108-028-7B19
MOTC-IOT-107-H1DC001

公路早期防救災決策支援系統及橋梁管理模組維護

交 通 部 運 輸 研 究 所

中 華 民 國 108 年 2 月

108-028-7B19
MOTC-IOT-107-H1DC001

公路早期防救災決策支援系統及橋梁管理模組維護

著 者：謝明志、林雅雯、邱建國、
鄭明淵、廖國偉、吳育偉

交 通 部 運 輸 研 究 所

中 華 民 國 108 年 2 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橋梁管理模組維護 / 謝明志等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民 108.02
面 ; 公分
ISBN 978-986-05-8523-0(平裝)

1.交通管理 2.決策支援系統

557 108000751

公路早期防救災決策支援系統及橋梁管理模組維護

著　　者：謝明志、林雅雯、邱建國、鄭明淵、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)26587176
出版年月：中華民國 108 年 2 月
印 刷 者：采峰實業有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站
定　　價：450 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：1010800151　　ISBN：978-986-05-8523-0 (全套: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。

108

公路早期防救災決策支援系統及橋梁管理模組維護

交通部運輸研究所

GPN: 1010800151
定價 :450 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橋梁管理模組維護</td></tr>
<tr><td>國際標準書號（或叢刊號）
978-986-05-8523-0</td><td>政府出版品統一編號
1010800151</td><td>運輸研究所出版品編號
108-028-7B19</td><td>計畫編號
MOTC-IOT-107-H1DC001</td></tr>
<tr><td>本所主辦單位：港研中心
主管：朱金元
計畫主持人：林雅雯
研究人員：
聯絡電話：04-26587191
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：邱建國
協同主持人: 鄭明淵、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)2737-7535</td><td>研究期間
自 107 年 02 月
至 107 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，交通部運輸研究所已於 94、95 年辦理「交通工程防災預警系統建立之研究」，並逐年擴充建置臺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)鋼結構橋梁維護分析模式精進、(2)橋梁整體耐震能力評估模式選取一座橋梁分析、(3)橋梁振動檢測案例分析、(4)災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式模組建置。本研究成果包含已建置公路總局轄管橋梁維護策略最佳化模式，並提供可查詢之功能模組，提升使用者查詢便利性。以公路總局所轄管之橋梁-中坑高架橋為例進行橋梁整體耐震能力分析。至南雲大橋進行雨季前後振動頻率量測，並確認量測方法與外在干擾來源。最後建置橋梁災後巡檢路線規劃模組，可於線上進行巡檢路徑之規劃。

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。</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>108 年 2 月</td><td>399</td><td>450</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 Maintenance and Modules Update

ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
978-986-05-8523-0	1010800151	108-028-7B19	MOTC-IOT-107-H1DC001

DIVISION: Harbor & Marine Technology Center
DIVISION DIRECTOR:Chin-Yuan Chu
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lin Ya-Wen
PROJECT STAFF:
PHONE: (04) 26587191
FAX: (04) 26564418

PROJECT PERIOD

FROM February 2018
TO November 2018

RESEARCH AGENCY: National Taiwan University of Science and Technology , Ecological and Hazard Mitigation Engineering Research Center
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chien-Kuo Chiu
PROJECT STAFF: Cheng Min-Yuan, Guo-Wei Liao, Yu-Wei Wu
ADDRESS: #43 , Sec.4 , Keelung Rd. , Taipei , 106 , Taiwan , R.O.C
PHONE: (02)2737-7535

KEY WORDS: Bridge Seismic Evaluation、Steel Bridge Maintenance, Disaster Prevention

ABSTRACT:

Taiwan's bridges are highly prone to collapse or breakage during floods and earthquakes due to natural environmental factors. In particular, once a disaster occurs, the impact on the road is more serious, and the loss of life and property of the victims is difficult to estimate. From 2005 and 2006, the Institute of Transportation, MOTC commissioned a research project and expanded the Taiwan Road Early Nature Disaster Prevention Systems (TRENDS) year by year. Therefore, this study aims to improve TRENDS practicality and stability by adding several functions: (1) Steel bridge maintenance analysis model improvement, (2) Add one case study using bridge seismic capacity inference model, (3) Bridge health evaluation using the pier vibration frequency, (4) Post-disaster route planning model for bridge inspection. The results of this study include the optimization of the bridge maintenance strategy adopted by the Directorate General of Highways, and the provision of function that can be query to improve user accessibility. Take the Zhongkeng bridge as an example to analyze the overall seismic capacity of the bridge. The Nanyun bridge was use for vibration frequency before and after the rainy season, and the measurement method and external interference sources were confirm. Finally, the post-disaster inspection route-planning module is developed, and the inspection route can be search online.

BENEFITS AND APPLICATIONS:

The Ministry of Transportation and Communications or the bridge management department can refer to the results for policy-making.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
February, 2019	399	450	□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

橋梁管理模組維護

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 1-2

1.5 研究方法及進行步驟 1-3

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臺灣地區橋梁管理資訊系統 2-10

2.4 第二代TBMS臺灣地區橋梁管理資訊系統 2-20

2.5 臺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 2-41
2.9 巡查與檢測路線規劃相關文獻.....2-52
2.10 橋梁振動頻率評估.....2-62
2.11 沖刷造成橋梁損壞之評估 2-66
2.12 生物共生演算法(SOS).....2-67
2.13 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 2-70
2.14 確認鋼結構橋梁風險因子 2-76
2.15 文獻中鋼橋與RC橋生命週期成本評估方法 2-77
2.16 橋梁檢測與承載評定之文獻回顧 2-83
2.17 橋梁維護策略最佳化文獻回顧 2-84
2.18 橋梁維護之重要性非直接成本因子 2-85
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 至公路總局1個養護工程處進行訪談 3-17
3.6 檢核目前影響因子是否足夠推求實際橋梁現況之耐震能力.....3-23
3.7 製作系統操作手冊 3-25
第四章 鋼結構橋梁維護分析模式精進..... 4-1

4.1 建置鋼結構橋梁風險評估模式(去年度進度)..... 4-2
4.2 群橋生命週期維護策略最佳化模式(本年度進度)....4-52
4.3 橋梁風險評估模式更新模組(本年度進度).....4-63
第五章 橋梁整體耐震能力評估模式案例分析..... 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..... 5-3
5.3 案例分析..... 5-9
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
6.2 試驗結果討論與橋梁結構系統識別.....6-24
6.3 感測器規格與建議之試驗流程.....6-34
第七章 災害橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進..... 7-1
7.1 初擬災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式..... 7-2
7.2 規劃災害橋梁巡查與檢測路線規劃模式功能模組測試案例.....7-11
7.3 建置巡查與檢測路徑規劃模組.....7-22
第八章 結論與建議..... 8-1
8.1 結論..... 8-1
8.2 建議..... 8-2
8.3 預期效益與應用情形..... 8-3
參考文獻.....參-1
附錄一期中報告審查意見處理情形表.....附錄1-1

附錄二 期末報告審查意見處理情形表 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 1-4
圖1.2 研究工作項目連結圖 1-6
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.....2-19
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.....2-64
圖2.20 生態系統中的生物共生關係示意圖 2-68
圖2.21 橋梁重要性評定架構圖 2-86
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3.7 地震分析紀錄時間XML 3-16
圖3.8 公路總局應變中心訪談會議 3-17
圖3.9 公路總局第二區養護工程處會議簽到.....3-18
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 貝氏分析流程圖 4-17
圖4.8 運用橋檢資料貝氏更新 4-18
圖4.9 修正係數分布 4-24
圖4.10 改變單次維護費用流程圖 4-24
圖4.11 下降分數對應維護費用上升.....4-25
圖4.12 塗裝費用及施作費用 4-29
圖4.13 洪水維護風險機率評估流程圖 4-35
圖4.14 臺灣主要河川分布圖(水利署).....4-36
圖4.15 發生50年洪水時對應SSI指標下降 4-38
圖4.16 洪水造成維護機率蒙地卡羅計算流程圖 4-39
圖4.17 洪水維護成本分析流程圖 4-41

圖4.18 人工智慧橋梁洪水維護成本推論模式.....4-43
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)
.....4-43
圖4.20 地震造成維護機率計算流程圖.....4-45
圖4.21 地震造成維護機率蒙地卡羅計算流程圖.....4-46
圖4.22 震後結構性能修正示意圖.....4-48
圖4.23 未來損傷分級機率關係曲線.....4-48
圖4.24 地震維護成本分析程圖.....4-49
圖4.25 群橋維護成本最佳化流程圖.....4-52
圖4.26 群橋最佳化應用SOS演算法程序.....4-55
圖4.27 SOS演算法程序.....4-56
圖4.28 橋梁維護策略示意圖.....4-60
圖4.29 橋梁維護與風險管理功能.....4-61
圖4.30 設定搜尋條件.....4-61
圖4.31 刪除表單.....4-61
圖4.32 群橋維護策略搜尋條件.....4-62
圖4.33 一區工程處分析結果.....4-62
圖4.34 各橋維護策略.....4-63
圖4.35 橋梁構件老化維修風險評估模式程式流程圖.....4-64
圖4.36 鋼結構橋梁塗裝劣化風險評估模式程式流程圖.....4-64
圖4.37 橋梁洪水沖刷風險評估模式程式流程圖.....4-65
圖4.38 橋梁地震維修風險評估模式程式流程圖.....4-66
圖4.39 GIS套疊橋梁位置及縣市框.....4-67
圖4.40 GIS套疊橋梁位置及地形模型資料.....4-69
圖4.41 GIS套疊橋梁位置及河流流域.....4-74

圖4.42 流量測站歷史流量圖表資料.....4-75
圖4.43 橋梁構件老化風險成本模組介面 4-82
圖4.44 鋼結構橋梁塗裝劣化風險成本模組介面 4-82
圖4.45 橋梁洪水維護風險成本模組介面 4-83
圖4.46 橋梁地震損傷維護風險成本模組介面.....4-83
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 結構分析SAP2000模型.....5-10
圖5.9 側推曲線(基底剪力-位移).....5-11
圖5.10 側推曲線(譜加速度譜位移Sa_Sd) 5-11
圖5.11 側推曲線(EPA_Sd圖) 5-12
圖5.12 橋梁整體損傷等級超越機率.....5-14
圖6.1 速度計配置圖 (No.1 No.6:三軸、No.1~No.5:單軸)..... 6-9
圖6.2 南雲大橋之試驗墩柱 (墩柱14)..... 6-9
圖6.3 南雲大橋起點(Ch1)、1/4跨(Ch2)、1/2跨(Ch3)、3/4跨(Ch4)與終點處(Ch5)之振譜 (pier 14、有行車，車行方向)...6-10
圖6.4 南雲大橋兩組(S2: Ch1、S1: 三軸)試驗結果之比較(pier 14、有行車，車行方向) 6-11
圖6.5 南雲大橋起點(CH1)、1/4跨(CH2)、1/2跨(CH3)、3/4跨(CH4)與終點處(CH5)之振譜 (pier 14、無行車，車行方向)..6-12
圖6.6 南雲大橋兩組(S2: CH1、S1: 三軸)試驗結果之比較(pier 14、

無行車，車行方向) 6-13
圖6.7 南雲大橋起點(Ch1)、1/4跨(Ch2)、1/2跨(Ch3)、3/4跨(Ch4)與終點處(Ch5)之振譜 (pier 14、有行車，垂直車行方向) 6-14
圖6.8 南雲大橋兩組(S2: Ch1、S1: 三軸)試驗結果之比較(pier 14、有行車，垂直車行方向).....6-15
圖6.9 南雲大橋起點(Ch1)、1/4跨(Ch2)、1/2跨(Ch3)、3/4跨(Ch4)與終點處(Ch5)之振譜 (pier 14、無行車，垂直車行方向) 6-17
圖6.10 南雲大橋兩組(S2: CH1、S1: 三軸)試驗結果之比較(pier 14、無行車，垂直車行方向).....6-18
圖6.11 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之振譜(pier 14、有行車，車行方向) 6-20
圖6.12 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之振譜(pier 14、無行車，車行方向) 6-21
圖6.13 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之振譜(pier 14、有行車，垂直車行方向).....6-22
圖6.14 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之振譜(pier 14、無行車，垂直車行方向).....6-23
圖6.15 南雲大橋某次有車、垂直車行方向之量測結果.....6-26
圖6.16 A(上)與C(下)部分之振譜 6-27
圖6.17 B(上)與D(下)部分之振譜 6-28
圖6.18 南雲大橋某次伸縮縫處橋面板與墩柱之量測結果(a)車行方向 (b)垂直車行方向 6-29
圖6.19 南雲大橋車行方向之自由振動歷時(EX1: 6/19、EX2:10/12) 6-30
圖6.20 系統識別時所使用的有限元素模型 6-31

圖6.21 RMSE在最佳化過程中降低的情形.....6-32
圖6.22 模擬的與量測的自由振動歷時之比較.....6-33
圖6.23 以備用電源供應筆電與速度計之電力.....6-35
圖6.24 速度計上LED燈之檢核.....6-36
圖7.1 多目標地震災後橋梁特別巡查與檢測旅運路網規劃流程圖
..... 7-2
圖7.2 多層旅運路網圖..... 7-4
圖7.3 MO-SOS多目標路徑規劃流程..... 7-9
圖7.4 橋梁所在地路網圖.....7-13
圖7.5 二層旅運路網圖.....7-15
圖7.6 支配個數法二目標最佳化圖.....7-21
圖7.7 帕雷托最適圖.....7-22
圖7.8 模式執行流程.....7-23
圖7.9 使用者依照需求選擇地區、因子.....7-24
圖7.10 該工務段需要巡查之橋梁清單.....7-24
圖7.11 以旅行時間與通行失敗機率及重要度多目標規畫結果.....
.....7-25
圖7.12 第一組路線規畫結果.....7-26
圖7.13 第二組路線規畫結果.....7-26
圖7.14 第三組路線規畫結果.....7-27

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.....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2-6 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) 2-42
表2-8 公路橋梁耐震評估檢查表-強度韌性評估(一般橋梁)....2-43
表2-9 有效地表加速度轉換表 2-47
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 2-71
表2-14 D.E.R.U.系統之評估準則 2-71
表2-15 塗裝系統之綜合評估.....2-72
表2-16 塗膜更換次數與耐用年數 2-73
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 2-77
表2-22 只考慮防蝕因子之建造總成本.....2-82
表2-23 國內目前橋梁維護優先順序文獻蒐集 2-84
表2-24 BH2橋梁重要性評估指標項目 2-86

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 訪談討論紀錄.....3-19
表3-4 耐震能力評估所需欄位和TBMS欄位比較表 3-24
表3-5 系統手冊目錄架構.....3-26
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 4-16
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 4-17
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.....4-20
表4-14 編號10橋各構件單次維護費用整理 4-20
表4-15 採用相近量體或用途橋梁資料補足 4-21
表4-16 各橋梁歷史年維護經費(部分表格) 4-22
表4-17 歷史年平均維護費用與推估費用 4-23
表4-18 大型橋梁防蝕塗裝對應輔助機具費用比值 4-27
表4-19 其他橋梁防蝕塗裝對應輔助機具費用比值 4-28
表4-20 編號10號橋防蝕塗裝與高空作業車 4-29

表4-21 塗裝系統A4-1 4-30
表4-22 塗裝系統A4-2 4-30
表4-23 塗裝系統A5-1 4-30
表4-24 塗裝系統A5-2 4-31
表4-25 各區域鋅腐蝕速率試驗點之行政區 4-32
表4-26 各區域之鋅腐蝕速率及底漆使用年限 4-32
表4-27 塗裝系統A4-1之使用年限.....4-33
表4-28 塗裝系統A4-2之使用年限.....4-33
表4-29 塗裝系統A5-1之使用年限.....4-34
表4-30 塗裝系統A5-2之使用年限.....4-34
表4-31 臺灣主要河系洪水重現期對應SSI指標下降表.....4-37
表4-32 洪水維護機率分析結果(節錄)，單位(%).....4-40
表4-33 洪水維修經費因子表.....4-41
表4-34 跨河橋梁維修案例(節錄).....4-42
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) 4-44
表4-36 RC結構物之損傷指標 4-47
表4-37 損害狀況及損害比之關係 4-50
表4-38 A橋之綜合能力指標.....4-51
表4-39 橋梁相關參數彙整(節錄).....4-55
表4-40 橋梁老化維修案例篩選詞彙 4-68
表4-41 橋梁老化影響因子 4-69
表4-42 混凝土橋梁老化維修風險成本(部分表格).....4-70
表4-43 鋼結構橋梁老化維修風險成本(部分表格).....4-71
表4-44 鋼結構橋梁塗裝劣化維修案例篩選詞彙.....4-71

表4-45 鋼結構橋梁塗裝維修風險成本(部分表格) 4-73
表4-46 臺灣主要河川流域洪水重現期對應SSI下降表.....4-75
表4-47 橋梁洪水維修案例篩選詞彙 4-76
表4-48 橋梁洪水沖刷影響因子.....4-77
表4-49 橋梁洪水維修風險成本(部分表格) 4-78
表4-50 橋梁洪水重建風險成本(部分表格) 4-79
表4-51 橋梁耐震能力影響因子.....4-80
表5-1 構件及元件損傷對照表..... 5-6
表5-2 採用設計規範版本對應之耐震性能目標..... 5-9
表5-3 結構材料強度.....5-10
表5-4 橋柱耐震性能譜位移容量 5-13
表5-5 中坑高架橋之構件容量.....5-13
表5-6 損傷等級超越機率(行車向)-蒙地卡羅模擬.....5-15
表5-7 損傷等級超越機率(橫向)-蒙地卡羅模擬 5-16
表6-1 南雲大橋起點(Ch1)、1/4跨(Ch2)、1/2跨(Ch3)、3/4跨(Ch4)與終點處(Ch5)之第一振態頻率值 (pier 14、有行車，車行方向).....6-11
表6-2 南雲大橋兩組(S2: Ch1、S1: 三軸)試驗之第一振態頻率值(pier 14、有行車，車行方向).....6-12
表6-3 南雲大橋起點(CH1)、1/4跨(CH2)、1/2跨(CH3)、3/4跨(CH4)與終點處(CH5)之第一振態頻率值 (pier 14、無行車，車行方向).....6-13
表6-4 南雲大橋兩組(S2: CH1、S1: 三軸)試驗之第一振態頻率值(pier 14、無行車，車行方向).....6-14
表6-5 南雲大橋起點(Ch1)、1/4跨(Ch2)、1/2跨(Ch3)、3/4跨(Ch4)與終點處(Ch5)之第一振態頻率值 (pier 14、有行車，垂直

車行方向).....6-15
表6-6 南雲大橋兩組(S2: Ch1、S1: 三軸)試驗之第一振態頻率值(pier 14、有行車，垂直車行方向).....6-16
表6-7 南雲大橋起點(Ch1)、1/4跨(Ch2)、1/2跨(Ch3)、3/4跨(Ch4)與終點處(Ch5)之第一振態頻率值 (pier 14、無行車，垂直車行方向).....6-17
表6-8 南雲大橋兩組(S2: CH1、S1: 三軸)試驗之第一振態頻率值(pier 14、無有車，垂直車行方向).....6-18
表6-9 南雲大橋6/19於無車、垂直車行方向之量測結果 6-19
表6-10 南雲大橋先前量測的結果 (無車、垂直車行方向).....6-19
表6-11 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之第一振態頻率值 (pier 14、有行車，車行方向).....6-20
表6-12 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之第一振態頻率值 (pier 14、無行車，車行方向).....6-21
表6-13 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之第一振態頻率值 (pier 14、有行車，垂直車行方向) 6-22
表6-14 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之第一振態頻率值 (pier 14、無行車，垂直車行方向) 6-23
表6-15 南雲大橋6/19於無車、平行車行方向之量測結果.....6-24
表6-16 南雲大橋10/12於無車、平行車行方向之量測結果.....6-24
表6-17 南雲大橋6/19於無車、垂直車行方向之量測結果.....6-25
表6-18 南雲大橋10/12於無車、垂直車行方向之量測結果.....6-25
表6-19 南雲大橋6/19於無車、平行車行方向之量測結果.....6-25
表6-20 南雲大橋6/19於無車、垂直車行方向之量測結果.....6-25
表6-21 最佳化進行時各參數的數值 6-31
表6-22 各參數的最佳值 6-33

表6-23 單軸速度計(VSE-15D1)之規格 6-34
表6-24 三軸速度計(CV-374A)之規格 6-34
表7-1 測試橋梁之橋梁重要度及通行失敗機率.....7-12
表7-2 橋梁兩兩旅運巡檢測時間矩陣(單位:分鐘).....7-12
表7-3 $F_{7,6}^{1}$檢測路網矩陣 7-14
表7-4 $F_{7,6}^{2}$檢測路網矩陣 7-15
表7-5 檢測次數檢核矩陣 7-16
表7-6 總旅運檢測時間計算 7-17
表7-7 受支配個數法之最佳解.....7-21

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。有鑑於臺灣天然災害頻傳，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，交通部運輸研究所已於94、95年著手進行交通工程防災預警系統建立之相關研究，並逐年擴充建置臺灣公路早期防救災決策支援系統(Taiwan Road Early Nature Disaster prevention Systems，TRENDS)。為更新系統資料、提高分析準確度並與相關單位之監測資料進行驗證，本計畫將納入本所近期研究之分析模組及成果，並確認系統實用性及穩定性。

本研究年度內計畫先至公路總局某一個養護工程處進行系統介紹與訪談，藉由系統簡介讓公路橋梁管理單位了解系統特性，並由訪談過程了解橋梁管理單位實務運作情形及使用需求，作為本年度系統與研究方向修正之依據。本年度預計新增與更新項目除系統維護外另包括:(1)鋼結構橋梁維護策略:鋼結構橋梁風險分析及維護策略單橋分析模式擴展至群橋風險管理及維護策略，與前期「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研發」鋼筋混凝土群橋風險管理及維護策略成果結合，並建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋)風險分析資料庫及風險評估與查詢功能模組。(2)整體橋梁耐震能力評估: 進行1座整體橋梁耐震能力側推案例，並持續蒐集整體橋梁耐震能力評估案例並納入系統資料庫。(3)橋梁振動頻率方面，選取1座橋梁安裝2組以上速度計同時進行橋梁多點頻率梁測，藉以了解振動頻率雜訊來源與變動原因。(4)橋梁巡查與檢測路徑規劃部分:精進災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式，與建置巡查與檢測路徑規劃模組。

1.2 計畫目的

本計畫研究目的為進行臺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)鋼結構橋梁維護策略擬定建議。(2)整體橋梁耐震能力評估模式。(3)橋梁振動頻率之驗證。(4)橋梁巡查與檢測路徑規劃之精進。

1.3 研究範圍與對象

為了使本研究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，本研究的範圍限制如下：1.本研究僅針對公路總局轄管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。

1.4 研究內容與工作項目

1.系統維護部分:

(1)至公路總局1個養護工程處進行系統橋梁維護策略模組介紹與訪談。

(2)依訪談結論修改系統橋梁維護策略模組，以符合橋管單位實務使用需求。

(3)針對橋梁耐震能力資料庫更新需求，檢核目前影響因子是否足夠推求實際橋梁現況之耐震能力。

(4)系統資料庫更新及維護運作管理。

(5)製作系統操作手冊。

2.橋梁維護策略最佳化部分:

(1)建立鋼橋群橋風險管理及維護策略。

(2)建置公路總局轄管鋼結構橋梁風險分析資料庫。

(3)建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組。

(4)與前期「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研發」鋼筋混凝土群橋風險管理及維護策略成果結合，並建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋) 群橋風險分析資料庫及風險評估與查詢功能模組。

(5)建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋)維護策略最佳化模式。

3.整體橋梁耐震能力評估部分:

(1)選取公路總局1座橋梁進行整體橋梁耐震能力側推分析。

(2)持續蒐集整體橋梁耐震能力評估案例並納入系統資料庫。

4.橋梁振動檢測分析部分:

(1)選取1座橋梁安裝2組以上速度計同時進行橋梁多點頻率量測，藉以了解振動頻率雜訊來源與變動原因。

5.橋梁災後巡查與檢測路線規劃部分:

(1)精進災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式。

(2)建置巡查與檢測路徑規劃模組。

1.5 研究方法及進行步驟

依據計畫目的，研究內容分為七個階段，如圖1.1所示，以下章節針對各階段分別敘述。

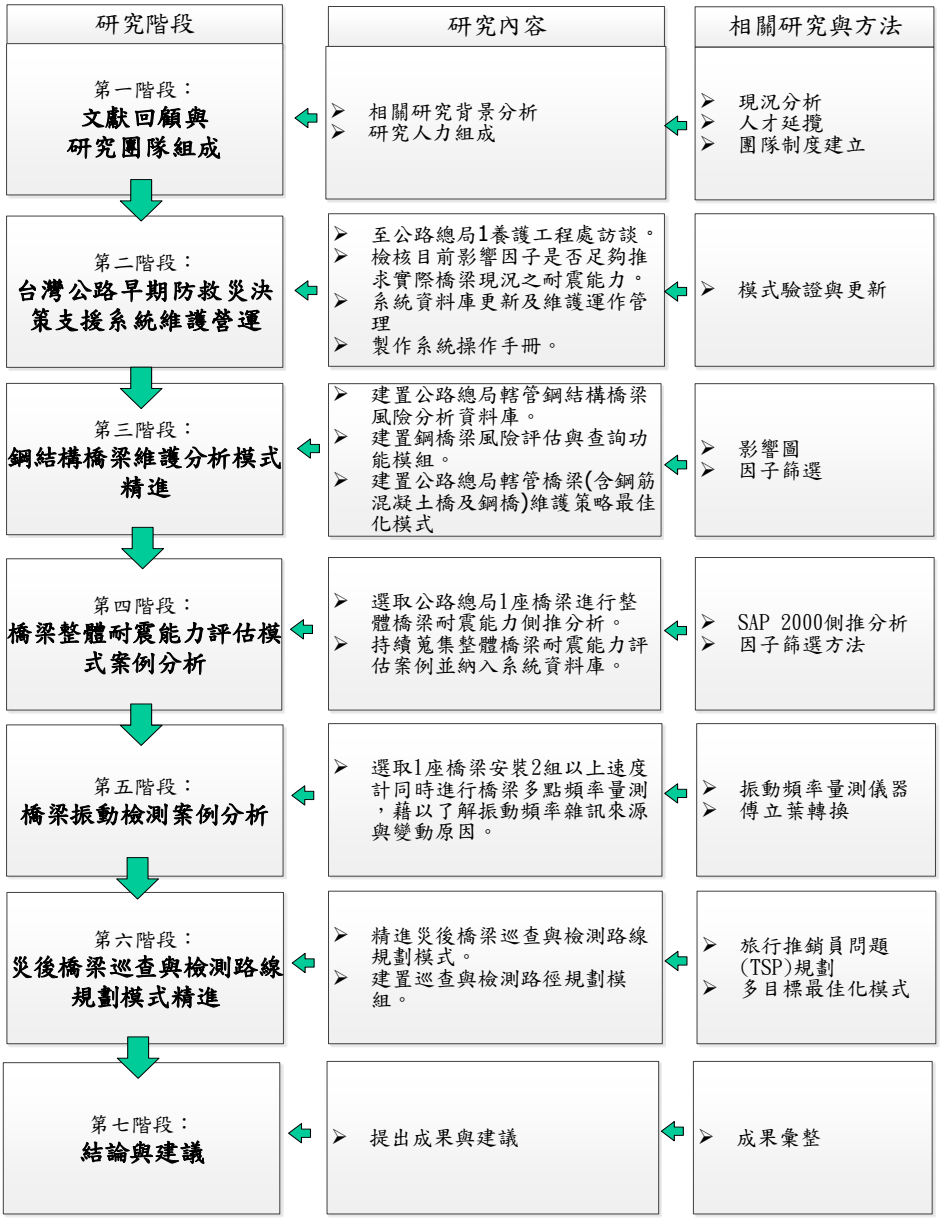

研究階段
研究內容
相關研究與方法
第一階段：
文獻回顧與
研究團隊組成
相關研究背景分析
研究人力組成
現況分析
人才延攬
團隊制度建立
第二階段：
台灣公路早期防救災決策支援系統維護營運
至公路總局1養護工程處訪談。
檢核目前影響因子是否足夠推求實際橋梁現況之耐震能力。
系統資料庫更新及維護運作管理
製作系統操作手冊。
模式驗證與更新
第三階段：
鋼結構橋梁維護分析模式精進
建置公路總局轄管鋼結構橋梁風險分析資料庫。
建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組。
建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋)維護策略最佳化模式
影響圖
因子篩選
第四階段：
橋梁整體耐震能力評估模式案例分析
選取公路總局1座橋梁進行整體橋梁耐震能力側推分析。
持續蒐集整體橋梁耐震能力評估案例並納入系統資料庫。
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
選取1座橋梁安裝2組以上速度計同時進行橋梁多點頻率量測，藉以了解振動頻率雜訊來源與變動原因。
振動頻率量測儀器
傅立葉轉換
第六階段：
災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進
精進災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式。
建置巡查與檢測路徑規劃模組。
旅行推銷員問題(TSP)規劃
多目標最佳化模式
第七階段：
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:臺灣公路早期防救災決策支援系統維護營運

臺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。針對系統橋梁維護策略模組訪談並修改，以符合橋管單位實務使用需求。檢核目前橋梁耐震能力資料庫影響因子，讓耐震能力推估能精進更新至實際橋梁現況之耐震能力，並製作系統操作手冊。

第三階段:鋼結構橋梁維護分析模式精進

擬定鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式，建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋)維護策略最佳化模式。

第四階段:橋梁整體耐震能力評估模式案例分析

建立1座橋梁進行整體橋梁耐震能力側推分析並更新系統資料庫。

第五階段:橋梁振動檢測案例分析

選取選取1座橋梁安裝2組以上速度計同時進行橋梁振動多點頻率量測。

第六階段:災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進

精進橋梁災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式，並建置巡查與檢測路徑規劃模組。

第七階段: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。

上述主要工作內容之連結性如圖1.2所示，其中TRENDS系統維護營運貫穿整個計畫，而鋼結構橋梁維護分析模式精進部分可提升災前階段對於橋梁原有能力之掌控性，了解各橋梁現況，進而提早進行相關維護補強作業。而在橋梁整體耐震能力評估模式案例分析部分，則以橋梁耐震能力評估在不同地震下是否有損壞之可能性。當有破壞可能性，在災時則可透過災害橋梁巡查與檢測路線規劃模式，依照巡查與檢測路徑之遠近或是橋梁破壞機率等條件做為巡查與檢測路線規畫之考量因子。而巡查與檢測後，若該橋梁已封閉，在決定是否開放通行階段，則可以參考橋梁振動案例分析，根據橋梁災前與災後之主頻變化，輔助評估橋梁是否有遭受到無法以肉眼觀察之內傷。

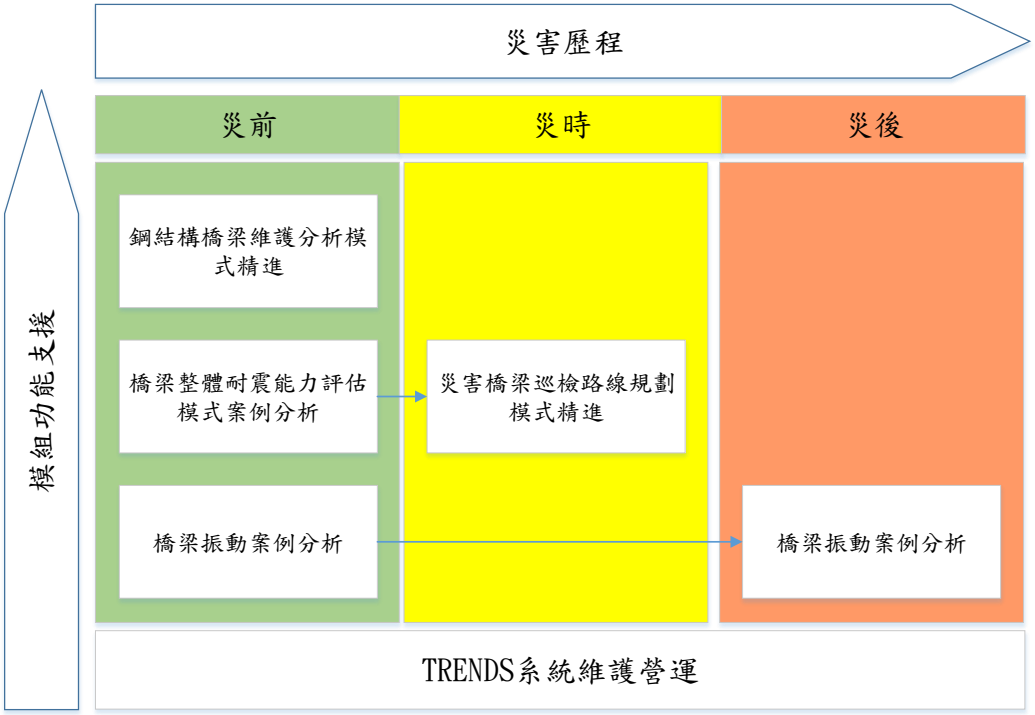


圖 1.2 研究工作項目連結圖

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布及屬性資料的展現，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

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，而臺北市目前建構完成之災害防救體系係以「災害防救法」、「臺北市災害防救規則」、「地

方制度法」等相關法令為基礎，基於實際運作需要，乃將臺北市災害防救體系，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「臺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，臺北市政府為因應各國災害防救體制趨勢及臺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)

本系統係由本所於民國94年開發，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)，目前已於全臺灣中小學整合建置581個低價位的強地動觀測站，並提供線上的臺灣即時震度資訊(圖2.3)，能在地震發生時，即刻獲取全臺詳細的震度圖，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。根據臺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]。

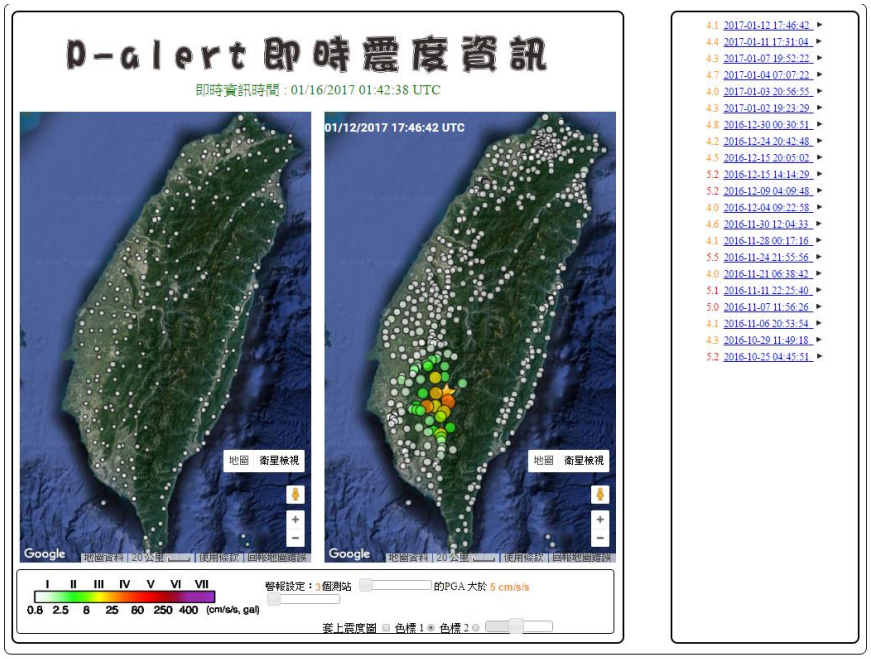


圖 2.3 P alert 系統畫面

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「臺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。臺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(包括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 臺灣地區橋梁管理資訊系統

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「臺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。本所依此規劃，於民國88年委託國立中央大學研究團隊進行「建立臺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高公局、公路總局、鐵路局，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，使用單位有交通部臺灣區國道高速公路局、交通部公路總局、臺灣鐵路管理局、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。

(10)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：

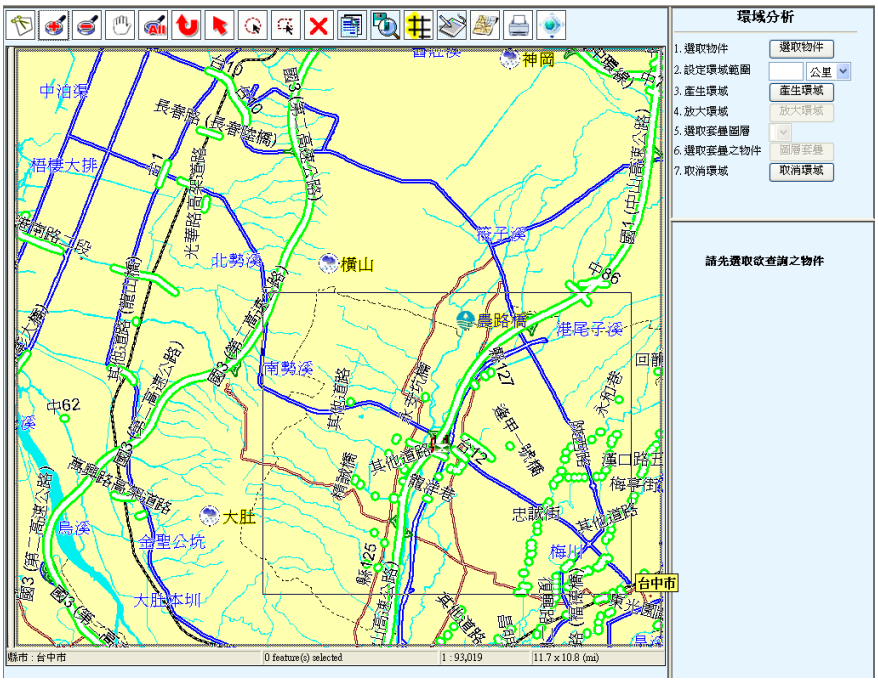


圖 2.9 地理資訊系統模組圖面查詢 [姚乃嘉等，2013]

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 第二代 TBMS 臺灣地區橋梁管理資訊系統

根據本所「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，本所於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

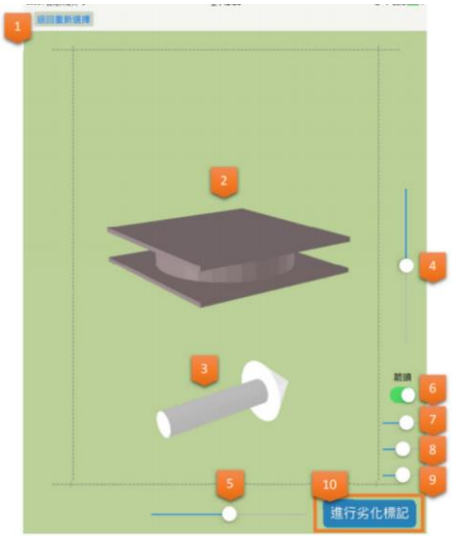


圖 2.13 橋梁 3D 模型與檢測

2.5 臺灣公路早期防救災決策支援系統

根據本所研究報告「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，為洪水預警與地震預警之核心，敘述如下:

1.跨河橋梁安全預警模組

根據本所民國102年「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馬鞍壩下游橋梁作為研究對象，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，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]。

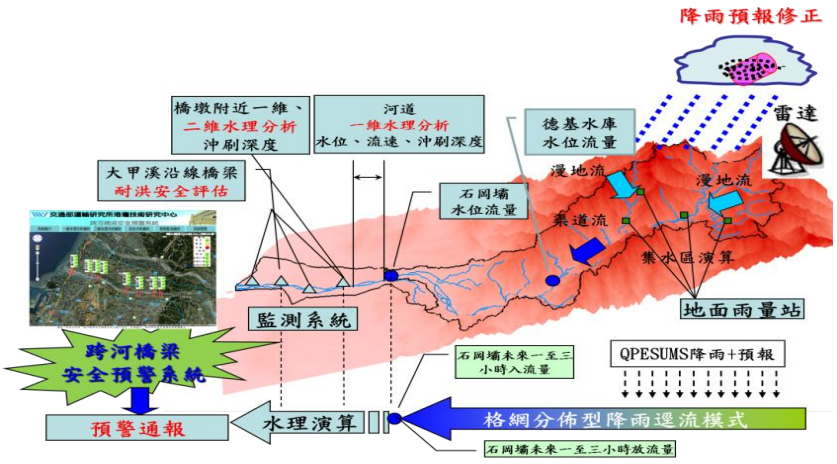


圖 2.14 颱洪災害跨河橋梁防災架構圖[鄭明淵等，2013]

2.橋梁地震通阻分析模組

根據本所民國100年「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」分析臺灣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」，即可根據全臺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，進而建置全臺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」，計算出全臺灣各地地表加速度，以ArcGIS Server的Geoprocess Service找尋各橋梁所在地震PGA，結合全臺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查與檢測優先順序之標準。

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警戒值(超過橋梁Ay耐震能力對應之機率)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。

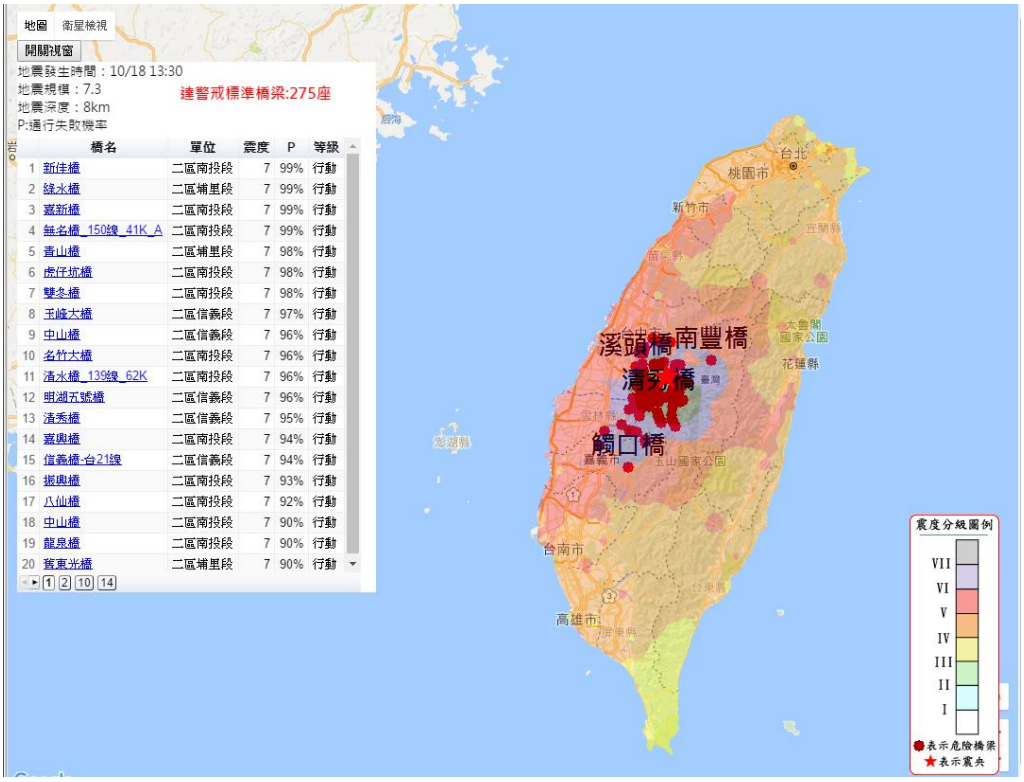


圖 2.15「橋梁地震破壞潛勢」介面(一) [鄭明淵、邱永芳、謝明志等，2011]

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警戒值(超過橋梁Ay耐震能力對應之機率)之橋梁列出，並建立異常狀況橋梁清單。接著，TRENDS將相關資訊傳遞至公路總局BOBE系統進行後續通報作業。

2.6 橋梁通阻檢測分析模式建立之研究

橋梁為臺灣地區之重要交通工程設施，但臺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。且臺灣為多地震的國家，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，本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:

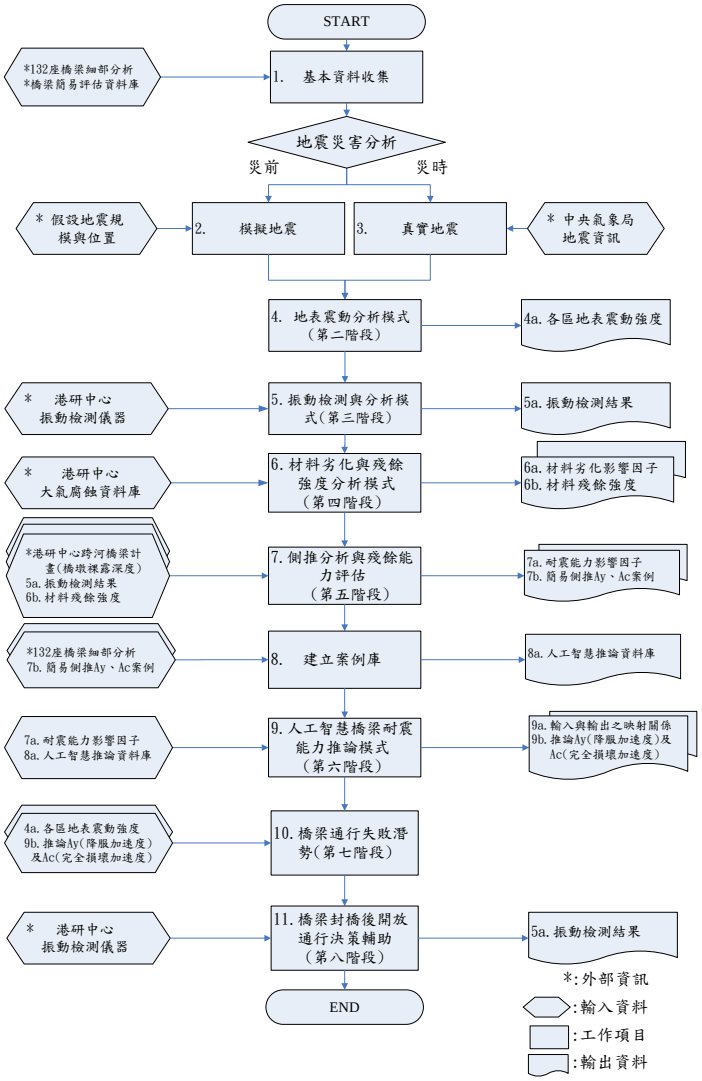


圖 2.17 橋梁通阻檢測分析模式架構圖

如圖2.17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，推估臺灣不同地區之地表震動強度。並以格網方式將臺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

考量臺灣地區環境因素，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臺灣地區大

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

臺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，但臺灣地處季風氣候地區，使鋼橋的鏽蝕問題不可小覷；與此同時臺灣也位於地震帶上，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

來源: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 進行巡查與檢測，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：

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

(1)Ic_{ij}：梁構件狀況指標。

(2)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。

(3)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。

$$Ic_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} Ic_{ij}}{n} \quad \text{..... (2.2)}$$

$$CI = \frac{\sum_{j=1}^{20} Ic_i\times w_i}{\sum_{i=1}^{20} w_i} \text{..... (2.3)}$$

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. 鋼橋塗裝作法

在臺灣地區而言，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。

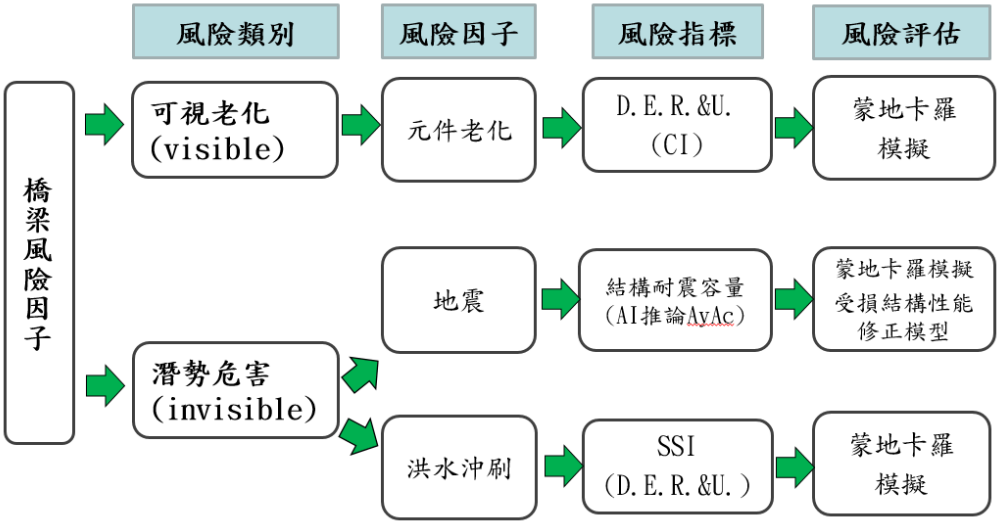


圖 2.18 橋梁風險因子分類

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)[張國鎮等，2009]

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)[張國鎮等，2009]

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:$w=2.0-2.0\left(\frac{h_{left}}{h}\right)$ ；沉箱基礎:$w=1.43-1.43(\frac{h_{left}}{h})$
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
		分數總計	100	

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[臺灣世曦，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。

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

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

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

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

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。

$$S_{dy} = \frac{2A - S_{au} \times S_{du}}{k_1 S_{du} - S_{au}} \ , \ S_{ay} = k_1 \times S_{dy} \quad \text{..... (2.8)}$$

(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。臺灣橋梁管理單位，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)。

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

A 與R_i計算如式(2.10)、式(2.11)。

$$\mathrm{A} = \sqrt{[1 + \alpha(R_i - 1)][2R_i - 1 - \alpha(R_i - 1)]} \quad \text{..... (2.10)}$$

$$R_i = \frac{\delta_i}{\delta_y} \geq 1 \quad \text{..... (2.11)}$$

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
$T < 0.2T_0^D$	$0.2T_0^D \le T < T_0^D$	$T_0^D \le T < 2.5T_0^D$	$T > 2.5T_0^D$
$\frac{Sa_i \times F_u(R)}{(1+\frac{3T}{0.4T_0^D})}$	$\frac{Sa_i \times F_u(R)}{2.5}$	$\frac{Sa_i \times F_u(R)}{\frac{S_{D1}}{0.4S_{DS}T}}$	

其中，相關係數，分一般工址、活動斷層近域及臺北盆地區域三種情況計算如下：

a.一般工址：

$$S_{DS} = F_a S_S^D$$
$$S_{D1} = F_v S_1^D \quad \text{..... (2.12)}$$
$$T_0^D = S_{D1}/S_{DS}$$

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

b.活動斷層近域：

$$S_{DS} = F_a(S_S^D N_A)$$
$$S_{D1} = F_v(S_1^D N_v) \text{ ..... (2.13)}$$
$$T_0^D = S_{D1}/S_{DS}$$

N_A :反應譜等加速度段之斷層近域調整因子

N_V :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。

c.臺北縣市之震區分為臺北盆地及一般震區。

$S_{DS} = 0.6$

$T_0^D = 1.6$秒$(臺北一區)$

$= 1.3$秒$(臺北二區)$ ..... (2.14)

$= 1.05$秒$(臺北三區)$

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

臺北縣市震區因盆地效應性質特殊，故另訂譜加速度係數。臺北盆地區域，包括臺北市及臺北縣之三重市、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，並劃分為臺北一區、臺北二區 及臺北三區。臺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]。

$L_N \geq L_{N,min} \cap L_N \geq u_R + u_G$ ..... (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:

a. 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)。

$H_{se} \leq 0.9H_{SU}$ ..... (2.16)

$H_{sem} \leq H_{SU}$ ..... (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

b. 剪力鋼棒:剪力強度如式(2.18):

$$\frac{\emptyset A_s \sigma_u}{\sqrt{3}}$$ ..... (2.18)

Ø: 強度折減係數
(475 年回歸期地震Ø = 0.9；2500 年回歸期地震Ø = 1)

A_s: 鋼棒斷面積 、σ_u: 鋼棒極限強度

c. 止震塊:止震塊剪力強度如式(2.19):

$$V = \emptyset \mu A_v f_y \leq 0.2 f_c' A_{cv} \quad \text{..... (2.19)}$$

Ø: 強度折減係數(475年回歸期地震Ø = 0.9；2500年回歸期地震Ø = 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):

$$\emptyset V_u \geq V_n$$
$$\emptyset M_u \geq M_n \quad \text{..... (2.20)}$$

(6) 橋柱穩定性檢核

等級II地震適用檢核式(2.21):

$$\Delta \leq 0.2 \frac{M_n}{P_U} \quad \text{..... (2.21)}$$

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

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

$R_{PU} = 0.85f_c{}'A_x + \sigma_y A_s$ ..... (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

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

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

P_{TU}:樁頭在地震下之拉拔力

現行上述橋梁補強分析與設計時除橋柱之耐震性能外，亦考量基礎、帽梁、支承墊及防落裝置等項目評估橋梁是否進行補強，但卻僅以非線性靜力分析所得之有效地表加速度-譜位移關係(EPA-Sd 曲線圖) 決定整座橋梁的損傷等級，而未考慮其它元件或構件之損傷狀態。[邱建國等人，2017]進行補強效益試算，首先在效益評估前需要進行損傷評估，因考慮橋梁元件或構件之各損傷等級發生機率，該研究以三階近似分析、蒙地卡羅模擬 (Monte carlo simulation;MCS) 與反應曲面法 (Response surface method; RSM) 等系統可靠度計算方式分別求取損傷發生機率。此外，為反應橋梁於補強時之功能為隨時間回復，因此該研究帶入災後功能回復 (Resiliency) 之概念，改善目前於評估補強效益時修復期

間內橋梁功能為一定值之假設，最後再以益本比作為補強效益指標，並且推算補強工程投資之回收年限，以作為橋梁補強決策之參考。因此，本計畫於後續計算橋梁之損傷機率時，將採用[邱建國等人，2017]建議之方法進行。

2.9 巡查與檢測路線規劃相關文獻

臺灣地區以橋梁為連絡河流、陸地兩岸之重要交通工程設施，然而臺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查與檢測路線規劃，現行橋梁於地震後雖然能夠依照損壞機率做出巡查與檢測之排序，但是在實務的巡查與檢測上，卻不能夠直接依據橋梁損壞機率跳點式的巡查與檢測，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、巡查與檢測路線距離為一多目標最佳化問題。

2.9.1 臺灣公路橋梁特別檢測

目前臺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查與檢測為主要研究對象，而公路總局將橋梁分為 A~E 種類橋梁(如表 2-10)，

各橋梁，根據公路總局所提出檢測頻率，有關於特別檢測如下：

a. 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。

b. 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。

c. 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。

d. 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。

e. 人為破壞因素（如火災或車輛撞損主梁等）引起之災害。

f. 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。

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 橋梁評等依各部位損傷模式進行

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	

上述各類橋梁名單視橋況逐年滾動檢討

2.9.2 現行橋梁巡查與檢測方式

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），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，如表2-11所示，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：

a.正確解法：

(a)動態規劃法

(b)整數規劃法

(c)分枝界限法

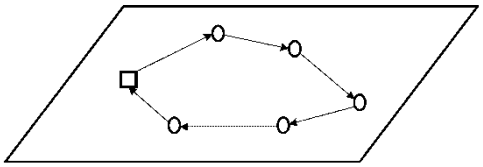
b.近似解法：

(a)路線構建型

(b)路線改善型

(c)綜合型

c.圖形：



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：

a.正確解法：

(a)動態規劃法

(b)整數規劃法

(c)分枝界限法

b.近似解法：

(a)先分群後排路線

(b)先排路線後分群

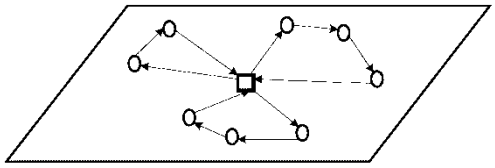
(c)節省法/插入法

(d)改善/交換法

(e)數學規劃法

(f)人機互動法

c.圖形：



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。

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梁檢測點 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：所有服務橋梁檢測點之集合。

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。

數學定式：

(1) 目標式：

$$MinZ = \sum_{m\in M}\sum_{ij\in BA^m}(t_{ij}^m + C_j^m)x_{ij}^m \quad \text{..... (2.27)}$$

(2) 限制式：

$$\sum_{j\in BN^m} x_{ij}^m - \sum_{k\in BN^m} x_{ki}^m = \begin{Bmatrix} 1, i \in S^m \\ 0, i \in T^m \\ -1, i \in D^m \end{Bmatrix}, \forall m \in M \quad \text{.. (2.28)}$$

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

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

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，臺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。所進行3座橋梁試驗，分別為臺中東勢大橋、臺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。

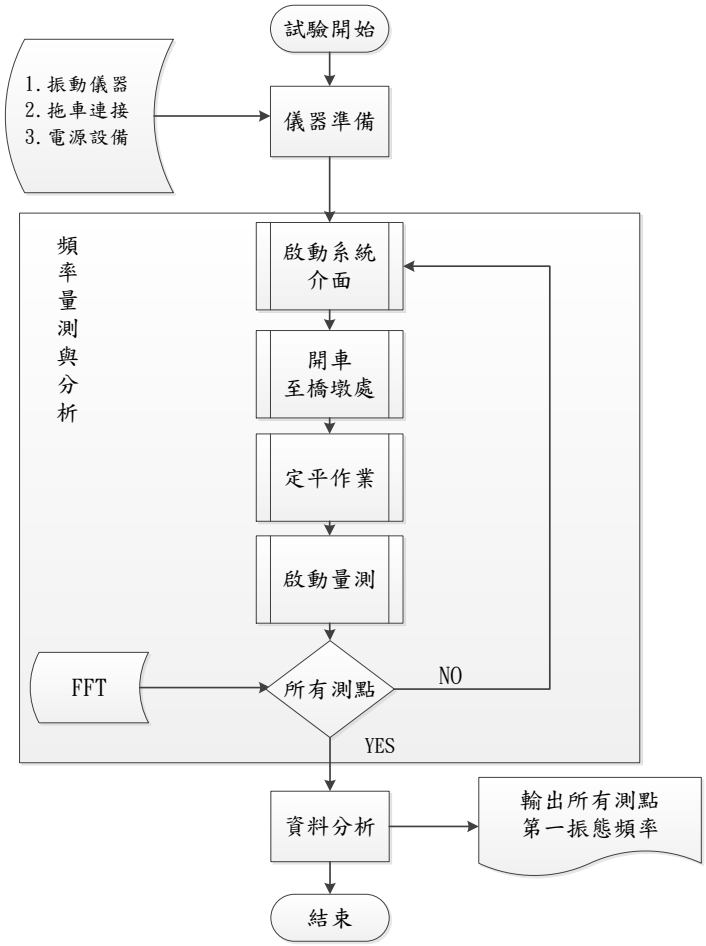


圖 2.19 臺灣地區建議之移動式振動檢測模式流程圖[鄭明淵、廖國偉、吳育偉等，2013]

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：

a.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。

b.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。

c.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。

d.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：

a.將儀器固定於托車上

b.將拖車固定於具移動性之車輛上

c.整合各項儀器

d.以汽車將拖車與量測儀器運送至某一橋墩上方

e.進行訊號收集

f.重複 d 至 e 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:

(a).儀器(速度計)直接置於橋面版上，橋梁上無任何行車。

(b).儀器(速度計)直接置於橋面版上，橋梁上行車正常。

(c).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。

(d).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。

(e).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。

(f).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小於該橋梁降伏(A_y)或崩塌(A_c)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 沖刷造成橋梁損壞之評估

