

115-009-7E09
MOTC-IOT-114-H1CA001b

橋梁箱內檢測技術探討 與後續研發評估



交通部運輸研究所

中華民國 115 年 3 月

115-009-7E09
MOTC-IOT-114-H1CA001b

橋梁箱內檢測技術探討 與後續研發評估

著 者：鄭登鍵、胡啟文

交通部運輸研究所

中華民國 115 年 3 月

GPN : 1011500170

定價 200 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估/ 鄭登鍵,
胡啟文著.-- 初版.-- 臺北市:交通部運輸研究所,
民 115.03
面; 公分
ISBN 978-986-531-748-5(平裝)

1.CST: 橋梁工程 2.CST: 檢測 3.CST: 遙控飛機
441.8 115001319

橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

著 者: 鄭登鍵、胡啟文
出版機關: 交通部運輸研究所
地 址: 105004 臺北市松山區敦化北路 240 號
網 址: www.iot.gov.tw (中文版>數位典藏>本所出版品)
電 話: (04)2658-7200
出版年月: 中華民國 115 年 3 月
印 刷 者:
版(刷)次冊數: 初版一刷 46 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所網站
定 價: 200 元
展 售 處:
交通部運輸研究所運輸科技及資訊組•電話: (02)2349-6789
國家書店松江門市: 104472 臺北市中山區松江路 209 號•電話: (02)2518-0207
五南文化廣場: 400002 臺中市中區中山路 6 號•電話: (04)2226-0330

GPN : 1011500170 ISBN : 978-986-531-748-5 (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分內容者, 須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-531-748-5 (平裝)	政府出版品統一編號 1011500170	運輸研究所出版品編號 115-009-7E09	計畫編號 MOTC-IOT-114-H1CA001b
本所主辦單位：運輸技術研究中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：鄭登鍵 研究人員：胡啟文 聯絡電話：(04)2658-7200 傳真號碼：(04)2657-1329			研究期間 自 114 年 1 月 至 114 年 12 月
關鍵詞：橋梁檢測、局限空間、智慧檢測、無人飛行載具			
摘要： 我國車行橋梁中，箱型橋約有 3,200 座，由於箱型梁內部構件狀況無法透過外部目視確認，箱內檢測為確保橋梁結構安全之必要工作。然而箱梁內部空間狹窄、通風不良、幽暗，為高風險之局限空間，傳統人工目視檢測因此須嚴格遵循《職業安全衛生法》等法規，導致人力及成本提高，且目視檢測高度依賴人員經驗，數據客觀性與一致性不足。 本計畫旨在彙整橋梁箱內檢測實務所面臨之困難與技術瓶頸，初步探討研發輔助工具之可行性，並研提後續研發方向。研究分析無人機(UAV)、地面/履帶式機器人、軌道式攝影機及穿戴式裝置等輔助系統之技術可行性與應用潛力。結論指出，導入此類智慧檢測系統具備高度必要性與可行性，能夠有效降低檢測風險，並顯著提升檢測效率與數據品質。核心技術挑戰在於克服無 GPS、缺乏環境特徵的箱內環境，實現高穩健性自主導航與同步定位及製圖(SLAM)，爰建議未來應聚焦研發主動式 SLAM 算法，並結合 AI 影像辨識技術，實現對損傷的精確量化與空間註記，預期研發成果可大幅降低人員進入局限空間之安全風險，降低橋梁長期維護預算，並提升橋梁檢測品質與效率，進而提升橋梁通行安全。			
研究成果效益： 1. 完成橋梁箱梁內部檢測問題與技術彙整，歸納實務面臨之困難，為後續研發奠定基礎。 2. 研提可行之解決方案，初步評估工具開發效益與可行性。 3. 預期輔助工具可實質上降低人員安全風險，並大幅提升檢測品質與效率。			
提供應用情形： 本研究可提供中央(內政部國土管理署、交通部高速公路局、公路局等)、地方(縣市政府)橋梁維護管理機關，以及實際執行橋梁檢測之顧問公司或廠商，後續執行箱型橋梁定期檢測之參考。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
115 年 3 月	188	200	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。
備註：本計畫之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Investigation of Inspection Technologies for Bridge Box Girders and Evaluation of Subsequent R&D			
ISBN(OR ISSN) 978-986-531-748-5 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011500170	IOT SERIAL NUMBER 115-009-7E09	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-114- H1CA001b
DIVISION: Transportation Technology Research Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Teng-Chien Cheng PROJECT STAFF: Chi-Wen Hu PHONE: (04)2658-7200 FAX: (04)2657-1329			PROJECT PERIOD FROM January 2025 TO December 2025
KEY WORDS: Bridge inspection, confined space inspection, intelligent inspection, UAV			
<p>ABSTRACT:</p> <p>Taiwan currently has approximately 3,200 box girder vehicle bridges. Internal inspection is essential for ensuring bridge structural safety because the condition of internal components cannot be visually confirmed from the exterior. However, the interior space of the box girder is narrow, poorly ventilated, and dark, classifying it as a high-risk confined space. Consequently, traditional manual visual inspection must strictly comply with regulations such as the Occupational Safety and Health Act, which leads to increased manpower requirements and higher costs. Furthermore, visual inspection heavily relies on personnel experience, resulting in insufficient data objectivity and consistency.</p> <p>This project aims to compile the practical difficulties and technical bottlenecks encountered in bridge box interior inspection, preliminarily explore the feasibility of developing auxiliary tools, and propose subsequent R&D directions. The study analyzed the technical feasibility and application potential of auxiliary systems, including Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), ground/tracked robots, rail-mounted cameras, and wearable devices. The conclusion indicates that the introduction of such smart inspection systems is highly necessary and feasible, as it can effectively reduce inspection risks and significantly enhance inspection efficiency and data quality. The core technical challenge lies in overcoming the GPS-denied, feature-lacking box interior environment to achieve robust autonomous navigation and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). Therefore, it is recommended that future R&D focus on developing active SLAM algorithms and integrating AI image recognition technology to achieve precise damage quantification and spatial annotation. The expected R&D outcomes can substantially reduce the safety risks for personnel entering confined spaces, lower long-term bridge maintenance budgets, and enhance bridge inspection quality and efficiency, thereby improving bridge traffic safety.</p> <p>Research Outcomes and Benefits:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Completed the compilation of problems and technologies related to bridge box girder interior inspection, outlining practical difficulties, thereby laying the foundation for subsequent research and development. 2. Proposed feasible solutions and preliminarily assessed the benefits and feasibility of tool development. 3. Expected auxiliary tools can substantially reduce personnel safety risks and significantly improve inspection quality and efficiency. <p>Application Scenarios:</p> <p>This study serves as a practical reference for the subsequent execution of periodic inspections for box girder bridges. It is intended for central government authorities (such as the National Land Management Agency of the Ministry of the Interior, and the Bureau of Highpower/Freeways and Highway Bureau of the Ministry of Transportation and Communications), local governments, and the engineering consultancy firms or contractors responsible for bridge inspections.</p>			
DATE OF PUBLICATION Mar. 2026	NUMBER OF PAGES 188	PRICE 200	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目 錄	III
圖目錄	VII
表目錄	IX
第一章 緒論.....	1-1
1.1 研究緣起.....	1-1
1.2 研究目的.....	1-4
1.3 研究架構及工作項目.....	1-5
第二章 文獻回顧	2-1
2.1 國內外橋梁箱梁內部檢測技術相關研究	2-1
2.2 箱型梁內部檢測技術與工具發展歷程	2-3
2.2.1 傳統人員目視檢測技術.....	2-3
2.2.2 局限空間作業之職業安全與法規	2-4
2.2.3 檢測技術與工具的現代化發展	2-5
2.2.3.1 智慧輔助設備	2-7
2.2.3.2 檢測人員套件	2-9
2.2.3.3 檢測數據的數位化與人工智慧整合	2-10
2.3 新型輔助工具之限制與挑戰	2-10
2.3.1 無人機應用於箱內檢測技術瓶頸	2-10
2.3.2 機器人自主導航(SLAM)的深層技術瓶頸.....	2-12
2.4 小結.....	2-13

第三章 國內橋梁箱梁型式與檢測問題分析	3-1
3.1 國內橋梁箱梁型式分類	3-1
3.1.1 依結構使用材料與施工方法分類	3-2
3.1.2 依幾何形狀及數量分類.....	3-7
3.1.3 依結構型式分類.....	3-8
3.1.4 依維護管理分類.....	3-13
3.2 箱型梁檢測模式.....	3-14
3.2.1 箱型梁內部檢測作業流程.....	3-15
3.2.2 箱型橋梁內部檢測常見劣化與缺失	3-19
3.2.2.1 鋼筋混凝土箱梁內部常見劣化與缺失.....	3-19
3.2.2.2 鋼箱梁內部及其他箱梁綜合常見劣化與缺失.....	3-20
3.3 國內橋梁箱梁內部檢測現況與挑戰分析	3-23
3.3.1 國內橋梁維護管理機制與傳統檢測範疇	3-23
3.3.2 箱梁結構的特殊性與檢測作業挑戰	3-23
3.4 小結.....	3-26
第四章 橋檢實務現況調查與訪談	4-1
4.1 訪談對象與調查方法.....	4-1
4.1.1 橋梁管理養護單位訪談.....	4-2
4.1.2 橋梁檢測作業團隊訪談.....	4-3
4.2 橋梁檢測實務現況訪談.....	4-4
4.2.1 高速公路局大甲工務段.....	4-4
4.2.2 黎明工程顧問股份有限公司.....	4-9
4.3 現場觀摩及操作觀察分析	4-15
4.3.1 台 74 線(更生巷~松竹路高架橋)PC 箱梁現地觀摩..	4-15
4.3.2 南投縣南投市軍功橋鋼箱梁現地觀摩	4-23

4.4 小結.....	4-33
第五章 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估	5-1
5.1 現行技術可行性分析.....	5-1
5.1.1 無人機(UAV)系統	5-1
5.1.2 地面/履帶式機器人系統	5-7
5.1.3 軌道式攝影機系統.....	5-9
5.1.4 穿戴式裝置.....	5-11
5.1.5 檢測輔助工具之技術與應用潛力研析	5-14
5.2 橋檢輔助工具研發評估	5-14
5.2.1 核心技術.....	5-14
5.2.2 輔助工具與傳統人工檢測的效率與風險	5-15
5.2.3 成本效益分析.....	5-16
5.2.4 在地化應用情境分析.....	5-16
5.3 箱梁內部檢測綜合解決方案與研發藍圖	5-17
第六章 結論與建議	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-2
6.3 研究成果與效益.....	6-2
6.4 提供應用情形.....	6-3
參考文獻.....	參-1
附錄一 專家學者座談會會議紀錄	附錄 1-1
附錄二 第 1 次工作會議紀要	附錄 2-1
附錄三 第 2 次工作會議紀要	附錄 3-1
附錄四 第 3 次工作會議紀要	附錄 4-1
附錄五 期末審查意見及辦理情形說明表	附錄 5-1

附錄六 簡報資料 附錄 6-1

圖 目 錄

圖 1.1 橋檢人員搭乘船艇進入橋梁梁底目視檢測	1-2
圖 1.2 橋檢人員攀爬於鋼箱梁內部進行目視檢測	1-3
圖 2.1 橋梁檢測車及高空作業車	2-4
圖 2.2 橋梁檢測智慧檢測技術	2-6
圖 2.3 橋梁檢測智慧型輔助設備	2-6
圖 2.4 Flyability Elios 無人機.....	2-7
圖 2.5 軌道攝影機	2-8
圖 2.6 鋼索攝影機	2-9
圖 3.1 箱型橋數量統計圖	3-2
圖 3.2 鋼箱梁結構示意圖	3-6
圖 3.3 車型橋梁統計系統橋梁結構型式分類示意圖	3-9
圖 3.4 國道 6 號愛蘭脊背橋	3-11
圖 3.5 國道 3 號高屏溪斜張橋	3-12
圖 3.6 關渡大橋	3-13
圖 3.7 箱型橋梁內部檢測流程圖	3-16
圖 3.8 箱型橋梁內部檢測搭設施工架	3-17
圖 4.1 高速公路局大甲工務段訪談	4-2
圖 4.2 鋼箱梁現場觀摩及訪談	4-3
圖 4.3 檢測人員以工作爬梯進出箱梁	4-16
圖 4.4 預力混凝土(PC)箱梁內部.....	4-17
圖 4.5 壁面混凝土蜂窩現象	4-18
圖 4.6 滲水水痕及鋼筋突出	4-19
圖 4.7 箱梁內未拆除之模板	4-19
圖 4.8 橋梁之防落設施	4-20

圖 4.9 箱梁內橫向之混凝土梁	4-21
圖 4.10 橫向混凝土梁上之裂縫標記	4-21
圖 4.11 人員穿越箱與箱間之人孔通道	4-22
圖 4.12 南投市軍功橋橋梁外觀	4-24
圖 4.13 進入軍功橋鋼箱梁內部之人員步行路線	4-25
圖 4.14 人員進入鋼箱梁之橋側人孔	4-26
圖 4.15 軍功橋鋼箱梁之內部高度漸變示意圖	4-27
圖 4.16 鋼箱梁前段高度較低人員需半蹲彎腰移動	4-28
圖 4.17 鋼箱梁高度漸高人員可直立移動	4-29
圖 4.18 施工預留孔周圍塗裝破損生鏽	4-30
圖 4.19 螺栓未斷尾	4-31
圖 4.20 鋼箱連接處有螞蟻群聚	4-31
圖 4.21 鋼箱梁內人行通道開口位置一致且連貫	4-32
圖 5.1 本所橋梁劣化 AI 影像辨識系統裂縫偵測成果	5-2

表 目 錄

表 1-1 全國橋梁使用狀態統計表	1-1
表 1-2 全國橋梁橋齡統計表	1-1
表 2-1 局限空間非導航環境下 SLAM 挑戰與優化對策.....	2-13
表 3-1 鋼筋混凝土箱型梁的特點與優勢	3-3
表 3-2 預力混凝土箱型梁的特點與優勢	3-4
表 3-3 鋼筋混凝土箱梁與預力混凝土箱梁之差異	3-5
表 3-4 鋼構造箱型梁的特點與優勢	3-6
表 3-5 市區箱型梁橋人孔進出常見狀況及處理方案	3-18
表 3-6 混凝土箱梁內部常見問題	3-20
表 3-7 鋼箱梁內部常見問題(螺栓)	3-21
表 3-8 鋼箱梁內部常見問題(銲道)	3-21
表 3-9 鋼箱梁內部常見問題(鋼板)	3-22
表 3-10 箱型梁內部其他常見問題	3-22
表 3-11 局限空間作業法規要求與技術輔助工具對應機制.....	3-25
表 4-1 114 年訪談及現地觀摩列表	4-1
表 4-2 高公局大甲工務段橋梁箱型梁內部檢測實務現況及挑戰....	4-8
表 4-3 橋檢從業人員橋梁箱型梁內部檢測實務現況及挑戰.....	4-13
表 4-4 更生巷~松竹路高架橋基本資料	4-15
表 4-5 軍功橋(東向線)基本資料	4-23
表 5-1 UAV 箱梁內部技術挑戰解決對策	5-5
表 5-2 箱梁內部檢測輔助工具技術特性比較	5-14
表 5-3 箱梁內部檢測綜合解決方案與策略	5-17

第一章 緒論

1.1 研究緣起

橋梁多為由鋼構、鋼筋及混凝土組成的構造物，會隨著氣候及環境因素的交替作用產生老舊劣化現象，因此需要定期巡檢並適時維護。依據「全國橋梁統計資訊系統」^[1]的統計資料(如表 1-1)，截至 114 年，全國正常使用與維修中之橋梁將近 2 萬 7,000 座。橋梁維護管理工作仰賴國內各級橋梁管理單位落實執行，而橋梁檢測工作直接攸關民眾行的安全，爰橋梁檢測工作是否確實、檢測品質的好壞極為重要且關鍵。

表 1-1 全國橋梁使用狀態統計表

橋梁類別	所有橋梁		鋼索型橋梁	
	使用中	停用	使用中	停用
車行橋梁	23,019	35	182	2
鐵道橋梁	1,501	73	5	0
人行天橋	1,840	79	108	21
小計	26,360	187	295	23
合計	26,547		318	

資料來源：全國橋梁統計資訊系統

國內車行橋梁主要由交通部公路局、高速公路局及各縣市政府負責維護管理，依據統計(如表 1-2)國內橋梁橋齡在 30 年以上的橋梁(含橋齡不詳)約 1 萬 5,000 座佔總數的 50%，反映出我國大部分橋梁正逐漸邁入老舊橋梁的階段，為了維持橋梁的服務功能與結構安全，老舊橋梁的管理與維護是不可避免的重要議題。

表 1-2 全國橋梁橋齡統計表

橋梁類別	所有橋梁							鋼索型橋梁						
	<2 年	2~10	11~20	21~30	31~40	>40	不詳	<2 年	2~10	11~20	21~30	31~40	>40	不詳
車行橋梁	77	1,324	2,868	5,743	4,124	3,525	5,393	2	47	87	35	4	5	4
鐵道橋梁	11	240	169	352	303	411	88	0	3	2	0	0	0	0
人行天橋	20	199	292	173	73	70	1,092	0	16	43	12	12	5	41
小計	108	1,763	3,329	6,268	4,500	4,006	6,573	2	66	132	47	16	10	45
合計	26,547							318						

資料來源：全國橋梁統計資訊系統

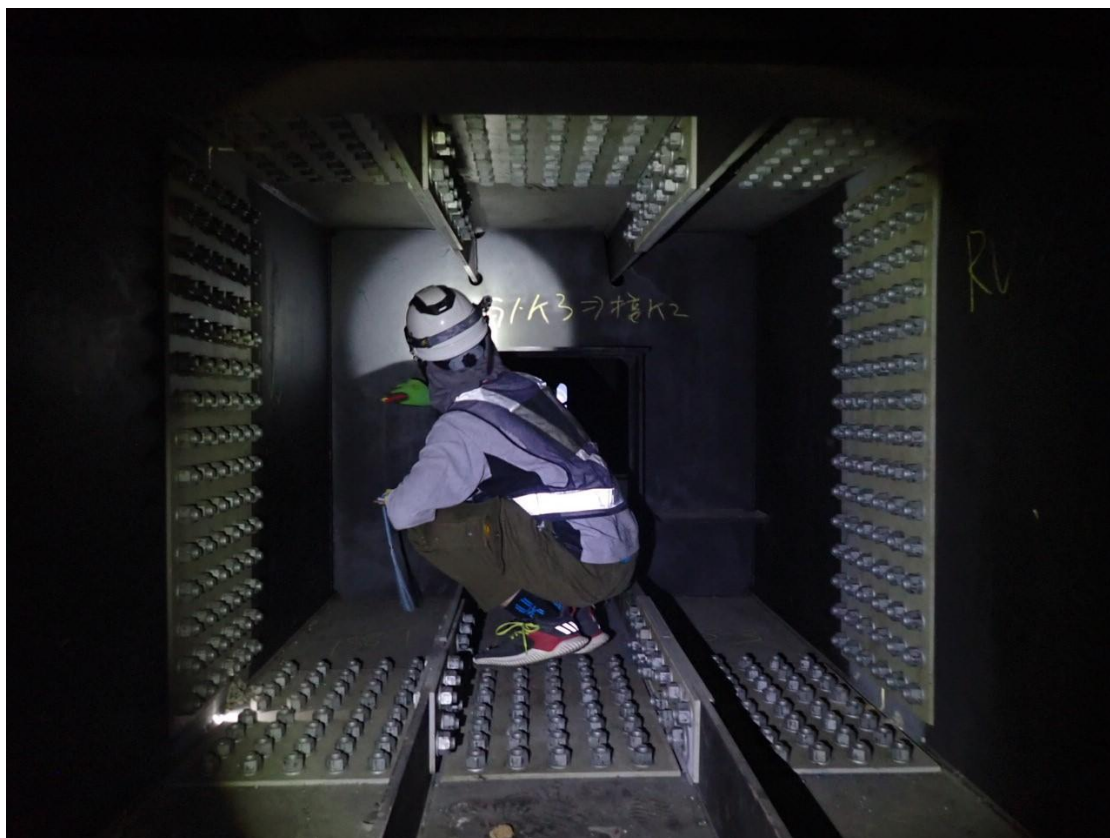
依照《公路橋梁檢測及補強規範》^[2]之規定，橋梁檢測分為定期檢測、特別檢測與詳細檢測 3 類，其中定期檢測是為了掌握橋梁結構的健全度，並及早發現損傷劣化及其原因，通常以 2 年為原則進行全面性檢測，但在特殊情況下間隔不得超過 4 年。檢測方式主要採直接目視或間接目視檢測，檢測人員通常需徒步儘可能接近待檢測構件，或必要時搭乘輔助載具(如橋梁檢測車、高空作業車、船舶等，如圖 1.1 所示)，或使用其他觀測、量測設備(如望遠鏡、高解析度相機、無人遙控載具、工業內視鏡)取得相關資訊，藉此判斷橋梁構件是否有劣化或異常情況。



圖 1.1 橋檢人員搭乘船艇進入橋梁梁底目視檢測

在實務作業中，橋梁檢測常使用的輔助工具有橋梁檢測車、高空作業車，以及近年投入使用的無人飛行載具(UAV)等。然而，這些工具皆有其適用環境條件及限制，例如，橋檢車適用於橋下淨高 3 公尺以上，且需將人員搭乘於吊籃中，由橋面下伸至橋梁底部進行目視檢測；高空作業車則適用於非跨水橋，且橋下空間須有吊車停放及作業空間；UAV 做為新興橋檢輔助工具，在橋梁外部檢測方面發展迅速，但目前仍面臨

續航力不足、抗風能力不足、失控墜落風險、影像解析度有限、橋下光線不足、橋下無 GPS 訊號及逆光拍攝等不利因素待克服，爰橋檢作業中難以接近或環境因素無法使用輔助工具協助進行檢測之橋梁(如梁底狹小空間、箱梁內部檢測等，如圖 1.2 所示)，實務作業中還是依靠人工為主，以步行涉水或攀爬進入橋梁人孔，以直接目視之方式執行橋檢工作。



資料來源：<https://reurl.cc/4bQlaY>

圖 1.2 橋檢人員攀爬於鋼箱梁內部進行目視檢測

根據統計，我國約 2 萬 3,000 座車行橋梁中，箱型橋(主梁為箱型梁)有 3,288 座，約佔車行橋梁總數 14%。高速公路局規定，轄管橋梁的箱型梁內部檢測作業，則規定每 3 年至少辦理 1 次。本計畫為改善橋檢實務問題，提升我國橋梁檢測之品質及效率，依據本所 113 年《公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣》^[3]計畫，彙整橋檢實務問題與設備需求，認為投入研發箱型橋梁內部檢測輔助工具有其必要性，透過分析目前相關領域產業發展概況，應用於箱型橋梁之

檢測工具發展技術較少，具有良好的技術發展前景。然而，相較於橋梁外部構件檢測，箱梁內部檢測因環境特性面臨以下困難和職業安全風險：

1.箱內環境條件惡劣

箱涵內部空間狹窄，不易通風，白天可能過熱，且構件封閉、幽暗且視線不佳。

2.進入困難與安全風險

人員、機具不易進入檢測。檢測人員必須鑽過狹小的橋洞進入，這種方式屬於高危險性之工作環境，依據規範進入箱型梁等密閉空間檢測前，需先檢查箱型梁內是否存有毒氣，確定安全無虞後方可進入。傳統橋檢需要人員接近檢測標的進行目視評估和記錄，存在很高的職業安全風險，且箱梁內部可能躲藏有毒生物。

3.效率及品質問題

一趟橋梁箱內檢測需要動用到4~5名以上人力，人員進入箱內目視檢測過程中，由於各檢測人員的經驗不同，可能導致產出數據品質不一，且使用紙張記錄較容易出錯或產生空間迷航，導致檢測資料不完整或不清晰。

有鑑於橋梁檢測技術日趨多元，且箱型橋梁內部檢測實務面臨多重困難及高風險，本計畫旨在梳理目前橋檢箱內作業所面臨之問題及困難，並初步探討可行之解決方案，以做為後續研發橋檢輔助工具之參考依據，持續累積後續精進及開發橋檢工具設備之能量。

1.2 研究目的

本計畫旨在探討橋梁箱內檢測技術的現況與後續研發評估，具體研究目的如下：

1.技術與問題彙整

針對橋梁箱內檢測的現況進行研析，歸納實務上所使用的箱內檢測工具及技術。

2.研析困難與挑戰

彙整目前橋梁箱內檢測作業實務上所面臨之問題及困難，特別是針對不同種類的箱梁結構。

3.研提可行解決方案

依據文獻回顧、實務訪談及現況查訪所蒐集之意見與問題，研提可行之解決方案。

4.評估研發方向

依據研提之可行方案，初步評估橋檢工具的研發方向、工具開發效益及可行性。

5.提升橋檢品質與安全

藉由提供橋檢人員方便且多樣的輔助工具，全面提升橋檢品質，並保障執行橋檢工作人員的職業安全。

6.累積研發能量

規劃相關橋檢工具之後續開發，並進行其他橋梁檢測應用之探討，做為交通部運輸研究所(以下簡稱本所)未來持續精進或研發新式橋梁檢測工具之參考依據。

1.3 研究架構及工作項目

本計畫研究架構及工作項目說明如下：

1.文獻回顧

本工作項目為後續的檢測問題研析奠定基礎，蒐集彙整國內外橋梁箱內檢測方式、技術現況，以及用於橋梁檢測作業輔助工具發展之相關研究文獻。

2. 橋梁箱梁型式分類及箱內檢測問題研析

針對國內箱梁現況，釐清不同型式的檢測挑戰。由相關文獻資料進行國內橋梁箱梁型式分類，並依不同種類之箱梁結構，針對其檢測模式進行檢測作業問題研析。

3. 專家學者及實務訪談及橋檢作業現況查訪觀摩

透過與第一線人員及專家交流，掌握實務需求與困難，拜訪國內橋梁檢測領域專家學者、接洽國內橋梁維護管理機關(構)(如公路局、高速公路局等)及實際執行橋檢作業之顧問公司或廠商，進行訪談以瞭解橋梁箱內檢測之技術發展及實務現況，並進行橋檢作業實務查訪及觀摩，瞭解橋檢實務現況，最終彙整訪談意見、相關實務問題及橋檢輔助工具研發建議。

4. 研提橋檢可行方案及橋檢工具開發評估

本計畫依據訪談所蒐集之意見及實務問題，彙整橋梁箱內檢測實務所面臨之困難，研提可行之解決方案。依蒐集回饋意見、實務工作需求研提之可行方案，初步評估橋檢工具研發方向、工具開發效益及可行性。此評估亦涵蓋規劃相關橋檢工具之後續開發，並進行其他橋梁檢測應用之探討，做為本所未來持續精進橋檢工具，或研發新式橋梁檢測工具之參考依據。

透過以上工作項目，本計畫將能全面探討橋梁箱內檢測技術的現況與未來發展潛力，為提升我國橋梁檢測的安全與效率，提供關鍵的參考依據。

第二章 文獻回顧

本章旨在探討橋梁箱內檢測輔助工具之可行性。臺灣南北狹長且山高坡陡致河川流速湍急，連接河岸兩端之跨河橋梁常設計為大跨距，以減少落墩數量來避免基礎沖刷，而此類橋梁之主梁結構常以箱型構造為主，其在陸路運輸中居關鍵地位。箱型梁有別於I型梁，除外部構造外，還包含箱體之內部構造，為使橋梁能維持正常運作，進入箱梁內部檢測是必要的，因其內部常因積水導致下翼板等結構元件生鏽腐蝕，此劣化無法透過外部目視確認，傳統檢測高度依賴人員經驗，但內部屬於高風險局限空間(Confined Space)，存在缺氧、中毒等職業安全危害，人員進入須嚴格遵循職業安全相關法規，大幅提高了作業門檻與成本。

為提升安全和效率，國內外已轉向導入智慧檢測系統，應用無人機(UAV)與軌道攝影機等智慧輔助設備，可顯著減少檢測時間與人力。然而，新型工具仍面臨購置成本高昂、檢測數據品質(如裂縫寬度)精確度待提升的挑戰。尤其在箱梁內部缺乏環境特徵的條件下，自主導航的同步定位與製圖(SLAM)技術面臨深層瓶頸，必須結合環境敏感型算法進行優化，才能確保數據的空間精確性。

2.1 國內外橋梁箱梁內部檢測技術相關研究

陸路運輸高度依賴橋梁，尤其臺灣地形狹長、河川遍布的地理環境，使得橋梁在交通中扮演著至關重要的角色。隨著經濟快速發展，自民國 54 年開始，高速公路等交通建設迅速展開，許多長跨距的市區高架橋多採用箱型梁橋結構。箱型梁橋因其閉合薄壁截面特性，具有較高的抗扭勁度，且底板與頂板面積大，能滿足彎矩需求，特別適用於高架橋路段。

我國橋梁檢測制度的建立與發展，可追溯至民國 76 年交通部頒布第一版《公路養護手冊》，此後經過多次重大橋梁災害(如民國 97 年后

豐大橋斷橋、民國 98 年莫拉克風災造成 129 座橋梁斷橋)以及南方澳大橋斷裂事故，臺灣的橋梁檢測規範不斷演進。依據《公路橋梁檢測及補強規範》^[2]臺灣的公路橋梁檢測依時機分為 3 類：定期檢測、特別檢測與詳細檢測，其中，定期檢測以目視方式進行全面性檢測，旨在早期發現異常與損傷劣化，原則上新建橋梁於完工後 2 年內進行第一次，之後間隔以 2 年為原則，但不超過 4 年，定期檢測主要以 DER&U 評估法為基本架構，評定劣化程度(D 值)、劣化範圍(E 值)、對使用性及安全性的影響(R 值)及處置急迫性(U 值)^[4]。

箱型梁內檢測的必要性，在於其內部屬於高風險、難以自然通風的局限空間，且雨水常經由工地接頭等縫隙孔侵入內部^[4]，箱梁內部若有複雜的隔板和加勁板設計，會使水分排除緩慢或無法排除，長年積水和乾溼交替會導致下翼板、銲道、螺栓及接合板生鏽腐蝕，這些劣化情形無法透過一般外部目視檢測確認，因此，進入箱內檢測成為必要工作。箱型梁橋內部檢測的重點主要集中於結構安全項目，特別是混凝土裂縫，常見的缺失型態包含混凝土裂縫、剝落、剝離、蜂窩、鋼筋或鋼腱銹蝕、滲水、白華、銹水流出等；對於鋼結構箱梁，則關注鋼板或桿件的挫屈、變形、銹蝕、裂縫、塗裝劣化、銲道損傷、螺栓鬆動或脫落等^[5]。

若定期或特別檢測後仍有疑慮，則需進行詳細檢測，這可能涉及儀器或相關設備進行局部破壞或非破壞檢測。常用非破壞檢測方法包括反彈錘試驗法、鋼筋腐蝕檢測法、音洩檢測法、紅外線檢測法、敲擊回音法、透地雷達法等^[5]，國外橋梁檢測技術相關研究與制度，如日本、美國、英國等，均有其成熟的橋梁管理體系和檢測規範^[6]。

日本《道路橋定期檢驗要領》(2014 年頒布)規定以 5 年 1 次的頻率實施定期檢驗，主要以近距離目視檢測為主，其檢驗流程包括「損傷狀況的掌握」、「對策區分的判定」及「健全性的診斷」3 大步驟，對於混凝土裂縫量化標準，RC 及 PC 結構橋梁之裂縫寬度分為 0.2mm 和 0.3mm，以及 0.1mm 和 0.2mm。美國聯邦公路總署(FHWA)橋梁評分標準，將構件評分分為 0 到 9，共 9 個等級。英國則採用嚴重度-範圍評

分規則來評估橋梁損傷^[6]。

這些國際經驗反映了橋梁檢測的趨勢，從定性評估過渡到結合定性和定量標準，並強調詳細檢測做為目視檢查的補充。近年來，國內外產官學界亦投入大量資源研究自動化橋梁檢測，如攀爬式機器人探測、橋梁自動檢測路徑規劃等^[7]。

2.2 箱型梁內部檢測技術與工具發展歷程

箱型梁內部之檢測技術發展，主要著重於克服其局限空間的固有危險性、提升箱內檢測效率及蒐集數據之精確度等 3 大方向。

2.2.1 傳統人員目視檢測技術

目前實務檢測作業方式係以直接目視或間接目視檢測為主，檢測人員以徒步儘可能接近檢測構件，必要時搭乘輔助載具，或使用其他觀測、量測設備取得相關資訊，判斷構件是否有劣化或異常情況。橋檢工作以目視檢測為主，不僅是因為相較於使用輔助工具，其成本效益高、操作相對簡便，更是因為能夠最直接、最準確且最快速取得檢測資訊，瞭解橋梁整體概況。然而，目視檢測本質上是一種表面現象的檢測，其成果高度依賴於檢測人員的經驗、判斷力以及橋梁部位的可及性，但對於結構內部、隱藏性缺陷，如內部鋼索斷裂、箱梁內部濕氣累積導致的腐蝕或深層混凝土的空洞等，即無法簡單地以目視檢測獲取相關資訊。

傳統的箱梁內部檢測主要依賴人員目視檢查，由於箱梁內部屬於局限空間，非設計供人持續工作、進出受限制、可能存在有害物質或含氧量不足的空間(如儲罐、容器、隧道等)，因此，人員進入箱梁內部進行檢測屬於高風險作業，可能面臨缺氧(含氧量低於 18%)、硫化氫中毒(由有機廢液產生)、一氧化碳中毒(燃燒不完全產生)及易燃氣體(如沼氣)等空氣危害^[7]、高空作業墜落危害，以及熱中暑(環境悶熱)危害等^[5]。

實務檢測流程要求遵循勞動部發布施行之《職業安全衛生法》^[8]及交通部頒布之《公路橋梁檢測及補強規範》等相關規定以確保安全。檢測前必須先備妥橋梁基本資料和維修紀錄，並確認構件編碼原則^[2]。由於人孔通常位於高處(如高架橋箱底離地淨高至少 10 公尺)，必須租賃相關機具輔助到達人孔蓋，常見的輔助工具與機具包括工作爬梯、高空作業車(適用於橋下空間可供到達時)、橋梁檢測車(適用於跨越河道或高灘地等橋下空間無法到達處，如圖 2.1 所示)及搭設工作架，若檢測地點占用道路，還需租用標誌車、電動旗手和通風換氣設備^[7]。



