

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

October
2018

卓越源自於超越

台灣世曦始終相信並堅持
唯有不斷超越自我，才有機會成就不凡
在服務業主的每一當下
積極尋求創新與精進
用專業贏得客戶的信賴
用關懷永續生生不息的大地



ISSN 0253-3804



NT\$350



Volume 45, No. 5

社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

物聯網、大數據、
人工智慧的
發展與應用

專輯

木鐸集

土木工程與
經濟發展

義大利
Morandi 橋崩塌
帶來的省思

特輯



CROSSWAVE

基地保水滲透資材



台中南屯文山水資源施工前



台中南屯文山水資源施工後

- + 95%儲留率
- + 不用扣件及五金零件施工
- + 快速施工
- + 高承載重量
- + 原廠正版進口

+ 完整的施工縮時攝影



- ✓ 高效率滯洪功能
- ✓ 解決熱島效應
- ✓ 前瞻計畫最佳治水材
- ✓ 綠建築最佳儲保水材料



連積企業有限公司

TEL: 02-8660-7768

土木水利

社團法人中國土木工程學會會刊



卓越源自於超越

台灣世曦工程顧問股份有限公司

土木水利半月集

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠營建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土水法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木工程學刊
- 土木水利雙月刊

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水部分會
- 土水東部分會

發行人：王炤烈

出版人：社團法人中國土木工程學會

主任委員：劉格非 (國立臺灣大學土木學系教授、編輯出版委員會主任委員兼總編輯)

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元 (航郵另計)

繳費：郵政劃撥 00030678 號 社團法人中國土木工程學會

會址：10055 台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：http://www.ciche.org.tw

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161 新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木工程學會第二十三屆理監事 (依姓氏筆劃排序)

理事長：王炤烈

常務理事：陳仲賢 楊偉甫 歐來成 歐善惠

理事：朱旭 余信遠 吳瑞賢 宋裕祺 沈景鵬 林呈 林其璋

胡宣德 胡湘麟 高宗正 張荻薇 許泰文 陳彥伯 黃炎龍

廖學瑞 劉沈榮 劉恒昌 謝啟萬

常務監事：呂良正

監事：李元唐 李建中 周功台 陳清泉 楊永斌 薛春明

中國土木工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第 518 號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第 0248 號

「義大利 Morandi 橋崩塌帶來的省思」特輯



- 📖 特輯引言：義大利 Morandi 橋崩塌帶來的省思 王昭烈 4
- 📖 Morandi 橋崩塌事件分析報導 彭康瑜／林曜滄／宋裕祺／洪曉慧／蘇進國／吳明遠 5
- 📖 橋梁監測與結構健康診斷 宋裕祺／張國鎮／陳俊仲／李政寬／洪曉慧／蘇進國 22
- 📖 國內大跨徑預力梁橋面臨之問題與因應對策探討 黃炳勳／吳弘明／劉 珊／蘇彥彰 30
- 📖 Morandi 橋崩塌帶來的省思與建議 王昭烈／宋裕祺／林曜滄／彭康瑜／黃炳勳 44

「物聯網、大數據、人工智慧的發展與應用」專輯 (客座主編：陳俊杉教授)

- 📖 專輯序言：物聯網、大數據、人工智慧的發展與應用 陳俊杉 50
- 📖 尖端人工智慧於土木設施應用之展望 顏 愉／溫欣儀／黃尹男／陳柏華 51
- 📖 人工智慧模型之建置與應用 楊明德／蔡慧萍／許鈺群／曾信鴻 59
- 📖 雲端智慧服務於工程影像之應用研究 趙志偉／李明哲／林冠成／黃志民／周頌安 67
- 📖 電信與車輛偵測大數據應用 — 高雄市旅運特性分析與易壅塞道路預報 周諺鴻／顏郁航／王志綱 75
- 📖 應用視覺化工具模擬建物智慧化防禦 — 輔以 C4ISR 之概念 李秋明／謝尚賢 82
- 📖 政府開放資料之應用 — 以利用高速公路電子收費資料 (ETC) 評估震後路網阻斷衝擊為例 楊承道／林祺皓／黃為學／林旭信 88
- 📖 對話機器人在工程上的應用 — 以 Ask Diana 為例 蔡孟涵／楊政珉／詹皓詠／陳奕竹／康仕仲／郭純伶／張成璞 94
- 📖 應用模型參數識別及類神經網路於結構健康診斷 林子剛／張家銘／張至維 101
- 📖 機器學習於橋墩沖刷預測之應用 張世界／陳翊翔／張書瑋／張家銘／林詠彬／張國鎮／陳俊杉 111

水鐸集：土木與文明

- 📖 土木工程與經濟發展 洪如江 118

107年年會

- 📖 107 年年會暨 2018 土水國際論壇 敬邀報名參加！ 47
- 📖 12月7日 2018 土水國際論壇議程 48
- 📖 12月8日 107 年年會大會及工程論壇議程 49

學會資訊看板

- 📖 9.12 橋梁全生命週期管理研討會 精彩內容分享，歡迎瀏覽 46
- 📖 預告 11月21日【日月同輝 陳立誠講座】台灣能源何去何從？ 58
- 📖 9.27 工程參訪 — 中庄調整池、臺中捷運 優良工程參訪活動 126
- 📖 9.27 國際交流 — 厄瓜多 Santa Elena 省省長希斯內羅拜會本學會 126
- 📖 2018 學生BIM應用競賽優勝出爐 126
- 📖 9.20 校園開講開跑 — 青年工程師委員會「校園開講活動」 封底裡

廣告特搜

- 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 卓越源自於超越 封面
- 連積企業有限公司 — 基地保水滲透資材 封面裡
- 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 夢想和幸福 零距離的接軌 43
- 歐亞電腦股份有限公司 — Choose the software for concrete construction 87
- 107 年年會暨 2018 土水國際論壇 — 智慧工程、特色城市 封底



特輯引言

義大利 Morandi 橋崩塌帶來的省思

王炤烈／社團法人中國土木工程學會 理事長、台灣世曦工程顧問股份有限公司 總經理

莫蘭迪大橋（義大利語：Ponte Morandi，英語：Morandi Bridge）位於義大利北部熱那亞（Genova）銜接薩沃納（Savona）之 A10 高速公路上，由已故知名義大利橋梁大師 里卡爾多·莫蘭迪（Riccardo Morandi）所設計，於 1962 年開工、1967 年 9 月 4 日竣工通車，橋址位於地形複雜的波希維拉河谷（Polcevera），共跨越鐵道、民宅、河川及橫交道路。其結構系統簡潔，深具風格，曾被視為近代橋梁工藝的代表之一。

2018 年 8 月 14 日，莫蘭迪橋在暴風雨中，突然發生橋梁單元 Pylon 9 的斷橋倒塌意外，造成 43 人死亡以及 14 人受傷。此次公共工程意外事件不僅引發國際間關注，對於既有橋梁全生命週期維護管理。議題亦再次廣受討論，台灣雖無相似橋型，但同樣是長跨度、預力混凝土橋梁有不少，尤其對同樣已使用 50、60 年老橋的養護與安全問題，更值得我們注意，應要防範避免發生類似的崩塌事件。

為此，土水學會曾在該橋倒塌後不到一個月的時間，於 9 月 12 日舉辦「橋梁全生命週期管理研討會」，邀請專家學者，包括顧問公司（TY Lin）、業主（高公局）、學校（台大、北科大）、研究單位（國震）、統包公司（中鼎）、營造業（泛亞前總經理）等，就橋梁全生命週期管理的各個階段議題發表演講，會中互動熱烈，各個議題均引發不少討論，惟受限於研討會時間，討論情形意猶未盡、不夠深入與詳盡。因此本學會再參考義大利官方的基礎設施和運輸部部長檢查委員會，在後續所發表的

第一次災後報告，再接再厲，於 2018 年 10 月號的土木水利雙月刊中，刊登「義大利 Morandi 橋崩塌帶來的省思」特輯，期望能增進國人，包括產、官、學各界更注意我們橋梁的建設與養護問題。

本特輯包含四大部分：第一部分談 Morandi 橋崩塌事件分析報導，第二部分談橋梁監測與結構健康診斷，第三部分談國內大跨徑預力梁面臨之問題與因應對策探討，以及第四部分的省思與建議。特輯邀請到國內橋梁方面各大單位與專家，包含林同棧顧問公司、台灣世曦顧問公司、臺北科技大學、臺灣大學以及國震中心等，各專家學者經過多次討論、融合意見，通力合作完成此次特輯。

由義大利 Morandi 橋瞬間崩塌及重大傷亡事件，舉世震驚，對於國家社會造成有形及無形的創傷影響是相當深遠，國內橋梁工程界應記取教訓，深自檢討與反省。台灣的橋梁總數約近二萬八千座，老、中、青各個年代、各種橋型都有，尤其較早年完成之老舊橋梁，當年設計採用之規範對於耐災規定較不周延；加上台灣地處環太平洋地震帶，地震頻繁；又屬亞熱帶地區，氣候高溫多濕，腐蝕環境嚴苛；同樣面臨氣候變遷的影響，颱風、暴雨侵襲日趨嚴重，近年來產生複合型連鎖式災害日趨頻繁，更應勇於面對，加以重視。本文提出橋梁全生命週期各階段包括規劃設計階段、施工階段、營運階段等應注意的要點與建議，均是多年來工程產業界的心聲，希望提供大家做為共同努力的方向。



Morandi 橋崩塌事件分析報導

彭康瑜／林同棧工程顧問股份有限公司 副總經理兼總工程師

林曜滄／台灣世曦工程顧問股份有限公司 總工程師

宋裕祺／國立臺北科技大學土木系 教授兼工程學院院長、國家地震工程研究中心 組長

洪曉慧／國家實驗研究院國家地震工程研究中心 研究員

蘇進國／國家實驗研究院國家地震工程研究中心 副研究員

吳明遠／國立臺北科技大學土木與防災研究所 碩士生

Morandi 大橋設計理念

(本節作者：彭康瑜)

莫蘭迪橋（義大利語：Ponte Morandi，英語：Morandi Bridge）是義大利 A10 高速公路 Polcevera 高架橋（義大利語：Viadotto Polcevera）的其中一段，位於利古里亞（Liguria）首府熱那亞（Genova），建造於 1967 年，由義大利土木工程師里卡爾多·莫蘭迪（Riccardo Morandi）設計，義大利官方後來正式命名為「莫蘭迪橋」[1,2]。

首先，談談大橋的設計理念，依據莫蘭迪教授於 1969 年發表的文章「Some Types of Tied Bridges in Prestressed Concrete」（Riccardo Morandi, 1969），可以大致說明莫蘭迪教授的基本想法，他在文章中提出兩種設置「Tied Member」的基本型態預力混凝土橋梁，分別為 (A) Bridges with the Lower Ties 與 (B) Bridges with the Upper Ties，如圖 1 與圖 2 所示 [3]。

從圖 1 與圖 2 的結構系統，可以瞭解莫蘭迪教授擅長利用混凝土的抗壓原理與鋼腱的預力特性，類似近代鋼筋混凝土分析計算的壓拉桿模型（Strut-and-Tie-Modeling），將結構系統設計的十分簡潔，且具有個人獨特的風格；本次發生斷裂事故之莫蘭迪橋，即屬於圖 2 的結構系統。

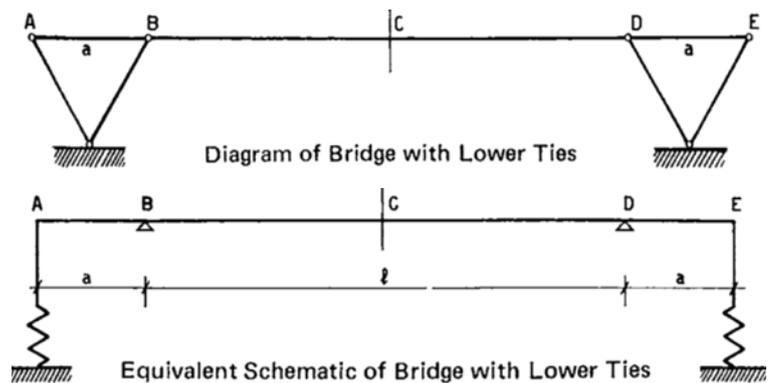


圖 1 結構系統示意圖 (A)：Bridges with the Lower Ties

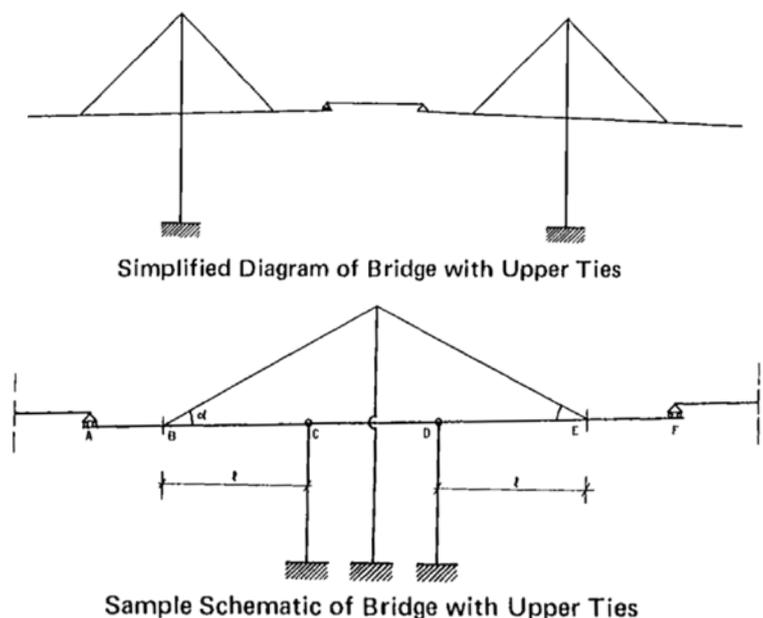


圖 2 結構系統示意圖 (B)：Bridges with the Upper Ties

莫蘭迪教授設計如圖 2 的同類型橋梁，在世界上最著名的是委內瑞拉 1962 年完工的拉斐爾·烏達內塔將軍大橋 (General Rafael Urdaneta Bridge)，該大橋採用預力鋼筋混凝土建成，全長 8,679 公尺，共有 134 個橋墩，主橋段為多塔斜張橋，5 個主跨各長 235 公尺，當年，是拉丁美洲跨度最長的斜張橋 (圖 3)。

本文莫蘭迪橋，則是莫蘭迪教授設計的第二座此類型預力混凝土斜張橋 (1967 年)，其橋梁長總約 1,102 公尺，P1 ~ P8 為邊橋單元，採 V 型橋墩設計，P9 ~ P11 為三塔斜張橋，採 A 型橋塔設計，橋塔基礎設置四組 H 型鋼筋混凝土構架，與五室的預力箱型梁剛接 (Rigid Connection)，橋塔則利用四組預力混凝土斜材 (PC Ties)，斜拉支撐預力箱型梁，形成穩定獨立

的三角形橋塔單元，最大跨徑約 210 公尺，P12 則為橋台，用以銜接附近的交流道系統 (圖 4 至圖 6)。



圖 3 委內瑞拉的拉斐爾·烏達內塔將軍大橋 [4]

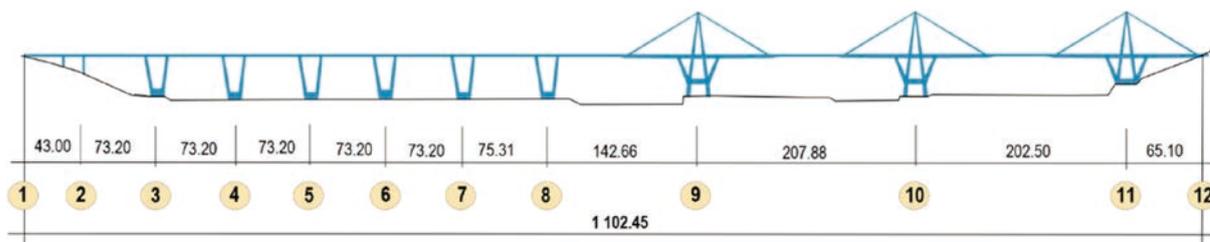


圖 4 義大利莫蘭迪橋的結構立面示意圖 [2]

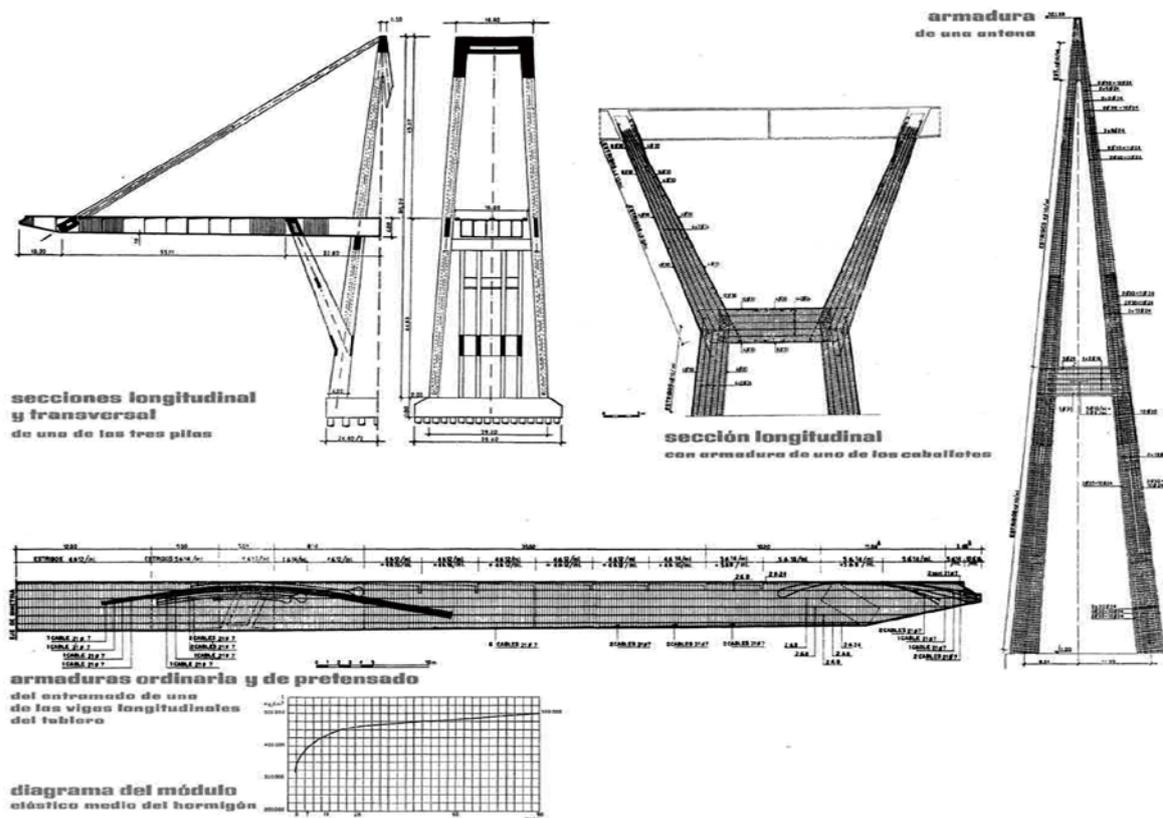


圖 5 莫蘭迪橋 A 型橋塔結構設計圖 [5]

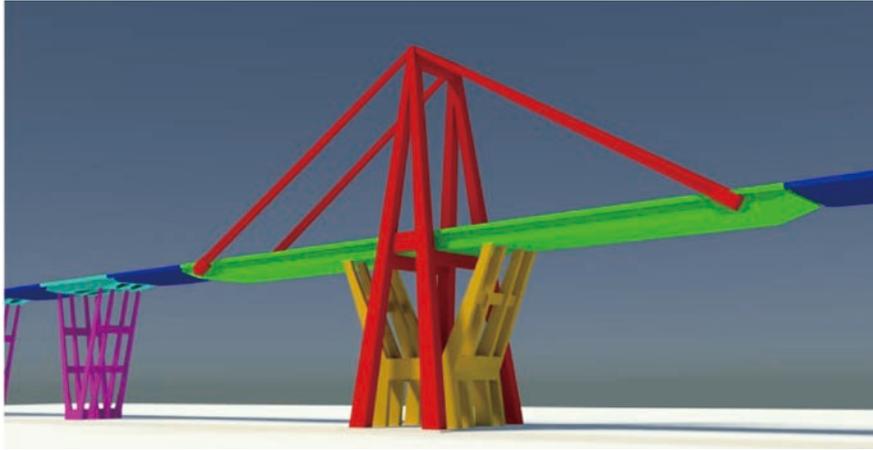


圖 6 莫蘭迪橋 A 型橋塔結構系統示意圖 [2]

其中，值得特別說明的是，A 型塔柱於預力箱型梁下方，設置有一對橫梁，但其並不承載預力箱型梁傳遞的力量，如圖 2 的結構系統之說明。這與網路媒體轉載的橋梁崩塌現況影片中，P9 橋塔單元的 H 型鋼筋混凝土構架與預力箱型梁，先行斷裂後，A 型塔柱才接續崩塌的現象，是相符合的。

莫蘭迪教授在成功發展了他獨特的橋梁結構系統後，受到當時國際工程界的矚目；另外，他也獲邀設

計了利比亞的 Wadi el Kuf 大橋（1972 年），與哥倫比亞的 Alberto Pumarejo 大橋（1974 年）；其中，哥倫比亞 Alberto Pumarejo 大橋，近年來由於橋梁腐蝕損傷嚴重，且因橋梁負擔交通量與船舶航道的需求急遽增加，目前正委由林同棧國際工程顧問公司負責設計，改建為新的 Pumarejo 大橋，新線的斜張橋主跨 380 公尺，橋寬約 38.1 公尺，預定於 2019 年完工，如圖 7。



圖 7 哥倫比亞施工中的新 Pumarejo 大橋

莫蘭迪教授發展的斜張橋結構系統，雖然有其優點與特色，但數量很少的預力斜材，缺少傳遞力量的替代路徑，也造成他受到其他工程師的批評。若以現代斜張橋的設計觀點，依據美國 PTI 協會設計規範（Recommendations for Stay Cable Design, Testing & Installation）的規定，斜張橋設計必須檢核任一組斜張鋼纜斷裂造成橋梁安全的衝擊影響，就可以清楚瞭解莫蘭迪教授的斜張橋結構系統，缺乏結構贅餘度（Redundancy）與穩固性（Robustness）的缺點。

此外，莫蘭迪橋預力斜材內的斜張鋼纜，係以預鑄鋼筋混凝土殼內灌混凝土包覆，造成日後營運階段，斜張鋼纜的腐蝕損傷，檢測十分困難，間接造成橋梁安全的重大威脅。

建造施工方法及後來的維修補強

（本節作者：彭康瑜）

莫蘭迪橋在設計當時，由於橋址已有多棟樓房建築、廠房、河道與營運中的鐵路軌道，所以，莫蘭迪教授所設計的施工方案，大量採用機械化的施工工藝，例如：橋塔單元預力混凝土箱型梁的場鑄節塊懸臂施工，施工中臨時懸臂鋼鍵的配置，如圖 8 所示，

跨徑中央外懸簡支預鑄預力梁的機械化吊裝，A 型塔柱採高低塔吊的施工方案等，充分展現出義大利混凝土橋梁的工藝水準，在當時世界上屬於領先的地位。

由於莫蘭迪橋鄰近海岸，受到鹽害腐蝕的威脅，一直困擾著橋梁養護的人員，在大橋完工後幾年間，P11 橋塔單元的斜張鋼纜與塔頂鞍座，就因為腐蝕嚴重，進行斜張鋼纜的抽換與塔頂鞍座的加固補強；接著幾年後，P10 橋塔單元的塔頂鞍座，亦進行外加鋼製構件的加固補強。其中，P11 橋塔單元斜張鋼纜的抽換補強，採用於預力斜材外增設鋼框構架，設置外置預力鋼鍵取代原有混凝土包覆的預力鋼纜，其力量轉換的機制與施工步驟，以現今的施工風險評估標準，仍是屬高風險的施工方法，也展現出當年義大利預力補強施工的高水準工藝。

2018 年 8 月 14 日大橋斷裂後，義大利基礎設施和交通運輸部於 8 月 16 日組成事故調查委會，預定在 30 天內完成調查報告。依據 9 月 25 日公布的官方調查報告 [11]，莫蘭迪橋的斷裂崩塌，主因是預力梁的鋼筋與鋼鍵腐蝕嚴重所造成的構件斷裂，不是直接因為一根或多根預力斜材的鋼纜腐蝕斷裂所引致橋梁崩塌，報告中也多處指出，負責橋梁營運的特許公司，對歷年橋梁檢測與結構損傷狀況，沒有盡到應有的維護補強義務。

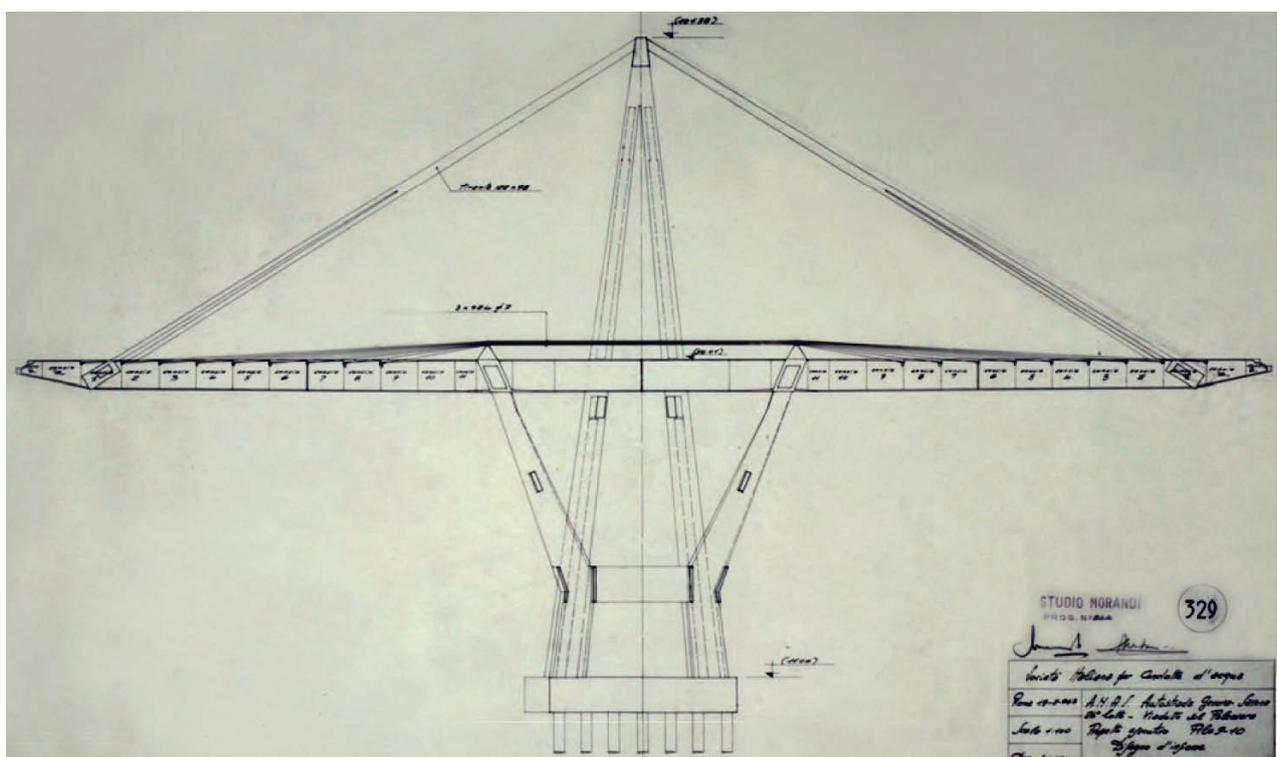


圖 8 莫蘭迪橋場鑄節塊懸臂施工示意圖 [6]

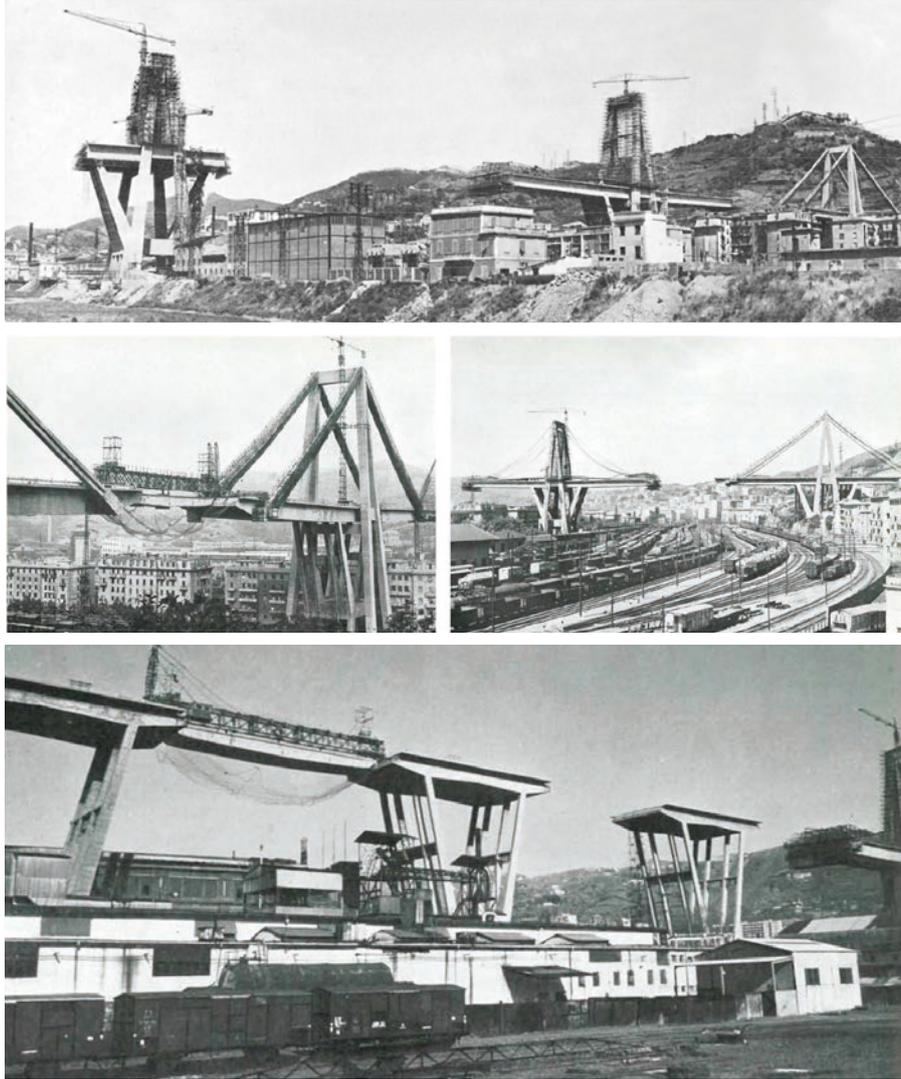


圖 9 莫蘭迪橋施工相片 [5]

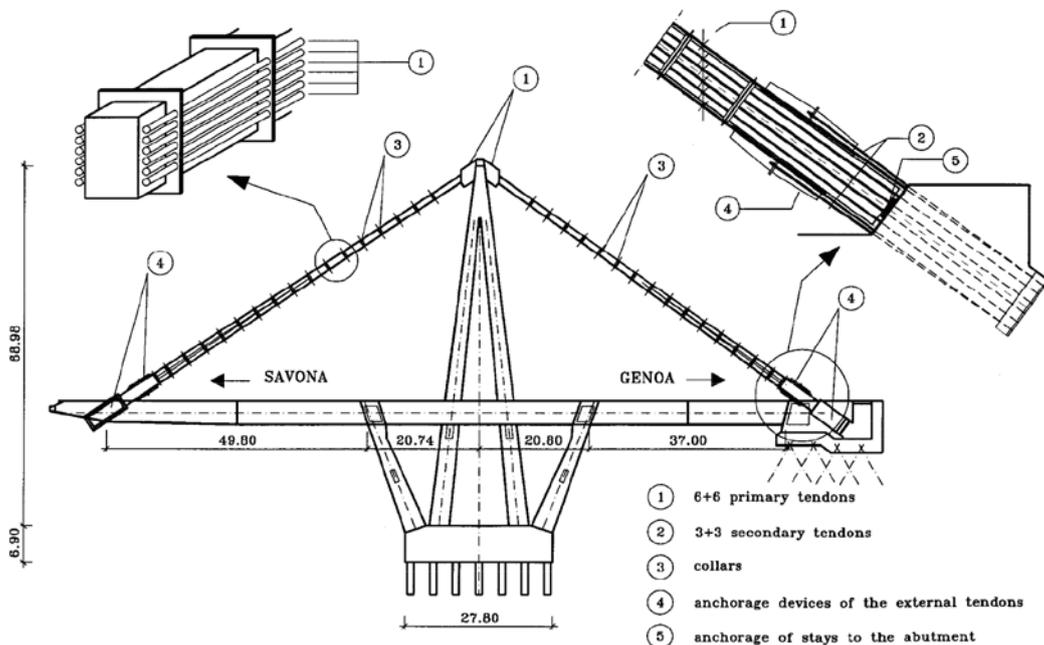


圖 10 莫蘭迪橋 P11 橋塔單元斜張鋼纜抽換與鞍座加固補強 [7]

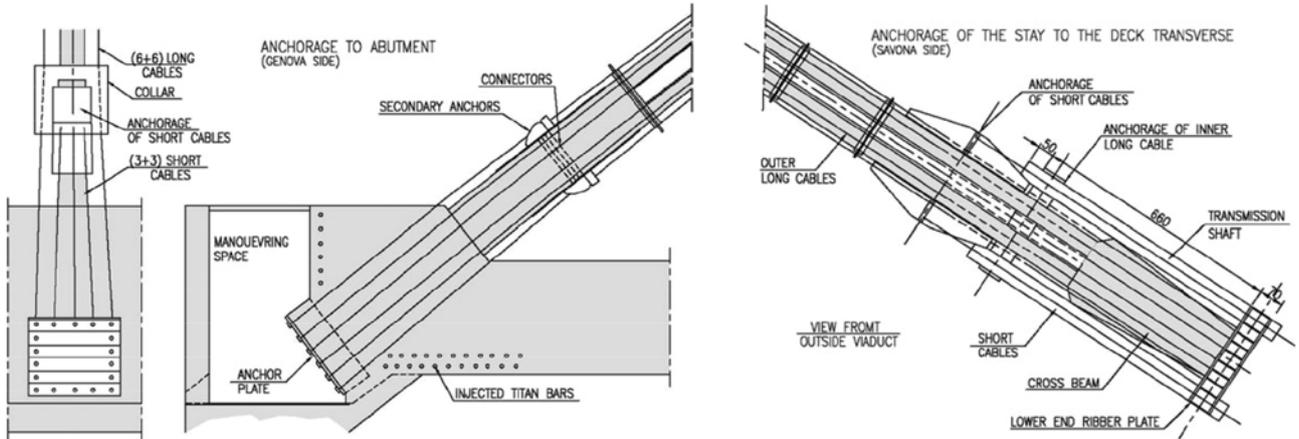


圖 11 莫蘭迪橋 P11 橋塔單元斜張鋼纜錨座加固補強 [8,9]

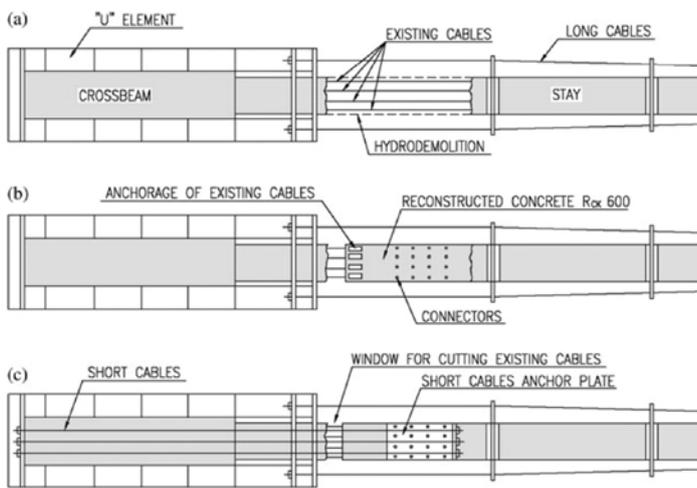


圖 12 莫蘭迪橋 P11 橋塔單元斜張鋼纜更換程序 [8,9]



圖 13 莫蘭迪橋 P10 橋塔單元塔頂鞍座加固補強 [10]

橋梁崩塌模式拆解 (本節作者：林曜滄)

導致 Morandi 橋崩塌之原因探討

經蒐集及參考橋梁所處環境照片、技術資料、本橋補強資料、當時橋梁設計施工技術水準、材料之發展，及媒體報導等，綜合整理如下。

- 外在環境因素：臨近海邊，位處工業區，極嚴重腐蝕環境；交通輛成長 4 倍、活載重增加；金屬護欄改成 RC 護欄，橋面附加載重增加；當時風雨交加風雨動態載重；及例行性維修之施工荷重等。
- 材料老劣化因素：PC 開裂滲水鋼材腐蝕；PC 乾縮潛變；非低鬆弛鋼絞線，預力鋼腱鬆弛；反覆振動與疲勞裂縫，達疲勞強度等。
- 結構系統因素：贅餘度極少的斜張橋；預力斜材錨碇集中於一處；主梁不連續；具外懸鉸接構造；具懸吊段構造；部分構件維修困難；完工後結構性問題持續進行維修。

- 維修管理因素；檢測維修未落實；超過養護時間未維修；維修或改善預算不足；管養人力不足等。

Morandi 橋崩塌拆解

由於橋梁係瞬間完全崩塌，由此研判應為結構 critical member 破壞所導致，而斜張橋之 critical member 主要是鋼纜 (stay cable) (拉力構件)、橋塔 (壓力構件) 或主梁 (撓剪構件)，由 2018/9/25 官方公布調查主因 [11] 是預力主梁的鋼筋與鋼腱腐蝕嚴重所造成的構件斷裂，不是直接因為一根或多根預力斜材的鋼纜腐蝕斷裂所引致橋梁崩塌。而主梁內部鋼筋與預力鋼絞線斷裂原因推估為腐蝕 (靠海、工業區、混凝土保護層開裂滲水)、交通量飽和超載、疲勞等因素。

莫蘭迪橋崩塌是一種連鎖式的崩塌，可由掉落的橋面，推估崩塌情形。由空拍照片將原橋區分為懸吊段、懸臂段 (A ~ D、4 區) 及柱頭段，其中懸臂段

(B、C 區) 再細分為 B1&B2、C1&C2，如圖 14 所示，崩塌後之段落區分如圖 15 所示。蒐集相關現場照片整理分析如下：

- (1) A 區及 D 區主梁懸吊段脫離外懸鉸接伸縮縫處支座位，直接掉落地面，如圖 15、圖 18 所示。
- (2) B 區懸臂段主梁 B1 扭轉後掉落並插入地面，如圖 16 所示，這可推估是其中一個預力斜材先損壞，主梁

扭轉掉落，它是唯一不在橋軸線上，重量轉移至另一預力斜材，驅動了橋塔的扭轉。

- (3) 東半部 C 區懸臂段主梁整個橋面掉下來，幾乎是沿橋軸線，另外是懸臂段折成二段，在鐵路上方有兩層橋面疊加，下層 C2 橋面被預力斜材拉向塔側然後掉落在軌道上，上層 C1 以橋柱支撐翻轉 180°後橋面翻落倒置壓在上面，如圖 17 所示。

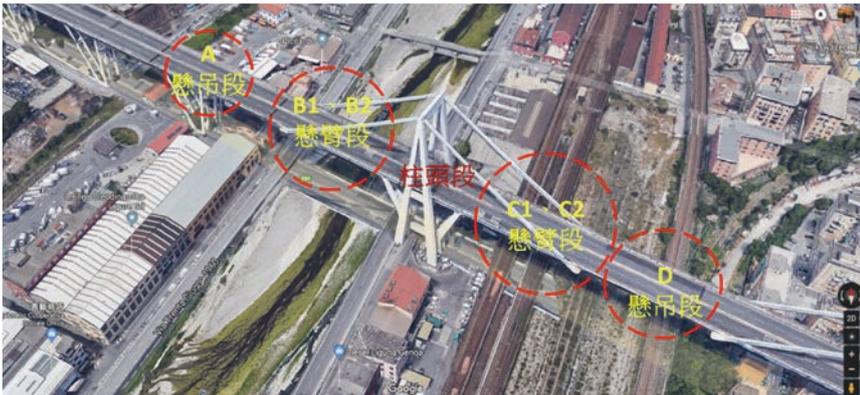


圖 14 橋梁倒塌前分區示意圖 [12]



圖 15 橋梁倒塌後分區示意圖 [13]



圖 16 橋梁倒塌 B 區照片 [14]



圖 17 橋梁倒塌 C 區照片 [15]

C 區：主梁掉落地面疊成二層 (C1&C2)，上層梁翻轉 180 度



圖 18 橋梁倒塌 D 區照片 [16]

崩塌事件之結構分析與探討

(本節作者：宋裕祺、洪曉慧、蘇進國、吳明遠)

莫蘭迪大橋，如圖 19 所示，為研析其結構破壞原因及其崩塌順序，本節透過橋梁設計、施工及相關補強資料之蒐集，結合現今橋梁分析數值模擬方法，拆解結構內力轉換過程，冀能提供橋梁結構分析時之參考，亦祈對橋梁管養及相關主管機關決策過程能有所助益。

基本資料

曾被視為義大利建築工藝代表作之一的莫蘭迪大橋，在相同時期相似的結構系統共計有：(1) 位於委內瑞拉境內跨越 Maracaibo 湖的烏達內塔將軍大橋 (General Rafael Urdaneta Bridge, 1962 年竣工)；(2) 位於利比亞北大的瓦迪橋 (Wadi el Kuf Bridge, 1971 年竣工)；(3) 位於阿根廷雷西斯滕西亞跨越巴拉

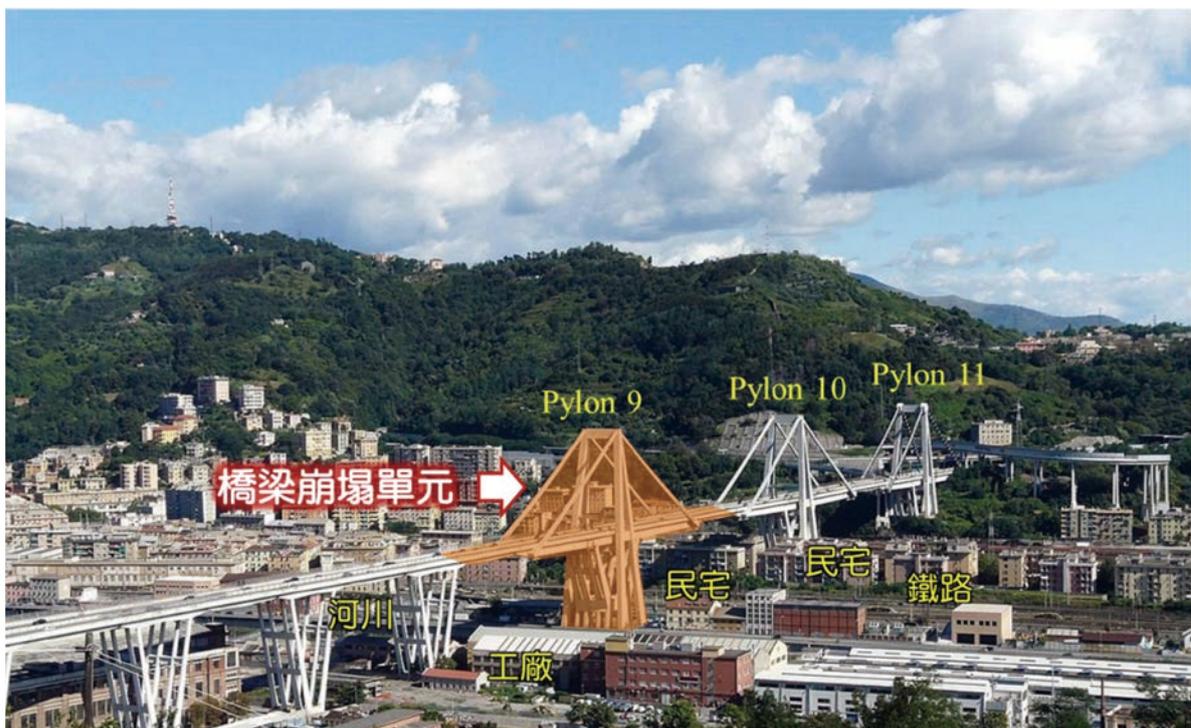


圖 19 莫蘭迪大橋現地照片 (照片來源：<https://zh.wikipedia.org/wiki/莫蘭迪橋>)

那河 (Paraná River) 的查科 - 科連特斯大橋 (Chaco-Corrientes Bridge, 1973 年竣工); (4) 位於哥倫比亞境內跨越馬格達萊納河 (Magdalena River) 的普雷馬霍橋 (Pumarejo Bridge, 1974 年竣工)。有鑑於莫蘭迪大橋的倒塌意外, 針對此類特殊橋型之結構行為, 確有詳細研究及探討的必要性。

根據莫蘭迪於 1968 年發表之義大利報告指出 [17], 莫蘭迪大橋原跨徑配置為 $43 + 5@73.2 + 75.313 + 142.655 + 207.884 + 202.50 + 65.10 = 1102.452$ 公尺, 並於主橋最大跨徑處配置三個主塔, 其編號分別為 Pylon 9 ~ Pylon 11, 而當時為克服主橋段最大跨距超過 200 公尺的鋼筋混凝土上部結構配置, 規劃採用如圖 20 所示之主塔懸臂單元銜接簡支單元 (36 公尺長) 等系統進行結構設計。其後於 1997 年時, C. Gentile 等人 [18] 針對莫蘭迪大橋 Pylon 11 進行預力斜材置換補強後, 曾發表預力斜材元件動力量測與分析等研究成果。其中,

對於此橋結構分析模型之建立, 主要係以單一橋塔懸臂單元為主, 並經二維及三維等不同數值模型研究, 探討現地量測所得成果, 並藉此確認預力斜材的索力狀態。因莫蘭迪大橋原始設計圖說及結構計算書等資料索取不易, 為有效掌握已倒塌 Pylon 9 單元的結構內力傳遞及崩塌順序, 本文參考相關文獻及本橋結構特性, 擬以單一懸臂振動單元為分析對象, 建立三維結構數值模型, 並透過研讀既有橋梁設計資料及施工過程等網路資訊, 逐步進行橋梁結構崩塌的行為研究。

橋梁設計及施工過程資料蒐集與探討

莫蘭迪曾於報告 [17] 中, 明確保存如圖 21 所示之懸臂單元平立面圖。由其原始設計概念中, 可將懸臂單元另行拆成四個重要組成子結構, 包含如圖 22 所示的 A 型橋塔、V 型橋墩、外置預力斜材及三跨連續主梁系統:

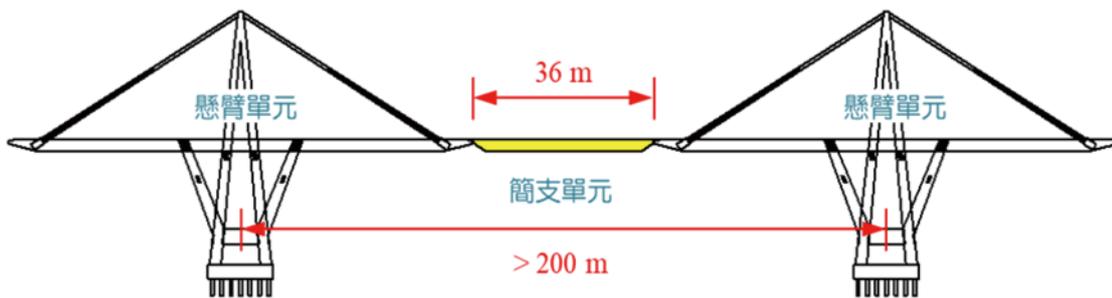


圖 20 莫蘭迪大橋結構系統示意圖 (本研究繪製)

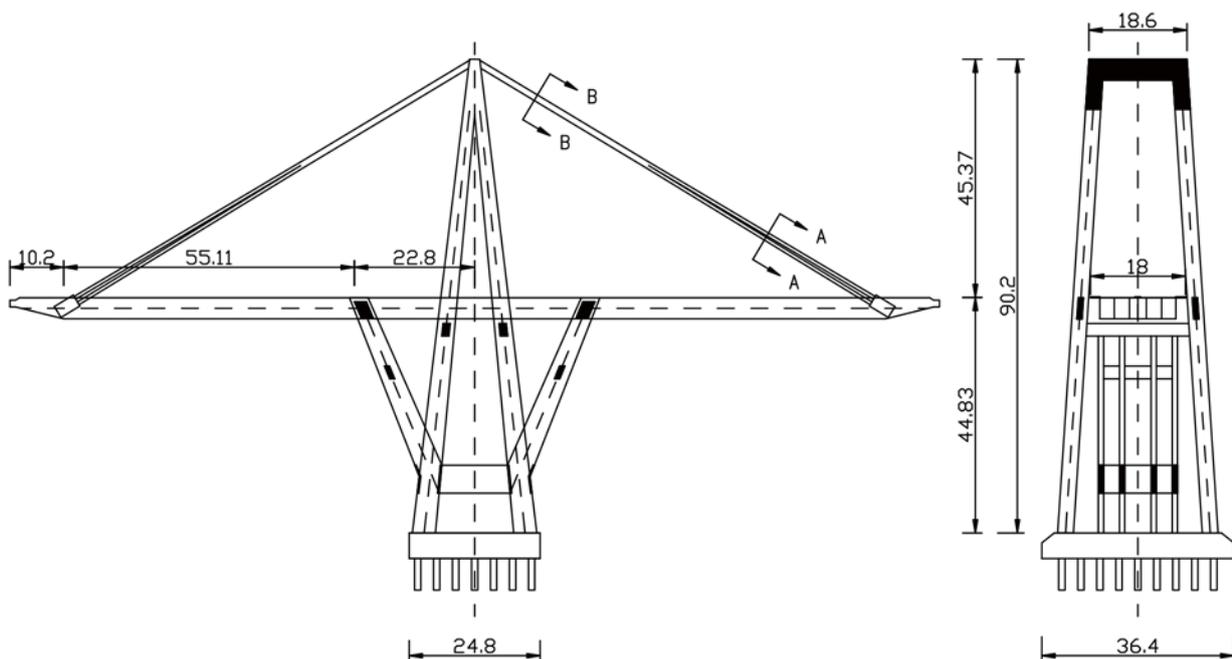


圖 21 莫蘭迪大橋結構設計立面圖 (本研究重繪, 單位: 公尺)

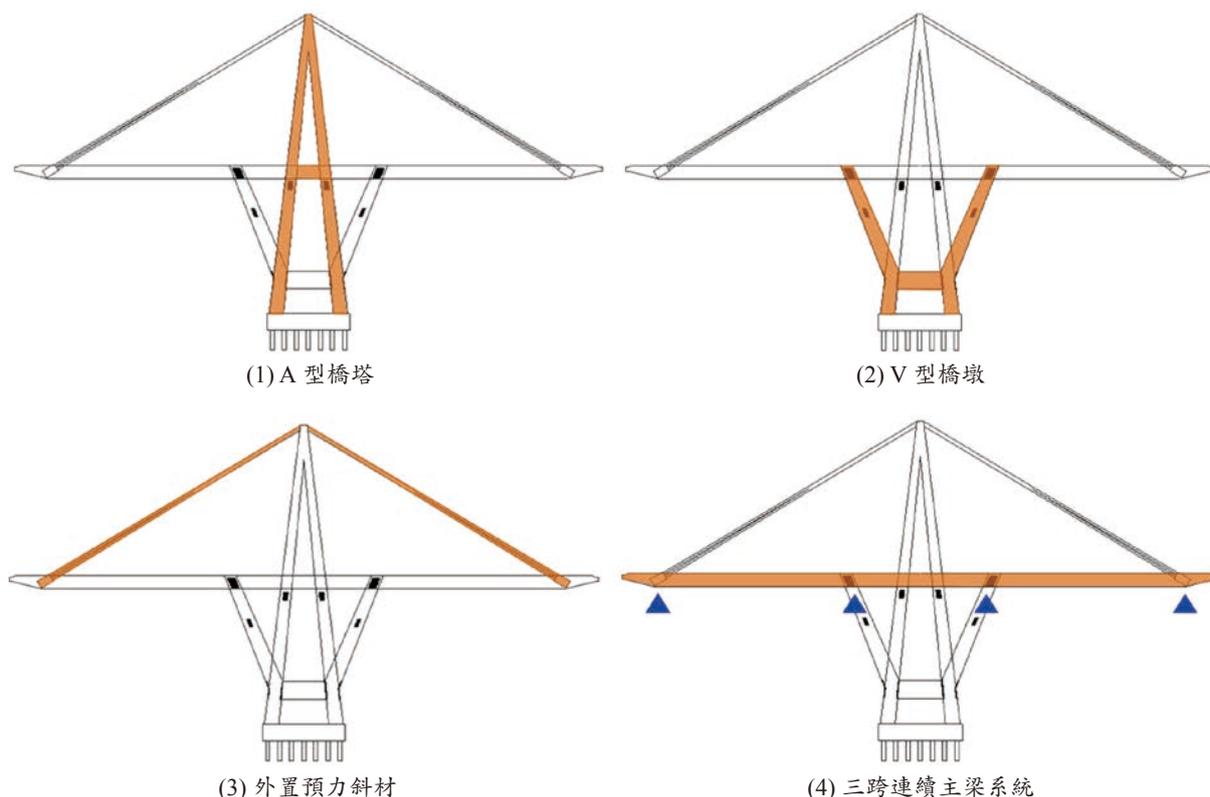


圖 22 莫蘭迪大橋結構拆解示意圖 (本研究繪製)

1. A 型橋塔自塔頂至橋面高度約 45.37 公尺，橋面至塔底為 44.83 公尺，橋塔總長度為 90.2 公尺。
2. V 型橋墩以固接方式連接主梁及基礎板，基礎板下方設置樁長約 40 公尺長之基樁，單一橋墩下方基樁樁數約為 $9 \times 7 = 63$ 根。
3. 外置預力斜材主要用於連接橋塔及主梁，其斷面由兩組 $98 \text{ cm} \times 61 \text{ cm}$ 方形元件 (如圖 23 Sect. A-A) 漸變接合成 $98 \text{ cm} \times 122 \text{ cm}$ 混凝土斷面 (如圖 23 Sect. B-B)。其中， $98 \text{ cm} \times 61 \text{ cm}$ 混凝土方形斷面內，設置由 4 根 12T 與 8 根 16T 鋼絞線所組成的 A-cable，以及 14 根 4T 鋼絞線所組成的 B-cable。參考施工過程照片可知 (如圖 24)，當主梁懸臂段全部完成後，施工步驟先以 A-cable 懸吊主梁，其後安裝預鑄混凝土斷面及 B-cable，並控制混凝土斷面承受約 10 N/mm^2 之壓應力，期能抵抗風壓、活載重疲勞及環境腐蝕等外力因素，確保預力斜材的耐久性。
4. 三跨連續主梁系統方面，上部結構設計規劃採用五箱室之箱型梁，其橋面全寬約 18 公尺、梁深約 4.5 公尺，因橋下淨高超過 40 公尺、場撐施工不易，故採用懸臂施工方式進行施築。惟主梁施工過程橋塔尚未完成，無法及時提供外加垂吊支撐分力，因此當時所採用的懸臂工法及內置預力配置較現今常見

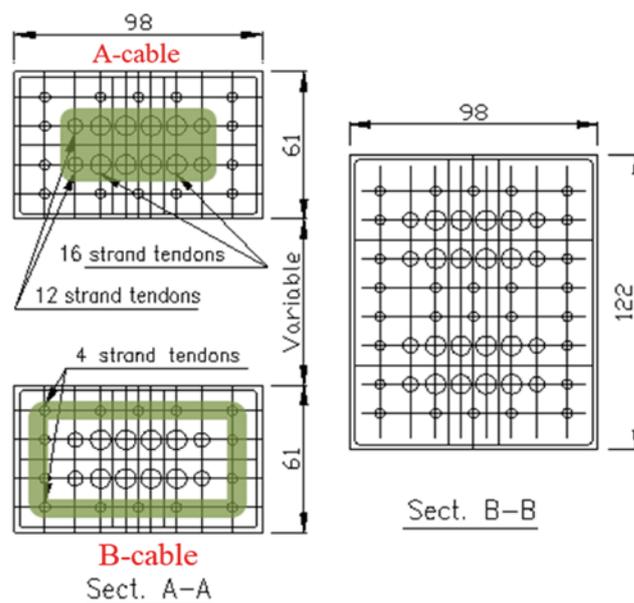


圖 23 預力斜材配置圖 (本研究重繪，單位:公分)

之箱梁頂板對拉方式不同，並係於橋面設置臨時吊梁系統 (temporary tie beams, 如圖 25)，用以克服頂板拉力及重力引致的變位量。待整體懸臂段完成後，方由外置預力斜材提供吊點，並搭配 X 型橋墩支撐系統，形成三跨連續結構，並配置如圖 26 所示之箱梁內置預力系統配置。

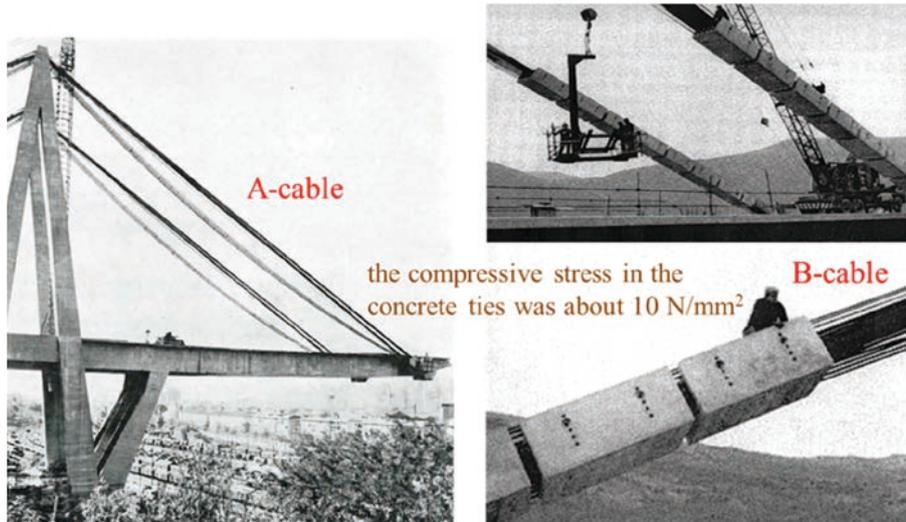


圖 24 預力斜材施工過程示意圖 (圖片來源: <http://www.retrofutur.org/retrofutur>)

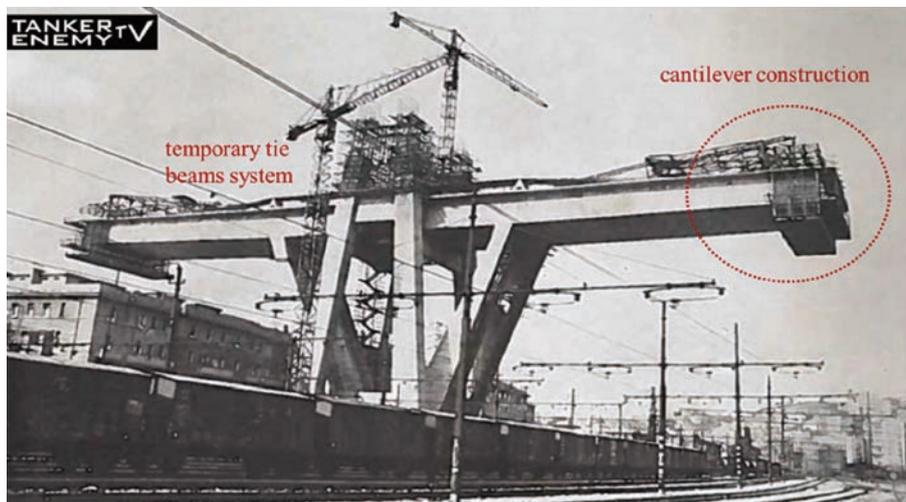


圖 25 主梁懸臂施工示意圖 (圖片來源: https://www.youtube.com/watch?v=GuFaS1_e9Sw&t=23s)

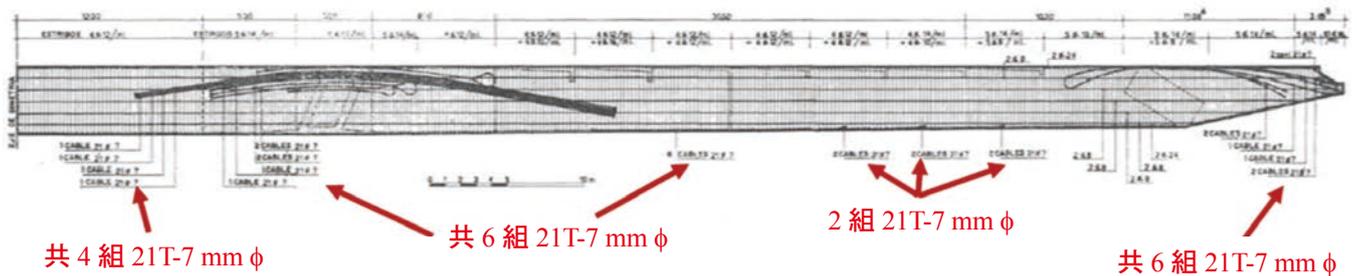


圖 26 原配置內置預力系統示意圖 [17]

結構分析數值模型概述

針對前節所述原始設計條件及目前蒐集既得資訊，本節假設基本分析條件，並據以建立結構數值分析模型，另參考橋面支撐系統及現況受力情況，配合參考文獻 [18] 所述 Pylon 11 之預力斜材修補置換索力，完成整體結構分析資訊。相關說明如下：

基本假設條件說明：

- (1) 數值模型以單一橋塔所組成之懸臂振動單元進行分析。
- (2) 假設材料強度及分析條件：
 - (a) 橋塔與主梁混凝土強度：350 kgf/cm²
 - (b) 橋墩與基礎混凝土強度：280 kgf/cm²

- (c) 7 mm 高拉力鋼線極限強度：16,500 kgf/cm²
- (d) 分析過程未考量懸臂施工過程（原設計以 9@5.5 m 之節塊施工進度進行澆築）及預力斜材二次施作之影響。

結構分析數值模型元件

本文所建立之 Pylon 9 懸臂振動單元結構分析模型如圖 27 所示，包含前述 A 型橋塔、V 型橋墩、外置預力斜材及三跨連續主梁系統等各式結構元件，惟基樁及地下土壤鑽探資訊並無參考依據，因此假設邊界條件係於基礎底部採用固接方式設定。

橋面支撐系統及受力

對於三跨連續主梁系統所承受外力部分，假設懸臂振動單元於左右兩端各自承受 36 公尺長的簡支單元一半自重，並假設主梁承受 5 公分厚的 AC 鋪面重量，以及中央分隔島、兩側橋護欄和管線附掛等附加載重（Superimposed loading），外力施加方式如圖 28 所示。

預力斜材索力設定

預力斜材索力主要參考 C. Gentile 等人 [18] 執行 Pylon 11 預力斜材置換時的外加索力值，而其補強階段導入的主要預力約為 17,040 kN。另檢核圖 23 所示 Sect. B-B 的高拉力鋼線總數，共約有 (4 × 12T + 8 ×



圖 27 Pylon 9 結構分析數值模型元件示意圖（本研究繪製）

16T + 14 × 4T) × 2 = 464T 鋼線，假設鋼線斷面係採用單根直徑 7 mm φ (A_s = 0.3848 cm²) 之型式，則各鋼線承受應力 (σ = P/A_s) 約為 9,728.5 kgf/cm²。

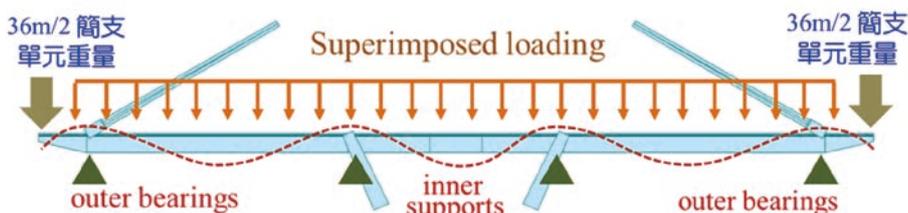


圖 28 橋面支撐系統及外加载重示意圖（本研究繪製）

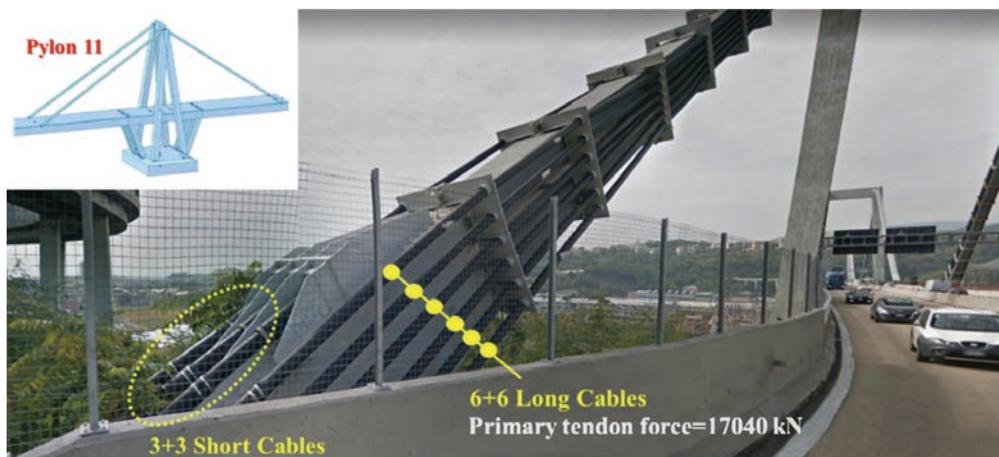


圖 29 橋塔 Pylon 11 預力斜材置換示意圖（照片來源：Google map）

情境一：預力斜材先斷損之破壞程序模擬及分析

本研究參考網路資訊及新聞報導橋梁崩塌照片，研擬破壞程序分析步驟如圖 30 所示。分析過程先評估橋梁初始結構受力狀態，續假設單側單根預力斜材元件斷裂失效，再評估單側兩根預力斜材損壞時的結構內力變化，最後將三跨連續主梁變更為兩跨連續系統，並依序觀察所提分析程序中，整體結構力量分布情形，據此探討橋梁倒塌順序。

