都市交通 Urban Traffic

半年刊 Biannually

第四十一卷 第一期 Volume 41 Number 1
民國一一五年六月 June 2026



ISSN 1562-1189

台北市交通安全促進會發行

Published by the Taipei Society for Traffic Safety

都市交通 Urban Traffic

半年刊 Biannually

第四十一卷 第一期 Volume 41 Number 1

中華民國一一五年六月 June 2026

發 行 所 台北市交通安全促進會

地 址 10571臺北市南京東路五段102號10樓之3

網 址 www.tsfts.org.tw

發 行 人 陳學台

主 編 王中允

副 主 編 溫裕弘

助理編輯 陳亭愷

專題論著審查召集委員 曾平毅

專題論著審查委員

王中允 吳水威 吳健生 林志盈 林麗玉 李俊賢

邱裕鈞 曾平毅 溫裕弘 馮正民 藍武王 張學孔

許添本 葉名山 羅孝賢

(依筆畫順序)

行政會計 施仕青

投 稿 詳稿約及審查說明

訂 閱 02-2748-5280

傳 真 02-2764-7215

印 刷 複合文具印刷有限公司

電 話 02-23633114

傳 真 02-23626053

地 址 106臺北市新生南路三段86巷8號

〈版權所有未經同意不得轉載〉

中華郵政北台字第1816號

執照登記為新聞紙類交寄

ISSN 1562-1189

都市交通 Urban Traffic

半年刊 Biannually

第四十一卷 第一期 Volume 41 Number 1

中華民國一一五年六月 June 2026

目錄 Table of Contents

封面故事 1

古莊里行人友善區

林育生 、沈敬莘 、陳冠瑋 、陳威豪 、黃韻潔 、邱詩純

Guzhuang Village Pedestrian-friendly Zone

Lin, Yu-Sheng, Shen, Ching-Shin, Chen, Kuan-Wei, Chen, Wei-Hao, Huang, Yun-Chieh, Chiu, Shih Chen

以複雜性理論探析都市運輸設施之耐災韌性 15

鄧敏政、許智豪

Analysis the Disaster Resilience of Urban Transportation Facilities Based on the Concept of Complexity Theory

Teng, Meng-Cheng, Hsu, Chih-Hao

高雄環狀輕軌大順路段之效益分析 31

張淑娟、許乃文、李啓源、張哲瑋、陳俞君、林大鈞、陳怡如

Benefit Analysis of the Dashun Road Section of Kaohsiung Light Rail

Chang, Shu-Chuan, Hsu, Nai-Wen, Lee, Chi-Yuan, Jhang, Jhe-Wei, Chen, Yu-Jun, Lin, Da-Chun, Chen, Yi-Ru

國道1號堤頂交流道之交通改善 47

紀韋廷、陳昇陽、劉信宏、丁培倫、陳威瑀

Traffic Improvement for the Tiding Interchange on National Highway No. 1

Chi, Wei-Ting, Chen, Sheng-Yang, Liu, Sin-Hong, Ting, Pei-Lun, Chen, Wei-Yu

應用元學習與多任務強化學習模型發展都會區單一化號誌控制架構 75

張益城、周家慶、孫將瓠、董尚義、胡昱亭、林佳欣、林小淳、郭哲維、吳其為

The Development of a Unified Signal Control Architecture for Metropolitan Areas using Meta-learning and Multi-task Reinforcement Learning Models

Chang, Yi-Cheng, Chou, Ja-Ching, Sun, Jiang-Ling, Dong, Shang-Yi, Hu, Yu-ting, Lin, Chia-Hsin, Lin Xiao-Chun, Guo Zhe-Wei, Wu, Chi-Wei