由於沖刷造成的橋梁基礎暴露已被認為是臺灣公路橋梁失效最嚴重的原因，但Ko等人(2010)認為識別其風險等級有其難度。因為理論上

可以利用振動測量估算橋梁暴露的程度，Ko等人(2010)嘗試使用振動測量進行橋梁基礎沖刷的可行性評估。藉由有限元模型的動態分析，可以看出基礎暴露會降低橋梁系統整體勁度並降低其振動頻率，特別是在垂直車流方向。並根據現場振動測量結果證實，基礎暴露對橋梁上部結構的振動特性具有影響。雖然如此，因為橋梁結構是一個複雜結構體系統，建議仍應建立數值計算應建立模型以提供更精確的橋梁振動響應分析。Prendergast等人(2016)亦認為沖刷是跨河橋梁失敗的首要原因。沖刷導致基礎勁度的快速損失並可能導致突然崩潰。Prendergast等人(2016)開發了一個車-橋 -土互制的數值模型。通過在該模型中進行模態研究看出，對於各種可能的土壤狀態，具有沖刷的橋的第一模式的頻率變化幅度約40%。該數值分析僅使用雙軸卡車作為外力輸入，並未考慮其他不同的車輛種類。Idris等人(2015)認為目前並沒有具體的方法或指導方針來對橋梁進行環境振動測試(ambient vibration)，雖然如此，他們仍然整理幾個重要的事項如下所述。需有足夠數量的感測器以確定結構的振動模式，當使用多個感測器時，應有固定位置的感測器作為參考感測器；惟跨距的中點不適合作為參考位置，因為該處通常第二垂直彎曲振動模態的反曲點處。另、可在在結構的兩側進行測試，便能夠清楚地識別是否有扭轉模式的振動。藉由文獻回顧，Idris等人(2015)認為環境振動檢測確實可以識別出橋梁的頻率模式，但也提及，大多數研究人員除了環境振動量測外，均使用有限元建模來驗證其檢測的結果。

2.12 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。

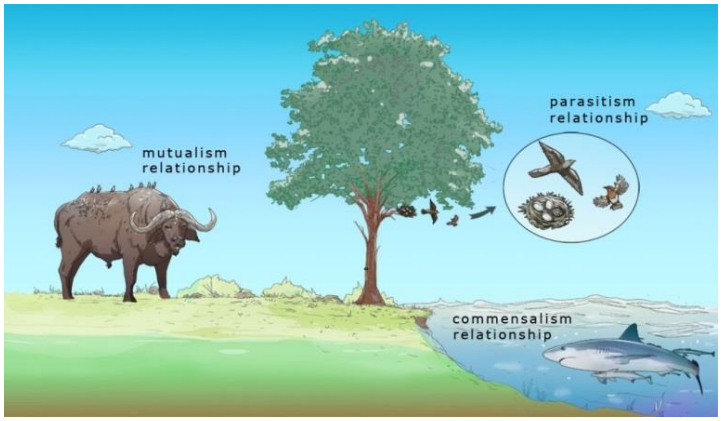


圖 2.20 生態系統中的生物共生關係示意圖

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。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，每個音樂家彈奏各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(random selection)、記憶體考量(memory consideration)、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，擬定了該共生模式的主要原則與相互作用。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。

2.13 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(目前臺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「道路構造物点検標準」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做為損傷判定的依據，故使各橋梁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 [臺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「臺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。

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「臺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「臺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所示，以確保塗膜系統之性能與壽命，而各種塗料之適用性亦可參考表2-20。

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。

2.14 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龐大\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)

2.15 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[財團法人臺灣營建研究院，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、及廢棄物處理，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、	固定 8% (不含通膨)	未建立歷史成本資料庫

			IRR 等		
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：**[**財團法人臺灣營建研究院，2003**]**

2. 美加地區[財團法人臺灣營建研究院，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：

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。

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

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示橋梁生命週期狀況變動。

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[財團法人臺灣營建研究院，2003]

日本地形環境與臺灣類似，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 %，

而混凝土橋梁佔 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，決定其維護的優先程序。

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：

a. 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。

b. 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。

c. 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$，其運送價格為$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皆為「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生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。如果橋長介於 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，主要掌控維護費用為「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。

2.16 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，導致臺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，目前臺灣橋梁檢查以「臺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：(a)樁帽與基樁均埋置於土層中、(b)樁帽裸露而基樁未裸露與(c)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。

2.17 橋梁維護策略最佳化文獻回顧

各個國家在定義橋梁維護優選排序時，考量之因素與方法眾多，其考慮之因素差異相當大，如道路之重要性等級、維護成本的最低估算、政策、替代道路長短、道路等級與橋梁生命週期成本、橋梁管理單位維護預算限制等方式來管理橋梁之維護策略。目前國內之研究較偏向美國以重要性相關因子權重的方式決定。本計畫整理出國內與國外目前相關橋梁維護排序方法與各國橋梁管理單位優選排序考量之因素，如下表2-23。

表2-23 國內目前橋梁維護優先順序文獻蒐集

國家/系統	橋梁優先排序考量因素
臺灣	1. 橋梁的重要性等級 2. 結構性指標 3. 特殊性指標 4. 服務性指標 5. 易損性指標
芬蘭	維護的指標(結構元件的破壞程度和傷害造成維護的緊急等級)

法國	1.橋梁的情況　2.道路等級 3.地方管理單位的有限預算　4.政治 5.地方政府維護的可行性(考察與維護)
挪威	1.橋梁破壞的程度與後果 2.調查並考量技術性或替代策略 3.評估價值工程(直接成本與非直接成本)
美國加州(DOT)	效率成本比率
美國各州(未含加州)	橋梁的重要性等級
德國	1.橋梁的情況　2.橋梁破壞的程度與後果 3.道路等級　4.橋面板的淨空度 5.交通安全　6.合宜的人員
比利時	結構物可靠度的風險
葡萄牙	1.橋梁的情況 2.傷害的範圍與結果 3.交通的安全性 4.維護成本的最小化
英國	1.全生命週期 2.安全性指標 3.政治

資料來源:本計畫團隊整理，[張修誠，2011][RJ Woodward，2001][曾志煌、陳茂南，2008]

2.18 橋梁維護之重要性非直接成本因子

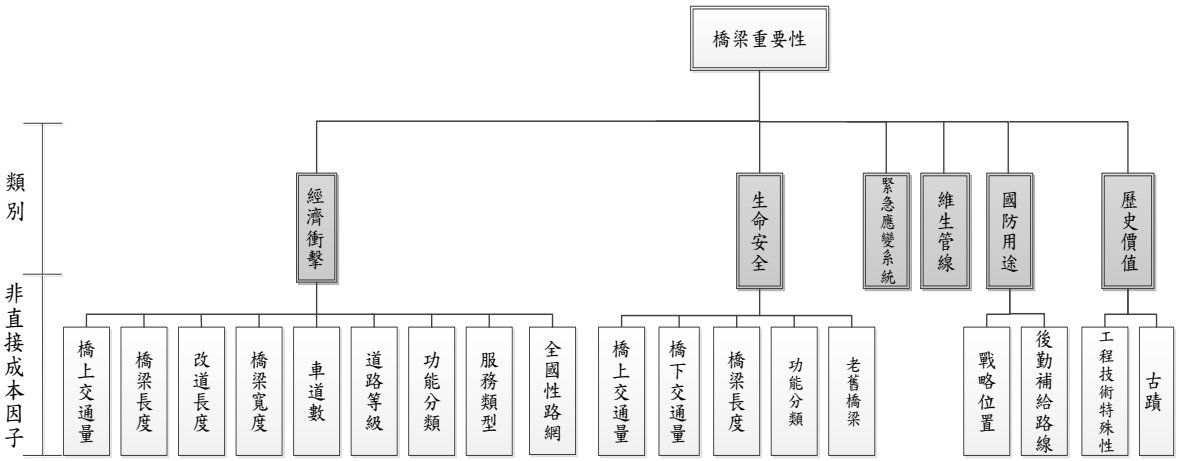
本研究希望將橋梁之重要性納入考量，接著，將藉由文獻回顧、橋梁管理單位訪談等方法，初步確認橋梁重要性非直接成本影響因子，然後利用篩選之方法確認非直接成本影響因子與用路人成本之關聯，再依各因子之關聯性建置一橋梁重要性與用路人成本評估模式。

相關國內研究中學者葉士青(2004)參考11種美國各州運輸部所採用之橋梁重要性評估法，分別是Babaei & Hawkins(以下簡稱B&H)、 Mod. B&H、Mod. Buckle、Montana、Nevada、Missouri、IDOT法等，進行各方法之比較分析，最後，此研究根據本土橋梁之特性與需求，建議國內環境適合使用之橋梁重要性評估方法為BH2，BH2橋梁重要性評估指標因子如表2-24所示。

表2-24 BH2橋梁重要性評估指標項目

BH2橋梁重要性評估指標項目	單位
功能分類	道路服務等級
橋長	公尺
平均日交通量	車流量
改道長度	公尺
維生管線	有/無
國防用途	有/無

另外，目前國內評估橋梁維護優先順序的相關研究方法有橋梁綜合評估指標(曾志煌等，2008)與橋梁重要程度等級評定(蔣偉寧等，2004)等方式，此架構是先將評估指標層級化，建立各層級之相關因子，再請專家評估各項橋梁評選因子，建立各因子之權重，後續以每一座橋梁之條件代入算出積分，最後以積分高至低之方式排序。文獻將橋梁維護的重要性分成6大類，分別是經濟衝擊、生命安全、維生管線、歷史價值、國防用途、緊急應變系統，如圖2.21之架構圖，並根據國內外之文獻，整理出各類別之相關非直接成本因子。



資料來源:本研究整理

圖 2.21 橋梁重要性評定架構圖

第三章 TRENDS系統維護營運

有鑑於臺灣天然災害頻傳，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，並技術移轉交通部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	臺科大鄭明淵	土石流預警通報	臺科大	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、國家地震中心與臺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 臺科大 臺科大	- 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	臺科大	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	臺科大鄭明淵	地震潛勢 洪水土石流 預警通報	臺科大	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**(佳作獎)** 。
					清雲科大	土木系	蔡明修	
				邊坡崩塌	臺科大	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	臺科大鄭明淵	洪水沖刷 預警通報	臺科大	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	臺科大	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	臺科大鄭明淵	材料劣化	臺科大	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	臺科大	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**評估全臺灣 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	臺科大	營建系	鄭明淵	
				振動分析	臺科大	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	臺科大	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	臺科大鄭明淵	預警通報	臺科大	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	臺科大鄭明淵	系統整合	臺科大	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	臺科大	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	臺科大鄭明淵、邱建國	維護策略	臺科大	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	臺科大	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)	臺科大鄭明淵	系統整合	臺科大	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	臺科大	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)	臺科大鄭明淵	系統整合	臺科大	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	臺科大	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(a)地震方面:應用AI推論公總全臺五區工程處共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；交通部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。(b)洪水沖刷方面:交通部運輸研究所目前已將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臺。(c)邊坡方面:(i)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。(ii)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

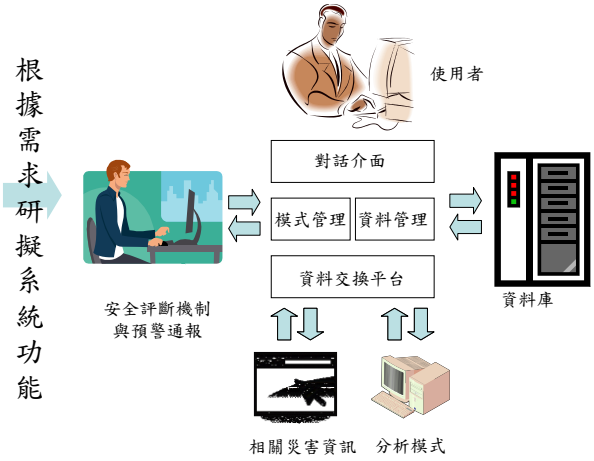


圖 3.1 TRENDS 系統概念

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。

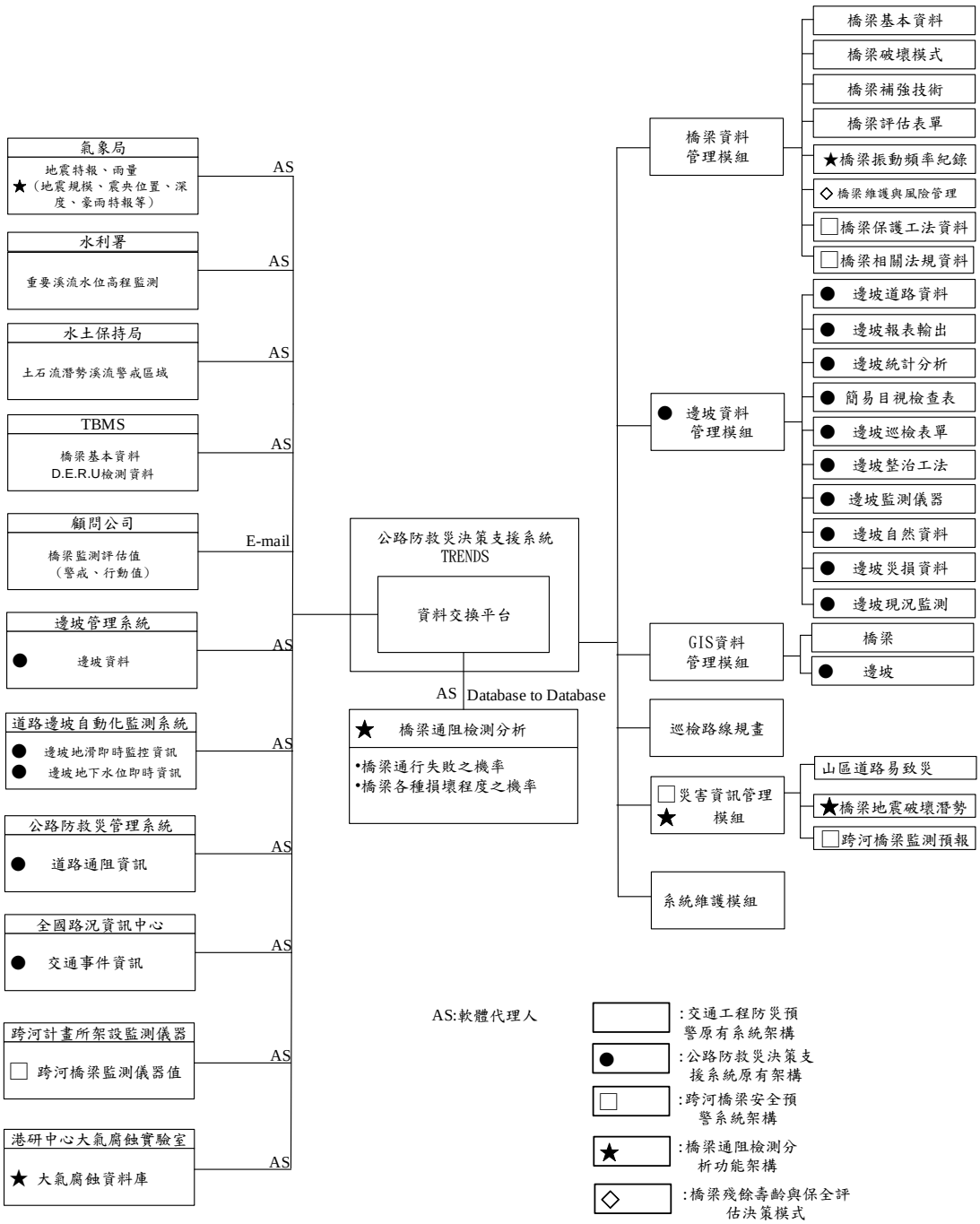


圖 3.2 TRENDS 系統模組

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)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。

(4)巡檢路線規劃規劃

此模式運用橋梁可能發生破壞之潛勢及橋梁重要度，藉以搜尋巡檢路線之規劃，進而可應用於救災資源調派之功能。

(5)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。

(6)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。

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(1)既有系統連結與(2)新增系統連結，架構如圖3.3所示。

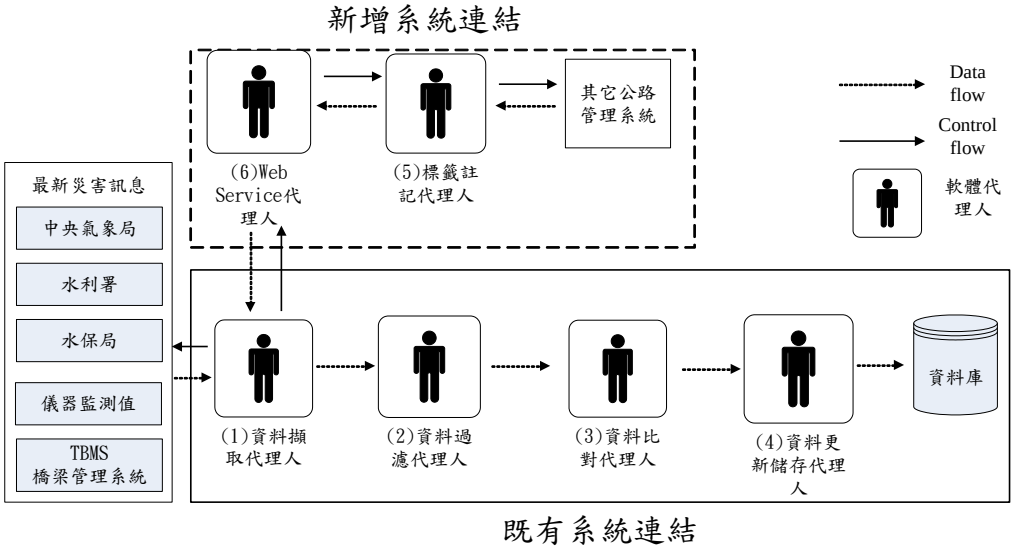


圖 3.3 軟體代理人架構圖

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(1)標籤註記代理人及(2) 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。

(1)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：

a.索取 XML Schema 格式標準，由資料庫中索取事先定義之 XML 格式。

b.取得網頁 html 文件，經由網路連結取得目標網頁 Html 文件檔。

c.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。

d.產生 XML 文件，根據標籤註記產生對應之 XML 文件。

(2)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：

a.取得 XML 文件，Web Service 代理人藉由標簽註記代理人取得 XML 文件。

b.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 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>

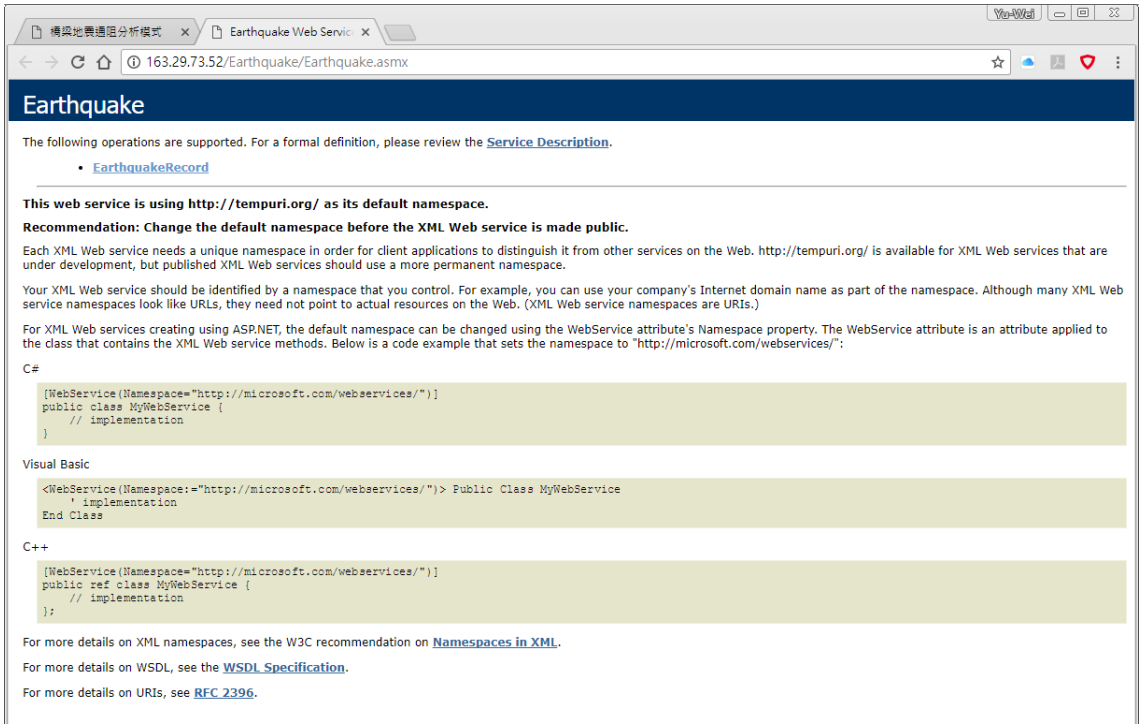


圖 3.4 橋梁通行失敗機率 Web Service

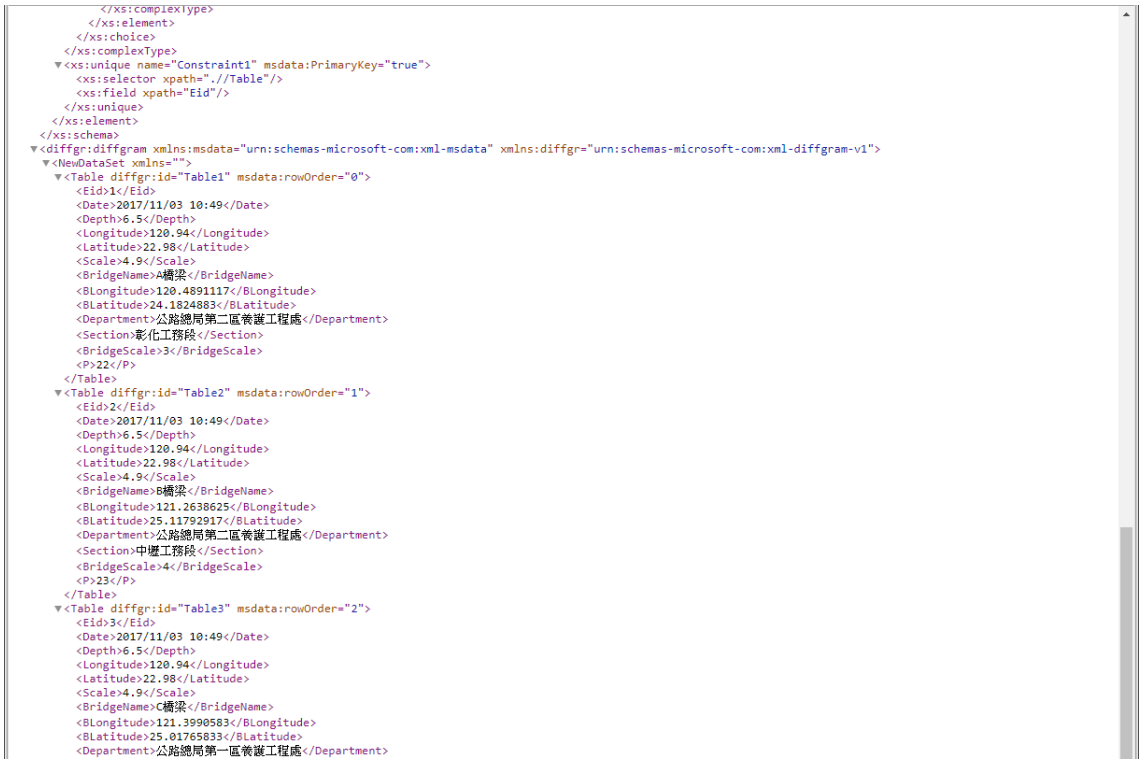


圖 3.5 橋梁通行失敗機率 XML

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)。

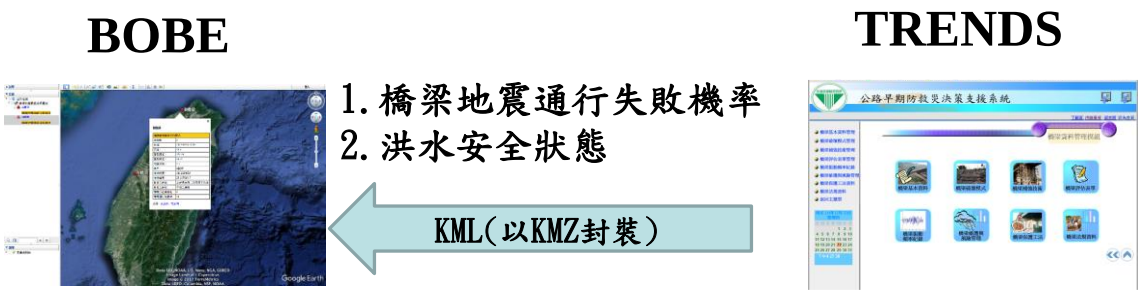


圖 3.6 與公路總局介接示意圖

由於每次的地震如果未達震度5級以上，系統篩選結果則無任何橋梁，因此因應公路總局之需求，於2018/06/05增加一個查詢最新地震資訊的webservice的服務，可供公路總局判別最新分析的日期，如圖3.7所示，分析結果同樣以XML格式提供公路總局介接。

圖 3.7 地震分析紀錄時間 XML

3.5 至公路總局1個養護工程處進行訪談

研究團隊於105年10月20日上午10:00至公路總局應變中心進行訪談，藉由訪談公路管理單位人員，做為系統功能精進與加強之依據(如圖3.8)。

會議中分別依1.地震破壞潛勢評估、2.颱洪跨河橋梁安全預警、3.橋梁振動頻率檢測、4.道路邊坡災害預警及決策支援、5.橋梁耐震耐洪設計與維護階段防災預警整合、6.橋梁保全評估與養護經費決策支援、7.自動通報機制等主題，簡報系統成果。再針對討論課題，分別進行討論。

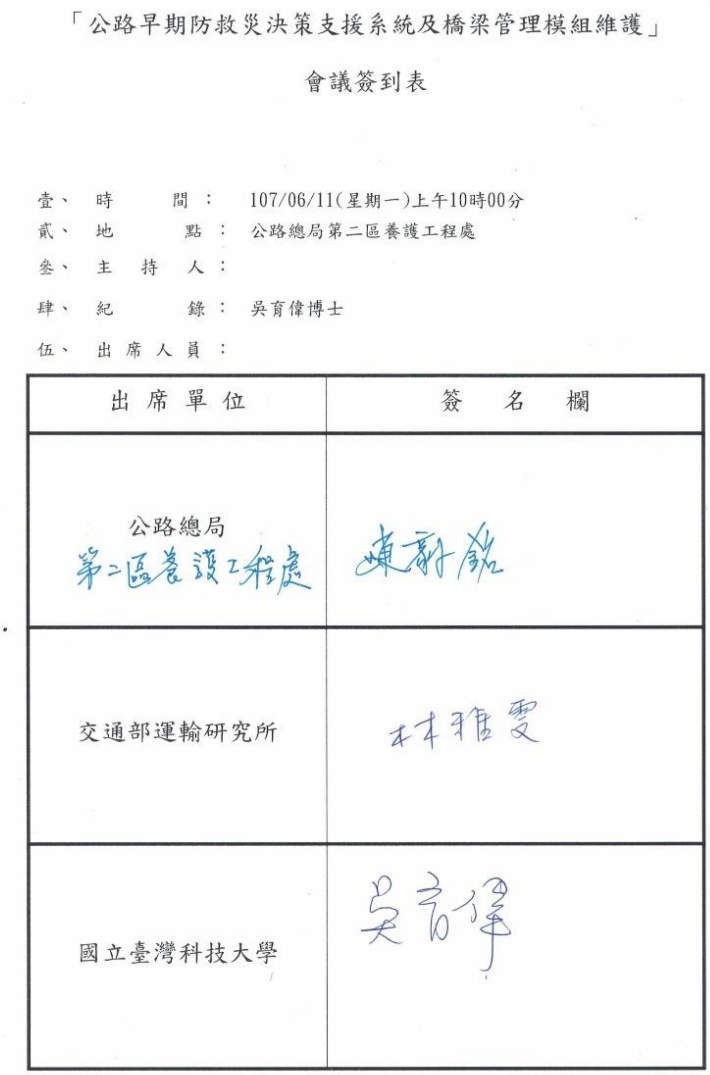
圖 3.8 公路總局應變中心訪談會議

今年度至107年6月4日與公路總局第二區養護工程處與一位幫工程司接洽，該幫工程司之工作業務為負責第二區養護工程處橋梁道路維護管理經費編列，過去亦曾有於工務段服務之經驗，因此該幫工程司同時了解工務段與工程處之養護經費編列與使用之流程，非常適合作為本次訪談的對象。

過程中計畫團隊先提供計畫相關的成果與訪談內容，供幫工程司事先了解訪談項目，訪談內容如下表3-3。內容涵蓋三大層面

問題，分別為:分析方法、系統介面、研究成果與實務面之應用。

接著安排107年6月11日至公路總局第二區養護工程處進行訪談 (如圖3.9)。



「公路早期防救災決策支援系統及橋梁管理模組維護」

會議簽到表

壹、 時　　間 ： 107/06/11(星期一)上午10時00分
貳、 地　　點 ： 公路總局第二區養護工程處
叁、 主 持 人 ：
肆、 紀　　錄 ： 吳育偉博士
伍、 出 席 人 員 ：

出 席 單 位	簽　名　欄
公路總局 第二區養護工程處	陳新發
交通部運輸研究所	林雅雯
國立臺灣科技大學	吳育偉

圖 3.9 公路總局第二區養護工程處會議簽到

訪談概要紀錄如下表3-3，根據訪談的實務經驗探討修正研究方向之可行性:

表3-3 訪談討論紀錄

問題	討論	改善對策
一、本研究分析方法 1.對於目前分析方法是否有建議 1-1.風險分析層面(橋梁面臨風險之探討)		
(1) 目前系統所考量改道後社會成本之因子是否合理(如附件簡報P.30所考量之因子)，並計算如P.31之結果，其中以大庄橋為例(表1)，旅行延時成本、車輛運行成本與事故成本，在改道距離0.35km下(圖1)可分別以P.30公式計算得到(如下表2)，加總可得到用路人成本總和23,867。此邏輯是否合理?或是實務上有另外考量之因子?	如欲橋梁無法改道的情況，計算結果是否會出現差異性。 ADT:每日平均交通流量(輛/日)，是否可依一般公路設計採用第30小時(30HV)交通量或考量(尖峰及離峰流量)以年平均每日平均交通量(AADT)	模式中採用之參數改為AADT
(2) 貴單位歷年因為老化維護、地震或洪水等因素之維護經費是否有相關統計資料，是否可提供不同因素所占比例。	經詢問工程處主計單位，目前預算分為一般維護(包含橋梁、道路與邊坡)、災害搶修、地震補強及重建等。預算之執行通常以一個路段進行發包(包含橋、路、邊坡)，較難以區分經費使用狀況。	如能提供相關數據，研究將可進一步分析各風險之比例，如無此數據並未影響整體成果。

表3-3 訪談討論紀錄(續)

問題	討論	改善對策
1-2.維護策略層面(實務經驗)		
(1) 目前工程處如何分配橋梁維護經費?如何考量優先順序與金額分配?	目前橋梁維護經費由本處統籌分配，依據轄下各工務段橋梁定期檢測或是特別檢測成果，如發現橋梁構件劣化(D.E.R.&U.)找出需維修之橋梁。10月份將需求送公路總局彙整，11月份得知核定結果。	與目前系統預設架構相符。
(2) 目前工務段如何分配橋梁維護經費?如何考量優先順序與金額分配?	如上由工務段將須檢測橋梁彙報工程處，再由工程處提送公路總局。	與目前系統預設架構相符。
(3) 系統預設以工程處為經費分配的對象是否合宜?是否改為工務段較符合實際狀況?	建議預設以工程處為經費分配為宜，經費分配及執行進度控管目前由工程處統籌辦理,符合現行方法。	與目前系統預設架構相符。
二、本研究系統介面(P.39~P.47)		
(1) 系統分析結果的呈現是否有修正建議?	目前尚無建議	-
(2) 對於操作流程是有修正建議?	目前尚無建議	-

表3-3 訪談討論紀錄(續)

問題	討論	改善對策
三、研究成果與實務面之應用		
1.針對本研究的橋梁地震風險排序名單與貴單位橋梁地震風險排序是否相同?不同處為何?	本局尚未完成耐震補強橋梁(E類橋梁)會被列為地震風險排序較高橋梁。	模式中根據公路總局所提供最新的耐震補強報告書，更新橋梁補強後之耐震強度值，而未補強之橋梁仍維持原先之耐震能力。
2.針對本研究的橋梁洪水風險排序名單與貴單位橋梁洪水風險排序是否相同?不同處為何?	本局橋基輕微裸露橋梁(B類橋梁)有玄寶大橋、後龍觀雲大橋、西湖溪橋、大安溪橋、大甲溪橋、中彰大橋(WH46)、南雲大橋、育樂橋、長壽橋、仙人橋、炎峰橋、中山橋、龍神橋、陳有蘭溪橋、烏溪橋(63)，供研究團隊參考。	分析模式根據TBMS最新的檢測結果(沖刷裸露)進行分析，如檢測人員有確實填報，耐洪分析結果亦有反應在分析結果上。
3.針對本研究的橋梁老化風險排序名單與貴單位橋梁老化風險排序是否相同?不同處為何?	實務上部分小型橋梁較無維修風險，建議設定門檻，一定規模以下橋梁可忽略。	模式在後續年度中可加入多目標的最佳化維護策略分析方法，同時考量成本、橋梁重要度(可反映小型橋梁問題)同時進行維護策略排序。
4.針對本研究的橋梁維護排序名單(考量地震、洪水及老化)與貴單位橋梁維護排序是否相同?不同處為何?	目前尚無建議	-

表3-3 訪談討論紀錄(續)

問題	討論	改善對策
5.本研究之系統可否利用貴單位資料驗證(如風險排序)？如何結合驗證?	目前尚無建議	-
6.本研究之系統應用於貴單位(風險排序及維護經費編列)是否可行?若目前不可行，請說明原因。	跨水橋(中央管河川、縣管河川)橋梁構件劣化(D&R ≧ 3及U=3一年內)及沿海地區區域排水橋梁會優先處理，其他區域排水或是橋梁跨數較少及跨徑較短之橋梁，劣化情形明顯偏低。	如同多目標的最佳化維護策略分析方法之研究方向，可加入區域排水或是橋梁跨數及跨徑之因子於搜尋過程中。
7.其他有關本研究或系統精進之建議?	本處轄管部分橋梁已完成全橋改建(中港溪橋、竹木橋、北勢大橋、軍功橋、北港溪橋、史港橋、大湳橋、龍神橋)或是基礎換底工程(晉安一號橋、晉安二號橋)，相關評估內容建議應更新。	如有改建之橋梁在TBMS系統中如有更新資料，系統模式亦會一併更新。

根據上述訪談結果與107年8月31日與港研中心工作會議討論結果，可得到系統未來改善之方向，主要結論為目前實務上維護策略常有因為考量橋梁長度、跨徑或跨數等橋梁規模之因素，但在目前的研究架構下，如需考量這些因素將與原本研究的主要目標求得風險成本最小化之方向相違背。因此建議後續年度中，修正研究方向為可同時考量橋梁風險成本、橋梁長度、跨徑或跨數等多項搜尋目標。

3.6 檢核目前影響因子是否足夠推求實際橋梁現況之耐震能力

本系統之耐震能力資料庫之依據係延續交通部運輸研究所委託國家地震中心之「公路橋梁地震早期損失評估資料庫建置與模組開發之研究(2/2) 」中公路橋梁地震早期損失評估資料庫（以下簡稱TELES橋梁資料庫）研究成果，故後續橋梁相關基本資料如有更新時如能涵蓋TELES欄位，就可避免資料缺漏之問題。TELES在該案中透過資料校正與現地調查逐一確保資料庫內容的正確性和完整性，以提升公路橋梁地震早期損失評估分析模組的精確度。隨著該計畫結束，未來臺灣仍會有許多橋梁和高架道路的改建或興建工程，資料庫內容若無法與現實狀況一致，橋梁地震早期評估的結果即會失去其意義。而臺灣地區橋梁管理資訊系統TBMS是目前臺灣地區唯一較完善的橋梁資料管理系統，不僅對公路橋梁資料有詳細的紀錄，甚至鐵路橋梁、高速公路橋梁和各縣市政府管轄的公路橋梁都有比較完整的資料。

因此本階段根據國震中心報告成果所整理TELES與TBMS之欄位差異。TBMS資料庫欄位若能加入TELES欄位結合，未來僅需從TBMS中匯出資料即可供橋梁耐震評估使用。參考文獻[劉季宇、葉錦勳等，2011]所整理表3-4，耐震能力評估所需的橋梁資料多數欄位皆可由TBMS中取得，但仍有部分為須新增之欄位，後續建議可加入TBMS系統基本資料表中，但是可在欄位填寫需求上備註非必填項目。

表3-4 耐震能力評估所需欄位和TBMS欄位比較表[劉季宇、葉錦勳等，2011]

耐震能力所需欄位		TBMS 參考欄位			TBMS 資料轉換 TELES 資料建立方式	TBMS 資料庫否足以 TELES 使用
欄位名稱	欄位說明	資料類別	中文名稱	下拉式選單內容		
Office	工程處	管理	工程處		參考 TBMS 對應欄位	是
M_Office	工程處代碼				參考 TBMS 對應欄位	
Branch	工務段	管理	工務段		參考 TBMS 對應欄位	是
Branch_ID	工務段代碼				參考 TBMS 對應欄位	
Route_name	路線名稱	管理	路線		參考 TBMS 對應欄位	是
Route_ID	路線代碼				參考 TBMS 對應欄位	
Name	橋梁名稱	管理	橋梁名稱		參考 TBMS 對應欄位	是
Mileage_km	里程公里數	管理	橋頭里程(K)		以橋頭里程為主	是
		管理	橋尾里程(K)			
Mileage_m	里程公尺數	管理	橋頭里程(M)		以橋頭里程為主	是
		管理	橋尾里程(M)			
ID	橋梁代碼	管理	工程處		參考 TBMS 對應欄位	是
		管理	工務段			
		管理	路線			
		管理	橋頭里程(K)			
		管理	橋尾里程(K)			
		管理	橋頭里程(M)			
		管理	橋尾里程(M)			
Length	橋長(公尺)	幾何	橋梁總長		參考 TBMS 對應欄位	是
Width	橋寬(公尺)	幾何	最大淨寬		以最大淨寬為主	是
		幾何	最小淨寬			
Deck_area	橋面積(平方公尺)	幾何	橋版投影面積		1 參考 TBMS 對應欄位 2.橋長×橋寬	是
Numunits	振動單元數	無資料				否
Numspans	跨數	幾何	總橋孔數		參考 TBMS 對應欄位	是
Maxspanlen	單跨最大長度(公尺)	幾何	最大跨距		參考 TBMS 對應欄位	是
FoundType	基礎形式	結構	橋台基礎型式	樁基礎、沈箱基礎、直接基礎、其他、無、無法檢測	1.橋墩基礎型式 2.橋台基礎型式	是
		結構	橋墩基礎型式			
Skewangle	歪斜角	無資料				否
Ft_val	抗液化能力	結構	橋台基礎型式	樁基礎、沈箱基礎、直接基礎、其他、無、無法檢測	由 TELES 建立好的 FoundType 欄位取樁基礎與沉箱基礎為 2，混合基礎為 1.5，直接基礎為 1	是
		結構	橋墩基礎型式			
Cost	重建成本(百萬元)	管理	造價		1.參考 TBMS 對應欄位 2.BrdgCost 檔之單位橋面板面積單價，分為深基礎及淺基礎	是

耐震能力所需欄位		TBMS 參考欄位			TBMS 資料轉換 TELES 資料建立方式	TBMS 資料庫否足以 TELES 使用
欄位名稱	欄位說明	資料類別	中文名稱	下拉式選單內容		
Z_coeff	設計水平加速度(g)	設計	設計水平地表加速度		1.參考 TBMS 對應欄位 2.BrdgAy_2 檔，使用 Town_code 對照欄位，以設計年代(Dsg_Year 欄位)作為規範年代分界	是
Soiltype	地盤種類	設計	地盤種類	第一類地盤、第二類地盤、第三類地盤、臺北盆地、不詳、無法取得	1.參考 TBMS 對應欄位 2.由橋梁座標點位對應 Tract 檔可決定	是
SoilLqf	土壤液化敏感類別	無資料				否
LandSlide	山崩敏感類別	無資料				否
Waterdepth	地下水位(公尺)	無資料				否
Class	橋梁類別	幾何	總橋孔數		總橋孔數→單跨、多跨 結構型式→拱橋、斜張橋、桁架橋為其他橋梁 支承端型式→簡支、連續 橋墩型式→單柱、構架式或壁式 竣工年→民國 84 年以後者統一訂為經耐震設計橋梁 最近一次維修年→民國 84 年以前者仍訂為未經耐震設計，以後者訂為經耐震補強	是
		結構	結構型式	版橋、梁式橋、箱型橋、拱橋、桁架橋、懸索橋、斜張橋、剛架橋、簡支梁、其他		
		結構	支撐端型式	簡支、連續式、懸臂式、剛架式、其他		
		結構	橋墩型式	牆式、單柱式、多柱式、樁排架式、塔式、其他、無		
		管理	竣工年			
		管理	最近一次維修年			
X	橋梁中點 X 座標	幾何	橋頭 GPS 經度		計算橋梁中點 X 座標	是
		幾何	橋尾 GPS 經度			
Y	橋梁中點 Y 座標	幾何	橋頭 GPS 緯度		計算橋梁中點 Y 座標	是
		幾何	橋尾 GPS 緯度			
Comp_year	完工年代(民國)	管理	竣工年		參考 TBMS 對應欄位	是
Dsg_Year	橋梁設計年代(民國)	管理	竣工年		竣工年-2	是
ScourDepth	沖刷深度(公尺)	無資料				否

3.7 製作系統操作手冊

此階段根據近年系統維護更新成果，製作系統操作手冊，其章節架構如下表3-5所示，並包含系統安裝說明。

表3-5 系統手冊目錄架構

章節	頁碼
第一章　前言	16
第二章　公路防救災決策支援系統各功能模組介紹	17
2.1 橋梁資料管理	19
2.1.1 橋梁基本資料	19
2.1.2 橋梁破壞模式	21
2.1.3 橋梁補強技術	27
2.1.4 橋梁評估表單	30
2.1.5 橋梁振動頻率紀錄	78
2.1.6 橋梁維護與風險管理	81
2.1.7 橋梁保護工法資料	83
2.1.8 橋梁法規資料	84
2.2 邊坡資料管理	85
2.2.1災前預防階段	85
2.2.2災中搶修階段	94
2.2.3災後復健階段	102
2.3 GIS資料管理	125
2.2.1 橋梁GIS資料	126
2.2.2 邊坡GIS資料	127
2.4 巡檢路線規劃	136
2.5 災害資訊管理	139
2.5.1 山區道路易致災路段監測預警管制系統	139
2.5.2 跨河橋梁監測預報資訊	144
2.5.3 橋梁地震破壞潛勢	151
2.6 系統維護	152
2.6.1 使用者管理	152
2.6.2 權限設定	158
2.6.3 使用說明	159
2.6.4 系統參數設定	161
2.6.5 版本說明	161
第三章　系統軟硬體需求	163
第四章　系統安裝說明	164
4.1 Java2 SDK 安裝步驟	164
4.2 SQL Server 安裝步驟	167

章節	頁碼
4.3 Jsp Server 安裝步驟	173
4.4 ESRI ArcGIS Server安裝步驟	175
第五章　系統軟硬故障排除說明	185
5.1 軟體部分	185
5.2 硬體部分	185

第四章　鋼結構橋梁維護分析模式精進

橋梁是臺灣重要的交通工程設施之一，因臺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，臺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，因為臺灣位處地震帶上，導致臺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，臺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(去年度進度)

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。並參考交通部運輸研究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。

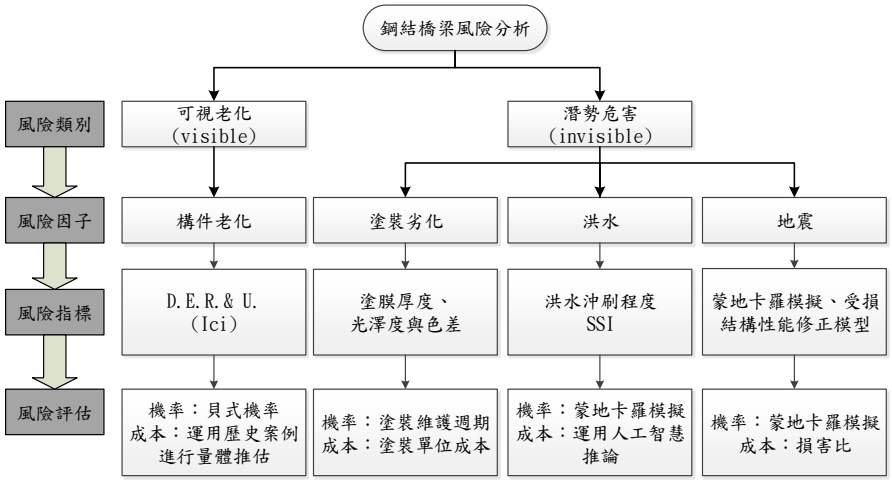


圖 4.1 鋼橋風險評估架構

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。

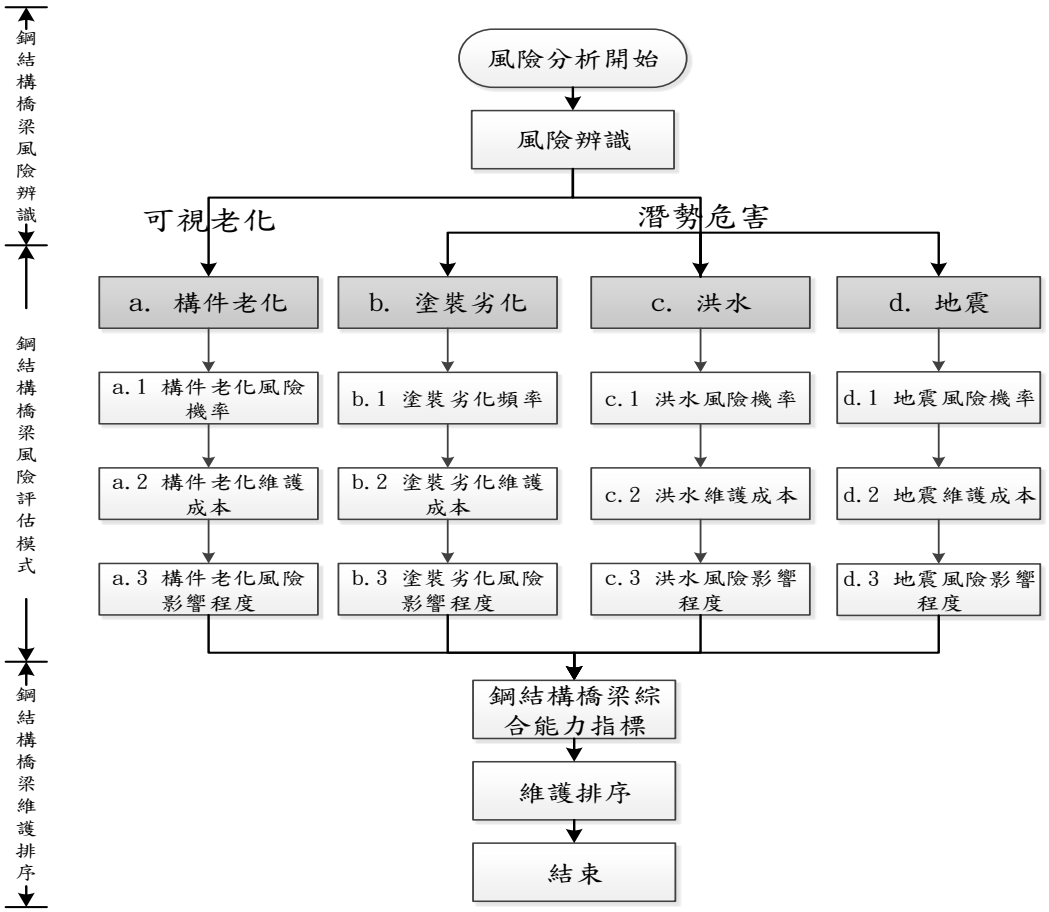


圖 4.2 鋼橋風險評估模式流程

1.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。

2.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，再應用貝氏分析、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。

3.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。

$$E_S(Cost)=E(MC)+E(RC) \quad \text{..... (4.1)}$$

其中:

ES(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。

$$Es(Cost)=\left(P_{MD_{ij}}\times C_{MD_{ij}}+P_{MC_{ij}}\times C_{MC_{ij}}+P_{MS_{ij}}\times C_{MS_{ij}}+P_{S_{ij}}\times C_{RS_{ij}}+P_{ME_{ij}}\times C_{ME_{ij}}+P_{E_{ij}}\times C_{RE_{ij}}\right)$$

.....(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

4.1.2.1 可視危害(Visible)部分

臺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.構件老化風險機率

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。

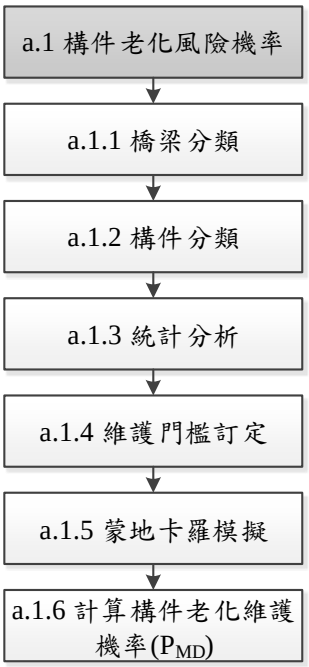


圖 4.3 構件老化風險機率評估流程圖

(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。

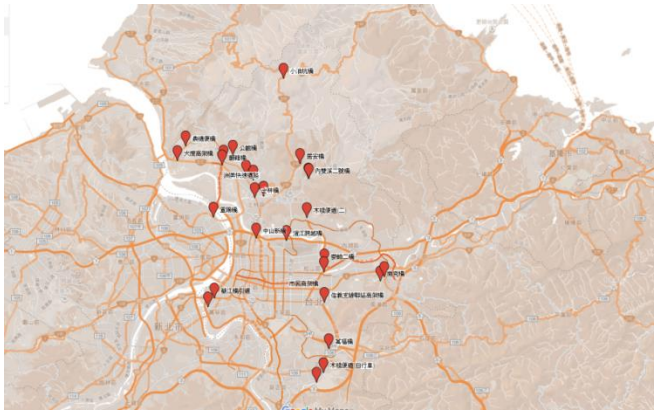


圖 4.4 位於臺北市鋼結構橋梁

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)。

a 橋梁各構件指標Ic_i：

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

b 橋梁整體狀況指標 CI：

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

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。

c 優選指標 PI：

僅考慮 5~6、12~16、18~20 項的構件進行權重分配

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

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)貝氏分析推估年維護次數

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	
	最速使用年期速率(r0)	最緩使用年期速率(r1)	最速使用年期速率(r0)	最緩使用年期速率(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。

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

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

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分析，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)。

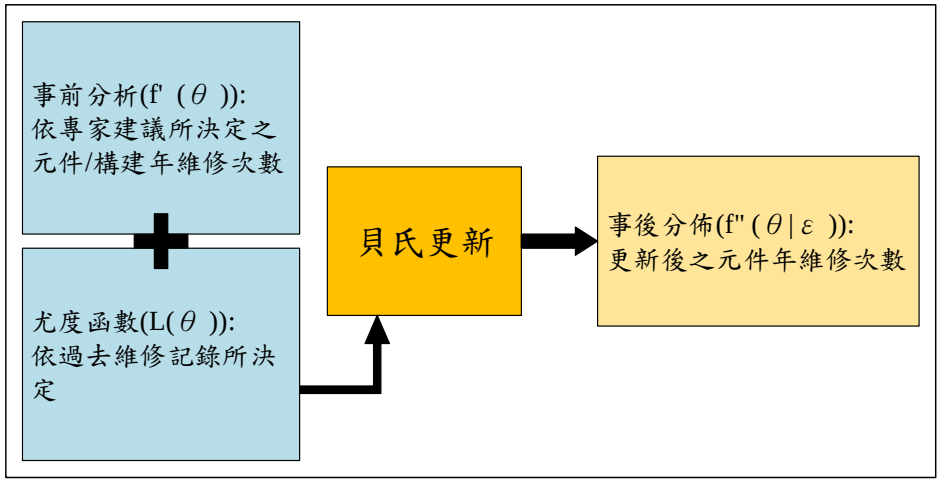


圖 4.7 貝氏分析流程圖

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

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

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)與(式 4.10)所示。

v"=v'+t ， k"=k'+x .....(4.10)

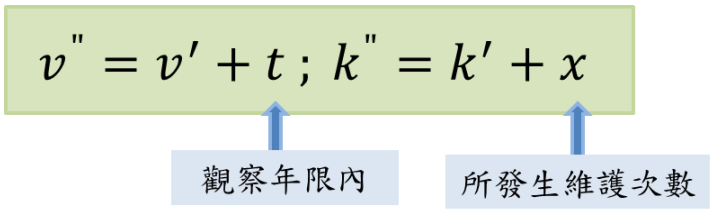


圖 4.8 運用橋檢資料貝氏更新

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

$$k' = \frac{1}{C.O.V^2}，v' = \frac{k}{AVG} \quad (4.11)$$

$$k'' = k' + x，v'' = v' + t \quad (4.12)$$

$$Avg = \frac{k''}{v''}，Cov = \frac{1}{\sqrt{k''}} \quad (4.13)$$

(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。

2.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

(1)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，用貝氏分析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 4.14)，可供後續推估更加逼近真實。

$$\text{修正係數}=\frac{\text{歷史平均年維護費用}}{\text{推估之平均年維護費用}} \quad \text{..... (4.14)}$$

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。

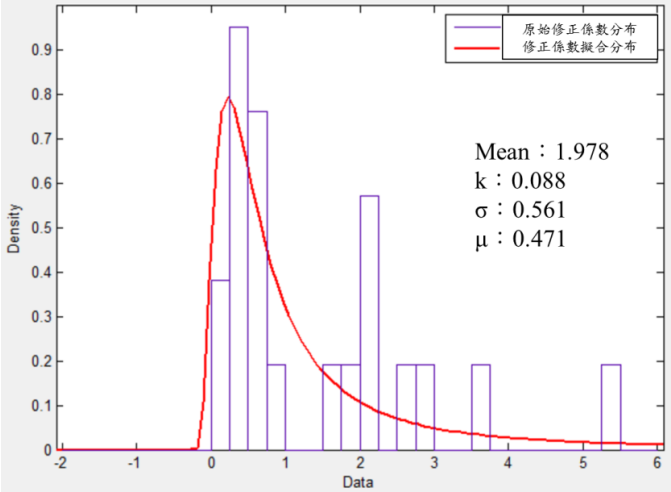


圖 4.9 修正係數分布

(2)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)。

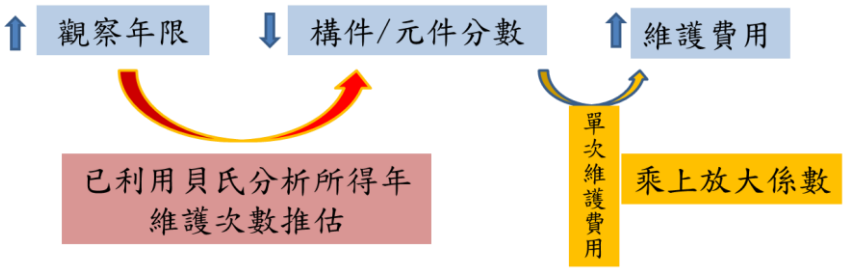


圖 4.10 改變單次維護費用流程圖

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。

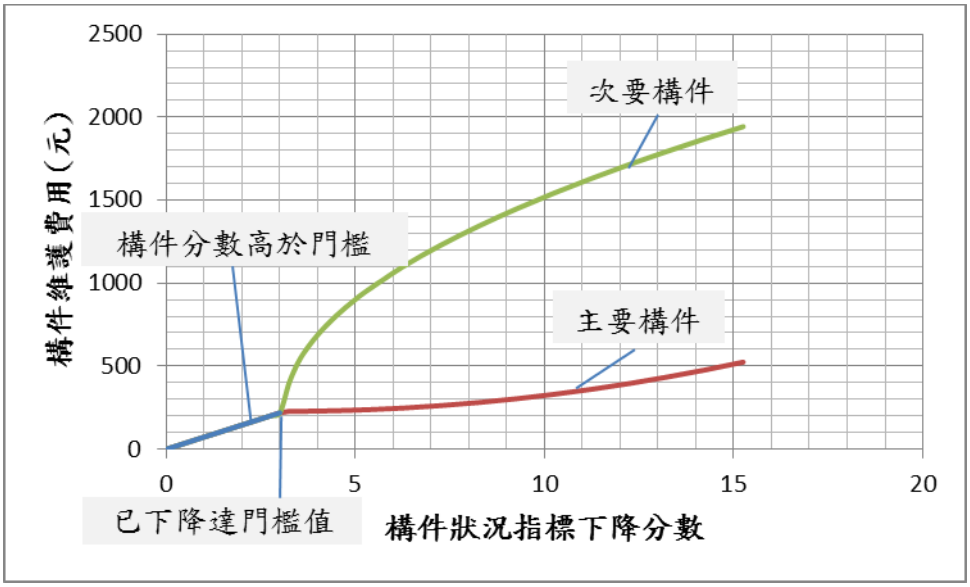


圖 4.11 下降分數對應維護費用上升

(3)定期維護成本

前面由貝氏分析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 4.15)，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)=劣化後構件分數機率分.....(4.15)

建立分數所對應的維護費用關係式(式4.16)，為上一小節所提：

C(x)=劣化構件分數與維護經費關係.....(4.16)

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4.17)為：

$$Cost=\int_0^{100}[f(x)\times C(x)]dx \quad \text{.....(4.17)}$$

4.1.2.2 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[中華民國鋼結構協會，2011]，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：

$$\text{塗膜使用年限}=\frac{\text{膜厚}\times 0.8}{\text{塗膜厚度消耗速率}} \quad (4.18)$$

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。

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.洪水維護風險機率

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：

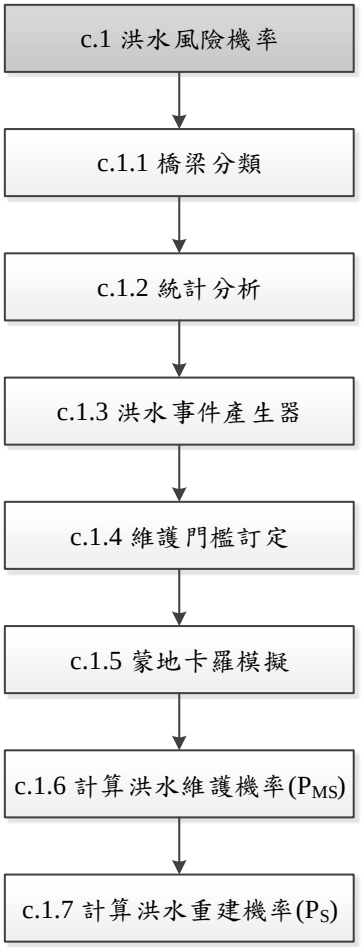


圖 4.13 洪水維護風險機率評估流程圖

(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 臺灣主要河川分布圖(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 臺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 臺灣主要河系	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)洪水事件產生器、(4)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。