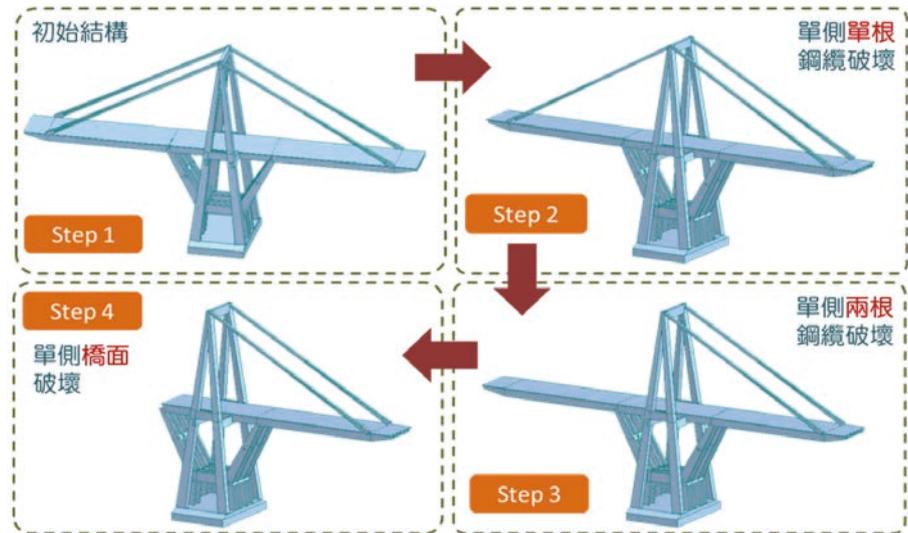


圖 30 橋梁破壞程序模擬示意圖（本研究繪製）

破壞過程整體結構軸力分布

結構分析過程除估算幾何關係、各元件勁度、自重及附加載重之外，另一重要工作係參考相關文獻導入預力斜材約 17,040 kN 之預力。於單一預力作用下，經過力量分配後，可得混凝土內置纜索元件內力約為 -1,673 tf，若進一步考量結構自重及附加載重後，其總受力約 418 tf，此與補強設計案例要求斷面維持 10

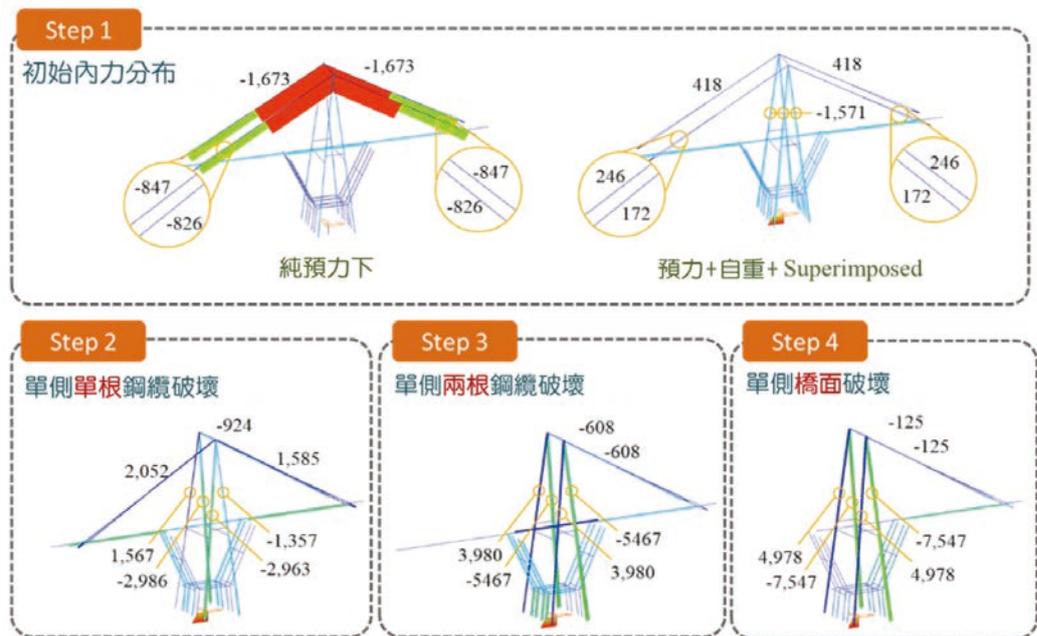


圖 31 整體結構軸力分布示意圖（本研究繪製，單位：tf）

N/mm² 有所不同，主要差異來自於 Pylon 9 與 Pylon 11 下部結構及懸臂單元受力不同之影響。

觀察圖 31 所示整體結構軸力變化圖中，橋梁於原始服務階段（Step 1），A 型橋塔四根塔柱均約承受 \square 1,571 tf 之軸壓力，若考量左邊單側單根預力斜材破壞時（Step 2），橋塔產生扭轉現象，銜接預力斜材斷裂處之塔柱由承壓轉受拉（拉力值約 1,567 tf），其他三根塔柱則維持受壓，惟壓力值亦伴隨產生不同變化。

再者，若進一步模擬單側兩根預力斜材破壞時（Step 3），連接預力斜材斷裂處之兩根 A 型塔柱產生 3,980 tf 的受拉狀態，其後懸臂單元左側上部結構可能因為失去斜索懸吊而發生落橋情形（Step 4），原三跨連續主梁轉變為兩跨連續系統，將令懸臂單元產生左右不平衡狀態，而其不平衡彎矩對連接預力斜材斷裂處之兩根 A 型塔柱而言，更可能產生 4,978 tf 的拉力值。

破壞過程整體結構彎矩分布

觀察圖 32 所示整體結構彎矩變化圖中，橋梁於原始服務階段 (Step 1) 係屬於三跨連續系統，最大正彎矩為 13,528 tf-m、最大負彎矩為 -20,411 tf-m，若考量左邊單側單根預力斜材破壞時 (Step 2)，右側主梁之最大正彎矩降為 11,059 tf-m，但左側主梁之最大負彎矩提高至 -31,092 tf-m，約為原設計值的 1.5 倍。再者，當單側兩根預力斜材破壞時 (Step 3)，上部結構幾乎全面承受負彎矩，右側主梁之最大負彎矩提高至 -80,375 tf-m、左側主梁之最大負彎矩提高至 -135,885 tf-m，兩者約為原

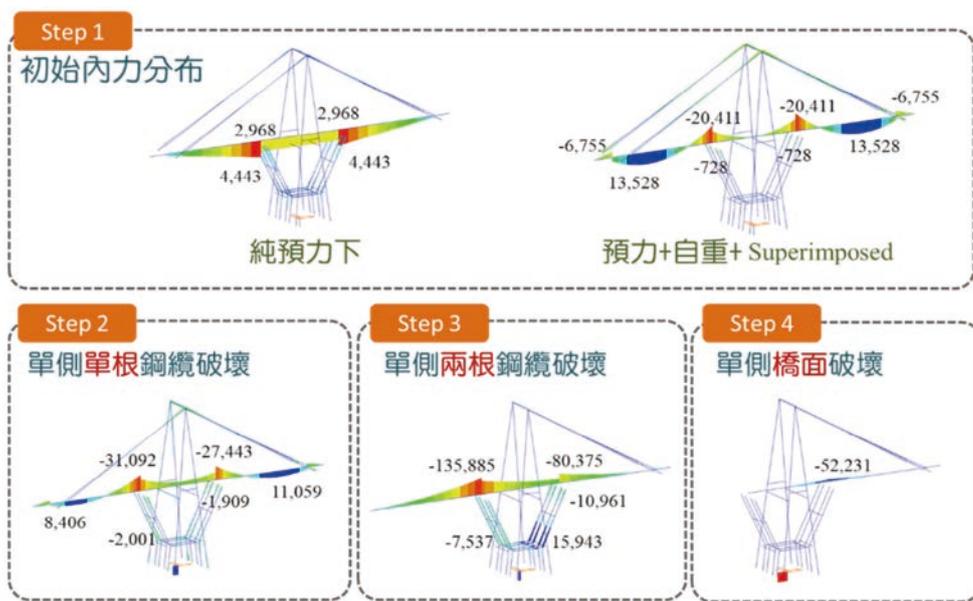


圖 32 整體結構彎矩分布示意圖 (本研究繪製，單位：tf-m)

設計值之 4 ~ 6.75 倍。最後，當左側橋面產生破壞後，右側主梁之最大負彎矩為 -52,231 tf-m，約為原設計值之 2.6 倍。

破壞過程橋塔剪力分布

觀察圖 33 所示塔柱結構剪力變化圖中，橋梁於原始服務階段 (Step 1)，塔柱各結構原件最大剪力值僅為 111.8 tf，若考量左邊單側單根預力斜材破壞時 (Step 2)，A 型橋塔塔頂及塔中橫梁剪力分別增至 -302 tf 和 254 tf，V 型墩柱則最大增至 236 tf。當單側兩根預力斜材破壞時 (Step 3)，V 型墩柱右側下部結構剪力倍增加至 888 tf，而 V 型墩柱底部連梁剪力增加至 -1,317 tf，此狀態應為下部結構發生剪力破壞最可能的情形。最後，當左側橋面產生破壞後，V 型墩

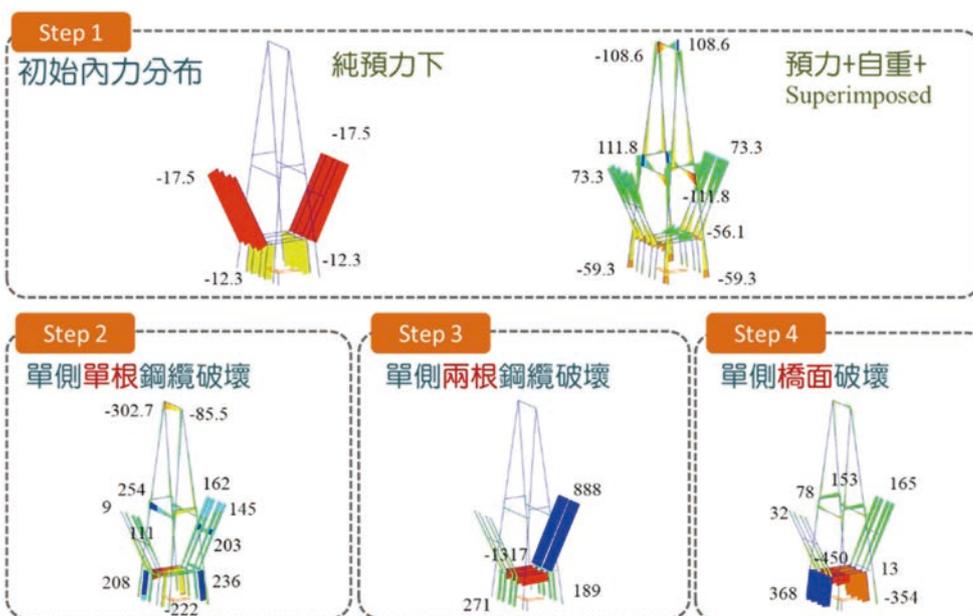


圖 33 塔柱結構剪力分布示意圖 (本研究繪製，單位：tf)

柱底部連接基礎板之剪力微幅增加至 368 tf。

整體結構破壞順序推估

綜合分析國際報導及本文結構模擬分析結果，初步推估整體結構破壞順序如圖 34 所示，相關說明簡述如下：

Step 1：

懸臂單元之單側單根預力斜材可能因環境腐蝕或老劣化等因素產生裂損破壞現象。

Step 2：

單根預力斜材失效後，橋面與橋塔均產生扭轉現象，橋塔兩

側上部結構之自重及扭力均由另一根鋼纜獨自傳遞至無法完全負荷。

Step 3：

單側兩根預力斜材破壞後，上部結構瞬間失去重要支撐點，導致主梁無法承受急速倍增之負彎矩而崩裂。

Step 4：

主梁由三跨連續變為兩跨連續結構，A 型橋塔因左右兩側不平衡受力現象，引致塔柱各元件由全受壓變為單側受拉，倍增之拉力超過原始設計範圍時，即造成 A 型橋塔沿行車向倒塌。

Step 5：

A 型橋塔倒塌後，另一側僅存之預力斜材亦隨即掉落，並引致其懸吊之上部結構瞬間失去支撐點，進而持續發生坍塌現象。

Step 6：

懸臂單元所有上部結構、A 型橋塔及左右兩側簡支單元全數崩塌掉落，現地僅存 V 型橋墩底部結構。

情境二：主梁先斷損之模擬及分析

根據義大利官方公布調查結果顯示，懸臂單元箱型主梁及簡支單元預力 I 型梁於事發之前，業已檢測

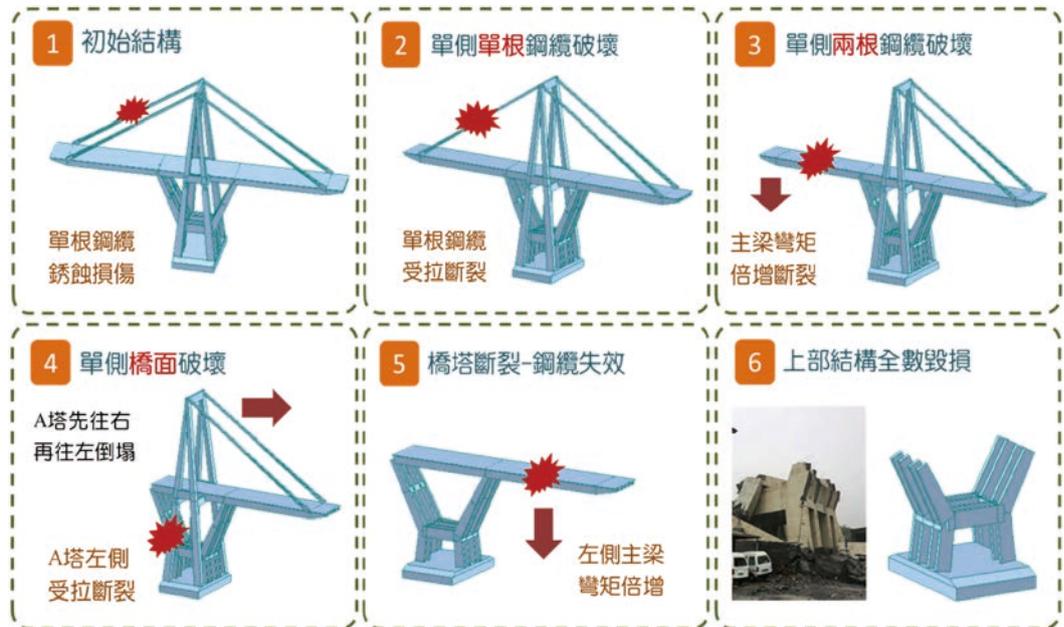


圖 34 整體結構破壞順序推估示意圖（本研究繪製）

發現鋼筋腐蝕及鋼纜鏽蝕等現象，因而可能由上部結構主梁先行發生斷裂，再直接引致全橋倒塌情形。爰此，為模擬主梁先行斷裂之狀況，本節將以單側簡支單元的預力 I 型梁先發生毀損，亦或懸臂單元箱型主梁先發生斷裂等二者，分別進行分析並說明如後：

Case 1：單側簡支單元預力 I 型梁先發生毀損

如圖 35 所示，為釐清單側簡支單元發生損壞後，對於懸臂單元左右兩側不平衡受力之情形，先假設僅單側承受簡支單元重量，觀察其後續內力變化。由圖 36 之分析結果顯示，A 型橋塔右側軸力由圖 31 所示約 -1,571 tf 之壓力，增加至 -2,792 tf，主梁最大正、負彎矩由圖 32 原始 13,528 tf-m 及 -20,411 tf-m 增加至 16,518 tf-m 及 -26,102 tf-m，而塔柱剪力變化並未非常明顯。

Case 2：由單側懸臂單元箱型梁先發生斷裂

如圖 37 所示，為分析過程單側箱梁斷面發生損壞，故假設其箱梁斷面勁度瞬間衰減至微小值，用以觀察橋梁結構內力分布。根據圖 38 之分析結果顯示，因箱梁勁度瞬間衰減，左側預力斜材軸力隨即發生異常增減量，而 A 型橋塔軸力亦由圖 31 所示純受壓（約 -1,571 tf）轉變為一拉一壓（約 5,583 tf 及 -8,829 tf）狀態，過

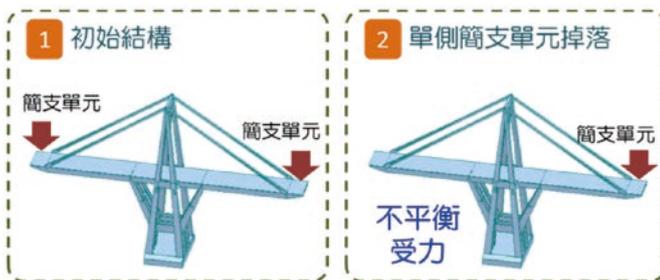


圖 35 單側簡支單元預力 I 型梁先發生斷裂示意圖 (本研究繪製)

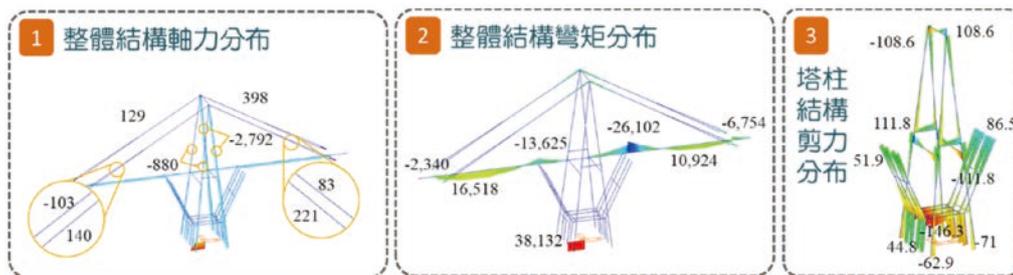


圖 36 單側簡支單元斷裂後之內力分配圖 (本研究繪製)

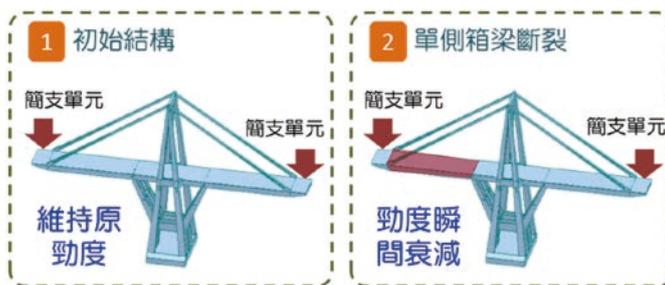


圖 37 單側懸臂單元箱型梁先發生斷裂示意圖 (本研究繪製)

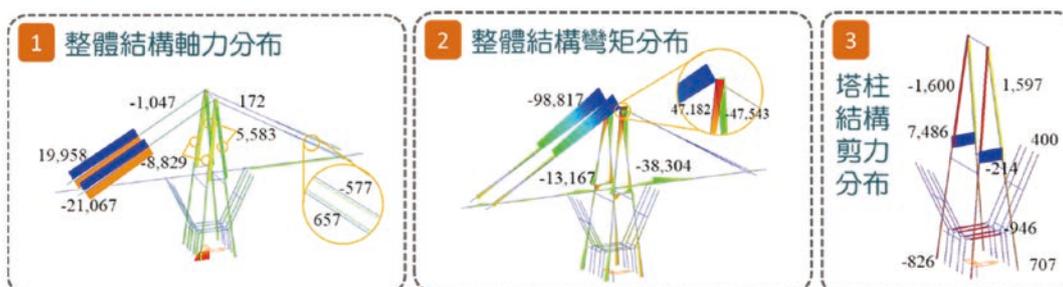


圖 38 單側懸臂單元斷裂之內力分配圖 (本研究繪製)

大之拉力可能引致橋塔接續發生破壞；在整體結構彎矩分布部分，橋塔頂部各銜接桿件均發生異常放大現象，而右側主梁最大負彎矩由圖 32 原始 $-20,411$ tf-m 倍增至 $-38,304$ tf-m，亦可能因此引起預力斜材、橋塔及主梁發生連續性破壞狀況；在塔柱結構剪力分布部分，A 型橋塔塔柱及連梁剪力亦異常倍增至正負 $1,600$ tf 及 $7,500$ tf 之大小。

結論與展望

橋梁全生命週期成本主要包含規劃、設計、發包和施工等初期成本，以及維護和管理的管養成本，與拆除和重建的改建成本等，如何在最佳化的生命週期裡，有效延長橋梁壽命，關鍵技術在於常時的維護與管理。其中，有效的橋梁檢測、監測、維修與補強工作，更是維護管理的執行重點。

以莫蘭迪大橋為例，其橋齡已臻 50 餘載，橋梁生命週期管養階段已發現 Pylon 10 與 Pylon 11 的部分損傷，並針對 Pylon 10 的 A 型橋塔頂部執行預力斜材鞍座補強，另針對相對損壞較嚴重的 Pylon 11，業已進行預力斜材置換補強工作，惟根據 Pylon 9 當時檢測報告指出，其表面並無明顯損傷，故尚未執行任何維修補強工作，今卻發生意料外的橋梁倒塌事故，瞬間增加可觀的社會成本，實應列為產、官、學、研等各界警惕。

經由義大利官方調查結果及各種破壞程序之假設，本文已針對預力斜材或主梁等二者斷裂情形，進行破壞程序模擬分析。根據結果顯示，莫蘭迪大橋橋址位於波希維拉河谷並緊鄰海岸線，長期接觸海風而俱氯離子侵襲之虞，造成主梁內置預力與鋼筋鏽蝕，而斜張鋼纜及其外置錨碇設施亦可能發生腐蝕現象。惟主梁可能因自身內置預力過度失效而直接斷裂，亦可能由預力斜材內力逐漸降低過程，引發主梁負彎矩超過彎矩容量而斷裂，更可能由斜張鋼纜直接斷裂而引致落橋。爰此，本文遂行各類假設分析，相關模擬過程及評估結果冀能提供參考之用。

鑑於此次國際公共工程安全事件，以國內橋齡逐漸老年化的事實為例，建議應積極發展橋梁健康安全守護工作，並以結構分析為基礎，著手執行「醫檢分離」、「完整履歷」、「提早預防」、「長期照護」等橋梁養護工作，藉由全自動化表單、檢測與評估分工、全方位檢測資訊、完整記錄履歷、自動化災防評估與預警提示、自動化監測系統、橋梁健康長期照護等研究方向，逐一邁向橋梁全生命週期科技化管理目標，亦冀能達到支援政府決策、守護橋梁健康、降低受災風險的最大效益。

參考文獻

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Ponte_Morandi
2. https://it.wikipedia.org/wiki/Viadotto_Polcevera
3. Riccardo Morandi, "Some Types of Tied Bridges in Pre-stressed Concrete," ACI Special Publication, Volume 23, pp. 447-466 (1969)
4. https://en.wikipedia.org/wiki/General_Rafael_Urdaneta_Bridge
5. Riccardo Morandi, "Polcevera Viaduct in Genova-Italy," Construction Reports Vol. 21, No. 200, May 1968
6. SIXXI edited by Tullia Iori and Sergio Poretti, STRUCTURAL IN ITALY HISTORY OF ENGINEERING 4, 2011
7. C. Gentile and F. Martinez Y Cabrera, "Dynamic Investigation of a Repaired Cable-Stayed Bridge," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 41-59 (1997)
8. F. Martinez Y Cabrera, G. Camomilla, M. Donferri Mitelli and F. Pisani, "Rehabilitation of the Stays of the Polcevera Viaduct," 1994 International Symposium of Cable-Stayed Bridges, Shanghai, China, pp. 640-665 (1994)
9. Gabriele Camomilla, Francesco Pisani, F. Martinez y Cabrera and Agostino Marioni, "Repair of the stay cables of the Polcevera Viaduct in Genova, Italy," IABSE Reports No. 73, Vol. 1, pp. 535-540, Extending the Lifespan of Structures, IABSE Symposium, San Francisco, August 1995
10. http://www.retrofutur.org/retrofutur/app/main?DOCID=1000115890&blobIndex=image_med1
11. "The Report on the Collapse of the Genoa Bridge (14 September 2018)," The Inspection Commission, Ministry of Infrastructures and Transport, Italy <http://www.mit.gov.it/comunicazione/news/ponte-crollo-ponte-morandi-commissione-ispettiva-genova/ponte-morandi-online-la>
12. Google Map 截圖
13. <https://dmpublisher.s3.us-west-2.amazonaws.com/2018/August/16/7/2b6271f4-cff2-4247-b6e9c2e2271fc772-original>
14. [https://www.google.com.tw/search?q=morandi+bridge&tbm=isch&tbs=rim:CRtwAinxzQAbIjifm4iKpWkZCtwfz11YkxMnMj2FNdDykvRD6_FCK9G9EW54sDt8rzE8kvUEsF_199eIs2Kz_1Ls3oQ4CoSCZbiIqlaRkKEfi6GHdAaLxKhIJ3B_1PXViTEycR2aWXTacN0l4qEgkyPYU10PKS9BG-6yg2LbwALioSCUPoUir0b0RbERF8CGbjFuVeKhI-JniwO3yvMTyQR_GLT4dyMohC0qEgm9QSwX_1314ixE2RDeTy4kjCoSCTYrP8uzehDgER1ylyu6Oj2V&tbo=u&sa=X&ved=2ahUKEwiN2q2q9JHeAhWbdd4KHQ1YC3kQ9C96BAGBEBS&biw=1920&bih=933&dpr=1#imgrc=ZUn_U_XZVIE4kM:&spf=1539931616684\(EP_A photo\)](https://www.google.com.tw/search?q=morandi+bridge&tbm=isch&tbs=rim:CRtwAinxzQAbIjifm4iKpWkZCtwfz11YkxMnMj2FNdDykvRD6_FCK9G9EW54sDt8rzE8kvUEsF_199eIs2Kz_1Ls3oQ4CoSCZbiIqlaRkKEfi6GHdAaLxKhIJ3B_1PXViTEycR2aWXTacN0l4qEgkyPYU10PKS9BG-6yg2LbwALioSCUPoUir0b0RbERF8CGbjFuVeKhI-JniwO3yvMTyQR_GLT4dyMohC0qEgm9QSwX_1314ixE2RDeTy4kjCoSCTYrP8uzehDgER1ylyu6Oj2V&tbo=u&sa=X&ved=2ahUKEwiN2q2q9JHeAhWbdd4KHQ1YC3kQ9C96BAGBEBS&biw=1920&bih=933&dpr=1#imgrc=ZUn_U_XZVIE4kM:&spf=1539931616684(EP_A photo))
15. <http://www.meteoweb.eu/2018/08/crollo-ponte-morandi-genovaautostrade-italia/1137544/>
16. <https://www.neweurope.eu/article/italians-wonder-whom-to-blame-for-morandi-bridge-collapse/>
17. Riccardo Morandi, "viaducto sobre el Poleevera en Genova-Italia", Informes de la Construcción Vol. 21, nº 200 Mayo de 1968.
18. C. Gentile and F. Martinez Y Cabrera, "Dynamic Investigation of A Repaired Cable-stayed Bridge", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 41-59, 1997.
19. 網路資料：<https://www.newcivilengineer.com/latest/revealed-collapsed-italy-bridge-construction-photos-and-designs/10034288.article?blocktitle=News-Feed&contentID=13612>
20. 網路資料：<http://www.retrofutur.org/retrofutur/app/main?DOCID=1000116030>
21. 網路資料：https://www.youtube.com/watch?v=GuFaS1_e9Sw&t=23s
22. Camomilla, Martinez y Cabrera, Pisani and Marioni, "Repair of the Stay Cables of the Polcevera Viaduct in Genova, Italy", IABSE Symposium 1995.
23. Pier Giorgio Malerba, "Inspecting and repairing old bridges: experiences and lessons", Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 443-470.
24. Walter Podolny, "Concrete Cable-stayed Bridges", Federal Highway Administration.
25. Riccardo Morandi, "Some types of Tied Bridges in Prestressed Concrete", First International Symposium, ACI Publication SP-23.
26. Riccardo Morandi, "The long-term behavior of viaducts subjected to heavy traffic and situated in an aggressive environment : the viaduct on the Polcevera in Genoa", IABSE reports, 032 (1979). 



橋梁監測與結構健康診斷

宋裕祺／國立臺北科技大學土木系 教授兼工程學院院長、國家地震工程研究中心 組長

張國鎮／國立台灣大學土木工程系 特聘教授

陳俊仲／國家地震工程研究中心 副研究員

李政寬／國家地震工程研究中心 副研究員

洪曉慧／國家地震工程研究中心 研究員

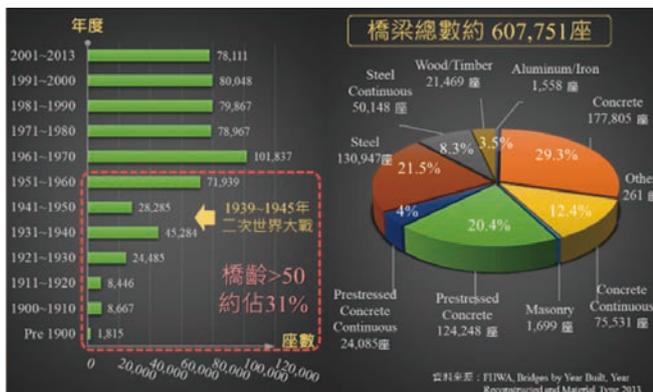
蘇進國／國家地震工程研究中心 副研究員

前言

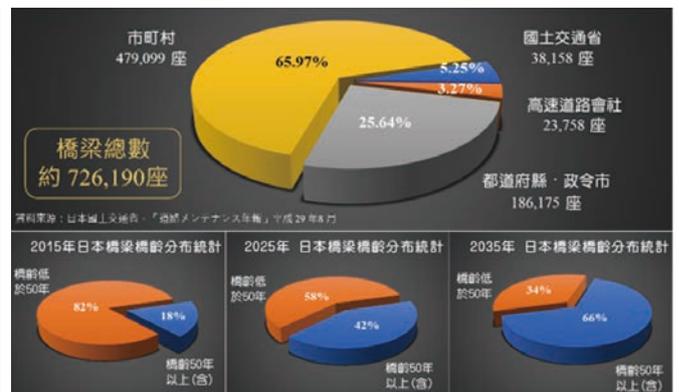
橋梁是非常重要的基礎設施結構，連結著社會經濟運輸路網，世界各國均很重視橋梁安全維護工作，在民生經濟建設的發展過程，必須持續提升民眾生活品質並同時確保其生命財產安全，進行橋梁監測和健康診斷是讓橋梁結構維持使用性與服務安全之必要手段。以美國為例，目前美國橋梁總數約六十餘萬座，橋齡超過 50 年則佔了約 31%，根據美國道路與運輸建設集團報告指出，美國公路及橋梁平均壽命落在 50 至 70 年，50 年使用期間從未進行重建工程之橋梁超過四分之一，約十七萬座，估計超過五萬五千座橋梁急需修護或汰換重建（圖 1a）。而鄰近台灣的日本，日本橋梁目前總數約七十二萬座，大部分隸屬市町村（約四

十七萬餘座），其它橋梁管理單位尚包括國土交通省、高速道路會社與都道府縣和政令市，2015 年統計日本橋梁橋齡大於 50 年約占 18%，並推估到 2035 年日本有超過 66% 之橋梁橋齡將超過 50 年（圖 1b）。

台灣於 2017 年橋梁統計數量約將近二萬八千座，分別由交通部公路總局管理占 11.5%，高速公路局管理占 8.5%，鐵路局管理為 5.8%，其餘 74% 則屬於縣市政府及其它機關管理，台灣橋梁橋齡超過 50 年占橋梁總數約 3.5%（圖 2）。2005 年世界銀行發表之自然災害熱點全球風險分析報告內容顯示，台灣土地以及人口受災風險位居世界首位，2015 年跨國保險組織發表 2015-2025 城市風險指標，台北市在事故和自然災害導致的經濟損失規模排名第一，超過日本東京、韓國

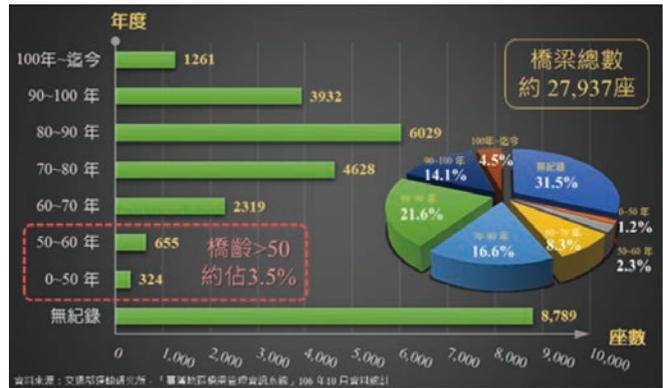
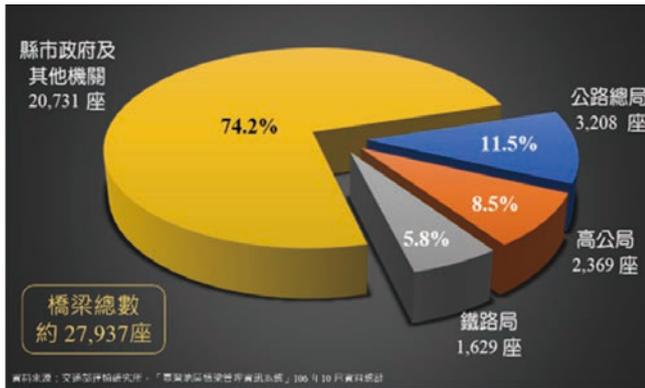


(a) 美國橋梁統計資料



(b) 日本橋梁統計資料

圖 1 美國和日本橋梁統計資料



(a) 橋梁分屬單位統計

(b) 橋梁齡統計

圖 2 台灣橋梁統計資訊

首爾、菲律賓馬尼拉、美國紐約和洛杉磯和中國上海等大都市，因此台灣橋梁相較於美國和日本的橋梁，其結構健康安全面臨著更多種災害風險的高度威脅，包括地震、颱風、洪水、山崩、土石流及腐蝕老劣化等，故如何強化並落實橋梁監測和健康診斷技術，有效降低橋梁破壞的可能，確保民眾行的安全是持續性且刻不容緩的工作。

橋梁全生命週期管理思維

橋梁等基礎設施結構可比喻為人的身體，必須適當照護才能確保健康並面對使用期間各種威脅的挑

戰，如何減少橋梁結構因天然災害或老劣化因素損壞產生破壞，以延長橋梁使用年限並有效提供服務功能，為當務之急（圖 3）。將橋梁生命週期成本之思維導入橋梁管理工作，已深受各國重視。橋梁於服務期間經歷包括規劃、設計、發包、施工、維護、管理、拆除或重建等不同生命週期之階段，各階段所需面臨的橋梁特有問題並不盡相同，然而維護橋梁具備應有性能的橋梁管理目標並無二致（圖 4）。

不同的橋梁維護策略將導致不同的全生命週期成本結果。圖 5 所示預防補強型與損傷後補強型管理策略現不同的成本支出特性。前者的維護門檻值較高，

地震

颱風洪水

沖刷

老化

劣化

Lloyd's City Risk Index 2015-2025
Analysing the economic exposure from 18 threats over ten years

Understand the risks: www.lloyds.com/cityriskindex

Taipei, Taiwan

Average GDP growth rate: 3.84%
Average annual GDP: \$400.54bn*
Total GDP@Risk: \$181.20bn
Share of Average annual GDP: 45.24%

GDP@Risk ranking
Global: 1 Regional: 1 National: 1

GDP@Risk by threat type

圖 3 台灣橋梁自然環境的挑戰（國家地震工程研究中心）

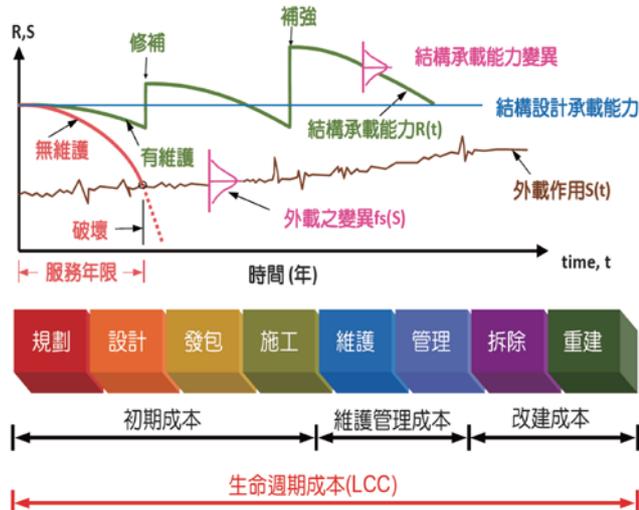


圖 4 橋梁生命週期成本

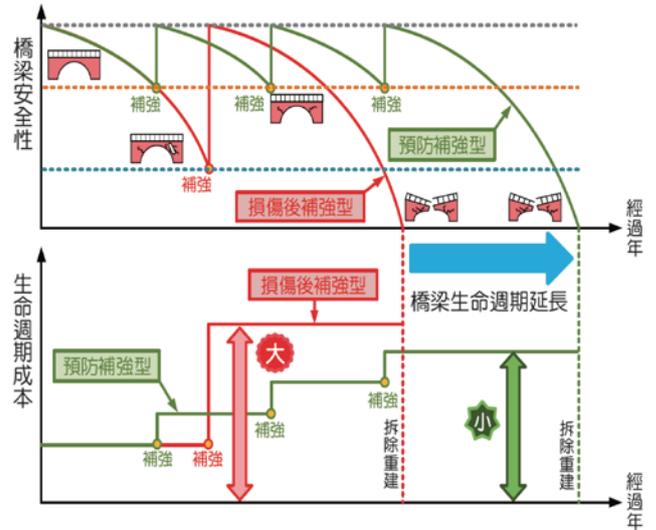


圖 5 橋梁生命週期管理計畫

舉凡橋梁各項性能退化到該門檻值時，即行啟動橋梁維修或補強作業，因此時橋梁性能與剛完工時者差距不大，因此所需費用與工期並不至於太大，橋梁管理單位的維護成本支出呈現微幅成長的漸變階梯狀分布，有利於橋梁管理單位的預算編列與財務管理；後者的維護門檻值較低，大多橋梁呈現明顯且嚴重的損害後才行橋梁維修或補強作業，此時橋梁性能與剛完工時者差距頗大，因此所需費用與工期相對增大，橋梁管理單位的維護成本支出呈現巨幅跳躍式成長的分布，不利於橋梁管理單位的預算編列與財務管理。由橋梁全生命週期成本管理思維而言，相對於橋梁發生明顯損壞或損傷後之補強工作，預防性補強可降低橋梁全生命週期成本並使橋梁在其服務使用年限內保有較佳的橋梁性能。

橋梁健康監測與診斷技術

對於目前處於營運階段的重點橋梁而言，施以必要的長期健康監測，透過合宜的健康診斷技術，妥善規劃雲端監測資料庫和警報應變機制，將可達到自動化橋梁防災之目標，發揮及早發出致災警告之功能，有效降低橋梁損壞甚至崩塌引致的人命傷亡與社會成本之損失。近幾年資訊技術發展益趨成熟，已可針對高精度感測元件之大量監測資料，應用更多樣的方法進行處理工作，如採用機器學習或深度分析等人工智慧邏輯演算方法處理相關大數據，即時顯示攸關橋梁安全之各項控制指標，已蔚為健康診斷技術的核心。

橋梁健康監測系統

橋梁健康監測系統可分為硬體和軟體兩部分，其中硬體部分大致包括四個子系統：(1) 感測器系統、(2) 資料擷取系統、(3) 資料通信與傳輸系統及 (4) 資料分析和處理系統，各子系統藉由通信網路連結並搭配相應之系統程式軟體，構成完整的監測系統。擬定橋梁監測計畫必須考量工址環境適合性、橋梁結構性能、安全性和使用性（如圖 6），方能提供橋梁營運期間有效的維護管理建議。

完整的橋梁健康監測系統，在工程方面至少應具備：(1) 穩定性及可靠度高之感測器，例如感測元件對於應變或溫度變化等物理量之感測靈敏度要高，雜訊干擾要小，並應搭配智慧型功能避免誤報。且橋梁監測環境嚴苛且監測設備通常需使用達數年之久，經常日曬雨淋等高溫、高濕、灰塵之作用，感測材料劣化或現場溫濕度造成訊號飄移，均會影響監測之正確

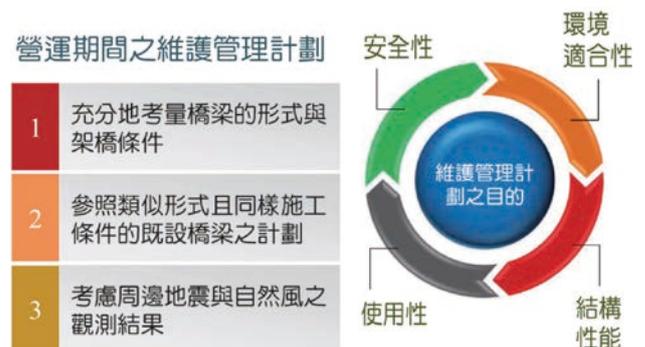


圖 6 橋梁健康監測計畫擬定要點

性，因此除定期檢測更新外，選用之感測器須能抵抗惡劣環境而不致損壞或尚失穩定性，才能於橋梁使用年限中發揮應有的功效；(2) 全自動雲端監測，監測項目內容主要可分為一般長期服務性量測及突發應變狀況量測，一般量測乃針對橋梁靜載、劣化，定期蒐集並儲存各感測器量得之訊號。而突發性量測對象則是活載等常變的載重，當橋梁受到足以造成損壞或已造成部分損壞之載重時，必須能迅速及時地將橋梁反應以高頻率記錄器記錄下來並回報，長期之監測系統應由已程式化之電腦進行定時量測，並具有自動觸發紀錄量測之功能，也藉由通訊網路技術之發展，目前市面上已有許多有線和無線通訊模組與雲端儲存資料庫服務功能，對於遠端監測應用需求提供穩定且可靠的方法；(3) 後處理及儲存能力，對於原始資料，系統必須能自動地定期整理分類數據，並套用適當之評估演算邏輯執行診斷作業，簡化監測系統人為操作設定程序，使監測設備需讓使用者一看即可操作才能普遍應用，並能自動將原始資料加以壓縮儲存備查，掌握橋梁結構物之健康狀況；(4) 設備保護措施及完善之電力系統，精密之量測儀器及電腦必須安置於僻護良好之測站中，透過空調及防震設施確保儀器能正常地運作，並配置保全系統以免儀器遭竊或被破壞，在電力方面應準備不斷電系統，以免停電而使得監測中斷，目前市場也有部分感測儀器無需連結現地主機，簡化現地佈建監測設備箱之需求，大幅提高了監測系統建置效率，一般橋梁監測之主要項目和內容可參考圖 7。

監測項目	監測內容
應變	鋼梁、混凝土頂板、腹板或底板應變
位移	支承墊、伸縮縫、跨斷層位移
沉陷	墩柱、上部結構、路基沉陷
傾斜	墩柱、橋塔傾斜
荷重	鋼索頻率或荷重監測
振動	墩柱、上部結構、橋塔、外置預力振動
溫度	大氣溫度、箱梁溫度梯度、鋼箱內溫度
風速	橋塔、橋面、地面之風速
沖刷	水深變化、沖刷深度與回淤變化

圖 7 橋梁健康監測的主要項目和內容

橋梁健康診斷

橋梁結構健康監測泛指根據橋梁量測資料結果，以期得到關於橋梁結構設計、施工、維護管理的知識之統稱，可以更精確地掌握實際詳細狀況，營運階段中也能進行量測結構物的振動特性，將結構振動特性作為結構物的監測指標，圖 8 說明橋梁結構健康診斷實施目的，首先須藉由實際量測到的橋梁結構反應，比對量測資料與結構分析結果之差異，進而採用適用的識別和評估分析方法，修正建構橋梁結構分析模型之相關參數，確認結構分析模型之正確性，期讓橋梁結構分析模型詳實反映現地橋梁結構真實行為，並據以進行推估橋梁結構在各種可能環境載重作用下的行為，做為橋梁健康診斷的根基。

橋梁健康監測技術研發與應用案例

國家實驗研究院地震工程研究中心因應全球科學技術發展趨勢，近幾年積極投入橋梁健康監測與健康診斷技術研發工作，也參與許多國內現地橋梁監測診斷與試驗工作，本節概述近期自製研發之橋梁監測元件與相關橋梁監測健康診斷技術應用案例。

光纖式沉陷量測系統

相較於傳統的電子通訊方式，光纖傳輸具有低干擾與損耗、頻寬大、高穩定性等優勢，將光纖通訊應用於結構監測系統，已成為工程科技的主流。橋梁監測項目中，橋面高程線型變化可反應橋梁結構承受各式載重（如行車載重、溫差載重、風力、洪水與地震

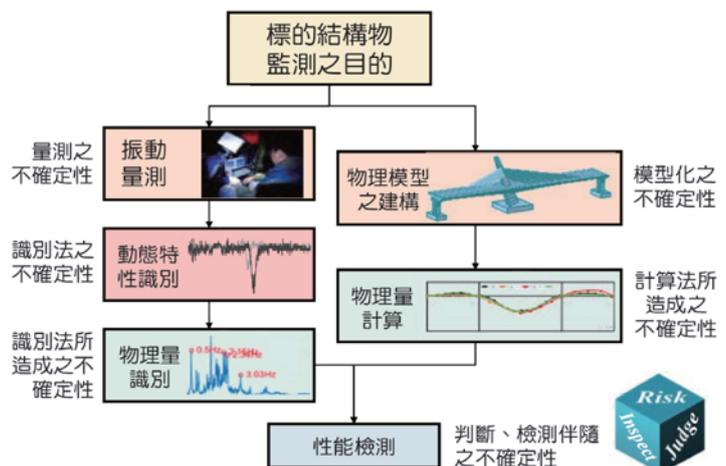


圖 8 橋梁結構健康診斷實施目的

力等)下的結構行為,可供為掌握及評估橋梁結構使用狀態的重要指標之一可藉由測量與統計橋梁日常荷載與反應,界定橋梁服務安全之「基準值」或「安全界限值」指標,經由自動化長期觀測橋梁結構變化,更可協助橋梁管理者進一步掌握及監控橋梁安全的變化狀況。

自製研發之光纖式沉陷量測系統如圖 9,系統主要架構包括可注入液體之連通管路及可感測管內液面變化之光纖光柵元件兩部分,藉由量測連通管液面變化得到各量測點之相對高程關係,系統工作原理則結合了連通管原理、浮力原理和虎克定律(光纖光柵材料)。基本原理係應用光纖光柵感測元件(Fiber Bragg Grating, FBG)量測液面高程變化,利用連通管原理與浮力原理,圖中所示右側水筒上升或下降時,左側的 FBG 承受的拉力因而減小或增大,組構成沈陷量測系統,此系統之靈敏度、解析度、容許衝程等可搭配量測標的特性規劃設計參數製作感測元件提供客製化量測功能。

此系統為國內自製開發具有構造簡單、安裝容易、系統穩定且資料可靠度高、適合大型結構量體長期與短期量測以及可連續性自動記錄等特色,圖 10 為以鋼梁為試體之系統校正試驗,梁側邊的各撓度量測點鎖固 L 型鋼板, L 型鋼板上安裝光纖沉陷計,下方安裝電子式位移計,試驗時於梁中點施加垂直載重,以光纖沉陷計與電子式位移計同時量測撓度進行系統校正並獲得驗證,對於橋梁、隧道、水壩、邊坡擋土設施等大型結構體,採用傳統測量方法進行完整且全面性的水準測量作業將耗時費力。針對此些大型工程量體而言,光纖式沉陷量測系統將可有效率地進行結構變形量測資訊的長期紀錄,同時滿足工程經濟性且務實可靠的變位量測結果,目前也已於國內數座橋梁建置正常提供橋梁長期監測服務功能中。

以蘇花公路白米景觀橋建置之橋梁監測系統為案例(圖 11),該橋為國內橋梁工程首次採用之具有波形鋼腹板脊背橋,考量其工程特色屬新橋型創舉,為更

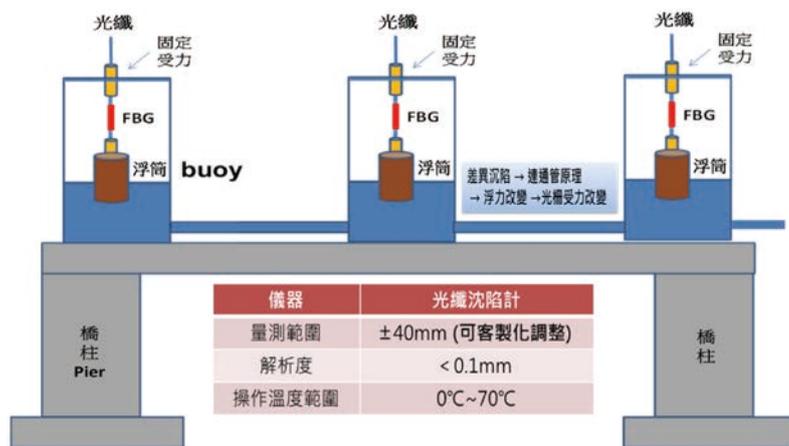
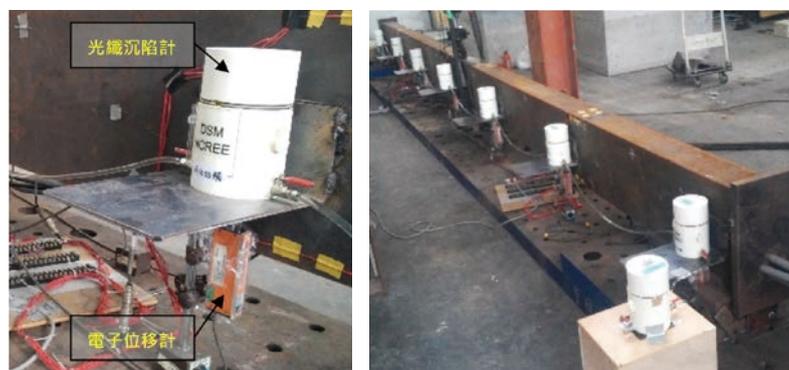


圖 9 光纖式沉陷量測系統



(a) 光纖沉陷計與電子式位移計 (b) 鋼梁試體

圖 10 光纖式沉陷計校正試驗

瞭解此類創新橋梁型式實際結構特性,故除建置橋梁結構分析模型之外,於橋體結構安裝應變計、外置斜索與箱梁內鋼纜安裝索力計、塔頂安裝傾斜計以及箱梁內設置光纖沉陷計,組構成全方位之橋梁長期監測系統,記錄橋梁承受環境外力的反應並分析橋梁的安全性,有利日後橋梁維護管理,並經由車輛載重試驗及監測成果驗證系統可靠性。

橋梁監測案例一 國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程計畫中五股林口段

國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程計畫中五股林口段工程,範圍北起由汐五高架段五股端(統一里程約 31K),南至統一里程 45K 處,全長約 14 公里,有關路線設計原則係採北上線與南下線分離並緊鄰國道 1 號二側設置。在五股林口段工程當中有三種特殊橋梁型式,包括:

- (1) 林口跨越橋為考量儘量避免造成環境的不利影響,

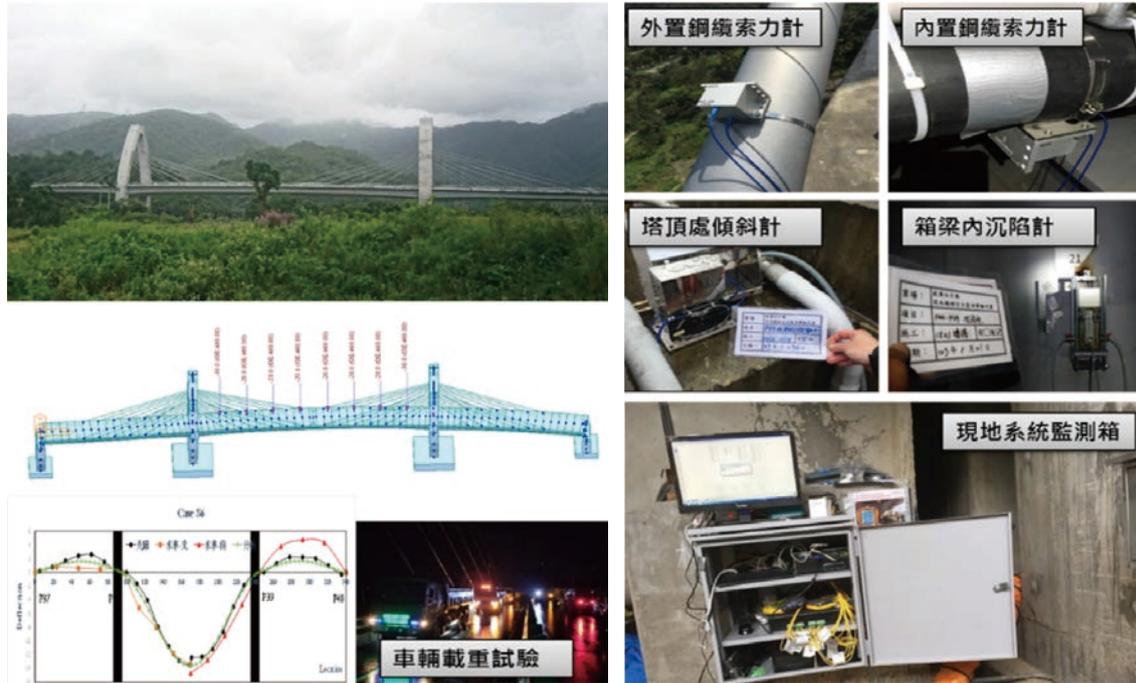


圖 11 蘇花公路白米景觀橋橋梁監測系統

北上線須避開地質敏感區，以致於橋梁平面線形須配設為兩度跨越中山高速公路，此跨越橋梁的主跨為全台灣目前最長跨度之鋼箱型梁，中央跨徑達 216 公尺，主跨的跨徑中央處因受到地震、車流量的振動影響，容易產生較大的變形，且本橋採用較大梁深設計，沿梁深方向容易形成溫度梯度，導致產生非預期的撓曲曲率，故有必要進行結構監測以了解橋梁的力學特性。

- (2) 泰山林口段雙層高架橋為因應工址東側邊坡屬地質敏感區，故北上線與南下線採雙層共墩方式（即北上線置於上層，南下線置於下層）。在雙層共構以及高橋墩柱設計概念下，容易造成橋梁受到自身荷重影響，產生長期偏心效應，使得橋梁下部結構容易形成局部較大應力及整體變位的可能，因此，為減輕自重，上、下層橋均採鋼箱型梁橋配置，下部結構採用矩形 RC 橋墩。為了解雙層高橋墩承受長期偏心載重以及地震與車輛振動的影響，有必要對於橋墩底部的構材應變與承載下層橋面之懸臂帽梁端部的變位進行結構監測。
- (3) 鋼與預力混凝土混合梁橋位於跨越進出高公局匝道路段中，橋梁上部結構採用等梁深配置，並使用鋼與預力混凝土混合梁橋之配置方式，同時為減小跨

徑亦設計偏心橋墩因應之。鋼梁對稱配設於主跨中央處，並於主跨左右四分之一處各設置了鋼梁與混凝土梁的接合。在此不同材料的接合處，容易因勁度不連續造成應力集中現象，藉由結構監測，將有助於了解此材料混合處之力學特性。

本應用案例橋梁極具代表性，橋梁監測系統之設置主要為掌握結構動態及靜態行為，分析研判其安全性，其中動態監測對象主要為地震、交通車流對橋體引起的振動行為；靜態監測則為研析橋體受非動態載重等作用下，橋體的溫度、傾斜量、位移值、應變值，目的乃用以檢驗設計階段假設值是否合理，期能得知完工時結構內部應力之狀況，並藉由定時蒐集資料做為結構診斷與管理之參考。

圖 12 為本案例監測系統建置作業內容與成果，說明除了各橋梁結構分析模型建置研究工作之外，於現地橋梁擇定位置安裝應變計、位移計、傾斜計、溫度計與強震加速度計等感測器，並組成完整之橋梁監測系統，同時配合現地試驗包括強迫振動試驗、靜態車輛載重試驗與動態車輛載重試驗等量測資料，回饋各橋梁結構分析模型，由模型分析資料輸出與現場監測資料比對，應用橋梁結構健康診斷方法進行評估，並據以訂定監測警戒值與行動值，提供橋梁安全應變和維護管理策略主要參考資訊。本監測

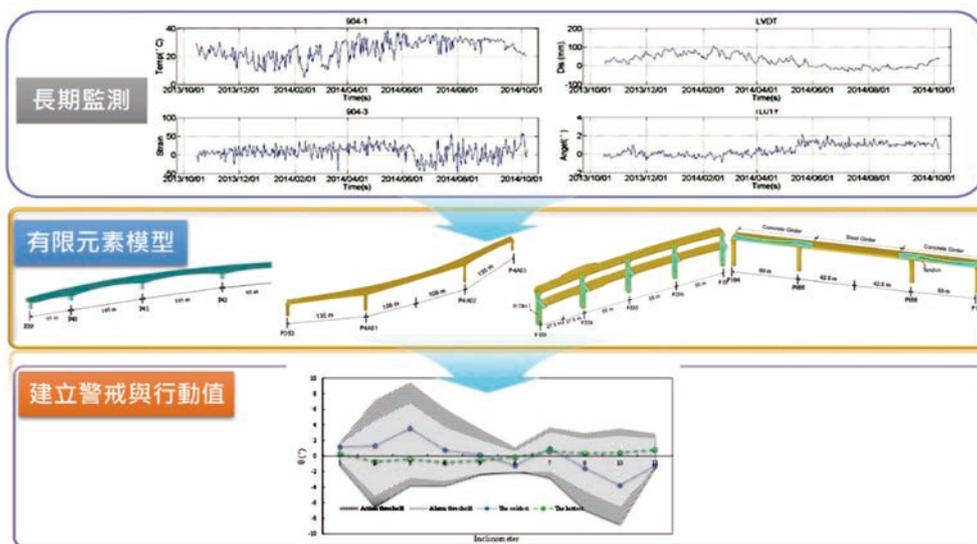
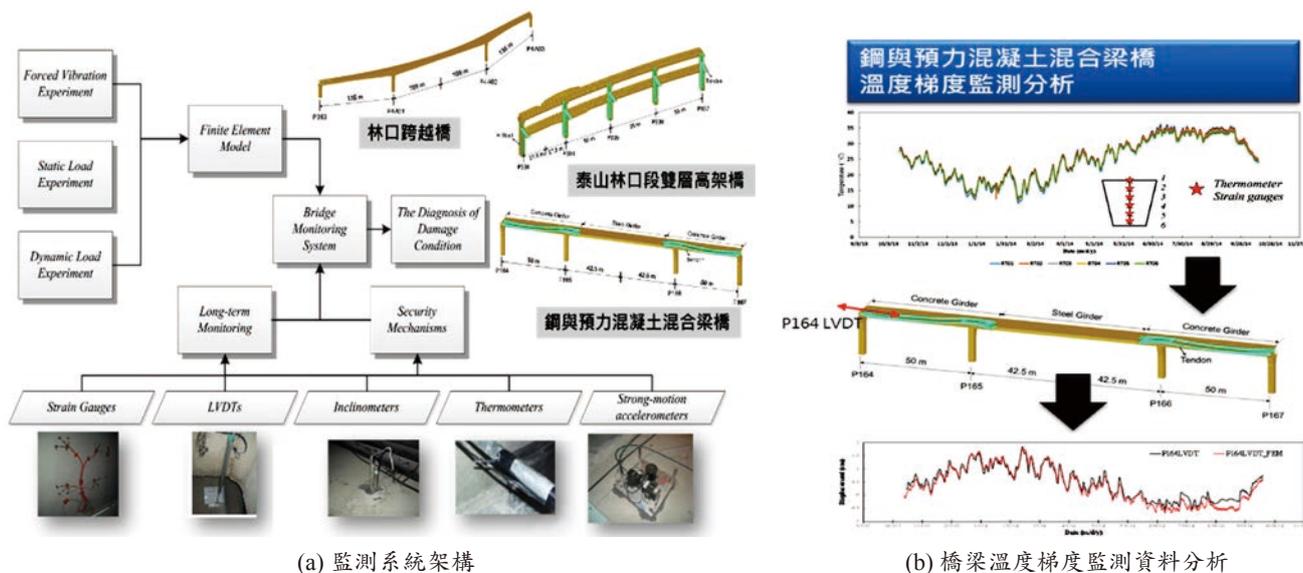


圖 12 國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程計畫中五股林口段橋梁監測案例

案例除使用一般傳統儀器進行橋梁之應力、應變與結構變形等監測，亦引進微機電技術與無線傳輸模組組合的系統，對橋梁結構進行相關監測，藉由兩種不同監測系統，記錄橋梁實際結構行為，以比對驗證監測結果的可靠性與準確性，掌握橋梁結構變化情形。

橋梁健康監測與診斷系統之開發

國家地震工程研究中心建構有效且完整之橋梁防災安全管理服務平台，平時可進行自動化的橋梁安全評估，更可在災害發生前，由先進的橋梁全自動監測系統，及時提醒橋梁管理單位，成為橋梁健康安全防災管理的全新里程碑。

圖 13 為結合光纖沉陷量測系統所建置的橋梁自動監測與健康長期照護系統，此系統畫面搭配適當間距設置量測點位，直接顯示橋梁高程線型變化，反應橋梁結構承受各式荷重，例如行車載重、溫差載重等外力對結構本體產生之影響，亦可用為掌握及評估橋梁結構使用狀態的指標之一。

橋梁防災安全管理服務平台也可結合地震與颱風洪水等災害事件的資訊，在地震及颱風洪水發生前後，可迅速預測或推估出可能受損的橋梁，通知相關單位進行災後特別檢測，並在必要時實施封橋作業，避免斷橋危害民眾安全。

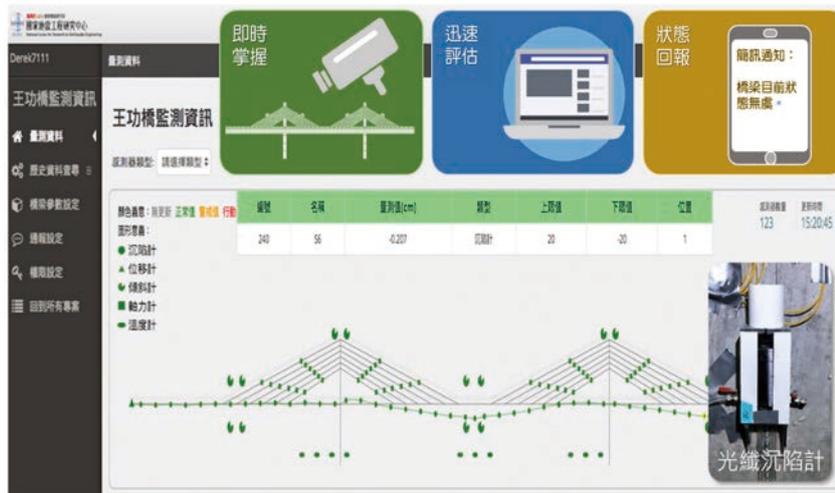


圖 13 橋梁自動監測與健康長期照護系統

結論與展望

本文綜合闡述橋梁監測與結構健康診斷技術之相關內容與應用，無論美國、日本或台灣等世界各國，既有橋梁都會隨著服務年限增加而發生老劣化問題，於橋梁生命週期各階段以維護營運階段為期最長，針對台灣橋梁而言，由於位屬發生地震、風災與水災等多種天然災害發生頻繁的區域，橋梁防災的維護管理議題更為重要。

早在民國九十年行政院公共工程委員會提出「橋梁安全政策白皮書」中，即針對國內橋梁現況分析探討說明，而國內橋梁絕大部分為混凝土構造，雖然混凝土係為耐久性良好之材料，惟國內橋梁所處環境日趨惡化，橋梁管理單位人力不足，維修補強經費相當有限，使得國內橋梁劣化或損害情況已成為國人重視之問題。為使橋梁之使用年限與設計年限相符，減輕因自然環境、外力超載、材料老化劣化等不利因素折損其使用年限，建構能符合國內橋梁需求之監測系統，提供可靠且穩定之監測檢測訊號，瞭解橋梁結構狀況據以採取適當之處理，乃為應當且必要之措施。

近幾年，強化防災管理已成為橋梁管理單位所需面臨的課題之一，對於防災地圖中之重點橋梁而言，對其進行長期健康監測與健康診斷已是刻不容緩的工作，期待政府相關橋梁維護與管理單位，能夠投入更多心力於此一重要課題，如此將有助於延長橋梁使用年限、有效發揮橋梁服務功能、降低橋梁結構損壞或崩塌造成生命財產損失的機率。

參考文獻

1. 陳俊仲，「光纖布拉格光柵於結構感測器之應用與研發」，碩士學位論文，國立台灣大學，臺北，臺灣，2001年6月。
2. 蘇進國，「模糊遺傳算法在橋梁耐震性能設計之應用與耐震維修補強生命週期成本最小化之研究」，博士學位論文，國立台北科技大學，臺北，臺灣，2008年6月。
3. Y.C. Sung and C.K. Su (2011), "Time-dependent seismic fragility curves on optimal retrofitting of neutralised reinforced concrete bridges", *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 7, No. 10, October 2011, pp. 797-805.
4. Y.C. Sung, T. Miyasaka, T.K. Lin, C.Y. Wang, C.Y. Wang (2012), "A Case Study on Bridge Health Monitoring Using Position Sensitive Detector Technology", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 19, No. 2, pp. 295-308.
5. Y.C. Sung, C.Y. Wang (2013), "A Study on Damage Assessment of the Scoured Bridges", *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 36, No. 8, pp. 994-1007.
6. Y.T. Chiu, T.K. Lin, H.H. Hung, Y.C. Sung, K.C. Chang (2014), "Integration of In-Situ Load Experiments and Numerical Modeling in a Long-Term Bridge Monitoring System on a Newly-Constructed Widened Section of Freeway in Taiwan", *Smart Structures and Systems*, Vol. 13, No. 6, pp. 1015-1039.
7. Federal Highway Administration (FHWA) (2013), "Bridge by Year Built, Year Reconstructed and Material Type".
8. Y.C. Sung, T.K. Lin, Y.T. Chiu, K.C. Chang, K.L. Chen, C.C. Chang (2016), "A Bridge Safety Monitoring System for Prestressed Composite Box-Girder Bridges with Corrugated Steel Webs Based on In-Situ Loading Experiments and a Long-Term Monitoring Database", *Engineering Structures*, Vol. 126, pp. 571-585.
9. 張國鎮、宋裕祺、陳俊仲、許家銓、李政寬，「橋梁結構安全與養護管理檢監測技術研發與應用」，中華技術，第111期，第42-53頁，2016年7月。
10. 日本國土交通省，「道路メンテナンス年報」，平成29年（2017）8月。
11. 「臺灣地區橋梁管理系統」，交通部運輸研究所，參考網址：<http://tbms.iot.gov.tw/bms2/>，2017年。
12. 宋裕祺，橋梁監測與結構健康診斷，橋梁全生命週期管理研討會，中國土木水利工程學會，2018年9月12日。