發刊宗旨

為因應專業在實務運輸問題上應用的需求，並提升國內學術界對於『都市交通』實務議題的重視，本期刊以定期發行的方式，針對國內、外有關運輸：運輸政策分析、運輸規劃、運輸管理、交通工程、運輸業經營與策略規劃、運輸安全、交通控制、運輸專案管理、運輸計劃評估、運輸行銷等領域實務議題的技術報告或是實際案例分析，都歡迎改寫為論文的格式，投稿都市交通半年刊，期使運輸領域學術界研究成果與實務界的應用充分結合，也希望未來本期刊所刊登的論文，可以對於運輸規劃、管理、工程、作業及操作的第一線人員，提供最直接的技術支援。

都市交通半年刊
第四十一卷第一期
民國一一五年六月
頁 1 ～ 14

Urban Traffic Biannually
Volume 41 Number 1
June 2026
pp. 1 ~ 14

封面故事

古莊里行人友善區

Guzhuang Village Pedestrian-friendly Zone

林育生[1]、沈敬莘[2]、陳冠瑋[3]、陳威豪[4]、黃韻潔[5]、邱詩純[6]

Lin, Yu-Sheng, Shen, Ching-Shin, Chen, Kuan-Wei, Chen, Wei-Hao, Huang, Yun-Chieh, Chiu, Shih Chen



[1]臺北市停車管理工程處主任秘書(聯絡地址：臺北市信義區市府路1號02-2720-8889轉6862 E-mail:gakuloda@gov.taipei)。
[2]臺北市交通局股長(聯絡地址：臺北市信義區市府路1號02-2720-8889轉6924 E-mail:aa0247@gov.taipei)。
[3]臺北市交通局聘用企劃師(聯絡地址：臺北市信義區市府路1號02-2720-8889轉6865 E-mail:at2666@gov.taipei)。
[4]鼎漢國際工程顧問股份有限公司 規劃師(聯絡地址：臺北市信義區松山路130號5樓，電話：02-27488822，E-mail:weihao@thi.com.tw)。
[5]鼎漢國際工程顧問股份有限公司 高級規劃師(聯絡地址：臺北市信義區松山路130號5樓，電話：02-27488822，E-mail:yunchieh@thi.com.tw)。
[6]鼎漢國際工程顧問股份有限公司 經理(聯絡地址：臺北市信義區松山路130號5樓，電話：02-27488822，E-mail:stream@thi.com.tw)。

摘要

臺北市近年推動行人友善環境，並非單一工程措施或短期政策作為，而是歷經多年制度化累積與滾動調整的治理歷程。自2015年啟動「鄰里交通改善計畫1.0」，逐步深化至2020年「鄰里交通改善計畫2.0」，並自2023年5月起推動行人友善區，逐步建立以「人本安全」為核心的街道治理模式，落實行人通行權優先的城市發展方向。並從里層級改善巷弄交通環境，透過減速丘、人行道外推、路面抬升、彩色鋪面及入口意象等措施，降低車速並提升行人可視性，同時減少穿越性車流，強化巷弄內步行安全。相較於過去以標線為主的改善方式，行人友善區進一步以整體區域規劃及在地參與機制推動，結合里長、居民與市府共同參與，提升政策落實性與環境品質。

關鍵詞：人本交通、減速設施、行人友善區

Abstract

In recent years, Taipei City's efforts to promote pedestrian-friendly environments have extended beyond isolated engineering measures or short-term policy initiatives, representing instead a long-term governance process characterized by institutional accumulation and iterative refinement. Beginning with the Neighborhood Traffic Improvement Program 1.0 in 2015, the policy was further advanced through Program 2.0 in 2020, and expanded with the launch of the Pedestrian-Friendly Zone program in May 2023. Collectively, these initiatives have progressively established a street governance model centered on human safety, advancing an urban development approach that prioritizes pedestrian right-of-way. At the neighborhood (village) level, the program focuses on improving alleyway traffic environments through a range of traffic calming and street design measures, including speed humps, curb extensions, raised road surfaces, colored pavement, and gateway treatments. These interventions aim to reduce vehicle speeds, enhance pedestrian visibility, and discourage through traffic, thereby improving walking safety within local streets. Compared with earlier approaches that primarily relied on pavement markings, the Pedestrian-Friendly Zone program adopts an area-based planning approach combined with participatory mechanisms. It brings together local leaders, residents, and municipal agencies in a collaborative process, thereby strengthening policy implementation and enhancing overall environmental quality.

