107-019-7A64
MOTC-IOT-106-H1DC001

公路早期防救災決策支援系統及鋼橋管理模組維護更新

交 通 部 運 輸 研 究 所

中 華 民 國 107 年 3 月

107-019-7A64
MOTC-IOT-106-H1DC001

公路早期防救災決策支援系統及鋼橋管理模組維護更新

著 者：邱永芳、林雅雯、鄭明淵
、邱建國、廖國偉、吳育偉

交 通 部 運 輸 研 究 所

中 華 民 國 107 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

公路早期防救災決策支援系統及鋼橋管理模組維護更新 / 邱永芳等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民107.03
面 ; 公分
ISBN 978-986-05-5204-1(平裝)

1.交通管理 2.決策支援系統

557 107000573

公路早期防救災決策支援系統及鋼橋管理模組維護更新

著　　者：邱永芳、林雅雯、鄭明淵、邱建國、廖國偉、吳育偉
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：10548 臺北市敦化北路 240 號
網　　址：www.ihmt.gov.tw (中文版＞中心出版品)
電　　話：(04)26587132
出版年月：中華民國 107 年 3 月
印 刷 者：采峰實業有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 50 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所網站
定　　價：400 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010700158　　ISBN：978-986-05-5204-1 (平裝)
著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)
本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

106

公路早期防救災決策支援系統及鋼橋管理模組維護更新

交通部運輸研究所

GPN: 1010700158
定價 400 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<table>
<tr><td colspan="4">出版品名稱：公路早期防救災決策支援系統及鋼橋管理模組維護更新</td></tr>
<tr><td>國際標準書號（或叢刊號）
ISBN 978-986-05-5204-1(平裝)</td><td>政府出版品統一編號
1010700158</td><td>運輸研究所出版品編號
107-019-7A64</td><td>計畫編號
MOTC-IOT-106-H1DC001</td></tr>
<tr><td>本所主辦單位：港研中心
主管：邱永芳
計畫主持人：林雅雯
聯絡電話：04-26587186
傳真號碼：04-26564418</td><td colspan="2">合作研究單位：國立臺灣科技大學
計畫主持人：鄭明淵
協同主持人: 邱建國、廖國偉
研究人員：吳育偉
地址：臺北市大安區基隆路 4 段 43 號
聯絡電話：(02)2737-6663</td><td>研究期間
自 106 年 02 月
至 106 年 11 月</td></tr>
<tr><td colspan="4">關鍵詞：橋梁損傷評估、鋼橋維護管理、防災預警</td></tr>
<tr><td colspan="4">摘要：

臺灣橋梁因天然環境因素，遭受洪水與地震等災害時倒塌或斷裂的機率極高。尤其災害一旦發生，對於公路之影響更為嚴重，造成災民之生命財產損失亦難以估計。為此，本所於 94、95 年委託研究計畫「交通工程防災預警系統建立之研究」，並逐年擴充建置台灣公路早期防救災決策支援系統(Taiwan Road Early Nature Disaster prevention Systems，TRENDS)。考量到橋梁防災分析與評估方法逐年修正，本計畫擬針對以下不同領域進行系統模式更新、提高分析準確度，並確認系統實用性及穩定性，包括:(1)初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構、(2)橋梁整體耐震能力評估模式擬定、(3)橋梁振動檢測案例分析、(4)確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟、(5)與公路總局既有系統介接。

成果效益與應用情形：

在施政上，本研究成果可提供交通部、橋梁管理單位在有效管理橋梁設計參數資料作為後續維護與補強重新分析時之參考。在實務上，可在地震、洪水來臨時即時篩選危險橋梁，並進行自動通報，降低用路人之風險。</td></tr>
<tr><td>出版日期</td><td>頁數</td><td>定價</td><td>本 出 版 品 取 得 方 式</td></tr>
<tr><td>107 年 3 月</td><td>420</td><td>400</td><td>凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。</td></tr>
<tr><td colspan="4">機密等級：
□限閱 □機密 □極機密 □絕對機密
（解密【限】條件：□ 年 月 日解密，□公布後解密，□附件抽存後解密，
□工作完成或會議終了時解密，□另行檢討後辦理解密）
■普通</td></tr>
<tr><td colspan="4">備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。</td></tr>
</table>

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: TRENDS and Steel Bridge Management Modules Maintenance and Update

ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
ISBN 978-986-05-5204-1	1010700158	107-019-7A64	MOTC-IOT-106-H1DC001

DIVISION: Harbor & Marine Technology Center
DIVISION DIRECTOR:,Yung-Fang Chiu
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lin Ya-Wen
PHONE: (04) 26587191
FAX: (04) 26564418

PROJECT PERIOD
FROM February 2017
TO November 2017

RESEARCH AGENCY: National Taiwan University of Science and Technology , Ecological and Hazard Mitigation Engineering Research Center
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Cheng Min-Yuan
PROJECT STAFF: Chien-Kuo Chiu, Guo-Wei Liao, Yu-Wei Wu
ADDRESS: #43 , Sec.4 , Keelung Rd. , Taipei , 106 , Taiwan , R.O.C
PHONE: (02)2737-6663

KEY WORDS: Bridge seismic evaluation、Steel Bridge Maintenance, Disaster Prevention

ABSTRACT:

Taiwan is small island country with mountain ranges that run north–south, and features highly diverse terrain, soil, as well as numerous mountains and rivers. Because of this geography, bridges were often required to cross natural obstructions during the construction of the highway system. Therefore, bridges have had a tremendous contribution to Taiwan's overall economic development. This study aims to improve TRENDS and add several functions: (1) Steel bridge maintenance analysis model, (2) Bridge seismic capacity inference model, (3) Bridge health evaluation using the pier vibration frequency, (4) Post-disaster route planning model for bridge inspection, (5)Disaster information exchange between TRENDS and BOBE. Finally, TRENDS can be provided to the bridge management and applied on decision support and disaster prevention in the bridge maintenance strategy.

BENEFITS AND APPLICATIONS:

The Ministry of Transportation and Communications or the bridge management department can refer to the results for policy-making. TRENDS can be provided to the bridge management and applied on decision support and disaster prevention in the bridge maintenance strategy.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
March 2018	420	400	□RESTRICTED □CONFIDENTIAL □SECRET □TOP SECRET ■UNCLASSIFIED

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

公路早期防救災決策支援系統及鋼橋管理模組維護更新

目錄

中文摘要 I

英文摘要 II

目錄 III

圖目錄 VII

表目錄 XIII

第一章 研究計畫之背景及目的 1-1

1.1 計畫背景分析 1-1

1.2 計畫目的 1-2

1.3 研究範圍與對象 1-2

1.4 研究內容與工作項目 1-3

1.5 研究方法及進行步驟 1-4

第二章 文獻回顧 2-1

2.1 國內預警系統之開發實例 2-1

2.2 國外預警系統之開發實例 2-8

2.3 TBMS台灣地區橋梁管理系統 2-10

2.4 二代TBMS台灣地區橋梁管理系統 2-20

2.5 台灣公路早期防救災決策支援系統 2-22

2.6 橋梁通阻檢測分析模式建立之研究 2-26

2.7 鋼結構橋梁維護管理 2-30

2.8 國內現行耐震評估方法 2-40

2.8.1初步評估方法 2-40

2.8.2詳細評估方法 2-43
2.9 巡檢路線規劃相關文獻 2-51
2.9.1 臺灣公路橋梁特別檢測 2-51
2.9.2 現行橋梁巡檢方式.....2-54
2.9.3 旅行推銷員問題 2-55
2.9.4 橋梁定期檢測作業排程最佳化模式之研究 2-60
2.10 橋梁振動頻率評估.....2-62
2.11 生物共生演算法(SOS).....2-66
2.12 國內橋梁管理單位所採用鋼結構橋梁檢測評估、維修（保護）工法與延壽策略等相關文獻 2-69
2.13 確認鋼結構橋梁風險因子 2-76
2.14 文獻中鋼橋與RC橋生命週期成本評估方法 2-77
2.15 橋梁檢測與承載評定之文獻回顧 2-84
第三章 TRENDS系統維護營運..... 3-1
3.1 TRENDS系統架構 3-4
3.2 TRENDS系統核心-資料交換平台 3-8
3.3 TRENDS系統與國內其他系統比較 3-11
3.4 與公路總局既有系統介接 3-14
3.5 辦理研討會一場次 3-16
第四章 初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構..... 4-1
4.1 建置鋼結構橋梁風險評估模式..... 4-2
4.1.1 鋼橋風險辨識..... 4-4
4.1.2 鋼橋風險評估模式 4-7
4.2 鋼橋維護策略.....4-49
4.2.1鋼結構單橋成本維護策略 4-50

4.2.2共生生物演算法 4-52
4.2.3鋼結構橋梁單橋管理策略訂定 4-57
第五章 橋梁整體耐震能力評估模式擬定 5-1
5.1 橋梁整體耐震能力側推分析 5-1
5.2 橋梁損傷評估 5-4
5.3 橋梁整體損傷評估案例建置 5-9
5.4 橋梁整體耐震能力影響因子確認 5-9
5.4.1 第一階段篩選-橋梁整體耐震能力影響因子問卷 ..
.....5-10
5.4.2 FPR量化定性因子 5-16
5.4.3 收集橋梁案例之影響因子資料.....5-20
5.4.4 第二階段因子篩選 5-23
5.5 橋梁整體耐震能力案例資料庫建立 5-36
5.5.1 推論模式建立.....5-36
5.5.2 模式驗證 5-40
5.5.3 模式應用 5-42
5.5.4 案例分析 5-42
5.5.5 推論模式應用流程 5-44
5.5.6 與傳統方法比較 5-47
第六章 橋梁振動檢測案例分析 6-1
6.1 橋梁振動檢測案例分析 6-1
6.1.1 移動式非破壞性振動檢測可行性評估..... 6-2
6.1.2 現地試驗結果..... 6-5
6.1.2.1 量測的頻率是否穩定..... 6-6
6.1.2.2 橋梁狀態是否可以藉由頻率的變化得知..... 6-8

6.1.2.3 移動式量測中橋面板所取的頻率之分析 6-17
6.2 建立橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統 6-20
6.2.1 微型加速度計 6-20
6.2.2 微控制器(Micro-controller Unit，MCU).....6-23
6.2.3 無線傳輸分析及警報系統 6-24
6.2.4 開發過程與結果說明.....6-26
第七章 確認災害橋梁巡檢路線規劃模式 7-1
7.1 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子 7-2
7.2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式 7-4
7.3 案例測試 7-15
7.4 建立案例資料庫 7-26
7.4.1 橋梁蒐集及資料處理.....7-26
7.4.2 案例資料輸入.....7-28
7.4.3 輸出結果 7-31
7.5 模組功能整合至TRENDS中初步成果 7-51
第八章 結論與建議..... 8-1
8.1 結論..... 8-1
8.2 建議..... 8-2
8.2 預期效益與應用情形..... 8-3
參考文獻.....參-1
附錄一 期中報告意見處理情形 附錄1-1
附錄二 期末報告意見處理情形 附錄2-1
附錄三 期末報告簡報資料.....附錄3-1

圖目錄

圖1.1 研究內容架構圖 1-5
圖2.1 公路防救災資訊系統主頁面 2-4
圖2.2 GIS圖形查詢界面 2-4
圖2.3 P alert系統畫面 2-6
圖2.4 基本資料模組畫面 2-12
圖2.5 檢測資料模組示意圖.....2-13
圖2.6 維修記錄模組功能示意圖 2-15
圖2.7 統計分析模組畫面 2-16
圖2.8 決策支援模組畫面 2-18
圖2.9 地理資訊系統模組圖面查詢 2-19
圖2.10 防災資訊模組畫面.....2-20
圖2.11 第二代臺灣地區橋梁管理資訊系統 2-21
圖2.12 第二代臺灣地區橋梁管理資訊系統APP.....2-21
圖2.13 橋梁3D模型與檢測.....2-22
圖2.14 颱洪災害跨河橋梁防災架構圖 2-23
圖2.15「橋梁地震破壞潛勢」介面(一) 2-25
圖2.16「橋梁地震破壞潛勢」介面(二) 2-25
圖2.17 橋梁通阻檢測分析模式架構圖 2-27
圖2.18 橋梁風險因子分類.....2-40
圖2.19 臺灣地區建議之移動式振動檢測模式流程圖.....2-63
圖2.20 生態系統中的生物共生關係示意圖 2-67
圖3.1 TRENDS系統概念 3-5
圖3.2 TRENDS系統模組 3-6
圖3.3 軟體代理人架構圖 3-9

圖3.4 橋梁通行失敗機率Web Service 3-15
圖3.5 橋梁通行失敗機率XML 3-15
圖3.6 與公路總局介接示意圖 3-16
圖4.1 鋼橋風險評估架構 4-2
圖4.2 鋼橋風險評估模式流程 4-3
圖4.3 構件老化風險機率評估流程圖 4-7
圖4.4 位於臺北市鋼結構橋梁 4-10
圖4.5 部分橋梁D.E.R.&U.檢測表 4-10
圖4.6 部分鋼結構劣化程度D值判斷表 4-11
圖4.7 貝氏更新流程圖 4-17
圖4.8 運用橋檢資料貝氏更新 4-17
圖4.9 修正係數分布 4-23
圖4.10 改變單次維護費用流程圖 4-23
圖4.11 下降分數對應維護費用上升.....4-24
圖4.12 塗裝費用及施作費用 4-27
圖4.13 洪水維護風險機率評估流程圖 4-33
圖4.14 台灣主要河川分布圖(水利署).....4-34
圖4.15 發生50年洪水時對應SSI指標下降 4-36
圖4.16 洪水造成維護機率蒙地卡羅計算流程圖 4-36
圖4.17 洪水維護成本分析流程圖 4-38
圖4.18 人工智慧橋梁洪水維護成本推論模式.....4-40
圖4.19 橋梁風險影響程度預測值與實際值比較-跨河橋梁(洪水)
.....4-40
圖4.20 地震造成維護機率計算流程圖 4-42
圖4.21 地震造成維護機率蒙地卡羅計算流程圖 4-43

圖4.22 震後結構性能修正示意圖 4-45
圖4.23 未來損傷分級機率關係曲線。 4-46
圖4.24 地震維護成本分析程圖 4-47
圖4.25 橋梁維護策略示意圖 4-50
圖4.26 橋梁劣化曲線示意圖 4-51
圖4.27 SOS演算法程序 4-54
圖4.28 橋梁維護組合方案 4-58
圖4.29 搜尋維護策略在門檻值為85分 4-60
圖4.30 搜尋維護策略在門檻值為86分 4-63
圖4.31 搜尋維護策略在門檻值為87分 4-64
圖4.32 搜尋維護策略在門檻值為88分 4-64
圖4.33 搜尋維護策略在門檻值為89分 4-65
圖4.34 搜尋維護策略在門檻值為90分 4-65
圖4.35 A橋橋梁之維護策略 4-66
圖5.1 側推分析流程圖 5-1
圖5.2 雙線性計算示意圖 5-3
圖5.3 橋梁損傷評估流程 5-4
圖5.4 損傷等級劃分 5-5
圖5.5 各損傷等級界線值 5-7
圖5.6 損傷超越機率示意圖(一) 5-7
圖5.7 損傷超越機率示意圖(二) 5-8
圖5.8 有效地表加速度_損傷超越機率圖 5-9
圖5.9 因子篩選流程圖 5-10
圖5.10 正相關圖例 5-24
圖5.11 負相關圖例 5-24

圖5.12 橋梁整體耐震能力影響主成分因素陡坡圖 5-29
圖5.13 推論模式建立流程圖 5-37
圖5.14 10褶交叉驗證 5-38
圖5.15 有效地表加速度_損傷超越機率曲線圖 5-43
圖5.16 模式應用流程(一).....5-44
圖5.17 通行失敗機率計算對照圖 5-45
圖5.18 模式應用流程(二).....5-46
圖5.19 傳統方法有效地表加速度_損傷超越機率圖 5-47
圖6.1 南雲大橋墩柱9到墩柱16之立面圖 6-3
圖6.2 南雲大橋9號墩柱沖刷現況 6-3
圖6.3 南雲大橋墩柱14沖刷現況 6-4
圖6.4 溪州大橋墩柱30現況(有貓道處) 6-4
圖6.5 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 9、無行車，車行方向，2017/6/23) 6-10
圖6.6 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 9、無行車，車行方向，2017/11/3) 6-11
圖6.7 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 14、無行車，車行方向, 2017/6/23) 6-11
圖6.8 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 14、無行車，車行方向, 2017/11/3) 6-12
圖6.9 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 14、無行車，水流方向，2017/6/23).....6-12
圖6.10 溪州大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 36、無行車，車行方向，2017/6/23).....6-14
圖6.11 溪州大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 36、無行車，車行方向，2017/11/3).....6-15

圖6.12 溪州大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 30、無行車，車行方向，2017/6/23).....6-15
圖6.13 溪州大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 30、無行車，車行方向，2017/11/3).....6-16
圖6.14 溪州大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜 (pier 36、無行車，水流方向，2017/6/23).....6-16
圖6.15 Arduino與Raspberry Pi 6-24
圖6.16 警示系統架構示意圖 6-26
圖6.17 繼電器 6-27
圖6.18 警示燈程式碼 6-28
圖6.19 Arduino(左上)、無線傳輸配置(右)與系統完成配置圖(左下).....6-28
圖7.1 橋梁重要性指標層級圖 7-3
圖7.2 多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃流程圖 7-5
圖7.3 多層旅運路網圖 7-7
圖7.4 MO-SOS多目標路徑規劃流程 7-13
圖7.5 橋梁所在地路網圖 7-17
圖7.6 二層旅運路網圖 7-19
圖7.7 支配個數法二目標最佳化圖 7-25
圖7.8 帕雷托最適圖 7-25
圖7.9 旅運時間-通行失敗機率-橋梁重要度帕雷托圖與效率前緣曲面.....7-33
圖7.10 旅運時間-通行失敗機率帕雷托圖與效率前緣曲線.....7-36
圖7.11 旅運時間-橋梁重要度帕雷托圖與效率前緣曲線.....7-39
圖7.12 通行失敗機率-橋梁重要度帕雷托圖與效率前緣曲線.7-42
圖7.13 路線規畫結果 7-51

圖7.14 以範例中和工務段為例 7-51
圖7.15 以旅行時間與通行失敗機率雙目標規畫結果.....7-52
圖7.16 以旅行時間與通行失敗機率及重要度多目標規畫結果.....
.....7-53

表目錄

表2-1 國內開發之預警系統 2-1
表2-2 國外開發之預警系統 2-9
表2-3 系統欄位概述[姚乃嘉等，2013].....2-12
表2-4 橋梁構造物檢測評定標準 2-31
表2-5 定期檢測表(1/5).....2-33
表2-5 定期檢測表(2/5).....2-34
表2-5 定期檢測表(3/5).....2-35
表2-5 定期檢測表(4/5).....2-36
表2-5 定期檢測表(5/5).....2-37
表2-6 鋼橋塗裝系統種類 2-39
表2-7 公路橋梁耐震評估檢查表-落橋評估(一般橋梁) 2-41
表2-8 公路橋梁耐震評估檢查表-強度韌性評估(一般橋梁)....2-42
表2-9 有效地表加速度轉換表 2-46
表2-10 橋梁評等依各部位損傷模式進行 2-54
表2-11 宅配業貨物配送路線規劃問題之特性 2-56
表2-12 最佳解解法 2-59
表2-13 A.B.C.D.之評估準則 2-70
表2-14 D.E.R.U.系統之評估準則.....2-70
表2-15 塗裝系統之綜合評估 2-71
表2-16 塗膜更換次數與耐用年數 2-72
表2-17 塗膜之耐用年數.....2-73
表2-18 不同維護策略之成本比較 2-74
表2-19 表面處理等級與適用標準 2-75
表2-20 各種塗料之適用性.....2-75

表2-21 歐洲生命週期成本評估實務應用 2-78
表2-22 只考慮防蝕因子之建造總成本 2-83
表3-1 TRENDS發展歷程 3-2
表3-2 TRENDS與各系統比較 3-12
表3-3 2017年道路橋梁災害防治技術研討會」議程表 3-19
表4-1 鋼橋風險因子列表 4-5
表4-2 橋梁檢測紀錄分組分布表 4-8
表4-3 橋梁D.E.R&U構件及構件分類..... 4-9
表4-4 D.E.R.&U.數值含意 4-11
表4-5 橋梁各構件CI及PI值的權重.....4-12
表4-6 編號21橋梁構件Ici值變化.....4-13
表4-7 部份各橋梁各構件進入維修時Ici門檻值 4-14
表4-8 整合各橋梁構件進入維修時Ici值 4-15
表4-9 專家建議之構件/元件劣化速率 4-15
表4-10 專家建議之維護門檻值.....4-16
表4-11 編號10號橋推估出年平均維護次數 4-16
表4-12 編號10橋梁貝氏更新後的年維護次數 4-18
表4-13 編號10橋排水系統歷史維護資料.....4-19
表4-14 編號10橋各構件單次維護費用整理 4-19
表4-15 採用相近量體或用途橋梁資料補足 4-20
表4-16 各橋梁歷史年維護經費(部分表格) 4-21
表4-17 歷史年平均維護費用與推估費用 4-22
表4-18 大型橋梁防蝕塗裝對應輔助機具費用比值 4-26
表4-19 其他橋梁防蝕塗裝對應輔助機具費用比值 4-26
表4-20 編號10號橋防蝕塗裝與高空作業車 4-27

表4-21 塗裝系統A4-1 4-28
表4-22 塗裝系統A4-2 4-28
表4-23 塗裝系統A5-1 4-28
表4-24 塗裝系統A5-2 4-29
表4-25 各區域鋅腐蝕速率試驗點之行政區 4-30
表4-26 各區域之鋅腐蝕速率及底漆使用年限 4-30
表4-27 塗裝系統A4-1之使用年限.....4-31
表4-28 塗裝系統A4-2之使用年限.....4-31
表4-29 塗裝系統A5-1之使用年限.....4-31
表4-30 塗裝系統A5-2之使用年限.....4-32
表4-31 台灣主要河系洪水重現期對應SSI指標下降表.....4-35
表4-32 洪水維護機率分析結果(節錄)，單位(%).....4-37
表4-33 洪水維修經費因子表.....4-38
表4-34 跨河橋梁維修案例(節錄).....4-39
表4-35 橋梁風險衝擊影響程度預測模式搜尋結果-跨河橋梁(洪水).....4-41
表4-36 RC結構物之損傷指標 4-44
表4-37 損害狀況及損害比之關係 4-47
表4-38 A橋之綜合能力指標.....4-49
表4-39 A橋梁引道路堤生命週期Ici值 4-59
表4-40 門檻85分A橋構件維護時間點與風險成本一覽表 4-61
表5-1 構件及元件損傷對照表..... 5-6
表5-2 案例資料依鋼筋腐蝕率分類整體..... 5-9
表5-3 橋梁整體耐震能力影響因子問卷調查 5-12
表5-4 問卷受測者背景.....5-13

表5-5 問卷結果統計表 5-14
表5-6 初步篩選因子結果 5-15
表5-7 定性選項權重語意變數表 5-16
表5-8 定性因子計算權重問卷表 5-17
表5-9 定性選項量化範例表 5-20
表5-10 定量因子 5-21
表5-11 定性因子 5-22
表5-11 定性因子(續) 5-23
表5-12 橋梁整體耐震能力影響因子相關矩陣 5-26
表5-13 橋梁整體耐震能力因子主成分表 5-29
表5-14 橋梁整體耐震能力影響之因素載荷矩陣 5-31
表5-15 橋梁整體耐震能力影響轉軸後之因素載荷矩陣 5-32
表5-16 主成分分析之橋梁整體耐震重要性因子 5-33
表5-17 相關係數分析之橋梁耐震重要性因子 5-33
表5-18 多層感知法之橋梁整體耐震常態化重要性因子(單位%)...
.....5-34
表5-19 相關係數分析之橋梁耐震重要性因子 5-35
表5-20 分析結果整理表 5-35
表5-21 橋梁整體耐震能力影響因子 5-36
表5-22 必要因子欄位說明 5-36
表5-23 MAPE的評估標準 5-39
表5-24 SOS-LSSVM推論結果 5-41
表5-25 SOS-LSSVM與其他模式比較 5-41
表5-26 橋梁基本資料表 5-42
表5-27 案例分析結果 5-43

表5-28 應用比較表 5-48
表6-1 南雲大橋(帽梁)量測穩定性結果(cov) (pier 14)..... 6-7
表6-2 南雲大橋(帽梁)量測穩定性結果(cov) (pier 9)..... 6-7
表6-3 南雲大橋(橋面板)量測穩定性結果(cov) (pier 14)..... 6-7
表6-4 南雲大橋(橋面板)量測穩定性結果(cov) (pier 9)..... 6-7
表6-5 溪州大橋(帽梁)量測穩定性結果(cov) (pier 30)..... 6-8
表6-6 溪州大橋(橋面板)量測穩定性結果(cov) (pier 30)..... 6-8
表6-7 溪州大橋(帽梁)量測穩定性結果(cov) (pier 36)..... 6-8
表6-8 溪州大橋(橋面板)量測穩定性結果(cov) (pier 36)..... 6-8
表6-9 南雲大橋帽梁所量測的頻率值(pier 14) 6-9
表6-10 南雲大橋帽梁所量測的頻率值 (pier 9) 6-9
表6-11 南雲大橋橋面板處所量測的頻率值 (pier 14)..... 6-9
表6-12 南雲大橋橋面板處所量測的頻率值 (pier 9).....6-10
表6-13 溪州大橋帽梁所量測的頻率值(pier 36) 6-13
表6-14 溪州大橋帽梁所量測的頻率值 (pier 30) 6-13
表6-15 溪州大橋橋面板處所量測的頻率值 (pier 36).....6-13
表6-16 溪州大橋橋面板處所量測的頻率值 (pier 30).....6-14
表6-17 南雲大橋水流方向頻率比值的比較(pier 14).....6-18
表6-18 南雲大橋水流方向頻率比值的比較 (pier 9).....6-18
表6-19 南雲大橋水流方向頻率比值的比較(pier 14).....6-19
表6-20 南雲大橋水流方向頻率比值的比較 (pier 9).....6-19
表6-21 南雲大橋水流方向頻率比值的比較 (pier 9).....6-19
表6-22 溪州大橋水流方向頻率比值的比較 (pier 36).....6-19
表6-23 尖山大橋水流方向頻率比值的比較 6-20
表6-24 目前市售的微型加速度計 6-22

表6-25 MMA8451之機性(mechanical characteristic)與Electrical characteristic.....6-23
表7-1 橋梁重要因素表..... 7-4
表7-2 測試橋梁之橋梁重要度及通行失敗機率.....7-16
表7-3 橋梁兩兩旅運檢測時間矩陣(單位:分鐘).....7-16
表7-4 F7,61檢測路網矩陣.....7-18
表7-5 F7,62檢測路網矩陣.....7-18
表7-6 檢測次數檢核矩陣.....7-19
表7-7 總旅運檢測時間計算.....7-20
表7-8 受支配個數法之最佳解.....7-24
表7-9 基本資料數據範例.....7-27
表7-10 橋梁旅運檢測時間表(單位:min).....7-27
表7-11 輸入資料.....7-28
表7-12 案例基本資料（14座）.....7-29
表7-13 案例橋梁旅運檢測時間表(14座) (單位：min) 7-30
表7-14 100組路線規劃方案1.....7-31
表7-14 100組路線規劃方案1(續).....7-32
表7-15 100組路線規劃方案2.....7-34
表7-15 100組路線規劃方案2(續).....7-35
表7-16 100組路線規劃方案3.....7-37
表7-16 100組路線規劃方案3(續).....7-38
表7-17 100組路線規劃方案4.....7-40
表7-17 100組路線規劃方案4(續).....7-41
表7-18 100組路線規劃方案5.....7-43
表7-18 100組路線規劃方案5(續).....7-44

表7-19 100組路線規劃方案6.....7-45
表7-19 100組路線規劃方案6(續).....7-46
表7-20 100組路線規劃方案7.....7-47
表7-20 100組路線規劃方案7(續).....7-48
表7-21 各種影響因子組合之最佳旅運巡檢路線.....7-50

第一章　研究計畫之背景及目的

1.1 計畫背景分析

由於臺灣多山多河的地理特性，使得橋梁成為連結陸上交通的重要設施。有鑑於台灣天然災害頻傳，如地震災害、水災及土石流等等；災害之來臨常帶來嚴重的損失，尤其災害一旦發生，對於公路之影響更為嚴重，造成災民之生命財產損失亦難以估計。為此，本所於94、95年著手進行交通工程防災預警系統建立之相關研究，並逐年擴充建置台灣公路早期防救災決策支援系統(Taiwan Road Early Nature Disaster prevention Systems，TRENDS)。考量到橋梁防災分析與評估方法逐年修正，本計畫擬針對不同領域進行系統模式更新、提高分析準確度，並確認系統實用性及穩定性。其中新增與更新項目包括:

1. 初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構: 臺灣屬於多山多河之海島地形，更需要多且性能良好之橋梁建設以建構完整之路網系統。隨著東、南部高速公路、東西向快速道路及臺灣高速鐵路之蓬勃發展，交通路網脈絡交錯頻繁與減少道路對環境之分割與衝擊，高架方式與大跨徑之構築是現在橋梁所必須考慮的課題。鋼結構橋梁有著高強度、高韌性、工廠化生產、品質控管容易、工期短、回收價值高等優點，為長跨徑橋梁優先選擇方案。然而鋼結構橋梁仍有鏽蝕與強度衰減之維護問題，因此如何在生命週期成本最小化之需求下，求得鋼橋之維修時機與方法，成為一迫切研究課題。

2. 橋梁整體耐震能力評估模式擬定:如果橋梁耐震能力不足，地震發生時可能造成橋梁損傷，因此須對橋梁進行耐震評估，國內現行研究以橋梁下部結構-橋柱性能的耐震能力為主，較少同時考量橋梁整體結構，亦未將上部結構資料納入分析。然而上部結構耐震能力不足時，可能造成落橋等災害，影響用路人通行安全。因此，目前現行橋梁管理單位所採用之評估方法，尚無

法完整反應橋梁整體現況。

3.橋梁振動檢測案例分析:本所已累積一定數量之橋梁振動頻率檢測紀錄，但在統計檢定之樣本數要求上，需提升檢測紀錄樣本數，以驗證於橋面板上量測災前與災後頻率比值可取代於墩帽上量測結果。

4.確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟:目前橋梁在地震後雖然可以依據損壞機率排出巡檢優先順序，但是在實務巡檢上，直接依據橋梁損壞機率大小排序將面對跳點方式巡檢之問題，實際執行上可能窒礙難行，因此如何在不同路段上考量該路線上各橋梁之損壞機率、橋梁重要性權重、巡檢路線繞路長度為一個多目標最佳化問題。

5.與公路總局既有系統介接:目前系統已開發不同災害下之分析模式，如何與公路總局現有防災系統介接，為重要課題，因此將以公路總局所開放介接之格式為前提，將系統目前成果介接至公路總局系統中，提升系統使用性。並依據合約要求辦理研討會1場次，推廣系統成果。

1.2 計畫目的

本計畫研究目的為進行台灣公路早期防救災決策支援系統(TRENDS)維運，並擬針對以下不同領域進行系統模式更新、提高分析準確度，確認系統實用性及穩定性，包括:1.初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構、2.橋梁整體耐震能力評估模式擬定、3.橋梁振動檢測案例分析、4.確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟、5.與公路總局既有系統介接。

1.3 研究範圍與對象

整體橋梁耐震詳細評估為目前趨勢，但整體橋梁模型建置過程繁雜，目前僅某直轄市政府開始建置整體橋梁模型資料，故本計畫選定的研究對象為某直轄市政府轄下已建置完整模型的15

座橋梁。為了使本計畫預測模式具體且合理，必須針對研究範圍加以限制與規範，期能使實際成果與所預期相符，本計畫的範圍限制如下：1.本計畫僅針對橋墩材質為鋼筋混凝土之橋梁進行研究。2.橋梁上部結構材質包括鋼結構與鋼筋混凝土。3.完整橋梁模型指具有上、下部各細部構件、元件資料之模型。

在鋼結構橋梁之風險評估分析所引用檢測資料為公路總局公路鋼結構橋梁之檢測與補強規範中經常巡查與定期檢測，而特別檢測與鋼結構橋梁結構安全評估因需針對個別橋梁進行詳細結構分析不適用於大規模橋梁之風險評估，故不納入本計畫範圍。

1.4 研究內容與工作項目

根據交通部運輸研究所委託研究計畫之研究主題與重點，本計畫預定工作項目如下所述：

1.鋼結構橋梁部分:

(1)收集目前國內橋梁管理單位所採用鋼結構橋梁檢測評估、維修（保護）工法與延壽策略等相關文獻。

(2)確認鋼結構橋梁風險因子，如腐蝕因素等。

(3)研發鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式。

2.整體橋梁耐震能力評估部分:

(1)確認橋梁整體耐震能力評估方式，加入上部結構耐震能力評估指標。

(2)分析15筆橋梁整體耐震能力案例。

(3)建置橋梁整體耐震能力評估案例庫。

(4)整體橋梁耐震能力影響因子確認。

3.橋梁振動檢測分析部分:增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測，並建立橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統。

4.災後巡檢路線規劃之考量因子確認，後續將橋梁巡檢路徑規劃納入系統。

5.與公路總局既有系統介接機制整合。

6.辦理研討會1場次，推廣系統成果。

1.5 研究方法及進行步驟

依據研究目的，本計畫擬定研究內容，共計八個研究階段，如圖1.1所示，以下章節將針對各階段分別敘述。

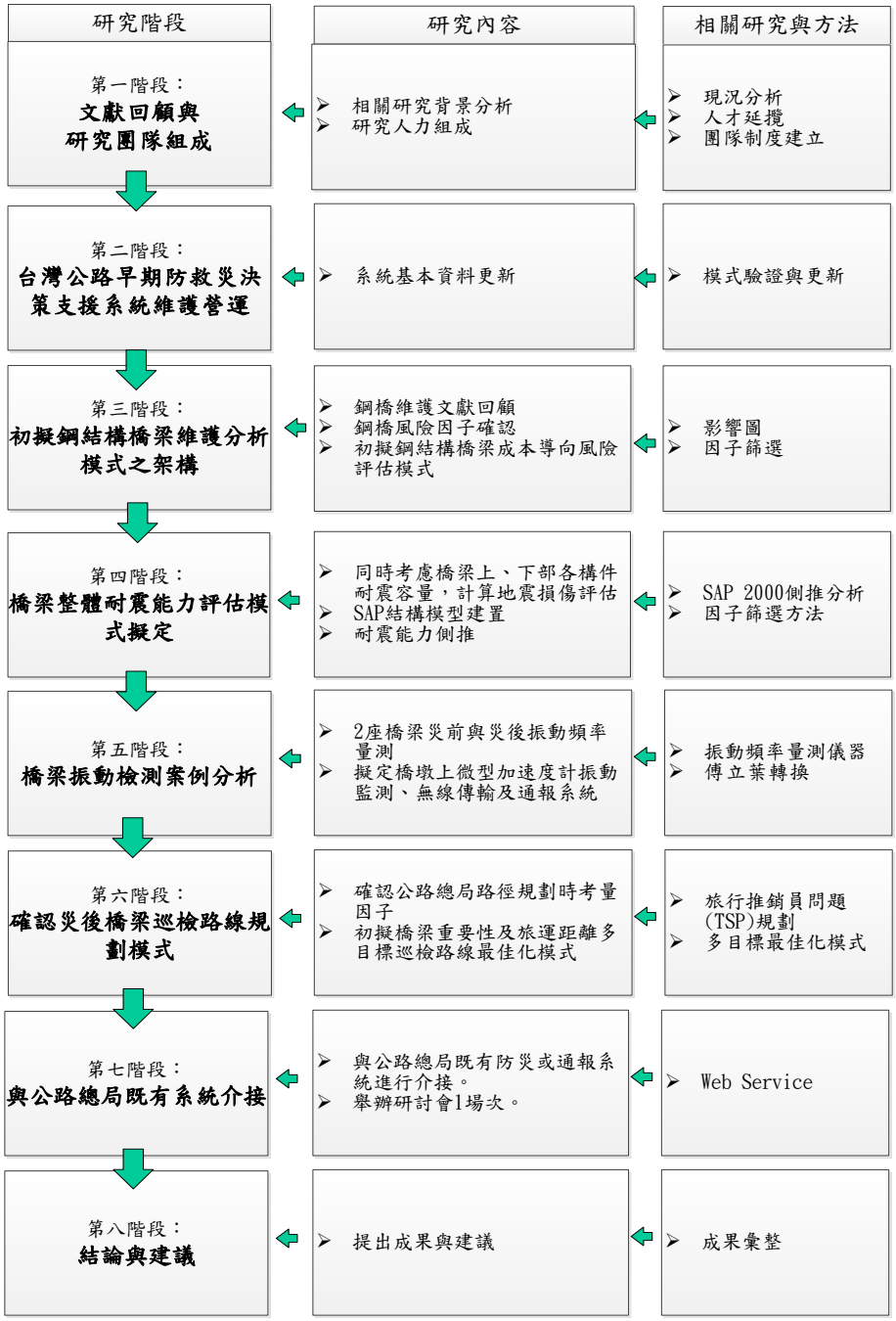

研究階段
研究內容
相關研究與方法
第一階段：
文獻回顧與
研究團隊組成
相關研究背景分析
研究人力組成
現況分析
人才延攬
團隊制度建立
第二階段：
台灣公路早期防救災決策支援系統維護營運
系統基本資料更新
模式驗證與更新
第三階段：
初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構
鋼橋維護文獻回顧
鋼橋風險因子確認
初擬鋼結構橋梁成本導向風險評估模式
影響圖
因子篩選
第四階段：
橋梁整體耐震能力評估模式擬定
同時考慮橋梁上、下部各構件耐震容量，計算地震損傷評估
SAP結構模型建置
耐震能力側推
SAP 2000側推分析
因子篩選方法
第五階段：
橋梁振動檢測案例分析
2座橋梁災前與災後振動頻率量測
擬定橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸及通報系統
振動頻率量測儀器
傅立葉轉換
第六階段：
確認災後橋梁巡檢路線規劃模式
確認公路總局路徑規劃時考量因子
初擬橋梁重要性及旅運距離多目標巡檢路線最佳化模式
旅行推銷員問題(TSP)規劃
多目標最佳化模式
第七階段：
與公路總局既有系統介接
與公路總局既有防災或通報系統進行介接。
舉辦研討會1場次。
Web Service
第八階段：
結論與建議
提出成果與建議
成果彙整

圖 1.1 研究內容架構圖

第一階段:文獻回顧與研究團隊組成

首先針對目前橋梁防救災系統進行了解，找出目前問題或狀況，據以擬定本研究之研究目的，並組成研究團隊，由具備橋梁防災資訊管理系統經驗與資訊管理人員組成，提升計畫成功度。

第二階段:台灣公路早期防救災決策支援系統維護營運

台灣公路早期防救災決策支援系統(TRENDS)維護與資料更新、模式作業化環境之改善及維護等相關工作。

第三階段:初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

收集目前國內橋梁管理單位所採用鋼結構橋梁檢測評估、維修（保護）工法與延壽策略等相關文獻。初步確認鋼結構橋梁風險因子，如腐蝕因素等。擬定鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式。

第四階段:橋梁整體耐震能力評估模式擬定

確認橋梁整體耐震能力評估方式，加入上部結構耐震能力評估指標。分析15座橋梁整體耐震能力案例，並建置所分析15座橋梁整體耐震能力評估案例庫。最後確認整體橋梁耐震能力影響因子，以作為後續年度人工智慧推論時採用參考。

第五階段:橋梁振動檢測案例分析

增加現地量測樣本數，選取2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測，驗證既有橋梁模型評估結果與現地量測之相關性。並擬定橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統。

第六階段:確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

災後巡檢路線規劃之考量因子確認，擬定巡檢路徑最佳化模式。

第七階段:與公路總局既有系統介接

將以公路總局所開放介接之格式為前提，將系統目前成果介

接至公路總局系統中，提升系統使用性。並辦理研討會1場次，推廣系統成果。

第八階段:結論與建議

針對本研究所完成之研究，提出適當之結論與建議以供後續研究發展及實際運用時之參考。

第二章 文獻回顧

2.1 國內預警系統之開發實例

本章節整理國內外相關防災預警研究，預警系統通常藉由地理資訊系統對空間分部及屬性資料的展現，可讓決策者更能有效率地制定最佳的空間資訊政策。一方面可降低災害對人類的衝擊與損失，另一方面可有效達成災害預防與災後重建的目的，並提高分析的便利性與準確度。目前國內相關研究成果如下表2-1所示。

表2-1 國內開發之預警系統

No	分類	名稱	技術與應用
1	整體規劃	國土資訊系統	GIS 整體規劃、示範工作、空間資料處理、應用程式、GIS 工具發展、標準化及訓練專業人才
2	防救災系統	颱風災害應變管理決策支援系統	網路地理資訊系統為展示平台，並結合氣象、坡地、洪水災害模式及即時環境監測資料。
3	防救災系統	臺北市防災資訊網暨防救災決策支援系統	提供民眾掌握，最即時颱洪淹水及坡地等警戒資訊及相關災害潛勢分析資料
4	防救災系統	公路防救災資訊系統(BOBE)	結合衛星定位儀、攝影工具及3G之資訊傳輸方式，將公路災害之現場影像與空間資訊傳遞至相關單位
5	防救災系統	系集降雨預報應用於洪水預報之研究	在水患發生前，透過降雨推估和逕流、洪水演算，有效操作水庫閘門蓄減洪峰，降低洪水所造成傷亡
6	預警系統	P-alert	利用偵測P波並在3秒內決定是否災害性地震來襲，並在具破壞力之S波到達前發出警報訊息
7	預警系統	TELES	結合地震與地震工程、社會與經濟等各領域的知識，提供各級政府與民間業者如保險業、高科技產業等有關地震災害損失評估工具
8	預警系統	經濟部水利署防災資訊服務網	利用整合自動化電話語音調查系統與GIS圖層功能，以圖示化方式快速調查彙整防汛志工與防汛夥伴回報之災區訊息，提供快速有效的淹水資訊收集
9	防災資訊網	臺北市防災資訊網	臺北市防災資訊網包括:防災宣導、氣象地震資料、疏散避難資訊、組織及應變中心與防災人員專區等功能。

1.國土資訊系統

我國於1990年由經建會報請行政院，成立國土資訊系統（NGIS）推動小組，開始進行國土地理資訊系統的推動。在國土資訊系統推動小組成立之前，各部門多依各自不同的空間資訊需求進行各自的研發工作，其中較具系統者，為內政部地政司及其前身內政部地政資訊中心所主導的地政自動作業核心的遙感探測的應用研究。國土資訊系統推動小組成立初期，僅部會的組織，而後由於工作需求的增加，陸續增設12分組及推動小組。目前國土資訊系統的相關工作內容包括GIS 整體規劃、示範工作、空間資料處理、應用程式、GIS 工具發展、標準化及訓練專業人才等專案。發展至今，我國國土資訊系統已顯示出相當大的實質效益，且其服務物件相當廣泛，加上目前專業人才日益增加，將有助於未來朝向更縝密的訊息管理工作。

2.颱風災害應變管理決策支援系統

國家災害防救科技中心(NCDR)因應颱洪災害應變任務發展了颱風災害應變管理決策支援系統，此系統以網路地理資訊系統為展示平台，並結合氣象、坡地、洪水災害模式及即時環境監測資料。此系統應用於災害應變作業已有三年，並持續更新改進中。藉由此系統，災害應變作業已從過去的被動搶救提升到現在的主動預警，有效的減少人員傷亡與動員的人力資源。該系統未來將導入防救災資料服務平台，利用即時GIS 資料交換技術，增加資料的來源和即時性。另外系統也將延伸建置應變需求的其它功能，期能提供更佳的防救災資訊服務。

3.臺北市防災資訊網暨防救災決策支援系統

建置臺北市防災資訊網主要目的，平時提供民眾瞭解在颱風、坡地、地震等災害防治方面的豐富教育資訊，隨時學習防災之觀念，以達到全民防災及共同參與之宗旨。同時於防汛期透過網站提供民眾掌握，最即時颱洪淹水及坡地等警戒資訊及相關災害潛

勢分析資料及提供災害預警，使網站成為防救災領域中廣結各類資訊流通、教育宣導與即時資訊，並作為臺北市政府與民眾間相關災害防救資訊互動之交流園地。

根據臺北市政府中臺北市防災資訊系統[臺北市政府，2017]說明。我國災害防救體系依行政體制區分為中央、直轄市及縣(市)政府、鄉（鎮、市）公所3個層級，而台北市目前建構完成之災害防救體系係以「災害防救法」、「台北市災害防救規則」、「地方制度法」等相關法令為基礎，基於實際運作需要，乃將台北市災害防救體系，依行政體制規劃為「市」及「區」2個層級。本府自89年與國科會合作推動防救災合作計畫，成立「臺北市防災計畫辦公室」，負責災害潛勢分析、災害防救科技研發成果應用。

91年依災害防救法設置「台北市政府災害防救委員會」，以統籌、規劃、督導、考核、整合本府所屬各機關辦理災害防救之相關事項，係全國地方政府率先成立之災害防救專責單位。

惟盱衡美日等先進國家為強化災害防救體制，相繼完成「政府組織再造」工程，台北市政府為因應各國災害防救體制趨勢及台北市政府防救災工作需求，結合本府組織再造及災害防救專責機構之建置，推動成立隸屬府層級之「本市災害防救辦公室」，俾達成減災、整備、應變及復建全方位防救災政策落實，進而提昇防救災效能，案經100年11月8日市政會議通過，設置「災害防救辦公室」，並於100年12月1日發布。

所建置之臺北市防災資訊網，包括:防災宣導、氣象地震資料、疏散避難資訊、組織及應變中心與防災人員專區等功能。

4.公路防救災資訊系統(BOBE)

係民國94年由交通部運輸所所開發之管理系統。此系統以地理資訊系統為基礎，結合衛星定位儀、攝影工具及3G之資訊傳輸方式，將公路災害之現場影像與空間資訊傳遞至相關單位。該系統建立時，已針對平時整備、災前預防、災中應變及災後復健提

出相對應的管理模組並蒐集交通部公路總局在處理災害的過程中累積之空間與屬性資料，作為歷史災損資料分析與研究易致災路段之決策參考。系統主頁面及相關查詢界面如圖2.1~圖2.2所示。

圖 2.1 公路防救災資訊系統主頁面

圖 2.2 GIS 圖形查詢界面

5.系集降雨預報應用於洪水預報之研究

此計畫由經濟部水利署主辦，為落實防洪減災的任務，發展水利署洪水預報系統，希望能在水患發生前，透過降雨推估和逕流、洪水演算，有效操作水庫閘門蓄減洪峰，降低洪水所造成傷亡。此計畫進而利用系集降雨預報，建置河川洪水位機率預報系統；協助水利署彙整各河川局不同洪水預報系統的預報資訊；擴充水利署洪水預報系統之預報流域[李天皓等，2014]。

6. Palert 地震P波感測儀

由國內三聯科技股份有限公司與國立臺灣大學地質科學系教授吳逸民所合作研發P alert(地震P波感測儀)，目前已於全台灣中小學整合建置581個低價位的強地動觀測站，並提供線上的台灣即時震度資訊(圖2.3)，能在地震發生時，即刻獲取全台詳細的震度圖，作為救災及研究的重要參考。此系統並已成功推廣至其他數個國家。其原理為利用偵測P波並在3秒內決定是否災害性地震來襲，並在具破壞力之S波到達前發出警報訊息，以提供使用者做為地震減災之用。根據台灣地震科學中心通訊第十一期提到在2016年高雄美濃地震發生後約5秒，P alert可估計近似中央氣象局發布的地震位置，震央相差6.1公里、震源深度相差2.4公里[吳逸民等，2015]。

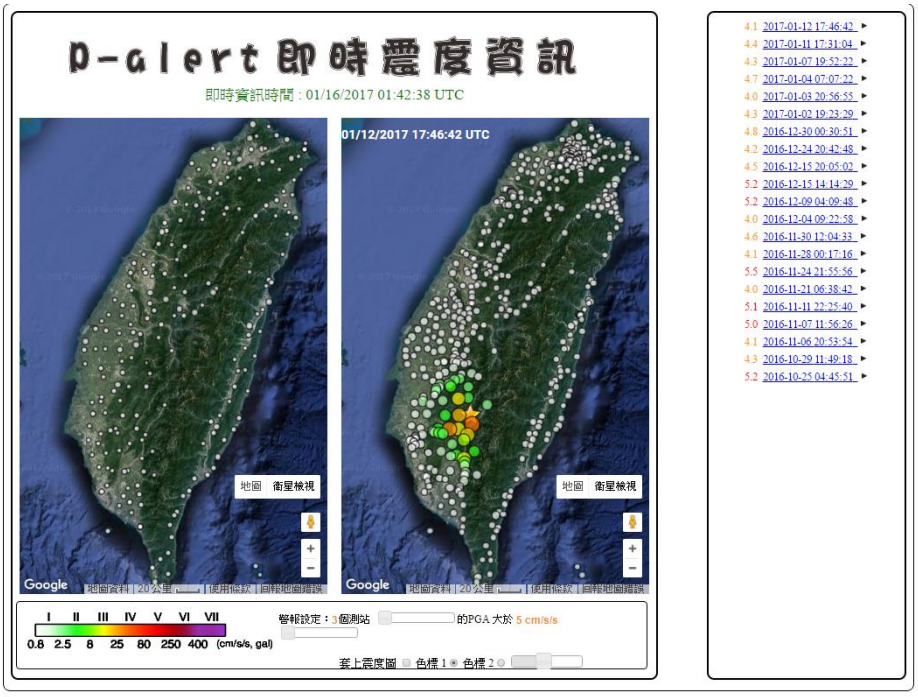


圖 2.3 P alert 系統畫面

7.TELES

國家科學委員會與經濟部於民國87年引進美國FEMA(Federal Emergency Management Agency)所發展的地震災害損失評估系統HAZUS (RMS, 1997)，並加以本土化稱為HAZ-Taiwan。初版的HAZ-Taiwan系統是委託美國的Risk Management Solution, Inc. (RMS)撰寫應用軟體，但相關本土化的資料庫和分析模式，由國家科學委員會防災辦公室和國家地震工程研究中心整合協調各專家或單位提供。

依據資策會委託RMS開發應用軟體的合約，初版HAZ-Taiwan所具有的功能為美國所用的HAZUS 97的分析模式；換言之，並未完全使用本土化的分析模式和參數值。隨著科技進步與數位化資料庫的日益完備，在評估地震災害的潛勢或評估工程結構物的損害狀態機率時，可採用較精確的分析模式和參數值。但受制於應用軟體在開發時無法兼顧未來的發展，適時的修改原始程式碼或增加新的分析功能是有必要的。

有鑒於初版HAZ-Taiwan系統的軟體架構不易更動，因此有必要開發一套新的系統，不但在分析模式和架構上採用模組化設計，應用軟體也採物件化語言撰寫及模組化設計，以方便未來適時更新和增加分析功能。因此國家地震工程研究致力於「台灣地震損失評估系統—TELES (Taiwan Earthquake Loss Estimation System)」之研發與更新，乃希望結合地震與地震工程、社會與經濟等各領域的知識，提供各級政府與民間業者如保險業、高科技產業等有關地震災害損失評估工具，作為研擬相關都市防災規劃、震災初期動員機制、震災模擬演練、地震保險與風險管理策略…等等的參考，藉以減低地震對社會與經濟的衝擊。

TELES之研究是一項以實用為導向、跨領域的科技研究案。主要目的之一是提供標準且一致的地震災害損失評估方法，且須適應不同使用者的需求與不同精確度的資料來源，以作為地區性或全國性的地震災害損失評估之用。台灣地震損失評估系統之研發目標至少包含下列三項功能[1]：

(1)提供震災早期評估的功能：在地震發生後能自動啟動或以人工方式啟動，在短時間內推估地表振動強度、工程結構物(一般建築物、橋梁)的損害狀態機率與數量、人員傷亡程度與數量、經濟損失評估…等等數據，可供各級災害應變中心參考，作為救災人力物力和醫療資源派遣的決策支援系統。緊急評估項目依使用者需求和現實資料庫的建置進度而定。

(2)地震災害境況模擬功能：根據模擬地震的震源參數和活動斷層分佈資料，推估地表振動強度和土層破壞機率與永久位移量，並可進行各項工程結構物的損害評估及對社會經濟的衝擊等等。

(3)地震風險評估的功能：由於地震發生的時間、地點和規模具有極大的不確定性，配合實際工程結構物的分佈不均，因此引致的損失金額或其他可量化的風險也有許多的不確定性。為真實

反應評估對象(如一般建築物、橋梁或高科技廠房)受地震影響的危害度，有必要結合地震危害度分析和工程結構物的易損性分析，進行一系列的等危害度之模擬地震的震災境況模擬，根據統計分析的結果得到評估對象受地震影響的風險程度，如年平均損失金額及其信賴區間等資訊。

8. 經濟部水利署防災資訊服務網

近年來，由於全球氣候變遷，臺灣因地理位置及地形因素，發生之颱洪災害有愈來愈嚴重之趨勢，尤其在極端氣候下，降雨頻率減少、降雨強度增加以致在時間與空間分布較以往更不均勻，屢見破紀錄之降雨事件，其帶來之水量已大大超越治水工程之設計頻率年。災害的發生總在一瞬間，如何在災害發生前即時通報相關人員，爭取可應變防災時間，預警資訊成為一項重要工作議題。有鑑於此，經濟部水利署除了建設淹水偵測設施外，另廣邀民眾及企業員工籌組防汛志工及防汛夥伴，利用整合自動化電話語音調查系統與GIS圖層功能，以圖示化方式快速調查彙整防汛志工與防汛夥伴回報之災區訊息，提供快速有效的淹水資訊收集，並透過水利署開發「防災資訊服務網、行動水情App、上網登門號、防汛抗旱粉絲團」等四項防災避災工具，讓民眾及早獲得水情資訊，將災害可能造成之損失降至最低[經濟部水利署，2017]。

2.2 國外預警系統之開發實例

開發防災預警系統先進國家都已經投入相當多的人力及物力進行研究及發展，但各國地理環境的不同所面對的災害亦不相同，因此將會依不同的災害發展出不同的預警系統來減低災害所造成的損失。如下表2-2所示，列出了美國、歐洲、荷蘭及日本所研發的預警系統名稱及系統的開發團隊，並予以分類。

表2-2 國外開發之預警系統

No	分類	名稱	開發團隊
1	防救災系統	Integrated Decision Support System (IDSS)	太平洋災害應變中心(Pacific Disaster Center)
2	防災系統	The European Flood Forecasting System (EFFS)	歐洲自然水部門(European national water services)
3	防災系統	Delft Hydraulics' Flood Early Warning System (Delft-FEWS)	戴伏特水利研究所(Delft Hydraulics)
4	防救災系統	Earthquake Early Warning(EEW)	沖電氣工業株式會社」(Miyagi Oki Electric Co.)

以下將概述上列各預警系統：

1.整合決策支援系統(Integrated Decision Support System ,IDSS)

整合決策支援系統是由太平洋災害應變中心(Pacific Disaster Center)進行設計開發應用於加勒比海，系統內包含了GIS視覺化工具及分析模式，可提供災害管理人員關於災害分析、風險及潛勢評估等資訊，並可輔助計畫整備及教育訓練。

2.歐洲洪水預報系統(The European Flood Forecasting System, EFFS)

歐洲自然水部門(European national water services)提升了系統預警能力在4至10天前即可發佈洪水警訊，有別於一般洪水警報為0至3天。所增加的預警時間可以讓管理人員進行災前測量；大眾可以有足夠的時間瞭解相關災情資訊；水庫亦可進行排水淨空防災；另對於其他附加災害可以提前預防。

此系統包含四大模組：

(1)全域數值化氣象預報模組

(2)可選取範圍的局部數值化氣象預報模組

(3)流域水文模組(內包含了每日土壤水分平衡模式以及每小時的洪水演算模式)

(4)高解析度洪水模組

3.戴伏特水利研究所-洪水預警系統(Delft Hydraulics' Flood Early Warning System, Delft-FEWS)

此系統是由荷蘭的「戴伏特水利研究所」所開發之洪水預警報系統DELFT-FEWS，在洪水來臨前直接從網路上以XML格式截取水文資訊，並存取至資料庫中，經由水理分析模式分析後發佈警報。

4.地震預警系統(Earthquake Early Warning, EEW)

系統是由「沖電氣工業株式會社」(Miyagi Oki Electric Co.)所開發，主要是運用REIC(Real-time Earthquake Information Consortium)所發佈的震波資訊，當接收到了地震波P波之後會立刻發佈警訊，並進行撤離工作人員、關閉油氣及化學物質的供應開關避免產生二次災害及停止生產設備運作減少經濟上的損失。系統共包含了五大功能：地震災害資料的接收、震災層級的預測、警報的發佈及停止、災時相關資料顯示、災時監測及資料記錄等。

2.3 TBMS 台灣地區橋梁管理系統

行政院於八十四年起即責成交通部積極進行各項橋梁安檢維護作業，交通部於八十六年七月完成「台灣地區橋梁安全管理策略探討與制定」研究，將建立中央橋梁管理系統及適合各橋梁主管單位使用之管理系統，列為現階段重點工作之一，希望利用有系統、有效率的電腦化管理方法，結合GIS(Geographic

Information System)、GPS(Global Positioning System)及網路技術，以協助橋梁管理機關進行橋梁之管理，而提高橋梁服務水準，確保結構穩定性與安全性，俾維護陸路運輸機能，有效運用資源，降低使用及維修成本，並延長橋梁使用年限。交通部運輸研究所依此規劃，於民國88年委託國立中央大學研究團隊進行「建立台灣地區橋梁管理系統」研究案，並於民國89年開發完成。「臺灣地區橋梁管理資訊系統」為一套網路層級之管理資訊系統，使用單位從交通部到所屬各局處及其各工務段，以及內政部營建署與各縣市政府，使用者只要連結網際網路即可透過瀏覽器操作系統。系統於2000年底建置完成並上線，為全國各橋梁管理機關統一使用之橋梁管理系統。交通部亦同時於此階段進行全國橋梁普查，調查所有相關機關管轄橋梁之基本資料，並進行全面性之橋梁目視檢測。當時普查並鍵入系統中之橋數約為2萬3千餘座，至今系統中之橋數已達2萬8千餘座。

TBMS系統於2008年進行全面改版作業，新系統已於2009年5月20日正式上線啓用。新系統分為1.基本資料模組、2.檢測資料模組、3.維修記錄模組、4.統計分析模組、5.決策支援模組、6.地理資訊模組、7.防災資訊及8.系統設定，共八大模組。

TBMS為目前國內橋梁管理單位所統一使用之橋梁管理系統，使用單位有交通部台灣區國道高速公路局、交通部公路總局、台灣鐵路管理局、各縣市政府以及各鄉鎮市公所。以下針對較為常用的7個模組做介紹[姚乃嘉等，2013]：

1.橋梁基本資料模組：

完整的資料庫可謂是橋梁管理系統之核心，TBMS基本資料模組將橋梁資料分為管理資料、幾何資料、結構資料及設計資料以詳細記載每座橋梁之基本資料，橋梁基本資料庫欄位概述如表2-3所示，基本資料模組系統畫面如圖2.4。

表2-3 系統欄位概述[姚乃嘉等，2013]

資料類別	欄位名稱
管理資料	橋梁名稱、管理機關、所在地、道路等級、路線、里程樁號、竣工年度、竣工月份、合約編號、設計單位、施工單位、竣工圖說保存地點、最近一次維修年度、最近一次維修月份、跨越物體、參考地標、造價、附註
幾何資料	橋梁總長、橋梁最大淨寬、橋梁最小淨寬、最高橋墩高度、橋面版面積、橋上淨高、橋下淨高、總橋孔數、總車道數、最大跨距、其他跨距、橋頭 GPS 座標東經、橋頭 GPS 座標北緯、橋尾 GPS 座標東經、橋尾 GPS 座標北緯
結構資料	結構型式、橋墩型式、橋墩材質、橋墩基礎型式、主梁型式、主梁材質、橋台型式、橋台基礎型式、翼牆型式、支承型式、防震設施
設計資料	設計活載重、防落橋長度、設計地表加速度、計畫洪水位、計畫堤頂高程、計畫河床高度、地盤種類、橋基保護工法
橋梁照片	橋梁近端全景、橋梁遠端全景、橋梁上游全景、橋梁下游全景

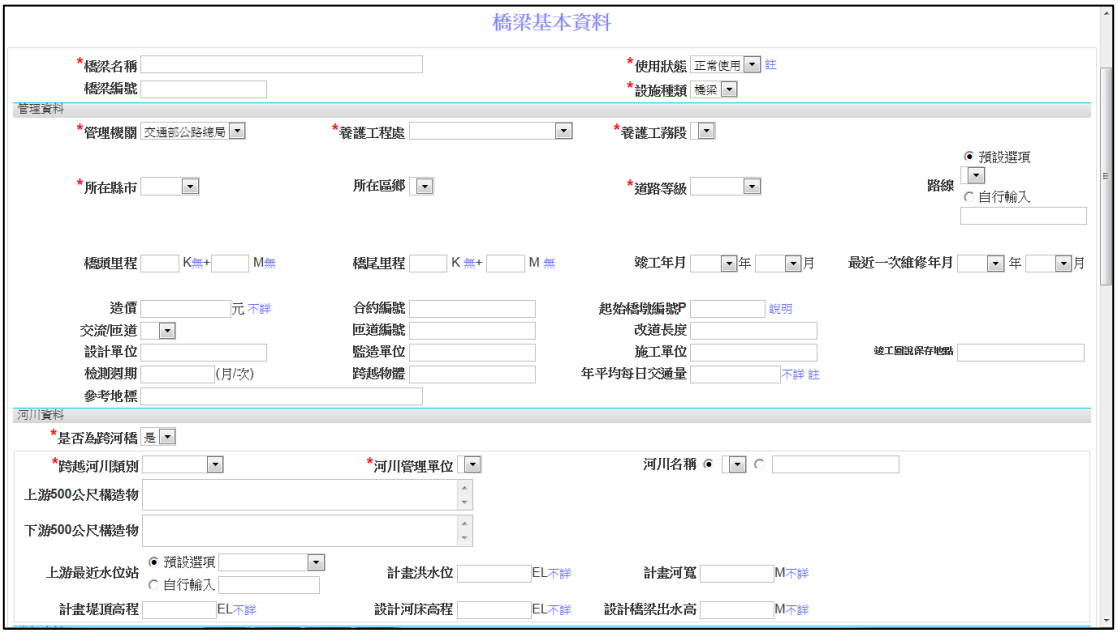


圖 2.4 基本資料模組畫面[姚乃嘉等，2013]

2.檢測資料模組：

目視檢測是對於橋梁使用現況具體的管理方式之一，TBMS系統是採用D.E.R.&U.之目視檢測準則，模組畫面如圖2.5所示，模組提供下列功能：

圖 2.5 檢測資料模組示意圖 [姚乃嘉等，2013]

(1)列印空白檢測評估表：

使用者可針對各座橋梁列印空白檢測評估表，系統將於表上自動填入橋梁名稱、路線別、里程樁號、總長、淨寬、結構型式等基本資料。

(2)輸入、編輯及列印橋梁檢測資料：

當橋梁檢測進行完畢之後，將檢測資料輸入系統中，系統將以不同檢測日期記錄單座橋梁之檢測記錄。此外，使用者可於系統中修改原有之檢測資料或增加新的檢測資料，填入描述各個瑕疵的位置、所需之修復工法、數量、修復的急迫性及對各個瑕疵可能發生原因的判斷，並且初步評估所需維修工法，或者建議做進一步的補強，以便往後進行各項分析或決策工作。

(3)檢測照片資料庫：

為更加詳實記載每座橋梁進行檢測時之各構件之劣化破損狀況，此模組亦提供登錄檢測照片，讓使用者能更確實了解該橋梁之損壞狀況，並可同時記載檢測員對此項損壞之照片說明。

(4)維修工作項目：

提供檢測人員依定位系統中定義的編號，描述各個瑕疵的所在位置、所需的維修工法、數量、修復的急迫性及對各個瑕疵的詳細說明。檢測人員可充分利用此欄描述瑕疵的現象，填寫個人對瑕疵可能發生原因的判斷，並且初步評估所需的修復工法。

(5)檢測員意見：

提供檢測員填寫個人對此橋的意見，包括對整體結構安全性及服務性的評估及是否應安排作進一步之詳細檢測。

3.維修記錄模組：

維修記錄模組之功能，在於管理及監控橋梁維修工作之進度。同時，亦可由橋梁維修資料之累積，發現橋梁劣化之趨勢，若發現維修工作之頻率異常，或服務年限過短，橋梁管理單位便可針對此一現象深入探討其成因，以做出適當之決策，避免不必要之花費。

橋梁在進行檢測之後，便可以本模組針對不同構件所建議維護工作之方法、數量與急迫性，記錄其維修工作承包商名稱、統一編號、實際維修數量、實際維修金額、維修開工日期及維修完成日期，使用者可經由此一功能進行橋梁破損狀況之維修工作管理、考核。俟一維修工作項目完成後，使用者登錄完成之修復工作後，系統亦會同時更新此項記錄於功能畫面中，使用者可輕易辨識橋梁破損狀況維修工作是否完成。模組畫面如圖2.6所示：

圖 2.6 維修記錄模組功能示意圖 [姚乃嘉等，2013]

4.統計分析模組：

橋梁管理機關在面臨管理工作時，首先關注的主題為其所管轄之橋梁年代的分布、橋齡的分布或是各種橋梁長度的統計與分布等等問題，藉由獲得這些資料，可進一步了解該管理機關所面臨之橋梁維護管理工作的範圍與負擔程度。統計分析模組可將傳統須以人工進行之統計分析及分析圖表繪製的工作，藉由電腦化系統迅速完成並輔以報表輸出，將所得之結果供作橋梁管理相關工作決策分析之參考。

統計分析模組可進行對橋梁基本資料、檢測記錄及維修記錄進行統計分析查詢並配合圖表之輸出以彙整成報告及清冊，其模組畫面如圖2.7所示：

圖 2.7 統計分析模組畫面 [姚乃嘉等，2013]

統計分析模組包含以下9項統計分析功能：

(1)橋梁特性分析：

所謂橋梁之特性分析，乃是針對不同的橋梁分佈範圍及種類，找出在此限制之下，有關橋梁的橋齡、橋長、橋版面積、交通量等特性之排序，排序可分為從小至大、從大至小兩種順序。此分析可提供給橋梁管理機關了解其轄區內橋齡最老的前幾座橋梁、或是橋長最長及橋面版面積最大之前幾座橋梁，有助於了解轄區內所管理橋梁之排列狀況。

(2)橋梁數量統計：

橋梁數量統計係用以提供使用者查詢不同統計範圍中橋梁的分布狀況，此項功能可對各個單位管轄橋梁、某一縣市橋梁及不同道路等級之數量分等進行統計分析並輸出圖表進行列印及匯出成檔案以利彙整成報告。

(3)橋齡統計：

橋齡統計係用以提供使用者繪製不同統計範圍之橋梁年齡

結構分佈圖。其分析並可提供使用者選擇以建造年代或以橋齡為橫軸，以繪製不同主題之橋齡分佈統計圖。

(4)橋梁長度統計：

橋梁長度統計可提供使用者繪製不同長度區間內之橋梁數量統計圖，或是各年代中所建造之橋梁總長度比較圖。

(5)橋版面積統計：

橋版面積統計可提供使用者繪製不同面積區間中之橋梁數量統計圖。

(6)結構型式統計：

結構型式統計可提供使用者繪製橋型數量統計與橋長之關係。所謂與橋長之關係為某種結構型式之橋梁之平均長度分析圖；而橋型分析則是顯示特定結構型式（如梁式、版橋、拱橋等）之分佈狀況，以利各使用單位對不同結構型式之橋梁進行統計分析。

(7)成長趨勢分析：

成長趨勢分析功能可提供使用者繪製橋梁總長及橋面版總面積於不同時間區間內之成長趨勢圖表。

(8)交叉分析：

本功能提供使用者選擇統計圖表不同的縱軸及橫軸，進行橋梁基本資料之交叉分析。

(9)橋梁檢測資料排序及統計：

透過系統所採用之D.E.R.&U.目視檢測可具體掌握橋梁使用現況，即可使檢測員掌握各橋梁的劣化狀況，並給予各項劣化適當的評分，以作為橋梁優劣順序排定的主要依據之一。也就是說，當一檢測員對上述檢測方法非常熟悉後，其便可對於D.E.R.&U.目視檢測方法中共66種劣化狀況類別，以劣化程度

（Degree）、範圍（Extend）及重要性（Relevancy）三個層面來加以分析、評分。另外再考慮橋梁之結構安全性、服務性、重要性等因素後，系統即可運用上述橋梁檢測評分資料及因素進行橋梁構件狀況指標（Icij）及橋梁分年進行排序及統計。因此，各層級之使用者便可依此對其所轄橋梁目前之結構安全與使用狀況有一全面性的瞭解，並配合圖表之輸出即可將其排序及統計資料匯整成報告。

5.決策支援模組：

決策支援模組包含四大功能，檢測預算編列、維修成本估算、橋梁維修排序及維修經費分配。可分別由使用者自行勾選橋梁後，系統針對所勾選之橋梁進行檢測預算編列。第二種方式是使用者選取篩選條件後，系統針對篩選條件下之所有橋梁進行計算，如圖2.8所示。

圖 2.8 決策支援模組畫面[姚乃嘉等，2013]

6.地理資訊系統模組：

地理資訊系統可以有效掌握、規劃及管理空間資訊，使得建立科學化及最佳化之分析模式，並可提高工作效率及降低成本。傳統橋梁管理系統僅著重於文字與數值計算之表現，然而橋梁所處位置周遭的空間資訊實不易以平面文字或數字表示之，因此，

若能加入地理資訊系統技術，而於系統內顯示橋梁之空間位置及周遭環境之資訊，更有助於管理者對相關環境獲得全盤了解。模組畫面如圖2.9所示：

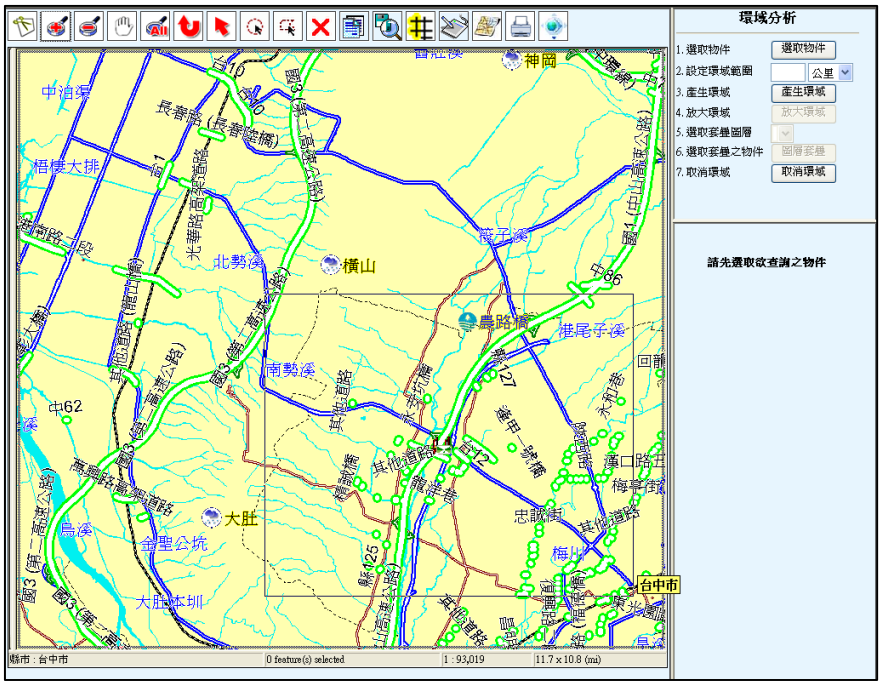


圖 2.9 地理資訊系統模組圖面查詢 [姚乃嘉等，2013]

7.防災資訊模組：

此模組(圖2.10)可提供使用者查詢即時河川水位資料、即時水庫測站資料及即時雨量等水情資料，並分別橋梁防災預警條件，當災害發生時發送簡訊通知。

圖 2.10 防災資訊模組畫面[姚乃嘉等，2013]

2.4 二代 TBMS 台灣地區橋梁管理系統

根據交通部運輸研究所「第二代臺灣地區橋梁管理資訊系統建置規劃」[交通部運輸研究所，2015]報告內容，「臺灣地區橋梁管理資訊系統」(TBMS)自民國89年建置完成迄今已有十五年，期間我國遭逢多次重大颱風豪雨侵襲，並因而發生多起橋梁斷落、人員傷亡之不幸事件。臺灣地區地震頻繁，常因颱風豪雨導致劇烈沖刷或淤積，加上橋體老劣化、車輛超載及河川砂石盜採等不利因素影響下，橋梁劣化受損之風險也常隨之不斷增加。為強化現行之「臺灣地區橋梁管理資訊系統」對耐洪能力、耐震能力、載重能力及老舊劣化情形之掌握，並利用行動裝置提升橋梁檢測之效率及品質，運研所於102年開始委託國立中央大學進行「第二代臺灣地區橋梁管理資訊系統建置規劃」之研究，以構件化、行動化、以及客製化為主軸進行「第二代臺灣地區橋梁管理資訊系統」主系統(簡稱TBMS2)(如圖2.11)及行動裝置應用程式(簡稱App)(如圖2.12)之規劃及開發，除可快速簡易地生成橋梁3D模型並掌握各主要構件最新狀況與變化趨勢外，亦可利用行動裝置App直觀呈現橋梁3D構件狀況及逐構件記錄橋梁檢測結果(如圖

2.13)，立即透過無線網路上傳至TBMS2，有效提升橋梁檢測資料之完整詳實度以及橋梁檢測作業之品質與效率。

圖 2.11 第二代臺灣地區橋梁管理資訊系統

圖 2.12 第二代臺灣地區橋梁管理資訊系統 APP

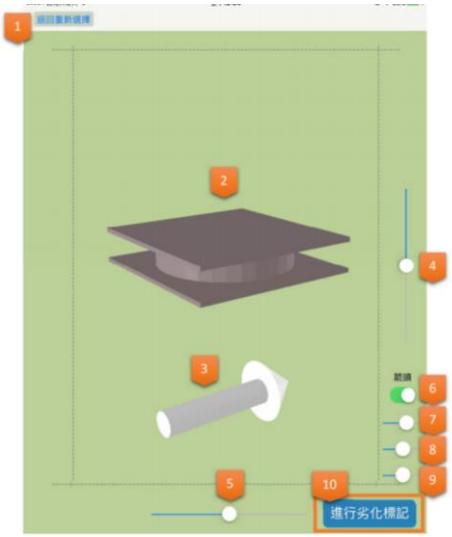


圖 2.13 橋梁 3D 模型與檢測

2.5 台灣公路早期防救災決策支援系統

根據交通部運輸研究所研究報告「公路防救災決策支援系統建立之研究」中，所開發之「臺灣公路早期防救災決策支援系統(TRENDS)」已針對目前國內外之防救災系統文獻資料及國內已發展完成之防救災決策支援系統進行資料蒐集，內容包含國內外之邊坡、橋梁、道路等之防災、救災資料及相關資料庫系統之技術等。此計畫為達到各系統間資料交換之目的，以軟體代理人(Software Agents)為基礎，建立一資料交換平台。資料交換平台之建立，可減少資料重覆建置，增加資訊之使用率，達到資源共享之目標。經由此架構，各服務使用者(相關交通系統)，可經由資料交換平台，找到可以交換之資料格式與來源位置，在設定軟體代理人之初始值後(資料之輸出、輸入及服務)，即可連結各系統，整合各項資訊。

資料交換平台整合橋梁及坡地災害管理、預警系統於統一架構下，此整合模式未來可做為其他公路設施整合擴充之依循。此架構下共用GIS圖層資料，並在資料庫上作相關之連結，而資料交換之工作則由代理人擔任。此整合系統包括以下四大功能：1.災害預警的啟動機制。2.災害資訊、橋梁資料及邊坡資料的提供。3.

災害應變措施及調查表單之系統性流程。4.自發性的通報系統。系統中(1)跨河橋梁安全預警模組與(2)橋梁地震通阻分析模組，分別洪水預警與地震預警之核心，分別敘述如下:

(1)跨河橋梁安全預警模組

根據交通部運輸研究所(2013)「跨河橋梁安全預警系統建置更新驗證與維護管理」之研究成果，以公路總局所管轄大甲溪下游至馬鞍壩跨河橋梁作為研究對象，其中所開發之「跨河橋梁安全預警系統」，會自動接收河系上游集水區中央氣象局雷達雨量觀測預報，在與地面雨量觀測進行修正後，推算河川流域即時與未來一小時之降雨強度，再結合集水區演算、地表漫地流演算、河道一維水理演算、水庫演算，並於部分重要橋梁以二維水理推估河道之流量、水位、流速與沖刷深度；然後考量橋梁材料結構特性，進行橋梁穩定性分析，計算橋梁之耐洪安全係數，作為即時及未來一小時之橋梁預警。此系統自動計算橋梁安全性並提前預警，提供橋梁管理單位，在颱洪時作決策支援，有利於爭取防災應變之黃金時間，給予用路人生命財產更多的保障，其架構如圖2.14所示[鄭明淵等，2013]。

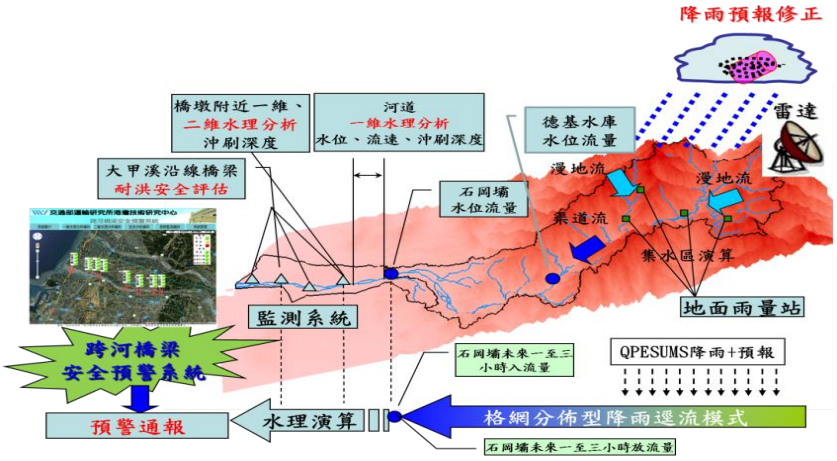


圖 2.14 颱洪災害跨河橋梁防災架構圖[鄭明淵等，2013]

(2)橋梁地震通阻分析模組

根據交通部運輸研究所(2011)「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」之研究成果，其中「側推分析與殘餘能力分析模式」分

析台灣24座橋梁(考慮橋梁劣化)側推分析成果。並將成果建置成人工智慧學習所需資料庫，進而建立「人工智慧橋梁耐震能力推論模式」，即可根據全台灣鋼筋混擬土橋橋齡、結構形式、環境狀態等屬性推論Ay、Ac值，進而建置全台省縣道橋梁耐震資料庫[鄭明淵、邱永芳、謝明志等，2011]。

當地震災害發生時，資料交換平台(以港研中心專利:災害預警資料交換機為核心)會自動擷取地震速報(取自中央氣象局)。接著將地震速報中地震位置、規模及深度輸入「地表震動分析模式」，計算出全台灣各地地表加速度，以ArcGIS Server的Geoprocess Service找尋各橋梁所在地震PGA，結合全台省縣道橋梁耐震資料庫，計算各橋梁通行失敗機率。故當地震發生，公路管理單位可利用通行失敗機率作為巡檢優先順序之標準。

上述之成果整合到TRENDS。該功能放置於「災害資訊管理模組」的「橋梁地震破壞潛勢」功能，如圖2.15所示，此功能以Google Map作為底圖，並利用GIS Server的Geoprocess Service畫出震度分級圖並套疊在Google Map上。同時系統將通行失敗機率大於50%橋梁視為危險橋梁，頁面左方表格分別列出橋名、工程處、工務段、PGA、P__T(TELES計算通行失敗機率)、P_E(此研究計算通行失敗機率)、P(P_T及P_E取大值)，並會在Google Map上點繪出危險橋梁位置。圖2.16以921地震為模擬事件，紅色星星為地震震央，暗紅色點即為在921地震通行失敗機率大於50%之橋梁所在位置，地圖上各顏色則依中央氣象局分級方式，將各地震度分為八個等級，可參考頁面右方圖例。

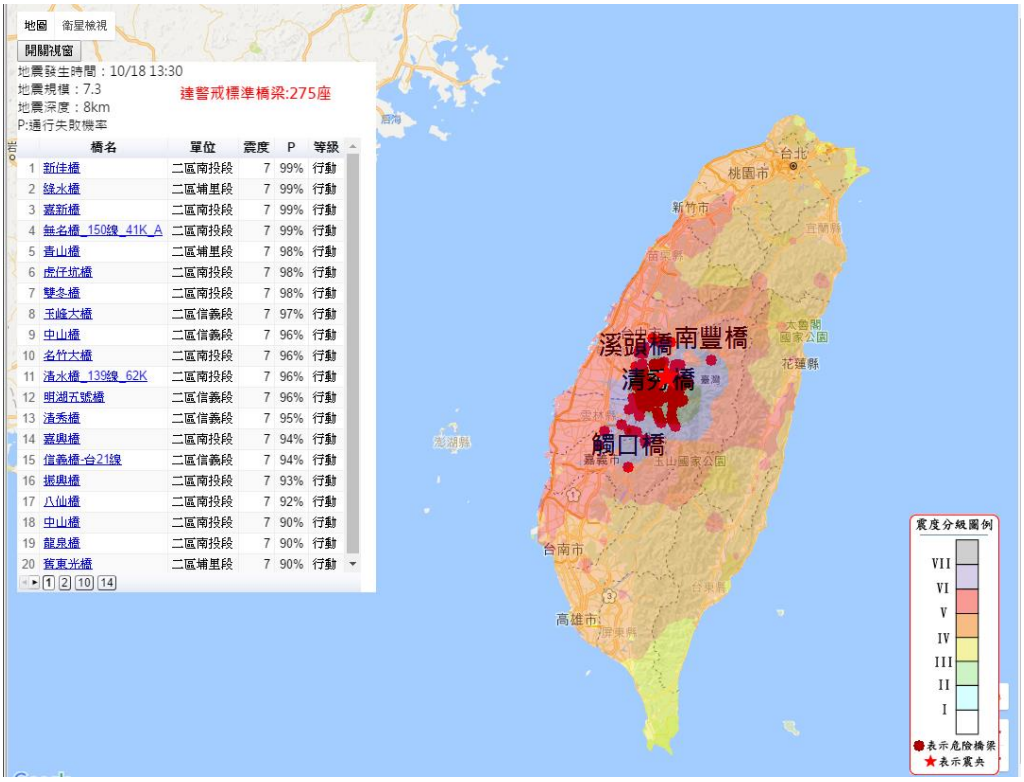


圖 2.15「橋梁地震破壞潛勢」介面(一)

[鄭明淵、邱永芳、謝明志等，2011]

圖 2.16「橋梁地震破壞潛勢」介面(二)

[鄭明淵、邱永芳、謝明志等，2011]

此系統為了讓使用者能夠快速了解橋梁地震破壞潛勢狀況，提供「文查圖」及「圖查文」的功能。「文查圖」功能可以應用

左邊表格，點選所要查詢橋梁，即能夠快速找到橋梁所在位置；「圖查文」的功能則可由圖片找尋到橋梁基本資料。如圖2.16所示，使用者想查詢「新街橋」，點擊橋名，則地圖能夠快速幫找到「新街橋」位置，並且放置一個標籤，讓使用者馬上知道橋梁所在位置。

當地震災害發生後，藉由資料交換平台擷取中央氣象局地震速報。「橋梁通阻檢測分析模組」則會自動啟動運作，將通行失敗機率大於50%橋梁列出，並建立異常狀況橋梁清單。接著，TRENDS自動啟動指派機制通知公路總局值班人員進行巡檢。

2.6 橋梁通阻檢測分析模式建立之研究

橋梁為台灣地區之重要交通工程設施，但台灣屬季風型氣候夏季多雨，每年洪水來襲皆造成橋梁重大威脅，由於河水沖刷將導致河床降低，致使橋梁基礎深度變淺，因此影響橋梁的安全性能。且台灣為多地震的國家，一旦發生地震等大規模天然災害時，橋梁倒塌或斷裂的機率很高。為避免災害發生時，造成橋梁損壞導致交通中斷、居民受困甚或是人員傷亡等事件的發生，對現有橋梁進行全面檢測勢在必行。然而國內橋梁數量高達數萬座，若對所有橋梁進行破壞性檢測或全面性結構分析，將花費許多時間與經費。

有鑑於此，交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)委託國立臺灣科技大學，發展建置一套橋梁通阻檢測分析模式，模式應用移動式非破壞性振動檢測、材料劣化評估橋梁現況與殘餘容量，再整合地震破壞潛勢分析詳細計算橋梁Ay(降伏加速度)、Ac(完全損壞加速度)，最後應用人工智慧橋梁耐震能力推論模式推論其他橋梁之Ay、Ac，成果可迅速對現有橋梁安全程度進行診斷，得到不同橋梁之損壞機率，並作為災後橋梁封橋管制後是否開放通行之依據。其流程與架構如下圖2.17所示:

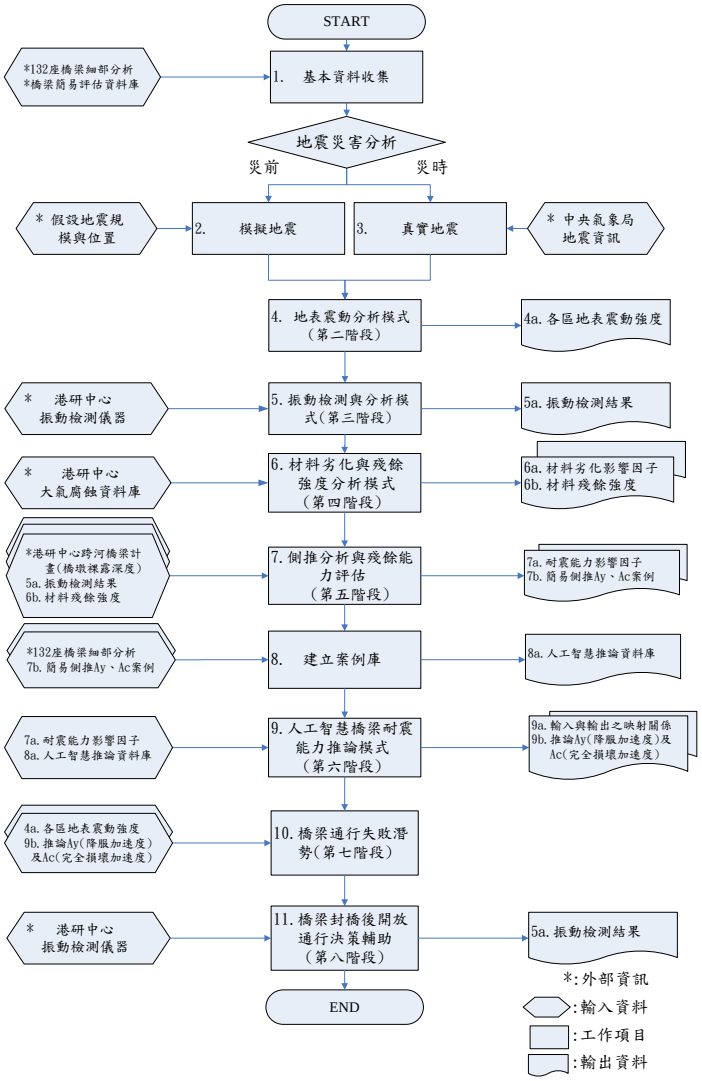


圖 2.17 橋梁通阻檢測分析模式架構圖

如圖2.18所示，研究取得公路總局計畫成果中，132座橋梁細部分析與簡易評估資料庫。並根據中央氣象局公佈之地震資訊、或人為假設地震規模與位置，運用地表震動分析模式推估各地區之地表加速度。以移動式振動檢測及材料劣化評估方式求取橋梁殘餘強度。將分析之結果結合橋墩裸露深度等橋梁現況做為側推分析之輸入，進行橋梁耐震能力評估分析。最後運用人工智慧方式學習輸入(地震耐震能力影響因子)與輸出(降伏加速度Ay、損壞加速度Ac)之映射關係，並依此結果得到不同地震強度下之橋梁損壞機率。模式中外部資料將藉由「災害預警資料交換機」取得，

各階段概要步驟如下所述:

1.基本資料收集:取得公路總局「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」計畫成果中，針對132座橋梁細部分析的資料。

2.模擬地震: 地震災害分析可分為災前與災時，災前將應用模擬震源方式，假設地震規模與位置。

3.真實地震:災時應用港研中心「交通工程防災預警系統建立之研究」中所建置之「災害預警資料交換機」，與中央氣象局連結，透過資料交換整合取得即時地震資訊。

4.地表震動分析模式:根據前階段中災前與災時所得到之地震資訊，如地震規模與震源等資料。利用震動強度衰減率修正地震規模和距離之關係，推估台灣不同地區之地表震動強度。並以格網方式將台灣地區切割成不同格狀區域，再依各地區的地盤種類和距離之不同，分別求算其地表加速度。

5.振動檢測與分析模式:評估並建置適合於國內採用之震動頻率檢測方式。排定實驗計畫，運用港研中心既有之振動檢測設備(速度計及加速度計各1組)，利用移動式非破壞性振動檢測，針對車行方向、水流方向等進行量測，分析不同水位、流速、車行振動及橋梁劣化等狀況，解析沖刷深度或橋梁破壞所造成頻率的影響，進行儀器測試與校正。其結果可作為側推分析與殘餘能力分析模式中之輸入及結果驗證比對之依據。

6.材料劣化與殘餘強度分析模式:考量台灣地區環境因素，應用「災害預警資料交換機」，擷取港灣研究中心大氣腐蝕實驗室所量測建置之台灣地區大氣腐蝕資料，再應用材料實驗方式分析，求得大氣環境對橋梁RC材料之影響，據此初步繪製橋梁劣化曲線圖，以求得較精確之橋梁殘餘容量，並作為後續推估地震破壞潛勢分析之依據。

7.側推分析與殘餘能力分析模式:根據橋梁設計或竣工圖，結合現地環境、橋梁現況(移動式非破壞振動檢測結果)、殘餘容量(材

料劣化評估結果)等資料，兼顧計算準確與操作簡易的特性，透過地震損壞影響因子求算Ay及Ac值。為驗證該分析模式的準確性，針對基本資料收集步驟中可用121座橋梁細部分析資料，選擇其中12種代表性的橋梁型式，以所開發的側推分析模式求得之橋梁Ay與Ac值與「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」計畫121座橋梁分析結果進行比對，驗證所開發的側推分析之準確性。

8.建立案例庫:首先以121座經細部評估求得之橋梁Ay、Ac值為輸出(Output)，並同樣以121座橋梁簡易調查之資料為輸入因子(Input)，建立資料庫。但由於此資料庫，再經橋梁類型分類後，將會有案例數不足，不利AI學習，預測準確度較差的問題，因此本計畫考量現有資料庫條件限制下，透過前一階段地震破壞潛勢評估中所建立之側推分析與殘餘能力分析模式，持續增加案例資料庫之案例數，以提升AI預測之準確性。

9.人工智慧橋梁耐震能力推論模式:應用快速混雜基因演算法融合支持向量機發展建置「人工智慧機械學習推論模式」。採用前一階段中所建置公路總局121座橋梁細部評估結果資料庫，透過案例學習，找出輸入(簡易調查耐震能力影響因子)與輸出(細部評估Ay、Ac)之映射關係。

10.橋梁通行失敗潛勢:綜合上述步驟，針對公路總局轄下四千多座省縣道橋梁進行AI推論，求得各橋梁之Ay與Ac值，並據此繪製出地表震動影響下橋梁地震健康度曲線，定義出不同地表震動下橋梁可能的損壞機率。

11.橋梁封橋管制後開放通行評估:應用非破壞性振動檢測分析模式，使用港研中心既有振動檢測儀器，針對災後橋梁所量測到之頻率主頻偏移，解析沖刷深度或橋梁破壞所造成頻率的影響，判斷橋梁之安全狀態，進而做為橋梁封橋管制後是否開放通行之依據。

2.7 鋼結構橋梁維護管理

台灣地形多高山峽谷而且河川溪流眾多，橋梁即為聯繫河岸兩地重要的交通工程設施，但台灣地處季風氣候地區，使鋼橋的鏽蝕問題不可小覷；與此同時台灣也位於地震帶上，每當地震來襲時對鋼橋會造成重大威脅。如何評估現有鋼構橋梁健康度，與盡早修復因為外力所造成損傷較嚴重的鋼橋及顯得格外重要。

目前國內橋梁耐震評估鋼橋是否有損傷疑慮，大多僅考慮鋼橋的下部結構，較少針對鋼橋的整體結構進行分析，無法完整反映橋梁整體的損壞狀況。另外在現行的檢測作業方面，大部分只考慮鋼橋的可視老化以及是否鏽蝕等情況發生，對於地震、耐洪等潛勢危害較少探討，依現行所採用的檢測方法，檢測人員難以診斷鋼橋的現況。為使相關工程人員在進行檢測還有後續之維修補強時，能有一準則可供相關人員進行判斷，建立維修標準顯示出其必要性。考慮到公路橋梁管理單位經費有限的情況下，若能知道各個鋼橋的健康度以及維護預測成本，即可交由橋梁管理單位進行橋梁維護的先後排序，便於管理單位的控管維修經費的使用。以下針對鋼橋維護規範、風險管理、破壞模式、性能指標與相關文獻進行整理與探討。

1.國內公路橋梁例行性檢測作法：

目前台灣交通部之公路養護規範主要是採用D.E.R.&U. 方法，此評估法乃根據交通部國道高速公路局所開發之橋梁管理系統基礎，委託CSIR公司與昭陵顧問工程股份有限公司制定之目視評估準則。檢測人員於定期檢測時參照橋梁檢測表格，表2-4列出各構件之劣化情形，分別依劣化程度（Degree，D）、劣化範圍（Extent，E）、重要性（Relevancy，R）等三項予以評定後；再評估該劣化構件需維修之急迫性（Urgency，U）。

為評估劣化情形，D.E.R.&U.以1至4之四個等級予以具體評

估劣化程度，但若「無此項目」或「無法檢測」或「無法判定」時，則以0予以記錄。並由橋梁檢測人員於現場予以評等。橋梁檢測人員得參考相關檢測手冊並接受適當之橋梁檢測培訓，以期了解D.E.R.&U.檢測評估方法及評定準則(公路養護手冊，2012)。

缺點常因檢測人員不同而有不一致現象，且僅能觀看到外部損傷，無法得知內部損傷情形。

表2-4 橋梁構造物檢測評定標準

	0	1	2	3	4
D(劣化程度)	無此項目	良好	尚可	差	嚴重損壞
E(劣化範圍)	無法檢測	<10%	10%~30%	30%~60%	>60%
R(重要性)	無法判定重要性	微	小	中	大
U(急迫性)	無法判定急迫性	例行維護	3年內	1年內	緊急處理維護

橋梁構件狀況指標[李有豐，2000]：

D.E.R.&U.檢測法主要在於考量橋梁的安全性、結構性、重要性等，先採用表2-5進行巡檢，再以橋梁構件狀況指標 Icij 進行橋梁評估，當Icij越小，即表示該橋梁構件損壞越嚴重，最後依據 Icij 其大小進行排列，其橋梁構件狀況指標 Icij，計算公式如式(2.1)敘述之：

$$Icij = 100 - 100\frac{D\times E\times R^{a}}{(4+4)\times 4^{a}} \quad (2.1)$$

- Ic_{ij}：梁構件狀況指標。
- D、E 、R ：表示 D.E.R.&U.檢測表格之各構件評分結果，分數範圍為 0~4 分。
- a ：表示相對重要權重之參數，通常內定值為 1，若使用者欲強調該構件之重要性，可取 2。

當各構件Icij 評估完畢後，再將所各構件Icij 值帶入式(2.2)中可獲得該構件 i 之狀況值Ici。最後把Icij 、w_i代入式(2.3)即可求出橋梁整體狀況指標CI。橋梁整體狀況指標CI 愈高，則表示橋梁整體狀況越好，CI 愈低則反之。

$$Ic_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} Ic_{ij}}{n} \tag{2.2}$$

$$CI = \frac{\sum_{j=1}^{20} Ic_i \times w_i}{\sum_{i=1}^{20} w_i} \tag{2.3}$$

Ic_{ij}：梁構件狀況指標。

Ic_i：為構件項目i之狀況值。

n：橋梁各構件之總數。

CI：橋梁整體狀況指標。

w_i：構件i相對橋梁之權重。

表2-5 定期檢測表(1/5)

項次	檢測項目			細項判定及說明			照片編號	綜合判定及說明		
				D	E	說明		D	E	說明
1	引道路堤	近端	引道路堤沉陷							
			引道路堤之沖刷或侵蝕							
			其他損傷							
		遠端	引道路堤沉陷							
			引道路堤之沖刷或侵蝕							
			其他損傷							
2	引道護欄	近端	混凝土裂縫							
			混凝土剝落							
			混凝土蜂窩							
			混凝土空洞							
			鋼筋外露、銹蝕							
			構件損傷							
			銲接處裂縫							
			螺栓損傷、欠缺或鬆動							
			生銹及腐蝕							
			異常聲音							
			其他損傷							
		遠端	混凝土裂縫							
			混凝土剝落							
			混凝土蜂窩							
			混凝土空洞							
			鋼筋外露、銹蝕							
			構件損傷							
			銲接處裂縫							
			螺栓損傷、欠缺或鬆動							
			生銹及腐蝕							
			異常聲音							
			其他損傷							
3	河道或土壤		河道變遷							
			上游攔河堰							
			河道之潛壩、固床工、河堤建造物							
			及親水設施等							
			上下游開採砂石							
			橋址河床變化							
			橋墩沖刷狀況							
			其他損傷							
4	引道路堤-保護設施	近端	保護設施遭破壞、移動或遺失							
		遠端	保護設施遭破壞、移動或遺失							

表2-5 定期檢測表(2/5)

項次	檢測項目			細項判定及說明			照片編號	綜合判定及說明		
				D	E	說明		D	E	說明
5	橋台基礎	近端	混凝土裂縫							
			混凝土剝落							
			混凝土蜂窩							
			混凝土空洞							
			鋼筋外露、銹蝕							
			滲水、游離石灰							
			基礎傾斜、沉陷							
			基礎入土深度							
			其他損傷							
		遠端	混凝土裂縫							
			混凝土剝落							
			混凝土蜂窩							
			混凝土空洞							
			鋼筋外露、銹蝕							
			滲水、游離石灰							
			基礎傾斜、沉陷							
			基礎入土深度							
			其他損傷							
6	橋台	近端	橋台傾斜、移動、沉陷							
			混凝土裂縫							
			混凝土剝落							
			混凝土蜂窩							
			混凝土空洞							
			鋼筋外露、銹蝕							
			排水孔堵塞							
			其他損傷							
		遠端	橋台傾斜、移動、沉陷							
			混凝土裂縫							
			混凝土剝落							
			混凝土蜂窩							
			混凝土空洞							
			鋼筋外露、銹蝕							
			排水孔堵塞							
			其他損傷							
7	翼牆/擋土牆	近端	翼牆/擋土牆傾斜、移動、沉陷							
			混凝土裂縫							
			混凝土剝落							
			混凝土蜂窩							
			混凝土空洞							
			鋼筋外露、銹蝕							
			滲水、游離石灰							
			其他損傷							
		遠端	翼牆/擋土牆傾斜、移動、沉陷							
			混凝土裂縫							
			混凝土剝落							
			混凝土蜂窩							
			混凝土空洞							
			鋼筋外露、銹蝕							
			滲水、游離石灰							
			其他損傷							

表2-5 定期檢測表(3/5)