國內大跨徑預力梁橋面臨之問題 與因應對策探討

黃炳勳／台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部 資深協理

吳弘明／台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部 副理

劉 珊／台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部 副理

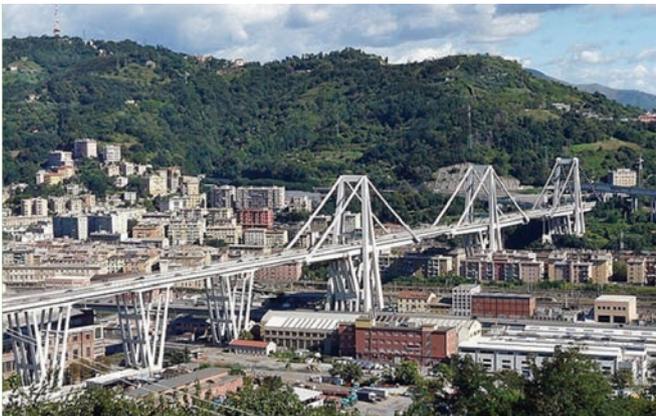
蘇彥彰／台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部 正工程師

前言

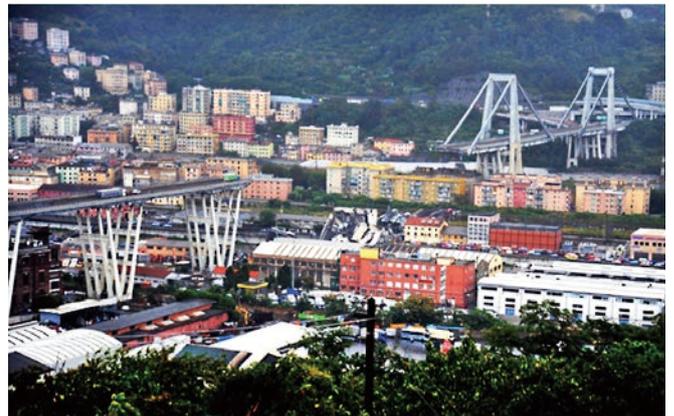
2018年8月14日義大利熱那亞跨越 Polcevera 河及 Sampierdarena 工業區之莫蘭迪橋 (Morandi Bridge) 於當地時間 11:36 一場暴雨中, P9 橋塔與相鄰之橋跨崩塌, 造成車輛墜落及人員死傷之慘劇, 橋梁崩塌前後之照片如圖 1。莫蘭迪橋係於 1967 年完工通車, 發生事故橋跨之結構系統屬於早期預力鋼腱外置之斜拉預力混凝土橋, 橋齡已達 50 年, 初步研判係橋塔處支撐橋面之預力斜索突然斷裂造成橋梁崩塌, 至於引致斜索斷裂之原因, 可能由於橋梁老舊、鋼腱或鋼筋腐蝕, 另外交通量之成長達設計時之四倍, 造成橋體負荷加重及材料之疲勞, 橋上進行維修補強所增加之重型混凝土護欄和

風暴等, 都有可能是導致崩塌之相關因素, 此事件喚起世人對於老舊橋梁結構安全之重視。

多年來負責管養這座橋梁的公司 (the Autostrade Company) 雖持續檢查、監控和維護這座橋梁, 且已在 2018 年 6 月發包, 預計在 5 年內完成橋塔 P9 及 P10 之斜索補強, 但仍未能避免此災害。此事件更使歐洲各國如德國、法國及義大利等相關研究機構呼籲對老舊橋梁有腐蝕及結構劣化者, 應特別予以維修補強或改建, 更促使義大利政府召集 200 多位工程師對該國高速公路老舊橋梁是否需改建進行檢討。另據資料顯示, 在利比亞同屬該結構系統之 Wadi el Kuf 橋 (如圖 2), 於 2017 年 10 月在橋上發現有潛在之斷裂危險後, 考量安全因素已封閉禁止通行。



莫蘭迪橋崩塌前 (Photo: From Wikipedia)



莫蘭迪橋崩塌後 (Photo: Stringer/Reuters)

圖 1 義大利 Morandi Bridge 崩塌前後之照片



圖片來源：www.dobooku.com

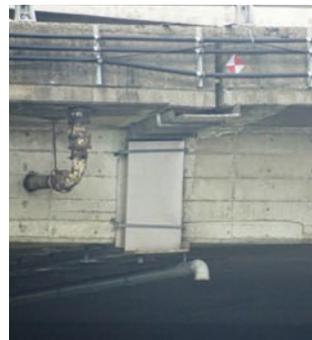
圖 2 利比亞 Wadi el Kuf Bridge

雖然國內並無與莫蘭迪橋相同結構系統之橋梁，對於大跨徑預力混凝土橋，除早期國道 1 號圓山橋（如圖 3）、台北市新生高架松江橋（如圖 4）及民權大橋（如圖 5）等以懸臂施工之中間鉸接處因混凝土乾縮、潛變及預力損失而造成橋面下垂問題外，國內許多已完工通車中之大跨徑預力混凝土橋，亦有因設計、施工或腐蝕問題等因素，而造成橋面下垂問題。雖然目前橋梁管養單位

均已注意並監測或補強，惟問題似乎持續存在，無法完全解決結構安全之隱憂。另對於新穎之脊背橋橋型，其外置斜拉鋼索長期之維護與防蝕問題，亦應特別關注。現今之橋梁工程師除應關注橋梁材料老劣化對橋梁結構完整性的影響外，亦不應忽視環境和極端天氣條件的潛在影響。本文蒐集國內外大跨徑之預力混凝土損傷及補強案例，探討相關因應對策，供國內工程界參考。



中山高圓山橋中間鉸接端下垂現況



鉸接端補強現況



橋墩補強現況

圖 3 台北市中山高圓山橋現況照片



新生高架 — 松江橋中間鉸接端下垂現況



西側鉸接端分離現況



東側鉸接端現況

圖 4 台北市新生高架 — 松江橋現況照片



民權大橋中間鉸接端下垂現況

中間鉸接端分離與補強現況

橋面路面不平整現況

圖 5 台北市民權大橋現況照片

國內大跨徑預力梁橋發展情況

國內大跨徑之預力混凝土橋早期並不多見，1968 年完成第一座以懸臂工法施工、跨徑 120 m 之長虹橋 [1]，其後尚有跨徑達 150 m、懸臂工法施工之國道 1 號圓山橋，跨徑 134 m 預力混凝土斜張構造之光復橋，以及台北市新生高架松江橋、民權大橋與建國高架跨仁愛路、信義路段之預鑄節塊等大跨徑預力混凝土橋。二高建設時期大規模引進歐美先進國家之施工法，如預鑄節塊、懸臂工法等，多跨連續大跨徑預力

混凝土橋之興建在當時達到高峰，國道 3 號關西大橋之懸臂預力橋為台灣第一座中央無鉸結之懸臂預力混凝土橋，其最大跨徑為 120 m。而最近陸續完成之國道 1 號五楊高架、省道台 9 南迴、蘇花改及各高快速公路，主跨徑 90 ~ 150 m 間者比比皆是，如圖 6。另具有景觀意象之預力拱橋（如圖 7）或採外置預力之脊背橋（如圖 8），主跨徑亦達 150 m 以上，目前全台完成者已達 10 餘座，興建中之金門大橋採五塔六跨連續設計，主跨徑更達 200 m。



台 9 線蘇花公路南澳和平段工程



台 9 線南迴公路安朔至草埔段 C1 橋梁標

圖 6 採懸臂工法之連續多跨變斷面預力混凝土橋



台 61 線新豐溪橋（跨徑 100 + 180 + 100 m）



國 5 冬山河橋（跨徑 94 + 187 + 94 m）

圖 7 具景觀意象之預力拱橋



台9線新豐平橋（跨徑 84 + 2@140 + 84 m）



台9線蘇花改南澳北溪橋（跨徑 95 + 160 + 105 m）

圖 8 採外置預力之脊背橋

國內外大跨徑預力梁橋面臨之問題

台灣地區許多橋梁之橋齡已高，橋梁受到嚴苛的環境條件影響，例如洪飈、高溫多雨、車輛超載等因素，使得橋梁可能於使用年限中受到損害或劣化，進而導致橋梁承載力不足、服務功能喪失以及影響使用安全。

一般鋼筋混凝土橋梁劣化之原因，可歸類為自然現象、人為因素及環境因素三方面。自然現象一般係指材料本身的特性與物理作用因素，包括混凝土乾縮、潛變、預力損失、溫度效應等，以及天然災害如地震、颱風、洪水及土石流等因素，導致橋梁的損傷及劣化現象。人為因素係指橋梁結構於設計施工階段，因設計不當、施工不良或使用不當的材料等因素，造成橋梁構件具有先天不良的缺陷。設計不當常使結構承受過高的壓力、張力、剪力、扭力等，導致混凝土開裂或剝落；材料設計時，選擇之水泥類型不當、水泥用量不足、水灰比過高、混凝土強度或鋼筋降伏強度不當、骨材級配不良等情形，均為混凝土結構可能發生劣化因素；或者因用路人不當使用等外在因素如超載、撞擊及火害等，使橋梁構件產生非預期的損害。環境因素係指所處環境周圍之有害物質侵蝕，如空氣中鹽分、氯化物、硫化物及一些侵蝕性水質，皆會經由混凝土孔隙或前述因素造成損傷之部位滲入，引起鋼筋混凝土材料發生一系列的化學與物理變化，造成鋼筋混凝土品質開始劣化，出現表面龜裂、剝落、鋼筋腐蝕、體積膨脹、開裂等損傷現象，嚴重時將使鋼筋混凝土構材強度降低，而導致破壞 [2]。

預力混凝土橋及鋼筋混凝土橋為台灣最普遍的橋梁類型，對材料性質而言，兩者均採用鋼筋混凝土材料，對結構性質而言，兩者的區別則是主結構構材是

否施加預力。因此預力混凝土橋對於預力系統狀況瞭解及掌握是非常重要的，若預力損失或其材料劣化，亦將危及橋梁結構安全。預力系統的劣化成因，可區分成材料與結構二方面。

材料方面，一般混凝土構件可能受混凝土乾縮、潛變或其他環境不良化學反應造成劣化。此外，預力鋼筋鋼材之腐蝕是預力系統與其他鋼筋混凝土橋最大不同的特徵。導致鋼筋腐蝕常見的因素有下列幾點，如端錨無密封墊防止水滲入，混凝土乾縮、潛變生成裂縫，套管品質不良產生滲水等因素，而最常見因素為套管中水泥砂漿的填充不確實或混凝土蜂窩之生成，此因素為最重要，因為鋼筋未受到保護，使得鋼筋與滲入水產生作用，導致鋼材腐蝕狀況生成，進而使鋼筋受損及預力損失。如美國 Lowe's Motor Speedway Pedestrian Bridge 橋鋼筋腐蝕造成斷裂（2000 年，如圖 9），事後發現 11 根鋼筋皆腐蝕。一般檢測方式為利用目視檢查混凝土裂縫狀況以及有無滲水，另有透過超音波方式檢測套管中水泥砂漿及鋼筋腐蝕斷裂狀況，抑或以軟管式攝影機檢測套管內部。

結構方面，如預力混凝土之潛變與乾縮及鋼筋鬆弛或疲乏，將導致鋼筋內預力減少，造成預力梁撓度增加及降低承載能力，對於使用安全性有一定影響。此外，溫度梯度、乾縮及潛變應變力重分配估算過低、鋼筋套管間摩擦力估算過低、套管漂浮等亦會導致預力與預期不同，為導致撓曲裂縫的主因，使得構件劣化。然而目前大部分預力橋梁檢測大多專注外部目視檢測，或針對鋼筋腐蝕問題等進行檢測，而對於預力損失之估算，國內規範均建議依歐美日規範規定之潛變乾縮公式進行預力長期損失的計算，這方面對於國內既有橋梁尤其是長跨徑橋梁之預力現況的掌握未必足夠，如此也可能對於預力橋梁於設計年限 50 年甚至 100 年之結構安全性



圖 9 美國 Lowe's Bridge 鋼腱腐蝕造成斷裂

的不確定。而其他較為深入詳細的預力檢測技術也常為破壞性檢測方法，如應力釋放法（切槽法）、十字弓法（crossbow method），或透過動態方式進行評估等，然如破壞性試驗方法較難於實際橋梁上應用，可執行性具有一定困難度，因此既有橋梁預力現況鑑定之準確度不易掌握且繁複 [3]。

國內外有關長跨徑預力橋因混凝土乾縮及潛變、預力損失、預力鋼腱銹蝕等因素所面臨之問題，可大致分為：A、具有中央鉸接橋梁之異常撓度增加，及 B、懸索系統橋梁結構安全風險之二大類案例，說明如下：

A、具有中央鉸接橋梁之異常撓度增加

國道 1 號圓山橋

1977 年完工迄今已 41 年，主跨長 150 m，為懸臂施工之預力混凝土箱型梁橋，主橋跨中間採鉸接方式設計。由於具有中央鉸接之橋梁於懸臂施工階段與結構體系完成後之靜載重彎矩相近，可以簡易計算達成大跨徑橋梁之設計，因此於計算機不發達的年代，建造了不少此類型之橋梁。本橋通車 15 年後，主橋跨中間鉸接處有明顯下垂現象（如圖 10），最大處達到 63 公分，遠大於原設計估計之 21 公分，研判係因混凝土



圖 10 國道 1 號圓山橋主跨中間鉸接處下垂現象
（陳振川教授簡報圖資）

之乾縮與潛變大於預期，加上鋼腱鬆弛等問題，導致橋梁於梁跨中間鉸接點處撓度變位大於預估值，影響行車舒適度甚至可能影響使用安全。

台北市新生高架松江大橋

1979 年完工迄今已 39 年，主跨亦為懸臂施工預力混凝土箱型梁，跨河段主跨中間鉸接處亦有明顯下垂問題（如圖 11），影響行車舒適度，2008 年至 2009 年間曾進行新生高架橋改善工程。



圖 11 台北市新生高架松江大橋主跨中間鉸接處下垂現象

台北市民權大橋

1982 年完工迄今已 35 年，跨河段主橋跨 95 m，為懸臂施工預力混凝土箱型梁，主跨中間鉸接處有明顯下垂達 30 公分（如圖 12），影響行車舒適度。



圖 12 台北市民權大橋跨河段主跨中間鉸接處下垂現象

國道 3 號烏溪一號河川橋

2003 年完工，為懸臂施工之長跨徑預力混凝土箱型梁橋，完工通車後橋單元 PN17 ~ PN20（跨徑配置 $71.5 + 90 + 90 + 71.5 = 323$ m）等部分橋面陸續產生變形下垂現象，於伸縮縫邊跨箱梁沉陷量達 20 餘公分（如圖 13），並於伸縮縫前後路面凹陷導致伸縮縫處相

對凸出，影響行車舒適。評估主要因為施工幾何控制欠佳（預拱量低估）及混凝土長期乾縮潛變效應所造成，2009 年至 2012 年間，進行箱型梁內增設外置預

力補強、AC 平順加鋪等，並於 2013 年進行北上線橋單元減重剷除，以減少自重造成之下陷，近期監測觀察其變位已逐漸趨於穩定。

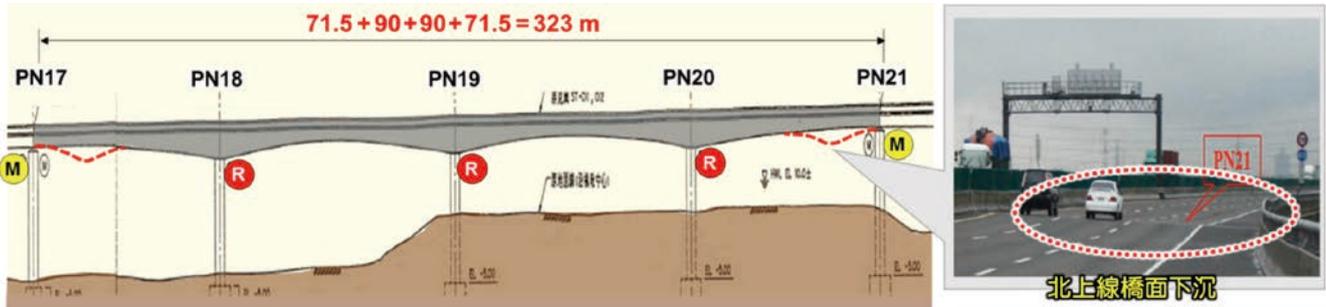


圖 13 國 3 烏溪一號河川橋邊跨橋面下沉

Koror-Babeldaob Bridge

帛琉的 Koror-Babeldaob Bridge 橋為懸臂施工預力混凝土箱型梁橋，主跨長 240.8 m，完工通車 18 年後，

主跨中間鉸接處變位下垂達 1.61 m，其預力鋼腱平均預力損失達 50%，於 1996 年的預力補強工程完工後 3 個月橋主跨崩塌（如圖 14）。

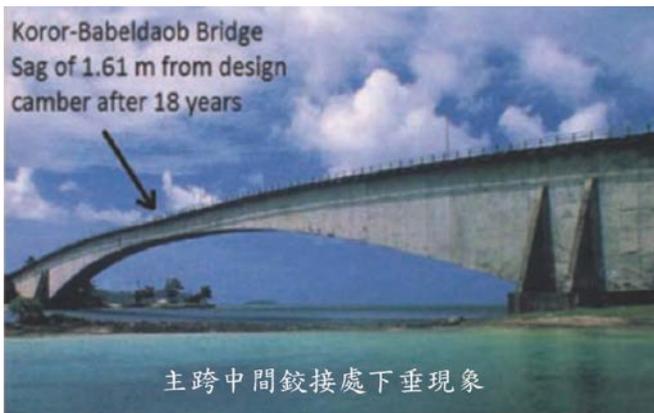


圖 14 帛琉 Koror-Babeldaob Bridge (Bažant et al. 2011)

日本浜名大橋

浜名大橋位於日本靜岡縣，於 1976 年完工，全長 631.8 m，為中央跨設有鉸接構造之五跨連續預力箱型梁橋，中央最大跨徑 240 m，為日本此類型橋梁規模最

大者。於完工後 35 年，中央鉸接位置相對於閉合時之位置，設計下沉量為 60 公分，閉合後約 12 年即超過設計下沉量，於竣工後 35 年之下沉量為 80 公分，下沉發展較設計值多了 20 公分左右。

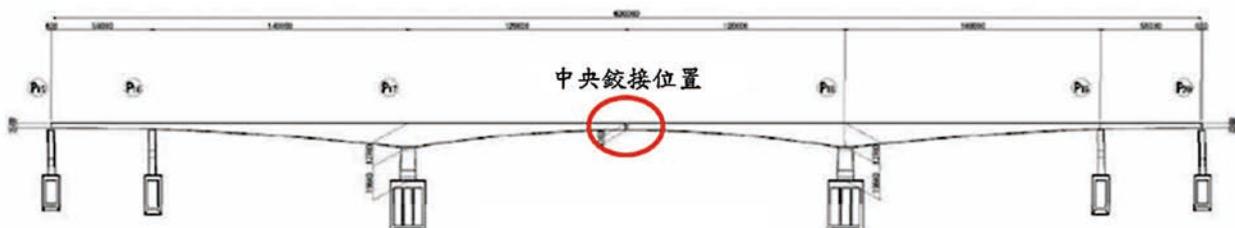


圖 15 日本浜名大橋立面圖

B、懸索系統橋梁結構安全風險

日本豐里大橋

本橋位於日本大阪府，1970 年完工，為三跨徑連續鋼板箱梁斜張橋，單面雙層之懸索構造，本橋雖非預力梁橋，但可以本案例來說明懸索系統贅餘度與橋梁結構系統安全之關連性。本橋於 2013 年詳細調查

中確認 C6 與 C8 懸索有銹蝕現象 [4]。由於本橋為單面懸索構造，單側懸索僅有二根，懸索根數少，靜不定度低，如有一根懸索銹蝕而斷面不足甚或斷裂，將因橋梁系統改變與力量轉移而造成其餘懸索承受過大載重而二次破壞，因此懸索銹蝕狀況之檢查應為橋檢之重點項目。

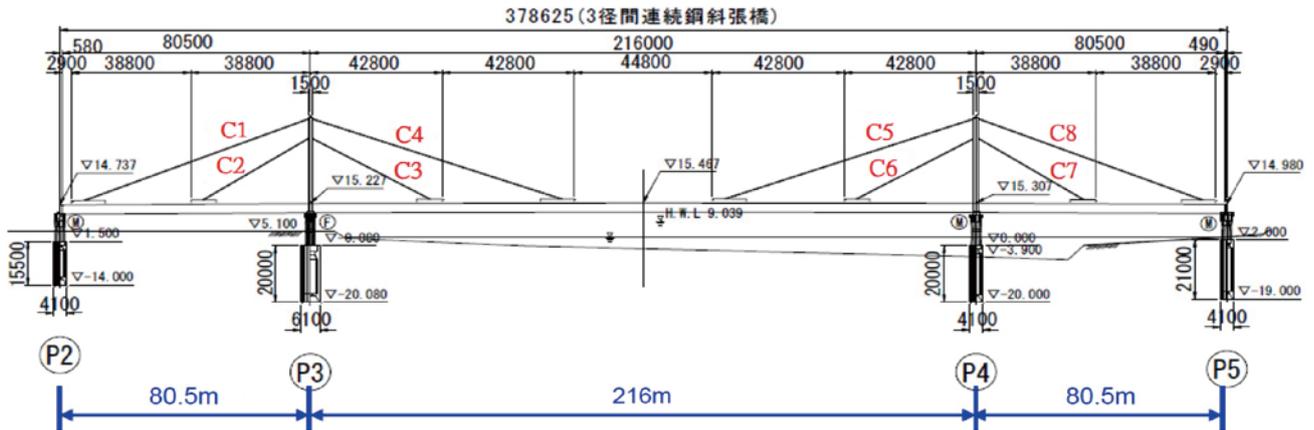


圖 16 日本豐里大橋立面圖

日本雪沢大橋

雪沢大橋位於日本秋田縣大館市雪沢地區，為最大跨徑 71 m、全長 177.1 m 之三跨連續脊背橋（單座脊背橋 + 側跨之 PC 箱型梁橋）；雪沢大橋之脊背橋為雙平行索面構造，共有 8 根 @2 面 = 16 根懸索，於

2001 年完工。2011 年發現雪沢大橋上游側索面由下起算第五根懸索斷裂，為了確保行車安全，於當日立即封閉交通。其後進行了斷裂原因調查、殘餘懸索健全性調查與懸索更換，於 2012 年 9 月恢復通車 [5]。

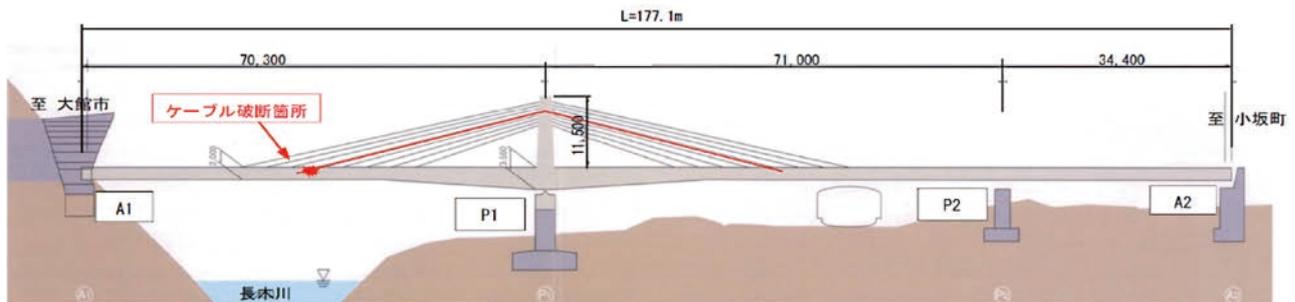


圖 17 日本雪沢大橋立面圖

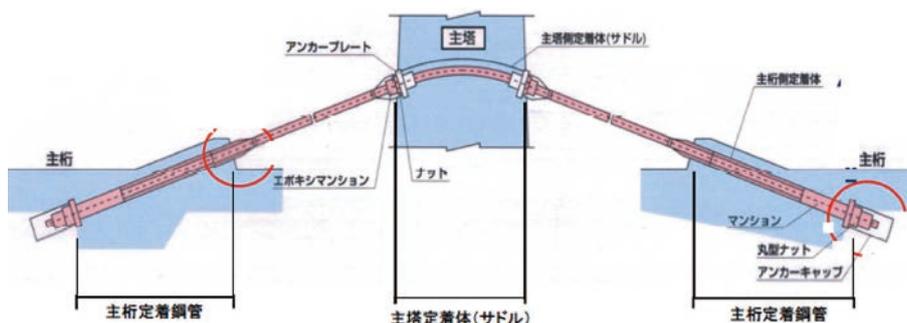


圖 18 雪沢大橋懸索錨碇構造示意圖

經過現場調查與分解調查後，發現未被覆之防蝕段鋼絞線嚴重銹蝕、錨碇鋼管頂部滯水、由斷裂鋼絞線可以檢測出含有氯離子成分。由電子顯微鏡觀察鋼絞線破裂斷面，分別有 2 種應力銹蝕破裂斷面及拉伸破裂斷面，詳見圖 19。至於進入錨碇鋼管的水，透過何種機制與 PC 鋼絞線接觸，經過詳細調查後，仍然無法解明。

破面の種類	凡例	形状	調査
破面の種類	○		60
	●		68
	△		5
合計			133

圖 19 雪沢大橋鋼絞線破裂斷面種類

因為水分有進入錨碇鋼管內之可能性，故有必要檢討殘餘懸索之健全性。雪沢大橋對於殘餘懸索健全性調查，直接採用抽取懸索、移除防蝕段鋼絞線外層被覆與內部灌注固化之防蝕材後，以直接目視方式檢查 PC 鋼絞線之銹蝕程度；觀察結果發現 PC 鋼絞線表面有點狀銹斑，且判斷銹斑為較近時期形成，無法排除為移除固化防蝕材時所採用水刀工法之水分的影響。由上述詳細檢查可發現，內部灌注之防蝕材可提供防蝕保護，相對地在維護管理上對於 PC 線材銹蝕狀況之檢查亦會造成妨礙。

維修補強對策案例

綜觀國內外大跨徑預力橋所面臨之問題已如前述，至於其因應對策，國內似鮮有案例。為利國內大跨徑預力橋梁所面臨類似問題及未來補修補強之參考，茲蒐集國外相關案例，綜整初步探討對策如下：

增設構件工法

此工法主要是針對跨徑中間具有鉸接之大跨徑橋梁，在既有橋梁外，另增建具補強功能之結構體，提供額外支撐力，以改善原橋梁超乎預期之橋面下陷，防止橋梁功能繼續低下及橋體構件之劣化。其主要方式如下：

1. 增設橋墩

直接在鉸接處橋下新建橋墩，以防止橋面繼續下垂，恢復原橋面之交通服務功能，可分散並緩解部分橋梁結構之應力。但此法往往必須於河道或橋跨間施築，可行性受限於橋址施工環境特性，橋梁景觀性亦受改變，其結構示意如圖 20。

2. 增設輔助拱結構

在鉸接處橋跨下，相鄰兩橋墩間新建拱狀結構，以支撐下垂之橋面，恢復原橋面之交通服務功能，並分散及緩解部分橋梁結構之應力。由於此法必須於橋跨下新建橋拱，若跨度太大或橋下施工環境不佳，則其可行性將受限。其結構示意如圖 21，國外類似案例，如日本的矢井原橋 [6]。

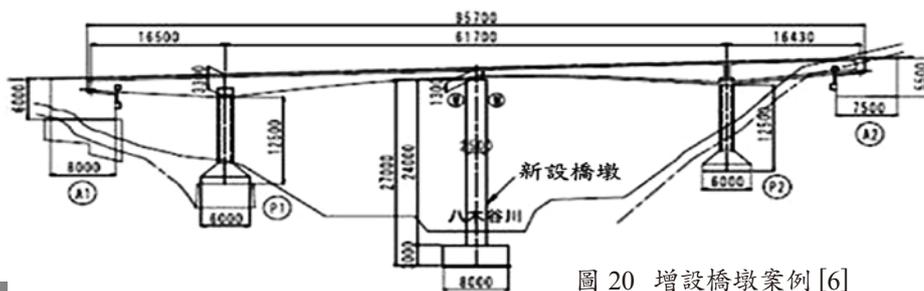


圖 20 增設橋墩案例 [6]



日本矢井原橋

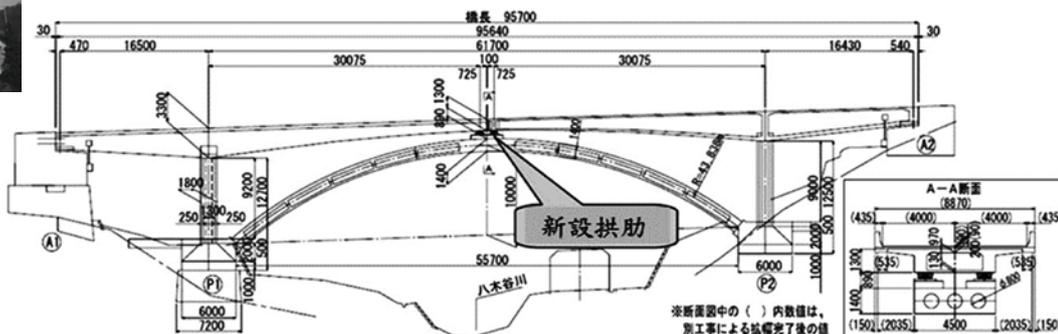


圖 21 增設輔助拱結構案例 (日本矢井原橋) [6]

3. 增設橋塔與斜張系統

此工法主要是在鉸接橋跨兩相鄰橋墩處，新建橋塔結構，並輔以斜張鋼索系統，以支撐下垂之橋面，恢復原橋交通功能，並分散及緩解部分橋梁結構之應力。由於此法主要係於橋墩側及橋面上施工，施工性較佳，惟其結構性變異較大，鋼索施拉造成橋梁結構應力的重新分配尤應深入檢核，其結構示意如圖 22，國外類似案例，如挪威的 Puttesund 橋 [7]。



圖 22 增設橋塔與斜張系統案例 (挪威 Puttesund 橋) [7]

外置預力工法

此工法主要是於橋跨中以外置預力增加抗彎矩能力，以達到既有橋梁之補強功能，進而防止橋梁功能繼續低下及橋體構件之劣化。其主要方式如下：

1. 箱梁內增設外置預力

於 PC 箱型梁內增設必要之隔梁、轉向塊、錨碇塊等構造，並配置適當預力鋼腱及施拉，及考量必要的連續化處施工，以達改善及補強效果。由於此工法施築主要都在箱梁內進行，故完成後橋梁之外觀幾乎不受影響，其結構示意如圖 23，國外類似案例，如日本的浜名大橋 [8]。

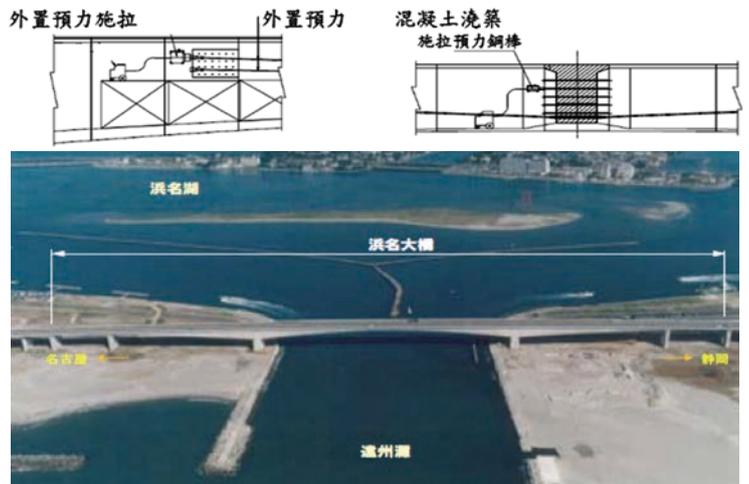


圖 23 增設外置預力補強工法案例 (日本浜名大橋) [8]

2. 複合型外置預力

於 PC 箱型梁內外增設必要之隔梁、轉向塊、錨碇塊等構造，並配合鋼構架及適當預力鋼腱施拉，以達到對既有橋梁提供必要之補強效果。由於此工法鋼構架係設置於箱梁外，故完成後橋梁之橋下淨高及外觀等些許受影響，其結構示意如圖 24，國外類似案例，如日本的喜連瓜破高架橋 [9]。

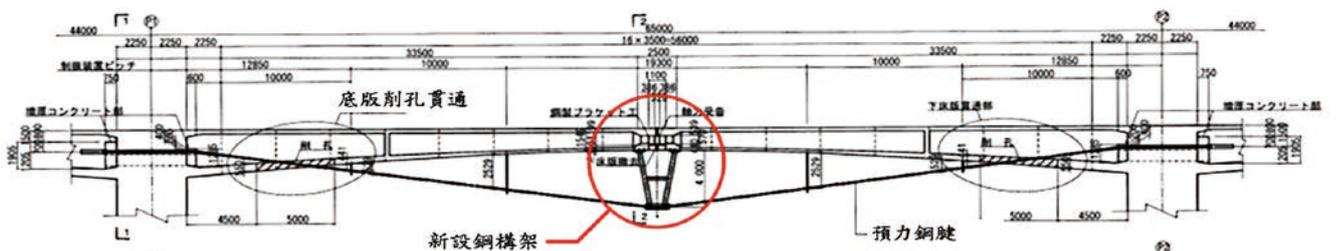


圖 24 增設複合型外置預力補強工法案例 (日本喜連瓜破高架橋) [9]

變更結構系統工法

此工法係將既有橋梁鉸接構造進行實質結構性改變，改造為連續性的橋梁結構，以達到橋梁結構的連續化及結構靜不定度的增加，對既有橋梁提供良好的

補強效果。由於此工法必須對原橋梁結構體進行必要之切梁，因此對於既有橋梁之鋼腱切斷與接續必須予以審慎評估，以免危及施工期間橋梁之安全性，其施工示意如圖 25，國外類似案例，如日本的鈴田橋 [10]。

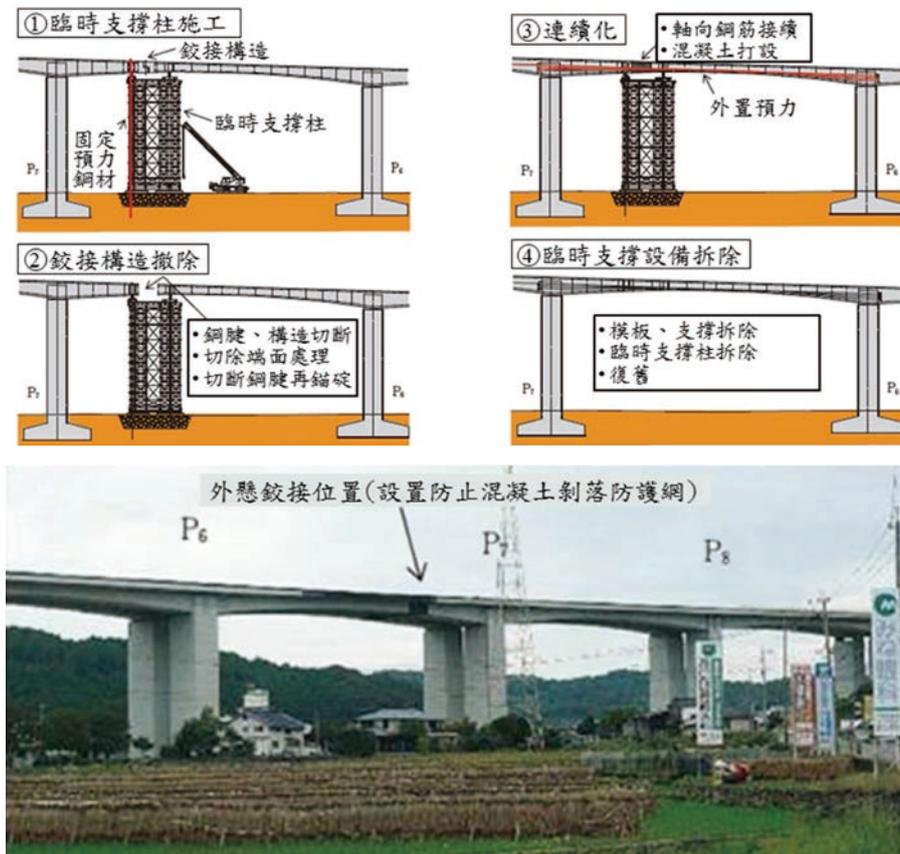


圖 25 構造改變工法 (日本鈴田橋)[10]

提升懸索檢測維修對策

對於懸索健全性之檢測，如採用強制振動法之固有週期測定或全磁束法之非破壞檢測銹蝕方式，若斷面缺損沒有到相當程度，於測定上較為困難，無法早期發現及確認鋼腱是否銹蝕；然若如同雪沢大橋對於殘餘懸索健全性調查，如採用直接目視方式檢查 PC 鋼絞線之銹蝕程度，則須移除鋼絞線外層被覆與內部灌注固化之防蝕材後方能檢測，對於健全橋梁之定期檢測作業不一定適用。因此於設計階段，宜對於懸索系統之細部構造多加探討，研擬容易檢測懸索是否銹蝕之結構細部。

例如雪沢大橋根據懸索斷裂之詳細調查結果，於懸索復舊時採取主要對策為：(1) 錨碇鋼管頂部防水對策，採用三重防水構造以完全阻絕水分經由錨碇鋼管

頂部進入錨碇鋼管內部；(2) 錨碇鋼管錨頭防銹處理，採用鋅鋁溶射防銹處理，以取代原有之充填防蝕材之防銹方式，避免對於鋼腱養護檢查時造成妨礙；(3) 錨碇鋼管內部排水對策，為避免錨碇鋼管內滯水，造成鋼腱與水分接觸，於錨頭墊片設置排水開槽孔。

同時在未來之維護管理方面，於現有維護管理手冊中追加雪沢大橋特殊構造之檢查項目，於每年 1 次的檢查時，以接近目視方式檢查錨碇鋼管頂部之防水構造與箱梁內錨頭之排水孔；同時於 5 年 1 次之定期檢查時，以高空作業車接近目視方式檢查主塔與懸索，並以強制振動法量測懸索之固有周期，並與懸索更換完成時之固有周期初始值進行比較，以掌握確認懸索之經年變化。

後續精進作為

設計與施工面之檢討

設計面

由於混凝土材料係由水泥漿體及粗細骨材構成，在混凝土硬化之過程會產生乾燥收縮變形，且於承受外力時會產生潛變，此種變形隨時間逐漸發生，且在長跨預力混凝土橋特別明顯。橋梁變位逐漸增加除影響行車舒適性外，亦可能造成額外預力損失及內應力重新分配，影響橋梁壽命甚至減低結構安全性。Z. P. Bazant [11] 收集相當多長跨預力橋梁之長期變形資料，證實橋梁在使用數十年後仍持續產生變形，圖 26 為依據不同規範或預測模型計算 Koror-Babeldaob 橋之變位發展，可明顯看出一般規範預估之變位值遠小於實際之變位量 [12]。另依 Z. P. Bazant 之研究 [13]，潛變之發展不會朝一終值趨近而會持續發展，如圖 27 所示。

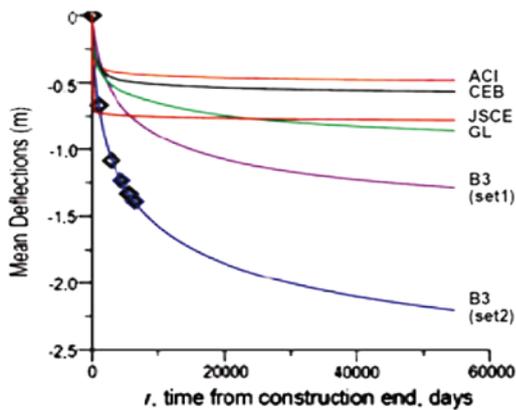


圖 26 不同規範或預測模型計算 Koror-Babeldaob 橋之變位發展

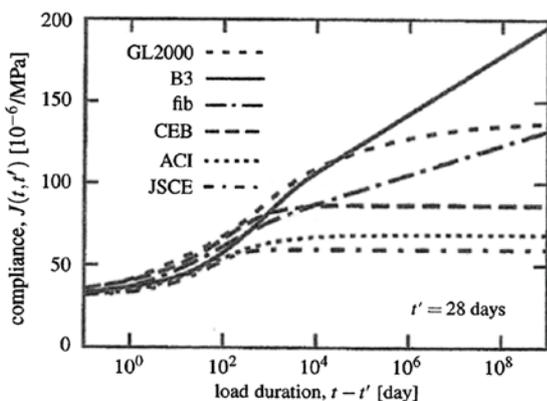


圖 27 不同規範或預測模型計算潛變順應模數 (Creep compliance)

國內橋梁設計規範僅規定設計時應考量混凝土潛變及收縮之影響，但對於如何計算潛變及收縮之變化並無相關公式，故設計時僅能參照國外規範如美國之 ACI 規範或歐洲之 CEB-FIP 規範。而國內之混凝土材料與國外差異極大，台灣粗骨材之彈性模數偏低 [14]，為達到混凝土之需求強度，使用漿體量偏高，故收縮及潛變量較大，引用國外規範無法確實反映國內混凝土材料之性質。另外國內混凝土之水泥採用卜作嵐材料替代之比例高，與國外多採一般混凝土不同，規範是否能夠應用值得探討。

為準確預估長跨預力橋梁之變形及對預力損失之影響，國內應就混凝土潛變及收縮性質進行研究，找出在地合理的預測模式，納入結構分析及施工預拱值計算，才能掌握橋梁的長期行為，避免影響使用性甚至減低橋梁整體承載能力。

施工面

大跨徑（主跨徑 > 60 m）變斷面預力混凝土橋、PC 拱橋及脊背橋，一般都會採用節塊（場鑄或預鑄）利用工作車來逐節施作，故在施工之品質控制是非常重要的，尤其是線形精度與拉預力量之控制常是影響橋梁完工品質之關鍵。在國內施工常見的問題是對拱度之控制精度不良，造成閉合節塊之高差與縱面高程無法符合設計高程之問題，此問題除了造成結構體外觀線形不佳外（如圖 28），導致施工或養護單位為讓節塊順利閉合和路面高程平順，而常以增加混凝土斷面厚度或加鋪 AC 厚度來達到設計高程要求或路面之平整度，但以此方式將會增加橋體結構之承載負荷，如未檢核原設計之容許承載能力將導致有結構損傷之疑慮。原橋面因施工不良增加額外載重再加上預力混凝土之乾縮潛變等因素，將導致橋面下垂變形更加嚴重，橋梁養護單位又常因路面下垂不平整而再加鋪 AC 以求用路人行車之舒適性，如此惡性循環長時間以後，橋體因負荷加重再加上混凝土之乾縮潛變及預力鋼腱鬆弛所造成之預力損失，而使橋體受損產生裂縫（如圖 29），進而影響橋體結構安全及使用年限。

以懸臂工法施工最影響其施工品質者為 (1) 施工時節塊線形之控制 (2) 施拉預力之控制，其主要之控制因素概述如下：



節塊施工線形控制不佳

曲線線形控制不佳，外型呈現扭曲

圖 28 節塊懸臂施工線形控制不佳案例



大梁節塊腹板剪力及底板撓曲裂縫

節塊開裂

圖 29 橋體之結構裂縫

(1) 施工時節塊線形之控制：

包括水平（平面）線形與縱面（拱度）線形之精度控制，線形控制主要在於確保橋體完成後能符合設計要求，同時結構體內應力能維持在容許範圍內，線形之變化與設計基本參數、施工條件與施工機具等息息相關。

水平線形之控制必須考慮相鄰兩節塊間相對位移，包括有施加預力之結構彈性變形、混凝土之乾縮變形、結構體因載重造成之潛變變形、溫度變化引起之變形等，一般場鑄節塊於每節塊施作時須以分析之預測量來調整工作車及模板之線形，採預鑄節塊施作者則須考量採短線或長線鑄造之不同控制要點。

拱度控制由於橋梁在施工過程中，橋體會因自重、預力、乾縮潛變、溫度、施工機具及施工方法等因素產生撓曲變形，如此將使橋體施工線形與設計線形產生一偏差量，此一垂直變化量即為拱度，其值之大小亦與材

料勁度有關，為使橋梁在完工後結構線形能符合設計原意，因此節塊在混凝土澆置作業進行前，模板高程需額外預加一撓曲變形量，此值即為預拱值。由於拱度變化受自重、預力、乾縮潛變、施工誤差與各項外載重所影響，為確保節塊拱度誤差量能維持在管理範圍內，拱度控制作業規畫須包含前置階段結構分析、監測點配置、施工期間高程資料量測、判讀與回饋等，而結構分析模式應依工法之特性，建立分析流程以提供拱度比對之相關數據，監測點位則參考施工階段預測橋體節塊之變化曲線進行配置。橫向高程變化調整（超高）變化調整可依鑄造曲線所需之高程變化平均分配至各節塊，並藉由澆置完成之節塊高程座標而使新接合鑄造節塊相對高程改變，達成節塊變斜率之橫向傾斜度控制作業。進行節塊拱度控制作業時，基於節塊垂直線形係與橫向傾斜度相互影響，因此需綜合評量橫向傾斜量與垂直線形；而垂直線形計算值必須考慮跨徑設計高程及施工階段之預

拱值，故進行檢測控制作業時須包含上述各項計算值，並據以求得工作車上之模板或預鑄床軌道上各控制點位之對應高程。如有誤差時可調整工作車上之模板或用填隙墊片調整預鑄場上軌道高程。為求有效控制施工階段節塊位移變化，可利用幾何線形施工監控程式 GCP (Geometry Control Program) [15]，利用位移法配合結構系統勁度矩陣修正模式，綜合考量節塊之施工程序及混凝土結構隨時間變化特性因素等影響，透過程式模擬解算，即時修正各節塊接合施工之幾何誤差。

(2) 施拉預力之控制：

懸臂工法之預力施拉一般採平衡對稱施拉，每節塊施拉完預力，皆應量測各節塊之控制點高程並檢核與預測值比較其差異，再將差異值回饋至後續節塊之預拱高程作調整線形符合設計需求。現場施拉之預力量大小之控制，當以設計圖所需之有效預力為準，千斤頂應經過校對檢驗，施拉時以千斤頂之油壓表為準再輔以鋼腱伸長量作檢核，一般伸長量在 $\pm 5\%$ 左右，若油壓表已達需求值但伸長量異常，不應繼續超拉，而應暫停施拉並檢查套管內是否有漏漿或因穿線時鋼腱扭絞等而使伸長量發生問題。

橋梁之結構安全監測

近幾年來量測技術和電腦處理能力提升，橋梁結構在施工及完工階段可利用各種儀器量測結構位移沉陷、震動或鋼纜索力，營運中之橋梁也可藉由量測結構物的振動特性，更精確地掌握橋梁實際現況。

對於已有損傷之橋梁結構必須作即時有效之補強與監測，以莫蘭迪橋為例，雖然在事件發生之前作了檢測與試驗，許多專家學者亦提出警訊，負責維護管養之公司亦發包進行維修補強，但卻在 P9 及 P10 還未來得及補強前，即發生不預期之突然倒塌事件，造成重大用路人之死傷，所以對於已有損傷之橋梁結構且仍繼續營運者，雖已有在進行監測或維修補強作業，亦不可掉以輕心，應隨時監測其橋梁之狀況，應利用可即時監測系統 (realtime) 配合 WIFI 無線傳輸，隨時監視橋梁健康狀態，如有發現異常警訊時，必要時應立即封閉交通作進一步之特殊檢測與診斷評估橋梁之安全性，以確保用路人之行車安全，避免莫蘭迪橋事件之慘劇再次發生。

橋梁長期安全監測 西濱-房裡大安脊背橋

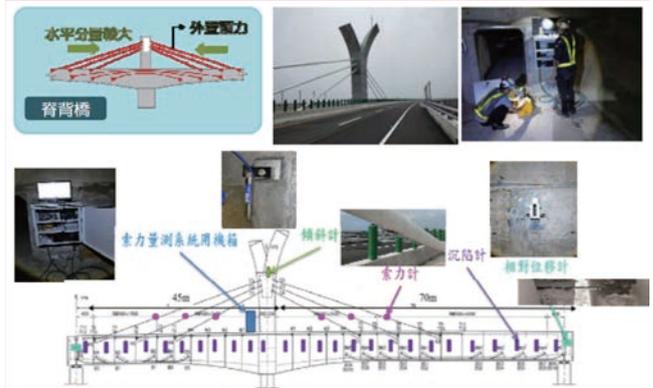


圖 30 橋梁監測案例 (宋裕祺教授簡報圖資)

結論與展望

莫蘭迪橋倒塌事件成因複雜，諸如斜索腐蝕、交通量負載過重、材料疲勞、不當維護補強等皆為探討倒塌因素之方向。由本事件反思國內大跨徑預力梁橋所面臨之問題與如何因應，可就設計與維管層面進行發想與檢討。

在設計層面上，莫蘭迪橋設計採用了當時最先進之技術，以最小量之下部結構支撐量體完成長跨徑上部結構之橋梁架設。然而以今日技術觀之，仍有材料、潛變、防蝕、結構系統贅餘度、超過載重等於橋梁設計規劃階段須檢討改善之面向。鑑古知今，對於今日吾人建設大跨徑預力橋梁時，在面對未來環境變遷與極端氣候之挑戰下，諸如使用材料與設計規範之差異性、預力混凝土潛變設計值與實際潛變發展之差異、嚴苛環境條件下之防蝕設計、超過設計規範載重之極端事件等等面向，仍須要戮力進行檢討改善與精進；同時，在今日防災意識提升之共識下，面對諸如超出設計地震力等極端事件風險之提高，結構系統之贅餘度將直接關係到道路橋梁系統之災害承受能力，設計所採用橋梁系統之強健性 (robustness) 與韌性 (resilience)，當為未來研究方向之重點。

在維管層面上，由莫蘭迪橋倒塌事件與日本雪沢大橋懸索斷裂案例可了解，即便對於懸索為結構系統重要構件之體認已無庸置疑，但仍因諸如鋼腱銹蝕情況檢測不易等因素下，無法早期發現而終至斷裂事件發生，甚至進而影響橋梁結構系統之安全，因此結構

細部設計與檢測技術之相互配合，當為未來努力研究之方向。同時由案例中現場維管人員對於橋梁系統之特性了解不夠，採用不當加載等維修工法造成潛變下沉加劇之情況，因此對於特殊橋梁檢測方式與規範，應為未來探討與落實之方向。

參考文獻

1. 賈駿祥，「台灣地區橋梁工程之發展」，臺灣公路工程，第三十卷第十二期，民國九十三年六月。
2. 財團法人中華顧問工程司，「混凝土橋梁常見劣化樣態探討」，財團法人中華顧問工程司編著，中華民國一〇六年二月。
3. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「受壓及預力構件軸力檢測技術研發與應用」，台灣世曦公司研發計畫成果報告書，中華民國一〇六年十二月。
4. 西道路研究會道路橋調查研究委員會，「斜張橋ケーブルの耐久性評価と今後の維持管理」，2018.01。
5. 神田隆仁、船木孝仁、高橋昌平、高野優、越前谷宏昭，「雪沢大橋ケーブル破断への対応と今後の維持管理について」，国土交通省・平成26年度東北地方整備局管内業務発表會。
6. 西口喜隆、小西純哉、高龍，「老朽化した有ヒンジラーメン橋補強工事の計画と施工（国道9號矢井原橋）」，建設の施工企画，2008.10。
7. Gordon Clark, "The development of prestressed concrete bridges", CBDG Conference 1st July 2010.
8. 加藤達也、辻英雄，「～平成の大改修～「浜名大橋」橋梁補強について」，平成23年度国土交通省国土技術研究會，2011.10。
9. プレストレスト・コンクリート建設業協 中国支部，「PC橋の補修・補強技術」，平成26年1月10日。
10. 尾堂良一、駒谷大三、熊谷裕司、安藤直文，「鈴田橋のゲルバーヒンジ部補修における設計・施工」，コンクリート工学，2013.08，Vol. 51 No. 8。
11. Z. P. Bazant, M. H. Hubler & Qiang Yu, "Excessive Creep Deflections: An Awakening, Data from numerous long-span prestressed segmental box girders show alarming trend", Concrete International, Aug. 2011.
12. Z. P. Bazant, Qiang Yu, Guang-Hua Li, G.J. Klein & V. Kristek, "Excessive Deflections of Record-Span Prestressed Box Girder: Lessons learned from the collapse of the Koror-Babeldaob Bridge in Palau", ACI Concrete International, Vol. 32, No. 6, Jun. 2010.
13. Z. P. Bazant & M. Jirasek, "Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures", 2018.
14. 陸景文、詹穎雯、陳振川，「台灣地區混凝土抗壓強度與彈性模數特性研究」，中國土木工程學刊第十四卷第三期，中華民國九十一年九月。
15. 莊輝雄、蔡同宏，「預鑄節塊懸臂工法之施工控制作業」，中華技術雜誌，中華民國九十一年一月，第53期。

夢想和幸福
零距離的接軌

技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持。
夢想的城堡、幸福的家園，就座落在不遠的前方。
台灣世曦和您一起攜手而行。用築夢的心、關懷的情，
戮力建設出每一項希望的工程。

高雄輕軌

Creativity · Excellence · Conservation · Integrity



Morandi 橋崩塌帶來的省思與建議

王炤烈／社團法人中國土木水利工程學會 理事長、台灣世曦工程顧問股份有限公司 總經理

宋裕祺／國立臺北科技大學土木系 教授兼工程學院院長、國家地震工程研究中心 組長

林曜滄／台灣世曦工程顧問股份有限公司 總工程師

彭康瑜／林同棧工程顧問股份有限公司 副總經理兼總工程師

黃炳勳／台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部 資深協理

由本橋瞬間崩塌事件，舉世震驚，造成當地用路人重大傷亡，對於國家有形與無形的損傷，既深且遠，國內橋梁工程界不能不深自反省。台灣的橋梁總數約近二萬八千座，老、中、青各個年代、各種橋型都有；加上國內位處環太平洋地震帶，地震頻繁；又屬亞熱帶地區，氣候高溫多濕，腐蝕環境嚴苛；更面臨氣候變遷的影響，颱風、暴雨侵襲日趨嚴重。我們更應深切檢討，重視橋梁全生命週期管理，以免重蹈覆轍。茲提出橋梁全生命週期各階段應注意的要點，供各界參考與努力方向。

規劃設計階段

- 應採用具有贅餘度高的結構系統，莫蘭迪大橋在結構系統上有個先天弱點，其懸吊系統採用了單根預力斜材，且全橋結構系統的贅餘度 (Redundancy) 亦低，若有稍許損害即造成全橋倒塌。現代橋梁設計應要注意結構系統的好壞，對斜張橋設計亦要採用多股式的鋼纜，以增加整體橋梁結構的贅餘度，避免結構產生脆性破壞。
- 注意耐久性的規劃設計，橋梁腐蝕因子主要為水及鹽分（氯鹽、硫酸鹽等），若橋梁工址位於近海，屬嚴重腐蝕環境。以現今技術，位於腐蝕環境的橋梁，其混凝土可使用 C3A 含量適度之 TYPE II 水泥添加卜作嵐材料（飛灰、爐石上限 45%）、或 IS (MS) 高爐石中度抗硫水泥、IP (MS) 卜作嵐中度抗硫水泥；混凝土應採用較高強度，例如上構採 420 kgf/cm²、下構 350 kgf/cm²，以增加其水密性；鋼纜採同步射出之聚乙烯 (HDPE) 內套管並灌注油脂之鍍鋅單根鋼絞線 (Co-extruded mono-strand)；鋼纜外套管為抗紫外線 (UV) 處理之高密度聚乙烯 (HDPE) 之多重防蝕系統；鋼筋可採鍍鋅鋼筋或 Epoxy 鋼筋及增加保護層厚度等方式，來加強材料與結構之耐久性。
- 鄰近海域受氯鹽侵蝕的混凝土橋梁，在規劃設計階段，對其耐久性設計、檢測與維護的完整體系，應該先要建立整體管養策略，全面加強結構的可維護性，盡量做到「可達、可檢、可修、可換」的目標。
- 橋梁結構系統的設計，除注意結構贅餘度 (Redundancy) 與穩固性 (Robustness) 外，應重視預留日後橋梁檢測與維修的通道。

施工階段

- 莫蘭迪橋塔單元之場鑄節塊懸臂施工，當推進至斜張鋼纜架設完成後，施工中之臨時懸臂鋼腱即予取消，而混凝土箱型梁內部的預力鋼腱，僅局部配置在常時載重的負彎矩區域，導致當預力斜材因損傷變形時，大幅改變彎矩變化後，極易造成混凝土箱型梁斷裂破壞，故工法之選擇及對長期結構之使用安全，應更妥適之考量。
- 工程施工階段，對於材料之品質管控，要落實品質管理制度，確實嚴格執行，對於材料之來源，也應做好查證及檢驗，並留下完整紀錄。對於混凝土結構保護層尺寸、施工縫處理、鋼構材料之防蝕施工，都應遵守作業規定，以確保結構之耐久性能。

營運階段

- 由莫蘭迪橋的崩塌事件，可知橋梁檢測與維護的重要性，目前國內有多座大跨度預力混凝土橋梁，因受長期混凝土乾縮潛變、預力鬆弛等影響，有過大下垂變形問題，以及嚴重腐蝕，或是沖刷、基礎裸露問題...等。除了建立長期的安全監測系統外，更重要的是「起而行」，推動具體的維修補強工程，或是因應可能需要之橋梁改建，及早研擬合宜的交通動線規劃，以利進行橋梁更新的推動，確保用路人的方便與安全。
- 橋梁監測執行：國內橋梁所處環境日趨惡化，復以橋梁管理單位人力不足，維修補強經費有限，國內橋梁劣化或損害以及其安全狀態已成為國人重視之問題。對於重點橋梁而言，對其進行長期健康監測與健康診斷實屬重要，期待相關橋梁維護管理單位，能夠投入更多心力於橋梁監測，以延長橋梁使用年限、發揮橋梁服務功能、降低橋梁結構損壞與避免橋梁崩塌造成生命財產損失的機率。
- 預力混凝土橋梁的鋼腱或鋼纜腐蝕損傷，易造成有效預力損失，甚至突然斷裂，一般傳統的檢測方法，很難確實評估其損傷程度，所以，發展更可靠的非破壞預力檢測技術，更顯重要與急迫。
- 對於檢測項目及內容應妥善規劃，若須委外辦理也應注意編列合理費用，要與工作內容相對應，不要因費用不足因素，產生劣幣驅逐良幣情況。
- 不易接近或隱藏於水中或裝飾板內的橋梁結構構件，如山谷中高橋墩、箱梁內部、橋梁支承、水下基礎、具裝飾板的橋梁，建議應在檢測規範中要求每適當年限內，須作一次檢測，確實深入的檢查到橋梁的每一部位。至於適當年限，可由橋管單位依其實務及所處環境綜合考量訂定檢測頻率。
- 對於有疑慮之橋梁，應盡速進行詳細檢測與安全評估，確實掌握每座橋之使用及安全現況。
- 開發橋梁檢測技術，運用無人機 (UAV)、影像辨識、人工智慧 (AI) 技術，讓科技發展，導入人力密集、外業作業環境嚴苛的橋檢工作；並落實定期橋梁巡查、檢測作業，對橋梁每一結構構件，須詳實記錄損傷及劣化情況，並追蹤或提出改善措施。
- 對檢測人員資格與訓練規定應進行檢討，檢測人員建議登錄系統並管理考核，就猶如人的健檢，會選擇優質可靠的單位及有經驗的醫師。
- 評估後須要維修改善或補強之橋梁，應編列預算執行，且在未完成維修改善或補強前，也應有緊急監測與預警等防災措施。
- 補強採用之工法、補強後之各項承載能力的提升，也應進行驗證，確認其補強效益與目標，注意別提升了 A 項能力、卻影響 B 項能力。
- 汲取國外先進技術，多與先進國家進行技術交流，並持續不斷精進與提升補強技術與開發。
- 各橋管機關因應橋梁日益老舊，橋管人力普遍不足，建議先進行橋梁快篩分析 (Quick Screen)，找出危險及老舊橋梁，進行分級管理，建立短、中、長期減災規劃及預算匡列。
- 建議橋管單位加速開放橋梁基本資料成開放資料 (open data)，可參考如美國國家橋梁資料庫 National Bridge Inventory (NBI) 公佈 2017 年美國橋梁有 615,002 座，每座橋有 116 項基礎資料為 open data，讓更多關心橋梁之民間企業、學研單位從事相關橋梁防減災研發與開發工作，為提升台灣韌性、永續發展的環境奉獻心力。

107.9.12 橋梁全生命週期管理研討會

精彩內容分享，歡迎瀏覽



王焯烈理事長



彭康瑜總工程師



林炳松副總工程師



陳振川特聘教授



宋裕祺教授



陳國隆總工程師



袁寧經理



高銘堂董事長



橋梁全生命週期管理研討會

~ Morandi 橋崩塌帶來的省思 ~

時間：107.9.12 日(三) 下午 13:20-17:20 地點：【台大應力所國際會議廳】

時間	議程	演講人	主持人
13:00-13:20		報到	
13:20-13:30	引言及開幕致詞 Morandi 橋崩塌帶來的省思	 王焯烈理事長 中國土木水利工程學會	
13:30-14:00	義大利莫蘭迪橋 2018年8月14日 崩塌事件	 彭康瑜總工程師 林同棧工程顧問公司	
14:00-14:30	 我國高速公路橋梁 維護與補強	 林炳松副總工程師 交通部高速公路局	王焯烈 理事長 中國土木水利 工程學會
14:30-15:00	從生命週期考量看 臺灣長跨預力混凝土 橋梁安全維護管理	 陳振川特聘教授 國立臺灣大學	
15:00-15:20	中場休息 (20 min)		
15:20-15:50	 橋梁監測與 結構健康診斷	 宋裕祺教授 國震中心橋梁組組長 台北科技大學工程學院院長	 陳國隆 總工程師 交通部 高速公路局
15:50-16:20	國際合約的分工與 介面整合	 袁寧經理 中鼎工程公司法務部	
16:20-16:50	 國內面臨的工程環境 與施工考驗	 高銘堂董事長 工程會採購申訴審議委員	
16:50-17:20	綜合討論	宋裕祺教授 國立臺北科技大學工程學院院長	



現場提供講者介紹及簡報的 QR code，掃描後即可直接線上瀏覽。

社團法人中國土木工程學會 107 年年會暨 2018 土水國際論壇



請多利用網路報名

敬邀報名參加！

時間：107 年 12 月 7、8 日 (星期五、六)

地點：中鋼集團總部大樓 (高雄市前鎮區成功二路88號)



詳細年會訊息網頁

請直接上網報名或填寫報名表如下：

姓名		服務單位	
會員證號	(沒有請空白)	聯絡電話	手機： 公司：
Email	(請提供)	膳食偏好	<input type="checkbox"/> 葷食 <input type="checkbox"/> 素食
參加活動項目 (請勾選)	12月7日(五)上午9:30-12:30 國際論壇		
	<input type="checkbox"/> Keynote Lectures 【B1 國際會議廳】 <input type="checkbox"/> 12月7日 午餐		
	12月7日(五)下午13:30-15:10 國際 Session 1 & 2 & 3 (三選一)		
	<input type="checkbox"/> Session 1 【Rm 1607】 <input type="checkbox"/> Session 2 【Rm 1605】 <input type="checkbox"/> Session 3 【Rm 1604】		
	12月7日(五)下午15:30-17:10 國際 Session 4 & 5 & 6 (三選一)		
	<input type="checkbox"/> Session 4 【Rm 1607】 <input type="checkbox"/> Session 5 【Rm 1605】 <input type="checkbox"/> Session 6 【Rm 1604】		
	12月8日(六)上午9:30-12:20 年會大會		
	<input type="checkbox"/> 年會大會 【B1 國際會議廳】 <input type="checkbox"/> 12月8日 午餐		
	12月8日(六)下午13:30-15:10 論壇一、二、三 (三選一)		
	<input type="checkbox"/> 論壇一【1607 會議室】 <input type="checkbox"/> 論壇二【1605 會議室】 <input type="checkbox"/> 論壇三【1604 會議室】		
12月8日(六)下午15:40-17:20 論壇四、五、六 (三選一)			
<input type="checkbox"/> 論壇四【1607 會議室】 <input type="checkbox"/> 論壇五【1605 會議室】 <input type="checkbox"/> 論壇六【1604 會議室】			
晚宴費用	<input type="checkbox"/> 500 元 (會員) <input type="checkbox"/> 1000 元 (非會員) <input type="checkbox"/> 免費 (貴賓、理監事、主任委員)		
付款方式	<input type="checkbox"/> 郵政劃撥 (帳號：00030678、戶名：社團法人中國土木工程學會) <input type="checkbox"/> 信用卡 (請填寫授權書如下)		
發票開列	<input type="checkbox"/> 二聯式 <input type="checkbox"/> 三聯式 統一編號：_____		
	發票抬頭： <input type="checkbox"/> 同本人 <input type="checkbox"/> 同服務單位 <input type="checkbox"/> 其他 (請填寫)：_____		
身分證字號	申請以下認證積分需提供身分證字號		
技師積分	<input type="checkbox"/> 需要 (限技師、請填寫科別)	科別	
公務人員	<input type="checkbox"/> 需要 (限公務人員)	參訓證明	<input type="checkbox"/> 需要 (請先勾選、事後恕不補發)

報名截止：107.11.30(五)

年會晚宴信用卡授權書 (僅供本學會 107 年年會晚宴用)

卡號		有效日期	月	年	末三碼	
持卡人簽名		金額				

107 年年會暨 2018 土水國際論壇

~ 智慧工程、特色城市 ~

Building Smart Engineering Projects & Cultivating Urban Culture Characteristics



歡迎網路報名



年會詳細資訊網頁

主辦單位：中國土木水利工程學會、高雄市政府

合辦單位：中國鋼鐵股份有限公司、高雄市政府工務局、高雄市政府水利局、
中國工程師學會高雄市分會、柏林股份有限公司

協辦單位：中國土木水利工程學會南部分會、台灣世曦工程顧問股份有限公司、
中興工程顧問股份有限公司、中華民國鋼結構協會 (其餘邀請中)



2018 土水國際論壇
2018 CICHE International Forum

時間：Friday, Dec. 7, 2018 (107 年 12 月 7 日 星期五)

地點：China Steel Corporation Headquarters

中鋼集團總部大樓 高雄市前鎮區成功二路 88 號

Time	Program		
09:00~09:30	Registration [B1F International Conference Hall]		
09:30~09:45	Opening Ceremony Welcome message by President of CICHE, Mr. WANG, Jaw-Lieh Opening Remarks by Guests of Honors		[B1F International Conference Hall]
09:45~10:15 (30min)	Keynote Lecture No. 1 (Kaohsiung)		
10:15~10:45 (30min)	Keynote Lecture No. 2 (JSCE)		
10:45~11:00	Coffee Break		
11:00~11:30 (30min)	Keynote Lecture No. 3 (AECOM or others) (inviting)		[B1F International Conference Hall]
11:30~12:00 (30min)	Keynote Lecture No. 4 (KSCE)		
12:00~12:30 (30min)	Keynote Lecture No. 5 (CICHE)		
12:30~13:30	Lunch (Lunch Box)		
13:30~15:10 (100min)	Session 1 Smart Engineering Projects & Technologies	Session 2 Mega Projects	Session 3 Energy Related
	[Rm 1607]	[Rm 1605]	[Rm 1604]
15:10~15:30	Coffee Break		
15:30~17:10 (100min)	Session 4 Disaster Prevention Related	Session 5 Hydraulic Related	Session 6 Young Engineers Dynamics
	[Rm 1607]	[Rm 1605]	[Rm 1604]
18:00~20:00	Welcome Reception (by Invitation)		