Keywords: People-oriented transportation planning, Traffic calming devices, Pedestrian-friendly zone

一、前言

2022年底，CNN 報導臺灣為「行人地獄」，不僅衝擊國際形象，更凸顯長期以來交通體系「車本位」的結構性問題。面對高齡化社會的快速到來，重新檢視城市交通規劃的核心思維，已成為攸關公共安全、都市永續發展與生活品質的重要課題。

隨著都市交通發展與人口密度提升，臺北市巷弄空間逐漸成為人車交織的重要生活場域。然而，巷弄中車速過快、人行空間不足及穿越性車流頻繁等問題，已影響居民日常通行安全與整體生活品質。過去鄰里交通環

境改善雖已初步提供基本步行空間，但仍多停留於標線型人行道設置，對於降低車速與改善整體交通環境之成效有限。

為回應上述課題，臺北市以「人本交通」為核心理念，自2023年5月起推動「行人友善區」計畫，並參考新加坡推動之「Silver Zone(樂齡安全區)」經驗，於大安區大學里試辦全臺首創示範區。

本案以「降低車速、提升行人安全」為主要目標，透過設置減速丘、人行道外推、路面抬升、彩色標記及車道縮減等交通工程手段，營造車輛自然減速之道路環境，同時提升行人可視性與穿越安全。此外，亦透過行人友善區入口意象塑造(如設置專屬標誌、路口縮減及彩色壓花鋪面)強化辨識性，建立整體區域交通安全氛圍。

在推動上，行人友善區與鄰里交通環境改善計畫及2024年10月實施之行人優先區政策相互銜接，由點狀改善進一步擴展為以「里」為單位之整體規劃，將交通工程設計深入巷弄內部，並透過降低車速及減少穿越性車流，全面提升行人通行安全。

同時，行人友善區強調在地參與及因地制宜，依據各里環境特性與居民需求，由里長、里民與市府相關單位共同參與規劃與執行，從單點改善進一步邁向系統性治理，逐步形塑安全、宜居且具永續性的都市生活空間。

二、執行內容

2.1 推動緣起

為打造人本交通環境，立法院於2024年4月通過《行人交通安全設施條例》，並自10月1日正式實施，相關內容要求自2025年起各縣市每年應逐步提出「行人友善區」進行改善，朝行人優先的用路邏輯前進。根據條例規定，地方政府須將醫療院所、學校、機關及大眾運輸場站等人潮密集處的周邊區域，劃設為「行人友善區」，並透過定期舉辦說明會徵詢在地居民意見，逐步推動改善工程。

本案參考大安區大學里交通友善區試辦成果，檢討規劃範圍內之行人動線、行車動線、路口行人駐足空間、行穿線設置位置、減速策略、停車空間供需等，研擬相關改善規劃設計方案，除既有標誌標線號誌調整外，另試辦設置組裝式減速丘、標線型人行道或行人空間實體分隔、彎曲道路、路口縮減、彩繪標記行穿線、入口意象設計(入口意象同時含彩繪瀝青鋪面及行人友善區牌面掛設)等，以塑造行人友善區環境，使巷弄車行速度降低，提供行人友善通行空間，改善市民的巷弄生活品質，達成國際化首善之都交通的都市願景。



資料來源：內政部國土管理署

圖1 行人友善區簡介

2.2 推動流程

在中央部會發布《行人交通安全設施條例》及其施行細則之前，臺北市已率全國之先，協助臺北市大學里推動全國首座「交通友善區」，透過由下而上、民眾參與工作坊、前後成果調查分析、牌面設計等成果，更是成為內政部擬定推動細則之參考依據，展現前瞻布局與政策引領能力。