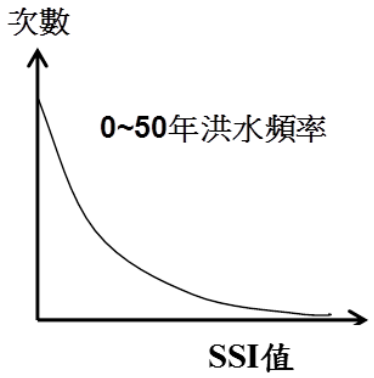


圖 4.15 發生 50 年洪水時對應 SSI 指標下降

(5)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。

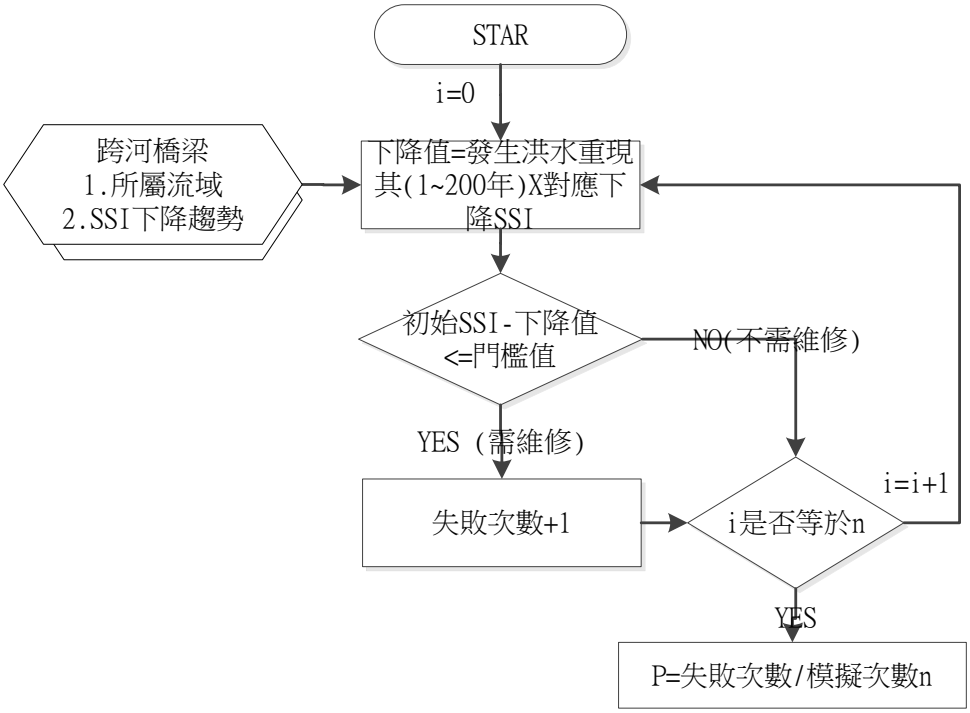


圖 4.16 洪水造成維護機率蒙地卡羅計算流程圖

(6)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

(7)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。

3.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：

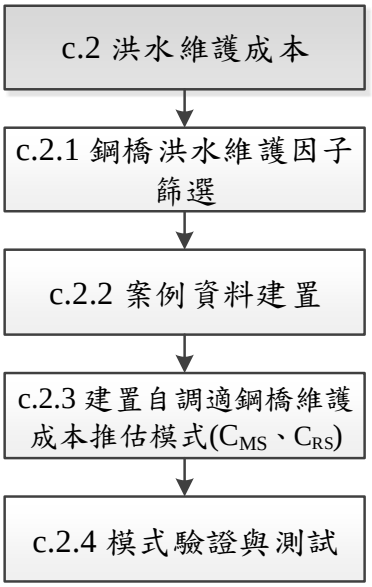


圖 4.17 洪水維護成本分析流程圖

(1)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

(2)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

(3)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。

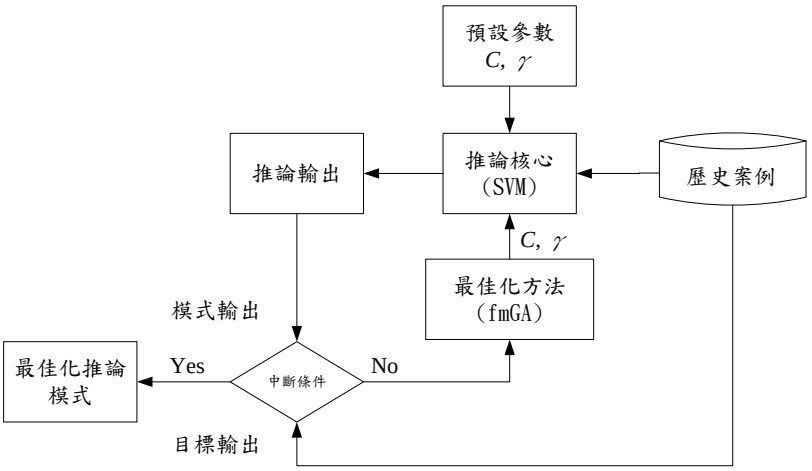


圖 4.18 人工智慧橋梁洪水維護成本推論模式

(4)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-跨河橋梁(洪水) 如表 4-35。

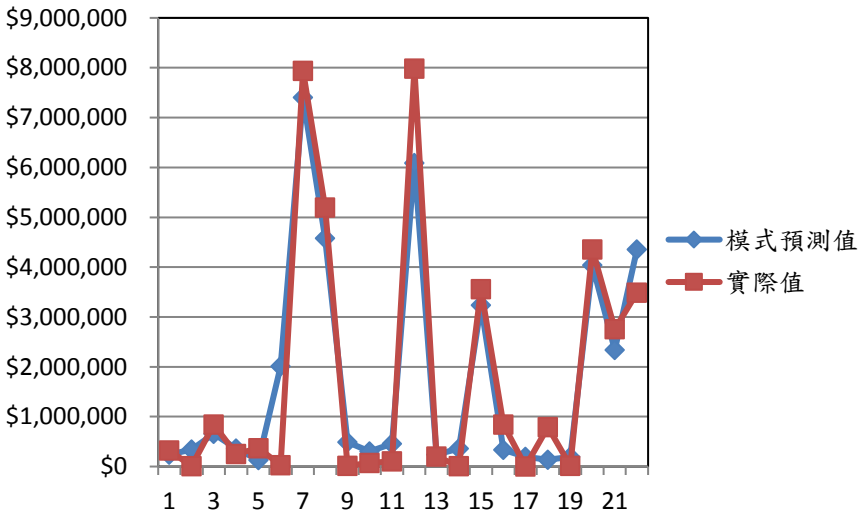


圖 4.19 橋梁風險影響程度預測值與實際值比較-跨河橋梁(洪水)

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

(5)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。

4.地震維護機率

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。

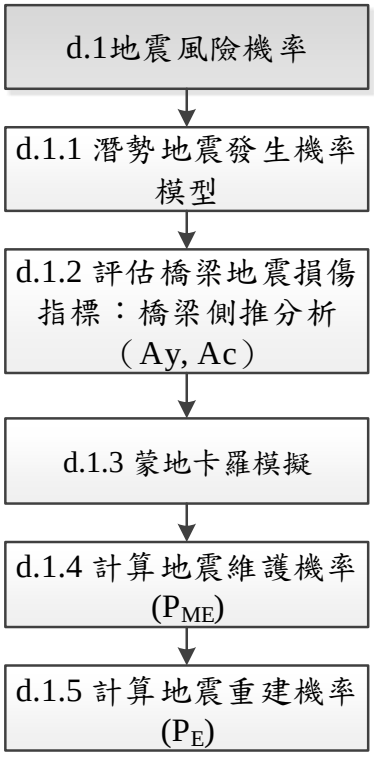


圖 4.20 地震造成維護機率計算流程圖

(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。

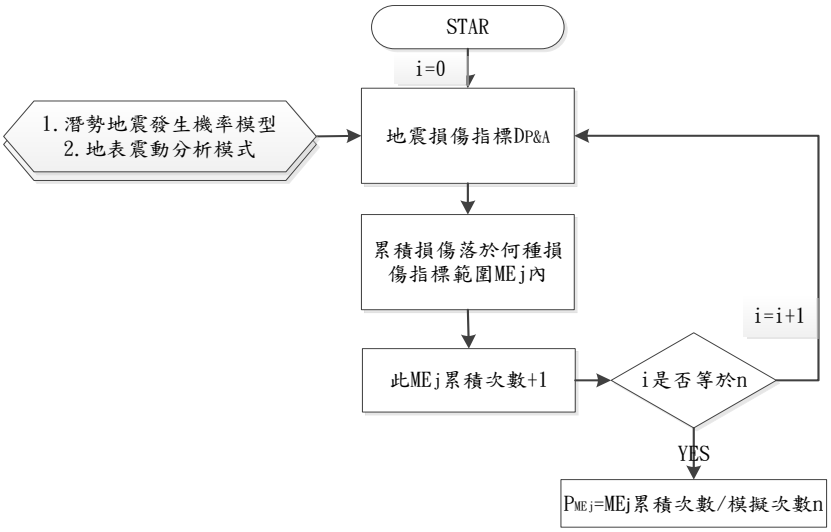


圖 4.21 地震造成維護機率蒙地卡羅計算流程圖

(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 4.19 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。

$$D_{P\&A}=\frac{\delta_M}{\delta_u}+\frac{\beta}{F_y\delta_u}\int dE \qquad \text{.....(4.19)}$$

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 4.20、4.21 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。

$$\delta_y^i = \delta_M^{i-1} - \delta_r^{i-1} \quad \text{.....(4.20)}$$

$$\delta_u^i = \delta_u^{i-1} - \delta_r^{i-1} \quad \text{.....(4.21)}$$

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 4.22 所示。

$$D_{P\&A}^i = \frac{\max\{\delta_1, \delta_2, ..., \delta_i\}}{\delta_u} + \frac{\beta}{F_y \delta_u} \sum_{i=1}^{i} \int dE \quad \text{.....(4.22)}$$

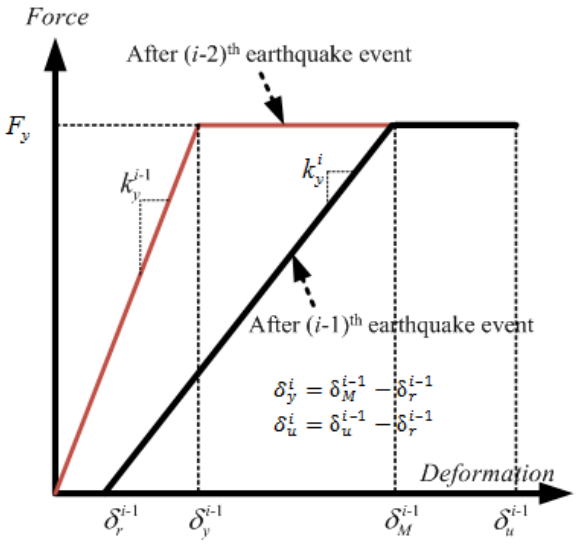


圖 4.22 震後結構性能修正示意圖

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 850 次，則對應之損傷分級落在輕微損傷之機率為 850/10000=8.5%。以此類推，即可匯出圖 4.23 之關係曲線。

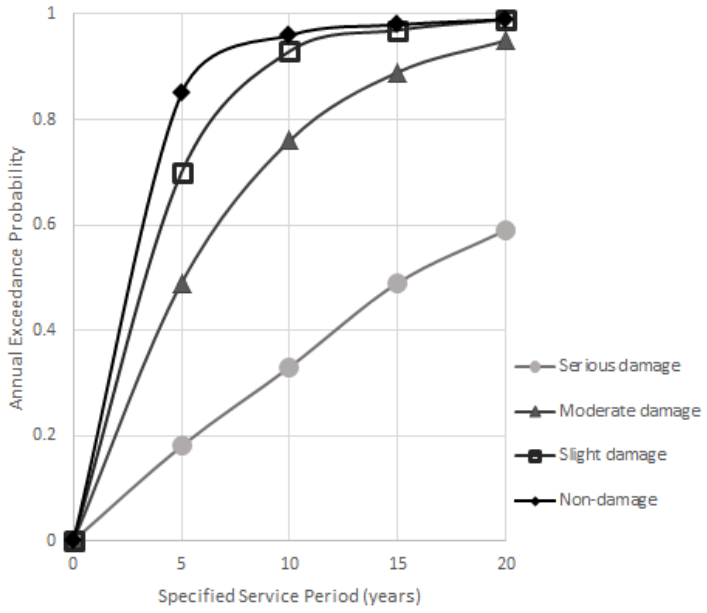


圖 4.23 未來損傷分級機率關係曲線

(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 8 次，因此可得到地震造成重建機率 PE=8/10000=0.08%。

5.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所示，各步驟如下圖 4.24 所述：

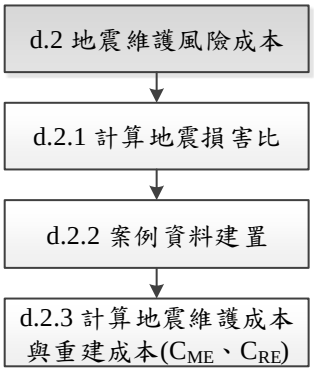


圖 4.24 地震維護成本分析程圖

(1)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(4.23)。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。

$$\frac{C_L}{C_I} \quad \text{.....(4.23)}$$

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。

(2)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。

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

4.2 群橋生命週期維護策略最佳化模式(本年度進度)

根據上述的鋼橋風險評估成果與 TRENDS 系統過去針對鋼筋混凝土橋梁之評估結果，本章將同時將公路總局轄管的鋼筋混凝土橋梁與鋼橋同時進行群橋維護成本最佳化分析。在橋梁管理單位有限維護預算下，搜尋群橋生命週期最佳維護時機與最小成本。本階段建立群橋成本維護最佳化模式，在二十年橋梁的壽齡中，各橋梁在不同時機維護，其損壞機率與維護成本不同，群橋維護之時間點組合方案眾多，難以估計，若以傳統試誤法等方式求解，將無法在短時間內求得。因此本計畫擬使用生物共生演算法(SOS)，分別計算不同維護方案之風險影響程度，再以最佳化模式找出群橋生命週期總風險成本最低之維護組合。其方法以保持生物共生時的多樣性及加速收斂的效果，搜尋最佳化結果，使得群橋維護總成本最低，如此橋梁管理單位即可依此規劃長程群橋之維護策略，以便將有限資源做最有效運用。

此階段分成三部分做介紹，分別為建立目標函數與限制式、生物共生演算法最佳化搜尋以及群橋生命週期維護成本最佳化。流程如圖 4.25 所示。

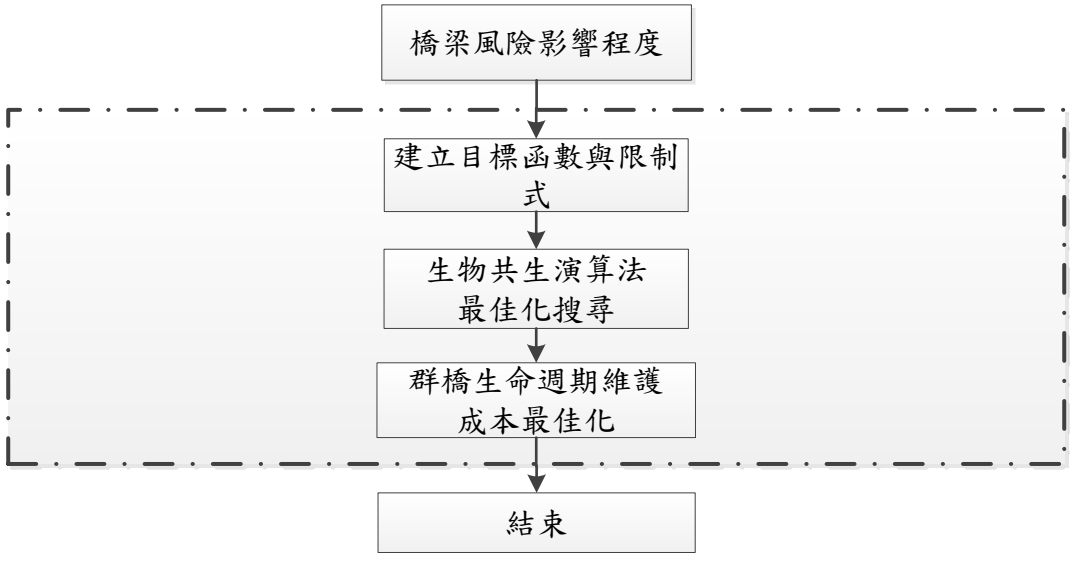


圖 4.25 群橋維護成本最佳化流程圖

4.2.1 群橋最佳化模式之目標方程式

將各橋之風險期望成本 E_B(Cost)加總可得到群橋風險期望成本 E_{GT}(Cost)，E_B(Cost)之計算方式如圖 4.2 所示，而群橋維護最佳化之目標方程式，係以各工程處之預算為限制條件(式 4.24)，找出群橋生命週期最小的風險期望成本 E_{GT}(Cost)，如公式 4.24。

$$\mathrm{Min}E_{GT}(\mathrm{Cost}) = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} E_{Bij}(\mathrm{Cost}) \quad \text{.....(4.24)}$$

式 4.24 中:

E_{GT}(COST):群橋風險成本(Total Risk Cost of Group Bridges)

$\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} E_{Bij}(\mathrm{Cost})$:同一工程處各橋梁 j，與 i 年內之風險成本總和。

4.2.2 群橋最佳化模式之限制式

本模式之限制式為橋梁管理單位的維護預算，以第 i 年為例，最佳化需滿足第 i 年之預算限制(如式 4.25)。在生物共生演算法最佳化搜尋過程中會用隨機組合之方式，來找出滿足最小群橋風險成本 E_{GT}(Cost)同時又滿足限制式的維護策略。

For i=1 to 20

$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^{m} E_{ij}(MC) \le B_i \quad \text{.....(4.25)}$$

END

式 4.25 中

m:工程處轄區橋梁總數

Bi:第 i 年度預算(Budget)

j:為同一橋管單位之第 j 座橋梁

i 某段期間橋梁的使用年限，本計畫 i=1~20 年(本計畫維護

策略設定為 20 年，不過也可依橋管單位設定求得 20,25,30 年之維護策略)。

4.2.3 生物共生演算法

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)。

生物共生演算法是以其他演算法為研究基礎所發展出的演算法，SOS 可在搜尋空間不斷地迭代候選解，進而求得全域最佳解。在 SOS 演算法中，初始假設數值空間是一個生態系統，在這個生態系統搜尋空間中，會有一組隨機生成的生物群，生物群中的每一個生物體代表一個對應問題的候選解，同時每一個生物體在生態系統中也代表一組目標適存值(Fitness value)，這個目標適存值會反映預期目標的適存程度。如圖 4.26，先輸入橋梁相關參數，應用 SOS 搜尋，輸出群橋維護策略方案。

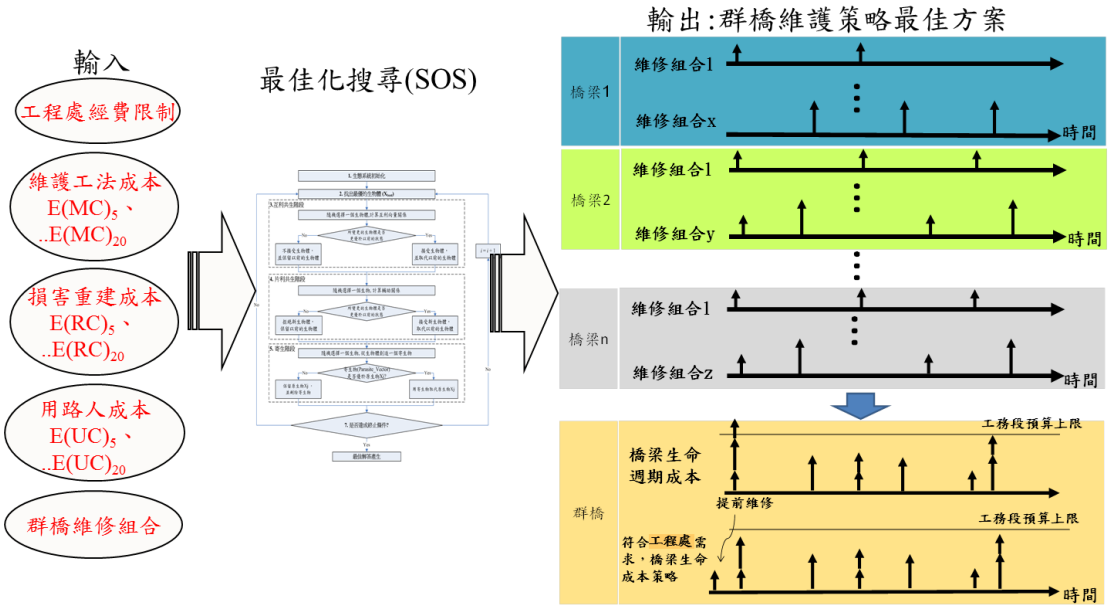


圖 4.26 群橋最佳化應用 SOS 演算法程序

首先在程式中輸入工程處經費限制，本計畫以二區工程處為例，根據過去年預算平均值為 1,407,154,097 元/年，但是因為公路總局歷年預算變動較大，因此於本研究中先取兩倍標準差(其定義為可涵蓋 95%數值分布)進行計算，而使用者仍可以手動調整各年度之預算值。如果加入兩個標準差作為搜尋之預算限制，因此二區工程處之年維護預算約為 3,780,217,329 元/年。接著執行程式，程式自動輸入相關參數彙整資料等，如表 4-39 所示。接著進入到 SOS 演算法詳細演算流程，如圖 4.27 所示。

表4-39 橋梁相關參數彙整(節錄)

ID	E(MC)1	E(MC)2	E(MC)3	E(MC)4	E(MC)5	E(MC)6	E(MC)7	E(MC)8	E(MC)9
B01-0010-010A	1,328,270	1,800,995	2,179,175	2,651,900	2,935,535	3,030,080	3,030,080	3,124,625	3,227,619
B01-0010-091A	19,233	48,418	150,565	208,935	362,802	746,973	768,215	811,993	826,585
B01-0010-092A	151,915	387,555	579,013	755,743	785,198	1,020,838	1,183,793	1,655,382	1,817,244
B01-0010-097A	4,640	8,644,640	23,764,640	29,164,640	35,649,405	37,817,348	43,212,582	47,529,405	49,690,994
B01-0010-097E	2,724,640	12,244,640	13,604,640	20,404,640	21,764,640	23,124,640	28,564,640	34,004,640	40,807,206
B01-0010-097C	1,664,860	4,198,880	6,296,000	8,130,980	8,742,640	9,529,060	11,889,851	12,678,135	13,726,232
B01-0010-098A	81,990	217,353	314,040	449,403	497,608	687,806	763,568	977,869	1,095,482
B01-0010-098E	537,760	1,537,360	2,403,680	3,403,280	4,336,240	5,135,920	5,277,788	5,945,261	6,017,748
B01-0010-099A	942,140	2,442,140	4,692,140	5,067,140	6,005,151	6,754,756	7,130,120	7,694,029	9,192,703
B01-0010-101A	4,640	23,865	23,865	43,090	62,973	62,981	63,110	160,174	181,348
B01-0010-103A	46,185	150,047	191,592	253,910	358,707	420,505	586,649	710,997	815,056
B01-0010-108A	25,168	168,860	292,025	394,663	478,784	621,695	662,024	1,031,984	1,113,647
B01-0010-112A	4,640	871,303	1,501,603	1,974,328	2,456,583	2,686,592	3,009,684	3,238,104	3,398,856
B01-0010-116A	64,215	123,790	540,815	659,965	957,840	1,434,440	1,791,890	2,089,765	2,390,344
B01-0010-117A	7,024,640	17,554,640	20,674,640	26,524,640	33,934,640	40,564,640	44,854,640	47,974,640	57,730,994
B01-0010-118A	194,303	421,898	763,290	1,066,750	1,229,599	1,526,705	1,754,300	1,942,374	2,290,121
B01-0010-125A	56,703	264,953	369,078	785,578	1,364,619	1,727,468	2,043,020	2,298,567	3,030,619
B01-0010-126A	203,218	534,180	997,528	1,328,490	2,122,800	2,850,918	2,983,303	3,380,458	3,645,698
B01-0010-131A	724,640	1,264,640	1,804,640	2,704,640	5,055,759	5,590,994	6,678,936	7,394,171	8,469,405
B01-0010-132A	1,159,640	1,621,640	2,314,640	3,238,640	3,931,640	4,162,640	14,431,345	17,345,237	21,030,929
B01-0010-132E	206,008	474,498	608,743	810,110	944,355	1,279,968	1,749,825	2,152,560	2,219,849

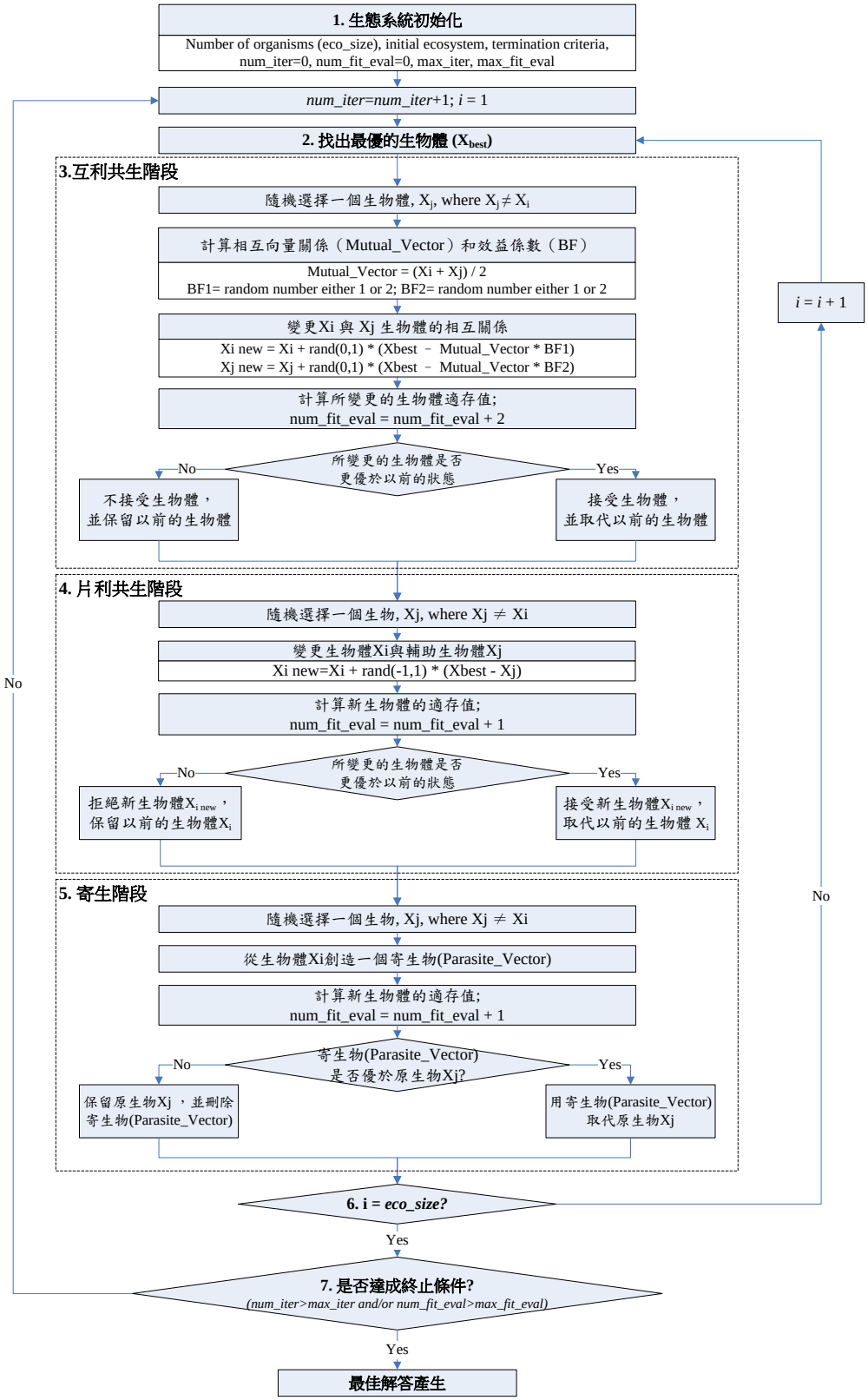


圖 4.27 SOS 演算法程序

1.生物系統初始化，設定生物體數量與邊界條件

本計畫將設定 SOS 演算法中的生物體數量為 50 個，且每一個生物體即代表一種維護策略組合。因此，本階段會以隨機的方式產生這 50 個生物體的維護策略組合，後續在疊代的過程中各生物體之間，會在 SOS 的共生行為中，互相影響維護策略的組合。

以二區工程處為例，二區工程處橋梁數量總共有 920 座，其生命週期之規畫以 20 年為例的話，其結果將會有 18,400 個欄位(即 920 乘以 20 等於 18,400)，然後這 18,400 的欄位會有 18,400 的平方種組合(因本程式假設維護或不維護是應用二進制之方法為 0 與 1，因此為平方關係)。因 SOS 演算法最佳化搜尋的空間維度特性主要為連續數值，且因本課題維護或不維護為二進制之問題，因此需要將連續數值轉換為二進制(如：連續數值 42 轉換二進制結果為 0011010000110010)其中 0 代表不需維護、1 即代表需維護。

2.找出最優的生物體(Xbest)

此步驟將會在迭代過程中找出最好的適存值維護策略紀錄。

3.互利共生階段

舉例來說，互利共生是指兩種不同的生物，彼此互助互惠生存的關係，像是蜜蜂與花，蜜蜂在花朵間飛舞採花蜜，這個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，在此的 SOS 階段就像是一種互惠關係。

在 SOS 中，Xi 代表一個生物體在生態系統中的第 i 個成員，且 Xi 在每次的疊代過程中都會輪流轉換，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。這兩種生物體彼此之間會互助互惠，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 Xinew 和 Xjnew 如式(4.26)式(4.27)。

$$X_{i\,\mathrm{new}} = X_i + rand(0,1) * (X_{best} - Mutual_Vector * BF_1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.26)$$

$$X_{j\,\mathrm{new}} = Xj + rand(0,1) * (X_{best} - Mutual_Vector * BF_2) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.27)$$

在這裡利益因素(BF_1、BF_2)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。公式 4.28 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，只有當新的適存值優於之前的互動適存值，生物體才會被更新，如 Xi new 的適存值優於 Xi 的適存值，即 Xi 的維護策略會被 Xi new 取代。

$$Mutual_Vector = \frac{X_i + X_j}{2} \quad \text{.....(4.28)}$$

4.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，如果有獲益或是損益的話也是很小的。

在 SOS 中，互利共生階段的生物體 Xj 為從生態系統中被隨機挑選出來與生物體 Xi 互動的生物體。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 4.29。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。即程式會隨機產生一介於-1 至 1 的數值，該數值會乘上步驟二已找出的 Xbest，之後再加上 Xi 得到新的適存值，如 Xi new 的適存值優於 Xi 的適存值，即 Xi 的維護策略會被 Xi new 取代。

$$X_{i\,\text{new}} = X_i + rand(-1,1) * (X_{best} - X_j) \quad \text{.....(4.29)}$$

5.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

存值。如果寄生蟲載體有更好的適存值，它會殺死生物體 Xj，並取代其在生態系統中的地位。如果 Xj 有更好的適存值，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，公式如 4.30 所示。

IF FitnessValue(Parasite_Vector) >FitnessValue(X_j) THEN $X_j = X_j$
IF FitnessValue(Parasite_Vector) ≤ FitnessValue(X_j) THEN X_j =Parasite_Vector
.....(4.30)

6.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。本計畫之迭代次數為 1500 次，並驗證至其收斂。

7.滿足終止條件

滿足終止條件時，SOS 將會停止計算。得到最小之 LCC 群橋維護最佳化目標、最佳維護策略與 E(MC)橋梁維護風險成本。

4.2.4 群橋生命週期維護成本應用

本計畫導入生命週期成本導向之概念，建置群橋維護策略最佳化模式，如圖 4.28 之示意。由於同一橋梁在不同時間點執行維護下，有不同之效益，即維護方案執行後使設施保持健康或堪用狀態的程度可能會有所差異。因此，根據各橋梁之劣化曲線，求得橋梁殘餘能力，再依照前述之計算成果與 4.1 節之計算公式求得群橋各橋梁風險，並加總求得生命週期維護風險成本 E_B(Cost)，最後在符合維護預算限制下，找出最小之 E_{GT}(Cost)，來決定工程處各橋梁因年限、外力影響受損之最佳維護時機。

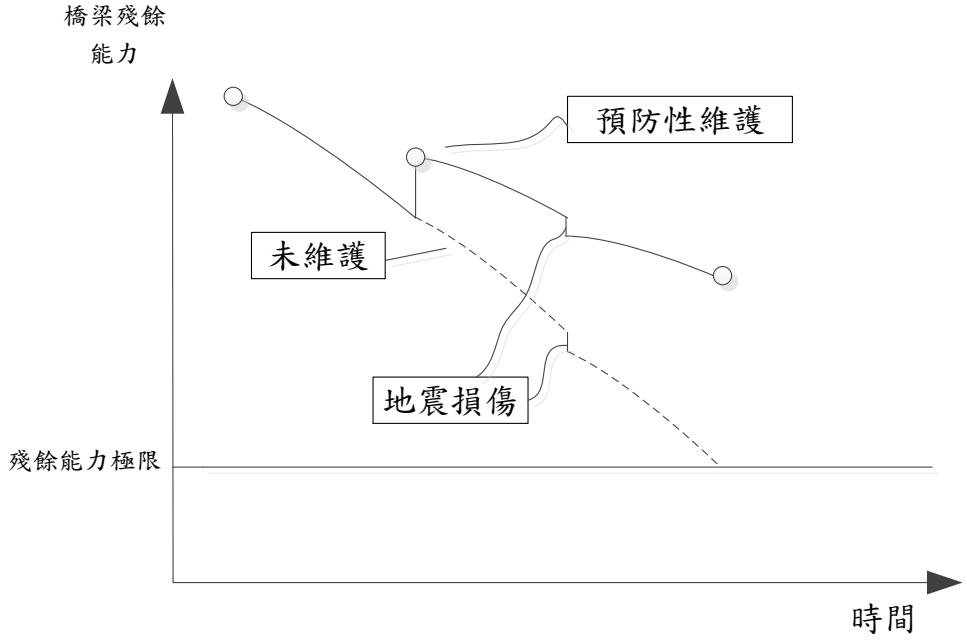


圖 4.28 橋梁維護策略示意圖

已完成建置之網頁程式可供使用者查詢，如圖 4.29 所示。橋梁維護與風險管理項目中分為單橋維護策略與群橋維護策略(圖 4.29)。

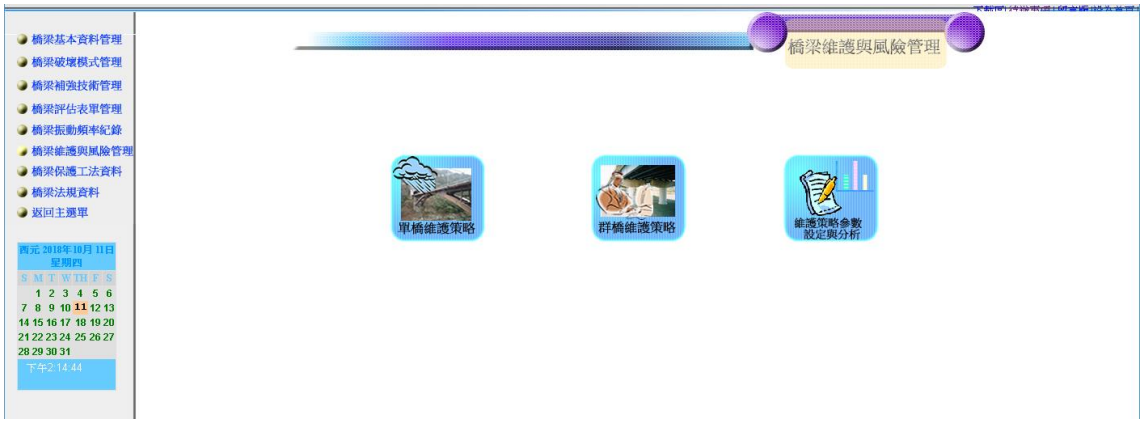


圖 4.29 橋梁維護與風險管理功能

點選單橋維護策略(圖 4.30)，並設定要搜尋之條件。

圖 4.30 設定搜尋條件

以第一區景美工務段為例(圖 4.31)，各橋梁因為老化、洪水、地震及塗裝劣化之維修機率以清單列出，並可分別進行排序。

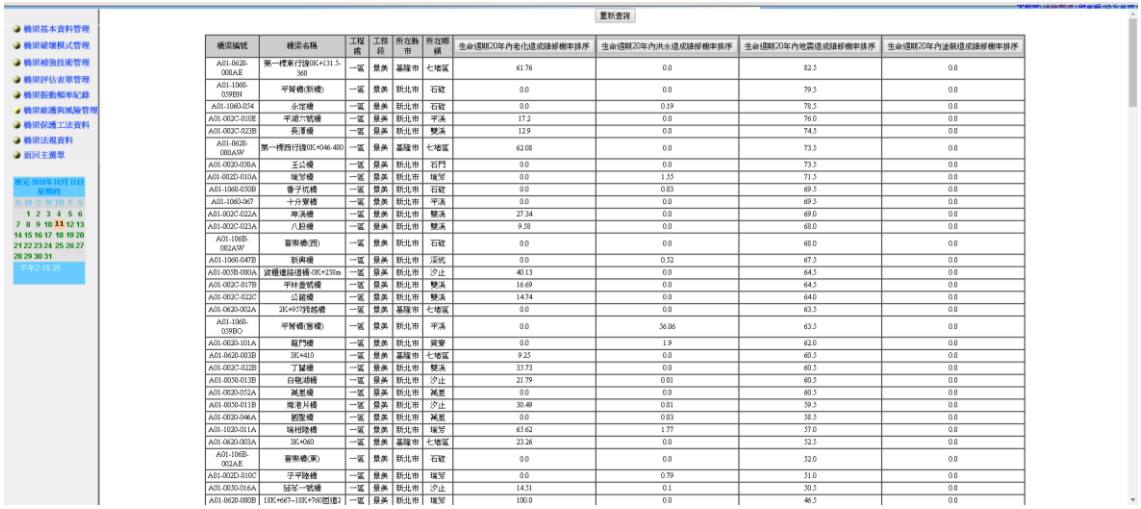


圖 4.31 刪除表單

點選群橋維護策略按鈕後，需勾選查詢之條件(圖 4.32)。

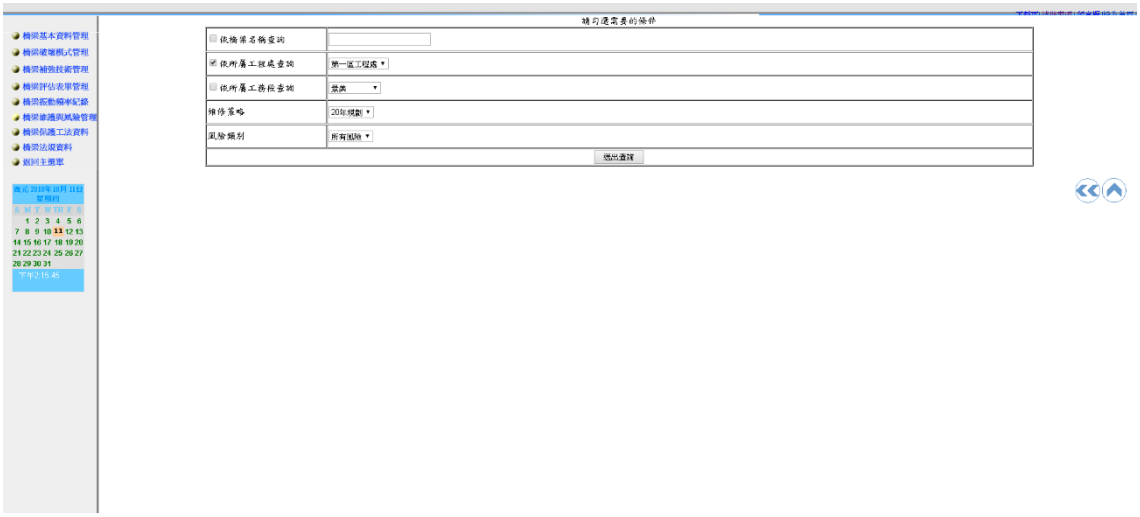


圖 4.32 群橋維護策略搜尋條件

以第一區工程處 20 年維護週期為例，顯示此工程處最佳維修策略組合，如圖 4.33 所示。

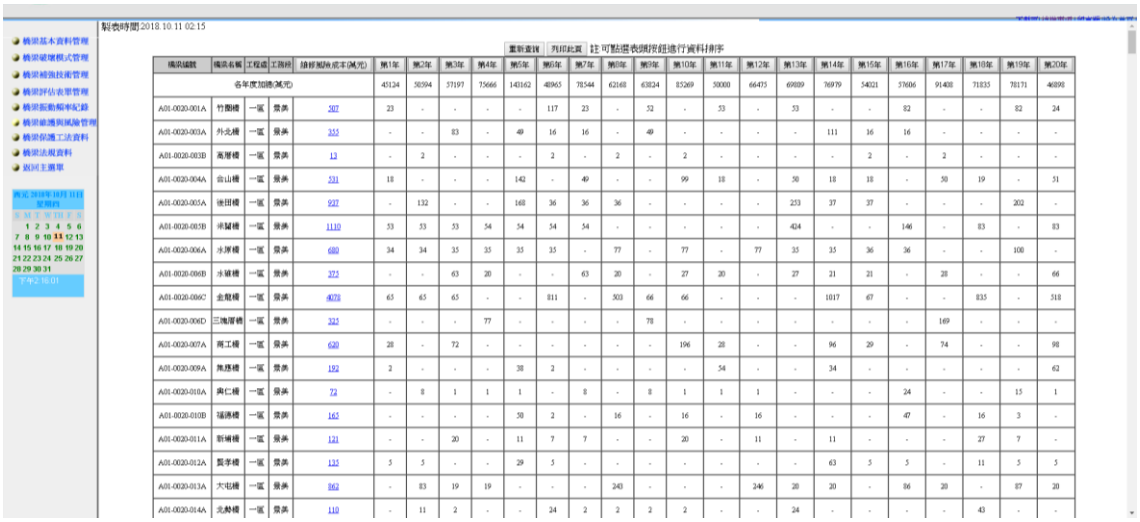


圖 4.33 一區工程處分析結果

點選橋梁維修成本可進一步查看老化、耐洪、耐震或是塗裝維修風險成本值，如圖 4.34 所示。

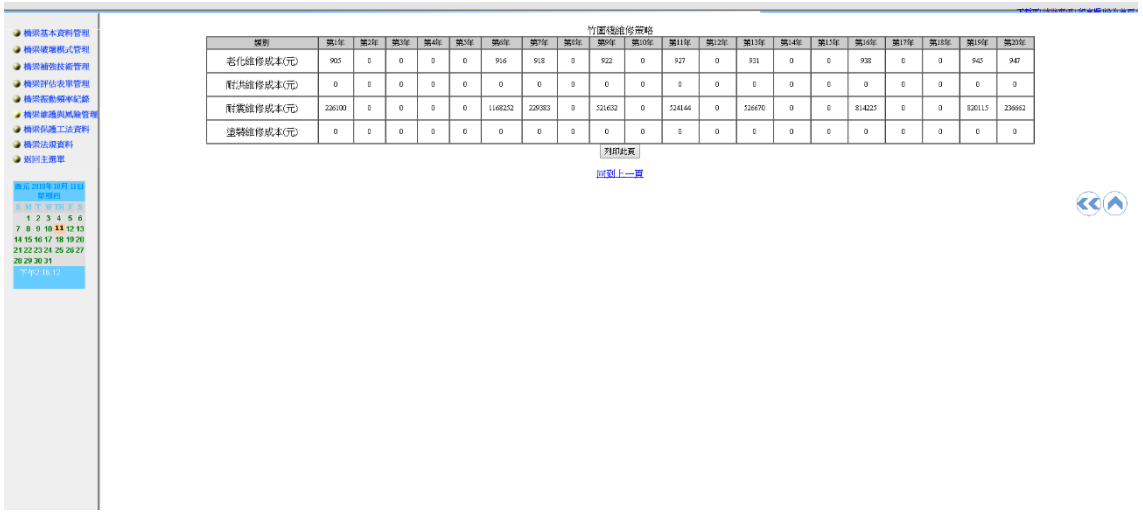


圖 4.34 各橋維護策略

4.2.5 群橋維護成本最佳化模式使用建議

群橋維護成本最佳化模式之運算資料來源包括:(1)TBMS 檢測結果、(2)TBMS 維修紀錄、(3)工程處年度預算等。因此，建議橋梁管理單位在該年度確實填寫各橋梁之檢測與維修紀錄，並依各年度通過預算更改系統中預算值，再重新進行分析運算，以符合橋梁實際維修需求。

4.3 橋梁風險評估模式更新模組(本年度進度)

根據上述步驟，為使風險評估模式可定期更新及提升建置風險評估模式之效率，本研究建置資料及風險評估模式更新模組，以下各模組更新模組及計算橋梁風險成本之程式流程圖，依序為橋梁構件老化風險成本計算自動化程式流程圖(圖 4.35)、鋼結構橋梁塗裝劣化風險成本計算自動化程式流程圖(圖 4.36)、橋梁洪水沖刷風險成本計算自動化程式流程圖(圖 4.37)及橋梁地震風險成本計算自動化程式流程圖(圖 4.38)，及各種橋梁風險成本計算自動化步驟。

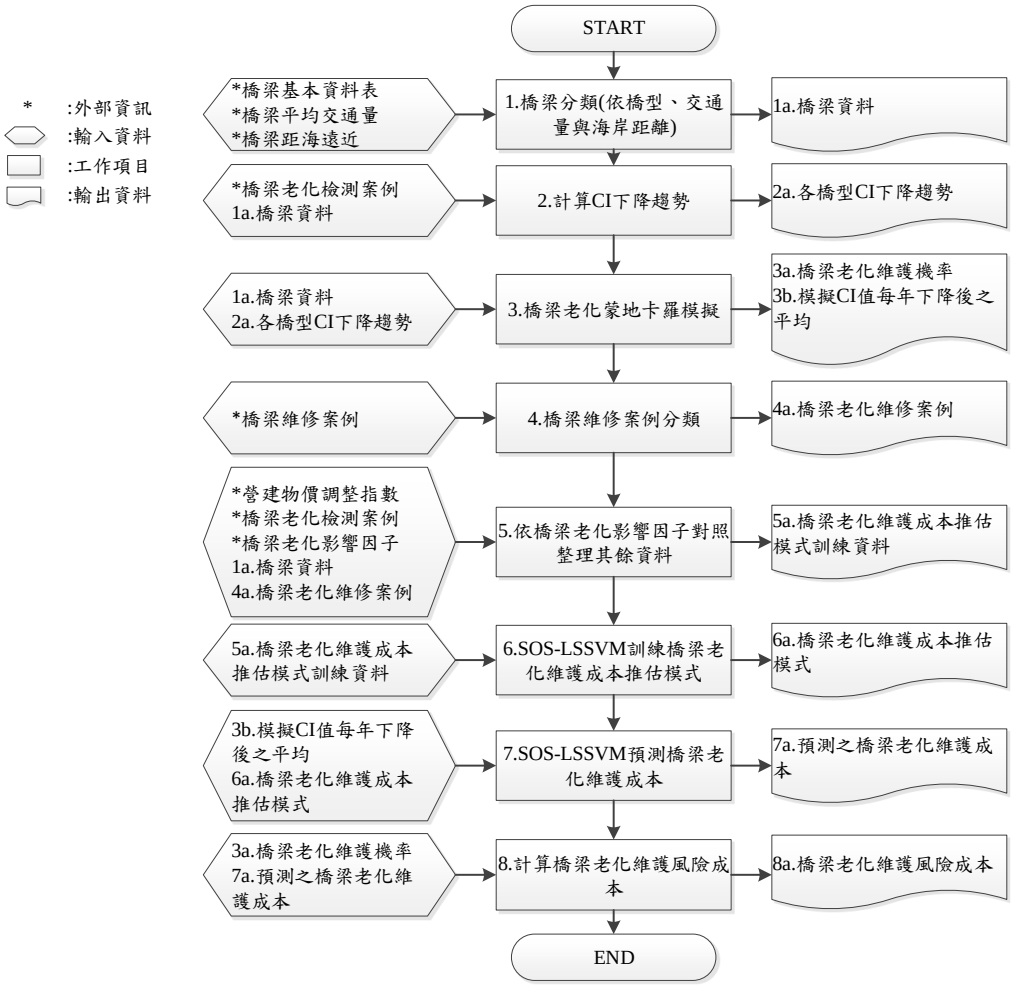


圖 4.35 橋梁構件老化維修風險評估模式程式流程圖

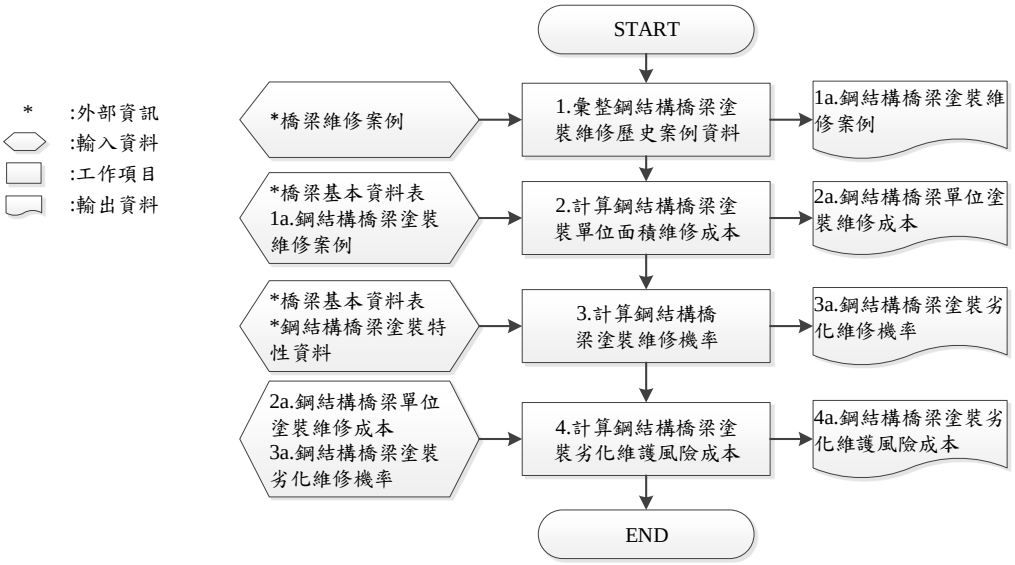


圖 4.36 鋼結構橋梁塗裝劣化風險評估模式程式流程圖

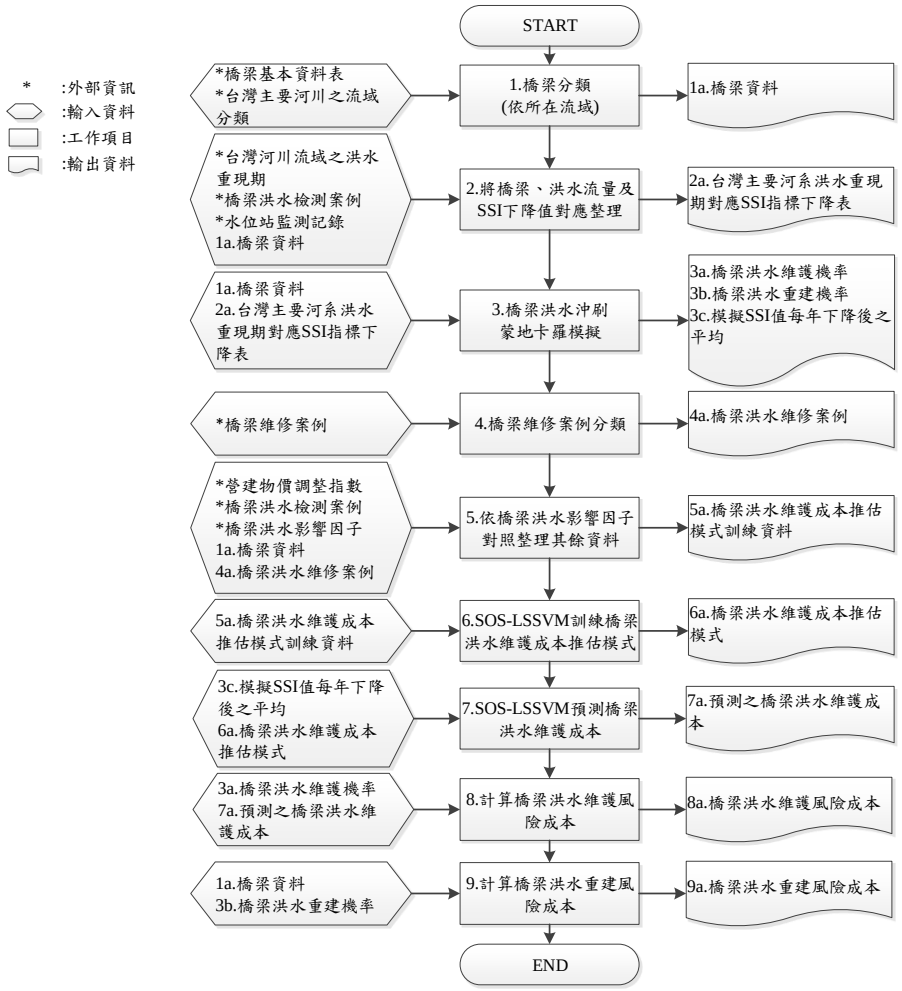


圖 4.37 橋梁洪水沖刷風險評估模式程式流程圖

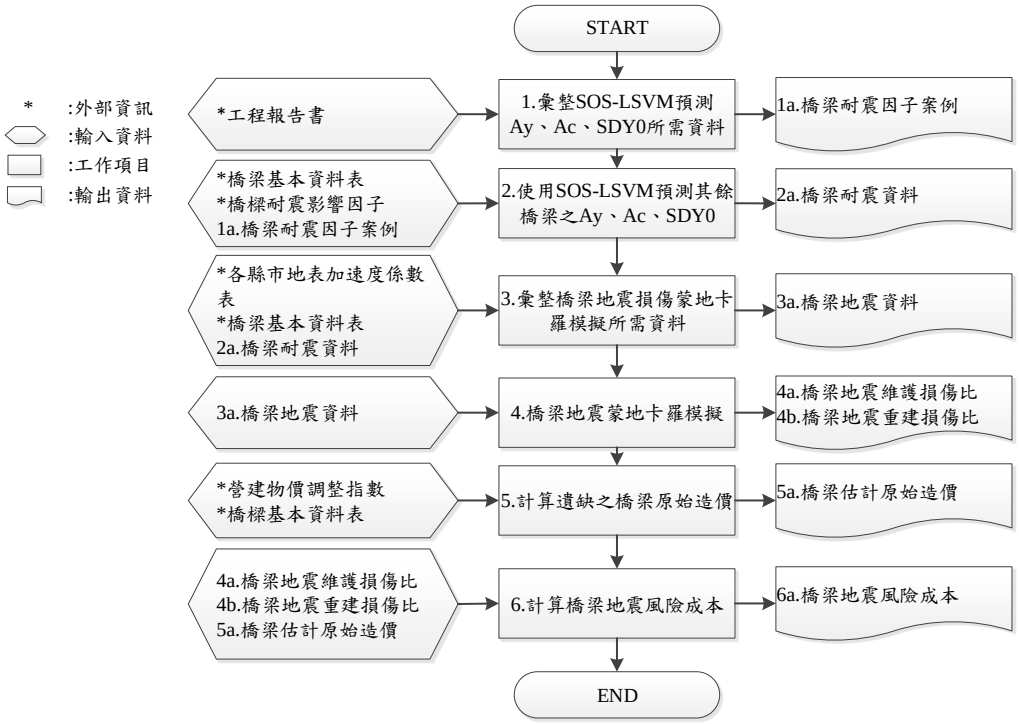


圖 4.38 橋梁地震維修風險評估模式程式流程圖

4.3.1 橋梁構件老化維修風險成本計算自動化步驟

4.3.1.1 橋梁分類(依橋型、交通量與海岸距離)

1.橋梁結構形式

TBMS 橋梁基本資料裡共有九種橋梁結構型式，π 橋、版橋、拱橋、剛架橋、桁架橋、斜張橋、梁式橋、箱型橋及其他。

2.橋梁交通量

為了補足 TBMS 橋梁基本資料裡不完整之交通量資料，利用 TBMS 橋梁基本資料表之路線及里程欄位，與交通部公路總局 105 年度公路交通量調查統計表(資料來源:交通部公路總局)，以不同方向(例如:南向、北向)對照每座橋交通量。如同里程範圍內無統計資料，則將里程前後放寬至 1 公里範圍。若還有無法對照到交通量之橋梁，該橋梁之交通量將以零做為最保守之假設(即表示無交通流量但仍有劣化趨勢)。

3.橋梁距海距離

利用 TBMS 橋梁基本資料裡的 GIS 座標欄位，以及臺灣縣市界線圖(資料來源:政府資料開放平臺)，使用 GIS 計算各座橋梁距海遠近(圖 4.39)。

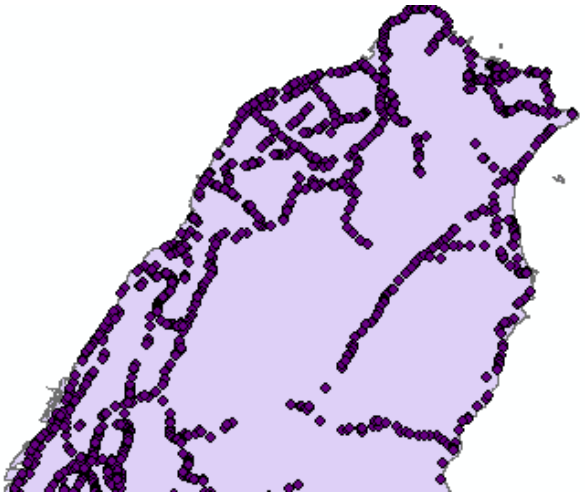


圖 4.39 GIS 套疊橋梁位置及縣市框

依照九種橋梁型式、距海距離(小於 300 公尺、在 300 與 1000 公尺之間、在 1000 與 3000 公尺之間、大於 3000 公尺)及交通量(PCU 小於 6000、PCU 在 6000 與 12000 之間及 PCU 大於 12000)可以分成 108 組。以π橋為例，π橋會有分成距海距離小於 300 公尺及交通量 PCU 小於 6000、距海距離小於 300 公尺及交通量 PCU 在 6000 與 12000 之間、距海距離小於 300 公尺及交通量 PCU 大於 12000…等，共 12 組，故九種橋梁型式共有 108 組。

4.3.1.2 計算CI值下降趨勢

依照上個步驟之分組規則，將所收集之TBMS橋梁檢測歷史紀錄進行分組，在各組別中將各橋梁兩筆在時間上相鄰之檢測資料做比對，將在某筆檢測資料之CI值減去過去時間最鄰近檢測CI值(且鄰近CI值小於原CI值)得到CI下降值，將此CI下降值除以間隔天數，即為CI值下降趨勢，而CI值下降趨勢平均即為該橋所有CI值下降趨勢之平均。

以π橋為例，已求得多筆π橋某組檢測資料之CI值下降趨勢，若這些

CI下降趨勢記錄總數不足30筆，則用π橋全部分組之CI值下降趨勢，去計算CI值下降趨勢平均值。若π橋全部分組之CI值下降趨勢記錄總數仍不足30筆，則用所有橋梁檢測紀錄計算CI值下降趨勢平均值。