107 年年會暨 2018 土水國際論壇



~ 智慧工程、特色城市 ~

年會詳細資訊網頁

107 年年會大會及工程論壇



歡迎網路報名

時 間：107 年 12 月 8 日 星期六

地 點：中鋼集團總部大樓 (高雄市前鎮區成功二路 88 號)

時 間	議 程			
9:00-9:30	相見歡 (註冊、報到與領取資料)			
9:30-12:20	<p>107 年年會大會</p> <ol style="list-style-type: none"> 開幕式 主席致詞 介紹貴賓及貴賓致詞 專題演講 工程獎章小組報告、頒發、得獎人致詞 程禹傑出工程師獎小組報告、頒獎、得獎人致詞 107 年得獎人：< 得獎人介紹 > 榮譽會員頒發、得獎人：致詞 107 年榮譽會員：< 得獎人介紹 > 會士審查委員會報告、頒發會士證書 107 年當選會士：< 得獎人介紹 > 論文小組報告、頒發論文獎 獎學金小組報告、頒發獎學金 資訊委員會報告、BIM 技術優良獎頒獎 全國大專院校工程創意競賽報告、頒獎 年會籌備報告、107 年會務報告 唱大禹歌、禮成 			得獎人及優勝海報展 暨 智慧土木應用展
12:20-13:30	午 餐 (盒餐)	第 23 屆第 2 次 會員代表大會		
13:30-15:10 (100 min)	<p>工程論壇一 土木工程 (含軌道建設)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 智慧城市建設 - 鐵路地下化 - 高雄市火車站 - 桃機 T3 航廈 	<p>工程論壇二 能源工程</p> <ul style="list-style-type: none"> - 離岸風電 - 儲能技術 - 2030 能源規劃 - 再生能源新科技 	<p>工程論壇三</p> <p>2018 學生 工程創意競賽 優勝發表</p>	
	[1607 會議室]	[1605 會議室]	[1604 會議室]	
15:10-15:30	茶 敘			
15:30-17:10 (100 min)	<p>工程論壇四 水利工程 (含防災)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 都市防洪 - 防災大數據 - 伏流水 - 水庫管理及延壽 	<p>工程論壇五 綠營建</p> <ul style="list-style-type: none"> - 綠營建技術發展政策 - 綠營建技術發展制度 - 建築工程實際推動成效 - 土木工程實際推動成效 	<p>工程論壇六</p> <p>2018 學生 BIM 軟體應用競賽 優勝發表</p>	
	[1607 會議室]	[1605 會議室]	[1604 會議室]	
18:00-20:30	晚 宴			



尖端人工智慧於土木設施應用之展望

顏 愉／國立臺灣大學土木工程學系 研究助理

溫欣儀／國立臺灣大學土木工程學系 研究助理

黃尹男／國立臺灣大學土木工程學系 副教授

陳柏華／國立臺灣大學土木工程學系 副教授

時至今日，於建築、工程與營建（Architecture, Engineering, Construction）及設施管理（facilities management）領域中，仍有許多與生活密切相關之問題待解決，諸如應用物件偵測（object detection）、物件追蹤（object tracking）及即時定位與地圖構建（simultaneously localization and mapping, SLAM）技術等等，在解決此類問題的同時，亦須賴以可靠之技術以有效解決問題。目前機器學習（machine learning）技術因其快速有效之特色，成為近年之熱門技術，並且仍高速發展及應用於各項領域。土木及水利工程領域亦逐漸重視此技術，本研究回顧近期於物件偵測、物件追蹤、即時定位與地圖構建、深度估計與影像風格轉換（image-to-image translation）之新穎技術，將上述技術進行初步運用，並提出與土木及水利工程相關應用之建議，作為未來建築、工程與營建及設施管理之參考依據。

緒論

本研究主要針對 2017 年至 2018 年 CVPR（IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition）研討會之最新研究，回顧近期於物件偵測、物件追蹤、即時定位與地圖構建、深度估計與影像風格轉換之新穎技術。CVPR 係由 IEEE 每年舉辦之研討會，其所接受的文章皆為電腦視覺領域最具學術創新及應用效益之研究。

目前土木及水利領域，影像處理技術已不可或缺，諸如交通領域之行人追蹤、土木與營建管理領域之影像補遺以及水利工程領域土石流空拍影像處理等等，故本研究將所回顧之文章類型分為偵測與追蹤、即時定位與地圖構建與影像風格轉換。其中，偵測與追蹤再細分為物件偵測及追蹤等二大主題。此外，即時定位與地圖構建再加入影像深度之估計技術加以說明。最後，本研究於回顧機器學習近期技術的同時，提出各項技術於土木及水利領域可能之應用建議。

物件偵測與追蹤

物件偵測

物件偵測係現今數位影像處理（image processing）技術的一主要課題。相較於單純的影像分類（image classification）技術，僅負責針對單一影像進行分類；物件偵測技術需於含有不定個數、不定種類物件的影像中，偵測特定種類之物件（如行人、車輛、建物…等），並獲取其相關資訊，包含被偵測物件之位置及範圍、大小以及種類等。

目前物件偵測技術大量引入深度學習（deep learning）技術，透過複雜且眾多層次的神經網路模式，使得其相較傳統機器學習技術能處理較複雜的課題，在偵測上也較不受物件轉向及模糊等物件變形影響。然而因深度學習方法需要訓練神經網路中大量的方程式權重，因此相較傳統機器學習方法，需要更多的訓練資料及計算時間。目前物件偵測大量使用卷積神經網路（convolutional neural network, CNN），為當今

影像處理以及深度神經網路的主流發展技術。

目前的物件偵測技術能夠利用單一模型偵測上千種不同種類的物件。人臉辨識、行人偵測均是此技術的主流應用方向；而後續將介紹的物件追蹤技術也是物件偵測技術的延伸應用課題。以下將介紹物件偵測之模式。

YOLO9000: Better, Faster, Stronger

YOLO9000^[1] 係由同團隊所發表的前版本 YOLO^[2] 改進而來，在 2017 年時發表於 CVPR 研討會的物件偵測技術。

YOLO 整個模型僅使用一個 CNN 網路來產生定界框 (bounding box) 與進行物件分類；因其模型構造簡單，係屬於端對端 (end-to-end) 的技術方法，所以比較容易進行訓練，辨識速度也快。YOLO9000 較先前的版本運算時間更為縮短，且精準度提升，同時經過訓練可以辨識高達 9000 種的不同的物件。因在較高的精準度之下同時又能有很快的運算速度，例如適應較差解析度的版本 YOLOv2 288 × 288 之運算速度可高達每秒 90 幀，因此 YOLO9000 非常適合應用於即時影像辨識。

圖 1 為本研究測試 YOLO9000 之辨識成果，(a) 至 (c) 之底圖分別為國立臺灣大學圖書館監視影像、國立

臺灣大學土木系女籃合影及公館捷運站以手機側錄之影像，(d) 則係由網路上採集因災所破壞之房屋影像。圖 1 中 (a) 及 (b) 表現 YOLO9000 有能力偵測出不同角度的人；(c) 中呈現此演算法可偵測出重疊的物件，如圖中的人及自行車；而 (d) 則呈現 YOLO9000 能夠辨識建物被破壞的狀態。

Mask R-CNN

Mask R-CNN^[3] 係於 2017 年發表於 ICCV 研討會的影像辨識技術。有別於以往個偵測技術，只會產出被偵測物體的定界框，Mask R-CNN 會進一步產出對應物體形狀的精準遮罩 (mask)，同時還可對人物產出身體結構。本研究將 Mask R-CNN 應用於臺北市捷運站月台內側錄之影像，如圖 2 所示，顯示 Mask R-CNN 優良之人體姿勢估計技術。

Mask R-CNN 演算法是以 Faster R-CNN^[4] 為基礎進行改進的版本，其在原始的 Faster R-CNN 結構上增加了一產生遮罩的分支，此分支與產生定界框的神經網路平行。而為了產出精準的遮罩，將 Faster R-CNN 中負責產生可能含有物件之後選區域的 RoIPooling 替換為 RoIAlign，以解決 RoIPooling 在執行 Max Pooling 時造成的影像偏移現象。



(a) 臺大圖書館監視影像



(b) 臺大土木系女籃合影



(c) 公館捷運站



(d) 因災所破壞之房屋

圖 1 YOLO9000 辨識成果



圖 2 Mask R-CNN 辨識成果 — 臺北市捷運站月台內側錄之影像

物件追蹤

物件追蹤係指對影片中單一或多個物件進行追蹤的技術，被追蹤之物件可以是人、動物、車輛，也可以是人的部分特徵，如頭部、四肢關節等。而目前主流的追蹤技術通常包含兩個步驟：一是物件偵測；二是對將影片前後影格的所偵測到的物件進行配對。而配對的目的，是希望能夠串聯同一個物體於影片中不同的影像位置，進而得到相同物件之軌跡或進行追蹤。而前述章節所介紹的 YOLO 以及 Mask R-CNN 均是追蹤技術中常利用的物件偵測工具。

Simple Online and Realtime Tracking

Simple Online and Realtime Tracking^[5]，後稱 SORT，為一能處理線上即時追蹤課題的人物追蹤技術，於 2016 年發表於 ICIP 研討會。

本演算法利用 Faster Region CNN (FrRCNN) 偵測影片中各幀行人的定界框，以卡門濾波 (Kalman filter) 與行人隨著時間的移動資料，預測行人於最新影格的定界框。在獲得預測所得的定界框與最新影格所偵測到的定界框後，利用匈牙利演算法 (Hungarian algorithm) 比較所有組合之預測定界框與偵測定界框兩兩之重疊比率 (intersection-over-union, IOU)，將前後影格所偵測到的人物進行配對。



圖 3 SORT 應用於臺北市政府捷運站出入口側錄追蹤之成果

圖 3 為本研究於 2012 年跨 2013 年時於臺北市政府捷運站出入口側錄大量行人進入捷運閘口之影像，並利用 Mask R-CNN 抓取人體姿勢後，以 SORT 進行配對與追蹤之成果。圖 3 中之偵測結果，為作者以 SORT 為架構，將 FrRCNN 替換為 Mask R-CNN 之成果。

PoseTrack: Joint Multi-Person Pose Estimation and Tracking

PoseTrack: Joint Multi-Person Pose Estimation and Tracking^[6] 為一行人追蹤技術，能夠處理多人身體姿勢偵測以及追蹤，如圖 4 所示，其中，圖 4 底圖亦來自臺北市捷運站月台內側錄之影像；此技術於 2017 年發表於 CVPR 研討會。

PoseTrack 先利用神經網路 RastNet-101 偵測可能的關節點，包含人的頭部、四肢以及重要關節之位置；再以 Non-maximum Suppression 以及 Confidence of Spatial Edge Candidates 判斷出最佳的關節位置。在獲得關節位置後，PoseTrack 利用數學規劃中之線性整數規劃法，以前後影格特徵點 (頭部與關節) 之相連路徑最短為目標值，進行最佳化之求解。

此演算法因使用線性整數規劃求解，因此相較其他方法速度較為緩慢，無法即時完成運算，同時在求解上也有物數量限制。然而偵測結果精準，且能克服人物重疊或暫時被遮蔽問題之優點。

Detect-and-Track: Efficient Pose Estimation in Videos

Detect-and-Track: Efficient Pose Estimation in Videos^[7]，為一人物追蹤技術。本文將以 Detect-and-Track 作為其簡稱。此方法能夠處理多人身體姿勢偵測以及追蹤，於 2018 年發表於 CVPR 研討會。

此演算法物體偵測部分修改了 Mask R-CNN，將其增加一時間維度，以同時輸入固定時間區間內的多幀影格作為偵測參考，稱為 3D Mask RCNN。在獲得偵測



圖 4 PoseTrack 於臺北市捷運站月台內側錄影像辨識與追蹤之成果

成果後，此演算法比較多種配對方法，其中包含比對人物所提取特徵的相似程度、利用 IOU 比對人物位置的相似程度，以及比對人物身體姿勢的相似程度等。最後獲得比對人物特徵所得之配對效果最好。

圖 5 之底圖來源為 MOTChallenge (Multiple Object Tracking Challenge)，名稱分別為 TUD-Campus 與 MOT17-09 的原始影像，本研究應用 Detect-and-Track 追蹤影像中之行人，如圖所示，被此演算法判定相同的人物會以相同顏色的外框顯示追蹤結果。

小結

物件追蹤與偵測是兩個有關聯但不同的影像處理技術：物件偵測只負責發現影像中的特定物體；而追蹤則是找出偵測物體在影片中的動向。隨著深度學習技術以及運算硬體的發展，物件追蹤與偵測技術都越來越精確，運算時間縮短，能夠處理的物件種類隨之增加。

追蹤與偵測技術在土木水利方面預期將可有不少應用空間，例如影像偵測技術可應用於地震等大型災害發生後受損建物偵測；若結合無人飛行載具獲得高空拍攝影像，則可幫助相關單位在短時間內判斷一地的建物受損、邊坡改變甚至河水暴漲等概況。而追蹤技術可應用於車流、人流甚至河流等流向資訊之取得，減少相關資料的搜集成本。

即時之同步定位與地圖構建

本章節將先介紹即時之同步定位與地圖構建技術之最新研究成果，再呈現影像深度估計之研究。進而討論在土木及水利工程之可能應用。

即時之同步定位與地圖構建

即時之同步定位與地圖構建技術指利用一移動偵測器在一未知的空間中進行移動偵測，透過偵測器獲得的資料（例如影像資訊）進行分析，構建地圖並定位偵測器之位置。現今之同步定位與地圖構建 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) 技術普遍追求能即時產生地圖構建與定位結果。

ORB-SLAM2: an Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras

ORB-SLAM2^[8] 係一 SLAM 技術，其改良自前版本 ORB-SLAM^[9]，能夠支援一般單鏡頭影像、立體攝影機以及彩色深度攝影機的影像分析；並且能夠在多種不同的環境執行地圖構建，包含室內以及室外的空

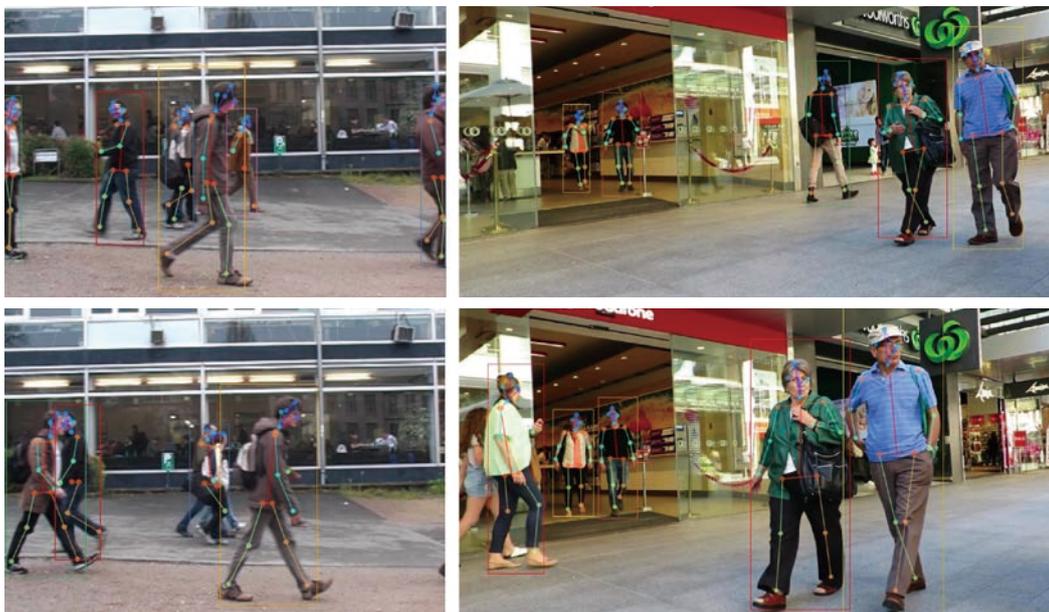


圖 5 Detect-and-Track 辨識與追蹤成果

拍場景，可以與手持攝影機結合，另外也可以搭載於無人飛行器上進行大範圍的地圖構建。由於其不耗費大量運算資源，因此可以運行於 CPU 環境，同時也可支援即時的分析。

圖 6 為 ORB-SLAM2 的執行成果，其底圖為本研究於國立臺灣大學土木系 3 樓走廊側錄之影像。左側為輸入之偵測影像，其中綠色標註點為影像中偵測到的特徵點。而右側則為 SLAM 輸出之建模成果，其中紅色點為特徵點對應至 3D 空間點雲，藍色方框則為偵測器（此例為手持攝影機）之定位呈現。

深度估計

影像的深度估計（Depth Estimation）技術是指利用影像估計影像中各物體的深度，過往的技術主要利用雙鏡頭、多鏡頭，在得知鏡頭相對位置的情況下，透過數學模型的方式求得。然而隨著深度學習技術的發展，越來越多研究團隊投入單鏡頭影像深度估計的研究領域。

Unsupervised Monocular Depth Estimation with Left-Right Consistency

左右一致之非監督式單一鏡頭深度估計（Unsupervised Monocular Depth Estimation with Left-Right Consistency）^[10]，後稱 monoDepth，為一影像深度分析技術，可以利用單一鏡頭的影像，透過訓練過的神經網路，進行影像中的各部分進行深度的推估，成果如圖 7 所示。該研究發表於 2018 年 CVPR 研討會。

一般的深度分析技術多半為監督式的，缺點為需要大量有深度標籤的影像資料，有極高的資料搜集成本。該研究利用雙鏡頭的攝影機，經過運算獲得大量的深度資料，透過此資料訓練出評估單鏡頭影像深度的神經網路，解決需要大量標籤資料的成本問題。

此技術預計可以與 SLAM 技術結合，使得可以在僅有單一鏡頭的載具也可以獲得合理的影像深度資訊，增加構建地圖的精準度。

小結

SLAM 技術使得一偵查器可以自動於未知空間內進行定位與環境地圖構建，而隨著深度學習技術以及運算硬體的發展，偵查器得以搭載更精確、更快速的演算法。

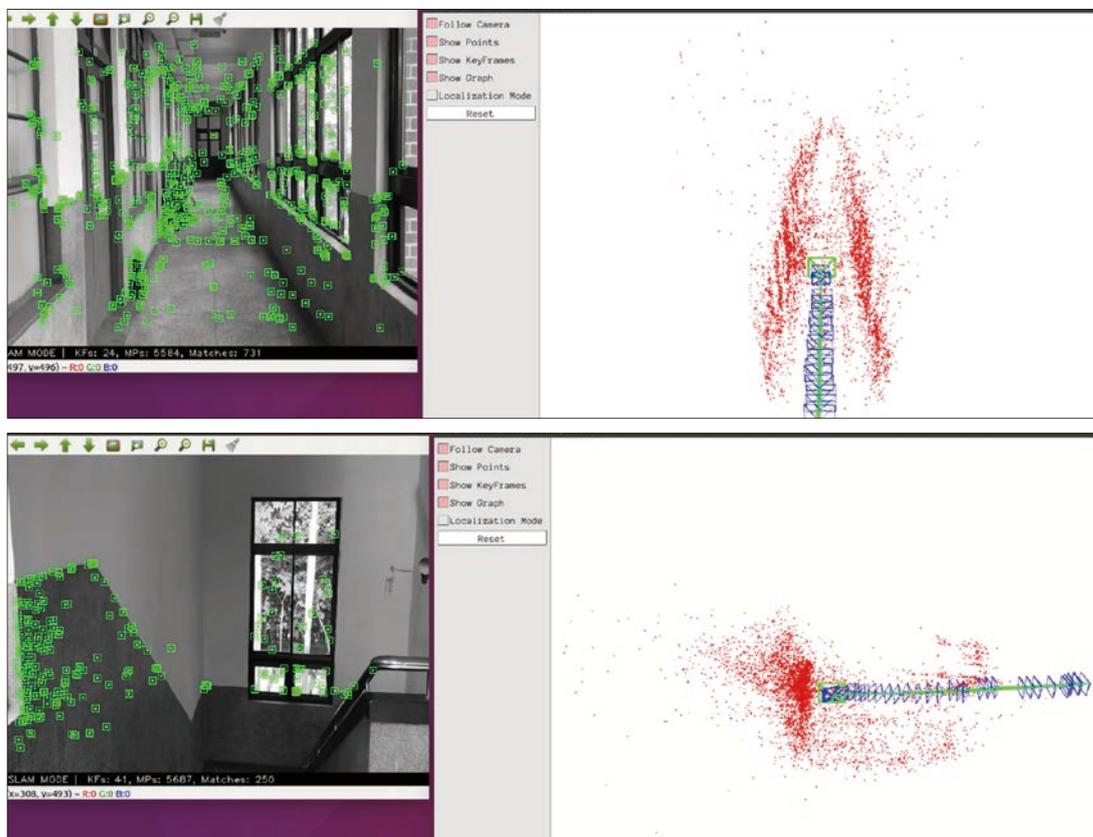


圖 6 ORB-SLAM2 定位與空間建構於臺大土木系系館三樓之展示成果

SLAM 技術預期可在土木水利以及防災領域有廣泛的應用。除了可應用於未知建物及環境的建模外，也可藉由結合 SLAM 技術的偵查機器人，執行倒塌建物內的情資搜查與建物建模等任務，此偵查機器人可結合簡單醫療或物資之投放功能，以解決倒塌建物中通道狹窄之問題，保障救災人員之自身安全，並完成物資、醫療資源之快速配送。

影像風格轉換

此章節將針對影像風格轉換作一介紹及說明。生成對抗網路 (Generative Adversarial Network, GAN) 是一種非監督式學習的神經網路演算法。生成對抗網路的結構包含兩組神經網路，一組為產生器，負責產生所需的資料，一組為辨別器，負責辨別產生器所產生的資料為真實資料或是產生器的假資料；其結構如圖 8 所示。透過反覆訓練產生器以及辨識器，使得產生器有能力輸出與目標需求相當接近的影像。

利用生成對抗網路，可將一筆資料 (例如影像、影片、聲音檔等) 輸入轉換成目標需求之風格。

Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks

Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks [11]，後稱 Cycle GAN，為一生成對抗神經網路，此演算法之設計使其可將一輸入影像風格轉換產生一輸出影像，例如將一照片轉換成梵谷繪畫風格的影像。此演算法於 2017 年發表於 ICCV 研討會。

Cycle GAN 將基本的生成對抗神經網路為架構，為了避免對抗生成網路的產生器無視輸入影響逕行輸出與輸入影像無關的照片，在演算法中引入另一組產生器，負責將輸出影像再次轉換成原始輸出影像，並要求輸入影像必須要非常接近還原影像，迫使影像風格轉換的產生器需保留一定程度的原始影像要素。

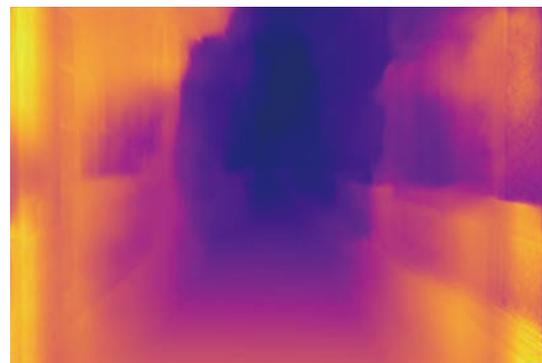
圖 9 為本研究利用 Cycle GAN 輸出之成果，底圖為本研究於國立臺灣大學圖書館正門及第一學生活動中心正門所拍攝之影像。如圖所示，透過 Cycle GAN，可將一照片變換其色澤，或將照片轉換成油畫風格之影像。

Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks

Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks [12]，後稱 Pix2pix，為一生成對抗神經網路，此演算法之設計使其可將一輸入影像風格



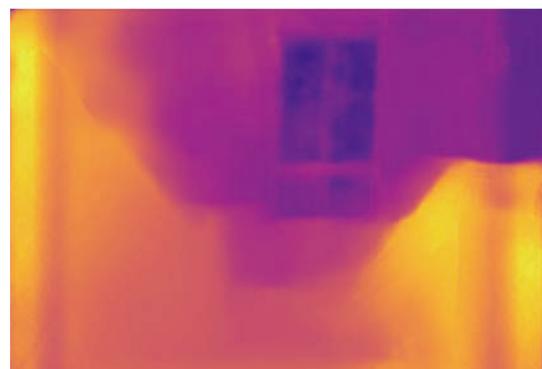
(a-1) 室內空間影像 a



(a-2) 室內空間影像 a 之深度分析結果



(b-1) 室內空間影像 b



(b-2) 室內空間影像 b 之深度分析結果

圖 7 monoDepth 影像深度分析於臺大土木系系館三樓之展示成果

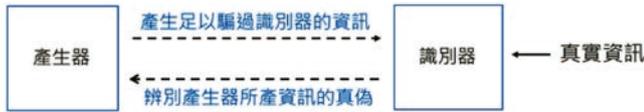


圖 8 生成對抗網路基本結構示意

轉換產生一輸出影像，例如將空照圖轉換成地圖，或將黑白照片轉換成彩色照片。此演算法於 2017 年發表於 CVPR 研討會。

本研究團隊於 2017 年發表 Using Context Encoders in AEC/FM^[13] 於 ICCCBCE 研討會。該研究將 cGAN 演算法之概念應用於影像補遺，消除在照片中的行人影像，同時根據消除區域周圍的資訊預測遺失的影像。圖 10 為本研究將 cGAN 應用於影像補遺之成果，其底圖為本研究於國立臺灣大學圖書館正門拍攝影像之成果。

小結

生成對抗網路為近期最受矚目的演算法之一，有別於以損失函數 (Loss Function) 為目標進行訓練，生成對抗網路能夠衡量圖像整體結構，進而產生以假亂真的輸出成果。例如 NVIDIA 團隊利用生成對抗網路產生的超高解析度虛擬人像^[14]。

在土木及水利工程的應用上，可利用影像風格轉換技術，將視線不佳、模糊之影像，轉換成其清晰的版本，以作為資訊搜集、影像判讀之輔助。另外也可利用其將被擋住物件進行補遺。而隨著人工智慧技術之精進，未來可期待利用此技術將有遮蔽之建築外觀輸入，生成其對應之主要設施圖，可用於土木與水利關鍵營建專案之規劃、設計、建造及營運維護等階段。

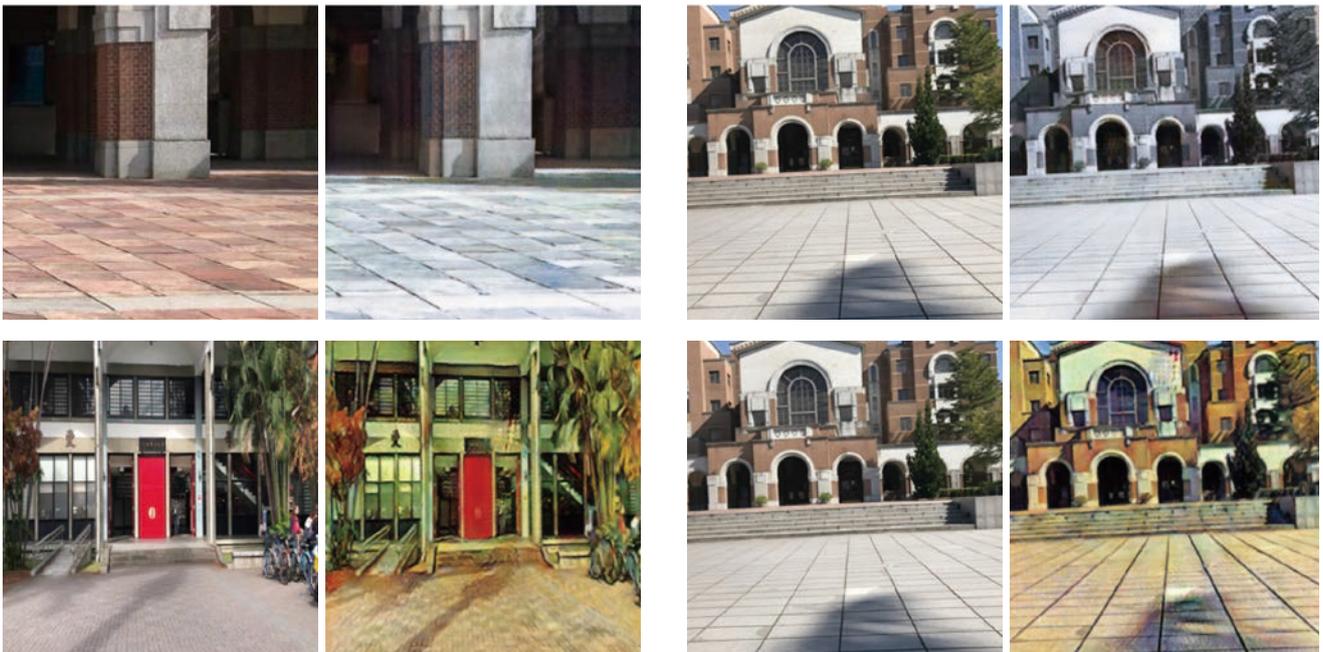


圖 9 於臺大校園之原始輸入影像與 Cycle GAN 之輸出成果



圖 10 cGAN 應用於臺大校園之影像補遺

結論

本研究由 2017 年至 2018 年之 CVPR 研討會文章中彙整出對於建築、工程與營建及設施管理領域深具潛在貢獻之最新技術，包含針對近期於物件偵測、物件追蹤、即時之同步定位與地圖構建、深度估計與影像風格轉換。

對於上述技術，本團隊已利用臺灣大學所拍攝之影像，進行初步之研究及應用，並將影像風格轉換中 image-to-image 技術實際應用於影像補遺中。另分別對物件偵測、物件追蹤、即時定位與地圖構建與深度估計提出應用之建議，相信對土木及水利工程應深具其應用價值。

參考文獻

1. J. Redmon and A. Farhadi (2016), "YOLO9000: Better, Faster, Stronger", 2016.
2. J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "(2016 YOLO) You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection", Cvpr 2016.
3. K. He, G. Gkioxari, P. Dollar, and R. Girshick (2017), "Mask R-CNN", In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision.
4. S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun (2015), "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks", pp. 91–99.
5. A. Bewley, Z. Ge, L. Ott, F. Ramos, and B. Upcroft (2016), "Simple online and realtime tracking", Proc. - Int. Conf. Image Process. ICIP, vol. 2016–August, pp. 3464–3468.
6. U. Iqbal, A. Milan, and J. Gall (2017), "PoseTrack: Joint Multi-Person Pose Estimation and Tracking", In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).
7. R. Girdhar, G. Gkioxari, L. Torresani, M. Paluri, and D. Tran (2018), "Detect-and-Track: Efficient Pose Estimation in Videos", In CVPR.
8. R. Mur-Artal and J. D. Tardos (2017), "ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras", IEEE Trans. Robot.
9. M. J. M. M. Mur-Artal Raúl and J. D. Tardós (2015), "{ORB-SLAM}: a Versatile and Accurate Monocular {SLAM} System", IEEE Trans. Robot., vol. 31, no. 5, pp. 1147–1163.
10. C. Godard, O. Mac Aodha, and G. J. Brostow (2017), "Unsupervised Monocular Depth Estimation with Left-Right Consistency", In CVPR.
11. J.-Y. Zhu, T. Park, P. Isola, and A. A. Efros (2017), "Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks", In Computer Vision (ICCV), 2017 IEEE International Conference on.
12. P. Isola, J.-Y. Zhu, T. Zhou, and A. A. Efros (2017), "Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks", CVPR.
13. S.-Y. Wen, A. Y. T. U. Chen, Y.-F. National, and T. U. Chiu (2018), "Using Context Encoders in AEC/FM".
14. T. Karras, T. Aila, S. Laine, and J. Lehtinen, "PROGRESSIVE GROWING OF GANS FOR IMPROVED QUALITY, STABILITY, AND VARIATION". 

【日月同輝 陳立誠講座】

台灣能源何去何從

時間：107 年 11 月 21 日（三）下午 15:00-17:00

地點：【文化大學城區部大夏館 B1 國際會議廳】

費用：免費



網路報名：<https://goo.gl/4xvN5U>
(11/16 (五) 報名截止，額滿提前截止)



目前政府能源政策有兩大目標：非核與減碳。要達到此二目標也有兩個手段：以綠電取代核電及以氣電取代煤電。此二手段對台灣影響極為深遠，但社會大眾多無警覺。

目前政府的能源政策肇因於未嚴謹評估綠電（風能、太陽能），核電（核安、核廢）及煤電（空污、暖化）的特性。本次演講將提供聽眾正確的能源知識以評估台灣能源政策應何去何從。



人工智慧模型之建置與應用

楊明德／國立中興大學土木工程學系 特聘教授

蔡慧萍／國立中興大學土木工程學系 助理教授

許鈺群／國立中興大學土木工程學系 博士生

曾信鴻／國立中興大學土木工程學系 碩士生

隨著物聯網的時代來臨，各類資料快速產生並經由網路傳遞，將巨量資料處理成有價值的資訊成為當下重要課題，人工智慧（Artificial Intelligence, AI）藉由深層類神經網路的發展與電腦計算效能提升，造就了這一波 AI 的浪潮。AI 的組成元素可分三大項，第一為巨量資料，包括標記及未標記資料；第二是深度學習方法，包括演算法及軟硬體；第三是應用情境，包括各種 AI 的應用與各領域專業知識，應用的範圍涵蓋教育、服務、農業、製造、金融、醫療等人類可能觸及之各種生活情境。本文針對此三大 AI 組成元素進行簡要介紹，並展示一些簡單的 AI 模型，並提出對 AI 發展趨勢的觀察，希冀能迎上這波 AI 產業化、產業 AI 化的全球浪潮。

隨著物聯網的時代來臨，各類資料快速產生並經由網路傳遞，如何處理巨量資料變成當下重要課題，在 1956 年就被提出的人工智慧（Artificial Intelligence, AI）也再度成為矚目焦點。廣義的 AI 可包含任何機器學習的方法，狹義的 AI 則是指基於深層的類神經網路架構應用。類神經網路技術已被發展數十年，但先前因常有過度擬和（overfitting）的問題，所以其發展沉寂了一段時間，近年來有了軟硬體快速進展與巨量資料的產生，尤其在近兩年間，AI 變成火紅的議題，主要原因為二方面的重要突破，分別是演算法—深層類神經網路的發展、與硬體—電腦計算效能提升，所以造就了這一波 AI 的浪潮。

AI 演化的進程可分為弱 AI（Weak AI — 特別型）、強 AI（Strong AI — 通用型）、及超級 AI（Super intelligence AI — 超級型）（圖 1），目前仍在弱 AI 的發展階段。弱 AI 時代，只能針對特別型的應用開發 AI 模型，如只會下圍棋的 Alpha Go，通常以監督式分

類方式來訓練模型，而且只能做特殊任務的工作。接著，AI 可能進化到通用型的強 AI，可透過無監督式分類方式自我學習，不須經由人類訓練即可學習執行一項任務，此時 AI 已具多元學習、推理、規劃和表達等人類的邏輯思考能力。最終，AI 會進化到一個具有超級智能的機器 — 超級 AI（Super intelligence AI），會自己思考並解決問題，也具有發展出優於人類的智慧的可能性。

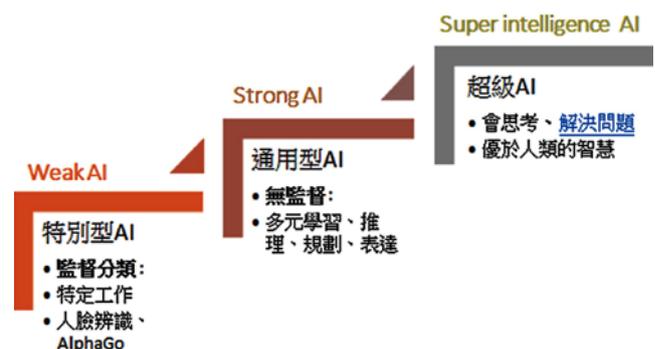


圖 1 AI 的世代演進

AI 的組成元素可粗分三大項，如圖 2，第一是巨量資料，包括標記及未標記資料；第二是深度學習，包括演算法及軟硬體；第三是應用情境，包括各種 AI 的應用與各領域專業知識，應用的範圍涵蓋教育、服務、農業、製造、金融、醫療等人類可能觸及之各種生活情境。

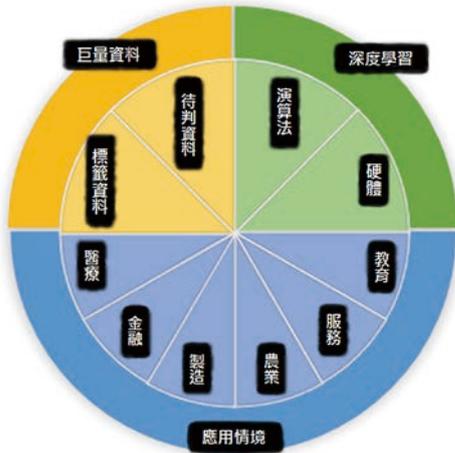


圖 2 AI 的組成元素

資料標記

機器學習是實現人工智慧的一種方法，透過大量的資料訓練讓電腦掌握資料特徵，透過類神經網路建立預測模型，而後以訓練過的模型進行推論，AI 模型建立流程如圖 3 所示。建立模型的流程中，有個相當重要的步驟，就是需要「教」電腦看懂真實世界的現象，這個步驟稱為標記 (Label)。人腦有錯綜複雜的神經系統，對事物有極高的學習能力，縱使非過目不忘，兩三次的訓練就能足以初步認知一件東西。對於電腦而言，機器學習則需透過千遍萬遍的學習，才能使電腦認識一種物件，這種訓練過程建立在「餵」給電腦正確資料的基礎上，即所謂經過人類標記的資料，故言「人工智慧建立在工人智慧之上」。標記這工作既基礎，但也費時又無趣，有時還需要許多專家協做才能蒐集到足夠的樣本，在中國大陸號稱有百萬人員從事標記的工作，有趣的是這些人在準備教會電腦識物以便取代自己的工作。

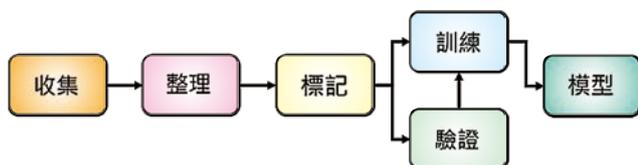


圖 3 AI 模型建立流程

演算法

狹義的 AI 是指基於深層的類神經網路架構應用。早期於 1960 至 1970 年代，由於受到生物神經系統的啟發，資訊科學家提出類神經網路的概念，希望能將電腦設計並訓練成具有人類的智能，但因為受限於電腦的計算能力和資料取得不易，類神經網路並沒有廣受推崇。近 30 年來，資訊科學家陸續開發出多種類神經網路類型，持續發展多樣網路架構、階層及初始化的方式。2010 年以後，類神經網路與深度學習幾乎畫上等號，隨著許多著名應用案例的成功，例如手寫郵遞區號辨識、AlphaGo 的棋弈競賽，類神經網路和深度學習的發展日漸蓬勃。總體而言，類神經網路是深度學習的支柱，根據其網路的架構與連結方式的不同，每種類神經網路皆有其特點、侷限與適用的領域。以下針對目前三個常用的深層的類神經網路學習架構進行簡要介紹，並比較其適用情境。

深度類神經網路 (Deep Neural Networks, DNN)

類神經網路 (Neural Networks) 為模仿生物神經系統的數學模型，藉由神經元 (neuron) 的連結與連結方式的設定，機器能夠自己以訓練資料 (training data) 找出每個神經元適合的權重 (weight)。類神經網路中的每個神經元都是一個簡單的函數，其構成是將每個輸入數值和其對應權重相乘後加總，再加上閾值 (bias) 成為激活函數 (activation function) 的輸入。線性整流函數 (Rectified linear unit, ReLU) 為其中常用之一種激活函數，其內涵生物學原理^[1]，通常比其他激活函數 (如：邏輯函數) 有更好的效果。類神經網路的結構是由神經元構成一排一排的層，再將各層連接，每層神經元的輸出為下層神經元的輸入，稱為完全連接前饋式網路 (fully connected feedforward network)，最後一層為輸出層，其他層為隱藏層 (hidden layer)。

一般而言，類神經網路透過運算，只要神經元夠多便可以描述任何函數，但是由於參數也會隨著神經元的數量增加而變多，所以效率較差。因此，「深度」類神經網路 (Deep Neural Networks DNN) 即指有多個隱藏層 (如圖 4)，且此較多的層數便可以較少的神經元數量，透過模組化的過程，有效使用參數

描述任何函數。比較少的有效參數也可避免過度擬合（overfitting）的狀況發生，訓練資料的數量需求也較少，增加資料的使用效率。DNN 中單層神經元數量的設定、各層之間神經元連接方式、層的數量及激活函數的類型需在訓練前已先決定，若這些參數定義的不好就無法找出最佳的函數。

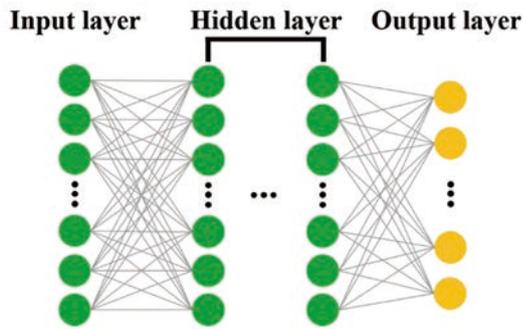


圖 4 深度類神經網路示意圖

DNN 在影像和口語辨識（speech recognition）上的分析表現特別好。例如在口語辨識上，微軟與蘋果等商業龍頭公司接續宣告其口語辨識的詞錯誤率（word error rate, WER）已降低到 10% 以下。在影像辨識上，微軟應用深達 152 層的深度殘留網路（deep residual network）展現了僅有 3.5% 的低影像辨識錯誤率。

卷積類神經網路（Convolutional Neural Networks, CNN）

卷積類神經網路（CNN）在影像和聲音等訊號類型方面的辨識具有極佳成效，其演算結構如圖 5 所示。以影像為例，其架構設計依據輸入的影像，透過卷積層（convolutional layer）及池化層（pooling layer）來強化模式辨識（pattern recognition）及相鄰資料間的關係。CNN 具有局部連接（local connection）和權值

共享（shared weight）兩大特點，因此其參數量和複雜度都大大降低，過度擬合的狀況較不易發生。卷積層是 CNN 的核心，通常由數十到數百個 $n \times n$ 的濾鏡（filter）組成，每個濾鏡具有一項特徵萃取的功能，會對不同的影像模式（pattern）進行強化。池化層（pooling layer）通常接在卷積層之後，進行類似訊號處理中的降維採樣（down sampling），常用的有最大值池化層（max pooling）和平均值池化層（average pooling）兩種。一般應用於影像識別的 CNN，在處理輸入資料時，有一到三次的卷積層加池化層的处理，之後再接兩層以上的完全連接層（fully connected feedforward network），才輸出預測結果。

CNN 是一種具有先驗知識（prior knowledge）的類神經網路，需要的參數也比 DNN 簡化。CNN 應用卷積層的濾鏡找出影像的模式（pattern），產生特徵圖層（feature map），適用於要分析的影像具有三大特點時，第一、要偵測的特徵（pattern）比整張影像小；第二、同樣的特徵可能出現在影像不同位置；第三、影像進行二次抽樣（subsampling）後不會有太大改變。CNN 在卷積層時進行第一和第二特點的運算，而在池化層時則為第三特點的運算。CNN 的訓練過程以反向傳播（backpropagation）的機器學習技巧建立模型，再用其他非訓練影像測試辨識效果，由精確率（Precision）和召回率（Recall）來進行評估。

CNN 最廣為人知的例子就是 Google 所開發的 AlphaGo 人工智慧電腦，其在棋局對弈的表現優於人類棋王。另外，CNN 還常被應用於口語（speech recognition）、自然語言處理（natural language processing）中的文字資料等等。百度 deep speech、IBM、微軟、Google 等著名公司皆相繼推出其在語音識別方面的 CNN 模型。

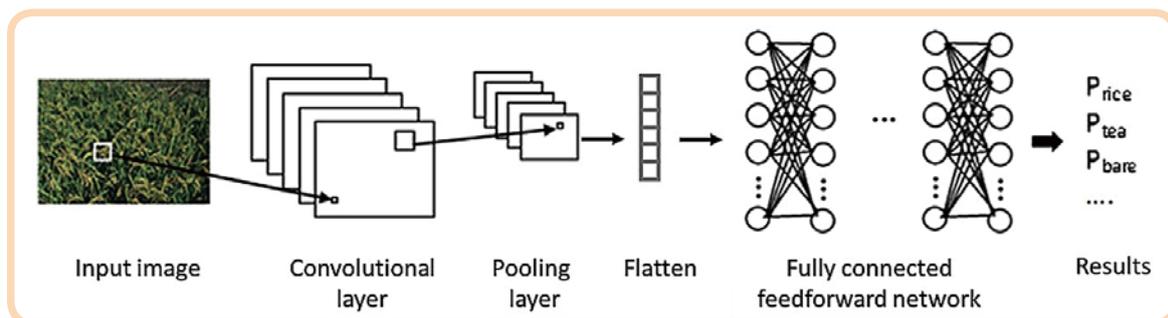


圖 5 卷積類神經網路運算示意圖

遞迴式類神經網絡 (Recurrent Neural Network, RNN)

遞迴式類神經網絡 (RNN) 基礎的運算架構如圖 6 所示，每個神經元 (以 s 表示) 獲得的輸入 (X) 來自於上一個時間點 (下圖左邊的黑色方框，時間以 t 表示)， U 、 V 、 W 為各時間點的參數，輸出以 O 表示。由於 RNN 具有上一個時間點的記憶 (memory)，同時也考量輸入的資料序列 (data sequence)，因此非常適合用於分析成串有序列性的輸入資料，例如文字 (text)、基因組 (genomes)、手寫文字 (handwriting)、口語 (spoken word) 或是來自感測器 (sensors) 或股票市場 (stock markets) 數值化的時間序列資料。常見的應用領域包括時間序列 (time series)、自然語言處理 (natural language processing)、手寫辨識 (handwriting recognition)、口語辨識 (speech recognition) 等。

在深度學習中常用梯度下降法 (gradient descent) 來找出最佳函數 (最佳參數組合)，但此方法有隨機性，僅能提供局部的最佳解，也會產生梯度消失與爆炸的問題 (gradient vanishing and exploding)。為了解決此問題，90 年代中期，德國學者 Hochreiter 和 Juergen Schmidhuber (1997) 提出了長短期記憶神經單元 (Long Short-Term Memory units, LSTMs) [3]。LSTMs 在傳統 RNN 神經元中加入了一個記憶細胞 (memory cell)，以三個閘門，分別為輸入閘 (input gate)、遺忘閘 (forget gate)、輸出閘 (output gates) 來控制每個時間點的記憶是否留存。LSTMs 在每個時間點都具有很多運算層時，效果甚佳，另外 LSTMs 也在語音辨識和機器翻譯方面應用甚廣 [4,5]。學者也陸續發展多種不同形式的記憶細胞，例如門閘遞迴單元 (gated recurrent unit, GRU) [6] 是 LSTM 的簡化版本，將輸入閘與遺忘

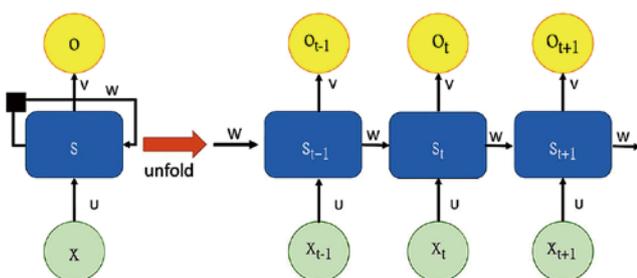


圖 6 遞迴式類神經網路運算示意圖 (重繪自 LeCun et al., 2015) [2]

閘進行連動 [7]，運算速度更快且被廣泛使用。RNN 也發展出多種變形結構，例如雙向的 Elman Networks 和 Jordan Networks 等。

深層類神經網路框架

機器學習在建構一套演算方式時，會使用多種且繁雜的演算法進行組合，故需先建立一套可以直接調用的模組，以避免運算程式碼過於冗長，以利機器學習修改與優化。若已預先建立一套專門為機器學習編程的函式庫，將各演算法與資料操作功能模組化，在建構神經網路模型時，就只需依照各框架指定方式，將各模組一一堆疊形成網路，在調整與優化時，只需要抽換、新增模組，或是更改各模組的輸入參數即可。如此一來，神經網路模型的建置就如堆疊積木一樣簡單，大幅降低了機器學習的入門門檻。

以下介紹七個以 Python 編寫的主流機器學習框架，分別是 Apache MXNet [8]、BVLC Caffe [9]、Google TensorFlow [10]、Microsoft CNTK [11] 及 Facebook PyTorch [12] 等五個獨立的框架，以及兩個整合多種框架的工具 - Keras team 釋出的 Keras [13] 及 NVIDIA 釋出的 DIGITS [14]。各種框架都有其優勢，也有其弱勢，使用者應依需求來挑選適用框架，以下簡單敘述各框架之優缺點，並將各框架之比較簡列於表 1。

Apache MXNet: A flexible and efficient library for deep learning

MXNet 為一靈活且高效能的深度學習套件，MXNet 支援多種高階語言，如 Python、R、Matlab、C++、Perl、Julia、Scala 等，也支援多種平台，如 Linux、MacOS、Windows，及 Raspberry Pi、NVIDIA Jetson TX2 與 AWS。硬體方面支援 CPU 與 GPU。高效能方面，MXNet 提供對高階語言的多 GPU、分散式系統計算優化。

BVLC Caffe: Convolutional Architecture for Fast Feature Embedding

Caffe 是目前最為廣泛使用的機器學習框架之一，主要支援 CNN 相關之影像辨識演算，但在 RNN 類型的網路支援度不佳。Caffe 支援 Python、Matlab 等介面，核心語言以 C++ 實踐，並支援 NVIDIA cuDNN 之深度類神經網路加速套件。Caffe 的特點在於其網路之建立都基於配置文件形式，將需要使用之函式寫入堆

表 1 主流機器學習框架簡述

框架	維護單位	支持語言	特點
MXNet	Apache	Python / R / Matlab / C++...	支援多種高階語言與多平台，亦能進行分散式運算，AWS 官方支援的框架。
Caffe	BVLC	Python / Matlab / C++...	廣泛使用的框架之一，發展較久、社群資源多，運行相對穩定，但是架構較舊，自訂義網路層不易。
TensorFlow	Google	Python / Java / Go / C++...	現今使用比率最高的機器學習框架，由 Google 維護，更新頻率快速、開發自由度高、社群龐大，適合新穎研究或原型開發。
CNTK	Microsoft	Python / C++ / BrainScript	支援大部分神經網路演算法，運算硬體優化佳，使其效率極高。網路配置與執行檔案分開，易於模型跨平台部署。
PyTorch	Facebook	Python	用法簡潔、直觀，對於熟悉 NumPy 的使用者，容易上手，模型設計快速。
Keras	Keras team	Python	整合多種框架使其用法更為彈性，模組化的功能設計，使模型設計僅需簡單幾行文字堆疊就能完成，適合初學者。
DIGITS	NVIDIA	Protobuf / Lua / Python	將資料集建立、模型訓練、模型推論與部署，整合於圖形介面的系統，流水線式的生產模型原型，可快速調整與優化模型參數。

疊成層，再由層層連接形成網路，相較其他網路框架易於上手，但也因此 Caffe 的網路定義檔案較為冗長，且新的功能擴充不易（須以 C++ 實踐）。對於深度學習的新手來說，Caffe 是個好的入門框架，因其擁有龐大的預訓練模型、社群支持，相對易於找到資源，其程序運行也較穩定，適合高穩定需求的工業生產環境。

Google TensorFlow: An open source machine learning framework for everyone

TensorFlow 為 Google Brain Team 於 2015 年釋出的機器學習套件，是目前最為熱門且使用率最高的機器學習套件，主要語言為 Python，另支援 Java、Go、C++ 等高階語言，核心以 C++ 及 CUDA 實踐。此架構主要應用於 CNN 與 RNN 的演算，亦支援強化學習（Reinforcement Learning），而 TensorFlow 不只侷限於神經網路運算，只要將計算表示為支援的計算圖形式，就可以利用 TensorFlow 計算，例如偏微分方程式（Partial Differential Equations, PDE）求解。

Microsoft CNTK: A free, easy-to-use, open-source, commercial-grade toolkit that trains deep learning algorithms to learn like the human brain

CNTK（Computational Network Toolkit, 現為 Cognitive Toolkit）為微軟研究院於 2016 年釋出的開放原始碼深度學習套件，其包含 MLP、CNN、RNN 及 LSTM 等演算模型，且可詳細設定網路模型模組，不需要自行實踐底層 C++ 或 CUDA，就能利用這些模組設計新的網路層。

CNTK 設計為性能導向的框架，在大規模並行訓練

上擁有非常高的效率。因為網路結構是由獨立配置文件定義，再透過指令執程序，因此跨平台部署相對容易、快速。

Facebook PyTorch: A deep learning framework for fast, flexible experimentation

PyTorch 為 Facebook 於 2017 年釋出之深度學習套件，參考原以 Lua 編寫的 Torch，後以 Python 實踐之故名 PyTorch（但實際上與 Torch 差異甚多），其語法簡潔、直觀、易上手，甚至於張量（Tensor）的操作與 NumPy 近乎相同。PyTorch 另一特點是神經網路模型拓樸排序（或是稱為有向圖）為動態的，在每一次迭代過程後，能對應輸入值來建立新的模型，對 RNN 演算方式特別有效，但是如 TensorFlow 這種靜態建立有向圖的框架，就必須把每種可能都先寫入神經網路模型的源碼中，在初次執行時先編譯執行碼。

Keras: Focus on enabling fast experimentation

Keras 是款建立於 TensorFlow、Theano 及 CNTK 之上的高層神經網路 API，以 Python 實踐，相較其他單一框架套件，Keras 更適合想快速體驗機器學習的入門新手，因其用法直觀，網路建立只需依照說明文件形式編寫，能快速建立多層之深度神經網路，利於建立神經網路模型原型。然而 Keras 是高層神經網路 API，較不適用於底層更動，也較難以理解神經網路的原理，若時間充裕，還是建議深入瞭解 TensorFlow。

NVIDIA DIGITS: Interactive Deep Learning GPU Training System

DIGITS 全名為 Deep Learning GPU Training

System，為 NVIDIA 開發的圖形介面多 GPU 深度學習系統，目前將 NVcaffe、Torch 及 TensorFlow 整合在統一平台上，此系統特點是同時涵蓋資料集建立、網路訓練、網路推論及網路部署的功能，能非常簡單地將模型訓練後，隨即測試與部署，將神經網路模型建立變成流水線生產的模式。然而此系統為 NVIDIA 所整合的環境，各深度神經網路套件的功能並非完全支援，且要新增功能較為不易，此環境適合對指令介面操作不熟悉的使用者，以及需要快速調整與優化模型參數的用戶。

應用情境

AI 的應用的範圍涵蓋教育、服務、農業、製造、金融、醫療等人類可能觸及之各種生活情。日新月異的應用情境發展在世界各國隨處可見，例如美國的 Amazon 的虛擬助理 Alexa、倉庫機器人 Kiva 可以執行指揮將包裝和運送過程更優化、還可檢測仿冒品。中國的阿里巴巴也廣泛使用 AI，應用於物流、線上支付、螞蟻金融等方面，並正在嘗試對審批交易進行中之臉部識別。其他應用的例子，例如保險公司藉由 AI 技術，

分析借貸者的近 50 種臉部表情，偵測其回答有關收入、償還計畫等問題的真實程度，決定是否核定其借貸申請。一般公司也可藉此 AI 分析找到最佳的申請者給予試用，減少新聘人員的成本與風險。營運管理方面則可利用 AI 從過去的銷售紀錄與其可能影響因子（如天氣），藉由天氣預報預測銷售量，調整進貨量及降低庫存。目前最常應用的簡單 AI 模型多屬於影像分類與物件偵測，以下以實際案例簡介此兩類型應用。

影像分類

機器學習一個模型的流程包括資料收集與整理、標記、訓練與驗證、最後才能餵進模型訓練模型的參數。舉例來說，任兩張貓咪的照片是完全不同的物體，需要收集大量的貓咪照片，經過整理，涵蓋各種情況之貓咪影像進行訓練，標記上貓的標籤，並以部分標記影像進行資料驗證，電腦才有機會學會看懂貓咪的照片。常用的影像類別已有整理好的資料集可提供進行訓練，例如圖 7 為機器學習常用的 CIFAR-10 資料集，左列簡單的幾個類別，包括飛機、汽車、貓、狗等 10 個常見類別，此資料集擁有大約 60,000 張已標記的影像。

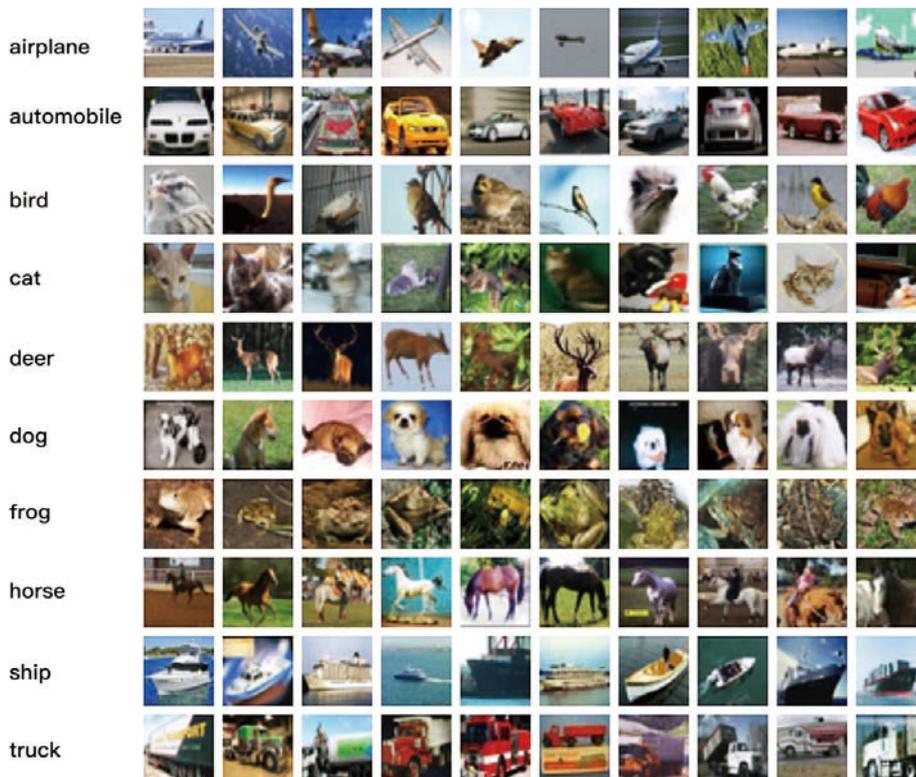


圖 7 CIFAR-10 資料集 (資料來源: CIFAR 資料集官網)

若想自行建立資料集則需大量人力收集影像、進行整理與標記，於實務上相當困難。舉例而言，在農業方面有許多害蟲會影響作物產量，造成許多困擾，例如最近幾年討論熱烈的荔枝椿象，牠會以刺吸方式危害荔枝、龍眼等無患子科植物，導致落花、落果與嫩枝幼果枯萎，大幅影響產量。且荔枝椿象在受驚動後就會噴射有害酸液，造成農民困擾。目前各界皆積極研發荔枝椿象的防治方式，本研究團隊也積極發展 AI 影像辨識技術，希望能透過影像，進行荔枝椿象的判釋。因此需要投資大量人力收集荔枝椿象各生長階段的影像，經過整理與預處理並進行標記，再進行 AI 模型訓練，以便發展荔枝椿象的自動化分類系統（如表 2）。

表 2 荔枝椿象影像辨識技術成果

			
卵：100%	若蟲：62.66%	若蟲：100%	成蟲：99.93%
若蟲（一齡）：0%	成蟲：36.78%	卵：0%	若蟲（一齡）：0.07%
若蟲：0%	若蟲（一齡）：2.56%	若蟲（一齡）：0%	卵：0%
成蟲：0%	卵：0%	成蟲：0%	若蟲：0%

物件偵測

物件偵測（Object Detection）也是常見的簡單 AI 模型。影像分類能夠分出不同物件的類別，但無法得知多目標數量、位置與分類成果等資訊，而這正是物件偵測可提供的資訊。透過目前熱門的即時物件偵測系統 Yolo（You Only Look Once）提供的資料庫與訓練模型，可簡單的進行物件化辨識，一般的物件偵測成果如圖 8 所示，影像為本研究團隊的研究室與研究生之影像，可分出多物件類別與位置，物件偵測可應用的情境相當多元，如人臉辨識、身份辨識、安控等，都是透過物件辨識的方式訓練出的模型應用情境。

雲端運算與邊緣運算

建立資料集並訓練出模型後，便可以輸入未經標記的資料，透過模型進行推論。以分類的案例來說，新的影像透過模型辨識即可推論出可能所屬的類別。單純的情境可以在單一電腦內完成，但複雜的情境則需透過雲端處理，因為雲端伺服器通常有較大的資料庫、多樣的訓練模組、及高性能的電腦運算能力，一般雲端架構可如圖 9 所示。

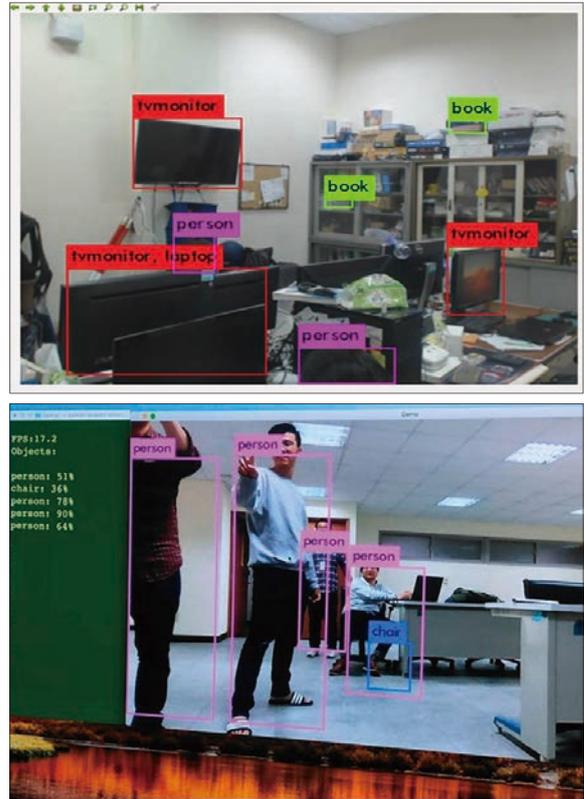


圖 8 物件偵測技術成果

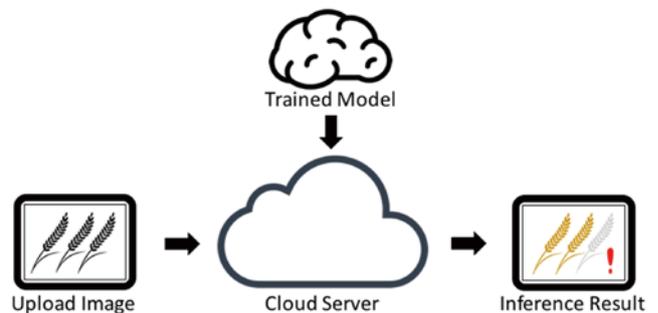


圖 9 AI 雲端化運算架構

將已訓練完成的模型放置於雲端伺服器並針對接口之訊息保持監聽（Listen）狀態，透過網路與應用程式介面（API）的方式，將上傳的影像進行推論，推論完成之結果可回應給使用者端。手機、無人機、移動裝置及 IOT 的邊緣端感測器負責影像資料蒐集，雲端伺服器負責大量運算，此集中運算方式無需在使用端機器上執行複雜、高負載的機器學習程式與訓練模型，為目前最常用的 AI 型態。

透過 AI 雲端運算架構，能夠於雲端伺服器進行集中式運算，但是需透過網路做資料傳輸，因此受限於網路頻寬與延遲。若需做更迅速反應、穩定獲取運算成果、及高度資料安全等要求，則須往分散式運算架構發展，導入邊緣運算（Edge computing）技術與微型化

的 AI 晶片開發，可將訓練好的模型植入於手機、無人機、移動裝置及 IOT 的設備，達到快速、穩定、安全的目的，並降低對雲端的依賴及負擔。例如，無人機巡航飛行時，若須判定當下鏡頭影像類別時，可有兩種做法：一是透過網路傳回雲端伺服器解算後，將成果回傳無人機端，並控制無人機做出對應的反應，此法為雲端化概念，需要維持穩定的網路傳輸速率與伺服器通暢。二是於無人機端進行即時解算，直接可將解算成果之對應指令給無人機做出立即反應，此法即為邊緣運算概念。目前受限於邊緣運算能力，目前只能處理較簡單之模型，惟隨著 AI 晶片之發展，邊緣運算之應用將會愈發多元與蓬勃，尤其適合台灣擁有晶片設計與製造能力且缺乏世界級資訊服務公司的小國家。

後語

在土木領域，設計最佳化、工程監造、材料機器搬運、工安維護與預防、要徑管理等，各種生產情境難度大增，雖可透過大量感測器做監測，但是資訊大量增加下，分析的壓力也會隨之遽增，而人類的分析速度很難跟上大量快速的資料供應，AI 卻可找出不易洞見的規律模式，進而避免先前發生的錯誤再發生，甚至做到提前預測與預防，可適時的提出警告或調整排程、減少呆料及廢料的產生、降低發生工安問題的機率。

目前的弱 AI 主要功能是協助操作者及管理者的從大量感測器搜集的數據中篩選出重要的部份，以方便操作管理者做出分析與決策判斷，目前的弱 AI 尚未具有能力自動做出具有邏輯性的決策，因此還需要結合專家智慧以作資訊的轉譯。以生產流程為例，首先，要將生產流程標準化系統化，以便達到資訊流自動化，才能以達到智慧製造與生產為目標。進而再利用感測裝置與網路，即時收集大量資訊成為大數據，再導入深度學習做即時辨識與分析，才可建立一個較完整的 AI 生態系。目前全球主要 IT 公司，尤其以美國與中國為首的世界級公司，幾乎在 AI 領域都投入大量研發能力，逐漸造成強者恆強、大者恆大的趨勢。

電影關鍵報告 (Minority Report) 中，為了降低犯罪率，採取積極的犯罪預防手段，依據諸多的電腦影像判識結果，事先逮捕可能罪犯以便防患未然。電影中，先知腦中可擷取出預測的影像，而在未來現實世界中，很可能 AI 就可以扮演先知的腳色，負責預知這項工作，並結合判識做出決策。當決策問題極度複雜而超過