項次	檢測項目		細項判定及說明			照片編號	綜合判定及說明		
			D	E	說明		D	E	說明
8	面層	表面劣化							
		其他損傷							
9	橋梁排水設施	排水設施阻塞							
		排水設施損傷							
		其他損傷							
10	緣石及人行道	混凝土裂縫							
		混凝土剝落							
		鋼構件銹蝕							
		鋼筋外露、銹蝕							
		其他損傷							
11	護欄	混凝土裂縫							
		混凝土剝落							
		混凝土蜂窩							
		混凝土空洞							
		鋼筋外露、銹蝕							
		構件損害							
		銲接處裂縫							
		螺栓損傷、欠缺或鬆動							
		生銹及腐蝕							
		異常聲音							
		其他損傷							
21其他附屬設施	標誌架及照明設施	構件損傷(變形、傾倒、銹蝕等)							
		螺栓損傷、欠缺、鬆動							
		侵入其他設施之使用空間							
		基座及錨定部位損傷							
		其他損傷							
	隔音牆	防落裝置損傷							
		構件損傷(變形、傾倒、銹蝕等)							
		螺栓損傷、欠缺、鬆動							
		基座及錨定部位損傷							
		異常聲音							
		其他損傷							
	維修走道	構件損傷(變形、傾倒、銹蝕等)							
		螺栓損傷、欠缺、鬆動							
		混凝土裂縫							
		異常聲音							
		其他損傷							
	其他設施	構件損傷、失去功能							
		其他損傷							

表2-5 定期檢測表(4/5)

項次	檢測項目		細項判定及說明			照片編號	綜合判定及說明		
			D	E	說明		D	E	說明
12	橋墩保護設施	保護設施遭破壞、移動或遺失							
13	橋墩基礎	混凝土裂縫							
		混凝土剝落							
		混凝土蜂窩							
		混凝土空洞							
		鋼筋外露、銹蝕							
		滲水、游離石灰							
		基礎傾斜、沉陷							
		基礎入土深度							
		其他損傷							
14	橋墩敦體(混凝土)	混凝土裂縫							
		混凝土剝落							
		混凝土蜂窩							
		混凝土空洞							
		鋼筋、鋼腱或錨定部位外露、銹蝕							
		滲水、游離石灰							
		構件彎曲、變形							
		墩柱傾斜、沉陷							
		阻水面積比與河川流向							
		其他損傷							
	橋墩敦體(鋼結構)	構件損傷(裂縫、彎曲、變形)							
		銲接處損傷							
		螺栓損傷、欠缺及鬆動							
		生銹及腐蝕							
		油漆銹蝕							
		油漆剝落							
		油漆龜裂							
		油漆白華化							
		積水或漏水							
		墩柱傾斜、沉陷							
		阻水面積比與河川流向							
		其他損傷							
15	支承	支承裝置損傷							
		螺栓損傷、欠缺及鬆動							
		生銹及腐蝕							
		支承沉陷							
		支承座、支承端部損傷							
		移動量							
		異常聲音							
		塵土、雜物堆積							
		阻尼裝置漏油							
		其他損傷							
16	防落設施	防止落橋裝置損傷							
		螺栓損傷、欠缺及鬆動							
		生銹及腐蝕							
		移動量							
		異常聲音							
		其他							
17	伸縮縫	伸縮縫裝置損傷							
		螺栓損傷、欠缺及鬆動							
		襯墊片或端部補強構件之損傷							
		高低差							
		橋面版間矩異常							
		異常聲音							
		漏水							
		伸縮縫間雜物堆積							
		其他損傷							

表2-5 定期檢測表(5/5)

項次	檢測項目		細項判定及說明			照片編號	綜合判定及說明		
			D	E	說明		D	E	說明
18	主要構件	構件損傷(裂縫、彎曲、變形)							
		銲接處損傷							
		螺栓損傷、欠缺及鬆動							
		生銹及腐蝕							
		油漆銹蝕							
		油漆剝落							
		油漆龜裂							
		油漆白華化							
		異常聲音、異常振動							
		積水或漏水							
		構件間距異常							
		其他損傷							
19	次要構件	構件損傷(裂縫、彎曲、變形)							
		銲接處損傷							
		螺栓損傷、欠缺及鬆動							
		生銹及腐蝕							
		油漆銹蝕							
		油漆剝落							
		油漆龜裂							
		油漆白亞化							
		異常聲音、異常振動							
		積水或漏水							
		構件間距異常							
		其他損傷							
20	橋面版 (混凝土)	橋面平整度							
		橋面與欄杆、緣石分離							
		混凝土裂縫							
		混凝土剝落							
		混凝土蜂窩							
		混凝土空洞							
		鋼筋、鋼腱或錨定部位外露、銹蝕							
		滲水、游離石灰							
		其他損傷							
	橋面版 (鋼結構)	橋面平整度							
		橋面與欄杆、緣石分離							
		構件損傷(裂縫、彎曲、變形)							
		銲接處損傷							
		生銹及腐蝕							
		油漆銹蝕							
		油漆剝落							
		油漆龜裂							
		油漆白華化							
		異常聲音、異常振動							
		積水或漏水							
		其他損傷							

2.鋼橋塗裝系統

在台灣地區而言，一般鋼材橋梁外露表面會進行防鏽油漆的塗刷，在[姚志銘，2007]中提到，塗裝分為底漆、中塗漆及面漆三種。底漆應採用具有優越防蝕性、密接性之塗料；中塗漆介於底漆與面漆間，具有較佳之相合性，可調和底漆與面漆之相異性；而面漆則應具有良好之耐候性、耐水性、耐藥性及含有著色顏料。這種以不同性能塗料分層塗刷，以發揮塗裝防蝕功能之組合，稱為塗裝系統。

而油漆種類又分為無機鋅粉、環氧樹脂、環氧柏油、聚胺基甲酸酯、油性樹脂、矽樹脂、氯化橡膠及聚氯乙烯樹脂等多種塗料。以下將對各種不同塗漆進行介紹：

(1)防銹底漆（Anti-Corrosion Primer）

功能：直接塗於鋼材表面，利用防銹顏料而達到止銹抑銹作用。

特性：須對被塗物有良好之附著性，於金屬膨脹收縮時均不剝離。對水、氧或其他腐蝕因子具低滲透性。具良好之塗膜物性，不易因外力而損傷塗膜， 且具抑銹功能。

(2)中塗漆（Middle Coating）

功能：於底漆與面漆之間可有效增強底漆防蝕功能及強化塗膜間之附著性及厚度。一般以添加鱗片狀防蝕顏料以形成一不透氣性之塗膜。

特性：對水、氧及腐蝕因子具低滲透性。表面較粗糙，可增強面漆與底漆之附著性。

(3)面漆（Top Coating）

功能：防止外來腐蝕因子入侵並配合環境需求，可兼具美觀作用。

特性：耐候性佳。耐水及耐藥品性佳。耐污染性佳，易清洗。

在[行政院農業委員會水土保持局農村再生設施施工規範,2016]中，根據塗裝流程與塗裝部位的不同，而有表2-6不同的情形。

表2-6 鋼橋塗裝系統種類

A 種：	鋼橋及鋼橋墩外露表面塗裝系統
B 種：	鋼梁及鋼橋墩內面塗裝系統
C 種：	RC 橋面板箱梁上翼板上面塗裝系統
Ca 種：	鋼床板裏面之箱梁內面塗裝系統
D 種：	鋼床板上面塗裝系統
E 種：	接合板外露表面塗裝系統
F 種：	接合板（適用鋼梁及鋼橋墩內）表面塗裝系統
G 種：	接合板（橋面版之箱梁外露）表面塗裝系統

2.7.1 橋梁維護風險分析

對造成橋梁損壞的情況進行適當的風險分析，對於橋梁管理者而言在發生緊急情況時，可以更靈機應變的應對各種場面，也有助於管理單位適度的掌握橋梁現有的各種潛在危機。在[邱建國、鄭明淵等，2014][林正軒，2013]同時考量可視劣化與不可視潛勢危害，並使用D.E.R.&U.當作元件老化指標；使用結構耐震容量作為地震的風險指標以及SSI作為洪水沖刷之風險指標,最後應用蒙地卡羅模擬評估風險程度，如圖2.18所示。

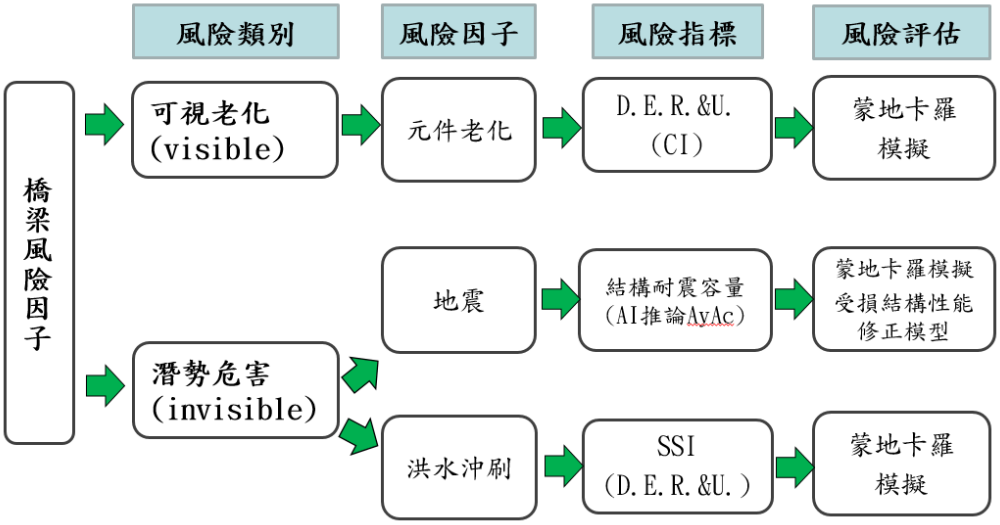


圖 2.18 橋梁風險因子分類

2.8 國內現行耐震評估方法

張國鎮等在『公路橋梁耐震能力評估及補強準則之研究』[張國鎮等，2009]中提到國內現行耐震能力評估方法，分為初步評估及詳細評估兩大類，初步評估係採用簡便、快速之方法，分為耐震評估檢查表及橋梁地震損失風險值法兩種方法，其結果為是否需進行詳細評估之依據，橋梁耐震能力詳細評估需依據現地資料，採用合宜的結構分析方法，求取結構耐震容量，並配合橋梁工址之地震需求，建立橋梁耐震性能曲線，並以性能點評估橋梁耐震能力是否符合耐震設計規範。

2.8.1初步評估方法

1.耐震評估檢查表

耐震評估檢查表分兩種，一為落橋評估，如表2-7所示，目的為評估橋梁地震時上部結構位移太大，致使落橋之可能性；另一為強度韌性評估，如表2-8所示，目的為評估橋梁於震時，下部結構強度與韌性組合之耐震能力。

表2-7 公路橋梁耐震評估檢查表-落橋評估(一般橋梁)

項次	項目	配分	評估內容
工址環境	是否為第一類活動斷層近域	8	是(1.0)否(0)
	地盤類別	4	臺北盆地(1)軟弱地盤(0.67)普通地盤(0.33)堅實地盤(0)
	相鄰橋墩間地表土質變化	2	大(1)中(0.67)小(0.33)無(0)
	液化可能性	6	高(1.0)中(0.67)低(0.33)無(0)
結構系統	相鄰兩震動單位結構系統差異性	8	大(1)中(0.67)小(0.33)無(0)
	外懸梁	2	有(1.0)無(0.0)
	梁端橋墩或橋台之斜角θ	4	$w=\frac{\theta^0}{90^0}\leq 1.0$
	縱坡角度 S(%)	2	w=S/6%$\leq$ 1.0
	曲線橋(半徑$\leq 100m$或交角$\geq 30^\circ$)	4	$w_1=1-(r-100)$；$w_2=\left(\frac{\alpha}{30}\right)-1$；$w=\max(w_1,w_2)$；$\gamma$: 半徑；$\alpha$:交角
	基礎裸露深度	20	樁基礎:$w=2.0-2.0\left(\frac{h_{left}}{h}\right)$；沉箱基礎:$w=1.43-1.43(\frac{h_{left}}{h})$
結構細部	支承狀況	4	極差(1.0)不良(0.67)尚可(0.33)良好(0)
	防落長度 Ne	20	$w=\frac{N-N_e}{N/2}\leq 1.0$，當$N-N_e\geq 0$；$w=0$，當$N_e\geq N$； Ne:實際防落長度；N:84 年規範規定之防落長度； N=50+0.25L+1.0H
	防落設施	12	兩項均無裝設(1.0)僅垂直行車向裝設(0.5)僅行車向裝設(0.25)兩項均有裝設(0)註:1.防落設施功能不良者，權重再加 0.25。 2.當$N_e\geq 1.2N$，行車向視為具有防落設施，且功能良好。
	其他異常現象	4	橋柱垂直度、支承座至帽梁邊緣混凝土支異常狀況等
	分數總計	100	

表2-8 公路橋梁耐震評估檢查表-強度韌性評估(一般橋梁)

項次		項目	配分	評估內容
橋址環境		是否為第一類活動斷層近域	8	是(1.0)否(0)
		地盤類別	6	臺北盆地(1)軟弱地盤(0.67)普通地盤(0.33)堅實地盤(0)76 年以後設計(0)
		液化可能性	6	高(1.0)中(0.67)低(0.33)無(0)
結構系統		梁端橋墩或橋台之斜角θ	4	$w=\frac{\theta^0}{90^0}\leq 1.0$
		橋柱或壁式橋墩高寬比	6	當 R≤ 2.5 ，$w=1.0$ ；當$2.5<R<5$ ，w =(5-R)/2.5；2;R≥ 5 ，$w=0$
		振動單位中橋柱、墩最高與最低之比	4	當$r\geq 1.5$ ，$w=1.0$ ；當$1.0\leq r<1.5$ ，$w=-2+2r$
		橋柱或壁式橋墩靜不定度	6	兩項均靜定(1.0)一向具靜不定(0.5)兩項均靜不定(0)
		基礎裸露深度	24	樁基礎:$w=2.0-2.0\left(\frac{h_{left}}{\quad}\right)$ ；*沉箱基礎*:$w=1.43-1.43(\frac{h_{left}}{\quad})$
結構細部	一般橋柱	柱底搭接與否	8	有搭接(1.0)無搭接(0)
		塑餃區箍筋細部	8	不符合耐震規定(1.0)部分符合耐震規定(0.5)符合耐震規定(0)
		主筋斷點與箍筋細部	4	有斷點且箍筋較柱底少(1.0)有斷點但箍筋不少於柱底(0.5)無斷點(0)
		橋柱與基礎劣化程度	8	嚴重(1.0)差(0.67)尚可(0.33)微(0)
	壁式橋墩	壁式橋墩底部鋼筋搭接與否	6	有搭接(1.0)無搭接(0)
		縱、橫向鋼筋比與細部	8	不符合耐震規定(1.0)部分符合耐震規定(0.5)符合耐震規定(0)
		主筋斷點與箍筋細部	6	有斷點且箍筋較柱底少(1.0)有斷點但箍筋不少於柱底(0.5)無斷點(0)
		橋墩與基礎劣化程度	8	嚴重(1.0)差(0.67)尚可(0.33)微(0)
	鋼橋柱	橋柱板之寬厚比	8	矩形柱$\frac{b}{t}<\frac{43}{F_y}(0)$ ；$\frac{43}{F_y}<\frac{b}{t}<\frac{63}{F_y}(0.5)$ ；$\frac{b}{t}\geq\frac{63}{F_y}(1.0)$ ；圓形柱$\frac{D}{t}<\frac{145}{F_y}(0)$ ；$\frac{145}{F_y}<\frac{D}{t}<\frac{232}{F_y}(0.5)$ ；$\frac{D}{t}\geq\frac{232}{F_y}(1.0)$
		縱向加勁板寬厚比	6	$\frac{b}{t}\geq\frac{16}{\sqrt{F_y}}(1.0)\frac{b}{t}<\frac{16}{\sqrt{F_y}}(0)$
		人孔位置	6	內灌混凝土高/人孔位置高≥0.4(1.0)；內灌混凝土高/人孔位置高<0.4(0)
		橋柱銲接細部	8	全滲透銲(0)；半滲透銲(1.0)
		支承狀況與其他異常現象	8	支承強度與損壞狀況、橋柱垂直度、跨度差異大、曲線橋、橋柱型式不同、焊接品質不良、腐蝕等

2.地震損失風險值法

此法係以多種典型橋梁發生輕微損傷、中度損傷、嚴重損傷、完全損傷的易損曲線為基礎，配合橋梁之設計地表加速度、地盤種類、三維效應與歪斜角程度，進而修正得到之易損曲線。計算工址發生475年回歸期設計地震時，受測橋梁之輕微損傷、中度損傷、嚴重損傷及完全損傷之或然率，與其對應的損失比相乘積，得到受測橋梁於設計地震下的損失比，再配合前述之落橋評估表(表2-7)、強度韌性評估檢查表(表2-8)，以及橋梁重要性指標加權平均後，進行維護優先排序。

2.8.2詳細評估方法

橋梁耐震能力詳細評估需依據竣工圖或現地檢測中，各項資料，例如：1.構材實際材料強度2.斷面尺寸資料3.鋼筋混凝土構材配筋之細節4.材料劣化之情形，採用合適的結構分析方法求取結構耐震容量。並配合橋梁工址之地震需求，建立橋梁耐震性能曲線，最後以性能點評估橋梁耐震能力是否符合耐震設計規範。

當規則橋梁針對耐震性能等級PL0、PL1、PL2、PL3進行評估之需求時，需使用非線性靜力分析法(側推分析)，而側推分析分為上部子結構(含橋柱)及基礎子結構(含土壤彈簧)兩大子結構分析[台灣世曦，2014]，以下分別敘述：

1.上部子結構(橋柱)之耐震分析評估

側推分析前，需先針對橋墩等結構構構材之鋼筋強度、混凝土強度、鋼筋斷面有效尺寸、混凝土斷面有效尺寸、箍筋斷面有效尺寸、箍筋間距、箍筋配設細節與材料劣化情形等設定構材之塑鉸性質(Plastic Hinge Property)。分析結果可得側推曲線、容量譜曲線及EPA_譜位移關係圖，後續可依此檢核帽梁剪力、橋柱穩定性、橋柱及支承之耐震能力等，以下分為(1)側推分析容量譜曲

線及雙線性計算(2)Fu-R-T法(3)防落長度檢核(4)支承剪力檢核(5)帽梁檢核(6)橋柱穩定性檢核 分別介紹。

(1) 側推分析容量譜曲線及雙線性計算

在各節點位置加上符合地震力豎向分配之側向力，依照橋柱高度比例增加，當整個結構至塑性階段的頂點水平位移與基頂剪力關係曲線即為側推容量曲線。

以ATC-40建議的方式建立容量譜曲線，因橋梁為多自由度之結構系統，需將結構物的頂部位移與基底剪力轉換為第一振態的關係，進而求得譜加速度_譜位移，繪製容量震譜曲線，如公式(2.4)、(2.5)、(2.6)、(2.7)所示[5]。

$$PF_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(w_i\emptyset_{i1})/g}{\sum_{i=1}^{N}(w_i{\emptyset_{i1}}^2)/g}\right] \quad (2.4)$$

$$\alpha_1 = \left[\frac{[\sum_{i=1}^{N}(w_i\emptyset_{i1})/g]^2}{[\sum_{i=1}^{N}w_i/g][\sum_{i=1}^{N}(w_i{\emptyset_{i1}}^2)/g]}\right] \quad (2.5)$$

$$S_{ai} = \frac{V_i}{M\alpha_1} \quad (2.6)$$

$$S_{di} = \frac{\Delta_{roof,i}}{(PF_1\times\emptyset_{1,roof})} \quad (2.7)$$

PF_1: 為第一振態的參與因子
w_i: 第 i 點的結構容量
g: 重力加速度
$\emptyset_{1,roof}$: 第一振態形狀在結構物頂部之值
α1: 第一振態的有效振態質量(Effective modal mass)
S_{ai}: 第 i 點譜加速度
S_{di}: 第 i 點譜加速度
V_i:第 i 點基底剪力
M:結構物總重

將容量震譜雙線性計算，是以等面積法定義出降伏點位置，步驟

如下:

Step 1：尋找曲線之最終點(譜位移,譜加速度)(S_{du},S_{au})

Step 2：計算雙線性計算之初始勁度 k1

Step 3：計算曲線下之面積

Step 4：利用等能量法(面積不變)，計算降伏點之譜加速度、譜位移值(S_{ay},S_{dy})，如式(2.8)所示。

$$S_{dy}=\frac{2A-S_{au}\times S_{du}}{k_1 S_{du}-S_{au}}\ ,S_{ay}=k_1\times S_{dy} \tag{2.8}$$

(2)Fu-R-T 法

由1995年Chopra提出之R-μ-T法修正，主要為估算非彈性SDF系統的反應。台灣橋梁管理單位，於公路橋梁耐震設計規範[交通部，2008]修正後稱為Fu-R-T法。

在SERCB FOR BRIDGE中Fu-R-T法定義為將結構物推到極限點獲取側推分析曲線，之後再藉由ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)將容量曲線轉為容量震譜，再依等能量法雙線性震譜，並依初始週期對應式(2.9)計算力量折減係數(Fu)。

$$F_u(\mathrm{R})=\begin{cases} R_i,\ T\geq T_0^D \\ A+(R_i-A)\times\frac{T-0.6T_0^D}{0.4T_0^D},\ 0.6T_0^D\leq T<T_0^D \\ A,\ 0.2T_0^D\leq T<0.6T_0^D \\ A+(A-1)\times\frac{T-0.2T_0^D}{0.2T_0^D},\ T\leq 0.2T_0^D \end{cases} \tag{2.9}$$

A 與R_i計算如式(2.10)、式(2.11)。

$$A = \sqrt{[1+\alpha(R_i-1)][2R_i-1-\alpha(R_i-1)]} \tag{2.10}$$

$$R_i = \frac{\delta_i}{\delta_y} \geq 1 \tag{2.11}$$

α: 雙線性計算後之容量震譜降伏勁度與降伏比

δ_i: 任一點之譜位移值

δ_y:降伏點之譜位移值

藉著側推分析，求取橋梁整體結構之容量曲線，利用容量震譜法轉換為譜加速度_譜位移曲線。再依據橋梁耐震設計規範[交通部，2008]中各工址地震水平譜加速度係數規定，透過有效地表加速度轉換公式(表2-9)建立有效地表加速度_譜位移曲線(EPA_Sd圖)，評估橋梁耐震能力是否符合性能要求之用。

表2-9 有效地表加速度轉換表

極短週期	短週期	中週期	長週期
$T < 0.2T_0^D$	$0.2T_0^D \leq T < T_0^D$	$T_0^D \leq T < 2.5T_0^D$	$T > 2.5T_0^D$
$\frac{Sa_i \times F_u(R)}{(1+\frac{3T}{0.4T_0^D})}$	$\frac{Sa_i \times F_u(R)}{2.5}$	$\frac{Sa_i \times F_u(R)}{\frac{S_{D1}}{0.4S_{DS}T}}$	

其中，相關係數，分一般工址、活動斷層近域及台北盆地區域三種情況計算如下：

①一般工址：

$$S_{DS} = F_a S_S^D$$

$$S_{D1} = F_v S_1^D \tag{2.12}$$

$$T_0^D = S_{D1}/S_{DS}$$

F_a :反應譜等加速度段之工址放大係數

F_v :反應譜等速度段之工址放大係數

S_S^D :震區短週期之設計地震水平譜加速度係數

S_1^D :震區一秒週期之設計地震水平譜加速度係數

T_0^D :振動週期

②活動斷層近域：

$$S_{DS} = F_a(S_S^D N_A)$$

$$S_{D1} = F_v(S_1^D N_v) \qquad (2.13)$$

$$T_0^D = S_{D1}/S_{DS}$$

N_A :反應譜等加速度段之斷層近域調整因子

NV :反應譜等速度段之斷層近域調整因子

考慮斷層近域效應時，工址放大係數F_a 及F_V ，應分別以N_A 、N_V 調整後之譜加速度係數決定。

活動斷層近域之工址堅實地盤短週期與一秒週期設計地震水平譜加速度係數調整為$S_S^D N_A$與$S_1^D N_v$，對於屬近斷層區域之橋梁，其耐震評估與補強除需藉由斷層近域調整因子N_A與N_v提高地震水準外，進行耐震補強時應適當考慮近斷層地震特性，盡量採用增加位移容量與防落橋能力之補強方式，或變更橋梁系統使成一連續性系統之系統補強方式。

③台北縣市之震區分為台北盆地及一般震區。

$$S_{DS} = 0.6$$

$$T_0^D = 1.6 \text{ 秒 } (\text{台北一區})$$

$$= 1.3 \text{ 秒 } (\text{台北二區}) \qquad (2.14)$$

$$= 1.05 \text{ 秒 } (\text{台北三區})$$

$$S_{D1} = S_{DS}T_0^D$$

台北縣市震區因盆地效應性質特殊，故另訂譜加速度係數。台北盆地區域，包括台北市及台北縣之三重市、新莊市、板橋市、中 和市、永和市、新店市、土城市、樹林市、蘆洲鄉、五股鄉、泰山鄉、淡 水鎮、八里鄉、汐止市等地區之部份村里，並劃分為台北一區、台北二區及台北三區。台北縣市非屬盆地範圍內之一般震區其S_{DS}、S_{D1}、T_0^D等式計算。

(3) 防落長度檢核

依耐震設計規範之規定，梁端於活動支承，防落長度L_N須符合式(2.15)之規定[交通部，2008]。

$$L_N \geq L_{N,min} \cap L_N \geq u_R + u_G \tag{2.15}$$

$$L_{N,min} = (50 + 0.25L + 1.0H)\left(1 + \frac{S^2}{8000}\right)$$

$$u_R = \sqrt{{u_{R1}}^2 + {u_{R2}}^2}$$

$$u_G = 1.4 \times \varepsilon_G \times L_e$$

L_N:防落長度(cm)、u_R:設計地震作用下所引致梁端與橋墩頂部的相 對變位(cm)、u_G:地震引致相鄰橋墩間表層地盤之水平相對變位、$L_{N,min}$:最小梁端防落長度(cm)、L:跨徑(m)、H:基面起算下部結構之高度(m)、S:橋墩之斜角、u_{Ri}:振動單元i之最大變位(cm)，i=1,2、ε_G:地盤變位係數，第一類地盤:0.0025，第二類地盤:0.00375，第三類地盤:0.005，臺北盆地:0.00625、Le:影響梁端防落長度之下部結構間距。

(4) 支承剪力檢核

支承型式種類多，包括常見的鑄鋼支承、人造橡膠支承墊、盤式支承等，各有不同的力量傳遞機制。既有橋梁與新建橋梁之支承耐震能力檢核標準不一。各支承型式之檢核標準分三種:

①鑄鋼支承與盤式支承

基於鑄鋼支承與盤式支承之設計方式與支承強度設計條件，檢核時應對應不同的地震等級，回歸期475年(等級II)地震如式(2.16)，回歸期2500年(等級III)地震如式(2.17)。

$$H_{se} \leq 0.9H_{SU} \tag{2.16}$$

$$H_{sem} \leq H_{SU} \tag{2.17}$$

H_{se}:475年回歸期地震下之水平受力

H_{SU}:支承水平受力

H_{sem}:2500年回歸期地震下之水平受力

②剪力鋼棒

剪力強度如式(2.18):

$$\frac{\emptyset A_s \sigma_u}{\sqrt{3}} \tag{2.18}$$

$\emptyset$: *強度折減係數*(475 *年回歸期地震*$\emptyset = 0.9$；2500 *年回歸期地震*$\emptyset = 1$)

A_s:鋼棒斷面積、σ_u:鋼棒極限強度

③止震塊

止震塊剪力強度如式(2.19):

$$\mathrm{V} = \emptyset \mu A_v f_y \leq 0.2 f_c^{'} A_{cv} \tag{2.19}$$

$\emptyset$:強度折減係數(475 *年回*歸期地震$\emptyset = 0.9$；2500 年回歸期地震$\emptyset = 1$)

μ:摩擦係數、A_{vf}:縱向鋼筋面積、A_{cv}:混凝土橫斷面積

f_y:鋼筋降伏強度、$f_c^{'}$混凝土壓強度。

(5) 帽梁檢核

帽梁強度檢核需檢核帽梁剪力及帽梁彎矩，如式(2.20):

$$\begin{aligned} \emptyset V_u &\geq V_n \\ \emptyset M_u &\geq M_n \end{aligned} \qquad (2.20)$$

(6) 橋柱穩定性檢核

等級II地震適用檢核式(2.21):

$$\Delta \leq 0.2\frac{M_n}{P_U} \qquad (2.21)$$

Δ:柱底與反曲點間之相對變位、P_U:*橋柱軸力*、M_n:*橋柱撓曲強度*

2.基礎子結構之耐震分析評估

基礎檢核耐震分析可獲得基樁及基礎版斷面力、基礎頂面轉角及樁頭位移等，並可進行基礎檢核項目包括軸壓力、拉拔力、基礎版最大轉角限制及樁體穩定性限制等，各檢核項目如下:

(1) 基礎版轉角

樁基礎頂面轉角(rad)<0.02

(2) 樁頭位移

基樁樁頭水平變位$\Delta < 0.2M_{ult}/P_{DL}$ (2.22)

(3) 樁頭極限軸壓力承載力檢核

$$P_{NU} \leq 0.9 \times \min(R_U, R_{PU}) \quad (2.23)$$

$$R_{PU} = 0.85 f_c{}' A_x + \sigma_y A_s \quad (2.24)$$

P_{NU}:樁頭在地震下之軸壓力、R_U:單樁土壤極限承載力

$f_c{}'$:混凝土 28 天抗壓強度、A_x:樁體混凝土斷面積

σ_y:鋼筋降伏強度、A_s:樁體鋼筋斷面積

(4) 樁頭極限拉拔力檢核

$$P_{TU} \leq 0.9 P_{PU} \quad (2.25)$$

$$P_{PU} = \max\left(2\sqrt{f_c{}'} A_c, \sigma_y A_s\right) \quad (2.26)$$

P_{TU}:樁頭在地震下之拉拔力

2.9 巡檢路線規劃相關文獻

台灣地區以橋梁為連絡河流、陸地兩岸之重要交通工程設施，然而台灣位於環太平洋地震帶，地震的發生十分頻繁，一旦發生大規模地震時，橋梁斷裂或倒塌的機率很高，此時則會嚴重影響民生基礎設施、社會經濟，甚至危害人身安全。對於地震災後橋梁巡檢路線規劃，現行橋梁於地震後雖然能夠依照損壞機率做出巡檢之排序，但是在實務的巡檢上，卻不能夠直接依據橋梁損壞機率跳點式的巡檢，必須於不同之路段上考量該路線上各個橋梁的損壞機率，以及橋梁重要性權重、巡檢路線距離為一多目標最佳化問題。

2.9.1 臺灣公路橋梁巡檢與檢測

目前台灣公路橋梁依省道公路養護需求及特性，分別以養路

巡查、已完工之路基及邊坡、鋪面、橋梁、隧道、排水設施、交通工程設施、交控設施、沿線路權內附屬設施、景觀及植栽等各項設施及其分類構造物，敘明其內容、養護注意事項、檢測或清查作業及相應之養護方法等，並訂明各項公路設施之巡查方式、頻率項目、並訂明各項公路設施之巡查方式、頻率項目、注意事項與各類參考表格供參，橋梁檢測為其中一部分，橋梁檢測之目的係為早期發現橋梁結構物的異常與損傷，以掌握橋梁使用現況及損傷情形，採取必要之對策，使其保持良好狀態。

公路橋梁之養護作業包括橋梁之損壞分類、檢測、檢測評估、養護維修補強工法。

1.橋梁檢測：為早期發現橋梁結構物的異常與損傷，以掌握橋梁使用現況及損傷情形，宜實施橋梁檢測。

2.檢測目的：橋梁檢測之目的除為適時發現橋梁之現況是否降低結構功能外，亦應具備下列之目的：

(1)提供橋梁狀況資訊；若有危及結構安全時，即時採取限制車輛通行或封閉交通等管制措施。

(2)提供劣化程度之資訊、劣化對構件之影響程度，以及該劣化係正常之劣化或其他原因所造成等參考資料。

(3)記錄橋梁時間序列之狀況。

(4)檢測橋梁結構劣化之情況，使橋梁維護計畫更具效率，並降低維修成本。

(5)維修以消除危害橋梁狀況，提高公共安全保障。

3.檢測類別及方式：

(1)定期檢測：

定時對橋梁構件實施檢測，檢測重點在掌握橋梁結構安全，早

期發現構件之劣化程度並評估對橋梁功能損傷及其原因。定期檢測係利用徒步、搭乘橋梁檢查車或其他高空作業車儘可能接近橋梁構造物，予以較詳盡之檢查，評估橋梁構造物之安全情形。

(2)特別檢測：

由天災（如颱風、豪雨、地震等）或人為破壞因素（如火災或車輛撞損等）引起之災害，致可能損傷橋梁結構所做之不定期檢測。檢測重點在針對災後或事故後或其他目的，探討是否造成橋梁功能損傷及是否需維修、補強。

本計畫以特別檢測之地震災後橋梁巡檢為主要研究對象，根據公路總局所提出檢測頻率，有關於特別檢測如下：

(1) 依中央氣象局地震測報中心之地震報告內震度達 5 級地區，檢測該震區內 A、B、C、E 類橋梁(橋梁評等如表 2-10)。

(2) 依中央氣象局地震測報中心之地震報告內震度達 6 級以上地區，檢測該震區內所有橋梁。

(3) 所在位置最近之水位站達二級警戒水位或上游雨量站達大豪雨(24 小時累積雨量達 200mm 以上)檢測該區域 A、B、D 類橋梁。

(4) 所在位置最近之水位站達一級警戒水位或上 游雨量站達超大豪雨 (24 小時累積雨量達 350 mm 以上)檢測該區域跨河橋梁。

(5) 人為破壞因素（如火災或車輛撞損主梁等）引起之災害。

(6) 以上天災或人為事故後，由工務段派員以目視或簡單之量測器具進行檢測上述橋梁。

而在特別巡查在颱風來臨前後、豪雨、洪水、震度5級以上之地震或重大交通事故後為之；另特別巡查在ABCDEF類橋梁及A級邊坡於震度4級之地震後為之。

挖掘路面案件，每週至少應巡查一次。

特別照護喬木於每週經常巡查時應下車詳查。

朝巡之啟動時機為設定條件達啟動標準時，設定條件與啟動標準得由養護單位視需要訂定之，如達封路、封橋之標準，則按相關規定辦理封路、封橋作業。

工務段指派之人員應於天災或人為事故發生後，於5小時內回報工務段所能掌握之轄內橋梁初步受災及通阻情形，以研判交通管制措施之必要性，後續再儘速補充回報，並在14工作天內完成特別檢測報告報局。

表2-10 橋梁評等

橋梁評等	橋梁狀態	備註
A	養護重點監控橋梁	後續需有改善作為
B	基礎有輕微裸露橋梁	
C	震度5級易受輕微損壞之橋梁	名單由業務單位另以行政命令規定
D	公路防災一級監控橋梁	
E	尚未完成耐震評估補強之橋梁	
F	註： F類橋梁係為上一年度汛期前定期檢測所計算之新CI(橋況指標)、新PI（ 優選指標） 最低前三名之橋梁。	

上述各類橋梁名單視橋況逐年滾動檢討

2.9.2 現行橋梁巡檢方式

根據文獻[葉錦勳等，2014]所提出國道橋梁震損評估及其應用中，公路橋梁之震後特別檢測，乃確保震後安全通行之必要工作，亦惟有仰賴適切之技術支援，方能貫徹執行。目前在實務運作上，各公路主管單位之工程處、工務段的橋梁管理人員，於地震後僅能依中央氣象局提供之有限的各地震度資訊，並自行詮釋以決定震後特別檢測的實施範圍與力度。綜合前述，公路橋梁地

震早期損失評估對於震後特別檢測，應有極大的助益。

公路橋梁由於特別檢測並無標準之型式，故參照[公路鋼結構橋梁枝檢涉及補強規範，2008]定期檢定準備作業，如下：

1.為使不同檢測員所記錄之同一構件，能有同一標示記錄，進行定期檢測前，應先建立構件編碼系統，以利橋梁之電腦管理作業。若橋梁已有構件編碼系統，則應採用既有之編碼系統。若先前未有構件編碼系統，則可依公路里程行進方向，由里程少至多、由左至右（面向里程增加方向）之原則予以編碼。

2.進行橋梁定期檢測時，為提高檢測效率並避免遺漏，應事先訂定檢測程序。檢測程序之原則為由上而下，亦即先上部結構，而後下部結構，但視橋梁型式、構件狀況、檢測種類、橋梁規模以及橋梁座落位置交通情況等之不同，可依實際情況另作調整。

3.橋梁定期檢測工作計畫可包括下列幾項：

(1)橋梁之種類與結構形式

(2)橋梁檢測之時程

(3)橋梁規模

(4)橋梁構造之複雜性

(5)通行於該橋梁之交通量

(6)所需之檢測人員

(7)所需之檢測儀器、材料、或特殊設備

(8)是否需要特殊儀器檢測單位支援

2.9.3 旅行推銷員問題

本計畫將結合旅行推銷員問題（Travelling salesman

problem,TSP）如表2-11，考量橋梁在地震後之通行失敗機率[鄭明淵等，2011]、橋梁重要度、旅運距離等作排序，路線規劃包含單一性、順序性、動態性、以及收送性，將橋梁分為數個責任分區，每一區再由負責人進行路線規劃，一為車輛出發後之路線規劃，係指每當有需求點產生，必須對原有路線予以重新規劃，但因已完成服務之路線不能改變，因此將僅針對未服務之路線進行重新規劃，本研究將根據先期路線規劃模式，結合最短路徑觀念，構建出即時路線規劃模式[許晉嘉等，2003]。

表2-11 宅配業貨物配送路線規劃問題之特性

類別	問題	備註
單一性	由於各分區自行規劃該分區之配送路線，且僅單一車輛服務。	類似旅行銷售員問題。
收送性	各分區之車輛進行路線規劃時，須同時考量收、送貨之特性。	
順序性	分區必須依顧客指定時段，依序服務。	各分區需求點之服務，應有順序性。
動態性	車輛進行送貨或收貨時，新開發顧客亦可能會隨時出現。	

關於路線規劃之問題，係車輛由原點出發，通過所有需求點後再回至原點，並搜尋最佳路徑，過去有關類似問題的研究，主要分為旅行銷售員問題(Traveling Salesman Problem)與車輛路線問題(Vehicle Routing Problem)兩類。

1.旅行銷售員問題(Traveling Salesman Problem)

特性：

(1)探討單一車輛之路線規劃

(2)車輛無容量限制

(3)使總旅行距離/時間極小化

求解方法：

(1)正確解法：

①動態規劃法

②整數規劃法

③分枝界限法

(2)近似解法：

①路線構建型

②路線改善型

③綜合型

2.車輛路線問題(Vehicle Routing Problem)

特性：

(1)探討單一車輛之路線規劃

(2)車輛無容量限制

(3)使總旅行距離/時間極小化

求解方法：

(1)正確解法：

①動態規劃法

②整數規劃法

③分枝界限法

(2)近似解法：

①先分群後排路線

②先排路線後分群

③節省法/插入法

④改善/交換法

⑤數學規劃法

⑥人機互動法

旅行銷售員問題，最早是由Hassler Whitney 在1934年所提出，其目的是希望能使整個拜訪的過程所花費的成本為最少。旅行銷售員問題的定義如下：一位銷售員從公司所在的城市出發，欲拜訪住在n 個不同地區中的客戶，在整個訪問的過程中，銷售員必須拜訪每座城市一次，且僅能拜訪一次，拜訪完所有的城市後必須回原本出發的城市。其最大的特點在於：問題的定義簡單，但求解卻相當困難。而求解方式可分為最佳解解法(exactsolution)及近似解解法(approximation)兩大類，[許晉嘉，2003]，本計畫參考文獻可採用最佳解解法求解，如下表2-12：

表2-12 最佳解解法

方法	說明	備註
動態規劃法(Dynamic Programming)	主要是將原來的大問題分為若干的小問題，並由問題的結尾向開頭的方向，反向求解的方式，求解一路徑中連結任兩點的最短路徑，進而擴大至第三點，直到所有的節點相互間的連結都被求得為止，再進一步求解正確解。	
整數規劃法(Integer Programming)	即列出問題的目標函數及欲滿足問題限制條件的限制函數，並以一變數值0或1的變數來表示問題的解，而在限制函數中必須加入破除內圍路徑的限制，以確保產生一條封閉的最佳路徑。	
分枝界限法(Branch and Bound)	先將問題的可行解展開為分枝樹，而在搜尋分枝的過程中，同時設定解值的上限或下限值，當某節點其下限值超過問題的上限時，表示解比目前已求得的解差，則停止再往下分枝，重複搜尋步驟，再由各個分枝中尋找最佳解。	分枝界限法的三個主要步驟為：分枝、界限、洞悉。

2.9.4 橋梁定期檢測作業排程最佳化模式之研究[顏上堯等，2015]

橋梁定期檢測作業排程最佳化模式，期能使執行橋梁定期檢測作業的總成本最小化。此外，此模式為一大型含額外限制之整數網路流動問題，屬NP-Hard 問題，難以現有最佳化軟體直接求最佳解，故本研究發展一啟發解演算法[顏上堯等，2015]。

依據[公路養護手冊，2012]規定，臺灣地區的橋梁需於每年定期接受針對所有構件之全面性檢測。定期檢測之執行方法為檢測小組搭乘車輛至各橋梁檢測點檢查，直至轄區內的橋梁均被檢測完畢為止。而實務上橋梁定期檢測作業之排程，主要由橋梁管養單位之決策者以人工指派方式決定，此作法雖簡易可行，但當轄區內需檢測之橋梁數量眾多時，此作法不但效率不佳，更可能造成人力、經費與資源之浪費，由此可知人工指派缺乏整體系統性的分析與規劃，無法有效地處理龐大的橋梁定期檢測作業排程。

此研究以公路總局橋梁管養單位決策者之角度，將實際執行地震災後特別檢測的相關要求（如車輛旅行時間、檢測時間之限制等）納入考量，建置一結合空間面及時間面之橋梁特別檢測作業路線排程最佳化模式，期望能夠節省時間，提升橋梁特別檢測作業之效率。根據文獻[顏上堯等，2015]所提出時空網路設計，應用時空網路流動技巧，以呈現檢測小組與車輛從出發點至各橋梁檢測點執行檢測作業之情形，其設計以一組檢測小組及車輛為單位建構一層時空網路，故為多層時空網路。網路縱軸代表時間之延續，橫軸則表示出發點 (即工務段) 與各橋梁檢測點之空間分佈。此規劃時窗須依據非汛期可進行橋梁定期檢測作業的期程來決定，參考實務作業，茲訂網路時間軸的長度為10 天，每天作業時間為上午8 點至下午4點，共8 小時，節點間距為半小時，總計170 個時點。

1.數學模式：

(1) 符號說明：於模式定式前，茲定義本模式所使用之集合、參數及決策變數如下。

①集合定義：

BN^m：第 m 層網路中所有節點之集合；
BA^m：第 m 層網路中所有節線之集合；
U_d^m：第 m 層網路中所有進入橋樑檢測點 d 的節線 (包含服務節線、發車節線) 之集合；
S^m：第 m 層網路中供給點之集合；
T^m：第 m 層網路中轉運點之集合；
D^m：第 m 層網路中需求點之集合；
M：所有網路層之集合；
DN：所有服務橋樑檢測點之集合。

②參數定義：

c_j^m：第 m 層網路中節點 j 之檢測成本；
t_{ij}^m：第 m 層網路中節線 (i,j) 之旅行成本。

③決策變數：

x_{ij}^m：第 m 層網路中節線 (i,j) 之流量。

2.數學定式：

(1) 目標式：

$$Min \quad Z = \sum_{m \in M} \sum_{ij \in BA^m} (t_{ij}^m + c_j^m) x_{ij}^m \tag{2.27}$$

(2) 限制式：

$$\sum_{je BN^m} x_{ij}^m - \sum_{ke BN^m} x_{ki}^m = \begin{Bmatrix} 1 & , i \in S^m \\ 0 & , i \in T^m \\ -1 & , i \in D^m \end{Bmatrix}, \quad \forall m \in M$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{ij \in U_d^m} x_{ij}^m = 1, \quad \forall d \in DN$$

$$x_{ij}^m = 0 \text{ or } 1, \quad \forall i, j \in BA^m, \forall m \in M \tag{2.28}$$

此模式為一含額外限制整數網路流動問題，其中目標式(2.27)

為橋梁定期檢測作業總成本最小化，總成本指所有檢測小組的旅行成本及執行作業時的檢測成本之總和。限制式(2.28)第1項為時空網路中各節點 (包含供給點、轉運點及需求點等) 流量守恆限制式，其目的為所有節點之進出流量能守恆。限制式(2.28)第2項為橋梁檢測次數的限制，即各橋梁檢測點僅能被檢測1次。限制式(2.28)第3項為決策變數之零壹整數限制，即決策變數之上限為1，下限為0。

2.10 橋梁振動頻率評估

跨河橋梁之耐洪能力主要受到橋梁本身結構、河川環境、水文條件與河岸防護措施等眾多因素之影響，為一個跨領域的複雜問題。因此，完整的評估分析通常需要藉助歷年水文資料的收集與統計分析、橋體非破壞性檢測評估與沖刷深度的丈量或計算等不同領域的整合使能完成，其分析過程通常十分耗時，在有限的時間與經費的條件下，若欲對大量的橋梁進行詳細評估，顯然有執行上的困難。

若橋基受到嚴重的沖刷，則橋墩的振動頻率將隨之下降，許多學者注意到此一現象並針對洪水前後之橋墩頻率變化率進行研究，冀能藉由此參數之變動，判斷橋梁健康之依據；例如文獻[陳正興、李維峰等，2009]嘗試從頻率的下降程度診斷出結構是否安全或結構破壞的原因。不過，多數研究所採取直接量測法且缺乏定量的評估流程。所謂直接量測法係指將量測儀器安裝於橋梁之上，直接讀取橋梁的振動頻率，然而，台灣地區之橋梁數量高達數萬座，逐一設置固定式頻率監測儀器之成本可能過高，實際上並不可行；不同於直接量測法，非直接量測法(如移動式非破壞性振動檢測)並不嘗試讀取橋梁的振動資訊，而是將量測儀器裝置於具有行動能力的車輛中，藉由量測車輛的振動結果反推橋梁之振動特性;非直接量測法，無論讀取資料時，車輛為行進中或靜止，均較傳統之直接量測法具有機動性。

因此，港研中心委託東源科技工程有限公司與國立臺灣科技大學[鄭明淵、廖國偉、吳育偉等，2013]，探討是否可以利用橋梁的自然振動頻率之定量化數據作為橋梁健康的指標。並針對多種橋梁頻率量測法(包含直接與非直接量測)進行試驗，分析並比較其間差異，探討非直接量測法應用於實際橋梁之可行性。目前本計畫共進行3座橋梁試驗，分別為台中東勢大橋、台中天福大橋與苗栗西湖大橋。

根據試驗結果，以下說明所建議的臺灣地區之移動式振動檢測模式，如圖2.19所示，詳細內容說明如下；圖中之流程除儀器準備外，其餘各流程均已整合為單一流程。

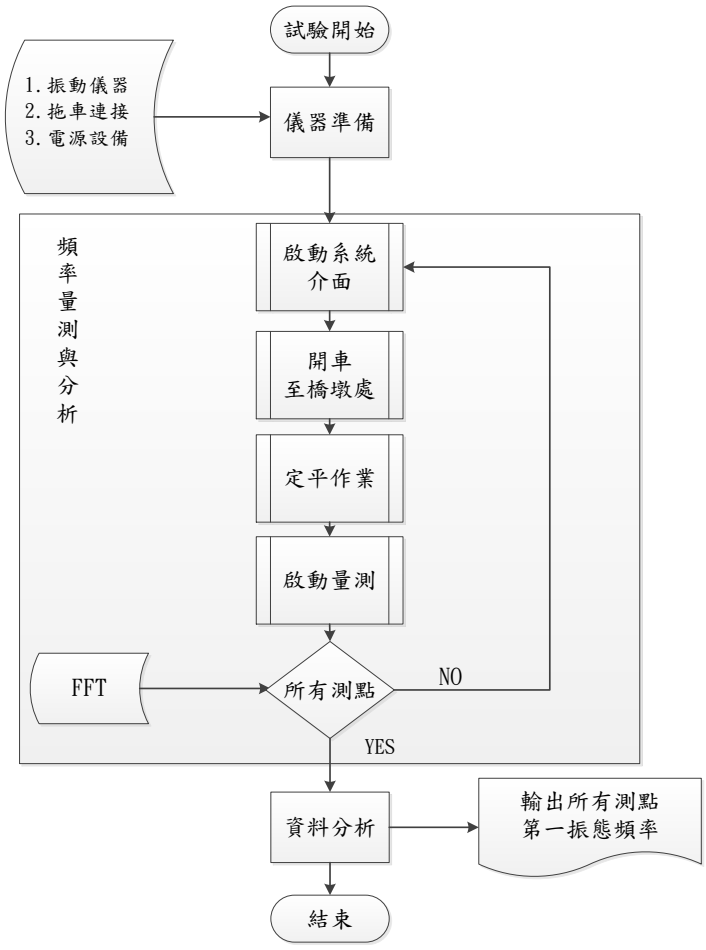


圖 2.19 臺灣地區建議之移動式振動檢測模式流程圖

[鄭明淵、廖國偉、吳育偉等，2013]

1.目的：此振動檢測模式旨在提供一個可以相對快速、經濟且正確地量

測橋面版與橋墩之振動頻率(第一振態)。

2.移動式振動檢測之定義：本計畫所規畫之移動式振動檢測係指量測儀器(速度計)置於具移動性之拖車上，量測時，裝載儀器的拖車係靜止狀態(間接-有行車-靜止-未發動)，每次量測時間約 2 分鐘。

3.檢測流程：

(1)儀器準備：

①振動儀器：建議使用速度計作為量測儀器，且其可量測範圍至少應為±2 kine (±0.02 m/s)；以可同時取得三個方向之歷時振動之儀器為優先考量。

②拖車設計：托車之自然振動頻率不宜介於 2.0Hz-8Hz 之間、且其各向(x 與 y 方向)之阻尼比不宜大於 5%，上述托車之結構性能可以由自由振動之歷時反應取得。

③電源設備：必須確保現場量測時筆記型電腦及速度計之電源無虞，不建議採用汽車之電力，以蓄電池(如電匠)提供電力較為理想。

④儀器測試：現場試驗前，各儀器(如筆電及速度計)應先整合並測試是否可以正常讀取振動訊息。

(2)頻率量測流程：

①將儀器固定於托車上

②將拖車固定於具移動性之車輛上

③整合各項儀器

④以汽車將拖車與量測儀器運送至某一橋墩上方

⑤進行訊號收集

⑥重複④至⑤直至每個橋墩與橋面版已完成資料之收集與分析(每筆兩分鐘)，量測資料之分析工作將於收集資料完畢時同步進行。

此計畫共進行6種不同橋梁頻率之量測方式:

1. 儀器(速度計)直接置於橋面版上，橋梁上無任何行車。
2. 儀器(速度計)直接置於橋面版上，橋梁上行車正常。
3. 儀器(速度計)置於小拖車上，汽車靜止未發動，橋梁上無任何行車。
4. 儀器(速度計)置於小拖車上，汽車靜止未發動，橋梁上行車正常。
5. 儀器(速度計)置於小拖車上，汽車靜止但發動，橋梁上行車正常。
6. 儀器(速度計)置於小拖車上，汽車已 10km/hour 等速前進，橋梁上行車正常。

評估的結果係建議採用方式1或方式2的量測方式 。

根據所量測之振動頻率(第一振態)，工程師可以針對同一座橋梁之振動頻率進行洪水前後或地震發生前後進行比較，若欲將比較的結果作為封橋與否的參考，尚須界定明確的臨界值，災害前後之頻率比值如下所示：

$$R = \frac{f_{ma}}{f_{mb}} \quad \text{..... (2.29)}$$

其中，f_{ma}為災害後橋墩的量測震動頻率(第一振態)，f_{mb}為災害前橋墩的量測震動頻率(第一振態)，R為兩者之比值。若$R < R_c$則應考慮進行

封橋，R_c定義如下：

$$R_c = \frac{f_{aa}}{f_{ab}} \quad \text{..... (2.30)}$$

其中，f_{aa}為橋墩受損後的振動頻率(第一振態)，f_{ab}為橋墩受損前的振動頻率(第一振態)。受損之定義為某一橋梁的結構狀態對等於側推分析中A_y或A_c的結構狀態，亦即，當任一橋梁抵抗橫向力的能力等於該橋梁降伏(A_y)或崩塌(A_c)時抵抗橫向力的能力時，視為受損狀態。過程中「安全臨界頻率比值」之計算受到橋梁是否已達極限受損狀態而定，必須經由橋梁側推分析才能得到。

2.11 生物共生演算法(Symbiotic Organism Search，SOS)

本計畫應用功能創新的演算法稱為生物共生演算法SOS，SOS為鄭明淵學者和Doddy Prayogo學者[Cheng, Prayogo，2014]所發展的一種新式最佳化演算法；SOS通過模擬生物生存在生態系統中與其他生物共生的策略，用以模擬數值最佳化搜尋及解決工程上設計的問題。

工程設計最佳化是個極具挑戰的研究領域，近年來吸引越來越多學者投入這項領域研究，開發了許多最佳化程式試著優化工程上設計的問題， SOS演算法模擬生物體在自然界中出現的互動行為。這是兩生物體之間生活在一起的交互作用，甚至包含不相似的生物體之間的吞噬行為。基於這種依賴關係被稱為共生。以下小節將解釋共生的意義，舉例共生關係原型的例子，並描述共生關係在生態系統中的作用。

共生這個詞來自希臘字為“生活在一起”的意思。1878年時De Bary第一次用來形容兩個同居的不同生物體。然而現今，共生是用來描述兩個不同的物種的生物體之間的關係。共生關係，可能是兩種生物體互相依賴於對方的生存，或兩種生物體選擇同居在一個的環境，但彼此之間不發生互相互惠的依賴關係。

在自然界中最易見的共生關係是互利共生，其他為片利共生和寄生。互利共生是指兩個不同的物種之間互惠互利的共生關係。而片利共生是兩個不同的物種，對其中一方有好處，另一方卻是未受影響或無害的共生關係。最後，寄生是指兩個不同的物種，寄生對其中一方有好處，另一方是受到損害或影響的共生關係。

在圖2.20中，為一群生物共同生活在一個生態系統中。一般來說，生物體為了發展一種適應環境變化的策略稱為共生關係。共生關係也可能有助於生物增加體能和長期生存優勢。因此，合理來說共生關係已建成並繼續塑造和維持所有現今的生態系統。

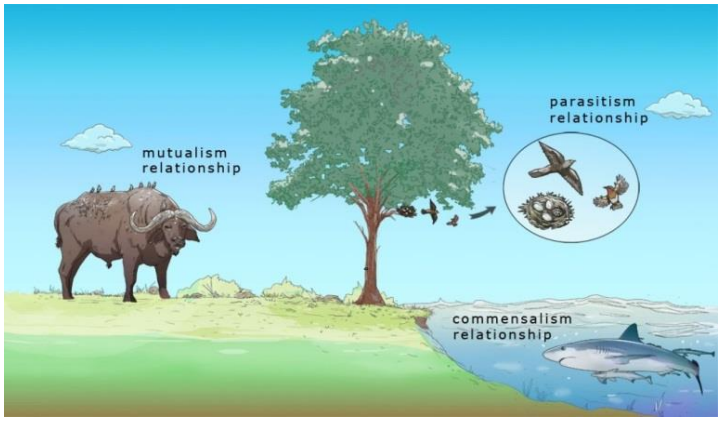


圖 2.20 生態系統中的生物共生關係示意圖

共生生物演算法是以其他演算法為研究基礎所發展出的演算法，SOS會在可搜尋空間中，不斷地迭代候選解，進而求得全域最佳解。幾乎所有的啟發式演算法都是使用連續迭代的方案，在每次迭代中，以生成優於原解決方案之方案作為下一次迭代的候選解。在一個標準的遺傳算法(GA)有兩個運算值，即交叉和變異。和諧搜索演算法(Harmony search)是一種元啟發式演算法，和諧搜索演算法模仿音樂家即興創作的過程，起初先建立並隨機初始化大小為HMS的Harmony Memory (HM)為了找到更好的和弦，每個音樂家彈奏個音符創作得到一和弦，新的和弦創作過程由三個部分組成:隨機選取(memory consideration)、記憶體考量(random selection)、高音調整(pitch adjustmwnt)。而蜂群演算法(Artificial Bee Colony)中使用了三個階段來找到最好的食物來源，工作蜜蜂，隨機蜜蜂和偵察蜜蜂階段。共生生物搜尋演算法(SOS)是模仿生

物在生態系統中的兩種生物之間的相互作用，類似於真實世界的生物相互作用模型的三種共生模式：互利共生，片利共生，和寄生。

這些共生模式的名稱，大概擬定了該共生模式的主要原則，的相互作用的字符定義了每個階段的主要原則。互利共生在共生模式中，對雙方都有好處；片利共生在共生模式中僅對一方有利，但並不影響其他共生的生物；寄生在共生模式中，常常是一方侵略另一方，造成一方有利，另一方受損。每個生物都必須與其他生物會反覆的進行共生的三個階段，直到滿足終止條件為止。下面的算法大綱反映了上述的解釋：

1.初始化

2.重複

①互利共生階段

②片利共生階段

③寄生階段

3.直到（滿足終止條件）

SOS演算法的三個階段在操作上是容易的，只需要用簡單的數學運算法則。此外比較於同類演算法，SOS不使用微調的參數，提高了性能的穩定性。儘管比同類算法使用較少的控制參數，還能夠解決各種數值最佳化問題。

2.12 國內橋梁管理單位所採用鋼結構橋梁檢測評估、維修（保護）工法與延壽策略等相關文獻

橋梁維護管理系統(Bridge Management System，BMS)是為確保用路人行車及橋梁結構安全所建立之橋梁檢測評估與維護補強系統。早期的橋梁維護管理系統主要著重在橋梁的檢測評估，各橋梁主管機關再依據橋梁的檢測評估結果、橋梁損傷程度與橋梁之重要性，排定維修補強維護的先後次序。

目前世界各國所採用之檢測評估制度與實施方式均有不同，各國所發展之制度皆以考慮該國之橋梁特性為出發點，並配合其特殊之地理、人文環境，建立適合該國之橋梁檢測評估制度。評估準則在檢測系統中佔相當重要的地位，其正確性與否，不僅直接影響載重能力、耐震能力分析與評估之結果，亦影響維修補強方法的選用與經費的估算。

國內目前在耐久性的橋梁檢測評估準則主要為 A.B.C.D.之評估準則與 D.E.R.U.之評估系統，如表 2-13、表 2-14 所示。A.B.C.D.之評估準則為中華顧問工程司(目前台灣世曦工程顧問公司)在民國 84~85 年間為省政府住都局所建構之「混凝土、鋼橋一般檢測手冊」中之評估準則，在比較歐美日各國橋梁檢測評估系統後，該準則以日本阪神道路公團「道路構造物奘檢標準」所提供之檢測分類與評估數據為主要依據，此評估準則因以量化的數據座損傷判定的依據，故使各橋樑損壞狀況有客觀且一致之評估值。D.E.R.U.之評估系統已建構完整之網路系統，故目前國內橋梁主管機關多採用此系統，惟因此系統缺乏量化之評估基準，因此在判定上需仰賴工程師之專業。

表2-13 A.B.C.D.之評估準則 [台灣省住宅及都市發展局，1996]

判定等級	狀　　況
A	損傷輕微，需作重點檢查。
B	有損傷，需進行監視，必要時視狀況修補。
C	損傷明顯，變形持續進行，功能可能降低必需加以修補。
D	損傷顯著，有重大變形及結構物功能降低，為確保交通之安全順暢，或避免對第三者造成障礙，必須採取緊急補修。
N	無此項目或無法判斷結構物之損傷狀況。
OK	上述以外之場合。

表2-14 D.E.R.U.系統之評估準則 [交通部科技顧問室，1996]

	0	1	2	3	4
程度(D)	無此項目	良好	尚可	差	嚴重損害
範圍(E)	無法檢查	<10%	<30%	<60%	>60%
影響性(R)	無法判定重要性	微	小	中	大
急迫性(U)	無法判定急迫性	例行維護	3 年內	1 年內	緊急處理維修

依過去研究可知，鋼橋塗膜維護費用佔其生命週期成本之比率甚高，且塗膜壽命或耐用年數會隨使用情形與所處環境因素等有密切關係，並不容易以同樣之判定基準而決定之，故有關影響材料劣化因素之相關研究仍需著手進行。目前國內塗膜系統之維修係根據「台灣公

路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」[交通部，2008]之規定，其綜合指標大於等級二即該進行塗膜維修，詳表 2-15 所示。現階段而言，可依據現有之橋梁調查與維護資料，採用鋼橋之重要性、所處環境、塗膜耗損與鏽蝕面積做為判定指標，著重於鋼材表面鏽蝕面積之劣化判定，依日本現地實作經驗則以 8%為界定值。

表2-15 塗裝系統之綜合評估 [交通部，2008]

綜合評估	狀況	評分總值之平均值	是否重新塗裝之判定
IV	漆膜面產生銹蝕、龜裂、剝離，漆膜之防蝕功能全部失效	70~100	必須緊急重漆
III	漆膜上點銹產生多處且局部發生龜裂、剝離，但仍存有部分漆膜	40~70(不含)	必須盡速重漆 (1 年內)
II	漆膜上幾乎無銹蝕，但顯著有光澤減退及白華化現象，上漆有部分消失	20~40(不含)	適當期間必須重漆(3 年內)
I	漆膜未發生異狀	小於 20	繼續追查

現有資料需依環境、鋼橋、易鏽蝕部位或維護時間與塗料種類等進行整理與分析，以便獲得表面劣化面積率之時間推移曲線。一般而言，表面劣化面積率於 0.5~8%程度時即需進行塗膜更換或修復，因此所需之劣化曲線範圍可利用 2 次曲線近似，而不需以複雜之回歸式表示。以歷年塗膜更換之現地調查資料進行耐用年數判定，日本依據劣

化環境與塗膜種類條件，其新設塗膜與更換塗膜之耐久年數整理如下表 2-16 與表 2-17，而可藉由既有鋼橋與實測資料，依據不同條件作等級分類，並進行可靠度分析，分析其材料之耐久性。若塗膜劣化現象明顯，亦可根據現地實際拍攝照片，利用電腦掃瞄分離其中不同之色度，並透過觀察歷來橋梁塗裝實測資料，明確定義出銹蝕色度、面積與塗膜劣化之關係。現有資料需依環境、鋼橋、易鏽蝕部位或維護時間與塗料種類等進行整理與分析，以便獲得表面劣化面積率之時間推移曲線。一般而言，表面劣化面積率於 0.5~8%程度時即需進行塗膜更換或修復，因此所需之劣化曲線範圍可利用 2 次曲線近似，而不需以複雜之回歸式表示。以歷年塗膜更換之現地調查資料進行耐用年數判定，日本依據劣化環境與塗膜種類條件，其新設塗膜與更換塗膜之耐久年數整理如下表，而本研究將可藉由既有鋼橋與實測資料，依據不同條件作等級分類，並進行可靠度分析，分析其材料之耐久性。若塗膜劣化現象明顯，亦可根據現地實際拍攝照片，利用電腦掃瞄分離其中不同之色度，並透過觀察歷來橋梁塗裝實測資料，明確定義出銹蝕色度、面積與塗膜劣化之關係。

表2-16 塗膜更換次數與耐用年數

塗替回數 耐用年數	全體	1 回	2 回以上
塗膜耐用年限	13.6 年	14.3 年	11.7 年

表2-17 塗膜之耐用年數

塗裝系 耐用年數	腐蝕環境	新設 A-1	新設 B-1	新設 C-1	塗替 a	塗替 b-1	塗替 c-1
塗膜耐用年數	一般	15.2年	15.4年	64.3年	13.6年	13.8年	36.7年
	稍為嚴峻	-	**22.2年**	-	-	7.8 年	14.3年
	嚴峻		-	23.8年	-	3.2 年	**13.9年**

注 1: 粗體字是採用線性方程式的值
注 2: 新設 A-1 對有些嚴重的環境，嚴重的環境、新設 B-1 對嚴重的環境、塗替 a 對有些嚴重的環境，嚴重的環境

鋼橋常因其所在位置及環境之影響而導致腐蝕現象發生，一般均採用塗膜系統將鋼材與外界隔絕，藉以防止腐蝕，但塗膜系統有其壽命，一旦塗膜系統破壞，即可能危害構件之耐久性和強度，勢必對塗膜系統採取維護措施，而此趨勢也將直接反應於維護成本上，表 2-18 即為「台灣公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」[交通部，2008]與「日本道路協會-鋼橋防蝕便覽」[日本道路協會，2014]對不同型式之塗膜系統做一維護費用評估，可發現不同等級之塗膜其使用年限與維護費用皆相異，故如何有效選擇塗膜系統，將是鋼橋維持管理系統中重要一環。

表2-18 不同維護策略之成本比較

塗裝面積 內面:約 3100m^2 外面:約 3100m^2		鋅鋁熔射(內面油漆)	油漆
初期費用	單價	約 1000 元/m^2	約 400 元/m^2
	工程費	4,340,000 元	2,480,000 元
覆蓋膜厚		熔射 250μm，面漆 100μm	255μm
1.免維護使用年限		50 以上	7
2.假設使用年限		50	50
3.全部維護次數		0	6
4.每次維護費用		0	1,860,000(約 600 元/m^2)
5.總計總護費用		0	11,160,000
6.總防蝕費用		4,340,000	13,640,000
7.費用差異		較 A 省	A

鏽蝕發生後會持續往平面及鋼材內部漫延，進而造成鋼材表面存在孔蝕現象使得表面高低不均，雖可用機具削磨進行整平，但仍存在不易施工處或平整度不均，其可能為早期鏽蝕發生之可能位置。在塗膜系統維護過程中，表面處理為影響塗膜耐久性之重要因素，故應依據舊塗膜之劣化程度適切地實行。而表面處理與塗膜更換之標準可參考「台灣公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」[交通部，2008]與「日本道路協會-鋼橋防蝕便覽」[日本道路協會，2014]之規定，如表 2-19 及 2-20 所示，以確保塗膜系統之性能與壽命。

表2-19 表面處理等級與適用標準 [交通部，2008]

等　級	適 用 對 象	處理前狀態	處理程度	作業方法
清淨度 1 級	新結構物之防蝕塗裝	全鋼料表面	完全除去黑皮、銹，以得清淨之金屬面	噴砂 化學藥品
清淨度 2 級	既有結構物之維修塗裝	塗膜劣化、銹蝕極為嚴重之狀態	除去舊有塗膜及銹蝕，使鋼鐵表面外露並清淨之	電磨機、鋼絲機等動力工具及手工具併用
清淨度 3 級	既有結構物之維修塗裝	局部銹蝕，活膜（未劣化塗膜）尚存在之狀態	留存活膜，清除部分銹蝕，使鋼鐵表面外露並清淨之	電磨機、鋼絲機等動力工具及手工具併用
清淨度 4 級	既有結構物之維修塗裝	塗膜變色或白色亞化狀態	除去粉化物及污物，留下活膜	鋼刷

表2-20 各種塗料之適用性 [交通部，2008]

	油性系	磷苯二甲酸系	酚樹脂 MIO 系	氯化橡膠系	環氧樹脂系	變性環氧樹脂系	柏油環氧樹脂系	聚氨基甲酸酯樹脂系	矽利康油性樹脂漆	氟素系
長暴型樹脂底漆	○	○	○	○	△	△	△	○	○	○
環氧樹脂鋅粉底漆	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○
無機鋅粉底漆	×	×	×	△	○	○	○	△	×	○
油性系	○	○	○	△	×	×	×	×	○	×
磷苯二甲酸系	○	○	○	△	△	△	△	△	○	×
酚樹脂 MIO 系	○	○	○	○	×	×	×	×	○	×
氯化橡膠系	△	△	△	○	△	△	×	△	△	×
環氧樹脂系	△	△	△	○	○	○	○	○	△	○
變性環氧樹脂系	△	△	△	○	○	○	○	○	△	○
柏油環氧樹脂系	△	△	△	△	△	△	○	△	×	×
聚氨基甲酸酯樹脂系	△	△	△	△	△	△	△	○	△	○

評價：　　○：可重漆；　△：有條件的可重漆；　×：不可重漆

若將上述塗膜材料之劣化與塗膜耐用年限評估納入鋼橋生命週期評估系統考量，配合不同塗膜等級之使用年限，採取合理之維護方式

與更換範圍，將能建構一鋼橋維持管理系統，使維護費用能更充分且有效率被利用。

2.13 確認鋼結構橋梁風險因子

鋼結構與 RC 結構橋梁於維護策略上之最大差異為塗膜或表面塗裝系統之功能；因此，本節將以鋼橋用塗膜性能為主進行論述。塗膜之功能可分為保護、美化和機能性。保護意指可保護基材，例如防止金屬鏽蝕及混擬土劣化；美化則給予基材色彩及光澤；塗膜本身的機能性則為防汙垢、防霉和防凝結等。然而，塗膜隨著歲月逐漸劣化降解，使得塗膜外觀變化且降低給予基材防禦效果。而對於塗膜的替換，塗膜的劣化程度對塗膜替換費用及防禦效果有很大的影響。假如塗膜呈現顯著的劣化時，此時塗膜的替換必對表面處理帶來盤大的費用與時間，並無法確保良好的施工品質，加上縮短塗膜替換時間，因此必要評估在塗膜呈現顯著變化前實施替換塗膜的時期。另外，對於塗膜之耐用年限，會隨著橋的架設環境及塗膜施工品質有所不同。因此，設定一致的塗膜替換週期有恐超過適當塗膜替換時期，或在塗膜劣化呈現顯著時進行塗膜替換，此無法使塗膜性能達到有效地發揮，進而無法達到顯著的經濟效益。有鑑於此，定期檢點塗膜來掌握塗膜劣化現象，及建立有效的塗膜替換之政策為此研究之重要目標。而對於塗膜之劣化，會受到環境因子，例如紫外線、水與氧等，經由溶解、擴散及氧化等劣化過程，使塗膜有化學、物理及機械性質之劣化反應。而在鋼橋塗膜一般環境用與腐蝕環境用塗裝系統之劣化現象有所不同。一般環境使用時，塗膜常見劣化現象有鏽蝕、剝落、龜裂及起泡；而在腐蝕環境時，則常見有光澤度減少、粉化、退色、塗膜消耗及孔蝕。

依現行之塗裝系統綜合評估方法，將其評估結果分為：I 及 II 屬塗裝系統劣化潛伏期、III 屬塗裝系統劣化進展期及 IV 屬塗裝系統劣化加速期，而其定義分述如下：

潛伏期: 塗膜劣化(鋼材腐蝕尚未發生)-塗膜劣化模型與曲線

進展期: 鋼材腐蝕與塗膜劣化(塗膜仍有部份功能)

加速期: 塗膜功能喪失與鋼材腐蝕加速(與裸鋼之腐蝕速度相同)

2.14 文獻中鋼橋與RC橋生命週期成本評估方法

為了解各先進國家橋梁生命週期成本模式發展現況，蒐集歐洲地區、美加地區及日本橋梁生命週期成本相關發展經驗作為本研究模式發展之基礎內容如下：

1. 歐洲地區[財團法人台灣營建研究院，2003**]**

根據英國 BS3843 規範之定義，生命週期成本為所有關於產品獲得、維護、廢棄處理所產生之費用，包含可行性研究、規劃設計、製造、維護、及廢棄物處哩，甚至產品獲得、使用及汰換時所發生之訓練或作業費用皆稱為生命週期成本。英國現有橋梁約有五成以上橋梁年齡已超過 30 年，這些橋梁將進入所謂維護階段，會帶來政府極大的維護成本負擔。

表 2-21 為歐洲各國曾進行橋梁生命週期成本分析應用之領域，主要以橋梁設計規劃階段考量為主。此外瑞典已結合新的橋梁管理系統(BaTMan)已可以計算出橋梁生命週期成本。丹麥及荷蘭也以結合橋梁管理系統作為橋梁生命週期成本計算的基礎。則在計算未來成本與現在成本之比例，除了現值法外，法國亦使用益本法及投資報酬率計算法。

表2-21 歐洲生命週期成本評估實務應用

國家	應用領域	分析年限	方法	利率	橋梁管理系統
丹麥	規畫、設計及使用維護之決策分析	固定25年	現值法	5~8%	DANBRO
法國	重大建設投資效益評估	--	B/C、現值法、IRR等	固定8% (不含通膨)	未建立歷史成本資料庫
荷蘭	土木工程設計與管理	--	--	5% (忽略通膨)	TISBO 專家意見

資料來源：**[**財團法人台灣營建研究院，2003**]**

2. 美加地區[財團法人台灣營建研究院，2003**]**

美國國家標準及技術研院(National Institute of Standards and Technology, NIST)針對橋梁工程研發一套橋梁生命週期成本評估軟體BridgeLCC。BridgeLCC目的在於比較兩個以上的橋梁替代方案之整體成本，BridgeLCC生命週期成本計算是以ASTM規範為基礎，而橋梁成本之分類則以NIST發展之成本架構為依據，將成本支付者分為政府成本、使用人成本及第三人成本，可確保計算結果能符合實際之需求，以幫助工程師完成橋梁生命週期成本評估工作。

美國橋梁生命週期成本評估軟體BLCCA的特色有下：

①結合美國全國橋梁資料庫(National Bridge Inventory, NBI)，使用者使用軟體進行生命週期成本評估時，可直接連資料庫之橋梁以獲得回歸資料，並對該座橋梁進行方案建立與評估。

②考量事件中(During event)及事件後(After event)所產生之成本。

③考量橋梁整體狀況指標 CI 值(Condition index)於生命週期成本評估中，使用者須於每次維修事件輸入維修後狀況值以及未來狀況值變化，以橋梁劣化預測結合機率方式表是橋梁生命週期狀況變動。

④對於事件發生之表達亦不同於以往之評估軟體，以平均(mean)、標準差(Standard deviation)、偏斜率(skew)及峭度(kurtosis)代表所有種類的機率分佈。

3. 日本[財團法人台灣營建研究院，2003**]**

日本地形環境與台灣類似，同樣具有山高谷深、溪流眾多之特徵，以致橋梁在交通運輸佔有極重要之地位。以橋梁而言，目前日本總橋梁數大約為 13500 座，其中鋼結構橋梁占總橋梁數 40.7 %，而混凝土橋量佔 35.7 %，其他次要為 RC 橋及其他類型橋梁。故在日本，鋼結構為主要的橋梁結構建材，近年來，日本大多數橋梁也與臺灣橋梁一樣都進入維修階段，維護成本的議題重視許多。另外為了瞭解日本橋梁拆除的原因，對於拆除的 5157 座橋梁拆除原因做統計，發現橋梁功能改變與改建是日本橋梁生命週期結束的最大原因佔 66 %，則部分構件劣化損壞約佔拆除原因的 19 %。至於在分析年限的取決上，由於日本橋梁施工技術已漸成熟，加上國家未來財政考量，因此多傾向於分析年限設定為 100 年。

各國學者分別對於橋梁生命週期成本分析，提出了許多相關之研究，目的希望是在有限的資源下，提供決策者最佳維護策略，規劃出橋梁構件的使用年限、維護時間點、維護金額。以下為橋梁維護相關研究回顧，內容包含作者、所分析因子、研究內容、與本研究之差異。

文獻[Jacobs，1992]研究採用不維護、維護和置換三種維護方法對

應不同的門檻值，藉由調整門檻值制定不同的維護成本。主要分析因子為橋面板，計算多座橋梁橋面版的維護成本最小化為目標，建立混合整數規劃模式。本研究考慮因子除了橋面板，額外多考慮其他七個構件，也就是考慮橋梁的上部結構，利用過去檢測維護紀錄，設立維護門檻值。

文獻[連夷佐，2003]將橋梁資料庫內的歷史維護資料，根據環境、結構、維護情形分類篩選後，利用迴歸分析將母體分為兩部分，分為惡劣狀況以及優良狀況下的構件。再分別對兩部分採用已取得的回歸方程式，推導出兩者情況下的耐用年限，亦可推估最速劣化速率以及最緩劣化速率，並且加入維護執行率 M，在最速與最緩劣化速率中找出一值，表示此橋梁構件的劣化速率。

文獻[謝宗霖，2009]分析三種不同維護規劃模式，分別為單一構件、整座橋梁及路網層級，三種不同層級各構件維護重要性不同，可依造構件權重性，決定優先順序。並且採用模糊規劃模式，利用模糊排序法將其轉為明確數值，解決模糊係數的問題，最後計算出維護時間點，以及維護作業之總維護費用。

文獻[翁凱翔，2009]研究橋梁維修和整建兩種不同的方案，在分析年限下預估各構件損壞後每次所需花費之成本，建立在最大效益下的選擇何種最合適方案執行。作為後續維護機關及單位考慮是否維護或是整建之依據。此篇研究主要分析維護和整建兩個方案成本比較，後續並做分析年限、折現率、用路人成本三項的敏感度分析。

文獻[林佑安，2012]採用非線性的劣化曲線來表示構件的劣化速率，並將劣化速率以及維護成本皆導入模糊理論，選用三種不同的維護方式對應上升不同程度的構件分數。也考慮用路人成本，最後運用文獻

[Zimmermann，1978]多目標求解模式求解多目標。此篇研究主要對象為預期不確定成本及用路人成本做討論，並且在預期不確定成本方面，構件維護門檻多加入了個上下界，構件分數若低於上界，即可進行維護，採用文獻[Hegazy et al.，2004]三種不同的維護模式，分別為置換、重度維護、中度維護，並在構件劣化速率以及維護成本皆採用模糊三角分配，最後再用模糊多目標規劃法，採用軟體 LINGO 求解。同時考慮三種不同的層級，分別為單一構件、專案層級、路網層級三種維護模式，可供維護單位因應不同情形而採用不同的層級，決定其維護得優先程序。

鋼結構橋梁生命週期成本研究，國內目前大多為與混凝土橋梁生命週期成本一起研究，分析鋼結構及混凝土結構此兩種方案橋梁生命週期成本之差異。很少單獨研究鋼結構橋梁是因為鋼橋只佔了臺灣橋梁比例的 2.2％，目前來說臺灣混凝土橋梁還是為主要大宗。但是在有著類似環境因素，同樣是島國也位於地震帶的日本，鋼橋所佔日本橋梁比例卻高達 40.7％。二者之生命週期成本顯著差異為三部分：

①初始的興建成本由於兩種橋梁主要構件材料不一，導致初始興建成本有所差異。

②進入維護階段時，鋼結構橋梁額外需要防蝕塗裝的更換或是修補，此部分又可分為三種主要不同的防蝕塗裝，分別為一般油漆塗裝、熱浸鍍鋅以及熱浸鍍鋅+塗裝，三種不同方案塗裝影響單次塗裝的費用，還有所需塗裝的間隔年頻率。混凝土橋梁的維修工法則多為修補混凝土裂縫與鋼筋鏽蝕處理及水刀鑿除等。

③最後拆除以及回收效益的部分，回收效益對於鋼橋而言，因其廢鋼可再度熔煉以提煉新鋼，因此對於橋梁管理單位本身具回收效益，依文

獻[陳屏甫，2005]研究顯示，其廢鋼收受的價格約為$7000/噸;由『廢棄混凝土再生利用成本效益分析之研究』報告，較單純之混凝土塊之廠商收受價格約為$50~100 元/$M^3$，擇期運送價格為$164 元/M^3但由於國內營建副產物再生方案推動，若其再生材料具有回收效益，回收處理場願意以較低的運費進行運送營業副產物，兩相平衡下，其回收效益為 0 元。

文獻[陳屏甫，2005]針對國道預力混凝土以及鋼結構橋梁兩種方案生命週期成本加以評估比較，其中鋼結構橋梁又將之區分為熱浸鍍鋅以及一般鋼的兩種方案，故總共評估三種方案。劣化速率預測模式採用文獻[連夷佐，2003]利用迴歸分析，推算出最速劣化速率以及最緩劣化速率，再導入預防性定期維護執行率 M，最後得到各構件的劣化速率。而當劣化構件分數下降至門檻值時，採用隨機對構件各維護工項工法取樣，來代表此次維護所花費的維護費用。計算了興建成本、預防性定期維護成本、維修補強成本以及拆除與回收效益，最後相互比較三個方案，若以生命週期成本為優先排序順序為預力混凝土鋼橋最低，其次為鋼橋(熱浸鍍鋅)，成本最高的為鋼橋(一般鋼)。為了要檢查研究中許多的不確定性因子，此篇研究對熱浸鍍鋅使用年限、鋼鐵之市場價格、預防性定期維護執行程度、橋梁構件設定標準、折現率以及能源使用與污染評估等六項進行敏感度分析。結果發現其中六個項目皆不影響三種方案選擇的排序，

環境評估的部分，雖然鋼結構材料單位構件下的排放毒物較高，但是因為混凝土所需要材料量體較大，故以環境污染而言鋼結構材料會較低於混凝土材料的，但是因為所差異不大，依然會採用混凝土橋梁的

方案。

文獻[姚志銘，2007]針對三種不同的塗裝模式對鋼結構橋梁進行生命週期成本之分析，此三種為一般塗料、熱浸鍍鋅以及熱浸鍍鋅+塗裝，生命週期成本運算方法類似文獻[陳屏甫，2005]推估方式，假設使用年限為 100 年，而若單純只考慮鋼材料製造以及定期維護費用結果如表 2-22。

同時針對熱浸鍍鋅與油漆之間的比較，考慮到工資上揚的因素，塗裝費用維修費用會日益增高，熱浸鍍鋅的免維護使用年限可以有效的降低維護所需的人力成本。短期而言，油漆塗裝之興建成本較低，容易獲得相關工程單位之青睞，然後油漆塗裝的定期維護頻率為 5 至 8 年間必須要重新塗裝，此維護模式會花費大量的人力成本以及材料成本，甚至還需要長期檢測的人力花費。相較於熱浸鍍鋅法來說，80 年免維護年限，80 年後每 7 年需要重新塗裝，長期而言，熱浸鍍鋅的成本比油漆低了許多，相較兩方案熱浸鍍鋅的維護費用遠比油漆塗裝等防蝕設施更加的低廉且方便。

表 2-22 只考慮防蝕因子之建造總成本

成本項目	熱浸鍍鋅	熱浸鍍鋅+油漆	油漆
免維護使用年限	25 年	80 年	5 年
總防蝕費用	2019 萬元	1955 萬元	2463 萬元
鋼梁成本	4777 萬元	4777 萬元	4550 萬元
總成本	6796 萬元	6732 萬元	7013 萬元

資料來源：[姚志銘，2007]

研究[林智仁，2013]考慮交通部高速公路局本區工程處國道三號橋梁歷年維護成本，彙整民國 85 年至 100 年維護成本資料進行研究，將

其維護項目分為十大類，分別為「伸縮縫」、「裂縫」、「混凝土修補」、「鋼筋外露」、「排水改善」、「欄杆修復」、「雜物清除」、「油漆」、「橋墩及堤防保護」與「其他」等十樣維護類別。彙整後的結果提出兩大論點：

鋼橋：鋼橋在生命週期維護成本中，維護類別與維護成本特性接為「油漆」、「其他」類別，主要是由於油漆塗裝此工項施工時需要高空作業車的的使用，表示若能降低「油漆」此工項的費用降低，或是塗裝頻率的減少，可以有效的影響鋼橋命週期維護成本的支出。

混凝土橋：混凝土橋在生命週期維護成本中，佔主要構件工項中以「伸縮縫」為維護費用大宗，表示可以朝「伸縮縫」深入研究，來降低混凝土的生命週期維護成本。則在橋長介於 361 至 1078 公尺或結構形式為梁式橋或主梁型式為 I 型梁或跨河橋之影響因子類下，主要掌控維護費用的為「橋墩及堤防保護」，此維修類別將能有效降低混凝土生命週期維護成本。

2.15 橋梁檢測與承載評定之文獻回顧

目前我國眾多公路橋梁因建造已達一定時間，各結構元件已呈現老化、劣化等問題，並且，由於地理位置的因素，地震及颱風發生的機率相對較高，兩者所伴隨的土石流及洪水問題也相對嚴重，加上海島型氣候的影響，混凝土結構中的鋼筋具有腐蝕劣化的潛在可能，以上種種，導致台灣的橋梁於使用壽命內經常需要花費相當的經費維護，鑑此，橋梁檢測的技術與應用便顯得相當重要；橋梁檢測可確認橋梁各元件損害程度、並據此判斷是否需要補強計畫，且完整的檢測資料建立有助於後續既有橋梁承載能力之評定。

一般而言，檢測與承載評定可細分為三階段：橋梁檢查、橋

梁荷載試驗及評定分析。橋梁檢查包含橋梁各項歷史資料的收集，如建造年代與相關規範、歷史最高洪水位及結構形式及材料種類。橋梁檢查可以目視檢測或以非破壞性檢測進行，目前台灣橋梁檢查以「台灣地區橋梁維護管理系統TBMS」來進行檢測作業之紀錄。橋梁荷載試驗依外力形式可分為靜載試驗或動載試驗，一般量測的項目有位移、應變、裂縫、頻率、阻尼及振態。進行橋梁承載力評定時應將各項影響因素納入考量，如原設計規範、施工品質與方法、劣化程度及橋梁型式。

定量分析並不容易；橋梁承載力的評估方法尚無定論，可約略區分為以下三類：1.透過理論分析計算：例如以側推分析推估橋梁的承載能力，為確保分析時所需之資料完整，檢測量測的內容宜於作業早期即予整合；2.實物調查比較，即由實際交通情況之統計資料，判定橋梁之承載力，為動態荷載評定法之一；3.實物荷載實驗法，如車行載重試驗；陳正興等(2009)利用車行載重試驗觀察到當橋梁結構因外力受到損害時，結構參數會隨著改變，其中又以振動頻率最為明顯，進一步針對洪水水位與頻率之關係進行定性的觀察，並於荷重試驗時，將橋梁受力機制區分為以下三類進行結構的頻率量測：①樁帽與基樁均埋置於土層中、②樁帽裸露而基樁未裸露與③兩者均裸露。上述規劃的重點在於探討當不同洪水位沖刷橋梁基礎時的頻率反應，該理論可應用於當封橋管制之後，以頻率變化作為是否開放通行之參考依據。

第三章 TRENDS系統維護營運

有鑑於台灣天然災害頻傳，計畫團隊於92年起投入防災研究領域，冀望以導入資訊科技改善既有防救災機制，並徹底檢討現有防災體系，提升災情通報效率，減少災情擴大。計畫團隊於94年首度導入智慧代理人概念開發資訊交換平台，94、95年交通部運輸研究所委託研究計畫「交通工程防災預警系統建立之研究」所開發之「災害預警資料交換機」申請專利，並技術移轉運輸研究所港灣技術研究中心，作為「公路防救災決策支援系統」與「跨河橋梁安全預警系統」二計畫之核心，提供資料交換平台，整合災害上、中、下游資訊，並整合歷年成果(如下表3-1)建置『臺灣公路早期防救災決策支援系統(Taiwan Road Early Nature Disaster Prevention System，TRENDS)』。

表3-1 TRENDS發展歷程

No	年度	計畫名稱	主持人	災害類別	參與團隊			本團隊參與說明
1	94-95	交通工程防災預警系統建立之研究	台科大鄭明淵	土石流預警通報	台科大	營建系	鄭明淵 呂守陞	交通部運輸研究所委託之計畫案於 95、96 年獲優良獎，鄭明淵教授擔任計畫主持人，創新導入「智慧代理人」，發展「**災害預警資料交換機**」，研究團隊整合共計兩校、國家地震中心與台灣營建研究院之研究資源。其中計畫主持人、協同主持人等九名，研究人員 18 人。
				地震潛勢	國家地震中心 台科大 台科大	- 營建系 營建系	葉錦勳 陳生金 鄭　蘩	
				洪水沖刷	國家地震中心	-	林詠彬	
				材料劣化	台科大	營建系	黃慶東	
				防救體系	臺灣營建研究院	-	林主潔	
2	96-99	公路防救災決策支援系統建立之研究	台科大鄭明淵	地震潛勢 洪水土石流預警通報	台科大	營建系	鄭明淵	延續前一計畫案，納入**土石流、道路邊坡預警**、替代道路規劃與救災資源指派，即時統整各項道路通阻資訊，動態規劃替代道路與救災資源，提供人員快速執行救災任務**(運研所佳作獎)** 。
					清雲科大	土木系	蔡明修	
				邊坡崩塌	台科大	營建系	廖洪鈞	
3	99-100	跨河橋梁安全預警系統之建立研究與整合作業	台科大鄭明淵	洪水沖刷 預警通報	台科大	營建系	鄭明淵	交通部運輸研究所所委託，鄭明淵教授擔任計畫主持人，研究內容須整合 8 校、中興工程顧問、中華顧問及國家地震中心之研究成果。此整合計畫研究領域橫跨了水理分析、風險評估、檢測評估、材料、法規及資料調查與監測等領域，進行災害潛勢分析。
					淡江大學	土木系	蔡明修	
				一維水理	成功大學	水利及海洋工程學系	游保杉	
				二維水理	中興工程顧問	-	廖哲民	
				安全評估	海洋大學	河海工程系	林三賢	
				檢測規範	中華顧問工程司	-	王仲宇	
				橋河資料	高雄應用科大	土木系	李良輝	
				保護工法	逢甲大學	水利系	廖清標	
				橋墩材料	海洋大學	材料所	楊仲家	
				保護工規範	台科大	研發中心	李維峰	
				災因分析	中興大學	土木系	蔡清標	
				監測儀器	中原大學	土木系	張達德	
				監測儀器	國震中心	-	張國鎮	
4	99-100	橋梁通阻檢測分析模式建立之研究	台科大鄭明淵	材料劣化	台科大	營建系	邱建國	應用所發展之 AI 推論模式學習橋梁耐震影響因子(輸入)與降伏加速度與破壞加速度(輸出)對應
				地震簡易側推分	台科大	營建系	歐昱辰	

No	年度	計畫名稱	主持人	災害類別	參與團隊			本團隊參與說明
				析				關係，快速**評估全台灣 2590 座橋梁耐震潛勢**。**(103 年土木水利工程學刊論文獎)。**
				AI 推論潛勢	台科大	營建系	鄭明淵	
				振動分析	台科大	營建系	廖國偉	
5	100	蘇花公路 115.9K 邊坡崩塌監測預警模式之建立研究	逢甲 洪本善	預警通報	台科大	營建系	鄭明淵	有鑑於蘇花 115.9K 突發性崩塌之災難，應用**資料交換平台**整合氣象局降雨預報、現場 GPS 監測與雨量計作為自動通報機制之啟動門檻，防止邊坡崩塌。
				降雨預測	成功大學	水利及海洋工程學系	游保杉	
				邊坡崩塌	逢甲大學	GIS 中心	方耀民	
6	101-102	跨河橋梁安全預警系統建置更新驗證與維護管理	台科大鄭明淵	預警通報	台科大	營建系	鄭明淵	本研究將跨河橋梁預警範圍擴展至大甲溪石岡壩上游至馬鞍壩。同時，藉由颱洪期資料持續修正大甲溪流域預測及預警模式，並與公路總局通報機制整合。
				二維水理	中興工程顧問	-	廖哲民	
				安全評估	海洋大學	河海工程系	林三賢	
7	102	移動式橋梁振動檢測及訊號分析與傳輸通報系統	台科大鄭明淵	系統整合	台科大	營建系	鄭明淵	於各橋梁設置振動頻率量測儀器，在有限的時間與經費下並不可行。本研究將儀器裝置於車輛中，取得橋梁之振動頻率分析結果作為橋梁開放通行或封閉之建議。
				振動分析	台科大	營建系	廖國偉	
8	101-103	橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研發	台科大鄭明淵、邱建國	維護策略	台科大	營建系	鄭明淵	應用風險期望值觀念，提出可視與不可視風險指標與評估模式。發展創新最佳化搜尋方法-生物共生演算法，搜尋橋梁生命週期最適維護時機與成本，供擬定最適維護策略之參考。**(營管協會論文優等獎) (104 年土木水利工程學刊論文獎)。**
				材料劣化	台科大	營建系	邱建國	
9	104	橋梁耐震能力與檢測評估分析模式之建立研究(1/2)	台科大鄭明淵	系統整合	台科大	營建系	鄭明淵	藉由縮小尺寸模型驗證移動式振動量測方式之可行性，並以人工智慧推論各橋梁通阻之臨界頻率值，作為橋梁開放通行之建議。
				振動分析	台科大	營建系	廖國偉	
10	105	橋梁耐震能力與檢測評估分析模式之建立研究(2/2)	台科大鄭明淵	系統整合	台科大	營建系	鄭明淵	持續至不同橋梁進行振動量測，驗證所建置之移動式振動量測之穩定性與可行性。
				振動分析	台科大	營建系	廖國偉	

計畫執行過程中TRENDS在地震、洪水沖刷與邊坡方面皆有應用之成效，其中:

1.地震方面:應用AI推論公總全台五區工程處共33個工務段2590座橋梁之耐震潛勢，並進行預警通報。地震發生後，TRENDS會自動擷取氣象局發布之地震資料，即時分析橋梁地震破壞潛勢，以e-mail及簡訊方式通報相關人員。目前於公路總局及五區工程處已採用，通報名單包括:交通部主任祕書1人；公路總局副總工程師1人、防災中心1人、道工科科長1人及五區處橋檢對口人員5人與工務段段長、副段長63人，橋檢工程師33人；運輸研究所運計組組長1人;港研中心主任1人、科長1人及研究員1人;國防部空軍戰術管制聯隊11人，總計123名，內容包括轄下超出預警值之橋梁及破壞機率排序，作為管理單位第一時間至現場勘查之參考。在2013/6/2所發生規模6.2地震中，有效發布綠水和舊東光2座橋梁危險警訊，供管理單位決定優先檢測順序之參考依據。

2.洪水沖刷方面:交通部運研所目前已將TRENDS應用在公路總局大甲溪跨河橋梁預警通報，未來擬推廣應用至全台。

3.邊坡方面:(1)提供第四區工程處蘇花公路豪大雨與邊坡位移通報預警，已在4次豪大雨事件中發揮功效(2011/08/04、08/27，2012/06/19、06/28)，提早發布通知，供段長封閉道路決策之依據，避免災情擴大傷及人命。(2)提供蘇花公路115.9K國防部空軍戰術管制聯隊之邊坡位移預警。

以下針對TRENDS系統之系統架構與模組功能進行分析。

3.1 TRENDS系統架構

TRENDS架構分為資料交換平台、資料庫與預警通報機制等。並以1.易於進行資料查詢及分析；2.提供橋梁基本、災害、監測資訊；3.GIS圖形介面等使用需求進行系統規劃(圖3.1)。

(1)系統使用需求

1.易於進行資料查詢及分析
2.提供橋梁基本、災害、監測相關資訊
3.GIS圖形化網頁介面

(2)系統發展概念研擬

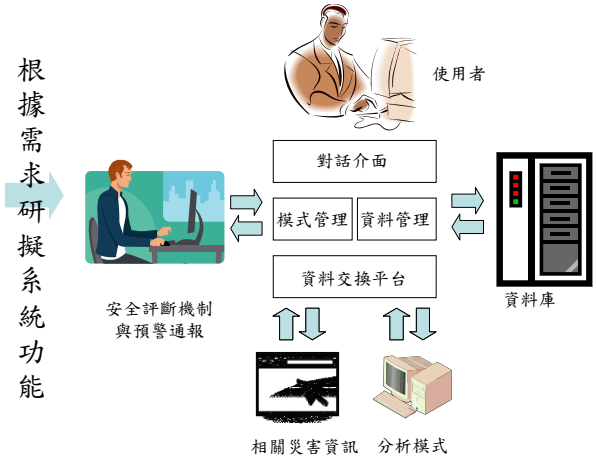


圖 3.1 TRENDS 系統概念

1.資料交換平台：應用港研中心「交通工程防災預警系統建立之研究」中所建置之「災害預警資料交換機」，建置資料交換平台，統整各項資訊。透過通報機制，於洪水災害發生時，第一時間收集監測資料與災害分析研判，並將結果即時透過各項通訊管道(手機簡訊與E-mail等)回報災情與範圍，提升救災效率，減少災情之損失與避免人員之傷亡。

2.資料庫：為了解決各介面整合與資源共享等問題，因此此階段將根據資料倉儲理念進行資源整合，研究資源項目包含GIS圖層、儀器監測值、氣象報告、水文資料、橋梁基本資料、橋梁耐洪安全評斷標準等資訊。

3.預警通報機制：最後，本研究為了能立即掌握即時橋梁安全情況，並提供災時工程人員應變、決策及通報的機制，將應用災害預警資料交換機即時收集災情資訊與安全評估結果，一旦橋梁到達設定之警戒值時，系統將以主動及被動兩種方式與公路總局通報機制進行整合。

如圖3.2所示，系統中各個模式以模式庫方式呈現，而且各個模式均可配合資料的改變來更新模式中的參數，使模式能應付現實狀況的改變，同時亦可反覆執行指定模式，以確保使用者可以得到所需之決策支援，進而達到模式管理的功能。

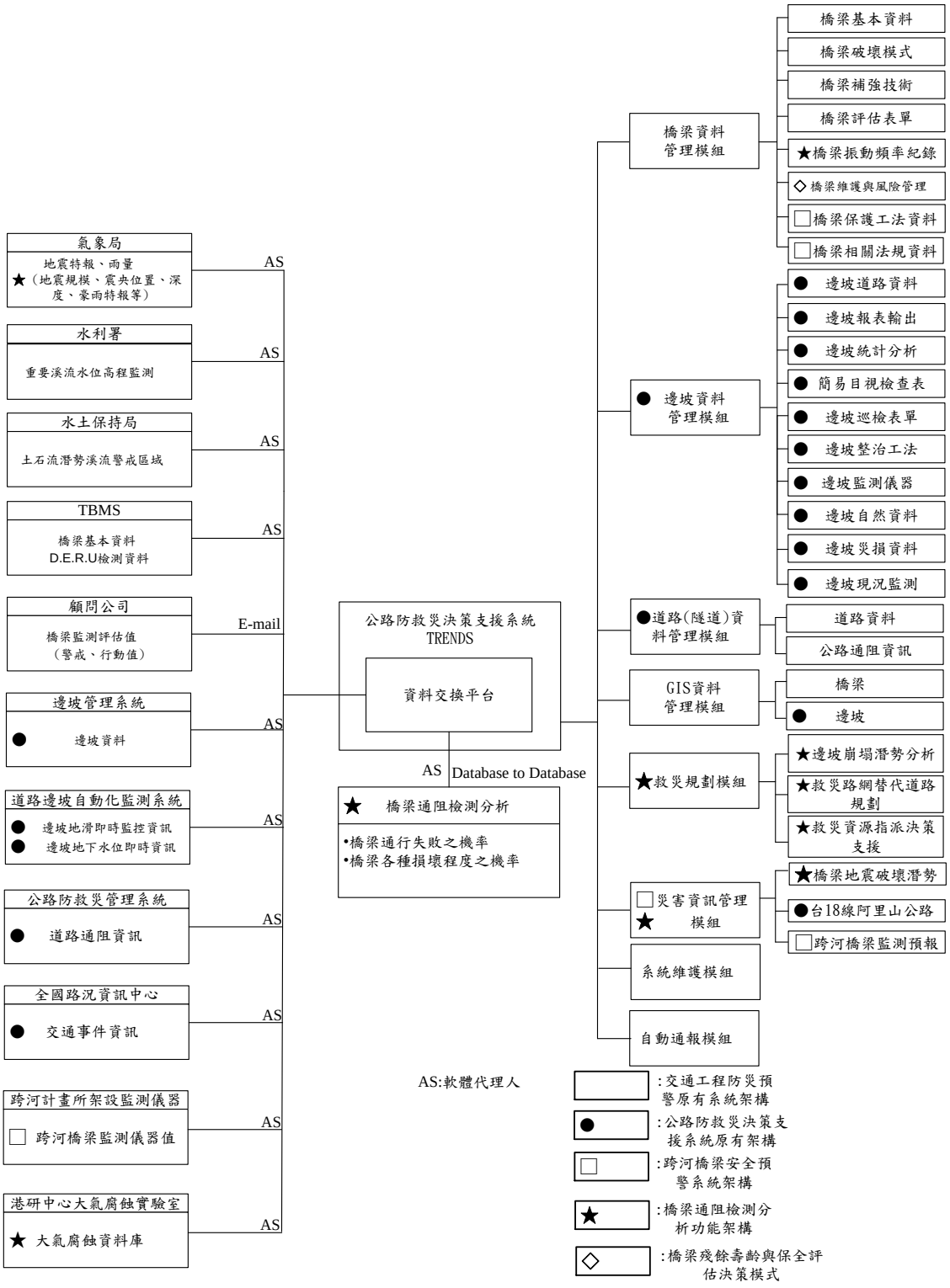


圖 3.2 TRENDS 系統模組

圖3.2中圓形、方形、星形與棱形記號分別代表TRENDS整合

不同計畫成果，各模式之說明如下:

(1)橋梁資料管理

橋梁資料管理部分主要提供使用者對橋梁基本資料進行管理維護的功能，以及橋梁破壞模式、橋梁補強技術、評估表單進行管理維護的功能。

(2)邊坡資料管理

邊坡資料管理部分主要提供使用者對邊坡基本資料、目視檢查表、巡檢表單、整治工法、監測儀器、災損資料進行管理維護的功能。

(3)道路（隧道）資料管理

道路（隧道）基本資料管理部分主要提供使用者對於道路工程資料進行管理維護的功能。

(4)GIS圖層資料管理

運用ArcGIS Server建構線上地理資訊系統，以地理圖層方式呈現使用者所查詢之橋梁位置、狀況異常橋梁、災害資訊、邊坡災損等資訊。

(5)救災規劃

此模式運用各交通工程在不同自然環境與天然災害下可能發生破壞之潛勢及可能造成災損與風險值之計算結果，藉以搜尋替代道路最適行車路線之規劃，進而可應用於救災資源調派之功能。

(6)災害資訊管理

提供使用者對資料交換平台交換所得之災害資料進行查詢的功能，包含橋梁地震潛勢、跨河橋梁安全預警等。

(7)系統維護

本模式之建立在於提供系統管理者對使用者之權限進行管

控。

(8)自動通報

此模式提供自動化的通報機制，藉由E-mail及手機簡訊給該橋梁或邊坡之管理單位人員，通知其儘速進行處理或調查。

3.2 TRENDS系統核心-資料交換平台

TRENDS將不同計畫成果內容彙整統合，然而不同計畫由不同單位執行，造成資料傳遞的困難且難以整合。為解決此問題，TRENDS中利用交通部運輸研究所-「交通工程防災預警系統」一案所開發之資料交換平台為基礎進行資料彙整工作。資料交換平台由各個智慧型代理人組成，並根據任務項目不同，指派特定智慧型代理人定期執行任務，最後針對不同計畫資料輸出方式，將資料格式轉換為標準XML文件，供TRENDS系統使用。以下簡單介紹資料交換平台機制及流程。

代理人技術已被應用在各種不同的領域，例如計畫排程、資訊檢索等，藉由此項技術的運用可以減少工作量以及資訊量(Information Overload)，使用者可以指派代理人完成特定的任務或是與代理人相互合作，完成共同的目標。代理人主要特徵如下：(1)自發性:代理人程式被指派工作後，便不需人力介入其工作流程，便有獨立完成工作之能力；(2)社會性:各代理人之間能夠透過特定方式相互溝通、協調工作。並且具有與自然人互動之能力；(3)感知性:代理人會採取目標導向方式進行工作，並能夠感應外在環境變化對其目標之影響；(4)反應性:代理人能夠在環境改變之後做出適當反應；(5)移動性:代理人能夠攜帶所需資訊在不同電腦之間遷徙，並且能夠在不同電腦間作業；(6)脈絡連續:代理人被賦予工作後，便能夠掌握自身之程序或執行序以便完成整體任務；(7)適應性:代理人能透過判斷行為的結果進行學習，因此會隨著時間及環境的變化調整自己的狀態。

因此本計畫藉由軟體代理人間可相互溝通之特性，建立一多

代理人之環境，協助資料傳遞工作。資料交換平台依運作範圍分為(一)既有系統連結與(二)新增系統連結，架構如圖3.3所示。

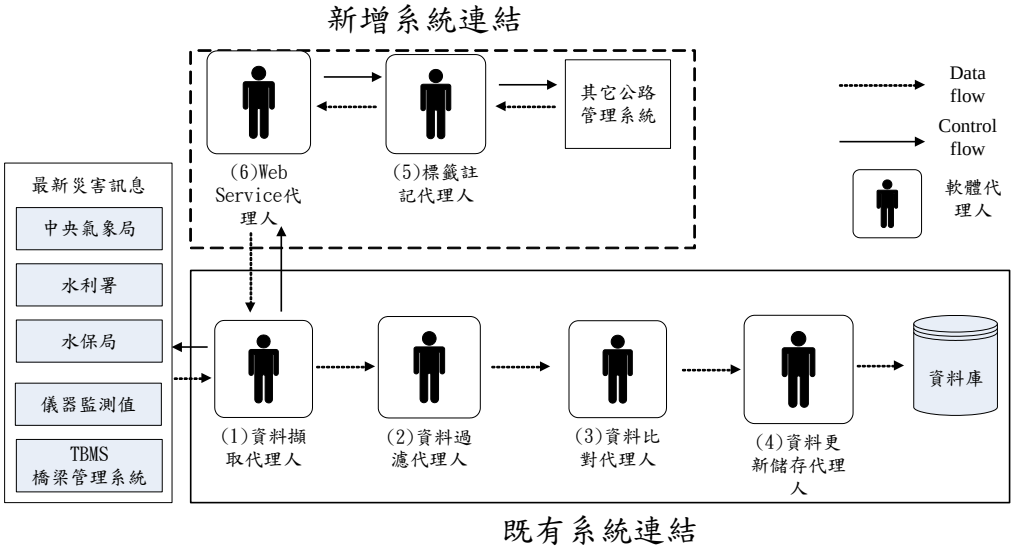


圖 3.3 軟體代理人架構圖

1.既有系統連結

既有系統連結中，資料交換平台由四個軟體代理人所組成，分別是(1)資料擷取代理人、(2)資料過濾代理人、(3)資料比對代理人及(4)資料更新儲存代理人。各代理人功能簡述如下：

(1)資料擷取代理人

能夠在使用者指定的目標網站中，擷取網站的內容。

(2)資料過濾代理人

能夠將資料擷取代理人所擷取之內容自動分析過濾，僅留下所需的資料內容。

(3)資料比對代理人

能夠比對擷取的資料與資料庫中現有的資料是否相同。

(4)資料更新儲存代理人

能夠將新的資料依照資料庫欄位之設計儲存或更新資料庫中之資料。

除具有XML文件的資料交換，對於非XML文件的一般網頁，資料交換平台會，加入另外兩個智慧型代理人於新增系統中(5)標籤註記代理人與(6)Web Service代理人，此兩個代理人能夠將非XML文件轉換為XML文件，以利資料交換平台運作，其說明如下。

2.新增系統連結

新增系統連結中，資料交換平台由(5)標籤註記代理人及(6)Web Service代理人所組成。新增系統網頁通常是以HTML標準撰寫，標簽註記方式較為自由，輸出表單以使用者可簡單閱讀為目的。但在此架構下，輸出網頁無法讓一些自動化軟體(如軟體代理人)所判讀，因此為了讓道路邊坡維護管理系統提供XML格式文件，此階段藉由標籤註記代理人先行對舊有系統網頁進行註記，在進行註記動作前，須針對該領域知識建置XML Schema資料庫，標籤註記理人可輔助使用者由資料庫選取合適標籤對資料欄位進行註解，以<tag></tag>方式在欄位左右處進行標記，使得網頁可以XML Schema格式進行資料輸出。Web Service代理人再根據需求，由網頁或是資料庫中，擷取資料建置Web Service功能。

(5)標籤註記代理人

主要功能是替原本無XML標準註記之系統網頁加入標籤，藉由標籤註記代理人由XML Schema資料庫中尋找合適之標籤加註於舊有系統產出文件中。其流程如下所示：

①索取XML Schema 格式標準

由資料庫中索取事先定義之XML格式。

②取得網頁html文件

經由網路連結取得目標網頁Html文件檔。

③進行標籤註記

標籤註記理人產生標籤對原有資料欄位進行註記。

④產生XML文件

根據標籤註記產生對應之XML文件。

(6)Web Service代理人

可將已加註標籤之網頁內容發佈為Web Service，在註冊服務器中登錄此模組功能服務，之後就可提供資料擷取代理人擷取其網頁內容。其流程如下所示：

①取得XML文件

Web Service代理人藉由標簽註記代理人取得XML文件。

②發佈服務

Web Service代理人提供符合XML格式之資訊。

3.3 TRENDS系統與國內其他系統比較

目前公路橋梁管理單位所使用之系統包含TBMS、公路防救災資訊系統(以下簡稱BOBE)、公路防救災 GIS 決策支援系統(以下簡稱TGIS)與TELES系統。各系統之目的與決策評估方法皆不同，以下用表格方式統整各系統與TRENDS間之差異比較，如表3-2所示。

表3-2 TRENDS與各系統比較

類別	系統名稱	TRENDS與各系統比較	
		同	異
基本資料	TBMS	TRENDS 採用TBMS建置之基本資料進行後續分析。	1.TBMS目前所保留之基本資料作為耐震能力與耐洪能力評估之需求尚不足。 2.TRENDS系統納入規劃設計階段參數，並可自動化分析評估橋梁在耐震與耐洪之安全性，提供防災預警之決策支援。
地震災害	TELES	由橋梁之降伏加速度(Ay)與破壞加速度(Ac)計算求得各橋梁之通行失敗機率	1.TELES出發之角度為都市整體災害潛勢分析，故建築物、交通設施皆納入分析範圍。 2.TRENDS藉由人工智慧推論模式，並加入橋梁鋼筋材料劣化之因素，推論未進行詳細評估(側推分析)橋梁之耐震能力。經與TELES驗證比較可提升地震耐震能力推論值之準確性。
	TBMS	以橋梁所在地之震度為通報標準	1.TRENDS除了橋梁所在地震度以外，由橋梁之降伏加速度(Ay)與破壞加速度(Ac)計算求得各橋梁之通行失敗機率。
洪水災害	BOBE	接收中央氣象局QPESUMS雷達降雨預報資料。	1.BOBE以橋梁跟上游集水區雨量站之回歸關係式訂定雨量站門檻值。 2.TRENDS系統以大甲溪流域為例，從首先中央氣象局接收雷達降雨預報，接著進行集水區演算、地表漫地流演算、河道一維水理演算、水庫演算，推估河道之流量、水位、流速與沖刷深度，然後，計算橋梁之耐洪安全係數作為即時未來一小時橋梁預警之依據。分析結果如超過警戒值，則自動啟動預警通報機制，提早通報橋梁管理單位，爭取防災應變之黃金時間，給予用路人生命財產更多的保障。
	TGIS	以Google底圖為展示平台。	1.TGIS僅為圖資展示之平台，無分析功能，TRENDS之地震、洪水安全評估分析結果可作為

類別	系統名稱	TRENDS與各系統比較	
		同	異
			TGIS圖資的來源。
道路邊坡	BOBE	跟據邊坡歷史崩塌紀錄訂定邊坡強降雨與累積降雨之門檻值。	1. BOBE依據過去崩塌紀錄擬定門檻值，並在每次豪雨事件後，開會檢討修正門檻值。 2.TRENDS根據歷史紀錄，分析災害發生時之雨量資料。最後，根據雨量參數分析結果，分別將發生可能性30%和50%之降雨值訂定為降雨基準值上下限。
維護策略	TBMS	TRENDS 採用TBMS 建置之DER&U巡檢紀錄進行後續分析。	1. TBMS僅記錄歷史DER&U巡檢紀錄未建議何時維護之方案。 2.TRENDS將分別探討橋梁可視(Visible)與不可視(潛勢)(Invisible)危害二風險類別，並將橋梁在維護或是斷橋風險下造成經濟損失之用路人成本納入考量，建立橋梁維護風險成本分析模式，可分別提出單橋或群橋維護策略。

3.4 與公路總局既有系統介接

本階段以公路總局所開放介接之格式為前提，將系統目前成果介接至公路總局系統中，提升系統使用性。在執行過程中與公路總局BOBE系統維護廠商(逢甲大學與中國生產力中心團隊)初步連繫後，並於2017/07/11至公路總局進行討論確認可採用Web Service交換資料，以KML(Keyhole Markup Language)為文件格式。並已在2017/09/30提供Web Service服務(圖3.4)，此服務將根據不同地震事件產生動態橋梁清單XML檔(圖3.5)，其內容包括:

1.地震發生日期:<Date>2017/11/03 10:49</Date>

2.地震深度:<Depth>6.5</Depth>

3.震央位置:<Longitude>120.94</Longitude>

4.震央位置:<Latitude>22.98</Latitude>

5.規模:<Scale>4.9</Scale>

6.橋梁名稱:<BridgeName>A 橋梁</BridgeName>

7.橋梁位置:<BLongitude>120.4891117</BLongitude>

8.橋梁位置:<BLatitude>24.1824883</BLatitude>

9.工程處:<Department>公路總局第二區養護工程處</Department>

10.工務段:<Section>彰化工務段</Section>

11.橋梁所在地震度:<BridgeScale>3</BridgeScale>

12.橋梁通行失敗機率:<P>22</P>

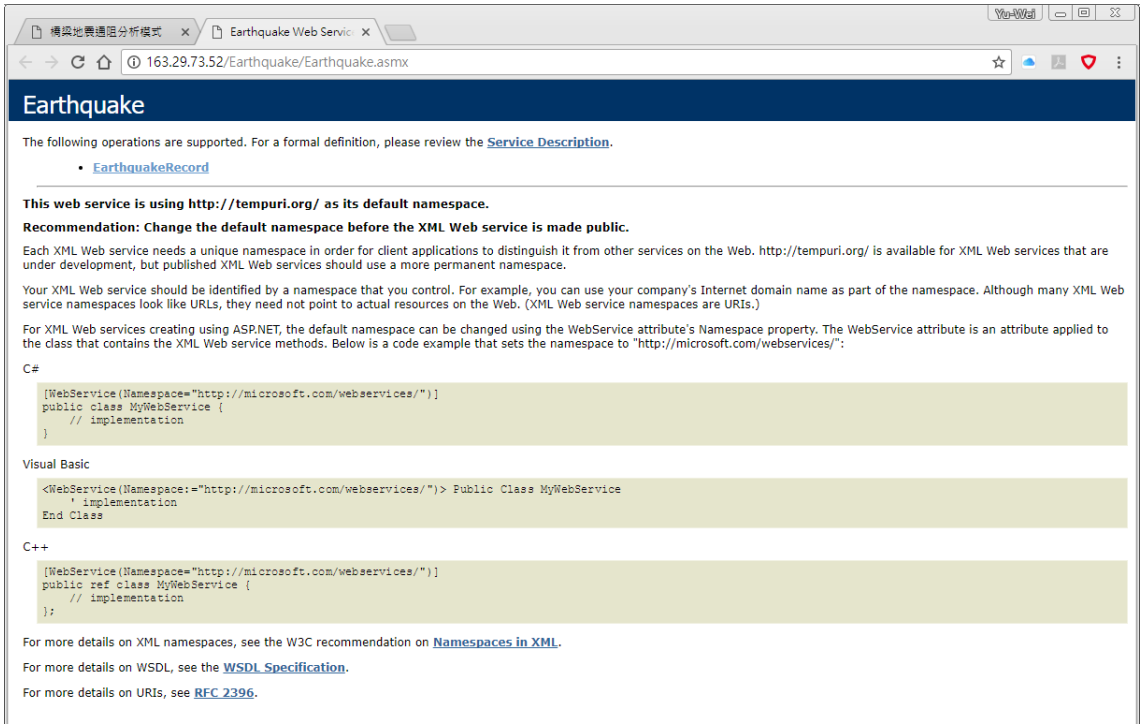


圖 3.4 橋梁通行失敗機率 Web Service

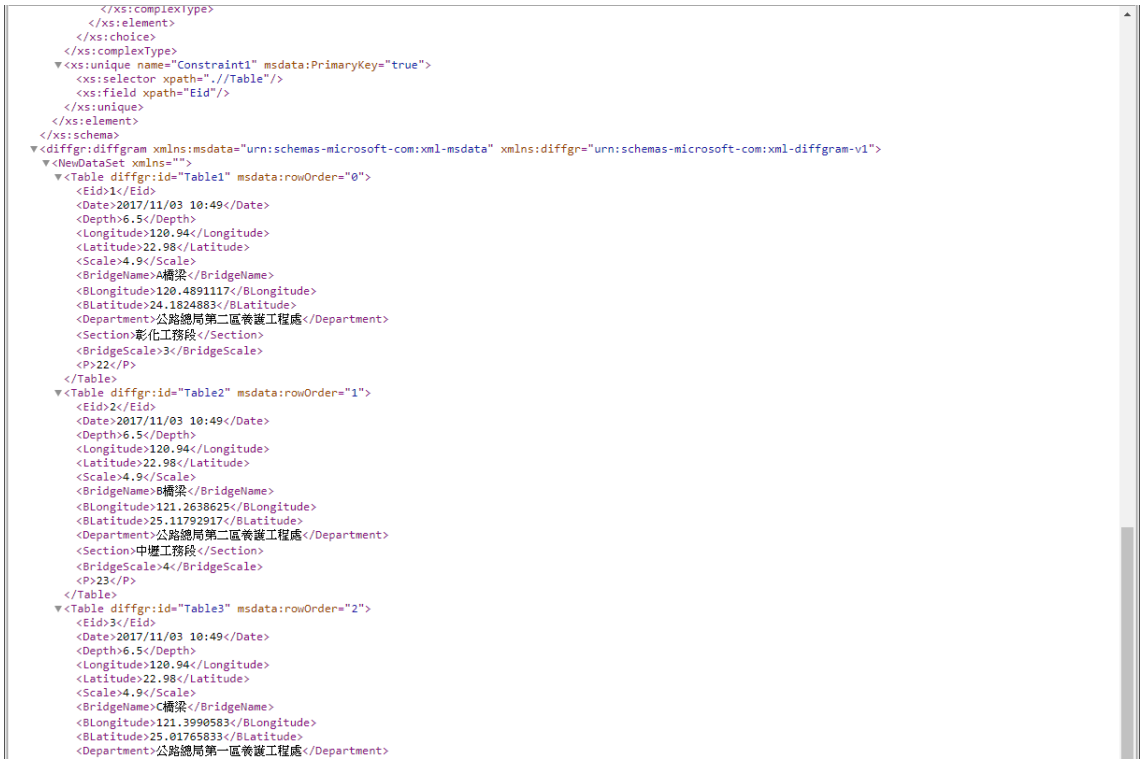


圖 3.5 橋梁通行失敗機率 XML

上述資訊可更靈活供 TBMS 加值應用，因為系統所提供之格式為

標準之 XML 檔案，目前亦已提供公路總局防災應變中心作為圖資展示與通報警訊發布之參考依據(如圖 3.6)，並完成介接，其中洪水安全狀態已於去年度介接完成。

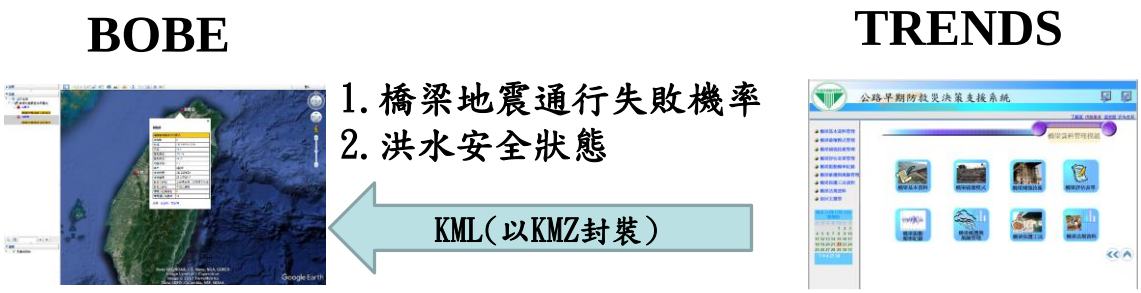


圖 3.6 與公路總局介接示意圖

3.5 辦理研討會一場次

於合約書內規定須辦理研討會 1 場次，推廣系統成果。原訂 11 月 9 日舉辦之研討會，因場地與主持人時間配合問題，延至 11 月 23 日於交通部運輸研究所舉辦。並配合主辦單位擬定研討會計畫書，並經交通部運研所核定。內容如下:

1.緣起

道路、橋梁為重要交通工程設施，然而每年颱風、豪雨及地震頻繁，使得道路邊坡崩塌、橋梁受颱洪及地震損害潛在威脅大增，因此，道路、橋梁安全性如何評估及預警，公路防救災決策支援系統、邊坡檢監測系統及橋梁檢測工具之開發建置等課題，實為當前實務應用研究重點。

本所道路橋梁災害防治技術研究成果，在「公路淺層土壤邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發」方面，除研發無線感測網路模組外，並結合具嚴謹力學理論之解析法進行邊坡穩定分析，發展場址客製化具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警架構; 而「公路邊坡崩塌近景攝影測量自動判讀系統開發應用研究」提供全自動近景攝影測量監測方法及多時序三維重建資料差異分析，用來記錄道路整體邊坡變遷，做

為崩塌潛勢判斷之依據;「臺灣公路早期防救災決策支援系統開發建置」導入資訊科技改善既有防救災機制，自動化整合災害上、中、下游資訊，除能減輕公路管理單位在資料彙整與分析之人力負擔，更提供道路邊坡、橋梁耐震、橋梁耐洪及橋梁平時維護管理決策支援，以達到公路防救災與減災之功效;另「感潮河段橋梁梁底檢測方式探討」係評估開發感潮河段梁底空間狹小橋梁之檢測工具，藉以突破此類極易劣損橋梁之檢測困難問題。

本研討會旨在針對道路橋梁災害防治技術進行成果研討，發表「公路淺層土壤邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發」、「公路邊坡崩塌近景攝影測量自動判讀系統開發應用研究」、「臺灣公路早期防救災決策支援系統開發建置」及「感潮河段橋梁梁底檢測方式探討」等四大主題相關成果，冀望透過本次研討會，向公路管理單位分享本所研究成果，並就公路安全及管理議題集思廣義，以獲致可供交通部、公路管理單位應用參考的結論。

2.發表論文

研討會中擬進行精湛的論文演講共 4 篇，論文主題為道路橋梁災害防治技術研究成果。論文題目與主講人分列如下：

(1)公路淺層土壤邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(成功大學土木系張文忠教授)

(2)公路邊坡崩塌近景攝影測量自動判讀系統開發應用研究(高雄應用科技大學土木系李良輝教授)

(3)臺灣公路早期防救災決策支援系統開發建置(臺灣科技大學營建系鄭明淵教授)

(4)感潮河段橋梁梁底檢測方式探討(大同大學電機系楊祝壽教授)

3.議程

本研討會訂於民國 106 年 11 月 23 日(星期四),於本所國際會議廳舉行。議程內容詳如表 3-3 所示，主要包括報到後的開幕式、論文研討，以及最後的綜合座談。在論文研討的時間分配方面，各場次均為 30 分鐘，首先由主持人介紹主講，其次由主講人就研討議題發表論文。在綜合座談，擬請各主持人、主講人一同座談。

4.效益分析

(1)將本所研究成果藉由主題演講，與道路橋梁管理單位人員共同研討、集思廣義。

(2)提供交通部、高公局、公路總局道路橋梁防災政策及技術支援。

(3)提供溝通平臺，促成道路橋梁管理單位人員，有相互交流、學習與成長的機會。

5. 經費需求

本次研討會為港灣技術研究中心主辦,合作研究單位國立臺灣科技大學依合約工作項目協助辦理,所需經費由國立臺灣科技大學支付。

6.研討會相關事宜

(1)主辦單位：交通部運輸研究所

(2)協辦單位：國立臺灣科技大學

(3)時間：民國106年11月23日(星期四)

(4)地點：交通部運輸研究所B1國際會議廳(臺北市松山區敦化北路240號)

(5)名額：預計100人，依報名順序額滿為止。

(6)費用：免報名費。

(7)研討會邀請單位：交通部、高公局、公路總局、臺鐵局及高鐵局

(8)工作分配：本所負責辦理研討會相關事宜，包括會議前的網路報名、會議資料準備、論文集編排、接駁車輛安排等工作，並負責會議當天的報名接待、會場服務、餐飲安排等工作，合作研究單位負責費用支付及核銷事宜。

表3-3 2017年道路橋梁災害防治技術研討會」議程表

時　間	內　　容		
9:00~9:30	報　　到		
9:30~9:40	開　幕　式		
論　文　研　討			
時　間	議　　題	主 講 人	主 持 人
9:40~10:10	臺灣公路早期防救災決策支援系統開發建置	臺灣科技大學 鄭明淵教授	本所港研中心 邱永芳主任
10:10~10:40	公路淺層土壤邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發	成功大學 張文忠教授	公路總局養路組蔡宗成組長
10:40~10:55	茶　　敘		
10:55~11:25	感潮河段橋梁梁底檢測方式探討	大同大學 楊祝壽教授	公路總局養路組蔡宗成組長
11:25~11:55	公路邊坡崩塌近景攝影測量自動判讀系統開發應用研究	高雄應用科技大學 李良輝教授	高公局林炳松副總工程司
11:55~12:10	綜　合　座　談		
12:10	午　餐、賦　歸		

第四章　初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

橋梁是台灣重要的交通工程設施之一，因台灣在地形上擁有許多高山以及河川等特殊地貌，所以有時在現場施工時，在現有技術的考量下，採用了施工快速且跨度施作範圍較長的鋼結構橋梁來進行施作。在自然氣候方面，台灣經常發生颱風以及豪雨等災害，在大雨以及強風的侵襲，使橋梁的各個構件折減了原本能使用的期限；在雨勢加劇的同時，導致河川發生溪水暴漲，在急遽水流的衝擊下，使橋梁不斷的受沖刷而損害。在地理位置方面，因為台灣位處地震帶上，導致台灣發生地震的頻率頻繁，地震發生時，對橋梁結構所造成的影響也是不容忽視；另一方面，台灣因為四面環海的關係，環境中充斥著讓鋼材腐蝕劣化的因子，對於鋼結構的橋梁，表面的油漆塗膜維護更顯重要。因此如何在合適的時機進行鋼結構橋梁的維護補強工作，以提升鋼結構橋梁的使用安全與使用年限是重要的課題。

國內鋼結構橋梁大部分都經過了一段使用時間，在橋齡持續增加的同時，也代表著橋梁因歲月所累積的損傷日趨嚴重。透過檢測人員定期對橋梁進行例行性巡檢，以評估橋梁的外部損傷，讓管理單位能在鋼結構橋梁的生命週期中，在適當地時機進行維護補強的作業，以盡早修復損傷嚴重的橋梁，來防止後續風險成本的增加，避免影響到使用者的人身安全。鋼結構橋梁於平時的定期檢測中，主要依據交通部所頒布的公路養護規定來進行橋梁檢測作業，因為檢測方法採取D.E.R.&U.的方式進行，但是因為D.E.R.&U.是以檢測人員採取目視檢測，所以僅能觀看到橋梁外部的損傷，檢測人員不容易診斷出因地震、洪水、塗裝劣化以及構件老化等因素所造成的鋼橋內部損傷。

由於橋梁管理單位在每一年編列橋梁維護預算時，所編列的維護經費有限，所以並無法將所有受損的橋梁皆進行相關的維護補強，因此橋梁管理單位需要考量每座橋梁的維護時機與其維護成本，來求得橋梁在生命週期維護總風險成本最低，有效的使用維護經費。

4.1 建置鋼結構橋梁風險評估模式

由第二章文獻分析可知，過去案例大多以現有混凝土橋之維護記錄並參考專家建議，以決定鋼橋各元件或構件之劣化速率與維護週期，於生命週期成本評估與維護決策建議時會有不合理現象。為建立合適鋼橋之生命週期維護管理策略，除須重新檢視既有維護資訊是否足夠用於劣化預測外，須進行鋼橋專用之塗裝或塗膜系統劣化性能與維護策略研究，此外，鋼材因會塗裝或塗膜系統劣化而腐蝕，然而其結構性能之評估則尚未被重要與研究；因此，本研究將以塗裝或塗膜系統劣化評估建立塗裝系統更新週期，以建立適用鋼橋之生命週期維護管理系統。並參考運研所港研中心委託計畫案「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研究」[邱建國、鄭明淵、吳育偉等，2014]之風險評估架構(圖4.1)，分別以可視危害(Visible)與潛勢危害(Invisible)二部份進行評估。

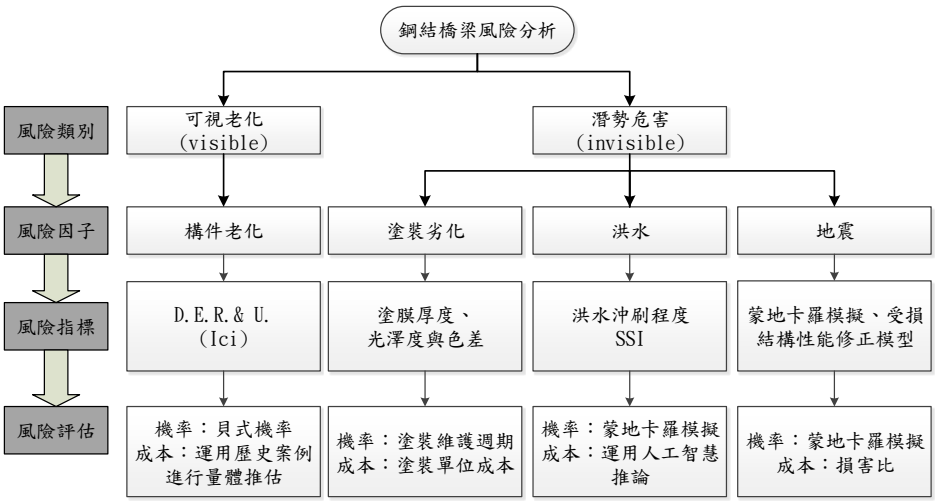


圖 4.1 鋼橋風險評估架構

如圖4.1，本計畫發展建立一鋼橋風險評估模式，模式中考量之風險因子類別分為可視老化風險(Visible):構件老化與潛勢危害(Invisible):塗裝劣化、洪水與地震，然後根據各風險因子類別確認其風險指標，並進行風險評估。本計畫主要包含3個步驟。以下按照研究步驟依序論述，如圖4.2所示。

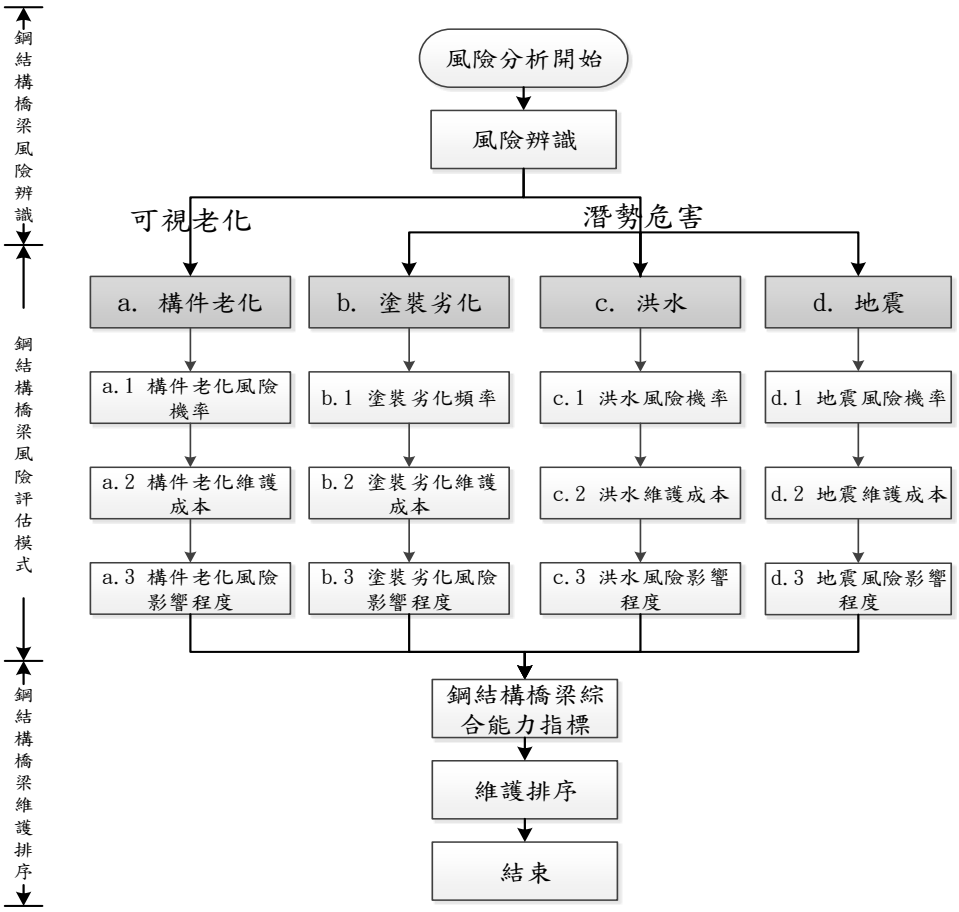


圖 4.2 鋼橋風險評估模式流程

步驟一:鋼橋風險辨識:

本階段首先針對鋼構橋梁進行風險辨識，篩選風險因子，其包括元件老化、塗裝劣化、洪水、地震等，發展鋼橋風險評估模式，模式中求得之橋梁維護風險期望值(風險成本)定義為鋼橋綜合能力指標，並按此一指標，作為求解維護策略之依據。

步驟二:鋼橋風險評估模式:

本階段將評估各風險因子之維護發生機率。元件老化與洪水部分，將依據不同橋梁類型，蒐集TBMS歷史檢測紀錄，迴歸找出CI及SSI下降趨勢，再應用貝氏更新、蒙地卡羅模擬因元件老化、洪水沖刷造成橋梁需維護或重建之機率。地震則是以地震潛勢機率模型計算求得各橋

梁所在地之PGA。再考量橋梁現有耐震強度(Ay,Ac)，評估橋梁地震損失進而求得橋梁地震損傷指標，並以蒙地卡羅模擬找出橋梁地震損傷需維護及重建之機率。

將橋梁檢測歷史紀錄與維護補強案例庫連結，可建置不同檢測結果(CI及SSI)對應補強成本歷史案例庫，然後應用人工智慧推論模式，找出案例資料中輸入值(CI及SSI)與輸出值維護成本之映射關係，再依據迴歸橋梁檢測資料所得之橋梁損壞下降趨勢，求得不同年限下元件老化程度(CI)與洪水沖刷程度(SSI)值，作為前述AI輸入值，以推論求得可能維護成本。地震部分擬參考阪神地震文獻建議使用不同損傷超越機率所對應之風險成本計算求得。

步驟三:鋼橋維護策略:

使用生物共生演算法最佳化搜尋分別計算不同維護方案之風險影響程度，找出符合預算限制下，最低生命週期成本E_S(Cost)之維護時機組合。

4.1.1 鋼橋風險辨識

首先定義鋼橋之維護風險成本E(MC)及重建風險成本E(RC)。本研究根據風險評估模式之因子，以風險期望值之概念，建立鋼構橋梁維護之風險期望值E_S(Cost)，如公式4.1。

$$E_S(Cost)=\overbrace{E(MC)}^{\text{維護成本}}+\overbrace{E(RC)}^{\text{重建成本}} \qquad (4.1)$$

其中:

E_S(Cost) : Steel Bridges Expected Cost，為第 i 年第 j 座橋梁之風險期望成本，其中，j 為同一管理單位之橋梁。

E(MC):Maintenance Cost，為風險下維護成本(元件老化、塗裝劣化、

洪水、地震)。

E(RC): Rebuilding Cost，為橋梁在未維護狀態下，因地震或洪水損害造成之重建風險成本。

橋梁維護風險成本 E(MC)部分由可視、不可視之機率與成本組成，如公式 4.2，以風險類別、風險因子等區分，各類別所使用計算因子如表 4-1 所示。

$$Es(Cost)=\overbrace{\left(P_{MD_{ij}}\times C_{MD_{ij}}\right)}^{\textbf{Visible}}+\overbrace{P_{MC_{ij}}\times C_{MC_{ij}}+P_{MS_{ij}}\times C_{MS_{ij}}+P_{S_{ij}}\times C_{RS_{ij}}+P_{ME_{ij}}\times C_{ME_{ij}}+P_{E_{ij}}\times C_{RE_{ij}}}^{\textbf{Invisible}} \quad (4.2)$$

表 4-1 鋼橋風險因子列表

風險類別	風險因子	橋梁維護機率	橋梁維護成本	斷橋風險機率	斷橋之重建成本
可視老化	構件老化	P_{MD}	C_{MD}	—	—
潛勢危害	塗裝劣化	P_{MC}	C_{MC}	—	—
	洪水	P_{MS}	C_{MS}	P_S	C_{RS}
	地震	P_{ME}	C_{ME}	P_E	C_{RE}

4.2 式中:

i:某段期間橋梁的使用年限，本研究預設 i=1~50 年每 5 年評估一次

j:為同一橋管單位之第 j 座橋梁

P_{MD}:元件老化造成橋梁損壞之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Deterioration)。

P_{MC}:塗裝劣化維護機率值(Maintenance Probability Caused by Coating)。

P_{MS}:洪水造成橋梁損壞之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Scour)。

P_{ME}:地震造成橋梁損壞之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Earthquake)。

C_{MD}:元件老化造成橋梁損壞之維護成本(Maintenance Cost of Deterioration)。

C_{MC}:全面塗裝之維護成本(Maintenance Cost of Coating)。

C_{MS}:洪水造成橋梁損壞之維護成本(Maintenance Cost of Scour)。

C_{ME}:地震造成橋梁損壞之維護成本(Maintenance Cost of Earthquake)。

P_S:洪水造成斷橋之風險機率值 (Bridge Broken Probability of Scour)。

P_E:地震造成斷橋之風險機率值(Bridge Broken Probability of Earthquake)。

C_{RS}:因洪水造成斷橋之重建成本(Rebuilding Cost of Scour)。

C_{RE}:因地震造成斷橋之重建成本 (Rebuilding Cost of Earthquake)。

4.1.2 鋼橋風險評估模式

1.可視危害(Visible)部分

台灣四處環海且位處地震帶上，加上多高山河流以及颱風豪雨等環境因素，皆會對鋼結構橋梁產生嚴重的損害；確認風險因子後，即可分析各個風險因子會對鋼結構橋梁所造成的損壞維護或是重建的機率。

(1)構件老化

構件老化對於鋼結構橋梁來說，擁有許多的不確定因素，本研究首先將鋼結構橋梁依據不同的結構形式分成七種橋梁類型，再根據橋梁管理單位對橋梁檢測的部位，區分出21個橋梁構件來探討，接著使用統計分析的概念，找出在鋼結構橋梁未維護的狀況下，其鋼結構橋梁構件的狀態指標(Ici)與時間的關係，統計出鋼結構橋梁構件狀況指標的下降平均值與標準差，最後運用蒙地卡羅模擬得到各個構件老化的發生機率，可視危害中構件老化之風險機率評估流程如圖4.3所示。

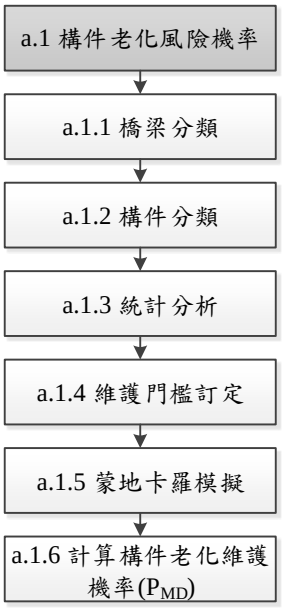


圖 4.3 構件老化風險機率評估流程圖

①橋梁分類

將鋼結構橋梁依照TBMS上所定義的結構形式，分為箱型橋、桁架

橋、梁式橋、剛架橋、π橋、拱橋、斜張橋，共七種類型(表4-2)，本研究假設同類型的鋼結構橋梁因為結構形式相同，其構件老化下降狀況相似。

表4-2 橋梁檢測紀錄分組分布表

橋型	檢測數量
拱橋	437
箱型橋	1588
梁式橋	1330
斜張橋	136
桁架橋	66
剛架橋	278
π橋	265

②構件分類

本研究定期維護成本主要討論於可預期不確定成本方面，可預期不確定成本屬於構件及元件老化，所需要花費維護費用成本，使此構件保有服務性能或是載重性能。橋梁構件及元件的分類本研究採用D.E.R.&U.檢測系統中的分類，將橋梁構件分成為21個構件，如下表4-3所示，1至11項屬於橋梁附屬設施，12至20項為橋梁主要及次要構件。

表4-3 橋梁D.E.R&U構件及構件分類

1.引道路堤	11.欄杆及護牆
2.引道護欄	12.橋墩保護設施
3.河道	13.橋墩基礎
4.引道護坡	14.橋墩墩體/帽樑
5.橋台基礎	15.支承
6.橋台	16.止震塊/防震拉桿
7.翼牆/擋土牆	17.伸縮縫
8.摩擦層(鋪面系統)	18.主構件/大樑
9.排水系統	19.副構件
10.緣石及人行道	20.橋面板
	21.其他

橋梁構件中又可分為上部結構以及下部結構，本研究主要探討於上部結構的構件老化，分別為21項中的其中8項，其中有橋面板、支承、伸縮縫、鋪面系統、防落橋裝置(止震塊/拉桿)、大樑(主構件)、護欄及排水設施等8項。上部結構的特性為不易受環境影響，而方便於研究構件單純因為時間和使用上老化所需維護的現象，減少研究下部結構容易受到環境因素帶來的不確定性。

本研究歷史資料初步選用臺北市與公路總局轄管鋼結構橋梁案例(圖4.4)，用來推算橋梁構件劣化速率、維護費用與構件狀況指標關係、設定構件維護門檻值。主要歷史資料為定期檢測資料，定期檢測是為掌控橋梁結構健全度，並提早發現及了解造成功能降低之損傷及其原因。定期檢測頻率不得少於兩年一次，若是位於完工的五年內之新建橋梁仍需進行經常巡查，而第一次定期檢測會在完工後第五年實行。

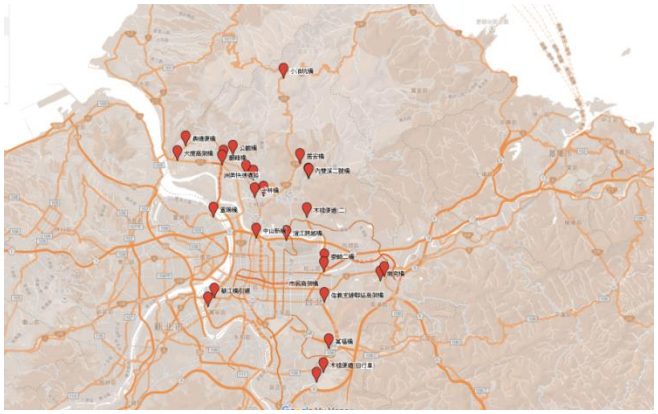


圖 4.4 位於臺北市鋼結構橋梁

定期檢測乃定期對橋梁實施之全面性檢測以徒步、工作架或是檢查車方式進行，並盡可能地接近結構物，以目視或必要之檢測儀器檢測判定橋梁狀況。檢測判定的標準採用D.E.R.&U.系統(圖4.5)，需要判定劣化程度(D值)、劣化範圍(E值)、劣化情形對橋梁結構安全性及服務性之影像度(R值)，以及劣化構件維修的急迫性(U值)。鋼結構的劣化程度(D值)有專屬的評估表(圖4.6)，可適用於橋面板構件、上部結構、橋墩及其他附屬設施等。

檢測項目		評估值 D	E	R	檢測項目		評估值 D	E	R	檢測項目	評估值 D	E	R
1. 引道路堤	近端				5. 橋台基礎	近端				9. 排水設施			
	遠端					遠端							
2. 引道護欄	近端				6. 橋台	近端				10. 緣石及人行道			
	遠端					遠端							
3. 河道或土壤					7. 翼牆/擋土牆	近端				11. 護欄			
						遠端							
4. 引道路堤-保護設施	近端				8.面層					21. 其他附屬設施			
	遠端												

橋台或橋墩號	12.橋墩保護設施 D	E	R	13.橋墩基礎 D	E	R	14.橋墩墩體 D	E	R	15.支承 D	E	R	16.防落設施 D	E	R	17.伸縮縫 D	E	R	橋孔號	18.主要構件 D	E	R	19.次要構件 D	E	R	20.橋面版 D	E	R

圖 4.5 部分橋梁 D.E.R.&U.檢測表

檢測項目		劣化程度	D 值
上部結構、橋墩及鋼製欄杆	構件損傷(裂縫、彎曲、變形)	H/125 或 50mm 以下之彎曲或構件有局部之變形。	2
		• 構件有裂縫，或斷面減少。 • H/125 或 50mm 以上之彎曲或主構件有明顯之變形。	3
		• 構件損傷持續進行，可能造成第三者之障礙。 • 構件之彎曲、變形超出規範之容許值。	4
	銲接處損傷	銲接處油漆裂紋。	2
		銲接處有損傷。	3
		銲接處有裂縫。	4
	螺栓損傷、欠缺、鬆動	• 主構件 1 個接合處未滿 5%或未滿 5 個螺栓鬆動。 • 次構件 1 個接合處未滿 10%或未滿 5 個螺栓鬆動。	1
		• 1 個結構物未滿 10 個及 1 個接合處 1 個螺栓的損傷、欠缺。 • 主構件 1 個接合處未滿 20%或 10 個螺栓鬆動。 • 次構件 1 個接合處 10~35%間或 5~9 個之螺栓鬆動。	2
		• 1 個結構物 10 個以上或 1 個接合處 2 個以上螺栓損傷、欠缺。 • 主構件 1 個接合處 20%以上或 10 個以上之螺栓鬆動。 • 次構件 1 個接合處 35%以上或 10 個以上之螺栓鬆動。	3
		螺栓脫落或持續性脫落	4
	生銹或腐蝕	點狀生銹。	1
		• 大範圍生銹。 • 點狀腐蝕。	2
		腐蝕深度達鈑厚 10%以下。	3
		腐蝕深度達鈑厚 10%以上。	4
	異常聲音 異常振動	有異常之金屬吱嘎聲音發生。	2
		主構件有搖晃之情形，於橋面站立時感覺有異常振動，或因車輛之衝擊有大的異常聲音發生。	3
	積水、漏水	少許積水或漏水。	1
		顯著積水或漏水。	2
	構件間距異常	間距不足。	2
		梁端接觸或有接觸可能。	3
	其他損傷	顯著功能阻礙。	3

圖 4.6 部分鋼結構劣化程度 D 值判斷表

D.E.R.&U.評估法中各別分數所代表的涵義如表4-4。

表4-4 D.E.R.&U.數值含意

	0	1	2	3	4
D	無此項目	良好或微	尚可	差	嚴重損壞
E	無法檢測	0~10%	10%~30%	30%~60%	60%~100%
R	無法判定重要性	微	小	中	大
U	無法判定急迫性	例行維護	3 年內維護	1 年內維護	緊急維護處理

從已知評估表分數中，需要制定出一個可以代表此構件的服務性能或是載重性能，簡化後的分數來表示，有許多種的表示方式。分別為各構件狀況指標Ic_i(式4.3)、橋梁整體狀況指標CI(式4.4)、優選指標PI(式4.5)。

橋梁各構件指標Ic_i：

$$Ic_{ij}=100-100\times\frac{(D_{ij}\times E_{ij})\times R_{ij}}{(4\times4)\times4}\ ,\ Ic_i=\frac{\sum_{j=1}^{n}Ic_{ij}}{n} \qquad (4.3)$$

橋梁整體狀況指標 CI：

$$CI=\frac{\sum_{i=1}^{21}(Ic_i\times w_i)}{\sum_{t=1}^{21}w_i} \qquad (4.4)$$

其中w_i為橋梁各別構件所代表的權重(表4-5)，可經由經驗、橋址環境、橋梁著重部分判斷加以改動。

優選指標 PI：

僅考慮5~6、12~16、18~20項的構件進行權重分配

$$PI=\frac{\sum_{i=5}^{6}(Ic_i\times w_i)+\sum_{i=12}^{16}(Ic_i\times w_i)+\sum_{i=18}^{20}(Ic_i\times w_i)}{\sum_{i=5}^{6}w_i+\sum_{i=12}^{16}w_i+\sum_{i=18}^{20}w_i} \qquad (4.5)$$

表4-5 橋梁各構件CI及PI值的權重

橋梁構件	w_i	橋梁構件	w_i
1.引道路堤	3	12.橋墩保護設施	6
2.引道護欄	2	13.橋墩基礎	8
3.河道	5	14.橋墩墩體/帽樑	7
4.引道護坡	3	15.支承	5
5.橋台基礎	6	16.止震塊/防震拉桿	5
6.橋台	5	17.伸縮縫	6
7.翼牆/擋土牆	5	18.主構件/大樑	8
8.摩擦層(鋪面系統)	3	19.副構件	6
9.排水系統	4	20.橋面板	7
10.緣石及人行道	2	21.其他	1
11.欄杆及護牆	3		

③統計分析

本研究研究目標為上部結構而非整體性的橋梁狀態評估，故採用

橋梁構件狀況指標Ic_i值，而並非CI值或是PI值。並且發現在歷年來的檢測資料中，若採用CI值或是PI值進行橋梁整體狀態的評估，分數通常會趨近於90分以上，深入發現即便某構件嚴重損壞，也會因為其他構件未加以損壞，而分數加權平均後無法顯著地找出此橋梁已經需要進行維護的程度。

將各橋梁各個構件在不同年度下的Ic_i值以表格方式加以彙整(表4-6)，並且觀察在逐年下橋梁元件應當老化，而Ic_i值有可能會下降，若發現有分數上升情形，以及橋梁檢測表歷年資料中有編列維護紀錄，表示有進行維護。

表4-6 編號21橋梁構件Ici值變化

檢測年代	95	96	100	102	104
橋面板	57.8125	90.625	100	100	96.875
支承	100	100	100	100	96.875
伸縮縫	100	96.875	100	100	100
摩擦層	100	100	100	100	96.875
防震拉桿	100	100	100	100	100
主結構	90.625	100	100	100	96.875
欄杆及護牆	100	100	100	100	96.875
排水設施	100	100	100	100	96.875

將各橋梁中進入維修時的Ic_i值分數彙整如下表4-7，未發生維護紀錄的構件，將會採用專家建議構件維護門檻值補足，用於後續建立與專家建議之維護門檻值如表4-8，一起進行比較。

表4-7 部份各橋梁各構件進入維修時Ici門檻值

編號	橋面版	支承	伸縮縫	摩擦層	止震塊	主結構	護欄	排水設施
1	90	85	90	90	90	96.875	90	90
2-西	96.875	85	90	90	90	85	90	90
2-東	96.875	85	90	90	90	85	96.875	96.875
2A	90	85	93.75	90	90	85	90	90
2B	90	85	90	90	90	85	96.875	90
2C	96.875	85	90	90	90	85	90	90
2D	90	85	90	90	90	85	90	90
2E	96.875	85	90	90	90	85	93.75	87.5
2F	96.875	85	96.875	90	90	93.75	90	93.75
2H	90	85	96.875	71.875	90	96.875	90	96.875
2EC	90	85	90	90	90	85	90	90
2ED	90	85	96.875	90	90	96.875	90	90
2U	90	85	96.875	98.4375	90	96.875	96.875	90
3	90	96.875	96.875	90	90	85	90	90
4	81.25	85	90	90	90	81.25	90	90
5	90	85	90	90	90	85	90	90

④維護門檻訂定

利用上述進入維護時分數表格(表4-7)整理後與專家建議值相互比對，有助於推估多年後構件指標分數下降情形時，精確度的上升。選定實際發生維護時的構件Ic_i值最大值為上限，以及將專家建議之維護門檻值作為下限，作為產生維護門檻均勻分布的標準(表4-8)。

表4-8 整合各橋梁構件進入維修時Ici值

構件/元件	橋面板	支承	伸縮縫	鋪面系統
有維護變動值之平均值	92.849	95.313	89.142	91.992
有維護變動值之最高值	96.875	96.875	98.75	98.4375
有維護變動值之最低值	81.25	85	43.75	71.875
專家建議門檻	90	85	90	90
構件/元件	防落橋裝置	大樑	護欄	排水系統
有維護變動值之平均值	84.75	91.563	91.484	94.196
有維護變動值之最高值	90	96.875	96.875	96.875
有維護變動值之最低值	81.25	71.875	81.25	87.5
專家建議門檻	90	85	90	90

⑤貝氏更新推估年維護次數

本研究採用貝氏更新定理，主要參考[陳屏甫，2005]之中採訪專家所得出混凝土橋梁以及鋼結構橋梁各構件的劣化速率，以及各構件狀況指標值低於多少分時即須進入維護的維護門檻值(表4-9、4-10)。

表4-9 專家建議之構件/元件劣化速率

橋梁構件	混凝土橋梁		鋼結構橋梁	
	最速使用年限(r0)	最緩使用年限(r1)	最速使用年限(r0)	最緩使用年限(r1)
橋面板	1.2	0.56-	1.6	0.49
支承	1.41	0.62	1.41	0.62
伸縮縫	3.75	0.88	3.75	0.88
鋪面系統	8.57	3.87	8.57	3.87
防落橋裝置	1.26	0.53	1.26	0.53
大樑	1.2	0.56	1	0.4
護欄	2.31	0.69	2.31	0.69
排水系統	10.91	1.1	10.91	1.1

資料來源：[陳屏甫，2005]

表4-10 專家建議之維護門檻值

橋梁構件	專家建議門檻值
橋面板	90
支承	85
伸縮縫	90
鋪面系統	90
防落橋裝置	90
大樑	85
護欄	90
排水系統	90

資料來源：[陳屏甫，2005]

結合專家建議之維護門檻值以及構件年期劣化速率，依照下列(式4.6)推估出年維護次數，(式4.7)則是假設最速劣化速率與最緩劣化速率相距四倍標準差，故以此計算。

$$AD=\frac{FD+SD}{2}\text{，年平均維護次數}=\frac{AD}{(\text{完好-界線})} \quad (4.6)$$

其中FD=專家建議劣化速率；SD=構件年期劣化速率；AD=劣化速率平均值。

$$C.O.V=\frac{\frac{(\text{完好-界線})}{FD}+\frac{(\text{完好-界線})}{SD}}{4\times\text{年平均維護次數}} \quad (4.7)$$

以編號10號橋為例(表4-11)，並且稱此為事前分布。

表4-11 編號10號橋推估出年平均維護次數

構件項目	完好	界限	FD	SD	AD	年平均維修次數	C.O.V
橋面板	100	90	1.6	0.49	1.045	0.10	0.27
支承	100	85	1.41	0.62	1.015	0.07	0.19
伸縮縫	100	90	3.75	0.88	2.315	0.15	0.31
鋪面系統	100	90	8.57	3.87	6.22	0.62	0.19
止震塊	100	90	1.26	0.53	0.895	0.09	0.20
大梁	100	85	1	0.4	0.7	0.05	0.21
護欄	100	90	2.31	0.69	1.5	0.15	0.27
排水設施	100	90	10.91	1.1	6.005	0.60	0.41

由於專家的建議無法反映各橋梁實際情況，為解決此問題採用貝氏更新，結合專家建議與既有之橋梁歷史檢測資料，建立構件年維護次數的事後分布(圖4.7)。

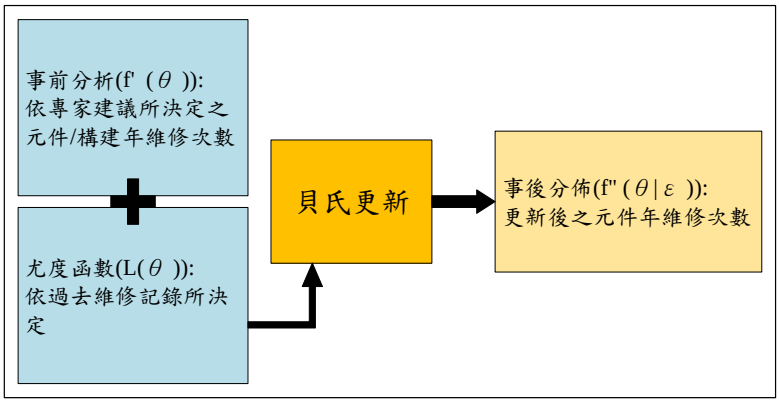


圖 4.7 貝氏更新流程圖

$$f_M(\mu)=\frac{v(v\mu)^{k-1}e^{-v\mu}}{\Gamma(k)} \quad (4.8)$$

$$E(\mu)=\frac{k}{v} \quad , \quad Var(\mu)=\frac{k}{v^2} \quad (4.9)$$

Gamma分布可依(式4.8)建立，(式4.9)則為平均值與變異數，其中μ為年維護次數，而k及v分別為Gamma分布尺度及形狀相關之係數，利用貝氏更新加入觀察t年間所維護次數x之既有歷史資料如(圖4.8)所示。

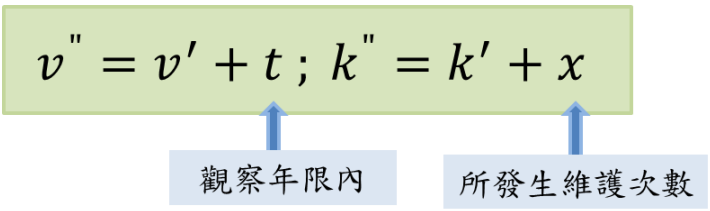


圖 4.8 運用橋檢資料貝氏更新

最後採用貝氏更新，得到各元件參考歷史橋梁檢測資料後的年維護次數事後分布(表4-12)，此分布屬於Gamma分布，而後用於推估n年

後構件狀況指標所下降的分數情形，並且推估維護費用。

表4-12 編號10橋梁貝氏更新後的年維護次數

專家建議年維護次數			事前分佈		事後分佈			
觀察構件	AVG	C.O.V	k’	v’	k"	v"	Avg	Cov
橋面板	0.10	0.27	14.18	135.7	16.18	96.8	0.17	0.25
支承	0.07	0.19	26.41	390.3	27.41	337.3	0.08	0.19
伸縮縫	0.15	0.31	10.41	67.4	11.41	68.2	0.17	0.30
鋪面系統	0.62	0.19	28.02	45.0	28.02	57.1	0.49	0.19
止震塊	0.09	0.20	24.05	268.7	24.05	280.7	0.09	0.20
主結構	0.05	0.21	21.78	466.6	22.78	400.9	0.06	0.21
護欄	0.15	0.27	13.72	91.4	13.72	103.5	0.13	0.27
排水設施	0.60	0.41	6.00	9.98	7.00	30.7	0.23	0.38

$$k'=\frac{1}{C.O.V^2}\text{，}v'=\frac{k}{AVG} \qquad (4.10)$$

$$k''=k'+x\text{，}v''=v'+t \qquad (4.11)$$

$$Avg=\frac{k''}{v''}\text{，}Cov=\frac{1}{\sqrt{k''}} \qquad (4.12)$$

⑥計算構件老化維護機率

本研究使用貝氏更新，事前分佈的設立選用共軛先驗分佈(Conjugate Prior Distribution)，特性為事前和事後分佈皆為同一分佈類型，有著計算簡單、快速具有解析解等優點，因此常被採用的事前分佈之一。Gamma分佈常用於描述一段時間內，事件所發生的次數，故選用此共軛分佈來描述年維護次數分佈。

⑦構件老化維護成本

單一橋梁構件維護費用制定困難，許多研究採用三種不同程度的維修種類來表示，如(Hegazy et al，2004)分別為中度維修、重度維修和置換等，花費成本分為初始成本的28.5%、65%、100%，並且對應不同

的回覆構件狀況指標等級。本研究採用歷史資料中，此橋梁曾經發生維護紀錄時，挑選維護費用最高的那筆，來代表此橋梁單一構件的維護單次費用。若歷史橋梁檢測資料中，此橋梁並無此構件的維護紀錄，利用量體相近的橋梁歷史檢測資料來補足所缺，最後可以得到各橋梁各構件單次維護成本。如表4-13及表4-14所示編號10的橋梁在歷史橋梁檢測資料中有三筆排水系統的維護紀錄，本研究選用最高費用340,000元為此構件維護一次的維護成本。

表4-13 編號10橋排水系統歷史維護資料

	位置	維修工項	數量	單位	單價	複價(元)	維修年份	構件分數	上升分數
排水設施	S2	清除淤塞的排水孔	680	個	500	340,000	93 年	81.25	18.75
	S2	清除淤塞的排水孔	4	個	500	2,000	103 年	93.75	6.25
	-	洩水孔清疏	15	處	425	6,375	104 年	93.75	6.25
		排水管更換	3	M	440	1,320			
	小計					7,695			

表4-14 編號10橋各構件單次維護費用整理

定期維護項目	維護構件單次費用(元)
橋面板	228
支承	70,400
伸縮縫	212,494
鋪面系統	59,675
防落橋裝置	9,000
大樑	28,515
護欄	28,496
排水系統	340,000

若欲觀測橋梁並無該項構件之維護紀錄，則採用相近量體及用途橋梁構件維護紀錄補足。如表4-15編號10號橋梁可以採用編號11號橋梁的構件維護紀錄填補所缺之維護單價資料。

表4-15 採用相近量體或用途橋梁資料補足

編號	橋板投影面積m^2	類別	編號	橋板投影面積m^2	類別
23	28.11	一般橋梁	16	4587.2	跨河大橋
3	37.37	一般橋梁	1	5367	跨河大橋
4	48.36	一般橋梁	15	5368	車行陸橋
5	50.18	一般橋梁	21	5547	車行陸橋
26	50.78	一般橋梁	18	5610	車行陸橋
24	90.3	一般橋梁	11	7498	跨河大橋
22	96.9	一般橋梁	10	8620	跨河大橋
14	201.83	一般橋梁	13	11799	車行陸橋
3	416.64	一般橋梁	8	20831.5	車行陸橋
25	1801	車行陸橋	9	60586	車行陸橋
20	1929.5	一般橋梁	7	113336	車行陸橋
6	2280	跨河大橋	2	150427	車行陸橋
12	3353.68	一般橋梁	19	154275	車行陸橋

⑧考慮因子與實際維護情形之修正係數

本研究主要考慮八項構件/元件之劣化情形,推導出所需維護成本,但是實際上的橋梁維護費用中，包含二十一項構件加上施工所需機具及施工架、雜物清理及其他等。故本研究將各橋梁中完整的維護費用彙整(表4-16)，並且簡單敘述此次的維護工項說明，再標出有關鋼結構塗裝的費用來源，以及防蝕塗裝施作所需機具費用。

表4-16 各橋梁歷史年維護經費(部分表格)

編號	維修年份	維護費用	簡易維修工項說明
1	101	24,029	工地處理＋高空作業車$18400、聚氯乙烯 B 型套管$440、防蝕塗裝$4171
2	99	163,545	一般鋼料塗裝$113978、結構用混凝土$31500、混凝土修復，鋼筋鏽蝕處理，水刀鑿除$7686、伸縮縫修復$7700
	101	1,144,139	護欄隔音牆更新(43 萬)、建議加高混凝土護座(10 萬)、鋼板除鏽塗裝(8.7 萬)、混凝土修補(7 萬)、植物清疏(7.3 萬)、混凝土修補(6.8 萬)、稅加其它$264032
	103	773,529	工地處哩，高空作業車租用(21 萬)+防蝕塗裝，水刀處理+油漆塗裝(15 萬)=36 萬、隔音牆蓋板維修 9.6 萬、混凝土修復，鋼筋除鏽處哩，水刀鑿除 8.6 萬、一般鋼料塗裝$40373
3	94	17,549	鋼版修復$5000+施工架+工地處理+交通維持=$17549
	100	72	植生移除
	104	9,165	鋼梁除鏽塗裝$3150+施工架$1200=$4350、鋼板除鏽及油漆塗裝$300
6	100	4,770	混凝土修補 1862 元、鋼板除鏽塗裝 963 元、隔音板除鏽塗裝 352 元，註;主構件$963
	101	14,652	鋼板除鏽塗裝$10835、混凝土修補$1862、隔音板除鏽塗裝$352、排水設施清疏$500;註：主構件$10835
	103	32,314	防蝕塗裝，水刀處理+油漆塗裝 1.5 萬+防蝕塗裝手工處理+油漆塗裝$634+施工架及安全護網$11981=$27615、混凝土修復 2752 元
7	97	1,060,943	更換合成橡膠單元 54 萬、鋼板除鏽塗裝 4.3 萬+施工架鋼管$60000、工地處理大型機具$51000=15.4 萬、修復維修步道 6 萬、稅$24 萬
	99	4,191	聚氯乙烯塑膠套管及配件 2142 元、防蝕塗裝，水刀處理+油漆塗裝 1729 元
	100	209,618	防蝕塗裝，手工處理+油漆塗裝 15.8 萬、洩水孔清疏 1.4 萬
	102	771,121	防蝕塗裝，水刀處理+油漆塗裝 26.2 萬+工地處理高空作業車租用$19.4 萬=45.6 萬、伸縮縫修復 6.9 萬、洩水孔清疏 2 萬、交通維持 21 萬
8	95	627,471	伸縮縫更新 45.5 萬、修補大於 0.3mm 的裂縫$27000、稅$144801
	97	508,114	修補裂縫 17 萬、鋼筋除鏽，修補混凝土 10 萬、伸縮縫更新 11 萬、保護塗層$279、稅$117257;註：橋面版$100000
	98	622,329	伸縮縫更新 25 萬、裂縫修補 8 萬、鋼筋除鏽，混凝土修補 7.6 萬;註：橋面版$7.6 萬
	100	1,164,384	植生移除 69 萬、混凝土修復，鋼筋鏽蝕處理，水刀鑿除 29 萬、鋼構護欄修復 9.5 萬、結構混凝土 6 萬
	102	637,381	混凝土修復，鋼筋鏽蝕處哩，水刀鑿除 7.9 萬、金屬欄杆修復 1.7 萬，植生清除 1.5 萬
9	99	710,840	鋼筋除鏽混凝土修復 23 萬、裂縫填補 15 萬、伸縮縫更新 10 萬、鋼板除鏽塗裝 1.1 萬、隔音牆損壞修復 3.6 萬
	101	966,057	鋼筋除鏽混凝土修復 49 萬、伸縮縫更新 7.5 萬、裂縫填補 5.2 萬、鋼板除鏽塗裝 3.6 萬、護欄隔音牆損壞維修 5.4 萬
	103	450,215	防蝕塗裝水刀處理$39459+工地處理高空作業車$215406=25.4 萬、一般鋼料塗裝$17562、混凝土修復 13 萬、隔音牆修復$3.6 萬
10	101	81,484	混凝土修復$5.4 萬、防蝕塗裝手工處理$3865+工地處理高空作業車$17702=2.1 萬
	103	117,514	防蝕塗裝，水刀處理+油漆塗裝(3 萬)+高空作業車$28395=6 萬、瀝青混凝土鋪面(2.5 萬)、混凝土修復$2.7 萬

為了降低本研究所推估維護費用與實際檢測資料之間的誤差，用貝氏更新所得構件年維護次數乘上此構件單次維護費用，推估出的維護費用與歷史橋梁檢測資料彙整(表4-17)，找尋兩者之間的關係，並且制定出修正係數(式4.13)，可供後續推估更加逼近真實。

$$\text{修正係數}=\frac{\text{歷史平均年維護費用}}{\text{推估之平均年維護費用}} \qquad (4.13)$$

表4-17 歷史年平均維護費用與推估費用

橋梁名稱	歷史資料下的維護費用(元)	利用量體相近補足推估維護費用(元)	歷史紀錄/推估費用
1	24029	34048	0.71
2	416243	186934	2.23
3	2435	6410	0.38
6	12934	86498	0.15
7	340979	875672	0.39
8	444960	201228	2.21
9	425422	792940	0.54
10	148746	430357	0.35
11	312279	374398	0.83
12	37447	12839	2.92
13	150258	27840	5.40
15	41421	11267	3.68
16	47006	67256	0.70
17	57344	36987	1.55
18	168579	378716	0.45
19	2137906	318820	6.71
20	1901	59204	0.03
21	69563	32680	2.13
22	8544	16065	0.53
23	5785	2224	2.60
24	87880	47898	1.83
25	11711	41901	0.28

將此23個修正係數，以類似的分布來代表，此處假定為G.E.V廣義

極值分布(圖4.9)來表示，其中k、σ以及μ為此G.E.V分布的形狀尺度參數。而此分布後續用來推估費用時，會在最後修正整體維護費用，補足本研究僅觀測之八項考慮因子的不足。

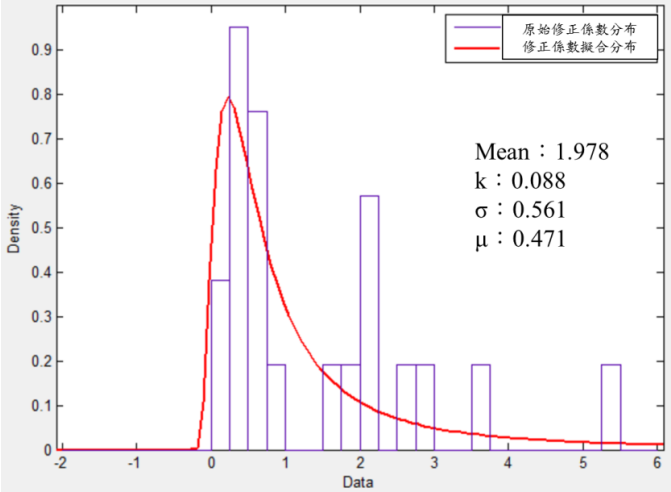


圖 4.9 修正係數分布

⑨分數所對應單次維護費用放大係數

構件狀況指數因為環境或是人為因素，將會隨著時間而劣化下降，此時則需要進行維護工作，保有或是提升此構件之性能以及服務品質。構件狀況分數若是下降的更加嚴重，維護費用應隨之上升，本研究假設一個分數所對應維護費用關係式，將已建立的各構件單次維護費用，與多年劣化後的構件分數做為結合(圖4.10)。

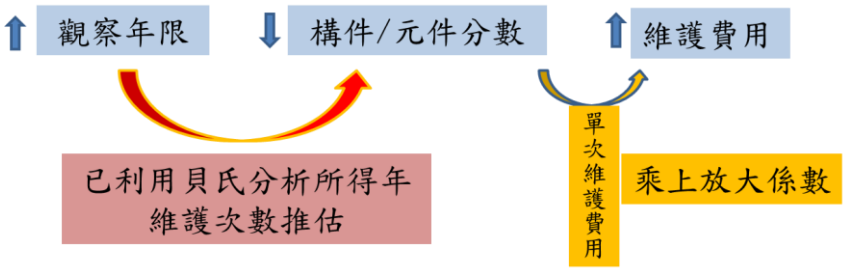


圖 4.10 改變單次維護費用流程圖

從歷史橋梁檢測資料中，制訂該構件發生維護的最大費用，也就是構件最大破壞情形，所對應的費用，用來推估關係曲線。假設構件狀況指標最大破壞情形為D、E、R皆等於3，此時構件狀況分數為52.1875分，

以線性的方式先計算出最大破壞維修所需的花費。此時將構件分為主構件以及次要構件，分數下降還未使構件狀況指標低於門檻值時採用線性關係，若下降分數已使構件狀況指標分數低於門檻值，則主要構件會以向下凹的二次曲線，維護費用隨著下降分數的增加而提升，反之次要構件為向上凹的二次曲線維護費用隨著下降分數成長如(圖4.11)所示。主要構件會隨著劣化程度更加明顯，例如橋面板以及主結構的裂縫會隨著時間更加劣化明顯，而次要構件劣化程度會較為當下即可目測得知，例如排水系統或是欄杆得損壞需更換等。

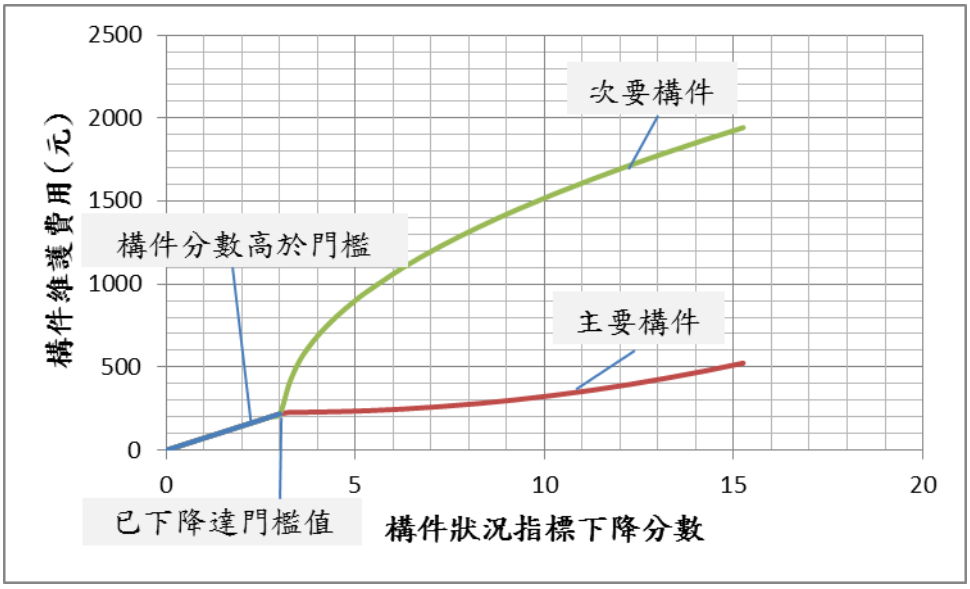


圖 4.11 下降分數對應維護費用上升

⑩定期維護成本

前面由貝氏更新所得知各構件年維修次數的事後分布，已知的年維護次數Gamma分布，以及由門檻值均勻分布亂數產生的構件維護門檻值，此均勻分布門檻值上界取構件歷史維護分數最高值P，下界為專家建議門檻值K，完好狀態分數與門檻值分數的差值。為了使年維護次數與分數下降結合，本研究將年維護次數與門檻值推估出的下降分數，兩者相乘，計算出該年的下降分數，再以完好狀態分數減去每年下降分數，得到n年後的分數機率分布f(x)，如(式4.14)，但由於此兩分佈分別為Gamma分佈以及均勻分布，所以採用蒙地卡羅方法進行計算出新的

機率分佈。

$$f(x)=\text{劣化後構件分數機率分布} \qquad (4.14)$$

建立分數所對應的維護費用關係式(式 4.15)，為上一小節所提：

$$C(x)=\text{劣化構件分數與維護經費關係} \qquad (4.15)$$

該構件或元件在 n 年劣化分數下降後，所對應之維護費用(式 4.16)為：

$$\text{Cost}=\int_0^{100}[f(x)\times C(x)]dx \qquad (4.16)$$

2.潛勢危害(Invisible)部分

(1)塗裝劣化

防蝕塗裝為鋼結構橋梁生命週期成本中的一大開銷，在許多研究混凝土與鋼結構橋梁兩種材料建造策略之評估中，鋼結構橋梁因為多了防蝕塗裝費用，生命週期成本費用會高於混凝土橋梁，而建議採用混凝土作為主結構的材料的方案。並且防蝕塗裝此維修工項，需要施工機具或式施工架的輔助，此費用在歷史橋梁檢測資料中明顯的反映出，該費用極高，不應該將此忽略。所以在整理歷史維護紀錄中，標記出發生防蝕塗裝此工項時，所需的施工機具花費、以及生產體力工成本。

彙整各橋梁歷年檢測資料中防蝕塗裝所需生產體力工成本，發現此成本佔的比例不高，而所需的施工輔助機具為高空作業車、施工架及護網。在大型多匝道的橋梁中(表4-18)，大多採用高空作業車的施作，其餘橋梁則是採用施工安全架跟鋼管及護網為主(表4-19)。

表4-18 大型橋梁防蝕塗裝對應輔助機具費用比值

編號	年份	防蝕塗裝面積 M2	單價	複價	高空作業車天數	單價	費用	輔助機具及施工費用/防蝕塗裝費用
2	103	248.27	622.38	154518	25	8616	215406	1.16
		104.3	387.1	40374.53	油漆防汙網 352	28.72	10125	
		小計		194893	小計		225532	
7	97	33.5	1300	43550	施工機具費用		111000	2.55
	102	369.72	711.06	262893	20	9708-	194160	0.74
9	103	63.4	622.38	39459	25	8616	215406	3.83
		45.37	387.1	17563	油漆防汙網	28.72	3124	
		小計		57022	小計		218530	
10	104	40.16	759	30481	3	10790	32370	1.06
	103	45.16	684	30889	3	9465	28395	0.92
	101	3.91	733	2866	2	8851	17702	6.18
11	103	5700	700	3990000	7	9465	66255	1.56
					施工架及防護網 5324	1155	6149220	
19	103	127.67	684	87326.28	10	9465	94650	1.08
							Avg	2.00

表4-19 其他橋梁防蝕塗裝對應輔助機具費用比值

編號	年份	防蝕塗裝面積 M2	單價(元)	複價(元)	施工架數量	單價(元)	費用(元)	輔助機具及施工費用/防蝕塗裝
6	103	26	704	18318	施工架安全防汙網		12500	0.68
12	97	78	1300	101400	施工架 78	300	23400	0.23
13	94	88	613	53944	施工架 50	299	14950	0.28
16	103	2	1190	2380	施工架 5	399	1995	0.84
20	104	1.07	1500	1605	16	300	4800	2.99
21	98	1.48	1300	1924	30	300	9000	4.68
21	100	0.7	531.23	371.861	-	-	-	-
21	104	14.5	711	10309.5	施工架 40	449.48	17979.2	1.74
23	1052	3	803	2409	施工架 6	449.48	2696.88	1.12
							Avg	1.57

計算防蝕塗裝所需額外的施工費用，採用橋梁歷史檢測資料中紀錄施工費用塗裝費用之比值，若有多筆資料則加以平均，將此比值用於已計算出來的塗裝費用，便可得知所需施工機具帶來的成本花費。某些橋梁沒有防蝕塗裝施作的記錄的話，則判斷需要高空作業車還是施工架及護網後，參考其他施工費用與塗裝費用之比值進行推估。以編號10號橋為例(表4-20)。

表4-20 編號10號橋防蝕塗裝與高空作業車

橋梁編號	10		
年份	104	103	101
防蝕塗裝面積 m2	40.16	45.16	3.91
單價(元)	759	684	733
費用(元)	30481	30889	2866
高空作業車天數	3	3	2
單價(元)	10790	9465	8851
費用(元)	32370	28395	17702
生產體力工費用(元)	615	108	346
輔助機具及施工費用/防蝕塗裝費用	0.94	1.09	0.73
Avg	0.73		

已知輔助機具及施工費用與防蝕塗裝費用之比值、生產體力工費用與防蝕塗裝費用之比值，將橋梁塗裝面積乘上此塗裝材質單價，觀察年限選定為50年，並且考慮現值法為3%情況下，推算出5年一次防蝕塗裝所需要的維護成本，包含此工項的施工費用(如圖4.12)。

塗裝單價(採用手工處理)	五年一次塗裝費用	觀察年限50年內所需塗裝次數	考慮現值法總塗裝費用
759	17031960	9	78657195.11

高空作業車費用	產體力工費	塗裝+施工費用+生產體力工	維護週期
57456702	3785955	139,899,852	5

塗裝費用乘上0.73　塗裝費用乘上0.05

圖 4.12 塗裝費用及施作費用

若採用不同塗裝系統，則其使用年限或維護週期可參考文獻[戴聿媞，2017]之建議。以塗裝系統A4及A5為例，面漆則選用氟素樹脂與聚氨酯樹脂兩種塗料規格，各系統之塗層膜厚及塗料規格如表4-21至表4-24所示。根據文獻[戴聿媞，2017]可知計算使用年限之方式為：

$$\text{塗膜使用年限}=\frac{\text{膜厚}\times 0.8}{\text{塗膜厚度消耗速率}} \quad (4.17)$$

表4-21 塗裝系統A4-1

塗層	塗料規格	塗膜厚度(μm)
底漆	無機鋅粉	80
中漆	環氧樹脂	100
面漆	聚胺脂	60
總塗膜厚度		240

表4-22 塗裝系統A4-2

塗層	塗料規格	塗膜厚度(μm)
底漆	無機鋅粉	80
中漆	環氧樹脂	100
面漆	氟素樹脂	60
總塗膜厚度		240

表4-23 塗裝系統A5-1

塗層	塗料規格	塗膜厚度(μm)
底漆	無機鋅粉	80
中漆	環氧樹脂	180
面漆	聚胺脂	60
總塗膜厚度		320

表4-24 塗裝系統A5-2

塗層	塗料規格	塗膜厚度(μm)
底漆	無機鋅粉	80
中漆	環氧樹脂	180
面漆	氟素樹脂	60
總塗膜厚度		320

計算出塗裝系統中各塗層之使用年限，為了讓推估之使用年限更接近實際塗膜使用狀況，需乘上一修正係數0.53[戴聿媞，2017]，再將各塗層之年限進行加總,即可得到整個塗裝系統防蝕性能之使用年限。

面漆採用氟素樹脂及聚氨酯樹脂，其於A4及A5塗裝系統皆為60 μm，但其塗刷過程共分兩道，第一道屬於面漆，第二道則歸類於中塗漆，因此實際面漆塗膜厚度為30 μm。氟素樹脂之塗膜厚度消耗速率為1 μm/ 年；聚氨酯樹脂之塗膜厚度消耗速率為2 μm/年[戴聿媞，2017]。經上述公式計算，得出氟素樹脂面漆之使用年限為24年；聚氨酯樹脂面漆之使用年限為12年。

中塗漆為環氧樹脂加上第二道面漆，A4塗裝系統膜厚為環氧樹脂100 μm加上第二道面漆30μm，其總膜厚為130 μm；A5塗裝系統膜厚為環氧樹脂180 μm加上第二道面漆30μm，其總膜厚為210 μm。所有有機樹脂之塗膜厚度消耗速率為10 μm/年(戴聿媞，2017)。經上述公式計算，得出A4塗裝系統之使用年限為10.4年；A5塗裝系統之使用年限為16.8年。

底漆為無機鋅粉，在A4及A5塗裝系統皆為80 μm。其塗膜厚度消耗速率將根據交通部運輸研究所「臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」之鋅腐蝕速率資料，統計2011年至2015年數據，分北部、中部、南部及東部(表4-25)，各別得出一平均鋅腐蝕速率(μm/年)。經上述公式計算，可得出各區域之底漆使用年限，如表4-26所示，塗裝系統防蝕年限之計算將以臺灣北部區域為主，因此底漆之使用年限為9.8年。

表4-25 各區域鋅腐蝕速率試驗點之行政區

區域	試驗點之行政區
北部	基隆市、臺北市、新北市、桃園市、新竹縣、苗栗縣
中部	臺中市、彰化縣、南投縣、雲林縣、嘉義縣
南部	臺南市、高雄市、屏東縣、屏東市
東部	臺東縣、臺東市、宜蘭縣、花蓮市、花蓮縣

表4-26 各區域之鋅腐蝕速率及底漆使用年限

區域	膜厚(μm)	鋅腐蝕速率(μm/年)	底漆使用年限(年)
北部	80	6.50	9.8
中部		6.89	9.3
南部		3.28	19.5
東部		4.71	13.6

根據以上結果，可分別將面漆、中塗漆及底漆之使用年限乘上修正係數，在進行加總，即為整個塗裝系統防蝕性能之使用年限，其各塗裝系統之使用年限如表4-27至表4-30所示。此外，文獻[戴聿媞，2017]中亦提及可用光澤或色澤為量化指標，配合各自之臨界值(光澤率為20-30%；色差為15-25)以分別決定其耐候年限與美觀年限。換言之，塗裝系統之維護週期可分別利用耐候、美觀與防蝕等性能決定，並配合各性能劣化曲線與臨界值計算維護機率。

因此其塗裝機率之計算方法即為可使用年限之倒數，即為每年需要重新塗裝之機率。

表4-27 塗裝系統A4-1之使用年限

塗層	塗料規格	膜厚(μm)	防蝕年限(年)	
			單純累加	乘0.53修正
底漆	無機鋅粉	80	9.8	5.2
中塗漆	環氧樹脂+聚氨酯	100+30	10.4	5.5
面漆	聚氨酯	30	12.0	6.4
總和		240	32.2	17.1

表4-28 塗裝系統A4-2之使用年限

塗層	塗料規格	膜厚(μm)	防蝕年限(年)	
			單純累加	乘0.53修正
底漆	無機鋅粉	80	9.8	5.2
中塗漆	環氧樹脂+氟素	100+30	10.4	5.5
面漆	氟素樹脂	30	24.0	12.7
總和		240	44.2	23.4

表4-29 塗裝系統A5-1之使用年限

塗層	塗料規格	膜厚(μm)	防蝕年限(年)	
			單純累加	乘0.53修正
底漆	無機鋅粉	80	9.8	5.2
中塗漆	環氧樹脂+聚氨酯	180+30	16.8	8.9
面漆	聚氨酯	30	12.0	6.4
總和		320	38.6	20.5

表4-30 塗裝系統A5-2之使用年限

塗層	塗料規格	膜厚(μm)	防蝕年限(年)	
			單純累加	乘0.53修正
底漆	無機鋅粉	80	9.8	5.2
中塗漆	環氧樹脂+氟素	180+30	16.8	8.9
面漆	氟素樹脂	30	24.0	12.7
總和		320	50.6	26.8

(2)洪水

洪水狀況隱含了相當多的不確定性，在橋梁未來生命週期中可能會發生不同大小的洪水事件。本研究藉由TBMS歷年SSI調查記錄與水利署水位站監測記錄，統計分析找出同一河系各年度SSI下降值與當年對應之洪水重現期之關連性。並導入可靠度的觀念，以蒙地卡羅模擬橋梁受洪水影響而需維護或重建之機率，其步驟如下圖4.13：

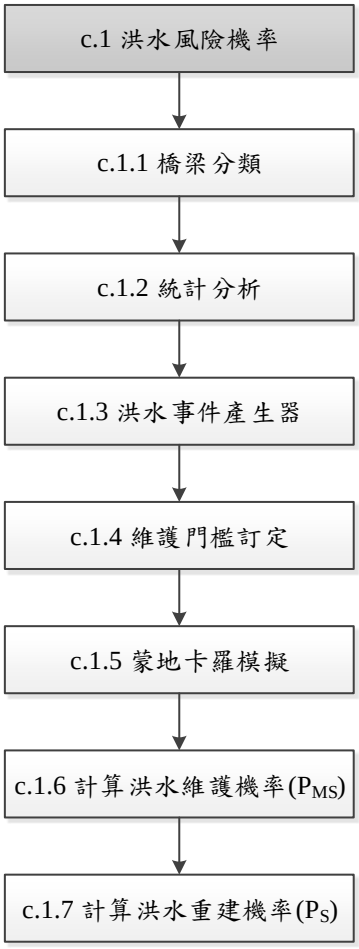


圖 4.13 洪水維護風險機率評估流程圖

①橋梁分類

因橋梁所屬流域不同，所遭遇之洪水程度與頻率亦會有所差異，將依橋梁所屬流域分群(水利署公告之中央管河川水域位置進行分類)進行研究評估(圖4.14)。

圖 4.14 台灣主要河川分布圖(水利署)

②統計分析

根據TBMS歷年SSI調查記錄與水利署水位站監測資料，找出同一河系橋梁遭遇不同洪水流量時SSI值所下降分數，並依此洪水流量所對應之洪水重現期資料(水文資訊網，2017)，統計分析找出SSI下降值與所對應之洪水重現期之關係。表4-31中的數字為此流域橋梁在遭遇該洪水重現期時，SSI對應下降分數。以淡水河跨河橋梁為例，曾經遭遇洪水重現期為五年的洪水，所對應SSI的下降值為2分。

表4-31 台灣主要河系洪水重現期對應SSI指標下降表

洪水重現期 SSI 下降數 台灣主要河系	1年	2年	5年	10年	20年	50年	100年	200年
淡水河	1	1	2	2	3	3	3	4
鳳山溪	1	1	7	9	11	14	17	19
頭前溪	1	1	2	3	4	5	6	7
中港溪	2	3	4	5	6	8	9	9
後龍溪	1	1	2	2	3	3	4	5
大安溪	1	3	5	7	10	13	16	20
大甲溪	1	3	5	7	8	10	12	13
烏溪	1	1	2	2	3	3	4	5
濁水溪	1	7	12	15	18	22	27	30
北港溪	1	4	6	7	9	11	12	12
朴子溪	1	2	4	5	6	7	8	9
八掌溪	1	2	3	4	4	5	5	6
急水溪	1	1	2	2	3	4	5	5
曾文溪	1	1	2	2	2	3	3	3
鹽水溪	1	2	4	4	5	6	6	6
二仁溪	1	1	1	2	3	2	2	4
高屏溪	1	1	2	2	3	3	3	3
東港溪	1	3	4	5	5	6	7	8
四重溪	1	3	4	5	6	7	7	8
卑南溪	1	1	1	2	2	2	3	3
秀姑巒溪	1	2	3	4	4	5	5	6
花蓮溪	1	3	4	5	5	6	7	7
和平溪	1	1	2	3	3	4	5	5
蘭陽溪	1	2	2	3	3	4	5	6

③維護門檻訂定

根據不同的洪水重現期，在橋梁未來生命週期中產生不同的洪水事件，圖4.15為50年洪水重現期強度發生次數所對應SSI值下降曲線示意圖，如發生的洪水較小下降趨勢較為和緩。本計畫根據各河系橋梁的歷史維護紀錄，以各類型橋梁最後一次維護時SSI值為維護建議門檻。本計畫將搜尋SSI值於85~90分維護門檻，未來相關管理單位可根據需求調整此門檻值，以符合現況。

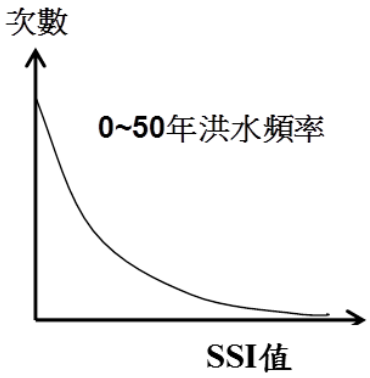


圖 4.15 發生 50 年洪水時對應 SSI 指標下降

④蒙地卡羅模擬:

將每一年度橋齡轉換為可靠度指標後，即可透過統計迴歸建立下降曲線,即可推估未來橋梁SSI值及維護發生機率。以某一座橋梁為例，該橋位於淡水河，如此即以表4-31淡水河之SSI值下降平均值與變異數作為蒙地卡羅之輸入，此階段使用蒙地卡羅模擬橋梁未來100年重現期洪水可能發生事件，計算流程如圖4.16所示，模擬計算10000次，依SSI下降趨勢曲線計算可能之SSI值，找出橋梁因洪水沖刷損壞而需維護機率。

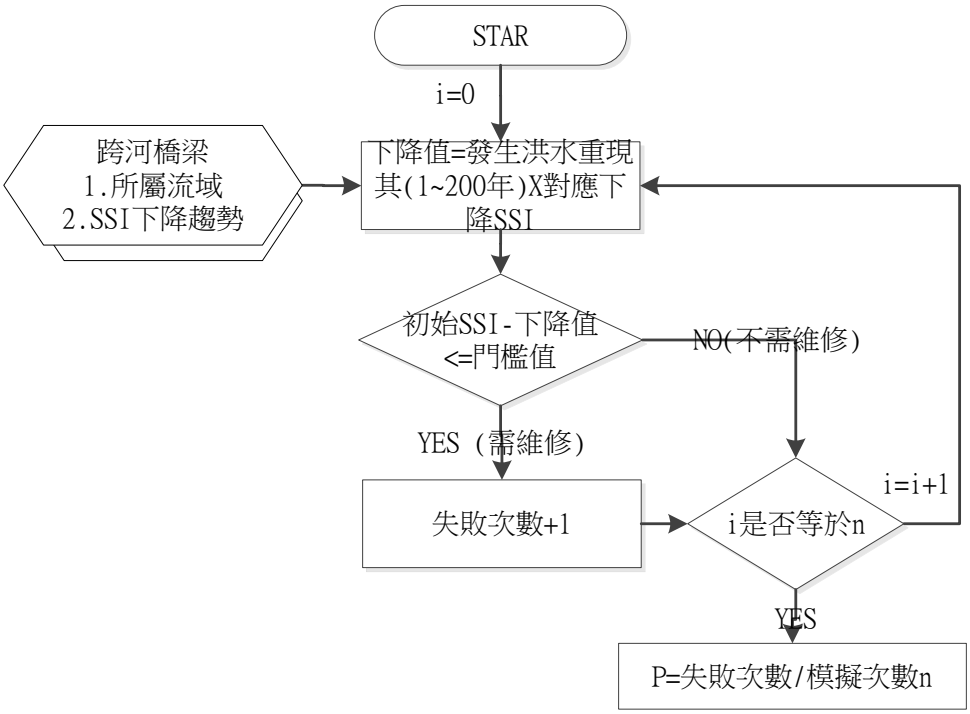


圖 4.16 洪水造成維護機率蒙地卡羅計算流程圖

⑤計算洪水維護機率(P_{MS}):

設定SSI門檻值，並以蒙地卡羅模擬，統計橋梁SSI值低於門檻值的次數，故可得洪水維護機率機率(表4-32)。

表4-32 洪水維護機率分析結果(節錄)，單位(%)

維護機率 / 橋梁ID	P_{MS5}	P_{MS10}	P_{MS15}	P_{MS20}	P_{MS25}	P_{MS30}	P_{MS35}	P_{MS40}	P_{MS45}	P_{MS50}	P_{MS55}	P_{MS60}	P_{MS65}	P_{MS70}	P_{MS75}	P_{MS80}	P_{MS85}	P_{MS90}	P_{MS95}	P_{MS100}
E01-0780-028A	0.56	1.91	39.17	97.65	99.97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
B08-0630-017A	0.47	1.89	40.37	98.09	99.98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
B08-0740-005B	0.28	1.45	29.11	96.30	99.96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
B08-0740-002B	0.55	2.34	49.67	98.74	99.99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
E05-020B-002A	0.30	1.37	28.96	95.79	99.97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
D01-002G-003B	0.42	2.22	44.82	98.40	99.98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
C01-0030-432A	0.54	2.06	48.83	99.02	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A02-0640-010A	0.47	1.90	41.71	98.26	99.98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A02-0640-010B	0.16	1.31	19.85	93.27	99.87	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A02-0640-011A	0.52	1.93	48.58	98.83	99.96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

⑥計算洪水重建風險機率(P_S):

國內橋梁興建時耐洪設計標準為100~200年，本計畫以重現期150年(取平均)作為洪水耐洪設計標準，本階段為求得橋梁因洪水而中斷之機率，故擷取蒙地卡羅模擬中，洪水事件中超過150年重現期之機率。

⑦洪水維護成本

本階段參考交通部運輸研究所計畫「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研究」[邱建國、鄭明淵等，2015]報告成果中對於洪水維護成本評估方法，建置分析流程如下圖所示，各步驟如下圖4.17所述：

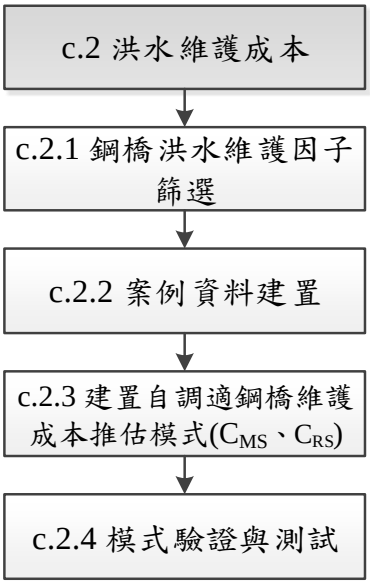


圖 4.17 洪水維護成本分析流程圖

⑧橋梁洪水沖刷維護因子篩選

參考文獻[邱建國、鄭明淵等，2015]中利用SPSS分析評估因子與維護成本相關性，從原始TBMS橋梁屬性資料107欄位中，挑選出顯著相關參數作為模式因子(表4-33)。

表4-33 洪水維修經費因子表

影響因子	關聯	單位
SSI	維修前 SSI 指標	數字
橋版投影面積	維修量體	M^2
最低橋下淨高(M)	維修量體	M
結構型式	維修方式	文字
高程*	山地與平地段考量	文字
最近維修年	物價修正用	民國年

⑨案例資料建置

本階段根據前一步驟所確認之洪水維護成本影響因子，收集跨河橋維護案例，建置維護案例資料庫(表4-34)。

表4-34 跨河橋梁維修案例(節錄)

No	沖刷指標	維修金額(原始值)	維修金額修正後	物價指數	開工年(物價修正用)	橋版投影面積(M2)(維修量體)	最低橋下淨高(M)(維修量體)	結構型式(維修方式)	高程	山地考量
1	99	1400	1502	93.24	2005	9956	11.3	梁式橋	9.85	0
2	99	2000	1711	116.86	2010	1200	4.2	梁式橋	17.21	0
3	99	3000	3000	100.00	2006	1500	3.5	梁式橋	130.52	0
4	99	3000	3000	100.00	2006	1500	3.5	梁式橋	130.52	0
5	99	3000	3697	81.14	2003	6900	5.5	梁式橋	131.25	0
6	98	4500	3974	113.24	2009	3979	8	梁式橋	111.40	0
7	99	4500	3974	113.24	2009	3979	8	梁式橋	111.40	0
8	99	5000	4279	116.86	2010	750	5.3	梁式橋	175.89	0
						•				
						•				
221	80	10592528	9717916	109.00	2007	359.3	8.4	梁式橋	18.10	0
222	50	9091000	9750107	93.24	2005	1188	6.5	梁式橋	43.78	0
223	81	12510000	10068410	124.25	2008	2530	25	剛架橋	547.86	0
224	77	10087550	10893683	92.60	2004	846	5.7	梁式橋	5.83	0
225	80	12917215	11406937	113.24	2009	11400	20	梁式橋	71.10	0
226	80	12917215	11406937	113.24	2009	11400	20	梁式橋	71.10	0
227	80	13260438	11710030	113.24	2009	39627	4.6	梁式橋	86.94	0
228	80	12072250	12947501	93.24	2005	34452	10.33	梁式橋	8.37	0

⑩建置人工智慧維護成本推估模式

本研究使用文獻[Cheng and Wu，2008]以ESIM為架構發展而成的Evolutionary Support Vector Machine Inference System「演化式支持向量機推論系統，ESIS」作為訓練與測試軟體。首先將橋梁風險衝擊影響程度推論模式所需之參數設定值輸入軟體中，利用ESIM執行自我調適程序，系統會將最後搜尋出之最佳染色體，以便使用者利用此一模式進行橋梁的風險影響程度預測。其模式分析流程如圖4.18，據此推論未來洪

水沖刷不同破壞程度下，所需之維護成本。

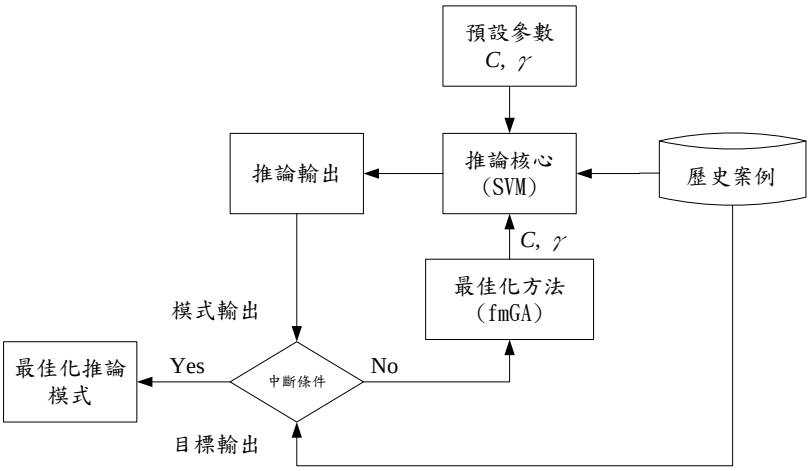


圖 4.18 人工智慧橋梁洪水維護成本推論模式

⑪模式驗證與測試

將採用十組交叉驗證，進行模式之驗證與測試，以確保洪水維護成本推論之正確性。以第一組測試案例輸出結果為例，洪水21筆測試案例模式預測值與實際值之曲線比較如圖4.19，橋梁風險衝擊影響程度預測模式搜尋結果如表4-35。