4.3.1.3 橋梁構件老化模地卡羅模擬

根據上個步驟得到之橋梁各組CI下降趨勢平均值及該趨勢之標準差準差，應用模地卡羅模擬橋梁在未來各時間點下的CI平均值，並同時計算橋梁在未來各時間點，當CI值小於門檻值之累計次數，將此累計次數除以模擬次數，即為橋梁因老化所造成之維護機率。

4.3.1.4 橋梁維修案例分類

根據TBMS維修歷史案例維修工法欄位，列出橋梁老化維修案例篩選詞彙(表4-40)，並以此從TBMS維修歷史案例中篩選橋梁老化維修案例。

表4-40 橋梁老化維修案例篩選詞彙

護欄	欄杆	雜物	鋼筋外露	伸縮縫	瀝青
洩水孔	附屬結構	洩水管	反光導標	端格梁	垂直預力抽換
落水管	上部結構	路燈	鋼筋鏽蝕	大梁	鋼筋及套管除鏽
排水管	下部結構	路面	支承墊	防落	鋼筋及套管除銹
橋墩帽	鋼筋銹蝕	洩水槽	鋼筋除鏽	橋面	
洩水盤	預力鋼腱	排水管	進橋版	懸臂板	
橋台	鋼筋除銹	塗裝	翼牆	蜂窩	

4.3.1.5 依橋梁老化影響因子對照整理其餘資料橋梁山地考量

利用TBMS橋梁基本資料表裡的GIS座標欄位，以及內政部20公尺網格數值地形模型資料(資料來源: 政府資料開放平臺)，使用GIS程式計算各座橋梁高程(圖4.40)，若橋梁高程高於1000公尺則視為山地橋梁。

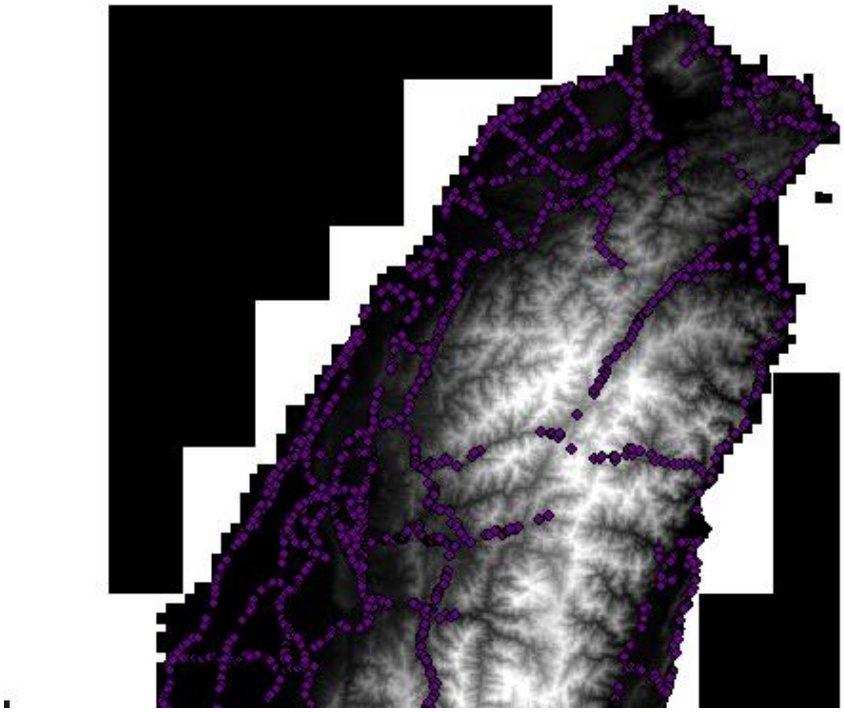


圖 4.40 GIS 套疊橋梁位置及地形模型資料

依橋梁老化影響因子(表4-41)對照TBMS橋梁基本資料及前面步驟整理出之資料，整理訓練橋梁老化維修成本推估模式所需使用欄位。

表4-41 橋梁老化影響因子

影響因子	關聯	單位
CI	維修前 CI 指標	數字
橋版投影面積	維修量體	M2
最低橋下淨高(M)	維修量體	M
結構型式	維修方式	文字
高程	山地與平地考量	文字
年平均每日車流量	反覆載重或使用量影響	車輛數
距海遠近	大氣腐蝕因素	公里
是否為跨河橋	跨河橋或陸橋案例	是/否
最近維修年	物價修正用	民國年
竣工年	施工技術	民國年

資料來源：(徐梓隆，2014)

4.3.1.6 SOS-LSSVM訓練橋梁老化維修成本推估模式

使用人工智慧推論模式SOS-LSSVM推估橋梁老化維修成本，利用上個步驟整理出之訓練資料，訓練橋梁老化維修成本推估模式。

4.3.1.7 SOS-LSSVM預測橋梁老化維修成本

利用上個步驟訓練出之模型，及依照橋梁老化影響因子整理出之預測資料，推估橋梁老化維修成本。

4.3.1.8 計算橋梁老化風險成本

利用橋梁老化模地卡羅模擬得出之橋梁因老化所造成之維護機率與SOS-LSSVM推估之橋梁老化維修成本相乘，即為橋梁老化風險成本，下表(表4-42、表4-43)為部分結果。

表4-42 混凝土橋梁老化維修風險成本(部分表格)

系統 ID	間隔 1 年	間隔 2 年	間隔 3 年	間隔 4 年	間隔 5 年	間隔 6 年	間隔 7 年	間隔 8 年	間隔 9 年	間隔 10 年
2232	16498	50468	231486	515410	889794	906013	922232	938451	954670	970889
2233	8236	92390	299736	628544	889499	905885	922200	938445	954671	970893
2234	95997	231410	536052	867950	885411	904128	921843	938423	954676	970897
2236	40213	216430	427055	871081	888187	905540	922137	938451	954678	970897
2237	15062	99236	289320	501827	848783	886227	915630	935688	953202	970004
系統 ID	間隔 11 年	間隔 12 年	間隔 13 年	間隔 14 年	間隔 15 年	間隔 16 年	間隔 17 年	間隔 18 年	間隔 19 年	間隔 20 年
2232	987108	1003327	1019546	1035765	1051984	1068202	1084421	1100640	1116859	1133078
2233	987114	1003334	1019554	1035773	1051992	1068211	1084429	1100646	1116862	1133080
2234	987116	1003335	1019554	1035773	1051992	1068211	1084430	1100649	1116868	1133088
2236	987116	1003335	1019554	1035773	1051992	1068211	1084430	1100649	1116868	1133087
2237	986694	1003187	1019517	1035762	1051957	1068035	1083795	1099045	1113802	1129354

表4-43 鋼結構橋梁老化維修風險成本(部分表格)

系統 ID	間隔 1 年	間隔 2 年	間隔 3 年	間隔 4 年	間隔 5 年	間隔 6 年	間隔 7 年	間隔 8 年	間隔 9 年	間隔 10 年
2271	47591	130256	299834	614491	1001876	1121304	1251017	1404064	1565244	1791374
2327	50440	125418	260371	467359	587296	730488	908933	1089149	1262108	1439813
2402	0	21018	76810	162762	339875	397990	467430	548585	662646	784060
2519	59516	152898	303189	509772	596135	704256	861310	1026432	1246343	1453088
2546	79558	191137	462698	1062214	1107373	1161457	1228180	1303870	1382539	1473529
系統 ID	間隔 11 年	間隔 12 年	間隔 13 年	間隔 14 年	間隔 15 年	間隔 16 年	間隔 17 年	間隔 18 年	間隔 19 年	間隔 20 年
2271	1960808	2167357	2381474	2581908	2808711	2995950	3163886	3295543	3414925	3464516
2327	1589601	1753498	1921127	2050375	2110732	2143274	2175816	2208359	2240901	2273443
2402	933565	1085969	1241513	1410982	1563447	1712496	1856882	1993561	2121874	2222656
2519	1650751	1785007	1926366	2054099	2112378	2144946	2177513	2210081	2242648	2275216
2546	1566863	1668957	1760154	1860086	1967244	2056969	2141917	2214215	2286184	2328705

4.3.2 鋼結構橋梁塗裝劣化風險成本計算自動化步驟

4.3.2.1 彙整鋼結構橋梁塗裝歷史案例

根據TBMS維修歷史案例維修工法欄位，列出鋼結構橋梁塗裝劣化維修案例篩選詞彙(表4-44)，根據此表從TBMS維修歷史案例中篩選鋼結構橋梁塗裝劣化維修案例。

表4-44 鋼結構橋梁塗裝劣化維修案例篩選詞彙

油漆修補	表面塗裝	除漆重新噴塗油漆	鋼橋油漆
油漆養護	外露面清洗及油漆	鋼筋防鏽劑塗刷	除銹及油漆
油漆塗裝	外露面油漆	除銹後油漆	鋼橋粉刷
面漆修補	鋼筋除鏽及防鏽處理	鋼橋清洗	除銹及塗裝

4.3.2.2 計算鋼結構橋梁塗裝單位面積維修成本

本研究利用TBMS橋梁維修案例中與鋼結構橋梁塗裝劣化維修相關案例，結合TBMS橋梁基本資料裡的橋面版投影面積，來計算鋼結

構橋梁塗裝劣化單位面積維修成本，作為鋼結構橋梁塗裝劣化維修成本推估依據。未來鋼結構橋梁塗裝劣化維修相關案例持續累積，程式會重新計算鋼結構橋梁塗裝劣化單位面積維修成本，使得鋼結構橋梁塗裝劣化維修成本推估更加精確。

4.3.2.3 計算鋼結構橋梁塗裝維修機率

根據邱建國(2017)提出，若以防蝕性能為狀態設定，氟素塗裝系統耐用年限為10年，PU塗裝系統為5年。若容許鋅層消耗，則氟素塗裝系統的耐用年限為15年，PU塗裝系統為10年。在文獻中以A橋為例，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。而鄭國宏(2017) 所計算出氟素/15年的生命週期成本為最低，本研究先採用塗裝系統氟素/15年來探討。

在TBMS維修歷史案例中，有部分鋼結構橋梁沒有塗裝劣化維修案例，故本研究假設，若有鋼結構橋梁塗裝劣化維修案例則從最近一次開始計算，若沒有鋼結構橋梁塗裝劣化維修案例，將從橋梁竣工年開始計算。

4.3.2.4 計算鋼結構橋梁塗裝維修風險成本

利用TBMS橋梁基本資料中之橋版投影面積欄位與橋梁塗裝劣化單位面積維修成本相乘，即為橋梁塗裝劣化維修成本。將橋梁塗裝劣化維修成本與橋梁塗裝劣化維修機率相乘，即為橋梁塗裝劣化維修風險成本(表4-45)。

表 4-45 鋼結構橋梁塗裝維修風險成本(部分表格)

系統ID	間隔1年	間隔2年	間隔3年	間隔4年	間隔5年	間隔6年	間隔7年	間隔8年	間隔9年	間隔10年
2271	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2327	0	0	2429065	0	0	0	0	0	0	0
2402	0	0	0	0	0	7452725	0	0	0	0
2519	0	0	5186625	0	0	0	0	0	0	0
2546	0	0	0	6736709	0	0	0	0	0	0
系統ID	間隔11年	間隔12年	間隔13年	間隔14年	間隔15年	間隔16年	間隔17年	間隔18年	間隔19年	間隔20年
2271	0	0	0	41154237	0	0	0	0	0	0
2327	0	0	0	0	0	0	0	2429065	0	0
2402	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2519	0	0	0	0	0	0	0	5186625	0	0
2546	0	0	0	0	0	0	0	0	6736709	0

4.3.3 橋梁洪水沖刷風險成本計算自動化步驟

4.3.3.1 橋梁分類(依所在流域)

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，故本研究依跨水橋梁所屬流域分群進行評估；本研究參考水利署臺灣主要河川之流域定義，分為二十五個流域。利用河川流域範圍圖(資料來源:經濟部水利署水資料分享站)，及TBMS橋梁基本資料GIS座標欄位，使用GIS程式產生跨水橋梁主要流域對應表，GIS套疊橋梁位置及河流流域如圖4.41。

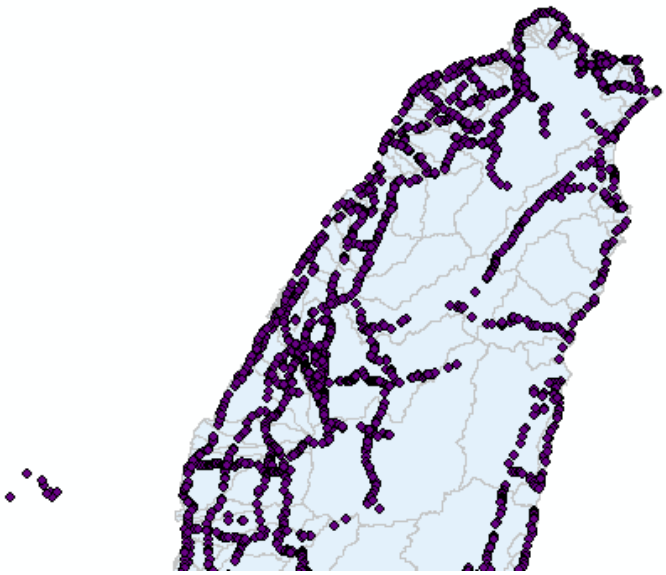


圖 4.41 GIS 套疊橋梁位置及河流流域

4.3.3.2 將橋梁、洪水流量SSI下降值對應整理

利用網頁擷取程式抓取經濟部水利署水文資訊網網站上之流量測站歷史流量圖表資料(圖4.42)、河川流域洪水重現期(資料來源:經濟部水利署洪水分析)、現存流量站(資料來源: 政府資料開放平臺)與河川河道(資料來源: 政府資料開放平臺)。結合TBMS橋梁檢測紀錄與上個步驟整理之跨水橋梁主要流域對應表，並將兩筆檢測紀錄之間之SSI下降值除以間隔天數，即為SSI下降趨勢。再從現存流量站之歷史流量資料將兩筆檢測紀錄之間之最高洪峰流量抓出用以對應河川流域洪水重現期，最後將SSI下降趨勢對應到相應河川流域之相應洪水重現期，即為臺灣主要河川流域洪水重現期對應SSI下降表(表4-46)。但因不是所有重現期之洪水在流量測站歷史流量紀錄皆有發生，故沒對應到臺灣主要河川流域洪水重現期之SSI下降趨勢，將參考徐梓隆(2014)臺灣主要河川流域洪水重現期對應SSI下降表之數值。表格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。

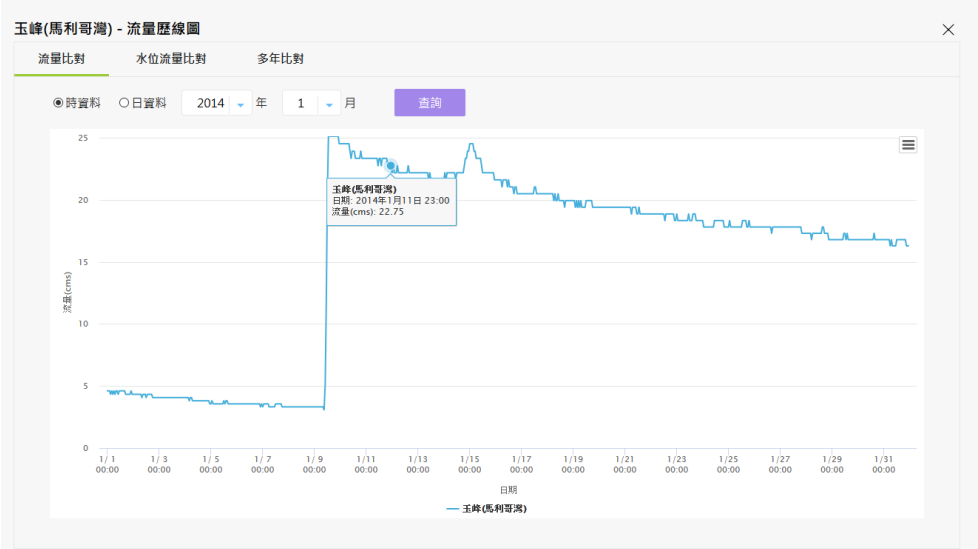


圖 4.42 流量測站歷史流量圖表資料

表4-46 臺灣主要河川流域洪水重現期對應SSI下降表

河川流域	1 年	2 年	5 年	10 年	20 年	50 年	100 年	200 年
二仁溪	0.834242	2.0625	1	2	3	3	3	4
八掌溪	0.6875	0.638571	3	4	4	5	5	6
大甲溪	1.190476	0.24	5	7	8	10	12	13
大安溪	0.916667	3	5	7	10	13	16	20
中港溪	1.88	3	4	5	1.5	8	9	9
北港溪	0.981125	1	8	7	9	11	12	12
四重溪	0.922966	3	4	5	6	7	7	8
朴子溪	0.787647	0.335	1	11	6	7	8	9
秀姑巒溪	0.869568	3.2	3	4	4	1	5	6
卑南溪	1.051963	1.954545	1.175	2	2	2	3	3
和平溪	1.253226	1.523	2	3	3	4	5	5
東港溪	2.424167	3	4	5	5	6	7	8
花蓮溪	1.338896	3	1.5	5	5	6	7	7
阿公店溪								
後龍溪	1.499592	0.250435	1.891667	2	3	3	4	3
急水溪	0.764098	2	4.265	1	3	4	5	5
烏溪	1.716129	1.735882	1	2.304348	1.333333	3	4	5
高屏溪	1.566947	1	2	2	3	3	3	3
淡水河	1.664177	1.076296	2	3.418929	3	8.615385	3	4
曾文溪	0.81875	1.0036	1.2	2	2	3	3	0.331
鳳山溪	1.763125	1.905556	2	1.546154	11	14	4	19
濁水溪	1.269028	0.937273	1	1.593	18	22	27	25.71429
頭前溪	1.1042	0.424	10	1	4	5	1	7
蘭陽溪	0.787267	0.915556	2	2.475	3	4	5	6
鹽水溪	0.557391	2	4	4	5	6	6	6

其中因阿公店溪流域沒有流量測站，故阿公店溪流域使用所有流域SSI下降趨勢平均。

4.3.3.3 橋梁洪水沖刷蒙地卡羅模擬

使用蒙地卡羅模擬跨水橋梁未來20年洪水可能發生事件，各時間點下的SSI值相加除以模擬次數，即為模擬橋梁各時間點下的SSI平均值。並將SSI小於門檻值之累計次數除以模擬次數，即橋梁因洪水沖刷損壞而須維修的機率。若發生超越洪水重現期200年之洪水，則橋梁可能損壞，模擬過程中出現超越洪水重現期洪水之累計次數除以模擬次數，即為橋梁因洪水沖刷損壞而須重建的機率。

4.3.3.4 橋梁洪水沖刷維修案例分類

根據TBMS維修歷史案例維修工法欄位，列出跨合橋梁洪水維修案例篩選詞彙(表4-47)，並根據此表從TBMS維修歷史案例中篩選橋洪水維修案例。

表4-47 橋梁洪水維修案例篩選詞彙

鼎塊	鼎型塊	鼎形塊	異型塊	石籠	圍堰	拋石
護坦	消波塊	橋基	橋墩	防衝鋼鈑	鋼版包覆	
攔沙壩	潛堰	河床	強化碳纖維貼附	框網導流	筐網導流	
鋼鈑包覆	鋼鈑包墩	鋼鈑及安裝	厚鋼版製作及安裝	微型樁	河道	
沖刷	固床工	鋼板包覆	鋼鈑局部包覆	基礎	基樁	

4.3.3.5 依照橋梁洪水沖刷影響因子對照整理其餘資料

依橋梁洪水沖刷影響因子(表 4-48)對照 TBMS 橋梁基本資料及橋

梁高程整理訓練橋梁洪水維護成本推估模式資料。

表4-48 橋梁洪水沖刷影響因子

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	山地與平地考量	文字
是否為跨河橋	跨河橋或陸橋案例	是/否
最近維修年	物價修正用	民國年

4.3.3.6 SOS-LSSVM訓練橋梁洪水維修成本推估模式

使用SOS-LSSVM推估跨河橋梁洪水維修成本，利用上個步驟整理出之訓練資料，訓練橋梁洪水維修成本推估模式。

4.3.3.7 SOS-LSSVM預測橋梁洪水維修成本

利用上個步驟訓練出之模型，及依照橋梁洪水影響因子整理出之預測資料，推估橋梁洪水維修成本。

4.3.3.8 計算橋梁洪水維修風險成本

利用橋梁洪水沖刷蒙地卡羅模擬得出之橋梁洪水沖刷維修機率與SOS-LSSVM推估橋梁洪水維修成本相乘，即為橋梁洪水維修風險成本(表4-49)。

表4-49 橋梁洪水維修風險成本(部分表格)

系統 ID	間隔 1 年	間隔 2 年	間隔 3 年	間隔 4 年	間隔 5 年
2238	2511561	6992113	13443036	7645425	8137334
2239	4548476	7231706	12533693	10519266	20902260
2243	6113782	10844245	9617469	7911984	20361593
2247	3434394	6010456	5447230	10206775	22563422
2248	4240563	5387432	6290246	1134057	5031129
系統 ID	間隔 6 年	間隔 7 年	間隔 8 年	間隔 9 年	間隔 10 年
2238	16093932	26850129	34690005	37864937	38872784
2239	29234974	34999219	37422542	38228251	38563944
2243	32075249	36392960	37554176	37816362	38005071
2247	31916449	36134435	37551200	38024549	38046520
2248	16006423	27728627	34115821	37709574	38734193
系統 ID	間隔 11 年	間隔 12 年	間隔 13 年	間隔 14 年	間隔 15 年
2238	39415466	39700910	39881524	40420258	41053194
2239	38892643	39463228	40101156	40739085	41377013
2243	38369750	39000193	39630636	40261080	40891523
2247	38256415	38879218	39507705	40136193	40764681
2248	38722451	38325079	38006209	38301421	38901178
系統 ID	間隔 16 年	間隔 17 年	間隔 18 年	間隔 19 年	間隔 20 年
2238	41686130	42319066	42952002	43584938	44217874
2239	42014942	42652870	43290798	43928727	44566655
2243	41521966	42152410	42782853	43413296	44043740
2247	41393169	42021656	42650144	43278632	43907120
2248	39500936	40100693	40700450	41300208	41899965

4.3.3.9 計算橋梁洪水重建風險成本

將橋梁洪水沖刷重建機率與TBMS橋梁基本資料橋梁造價相乘，即為橋梁洪水重建風險成本(表4-50)。因TBMS橋梁基本資料橋梁造價資料有部分不完整，故若造價資料不完整，則使用TBMS橋梁基本資料中橋版投影面積估算單位造價，推估不完整之造價資料。

表4-50 橋梁洪水重建風險成本(部分表格)

系統 ID	間隔 1 年	間隔 2 年	間隔 3 年	間隔 4 年	間隔 5 年
2238	1602980	3205961	4808941	4808941	6411921
2239	0	1077946	1077946	1077946	1077946
2243	471601	943203	943203	1414804	1414804
2247	0	1742370	3484740	3484740	3484740
2248	0	0	0	0	0
系統 ID	間隔 6 年	間隔 7 年	間隔 8 年	間隔 9 年	間隔 10 年
2238	6411921	6411921	6411921	8014902	8014902
2239	1077946	1077946	1077946	1077946	1616919
2243	1414804	1414804	1886406	2358007	2358007
2247	3484740	3484740	5227110	5227110	5227110
2248	2787792	2787792	2787792	2787792	2787792
系統 ID	間隔 11 年	間隔 12 年	間隔 13 年	間隔 14 年	間隔 15 年
2238	9617882	9617882	9617882	9617882	9617882
2239	2694866	2694866	2694866	2694866	2694866
2243	2358007	2358007	2358007	2358007	2829609
2247	5227110	5227110	6969480	6969480	6969480
2248	5575584	8363376	8363376	8363376	8363376
系統 ID	間隔 16 年	間隔 17 年	間隔 18 年	間隔 19 年	間隔 20 年
2238	9617882	9617882	11220863	11220863	11220863
2239	2694866	3233839	3233839	3233839	3772812
2243	2829609	2829609	2829609	3301210	3301210
2247	8711850	8711850	8711850	10454220	10454220
2248	8363376	8363376	8363376	8363376	8363376

4.3.4 橋梁地震損傷風險成本計算自動化步驟

4.3.4.1 彙整SOS-LSSVM預測Ay、Ac、SDY0所需資料

依橋梁耐震能力影響因子(表4-51)TBMS橋梁基本資料、TELES橋梁基本資料及地表加速度(資料來源:內政部營建署「建築物耐震設計規範及解說」)整理訓練橋梁耐震能力(Ay、Ac與SDY0)推估模式資料。

表4-51 橋梁耐震能力影響因子

影響因子	
1.設計水平加速度	7.主梁型式
2.基樁裸露深度	8.振動單元數
3.橋梁結構型態	9.單垮最大垮距
4.歪斜角	10.土壤液化類別
5.橋長	11.支承裝置
6.橋寬	

資料來源：(徐瑞甫，2010)

4.3.4.2 使用SOS-LSSVM預測橋梁Ay、Ac、SDY0

利用上個步驟訓練出之模型，及依照橋梁耐震能力影響因子整理出之預測資料，推估橋梁耐震能力(Ay、Ac與SDY0(降伏位移))。

4.3.4.3 彙整橋梁地震損傷蒙地卡羅模擬所需資料

依照前面章節所使用之橋梁地震損傷蒙地卡羅模擬所需資料，利用橋梁基本資料、前步驟推估所得之資料及地表加速度(資料來源:內政部營建署「建築物耐震設計規範及解說」)，整理出每座橋梁之SDS(震區短週期設計水平譜加速度係數)、SD1(震區一秒週期設計水平譜加速度係數)、SMS(震區短週期最大水平譜加速度係數)、Ay(橋梁降伏加速度)、Ac(橋梁破壞加速度)、SDY0(降伏位移)、GdY(地盤種類)、鄰近斷層(EN)、場址修正參數(PN)。

4.3.4.4 橋梁地震損傷蒙地卡羅模擬

將前面章節所使用之橋梁地震損傷蒙地卡羅模擬所使用之matlab程式，包裝成dll (Dynamic-link library 動態連結函式庫)，以實現程式自動化流程，並利用上步驟整理之資料，使用蒙地卡羅模擬取得橋梁地震損害比。

4.3.4.5 計算橋梁地震損傷風險成本

將前步驟蒙地卡羅模擬取得橋梁地震損害比與TBMS基本資料造價相乘，即為橋梁地震損傷風險成本。因TBMS橋梁基本資料橋梁造價資料有部分不完整，故若造價資料不完整，則使用TBMS橋梁基本資料橋版投影面積估算單位造價，推估不完整之造價資料。

4.3.5 程式介面

將上述步驟以程式化串連，建置如下圖4.43至圖4.46之構件老化、塗裝劣化、洪水沖刷與地震風險成本更新程式介面，每個模組皆可更新資料庫裡之主檔資料(Master Data)(例如:河川流域洪水重現期對照表、河川歷史流量紀錄…等)或者是橋梁相關資料(例如:橋梁基本資料、檢測歷史案例與維修歷史案例等)，並依更新後資料計算橋梁維護風險成本。

如圖4.43，橋梁構件老化風險成本模組可以更新橋梁歷史檢測案例資料、橋梁基本資料及橋梁歷史維護成本案例資料，並更新橋梁老化風險成本推估模式。

圖 4.43 橋梁構件老化風險成本模組介面

如圖4.44，鋼結構橋梁塗裝劣化風險成本模組可以更新橋梁基本資料及橋梁歷史維護成本案例資料，並更新鋼結構橋梁塗裝劣化風險成本推估模式。

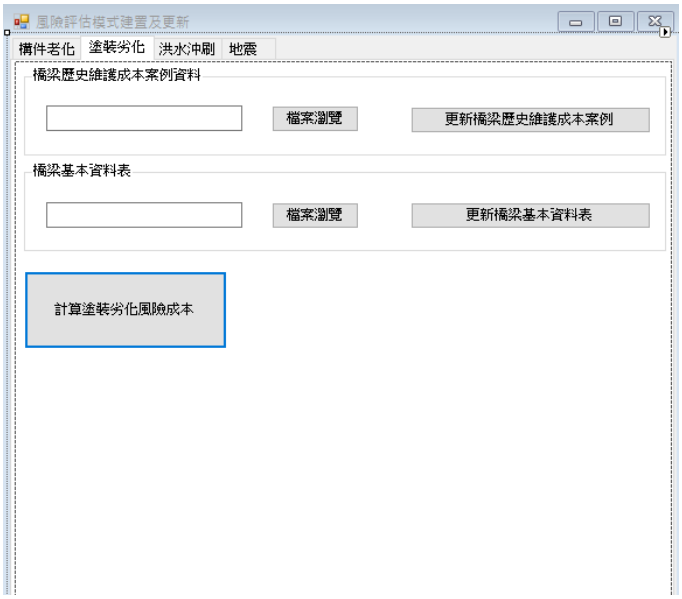


圖 4.44 鋼結構橋梁塗裝劣化風險成本模組介面

如圖4.45，橋梁洪水維護風險成本模組可以更新橋梁歷史檢測案例資料、橋梁基本資料、橋梁歷史維護成本案例資料、洪水回歸期資料及河川歷史流量紀錄，並更新橋梁洪水維護風險成本推估模式。

圖 4.45 橋梁洪水維護風險成本模組介面

如圖4.46，橋梁地震損傷維護風險成本模組可以更新地表加速度資料及橋梁基本資料，並更新橋梁地震損傷維護風險成本推估模式。

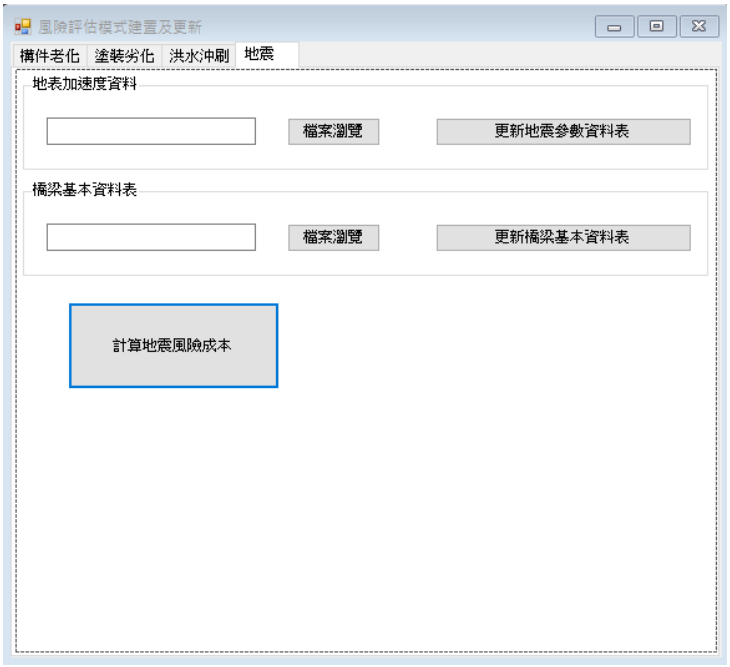


圖 4.46 橋梁地震損傷維護風險成本模組介面

第五章 橋梁整體耐震能力評估模式案例分析

本章節將針對橋梁整體耐震能力評估分成三個流程來介紹，包括橋梁整體耐震能力側推分析、橋梁損傷評估(橋梁損傷等級超越機率)及案例分析。

5.1 橋梁整體耐震能力側推分析

本階段將先進行案例模型的收集，透過SERCB軟體進行橋柱塑鉸分析，接著進行非線性靜力側推分析，此階段分析流程如圖5.1所示。各流程說明如下:

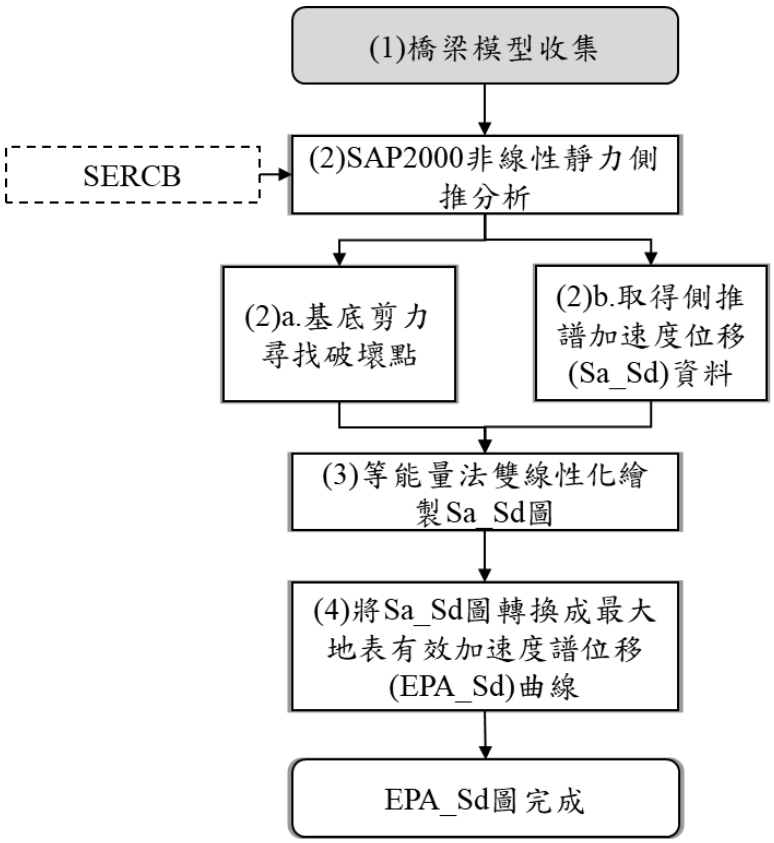


圖 5.1 側推分析流程圖

1.橋梁模型收集

此階段先取得公路總局轄管之一座橋梁以進行後續之分析。

2.SAP2000 非線性靜力側推分析

將所取得之橋梁模型利用國立臺北科技大學土木工程系宋裕棋教授團隊研發之 SERCB for Bridge[宋裕棋，2017]結構分析軟體進行塑鉸分析，接著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) 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)。

3.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)。

$$X_b = \frac{2A - x_m y_m}{k_1 x_m - y_m} \quad \text{.....(5.1)}$$

$$y_b = k_1 x_b \quad \text{.....(5.2)}$$

(5) 以降伏點至破壞點的斜率為k_2。

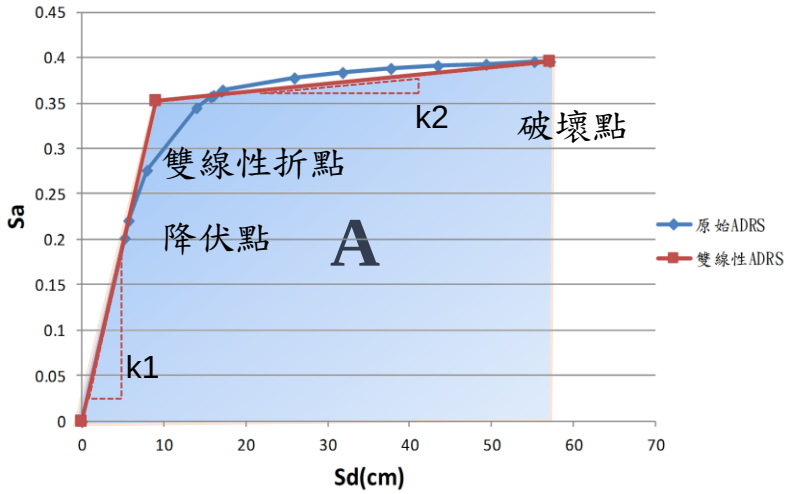


圖 5.2 雙線性計算示意圖

4.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:

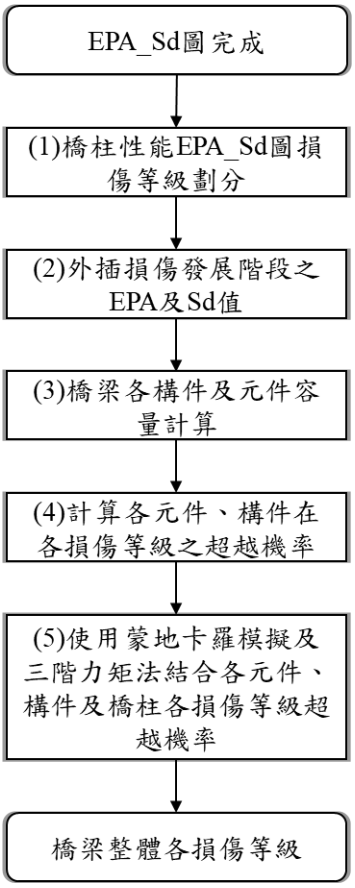


圖 5.3 橋梁損傷評估流程

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。

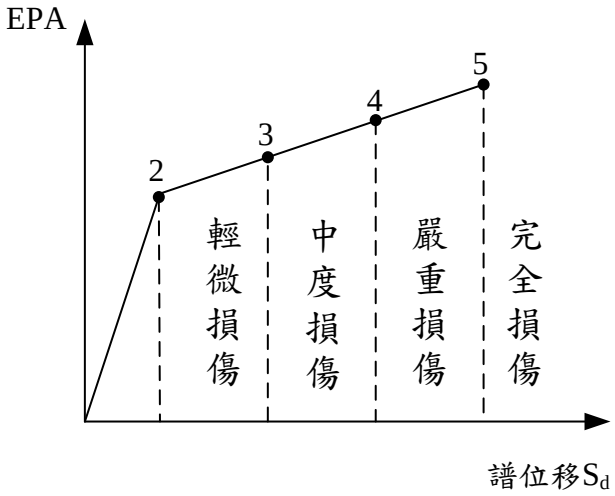


圖 5.4 損傷等級劃分

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[程瑞忠，2015]建議，若橋梁之各損傷發展階段之 EPA 值較低時，可假設超越機率在 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[程瑞忠，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。

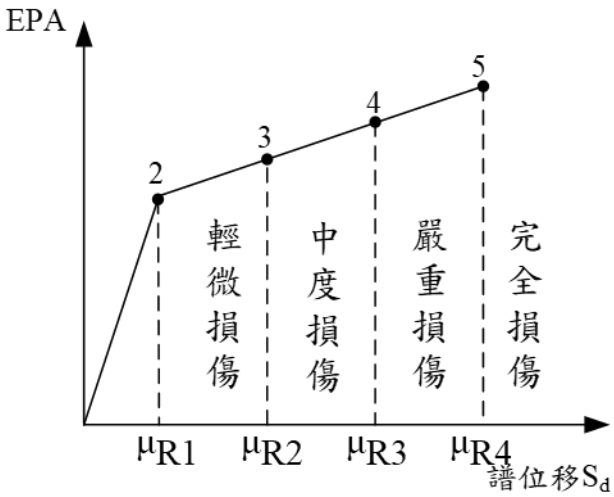


圖 5.5 各損傷等級界線值

$\mu = \mu_R - \mu_S$ .....(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、$\sigma_R = 0.1$ 、μ_R=10，$\mu_S = 70$、$\sigma_S = 0.2$ 、μ_S=14。

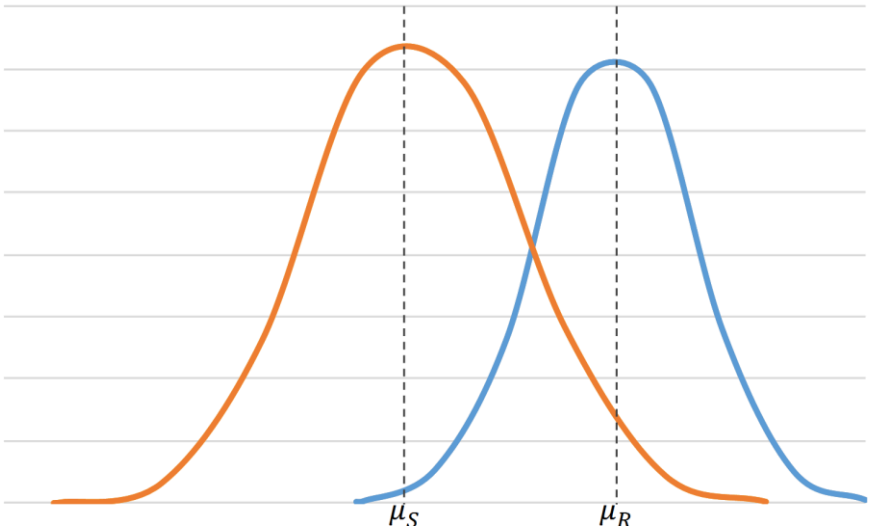


圖 5.6 損傷超越機率示意圖(一)

根據或然率概念，在計算超越機率時，由於為對數常態分佈，藉由式(5.4)及(5.5)將其轉換至對數平均值與標準差。

$$\xi = \sqrt{ln(1+\frac{\mu^2}{\sigma^2})} \quad \text{(5.4)}$$

$$\lambda = \ln(\mu - \frac{1}{2}\xi^2) \quad \text{(5.5)}$$

式中，μ及σ為容量之平均值與標準差；λ與ξ為對應之對數平均值與標準差。

故得到，$\xi_R = 2.148$，$\lambda_R = 4.582$，$\xi_R = 1.805$，$\lambda_R = 4.225$。

最後藉由式(5.6)來計算損傷超越機率

$$P_f = 1 - \Phi(\frac{\lambda_R - \lambda_S}{\xi_R - \xi_S}) \quad \text{(5.6)}$$

最後計算得到 P_f=0.14898。

如圖 5.7 所示，實心填滿區域之機率即為損傷超越機率。

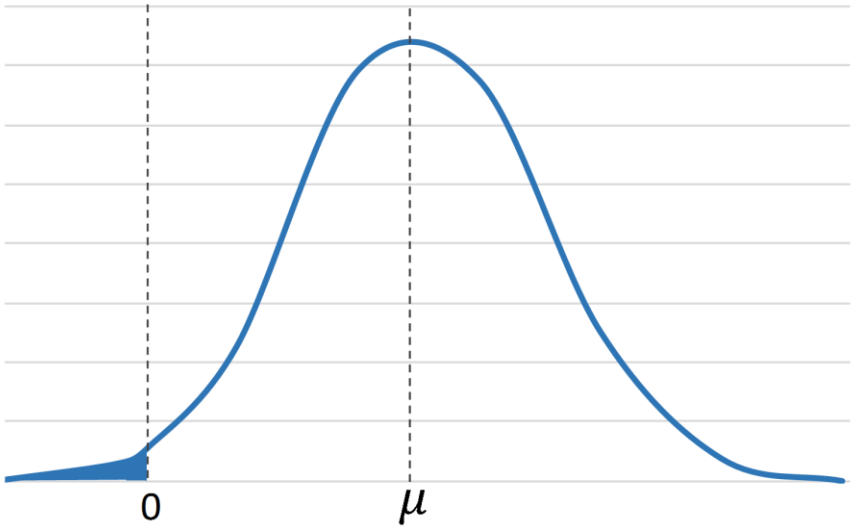


圖 5.7 損傷超越機率示意圖(二)

(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[程瑞忠，2015]將變異係數設定為 0.1 及 0.2，藉由式(5.4)至式(5.6)，計算橋梁構件、元件的超越機率。

5.使用蒙地卡羅模擬與三階力矩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，參考文獻[陳柏湧(2016)]所述，使用蒙地卡羅模擬與三階力矩法結合各構件及元件之損傷超越機率，得到橋梁整體損傷超越機率值。

5.3 案例分析

本節將以公路總局所轄管之橋梁-中坑高架橋為例進行上述章節的分析，求得橋梁整體損傷超越機率。

1.橋梁背景

中坑高架橋位於新北市五股區觀音里，採用之設計規範為 84 年版，工址屬臺北盆地微分區一區，並為重要橋梁，對應之性能如表 5-2 所示。本振動單元為連續 3 跨橋梁，上部結構配置一根預力箱型梁，橋面寬 11.5m；下部結構為單柱混凝土橋梁。此橋梁使用之材料強度如表 5-3 所示，其結構模型如圖 5.8 所示。

表5-2 採用設計規範版本對應之耐震性能目標

地震等級	84 及 89 年版	49 及 76 年版	49 年版以前
第 I 級地震 (中度地震)	PLA	PLA	PLA
第 II 級地震 (設計地震)	PLB	PLC	PLC

表5-3 結構材料強度

項次	混凝土強度(kgf/cm^2)
橋面板	280
基礎	245
橋台、擋土牆	245
場鑄基樁	280
橋墩	350
無筋混凝土	141
項次	降伏強度(kgf/cm^2)
#10(含)以下	2800
#13(含)以上	4200
項次	降伏強度(kgf/cm^2)
ASTM A572 GR.50	3500

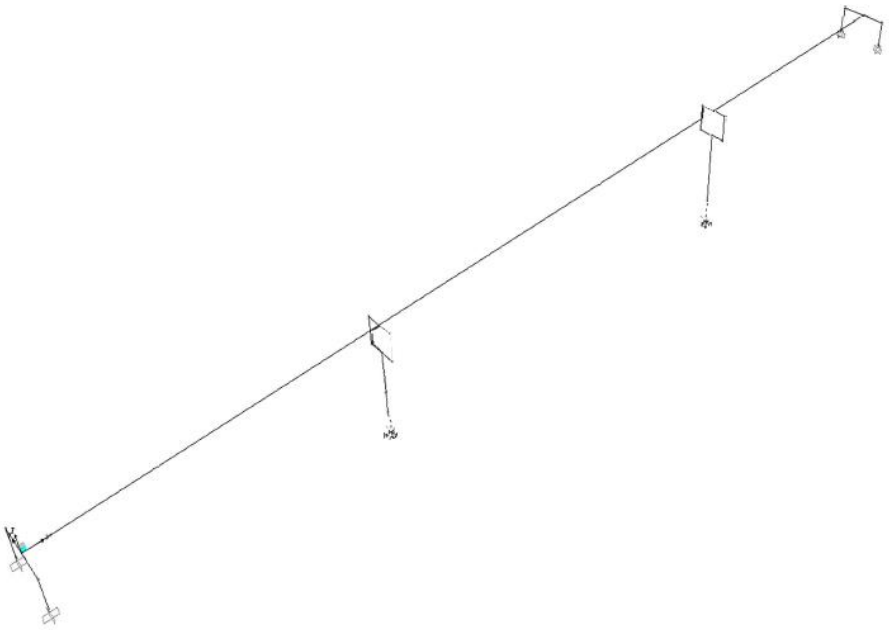
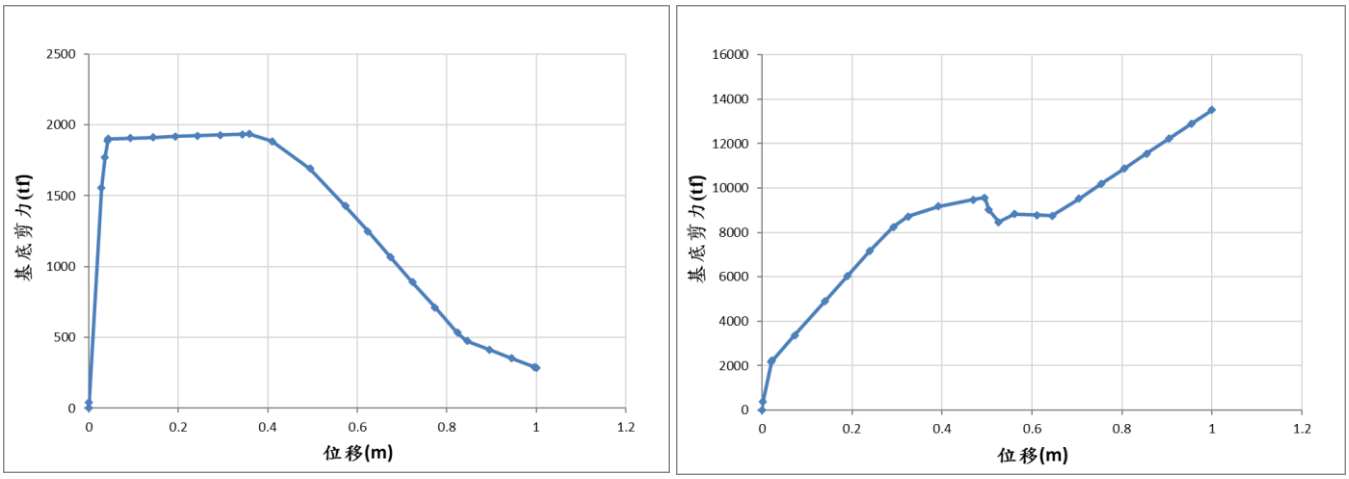


圖 5.8 結構分析 SAP2000 模型

2.非線性靜力側推分析

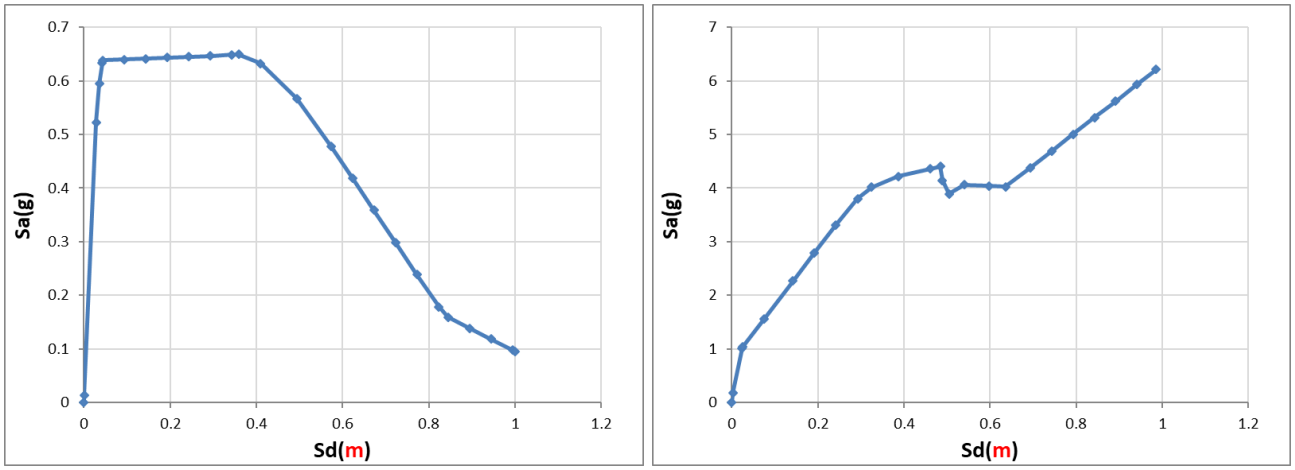
(1)側推曲線-基底剪力與位移(如圖 5.9 所示)



(a)行車向 X　　(b)橫向 Y

圖 5.9 側推曲線(基底剪力-位移)

(2)側推譜加速度譜位移(Sa_Sd) (如圖 5.10 所示)

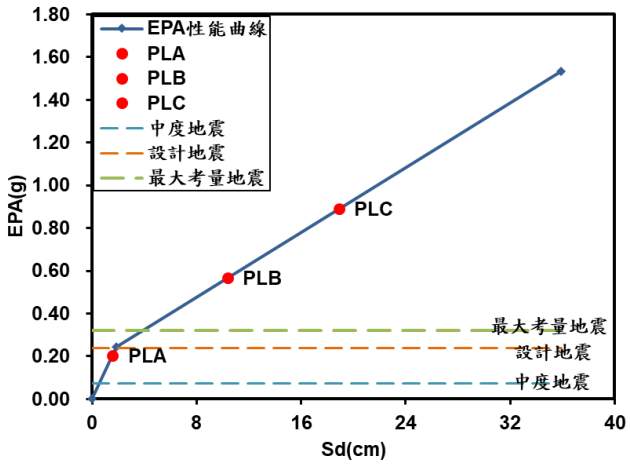


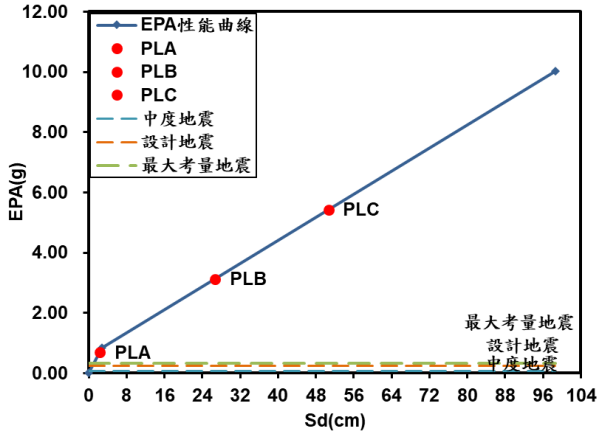
(a)行車向 X　　(b)橫向 Y

圖 5.10 側推曲線(譜加速度譜位移 Sa_Sd)

.