人腦可處理範圍時，決策的工作就得交給電腦處理，但若全都依照電腦的預測做決策，而人類已無能力判斷真偽的時候，是不是就是一個電腦主宰人類社會的來臨？其實，目前大部分的複雜問題都是電腦負責處理，雖然 Tesla 自駕車發生首起致命車禍震驚世界，但是在此同時世界上有多少人駕車正在發生車禍，連酒後不開車都難以杜絕，更遑論要讓所有的人駕車安全優於自駕車，只是人類無法接受車禍是由電腦造成而非是一個可以容許犯錯的凡人，畢竟「人非聖賢，孰能無過」。然而，比起人類的智慧進步速度而言，可預期未來的人工智慧的進步速度將會更為飛快，影響也更為深遠。

誌謝

部分研究成果承蒙科技部人工智慧專案計畫 (MOST-107-2634-F-005-003-) 經費補助，謹此致謝。

參考文獻

1. Glorot, Xavier, Antoine Bordes, and Yoshua Bengio (2011), "Deep sparse rectifier neural networks." Proceedings of the fourteenth international conference on artificial intelligence and statistics.
2. LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G. (2015), Deep learning. Nature, 521(7553), pp. 436-444.
3. Hochreiter, S. and Schmidhuber, J. (1997), Long short-term memory. Neural computation, 9(8), pp. 1735-1780.
4. Sutskever, I., Vinyals, O. and Le, Q.V. (2014), Sequence to sequence learning with neural networks. NIPS'14 Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems, 2, pp. 3104-3112.
5. Bahdanau, D., Kyunghyun, C. and Yoshua, B. (2014), Neural machine translation by jointly learning to align and translate. 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR2015), pp.1-15.
6. Cho, K., van Merriënboer, B., Gulcehre, C., Bahdanau, D., Bougares, F., Schwenk, H. and Bengio, Y. (2014), Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation. 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, Proceedings of the Conference (EMNLP 2014), pp. 1-15.
7. Chung, J., Gulcehre, C., Cho, K. and Bengio, Y. (2014), Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. Presented in NIPS 2014 Deep Learning and Representation Learning Workshop, pp. 1-9.
8. Apache, "MXNet: A Scalable Deep Learning Framework", <https://mxnet.apache.org/>
9. BVLC, "Caffe | Deep Learning Framework", <http://caffe.berkeleyvision.org/>
10. Google, "TensorFlow: An open source machine learning framework for everyone", <https://www.tensorflow.org/>
11. Microsoft, "The Microsoft Cognitive Toolkit", <https://www.microsoft.com/en-us/cognitive-toolkit/>
12. Facebook, "PyTorch", <https://pytorch.org/>
13. Keras-team, "Keras: Deep Learning for humans", <https://keras.io/>
14. NVIDIA, "DIGITS: Interactive Deep Learning GPU Training System", <https://developer.nvidia.com/digits> 



雲端智慧服務於工程影像之應用研究

趙志偉／中興工程顧問股份有限公司 研發及資訊部工程師

李明哲／中興工程顧問股份有限公司 三鶯捷運工程處工程師

林冠成／中興工程顧問股份有限公司 三鶯捷運工程處經理

黃志民／中興工程顧問股份有限公司 研發及資訊部協理

周頌安／中興工程顧問股份有限公司 總工程師

雲端運算已是今日資訊開發之重要基礎，透過雲端運算可加速應用軟體的推展與節省管理成本，但雲端運算形式眾多，來源亦十分廣泛，本文將以工程影像管理的角度出發，探討雲端應用程式開發模式。同時，人工智慧應用是近年來快速崛起的主题，在公有雲市場上呈現百家爭鳴的狀態，本文以微軟 Azure 平台為切入點，實作人工智慧相關應用，以快速開發出具備影像辨識功能之應用平台。本文開發之雲端工程影像中心，可結合影像辨識、人臉辨識等人工智慧服務，將巨量影像檔案自動標籤分類，並具備辨識已知人員、推測未知人員特徵等功能，以建構專業之工程影像資料庫，協助提升工程人員對大量工程影像資料之管理效益。

前言

影像資料對現代人來說，已成為生活中不可或缺之記錄方式。同樣的對於工程應用來說，利用監視系統或是攝影裝置來取得影像資料，亦是最快速與直接的工程記錄方法。尤其是行動裝置的普及，隨手拍照或錄影已成為大部分人的生活反射動作。因此妥善保存與運用影像資料，已然成為工程管理系統開發的基礎目標。

工程影像之處理與保存，從時間軸的角度來看，可大致區分為靜態影像與動態影像兩大部分。其中靜態影像（如 JPEG、BMP 等格式）因檔案體積較小，因此無論長期保存還是檔案處理所需耗用的資源較低，且資訊應用技術方面已較為成熟。至於動態影像（如 MP4、MOV 等格式）的部分，其檔案體積龐大，影像處理編碼（encoding）非常消耗運算資源。近年來影片之解析度已提升至 Full HD（1080p）之高解析度格式，甚至高達 4K 之錄影與監視設備亦逐漸成熟，若需

要將影像長期保存或進行應用分析，就技術而言是高成本的負擔與挑戰。

隨著資訊技術的演變，開發環境已由自有軟硬體逐漸朝向雲端運算（Cloud Computing）發展。尤其是大數據（Big Data）與人工智慧（AI）的快速進展，更需要雲端平台所提供的高擴展性才得以普及與深入各應用領域，因此雲端技術的導入已成為資訊開發的主流選擇之一。雲端技術中影像辨識分析的技術發展，目前已邁向機器學習（Machine Learning）的方向，在許多領域都有不錯的成果。因此，藉由公有雲所提供的相關辨識服務，找出適合於營建產業的應用情境，對於處理工程影像來說是一項重要的目標。

工程動態影像目前所面臨問題主要可分為保存與應用兩方面。從雲端服務的角度來說，巨量影像資料的保存可透過雲端分散式儲存系統來解決，雲端上可提供近乎無限量的儲存空間，不但具有良好的可擴展性（Scalability），可依實際使用量來計費，對於影片檔

案的保存來說相當有彈性，不必預先投資機房設備即可開始保存大量影片。

至於影像應用與分析辨識的部分，雲端服務在 PaaS (Platform as a Service) 層級提供了許多解決方案供開發使用，大致可分為語音辨識、文字辨識、人臉辨識和圖像辨識等類別。開發者在不需要具備機器學習相關技能的條件下，即可開始使用 AI 辨識服務，並利用 Web API 的方式呼叫雲端服務即可快速取得辨識結果。

雲端運算簡介

雲端運算定義

雲端 (Cloud) 目前已經轉變成一種流行性代名詞，舉凡生活中的各種大小產品，都不免俗的套上雲端兩字來強調其高端性，常使人誤以為只要能聯網使用的產品就算雲端的範疇，導致各式各樣的傳統軟硬體紛紛套上雲端來包裝行銷，因此以下嘗試用較為嚴謹的定義來釐清雲端技術之發展。

雲端運算 (Cloud Computing) 的實際內涵與範圍，可參考目前業界廣為認定的標準機構 — 美國國家標準與技術研究院 (NIST)，其對雲端運算的基本定義如圖 1：

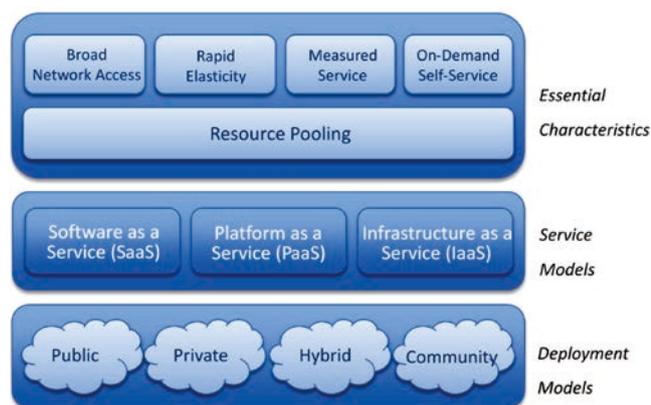


圖 1 NIST 雲端運算模型

(資料來源: National Institute of Standards and Technology SP 800-145)

按照 NIST 的定義，『雲端運算是一種資源共享的使用模式，透過網際網路來取得普及且便利的隨選即用電腦運算資源，例如網路、伺服器、儲存空間、應用程式與服務等等，取得的過程必須能降低管理成本與減少與客戶的互動時間。雲端運算的模型可分為三個服務模式、四個建置模式與五大基本特徵來分別描述。』

三個服務模式

- 軟體服務 (SaaS, Software as a Service)

此服務方式將軟體建置於雲端基礎架構之上，讓一般使用者可透過各式各樣的終端裝置聯網使用，使用對象不必具備軟硬體建置技術，即可直接開始操作使用。
- 平台服務 (PaaS, Platform as a Service)

程式開發者可透過雲端平台提供之開發架構與工具，來直接開發位於雲端上的應用程式，不需要自行管理程式底層所需之伺服器、作業系統、儲存體等基礎架構，直接針對所需功能即可開發軟體。
- 基礎服務 (IaaS, Infrastructure as a Service)

當系統管理或者程式開發需要直接操作作業系統底層資源時，所採取的服務方案。使用者不需自行建置硬體，即可取得作業系統、網路、儲存體等底層操作能力。

四個建置模式

- 公有雲 (Public Cloud)

由企業、學術或政府機構建置之雲端基礎建設，並對外公開提供使用。
- 私有雲 (Private Cloud)

由組織獨自擁有使用之雲端基礎建設，其營運可為自行建置或委外管理。
- 社群雲 (Community Cloud)

由一群具有共同目標與需求之組織團體所共同擁有之雲端基礎建設，其營運可為自行建置或委外管理。
- 混合雲 (Hybrid Cloud)

為上述三種雲端之混和建置模式，並透過標準協定來進行資料與應用程式的交換。

五大基本特徵

- 隨選即用服務 (On-demand Self-service)

使用者可自由的依據自身需要取得運算資源，與雲端供應者之間無須人為的介入，即可於線上完成選用。
- 多樣化網路存取能力 (Broad Network Access)

使用者可透過各種各樣的終端裝置存取雲端服務，例如手機、平板電腦、個人電腦等。

- 資源共享 (Resource Pooling)

由雲端供應商集中統一管理的運算資源，例如處理器、記憶體與網路頻寬等，可同時提供眾多使用者的需求來分配使用，並且可依實際需求大小的改變，隨時進行動態資源調度。使用者無須知道運算資源的實際位置，但是可透過大範圍的區域來選擇實際運行所在的資料中心。

- 快速彈性調度 (Rapid Elasticity)

運算資源可快速且彈性的提供或回收，對於一般使用者的需求來說，雲端供應商幾乎可提供無上限的運算資源供應能力。

- 可量化之服務 (Measured Service)

雲端服務可自動計算資源的實際使用量並產生相關報表，不論是儲存空間、處理器使用程度、網路頻寬或使用人數等，使用者都可以了解並掌握實際消費的額度。

雲端運算優勢

雲端運算對於資訊發展所帶來的衝擊，可先從傳統資訊系統的開發流程來探討。一般來說系統發展至少包含系統規劃、系統建置、軟硬體設備採購與後續之伺服器管理與維護等。其中系統開發的限制，在於自建機房的規模，若超出機房的容納量，則短期內往往無法順利執行。因此機房營運所需投入的成本與長期規劃，便成為資訊系統開發的瓶頸。

若選擇雲端服務的開發模式，則系統開發人員可跳過機房實體設備的限制，直接將應用程式部署至雲端後，即可隨時依使用量來調度雲端資料中心的龐大資源。以公有雲開發模式為例，無論是 IaaS 層級的虛擬機啟動，或者是 PaaS 層級的 API 呼叫，皆屬付費即可立即啟用的運作方式，只要程式開發完成，即可立即佈署上線。此外，雲端市集 (Marketplace) 上更提供了大量的企業級軟體服務，可簡化傳統資訊系統委外開發採購流程，透過簡單的佈署動作，即可快速取得企業級的應用軟體。本文採用了 Microsoft 微軟公司的 Azure 公有雲平台，作為雲端工程影像中心之開發環境，以銜接過去以微軟為主的技術開發資源，以便在降低學習門檻的條件下建置出以雲端為基礎之影像平台。

雲端人工智慧服務

近年來人工智慧 (Artificial Intelligence) 的崛起，

帶給了人類社會對未來無限的想像空間。不同於傳統由需求帶領技術發展的模式，AI 是屬於由技術領導應用的創新式發展，透過此一新技術的展現，讓研發人員以不同的思維來想像未來的發展領域。本文嘗試由目前機器學習中較為成熟的影像辨識應用為出發點，利用公有雲服務所提供的影像辨識 API 切入，以測試未來開發 AI 應用的可能空間。

本文所使用的微軟 Azure 雲端平台在人工智慧方面提供了相當多的服務內容，主要包含機器學習服務 (Azure Machine Learning)、對話機器人服務 (Azure Bot Service) 與智能認知服務 (Cognitive Services) 等三大區塊，本文之影像辨識是屬於智能認知服務中的電腦視覺服務 (Computer Vision) 範疇，以下先介紹智能認知服務的涵蓋範圍：

智能認知服務

Microsoft Azure 的智能認知服務 (cognitive-services)，主要是利用機器學習的方式，來針對文字、語言、影像進行智慧分析。其提供了 HTTP API 的介面供程式開發使用，為目前 PaaS 服務之主流介接方式。此架構適合分散式網站程式開發，依呼叫次數計費，能配合網站規模彈性調整。Azure 的智能認知服務可分為以下類別：

- 辨識 (Vision)：可智慧型識別、標示及控管圖片的影像處理演算法。
- 語音 (Speech)：將語音轉換成文字、使用語音來進行身分驗證，將辨識功能新增至行動裝置應用程式中。
- 語言 (Language)：讓應用程式能夠透過預先建置的程式處理自然語言、評估情感，以了解使用者的真正需求。
- 知識 (Knowledge)：對應複雜資訊和資料，以解決智慧建議和語意搜尋等工作。
- 搜尋 (Search)：將 Bing 搜尋引擎 API 連結至應用程式中，簡單透過 API 呼叫的方式即可取得數十億個網頁、影像、影片和新聞的搜尋結果。

影像辨識服務

本文實作了 Azure 智能認知服務，利用其中的辨識服務來建構平台影像應用功能，可分為下列三部分來說明：

人臉辨識

- 臉部偵測

可同時偵測影像中的多張人臉，並取得臉部所在之矩形位置及臉部屬性，該屬性是以機器學習為基礎的方式來進行預測，臉部屬性包括：年齡、表情、性別、姿勢、微笑及鬍子等。除了臉部屬性預測，API 可同時取得 27 個臉部特徵值，例如瞳孔、眼眶、眉毛、鼻尖、嘴等位置資訊。

- 臉部驗證

API 會傳回信心分數，回傳值介於 0.0 ~ 1.0 之間，以顯示兩張臉是屬於同一個人的可能性，開發人員可依據照片來源之清晰度來決定驗證是否成功之分數。

人臉辨識相關之 Face API 目前共有超過 50 組呼叫介面，並提供 HTTP 通訊協定的方式來使用，參數與執行結果則是透過 JSON 格式字串來傳遞，茲將幾種辨識主要功能所需的 API 名稱與流程整理如表 1：

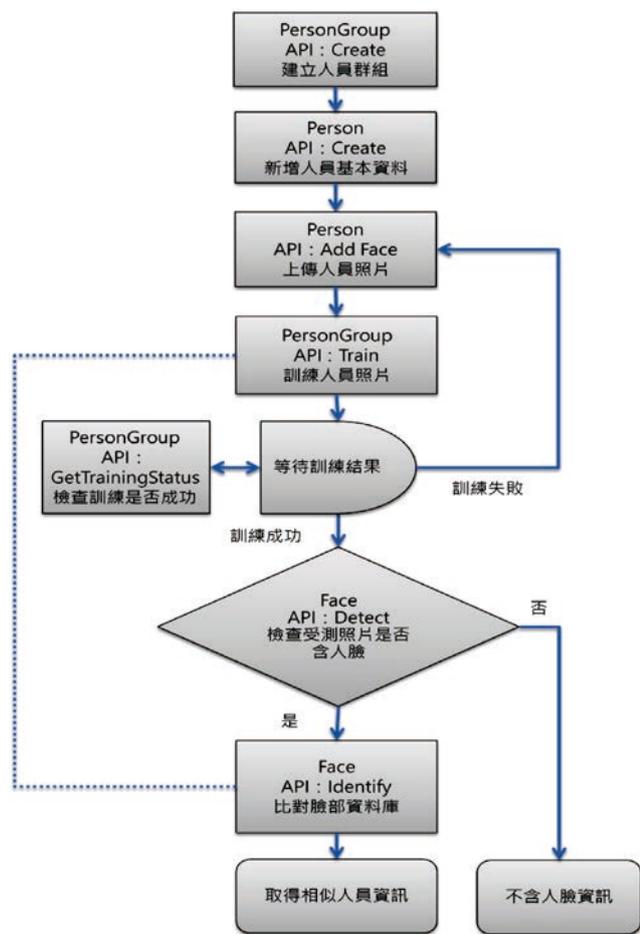


表 1 Face API 臉部辨識呼叫使用流程
(資料來源：Microsoft Azure Face API Reference)

影像標籤辨識

可傳回影像中的視覺化內容資訊，並使用標籤、類別及描述性文字等方式，來自動判讀影像內涵。目前雲端資料庫共有兩千多種預設標籤，涵蓋了生物、風景和行為。

影像文字辨識

光學字元辨識 (OCR) 可偵測影像中的文字，並將辨識出的字詞擷取成數位字元。分析影像後可輔助搜尋，省下複製文字所需的時間及精力。

工程影像數據

動態影像在工程相關的應用方面來說，可簡單區分為兩大來源，一是工地現場必備的長期監視影像系統，二是記錄工程發展所錄製或編輯的短期影片，分別就其特性與未來可能發展說明如下：

工程監視影像系統

監視錄影系統俗稱 CCTV，其特性為錄影時間連續，但儲存耗用大量空間，因此通常採取定期或定量之影片檔案保存方式，將超過容量限制之舊影像刪除，故難以長期保存歷史紀錄。錄影檔案通常存於工地現場之監視系統主機，資料安全與資料維護之風險程度高，若無足夠之備援機制，一旦故障發生則可能遺失重要畫面導致爭議問題發生。

傳統監視攝影通常為封閉式系統，因此影像資料交換不易，只能在現場區域內觀看影像內容。但隨著網路技術的發展，監視系統已逐步朝網路型監視系統邁進，更容易與雲端服務做進一步的結合，一般來說監視系統的發展可分為以下三類：

第一代監視系統：類比式攝影機 + 錄影帶儲存模式 (CCTV)

第二代監視系統：類比式攝影機 + 磁碟儲存模式 (DVR)

第三代監視系統：網路數位攝影機 + NAS 儲存模式 (IP Camera + NVR)

封閉式第一代 CCTV 監視系統目前已退出市場；第二代監視系統主要是將儲存設備改為硬碟為主之數位儲存體；第三代監視系統則是將前端也完全數位

化，從攝影機到主機端均可利用 TCP/IP 網路架構來連結，在佈設與管理上更具有彈性，亦較適合高解度之監視錄影需求。因此本文使用之設備是以第三代監視系統為主。

縮時影像與雲端技術

一般來說，大型土木營建工程除了工項複雜外，需要的工期也相當長，如需掌握工程施作狀況，監視影像不失為良好的切入點，例如國內許多工地均架設有現場攝影機，以便公眾或業主遠距了解施工情形。因為影像紀錄經年累月後資料量驚人，習慣上觀察工程長期變化的方式，是採用縮時攝影（Time-lapse Photography）技術來進行，將上述現場影像資料定時取回，做後續的處理來產生縮時影片。惟此方式需要另外發包製作縮時攝影，處理期間也無法立即取得影像，需靠人工定期處理檔案。且若發生器材故障甚至人為破壞的情形，重要的影像資亦將消逝而無法彌補。因此如何結合現場監視影像的完整錄影，來建立縮時攝影所需要的長期影像來源，亦為本文的重點之一。

隨著高解析度攝影器材的逐步發展，監視系統已逐步邁向 FullHD 以上之高解析度時代。網路監視系統的普及化，使得監視畫面的管理相當容易，影像資料的傳輸也能透過網際網路進行。因此若將原本工程現場必備的監視影像加以再利用，不但可省去縮時攝影器材的架設不便，更能即時取得現場的監控影像資料，做更有效的發揮，產出縮時影片，甚至結合智慧影像分析功能。

要達成以上目標，雲端服務的導入便成為重要技術關鍵。分散各處的現場工程影像，若要同時回傳至伺服器端處理，勢必需要高規格的機房設備才能應付。若採用公有雲平台，則可輕鬆依據影像重要性甚至預算考量，來制定影像收納規格，無論需要全面保存處理，或是局部重點保留，都能夠透過雲端的高延展特性來輕鬆達成。

雲端工程影像中心

以下就本文所述於 Azure 公有雲平台，開發出之工程影像專用之雲端工程影像中心（以下簡稱本平台），主要畫面如圖 2：



圖 2 雲端工程影像中心主要畫面

平台開發過程

本平台完全使用公有雲技術開發，因此系統開發方法也將轉為以雲端服務的角度來思考。本平台主要依據 Azure Application Architecture Guide 提供之論述來執行，主要目標在建立高彈性、高信賴與高擴展性之雲端應用程式。

雲端開發使用之架構樣式，不同於傳統就地（On-Premise）之開發模式。本平台採用適合企業開發之 PaaS 相關服務來建構雲端網站，並依據 Web-Queue-Worker 的架構樣式，來進行雲端開發；另外為了影像轉檔與分析需求，同時也加入了 IaaS 服務來建立虛擬機，以呼叫 Open Source 之 FFmpeg 影像函式庫來進行影像處理相關動作。

有關網站身分驗證部分，使用廣泛通行於網際網路之開放授權（OAuth）單一登入（Single Sign-On）方式，使用者只要擁有社群帳號，即可以免除再一次的帳號密碼輸入，可大幅簡化登入流程。本平台目前提供 Google 帳號的驗證串接，利用 Google 的資安保護機制，來維護帳號的安全性，日後若有需要亦可加入其他支援 OAuth 之社群帳號登入，例如 Facebook、Twitter、Microsoft 等。系統之完整使用情境詳見圖 3：

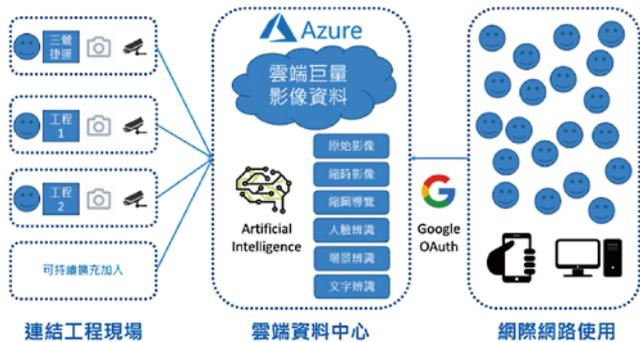


圖 3 雲端工程影像中心使用情境

平台開發成果

本文運用了雲端人工智慧服務的功能，將之整合至所開發之雲端工程影像中心，可以初步發揮下列智慧化影像功能：

一、影片自動截圖：

系統將影片擷取成單張靜態影像，可依需求自訂畫面間隔（例如每 5 秒 1 張），以快速導覽整部影片，示範畫面如圖 4：

二、自動標籤分類：

系統自動解析影片，統計出最能代表影片的標籤類別，幫助使用者找到所需之影片內容，示範畫面如圖 5：



圖 4 影像截圖示範畫面



圖 5 自動標籤分類示範畫面

三、影像人臉辨識：

人臉辨識可分為兩個主要用途：一是比對系統事先建立的臉部資料庫，找出畫面中出現的熟悉臉孔，標示出人員資訊；二是識別影片中有人物出現的場景，並推測人臉的生物特徵，如性別、年齡等。以上均可於影片截圖中標示出人臉區域，並顯示影片的播放時間點。平台同時加入了影片即時資訊功能，可跟隨著影片播放動態顯示畫面中人臉資訊，示範畫面如圖 6：



圖 6 影像人臉辨識示範畫面

四、影像文字辨識：

系統可對影片進行光學文字辨識，將畫面文字顯示於截圖下方，便利觀賞者快速掌握影片內容，並擷取文字資訊再利用，同時能跟隨著影片播放即時顯示畫面內之文字資訊，示範畫面如圖 7：

五、縮時影片製作：

使用者可自行決定縮時比例，目前提供 30 倍、60 倍與 90 倍等三種速率供使用。縮時影片製作完成後，使用者可先快速了解影片內涵，或快速切入正確的畫面時間點來觀賞影片段落，示範畫面如圖 8：

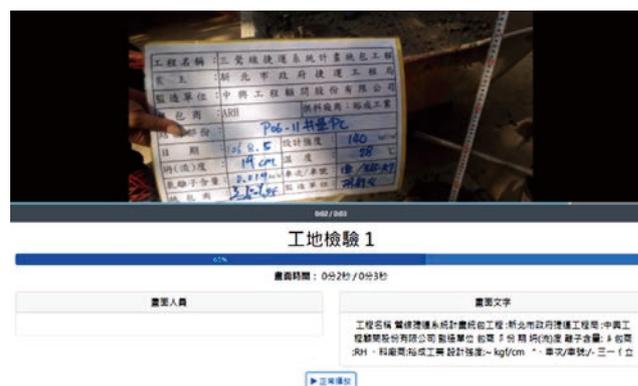


圖 7 影像文字辨識示範畫面



圖 8 縮時影片播放示範畫面

應用實例：捷運三鶯線工程影像應用

捷運三鶯線簡介

捷運三鶯線是因應三峽地區近年來人口快速成長之需求，同時配合「捷運土城線頂埔站周邊地區都市更新」、「北大安置及青年住宅新建工程」及「三鶯陶瓷藝術主題園區整體開發計畫」等相關計畫推動，所規劃而成之中運量捷運線。路線全長 14.29 公里，共設置 12 站，起站為頂埔站（捷運土城線頂埔站銜接轉乘），終站為鶯桃福德站（鶯歌區鶯桃路、福德一路口），並預留未來可延伸至桃園八德地區，與桃園綠線銜接轉乘，串聯桃園國際機場、高速鐵路及區域城際鐵路，促成重要公共運輸系統間的無縫整合銜接。中興工程顧問公司負責三鶯線捷運系統計畫統包工程之監造工作，工程目前仍在施工階段。

台北大學站實驗監視系統

為測試工程影像雲端服務之實用性，本文之影像來自於架設於台北大學站址附近之網路攝影機，屬於第三代之監視系統，通訊協定使用 TCP/IP 架構，因此可透過網路連結與管理（監視系統畫面如圖 9）。監視影像於 NVR 主機之段落存檔完畢後，即可自動同步至雲端，待累積一日完整影像後，系統即排程製作前一日之縮時影片。縮時影片以 60 倍速的方式進行壓縮，亦即一分鐘縮短為一秒鐘，一小時縮短為一分鐘，觀察一完整日的監視畫面僅需 24 分鐘。產出之影片為標準 H.264 MP4 格式，相容於目前主流之瀏覽器。畫面之框率為 30 FPS (Frame Per Second)，縮時後單框間隔相當於兩秒之原始畫面，因此實際損失的監視影像細節並不多，但可節省約 40 倍的檔案儲存空間。

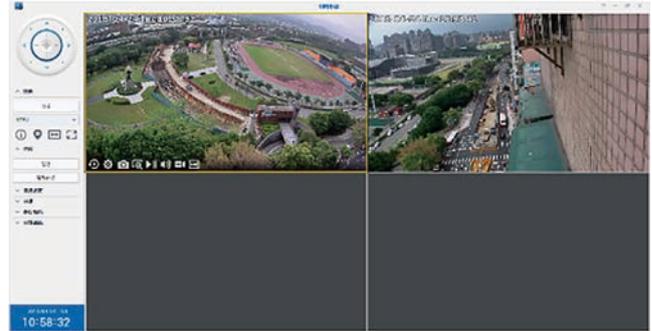


圖 9 台北大學站實驗監視系統畫面

監造影像應用效益

原本僅用於工地區域內之 NVR 監視系統，透過網路連結至雲端工程影像中心，使用範圍擴大至整個網際網路，可大幅擴充使用人數與流量。至於施工過程之查核追蹤等相關記錄工作，已從傳統紙本紀錄、靜態照片拍攝，進入到動態影像的完整紀錄。但動態影片的管理難度卻遠比靜態照片高上許多，不論是影片的後製處理，還是巨量檔案的長期保存，都很難在工務所內單獨完成。透過雲端工程影像中心，可協助監造人員將散落各處的影片上傳至雲端，將收看地點跨出工務所，邁向多元化終端裝置，讓智慧型手機夠輕鬆連接。使用者可透過自動產生的縮時影片，來快速掌握工程發展歷程，並結合雲端人工智慧的分析能力，來強化影像搜尋功能，建立人臉識別資料庫，以進一步發掘影像的潛藏資訊。

結論

雲端技術的導入與評估

雲端運算相關技術的應用十分廣泛，解決方案也相當的多元，若採用自建私有雲的方式，需導入 OpenStack 之類的相關技術來進行伺服器資源管理，但此方式建置成本與技術需求相當高昂，若未經過詳細的成本分析與未來需求調查，則可能會導致資源浪費的狀況發生。

公有雲則是本文採取的建置模式，主要是利用公有雲 Pay As You Go 的彈性計費特性，與完善的操作管理介面，作為雲端系統建置的範例。雲端平台的使用成本是屬於依量計費且持續支出的模式，與自有機房的一次性大量支出模式不同，但是雲端服務的優勢在於強大的自動化管理功能，與多元化的資料備援選擇，可降低許多傳統機房的營運成本，使用少數的人力即可管理大量的伺服器叢集。另外過去自建機房的

過程中，除了初期建置費用，還常忽略了許多隱形的成本支出，例如水、電、冷氣等能源消耗、大樓空間的租金分攤、機房管理的人事成本、軟體授權金的分攤、系統失敗的復原時間與異地備援的執行困難等。

影像數據的儲存方案

巨量資料的儲存與管理，對於小型資訊機房來說是個沉重的負擔。除了需要大量投資儲存設備，高可用性與資料安全備份的處理上也是個難題。系統發生錯誤後能否快速復原、檔案備份機制的的能力是否足夠、異地備援的機制是否成熟，皆影響著機房能否承載巨量影像資料的能力。

本文在開發過程中遵循了雲端的分散式架構樣式，網站單純處理來自使用端之 HTTP Request，影像資料存取由 Azure Blob 儲存體負責，人工智慧影像分析利用 Cognitive Services，影像截圖與縮時動作則交由虛擬機來運算。以上都是容易擴充的雲端服務，若未來有大量用戶加入本影像中心，可在不需要修改程式架構的狀況下，輕鬆於雲端管理介面中調整擴充。

若採用以往單機網站處理架構，集合網站流量、檔案儲存、功能運算於單一主機內，則未來面對大量用戶增加時，勢必較難擴充，若不修改程式的話，則只能夠採取 Scale-Up 的垂直擴展，擴充能力有限，無法如雲端架構採用 Scale-Out 的強大水平擴展模式。

人工智慧加值應用

就目前人工智慧的實際應用層面而言，臉部辨識技術是其中相當重要與成熟的一環，從私人手機的安全解鎖、國際機場的自動通關到無人商店，現今都是透過臉部辨識技術來完成。

在工程影像當中，亦經常有人臉出現的畫面，但

這項隱形的資訊過去從未被加以挖掘利用，因此本文於工程影像的智慧分析功能中，加入了人臉辨識的實際應用。使用者只要事先登錄於系統人臉資料庫，提供數張個人照片，即可自動比對出影片中是否有人臉資料庫的臉孔出現。因此舉凡會議紀錄影片、工地現場查驗過程，均可自動列出參與人員資訊，甚至陌生臉孔也能進行智慧推估，判斷性別、年齡等基礎生物特性，幫助使用者快速整理影片資訊。

除了臉部辨識的功能，系統在人工智慧服務上亦套用了智慧標籤分析、光學文字辨識等服務，自動整理影片畫面可能涵蓋內容，建置影片索引資料庫，並擷取影片中的字幕或標題部分，產生影片說明檔案，進一步強化影片內容搜尋能力，對於在大量影片中查找特定主題提供了便捷的解決方式。

參考資料

1. National Institute of Standards and Technology (NIST): SP 800-145 (The NIST Definition of Cloud Computing)
<https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-145/final>
2. Gartner, Inc.: Magic Quadrant for Cloud Infrastructure as a Service, Worldwide
<https://www.gartner.com/doc/reprints?id=1-2G2O5FC&ct=150519&st=sb>
3. Amazon Web Services: AWS 全球基礎設施
<https://aws.amazon.com/tw/about-aws/global-infrastructure/>
4. Microsoft Azure: Azure Architecture Center
<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/architecture/>
5. Google Cloud Platform: Google Cloud Platform 全球據點
<https://cloud.google.com/about/locations/?hl=zh-tw>
6. iThome 電腦周刊：iThome 2016 年 CIO 大調查 | 企業雲端平臺採用動向 <https://www.ithome.com.tw/article/103825>
7. iThome Online：安全監控系統的發展歷程
<http://online.ithome.com.tw/itadm/article.php?c=76084&s=1>
8. Youtube：YouTube 統計數據
<https://www.youtube.com/intl/zh-TW/yt/about/press/>
9. 新北市政府三環三線進度公開專頁
https://open33.ntpc.gov.tw/loading_sanying

一個凝聚產官學土木專業知識的團體

一個土木人務必加入的專業學術團體

一個國際土木組織最認同的代表團體

一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體



中國土木水利工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

電話：(02) 2392-6325

傳真：(02) 2396-4260

e-mail: service@ciche.org.tw



<http://www.ciche.org.tw>

下載入會申請表

歡迎加入學會



電信與車輛偵測 大數據應用 — 高雄市 旅運特性 分析與易壅塞 道路預報

周諺鴻／鼎漢國際工程顧問公司 資訊長／副總經理

顏郁航／鼎漢國際工程顧問公司 數據師

王志綱／高雄市政府交通局智慧運輸中心 主任

高雄市已實施多項交通管理或工程手段來解決塞車問題，然市區車流與相鄰縣市間及過境性城際車流仍需進一步透過整合式運輸走廊智慧交通管理的手段，引入先進交通預報管理解決方案，藉由科技管理、大數據分析與交通預警運作機制及跨單位複合運輸與交通協調構建交通預報與管理功能。先進技術上可結合道路車輛偵測數據及大樣本電信數據來精細掌握市民之旅運特性，包括分時段別旅次起迄、旅次目的、運具別等特性。因此，藉由建立大數據旅次起迄分析與短期交通預報資訊服務，持續性提供熱門景點及易壅塞道路車流特性分析與預報服務，作為管控與疏散運輸走廊壅塞車流之基礎。

電信大數據應用 — 旅運特性與飽和點分析

高雄市府與電信業者合作，將電信源頭端進行資料去識別化處理，再依據各地區基地台分佈位置、密度、訊號投射方向等，透過三角定位法，將基地台資料正規化轉換為空間網格維度資料，建立各網格對應之空間屬性資料，高雄市共劃分為 51,658 個分析網格。由於原始信令資料為行動通訊傳遞紀錄，需透過邏輯定義與轉換，依據不同分析維度將其轉換為旅運行為資料、路段速率、空間飽和與熱度等類型應用資料，如圖 1。

電信數據可擷取之旅運資料

1. 旅次行為資料：以用戶為基礎 (imsi-based) 之行動數據資料，透過用戶手機移動軌跡與基地台傳輸紀錄，定義各基站 POI 之對應關係 (例如：家、工作、學校等)，並以訊號移動的速度與停留時間，判

斷該旅次移動與停留特徵，轉換為旅次行為資料。
2. 路段速率資料：以 link-based 為基礎之行動數據資料，將用戶移動軌跡，以距離與時間進行行駛速率之運算，匹配於道路路網、路段上，轉換為不同時段各道路路段速率資料。

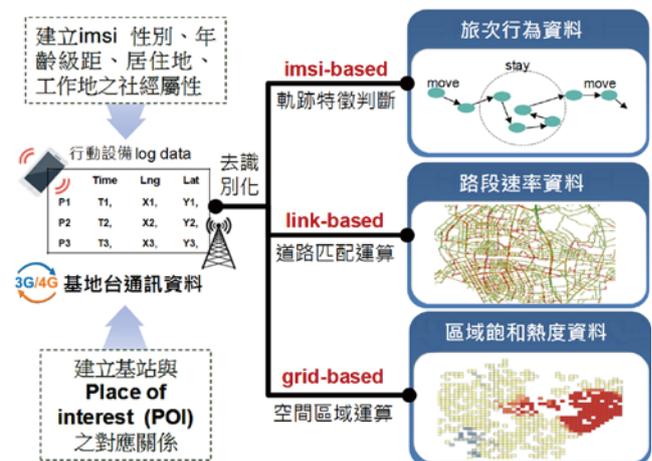


圖 1 電信數據資料轉換概念

3. 區域飽和度資料：以網格為基礎 (grid-based) 之行動數據資料，以不同時間斷面各基地台通訊傳輸之用戶數變化，轉換為以每 5 ~ 15 分鐘為一時間單位之空間網格飽和度熱度資料。

電信數據特性

電路控制需時刻進行，因此可以針對個體行動裝置活動，包含通話、通信、3G/4G 網路等進行追蹤。透過行動裝置回傳的信號資料與電信基地台間的相對關係，界定該信號用戶所在位置 (或所屬基站服務範圍)，並利用訊號於基站與基站間之移動距離、時間、速度等資訊，得知用戶於特定時間下的移動行為與軌跡。

根據不同信令資料類型，能應用於分析不同類型之議題，如 Call Detail Record (CDR) 或 Subscriber Dr. Data 由於資料密集度相對較低，因此較適用於判斷手機使用者 OD 起迄與旅次目的，Signal Data 為主動式資料，資料擷取時間頻率較高，因此除 OD 起迄與旅次目的外，亦可用於觀察使用者軌跡路徑，相對而言，其設備要求、資料量以及運算作業的硬體需求亦相對要求較高，各類型資料回傳密度示意如圖 2 所示，相關特性彙整如表 1 所示。

電信數據擷取旅運資料作法

基地台接收到用戶行動裝置的資料後，將其回傳至電信業者後端硬體設備中，再透過演算分析初步辨識和解析，轉換為以地區或是人為本位的資料庫進行存放。基於個人資料保護法，各用戶之個人資訊與所在位置為機密資訊，需將用戶所屬之國際行動用戶辨識碼 (International Mobile Subscriber Identification Number, IMSI) 轉編成臨時性 ID 資料，經由判讀用戶之每日各時段的旅次活動行為，先依據信號移動特性區分為停留與移動旅次，再針對有意義的停留旅次判斷活動目的、使用運具。

表 1 信令資料類型特性比較

資料類型	資料特性	數據密集度	限制
Call Detail Record (CDR)	提供通信、SMS 傳輸期間之基地台位置、時間	低	為被動式傳輸資料，資料間隔期長，較不適合做精細之行為分析
Subscriber Dr. Data	被動個體行動裝置活動追蹤 (包含：通信、SMS、3G/4G 網路等)	中	通信、上網等資料上傳期間才有資料
Signal	主動個體行動裝置活動追蹤 (包含：通信、SMS、3G/4G 網路等)	高	資料量龐大，資料倉儲費用高，需經過壓所萃取出具有特性意義之資料

電信數據分析高雄熱門活動據點

以一個月份的電信數據 (106 年 5 月份) 轉換為網格維度計算停留該區超過 15 分鐘之用戶數，透過空間運算克利金 (Kriging) 內插法，將高雄市各地區活動熱度區分為 1 ~ 10 分，指標分數越高代表活動熱度越強，藉此找出高雄熱門活動據點，參見圖 4。

以活動熱點最高之高鐵新左營站為例，電信數據飽和度為 10 分，該空間單元因涵蓋高鐵新左營站、臺鐵新左營站以及高雄捷運左營站，高鐵站之平均每日進出站量約 4.7 萬人次、臺鐵站之進出站量約 1.6 萬人次、捷運站之進出站量約 3.3 萬人次，三個車站合計之每日進出站量近 10 萬人次，加上車站 2 至 4 樓為環球購物中心，並緊鄰 10 層樓之新光三越百貨與彩虹市集，因此活動熱度高。進一步分析此地區之活動相對熱度，主要於週五、日以及連假收假日最高，並集中於晚上 17 點至 22 點，參見圖 5。

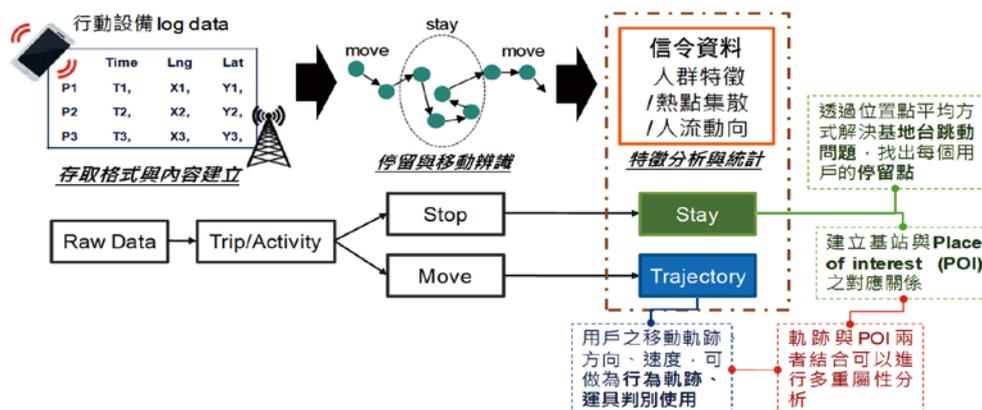


圖 2 電信數據移動停留特徵判斷處理

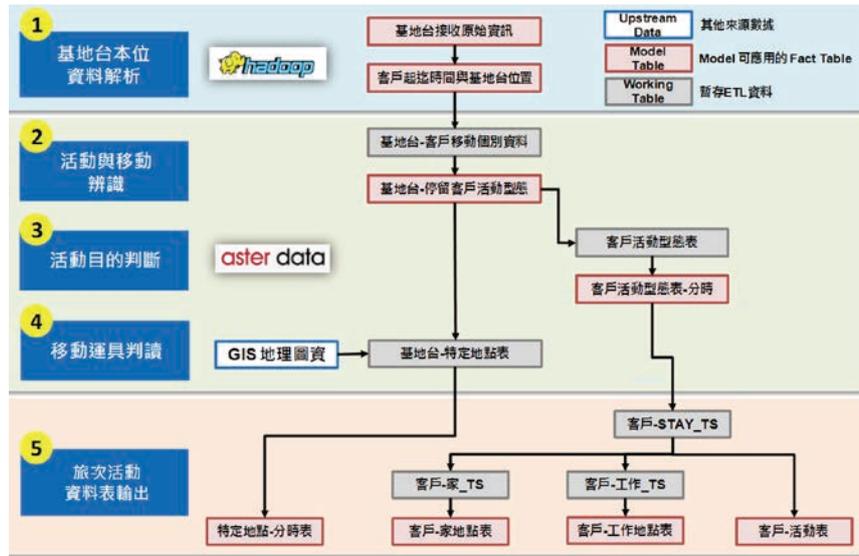


圖 3 旅運特性資料擷取作業

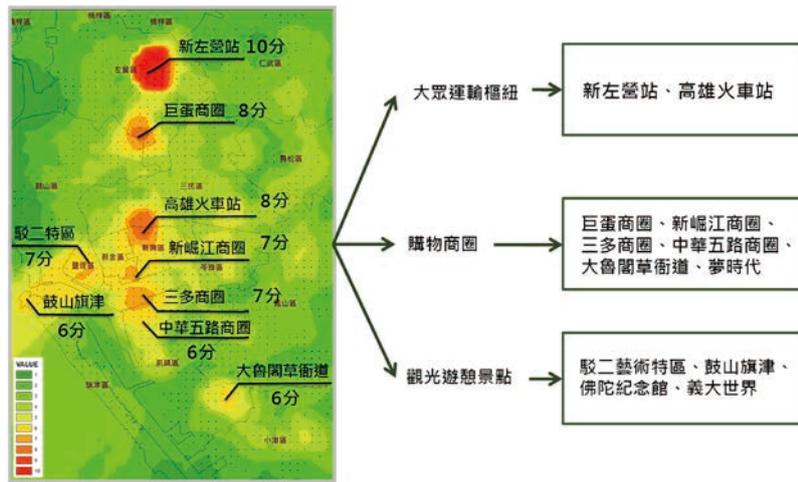


圖 4 電信數據分析高雄市熱門活動據點

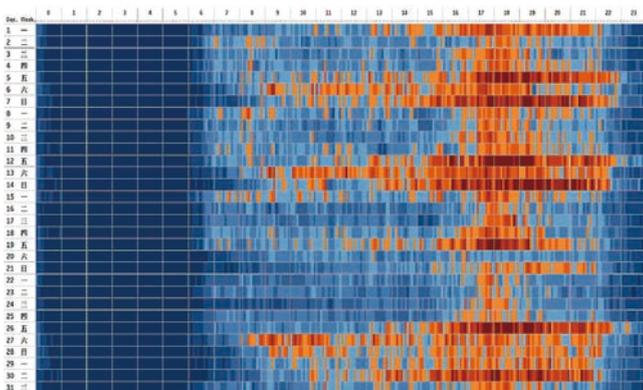


圖 5 電信數據分析高鐵新左營站地區分時活動熱度變化

電信數據分析高雄旅運特性

1. 平常日：以住宅區內旅次以及往來工業區旅次為大宗，主要起迄以左營區、前鎮區、小港區、楠

梓區、苓雅區、三民區、岡山區各自區內活動，以及跨行政區旅次之三民區至左營區、前鎮區至苓雅區、鼓山區至左營區、苓雅區至前鎮區、左營區至三民區、前鎮區至左營區等較高。

2. 週末假日：以往來商圈與熱門景點區域為最大宗，主要起迄分佈分別以左營區、三民區、前鎮區、苓雅區、鳳山區各自區內活動，以及跨行政區旅次之三民區往返於左營區、鼓山區往返於左營區、苓雅區往返前鎮區等較高。

3. 連續假期：跨區域活動之特性比平日、假日明顯，以分析當月份之端午節連假可看出左營區、前鎮區、三民區、小港區、鳳山區之各自區內活動以及跨行政區旅次之三民區至左營區、前鎮區往返苓雅區、鼓山區至左營區、鳳山區至前鎮區等較高。



圖 6 電信數據分析高雄不同日期主要旅次起迄

車輛偵測數據應用 — 道路壅塞預警門檻

一般道路偵測設備包括車輛偵測器 (Vehicle detector, VD)、車輛自動辨識 (Auto Vehicle Identify, AVI)、路側無線射頻感測器 (RFID Reader)、路況監視器 (Close Circuit television, CCTV) 等。其中，高雄市以車輛偵測器之建置數量 (約 220 處) 與分布最多最廣，車輛偵測器可記錄道路上車輛的平均速度、車流量和時間佔有率等數據，如圖 7，本文選擇以此作為道路績效數據蒐集與分析應用之基礎。

道路壅塞門檻值分析方法

將道路偵測回傳數據透過 K-means 法，以最佳分群數法進行分群，即群內差異最小、群間差異最大，分析道路壅塞臨界值。K-means 是一個分割式分群 (Partitional Clustering) 的演算法，主要的目的是在大

量資料中快速找出具有代表性的資料點，這些資料點稱為群中心 (center)，再依據相近的特徵邏輯分成 K 群。分割式分群法目的是希望盡量減小每個群聚中，每一資料點與群中心的距離平方誤差 (square error)，使其群間誤差極大化。亦即使同一分群裡需要具有類似特徵，不同分群必須具有相異之區別特性方能達到分群分類之用意。觀測值間之距離計算式如下：

$$\arg \min \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - \mu_i\|^2$$

μ_i : S_i 群體的平均數；

x_j : 第 j 個資料點；

k : 分群的總群數；

j = 1, 2, 3, ..., 資料總筆數 ; i = 1, 2, 3, ..., k 。



圖 7 高雄市車輛偵測器區位與數據查詢資訊

於 K- 平均數分群法中，最佳分群數之決定可由 CH 指標 (Calinski-Harabasz criterion) 評估而得，CH 指標透過計算各群間變異數與群內變異數之比例，以群間離散程度與群內緊密程度比例做為依據，以取得最佳分群數，公式如下：

$$\frac{SS_B}{SS_W} \times \frac{(N - k)}{(k - 1)}$$

- SS_B：群間變異數；
- SS_W：群內變異數；
- N：資料總筆數；
- k：分群的總群數；

而各分群之起始中心點則透過 Lloyd 演算法 (Lloyd's algorithm) 設定，Lloyd 演算法根據 CH 指標取得之分群數，將所有資料點隨機切分為初始化分組，並計算每組之中心點做為各分群之起始中心點。接著，計算各資料點與各分群中心點之歐氏距離 (Euclidean Distance)，並將資料點重新切分至距離最近之中心點所在分群後，再次計算各群中心點並重新分組，直到中心點位置不再改變。

易壅塞道路之壅塞預警門檻建立

本文以高雄市境內之道路車輛偵測器回傳之 105 年 1 月至 106 年 9 月間數據，透過分時流量、平均速率等兩項指標篩選高雄市易壅塞之路段，篩選出九如路、中正路、大中路、中華三路、自由二路、以及博愛路等 6 處為市區重要之易壅塞道路。將此 6 處壅塞道路以各路段順逆向分時之交通量與平均速率為一個資料分析點，共有 1.4 萬個數據點 (已剔除異常或缺漏數據點) 進行壅塞預警門檻值分析，如圖 8。

藉由分析找出各路段之壅塞臨界值，若車流量超過此門檻值時，速率會逐漸降低出現交通壅塞之情形，各路段之門檻值再納入交控中心，結合資訊可變標誌發佈排程設定，提供用路人於上游路段事先壅塞預警資訊，以避開壅塞時段或改道，以疏緩塞車之現象。

市區易壅塞道路交通預報

交通預報技術

1980 年代交通預測主要利用統計概率論建立數學模型，收集所觀察系統的數據，主要以迴歸分析、時間序列分析等進行量化的分析、總結，併進而推斷和預測。2010 年機器學習方法崛起，以大量特徵變數

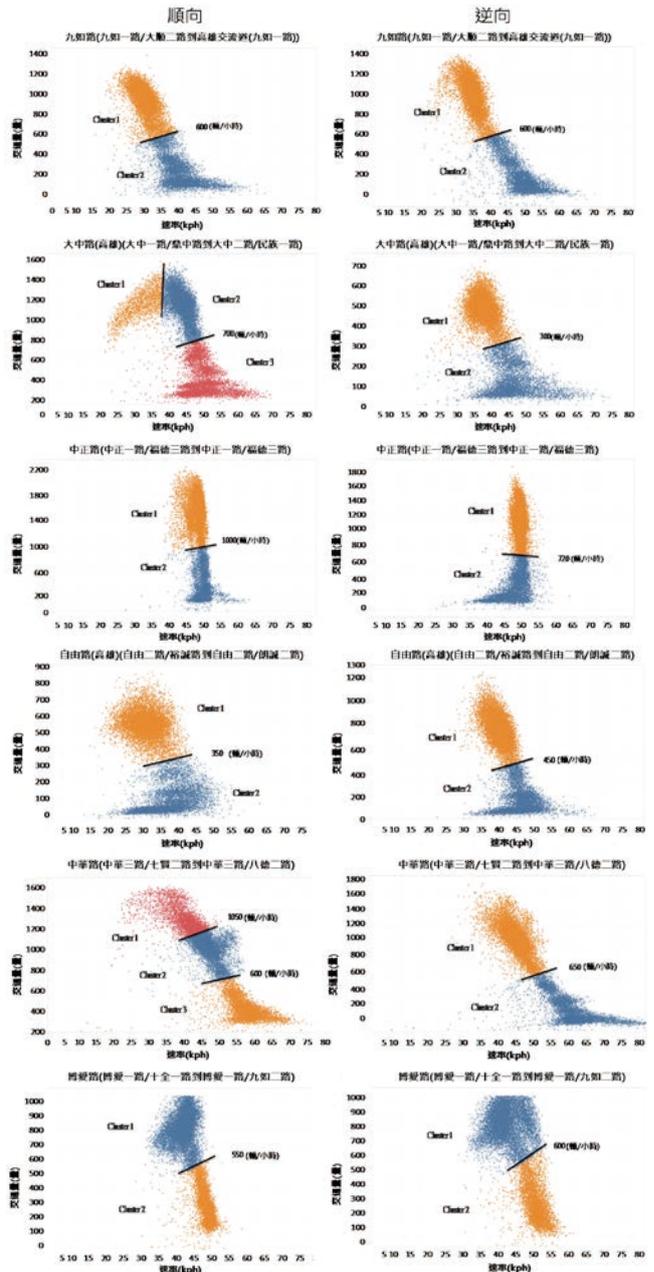


圖 8 高雄市區易壅塞道路壅塞預警門檻值界定

數據建立訓練集與測試集建立模式進行預測，機器學習方法發展相當快速且多元，包含決策樹 (Decision Tree)、隨機森林 (Random Forest)、類神經網路 (neural network)、最近鄰居法 (KNN)、貝葉斯算法 (Bayesian Algorithms) 等，國內交通部運輸研究所、高公局相關研究與創意競賽，亦導入機器學習法進行交通速率、旅行時間預報。2017 年隨著人工智慧 AI 時代的來臨，Google DeepMind 在人工智慧方面取得重大突破，AlphaGo 透過深度學習法 (Deep Learning) 戰勝棋王而聲名大噪，北京交通大學也導入深度學習法預測北京道路速率，亦獲得不錯效果。

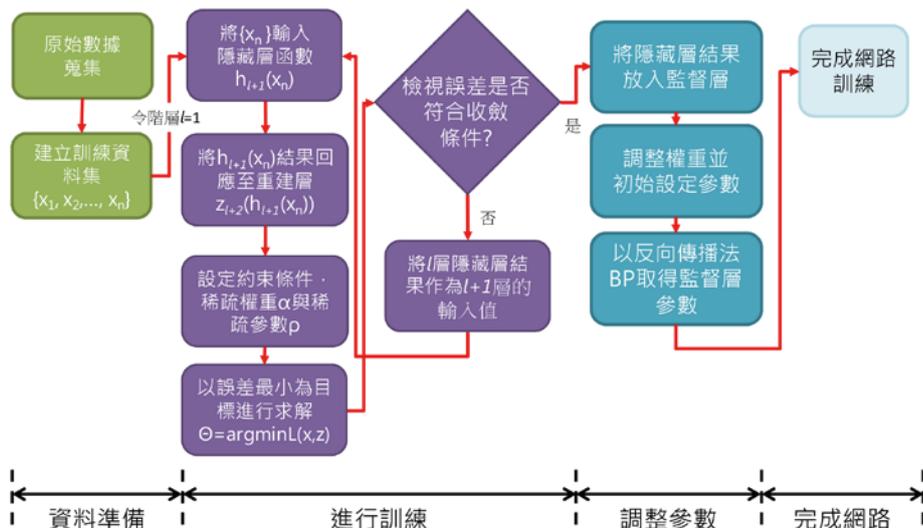


圖 9 深度學習模式訓練邏輯

本文針對此項機器學習法評估後，採用深度學習作為交通預報之方法，此演算法是基於最陡坡降法 (gradient steepest descent method)，透過疊代使資料輸出值實際值之誤差達到最小，並將過程建立成模式。深度學習的概念以目前公認的理解上系屬機器學習 (Machine Learning, ML) 的分支，並歸類為特徵學習 (Feature Learning) 之類別。簡略概之是期望可從眾多函數集 (現多採用線性、非線性等函數) 中選取最好的函數，然而函數會以不同的組合產生出不同等級的階層，產生出多個處理層對資料進行分析的演算法，並從中取得最佳績效函數與階層。

交通預報模式建立

1. 交通預報模式變數選擇，模式所需投入變數應具有可事前掌握之特性，並具有足夠的數據量，方能透過機器學習演算法建立預測模式，高雄交通預報模式變數可歸納為假期、氣象、交通、活動四大面向。

- (1) 假期：根據人事行政局每年公告行事曆，建立不同年月、星期別、假期名稱 (例如：春節、中秋節、清明節、端午節、雙十節、元旦等連續 3 天以上之假期)、假期天數 (例如：3 天、4 天等) 建立對照模式變數所需屬性變數。
- (2) 氣象：介接交通部中央氣象局氣候統計觀測資料查詢系統，透過 ETL 資料萃取轉換程序，處理成高雄交通預報模式所需變數，例如日雨量是否超過 80 mm，有則 heavyrain_yn 變數數值為 1，沒有超過 80 mm heavyrain_yn 變數數值為 0。

- (3) 交通：以道路偵測設備 (VD) 數據資料為基礎，收納 2016/1 ~ 2017/9 每 5 分鐘 VD 歷史數據資料，並透過 ETL 資料萃取轉換程序，剔除異常數據，並針對各 VD 進行分時流量與分時平均速率之運算，轉換為模式之訓練變數。
- (4) 活動：根據體育署與各縣市政府核可之路跑活動日期與範圍，將其建立為觀察變數。根據交通部觀光局、高雄旅遊網每年公告之活動行事曆、大型燈會、大型展覽、年度盛事之舉辦地點與日期建立模式所需之變數，及結合電信大數據分析之活動飽和度資料。



圖 10 高雄市區幹道交通預報模式建立流程

2. 深度學習模式選擇參數：參數值包括層數 (Layer)、疊代次數 (Epochs)、神經元數 (Neuron)、學習率 (Learning Rate)、活化函數 (Activation Function)、分配函數 (Distribution Function)、輸入層刪除率 (Input Dropout Ratio)。高雄交通預報模式經反覆測試訓練，最佳參數如表 2。

表 2 深度學習法選擇參數

模式參數	參數值
層數 Layer	3
疊代次數 Epochs	60
神經元數 Neuron	400
學習率 Learning Rate	Adaptive
活化函數 Activation Function	Rectifier
分配函數 Distribution Function	Auto
輸入層刪除率 Input Dropout Ratio	0.1

(3) 交通預報模式應用範圍：以兩處熱門據點之聯外道路，以及三條市區易壅塞道路進行預報模式驗證應用，模式預報可產出各路段不同日期每 5 或 30 分鐘為單位之每日時空流量與時空速率資料，作為交控中心事前掌握交通壅塞程度與發佈交管措施之基礎。

易壅塞道路交通預報應用與驗證

以雙十連續假期 (2017/10/7 ~ 10/10) 進行交通預報服務與驗證，於假期前 14 天啟動預報資訊提供，並於假期後進行交通預報驗證，先以三條市區易壅塞道路進行試辦。假期後透過平均絕對值誤差率 (mean absolute percentage error, MAPE) 檢驗預報與實際值之誤差，如表 3，驗證結果 MAPE 值多小於 15%，預報能力良好，可持續透過模式之滾動學習精進與持續將交通預報資料提供交通管理權責單位與用路民眾參考。

表 3 三條市區幹道壅塞路段交通預報 (2017 雙十連假) MAPE 值

日期 / 方向	大中路		九如路		中正路		
	速率	流量	速率	流量	速率	流量	
10/7	順向	9.11%	13.25%	6.72%	3.34%	2.50%	7.75%
	逆向	12.00%	6.58%	3.61%	1.80%	1.39%	2.22%
10/8	順向	6.28%	10.18%	8.11%	7.21%	2.83%	5.63%
	逆向	10.56%	6.50%	4.28%	0.19%	1.33%	2.79%
10/9	順向	6.78%	9.17%	5.61%	0.58%	1.83%	5.08%
	逆向	10.50%	3.44%	3.94%	0.10%	2.28%	12.92%
10/10	順向	5.11%	8.37%	5.11%	5.57%	0.67%	4.35%
	逆向	9.61%	0.43%	5.22%	2.99%	1.72%	11.49%

參考文獻

- 應用大數據技術建置重要瓶頸路段及運輸走廊之交通預警機制，交通部運輸研究所 (2016)。
- 106 年多元偵測技術整合應用計畫，高雄市政府交通局 (2018)。
- Mark K. Y. Mak, George T. S. Ho and S. L. Ting (2011), A Financial Data Mining Model for Extracting Customer Behavior.
- Miao Chong, Ajith Abraham and Marcin Paprzycki (2011), Accident Data Mining Using Machine Learning Paradigms.

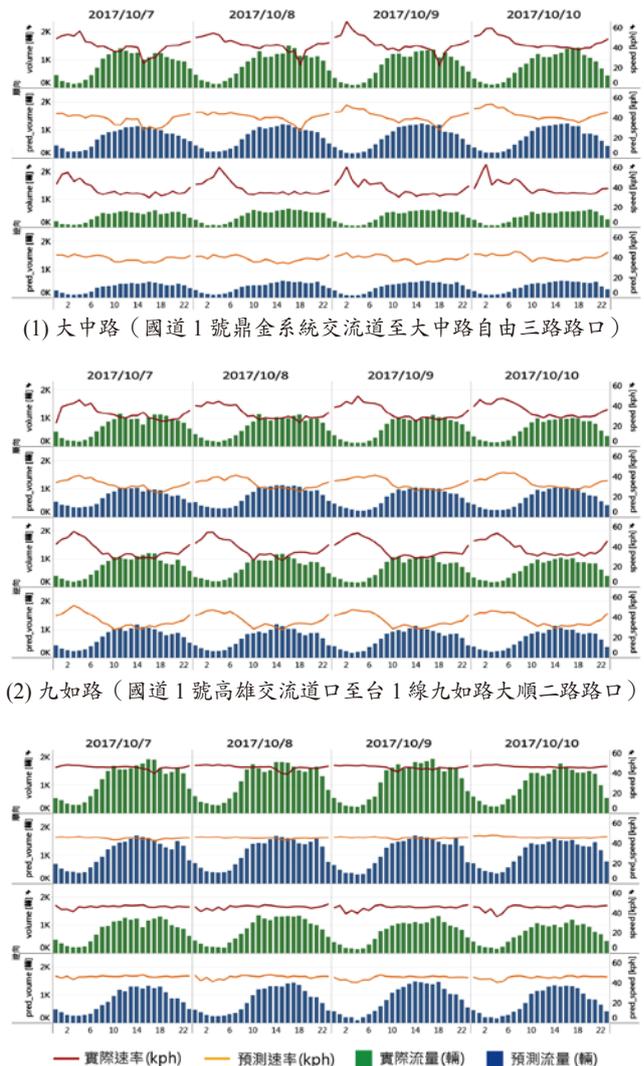


圖 11 三條市區幹道壅塞路段交通預報 (2017 雙十連假) 驗證

- Yann LeCun, Yoshua Bengio and Geoffrey Hinton (2015), Deep Learning.
- Yisheng Lv, Yanjie Duan, Wenwen Keng, Zengxi Li, Fei-Yue Wang (2015), Traffic Flow Prediction With Big Data: A Deep Learning Approach. IEEE. Vol. 16. No. 2. pp. 865-873.
- Manuel Fernandez-Delgado, Eva Cernadas, and Barro (2014), Do We Need Hundreds of Classifiers to Solve Real World Classification Problems? Journal of Machine Learning Research.
- Xiaolei Ma, Zhuang Dai, et al. (2017), Learning Traffic as Images: A Deep Convolutional Neural Network for Large-Scale Transportation Network Speed Prediction. Sensors. Vol. 17. Issue 4.
- Atos Group. Real Time Traffic Forecast, Ascent white paper. November 2013.
- Nicholas Polson and Vadim Sokolov (2016), Deep Learning Predictors for Traffic Flows. Cornell University Library, arXiv: 1604.04527.
- Xiaolei Ma and Haiyang Yu (2015), Large-Scale Transportation Network Congestion Evolution Prediction Using Deep Learning Theory.
- Zilu Liang and Yasushi Wakahara (2014), Real-time urban traffic amount prediction models for dynamic route guidance systems.