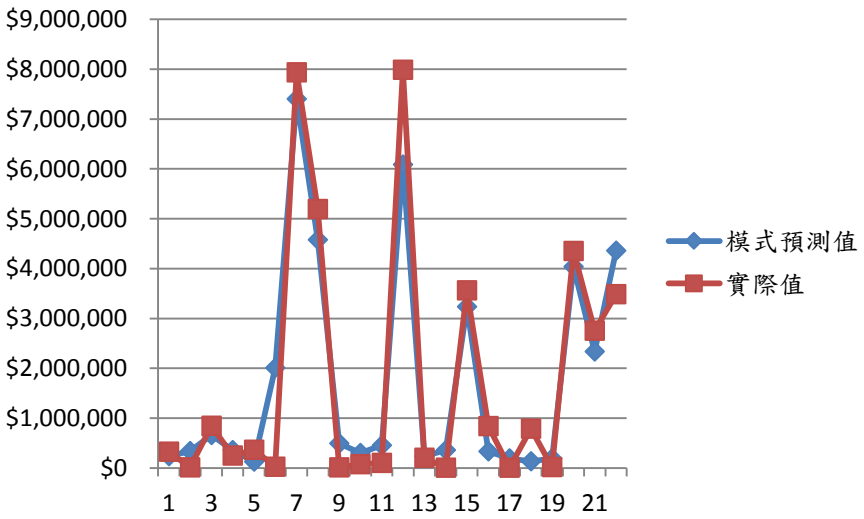


圖 4.19 橋梁風險影響程度預測值與實際值比較-跨河橋梁(洪水)

表4-35 橋梁風險衝擊影響程度預測模式搜尋結果-跨河橋梁(洪水)

ESIM模式執行結果											
案例組別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
執行迴圈 (EPOCH*ERA)	100 (Iterations)										
容錯參數C	200	185	120	126	192	16	0	0	189	192	122
核心函數參數γ	0.4001	0.8705	0.6001	0.8881	0.5221	0.9592	0.7057	0.4705	0.8141	0.9571	0.71875
模式訓練-模式均方根誤差 (RMSE)	0.09429	0.0955	0.09169	0.08754	0.09375	0.09929	0.10832	0.11578	0.0937	0.08981	0.09697
模式測試-模式均方根誤差 (RMSE)	0.09891	0.05421	0.10127	0.116	0.08188	0.09094	0.14335	0.12138	0.06751	0.09815	0.09736

⑫計算洪水維護、重建風險成本

本步驟將各維護間隔Δt之P_{MS}及P_S分別與C_{MS} 及C_{RS}相乘，即可分別求得洪水維護、重建風險成本。

(3)地震

此階段主要評估橋梁於維護間隔(Δt)時間之地震風險，參考鄭明淵學者交通部運輸研究所之橋梁通阻跨河橋梁分析模型(2011)，分析步驟依順序應用潛勢地震發生機率模型、橋梁地震損傷評估方式評估橋梁地震維護機率。詳細步驟說明如下圖4.20。

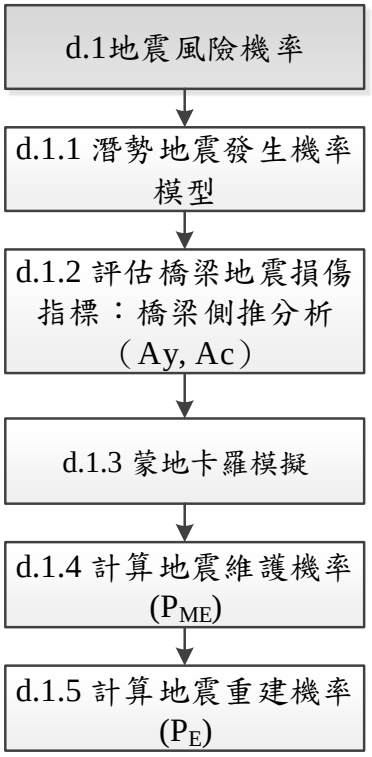


圖 4.20 地震造成維護機率計算流程圖

①潛勢地震發生機率模型

本部分參考文獻國家地震工程研究中心所執行之計「最具潛勢及歷史災害地震之強地動模擬」(2005)。本計畫採用計畫中所提出之數學機率模型，建立臺灣地區一般性震源、活動斷層之潛勢地震發生機率模型，並依機率模型推估未來臺灣地震發生次數與機率。

②橋梁地震損傷評估

本節採用相關文獻所建置之側推模式，並利用武田模式(Takeda model)進行橋梁之非線性動力分析。依橋梁所在位置之劣化影響及考慮未來可能遭遇之地震，計算其地震損傷指標。

③蒙地卡羅模擬

本研究依據蒙地卡羅模擬地震發生序列，並假設橋梁在維護間隔Δt年，未來因地震所造成的累積損傷。設定模擬次數，依橋梁累積損傷計算橋梁地震破壞機率。流程如圖4.21。設定模擬計算次數為10000次，依橋梁累積損傷計算橋梁地震破壞機率。

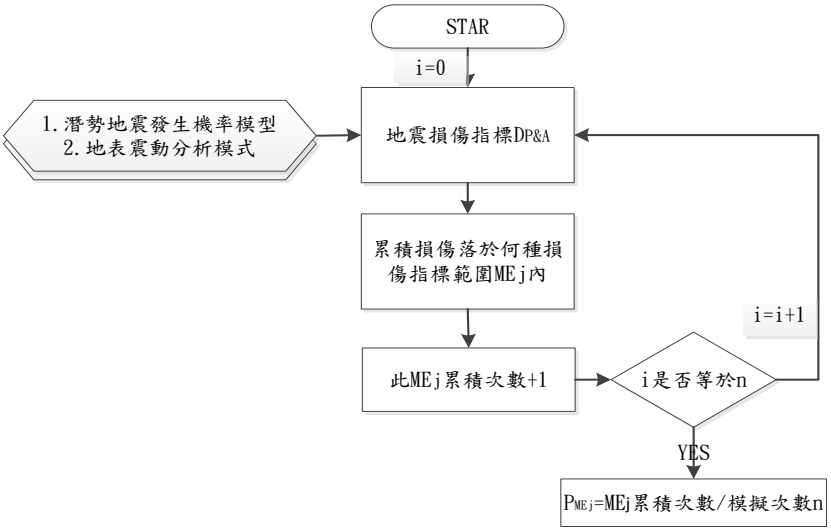


圖 4.21 地震造成維護機率蒙地卡羅計算流程圖

④計算地震維護機率(P_{ME})

Park and Ang(1985)所發展出之PA準則主要用於結構物震後損壞程度判斷依據，目前已被廣泛使用於RC結構桿件或系統；根據損傷指標($D_{P\&A}$)範圍將損壞等級分為五個等級，而與地震損傷指標關係可參照學者高橋稔明日本阪神大地震之統計分析結果[高橋稔明，2005]，如表4-36所示，PA模型之損壞指標主要依據地震作用下結構物之最大變形反應與反覆載重下遲滯迴圈之消散能量(即每一振動迴圈遲滯阻尼所消散之能量)進行評估，如式4.18所示。一般而言，當其損壞指標大於等於1.0時，則結構物可視為完全損壞或倒塌。

$$D_{P\&A}=\frac{\delta_M}{\delta_u}+\frac{\beta}{F_y\delta_u}\int dE \tag{4.18}$$

式中

$D_{P\&A}$：地震損壞指標

δM：地震作用下結構物之最大反應變位

dE：消散能量增量(Incremental absorbed hysteretic energy (excluding potential energy))

β：反覆載重影響係數(一般鋼筋混凝土建築物設為 0.05)。

表 4-36 RC 結構物之損傷指標

損壞分級(MEj)	損傷指標($D_{P\&A}$)	損壞程度之描述
無損傷 ME_1	<0.1	外部輕微裂縫非結構元件出現
輕微損傷 ME_2	0.1-0.2	結構元件出現微小裂縫
中度損傷 ME_3	0.2-0.4	隔間住上下兩端出現撓剪裂縫。非結構元件出現明損壞。
重度損傷 ME_4	0.4-0.1	混凝土橋柱之核心混凝土碎裂，箍筋嚴重鬆脫，主筋挫屈。
完全崩塌 ME_5	>1.0	混凝土橋柱之核心混凝土嚴重碎裂脫離，喪失承載能力，橋柱倒塌趨勢。

結構物若承受中度地震或非災害型地震且震後並未進行修補，當地震再度發生時，其損傷必有所累積且非線性累加。本計畫利用地震作用後所得之最大反應變位及殘留變位，依式4.19、4.20修正其結構性能；其中，(i-1)為第i次地震發生前，而i為第i次地震發生後。

$$\delta_y^i = \delta_M^{i-1} - \delta_r^{i-1} \tag{4.19}$$

$$\delta_u^i = \delta_u^{i-1} - \delta_r^{i-1} \tag{4.20}$$

本計畫除修正上述所列之降伏位移與極限位移外，其結構彈性勁

度也會依圖4.22所示進行修正。然而，本計畫主要分析橋梁於未進行任何維護下之地震風險評估，因此每次地震後之損傷指標計算，除遲滯消散能量須累計外，最大反應變形則取各地震作用下之最大值進行評估，如式4.21所示。

$$D_{P\&A}^{i}=\frac{\max\{\delta_1,\delta_2,...,\delta_i\}}{\delta_u}+\frac{\beta}{F_y\delta_u}\sum_{i=1}^{i}\int dE \tag{4.21}$$

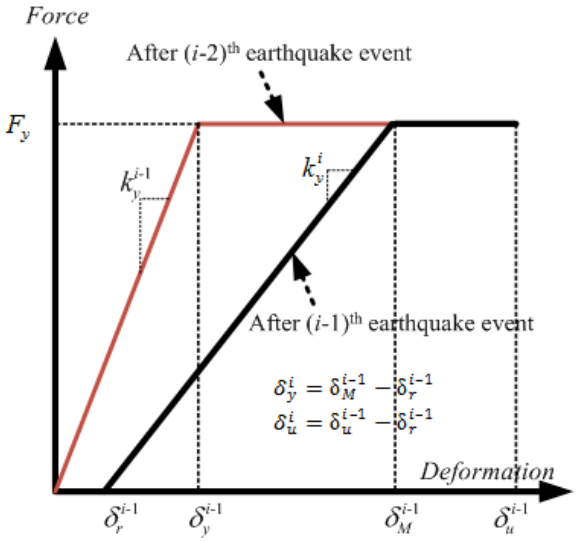


圖 4.22 震後結構性能修正示意圖

本階段應用蒙地卡羅模擬結果，繪製使用年與不同損壞分級之維護機率(P_{ME})。以圖4.23之繪製方法為例，在10000次蒙地卡羅中，橋梁於第5年時，其損傷指標($D_{P\&A}$)介於0.1~0.2的次數共7000次，則對應之損傷分級落在輕微損傷之機率為7000/10000=70%。以此類推，即可匯出圖4.23之關係曲線。

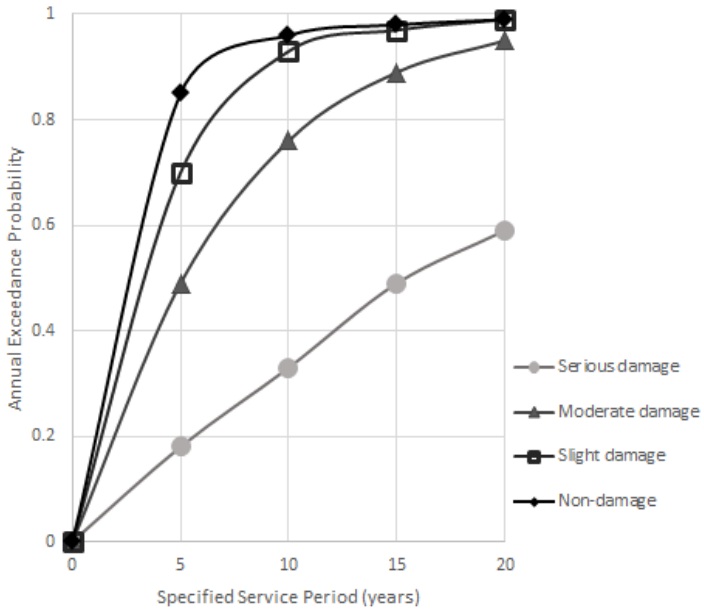


圖 4.23 未來損傷分級機率關係曲線。

⑤計算地震重建風險機率(P_E)

根據前一階段所求得之完全崩塌機率曲線，即為橋梁在不同使用年限時，因地震造成斷橋重建風險機率(P_E)的曲線。例如，在10000次蒙地卡羅中，其損傷分級落在完全崩塌之次數總計有1900次，因此可得到地震造成重建機率PE=1900/10000=19%。

⑥地震維護成本

本階段同樣參考交通部運輸研究所計畫「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研究」[邱建國、鄭明淵等，2015]報告成果中對於地震維護成本評估方法，建置分析流程如下圖4.24所述：

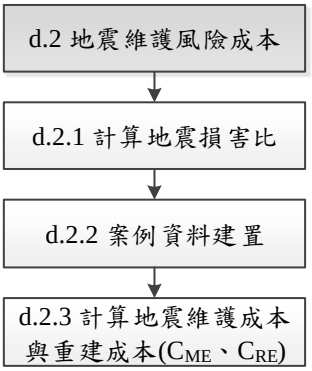


圖 4.24 地震維護成本分析程圖

⑦計算地震損害比:

當結構物受地震損壞時，一般會以結構物損壞狀況之損害比(Damage ratio)此一量化標準來描述地震損壞狀況，如式(4.22)。本研究參考ATC-13(1985)及HAZUS(FEMA(1997))之損害程度定義及其損害比之關係，將結構物各損壞狀況對應之損害比定義如表4-37。

$$\frac{C_L}{C_I} \tag{4.22}$$

上式，C_L：結構物受損所需之修復成本；C_I：結構物之建造成本。

表 4-37 損害狀況及損害比之關係

損害分級	損害比
無損傷	0.00
輕微損傷	0.02
中度損傷	0.10
重度損傷	0.50
完全崩塌	1.00

地震風險成本C_E為此年度結構物受地震外力作用所造成可能之年損失金額，即為考量各程度之地震發生機率及其所造成之損失總和。由上述方法求取各損傷指標之超越機率及損害分級，可得各損傷分級之發生機率。將其乘上此損害分級之損害比，即為此損傷等級可能造成之年損失金額。

⑧地震維護風險成本

本階段根據橋梁各維護間隔Δt維護機率所求得各地震損傷分級之發生機率(P_{ME})，將地震造成輕微、中度、重度損傷分級之機率乘上損害分級之損害比(D_j)，加總後乘上興建成本，即可求得橋梁在不同時間間隔下之地震維護風險成本。

⑨地震重建風險成本

根據各維護間隔Δt橋梁維護機率所求得之完全崩塌機率(P_{ME})乘上興建成本，即可求得橋梁因地震造成重建之風險成本。

本步驟將計算構件老化、塗裝劣化、洪水、地震各維護間隔△t下造成之維護風險成本E(MC)及重建風險成本E(RC)。在第四章節與第五章節分別求得鋼結構橋梁之風險機率、頻率與風險成本後，可透過式(4.1)，求得橋梁之綜合能力指標，如表4-38即為以A橋作為範例的橋梁綜合能力指標，根據本研究所計算出來的橋梁綜合能力指標，可提供橋梁管理單位進行評估，根據當年度的維護經費來決定哪些橋梁需要進行維護動作。

表4-38 A橋之綜合能力指標

橋齡 / 風險	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
構件老化	4,632,586	12,233,132	15,826,761	17,692,469	19,086,368	19,905,112	20,434,039	21,212,880	21,588,485	21,896,689
塗裝劣化	903,190	1,047,045	1,213,812	1,407,141	1,631,262	1,891,080	2,192,279	2,541,453	2,946,240	3,415,500
洪水維護	96,588	663,261	17,367,974	42,237,070	45,815,127	51,572,688	59,464,839	63,219,360	63,991,748	64,063,566
地震維護	4,154,650	11,079,065	23,543,014	36,006,963	45,701,145	55,395,327	56,780,210	56,780,210	56,780,210	56,780,210
洪水重建	546,725	2,051,323	3,223,754	4,741,379	6,414,118	8,767,357	11,298,319	13,908,259	15,358,020	17,297,163
地震重建	373,919	997,116	2,118,871	3,240,627	4,113,103	4,985,579	5,110,219	5,110,219	5,110,219	5,110,219
E[Cost]	10,707,657	28,070,942	63,294,185	105,325,649	122,761,123	142,517,143	155,279,905	162,772,381	165,774,922	168,563,348

4.2 鋼橋維護策略

本階段將導入生命週期成本導向之概念，建置鋼結構橋梁維護策略最佳化模式。由於同一座橋梁在不同時間點執行維護時，其維護成本也會有所不同。而且在不同時間執行維護方案後，其橋梁的健康程度及狀態也會有所差異。因此，根據每一座鋼結構橋梁的劣化曲線，針對單一座橋梁求得殘餘能力，再依據橋梁狀況分析，決定橋梁因為年限、外力所影響的最佳維護時機與工法，進一步求得所需的最小風險成本，如圖4.25所示。

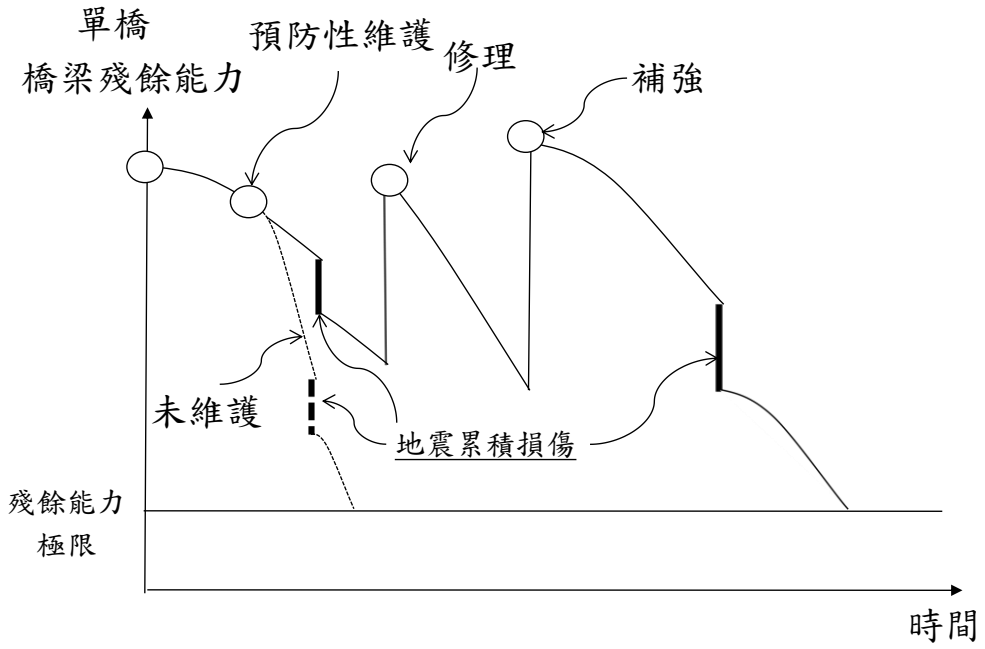


圖 4.25 橋梁維護策略示意圖

此外，考慮橋梁現況且維護經費有限的情形下，橋梁管理單位無法同時對所有鋼結構橋梁進行全面檢測與修復之工作。因此在有限的資源下，如何達到最有效率的運用是重要的課題。鋼結構橋梁維護策略最佳化模式將同時考量每個鋼結構橋梁所評估的健康度現況、所需維修工法成本與工期及重要性，輔助橋梁管理單位在針對單一座橋梁進行預算分配及維護成本估計，依據不同的鋼結構橋梁現況有效投入維護經費進行維護及補強的作業。

4.2.1鋼結構單橋成本維護策略

由於鋼結構橋梁生命週期中，不同構件損傷與不同工法之維護方案與維修時間點可排列組合的項次眾多，如果使用傳統的試誤法求最佳的解答，並無法有效的在短時間內求得。因此，本研究使用生物共生演算法(SOS)作為最佳化模式之理論，其方法主要能達到加速收斂的效果。

在鋼結構橋梁維護成本最佳化中，目標函數以求解橋梁生命週期

中，最低的橋梁維護金額為目的，同時橋梁的狀態仍然須保持堪用的狀態，也就是橋梁的健康度指標必須保持在一定的水準以上的維護成本。

本研究假設橋梁生命週期為五十年，在式(4.1)中，E[cost]為考量風險下之維護成本。算式中P_{MD}、P_{MC}、P_{MS}、P_{ME}為構件老化、塗裝劣化、洪水及地震風險發生的維護機率值，C_{MD}、C_{MC}、C_{MS}、C_{ME}為構件老化、塗裝劣化、洪水、地震之維護成本，將風險發生之機率值與維護成本兩者相乘，即可求出鋼結構橋梁於風險考量下的維護成本。在鋼結構橋梁生命週期五十年中，橋梁劣化曲線示意圖可參考圖4.26。

在圖4.26中，橋梁之構件Ici值初始設定值為100分，一座橋梁在未經使用前設定其值為滿分，經使用後，隨著橋齡逐漸提高，橋梁健康程度也隨之下降。

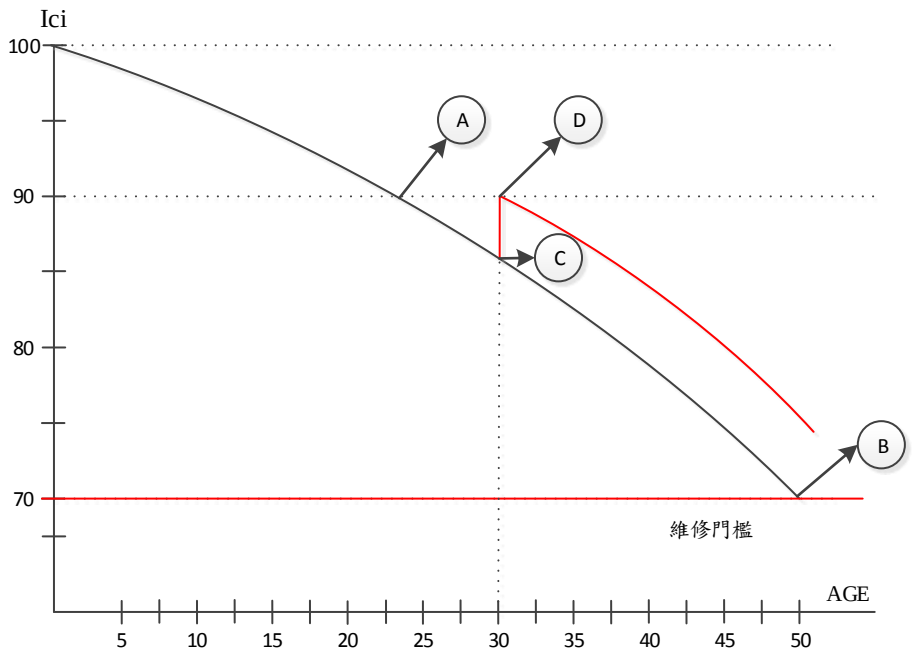


圖 4.26 橋梁劣化曲線示意圖

圖4.26為本研究之基本假設條件，詳如下列所述。

1. 本研究參考 TBMS 之維修頻率，假定維修策略機制啟動時機為 Ici 值下滑至 90 分以下時(A 點)。意指從維修門檻以上至 90 分，橋梁在此段分數間中的任意時間點可以進行橋梁維修。

2. 伴隨著時間增加，因為橋梁尚未維護的關係，Ici 值不斷降低，若始終不進行維護，則橋梁 Ici 值將低於維修門檻(B 點)，在此時橋梁可能嚴重影響到用路人之人身安全。因此在最佳化求解過程中，維持 Ici 在門檻值以上。

3. 橋梁每次經過維修後，Ici 能提升至 100 分。現在有一維護策略於橋齡 30 年時發生(C 點)，則橋梁構件健康程度將提升至 90 分(D 點)。

4. 影響橋梁劣化的因素如：橋梁地理位置，並不會因為橋梁維修而改變，因此本研究假設橋梁的劣化斜率與維修前相同。

5. 本研究假設維修策略之金額將不大於該座橋梁之重建成本，如果橋梁維修金額過高，則維護效益不大，則以拆除重建為優先考量。

本研究希望能在有限的維護經費中，提出鋼結構橋梁維護策略提高鋼結構橋梁的Ici值，因此希望透過最佳化搜尋找出在不同門檻值所對應的維護策略。首先假設6種橋梁維護門檻值，其門檻值分別為85分、86分、87分、88分、89分及90分。選定的案例為公路總局所管理的262座鋼結構橋梁為對象，比較各門檻下的橋梁維護成本，進而建議鋼結構橋梁於風險考量下的生命週期維護策略。

4.2.2共生生物演算法

現今的啟發式演算法通常模擬自然界生物的現象，例如蜂群演算法(Artificial Bee Colony)模擬蜜蜂成群地覓食特性；粒子群優化算法(Particle Swarm Optimization)模擬動物群聚行為，遺傳算法(Genetic Algorithm)模擬自然進化的過程。共生生物搜尋演算法(symbiotic Organism Search，SOS)模擬用生物體間的交互作用做配對，用於搜索最合適的生物體生物體間的交互作用關係，最初該算法被開發來解決在一個空間中連續數值的優化搜尋。

共生生物演算法是以其他演算法為研究基礎所發展出的演算法，SOS會在可搜尋空間中，不斷地迭代候選解，進而求得全域最佳解。在SOS演算法中，初始假設環境是一個生態系統，在這個生態系統搜尋空間中，會有一組隨機生成的生物群，每個生物代表一個對應的問題的候選解，每個生物體在生態系統中也代表一組目標適應值，這個目標適應值會反映預期目標的適應程度。其流程圖如圖4.27所示。

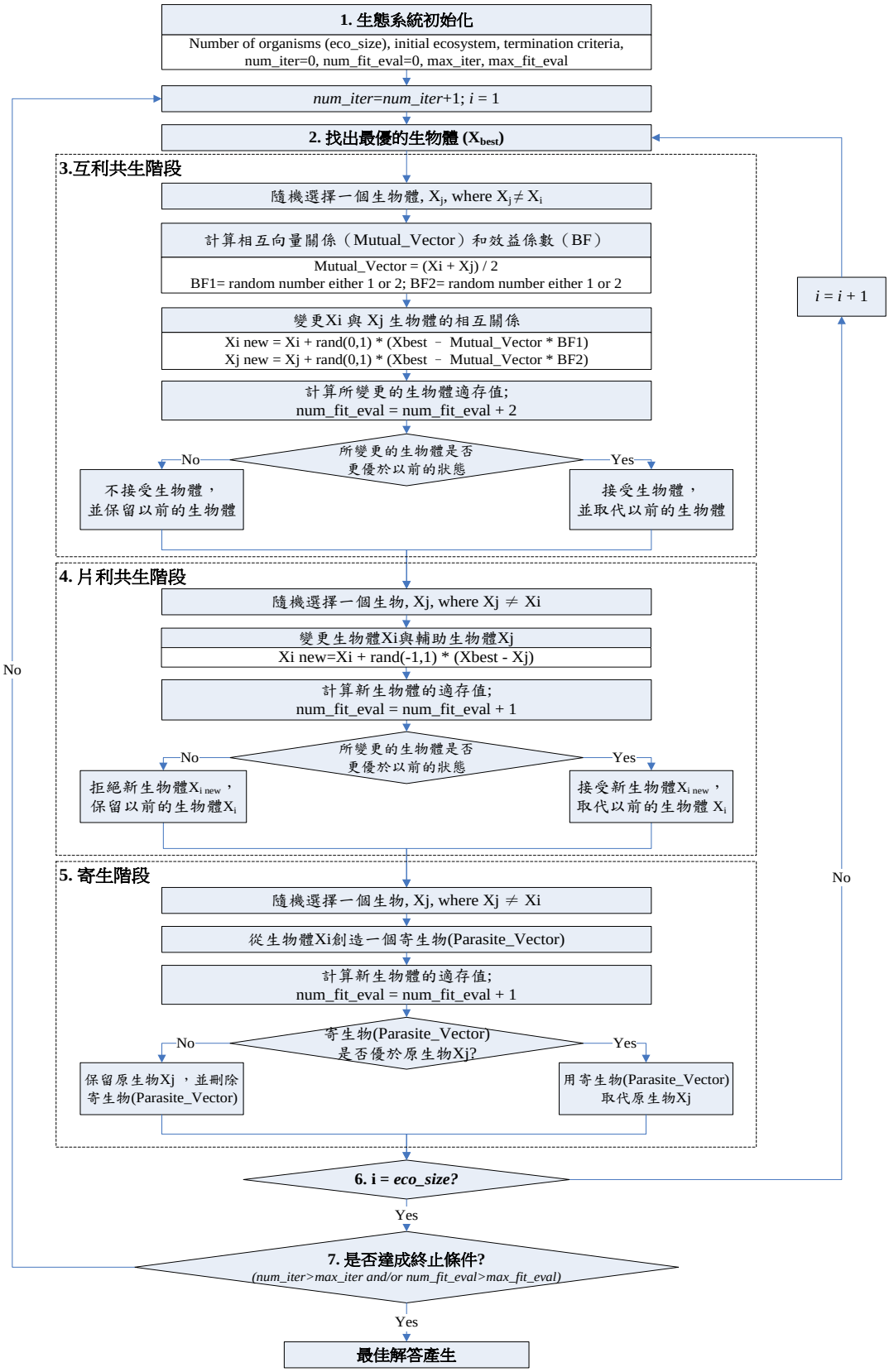


圖 4.27 SOS 演算法程序

Step1.生物系統初始化

設定生物體數量，邊界條件

本研究將設定Ici值低於90分時，開始維修機制，考量橋梁維修前後外在環境條件不變，維修後橋梁老化速度與維修前相同。

Step2.找出最優的生物體(Xbest)

此步驟將會不斷迭代出最好的解答

Step3.互利共生階段

舉例來說，互利共生是指兩種不同的生物，彼此互助互惠生存像是蜜蜂與花，蜜蜂在花朵間飛舞採花蜜，這項活動對蜜蜂來說可以獲得花蜜，對花來說因為蜜蜂採花蜜的行為而獲得授粉，此的SOS階段就像是這種互惠關係。

在SOS中，Xi代表一個生物體在生態系統中第i個成員，另一個生物體Xj是從生態系統中隨機選擇出來和Xi互動的生物體。這兩種生物彼此之間互助互惠，在生態系統中增進生存優勢。從生物體Xi和Xj的互助關係中會計算出新的候選解Xi和Xj如式(4.23)式(4.24)。

$$X_{i\,\mathrm{new}} = X_i + rand(0,1) * (X_{best} - Mutual_Vector * BF_1) \tag{4.23}$$

$$X_{j\,\mathrm{new}} = Xj + rand(0,1) * (X_{best} - Mutual_Vector * BF_2) \tag{4.24}$$

$$Mutual_Vector = \frac{X_i + X_j}{2} \tag{4.25}$$

在這裡利益因素(BF1、BF2)將隨機計算為1或2，這些因素代表每一個生物的利益水平，如生物體在相互作用中是否部分或完全得到好處。式(4.25)為一向量稱為互利向量“Mutual_Vector”，表示該生物體Xi

和Xj之間的關係特性。最後在互利共生階段，只有當新的適用值優於之前的互動適用值，生物才會更新。

Step4.片利共生階段

片利共生的例子如短印魚和鯊魚之間的關係。短印魚貼附鯊魚還有吃鯊魚食物殘渣，從而收到好處。鯊魚是幾乎不受短印魚影響，如果有獲益的話也是很小的。

在SOS中，互利共生階段之生物體Xj為從生態系統中被隨機挑選出之生物與Xi互動。在這種情況下，生物體Xi試圖從互動中受益。然而，生物體Xj本身既無好處也無壞處。新的候選解Xi是根據Xinew和Xj之間的片利共生互動產出，如式(4.26)。按照這樣的規則，生物體Xi只有當它新的適用值比其之前適用值更好才會更新。

$$X_{i\,\mathrm{new}} = X_i + rand(-1,1) * (X_{best} - X_j) \tag{4.26}$$

Step5.寄生階段

寄生之例子如瘧原蟲，透過瘧蚊叮咬人類，進入宿主。當瘧原蟲在人體內部擴散被發現，其人類宿主遭受瘧疾可能導致死亡的結果。

在SOS中，生物體Xi類似寄生之瘧蚊角色，透過人工創造寄生行為稱為寄生向量 “Parasite_Vector”。在搜尋的空間中寄生載體被創造複製出生物體Xi，然後使用一個隨機數修改成隨機的尺寸，再從生態系統中隨機選擇出生物體Xj，Xj作為主導寄生蟲載體。在生態系統中寄生蟲載體嘗試取代Xj。這兩種生物體評估與衡量自己的適用值。如果寄生蟲載體有更好的適用值，它會殺死生物體Xj，並取代其在生態系統中的地位。如果Xj有更好的適用值，Xj將能抵抗寄生蟲和寄生蟲載體，使其無法繼續同處在該生態系統中。

Step6.生物體達到設定值上限

在SOS演算法中，如果迭代次數達到生物體上限，則程式會終止計算。

Step7.滿足終止條件

滿足終止條件時，SOS將會停止計算。

本研究引用共生生物搜尋（SOS），其靈感來自生然生態系統中生物之間的互動模式，SOS使用三種策略:互利共生、片利共生和寄生模擬這種自然的模式。SOS演算法的三個階段在操作上是容易的，只需要用簡單的數學運算法則。此外比較於同類演算法，SOS不使用微調的參數，提高了性能的穩定性。儘管比同類算法使用較少的控制參數，還能夠解決各種數值最佳化問題。

4.2.3鋼結構橋梁單橋管理策略訂定

如圖4.28中，A橋其維護方案有多種維護組合，例如維護策略1為橋梁於10年與30年各進行一次的維護，使Ici值能維持在門檻之上。維護策略2為 10年、15年、40年各進行一次的維護。本研究希望透過最佳化搜尋，求解最低總維護成本之鋼結構橋梁構件維護組合。

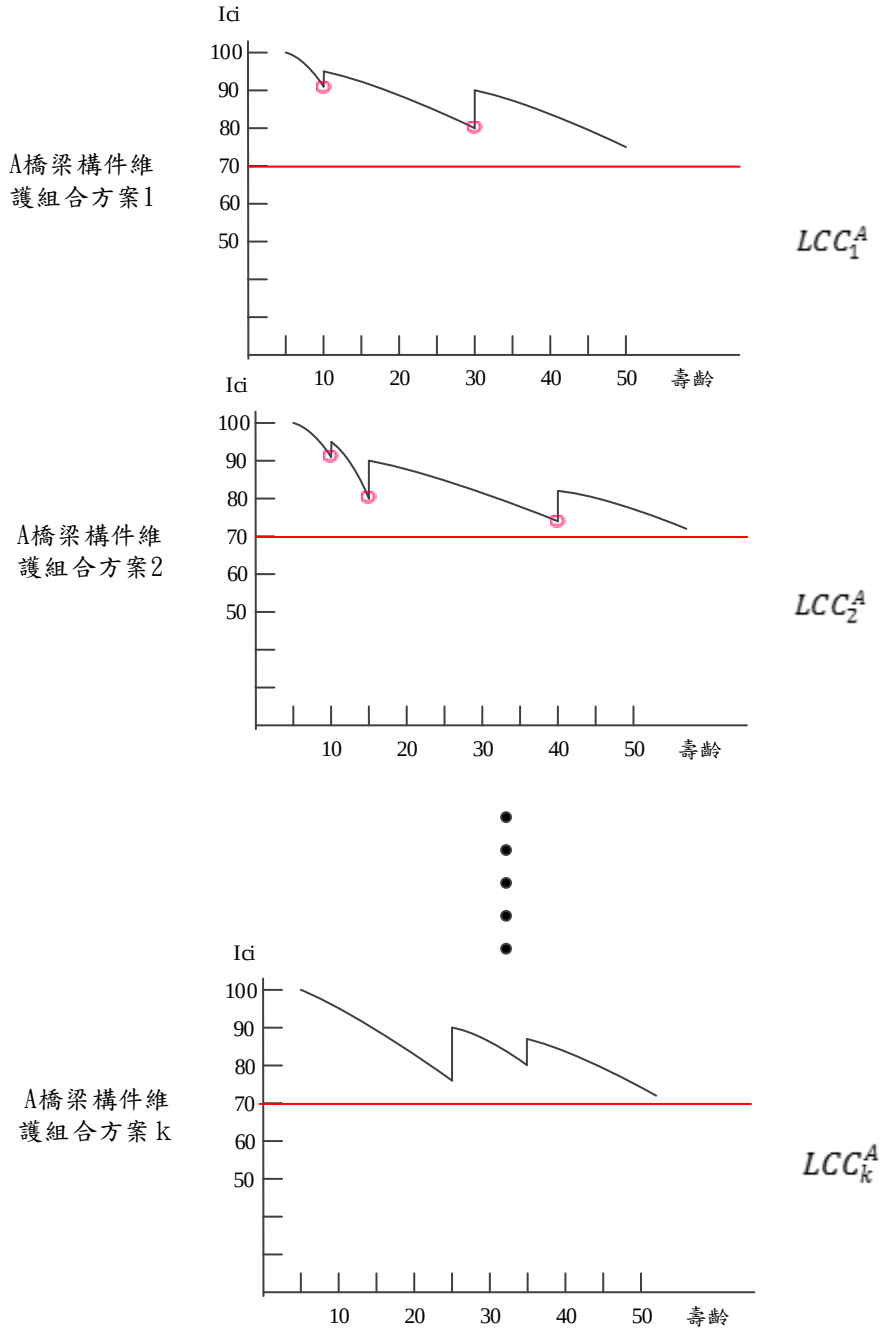


圖 4.28 橋梁維護組合方案

在前述計算橋梁維護機率步驟中，收集歷史案例統計資料，分析求得各鋼結構橋梁未來Ici值。以A橋梁為例，其引道路堤橋齡為5年時，Ici值參照表4-39得知為95.96。橋梁年齡為10年時，Ici值為94.53。橋梁經過維護後，Ici值回復至原設計強度。隨著時間增加，Ici值將逐漸向下

遞減。再將Ici值代入進行模擬，求得橋梁構件於各種風險下之維護機率。

由風險影響程度中，以損害維護比理論計算鋼結構橋梁未來可能發生之維護成本。最後將第四與第五章所求得的每座鋼結構橋梁之機率及成本，帶入式(4.1)求得Ecost維護風險成本。SOS會由所得之維護風險成本中，搜尋最低維護風險成本組合，進而發展出適合門檻值之維護策略。

本研究以公路總局A鋼結構橋梁為例，在考量風險成本後，橋梁維護門檻設定為85至90分。計算橋梁生命週期50年中，維護策略將找出可維持分數不低於門檻值之最低成本的組合，如圖4.29至圖4.34。表4-39為A橋梁引道路堤之生命週期Ici值，SOS參照此表計算橋梁最佳之維護策略。

表4-39 A橋梁引道路堤生命週期Ici值

橋齡	維護Ici值
5	95.96
10	94.53
15	93.03
20	91.47
25	90.14
30	88.89
35	87.74
40	86.48
45	85.82
50	84.90

在圖4.29中，維護門檻設定為85分，經最佳化搜尋成果，該座鋼結構橋梁的引道路堤分別在橋齡5年及50年時進行維護。在橋梁生命週期中，Ici值維持在不低於85分的狀態，該維護策略是此座橋梁在生命週期維護風險成本中最低值。表4-40為橋梁維護時機點的風險成本一覽表，在此案例中，因為構件劣化下降速率緩慢，所以當門檻值設定85分時，在5年到50年間可以不採取維護手段，也能維持分數高於所設定的門檻值。

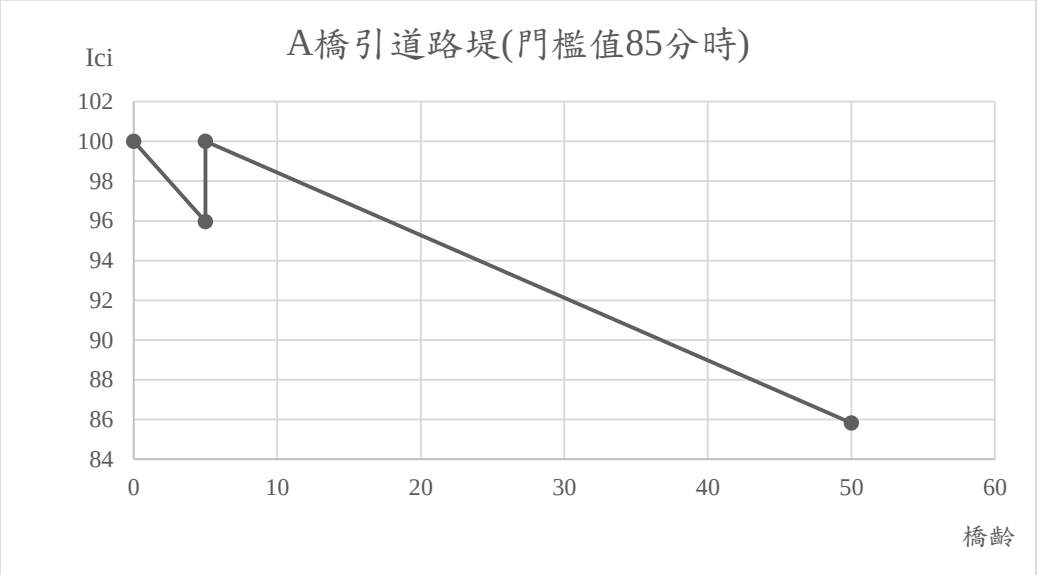


圖 4.29 搜尋維護策略在門檻值為 85 分

表4-40 門檻85分A橋構件維護時間點與風險成本一覽表

類別	維護時間點	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	風險成本
橋梁構件	引道路堤		8,916									8,916	17,832
	引道護欄											5,142	5,142
	河道		61,100									988,516	1,049,616
	引道路堤-保護措施											65	65
	橋台基礎		33,020									503,094	536,113
	橋台		2,241									35,831	38,072
	翼牆/擋土牆											193,082	193,082
	鋪面												0
	排水設施		3,836									63,123	66,959
	緣石及人行道											14,613	14,613
	橋護欄		14,850									261,853	276,703
	橋墩/橋基保護設施		34,314									561,079	595,393
	橋墩基礎											7,324,018	7,324,018
	橋墩墩體/帽梁		38,940									590,527	629,467
	支承/支承墊											12,337	12,337

類別 \ 維護時間點	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	風險成本
防落設施		13,268									213,597	226,865
伸縮縫											1,176,149	1,176,149
主構件(大梁)		8,980									138,859	147,839
次要構件(橫隔梁)		57,471									950,084	1,007,555
橋面版、鉸接版											7,354,402	7,354,402
其他												0
塗裝劣化		903,190									2,946,240	3,849,430
洪水		96,588									63,991,748	64,088,336
地震		4,154,650									56,780,210	60,934,860
總風險成本		5,431,364									144,113,483	149,544,846

在圖4.30中，維護門檻設定為86分，經最佳化搜尋成果，該座鋼結構橋梁的引道路堤分別在橋齡5年及50年時進行維護。在橋梁生命週期中，Ici值維持在不低於86分的狀態，該維護策略是此座橋梁在生命週期維護風險成本中最低值。在此案例中因為構件劣化下降速率緩慢，所以當門檻值設定86分時，引道路堤在5年到50年間可以不採取維護手段也能維持分數高於所設定的門檻值。

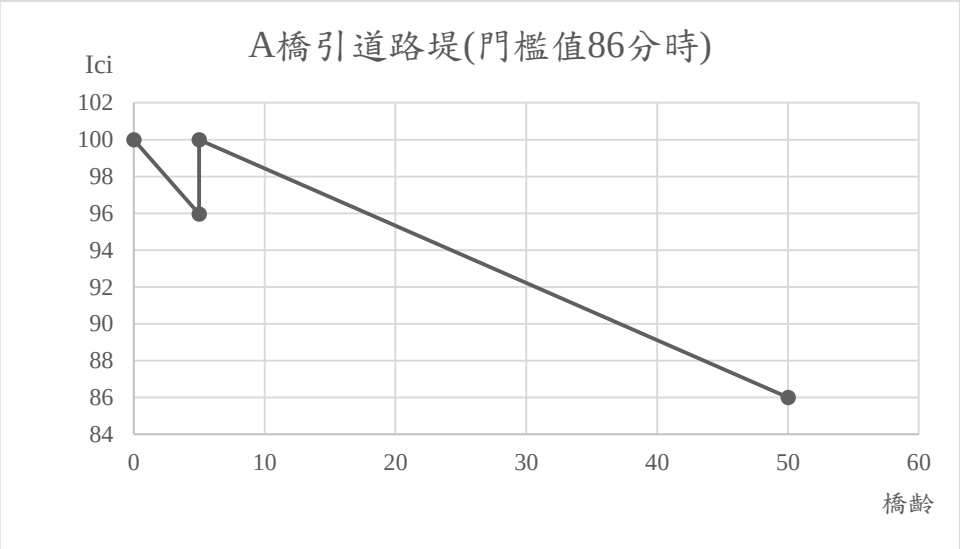


圖 4.30 搜尋維護策略在門檻值為 86 分

在圖4.31中，維護門檻設定為87分，經最佳化搜尋成果，該座鋼結構橋梁的引道路堤分別於橋齡5年、10年、15年及50年時進行維護。在橋梁生命週期中，Ici值維持在不低於87分的狀態，該維護策略是此座橋梁在生命週期維護風險成本中最低值。在此案例中因為構件劣化下降速率緩慢，所以當門檻值設定87分時，引道路堤在15年到50年間可以不採取維護手段，也能維持分數高於所設定的門檻值。

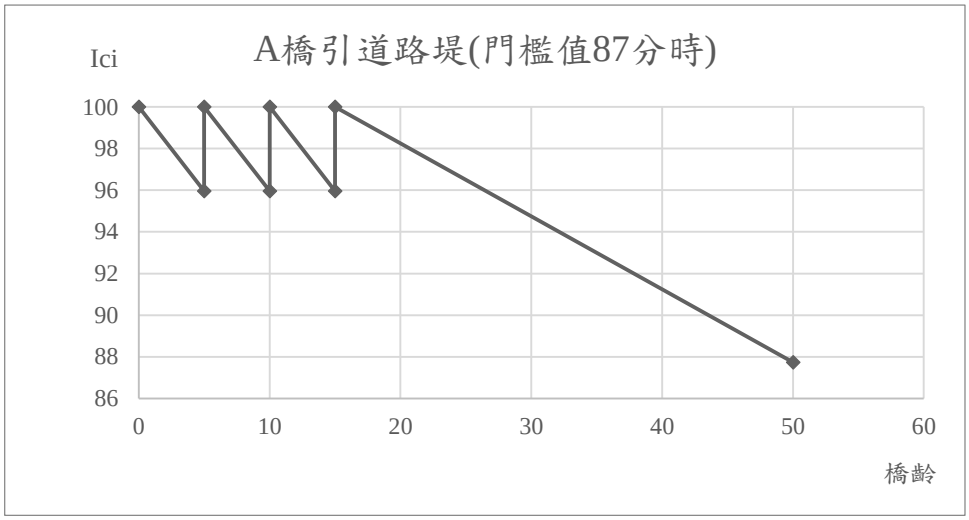


圖 4.31 搜尋維護策略在門檻值為 87 分

在圖4.32中，維護門檻設定為88分，經最佳化搜尋成果，該座鋼結構橋梁的引道路堤分別於橋齡5年、10年、15年、25年、35年及50年時進行維護。在此案例中當門檻值設定88分時，引道路堤在25年到50年間可以不採取維護手段，也能維持分數高於所設定的門檻值。

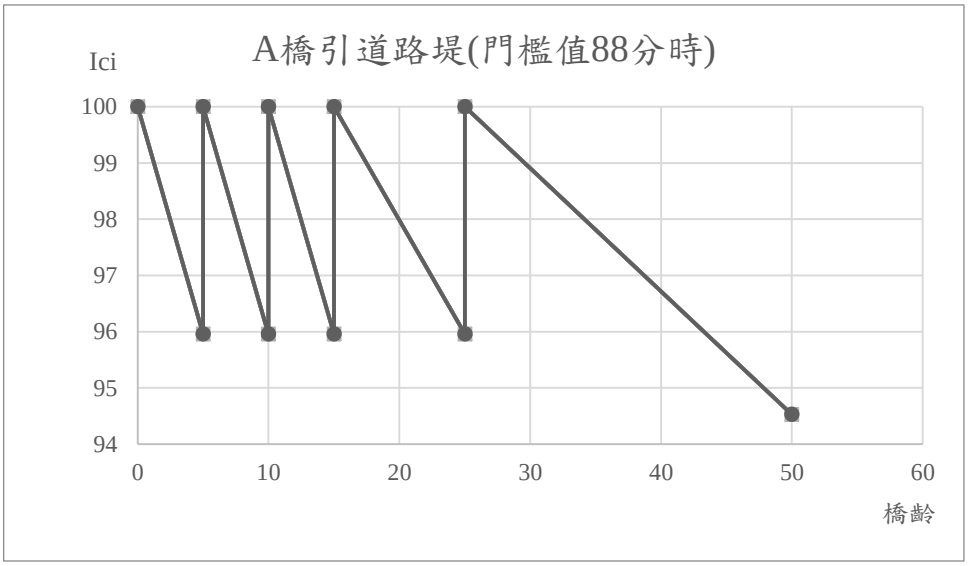


圖 4.32 搜尋維護策略在門檻值為 88 分

在圖4.33中，維護門檻設定為89分，經最佳化搜尋成果，該座鋼結構橋梁的引道路堤分別於橋齡5年、10年、15年、20年、25年及50年時進行維護，在此案例中引道路堤在25年到50年間可以不採取維護手段，也能維持分數高於所設定的門檻值。

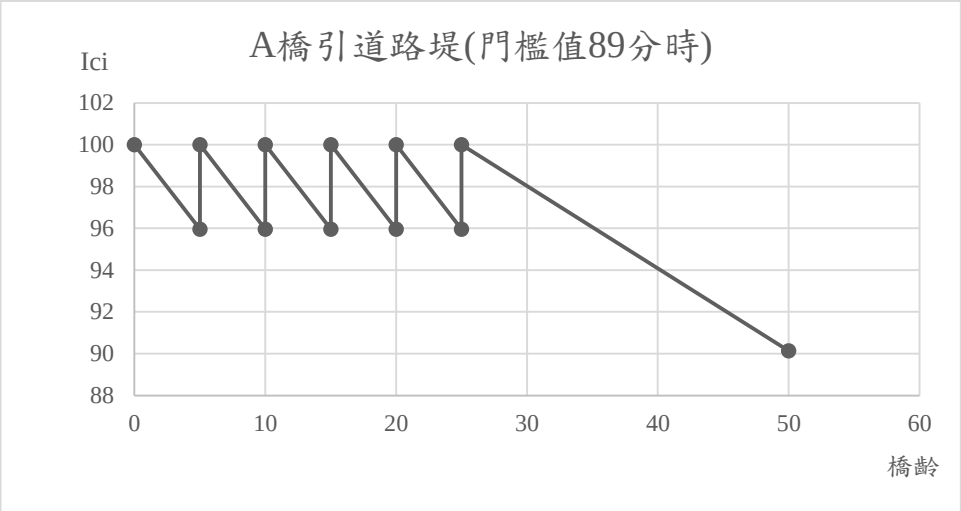


圖 4.33 搜尋維護策略在門檻值為 89 分

在圖4.34中，維護門檻設定為90分，經最佳化搜尋成果，該座鋼結構橋梁的引道路堤分別於橋齡5年、10年、15年、20年及50年時進行維護。

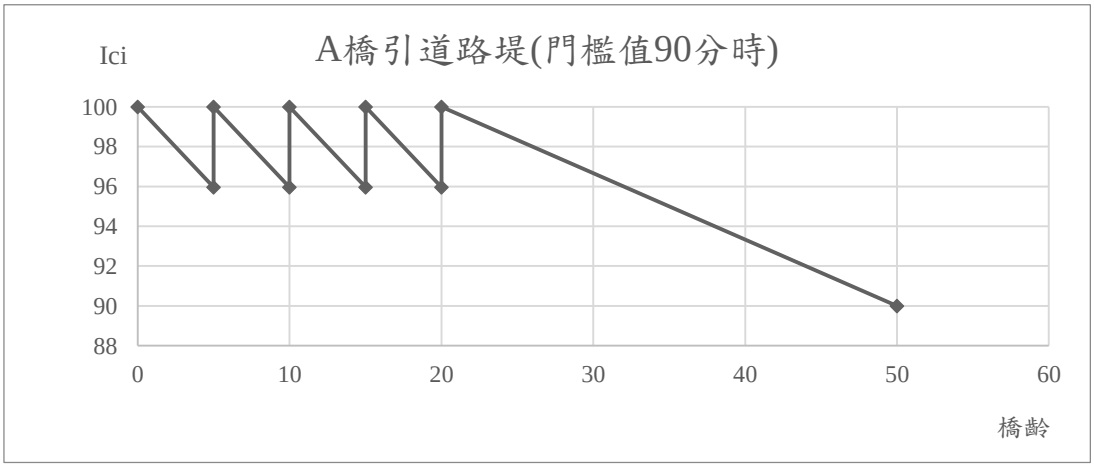


圖 4.34 搜尋維護策略在門檻值為 90 分

以A橋梁為例，該橋之重建成本為276,976,636元，經過最佳化搜尋後，各門檻值下(85 ~ 90)下的總風險成本依序為149,544,846、154,008,181、155,757,564、141,309,348、141,499,679 、141,605,948元。橋梁管理單位可根據維護經費預算，參考圖4.35之各門檻維護策略，選擇適當的維護方案。

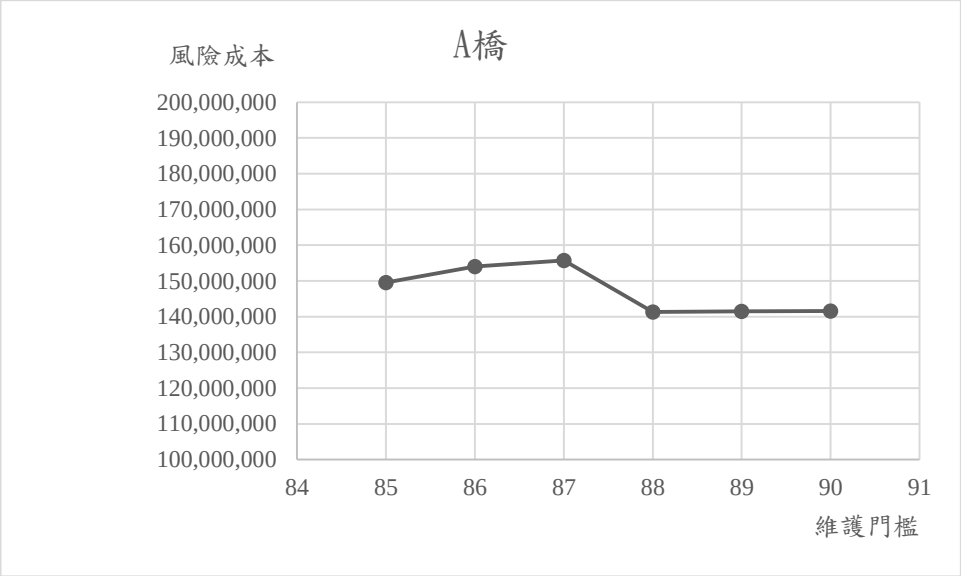


圖 4.35 A 橋橋梁之維護策略

第五章 橋梁整體耐震能力評估模式擬定

橋梁整體耐震能力評估與案例建置分為五個大流程，包括橋梁整體耐震能力側推分析、橋梁損傷評估、橋梁整體損傷評估案例建置、橋梁整體耐震能力影響因子確認及案例資料庫建立。

5.1 橋梁整體耐震能力側推分析

本階段將先進行鋼筋腐蝕率0%案例模型收集，因將鋼筋腐蝕率納入考慮，故須先透過更改0%模型之鋼筋斷面資料，分別建置鋼筋斷面腐蝕率5%、10%、20%、35%模型，再進行側推分析，此階段分析流程如圖5.1。各流程說明如下:

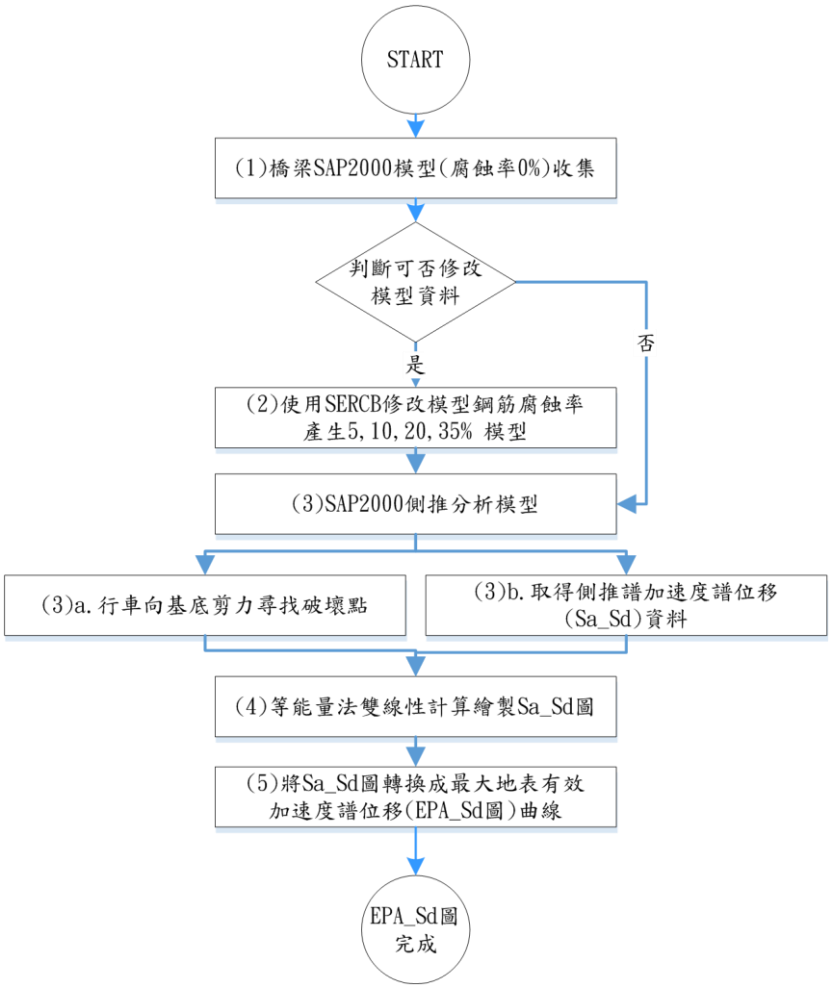


圖 5.1 側推分析流程圖

1. 橋梁 SAP2000 模型(腐蝕率 0%)收集

此階段先取得某直轄市政府委外建置之17座橋梁結構模型，因目前所建置之模型皆未考量鋼筋腐蝕率，因此，此階段取得之模型鋼筋斷面腐蝕率為0%。

2. 使用 SERCB for Bridge 修改鋼筋腐蝕率產生 5、10、20、35%之橋梁模型

此階段需先行判斷橋梁模型是否可以使用國立臺北科技大學土木工程系宋裕祺教授團隊研發之SERCB for Bridge[宋裕祺，2017]結構分析軟體重新進行塑鉸分析生成不同鋼筋腐蝕率之塑鉸資料。因軟體限制下，部分橋梁無法重新定義塑鉸，故此階段僅針對6座橋梁案例進行模型修正:

本計畫參考文獻[歐昱辰，2014]所建議，將自然腐蝕鋼筋降伏強度Fy折減係數設定為0.0123、彈性模數Es折減係數設定為0.013，並於SERCB for Bridge修改橋柱鋼筋之降伏強度及彈性模數，重新進行軸力彎矩分析、梁柱構件極限軸力分析、柱構件塑鉸分析。最後將結果匯入原橋梁模型產生鋼筋斷面腐蝕率5、10、20、35%之橋梁模型。

3. SAP2000 側推分析模型

設定適當之側向力後，進行非線性靜力側推分析，並分別擷取基底剪力曲線(Pushover Curve)及ATC40建議之側推需求容量曲線(Pushover Curve Demand Capacity-ATC40)。

(1)行車向基底剪力尋找破壞點

擷取基底剪力曲線(Pushover Curve)，並找尋基底剪力最大值(破壞點)。

(2)取得側推譜加速度譜位移(Sa_Sd)資料

擷取側推需求容量曲線(Pushover Curve Demand Capacity-ATC40)中譜加速度值(Sa)及譜位移值(Sd)，並繪製譜加速度_譜位移曲線

(Sa_Sd圖)。

4. 等能量法雙線性計算繪製 Sa_Sd 圖(如圖 5.2)

(1) 先計算 Sa_Sd 圖下總面積 A。

(2) 以第一點與原點間斜率為初始斜率k_1。

(3) 破壞點作為 Sa_Sd 圖之最大值(x_m, y_m)。

(4) 計算雙線性折點作為降伏點(X_b, y_b)，如式(5.1)、式(5.2)。

$$X_b = \frac{2A - x_m y_m}{k_1 x_m - y_m} \tag{5.1}$$

$$y_b = k_1 x_b \tag{5.2}$$

(5) 以降伏點至破壞點的斜率為k_2。

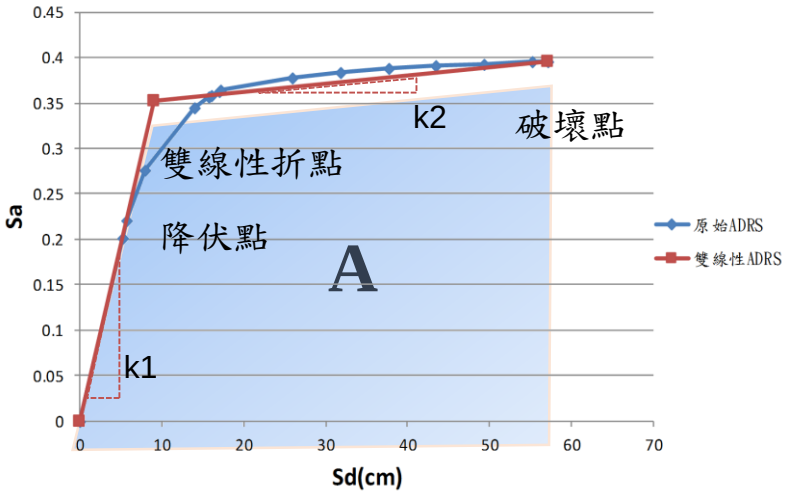


圖 5.2 雙線性計算示意圖

5. 將 Sa_Sd 圖轉換成有效地表有效加速度_譜位移圖(EPA_Sd 圖)

參考各工址之規範參數及Fu-R-T法將Sa_Sd圖轉換為EPA_Sd圖，作為下節之輸入。

5.2 橋梁損傷評估

本階段將進行橋梁整體損傷評估，分別計算橋梁各元件、構件之結構耐震容量，並透過反應曲面法，求得橋梁整體損傷超越機率，詳細流程如圖5.3，各步驟分述如下:

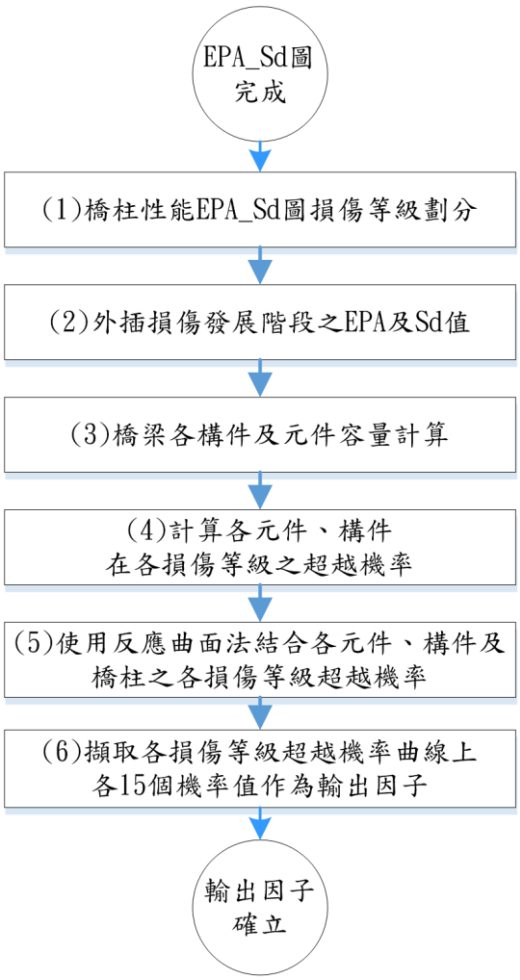


圖 5.3 橋梁損傷評估流程

1.橋柱性能 EPA_Sd 圖損傷等級劃分

前一節側推分析求得之有效地表加速度_譜位移圖(EPA_Sd圖)，找出降伏點及破壞點，原點至降伏點區間為無損傷，降伏點與極限點間均分三等分為輕微損傷、中度損傷、嚴重損傷以及破壞點後定義為完全損傷[交通部公路總局，2009]。，如圖5.4所示。

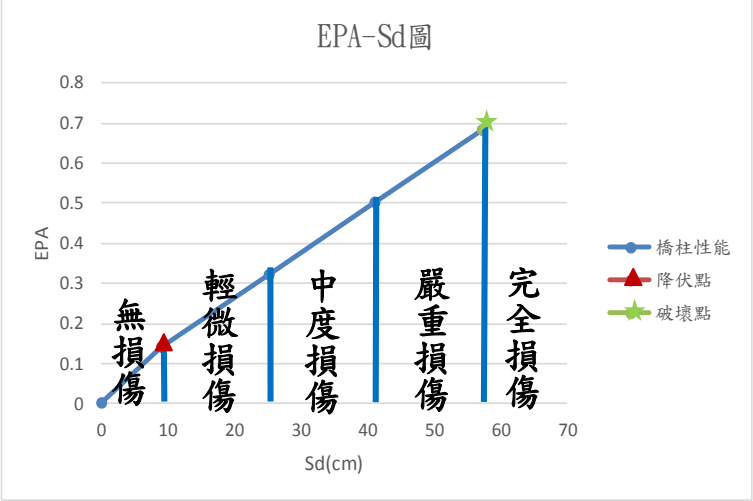


圖 5.4 損傷等級劃分

2.外插損傷發展階段之 EPA 及 Sd 值

因本計畫將橋梁整體各元件、構件耐震容量納入分析，而側推分析結束時各譜位移值不相同，依文獻[呈瑞忠，2015]建議，假設超越機率在EPA為1.5g時，各損傷超越機率皆為1.0。故本階段需從破壞點進行外插直至獲得EPA為1.5g之橋梁耐震容量。

3.橋梁各構件及元件結構容量計算

選擇需計算耐震容量構件之每一個該構件項目，如需計算支承剪力，則選取橋梁模型中每一個支承，再從構件受力表單中找出承受最大剪力支承，擷取該支承的結構容量變化資料作為計算超越機率之用。

4.計算各元件、構件在各損傷等級之超越機率

在不同損傷等級下，由橋梁側推模型中找出該損傷等級下，須考慮的橋梁構件或元件側推下之受力狀態，以計算其損傷超越機率，各損傷等級需考慮之構件項目如表5-1所示。

表5-1 構件及元件損傷對照表

			無損傷	輕微損傷	中度損傷	嚴重損傷	完全損傷
下部結構	橋柱性能		✓	✓	✓	✓	✓
	橋梁構件及元件	橋柱穩定性					✓ (II)
		樁頂轉角					✓ (II)
		樁頭位移					✓ (II)
		基樁撓曲				✓ (II)	✓(III)
		基樁剪力				✓ (II)	✓(III)
		拉拔力				✓ (II)	✓(III)
		軸壓力				✓ (II)	✓(III)
上部結構		防落長度					✓(II)
		支承剪力			✓ (II)	✓(III)	✓(III)
		帽梁剪力				✓ (II)	✓(III)
		帽梁彎矩			✓ (II)	✓(III)	✓(III)

(II): 475 年回歸期地震　　(III): 2500 年回歸期地震

以當地震之EPA達到中度損傷等級時為例，須考慮橋柱性能、支承剪力及帽梁彎矩三構件之檢核。其中，橋柱性能之超越機率計算方式與其他構件及元件不同，以下詳述其步驟：

(1)橋柱性能

以各損傷等級下的譜位移值作為損傷等級區分的界線($\mu_{R1}, \mu_{R2}, \mu_{R3}, \mu_{R4}$)(如圖5.5)，側推得知的譜位移值作為一平均值(μ_S)，並假設界線值與譜位移皆為常態分佈，參考文獻[呈瑞忠，2015]將變異係數設定為0.1及0.2，將譜位移大於各損傷等級界線值的機率作為橋柱性能各損傷等級的超越機率，如式5.3說明。

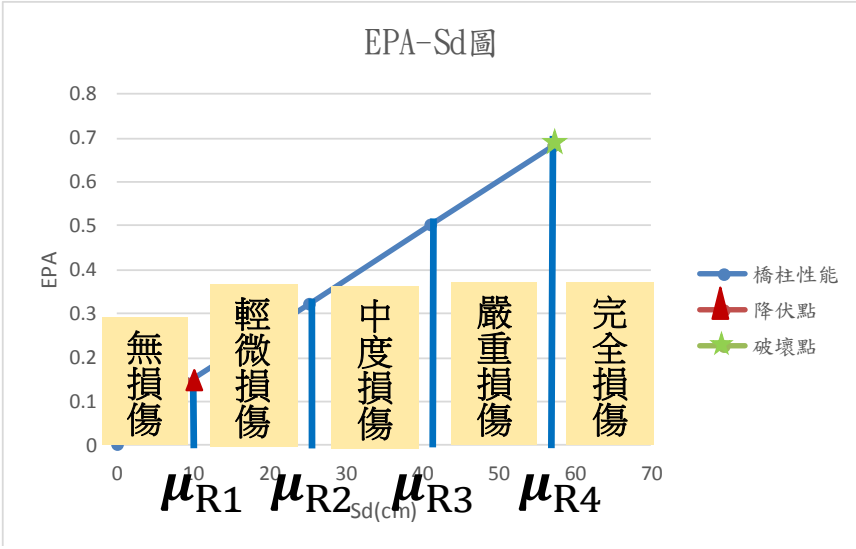


圖 5.5 各損傷等級界線值

$$\mu = \mu_R - \mu_S \tag{5.3}$$

$\mu < 0$ 表示發生了超越的情形

以圖5.6為例，假設界線值(R)與譜位移值(S)皆為常態分佈，μ_R =100、σ_R = 0.1 、μ_R=10，μ_S = 70、σ_S = 0.2 、μ_S=14。

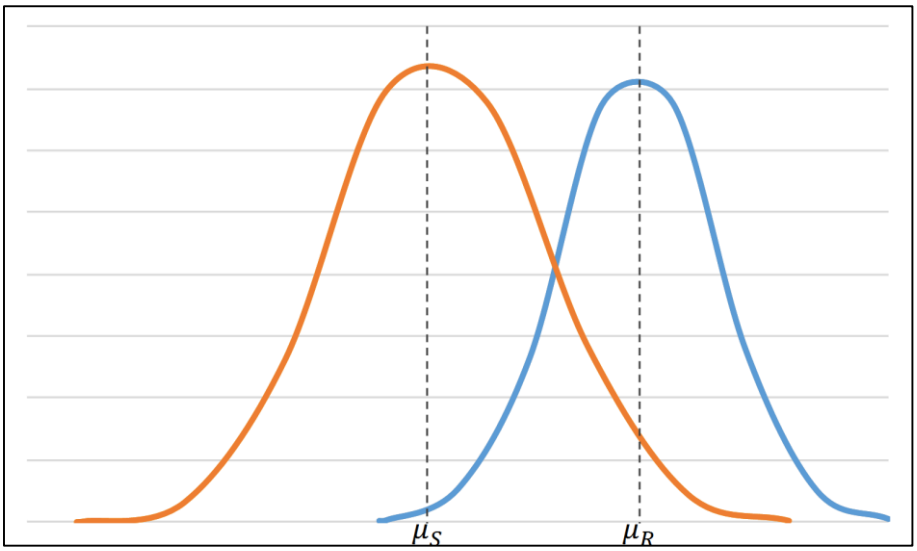


圖 5.6 損傷超越機率示意圖(一)

計算超越機率，$\mu = \mu_R - \mu_S = 30$，$\sigma = \sqrt{\sigma_R{}^2 + \sigma_S{}^2} = \sqrt{10^2 + 14^2}$ =17.20465， μ<0,表示發生了超越的狀況，超越機率為P(μ<0)，如圖5.7所示，實心填滿區域之機率即為損傷超越機率。

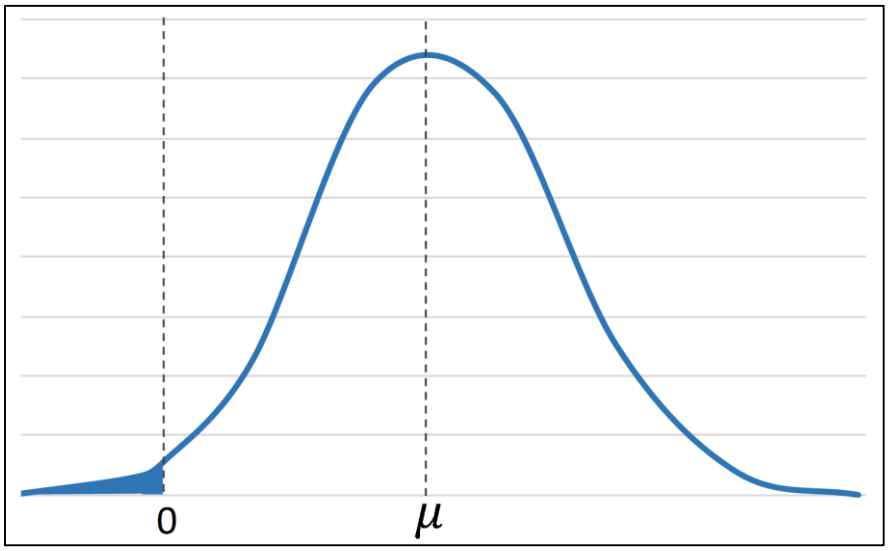


圖 5.7 損傷超越機率示意圖(二)

(2)橋梁構件及元件(橋柱性能除外)

將側推分析時之各項檢核項目變形與受力作為需求(Demand)，依公路橋梁耐震設計規範[交通部，2008]檢核式計算檢核容量(Capacity)，並假設需求與容量皆為常態分佈，參考文獻[呈瑞忠，2015]將變異係數設定為0.1及0.2，當容量不足(如式5.4所示)時，，發生損傷的機率作為橋梁構件、元件的超越機率，計算方式同橋柱性能損傷超越機率之統計方法。

$$\mu = \mu_C - \mu_D \tag{5.4}$$

$\mu < 0$ 表式發生了超越的情形

1.使用反應曲面法結合各元件及構件之各損傷等級超越機率

此階段運用系統可靠度之概念，並使用反應曲面法結合各構件及元件之損傷超越機率，收斂後得到損傷超越機率值。

2.擷取各損傷等級超越機率曲線上各 EPA 對應之損傷超越機率值作為案例庫之輸出因子

於案例側推分析時，可從SAP 2000模型中取得各案例側推各發展階段之EPA值及其耐震容量(如5.1節(3)所示)，故案例庫輸出因子即為各案例側推分析各發展階段之四個損傷等級損傷超越機率值。

5.3 橋梁整體損傷評估案例建置

本計畫共收集17座橋柱材質為鋼筋混凝土橋，以SERCB for Bridge修改模型加入鋼筋斷面腐蝕率後，共建置41筆模型，如表5-2所示。然後依5.2節之步驟，分別建置橋梁整體損傷評估案例，輸出結果如圖5.8所示，並以側推分析過程各階段EPA值所對應之損傷超越機率值完成案例建置。

表5-2 案例資料依鋼筋腐蝕率分類整體

鋼筋腐蝕率	0%	5%	10%	20%	35%
模型案例數量	17	6	6	6	6

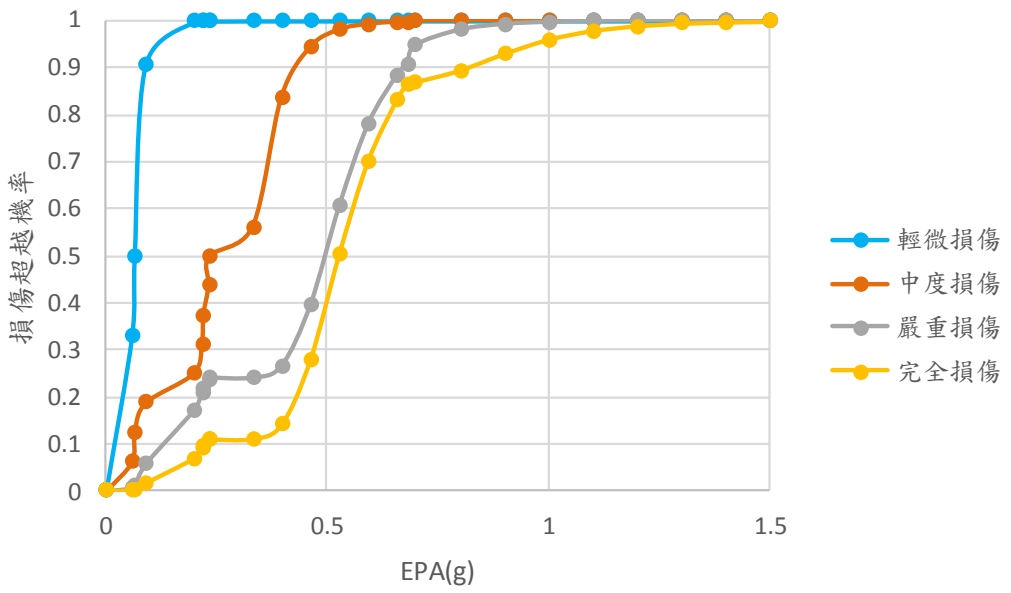


圖 5.8 有效地表加速度_損傷超越機率圖

5.4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

目前，台灣早期地震損失評估系統(TELES)資料庫為國內與地震相關性最高之橋梁管理系統，故本計畫參考TELES為資料庫再國內公路橋梁耐震檢查表欄位因子資料及台灣橋梁管理資訊系統(TBMS)之細部構件之定期檢測評估結果，初步確認橋梁整體耐震能力影響因子。

本階段將以專家訪談結果彙整TELES、TBMS及公路橋梁耐震檢查表欄位，以問卷調查的方式，做第一階段因子篩選，接著運用FPR量化定性因子，最後將第一階段篩選後的因子應用統計分析工具進行第二階段因子篩選，流程如下圖5.9所示:

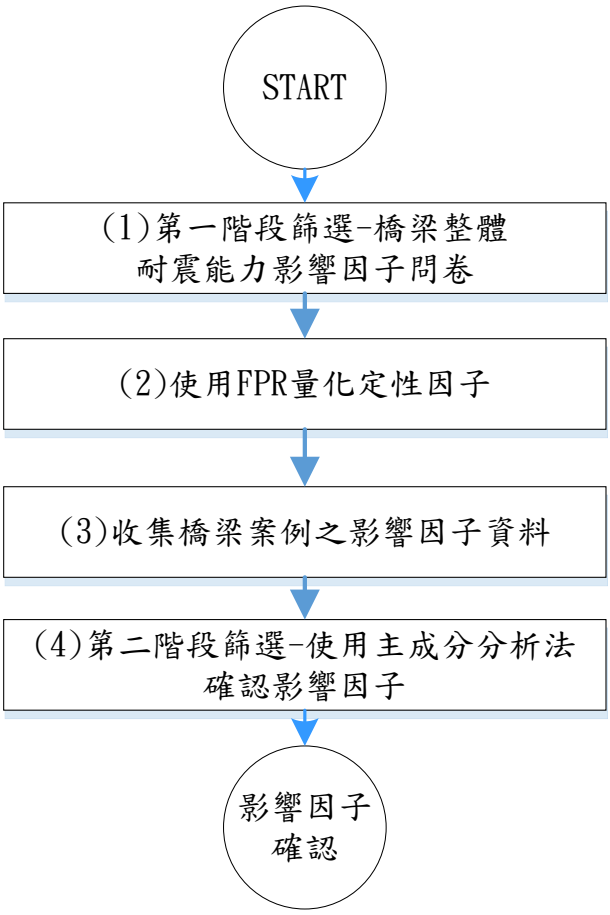


圖 5.9 因子篩選流程圖

5.4.1 第一階段篩選-橋梁整體耐震能力影響因子問卷

1.問卷設計

本研究設計「橋梁整體耐震能力影響因子問卷調查」，問卷內容包括以下三部份：

(1)問卷填寫例示範。

(2)「橋梁整體耐震能力影響因子」相關性調查。

(3)填寫個人資料。

本問卷針對TESLES及TBMS資料欄位透過專家訪談後，先將因子彙整，將資料來源縮減至25個欄位，再派發「橋梁整體耐震能力影響因子問卷」進行調查。如表3.3所示，受測者以自身主觀的認知勾選各項因子對於橋梁整體耐震能力影響的強弱關係。本問卷分為五個等級，分別為無關、微相關、相關、極為相關以及絕對相關。而各等級間再進一步細分折衷值，有助於專家學者選填，量化計算時，由0到10分成九等份，每往右一間格則相關性提高1.25，依序計算之，主要問卷內容如表5-3所示。

表5-3 橋梁整體耐震能力影響因子問卷調查

相關程度(分數) / 影響因子		無關(0)		微相關(2.5)		相關(5)		極為相關(7.5)		絕對相關(10)
定量因子	振動單元數									
	橋長									
	橋寬									
	跨數									
	設計水平加速度									
	歪斜角									
	竣工年									
	基樁裸露深度									
	防落設施狀況									
	支承裝置狀況									
	橋梁座標									
	單跨最大跨距									
	土壤液化類別									
	橋墩墩體/帽梁狀況									
	工址地震危害度									
	柱高									
定性因子	橋梁結構型態									
	橋梁主梁型式									
	橋墩型式									
	橋墩基礎型式									
	橋台型式									
	橋台基礎型式									
	橋梁分類									
	支承種類									
	防落設施種類									

2.問卷填寫

本問卷發放對象多為橋梁及建築相關從業人員。問卷調查總數共發放有效問卷 45 份，受訪者多為碩士學歷，有效問卷受測者背景彙整如表 5-4 所示。

表5-4 問卷受測者背景

學歷	人數
博士	5 名
碩士	33 名
學士	7 名

3.問卷統計量計算

回收與整理「橋梁整體耐震能力影響因子問卷」，將問卷勾選結果轉換成分數，接著計算每個影響因子的最大值、最小值、平均值與標準差，作為後續因子篩選的基礎，結果如表 5-5 所示。

表5-5 問卷結果統計表

影響因子		N	Min	Max	Mean	Std.
定量因子	振動單元數	45	0	10	5.861	2.101
	橋長	45	0	10	5.83	2.716
	橋寬	45	0	10	5.748	2.573
	跨數	45	0	10	5.680	2.188
	設計水平加速度	45	0	10	8.386	2.289
	歪斜角	45	0	10	6.343	2.222
	竣工年	45	0	10	5.502	2.673
	基樁裸露深度	45	0	10	7.263	2.694
	防落長度	45	0	7.5	3.125	2.843
	支承裝置狀況	45	5	10	8.839	1.865
	橋梁座標	45	0	10	2.609	2.864
	單跨最大跨距	45	0	10	7.275	2.174
	土壤液化類別	45	2.5	10	7.944	2.025
	橋墩墩體/帽梁狀況	45	0	10	7.768	3.029
	柱高	45	5	10	8.233	1.822
定性因子	工址地震危害度	45	2.5	10	7.834	2.044
	橋梁主梁型式	45	0	10	5.777	2.834
	橋墩型式	45	2.5	10	7.592	2.251
	橋墩基礎型式	45	3.75	10	6.846	2.417
	橋台型式	45	0	10	5.108	2.079
	橋台基礎型式	45	3.75	10	5.986	2.414
	橋梁分類	45	0	10	5.970	2.356
	橋梁結構型態	45	2.5	10	7.925	1.928
	支承種類	45	0	10	7.138	2.325
	防落設施種類	45	0	7.5	5.319	2.816

4.因子篩選

本研究第一階段篩選之因子採用滿足專家問卷統計結果平均值 3 分以上之條件。第一階段篩選後保留 24 個因子，依據因子的性質可區分為定量因子與定性因子兩類，其中定量因子有 14 個，定性因子有 10 個，如下表 5-6 所示：

表5-6 初步篩選因子結果

	影響因子	因子類型
1	設計水平加速度	定量
2	單跨最大跨距	定量
3	橋寬	定量
4	振動單元數	定量
5	基樁裸露深度	定量
6	防落設施種類	定性
7	防落長度	定量
8	橋長	定量
9	竣工年(橋齡)	定量
10	土壤液化類別	定量
11	歪斜角	定量
12	跨數	定量
13	支承裝置種類	定性
14	結構型態	定性
15	橋墩型式	定性
16	橋台型式	定性
17	橋梁分類	定性
18	主梁型式	定性
19	橋墩基礎型式	定性
20	橋台基礎型式	定性
21	工址地震危害度	定量
22	支承裝置狀況	定量
23	橋墩墩體/帽梁狀況	定量
24	柱高	定量

5.4.2 FPR量化定性因子

由於定性因子並非以數字呈現，無法明確表現其與耐震能力之關係，故本階段需先量化各定性因子，以便後續統計分析工具與推論模式的應用。本研究採用問卷調查的方式，結合模糊偏好關係(FPR)對定性因子進行調查，找出各定性因子的不同定性選項對於耐震能力的強弱的相對權重，達到量化的目的。

1.FPR 問卷調查

定性因子量化計算權重分為以下七個步驟：

(1)定義語意變數：

本研究沿用 E. Herrera.Viedma 等人 (2004)、Tien.Chin Wang 等人 (2007) 研究成果，將語意變數定義為$\left[\frac{1}{9},9\right]$，如表 5-7 所示。

表5-7 定性選項權重語意變數表

定義	重要性程度
絕對重要(Absolutely more Important)	9
極為重要(Very strongly more Important)	7
重要(Strongly more Important)	5
稍為重要(Weakly more Important)	3
一樣重要(Equally Important)	1
稍為不重要(Weakly less Important)	1/3
不重要(Strongly less Important)	1/5
極為不重要(Very strongly less Important)	1/7
絕對不重要(Absolutely less Important)	1/9

(2)專家問卷：

本階段之目的在於找出橋梁整體耐震能力影響因子評估時，定性因子的定性選項彼此之相對重要性關係，以「支承型式」對耐震能力的關係為例，問卷如表 5-8 所示。

表5-8 定性因子計算權重問卷表

	非常弱			長		相等		短		非常強	
Df_{I-1}											Df_{I-2}
Df_{I-2}											Df_{I-3}
Df_{I-3}											Df_{I-4}
代號		支承型式									
Df_{I-1}		無支承									
Df_{I-2}		合成橡膠支承									
Df_{I-3}		鋼製支承									
Df_{I-4}		盤式支承									

本問卷分別對表 5-6 中共 10 個定性因子做橋梁整體耐震能力問卷調查，填寫人以自身主觀的認知勾選各因子的定性選項對於橋梁整體耐震能力的強弱關係。本問卷分為五個等級 分別為非常長、長、相等、短以及非常短。以表 5-8 為例，DfI-1(無支承)和 DfI-2(合成橡膠支承)比較下，DfI-1 相對於 DfI-2 來說，使用無支承之橋梁整體耐震能力，若程度為”非常弱”，請於”非常弱”欄位內劃記。

(3)建置成對比較矩陣：

依據橋梁整體耐震能力的影響因子(Fi, i = 1,2,. . . ,n)，讓每一位受測者(Ek, k = 1,2,. . . ,m; k:受測者編號)針對兩兩選項間進行成對比較，即 F1 比 F2、F2 比 F3、F3 比 F4…以此類推，得知相關的正倒值乘積偏好關係 A=(a_{ij})，其中 $a_{ij} \in \left[\frac{1}{9},9\right]$，如式 5.5 所示。

$$A^k = \begin{array}{c} \\ F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} F_1 & F_2 & F_3 & \cdots & F_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & a_{12}^k & \times & \times & \times \\ \times & 1 & a_{23}^k & \times & \times \\ \times & \times & 1 & a_{34}^k & \times \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & a_{n-1n}^k \\ \times & \times & \times & \times & 1 \end{bmatrix} \end{array} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.5)$$

從成對比較偏好關係值 a_{ij}，透過 $p_{ij} = g(a_{ij}) = \frac{1}{2}(1+\log_9 a_{ij})$ 求得與 A 之相對應的正倒值模糊偏好關係 $P = (p_{ij})$，其中 $P_{ij} \in [0,1]$，如式 5.6 所示。

$$A^k \quad \Rightarrow \quad P^k = \begin{array}{c} \\ F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} F_1 & F_2 & F_3 & \cdots & F_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0.5 & p_{12}^k & \times & \times & \times \\ 1-p_{12}^k & 0.5 & p_{23}^k & \times & \times \\ \times & 1-p_{23}^k & 0.5 & p_{34}^k & \times \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & p_{n-1n}^k \\ \times & \times & \times & \times & 0.5 \end{bmatrix} \end{array} \quad \cdots\cdots (5.6)$$

(4)計算一致性模糊偏好關係（FPR）：

透過轉換函數公式，求得 n-1 個模糊偏好關係值 $\{p_{12}, p_{23}, \ldots, p_{n-1n}\}$，此 n-1 個模糊偏好關係值，可得式 5.5，利用

式 5.7 求得矩陣 P 之其他各個元素的模糊偏好關係值。

$$p_{ji} = \frac{j-i+1}{2} - p_{ii+1} - p_{i+1i+2} \cdots - p_{j-1j} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.7)$$

其中 $P_{ij} \in [0,1]$ 矩陣 P 的數值必須在 0 與 1 之間，若其中有一數值未介於 0 與 1 之間，需透過式 5.8 加以轉換獲得一致性模糊偏好關係 P′確保整個矩陣一致性。

$$f(x) = \frac{x+a}{1+2a} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.8)$$

其中 $a = \left|\min\left\{B \cup \left\{p_{12}, p_{23}, \cdots, p_{n-1n}\right\} \cup \neg B \cup \left\{1-p_{12}, 1-p_{23}, \cdots, 1-p_{n-1n}\right\}\right\}\right|$

(5)將受測者之成對矩陣 FPR 進行平均：

將各個決策者做出的 p_{ij}^{k} 值，加權平均求出 p_{ij} 。如式 5.9 所示。

$$p_{ij} = \frac{1}{m}\left(p_{ij}^{1} + p_{ij}^{2} + \ldots + p_{ij}^{m}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.9)$$

(6)正規化 step5.所得之 FPR 矩陣：

正規化第五步驟所求出平均的模糊偏好關係，依據式 5.10 所示，表示各個選項因子的模糊偏好值。

$$r_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} p_{ij}} \quad , \quad i, j = 1,2,\cdots,n \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.10)$$

(7)求取各定性因子的定性選項之權重：

最後依據式 5.11 所示，則可找到各定性因子的定性選項之權重 $\overline{w_i}$ 。

$$\overline{w_i} = \frac{\sum_{j-1}^{n} r_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j-1}^{n} r_{ij}} \quad \text{.....(5.11)}$$

2.量化結果

本階段係根據前節Step 6所求出的模糊偏好值，即為各定性選項的量化值，在此以合約類型為例，其量化結果如表5-9所示。所求得之模糊偏好值再經過Step 7的公式做正規化轉換為權重值，以供後續統計分析與推論模式使用。

表5-9 定性選項量化範例表

合約類型定性選項	模糊偏好值 Total	Weight
無支承	0.6935	0.1734
合成橡膠支承	1.0273	0.2568
鋼製支承	1.1384	0.2846
盤式支承	1.1408	0.2852
	合計	1.0000

5.4.3 收集橋梁案例之影響因子資料

本階段以前步驟之初步篩選結果，進行案例影響因子資料蒐集，各欄位對應資料如表5-10、表5-11。

表5-10 定量因子

因子性質	影響因子	定量單位	資料來源
定量	振動單元數	個	TELES
	橋長	M	TELES
	橋寬	M	TELES
	跨數	個	TELES
	設計水平加速度	G	TELES
	歪斜角	角度	檢查表
	竣工年	年	TELES
	基樁裸露深度	M	檢查表
	防落長度	M	TBMS
	支承裝置狀況	D.E.R.U 分數	TBMS
	單跨最大跨距	M	TELES
	土壤液化類別	類別編號	TELES
	橋墩墩體/帽梁狀況	D.E.R.U 分數	TBMS
	柱高	M	TBMS
	工址地震危害度	S_{DS}、T_o^D	規範

表5-11 定性因子

因子性質	影響因子	定性選項	資料來源
定性因子	橋梁結構型態	簡支梁橋	TELES
		連續梁橋	
		桁架橋	
		拱橋	
		斜張橋	
		吊橋	
	橋梁主梁型式	I 型梁	TELES
		T 型梁	
		U 型梁	
		箱型梁	
		版梁	
	橋墩型式	單跨無橋墩	TELES
		單柱式	
		架構式	
		壁式	
	橋墩基礎型式	無橋墩基礎	TELES
		直接基礎	
		樁基礎	
		沉箱基礎	
	橋台型式	無橋台	TELES
		重力式	
		懸臂式	
		扶壁式	
		鋼構式	
		樁排架式	
	橋台基礎型式	無橋台基礎	TELES
		直接基礎	
		樁基礎	
		沉箱基礎	

表5-11 定性因子(續)

因子性質	影響因子	定性選項	資料來源
定性因子	橋梁分類	單跨橋	TELES
		多跨簡支橋－單柱橋墩	
		多跨簡支橋－架購式橋墩	
		多跨簡支橋－壁式橋墩	
		多跨連續橋－單柱橋墩	
		多跨連續橋－架構式橋墩	
		多跨連續橋－壁式橋墩	
	防落設施	無妨落設施	TELES
		鋼製止震塊	
		RC 止震塊	
		防震拉桿	
		剪力鋼棒	
	支承型式	無支承	TELES
		合成橡膠支承	
		鋼製支承	
		盤式支承	

5.4.4 第二階段因子篩選

經第一階段因子篩選後，影響因子共保留24個。本研究所採用之人工智慧推論模式SOS-LSSVM，雖然可以處理大量的數據資料，但如果各特徵因子與輸出值呈現非正相關性時，訓練階段除容易干擾輸出因子，且造成誤差大，所以須利用客觀方式，分析評估因子與橋梁整體耐震能力相關性，挑選相關顯著參數作為模式因子。

在統計學中，相關（Correlation，或稱相關係數），是顯示兩個隨機變數之間線性關係的強度和方向。對於不同數據特點，可以使用不同的係數。最常用的是皮爾遜相關係數（Pearson's Product-Moment Correlation Coefficient）。其定義如下：

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\frac{1}{N}\sum(X-M_X)(Y-u_Y)}{\sqrt{\frac{1}{N}\sum(X-u_X)^2}\sqrt{\frac{1}{N}\sum(Y-u_Y)^2}} \quad \text{..... (5.12)}$$

ρ_{XY}：X,Y 變數的相關係數

σ_{XY}：X 與 Y 的共變數

σ_X：X 的標準差

σ_Y：Y 的標準差

μ_X：X 的平均數

μ_Y：Y 的平均數

ρ_{XY}樣本的相關係數是一次方的函數，可以用散佈圖來查看。ρ_{XY}正相關圖如圖5.10，ρ_{XY}負相關圖如圖5.11：

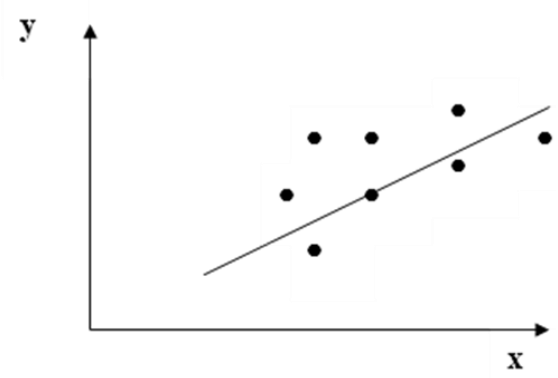


圖5.10 正相關圖例

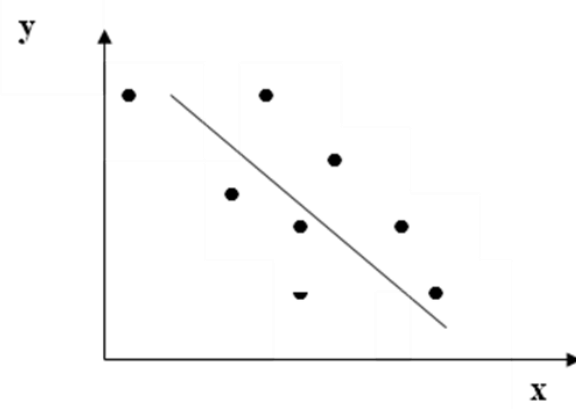


圖5.11 負相關圖例

本研究階段將使用SPSS22.0版，應用其中的主成分分析法、相關係數分析、類神經網路，針對24個因子與橋梁整體耐震能力做分析，找出各輸入因子與輸出因子的相關性程度，最後再依據分析結果做第二階段的因子篩選。

1.主成分分析法

(1)橋梁整體耐震能力影響因子問卷統計計算

採用表5-5統計計算求得各因子之平均值與標準差，作為後續相關矩陣分析之基礎。

(2)橋梁簡易調查因子耐震能力相關矩陣分析：

根據n份回收問卷中，假設某一評估構面有p個指標，則第一份問卷之量化方法以 x_{11}、x_{21}、x_{31}、.....、x_{p1} 表示，第二份問卷則以 x_{12}、x_{22}、x_{32}、.....、x_{p2} 表示，依此類推，則會形成一個原始數據矩陣，如公式5.13所示

$$x=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & .. & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & .. & x_{2n} \\ .. & .. & .. & .. \\ .. & .. & .. & .. \\ x_{p1} & x_{p1} & x_{p1} & x_{p1} \end{bmatrix} \quad \text{.....(5.13)}$$

$$x_{ij}^{'}=\frac{x_{ij}-\bar{x}_i}{S_i}\left(i=1,2....p;\ j=1,2,.....n\right) \quad \text{.....(5.14)}$$

$$\bar{x}_i=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}x_{ij} \qquad S_i^2=\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij}-\bar{x}_i)^2 \quad \text{.....(5.15)}$$

其中 x_{ij} 為原始變量，$\bar{x}_i$ 為變量平均值，S_i 為變量標準差，以及 $x_{ij}^{'}$ 為標準化後之變量。利用皮爾森（Pearson）相關係數計算公式，如式5.16，將原始數據矩陣轉化成皮爾森相關係數矩陣R，如式5.17，結果如表5-12。

$$r_{ij}=\frac{\left(\sum_{k=1}^{n}x_{ij}^{'}\bullet x_{ji}^{'}\right)}{n-1} \qquad (i,j=1,2,3.....p) \quad \text{.....} \quad (5.16)$$

$$R=\begin{bmatrix} 1 & r_{12} & .... & r_{1p} \\ r_{21} & 1 & .... & r_{2p} \\ .. & .. & .... & .. \\ .. & .. & .... & .. \\ r_{p1} & r_{p2} & .... & 1 \end{bmatrix} \quad \text{.....(5.17)}$$