在大學里「交通友善區」(現配合法規更正為行人友善區)的成功，也帶動其他區里的跟進，在行人友善區制度上路後，已經有大安區古風、龍泉、古莊、華聲、信義區嘉興及內湖區樂康等里施作友善區，至今有7個里進入規劃階段，23個里在初步討論階段，加上施工中及完工合計共有83個里提出申請。



圖2 推動流程圖

2.3 規劃範圍

古莊里位於臺北市大安區核心住宅區，全里由和平東路、羅斯福路及師大路包圍，鄰近學校、公園及生活機能設施，日常行人活動頻繁。基地道路多為里內巷弄型道路，路幅有限，長期以來以車輛通行與停放為主，行人通行空間不足，缺乏明確的人車分流設計。

而師範大學、師大公園與古莊公園屬南北縱向的帶狀，公園範圍與里內巷弄交錯切割多段，在公園之間穿越皆須留意巷弄來往車輛，且古莊里內與師大公園之巷弄行人串聯空間不足，為塑造友善人本之公園及交通環境，透過課題盤點、綿密的社區協作、縝密的交通規劃，以及實地改善工程，逐步打造更安全、更舒適的步行環境。



圖3 古莊里規劃範圍

2.4 現況課題盤點

除了里內行人空間不足、浦城街作為周邊穿越車輛替代動線，車速較快外，師大公園屬南北縱向的帶狀公園，公園範圍與里內巷弄交錯切割多段，在公園之間穿越皆須留意巷弄來往車輛，針對行人通行空間不足、人行鋪面不平整及人車爭道等問題，推動行人友善區最核心的挑戰是「停車需求」，因為設置人行空間，如設置標線人行道，往往需要取消既有的停車格，導致部分里民認為其停車權利被剝奪，成為里長在第一線推動時最主要的阻力，盤點現況所發現的問題如下：

1.行人通行空間不足、破碎、不連續

2.行車車速偏高，巷道安全性不足

3.路邊停車需求壓力造成，違停侵占道路

4.公園、學區及活動場所等重要節點步行動線串聯不佳

5.多處路口視距不佳，事故風險高



圖4 古莊里內改善前狀況

2.5 規劃原則

整體改善構想與交通改善措施朝向「路小」、「路彎」、「路顛簸」方向進行，藉由「速度管理」降低里內車輛通行速度，同時利用空間設置人行道，使區域人行空間完善。

2.5.1 交通工程與設計措施

1. 造入口意象

透過街角外推縮小車道寬度，結合 AC 瀝青壓花鋪面與行人友善區牌面設置，打造進入里內之入口意象，提醒駕駛人減速慢行，明確傳達「行人優先」街道訊息。



圖5 入口意象示意圖

2. 提升人行空間串聯性

透過劃設標線型人行道，縮減車道寬度，除降低車速外，亦可提供人行空間並提 升行人可視性。



圖6 增設人行空間示意圖

3. 高風險肇事路口、路廊改善

透過街角外推縮小路口、鄰近路口增設減速丘或減速設施，利用標線與減速設施重新塑造路口與路廊，提升路口視距，達到車輛減速之效果，以降低路口肇風險。



圖7 高風險肇事路口改善示意圖

4.公園整體意象串聯

古莊里東側鄰近師大公園、南側臨古莊公園，但因公園被既有道路切割為數塊，規劃構想其透過鋪面整合與設置彎曲道路，降低道路與公園之衝突，增加整體公園之串聯。



圖8 公園整體串聯示意圖

2.5.2 交通管理與配套措施

1. 停車管理

透過停車通需調查，了解里內停車狀況，檢討里內停車需求，減少違規停車對行人空間的侵占。



圖9 停車供需整合

2. 加強觀念、執法、宣導

通過《行人交通安全設施條例》發布，並自2024年10月1日正式實施，配合宣導與執法，強化行人優先與減速慢行觀念。



資料來源：內政部國土管理署

圖10 政府宣導

3. 通學路廊

透過瞭解周邊校園位置結合學校通學動線，確保學童上下學時段的行走安全。



圖11 通學動線整合



圖12 改善作為彙整

三、執行成果

為達行人友善，需優先解決原本狹窄、破舊的人行道與人車爭道等難題，從原本的人行空間不足、路邊停了許多車輛，人行通行時需要與車爭道，重新打造寬敞舒適，並設置景觀欄杆、導盲設施與無障礙空間，讓行人、長者與行動不便者都能安心通行，而解決停車的措施則是嘗試利用國有地或私有空地等尋求替代停車空間，以減輕衝擊及反對聲音。