應用 視覺化工具 模擬 建物智慧化防禦 — 輔以 C4ISR 之概念

李秋明／國立臺灣大學土木工程學系 博士生

謝尚賢／國立臺灣大學土木工程學系 教授兼系主任

拜現今科技所賜，在網路通訊發達之餘，物聯網（IoT）技術與設備也愈趨成熟，影像辨識準確度大大的提昇，再加上區域地理資訊數據完整，建築物 BIM 數位與邏輯資訊整合及應用也日漸普及，橫向系統整合能力強，對於特定區域內移動或是未被授權的人或物體等情報資訊的監視、偵查、與收集，可以即時透過雲端資料庫、利用大數據及人工智慧的分析與判讀比對，由中央指揮系統完全監控與管制，一旦發現可疑，系統得以即刻反應處置，避免發生不必要的麻煩問題。值此 21 世紀，工廠自動化、自駕車、無人飛機及機器人的普及應用，都讓我們可以預見未來智慧城市的系統結構必須翻轉，包括智慧建築、智慧社區、智慧交通、民生、知識教育等。智慧城市的基礎架構是為了保障人民的生命財產安全，以及數位網路資訊安全保密，避免因為資訊安全漏洞而影響公部門的行政運作，並造成個資外洩等問題，間接威脅到當事人。

本文透過國防安全系統（C4ISR）的基礎架構，探討當今智慧建築的智慧化防禦，並透過建物 BIM 資訊與 Unity 軟體開發工具的視覺動畫呈現，以臺灣大學土木研究大樓為參考藍圖，並利用該大樓現有的 BIM 資訊，來說明可以應用 GIS 地理資訊系統及結合建置的物聯網（IoT）設備，搭配影像攝影機智慧辨識監視系統，透過視覺模擬建置的一套智慧防護指揮系統來模擬無人機攻擊該大樓時可能出現之狀況，簡稱 NTU-C5ISR，希望藉此得以化解危機。本文利用視覺化的呈現，提醒眾人思考該如何解決未來可能面臨的情境問題。也作為校園防恐攻維安系統的初步探討，進而應用到重要的地標或公眾建物及設施等，以利提升智慧城市保障全體市民的安全規範。

緣起

在智慧城市中，政府需要保障人民的生命財產安全，確保建築物及網路資訊安全^[1]，避免因為天災、人禍或資訊駭客的威脅，導致個人財產及生命安全或隱私遭受威脅。在土木工程所討論的營建管理、交通、房屋結構、水利、測量及大地工程等議題中，皆脫離不開安全相關議題的探討與研究。針對一般住宅的結構健康安全監測（Structure Health Monitoring，簡稱 SHM）^[2] 方法及研究應用討論已非常廣泛，包括橋樑、隧道、高樓、公共建築、維生管道、河川土石流、邊坡及體育館

等。利用感測器如 Fiber Bragg Grating（FBG）^[3]，或物聯網（Internet of Things，簡稱 IoT）感測設備資料收集待測物的結構撓曲破壞變形與溫度的變化，透過有線或無線網路（Wireless Sensor Network，簡稱 WSN）^[4,5] 傳輸到中央控制主機。經由各式的演算法^[5-7] 進行分析實驗或實測收集的資訊，甚至利用人工智慧（Artificial Intelligence，簡稱 AI）^[8] 技術作為最後自動判讀的分析工具，構建早發預警系統（Early Warning System，簡稱 EWS）^[9]。在安全考量下提醒災難現場的人，可以及時避開因結構安全問題造成的危險與災難。因此本文

藉由智慧城市的安全考量，除模擬透過建置建物 SHM (Structural Health Monitoring) 系統平常可以自動收集的資訊外，同時也配合自動化指揮系統 (C4ISR) 基礎架構^[10]，探討當今智慧建築的智慧化防禦，透過一套簡稱為 NTU-C5ISR 的智慧防護自動指揮系統，以系統化的判斷決策來進行模擬以避免外來的災難。本文模擬在未來領空，未經報備登記的無人飛機橫行攻擊台大土木研究大樓。系統透過自動化指揮系統呈現動態視覺化的情境，以利進行校園防恐攻維安系統的初步探討，進而可應用到其他重要的地標建物或公眾建物設施等，來提升智慧城市保障全體市民的安全考量應用。

C4ISR 自動化指揮系統

C4ISR^[10,11] 自動化指揮系統是在二十世紀九零年代美國軍方所發展出的智慧型作戰系統。主要功能包含指揮 (Command)、控制 (Control)、通訊 (Communication)、計算 (Computing)、情報 (Information)、監視 (Surveillance)、及偵察 (Reconnaissance) 七大子系統功能。利用對情報的收集分析與監視，及早發現威脅，啟動預警的機制，如此便可即時發揮該有的軍備及戰力。圖 1 為 C4ISR 的系統架構圖。若比喻成人體的結構來看，人的四肢、眼、耳及鼻猶如感測器，神經系統將外界所接收到的訊息經由中樞神經傳輸到大腦，大腦最後可以自動判斷目前的處境是吉是凶，並立即採取應變措施。C4ISR 就是類似的運作機制，先從操作觀點確認作戰架構，藉此了解作戰需求，接著再從技術觀點來了解技術架

構以利制定各規範標準，最後從系統觀點來將各子系統的架構轉成實體的需求，流程如同系統工程中所討論的系統架構 (System of Systems, 簡稱 SoS)^[12,13]。正如韓孟麒博士^[14]所討論 C4ISR 自動化指揮系統透過感測器平台建置巡航巡視系統資訊，並透過例如 ZigBee 等無線設備傳輸，結合軍隊及武器的運用來制敵。目前物聯網 (IoT) 感測科技發展漸趨成熟，不僅帶動了應用系統及相關產業的技術，包括感測器的製作、設計、互動性、功能彈性、相互連結性與緊急狀況時的智慧判斷，也協助軍隊提昇了決策品質。國家中山科學研究院^[15]目前也建構了一套高度仿真之虛擬合成化戰場演訓環境，利用 C4ISR 結合虛擬實境遊戲等來進行建設性的模擬，實施跨系統或跨軍種之組合式訓練，用來提高部隊聯合作戰能力；同時也訂定了共同標準規範，目前已由陸軍完成試行階段，未來各軍種將配合政策逐步擴大應用規模，以確認合成化戰場在聯戰訓練及未來性上的執行效益。

商業及農業方面也都有利用 C4ISR 概念來執行設計及運作的商業模式，研究探討包括供給與需求、業務、生產、倉儲、採購、後勤支援、行銷到服務的案例^[10,16]。各產業更可以操作成為一個生態結構鏈。若簡化 C4ISR 的架構思維，以商業應用為例，可以分為第一部分是現場情資收集與傳遞，例如商品的規格、特性、訂價、客戶之狀況，或者是進、出貨，與庫存量，甚至是退貨貨品、問題狀況、數量等；第二部分為後勤資源與情報，市場資訊系統或大數據庫、倉儲管理系統，或客戶服務系統 (Customer

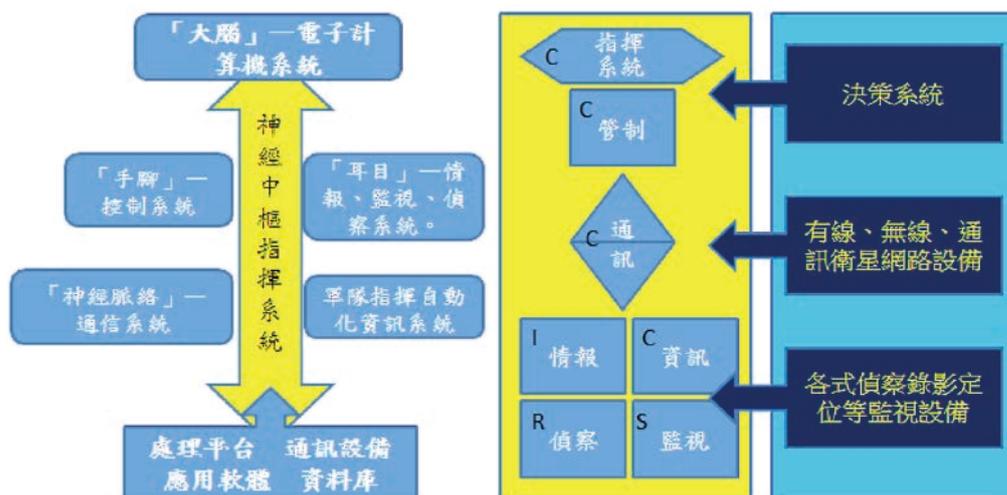


圖 1 C4ISR 系統架構 (本文整理)

Relationship Management，簡稱 CRM)；第三部分為橫向聯繫協調，例如公司的電腦化系統 (Enterprise Resource Planning，簡稱 ERP)，採購供應商系統 (Supply Chain Management，簡稱 SCM)，及物流管理系統 (Logistics) 等後勤支援；最後則是指揮與回應判斷，意即最高決策管理判斷，包括是否調整市場訂價策略、回收及退換貨政策、外包合作廠商品質營運策略等的綜合性判斷整合。整個架構系統關係到公司營運的績效與品質，以及是否能達到董事會所訂定的目標與利潤的多寡。以目前透過大數據資料庫的資料探勘分析，就可以產生公司的商業智慧 (Business Intelligence，簡稱 BI)，這些都是由不同子系統的運作所產出的效益。若相關人員可以在平時以此架構平台進行系統訓練，應可以提升整家公司的運作效益。

NTU-C5ISR 模擬系統

基於上述的 C4ISR 理論架構基礎，本文分享筆者在台大土木研究所大樓所模擬建置的大樓防禦與反擊安全系統 NTU-C5ISR 的經驗。圖 2 為 NTU-C5ISR 系統的模擬架構。本系統架構採用土木研究大樓的 3D BIM 模型資料庫，建置 AI 人工智慧引擎，並利用 IoT 感測設備做為當事件發生時的前端情報資訊收集設備，利用通訊無線網路 4G、5G 或 WiFi 傳輸設備，把啟動的事件資訊或物件特性、圖像、及地理位置坐標等資訊，傳送至中央控制後台 (NTU-C5ISR) 的系統資料庫。一旦事件的相關資訊進入中央控制後台後，影像辨識引擎及

地理資訊子系統引擎即會啟動，並自動將辨識後的結果回傳至中央指揮控制系統，同時透過連網的中間傳輸機制，連續觸發所有相關的警告訊息，並連動啟動智慧設備排程引擎，透過不同資訊的判讀進行橫向自動溝通。而中央指揮控制系統則可以藉由資訊判讀，立即判斷並啟動防禦反擊機制，如緊急告警、逃生設定指引方向機制，或災後救災活動，將事件的影響範圍縮到最小。即時狀態訊息則可利用網路傳輸中間媒介架構，例如 DDS (Data Distribution Service) 的即時傳輸功能 [17]，透過事先定義的事件 QoS (Quality of Service)，讓在同一個網域內的任何 IP 位置，都能藉由個人手持設備將即時資訊傳遞到所有位在該建築物內的人員。緊急通知功能則可以利用擴增實境 (Augmented Reality, AR)，提供現場人員疏散導引，如同「基於 BIM 之擴增實境輔助逃生系統」一文所述 [18]，降低災害所造成的傷亡。利用 C5ISR 系統的資訊溝通介面 (Data API) 也可以開放提供給其他早發預警、即時監控、指揮、或應變子系統使用，例如：建築物外觀透過無人機定期巡航建物安全系統、建物定期檢修維護系統、防恐攻事件監控系統、颱風過後應變與修復管理系統，以及災後巡視及復原指揮系統等。

NTU-C5ISR 模擬系統開展展示

本文根據上述的模擬系統架構，模擬假設以無人機攻擊土木研究大樓。而本展示系統利用 Unity 遊戲引擎作為動態模擬無人機送貨巡航，結合土木研究大樓 3D BIM 模型資訊 (如圖 3)，透過人工智慧 AI-BIM 分

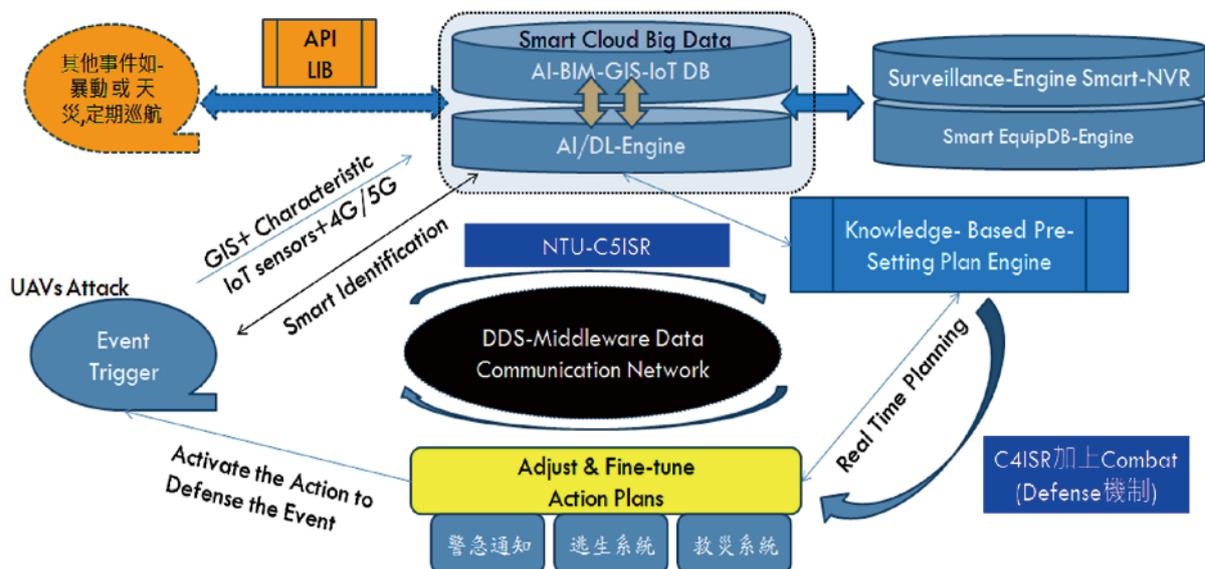


圖 2 NTU-C5ISR 架構 (本文繪製)

析引擎預估判斷建築物內人員出入的數量（如表 1），依此狀態若發生攻擊事件時，逃生計畫將依照時間並根據房間的人口數量作運算判斷並即時顯示逃生路線（如圖 4）。

本模擬系統透過 Java SE 工具所提供的標準 Wrapper 資料類別來包裝並快速收集大量 UAV 圖片，經過 Java 編譯運算處理篩選後，安排適當的訓練資料集做為測試庫，利用卷積神經網絡（Convolutional Neural Network，簡稱 CNN），透過 GPU 快速訓練模型，分析精確度及損失函數，修正所訓練的參數，再經過多次的訓練以提升 UAV 影像辨識率。例如辨識判斷無人機型屬於戰略、戰術、還是特殊任務的任一類類型，以及其屬於何種分類類別（例如：微型、小型、中型、攻擊型...）、所屬縮寫代號，航程，飛行高

度、續航時間等。透過人工智慧判斷這些資訊後，便可快速精準判定其是否為合法申請的無人機；若判定為不經意闖進或具惡意的無人機，本系統將啟動反制措施，透過約束快速驅離或擊落的機制，避免大樓發生立即性的危險。圖 5 說明 BIM、GIS、物聯網（IoT）及影像感測與 AI 人工智慧引擎資訊處理之間的關係示意圖。圖 6 呈現模擬系統運作時的動態展示，其中左上角的第一張圖片顯示有 UAV 進入監測區時，系統自動辨識並進行識別與記錄追蹤；左下角的第二張圖片顯示系統判斷兩架非預約或管制型號的無人機進入監控區，並從右上角的第三張圖中判斷出該兩架無人機屬於誤闖，大樓恐有被攻擊之疑慮，於是智慧型指揮系統綜合各方訊息判斷必須即刻將這兩架無人機驅離或者擊落。而右下角的第四張圖片即為經過系統判斷

Name	CreatedBy	CreatedOn	Category	FloorName	Description	ExtSystem	ExtObject	ExtIdentifier	RoomTag	UsableHeight	GrossArea	NetArea
房間 610	pc0065666@caece.net	2017-09-23T06:25:35	n/a	6F	研究室	Autodesk	房間	954406	n/a	n/a	17.1216	17.1216
房間 611	pc0065666@caece.net	2017-09-23T06:25:35	n/a	6F	研究室	Autodesk	房間	954408	n/a	n/a	17.1216	17.1216
房間 612	pc0065666@caece.net	2017-09-23T06:25:35	n/a	6F	研究室	Autodesk	房間	954410	n/a	n/a	11.7639	11.7639
房間 Vlab	pc0065666@caece.net	2017-09-23T06:25:35	n/a	6F	視覺實驗室	Autodesk	房間	954412	n/a	n/a	11.6639	11.6639
房間 Clab	pc0065666@caece.net	2017-09-23T06:25:35	n/a	6F	創意實驗室	Autodesk	房間	954414	n/a	n/a	17.1216	17.1216

圖 3 土木研究大樓 BIM 模型資訊

表 1 時間與空間內人口數的統計 — 以土木研究大樓 6 樓為例

時間	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
房間 610	15	20	25	26	21	15	25	25	25	15	8	5	3	3
房間 611	10	15	20	20	13	10	18	20	20	16	12	10	6	5
房間 612	5	8	10	10	8	3	6	10	10	10	4	2	1	2
房間 Vlab	2	36	40	40	24	5	35	42	42	28	5	6	4	3
房間 clab	0	0	0	2	5	4	2	0	0	2	5	6	3	2

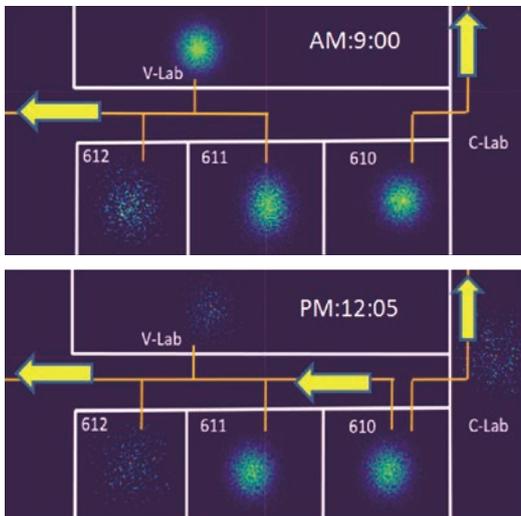


圖 4 依照不同時間規劃逃生路線

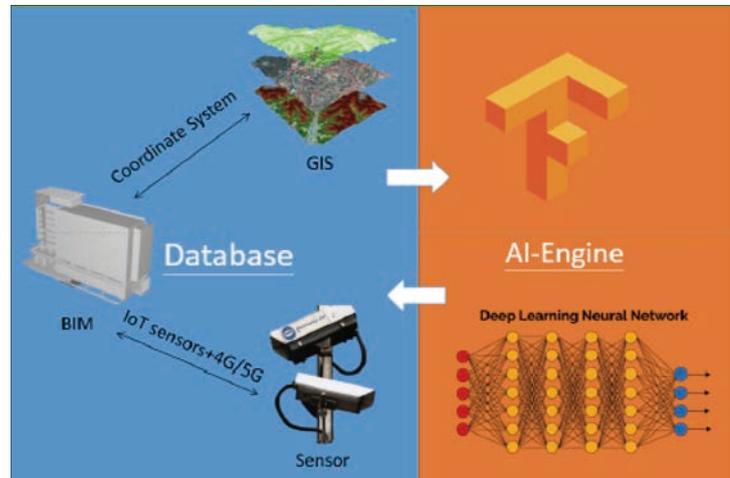


圖 5 BIM、GIS、物聯網（IoT）及影像感測與 AI 人工智慧資訊處理關係示意圖

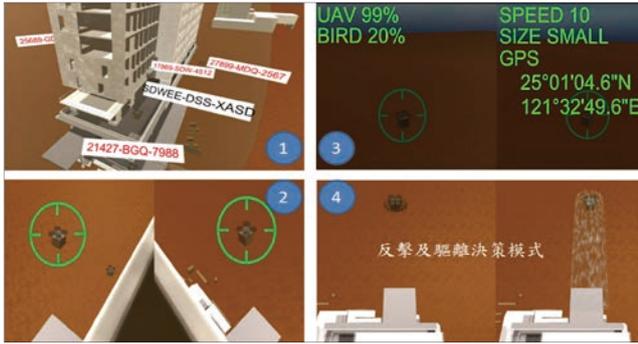


圖 6 NTU-C5ISR 系統展示執行驅離入侵無人機

後所下的決策，透過反擊設備將其中一架予以驅離，另一架無人機則用網子設備以驅補的動作予以擊落。利用視覺化模擬系統的好處是，可以進行不同情境或狀況的模擬，並透過相關的損害評估提供後續的防禦策略決定系統做參考。

應用 C4ISR 於公眾安全議題之國外案例

近幾年各國在公眾安全的議題上著墨不少，尤其無人機的製造技術已經越來越成熟，從國防軍用到商用機皆有更多元的用途。重要地標或建物遭受有心人士利用無人機攻擊或發生意外撞擊的可能性也將越來越高。反無人機系統大廠例如 Blighter^[19]、Chess Dynamics Ltd.、Enterprise Control System Ltd. 等，目前的技術已經可以做到從偵測（範圍 10 公里，100 平方公分，自動紅外線攝影機追蹤）到反擊擊落行動約 10 ~ 15 秒內完成（擊落方式也有許多，包括頻率干擾、撒網、訓練飛鳥 - 如老鷹、或其他各種方式）。市場上許多廠商也陸續提供各種多元方案，未來的技術勢必日新月異突飛猛進。相對地，攻擊的工具與手段也將越來越凌厲。如何有效地防範，公部門除了制訂法規管控以外，部署實質的防衛系統也已成爲未來的一大課題。美國太空總署（NASA）^[20] 自 2017 年 11 月起，便開始著手 Urban Air Mobility (UAM) 計畫，研究如何使無人機能在都市裡安全地進行送貨，同時成爲一個有效率、即時、安全，並自治無虞的運輸系統。目前 NASA 與 Uber 攜手合作，將此系統命名爲「空中計程車」運輸系統，預計將在 2020 年提供搭載人及貨物使用^[21]。

中國的華為公司^[22] 則是利用攝影機的人臉辨識技術來建置 C4ISR 協作架構平台，開創了安全視屏雲平台 (C-C4ISR)，用於監控公眾安全。此外，華為也與其他企業合作進行技術整合，包括從海量的人員視訊資

料中，精進核心辨識技術（目前所建置的系統，在茫茫人群中從追蹤人物目標到找到目標，只需約 7 秒鐘），同時也能進行危險物品辨識及人群聚集分析等，以統一告警與統一監控來解決公共安全問題。雖然此類監視系統之應用牽扯到公眾隱私保護問題，然而對治安的維護確實可以達到很好的效果。

結論

本文探討以 C4ISR 自動化指揮系統的架構爲基礎，以前端情報的收集及完善的通訊基礎網路，結合 3D 模型建物資料，模擬建物在遭受不預期事件（例如無人飛機）的威脅與破壞情境下，實作出 NTU-C5ISR 系統架構，並展示視覺化系統運作之動畫。藉由系統動畫模擬的呈現，可以在新建或規畫設計重要建物的時，將防禦系統納入考量。在邁入智慧城市時代的此時，期待政府能更保障人民財產及安全的前提下，可以建置參考規範。未來可以實現防禦指揮系統運作及搭配更先進的物聯網設備與人工智慧的輔助判斷，在管制範圍內及早發現不合法的人、機等物體的攻擊，避免不必要的災害發生，並降低建物財產的損失，達到智慧化的防禦。

誌謝

感謝台大土木系林怡萱、趙君傑、吳泓錡、及黃伯凱等人協助完成本文的相關資訊收集與展示系統的開發實作。並特別感謝台大土木 BIM 研究中心張國儀總編輯的協助校閱。

參考文獻

- Breining, C. and Nunez J. (2014), "Orchestrating Infrastructure for Sustainable Smart Cities", International Electrotechnical Commission, <http://www.iec.ch/whitepaper/smartcities/>.
- Klikowice, P., Salamark, M. and Poprawa, G. (2016), "Structure Healthy Monitoring of Urban Structure", *Procedia Engineering*, Vol. 161, 958-962.
- Zhang, X., Wang, P., Liang, D., Fan, C. and Li, C. (2014), "A Soft self-repairing for FBG Sensor Network in SHM System based on PSO-SVR Model Reconstruction", *Optics Communications*, Vol. 343, 38-46.
- Alonso, L., Barbarán, J., Chen, J., Díaz, M., Llopis, L. and Rubio, B. (2018), "Middleware and Communication Technologies for Structural Health Monitoring of Critical Infrastructures: A Survey", *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 56, 83-100.
- Gao, Y. and Spencer, B.F. (2008), "Structural Health Monitoring Strategies for Smart Sensor Networks", NSEL Report Series Report No. NSEL-011, May 2008.
- Sternal, M. and Dragos, K. (2016), "BIM-Based Modeling of Structural Health Monitoring Systems Using the IFC Standard," 28. Forum Bauinformatik, 19-21. September 2016, Leibniz Universität Hannover.

7. Ng, C-T. (2014), "Application of Bayesian-designed Artificial Neural Networks in Phase II Structural Health Monitoring Benchmark Studies", Australian Journal of Structural Engineering, Vol. 15, No. 1, 27-36.
8. Strov, A. (2017), "Cognitive Sensor Technology for Structural Health Monitoring," The 2nd International Conference on Structure Integrity (ICSI 2017), Funchal Madeira, Portugal, Procedia Structural Integrity, Vol. 5, 1160-1167.
9. Wang, J., Fu, Y. and Yang, X. (2017), "An Integrated System for Building Structural Health Monitoring and Early Warning Based on an Internet of Things Approach", International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 13, issue: 1.
10. 林千文 (1999) ,「資訊戰 — C4ISR 簡介」, 國立海洋大學, http://www.stu.ntou.edu.tw/MemberSites/Uploads/military/%7B21567557-0908-4FD3-BB50-C7D73E68B2A8%7D_%E8%B3%87%E8%A8%8A%E6%88%B0%E2%94%80C4ISR%20%E7%B0%A1%E4%BB%8B.ppt, 2018/08/26.
11. 台灣 Wiki ,「C4ISR 系統」, <http://www.twwiki.com/wiki/C4ISR%E7%B3%BB%E7%B5%B1>, 2018/08/26.
12. Worden, K., Cross, E.J., Dervilis, N., Papatheou, N. and Antoniadou, I. (2015), "Structural Health Monitoring: from Structures to Systems-of-Systems", IFAC-PapersOnLine, 48-21 (2015), 001-017.
13. Beihoff, B., Oster, C., Friedenthal, S., Paredis, C., Kemp, P. Stoewer, H., Nichols, D. and Wade, J. (2014), "A World in Motion System Engineering Vision 2025", International Council on Systems Engineering (INCOSE Foundation).
14. 韓孟麒, 「以大型系統理論為基礎的 C4ISR 系統」 <http://slidegur.com/doc/1133116/%E4%BB%A5%E5%A4%A7%E5%9E%8B%E7%90%86%E8%AB%96%E7%82%BA%E5%9F%BA%E7%A4%8E%E7%9A%84c4isr%E7%B3%BB%E7%B5%B1>, 2018/08/26.
15. 國家中山科學研究院, 「合成化戰場」, http://www.ncsist.org.tw/csistdup/products/product.aspx?product_Id=36&catalog=25, 2018/08/26.
16. 科技產業資訊室, 2015/3/13, 「系統體系與物聯網服務模式設計案例」, <http://iknow.stpi.narl.org.tw/post/Read.aspx?PostID=10852>, 2018/08/26.
17. 郭章良、李秋明、吳軒竹、謝尚賢 (2017), 「基於 BIM 的主動式防災通知系統之即時通訊架構設計」, 2017/07/07-08, 廣州第十二屆中國城市住宅研討會。
18. 楊懿 (2018), 「基於 BIM 之擴增實境輔助逃生系統」, 碩士論文, 台北: 臺灣大學土木工程研究所。
19. Blighter Surveillance Systems Ltd., <http://www.blighter.com/products/auds-anti-uav-defence-system.html>, 2018/08/26.
20. NASA (2017), "NASA Embraces Urban Air Mobility, Calls for Market Study", <https://www.nasa.gov/aero/nasa-embraces-urban-air-mobility>, 2018/08/26.
21. Reuters (2018), "Uber, NASA Partner to Explore 'Urban Air Mobility' in Quest for Flying Taxis", <https://gadgets.ndtv.com/transportation/news/uber-nasa-parner-to-explore-urban-air-mobility-in-quest-for-flying-taxis-1849516>, 2018/08/26.
22. Huawei (2017), "Huawei Releases C-C4ISR Collaborative Public Safety Solutions – Launching first all-cloud and matrix intelligence Video Cloud Solution and Crisis and Disaster Management Solution at Global Safe City Summit 2017", <https://duncannagle.com/huawei-releases-c-c4isr-collaborative-public-safety-solutions-launching-first-all-cloud-and-matrix-intelligence-video-cloud-solution-and-crisis-and-disaster-management-solution-at-global-safe-city/>, 2018/08/26. 



Trimble Choose the software for concrete construction. **Tekla**

Constructible BIM software for concrete construction

Visualize and communicate

Quantity takeoff for rebar and formwork

Import data rich model items straight from the producer

Clamps

www.ecs-ap.com

ecs 歐亞電腦股份有限公司
ENGINEERING COMPUTER SERVICES TAIWAN CO., LTD.

台北 TEL : (02) 87722966 台中 TEL : (04) 23750756 高雄 TEL : (07) 3363422
www.ecs-ap.com



政府開放資料之應用 — 以利用 高速公路電子收費資料 (ETC) 評估震後路網阻斷衝擊為例

楊承道 / 國家實驗研究院國家地震工程研究中心 副研究員

林祺皓 / 國家實驗研究院國家地震工程研究中心 助理研究員

黃為學 / 國立清華大學統計學研究所 研究助理

林旭信 / 中原大學土木工程學系 副教授

高速公路系統（以下簡稱，路網）平時即為民眾日常生活與經濟活動之維生線，地震發生後更是對外聯繫、急難救援與物資運輸的重要管道。若因地震而造成損壞，將會嚴重衝擊日常生活與救災活動之進行。直覺上，震後道路損失是以交通設施的損壞為主要考量（例如若干座橋梁因地震倒塌，所需的修復總金額與時間）。但單純以交通設施的損失是無法呈現道路阻斷所帶來的社會衝擊，因此另一種評估方法是以用路人的需求出發，評估如果道路狀態因地震發生改變，將有多少車輛被迫改道，以及這些改道車輛需比地震前多付出多少旅行成本（旅行距離、旅行時間、或旅行費用）才可完成原本預定的旅程。再者改道車輛的替代路徑是否會因車輛增加而壅塞進而付出更多的旅行成本，這些層面都是這個評估法產生的實質議題。故進一步而言，個別道路元件阻斷，除了代表有多少車輛被迫改道外，再往後探究則是某些都會區的日常經濟活動受道路阻斷的影響程度。不論是在震前防災規劃或震後快速應變，更細緻的路網衝擊評估能提供更多的決策參考依據。以交通運輸的角度出發來討論震後路網阻斷衝擊，需要路網狀態與運輸需求為基礎。在無政府開放的高速公路電子收費（Electronic toll collection, ETC）車流資料（以下簡稱，ETC 資料）前，這方面的探討只能運用粗略的推估數據^[1]；而利用 ETC 資料這樣詳盡的大數據庫，可更細緻化地評估震後路網阻斷衝擊。

前言

開放資料（Open Data）是網際網路蓬勃發展後經常被提及的新名詞，但其概念則已存在許久，與開放原始碼（Open Source）與開源硬體（Open Hardware）等非常相似。開放相對於不開放的迷人之處在於取得資料時所要付出的代價相對極小甚至幾乎為零，且加值並重製後的重新出版與發佈不會因為著作權、專利權或其它管制的限制而無法實行或者繼續發展。處於資訊決勝的時代裡，開放資料提供了所有個體與組織

一個相對較平等的起跑點，讓各領域的使用者可以在起始階段就能以真實世界為模型與驗證各種創新發想。政府為推動開放資料，建立了政府資料開放平台 (<https://data.gov.tw/>)，其目標與精神係藉由開放公眾資源與集體活動所建置之資料，創造有利於整合民間創意與跨機關交流之環境；並因應雲端運算及行動服務的趨勢，推動政府資料的開放與加值應用，進而促進公眾福祉之提升。

建置電子收費的最初目的是為了自動化收取用路

人的過路費，其計費方式是在特定的位置設置感應門架（以下簡稱，門架），每一個門架訂定依照里程推算出來的價格，車輛通過門架後就按照每個門架的定價計費。每一個利用高速公路完成的旅次，其過路費即以所有通過門架的定價加總計算。通過一個門架收一次錢，與傳統收費站點人工收費非常相似。為了讓計費與用路人的車輛確實連結、落實使用者付費以及確保日後不會發生交易爭議，ETC 額外紀錄每一輛車通過門架的時間與識別碼，這是人工收費時無法做到的動作。這個改變使得我們有機會追蹤每輛行經高速公路車輛的旅行軌跡，甚至可比對車輛通過兩個門架的時間判斷是否有超速行為。雖然 ETC 僅記錄車輛的軌跡，但由於台灣的高速公路主要是串接人口密集的都會區、高度發展的工業區與提供農產的農業區，其實 ETC 資料也紀錄了台灣大部分人口的日常動態與主要經濟活動。因此 ETC 資料除了直接應用於解決交通問題外，也可衍生應用來解決其它課題。例如，本文將簡要介紹的相關理論技術；並舉例應用 ETC 資料於評估路網震後阻斷衝擊。

如何評估劇烈地震後道路阻斷所帶來的衝擊

劇烈地震後路網發生阻斷除影響災區救災外，也將對非災區的日常生活與經濟活動造成衝擊。因衝擊層面非常廣泛，必須運用理論工具與配合數據將衝擊合理量化，才能有效評估地震對路網造成的影響。路網的震後衝擊評估是一種整合地區內地震風險特性、運輸需求、網路平衡、道路元件與路網分布的多種學科整合技術。

現有的評估工具中，以美國 Risks from Earthquake Damage to Roadway Systems（以下簡稱，REDARS2）^[2] 為代表。REDARS2 是一套用於高速公路的震災風險分析工具。這個分析工具是由美國 FHWA（Federal Highway Administration）於 1993-2000 年間支持 MCEER（Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research）執行的地震研究計畫所衍生出來的成果。REDARS2 主要由四個模組組成，如圖 1。REDARS2 的構成要件分別是：

- Hazards（地震災害潛勢）：評估地震發生時伴隨而來的地表震動、土壤液化、和斷層破裂可能引致的地表永久變形。

- Component（震損評估）：評估道路鋪面、橋梁、隧道等各項基礎設施，因震災引致的損壞程度、修復時間與成本、和交通狀態（如橋梁未修復前行經車輛是否需要降低速限、部分封閉或全部封閉）。
- System（路網分析）：用於評估路網服務效能是否受震災影響而降低。例如，路網內是否因為某一座橋梁受到地震損壞需要封閉維修，而造成系統內整體的行車時間與行車距離增加。
- Economic（經濟損失）：計算路網的基礎設施受震災衝擊所需的維修成本、旅次消失與車行延滯等各種經濟損失。

國內相關技術可以財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心（以下簡稱，本中心）自行研發的「台灣地震損失評估系統」為代表^[3]。該系統英文全名為 Taiwan Earthquake Loss Estimation System（以下簡稱，TELES），其子系統 T-Highway 可用於評估台灣地區的高速公路與主要公路系統，大致包含三個與 REDARS2 相同模組功能，如圖 1。T-Highway 為了能從整體路網的宏觀角度來檢視路網的地震風險，近年也與外部合作利用 T-Highway 的輸出資料結合商用運輸規劃軟體完成路網的地震風險評估^[4,5]。

總結相關文獻^[2-6,8,9]，路網震後衝擊評估的流程可以用圖 2 表示。工程結構物的損壞主要來自於強烈的地震動與地震引致的地層破壞（如土壤液化、斷層破裂或山崩等）。在震損評估階段，考慮道路元件本身的抗震能力與所在區域內的地質特性、活斷層震源和區域震源分佈。透過將活斷層震源和區域震源予以離散化，推估各個離散模擬地震的年發生率，進行公路橋梁的震災境況模擬，以評估個別橋梁之損害狀態機率、阻斷機率、修復時間、修復金額等。當道路元件



圖 1 REDARS 與 THIGHWAY 模組示意圖

發生損壞時，損壞程度大致可區分為 (1) 輕微損壞：車輛依然可通行，但車道須縮減或限速；(2) 嚴重損壞：如發生落橋、塌陷等現象，橋梁需封閉而導致交通阻斷。在路網分析階段，需透過使用者均衡指派 (User Equilibrium) 或系統最佳化指派 (System Optimum Assignment) 等方法論將日常運輸需求重新分配給震後部分受損的路網，求解總體的旅行時間延遲。藉由旅行時間增加車流量減少的動態需求理論推估可能消失的旅次。在經濟損失計算階段，主要是計算工程損失、旅行時間增加、旅次消失三個方面：

- **工程損失**：總和道路元件震後損壞所需要的修復金額。
- **旅行時間增加**：因為道路受損致使車輛須減速或繞道所增加的旅行時間與距離。透過時間價值及行車耗損等貨幣化之轉換，可將旅行時間增加、距離增加轉化為等值的貨幣。
- **旅次消失**：如某風景區於假日通常有眾多出遊及返家旅次，但因為災情傳出而使民眾取消旅遊計畫。計算旅次消失主是為了避免真實世界觀察到的現象與評估模式出現偏誤。道路受損讓車輛變少，而車輛變少使得本來壅塞的路段反而變成行車順暢，道路的服務水準看起來在災害後反而提高。

單以交通設施的工程損失來評估地震的衝擊，無法像總體用路人的旅行時間損失或有多少人因地震災害放棄出遊的旅次消失更能描述災害所帶來的社經衝擊。在沒有政府開放的 ETC 資料前，要推估路網阻斷對交通運輸的衝擊只能運用粗略的推估數據；而現在可利用 ETC 資料的大數據庫，可做到之前純理論推估無法完成的項目，例如於震後實際觀測阻斷區域鄰近的交通變化 (請參閱第四節)，或以近期實際觀測資料為基準推估路網阻斷所帶來的衝擊 (請參閱第五節)。

高速公路現況與 ETC 資料概述

目前台灣的高速公路有九條路線，其中國道一號與國道三號為聯結臺灣西部南北的兩大主線，國道一號有 2 個高架拓寬路段，分別是汐止五股高架道路與五股楊梅高架道路。兩大主線的支線除國道三號甲線及國道八號部分路段的道路等級為快速道路外，其餘均為高速公路。快速道路是指服務品質介於高速公路與一般公路之間的汽車、大型重型機車專用道路。快速道路以車輛的區域性移動為主，設計服務水準較高速公路為低，部份快速道路甚至沒有路肩設計。在台灣一般將高速公路與快速道路依管理單位區分為國道與省道。歸為國道的公路，由交通部高速公路局管理 (以下簡稱，高公局)；歸為省道者，由交通部公路總局管理 (以下簡稱，公路局)。前述國道三甲線雖然是快速道路等級，但管理單位是高公局。

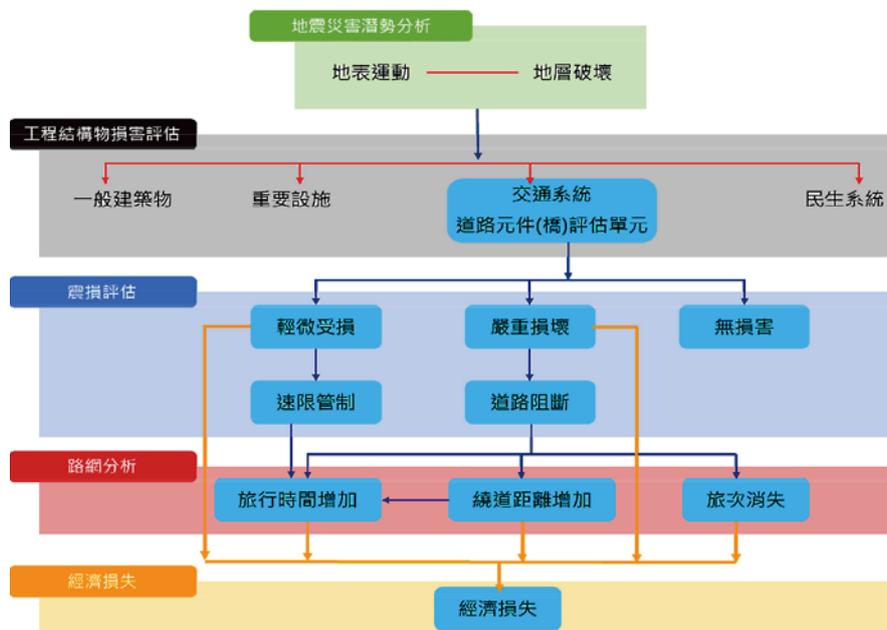


圖 2 路網震損評估求解流程

高速公路的 ETC 資料，是以 ETC 門架（以下簡稱，門架）偵測到每輛車通過門架的時間為基準經過統計運算產生。目前設置啟用約有 330 個門架，架設的位置包含：國道一號、國道三號、國道五號、國道三號甲線、汐止五股高架道路與五股楊梅高架道路。ETC 資料可至高公局「交通資料庫」(<http://tisvcloud.freeway.gov.tw>) 下載。ETC 資料的記錄時間起於 103 年 1 月 1 日，資料包含：各類車種通行量統計 (M03A)、站間各車種平均旅行時間 (M04A)、站間各車種平均行駛車速 (M05A)、各旅次路徑原始資料 (M06A)、各類車種旅次平均長度 (M07A)、各類車種旅次數 (M08A) 等六項報表。其中以 M06A 最為詳盡，而本文的案例即以 M06A 為基準。M06A 的紀錄來看待旅次，是從車輛被第一個門架偵測到的時間開始，到被最後一個門架偵測到的時間結束。旅次的歸檔以旅次通過第一個偵測站時間為基準，置於對應的日期檔案中，例如檔案名稱 M06A_20180731.tar.gz 的資料檔記錄了 2018 年 7 月 31 日所有進入高速公路的車輛，被第一個門架偵測到的時間落於當日 0 時 0 分 0 秒至 23 時 59 分 59 秒之旅次軌跡。



圖 3 ETC 門架分布與交流道出入口對應關係圖

M06A 資料主要包含各旅次的：

- 車種：區分小客車、小貨車、大客車、大貨車、聯結車。
- 起點：通過第一個門架的時間（時間精確到秒）及門架編號。
- 迄點：通過最後一個門架的時間及門架編號。
- 路徑：旅次經過的所有門架（編號）與通過時間。
- 行駛距離：旅次的行駛距離，起迄點門架及對應交流道的距離計算。

在此特別為讀者說明兩個初期使用 ETC 資料可能會產生疑惑的地方：

- 門架並非設於出入口：門架的編碼方式為國道代號（3 碼）、里程數（4 碼）、方向（1 碼），門架（01F3398N）即為設置於國道一號（01F）北向（N）339.8 公里處的門架如圖 3。以（01F3398N）為例，其位置介於高科交流道與路竹交流道之間。由於門架的位置並非設置在高速公路的出入口，所以若某一個旅次由高科交流道北上入口進入國道一號，而後從路竹交流道北上出口離開，透過 ETC 資料，只能找到這個旅次通過門架（01F3398N）的時間，無法完全準確知道該旅次進入與離開高速公路的時間。而 M06A 中所記錄行駛距離，也是以門架相對應的前後交流道為基準計算所得。
- 中途離開收費區依然會被追蹤：門架雖然只設置於縱向國道上，但解讀 M04A、M05A 與 M06A 的資料，依然可以追蹤到旅次利用橫向高速公路或快速道路，從縱向高速公路跨越至另一縱向高速公路的軌跡。例如，ETC 資料記錄某旅次先在國道一號南下 328.6 公里處經過門架（01F3286S），之後轉為國道三號南下 358.8 公里處經過門架（03F3588S）。透過上下游門架的組合與旅行時間紀錄，可合理推測該旅次利用橫向 86 快速道路（簡稱台 86 線），由國道一號轉向東行至國道三號。

利用 ETC 資料觀測美濃地震後鄰近路網交通變化

2016 年 2 月 6 日，凌晨 3 時 57 分，在屏東縣政府北偏東方 27.4 公里（高雄市美濃區）處，發生芮氏規模 6.4 地震，深度 16.7 公里。因發生在高雄美濃區附近亦稱為高雄美濃地震（以下簡稱，美濃地震）。此地震嚴重衝擊台南市，造成建築物倒塌、自來水系統損壞、人員傷亡與部分道路交通封閉等衝擊。其中台 86 線 16K 東行線（大潭 ~ 歸仁路段）24 號橋支承錯移，

於 6 日下午 5 時起進行封閉。台 86 線位於台南市，始於 17 號省道，向東與國道一號交會於仁德交流道，結束於國三號關廟交流道。台 86 線沿線附近有高鐵台南站、台南機場、安平港等重要的交通場站，為台南地區重要的橫向快速道路。根據公路局後續公告，台 86 線於同年 5 月 20 日 8 時後先開放 21 噸以下車輛通行，並於同年 7 月 20 日 17 時解除 21 噸以上車輛之限制。

本文以台 86 線為中心，追蹤從封閉前兩個月至東行線完全修復後一個月止，分析在此時段內鄰近區域所有門架收集到的數據，可發現車流有明顯變化的區域，如圖 4 所示，包含台 86 線封閉附近與其北邊的橫向國道八號。其中車流變化明顯的門架為 (A,B,C,D,E,F,G)，如圖 4 所標示。為了避免數據太多過於雜亂不易解讀，故圖 5 與圖 6 的橫軸與橫軸格線只標示這個時間段內所有星期三的日通行量。星期三的車流相較於一個星期的其他日子車流量最穩定，較不受前後假日之影響。門架 A 到 D 與 B 到 C 於這段時間的旅次日通行量標示於圖 5，明顯的可以觀察到特殊節日通行量異常增加和地震後通行量遽減，且在東行線修復開放後旅次有逐漸回復之狀態。另外一個比較有趣的觀察是在門架 E 到 F 與 E 到 G (圖 6) 的旅次通行量，台 86 線東行線封閉期間，從國道一號利用國道八號轉向東行至國道三號的旅次明顯變多，而東行線修復

後通行量即逐漸變少。因此本文利用 M06A 報表追蹤旅次的路徑軌跡，可以確立 ABCD 附近的旅次變化與 EFG 附近的旅次變化有直接相關。

解讀 M06A 報表可發現地震前車輛經過 B 門架到達 F 門架，可選擇的路徑有二，如圖 4 上標示的藍箭頭與綠箭頭。藍色路徑是國道一號北上，利用國道八號橫向切換到國道三號，路線長度 37.6 公里，平日過路費 18.2 元，行車時間約 23 分鐘。綠色路徑則是先利用台 86 快速道路橫向切換到國道三號，再由國道三道北上，路線長度 35.7 公里，平日過路費 12.1 元，行車時間約 24 分鐘。東行線封閉前，綠色路徑較短而且較便宜，且旅行時間差不多 (綠色路徑僅比藍色路徑多一分鐘)，但道路封閉後綠色路徑旅行時間大幅增加 (請參考表 1)。道路封閉後，利用 M06A 追蹤到同樣起迄點的旅次改走藍色路徑增加，但增加的旅次相對於國道一號平日旅次量算極少，所以藍色路徑上沒有因為交通量些微增加影響整體的行車時間。此外觀察到綠色路徑車流銳減，且低於藍色路徑，綠色路徑與藍色路徑旅次總和稍低於封閉前。

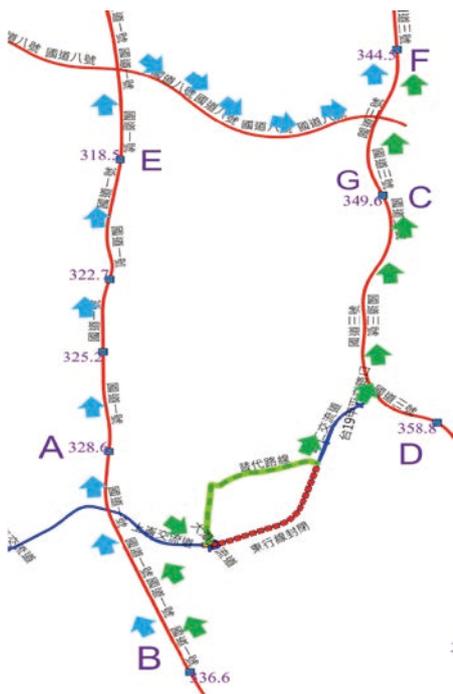


圖 4 美濃地震影響區域

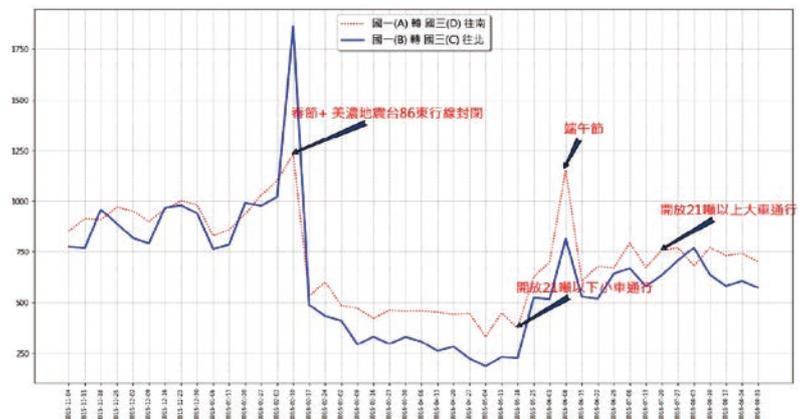


圖 5 台 86 東行線車流變化

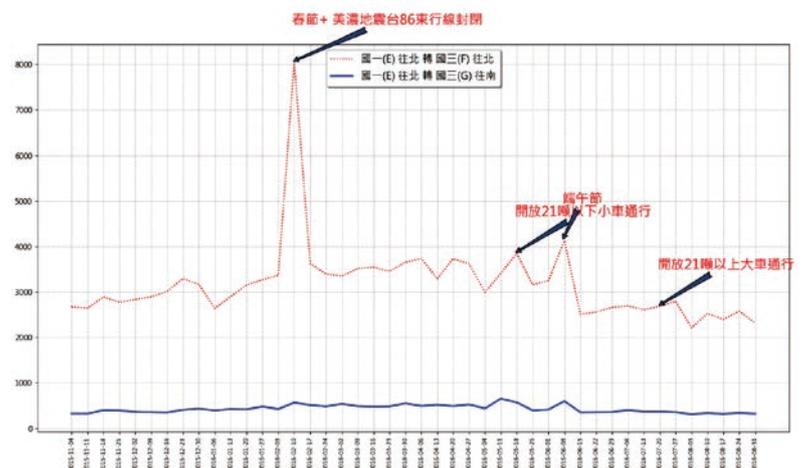


圖 6 國道八號橫向車流變化

表 1 藍路徑與綠路徑價格比較表

	藍箭頭路徑	綠箭頭路徑
路徑長度	37.6	35.7
過路費	18.2	12.1
行車時間(地震前)	約 23 分	約 24 分
行車時間(東行線阻斷後)	約 23 分	約 31 分
封閉前(平日)旅次	約 575 旅次	約 875 旅次
封閉後(平日)旅次	約 785 旅次	約 419 旅次

利用 ETC 資料推估路網阻斷衝擊地區

利用 ETC 資料亦可將地震後交通設施的點狀衝擊轉換為都會區域面狀分布來觀察阻斷所造成的衝擊。例如，從 ETC 資料中可以觀測到某周三早上通勤時間(6:00-8:30)有 22789 旅次由基隆地區的交流道進入高速公路。其中 7947 的旅次為在地活動車輛，會在基隆地區的其他交流道離開高速公路系統。而另外 14842 旅次跨過基隆河離開基隆地區往南前往其它都會區，如圖 7 藍圓圈所標示。圖上圓心標示旅次(大概的)目的地，半徑大小代表旅次數目，最大的交通量出現在台北市內湖區有 3192 旅次，而旅次數量小於 100 的地區忽略不計。若往南以淡水河為界，觀測同一天通勤時間，跨過淡水河南向離開台北市區的車輛共有 18533 旅次，如圖 7 紅圓圈所標示。其中最大的交通量出現在新北市泰山區 3257 旅次與桃園龜山區 3399 旅次。比較基隆市與台北市南向的車輛，可觀察到台北市車輛的活動範圍比基隆市分布廣，有部分延伸到新竹。以標示的交通量來比較跨越基隆河與淡水河南向路段，若這些路段震後受到阻斷，可以推估出淡水河南向所影響的旅次相對較多。若以通勤日為基準，分析 ETC 資料可以發現若淡水河南向路段阻斷，受衝擊的地區並非只包含淡水河對岸的三重、蘆洲與泰山一帶，實際衝擊的影響範圍可達桃園與新竹；而跨越基隆河之路段若發生阻斷則衝擊相對較小。

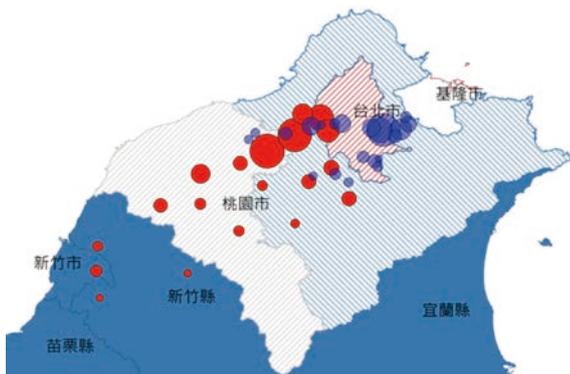


圖 7 通勤日離開基隆與台北地區的車輛數影響範圍示意圖

結論

本中心目前正以現有的 T-Highway 為基礎，配合 ETC 資料與運輸規劃技術發展新一代路網震後衝擊評估軟體 T-RoadNet。新一代軟體可評估在想定地震情境下，各路段發生阻斷可能衍生的旅行延遲與旅次消失外，也能標示實際受衝擊的社經區域。本軟體工具也可透過震後所得之 ETC 資料來觀測震後道路阻斷的鄰近區域交通量變化。高速公路平時即為台灣地區民眾生活與各種經濟活動之主要通道，若有重大災難發生時，更是救援物資、機具與人員快速應變的必要救援路徑。然而，台灣地形狹長且位處板塊交界，是地震頻繁的區域，若套疊經濟部中央地質調查所於民國 99 年公布的第一類與第二類活動斷層與現有高速公路系統，可以發現多條活動斷層與高速公路系統緊鄰或者相交。未來高速公路面對大規模地震災害的風險無法避免，T-RoadNet 可協助檢視各路段的地震風險與評估阻斷所帶來的衝擊，在震前防災規劃與震後應變提供決策參考。

參考文獻

- 交通部運輸研究所，「國家永續發展之城際運輸系統需求模式研究(4/4)」，民國 98 年 3 月出版。
- Werner, S. D., Taylor, C. E., Cho, S., Lavoie, J. P., Huyck, C. K., Eitzel, C. and Eguchi, R. T. (2006), Redars 2 Methodology and software for seismic risk analysis of highway systems (No. MCEER-06-SP08).
- Yeh, C. H., Loh, C. H. and Tsai, K. C. (2006), Overview of Taiwan earthquake loss estimation system. *Natural Hazards*, 37(1-2), 23-37.
- 林同棧工程顧問股份有限公司委託研究報告(2014)，「國道橋梁 TELES 系統地震損失評估之研究(含地震特別檢測時機建議)」，臺北。
- 台北市政府消防局委託研究報告(2004)，「台北市震後救援與避難道路規劃研究案期末報告書」，臺北。
- e Costa, C. A. B., Oliveira, C. S. and Vieira, V. (2008), Prioritization of bridges and tunnels in earthquake risk mitigation using multicriteria decision analysis: Application to Lisbon. *Omega*, 36(3), 442-450.
- Yang, C. T., Liu, X., Lin, C. H. and Tsai, C. Y., Impact of Meinong Earthquake on National Highway Traffic, 5th International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, August 15-17, 2016, Taipei
- Chang, L., Peng, F., Ouyang, Y., Elnashai, A.S. and Spencer Jr, B.F. (2012), Bridge seismic retrofit program planning to maximize post-earthquake transportation network capacity. *Journal of Infrastructure Systems*, 18(2), pp. 75-88.
- Padgett, J.E., DesRoches, R. and Nilsson, E. (2010), Regional seismic risk assessment of bridge network in Charleston, South Carolina. *Journal of Earthquake Engineering*, 14(6), pp. 918-933. 



對話機器人在工程上的應用 — 以 Ask Diana 為例

蔡孟涵／國立臺灣科技大學營建工程系 助理教授

楊政玕／國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心 助理

詹皓詠／國立臺灣大學土木工程學系 碩士生

陳奕竹／國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心 助理

康仕仲／國立臺灣大學土木工程學系 教授

郭純伶／經濟部水利署防災中心 主任

張成璞／經濟部水利署防災中心 正工程師

隨著使用者習慣的改變，通訊軟體的使用率已逐漸超過社群軟體、APP、網頁等其他平台。而以通訊軟體為平台所建置之對話機器人，伴隨著人工智慧技術的發展，逐漸在各領域中被廣泛地應用。相較於過去 APP 與網頁等僅能以單向的方式呈現資料，具有雙向的互動，加上其更為直覺的操作流程，讓對話機器人成為更有效率的溝通及資訊傳遞工具。在對話機器人中，最核心的技術為如何理解使用者語意之對話系統（Dialogue system）。其主要涵蓋：語意理解（Language understanding）、對話管理（Dialogue management）與自然語言產生（Natural language generation）這三種技術。透過對話系統的開發，能讓對話機器人能快速理解使用者需求，並快速地搜索使用者所需資訊，進而將資訊完整地提供給使用者。也因對話機器人具有能即時且準確提供資訊的特性，若能將其應用在複雜的工程領域中，勢必能大幅提升工程溝通的效率與準確性。另因對話機器人背後往往會包含一完備的資料庫，用以儲存相關的工程資料以及搜集現有使用者的操作紀錄，在有效處理後，該資料庫亦能成為工程經驗的傳承工具。此外，建置於大眾通訊平台之對話機器人，亦能作為大眾知識傳播的媒介。相信若能善用相關科技與技術，對話機器人勢必能在往後成為工程溝通、經驗傳承及知識傳遞的一大新利器。

對話機器人介紹

對話機器人（ChatBot）的發展

隨著資訊科技的發展及行動裝置的普及，使用者習慣也逐漸改變，通訊軟體（如：WeChat、KakaoTalk、LINE）的使用人數大幅增加，自 2015 年後已超越使用社群軟體（如：Facebook、Twitter）的使用人數（圖 1）。根據調查顯示，使用者對通訊軟體的

黏著度極高（BI Intelligence^[1]），且使用者對需要下載不同的 APP 已感到疲乏（ISAAC^[2]）。因此建置在通訊軟體中的對話機器人（ChatBot）也就成為目前溝通及取得資訊的方法之一。

對話機器人（ChatBot）是應用人工智慧（Artificial Intelligence）進行溝通與執行任務的應用工具。在資訊傳遞的部份，過去使用 Email 只能單向傳遞且 Email

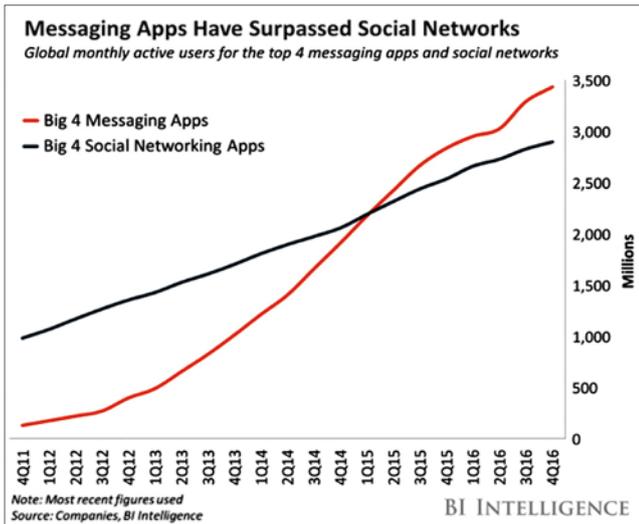


圖 1 社群軟體與通訊軟體成長比較圖 (BI Intelligence [1])

本身的開啟率不到 20%，而對話機器人可以雙向互動，且開啟率高達 90%，可有效提升溝通效率（黃彥鈞 [3]）。在資料取得的部份，使用者亦可透過對話機器人，在常用的通訊軟體進行對話，不再需要重新適應不熟悉的平台（蔡芸瑀 [4]）。以下分別簡述網頁（Web）時代、應用程式（APP）時代、對話機器人（ChatBot）時代探索及取得資料的差異：

1. Web 時代：使用者需要依照網頁的設計操作流程進行資料探索，與傳統語音查詢系統相似（如圖 2），因此使用者僅能由「設計流程的樹狀圖」的最上層節點進入，並一步一步照著樹狀圖往下一層的節點查詢資訊。
2. APP 時代：APP 的操作流程與網頁相似，只是顯示介面由大解析度的電腦螢幕，修改為小解析度的行動裝置螢幕。使用者一樣需要依照 APP 的設計操作流程進行資訊查找，因此使用者也僅能由「設計流程的樹狀圖」的最上層節點進入，並一步一步照著樹狀圖進入下一層的節點，以查詢所需資訊。
3. ChatBot 時代：ChatBot 重新定義了使用者介面，讓設計更聚焦於互動設計與使用者體驗。在 ChatBot 中，一樣有「設計操作流程」，使用者初次使用時可需要依照的設計流程操作，也就是使用者需要由「設計流程的樹狀圖」的最上層節點進入，並一步一步照著樹狀圖進入下一層的節點，以查詢及探索所需資訊。但最大的優勢在於，使用者可藉由直接輸入關鍵字，從「設計流程的樹狀圖」的任一節點進入（如圖 3）。未來使用者在開始使用系統時，可依照系統設計樹狀圖進行資料查找，也可以直接下

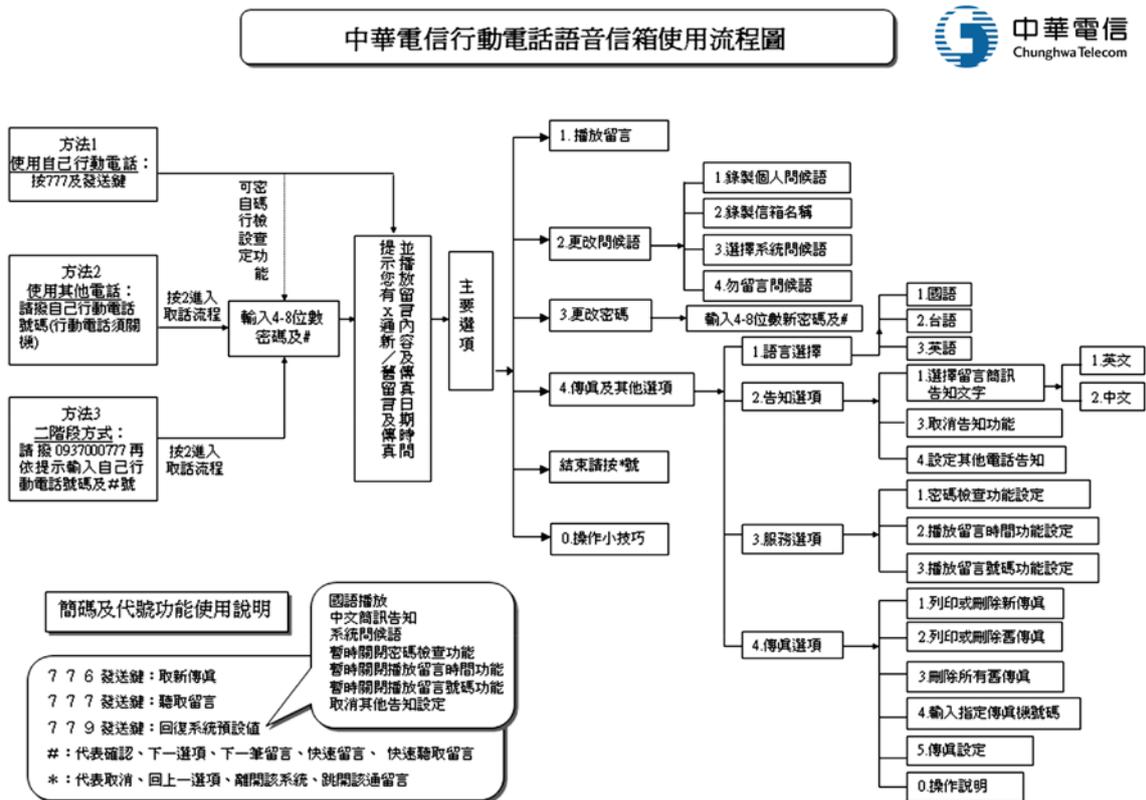


圖 2 傳統語音查詢系統 (蔡芸瑀 [4])



圖 3 ChatBot 查詢系統 — 可由任一節點進入 (蔡芸瑋^[4])

達指令及關鍵字，ChatBot 便可將資訊即時回傳，減少中間節點選擇之操作流程，提升資料查找及探索的效率。

對話機器人應用案例

目前市場上 ChatBot 的發展，多以已具有傳統語音服務之產業為主，因其已具備發展對話機器人的語義庫，能由過去收集的龐大語音資料中，規劃及定義使用者行為，以既有經驗為腳本進行應答，產生出結構性的回覆 (蔡芸瑋^[4])。此外，ChatBot 主要又可分為兩大類，一類是任務式 (Task-Oriented) ChatBot，另一類則是聊天型 (Chit-Chat) ChatBot。第一種任務型 ChatBot 類似個人數位助理，以幫助使用者完成特定任務為主，所以中文上又有人稱其為功能型機器人，來和後者以社交互動、閒聊或沒有特定任務目標的聊天型 ChatBot 區分。在中文用詞上，兩者都可通稱為對話機器人 (陳繼儂^[5])。本文針對不同服務範圍且常見之

六種 ChatBot 進行基本比較，如表 1 所示，並於下進行簡單說明：

1. Siri：Siri 為 Apple iOS 內建之 ChatBot，可直接使用語音輸入，並提供各種公開或個人資料查詢，其功能相當完善，但由於 Siri 服務對象為一般大眾，因此無法提供「專業領域」的資料查詢，並僅限於 iOS 系統用戶才能使用。
2. TaxiGo：TaxiGo 為提供計程車叫車服務之 ChatBot。在 Facebook 平台中，第一次使用 TaxiGo 時需要先進行手機認證，之後可以傳送地點進行叫車。ChatBot 主要功能為「根據預設決策樹提供服務」，因此無法使用「關鍵字查詢」，也無法對話。
3. 玉山小 i：玉山小 i 為玉山銀行的公開資料查詢 ChatBot，例如：查詢分行位置、如何貸款、匯率查詢等，在 Facebook 平台中無法查詢「個人化資料」。玉山小 i 可使用關鍵字查詢，如果使用者的關鍵字不

表 1 ChatBot 比較表

ChatBot 名稱	Siri	TaxiGo	玉山小 i	臺灣房屋	愛捐血	臺北市府
使用平台	iOS	Facebook	Facebook	Line	Line	Line
機器人種類	聊天型	任務型	任務型	任務型	任務型	任務型
服務範圍	通用查詢	叫車服務	銀行服務	房仲服務	捐血查詢	政府訊息公告
主動推播	無	有	有	有	有	有
主選單查詢	無	有	有	有	有	有
個人化資料查詢	有	有	無	無	開啟外部網頁	無
整合外部資料	有	無	無	無	無	無
地點查詢	有	有	有	有	有	無
關鍵字查詢	有	無	佳	可	可	無
模糊搜尋	有	無	無	無	可	無

夠精確，ChatBot 會列出相關的回答，在設定好的固定答案中，回覆使用者的查詢。

4. 臺灣房屋：臺灣房屋可查詢其既有的公開資料，例如：查詢成交行情、週邊環境、房貸試算等。臺灣房屋 ChatBot 可使用基本關鍵字查詢，主要都是將關鍵字視為「地點」進行查詢。地點查詢可定位所有位置，並於查詢後提供附近 500 公尺內的生活機能等相關資訊。
5. 愛捐血：愛捐血為台灣血液基金會查捐血公開資料的 ChatBot，例如：捐血點位置、捐血條件（疾病、手術、藥物）。如需要查詢個人化資料，需開啟外部網頁並進行認證，之後即可查詢下次可捐血日、捐血總次數等資料。愛捐血 ChatBot 可使用基本關鍵字查詢，不過主要都是將關鍵字視為「地點」進行查詢。地點查詢可列出附近的捐血據點。
6. 臺北市政府：臺北市政府為公共訊息之推播帳號，只能主動推播訊息，或以外部開啟網頁的方式，提供使用者「預設」功能，因此無法提供使用者關鍵字或地點查詢。

對話機器人應用潛力

對話機器人最大的特色在於其能有效提升使用者查詢資料的效率，且提供使用者更為直覺且即時的操作體驗。相較於過去網頁、APP 等資料呈現形式，對話機器人透過語意分析、機器學習等人工智慧技術，能大幅減少資料檢索的時間。此外，透過對使用者操作流程的設計與優化，讓使用者能更即時且直覺地取得所需資訊。

目前各領域的應用中，皆以與物聯網的搭配來連結企業與使用者，透過對話機器人能快速、即時回應等特性，來輔助既有之客服系統。若能從中蒐集使用者的行為、使用者如何與對話機器人互動、及語料庫等相關數據資料，以進行設計更符合使用者行為的機器人產品，必能提供人機之間更多的交流。

隨著人工智慧技術的發展，對話機器人的技術亦伴隨著成長，將會帶來的是使用者與開發端（如：工程人員、企業主等）的雙贏局面，對開發端來說，擁有人工智慧的對話機器人終將取代現有負責查詢及回覆資訊的專員，進而降低人事等相關成本。對使用者而言，不間斷且即時提供資訊的對話機器人，則是能大幅提升其搜索資訊的效率。

對話機制與技術

對話機器人背後的核心技術為「對話系統（Dialogue system）」。而對話系統則主要涵蓋了三個技術：語意理解（Language understanding）、對話管理（Dialogue management）與自然語言產生（Natural language generation）（Young^[6]）。以下將分述說明。