資料來源：交通部公路局



資料來源：臺北市新工處

圖 2.1 橋梁檢測車及高空作業車

進入箱梁等密閉空間前，須攜帶手電筒，並檢查箱梁內是否存有毒氣，確定安全無虞後方得進入。進入局限空間作業需至少 2 人 1 組，箱外需配置 1 名監視人員，檢測人員儘可能靠近構件，以直接目視或間接目視檢測為主，並使用手稿、照片及影片進行記錄^[7]。

2.2.2 局限空間作業之職業安全與法規

箱梁內部空間在臺灣職業安全法規中被明確界定為局限空間，任何人員進入行為必須遵循《職業安全衛生法》^[8]及《缺氧症預防規則》

[9]等法規，爰法規的剛性要求成為驅動箱梁檢測作業轉型的最主要非技術性動因。國內法規對局限空間作業之危害預防與管理措施如下：

1. 危害物質濃度確認與通風要求

必須於每次作業開始前，確認作業場所空氣中氧氣及危害物質(如缺氧、硫化氫、一氧化碳)的濃度，作業期間必須設置並維持連續有效運轉的適當通風換氣設備，並持續進行濃度測定。

2. 人員安全與監視機制

必須指定缺氧作業主管來監督作業，若作業區域超出監視人員的目視範圍，勞工必須佩戴符合標準的全身背負式安全帶及可偵測人員活動情形之裝置。

3. 緊急救援設備

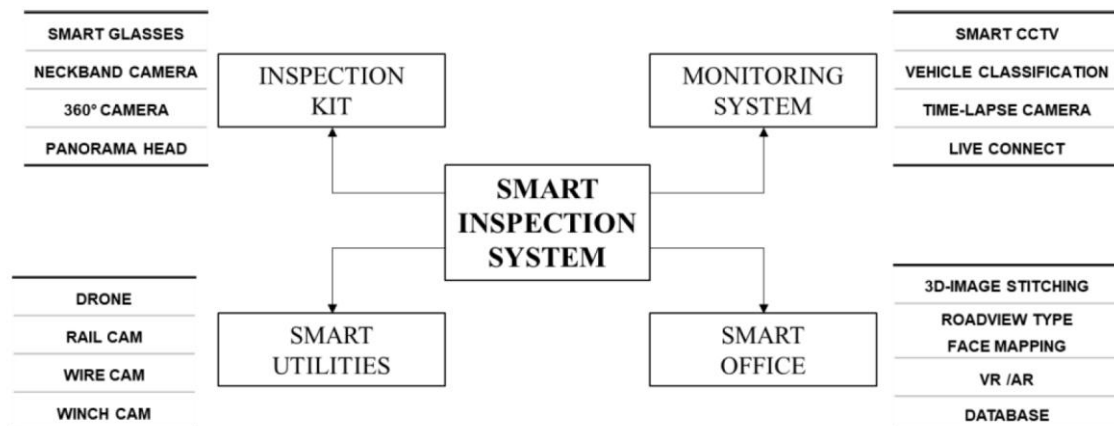
法規要求設置動力或機械輔助吊升之緊急救援設備，佈署這些設備需要時間、專業人力和空間，進一步增加了作業的複雜度和成本。

2.2.3 檢測技術與工具的現代化發展

隨著橋梁結構使用年限增長及自然災害的影響，橋梁維護管理的重要性日益增加，依據 Youngjin Choi 等人研究，在韓國服役超過 30 年的老舊設施數量到 2030 年將近乎翻倍^[10]。傳統的橋梁檢測技術，主要依賴具備合格證照的人員進行直接目視檢查與評估，並以手稿方式記錄缺失。然而這種高度依賴個人經驗的傳統方式，普遍存在職業安全風險高、檢測數據品質不一，以及紙本紀錄容易出錯或不清晰等問題，進而導致檢測資料不完整^[7]，為克服傳統檢測方式在安全性和效率上的瓶頸，應用新技術和建立新的智慧檢測系統(Smart Inspection System)已成為當代運輸部門的重要趨勢^[10]。

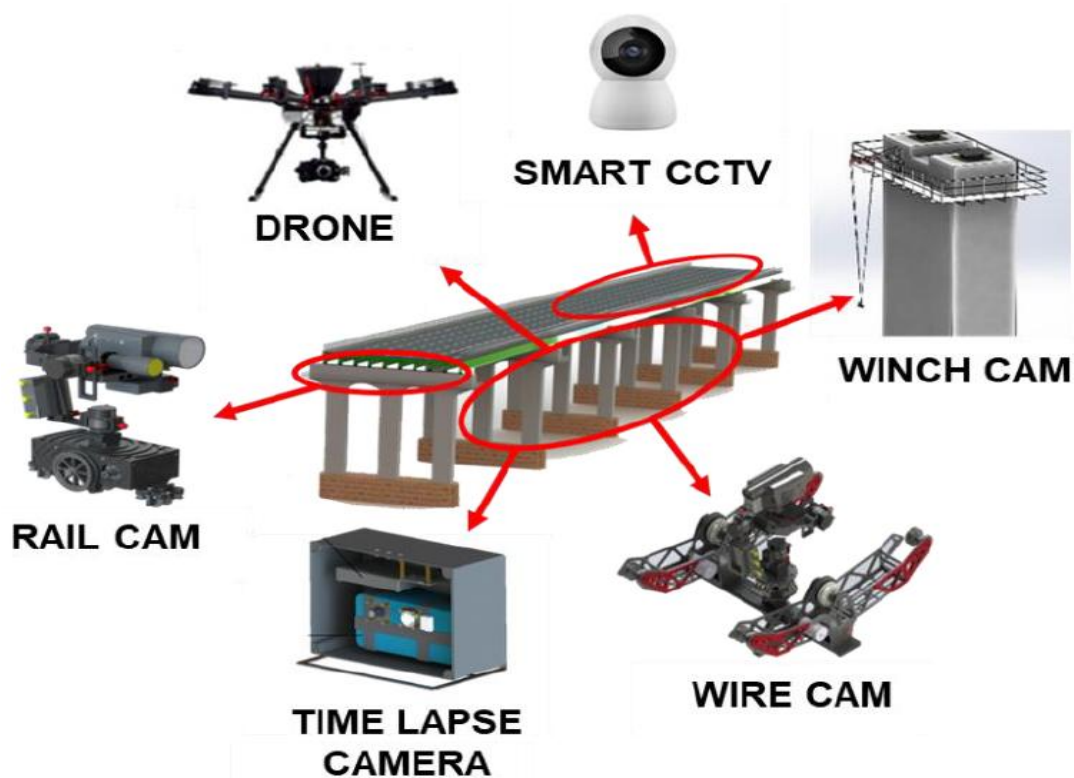
智慧檢測技術通常包括 4 大主要組成部分：檢測人員套件(Smart Inspection Kit)、智慧輔助設備(Smart Utilities)、即時監測系統(Monitoring

System)智慧辦公室(Smart Office)，如圖 2.2 所示。其中智慧輔助設備包含無人機(Drone)、軌道式攝影機(Rail Cam)、鋼索式攝影機(Wire Cam)以及絞盤式攝影機(Winch Cam)，如圖 2.3 所示^[10]。



資料來源：Utilization and Verification of Imaging Technology in Smart Bridge Inspection System: An Application Study

圖 2.2 橋梁檢測智慧檢測技術



資料來源：Utilization and Verification of Imaging Technology in Smart Bridge Inspection System: An Application Study^[10]

圖 2.3 橋梁檢測智慧型輔助設備

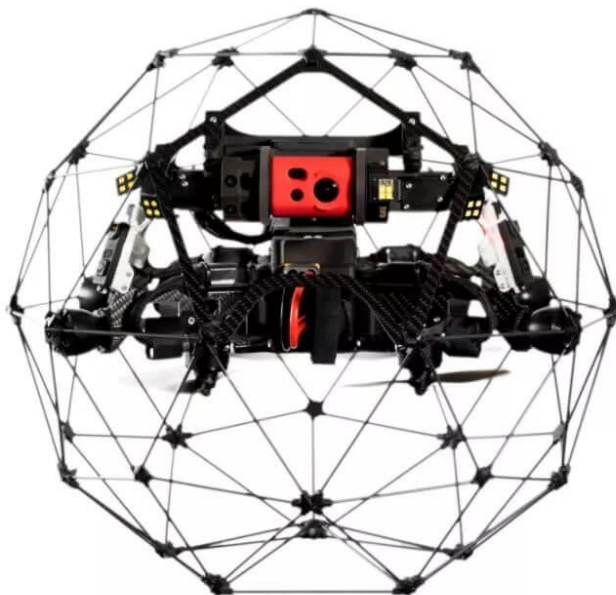
2.2.3.1 智慧輔助設備

智慧輔助設備旨在取代或輔助現有的人工目視檢查，縮短檢查時間，並最大限度地減少難以進入區域之檢測盲點，最常在橋梁檢測中使用的智慧工具包括無人機、軌道攝影機和鋼索攝影機。

1. 無人機(UAV)技術的應用與發展

本所及學術界自 2013 年起，陸續投入無人機(UAV)技術在橋梁檢測的應用研究。無人機，最初應用於軍事偵察，現已廣泛應用於商業和民用領域，包括影像拍攝、搜救和災害救援。

雖然交通部公路局與民間公司已導入無人機執行戶外橋梁巡檢作業，但應用於橋梁箱內探測的案例在國內尚屬鮮少，針對局限空間的特殊要求，需選用具備特殊設計的無人機。例如，Flyability Elios 系列(如圖 2.4 所示)等專為局限空間研發製造的無人機，已獲得如美國石油學會(API)等專業機構的批准使用，這些無人機通常配備高流明照明系統及雷射光達(LiDAR)感測技術，可在光線不足的狹小空間內，準確獲取內部空間資訊。



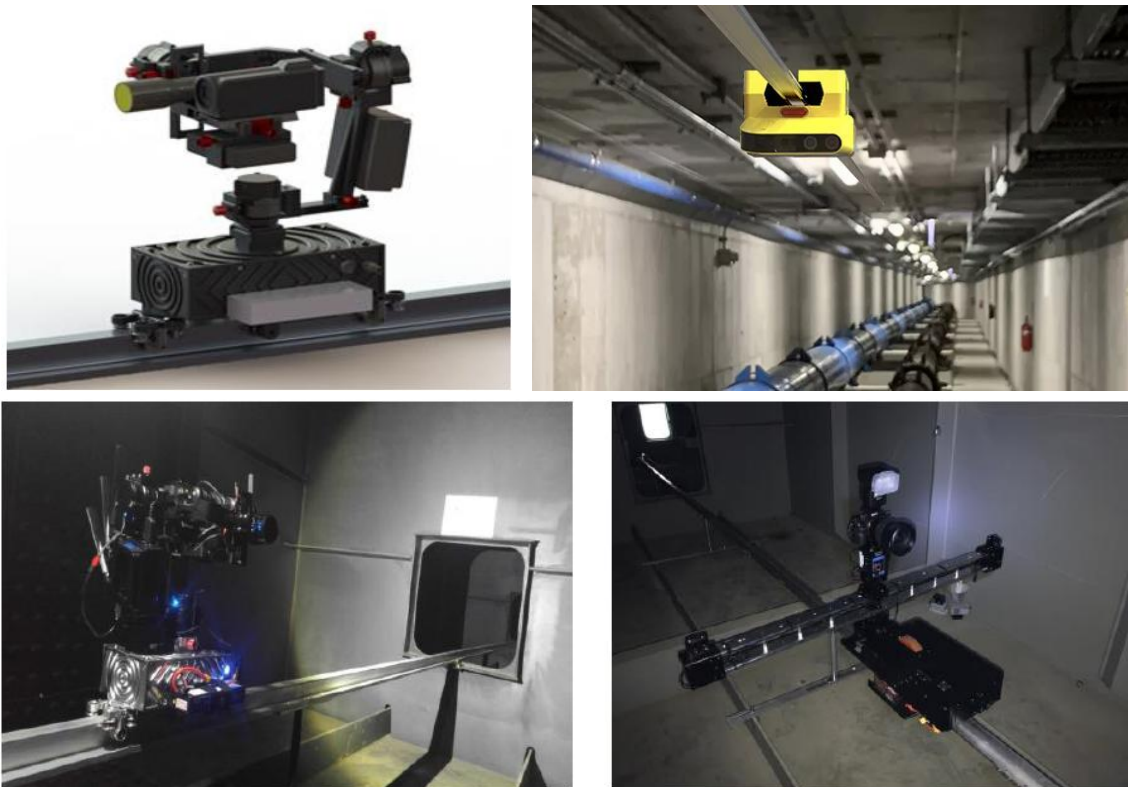
資料來源：<https://reurl.cc/7bDQy9>

圖 2.4 Flyability Elios 無人機

實證結果顯示，無人機輔助檢測的優勢顯著，包括可代替人員執行高風險作業、可大幅降低整體檢測時間(在實際案例中，可減少約 90% 的檢測時間)及出勤人數(可減少約 53% 的人力)，同時無人機探測數據可透過軟體建立具備座標位置，並可反覆確認的 3D 點雲模型，將橋梁箱內狀況全面記錄，從而降低檢測錯誤^[7]。

2. 軌道攝影機(Rail Cam)與箱內檢測

軌道攝影機應用於橋梁檢測作業，是專門用於檢查箱型梁內部、外部梁體以及梁間空間的主要設備，透過在需要檢查的區域(如箱梁內部)安裝半永久性軌道，移動設備即可在軌道上運行(如圖 2.5 所示)，檢測人員可以遠程控制設備，進行沿著軌道的前後移動，並透過外部顯示器檢查內容。這種方式從長遠來看比使用人力目視檢查箱體內部更具成本效益，只需少量具備專業知識經驗之檢測人員，即可進行大範圍的影像檢查，有效地解決封閉空間之檢查難題。



資料來源：Utilization and Verification of Imaging Technology in Smart Bridge Inspection System: An Application Study

圖 2.5 軌道攝影機

3.鋼索攝影機(Wire Cam)

該設備透過連接 2 個固定點沿跨度移動進行檢查(如圖 2.6 所示)，鋼索攝影機在檢查橋面板底部和梁間(這些區域因 GPS 問題和需要額外設備而難以進入)時表現出高效能，有助於解決大型或跨水橋梁檢測維護作業，橋下空間相關構件難以接近檢測之問題。



資料來源：Utilization and Verification of Imaging Technology in Smart Bridge Inspection System: An Application Study

圖 2.6 鋼索攝影機

2.2.3.2 檢測人員套件

智慧檢測套件用於解決非專業人員檢查錯誤和後續記錄過程中的不確定性，套件主要由智慧眼鏡(Smart Glasses)、頸戴式攝影機(Neckband Camera)和 360 度攝影機組成^[10]。

智慧眼鏡具備影像數據傳輸功能，允許管理人員即時查看現場檢測影片並指導檢查位置，即使在噪音環境下也能透過文字或文件提供檢查支持。頸戴式攝影機則用於監測檢測員周圍環境，檢查風險因素和確保工作安全。360 度攝影機搭配全景雲台(panoramic head)被開發用於解決傳統平面照片數據不連續、品質低落難以利用的問題，該設備能生成 360 度之檢查全景圖像，為後續的檢測及追蹤修繕維護提供連續性之數位資訊。

2.2.3.3 檢測數據的數位化與人工智慧整合

檢測技術的現代化不僅體現在工具上，更在於數據的採集與處理，無人機透過 LiDAR 技術，捕捉箱梁內部的點雲模型和數值表面模型，並輸出帶有時間戳記與座標的數位化資料，這種數位化的數據格式，為後續導入先進的數據分析技術，特別是人工智慧(AI)與機器學習(ML)創造了基礎。鑑於傳統檢測結果容易因檢測人員的專業背景和經驗不同而產生落差，國內外已有許多研究致力於發展 AI 影像辨識模型，以輔助缺失評等，例如，深度學習模型已被開發用於檢測混凝土結構的剝落(spalling)和鱗裂(scaling)等損壞。本所亦推行相關研究計畫，利用 AI 技術辨識橋梁構件的劣化類型，如混凝土結構性裂縫、剝落、鋼筋外露及白華損傷，利用無人機探測所帶回的數位化影像數據，已經證實可行地應用於混凝土裂縫的影像辨識模型訓練與驗證^[7]。

為方便檢查員和管理人員決策，檢測結果正被設計為直觀的系統和外部檢查地圖，透過將捕獲的圖像拼接(stitching)，可以創建 3D 圖像化的外部檢查地圖，並以路視圖(road view)格式呈現，這種 3D 圖像化的外部檢查地圖可與虛擬實境(VR)和擴增實境(AR)設備結合，提供空間感和真實感，使檢測位置和劣化項目一目瞭然，這對於檢查員的培訓和初步檢查尤為適合，實現了智慧辦公室與現場的即時協作^[10]。

2.3 新型輔助工具之限制與挑戰

2.3.1 無人機應用於箱內檢測技術瓶頸

雖然無人機在提升安全性和效率方面表現出相當大的優勢，但其廣泛應用仍面臨諸多挑戰，其中購置成本過高是主要考量因素(例如，箱內使用 Flyability Elios 系列防撞無人機報價約新臺幣約 200 萬元，依使用需求及情境不同)，同時新科技進步迅速也帶來既有資產汰換加速及人員訓練成本增加的挑戰。此外要充分發揮數位化檢測數據的價值，

現行橋梁檢測規範與標準，也需同步進行現代化。目前規範中缺乏對檢測照片拍攝角度、距離等因素的明確規定，可能干擾後續 AI 影像辨識的性能，因此，持續研發及推廣新型光學檢測技術，並建立標準化的數據採集流程，將是未來提升橋梁檢測精準度與效率的重要發展趨勢。

橋梁箱內檢測推展應用新型輔助工具，面臨技術和規範層面的挑戰整理如下列所示^[7]：

1. 技術成熟度與數據判定

儘管無人機可以採集高解析度的數位數據和 3D 模型，但缺失的最終判定(特別是結構性或非結構性裂縫的評定)目前仍需仰賴專業人員。無人機探測成果仍需偕同專業橋梁檢測人員進行評定，以確保結果可靠性。

2. 量測精確度問題

無人機可精確測量裂縫的位置和長度，但對於裂縫寬度，目前僅能透過影像後處理進行量測，精確度仍待提高，影像辨識技術的信心值會受限於影像角度、距離及光線等因素。

3. 空間限制與飛行挑戰

箱型梁內部空間狹窄，且上方可能具有數根加肋梁，可能限制無人機的活動範圍和搭載新技術(如環景鏡頭)的應用。無人機在密閉空間內的操作穩定性、訊號傳輸、以及克服橋梁內部可能存在的磁場干擾等問題，都需要進一步克服。

4. 數據標準化與規範滯後

現行橋梁檢測規範並未明定檢測照片拍攝的角度、距離等因素，導致檢測照片因人為因素而有差異，這對於利用無人機數位數據進行機器學習和影像辨識技術的發展，造成了數據標準化的挑戰。

5. 資源與培訓

雖然無人機技術潛力巨大，但初期導入需要專業的無人機服務廠商合作，且需要建立長期且完整的培訓制度，以確保檢測人員及承辦工程司具備新技術的操作和數據判讀能力。

2.3.2 機器人自主導航(SLAM)的深層技術瓶頸

無論是無人機還是履帶機器人，在箱梁內部最大的技術挑戰都歸結為在無 GPS 環境下實現高精度、高穩定性的同步定位與製圖(SLAM)，這項挑戰在長距離的混凝土箱梁或鋼箱梁內部，缺乏環境特徵的場景(degraded scenes)中變得尤為嚴峻^[1]，由於箱梁內部(特別是大型結構)通常是長走廊，表面單調且環境特徵極少，這使得 SLAM 系統的里程計(odometry)容易累積誤差，導致後續製圖(mapping)出現顯著的不準確性，在視覺為主的 SLAM 系統中，不同圖幀掃描到的場景可能極度相似，使得系統難以確定機器人的精確位移和方位。為了實現全自動化探索未知環境，系統必須採用主動式 SLAM (Active SLAM)技術，例如基於邊界探索(Frontier-based Exploration)的方法，來平衡探索性能與地圖資訊獲取。

為解決缺乏環境特徵帶來的挑戰，國際研究已開發出更為精密的優化策略，即環境敏感型相關掃描匹配(Environment-Sensitive CSM)方法，該方法能夠在缺乏足夠環境特徵的情況下，透過動態調整運動權重來實現自主適應性，具體而言，該方法利用主成分分析(PCA)來分散環境中所有掃描點的法向量，並根據前 2 個主向量 v_1 和 v_2 的比率 $k=v_1/v_2$ ，計算出降級係數 β ，其中 $\beta=1/(k+1)$ ， β 值越接近 1，表明環境退化程度越高。系統依據此係數動態調整 SLAM 算法的參數，以提高在低特徵環境中的定位精度，這表明臺灣的研發工作必須將國際對環境敏感型 SLAM 算法的研究成果，結合臺灣常見的橋型幾何特徵進行訓練和優化，這項技術優化是確保輔助工具能夠提供工程所需的精確空間定位數據的核心。局限空間非導航環境下 SLAM 挑戰與優化對策，彙整如表 2-1 所示。

表 2-1 局限空間非導航環境下 SLAM 挑戰與優化對策 [11][12]

技術平台	箱梁內部挑戰	挑戰影響的技術原理	挑戰描述	解決方案方向
UAV/Robotics 共通	GPS 訊號缺失	定位與導航	無法利用外部訊號進行全球定位，依賴內建感測器。	結合視覺慣性里程計(VIO)與 3D 製圖。
Robotics(履帶)	環境特徵缺乏 (Degraded Scenes)	SLAM 製圖	長走廊、單調表面導致不同圖幀掃描高度相似，累積里程計誤差。	研發環境敏感型 CSM(利用 PCA 計算降級係數 β)。
UAV/Robotics 共通	光照不足/粉塵	數據採集/感測器	影響相機、紅外線感測器及視覺 SLAM 演算法的性能。	搭載高強度照明、高感光度相機及濾鏡，或利用雷射掃描數據補充。
UAV	氣流擾動/機身穩定性	飛行控制	內部氣流或風道效應影響無人機懸停及數據採集穩定性。	高性能姿態控制系統(Attitude Control)及多重冗餘感測器。

2.4 小結

本章深入探討橋梁箱型梁內部檢測的現況、挑戰及技術發展趨勢。鑒於臺灣地形環境特性，箱型梁橋在交通運輸中佔據重要地位，但其內部屬於高風險、難以自然通風的局限空間，長年積水易導致下翼板等結構元件生鏽腐蝕，透過外部目視檢測無法確認箱梁內部劣化情形，因此，進入箱內檢測是確保結構安全的必要工作。

然而傳統上依賴人員的目視檢測，不僅成果高度依賴個人經驗與判斷力，更使檢測人員面臨缺氧、中毒、墜落等嚴重職業安全危害，必

須嚴格遵循《職業安全衛生法》等法規，大幅增加作業之複雜度與成本。為克服前述瓶頸，國內外已積極轉向智慧檢測系統(Smart Inspection System)無人機(UAV)、軌道攝影機(Rail Cam)等，已證實能夠替代人員執行高風險作業，並可大幅減少檢測時間(約 90%)與人力(約 53%)，同時能採集具座標定位之數位化資料，用於建立 3D 點雲模型。

新技術的研發及推廣仍面臨諸多挑戰，包括購置成本高昂及檢測數據品質的精確度(特別是裂縫寬度量測)仍有待提高，而最深層之技術挑戰在於，箱梁內部此種缺乏環境特徵、無 GPS 訊號的環境下，如何實現高穩健性的同步定位與製圖(SLAM)，為了確保輔助工具能提供工程所需的精確空間定位數據，未來必須借鑒國際研究成果，將環境敏感型相關掃描匹配(CSM)等算法，結合橋梁幾何特徵進行訓練與優化，以克服里程累積產生之誤差，全面推動橋梁檢測技術的現代化與數據標準化。

第三章 國內橋梁箱梁型式與檢測問題分析

本章旨在對國內箱梁型式進行分類與檢測問題分析。箱梁型式主要依據結構材料(如鋼筋混凝土、預力混凝土、鋼構造)、幾何形狀(矩形、梯形、單箱、多箱)與結構型式(梁式橋、脊背橋、斜張橋等)進行劃分，其中預力混凝土箱梁數量最多，鋼箱梁則多用於複雜橋型。箱梁內部屬於局限空間，於內部執行檢測具有高風險、高成本且難以接近之作業特性，檢測時須遵循職業安全衛生法規相關規定，現行作業面臨之主要挑戰包括職業安全風險極高、交通維持與輔助機具租賃成本昂貴、以及檢測數據品質因高度依賴檢測員主觀判斷而缺乏一致性等，這些挑戰迫切需要引入非進入式輔助工具(如自走型機器人或無人機)，以規避或減少人員進入的風險，並大幅降低法規遵循成本，此乃可行性研究探討之基礎。

3.1 國內橋梁箱梁型式分類

依據「車行橋梁管理系統」^[1]我國車行橋梁中箱型橋(主梁為箱型梁)有 3,288 座，主梁材質包含鋼構造共 1140 座，數量統計如圖 3.1 所示。國內橋梁箱梁型式分類可以從結構材料、施工方法、形狀，以及行政管理之特殊性等區分。

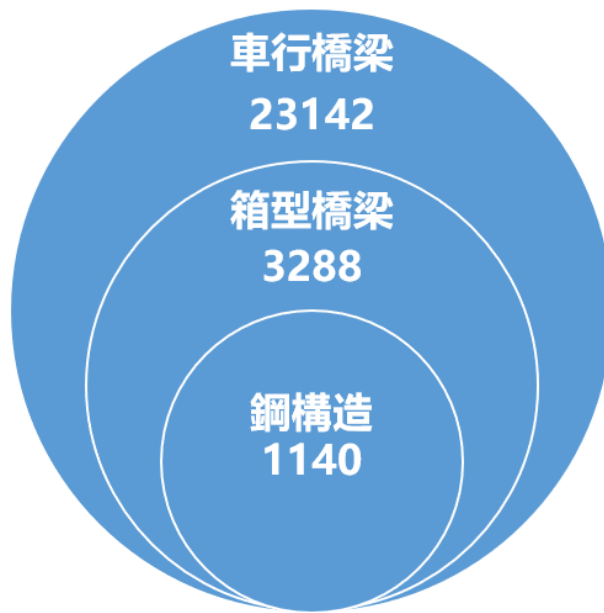


圖 3.1 箱型橋數量統計圖

3.1.1 依結構使用材料與施工方法分類

箱型梁為臺灣橋梁主梁型式之一，廣泛應用於各種橋梁主要結構，通常由混凝土、結構鋼或複合材料所組成，依結構使用材料與施工方法，一般分類如下：

1. 鋼筋混凝土箱梁(Reinforced Concrete Box Girder)

鋼筋混凝土箱梁是橋梁結構中常見的梁型，結合了傳統鋼筋混凝土(RC)結構的穩定性與箱型斷面(Box Girder)的結構優勢，此種梁型主要依賴混凝土抗壓能力和內部鋼筋抗拉能力共同承受載重，其箱型斷面呈中空箱體狀，通常為單室或多室設計，這種中空結構能有效地提供較大的慣性矩(Moment of Inertia)和抗扭轉剛度(Torsional Rigidity)，使其在較寬的橋面或需要抗扭矩的情況下表現良好。

結構受力原理是將鋼筋配置在結構的受拉區，由鋼筋抵抗拉力，混凝土則主要承擔壓力。在梁承受外部載重(如車輛、自重)時，梁底部受拉，頂部受壓，由於混凝土抗拉能力差，在正常載重下，受拉區往往會產生微小裂縫，這是 RC 結構的正常現象，但必須控制裂縫寬度以確保

結構耐久性。

鋼筋混凝土箱梁因其施工技術相對簡單、成本較預力混凝土(Prestressed Concrete)低廉(在小跨度範圍內)，廣泛應用於中小跨徑橋梁(數十公尺以內)及一般道路與城市橋梁，適用於交通量和跨越要求相對較低之環境。

依其製造及施工方式，亦有分為現場澆置箱梁(Cast-in-place Box Girder)及預鑄箱梁(Precast Box Girder)。現場澆置箱梁係由於鋼筋混凝土結構較重，通常需要現場架設支撐進行澆築，尤其適用於線形複雜或斷面形狀不規則的橋梁；預鑄箱梁則是將箱梁段在預鑄場製造，達到強度後運至現場吊裝，以加速現場施工進度。鋼筋混凝土箱型梁的特點與優勢，彙整如表 3-1 所示。

表 3-1 鋼筋混凝土箱型梁的特點與優勢

特點/優勢	說明
抗扭能力強	藉由箱型斷面結構，提供優良的抗扭轉剛度，有利於寬橋面。
施工技術成熟	鋼筋混凝土施工技術已發展百年，工人與設備取得容易，品質控制相對穩定。
結構穩定性高	混凝土材料本身具有良好的抗震和耐久性。
成本效益	在較小的跨距範圍內，相較於預力混凝土可節省預力施工的特殊設備與技術成本。
防火性	混凝土本身具有優良的防火性能，能有效保護內部鋼筋。

2. 預力混凝土箱型梁(Prestressed Concrete Box Girder)

預力混凝土箱型梁是橋梁結構中另一種常見且重要之橋梁型式，結合了預力混凝土和箱型斷面的優點，使其非常適合用於中長跨徑之橋梁。結構組成為箱型斷面(Box Girder)，梁的橫截面呈中空箱體狀，通常有一個或多個箱室，這種形狀提供了優異的抗扭轉剛度和彎曲強度，特別適合用於寬闊的橋面和曲線橋。

預力混凝土於梁承受外載重(如車輛、自重)之前，就先在混凝土中施加預壓應力(通常是通過高強度鋼絞線或鋼棒，即預力鋼腱)，這個預壓應力能抵消或減少外載重引起的拉應力，讓主要承受壓力的混凝土材料能更有效地發揮其強度，並控制裂縫的產生和發展。

預力混凝土箱型梁橋因其結構效率高、適用跨徑範圍廣、外觀簡潔等優點，被廣泛應用於國道公路、市區道路之高架橋、鐵路橋梁及中等至大跨徑(從數十公尺到上百公尺)之連續梁橋。依其製造及施工方式又分為預鑄箱梁、現場澆置箱梁及鋼構結合預力混凝土箱型梁。預力混凝土箱型梁的特點與優勢，彙整如表 3-2 所示，其中鋼筋混凝土箱梁與預力混凝土箱梁之差異，彙整如表 3-3 所示

表 3-2 預力混凝土箱型梁的特點與優勢

特點/優勢	說明
結構效率高	箱型斷面在提供大慣性矩的同時，由於中間中空，能有效減輕結構自重。
抗扭能力強	箱型結構具有優異的抗扭轉剛度，對寬橋面或曲線橋的設計特別有利。
跨越能力佳	透過施加預力，能有效控制應力並減少撓度(下垂)，使其能跨越比一般鋼筋混凝土梁更長的跨距。
耐久性好	預壓應力能減少混凝土的受拉裂縫，從而保護內部鋼筋和預力鋼腱免受水分和化學物質侵蝕，延長橋梁使用壽命。
美觀性	斷面線條簡潔流暢，易於與周邊環境協調。
施工方式多樣	適用多種施工方法，包括支撐先進工法(支撐逐跨施作)、懸臂工法(無需支撐，從橋墩向兩側平衡伸展施作)等，可適應不同的地形和施工限制。

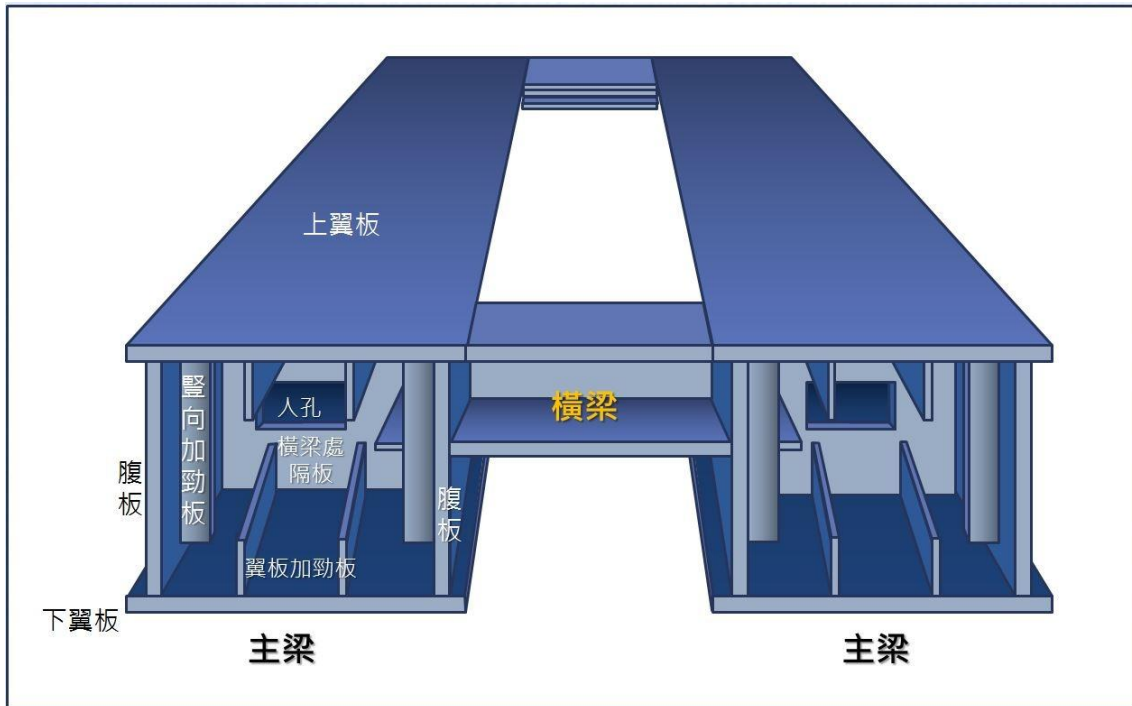
表 3-3 鋼筋混凝土箱梁與預力混凝土箱梁之差異

差異項目	鋼筋混凝土箱梁(RC Box Girder)	預力混凝土箱梁(PC Box Girder)
核心抗拉材	普通鋼筋(承受外載重產生的拉力)	高強度預力鋼鍵(預先施加壓力以抵消拉力)
受力狀態	在載重下，受拉區允許產生微小裂縫	在載重下，受拉區保持受壓或極低拉應力，極力控制裂縫
適用跨距	中小跨徑(通常小於 30 公尺)	中長跨徑(數十公尺至上百公尺)
結構自重	較重(需要更大的梁深以抵抗撓度)	相對較輕(預力可有效控制撓度，允許較小的梁深)
耐久性	裂縫存在，易受水氣侵蝕影響鋼筋鏽蝕	裂縫受控，對內部鋼鍵和鋼筋保護較佳，耐久性優
施工複雜度	一般(傳統 RC 工法)	較高(需特殊張拉設備及精確的預力控制)