表5-12 橋梁整體耐震能力影響因子相關矩陣

		單跨最大跨距	橋寬	振動單元數	基樁裸露深度	設計水平加速度	橋長	土壤液化類別	歪斜角	跨數	結構型態	橋墩型式	橋台型式	支承型式	橋梁分類	主梁型式	橋墩基礎型式	橋台基礎型式	防落設施	地盤種類	竣工年	防落長度	柱高	支承狀況	橋墩墩體/帽梁狀況
相關	單跨最大跨距	1	0.652	0.884	0.39	0.439	0.688	0.476	0.851	0.786	0.857	0.725	0.722	0.762	0.676	0.789	0.729	0.781	0.244	0.518	0.417	0.044	0.097	0.147	0.128
	橋寬	0.652	1	0.529	0.438	0.371	0.807	0.337	0.459	0.484	0.542	0.515	0.391	0.702	0.523	0.532	0.537	0.447	0.367	0.314	0.478	-0.051	0.097	0.097	0.064
	振動單元數	0.884	0.529	1	0.238	0.373	0.522	0.429	0.776	0.808	0.857	0.706	0.758	0.659	0.617	0.715	0.662	0.739	0.054	0.443	0.32	0.041	0.128	0.084	0.12
	基樁裸露深度	0.39	0.438	0.238	1	0.68	0.425	0.769	0.553	0.373	0.459	0.583	0.271	0.475	0.453	0.484	0.649	0.458	0.579	0.673	0.508	0.091	-0.045	0.028	0.034
	設計水平加速度	0.439	0.371	0.373	0.68	1	0.35	0.811	0.542	0.525	0.668	0.699	0.483	0.567	0.555	0.467	0.672	0.604	0.541	0.789	0.694	0.015	-0.116	0.059	-0.007
	橋長	0.688	0.807	0.522	0.425	0.35	1	0.314	0.497	0.55	0.526	0.491	0.487	0.691	0.68	0.63	0.531	0.461	0.322	0.3	0.38	-0.052	0.07	0.144	0.157
	土壤液化類別	0.476	0.337	0.429	0.769	0.811	0.314	1	0.687	0.566	0.673	0.69	0.486	0.605	0.481	0.546	0.75	0.684	0.459	0.847	0.67	0.127	-0.126	-0.032	-0.039
	歪斜角	0.851	0.459	0.776	0.553	0.542	0.497	0.687	1	0.793	0.783	0.777	0.71	0.584	0.65	0.693	0.82	0.842	0.227	0.636	0.488	0.168	0.039	-0.004	0.022
	跨數	0.786	0.484	0.808	0.373	0.525	0.55	0.566	0.793	1	0.857	0.814	0.844	0.606	0.785	0.783	0.846	0.866	0.115	0.69	0.402	0.074	0.08	0.052	0.064
	結構型態	0.857	0.542	0.857	0.459	0.668	0.526	0.673	0.783	0.857	1	0.849	0.827	0.805	0.701	0.815	0.795	0.847	0.232	0.775	0.597	0.046	0.096	0.158	0.123
	橋墩型式	0.725	0.515	0.706	0.583	0.699	0.491	0.69	0.777	0.814	0.849	1	0.845	0.708	0.769	0.813	0.917	0.896	0.372	0.814	0.606	0.169	0.159	0.06	0.099
	橋台型式	0.722	0.391	0.758	0.271	0.483	0.487	0.486	0.71	0.844	0.827	0.845	1	0.657	0.801	0.791	0.778	0.87	-0.016	0.665	0.413	0.087	0.159	0.068	0.062
	支承型式	0.762	0.702	0.659	0.475	0.567	0.691	0.605	0.584	0.606	0.805	0.708	0.657	1	0.587	0.78	0.677	0.729	0.339	0.636	0.694	-0.02	0.13	0.216	0.219
	橋梁分類	0.676	0.523	0.617	0.453	0.555	0.68	0.481	0.65	0.785	0.701	0.769	0.801	0.587	1	0.783	0.771	0.765	0.126	0.627	0.363	0.047	0.126	0.052	0.112
	主梁型式	0.789	0.532	0.715	0.484	0.467	0.63	0.546	0.693	0.783	0.815	0.813	0.791	0.78	0.783	1	0.808	0.822	0.143	0.685	0.356	0.169	0.217	0.202	0.247
	橋墩基礎型式	0.729	0.537	0.662	0.649	0.672	0.531	0.75	0.82	0.846	0.795	0.917	0.778	0.677	0.771	0.808	1	0.937	0.292	0.838	0.531	0.158	0.034	-0.002	0.011
	橋台基礎型式	0.781	0.447	0.739	0.458	0.604	0.461	0.684	0.842	0.866	0.847	0.896	0.87	0.729	0.765	0.822	0.937	1	0.129	0.814	0.546	0.129	0.078	0.034	0.052
	防落設施	0.244	0.367	0.054	0.579	0.541	0.322	0.459	0.227	0.115	0.232	0.372	-0.016	0.339	0.126	0.143	0.292	0.129	1	0.34	0.49	0.15	-0.058	0.035	0.029
	工址地震危害度	0.518	0.314	0.443	0.673	0.789	0.3	0.847	0.636	0.69	0.775	0.814	0.665	0.636	0.627	0.685	0.838	0.814	0.34	1	0.698	0.138	-0.001	0.045	0.015
	竣工年	0.417	0.478	0.32	0.508	0.694	0.38	0.67	0.488	0.402	0.597	0.606	0.413	0.694	0.363	0.356	0.531	0.546	0.49	0.698	1	0.031	0.02	0.017	0.045
	防落長度	0.044	-0.051	0.041	0.091	0.015	-0.052	0.127	0.168	0.074	0.046	0.169	0.087	-0.02	0.047	0.169	0.158	0.129	0.15	0.138	0.031	1	0.197	-0.16	0.08
	柱高	0.097	0.097	0.128	-0.045	-0.116	0.07	-0.126	0.039	0.08	0.096	0.159	0.159	0.13	0.126	0.217	0.034	0.078	-0.058	-0.001	0.02	0.197	1	0.361	0.642
	支承狀況	0.147	0.097	0.084	0.028	0.059	0.144	-0.032	-0.004	0.052	0.158	0.06	0.068	0.216	0.052	0.202	-0.002	0.034	0.035	0.045	0.017	-0.16	0.361	1	0.666
	橋墩墩體/帽梁狀況	0.128	0.064	0.12	0.034	-0.007	0.157	-0.039	0.022	0.064	0.123	0.099	0.062	0.219	0.112	0.247	0.011	0.052	0.029	0.015	0.045	0.08	0.642	0.666	1

(3)橋梁簡易調查因子耐震相關之因素萃取

本研究之因素萃取採用主成份分析法，假設對於式5.16相關係數矩陣之相對應特徵值為λ_1、λ_2、.....λ_p、特徵向量為Cij，則有以下行列式5.18關係存在

$$CRC' = \Lambda \quad \text{.....(5.18)}$$

由C'左乘式 5.20，可得

$$RC' = C'\Lambda \quad \text{..... (5.19)}$$

其中R = xx'為相關係數，特徵向量Cij為正交矩陣，滿足$C \cdot C' = I$，而 Λ 定義為式5.20：

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & .... & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & .... & 0 \\ .. & .. & .. & .... & .. \\ .. & .. & .. & .... & .. \\ 0 & .. & .. & .... & \lambda_P \end{bmatrix} \quad \text{.....(5.20)}$$

λ_i稱為主成份特徵值，因此式5.19可改寫成式5.21：

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & ...r_{1p} \\ ..... & & \\ ..... & & \\ r_{p1} & r_{p2} & ...r_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & ..C_{p1} \\ ..... & & \\ ..... & & \\ C_{1p} & C_{2p} & ..C_{pp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & ...C_{p1} \\ ..... & & \\ ..... & & \\ C_{1P} & C_{2P} & ...C_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & .....0 \\ 0 & \lambda_2 & ..... \\ & & ..... \\ 0 & ..... & \lambda_P \end{bmatrix} \quad \text{.....(5.21)}$$

將式5.21展開可得p^2個方程式，在此考慮在該矩陣乘積中由第一行所得之p個方程為：

$$\begin{cases} (r_{11} - \lambda_1)C_{11} + r_{12}C_{12} + ... + r_{1p}C_{1p} = 0 \\ r_{21}C_{11} + (r_{22} - \lambda_1)C_{12} + ... + r_{2p}C_{1p} = 0 \\ ..... \\ r_{p1}C_{11} + r_{p2}C_{12} + ... + (r_{pp} - \lambda_1)C_{1p} = 0 \end{cases} \quad \text{.....(5.22)}$$

為得到齊次方程式5.22的非零解，要求關於C_{ij}的係數行列式為零，即為：

$$\begin{bmatrix} (r_{11}-\lambda_1) & r_{12} & .... & r_{1P} \\ r_{21} & (r_{22}-\lambda_1) & .... & r_{2P} \\ .. & .. & .... & r_{21} \\ .. & .. & ..... & .. \\ r_{p1} & r_{p2}C_{p2} & .... & r_{p1} \end{bmatrix} = 0 \quad \text{.....(5.23)}$$

依此類推寫成矩陣式可得式5.24：

$$\left|R-\lambda \mathrm{I}\right| = 0 \quad \text{.....(5.24)}$$

其中矩陣Ⅰ稱為單位矩陣，由此矩陣行列式可解出特徵值λ_1、λ_2、.....λ_p，而特徵值相對應之特徵向量Cij也可依式5.17求出。

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & .... & c_{1p} \\ c_{21} & c_{22} & .... & c_{2p} \\ .. & .. & .... & .. \\ c_{p1} & c_{p1} & .... & c_{p1} \end{bmatrix} = (C_1 \quad C_2 \quad .. \quad ...C_p) \quad \text{.....(5.25)}$$

可求得主成份之特徵向量矩陣如式5.26所示：

$$y = \begin{Bmatrix} y_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + ...c_{1p}x_p \\ y_2 = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + ...c_{2p}x_p \\ ..... \\ y_p = c_{p1}x_1 + c_{p2}x_2 + ...c_{pp}x_p \end{Bmatrix} \quad \text{.....(5.26)}$$

所得到之y_i主成份量p個，即是對於樣本事件具有解釋能力之互相獨立之變量，其累積解釋能力為100%。而針對其p個主成份篩選以簡化相對變量之方法為累積解釋變異比門檻值大約定為80%且特徵值大於1。

利用公式(5.26)，將相關矩陣計算出各主成分之特徵值，如表5-13所示，並畫出相對之因素陡坡圖(Screen Plot)如圖5.12所示。由於前五個主成份對總體解釋能力已達85.78%，且特徵值大於1，故萃取特徵值大於1的五個主成分。

表5-13 橋梁整體耐震能力因子主成分表

元件	起始特徵值			擷取平方和載入			循環平方和載入	
	總計	變異的 %	累加 %	總計	變異的 %	累加 %	總計	變異的 %
1	12.782	53.256	53.256	12.782	53.256	53.256	9.413	39.222
2	2.538	10.575	63.832	2.538	10.575	63.832	4.714	19.642
3	1.985	8.270	72.102	1.985	8.270	72.102	2.359	9.830
4	1.520	6.332	78.434	1.520	6.332	78.434	2.235	9.314
5	1.117	4.656	83.090	1.117	4.656	83.090	1.220	5.083
6	.722	3.007	86.097					
7	.663	2.761	88.858					
8	.487	2.030	90.888					
9	.438	1.824	92.712					
10	.316	1.317	94.029					
11	.285	1.186	95.215					
12	.248	1.032	96.247					
13	.203	.845	97.092					
14	.163	.678	97.770					
15	.135	.562	98.332					
16	.126	.525	98.857					
17	.079	.328	99.184					
18	.061	.254	99.438					
19	.056	.235	99.673					
20	.043	.179	99.852					
21	.017	.072	99.924					
22	.009	.038	99.962					
23	.008	.032	99.994					
24	.001	.006	100.000					

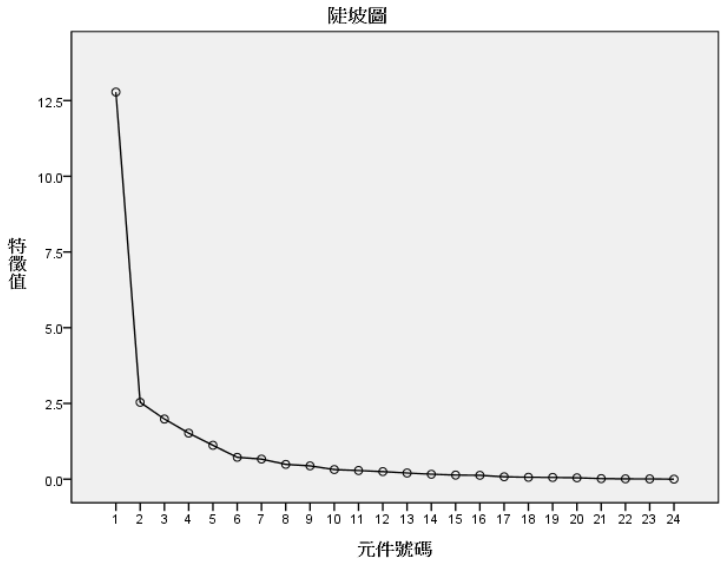


圖 5.12 橋梁整體耐震能力影響主成分因素陡坡圖

(4)計算因素載荷矩陣

假設依(3)篩選出之主成份為m個，則此m個主成份經由特徵向量與特徵值方根相乘積所形成之變數矩陣為$\boldsymbol{Y_{m*p}=C'_{m*p}X_{m*p}}$，對此矩陣兩端同乘以$\boldsymbol{C'}$的正交矩陣$\boldsymbol{C}$之後得出$\boldsymbol{X_{m*p}=C_{m*p}Y_{m*p}}$之矩陣。此矩陣稱為「因素模型」，代表原始變量與主成份間之相對關係大小。而將因素模型進行規格化計算後得出一X矩陣稱為因素載荷矩陣，如式5.27所示矩陣。

$$X=\begin{Bmatrix} x_1=a_{11}y_1+ & a_{12}y_2+ & ..a_{1p}y_m \\ x_2=a_{21}y_1+ & ... & ... \quad ... \\ ... & ... & ... \quad ... \\ x_p=a_{p1}y_1+ & a_{p2}y_2 & ...+ \quad a_{pm}y_m \end{Bmatrix} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad \cdots\cdots (5.27)$$

在因素載荷矩陣中：

① $\boldsymbol{y_1}$、$\boldsymbol{y_x}$、$\boldsymbol{y_3}$、.....、$\boldsymbol{y_m}$稱為公共因子(主成份)，它是在各個變量中共同出的因子，公共因子是高維空間中所張起的互相垂直的m個坐標軸。

② $\boldsymbol{a_{ij}}$為因子載荷，它是第i個變量在第j個主成份上的負荷，或者為第i個變量在第j個主成份上的權，它反映了第i個變量在第j個主成分上的相對重要性。如果把看作高維因子空間上的一個向量，則因子荷載量即表示在坐標軸上的投影。

橋梁整體耐震能力影響之因素載荷矩陣如表 5-14 所示。

表5-14 橋梁整體耐震能力影響之因素載荷矩陣

	元件				
	1	2	3	4	5
單跨最大跨距	0.857	0.245	-0.12	-0.226	0.095
橋寬	0.641	0.094	0.193	-0.581	0.251
振動單元數	0.786	0.319	-0.278	-0.109	0.021
基樁裸露深度	0.635	-0.439	0.362	0.016	0.081
設計水平加速度	0.73	-0.442	0.239	0.089	-0.209
橋長	0.661	0.196	0.145	-0.562	0.233
土壤液化類別	0.764	-0.467	0.141	0.19	-0.111
歪斜角	0.856	-0.012	-0.184	0.063	0.09
跨數	0.874	0.154	-0.278	0.049	-0.039
結構型態	0.929	0.093	-0.076	0.02	-0.135
橋墩型式	0.932	-0.029	-0.025	0.166	0.022
橋台型式	0.837	0.231	-0.315	0.133	-0.096
支承型式	0.838	0.099	0.204	-0.226	-0.051
橋梁分類	0.817	0.154	-0.147	-0.041	0.027
主梁型式	0.871	0.268	-0.047	0.058	0.063
橋墩基礎型式	0.928	-0.102	-0.112	0.12	0.031
橋台基礎型式	0.922	0.04	-0.22	0.175	-0.078
防落設施種類	0.355	-0.47	0.57	-0.151	0.275
工址地震危害度	0.831	-0.304	0.064	0.314	-0.191
竣工年	0.653	-0.348	0.326	-0.028	-0.104
防落長度	0.109	-0.04	0.007	0.541	0.749
柱高	0.101	0.632	0.385	0.351	0.204
支承狀況	0.108	0.532	0.571	0.054	-0.384
橋墩墩體/帽梁狀況	0.12	0.634	0.612	0.254	-0.055

擷取方法：主體元件分析。

(5)進行因素轉軸

本步驟是利用各主成份矩陣之特性進行空間軸之旋轉。即是說，若第i個變量在第j個主成份上經過旋轉後其值增大或縮小，意味著該變量在另一些主成份上的荷載要縮小或增大。所以因素轉軸是使因素荷載按列向0、1二極分化。進一步使各變量對主成份之關係能夠被明顯表現

出來，橋梁整體耐震能力影響轉軸後之因素載荷矩陣如表5-15所示。

表5-15 橋梁整體耐震能力影響轉軸後之因素載荷矩陣

	元件				
	1	2	3	4	5
單跨最大跨距	0.791	0.142	0.467	0.068	-0.016
橋寬	0.362	0.236	**0.817**	0.037	-0.053
振動單元數	**0.849**	-0.001	0.293	0.052	-0.027
基樁裸露深度	0.234	0.786	0.224	-0.017	0.106
設計水平加速度	0.405	**0.812**	0.031	-0.034	-0.109
橋長	0.433	0.157	**0.803**	0.083	-0.062
土壤液化類別	0.476	0.795	-0.025	-0.098	0.027
歪斜角	0.79	0.32	0.179	-0.064	0.129
跨數	**0.904**	0.18	0.139	-0.001	0.004
結構型態	**0.845**	0.363	0.176	0.101	-0.09
橋墩型式	**0.797**	0.477	0.124	0.074	0.122
橋台型式	**0.929**	0.111	0.038	0.056	-0.008
支承型式	0.6	0.421	0.456	0.203	-0.14
橋梁分類	0.778	0.203	0.258	0.049	0.016
主梁型式	**0.82**	0.217	0.252	0.218	0.094
橋墩基礎型式	**0.805**	0.469	0.132	-0.048	0.109
橋台基礎型式	**0.907**	0.334	0.032	0.006	0.036
防落設施種類	-0.144	0.737	0.413	0.006	0.189
工址地震危害度	0.638	0.705	-0.136	0.012	0.014
竣工年	0.301	0.73	0.187	0.034	-0.079
防落長度	0.086	0.074	-0.074	0.037	**0.92**
柱高	0.119	-0.138	0.031	0.761	0.331
支承狀況	0.023	0.058	0.04	**0.814**	-0.323
橋墩墩體/帽梁狀況	0.042	0.009	0.056	**0.921**	0.058

(6)篩選橋梁耐震能力影響因子

為了有效篩選橋梁耐震能力影響因子，對於各主成份之指標篩選原則為每一主成份選取最重要的因子，若該主成份中重要因子極顯著接近，則依該因子群之特性一起選取。將經過因素分析法篩選

後所得到之橋梁耐震能力影響因子予以彙整，如表5-16。

表5-16 主成分分析之橋梁整體耐震重要性因子

1.橋寬	8.橋台型式
2.振動單元數	9.主梁型式
3.設計水平加速度	10.橋墩基礎型式
4.橋長	11.橋台基礎型式
5.跨數	12.防落長度
6.結構型態	13.支承狀況
7.橋墩型式	14.橋墩墩體/帽梁狀況

2.相關係數分析法

本階段將正規化後之歷史案例數據，應用SPSS 22版進行分析，以Pearson分析法、Kendall's tau_b統計量數分析法及Spearman's rho係數法，對2844筆案例需篩選的24個因子與損傷超越機率值進行相關係數分析，在三個方法之結果中取聯集找出顯著水準低於0.05之橋梁整體耐震影響因子，作為本階段橋梁整體耐震能力影響因子，其分析結果如表5-17所示。

表5-17 相關係數分析之橋梁耐震重要性因子

1. 柱高	7. 支承狀況
2. 單跨最大跨距	8. 橋墩型式
3. 橋寬	9. 橋台型式
4. 設計水平加速度	10.支承型式
5. 土壤液化類別	11.主梁型式
6. 結構型態	

3.類神經網路

本階段將正規化後之歷史案例數據，應用SPSS 22.0版進行分析，以類神經網路之多層感知法，對2844筆案例的24項因子與損傷超越機率進行分析，對24項橋梁整體耐震影響因子作重要性排序，其五次的分析結果如表5-18。

表5-18 多層感知法之橋梁整體耐震常態化重要性因子(單位%)

	1	2	3	4	5
單跨最大跨距	**64.9**	**62.6**	**86.2**	**100**	49.0
橋寬	30.3	12.7	**100**	37.4	**65.4**
振動單元數	35.8	**100**	30.1	25.3	**100**
基樁裸露深度	44.7	22.1	37.5	44.5	16.3
設計水平加速度	27.0	47.4	12.7	26.8	27.8
橋長	**72.4**	**67.2**	**82.0**	41.7	28.6
土壤液化類別	35.2	42.4	23.0	28.4	40.6
歪斜角	14.7	27.3	6.7	13.1	7.8
跨數	100	**52.2**	45.3	**63.5**	**67.1**
結構型態	32.4	13.5	**78.4**	14.2	17.0
橋墩型式	**55.2**	31.6	18.4	10.6	42.2
橋台型式	**51.1**	12.0	31.8	16.6	14.4
支承型式	26.6	26.8	9.5	19.0	30.9
橋梁分類	43.2	15.2	49.1	11.2	19.6
主梁型式	35.8	33.3	38.9	49.9	47.8
橋墩基礎型式	41.5	16.5	**67.5**	26.5	**66.4**
橋台基礎型式	**56.3**	26	15.4	20.0	15.3
防落設施種類	19.2	35.4	16.7	42.4	38.0
工址地震危害度	15.2	28.0	29.4	40.3	28.3
竣工年	34.0	**86.8**	24.7	18.1	36.7
防落長度	**95.1**	30.7	23.6	20.3	50.2
柱高	**97.2**	25	35.7	29.5	25.6
支承狀況	21.9	15.7	8.9	15.5	24.9
橋墩墩體/帽梁狀況	26.2	15.7	16.3	16.8	38.1

在五次分析中，取任一次結果中常態重要性高於50%之橋梁整體耐震影響因子，作為本階段橋梁整體耐震能力影響因子，分析結果如表5-19所示。

表5-19 相關係數分析之橋梁耐震重要性因子

1. 單跨最大跨距	6. 橋墩型式
2. 橋寬	7. 橋墩基礎型式
3. 振動單元數	8. 竣工年
4. 橋長	9. 防落長度
5. 跨數	

彙整三種統計分析方法篩選出之因子，如表5-20所示，在三種方法中出現兩次之因子，即為本模型之橋梁整體耐震能力影響因子，如表5-21所示。另外，本研究推論模式為考量鋼筋腐蝕率，求取不同損傷等級各EPA點為之損傷超越機率值，故增加鋼筋腐蝕率、損傷等級、EPA等三因子，因子說明如表5-22。

表5-20 分析結果整理表

	主成分分析法	相關係數分析	類神經網路
柱高		◎	
單跨最大跨距		◎	◎
橋寬	◎	◎	◎
振動單元數	◎		◎
基樁裸露深度			
設計水平加速度	◎	◎	
橋長	◎		◎
土壤液化類別		◎	
歪斜角			
跨數	◎		◎
結構型態	◎	◎	
橋墩型式	◎	◎	◎
橋台型式	◎	◎	
支承型式		◎	
橋梁分類			
主梁型式	◎	◎	
橋墩基礎型式	◎		◎
橋台基礎型式	◎		
防落設施			
工址地震危害度			
竣工年			◎
防落長度	◎		◎
支承狀況	◎	◎	
橋墩墩體/帽梁狀況	◎		

表5-21 橋梁整體耐震能力影響因子

1. 單跨最大跨距	6. 跨數	11. 橋墩基礎型式
2. 橋寬	7. 結構型態	12. 防落長度
3. 振動單元數	8. 橋墩型式	13. 支承狀況
4. 設計水平加速度	9. 橋台型式	
5. 橋長	10.主梁型式	

表5-22 必要因子欄位說明

因子項目	鋼筋腐蝕率				
欄位	0%	5%	10%	20%	35%
數值	0	5	10	20	35
因子項目	損傷等級				EPA
欄位	輕微損傷	中度損傷	嚴重損傷	完全損傷	側推分析各 STEP 之 EPA
數值	1	2	3	4	EPA 值

5.5 橋梁整體耐震能力案例資料庫建立

根據上述之結果，後續將以 16 個影響因子作為輸入變數及 41 筆損傷評估結果建立案例資料庫。

5.5.1 推論模式建立

本研究使用文獻[Cheng and Doddy, 2014]中，由 Min-Yuan Cheng and Doddy Prayogo 提出以 SOS 及 LS-SVM 為架構發展而成的最佳化決策模式「生物共生演算法最小平方差支持向量機」(Symbiotic Organisms Search- Hybrid Least Squares SVM，SOS-LSSVM)做為本研究預測模式的核心推論引擎。本研究將依照圖 5.13 之架構建立推論模式，以下詳加說明各步驟內容。

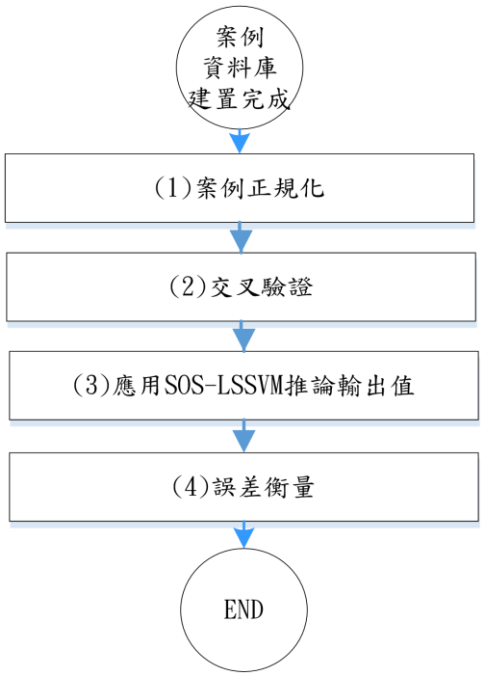


圖 5.13 推論模式建立流程圖

1. 案例正規化

將原始資料正規化，使範圍介於 0 到 1 之間，可以避免數值間差距過大而影響到程式的判斷，也可以避免運算時間過長，降低誤差以提升預測的準確性。本階段將正規化後的案例庫整理成 SOS-LSSVM 所需之格式。

2. 交叉驗證

為避免單一固定的測試集過度武斷，因此採用交叉驗證來測試模式。交叉驗證藉由將原始資料分成 K 個相等的子樣本，每一次測試其中一個子樣本，剩下的 K-1 個子樣本則做為訓練數據。交叉驗證的過程會一直持續 K 次，直到每個子樣本都完成測試，如圖 5.14 所示。本研究採用 10 褶交叉驗證，先將案例庫隨機分成 10 組，輪流將其中 9 組(2560 筆)做為訓練資料，1 組(284 筆)做為測試組以供 SOS-LSSVM 應用。

	training									testing
Fold1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fold2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1
Fold3	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2
Fold4	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3
Fold5	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4
Fold6	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5
Fold7	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6
Fold8	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7
Fold9	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8
Fold10	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9

圖 5.14 10 褶交叉驗證

3. 應用 SOS-LSSVM 推論輸出值

案例庫分組後應用 SOS-LSSVM 做訓練與測試，找出輸入和輸出變量間的映射關係，建立推論模式，推論輸出變量。

4. 誤差衡量

為了解推論模式之準確程度，必須了解如何衡量誤差，藉以改善推論的準確性。欲比較各種推論方法的相對準確性，就必須累計許多的推論誤差，再運用統計方法檢定其推論正確性是否有顯著差異。本研究運用以下的四個誤差衡量值來驗證推論模式的準確性。

(1) 均方根誤差(Root Mean Squared Error，RMSE)

均方根誤差之值可用來表示誤差的分布情形，當其值愈小時，可代表推論的結果愈準確。其計算方法就是將平均誤差平方進一步取均方根。公式如 5.28：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_j - \hat{y}_j)^2} \qquad (5.28)$$

y_j:實際資料

$\hat{y}_j$:預測資料

n:訓練數據總數

(2) 平均絕對百分比誤差(Mean Absolute Percent Error，MAPE)

在某些情況下，推論值偏離實際值的幅度遠比推論誤差的絕對數更具參考價值，面臨這類情況時，我們用百分比來顯示推論誤差的程度，常用平均絕對百分比誤差當指標，平均絕對誤差百分比之值愈小時，表示推論值與實際值之間的誤差愈小，結果也愈好，公式如(5.29)所示：

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left|\frac{y_j - \hat{y}_j}{y_j}\right| \times 100\% \qquad (5.29)$$

y_j:實際資料

$\hat{y}_j$:推論結果

n:訓練數據總數

MAPE 是有效的評估指標，並對於 MAPE 值大小與其代表涵義提出說明說明如表 5-23 所示。

表5-23 MAPE的評估標準

MAPE(%)	說　　明
<10	高精準的預測
10~20	優良的預測
20~50	合理的預測
>50	不準確的預測

(3) 相關係數 R

相關係數 R 用來衡量輸入與輸出相關程度的指標，其值介於 -1 到 1 之間。R 越接近 1，表示其正相關程度越高，R 越接近 -1，表示其負相關程度越高，而值越接近 0，表示相關程度越差。公式如 5.30：

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{n}(y_j - \hat{y}_j)^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(y_j - \bar{y})^4}} \quad (5.30)$$

y_j:實際資料

$\hat{y}_j$: 推論結果

ȳ:實際平均值

n: 訓練數據總數

(4) 平均絕對誤差法(Mean Absolute Error, MAE)

平均絕對誤差是實際值與推論值之推論誤差絕對值取平均，是在不考慮推論誤差的變動方向下，且給予每個推論誤差值相同權重，以此來衡量推論誤差的程度。其值越低，代表推論的準確性越佳，公式如5.31：

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{j-1}^{n}\left|y_j - \hat{y}_j\right| \quad (5.31)$$

y_j為實際資料

$\hat{y}_j$為推論結果

n 為訓練數據總數

5.5.2 模式驗證

本研究將透過所建立之模式，以 4 種不同誤差衡量指標進行模式驗證，在測試案例資料表中，輸入橋梁整體耐震能力影響因子及各 EPA 點位進行推論，再以誤差均方根(RMSE)及平均誤差率，來驗證測試案例的推論結果。經過 SOS-LSSVM 的 10 褶交叉訓練與測試後，輸出結果如下表 5-24 所示：

表5-24 SOS-LSSVM推論結果

	Training				Testing			
	MAPE	MAE	RMSE	R	MAPE	MAE	RMSE	R
Fold1	5.28%	0.0145	0.0012	0.9964	15.66%	0.0427	0.0081	0.972
Fold2	6.39%	0.0157	0.0014	0.9960	16.86%	0.0410	0.0062	0.9814
Fold3	5.58%	0.0179	0.0016	0.9954	15.16%	0.0453	0.0076	0.9766
Fold4	5.96%	0.0165	0.0014	0.9959	17.87%	0.0393	0.0087	0.9712
Fold5	5.65%	0.0156	0.0013	0.9961	16.24%	0.0414	0.0077	0.9771
Fold6	5.67%	0.0162	0.0014	0.9958	20.88%	0.0411	0.0071	0.9797
Fold7	5.27%	0.0150	0.0013	0.9961	19.81%	0.0383	0.0059	0.9836
Fold8	5.64%	0.0165	0.0015	0.9956	21.85%	0.0368	0.0068	0.9798
Fold9	5.59%	0.0159	0.0014	0.9959	24.11%	0.0437	0.0107	0.9689
Fold10	6.69%	0.0185	0.0017	0.9951	12.94%	0.0418	0.0074	0.9783
Average	5.77%	0.0162	0.0014	0.9958	18.14%	0.0412	0.0076	0.9768

由 SOS-LSSVM 的輸出結果可以看出，訓練的平均誤差是 5.77%，而測試的平均誤差是 18.14%，以 MAPE 的評估標準來看，訓練與測試皆小於 20%，屬於優良的推論。

為了驗證本研究之預測模式準確度，以下選擇了目前常見的預測模式如下：迴歸 Regression、倒傳類神經 BPNN、支持向量機 SVM、最小平方差支持向量機 LS-SVM；以及結合最佳化的人工智慧預測模式：演化式支持向量機 ESIM、演化式最小平方差支持向量機 ELSIM 做比較，輸出結果如下表 5-25 所示：

表5-25 SOS-LSSVM與其他模式比較

模式	MAPE(%)		R		MAE		RMSE		RI_1	
	training	testing	training	testing	training	testing	training	testing	training	testing
Regression	117.33	120	0.7468	0.744	0.183	0.2009	0.0545	0.0596	0.584	0.5709
BPNN	39.66	46.53	0.9459	0.9275	0.0835	0.0940	0.1222	0.1386	0.8384	0.8099
SVM	102.38	113.66	0.8134	0.7906	0.1648	0.1812	0.2285	0.2509	0.6089	0.5671
LSSVM	73.28	76.30	0.8819	0.8736	0.1334	0.1373	0.1334	0.1373	0.7133	0.7015
ESIM	83.79	78.89	0.8457	0.8862	0.1297	0.1220	0.2037	0.1962	0.6756	0.7060
ELSIM	26.64	57.87	0.9470	0.8654	0.0505	0.0970	0.1022	0.1559	0.8890	0.7618
SOS-LSSVM	5.77	18.14	0.99583	0.97684	0.01622	0.04116	0.0374	0.0412	0.9723	0.9198

由上表可以看出不管是過去文獻中常用的的預測模式，或是經過最佳化參數搜尋的人工智慧預測模式，SOS-LSSVM 的輸出結果在 4 個誤差衡量值的表現上皆優於其他六種模式，也代表說 SOS-LSSVM 此模式更能做出準確的預測。

5.5.3 模式應用

本階段將介紹橋梁整體耐震能力推論模式於實務之應用，提供橋梁管理單位，依此流程進行防災預警及災害應變計畫制定。本研究以某座市區橋梁為例，進行模式應用，橋梁基本資料如表 5-26 所示。

表5-26 橋梁基本資料表

單跨最大跨距	42 公尺
橋寬	21.6 公尺
振動單元數	9
設計水平加速度	230gal
橋長	356 公尺
跨數	17
結構型態	簡支梁橋
橋墩型式	架構式
橋台型式	矮墩式
主梁型式	I 型梁
橋墩基礎型式	樁基礎
防落長度	0.35 公尺
支承狀況	1
鋼筋腐蝕率	0%(研究假設)

5.5.4 案例分析

依橋梁基本資料，進行案例分析，七級地震 PGA 為 0.42g 相當於 EPA=0.36g，故決定 EPA=0~0.36 時，EPA 每增加 0.03 取一次機率值，EPA=0.5,1,1.5 各取 1 次，以 15 個點位繪製損傷超越機率曲線。四個損傷等級，共 60 個機率值作為案例輸出因子，結果如表 5-27 所示，並可將結果繪製成有效地表加速度_損傷超越機率曲線，如圖 5.15 所示：

表5-27 案例分析結果

EPA	輕微損傷	中度損傷	嚴重損傷	完全損傷
0	0	0	0	0
0.03	0.17063	0.05088	0.00306	0.00052
0.06	0.38125	0.10176	0.00718	0.00130
0.09	0.90694	0.15264	0.05857	0.01689
0.12	0.93245	0.20352	0.08994	0.03160
0.15	0.95797	0.25440	0.12131	0.04632
0.18	0.98348	0.30527	0.15268	0.06103
0.21	0.99884	0.35615	0.19603	0.08367
0.24	0.99955	0.40703	0.24073	0.11023
0.27	0.99968	0.45791	0.24082	0.11054
0.3	0.99981	0.50879	0.24091	0.11084
0.33	0.99994	0.55967	0.241	0.11115
0.36	0.99996	0.68344	0.25226	0.12434
0.5	0.99999	0.96394	0.51711	0.40781
1	0.99999	0.99982	0.99572	0.95879
1.5	0.99999	0.99998	0.99969	0.99739

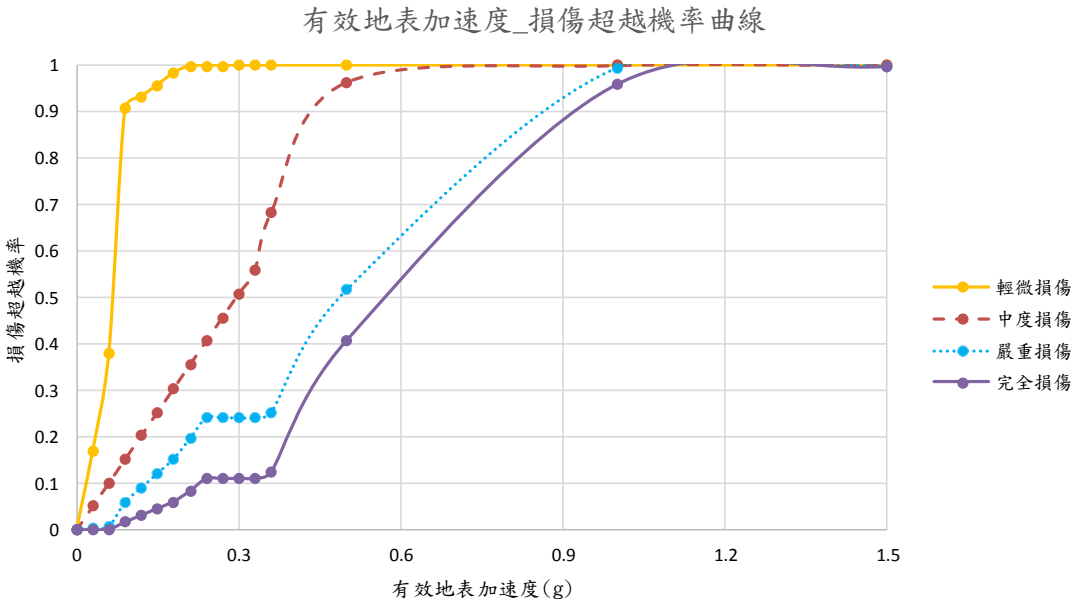


圖 5.15 有效地表加速度_損傷超越機率曲線圖

5.5.5 推論模式應用流程

模式應用流程分為兩部分:

1. 平時維護時使用，提早進行防災預警，應用流程分為四個步驟，如圖 5.16 所示:

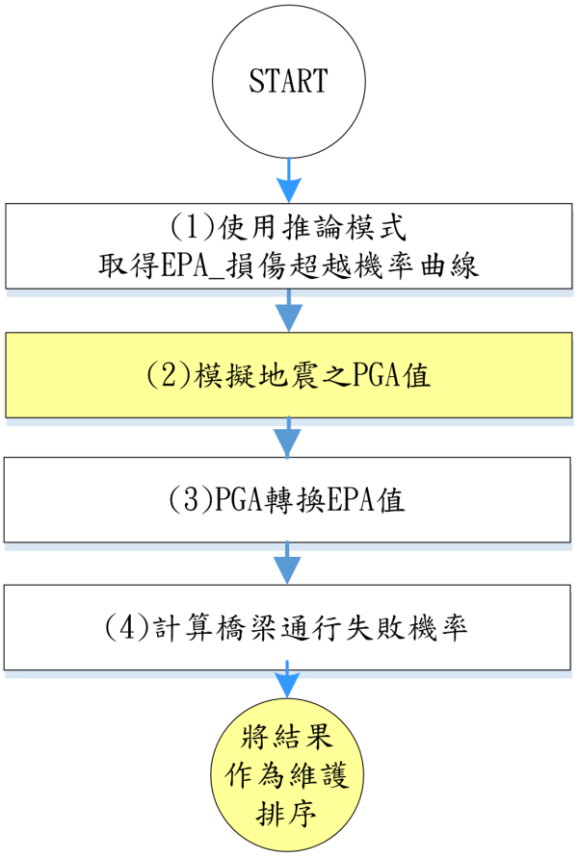


圖 5.16 模式應用流程(一)

(1)使用推論模式取得 EPA_損傷超越機率曲線(如圖 5.17)

(2)模擬地震之 PGA 值

模擬 5 級地震 PGA 為 245gal 時，PGA 為 0.25g。

(3)PGA 值轉換 EPA 值

EPA 值約為 PGA 折減 15%，故模擬地震之 EPA 約為 0.217g。

(4)計算橋梁通行失敗機率

查詢圖 5.17 可得輕微損傷超越機率為 0.999017，中度損傷超越機率為 0.368689，嚴重損傷超越機率為 0.207039，完全損傷超越機率為 0.090215。將各機率值代入 2.2 節之通行橋梁失敗機率公式(式 2.24)。

通行失敗機率=0.01*(0.999017-0.368689)+0.2*(0.368689-0.207039)+0.8*(0.207039-0.090215)+ 0.090215=0.222308

案例橋梁之通行失敗機率為 0.222308，將橋管單位轄下橋梁之通行失敗機率進行排序，即可作為平時維護依據。

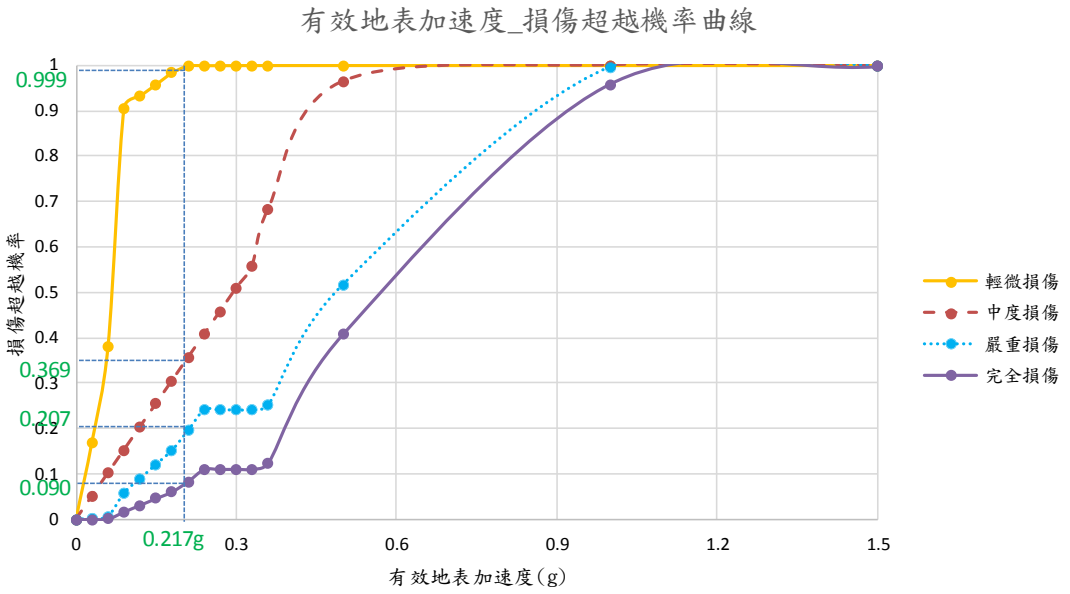


圖 5.17 通行失敗機率計算對照圖

2. 地震發生時，巡檢使用，應用流程分為四個步驟，如圖 5.18 所示：

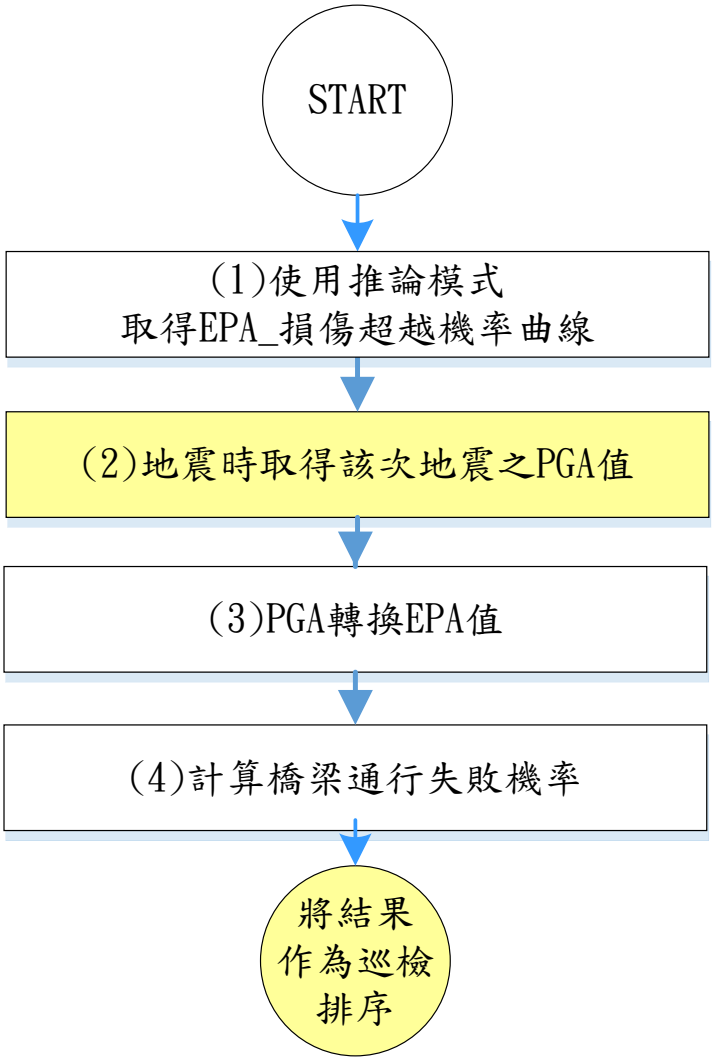


圖 5.18 模式應用流程(二)

(1)使用推論模式取得 EPA_損傷超越機率曲線

(2)地震時取得該次地震之 PGA 值

以該橋梁工址為例，今年度截至七月最大的地震為 3 級地震 PGA 為 29.19gal，PGA 為 0.0298g。

(3)PGA 值轉換 EPA 值

EPA 值約為 PGA 折減 15%，故模擬地震之 EPA 約為 0.0259g。

(4)計算橋梁通行失敗機率

計算方式同前一應用方法，查詢機率曲線可得輕微損傷超越機率為 0.1473，中度損傷超越機率為 0.0439，嚴重損傷超越機率為 0.0026，完全損傷超越機率為 0.0005。可得案例橋梁之通行失敗機率為 0.0115，將橋管單位轄下橋梁之通行失敗機率進行排序，即可作為震時優先巡檢之依據。

5.5.6 與傳統方法比較

傳統方法計算橋梁損傷超越機率，未考慮細部構件的影響，僅計算橋柱之損傷超越機率，如圖 5.19 所示。

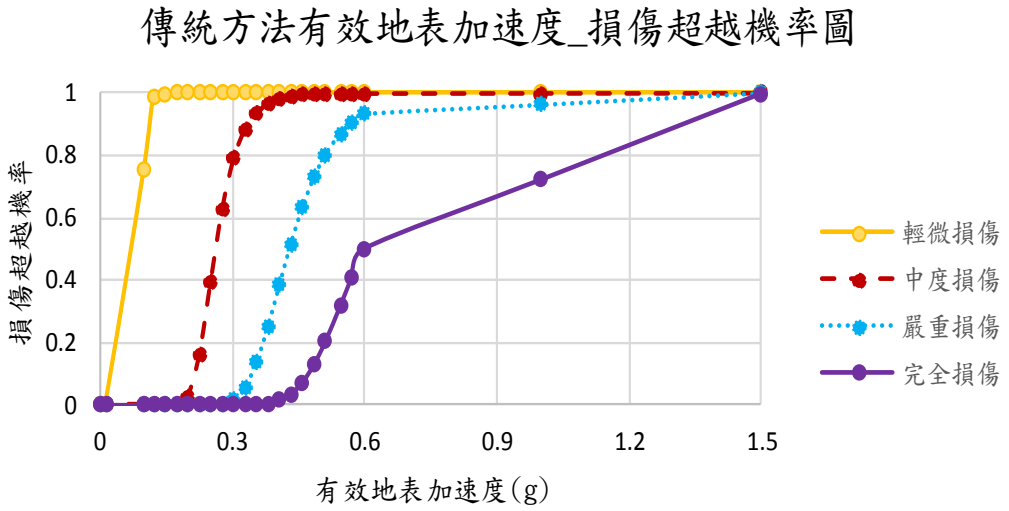


圖 5.19 傳統方法有效地表加速度_損傷超越機率圖

其通行失敗機率計算方法同前述應用之公式，其結果與前述之應用結果比較如表 5-28 所示，因考慮細部構件之損傷，橋梁之各項損傷機率皆明顯高於過去之方法，可顯著反應細部構件之影響。

表5-28 應用比較表

類別	EPA	輕微損傷機率	中度損傷機率	嚴重損傷機率	完全損傷機率	通行失敗機率
應用一	0.217g	0.99901	0.36869	0.20704	0.09022	0.22231
傳統方法		0.99997	0.11195	6.9E-06	5.4E-10	0.0313
應用二	0.0259g	0.14732	0.04393	0.00264	0.00045	0.01149
傳統方法		2.0E-16	2.5E-20	9.8E-22	0	2.1E-18

第六章 橋梁振動檢測案例分析

6.1 橋梁振動檢測案例分析

跨河橋梁之耐洪能力主要受到橋梁本身結構、河川環境、水文條件與河岸防護措施等眾多因素之影響，為一個跨領域的複雜問題。因此，完整的評估分析通常需要藉助歷年水文資料的收集與統計分析、橋體非破壞性檢測評估與沖刷深度的丈量或計算等不同領域的整合使能完成，其分析過程通常十分耗時，在有限的時間與經費的條件下，若欲對大量的橋梁進行詳細評估，顯然有執行上的困難。

若橋基受到嚴重的沖刷，則橋墩的振動頻率將隨之下降，許多學者注意到此一現象並針對洪水前後之橋墩頻率變化率進行研究，冀能藉由此參數之變動，判斷橋梁健康之依據；例如陳正興等(2009)嘗試從頻率的下降程度診斷出結構是否安全或結構破壞的原因。因此，振動頻率的取得為本檢測的重點項目之一；目前量測振動頻率的振動感測器約略可區分為固定式、攜帶式及移動式三類，固定式係指量測儀器(如速度計或加速度計)長期安裝於橋梁結構體上，攜帶式亦須固定安裝於結構體上，惟通常當試驗完畢之後，即自結構體中移除，屬短期量測；因移動式之量測儀器並非直接設置於受測結構物上，故亦稱非直接式量測。移動式設備因不須於每座橋梁架設儀器，故振動感測器的需求數量相對於固定式或攜帶式量測，可以大幅降低，進而減少檢測的整體經費，缺點則有(1)無法建立長時監測資料，(2)台灣目前相關技術並不成熟，仍需時間開發及(3)因量測儀器裝置位置需具有機動性，因此，橋面板為理想的裝置位置，但墩柱受沖刷影響較大，因此，量處所取得的振動資訊是否一致，尚待確認。

當橋梁現場傳送的振動訊號送達資料整合的電腦時，尚需分析工具對訊號進行處理，以模態分析為例，一般可分為頻域法及時域法兩種；頻域法有傳統的傅立葉轉換(Fouier Transform)及正

規化平均Welch頻譜法；時域法則有隨機空間識別法(Stochastic Subspace ID)。一般儀器廠商均針對自家儀器進行分析工具軟體的開發，因此，選擇量測儀器時，應將軟硬體之各項功能一併列入考量。

以下將針對(1).移動式非破壞性振動檢測可行性評估及(2).現地試驗結果等分別說明。

6.1.1 移動式非破壞性振動檢測可行性評估

移動式非破壞性振動檢測擁有潛在的經濟效益及本身具有的機動性之優點，即使如此，此法亦有無法建立長期監測資料之缺點。不過如前所述，此法為橋梁檢測之新技術與概念，仍有許多重要的關鍵點需要加以驗證，說明如下：

1.因量測儀器係裝置於車輛之中，其所接收之訊號的傳遞媒介包含了橋梁及車子本身，惟橋梁工程師僅對橋梁部分有興趣，故需確認所收集的震動訊息確實包含橋梁的部分。例如先前的研究，主要以儀器設置於所取得的振動頻率之變化作為橋量沖刷程度的判斷依據。移動式量測因儀器係裝置於車上，推測其所得之振動頻率大多來自於橋面板或車輛本身，此頻率若作為判斷指標，準確性不足。因此，本計畫於後續的現地試驗中，將儀器同時設置於墩柱與非墩柱部分(墩柱上方的橋面板處)，並比較數據用以驗證將儀器設置於墩柱與非墩柱所取得的振動頻率之差異性。

2. 所取得之振動頻率是否具有隨洪水前後(沖刷前後)而變化的特質。因為現地試驗經常受限於洪水是否發生之條件(例如若執行計畫該年並無洪水與沖刷情事)，無法確定於墩柱所取得之頻率變化的趨勢。關於此點，本計畫擬比較南雲大橋第9號與第14號墩柱振動頻率的量測結果，以探討沖刷深度與振動頻率間的關係。南雲大橋第9號(不位於主河道)與第14號墩柱(位於主河道)的結構設計尺寸與材料完全相同，如圖6.1所示。目前兩個墩柱均有沖刷現象，如圖6.2所示，其中，第14號墩柱的沖刷現象較為明顯(如圖

6.3所示)，因此，此二墩柱的試驗結果可以提供參考。

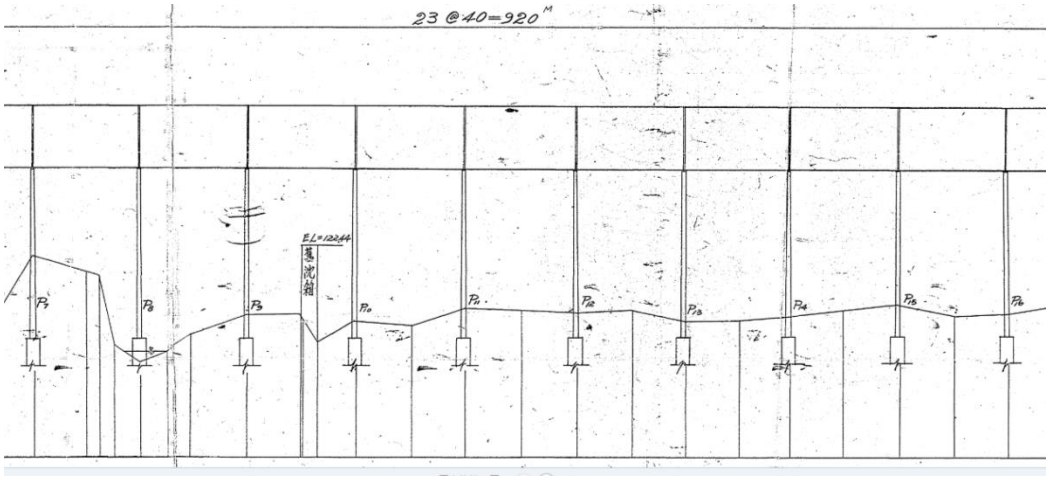


圖 6.1 南雲大橋墩柱 9 到墩柱 16 之立面圖

圖 6.2 南雲大橋 9 號墩柱沖刷現況

圖 6.3 南雲大橋墩柱 14 沖刷現況

3. 所取得之振動頻率受到水流的影響程度如何?台灣跨河橋梁墩柱位於主河道區的比例並不高，多數墩柱並未有水流通過，水流因素對於頻率可能有潛在的影響(雖然，多數墩柱的水位並不高且水流速亦不大)。本計畫擬比較溪州大橋第30號(位於主河道)與第36號(不位於主河道)墩柱振動頻率的量測結果，以探討水流與振動頻率間的關係。溪州大橋第30號，如圖6.4所示。

圖 6.4 溪州大橋墩柱 30 現況(有貓道處)

根據以上考量，本計畫將應用先前港研中心100年度建立之「移動式振動檢測模式」[鄭明淵、廖國偉、吳育偉等，2013]與其他檢測方式進行相關課題的研究。振動檢測的方式眾多，於進行

現地檢測前，應先確認適合的檢測方式。選定符合目標之試驗橋梁，利用多種振動檢測方法，針對橋墩處平行與垂直水流方向進行頻率量測，以下說明本計畫團隊先前對於檢測方式的經驗，並依據之前試驗的結果，選取適合國內橋梁振動頻率檢測方式並應用於本計畫。

本團隊曾於100年交通部運輸研究所「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」計畫中，曾對四座橋梁進行五次試驗，根據上述原則暨先前三次的試驗經驗，本計畫目前選擇彰化雲林間的「溪州大橋」(位於台1線)與南投雲林間的「南雲大橋」(位於台3線)進行現地試驗。檢測的方式如下。其中，根據先前的測試結果得知，儀器(速度計)置於小拖車上時誤差較大，故今年實地量測時並未執行該項試驗。

(1)儀器(速度計)直接置於橋面版上，橋梁上無任何行車。

(2)儀器(速度計)直接置於橋面版上，橋梁上行車正常。

(3)儀器(速度計)直接置於墩柱上，橋梁上無任何行車。

(4)儀器(速度計)直接置於墩柱上，橋梁上行車正常。

如前所述，溪州大橋與南雲大橋均針對兩座墩柱(位於與不位於水流處)進行測試，以探討水流與沖刷對振動頻率的影響。

6.1.2 現地試驗結果

本研究團隊於夏季前後分別進行一次試驗，夏季前的試驗時間為6月23日晚間至6月24日清晨。根據往年經驗，每年6、7月為颱風較為頻仍的季節，因此，本研究團隊將另於11月3日晚間至11月4日清晨赴溪州大橋與南雲大橋進行第二次現地試驗。

以南雲大橋為例，每次試驗均進行十次重複的量測(每次30秒)，而每次量測均分為車行方向與水流方向，因此，共有10(次) ×2(方向) ×4(量測方式) ×2(墩柱) ×2(夏季前後)=320個試驗結果。

因為試驗的結果數目較多，以下僅就重要的部分進行說明。橋梁振動頻率是否可以作為橋梁健康診斷的依據，主要觀察的重點有：

1.量測的頻率是否穩定

2.橋梁狀態是否可以藉由頻率的變化得知

3.對於移動式量測的方式，橋面板所取的頻率應如何應用

以下將藉由回答上述問題的過程中，說明試驗的結果。

6.1.2.1 量測的頻率是否穩定

量測結果是否穩定可以藉由同次現地試驗中的數次試驗結果觀察得知，表6-1與6-2所示為南雲大橋同一個量測位置(帽梁)同一天試驗的變異係數值(coefficient of variation, cov)，其中，因為去年亦曾針對南雲大橋進行試驗，相關數據亦呈現於表中。表6-3與6-4所示為南雲大橋同一個量測位置(橋面板)同一天試驗的變異係數值(coefficient of variation, cov)。就南雲大橋而言，當儀器置於橋面板，其最大的cov值為0.21，若至於帽梁處時，則為0.184，顯示帽梁處的量測具有較佳的穩定性。其中，2017/6/23的試驗過程中，置於橋面板的速度計的y軸(水流方向)損壞，因此，若扣除此項資料，有上表中可知，此次試驗所得之cov與去年試驗呈現類似的結果，其變異性仍屬可接受的範圍。

表6-5~表6-8則為溪州大橋在上述條件下的cov值。以溪州大橋而言，無論儀器置於帽梁或橋面板，其cov相對於南雲大橋，其值較不穩定，兩次試驗均可看到約0.5左右的cov值，顯示量測結果呈現高度的變異性。

表6-1 南雲大橋(帽梁)量測穩定性結果(cov) (pier 14)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	0.01	0.06	0.013	0.012
水流方向(y)	0.05	0.07	0.044	0.168

表6-2 南雲大橋(帽梁)量測穩定性結果(cov) (pier 9)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	0.003	0.007	0.015	0.018
水流方向(y)	0.01	0.1	0.07	0.184

表6-3 南雲大橋(橋面板)量測穩定性結果(cov) (pier 14)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	0.0007	0.0003	0.02	0.023
水流方向(y)	0.06	0.07	0.21	0.0156

表6-4 南雲大橋(橋面板)量測穩定性結果(cov) (pier 9)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	0.013	0.006	0.01	0.023
水流方向(y)	0.15	0.075	0.17	0.184

表6-5 溪州大橋(帽梁)量測穩定性結果(cov) (pier 30)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	0.5	0.571
水流方向(y)	0.22	0.286

表6-6 溪州大橋(橋面板)量測穩定性結果(cov) (pier 30)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	0.11	0.456
水流方向(y)	0.47	0.286

表6-7 溪州大橋(帽梁)量測穩定性結果(cov) (pier 36)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	0.3	0.05
水流方向(y)	0.36	0.573

表6-8 溪州大橋(橋面板)量測穩定性結果(cov) (pier 36)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	0.44	0.119
水流方向(y)	0.28	0.570

6.1.2.2 橋梁狀態是否可以藉由頻率的變化得知

表6-9~6-12為南雲大橋這兩年內四次試驗所取得的主頻之平均值(無行車)，除了橋面板(平行水流方向)因儀器毀損外，其餘數值均與前幾次所得結果相差不大。南雲大橋的振譜如圖6.5~6.9所示，因為測試的次數較多，報告中僅將較典型的振譜列出。其中，由圖可驗證於車行方向，主頻較為明確，因此在歷次的量測中，變異性較小。然而，於水流方向，除了因試驗中致於橋面版處的速度計損害(如圖6.9所示)，位於帽梁處的所取得數據其變異性亦

較大。

表6-9 南雲大橋帽梁所量測的頻率值(pier 14)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	2.93	2.89	2.99	2.89
水流方向(y)	2.47	2.44	2.79	2.63

表6-10 南雲大橋帽梁所量測的頻率值 (pier 9)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	3.04	3.04	3.01	2.87
水流方向(y)	2.68	2.68	2.42	2.50

表6-11 南雲大橋橋面板處所量測的頻率值 (pier 14)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	2.89	2.96	2.99	2.86
水流方向(y)	2.42	2.44	7.09*	2.59

*此時橋面板上的速度計已損壞

表6-12 南雲大橋橋面板處所量測的頻率值 (pier 9)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向 (x)	2.68	3.03	2.96	2.88
水流方向 (y)	2.41	2.26	8.05*	2.50

*此時橋面板上的速度計已損壞

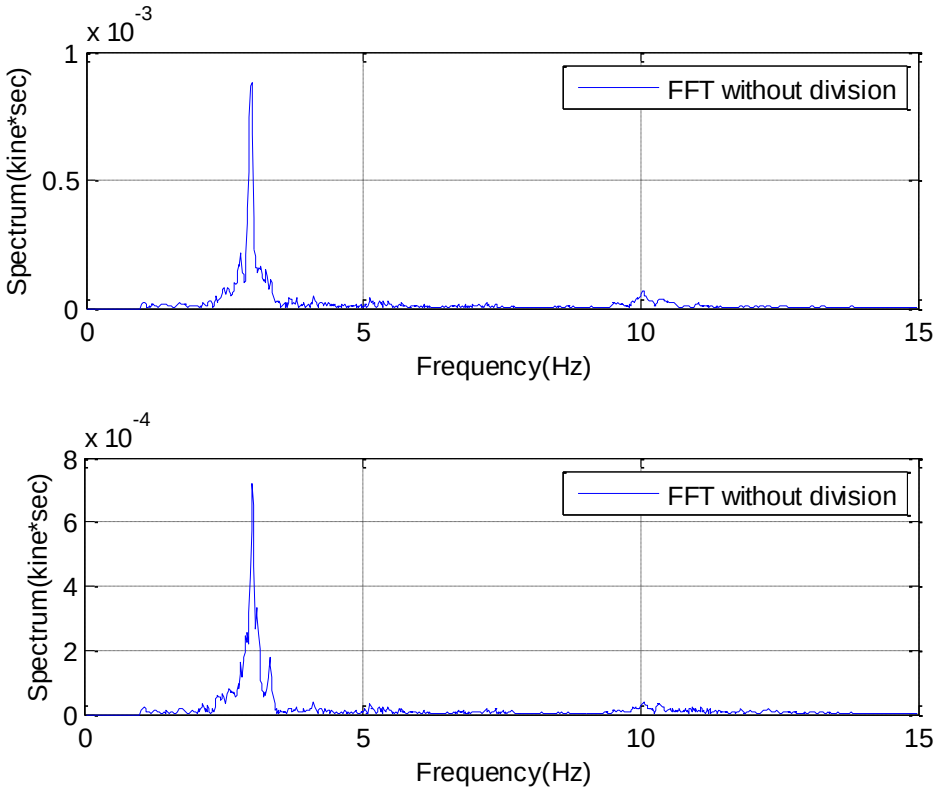


圖 6.5 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 9、無行車，車行方向，2017/6/23)

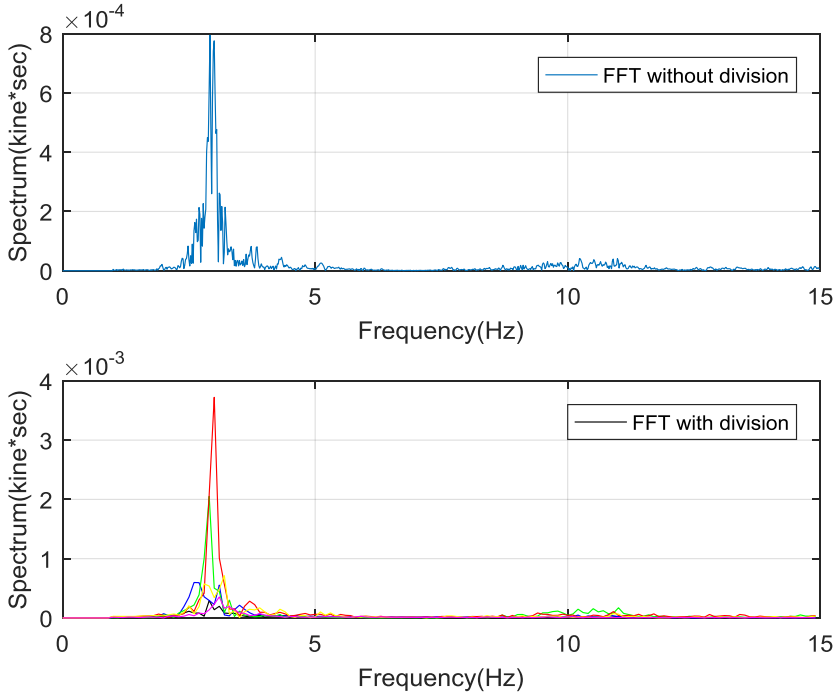


圖 6.6 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 9、無行車，車行方向，2017/11/3)

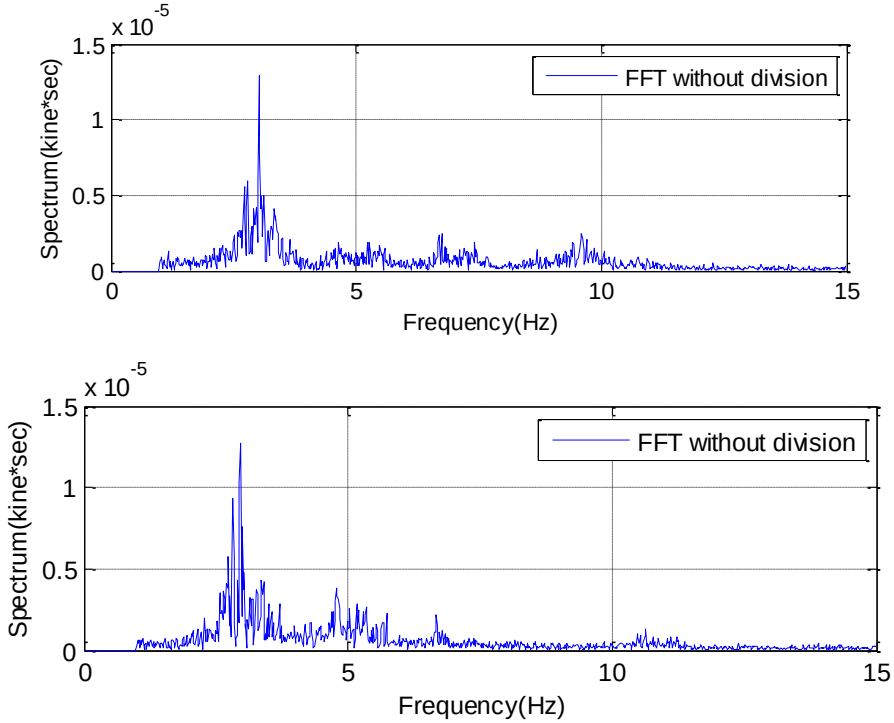


圖 6.7 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 14、無行車，車行方向, 2017/6/23)

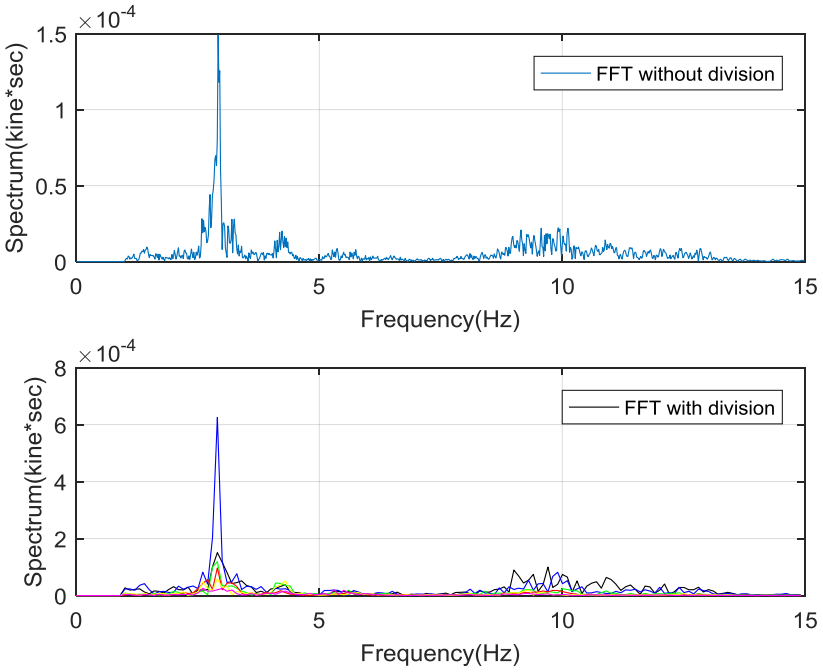


圖 6.8 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 14、無行車，車行方向, 2017/11/3)

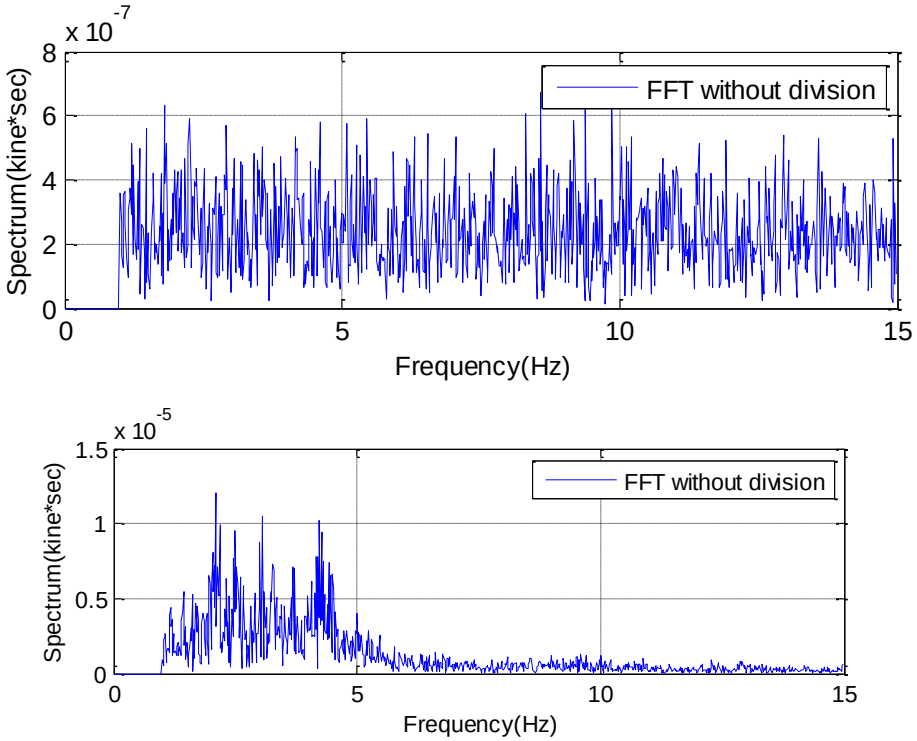


圖 6.9 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 14、無行車，水流方向，2017/6/23)

表6-13~6-16為溪州大橋今年試驗與先前試驗所取得的主頻之平均值(無行車)，其中，橋面板(pier 30，平行水流方向)因儀器毀損，所得數值，不具參考價值。

由圖6.10~6.11顯示，溪州大橋的主頻呈現較高的變異性主要係因在多次的量測過程中發現，其頻率有兩個峰值。然而，由圖6.10~6.11亦發現，雖然溪州大橋的主頻較難清楚地釐清，但在橋面版與帽梁上量測到的振譜的相似度很高。上述兩個情形(兩個峰值，相似度高)在不同墩柱的試驗(pier 36與pier 30)，均有相同的現象，如圖6.12~6.13所示。溪州大橋水流方向的振譜其主頻的峰值較不明確可由圖6.14得知。雖然如此，在同一次的量測中，橋面板與帽梁所得的結果，基本上，相似度較高(圖6.14)。下節將進行進一步的分析。

表6-13 溪州大橋帽梁所量測的頻率值(pier 36)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	2.90	1.91
水流方向 (y)	2.38	2.43

表6-14 溪州大橋帽梁所量測的頻率值 (pier 30)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	1.93	2.68
水流方向(y)	1.98	2.16

表6-15 溪州大橋橋面板處所量測的頻率值 (pier 36)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	2.55	1.77
水流方向(y)	2.10	2.31

表6-16 溪州大橋橋面板處所量測的頻率值 (pier 30)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	1.53	2.01
水流方向(y)	8.38*	2.16

*此時橋面板上的速度計已損壞

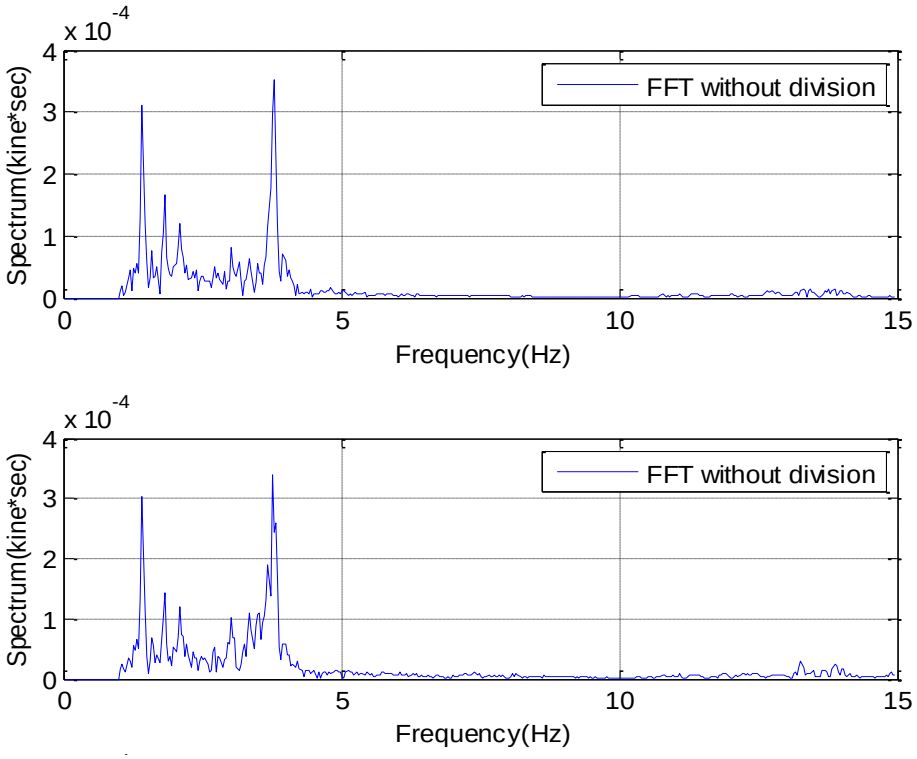


圖 6.10 溪州大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 36、無行車，車行方向，2017/6/23)

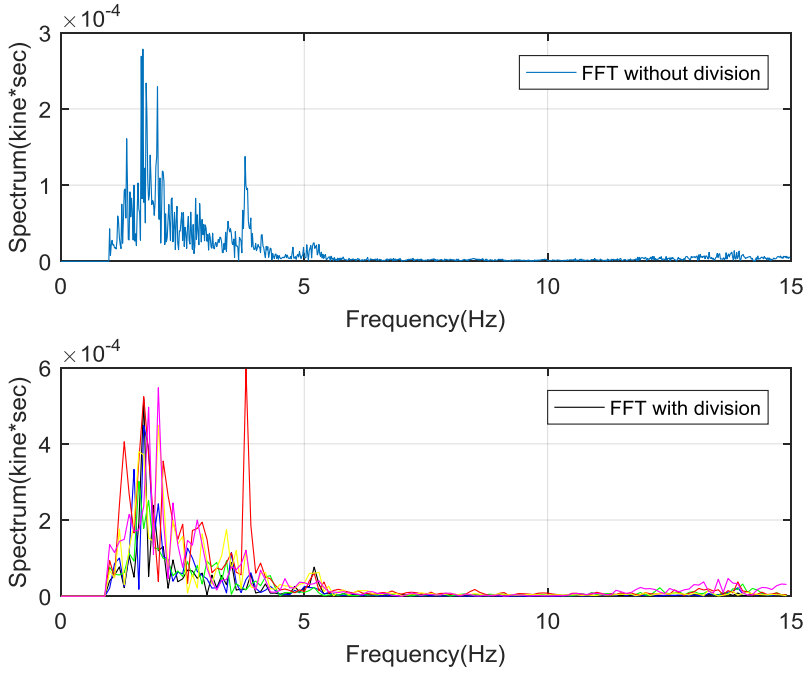


圖 6.11 溪州大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 36、無行車，車行方向，2017/11/3)

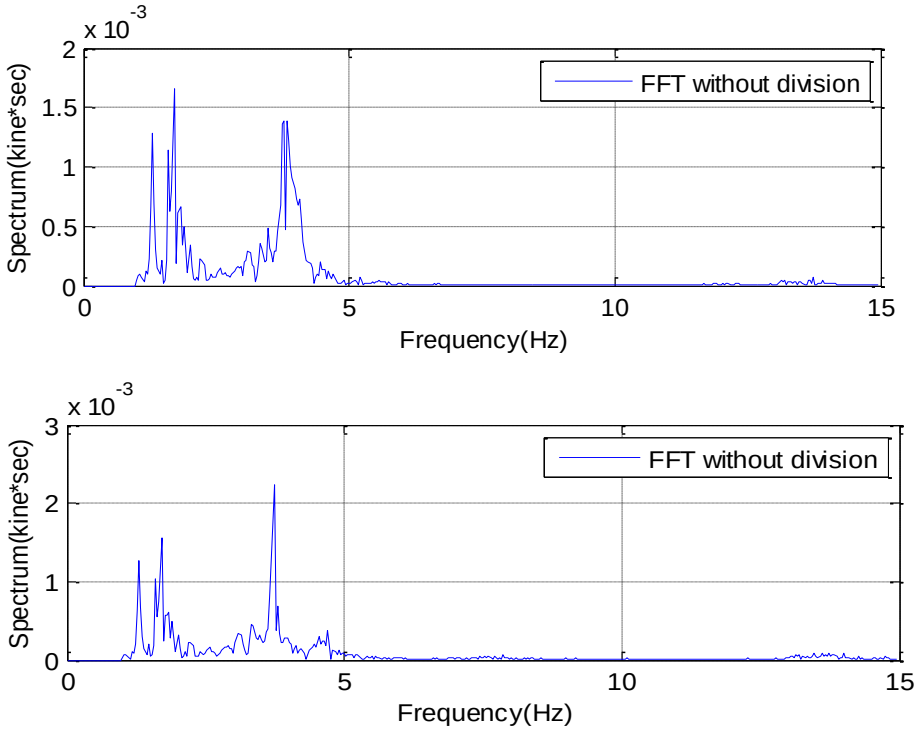


圖 6.12 溪州大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 30、無行車，車行方向，2017/6/23)

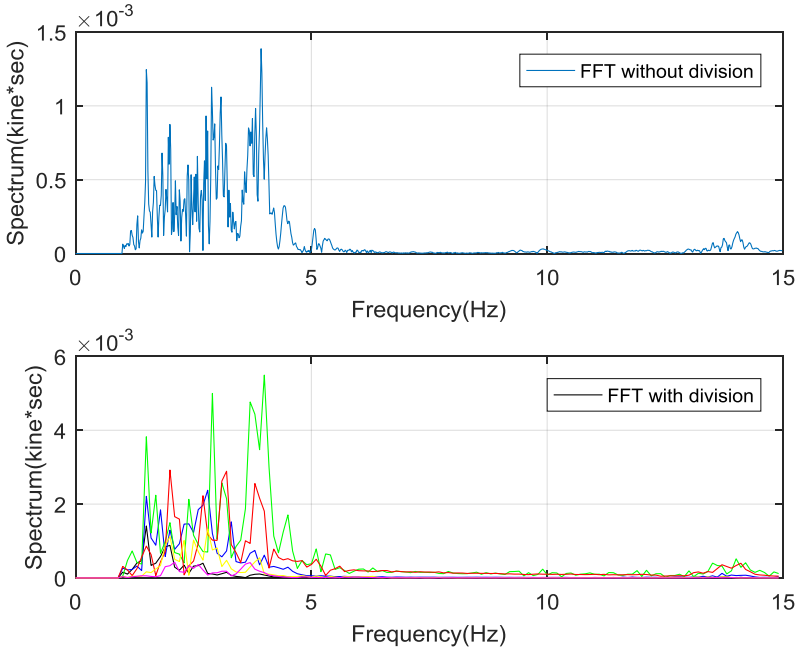


圖 6.13 溪州大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 30、無行車，車行方向，2017/11/3)

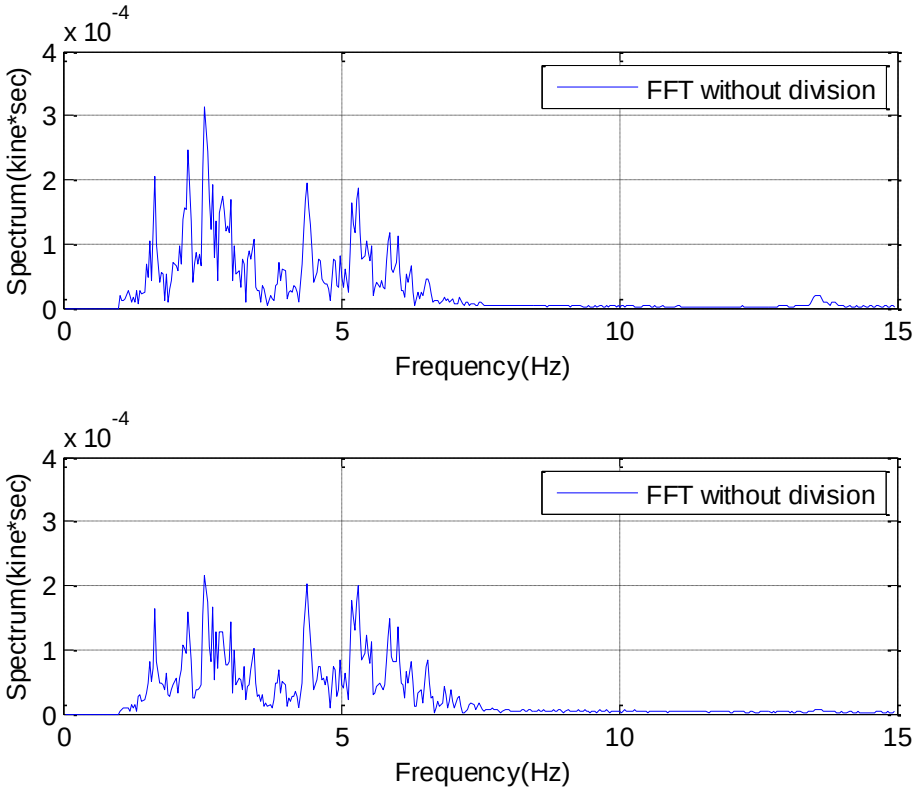


圖 6.14 溪州大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜 (pier 36、無行車，水流方向，2017/6/23)

由上述結果得知，南雲大橋的量測結果，十分穩定，不過以上的敘述僅為定性的觀察，以下利用Z-test進行進一步的分析。

針對南雲大橋，本團隊共進行4次試驗，若以每兩次試驗進行檢定，則共有6×4選2＋2×3選2＝42組檢定，其中(6+2=8)表示每次試驗均有兩個方向，且分為橋面板與墩帽，且有兩橋墩的試驗，故理想下，應有8組試驗可供比較(2^3=8)。因為第三次試驗有部分方向沒有數據，故有2組試驗並沒有完整的資料可供檢定(完整為4選2，不完整為3選2)。根據Z-test結果顯示，42組測試中，有50%的檢定顯示頻率無明顯差異。換言之，有一半的檢定結果表示這兩年內，橋梁狀況並無明顯改變；但也有另一半的結果顯示，橋梁狀況已明顯改變。因為兩兩比較時缺乏客觀的事實 (有改變或無改變)，因此上述結果並無法提估進一步的涵義。若加上溪州大橋的試驗結果(共七組)，在七組中，呈現無顯著結果的有4組，結果與南雲相近。由此可知，雖然南雲的穩定性高(6.1.2.1節)，因此cov較溪州小，較小的cov使得Z-test的結果不容易為「無顯著差異」。相反地，溪州雖然穩定性不若南雲，但卻因其cov值較大，Z-test的結果較易為「無顯著差異」，因此，兩座橋梁的「無顯著差異」的比例相近。

6.1.2.3 移動式量測中橋面板所取的頻率之分析

本計畫欲探討的目標至少有:1:頻率是否可以反映橋梁的健康狀態、2:是否可利用於橋面板處所取的的頻率簡化未來的檢測作業。本節將針對橋面版所取得的頻率進行進一步的討論。橋面板與帽梁間存有支承墊，支承墊對頻率應有一定程度的影響，為減低支承墊對頻率的影響，本計畫所選的現地量測橋梁均不具有功能性支承墊。除此之外，本計畫提出以兩次量測間的頻率比來顯示頻率的變化，希望藉由比值去除支承墊(或量測位置)對頻率的影響。因為前後次比值基本上創造了一個新的隨機變數，在比較的過程中，如先前所使用的的Z-test，需要標準差的資訊。對於

比值隨機變數，其變異數如下式(假設兩隨機變數為互相獨立)所示

$$\mathrm{Var}(R/S)=\frac{\mu_R^2}{\mu_S^2}[\frac{\sigma_R^2}{\mu_R^2}+\frac{\sigma_S^2}{\mu_S^2}] \quad \text{..... (6.1)}$$

依據以上資訊與上式分別計算的結果如表6-17~6-23所示。由表所示，藉由比值的計算，於帽梁或橋面版所取得的頻率並無顯著的差異(包含2016年尖山大橋的結果)，表示確實可以以比值作為指標。然而，目前所分析的條件僅限於橋梁狀態沒有明顯改變，若橋梁具有明顯的沖刷深度，比值是否仍如目前分析的結果，尚有待觀察。

表6-17 南雲大橋水流方向頻率比值的比較(pier 14)

	6/13/2016	10/3/2016	比值
帽梁	2.47 (0.05)*	2.44 (0.07)	1.010
橋面板	2.42 (0.06)	2.44 (0.07)	0.991
Z-test	-	-	相等

*cov

表6-18 南雲大橋水流方向頻率比值的比較 (pier 9)

	6/13/2016	10/3/2016	比值
帽梁	2.68 (0.01)	2.68 (0.1)	1.000
橋面板	2.41 (0.15)	2.26 (0.075)	1.066
Z-test	-	-	相等

表6-19 南雲大橋水流方向頻率比值的比較(pier 14)

	6/13/2016	11/3/2017	比值
帽梁	2.47 (0.05)*	2.63 (0.17)	0.94
橋面板	2.42 (0.06)	2.59 (0.02)	0.93
Z-test	-	-	相等

*cov

表6-20 南雲大橋水流方向頻率比值的比較 (pier 9)

	6/13/2016	11/3/2017	比值
帽梁	2.68 (0.01)	2.50 (0.18)	1.07
橋面板	2.41 (0.15)	2.50 (0.18)	0.96
Z-test	-	-	相等

表6-21 南雲大橋水流方向頻率比值的比較 (pier 9)

	6/13/2016	11/3/2017	比值
帽梁	2.68 (0.01)	2.50 (0.18)	1.07
橋面板	2.41 (0.15)	2.50 (0.18)	0.96
Z-test	-	-	相等

表6-22 溪州大橋水流方向頻率比值的比較 (pier 36)

	6/23/2017	11/3/2017	比值
帽梁	2.38 (0.36)	2.43 (0.57)	0.98
橋面板	2.10 (0.28)	2.31 (0.57)	0.91
Z-test	-	-	相等

表6-23 尖山大橋水流方向頻率比值的比較

	6/17/2016	9/28/2016	比值
帽梁	2.83 (0.06)	2.63 (0.17)	1.076
橋面板	2.80 (0.06)	2.79 (0.17)	1.003
Z-test	-	-	相等

6.2 建立橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統

6.2.1 微型加速度計

目前常用的微加速度計種類有壓電式、壓阻式、電容式及熱對流式。壓電式感測頻寬較高，但解析度較差，且價格昂貴；電容式感測頻寬較低，但解析度相對提高，且價格便宜。電容式速度計的原理為藉由加速度運動造成內部的電容極板移動，極板中的雜散電容量會有等量的變化，收集此電容變化量後經由放大再交積體電路(ASIC)轉換後可得到類比式或數位式輸出。由於微機電系統(MEMS) 在 90 年代的重大突破(從電化學液體蝕刻至電化學氣體蝕刻)，改善了電化學液體對 Z 軸垂直蝕刻的難度，亦加強了 3 軸晶格的穩定度與精密度，減低了自體雜訊比。微型加速度計的主要元件是機械單元、感測機制以及特定應用積體電路或微控制器。運用半導體與微製程技術，透過微機械加工將所有電子元件、感測器和機械元件使用光罩及蝕刻方式整合至一片矽基板。隨著應用於消費性電子產品的普及，其大量生產及良率也不斷提升，因此才能提供業界價格低廉及穩定性極高的感測元件。

雖然微機電型加速度計在高頻信號的接收上有其限制存在，但根據經驗橋梁的顯著週期一般在 5Hz 以下，20Hz 以上極為罕見。上述頻

率範圍具所謂的高頻有段距離，因此，具有開發的價值。本計畫先前曾對微型加速度進行驗證，驗證時首先將校正用速度計(高階型)與待測的加速度計(微型)放置於同一個震動源上(如振動台或墩柱上)，並將校正用速度計的輸出訊號，和微型加速度計的輸出信號，由頻譜分析進行訊號處理，比較校正用加速度計與微型加速度計在幾個主頻上的輸出值，以求得微型加速度計的準確性。目前市售的微型加速度種類繁多，如表 3-34 所示。影響加速度計是否可以精確地量測到被測物頻率的關鍵為其解析度，解析度的計算公式為

$$R=N\times\sqrt{BW\times 1.6} \qquad (3.39)$$

其中，

R 為解析度(resolution)，N 為雜訊密度(Noise Density)，*BW*：頻寬(Bandwidth)。MMA8451Q 的部分規格如下所述。

- 供應電壓為 1.95V 至 3.6V
- 接口電壓為 1.6V 至 3.6V
- 可選擇±2g / ±4g / ±8g 之動態範圍(Dynamic Range)
- 輸出資料速率(ODR)從 1.56Hz 至 800Hz
- 雜訊密度(Noise Density)為 99 μg/$\sqrt{Hz}$
- 以 14-bit 數位輸出
- 數位輸出接口(I2C)
- ODR 自動更改以自動喚醒並返回睡眠模式
- 32-sample FIFO
- 每個採樣和 FIFO 皆有高通濾波數據(High-pass filter)
- 電流消耗量: 6 μA t 至 165 μA

根據本研究團隊先前的經驗，針對市面販售微型加速度計初步針

對規格進行探討(表 6-24)，如表 6-25，其中所選用 MMA8451Q 微型加速度計的解析度(resolution)於微震下仍有改善空間，但若地震震幅可達 10^{-3}cm，則無應用上的問題。

表6-24 目前市售的微型加速度計

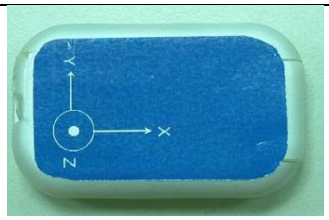
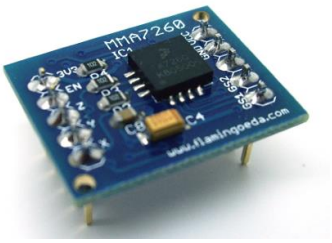
SANLIEN 00EA-SL	MicroStrain G-Link series
	
Sparkfun ADXL335	ITEM-29
	
MMA8451Q	

表6-25 MMA8451之機性(mechanical characteristic)與Electrical characteristic

參數	測試條件	單位
最大量測範圍	三個模式: 2G, 4G, 8G	G
靈敏度(sensitity)	4096 counts/g in 2G case 2048 counts/g in 4G case 1024 counts/g in 8G case	counts/g
輸出雜訊	126 in normal mode (ODR = 400 Hz)	$\mu g/\sqrt{Hz}$
所需電壓	1.95~3.6	伏特
工作溫度	-40~85	^0C

6.2.2 微控制器(Micro-controller Unit，MCU)

上述加速度感應器需要連接到微處理器才可以取得加速度的歷時資料並進行訊號分析。微控制器基本上係將中央處理器(CPU)、記憶體(RAM/ROM)、輸入輸出(I/O)介面都整合在一塊晶片上的微型電腦。其最大優點是體積小，可放在儀表內部，且由於記憶體容量小，輸入輸出介面簡單，功能較低，但其發展非常迅速，可應用於多種領域。目前市面上有多種微處理器，一般較為熟知的有 Arduino 與 Raspberry Pi。

Arduino，是一個開放原始碼的單晶片微控制器，使用低價格的微處理控制器(Atmel AVR)，採用了開放原始碼的軟硬體平台，建構於簡易輸出/輸入介面板，可以利用 Arduino 語言與 Macromedia Flash、Processing、Max/MSP、Pure Data 和 SuperCollider 跟 Java 和 make block.cc 等軟體，結合電子感應器，例如加速度計、LED、步進馬達或其他輸出裝置，作出互動作品。樹莓派（Raspberry Pi），為 Linux 系統的單板機微控制器，係由英國的樹莓派基金會所開發，支援 BBC BASIC、C 語言和 Perl 等程式語言。圖 6.15 所示為 Arduino 與 Raspberry Pi 微處理器，基於先前的開發經驗，本計畫未來擬選擇 Arduino 作為本研究之微處理器。

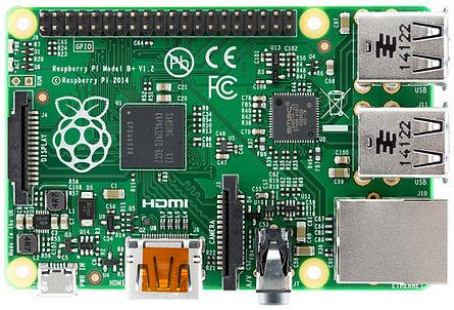
Arduino	Raspberry Pi
	

圖 6.15 Arduino 與 Raspberry Pi

6.2.3 無線傳輸分析及警報系統

無線傳輸技術是經由空間電磁波來傳輸信息的技術。無線網路的傳輸技術可分為兩大類別：光學傳輸和無線電波傳輸。目前以光為傳輸介質的技術有紅外線和雷射(Laser)，利用無線電波傳輸的技術則包括窄頻微波(Narrowband Microwave)、直接序列展頻(Direct Sequence Spread Spectrum，DSSS)、跳頻式展頻(Frequency Hopping Spread Spectrum，FHSS)、HomeRF 以及藍芽(Bluetooth)等多項技術[陳玉書，2015]。無線網路以傳輸距離來分，可分為四大部份[黃國鴻，2017]：

1. 無線個人網路(WPAN，Wireless Personal Area Network)
   (1) 使用於個人的活動範圍，1~10 幾米之內。
   (2) 主要是用於個人的裝置例如：筆記型電腦、手機、PDA。
   (3) 個人的無線網路通訊技術例如：藍芽等。
2. 無線區域網路(WLAN，Wireless Local Area Network)
   (1) 使用於家中、學校或辦公室等，透過無線網路卡和基地台的通訊來連接上網。
   (2) 其目前所包含的標準有3種：
   a IEEE802.11a

b IEEE802.11b

c IEEE802.11g。

3. 無線都會網路(WMAN，Wireless Metropolitan Area Network)

(1) 傳輸的範圍在一個都市中。

(2) 其目前的標準為WiMAX，正式名稱為IEEE802.16，是無線區域網路的延伸。

4. 無線廣域網路(WWAN，Wireless Wide Area Network)

(1) 範圍廣大，能夠跨越不同的都市之間或是國家。

(2) 目前的通訊技術有 2G、3G、GSM、GPRS。

於橋梁監測的過程中，若將每一個加速規的訊息均傳送至網際網路，並不合理。因此，可利用 Arduino 開發板的記憶體，將資訊儲存後發送到較大的網路節點，再統一發送到網際網路。各加速規將資料傳輸到資料收集站可利用上述的無線傳輸技術，目前有許多常見的無線傳輸模組，例如 nRF24L01 與 ZigBee 無線傳輸模組。NRF24L01 是一款工作在 2.4-2.5GHz 世界通用（Industrial Scientific Medical Band, ISM）頻段的收發晶片模組，NRF24L01 無線收發器包括：頻率發生器 增強型 SchockBurstTM 模式控制器、功率放大器、晶體放大器、調製器、解調器、輸出功率頻道選擇和協定的設置可以通過 SPI 介面進行設置極低的電流消耗，當工作在發射模式下發射功率為 6dBm 時，電流消耗為 9.0mA，接受模式為 12.3mA 掉電模式和待機模式下電流消耗模式更低[曹永忠，2015]。nFR24L01 2.4G 無線模組只能單向雙工，一個模組只能單純發送或接收，因此需要使用兩塊無線模組來分別收發。ZigBee 無線傳輸模組-XBee。ZigBee 是一種低速且短距離傳輸的無線網路協定，ZigBee 這個名字是源自蜜蜂透過跳 ZigZag 形狀的舞蹈來通知其他蜜

蜂花朵與花蜜的所在距離、位置與方向等地理資訊的一種通訊方式。ZigBee 是採用 IEEE 802.15.4 開放式無線個人區域網(Wireless Personal Area Networks)的標準規範，它主要的特色為低速、低耗電、低成本、支援大量網路節點、支援多種網路拓撲、低複雜度、可靠與安全[江柏翰，2016]。本計畫將評估上述或其他常件的無線傳輸模組，作為本計畫傳輸資料之工具。當各加速度規的資料均彙整至資料收集站時，若加速度值大於臨界值，系統將啟動警示燈提供橋管單位或用路人參考，如圖 6.16 所示。

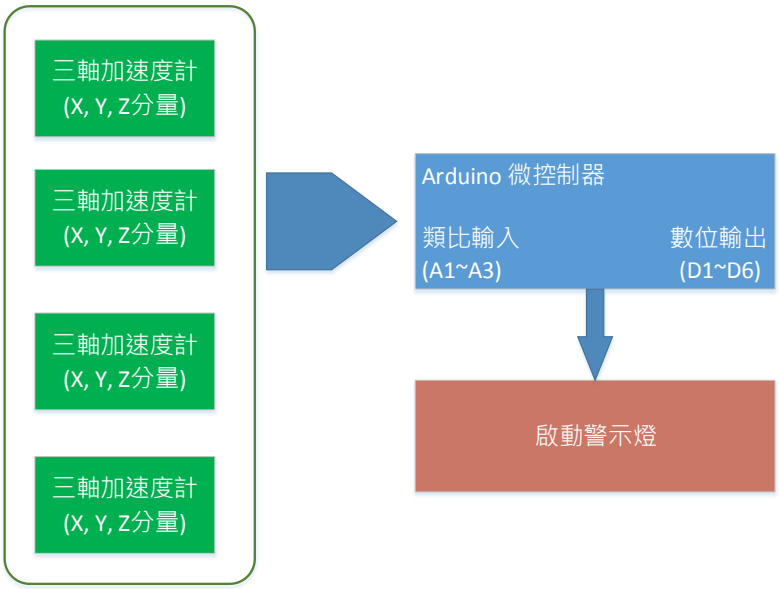


圖 6.16 警示系統架構示意圖

6.2.4 開發過程與結果說明

如前述，本計畫欲進行的流程實際上可視為利用小電流控制大電流運作的一種“自動開關”。繼電器模組(如圖 6.17 所示)符合本試驗要求，例如於單晶片機控制強電裝置，且繼電器在控制和使用上也非常方便，只需要給繼電器的輸出端輸入相應不同的電位，即可達到通過控制繼電器再而控制其它設備的目的。繼電器是一種電源控制元件，它具有