1. 創造低速環境

透過減速設施及道路配置調整等配套措施後，車輛行駛速度明顯降低，行人通行安全感提升。



點位	汽車			機車		
	改善前	改善後	等差	改善前	改善後	等差
1	21.2	22.3	+1.1	23.6	22.9	-0.7
2	16.9	17.5	+0.6	20.6	18.6	-2.0
3	20.7	16.5	-4.2	28.3	17.0	-11.3
4	25.0	14.2	-10.8	35.1	17.8	-17.3
5	23.7	15.6	-8.1	35.8	14.4	-21.4
6	27.8	26.1	-1.7	31.5	25.5	-6.0

圖13 車輛降速

2. 高風險路口、路廊改善

古莊里於114年7月後完成浦城街改善，透過肇事資料統計以完成前後之肇事資料進行分析，114年7月完工初期由於民眾不熟路況，至114年12月底肇事件數為2件，但相較前半年事故件數仍有所下降，路口衝突點減少，居民反映行走環境更為安心，未來將持續觀察並滾動式調整。



圖14 浦城街近年碰撞構圖

表1 浦城街歷年肇事件數統計

處理別	111	112	113	114/1-114/7	114/8-114/12
	件數	件數	件數	件數	件數
A1	0	0	0	0	0
A2	2	5	2	2	0
A3	0	2	4	5	2
合計	2	7	6	7	2

資料來源：臺北市政府交通局

3. 提升人行空間串聯

將不連續、淨寬不足之行人空間改善，使行人空間更為清楚，推嬰兒車、輪椅及長者通行便利性提高，讓社區對交通改善的認同感提升，形成正向的街道使用文化。



圖15 人行空間改善

4. 公園意象

古莊里內包含古莊公園及師大公園，透過鋪面整合及人行道改善，連接兩處公園，打造公園整體意象。



圖16 公園意象串聯

5. 停車空間整理

因應浦城街及里內人行空間增加，將部分停車格位取消，為解決停車問題，於規劃上利用空間規劃及尋找國有地或私有空地等措施，設置替代停車空間。



圖17 停車空間整理



圖18 改善成果

四、結論

臺北市政府推動「臺北交通安心行」計畫，打造「以人為本」的交通與城市環境改善政策，需要一步步完成，從提升人行空間安全、降低車速威脅，再到多個具示範性的行人友善區，逐步翻轉過往「車輛優先」的使用者體驗，讓步行成為市民的日常選擇。

透過友善區示範推動，經問卷調查周邊居民及來訪民眾之感想，滿意度達94.6%，未來將持續以「步步安心」為核心理念，建立可複製之規劃與執行模式，作為後續擴大推動行人友善區及行人友善區政策之基礎，結合街道景觀、綠化及公共空間改善，打造安全、宜行、宜居之街道環境，提升市民生活品質與城市友善形象。

都市交通半年刊
第四十一卷第一期
民國一一五年六月
頁 15 ～ 30

Urban Traffic Biannually
Volume 41 Number 1
June 2026
pp. 15 ~ 30

以複雜性理論探析都市運輸設施之耐災韌性

Analysis the Disaster Resilience of Urban Transportation Facilities Based on the Concept of Complexity Theory

鄧敏政[1]、許智豪[2]