3.鋼構造箱型梁(Steel Structure Box Girder)

鋼構造箱型梁是一種截面呈封閉箱體形狀的梁結構，完全由鋼板焊接而成，在土木和建築工程中常見且高效的結構元件，利用鋼材的高強度和箱型斷面的優勢，特別適用於需要大跨度、高承載力和優異抗扭剛度的場合，鋼箱梁常見於各類橋梁結構中。

一個典型的鋼箱型梁由頂板/上翼板(Top Flange)、底板/下翼板(Bottom Flange)、腹板(Web)、隔板/橫隔板 (Diaphragm)及加勁肋(Stiffener)組成(如圖 3.2 所示)，頂板位於梁的頂部，主要抵抗彎矩產生的壓力(在簡支梁中間)；底板位於梁的底部，主要抵抗彎矩產生的拉力(在簡支梁中間)；腹板連接頂板和底板的垂直或傾斜鋼板，通常有 2 片或更多，主要負責抵抗剪力；隔板/橫隔板設置在箱體內部，用於維持箱型梁的截面形狀、提高抗扭轉剛度，並將載重傳遞到支撐點；加勁肋沿腹板或翼板方向焊接的鋼條，用於防止鋼板因受壓或受剪而發生局部失穩(Buckling)。鋼構造箱型梁的特點與優勢，彙整如表 3-4 所示。



資料來源：<https://reurl.cc/gnajaX>

圖 3.2 鋼箱梁結構示意圖

表 3-4 鋼構造箱型梁的特點與優勢

特點/優勢	說明
高強度與高剛度	鋼材本身強度高。箱型截面具有很大的慣性矩，使得梁的承載能力強，且撓度(變形)小。
優異的抗扭轉能力	封閉的薄壁截面是抵抗扭轉的最佳幾何形狀，對於曲線橋、寬橋面或有偏心載重的情況特別有利。
輕量化	相較於同等承載力的實心梁或混凝土梁，鋼材用量更為經濟，整體結構自重較輕，有利於減少基礎工程的規模和成本。
施工快速	鋼梁可以在工廠預製，品質易於控制。現場只需進行吊裝和接合，縮短工期。
適用大跨距	由於高強度和輕自重，鋼箱型梁是特大跨度橋梁(如懸索橋、斜張橋或長大跨徑梁橋)之理想選擇。
美觀與維護	外形簡潔大方，符合現代建築美學。 箱體內部空間可供檢查和維護(例如鋼結構的防鏽處理或管線佈設)。

3.1.2 依幾何形狀及數量分類

箱型梁的幾何分類主要基於其橫斷面的形狀和箱體的數量，箱型梁的橫斷面，通常設計成 2 種主要類型通常為矩形或是梯形，而箱型梁箱體數量可分為單箱(Single box)箱體及多箱(Multi-box)箱體，這 2 種分類維度(形狀和數量)決定了箱型梁在結構性能、施工複雜度以及成本上的基本特性。

1. 矩形箱型梁(Rectangular Box)

箱體頂板、底板和 2 側腹板(側壁)均為垂直相交，形成標準的矩形或方形，矩形箱體優勢在於結構計算和施工製作相對簡單直接，由於腹板為垂直平面，這對於鋼箱梁的製作，特別是焊接，帶來便利，在混凝土箱梁中，矩形也有利於模板的架設和混凝土的澆築，常見於高架道路、橋梁的輔助跨徑，或是不需要特別考慮通航淨高限制的場合。

2. 梯形箱型梁(Trapezoidal Box)

頂板通常較寬，底板較窄，而 2 側的腹板則向內傾斜，形成 1 個梯形，梯形箱體之優勢在於其將腹板內傾，可以使梁體的應力流線更為順暢，尤其是靠近支點的位置且能有效利用空間，由於腹板內傾有助於將結構體積集中在靠近中性軸(應力為零的軸線)附近，較能減輕結構體積。在鋼結構中，梯形截面可以讓頂板下方有足夠的空間，方便將橋面鋪設層(例如混凝土橋面板)與鋼箱梁頂板進行剪力連接，梯形箱型梁特別常見於需要跨越較大距離、外觀要求高，或需要輕量化的橋梁設計中，如斜張橋或懸索橋的加勁梁。

3. 單箱型梁(Single Box)

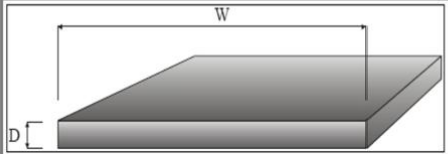

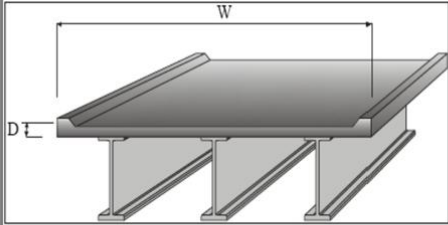

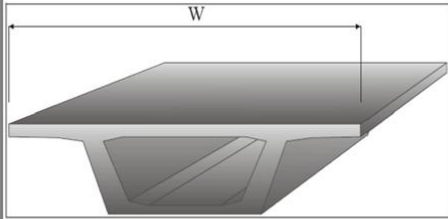

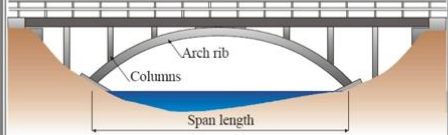

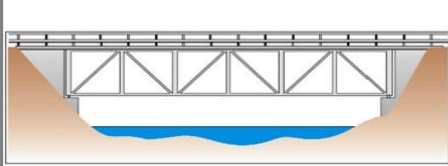

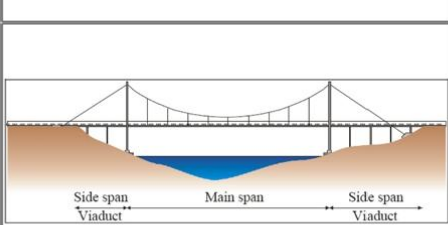

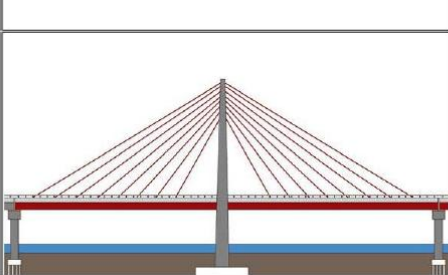

整個橋寬僅由單一的空心箱體構成，其結構一體性高，抗扭轉剛度極強，且橫向(寬度方向)的受力簡潔明確，於製造和安裝單箱梁時，也通常更方便控制，適用於標準或中等寬度的橋面，例如，雙車道或 4 車道的高速公路匝道或主線橋梁。

4. 多箱型梁(Multi-box)

橋面由多個獨立的箱體沿著橫向排列組成，箱體之間可能存在橫向連繫或完全分離，多箱型梁適用極寬橋面，當橋面寬度極大(例如 8 車道或以上)時，單一箱體無論是尺寸還是運輸都可能不切實際，此時採用多個標準尺寸的箱體組合更為靈活和經濟，其載重分佈均勻有助於將極端偏心的載重分散到多個箱體上，但需要設計良好的橫向聯繫以確保共同作用。適用於特寬城市高架橋、複雜的互通式立交橋或需要分期施工擴建的結構。

3.1.3 依結構型式分類(Classification by Structural Type)

箱型梁做為承重構件，廣泛應用於多種橋梁結構中，尤其是在高架路段、輕軌運輸系統的高架路段及斜張橋等，箱型梁都能提供所需的強度、剛度與輕量化。依據「車行橋梁統計系統」數據，橋梁依結構型式分類分為版橋、梁式橋、箱型橋、拱橋、桁架橋、懸索橋及斜張橋等，其分類及示意圖，如圖 3.3 所示。

結構型式		
版橋 Slab Bridge		
梁式橋 Beam/Girder Bridge		
箱型橋 Box Girder Bridge		
拱橋 Arch Bridge		
桁架橋 Truss Bridge		
懸索橋 Suspension Bridge		
斜張橋 Cable Stayed Bridge		

資料來源：車行橋梁統計系統

圖 3.3 車行橋梁統計系統橋梁結構型式分類示意圖

其中箱梁結構出現在以下幾種橋型中：

1. 梁式橋(Beam Bridge)/箱型橋(Box Girder Bridge)

在橋梁數據的統計分類中，「梁式橋」通常指的是結構上主要依賴梁的抗彎能力來承載荷重的橋型，而「箱型橋」則專指使用箱型梁做為上部結構主體的一類梁式橋，箱型梁幾乎是現代中、短跨徑連續梁橋的標準形式，其結構效率高，施工技術成熟，是公路系統中數量最多的橋梁類型之一。

其上部結構多為預力混凝土箱型梁(PC Box Girder)這是最常見的應用，箱型梁提供的高抗扭剛度，使其非常適合連續梁橋，能夠適應曲線路段和不均勻的載重分佈，同時，其閉合的中空斷面能有效降低自重，提高跨越能力，常見於高架路段和立交橋，採用懸臂工法或支撐工法進行快速施工。城市輕軌運輸系統(LRT/MRT)中，輕軌高架橋對梁體平穩性和抗扭變形要求高，箱型梁能提供最佳的剛性。

2. 脊背橋(Extradosed Bridge)

脊背橋是一種介於傳統梁式橋和斜張橋之間的新興橋型，其獨特之處在於採用較低的主塔和較小的斜拉索傾角。脊背橋中箱型梁提供主要承載力，與純粹依賴斜拉索的斜張橋不同，脊背橋的梁體本身仍需承擔大部分的垂直載重，因此梁體必須具有極高的抗彎和抗壓能力，另外箱型梁承受拉索錨固力，脊背橋的拉索通過錨固在箱型梁的頂部(即上翼板)，將巨大的拉力傳遞給梁體，因此梁體(多為預力混凝土箱型梁)必須具備足夠的強度和局部加勁來承受拉索集中的錨固應力。

國道 6 號愛蘭脊背橋(如圖 3.4 所示)、苑裡蘭草脊背橋，這些案例證明了箱型梁在與斜索體系結合時，能有效地優化結構受力，使橋梁的跨越能力超越傳統梁橋，同時保持較低的橋塔高度，達到景觀協調的目的。



資料來源：<https://reurl.cc/Ab0mR8>

圖 3.4 國道 6 號愛蘭脊背橋

3.斜張橋(Cable-Stayed Bridge)

斜張橋是一種主要利用斜拉索將橋面梁體懸掛起來的橋型，適用於大跨徑，在這種結構中，箱型梁為主要的加勁梁用於分佈荷載，將橋面載重收集起來，均勻傳遞給斜拉索和主塔，並提供必要的抗彎和抗扭剛度，以防止梁體在風力、地震力或不對稱載重下發生過大的變形或扭轉，其多為鋼構造或預力混凝土，鋼箱型梁適用於更大跨徑，鋼材輕量化、強度高，且工廠化製造精度高，是主跨徑超過數百公尺斜張橋的首選，例如國道 3 號高屏溪斜張橋(如圖 3.5 所示)，其主梁即為鋼箱梁；混凝土箱型梁適用於中等跨徑，提供更佳的阻尼和耐久性。

箱型梁的高抗扭剛度對於斜張橋至關重要，斜拉索在橋梁的不同位置錨固，容易引起梁體的扭轉，只有箱型截面才能有效抵抗這種扭轉效應，確保橋梁的整體穩定性。



資料來源：<https://reurl.cc/Ab0mR8>

圖 3.5 國道 3 號高屏溪斜張橋

4. 拱橋(Arch Bridge)

拱橋主要依賴拱圈(或拱肋)的壓力來承載荷重，箱型梁在此類橋梁中主要做為橋面梁、加勁梁或拱肋本身(如圖 3.6 所示)，於上承式拱橋中，橋面系統仍需依靠梁來承載交通荷載並傳遞給拱肋，此時，預力混凝土箱型梁或鋼箱型梁常被用作橋面橫梁或縱梁，於現代大跨度拱橋中，拱肋本身常採用鋼箱型截面，這種封閉的鋼箱可以提高拱肋的抗側向失穩能力和抗扭剛度，使結構更加穩定。箱型梁與拱結構的結合，能夠將橋梁的受力機制多樣化，拱承擔垂直壓力，而箱型梁則提供剛度、抵抗彎矩和扭轉，使整體結構更加可靠和高效。



資料來源：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%97%9C%E6%B8%A1%E5%A4%A7%E6%A9%8B>

圖 3.6 關渡大橋

3.1.4 依維護管理分類

依據交通部《公路橋梁檢測及補強規範》C1.3 節說明中，橋梁包含梁橋、I 型梁、T 型梁、U 型梁、箱型梁與鋼架橋等；至於特殊性橋梁，例如吊橋、斜張橋、脊背橋、桁架橋、鋼拱橋等，因其載重與設計需求不同而有所差異^[13]。特殊性橋梁需依其維護管理作業計畫所訂頻率辦理檢測，並採用不同的檢測與養護標準，這項分類直接影響了做為橋梁主體結構的箱型梁將如何被檢測和管理。

1. 一般性橋梁(General Bridges)

一般性橋梁泛指結構形式相對標準、受力機制較為常見的橋梁，包括絕大多數的預力混凝土箱型梁橋(梁式橋)，對於這類橋梁，養護管理單位必須嚴格依照規範，如《公路橋梁檢測及補強規範》的各章節規定執行例行性的檢測、評估、維修及補強。箱型梁檢測通常著重於標準的項目，如混凝土箱梁的表面裂縫、潛變撓度、支承墊塊的狀況，以及預力鋼腱的錨定區是否有滲水或腐蝕跡象，由於結構型式相似，可採用標準化的流程與工具。

2. 特殊性橋梁(Special Bridges)

特殊性橋梁參照交通部頒布之《公路橋梁檢測及補強規範》明定公路橋梁管理機關對於特殊性橋梁如吊橋、斜張橋、脊背橋、桁架橋、鋼

拱橋、混合梁橋、複合梁橋等橋型應訂定維護管理作業計畫，內容應包含檢(監)測項目、執行方式與頻率、判定標準等^[14]，而特殊性橋梁主要是指那些結構型式複雜、跨徑較大、受力機制獨特，或是具有極高重要性的橋梁，這類橋梁通常包含許多採用鋼箱型梁或大尺度預力混凝土箱型梁的結構，例如，斜張橋或脊背橋等，由於結構型式不一，重要構件各有不同，養護方式應量身訂做維護管理作業計畫。

對於特殊性橋梁，如規範要求公路養護管理機關或單位應考量個案特殊橋梁的結構特性及現地狀況，制定維護管理作業計畫，對於這類橋梁，針對其重要構件應進行詳細檢測，詳細檢測重要構件針對這些特殊結構，檢測必須深入到其獨有的重要構件，例如，斜張橋/脊背橋主橋塔、拉索的錨定端部(與箱型梁的接合處)、拉索本身的張力變化，以及箱型梁內部的阻尼器或特殊連接裝置，大跨度鋼箱梁，其鋼梁內部的防鏽塗層狀況、焊道的疲勞裂紋、加勁肋的穩定性，以及箱梁內部的濕度與通風。

總結來說，國內箱梁型式多數屬於預力混凝土箱型梁，但也大量使用鋼構造箱型梁，並且是許多複雜橋型(如脊背橋、斜張橋、拱橋)的核心結構構件。在維護管理方面，箱型橋梁的內部檢測(無論是預力箱或鋼箱)屬於重要且高風險的工作，需要特殊技術和程序來執行。

3.2 箱型梁檢測模式

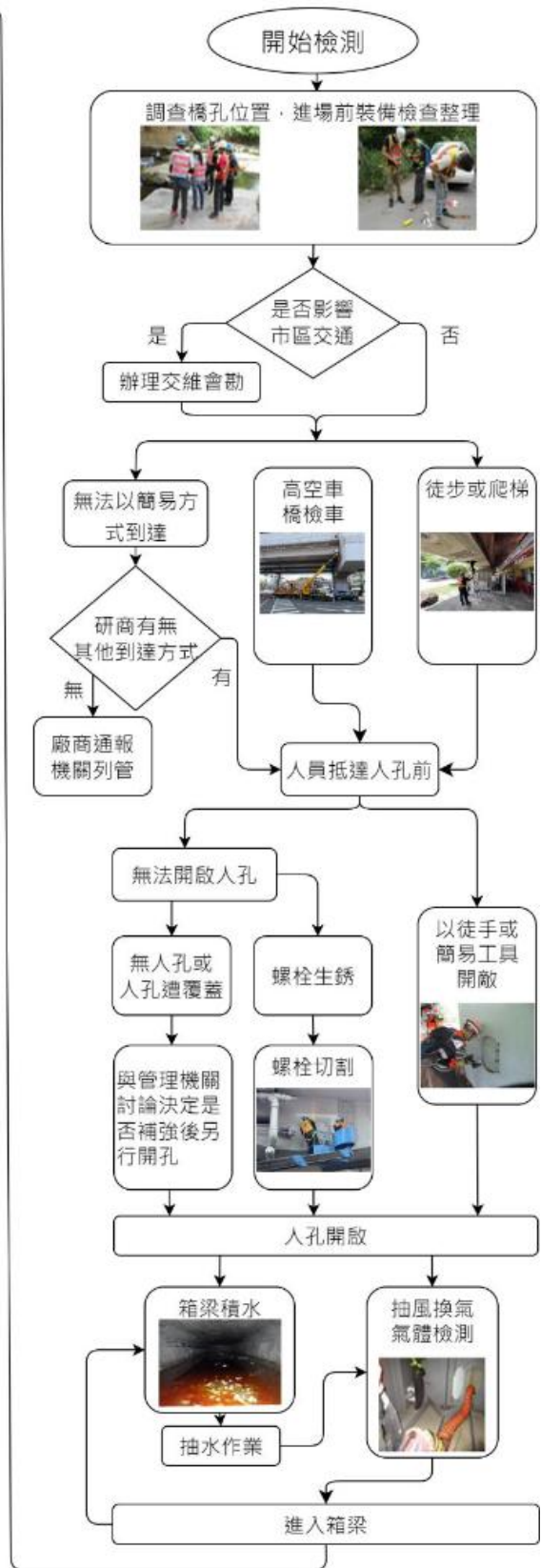
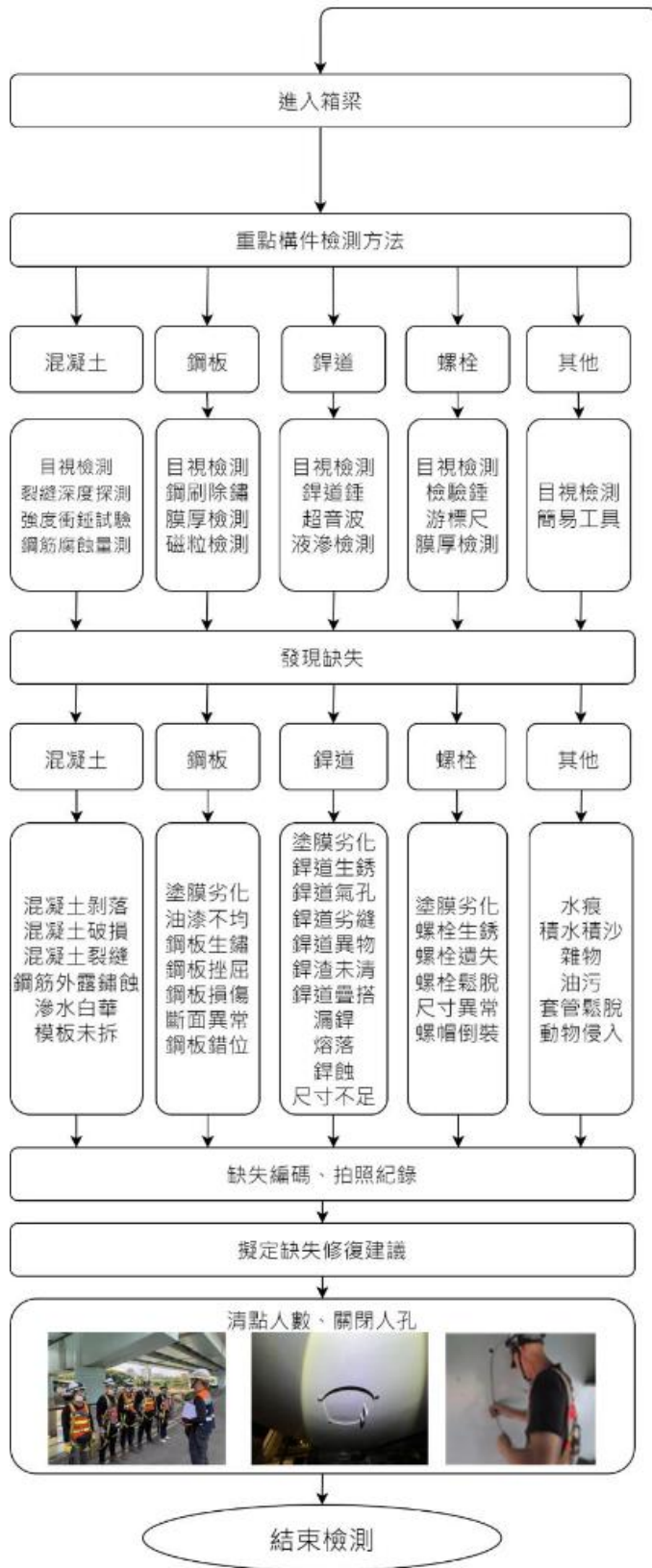
橋梁做為國家交通網絡的關鍵基礎設施，其維護與管理工作具有高度的公共安全與經濟重要性，這項工作在法制上奠基於《橋梁維護管理作業要點》，該要點明確地建構了各級政府機關的權責體系。在這個框架下，中央與地方主管機關的角色被精確劃分，以確保橋梁養護工作的連續性、專業性與有效性，中央主管機關通常負責制定宏觀政策、技術標準的審定，以及對整體執行情況的督導與考核；而橋梁維護管理之中央及地方單位機關或特定的橋梁養護單位，則肩負起對所轄橋梁進行實際維護的職責，這些養護單位必須依照既定的規範，對橋梁採取一

系列預防性、修正性的措施，核心目標始終是維持橋梁的原有功能，並保障社會大眾的通行安全，這套機制旨在形成一個閉環管理，從計畫、執行、檢查、到評估與改善，確保每一座橋梁都能維持在可接受的安全服務水準。

儘管我國在維護管理機制上具備一套明確的法規依據和權責劃分，但在具體檢測技術範疇的實務操作中，人工進行的目視檢測至今仍是評估結構狀況的核心基石，相關規範如《高速公路橋梁目視檢測手冊》^[15]，不僅是指導性的基礎規範，更是檢測人員進行初步結構評估與記錄的標準作業指南，檢測人員運用自身的經驗與專業知識，對橋梁的表面結構、構件連接處、支承系統以及排水設施等部位進行仔細的觀察，以識別、記錄並量化任何可見的損傷、缺陷或退化跡象，例如，混凝土裂縫、剝落、鋼材鏽蝕、油漆塗層破損、接縫失效或異常沉陷與變形等。

3.2.1 箱型梁內部檢測作業流程

箱型梁內部檢測屬於高風險作業，其具有進出困難(高空作業)、空間狹隘且無法自然通風(局限空間作業)、環境悶熱(高溫作業)等特性，可能發生墜落、缺氧、熱中暑等各項危害，作業時須遵循職業安全衛生法各項相關規定，劉家銘等(112年)整理橋梁箱內檢測整體作業流程及檢測項目，如圖 3.7 所示^[5]。

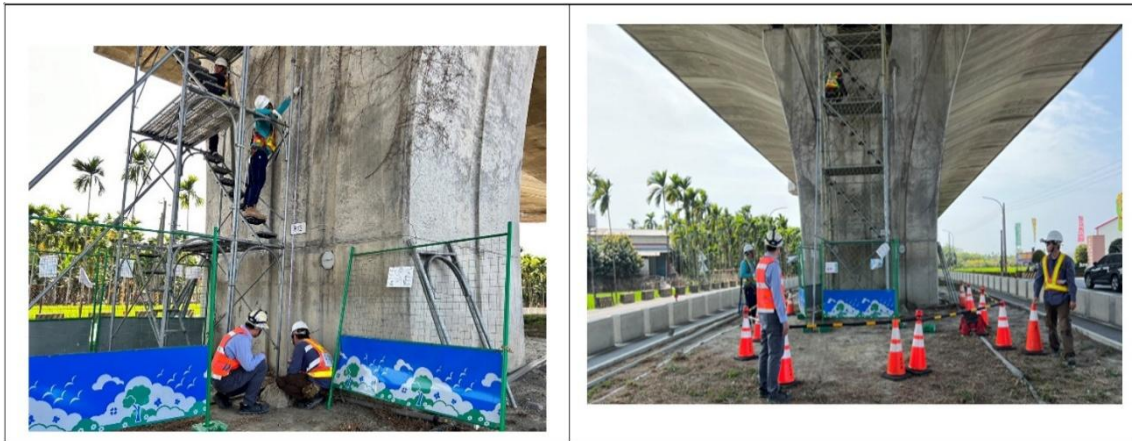


資料來源：市區箱型梁橋檢測常見問題及建議解決辦法^[5]

圖 3.7 箱型橋梁內部檢測流程圖

進出箱型梁人孔綜合了高風險的職業安全隱憂、設備使用的限制以及實際操作的困難，對檢測人員而言是箱內檢測作業中首要面對的環節，這一挑戰的核心在於如何安全、符合勞安規定且有效地將人員從橋面高處或外部安全區域轉移到箱梁側邊或底部的狹小開口，進出箱梁常需仰賴高空作業車或橋梁檢測車，將人員送至人孔高度。

其次，在無法使用高空作業車(如跨水橋)或橋梁檢測車(橋面、橋側空間不足)之情況下，替代方案是搭設成本高昂之施工架(如圖 3.8 所示^[5])。然而，這對預算有限的公部門和地方政府造成相當之負擔，也使檢測進度落後甚至無法落實，爰檢測人員在選擇進入方式時，始終受限於成本、時間與安全規範之間的 3 難困境。



資料來源：市區箱型梁橋檢測常見問題及建議解決辦法^[5]

圖 3.8 箱型橋梁內部檢測搭設施工架

此外，箱梁進出人孔設計的限制也加劇了進入的難度，一般人孔開口狹小，人員在進入時必須彎曲身體才能順利進入，此一情形亦限制攜帶的裝備(如 5 合 1 偵測器、通訊設備、手電筒和相機)須儘量輕便，新式橋梁中，雖然部分底部人孔設計允許人員從頭到尾貫穿，提升了效率，但舊式橋梁單元間的端隔梁封閉設計，則迫使檢測人員必須在每個單元重複進行高風險的進出動作，每一次重複都是對生命安全的額外暴露，從業人員必須在不穩定的高空環境中，精準地完成「跨越」與「進入」的動作，若缺乏能克服垂直或水平移動限制的新型設備，人員從高空工作車籃子轉移至人孔時的每一步都潛藏著墜落風險。

臺灣人口密集、交通繁忙，因此，許多都市地區高架橋之橋下使用狀況普遍較複雜，例如，橋下係跨越道路、河川、其他橋梁甚至匝道等；另外橋下如供其他機關使用者，則需提前與使用機關會勘商討合適之工作方案。都市地區箱型梁橋人孔進出常見狀況，如表 3-5 所示^[5]：

表 3-5 市區箱型梁橋人孔進出常見狀況及處理方案

狀況 1	現場狀況：人孔位於橋台或主梁較低處。 處理方案：人員可直進入或架梯進入。	狀況 2	現場狀況：人孔距地面 24M 以內，橋下車輛可進入，非屬市區道路。 處理方案：於橋下使用高空車。
			
狀況 3	現場狀況：人孔下方屬市區道路。 處理方案：需會同交通管理單位會勘，於外側車道使用高空車抵達人孔。	狀況 4	現場狀況：橋梁下方為匝道。 處理方案：需辦理橋面交雜會勘後於下層橋面使用高空車抵達。
			
狀況 5	現場狀況：人孔處位於為河道、或其他高架橋之上方。 處理方案：需會同交通管理單位會勘，於外側車道使用高空車抵達人孔。	狀況 6	現場狀況：橋孔下方供其他機關使用 處理方案：需與橋下使用單位會勘後，使用高空車抵達人孔處
			

資料來源：市區箱型梁橋檢測常見問題及建議解決辦法^[5]




3.2.2 箱型橋梁內部檢測常見劣化與缺失

3.2.2.1 鋼筋混凝土箱梁內部常見劣化與缺失

鋼筋混凝土結構是以水泥的水化產物做為膠結材料，結合一定級配骨料和鋼筋所形成的一種複合材料，鋼筋提供結構的抗拉強度，混凝土提供結構抗壓強度並給予鋼筋保護作用，因此混凝土材料的耐久性與性能表現，將直接影響鋼筋混凝土的結構性能。一般而言，混凝土橋梁設計，在其生命週期內不需過度的維護，即可抵抗預期的外力、磨耗與環境衝擊，並維持應有的結構性能與服務品質，然而在多數情況下不可避免受各種因素影響，造成鋼筋混凝土產生各種劣化現象與損傷缺陷。

常見混凝土橋梁之損傷劣化主要有裂縫、剝離、剝落、蜂窩、鋼筋外露、鋼筋銹蝕、表面侵蝕等，造成之原因更是各式各樣，且通常為複合因素同時作用所造成，例如，設計細節、混凝土品質、施工、養護、鹼骨料效應、交通衝擊與磨耗、環境因素及不當使用等各種影響因素。混凝土箱型梁內缺失項目主要大致與橋梁定期檢測項目類似，如混凝土剝落及裂縫、鋼筋外露鏽蝕、滲水白華等。此外，亦可能有施工階段遺留瑕疵，如模板爆模漏漿、或模板未拆等，統整如表 3-6 所示^[5]。

表 3-6 混凝土箱梁內部常見問題



損傷種類	混凝土裂縫	鋼筋外露鏽蝕	混凝土模板未拆
照片			
損傷成因	混凝土配比、施工不當或車輛超載造成混凝土開裂損傷。	鋼筋因滲水或氯離子過高產生鏽蝕現象後，混凝土脹裂。	因原有模板拆模後，發現灌漿缺失(蜂窩等)，以模板固定後修補之模板未拆除。
修復建議	研判裂縫是否屬結構性裂縫，一般裂縫可採表面修復或灌注，嚴重結構裂縫進行耐震詳評。	局部外露可將鬆動混凝土清除後，以鋼筋除鏽混凝土修復；如係因氯離子過高須整體評估。	因模板後方之混凝土狀況無法確定，建議拆除模板後再確認是否有混凝土空心或其他劣化情形。

資料來源：市區箱型梁橋檢測常見問題及建議解決辦法^[5]

3.2.2.2 鋼箱梁內部及其他箱梁綜合常見劣化與缺失

鋼箱型梁之重點檢測區域常見施工缺失包含螺栓及接合鈹未塗裝或噴塗不均，其中未塗裝之工地接頭若缺乏防蝕保護，其螺栓普遍有生鏽情形，而有噴塗不均情形之螺栓，則於塗裝不足之螺帽面上有局部生鏽情況，另因施工空間不足而未進行斷尾扭緊之螺栓，可發現已有鬆脫情形。橋梁使用期間常見之劣化問題包含螺栓鏽蝕、鋼板鏽蝕、銲道鏽蝕、積水，其他鋼箱梁缺失以鋼板塗裝剝落及銲道、鋼板鏽蝕為主，銲道也可見許多銲接相關缺失，如銲道氣孔、銲蝕、搭疊、漏銲等等，其建議解決方案，分別列於表 3-7 至表 3-9 所示^[5]。而不論鋼箱梁或混凝土箱梁，皆有可能因結構縫隙滲漏水，或箱梁內排水設施損壞等，導致箱梁內積水現象，箱內環境亦有可能吸引鳥類蛇蟲等生物築巢，其它箱型梁綜合常見問題，如表 3-10 所示^[5]。

表 3-7 鋼箱梁內部常見問題(螺栓)

損傷種類	螺栓塗膜劣化或不均	螺栓鏽蝕	螺栓未斷尾
照片			
損傷成因	噴塗前表面處理不良，塗膜附著性降低；或鎖固後未依規定塗膜，造成螺栓有單側無塗膜之情形。	因降雨水流滲入箱內，長期乾濕交替導致螺栓鏽蝕，常見於箱梁底板及頂板處之工地接頭螺栓、未塗膜螺栓	工地接頭螺栓未進行斷尾扭緊。
修復建議	螺栓表面除鏽處理後補漆至原設計要求。	依腐蝕程度進行表面除鏽處理後補漆或更換螺栓。	依空間考量使用螺帽轉角法鎖固或電動工具旋緊螺栓至斷尾。




資料來源：市區箱型梁橋檢測常見問題及建議解決辦法^[5]

表 3-8 鋼箱梁內部常見問題(銲道)

損傷種類	銲道氣孔	銲道搭疊	銲道尺寸不足
照片			
損傷成因	銲接時因氣流捲入銲接金屬表面或內部造成孔洞。	銲道趾部沒有銲著於母材而僅重疊搭在其之上，易應力集中導致裂縫	銲接缺失，銲道腳長、喉深不足，熔填不良。
修復建議	範圍較小且較輕微之缺失者採持續觀察，必要時進行銲道磨除並重新銲接。	範圍較小且輕微者可採持續觀察，搭疊區域較長者應磨平搭疊區域銲道。	如為主銲道，建議除漆後銲道補強至原設計尺寸。