控制系統(又稱輸入迴路)和被控制系統(又稱輸出迴路)之間的互動關係。亦應用於自動化的控制電路中；繼電器模組有單路繼電器、雙路繼電器、四路繼電器、八路繼電器，可以滿足不同用戶的用途需要，繼電器是一種當輸入量(激勵量)的變化達到規定要求時，在電氣輸出電路中讓被控量發生預定的階躍變化的一種電器。繼電器模組可以接在交流電 220V 或直流電 28V 電源而對各種其它電器產品進行控制。本計畫利用單晶片機控制繼電器模組進而控制開關為目的。

藉由 mma8451 三軸加速度所量測出加速度 x、y 軸之分量，並且使用編譯程式碼來制定喚醒警示燈範圍條件，若量測出加速度分量超出所制定範圍，將立即延遲量測動作並且傳遞指令喚醒警示燈(如圖 6.18 所示)，試驗結果顯示，警示燈運轉順利，符合本計畫所訂定的目標。圖 6.19 所示為 Arduino(左上)、無線傳輸配置(右)與系統完成配置圖(左下)。

圖 6.17 繼電器

MMA8451demo |

MMA8451demo

```
if((event.acceleration.x/9.80665 >= 0.3))
{
  Serial.print('H');
  delay(3000);
}
else
{
  Serial.print('L');
}

if((event.acceleration.y/9.80665 >= 0.3))
{
  Serial.print('H');
  delay(3000);
}
else
{
  Serial.print('L');
}

if((event.acceleration.x/9.80665 <= -0.3))
{
  Serial.print('H');
  delay(3000);
}
else
{
  Serial.print('L');
}
```

圖 6.18 警示燈程式碼

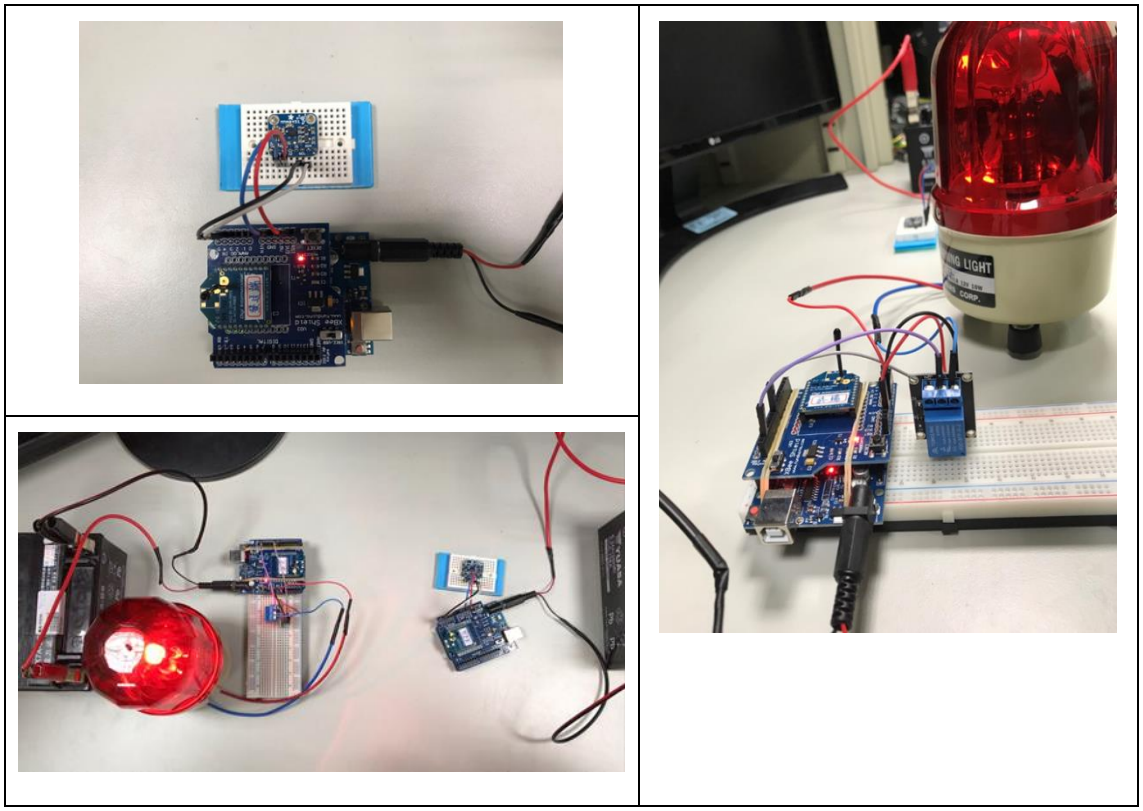


圖 6.19 Arduino(左上)、無線傳輸配置(右)與系統完成配置圖(左下)

第七章 確認災害橋梁巡檢路線規劃模式

橋梁具跨越河川及山谷、聯絡外地之功能，為公路建設中重要的一環，臺灣處於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊交界處，屬於環太平洋地震帶一部分，地震活動非常頻繁，在地震發生時，造成橋梁倒塌、斷裂或損壞的機率極高；橋梁受損除了會危害損及用路人之生命財產安全外，亦會增加災時搶救之困難度，因此於地震災後第一時間派遣巡檢人員檢測橋梁之安全狀況；進行適當之處置措施避免二次災害的發生，為公路管理單位的首要任務。

依交通部公路總局之規定，由天災（如颱風、豪雨、地震等）引起之災害，致可能損傷橋梁結構所做之不定期檢測，檢測重點在針對災後，探討是否造成橋梁功能損傷及是否需維修、補強。另規定當地震發生後，須進行特別巡檢，緊急評估轄內各橋梁受損情形，判定橋梁是否正常通行，管制通行或是封橋。

為因應公路防救災需要，目前交通部運研所研究發展一套「臺灣公路早期防救災決策支援系統(Taiwan Road Early Nature Disaster prevention Systems，TRENDS)」，TRENDS「災害資訊管理模組」中的「橋梁地震破壞潛勢」功能，會在地震災害發生時，藉由資料交換平台擷取中央氣象局地震速報，再結合全台省縣道橋梁耐震資料庫，分析求得各橋所在位置之地表加速度及其通行失敗機率，然後以各橋耐震能力之Ay值，所對應求得之通行失敗機率為門檻值，列出該地震事件中，橋梁通行失敗機率大於門檻值之所有橋梁清單，並按機率大小排序。接著，TRENDS會自動啟動指派機制，通知公路總局值班人員進行巡檢，公路管理單位可利用此通行失敗機率作為排序巡檢優先順序之參考。

TRENDS雖然在地震發生後，能夠即時分析計算所有橋梁之通行失敗機率，並按順序列出各分析機率超過其門檻值之橋梁，提供橋梁管理單位巡檢優先順序之參考依據。然而實務上，按機率值排定之巡檢順序橋梁，往往並非在同一路網或路線上，所以

不能夠直接依此分析結果作跳點式巡檢；再者，特別巡檢路線規劃時，因時間之緊迫性，旅運時間為一重要考量因素；而且橋梁重要度涉及災區可及性、生命安全、經濟衝擊、維生管線、緊急應變系統(位於救災系統或緊急醫療系統中)，以及歷史價值，亦為在規劃時，須納入之影響因素，歸納上述，如何同時考量橋梁通行失敗機率、旅運時間及橋梁重要度三因子，進行災時特別巡檢之多目標巡檢路網規劃，為公路防救災規劃之重要研究課題。

7.1 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子

因此此階段將找出規劃災後橋梁巡檢路線時所需考量之因子，根據過去公路總局委託計畫報告與文獻回顧，將初步歸納為:需要巡檢橋梁之數量、橋梁重要性排序(橋梁重要等級)、橋梁的損壞機率(通行失敗機率)、車輛旅行時間、區域內可用之檢測人員(巡檢組數)數量、檢測人員檢測時間之限制等。

其中橋梁重要性排序部分將參考公路總局委託國立中央大學計畫「橋梁重要程度等級之建立」報告[蔣偉寧等，2004]第五章中，橋梁重要等級評定方法之定義，依據以下原則進行重要等級評定：

1.完整考量影響橋梁重要程度之重要因素。

2.配合全國橋梁管理系統資料庫。

3.資料收集之可行性。

4.簡單易用。

5.能區分橋梁之重要程度。

在此文獻中以AHP層級分析法決定各因子間權重，並擬定橋梁重要性等級評定架構，如圖7.1所示。

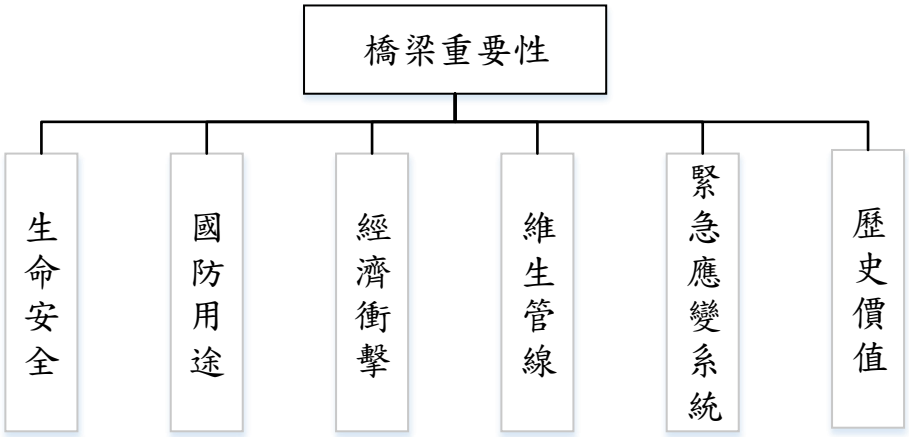


圖 7.1 橋梁重要性指標層級圖[蔣偉寧等，2004]

而在圖7.1中各關鍵因子下層定義了計算方法與權重，如表7-1所示。後續計算橋梁重要程度將參考表7-1計算方法，並代入TBMS中橋梁基本資料對應欄位資料，另外考量TBMS系統中並無紀錄緊急應變系統、歷史價值兩項因子，因此將排除這兩項因子對橋梁重要性之影響。

表7-1 橋梁重要因素表[蔣偉寧等，2004]

重要因素	關鍵因素	分數等級	權重
生命安全 (0.34)	橋上交通量(U_{TC}) (0.65)	$0 \le 1-\frac{(ADT_{Carry}-28000)^2}{784\times10^6} \le 1$	0.22
	橋下交通量(U_{TU}) (0.13)	$0 \le 1-\frac{(ADT_{under}-28000)^2}{784\times10^6} \le 1$ 跨越鐵路(1.0)；其它為(0.0)	0.04
	橋長(U_L) (0.22)	$0 \le \frac{L}{200} \le 1$	0.08
經濟衝擊 (0.38)	橋上交通量(U_{TC}) (0.06)	$0 \le 1-\frac{(ADT-28000)^2}{784\times10^6} \le 1$	0.02
	道路等級(U_{RT}) (0.32)	國道（1.0） 省道（0.75） 縣道（0.5） 鄉鎮道路（0.25） 產業道路（0）	0.12
	改道長度(U_{DL}) (0.35)	15 公里以上（1.0） 5 公里以上 15 公里以下（0.5） 5 公里以下（0.2）	0.13
	橋長(U_L) (0.27)	$0 \le \frac{L}{200} \le 1$	0.11
維生管線 (0.04)	維生管線(U_{UT}) (1.0)	無（0） 橋梁上附掛一種維生管線（0.5） 橋梁上附掛二種維生管線（1.0）	0.04
緊急應變系統 (0.16)	緊急應變系統(U_{ER}) (1.0)	無(0) 位於救災系統或緊急醫療系統中（1.0）	0.16
歷史價值 (0.08)	工程技術唯一性(U_U) (0.5)	橋梁工程技術具唯一性（1.0） 橋梁工程技術不具唯一性（0）	0.04
	古蹟(U_H) (0.5)	此橋梁為古蹟（1.0） 此橋梁為非古蹟（0）	0.04

7.2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

公路總局五個養護工程處三十四個工務段約三千座橋梁，於地震發生後規劃橋梁巡檢路線，進行緊急評估，並依橋梁之受損狀況決定正常管制通行或是封橋，以利提升災後橋梁搶救之效率，降低二次災害的發生。本研究將建立「多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式」，流程圖如圖7.2所示，執行步驟說明如下：

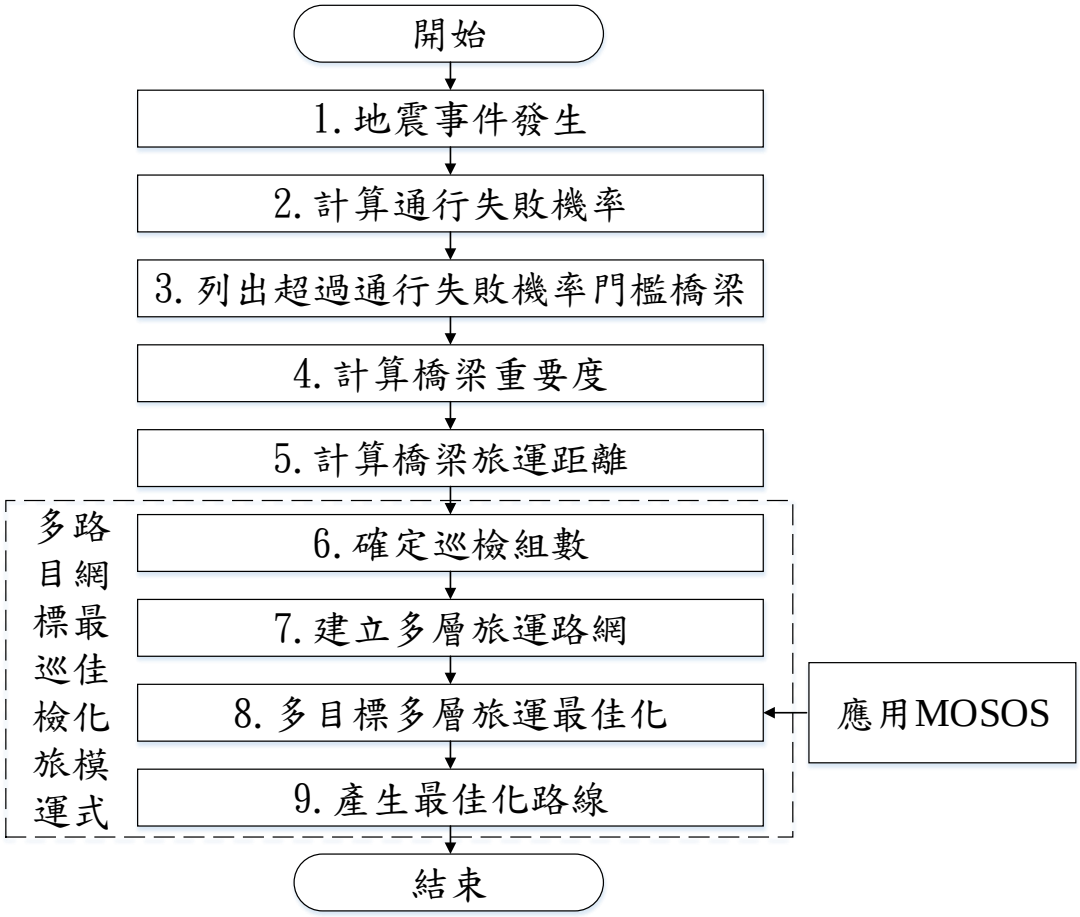


圖 7.2 多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃流程圖

1.地震事件發生

當某一地震事件發生時，須先根據中央氣象局地震速報資訊，如橋梁所在地區震度達到五級，則該區域橋梁依目前規範須進行特別巡檢。

2.計算通行失敗機率

當地震災害發生時，TRENDS系統中資料交換平台會自動擷取地震速報資訊(取自中央氣象局)。根據全臺灣各地地表加速度，以ArcGIS Server的Geoprocess Service計算各橋梁所在地震地之地表加速度(PGA)，再依據各橋梁之降伏強度(Ay)值與破壞加速度，計算橋梁通行失敗機率。

3.列出超過通行失敗機率門檻橋梁

根據前一步驟所計算之各橋梁通行失敗機率，與各橋Ay值對應求得之通行失敗機率設定為門檻值比較，若此地震事件該橋之通行失敗機率超過此門檻值，即為須巡檢，進行緊急評估之橋梁。

4.計算橋梁重要度

考量生命安全、經濟衝擊、維生管線、緊急應變系統，以及歷史價值等因素，計算橋梁重要度，其值越高須優先巡檢。

5.計算橋梁旅運時間

應用Google Map API計算出橋梁兩兩間之旅運時間，作為後續路網規劃，計算總旅運時間之基礎。

6.確定巡檢組數

根據待命巡檢人員與車輛數量，決定檢測小組之組數。

7.建立多層旅運路網

依據步驟二至步驟五，將須檢定之橋梁列出，再按步驟六所決定之巡檢組數，以每組一路網圖層進行規劃，建構多層旅運路網圖，其限制為各層檢測之橋梁不能重複，如圖7.3所示。

(j)

(i)

	O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	…	…	N
O	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	-	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	-	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
10	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
⋮	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
⋮	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	-	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(第1層)

(第M層)

圖 7.3 多層旅運路網圖

8.多目標多層旅運最佳化

應用多目標生物共生演算法(MOSOS)概念，建立多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式。

9.產生最佳化路線

同時考量通行失敗機率、旅運時間，以及橋梁重要度之因子，求得最佳化之巡檢路網，以作為橋梁管理單位在規劃災時特別巡

檢路線時之參考。

在圖 7.2 中，本研究應用 MOSOS[Cheng and Doddy, 2014]建置多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式，本模式之基本假設與方法說明如後：

(1) 模式基本假設

為了符合公路總局在災害後考量橋梁重要度與巡檢路線最佳化之需求，需界定模式使用上之限制，初步擬定以下基本假設。

①橋梁相關資料已建置

透過臺灣地區橋梁管理系統(TBMS)取得各橋梁資料(如地理位置、橋孔數、橋梁規模等)，且其檢測作業方式也有標準化之流程，故可得知橋梁檢測點間之旅行時間。

②橋梁特別檢測作業期程為震後期間之可工作時數

實務上，根據交通部公路總局規定，依中央氣象局之地震速報資訊，震度達 5 級地區，或通行失敗機率大於門檻值橋梁，各工務段需在 5 小時內，針對轄下這些橋梁進行特別巡檢，緊急評估各橋之安全狀況，並決定是否採取交通管制措施之必要性。

③巡檢出發點為工務段

所有檢測小組在任務開始第一時間於工務段出發，檢測作業會不間斷持續執行，因此檢測小組在每次檢測完的橋梁，直接前往下一座橋梁。

④車輛行駛速度採平均速率

假設各檢測小組車輛行駛速度為平均速率 60km/hr，各橋梁檢測

點間之旅行時間亦為平均旅行時間。

⑤所有檢測人員作業效率相同

假設全部的檢測員對檢測工作的熟練度相同，不會因為個人的經驗與資歷而有檢測效率之差別。未來在模式的應用上， 若有不一致之情形，則只需適當修訂模式中各檢測小組對各橋梁的檢測時間，而此修改並不會改變模式的架構。

(2) 目標方程式

過去之文獻在面對橋梁巡檢作業時，因為其情境為平時巡檢作業，因此不需要考量不同橋梁在地震災害後之可能損壞程度與機率，所以在擬定目標方程式時，多以最小化巡檢成本為目標。而本計畫將同時考量橋梁重要度(橋梁之流量與損壞機率)及最小巡檢成本(旅運距離)之多目標問題，進而初步擬訂本計畫之目標方程式。本計畫在考慮巡檢人員之需求下，訂定以下三個目標方程式，分別為 1.以總旅運距離(D)最小為目標(式 7.1)；2.以優先巡檢高通行失敗機率(P)之橋梁為目標(式 7.2)；3.以優先巡檢高重要性(W)之橋梁為目標(式 7.3)。目標函數分述如下:

目標式(7.1)為計算為總旅運檢測時間最小，總旅運檢測時間中，包含用 Google API 計算的橋梁旅運時間及橋梁的檢測時間；目標式(7.2)為計算高通行失敗機率；目標式(7.3)為計算高橋梁重要性。

目標式(一)總旅運檢測時間：

此目標式為求得巡檢路線總旅運檢測時間最小值。

$$MinT = \sum_{k=1}^{m} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{n} t_{ij}^{k} \times F_{ij}^{k} \quad \text{.....(7.1)}$$

目標式(二) 總通行失敗機率：

此目標式為求得總通行失敗機率的值，式中$p \times r$值愈小，須優先巡檢。

$$MinP = \sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} p_i^k \times r_i^k, r^k = \{a_1, a_2 \dots a_n\} \dots\dots\dots\dots\dots\dots (7.2)$$

$$a_i = \begin{cases} 0, \text{第} i \text{座橋未巡檢} \\ 1 \sim n, \text{第} i \text{座橋的巡檢順序} \end{cases}$$

目標式(三) 總橋梁重要性：

此目標式為求得總橋梁重要性的值，式中$w \times r$值愈小，須優先巡檢。

$$MinW = \sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} w_i^k \times r_i^k, r^k = \{a_1, a_2 \dots a_n\} \qquad (7.3)$$

$$a_i = \begin{cases} 0, \text{第} i \text{座橋未巡檢} \\ 1 \sim n, \text{第} i \text{座橋的巡檢順序} \end{cases}$$

符號說明：

n：n座橋

m：m組檢測組

i：1~n座橋

i：0為工務段

j：1~n座橋

k：1~m組檢測組

T：總旅運檢測時間

P：總通行失敗機率

W：總橋梁重要性

t_{ij}^k：第k組巡檢小組從第i座橋至j座橋之旅運時間(含檢測時間)

F_{ij}^k：第k組從第i座橋出發在第j座橋巡檢次數

p_i^k：第k組巡檢小組檢測第i座橋之通行失敗機率

w_i^k：第k組巡檢小組檢測第i座橋之重要度

r_i^k：第k組巡檢小組檢測第i座橋之檢測順序

(3) 限制式

另外除了上述的目標式，為了符合公路總局公路養護手冊中特別巡檢之規定，工務段指配之人員應於天災或人為事故發生後，於5小時內回報工務段所能掌握之轄內橋梁初步受災及通阻情形。因此根據上述需求，分別設計兩個限制式:1.每座橋梁僅檢測一次(式7.4)；2.各組巡檢時間需小於5小時(式7.5)。分述如下:

$$\sum_{k=1}^{m}\sum_{i=0}^{n} F_{ij}^k = 1, j \in n \quad \text{.....(7.4)}$$

$$\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n} t_{ij}^k \times F_{ij}^k \div V \leq 5(hr), k \in m \quad \text{.....(7.5)}$$

其中:

t_{ij}^k：第k組巡檢小組從第i座橋至j座橋之旅運時間(含檢測時間)

F_{ij}^k：第k組從第i座橋出發在第j座橋巡檢次數

V：$60(km/hr)$

(4) 最佳化方法

現今的啟發式演算法通常是模擬自然界生物的現象，例如蜂群演算法 ABC(Artificial Bee Colony)模擬蜜蜂成群地覓食特性；遺傳算法 GA(Genetic Algorithm)模擬自然進化的過程，粒子群優化算法 PSO(Particle Swarm Optimization)模擬動物群聚行為。而生物共生搜尋演算法 SOS 模擬生物體間的交互共生作用做配對，用於搜索生物體間

最合適的交互共生作用關係，SOS 演算法主要的特點是可以解決空間維度連續數值的最佳化搜尋。

本計畫使用之生物共生搜尋演算法（SOS），其靈感來自生然生態系統中生物之間的互動模式，SOS 主要使用三種計算策略分別為互利共生、片利共生和寄生，以模擬自然生態的共生模式。另外 SOS 演算法的三個階段在操作上是容易的，只需要用簡單的數學運算法則。此外，相較於同類演算法，SOS 不使用微調的參數，並提高了性能的穩定性，即使比同類算法使用較少的控制參數，還能夠解決各種數值最佳化之問題，其在尋優與運算時間表現均優於目前被廣為應用之基因演算法(Genetic Algorithms，GA)與粒子群演算法(Particle Swarm Optimization，PSO)。而針對多目標問題所衍生之搜尋演算法即為 MO-SOS (Multi-Objective SOS，MO-SOS)，其執行流程如圖 7.4 所示，以下以一個假設事件按步驟進行說明：

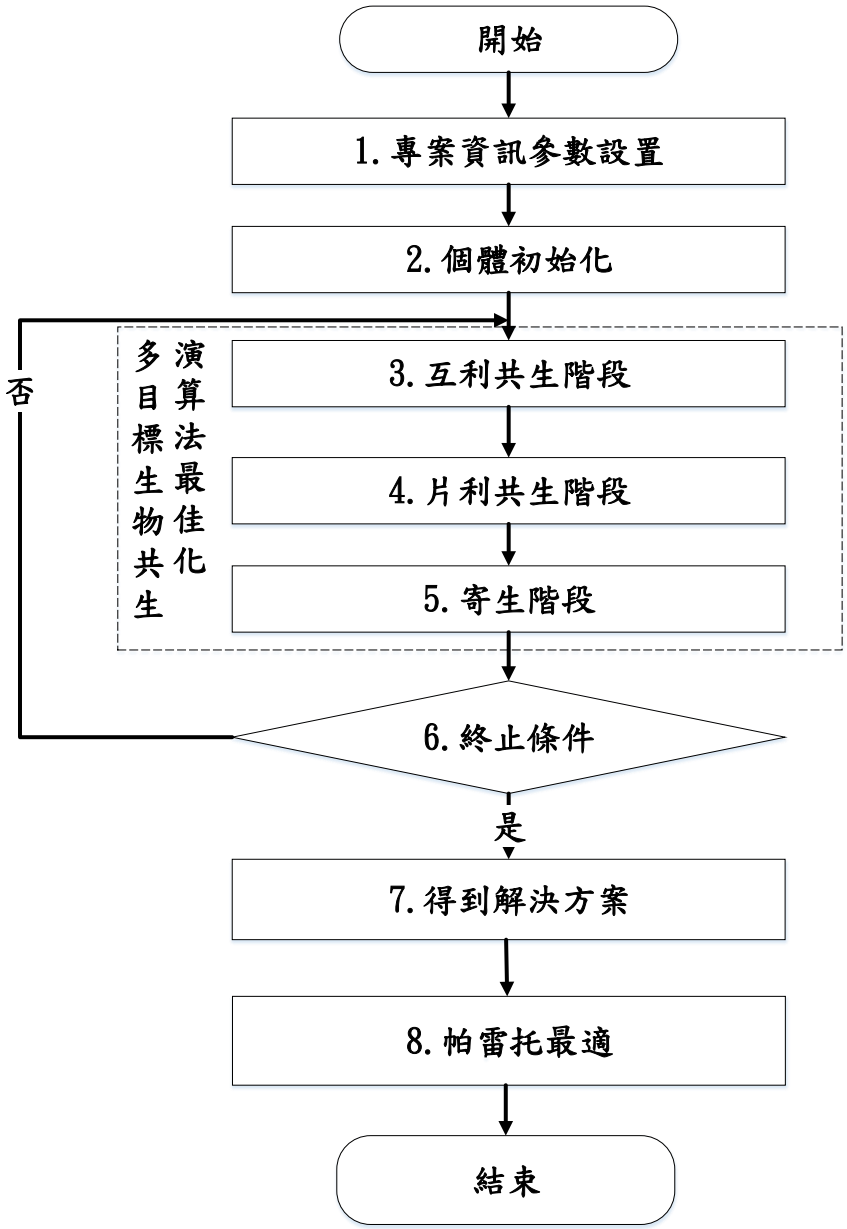


圖 7.4 MO-SOS 多目標路徑規劃流程

步驟一：專案參數設置

將此案例之參數設定，如產生多少生物體，疊代幾次等參數。

步驟二：個體初始化

將此案例之決策變數輸入，如橋梁為n=14座，巡檢小組m=3組等基本變數預設完成。多目標生物共生演算法最佳化：

步驟三：互利共生階段

Xinew=Xi+rand(0,1)*(Xbest-Mutual_Vector*BF1)..... (7.6)

Xjnew=Xj+rand(0,1)*(Xbest-Mutual_Vector*BF2)..... (7.7)

Mutual_Vector=(X_i+X_j)/2 ..... (7.8)

其中，Xi是生態系統中第i個生物體，Xbest是生態系統中最優的生物體，而另一個生物體Xj則是隨機選擇來與Xi進行互相反應，雙方互相增進在生態系統中的生存幾率，BF1和BF2為決定雙方獲益程度的權重，取值為1或者2， Mutual_Vector是Xi和Xj的中間值。產生初始表$G_{k,x}$，Xinew=G，以三個目標式(7.1-7.3)，以及限制式(7.4與7.5)，MOSOS透過三種共生階段，進行最佳化搜尋。

步驟四：片利共生階段

Xinew=Xi+rand(-1,1)*(Xbest-Xj) ..... (7.9)

Xi是生態系統中第i個生物體，Xbest是生態系統中最優的生物體。如步驟三，進行最佳化搜尋。

步驟五：寄生階段

選取某機個體的一個隨機維度，以隨機值替換之。再進行計算適應值，若更適於原生物體，則將原生物體替換為寄生生物體。如步驟三，進行最佳化搜尋，評估適存值。

步驟六：終止條件

MOSOS的疊代次數40000次做為終止條件。若模式滿足終止條件時，則停止最佳化過程，並進入步驟七；若不滿足，則模式回至步驟二，再次進行最佳化搜尋。

步驟七：得到解決方案

此模式得到40000組解，取前100組最佳的解決方案，其為MOSOS產生出的方案。

步驟八：帕雷托最適(Pareto optimality)

產生帕雷托最適，其每個點皆為一個解，於效率前緣上的點為最佳解。

本節以案例測試的方式，規劃最佳化路線之排序。本研究應用旅運路網流動性，以呈現巡檢小組與檢測車輛從出發點至各橋梁檢測點進行巡檢作業之情形，以一組巡檢小組為單位建構一層旅運路網，故為多層旅運路網。

7.3案例測試

本節以案例測試的方式，規劃最佳化路線之排序。本研究應用旅運路網流動性，以呈現巡檢小組與檢測車輛從出發點至各橋梁檢測點進行巡檢作業之情形，以一組巡檢小組為單位建構一層旅運路網，故為多層旅運路網。

7.3.1 案例說明

1.若某一地震事件發生，根據中央氣象局地震資訊速報，某工務段轄下橋梁所在位置地震強度為五級，或橋梁通行失敗機率大於其Ay所對應門檻值之橋梁有六座(n=6)，派遣兩組巡檢人員進行特別巡檢(m=2)。

2.計算橋梁重要度與通行失敗機率如表7-2，以Google Maps API計算兩點間旅運時間加上橋梁檢測時間得橋梁旅運檢測矩陣如表7-3，圖7.5為橋梁所在地之實際路網圖。

表7-2 測試橋梁之橋梁重要度及通行失敗機率

橋梁	第二大雅橋 (A)	豐里橋 (B)	大里橋 (C)	新民橋 (D)	東勢大橋 (E)	中彰大橋 (F)
橋梁重要度	41.53	15.00	21.14	35.76	84.56	98.57
通行失敗機率	75%	80%	60%	50%	70%	85%
門檻值 (Ay對應通行失敗機率)	65%	75%	45%	40%	68%	70%

表7-3 橋梁兩兩旅運檢測時間矩陣(單位:分鐘)

迄(j) / 起(i)	A	B	C	D	E	F
O	36	43	40	20	63	37
A	0	33	52	41	47	54
B	33	0	37	55	49	45
C	52	37	0	49	53	67
D	41	55	49	0	41	42
E	47	49	53	41	0	49
F	54	45	67	42	49	0

圖 7.5 橋梁所在地路網圖

3.建構多層旅運路網，求得最佳化巡檢路線。

共分為六個步驟：

步驟一：MOSOS產出初始順序表$G_{k,x}$（第k個巡檢組的第x批順序)本範例有2個巡檢組，各組第1批巡檢順序分別為$G_{1,1}$=（O,D,A,F） $G_{2,1}$=（O,C, B, E）

步驟二：將$G_{k,x}$轉換為檢測路網矩陣，產生2層路網圖：

在此以$G_{1,1}$=(O,D,A,F)為例，第1巡檢組依照橋梁檢測起訖點，分別在(O,D)，(D,A)，(A,F)三個格位中填入1值，其餘格位填0值，求得第1巡檢組之第1層路網$F_{7,6}^{1}$檢測路網矩陣，如表7-4。

表7-4 $F_{7,6}^{1}$檢測路網矩陣

迄(j) 起(i)	A	B	C	D	E	F
O	0	0	0	1	0	0
A	0	0	0	0	0	1
B	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0
D	1	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0

同理$G_{2,1}$=（O,C,B,E）依照橋梁檢測起訖點，建立$G_{2,1}$檢測矩陣，如表7-5，求得第2組之巡檢第2層路網$F_{7,6}^{2}$。

表7-5 $F_{7,6}^{2}$檢測路網矩陣

迄(j) 起(i)	A	B	C	D	E	F
O	0	0	1	0	0	0
A	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	1	0
C	0	1	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0

表7-4，表7-5即形成一「二層旅運路網圖」，如圖7.6所示。

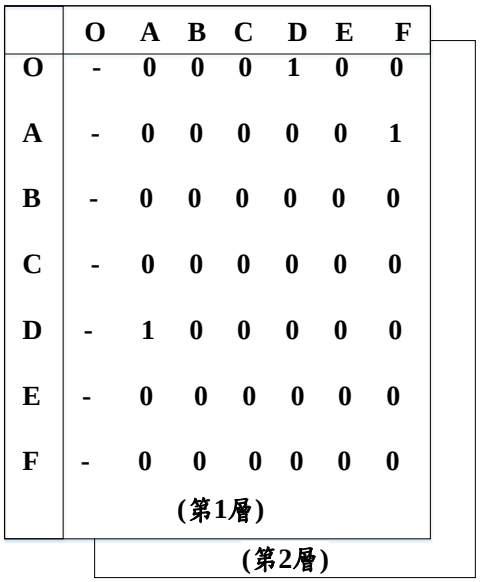


圖 7.6 二層旅運路網圖

步驟三：檢核每座橋只會被巡檢一次

依據(7.4)式，得本例之限制式如下：

$\sum_{k=1}^{m=2}\sum_{i=0}^{n=6} F_{ij}^{k} = 1, j \in n$ ..... (7.10)

按式(7.10)將表7-4，7-5疊合，求得檢測次數檢核矩陣，如表7-6。

表7-6 檢測次數檢核矩陣

迄(j) / 起(i)	A	B	C	D	E	F
O	0	0	1	1	0	0
A	0	0	0	0	0	1
B	0	0	0	0	1	0
C	0	1	0	0	0	0
D	1	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0
$\sum\sum F_{ij}^{k}$	1	1	1	1	1	1

步驟四：總旅運檢測時間最小

目標式一(式7.1)：將表7-3橋梁兩兩旅運檢測時間矩陣之格位

分別乘以表7-6檢測次數檢核矩陣之相對格位，即得旅運檢測時間矩陣格位，再將所得之旅運檢測時間矩陣格位值全部累加起來即為總旅運檢測時間值，表7-7為範例總旅運檢測時間計算之結果。

(單位：min)

表7-7 總旅運檢測時間計算

(i)\(j)	A	B	C	D	E	F
O	36	43	40	20	63	37
A	0	33	52	41	47	54
B	33	0	37	55	49	45
C	52	37	0	49	53	67
D	41	55	49	0	41	42
E	47	49	53	41	0	49
F	54	45	67	42	49	0

＊

(i)\(j)	A	B	C	D	E	F
O	0	0	1	1	0	0
A	0	0	0	0	0	1
B	0	0	0	0	1	0
C	0	1	0	0	0	0
D	1	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0

＝

(單位：min)

(i)\(j)	A	B	C	D	E	F
O	0	0	40	20	0	0
A	0	0	0	0	0	54
B	0	0	0	0	49	0
C	0	37	0	0	0	0
D	41	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0

$$T = \sum T_{ij} = 40 + 20 + 54 + 49 + 37 + 40 = 241(\text{min})$$

如下舉例：

第一組旅運檢測時間：

$$t^1_{0\,4} \times F^1_{0\,4} = 20 \times 1$$

$$t^1_{4\,1} \times F^1_{4\,1} = 41 \times 1$$

$$t^1_{16} \times F^1_{16} = 54 \times 1$$

$$t^1_{03} \times F^1_{03} = 40 \times 0$$

$$t^1_{32} \times F^1_{32} = 37 \times 0$$

$$t^1_{25} \times F^1_{25} = 49 \times 0$$

$$\vdots$$

$$t^n_{nn} \times F^k_{nn}$$

第二組旅運檢測時間：

$$t^2_{04} \times F^2_{04} = 20 \times 0$$

$$t^2_{41} \times F^2_{41} = 41 \times 0$$

$$t^2_{16} \times F^2_{16} = 54 \times 0$$

$$t^2_{03} \times F^2_{03} = 40 \times 1$$

$$t^2_{32} \times F^2_{32} = 37 \times 1$$

$$t^2_{25} \times F^2_{25} = 49 \times 1$$

$$\vdots$$

$$t^n_{nn} \times F^k_{nn}$$

總旅運檢測時間T= 115+126=241 (min)

依此類推，求得其他可行方案之總旅運檢測時間，取最小值。

步驟五：總通行失敗機率最小

目標式二(式7.2)：

以表7-1通行失敗機率乘順序表r，最後加總其值，得到總通行失敗機率值。以下舉例：

r為檢測順序

$$r^1 = [1,2,3,0,0,0]$$

$$p_4^1 \times r_4^1 = 50 \times 1$$

$$p_1^1 \times r_1^1 = 75 \times 2$$

$$p_6^1 \times r_6^1 = 85 \times 3$$

$$\vdots$$

$$p_n^n \times r_n^n$$

$$r^2 = [0,0,0,1,2,3]$$

$$p_3^2 \times r_3^2 = 60 \times 1$$

$$p_2^2 \times r_2^2 = 80 \times 2$$

$$p_5^2 \times r_5^2 = 70 \times 3$$

$$\vdots$$

$$p_n^n \times r_n^n$$

總通行失敗機率P= $(50 + 150 + 255) + (60 + 160 + 210)$=885

依此類推，求得其他可行方案之總通行失敗機率，取最小值。

步驟六：總橋梁重要性最小

目標式三(式7.3)：以下舉例：r為檢測順序

$$r^1 = [1,2,3,0,0,0]$$

$$w_4^1 \times r_4^1 = 35.76 \times 1$$

$$w_1^1 \times r_1^1 = 41.53 \times 2$$

$$w_6^1 \times r_6^1 = 98.57 \times 3$$

$$\vdots$$

$$w_n^n \times r_n^n$$

$$r^2 = [0,0,0,1,2,3]$$

$$w_3^2 \times r_3^2 = 21.14 \times 1$$

$$w_2^2 \times r_2^2 = 15.00 \times 2$$

$$w_5^2 \times r_5^2 = 84.56 \times 3$$

$$\vdots$$

$$w_n^n \times r_n^n$$

總橋梁重要性巡檢順序

W= (35.76+83.06+295.71)+(21.14+30.00+253.68)=719.35

依此類推，求得其他可行方案之橋梁重要性，取最小值。

步驟七：多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式會產生出一百組解，越靠近效率前緣的點為最佳解，如圖3-8為橋梁通行失敗機率、旅運時間以及橋梁重要度路線最佳化之帕雷托最適圖。

本模式利用受支配個數法，找出每一可行解被其他解完全控制的受支配(Dominated)個數，再以所有可行解總個數減去每一個解的受支配數，將每個目標式之支配數加總得到最大的值為此多目標建議最佳值。在此以二維度之旅運時間、通行失敗機率二目

標為例作說明，首先將100組方案分別按旅運時間、通行失敗機率由小至大排序，再以100分別減旅運時間的序號及通行失敗機率之序號，分別得到兩者之支配數值，再行加總，而支配數相加最大值即為最佳解。表3-7為受支配個數法之最佳解，以方案1為例，旅運時間為241，排序順位數為6，旅運時間支配數為100-6=94；通行失敗機率為885，順位數為2，通行失敗機率支配數為100-2=98，兩者支配數加總為94+98=192，其值大於其他所有解，為本例最佳解將表7-8繪製成圖7.7支配個數法二目標最佳化圖，其他之多目標組合可依此類推求得。

表7-8 受支配個數法之最佳解

方案	旅運時間	旅運時間支配數	通行失敗機率	通行失敗機率支配數	支配數加總	rank
1	241	94	885	98	192	1
2	258	92	863	99	191	1
3	225	99	913	88	187	1
4	287	89	905	96	185	1
5	357	77	892	97	174	1
6	329	83	997	76	159	2
7	432	69	932	82	151	3
8	498	58	958	81	139	3
9	312	82	1035	47	129	3

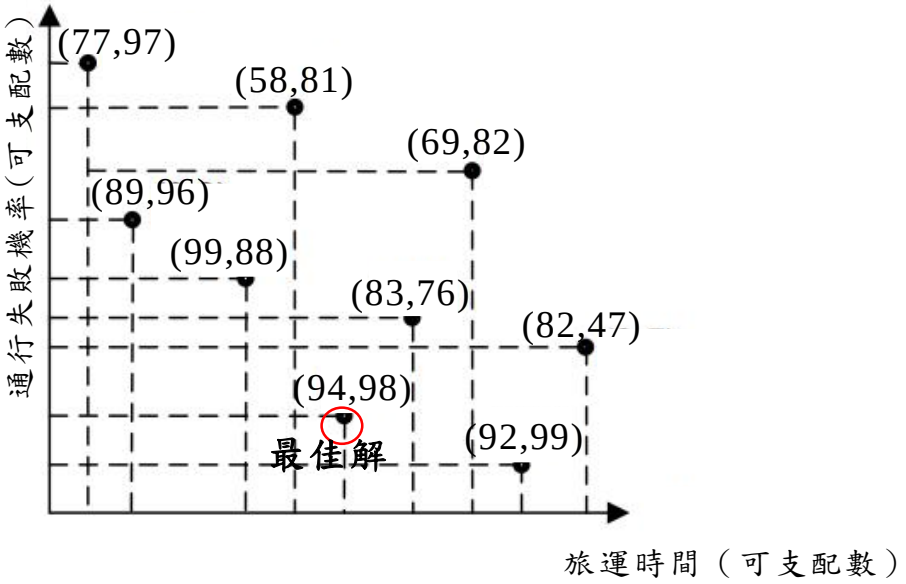


圖 7.7 支配個數法二目標最佳化圖

依此，本測試案例考量旅運時間、通行失敗機率、橋梁重要度三維度求得之支配個數最佳解為，第一組：O→D →A→ F；第二組：O→ C →B→ E，其帕雷托最適圖與效率前緣曲面如圖7.8所示。

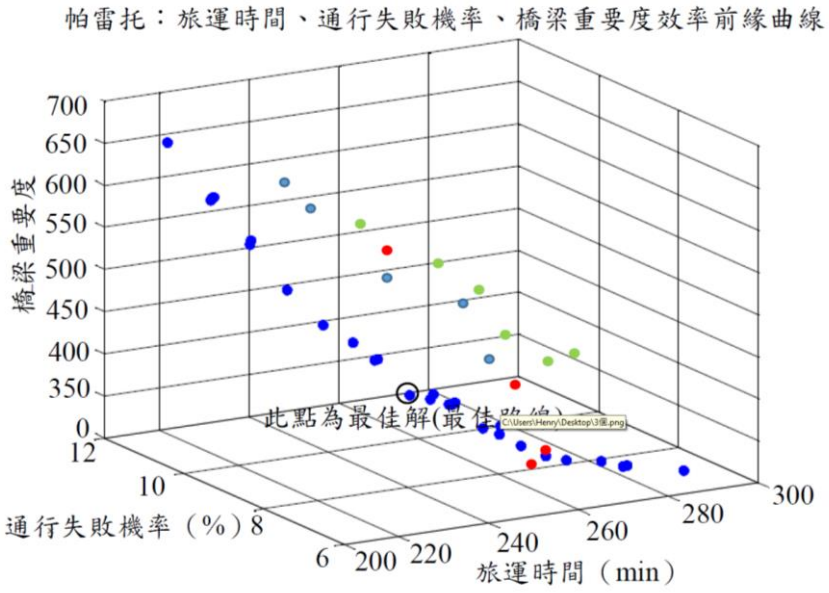


圖 7.8 帕雷托最適圖

後續將以多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式於實務之應用，驗證本研究之最佳化模式，可提供橋梁養護單位，依照模式規劃路線巡檢，以提升災時橋梁特別巡檢作業效率。

7.4建立案例資料庫

本節將依據公路總局橋梁建立案例資料庫，其過程包含案例蒐集與資料處理兩個部分。

7.4.1橋梁蒐集及資料處理

1.橋梁蒐集

本研究蒐集公路總局於臺灣地區橋梁管理系統（TBMS）中五區養護工程處三十四個工務段之橋梁，日後一旦地震發生時，即按各工務段之管轄範圍巡檢轄下之受損橋梁，目前總共收集3207座橋梁之案例。

2.資料處理

在此以某工務段為例，將其管轄之橋梁資料整理如表7-9，其中包含橋梁基本資料，橋梁名稱、橋梁養護工程處、橋梁養護工務段、橋梁所在位置以及橋梁重要度等，橋梁旅運檢測時間如表7-10。

表7-9 基本資料數據範例

橋梁代號	管理機關	養護工程處	養護工務段	所在縣市	所在區鄉	GIS座標X	GIS座標Y	生命安全 橋上交通量				生命安全 橋下交通量			生命安全 橋長				經濟衝擊 橋上交通量				經濟衝擊 道路等級			經濟衝擊 改道長度			經濟衝擊 橋長				橋梁重要度總分
								ADT	分數等級	權重	得分	分數等級	權重	得分	橋長	分數等級	權重	得分	ADT	分數等級	權重	得分	分數等級	權重	得分	分數等級	權重	得分	橋長	分數等級	權重	得分	
(A)	交通部公路總局	公路總局第一區養護工程處	中和工務段	新北市	三峽區	121.387	24.933	8272	0.5	0.22	0.11	0	0.04	0	12.5	0.06	0.08	0.01	8272	0.5	0.02	0.01	0.75	0.12	0.09	0.2	0.13	0.03	12.5	0.06	0.11	0.01	0.248734
(B)	交通部公路總局	公路總局第一區養護工程處	中和工務段	新北市	土城區	121.4263	24.963	22123	0.96	0.22	0.21	0	0.04	0	20.1	0.1	0.08	0.01	22123	0.96	0.02	0.02	0.75	0.12	0.09	0.2	0.13	0.03	20.1	0.1	0.11	0.01	0.3645218
(C)	交通部公路總局	公路總局第一區養護工程處	中和工務段	新北市	三峽區	121.3771	24.884	0	0	0.22	0	0	0.04	0	20	0.1	0.08	0.01	0	0	0.02	0	0.75	0.12	0.09	0.2	0.13	0.03	20	0.1	0.11	0.01	0.135
(M)	交通部公路總局	公路總局第一區養護工程處	中和工務段	新北市	五股區	121.4486	25.082	0	0	0.22	0	0	0.04	0	669	3.34	0.08	0.27	0	0	0.02	0	0.75	0.12	0.09	0.2	0.13	0.03	669	3.34	0.11	0.37	0.7513942
(N)	交通部公路總局	公路總局第一區養護工程處	中和工務段	新北市	三峽區	121.3684	24.92	0	0	0.22	0	0	0.04	0	110	0.55	0.08	0.04	0	0	0.02	0	0.75	0.12	0.09	0.2	0.13	0.03	110	0.55	0.11	0.06	0.2205

表7-10 橋梁旅運檢測時間表(單位:min)

	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)	(J)	(K)	(L)	(M)	(N)
工務段(O)	37	27	46	23	25	42	47	50	63	42	49	26	41	44
A)	0	24	24	40	42	59	63	58	65	50	27	47	50	22
(B)	24	0	35	31	33	50	55	49	63	41	38	38	42	34
(C)	24	35	0	50	52	69	74	68	74	60	13	57	61	23
(L)	47	38	57	40	42	53	63	48	59	54	60	0	38	46
(M)	50	42	61	46	48	59	69	38	49	44	32	38	0	51
(N)	22	34	23	59	51	62	72	57	68	63	59	46	51	0

7.4.2案例資料輸入

問題定義：本研究將以第一養護工程處中和工務段之橋梁為例，假設發生地震，根據中央氣象局地震速報資訊，橋梁所在地區地震強度為五級，橋梁通行失敗機率大於Ay對應門檻值之橋梁有14座，派遣三組巡檢人員進行特別巡檢，輸入資料如表7-11；案例基本資料、TRENDS取得之案例通行失敗機率表與案例橋梁重要度如表7-12，表7-13為案例橋梁旅運檢測時間表。

表7-11 輸入資料

項目	輸入資料
規劃期程	5小時
執行巡檢時間	5小時
檢測工務段	中和工務段
檢測小組	3組
工務段所有橋梁數	102座
需檢測之橋梁數	14座

表7-12 案例基本資料（14座）

橋梁代號	所在縣市	所在區鄉	GIS座標X	GIS座標Y	通行失敗機率	門檻值(Ay對應通行失敗機率)	橋梁重要度
A	新北市	三峽區	121.38697	24.933425	60%	55%	24.87
B	新北市	土城區	121.426275	24.963315	75%	65%	36.45
C	新北市	三峽區	121.377109	24.884098	56%	50%	13.50
D	新北市	新店區	121.546935	24.951465	80%	75%	26.24
E	新北市	新店區	121.545995	24.94093	70%	65%	24.72
F	新北市	新店區	121.54995	24.898995	85%	80%	33.36
G	新北市	烏來區	121.551795	24.86441	88%	70%	21.46
H	新北市	八里區	121.4573	25.125575	90%	60%	95.00
I	新北市	林口區	121.297874	25.122248	50%	50%	97.00
J	新北市	八里區	121.439205	25.154065	68%	60%	31.87
K	新北市	三峽區	121.372612	24.868575	72%	65%	14.14
L	新北市	中和區	121.513299	24.99204	60%	55%	99.00
M	新北市	五股區	121.448626	25.081616	80%	70%	75.14
N	新北市	三峽區	121.368363	24.919972	95%	80%	22.05

表7-13 案例橋梁旅運檢測時間表(14座) (單位：min)

迄(j) / 起(i)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
工務段(O)	37	27	46	23	25	42	47	50	63	42	49	26	41	44
A	0	24	24	40	42	59	63	58	65	50	27	47	50	22
B	24	0	35	31	33	50	55	49	63	41	38	38	42	34
C	24	35	0	50	52	69	74	68	74	60	13	57	61	23
D	40	31	50	0	12	28	33	54	68	47	53	40	46	59
E	42	33	52	12	0	26	31	57	70	49	55	42	48	51
F	59	50	69	28	26	0	20	68	81	60	66	53	59	62
G	63	55	74	33	31	20	0	78	91	70	76	63	69	72
H	58	49	68	54	57	68	78	0	51	13	61	48	38	57
I	65	63	74	68	70	81	91	51	0	24	72	59	49	68
J	50	41	60	47	49	60	70	13	24	0	68	54	44	63
K	27	38	13	53	55	66	76	61	72	68	0	60	32	59
L	47	38	57	40	42	53	63	48	59	54	60	0	38	46
M	50	42	61	46	48	59	69	38	49	44	32	38	0	51
N	22	34	23	59	51	62	72	57	68	63	59	46	51	0

7.4.3輸出結果

本案例工務段同時考量旅運時間、通行失敗機率、橋梁重要度三因子，多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式之最佳化搜尋結果如表7-14。

表7-14 100組路線規劃方案1

方案	第一組	第二組	第三組	旅運時間	通行失敗機率	橋梁重要度
1	O→A→J→M→C	O→L→G	O→B→H→E→I→N→F→K→D	699	29.67	1578.698818
2	O→D→E→K→G	O→L→F	O→N→H→M→C→I→A→B→J	692	31.42	1508.555675
3	O→I→A→L→B	O→K→G	O→N→E→D→F→M→J→H→C	579	30.17	1855.150994
4	O→B→K→F→H	O→G→L	O→I→J→E→M→D→N→C→A	525	39.29	2018.122938
5	O→M→G→C→F	O→N→L	O→K→I→H→D→A→J→E→B	666	30.8	1555.773959
6	O→C→F→A→J	O→B→E	O→H→G→I→L→N→K→M→D	659	30.98	1559.664177
7	O→C→N→D→F	O→H→E	O→I→A→M→L→J→K→G→B	659	31.67	1432.973353
8	O→G→N→K→F	O→J→D	O→M→L→E→H→A→I→B→C	638	32.12	1644.52603
9	O→N→L→I→K	O→H→E	O→F→G→B→M→J→C→A→D	599	28.19	1683.728616
10	O→N→I→E→A	O→H→C	O→L→D→G→F→J→M→K→B	773	29.62	1643.095044
11	O→E→C→I→B	O→H→A	O→F→D→N→G→L→J→K→M	712	27.74	1813.77405
12	O→D→J→K→F	O→L→B	O→I→A→M→N→E→C→H→G	610	32.26	1548.614855
13	O→G→C→E→D	O→I→J	O→B→H→N→M→A→L→K→F	577	32.31	1613.360086
14	O→M→N→J→I	O→K→E	O→D→G→A→B→L→C→H→F	590	29.85	1992.418372
15	O→B→L→C→F	O→I→G	O→M→H→J→D→N→A→K→E	573	32.4	1524.04402
16	O→A→K→C→D	O→L→B	O→J→H→F→I→N→E→G→M	593	38.69	1898.879315
17	O→F→A→D→H	O→B→G	O→I→E→L→J→M→K→N→C	684	31.09	1599.496723
18	O→I→D→C→E	O→H→A	O→K→J→B→L→N→M→F→G	602	36.37	1944.558271
19	O→N→B→I→F	O→H→C	O→K→J→L→E→D→G→A→M	589	32	2020.393715
20	O→L→F→E→K	O→I→G	O→D→C→M→J→N→H→B→A	634	33.01	1757.918874
21	O→H→G→M→E	O→A→I	O→J→D→B→K→N→L→F→C	692	29.13	1834.418944
22	O→D→J→L→N	O→G→K	O→C→I→H→M→F→A→B→E	721	30.87	1662.231799
23	O→H→A→C→L	O→I→F	O→B→N→J→D→K→E→G→M	709	30.08	1733.615965
24	O→I→D→H→G	O→C→L	O→F→M→E→B→N→K→A→J	687	29.84	1926.61639
25	O→B→I→K→J	O→M→H	O→N→C→A→D→F→E→G→L	634	28.96	1980.065971
26	O→M→E→K→H	O→G→J	O→L→A→I→D→N→B→F→C	686	30.11	1764.30856
27	O→H→I→N→E	O→M→F	O→J→L→D→C→K→G→A→B	648	32.94	1571.286628
28	O→A→C→J→N	O→D→F	O→I→H→M→L→K→B→E→G	739	34.15	1439.74005
29	O→N→L→C→F	O→A→H	O→I→D→B→G→K→J→E→M	623	30.39	1967.47322
30	O→N→A→D→E	O→K→M	O→H→I→L→G→J→B→F→C	716	35.06	1511.17498
31	O→C→F→L→E	O→J→K	O→B→G→H→N→A→I→M→D	634	30.49	1894.920549
32	O→A→G→J→E	O→L→M	O→H→B→N→C→F→I→D→K	685	31.83	1534.983581
33	O→N→C→G→J	O→E→B	O→L→H→F→M→I→K→D→A	730	32.44	1453.407927
34	O→L→F→A→D	O→G→J	O→M→N→E→B→I→C→K→H	617	31.21	1827.708168
35	O→D→J→K→B	O→A→N	O→H→M→I→L→C→F→E→G	644	33.09	1525.056166
36	O→J→K→G→H	O→D→L	O→I→M→B→N→C→F→A→E	639	31.32	1693.159602
37	O→E→F→A→L	O→H→M	O→C→I→G→B→K→J→N→D	743	31.03	1817.43293
38	O→J→B→M→I	O→N→C	O→K→D→A→F→L→H→E→G	705	29.66	2146.152098
39	O→E→K→L→C	O→H→G	O→N→A→B→J→M→F→D→I	637	32.33	2251.578286
40	O→L→D→M→B	O→K→J	O→G→C→I→A→E→F→H→N	666	31.22	1962.382942
41	O→M→J→G→N	O→H→D	O→I→A→K→B→E→F→L→C	689	33.06	1601.415474
42	O→I→K→J→G	O→A→M	O→D→B→L→N→H→F→E→C	601	33.74	2146.975501
43	O→E→G→L→D	O→J→N	O→C→I→K→H→M→B→F→A	737	31.52	1604.131733
44	O→D→J→H→B	O→F→L	O→C→M→K→A→E→I→G→N	701	30.47	1852.29431
45	O→M→K→F→E	O→B→L	O→D→C→N→G→J→I→H→A	715	29.91	1883.044616

表7-14 100組路線規劃方案1(續)

方案	第一組	第二組	第三組	旅運時間	通行失敗機率	橋梁重要度
46	O→I→M→F→E	O→A→K	O→G→C→L→H→D→J→N→B	694	30.21	1866.639962
47	O→H→B→C→G	O→K→N	O→F→I→L→J→D→A→E→M	679	31.66	1766.314105
48	O→K→L→D→F	O→I→A	O→J→N→G→B→C→M→E→H	704	30.33	1855.625757
49	O→C→F→H→N	O→K→J	O→A→D→M→B→E→G→L→I	641	31.33	1963.908657
50	O→A→E→K→D	O→I→B	O→F→N→H→C→L→M→G→J	670	32	1720.465084
51	O→G→N→D→H	O→B→M	O→K→F→I→E→L→A→J→C	727	32.11	1706.362973
52	O→A→M→H→L	O→N→J	O→D→F→K→C→E→G→I→B	689	30.55	2228.707252
53	O→B→G→M→H	O→J→N	O→K→C→E→A→I→F→D→L	624	32.4	2211.472445
54	O→I→N→E→C	O→B→G	O→A→K→J→M→F→D→H→L	652	31.3	1990.62804
55	O→E→K→I→G	O→F→H	O→N→B→J→C→D→M→L→A	664	32.02	2236.629531
56	O→K→H→F→B	O→E→M	O→G→L→I→N→D→A→C→J	727	31.33	1863.857525
57	O→C→B→M→D	O→G→E	O→H→A→F→L→N→K→J→I	744	30.58	1888.170736
58	O→G→E→J→K	O→I→C	O→L→M→F→H→N→A→D→B	672	36.75	1754.915214
59	O→M→N→H→I	O→C→A	O→E→G→F→L→K→D→J→B	626	34.21	2313.360501
60	O→H→C→D→N	O→I→J	O→G→B→M→F→E→K→L→A	671	32.57	1995.024031
61	O→D→N→G→K	O→L→H	O→J→A→C→F→E→I→M→B	650	36.71	2136.724304
62	O→K→I→F→M	O→H→L	O→C→A→N→D→E→G→J→B	660	34.43	2092.800425
63	O→L→G→K→E	O→M→I	O→N→B→C→A→F→J→D→H	702	31.27	1938.768755
64	O→B→D→A→J	O→C→N	O→E→H→L→G→F→K→I→M	660	39.28	2018.961896
65	O→A→L→C→N	O→F→K	O→J→D→H→E→G→I→B→M	702	30.41	1946.623931
66	O→I→K→H→M	O→C→L	O→J→F→B→G→D→E→N→A	627	35.63	2194.513723
67	O→I→M→D→K	O→L→N	O→J→H→C→B→G→A→E→F	721	34.32	1758.99194
68	O→C→N→I→E	O→D→K	O→J→L→A→F→M→B→H→G	689	34.74	1766.773288
69	O→G→H→J→M	O→F→C	O→K→E→A→N→I→L→D→B	668	33.65	2077.607009
70	O→L→I→N→B	O→F→M	O→C→K→E→D→A→J→G→H	736	30.06	1973.226518
71	O→J→A→N→H	O→E→M	O→G→K→I→B→F→D→L→C	664	33.74	2069.594303
72	O→C→H→L→J	O→I→F	O→D→E→G→A→B→N→M→K	683	31.45	1976.377126
73	O→G→H→C→E	O→J→L	O→N→M→I→F→B→A→D→K	695	34.5	1626.936789
74	O→A→M→E→J	O→I→N	O→B→H→F→K→L→G→C→D	777	33.88	1870.370316
75	O→L→N→E→D	O→A→G	O→C→J→M→I→K→F→H→B	708	32.33	1951.375633
76	O→B→L→K→N	O→H→D	O→C→J→E→A→I→M→G→F	627	40.26	2671.028557
77	O→I→K→N→H	O→M→A	O→J→C→B→L→D→F→G→E	674	37.03	1812.735672
78	O→N→L→F→G	O→M→D	O→I→K→C→J→E→A→B→H	661	42.06	2323.193259
79	O→N→B→F→J	O→H→C	O→G→I→E→M→A→K→L→D	678	36.37	1995.907278
80	O→I→D→H→A	O→C→E	O→N→F→B→L→K→M→J→G	628	41.47	2473.004086
81	O→H→L→I→B	O→J→F	O→E→D→C→K→M→A→G→N	685	31.47	1999.968288
82	O→E→N→J→I	O→C→G	O→F→L→K→A→M→H→D→B	629	37.42	2370.232465
83	O→N→K→L→C	O→F→A	O→E→B→D→M→I→G→J→H	708	34.8	1749.788411
84	O→E→A→N→L	O→B→C	O→D→F→J→M→I→K→H→G	678	33.18	2160.596334
85	O→J→F→E→I	O→D→B	O→A→C→K→G→L→M→H→N	654	35.93	2522.367786
86	O→B→M→N→G	O→K→H	O→A→D→I→E→F→J→L→C	711	32.39	2009.078656
87	O→H→B→L→I	O→F→G	O→D→A→J→C→M→E→N→K	690	32.95	2635.374668
88	O→L→J→A→H	O→D→N	O→M→G→F→C→E→I→K→B	713	31.85	2027.218252
89	O→L→G→A→F	O→K→N	O→C→I→B→E→M→J→D→H	680	35.39	2220.881836
90	O→H→G→M→K	O→C→N	O→A→I→J→L→D→F→B→E	697	34.78	2274.641532
91	O→L→M→G→I	O→J→E	O→H→A→F→C→N→D→B→K	696	36.47	2216.281781
92	O→F→H→G→N	O→M→B	O→I→C→E→K→J→A→L→D	681	37.49	2261.691504
93	O→D→N→I→E	O→K→F	O→G→H→M→L→C→A→B→J	722	34.41	2076.300703
94	O→H→I→C→M	O→D→B	O→E→N→L→K→F→A→G→J	725	36.95	2074.017959
95	O→K→I→L→J	O→E→H	O→A→C→M→B→D→N→G→F	724	33.92	2177.203252
96	O→E→L→D→A	O→I→B	O→J→H→G→K→F→N→C→M	731	37.4	2103.968698
97	O→M→I→B→J	O→C→G	O→L→D→K→N→A→H→E→F	699	41.4	2447.002654
98	O→J→L→E→M	O→K→I	O→D→F→N→B→G→A→C→H	759	35.57	2513.713783
99	O→B→D→G→J	O→F→I	O→A→K→M→C→E→L→H→N	766	34.82	2265.064272
100	O→N→I→J→A	O→C→B	O→D→K→E→L→M→G→F→H	721	43.86	2834.777302

將表7-14繪製成圖7.9，於效率前緣上的解，皆為最佳解，本模式利用受支配個數法，找出每一可行解被其他解完全控制的受支配(Dominated)個數，再以所有可行解總個數減去每一個解的受支配數，即得每一個解之適存值，本案例最佳解為：第九組方案，亦即第1組巡檢小組須巡檢O→N→L→I→K，第2組巡檢小組須巡檢O→H→E，第3組巡檢小組須巡檢O→F→G→B→M→J→C→A→D。

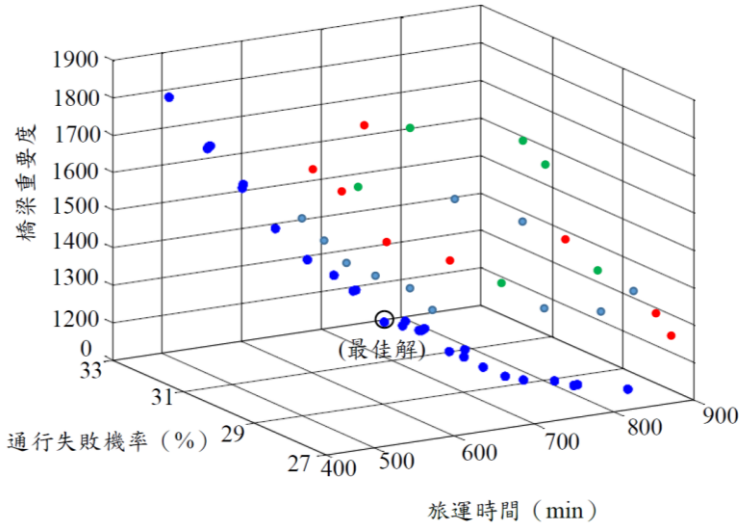


圖 7.9 旅運時間-通行失敗機率-橋梁重要度帕雷托圖與效率前緣曲面

若同時考量旅運時間、通行失敗機率二因子，多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式之最佳化搜尋結果如表7-15。

表7-15 100組路線規劃方案2

方案	第一組	第二組	第三組	旅運時間	通行失敗機率
1	O→G→A→K→C→L	O→F→N→M→H→B→I	O→D→J→E	585	29.28
2	O→N→C→H→B→F	O→D→K→E→M→L→I	O→J→A→G	626	28.92
3	O→F→C→G→N→A	O→J→D→I→L→H→E	O→K→B→M	704	28.24
4	O→K→B→H→M→G	O→E→F→A→D→L→I	O→C→J→N	537	29.68
5	O→G→L→F→C→J	O→H→B→D→A→M→I	O→E→N→K	690	28.43
6	O→J→B→N→I→A	O→L→G→D→M→F→C	O→H→E→K	530	32.28
7	O→J→N→I→M→L	O→E→B→A→C→F→K	O→D→H→G	563	30.59
8	O→K→N→M→D→B	O→C→F→L→E→H→I	O→A→G→J	600	29.43
9	O→A→M→E→F→D	O→N→K→B→G→C→L	O→J→I→H	655	29
10	O→D→I→E→A→C	O→J→M→G→B→K→H	O→L→F→N	549	37.42
11	O→G→J→H→N→L	O→B→I→M→E→C→K	O→F→D→A	623	29.3
12	O→H→G→B→A→E	O→K→L→N→I→F→J	O→D→C→M	750	28.43
13	O→M→D→B→C→L	O→N→E→J→K→I→H	O→G→F→A	574	29.74
14	O→J→N→D→L→H	O→F→E→K→C→G→A	O→M→I→B	612	33.37
15	O→L→M→N→A→J	O→G→C→H→I→D→B	O→K→F→E	672	29.08
16	O→N→M→L→I→K	O→G→B→A→H→J→C	O→D→E→F	617	29.79
17	O→B→N→F→I→A	O→M→C→J→G→E→K	O→L→H→D	562	37.97
18	O→K→B→L→H→I	O→A→N→E→G→C→F	O→M→D→J	581	33.63
19	O→E→N→M→G→K	O→A→B→F→I→J→L	O→C→D→H	649	30.26
20	O→E→G→J→C→F	O→H→D→A→L→B→K	O→I→N→M	621	30.78
21	O→K→C→F→G→I	O→N→J→E→D→M→H	O→L→B→A	672	29.78
22	O→H→M→C→L→G	O→B→A→I→J→N→D	O→K→F→E	622	30.57
23	O→D→A→B→H→I	O→J→F→N→E→L→G	O→M→K→C	673	29.32
24	O→C→N→D→B→G	O→F→A→L→K→J→M	O→H→E→I	655	30.14
25	O→M→A→C→G→I	O→F→L→B→H→E→D	O→N→K→J	642	30.3
26	O→G→M→F→C→A	O→J→K→D→H→E→L	O→B→I→N	738	29.2
27	O→A→N→J→I→M	O→F→B→C→H→D→G	O→E→L→K	587	34.54
28	O→A→J→K→F→B	O→N→H→G→I→L→M	O→C→E→D	693	29.5
29	O→L→F→H→C→A	O→B→K→G→J→N→E	O→M→I→D	715	29.33
30	O→F→H→M→D→A	O→K→N→J→G→E→I	O→L→B→C	696	29.49
31	O→H→A→G→E→J	O→B→N→D→F→C→M	O→L→I→K	681	29.98
32	O→A→M→H→E→I	O→N→B→G→F→L→C	O→J→D→K	700	29.39
33	O→A→I→J→E→C	O→F→K→B→D→M→G	O→L→N→H	599	35.5
34	O→E→G→B→M→C	O→J→N→D→H→F→I	O→A→K→L	649	30.75
35	O→I→B→C→G→E	O→A→F→L→N→K→M	O→J→H→D	632	31.72
36	O→B→M→H→D→A	O→K→J→I→F→E→N	O→L→C→G	668	30.15
37	O→N→F→K→I→G	O→E→L→H→B→D→C	O→M→A→J	640	31.73
38	O→I→C→G→K→M	O→L→J→H→E→D→N	O→F→B→A	716	30.04
39	O→M→D→N→J→F	O→I→C→G→A→L→E	O→B→K→H	632	32.82
40	O→I→G→L→E→A	O→B→D→C→M→F→H	O→J→N→K	672	30.34
41	O→F→J→G→C→E	O→I→M→L→N→B→K	O→D→H→A	696	30.11
42	O→J→F→A→I→K	O→B→D→G→M→L→N	O→C→E→H	661	31.32
43	O→L→D→M→A→N	O→G→I→B→H→E→C	O→F→K→J	609	36.86
44	O→A→L→I→N→M	O→K→G→H→B→F→J	O→E→D→C	681	30.29
45	O→A→K→L→I→J	O→B→E→D→N→G→F	O→M→H→C	718	29.6

表7-15 100組路線規劃方案2(續)

方案	第一組	第二組	第三組	旅運時間	通行失敗機率
46	O→C→M→G→E→A	O→F→I→D→H→J→B	O→L→N→K	723	29.47
47	O→D→F→J→E→B	O→L→C→A→H→M→N	O→G→K→I	699	30.72
48	O→C→L→J→N→E	O→F→A→D→K→G→I	O→H→M→B	746	29.52
49	O→M→J→K→L→H	O→N→G→C→A→D→B	O→F→I→E	737	29.53
50	O→I→N→F→L→D	O→G→K→E→H→A→B	O→M→J→C	708	30.53
51	O→M→G→C→D→E	O→L→B→J→I→F→N	O→A→K→H	640	31.81
52	O→C→I→L→M→H	O→A→D→N→B→G→E	O→K→F→J	684	30.72
53	O→N→E→L→K→H	O→C→A→G→I→J→F	O→M→D→B	680	30.99
54	O→L→H→K→A→F	O→N→I→G→E→C→M	O→D→J→B	681	31.67
55	O→M→K→H→B→A	O→D→E→G→I→L→C	O→F→N→J	645	31.99
56	O→J→B→G→E→N	O→K→I→H→F→L→C	O→A→D→M	716	30.97
57	O→N→L→D→M→G	O→J→F→A→K→C→E	O→H→I→B	683	31.6
58	O→G→I→J→C→N	O→F→K→L→H→M→E	O→D→A→B	644	33.71
59	O→E→I→H→B→D	O→F→K→G→A→N→J	O→L→M→C	737	30.72
60	O→M→N→K→A→E	O→I→D→B→G→J→H	O→C→L→F	705	31.39
61	O→E→L→B→D→C	O→G→I→H→F→J→A	O→M→N→K	654	32.69
62	O→L→F→J→K→G	O→B→M→A→N→C→E	O→I→D→H	706	32.02
63	O→H→K→L→C→F	O→D→A→G→M→J→I	O→N→E→B	717	32.02
64	O→K→A→C→F→G	O→N→J→H→L→D→I	O→E→M→B	655	32.37
65	O→K→J→I→G→L	O→M→N→A→D→E→C	O→H→B→F	650	32.71
66	O→F→I→J→M→N	O→H→A→B→L→G→D	O→C→E→K	733	31.3
67	O→M→K→J→F→H	O→I→D→L→N→A→G	O→C→E→B	689	32.17
68	O→N→D→G→L→K	O→E→H→C→J→A→I	O→M→B→F	718	31.61
69	O→A→B→C→E→F	O→L→I→D→N→M→K	O→G→J→H	684	32.2
70	O→D→C→N→J→B	O→A→G→K→F→E→L	O→I→M→H	729	32.19
71	O→F→K→M→E→N	O→L→H→B→A→D→C	O→J→I→G	660	32.76
72	O→D→E→A→N→K	O→C→F→B→L→H→I	O→J→G→M	653	35.04
73	O→I→D→E→B→M	O→C→K→F→A→G→L	O→J→H→N	754	31.46
74	O→N→F→A→J→K	O→C→I→L→G→H→D	O→B→E→M	673	32.46
75	O→I→K→C→B→G	O→F→J→L→M→A→D	O→H→E→N	733	31.73
76	O→B→I→D→G→M	O→A→K→C→L→F→N	O→E→J→H	678	32.81
77	O→D→E→L→M→B	O→N→K→H→F→I→A	O→C→J→G	659	36.42
78	O→C→M→G→I→J	O→H→A→N→E→L→K	O→B→D→F	737	31.82
79	O→J→F→M→L→N	O→C→G→D→A→K→B	O→H→I→E	662	37.41
80	O→K→J→I→F→L	O→M→G→E→B→A→D	O→H→N→C	748	32.27
81	O→G→L→I→F→C	O→M→A→J→D→N→B	O→H→K→E	681	32.86
82	O→E→A→C→G→H	O→L→F→D→N→B→M	O→I→J→K	666	36.78
83	O→D→M→L→K→N	O→F→G→C→A→H→E	O→J→B→I	696	34.24
84	O→E→D→B→G→L	O→K→N→J→H→I→F	O→M→A→C	681	34.93
85	O→G→C→I→D→M	O→F→A→N→L→H→K	O→J→B→E	666	38.76
86	O→H→N→E→J→G	O→D→F→L→B→A→C	O→K→I→M	702	33.17
87	O→L→K→H→M→G	O→I→F→E→J→A→D	O→C→B→N	671	37.45
88	O→G→E→A→K→B	O→C→H→J→M→I→L	O→N→D→F	755	32.64
89	O→I→H→K→J→A	O→C→B→D→N→E→L	O→F→M→G	737	33.98
90	O→J→C→M→B→I	O→F→K→D→H→E→A	O→N→L→G	667	38.83
91	O→C→M→F→E→N	O→G→L→I→B→H→A	O→D→K→J	692	35.99
92	O→A→C→M→D→H	O→K→E→L→N→G→B	O→F→I→J	693	40.02
93	O→L→A→D→H→N	O→B→I→F→K→E→G	O→M→C→J	712	36.19
94	O→A→K→B→D→C	O→F→L→H→E→N→G	O→I→M→J	709	39.88
95	O→H→B→I→G→D	O→J→A→L→M→F→K	O→E→C→N	723	36.4
96	O→L→H→E→N→F	O→I→D→B→G→C→A	O→K→J→M	695	41.45
97	O→G→N→D→J→M	O→B→E→I→F→A→C	O→H→K→L	732	36.35
98	O→K→J→C→E→A	O→D→G→N→F→B→H	O→L→M→I	744	36.92
99	O→J→F→K→E→D	O→C→M→A→N→B→H	O→L→I→G	737	37.15
100	O→E→K→H→N→A	O→L→C→G→B→M→F	O→J→D→I	776	42.65

若僅考慮旅運時間、通行失敗機率二因子求得之效率前緣，如圖7.10所示，應用受支配個數法求得之最佳解為：第九組，亦即第1組巡檢小組須巡檢O→A→M→E→F→D，第2組巡檢小組須巡檢O→N→K→B→G→C→L，第3組巡檢小組須巡檢O→J→I→H。

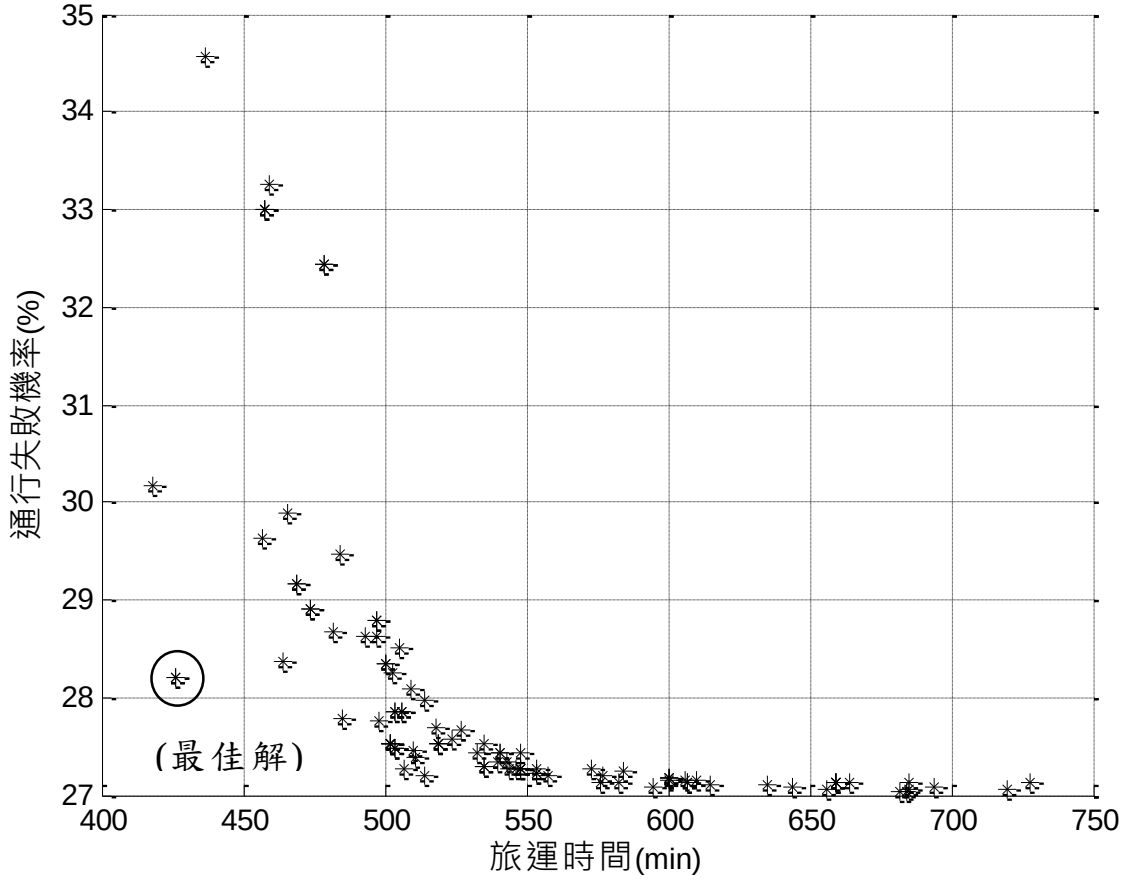


圖 7.10 旅運時間-通行失敗機率帕雷托圖與效率前緣曲線

若同時考量旅運時間、橋梁重要度二因子，多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式之最佳化搜尋結果如表7-16。

表7-16 100組路線規劃方案3

方案	第一組	第二組	第三組	旅運時間	橋梁重要度
1	O→G→A→K→C→L	O→F→N→M→H→B→I	O→D→J→E	705	1412.319201
2	O→N→C→H→B→F	O→D→K→E→M→L→I	O→J→A→G	604	1605.623153
3	O→F→C→G→N→A	O→J→D→I→L→H→E	O→K→B→M	600	1745.683966
4	O→K→B→H→M→G	O→E→F→A→D→L→I	O→C→J→N	568	1808.639009
5	O→G→L→F→C→J	O→H→B→D→A→M→I	O→E→N→K	649	1525.200413
6	O→J→B→N→I→A	O→L→G→D→M→F→C	O→H→E→K	621	1598.290234
7	O→J→N→I→M→L	O→E→B→A→C→F→K	O→D→H→G	575	2413.069946
8	O→K→N→M→D→B	O→C→F→L→E→H→I	O→A→G→J	587	2104.080519
9	O→A→M→E→F→D	O→N→K→B→G→C→L	O→J→I→H	707	1513.883418
10	O→D→I→E→A→C	O→J→M→G→B→K→H	O→L→F→N	681	1584.279409
11	O→G→J→H→N→L	O→B→I→M→E→C→K	O→F→D→A	682	1558.885375
12	O→H→G→B→A→E	O→K→L→N→I→F→J	O→D→C→M	688	1553.155516
13	O→M→D→B→C→L	O→N→E→J→K→I→H	O→G→F→A	670	1662.172366
14	O→J→N→D→L→H	O→F→E→K→C→G→A	O→M→I→B	639	1687.943621
15	O→L→M→N→A→J	O→G→C→H→I→D→B	O→K→F→E	612	1796.386019
16	O→N→M→L→I→K	O→G→B→A→H→J→C	O→D→E→F	663	1678.975528
17	O→B→N→F→I→A	O→M→C→J→G→E→K	O→L→H→D	689	1540.783758
18	O→K→B→L→H→I	O→A→N→E→G→C→F	O→M→D→J	614	1696.617909
19	O→E→N→M→G→K	O→A→B→F→I→J→L	O→C→D→H	603	1933.216462
20	O→E→G→J→C→F	O→H→D→A→L→B→K	O→I→N→M	688	1614.459446
21	O→K→C→F→G→I	O→N→J→E→D→M→H	O→L→B→A	713	1538.728012
22	O→H→M→C→L→G	O→B→A→I→J→N→D	O→K→F→E	617	1968.226537
23	O→D→A→B→H→I	O→J→F→N→E→L→G	O→M→K→C	603	2019.109837
24	O→C→N→D→B→G	O→F→A→L→K→J→M	O→H→E→I	629	1734.734364
25	O→M→A→C→G→I	O→F→L→B→H→E→D	O→N→K→J	686	1683.198319
26	O→G→M→F→C→A	O→J→K→D→H→E→L	O→B→I→N	671	1690.416861
27	O→A→N→J→I→M	O→F→B→C→H→D→G	O→E→L→K	638	1803.214025
28	O→A→J→K→F→B	O→N→H→G→I→L→M	O→C→E→D	669	1757.060731
29	O→L→F→H→C→A	O→B→K→G→J→N→E	O→M→I→D	732	1543.857001
30	O→F→H→M→D→A	O→K→N→J→G→E→I	O→L→B→C	609	2392.804011
31	O→H→A→G→E→J	O→B→N→D→F→C→M	O→L→I→K	623	2002.088272
32	O→A→M→H→E→I	O→N→B→G→F→L→C	O→J→D→K	625	1986.026917
33	O→A→I→J→E→C	O→F→K→B→D→M→G	O→L→N→H	685	1730.919787
34	O→E→G→B→M→C	O→J→N→D→H→F→I	O→A→K→L	632	1960.201918
35	O→I→B→C→G→E	O→A→F→L→N→K→M	O→J→H→D	633	1924.212914
36	O→B→M→H→D→A	O→K→J→I→F→E→N	O→L→C→G	697	1653.974407
37	O→N→F→K→I→G	O→E→L→H→B→D→C	O→M→A→J	648	1998.197211
38	O→I→C→G→K→M	O→L→J→H→E→D→N	O→F→B→A	707	1677.972742
39	O→M→D→N→J→F	O→I→C→G→A→L→E	O→B→K→H	644	2033.029572
40	O→I→G→L→E→A	O→B→D→C→M→F→H	O→J→N→K	628	2494.738801
41	O→F→J→G→C→E	O→I→M→L→N→B→K	O→D→H→A	668	1930.091386
42	O→J→F→A→I→K	O→B→D→G→M→L→N	O→C→E→H	670	1814.015644
43	O→L→D→M→A→N	O→G→I→B→H→E→C	O→F→K→J	627	2884.528585
44	O→A→L→I→N→M	O→K→G→H→B→F→J	O→E→D→C	630	2074.938976
45	O→A→K→L→I→J	O→B→E→D→N→G→F	O→M→H→C	635	2486.374482

表7-16 100組路線規劃方案3(續)

方案	第一組	第二組	第三組	旅運時間	橋梁重要度
46	O→C→M→G→E→A	O→F→I→D→H→J→B	O→L→N→K	640	2158.033
47	O→D→F→J→E→B	O→L→C→A→H→M→N	O→G→K→I	710	1685.35006
48	O→C→L→J→N→E	O→F→A→D→K→G→I	O→H→M→B	671	1879.06232
49	O→M→J→K→L→H	O→N→G→C→A→D→B	O→F→I→E	641	2156.62105
50	O→I→N→F→L→D	O→G→K→E→H→A→B	O→M→J→C	676	1835.87689
51	O→M→G→C→D→E	O→L→B→J→I→F→N	O→A→K→H	687	1826.11549
52	O→C→I→L→M→H	O→A→D→N→B→G→E	O→K→F→J	646	2050.4112
53	O→N→E→L→K→H	O→C→A→G→I→J→F	O→M→D→B	669	1954.24327
54	O→L→H→K→A→F	O→N→I→G→E→C→M	O→D→J→B	724	1715.1079
55	O→M→K→H→B→A	O→D→E→G→I→L→C	O→F→N→J	679	1903.00315
56	O→J→B→G→E→N	O→K→I→H→F→L→C	O→A→D→M	683	1884.504
57	O→N→L→D→M→G	O→J→F→A→K→C→E	O→H→I→B	722	1728.68073
58	O→G→I→J→C→N	O→F→K→L→H→M→E	O→D→A→B	660	2108.85303
59	O→E→I→H→B→D	O→F→K→G→A→N→J	O→L→M→C	718	1839.73875
60	O→M→N→K→A→E	O→I→D→B→G→J→H	O→C→L→F	705	1875.71876
61	O→E→L→B→D→C	O→G→I→H→F→J→A	O→M→N→K	684	1877.83255
62	O→L→F→J→K→G	O→B→M→A→N→C→E	O→I→D→H	648	2122.03043
63	O→H→K→L→C→F	O→D→A→G→M→J→I	O→N→E→B	667	2077.38961
64	O→K→A→C→F→G	O→N→J→H→L→D→I	O→E→M→B	669	2014.44043
65	O→K→J→I→G→L	O→M→N→A→D→E→C	O→H→B→F	708	1881.89327
66	O→F→I→J→M→N	O→H→A→B→L→G→D	O→C→E→K	702	1888.04701
67	O→M→K→J→F→H	O→I→D→L→N→A→G	O→C→E→B	663	2369.77943
68	O→N→D→G→L→K	O→E→H→C→J→A→I	O→M→B→F	650	2452.69428
69	O→A→B→C→E→F	O→L→I→D→N→M→K	O→G→J→H	731	1744.94753
70	O→D→C→N→J→B	O→A→G→K→F→E→L	O→I→M→H	692	1889.03653
71	O→F→K→M→E→N	O→L→H→B→A→D→C	O→J→I→G	682	2064.90334
72	O→D→E→A→N→K	O→C→F→B→L→H→I	O→J→G→M	691	1929.79414
73	O→I→D→E→B→M	O→C→K→F→A→G→L	O→J→H→N	666	2225.04897
74	O→N→F→A→J→K	O→C→I→L→G→H→D	O→B→E→M	733	1862.88664
75	O→I→K→C→B→G	O→F→J→L→M→A→D	O→H→E→N	682	2143.13921
76	O→B→I→D→G→M	O→A→K→C→L→F→N	O→E→J→H	753	1797.28119
77	O→D→E→L→M→B	O→N→K→H→F→I→A	O→C→J→G	716	1954.55072
78	O→C→M→G→I→J	O→H→A→N→E→L→K	O→B→D→F	693	2094.30373
79	O→J→F→M→L→N	O→C→G→D→A→K→B	O→H→I→E	694	1956.36181
80	O→K→J→I→F→L	O→M→G→E→B→A→D	O→H→N→C	683	2215.12159
81	O→G→L→I→F→C	O→M→A→J→D→N→B	O→H→K→E	714	1971.82121
82	O→E→A→C→G→H	O→L→F→D→N→B→M	O→I→J→K	709	2048.9203
83	O→D→M→L→K→N	O→F→G→C→A→H→E	O→J→B→I	753	1940.91296
84	O→E→D→B→G→L	O→K→N→J→H→I→F	O→M→A→C	705	2101.94754
85	O→G→C→I→D→M	O→F→A→N→L→H→K	O→J→B→E	720	2300.68836
86	O→H→N→E→J→G	O→D→F→L→B→A→C	O→K→I→M	735	1985.68179
87	O→L→K→H→M→G	O→I→F→E→J→A→D	O→C→B→N	696	2950.96491
88	O→G→E→A→K→B	O→C→H→J→M→I→L	O→N→D→F	709	2558.76788
89	O→I→H→K→J→A	O→C→B→D→N→E→L	O→F→M→G	730	2017.89044
90	O→J→C→M→B→I	O→F→K→D→H→E→A	O→N→L→G	722	2060.26749
91	O→C→M→F→E→N	O→G→L→I→B→H→A	O→D→K→J	764	1990.91947
92	O→A→C→M→D→H	O→K→E→L→N→G→B	O→F→I→J	754	2054.34494
93	O→L→A→D→H→N	O→B→I→F→K→E→G	O→M→C→J	740	2127.9807
94	O→A→K→B→D→C	O→F→L→H→E→N→G	O→I→M→J	728	2256.8618
95	O→H→B→I→G→D	O→J→A→L→M→F→K	O→E→C→N	722	2408.83955
96	O→L→H→E→N→F	O→I→D→B→G→C→A	O→K→J→M	729	2159.10148
97	O→G→N→D→J→M	O→B→E→I→F→A→C	O→H→K→L	750	2136.2375
98	O→K→J→C→E→A	O→D→G→N→F→B→H	O→L→M→I	741	2146.11595
99	O→J→F→K→E→D	O→C→M→A→N→B→H	O→L→I→G	769	2112.9449
100	O→E→K→H→N→A	O→L→C→G→B→M→F	O→J→D→I	745	2399.79394

若僅考慮旅運時間、橋梁重要度二因子求得之效率前緣，如圖7.11所示，應用受支配個數法求得之最佳解為：第三組，亦即第1組巡檢小組須巡檢O→F→C→G→N→A，第2組巡檢小組須巡檢O→J→D→I→L→H→E，第3組巡檢小組須巡檢O→K→B→M。

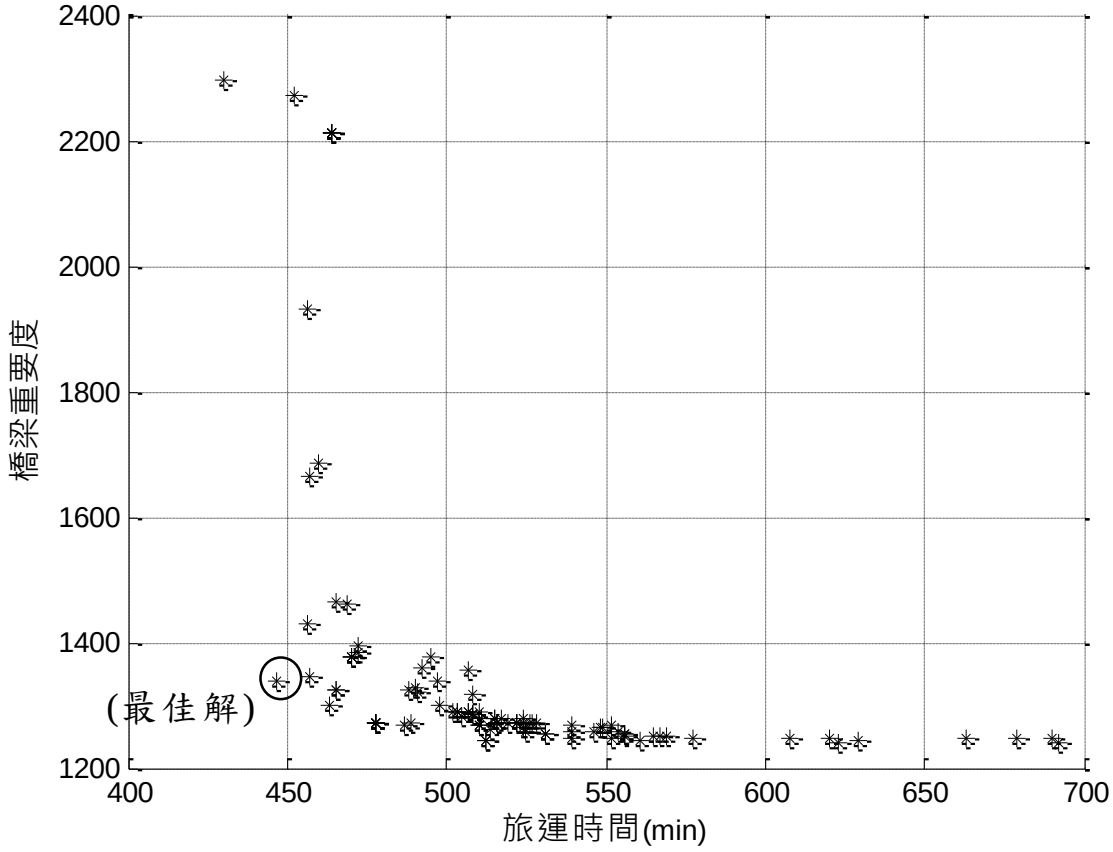


圖 7.11 旅運時間-橋梁重要度帕雷托圖與效率前緣曲線

若同時考量通行失敗機率、橋梁重要度二因子，多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式之最佳化搜尋結果如表7-17。

表7-17 100組路線規劃方案4

方案	第一組	第二組	第三組	通行失敗機率	橋梁重要度
1	O→D→M	O→I→B→J	O→L→H→K→G→N→E→A→F→C	29.54	1434.325383
2	O→M→N	O→G→F→K	O→H→B→D→J→L→A→I→E→C	28.29	1617.905514
3	O→D→B	O→L→J→C	O→H→M→E→I→K→N→F→G→A	29.58	1371.205113
4	O→G→F	O→E→N→D	O→H→B→I→C→A→L→K→J→M	28.91	1777.206353
5	O→B→J	O→C→N→K	O→M→I→D→A→E→H→L→F→G	29.82	1477.18772
6	O→F→J	O→B→I→K	O→G→L→C→D→M→A→N→H→E	30.35	1443.053049
7	O→H→A	O→N→D→F	O→I→K→B→L→C→E→J→M→G	29.57	1568.831841
8	O→A→K	O→I→G→B	O→H→E→M→J→L→N→F→C→D	30.99	1551.761818
9	O→J→M	O→N→I→K	O→D→G→F→E→L→B→H→A→C	30.39	1587.762417
10	O→G→C	O→L→E→I	O→F→B→K→J→D→H→A→M→N	29.34	1879.210543
11	O→G→A	O→K→D→L	O→C→N→M→H→E→J→B→F→I	29.01	2135.649097
12	O→N→H	O→D→M→A	O→L→I→F→E→J→G→B→C→K	31.18	1511.027824
13	O→B→I	O→E→M→H	O→F→C→L→J→A→G→N→D→K	29.78	1725.332103
14	O→C→F	O→I→N→J	O→B→G→M→E→L→K→A→H→D	30.01	1688.792654
15	O→E→N	O→J→M→K	O→G→B→F→C→A→L→H→D→I	29.5	2121.229999
16	O→M→D	O→N→B→C	O→E→L→F→K→G→A→I→J→H	29.8	1986.157806
17	O→E→G	O→D→K→L	O→M→I→J→F→H→A→N→C→B	29.87	1790.176352
18	O→I→A	O→H→J→G	O→D→L→B→M→K→C→F→N→E	30.59	1638.757486
19	O→I→N	O→F→A→K	O→B→H→C→G→M→J→E→D→L	30.1	1725.441165
20	O→H→I	O→M→F→C	O→B→J→E→L→D→N→G→K→A	34.52	1598.122128
21	O→M→G	O→F→E→J	O→I→D→L→B→C→K→N→H→A	30.63	1606.072819
22	O→G→B	O→I→N→K	O→J→F→M→E→D→C→H→A→L	30.28	1838.849779
23	O→E→D	O→B→K→A	O→N→I→H→J→G→F→C→M→L	30.41	1801.356279
24	O→K→J	O→E→D→L	O→I→A→M→H→B→C→G→N→F	30.68	1683.561856
25	O→I→A	O→E→F→D	O→G→N→B→C→K→L→H→M→J	29.98	1977.167704
26	O→F→I	O→K→N→C	O→M→J→L→E→G→D→A→B→H	30.12	1942.519455
27	O→G→A	O→J→K→N	O→D→B→C→H→F→I→E→M→L	29.85	2189.614607
28	O→N→F	O→L→G→B	O→I→K→H→E→D→M→C→J→A	31.41	1611.501698
29	O→D→F	O→N→G→K	O→C→L→E→A→B→M→H→J→I	29.87	1980.604487
30	O→F→N	O→H→M→L	O→E→D→G→I→B→J→C→A→K	30.45	1803.68037
31	O→E→B	O→I→G→L	O→M→N→F→H→A→C→D→J→K	30.31	1842.893313
32	O→C→J	O→A→D→K	O→E→F→I→M→N→H→G→B→L	30.29	1979.135074
33	O→E→H	O→M→F→I	O→L→J→G→D→C→K→A→B→N	31.08	1710.673932
34	O→M→A	O→I→J→N	O→B→H→E→F→K→L→G→D→C	31.59	1629.217437
35	O→A→C	O→L→N→G	O→K→F→B→H→I→D→J→E→M	30.9	1716.609485
36	O→I→B	O→M→H→C	O→N→F→E→G→A→J→L→K→D	32.28	1646.301794
37	O→H→I	O→F→B→M	O→J→G→K→L→D→C→E→A→N	30.75	1819.840245
38	O→M→G	O→C→F→L	O→A→D→H→J→I→E→K→N→B	30.62	1993.698223
39	O→I→A	O→B→H→L	O→M→C→J→N→F→E→D→K→G	31.09	1765.621152
40	O→A→B	O→L→D→M	O→C→H→F→K→N→I→J→G→E	31.19	1753.383979
41	O→L→M	O→N→J→C	O→D→G→F→K→A→I→H→B→E	30.32	2040.840847
42	O→C→G	O→D→M→F	O→J→H→B→A→I→L→N→K→E	33.69	1646.125016
43	O→J→B	O→A→I→D	O→G→E→H→C→L→N→K→F→M	30.8	1847.386579
44	O→I→N	O→L→B→G	O→D→C→F→E→M→J→H→A→K	32.2	1766.072685
45	O→D→M	O→C→E→N	O→G→H→L→I→J→K→B→F→A	31.11	1770.802632

表7-17 100組路線規劃方案4(續)