(3)側推有效地表加速度譜位移圖(EPA_Sd)(如圖 5.11 所示)





行車向	Sd(cm)	Sa(g)	EPA(g)
降伏點	1.87	0.61	0.24
極限點	35.90	0.65	1.53
PLA	1.56	0.51	0.20
PLB	10.38	0.62	0.57
PLC	18.88	0.63	0.89

橫向	Sd(cm)	Sa(g)	EPA(g)
降伏點	2.83	1.81	0.83
極限點	98.56	6.22	10.02
PLA	2.36	1.51	0.69
PLB	26.76	2.91	3.13
PLC	50.69	4.01	5.43

圖 5.11 側推曲線(EPA_Sd 圖)

3.橋梁損傷評估

(1)橋柱耐震性能損傷定義

根據圖 5.5 來定義橋梁雙向之橋柱耐震性能之損傷，結果如表 5-4 所示。

表5-4 橋柱耐震性能譜位移容量

橋柱譜位移容量(Sd)	輕微損傷 μ_{R2}(cm)	中度損傷 μ_{R3}(cm)	嚴重損傷 μ_{R4}(cm)	完全損傷 μ_{R5}(cm)
行車向	1.87	13.21	24.55	35.90
橫向	2.83	34.74	66.65	98.56

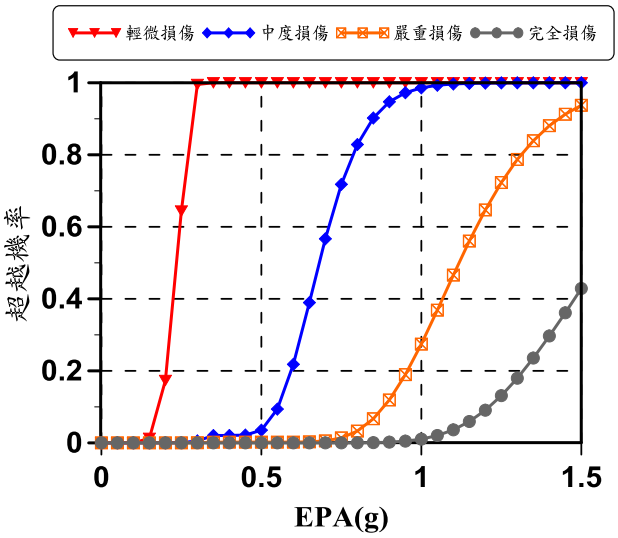
(2)橋梁構件、元件之容量(如表 5-5 所示，表中括號之數字為 2500 年地震下之容量)。

表5-5 中坑高架橋之構件容量

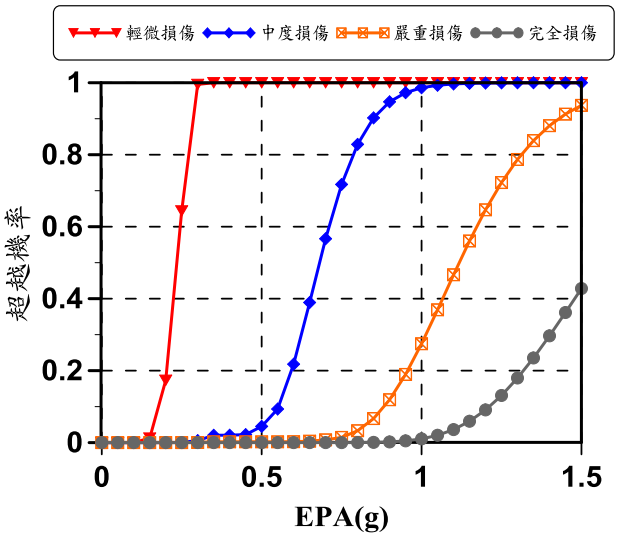
橋墩編號		防落長度(cm)	支承剪力(tf)	帽梁剪力(tf)	帽梁彎矩(tf-m)	橋柱穩定性(m)
AE1	行車向	95	-	-	-	0.12
AE1	橫向	95	789.47 (877.19)	-	-	0.12
AE2	行車向	95	-	-	-	0.13
AE2	橫向	95	1076.56 (1196.17)	-	-	0.13

(3)損傷等級超越機率曲線

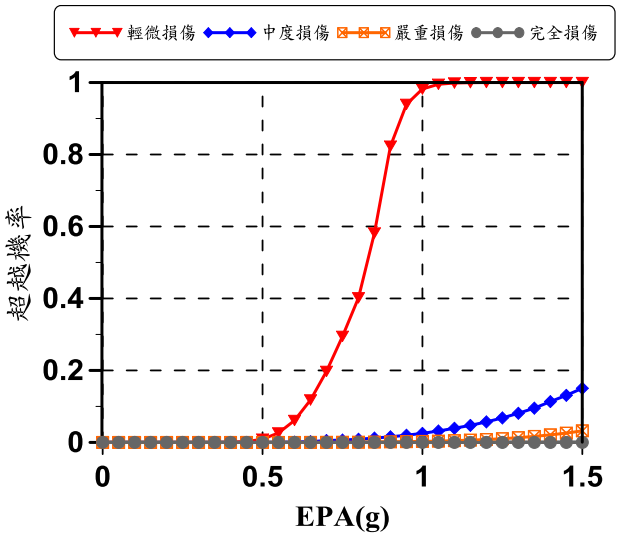
根據 5.2 節所述之系統可靠度方法來計算橋梁整體損傷等級超越機率，如圖 5.12、表 5-6 及表 5-7 所示。



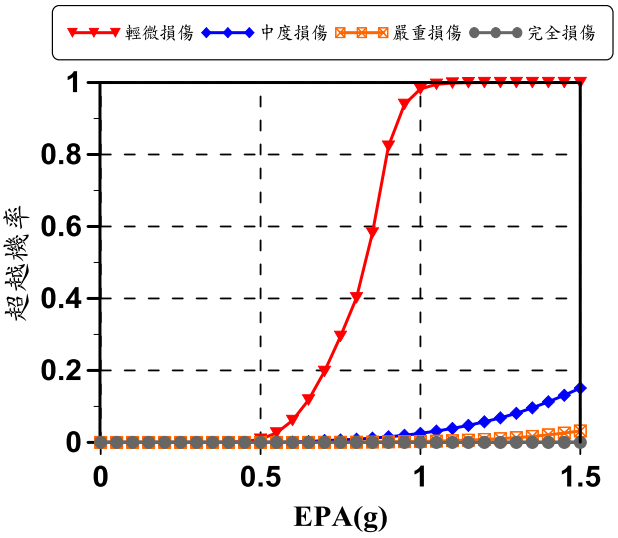
蒙地卡羅模擬(MCS)-行車向



三階力矩法-行車向



蒙地卡羅模擬(MCS)-橫向



三階力矩法-橫向

圖 5.12 橋梁整體損傷等級超越機率

表5-6 損傷等級超越機率(行車向)-蒙地卡羅模擬

EPA(g)	損傷等級超越機率			
	輕微損傷	中度損傷	嚴重損傷	完全損傷
0.05	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.20	0.0126	0.0000	0.0000	0.0000
0.25	0.1734	0.000018	0.0000	0.0000
0.30	0.6439	0.000478	0.000022	0.0000
0.35	0.9953	0.005547	0.000386	0.0000
0.40	1.0000	0.020449	0.002038	0.0000
0.45	1.0000	0.020669	0.002087	0.0000
0.50	1.0000	0.021644	0.002087	0.0000
0.55	1.0000	0.035391	0.002135	0.0000
0.60	1.0000	0.093901	0.002151	0.0000
0.65	1.0000	0.218133	0.002226	0.0000
0.70	1.0000	0.389553	0.002781	0.000001
0.75	1.0000	0.566694	0.005564	0.000007
0.80	1.0000	0.718068	0.013788	0.00004
0.85	1.0000	0.828458	0.032809	0.000168
0.90	1.0000	0.902116	0.066953	0.000635
0.95	1.0000	0.947137	0.119195	0.001926
1.00	1.0000	0.972327	0.189528	0.004777
1.05	1.0000	0.985908	0.274329	0.010327
1.10	1.0000	0.993096	0.368737	0.02048
1.15	1.0000	0.996604	0.466074	0.036141
1.20	1.0000	0.99836	0.560487	0.059333
1.25	1.0000	0.999232	0.646823	0.090677
1.30	1.0000	0.999627	0.723044	0.131234
1.35	1.0000	0.99982	0.787232	0.179517
1.40	1.0000	0.999914	0.839021	0.235477
1.45	1.0000	0.999954	0.880874	0.296753
1.50	1.0000	0.999987	0.912632	0.361102

表5-7 損傷等級超越機率(橫向)-蒙地卡羅模擬

EPA(g)	損傷等級超越機率			
	輕微損傷	中度損傷	嚴重損傷	完全損傷
0.05	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.10	1.51462E-37	0.0000	0.0000	0.0000
0.15	3.09388E-22	0.0000	0.0000	0.0000
0.20	3.14848E-15	0.0000	0.0000	0.0000
0.25	4.00268E-11	0.0000	0.0000	0.0000
0.30	1.96249E-08	0.0000	0.0000	0.0000
0.35	1.49152E-06	0.0000	0.0000	0.0000
0.40	3.49223E-05	0.0000	0.0000	0.0000
0.45	0.000369574	0.000002	0.0000	0.0000
0.50	0.002231277	0.000007	0.0000	0.0000
0.55	0.008934392	0.000026	0.000001	0.0000
0.60	0.026280638	0.0002	0.000004	0.0000
0.65	0.061038407	0.000658	0.000029	0.0000
0.70	0.117979409	0.002056	0.000104	0.0000
0.75	0.197399843	0.005353	0.000357	0.0000
0.80	0.294664056	0.006576	0.000491	0.0000
0.85	0.401772382	0.008866	0.000744	0.0000
0.90	0.581836894	0.012031	0.001031	0.0000
0.95	0.823230805	0.015418	0.001446	0.0000
1.00	0.939347691	0.020052	0.001994	0.0000
1.05	0.981937052	0.025183	0.002784	0.0000
1.10	0.99509751	0.031603	0.003662	0.0000
1.15	0.998745404	0.039292	0.004863	0.0000
1.20	0.999690054	0.047255	0.006476	0.0000
1.25	0.999924857	0.057064	0.007946	0.0000
1.30	0.999981915	0.068066	0.010311	0.0000
1.35	0.999995644	0.08092	0.013121	0.0000
1.40	0.999998944	0.095236	0.016655	0.0000
1.45	0.999999741	0.113387	0.020969	0.0000
1.50	0.999999936	0.130806	0.025815	0.0000

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震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，故震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)臺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；除此之外，根據本團隊過去量測的數值，橋梁現場所量取的數據具有不確定性，由於先前量測時感應器(速度計)係置於簡支梁橋伸縮縫處與其下方的墩柱，今年計畫的另一個重點在於探討所取得的振動資

訊是否僅為為伸縮縫處之局部振動。

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，如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，故需確認所收集的振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。進一步而言，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。且所取得之振動頻率受到水流的影響程度如何?臺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。附加質量(added mass)為常見考量結構沒入水中的分析方式，經過本團隊初步分析的結果，若水流速小於5m/sec，則可忽略水的影響；上述結果主要是因為橋梁墩柱的沒入水中的長度通常不大，附加質量的效果不大。

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車行方向進行頻率量測，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。

首先，本計畫團隊曾經進行橋梁震動量測試驗五次，五次進

行的方式不盡相同，以下將詳細說明期間的演進過程，最後再說明於本年度的檢測。以下分別說明：

6.1.1.1 第一次試驗(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)

首先說明檢測方式的分類原則如下：

a. 有無外力作用於橋梁：

可分為兩類:(1)等速動態載重試驗(有)及(2)微振量測(無)。(1)項中，外力來源又可分為大型卡車(6 噸)、小型休旅車(1.5 噸)及小型自用車(1.5 噸)三種；外力作用於橋梁之速度有 10 公里/小時、20 公里/小時及 40 公里/小時等。

b. 儀器是否直接置於橋梁結構體上，則可分為以下兩類

(1)直接量測(有)及(2)非直接量測(無)；直接量測係指量測儀器直接置於橋梁結構體上，非直接量測係指量測儀器置於小自客或無動力拖車(斗)中。

c. 量測儀器移動與否，則可以分為移動式與靜止式量測

其中，移動式量測中，儀器可能設置於小型自用車之行李箱中或小拖車上。靜止式量測時，儀器可能設置於橋面板橋墩上方處、小自客後行李箱中及小拖車中。

綜合上述，本計畫團隊於 100 年度已進行評估的試驗項目計有：

1. <等速動態載重法 - 非直接量測 - 移動>

d. <等速動態載重法 - 非直接量測 - 靜止>

e. <等速動態載重法 - 直接量測 - 靜止>

f. <微振法 - 非直接量測 - 靜止>

g. <微振法 - 直接量測 - 靜止>

以上各檢測方式的名稱過長，進一步精簡如下：

1. <移動式量測法>

    h. <等速動態載重法 - 非直接量測>

    i. <等速動態載重法 - 直接量測>

    j. <微振法 - 非直接量測>

    k. <微振法 - 直接量測>

其中，經觀察知，在五個試驗法中，僅有第一個量測法其儀器為移動形式，故精簡為<移動式量測法>；而第二個至第五個試驗則其儀器均為靜止狀態，故省略。

6.1.1.2 第二次試驗(102年交通部運輸研究所「移動式橋梁振動檢測及訊號分析與傳輸通報系統」計畫)

本團隊因鑒於若可在不影響交通的情形下可取得振動頻率，應為較理想的檢測方式，故此次檢測相較於前次試驗，主要是增加這項考量。此研究的檢測方式說明如下；

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，汽車以 10km/hour 等速前進，橋梁上行車正常。

若上述各方法均可行，最佳選擇之優先順序為：6、5、4、3、2、1；上述順序亦反映出各量測法中，對訊號的干擾程度。

第6個量測法為最優先選擇主因為其符合機動性佳、儀器可以設置於車上不須搬動，且不需進行任何交通管制計畫，除滿足

利用單一儀器快速量測多個橋梁的目的，對交通衝擊最小且對施作性最佳；第5個量測法相較於第6個量測法，其量測過程中，除機動性稍為不理想(因試驗車輛必須短暫停止但不需熄火)，需時較第一個量測方法稍久，但有相當程度的機動性，且同樣地，因儀器設置於小拖車上不須機常搬動，故為第二優先；第4個量測法與第5個量測法類似，唯一不同處在於量測時引擎需要熄火；第3個量測法與第4個量測法一樣，唯須進行交通管制，對橋梁交通的衝擊較大；第1及第2個量測法則直接將速度計置於橋面版，其中第1個量測法因排除橋面上來往車輛的干擾，在訊號蒐集過程中干擾最小，故所求得之頻率可視為該橋之最正確的頻率，第2個量測法則為第1個量測法之對照組。

以上各量測方法進一步精簡如下：

1. <直接-無行車>
2. <直接-有行車>
3. <間接-無行車-靜止-未發動>
4. <間接-有行車-靜止-未發動>
5. <間接-有行車-靜止-發動>
6. <間接-有行車-移動>

以上名稱與先前相近，目的在於精簡各試驗名稱，增加本報告之閱讀性。

6.1.1.3 第三次試驗(104年度橋梁耐震能力與檢測評估分析模式之建立研究(1/2))

針對宜蘭「蘭陽大橋」與「舊東澳大橋」(位於臺9號)進行現地試驗。檢測的方式根據前兩次試驗經驗擬定如下：

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,橋梁上無任何行車。
6. 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。
7. 儀器(速度計)直接置於墩柱上，橋梁上無任何行車。
8. 儀器(速度計)直接置於墩柱上，橋梁上行車正常。

6.1.1.4 第四次試驗(105年度橋梁耐震能力與檢測評估分析模式之建立研究(2/2))

根據上述原則暨先前三次的試驗經驗,選擇苗栗「尖山大橋」(位於臺1線)與南投雲林間的「南雲大橋」(位於臺3線)進行現地試驗。檢測的方式如下：

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)直接置於墩柱上，橋梁上無任何行車。
6. 儀器(速度計)直接置於墩柱上，橋梁上行車正常。

除上述測試外，南雲大橋並分別針對墩柱是否位於主河道進行量測，以探討水流對振動頻率的影響。

6.1.1.5 第五次試驗

本年度依據以下幾點選擇試驗對象：

1. 因非直接量測技術於國內尚未成熟，為專注於技術開發，以簡支直線型橋梁且不具功能性支承墊為優先。

2. 為配合整體計畫規劃，試驗橋梁需有竣工圖，以利相關後續計畫之分析。

3. 可以同時取得橋面板處與橋墩處之震動內容，藉以評估由橋面板所取得之振動頻率是否與橋墩處相近。

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」(位於臺1線)與南投雲林間的「南雲大橋」(位於臺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。

6.1.1.6 本年度試驗規劃

本年度試驗的重點在於釐清歷年來所觀察到的頻率具有相當的不確定之原因，為達到此目的，本年度共分兩組試驗，其中第一組試驗與先前試驗使用相同的試驗儀器(兩台三軸速度計分別置於墩柱與橋面版伸縮縫處)；第二組試驗使用10個單軸速度計，以兩個一組，分別置於試驗橋跨的起點、1/4跨、1/2跨、3/4跨與終點處，如圖6.1所示。兩組試驗的結果將進行比對，以確認置於伸縮縫處的三軸速度計所取的頻率為局部或整體的振動訊息。上述兩組試驗均進行以下四項試驗：

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。

因為歷年來南雲大橋的試驗次數最多，因此，本年度選取南雲大橋(圖6.2)進行測試，以探討振動頻率於歷年來的變異性。

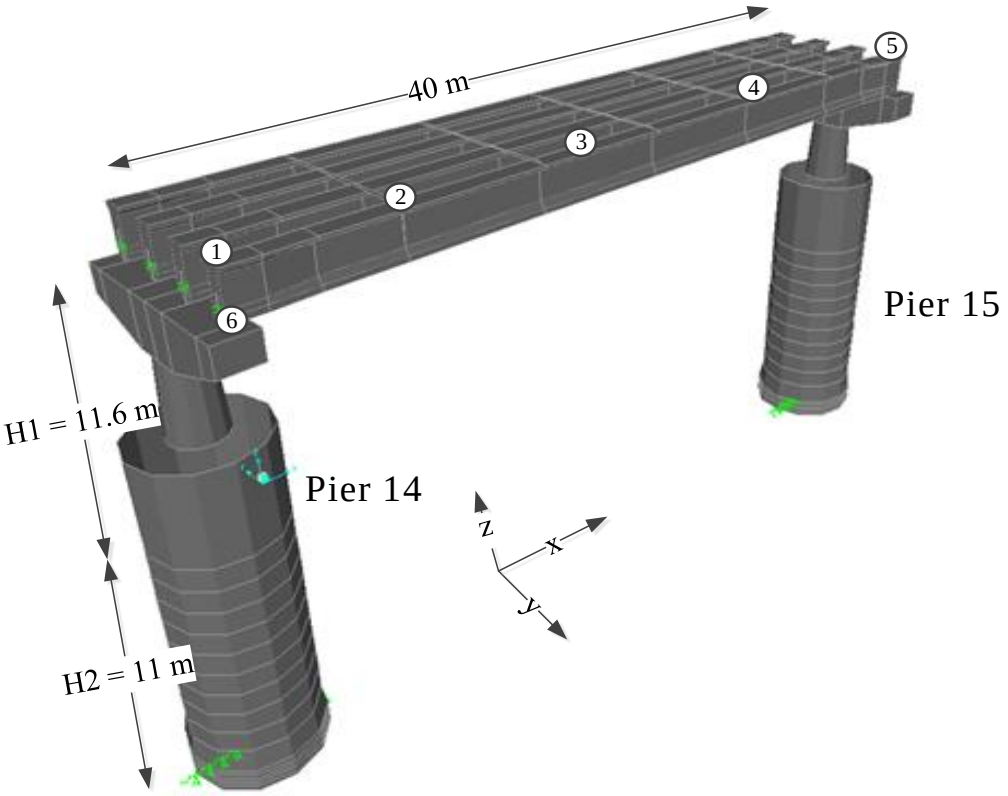


圖 6.1 速度計配置圖 (No.1 No.6:三軸、No.1~No.5:單軸)

圖 6.2 南雲大橋之試驗墩柱 (墩柱 14)

6.1.2 第一次現地試驗結果

本研究團隊計畫於夏季前後分別進行一次試驗，夏季前的試驗時間為6月19日晚間至6月20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，本研究團隊另於10月12晚間至13日清晨進行第二次試驗(詳見第6.1.3節)。6月19日晚間至6月20日清晨試驗的初步分析結果(分為4種情形)說明如下。上述4種情形各進行5次試驗，以下僅針對5次試驗中的第1次試驗詳細說明，其餘4次結果僅列出最後的結果。

1. 有車、車行方向

圖 6.3 所示為五組單軸速度計的試驗結果，表 6-1 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，各位置處所得到的結果十分一致，南雲大橋此跨的第一振態(車行方向)應在 3.0Hz 附近。圖 6.4 所示為兩組三軸與一組單軸速度計於伸縮縫處的試驗結果，表 6-2 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，於伸縮縫橋面板處及與墩帽所得到的振態頻率結果與其他各處的結果十分一致。

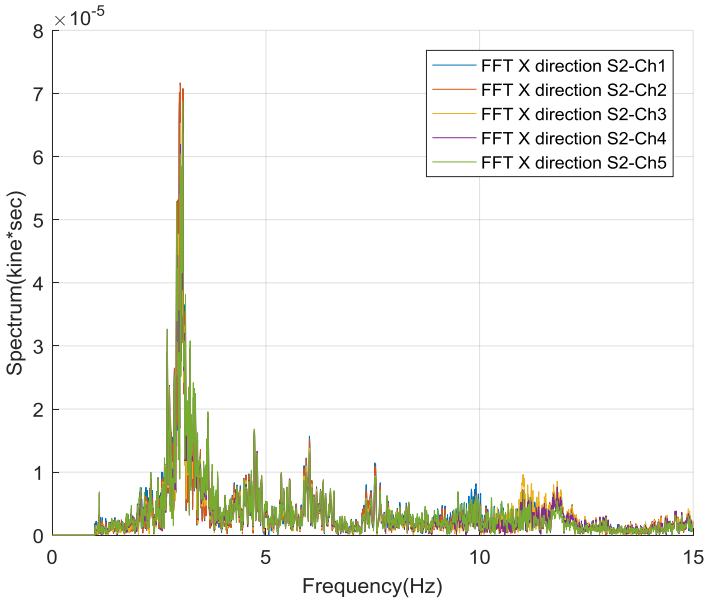


圖 6.3 南雲大橋起點(Ch1)、1/4 跨(Ch2)、1/2 跨(Ch3)、3/4 跨(Ch4)與終點處(Ch5)之振譜 (pier 14、有行車，車行方向)

表6-1 南雲大橋起點(Ch1)、1/4跨(Ch2)、1/2跨(Ch3)、3/4跨(Ch4)與終點處(Ch5)之第一振態頻率值 (pier 14、有行車，車行方向)

Condition	第一振態頻率
Ch-1	3.06
Ch-2	2.99
Ch-3	3.00
Ch-4	3.05
Ch-5	3.05

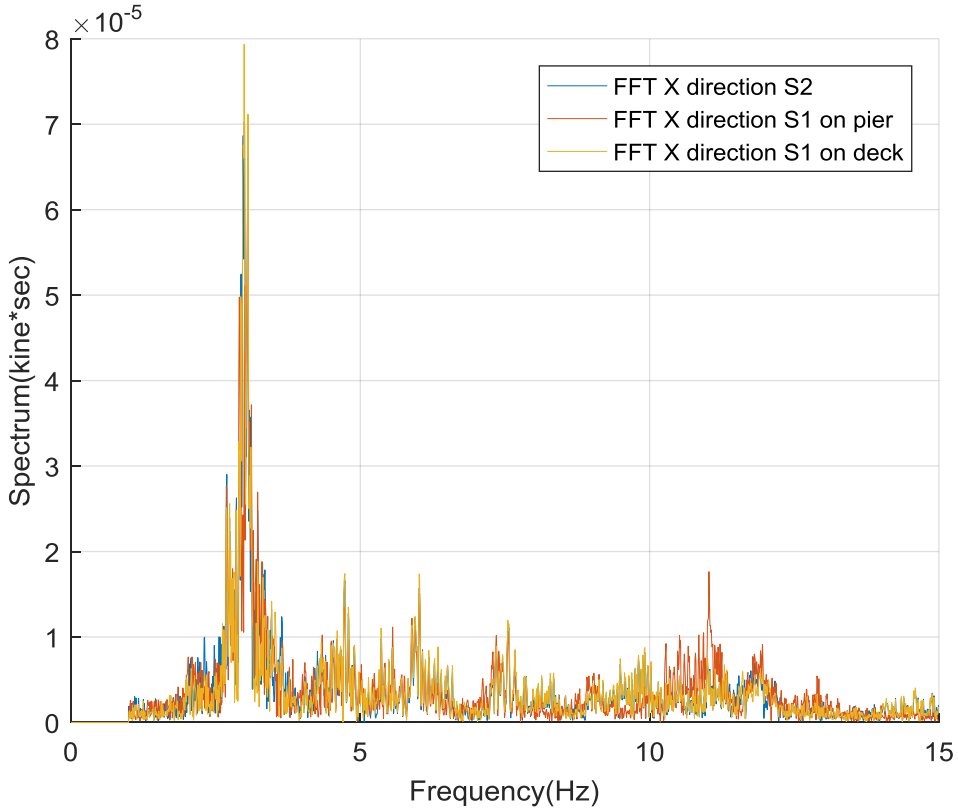


圖 6.4 南雲大橋兩組(S2: Ch1、S1: 三軸)試驗結果之比較 (pier 14、有行車，車行方向)

表6-2 南雲大橋兩組(S2: Ch1、S1: 三軸)試驗之第一振態頻率值 (pier 14、有行車，車行方向)

Condition	第一振態頻率
Sensor 2	3.06
Sensor 1 pier	3.05
Sensor 1 deck	2.99

2. 無車、車行方向

圖 6.5 所示為五組單軸速度計的試驗結果，表 6-3 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，各位置處所得到的結果十分一致，南雲大橋此跨的第一振態(車行方向)應在 2.8 Hz 附近。圖 6.6 所示為兩組三軸與一組單軸速度計的試驗結果，表 6-4 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，於伸縮縫橋面板處及與墩帽所得到的振態頻率結果與其他各處的結果十分一致。雖然此次試驗的結果尚稱一致，不過與無行車的分析結果略有差異(3.0 Hz)。

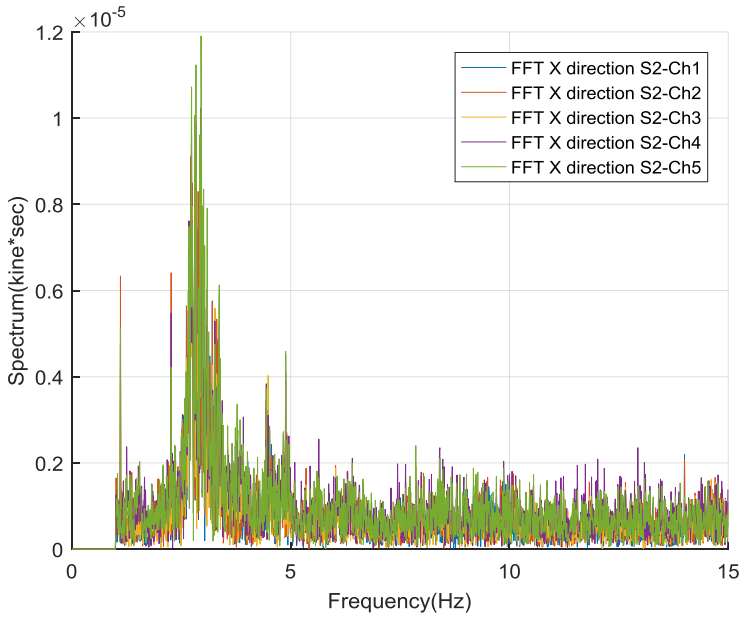


圖 6.5 南雲大橋起點(CH1)、1/4 跨(CH2)、1/2 跨(CH3)、3/4 跨(CH4)與終點處(CH5)之振譜 (pier 14、無行車，車行方向)

表6-3 南雲大橋起點(CH1)、1/4跨(CH2)、1/2跨(CH3)、3/4跨(CH4)與終點處(CH5)之第一振態頻率值 (pier 14、無行車，車行方向)

Condition	Dominant Frequency
Ch-1	2.72
Ch-2	2.72
Ch-3	2.81
Ch-4	2.95
Ch-5	2.95

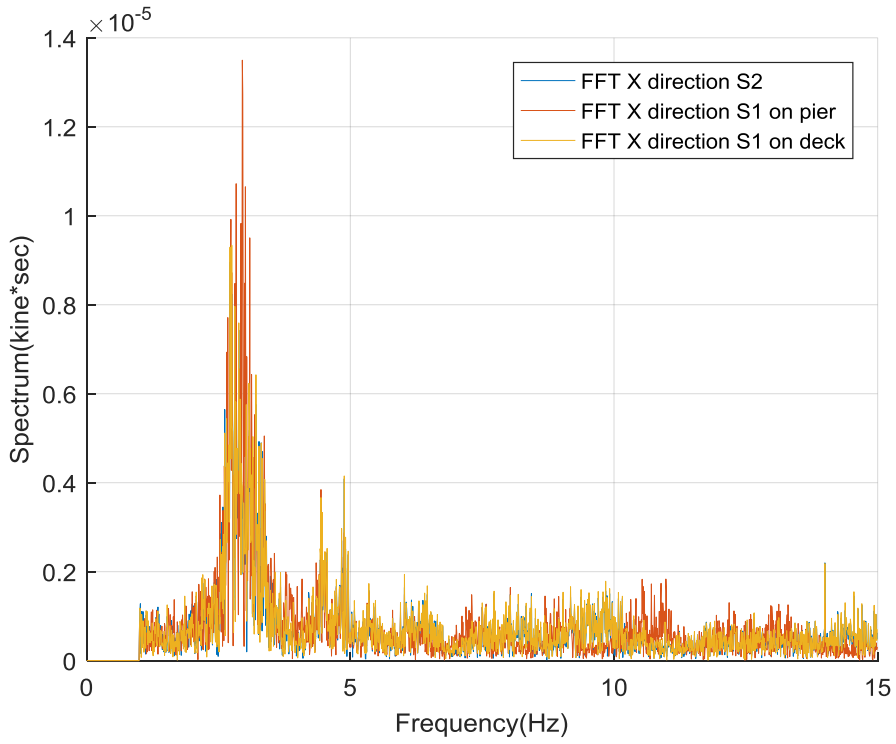


圖 6.6 南雲大橋兩組(S2: CH1、S1: 三軸)試驗結果之比較

(pier 14、無行車，車行方向)

表6-4 南雲大橋兩組(S2: CH1、S1: 三軸)試驗之第一振態頻率值 (pier 14、無行車，車行方向)

Condition	Dominant Frequency
Sensor 2	2.72
Sensor 1 pier	2.95
Sensor 1 deck	2.75

3. 有車、垂直車行方向

圖 6.7 所示為五組單軸速度計的試驗結果，表 6-5 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，各位置處所得到的結果十分一致，南雲大橋此跨的第一振態(車行方向)應在 2.04 Hz 附近。圖 6.8 所示為兩組三軸與一組單軸速度計的試驗結果，表 6-6 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，於伸縮縫橋面板處及與墩帽所得到的振態頻率結果與其他各處的結果十分一致。

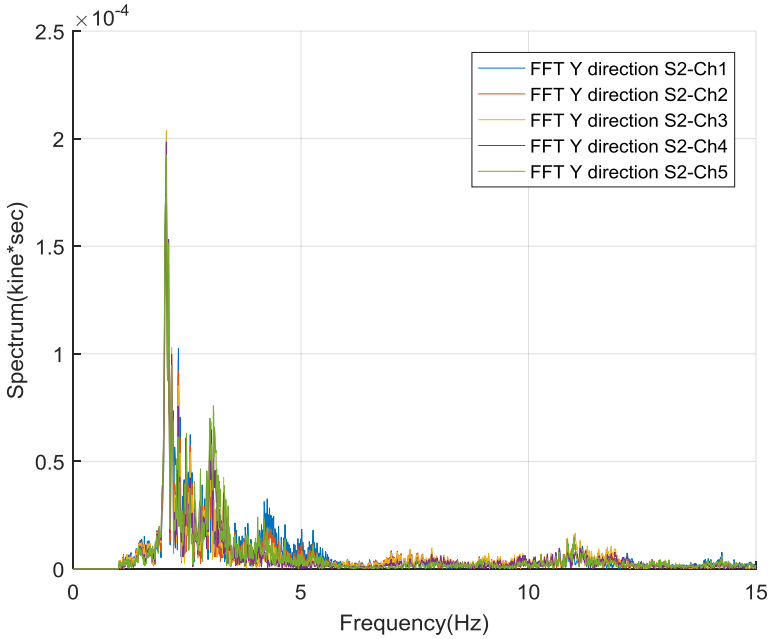


圖 6.7 南雲大橋起點(Ch1)、1/4 跨(Ch2)、1/2 跨(Ch3)、3/4 跨(Ch4)與終點處(Ch5)之振譜 (pier 14、有行車，垂直車行方向)

表6-5 南雲大橋起點(Ch1)、1/4跨(Ch2)、1/2跨(Ch3)、3/4跨(Ch4)與終點處(Ch5)之第一振態頻率值 (pier 14、有行車，垂直車行方向)

Condition	Dominant Frequency
Ch-1	2.04
Ch-2	2.04
Ch-3	2.04
Ch-4	2.04
Ch-5	2.04

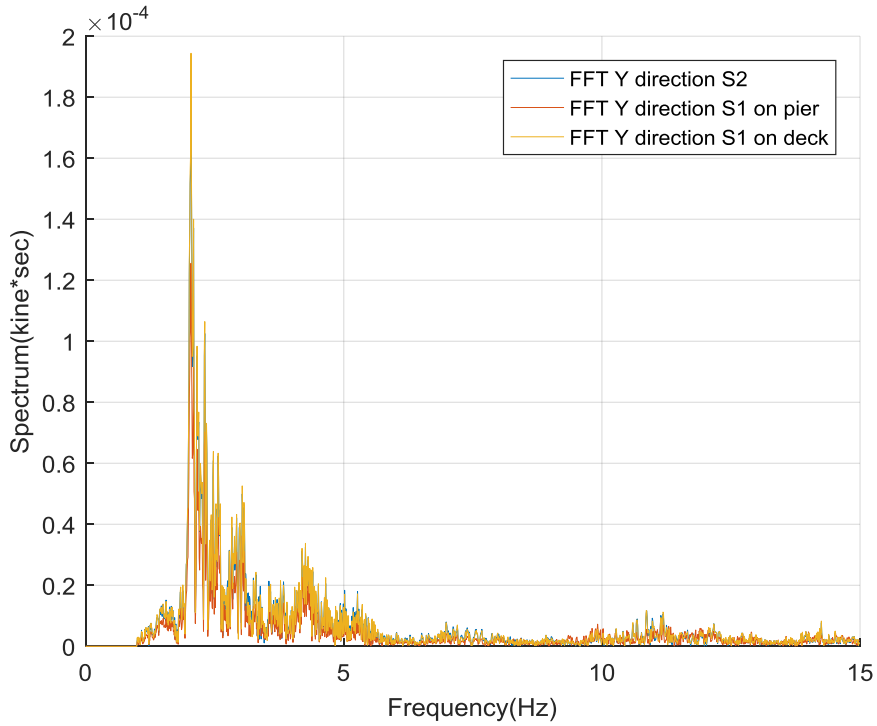


圖 6.8 南雲大橋兩組(S2: Ch1、S1: 三軸)試驗結果之比較 (pier 14、有行車，垂直車行方向)

表6-6 南雲大橋兩組(S2: Ch1、S1: 三軸)試驗之第一振態頻率值
(pier 14、有行車，垂直車行方向)

Condition	Dominant Frequency
Sensor 2	2.04
Sensor 1 pier	2.04
Sensor 1 deck	2.04

4. 無車、垂直車行方向

圖 6.9 所示為五組單軸速度計的試驗結果，表 6-7 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，各位置處所得到的結果十分一致，南雲大橋此跨的第一振態(車行方向)應在 2.08 Hz 附近。圖 6.10 所示為兩組三軸與一組單軸速度計的試驗結果，表 6-8 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，於伸縮縫橋面板處及與墩帽所得到的振態頻率結果與其他各處的結果十分一致。此次試驗結果與無行車的分析結果的差異甚小(2.08 Hz v.s. 2.04 Hz)。表 6-9 與表 6-10 顯示為此次與先前量測時的結果，由此 2 表可知除了本次試驗自身的 5 次結果存有差異性外，與先前的結果亦存有差異性歷次(含本次)的試驗結果，均顯示不同次試驗間的頻率的存有差異性。這個問題，將於說明第二次試驗(10/12)的結果後，再進行進一步的討論。

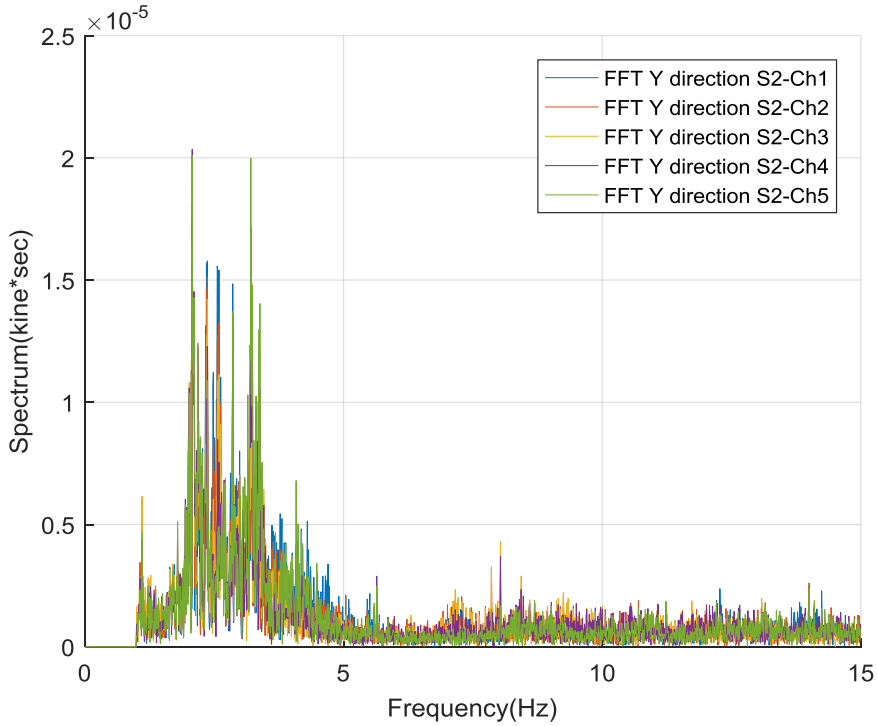


圖 6.9 南雲大橋起點(Ch1)、1/4 跨(Ch2)、1/2 跨(Ch3)、3/4 跨(Ch4)與終點處(Ch5)之振譜 (pier 14、無行車，垂直車行方向)

表6-7 南雲大橋起點(Ch1)、1/4跨(Ch2)、1/2跨(Ch3)、3/4跨(Ch4)與終點處(Ch5)之第一振態頻率值 (pier 14、無行車，垂直車行方向)

Condition	Dominant Frequency
Ch-1	2.08
Ch-2	2.08
Ch-3	2.08
Ch-4	2.08
Ch-5	2.08

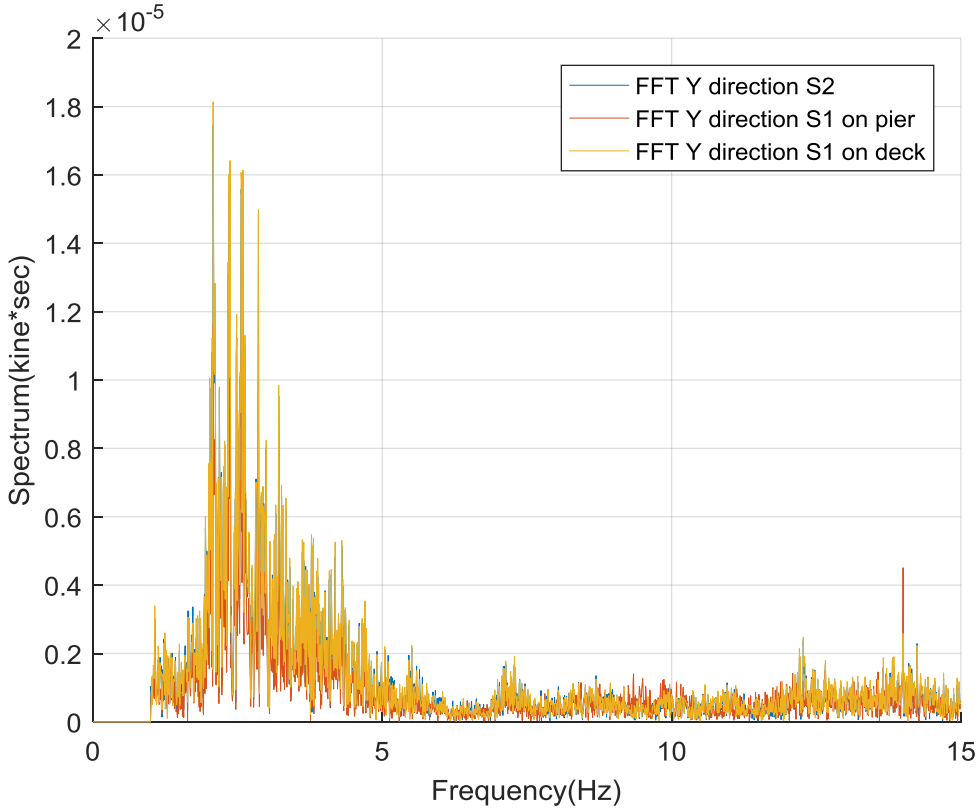


圖 6.10 南雲大橋兩組(S2: CH1、S1: 三軸)試驗結果之比較

(pier 14、無行車，垂直車行方向)

表6-8 南雲大橋兩組(S2: CH1、S1: 三軸)試驗之第一振態頻率值

(pier 14、無有車，垂直車行方向)

Condition	Dominant Frequency
Sensor 2	2.08
Sensor 1 pier	2.08
Sensor 1 deck	2.08

表6-9 南雲大橋6/19於無車、垂直車行方向之量測結果

(P14、單軸速度計)

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫處單軸	2.08	2.12	2.10	2.13	2.58
墩帽處三軸	2.08	2.12	2.81	2.13	2.58
伸縮縫處三軸	2.08	2.12	2.81	2.13	2.58

表6-10 南雲大橋先前量測的結果 (無車、垂直車行方向)

2016/6/13	2016/10/3	2017/6/23	2017/11/3
2.47	2.44	2.79	2.63

6.1.3 第二次現地試驗結果

如前述，本研究團隊另於10月12晚間至13日清晨進行第二次試驗(量測時水位約僅50公分，橋墩沖刷深度約為1公尺，與第一次量測時狀況類似)。因為以下兩個原因，本次試驗的項目與第一次試驗(6/19)略有不同：(1)根據上述試驗結果得知，置於各處(伸縮縫與各跨距)的速度所量測的結果十分一致且橋梁為對稱結構，因此第二次試驗速度計安裝的位置減為三處(伸縮縫處、1/4跨處與1/2跨處)。(2)試驗橋梁(南雲)於兩次試驗之間，進行改善工程，工程進行中將通往墩柱上端的貓道拆除，基於第一次試驗得知，置於伸縮縫處橋面板與其下墩柱處的數值十分一致，因此，本次試驗不進行墩柱處振動頻率的量測。此外，因為第一次試驗的結果顯示，雖然不同位置同一次量測下差異不大，但同一位置不同次量測的結果卻出現明顯差異，因此，除了前述的FFT外，第二次試驗結果在分析時增加Welch法(增加時窗與平均的技術)，以下說明第二次試驗之結果(同樣地，僅提供5次試驗中第1次試驗的詳細結果)。

1. 有車、車行方向

圖 6.11 所示為 3 組三軸速度計的試驗結果，表 6-11 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，類似 6/19 的試驗結果，各位置處所得到的結果十分一致，南雲大橋此跨的第一振態(車行方向)應在 2.95Hz 附近。若以 FFT 的結果比較，6/19 的頻率約在 3.0Hz 附近，兩次試驗結果顯示，在車行方向，無論是不同位置還是不同時間，均有相當一致的結果。另根據圖 6.11 與表 6-11 結果顯示，Welch 分析結果與 FFT 相近。

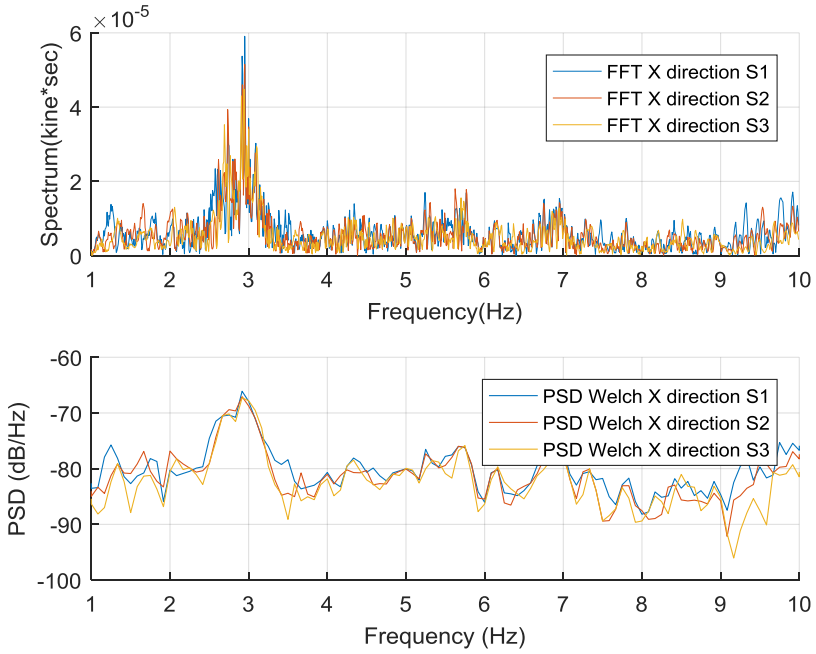


圖 6.11 南雲大橋起點(S1)、1/4 跨(S2)、1/2 跨(S3)之振譜 (pier 14、有行車，車行方向)

表6-11 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之第一振態頻率值 (pier 14、有行車，車行方向)

Condition	第一振態頻率 (Welch)	第一振態頻率 (FFT)
S1	2.92	2.95
S2	2.92	2.95
S3	2.92	2.94

2. 無車、車行方向

圖 6.12 所示為三組三軸速度計的試驗結果，表 6-12 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，各位置處所得到的結果十分一致，南雲大橋此跨的第一振態(車行方向)應在 2.97 Hz 附近。無論與無車行(10/12)或第一次試驗(6/19)比較，均十分接近。

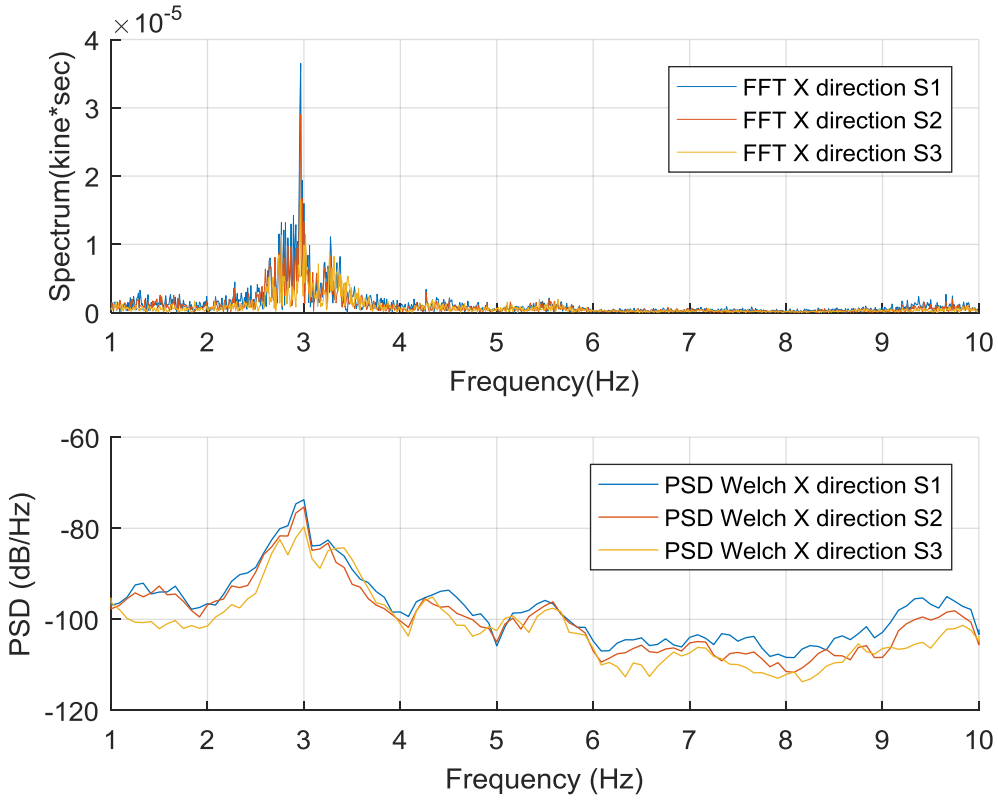


圖 6.12 南雲大橋起點(S1)、1/4 跨(S2)、1/2 跨(S3)之振譜 (pier 14、無行車，車行方向)

表6-12 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之第一振態頻率值 (pier 14、無行車，車行方向)

Condition	第一振態頻率 (Welch)	第一振態頻率 (FFT)
S1	3.00	2.97
S2	3.00	2.97
S3	3.00	2.97

3. 有車、垂直車行方向

圖 6.13 所示為三組三軸速度計的試驗結果，表 6-13 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，各位置處所得到的結果十分一致，南雲大橋此跨的第一振態(車行方向)應在 2.03 Hz(以 FFT 法之平均值估算)附近，此結果與第一次試驗結果(2.04 Hz)十分接近。

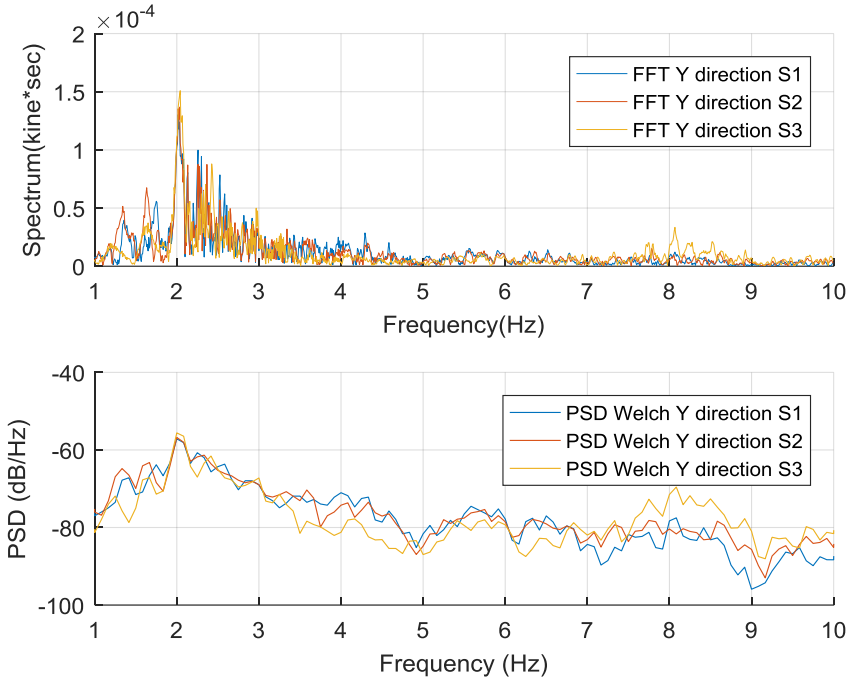


圖 6.13 南雲大橋起點(S1)、1/4 跨(S2)、1/2 跨(S3)之振譜 (pier 14、有行車，垂直車行方向)

表6-13 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之第一振態頻率值 (pier 14、有行車，垂直車行方向)

Condition	第一振態頻率 (Welch)	第一振態頻率 (FFT)
S1	2.00	2.02
S2	2.00	2.03
S3	2.00	2.04

4. 無車、垂直車行方向

圖 6.14 所示為三組三軸速度計的試驗結果，表 6-14 為其對應的第一振態頻率，由以上可知，各位置處所得到的結果十分一致，南雲大橋此跨的第一振態(車行方向)應在 2.07Hz 附近。此結果與第一次試驗結果(2.08 Hz)十分接近。圖 6.14 提供一個重要的現象，南雲大橋於垂直車行方向，有三個頻率內涵所具有的能量相對較高，下節將進行進一步的說明。

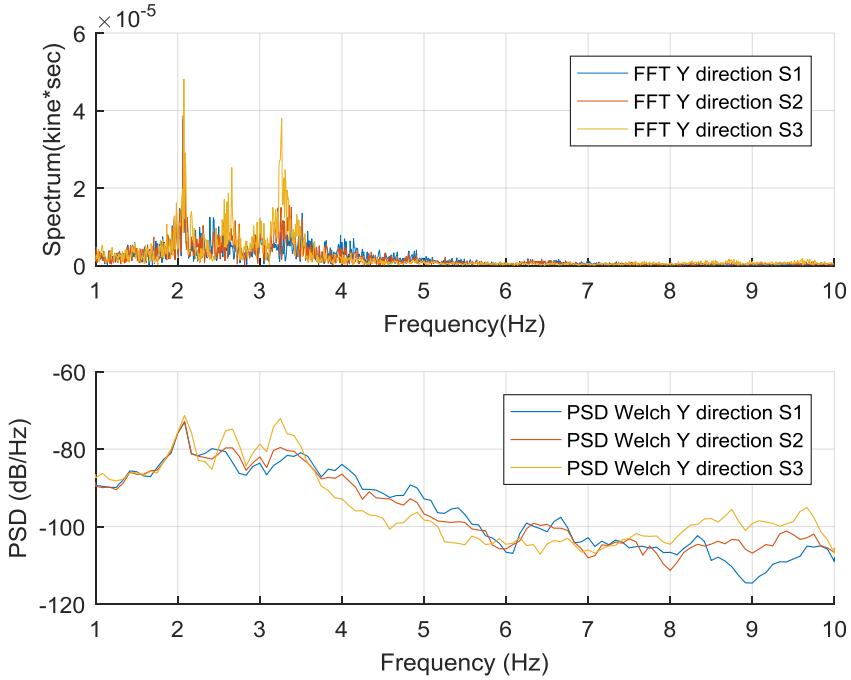


圖 6.14 南雲大橋起點(S1)、1/4 跨(S2)、1/2 跨(S3)之振譜 (pier 14、無行車，垂直車行方向)

表6-14 南雲大橋起點(S1)、1/4跨(S2)、1/2跨(S3)之第一振態頻率值 (pier 14、無行車，垂直車行方向)

Condition	第一振態頻率 (Welch)	第一振態頻率 (FFT)
S1	2.08	2.07
S2	2.08	2.07
S3	2.08	2.08

6.2 試驗結果討論與橋梁結構系統識別

表6-15~6.18所示為6/19與10/12設置於橋面板處五次試驗的結果(平行車行與垂直車行)。除表6-17的第五次試驗與表6-18的結果有較大的變異性外，其餘的結果均相當一致。其中，平行車行方向在十次試驗的過程中，所量測到的範圍為2.72Hz到3.06Hz，平均值約為2.9Hz左右，且變動幅度不大(最大約6%)。顯示平行車行方向的第一振態的振動頻率應該可以確認在2.90Hz附近。此點另可由表6-19得到佐證。表6-19為設置於伸縮縫處與墩柱處所測量的結果，同樣地，其振動頻率亦均落於2.90Hz附近。

不同於平行車行方向有十分穩定的結果，垂直車行方向雖然多數試驗的結果亦十分一致，但表6-18與表6-20所示，似乎另有主頻落在2.6與3.0左右，導致試驗結果不如預期。

表6-15 南雲大橋6/19於無車、平行車行方向之量測結果

(P14、單軸速度計)

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫	2.72	2.91	2.94	2.77	3.06
1/4 跨處	2.72	2.91	2.94	2.77	3.06
1/2 跨處	2.81	2.72	2.97	2.73	3.01

表6-16 南雲大橋10/12於無車、平行車行方向之量測結果

(P14、三軸速度計)

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫	2.97	2.83	2.82	2.88	2.95
1/4 跨處	2.97	2.83	2.82	2.88	2.97
1/2 跨處	2.97	2.83	2.82	2.88	2.93

表6-17 南雲大橋6/19於無車、垂直車行方向之量測結果

(P14、單軸速度計)

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫	2.08	2.12	2.10	2.13	2.58
1/4 跨處	2.08	2.12	2.10	2.13	2.58
1/2 跨處	2.08	2.12	2.10	2.13	2.17

表6-18 南雲大橋10/12於無車、垂直車行方向之量測結果

(P14、三軸速度計)

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫	2.07	3.17	2.88	2.93	2.27
1/4 跨處	2.07	3.16	2.90	2.93	2.30
1/2 跨處	2.08	3.04	2.88	2.93	2.27

表6-19 南雲大橋6/19於無車、平行車行方向之量測結果

(P14、三軸速度計)

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫	2.95	2.95	2.97	2.96	2.96
墩柱	2.75	2.91	2.94	2.77	3.06

表6-20 南雲大橋6/19於無車、垂直車行方向之量測結果

(P14、三軸速度計)

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫	2.08	2.12	2.81	2.13	2.58
墩柱	2.08	2.12	2.81	2.13	2.58

因期中報告時已發現垂直方向的結果不如預期，故於10/12的試驗結果分析時加入Welch分析法，惟Welch分析法基本上與FFT相似，無法提供進一步的訊息。

上述垂直於車行方向的試驗結果進一步說明如下。圖6.15所示為一個1400秒的歷時速度樣本(垂直車行方向)。此圖可進一步再細分為四個部分(A、B、C與D)，其中，A與C為ambient振動，

B為大卡車經過所量得的振動，D為小客車通過時所量得的振動。圖6.16為A與C部分的FFT結果，由圖6.16可見，明顯地，2Hz為其主要頻率。圖6.17為B與D部分的FFT結果，由圖6.17可見，明顯地，3Hz為其主要頻率。尤其重要的是，3Hz因為是大卡車經過的振動頻率，其能量約是A與C部分的1000倍。根據橋梁系統與試驗結果我們可知，當有重車經過橋梁時，重車對平行車行方向的振動影響很大，因此推論此處所見的3Hz應為平行車行方向橋梁結構的振動頻率。雖然此時主要係量測垂直車行方向的振動，但除非速度計的擺設位置完全沒有平行方向的分量(這在技術上不容易達成)，否則，垂直方向的量測結果將包含水平方向的內涵，而若此時有重車經過，將加強此訊號，因此，導致於垂直方向偶而會看到接近3Hz的頻率。

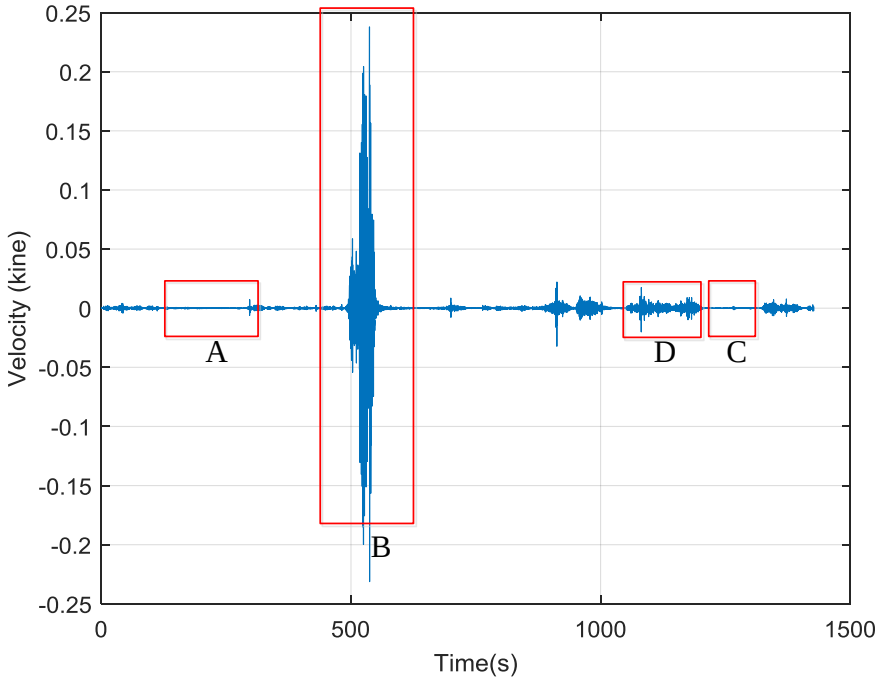
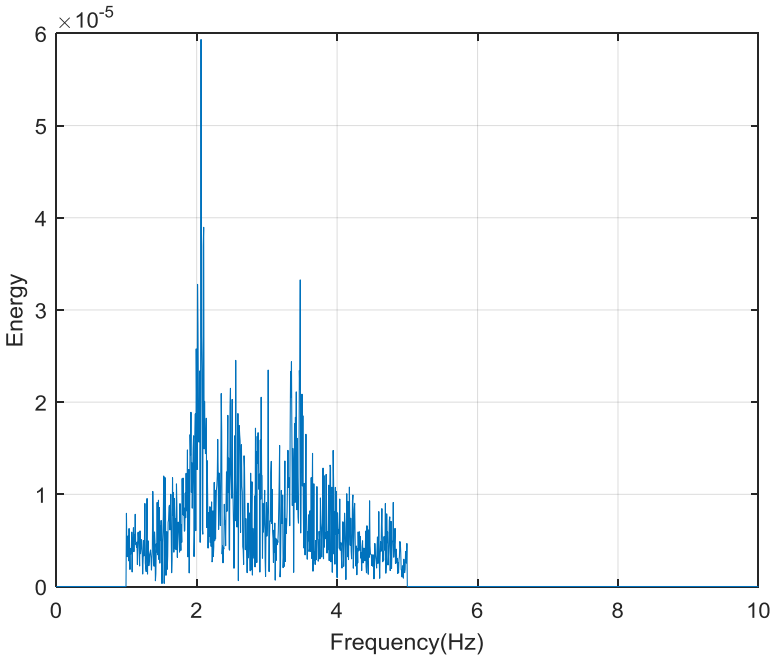
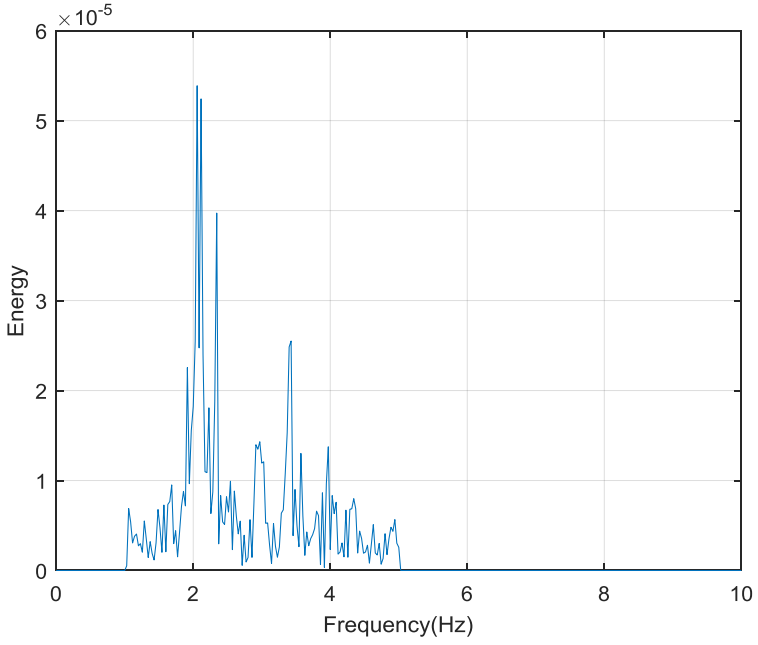


圖 6.15 南雲大橋某次有車、垂直車行方向之量測結果

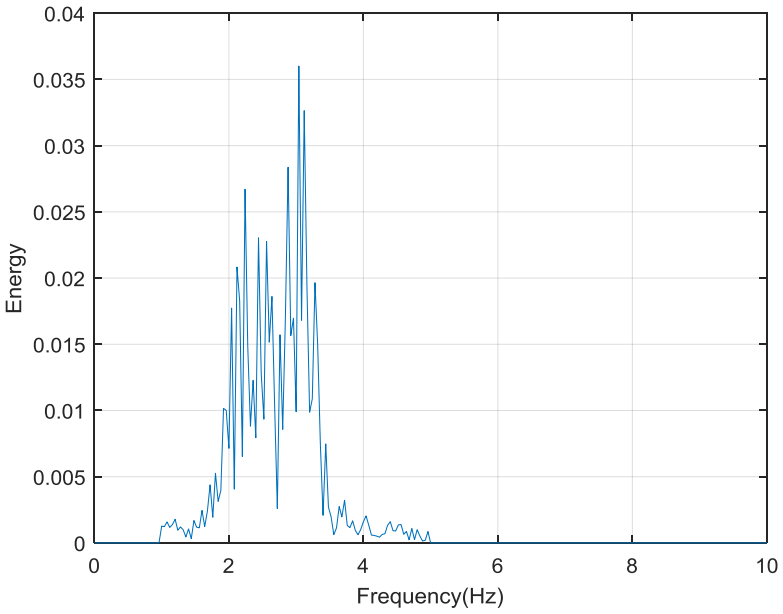


(A)