資料來源：市區箱型梁橋檢測常見問題及建議解決辦法^[5]

表 3-9 鋼箱梁內部常見問題(鋼板)

損傷種類	鋼板塗膜劣化、垂流	鋼板變形	鋼板錯位
照片			
損傷成因	噴塗前表面處理不良、受到污染或受高溫影響造成塗膜劣化；局部噴塗過多或過厚，發生垂流現象。	因銲接應力受熱變形、施力不均造成下翼板局部受力變形或受外力撞擊產生之變形。	箱梁內因放樣或安裝誤差，導致鋼板銲接對接處錯位情形。
修復建議	鋼板表面除銹處理後補漆至原設計要求，垂流不影響防蝕功能，可持續觀察。	鋼板變形嚴重時須進行鋼板補強及矯正。	錯位距離若過大且對接之銲道無法符合全滲透銲要求，應再進行補銲或使用鋼板補強。

資料來源：市區箱型梁橋檢測常見問題及建議解決辦法^[5]

表 3-10 箱型梁內部其他常見問題

損傷種類	箱梁積水	生物活動痕跡或雜物	防落設施損傷
照片			
損傷成因	鋼箱梁續接板、人孔漏水；箱梁最低點無排水孔；排水設施損壞等。	施工遺留廢料或因鳥類等築巢所產生之雜物。	防落設施因橋梁長期自然振動，而有鬆動之情形。
修復建議	須釐清水流來源及路徑，自源頭阻絕水流進入箱內，並改善自然排水。詳如本文第四節。	為後續檢測工作及維護管理方便，建議連同維修工作時一同清除。	如配件仍完好，予以重新鎖固；倘有損壞之情形則必須更換。

資料來源：市區箱型梁橋檢測常見問題及建議解決辦法^[5]

國內橋梁檢測作業方式以目視檢測為主，例如交通部公路局轄區內省道鋼箱梁的內部檢測工作，便是以執行目視檢測評估工作為主，鋼箱梁內部是一個密閉、照明不佳且環境較為惡劣的空間，檢測人員需進

入其中，仰賴手持或穿戴式照明設備，步行或爬行進行全面性的觀察。主要檢視內部鋼板的鏽蝕程度、焊道的完整性、加勁板的變形，以及是否有水漬滲漏或累積的跡象。儘管這些工作非常重要且不可或缺，但這種高度勞力密集且主觀依賴性強的傳統方法，難以有效且一致地捕捉到結構物料層次上的細微變化，也無法即時監控動態的結構行為。

3.3 國內橋梁箱梁內部檢測現況與挑戰分析

3.3.1 國內橋梁維護管理機制與傳統檢測範疇

國內橋梁維護管理框架，依據行政院頒佈之《橋梁維護管理作業要點》確立了各級政府機關(包含中央與地方主管機關)在橋梁養護、考核及督導方面的權責劃分。橋梁的養護單位需依規定對所轄橋梁進行維護措施，以維持其原有功能並確保公眾通行安全。

在具體檢測技術方面，依據交通部頒佈之《公路橋梁檢測及補強規範》，現行橋梁檢測作業橋梁結構狀況評估仍以人工進行的目視檢測為基礎，各橋梁維護管理機關(構)如交通部高速公路局，自訂《高速公路橋梁目視檢測手冊》做為基礎規範文件，指導了檢測人員對結構的初步評估與記錄，公路局轄區內的省道鋼箱內部檢測工作，亦仍以目視檢測評估工作為主。

然而，儘管相關手冊持續修訂以精進作業，傳統目視評估本質上依賴檢測人員的近距離接觸和主觀判斷。這種方法在數據記錄方面容易產生錯誤、資料不清晰或不完整，且與現代對檢測數據客觀性、可重複性及日益嚴格的職業安全要求產生本質上的矛盾。

3.3.2 箱梁結構的特殊性與檢測作業挑戰

箱梁(Box Girder)結構，無論是鋼箱梁或預力混凝土箱梁，其內部空間因設計要求和施工限制，通常形成一個狹窄、缺乏自然光照、通風

不良且具有潛在障礙物的環境，目前實務檢測作業方式係以直接目視或間接目視檢測為主，目視檢測能夠最直接、最快速取得資訊，而箱梁內部結構特性對傳統目視檢測方法有許多作業挑戰：

1.安全風險及成本高昂

箱梁內部屬於局限空間，潛在的缺氧或有毒氣體危害極高，必須投入大量安全資源(如通風設備、監視人員、安全設施等)。高架橋檢測還需租用昂貴的輔助機具，如高空作業車、橋梁檢測車、標誌車，必要時還需進行交通管制或執行交通維持計畫，影響交通車流且大幅增加了檢測成本。

2.可近性及執行難度

許多橋梁，特別是山區、狹窄道路或跨越峽谷的橋梁，橋檢車無法通行或機器手臂無法觸及，電器化鐵路橋梁亦不適合橋檢車運作，在這些難以接近的區域，目視檢查或近距離量測的難度極高。

3.檢測資料的主觀性和不一致性

傳統 DER&U 目視檢測法雖然可以快速辨識問題，但高度仰賴檢測人員的經驗和主觀判斷。資淺人員容易因經驗不足造成評估結果的差異。此外，檢測表格數量多、現場填寫複雜，且檢測紀錄常有手稿遺漏不清、照片無法比對等問題，影響數據品質。

4.量測項目超出目視檢測範疇

部分規範要求的檢測項目(如沉陷量)必須透過測量儀器長期量測比對，而非目視檢測作業可評估。基礎裸露長度需要設計深度資料才能判定，但許多老舊橋梁的設計圖說資料已不可考。這使得規範在實務上的操作難度過高。

綜上所述，傳統人工檢測要求人員進入局限空間進行目視，這使得安全合規成本極高，若採用非進入式輔助工具(如 UAV 或履帶機器人等)將能夠極大程度地減少或消除人員進入之需求，因此導入先進技術

的首要經濟效益並非單純來自檢測效率提升，而是源於對職業安全風險的規避以及法規遵循成本的顯著下降，此種風險轉移與成本效益，使得自動化檢測投資具有長期的規模經濟效益。

在仍須少量人員進入進行關鍵複檢或緊急維護的情況下，穿戴式裝置如具備即時視訊傳輸功能的頭戴式攝影機或 AR 裝置，成為最小化人員風險與時間暴露的關鍵手段，這些裝置能將人員的目視資訊、生命體徵數據即時傳送至外部監控站，提高外部人員的態勢感知能力，並在人員必須進入時，能大幅縮短其在局限空間內的停留時間。

此外，由於法規明確要求在任何作業開始前必須確認空氣中的氧氣及危害物質濃度，這對技術輔助工具之設計提出了剛性要求，即使機器人或無人機執行主要檢測，後續仍可能需要少數人員進入執行維護。因此，研發的輔助工具(特別是做為先導偵測的平台)必須具備預探測功能，搭載多氣體傳感器，以滿足法規中「作業開始前確認濃度」的要求，做為後續人員進入的先決條件。局限空間相關作業法規要求與技術輔助工具對應機制，如表 3-11 所示。

表 3-11 局限空間作業法規要求與技術輔助工具對應機制

法規要求(依據職安法/缺氧症預防規則)	傳統人工檢測(風險/限制)	輔助工具(UAV/機器人/穿戴式裝置)解決方案	效益
氧氣及有害物濃度確認(作業開始前/持續測定)。	需人工進入，存在暴露風險，且數據傳輸困難。	搭載多氣體傳感器的機器人或 UAV 先行探測，即時數據回傳。	提升安全性，數據即時性高，滿足法規先決條件。
作業區域持續監視(超出目視範圍須配備偵測裝置)。	難以連續掌握人員動態，缺乏救援時效。	輔助工具提供廣角、全景或 3D 影像回傳，做為外部監視人員的延伸視覺；穿戴式裝置即時回傳人員狀態與視角。	強化安全管理，提供高保真度現場情報，縮短人員暴露時間。
設置適當通風換氣設備。	設備笨重，部署複雜，耗費時間。	機器人或 UAV 可用於評估通風效果，並減少人員對通風設備的依賴程度。	減少複雜設備部署的時間與人力。
動力或機械輔助吊升之緊急救援設備。	需大量人力與時間布署，救援反應慢。	減少人員進入，實質上降低了對複雜救援系統的依賴。	減少人力成本與救援複雜度，避免人員受困。

3.4 小結

本章分析國內橋梁箱梁型式，並深入探討其內部檢測所面臨的嚴峻挑戰，從數量統計來看，全國車行橋梁中箱型橋約有 3,288 座，主梁材質以預力混凝土箱梁數量最多，而鋼構造箱梁則約有 1,140 座，廣泛應用於梁式橋、脊背橋、斜張橋和拱橋等複雜結構型式，其優異的抗扭能力和輕量化特性使其成為中長跨徑橋梁的理想選擇。國內橋梁維護管理體系在行政上雖已確立了明確的權責劃分和規範依據如《橋梁維護管理作業要點》，但實務檢測的方式仍是以人工目視檢測為主。

然而箱梁內部空間的特殊性(狹窄、通風不良、黑暗)，使其檢測作業具備極高的風險與成本。作業需遵循職業安全衛生法規，投入大量的安全資源(如通風設備、監視人員等)，且進出人孔往往需要租用昂貴的輔助機具，如高空作業車或橋梁檢測車，若無法使用機具，則須搭設成本高昂的施工架，大幅增加了檢測難度與經費負擔。此外傳統目視檢測面臨資料主觀性高、一致性不足之問題，難以精確量測規範要求的微小劣化尺度，影響了結構評估的客觀性。箱梁內部常見的劣化問題包含混凝土結構的裂縫、鋼筋外露鏽蝕、施工階段遺留的模板未拆，以及鋼箱梁的螺栓鏽蝕、銲道缺陷(如氣孔、搭疊)和積水等。

雖然目視檢測在提供直觀、初步評估方面具有不可替代的價值，但面對現代橋梁結構日益複雜化、交通流量與載重不斷增長，以及對基礎設施安全要求日益提高的趨勢，這種傳統範疇的限制也日益凸顯，且傳統人工進入局限空間的模式，其高昂的安全合規成本和職業風險，已成為持續維護管理的重大瓶頸，因此未來如何有效地整合並推廣使用先進的非接觸式感測技術、遙測技術、機器人檢測，以及結構健康監測(SHM)系統，以克服傳統目視檢測的侷限，轉向更全面、客觀且數據化的評估模式，導入如機器人或無人機等輔助工具，透過輔助甚至取代人員進入箱梁內部檢測之需求，將能夠顯著降低法規遵循成本與風險，此為推動臺灣橋梁維護管理體系進化之關鍵方向。

第四章 橋檢實務現況調查與訪談

本章旨在呈現對國內橋梁箱內檢測實務現況的調查與專家訪談結果，內容涵蓋政府單位養護管理機關(構)與第一線橋梁檢測顧問公司之視角。調查結果確立了國內箱內檢測作業的核心挑戰，主要集中於高風險局限空間作業、昂貴且受限的進入方式，以及極端惡劣的環境條件。同時本章深入分析了現行技術的瓶頸，包括無人機因揚塵與照明不足難以應用、雷射掃描因障礙物多且受橋梁震動影響，以及數位系統因箱內訊號不良等。本計畫前往橋梁箱內現地觀摩，比較不同箱梁型式在空間、溫度和檢測重點上之差異，瞭解人工目視檢測於箱內空間之困難、危險性，以及高度耗時之特性。

為提升橋梁檢測之安全與效率，未來橋檢輔助工具必須具備輕量化、高穩定度，且能減少人員於高風險環境暴露時間之特性，以緩解人力檢測困境。本計畫進行專家訪談及現地觀摩，列表如表 4-1 所示。

表 4-1 114 年訪談及現地觀摩列表

項次	時間	項目	地點
1	6 月 18 日	橋梁管理養護單位訪談	交通部高速公路局中區養護工程分局大甲工務段
2	7 月 11 日	台 74 線(更生巷~松竹路高架橋)主線 PC 箱梁現地觀摩	臺中市台 74 線更生巷~松竹路高架橋
3	9 月 11 日	橋梁檢測作業團隊訪談	南投縣南投市軍功橋
4	9 月 11 日	南投縣南投市軍功橋鋼箱梁現地觀摩	南投縣南投市軍功橋

4.1 訪談對象與調查方法

本計畫訪談對象主要分為 2 個領域，包括政府單位負責橋梁養護管理單位負責人與工程師，以及實際執行橋梁檢測作業的顧問公司檢測團隊。

4.1.1 橋梁管理養護單位訪談

本計畫於 114 年 6 月 18 日拜訪交通部高速公路局中區養護工程分局大甲工務段(以下簡稱高公局)，並進行專家訪談，主要訪談對象包括單位主管、承辦橋檢業務工程師，以及單位執行橋檢工作之工程顧問公司技師。訪談目的在於從維護管理橋梁之政府單位角度，瞭解橋梁箱型梁內部檢測的作業流程、頻率、人力配置與技術應用現況，並蒐集檢測作業中面臨的實務困難與職業風險。

單位主管及工程師做為高公局工務段的管理與橋檢工程人員，對轄區內的橋梁管理狀況有深入的瞭解，特別是目前高公局規定每 3 年檢測 1 次箱梁內部之規範，他們提供了關於轄區內橋梁數量(約 149 座，其中約 93 座為箱型梁橋)、檢測頻率，以及在現場執行中遇到的照明、通風、高溫、狹窄空間等問題，此外，本次訪談也探討了現階段，橋梁箱內檢測實務中，常使用之輔助工具的使用成效，以及對未來新型檢測輔助設備(如機器人、AI 分析)的潛在需求，訪談會議如圖 4.1 所示。



圖 4.1 高速公路局大甲工務段訪談

4.1.2 橋梁檢測作業團隊訪談

本次訪談對象為黎明工程顧問股份有限公司檢測組組長，組長從事檢測工作約 17 年，主要負責公路局雲嘉南地區的橋梁檢測業務，所屬團隊為檢測工作之主要執行者。

組長提供了第一線的實務經驗，包括他們檢測小組通常由 3 名人員組成(負責找缺失、記錄、拍照)，以及進入箱內檢查的主要仰賴高空工作車，於鋼箱梁內檢測之重點包括焊道、螺栓接合處與油漆塗裝狀況，並強調工作環境的極端條件，如狹小、悶熱以及可能遭遇的動物和施工遺留物帶來的風險。組長的經驗為評估新技術在克服高風險、高人力成本檢測作業中的可行性提供了關鍵參考，現地訪談如圖 4.2 所示。



圖 4.2 鋼箱梁現場觀摩及訪談

4.2 橋梁檢測實務現況訪談

4.2.1 高速公路局大甲工務段

本計畫於 114 年 6 月 18 日拜訪高速公路局大甲工務段之單位主管、承辦橋檢業務工程師，以及單位執行橋檢工作之工程顧問公司技師進行訪談，對臺灣橋梁箱型梁內部檢測實務現況進行深入訪談。現況顯示，國內橋梁檢測作業在法規要求、作業環境、技術應用及制度上，面臨多重且複雜的挑戰。

1. 橋梁管理法規與檢測頻率現況

根據高公局的規定，轄區內的箱型梁內部檢測有相關時程要求，大甲工務段管轄約 149 座橋梁，其中箱型梁約有 93 座，高公局規定箱梁內部必須每 3 年檢測 1 次，對於特殊或重點管控的橋梁，檢測頻率甚至需提高至每年 1 次。

然而，實務上並非所有箱體都能順利進入，若箱室因設計缺陷或管線阻礙而無法進入，工務段須提報詳盡原因，並經局方會勘同意，方可豁免檢測，此外考量到箱內極端惡劣的工作環境，檢測時程的安排也成為管理的重點，為了避免夏季鋼箱梁內部高溫導致人員中暑，工務段會將大部分的箱內檢測任務安排在年初或冬季執行。

2. 高風險檢測作業流程與職業挑戰

箱內檢測被視為高風險的密閉空間作業，對檢測人員構成實質的職業危害，訪談中受訪人員提出目前實務進行箱內檢測所面臨的問題及挑戰。

(1) 人力配置與安全規範

標準的箱內檢測作業小組至少需由 3 名人員組成，包括進入者和外部戒護人員。安全規範要求進入箱內前，作業主管必須在場，人員需配戴 5 合 1 偵測器(用於偵測氧氣濃度及有害氣體)，並使用對講機或無

線電與外部人員隨時保持聯繫，這反映出箱內檢測作業的高度危險性，需要嚴謹的生命安全保障機制。

(2) 惡劣的環境與人身傷害

檢測人員必須克服多種惡劣環境：

- 狹小空間：許多箱梁(例如烏日路段的橋梁)高度低，要求人員全程彎腰、蹲低甚至爬行。鋼箱梁內部還設有縱向與橫向的加勁板，大幅阻礙人員行走與視野。
- 極端高溫：尤其在夏季或鋼箱梁內，溫度會極速升高，導致人員大量出汗，體力迅速流失。曾發生檢測人員水喝光，需緊急補充的案例，甚至有同仁因壓力或環境影響需靠藥物維持。
- 視野與定位：箱內光源嚴重不足，僅靠手電筒照明。長跨橋梁內部空間感差，容易發生誤判位置，因此檢測人員需用粉筆在旁邊寫下橋梁編號或跨距，做為空間定位的輔助手段。
- 危險遺留物：箱內常見施工遺留的鐵釘、鋼筋端部、拉桿等，曾有同仁踩到鐵釘穿刺工作鞋或因未踩穩鋼腱錨定塊而膝蓋受傷流血的案例。

3. 現行檢測技術瓶頸與數位化困境

目前箱內檢測仍以目視檢測為基礎，高度依賴人員的經驗判斷，新興輔助工具技術的應用在實務上挑戰及限制：

(1) 無人機(UAV)

在箱內因揚塵嚴重、照明不足及電池續航力短(經測試只能飛1跨)而無法有效應用。

(2) 雷射掃描(LiDAR)

由於箱內有大量管線、防震拉桿及預力鋼腱錨定塊等障礙物，無法進行完整掃描，且橋梁微小震動會影響其精度，難以有效檢測裂縫。

(3)360 度攝影機

雖然可快速記錄全景影像，但影像會產生嚴重變形，難以準確判讀裂縫的長度或寬度。

4.未來技術輔助的期望與創新障礙

面對高風險和高人力成本之箱內檢測，業界對新型輔助技術抱有高度期望，但強調必須具備實用性、簡易操作性與穩定性。

(1)對理想輔助設備的期望

以目前現有橋梁箱內環境現況及相關技術之發展，理想之箱內輔助設備應著重在減少人員於箱內之停留時間，而非完全取代人力。橋梁維管單位建議之方向包括：

- 輕量化、穩定度高的穿戴式攝影機：雖然頭戴式攝影機容易因晃動影響畫質，但若解決穩定性問題，將能協助記錄人員快速走過，將人力資源集中於後續分析。
- 內建軌道式巡檢機器人：這是針對新建橋梁的理想解決方案。若能在橋梁新建時預留軌道，讓可掛載式機器人進行自動化巡檢，將能大幅減少未來的人工檢測需求，甚至提高檢測頻率，然而對於現有橋梁，要加裝軌道需克服鑽孔(需避開鋼腱)和伸縮縫等問題。
- 利用既有結構：考量到許多高公局橋梁內已有交控管線，建議探討是否能利用這些既有管線做為機器人移動的軌道或附掛點，以克服頂板鑽孔和架設新軌道的複雜性。

(2)實踐與制度之障礙

政府單位或檢測業者在採購和應用新設備時，傾向於選擇穩健、實用且方便使用之產品，過於複雜或需要大量後續分析的設備(如複雜的AI系統)較難以被第一線使用人員接受。

爰此，本所洽商高公局大甲工務段同意未來可提供相對短且筆直之箱梁做為本所研發新檢測工具之測試驗證場地，將能有助於新檢測技術之推展與落實。

5. 制度面的人力與培訓需求

除了技術和環境挑戰，制度面上的人力供應與培訓機制，亦影響箱內檢測效率之落實。

(1) 橋檢證照與名額限制

橋梁檢測人員專業證照(通常每 4 年回訓 1 次)發放面臨供需失衡：

- 名額不足：每年舉辦的訓練課程名額有限，導致某些沒報到名之橋檢人員無法順利受訓。
- 證照發放時程過長：受訓課程通常在 7、8 月結束，但參訓合格人員往往須等到 10 月或 11 月才能拿到正式證書，這導致新培訓之人員，受訓後至實際執行橋檢工作有空窗期，無法在當年度的契約時程內上崗執行工作。應簡化或縮短從考試到取得證照的過渡期，例如先發放臨時證明，以緩解廠商在執行高風險工作時之人力壓力。

(2) 養護能量與缺失處理

實務上橋梁維管單位之養護經費有限，檢測報告中的缺失會依影響及嚴重程度排序處理，這導致許多不影響橋梁整體結構安全，但影響檢測人員安全之施工缺失(如箱內遺留的鐵釘、未移除的頂板模版等)，即便每次都被記錄下來，也因經費有限迫使橋梁維管機關必須將資源集中在較重大缺失上而無法立即處理，忽視了細微但持續存在的職業安全隱患。依高公局大甲工務段訪談內容彙整之橋梁箱型梁內部檢測實務現況及挑戰，如表 4-2 所示。

表 4-2 高公局大甲工務段橋梁箱型梁內部檢測實務現況及挑戰

構面	主題	現況/挑戰	解決方案/期望
法規與管理	1. 檢測頻率	高公局要求箱梁內部每 3 年檢測 1 次，重點橋梁每年 1 次。	-
	2. 豁免與時程	1. 箱室若因設計或管線阻礙無法進入，須提報核准方可豁免。 2. 考量夏季鋼箱梁內部高溫，多數檢測安排在年初或冬季。	-
高風險作業與職業挑戰	1. 人力與安全規範	1. 標準作業小組至少需 3 人(進入者及外部戒護)。 2. 需配戴 5 合 1 偵測器，並全程保持通訊。	強化生命安全保障機制。
	2. 進入方式限制	1. 依賴高空作業車進入人孔。 2. 人員從工作車籃子爬出進入人孔，有勞安疑慮被視為錯誤作業行為，若嚴格執行，現行檢測恐難以進行。	需開發能克服垂直/水平移動限制的新型設備。
	3. 惡劣環境	1. 空間受限：需彎腰、蹲低、爬行，加勁板阻礙行走與視野。 2. 極端高溫：夏季或鋼箱梁內易導致人員中暑、體力快速流失。 3. 視野不佳：僅靠手電筒，長跨橋梁需粉筆輔助定位。 4. 危險遺留物：施工遺留的鐵釘、鋼筋端部等，易造成人身傷害。	核心目標：減少人員在箱內暴露時間。
技術瓶頸與數位化困境	1. 檢測技術	仍以目視檢測為基礎，高度依賴人員經驗。	-
	2. 輔助工具限制	1. 無人機(UAV)：揚塵、照明不足、續航力短，難以應用。 2. 雷射掃描(LiDAR)：障礙物多、橋梁微震，影響精度，難檢測裂縫。 3. 360 度攝影機：影像嚴重變形，難準確判讀裂縫長寬。	-
	3. 系統限制	1. 設備綁定：僅支援特定設備(如 Apple iPad)。 2. 訊號/定位要求：鋼箱梁內無訊號，系統有嚴格地理限制(需在中心點 2 公里內)。 3. 即時上傳壓力：強制要求即時上傳，恐拉長人員在密閉空間的逗留時間，造成安全顧慮。	1. 簡化現場填報流程，允許彈性上傳。 2. 廠商多採紙本/影像記錄後回辦公室再上傳的變通方式。

未來技術輔助期望與障礙	1.理想輔助設備	<ul style="list-style-type: none"> 1.輕量化、穩定度高的穿戴式攝影機：協助快速記錄，將資源集中於後續分析。 2.內建軌道式巡檢機器人：理想的新建橋梁解決方案，可大幅減少人工需求。 3.利用既有結構：探討利用交控管線做為機器人移動軌道或附掛點。 	研發導向輕量化、抗噪、高穩定度的影像記錄與分析輔助設備。
	2.實踐與制度障礙	<ul style="list-style-type: none"> 1.政府單位採購傾向穩健、實用且方便使用之設備，複雜系統難被接受。 2.缺乏實驗場域來測試新技術。 	提供相對短且筆直的橋梁做為示範場地，促進產研合作。
制度面的人力與培訓需求	1.證照與名額限制	<ul style="list-style-type: none"> 1.名額有限：訓練名額有限，導致某些沒報到名之橋檢人員無法順利受訓。 2.發證時程過長：課程結束到拿到證書時間過久，影響當年度契約時程。 	簡化或縮短從考試到取得證照的過渡期(如先發放臨時證明)。
	2.養護能量與缺失處理	<ul style="list-style-type: none"> 1.工務段養護經費有限，導致許多非重大但影響檢測人員安全之施工缺失(如箱內遺留物)無法立即處理。 2.資源集中處理重大缺失，忽視細微但持續存在的職業安全隱患。 	確保足夠的養護經費，並平衡處理重大缺失與職業安全隱患。

4.2.2 黎明工程顧問股份有限公司

本計畫 114 年 9 月 11 日訪談黎明工程顧問股份有限公司結構部檢測組組長，組長做為第一線的資深橋梁檢測專家，提供了極具價值的現場經驗與對業界制度之專業見解。

1.橋梁箱內檢測的政策目標與法規頻率

(1)法規與目標時程

公路局近年對所轄橋梁箱內進行全面之檢測，目前設定之明確目標為在民國 116 年之前，須完成所有箱型梁之內部檢查。組長提到公

路局轄區內之橋梁數量龐大，僅該公司承攬負責執行檢測之公路局中分局(管轄橋梁數量最多)，就需動員近 20 名同仁執行檢測。組長的團隊則是在 106 年至 110 年間，已將公路局(中分局)所轄之鋼箱梁全面檢查完畢，目前正著手進行預力箱梁之內部檢測工作。

針對檢測頻率，業界存在成本與安全性的權衡討論。組長提到，認為若橋梁內部狀況良好，或許可以拉長檢測間隔，或有其他能輔助初步研判箱內狀況之儀器工具，亦可考慮將檢測頻率延長。

(2)檢測核心項目

箱內檢測主要目標是確認結構物的劣化程度，其中鋼箱梁有 3 個核心檢測項目必須特別關注：焊道狀況、螺栓接合處，以及油漆塗裝狀況。箱內檢測的頭號敵人是水，若箱梁內部出現積水或漏水的狀況，將對鋼結構造成腐蝕生鏽，對整體結構穩定性產生重大影響，因此檢查人員必須記錄所有缺失，如螺栓是否有鬆脫或缺少，焊道是否有裂縫、氣孔，以及塗裝是否剝落。

2.檢測作業流程與人力配置的實務分析

(1)檢測進入方式

組長指出，目前檢測工作有約 70%~80%須依靠高空作業車或橋梁檢測車才能接近出入箱梁之人孔，其中又有 90%以上是依靠高空工作車，需將人員送至箱梁側邊或底端的人孔，實務經驗中，箱內檢測使用橋梁檢測車之頻率極低，通常只在特定橋跨(如跨越國道)無法使用高空作業車時才會使用，且橋檢車不適用於較小型之橋梁。若高空車與橋檢車因環境狀況皆無法使用，最後的手段是搭設施工架(從上方或下方搭設)，然而搭架成本高昂，僅為進入檢查箱內就需花費數十萬，這對預算有限之橋梁維管單位而言，是難以承受之負擔。

此外，新舊橋梁設計影響著檢測的效率與安全，舊式橋梁單元間往往有端隔梁封閉，檢測人員必須在每個單元進出多次，每次進出都是一次危險且極度耗時影響檢測效率。較新的橋梁設計則在箱梁單元間之

端部開了人孔，允許人員從頭到尾貫穿，大幅提升了檢測效率。

(2)人力配置與效率

組長的經驗顯示，執行箱內檢測最省人力且效率最高之作業小組應配置 3 名人員，工作分別為第 1 名人員初步尋找缺失並快速掃視、第 2 名人員記錄並同步複核缺失以防遺漏，第 3 名人員負責拍照記錄。

他認為 4 人雖可提高檢測品質但可能會造成人力過剩，在效率方面檢測一條長約 290 公尺的箱室通道，1 個小組(3 人)通常需要 1.5 到 2 個小時才能完成，如果缺失點過多耗時將更久，組長曾有單次在箱內停留超過 4 小時的紀錄。

3.極端作業環境與人身安全風險

箱內環境是高風險工作的主要挑戰來源，箱內檢測被視為高風險的密閉空間作業，對檢測人員構成實質的職業危害，訪談中受訪人員提出目前實務進行箱內檢測所面臨的問題及挑戰如下：

(1)空間限制與作業難度

箱梁內部空間的狹小性是普遍問題，有些小型箱梁高度可能僅有 1.2 公尺，檢查人員必須全程蹲著或爬行才能移動和作業。鋼箱梁內部充斥著縱向與橫向的加勁板，這些構造會成為人員跨越或作業的障礙。

(2)溫度與通風問題

尤其鋼箱梁在白天會因為鋼構材質強烈吸熱，而導致內部溫度極高非常悶熱。組長指出若檢測當日在上午未完成作業，會因箱體吸熱內部溫度持續升高，下午進入會熱到難以忍受，甚至可能發生中暑或身體不適，需要緊急撤離休息，因此檢測團隊會盡量將鋼箱梁的檢測排在清晨時段，於上午完成檢測作業。

(3)生物與施工遺留物危害

檢測人員在箱內會遭遇各種生物，包括螞蟻、蜘蛛、蟑螂或蛇類等，

在山區橋梁中蝙蝠非常多，但蝙蝠通常會避開人，若鴿子則會緊張亂飛造成困擾，此外內部還經常發現動物屍體。

在施工遺留物方面，箱內可能殘留鐵釘、鋼筋端部等危險物品，由於人孔狹小箱內行動相當困難且具危險性，若箱內留有大型廢棄物往往留在原地難以清除，必要時需在箱內進行切割作業，但若不影響橋梁結構安全，大多不處理僅做記錄。

4.技術瓶頸與對未來輔助工具的需求

現行箱內檢測仍主要仰賴人力目視及紙本記錄，效率低且風險高，組長及其團隊對於新興技術抱持開放態度，並提出 2 大主要需求方向：

(1)軌道式自動巡檢系統

針對結構較為一致的鋼箱梁，可考慮導入軌道式攝影機或機器人。參考本計畫提供國外已有在鋼箱內加裝軌道進行影像拍攝之研究案例，他認為，這種系統的優勢在於：

- 快速掃描：機器人可以在極短時間內(例如 290 公尺只需 10 分鐘)跑完 1 趟，遠遠快於人工的 1.5 至 2 小時。
- 初步篩選：機器人或攝影機的目的是進行快速初篩，判斷箱內是否有重大異常(例如明顯漏水或結構大問題)，若發現重大缺失，再派人力進場詳細檢查，避免人員為「無事發生」的橋梁長時間暴露於風險中，亦可減少有限經費不必要之開支。
- 可行性評估：雖然在舊橋梁上鑽孔或焊接軌道存在難度(需避開預力鋼腱)，且軌道設置可能影響人員通過，但對於結構一致的鋼箱梁而言，仍是提高效率的潛力方向。

(2)穿戴式與 AI 輔助記錄

對於預力箱梁或其他內部結構複雜之橋梁，以目前技術難以有一可靠且方便之自動化工具取代人員執行檢測工作，人員仍必須進入箱梁內部，因此組長建議開發輕便、穿戴式之檢測設備(如頭戴式攝影機)，

理想的穿戴式設備應能達到以下目標：

- 減少人力：透過輔助記錄功能，將員 3 名人員縮減至 2 名人員。
- 自動記錄：設備應具備 AI 輔助記錄功能，直接將檢測人員之口述內容(例如缺失類型)轉換成文字且定位標記。
- 定位精準：由於鋼箱梁內部訊號不良無法依賴 GPS 訊號，設備應能透過距離測量等方式，精準定位缺失點位於哪一跨之箱梁中之哪一塊構件。

5. 制度面挑戰與橋檢人力困境

箱內檢測的高風險性和專業性，導致業界長期面臨人力短缺的嚴重問題，由於工作環境極端惡劣且具危險性，建議執行箱內作業的同仁應有額外獎金，做為風險性報酬與鼓勵，然而實務上即使有額外獎金，年輕人仍多不願從事這種高風險工作。依黎明工程顧問股份有限公司結構部檢測組組長訪談內容，彙整之橋梁箱型梁內部檢測實務現況及挑戰，如表 4-3 所示。

表 4-3 橋檢從業人員橋梁箱型梁內部檢測實務現況及挑戰

構面	主題	現況/挑戰	解決方案/期望
法規與政策目標	1.政策時程	公路局目標在民國 116 年之前完成所有預力箱型梁的內部檢查。	-
	2.檢測頻率與權衡	1.過去高公局頻率為每 3 年/4 年一次。 2.業界討論：狀況良好之橋梁，建議可拉長檢測間隔。	依橋梁實際狀況，權衡檢測成本與安全性，調整頻率。
	3.核心檢測項目	必須關注焊道狀況、螺栓接合處及油漆塗裝。頭號敵人是水(積水/漏水)，會造成腐蝕生鏽。	-
作業流程與人力配置	1.檢測進入方式	1.約 90% 依靠高空工作車，將人員送至人孔。 2.橋梁檢測車使用率極低，僅用於特定橋跨。 3.搭設施工架成本數十萬，難以負擔。	應開發能替代高空車/施工架、安全且經濟的進入方式。