Teng, Meng-Cheng, Hsu, Chih-Hao

摘要

都市災害案例顯示，電力、運輸、資通訊系統等設施，基礎設施常因災害導致損害，單一設施網絡的失效，更可引起其他設施復原遞延之蝴蝶效應，進而造成都市運輸設施之耐災韌性下降，而運輸設施受災會導致救援、疏散與緊急醫療服務受影響，顯見運輸設施防災韌性的重要性。最近幾年學者陸續將複雜性理論應用於智慧城市規劃與降低重大事件對城市安全的衝擊，顯見複雜性理論的系統觀點，可用來詮釋都市災害治理範疇。本研究彙整相關文獻，藉由複雜性理論分析框架，建立運輸設施系統模型範例，以實際都市運輸網絡案例，分析其在干擾時的脆弱行為與韌性表現，未來可進一步探究其網絡之關鍵設施節點與調適能力，以提供都市運輸設施韌性提升之理論與政策依據。

關鍵詞：複雜性理論、運輸設施、耐災韌性

Abstract

Within the cities network, critical infrastructure systems such as electricity, transportation, and information and lifeline communication technologies, play a vital role in maintaining stable urban operations. Transportation facilities were damaged will affect rescue, evacuation, and emergency medical services, highlighting the importance of transportation facilities disaster resilience. In recent years, scholars have successively applied complexity theory to smart city planning and reducing the impact of major events on urban safety. This study synthesizes relevant literature and employs an analytical framework grounded in complexity theory to construct a model of lifeline infrastructure systems. Using urban infrastructure network cases, the study analyzes vulnerability patterns and resilience

[1] 國家災害防救科技中心地震與人為災害組副研究員(聯絡地址：23143新北市新店區北新路三段200號九樓，電話：02-8195-8600，Email: jack@ncdr.nat.gov.tw)。

[2] 國家災害防救科技中心地震與人為災害組副研究員。

performance under disruptive conditions. Furthermore, it identifies critical nodes within the infrastructure network and explores their adaptive capacities, thereby providing theoretical and policy foundations for enhancing the resilience of urban transportation facilities systems.

Keywords: Complexity Theory, Transportation Facilities, Disaster Resilience.

一、前言

美國國土安全部(Department of Homeland Security, DHS)於 2013 年 12 月提出最新的「國家關鍵基礎設施防護計畫」，其中強調整體考慮關鍵設施的網路(cyber)與實體(physical)保護與耐災韌性，並實施風險管理，確保關鍵基礎設施功能持續運作的重要目的[1]。國內關鍵基礎設施共有 8 項主部門，其中公路運輸系統即為交通系統之重要設施，顯見運輸設施亦為國家關鍵基礎設施主要防護對象。

聯合國減災風險辦公室(UN Office for Disaster Risk Reduction，UNDRR)「2019 年城市具有韌性評估報告」為使城市具有韌性抗災能力，基礎設施在維持都市動態系統中扮演極為關鍵的角色，運輸設施扮演基礎設施重要都市營運角色，倘若設施受災服務中斷，對社會與經濟的衝擊將造成重大影響[2]。

奧雅納(Arup)工程顧問公司於 2014 年公佈都市耐災韌性指標(City Resilience Index)。都市耐災韌性被定義為：都市功能對於市民生存和發展所遭遇各種壓力或衝擊的恢復能力。相隔十年後於 2024 年再次發表更新版都市耐災韌性指標架構(圖 1)，包含 4 個主要關鍵維度(Dimension)、12 項目標(Goals)，以評估整體的都市耐災韌性[3]，幫助公私營部門的領導者識別並應對他們所面臨的風險和不確定性。因「韌性」的概念在現今社會和文化中變得越來越熟悉，有鑒於其具有複雜性，採取保護行動實現韌性提升仍然是一項艱鉅的任務。4 個主要關鍵維度中，即包含基礎設施和環境(Infrastructure and Environment)：以提供都市居民相關之關鍵基礎設施服務、保護和傳輸。



圖 1 都市耐災韌性分析架構[3]

回顧重大天然災害顯示，維生設施於災中衝擊後果嚴重，舉例而言1994年美國洛杉磯北嶺(Northridge)地震、1995年日本阪神(Kobe)地震、1999年台灣921集集(Chi Chi)地震與2011年東日本大震災(311大地震)，對於橋梁、軌道、道路等運輸設施、維生設施與電信設施毀損嚴重，甚至導致災害緊急救援與醫療時程延宕、都市機能運作服務水準降低與經濟等巨大損失衝擊。