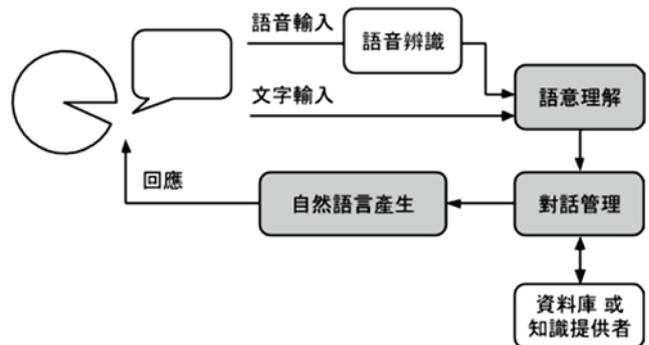


圖 4 任務型對話系統基本架構（重製自 Young^[6]）

語意理解

「語意理解」是自然語言處理（Natural language processing）領域中的課題之一，主要任務為「理解」使用者輸入文字背後的意圖（intent）與所涉及的領域（domain），並提取文字中所提及的資訊。使用者可透過語音輸入，經辨識後轉為文字，或是直接使用文字輸入後，進行自然語言處理。

在自然語言處理的過程中，要「理解」意圖與涉及領域的辨識，在技術上使用的方法，是將文字輸入分類模型來決定其落入的類別。分類模型的建構，在技術上可採用人工訂定規則或經機器學習（Machine learning）產生。近期常見的分類模型其一為：支持向量機（Support vector machine），這是將標記過意圖與涉及領域的語料，放入向量空間（vector space）中，透過空間分隔來產生分類模型，之後透過輸入文字在空間中所座落的位置來判斷其所屬意圖與涉及領域。

資訊的提取使用到名詞辨識（Named entity recognition），透過文字相似度的比對，來提取使用者輸入的文字中，所帶有的資訊。文字的相似度可以使用向量方法（vector method）或統計方法（statistic method）計算。這些透過「語意理解」所提取的資訊，將用於「對話管理」階段進行判斷或達成使用者所交付給對話機器人的任務。

對話管理

「對話管理」用以判斷使用者所交付的任務是否已經完成。在「對話管理」階段主要任務為：追蹤對話的狀態 (Dialogue state tracking)，並依據對話規則 (Dialogue policy) 來判斷使用者任務是否已經完成。經「語意理解」後所得到的資訊，也將在本階段，透過與介接的資料庫或其他外部資源互動，來完成使用者的任務。

對話狀態追蹤會參酌一系列對話中的前後文 (content) 與使用者的反應回饋，並使用數學模型來進行。以隱藏馬可夫模型 (Hidden Markov Model) 為例，該模型會透過觀察使用者的反應，來判斷使用者交付任務目前被執行的進度，並決定需要進行什麼樣的行動，來推進任務的執行。

對話規則可透過人工訂定規則，或機器學習技術來訓練模型。在對話管理中，常用的機器學習方法有透過偵測環境狀態，來決定下一步行動，藉此訓練出由規則組成的模型，用以判斷使用者的任務是否已經完成的強化學習 (Reinforcement learning)。

自然語言產生

「自然語言產生」階段與「語意理解」相同，為自然語言處理領域的課題之一。「自然語言產生」是透過完成使用者任務，或是搜尋到使用者所需的資料後，將獲得的資訊轉換為人類可以理解的語言之步驟。因此也可以使用人工訂定規則、或機器學習訓練出來的模型，來產生自然語言。

常見「自然語言產生」的方法有三種：(1) 將前一階段「對話管理」所取得的結果，套入訂定好的模板語句。(2) 透過使用大量文本訓練語言模型 (Language model)，將「對話管理」的結果放入模型，產生多個符合文法規則的語句，再透過評分排名的方式，選擇最適切的回應。(3) 應用深度學習 (Deep learning) 技術，透過組合多種機器學習技術或數學方法，藉此建構出可以深度學習的網絡，來學習如何使用自然語言產生適切的語句。

在「對話系統」中的三個技術研發，皆可採用人工訂定規則或機器學習訓練模型，可依據需求、應用領域的特性，彈性選擇最適合的方法。為了使對話機器器具備更接近特定領域專業人員的能力，在與對話

管理環節，介接的資料庫可改採用知識庫 (knowledge base)。不同於一般資料庫，在資料格式與資料表欄位等方面缺乏彈性，知識庫乃依據專業人士所提供的知識體系所建置，可以更加彈性地記錄結構化與非結構化的資料，以及不同知識概念之間的關聯。透過建置知識庫，並與對話管理介接，可以讓對話機器人更完善地達成使用者交付的任務。

工程領域研發案例：Ask Diana 水利防災智慧應答機器人

Ask Diana 是國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心 (臺大天災中心) 開發之智慧應答機器人 (ChatBot)。Ask Diana 目前整合水利署提供之水利防災相關資訊 (如：抽水機調度資訊、抗旱整備資訊等) 及防汛應變時所需資訊 (如：氣象資訊等)，在大眾常用之網路通訊平台 — LINE 上提供水利防災人員於防災各階段所需資訊 (陳奕竹等人^[7])。



圖 5 加入 Ask Diana

研發動機

在防災應變時，決策人員往往需要參考各式的即時資訊，並與歷史決策經驗結合，方能有效地做出精準的決策。隨著科技與網路的蓬勃發展，大量且多樣的防災資訊開始充斥於各式網路平台中，該如何更有效地利用這些資訊，成為應變決策中極為重要的一環。因此，為能解決上述之問題，臺大天災中心自 2017 年起，進行人工智慧技術的研發，並整合水利署提供之水利應變資訊及水利災害應變學習中心 (llc.caee.net) 等水利應變過程之資訊，亦透過臺大研發中之語意分析模組，讓使用者能以對話的方式，直接向 Ask Diana 探索及詢問所需資訊，以自動化地查找取代人工搜尋資料所需耗費的冗長時間，讓決策者與幕僚團隊可以更加即時且有效率地作出精準的決策。

使用對象

臺大天災中心已擔任水利應變決策幕僚長達 11 年，故 Ask Diana 在開發階段，以經濟部水利署中之應變決策者為主要客群，其他使用者則包含水利署本署、所屬機關之應變人員，亦開放一般民眾進行查詢，提供不同需求族群不同權限及查找內容（圖 6）。Ask Diana 目前為試營運階段，先以水利防汛資料進行分類，並同步與應變人員進行需求分析與訪談，瞭解在防災期間必要且有助於決策之資訊，再經過統整、關鍵字建立等步驟後，系統化的蒐整進 Ask Diana 資料庫中，在經過這些建置的過程後，未來決策者除可透過幕僚團隊索取水利防災應變相關資訊外，亦可直接向 Ask Diana 索取資訊，輔助決策過程，並提升決策效率。

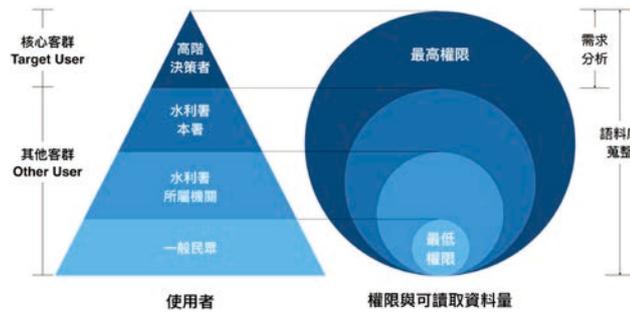


圖 6 Ask Diana 之使用者及權限

Ask Diana 操作流程

現階段的 Ask Diana 主要提供兩種不同的資訊查找方式，一為透過 LINE 平台提供之使用者介面，以點擊的方式探索資料；另一則是以直接輸入關鍵字的方式



圖 7 Ask Diana 功能示意圖

式查找資訊。在 Ask Diana 中，臺大天災中心以水利防災年報及水利署作業事項查核表與歷年應變之經驗結合，將整備、應變、復原等階段所需之資訊建置成防災決策樹，並將其以選單的方式建置於 Ask Diana 中，以供使用者透過點擊的方式從決策樹的各節點中切入，以瀏覽各式防災資訊。

以查詢 3 小時即時雨量為例，使用者可於 Ask Diana 的主選單中點擊「氣象資訊」，Diana 則會提供與氣象資訊相關之所有資訊選單。使用者可於選單中找到「即時雨量」的按鈕，點擊後 Diana 會列出 10 分鐘即時雨量、1 小時即時雨量、3 小時即時雨量、6 小時即時雨量、12 小時即時雨量、以及 24 小時即時雨量六個資訊。點擊「3 小時即時雨量」按鈕，Diana 就會列出 3 小時累積雨量前十名的雨量站及其對應之雨量值，供使用者參考。



圖 8 選單查詢方式



圖 9 關鍵字查詢方式

除了透過點擊選單的方式之外，Ask Diana 亦提供了關鍵字搜尋之功能，透過科技部計畫「對話式防災決策輔助系統」研發之資料盤點、關鍵字定義、模糊搜尋演算法建置等技術，使用者能直接在 LINE 上與 Diana 進行對話，並以輸入文字的方式索取所需資訊。當 Diana 不確定使用者所需資訊為何時，亦會提供可能的選項供使用者進行選擇。

結論：善用科技 溝通傳承

隨著資訊不斷的累積以及人工智慧技術的蓬勃發展，對話機器人勢必將成為未來資訊傳遞的主要工具，工程領域當然也不例外。在工程領域應用上，藉對話機器人能即時且迅速提供必須資訊的特性，可有效幫助工程人員間的溝通與資訊傳遞，而其具備之巨量且完善之資料庫則可作為工程經驗之傳承。此外，建置於既有公眾通訊平台（如：LINE、Messenger 等）的對話機器人，亦能作為大眾知識傳遞之媒介。

本研究所開發之 Ask Diana 即為對話機器人與工程領域應用之案例，以 LINE 為平台，蒐整水利防災決策所需之重要資訊，作為防災人員於災時應變時的決策輔助工具。然 Ask Diana 目前為試營運階段，未來仍需要透過颱風豪雨應變期間之實際應用及水利防災應變人員之使用回饋，不斷的讓對話機器人之資料庫完整化，並透過對話機制及技術讓對話機器人更符合防災決策之輔助需求。

由於對話機器人可作為資訊傳遞之媒介，亦可透過使用者行為資料的蒐集與分析，若輔以人工智慧技術後不斷地自我學習、成長，更可讓對話機器人可以協助處理工程中繁雜及規律性的任務，提供即時地查找及蒐整資訊的服務。而其直覺且便利的使用者操作流程，除可提升工程管理之品質外，亦可有助於工程人員之溝通協調、經驗傳承、及知識傳播等方面之效率。

誌謝

本研究感謝科技部提供經費補助（計畫名稱：對話式防災決策輔助系統 MOST 107-2119-M-002-017）及國立臺灣大學蔡芸瑀教授對演算技術之指導，同時本研究所使用水利防災資料及應用場域是由經濟部水利署「107 年水利署災害應變服務計畫」提供。本研究亦感謝酷必資訊所提供之技術諮詢及協助。本研究構想已獲得臺灣防災產業協會「106 年度防災科技應用技術優質獎」佳作。本研究作者感謝經濟部水利署及國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心參與人員提供本研究寶貴的支持及意見回饋。

參考文獻

1. BI Intelligence (2016), Messaging apps are now bigger than social networks. <http://www.businessinsider.com/the-messaging-app-report-2015-11>
2. ISAAC, M. (2016), Facebook Bets on Bots for Its Messenger App, The New York Times. https://www.nytimes.com/2016/04/13/technology/facebook-bets-on-a-bot-resurgence-chattier-than-ever.html?emc=edit_ct_20160414&nl=personaltech&lid=362333&_r=4&mtref=www.bnxt.com.tw&mtref=www.nytimes.com
3. 黃彥鈞 (2017), Facebook 聯合開發者和企業，用 ChatBot 直搗使用者心窩，TechNews 科技新報，<https://technews.tw/2017/12/01/facebook-messenger-meetup-chatbot/>
4. 蔡芸瑀 (2017), 聊天機器人的語意設計思路。國立臺灣大學 NTU CS+X 系列課程資料。
5. 陳縉儂 (2017), Chatbot 三大技術關鍵與最新研究方向，網址：<https://www.ithome.com.tw/news/113445>
6. Young, S. (2000), Probabilistic methods in spoken dialogue systems, Physical and Engineering Sciences, 358(1769), 1389-1402. doi: 10.1098/rsta.2000.0593
7. 陳奕竹、蔡孟涵、詹益淋、邱霽欣、康仕仲、郭純伶 (2017), 「互動式防災對話機器人」, 2017 臺灣災害管理研討會暨 106 年科技部自然科學及永續研究發展司防災科技學門計畫成果研討會，台北，台灣。十一月三日。





應用模型參數識別及類神經網路 於結構健康診斷

林子剛／國立交通大學土木工程研究所結構工程組 副教授

張家銘／國立臺灣大學土木工程研究所結構工程組 助理教授

張至維／國立交通大學土木工程研究所結構工程組 碩士研究生

近年來結構健康診斷運用於實務工程上已經進入成熟階段，利用相關理論研究判定出結構物的破壞位置及損壞程度，甚至是損壞構件的殘餘性能，因此本文提出了一種新型結構健康監測方針，根據人工智慧的神經網絡系統去做整合與開發。本研究根據環境擾動下所識別的模態特性結果得到實驗之數值模型，並建立此神經網絡模型。首先利用隨機子空間系統識別推導出健康結構的自然頻率和模態振型，再根據結果推行出此結構的簡易模型，進而改變樓層勁度來建構各種損傷模式，最後依照這些損傷模式的模態參數來訓練神經網絡，提出一項全新的結構健康監測技術。在發生重要事件（例如地震）之後，即可使用該神經網絡系統來估計此結構之損傷模式。在這項研究中，我們執行了三組不同之損傷情況來做驗證，其中包含單層和多層損壞的七層樓建物，以評估所提出的結構健康監測策略之性能表現。此外，本研究利用地震模擬振動台進行縮尺化雙塔模型實驗，輸入地震歷時及白噪音事件進行振動試驗，將弱斜撐桿件安裝在指定樓層形成結構物之軟弱層，隨後根據隨機子空間系統辨識所得到結構的模態特性，建立初始結構物的簡化模型。經過地震事件之後，透過神經網絡模型進行結構物損傷檢測，判斷損傷位置和破壞程度。因此，此研究所提出之新穎整合系統對於識別的模態特性與類神經網絡技術相對精確且可靠，將會是一套相當有效及具實用性的結構健康診斷系統。

簡介

結構設施的性能會因為反覆的自然危害而降低或失去原有之表現，因此近年來學者利用非破壞檢測方法或以振動分析進行結構健康監測，並與健康狀況下的結構物相比，觀察結構的變化行為來判斷結果可能會惡化結構之性能。而運用模態分析^[1,2]可以獲得結構動力特性（即自然頻率，阻尼和振態），進而比較相對變化判斷結構損傷。儘管結構中存在的變化可以識別，但結構完整性的程度是仍然未知的。

建立結構模型的過程中，系統識別技術扮演著重

要的角色。如前所述，模態特性通常用於推衍或更新結構模型，而模態特性可以隨著系統識別經由模態分析來獲得。對於現實生活應用，由於輸入訊號之不可預測，系統識別應以隨機的方式進行處理。在時間域上，Van Overschee 與 De Moor^[3]在1991年提出的隨機子空間系統識別是最廣為接受的方法之一，此方法利用延伸可觀測性來推導模態參數。此外，1999年Peeters和De Roeck^[4]進一步研究SSI方法以提高計算效率。Peeters和De Roeck^[5]在2001年更提出了SSI的穩態圖來提高識別結果的精確性。爾後諸多研究人員也採用類似的方

法來探究環境振動下結構的模態特性 [6-10]。上述研究結果顯示，結構之自然頻率和模態振形可成功地獲取，特別是在低階模態方面能夠擁有精準的識別成果。

勁度折減的結構破壞將會導致模態特性的變化，因此透過觀察自然頻率可以輕易地判斷出此類型之損壞。然而經由觀察自然頻率無法得知損害的位置和損壞程度。Hartmann 和 Smarsly [11] 提出了自動化的 SHM 系統，其中使用 AI 的專家系統進行評估分析。Ko 和 Ni [12] 使用神經網路與支持向量機模型將環境溫度及自然頻率作相關學習演算法。若以模態特性反推結構中某構件之勁度折減，此方法是相當具有挑戰性的，以此之故科學家開始利用人工智慧 (AI) 開發損傷檢測理論；例如 Okafor 等人 [13] 將模態頻率的變化整合到神經網路模型中，以診斷疊層組合樑的損傷，而 Luo 和 Hanagud [14] 利用損傷模式及頻率響應函數之關係建立神經網路模型，並對組合樑進行破壞檢測。上述模型中的自然頻率可藉由 SHM 評估進行校正與訓練。Madani 和 Ulieru [15] 提出了 AI 代理架構的電子橋樑監控系統，經由橋樑本體獲取訊息並自動生成決策實行結構健康診斷。所有應用程序構建了信息與損害關係，其中包括作為輸入的測量資料及作為輸出的損壞類別，此系統將搜索資料庫中的最佳解答，同時解決了自古以來的不可逆問題。

本研究中開發了一種以人工智慧為基礎的結構健康監測系統，評估結構體在樓層位置和破壞程度方面的損害。由結果可以得知，此 SHM 系統結合 AI 技術利用不同級別的折減勁度模擬結構損傷，成功地偵測與預測數據集對應的損傷位置和破壞樓層。此外，經過系統診斷的勁度折減可以更新簡化模型，它能描述結構的動態行為並且預測整體結構的殘餘性能。

SHM 系統

SHM 系統之流程圖如圖 1 所示。以下將簡單闡述 SSI 與 ANN 的基本理論以及診斷方針。

隨機子空間識別 (SSI)

考慮一個 n_1 維自由度之物理系統，該物理系統由透過彈簧及阻尼連接之質量組成，由下式表示：

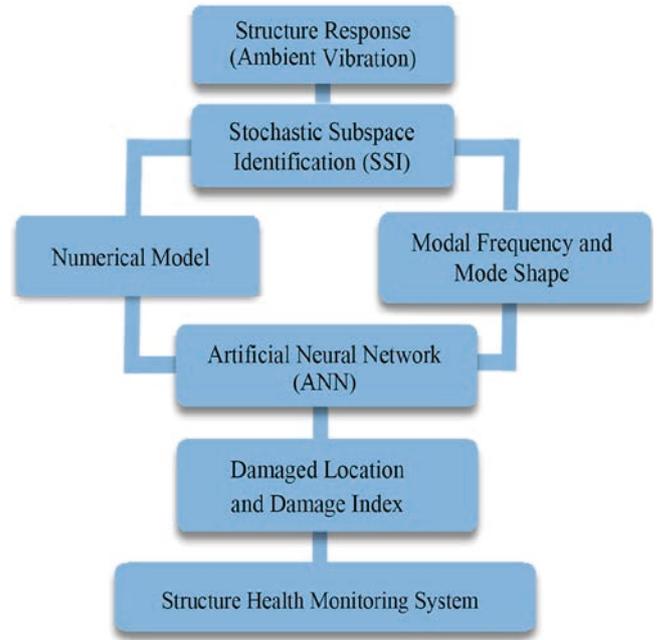


圖 1 SHM 系統流程圖

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) = B_1u(t) \quad (1)$$

其中 $x(t) \in R^{n_1}$ 為在連續時間 t 時之位移向量； $M, C_1, K \in R^{n_1 \times n_1}$ 為質量、阻尼及勁度矩陣；在時間函數上的點表示為時間之導數； $f(t) \in R^{n_1}$ 為激發力，可用 $u(t) \in R^{m \times 1}$ 向量與轉換矩陣 $B_1 \in R^{n_1 \times m}$ 表示，亦即 m 個輸入的 $u(t) \in R^{m \times 1}$ 向量根據轉換矩陣 $B_1 \in R^{n_1 \times m}$ 所指定的自由度施加於該物理系統上。而輸出向量 $y(t) \in R^{1 \times 1}$ 可定義為：

$$y(t) = C_a\ddot{x}(t) + C_v\dot{x}(t) + C_d x(t) \quad (2)$$

其中 C_a, C_v 及 $C_d \in R^{1 \times n_1}$ 為加速度、速度及位移之輸出矩陣。而 $y(t)$ 輸出向量為狀態空間之狀態及輸入向量相關式

$$y(t) = Cs(t) + Du(t) \quad (3)$$

其中 $s(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}$ ； $C = [C_d - C_a M^{-1}K \quad C_v - C_a M^{-1}C_1]$ 為輸出矩陣； $D = C_a M^{-1}B_1$ 前饋矩陣。式 (2) 與 (3) 為表示離散時間狀態空間模型。

$$\begin{aligned} s_{k+1} &= As_k + Bu_k \\ y_k &= Cs_k + Du_k \end{aligned} \quad (4)$$

A 為離散狀態矩陣， B 為離散輸入矩陣， $S_k = S(k\Delta t)$ 為離散時間狀態向量， Δt 為取樣時間， $k \in N$ 為自然數。

而第 (4) 式也被稱為確定性模型，亦即輸入 u_k 及輸出 y_k 可以準確量測。然而實際上量測都不可避免會有雜訊，因此將雜訊作適當假設並納入考慮，以此近似之方式建立系統之模型，亦即以結合確定性與隨機狀態之離散時間空間模型表示，如下式：

$$s_{k+1} = As_k + Bu_k + w_k \quad (5)$$

$$y_k = Cs_k + Du_k + v_k$$

其中 $w_k \in R^{n \times 1}$ 為擾動或建模誤差之程序雜訊， $v_k \in R^{1 \times 1}$ 為擾動或量測誤差所造成之量測雜訊。

利用隨機子空間識別法，可由輸出向量 y_k 識別得系統之 A 、 C 和模態參數，主要步驟如下：

1. 漢克爾矩陣 (Hankel matrix)：

漢克爾矩陣可利用輸出之量測數據組成：

$$Y = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & \dots & y_j \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{i-1} & y_i & \dots & y_{i+j-2} \\ y_i & y_{i+1} & \dots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \dots & y_{i+j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \dots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_p \\ Y_f \end{bmatrix} \in R^{2i \times j} \quad (6)$$

其中 i 為使用者自定之參數，須大於系統階數 n ；因所量測為 l 之自由度，所以輸出向量 y_k 為 l 列，而 H 矩陣為 $2li$ 列；而 j 對應的是漢克爾矩陣之行數；為確保輸出向量 y_k 之所有 r 時間取樣皆填入漢克爾矩陣中，則 j 可相等於 $r - 2i + 1$ 。根據第 (6) 式，漢克爾矩陣可分為過去 $Y_p \in R^{li \times j}$ 和未來 $Y_f \in R^{li \times j}$ 兩部分。

2. 列空間投影：

定義 O_i^l 為矩陣 Y_p 之列空間正交投影於矩陣 Y_f 之列空間，公式如下：

$$O_i^l = Y_f / Y_p \equiv Y_f Y_p^T (Y_p Y_p^T)^\dagger Y_p \quad (7)$$

其中“/”為投影運算， T 為轉置運算及 \dagger 為虛逆矩陣運算。

3. 將正交投影 O_i^l 進行奇異值分解 (Singular Value Decomposition, SVD)：

選擇系統階層 n ，將奇異值向量和奇異值分為兩部分：

$$O_i^l = USV^T = (U_1 \ U_2) \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} \approx U_1 S_1 V_1^T \quad (8)$$

其中， S_1 包含前 n 個奇異值。

4. 計算擴展觀測矩陣， Γ_i ：

$$\Gamma_i = U_1 S_1^{1/2} \equiv \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{i-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

5. 由 Γ_i 求得系統參數矩陣 A 及輸出矩陣 C ：

$$A = \underline{\Gamma}_i^\dagger \bar{\Gamma}_i \quad (10)$$

其中 $\underline{\Gamma}_i^\dagger \in R^{l(i-1) \times n}$ 為 Γ_i 無最後之 l 列之矩陣， $\bar{\Gamma}_i \in R^{l(i-1) \times n}$ 為 Γ_i 無初始之 l 列之矩陣。而矩陣 C 可從 Γ_i 之初始 l 列所求得，如第 (9) 式所示。

6. 系統模態參數，即模態頻率與模態振型可以經由 A 和 C 矩陣求得，並作為 ANN 神經網路之輸入資料。

類神經網路 (ANN)

利用類神經網路模擬人腦功能，本研究期望對結構的健康情況進行診斷。單神經元的基本概念如圖 2 所示，輸入與輸出之間的關係以第 (11) 式表示。透過激勵函數對加權過後的輸入神經元進行歸納和傳遞，得到最終的輸出結果。通常採用非線性函數 (sigmoid)、雙曲正切函數 (hyperbolic tangent) 和線性函數等轉換函數。

$$\begin{aligned} \text{Output} &= f \left(\sum_{i=1}^n (w_i a_i) + b \right) \\ &= f (w_1 a_1 + w_2 a_2 + \dots + w_n a_n + b) \end{aligned} \quad (11)$$

經由擴展神經元結構可以建立範圍更廣的類神經網路。由輸入層，隱藏層和輸出層所組成的典型 ANN

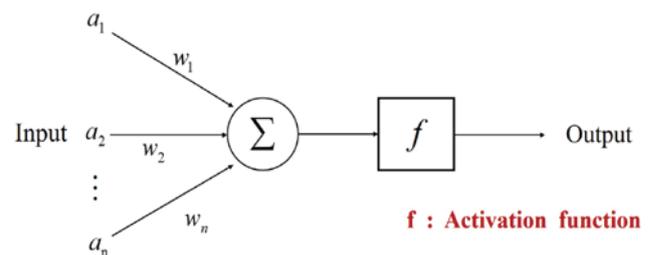


圖 2 單神經元的概念圖

架構如圖 3 所示。在加權和偏權值的最佳化後，輸出可以透過第 (12) 式來計算。倒傳遞過程用於調整每層中的權重，並且在第 (13) 式中定義的誤差函數可以利用預設的停止標準逐漸最小化，達到目標收斂完成類神經網路系統。

$$net_j^n = \sum_i^n w_{ji}^n y_i^{n-1} - b_j^n \quad (12)$$

$$y_j^n = f(net_j^n)$$

$$E = \sum_k (d_k - y_k)^2 \quad \Delta w_{ji} = \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} \quad (13)$$

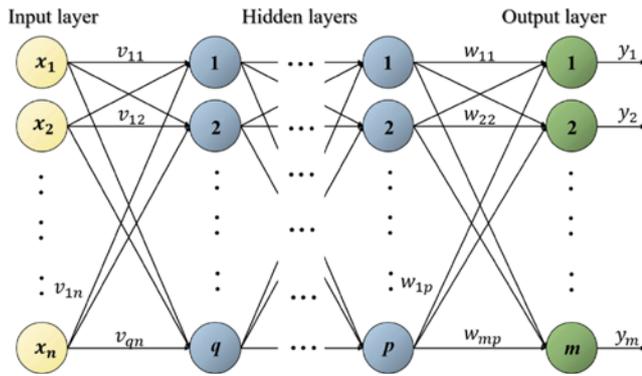


圖 3 典型 ANN 架構

本研究根據人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 的類神經網路系統 (Artificial Neural Network, ANN) 提出一種新型之結構健康監測系統，首先配置完善的感測器能夠將在環境擾動下的結構反應記錄下

來，並利用隨機子空間識別法 (Stochastic Subspace Identification, SSI) 辨識結構的模態頻率和模態振型，而在識別結果的支援下建立了一組數值模型，建立各種損傷層級和位置的訓練資料庫。另外以類神經網路進一步連接了模態頻率與模態振型、損傷位置與破壞指數的關係。透過此結構健康診斷系統可以很容易地對結構的健康情況進行快速及可靠之診斷。

數值分析

本數值模擬使用 7 個自由度 (d.o.f) 系統來模擬典型的七層樓結構，為了使其簡化將假定每個樓板質量塊為 1 kg 且勁度為 1,105.4 kN/m。如圖 4 所示，所分析的 7 種基礎頻率和模態振型為結構健康狀態下之模態。前三個頻率分別為 1.11、3.27 和 5.29 Hz，結果與實際工程中的中高樓層建築非常吻合。此外，為了反應結構的可能損傷程度和位置，對每個樓層給予具有 10%、20%、30%、40% 的勁度折減並加以模擬其數值模型，其中總共擁有 279,936 (6⁷) 種組合，而後將每個損傷情況的結構頻率和模態振型作為類神經網路的訓練資料庫進行存儲。

如同前述所提，前七個基本頻率和其對應的模態振型作為 ANN 系統的輸入特徵，其中由 56 個獨立特徵所組成。為了有更好的訓練效率，分別對不同破壞情況下的模態振型以其最大值做正歸化。類神經網路模型採用兩層隱藏層，每個神經元的數量為 140，經過一系列反覆試誤以達到預測損傷情況和破壞位置的

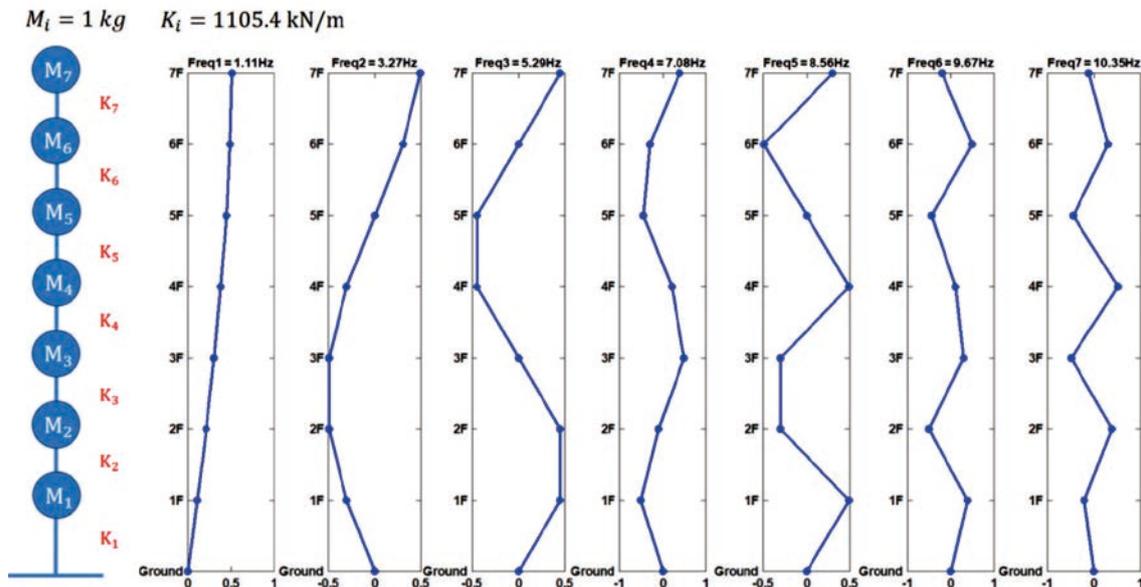


圖 4 數值模型示意圖

最佳性能。診斷訓練結果以表 1 中所列出的破壞指數 (DI)，從 -1 到 1 表示；若結構診斷為健康狀態，其破壞指數即為 -1 值，而結構診斷為 50% 勁度損失則以破壞指數為 1 值表示。此數值模擬之 ANN 詳細架構如圖 5 所示。

表 1 折減勁度與破壞指數之關係

Stiffness K	DI
K*1 (health)	-1
K*0.9	-0.6
K*0.8	-0.2
K*0.7	0.2
K*0.6	0.6
K*0.5	1

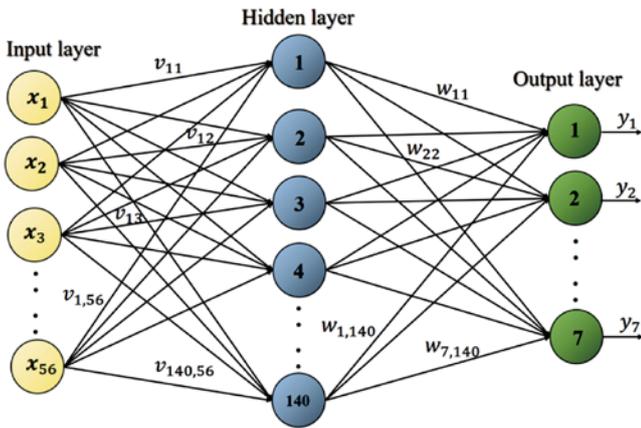


圖 5 數值模擬之 ANN 架構

此研究中在資料庫中隨機選擇 75% 之數據作為訓練資料，其餘 25% 用於驗證資料。最大訓練迭代次數設為 30,000，而均方誤差 (mse) 達到 10^{-3} 時訓練過程將自動提早停止。表 2 為所應用的訓練參數，圖 6 為當驗證過程中的 mse 達到目標 (10^{-3}) 後，最佳驗證結果在 21527 次訓練中獲得。

表 2 ANN 之訓練參數

Training parameters	parameters
Number of hidden layer neurons	140
Number of hidden layers	1
Transfer function	Logsig
Epoch	30000
Max failure number	300
Time	Infinite
Goal	0
Min gradient	$1 * e^{-5}$
Learning rate	0.01
Learning rate increment	1.05
Learning rate decrement	0.7
Max performance increment	1.04

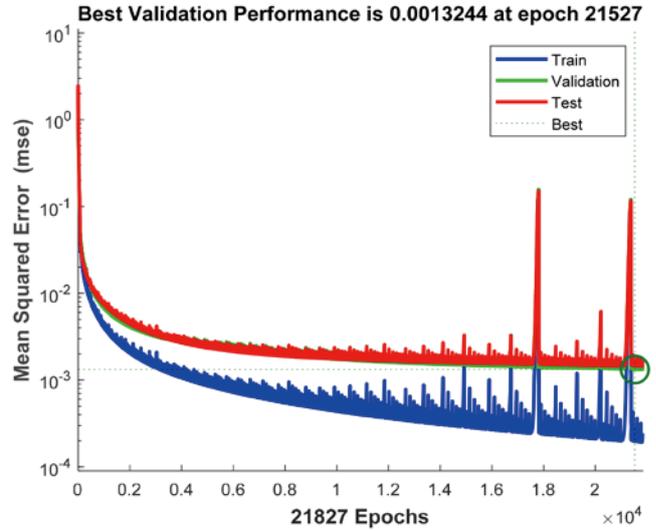


圖 6 ANN 之最佳訓練性能表現

圖 7 顯示了訓練、驗證及測試的回歸分佈圖，所有的回歸係數都展現了目標與輸出值之間良好的一致性。再者，各類別的標準差都相對較小，此結果證明了 ANN 在識別損傷程度上的可靠性。

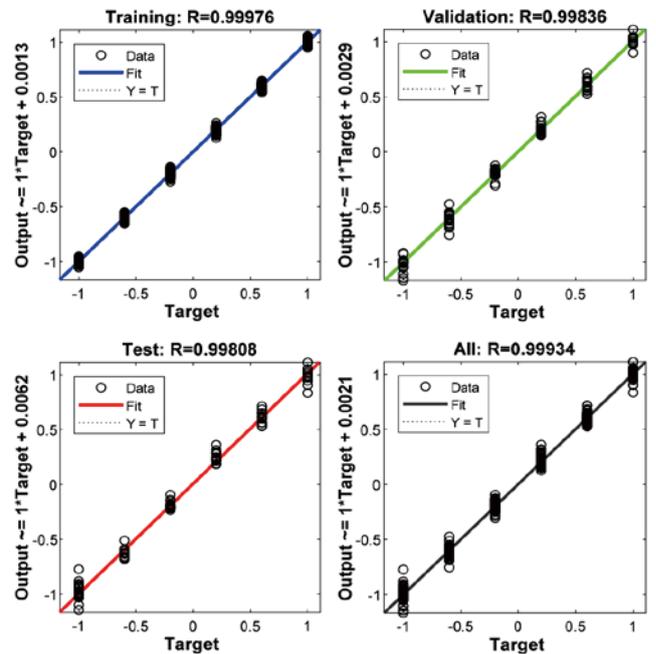


圖 7 訓練、驗證與測試之回歸分析

我們隨機測試三種不同的損傷情況作為示例：(1) 一樓之勁度降低至 50%；(2) 一、二和三樓之勁度分別降低至 70%、60% 和 50%；(3) 一、二和三層的勁度分別降至 90%、50% 和 70%。上述勁度之隨機組合用於驗證 SHM 系統的精準性。

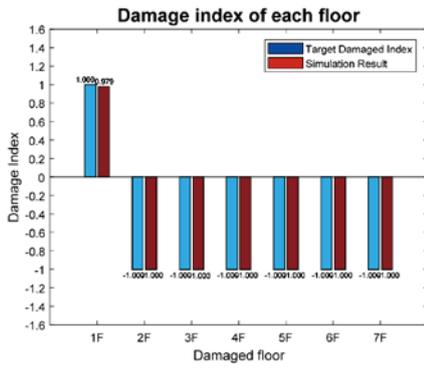


圖 8 狀況一之診斷結果

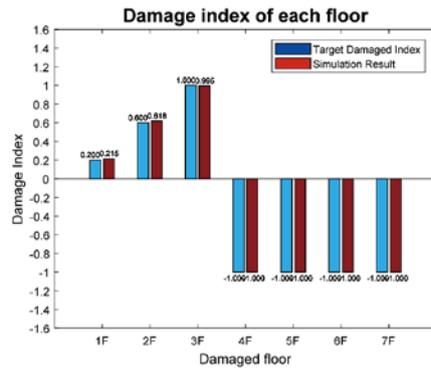


圖 9 狀況二之診斷結果

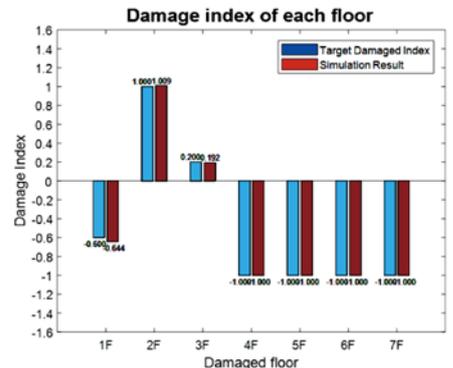


圖 10 狀況三之診斷結果

表 3 狀況一之診斷結果

	Stiffness Reduction Factor	Evaluated Reduction Factor	Damage Index	Evaluated Damage Index	Error%
1F	0.5	0.505	1	0.9785	-2.15%
2F	1	1.0001	-1	-1.0004	0.04%
3F	1	1.001	-1	-1.003	0.3%
4F	1	1	-1	-1	0%
5F	1	1	-1	-1	0%
6F	1	1	-1	-1	0%
7F	1	1	-1	-1	0%

表 4 狀況二之診斷結果

	Stiffness Reduction Factor	Evaluated Reduction Factor	Damage Index	Evaluated Damage Index	Error%
1F	k*0.7	0.696	0.2	0.215	7.5%
2F	k*0.6	0.596	0.6	0.618	3%
3F	k*0.5	0.501	1	0.995	-0.5%
4F	k	1	-1	-1	0%
5F	k	1	-1	-1	0%
6F	k	1	-1	-1	0%
7F	k	1	-1	-1	0%

表 5 狀況三之診斷結果

	Stiffness Reduction Factor	Evaluated Reduction Factor	Damage Index	Evaluated Damage Index	Error%
1F	k*0.9	0.911	-0.6	-0.644	7.33%
2F	k*0.5	0.498	1	1.009	0.9%
3F	k*0.7	0.702	0.2	0.192	-4%
4F	k	1	-1	-1	0%
5F	k	1	-1	-1	0%
6F	k	1	-1	-1	0%
7F	k	1	-1	-1	0%

上述結果顯示，利用數值分析的訓練和測試成果，可以透過此 SHM 系統可靠地估算出折減勁度因子和量化破壞指數，證明此系統將能作為實際應用，並明顯地反應整體結構的損傷程度和位置。

實驗驗證

本研究採用振動台試驗對雙塔建築進行 SHM 系統試驗，對損傷檢測方法進行評估與驗證。本實驗為

“Advanced Earthquake Early Warning Research”的一部分，並在國家地震工程研究中心進行。圖 11(a) 為中部科學工業園區管理局，圖 11(b) 為實驗用之雙塔結構。此試體是一座鋼構架雙塔建築，為中科管理局之縮尺幾何模型。通過本實驗來驗證損傷檢測方法，對損傷進行局部化，並對殘餘性能進行評估。本實驗以五層樓鋼構架 (Frame A) 與四層樓鋼構架 (Frame B)，兩棟構架的一樓為相連通型式之標竿結構進行振動台試驗。表 6 為此試驗之振動歷時順序，利用數個環境擾動 (白噪音) 與 TCU071 地震力相互交叉試驗使結構試體產生損壞。

再來由於一、二樓為結構主要破壞位置，因此假設 Frame A 與 Frame B 之一、二樓各層勁度折減分別為



圖 11(a) 中科管理局雙塔建物



圖 11(b) 雙塔模型建築

表 6 實驗歷時紀錄表

試驗順序	Earthquake	PGA
1	WN_1	50 gal
2	WN_2	50 gal
3	TCU071	50 gal
4	WN_3	50 gal
5	WN_4	50 gal
6	TCU071	200 gal
7	WN_5	50 gal
8	WN_6	50 gal
9	TCU071	400 gal
10	WN_7	50 gal
11	TCU071	600 gal
12	WN_8	50 gal
13	TCU071	800gal
14	WN_9	50 gal
15	TCU071	1000 gal

10%、20%、30%、40% 及 50%，而 Frame A 與 Frame B 一樓以連接鋼板相接，故視為同一自由度，因此總共有三個自由度 $6^3 = 216$ 個可能性，並將上述情況以數值模型模擬出各別情況之模態頻率與模態振型，建立出類神經網路之訓練資料庫。

而本類神經網路所運用之輸入資料為上述所有情況之模態頻率及模態振型，輸入資料必須作前處理方能匯入訓練網路中，其目的為將輸入和目標尺度化，搭配網路中之激活函數定義，使得兩者能落在同一個指定範圍區間內。此前處理步驟依序分為兩個部分作整理；第一部分將所有經模擬得到之模態頻率做正規化，其中最大值視為 1，最小值視為 -1，其餘數值以等比例內插使資料範圍收斂於 1 到 -1 之間，第二部分為數值模擬後之模態振型，其各數值須除以其模態之總向量長度，亦即使各模態振型內之數值為正規化向量，在向量空間中代表總單位長度為 1。另外，輸出資料方面亦採用破壞指數 damage index (DI) 來表示，其輸出資料使其範圍介於 1 至 -1 之間，同於前述所提之規範。

此類神經網路所設定之訓練參數如表 7 所示，將隱藏層數目提升為兩層並且每層神經元個數為 120 個，而此次轉換函數採用 Tansig 欲使結果收斂於 1 至 -1 之內。

圖 13 與圖 14 分別為 ANN 之網路性能表現與訓練結果回歸分布圖，由圖 13 能得知在迭代次數 22,556 次時驗證均方差有最佳之表現，且從圖 14 中能觀察出輸

表 7 神經網路之訓練參數

Training	parameters
Number of hidden layer neurons	120
Number of hidden layers	2
Transfer function	Tansig, Tansig
Epoch	30000
Max_fail	300
Time	Infinite
Goal	0
Min_grad	1*
Learning_rate	0.01
Lr_inc	1.05
Lr_dec	0.7
Max_perf_inc	1.04

出資料與目標值之回歸分布非常一致，顯示此類神經網路對於破壞程度機制訓練之結果表現良好。

最後在實驗案例中有九次白噪音振動來模擬環境擾動，其中也穿插不同大小之地震力，接著以 SSI 法識別此九次環境擾動，並利用其識別結果驗證上述類神經網路之可靠性與精確性。圖 15 為第一至第六模態頻率識別結果，圖 16 為 Frame A 之第一至第五模態振型識別結果，圖 17 為 Frame B 之第一至第五模態振型識別結果，隨後將上述之結果作資料前處理當作輸入資料再匯入神經網路作模擬驗證。

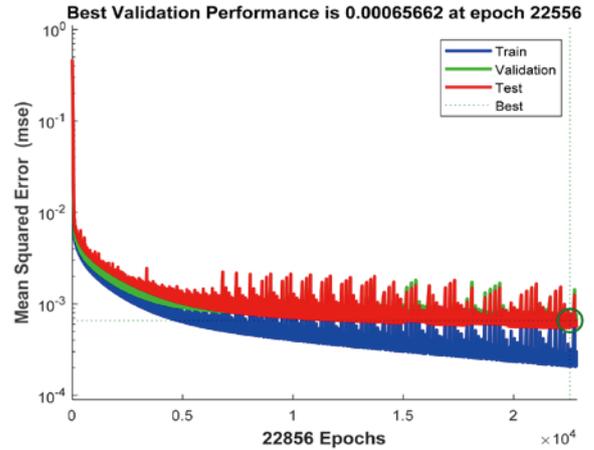


圖 13 ANN 之網路性能表現

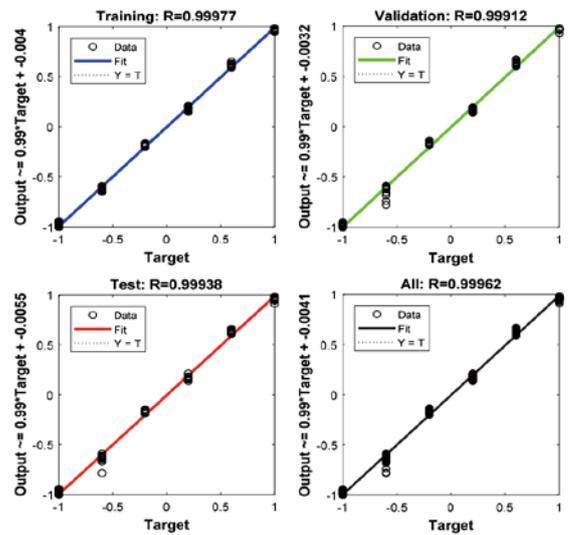


圖 14 回歸分布圖

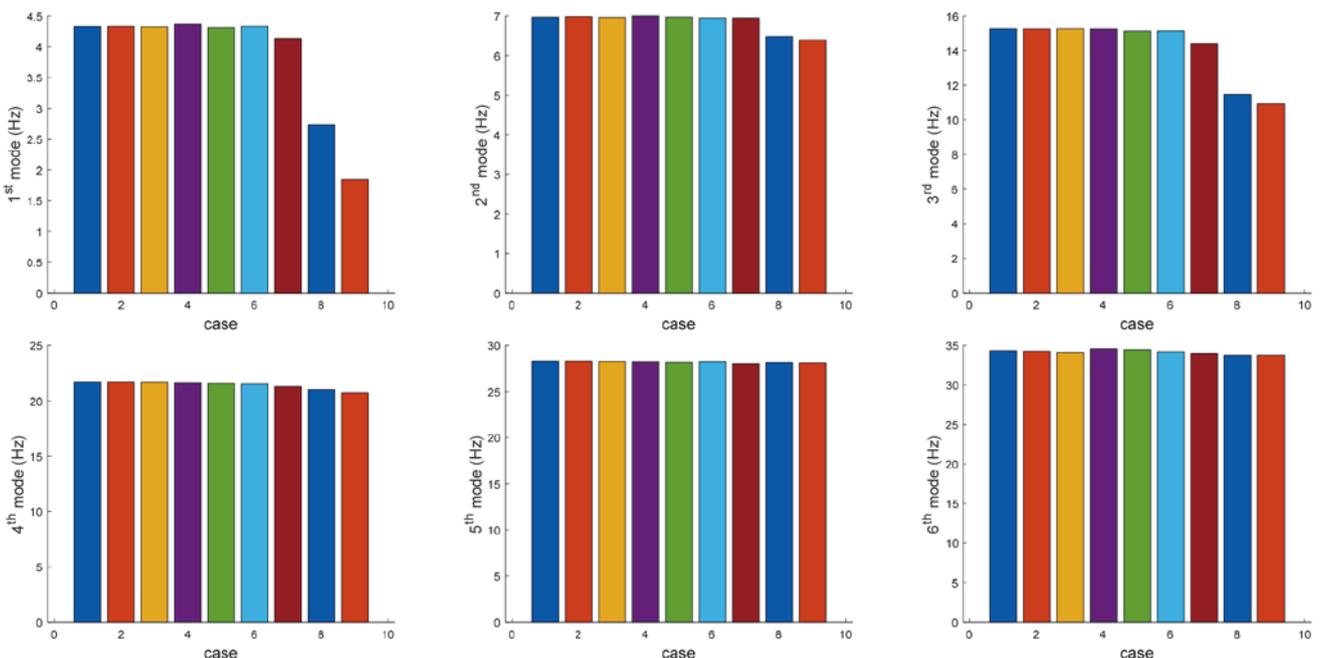


圖 15 模態頻率識別結果

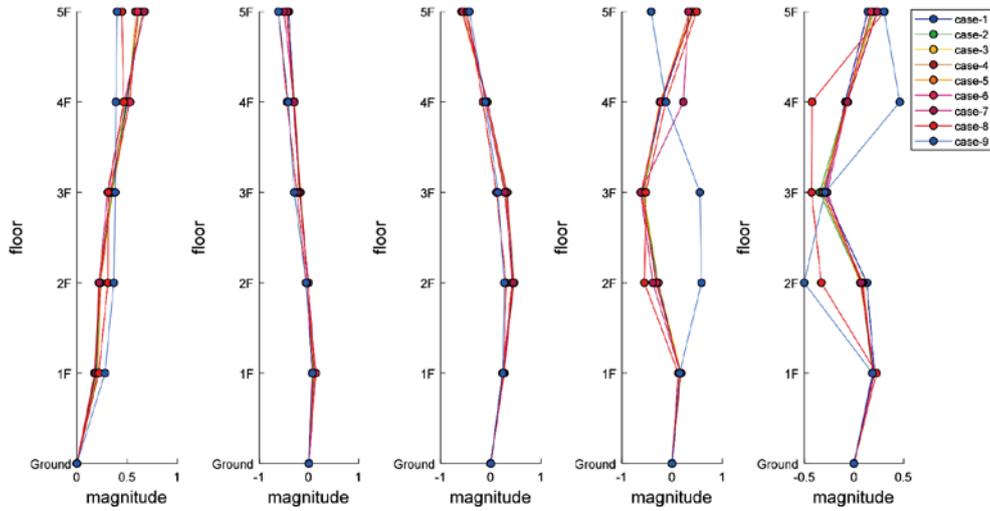


圖 16 Frame A 模態振型識別結果

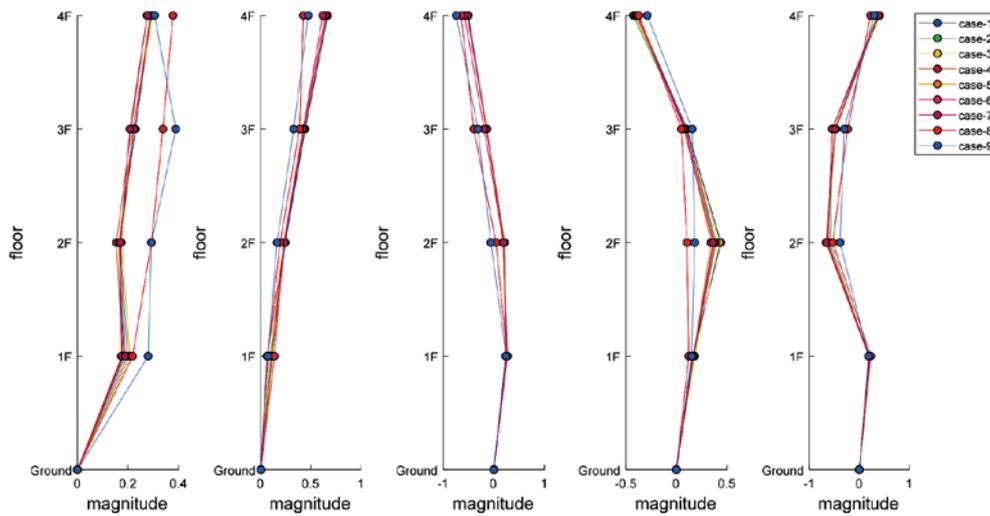


圖 17 Frame B 模態振型識別結果

圖 18 為經過地震事件 800 gal 與 1000 gal 後之試體損壞結果。九次環境擾動實驗之驗證結果如表 7 所示，表 8 為對應樓層之勁度折減。由其數據可觀察出 Frame A 及 Frame B 之一樓破壞指數隨著試驗順序逐漸增大，代表勁度折減係數逐漸遞減，最後三組 WN 事件之結果顯示樓層損壞程度逐漸升高，於第九個 WN 事件一樓有高達 49.7% 的勁度損失，結構物之一樓可視為完全破壞；再者 Frame A 與 Frame B 之二樓皆有合理的結果呈現，與預期的結構健康診斷理念一致，再次展現所提出的理論方法具有可行性及實用性。

結論

本研究開發了一種基於人工智慧的結構健康監測系統。該結構健康監測系統將運用模態分析並彙集至神經網絡中。透過隨機子空間系統識別進行模態分

析，獲得結構的自然頻率和模態振形。這些模態特徵用於構建簡化的數值模型，運算該模型具有各種勁度變化的模態特徵並集成數據庫。經過關鍵事件後，進行模態分析以獲得結構模態，而神經網絡模型隨後根據損傷位置和程度來診斷結構安全性。因此，只要成功獲得模態特性，所提出的結構健康監測系統就能有效地檢測到結構中的損壞。

數值分析目的為探討該結構健康診斷系統的性能。當建築物中存在單一損壞構件時，該系統能成功地檢測到損壞；而當發生多重損傷模式時，該系統仍然有效地定位損傷，勁度折減方面僅存在些微誤差。實驗測試部分，所提出之系統可以有效地判斷縮尺雙塔結構的損壞。若系統識別方法不能分析精確的模態特徵時，神經網絡模型可能會產生誤判結構的損壞位置及程度。

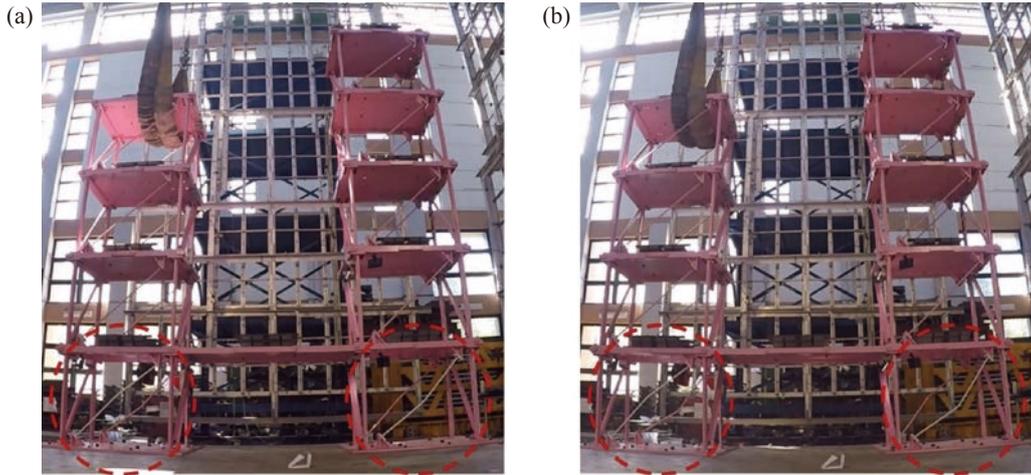


圖 18 地震事件 800 gal 與 1,000 gal 後之破壞結果

表 8 勁度折減

Location	Test events								
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th	9 th
1 st floor	6.9%	8.8%	7.7%	8.8%	8.0%	9.0%	15.5%	49.6%	49.7%
2 nd floor of tower A	0.2%	0.2%	0.2%	0.5%	0.1%	0.2%	1.4%	0.1%	44.0%
2 nd floor of tower B	0	0	0	0	0	0	0.1%	1.0%	15.4%

本研究利用隨機子空間系統識別分析目標結構之模態參數，再透過類神經網路技術進行結構物模態參數訓練所建立之資料庫，進行損傷樓層位置、破壞程度以及殘餘性能之判斷，經由實驗驗證來檢驗其可靠度，進一步應用於結構健康診斷方面，有助於在學術界能夠深入的了解相關研究，並以此為依據接續發展出更適用於實務工程上的方法，應用於實際案例並探討此法於結構健康診斷之可行性。

參考資料

1. Farrar C.R. and Worden K., An introduction to structural health monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 373 (2007) 303-315.
2. Sim S.H. and Spencer B.F. Jr., Decentralized strategies for monitoring structures using wireless smart sensor networks, *Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series*, No. 019, University of Illinois at Urbana-Champaign 2009 (<http://hdl.handle.net/2142/14280>).
3. Van Overschee P. and De Moor B., Subspace algorithms for the stochastic identification problem, *30th IEEE Conference on Decision and Control*, Brighton, UK (1991) 1321-1326.
4. Peeters B. and De Roeck G., Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing* 13(6) (1999) 855-878.
5. Peeters B. and De Roeck G., Stochastic system identification for operational modal analysis: a review, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 123(4) (2001) 659-667.
6. Brownjohn J.M.W., Ambient vibration studies for system identification of tall buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 32 (2003) 71-95.
7. Lynch J.P., Wang Y., Loh K.J., Yi J-H and Yun C-B, Performance monitoring of the Geumgang Bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors, *Smart Materials and Structures* 15 (2006) 1561-1575.
8. Siringoringo D.M. and Fujino Y., System identification of a suspension bridge from ambient vibration response, *Engineering Structures* 30 (2008) 462-477.
9. Weng J-H, Loh C-H, Lynch J.P., Lu K-C, Lin P-Y and Wang Y., Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems, *Engineering Structures* 30 (2008) 1820-1830.
10. Chang C.M. and Loh C.H., Improved stochastic subspace system identification for structural health monitoring, *Journal of Physics: Conference Series* 628 (2015) 012010.
11. Hartmann D. and Smarsly K., Development of an Autonomous Monitoring System for Safety-Relevant Engineering Structures, Res. Project, Institute for Computational Engineering, 2005.
12. Ko J.M. and Ni Y.Q., Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges, *Engineering structures* 27(12) (2005) 1715-1725.
13. Okafor A.C., Chandrashekhara K. and Jiang Y.P., Delamination prediction in composite beams with built-in piezoelectric devices using modal analysis and neural network, *Smart materials and structures* 5(3) (1996) 338.
14. Luo H. and Hanagud S., Dynamic learning rate neural network training and composite structural damage detection, *AIAA journal* 35(9) (1997) 1522-1527.
15. Madani S.A. and Ulieru M., An Application of Industrial Agents to Concrete Bridge Monitoring, *IEEE ICINCO* 6 (2006).