	2.橋梁設計影響	舊式橋梁：單元間有端隔梁封閉，需多次進出，耗時且危險。 較新設計：箱梁間端部設人孔，允許人員貫穿，大幅提升效率。	新建橋梁應優先採用有利於檢測的設計。
	3.人力配置與效率	1.效率最高配置：3 人小組尋找缺失、記錄/複核、拍照)。 2.作業時間：約 290 公尺箱室需 1.5 至 2 小時，缺失多時可能超 4 小時。	-
極端作業環境與人身安全	1.空間限制	有些小型箱梁高度僅 1.2 公尺，檢測人員須全程蹲低或爬行；鋼箱梁內加勁板阻礙移動。	-
	2.溫度與通風	鋼箱梁白天強烈吸熱，內部溫度極高、悶熱，易導致中暑，需將檢測排在清晨。	-
	3.生物與施工遺留物	1.生物危害：螞蟻、蟑螂、蜘蛛、蛇類、蝙蝠、鴿子、動物屍體。 2.遺留物危害：鐵釘、鋼筋端部等，清理困難，大型廢棄物常留至於箱內。	需落實清理遺留物，確保工作環境安全。
技術瓶頸與未來輔助工具需求	1.軌道式自動巡檢系統(鋼箱梁)	1.優勢：快速掃描(290 公尺只需 10 分鐘)、用於初篩重大異常，避免人員不必要的風險暴露。 2.挑戰：舊橋梁鑽孔/焊接軌道難度，且需避開預力鋼腱。	優先導入結構一致的鋼箱梁進行快速篩選，再輔以人力詳檢。
	2.穿戴式與 AI 輔助記錄(預力箱梁)	1.減少人力：理想情況下，可將 3 人組減至 2 人組。 2.自動記錄：AI 輔助記錄功能，將口述內容轉為文字或標記。 3.定位精準：需克服箱內無 GPS 訊號，透過距離測量等方式精準定位缺失點。	開發輕便、能精準定位、具 AI 輔助記錄的穿戴式設備。
制度面挑戰與人力困境	風險報酬與人力激勵	發放獎金做為風險報酬，但年輕人從事意願仍低。	提高風險性報酬與工作待遇，以吸引新血。

4.3 現場觀摩及操作觀察分析

4.3.1 台 74 線(更生巷~松竹路高架橋)PC 箱梁現地觀摩

本計畫於 114 年 7 月 11 日參與交通部公路局黎明工程顧問股份有限公司箱梁內部檢測作業，前往台 74 線(更生巷~松竹路高架橋)主線 PC 箱梁進行現地觀摩，橋梁基本資料，如表 4-4 所示。

表 4-4 更生巷~松竹路高架橋基本資料

橋梁名稱	更生巷~松竹路高架橋	橋梁編號	74B2-4-1	使用狀態	正常使用	設施種類	橋梁
維管中央主管機關	交通部	財產權屬機關	未代養				
管理機關	交通部公路局	第二層管理機關	公路局中區養護工程分局	第三層管理機關	員林工務段	橋梁等級	
所在縣市	臺中市	所在區鄉	北屯區	道路等級	省道	路線	臺 74 線
交流/匝道	否	匝道編號		定期檢測週期	24 月/次		
是否為跨水橋	否	跨越物體	平面道路	改道長度	小於 5 公里	年平均每日交通量	100793
橋梁總長	645M	A1 進橋板長度	8M	A2 進橋板長度	0M	總車道數	6
最大淨寬	26.2M	最小淨寬	26.2M	橋面板投影面積	17544M ²	總橋孔數	15
最低橋上淨高	橋上無跨越物 M	最低橋下淨高	5.1M	主梁材質	預力混凝土	主梁型式	箱型梁
結構型式	箱型橋						

資料來源：全國橋梁統計資訊系統

本橋座落於臺中市為台 74 線快速道路之主線箱梁，由交通部公路局負責養護工作。本高架橋竣工於民國 99 年，目前狀態評估為正常使用，此橋梁總長為 645 公尺，屬於城市高架橋結構，除了例行檢查上部

結構、橋面與附屬設施的完整性外，鑑於其在地震潛勢區域，須特別關注其耐震設計標準，重點評估橋墩、基礎與支承墊等關鍵構件，確保其自竣工以來，功能未因環境影響而劣化，並持續維持其設計要求的抗震韌性。

橋梁檢測作業觀摩日前一週，丹娜絲颱風侵臺並造成西南沿海嚴重災情，丹娜絲殘留雲系形成的低壓帶與西南風結合，形成強烈雷雨，在新竹縣、新竹市、苗栗縣及桃園市等地造成持續將近 18 小時的豪雨，導致多起災情並且於 114 年 7 月 9 日上午中臺灣再度下起大雨，臺中市沙鹿區、龍井區、大雅區等地出現泥石流，在臺灣西部引發 10 小時的持續豪雨，造成各地嚴重淹水。

由於丹娜絲颱風殘留影響造成的豪雨，影響臺中後續一週降雨不斷，橋梁檢測觀摩當日雨勢雖已趨緩，但仍間歇降下暴雨，導致原橋下易於進入之人孔周圍，因連日降雨造成積水，靠近開口需先穿過泥濘之土方，再踩著橋檢人員事先鋪好之石塊，彎著身軀小心爬上積水區中央之人字工作梯，才能順利進入箱室內部進行橋梁箱內之檢測工作，如圖 4.3 所示。

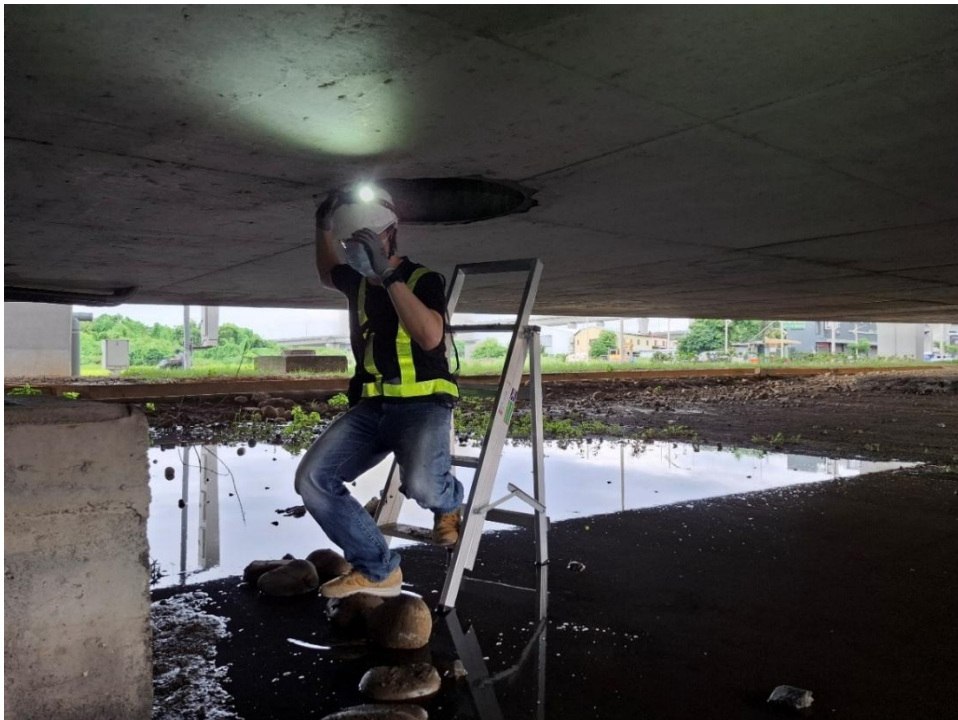


圖 4.3 檢測人員以工作爬梯進出箱梁

箱梁內部封閉終年無光線照入，入內必須配備足夠之光源，如手持手電筒或固定於安全帽之頭燈，為防護人身安全應配戴手套避免攀爬時割傷，並穿戴反光背心並配戴工程防撞安全帽避免穿越較狹隘空間時頭部碰傷擦傷。因箱梁內部屬於局限空間，進到箱梁內部前橋檢人員會先使用氣體偵測儀進行有毒氣體檢測，確定箱內檢測環境無有毒氣體才進入箱梁，並於進入後持續進行箱內氣體監測，一方面偵測是否有其他有害氣體，另一方面亦須偵測內部氧氣濃度是否充足，確保橋檢執行人員之安全。進到箱梁後箱內空間因不通風稍感濕悶，但因連日陰雨溫度還算適宜，組長表示由於混凝土箱梁因材料性質，一般於中午前進行箱內作業溫度還算能接受，再加上本次觀摩之混凝土箱梁因內部相當寬大，相對內部氧氣較多，不會感受到侷促狹隘難耐，但若夏日陽光曝曬一般至下午時刻，箱梁內部溫度即會顯著上升，就要特別注意作業溫度及熱傷害之問題。此箱梁屬預力混凝土(PC)箱梁，內部空間屬單箱單室，橫向寬度寬大高度約 200 公分，內部 2 側附掛管線及電信線，天花板上方設有排水管線，如圖 4.4 所示。



圖 4.4 預力混凝土(PC)箱梁內部

此次箱梁內部檢測屬交通部公路局專案性質之詳細檢測，該局預計 112 年至 116 年完成其轄下預力混凝土(PC)箱梁之內部檢測作業。本次檢測項目包含箱內構件之常見劣化目視檢查，如混凝土剝落、混凝土破損、混凝土裂縫、鋼筋外露鏽蝕、滲水白華、混凝土模板未拆、箱梁內部積水、防落設施損傷等。本次進入台 74 線快速道路之主線箱梁，箱梁內部狀況大致良好，但有發現壁面混凝土有蜂窩現象(如圖 4.5 所示)，以及壁面白華、滲水之水痕及鋼筋突出(如圖 4.6 所示)，另有未拆除之模板(如圖 4.7 所示)，並檢查橋梁之防落設施(如圖 4.8 所示)。



圖 4.5 壁面混凝土蜂窩現象



圖 4.6 滲水水痕及鋼筋突出



圖 4.7 箱梁內未拆除之模板



圖 4.8 橋梁之防落設施

因本橋梁當初設計為加強橋面版之支撐性，於箱梁內部天花板間隔固定距離有增設一橫向之混凝土梁(如圖 4.9 所示)，公路局於本次檢測特別要求需特別逐一檢查該梁是否有結構性裂縫，並加以標註並做後續追蹤(如圖 4.10 所示)，組長表示一般如此量體之箱梁檢測大約 1 人約 15~20 分鐘可完成，但因需詳細檢查相關裂縫，因此檢測 1 箱的時間需花費將近 1.5 小時才能完成。



圖 4.9 箱梁內橫向之混凝土梁



圖 4.10 橫向混凝土梁上之裂縫標記

此箱梁內部寬敞，箱與箱之間之人孔通道設計亦較寬大易於穿越，人孔通道檻高約 30 公分、內部高度約 120 公分、寬約 60 公分，稍微彎腰倚身人員即可步行穿越，如圖 4.11 所示。



圖 4.11 人員穿越箱與箱間之人孔通道

4.3.2 南投縣南投市軍功橋鋼箱梁現地觀摩

本計畫於 114 年 9 月 11 日由黎明工程顧問股份有限公司陪同前往南投縣南投市軍功橋主線鋼箱梁進行現地觀摩，橋梁基本資料，如表 4-5 所示。

表 4-5 軍功橋(東向線)基本資料

橋梁名稱	軍功橋 (東向線)	橋梁編號	014B-009E	使用狀態	正常使用	設施種類	橋梁
維管中央 主管機關	交通部	財產權屬 機關	未代養				
管理機關	交通部 公路局	第二層管 理機關	公路局中區 養護工程分 局	第三層管 理機關	南投工務 段	橋梁等級	
所在縣市	南投縣	所在區鄉	南投	道路等級	省道	路線	台 14 乙線
是否為跨 水橋	是	跨越物體	貓羅溪	改道長度	小於 5 公 里	年平均每 日交通量	16828
橋梁總長	290M	A1 進橋板 長度	5M	A2 進橋 板長度	5M	總車道數	3
最大淨寬	11.3M	最小淨寬	11.3M	橋面板投 影面積	3480M ²	總橋孔數	5
最低橋上 淨高	6.2M	最低橋下 淨高	5.2M	主梁材質	鋼構造	主梁型式	型鋼梁， 箱型梁
結構型式	梁式橋,箱型橋						

資料來源：全國橋梁統計資訊系統

軍功橋本橋梁隸屬於南投縣南投市，於民國 106 年竣工，目前使用狀態為正常使用。在管理權責上由公路局及其中區養護工程分局負責實際的營運、養護與管理。軍功橋分為東向線及西向線，本次進入觀摩之箱梁為東向線，其總長度為 290 公尺，總寬度為 11.3 公尺，屬於中長跨徑橋梁。在常規定期檢測中需特別注意混凝土材質之相關構件(如橋墩、帽梁等)是否有初期裂縫、防水層功能是否完好，以及附屬結構如欄杆、伸縮縫等是否有破損或積水現象。從地域風險評估來看，本

橋梁鄰近車籠埔斷層，屬於高地震潛勢區域，因此在檢查時須將抗震韌性納入首要考量。檢測過程中須詳細檢查橋墩與橋台的基礎穩定性，以及支承墊是否老化或變形，以確保其在面對極端事件時仍能有效傳遞載重與消散能量，橋梁外觀現況，如圖 4.12 所示。



圖 4.12 南投市軍功橋橋梁外觀

於軍功橋現地觀摩當日氣候晴朗無雲，進入箱梁時間約上午 10 點，季節雖已進入 9 月份但氣溫仍高(高溫達 30 度以上)，進入箱內應避免於局限空間內之熱傷害並注意補充水分，而進入人員為避免碰撞並保護手部頭部，須完整佩掛手套及防撞工程安全帽，穿著反光背心以利辨識，並配戴頭燈協助入內照明，由於當日氣溫炎熱，研究人員於橋側著裝完畢尚未進入箱內，已感受到穿戴整套裝備之悶熱感。

軍功橋之箱梁出入人孔位於橋頭橋尾之橋梁結構銜接處之間隙，無須搭乘高空作業車，人員可自行步行攀爬至橋梁兩端(本次觀摩從東側端)橋台後進入，組長表示此為少數不須車輛輔助，如搭乘高空作業

車或橋梁檢測車甚至搭建臨時鷹架，即可抵達入出口之人孔，進出鋼箱梁之人員動線及橋側人孔，如圖 4.13、圖 4.14 所示。



圖 4.13 進入軍功橋鋼箱梁內部之人員步行路線



圖 4.14 人員進入鋼箱梁之橋側人孔

進入高度約 60 公分人孔後，箱內因鋼箱之金屬材質極易受陽光照射而升溫，與 7 月份於台 74 線主線 PC 箱梁進行現地觀摩時相同，大約上午 10 時進入混凝土箱梁之感受相比，鋼箱內感受溫度較高空氣悶熱，且因鋼箱包覆，手機於箱內幾乎沒有通信訊號，組長表示隨陽光照射時間增加至中午時間，甚至下午橋梁西曬面，箱內之溫度可達 4、50

度，爰相關檢測會儘量避開夏日及下午時段。

因軍功橋鋼箱梁內部為高度漸變之形式(如圖 4.15 所示)，一開始鋼箱梁內部空間之高度較低，人員需半蹲彎腰移動並避開中間之排水管線(如圖 4.16 所示)，穿過前幾個橫梁處隔板後內部高度漸增，人員於內部可站立行走(如圖 4.17 所示)，此時鋼箱梁內部高度約 220 公分，寬度約 200 公分，唯鋼箱內部為提高結構的穩定性和承載能力，垂直面有豎向加勁板(Stiffeners)，縱向有翼板加勁板之配置，人員於內部行走常須提高腳步跨越。



圖 4.15 軍功橋鋼箱梁之內部高度漸變示意圖



圖 4.16 鋼箱梁前段高度較低人員需半蹲彎腰移動



圖 4.17 鋼箱梁高度漸高人員可直立移動

軍功橋為 106 年竣工啟用，鋼箱梁內部塗裝嶄新漆面完整，尚維持完工時之樣態，組長說明鋼箱梁檢測項目，包含箱內構件之常見劣化

目視檢查，主要分為 3 大構件包含鋼板、銲道及螺栓等劣化缺失，鋼板缺失如塗膜裂化、油漆不均、鋼板生鏽、挫屈、損傷、錯位及斷面異常等，銲道缺失如塗膜裂化、銲道生鏽、氣孔、裂縫、異物、銲渣未清、銲道疊搭、漏銲、熔落、銲蝕及尺寸不足等，螺栓缺失如塗膜劣化、螺栓生鏽、遺失、鬆脫、落栓未斷尾、尺寸異常、螺帽倒裝等。

本次進入軍功橋僅發現興建橋梁時留下之施工預留孔(已封死)，周圍因鎖固時有塗裝破損導致生鏽(如圖 4.18 所示)，以及螺栓未進行斷尾(如圖 4.19 所示)，以及鋼箱連接處之螺栓有螞蟻群聚(如圖 4.20 所示)，鋼箱內因空間密閉，常成為小型動物築巢或活動的理想場所，因此會發現許多活動痕跡，例如蜘蛛織網、昆蟲脫殼或屍體堆積、鼠類排泄物與啃咬痕跡，以及蝙蝠或鳥類(若有開口)的糞便、屍體，甚至有毒之蛇類出沒，其中有些動物糞便會造成塗料損壞，這些生物遺跡一方面可能影響橋梁構件，另一方面顯示了箱梁內部生態的動態，提醒檢修人員在進入維護前需注意環境狀況，以及有可能發生之危險。



圖 4.18 施工預留孔周圍塗裝破損生鏽



圖 4.19 螺栓未斷尾



圖 4.20 鋼箱連接處有螞蟻群聚

軍功橋鋼箱梁內部箱與箱之間之人孔通道較大，且鋼箱梁為廠鑄成型後才運至橋址進行吊掛接合，因此通道開口位置一致且連貫(如圖 4.21 所示)，軍功橋長度 290 公尺，由 3 人為一組檢測大約需花費 1.5 小時至 2 小時才能完成。

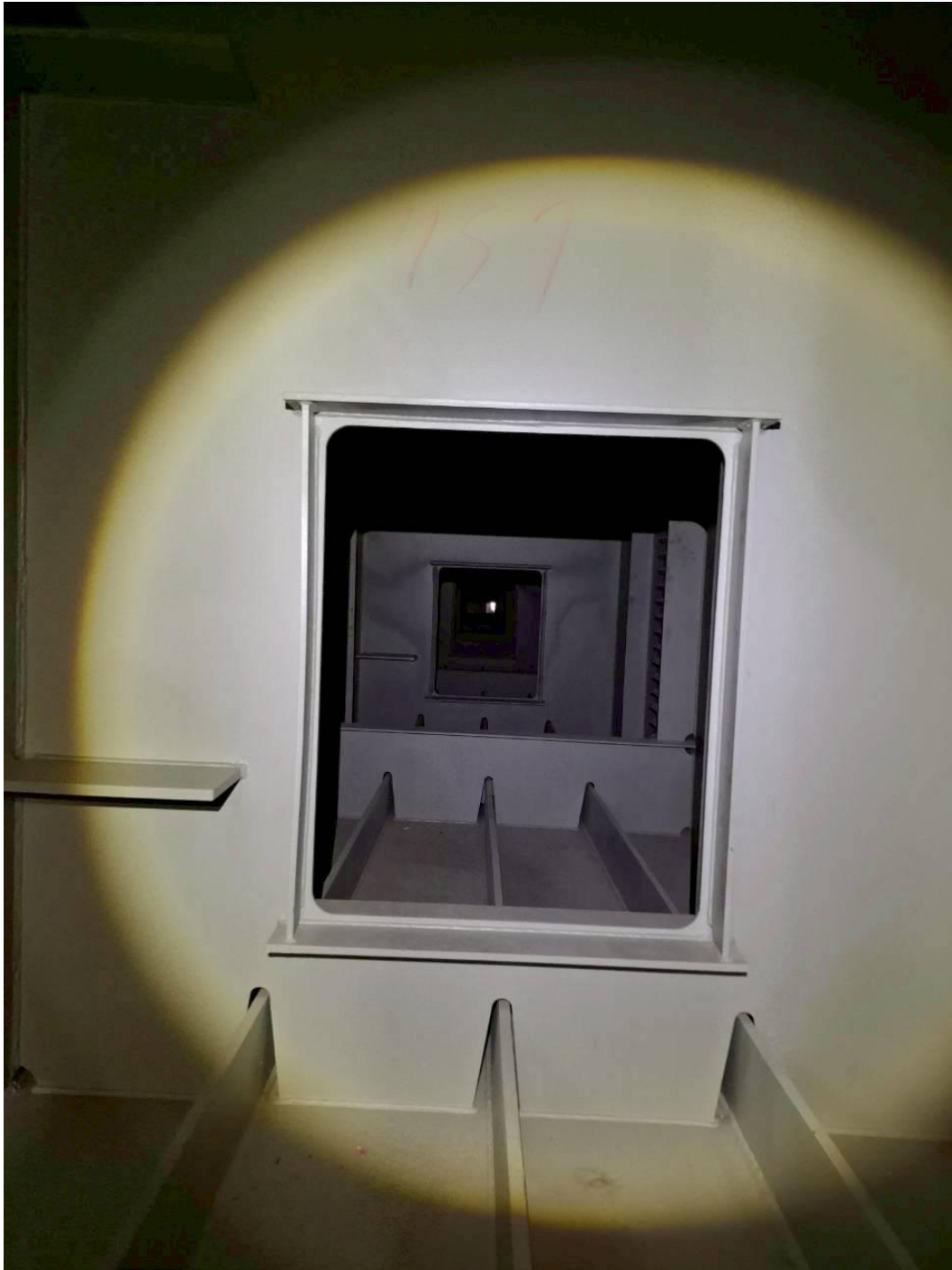


圖 4.21 鋼箱梁內人行通道開口位置一致且連貫

4.4 小結

本章經過對交通部高速公路局大甲工務段(政府單位養護單位)及黎明工程顧問股份有限公司的訪談與現地觀摩(台 74 線 PC 箱梁與軍功橋鋼箱梁)，深入剖析了國內橋梁箱內檢測實務現況所面臨的結構性困境與技術瓶頸。總體而言，國內箱內檢測作業在法規要求、執行風險、技術成熟度與制度人力供給上存在顯著的挑戰與風險，本計畫透過橋檢實務現況調查與訪談歸納出以下箱內檢測實務之挑戰與困難：

1. 高風險作業環境與成本壓力

箱內檢測被視為高風險的密閉空間作業，對檢測人員構成實質的職業危害。作業仰賴高空作業車進入人孔，而搭設施工架成本高昂難以負擔。檢測人員必須克服極端惡劣的環境：鋼箱梁內部在夏季或西曬面溫度可達攝氏 4、50 度，易導致中暑或體力透支；空間狹小(小型箱梁高度可能僅 1.2 公尺)，需要全程彎腰、蹲低甚至爬行；箱內光線嚴重不足，且充斥著鐵釘、鋼筋端部等危險遺留物及動物屍體、螞蟻、蝙蝠等生物危害。這些因素導致作業時間拉長(約 290 公尺箱室需 1.5 至 2 小時)，顯著增加了人員的風險暴露時間。

2. 現行技術與數位化困境

現行檢測仍以人工目視檢測為主，高度依賴人員經驗且面臨新興技術應用的瓶頸。無人機因揚塵、照明不足及續航力短而在箱內難以有效應用、雷射掃描(LiDAR)缺乏訊號。

3. 制度面的人力與培訓危機

制度層面的人力短缺是核心問題，橋梁檢測證照的培訓名額有限，導致第一線執行高風險作業的顧問公司難以培訓足夠的合格人才。且從結訓到拿到正式證書的發證時程過長，造成新血無法即時上崗執行業務，加劇了人力危機。

4. 未來技術輔助的期望

業界對於未來之輔助設備期望輕量化、高穩定度，且能有效減少人員暴露時間。理想的方案包括針對新建橋梁之內建軌道式巡檢機器人，或針對現有執行橋檢工作之橋檢人員之穿戴式攝影機，並結合 AI 輔助記錄與定位功能，可將 3 人小組縮減為 2 人小組，以節省人力需求。總結而言，為提升檢測安全與效率，未來必須推動技術與制度之革新，不僅需研發實用且穩健的輔助設備，更應改革相關制度，從根本上緩解人力供給瓶頸。

第五章 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估

本章旨在對橋梁箱內檢測的可行輔助工具進行技術分析與研發構想，包括無人機(UAV)、地面/履帶式機器人、軌道式攝影機以及穿戴式裝置 4 大系統的優劣勢與應用潛力。本計畫分析認為 UAV 具備提升安全與效率的顯著效益，能採集數據創建高品質 3D 模型，並透過 AI 影像辨識實現損傷自動化量化，將檢測數據客觀數位化留存，解決傳統目視的主觀性。針對 UAV 在無 GPS 環境下的導航挑戰，技術解決方案是融合 LiDAR、IMU 與 SLAM 系統；履帶式機器人則憑藉其穩定性與高荷載能力，適用於地面平整的混凝土箱梁；軌道式攝影機提供極高的數據穩定性與重複性，利於長期追蹤。

研究結論建議採取 UAV/機器人/軌道式混合佈署方案，並將研發核心聚焦於環境敏感型自主導航、AI 定量分析及建立橋梁數位分身(Digital Twin)，並搭配人員配備穿戴式裝置。導入這些工具的核心價值在於徹底改變檢測人員之風險暴露模式，將高危險局限空間作業轉化為遠端操作，同時達成規模經濟效益，優化長期維護預算，有效降低人員執行橋檢工作之風險並提升工作品質及效率。

5.1 現行技術可行性分析

5.1.1 無人機(UAV)系統

無人機(UAV)在箱梁內部探測方面展現出顯著的技術優勢與經濟效益，無人機應用於此類複雜結構的非破壞性檢測(Nondestructive Inspection, NDI)是一個日益受到關注的領域，其主要效益包括提升作業安全、減少檢測時間與人力，以及做為其他新興技術(如影像辨識與 3D 建模)的搭載平台。在數據產出方面，成功應用案例顯示，商用無人機可以採集數據並創建高品質的 3D 測量模型，以及點雲模型用於保存

橋梁箱內探測成果，這種方法將結構狀況以客觀的數位形式留存。

在劣化缺失識別能力方面，透過結合先進的圖像分析技術，特別是卷積神經網絡(CNNs)，無人機採集的高解析度影像能夠用於自動化檢測和量化損傷，如本所推動辦理「無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之研究」^[16]研究計畫，已開發混凝土橋梁 AI 影像辨識模式(如圖 5.1 所示)，可辨識混凝土橋梁 6 大主要構件(主梁、橫隔梁、橋墩/帽梁、橋面板、橋台、擋土牆)之 3 大劣化缺失(混凝土結構裂縫、混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕、滲水、白華損傷)，未來本橋檢工具拍攝之劣化影像，可透過導入本所開發之橋梁劣化 AI 影像辨識系統，進行橋梁檢測相關劣化之自動判識，增進橋梁檢測品質與效率。



資料來源：無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之研究，113 年

圖 5.1 本所橋梁劣化 AI 影像辨識系統裂縫偵測成果

但儘管 UAV 應用在橋梁外部檢測效益顯著，其在箱梁內部環境的應用仍面臨嚴峻的技術挑戰，這些挑戰主要與內部環境的物理特性相關，首先是定位與導航問題(GPS 缺失)，箱梁內部環境因密閉且與外界阻隔，是完全缺乏全球定位系統(GPS)訊號的空間，特別如鋼箱梁又受梁體本身材質干擾，這對無人機的自我定位系統構成根本性挑戰，影響其飛行穩定性與精確數據採集。此外，缺乏 GPS 訊號也可能影響部分紅外線傳感器或避障系統的運作效能。其次為環境影響因素(如光線及粉塵)，箱梁內部因與外部阻隔通常光照不足，這是檢測作業中的常見困難，需要 UAV 搭載專門的高強度照明系統，另由於氣流擾動或結構表面物脫落，作業過程中可能產生粉塵，顯著降低能見度，進一步影響視覺系統的性能，最後為硬體設備限制，無人機的電池續航能力和有效載荷，限制了每次任務的檢測範圍，同時也限制了可搭載的非破壞性檢測(NDT)傳感器(例如熱影像儀)的種類和尺寸。

無人機技術應用於橋梁箱梁內部檢測具備可行性，箱梁內部因其密閉、狹窄、光照不足且潛藏有害氣體，法規明確定義為局限空間，使傳統人工目視檢測面臨極高的職業安全風險。以下將從必要性、技術優勢、經濟效益與挑戰對策 4 個面向，進行全面的可行性分析：

1. 應用之必要性

(1) 解決局限空間作業風險

箱梁內部環境存在極高的墜落、碰撞、缺氧及中毒風險，傳統人工檢測必須嚴格遵循《職業安全衛生法》及《缺氧症預防規則》，包括作業前確認氧氣及有害物質濃度、持續通風、人員監視及緊急救援設備佈署等嚴苛要求。UAV 等非進入式輔助工具的導入，能實質上減少或消除人員進入的需求，將檢測風險從「高危險、需複雜救援」轉移至「遠端操作，無人員直接暴露」的安全模式。輔助工具(例如搭載多氣體傳感器)甚至能做為先導偵測平台，在作業開始前確認氣體濃度，滿足法規對人員進入的先決條件。

(2) 克服人工檢測限制與主觀性

傳統目視檢測極度依賴檢測人員的經驗與主觀判斷，導致數據記錄易出錯、資料不完整或不清晰，UAV 技術可提供即時、多角度的視覺資料，將結構狀況以客觀的數位形式留存，有效提升數據的客觀性與可重複性。

2.技術優勢與數據量化可行性

無人機做為橋梁檢測最具發展潛力的工具，其技術可行性已在數據採集和劣化識別方面得到驗證。

(1)提升效率與節省人力

成功案例顯示，UAV 探測可顯著降低檢測所需的時間與人力。在實證案例中，使用無人機探測相比人員檢測，可大幅節省檢測時間。出勤人數亦可大幅減少(例如，在實證案例中，總出勤人數可從 13 人降至 6 人，減少約 53%)^[7]。

(2)數據產出與數位留存

商用無人機可以採集數據並創建高品質的 3D 光測量模型，以及用於保存橋梁箱內探測成果的點雲模型，這些數據可以轉換為數值表面模型(Digital Surface Model, DSM)，並透過軟體進行處理和量測。另透過 SLAM 技術，無人機可以在探測時定位並即時生成點雲圖，避免檢測位置重複^[7]。

(3)先進的損傷自動化識別與量化

透過結合深度學習和圖像分析技術，特別是卷積神經網絡(CNNs)，無人機採集的高解析度影像能夠用於自動化檢測和量化損傷，國際研究已證明此類方法能夠檢測並量化細至 0.1mm 的微小裂縫，以及量化 60cm 長的混凝土裂縫、3.5m²的滲漏和 40cm 範圍的腐蝕^[17]。實證應用結果顯示，無人機探測後輸出的影像確實可用於影像辨識模型，且影像辨識的信心值最高可達 60%以上，較高的信心值通常歸因於「距離裂縫位置較近且特徵明顯」的影像特性^[7]。

3.經濟效益與規模經濟分析

雖然無人機租賃或購置的初始成本較高，但從長期來看，導入該技術具有顯著的規模經濟效益。

(1)成本轉移與節約

傳統人工檢測的總成本中包含了大量的安全風險與法規遵循成本；而無人機將這些隱藏成本轉化為可預算的設備折舊與研發成本，如果以購置無人機的角度進行效益評估(攤提折舊)，並根據橋梁檢測數量增加進行模擬估算，會因探測數量變多，相對降低其付出成本。例如，依據本計畫訪談所得資料，目前箱梁檢測 1 公尺之承包價格約新臺幣 350 元，另以文獻資料 2023 年橋梁箱內檢測估算，人員檢測平均探測 1 公尺成本約為新臺幣約 83.3 元，而無人機(包含折舊)的平均成本約為新臺幣 56.55 元^[7]。

(2)促進預測性維護

透過無人機建立長期、客觀、量化的結構健康監測(Structural Health Monitoring, SHM)數據庫，能夠為養護單位提供基於狀態的維護決策依據，極大優化維護計畫的有效性。

4.關鍵挑戰與技術解決對策

儘管 UAV 效益顯著，其在箱梁內部仍面臨嚴峻的技術挑戰，但國際研究及實務應用已提出相應的解決方案，如表 5-1 所示。

表 5-1 UAV 箱梁內部技術挑戰解決對策

挑戰類別	挑戰描述	技術瓶頸深度解析	關鍵技術解決對策
定位與導航	GPS 缺失，影響飛行穩定與數據採集。	箱梁內部是無 GPS 環境，尤其長走廊、單調表面導致視覺 SLAM 系統的里程計容易累積誤差。	融合多感測器：使用 LiDAR、慣性測量單元(IMU)和 SLAM 技術進行同步定位與製圖。可研發環境敏感型 SLAM 策略或應用 UWB 定位訊號取代 GNSS。

環境影響因素	光照不足，需高強度照明；粉塵會降低能見度。	內部環境黑暗，且氣流擾動或表面物脫落會產生粉塵，嚴重影響視覺系統性能。	1.UAV 需搭載專門的高強度照明系統(例如 16,000 流明)及防塵鏡頭。 2.選擇具備複合移動能力(飛行搭配路面行走)之無人機，以飛行形式抵達及穿越人孔或越過障礙物，以滾輪移動形式不造成揚塵進行空間影像拍攝。
作業限制	電池續航能力和有效載荷限制。	搭載 LiDAR 的局限 空間無人機通常只能航行約 9 分鐘。有效載荷限制了 NDT 傳感器(如熱影像儀)的種類和尺寸。	任務規劃與電池管理：精確規劃航線並攜帶足夠備用電池。在橋梁檢測中，熱影像模組可輔助識別滲漏和白華。

5.替代方案與結論

雖然 UAV 在空間較大、高度足夠的箱梁中具有優勢，但對於特定結構，仍需考慮以下替代或互補方案：

(1)地面/履帶式機器人：適用於地面平整、長距離的混凝土箱梁，具有卓越的穩定性和載荷能力，可搭載更複雜、精密的 NDT 傳感器^[18]。

(2)軌道攝影機(Rail Cam)：可半永久性地安裝於箱梁內部或鋼箱梁腹板，適合長期且穩定的重複檢測，只需少量檢測人員即可遙控診斷^[10]。

總結而言，UAV 技術應用於箱梁內部檢測具可行性，不僅在於技術上能克服無 GPS、低光照等環境困難(通過 SLAM、LiDAR 與高強度照明等解決方案)，更在於其帶來的安全效益與效率提升，能夠極大地降低人工進入局限空間的風險與成本，並提供客觀、量化的數位數據，為橋梁維護管理實現數位化轉型奠定基礎。然而，為確保成功，必須集中資源研發自主導航系統並將 AI/CNN 損傷量化技術在地化，以達成從傳統目視提升至客觀數位化結構健康監測(SHM)。