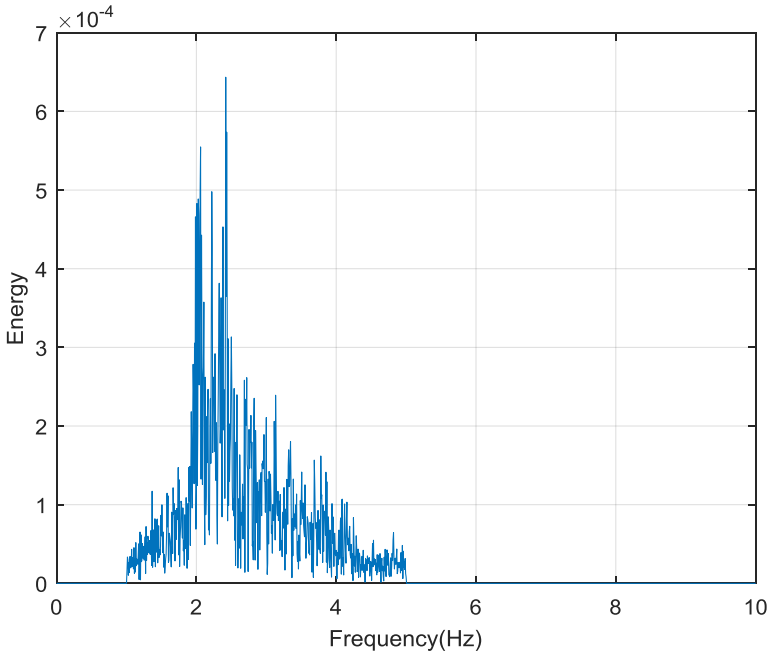


(C)

圖 6.16 A(上)與 C(下)部分之振譜



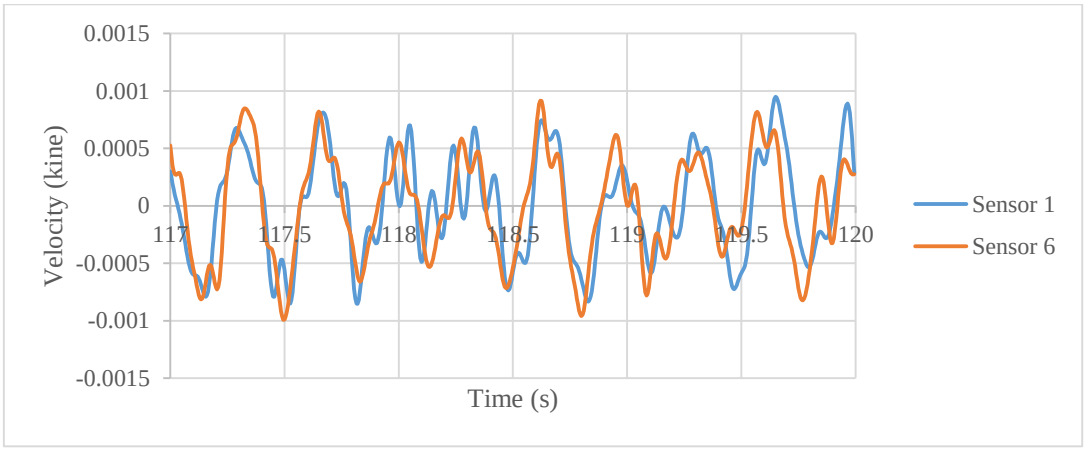
(B)



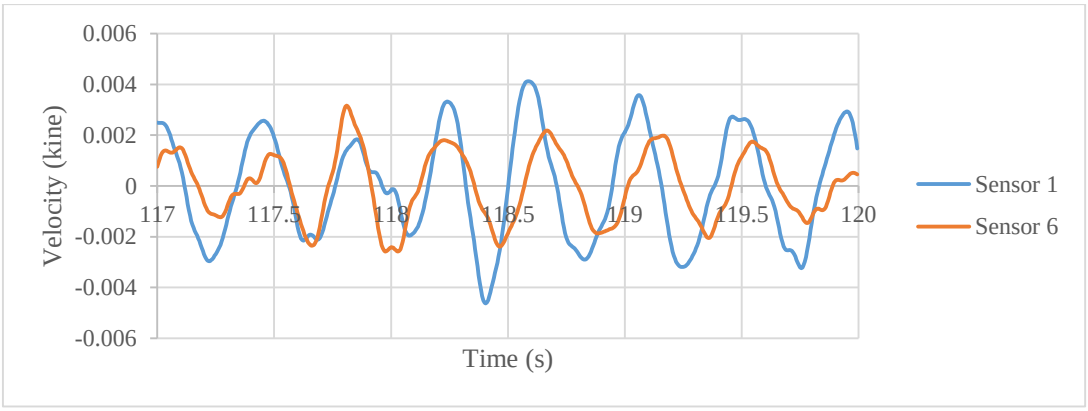
(D)

圖 6.17 B(上)與 D(下)部分之振譜

圖6.18(a)顯示了1號速度計和6號速度計測量值之間的比較(速度計編號詳見圖6.1)，其中，車行方向兩個速度計(橋面板與墩柱)幾乎具有相同的幅度和相同的趨勢，驗證了兩個位置測量的振動歷時相似。除此之外，亦可由此圖計算出車行方向的振動頻率約為1/(3/8.8)~=2.933，與先前量測結果的觀察一致。圖6.18(b)顯示了1號速度計和6號速度計在垂直車行方向測量值之間的比較(速度計編號詳見圖6.1)，類似車行方向的結果，但此方向橋面板的振幅約為墩柱振幅的1.5倍。



(a)



(b)

圖 6.18 南雲大橋某次伸縮縫處橋面板與墩柱之量測結果

(a)車行方向 (b)垂直車行方向

根據以上觀察：(1)當有重車經過時，車行方向振動明顯受到影響，並可於重車駛離觀測振動單元時，取得自由振動資料，如

圖6.19所示、(2)車行方向與垂直車行方向的振動頻率比值約為1.5(2.9Hz/2.0Hz)、(3)垂直車行方向橋面板的位移約為墩柱的1.5倍(圖6.18(b))。以下將利用particle swarm optimization(PSO)進行結構系統識別。此法不僅可以預測橋梁的頻率，還可以預測橋梁的設計特性。進行時，本計畫首先建立橋梁有限元模型，並最佳化有限元模型的未知變量，使有限元模型的自由振動與實驗結果測得的自由振動具有相同的結果(上述第(1)點)並且滿足上述第(2)與第(3)點。本計畫最佳化的未知變量有四個，分別為阻尼比，混凝土模彈性模數，土壤彈簧和橋梁墩柱與上部結構之間的旋轉彈簧。由於此過程需要迭代計算，因此有限元素模型盡可能簡化，以便可以控制計算時間。圖6.20為系統識別時所使用的有限元素模型。根據試驗結果，假設上部結構是剛性的，並假設混凝土密度為2400kg/m^3。表6-21所示為最佳化進行時各參數的數值。

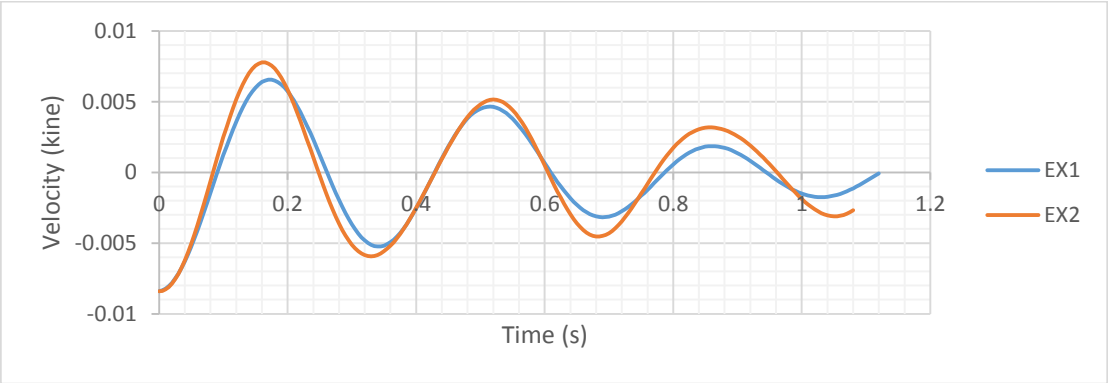


圖 6.19 南雲大橋車行方向之自由振動歷時 (EX1: 6/19、EX2:10/12)

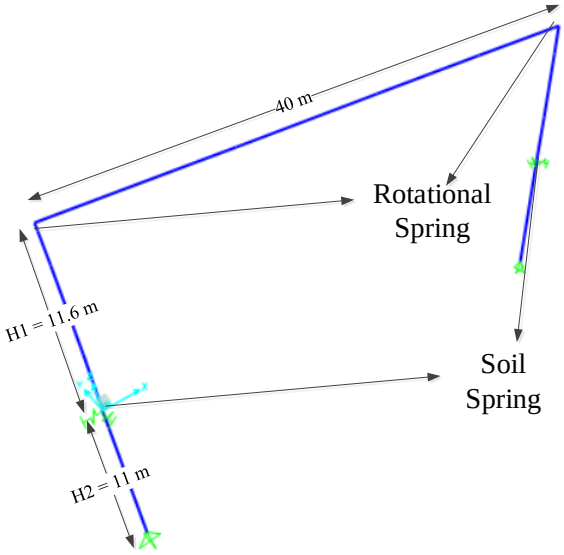


圖 6.20 系統識別時所使用的有限元素模型

表6-21 最佳化進行時各參數的數值

最佳化演算法: PSO			
粒子數	50		
迭代數	30		
變數範圍			
變數	分布型態	範圍	Unit
阻尼比(X dir)	Uniform Random	0.001-0.1	MPa
混凝土彈性模數	Uniform Random	5000-40000	MPa
土壤彈簧	Uniform Random	1e8-1e12	N/mm
旋轉彈簧	Uniform Random	0-1e12	Nmm/rad

圖6.21顯示了測量數據和有限元結果之間的自由振動的RMSE在最佳化過程中降低的情形，圖6.22顯示了與測量數據相比的數值振動歷時。表6-22顯示了每個變量的最佳值。根據以上各種量測與分析，結論如下

1. 兩次量測期間，橋梁的振動特性沒有明顯改變。

2. FFT和Welch方法都產生相同的橋頻率內涵之估計。

3. 在沒有外力的情況下進行環境振動測試為最佳的狀況。因為當有汽車時，車行方向的振動將會影響垂直車行方向的量測結果。因本試驗為增取時間(試驗時，不易有無車狀態)，當車輛剛駛離觀測的振動單元時，即開始測量，但經觀察，剛離開時在車行方向的振動仍會影響垂直車行方向的量測結果。

4. PSO為系統識別的良好工具並可做為預測頻率之用。但需要對橋梁振動進行明確的輸入和輸出測量。

5. 車行和與垂直車行方向的第一振態頻率分別約為2.9Hz和2.05Hz。

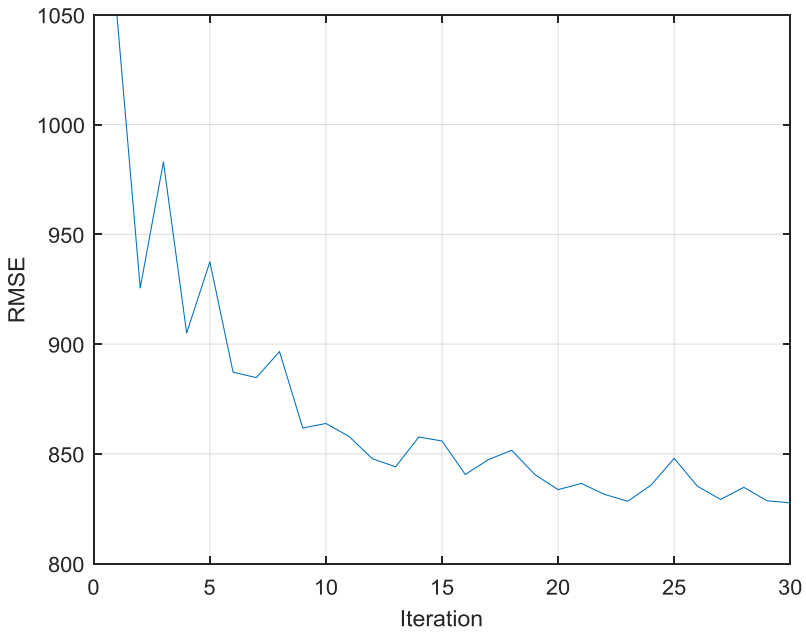


圖 6.21 RMSE 在最佳化過程中降低的情形

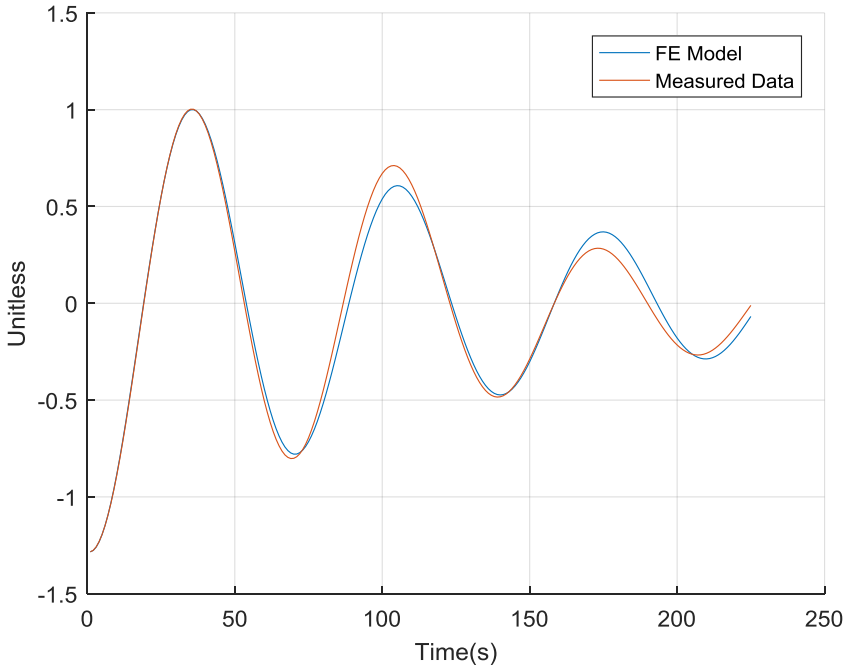


圖 6.22 模擬的與量測的自由振動歷時之比較

表6-22 各參數的最佳值

變數	數值	Unit
阻尼比(X dir)	0.0792	MPa
混凝土彈性模數	26040	MPa
土壤彈簧	6.36E+11	N/mm
旋轉彈簧	1.00E+12	Nmm/rad

6.3 感測器規格與建議之試驗流程

本次試驗所使用之單軸與三軸速度計之規格，如表 6-23 與表 6-24 所示。

表6-23 單軸速度計(VSE-15D1)之規格

Model	VSE-15D1
Frequency range	0.1～100Hz
Mode of operation	Horizontal, Vertical
Max. measuring range	±0.1m/s , ±2000gal
Output	(Low): 100V/m/s. (High): 1000V/m/s , 10V/2000gal
Output resistance	Less than 50 Ohm
Max. Output voltage	±10V
Linearity	0.03% of Full scale
Resolution	10^{-7}m/s^2 (10^{-5}gal)
Dynamic range	Approximately 140dB
Damping ration	h = about 10000%
Calibration coil	・Sensitivity : 600 μ A m/s^2 (6μA/gal) ・Coil resistance : 550Ω (±20%)
Power requirements	±15VDC
Current consumption	Approximately 15mA
Cross axis sensitivity	0.03G/G
Sensitivity of temperature coefficient	0.01%/℃
Temperature coefficient of zero-shift	0.05%/℃
Temperature range	−30℃～70℃
Connect cable	Shielded 4 pair twist cable
Allowable shock	30G (less than 0.1Sec)
Dimension	55×55×72(H)

表6-24 三軸速度計(CV-374A)之規格

Analogue, A/D converter		Clock calibration	
Input	±4.0V, ±10.0V(Option)	Accuracy	<±2.5ppm, −30℃～+75℃
Sampling	100, 200, 500, 1KHz	Clock synchronization	GPS or NTP server Slave unit can adjust by the transfer time code
AD converter	24bit		
Resolution	Less than 10mGal p-p (Sampling: 100Hz/2000Gal full scale)	Clock accuracy	<±0.62ppm(GPS)
		Clock function	Year to Seconds Daily 0.1 second (no GPS, NTP)
Sensor (option: external sensor)		Master/Slave function	
Type	Servo Accelerometer	Time code	Hour, minute, seconds mark
Component	3 Tri-axial	Port	RS-485, Max transmission 1Km
Full scale	±2000Gal	Data interlock	Trigger data start/stop
Bandwidth	DC～100Hz	Synchronization accuracy	Synchronized within 1msec. (When using exclusive HUB)
Calibration		Communication	
Frequency	1Hz	Ethernet	10base-Tor100base-TX (automatic change)
Waveform	Sine Wave (100Gal)	Port	1 port
		Protocol	telnet, ftp, TCP/IP socket
Data record		Power supply	
Trigger level	0.5～100Gal (0.1Gal step)	Input	AC100V (85V～264V) / CV-374A Exclusive HUB / CV-374B
Trigger logic	Or, and, 2and		
Pre trigger	1～300 sec.	Power consumption	Max.3.6VA(GPS)
Post trigger	10～300 sec.	Internal battery	Lithium battery 6.8V,0.9A
Trigger data	160 hours (1～10 mins./File)	Battery backup	Approx. 90 min.
Media	Approx. 30 days (10 mins./File) (CF MEMORY 2GB)	Environment	
		Temperature	0℃～+50℃
Overwrite format	Delete the old data, overwrite the new data	Proof	IP65
		Dimension and Weight	
Media	CF card, Max. 2GB FAT32 format	Case	Cast Aluminum
		Dimension	180mm(W)×120mm(D)×100mm(H)
Wave format	WIN32 compliance	Weight	Approx. 1.5kg
		Connector	Water-proof connector

本計畫建議之標準量測施作流程如下所述。

1. 將量測相關器材及車子行駛至第一個量測點。

2. 至量測點後開始安裝儀器，安裝步驟如下：

(1) 自箱子取出速度計後，將其電源線、網路傳輸線、GPS 連接線接至速度計上相對應的孔槽。

(2) 開啟筆記型電腦並確認是否有足夠的電力。

(3) 將筆電電源線及速度計之電源線插入電瓶中，並確保在量測時有足夠的電力，以避免量測中途斷電之問題產生，如圖 6.23。

圖 6.23 以備用電源供應筆電與速度計之電力

(4) 確定電源均安置好後，開啟速度計之電源開關(其電源開關於電源孔槽之下方)。

(5) 查看速度計上方之 LED 燈(於左至右數來第四個燈)是否有亮起綠燈，若亮起綠燈即完成開機的動作，若無請確認電源是否有插在電瓶中，亦或是電瓶之開關無啟動，如圖 6.24。

圖 6.24 速度計上 LED 燈之檢核

(6) 確認速度計上方之 LED 燈(於左至右數來第三個燈)是否有在閃爍橘燈，若無請確認速度計之相關設定是否有開起連續紀錄的選項。

(7) 確認速度計上方之 LED 燈(於左至右數來第二個燈)至否有在閃爍紅燈，其動作是確認 GPS 是否有接收到訊號，若無請進一步確認是否有將 GPS 接收器完整接好，並置於較寬廣的地方。

3. 完成好相關儀器之安裝步驟後，確認速度計之水準氣泡是否於中心，若沒有則微調旋轉鈕完成定平之動作，避免量測之數據不準確的問題。

4. 完成上述之步驟後，開啟電腦內 Tokyo Sokushin\CV-374V 中之「CV373cnf」，進入初始介面後選右上方之「SEARCH」鍵來搜尋速度計之 IP 位置並選定，按下下方「OK」鍵後即可進入設定介面並確認介面中之參數是否與下述之設定相同。

(1) 確認「CONTINUOUS RECORD 」之選項是否有勾起。

(2) 確認「SAMPING FREQUENCY」之選項為 200Hz。

(3) 確認「TRIGGER LOGIC」之選項為 OR、2AND、AND 其中一種。

(4) 另外進入在 Tokyo Sokushin\CV-374V 的 RTD.ini 檔，其選項「RTD_SAMP」、「RTD_NUMD」需與 CV373cnf 中「AMPING FREQUENCY」之選項一致，即同時為指定的 Hz，若無相同則無法進行量測動作，確認相同後並儲存該檔案。

(5) 在設定確認無誤後按下下方之「WRITE」鍵後，需等待 1 分鐘讓速度計重新開機，此時進入命令提示字元視窗(cmd)鍵入「ping 192.168.10.200(速度計之 IP)」，約略等待 1 分鐘後，若此時命令提示字元視窗顯示成功連線後即完成相關設定。

(6) 上述之設定完成後，回至 Tokyo Sokushin\CV-374V 資料夾中開啟「SensChk」之程式來確定是否有完成設定且是否有亮起綠燈之圖案，若有亮起圖案即可按下右邊的「RTD start」鍵來開啟量測介面。

(7) 量測時須注意以下之事項

a. 由於速度計之自動量測之功能是每十分鐘才紀錄資料並存於儀器中(例：11:10 儲存一筆、11:20 儲存一筆，以此類推)；因此若量測的資料有跨越兩段儲存時間之問題(例：起始量測時間為 11:59) ，建議稍後如 12:00 再開始進行量測，因為速度計是每 10 分鐘儲存一筆資料。

b. 若量測完成後，須等分針至每 10 分鐘後才可進行筆電與速度計之關機動作，否則會有資料遺失的問題。

c. 需記錄當前量測之時間，以便後續作業的便捷。

d. 若測點於橋面版上時，需確認速度計之擺放方向是否與前次量測之方向相同(於速度計左下方有 X、Y 軸之貼紙供參考)。

5. 若第一個量測點完成後，即可移動拖車至下一個量測點並完成定平之動作，此時僅須注意上述之注意事項即可，待量測時間到時在移至下一個量測點，反覆此動作至全部測點均完成。

第七章　災害橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進

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查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。

依交通部公路總局公路之規定，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，須進行特別巡查，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，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，再結合全臺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查，公路管理單位可利用此通行失敗機率作為排序巡查優先順序之參考。

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查優先順序之參考依據。然而實務上，按機率值排定之巡查順序橋梁，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查；再者，特別巡查路線規

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，進行災時特別巡查之多目標巡查路網規劃，為公路防救災規劃之重要研究課題。

7.1 初擬災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式

前一年度中計畫團隊已建立「多目標地震災後橋梁特別巡查與檢測旅運路網規劃模式」之雛型，其流程圖如圖7.1所示，期執行步驟說明如下：

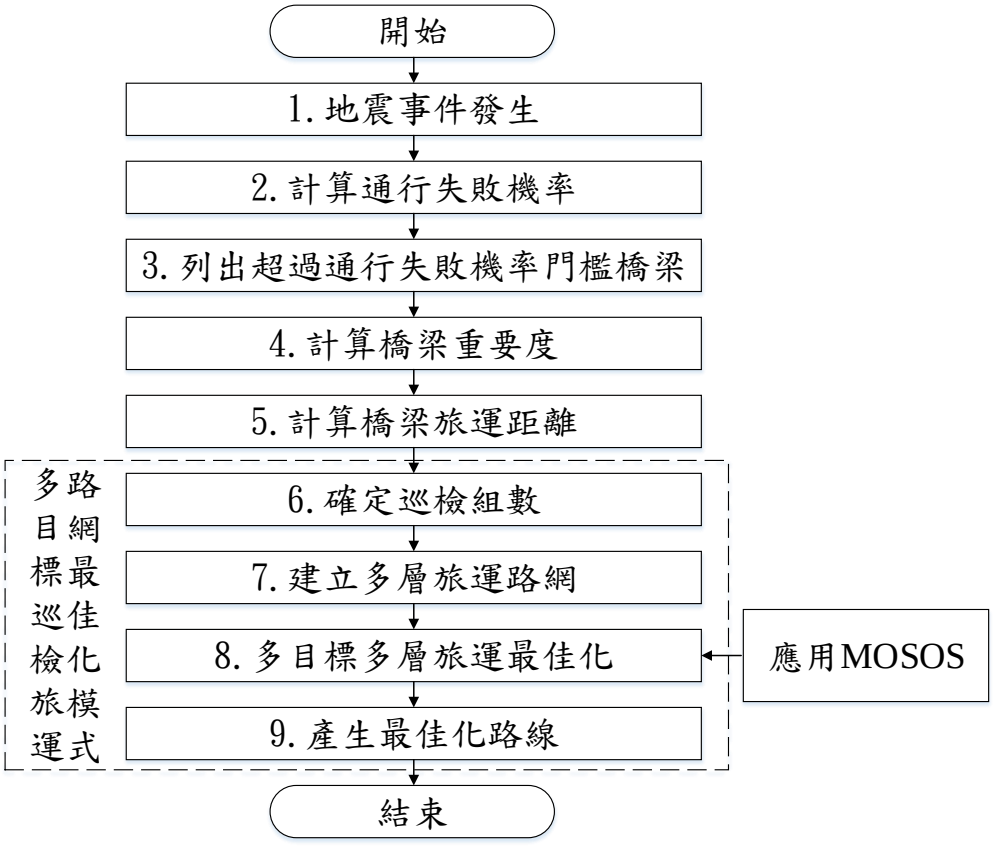


圖 7.1 多目標地震災後橋梁特別巡查與檢測旅運路網規劃流程圖

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查與檢測。

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，即為須巡查與檢測，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，其值越高須優先巡查與檢測。

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.確定巡查與檢測組數

根據待命巡查與檢測人員與車輛數量，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查與檢測組數，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 7.2 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 7.2 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查與檢測旅運路網規劃模式。

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，求得最佳化之巡查與檢測路網，以作為橋梁管理單位在規劃災時特

別巡查與檢測路線時之參考。

在圖 7.1 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查與檢測旅運路網規劃模式，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查與檢測路線最佳化之需求，需界定模式使用上之限制，初步擬定以下基本假設。

a.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。

b.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查，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。

c.巡查出發點為工務段: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。

d. 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。

e. 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查作業時，因為其情境為平時巡查作業，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，多以最小化巡查成本為目標。而本計畫同時考量橋梁重要度(橋梁之流量與損壞機率)及最小巡查成本(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。本計畫在考慮巡查人員之需求下，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.以優先巡查高通行失敗機率(P)之橋梁為目標(式 7.2)；3.以優先巡查高重要性(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：

此目標式為求得巡查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，須優先巡查。

$$MinP = \sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} p_i^k \times r_i^k, r^k = \{a_1, a_2 \dots a_n\} \text{.....(7.2)}$$

$$a_i = \begin{cases} 0, \textit{第}i\textit{座橋未巡查} \\ 1 \sim n, \textit{第}i\textit{座橋的巡查順序} \end{cases}$$

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，須優先巡查。

$$MinW = \sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} w_i^k \times r_i^k, r^k = \{a_1, a_2 \dots a_n\} \dots\dots\dots\dots\dots (7.3)$$

$$a_i = \begin{cases} 0, 第i座橋未巡查 \\ 1 \sim n, 第i座橋的巡查順序 \end{cases}$$

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組巡查小組從第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座橋巡查次數

p_i^k：第k組巡查小組檢測第i座橋之通行失敗機率

w_i^k：第k組巡查小組檢測第i座橋之重要度

r_i^k：第k組巡查小組檢測第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查之規定，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.各組巡查時間需小於 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組巡查小組從第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座橋巡查次數

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 7.3 所示，以下以一個假設事件按步驟進行說明：

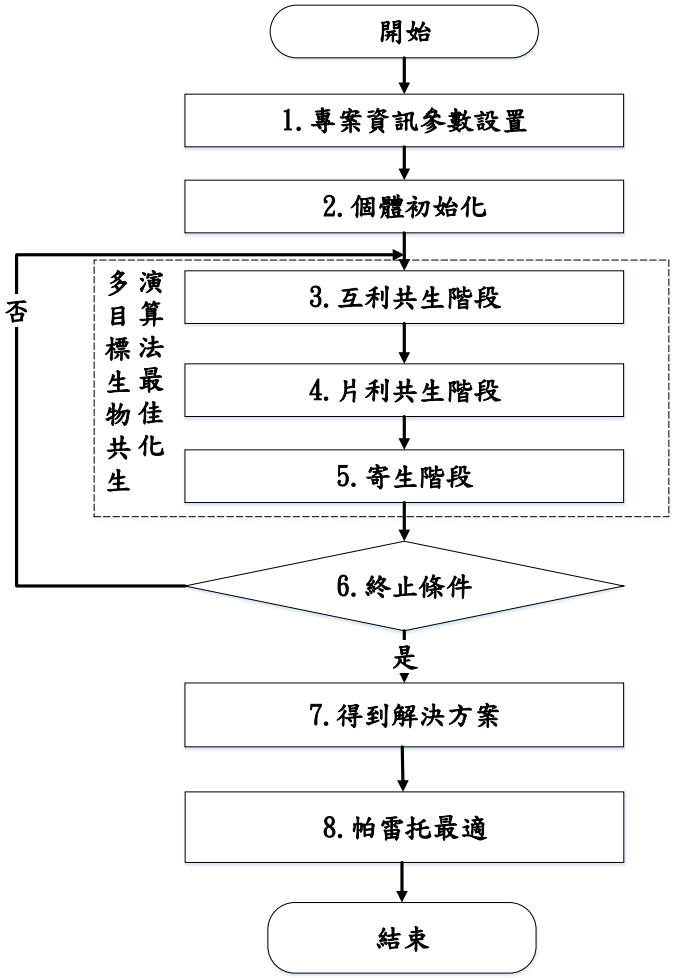


圖 7.3 MO-SOS 多目標路徑規劃流程

(1)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。

(2)個體初始化

將此案例之決策變數輸入，如橋梁為 n=14 座，巡查小

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：

(3)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。

(4)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。

(5)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。

(6)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。

(7)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。

(8)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，以呈現巡查小組與檢測車輛從出發點至各橋梁檢測點進行巡查作業之情形，以一組巡查小組為單位建構一層旅運路網，故為多層旅運路網。

7.2 規劃災害橋梁巡查與檢測路線規劃模式功能模組測試案例

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，以呈現巡查小組與檢測車輛從出發點至各橋梁檢測點進行巡查作業之情形，以一組巡查小組為單位建構一層旅運路網，故為多層旅運路網。

7.2.1 案例說明

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)，派遣兩組巡查人員進行特別巡查(m=2)。計算橋梁重要度與通行失敗機率如表7-1，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7-2。

表7-1 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7-2 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7.4為橋梁所在地之實際路網圖。

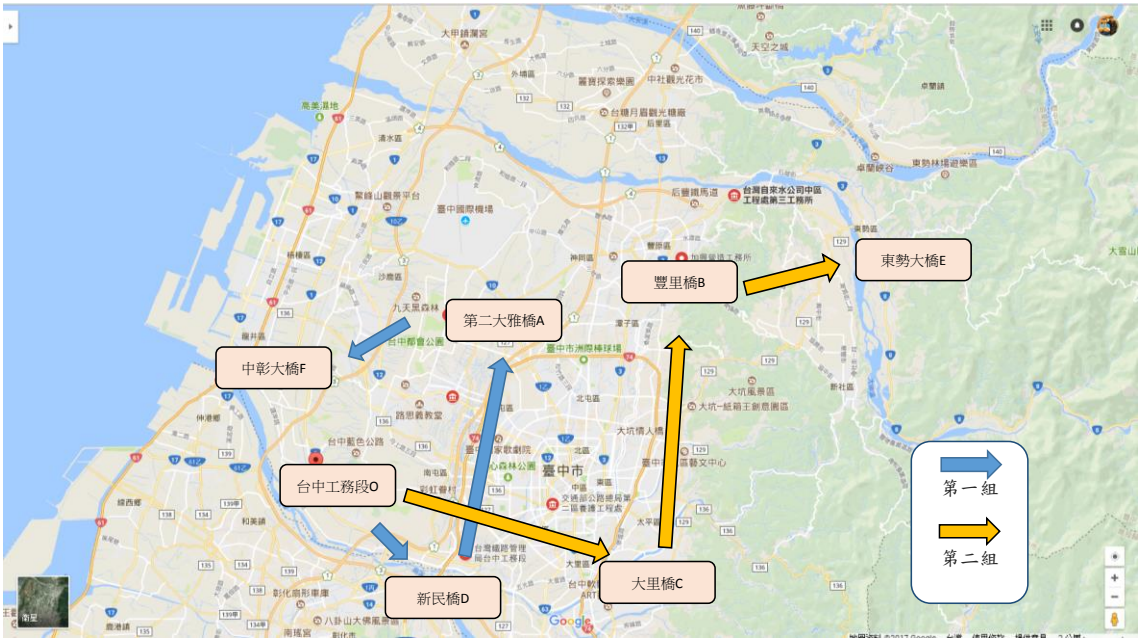


圖 7.4 橋梁所在地路網圖

建構多層旅運路網，求得最佳化巡查路線。共分為六個步驟：

1.步驟一

MOSOS 產出初始順序表$G_{k,x}$ (第 k 個巡查組的第 x 批順序)本範例有 2 個巡查組，各組第 1 批巡查順序分別為$G_{1,1}$=（O,D,A,F） $G_{2,1}$=（O,C, B, E）

2.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 巡查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 巡查組之第 1 層路網$F_{7,6}^{1}$檢測路網矩陣，如表 7-3。

表7-3 $F_{7,6}^{1}$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 7-4，求得第 2 組之巡查第 2 層路網$F_{7,6}^{2}$。

表7-4 $F_{7,6}^{2}$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 7-3，7-4 即形成一「二層旅運路網圖」，如圖 7.5 所示。

	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)

圖 7.5 二層旅運路網圖

3.步驟三：

檢核每座橋只會被巡查一次，依據(7.4)式，得本例之限制式如下：

$$\sum_{k=1}^{m=2}\sum_{i=0}^{n=6} F_{ij}^{k} = 1, j \in n \quad \text{..... (7.10)}$$

按式(7.10)將表 7-3，7-4 疊合，求得檢測次數檢核矩陣，如表 7-5。

表7-5 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**

4.步驟四：

總旅運檢測時間最小，目標式一(式 7.1)：將表 7-2 橋梁兩兩旅運檢測時間矩陣之格位分別乘以表 7-5 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 7-6 為範例總旅運檢測時間計算之結果。

(單位：min)

表7-6 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：

$$t^1_{0\,4} \times F^1_{0\,4} = 20 \times 1$$

$$t^1_{4\,1} \times F^1_{4\,1} = 41 \times 1$$

$$t^1_{1\,6} \times F^1_{1\,6} = 54 \times 1$$

$$t^1_{0\,3} \times F^1_{0\,3} = 40 \times 0$$

$$t^1_{3\,2} \times F^1_{3\,2} = 37 \times 0$$

$$t^1_{2\,5} \times F^1_{2\,5} = 49 \times 0$$

$$\vdots$$

$$t^n_{nn} \times F^k_{nn}$$

第二組旅運檢測時間：

$$t^2_{0\,4} \times F^2_{0\,4} = 20 \times 0$$

$$t^2_{4\,1} \times F^2_{4\,1} = 41 \times 0$$

$$t^2_{1\,6} \times F^2_{1\,6} = 54 \times 0$$

$$t^2_{0\,3} \times F^2_{0\,3} = 40 \times 1$$

$$t^2_{3\,2} \times F^2_{3\,2} = 37 \times 1$$

$$t^2_{2\,5} \times F^2_{2\,5} = 49 \times 1$$

$$\vdots$$

$$t^n_{nn} \times F^k_{nn}$$

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。

5.步驟五

總通行失敗機率最小，目標式二(式 7.2)：以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

$$r^1 = [1,2,3,0,0,0]$$

$$p^1_4 \times r^1_4 = 50 \times 1$$

$$p^1_1 \times r^1_1 = 75 \times 2$$

$$p_6^1 \times r_6^1 = 85 \times 3$$

.

.

.

$$p_n^n \times r_n^n$$

$$r^2 = [0,0,0,1,2,3]$$

$$p_3^2 \times r_3^2 = 60 \times 1$$

$$p_2^2 \times r_2^2 = 80 \times 2$$

$$p_5^2 \times r_5^2 = 70 \times 3$$

.

.

.

$$p_n^n \times r_n^n$$

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。

6.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)。$r^1 = [1,2,3,0,0,0]$

$$w_4^1 \times r_4^1 = 35.76 \times 1$$

$$w_1^1 \times r_1^1 = 41.53 \times 2$$

$$w_6^1 \times r_6^1 = 98.57 \times 3$$

.

$$w_n^n \times r_n^n$$

$$r^2 = [0,0,0,1,2,3]$$

$$w_3^2 \times r_3^2 = 21.14 \times 1$$

$$w_2^2 \times r_2^2 = 15.00 \times 2$$

$$w_5^2 \times r_5^2 = 84.56 \times 3$$

$$\cdot$$

$$w_n^n \times r_n^n$$

總橋梁重要性巡查順序

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。

7.步驟七：

多目標地震災後橋梁特別巡查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 7.6 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 7-7 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 7-7 繪製成圖 7.6 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7-7 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

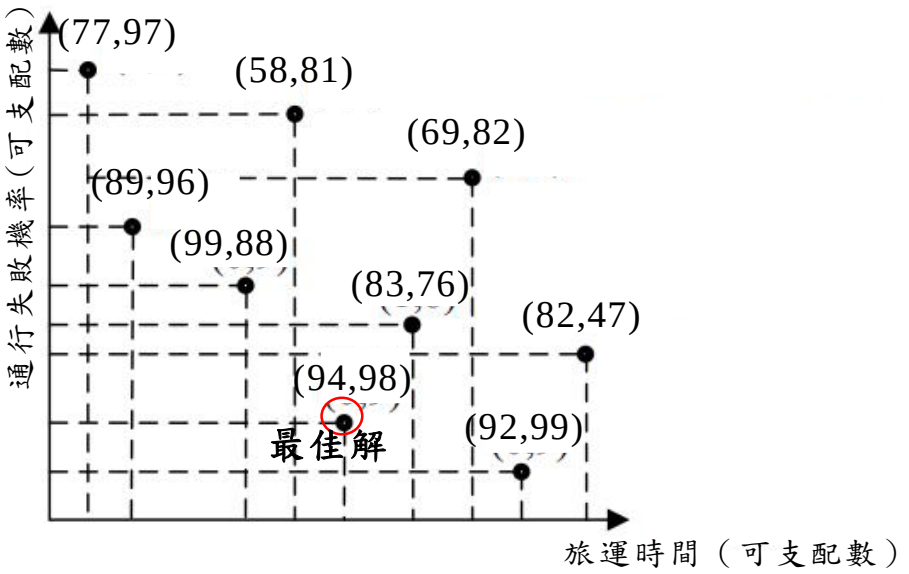


圖 7.6 支配個數法二目標最佳化圖

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 7.7 所示。

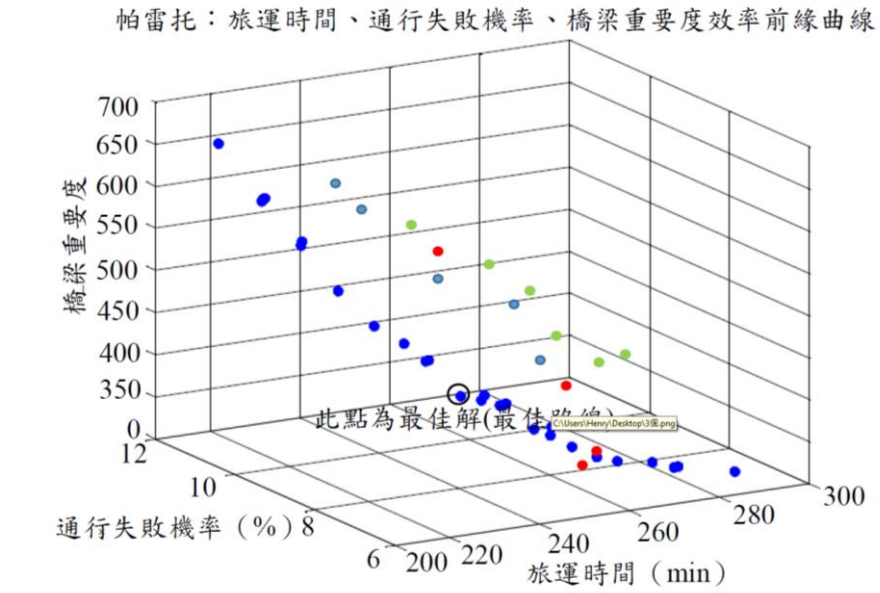


圖 7.7 帕雷托最適圖

7.3 建置巡查與檢測路徑規劃模組

利用上述初步規劃之模式架構，本年度已建置巡查與檢測路徑規劃模組，模式執行流程如圖 7.8 所示。

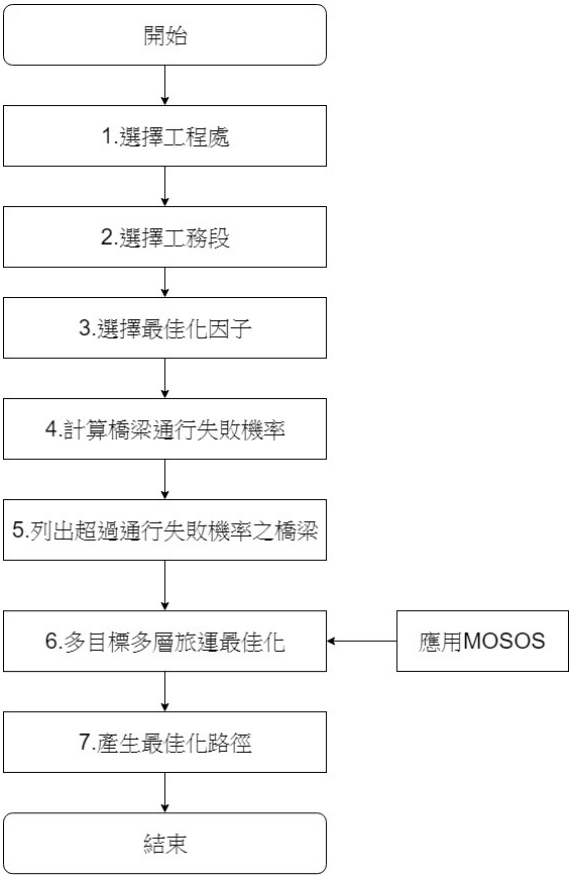


圖 7.8 模式執行流程

1.選擇工程處

系統可以選擇不同工程處進行(如圖 7.9)。

2.選擇工務段

系統可以選擇不同工程段進行(如圖 7.9)。

3.選擇最佳化因子

系統可以根據使用著需求選擇所需要之因子(如圖 7.9)。

圖 7.9 使用者依照需求選擇地區、因子

4.計算橋梁通行失敗機率

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。

5.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，即為須巡查，進行緊急評估之橋梁。(如圖 7.10)

圖 7.10 該工務段需要巡查之橋梁清單

6.多目標多層旅運最佳化(應用 SOS)

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查旅運路網規劃模式。

7.產生路徑

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 7.11 所示。

多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網

工程處：二區　　工務段：信義

考量因子：☑ 旅運時間 ☑ 通行失敗機率 ☑ 橋梁重要度

巡檢組數：3　　巡檢橋數：43

重新搜尋

方案	第1組	第2組	第3組	旅運時間	通行失敗機率	橋梁重要度
1	工務段→中山橋→望美橋→頂平三號橋→筆石橋→民和橋→清山橋→大勇橋→郡安橋→新郡橋→無名橋 【路線規劃】	工務段→風坑橋→新興橋→郡平橋→頂平四號橋→信義橋-台21線→新開橋→松柏橋→頂平二號橋→豐丘橋→郡坑橋→沙里凍橋→郡坑溪橋→愛玉橋→圳頭橋→頂平一號橋→新山橋→神和橋→玉泉橋→上安橋→龍神橋 【路線規劃】	工務段→九層橋→玉平橋→望鄉橋→社子橋→天水橋→新城橋-台16線→上和隆橋→庫坑橋→郡坑口橋→松泉橋→陳有蘭溪橋→民和橋→草坪橋 【路線規劃】	1512	12519	82.415594107551
2	工務段→郡坑溪橋→望美橋→庫坑橋→豐丘橋→玉平橋→清山橋→大勇橋→愛玉橋→天水橋 【路線規劃】	工務段→松泉橋→社子橋→頂平一號橋→郡平橋→頂平四號橋→信義橋-台21線→郡坑口橋→上和隆橋→九層橋→頂平二號橋→郡坑橋→松柏橋→中山橋→郡安橋→草坪橋→新郡橋→陳有蘭溪橋→沙里凍橋→玉泉橋→上安橋 【路線規劃】	工務段→新山橋→望鄉橋→民和橋→龍神橋→神和橋→頂平三號橋→筆石橋→民和橋→新城橋-台16線→圳頭橋→風坑橋→無名橋→新興橋→新開橋 【路線規劃】	1512	12519	82.415594107551
3	工務段→松柏橋→新開橋→清山橋→豐丘橋→民和橋→郡安橋→風坑橋→頂平二號橋→九層橋→無名橋→庫坑橋 【路線規劃】	工務段→陳有蘭溪橋→玉泉橋→上和隆橋→新山橋→圳頭橋→郡坑溪橋→郡平橋→新城橋-台16線→玉平橋→大勇橋→中山橋→郡坑口橋→信義橋-台21線→頂平一號橋→上安橋→沙里凍橋→郡坑橋 【路線規劃】	工務段→社子橋→龍神橋→愛玉橋→頂平三號橋→望美橋→筆石橋→天水橋→民和橋→頂平四號橋→望鄉橋→新郡橋→松泉橋→草坪橋→新興橋→神和橋 【路線規劃】	1752	12025	87.1086053369388
4	工務段→玉泉橋→社子橋→望鄉橋→草坪橋→松泉橋→民和橋→信義橋-台21線→新城橋-台16線→豐丘橋 【路線規劃】	工務段→郡平橋→九層橋→大勇橋→沙里凍橋→上和隆橋→新山橋→望美橋→中山橋→庫坑橋→筆石橋→龍神橋→郡坑溪橋→陳有蘭溪橋→郡安橋→郡坑口橋→風坑橋→松柏橋→郡坑橋→無名橋	工務段→上安橋→玉平橋→愛玉橋→頂平三號橋→頂平二號橋→民和橋→神和橋→圳頭橋→天水橋→新郡橋→新開橋→新興橋→頂平四號橋→清山橋→頂平一號橋	1984	11986	88.0686103303062

圖 7.11 以旅行時間與通行失敗機率及重要度多目標規畫結果

以方案一為例，第一組巡查小組從工務段出發後分別巡查中山橋、望美橋、頂平三號橋、筆石橋、民和橋、清山橋、大勇橋、郡安橋、新郡橋、無名橋等，路線如圖7.12所示。

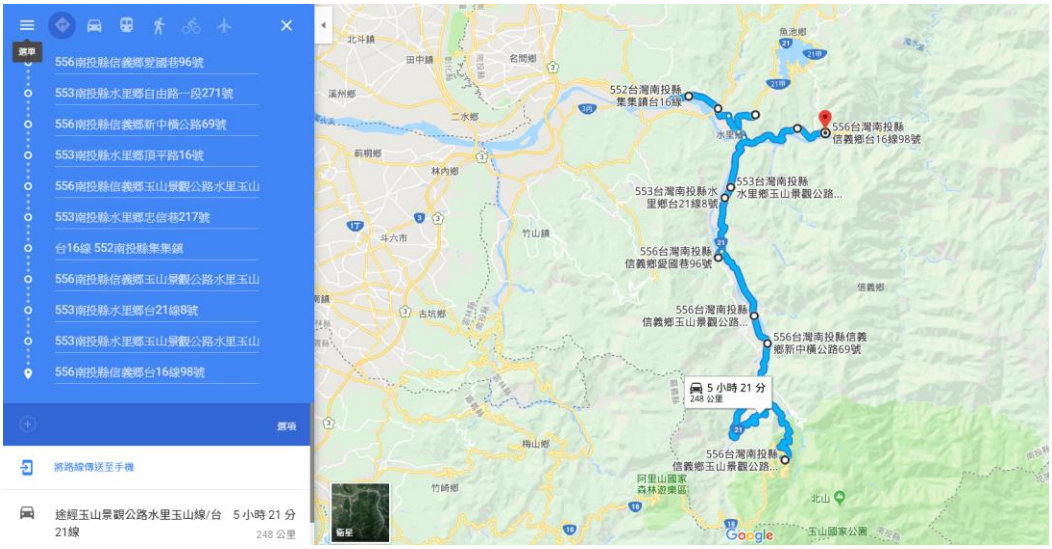


圖 7.12 第一組路線規畫結果

第二組巡查小組從工務段出發後分別巡查風坑橋、新興橋、郡平橋、頂平四號橋、信義橋(臺21線)、新開橋、松柏橋、頂平二號橋、豐丘橋、郡坑橋、沙里凍橋、郡坑溪橋、愛玉橋、川頭橋、頂平一號橋、新山橋、神和橋、玉泉橋、上安橋、龍神橋等，路線如圖7.13。

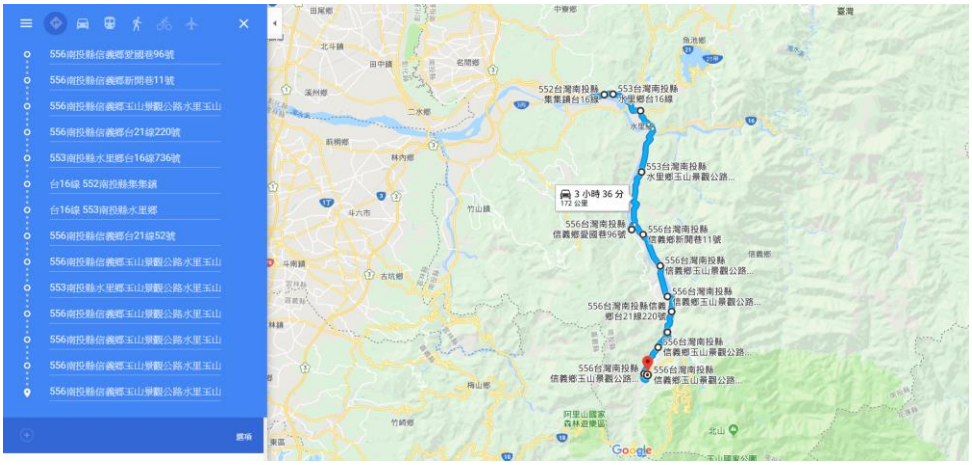


圖 7.13 第二組路線規畫結果

第三組巡查小組從工務段出發後分別巡查九層橋、玉平橋、望鄉橋、社子橋、永水橋、新城橋(臺16線)、上和隆橋、庫坑橋、郡坑口橋、松泉橋、陳有蘭溪橋、民和橋、草坪橋等，路線如圖

7.14。

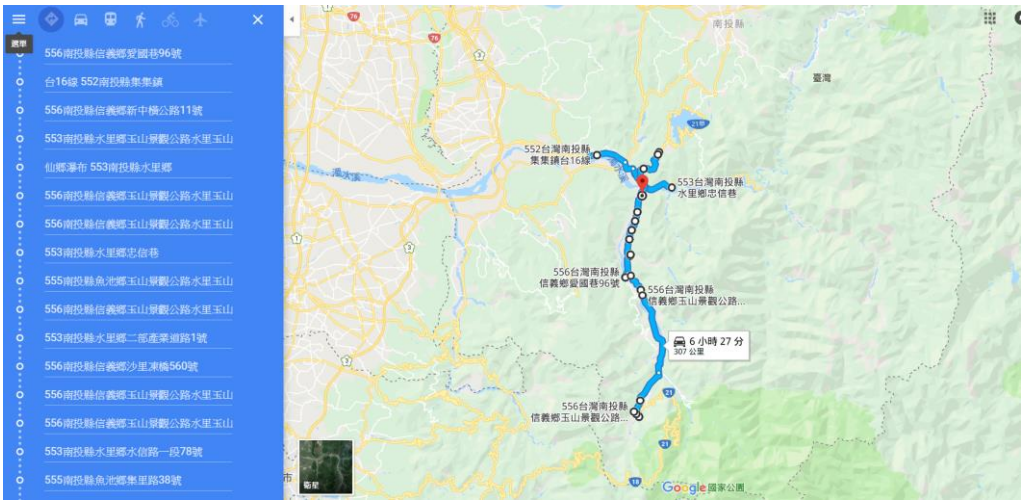


圖 7.14 第三組路線規畫結果

第八章 結論與建議

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)鋼結構橋梁維護策略:將鋼結構橋梁風險分析及維護策略單橋分析模式擴展至群橋風險管理及維護策略，與前期「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研發」鋼筋混凝土群橋風險管理及維護策略成果結合，並建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋)風險分析資料庫及風險評估與查詢功能模組。(2)整體橋梁耐震能力評估: 進行 1 座整體橋梁耐震能力側推案例，並持續蒐集整體橋梁耐震能力評估案例並納入系統資料庫。(3)橋梁振動頻率方面，選取 1 座橋梁安裝 2 組以上速度計同時進行橋梁多點頻率梁測，藉以了解振動頻率雜訊來源與變動原因。(4)橋梁巡檢路徑規劃部分:精進災後橋梁巡檢路線規劃模式，與建置巡檢路徑規劃模組。

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:

根據前一年度所確認之評估機制，並建置公路總局轄管橋梁分析資料庫。最後同時納入鋼筋混凝土橋梁與鋼橋進行群橋風險分析評估，最後建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋)維護策略最佳化模式，並提供可查詢之功能模組，提升使用者查詢便利性。

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。本年度以公路總局所轄管之橋梁-中坑高架橋為例進行橋梁整體耐震能力分析，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，求得橋梁整體損傷超越機率。

3.橋梁振動檢測分析部分:

本年度至南雲大橋進行雨季前(2018/06/19)與雨季後(2018/10/12)振動頻率量測，其結論如下:

(1)兩次量測期間，橋梁的振動特性沒有明顯改變。

(2)FFT 和 Welch 方法都產生相同的橋頻率內涵之估計。

(3)在沒有外力的情況下進行環境振動測試為最佳的狀況。因為當有汽車時，車行方向的振動將會影響垂直車行方向的量測結果。因本試驗為增取時間(試驗時，不易有無車狀態)，當車輛剛駛離觀測的振動單元時，即開始測量，但經觀察，剛離開時在車行方向的振動仍會影響垂直車行方向的量測結果。

4.建置橋梁災後巡檢路線規劃模組

可於線上進行巡檢路徑之規劃，在同時考量巡檢路徑長度、橋梁損壞機率與橋梁重要度的不同條件，系統可建議合適的巡檢路線，降低巡檢時繞路之可能性。

8.2 建議

本計畫在(1)橋梁維護策略最佳化部分，因為仍受限部分外部系統資料來源取得之限制，如 TBMS 系統匯出檢測資料時仍需有手動匯出表單之程序，建議 TBMS 未來可提供如政府公開 open data 資料介面，提升橋梁資料引用之整合性與自動化性能。(2)災後橋梁巡檢路線規劃模式在本計畫中已建置可獨立運作之系統模組，然而如需完全整合至公路總局現行之 BOBE 系統中，仍需確認傳遞資料欄位並與 BOBE 通報介面進一步整合。

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.災後橋梁巡檢路線規劃模式可提升巡檢路徑之效率，避免繞路所造成額外時間。

參考文獻

1. 中華民國鋼結構協會，鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊，2011。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 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。
9. 林呈等，「跨河橋梁訂定封橋水位」，交通部公路總局，2004。
10. 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。

11. 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。

12. 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。

13. 邱建國、宋裕祺、劉光晏、程瑞忠、陳柏湧，(2017)，"考慮系統功能影響之橋梁補強工程效益研究"，中國土木水利工程學刊，第二十九卷，第四期，211-225，臺灣。

14. 邱建國，趙衍剛，「四階矩法於橋梁結構系統可靠度之應用」，土木水利地震工程專輯，第四十四卷第一期，2017。

15. 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。

16. 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。

17. 李森栩，「SAP2000 結構實務設計(V8&V9) 」，科技圖書股份有限公司，2008。

18. 李有豐、林安彥，橋梁檢測評估與補強，全華科技圖書，2000。

19. 台灣省住宅及都市發展局，混凝土鋼橋一般檢測手冊，1996。

20. 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。

21. 交通部，公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範，2008。

22. 交通部公路總局,公路養護手冊，2012。

23. 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。

24. 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。

25. 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。

26. 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。

27. 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。

28. 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。

29. 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。

30. 行政院農業委員會水土保持局，農村再生設施施工規範，2016。

31. 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。

32. 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。

33. 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。

34. 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。

35. 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。

36. 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。

37. 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。

38. 葉士青，「台灣公路橋梁重要等級評估之研究」，碩士論文，中央大學土木工程研究所，2004。

39. 葉錦勳等，「國道橋梁震損評估及其應用」，2014。

40. 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。

41. 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。

42. 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。

43. 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。

44. 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。

45. 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。

46. 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。

47. 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。

48. 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。

49. 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。

50. 張修誠，「層級分級法應用於現存橋梁維修優選排序」，碩士論文，雲林科技大學營建工程研究所，2011。

51. 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。

52. 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。

53. 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。

54. 曾志煌、陳茂南，「縣市政府所轄老舊橋梁改善可行性評估」，交通部運輸研究所，2008。

55. 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。

56. 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。

57. 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。

58. 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。

59. 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。

60. 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。

61. 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。

62. 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。

63. 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。

64. 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。

65. 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。

66. 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。

67. 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。

68. 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。

69. 蔣偉寧、顏上堯、周建捷、姚乃嘉、許文科、洪東謀，橋梁重要程度等級之建立，交通部公路總局， 2004。

70. 經濟部水利署，防災資訊服務網，系統網頁，http://fhy.wra.gov.tw/fhy/，2017。

71. 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。

72. 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。

73. 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。

74. 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。

75. 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。

76. 國家發展委員會，國土資訊系統，系統網頁，http://ngis.nat.gov.tw/，2017。

77. 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。

78. 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。

79. Cheng Min-Yuan, Prayogo Doddy, “Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm”, Computers & Structures, vol. 139, pp. 98-112, 2014.

80. CSI, “SAP2000：Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures”,Computers and Structures, Inc.,Berkely,California,(1996).

81. 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.

82. Prendergast, L. J., et al. (2016). "Determining the Presence of Scour around Bridge Foundations Using Vehicle-Induced Vibrations." Journal of Bridge Engineering 21(10): 04016065.

83. RJ Woodward, Bridge Management Systems: Extended Review of Existing Systems and Outline framework for a European System, BRIME(Bridge Management in Europe), PL97-2220, 2001.

84. Idris, N. S., et al. (2015). "A Review of Ambient Vibration Technique on Bridges." Applied Mechanics and Materials 773-774: 1002-1006.

85. Jacobs, T.L, "Optimal Long-Term Scheduling of Bridge Deck Replacement and Rehabilitation'', Journal of the Transportation Research Board, 1866, 44-50, 1992.

86. Y. Y. Ko, Ph.D. ; W. F. Lee, Ph.D. ; W. K. Chang, Ph.D. ; H. T. Mei ; and C. H. Chen, Ph.D. Scour and Erosion . GSP 210 . 2010.

87. Zimmermann, H.J., "Description and optimization of fuzzy systems'', International Journa of General systems, 2, 209-215,1976.