方案	第一組	第二組	第三組	旅運時間	通行失敗機率	橋梁重要度
46	O→I→K	O→E→H→G	O→N→A→L→M→B→J→C→D→F	723	32.71	1663.496013
47	O→N→J	O→I→D→A	O→F→G→L→M→H→B→K→C→E	699	32.36	1721.903934
48	O→C→H	O→G→K→I	O→F→N→J→D→L→B→E→A→M	746	30.51	2192.454196
49	O→A→J	O→L→C→F	O→D→K→M→N→G→E→H→I→B	737	30.89	2048.847952
50	O→K→I	O→E→L→B	O→G→M→H→F→N→C→J→A→D	708	31.11	1930.678231
51	O→H→K	O→D→L→G	O→J→F→B→I→E→M→C→A→N	640	32.53	1729.900959
52	O→B→N	O→F→J→M	O→K→I→L→E→H→C→G→D→A	684	32.39	1736.133175
53	O→N→M	O→F→H→C	O→B→A→J→I→D→L→G→K→E	680	30.93	2030.426056
54	O→F→J	O→D→M→I	O→L→B→H→K→C→G→E→N→A	681	35.64	1747.131505
55	O→N→L	O→K→G→J	O→C→I→D→F→E→B→A→H→M	645	30.9	2070.244222
56	O→E→C	O→N→I→K	O→M→A→J→H→B→G→D→F→L	716	32.61	1791.034642
57	O→M→F	O→I→G→N	O→B→H→K→E→C→L→J→A→D	683	33.54	1752.079906
58	O→K→H	O→L→A→I	O→C→F→D→N→J→B→G→E→M	644	31.38	1943.772683
59	O→C→A	O→G→B→K	O→I→L→H→F→D→N→J→M→E	737	33.8	1770.179483
60	O→C→E	O→D→J→I	O→N→G→M→B→A→H→F→L→K	705	31.15	2126.373016
61	O→F→K	O→L→N→M	O→D→E→J→H→A→I→G→B→C	654	33.07	1919.514518
62	O→C→N	O→K→F→E	O→J→A→B→M→I→H→G→D→L	706	33.39	1911.86666
63	O→L→J	O→K→F→E	O→A→G→N→H→D→M→I→B→C	717	32.59	1980.887719
64	O→H→A	O→F→K→L	O→E→D→G→C→J→B→I→N→M	655	32.35	2183.310163
65	O→M→H	O→D→C→J	O→A→E→N→I→G→K→B→F→L	650	32.7	2056.37458
66	O→N→C	O→I→K→H	O→J→G→F→L→B→E→D→A→M	733	34.02	1980.296403
67	O→K→G	O→A→D→H	O→L→M→C→I→B→N→F→J→E	689	34.85	1864.783266
68	O→N→A	O→I→L→M	O→C→F→B→H→E→J→G→D→K	718	34.93	1779.958574
69	O→E→F	O→K→A→G	O→I→M→B→J→C→L→D→N→H	684	34.92	1783.587328
70	O→K→N	O→J→C→G	O→H→L→I→A→D→F→E→B→M	729	35.04	1897.842149
71	O→A→I	O→L→M→F	O→D→H→G→E→N→B→C→J→K	660	37.02	1839.005492
72	O→B→D	O→J→G→H	O→N→M→L→F→I→K→E→C→A	653	32.76	2138.958417
73	O→M→K	O→H→N→J	O→F→B→C→I→L→G→D→E→A	754	35.64	1902.787372
74	O→F→I	O→A→N→J	O→C→D→B→M→H→G→K→L→E	673	33.05	2245.648417
75	O→A→N	O→J→D→E	O→I→F→L→B→C→G→K→M→H	733	35.41	2100.69496
76	O→M→K	O→D→I→L	O→G→C→N→E→F→H→A→B→J	678	35.06	2273.603794
77	O→C→K	O→B→E→M	O→L→G→I→N→A→D→H→J→F	659	35.91	1963.206085
78	O→M→F	O→K→C→I	O→A→L→H→B→E→N→J→G→D	737	35.69	2192.435466
79	O→F→G	O→H→M→J	O→B→E→C→K→I→A→N→L→D	662	35.72	2040.726083
80	O→K→H	O→I→B→J	O→L→N→A→D→C→E→F→G→M	748	36.65	1945.290195
81	O→D→J	O→A→L→H	O→N→F→C→K→I→E→M→B→G	681	36.9	2336.106398
82	O→G→A	O→C→D→N	O→L→F→E→M→H→I→J→B→K	666	37.38	2028.002181
83	O→I→D	O→B→A→H	O→N→L→M→F→E→K→C→J→G	696	37.07	2067.430702
84	O→F→H	O→J→M→A	O→E→D→C→N→G→B→I→L→K	681	35.18	2360.592934
85	O→J→M	O→G→K→A	O→I→F→N→C→B→E→H→D→L	666	36.03	2587.664255
86	O→F→N	O→H→E→A	O→C→D→L→G→J→M→K→B→I	702	36.56	2499.000156
87	O→F→K	O→E→A→G	O→N→C→L→D→M→H→B→I→J	671	37.14	2072.545802
88	O→I→D	O→N→F→H	O→E→J→C→G→M→A→L→K→B	755	36.79	2430.967671
89	O→I→L	O→M→C→F	O→K→D→J→H→E→N→G→B→A	737	40.26	2077.621252
90	O→A→L	O→E→K→H	O→B→G→D→N→F→C→I→J→M	667	36.34	2742.186473
91	O→B→A	O→E→K→M	O→N→C→H→G→J→L→I→D→F	692	37.23	2123.551875
92	O→G→A	O→C→M→N	O→J→E→H→B→D→I→K→F→L	693	37.29	2600.379489
93	O→G→C	O→K→M→B	O→E→A→D→H→N→F→J→I→L	712	36.61	2754.266716
94	O→L→D	O→N→C→I	O→H→F→K→B→A→M→J→E→G	709	37.54	2273.171719
95	O→C→I	O→A→N→M	O→E→D→L→B→H→G→J→F→K	723	37.54	2645.138483
96	O→I→E	O→K→H→L	O→G→F→B→M→J→A→D→C→N	695	40.18	2426.530525
97	O→A→N	O→C→J→I	O→G→F→K→B→D→M→H→E→L	732	40.04	2847.678937
98	O→D→N	O→M→C→A	O→B→E→K→L→J→H→G→F→I	744	41.64	2947.037572
99	O→A→B	O→C→N→M	O→F→D→I→E→G→H→L→J→K	737	45.72	3246.545691
100	O→M→H	O→D→I→L	O→N→G→C→E→F→K→B→J→A	776	48.79	3365.618618

若僅考慮通行失敗機率、橋梁重要度二因子求得之效率前緣，

如圖7.12所示，應用受支配個數法求得之最佳解為：第一組，亦即第1組巡檢小組須巡檢O→D→M，第2組巡檢小組須巡檢O→I→B→J，第3組巡檢小組須巡檢O→L→H→K→G→N→E→A→F→C。

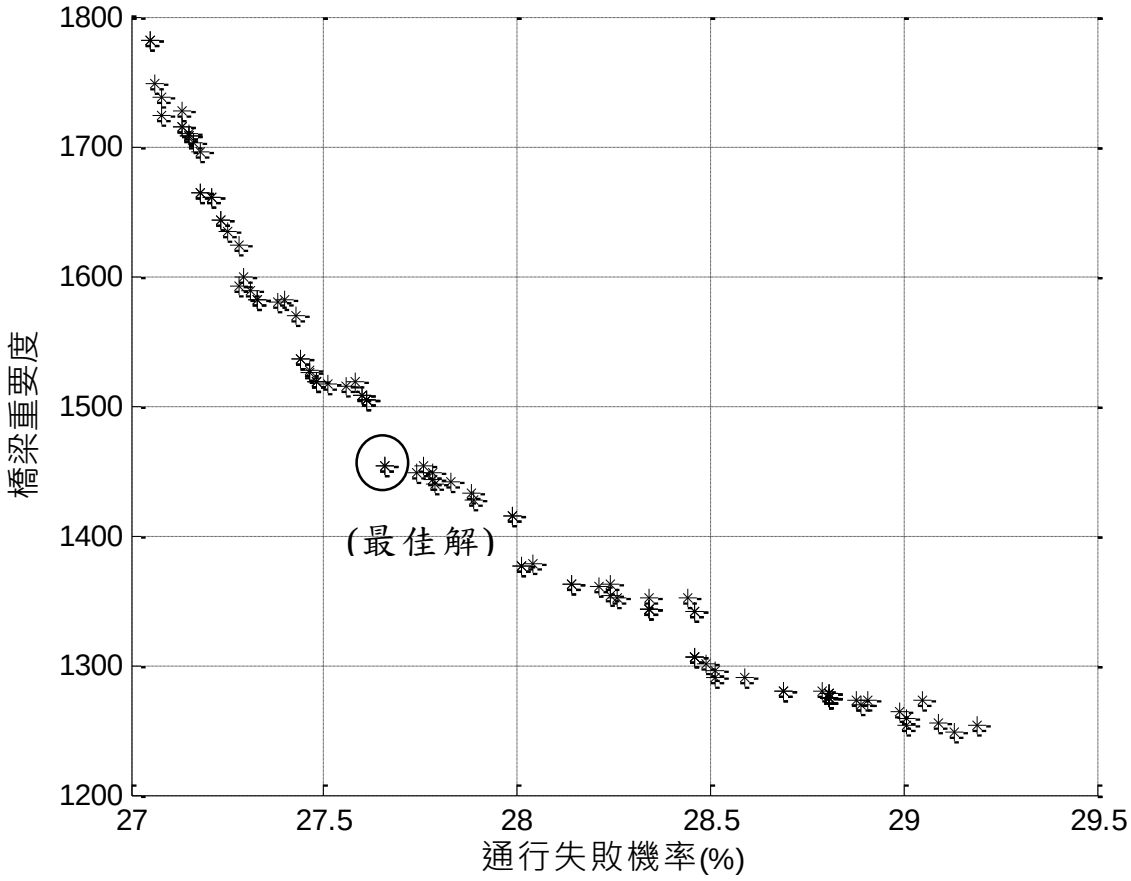


圖 7.12 通行失敗機率-橋梁重要度帕雷托圖與效率前緣曲線

若考量旅運時間一因子，多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式之最佳化搜尋結果如表7-18，其中最佳解為：第六組，亦即第1組巡檢小組須巡檢O→H→E→K，第2組巡檢小組須巡檢O→J→B→N→I→A，第3組巡檢小組須巡檢O→L→G→D→M→F→C。

表7-18 100組路線規劃方案5

方案	第一組	第二組	第三組	旅運時間
1	O→D→J→E	O→G→A→K→C→L	O→F→N→M→H→B→I	585
2	O→J→A→G	O→N→C→H→B→F	O→D→K→E→M→L→I	626
3	O→K→B→M	O→F→C→G→N→A	O→J→D→I→L→H→E	704
4	O→C→J→N	O→K→B→H→M→G	O→E→F→A→D→L→I	537
5	O→E→N→K	O→G→L→F→C→J	O→H→B→D→A→M→I	690
6	O→H→E→K	O→J→B→N→I→A	O→L→G→D→M→F→C	530
7	O→D→H→G	O→J→N→I→M→L	O→E→B→A→C→F→K	563
8	O→A→G→J	O→K→N→M→D→B	O→C→F→L→E→H→I	600
9	O→J→I→H	O→A→M→E→F→D	O→N→K→B→G→C→L	655
10	O→L→F→N	O→D→I→E→A→C	O→J→M→G→B→K→H	549
11	O→F→D→A	O→G→J→H→N→L	O→B→I→M→E→C→K	623
12	O→D→C→M	O→H→G→B→A→E	O→K→L→N→I→F→J	750
13	O→G→F→A	O→M→D→B→C→L	O→N→E→J→K→I→H	574
14	O→M→I→B	O→J→N→D→L→H	O→F→E→K→C→G→A	612
15	O→K→F→E	O→L→M→N→A→J	O→G→C→H→I→D→B	672
16	O→D→E→F	O→N→M→L→I→K	O→G→B→A→H→J→C	617
17	O→L→H→D	O→B→N→F→I→A	O→M→C→J→G→E→K	562
18	O→M→D→J	O→K→B→L→H→I	O→A→N→E→G→C→F	581
19	O→C→D→H	O→E→N→M→G→K	O→A→B→F→I→J→L	649
20	O→I→N→M	O→E→G→J→C→F	O→H→D→A→L→B→K	621
21	O→L→B→A	O→K→C→F→G→I	O→N→J→E→D→M→H	672
22	O→K→F→E	O→H→M→C→L→G	O→B→A→I→J→N→D	622
23	O→M→K→C	O→D→A→B→H→I	O→J→F→N→E→L→G	673
24	O→H→E→I	O→C→N→D→B→G	O→F→A→L→K→J→M	655
25	O→N→K→J	O→M→A→C→G→I	O→F→L→B→H→E→D	642
26	O→B→I→N	O→G→M→F→C→A	O→J→K→D→H→E→L	738
27	O→E→L→K	O→A→N→J→I→M	O→F→B→C→H→D→G	587
28	O→C→E→D	O→A→J→K→F→B	O→N→H→G→I→L→M	693
29	O→M→I→D	O→L→F→H→C→A	O→B→K→G→J→N→E	715
30	O→L→B→C	O→F→H→M→D→A	O→K→N→J→G→E→I	696
31	O→L→I→K	O→H→A→G→E→J	O→B→N→D→F→C→M	681
32	O→J→D→K	O→A→M→H→E→I	O→N→B→G→F→L→C	700
33	O→L→N→H	O→A→I→J→E→C	O→F→K→B→D→M→G	599
34	O→A→K→L	O→E→G→B→M→C	O→J→N→D→H→F→I	649
35	O→J→H→D	O→I→B→C→G→E	O→A→F→L→N→K→M	632
36	O→L→C→G	O→B→M→H→D→A	O→K→J→I→F→E→N	668
37	O→M→A→J	O→N→F→K→I→G	O→E→L→H→B→D→C	640
38	O→F→B→A	O→I→C→G→K→M	O→L→J→H→E→D→N	716
39	O→B→K→H	O→M→D→N→J→F	O→I→C→G→A→L→E	632
40	O→J→N→K	O→I→G→L→E→A	O→B→D→C→M→F→H	672
41	O→D→H→A	O→F→J→G→C→E	O→I→M→L→N→B→K	696
42	O→C→E→H	O→J→F→A→I→K	O→B→D→G→M→L→N	661
43	O→F→K→J	O→L→D→M→A→N	O→G→I→B→H→E→C	609
44	O→E→D→C	O→A→L→I→N→M	O→K→G→H→B→F→J	681
45	O→M→H→C	O→A→K→L→I→J	O→B→E→D→N→G→F	718

表7-18 100組路線規劃方案5(續)

方案	第一組	第二組	第三組	旅運時間
46	O→L→N→K	O→C→M→G→E→A	O→F→I→D→H→J→B	723
47	O→G→K→I	O→D→F→J→E→B	O→L→C→A→H→M→N	699
48	O→H→M→B	O→C→L→J→N→E	O→F→A→D→K→G→I	746
49	O→F→I→E	O→M→J→K→L→H	O→N→G→C→A→D→B	737
50	O→M→J→C	O→I→N→F→L→D	O→G→K→E→H→A→B	708
51	O→A→K→H	O→M→G→C→D→E	O→L→B→J→I→F→N	640
52	O→K→F→J	O→C→I→L→M→H	O→A→D→N→B→G→E	684
53	O→M→D→B	O→N→E→L→K→H	O→C→A→G→I→J→F	680
54	O→D→J→B	O→L→H→K→A→F	O→N→I→G→E→C→M	681
55	O→F→N→J	O→M→K→H→B→A	O→D→E→G→I→L→C	645
56	O→A→D→M	O→J→B→G→E→N	O→K→I→H→F→L→C	716
57	O→H→I→B	O→N→L→D→M→G	O→J→F→A→K→C→E	683
58	O→D→A→B	O→G→I→J→C→N	O→F→K→L→H→M→E	644
59	O→L→M→C	O→E→I→H→B→D	O→F→K→G→A→N→J	737
60	O→C→L→F	O→M→N→K→A→E	O→I→D→B→G→J→H	705
61	O→M→N→K	O→E→L→B→D→C	O→G→I→H→F→J→A	654
62	O→I→D→H	O→L→F→J→K→G	O→B→M→A→N→C→E	706
63	O→N→E→B	O→H→K→L→C→F	O→D→A→G→M→J→I	717
64	O→E→M→B	O→K→A→C→F→G	O→N→J→H→L→D→I	655
65	O→H→B→F	O→K→J→I→G→L	O→M→N→A→D→E→C	650
66	O→C→E→K	O→F→I→J→M→N	O→H→A→B→L→G→D	733
67	O→C→E→B	O→M→K→J→F→H	O→I→D→L→N→A→G	689
68	O→M→B→F	O→N→D→G→L→K	O→E→H→C→J→A→I	718
69	O→G→J→H	O→A→B→C→E→F	O→L→I→D→N→M→K	684
70	O→I→M→H	O→D→C→N→J→B	O→A→G→K→F→E→L	729
71	O→J→I→G	O→F→K→M→E→N	O→L→H→B→A→D→C	660
72	O→J→G→M	O→D→E→A→N→K	O→C→F→B→L→H→I	653
73	O→J→H→N	O→I→D→E→B→M	O→C→K→F→A→G→L	754
74	O→B→E→M	O→N→F→A→J→K	O→C→I→L→G→H→D	673
75	O→H→E→N	O→I→K→C→B→G	O→F→J→L→M→A→D	733
76	O→E→J→H	O→B→I→D→G→M	O→A→K→C→L→F→N	678
77	O→C→J→G	O→D→E→L→M→B	O→N→K→H→F→I→A	659
78	O→B→D→F	O→C→M→G→I→J	O→H→A→N→E→L→K	737
79	O→H→I→E	O→J→F→M→L→N	O→C→G→D→A→K→B	662
80	O→H→N→C	O→K→J→I→F→L	O→M→G→E→B→A→D	748
81	O→H→K→E	O→G→L→I→F→C	O→M→A→J→D→N→B	681
82	O→I→J→K	O→E→A→C→G→H	O→L→F→D→N→B→M	666
83	O→J→B→I	O→D→M→L→K→N	O→F→G→C→A→H→E	696
84	O→M→A→C	O→E→D→B→G→L	O→K→N→J→H→I→F	681
85	O→J→B→E	O→G→C→I→D→M	O→F→A→N→L→H→K	666
86	O→K→I→M	O→H→N→E→J→G	O→D→F→L→B→A→C	702
87	O→C→B→N	O→L→K→H→M→G	O→I→F→E→J→A→D	671
88	O→N→D→F	O→G→E→A→K→B	O→C→H→J→M→I→L	755
89	O→F→M→G	O→I→H→K→J→A	O→C→B→D→N→E→L	737
90	O→N→L→G	O→J→C→M→B→I	O→F→K→D→H→E→A	667
91	O→D→K→J	O→C→M→F→E→N	O→G→L→I→B→H→A	692
92	O→F→I→J	O→A→C→M→D→H	O→K→E→L→N→G→B	693
93	O→M→C→J	O→L→A→D→H→N	O→B→I→F→K→E→G	712
94	O→I→M→J	O→A→K→B→D→C	O→F→L→H→E→N→G	709
95	O→E→C→N	O→H→B→I→G→D	O→J→A→L→M→F→K	723
96	O→K→J→M	O→L→H→E→N→F	O→I→D→B→G→C→A	695
97	O→H→K→L	O→G→N→D→J→M	O→B→E→I→F→A→C	732
98	O→L→M→I	O→K→J→C→E→A	O→D→G→N→F→B→H	744
99	O→L→I→G	O→J→F→K→E→D	O→C→M→A→N→B→H	737
100	O→J→D→I	O→E→K→H→N→A	O→L→C→G→B→M→F	776

若考量通行失敗機率一因子，多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式之最佳化搜尋結果如表7-19，其中最佳解為：第十一組，亦即第1組巡檢小組須巡檢O→F→D→N→G→L→J→K→M，第2組巡檢小組須巡檢O→E→C→I→B，第3組巡檢小組須巡檢O→H→A。

表7-19 100組路線規劃方案6

方案	第一組	第二組	第三組	通行失敗機率
1	O→B→H→E→I→N→F→K→D	O→A→J→M→C	O→L→G	29.67
2	O→N→H→M→C→I→A→B→J	O→D→E→K→G	O→L→F	31.42
3	O→N→E→D→F→M→J→H→C	O→I→A→L→B	O→K→G	30.17
4	O→I→J→E→M→D→N→C→A	O→B→K→F→H	O→G→L	39.29
5	O→K→I→H→D→A→J→E→B	O→M→G→C→F	O→N→L	30.8
6	O→H→G→I→L→N→K→M→D	O→C→F→A→J	O→B→E	30.98
7	O→I→A→M→L→J→K→G→B	O→C→N→D→F	O→H→E	31.67
8	O→M→L→E→H→A→I→B→C	O→G→N→K→F	O→J→D	32.12
9	O→F→G→B→M→J→C→A→D	O→N→L→I→K	O→H→E	28.19
10	O→L→D→G→F→J→M→K→B	O→N→I→E→A	O→H→C	29.62
11	O→F→D→N→G→L→J→K→M	O→E→C→I→B	O→H→A	27.74
12	O→I→A→M→N→E→C→H→G	O→D→J→K→F	O→L→B	32.26
13	O→B→H→N→M→A→L→K→F	O→G→C→E→D	O→I→J	32.31
14	O→D→G→A→B→L→C→H→F	O→M→N→J→I	O→K→E	29.85
15	O→M→H→J→D→N→A→K→E	O→B→L→C→F	O→I→G	32.4
16	O→J→H→F→I→N→E→G→M	O→A→K→C→D	O→L→B	38.69
17	O→I→E→L→J→M→K→N→C	O→F→A→D→H	O→B→G	31.09
18	O→K→J→B→L→N→M→F→G	O→I→D→C→E	O→H→A	36.37
19	O→K→J→L→E→D→G→A→M	O→N→B→I→F	O→H→C	32
20	O→D→C→M→J→N→H→B→A	O→L→F→E→K	O→I→G	33.01
21	O→J→D→B→K→N→L→F→C	O→H→G→M→E	O→A→I	29.13
22	O→C→I→H→M→F→A→B→E	O→D→J→L→N	O→G→K	30.87
23	O→B→N→J→D→K→E→G→M	O→H→A→C→L	O→I→F	30.08
24	O→F→M→E→B→N→K→A→J	O→I→D→H→G	O→C→L	29.84
25	O→N→C→A→D→F→E→G→L	O→B→I→K→J	O→M→H	28.96
26	O→L→A→I→D→N→B→F→C	O→M→E→K→H	O→G→J	30.11
27	O→J→L→D→C→K→G→A→B	O→H→I→N→E	O→M→F	32.94
28	O→I→H→M→L→K→B→E→G	O→A→C→J→N	O→D→F	34.15
29	O→I→D→B→G→K→J→E→M	O→N→L→C→F	O→A→H	30.39
30	O→H→I→L→G→J→B→F→C	O→N→A→D→E	O→K→M	35.06
31	O→B→G→H→N→A→I→M→D	O→C→F→L→E	O→J→K	30.49
32	O→H→B→N→C→F→I→D→K	O→A→G→J→E	O→L→M	31.83
33	O→L→H→F→M→I→K→D→A	O→N→C→G→J	O→E→B	32.44
34	O→M→N→E→B→I→C→K→H	O→L→F→A→D	O→G→J	31.21
35	O→H→M→I→L→C→F→E→G	O→D→J→K→B	O→A→N	33.09
36	O→I→M→B→N→C→F→A→E	O→J→K→G→H	O→D→L	31.32
37	O→C→I→G→B→K→J→N→D	O→E→F→A→L	O→H→M	31.03
38	O→K→D→A→F→L→H→E→G	O→J→B→M→I	O→N→C	29.66
39	O→N→A→B→J→M→F→D→I	O→E→K→L→C	O→H→G	32.33
40	O→G→C→I→A→E→F→H→N	O→L→D→M→B	O→K→J	31.22
41	O→I→A→K→B→E→F→L→C	O→M→J→G→N	O→H→D	33.06
42	O→D→B→L→N→H→F→E→C	O→I→K→J→G	O→A→M	33.74
43	O→C→I→K→H→M→B→F→A	O→E→G→L→D	O→J→N	31.52
44	O→C→M→K→A→E→I→G→N	O→D→J→H→B	O→F→L	30.47
45	O→D→C→N→G→J→I→H→A	O→M→K→F→E	O→B→L	29.91

表7-19 100組路線規劃方案6(續)

方案	第一組	第二組	第三組	通行失敗機率
46	O→G→C→L→H→D→J→N→B	O→I→M→F→E	O→A→K	30.21
47	O→F→I→L→J→D→A→E→M	O→H→B→C→G	O→K→N	31.66
48	O→J→N→G→B→C→M→E→H	O→K→L→D→F	O→I→A	30.33
49	O→A→D→M→B→E→G→L→I	O→C→F→H→N	O→K→J	31.33
50	O→F→N→H→C→L→M→G→J	O→A→E→K→D	O→I→B	32
51	O→K→F→I→E→L→A→J→C	O→G→N→D→H	O→B→M	32.11
52	O→D→F→K→C→E→G→I→B	O→A→M→H→L	O→N→J	30.55
53	O→K→C→E→A→I→F→D→L	O→B→G→M→H	O→J→N	32.4
54	O→A→K→J→M→F→D→H→L	O→I→N→E→C	O→B→G	31.3
55	O→N→B→J→C→D→M→L→A	O→E→K→I→G	O→F→H	32.02
56	O→G→L→I→N→D→A→C→J	O→K→H→F→B	O→E→M	31.33
57	O→H→A→F→L→N→K→J→I	O→C→B→M→D	O→G→E	30.58
58	O→L→M→F→H→N→A→D→B	O→G→E→J→K	O→I→C	36.75
59	O→E→G→F→L→K→D→J→B	O→M→N→H→I	O→C→A	34.21
60	O→G→B→M→F→E→K→L→A	O→H→C→D→N	O→I→J	32.57
61	O→J→A→C→F→E→I→M→B	O→D→N→G→K	O→L→H	36.71
62	O→C→A→N→D→E→G→J→B	O→K→I→F→M	O→H→L	34.43
63	O→N→B→C→A→F→J→D→H	O→L→G→K→E	O→M→I	31.27
64	O→E→H→L→G→F→K→I→M	O→B→D→A→J	O→C→N	39.28
65	O→J→D→H→E→G→I→B→M	O→A→L→C→N	O→F→K	30.41
66	O→J→F→B→G→D→E→N→A	O→I→K→H→M	O→C→L	35.63
67	O→J→H→C→B→G→A→E→F	O→I→M→D→K	O→L→N	34.32
68	O→J→L→A→F→M→B→H→G	O→C→N→I→E	O→D→K	34.74
69	O→K→E→A→N→I→L→D→B	O→G→H→J→M	O→F→C	33.65
70	O→C→K→E→D→A→J→G→H	O→L→I→N→B	O→F→M	30.06
71	O→G→K→I→B→F→D→L→C	O→J→A→N→H	O→E→M	33.74
72	O→D→E→G→A→B→N→M→K	O→C→H→L→J	O→I→F	31.45
73	O→N→M→I→F→B→A→D→K	O→G→H→C→E	O→J→L	34.5
74	O→B→H→F→K→L→G→C→D	O→A→M→E→J	O→I→N	33.88
75	O→C→J→M→I→K→F→H→B	O→L→N→E→D	O→A→G	32.33
76	O→C→J→E→A→I→M→G→F	O→B→L→K→N	O→H→D	40.26
77	O→J→C→B→L→D→F→G→E	O→I→K→N→H	O→M→A	37.03
78	O→I→K→C→J→E→A→B→H	O→N→L→F→G	O→M→D	42.06
79	O→G→I→E→M→A→K→L→D	O→N→B→F→J	O→H→C	36.37
80	O→N→F→B→L→K→M→J→G	O→I→D→H→A	O→C→E	41.47
81	O→E→D→C→K→M→A→G→N	O→H→L→I→B	O→J→F	31.47
82	O→F→L→K→A→M→H→D→B	O→E→N→J→I	O→C→G	37.42
83	O→E→B→D→M→I→G→J→H	O→N→K→L→C	O→F→A	34.8
84	O→D→F→J→M→I→K→H→G	O→E→A→N→L	O→B→C	33.18
85	O→A→C→K→G→L→M→H→N	O→J→F→E→I	O→D→B	35.93
86	O→A→D→I→E→F→J→L→C	O→B→M→N→G	O→K→H	32.39
87	O→D→A→J→C→M→E→N→K	O→H→B→L→I	O→F→G	32.95
88	O→M→G→F→C→E→I→K→B	O→L→J→A→H	O→D→N	31.85
89	O→C→I→B→E→M→J→D→H	O→L→G→A→F	O→K→N	35.39
90	O→A→I→J→L→D→F→B→E	O→H→G→M→K	O→C→N	34.78
91	O→H→A→F→C→N→D→B→K	O→L→M→G→I	O→J→E	36.47
92	O→I→C→E→K→J→A→L→D	O→F→H→G→N	O→M→B	37.49
93	O→G→H→M→L→C→A→B→J	O→D→N→I→E	O→K→F	34.41
94	O→E→N→L→K→F→A→G→J	O→H→I→C→M	O→D→B	36.95
95	O→A→C→M→B→D→N→G→F	O→K→I→L→J	O→E→H	33.92
96	O→J→H→G→K→F→N→C→M	O→E→L→D→A	O→I→B	37.4
97	O→L→D→K→N→A→H→E→F	O→M→I→B→J	O→C→G	41.4
98	O→D→F→N→B→G→A→C→H	O→J→L→E→M	O→K→I	35.57
99	O→A→K→M→C→E→L→H→N	O→B→D→G→J	O→F→I	34.82
100	O→D→K→E→L→M→G→F→H	O→N→I→J→A	O→C→B	43.86

若考量橋梁重要度一因子，多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式之最佳化搜尋結果如表7-20，其中最佳解為：第二十四組，亦即第1組巡檢小組須巡檢O→F→N→M→H→B→I，第2組巡檢小組須巡檢O→G→A→K→C→L，第3組巡檢小組須巡檢O→D→J→E。

表7-20 100組路線規劃方案7

方案	第一組	第二組	第三組	橋梁重要度
1	O→H→D→A→L→B→K	O→E→G→J→C→F	O→I→N→M	1614.459446
2	O→N→J→E→D→M→H	O→K→C→F→G→I	O→L→B→A	1538.728012
3	O→B→A→I→J→N→D	O→H→M→C→L→G	O→K→F→E	1968.226537
4	O→J→F→N→E→L→G	O→D→A→B→H→I	O→M→K→C	2019.109837
5	O→F→A→L→K→J→M	O→C→N→D→B→G	O→H→E→I	1734.734364
6	O→F→L→B→H→E→D	O→M→A→C→G→I	O→N→K→J	1683.198319
7	O→J→K→D→H→E→L	O→G→M→F→C→A	O→B→I→N	1690.416861
8	O→F→B→C→H→D→G	O→A→N→J→I→M	O→E→L→K	1803.214025
9	O→N→H→G→I→L→M	O→A→J→K→F→B	O→C→E→D	1757.060731
10	O→B→K→G→J→N→E	O→L→F→H→C→A	O→M→I→D	1543.857001
11	O→K→N→J→G→E→I	O→F→H→M→D→A	O→L→B→C	2392.804011
12	O→B→N→D→F→C→M	O→H→A→G→E→J	O→L→I→K	2002.088272
13	O→N→B→G→F→L→C	O→A→M→H→E→I	O→J→D→K	1986.026917
14	O→F→K→B→D→M→G	O→A→I→J→E→C	O→L→N→H	1730.919787
15	O→J→N→D→H→F→I	O→E→G→B→M→C	O→A→K→L	1960.201918
16	O→A→F→L→N→K→M	O→I→B→C→G→E	O→J→H→D	1924.212914
17	O→K→J→I→F→E→N	O→B→M→H→D→A	O→L→C→G	1653.974407
18	O→E→L→H→B→D→C	O→N→F→K→I→G	O→M→A→J	1998.197211
19	O→L→J→H→E→D→N	O→I→C→G→K→M	O→F→B→A	1677.972742
20	O→I→C→G→A→L→E	O→M→D→N→J→F	O→B→K→H	2033.029572
21	O→B→D→C→M→F→H	O→I→G→L→E→A	O→J→N→K	2494.738801
22	O→I→M→L→N→B→K	O→F→J→G→C→E	O→D→H→A	1930.091386
23	O→B→D→G→M→L→N	O→J→F→A→I→K	O→C→E→H	1814.015644
24	O→F→N→M→H→B→I	O→G→A→K→C→L	O→D→J→E	1412.319201
25	O→D→K→E→M→L→I	O→N→C→H→B→F	O→J→A→G	1605.623153
26	O→J→D→I→L→H→E	O→F→C→G→N→A	O→K→B→M	1745.683966
27	O→E→F→A→D→L→I	O→K→B→H→M→G	O→C→J→N	1808.639009
28	O→H→B→D→A→M→I	O→G→L→F→C→J	O→E→N→K	1525.200413
29	O→L→G→D→M→F→C	O→J→B→N→I→A	O→H→E→K	1598.290234
30	O→E→B→A→C→F→K	O→J→N→I→M→L	O→D→H→G	2413.069946
31	O→C→F→L→E→H→I	O→K→N→M→D→B	O→A→G→J	2104.080519
32	O→N→K→B→G→C→L	O→A→M→E→F→D	O→J→I→H	1513.883418
33	O→J→M→G→B→K→H	O→D→I→E→A→C	O→L→F→N	1584.279409
34	O→B→I→M→E→C→K	O→G→J→H→N→L	O→F→D→A	1558.885375
35	O→K→L→N→I→F→J	O→H→G→B→A→E	O→D→C→M	1553.155516
36	O→N→E→J→K→I→H	O→M→D→B→C→L	O→G→F→A	1662.172366
37	O→F→E→K→C→G→A	O→J→N→D→L→H	O→M→I→B	1687.943621
38	O→G→C→H→I→D→B	O→L→M→N→A→J	O→K→F→E	1796.386019
39	O→G→B→A→H→J→C	O→N→M→L→I→K	O→D→E→F	1678.975528
40	O→M→C→J→G→E→K	O→B→N→F→I→A	O→L→H→D	1540.783758
41	O→A→N→E→G→C→F	O→K→B→L→H→I	O→M→D→J	1696.617909
42	O→A→B→F→I→J→L	O→E→N→M→G→K	O→C→D→H	1933.216462
43	O→G→I→B→H→E→C	O→L→D→M→A→N	O→F→K→J	2884.528585
44	O→K→G→H→B→F→J	O→A→L→I→N→M	O→E→D→C	2074.938976
45	O→B→E→D→N→G→F	O→A→K→L→I→J	O→M→H→C	2486.374482

表7-20 100組路線規劃方案7(續)

方案	第一組	第二組	第三組	橋梁重要度
46	O→D→A→G→M→J→I	O→H→K→L→C→F	O→N→E→B	2077.38961
47	O→N→J→H→L→D→I	O→K→A→C→F→G	O→E→M→B	2014.44043
48	O→M→N→A→D→E→C	O→K→J→I→G→L	O→H→B→F	1881.89327
49	O→H→A→B→L→G→D	O→F→I→J→M→N	O→C→E→K	1888.04701
50	O→I→D→L→N→A→G	O→M→K→J→F→H	O→C→E→B	2369.77943
51	O→E→H→C→J→A→I	O→N→D→G→L→K	O→M→B→F	2452.69428
52	O→L→I→D→N→M→K	O→A→B→C→E→F	O→G→J→H	1744.94753
53	O→A→G→K→F→E→L	O→D→C→N→J→B	O→I→M→H	1889.03653
54	O→L→H→B→A→D→C	O→F→K→M→E→N	O→J→I→G	2064.90334
55	O→C→F→B→L→H→I	O→D→E→A→N→K	O→J→G→M	1929.79414
56	O→C→K→F→A→G→L	O→I→D→E→B→M	O→J→H→N	2225.04897
57	O→C→I→L→G→H→D	O→N→F→A→J→K	O→B→E→M	1862.88664
58	O→F→J→L→M→A→D	O→I→K→C→B→G	O→H→E→N	2143.13921
59	O→A→K→C→L→F→N	O→B→I→D→G→M	O→E→J→H	1797.28119
60	O→N→K→H→F→I→A	O→D→E→L→M→B	O→C→J→G	1954.55072
61	O→F→I→D→H→J→B	O→C→M→G→E→A	O→L→N→K	2158.033
62	O→L→C→A→H→M→N	O→D→F→J→E→B	O→G→K→I	1685.35006
63	O→F→A→D→K→G→I	O→C→L→J→N→E	O→H→M→B	1879.06232
64	O→N→G→C→A→D→B	O→M→J→K→L→H	O→F→I→E	2156.62105
65	O→G→K→E→H→A→B	O→I→N→F→L→D	O→M→J→C	1835.87689
66	O→L→B→J→I→F→N	O→M→G→C→D→E	O→A→K→H	1826.11549
67	O→A→D→N→B→G→E	O→C→I→L→M→H	O→K→F→J	2050.4112
68	O→C→A→G→I→J→F	O→N→E→L→K→H	O→M→D→B	1954.24327
69	O→N→I→G→E→C→M	O→L→H→K→A→F	O→D→J→B	1715.1079
70	O→D→E→G→I→L→C	O→M→K→H→B→A	O→F→N→J	1903.00315
71	O→K→I→H→F→L→C	O→J→B→G→E→N	O→A→D→M	1884.504
72	O→J→F→A→K→C→E	O→N→L→D→M→G	O→H→I→B	1728.68073
73	O→F→K→L→H→M→E	O→G→I→J→C→N	O→D→A→B	2108.85303
74	O→F→K→G→A→N→J	O→E→I→H→B→D	O→L→M→C	1839.73875
75	O→I→D→B→G→J→H	O→M→N→K→A→E	O→C→L→F	1875.71876
76	O→G→I→H→F→J→A	O→E→L→B→D→C	O→M→N→K	1877.83255
77	O→B→M→A→N→C→E	O→L→F→J→K→G	O→I→D→H	2122.03043
78	O→H→A→N→E→L→K	O→C→M→G→I→J	O→B→D→F	2094.30373
79	O→C→G→D→A→K→B	O→J→F→M→L→N	O→H→I→E	1956.36181
80	O→M→G→E→B→A→D	O→K→J→I→F→L	O→H→N→C	2215.12159
81	O→M→A→J→D→N→B	O→G→L→I→F→C	O→H→K→E	1971.82121
82	O→L→F→D→N→B→M	O→E→A→C→G→H	O→I→J→K	2048.9203
83	O→F→G→C→A→H→E	O→D→M→L→K→N	O→J→B→I	1940.91296
84	O→K→N→J→H→I→F	O→E→D→B→G→L	O→M→A→C	2101.94754
85	O→F→A→N→L→H→K	O→G→C→I→D→M	O→J→B→E	2300.68836
86	O→D→F→L→B→A→C	O→H→N→E→J→G	O→K→I→M	1985.68179
87	O→I→F→E→J→A→D	O→L→K→H→M→G	O→C→B→N	2950.96491
88	O→C→H→J→M→I→L	O→G→E→A→K→B	O→N→D→F	2558.76788
89	O→C→B→D→N→E→L	O→I→H→K→J→A	O→F→M→G	2017.89044
90	O→F→K→D→H→E→A	O→J→C→M→B→I	O→N→L→G	2060.26749
91	O→G→L→I→B→H→A	O→C→M→F→E→N	O→D→K→J	1990.91947
92	O→K→E→L→N→G→B	O→A→C→M→D→H	O→F→I→J	2054.34494
93	O→B→I→F→K→E→G	O→L→A→D→H→N	O→M→C→J	2127.9807
94	O→F→L→H→E→N→G	O→A→K→B→D→C	O→I→M→J	2256.8618
95	O→J→A→L→M→F→K	O→H→B→I→G→D	O→E→C→N	2408.83955
96	O→I→D→B→G→C→A	O→L→H→E→N→F	O→K→J→M	2159.10148
97	O→B→E→I→F→A→C	O→G→N→D→J→M	O→H→K→L	2136.2375
98	O→D→G→N→F→B→H	O→K→J→C→E→A	O→L→M→I	2146.11595
99	O→C→M→A→N→B→H	O→J→F→K→E→D	O→L→I→G	2112.9449
100	O→L→C→G→B→M→F	O→E→K→H→N→A	O→J→D→I	2399.79394

彙整上述各種影響因子組合之最佳旅運巡檢，最佳路線得表7-21，該工務段之決策者，即可在本案例地震事件發生時，依據所選擇之影響因子組合，參考本表，規劃3組巡檢小組之最佳旅運巡檢路線。

表7-21 各種影響因子組合之最佳旅運巡檢路線

影響因子			最佳解				檢測小組路網規劃		
旅運時間	通行失敗機率	橋梁重要度	方案	旅運時間	通行失敗機率	橋梁重要度	第1組	第2組	第3組
✓	✓	✓	9	599	28.19	1683.728616	O→N→L→I→K	O→H→E	O→F→G→B→M→J→C→A→D
✓	✓	–	9	655	29	–	O→A→M→E→F→D	O→N→K→B→G→C→L	O→J→I→H
✓	–	✓	3	600	–	1745.683966	O→F→C→G→N→A	O→J→D→I→L→H→H	O→K→B→M
–	✓	✓	1	–	29.54	1434.325383	O→D→M	O→J→B→J	O→L→H→K→G→N→E→A→F→C
✓	–	–	6	530	–	–	O→H→E→K	O→J→B→N→I→A	O→L→G→D→M→F→C
–	✓	–	11	–	27.74	–	O→F→D→N→G→L→J→K→M	O→E→C→I→B	O→H→A
–	–	✓	24	–	–	1412.319201	O→F→N→M→H→B→I	O→G→A→K→C→L	O→D→J→E

7.5 模組功能整合至TRENDS中初步成果

本年度初步規劃災害橋梁巡檢路線規劃模式功能模組，如圖7.13所示，系統可依據不同工程處之工務段進行查詢。

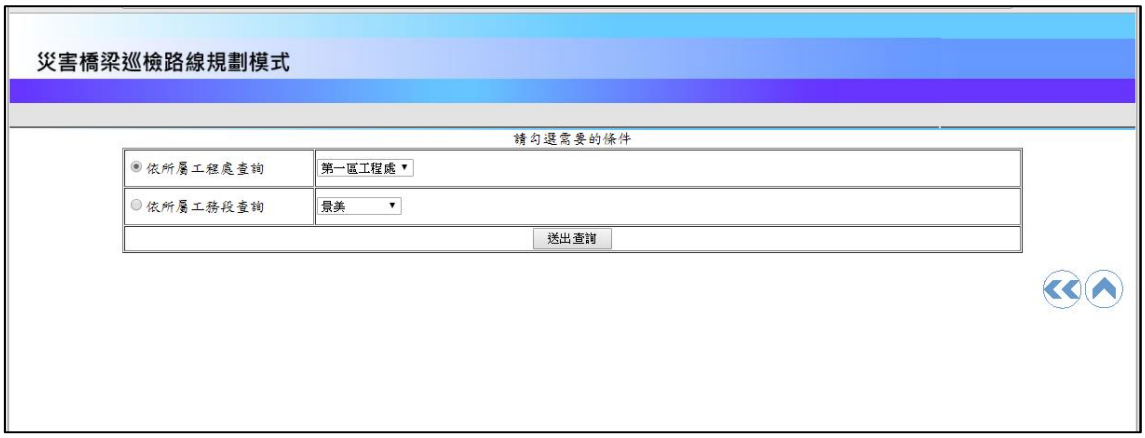


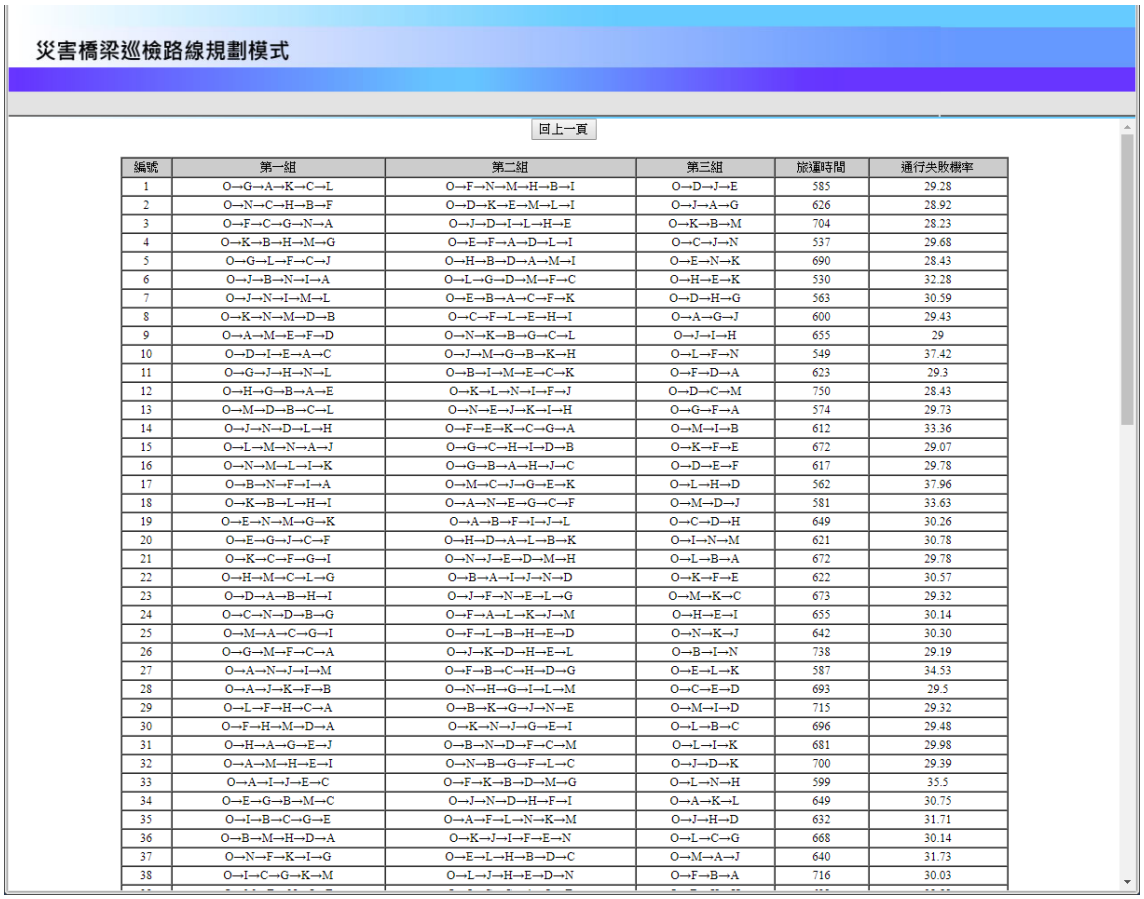
圖 7.13 路線規畫結果

以前一節中中和工務段為例，可查詢目前所屬橋梁中通行失敗機率高於門檻值之清單(如圖7.14)，並可分別以旅運時間與通行失敗機率雙目標進行排序，或是以旅運時間與通行失敗機率及橋梁重要度進行多目標排序。

橋梁代號	橋梁編號	橋梁名稱	工程處	工務段	所在縣市	所在鄉鎮	通行失敗機率	橋梁重要度
A	A02-0640-019B	東西向快速公路八里新店線-1	一區	中和	新北市	板橋	60	24.87
B	A02-0640-021B	臺64線中和中正路立體交叉工程	一區	中和	新北市	中和	75	36.45
C	A02-0640-022A	東西向快速公路八里新店線-2	一區	中和	新北市	中和	56	13.50
D	A02-0640-024A	東西向快速公路八里新店線-3	一區	中和	新北市	中和	80	26.24
E	A02-1030-000A	成蘆大橋D匝道	一區	中和	新北市	蘆洲	70	24.72
F	A02-1030-000B	成蘆大橋C匝道	一區	中和	新北市	蘆洲	85	33.36
G	A02-1030-001	師子頭橋	一區	中和	新北市	五股	88	21.46
H	A02-1030-002A	獅子橋	一區	中和	新北市	五股	90	95.00
I	A02-1030-002B	成蘆大橋	一區	中和	新北市	蘆洲	50	97.00
J	A02-1040-000A	重新大橋B匝道橋	一區	中和	新北市	三重	68	31.87
K	A02-1040-000B	重新大橋E匝道橋	一區	中和	新北市	三重	72	14.14
L	A02-1040-000C	重新大橋F匝道橋	一區	中和	新北市	三重	60	99.00
M	A02-1040-000D	重新大橋C匝道橋	一區	中和	新北市	三重	80	75.14
N	A02-1040-002A	中興大橋I匝道	一區	中和	新北市	三重	95	22.05

圖 7.14 以範例中和工務段為例

以旅運時間與通行失敗機率雙目標進行排序，其查詢結果如圖7.15所示，系統將列出建議方案。

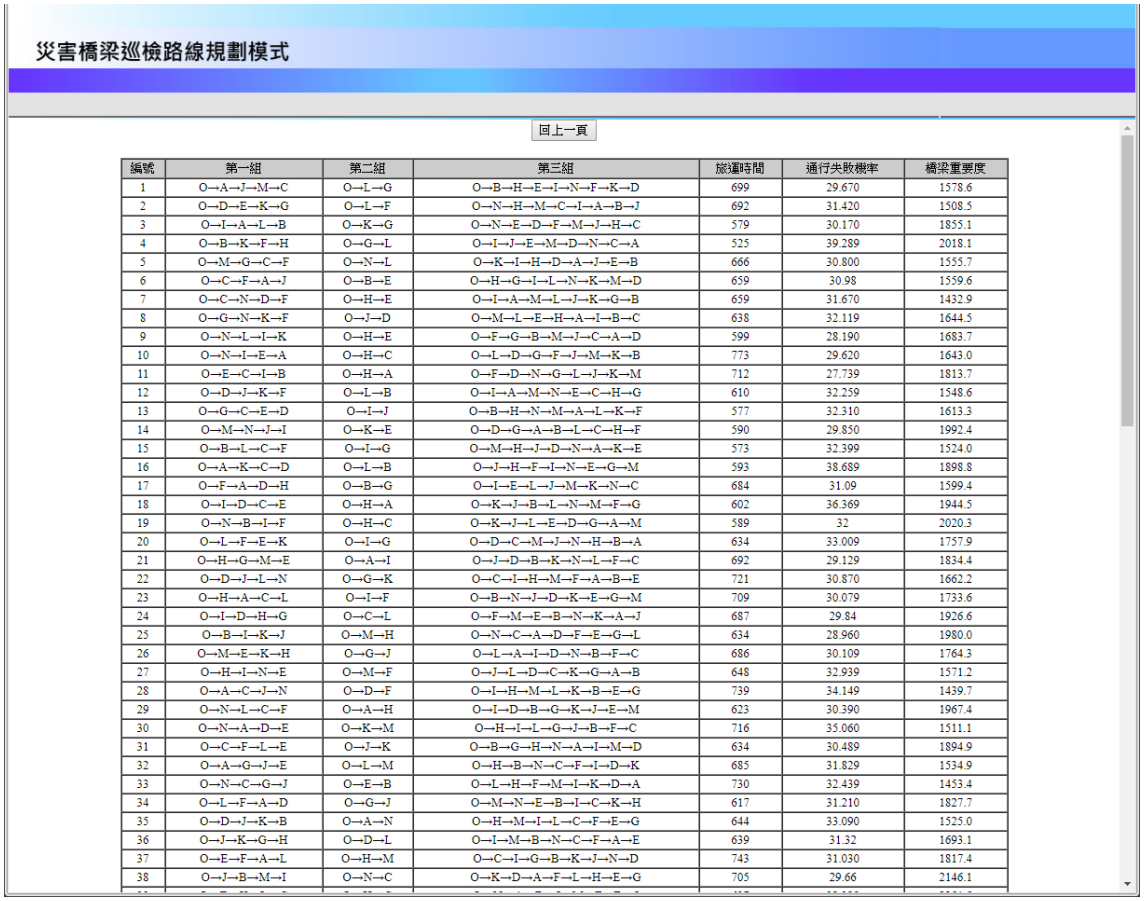


編號	第一組	第二組	第三組	旅運時間	通行失敗機率
1	O→G→A→K→C→L	O→F→N→M→H→B→I	O→D→J→E	585	29.28
2	O→N→C→H→B→F	O→D→K→E→M→L→I	O→J→A→G	626	28.92
3	O→F→C→G→N→A	O→J→D→I→L→H→E	O→K→B→M	704	28.23
4	O→K→B→H→M→G	O→E→F→A→D→L→I	O→C→J→N	537	29.68
5	O→G→L→F→C→J	O→H→B→D→A→M→I	O→E→N→K	690	28.43
6	O→J→B→N→I→A	O→L→G→D→M→F→C	O→H→E→K	530	32.28
7	O→J→N→I→M→L	O→E→B→A→C→F→K	O→D→H→G	563	30.59
8	O→K→N→M→D→B	O→C→F→L→E→H→I	O→A→G→J	600	29.43
9	O→A→M→E→F→D	O→N→K→B→G→C→L	O→J→I→H	655	29
10	O→D→I→E→A→C	O→J→M→G→B→K→H	O→L→F→N	549	37.42
11	O→G→J→H→N→L	O→B→I→M→E→C→K	O→F→D→A	623	29.3
12	O→H→G→B→A→E	O→K→L→N→I→F→J	O→D→C→M	750	28.43
13	O→M→D→B→C→L	O→N→E→J→K→I→H	O→G→F→A	574	29.73
14	O→J→N→D→L→H	O→F→E→K→C→G→A	O→M→I→B	612	33.36
15	O→L→M→N→A→J	O→G→C→H→I→D→B	O→K→F→E	672	29.07
16	O→N→M→L→I→K	O→G→B→A→H→J→C	O→D→E→F	617	29.78
17	O→B→N→F→I→A	O→M→C→J→G→E→K	O→L→H→D	562	37.96
18	O→K→B→L→H→I	O→A→N→E→G→C→F	O→M→D→J	581	33.63
19	O→E→N→M→G→K	O→A→B→F→I→J→L	O→C→D→H	649	30.26
20	O→E→G→J→C→F	O→H→D→A→L→B→K	O→I→N→M	621	30.78
21	O→K→C→F→G→I	O→N→J→E→D→M→H	O→L→B→A	672	29.78
22	O→H→M→C→L→G	O→B→A→I→J→N→D	O→K→F→E	622	30.57
23	O→D→A→B→H→I	O→J→F→N→E→L→G	O→M→K→C	673	29.32
24	O→C→N→D→B→G	O→F→A→L→K→J→M	O→H→E→I	655	30.14
25	O→M→A→C→G→I	O→F→L→B→H→E→D	O→N→K→J	642	30.30
26	O→G→M→F→C→A	O→J→K→D→H→E→L	O→B→I→N	738	29.19
27	O→A→N→J→I→M	O→F→B→C→H→D→G	O→E→L→K	587	34.53
28	O→A→J→K→F→B	O→N→H→G→I→L→M	O→C→E→D	693	29.5
29	O→L→F→H→C→A	O→B→K→G→J→N→E	O→M→I→D	715	29.32
30	O→F→H→M→D→A	O→K→N→J→G→E→I	O→L→B→C	696	29.48
31	O→H→A→G→E→J	O→B→N→D→F→C→M	O→L→I→K	681	29.98
32	O→A→M→H→E→I	O→N→B→G→F→L→C	O→J→D→K	700	29.39
33	O→A→I→J→E→C	O→F→K→B→D→M→G	O→L→N→H	599	35.5
34	O→E→G→B→M→C	O→J→N→D→H→F→I	O→A→K→L	649	30.75
35	O→I→B→C→G→E	O→A→F→L→N→K→M	O→J→H→D	632	31.71
36	O→B→M→H→D→A	O→K→J→I→F→E→N	O→L→C→G	668	30.14
37	O→N→F→K→I→G	O→E→L→H→B→D→C	O→M→A→J	640	31.73
38	O→I→C→G→K→M	O→L→J→H→E→D→N	O→F→B→A	716	30.03

圖 7.15 以旅行時間與通行失敗機率雙目標規畫結果

如果以旅運時間與通行失敗機率及橋梁重要度進行多目標排序，其結果如圖7.16所示。

上述功能為本年度初步之成果，在即時規劃與線上更新部分仍待下一年度中加強。



編號	第一組	第二組	第三組	旅運時間	通行失敗機率	橋梁重要度
1	O→A→J→M→C	O→L→G	O→B→H→E→I→N→F→K→D	699	29.670	1578.6
2	O→D→E→K→G	O→L→F	O→N→H→M→C→I→A→B→J	692	31.420	1508.5
3	O→I→A→L→B	O→K→G	O→N→E→D→F→M→J→H→C	579	30.170	1855.1
4	O→B→K→F→H	O→G→L	O→I→J→E→M→D→N→C→A	525	39.289	2018.1
5	O→M→G→C→F	O→N→L	O→K→I→H→D→A→J→E→B	666	30.800	1555.7
6	O→C→F→A→J	O→B→E	O→H→G→I→L→N→K→M→D	659	30.98	1559.6
7	O→C→N→D→F	O→H→E	O→I→A→M→L→J→K→G→B	659	31.670	1432.9
8	O→G→N→K→F	O→J→D	O→M→L→E→H→A→I→B→C	638	32.119	1644.5
9	O→N→L→I→K	O→H→E	O→F→G→B→M→J→C→A→D	599	28.190	1683.7
10	O→N→I→E→A	O→H→C	O→L→D→G→F→J→M→K→B	773	29.620	1643.0
11	O→E→C→I→B	O→H→A	O→F→D→N→G→L→J→K→M	712	27.739	1813.7
12	O→D→J→K→F	O→L→B	O→I→A→M→N→E→C→H→G	610	32.259	1548.6
13	O→G→C→E→D	O→I→J	O→B→H→N→M→A→L→K→F	577	32.310	1613.3
14	O→M→N→J→I	O→K→E	O→D→G→A→B→L→C→H→F	590	29.850	1992.4
15	O→B→L→C→F	O→I→G	O→M→H→J→D→N→A→K→E	573	32.399	1524.0
16	O→A→K→C→D	O→L→B	O→J→H→F→I→N→E→G→M	593	38.689	1898.8
17	O→F→A→D→H	O→B→G	O→I→E→L→J→M→K→N→C	684	31.09	1599.4
18	O→I→D→C→E	O→H→A	O→K→J→B→L→N→M→F→G	602	36.369	1944.5
19	O→N→B→I→F	O→H→C	O→K→J→L→E→D→G→A→M	589	32	2020.3
20	O→L→F→E→K	O→I→G	O→D→C→M→J→N→H→B→A	634	33.009	1757.9
21	O→H→G→M→E	O→A→I	O→J→D→B→K→N→L→F→C	692	29.129	1834.4
22	O→D→J→L→N	O→G→K	O→C→I→H→M→F→A→B→E	721	30.870	1662.2
23	O→H→A→C→L	O→I→F	O→B→N→J→D→K→E→G→M	709	30.079	1733.6
24	O→I→D→H→G	O→C→L	O→F→M→E→B→N→K→A→J	687	29.84	1926.6
25	O→B→I→K→J	O→M→H	O→N→C→A→D→F→E→G→L	634	28.960	1980.0
26	O→M→E→K→H	O→G→J	O→L→A→I→D→N→B→F→C	686	30.109	1764.3
27	O→H→I→N→E	O→M→F	O→J→L→D→C→K→G→A→B	648	32.939	1571.2
28	O→A→C→J→N	O→D→F	O→I→H→M→L→K→B→E→G	739	34.149	1439.7
29	O→N→L→C→F	O→A→H	O→I→D→B→G→K→J→E→M	623	30.390	1967.4
30	O→N→A→D→E	O→K→M	O→H→I→L→G→J→B→F→C	716	35.060	1511.1
31	O→C→F→L→E	O→J→K	O→B→G→H→N→A→I→M→D	634	30.489	1894.9
32	O→A→G→J→E	O→L→M	O→H→B→N→C→F→I→D→K	685	31.829	1534.9
33	O→N→C→G→J	O→E→B	O→L→H→F→M→I→K→D→A	730	32.439	1453.4
34	O→L→F→A→D	O→G→J	O→M→N→E→B→I→C→K→H	617	31.210	1827.7
35	O→D→J→K→B	O→A→N	O→H→M→I→L→C→F→E→G	644	33.090	1525.0
36	O→J→K→G→H	O→D→L	O→I→M→B→N→C→F→A→E	639	31.32	1693.1
37	O→E→F→A→L	O→H→M	O→C→I→G→B→K→J→N→D	743	31.030	1817.4
38	O→J→B→M→I	O→N→C	O→K→D→A→F→L→H→E→G	705	29.66	2146.1

圖 7.16 以旅行時間與通行失敗機率及重要度多目標規畫結果

第八章 結論與建議

台灣公路早期防救災決策支援系統 TRENDS 已依前期「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研發」研究案成果建立鋼筋混凝土群橋風險管理及維護策略，鋼結構橋梁風險管理及維護策略仍未建立，另橋梁振動檢測需持續精進並驗證，期能做為封橋後開放通行之決策依據。

本計畫針對 TRENDS 系統中不同領域進行模組更新與功能提升，包括:(1)初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構、(2)橋梁整體耐震能力評估模式擬定、(3)橋梁振動檢測案例分析、(4)確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟、(5)與公路總局既有系統介接。以提升 TRENDS 系統運作穩定性與模組之精確性為目標，整合相關計畫成果於同一操作介面下，降低人力操作與維護需求。

本計畫綜合上述做以下結論與建議:

8.1 結論

本年度延續前一年度成果，分別針對鋼結構橋梁風險評估、整體橋梁耐震能力評估、橋梁振動頻率分析等部分進行研究。以下為本計畫成果之說明:

1. 在鋼結構橋梁風險評估方面:收集目前國內橋梁管理單位所採用鋼結構橋梁檢測評估、維修（保護）工法與延壽策略等相關文獻。並初步確認鋼結構橋梁風險因子，釐清鋼結構損壞之因素，接著擬定鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式，並嘗試以生命週期成本計算橋梁較適宜的維護門檻值。
2. 整體橋梁耐震能力評估部分:根據目前結構分析之趨勢，新增橋梁整體耐震能力評估方式，加入上部結構耐震能力評估指標。本年度已收集分析 17 筆橋梁整體耐震能力案例，並分別進行耐震能力側推分析，依據整體耐震能力分析結果，建置橋梁整體耐震能力評估案例庫。接著確認整體橋梁耐震能力影響因子，

並應用不同人工智慧進行模式訓練與測試，以供後續年度人工智慧推論使用。

3.橋梁振動檢測分析部分:本年度至南雲大橋與溪州大橋進行雨季前(2017/06/23)與雨季後(2017/10/13)振動頻率量測，例次試驗均顯示於帽梁或橋面版所取得的頻率並無顯著差異。並已開發橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報之雛形系統。

4.透過災後巡檢路線規劃之考量因子之確認，可同時考量橋梁通行失敗機率、旅運時間及橋梁重要度三因子，進行災時特別巡檢之多目標巡檢路網規劃。

5.已採用 Web Service 資料交換方式將橋梁耐震能力通行失敗機率介接至公路總局系統中，與地震後如地表加速度大於橋梁降伏強度，公路總局可藉由通報清單統一發送訊息通知橋梁管理人員。

6.2017/11/23 於運輸研究所辦理研討會 1 場次，計有 100 人次參與，推廣系統成果。

8.2 建議

本計畫在(1)初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構、(4)確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟兩個工作項次中，僅先針對模式架構進行擬定，於實際應用上仍未著墨，有待後續年度中進一步與公路管理單位進行訪談與驗證。另外因整體橋梁模型建置及分析複雜度高，不僅費時、費力，且模型建置不易，而國內公路總局轄管橋梁數量高達數千座，具有整體橋梁結構分析之橋梁資料有限。透過本計畫推論模式推估橋梁耐震能力，可節省專業人力投入的時間、成本。因本計畫今年僅先針對橋梁整體耐震能力分析進行模式初步建置，尚未應用至其他橋梁，後續年度可針對應用面進行擴充。

8.3 預期效益與應用情形

本計畫之預期效益及應用如下所述:

1.提升臺灣公路早期防救災決策支援系統模組之實用性及穩定性。

2.增加鋼橋管理模組及橋梁整體耐震能力分析功能。

3.建立橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統，提升橋管人員應用振動量測實用性。

參考文獻

1. 王仲宇、唐治平、蔣偉寧、莊秋明、林呈、周憲德等，「橋梁設計維修支援系統之建立－腐蝕、地震、河川沖蝕之潛勢分析及相關技術整合」，交通部科技顧問室，1999。
2. 王仲宇等,「高、快速公路橋梁鄰近區域之自然災害度潛勢分析」,交通部公路總局，2004。
3. 公路總局，公路總局公路防救災資訊系統，系統網頁，https://bobe168.tw/，2017。
4. 江柏翰，低頻微振動量測用之加速規研製與無線傳輸應用，南臺科技大學機械工程系碩士論文，2016。
5. 林呈等，「本省西部重要河川橋梁橋基災害分析與橋基保護工法資料庫系統之建立」，交通部運輸研究所，1998。
6. 林呈，「跨河構造物防治沖刷之技術與策略研究—應用剛性或柔性攔砂堰作為橋基保護方法之評估探討」，1999。
7. 林呈等，「台灣河流之沖刷對橋梁基礎與道路邊坡之影響及因應對策研究」，交通部公路總局，2002。
8. 林呈等，「跨河橋梁訂定封橋水位」，交通部公路總局，2004。
9. 林呈等，「河川橋梁之橋墩（台）沖刷保護工法之研究」，交通部公路總局，2005。
10. 林正軒，橋梁生命週期維護策略最佳化模式之研究，國立臺灣科技大學營建工程所，碩士論文，2013。日本道路協會，日本鋼道路橋防食便覽，2014。
11. 邱永芳，胡啟文，李良輝，道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究，交通部運輸研究所，2015。

12. 邱建國、鄭明淵、吳育偉等，「橋梁殘餘壽命與保全評估決策模式之研發(4/4)」，成果報告，交通部運輸研究所，2014。李天浩等，系集降雨預報應用於洪水預報之研究，成果報告，經濟部水利署，2014。

13. 李金翰,橋墩振動頻率作為封橋基準之研究,國立臺灣科技大學,營建工程系碩士，2011。

14. 李森栂,「SAP2000 結構實務設計(V8&V9) 」,科技圖書股份有限公司，2008。

15. 李有豐、林安彥，橋梁檢測評估與補強，全華科技圖書，2000。

16. 台灣省住宅及都市發展局，混凝土鋼橋一般檢測手冊，1996。

17. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，台北市橋梁耐震評估工作期中報告,台北市政府工務局新建工程處,2014。交通部科技顧問室，台灣地區橋梁安全管理策略探討與制訂計劃， 1996。

18. 交通部，公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範，2008。

19. 交通部公路總局,公路養護手冊，2012。

20. 交通部，交通技術標準規範類公路工程部橋梁耐震設計規範，ISBN:978-986-01-6017-8，2008。

21. 交通技術標準規範公路類公路工程部，「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」，2008。

22. 交通部公路總局，「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」，2009。

23. 交通部運輸研究所，「第二代臺灣地區橋梁管理資訊系統建置規劃」，2015。

24. 吳逸民等，校園低價位 P 波警報器系統之建立與運用，災害防救電子報，行政院國家災害防救科技中心，2015。

25. 林智仁，國道鋼橋與混凝土橋生命週期維護成本分析之研究，國立中央大學營建管理研究所碩士論文，2013。

26. 林佑安，橋梁非線性劣化下之維護規劃，國立成功大學，土木工程研究所碩士論文，2012。

27. 行政院農業委員會水土保持局，農村再生設施施工規範，2016。

28. 伊藤義人、岩田厚司、貝沼重信：鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験とその促進倍率に関する基礎的研究, 構造工学論文集, v.48A, pp.1021-1029,　2002。

29. 田原芳雄：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究、土木学会論文集第 570 号, pp.129-140, 1997。

30. 西村昭、島田喜十郎：鋼構造物塗膜の長期経年劣化挙動の理論解析、橋梁と基礎, No.5, pp.17-21, 1998。

31. 長谷川拓哉、千歩修：屋外暴露環境下における仕上塗材・塗料の光沢保持率低下予測に関する検討、日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.55-58, 2012.10。

32. 長谷川拓哉、千歩修、福山智子：文献調査に基づく建築用塗料・仕上塗材の促進耐候性試験による劣化進行予測に関する検討、日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.151-154, 2014.10。

33. 姚志銘，熱浸鍍鋅鋼橋生命週期成本模式建立之研究，逢甲大學交通工程與管理學系碩士班碩士論文，2007。

34. 姚乃嘉、黃榮堯、葉啟章等，「第二代台灣地區橋梁管理資訊系統建置規劃」成果報告，交通部運輸研究所，2013。

35. 葉錦勳等，「國道橋梁震損評估及其應用」，2014。

36. 黃敏郎等，「山區道路易致災路段調查評估、風險分析及監測預警管制技術之研發(4/4)」，交通部運輸研究所，2014。

37. 黃國鴻，網路概論，嘉義大學開放式課程，http://opencourse.ncyu.edu.tw/ncyu/course/view.php?id=15，2017。

38. 許晉嘉，「宅配業貨物配送路線規劃問題之研究」，國立成功大學，碩士論文，2003。

39. 曹永忠，邁入『物聯網』的第一步：如何使用無線傳輸；http://www.techbang.com/posts/25459-technology-in-the-future-internet-of-things-business-model-how-to-use-wireless-transmission-the-basic-text，2015。

40. 陳玉書，無線傳輸控制相機腳架旋轉之設計與實現，崑山科技大學電機工程系碩士論文，2015。

41. 陳屏甫，國道預力混凝土橋與鋼橋生命週期成本評估個案之研究，國立中央大學營建管理研究所碩士論文，2005。

42. 陳清泉、蔡益超、張國鎮、李鴻源、李有豐、謝尚賢、單信瑜、許志揚、游進裕、林詠彬，「河川橋梁沖刷並補強後之安全評估」，交通部公路總局，2004。

43. 陳正興、李維峰與梅興泰，「公路橋梁振動量測與分析」，第六屆公共工程非破壞檢測技術研討會，2009。

44. 陳振川、蔡益超、張國鎮，「橋梁監測預警系統及沖刷保護措施及補強等之研究」第二階段策略研擬報告，交通部公路總局，2005。

45. 顏上堯等，「橋樑定期檢測作業排程最佳化模式之研究」，運輸計劃季刊，第四十五卷，第一期，P63~P80，2015。張毓文，場址特性分析及最大加速度衰減模式校正。國立中央大學碩士論文，2002。

46. 張國鎮等，「高科技橋梁即時監測系統建置試辦計畫」，交通部臺灣區國道高速公路局，2011。

47. 張國鎮、蔡益超、張荻薇、宋裕祺、廖文義、柴駿甫、洪曉慧、劉光晏、吳弘明、戚樹人、陳彥豪，國家地震工程中心，公路橋梁耐震能力評估及補強準則之研究，NCREE-09-028，2009。

48. 呈瑞忠，「考慮回復性能之橋梁補強效益研究」，國立臺灣科技大學碩士論文，2015。

49. 臺北市政府，臺北市防災資訊系統，系統網頁，http://tdprc2.tfd.gov.tw/EOC/，2017。臺北市政府，臺北市防災資訊網暨防救災決策支援系統，系統網頁，http://www.eoc.gov.taipei/taipeicityems1_public/Member，2017。

50. 翁愷翔，橋梁維修與整建效益評估之比較研究，國立中央大學營建管理研究所碩士論文，2009。

51. 歐昱辰、郭陳風、劉澄洲，腐蝕鋼筋之拉力行為，土木水利，第四十一卷，第二期，2014。

52. 鄭明淵、吳育偉、張于漢等，「公路防救災決策支援系統建立之研究(4/4)」，交通部運輸研究所，2010。

53. 鄭明淵、吳育偉、林三賢等，「跨河橋梁安全預警系統之建置更新驗證與維護管理」，交通部運輸研究所，2013。

54. 鄭明淵、邱永芳、謝明志等，「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」，交通部運輸研究所，2011。

55. 鄭明淵、陳生金、呂守陞等，「交通工程防災預警系統建立之研究 (1/2)」，交通部運輸研究所，2005。

56. 鄭明淵、陳生金、呂守陞等，「交通工程防災預警系統建立之研究 (2/2)」，交通部運輸研究所，2006。

57. 鄭明淵、廖國偉、吳育偉等，「橋梁振動檢測車暨訊號分析系統建置」成果報告，東源科技工程有限公司，2013。

58. 財團法人臺灣營建研究院，「鐵路橋梁過河沖刷斷橋墩與基礎結構系統檢測技術之研究」，交通部高速鐵路局，2007。

59. 財團法人臺灣營建研究院，「台灣地區橋梁安全檢查、評估及監測執行程序之訂定－安全檢測報告書」，交通部公路總局，2008。

60. 財團法人臺灣營建研究院，「國道 3 號濁水溪橋沖刷監測之研究」，交通部台灣區國道高速公路局，2010。

61. 財團法人臺灣營建研究院，「國道 3 號濁水溪橋沖刷後續監測之研究」，交通部台灣區國道高速公路局，2011。

62. 財團法人台灣營建研究院，橋梁生命週期成本評估方法與結構使用年限之建立(2/2)，2003。

63. 經濟部水利署，防災資訊服務網，系統網頁，http://fhy.wra.gov.tw/fhy/，2017。詹皓凱，加速度地動潛勢預估。國立中央大學碩士論文，2008。

64. 簡文郁，考慮特徵地震與場址效應的地震危害度分析，國家地震工程研究中心報告，NCREE-01-036，台北，2001。

65. 簡文郁、張毓文、溫國樑、羅俊雄，台北盆地地盤效應分析，結構工程，第十七卷，第三期，2002。

66. 連夷佐，橋梁維護管理生命週期成本評估模式之研究，國立中央大學營建管理研究所碩士論文，2003。

67. 戴聿媞，鋼材表面被覆材之耐用年限評估研究，國立臺灣科技大學營建工程系碩士論文，2017。

68. 謝宗霖，橋梁之最佳生命週期維護規劃，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，2009。

69. 國家發展委員會，國土資訊系統，系統網頁，http://ngis.nat.gov.tw/，2017。

70. 國家地震工程研究中心，台灣地震損失評估系統，系統網頁，http://teles.ncree.org.tw/，2017。

71. 國家地震工程研究中心，公路橋梁耐震能力評估及補強準則之研究，2009。

72. Cheng Min-Yuan, Prayogo Doddy, “Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm”, Computers & Structures, vol. 139, pp. 98-112, 2014.

73. CSI, “SAP2000：Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures”,Computers and Structures, Inc.,Berkely,California,(1996).

74. Hegazy, T.Elbeltagi, E. amd El-Behairy, H., “Bridge Deck Management System with Integrated Life-Cycle Cost Optimization’’, Journal of the Transportation Research Bpard, 1866, 44-50, 2004.

75. Jacobs, T.L, “Optimal Long-Term Scheduling of Bridge Deck Replacement and Rehabilitation’’, Journal of the Transportation Research Board, 1866, 44-50, 1992.

76. Zimmermann, H.J., “Description and optimization of fuzzy systems’’, International Journa of General systems, 2, 209-215,1976.

附錄一

期中報告意見處理情形

交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質)

期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路早期防救災決策支援系統及鋼橋管理模組維護更新

合作研究單位：國立台灣科技大學

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
一、何鴻文委員		
1. 報告 2.6.1 節公路養護手冊交通部已授權各部屬單位依據養護規範自行訂定，文中所述如係指公路總局，該局已有 2016 年版，請參考修正。	1. 感謝委員建議，已在期末報告中修正相關說明。	同意辦理
2. 圖 4.1 流程之河川沖刷評估建議改為「耐洪能力分析評估」，另「維修補強方法建議」、「監控系統之規畫設計建議」及「建立橋梁檢測維護管理系統」三流程順序、內容請再檢討。	2. 因此流程圖與本研究較無直接關係，於期末報告中已刪除。	同意辦理
3. P.4-4 與 P.4-5 重複貼文，請修正。	3. 感謝委員糾正，已刪除重複內容。	同意辦理
4. 表 4-4 及表 4-5 系本研究成果抑或引用其他研究請註明，另表 4-5 知名詞「嚴峻、嚴重」及「稍為嚴峻、有些嚴重」請統一，新設 B-1 一般腐蝕環境之耐用年度 15.4 年反較短，是否合理，請再查明。	4. 感謝委員意見；表 4-4 及 4-5 均為日本文獻記載，主要依據實測資料決定。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
5. 鋼橋塗裝維護策略之成本比較有關熱浸鍍鋅及鋅鋁熔射之免維護年限 80 年及 50 年似乎過於樂觀,請查明。	5. 感謝委員意見；主要進行文獻資料收集，目前尚未直接引用計算。	同意辦理
6. P.4-7「且現存之處理方式中，亦有於舊塗膜上進行新塗膜施作..」與現行施作規範不符，請修正。	6. 感謝委員意見；目前已經所提之相關描述進行刪除。	同意辦理
7. 表 4-27 僅有 22 座橋梁(P.4-44 稱 23 座)且歷史紀錄/推估費用值由 0.15~6.71，差距甚大，據此推估是否足夠，請說明。	7. 感謝委員意見；後續會再進行資料擴充，目前僅依現有資料提出分析架構。	同意辦理
8. 橋梁管理系統已發展至第二代，第 2.3 節內容請配合修正。	8. 感謝委員建議，增加二代 TBMS 說明。	同意辦理
二、張文忠委員：		
1. 維護分析模式中已蒙地卡羅模擬計算機率，建議可進行靈敏度分析，列出各因子權重，並可考慮適度簡化。	1. 目前蒙地卡羅模擬機率部分，在 CI 與 SSI 部分僅考量其下降值與變異數，故因子已經過簡化。	同意辦理
2. 檢核橋面板與墩柱振動特徵,可以同時量測之結果進行比對,並說明為何以 Z-test 檢定。	2. 現場量測的數值具有不確定性，進行比對時，以 Z-test 較能客觀地(以機率的形式)呈現比較的結果。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
3. 微型加速度振動監測須留意解析度、雜訊比(signal-noise ratio)及穩定性，請於後續系統開發留意。另因動態量測其量測頻率，記憶體大小等非一版 MCU 可處理，建議於開發系統前詳加考量。	3. 謝謝委員建議。後續開發時將留意相關問題。誠如委員的意見，後續開發時，以 SD 卡改善記憶體空間。	同意辦理
三、林炳森委員 1. 本計畫工作內容多，但應將評估方法定義清楚，如 P.4-10 塗裝系統綜合評估方法分成四級，應量化定義。	1. 感謝委員建議；因本研究主要以潛伏期定義維護週期或使用年限，文中已針對潛伏期部份進行介紹與試算。	同意辦理
2. 圖 5-4 分成五級之依據為何?	2. 本研究參考交通部公路總局，「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」報告成果，並已將引用文獻加入。	同意辦理
3. P.6-2 橋梁承載力分析定量分析不容易，所以本計畫採用理論分析，是否能符合實際情形，應說明。	3. 目前團隊所使用的理論分析方法為側推分析，為現在台灣普遍可接受的方法。其詳細的步驟與內容，主要係由國家地震中心所提出，該法之準確性曾藉由實驗驗證(如牛鬥橋)。雖然如此，感謝委員意見，團隊將持續關注該法的準確性，並留意國內外是否有其他或可改進的地方。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
4. P.6-30 文中表 3-34 應為表 6-19；表 6-19 微加速度計應詳加說明，如解析度。	4. 微加速度計相關的性質於期末報告中已附上。	同意辦理
5. P.8-1 如何整合 4 個預期成果，應具體說明。	5. 本研究為 TRENDS 系統維護與擴充，相關成果與功能會陸續加入系統中。	同意辦理
6. 其他報告中應修正: a.英文 abstract 與中文不一致，另”Taiwan is rich in many mountaion and rivers..”應修正。 b.p.1-2 某直轄市是否可寫出台北市? c.p.2-1~p.2-8 與 p.2-9,p.2-10 國內外預警系統之開發哪一種較好? d.p.3-11~p.3-13 表 3-2 各系統哪一個較好? e.簡報 p.70 溪州大橋變異係數 0.58 應說明變異係數在何種情況方可接受。 f.p.2-70 應說明生物共生搜尋演算法(SOS)之優缺點。	6. a.已進行英文摘要修正。 b.感謝委員意見；目前以不標列出對應縣市為原則。 c.不同國家會因應不同規定需求由有不同系統功能，因此不建議直接比較優劣。 d.與各系統比較並非有優劣之分，會因為需求不同由有不同系統。 e.約於 0.15 以下為可接受的數值，現地量測所得數據的不確性較大確實應特別留意。 f.於 P.7-12 補充相關說明。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
四、徐耀賜委員		
1. 振動頻率可思考結構行為之變化對橋梁安全之影響。橋面板與帽梁之頻率必不同，方向性亦不同，可深思，何況帽梁與橋面版間尚有其他構建。	1. 謝謝委員建議。團隊同意委員的意見，也因如此，團隊以試驗的方式驗證所述因素的影響程度，並以前後次量測的比值作為檢定的依據。目前試驗結果顯示，比值確實可有效避免簡易支承墊的影響，不過，現地量測所得數據的不確性較大確實應特別留意。	同意辦理
2. 鋼橋之 critical members 應先明訂，1 member failure=1 bridge failure.	2. 在本研究的確為單一構件損壞，即需要進行維護。	同意辦理
3. 可否分短期、長期分別考量鋼橋綜合能力，或者加以權重。	3. 本研究可以提供不同使用年限供管理單位在如 5、10~50 年度下之維護方案參考。	同意辦理
4. 每座橋梁皆有其特性，各設計、施工完畢之後必有相應之維護管理手冊，此方向才是道路機關應努力之方向，巨觀與微觀處理。	4. 感謝委員建議，TBMS 應該納入相關參數，以利後續加值利用。	同意辦理
5. 災後巡檢，如橋已斷不通，將如何?	5. 本研究所排列的為巡檢順序，如遇斷橋狀況，仍須按公路總局規定處理。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
五、公路總局(林意晴)		
1. 第 p.2-3 圖 2.1~2.3 本局 Bobe 系統已於 105 年改版，相關引用畫面請更新。	1. 感謝委員建議，將修正相關說明。	同意辦理
2. 本局目前於臨海橋梁如台 17 及台 61 二座中彰大橋(RC)為本局監控橋梁之一，其位置較為偏遠，於實務上而言，如遇 wifi 傳輸分析遭遇阻斷，如何應用於即時之防災應變，是否有其他備援傳遞方式，另國震中心有斷橋預警系統可參考。	2. 所開發之現地加速度計警報系統為雛型系統，其功能為偵測橋梁當地地表加速度是否大於橋梁可容許加速度，如大於就驅動警示燈閃爍。因此是不需要網路傳遞，如有需要傳遞也應該是加裝如 4G 傳輸系統。	同意辦理
3. 災後橋梁巡檢，針對震後如遇災害影響期間，如連續豪雨期間又逢地震，最佳路線建議增加考量在建工程道路管制作為是否已預警性封閉或已通報阻斷?	3. 災後路徑為建議之巡檢路線，如有已封閉橋梁，可從巡檢對象移除後，再重新規劃。	同意辦理
4. 橋梁警示燈號本研究著重橋面板振動，目前主要考量水文、雨量為參考依據，建議可提供相關之水資訊呈現關係，以回饋於 SOP 或相關防災策略門檻值之修正。	4. 如第 2 題回覆，警示燈號主要以地震強度為門檻值，並不會牽涉到目前公路總局所訂定水文、雨量標準。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
5. 災後橋梁沖刷或橋面錯動災害情勢已發生，路線最佳分析或警示燈號空白資料庫比對如何滾動更新、修正模式運算。	5. 目前警報系統警示燈號為開發雛形，尚未與網路即時連結。	同意辦理
6. 期待已取得 12、13 年之豐碩資料，希可透過大數據分析，得到實務應用，感謝團隊之發展研究。	6. 感謝委員認同。	同意辦理
六、國道高速公路局 (書面意見)		
1. 本計畫擬辦理分析 15 筆橋梁整體耐震能力案例，可否提供至少 3 座國道橋梁數量，已供本局作為耐震補強之依據。	1. 本計畫研究範圍針對已建置之橋梁整體耐震能力案例，分析案例中並無國道橋梁。	同意辦理
2. 本報告書「5.4 橋梁整體耐震能力影響因子確認」，建議可納入現行「公路橋梁耐震設計規範」之所訂有相關參數。	2. 目前所納入因子為 TBMS 系統已建置欄位，其原因為 TBMS 為目前橋梁管理單位中基本資料最完善之系統。如納入其他參數將面臨資料缺漏之問題，但如規範中相關參數非常重要，可建議 TBMS 在未來擴充欄位時納入。	同意辦理
3. 報告書 p.4-28，其中圖 4.5 所述上部結構所列支撐構件有 2 欄，建議可合併；惟支承裝置與防落裝置是否能發揮「支撐」功能，可再討論。	3. 感謝委員建議；大梁與橫腸梁則維持”支撐構件”，而支承裝置與防落裝裝置則改為”支承與防落”。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
七、本所港研中心第一科謝明志科長：		
1. 建議第四章、第六章各自章節的文獻回顧整合到第二章，以求整體報告的統一性。	1. 感謝委員建議，期末報告將相關文獻說明部分，統整至第二章節。	同意辦理
2. 請在 1.5 節加入簡報檔上所列的執行進度表。	2. 已在期末報告加入執行進度表。	同意辦理
3. 微型加速度計的研發，因擷取的是自然頻率，請先確定所需基本的節取精度，以利後續研發。	3. 微型加速度計的相關性質已附上，所選加速度計的規格對於開發所定的目標並無明顯的影響。	同意辦理
4. 本年度橋梁振動頻率現地試驗主要探討水流與沖刷的影響，故所選擇的 2 座橋梁(南雲大橋與溪州大橋)各 2 座墩柱，哪一座位於流水處，哪一座不位於流水處，簡報檔上有描述到，但仍請在報告第六章內註明及分析其可能影響。	4. 謝謝委員意見，已於期末報告中註明(6.1.2)。	同意辦理
八、本所港研中心第一科賴瑞應副科長		
1. 首先對研究團隊的努力給予肯定，因為本研究很有挑戰性，在管期內要完成研究成果並落實應用，實屬不易。	1. 感謝委員之肯定。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
2. 第 4 章很多鋼橋的維護費用統計表，建議能加強註記說明資料來源及屬於何單位的橋梁，例如公路總局、高公局或是縣市政府的橋梁，因為這些資料是否有代表性，對報告的論述是否可靠、可信有很重要影響。	2. 目前所收集到案例為縣市政府。	同意辦理
3. 在橋梁振動檢測案例分析部分，建議未來報告或簡報加強說明結構型式與有無隔震支承墊，以釐清研究方法的適用範圍。	3. 謝謝委員意見，已於期末報告中註明(6.1.2)。	同意辦理
4. 在災後橋梁巡檢路線規劃模式部分，建議針對公路總局現況災害巡檢方式，做說明並檢討其缺點後在研擬最佳化之模式，以免未來研擬的方式公路總局不採用。	4. 目前模式所設定之目標式與限制式為考量公路總局現行規定所設計，並將相關建議放於第八章結論與建議中。	同意辦理
九、本所港研中心第一科林雅雯研究員		
1. 報告 4-48 頁表 4-30 應為防蝕塗裝費用/輔助機具及施工費用，且 101 年的值為 0.162，防蝕塗裝與高空作業車的數量關係應與塗裝面積有關，直接三年平均是否洽當請考量。	1. 其中塗裝費用反應施作面積，所以計算塗裝費用後再乘上比值，以考慮相關施工的花費。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
2. 報告第 4-25 頁圖 4.4 流程已蒙地卡羅模擬，但後面文章以貝氏更新訂理分析，請檢核修正。	2. 將修正相關說明。	同意辦理
3. 報告第 4-56 頁表 4-33 洪水維修經費因子表包含是否為跨河橋因子，洪水危害分析對象為跨河橋，此因子是否有誤，請檢核。	3. 此因子為計畫中篩選案例為跨河橋梁才納入，並非採用此因子當作輸入因子。	同意辦理
4. 英文摘要撰寫內容與中文摘要不同，用字遣詞請再檢核。	4. 感謝委員建議，英文摘要將進行修正。	同意辦理
5. 報告第 2-2 頁及 2-8 頁都是談台北市防災資訊網，請整合	5. 感謝委員建議，已刪除重複內容。	同意辦理
6. 請檢核報告中圖及表有無於文章中述及，圖座標標示有卻漏情形，公式及圖有符號請加符號說明，圖表有些有模糊不清的情形。	6. 感謝委員建議，將於內容加入相關圖說編號。	同意辦理

附錄二

期末報告意見處理情形

交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質)

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路早期防救災決策支援系統及鋼橋管理模組維護更新

合作研究單位：國立台灣科技大學

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
一、施邦築委員		
1. 成果豐富、良好。	1. 感謝委員之肯定與認同。	同意辦理
2. 在橋面版上量測災前與災後(事件前與事件後)自然振動頻率來取代墩帽上量測結果，但事件規模的大小或是否接近橋墩柱破壞或支承破壞的臨界時，量測的比值結果仍然可靠嗎?	2. 根據目前的量測結果所進行的統計檢定分析顯示，事件前後的頻率比值，在橋面版與墩帽所量測的結果並無明顯差異。委員所關注的事件大小或破壞的臨界狀態時，是否仍呈現無差異的統計結果，因目前缺乏此類資料，確實值得關注。另，上述檢定結果的資料量低於 10 組，若可增加資料量則可提升分析的可信度。	同意辦理
3. 引用國外文獻之橋梁構件損傷程度分為中度、重度維修、置換的費用比例，請說明中度、重度維修的定義，費用比例是否可經訪談再引用。	3. 維修經費主要以恢復現況進行評估。每座橋梁可依其現況或現地人員維護經驗進行調整。目前則以文獻建議為設定參考。建議後續年度與公路養護單位進行訪談做細部修正。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
4. 以線性外插橋柱性能 EPA-Sd，此外插的準確性如何?	4. 因目前橋梁側推分析分析的地表加速度不一定到達 1.5g,為求各損超越機率皆會是 1.0，故僅針對超越平時分析地震強度以上值進行外插,此值不影響結果。	同意辦理
5. 災後橋梁巡檢路線的規劃模式,建議與實務的工務段訪談，以增加應用性。	5. 感謝委員建議,已於結論與建議中加入。	同意辦理
二、翁健煌委員：		
1. 文章內容修改建議如紙本註記，請酌予參考。	1. 感謝委員建議,將進行文字之修改。	同意辦理
2. 本文結論與 1.4 節內容幾乎相同，不太恰當，建議改為各工作項目之成果摘要較為適宜。	2. 感謝委員建議,已將結論修改為各工作項目之成果摘要。	同意辦理
3. 有關第 6 章「橋梁振動檢測案例分析」，僅由單點量測訊號之 FFT 的 peak 點判斷橋梁的頻率，此作法在少數情況下可能有誤判疑慮，建議先從多點量測配合其他系統識別方法識別橋梁模態參數,以釐清檢測鎖定的頻率確實為橋梁頻率，且該頻率對於橋梁損壞程度相較於其他模態更敏感。	3. 同意委員的建議。本計畫案目前受限於儀器的數目,並未進行模態識別,報告中亦有提醒利用峰值的潛在誤差。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
4. 有關第 4 章「初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構」，本研究將構件老化與塗裝劣化之風險分開計算，建議補充說明在維護費用計算方面，如何避免構件老化風險計及部分的塗裝劣化風險。	4. 感謝委員建議;構件老化評估中已包含塗裝受損或劣化之修補,但非大規模之預防性維護。本研究所提之塗裝劣化風險主要針對全橋之重新塗裝進行評估，屬預防性維護。	同意辦理
5. 建議章節順序依照 1.4 節中工作項目之排序，以便比對各項工作項目是否如期完成。	5. 感謝委員建議,已將第三章修改為 TRENDS 系統維護營運。而第七階段與公路總局既有系統介接,因為與系統營運維護有極度相關,因此將內容放置於第三章內介紹。	同意辦理
6. 圖 3.6 顯示介接內容包含洪水安全狀態，但 3.4 節內文並無此部分之說明，請再確認。	6. 目前為介接地震後橋梁通行失敗機率計算結果。	同意辦理
7. 表 5-10 中地盤種類之定量單位為S_{DS}、T_0^D，一般熟悉橋梁設計之工程師較難聯想其間之關係，恐影響問卷調查結果。另外，S_{DS}與工址地震危害度有關，應與橋梁耐震能力無關。	7. 感謝委員建議,將字句修正為工址地震危害度。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
三、何鴻文委員 1. 肯定港研中心與台科大鄭教授團隊對公路早期防救災決策支援系統之努力，尤其本案特別納入鋼橋上部結構管理因素，更顯特色。	1. 感謝委員之肯定與認同。	同意辦理
2. 依報告建議仍有兩工作項次有待實際應用驗證，期待能有進一步驗證成果供實務單位參考使用。	2. 感謝委員建議，已於結論與建議中建議後續年度加入相關驗證與訪談工作項目。	同意辦理
3. 公路總局針對震度 4 級以上地震訂有特別巡查規定，建議納入報告內容，並將 7.4.2 節中和工務段之特別巡查、特別檢測橋梁名單與報告分析結果作一比較說明，並就建議巡檢路線就中和段實際規劃巡檢路線作一比較說明。	3. 感謝委員建議，在第二章關於特別巡查部分增加以下內容說明:”而在特別巡查在颱風來臨前後、豪雨、洪水、震度 5 級以上之地震或重大交通事故後為之；另特別巡查在 ABCDEF 類橋梁及 A 級邊坡於震度 4 級之地震後為之”。已於結論與建議中建議後續年度加入後續與橋梁管理單位訪談確認目前路線巡檢路線規劃結果與實際結果之比較。	同意辦理
4. 橋梁「垮」距請修正為「跨」距。	4. 已將相關錯字更正。	同意辦理
5. 表 7-2「單位:mm」與表內容重疊，請調整。	5. 表說明部分已修正。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
四、賴榮俊委員 1. p.2-23 跨河橋梁安全預警模組，採一維水理演算推估河道流量、水位、流速與沖刷深度，由於一維水理模式主要以探討整體河川為主，對於橋梁墩柱河段之流速、水位、沖刷深度及沖淤特性河川斷面容易改變現象，如何提供準確預警值?	1. 以修正為運用河道一維水理演算、水庫演算，並於部分重要橋梁以二維水理推估河道之流量、水位、流速與沖刷深度，故此參考之研究計畫在橋墩處是以二維水理分析進行流速、水位、沖刷深度之計算。	同意辦理
2. p.1-3 橋梁振動檢測分析，建立橋墩上微型加速度計，振動監測與 p.2-63 的移動式振動檢測車的振動監測兩者之關係式為何? (前者在橋墩，後者在橋面版)	2. 微型加速度計的設置位置可為橋梁附近的地面或橋梁結構體上(橋面或墩帽上)；速度計則設置於橋面或墩帽上。微型加速度計的設計為當地表加速度大於 Ay(或頻率低於臨界頻率)時，橋梁入口處的警示燈將作用。速度計的檢測重點則在於橋面板與墩帽上的量測結果是否一致，若是，則藉由前後次試驗的頻率比值，可判定橋梁初步的安全狀態，此點，與微型加速度計類似。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
3. p.4-24 表 14 編號 10 橋梁各構件單次費用整理，表內維護構件單次費用，橋面版、支承、伸縮縫等項目由於型式、厚度、高度、強度、材質及所處環境均不同，是否可再作細分可較有利於引用。	3. 感謝委員建議；目前均針對特定橋梁之資料進行探討，無法依不同環境之使用進行建議考量到目前所收集資料尚未在針對細部進行分類，故僅能針對所收集到資料呈現。	同意辦理
4. p.4-26 頁表 4-16 鋼構塗裝費用，由於跨河大橋、車行陸橋，其間接施工費用都與環境和交通量大小有很大相關，若採懸臂式施工架其假設工程費用會更高，至於塗裝費用則應將塗膜厚度註明，訂定塗裝程序道數等，會更接近真實修正係數。	4. 感謝委員建議；目前均針對特定橋梁之資料進行探討，無法依不同施工方法、環境或交通量下之橋梁進行建議。此維護經費表格為橋梁維護管理單位所提供，但所紀錄之項目如表 4-16 所示，因此如厚度、程序道數等資料在歷史資料中即未登錄，因此要回朔當初之狀況，在目前僅能取得之歷史資料背景下，有其難度。	同意辦理
5. p.4-6 公式 4.2 漏列。p4-19 公式(4.6) FD、SD、AD 未作定義。p.4-20、4-21 貝氏分析、事前分析用詞應統一。圖 4.8 未列於報告中。Gamma 分布未作定義?	5. 公式 4.2 已補上。公式 4.6 之說明已補上。貝氏更新名詞已統一。Gamma 分布則為統計學中連續機率函數之基本定義。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
五、謝明志委員		
1. 請確認第五章橋梁整體耐震能力，有否施作 15 筆案例分析，以符工作項目及數量之要求。	1. 本計畫已完成 17 座橋梁耐震能力分析，超過合約要求 15 座。	同意辦理
2. 文字宜精簡，第六章移動式振動檢測 1st~4th 試驗非本年度工作項目，建議可刪除，所引用資料可列參考文獻來引用。	2. 已參照委員意見修正。	同意辦理
3. p.3-17 倒數 5th 行表 1 應改為表 3-3;p.3-19 的表格也應註明為表 3-3。	3. 感謝委員建議，已修正。	同意辦理
4. 災後橋梁巡檢路徑規劃請納入系統。	4. 已補充災後橋梁巡檢路徑規劃系統功能相關說明於第七章中 7.5 節。	同意辦理
六、賴瑞應委員		
1. 建議定稿報告刪除 1.6 研究計畫工作進度圖。	1. 已刪除此章節。	同意辦理
2. 第八章結論部分請具體將成果摘要敘述，而非說明工作項目，如初步確認鋼結構橋梁風險因子是哪些因子，增加哪 2 座橋之振動檢測分析，確認災後巡檢路線規劃因子是哪些因子。	2. 已重新針對第八章內容進行修改，說明各工作項目摘要內容。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
3. 在與公路總局既有系統介接部分，請明確敘述已提供介接。	3. 於 P3-16 中修改說明如下”目前亦已提供公路總局防災應變中心作為圖資展示與通報警訊發布之參考依據(如圖 3.6)，並完成介接。”	同意辦理
4. 建議在研擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構與災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子時，應充分瞭解公路管理單位操作模式並至各單位進行系統驗證是否可行。	4. 感謝委員建議，已於結論與建議中加入後續年度工作項目中。	同意辦理
七、本所港研中心第一科林雅雯研究員		
1. 研究報告第 4-10 頁表 4-2 橋梁分類表，橋梁檢測數量總計 4,100，與全臺鋼結構橋梁數不合，建議釐清。	1. 此為 TBMS 中有紀錄的檢測紀錄，一筆橋梁可能有多筆紀錄，所以並非為橋梁數量。	同意辦理
2. 報告 4-39 頁計算塗裝使用年限，但綜合能力指標需要維護機率，請補充敘述塗裝維護機率計算方式。	2. 塗裝系統之維護週期可分別利用耐候、美觀與防蝕等性能決定，並配合各性能劣化曲線與臨界值計算維護機率。塗裝機率之計算方法即為可使用年限之倒數，即為每年需要重新塗裝之機率”。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
3. 報告 4-54 頁算出橋梁第 5 年輕微損傷之機率為 8.5%，與圖 4.23 不合。	3. 修正範例說明，更正為其損傷指標(DP&A)介於 0.1~0.2 的次數共 7000 次，則對應之損傷分級落在輕微損傷之機率為 7000/10000=70%。	同意辦理
4. 報告 4-21 頁公式 4.10 與圖 4.8 重覆。	4. 刪除重複之公式 4.10。	同意辦理
5. 橋梁整體耐震能力分析之實務應用及於 Trends 之應用建議說明。	5. 於建議中加入相關說明:因整體橋梁模型建置及分析複雜度高，不僅費時、費力，且模型建置不易，而國內公路總局轄管橋梁數量高達數千座，具有整體橋梁結構分析之橋梁資料有限。透過本研究推論模式推估橋梁耐震能力，可節省專業人力投入的時間、成本。因本計畫今年僅先針對橋梁整體耐震能力分析進行模式初步建置，尚未應用至其他橋梁，後續年度建議可針對應用面進行擴充。	同意辦理
6. 報告 6-23 頁「choose」請改為選	6. 已參照委員意見修正。	同意辦理

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
7. 南雲的穩定性高(6.1.3.1)，此(6.1.3.1)所指為何? 最後三行「南雲穩定性高但Z-test(6.1.3.1)不容易為「無顯著差異」，相反地，溪州穩定性較高，但Z-test結果與南雲相近」，請再詳加解釋。	7. 為6.1.2.1節之誤植，已修正。已補充說明如下「由此可知，雖然南雲的穩定性高(6.1.2.1節)，因此cov較溪州小，較小的cov使得Z-test的結果不容易為「無顯著差異」。相反地，溪州雖然穩定性不若南雲，但卻因其cov值較大，Z-test的結果較易為「無顯著差異」，因此，兩座橋梁的「無顯著差異」的比例相近。」。	同意辦理
8. 報告6-18至6-22頁振動頻譜圖皆未標示日期，應標示日期並應包含今年2座橋各2次量測頻譜圖。	8. 日期與兩次試驗兩個墩柱的代表性振譜均已補上。	同意辦理

附錄三

期末報告簡報資料

公路早期防救災決策支援系統(TRENDS)及鋼橋管理模組維護更新
期末簡報

委託單位：交通部運輸研究所
執行單位：台灣科技大學營建工程系

中華民國一百零六年十一月

簡報流程

壹 計畫背景及目的
貳 研究方法
參 執行步驟
肆 執行進度
伍 結論

壹 計畫背景及目的

問題

(1)鋼結構橋梁比例提升，如何評估鋼橋之能力與維修時機?