5.1.2 地面/履帶式機器人系統

1.應用之必要性

地面/履帶式機器人系統(Robotic Systems)在橋梁箱梁內部檢測中，做為新型檢測輔助設備，具有可行性及獨特優勢，特別是在數據穩定性和高精度定位方面，使其成為無人機(UAV)重要的替代或補充方案，橋檢人員對於提供爬行式攝影機/攝影車或蛇型機械臂等輔助工具表現出應用潛力的期望。

2.技術優勢與結構適用性

履帶式機器人平台憑藉其固有的物理特性，在數據採集和穩定性方面具有顯著優勢：

(1)卓越的穩定性與高載荷能力

機器人平台具備卓越的穩定性，能夠克服地面不平整或輕微的台階(steps)等障礙，並能承載更複雜、更精密的傳感器組合，例如雷射測距儀、深度攝影機(RGB-D Camera)和高解析度相機。

(2)高精度數據採集與定位註記

機器人可以採集高細節的表面狀況圖片，並將其與 3D 幾何地圖進行精確的位置註記，這種遠端評估技術有利於長期監測同一區域的變化，並提供客觀、量化的數位指標。

(3)多樣化結構的適用性

履帶式機器人尤其適用於地面平整、長距離的混凝土箱梁，對於鋼箱梁，則可考慮採用攀爬或磁吸式機器人，或如國際案例^[10]所示，利用軌道攝影機(Rail cam)，少量檢測人員即可遙控診斷。

3.核心技術挑戰與限制

儘管優勢顯著，履帶式機器人應用於箱梁內部仍面臨嚴峻的技術挑

戰，主要與箱梁內部環境的物理特性和導航困難相關：

(1)無 GPS 環境下的自主導航挑戰

箱梁內部是完全缺乏全球定位系統(GPS)訊號的密閉空間，這對機器人的自我定位構成根本性挑戰。

(2)SLAM 穩健性與製圖誤差

無論是履帶機器人或無人機，在缺乏環境特徵之場景下，因箱梁內部空間狹長、構件單一且重複，會導致 SLAM 系統的里程計(odometry)容易累積誤差。

(3)狹窄空間與內部障礙

臺灣的橋梁類型多樣，部分舊橋的人孔開口可能很小，箱梁淨高可能低至 1.2 公尺，需要檢測人員蹲著或用爬的才能進入。此外，箱梁內部常有附掛管線，如交控管線或防震拉桿，這些都會影響機器人的移動路徑和佈署。

4.結論與建議

地面/履帶式機器人系統應用於箱梁內部檢測具備可行性之方案，其在無 GPS 環境下雖面臨 SLAM 穩健性的挑戰，但其穩定性和高荷載能力使其成為採集精確、量化檢測數據的理想平台。

研發工作應聚焦於：

(1)低特徵環境 SLAM 技術

應針對狹長空間、低特徵環境研發 SLAM 技術因應策略，以克服里程計累積誤差，確保數據的精確空間定位。

(2)AI 數據整合

結合深度學習(如 CNNs)，將機器人採集的高解析度影像用於自動化檢測和量化損傷，實現從主觀目視評估向客觀數位化結構健康監測

(SHM)的轉變。

(3)多樣化平台發展

針對不同橋型(例如地面平整的混凝土箱梁及鋼箱梁內部)採用混合佈署方案，並考慮研發能夠利用既有管線或結構進行附掛移動的系統。

5.1.3 軌道式攝影機系統

針對箱梁內部結構平直、長距離且具備高度重複性檢測需求的環境，軌道式攝影機系統(Rail-Mounted Camera Systems)提供了一種高穩定度、高精度數據採集的解決方案，特別適用於解決橋梁主結構(例如箱梁內部)難以進入且需要重複檢測的挑戰。此系統需預先在箱梁內部底部或側壁安裝輕型軌道，攝影機模組沿軌道移動，可以確保每個檢測點位的拍攝角度與距離高度一致，其核心優勢在於攝影機移動平穩，不受氣流或導航誤差影響，數據品質極高，特別適用於獲取裂縫或焊縫的精確、無變形之線性圖像，便於長期追蹤比較，但軌道式攝影機系統缺點及限制在於其佈署時間較長，布設軌道需要人力進入，且系統缺乏靈活性，僅能沿軌道單一軸線移動，無法提供立體或自由空間的檢測。

1.技術可行性與核心優勢

軌道式攝影機的核心技術在於其高穩定性與數據品質，使其在長距離、重複性高的檢測任務中表現卓越：

(1)數據穩定性與重複性

軌道攝影機允許機器人沿著預先安裝的半永久性軌道移動，這確保了攝影機移動的平穩性，且不受氣流擾動或導航誤差(如無 GPS 環境下 UAV 遇到的問題)的影響。軌道系統能獲取精確、無變形之線性圖像，特別適用於檢測裂縫或焊縫，便於長期追蹤和比較同一位置之變化。

(2) 檢測覆蓋與遠端操作

檢測人員可以遠端控制軌道機器人，沿著軌道前進或後退來診斷箱梁，攝影機模組可透過搭載 3 軸穩定器，使其能夠捕獲整個 360 度空間之影像，涵蓋了箱梁內部的頂板、腹板和底板，檢測人員可以從外部透過監控器檢查內容，因此可透過僅需少量檢測人員即可進行大範圍影像檢查，有效提升檢測效率。

(3) 長期經濟效益

儘管軌道安裝會產生初始建造成本，但從長期角度來看，該系統被認為是成本效益高之解決方案，特別是當應用於需要高頻率、長距離或重複性監測的箱梁時，其規模經濟效益將顯現。

(4) 技術集成潛力

軌道式系統可搭載多種模組，除了基本的 RGB 攝影機外，還可替換為 360 度攝影機或熱影像模組，軌道機器人可以導入應用自駕技術達成自動檢測，進一步提高檢測效率。

2. 關鍵挑戰與限制

雖然軌道式攝影機在技術上成熟且穩定，但在實際佈署和靈活性方面仍面臨以下限制：

(1) 佈署複雜度與局限空間風險

軌道系統的軌道必須單獨安裝在箱梁內部，這項工作需要人力進入局限空間，增加了作業的佈署時間和複雜度，安裝軌道可能需要於原箱梁結構中進行鑽孔或銲接，這涉及到結構物的侵入性修改，影響其結構完整性及破壞壁面保護塗層。

(2) 缺乏靈活性與盲點問題

軌道系統的移動僅限於單一軸線，這使其在箱梁內部複雜的交叉管線、防震拉桿或加勁板等障礙物附近缺乏彈性，檢測範圍直接受到軌

道安裝位置之限制，若軌道安裝於箱梁頂部，可能導致無法有效檢測到軌道正下方或極近區域之劣化缺失。此外，軌道的架設也可能會影響到後續人員之通行及修繕施工作業。

(3)數據類型與檢測範圍

單純的攝影機系統(僅拍攝即時影像)可能無法完全滿足所有橋梁檢測的實務需求，例如裂縫的精確量測或更深入的非破壞性檢測(NDT)。

3.結論與策略建議

軌道式攝影機系統應用於箱梁內部檢測是可行之解決方案，特別適用於新建橋梁，在設計新工階段即預留軌道安裝位置，可最大化軌道系統的效能，並減少後續安裝的結構衝擊。軌道系統適用於長距離、高重複性要求之橋梁，在需要頻繁、長期追蹤劣化趨勢的橋梁中，軌道系統的穩定數據輸出具有不可替代的價值。

然而，對於服役中橋梁佈署軌道系統，則必須審慎評估其初始安裝成本、對結構的侵入程度(打孔或焊接)以及是否會妨礙檢測人員進出。對於內部結構複雜、狹小或非直線性移動需求的箱梁，可能需要結合其他輔助技術(如微型無人機或履帶式機器人)，以彌補其單軸移動帶來的靈活性不足和盲點限制。總體而言，軌道式攝影機系統是實現箱梁內部檢測數位化、標準化和安全化的有效途徑，但其成功導入仰賴於周全的佈署規劃和對長期維護效益的權衡。

5.1.4 穿戴式裝置

穿戴式裝置(Wearable Devices)的重點不在於取代檢測，而在於優化和支援在複雜或緊急情況下仍須執行任務的人員，做為人員安全輔助與即時資訊支援的關鍵工具，以達成減少人員在局限空間內停留時間的目標，爰在橋梁箱梁內部檢測中具有可行性。這類裝置包括智慧眼鏡(提供 AR 輔助或即時視訊回傳)、生命體徵監測儀，以及具備高解析度、

固定視角的穿戴式攝影機等，其核心優勢在於能立即傳輸人員視角畫面與生命狀態(如心率、體溫)至外部監控站，實現遠程專家即時指導與支援，減少資訊傳遞時間，並在作業人員出現異常時迅速警報，從而大幅縮短人員在危險環境中的不必要停留時間，而其缺點及限制為檢測作業依舊須由人員進入局限空間，主要依據目視檢測之主觀判斷，數據紀錄與定位精度不如機器人或 UAV 的 3D 製圖系統。

1.應用之必要性與安全價值

穿戴式裝置被視為智慧檢測系統中的檢測套件(Smart Inspection Kit)^[10]，專門支援必須進入局限空間執行橋梁檢測任務之人員，主要目標是盡可能地減少人員在危險環境中的停留時間，提升檢測作業之安全性。

2.核心技術優勢與即時支援能力

穿戴式裝置的核心優勢在於其即時性與溝通能力，這使得外部專家能遠端參與並支援現場作業：

(1)遠程即時協作

智慧眼鏡可分享現場工作影片，做為外部管理人員參與檢測的關鍵設備，管理人員或專業之橋梁檢測人員可透過智慧眼鏡傳輸的即時影像，對現場操作員進行指示和支援，可有效節省專業橋檢人員人力負擔，因現場進箱作業可委由專業之設備操作團隊，派任年紀較輕、體力較好且善於攀爬之人員，透過專業分工可使具有橋梁劣化判斷專業知識之橋檢人員，延長其職業及職能生涯，解決專業人力不足之問題。

在環境噪音大、語音連接困難的箱梁內部，智慧眼鏡還能支援文字或文件方式的溝通。

(2)提升作業安全性

頸戴式攝影機(Neckband Camera)主要用於檢查作業員的周圍環境和風險因素，並確認佩戴者是否穿戴防護裝備，對於保障檢測人員安全

極為有效。

(3)縮短停留時間

檢測人員可攜帶此類設備快速走過檢查區域，記錄所有影像資料，將詳細的缺陷評估和報告工作延後至返回辦公室再進行，從而達成減少人員逗留時間的目標。

3.缺點與技術瓶頸

儘管穿戴式裝置在安全支援和效率方面表現優異，但其在數據產出方面存在固有以下缺點：

(1)人員依舊須進入局限空間

穿戴式攝影機所獲取的影像仍需依賴人員配戴後進入檢測空間，與無人機、履帶式機器人或軌道式攝影機相比，人員還是具有安全風險。

(2)數據品質與定位精度低

傳統檢測方法通常只能獲得損傷或異常構件的平面照片，造成數據的不連續性與品質不佳，使用如 360 度環景攝影機等穿戴設備獲取的影像，可能存在變形問題，難以進行精確的裂縫長度等量化測量。與無人機或履帶式機器人透過 SLAM 技術建立的 3D 模型相比，穿戴式裝置在數據記錄與空間定位精度上有所不足，同時，後續的人工圖像整理與拼接作業也相當耗時且依賴技術人員。

4.結論與定位

穿戴式裝置應用於箱梁內部檢測是可行，且具備立即可用性的技術，特別是做為人員安全保障和遠端專家指導的解決方案。但其無法取代對結構劣化進行定量化和客觀化測量的需求，因此穿戴式裝置應被定位為輔助性工具，用於快速掃描和安全監控，與 UAV 或履帶機器人等高精度定量檢測平台形成互補，共同建構更全面、更安全的智慧檢測流程。

5.1.5 檢測輔助工具之技術與應用潛力研析

針對臺灣橋梁多樣化的箱梁結構，單一技術系統難以適用所有情境，因此必須採取 UAV/機器人/軌道式混合佈署方案，並根據橋型選擇最優化工具，表 5-2 系統性地比較了 4 種主要輔助工具在箱梁內部環境下的技術特性：

表 5-2 箱梁內部檢測輔助工具技術特性比較

檢測系統	機動性/佈署	核心優勢 (Focus)	關鍵技術挑戰	數據品質(定位)	適用性(臺灣箱梁類型)
無人機 (UAV)	高機動性，快速佈署	速度快，立體空間覆蓋，規模經濟	GPS 缺失、光照/粉塵、電池限制	高解析度影像/點雲(定位精度受導航影響)	空間較大、高度足夠的混凝土或鋼箱梁
履帶/輪式機器人	佈署較慢，地面受限	穩定數據採集，高荷載能力	SLAM 環境累積誤差、跨越障礙能力	高精度 3D 幾何製圖與位置註記	地面平整、長距離的混凝土箱梁
軌道式攝影機	低機動性，需預先布軌	極高數據穩定性與重複性，高解析度線掃描	布軌時間長，僅限線性移動，成本高昂	穩定、精確的二維圖像序列與深度數據	內部平直、長跨度、高重複性檢測需求的箱梁
穿戴式裝置 (AR/視訊)	隨人員移動	強化作業安全，即時遠端支援，縮短人員暴露時間	人員操作限制，依賴操作人員目視判斷，電池續航力	人員視角即時影像與生命體徵數據	輔助進行關鍵點位複檢、初期探測及應急作業

5.2 橋檢輔助工具研發評估

5.2.1 核心技術

為將檢測作業從主觀目視提升至定量非破壞性檢測(NDT)範疇，輔助工具必須集成高精度傳感器並搭配先進的數據處理流程：

1. 數據採集與定位系統

平台需集成多重傳感器以克服單一系統的限制，其中視覺系統應採用高解析度相機，輔以多光譜或偏振光技術，用於缺失劣化細節的拍

攝甚至自動辨識。定位與深度感測方面，應結合雷射測距儀、RGB-D 攝影機和高精度慣性測量單元(IMU)，提供數據以支撐無 GPS 環境下的 SLAM 系統，這種多感測器融合是保障數據準確註記和地圖精度的基礎。

2.AI 驅動的損傷辨識與量化

數據採集後，必須採用深度學習模型，尤其是 CNNs，實現損傷的自動化辨識與量化。這不僅限於檢測出混凝土裂縫或鋼結構腐蝕，更重要的是實現劣化、損傷或缺失的定量化，例如自動測量裂縫的長度、寬度、滲漏面積或腐蝕程度，將傳統主觀的目視評估轉化為具有工程意義的客觀數位指標，這使得技術輔助工具的目標是超越人工目視的性能，提供預測性維護所需的精確輸入，提供後續維管修護人員，持續追蹤修繕之所需資訊。

3.數據整合與可視化(Digital Twin)

最終，採集的數據必須被精確地註記(Location-Annotated)到 3D 光測量模型或點雲模型中，這建立了一個橋梁內部結構的數位分身(Digital Twin)，使得橋檢人員或維管單位負責人可以安全地進行遠端評估，並將不同時期的檢測數據進行比對，從而有效地監測結構或構件劣化的過程。

5.2.2 輔助工具與傳統人工檢測的效率與風險

非接觸式檢測輔助工具的核心價值在於徹底改變了風險暴露模式，傳統人工檢測要求人員在局限空間內暴露於缺氧、中毒、墜落等高危險環境，並需要緊急救援設備，輔助工具則將檢測風險從「高危險、需救援」轉移至「遠端操作，無人員直接暴露」的安全模式。

在效率方面，相關研究統計數據證實，無人機箱內探測成果與傳統方法相比，可顯著降低檢測所需的時間與人力，此外由於輔助工具能夠採集定量且客觀的空間註記數據，有效地提高了檢測報告的品質，消除

了傳統目視檢測的主觀性與不完整性。穿戴式裝置的應用，在必須人員進入時，透過穿戴設備之劣化構件之影像蒐集，並提供即時遠程協助和生命體徵監測，實質上縮短了人員在局限空間內的暴露時間，大幅保障了橋梁內部檢測作業安全。

5.2.3 成本效益分析

對臺灣橋梁養護單位或執行橋梁檢測作業之廠商而言，導入先進檢測輔助工具的成本效益分析必須考慮其規模經濟潛力，成本效益分析應以購置設備角度，使用直線法攤提折舊進行模擬估算，直線法攤提折舊的模擬估算主要用於計算資產的殘值，亦即評估期結束時的剩餘經濟價值，其步驟是將資產的總資本支出，依據直線法計算出的每年固定折舊額，減去在評估期間內累積的折舊總額，這個計算出的殘值會被視為資產在最後 1 年的效益。由於成本效益分析著重於經濟現金流，此殘值後續須經過折現，納入淨現值(NPV)計算，以反映資產在評估期後的價值貢獻，而非僅將折舊視為費用，爰研究明確指出，隨著箱梁探測數量的增加，設備的付出成本會相對降低，具有規模經濟效益。

更重要的是，輔助工具將傳統人力成本、時間成本，以及最大的「安全風險與法規遵循成本」(如安全設備添購、通風設備、救援隊伍佈署、人員培訓等隱藏成本)，有效地轉化為可預算的設備折舊與研發成本，對於轄區內橋梁數量龐大的養護單位，或具有相當規模執行橋檢工作之工程顧問公司，集中投資自動化工具，是實現長期維護預算優化和安全管理升級的策略。

5.2.4 在地化應用情境分析

對於內部空間較大、高度足夠的箱梁，小型防撞 UAV 可提供快速、全面的立體檢測，而對於內部空間狹長、地面平坦的混凝土箱梁，履帶機器人則因其穩定性和高載荷能力而更具優勢，能確保數據採集品質。

軌道式攝影機則適用於長跨度、直線型的箱梁內部，特別是需要長期、高精度重複監測特定區域(如特定腹板或隔板)結構劣化的構建項目。穿戴式裝置則做為最後的安全防線，確保在機器人或無人機無法到達，或需要人工確認的關鍵點位上，檢測人員能夠在最短時間內、獲得最充分的遠程支援下完成任務。

技術輔助工具的最終目標是實現更頻繁、可重複性且資料數位化的檢測作業，透過這些工具建立長期、客觀、量化的結構健康檢測數據庫，能為養護單位提供基於狀態的維護決策依據，優化橋梁維護計畫的有效性，提升橋梁通行之安全性。

5.3 箱梁內部檢測綜合解決方案與研發藍圖

本計畫建議採取 UAV/機器人/軌道式混合佈署方案，並將技術重點置於導航穩健性、AI 定量分析和人員安全輔助的在地化研究，並將各方案案短中長期策略及達成目標，彙整如表 5-3 所示。

表 5-3 箱梁內部檢測綜合解決方案與策略

時間線	策略目標	具體研發步驟與技術需求	預期成果
短期策略 (1-2 年)	標準化非接觸式數據採集與安全預警。	1. 確立 UAV 機型規格與內部探測流程。 2. 整合多氣體傳感器，用於滿足局限空間作業前的濃度確認要求。 3. 佈署穿戴式裝置，用於在必須人員進入時，即時監測生命體徵與回傳作業實況，縮短人員暴露時間。	減少 50% 探測時間；消除人員在檢測階段的急性安全風險。
中期策略 (2-4 年)	克服自主導航挑戰，實現高精度量檢測。	1. 研發並測試環境敏感型 SLAM 算法(如基於 PCA 的 CSM 優化)，提高無 GPS 環境下的定位精度。 2. 訓練 CNN 模型，實現對臺灣常見損傷類型(如 0.1mm 裂縫、滲漏、腐蝕)的自動化檢測與量化。 3. 開發軌道式攝影機系統的快速布軌與自動化掃描軟體，用於高重複性線性結構檢測。	實現檢測數據的空間高精度註記；檢測報告客觀性顯著提升。
長期策略 (5+ 年)	建立智能 SHM 數據庫與預測	1. 整合多年度的 3D 檢測數據，建立橋梁數位分身(Digital Twin)。	大幅優化橋梁維護預算

時間線	策略目標	具體研發步驟與技術需求	預期成果
	性維護系統。	2.開發故障預測模型，由傳統定期檢測轉為基於狀態的預測性維護。 3.探討將NDT傳感器(如紅外線熱像儀)輕量化並整合至 UAV 的可行性。	分配與長期結構安全。

第六章 結論與建議

本研究旨在解決橋梁箱型梁內部檢測所面臨的實務困境、技術瓶頸與職業安全風險，並研提可行之輔助工具研發方向，以提升我國橋梁檢測之品質、效率及安全性。我國車行橋梁中箱型橋約有 3,288 座，佔梁式橋的 14%。由於箱梁內部常因積水導致結構元件生鏽腐蝕，且此劣化無法透過外部目視確認，箱內檢測是確保結構安全的必要工作。然而，箱梁內部空間狹窄、不通風、幽暗，被法規明確界定為局限空間，傳統人工檢測因此存在極高的職業安全風險並須嚴格遵循《職業安全衛生法》等法規，導致龐大人力需求。然而傳統目視檢測成果高度依賴人員經驗且具主觀性，難以精確量測規範要求的微小裂縫寬度，人員進入的高風險與高昂之成本，導入非進入式智慧檢測系統具高度必要性。可行輔助工具(如無人機、履帶機器人、軌道式攝影機)的研發，必須克服在無 GPS、缺乏環境特徵的箱內實現高穩健性同步定位與製圖(SLAM)定量化，從而全面提升橋檢作業的安全性、效率及品質，並達成優化長期維護預算之目的。

6.1 結論

1. 法規驅動技術必要性：臺灣局限空間作業法規(包括通風、氣體偵測、救援機制等)使得傳統人工箱梁檢測在符合安全規定上成本較高，技術輔助工具是提升安全與符合規定的必要且經濟之替代方案。
2. 技術瓶頸在於自主導航穩定性：無人機和履帶機器人平台在箱梁內部的核心技術挑戰並非數據採集能力，而在於缺乏 GPS 環境下之高精度自主製圖與定位，尤其是如何克服在狹長空間、低特徵環境中累積的 SLAM 誤差。
3. 數據量化實現典範轉移：輔助工具集成 AI 辨識相關技術，能夠將傳統依賴人眼的主觀目視檢測，轉變為可量化、可追蹤的數位化結構健康數據，從根本上提升檢測品質與維護效率。

6.2 建議

1. 建議可修訂橋檢相關規範，納入非接觸式檢測技術(UAV/Robot/軌道式)之數據標準、精度要求，以及 3D 建模成果的提報格式。
2. 鼓勵養護單位將輔助工具的預探測作業，視為滿足《職業安全衛生法》局限空間作業中「危害物質濃度確認」的技術性替代方案。同時將穿戴式裝置納入「人員安全與監視機制」的法規允許範圍內，以降低人員進入時的安全風險。
3. 建議未來可針對箱梁內部無特徵環境自主導航(SLAM)算法的本土化研究，以集中資源解決目前國際研究已確認的技術瓶頸。
4. 建議新建橋梁於設計階段，應考量後續橋梁維護檢測之設備佈設需求，以及人員出入之便利性。
5. 本案所提 4 項箱梁內部檢測輔助工具技術，穿戴式裝置方案檢測人員仍須進入箱梁內部，惟可減少人員於箱內之停留時間，可支援複雜及緊急情況下仍須完成橋梁檢測之情境，以降低人員危害風險，並快速達到檢測效果，實務上可行性較高，對業界幫助亦大，建議列入短期方案先行研究。無人機、履帶機器人及軌道式攝影機雖可取代人員進入箱內檢測，但各有其技術限制條件，對不同類型橋梁亦有其適用限制，在無 GPS 環境下須搭配高精度製圖定位，需較長之研發期程才能落地應用，建議列入後續長期研究推行之方案。

6.3 研究成果與效益

1. 完成橋梁箱梁內部檢測問題與技術彙整，本計畫針對橋梁箱內檢測的現況進行研析，歸納了實務上所面臨之多重困難(高風險、高成本、主觀性高)，特別是針對不同種類的箱梁結構，並彙整國內外輔助工具的發展概況與技術限制。
2. 本計畫依據文獻回顧、實務訪談及現況查訪所蒐集之意見，研提了包含 UAV、履帶機器人、軌道攝影機及穿戴式裝置等混合部署的可

行解決方案，並初步評估了工具開發效益與可行性，為本所未來持續精進或研發新式橋梁檢測工具累積研發能量。

3. 本計畫進行橋檢人員訪談交流，獲悉箱型橋梁內部檢測之實務問題及設備需求，可提供未來相關檢測輔助工具研發方向之參採。

6.4 提供應用情形

本計畫相關蒐整案例、解決方案及研發效益評估等成果，可提供中央(如交通部公路局、高速公路局)、地方(縣市政府)橋梁維護管理機關，以及實際執行橋梁檢測之顧問公司或廠商，於橋檢作業實務精進之參考，並提供本所後續橋梁檢測工具相關研究之應用。

參考文獻

1. 全國橋梁統計資訊網，檢自：<https://bss.iot.gov.tw>
2. 交通部，公路橋梁檢測及補強規範，99年1月3日。
3. 交通部運輸研究所，公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣，114年。
4. 蔡欣局、廖先格、黃俊豪、陳柏源、胡啟文、王瑞麟、姚乃嘉，臺灣公路橋梁檢測作業之演進與展望，中華技術，No.123，108年8月，頁324-341
5. 劉家銘、曾惠斌、張季閔、楊依璇、徐文娟、黃上傑，市區箱型梁橋檢測常見問題及建議解決辦法，鋪面工程，第21卷第3期，112年9月，頁81-92
6. 交通部運輸研究所，我國橋梁檢測方式之發展探究，107年。
7. 徐詩涵，無人機應用於箱型橋梁內部探測之可行性研究，國立高雄科技大學，112年。
8. 勞動部，職業安全衛生法，108年。
9. 勞動部，缺氧症預防規則，103年。
10. Youngjin Choi, Yangrok Choi, Jun-sang Cho, Dongwoo Kim, Jungsik Kong, "Utilization and Verification of Imaging Technology in Smart Bridge Inspection System: An Application Study", Sustainability 2023, 15, 1509.
11. Yujie Cui, Yue Pan, Dalei Wang, Mazeyu Ji, "A smart robotic system for autonomous inspection of large-scale concrete girder", Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability, 2024

12. J.C. Avendaño, J. Leander & R. Karoumi, “Drone-based photogrammetric indoor inspection of box girderbridges”, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2024.
13. 江明益、夏明勝、王瑞麟，淺談公路橋梁檢測制度精進歷程，技師報，No.1265，110年3月6日。
14. 交通部運輸研究所，特殊性橋梁養護作業督導考核制度之探討，112年。
15. 交通部高速公路局，高速公路橋梁目視檢測手冊，113年10月。
16. 交通部運輸研究所，無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之研究，113年。
17. Juan Camilo Avendaño, “Detection and quantification of cracks in concrete bridges using drone-image inspection”, KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2024.
18. Jaime Valls Miro, Freek De Bruijn, Gamini Dissanayake, Olivier Boisard, Peter Ton, “Robot-Assisted Inspection of Concrete Box Girders in Bridges”, Austroads Bridge Conference ,2011.

附錄一
專家學者座談會會議紀錄

交通部運輸研究所運輸技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：本所運技中心第一科 114 年度自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：114 年 5 月 12 日(星期一)上午 9 時 30 分

參、地點：本所運輸技術研究中心 2 樓簡報室

肆、主持人：蔡立宏主任

紀錄：鄭登鍵

伍、出單位及人員：如簽到表

陸、與會委員意見：

一、吳委員松旺

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 本工法適用於如大甲溪此類卵礫石河床，而臺灣的河川環境及地質具多樣性，在感潮區河川、泥砂或泥岩等環境是否可用其他的方式來保護橋基，建議後續可規劃針對相關的場域下橋基保護之研究。
2. 建議可建立本工法之 SOP 做為施工說明書，提示施工細節、步驟，以利後續推廣執行。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

目前箱內檢測還是以人力為主，無法用機器取代，本工務段可安排本案研究人員參與箱內檢測作業，實際參與執行體會實務困難及盲點。

(三) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

本工務段轄區國道 3 號竹南西至後龍段，因近海盤式支承鏽蝕嚴重，目前預計以手動或噴砂方式除鏽，若有研究參考需求可安排至現場案例蒐集。

二、柯委員永彥

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護

成效評估及技術推廣

1. 現場驗證使用 UAV 進行拍攝，如何針對水下沖刷部分進行觀察？
2. 本研究大甲溪河床屬於卵礫石，若針對不同性質之河床應如何調整或可直接適用？建議後續規劃相關延續性之研究。
3. 本研究建議可將計畫施作經驗回饋修正，如於現場工法之最佳配置、注意事項、步驟等補充說明。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

橋梁檢測方法相當多，包涵目視檢測及非破壞性檢測，建議透過訪談及現場觀摩，聚焦於實務需求。

(三) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

本案之研究場域是否有機會擴增至離岸風電之範圍？

(四) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

港灣構造物之管理相當重要，本研究今年度為最後一年，建議後續研究可從巡查檢測提升到監測，可節省人力並獲得更全面之資料。

(五) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

本研究今年做花蓮港即可蒐集 2018、2024 年震災之案例，做實際案例之對照。

(六) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

本研究可與臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查研究搭配，將 RC 構件佈放於各實驗場域做測試。

三、林委員健明

(一) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 須因應氣候劇烈所生颱風豪雨，造成既有排水設施無法消退之積水及淹水。

2. 因應船舶大型化，碰墊規格尺寸需變大，是否影響碼頭結構？

(二) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

碼頭水下構造物為鋼板樁或鋼管樁結構，海水腐蝕劣化因子是否有針對各港海氣候條件分別研究？

(三) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 本研究為 5 年期研究之第 4 年，相關的資料蒐集，主要以生成式 AI 蒐集國內外液化評估之文獻，請注意 AI 工具使用之實際性。

2. 花蓮港於 113 年 0403 地震中受創嚴重，相關研究資料陸續產出，請貴中心針對潛勢液化高之碼頭，提出具體建議以減少地震所帶來之災損。

四、王委員朝正

1. 8 個計畫含括基本資料建立、資料運用方法及管制檢測技術評估與應用，符合運技中心設立之目的。

2. 建議研究成果每年發表，依查核點審查並分享研究成果。

3. 建議貴中心持續讓工作同仁接受 AI 之相關訓練。

(一) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

碳鋼及鋅去年已建立關聯性，建議今年成果能帶入進行確認，並進行 AI 學習。

(二) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

鋼筋混凝土之劣化，鹽份、水份不可或缺，但若水量夠大是能沖掉鹽份，建議水量、時雨量及次數列入參數。

五、楊委員秉順

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 橋基沖刷涉及河床質種類、河床斷面、河床高程、基礎形式等狀況有不同影響，本案經歷多年試驗與現地驗證具有

效益性，建議可載明本案適用性範圍。

2. 可研議採用檢核表方式，對於有橋基沖刷之機關，只要針對檢核表內容勾選，即可知道是否可採用本方法，並於表中針對不同狀況提供織布配置建議方式，以方便依循。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 目前箱內檢測面臨人員安全、設備限制，狀況甚多，建議可先針對不同箱內情況了解。
2. 因為箱內狀況不同，有混凝土橋、鋼構，且隔梁人孔有管線或是箱內有錨頭等狀況甚多，建議後續歸納各種狀況之適用性方式。
3. 無管線、阻礙物或高低差等影響隔梁人孔之箱內環境，可研議採自動軌道之可行性。
4. 如屬較複雜有阻礙物之箱內環境，可研議採人員先蒐集箱內高解析之照片與影片，事後採用影像標註及檢測評分等方式可行性，減少人員停留時間。

(三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

本草案有規範相關土壤液化計算方式，建議可研議將港區地震液化風險評估模式精進等相關案例納入。

(四) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 邊坡情況甚多，有落石、土石流、倒懸、危木或節理開裂等問題，建議收集資料後先研擬預計 AI 判釋之方向。
2. 以公路局而言，RHRS 已有相關檢核表與評分機制，未來如能導入 UAV 等自動判釋相關邊坡分級數值，將可迅速分類。

(五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 本案歷年對於橋梁設計具有相當的助益，惟目前僅能以腐蝕等級由設計單位採用膜厚設計或耐久性設計等考量，建議本案後續可建立各區域相關設計參數，讓設計單位更能直接採用。

2. 因關渡橋與未來淡江大橋皆位於淡水河出海口，建議可於該處新增相關試驗。

(六) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 目前採用4種不同溫室氣體情境來研究鋼筋腐蝕速率模型計算，未來於不同現地上如何採用相關設計參數？
2. 本案提及選取一座鋼筋混凝土橋梁評估鋼筋腐蝕，是否已有選定？未來如何與模型相互驗證？

六、李委員坤哲

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 沖刷因子涉及流量、水深、福祿數、河床質..等等，本案目前採大甲溪案例，未來可擴充其他條件下之探討，如砂土、粉土質粒料，並據以調整織布，提升保護工耐久性。
2. 建議後續年度如繼續執行，可增加沖刷計算與水工試驗及現地試驗之比較，可推求不同條件下之成效。
3. 水利機關近年有辦理大甲溪疏濬工程，請注意地形及流況改變之影響。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 目前橋梁箱內檢測時，人員進出人孔之墜落風險及箱內局限空間為高風險等級。
2. 國內之前嘗試過之案例包括 UAV、Lidar、橋梁檢測機器人，因箱內構件複雜、管線遮蔽物、人孔位置不一、定位等困難，有諸多問題待克服。
3. 本案研究員後續將實際進入箱內查訪，對發掘問題及工具之開發應有極大幫助。

(三) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

目前邊坡主管單位之邊坡分級制度有定性及定量兩部分，其分級需要大量人力進行資料之判讀及更新，如

能在適當點導入 AI，並配合邊坡監測系統，將對邊坡預警及防災大有裨益。

柒、結論：

感謝各位委員提供本所相當寶貴之專業建議，請案關業務同仁將委員意見納入參採，以符合實際應用面，並提升研究成果之廣度及實用性。

捌、散會：上午 11 時 30 分

會議簽到表

壹、會議名稱：本所運技中心第一科 114 年度自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：114 年 5 月 12 日(星期一)上午 9 時 30 分