附錄一

期中報告審查意見處理情形表

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橋梁管理模組維護

合作研究單位：國立臺灣科技大學

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. 巡查與檢測為不同機制，建議「巡檢」路線之定義宜明確，另模式規劃路線與工務段實際巡查或檢測路線建議作一比對並分析其差異原因。	感謝委員提醒，報告內關於巡檢之字眼修正為巡查。本研究單以旅運距離最短下之巡檢順序下與實務中使用 google map 路徑規劃結果相符，可規劃出不繞路之最短路徑結果。	同意辦理
2. p.4-20 針對無維護紀錄橋梁採相近量體(投影面積)及用途(類別)之維護紀錄補足，建議將橋梁型式亦納入考量。	感謝委員建議;目前研究團隊主要以收集之 26 座鋼橋進行維護費用探討，為使其實用性增加，後續擬採用公路總局管轄鋼橋之維護資料進行分析與統計。	同意辦理
3. 洪水維護風險機率評估除 p.4-40 以重現期外，建議將橋基裸露程度等其他因素亦納入。	橋基裸露程度已反映在該橋梁 DERU 檢測結果中，即 SSI 值會因為橋基裸露而下降，此時再遭遇不同大小洪水將有造成維修之機率。	同意辦理
4. 橋梁頻率觀測結果之差異性宜針對其差異原因予以說明。	1. 目前同時間(次)、不同儀器、不同位置的觀測結果相當一致；惟不同時間(次)、相同儀器與相同位置的觀測結果有呈現差異的狀況，根據團隊討論，可能有以下因素與相對應的對策： (1)可能受到環境訊影響，下次試驗將增加車行衝擊載重減	同意辦理

	低環境的影響。 (2)可能為量測本質上的不確定性所引致。若觀測 FFT 的圖形得知，各次觀測的結果並無明顯差異。因此，此不確定性或可利用頻譜分析方法加以克服，例如資料分為若干子序列並容許子序列間有部分重疊，並針對每一個子序列求取頻率及其平均值以減低訊號隨機性之影響程度。	
5. 請查明橋梁整體耐震能力評估案例之中坑高架橋振動單元是否正確，以免影響後續分析評估結果。	感謝委員意見；目前使用之橋梁模型為顧問公司所提供，會再進行圖資比對工作。	同意辦理
二、張文忠委員		
1. 本計畫項目繁多，期中進度及成果符合原有規劃期程。	感謝委員認同。	同意辦理
2. 建議補充各分項工作之橫向與縱向之連結與關連。	感謝委員建議，將於期末報告第一章中補充。	同意辦理
3. 1. 訪談對象之選擇、背景及與計畫目的之關連與代表性，建議補充說明。	訪談對象為第二區養護工程處一位幫工程司，經過接洽，該幫工程司之工作業務為負責第二區養護工程處橋梁道路維護管理經費編列，過去亦曾有於工務段服務之經驗，因此同時有工務段與工程處之養護經費編列與使用之背景，非常適合作為本次訪談的對象。	同意辦理

4. 鋼橋風險評估報告內容，建議須將前期成果與本年內容做區隔，以突顯本年度精進之成果。	感謝委員建議，因此本研究與前期研究有延續性之關聯，於期末報告中將於章節標題中標示區隔。	同意辦理
5. 橋梁振動檢測，建議將各年度成果及差異列表比較說明，本年度選定之「南雲大橋」其成果應與 105 年進行比較，另量測應說明振動量測方向及分年量測成果可能差異原因。	(1)已依照委員建議，增列先前結果之表格以供比較。 (2)可能差異原因的回覆內容請參照回覆何鴻文委員(第 4 點)的內容。	(1)同意辦理 (2)同意辦理
6. 不同震動儀器(單軸、三軸)感測值應可於實驗室進行比對，不須至現地測試。	本次安排不同儀器量測的目的在於探討不同橋梁位置所取得的頻率是否相同，經測試顯示，不同位置所得結果相當一致。之所以使用不同儀器，係因目前沒有足夠的三軸速度計。	同意辦理
7. 建議期中報告補充本年度後續工作項目及預期目標。	感謝委員建議，於報告中補充相關工作項目與目標。	同意辦理
三、林炳森委員		
1. p.1-6，圖 1.2 進度圖中應標示橋梁整體耐震能力建模之查核點。	感謝委員建議，第四階段橋梁整體耐震能力評估模式案例分析在第 3 月標示橋梁整體耐震能力建模查核點。	同意辦理
2. p.2-43，表 2-8 張國鎮 2009 之文獻公路橋梁耐震評估檢查表(一般橋梁)應說明清楚完整。	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。原表	同意辦理

	格中被截斷處亦已補充。	
3. p.3-17，2018 年 6 月 11 日訪談意見在 p.3-20 提出橋梁老化風險排序與門檻值，如何訂定應說明。	研究建議先可依據公路總局公路分類中，公路路線設計規範之設計要件分類，依部頒規範歸類為四級路以上橋梁(即平原區設計速限 60 公里/小時、丘陵區速限 50 公里/小時)做為門檻，後續研究中可進一步應用橋梁重要度作為維修排序最佳化之搜尋目標之一。	同意辦理
4. p.4-5 橋梁維護風險成本 E(MC)部份可由可視、不可視之機率如公式 4.2，但未見公式 4.2。	感謝委員提醒，排版過程中公式遺漏問題已修正。	同意辦理
5. p.4-33，表 4-27 塗裝系統 A4-1 之使用年限為何乘 0.53 應說明。	因日本建議之防蝕耐用年限評估主要依各塗層之膜耗速率計算，將各塗層之耐用年限累加後再進行系統整體年限修正，依日本進行之現地比對資料，此一修正係數約為 0.53。目前臺灣本沒有相關實驗紀錄，因而沿用之。	同意辦理
6. p.4-53 自動化鋼結構橋風險評估模式更新模組應加強今年更新之工作。	自動化鋼結構橋風險評估模式為在期中階段為擬訂主要架構與流程，期末報告中將有較完整之成果內容。	同意辦理
7. p.5-6，表 5-1 中為何橋柱性能於無損害、輕微損害、中度、嚴重、完全損害全部打勾。	主要說明本研究進行橋梁整體損傷評估時，各損傷等級均須考量橋柱之損傷等級。	同意辦理
8. p.5-11，表 5-3 中坑高架橋案例分析成果應加強結	感謝委員建議；會將相關討論納入期末報告中。	同意辦理

論。		
9. 南雲大橋橋梁多點頻率量測與先前量測結果不同，應加以解釋與說明。	可能差異原因的回覆內容請參照回覆何鴻文委員(第 4 點)的內容。	同意辦理
10. p.6-18，C=αM+Bk 系統識別結果之質量(M)與勁度(K)是否與實際值相近？	因為本案並無計畫量取現地橋梁的質量與勁度，因此無法驗證委員所提的問題。惟本計畫系統識別之質量(M)與勁度(K)將與現地量測的頻率符合。	同意辦理
11. P.7-27，圖 7.11 旅運時間與通行失敗機率之關係，但在圖中未見旅運時間。	因此模式規劃圖為範例，經委員校正，將修正為旅運時間。	同意辦理
12. 第八章預期成果應加入目前之初步結論。	感謝委員建議，將補充初步成果與結論。	同意辦理
四、翁健煌委員		
1. 利用蒙地卡羅法計算超越機率之前，應先將所考慮的變數及其機率分布交待清楚，以 5.3 節案例分析為例，表 5-4 與 5-5 僅說明相關容量的平均值，但未說明其機率分布類型或變異係數，同時也未說明相關需求的機率分布。以上容量與需求之機率分布，應說明其參考來源，若無參考來源則應註明為案例假設。	感謝委員建議；有關超越機率計算所需之分佈與變異係數將於期末報告中補足並說明。期中報告之案例分析主要採用對數常態分佈，而變異係數則假設以 0.2(需求)及 0.1(容量)進行試算。	同意辦理
2. 圖 5.10(b)橫向側推分析 Sa 可達 6g 以上尚無下降跡象，建議應先檢查所有橋柱的塑鉸設定是否合理。	案例橋梁之耐震能力主要以車行方向主控，橫向部份結果多以外插分析所得，現階段結果僅供參考。後續評估時主要以車行方向為主。	同意辦理

3. p.5-5 假設 EPA=1.5g 時各損傷等級的超越機率皆為 1.0，但圖 5.12 案例分析結果並非如此。	p. 5-5 所提部份主要針對各元件或構件之超越機率，圖 5.12 主要針對橋梁整體。	同意辦理
4. 6.2 節預定將使用 PSO 最佳化方法進行橋梁結構系統識別，屆時必須將結構分析納入最佳化求解流程，整體計算將非常複雜，若僅為監測橋梁結構系統是否改變，應可由基本的系統識別方法解決。	確如委員所言，本計畫僅為監測橋梁結構系統是否改變，於系統識別過程(最佳化)中，將使用簡化的橋梁模型。	同意辦理
5. 表 5-1 無論考慮何種損傷等級，構件及元件本身容量與需求的機率分布並不會改變，為何須依損傷等級決定哪些構件及元件必須考慮？	感謝委員意見；表 5-1 主要說明橋梁系統損傷等級之判定原則。當橋柱為中度損傷或支承剪力損壞或帽梁損壞時均可判定為橋梁中度損傷。	同意辦理
五、賴瑞應委員		
1. 為落實 trends 之落實應用，本計畫與公路總局相關單位進行訪談之作為值得肯定。但美中不足之處為，2018/06/04 之訪談使用者僅一位陳毅銘幫工程司，似乎無法代表公路總局大多數的使用者意見，且表 3-3 的訪談討論紀錄，有很多討論議題該幫工程師也無法提供建議，而該幫工程師提供的相關建議本計畫也無具體的回應或改善作為，此部分建議後續研究可以再加強。	因為訪談對象需要同時了解工程處與工務段在維護經費編列與使用之作業流程，而公路總局第二區養護工程處幫工程司之工作業務為負責第二區養護工程處橋梁道路維護管理經費編列，過去亦曾有於工務段服務之經驗，因此陳幫工程司同時了解工務段與工程處之養護經費編列與使用之流程，非常適合作為本次訪談的對象。而回饋之意見中，包含橋梁維護對象實務上會針對大型橋梁，而小型橋梁則較為忽略之意見，已在模式中初步納入橋梁規模之因子，而其他意見亦可作為	同意辦理

	後續研究方向之參考。	
2. 報告第 4-16 頁表 4-9 提到最速使用年限(r0)與最緩使用年限(r1)是何意，請說明。	依文獻所述，二者應修改為：最速使用年期速率與最緩使用年期速率；主要代表各元件或構件每年之分數下降程度(Ici)。	同意辦理
3. 橋梁之構件維護費用估算是本計畫值得挑戰的研究課題，本計畫擬以各橋梁歷史維護紀錄中最高的一筆來估算，似乎不盡合理。也導致報告第 4-23 頁表 4-17 歷史年平均維護費用與推估費用差異非常大的原因，畢竟每次構件的維護條件與情境都不同，實在很難估算，建議可試著瞭解各單位在橋梁維護預算的編列方式來進行本計畫的維護費用估算。	期中報告主要以收集之 26 座鋼橋維護資料進行分析與探討。後續將參考 RC 橋模組，擬採用公路總局管轄橋梁為主，配合人工智慧進行維護費用推論。	同意辦理
4. 實務之維護管理策略應該是依當年的橋檢結果，按構件重要度及損害程度擬訂下一年度維護管理計畫及預算，是否有必要預估到 20 年之維護策略，請思考。	系統可根據前一年度最新的檢測結果重新分析下一年度建議的維修方案，此滾動式的模式應用方式，可根據上一年度的檢測結果提出不同的維護管理對象，而 20 年的維護策略則是希望提供公路管理單位以不同角度做長期維護管理策略。	同意辦理
5. 報告第 4-32 頁表 4-25 將各區域鋅腐蝕速率以北中南東來區分似乎不合理，因為腐蝕速率依本所研究顯示，腐蝕速率與離海邊、工業區及相關腐蝕因子之遠近有關，本所已針對臺灣地區作腐蝕環境分類，建議本計畫可以參考	本研究之鋅材腐蝕速率主要參考港研中心所提供之大氣腐蝕資料進行分區計算。	同意辦理

各地分類來評估腐蝕速率。		
6. 建議報告提供第六章南雲橋10個單軸速度計的布置圖，以利瞭解本計畫量測的點位。簡報提到於各位置處所得到的第一振態頻率結果十分一致，但同一天卻量測結果有差異，其原因請釐清，另外，量測所得之振態頻率到底是代表整體結構頻率還是構件的頻率，亦或是環境雜訊，可能是未來要釐清的地方。	(1)儀器置放的位置已增補於報告中。 (2)可能差異原因的回覆內容請參照回覆何鴻文委員(第 4 點)的內容。。	同意辦理
六、公路總局		
1. 橋梁振動檢測頻率，其災後定義為何？	災後的定義墩柱基礎受到明顯的沖刷。但受限於所選橋梁與計畫執行的期程，上述天災不一定會發生，就經驗而言，7, 8 月為降雨較為頻繁的季節，故量測的時間點選在此季節前後各一次。	同意辦理
七、公路總局第二區養護工程處		
2. 巡檢路線規劃最佳化有無將市區道路考量在內？	巡檢路線皆考量將可應用之的各路線，包含市區道路。	同意辦理
八、本所港研中心朱金元代主任		
1. 簡報第15頁建議加入TBMS系統之5欄位，此5欄位實務單位橋梁工程師是否有辦法填？	此為系統建議值，可作為推論模式之輸入值，但考量到舊橋梁資料保存問題亦保留可允許空值之空間。	同意辦理
2. 簡報第60頁橋梁多點頻率量測洪水前後之洪水大小	洪水指的是對墩柱基礎造成明顯的沖刷。但受限於	同意辦理

定義為何？何時需量測？如沒洪水發生，後續研究成果應用有沒有問題，其可信度及實用性為何？	所選橋梁與計畫執行的期程，上述天災不一定會發生，就經驗而言，7, 8 月為降雨較為頻繁的季節，故量測的時間點選在此季節前後各一次。本計畫係利用災害前後之頻率比值作為安全的判定，而此比值主要係由數值模型推得。目前本計畫的工作重點在於釐清現地量測是否具有足夠的穩定性。。	
3. 簡報第 62 頁橋梁多點頻率量測有行車指的車為何種車輛，是否有環境紀錄？	行車指的是當地行駛之車輛。下次試驗時，將記錄試驗過程中的環境狀態(如錄影)。	同意辦理
4. 簡報第 74 頁巡檢路線規劃其橋梁重要度依據為何？	此報告中所建置之橋梁重要度計算方法參考國內研究報告由交通部公路總局委託中央大學蔣偉寧教授之計畫「橋梁重要程度等級之建立」。	同意辦理
九、本所港研中心第一科謝明志科長		
1. 目前在成果推廣應用上，本系統已介接公總 BOBE 系統，提供震後橋梁通行失敗機率，公總使用後也提出新增功能的需求，研究團隊亦給予解決，此點值得肯定。	感謝委員的肯定。	同意辦理
2. 為推廣成果，所以請團隊進行訪談，以得知公路單位的需求，針對訪談結果，有哪些是本系統可以改善的地方，請團隊多思考。	其中關於較小型橋梁在實務上可能無維護 之需求，因此研究建議先可依據公路總局公路分類中，公路路線設計規範之設計要件分類，依部頒規範歸類為四級路以上橋梁做為門檻，後續研究中可進一	同意辦理

	步應用橋梁重要度作為維修排序最佳化之搜尋目標之一。	
3. 鋼橋與 RC 橋不同，養護上通常只需作好定期維護，就可減緩劣化，建議參考本所的臺灣腐蝕環境分類系統的資料，依據環境優劣，訂出適合的維修頻率，再配合維護成本進行考量。	感謝委員建議；期中報告主要以收集之 26 座鋼橋維護資料進行分析與探討。後續將參考 RC 橋模組，擬採用公路總局管轄橋梁為主，配合人工智慧進行維護費用推論。此外，於推論模式建立時可考慮委員所提及之環境因子。	同意辦理
4. 振動量測在不同時間所得結果差異較明顯，可能原因為何？	可能差異原因的回覆內容請參照回覆何鴻文委員(第 4 點)的內容。	同意辦理
5. 附錄第 2 頁表 1 的 An 值，其單位請檢視。	感謝委員提醒，此 An 單位為(次/輛公里)	同意辦理
十、本所港研中心第一科林雅雯研究員		
1. 文獻回顧針對國內預警系統撰寫，建議針對本案橋梁維護策略最佳化、橋梁整體耐震能力及橋梁振動檢測蒐集文獻及分析。	感謝委員建議，於期末報告終將補充相關文獻。	同意辦理
2. 橋梁老化、地震及洪水風險評估、維護經費及維護策略最佳化如何整體或局部驗證?	建議可以根據訪談結果中回饋意見，將較小型橋梁先排除後，再分別依據老化、地震及洪水維修之對象進行比對。	同意辦理
3. 本案研究方法及成果在與公路總局實務訪談後兩者有落差，現行橋梁維護策略及經費擬定與本案不同，如何有效提供該局橋梁維護策略擬定運用，請說明。	主要分為兩個構面，一個為現行將依據前一年度的檢測結果，做為下一年度維護之依據。因此建議模式應用滾動式執行之方式以符合現行制度，即每年度根據前一年度檢測結果重新執行模式更新與計算新輸出值；另一個構面為較小型橋梁在實務上可能	同意辦理

	無維護之需求，因此研究建議先可依據公路總局公路分類中，公路路線設計規範之設計要件分類，依部頒規範歸類為四級路以上橋梁做為門檻，後續研究中可進一步應用橋梁重要度作為維修排序最佳化之搜尋目標之一。	
4. 報告第 4-20 頁表 4-13 及表 4-14 排水設施 3 個歷史維護數量有很大落差，採用最高的 34 萬元是否合理?	對於 26 座橋梁分析部份，目前僅仍以此保守做法進行評估，後續將改採公路總局轄管鋼橋管料進行維護費用推估。	同意辦理
5. 報告第 4-23 頁表 4-17 橋梁維護費用推估與歷史紀錄比有 5.4 及 0.15 倍，建議研究落差原因而非用修正係數改善。	因為主要歷史維護表單中所列之項目眾多，有些並未納入本研究所列之評估項目，後續將參考 RC 橋模組，擬採用公路總局管轄橋梁為主，配合人工智慧進行維護費用推論。	同意辦理
6. 報告第 4-25 頁圖 4.11 次要構件一旦構件狀況指標下降，其維護費用為向上凸的二次曲線,在考量的 8 項構件哪些屬於主要構件、哪些屬於次要構件，如此的維護費用編列依據及合理性請補充說明。	感謝委員建議；此一部份為經費初探時之粗略假設。若後續採用公路總局之資料庫時，將參考 RC 橋模組，擬採用公路總局管轄橋梁為主，配合人工智慧進行維護費用推論。	同意辦理
7. 報告第 4-29 頁圖 4.12 高空作業車費用利用塗裝費用乘上 0.73 計算，是否應用塗裝面積考量高空作業車天數再計算費用。	有關塗裝天數部份已考慮於費用計算中，其主要與塗裝面積相關。	同意辦理
8. 報告第 4-31 頁面漆、中塗漆的使用年限是如何計算的， 將塗膜厚度除以消耗速度後計算值與使用年限	感謝委員意見；此部份計算會再行確認，並於期末報告中一併修正。	同意辦理

值不符。		
9. 報告第 4-41 頁橋梁洪水沖刷維護因子是否應考量橋梁管理系統中基礎頂高程及河床面高程之差值即橋基裸露深度。	以蒙地卡羅為主進行各損傷等級之運算，配合不同等級下之損傷比與成本，即可計算橋梁之地震風險成本。同時考量維護及間接損失成本以決定維護對策。	同意辦理
10. 請補充說明鋼橋維護案例資料庫案例數量，是否足以推求全臺鋼橋。	目前鋼橋耐震能力評估資料庫共有 18 座橋梁，相對於公路總局目前所轄管之鋼橋數量約三百多座，數量上仍是稍微不足。	同意辦理
11. 本年度鋼橋維護策略與已完成混凝土橋維護策略要結合，兩者結合的部份請補充案例說明。	感謝委員建議，將於期末報告補充。	同意辦理
12. 報告第 4-53 頁至 4-57 頁構件老化、橋梁塗裝劣化、洪水沖刷及地震風險評估模式建置及更新，資料表及案例資料是要手動更新嗎?	研究目前所建置之程式提供自動化分析流程，僅有部分 TBMS 資料因權限問題，需由管理者手動操作匯入檔案。	同意辦理
13. 報告第 5-15 頁橋梁損傷等級超越機率曲線用蒙地卡羅模擬及三力矩法計算，最後要採用何者?結果如何運用以決策支援?	會以蒙地卡羅為主進行各損傷等級之運算， 配合不同等級下之損傷比與成本，即可計算橋梁之地震風險成本。同時考量維護及間接損失成本以決定維護對策。	同意辦理
14. 第 7.3 節巡檢路規劃模組可否增加一開放選項，讓巡檢人員自己列橋梁及重要度等求最佳化巡檢路徑。	目前系統提供可依據不同單一條件進行排序，如巡檢人員可選擇僅依照重要度進行排序。	同意辦理
15. 第八章建議撰寫目前的結論與建議，而非預期成果。	感謝委員建議，將於期末報告修正為結論與建議。	同意辦理

16. 文字誤植及圖表不清楚部份建議修正。	感謝委員建議，文字誤植與圖表不清晰部分將一併修正。	同意辦理

附錄二

期末報告審查意見處理情形表

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橋梁管理模組維護

合作研究單位：國立臺灣科技大學

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. 上次審查建議將「巡檢」區分為「巡查」與「檢測」，本次回應已修正，但報告仍稱巡檢。	感謝委員建議，重新將期末簡報檔中與圖形中關於巡檢字眼修正為巡查與檢測。	同意辦理
2. 南雲大橋頻率量測位置請留下紀錄，以利後續若再有研究之比較。	所有量測的原始紀錄均會留存並已交付運研所港研中心。	同意辦理
3. 有關地震風險排序較高橋梁除「尚未完成耐震補強橋梁」外，已補強完成橋梁因後續天災（地震、洪水）或材料老劣化亦可能降低其抗震能力，請說明清楚。	因外在事件如地震等，補充如報告書 P4-48 說明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 4.20、4.21 修正其結構性能。而材料老劣化反映在耐震能力的下降。	同意辦理
二、翁健煌委員		
1. p.5-5 假設 EPA=1.5g 時，橋梁整體損傷超越機率皆為 1.0，代表各種類型橋梁的耐震能力均有相同的極限值，實際實用上是否合理？	感謝委員指正；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[程瑞忠，2015]建議，若橋梁之各損傷發展階段之 EPA 值較低時，可假設超越機率在 EPA 為 1.5g 時，各損傷超越機率皆為 1.0。故本階段	同意辦理

	需從破壞點進行外插直至獲得 EPA 為 1.5g 之橋梁耐震容量。	
2. p.5-15 案例橋梁之耐震能力，行車向為 1.53g；橫向為 2.21g，仍較正常情況高出甚多，應說明原因。且如問題 1，此情況似乎不須外插，以此結果為案例是否合理？	感謝委員意見；此一案例分析已多次與工程師進行討論，且垂直行車方向之耐震能力也與工程師之評估結果相似；因此，橋型建置與側推分析方法應沒有問題。如委員所述，此座橋梁之行車方向 EPA 值可不需外插進行損傷機率評估。	同意辦理
3. p.5-16 僅列出構件元件之容量，並未計算其損傷等級之超越機率，案例似乎尚未完整。	因各元件/構件之各損傷等級超越機率資料過多，報告書僅列出整體橋梁之各損傷等級超機率，如圖 5-12 所示。	同意辦理
4. p.6-33 最佳化方法以自由振動的 RMSE 值為目標函數，試問量測的自由振動與模擬的自由振動，兩者的 input(外力)如何確認相同？	根據量測的速度推算加速度，並使模擬的自由震動具有相同的出初始加速度。	同意辦理
三、林炳森委員		
1. p.1-7 圖 1.3 查核點應在底部說明符號※意義。	感謝委員建議，已在圖中加註此符號為查核點。	同意辦理
2. p.2-43 表 2.8 應加入張國鎮 2009 年文獻。	感謝委員提醒，已在表加入文獻。	同意辦理
3. p.3-17 訪談資料應加強門檻值說明。	因訪談對象對於實務上部分小型橋梁較無維修風險，建議設定門檻，一定規模以下橋梁可忽略。但訂定門檻值在實務上可能會因為管理者的標準不同而有不一樣的答案。因此如同本研究所建議之改善	同意辦理

	對策，以客觀的角度下，以最佳化維護策略分析方法，同時考量成本、橋梁重要度(可反映小型橋梁問題)同時進行維護策略排序。	
4. p.4-32 表 4.26 中，南部鋅腐蝕速率 3.28，底漆使用年限 19.5 年與其他趨勢不一致。	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)。因此，表 4-26 為依平均實測值計算而得。	同意辦理
5. p.4-74 表 4-43 鋼橋…塗裝維修成本，部份間隔年無數據，如系統 2271 之 1 年、2 年、3 年…10 年。	因為目前鋼橋塗裝之維護方法為鋼橋塗裝包商在承攬該橋梁之塗裝工作後，將提供一定年限之保固，在此保固期內將負責相關塗裝維護之工作，因此分析結果才有間隔年下維護成本為 0 之數據。	同意辦理
6. p.5-11 表 5-3 部份材料強度未列如 ASTE A572 GR.50 之降伏強度。	感謝委員指示；已於表 5-3 標記。	同意辦理
7. p.6-19 第二次現地試驗結果應說明洪水位高度與河床沖刷深度。	量測時水位約僅 50 公分，橋墩沖刷深度約為 1 公尺，與第一次量測時狀況類似，以上內容已補充於報告中。	同意辦理
8. p.7-22 表 7-7 分析結果受支配數影響，應建議支配數為多少？	多目標分析結果係以本次所選取之目標項目下所加總之支配數為方案排序之	同意辦理

	依據。因此並無支配數之建議值。	
9. p.7-13 表 7-1 各橋門檻值如何獲得？	此值如文章所述，係由該橋梁通行失敗機率大於其 Ay 所對應失敗機率作為門檻值。	同意辦理
10. p.8-1 應加強今年成果重點，如鋼橋分析模式精進。	感謝委員建議於 8.1 結論部分補充鋼橋分析模式精進說明。	同意辦理
四、張文忠委員		
1. 期中審查意見均已妥適回覆並於期末報告修改。	感謝委員歷次報告之寶貴意見。	同意辦理
2. 群橋風險評估中用路人成本相關輸入參數來源或參考文獻請補充說明。	本研究延續港研中心「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研發(4/4)」計畫案成果，此計畫中已有明確定義用路人參數來源，已在簡報資料補充引用來源。	同意辦理
3. 橋梁損傷評估中材料參數是否有考慮材料老化之影響？請補充說明其影響或如何考量。	此部分引用港研中心「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」計畫案成果，考量大氣腐蝕因素對鋼筋斷面之影響，其中包括氯離子與中性化兩種材料老化因素，並根據滲透速率計算鋼筋斷面減少率，進而計算橋梁耐震能力的下降可能性。	同意辦理
4. 橋梁多點頻率量測所用感測器及集錄器規格及參數應列表說明，另不同系統之校對比較，而使用 Welch 法與 FFT 之比較亦請補充。	報告中增列 6.3 感測器規格與建議之試驗流程一節，委員建議之相關內容已描述於該節中。Welch 法與 FFT 之比較已列入相關章節中。	同意辦理
5. 請依現有橋梁頻率量測成	報告中增列 6.3 感測器規	同意辦理

果，建議提供量測之 SOP 及相關可能誤差來源列表。	格與建議之試驗流程一節，委員建議之相關內容已描述於該節中。	
五、賴瑞應委員		
1. 本計畫含括耐震評估、沖刷評估、振動檢測、維護策略及災後巡檢路線規劃等課題，均非常有挑戰性，研究團隊在有限的經費下完成相關研究工作，團隊的努力值得肯定。	感謝委員歷次報告之寶貴意見。	同意辦理
2. 為落實 trends 之落實應用，本計畫與公路總局相關單位進行訪談，瞭解相關單位的現況防災作為及對系統之使用意見，值得肯定。建議後續能持續跟公路總局的各使用單位進行訪談及推廣本系統，以利研究成果的落實應用。	感謝委員建議，如運研所後續有相關計畫，研究單位亦會積極參與。	同意辦理
3. 報告第 4-32 頁表 4-25 將各區域鋅腐蝕速率以北中南東來區分似乎不合理，舉例來說，同樣北部地區，靠近海邊與靠近山區的鋅腐蝕速率應該不同，本系統以同樣的腐蝕速率估算明顯不合理，建議後續本中心可以協助提供臺灣大氣腐蝕 GIS 圖檔（包含座標空間資訊）及各分類之腐蝕速率區間範圍，供研究團隊將圖資匯入系統模組中使用。	感謝委員建議；後續將進一步了解港研中心之大氣腐蝕資料庫中關於鋅腐蝕速率產出。。	同意辦理
4. 報告第 4-71 頁，表 4-41 混凝土橋梁老化維修風險成本之估算成果，建議後續可以進行案例的驗證，	感謝委員建議，另外此表格所顯示的並非該橋第幾年之維修風險成本，而是該橋梁維修間隔多少年下	同意辦理

以確認模式的可靠度。另外，由表的分析成果顯示，前 4 年的維修成本以倍數成長，第 5 年以後到第 20 年，每年維修成本僅微幅增加，請補充說明此現象的原因，若真如模式分析結果，是否可以以此分析結果研擬最佳維修策略，以達到生命週期最低維護成本的目的。	的維修成本。以編號 2232 的橋梁為例，如以每隔 2 年維修一次則每 2 年需要 50468 的費用，而後面間隔越久就約接近置換整個設施的費用，因此就會趨近平緩。	
5. 針對橋梁巡查路線規劃模式，建議可以進行各工程處或各工務段的過去災害案例巡查路線模擬，並跟各工程處或工務段的實際巡查路線做比較，驗證模式的可靠度，以利未來的落實應用。	感謝委員建議，如後續有計畫案之需求，可將此目標列為工作項目。	同意辦理
六、公路總局		
1. 橋梁振動頻率識別完成後，後續如何辦理加值應用？對於決策支援系統如何併行運用？	橋梁振動頻率識別完成後，可藉由洪災發生前後之頻率變化了解橋梁之健康狀態，提供決策支援系統使用。	同意辦理
2. 有關南雲大橋雨季前及雨季後，其振動頻率差異不大，是否有和河床斷面比較其沖刷深度和頻率之關係。	河床斷面、沖刷深度均與頻率相關，惟上述影響因子在現地為自然現象，非人力可控制。因前後量測期間，清水溪並無明顯洪災發生，橋梁狀態類似，與量測結果吻合。	同意辦理
3. 本局刻正辦理「高科技橋梁監測」委託研究案，針對南雲大橋之監測結果，是否可提供本局參考。	(1)應選定具高沖刷潛勢之橋梁。 (2)平行與垂直方向之振動訊號應明確分離。 (3)初期可採用多測站確保	同意辦理

	確實量測到所欲取得之振動訊息。 (4)警戒值或行動值之擬定。	
4. 振動頻率除和車行相關，河川沖擊橋墩亦有影響，本研究於量測時之洪水位為何？有無初步結論(洪水位與頻率之關係)？	量測時水位約僅 50 公分，橋墩沖刷深度約為 1 公尺。洪水位確實會影響頻率，惟洪水位的因素目前並不在本計畫的研究範籌。洪水位對頻率的影響，目前學界的研究多傾向以數值模擬方式進行，根據文獻，以具有較細長的結構(如墩柱)的影響較大。	同意辦理
七、本所港研中心柯正龍科長		
1. 報告及參考文獻請依照本所出版品規定辦理，本所名稱請統一。	感謝委員建議，會以出版品規定檢視修正報告格式，並統一名詞為交通部運輸研究所。	同意辦理
2. 中英文摘要請加入研究成果。	感謝委員建議，已在摘要加入研究成果。	同意辦理
3. 報告第 4-31 頁利用大氣腐蝕速率，鋼橋為何不採用鋼腐蝕速率，而是引用鋅腐蝕速率？	鋼橋防蝕塗裝之底層漆為無鉛鋅粉，主要採用鋅腐蝕速率以計算鋅層耐用年限。	同意辦理
4. 大氣腐蝕分類系統分為城市、鄉村、距海遠近等，本研究是否加以考量？	此一部份主要參考港研中心之大氣腐蝕資料庫進行材料老劣化預測。	同意辦理
5. 塗裝系統引用文獻請註明，圖表下可加註資料來源。	感謝委員建議；已標註。	同意辦理
6. 鋼結構防蝕部份可參考鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊。	感謝委員建議；已納入參考文獻。	同意辦理

八、本所港研中心第一科林雅雯研究員		
1. 報告格式請依照本所出版品規定再次檢視修正。	感謝委員建議，會以出版品規定檢視修正報告格式。	同意辦理
2. 報告第 4-56 頁預算金額加入 2 倍標準差的原因請補充說明。	感謝委員建議，於文章補充說明:因為公路總局歷年預算變動較大，因此於研究中先取兩倍標準差(其定義為可涵蓋 95%數值分布)進行計算，而使用者仍可以手動調整各年度之預算值。	同意辦理
3. 報告第 6-25 頁振動量測平行車行方向頻率約為 2.72~3.01，垂直車行方向約 2.08~3.17，目前研究採前後比值設門檻值方式判斷異常，由於頻率數值太小，變動的百分比就相對較大，是否考量以頻率值本身來判斷，超過範圍就視為異常？因目前亦僅取最主頻的值來判斷。	根據 6.2 節的分析結果，南雲大橋車行和與垂直車行方向的第一振態頻率分別約為 2.9Hz 和 2.05Hz，根據分析結果，兩個方向的頻率變動率均已大為縮小。	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及橋梁管理模組維護期末簡報

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

中華民國一百零七年十一月

簡報流程

壹 計畫背景及目的

貳 研究方法

參 工作項目

肆 執行進度

伍 結論與建議

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查與檢測優先順序，將面對跳點方式巡查與檢測之問題，實際執行上可能窒礙難行。

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)鋼結構橋梁維護分析模式精進

(2)橋梁整體耐震能力評估模式案例分析

(3)橋梁振動檢測案例分析

(4)災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進

貳 研究方法(1/2)

本計畫期程分為七個項目完成

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**	➢ 至公路總局1養護工程處訪談。 ➢ 檢核目前影響因子是否足夠推求實際橋梁現況之耐震能力。 ➢ 系統資料庫更新及維護運作管理 ➢ 製作系統操作手冊。	➢ 模式驗證與更新
第三階段： **鋼結構橋梁維護分析模式精進**	➢ 建置公路總局轄管鋼結構橋梁風險分析資料庫。 ➢ 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組。 ➢ 建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋)維護策略最佳化模式	➢ 影響圖 ➢ 因子篩選

貳 研究方法(2/2)

研究階段	研究內容	相關研究與方法
第四階段： **橋梁整體耐震能力評估模式案例分析**	➢ 選取公路總局1座橋梁進行整體橋梁耐震能力側推分析。 ➢ 持續蒐集整體橋梁耐震能力評估案例並納入系統資料庫。	➢ 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**	➢ 選取1座橋梁安裝2組以上速度計同時進行橋梁多點頻率量測，藉以了解振動頻率雜訊來源與變動原因。	➢ 振動頻率量測儀器 ➢ 傅立葉轉換
第六階段： **災後橋梁巡檢路線規劃模式精進**	➢ 精進災後橋梁巡檢路線規劃模式。 ➢ 建置巡檢路徑規劃模組。	➢ 旅行推銷員問題(TSP)規劃 ➢ 多目標最佳化模式
第七階段： **結論與建議**	➢ 提出成果與建議	➢ 成果彙整

今年度工作項目

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
邱 建 國 教 授	國立臺灣科技大學/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研究、鋼筋混凝土結構物生命週期耐久性能設計與維持管理等	計畫協調整合事項 第四階段
鄭 明 淵 特聘教授	國立臺灣科技大學/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、地理資訊系統等	第一階段 第二階段 第三階段
廖 國 偉 副 教 授	國立臺灣大學生物環境系統工程學系	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 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-第二項 TRENDS系統營運維護

1. 至公路總局1個養護工程處進行系統橋梁維護策略模組介紹與訪談
2. 檢核目前影響因子是否足夠推求實際橋梁現況之耐震能力
3. 製作系統操作手冊

參 養護工程處介紹與訪談

第二項-TRENDS系統營運維護

研究團隊於105年10月20日，偕同港研中心科長與研究員，至公路總局應變中心進行訪談，藉由訪談公路管理單位人員，做為系統功能精進與加強之依據。

公路總局應變中心訪談會議

今年度以同樣方式選取公路總局1個養護工程處進行系統橋梁維護策略模組介紹與訪談，依照訪談結論，進而修改系統橋梁維護策略模組，以符合橋管單位實務使用需求。

參 養護工程處介紹與訪談

第二項-TRENDS系統營運維護

2018/06/04先行寄送訪談文件

2018/06/11至臺中第二區養護工程處訪談陳毅銘幫工程司。

介紹大綱

訪談大項(事先將簡報與訪談內容寄送給受訪者)

1. 對於目前分析方法是否有建議

   1-1. 風險分析層面(橋梁面臨風險)

   1-2. 維護策略層面(實務經驗)

2. 系統預定的操作介面是否有建議

   2-1. 系統欄位的增減

   2-2. 系統操作流程的修正

3. 研究成果與實務面之應用。

參 養護工程處介紹與訪談

第二項-TRENDS系統營運維護

問題	討論	改善對策
一、本研究分析方法 1.對於目前分析方法是否有建議 1-1.風險分析層面(橋梁面臨風險之探討)		
(1)目前系統所考量改道後社會成本之因子是否合理。此邏輯是否合理?或是實務上有另外考量之因子?	如欲橋梁無法改道的情況，計算結果是否會出現差異性。ADT:每日平均交通流量(輛/日)，是否可依一般公路設計採用第30小時(30HV)交通量或考量(尖峰及離峰流量)以年平均每日平均交通量(AADT)	模式中採用之參數改為AADT
(2)貴單位歷年因為老化維護、地震或洪水等因素之維護經費是否有相關統計資料是否可提供不同因素所占比例。	經詢問工程處主計單位，目前預算分為一般維護(包含橋梁、道路與邊坡)、災害搶修、地震補強及重建等。預算之執行通常以一個路段進行發包(包含橋路、邊坡)，較難以區分經費使用狀況。	如能提供相關數據，研究將可進一步分析各風險之比例，如無此數據並未影響整體成果。

參 養護工程處介紹與訪談

第二項-TRENDS系統營運維護

問題	討論	改善對策
1-2.維護策略層面(實務經驗)		
(1)目前工程處如何分配橋梁維護經費?如何考量優先順序與金額分配?	目前橋梁維護經費由工程處統籌分配，依據轄下各工務段橋梁定期檢測或是特別檢測成果如發現橋梁構件劣化(D.E.R.&U.)找出需維修之橋梁年底需求送公路總局彙整，得核定結果。	與目前系統預設架構相符。
(2)目前工務段如何分配橋梁維護經費?如何考量優先順序與金額分配?	如上由工務段將須檢測橋梁彙報工程處，再由工程處提送公路總局。	與目前系統預設架構相符。
(3)系統預設以工程處為經費分配的對象是否合宜?是否改為工務段較符合實際狀況?	建議預設以工程處為經費分配為宜，經費分配及執行進度控管目前由工程處統籌辦理，符合現行方法。	與目前系統預設架構相符。

參 養護工程處介紹與訪談

第二項-TRENDS系統營運維護

問題	討論	改善對策
三、研究成果與實務面之應用		
1.針對本研究的橋梁地震風險排序名單與貴單位橋梁地震風險排序是否相同?不同處為何?	本局尚未完成耐震補強橋梁(E類橋梁)會被列為地震風險排序較高橋梁。	模式中根據公路總局所提供最新的耐震補強報告書更新橋梁補強後之耐震強度值，而未補強之橋梁仍維持原先之耐震能力。
2.針對本研究的橋梁洪水風險排序名單與貴單位橋梁洪水風險排序是否相同?不同處為何?	本局橋基輕微裸露橋梁(B類橋梁)有玄寶大橋等，供研究團隊參考。	分析模式根據TBMS最新的檢測結果(沖刷裸露)進行分析，如檢測人員有確實填報，耐洪分析結果亦有反應在分析結果上。
3.針對本研究的橋梁老化風險排序名單與貴單位橋梁老化風險排序是否相同?不同處為何?	實務上部分小型橋梁較無維修風險，建議設定門檻一定規模以下橋梁可忽略	模式在後續年度中可加入多目標的最佳化維護策略分析方法，同時考量成本橋梁重要度(可反映小型橋梁問題)同時進行維護策略排序。

參 養護工程處介紹與訪談

第二項-TRENDS系統營運維護

問題	討論	改善對策
6.本研究之系統應用於貴單位(風險排序及維護經費編列)是否可行?若目前不可行，請說明原因。	跨水橋(中央管河川、縣管河川)橋梁構件劣化(D&R≧3及U=3一年內)及沿海地區區域排水橋梁會優先處理，其他區域排水或是橋梁跨數較少及跨徑較短之橋梁，劣化情形明顯偏低	如同多目標的最佳化維護策略分析方法之研究方向可加入區域排水或是橋梁跨數及跨徑之因子於搜尋過程中。
7.其他有關本研究或系統精進之建議?	本處轄管部分橋梁已完成全橋改建(中港溪橋竹木橋、北勢大橋、軍功橋、北港溪橋、史港橋、大湳橋、龍神橋)或是基礎換底工程(晉安一號橋、晉安二號橋)，相關評估內容建議應更新。	如有改建之橋梁在TBMS系統中如有更新資料，系統模式亦會一併更新。

參 檢核橋梁耐震能力因子

第二項-TRENDS系統營運維護

根據文獻，耐震能力評估所需的橋梁資料多數欄位皆可由TBMS中取得，但仍有部分為須新增之欄位，後續研究可參考建議加入TBMS系統基本資料表中。

*可在欄位填寫需求上備註非必填項目。

篩選建議加入之欄位

欄位名稱	欄位說明
Numunits	振動單元數
Skewangle	歪斜角
SoilLqf	土壤液化敏感類別
Waterdepth	地下水位(公尺)
ScourDepth	沖刷深度(公尺)

參 製作系統操作手冊

第二項-TRENDS系統營運維護

根據近年系統維護更新成果，製作系統操作手冊，其章節架構如右所示(完整請參考附錄)，並包含系統安裝說明、系統軟硬故障排除說明。

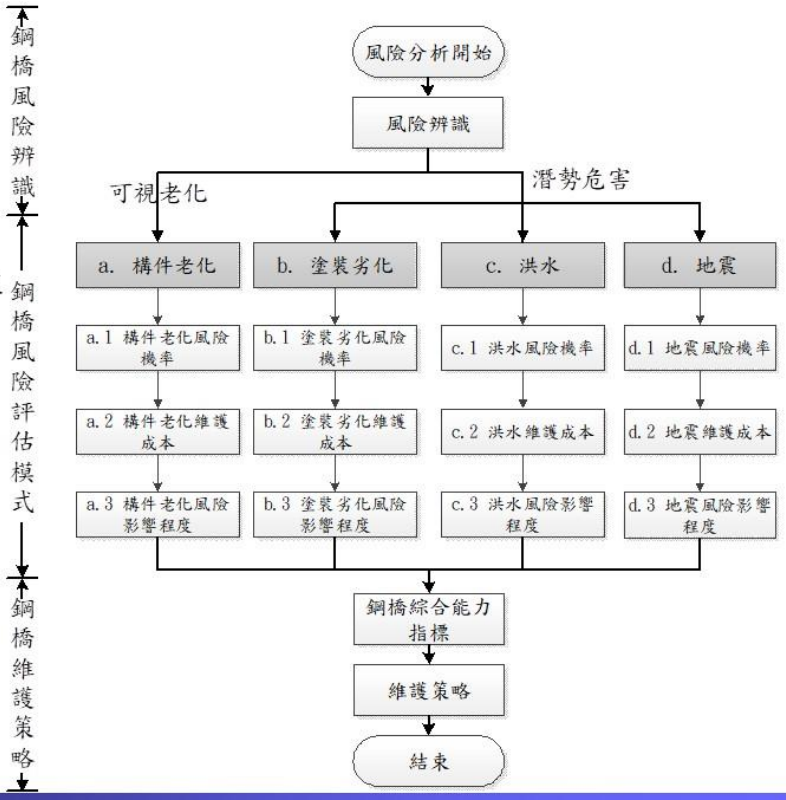
章節	頁碼
第一章 前言	14
第二章 公路防救災決策支援系統各功能模組介紹	15
2.1 橋梁資料管理	19
2.2 邊坡資料管理	94
2.3 GIS資料管理	137
2.4巡查與檢測路線規劃	149
2.5 災害資訊管理	152
2.6 系統維護	165
第三章 系統軟硬體需求	177
第四章 系統安裝說明	178
4.1 Java2 SDK 安裝步驟	178
4.2 SQL Server 安裝步驟	181
4.3 Jsp Server 安裝步驟	188
4.4 ESRI ArcGIS Server安裝步驟	189
第五章 系統軟硬故障排除說明	200
5.1 軟體部分	200
5.2 硬體部分	200

參 執行步驟-第三項 鋼結構橋梁維護分析模式精進

1. 建立鋼橋群橋風險管理及維護策略
2. 建置公路總局轄管鋼結構橋梁風險分析資料庫
3. 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組

去年度成果

鋼橋風險評估模式流程



參 建立鋼橋群橋風險管理及維護策略

第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

去年度成果

鋼橋風險評估架構

參 建立鋼橋群橋風險管理及維護策略
第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

去年度成果

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。

參 建立鋼橋群橋風險管理及維護策略

因公路橋梁管理單位年度維護**預算有限**，管理單位無法同時對所有橋梁進行全面檢測與修復之工作，因此，除了考量**可視風險**與**潛勢危害**外，還必須考量橋梁之**重要性**與橋梁維修造成**社會成本**之損失。

因素
- 各工務段管理單位，橋梁維護預算有限。

結果
- 無法決定各橋梁的維護優先順序與時機。

參 建立鋼橋群橋風險管理及維護策略
第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

群橋成本維護最佳化模式E_B(Cost)

風險下維護成本　損害重建成本　用路人成本

$$E_{Bij}(Cost) = E(MC) + E(RC) + E(UC)$$

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

E(MC): Maintenance Cost，為風險下維護成本。

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。

E(UC): User Cost，因災害發生，造成橋梁中斷完全改道或是維護部分改道之用路人成本。

參 建立鋼橋群橋風險管理及維護策略
第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

用路人成本E(UC)

完全封閉　部分封閉

$$E(UC) = \left(P_{S_{ij}} \times C_{U_{ij}} + P_{E_{ij}} \times C_{U_{ij}}\right) + \left(P_{MD_{ij}} \times C_{U_{ij}}' + P_{MS_{ij}} \times C_{U_{ij}}' + P_{ME_{ij}} \times C_{U_{ij}}'\right)$$

C_U: 橋梁完全封閉之用路人成本(User Cost of Entire Closed Bridge)

C_U': 橋梁部分封閉之用路人成本(User Cost of Partial Closed Bridge)

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)

P_{MD}: 元件老化之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Deterioration)

P_{MS}: 洪水造成之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Scour)

P_{ME}: 地震之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Earthquake)

參 建立鋼橋群橋風險管理及維護策略
第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

用路人成本因子計算

分別計算用路人旅行延時成本、車輛運行成本、事故發生成本

	社會成本			
類別編號	成本項目	道路狀況	計算公式	說明
I	旅行延時成本	部分封閉	$(\frac{L}{S_a}-\frac{L}{S_n})\times ADT\times W\times NP$	L 為因子橋梁長度與改道長度量化部分 L：維修影響的道路長度(Km) L'：橋梁的改道長度(Km) S 為道路等級量化之部分，因不同道路等級平時行車速度不同 Sa：維修時車行速度(Km/hr) Sn：平日車行速度(Km/hr) AADT 為橋上交通量量化部分 AADT：每年日平均交通流量(輛/日) W：旅行平均每小時時間價值(元/hr) NP:平均乘載駕駛人 r：車輛平均每小時燃料及折舊成本(元/hr) An：車輛事故發生率（次/百萬輛公里） Ca：每次事故成本（元/次）
		完全封閉	$(\frac{L'}{S_n}-\frac{L}{S_n})\times ADT\times W\times NP$	
II	車輛運行成本	部分封閉	$(\frac{L}{S_a}-\frac{L}{S_n})\times ADT\times r$	
		完全封閉	$(\frac{L'}{S_n}-\frac{L}{S_n})\times ADT\times r$	
III	事故發生成本	完全封閉	$(L'-L)\times ADT\times A_n\times C_a$	

「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研發(4/4)」交通部運輸研究所，2014

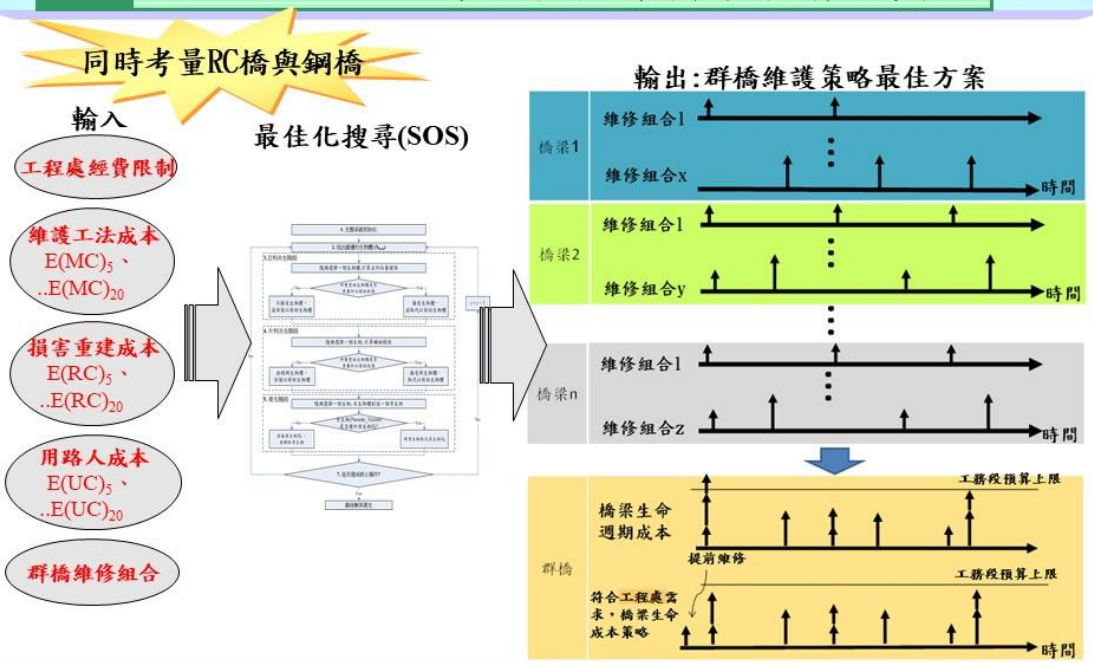
參 建置公路總局轄管鋼結構橋梁風險分析資料庫
第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

用路人成本因子計算

計算結果示意:

橋梁順序	工務段	所在區鄉	車流量	替代道路(km)	橋長(km)	旅行延時成本		車輛運行成本		事故成本	用路人成本總和
						部分封閉	完全封閉	部分封閉	完全封閉	完全封閉	
1	埔里	仁愛	960	10.983	0.0119	192	40,887	12	2,449	6,293	55,520
2	苗栗	後龍	9,620	0.35	0.044	204	4,564,767	8	181,779	467,008	23,867
3	苗栗	頭份	9,620	0.85	0.009	681	4,564,053	27	181,751	466,935	60,722
4	苗栗	頭份	9,620	0.45	0.0066	1,021	4,563,542	41	181,730	466,883	32,095
5	苗栗	頭份	11,038	4.9	0.432	1,226	4,563,236	49	181,718	466,851	389,344
6	苗栗	後龍	12,013	7.2	0.34	6,128	4,555,882	244	181,425	466,099	633,010
7	苗栗	頭份	9,620	0.9	0.04	2,259	3,783,620	90	150,672	387,091	63,435
8	苗栗	頭份	9,620	1.9	0.0104	77	3,342,803	5	200,255	514,476	136,006
9	苗栗	頭份	9,620	1.9	0.035	240	2,684,050	10	106,885	274,597	135,312
10	苗栗	竹南	9,620	2.8	0.075	5,065	2,676,814	202	106,597	273,857	198,747
11	苗栗	造橋	9,620	0.35	0.01	1,571	1,968,741	63	78,400	201,416	24,826
12	苗栗	造橋	9,620	8	0.0105	1,571	1,968,741	63	78,400	201,416	573,594
13	苗栗	後龍	9,620	2.5	0.01	2,857	1,966,813	114	78,323	201,219	179,059
14	苗栗	後龍	9,620	2.3	0.0349	2,999	1,966,599	119	78,314	201,197	164,009
15	苗栗	西湖	9,620	1.4	0.03	116,214	1,671,054	4,628	66,545	170,961	99,585
⋮											
100	台中	清水區	23,431	0.75	0.03	293	382,696	12	15,240	39,153	91,030
101	台中	清水區	23,431	3.1	0.036	1,336	353,922	80	21,202	54,470	380,795
102	台中	梧棲區	23,431	0.75	0.3016	149,678	233,756	5,961	9,309	23,915	110,331
103	台中	龍井區	23,431	1.8	0.03	797	362,947	32	14,453	37,132	312,444
104	台中	龍井區	23,431	1.1	0.135	6,281	354,872	250	14,132	36,306	128,816
105	台中	龍井區	23,431	0.75	0.44	17,377	338,227	692	13,469	34,603	69,882

參 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組
第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進



參 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組
第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

群橋最佳化模式之目標方程式:

同時考量RC橋與鋼橋

$$\text{Min}E_{GT}(\text{Cost}) = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} E_{Bij}(\text{Cost})$$

$E_{GT}(\text{Cost})$:群橋風險成本(Total Risk Cost of Group Bridges)。

$\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} E_{Bij}(\text{Cost})$

將各橋梁之風險期望成本**E_B(Cost)**加總可得到**群橋風險期望成本E_{GT}(Cost)**，本研究以求得**Min E_{GT}(Cost)**為目標下進行最佳化搜尋。

參 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組
第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

限制式:

同時考量RC橋與鋼橋

For i=1 to 20

Subject to $\sum_{j=1}^{m} E_{ij}(MC) \le B_i$

END

m:工務段轄區橋梁總數
Bi:第i年度預算(Budget)
j:為同 一管理單位之橋梁
i:某段期間橋梁的使用年限

以第i年為例，最佳化需滿足**第i年之預算限制**。在搜尋過程中會用隨機組合之方式，來找出滿足滿足限制式的維護策略。

參 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組
第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

演算過程:

同時考量RC橋與鋼橋

1. 以二區工程處為例，橋梁數量總共有849座，20年維修策略則有849X20=16980個欄位。
2. 16980欄位各有維護或不維護選擇。
3. SOS將於各欄位中嘗試維護或不維護之可能，並加總計算E(COST)。
4. 於演算過程中，紀錄每種維修策略總成本。
5. 當結果收斂時，取最小維修總成本結果為群橋維修最佳策略。

20年維修策略

no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
849	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1

可能解:2^16980=3X10^5111

849座橋梁

參 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組

第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

群橋維護風險管理分析結果

同時考量RC橋與鋼橋

以二區工程處為例，計算群橋生命週期20年之維護策略。

橋梁數量:849座

預算限制:每年3,780,217,329元

ID	E(MC)1	E(MC)2	E(MC)3	E(MC)4	E(MC)5	E(MC)6	E(MC)7	E(MC)8	E(MC)9	E(MC)10	••••	E(MC)17	E(MC)18	E(MC)19	E(MC)20	Ej(Cost)
B01-0010-010A	1,330,494	1,333,695	1,336,903	0	1,820,634	1,346,576	0	1,833,806	1,356,318	1,359,581		0	0	0	0	13,081,134
B01-0010-091A	0	45,290	0	45,508	0	0	149,468	16,268	16,307	16,346		0	0	153,841	0	658,347
B01-0010-092A	0	384,868	0	0	580,959	0	0	0	766,730	0		0	814,175	0	0	3,245,376
B01-0010-097A	67,392	67,554	67,717	67,880	0	0	0	0	0	38,708,215		70,033	70,202	0	0	78,668,247
B01-0010-097B	2,773,040	2,779,711	2,786,399	2,793,102	0	12,441,625	2,813,309	0	0	13,951,516		0	22,722,531	2,895,611	2,902,577	84,353,095
B01-0010-097C	0	4,210,585	0	4,230,869	1,682,554	1,686,602	1,690,660	0	4,282,007	1,702,891		0	4,375,618	0	0	36,606,664
B01-0010-098A	78,972	79,162	0	0	0	451,780	0	217,971	80,505	0		0	464,997	82,463	82,661	2,079,648
B01-0010-098B	538,580	539,876	541,175	0	1,553,036	545,090	0	0	2,451,169	550,354		3,537,523	0	1,606,169	563,739	14,562,002
B01-0010-099A	0	0	4,721,838	956,067	0	0	0	5,160,271	0	0		5,273,082	0	0	0	23,446,091
B01-0010-101A	1,560	0	0	20,935	0	0	0	0	61,056	0		1,621	1,625	1,629	1,633	137,680
B01-0010-103A	0	147,399	0	148,109	43,600	43,705	43,810	43,915	0	0		0	0	196,926	45,200	1,274,569
B01-0010-108A	0	0	0	0	480,298	0	168,187	0	168,998	0		0	172,692	0	173,524	1,804,491
B01-0010-112A	5,444	0	876,308	5,484	5,497	0	884,771	5,537	5,550	0		0	908,469	0	912,846	6,068,041
B01-0010-116A	0	0	543,460	64,720	64,876	65,032	65,188	65,345	65,502	65,660	••••	562,054	0	129,303	67,257	2,018,026
B01-0010-117A	7,043,400	0	0	0	0	0	41,172,742	7,162,873	7,180,106	7,197,379		0	0	46,856,846	0	131,337,731
B01-0010-118A	192,783	0	0	767,281	194,644	195,113	0	0	776,555	0		0	1,109,645	0	440,015	4,882,182
⋮						⋮										⋮
B08-0760-020AL	4,682,693	0	21,501,024	0	21,604,601	4,739,292	0	21,760,904	4,773,579	4,785,063		0	22,290,126	4,889,672	4,901,435	216,091,285
B08-0760-020AR	503,880	0	13,103,137	0	0	0	0	38,759,686	513,660	514,896		0	13,584,031	526,152	527,418	91,768,428
B08-0760-023AL	4,505,823	0	24,729,256	0	24,848,385	4,560,284	0	25,028,156	4,593,277	4,604,327		0	0	0	51,013,180	203,034,861
B08-0760-023AR	0	0	0	24,645,185	486,695	487,866	489,040	490,217	0	12,747,827		21,272,813	0	0	0	82,233,590
B08-0760-026A	0	0	0	3,929,599	0	0	0	0	5,330,212	1,093,371		0	4,064,041	0	0	18,331,570
B08-0760-026B	0	0	2,986,188	1,268,486	0	1,633,850	1,277,663	0	0	3,036,841		0	1,681,647	0	0	17,949,122
維護機數	383	293	298	330	319	325	329	306	326	331	••••	354	341	373	272	
$\sum_{j=1}^{n} E_{ij}(MC)$	1,224,951,381	1,280,732,502	1,430,559,280	1,401,804,451	2,423,811,374	1,868,188,382	1,875,559,411	1,878,771,972	2,007,804,441	2,058,339,418	••••	2,343,870,388	2,444,282,557	2,362,530,422	2,027,516,615	42,627,586,437

$$\sum_{j=1}^{m} E_{ij}(MC) \le B_i$$

$$\text{Min}E_{GT}(\text{Cost}) = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} E_{Bij}(\text{Cost})$$