(2)國內以橋梁下部結構-橋柱性能的耐震能力為主，未將上部結構資料納入分析。上部結構耐震能力不足造成落橋等災害，影響用路人通行安全。

(3)需增加橋梁振動頻率檢測紀錄樣本數，以統計分析驗證，於橋面板上量測災前與災後頻率比值可取代於墩帽上量測結果。

(4)震後如依橋梁損壞機率排出巡檢優先順序，將面對跳點方式巡檢之問題，實際執行上可能窒礙難行。

(5)如何與公路總局現有防災系統介接，提升系統使用性。

壹 計畫背景及目的

目的

•台灣公路早期防救災決策支援系統(TRENDS)維運，並擬針對以下不同領域進行系統模式更新、提高分析準確度，確認系統實用性及穩定性。

(1)初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

(2)橋梁整體耐震能力評估模式擬定

(3)橋梁振動檢測案例分析

(4)確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟

(5)與公路總局既有系統介接

貳 研究方法(1/3)

本計畫期程分為八個項目完成

研究階段	研究內容	相關研究與方法
第一項目： **文獻回顧與研究團隊組成**	➢ 相關研究背景分析 ➢ 研究人力組成	➢ 現況分析 ➢ 人才延攬 ➢ 團隊制度建立
第二項目： **台灣公路早期防救災決策支援系統維護營運**	➢ 系統基本資料更新	➢ 模式驗證與更新
第三項目： **初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構**	➢ 鋼橋維護文獻回顧 ➢ 鋼橋風險因子確認 ➢ 初擬鋼結構橋梁成本導向風險評估模式	➢ 影響圖 ➢ 因子篩選

貳 研究方法(2/3)

研究階段	研究內容	相關研究與方法
第四項目： **橋梁整體耐震能力評估模式擬定**	➢ 同時考慮橋梁上、下部各構件耐震容量，計算地震損傷評估 ➢ SAP結構模型建置 ➢ 耐震能力側推	➢ SAP 2000側推分析 ➢ 因子篩選方法
第五項目： **橋梁振動檢測案例分析**	➢ 2座橋梁災前與災後振動頻率量測 ➢ 擬定橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸及通報系統	➢ 振動頻率量測儀器 ➢ 傅立葉轉換
第六項目： **確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟**	➢ 確認公路總局路徑規劃時考量因子 ➢ 初擬橋梁重要性及旅運距離多目標巡檢路線最佳化模式	➢ 旅行推銷員問題(TSP)規劃 ➢ 多目標最佳化模式

貳 研究方法(3/3)

貳、研究方法與流程

參 執行步驟-第一項 文獻回顧與研究團隊組成

參 執行步驟-第二項 TRENDS系統營運維護

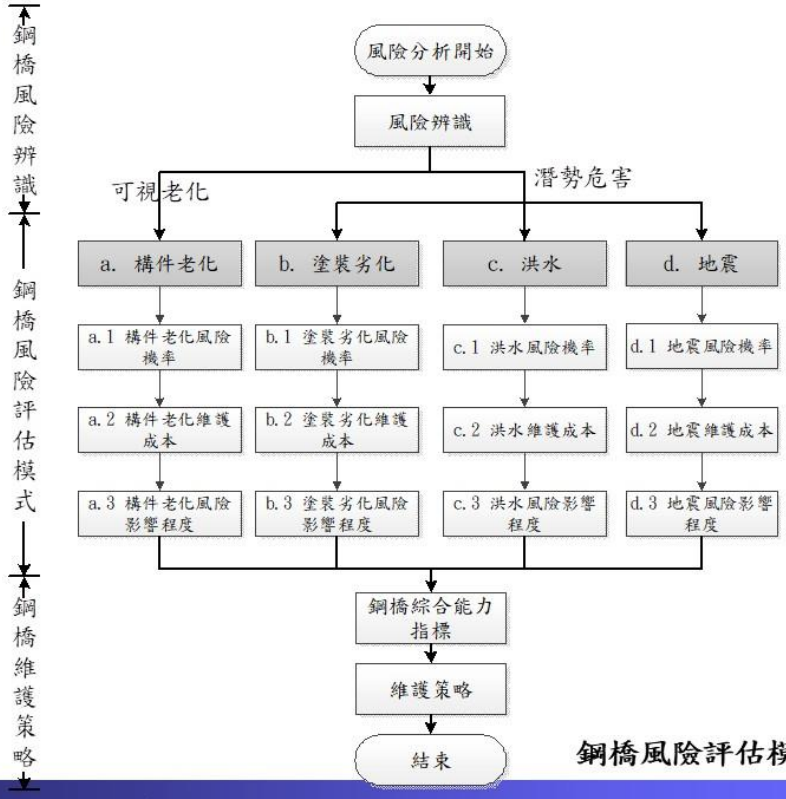
參 執行步驟-第一項 研究團隊組成

研究團隊組成

名稱	服務機構/系所	專長	負責事項
鄭　明　淵 特　聘　教　授	國立台灣科技大學/營建工程系/管理組	資訊管理系統、營建業流程再造、人工智慧、地理資訊系統	計畫協調整合事項
邱　建　國 教　　授	國立台灣科技大學/營建工程系/結構組	鋼筋混凝土結構物劣化分析與耐震行為、生命週期耐久性能設計與維持管理、複合環境影響下之耐用年限分析	第三階段 第四階段
廖　國　偉 副　教　授	國立台灣科技大學/營建工程系/資訊組	系統工程、可靠度分析、最佳化設計、結構力學	第五階段
吳　育　偉 博　　士	國立台灣科技大學/營建工程系	資訊工程、軟體代理人、網頁系統	第六階段 第七階段
4　名 碩士兼任助理	國立台灣科技大學/營建工程系	營建管理、資訊工程等	協助試驗側推分析

參 執行步驟-第三項 初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

1. 收集相關文獻
2. 確認鋼結構橋梁風險因子
3. 文獻中鋼橋與RC橋生命週期成本評估方法
4. 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式



鋼橋風險評估模式流程

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

第三項-初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

鋼橋風險評估架構

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式
第三項-初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

風險下維護成本　損害重建成本

$$E_{Bij}(Cost) = E(MC) + E(RC)$$

E_{Bij} (Cost): Bridges Expected Cost，為第i年第j座橋梁之風險期望成本

E(MC): Maintenance Cost，為風險下維護成本(元件老化、塗裝劣化、洪水、地震)。

E(RC): Rebuilding Cost，為橋梁在未維修狀態下因地震或洪水損害造成之重建成本。

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式
第三項-初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

可視老化　潛勢危害

$$E_S[Cost] = P_{MD} \times C_{MD} + P_{MC} \times C_{MC} + P_{MS} \times C_{MS} + P_S \times C_{RS} + P_{ME} \times C_{ME} + P_E \times C_{RE}$$

類別	類型	維修機率	維修成本	重建機率	重建成本
可視老化	元件老化	P_{MD} (已完成)	C_{MD} (已完成)	-	-
潛勢危害	塗裝劣化	P_{MC} (已完成)	C_{MC} (已完成)	-	-
	洪水沖刷	P_{MS} (已完成)	C_{MS} (已完成)	P_S (已完成)	C_{RS} (已完成)
	地震	P_{ME} (已完成)	C_{ME} (已完成)	P_E (已完成)	C_{RE} (已完成)

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式
第三項-初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

各因子評估方法

類別	類型	維修機率	維修成本	重建機率	重建成本
可視老化	元件老化	蒙地卡羅	損害維修比	-	-
潛勢危害	塗裝劣化	維護週期	損害維修比	-	-
	洪水沖刷	蒙地卡羅	人工智慧推論	蒙地卡羅	興建成本
	地震	蒙地卡羅	損害維修比	蒙地卡羅	興建成本

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式
第三項-初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

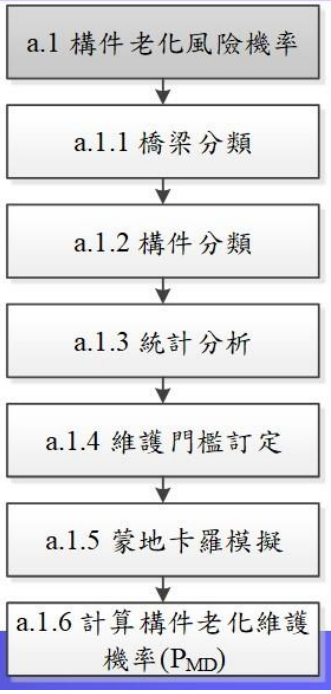
(a) 元件老化

(a.1.1)橋梁分類

本計畫收集整理台灣橋梁管理系統中歷年調查結果，將結構型式作為分組之依據，並假設同一類型橋梁其元件老化狀況類似

橋型	檢測數量筆數
拱橋	437
箱型橋	1588
梁式橋	1330
斜張橋	136
桁架橋	66
剛架橋	278
π橋	265

(公路總局歷年鋼橋檢測數量)



4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

第三項-初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

(a) 元件老化

(a.1.2)構件分類

1至11項屬於橋梁附屬設施，12至20項為橋梁主要及次要構件

橋梁D. E. R&U構件及構件分類	
1. 引道路堤	11. 欄杆及護牆
2. 引道護欄	12. 橋墩保護設施
3. 河道	13. 橋墩基礎
4. 引道護坡	14. 橋墩墩體/帽樑
5. 橋台基礎	15. 支承
6. 橋台	16. 止震塊/防震拉桿
7. 翼牆/擋土牆	17. 伸縮縫
8. 摩擦層(鋪面系統)	18. 主構件/大樑
9. 排水系統	19. 副構件
10. 緣石及人行道	20. 橋面板
	21. 其他

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

第三項-初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

(a) 元件老化

(a.1.3)統計分析

統計各構件在不同年度下的Ic_i值之平均下降值

(a.1.4)維護門檻訂定

訂定不同Ic_i值作為門檻值

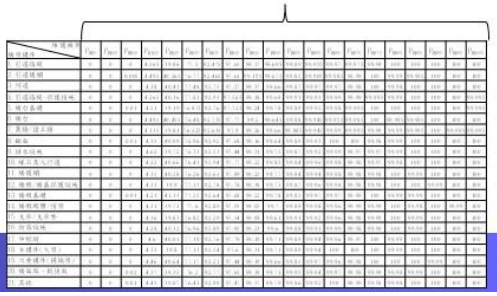
(a.1.5)蒙地卡羅模擬

將同類型橋梁的Ici平均值與變異數作為蒙地卡羅之輸入；模擬次數10000次，找出各門檻值之間的累計次數。

(a.1.6)計算構件老化維護機率

將蒙地卡羅各門檻值之間的累計次數除以模擬次數，即可得到橋梁因構件老化所需的維護機率。

使用50年維護評估



262座鋼橋x21個構件x不同門檻值(85~90)=33,012組

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

a.2 構件老化維護成本

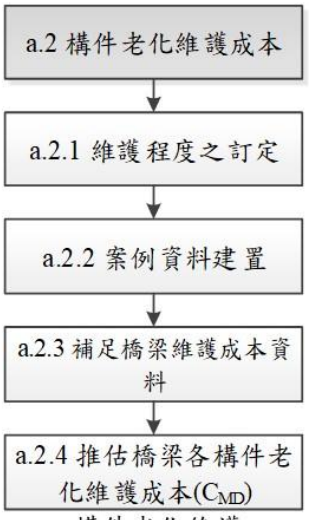
a.2.1 維護程度之訂定

採用Hatem Elbehairy (2007)
構件損傷程度分為：中度維修、重度維修以及置換三種程度，
依損壞程度對應不同維護成本。

損傷程度	中度維修	重度維修	置換
花費金額對應初始成本的百分比	28.5%	65%	100%

a.2.2 案例資料建置

收集TBMS鋼橋歷史維護案例，進行構件老化維護成本資料庫之建置。



構件老化維護成本流程圖

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

a.2.3 補足橋梁維護成本資料

如有橋梁構件無相關維護紀錄，則根據橋梁構件分類的不同，採用不同的資料欄位來進行評估，依照橋梁量體的比例，來填補所缺少的維護成本資料。

橋梁構件	1. 引道路堤	2. 引道護欄	3. 河道	4. 引道路堤-保護措施	5. 橋台基礎	6. 橋台	7. 翼牆/擋土牆
構件對應的資料欄位	A1進橋版長度、A2進橋版長度	A1進橋版長度、A2進橋版長度	計畫河寬	A1進橋版長度、A2進橋版長度	橋台型式	橋台型式	翼牆/擋土牆型式
橋梁構件	8. 鋪面	9. 排水設施	10. 緣石及人行道	11. 橋護欄	12. 橋墩/橋基保護設施	13. 橋墩基礎	14. 橋墩墩體/帽梁
構件對應的資料欄位	橋版投影面積	橋長	橋長	橋長	跨距分配	跨距分配	跨距分配、橋寬
橋梁構件	15. 支承/支承墊	16. 防落設施	17. 伸縮縫	18. 主構件(大梁)	19. 次要構件(橫隔梁)	20. 橋面版、鉸接版	21. 其他
構件對應的資料欄位	跨距分配	跨距分配	跨距分配、橋寬	橋版投影面積	橋版投影面積	橋版投影面積	

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

a.2 構件老化維護成本

a.2.4 推估橋梁各構件老化維護成本

根據不同的維護程度以及橋梁各構件的維護成本，可推估出橋梁各構件老化維護成本。

推估構件維護總金額

橋梁構件	1.引道路堤	2.引道護欄	3.河道	4.引道路堤-保護措施	5.橋台基礎	6.橋台	7.翼牆/擋土牆
構件對應的推估維護金額(單位：元)	8916	11300	2323187	144.1818	1138607	79756	422222
橋梁構件	8.鋪面	9.排水設施	10.緣石及人行道	11.橋護欄	12.橋墩/橋基保護設施	13.橋墩基礎	14.橋墩墩體/帽梁
構件對應的推估維護金額(單位：元)	69953	144215	32394	591624	1243251	15991306	1366328
橋梁構件	15.支承/支承墊	16.防落設施	17.伸縮縫	18.主構件(大梁)	19.次要構件(橫隔梁)	20.橋面版、鉸接版	21.其他
構件對應的推估維護金額(單位：元)	26536	486000	2547431	307549	2136460	15991306	

推估構件中度維修時的金額

橋梁構件	1. 引道路堤	2. 引道護欄	3. 河道	4. 引道路堤-保護措施	5. 橋台基礎	6. 橋台	7. 翼牆/擋土牆
構件對應的推估維護金額(單位：元)	25416	3220	662108	41.09182	324503	22730	120333
橋梁構件	8. 鋪面	9. 排水設施	10. 緣石及人行道	11. 橋護欄	12. 橋墩/橋基保護設施	13. 橋墩基礎	14. 橋墩墩體/帽梁
構件對應的推估維護金額(單位：元)	19936	41101.44	9232.414	168613	354326	45100184	389403
橋梁構件	15. 支承/支承墊	16. 防落設施	17. 伸縮縫	18. 主構件(大梁)	19. 次要構件(橫隔梁)	20. 橋面版、鉸接版	21. 其他
構件對應的推估維護金額(單位：元)	7562	138510	726017	87651	608891	4557522	0

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

第三項-初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

(b) 塗裝劣化

b.1.1 設定塗裝維護狀態

塗裝維護狀態:

1.美觀為狀態設定，塗裝系統的耐用年限較短。

2.蝕性能為狀態設定，耐用年限會比較長。

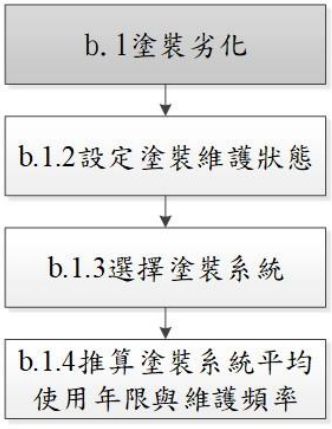
b.1.2 設定塗裝系統

本階段的塗裝系統探討

1.PU/5年

2.氟素/10年

3.氟素/15年



塗裝劣化風險機率流程圖

(b) 塗裝劣化

b.1.3 推算塗裝系統平均使用年限與維護頻率

根據邱建國(2017)提出，若以美觀為狀態設定，

平均使用年限(年)

需求\塗裝系統	氟素塗裝	PU塗裝
美觀	8	6
防鏽	10	6
容許鋅層	15	10

模擬A橋使用年限設定為50年，則在A橋的生命週期中選擇使用氟素/10年，需要5次的塗裝維護；若選擇氟素/15年，需要三次的塗裝維護，若選擇PU/5年則需要10次的塗裝維護。

b.2 塗裝劣化維護成本

b.2.1 案例資料建置

採用鄭國宏(2017)提到考慮塗裝系統的支出*(包含機具人員的施工成本)。**氟素/15年的生命週期成本為最低，本研究僅使用氟素/15年來探討。**

*支出包含:高空作業車費用、產體力工費、塗裝系統費用等費用，並且採用現值法3%的情況下，推論出50年後，上述費用的變化。

收集TBMS鋼橋歷史維護案例，進行構件老化維護成本資料庫之建置。

塗裝劣化維護成本流程圖

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

b.2 塗裝劣化維護成本

b.2.2 計算塗裝劣化維護成本

根據上述之步驟，可以推論出橋梁在50年的生命週期中每5年的維護成本。

橋齡	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
維護成本（元）	903190	1047045	1213812	1407141	1631262	1891080	2192279	2541453	2946240	3415500

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

(c) 洪水沖刷

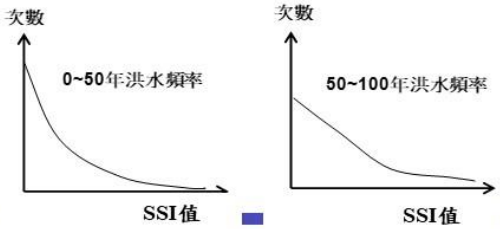
c.1洪水風險機率

C.1.1 橋梁分類

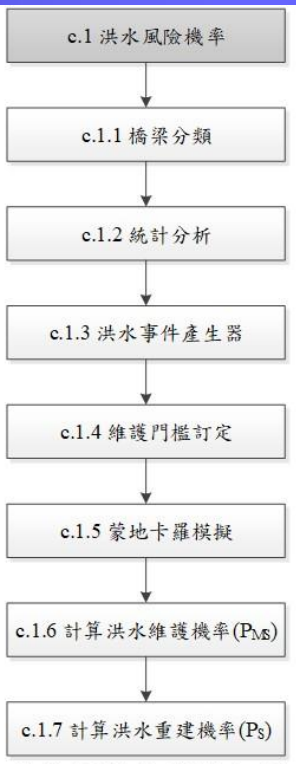
因橋梁所屬河川流域不同，所遭遇的洪水規模與洪水頻率也會有所差異；本研究根據水利署所公布的台灣主要河川之流域定義，將橋梁依據流域分為二十五個區域。

C.1.2 統計分析

依據橋梁管理系統歷年的SSI記錄與水利署水位站監測的紀錄，分析洪水重現期所對應SSI指標的下降趨勢。



洪水重現期強度發生次數與SSI指標下降曲線示意圖



洪水風險機率流程圖

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

c.1.3 洪水事件產生器

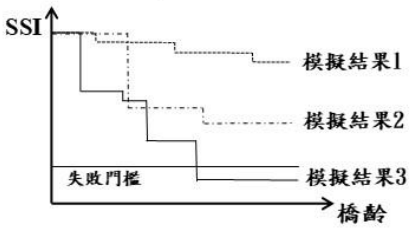
根據不同的洪水重現期，在橋梁的未來生命週期中產生不同的洪水事件。

c.1.4 維護門檻訂定

本研究根據各河系橋梁的維護紀錄，根據訂定SSI值門檻值；此門檻可依據使用者需求進行調整，以符合現地的情況。

c.1.5 蒙地卡羅模擬

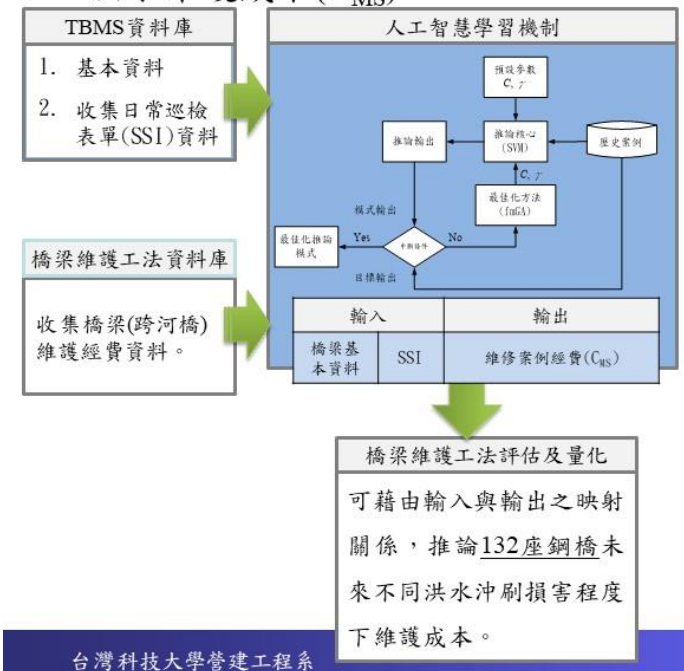
將同類型橋梁的SSI下降平均值與變異數作為蒙地卡羅之輸入，模擬次數10000次，找出欲模擬次數小於設定門檻值的累計次數。

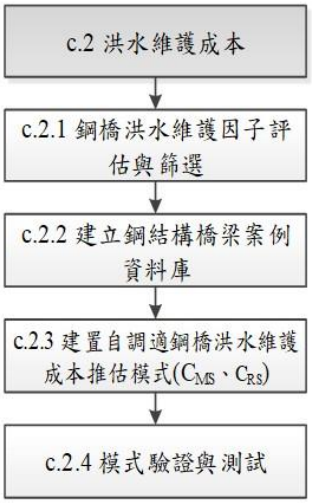


模擬洪水事件示意圖

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

c.2洪水維護成本(C_{MS})





洪水維護成本流程圖

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

c.2 洪水維護成本(C_{MS})

c.2.1 鋼橋洪水維護因子篩選

依據公路總局TBMS橋梁屬性欄位共117個欄位利用統計分析結果篩選後，並進行專家訪談，挑選出6個顯著相關參數，做為模式因子。

TBMS基本資料表，共計117個欄位

系統ID	最近維修年	跨越類別	跨距分配	橋台基礎型式	橫桿材質
橋梁名稱	最近維修月	河川/水域管理單位	最高橋墩高度	翼牆/擋土牆型式	吊材材質
使用狀態	原始造價	河川/水域名稱	最低橋上淨高(M)	橋墩材質	立柱材質
停用類型	合約編號	上游500公尺構造物	最低橋下淨高(M)	橋墩型式	鋼纜型式
停用未拆除原因	交流/匝道	下游500公尺構造物	橋頭GPS經度	橋墩基礎型式	錨定裝置
橋梁編號	匝道編號	上游最近水位站	橋頭GPS緯度	橋墩最淺基礎深度(M)	設計活載重
設施種類	改道長度	計畫洪水位(EL)	橋尾GPS經度	橋墩最深基礎深度(M)	地盤種類
管理機關	設計單位	計畫河寬(M)	橋尾GPS緯度	橋基(墩)保護工法	防落設施
養護工程處	監造單位	計畫堤頂高程(EL)	橋中心座標計算方式	橋塔材質	規範設計水平地表加速度
養護工務段	施工單位	設計河床高程(EL)	結構型式	橋塔型式	防落橋長度
所在縣市	是否有堵工圍	設計橋梁出水高(M)	支撐端型式	主纜索型式	設計水平地表加速度(G)
所在區鄉	堵工圍說保存地點	橋梁總長(M)	主梁材質	吊索型式	設計垂直地表加速度(G)
道路等級	應特別檢測震度	A1進橋版長度(M)	主梁型式	吊索佈置型式	GIS座標X
路線	特別檢測震度設定理由	A2進橋版長度(M)	鋼構接合型式	抗風索材質	GIS座標Y
橋頭里程(K)	土壤液化潛勢	最大淨寬(M)	橫梁型式	抗風支索材質	附註
橋頭里程(M)	檢測週期(月/次)	最小淨寬(M)	橋面版材質	索面系統型式	CI
橋尾里程(K)	跨越物體	橋版投影面積(M^2)	鋪面材質	索面佈置型式	SSI
橋尾里程(M)	年平均每日交通量	總車道數	伸縮縫型式	拱上結構型式	
堵工年	參考地標	總橋孔數	支承型式	橋面版位置	
堵工月	是否為跨水橋	最大跨距(M)	橋台型式	拱圈材質	

經篩選後的影響因子

影響因子	關聯	單位
SSI	維修前SSI指標	數字
橋版投影面積	維修量體	M^2
最低橋下淨高(M)	維修量體	M
結構型式	維修方式	文字
高程	山地與平地段考量	文字
最近維修年	物價修正用	西元年

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

c.2洪水維護成本(C_{MS})

c.2.2 建立鋼結構橋梁案例資料庫

根據橋梁輸入及輸出影響因子，建置歷史案例庫共計228筆，此處只考慮洪水沖刷故為跨河橋梁，且物價指數為輸出因子，所以以下輸入因子為5項。

c.2.3 建置自調適鋼橋洪水維護成本推估模式

藉由人工智慧推論模式，歷史案例學習與預測，推論洪水維護成本C_{MS}。

輸入因子					輸出因子
SSI指標值	橋板投影面積	最低橋下淨高	結構型式	高程是否高於1000m	經營建物價指數調整後之維修經費
77	1190	5	梁式橋	否	2,107,000
		⋮			
86	5850	8	梁式橋	否	7,651,278

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

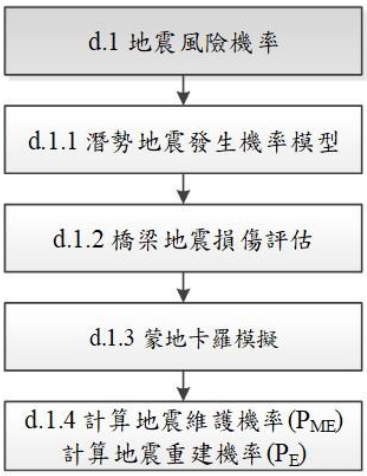
c.2洪水維護成本(C_{MS})

將輸入影響因子(橋梁欄位資料)，歷史案例庫共計228筆，同樣以十組交叉驗證(10 fold Cross-validation)方式進行案例訓練與測試。

模式訓練平均均方根誤差RMSE為0.1019
模式測試平均均方根誤差RMSE為0.1016
為可接受之模式推論準確性。

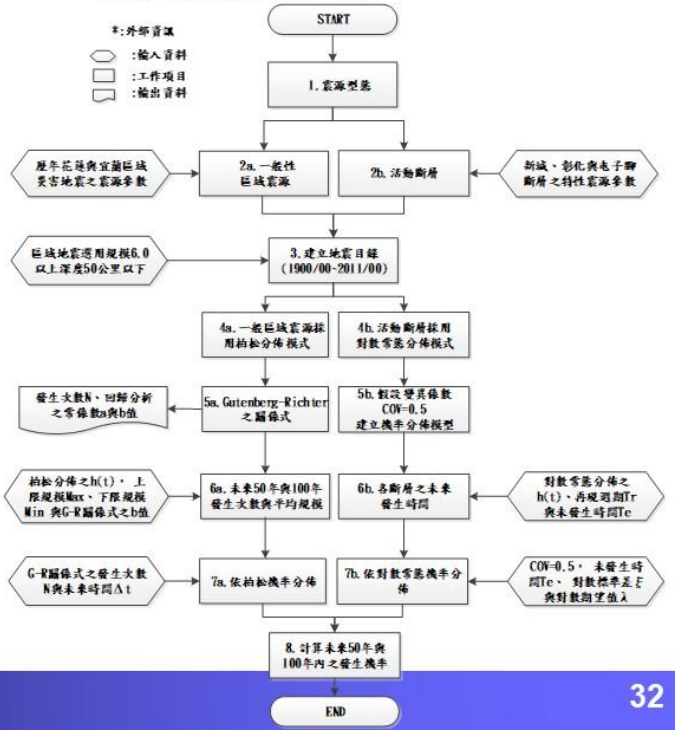
洪水沖刷維修成本推論模式執行結果											
組別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
模式訓練-(RMSE)	0.0856	0.0711	0.1210	0.1219	0.1156	0.1403	0.1092	0.0845	0.0901	0.0798	**0.1019**
模式測試-(RMSE)	0.0975	0.1582	0.0933	0.0465	0.0630	0.1067	0.1728	0.0744	0.0827	0.1212	**0.1016**

(d) 地震損傷



地震風險機率流程圖

d.1.1 潛勢地震發生機率模型



4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

(d) 地震損傷

d.1.2 橋梁地震損傷評估

採用交通部運輸研究所(2011)所提出之理論，進行橋梁之非線性動力分析。計算其地震損傷指標，並結合張容瑋(2017)所提出的橋梁整體耐震能力推論模式，評估整體橋梁的耐震能力。

d.1.3 蒙地卡羅模擬

將同區域所對應的加速度參數值作為蒙地卡羅之輸入，設定欲模擬次數找出小於設定門檻值的累計次數。

d.1.4 計算地震維護機率(P_{ME})、地震重建機率(P_E)

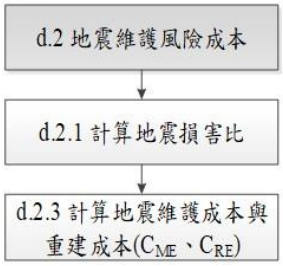
損壞等級分為:1.輕微損壞、2.中度損壞、3.嚴重損壞、4.完全損壞；應用蒙地卡羅結果找出使用年與損壞分級之維護機率與橋梁因地震造成橋梁完全崩塌的機率。

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

d.2 地震維護成本

d.2.1 計算地震損害比

地震風險成本C_E為此年度結構物受地震外力作用所造成可能之年損失金額，即為考量各程度之地震發生機率及其所造成之損失總和。



地震維護成本流程圖

$$C_e = \sum (C_E^i \times P_E^i)$$

C_E^i：橋梁第i損壞等級之損害比

P_E^i：橋梁第i損壞等級之發生機率

損害分級	損害比
無損傷	0.00
輕微損傷	0.02
中度損傷	0.10
重度損傷	0.50
完全崩塌	1.00

損害狀況及損害比之關係

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

d.2 地震維護成本

d.2.1 計算地震維護成本與重建成本(C_{ME}、C_{RE})

地震維護風險成本

年分	5	10	15	20	25
地震維護風險成本(元)	4154649.54	11079065.44	23543014.06	36006962.68	45701144.94
年分	30	35	40	45	50
地震維護風險成本(元)	55395327.2	56780210.38	56780210.38	56780210.38	56780210.38

地震重建風險成本

年分	5	10	15	20	25
地震重建風險成本(元)	373918.5	997115.9	2118871	3240627	4113103
年分	30	35	40	45	50
地震重建風險成本(元)	4985579	5110218.9	5110218.9	5110218.9	5110218.93

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

根據上述步驟分別計算

1.構件老化、2.塗裝劣化、3.洪水、4.地震

各維護間隔△t下造成之維護風險成本E(MC)及重建風險成本E(RC)。分別求得鋼結構橋梁之風險機率與風險成本後，可透過下列式子，求得橋梁之綜合能力指標。

風險下維護成本　損害重建成本

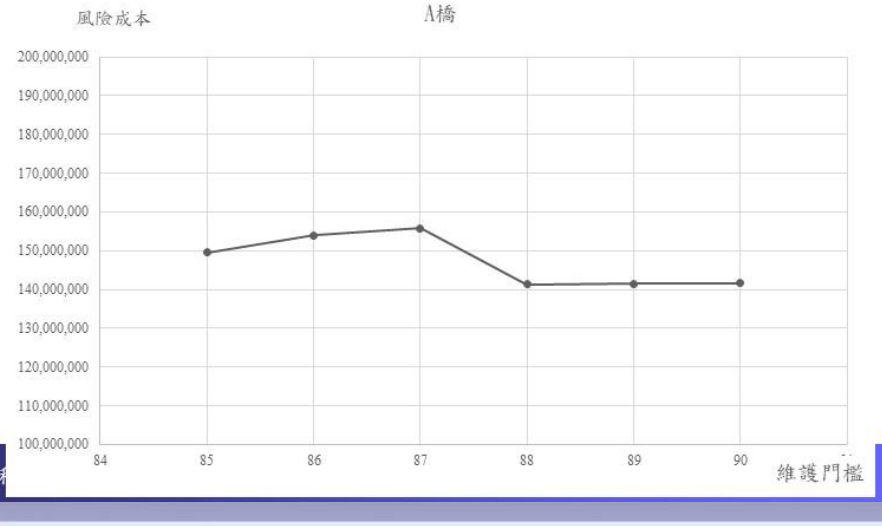
$$E_S[Cost] = E(MC) + E(RC)$$

不同維修間隔下風險成本(以A橋為例)

橋齡 / 橋梁風險	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
構件老化	4632586	12233132	15826761	17692469	19086368	19905112	20434039	21212880	21588485	21896689
塗裝劣化	903190	1047045	1213812	1407141	1631262	1891080	2192279	2541453	2946240	3415500
洪水維護	96588	663261	17367974	42237070	45815127	51572688	59464839	63219360	63991748	64063566
地震維護	4154650	11079065	23543014	36006963	45701145	55395327	56780210	56780210	56780210	56780210
洪水重建	546725	2051323	3223754	4741379	6414118	8767357	11298319	13908259	15358020	17297163
地震重建	373919	997116	2118871	3240627	4113103	4985579	5110219	5110219	5110219	5110219
Es[Cost]	10707657	28070942	63294185	105325649	122761123	142517143	155279905	162772381	165774922	168563348

4 建置鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

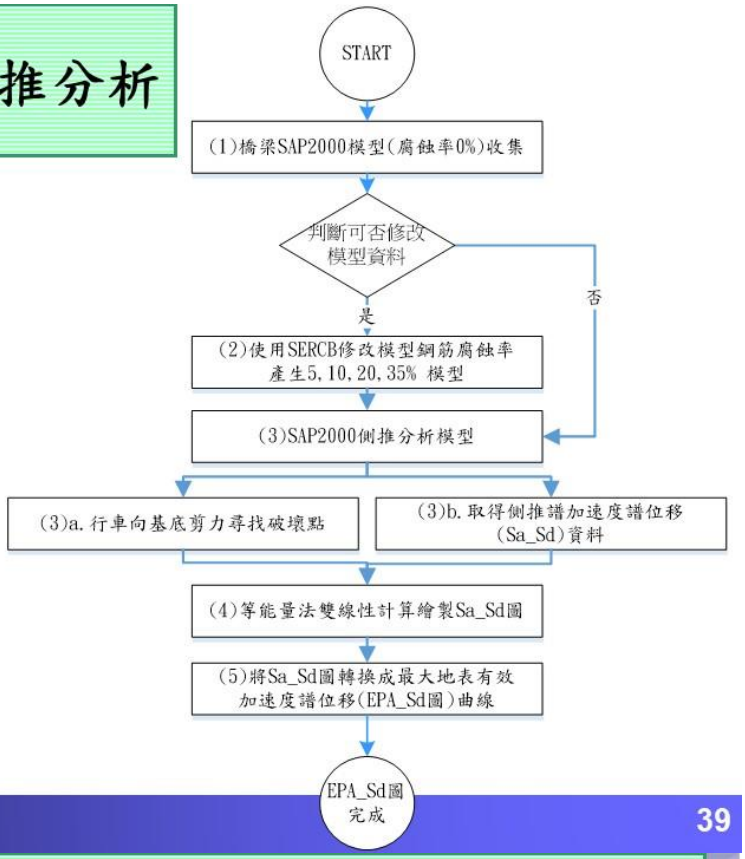
以A橋梁為例，該橋之重建成本為276,976,636元，經過最佳化搜尋後，各門檻值下(85 ~ 90)下的總風險成本依序為14,954萬、15,400萬、15,575萬、14,130萬、14,149萬、14,160萬元。橋梁管理單位可根據維護經費預算，參考下圖之各門檻維護策略，建議選擇88分為維護門檻。



參 執行步驟-第四項 橋梁整體耐震能力評估模式擬定

1. 案例收集與側推分析
2. 橋梁損傷評估
3. 橋梁整體損傷評估案例建置
4. 橋梁整體耐震能力影響因子確認

1 案例收集與側推分析



1 案例收集與側推分析

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 1:橋梁SAP2000模型(腐蝕率0%)收集

已取得17座橋梁結構模型(鋼筋斷面腐蝕率為0%)。

STEP 2:使用SERCB修改鋼筋腐蝕率產生5,10,20,35%之橋梁模型

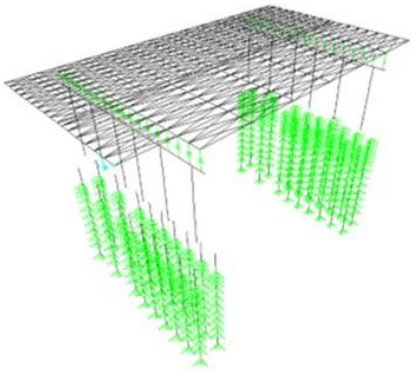
參考使用文獻[宋裕祺教授團隊]所開發SERCB for Bridge結構分析軟體重新進行塑鉸分析生成不同鋼筋腐蝕率之塑鉸資料。

1 案例收集與側推分析

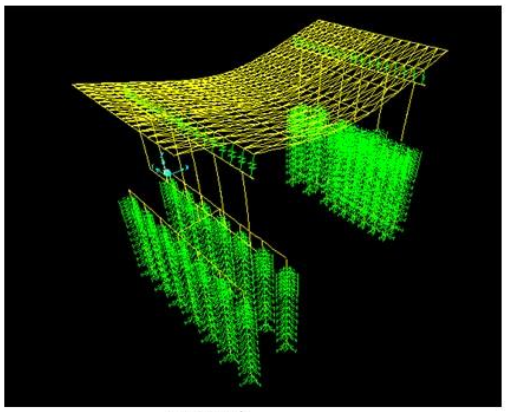
第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 3:SAP2000側推分析模型

使用SAP2000分析軟體，進行橋梁行車向非線性靜力側推分析(Pushover Analysis)



側推前



側推後

1 案例收集與側推分析

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 3a:行車向基底剪力尋找破壞點

擷取SAP2000 表單

Pushover Curve-Push-X，

並找尋破壞點。

破壞點為Max(BaseForce)

Step	Displacement	BaseForce
	m	Tonf
0	0.000916	0
1	0.060916	1568.5057
2	0.066911	1723.0868
3	0.091657	2109.8665
4	0.157371	2483.7794
5	0.175108	2542.822
6	0.178277	2548.9177
7	0.18911	2562.4437
8	0.190714	2563.1794
9	0.280714	2560.3978
10	0.340714	2558.5434
11	0.400714	2556.689
12	0.460714	2554.8346
13	0.520714	2552.9802
14	0.580714	2551.1258
15	0.600916	2550.5014

1 案例收集與側推分析

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 3b:取得側推譜加速度譜位移(Sa_Sd)資料

擷取SAP2000 表單Pushover Curve Demand Capacity-ATC40中，Sd Capacity,Sa Capacity欄位資料，繪製Sa_Sd圖

TABLE: Pushover Curve Demand Capacity - ATC40 - Push-EQL

Step	Teff	Beff	SdCapacity	SaCapacity	SdDemand	SaDemand	Alpha	PFPhi
			m		m			
0	1.017407	0.05	0	0	0.101092	0.393156	1	1
1	1.017407	0.05	0.051905	0.201866	0.101092	0.393156	0.512891	1.155948
2	1.018376	0.051105	0.057066	0.221512	0.100647	0.390681	0.513467	1.156464
3	1.074815	0.102885	0.079254	0.276179	0.087655	0.305457	0.504273	1.144945
4	1.281504	0.223256	0.140766	0.345062	0.08	0.196105	0.475136	1.111452
5	1.333043	0.242175	0.157597	0.357026	0.08054	0.182458	0.470129	1.105295
6	1.34286	0.245936	0.160634	0.358604	0.080622	0.179983	0.469183	1.104132
7	1.377272	0.258945	0.171053	0.36302	0.080936	0.171767	0.465935	1.100206
8	1.382582	0.260989	0.172601	0.363497	0.080979	0.170541	0.465458	1.099635
9	1.662772	0.335869	0.259818	0.378306	0.087035	0.126726	0.446751	1.076898
10	1.826113	0.360067	0.318121	0.38404	0.092448	0.111604	0.439762	1.06814
11	1.976207	0.375825	0.376486	0.388081	0.09818	0.101204	0.434867	1.06192
12	2.115875	0.386868	0.434889	0.391054	0.105119	0.094524	0.431248	1.057277
13	2.247063	0.395023	0.493317	0.39331	0.111637	0.089005	0.428464	1.053679
14	2.371179	0.40596	0.551763	0.39506	0.117803	0.084346	0.426256	1.050809
15	2.411571	0.409537	0.571445	0.395561	0.119809	0.082934	0.425612	1.04997

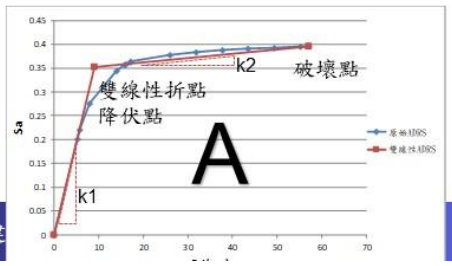
1 案例收集與側推分析

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 4:等能量法雙線性計算繪製Sa_Sd圖

- 計算Sa_Sd圖下之總面積A
- K1:第一點與原點之間的斜率為初始斜率
- 破壞點:MAX(Sa Capacity,SdCapcity)
- 降伏點:雙線性折點
- 以降伏點至破壞點的斜率為k2

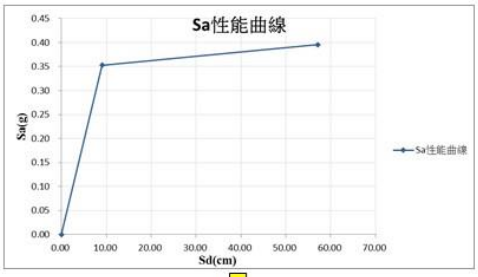
SdCapacity	SaCapacity
cm	
0	0
5.1905	0.201866
5.7066	0.221512
7.9254	0.276179
14.0766	0.345062
15.7597	0.357026
16.0634	0.358604
17.1053	0.36302
17.2601	0.363497
25.9818	0.378306
31.8121	0.38404
37.6486	0.388081
43.4889	0.391054
49.3317	0.39331
55.1763	0.39506
57.1445	0.395561

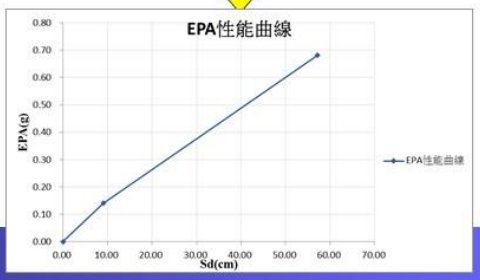


1 案例收集與側推分析

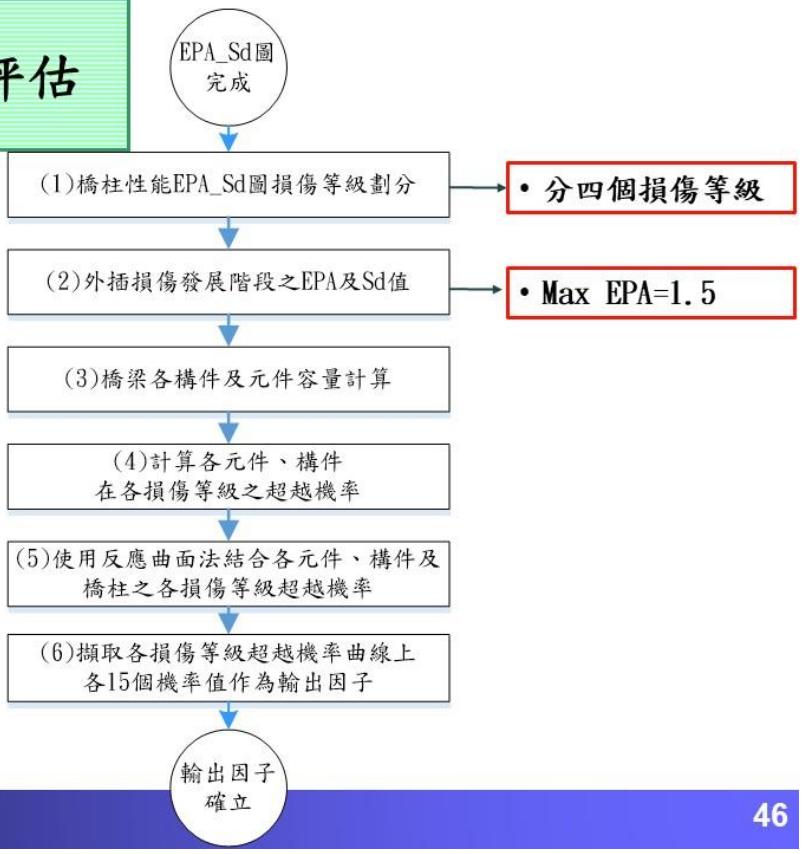
第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 5:將Sa_Sd圖轉換成最大地表有效加速度_譜位移圖(EPA_Sd圖)





2 橋梁損傷評估



2 橋梁損傷評估

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 1:橋柱性能EPA-Sd圖損傷等級劃分

將側推分析後得到之有效地表加速度-譜位移關係圖(EPA-S_d圖)進行損傷劃分:

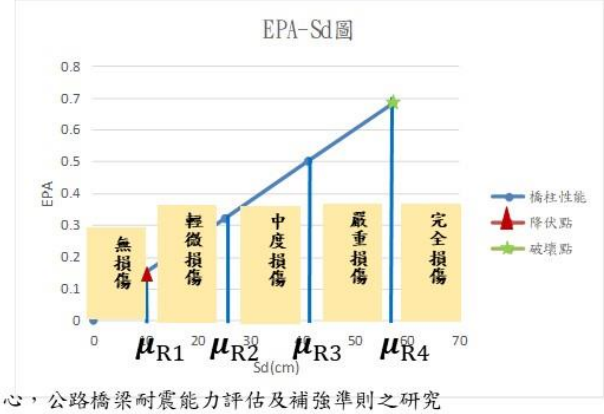
先找出降伏點以及破壞點，

原點至降伏點區間為無損傷，

降伏點與極限點間均分三等分為

輕微損傷、中度損傷、嚴重損傷

以及破壞點後定義為完全損傷。



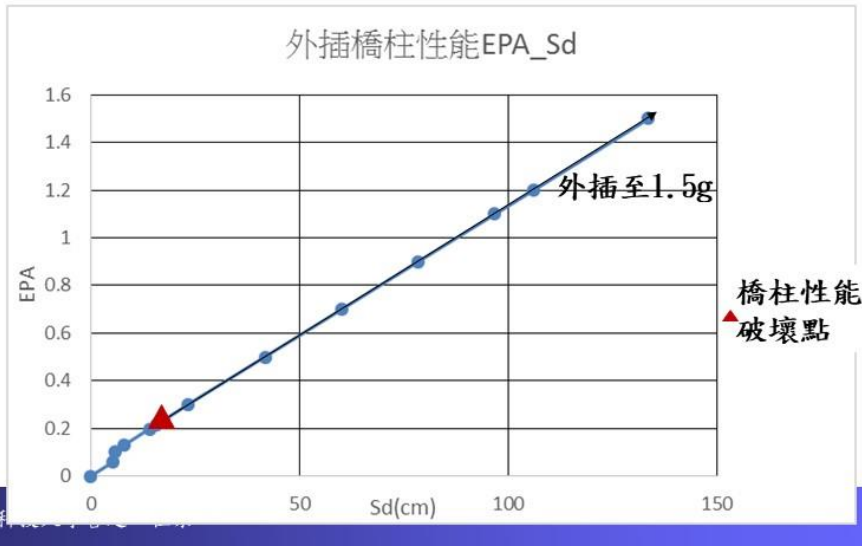
資料來源:國家地震工程研究中心，公路橋梁耐震能力評估及補強準則之研究

2 橋梁損傷評估

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 2:外插損傷發展階段之EPA及Sd值

- 假設超越機率在EPA為1.5g時，各損傷超越機率會達到1.0(EPA=1.5g時，確定橋梁所有構件都一定會完全損壞)。



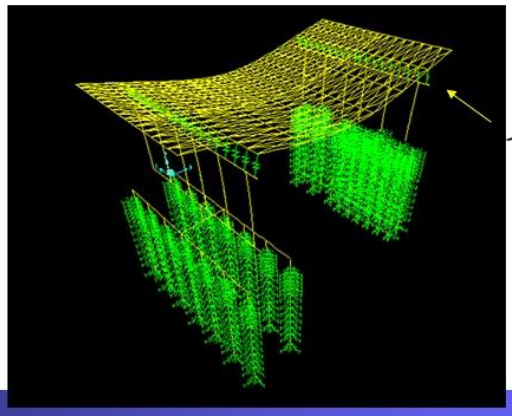
2 橋梁損傷評估

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 3:橋梁各構件及元件結構容量計算

選擇需計算耐震容量構件之每一個該構件項目。

以支承剪力為例，選取橋梁模型中每一個支承，再找出承受最大剪力支承，擷取該支承的結構容量變化資料作為計算超越機率之用。



2 橋梁損傷評估

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 4:計算各元件、構件在各損傷等級之超越機率

在不同損傷等級下，由橋梁側推模型中找出該損傷等級下須考慮的橋梁構件或元件側推下之受力狀態，以計算其損傷超越機率。

例:當中度損傷等級時考慮

1. 橋柱性能、
2. 支承剪力及
3. 帽梁彎矩之檢核。

			無損傷	輕微損傷	中度損傷	嚴重損傷	完全損傷
下部結構	橋梁構件及元件	橋柱性能	✓	✓	✓	✓	✓
		橋柱穩定性					✓ (II)
		樁頂轉角					✓ (II)
		樁頭位移					✓ (II)
		基樁撓曲				✓ (II)	✓(III)
		基樁剪力				✓ (II)	✓(III)
		拉拔力				✓ (II)	✓(III)
		軸壓力				✓ (II)	✓(III)
上部結構		防落長度					✓(II)
		支承剪力			✓ (II)	✓(III)	✓(III)
		帽梁剪力				✓ (II)	✓(III)
		帽梁彎矩			✓ (II)	✓(III)	✓(III)

(II):475年回歸期地震　(III):2500年回歸期地震

2 橋梁損傷評估

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 4:計算各元件、構件在各損傷等級之超越機率(續)

以1.橋柱性能為例

以各損傷等級下的譜位移值作為損傷等級區分的界線($\mu_{R1},\mu_{R2},\mu_{R3},\mu_{R4}$)，以側推得知的譜位移值作為一平均值($\mu_S$)，並假設界線值與譜位移皆為常態分佈，變異係數為0.1及0.2，將譜位移大於各損傷等級界線值的機率作為橋柱性能各損傷等級的超越機率。

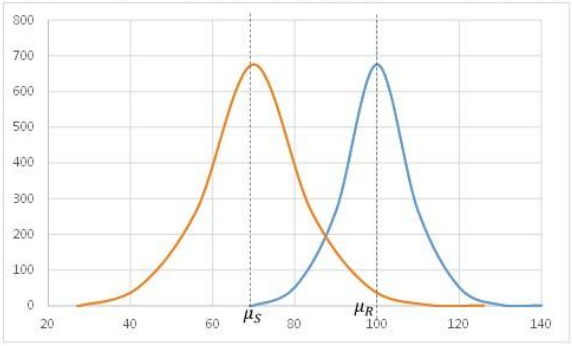
$\mu = \mu_R - \mu_S$

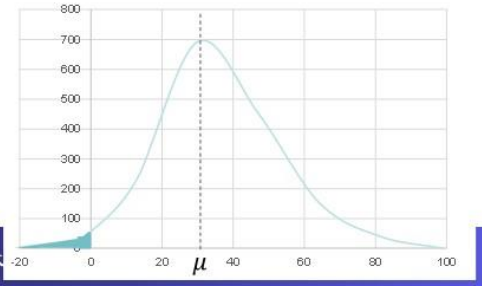
$\mu < 0$表示發生了超越的狀況

2 橋梁損傷評估

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 4:計算各元件、構件在各損傷等級之超越機率(續)





假設界線值R與譜位移值S皆為常態分佈

$\mu_R = 100, \sigma_R = 0.1\mu_R = 10$

$\mu_S = 70, \sigma_S = 0.2\mu_S = 14$

計算超越機率

$\mu = \mu_R - \mu_S = 30$

$\sigma = \sqrt{\sigma_R{}^2 + \sigma_S{}^2}$

$= \sqrt{10^2 + 14^2}$

$= 17.20465$

$\mu<0$, 發生了超越的狀況

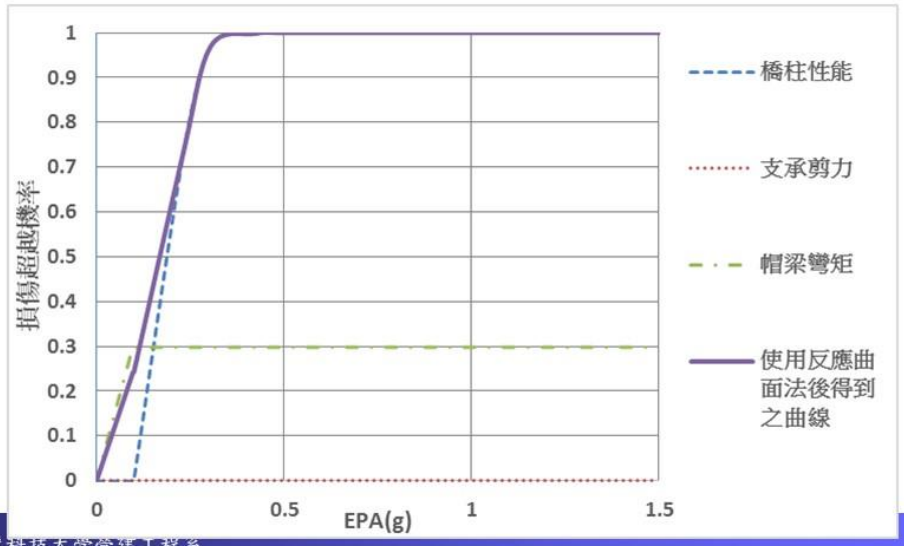
$P(\mu<0)$, 超越機率

2 橋梁損傷評估

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 5:使用反應曲面法結合各元件、構件之各損傷等級超越機率

以中度損傷之損傷超越機率為例



2 橋梁損傷評估

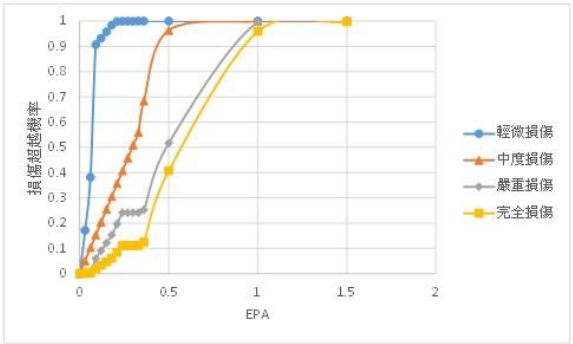
第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

STEP 6:擷取各損傷等級超越機率曲線上各EPA對應之損傷超越機率值作為案例庫之輸出因子

橋梁側推分析時，為一個循序漸進的發展，因此，可依SAP2000定義之各個節點之EPA值，擷取案例輸出因子。

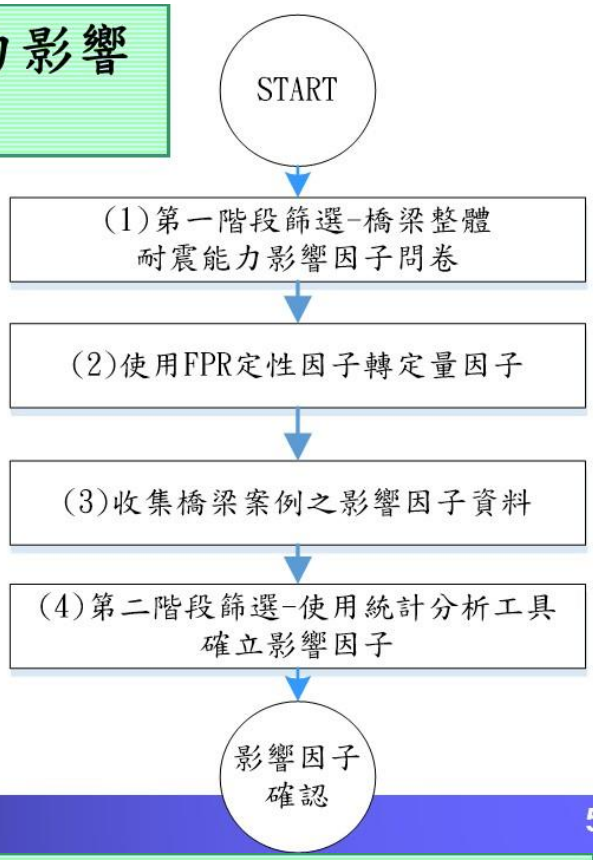
每個損傷各16個對應值

EPA(g)	輕微損傷	中度損傷	嚴重損傷	完全損傷
0	0	0	0	0
0.03	0.17063	0.05088	0.00306	0.00052
0.06	0.38125	0.10176	0.00718	0.0013
0.09	0.90694	0.15264	0.05857	0.01689
0.12	0.93245	0.20352	0.08994	0.0316
0.15	0.95797	0.2544	0.12131	0.04632
0.18	0.98348	0.30527	0.15268	0.06103
0.21	0.99884	0.35615	0.19603	0.08367
0.24	0.99955	0.40703	0.24073	0.11023
0.27	0.99968	0.45791	0.24082	0.11054
0.3	0.99981	0.50879	0.24091	0.11084
0.33	0.99994	0.55967	0.241	0.11115
0.36	0.99996	0.68344	0.25226	0.12434
0.5	0.99999	0.96394	0.51711	0.40781
1	0.99999	0.99982	0.99572	0.95879
1.5	0.99999	0.99998	0.99969	0.99739



可在107年度計畫中計算橋梁通行失敗機率

4 橋梁整體耐震能力影響因子確認



4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

TBMS基本資料表，共計107個欄位

橋梁名稱	合約編號	計畫洪水位(EL.)	橋尾GPS經度	橋基保護工法	防落橋長度
使用狀態	交流/匝道	計畫河寬(M)	橋尾GPS緯度	橋塔材質	設計水平地表加速度(G)
橋梁編號	匝道編號	計畫堤頂高程(EL.)	結構型式	橋塔型式	設計垂直地表加速度(G)
設施種類	改道長度	設計河床高程(EL.)	支撐端型式	主纜索型式	GIS座標X
管理機關	設計單位	設計橋梁出水高(M)	主梁材質	吊索型式	GIS座標Y
養護工程處	監造單位	橋梁總長(M)	主梁型式	吊索佈置型式	SSI
養護工務段	施工單位	A1進橋版長度(M)	鋼構接合型式	索面系統型式	CI
所在縣市	是否有竣工圖	A2進橋版長度(M)	橋梁型式	索面佈置型式	
所在區鄉	竣工圖說保存地點	最大淨寬(M)	橋面版材質	拱上結構型式	
道路等級	檢測週期(月/次)	最小淨寬(M)	鋪面材質	橋面版位置	
路線	跨越物體	橋版投影面積(M^2)	伸縮縫型式	拱圈材質	
橋頭里程(K)	年平均每日交通量	總車道數	支承型式	橫撐材質	
橋頭里程(M)	參考地標	總橋孔數	橋台型式	吊材材質	
橋尾里程(K)	是否為跨河橋	最大跨距(M)	橋台基礎型式	立柱材質	
橋尾里程(M)	跨越河川類別	跨距分配	翼牆/擋土牆型式	鋼纜型式	
竣工年	河川管理單位	最高橋墩高度	橋墩材質	錨定裝置	
竣工月	河川名稱	最低橋上淨高(M)	橋墩型式	設計活載重	
最近維修年	上游500公尺構造物	最低橋下淨高(M)	橋墩基礎型式	地盤種類	
最近維修月	下游500公尺構造物	橋頭GPS經度	橋墩最淺基礎深度(M)	防震設施	
造價	上游最近水位站	橋頭GPS緯度	橋墩最深基礎深度(M)	設計震度	

與專家訪談後，挑選出相關因子

	影響因子	
1	振動單元數	定量
2	橋長	定量
3	橋寬	定量
4	垮數	定量
5	設計水平加速度	定量
6	歪斜角	定量
7	竣工年(橋齡)	定量
8	基樁裸露深度	定量
9	防落長度	定量
10	支承裝置狀況	定量
11	橋梁座標	定量
12	單垮最大垮距	定量
13	土壤液化類別	定量
14	橋墩墩體/帽梁狀況	定量
15	地盤種類	定量
16	柱高	定量
17	橋梁結構型態	定性
18	橋梁主梁型式	定性
19	橋墩型式	定性
20	橋墩基礎型式	定性
21	橋台型式	定性
22	橋台基礎型式	定性
23	橋梁分類	定性
24	支承種類	定性
25	防落設施種類	定性

4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

(1)第一階段篩選-橋梁整體耐震能力影響因子問卷

- 橋梁相關專家進行影響因子篩選問卷分析

(2)收集橋梁案例之影響因子資料

- 收集案例橋梁之屬性因子

(3)使用模糊偏好關係(FPR)量化定性因子

- 以FPR將定性因子量化，包含支承種類、橋梁結構型態、主梁型式、橋墩型式、橋墩基礎型式、橋台型式、橋台基礎型式、橋梁分類、防落設施種類等。

(4)第二階段篩選-使用統計分析工具確認影響因子

- 以1.主成分分析法、2.相關係數分析、3.類神經網路，進行因子篩選。

4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

體耐震能力評估模式擬定

	項目	MIN	MAX	AVERAGE	STDEV
1	振動單元數	0	10	5.861111	2.101696
2	橋長	0	10	5.83	2.715956
3	橋寬	0	10	5.747556	2.573018
4	垮數	0	10	5.680444	2.18797
5	設計水平加速度	0	10	8.385778	2.28937
6	歪斜角	0	10	6.343111	2.222391
7	竣工年(橋齡)	0	10	5.501778	2.673307
8	基樁裸露深度	0	10	7.263333	2.694429
9	防落長度	0	7.5	3.125	2.848329
10	支承裝置狀況	5	10	8.839286	1.864669
11	[illegible]	0	10	[illegible]	[illegible]
12	單垮最大垮距	0	10	7.274889	2.173504
13	土壤液化類別	2.5	10	7.944444	2.025286
14	橋墩墩體/帽梁狀況	0	10	7.767857	3.029446
15	地盤種類	2.5	10	7.834222	2.043665
16	柱高	5	10	8.125	1.750687
17	橋梁結構型態	2.5	10	7.924667	1.928396
18	橋梁主梁型式	0	10	5.777111	2.834037
19	橋墩型式	2.5	10	7.591778	2.250659
20	橋墩基礎型式	3.75	10	6.846444	2.417022
21	橋台型式	0	10	5.108444	2.079498
22	橋台基礎型式	3.75	10	5.986222	2.413902
23	橋梁分類	0	10	5.970444	2.355792
24	支承裝置種類	0	10	7.138222	2.324591
25	防落設施種類	0	7.5	5.319111	2.816162

(1)第一階段篩選-橋梁整體耐震能力影響因子問卷

- 問卷對象:橋梁相關專家，學士7位，碩士33位，博士5位。
- 透過與研究主題有關的專業人士對問卷內容提供建議決定25個因子進行影響因子篩選問卷分析，

問卷結果

平均分數高於3分之因子共24個。

4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

(4)收集橋梁案例之影響因子資料

本階段收集17座案例橋梁之因子資料。

定量因子	定量單位	資料來源	定性因子	資料來源
振動單元數	個	TELES	支承種類	TELES
橋長	M	TELES	橋梁結構型態	TELES
橋寬	M	TELES	橋梁主梁型式	TELES
垮數	個	TELES	橋墩型式	TELES
設計水平加速度	g	TELES	橋墩基礎型式	TELES
歪斜角	角度	TELES	橋台型式	TELES
竣工年	年	TELES	橋台基礎型式	TELES
基樁裸露深度	M	TELES	橋梁分類	TELES
防落長度	M	TBMS	防落設施種類	TELES
支承裝置狀況	D.E.R.U分數	TBMS	地盤種類	TBMS
單垮最大垮距	M	TELES		
土壤液化類別	類別編號	TELES		
橋墩墩體/帽梁狀況	D.E.R.U分數	TBMS		

4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

(3)使用FPR量化定性因子

以FPR將9個定性因子量化，包含支承種類、橋梁結構型態、主梁型式、橋墩型式、橋墩基礎型式、橋台型式、橋台基礎型式、橋梁分類、防落設施種類。

橋梁結構型態	Total	Weight	Rank
梁橋（簡支式）	0.9546	0.1591	4
梁橋（連續式）	1.1004	0.1834	1
桁架橋	0.9312	0.1553	5
拱橋	1.0686	0.1781	2
斜張橋	1.0124	0.1687	3
吊橋	0.9308	0.1551	6
	6.0000	1.00	

橋梁種類	Total	Weight	Rank
單垮橋	1.0285	0.1469	3
多垮簡支橋－單柱橋墩	0.8098	0.1157	7
多垮簡支橋－架牆式橋墩	1.1066	0.1581	2
多垮簡支橋－墊式橋墩	0.9236	0.1319	6
多垮連續橋－單柱橋墩	0.9775	0.1396	5
多垮連續橋－架構式橋墩	1.1505	0.1644	1
多垮連續橋－墊式橋墩	1.0035	0.1434	4
	7	1	

防落設施	Total	Weight	Rank
無防落設施	0.6603	0.1321	5
鋼製止震塊	1.0588	0.2118	3
RC止震塊	1.1156	0.2231	2
防震拉桿	1.1444	0.2289	1
剪力鋼棒	1.0208	0.2042	4
	5	1	

橋墩型式	Total	Weight	Rank
無橋墩（單垮）	1.3867	0.3492	1
單柱式	0.8128	0.2032	3
架構式	1.1002	0.2751	2
墊式	0.6903	0.1726	4
	4	1	

橋梁主梁型式	Total	Weight	Rank
I 型梁	1.0363	0.2073	2
T 型梁	0.9613	0.1923	4
U 型梁	0.8563	0.1713	5
箱型梁	1.1629	0.2326	1
版梁	0.9832	0.1966	3
	5.000	1.000	

橋台基礎	Total	Weight	Rank
無橋台基礎	0.8220	0.2055	4
直接基礎	0.9240	0.2310	3
樁基礎	1.2029	0.3007	1
沉箱基礎	1.0511	0.2628	2
	4	1	

橋台型式	Total	Weight	Rank
無橋台	0.9809	0.1635	5
重力式	0.8705	0.1451	6
懸臂式	1.0287	0.1715	3
扶墊式	1.0526	0.1754	2
鋼構式	0.9969	0.1661	4
倚神架式	1.0704	0.1784	1
	6	1	

橋墩基礎	Total	Weight	Rank
無橋墩基礎	1.0782	0.2695	2
直接基礎	0.7715	0.1929	4
樁基礎	1.1498	0.2874	1
沉箱基礎	1.0005	0.2501	3
	4	1	

支承種類	Total	Weight	Rank
無支承	0.6935	0.1734	4
合成橡膠支承	1.0273	0.2568	3
鋼製支承	1.1384	0.2846	2
盤式支承	1.1408	0.2852	1
	4	1	

4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

(4)第二階段篩選-使用統計分析工具確認影響因子

	因子欄位	主成分分析法	相關係數分析	類神經網路
1	振動單元數	◎		◎
2	橋長	◎		◎
3	橋寬	◎	◎	◎
4	垮數	◎		◎
5	設計水平加速度	◎	◎	
6	歪斜角			
7	竣工年(橋齡)			◎
8	基樁裸露深度			
9	防落長度	◎		◎
10	支承裝置狀況	◎	◎	
12	單垮最大垮距		◎	◎
13	土壤液化類別		◎	
14	橋墩墩體/帽梁狀況	◎		
15	地盤種類			
16	柱高		◎	
17	橋梁結構型態	◎	◎	
18	橋梁主梁型式	◎	◎	
19	橋墩型式	◎	◎	◎
20	橋墩基礎型式	◎		◎
21	橋台型式	◎	◎	
22	橋台基礎型式	◎		
23	橋梁分類			
24	支承種類		◎	
25	防落設施種類			

本研究階段應用主成分分析法、相關係數分析、類神經網路，對案例影響因子進行因子篩選。

各方法重要性高之13個因子作為篩選後之因子結果。

	影響因子	
1	振動單元數	定量
2	橋長	定量
3	橋寬	定量
4	垮數	定量
5	設計水平加速度	定量
6	防落長度	定量
7	支承裝置狀況	定量
8	單垮最大垮距	定量
9	橋梁結構型態	定性
10	橋梁主梁型式	定性
11	橋墩型式	定性
12	橋墩基礎型式	定性
13	橋台型式	定性

61

4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

以因子篩選結果之13個因子及鋼筋腐蝕率、損傷等級、EPA等必要因子，確認16個橋梁整體耐震能力影響因子。

	影響因子
1	振動單元數
2	橋長
3	橋寬
4	垮數
5	設計水平加速度
6	防落長度
7	支承裝置狀況
8	單垮最大垮距
9	橋梁結構型態
10	橋梁主梁型式
11	橋墩型式
12	橋墩基礎型式
13	橋台型式

因子項目	14.鋼筋腐蝕率				
欄位	0%	5%	10%	20%	35%
數值	0	5	10	20	35
因子項目	15.損傷等級				16.EPA
欄位	輕微損傷	中度損傷	嚴重損傷	完全損傷	側推分析各STEP之EPA
數值	1	2	3	4	EPA值

4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

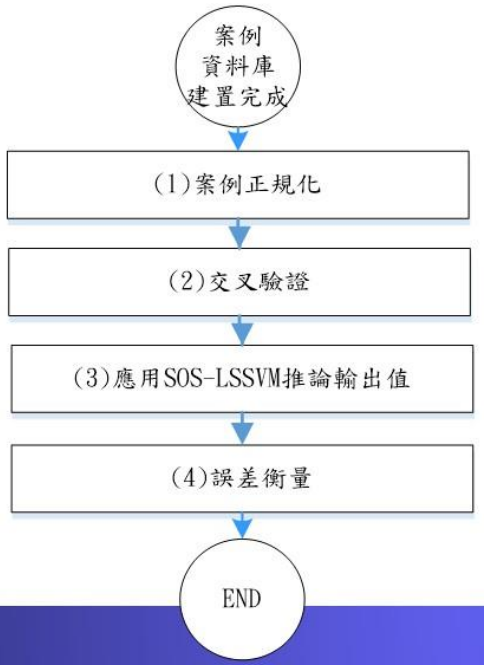
第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

所收集17座橋梁案例，41筆橋梁案例模型(僅有6座橋含5種腐蝕率資料，6×5+11=41)，共收集41×60=2460筆資料建立案例資料庫。

防落長度	納長	橋寬	跨數	振動單元數	設計水平加速度	單跨最大跨徑	橋梁縱橋型態	橋梁主梁型式	橋墩型式	橋墩基礎型式	橋台型式	支承狀況	鋼筋腐蝕率	損傷等級	EPA	機率
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.058229	0.331538
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.0640486	0.5
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.0890003	0.906089
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.197321	0.998214
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.216223	0.999151
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.219633	0.999248
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.231334	0.999493
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.233072	0.99952
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.331018	0.999947
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.396493	0.999978
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.462037	0.999988
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.527624	0.999993
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.593239	0.999995
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.658875	0.999996
0.155882	0.154539	0.783333	0.14172	0.3026	0.946638	0.05	0.05	0.287273	0.159094	0.207254	0.279055	0.284598	0	1	0.680978	0.999997
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.000274	3.49E-23
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.205705	0.001432
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.220454	0.03154
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.226751	0.033061
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.2610188	0.046048
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.2973188	0.061269
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.318485	0.120069
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.3409863	0.21352
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.364493	0.22713
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.3931886	0.247927
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.418	0.282585
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.4390694	0.341614
0.515882	0.137725	0.61111	0.147452	0.05	0.93	0.05	0.05	0.581818	0.159094	0.207254	0.203199	0.256818	0	3	0.479543	0.34126

4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定



4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

SOS-LSSVM訓練結果的平均誤差是5.77%，而測試的平均誤差是18.14%

	Training				Testing			
	MAPE	MAE	RMSE	R	MAPE	MAE	RMSE	R
Fold1	5.28%	0.0145	0.0012	0.9964	15.66%	0.0427	0.0081	0.972
Fold2	6.39%	0.0157	0.0014	0.9960	16.86%	0.0410	0.0062	0.9814
Fold3	5.58%	0.0179	0.0016	0.9954	15.16%	0.0453	0.0076	0.9766
Fold4	5.96%	0.0165	0.0014	0.9959	17.87%	0.0393	0.0087	0.9712
Fold5	5.65%	0.0156	0.0013	0.9961	16.24%	0.0414	0.0077	0.9771
Fold6	5.67%	0.0162	0.0014	0.9958	20.88%	0.0411	0.0071	0.9797
Fold7	5.27%	0.0150	0.0013	0.9961	19.81%	0.0383	0.0059	0.9836
Fold8	5.64%	0.0165	0.0015	0.9956	21.85%	0.0368	0.0068	0.9798
Fold9	5.59%	0.0159	0.0014	0.9959	24.11%	0.0437	0.0107	0.9689
Fold10	6.69%	0.0185	0.0017	0.9951	12.94%	0.0418	0.0074	0.9783
Average	5.77%	0.0162	0.0014	0.9958	18.14%	0.0412	0.0076	0.9768

4 橋梁整體耐震能力影響因子確認

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式擬定

SOS-LSSVM的輸出結果在4個誤差衡量值的表現上皆優於其他六種模式，SOS-LSSVM模式更能做出準確的預測

模式	MAPE(%)		R		MAE		RMSE		RI_1	
	training	testing	training	testing	training	testing	training	testing	training	testing
Regression	117.33	120	0.7468	0.744	0.183	0.2009	0.0545	0.0596	0.584	0.5709
BPNN	39.66	46.53	0.9459	0.9275	0.0835	0.0940	0.1222	0.1386	0.8384	0.8099
SVM	102.38	113.66	0.8134	0.7906	0.1648	0.1812	0.2285	0.2509	0.6089	0.5671
LSSVM	73.28	76.30	0.8819	0.8736	0.1334	0.1373	0.1334	0.1373	0.7133	0.7015
ESIM	83.79	78.89	0.8457	0.8862	0.1297	0.1220	0.2037	0.1962	0.6756	0.7060
ELSIM	26.64	57.87	0.9470	0.8654	0.0505	0.0970	0.1022	0.1559	0.8890	0.7618
SOS-LSSVM	5.77	18.14	0.99583	0.97684	0.01622	0.04116	0.0374	0.0412	0.9723	0.9198

參 執行步驟-第五項 橋梁振動檢測案例分析

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

2 建立以微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

(1) 試驗日期

本年度2座橋梁頻率檢測對象

橋梁試驗對象	試驗日期(洪水前)	試驗日期(洪水後)
南雲大橋	2017/6/23	2017/10/13
溪州大橋	2017/6/23	2017/10/13

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(1) 試驗對象

南雲大橋(墩柱14)

溪州大橋(墩柱30)

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測
第五項-橋梁振動檢測案例分析

南雲大橋(帽梁)量測結果 (pier 14)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向 (x)	2.93	2.89	2.99	2.89
水流方向 (y)	2.47	2.44	2.79	2.63

南雲大橋(帽梁)量測結果 (pier 9)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向 (x)	3.04	3.04	3.01	2.87
水流方向 (y)	2.68	2.68	2.42	2.50

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

第五項-橋梁振動檢測案例分析

南雲大橋(橋面板)量測結果 (pier 14)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向 (x)	2.89	2.96	2.99	2.86
水流方向 (y)	2.42	2.44	7.09*	2.59

*此時橋面板上的速度計已損壞

南雲大橋(橋面板)量測結果 (pier 9)

	2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
車行方向 (x)	2.68	3.03	2.96	2.88
水流方向 (y)	2.41	2.26	8.05*	2.50

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

第五項-橋梁振動檢測案例分析

溪州大橋(帽梁)量測結果 (pier 36)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	2.90	1.91
水流方向 (y)	2.38	2.43

溪州大橋(帽梁)量測結果 (pier 30)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	1.93	2.68
水流方向 (y)	1.98	2.16

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

第五項-橋梁振動檢測案例分析

溪州大橋(橋面板)量測結果(pier 36)

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	2.55	1.77
水流方向 (y)	2.10	2.31

溪州大橋(橋面板)量測結果(pier 30) *此時橋面板上的速度計已損壞

	2017/6/23	2017/11/3
車行方向(x)	1.53	2.01
水流方向 (y)	8.38*	2.16

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

第五項-橋梁振動檢測案例分析

南雲大橋:

- **除了橋面板(平行水流方向)因儀器毀損外，其餘數值均與前幾次所得結果相差不大**

溪州大橋:

- **溪州大橋的主頻呈現較高的變異性主因在量測過程中發現，其頻率有兩個峰值**

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

第五項-橋梁振動檢測案例分析

於橋面板處所取的的頻率簡化未來檢測作業之分析結果

南雲大橋水流方向頻率比值比較(pier 14)

	2016/6/13(洪水前)	2016/10/3(洪水後)	比值
帽梁	2.47 (0.05)*	2.44 (0.07)	1.010
橋面板	2.42 (0.06)	2.44 (0.07)	0.991
Z-test**	-	-	相等

*COV **資料比數~30

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

第五項-橋梁振動檢測案例分析

於橋面板處所取的的頻率簡化未來檢測作業之分析結果

南雲大橋水流方向頻率比值比較(pier 14)

	2016/6/13(洪水前)	2017/11/3(洪水後)	比值
帽梁	2.47 (0.05)	2.63 (0.17)	0.94
橋面板	2.42 (0.06)	2.59 (0.02)	0.93
Z-test	-	-	相等

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

第五項-橋梁振動檢測案例分析

於橋面板處所取的的頻率簡化未來檢測作業之分析結果

南雲大橋水流方向頻率比值比較(pier 9)

	2016/6/13(洪水前)	2016/10/3(洪水後)	比值
帽梁	2.68 (0.01)	2.68 (0.1)	1.000
橋面板	2.41 (0.15)	2.26 (0.075)	1.066
Z-test	-	-	相等

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

第五項-橋梁振動檢測案例分析

於橋面板處所取的的頻率簡化未來檢測作業之分析結果

南雲大橋水流方向頻率比值比較(pier 9)

	2016/6/13(洪水前)	2017/11/3(洪水後)	比值
帽梁	2.68 (0.01)	2.50 (0.18)	1.07
橋面板	2.41 (0.15)	2.50 (0.18)	0.96
Z-test	-	-	相等

1 增加2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測

第五項-橋梁振動檢測案例分析

於橋面板處所取的的頻率簡化未來檢測作業之分析結果

溪州大橋水流方向頻率比值比較(pier 36)

	2017/6/23	2017/11/3	比值
帽梁	2.38 (0.36)	2.43 (0.57)	0.98
橋面板	2.10 (0.28)	2.31 (0.57)	0.91
Z-test	-	-	相等

結論:例次試驗均顯示於帽梁或橋面版所取得的頻率並無顯著差異

2 建立橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統

第五項-橋梁振動檢測案例分析

(a) 微型加速度計與微控制器開發

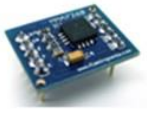
目前市售的微型加速度計

SANLIEN 00EA-SL

MicroStrain G-Link series

Sparkfun ADXL335

ITEM-29



MMA8451Q

微控制器(Micro-controller Unit，MCU)

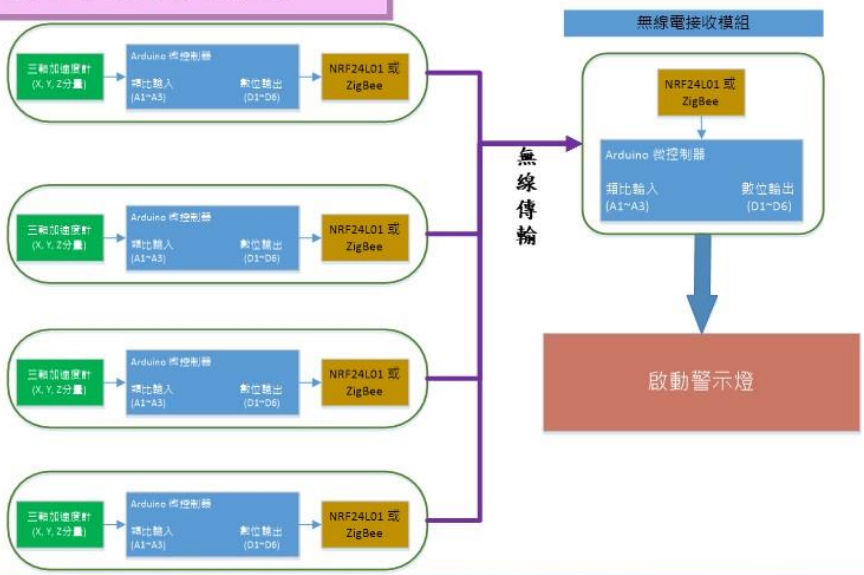
Arduino

Raspberry Pi

2 建立橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統

第五項-橋梁振動檢測案例分析

(b) 無線傳輸與警報系統

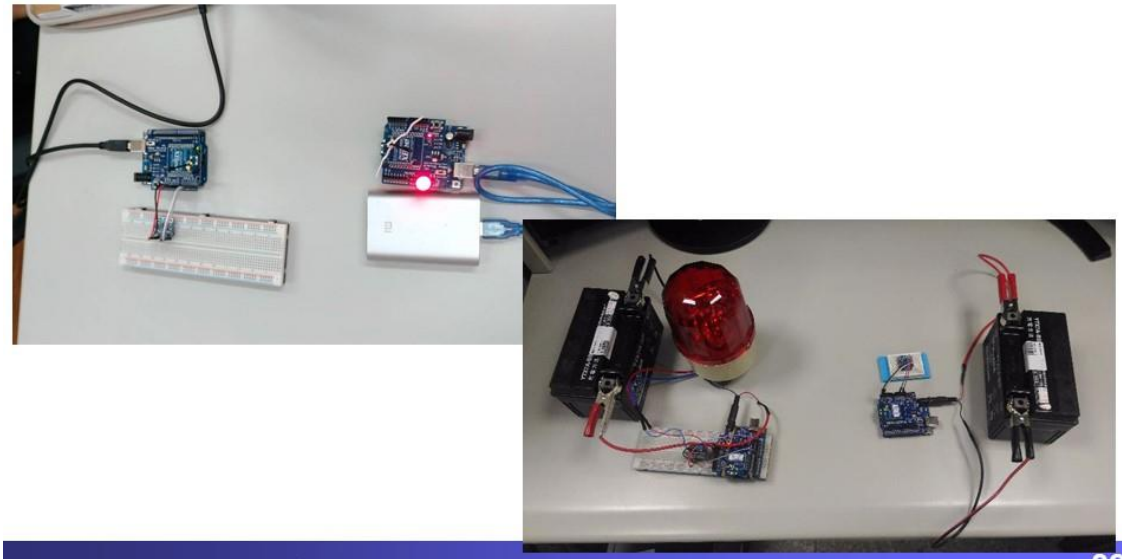


加速度量測與無線電發射模組

2 建立橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統

第五項-橋梁振動檢測案例分析

(c) 開發完成之系統-1

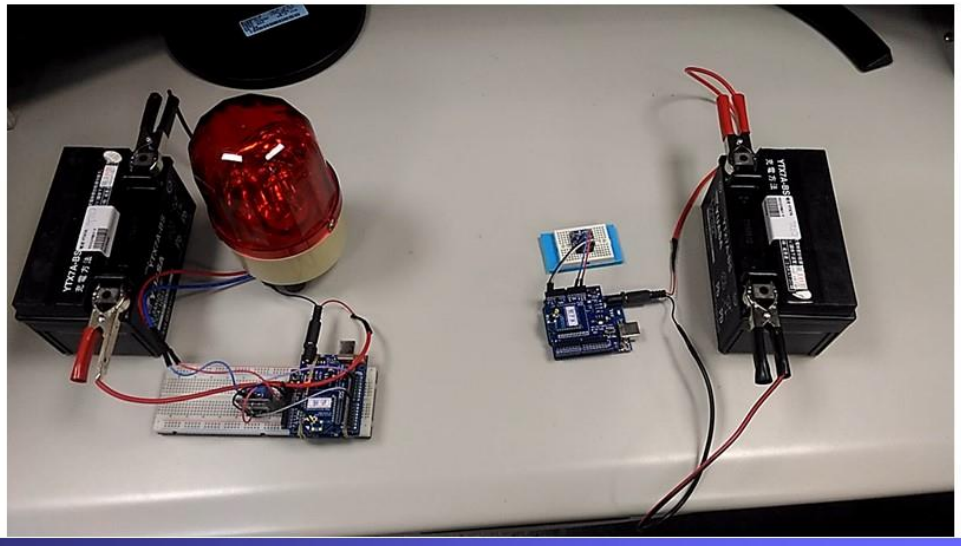


2 建立橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統

第五項-橋梁振動檢測案例分析

(c) 開發完成之系統-2

操作影片



參 執行步驟-第六項

確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

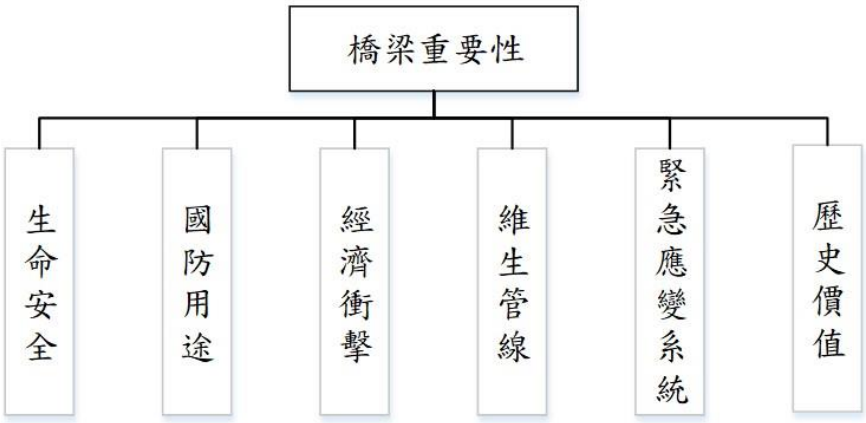
1 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式影響因子

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

1 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式影響因子

第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

參考交通部報告，初步擬定橋梁重要性評估需考量因子(如交通量、改道長度、橋梁長度等)再加上橋梁通行失敗機率。



橋梁重要性指標層級圖[蔣偉寧等，2004]

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

台灣科技大學營建工程系 多目標地震災後橋梁巡檢旅運路網模式之流程圖

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式
第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

- 基本假設：

1. 已知所有橋梁基本資料

   透過臺灣地區橋梁管理系統(TBMS)取得各橋梁資料(如地理位置、橋孔數、橋梁規模等)，且其檢測作業方式也有標準化之流程，故可得知橋梁檢測點間之旅行時間。

2. 橋梁特別檢測作業期程為震後期間之可工作時數

   根據公路養護規定所提出，依中央氣象局之地震報告內震度達5級地區，於5小時內回報工務段所能掌握之轄內橋梁初步受災及通阻情形，以研判交通管制措施之必要性。

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式
第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

3. 第一時間出發點之位置為工務段

   所有檢測小組在任務開始第一時間於工務段出發，檢測作業會不間斷持續執行，因此檢測小組在每次檢測完的橋梁，直接前往下一座橋梁。

4. 車輛行駛速度採平均速率(60km/hr)

   假設各檢測小組車輛行駛速度為平均速率(60km/hr)，各橋梁檢測點間之旅行時間亦為平均旅行時間。

5. 所有檢測人員作業效率相同

   假設全部的檢測員對檢測工作的熟練度相同，不會因為個人的經驗與資歷而有檢測效率之差別。

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

- 目標函數

目標式1(總旅運距離D最小)：

$$Min\ \ D=\sum_{k=1}^{m}\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n}d_{ij}^{k}\times F_{ij}^{k}$$

目標式2(高通行失敗機率優先巡檢P)：

$$Min\ \ P=\sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}p_i^k\times r_i^k, r^k=\{a_1,a_2\dots a_n\}$$

$$a_i=\begin{cases}0, 第i座橋未巡檢\\ 1\sim n, 第i座橋的巡檢順序\end{cases}$$

目標式3(高橋梁重要性優先巡檢W)：

$$Min\ W=\sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}w_i^k\times r_i^k, r^k=\{a_1,a_2\dots a_n\}$$

符號說明:

n = n座橋

m = m組檢測組

i = 1~n座橋

i = 0為工務段

j = 1~n座橋

k = 1~m組檢測組

d_{ij}^k= 第k組巡檢小組從第i座橋至j座橋之旅運距離

F_{ij}^k= 第k組在第i座橋至j座橋巡檢次數

p_i^k=第k組巡檢小組檢測第i座橋之通行失敗機率

w_i^k=第k組巡檢小組檢測第i座橋之重要度

r_i^k=第k組巡檢小組檢測第i座橋之檢測順序

$$a_i=\begin{cases}0, 第i座橋未巡檢\\ 1\sim n, 第i座橋的巡檢順序\end{cases}$$

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

限制式1(各組總巡檢時間≤5小時)：

$$\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n}d_{ij}^{k}\times F_{ij}^{k}\div V\le 5(hr), k\in m$$

限制式2(每座橋僅檢測一次)：

$$\sum_{k=1}^{m}\sum_{i=0}^{n}F_{ij}^{k}=1, j\in n$$

- 符號說明

d_{ij}^k= 第k組巡檢小組從第i座橋至j座橋之旅運距離

V = $60(km/hr)$

F_{ij}^k= 第k組在第i座橋至j座橋巡檢次數

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

- 某一地震事件發生，全台橋梁通行失敗機率大於Ay對應門檻值之橋梁有六座(n=6)。
- 兩組巡檢人員進行特別巡檢(m=2)。

以下為測試橋梁

橋梁	第二大雅橋(A)	豐里橋(B)	大里橋(C)	新民橋(D)	東勢大橋(E)	中彰大橋(F)
橋梁重要度	41.53	15.00	21.14	35.76	84.56	98.57
通行失敗機率	75%	80%	60%	50%	70%	85%
Ay對應通行失敗機率	65%	75%	45%	40%	68%	70%

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

距離矩陣表(使用Google API計算兩點間距離矩陣)(單位:m)

	工務段(O)	第二大雅橋(A)	豐里橋(B)	大里橋(C)	新民橋(D)	東勢大橋(E)	中彰大橋(F)
工務段(O)	0	23800	33600	18100	5500	42600	10100
第二大雅橋(A)	23800	0	16900	22400	18300	25900	23100
豐里橋(B)	33600	16900	0	21500	26400	11900	33500
大里橋(C)	18100	22400	21500	0	12200	38500	30300
新民橋(D)	5500	18300	26400	12200	0	42300	18600
東勢大橋(E)	42600	25900	11900	38500	42300	0	42400
中彰大橋(F)	10100	23100	33500	30300	18600	42400	0

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

- 步驟一：

  MOSOS產出初始順序表Gk, x（第k個巡檢組的第x批順序）

  $G_{1,1}$=（ O D A F ） $G_{2,1}$=（ O C B E ）

- 步驟二：

  Gk, x表填入檢測矩陣　　迄(j)

起(i)

	A	B	C	D	E	F
O	0	0	0	1	0	0
A	0	0	0	0	0	1
B	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0
D	1	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0

起(i)

	A	B	C	D	E	F
O	0	0	1	0	0	0
A	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	1	0
C	0	1	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

- 依步驟二繪製多層路網

	O	A	B	C	D	E	F
O	-	0	0	0	1	0	0
A	-	0	0	0	0	0	1
B	-	0	0	0	0	0	0
C	-	0	0	0	0	0	0
D	-	1	0	0	0	0	0
E	-	0	0	0	0	0	0
F	-	0	0	0	0	0	0

(第1層)

(第2層)

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

- 步驟三：

每座橋只會被巡檢一次

檢核式：

$$\sum_{k=1}^{m=2}\sum_{i=0}^{n=6} F_{ij}^{k} = 1, j \in n$$

迄(j)

起(i)	A	B	C	D	E	F
O	0	0	1	1	0	0
A	0	0	0	0	0	1
B	0	0	0	0	1	0
C	0	1	0	0	0	0
D	1	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0

F → 1 1 1 1 1 1 ⇨ 巡檢次數

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

- 步驟四：

依照順序表代入距離

目標式1：

$$Min\ \ D = \sum_{k=1}^{m}\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n} d_{ij}^{k} \times F_{ij}^{k}$$

第一組旅運距離:

$d_{0\,4}^{1} \times F_{0\,4}^{1} = 5500 \times 1$
$d_{4\,1}^{1} \times F_{4\,1}^{1} = 18300 \times 1$
$d_{1\,6}^{1} \times F_{1\,6}^{1} = 23100 \times 1$
$d_{0\,3}^{1} \times F_{0\,3}^{1} = 18100 \times 0$
$d_{3\,2}^{1} \times F_{3\,2}^{1} = 21500 \times 0$
$d_{2\,5}^{1} \times F_{2\,5}^{1} = 11900 \times 0$
⋮
$d_{nn}^{n} \times F_{nn}^{k}$

第二組旅運距離:

$d_{0\,4}^{2} \times F_{0\,4}^{2} = 5500 \times 0$
$d_{4\,1}^{2} \times F_{4\,1}^{2} = 18300 \times 0$
$d_{1\,6}^{2} \times F_{1\,6}^{2} = 23100 \times 0$
$d_{0\,3}^{2} \times F_{0\,3}^{2} = 18100 \times 1$
$d_{3\,2}^{2} \times F_{3\,2}^{2} = 21500 \times 1$
$d_{2\,5}^{2} \times F_{2\,5}^{2} = 11900 \times 1$
⋮
$d_{nn}^{n} \times F_{nn}^{k}$

旅運總距離D= $46900 + 51500 = 98400$

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

- 步驟五：

通行失敗機率排序

目標式2：

$$Min\ \ P=\sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}p_i^k\times r_i^k, r^k=\{a_1,a_2\dots a_n\}$$

$$a_i=\begin{cases}0,\text{第}i\text{座橋未巡檢}\\1\sim n,\text{第}i\text{座橋的巡檢順序}\end{cases}$$

$r^1=[1,2,3,0,0,0]$　　$r^2=[0,0,0,1,2,3]$

$p_4^1\times r_4^1=50\times 1, p_1^1\times r_1^1=75\times 2, p_6^1\times r_6^1=85\times 3\cdots$

$p_3^2\times r_3^2=60\times 1, p_2^2\times r_2^2=80\times 2, p_5^2\times r_5^2=70\times 3\cdots$

高通行失敗機率優先巡檢順序P ：

$(50+150+255)+(60+160+210)=885$

2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

- 步驟六：

橋梁重要度權重排序

目標式3：

$$Min\ W=\sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}w_i^k\times r_i^k, r^k=\{a_1,a_2\dots a_n\}$$

$$a_i=\begin{cases}0,\text{第}i\text{座橋未巡檢}\\1\sim n,\text{第}i\text{座橋的巡檢順序}\end{cases}$$

$r^1=[1,2,3,0,0,0]$　　$r^2=[0,0,0,1,2,3]$

$w_4^1\times r_4^1=35.76\times 1, w_1^1\times r_1^1=41.53\times 2, w_6^1\times r_6^1=98.57\times 3\cdots$

$w_3^2\times r_3^2=21.14\times 1, w_2^2\times r_2^2=15.00\times 2, w_5^2\times r_5^2=84.56\times 3\cdots$

高橋梁重要性優先巡檢順序W：

$(35.76+83.06+295.71)+(21.14+30.00+253.68)=719.35$

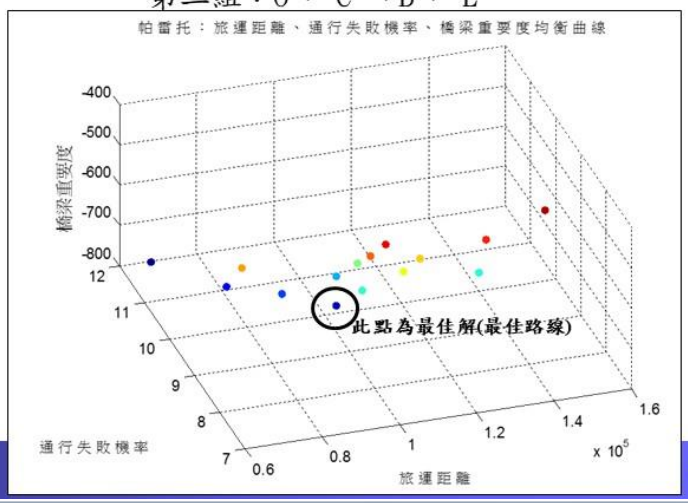
2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式
第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

- 步驟七：

帕雷托最適示意圖：

測試案例之最佳路線，第一組：O→D →A→ F；

第二組：O→ C →B→ E



2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式
第六項確認災後橋梁巡檢路線規劃模式

巡檢旅運路網結果示意圖：

參 執行步驟-第七項 TRENDS與公路總局BOBE系統介接

1 TRENDS與公路總局BOBE系統介接

2 舉辦研討會1場次，推廣系統成果

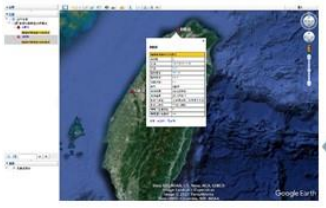
1 TRENDS與公路總局BOBE系統介接

第七項 TRENDS與公路總局BOBE系統介接

與公路總局BOBE系統維護廠商(逢甲大學與中國生產力中心團隊)初步連繫，並於2017/7/11至公路總局進行討論確認可採用Web Service交換資料，以KML(Keyhole Markup Language)為文件格式。

並已在2017/9/30提供連結

BOBE **TRENDS**



1. 橋梁地震通行失敗機率
2. 洪水安全狀態

KML(以KMZ封裝)

2 舉辦研討會1場次，推廣系統成果

第七項TRENDS與公路總局BOBE系統介接

於2017/11/23與港研中心共同舉辦研討說明會1場次，提供TRENDS系統說明。

時 間	內 容		
9:00~9:30	報 到		
9:30~9:40	開 幕 式		
論 文 研 討			
時 間	議 題	主 講 人	主 持 人
9:40~10:10	臺灣公路早期防救災決策支援系統開發建置	臺灣科技大學 鄭明淵教授	本所港研中心邱永芳 主任
10:10~10:40	公路淺層土壤邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發	成功大學 張文忠教授	公路總局養路組蔡宗 成組長
10:40~10:55	茶 敘		
10:55~11:25	感潮河段橋梁梁底檢測方式探討	大同大學 楊祝壽教授	公路總局養路組蔡宗 成組長
11:25~11:55	公路邊坡崩塌近景攝影測量自動判讀系統開發應用研究	高雄應用科技大學 李良輝教授	高公局林炳松副總工 程司
11:55~12:10	綜 合 座 談		
12:10	午 餐、賦 歸		

3

2 舉辦研討會1場次，推廣系統成果

第七項TRENDS與公路總局BOBE系統介接

運研所吳所長致詞

參與人數100人

主持人簡報

綜合討論

肆 執行進度

工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月
第一項:研究團隊組成	■	■								
第二項:TRENDS系統維護營運	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
第三項:初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構		■	※	■	■	■				
期中報告				■	※					
第四項:橋梁整體耐震能力評估模式擬定			■	■	■	■	■	※		
第五項:橋梁振動檢測案例分析		■	■	■	■	■	■	■	■	■
第六項:確認災後橋梁巡檢路線規劃模式				■	■	■	■	■	■	■
第七項:與公路總局既有系統介接						■	■	■	■	■
期末報告									■	※
工作進度估計百分比(累積數)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

伍 結論(1/2)

提升台灣公路早期防救災決策支援系統(TRENDS)實用性及穩定性。

收集鋼結構橋梁檢測評估、維修（保護）工法與延壽策略等相關文獻。初步確認鋼結構橋梁風險因子，擬定鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式

確認橋梁整體耐震能力評估方式，加入上部結構耐震能力評估指標。分析17座橋梁整體耐震能力，並建置案例庫，最後確認整體橋梁耐震能力影響因子。

伍 結論(2/2)

增加現地量測樣本數，選取2座橋梁進行災前與災後振動頻率量測，驗證模式。
擬定地震微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統。

災後巡檢路線規劃之考量因子確認，擬定巡檢路線最佳化模式。

以公路總局所開放介接之格式為前提，將系統目前成果介接至公路總局系統中，提升系統使用性。

簡報完畢

敬請指教