參、地點：本所運輸技術研究中心2樓簡報室

肆、主持人：蔡主任立宏 蔡立宏

伍、出席單位及人員：

所外委員	簽名
林委員健明	林健明
楊委員秉順	楊秉順
吳委員松旺	吳松旺
柯委員永彥	柯永彥
李委員坤哲	李坤哲
王委員朝正	王朝正
第一科	賴瑞蓮 顏麗香 張道光 曾文傑 王瑞萍 胡敏 鄭登建 賴俊呈 黃育瑞 謝幼屏 黃煜辰
第二科	李信穎
第三科	林雅雯

附錄二
第 1 次工作會議紀要

114 年 6 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

時間：114 年 6 月 30 日(星期一)上午 10 時至 13 時

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

- (一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣
 - 1. 相關三維數值水理分析文獻資料之蒐集。
 - 2. 本工法施工說明書撰擬、現場觀測執行及三維數值分析模型建置情形。
 - 3. 階段性成果應用說明。
- (二)橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估
 - 1. 國內橋梁箱型梁結構型式分類介紹。
 - 2. 橋梁箱內檢測規定及實務問題說明。
 - 3. 6 月專家學者諮詢及實務單位訪談內容說明。
- (三)港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點
 - 1. 彙整及回顧臺灣港灣構造物設計基準發展歷程。
 - 2. 彙整及回顧日本「港灣の施設の技術上の基準・同解説」之變遷。
 - 3. 調查及蒐集「港灣構造物設計基準(草案)」所參考引用國內外標準或規範之最新版本。

(四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 已蒐集之國內外 AI 於邊坡相關研究文獻說明。
2. 專家學者諮詢及實務單位訪談規劃。
3. 國營臺灣鐵路股份有限公司邊坡分級制度介紹。

(五)114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 完成第 1~2 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作，持續辦理第 3~4 季工作。
2. 完成出版年報與辦理研習會工作，後續工作重點在進行銅金屬關聯性分析工作。

(六)港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

1. 各港區其他設施之巡檢項目與維護管理制度彙整與研析。
2. 其他設施常見之劣化項目探討。

(七)港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 彙整液化評估法相關文獻，並蒐集花蓮港及安平港近 10 年新建设工程所增加之地質鑽探資料。
2. 初步完成花蓮港及安平港地質鑽探資料盤點。

(八)氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. AR6 統計降尺度資料之篩選及資料處理流程。
2. 鋼筋混凝土腐蝕劣化評估模型之選用。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 討論所蒐集文獻之適用性。
2. 三維數值模型分析流程與可列入檢定及驗證事件探討。

(二)橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 依橋梁箱型梁結構分類，討論橋檢輔助工具之適用模式。
2. 專家學者諮詢及實務訪談所蒐集之橋檢實務問題討論。

(三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

討論本案盤點檢討「港灣構造物設計基準(草案)」參考引用國內外標準或規範之最新版本及取得的情形。

(四) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 蒐集文獻有 AI 結合數位孿生此類較為新穎之整合應用，建議針對目前 AI 於邊坡之新應用案例加強蒐集，以做為未來研究課題之發想。
2. 建議持續前往案關單位進行諮詢，以瞭解實務運作及 AI 應用所在。

(五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 討論關聯性研究的建模數據、主要影響因子、依區域特性建模等相關課題。
2. 討論水下試片取樣分析與研究重點。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

1. 討論其他設施維護管理機制、巡查檢測項目與劣化判定標準。
2. 討論各港之其他設施構件劣化項目。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 討論 111-113 年成果與港灣構造物維護管理系統介接的內容。
2. 討論後續報告內容的加強與補充。

(八) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 選用之腐蝕劣化評估模型於臺灣地區的適用性。
2. 既有文獻上其他腐蝕劣化評估模型之差異性。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

(一)高公局大甲工務段已於今年汛期前採用本工法完成 P25L~P26L 橋基保護工作，並已據此完成今年度現場試驗區第 1 次 UAV 觀測航拍記錄初始地形，後續請持續注意降雨情形適時進場拍攝，以及注意航拍活動申請之期限。

(二)三維模型建置驗證事件之選取，考量降雨量、石岡壩放流量、試驗區影響性及觀測資料完整性，可採 113 年凱米颱風事件。

二、橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

(一)建議增加橋梁箱內檢測之檢測項目相關論述，以利聚焦並評估橋檢工具應具備之功能及實用性。

(二)建議報告蒐集並統計呈現各種類箱型梁之數量，以利評估未來橋檢工具研發之效益。

三、港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

(一)有些標準或規範需要付費購買才能取得，建議先以已經蒐集取得的最新版本之標準或規範進行盤點檢討。

(二)有關本計畫鈞長提示：「港灣構造物設計基準複審一案，涉及原提報交通部複審時未納入之新增議題，惟該等議題尚未經初審即納入複審程序，為確認其程序之適切性及實務可行性，請與綜合規劃司研商後續處理方式。」在經與綜合規劃司討論後，其建議先進行盤點，俟盤點後評估修訂內容多寡，再決定逕行辦理複審作業，還是交通部函文將基準(草案)退回本所，重新辦理基準編修及初審作業。故請於 8 月 31 日前，提供盤點資料予綜合規劃司參辦。

四、鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

(一)建議後續再持續蒐集臺灣高速鐵路股份有限公司(簡稱高鐵公司)及農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處(簡稱阿里山林鐵)邊坡分級相關規定，以做相互參照比較。

(二)應依照本計畫研究目的及對象，逐步收斂課題、以終為始，故建議初步蒐整鐵公路邊坡分級制度後，應歸納並分類出適合 AI 介入輔助之情境，俾後續提供實務單位參考應用。

五、114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

(一)後續可分區進行關聯性分析，探討臺灣不同大氣環境、不同腐蝕因子特性區域間的腐蝕差異性。

(二)後續可比較各年期、各港區水下金屬腐蝕差異性，以及水下金屬腐蝕與腐蝕因子間的關聯性。

六、港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

(一)統計並分類各個港區其他設施構件之劣化項目，以瞭解設施常見損壞構件，提供後續設施維護之參考數據。

(二)建議再加強蒐集新興科技可應用在其他設施的巡檢作業案例。

七、港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

(一)請提供歷年各港液化相關研究成果予港灣設施維護管理系統介接，提供臺灣港務股份有限公司未來的應用。

(二)今年度進行花蓮港及安平港模式精進，建議運用國內、外的液化分析方法，推估花蓮港及安平港液化範圍及震陷量，提供地震速報簡訊之應用。

八、氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

(一)建議測試比較不同腐蝕劣化評估模型之差異。

(二)建議搜尋是否有臺灣本土的相關溫度及濕度等修正因子試驗資料，以利建立臺灣本土之修正因子。

附錄三
第 2 次工作會議紀要

114 年 8 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

時間：114 年 8 月 28 日(星期四)上午 9 時至 12 時 40 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 文獻資料蒐集及本工法施工說明書撰擬說明。
2. 數值分析流程及三維數值分析模型檢定與驗證情形說明。
3. 階段性成果應用說明。

(二)橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 蒐整橋梁箱內部檢測之檢測項目及缺失樣態說明。
2. 箱梁內部檢測作業現地觀摩內容說明。

(三)港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 初步盤點並檢討草案內容。
2. 與臺灣世曦工程顧問股份有限公司討論盤點結果及後續編修方向討論。

(四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 蒐整國內外 AI 應用於邊坡相關研究文獻。
2. 實務單位訪談紀要說明。

3. 我國鐵公路邊坡分級制度現況說明。

(五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 完成第 1~2 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作，持續辦理第 3~4 季工作。
2. 初步完成銅金屬關聯性分析工作，後續將持續精進與優化模式。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

1. 探討各港區其他設施經常及特別巡查設施之劣化項目。
2. 無人機與行動應用程式應用於其他設施巡檢作業。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 建置花蓮港及安平港地質鑽探資料，並盤點、篩選液化風險評估可用資料，花蓮港共 36 筆、安平港共 193 筆地質鑽探資料。
2. 完成不同地震情境下液化潛勢比較。

(八) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 氯離子擴散係數之溫度及時間影響修正。
2. 需考量鹽害影響縣市之使用年限損失比較。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 文獻引用資料之適用性。
2. 三維數值模型檢定與驗證情形，及後續可列入模擬分析之事件探討。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 依不同箱內環境適用之檢測輔助工具模式討論及比較。
2. 國外箱內檢測技術應用及現地試驗成果文獻討論。

(三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 討論初步盤點檢討之結果，特別針對氣候變遷對於港灣影響，草案所參考引用之國外規範，於更新之版本皆已修訂相關方針、措施及策略等來調適因應。後續草案辦理修訂時，建議參考更新版之國外規範進行更新修訂，以因應氣候變遷之挑戰。
2. 討論草案參考引用之國內外規範更新版本，有關需付費才能取得之新版規範是否需進行採購。

(四) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 目前蒐集之邊坡結合 AI 應用案例及文獻，仍是以較常見之情境，例如：邊坡滑動風險評估及災害預測、劣化辨識及結構弱面分析等，建議蒐集生成式 AI 於邊坡之應用案例，以拓展思路。
2. 建議國外鐵公路邊坡分級制度可考量納入蒐整，相互比較。

(五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 討論關聯性研究於校正迴歸模式時之主要考量因素。
2. 討論關聯性模式與前期模式差異，以及未來精進模式之方向。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

1. 討論其他設施巡檢劣化項目之探討。
2. 討論新興科技應用於其他設施之巡檢作業。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 討論花蓮港及安平港不同地震情境下液化潛勢分析。
2. 討論後續報告內容之加強與補充。

(八) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 納入溫度修正氯離子擴散係數造成提前發生初始腐蝕。
2. 各縣市使用年限損失差異不大，可能是因為需考量鹽害影響之各縣市年均溫相差不大。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

- (一)請檢視高公局大甲工務段應用本工法之時間，以及更新引用水利署之斷面流速及水位資料。
- (二)後續以水利署演算之大甲溪不同重現期流量進行分析模擬，評估本工法之耐洪性。

二、橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

- (一)建議規劃至不同型式之箱梁進行現地觀摩，以較全面了解國內箱梁內部型態及狀況。
- (二)依據箱內空間及相關構件佈設，檢測輔助工具選擇除固定軌道式、攀爬及自走式機器人外，複雜之箱內空間可研發穿戴式設備方案，輔助人員紀錄以減少檢測人員待於箱內時間。

三、港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

- (一)需要付費購買才能取得之新版國內外規範，建議後續以草案參考引用較多或較常用之新版規範優先採購。
- (二)經初步盤點結果，因應氣候變遷、船舶大型化、耐震規定及材料規格等因素，本草案所參考引用之國內外規範或標準，均已大幅更新，爰刻正辦理函文請交通部辦理退回草案相關事宜。俟退回後，本所將重新進行編修及初審相關作業，完成更新後再陳送交通部辦理複審。

四、鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

- (一)針對所盤點之鐵公路邊坡分級制度和現況，後續如何結合 AI 應用，應在報告後面章節詳加描述兩者之間的關聯性。
- (二)本案所提出適合 AI 輔助鐵公路邊坡之應用情境，後續可歸納及分類，提供其他實務單位參考應用。

五、114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

後續進行關聯性研究，可嘗試應用 AI 技術，分析金屬腐蝕速率與腐蝕因子間之關聯性。

六、港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

- (一)建議補充新興科技 UAV 應用於其他設施巡檢案例之說明。
- (二)建議加強新興科技應用於其他設施之運用與維護管理巡檢作業之精進說明。

七、港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

- (一)下次工作會議請補充液化風險評估之機率分析與定值分析之差異處。
- (二)本計畫前期成果臺北、臺中、高雄等 3 港區之鑽探熱點圖及土壤液化潛勢圖，提供港灣設施維護管理系統介接，相關使用權限設定要慎重，以免影響航商選擇該港埠之停靠意願。

八、氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

- (一)建議再搜尋文獻是否有其他影響氯離子擴散係數之因子。
- (二)後續腐蝕防治策略應朝實務應用提供建議。
- (三)建議詳細列出各氣候變遷模擬情境之使用年限損失。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

貳、時間：114 年 8 月 28 日(星期四) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心5樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研員 副研員 副研員 " " " 副研究員 助理研究員	賴俊杰 鄭登建 胡怡了 曹文偉 謝維厚 黃亨謙 張道光 顏麗香 黃煥長 王浩祥
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李俊翰
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄四
第 3 次工作會議紀要

114 年 10 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

時間：114 年 10 月 27 日(星期一)上午 9 時至 12 時 50 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

- (一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣
 - 1. 本工法施工說明書撰擬說明。
 - 2. 數值分析流程及三維數值分析模型 Q5、Q10、Q20、Q50、Q100 模擬評估情形說明。
 - 3. 階段性成果應用及技術推廣規劃說明。
- (二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估
 - 1. 鋼箱梁內部檢測作業現地觀摩內容說明。
 - 2. 橋梁箱內檢測輔助工具可行方案及橋檢工具開發評估說明。
- (三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點
 - 1. 宇泰工程顧問有限公司視訊訪談盤點及後續編修方向討論。
 - 2. 撰寫期末報告初稿。
- (四) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討
 - 1. 鐵公路邊坡分級制度綜整說明。
 - 2. 邊坡分級制度結合 AI 之應用場景剖析。
- (五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 完成第 1~3 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作，持續辦理第 4 季工作。
 2. 完成第 4 次水下試片取樣工作，持續辦理水下腐蝕試驗之金屬試片腐蝕生成物清除、秤重工作。
 3. 規劃辦理板狀標準試片之大氣腐蝕暴露試驗。
- (六) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進
1. 完成花蓮港及安平港不同地震情境下液化潛勢分析。
 2. 完成花蓮港及安平港不同地震情境下地震沉陷潛勢分布。
- (七) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響
1. 臨界氯離子濃度、氯離子擴散係數計算公式修正。
 2. 設計年限內鋼筋腐蝕量計算。
 3. 氯離子擴散係數縮減率計算。
 4. 抗氯鹽腐蝕策略分析及彙整。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

- (一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣
1. 三維數值模擬時間及其與二維分析結果轉為邊界條件之討論。
 2. 本工法於不同重現下保護成效及保護工法鋪設方法再改良之討論。
- (二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估
1. 依橋梁箱內環境討論檢測輔助工具可行方案。
 2. 箱梁內部環境需求急迫性討論研發可能性及優先順序。
- (三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點
1. 討論宇泰工程顧問有限公司建議基準後續編修的方式。
 2. 依據盤點檢討之初步成果，討論後續編修方式及初審工作。
- (四) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 建議多加蒐集並整理我國邊坡養護單位已實際應用 AI 輔助於邊坡之案例，以提供其他單位參考發展。
 2. 建議針對巡查、監測及地錨檢測等各邊坡管理手段，探討可能結合 AI 輔助應用之應用場景，並說明適用性。
- (五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究
1. 討論進行板狀試片暴露試驗的作業困難與因應方案。
 2. 討論進行板狀試片暴露試驗的後續執行工作內容。
- (六) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進
1. 花蓮港及安平港不同地震情境下地震沉陷潛勢討論。
 2. 後續報告內容的加強與補充討論。
- (七) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響
1. 臨界氯離子濃度計算公式的適用條件。
 2. 既有混凝土橋梁抗腐蝕策略。

貳、重點紀要/主要結論

- 一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣
- (一) 本年度僅於年初進行一次現場拍攝作業，請儘速規劃第二次現場觀測作業，做為成效評估之依據。
 - (二) 本計畫為第 4 年期之研究，後續請儘速規劃本工法成效總評估之說明暨技術推廣活動，以供相關橋管機關參用。
- 二、橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估
- (一) 建議蒐集現行橋梁箱內檢測之檢測作業執行成本，以利比較研發相關輔助工具之成本效益。
 - (二) 橋檢人員穿戴式輔助工具可納入勞安有關議題之相關探討，提升本工具之需求及必要性。
- 三、港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

臺灣世曦工程顧問股份有限公司及宇泰工程顧問有限公司之意見可提供辦理編修及初審作業之參考，以完備基準的內容、調整編修的方式等，俾利於基準更具實用性。

四、鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

- (一)邊坡養護單位完成之巡查工作紀錄、各項表單及蒐集大量災害及損傷影像，皆保存於其建置之邊坡全生命週期管理系統或資料庫，而目前 AI 發展日新月異，大語言模型如 ChatGPT 已蓬勃發展，使用者透過一問一答方式即能請 AI 協助判識影像、撰寫程式碼並建構專屬之 AI 模型等等，相較過往，專業門檻已降低不少，使用者僅需著重於資料之蒐集、品管、標註和處理等工作。本研究之目的應定位在盤點邊坡養護單位可供 AI 訓練之資料，協助其發想自身之 AI 應用。
- (二)建議統整各邊坡養護單位之維護管理機制中，共通性之工作、項目及流程，並提供具泛用性之 AI 輔助應用場景。

五、114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

- (一)後續安裝大氣腐蝕暴露試驗之板狀試架時，建請按 CNS 規範進行安裝。
- (二)試驗裝置多安裝在樓頂，易受颱風、狂風影響，建議於試架側邊增加螺栓鎖緊、底部增加水泥加固，以強化穩定性。

六、港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

請依據觸發門檻加速度及高潛勢區面積分析成果，推估花蓮港及安平港區之分區地震沉陷量，並說明與花蓮港 0403 地震災況之差異。

七、氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

- (一)應補充耐久性設計評估公式引用依據。
- (二)補充既有混凝土橋梁因應氣候變遷抗腐蝕策略。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

貳、時間：114 年 10 月 27 日(星期一) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心5樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研管 副研究員 助理研究員 副研究員 副研究員 副研究員	胡怡了 謝少澤 黃煥良 鄭登健 黃宇謙 賴俊呈 曾文傑
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李伶穎
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄五

期末審查意見及辦理情形說明表

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

審查意見	處理情形
(一)陳天賜委員	
1. 本計畫廣泛蒐集箱型橋內部檢測技術與方法，瞭解現行橋梁檢測困難與問題，並就可行的方案與可能之輔助工具進行初步評估，構建未來發展方向策略，就自辦計畫之目的而言，應已完整給予肯定。	感謝委員肯定。
2. 本案蒐整提出 4 項箱梁內部檢測輔助工具技術，其中穿戴式裝置之方案檢測人員仍須進入箱梁內部，惟可減少人員於箱內之停留時間，可支援複雜及緊急情況下仍須完成橋梁檢測之情境，以降低人員危害風險，並快速達到檢測效果，實務上可行性較高，對業界幫助亦大，贊成列入短期方案先行研究。	感謝委員認同本計畫，將穿戴式裝置之方案列入短期方案先行研究。
3. 無人機、履帶機器人及軌道式攝影機雖可取代人員進入箱內檢測，但各有其技術限制條件，對不同類型橋梁亦有其適用限制，在無 GPS 環境下須搭配高精度製圖定位，需較長之研發期程才能落地應用。	箱內檢測導入無人機、履帶機器人及軌道式攝影機之適用條件不同，且各有目前須克服之技術瓶頸，尚需透過較長之研發期程，才有突破應用之可能。
4. 本計畫未來建議加強與美、日、韓等先進國家之檢測技術交流，參考國外如何克服箱梁檢測的環境限制，以調整研發進程	遵照辦理，未來設備研發將參考國外先進國家之檢測技術及作法。
(二)吳松旺委員	
1. 技術研發不應僅止於「紙上作業」，建議應邊做邊想，建議可尋找距離中心較近、環境單純且交通可及的橋址進行實地測試，本工務段轄下人員無法進入之多孔式箱型梁，可安排初步測試。	感謝委員支持及提供未來設備研發之測試場域。
2. 橋梁管理單位更關心箱梁內部會影響結構安全的重大缺失(如防震拉桿脫落、伸縮縫嚴重損壞)，而非細微之施工缺失。	本計畫後續研發之橋檢工具，將針對橋管及實務單位於箱內檢測之重點列為檢測標的。

3. 建議思考如何利用箱梁內既有之交控管線、電力或光纖系統(如高公局的 CCTV 或收費系統資電基座)，避免從無到有建置系統之辛勞。	遵照辦理，將思考以箱內既有設施管線作為設備移動設施之可行性。
4. 箱內檢測環境惡劣且檢測證照要求高，導致檢測人力招募困難。針對人無法進入之多孔式箱梁，研發自走式工具以確認內部是否有孔洞，對確保行車安全至關重要。	本計畫研發之橋檢輔助工具，以提高檢測品質及效率、降低人員負擔並提升其作業安全為目標，將針對人無法進入之箱內空間，評估研發相關輔助工具之可行性。
(三)李坤哲委員	
1. 本計畫研究國內外橋梁箱梁內部檢測技術、實際訪談橋梁管理養護單位及檢測人員、進入箱梁參與現場操作，針對現行技術分析並提出綜合解決方案與策略，研究內容完整，成果對未來發展相關技術有極高參考性。	感謝委員肯定。
2. P3-24, 104 年版「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範」對劣化程度的判定標準趨於量化且嚴苛。考量現場檢測操作性，107 年版後之規範對於劣化評等由定量改為定性。	已修正，詳報告 3-24 頁。
3. 目前箱內檢測輔助工具皆採影像辨識有無劣化及劣化程度，這是符合目前檢測規範定期檢測採目視檢測為主，定期檢測後有必要時再進行人員或工具之詳細檢測。	感謝委員肯定，目前評估研發檢測輔助工具皆是以影像辨識為主，以符合實務作業之所需。
4. 箱梁內部缺乏環境特徵、無 GPS 訊號環境，目前人工檢測做法是用粉筆標註構件編碼 ex: 1B1Wr、1D1..等，檢測輔助工具後續短期可在箱內張貼里程、構件編碼牌面或定位器，提供空間定位，長期再發展高穩健性的同步定位與製圖(SLAM)。	遵照辦理，將評估於箱內張貼里程、構件編碼牌面或定位器之方法定位做為初期研發測試之可行性。
5. 目前履帶機器人要通過箱梁內橫隔梁或加勁材有相當難度，未來應會朝向多移動方式機器人發展。	遵照辦理，將依箱內之環境特性選用及研發適用之工具設備。
6. 穿戴式裝置可縮短人員在局限空間時間，即時遠端協作會受限 RC 板及鋼板對傳訊之屏障，可列為未來技術挑戰課題	遵照辦理，箱內通訊為未來設備研發相當重要之挑戰課題
7. 特殊性橋梁箱梁須進入檢測之頻率	於結論與建議新增，新建橋梁應考量後

高,可建議未來新建特殊性橋梁設計時應預先配置檢測輔助工具	續檢測之所需及便利性,應符合相關設備裝設及人員出入之需求。
(四)本所運輸技術研究中心第一科 賴瑞應科長	
1. 本報告依據箱型橋梁內部特殊環境,歸納實務上相關技術應用失敗和檢測效率低下的原因,提供後續相關檢測設備研發的重要參考依據,研究成果予以肯定。	感謝肯定。
2. 建議鼓勵將搭載氣體傳感器的輔助工具的預探測作業,視為滿足《職業安全衛生法》中局限空間作業「危害物質濃度確認」的技術性替代方案。	未來檢測輔助工具研發將評估搭載氣體傳感器,符合氣體偵測需求之可行性。
3. 對於必須人工進入的場景(如預力混凝土箱梁),建議研發輕量化、高穩定度的穿戴式攝影機,並結合 AI 輔助記錄與定位功能,以便將口述內容轉為文字並精準標記缺失點位,將 3 人小組縮減至 2 人,以減少人力需求及人員於箱內之時間。	未來檢測輔助工具研發將評估以穿戴式裝置方式,提升檢測品質及效率,並降低人力需求。
4. 有關改革橋檢人員證照培訓與發放流程,擴大培訓名額,並簡化或縮短從考試到取得證照的過渡期(例如先發放臨時證明),以緩解高風險作業人力短缺的困境,建議可以將相關建議提供給本所運工組參考辦理。	遵照辦理,已將相關資訊提供本所運工組參考。
(五)本所運輸技術研究中心第二科 李俊穎科長(書面意見)	
1. 本計畫初步探討研發輔助工具之可行性,可供後續計畫參考。	遵照辦理,後續計畫將參考本報告資料內容。
2. 建議後續計畫期間可去查訪較惡劣環境之橋梁來驗證或測試評估檢測技術之可行性。	遵照辦理,後續計畫將安排至不同橋型之箱梁內部進行現場環境勘查。
(六)本所運輸技術研究中心第三科 陳鈞彥副研究員(書面意見)	
1. 針對國內外橋檢技術資料收集完整,對國內現況訪談及確實分析,值得肯定。	感謝肯定。
2. 後續研發更精進之橋檢技術,宜依本研究結論及建議,考量實務操作及人員安全之前提下進行研發。	後續計畫將參考本計畫結論及建議研發橋檢輔助工具,依實務需求並以提高檢測品質及效率、降低人員負擔並提升其作業安全為目標。

附錄六
簡報資料



期末報告審查

橋梁箱內檢測技術探討 與後續研發評估

團隊成員：鄭登鍵、胡啟文

2025.12.19



1

大綱

- 1 研究緣起與目的
- 2 文獻回顧
- 3 國內橋梁箱梁型式與檢測問題分析
- 4 橋檢實務現況調查與訪談
- 5 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估
- 6 結論與建議

2

1 研究緣起與目的

緣起 & 目的

計畫緣起

- 一般實務上如遇較大型、高橋墩或跨河橋梁時，橋檢常用的輔助工具有：橋梁檢測車、高空作業車，以及近年無人飛行載具(UAV)等，但**每項工具都有適合使用的環境條件及限制並非所有橋梁都適用。**

先期計畫

- 113年「公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣」辦理推廣活動與第一線橋檢人員交流，進行訪談並蒐集回饋意見。初步調查橋檢**實務問題與需求**，做為評估研發新式橋梁檢測工具之依據。

計畫目的

- 本計畫(114年)將針對**橋梁各類箱內檢測所面臨之問題及困難**，**盤點相關檢測技術及執行模式**，**探討可行之解決方案**，以做為後續研發橋檢輔助工具之參用，提升橋檢品質及橋檢工作之安全。

3

1 研究緣起與目的 – 橋梁箱內檢測現況



我國車行橋梁共**23,124**座，有15,671座橋梁為梁式橋，佔68.4%，梁式橋中包含箱型橋(主梁為箱型梁)**3,238**座，佔約14%。

依公路橋梁檢測及補強規範規定，新建橋梁應於完工使用後2年內進行第1次定期檢測，爾後定期**檢測之間隔以2年為原則，不得超過4年**，以交通部高速公路局為例，其轄管的特殊橋梁提高到每年檢測1次，至於**箱梁內部每3年檢測1次**，目視檢測發現問題之後，會進行劣化評等，視情況安排更進一步的詳細檢測，規劃維修計畫。



橋檢人員檢測箱梁內部

4

1 研究緣起與目的 – 橋梁箱內檢測現況



國家地震研究中心表示，箱梁內部屬於不易接近且工安風險較高之場所，但因箱梁內部易產生嚴重腐蝕或裂縫之情形，而這些損傷劣化均足以快速影響橋梁結構安全，以國內鋼橋為例，故箱梁內部檢測雖風險高且不易執行，但卻是必要且應落實執行之橋梁檢測項目。



國內鋼橋箱梁內部嚴重腐蝕及裂縫案例

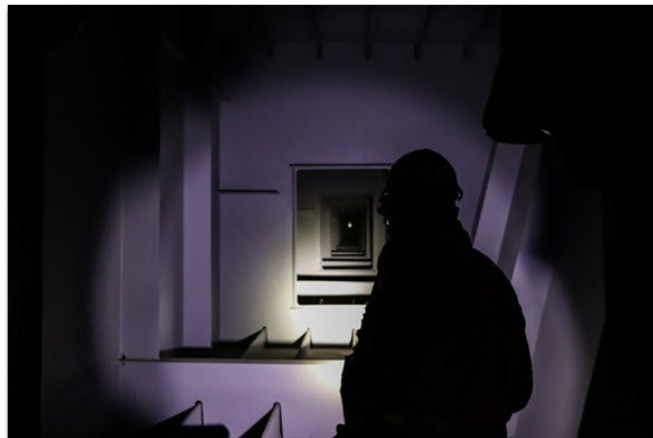
5

1 研究緣起與目的 – 橋梁箱內檢測現況



橋梁檢測面臨人力不足與經費短缺的窘境，某些地方政府因財政狀況較拮据，能執行橋梁檢測之費用有限，長期下來影響橋檢品質，進而影響橋梁安全。《顧好每座橋(下)|從高屏溪橋、蘇澳白米橋看橋梁健康要如何把關?，108年》

現行箱型橋梁內部檢測作業，一次箱內檢測需要4到5名人員共同執行，在人力與經費缺乏的衝擊下，透過人員目視檢測之人力調度更加不易，而每年檢測期間機具租賃也越來越困難。《徐詩涵112年之研究調查》



橋檢人員人力及經費不足

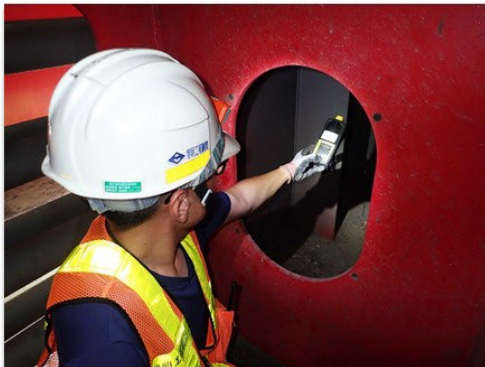
6

1 研究緣起與目的 – 橋梁箱內檢測現況

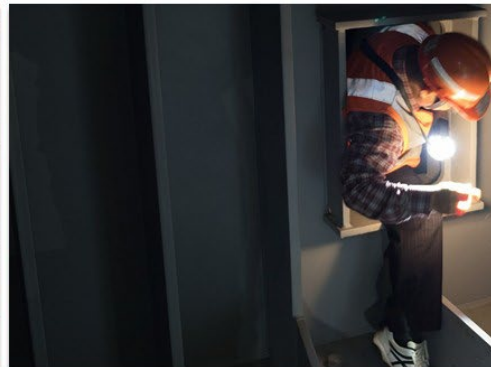
箱涵內部狹窄，人員、機具不易進入檢測，**白天過熱、不通風，構件封閉、幽暗且視線不佳**，屬**高危險性之工作環境**，因此有其提升工作安全之必要性。



根據勞動部職業安全衛生署於民國110年8月22發布「110年勞動檢查統計年報」，全國重大職業災害總數與109年下降11%，唯**局限空間之重大職業災害件數及死亡數為明顯上升**，箱型梁內部也屬於局限空間的一種，傳統橋梁檢測需要人員接近檢測標的進行目視評估和紀錄，這種方式存在很高的職業安全風險。《徐詩涵112年之研究調查》



橋檢人員測試箱內是否有毒氣



橋檢人員穿過箱內檢修人孔

7

1 研究緣起與目的 – 研究項目與內容

研究項目

✓ 文獻回顧

- 國內外橋梁箱內檢測技術及輔助工具之相關研究及發展文獻蒐集與彙整。

✓ 橋梁箱梁型式分類及箱內檢測問題研析

- 國內橋梁箱梁型式分類，並依不同種類之箱梁結構之檢測模式進行檢測作業問題研析。

✓ 專家學者及實務訪談及橋檢作業現況查訪觀摩

- 橋梁檢測領域專家學者、橋梁維管單位或執行橋檢工作之橋檢人員訪談，並進行橋檢作業實務查訪及觀摩，瞭解橋檢實務現況。

➤ 研提橋檢可行方案及橋檢工具開發評估

- 依據彙整意見、實務工作需求，研提可行之解決方案並進行橋檢工具研發執行評估。

8

1 研究緣起與目的 – 研究項目與內容

工作流程示意圖



9

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

Utilization and Verification of Imaging Technology in Smart Bridge Inspection System: An Application Study

成像技術在智慧橋梁檢測系統中的應用與驗證：應用研究

MDPI 出版社 Sustainability 期刊 2023, 15, 1509.

智慧橋梁檢測系統

智慧橋梁檢測系統結合了無人機、軌道攝影機與線纜攝影機等裝置。無人機配備360°RGB攝影機與熱影像模組，用於檢測橋梁外觀與底部結構；軌道攝影機則安裝於橋梁內部，透過遙控操作進行長距離檢測，適用於箱型梁等空間狹窄區域。

本研究總結多項技術，驗證每種技術的適用性。對2座橋梁實用性進行了評估，並將其應用於極端條件下的一座海上橋梁。透過該系統，能夠在極端環境下獲得經濟高效且客觀的橋梁檢測影像，並驗證了各種技術的適用性。

Utilization and Verification of Imaging Technology in Smart Bridge Inspection System: An Application Study
Youngjin Choi ¹, Yangrok Choi ¹, Jun-sang Cho ², Dongwoo Kim ³ and Junguk Kong ^{1,*}

Abstract: Image-based inspection technologies involving various sensors and unmanned aerial vehicles are widely used for facility inspections. The level of data analysis technology required to process the acquired data algorithmically (e.g., image processing and machine learning) is also increasing. However, compared with their development rate, the applicability of new inspection technologies to actual bridges is low. In addition, only individual technologies (for inspecting specific deteriorations) are being developed; integrated inspection systems have been neglected. In this study, the bottom-up method (which systematizes the applications of a specific technology) is avoided; instead, several technologies are summarized and a system of preliminary frameworks is established using a top-down method, and the applicability of each technology is verified in a testbed. To this end, the utility of the initially constructed technical system was assessed for two bridges; then, a strong utility technology was selected and applied to an offshore bridge under extreme conditions. The data obtained from the inspection were accumulated in a database, and a 3D-type external inspection map was produced and applied in the subsequent inspection via virtual and augmented reality equipment. Through the system, it was possible to obtain cost-effective and objective bridge inspection images in extreme environments, and the applicability of various technologies was verified.