機器學習於橋墩沖刷預測之應用

張世昇／國立臺灣大學土木工程研究所電腦輔助工程組 碩士班研究生

陳翊翔／國立臺灣大學土木工程研究所電腦輔助工程組 碩士班研究生

張書瑋／國立臺灣大學土木工程研究所結構工程組 助理教授

張家銘／國立臺灣大學土木工程研究所結構工程組 助理教授

林詠彬／財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心 研究員

張國鎮／國立臺灣大學土木工程研究所結構工程組 特聘教授

陳俊杉／國立臺灣大學土木工程研究所電腦輔助工程組 教授

台灣山區地勢陡峻、東西方向狹窄，豪雨期間河川流速湍急，導致橋墩常面臨嚴重的沖刷。橋樑沖刷深度目前多依賴經驗公式推估，但在精準度及適用性皆有許多改善空間。伴隨科技進步，橋樑沖刷的監測技術已可以精準的量測沖刷深度並擷取到非常大量的資料，因應大數據時代及人工智慧的發展，可以透過長期量測的資料建立精準的沖刷預測模型。本文介紹由國家地震工程研究中心研發的橋墩沖刷監測系統，並探討如何透過機器學習，將濁水溪流域的自強大橋長期監測的沖刷資料建立沖刷深度預測模型，藉由類神經網路高度非線性特性反應水位、流速對單一橋墩的沖刷深度之影響，並探討將此預測模型發展為泛用於其他橋墩之可行性。

簡介

橋樑損壞原因眾多，與河川水流相關因子則佔大多數（圖 1），台灣的橋樑也不例外。台灣位於菲律賓海板塊及歐亞大陸板塊的交界處，地理環境十分特殊，地形多為高山、丘陵、台地組成。由於山區地勢陡峻、東西方向狹窄，河川東西流向、坡度大，水流十分湍急，常面臨的問題是豪雨期間沖刷所造成的基礎裸露，導致橋樑的穩定性及承載力不足。以下列事件為例，2000 年碧利斯颱風過境時，高屏大橋無預警斷落、2008 年辛樂克颱風侵台期間，溪水暴漲導致后豐大橋斷裂、2009 年莫拉克颱風來襲的時候，台灣中南部地區有近百座橋樑因為橋墩受沖刷影響造成橋樑毀損等。以上的斷橋事件皆造成人民嚴重傷亡，因此如何因應橋樑沖刷的議題發展工程的解決方案實在刻不容緩。

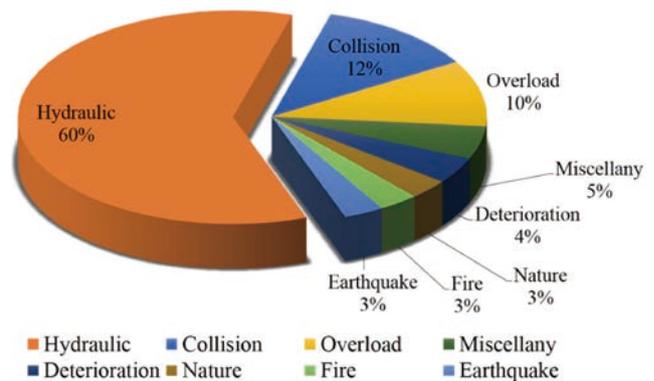


圖 1 橋樑損壞原因統計圖^[1]

過往許多學者針對沖刷的問題進行探討及研究，Melville^[2]、Sheppard and Miller^[3]、Raudkivi and Ettema^[4]、Graf and Istiarto^[5]、Breusers 等人^[6]透過縮尺沖刷實驗探討沖刷的物理機制，並依據實驗結果提出不同的經驗公式。近年來伴隨機器學習（Machine Learning）的

發展成熟，Baten 等人 [7]、Zounemat-Kermani 等人 [8]、Choi and Cheng [9]、Lee 等人 [10]、Toth and Brandimarte [11] 利用不同的演算法將縮尺模型實驗所量測的資料和現地獲得的觀測資料結合，嘗試建立沖刷深度推估模型，探討河川的水位、流速、橋墩尺寸、土壤粒徑等參數和沖刷深度之間的關聯性。上述的方法在應用的精準度及適用性皆有許多改善空間。

國家地震工程研究中心（National Center for Research on Earthquake Engineering, NCREE）針對橋樑沖刷議題，在過去幾年已發展可適用於現地險峻環境的橋樑沖刷監測系統，並於濁水溪流域的名竹大橋、中沙大橋、自強大橋和西濱大橋裝設此監測系統，於 2015 年開始監測至今，累積了非常龐大的觀測資料 [12]。這些資料包含河流的歷史水位、流速、橋墩的即時監測畫面及沖刷監測系統每個加速度感測節點之歷時資料。本文以自強大橋為例，介紹如何利用此長期監測的數據配合機器學習的方法建立水位、流速兩種河流資訊和橋墩沖刷深度之間的關聯性模型，並應用於預警系統以提升洪水來臨時用路人之安全。

橋梁沖刷監測系統

本文先針對由國家實驗研究院的國家地震工程研究中心、國家晶片系統設計中心、國家奈米元件實驗

室、國家高速網路與計算中心、儀器科技研究中心及台灣颱風洪水研究中心共同開發的橋梁沖刷監測系統做一簡介與說明，相關技術細節請參閱 [12]。

系統架構

橋梁沖刷監測系統整體架構如圖 2 所示，此架構可分為橋體上及橋體下兩部分。架設於橋體上的儀器用於監測河流狀態，當颱風或豪雨發生時，湍急的水流會對橋墩造成嚴重的沖刷，因此需針對河流的水位及流速進行監測並得到即時的資訊。架設於橋體下則為橋墩沖刷監測系統，其主要目的在於即時監測橋墩沖刷深度，並長期記錄橋墩周圍的河床沖刷及回淤歷程，避免橋墩因為過度暴露而危害橋梁安全。

水位和流速量測原理

水位的量測方式是將水位計裝設於橋面版上的欄杆旁，藉由雷達波的發射並接收脈衝，當雷達波遇到水位面反射會形成回波，由發射波與回波的時間差可得到即時的水位面變化，再藉由水位計的高程推算當時的水位高度。水位資料的取樣頻率約為 1 Hz，解析度為 ± 1 mm。水流速的量測是由天線對河川水面發射微波訊號，同時接收自河川水面反射的回波訊號，將發射訊號和回波訊號透過都卜勒效應得知兩者之頻差，可推求河川表面之流速，其資料的取樣頻率約為 0.5 Hz，解析度為 ± 0.01 m/s。

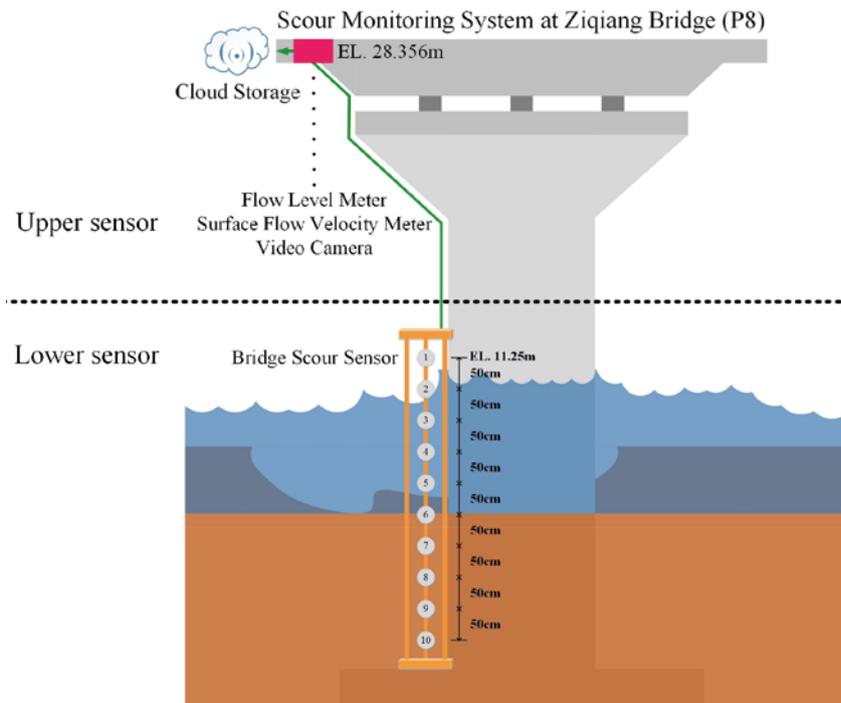


圖 2 橋梁沖刷監測系統架構示意圖

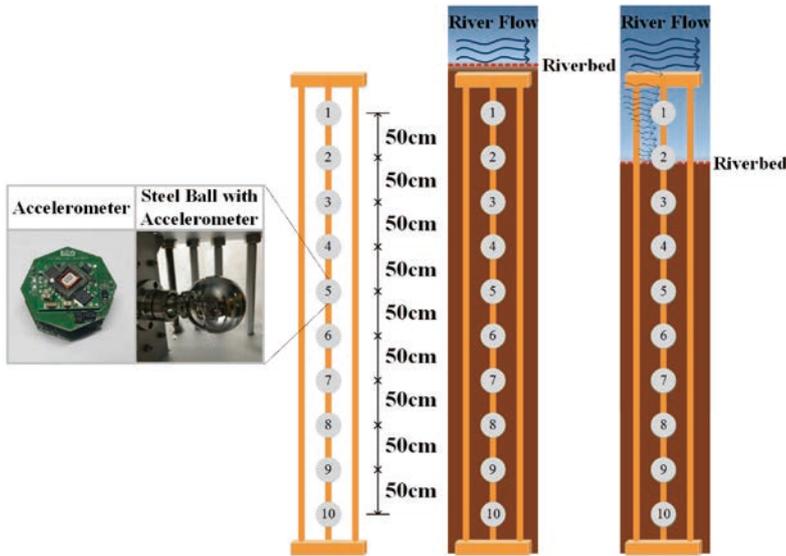


圖 3 沖刷監測系統感測器與運作原理示意圖

表 1 自強大橋強降雨沖刷事件列表

場址	事件編號	事件時間
自強大橋	1	2016/09/27 – 2016/10/31
	2	2017/04/22 – 2017/04/25
	3	2017/04/27 – 2017/04/30
	4	2017/05/25 – 2017/06/08
	5	2017/06/09 – 2017/06/18
	6	2017/06/30 – 2017/07/22
	7	2017/07/24 – 2017/08/03
	8	2017/08/23 – 2017/08/30
	9	2017/10/14 – 2017/10/17
	10	2018/01/06 – 2018/01/14

橋樑沖刷感測原理

橋樑沖刷監測系統的沖刷感測器設計原理是將三軸加速度規裝設在金屬鋼球中，並將金屬鋼球以五十公分為間距固定於鋼筋籠中，再將整個鋼筋籠以垂直的方式埋設在橋墩旁的河床底下，透過水流衝擊金屬球所引致的振動做為判斷該深度有無沖刷的依據。圖 3 為沖刷感測系統與運作原理示意圖，當河川流量較小時，沖刷感測器的感測節點被泥土覆蓋住，此時的感測節點處於穩定的狀態。當強降雨發生期間河川水流湍急，會對橋墩周圍造成局部沖刷的現象，此時橋墩周圍的覆土高度會逐漸下降，原本處於泥土中的感測節點會逐漸裸露並遭受水流及泥土的沖擊和擾動而產生振動。因此透過加速規所量測到的振動訊號可以識別每個感測節點是否受到沖刷而裸露在河水中，進而判斷沖刷深度的範圍。

數據蒐集與特徵分析

強降雨資料蒐集及建立

本文所採用的資料包括近三年的水位、水流速和沖刷感測節點的加速度訊號，皆來自於國家地震工程研究中心於 2015 年裝設於自強大橋 P8 橋墩的即時橋墩沖刷監測系統。由於長期監測的資料量非常龐大，本文僅針對雨季期間有明顯沖刷事件的資料進一步做探討。這些事件可透過現地攝影機所拍攝的畫面先擷取出水面高過於橋墩周圍覆土之時間段資料，根據這些原則，自強大橋總共可以擷取出 10 場完整的強降雨沖刷事件資料，如表 1。

資料前處理

檢視原始資料後可發現部分記錄之水位和流速的歷時資料有明顯錯誤和不合理的現象，初步研判應為量測儀器故障或訊號干擾所造成。本研究參照現地攝影畫面、經濟部水利署 (Water Resources Agency, WRA) 和台灣颱風洪水研究中心 (Taiwan Typhoon and Flood Research Institute, TTFRI) 在自強大橋所量測的水位和流速資料相互比對，並使用漢佩爾辨識法 (Hampel Identifier) 將異常質移除和高斯分佈權重之移動平均法 (Moving Average by Gaussian Distribution Weighting) 將資料平滑化，最後再透過內插方式將每分鐘之資料點補齊。圖 4 整理上述之修正原則，圖 5 以 2017 年 6 月 9 日至 2017 年 6 月 18 日的強降雨事件為例，比較修正前與修正後之水位與流速資料。由圖 5 可以發現此修正有效地將強降雨期間量測到之高度震盪的水位與流速除去雜訊與平滑化，讓此段期間的資料更為合理。

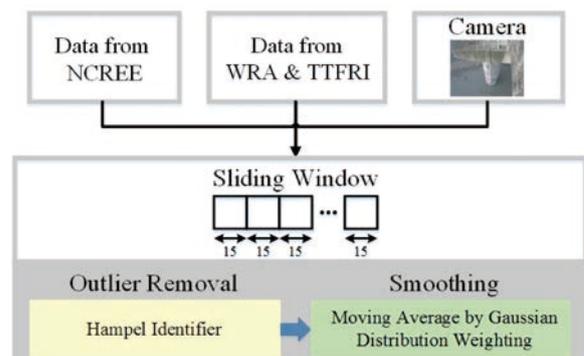


圖 4 水位、流速修正流程圖

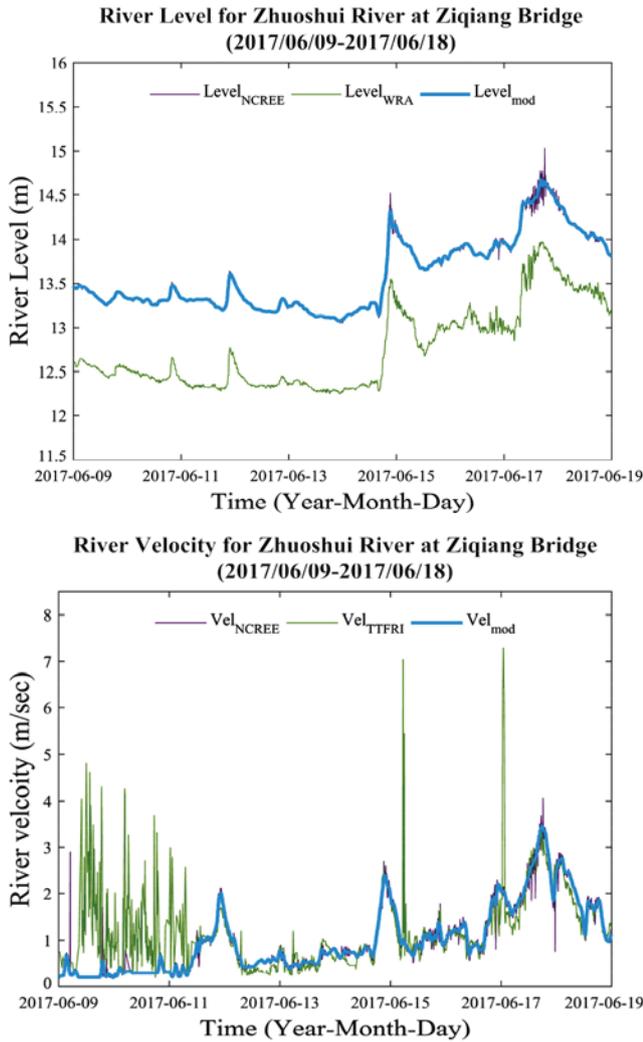


圖 5 2017/06/09-2017/06/18 降雨沖刷事件修正前與修正後之水位 (上圖) 和流速 (下圖)

本文採用監督式機器學習，需有真值做資料模型訓練。沖刷深度的真值以加速度訊號為準，並透過平均值、變異數與唯一值等三條件做為最後真值判斷的依據。在每個感測節點所輯錄的加速度歷時中可以量測到在非汛期無洪水沖刷時會有 $\pm 0.01\text{ g}$ 至 $\pm 0.03\text{ g}$ 的起伏，初步判斷為加速規本身的特性或是外在的訊號干擾。本文利用此特性，第一條件是利用加速度訊號平均值，因為感測節點的位移會造成加速規的電壓值改變而基線值偏移，因此以每秒為單位求得訊號的平均值並觀測其變化可以得知該感測點是否因為水流衝擊而移動。第二條件係以每秒鐘訊號的變異數做為判斷的依據，將無降雨事件發生時的變異數設定為門檻值，依其訊號和雜訊比可知道該感測點是否受到水流衝擊而引致振動。感測節點在靜止狀態時相當不穩定，因此另外增加第三條件，以每秒鐘不重複出現的值之個數 (Number of Unique Number) 並依據每個感測節點的特性設定一門檻值，當不重複出現的值之個數超過其門檻值則視為水流衝擊而引致振動，以上述的條件將三軸向的加速度取平均值、變異數和每分鐘不重複出現的值之個數再取聯集，則可以互相參照並提升識別的可信度。

圖 6 示意上述沖刷深度真值判斷流程，從識別結果顯示該時刻的沖刷深度範圍，並以五十公分為間距將每個時刻的沖刷深度範圍進行標籤作業。標籤的順序係以沖刷深度淺至深而小至大。標籤作業完成後，沖刷深度的標籤大小與水位和流速的趨勢相當一致，如圖 7 所示。

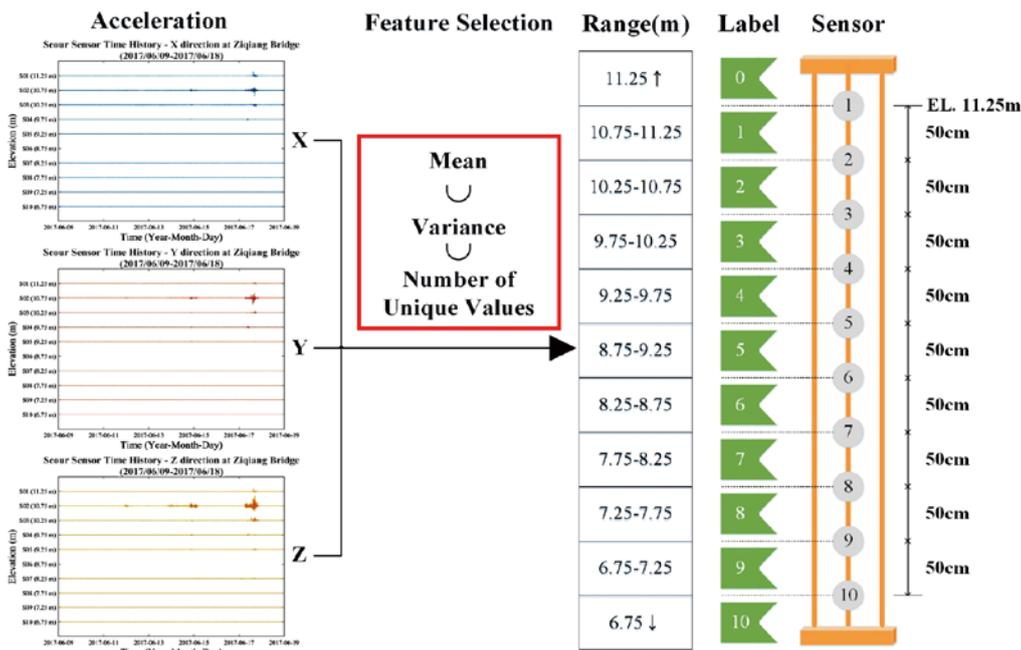


圖 6 沖刷深度識別及標籤作業方式

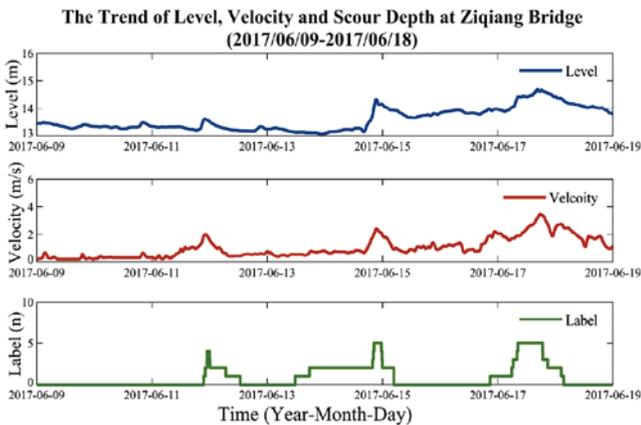


圖 7 自強大橋 2017/06/09-2017/06/18 事件之水位、流速和冲刷深度標籤趨勢

機器學習方法

深度學習與類神經網路

深度學習是一種以類神經網路 (Artificial Neural Network) 為基礎所演進的方法，而類神經網路的發想來自於人類大腦的神經網路，是一種模仿生物之神經網路所產生的數學模型。Hebb 於 1949 年根據突觸可塑性的基本理論提出赫布理論 (Hebbian theory) [13]，建立了學習過程中神經元 (Neuron) 互相影響的基礎。Rosenblatt 於 1958 年提出感知器 (Perceptron) [14]，將神經細胞結構數學模型化，如圖 8 所示。

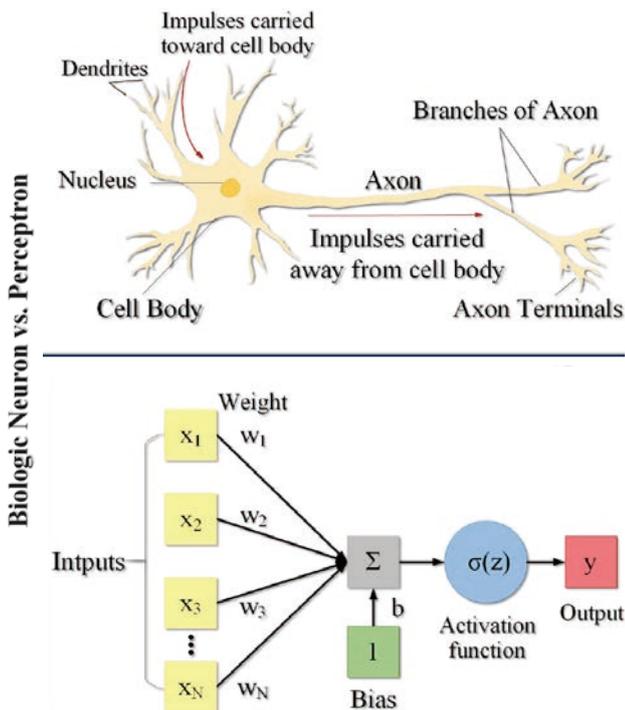


圖 8 神經元構造與感知器架構圖

類神經網路的數學模型與運作方式相對單純，假設每個神經元都是一簡單函數，而神經元的運作模式是將每個輸入值乘個別權重 (Weight) 後加上閾值 (Bias)，總和便成為神經元中激活函數 (Activation Function) 的輸入。其中激活函數是由使用者事先定義好的非線性函數，用來模仿神經元的複雜度。1980 年代多層感知器 (Multilayer Perceptron, MLP) 的應用開始逐漸增加，但發展上遇到理論與效率的瓶頸，直到 1986 年 Rumelhart 等人提出反向傳播 (Backpropagation) [15] 可以有效改善參數調整之速率。LeCun 等人 [16] 於 1989 年成功將反向傳播應用於手寫字體的辨識，展示反向傳播之演算法可有效提升類神經網路模型的訓練速度。Hinton 等人 [17] 於 2006 年成功地發展多層隱藏層 (Hidden Layer) 的類神經網路模型，如圖 9 所示，多層隱藏層為模型提供了更高的抽象層次，進而提高了模型的預測能力，揭開深度學習的濫觴。

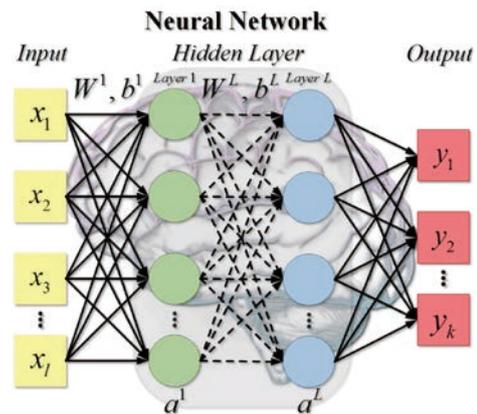


圖 9 深度類神經網路架構圖

模型訓練

在訓練類神經網路模型之前，需先定義整個類神經網路的架構，包含隱藏層的層數 (Hidden Layer)、每層的類神經數量 (Neuron Number)、訓練過程中數據集的採樣大小 (Batch Size)、激活函數 (Activation Function)、神經丟棄率 (Dropout Rate)、求解器 (Optimizer) 和每次訓練的迭代次數 (Epoch)，如圖 10 所示。本文建立模型的過程中，先嘗試不同隱藏層和神經元數量，最後提供一定範圍內的大量參數組合，如表 2 所示，並依照圖 11 之流程使用隨機搜尋法 (Random Search Method) 每次隨機找出 75 種參數組合進行模型訓練並以 4 次交叉驗證 (4-fold Cross-validation) 找到最佳的模型參數組合，詳細說明請參閱 [18]。

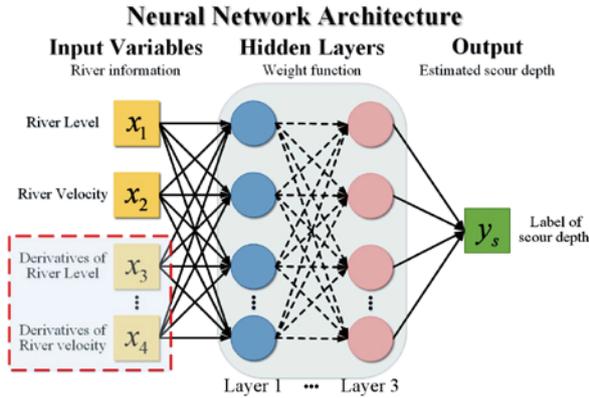


圖 10 預測沖刷深度模型架構圖

表 2 類神經網路模型參數組合

Hidden Layer	1, 2, 3
Neuron Number	15, 25, 35, 45, 55
Activation Function	softplus function,relu function
Dropout Rate	0.25,0.5
Batch Size	10,30,50,70,90
Optimizer	Adagrad
Epoch	200

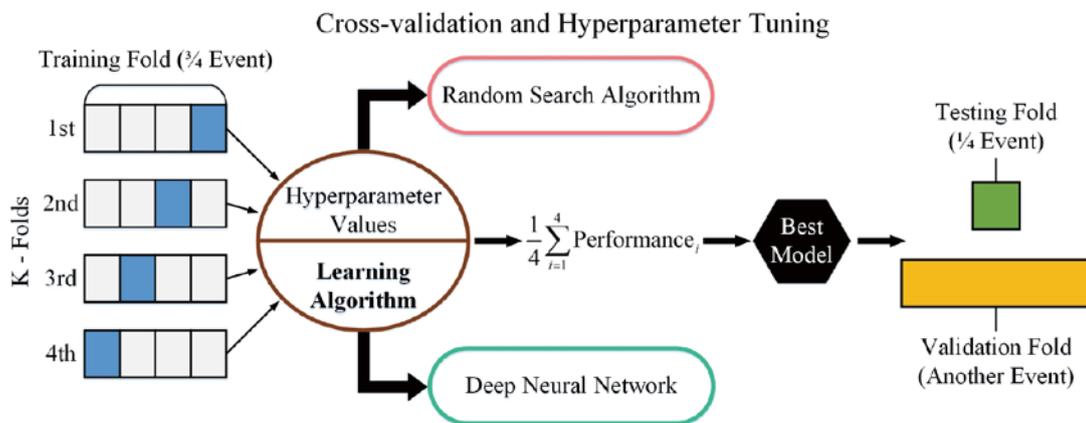


圖 11 訓練模型參數流程圖

由於輸入的特徵向量僅有水位和流速兩種，為了增加一些具有影響的特徵向量，因此將水位和流速分別進行一階微分做為訓練模型的特徵，利用兩種特徵向量組合以 1 分鐘 1 個資料點和前處理完成後的沖刷深度標籤進行分類模型訓練。經由本研究對於特徵向量組合進行探討過後，發現水位和流速以 1 分鐘 1 個資料點為特徵向量所建立的模型對於預測其他獨立事件的精準度較為穩定且準確，詳細說明請參閱^[18]。

沖刷深度預測

本文首先評估增加訓練樣本的事件數量能否有效提升預測模型的精準度，另外也驗證同一橋墩單一強降雨沖刷事件的訓練模型是否可延伸至其他強降雨沖刷事件。本文將較早發生之多場強降雨事件做為訓練樣本進行模型訓練，以預測較晚發生事件的沖刷深度。而每一次用來建立模型的事件，皆有四分之三的資料點做為訓練樣本，其他四分之一則做為測試資料

(Testing Data) 使用，其他較晚發生的事件則做為驗證資料 (Validation Data)。本文以最晚發生於 2018 年 1 月 6 日至 2018 年 1 月 14 日的強降雨事件作為驗證指標，評估訓練事件的數量對於預測事件的精準度，結果如圖 12 所示，不論是 2 個參數或是 4 個參數在 1 至 5 場事件所訓練的模型對於預測 2018/01/06-2018/01/14 事件的精準度皆有穩定上升的趨勢，約為 55% 至 60%，加入第 6 場事件進行訓練後其精準度則大幅提升 10%，接著再增加訓練樣本則沒有顯著提升的效果，最好的預測精準度大約為 70%。

預警系統需能準確掌握沖刷歷程。本文以預測 2017/06/09-2017/06/18 事件為例，將預測的分類結果轉換為深度並與實際沖刷歷程進行比較，發現兩者整體趨勢相當一致，如圖 13 所示。特別有趣的是在這場事件中沖刷發生的過程共有 3 個峰值，代表沖刷極為嚴重的時刻，這些時刻機器學習模型都可精準掌握，對未來發展預警系統有很重要的意涵。

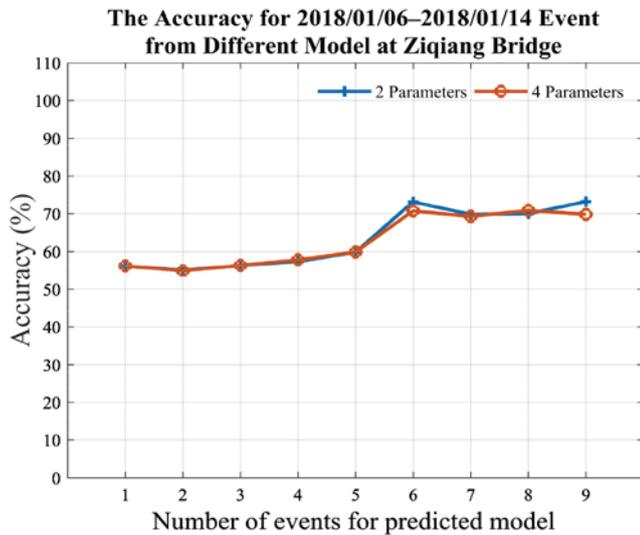


圖 12 不同樣本數量訓練之模型對於 2018/01/06-2018/01/14 事件之預測精準度

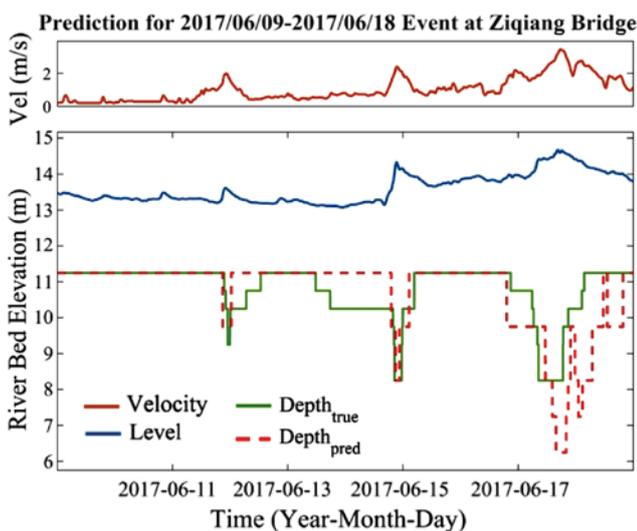


圖 13 預測自強大橋 2017/06/09-2017/06/18 事件之冲刷歷程

結論與展望

本文成功地運用監督式機器學習發展以現地水位和流速歷程為基礎的橋樑冲刷深度預測模型，也驗證單一強降雨冲刷事件的模型可延伸預測其他強降雨冲刷事件，在冲刷歷程預測也可精準掌握冲刷極為嚴重的時刻。本研究的成果對未來工程實務發展橋墩冲刷預警系統有重要的意涵，針對目前的成效，未來若能量化冲刷發生前河床和橋墩周圍土壤之初始狀態，並將橋墩尺寸、幾何形狀和河床土壤參數加入模型訓練的特徵向量，將有助於提高冲刷預測模型之精準度並延伸此方法泛用於其他橋墩之冲刷深度預測。

參考資料

- Shirole, A. M. and Holt, R. C. (1991), Planning for a comprehensive bridge safety assurance program. *Transportation Research Record*, 1290, 39-50.
- Melville, B. W. (1984). Live-bed scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(9), 1234-1247.
- Sheppard, D. M. and Miller, W. (2006), Live-bed local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(7), 635-642.
- Raudkivi, A. J. and Ettema, R. (1983), Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 338-350.
- Graf, W. H. and Istiarto, I. (2002), Flow pattern in the scour hole around a cylinder. *Journal of Hydraulic Research*, 40(1), 13-20.
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G., and Shen, H. W. (1977), Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(3), 211-252.
- Bateni, S. M., Borghei, S. M., and Jeng, D. S. (2007), Neural network and neuro-fuzzy assessments for scour depth around bridge piers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(3), 401-414.
- Zounemat-Kermani, M., Beheshti, A.-A., Ataie-Ashtiani, B., and Sabbagh-Yazdi, S.-R. (2009), Estimation of current-induced scour depth around pile groups using neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Applied Soft Computing*, 9(2), 746-755.
- Choi, S. U. and Cheong, S. (2006). Prediction of local scour around bridge piers using artificial neural networks. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(2), 487-494.
- Lee, T. L., Jeng, D. S., Zhang, G. H., and Hong, J. H. (2007), Neural network modeling for estimation of scour depth around bridge piers. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 19(3), 378-386.
- Toth, E. and Brandimarte, L. (2011), Prediction of local scour depth at bridge piers under clear-water and live-bed conditions: comparison of literature formulae and artificial neural networks. *Journal of Hydroinformatics*, 13(4), 812-824.
- 林詠彬、古孟晃、李柏翰、廖泰杉、吳志泓、陳倫奇 (2016)，橋梁冲刷防災雲端監測技術。科學發展月刊，519，28-33。
- Hebb, D.O. (1949), *The Organization of Behavior*, Wiley: New York, USA.
- Rosenblatt, F. (1958), The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65(6), 386.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J. (1986), Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533.
- LeCun, Y., Boser, B., Denker, J. S., Henderson, D., Howard, R. E., Hubbard, W., and Jackel, L. D. (1989), Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. *Neural Computation*, 1(4), 541-551.
- Hinton, G. E., Osindero, S., and Teh, Y. W. (2006), A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural Computation*, 18 (7), 1527-1554.
- 張世昇 (2018)，機器學習應用於橋梁冲刷監測系統之研究，碩士論文，國立臺灣大學工學院土木工程學系。



土木工程與經濟發展

洪如江／國立臺灣大學土木工程學系 名譽教授、中國土木水利工程學會 會士

導 論

重大土木工程建設，動員龐大的人力與物力，本身就是一種經濟活動。完工後衍生更進一步的經濟發展與產業升級，是重大土木工程建設對經濟的貢獻。胡佛壩工程，田納西流域多目標開發，絲路，運河（中國大運河、蘇伊士運河、巴拿馬運河），台灣的十大建設、大甲溪水利工程系統、翡翠水庫、大眾捷運系統、高速鐵路、等等，都是例證。

若工程完成後不能衍生更進一步的經濟活動與產業升級，那工程施工期間的經濟活動，只不過是一時的興奮劑而已，可能無益，反而有害。

古埃及金字塔（只為了存放法老王死後的一具屍體）、阿房宮（只為秦始皇一己的享受）、等等，不但有害經濟，反而耗盡國力而趨於窮困、衰落、滅亡。

內政部營建署 107.09.10 發布：台灣空屋約 86.48 萬戶，待售屋 7.45 萬戶。加上許多利用率極低的小型機場、漁港，嚴重排擠台灣經濟發展與國家安全所必須的資源；筆者稱之為**現代金字塔**。

天災（例如：地震、豪雨、暴潮）與人禍（例如：在山地的濫墾、濫種淺根作物、濫伐、濫建、濫開山路、超抽地下水、工程設計或施工不當），引發山

崩、土石流、地盤下陷、或無預警倒塌，造成人命傷亡、嚴重財務損失、經濟停滯或衰退。防災得當，減少人命傷亡及財經損失。

土木工程（包括建築）結構物，如具美感、神聖性、或人類文明源起及發展的遺產，必然吸引大量觀光客、信徒或求知者前往參訪，有助經濟繁榮。

美國 1930 年代大蕭條與土木工程振興經濟的功能

1929 年 10 月，美國股票崩盤，大蕭條開始，失業率急速升高；1930 年，失業人口達 500 萬人；1931 年，失業人口近 1,300 萬人。美國總統胡佛（Hoover），積極推動兩個大規模的土木工程建設，開創了以土木工程振興經濟的先河，分別說明於下。

科羅拉多河胡佛壩（Hoover Dam）工程與美國西部經濟發展

胡佛壩（圖 1）計畫由美國內政部墾務局（Bureau of Reclamation）負責推動。1931 年 4 月 20 日開工，1935 年 5 月 29 日混凝土重力式拱壩（高 221.4m）建成，1936 年 3 月 1 日各項工程全部完工，水庫（Lake Mead，庫容 352 億立方公尺，水域面積 639 平方公里）



圖 1 美國胡佛壩，高 221 公尺，蓄水 352 億立方公尺（洪以旻攝）

開始蓄水。水力發電，每年 40 億千瓦小時 (kwh/yr.)，23% 供給內華達州，19% 供給亞利桑那州，58% 供給加州（包括洛杉磯 15.4%）。供應數州 1400 萬人的民生及工業用水。拉斯維加斯也因為水、電、與觀光而興盛。

拉斯維加斯地處沙漠，但因泉水（Vegas，印地安語）而成為原住民及西部移民的中繼站。其後，因美國西部鐵路經過該地，1905 年發展為千人小鎮，被認為是拉斯維加斯建城之年。1931 年，許多失業者湧進拉斯維加斯，參加胡佛壩的工程建設；同年，內華達州政府授權拉斯維加斯開設賭場。胡佛壩完工，開始充分供應該城清潔自來水與電力。2005 年，拉斯維加斯（面積 340 平方公里，居民近 60 萬人）的觀光客近 3900 萬人，觀光收入達美金 367 億，賭博收入約美金 67 億，會議及展覽超過 2 萬場（非賭博收入達美金 76 億），其腹地克拉克郡（Clark County）的收益達美金 97 億（參考拉斯維加斯政府網頁及 www.LVCVA.com）。2006 年之後，發展更加快速，高科技產業紛紛進駐，成為美國最大的金雞母之一。

田納西流域多目標開發計畫與美國東南部的經濟發展

1933 年成立田納西河谷管理局（Tennessee Valley Authority, TVA），從事田納西流域多目標開發，重點包括在田納西河谷建設一連串大壩，從事水力發電、灌溉、防洪、及水土保持。田納西州、部分肯塔基州、阿拉巴馬州、喬治亞州、北卡羅來納州與維吉尼亞州經濟復甦，功效顯著。本計畫的成功，其他國家紛紛仿效，進行流域的多目標開發。孫中山先生也建議成立 YVA（Yangtze Valley Authority），大力主張在長江三峽建壩，是長江水利工程建設的先知。台灣的大甲溪流域多目標開發也有仿效 TVA 做法的痕跡。

絲路與經濟發展

國際貿易，永遠獲利甚豐。中國的漢朝（202BC ~ 318AD）初年（139BC），遣張騫與班超通西域，雖有國防上的考慮，建立「絲路」與西方的國際貿易才是重點。大漢的繁榮、強盛與聲威，絲路的貢獻極大。

漢末與晉朝，絲路中斷，經濟衰退，社會動盪不安。

唐朝（618AD ~ 907AD），積極重新打通絲路，獲得成功。長安的留學生多達數萬人之多，聲威遠播，不輸漢朝。在內部，「貞觀之治」與「開元之治」的時段，夜不閉戶，出外旅行不必自備糧食，可見富裕與繁榮之一般。唐朝滅亡之後，先是五代十國之亂（907 ~ 960），繼之以宋與遼、金之戰，南宋偏安，以及元兵橫掃歐、亞兩大洲，絲路中斷，亞歐國家的經濟普遍受到傷害。

明朝（1368~1661），領域其實很小，不及於西域；雖有鄭和七下西洋（1405~1433），目的只在宣揚國威，無意發展國際貿易，更無心進軍西域打通絲路。清朝至乾隆時代，平藏部與平回部（建新疆）之後，已經自滿自足，無意與「地處邊陲」的落後番邦通商；太平天國之亂平息之後，左宗棠經營西北，重新整建中國境內的絲路，並在路的兩旁種植傳頌百年的「左公柳」，更值得一提的是：力阻俄國力量進入新疆。

目前，中國境內的新絲路上，大貨車絡繹不絕，首尾相連（圖2）；西北運進中原的，以水果、蔬菜為主，中原運送西北的，以建材及日用品為主；商業活動、資源開發、基礎建設、城市發展、與觀光旅遊，都在新絲路沿途急速爆發出來。新絲路達板城段兩側的風力發電風車不計其數（圖3）。鐵絲路建成之後，更有新的經濟發展與成就。

運河工程與經濟發展

中國隋朝在西元 584 年至 610 年所開鑿的「大運河」，以及後代的增修，到元世祖之時（西元 1293 年），從杭州至北京之間極度繁榮的「運河經濟帶」，長達 1,782 公里。大運河也把東西向的幾條大河（海河、黃河、淮河、長江）連成一氣，不但方便人民的交通，軍隊的調動，以及把江南和長江流域的糧食、絲綢及瓷器北運，使得中原地區成為一個自給自足的中華帝國。但在明、清二朝，航海大船與汽船興起之



圖 2 今日的絲路，中國段，重型卡車都嚴重超載，首尾相連（洪如江攝）



圖 3 新絲路上的現代化風力發電風車，新疆達板城段（洪如江攝）

後，長江流域和江南的物資，如果利用海運送至天津，必然更為迅速而且便宜；但受阻於大運河經濟帶的既得利益者，與明成祖朱棣棄海運而專心擴建紫禁城的決心，無法實現以海運將江南貨物北運的理想。

1869年11月，蘇伊士運河（圖4）通航，地中海、大西洋、與印度洋，連成一氣，大西洋與印度洋的海路航程縮短一萬公里以上。蘇伊士運河的最大獲利者為英國，其大西洋及地中海的艦隊及商船可以迅速與亞、澳兩大洲往返，對建構「日不落帝國」，很有貢獻。難怪英國極端重視對直布羅陀海峽及蘇伊士運河的控制權，多次用兵。

巴拿馬運河（1881～1914施工）通航之後（圖5），紐約至舊金山的海路航程大為縮短。最大獲利者為美國，其密西西比河三角洲數量龐大的農產品，銷往太平洋地區（尤其是亞、澳兩洲各國），經巴拿馬運河使運費大幅度降低而有絕對的競爭力。對美國海軍快速戰艦在大西洋與太平洋之間的迅速調動也有很大的功效。

這兩條運河，對資本主義國家取得原料與推銷商品，縮短運距及時程，降低成本，功效極大；也便利帝國主義者（尤其是歐美強國）對外擴張。當然，世界文化交流與文明接觸，也更為方便。今日的空運雖然已經非常發達，但數量日益增多的大且重的原物料及農產品，還是要靠海運，蘇伊士運河與巴拿馬運河的重要性，不但不減，反而增加；甚至於還有拓寬與增建新運河的呼聲。

台灣十大建設與經濟發展

台灣在1960年代之末，西部之南北縱貫公路像是越南戰場，車禍不斷，公路兩旁，經常可以看到車禍車還在冒煙或起火燃燒。高雄港聯外道路容量嚴重不足，碼頭的貨物堆積如山，難以運送台灣各地；碼頭船席嚴重不足，許多進出口貨輪無法靠岸卸貨或裝船，甚至於還有許多貨輪無法進港而暫停港外。西部縱貫鐵路，客運非常擁擠；至於貨運，高雄站每天至少有50%以上的貨物無法運出。雖然對外貿易快速成長，奈何運輸系統嚴重不足，而且系統老舊，安全堪虞。國際機場只靠小小的松山機場，客貨運能皆已飽和，而需求日增。電力供應不足，停電頻繁。進口石油只供燃燒，無法裂解輕油供進一步的高階利用。而工業方面，尚停留在輕工業的層次。

在上述背景之下，蔣經國先生毅然決定推動十大建設，包括：交通運輸類的中山高速公路、鐵路電氣化、北迴鐵路、桃園中正國機場、台中港與蘇澳港等六項；重工業方面，包括大煉鋼廠、大造船廠、石油化工廠、與核能電廠。各項建設次地完成之後，雖然有能源危機與外交挫折，台灣經濟起飛反而引起全球的注目與羨慕。其中，尤其是中山高速公路的效益，立竿見影，即使是一般老百姓也都一目了然。台灣經濟成長率的歷時曲線（圖6），十大建設末期開始，除了能源危機那幾年之外，經濟成長率長期超過10%，

在1999年921大地震之前，尚能維持近10%的程度，若計入地下經濟的部分，其數字會更為亮麗。



圖4 蘇伊士運河（Suez Canal）伊斯馬利亞段（洪如江攝）



圖5 巴拿馬運河的相對位置圖（Credit Google Earth）
（圖中紅點為筆者洪如江加註）

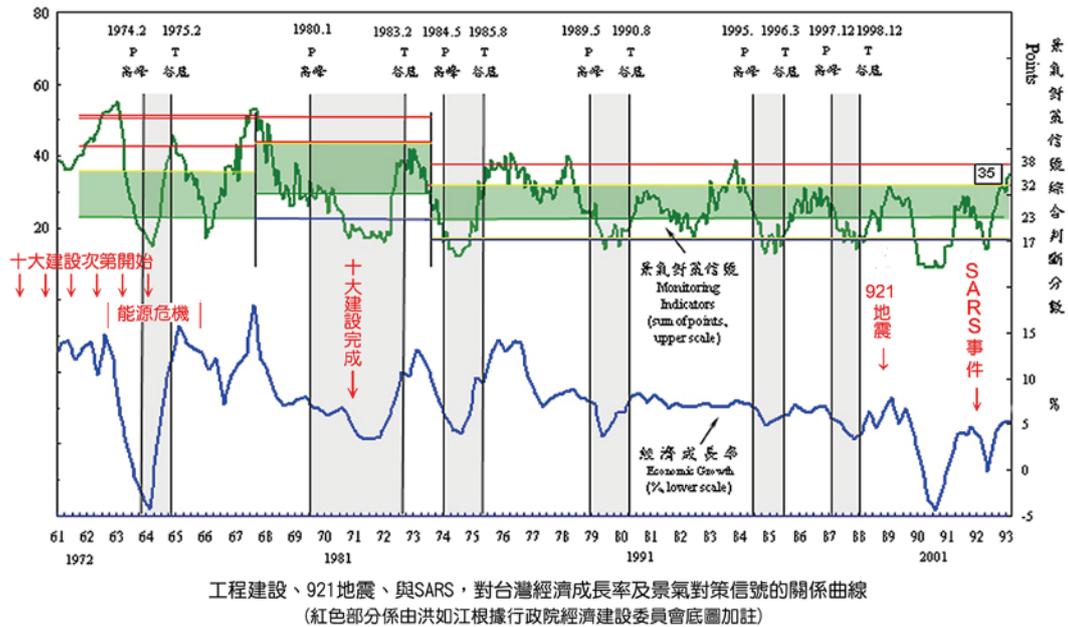


圖 6 台灣景氣對策信號與經濟成長率 (洪如江加註自行政院經建會原圖)

軌道運輸系統與經濟發展

第一次工業革命之後，列強競相建設鐵路，其對人流與物流的功效，眾所周知。孫中山先生也強烈主張廣建鐵路為其志業，惜壯志未酬。

工業城鎮的興起，人口向城市集中，為解決擁擠問題，軌道（多數為地下鐵路）型態的大眾捷運系統，紛紛在世界上各大都會建設通車，例如倫敦（1863）、格拉斯哥（1896）、布達佩斯（1896）、巴黎（1900）、柏林（1902）、紐約（1904）、布宜諾斯艾利斯（1913）、東京（1927）、莫斯科（1935）、鹿特丹（1968）、墨西哥（1969）、北京（1969）、首爾（1970）、巴西聖保羅（1974）、香港（1979）、印度加爾各達（1984）、開羅（1987）、上海（1995）、台北（1997）、高雄（2008）、等等 140 多個城市。

大台北捷運系統沿線的土地及房價上升，經濟活動增強。

有識之士，早在幾十年前就已經了解到工廠及汽機車燃燒化石能源危害人命的危險，開始提倡興建高速鐵路。1964 年，世界上的第一條高速鐵路（256 km/h）在日本啟用；1967 年，法國 TGV001（310 km/h）啟用；1978 年，義大利高速鐵路（250 km/h）啟用；1985 年，西德 InterCity（324 km/h）啟用；1994 年，EuroStar（300 km/h）經英法海隧道連接英國倫敦、比利時布魯塞爾、與法國巴黎（圖 7）；2006 年，西班牙高速鐵路（400 km/h）啟用；2007 年 5 月，台灣高速鐵路（圖 8，最高時速 300 公里）啟用。

目前，大台北捷運系統「單位耗能成本」（每一人每公里所需要消耗的能源，以新台幣計算）約為 0.25 元；高速鐵路的單位耗能成本應遠低於 0.2 元；高速公路上的長途大客車，單位耗能成本可能達新台幣 1 元之譜，依每車載客率而有很大的差異；乘坐計程車，單位耗能成本則需 1.5 元（四人共乘）至 6 元（一人乘坐）；乘坐飛機，單位耗能成本更高。準此，單位耗能成本，高速鐵路系統最低。在旅行時間方面，利用高速鐵路也比利用公路系統快上許多。但不可否認的是，短程的客運，還需要靠公路系統與台鐵區間車的服務。

筆者認為，相對於高速鐵路，服務距離超過 100 公里者，大客車的競爭力急速下降；1000 公里以內的內陸交通運輸，飛機沒有競爭力；超過 350 公里者，利用大客車已經很不經濟，應採用軌道系統。

在長途交通運輸方面，軌道系統除了耗能成本最低之外，尚有下列優點：

- 用地面積遠遠低於高速公路者，因此有利國土保育
- 在軌道上並不直接燃燒化石能源，不會像公路上行駛的汽車排放二氧化碳等等污染性氣體、固體懸浮微粒、熱氣、與噪音
- 車禍遠遠少於公路者
- 速率遠比汽車快，節省乘客時間，而時間就是金錢

ARUP（2014）出版一本富有前瞻性的書本 Future of Rail 2050，預料 2050 年新式高速鐵路的時速將達 1000 公里。



圖 7 英法海峽隧道工程開啟跨國的先端
高速火電車到達巴黎站 (洪如江攝)



圖 8 台灣高速鐵路試車中 (連永旺攝)

灌溉工程對經濟的貢獻

中國秦王政（秦始皇，259BC ~ 10BC）元年，聽從被捕的韓國間諜鄭國（也是水利工程師）的建議：引涇河之水，灌溉關中平原，可保秦國糧食充裕。秦王認為有理，動員 20 萬人，令鄭國負責建渠，完工之後，名鄭國渠。

中國四川省的都江堰水利工程，由秦朝李冰父子建設（約 250BC），成就了成都平原的文明至今不衰，而且其灌區日益擴大，是四川號稱天府之國的一大因素。

中國新疆省吐魯番，以高溫、乾燥著名，幾乎無雨水可用；但因開挖許多地下隧道及豎井，稱坎兒井，引天山之水灌溉，竟將沙漠變綠洲，盛產葡萄、其他水果、蔬菜，而聞名於世。目前，吐魯番地區尚有 1,600 條、長達 3,000 多公里的水利工程系統。

台灣，1930 年代，由八田與一技師設計及監造的烏山嶺引水隧道（長約 3 公里）、土壩（壩頂長 1,273 公尺，壩高 56 公尺）、烏山頭水庫（庫容 1.67 億立方公尺）及嘉南大圳網絡（總長度 1,410 公里），次第完工，灌溉雲林、嘉義與台南地區約 16 萬公頃的農地，

成為台灣最大的穀倉，提供台灣最大的產值。1970 年代之後，才逐漸由輕工業成為經濟發展的主角。曾文水庫（庫容 7 億立方公尺）於 1973 年完工，嘉南農田水利工程系統的供水能力更加穩定。

土木工程之美的力量與經濟發展

李仁芳教授，在《巷弄創業家》一書（326 頁）之中，強調美的力量，主張「美力孕育創新力」。下列幾座橋樑，都兼具型態之美與材質之美，並且與自然環境和諧相處，吸引最多的觀光客，對當地經濟大有助益。

- 美國舊金山的金門大橋（Golden Gate Bridge，1937AD ~）
- 法國南部的嘉德水道橋（Pont du Gard，19BC ~）
- 中國河北省的趙州橋（605AD ~）
- 捷克布拉格的查理士橋（Charles Bridge，1402 ~，參見圖 9）
- 等等

參考洪如江（107 年 4 月土木水利雙月刊）土木工程與文化（二）土木工程之美。

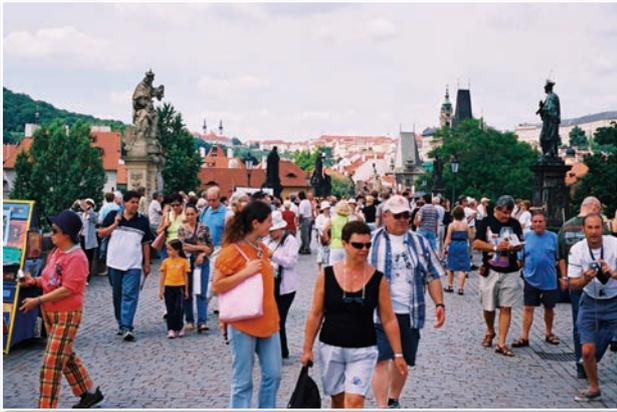


圖 9 捷克布拉格的查理士橋 (Chares Bridge, 1420~)
(洪如江攝)

神聖性的土木工程與經濟發展

歐洲許多大城市，都有一座神聖性的大教堂，吸引信徒及觀光客，例如：

- 翡冷翠 (Firenze) 的聖母百花大教堂 (Basilica di Santa Maria del Fiore)
- 米蘭大教堂 (Duomo di Milano)
- 梵諦岡的聖彼得大教堂
- 巴塞隆納由高弟 (Gaudi) 設計並開始興建的聖家堂 (La Sagrada Familia de Barcelona)
- 莫斯科的聖巴西里斯大教堂 (St. Basil's Cathedral)
- 等等

這些大教堂，多經幾百年的精工雕琢而成；不但是信徒宗教信仰的中心，也是觀光客必訪的景點。

還有許多具有神聖性的土木工程，吸引信徒前往崇拜、觀光客前往參訪：

- 伊斯蘭教的聖石殿 (位於耶路撒冷)，以及在許多國家內的清真寺
- 印度的許多印度教廟宇
- 吳哥窟的許多廟宇
- 台灣的媽祖廟、行天宮 (崇拜 關公)、指南宮 (道觀)、龍山寺 (主神為 觀世音菩薩，也有民間信仰的神像)、農禪寺、等等廟宇
- 中國的萬里長城、都江堰。大量訪客，對其神聖性崇拜的心意，遠大於對其功能的讚賞

城市工程建設與經濟發展

Florida (2006) 指出，全球 20 個「城市廊道」 (Urban Corridors)，居住人口只有 6 億 6,000 萬人

(約為世界人口的 10%)，卻佔世界經濟活動的一半、世界級科學活動的 3 分之 2、與全球創新產業 (innovations) 的 4 分之 3。

當世界人口的一半以上已經居住在城市之中，而台灣人口的 80% 已經居住在城鎮之中。因此，城市經濟發展的成敗，關係到整個國家經濟發展的成敗。

城市的世界級科學活動與創新產業，需要由教育 (包括家庭教育、學校教育、社會教育、在職教育、與自我教育) 培養國內人才，也需要容納國外人才前來。

適量與適質 (通常以低犯罪率為衡量標準) 的觀光客，開發健康的無煙囪工業，不但有助於城市經濟，也有助於提昇城市 (甚至於國家) 的形象。吸引觀光客，必須先珍惜城市中具有神聖性或普世價值的歷史遺產 (Historical Heritages) 及自然遺產 (Natural Heritages)。建構安全、友善而且富有美感的城市空間及人文環境。

台灣的城市，在治安及友善這兩方面，勝過世界上多數城市。台北市，捷運系統的空間，安全而且對使用者友善的程度，筆者認為是世界第一。但城市的天空線 (或稱鳥瞰視覺)，多奇醜無比。公共綠地面積，台北市僅 3.6% (根據 Global leadership on culture in cities, Taipei, 共 12 頁)，難以發揮減碳功能以達到進一步降低空氣污染致病的機率。

土木工程對台灣經濟可能貢獻之處

台灣，自來水尚無法生飲，在家必須浪費人力及能源燒開水，外出常需要購買瓶裝水。建構自來水可以生飲的土木工程系統，就長期觀點而言，符合經濟原則。

污水下水道的接管率尚不及印尼、馬來西亞、新加坡、等等國家；不少危險教室尚待改建或補強；台鐵窄軌系統應改為標準軌系統；許多城市尚未建立捷運系統。許多「危橋」尚待修補或重建。水庫泥沙淤積嚴重，應速建排沙道，以免河川下游河床泥沙侵蝕大於淤積而危及橋樑基礎及護岸結構物。

台灣西部平原，其實只不過是一個「城市廊道」而已 (Urban Corridors 或 Megalopolis, 參考 Florida, 2006)。因此，應積極推動台灣西部平原交通運輸系統的捷運化，以節省用地，並減少車禍及汽機車排放污濁廢氣對眾生的傷害。

工業及城市發展迅速，電力需求快速增加，除太陽能與風能之外，抽蓄發電是目前儲存大量電力的惟一方法，日月潭的兩個抽蓄發電系統就是最明顯的證據。台灣其實還有多處可以開發抽蓄發電的良址，其中，翡翠水庫抽蓄發電計畫最值得優先進行，以其最接近用電中心：台北市。

完善的防災工程，減少生命與財產損失，避免經濟衰退。但土木工程與防災這一議題，宜另文討論。

土木工程業者的規模效應

所謂土木工程業者，指工程顧問業、營造廠、工程材料業、及工程機具業。

任何工、商業者；規模越大者，購買原料、機具、資通訊軟體、專利技術、等等，所享受的折扣越大，成本越低，利潤越高。業者有能力以高薪付給工作夥伴（員工），精進技術及藝術水準。不只替本地以高效率（或高速度）建設（或製造）高品質的工程產品，也有能力進軍國際市場，衍生更進一步的經濟發展與產業升級。

以2008年北京奧運為例，數量及規模龐大的工程，包括新機場、運動場、選手村、等等；台灣沒有一家建築師事務所、工程顧問公司、營造廠，前往競標以取得設計或施工業務。台灣們建築師與工程師的個別水準一流，但業者的規模太小，沒有力量在北京奧運（或其他重大工程建設）20年前就有一個研究團隊從事功能、藝術（尤其是美學）、工程科技、工程作業，加以研發，而提出無可對抗的設計與施工方案讓業主別無其他選擇。

以土木工程使經濟壯大（相當於牛頓力學第二定律 $F = ma$ 之中的 m ）及加速發展（相當於 $F = ma$ 之中的 a ）來提昇國家經濟力量（相當於 $F = ma$ 之中的 F ），需要的不只是（甚至於不是）資訊及知識，而是智慧，例如台灣十大建設的決策（圖6）。

結 論

土木工程建設對經濟的真正貢獻，在於衍生更進一步的經濟活動與產業升級。

美國1930年代的胡佛壩工程所提供水與電力，不但使拉斯維加斯成為美國最大的金雞母之一，對美國

西部幾個州（尤其是南加州）的經濟，貢獻更大。

台灣在1970年代的十大建設，不但使台灣脫離貧窮的困境，而且使得台灣的經濟起飛，成為全世界稱讚羨慕的奇蹟。

受到新一代資訊科技的影響，土木工程也在應用最新科技（Technologies）及追求作業（Operations）的「速度」、「品質」、與「良率」。例如高速鐵路工程、高科技廠房工程，對支撐台灣經濟有很大的貢獻。

受到全球化趨勢的影響，跨國（甚至於跨洲）的重大土木工程建設興起。英法海峽隧道工程及倫敦巴黎間的高速鐵路，開其先端。丹麥與瑞典的國際道路（橋樑為主，加丹麥端的人工島及隧道）繼之。將來，跨越歐、非兩洲的直布羅陀海峽大橋（或隧道）工程，與跨越亞、美兩洲的白令海峽大橋（或隧道）工程，對改善經濟落後地區（尤其指非洲、西伯利亞）的經濟，會有很大貢獻。

歐亞大陸，以其氣候環境與地理環境，將再度成為人類文明躍昇的主要劇場。未來歐、亞交流的東西向交通運輸工具，最可能是單位耗能成本最低的新一代「高速鐵絲路網絡」（HSR Silk Road Network）。能夠佔據這一大網絡「節點」（node point）的國家或城市，經濟成就必然耀眼。

重大土木工程，應由高度專業的工程部或建設部，從事長期規劃，作為先導；再由工程師建設出在幾百年後，甚至幾千年後，還能夠挺立，成為後代子孫的文化遺產（Cultural Heritage）。土木工程界，在從事工程規劃、設計、施工、使用、與復育之時，也要了解自然、遵循自然法則，為後代子孫留下珍貴的自然遺產（Natural Heritage）。

參考文獻

1. 拉斯維加斯政府網頁及 www.LVCVA.com.
2. ARUP (2014), Future of Rail 2050.
3. Diamond, Jared (1997), Guns, Germs and Steel, Vintage.
4. Florida, Richard (2006), "The New Megalopolis", Newsweek, July 3 ~ 10, 2006.
5. Kennedy, Paul (1987), The Rise and Fall of the Great Powers : Economic Change and Military Conflict from 1500 to 2000. 漢文本（世界強權的興衰）由王保存與陳景彪譯，風雲時代出版公司出版。
6. Pennell, J.P.M. (1964), An Illustrated History of Civil Engineering, Thames and Hudson, London. 



**工程參訪 — 中庄調整池、臺中捷運 優良工程
參訪活動 @ 台中 107.9.27**

由中工會、臺灣營建研究院與本學會先進工程委員會合辦「中庄調整池暨臺中捷運烏日文心北屯線優良工程參訪活動」。全員在風光明媚的池邊合影留念後，搭車環湖至引水口聽取攔河堰、魚道等設施之作業簡報和現場觀摩。參加團員共 55 位。



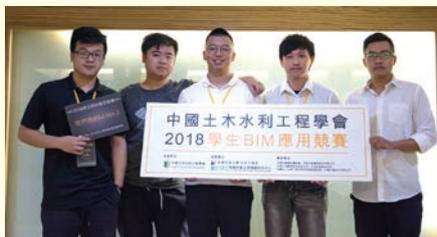
**國際交流 — 厄瓜多 Santa Elena 省
省長希斯內羅拜會本學會 107.9.27**



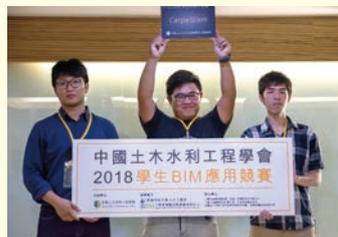
會中就我國水利工程技術及成果交流，並瞭解我國內相關廠商資訊。

2018 學生 BIM 應用競賽—決賽優勝出爐

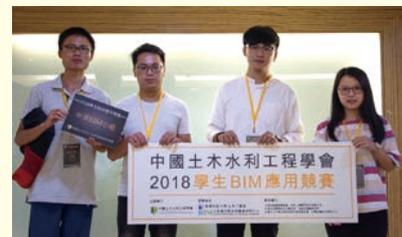
- 第一名：我們有 BIMVer.2 (淡江大學 / 土木工程學系)
- 第二名：Carpe Diem (國立高雄科技大學 / 土木工程系)
- 第三名：中原 BIM 小組 (中原大學 / 土木工程學系)



淡江大學 / 土木工程學系



國立高雄科技大學 / 土木工程系

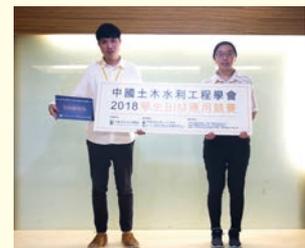


中原大學 / 土木工程學系

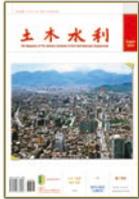
- 佳作：
- BIM 肩作戰 (台灣科技大學 / 營建工程系)
 - BIM 駕齊驅 (台北科技大學 / 土木工程系)



台灣科技大學 / 營建工程系



台北科技大學 / 土木工程系



茲附上廣告式樣一則
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致
社團法人中國土木工程學會

「土木水利」雙月刊
廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登位置	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏/封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3期9折， 4期以上8.5折	

刊登月份：

45.6 46.1 46.2 46.3 46.4 46.5 共 次
(12月) (2月) (4月) (6月) (8月) (10月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收摺據
請於刊登後檢據洽收

機構名稱： (請蓋公司印)
商號

負責人：

地 址：

廣告聯絡人：

電 話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木工程學會 電話：(02) 2392-6325 email: service@ciche.org.tw

98-04-43-04

郵政劃撥儲金存款單

收款帳號	0 0 0 3 0 6 7 8	金額 新台幣 (小寫)	仟	萬	拾	萬	仟	佰	拾	元
------	-----------------	-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---

通訊欄 (限與本次存款有關事項)

報名費
 繳納 _____ 研討會
報名費 _____ 元

繳納會費
 常年會員年費1,200元
 初級會員年費300元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期
 國內·會員 新台幣300元
 國內·非會員及機關團體 新台幣1,800元
自第 _____ 卷第 _____ 期起，_____ 年期雙月刊 _____ 份

訂閱中國土木工程學刊，一年四期
 國內·會員 新台幣800元
 國內·非會員及機關團體 新台幣1,800元
 國外·個人 美金40元
 國外·機關團體 美金100元
自第 _____ 卷第 _____ 期起 _____ 年期學刊 _____ 份

收款戶名	社團法人中國土木工程學會	
姓名	寄 款 人	
地 址	主管：	
電 話	經辦局收款戳	

虛線內備供機器印錄用請勿填寫

◎ 寄款人請注意背面說明
◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

郵政劃撥儲金存款收據

收款帳號戶名	
存款金額	
電腦紀錄	
經辦局收款戳	

社團法人中國土木工程學會

信用卡繳納通知書

姓名		款 別 註：入會時請先填入會申請書，傳真學會審查，我們會立即通知您，資格符合時請繳費，入會費一人僅需繳交一次	報名費 <input type="checkbox"/> 繳納_____研討會 報名費_____元
會員證號碼			繳納會費 <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,200元 <input type="checkbox"/> 初級會員年費 300元
身分證號碼			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 <input type="checkbox"/> 國內·會員 新台幣 300元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
卡 別	<input type="checkbox"/> VISA <input type="checkbox"/> MASTER CARD <input type="checkbox"/> JCB		訂閱中國土木水利工程學刊，一年四期 <input type="checkbox"/> 國內·會員 新台幣 800元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元 <input type="checkbox"/> 國外·個人 美金 40元 <input type="checkbox"/> 國外·機關團體 美金 100元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
信用卡卡號			白天聯絡電話
信用卡簽名欄最後三碼			通信地址
信用卡有效期限	(月/年)		
信用卡簽名			
繳費金額			

回覆請利用傳真：(02) 2396-4260 或 email：service@ciche.org.tw

回覆後請務必電話：(02) 2392-6325 確認，謝謝！

郵政劃撥存款收據

注意事項

- 一、本收據請詳加核對並妥為保管，以便日後查考。
- 二、如欲查詢存款入帳詳情時，請檢附本收據及已填妥之查詢函向各連線郵局辦理。
- 三、本收據各項金額、數字係機器印製，如非機器列印或經塗改或無收款郵局收訖章者無效。

請寄款人注意

- 一、帳號、戶名及寄款人姓名地址各欄請詳細填明，以免誤寄；抵付票據之存款，務請於交換前一天存入。
- 二、每筆存款至少須在新台幣十五元以上，且限填至元位為止。
- 三、倘金額塗改時請更換存款單重新填寫。
- 四、本存款單不得黏貼或附寄任何文件。
- 五、本存款金額業經電腦登帳後，不得申請撤回。
- 六、本存款單備供電腦影像處理，請以正楷工整書寫並請勿摺疊。帳戶如需自印存款單，各欄文字及規格必須與本單完全相符；如有不符，各局應婉請寄款人更換郵局印製之存款單填寫，以利處理。
- 七、本存款單帳號與金額欄請以阿拉伯數字書寫。
- 八、帳戶本人在「付款局」所在直轄市或縣(市)以外之行政區域存款，需由帳戶內扣收手續費。

交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

本聯由儲匯處存查 600,000 束 (100 張) 94.1.210 × 110mm (80g/m² 模) 保管五年 (拾大)

校園開講

9/20 起 青年工程師委員會「校園開講活動」開跑

由青年工程師委員會規劃，本學會發文給各大專院校系主任：

推薦優秀「校園開講講師名單」，可前往各系（所）演講，增進青年就業方向規劃與發展職場能力，並引發投入工程領域的興趣。

	課 題	講 師
1	傳統建築結構木作、泥與彩繪材料介紹施工 •簡介傳統大木結構、泥作雕塑與砌磚工法。 •介紹傳統施工作業流程與現代法差異。	高志瀚副教授 / 國立金門大學土木與工程管理學系
2	傳統建築施工影片介紹與解析 •介紹木作業樁接及組裝過程。 •介紹傳統建築修復之作業流程。	林建育負責人 / 涪江歷史田野工作室
3	傳統建築 3D 點雲掃描與BIM建模初步解析 •簡介 3D 點雲掃描與BIM建模。 •傳統建築 3D 點雲掃描與BIM建模之應用。	黃正翰組長 / 財團法人臺灣營建研究院產業資訊組
4	工程生涯經歷與分享	夏明勝技監 / 交通部
5	我公務生涯中的特別經歷	楊熾宗副分局長 / 高速公路局北區分局
6	工程生涯經歷與分享 如何面試予挑選工程公司	楊培堅 / 大彥工程顧問公司
7	工程生涯經歷與分享 如何面試予挑選工程公司	劉珊副理 / 世曦工程顧問公司
8	工程業界新知 如何準備技師考試	柯崑鐘技師 / 結構、土木、大地、水保
9	耐震技術新知 耐震領域之前瞻性 / 其他耐震相關議題	社團法人中華結構安全耐震補強協會
10	工程人員常見的法律陷阱 多元職涯發展	謝彥安主持律師 / 謝彥安律師事務所



社團法人中國土木工程學會 107 年年會暨 2018 土水國際論壇

～ 智慧工程、特色城市 ～



請多利用網路報名

時間：107 年 12 月 7、8 日（星期五、六）

地點：中鋼集團總部大樓（高雄市前鎮區成功二路 88 號）



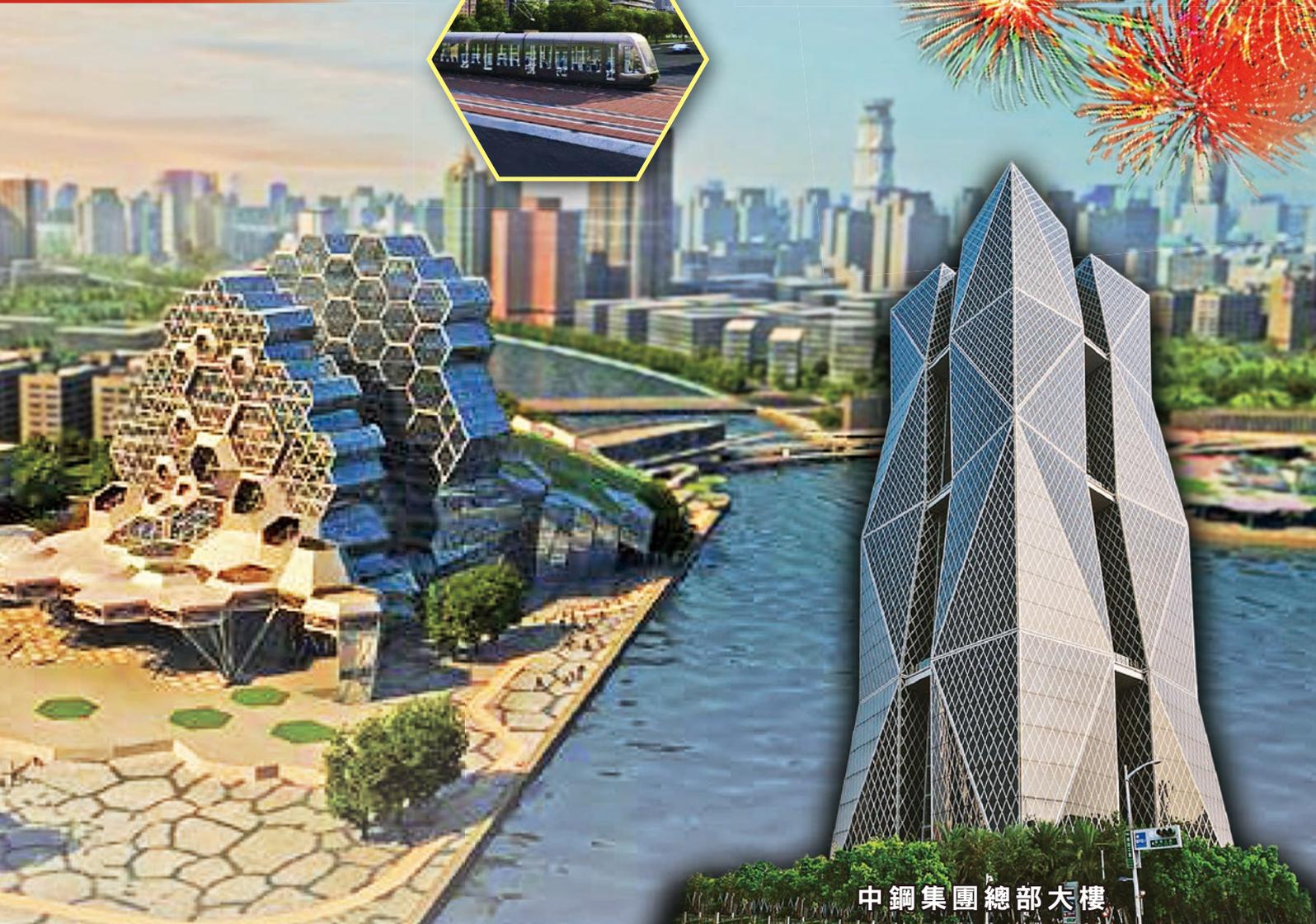
詳細年會訊息網頁

主辦單位：中國土木工程學會、高雄市政府

合辦單位：中國鋼鐵股份有限公司、高雄市政府工務局、高雄市政府水利局
中國工程師學會高雄市分會、柏林股份有限公司

協辦單位：中國土木工程學會南部分會、台灣世曦工程顧問股份有限公司
中興工程顧問股份有限公司、中華民國鋼結構協會（其餘邀請中）

107.12.7-8
高雄見



中鋼集團總部大樓