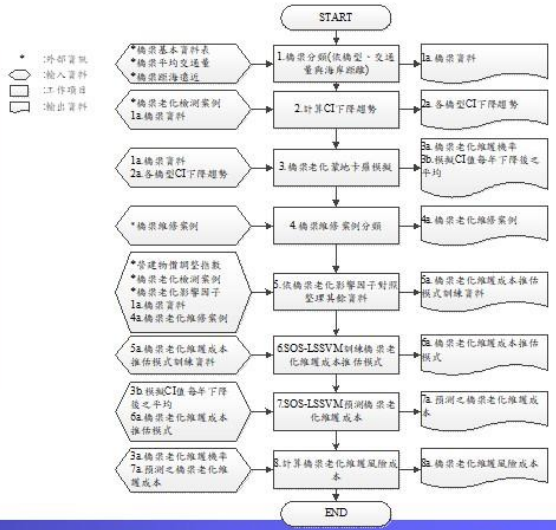
參 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組

第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

自動化程式建置:

為使風險評估模式可更新及提升建置風險評估模式之效率，本研究建置資料及風險評估模式更新模組，以老化風險為例。

構件老化風險成本模組介面



構件老化風險成本模組流程圖

參 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組

第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

網頁查詢功能:

同時考量RC橋與鋼橋

1.勾選搜尋條件

勾選搜尋條件，如橋梁名稱、工程處、工務段、20年~30年維護策略

參 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組

第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

網頁查詢功能:

同時考量RC橋與鋼橋

2.以第二區工程處為例，顯示此工程處最佳維修策略組合

20年維護策略

25年維護策略

30年維護策略

參 建置鋼橋梁風險評估與查詢功能模組

第三項-鋼結構橋梁維護分析模式精進

網頁查詢功能:

同時考量RC橋與鋼橋

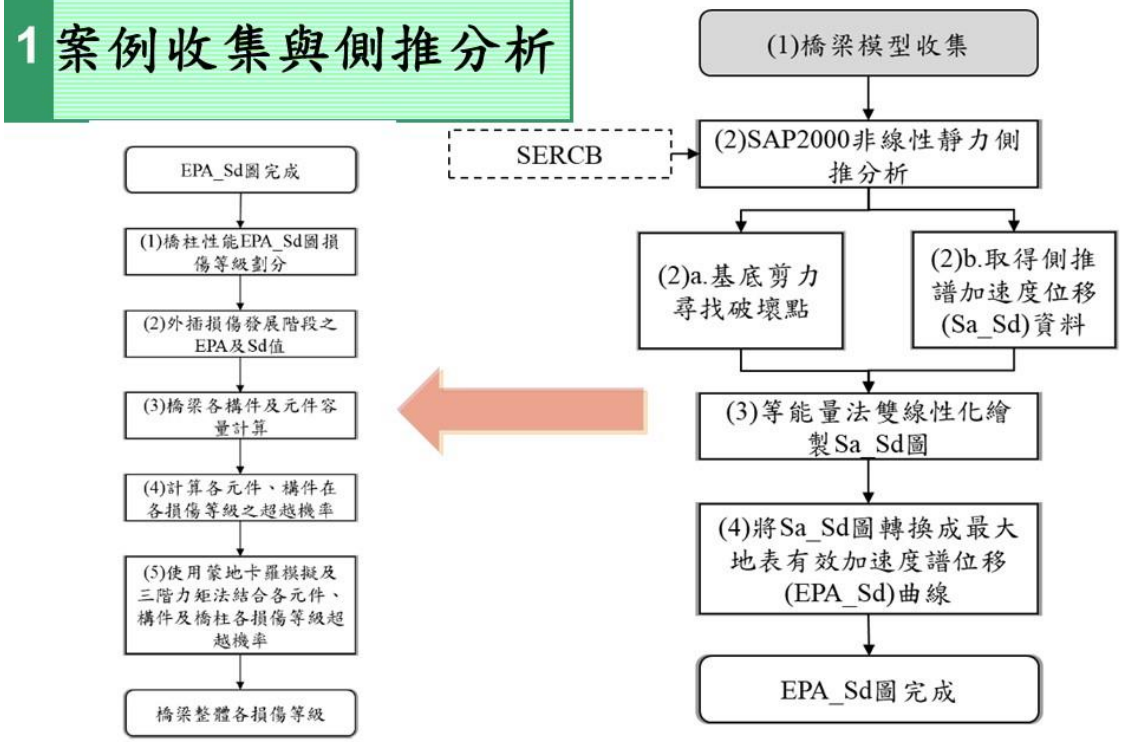
3.點選橋梁維修成本可查看老化、耐洪、耐震、塗裝維修風險成本值。

參 執行步驟-第四項

橋梁整體耐震能力評估模式案例分析

1. 案例收集與側推分析
2. 橋梁損傷評估
3. 案例分析

1 案例收集與側推分析



1 案例收集與側推分析

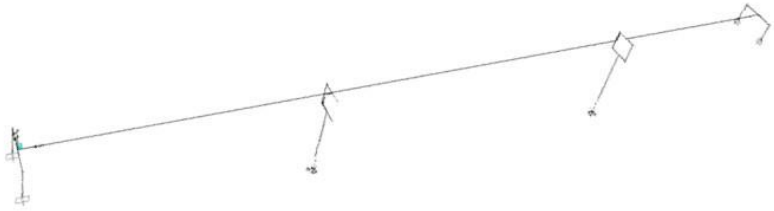
第四項-橋梁整體耐震能力評估模式案例分析

STEP 1:橋梁SAP2000模型收集

中坑高架橋位於新北市五股區觀音里，採用之設計規範為84年版，工址屬台北盆地微分區一區，並為重要橋梁，對應之性能如表5-2所示。本振動單元為連續3跨橋梁，上部結構配置一根預力箱型梁，橋面寬11.5m；下部結構為單柱混凝土橋梁。

STEP 2:SAP2000非線性靜力側推分析

參考使用文獻[宋裕祺教授團隊]所開發SERCB for Bridge結構分析軟體進行塑鉸分析並進行非線性靜力側推分析。



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案例分析

STEP 2a:由側推曲線-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(Base Force)

TABLE: Pushover Curve - PUSH

Step	isplacemc	BaseForce
	m	Tonf
0	0.000475	0
1	0.000889	40.3087
2	0.028768	1556.812
3	0.03605	1772.865
4	0.04229	1887.76
5	0.043583	1901.854
6	0.093583	1907.208
7	0.143583	1912.561
8	0.193583	1917.914
9	0.243583	1923.267
10	0.293583	1928.621
11	0.343583	1933.974
12	0.359296	1935.656
13	0.409745	1884.738
14	0.494357	1691.494
15	0.573535	1426.795
16	0.623535	1248.081
17	0.673535	1069.367

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案例分析

STEP 2b: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

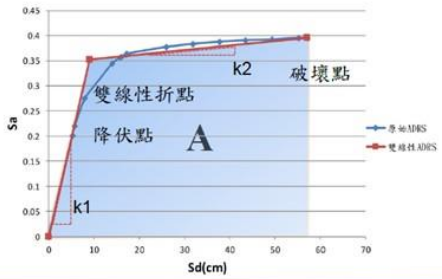
Step	Teff	Beff	SdCapacity	SaCapacity	SdDemand	SaDemand	Alpha	PFPhi
			m		m			
0	0.352187	0.05	0	0	0.030811	1	1	1
1	0.352187	0.05	0.000417	0.013542	0.030811	1	0.952108	0.991746
2	0.468428	0.057177	0.028478	0.522473	0.044996	0.825525	0.953102	0.993488
3	0.491695	0.106715	0.035728	0.594914	0.039656	0.660322	0.95321	0.995708
4	0.516473	0.151371	0.041972	0.633429	0.037197	0.561369	0.95327	0.99626
5	0.522457	0.162002	0.04327	0.63815	0.036752	0.542026	0.953284	0.996241
6	0.766071	0.369794	0.093259	0.639719	0.038278	0.262576	0.953623	0.998376
7	0.948163	0.415657	0.143255	0.641478	0.047106	0.210934	0.953676	0.99897
8	1.099735	0.445842	0.193252	0.643262	0.054636	0.181862	0.953694	0.999248
9	1.23211	0.463062	0.243251	0.645052	0.061213	0.162323	0.953702	0.99941
10	1.350947	0.473955	0.293249	0.646844	0.067116	0.148044	0.953706	0.999515
11	1.459562	0.481289	0.343248	0.648638	0.072513	0.137027	0.953709	0.999589
12	1.491948	0.483096	0.358962	0.649202	0.074122	0.134053	0.953709	0.999608
13	1.614666	0.513677	0.409381	0.632123	0.080218	0.123865	0.953711	0.999727
14	1.872099	0.618211	0.4939	0.56731	0.093008	0.106832	0.953713	0.999964
15	2.1956	0.789335	0.573031	0.478532	0.10908	0.091091	0.953714	1.000049
16	2.447772	0.936978	0.62301	0.418593	0.121608	0.081707	0.953715	1.00008
17	2.748434	1.12673	0.672988	0.358654	0.136545	0.072769	0.953715	1.000106
18	3.121403	1.385739	0.722966	0.298715	0.155075	0.064074	0.953715	1.000129
19	3.609923	1.767832	0.772945	0.238776	0.179345	0.055403	0.953716	1.000148
20	4.303973	2.398461	0.822923	0.178838	0.213826	0.046469	0.953716	1.000166

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案例分析

STEP 3: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, Sd Capacity)
- 降伏點:雙線性折點
- 以降伏點至破壞點的斜率為k2

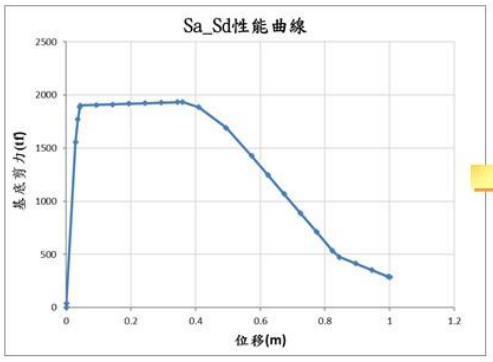


SdCapacity	SaCapacity
cm	
0	0
0.0417	0.013542
2.8478	0.522473
3.5728	0.594914
4.1972	0.633429
4.327	0.63815
9.3259	0.639719
14.3255	0.641478
19.3252	0.643262
24.3251	0.645052
29.3249	0.646844
34.3248	0.648638
35.8962	0.649202

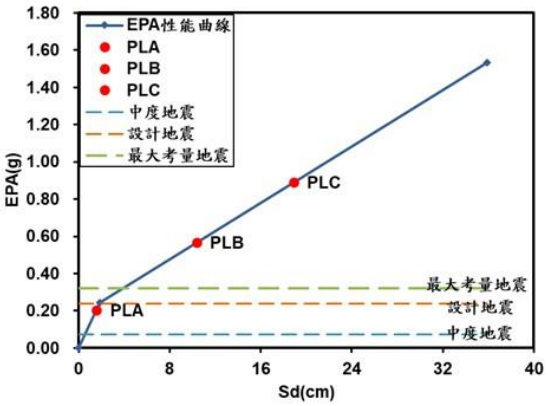
1 案例收集與側推分析

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式案例分析

STEP 4:將Sa-Sd圖轉換成最大地表有效加速度-譜位移圖(EPA-Sd圖)

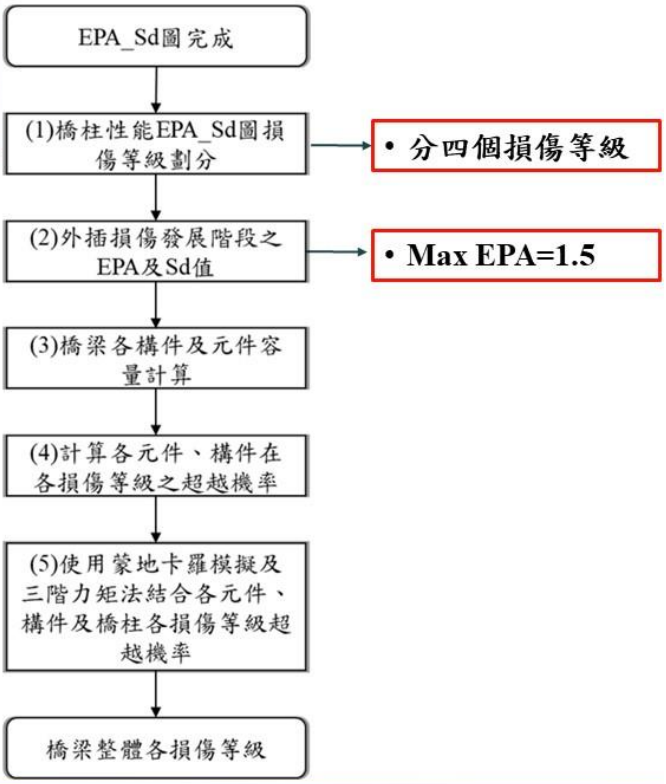


Sa_Sd性能曲線



EPA性能曲線

2 橋梁損傷評估



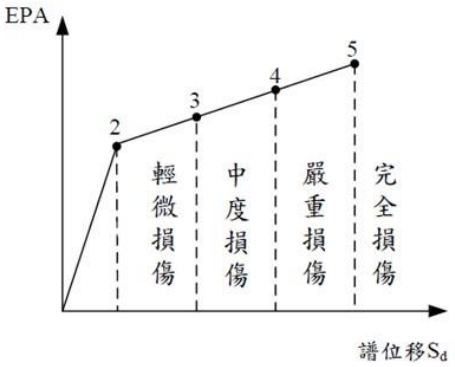
2 橋梁損傷評估

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式案例分析

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

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)。

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。

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。

表5-1 構件及元件損傷對照表

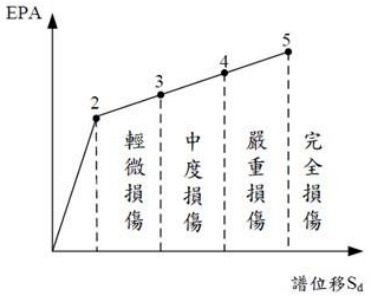
			無損傷	輕微損傷	中度損傷	嚴重損傷	完全損傷
下部結構	橋梁構件及元件	橋柱性能	✓	✓	✓	✓	✓
		橋柱穩定性					✓ (II)
		樁頂轉角					✓ (II)
		樁頭位移					✓ (II)
		基樁挫曲				✓ (II)	✓(III)
		基樁剪力				✓ (II)	✓(III)
		拉拔力				✓ (II)	✓(III)
		軸壓力				✓ (II)	✓(III)
上部結構		防落長度					✓(II)
		支承剪力			✓ (II)	✓(III)	✓(III)
		帽梁剪力				✓ (II)	✓(III)
		帽梁彎矩			✓ (II)	✓(III)	✓(III)

(II): 475 年回歸期地震　(III): 2500 年回歸期地震

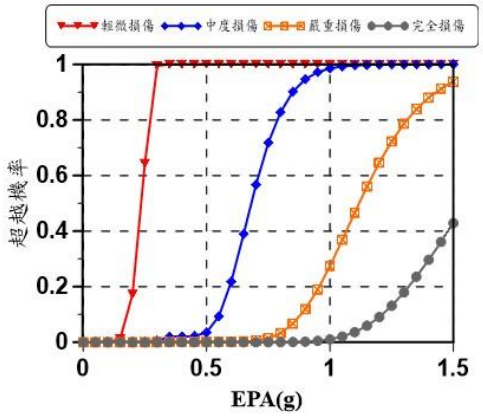
STEP 4:計算各元件、構件在各損傷等級之超越機率(續)

以1.橋柱性能為例

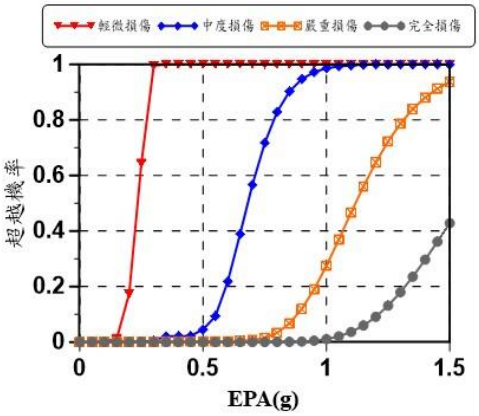
以各損傷等級下的譜位移值作為損傷等級區分的界線($\mu_{R1},\mu_{R2},\mu_{R3},\mu_{R4}$)，以側推得知的譜位移值作為一平均值($\mu_S$)，並假設界線值與譜位移皆為對數常態分佈，變異係數為0.1及0.2，將譜位移大於各損傷等級界線值的機率作為橋柱性能各損傷等級的超越機率。



STEP 5:使用蒙地卡羅及三階力矩法來結合各構件損傷等級超越機率
(以行車向為例)



蒙地卡羅模擬(MCS) -行車向



三階力矩法-行車向

3 案例分析

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式案例分析

(1) 橋梁背景

中坑高架橋位於新北市五股區觀音里，採用之設計規範為84年版，工址屬台北盆地微分區一區，並為重要橋梁。本振動單元為連續3跨橋梁，上部結構配置一根預力箱型梁，橋面寬11.5m；下部結構為單柱混凝土橋梁。

地震等級	84及89年版	49及76年版	49年版以前
第I級地震 (中度地震)	PLA	PLA	PLA
第II級地震 (設計地震)	PLB	PLC	PLC

3 案例分析

第四項-橋梁整體耐震能力評估模式案例分析

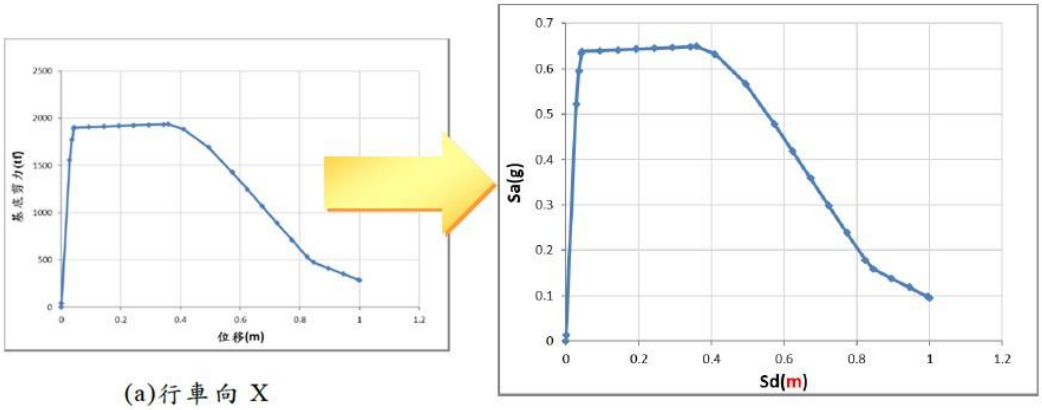
(2) 材料強度

表5-3 結構材料強度

項次	混凝土強度(kgf/cm²)
橋面板	280
基礎	245
橋台、擋土牆	245
場鑄基樁	280
橋墩	350
無筋混凝土	141
項次	降伏強度(kgf/cm²)
#10(含)以下	2800
#13(含)以上	4200
項次	降伏強度(kgf/cm²)
ASTE A572 GR.50	-

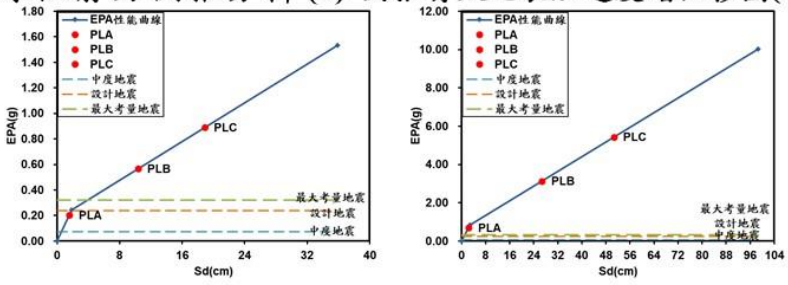
(3) 非線性靜力側推分析

(a) 側推曲線-基底剪力與位移



(a)行車向 X

(3) 非線性靜力側推分析 (c) 側推有效地表加速度譜位移圖(EPA-Sd)



行車向	Sd(cm)	Sa(g)	EPA(g)
降伏點	1.87	0.61	0.24
極限點	35.90	0.65	1.53
PLA	1.56	0.51	0.20
PLB	10.38	0.62	0.57
PLC	18.88	0.63	0.89

橫向	Sd(cm)	Sa(g)	EPA(g)
降伏點	2.83	1.81	0.83
極限點	98.56	6.22	10.02
PLA	2.36	1.51	0.69
PLB	26.76	2.91	3.13
PLC	50.69	4.01	5.43

(4) 橋梁損傷評估

(a) 橋柱耐震性能損傷定義

橋柱譜位移容量 (Sd)	輕微損傷 μ_{R2}(cm)	中度損傷 μ_{R3}(cm)	嚴重損傷 μ_{R4}(cm)	完全損傷 μ_{R5}(cm)
行車向	1.87	13.21	24.55	35.90
橫向	2.83	34.74	66.65	98.56

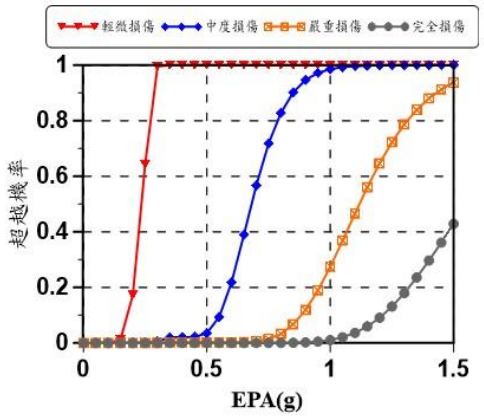
(4) 橋梁損傷評估

(b) 橋梁構件、元件容量值

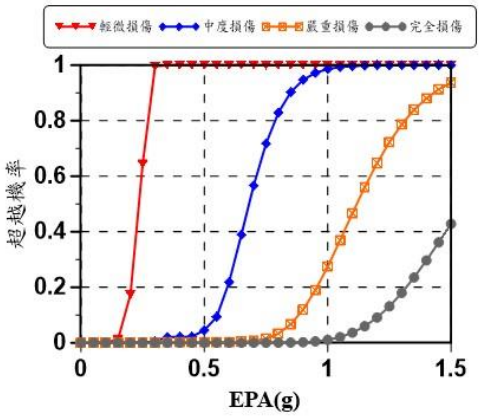
橋墩編號		防落長度 (cm)	支承剪力(tf)	帽梁剪力(tf)	帽梁彎矩(tf-m)	橋柱穩定性 (m)
AE1	行車向	95	-	-	-	0.12
AE1	橫向	95	789.47 (877.19)	-	-	0.12
AE2	行車向	95	-	-	-	0.13
AE2	橫向	95	1076.56 (1196.17)	-	-	0.13

(4) 橋梁損傷評估

(c) 橋梁整體損傷等級超越機率-行車向



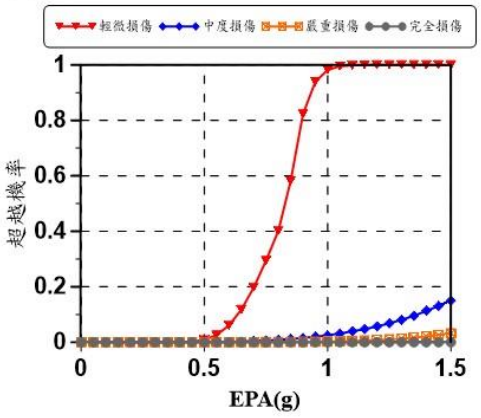
蒙地卡羅模擬(MCS) -行車向



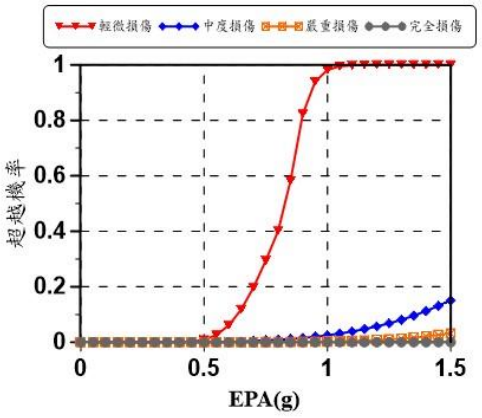
三階力矩法-行車向

(4) 橋梁損傷評估

(c) 橋梁整體損傷等級超越機率-橫向



蒙地卡羅模擬(MCS) -橫向



三階力矩法-橫向

參 執行步驟-第五項 橋梁振動檢測案例分析

1. 選取南雲大橋梁安裝兩組以上速度計同時進行橋梁多點頻率量測，藉以了解振動頻率雜訊來源與變動原因。

2. 共有兩組速度計
   第1組: 三軸速度計兩個，分別至於橋面版伸縮縫處與墩帽處
   第2組: 單軸速度計十個，分別至於兩側橋面版伸縮縫處、1/4、1/2與3/4跨處

1 橋梁多點頻率量測
第五項-橋梁振動檢測案例分析

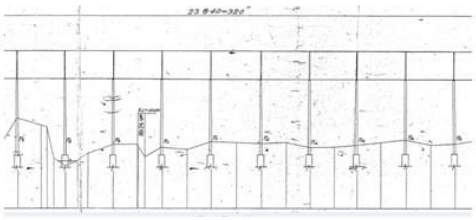
(1) 背景

計畫團隊曾對台灣12座橋梁進行橋梁震動試驗，根據試驗的結果發現現地量測的振動頻率存有變異性。
以南雲大橋為例，試驗結果最大的CV(變異係數)為0.15，這樣的變異性將減低實務的應用性。
先前試驗僅針對橋墩柱進行檢測，為深入了解先前試驗的變異性原因，本年度擬使用多個速度計同時於橋梁多點同時進行檢測，藉由結構振態資訊，釐清變異性的起源。

本年度所選取1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	2018/6/19~2018/6/20	2018/10/12~2018/10/13

(2) 試驗對象



南雲大橋墩柱9到墩柱16之立面圖

三軸速度計

南雲大橋(14號墩柱)

單軸速度計

南雲大橋試驗項目

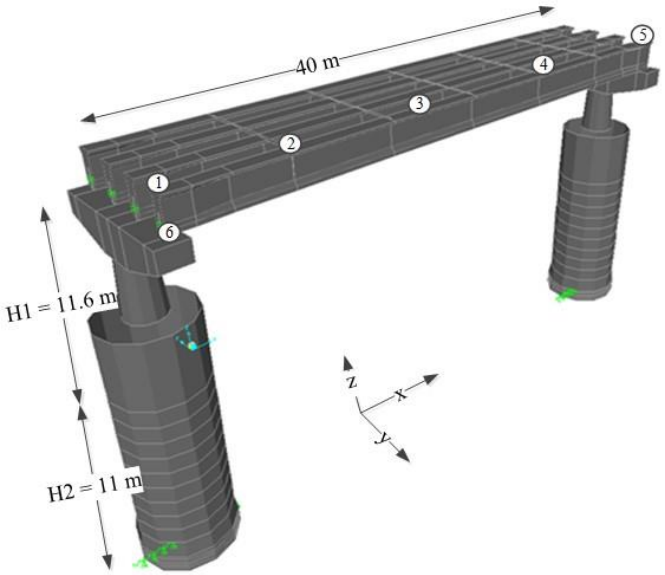
試驗方式	儀器位置	震動外力來源
無行車 有行車	橋面版伸縮縫處、橋面板1/4、1/2、3/4跨處、墩帽	無 橋上隨機車輛

1 橋梁多點頻率量測

第五項-橋梁振動檢測案例分析

儀器位置

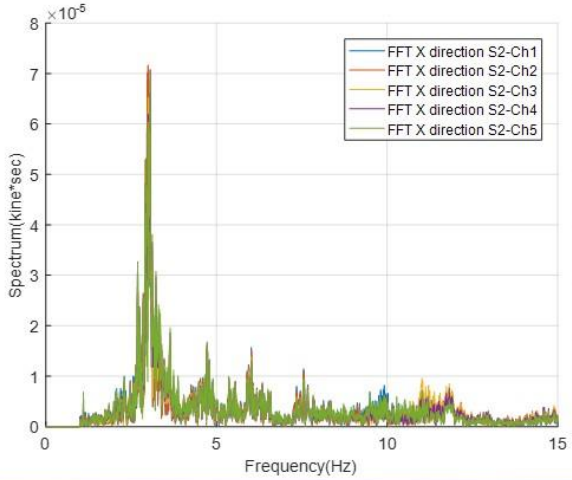
橋面版伸縮縫處、橋面板1/4、1/2、3/4跨處、墩帽



1 第1次現地試驗

第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－有車、車行方向(單軸速度計)

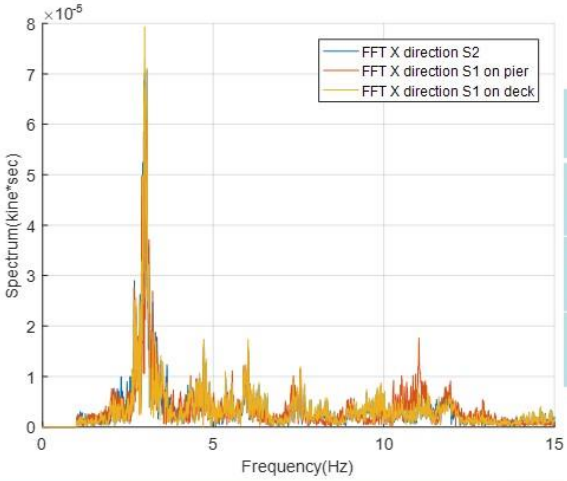


Condition	第一振態頻率
伸縮縫處 (Pier 14)	3.06
1/4跨	2.99
1/2跨	3.00
3/4跨	3.05
伸縮縫處 (Pier 15)	3.05

結果尚屬一致

1 第1次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－有車、車行方向(單軸與三軸速度計)

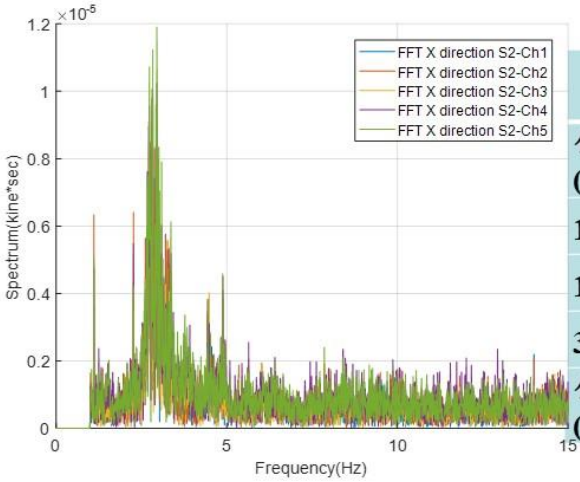


Condition	第一振態頻率
伸縮縫處單軸 (Pier 14)	3.06
墩帽處三軸 (Pier 14)	3.05
伸縮縫處三軸 (Pier 14)	2.99

結果尚屬一致

1 第1次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－無車、車行方向(單軸速度計)

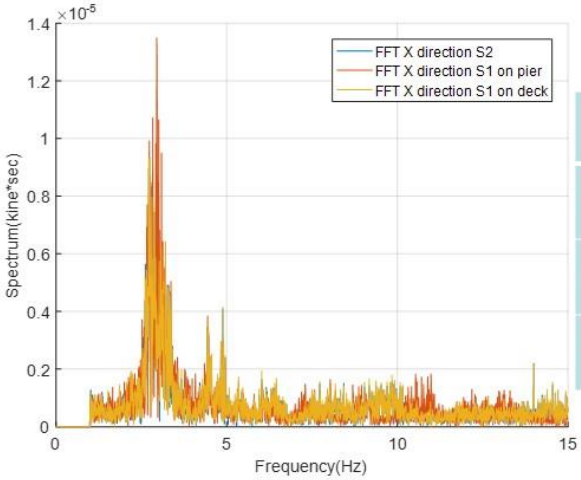


Condition	第一振態頻率
伸縮縫處 (Pier 14)	2.72
1/4跨	2.72
1/2跨	2.81
3/4跨	2.95
伸縮縫處 (Pier 15)	2.95

略有差異

1 第1次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－無車、車行方向(單軸與三軸速度計)

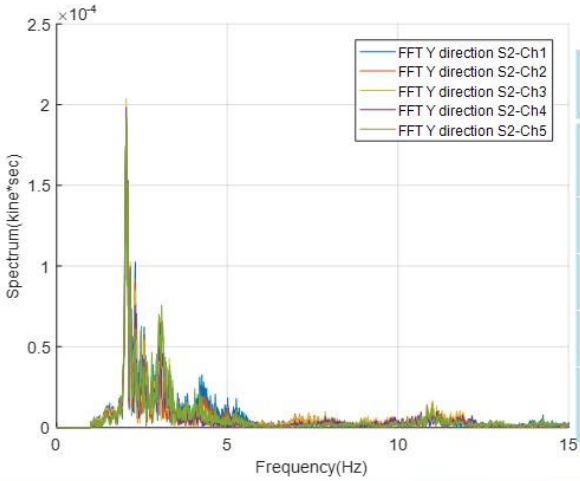


Condition	第一振態頻率
伸縮縫處單軸 (Pier 14)	2.72
墩帽處三軸 (Pier 14)	2.95
伸縮縫處三軸 (Pier 14)	2.75

略有差異

1 第1次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－有車、垂直車行方向(單軸速度計)

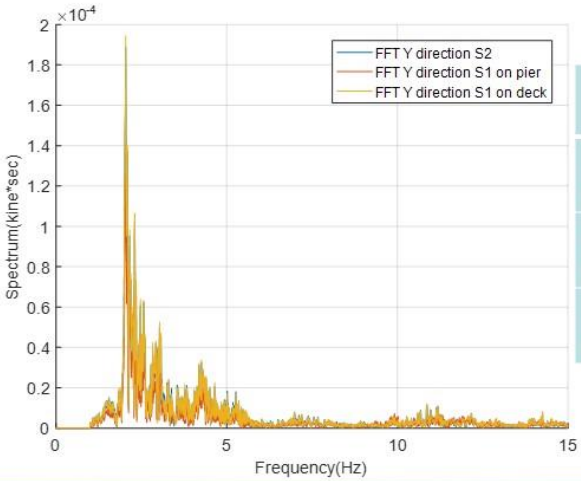


Condition	第一振態頻率
伸縮縫處 (Pier 14)	2.04
1/4跨	2.04
1/2跨	2.04
3/4跨	2.04
伸縮縫處 (Pier 15)	2.04

完全一致

1 第1次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－有車、垂直車行方向(單軸與三軸速度計)

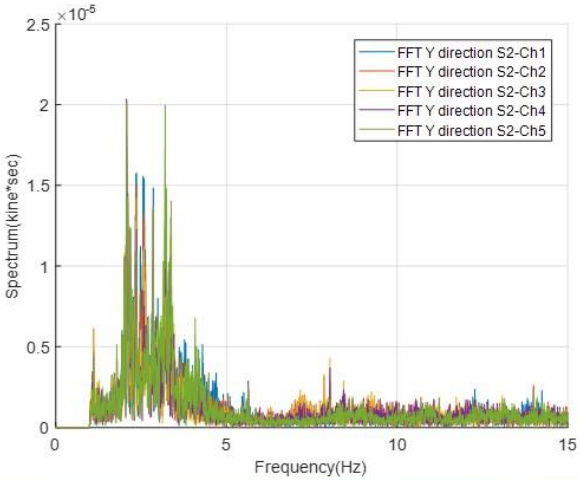


Condition	第一振態頻率
伸縮縫處單軸 (Pier 14)	2.04
墩帽處三軸 (Pier 14)	2.04
伸縮縫處三軸 (Pier 14)	2.04

完全一致

1 第1次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－無車、垂直車行方向(單軸速度計)

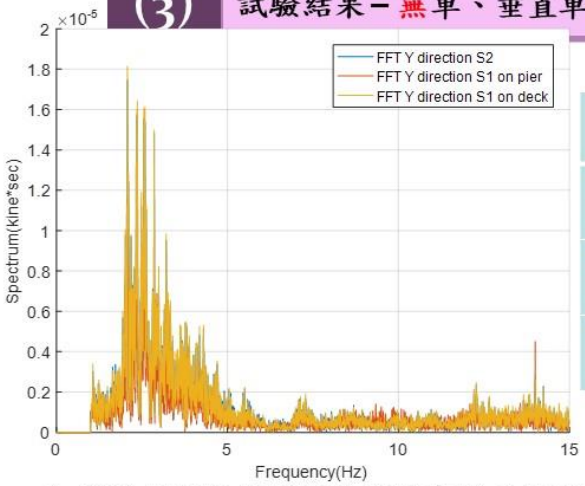


Condition	第一振態頻率
伸縮縫處 (Pier 14)	2.08
1/4跨	2.08
1/2跨	2.08
3/4跨	2.08
伸縮縫處 (Pier 15)	2.08

完全一致

1 第1次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－無車、垂直車行方向(單軸與三軸速度計)



Condition	第一振態頻率
伸縮縫處單軸 (Pier 14)	2.08
墩帽處三軸 (Pier 14)	2.08
伸縮縫處三軸 (Pier 14)	2.08

完全一致

✓ 置於墩帽與橋面版伸縮縫處的三軸速度計所量測的結果與各處一致，無論哪種儀器或量測位置，所得頻率均相當一致

1 第1次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－無車、垂直車行方向

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫處單軸 (Pier 14)	2.08	2.12	2.10	2.13	2.58
墩帽處三軸 (Pier 14)	2.08	2.12	2.81	2.13	2.58
伸縮縫處三軸 (Pier 14)	2.08	2.12	2.81	2.13	2.58

1 第1次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(4) 小結

- ✓ 各處(伸縮縫與各跨距)所量測的結果十分一致，所量得之振動頻率確為橋梁整體結構之震動特性
- ✓ 伸縮縫處橋面板與墩帽處所量得的結果十分一致，確實可以橋面板處之量測取代墩帽處之量測，可增加試驗之便利性
- ✓ 不同時間(但同一天)量測(即使使用同儀器與同位置)，各儀器量測的結果均呈現變化

第2次現地試驗(10月12晚間至13日清晨)

1 第2次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(1) 背景

- ✓ 各處(伸縮縫與各跨距)所量測的結果十分一致且橋梁為對稱結構，因此第2次試驗速度計安裝的位置減為三處(伸縮縫處、1/4跨處與1/2跨處)
- ✓ 於兩次試驗之間所進行的橋梁改善工程將通往墩柱上端的貓道拆除，基於第1次試驗得知，置於伸縮縫處橋面板與其下墩帽處的數值十分一致，因此，第2次試驗不進行墩帽處振動頻率的量測

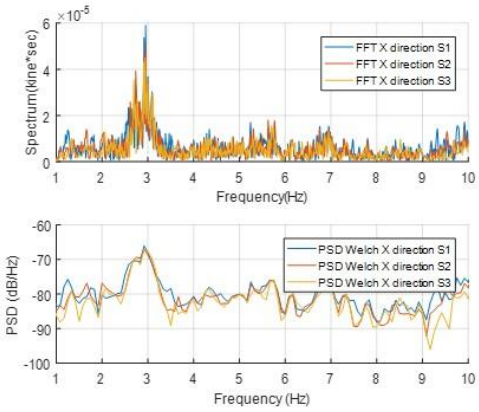
1 第2次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(2) 目的

- ✓ 找出第1次試驗的結果中，同一位置不同次量測的差異原因
  - ■ 分析: 增加Welch法(向對於FFT，增加時窗與平均的技術)
  - ■ 分析: 以結構系統識別輔助橋梁頻率的辨識
  - ■ 試驗: 除微振外，藉由強迫振動後之自由振動觀察橋梁頻率

1 第2次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－有車、車行方向(三軸速度計)



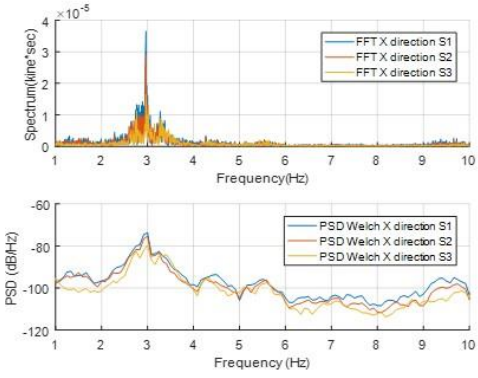
結果尚屬一致

Condition	Welch 1st mode	FFT 1st mode
伸縮縫處*	2.92	2.95
1/4跨	2.92	2.95
1/2跨	2.92	2.94

*Pier 14

1 第2次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－無車、車行方向(三軸速度計)



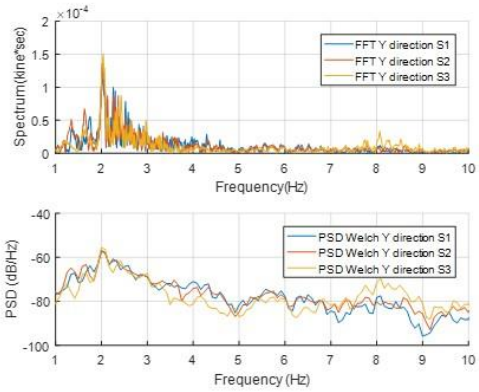
結果尚屬一致

Condition	Welch 1st mode	FFT 1st mode
伸縮縫處*	3.00	2.97
1/4跨	3.00	2.97
1/2跨	3.00	2.97

*Pier 14

1 第2次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－有車、垂直車行方向(單軸速度計)



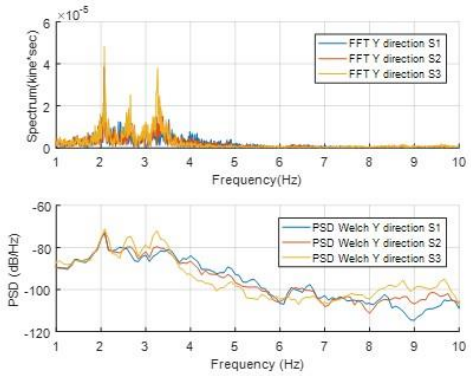
結果尚屬一致

Condition	Welch 1st mode	FFT 1st mode
伸縮縫處*	2.00	2.02
1/4跨	2.00	2.03
1/2跨	2.00	2.04

*Pier 14

1 第2次現地試驗
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(3) 試驗結果－無車、垂直車行方向(單軸速度計)



結果尚屬一致

Condition	Welch 1st mode	FFT 1st mode
伸縮縫處*	2.08	2.07
1/4跨	2.08	2.07
1/2跨	2.08	2.08

*Pier 14

1 試驗結果討論與結構系統識別

第五項-橋梁振動檢測案例分析

(1) 平行車行方向之量測結果

結果尚屬一致，最大差距6%

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫	2.72	2.91	2.94	2.77	3.06
1/4跨處	2.72	2.91	2.94	2.77	3.06
1/2跨處	2.81	2.72	2.97	2.73	3.01

2018/6/19

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫	2.97	2.83	2.82	2.88	2.95
1/4跨處	2.97	2.83	2.82	2.88	2.97
1/2跨處	2.97	2.83	2.82	2.88	2.93

2018/10/12

1 試驗結果討論與結構系統識別

第五項-橋梁振動檢測案例分析

(2) 垂直車行方向之量測結果

差距較大，稍後討論

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫	2.08	2.12	2.10	2.13	2.58
1/4跨處	2.08	2.12	2.10	2.13	2.58
1/2跨處	2.08	2.12	2.10	2.13	2.17

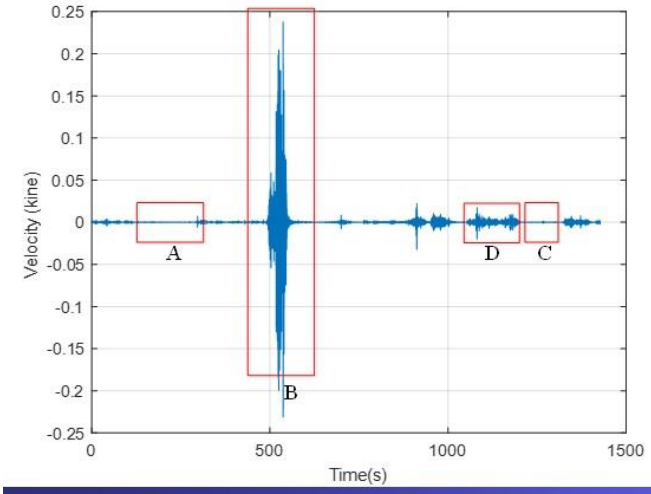
2018/6/19

Condition	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
伸縮縫	2.07	3.17	2.88	2.93	2.27
1/4跨處	2.07	3.16	2.90	2.93	2.30
1/2跨處	2.08	3.04	2.88	2.93	2.27

2018/10/12

1 試驗結果討論與結構系統識別
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(4) 討論 - 1



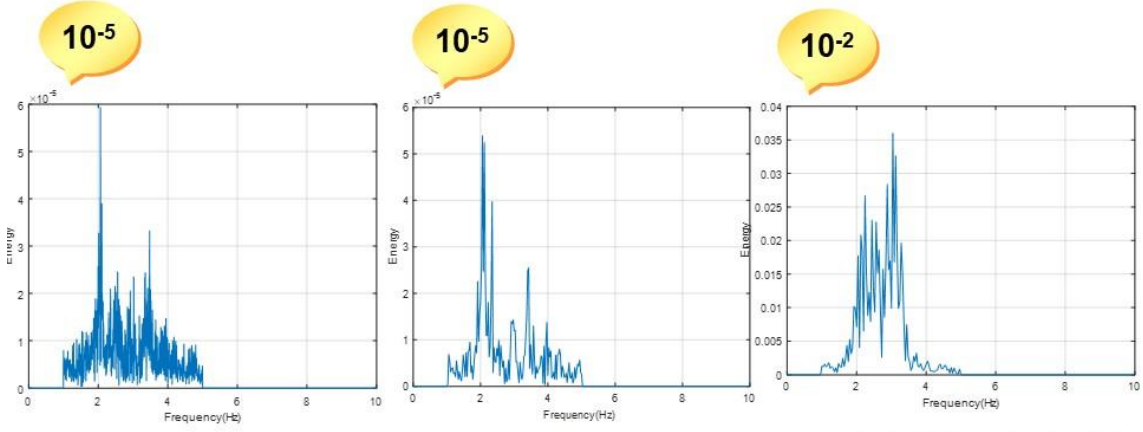
A與C: ambient振動

B: 大卡車經過

D: 小客車通過

1 試驗結果討論與結構系統識別
第五項-橋梁振動檢測案例分析

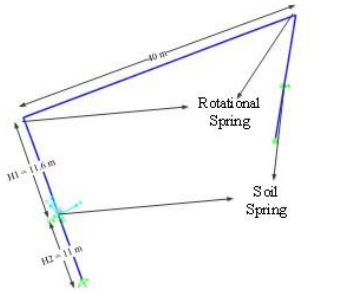
(4) 討論 - 2



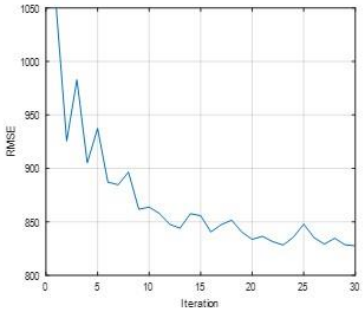
A (~2Hz) B (~2Hz) C (~3Hz, 大卡車)

1 試驗結果討論與結構系統識別
第五項-橋梁振動檢測案例分析

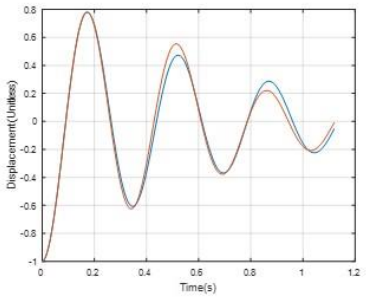
(4) 討論 - 3



系統識別時的有限元素模型



RMSE降低的情形



模擬與量測之比較
(對應頻率~3Hz)

1 試驗結果討論與結構系統識別
第五項-橋梁振動檢測案例分析

(4) 結論

(1)兩次量測期間，橋梁的振動特性沒有明顯改變

(2)FFT和Welch方法方分析結果具有相同的橋頻率內涵

(3)在沒有外力的情況下進行環境振動測試為最佳的狀況。當有汽車時，車行方向的振動將會影響垂直車行方向的量測結果

(4)PSO為系統識別的良好工具並可做為預測頻率之用。但需要對橋梁振動進行明確的輸入和輸出測量

(5)南橋大橋其車行和與垂直車行方向的第一振態頻率分別約為2.9Hz和2.05Hz

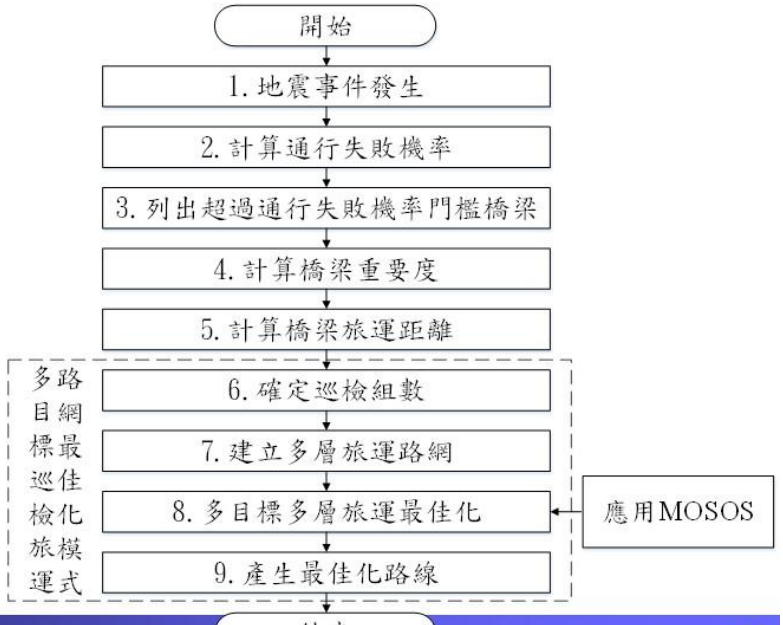
參 執行步驟-第六項
災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進

1 精進橋梁災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式

2 建置巡查與檢測路徑規劃模組

1 精進橋梁災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式
第六項-災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進

所建立「多目標地震災後橋梁特別巡查與檢測旅運路網規劃模式」如右圖。



1 建置巡查與檢測路徑規劃模組

第六項-災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進

所建置巡查路徑規劃模組，如下所示，系統可依據不同工程處之工務段進行查詢。

多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網

工程處	二區	工務段	信義
考量因子	☑ 旅運時間 ☑ 通行失敗機率 ☑ 橋梁重要度		
巡檢組數	3	巡檢橋數	43

列出路線規劃方案

橋名	所在鄉鎮	路線	橋頭里程(K)	橋頭里程(M)	橋尾里程(K)	橋尾里程(M)	參考地標	地圖
風坑橋	水里	臺16線	13	373	13	393	無	橋梁位置
天水橋	水里	臺16線	13	833	13	844	無	橋梁位置
清山橋	水里	臺16線	14	46	14	57	無	橋梁位置
新城橋-台16線	水里	臺16線	14	293	14	314	無	橋梁位置
中山橋	水里	臺16線	15	361	15	445	玉山國家公園管理處	橋梁位置
社子橋	水里	臺16線	17	6	17	16	水里外環圓環	橋梁位置
圳頭橋	水里	臺16線	18	862	18	869	無	橋梁位置
松柏橋	水里	臺16線	23	970	24	0	不詳	橋梁位置
民和橋	水里	臺16線	26	742	26	762.6	無	橋梁位置
無名橋	信義	臺16線	29	912	29	927	無	橋梁位置
頂平一號橋	魚池	臺21線	72	813	72	853	不詳	橋梁位置
頂平二號橋	魚池	臺21線	73	263	73	303	不詳	橋梁位置
頂平三號橋	魚池	臺21線	74	151	74	226	不詳	橋梁位置
頂平四號橋	水里	臺21線	74	574	74	609	不詳	橋梁位置
新山橋	水里	臺21線	80	836	80	871.2	不詳	橋梁位置
鄰平橋	水里	臺21線	81	922	81	942	不詳	橋梁位置
新鄰橋	水里	臺21線	82	251	82	281	無	橋梁位置
鄰坑口橋	水里	臺21線	82	391	82	403	無	橋梁位置
龍神橋	水里	臺21線	78	648	78	893	不詳	橋梁位置
鄰坑橋	水里	臺21線	83	165	83	177	無	橋梁位置
上安橋	水里	臺21線	84	369	84	399	無	橋梁位置
鄰坑溪橋	水里	臺21線	86	437	86	443	無	橋梁位置
鄰安橋	水里	臺21線	83	456	83	491	無	橋梁位置
新開橋	信義	臺21線	89	261	89	311	無	橋梁位置

1 建置巡查與檢測路徑規劃模組

第六項-災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進

可分別以

1.旅運時間

2.通行失敗機率

3.橋梁重要度

進行多目標的組合排序。

多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網

工程處	二區	工務段	信義
考量因子	☑ 旅運時間 ☑ 通行失敗機率 ☑ 橋梁重要度		
巡檢組數	3	巡檢橋數	43

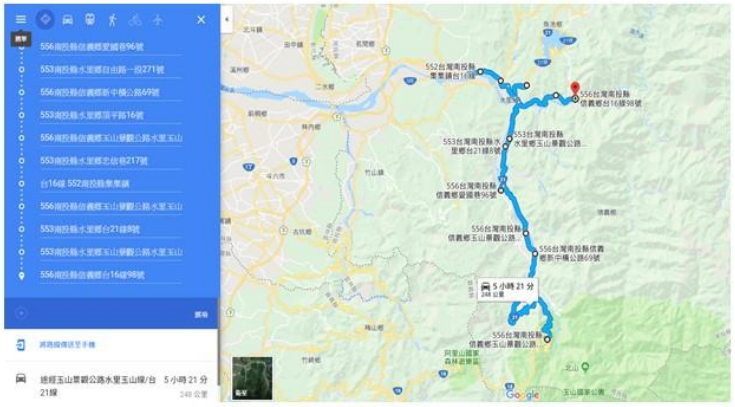
重新搜尋

方案	第1組	第2組	第3組	旅運時間	通行失敗機率	橋梁重要度
1	工務段→中山橋→望美橋→頂平三號橋→筆石橋→民和橋→清山橋→大勇橋→鄰安橋→新鄰橋→無名橋 【路線規劃】	工務段→風坑橋→新將橋→鄰平橋→頂平四號橋→信義橋-台21線→新開橋→松柏橋→頂平二號橋→豐立橋→鄰坑橋→沙里凍橋→鄰坑溪橋→安玉橋→圳頭橋→頂平一號橋→新山橋→神和橋→玉泉橋→上安橋→龍神橋 【路線規劃】	工務段→九層橋→五平橋→望鄰橋→社子橋→天水橋→新城橋-台16線→上和隆橋→專坑橋→鄰坑口橋→松泉橋→陳有量溪橋→民和橋→筆坪橋 【路線規劃】	1512	12519	82.415594107551
2	工務段→鄰坑溪橋→望美橋→專坑橋→豐立橋→五平橋→清山橋→大勇橋→安玉橋→天水橋 【路線規劃】	工務段→松泉橋→社子橋→頂平一號橋→鄰平橋→頂平四號橋→信義橋-台21線→鄰坑口橋→上和隆橋→九層橋→頂平二號橋→鄰坑橋→松柏橋→中山橋→鄰安橋→筆坪橋→新鄰橋→陳有量溪橋→沙里凍橋→玉泉橋→上安橋 【路線規劃】	工務段→新山橋→望鄰橋→民和橋→龍神橋→神和橋→頂平三號橋→筆石橋→民和橋→新城橋-台16線→圳頭橋→風坑橋→無名橋→新開橋 【路線規劃】	1512	12519	82.415594107551
3	工務段→松柏橋→新開橋→清山橋→豐立橋→民和橋→鄰安橋→風坑橋→頂平二號橋→九層橋→無名橋→專坑橋 【路線規劃】	工務段→陳有蘭溪橋→玉泉橋→上和隆橋→新山橋→圳頭橋→鄰坑溪橋→鄰平橋→新城橋-台16線→玉平橋→大勇橋→中山橋→鄰坑口橋→信義橋-台21線→頂平一號橋→上安橋→沙里凍橋→鄰坑橋 【路線規劃】	工務段→社子橋→龍神橋→安玉橋→頂平三號橋→望美橋→筆石橋→天水橋→民和橋→頂平四號橋→望鄰橋→鄰鄰橋→松泉橋→筆坪橋→新將橋→神和橋 【路線規劃】	1752	12025	87.10860533693888
4	工務段→玉泉橋→社子橋→望鄰橋→筆坪橋→松泉橋→民和橋→信義橋-台21線→新城橋-台16線→豐立橋 【路線規劃】	工務段→鄰平橋→九層橋→大勇橋→沙里凍橋→上和隆橋→新山橋→望美橋→中山橋→專坑橋→筆石橋→龍神橋→鄰坑溪橋→陳有量溪橋→鄰安橋→鄰坑口橋→風坑橋→松柏橋→鄰坑橋→無名橋	工務段→上安橋→五平橋→安玉橋→頂平三號橋→頂平二號橋→民和橋→神和橋→圳頭橋→天水橋→新鄰橋→新將橋→頂平四號橋→清山橋→頂平一號橋	1984	11986	88.0686103303062

不同巡查小組巡查與檢測路線

1 建置巡查與檢測路徑規劃模組
第六項-災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進

方案一為例，第一組巡查小組從工務段出發後分別巡查中山橋、望美橋、頂平三號橋、筆石橋、民和橋、清山橋、大勇橋、郡安橋、新郡橋、無名橋等，路線如右圖。



第一組路線規畫巡查路線

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:鋼結構橋梁維護分析模式精進		■	※	■	■	■				
期中報告				■	※					
第四項:橋梁整體耐震能力評估模式案例分析			■	■	■	■	■	※		
第五項:橋梁振動檢測案例分析		■	■	■	■	■	■	■	■	■
第六項:災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式精進				■	■	■	■	■	■	■
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 結論與建議(1/3)

結論:

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。

鋼結構橋梁維護模式擴展至群橋風險管理及維護策略，建置公路總局轄管橋梁(含RC橋及鋼橋)風險分析資料庫及風險評估與查詢功能模組，提升適用性。

透過與公路總局1個養護工程處訪談與建議回饋作為橋梁維護管理模組修正參考，加強實用性。

伍 結論與建議(2/3)

結論:

橋梁整體耐震能力評估加入上部結構耐震能力評估指標，進行1座整體橋梁耐震能力側推案例，擴充整體橋梁耐震能力評估案例。

增加現地量測樣本數，選取1座橋梁安裝2組以上速度計同時進行橋梁多點頻率梁測，驗證模式。
建議沒有外力情況下進行環境振動測試為最佳狀況。

精進災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式與建置巡查路徑規劃模組，可建議合適的巡查路線，降低巡查時繞路之可能性。

伍 結論與建議(3/3)

建議:

仍受限部分外部系統資料來源取得之限制，如TBMS系統匯出檢測資料時仍需有手動匯出表單之程序，建議TBMS未來可提供如政府公開open data資料介面，提升橋梁資料引用之整合性與自動化性能。

災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式已可獨立運作，如需完全整合至公路總局之BOBE系統中，仍需確認傳遞資料欄位並與BOBE通報介面進一步整合。

簡報完畢

敬請指教