Keywords: bridge inspection; structural health monitoring; smart inspection system; bridge deterioration; image-based inspection

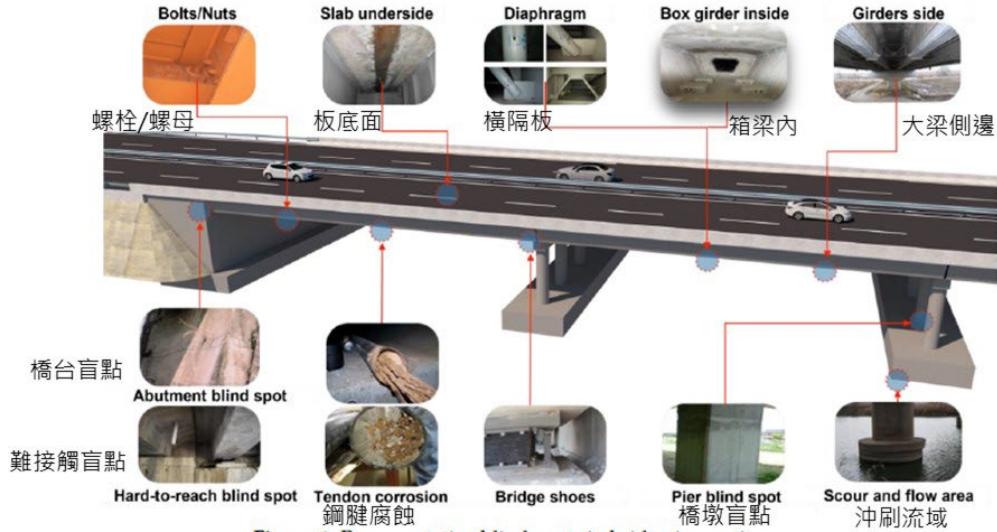
1. Introduction
In Korea, it is predicted that the number of old social overhead capital (SOC) facilities constructed more than 30 years ago will nearly double by 2030. Hence, the maintenance of old facilities is becoming increasingly important [1]. However, most inspections conducted upon bridges (representative SOC facilities) still involve daily visual inspections in which the inspector carries basic measuring equipment to the bridge and assesses its deterioration. In the case of difficult-to-access bridge members, inspectors use an inspection rail installed on an abutment, pier or aerial ladder vehicle. Inspection systems that rely on visual inspection produce many errors and suffer from problems such as poor inspector safety and traffic flow disruption [2].

10

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

橋梁檢測的盲點

大多數橋梁檢查員使用簡單的工具和儀器檢查橋梁構件。某些區域難以進入，或難以將設備運送到這些區域。尤其是在封閉區域（例如箱梁內部或大型橋梁的主梁），檢查通常無法正確進行。如果這些部位沒有持續且適當的檢查，可能會對橋梁造成重大風險，累積的損壞會導致高昂的維修和加固成本，這些檢查區域被定義為檢查盲區。



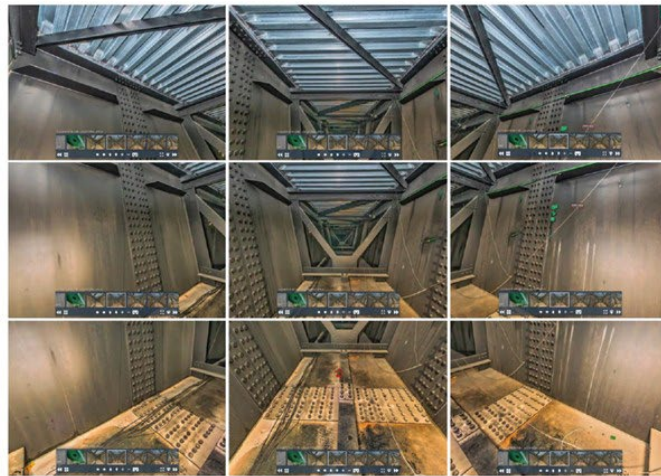
11

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

應用測試結果

鋼箱橋發現了一些缺陷（例如箱內油漆脫落或漏水），但未發現任何劣化（例如焊接不良、螺栓鬆動或腐蝕）。此外，也確認了雨水滲入箱體，箱壁有潮濕痕跡，以及水透過與上橋頂板連接的部件的細小裂縫滲透。使用上述設備進行的檢查比依賴現有人力進行的檢查更快；檢查通常需要2至4週，但現在已縮短為初步檢查和兩次主要檢查。。

• 檢測畫面



12

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

- 箱型梁內部檢測技術與工具發展歷程

傳統檢測以**人員目視**為主，**成果品質**高度依賴個人經驗，且**作業流程**複雜，需動用昂貴的輔助機具。

檢測方法

- 以**直接或間接目視**檢測為主。
- 採用 **DER&U** 法評估劣化程度(D)、範圍(E)、影響性(R)及急迫性(U)。

固有侷限

- 本質是「**表面現象**」檢測，對**內部隱藏性**缺陷無效。
- 成果具**高度主觀性**，依賴檢測人員經驗。

輔助機具

- 展示**高空作業車**、**橋梁檢測車**、**工作架**等大型設備。
- 進入箱梁人孔常位於高處（如離地10公尺），必須租賃機具輔助。



13

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

- 局限空間作業之職業安全與法規



- 《職業安全衛生法》
- 《缺氧症預防規則》

法規核心要求

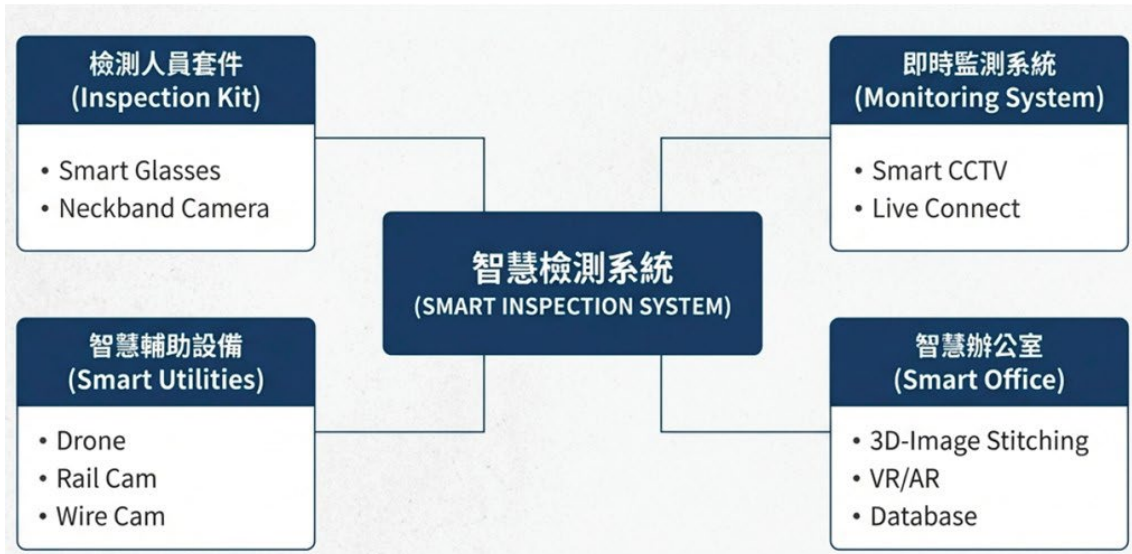
- **作業前**：必須確認空氣中氧氣及危害物質濃度。
- **作業中**：必須維持強制通風，並配置缺氧作業主管與監視人員。
- **緊急應變**：必須備妥動力或機械輔助的緊急救援設備。

結論：嚴格的法規遵循，大幅提高了人工檢測的作業門檻、複雜度與成本。

14

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

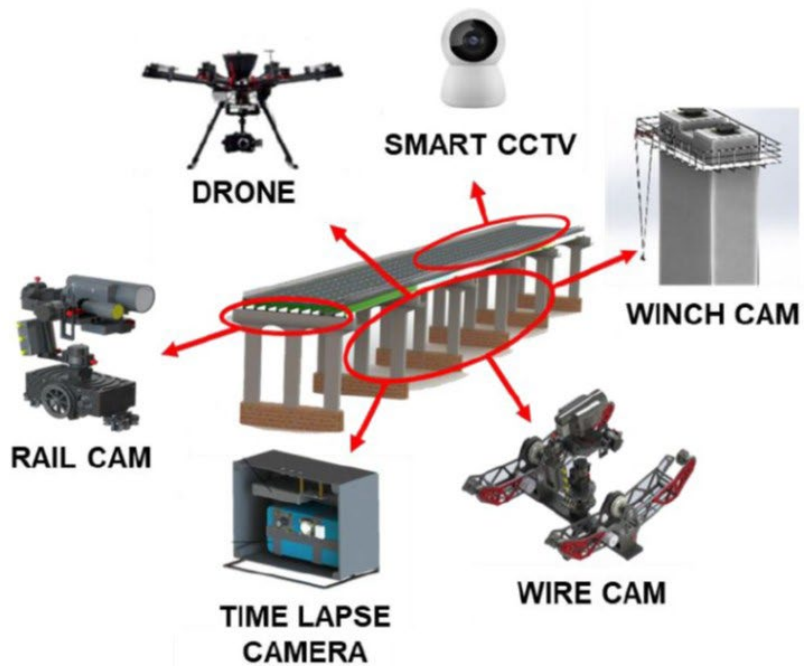
- 檢測技術與工具現代化發展



15

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

- 檢測技術與工具現代化發展



16

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

- 檢測技術與工具現代化發展

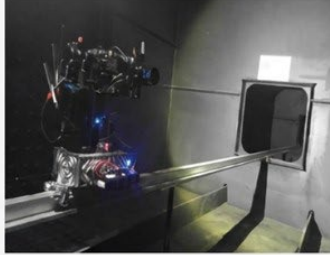
無人機、軌道攝影機與鋼索攝影機等工具，能有效替代人員進入危險區域，並克服檢測盲點。

無人機 (UAV)



專為局限空間設計，可進入人員難以到達的狹窄區域。
範例：Flyability Elios 系列，配備高流明照明與LiDAR。

軌道攝影機 (Rail Cam)



適用於箱內長距離、重複性的移動檢測，可在預設軌道上運行。

鋼索攝影機 (Wire Cam)



解決跨水或橋下空間等難以架設機具的檢測挑戰。

17

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

- 檢測技術與工具現代化發展

實證研究表明，導入智慧輔助設備可革命性地提升檢測效率與安全性。



檢測時間
90%
減少約 90%



出勤人力
53%
減少約 53%



數據品質
3D點雲模型
建立可反覆確認的數位模型，降低人為錯誤

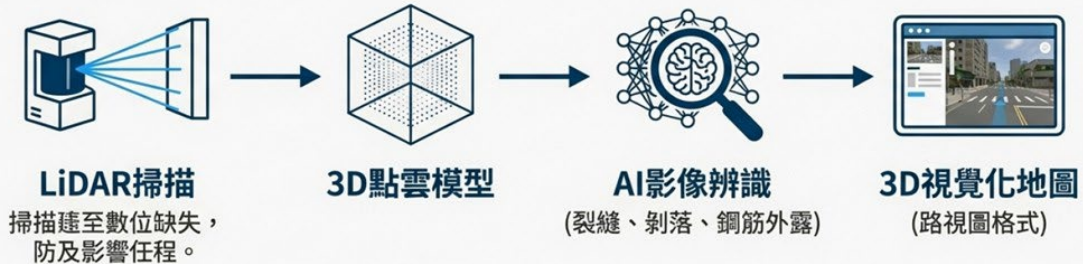
18

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

- 檢測技術與工具現代化發展

新技術的核心價值不僅是採集，更是將數據數位化，為導入AI影像辨識、建立VR/AR模型奠定基礎。

數據價值鏈



進階應用

- 輔助缺失評等：提高客觀性與一致性。
- 遠端協作與培訓：透過VR/AR設備，使管理人員和新手能身臨其境。

19

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

- 新型輔助工具之限制與挑戰

儘管潛力巨大，但高昂成本、量測精確度限制、以及數據標準化滯後，是目前廣泛應用的主要障礙。



經濟因素 (Economic)：
購置成本高昂（例：Flyability Elios 系列約新臺幣200萬元）。



技術限制 (Technical)：
裂縫「寬度」目前僅能透過影像後處理量測，精確度待提升。



空間限制 (Physical)：
箱梁內部狹窄空間與加肋梁，限制無人機飛行與搭載功能。



規範滯後 (Regulatory)：
缺乏標準化數據採集流程（如拍攝角度、距離），影響AI模型訓練的數據一致性。

20

2 文獻回顧 – 箱梁內部檢測相關文獻

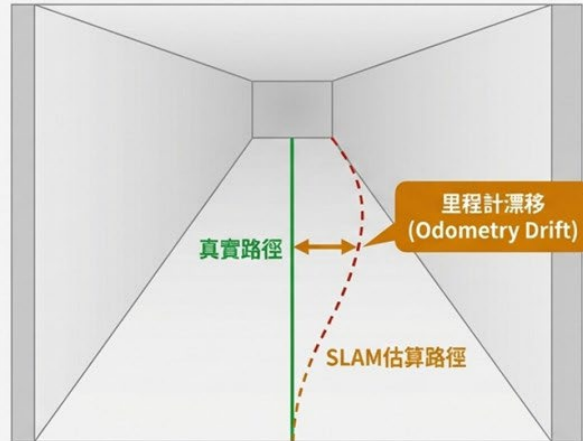
- 新型輔助工具之限制與挑戰

所有技術挑戰最終歸結於最核心的難題：如何在箱梁內部這種單調、無特徵的環境中，實現高穩健性的同步定位與製圖(SLAM)。

問題核心：無特徵場景 (Degraded Scenes)

失效原理：

- 場景：長走廊、單調表面、相似場景重複出現。
- 後果：視覺里程計 (Visual Odometry) 累積誤差，導致後續製圖 (Mapping) 嚴重失準。



21

3 國內橋梁箱梁型式與檢測問題分析 – 橋梁箱梁型式

箱型梁：現代橋梁工程的萬用骨幹



鋼筋混凝土 (RC)

結合穩定性與成本效益。
適用於中小跨徑橋梁（數十公尺以內）。施工技術成熟，但結構自重較重。



預力混凝土 (PC)

結構效率高，跨越能力佳。
最常用於中長跨徑橋梁（數十至上百公尺）。預壓應力能有效控制裂縫，耐久性更佳。



鋼構造 (Steel)

高強度、輕量化。特大跨度橋梁（如斜張橋）的理想選擇。施工快速，但需注意防鏽處理與焊道疲勞。

我們依材料對其分類，因為每種材料都有獨特的特性、應用，以及至關重要的——不同的檢測需求。

22

3 國內橋梁箱梁型式與檢測問題分析 – 橋梁箱梁型式與檢測方式

• 箱型梁橋人孔進出常見狀況及處理方案

狀況 1	現場狀況：人孔位於橋台或主梁較低處。 處理方案：人員可直進入或架梯進入。	狀況 2	現場狀況：人孔距地面 24M 以內，橋下車輛可進入，非屬市區道路。 處理方案：於橋下使用高空車。
			
狀況 3	現場狀況：人孔下方屬市區道路。 處理方案：需會同交通管理單位會勘，於外側車道使用高空車抵達人孔。	狀況 4	現場狀況：橋梁下方為匝道。 處理方案：需辦理橋面交雜會勘後於下層橋面使用高空車抵達。
			
狀況 5	現場狀況：人孔處位於為河道、或其他高架橋之上方。 處理方案：需會同交通管理單位會勘，於外側車道使用高空車抵達人孔。	狀況 6	現場狀況：橋孔下方供其他機關使用 處理方案：需與橋下使用單位會勘後，使用高空車抵達人孔處。
			

25

3 國內橋梁箱梁型式與檢測問題分析 – 橋梁箱梁型式與檢測方式


• 箱型梁橋箱內檢測常見劣化與缺失



26

3 國內橋梁箱梁型式與檢測問題分析 – 橋梁箱梁型式與檢測方式

- 臺灣橋梁箱梁內部檢測現況與挑戰分析

		
高度依賴經驗 (Experience-Dependent)	量測極度困難 (Measurement Difficulty)	記錄品質不一 (Inconsistent Records)
檢測高度仰賴檢測人員的經驗和主觀判斷。資深與資淺人員的評估結果可能存在顯著差異。	規範要求判定 0.1mm 的裂縫，但在光線不足的現場要精確量測至 0.05mm 級別是極度困難的。	傳統手寫記錄常有遺漏不清、照片與位置無法比對等問題，嚴重影響數據品質與後續分析。

27

4 橋檢實務現況調查與訪談 – 橋梁管理養護單位訪談

高公局大甲工務段訪談

- 日期：114年6月18日
- 訪談對象：吳松旺段長、林哲詠工程師、
仝葉工程顧問林敬唐技師



28

4 橋檢實務現況調查與訪談 – 現場觀摩及操作觀察分析

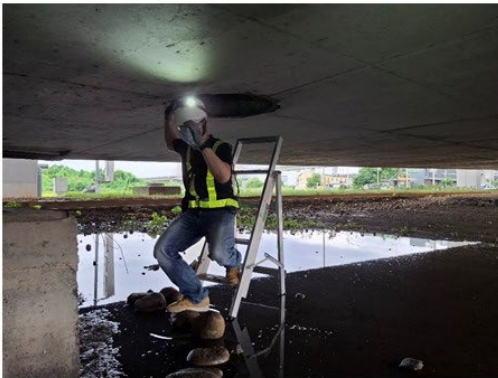
箱內橋檢現地觀摩

- 日期：114年7月11日
- 橋梁：台74線(更生巷~松竹路高架橋)主線PC箱梁
- 介紹人員：黎明工程楊竣傑組長



29

4 橋檢實務現況調查與訪談 – 現場觀摩及操作觀察分析



30

4 橋檢實務現況調查與訪談 – 現場觀摩及操作觀察分析

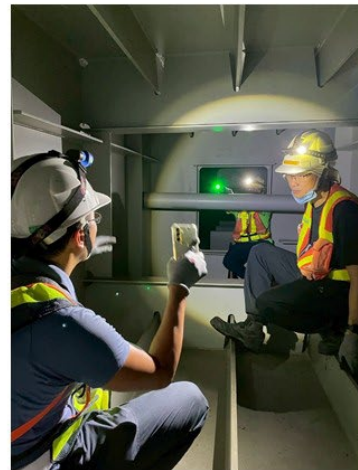


31

4 橋檢實務現況調查與訪談 – 橋梁檢測作業團隊訪談及現場觀摩

箱內橋檢現地觀摩及訪談

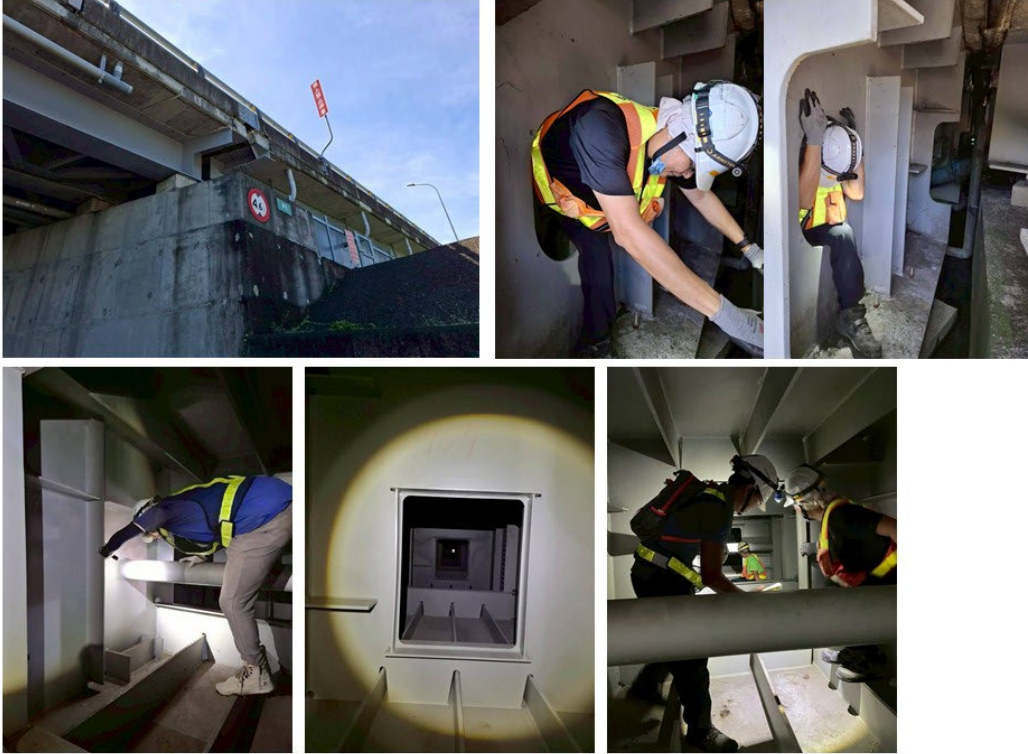
- 日期：114年9月11日
- 橋梁：南投縣南投市軍功橋(鋼箱梁)
- 介紹人員：黎明工程楊竣傑組長



- 極端高溫：上午10點已感悶熱，內部溫度可達40-50°C。
- 訊號隔絕：鋼箱完全屏蔽手機訊號。
- 空間障礙：內部充滿縱橫加勁板，阻礙行走；前段高度較低需彎腰移動。

32

4 橋檢實務現況調查與訪談 – 橋梁檢測作業團隊訪談及現場觀摩



33

4 橋檢實務現況調查與訪談 – 橋梁檢測作業團隊訪談及現場觀摩

軍功橋鋼箱梁內部實拍



鋼箱接合處大量螞蟻群聚



施工預留孔周圍塗裝破損生鏽



連貫但狹窄的人孔通道

34

第一線視角：在極端環境中與時間賽跑

作業實況

- 高度依賴高空作業車：約90%的進出仰賴高空車，成本與風險並存。
- 耗時的體力勞動：一條290公尺箱梁需1.5至2小時，若缺失多則可能超過4小時。
- 極端環境挑戰：
 - 空間：部分箱梁僅1.2米高，需全程蹲爬；內部加勁板阻礙移動。
 - 溫度：鋼箱梁內可達40-50°C，悶熱如烤箱。
 - 生物/遺留物：動物屍體、蛇類、鐵釘鋼筋為常態。

35

總結：國內橋梁箱內檢測面臨的四大結構性困境



1. 高風險環境與高昂成本的矛盾

作業環境極度惡劣，但安全進入的替代方案（如施工架）成本過高，難以負擔。



2. 新興技術與應用現實的落差

理想的輔助工具（無人機、LiDAR）在複雜的箱內環境中效能不彰，無法取代人力。



3. 制度設計與現場需求的人力危機

證照培訓與發放機制跟不上業界實際人力需求，形成嚴重瓶頸。



4. 未來期望與研發方向的明確指引

業界需求清晰：需要能有效減少人員暴露時間的輕量化、高穩定度務實工具。

36

5 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估

• 從今日挑戰到明日藍圖



37

5 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估

方案一：無人機 (UAV) — 空中之眼，靈活覆蓋廣泛空間

核心優勢

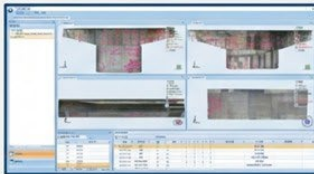
高機動性，快速部署，有效降低 **53%** 勤人力，提升檢測效率。

適用情境

內部空間較大、高度足夠之混凝土或鋼箱梁。

數據產出

- 建立高解析度 3D 模型與點雲，實現客觀數位留存。
- 結合本所 AI 影像辨識技術，自動量化裂縫 (細至 0.1mm)、剝落等損傷。



關鍵挑戰與對策

挑戰 (GPS 缺失)：

→ 透過 **LiDAR + IMU + SLAM** 技術融合，實現自主定位與導航。

挑戰 (光線/粉塵)：

→ 搭載高強度照明 (例如 16,000 流明) 與防塵鏡頭。

挑戰 (續航力)：

→ 精確任務規劃與電池管理。

38

5 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估

• 方案二：地面/履帶式機器人 — 穩定平台，承載高度精密探測

核心優勢

卓越的穩定性與高載荷能力，適合搭載精密 NDT (非破壞性檢測) 傳感器。

數據產出

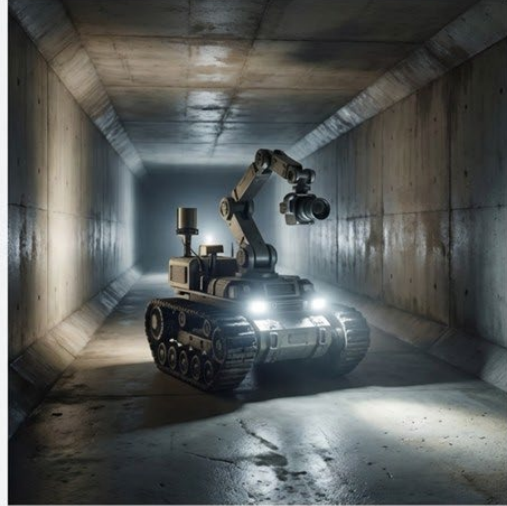
- 採集高細節表面影像，並精確註記於 3D 幾何地圖。
- 提供客觀、量化的數位指標，利於長期監測。

關鍵挑戰與對策

- **挑戰 (SLAM 穩健性)：**
針對長廊、低特徵環境，研發**環境敏感型 SLAM** 策略，克服里程計累積誤差。
- **挑戰 (內部障礙)：**
針對不同橋型開發多樣化平台 (如磁吸、攀爬式)。

適用情境

地面平整、長距離的混凝土箱梁。



39

5 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估

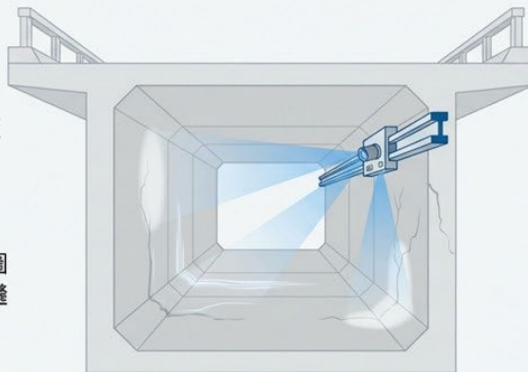
• 方案三：軌道式攝影機 — 極致穩定，實現高重複性追蹤

核心優勢

數據穩定性與重複性極高，不受氣流或導航誤差影響，適合長期追蹤劣化趨勢。

數據產出

- 獲取精確、無畸變的線性圖像，特別適用於裂縫或焊縫檢測。
- 可搭載 360 度或熱影像模組，實現全面覆蓋。



關鍵挑戰與對策

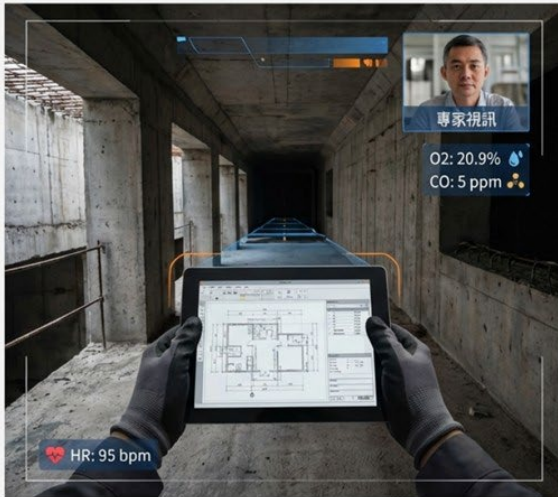
- **挑戰 (部署複雜/缺乏彈性)：**在新建橋梁設計階段即預留軌道，最大化效益。
- **挑戰 (盲點問題)：**結合微型無人機或機器人，彌補單軸移動的限制。

適用情境 內部平直、長跨度、有高頻率重複檢測需求的箱梁。

40

5 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估

• 方案四：穿戴式裝置 — 安全輔助，強化遠端協作



核心定位

支援人員，而非取代檢測。目標是「縮短人員在局限空間的停留時間」。

核心優勢

- 即時遠端協作：外部專家透過智慧眼鏡第一視角即時指導，解決專業人力不足問題。
- 提升作業安全：監測生命體徵與周圍環境，即時預警。

關鍵限制

- 檢測結果仍具主觀性。
- 數據定位精度低，難以精確量化。

適用情境

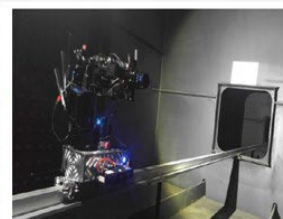
輔助關鍵點位複檢、初期探勘、應急作業，或在機器無法到達之處。

41

5 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估

• 技術特性比較：為不同情境選擇最佳工具

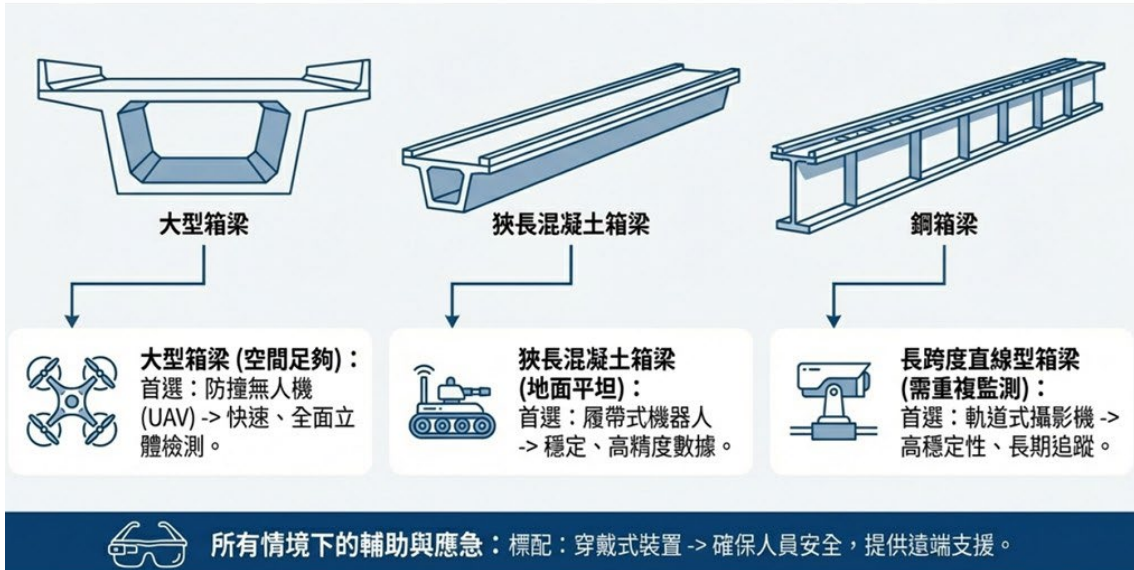
檢測系統	 無人機	 履帶機器人	 軌道攝影機	 穿戴裝置
機動性/部署	★★★★★ (高)	★★★★☆ (中)	★☆☆☆☆ (低)	★★★★★ (高)
核心優勢	速度快，立體覆蓋	穩定，高載荷	極高重複性	安全輔助，遠端協作
關鍵技術挑戰	GPS缺失、環境影響	SLAM穩健性、障礙	部署複雜、缺乏彈性	主觀性、電池限制
數據品質(定位)	★★★★☆ (高，受導航影響)	★★★★★ (極高)	★★★★★ (極高，線性)	★★☆☆☆ (低)
最適臺灣箱梁類型	空間大、高度足夠	地面平整、長距離	長跨度、高重複性	輔助、應急、複檢



42

5 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估

• 適地適材的混合部署方案



43

5 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估

全國車行橋梁23,142座。
箱型橋梁需進行箱內檢測共3,288座

主梁材質包含鋼構造共1140座



• 車型橋梁統計系統 - 箱型橋梁數量統計

定期檢測列表

編號	橋梁名稱	橋梁類型	橋梁材質	橋梁長度	橋梁寬度	橋梁高度	橋梁跨徑	橋梁用途	橋梁狀態	橋梁備註
1	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
2	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
3	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
4	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
5	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
6	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
7	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
8	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
9	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
10	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
11	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	
12	橋梁名稱	箱型橋梁	鋼構造	1000	30	30	1000	公路橋	使用中	

使用狀態統計

所屬部會	所有橋梁		鋼構造橋梁	
	使用中	停用	使用中	停用
交通部	5,908	1	37	0
內政部	14	0	0	0
教育部	14	0	0	0
經濟部	104	0	2	0
農委會	54	0	0	0
農林部	35	0	0	0
遊藝會	9	0	0	0
縣市政府	16,801	22	141	0
小計	22,939	23	180	0
合計	22,962		180	

44

5 橋梁箱內檢測方案與輔助工具研發評估

• 臺灣箱梁內部檢測綜合解決方案與策略



45

6 結論與建議 – 結論



1. 臺灣局限空間作業法規(包括通風、氣體偵測、救援機制等)使得**傳統人工箱梁檢測在安全合規性上成本高**，技術輔助工具是解決安全與合規問題的**必要且經濟的替代方案**。
2. 技術瓶頸在於自主導航穩定性：無人機和履帶機器人在箱梁內部，**核心技術挑戰在於缺乏 GPS 環境下之高精度自主製圖與定位**，尤其是如何克服在長走廊、低特徵環境中累積的 SLAM 誤差。
3. 數據量化實現典範轉移：輔助工具集成 AI 辨識相關技術，能夠將傳統依賴人眼的主觀目視檢測，轉變為**可量化、可追蹤的數位化結構數據**，從根本上**提升檢測品質與維護效率**。

46

6 結論與建議 – 建議



1. 修訂檢測手冊與標準：中央主管機關可修訂相關規範，納入非接觸式檢測技術 (UAV/Robot/軌道式) 之數據標準、精度要求，以及3D建模成果的提報格式。
2. 法規彈性與安全作業流程銜接：鼓勵養護單位將輔助工具作業，視為滿足《職業安全衛生法》局限空間作業中「危害物質濃度確認」的技術性替代方案。將穿戴式裝置納入「人員安全與監視機制」的法規允許範圍內，以降低必要人員進入時的安全風險。
3. 研發資源投入聚焦核心瓶頸：可針對臺灣橋梁幾何特徵的無特徵環境自主導航(SLAM)算法的在地化研究與工程化，以集中資源解決目前國際研究已確認的技術瓶頸。

47

簡報完畢



48