二、文獻回顧

都市運輸設施之耐災韌性涉及領域廣泛，且運輸設施網絡具有相互依賴、路網複雜性且高度關聯性，故可藉由歷史災害案例進行經驗學習以提升設施營運功能服務與韌性，相關領域文獻回顧如下：

2.1 基礎設施因應氣候變遷調適目標

災害規模與氣候變遷日益增加，維生設施除面對各類災害外，對於氣候變遷衝擊亦須提早規劃因應之道。有鑒於此，交通部於 2023 年提出維生基礎設施領域的調適目標，為「增進系統韌性、強化建設能力、提升調適能力」，主要目的為強化維生設施建設能力，以及提升維生設施因應氣候變遷之調適能力為主。為提升維生基礎設施及系統韌性，應強化系統之建設、風險評估與檢修應變力[4]。

2.2 國內外基礎設施災害案例

近年來國內外相繼發生基礎設施大規模損壞事件。回顧災例顯示，以供電、運輸、資通訊等系統，在災後受損較嚴重。

2025 年 4 月 28 日，歐洲南部的伊比利半島出現大規模停電，西班牙和葡萄牙全境均受到影響[5]。由於停電，上述地區的交通和通訊服務均受到嚴重影響，交通訊號燈停止運作，當地的地鐵線路被迫停止營運。停電後，里斯本的地鐵、火車和交通訊號燈停止運行，民眾通勤遭受了嚴重影響。

2025 年 2 月 25 日，南美洲國家智利下午全國大停電，導致全國陷入一片黑暗，更造成交通混亂、行動通訊中斷、網路斷線，並且癱瘓了商業活動與民眾的日常生活。受到停電波及，交通號誌熄燈，火車停駛，迫使警察與民眾在十字路口協力指揮交通，而加油站因無法使用電力設備而無法提供運輸車輛之燃料[6]。

池上地震發生於2022年9月18日，係位於臺東縣池上鄉發生規模6.8、震源深度7.0公里之淺層地震。0918池上地震序列在花蓮與臺東地

區造成大量地表破裂、橋梁毀損、建物倒塌與人員傷亡，共 1 人死亡與 170 人受傷[7]。受損嚴重的橋梁共有五座，其中位於花蓮縣的高寮大橋因地震影響而產生大量橫向位移、橋柱剪斷、多處落橋嚴重損壞現象(圖 2)，嚴重影響連接橋梁兩端村落正常通行。此外大眾運輸工具亦受損嚴重，其中台鐵東里車站之月台水泥屋頂在地震後倒塌。另位於車站北側、橫跨秀姑巒溪的新秀姑巒溪鐵橋之橋柱破損、橋面板位移、電力線與電線杆等電力設施斷裂、傾倒，嚴重損害(圖 3)。因受地震破壞設施影響，當時鳳林站至富里站之間的台鐵班次皆因此停運，改由類火車進行接駁。鳳林站以北與富里站以南之台鐵車次則轉以區間車載客通行。



圖 2 高寮大橋受損情況

(照片來源：本中心勘災團隊)



圖 3 東里車站與新秀姑巒溪鐵橋受損情況

(照片來源：本中心勘災團隊)

2017 年 8 月 15 日台灣中油股份有限公司維修人員在大潭發電廠天然氣計量站更換電源供應器時，不慎導致天然氣供氣中斷，造成大潭發

電廠 6 部機組跳機，全臺執行 4 輪全台緊急分區輪流停電。根據報告資料顯示，全台 17 縣市 99 個鄉鎮(市)區共計約 592 萬戶用電受到影響，進而造成全臺各縣市分區停電。重要基礎設施也受到供電中斷鏈鎖效應，導致間接服務失效嚴重影響，如馬路上交通號誌失效、供水中斷，工業區與科學園區等高科技產業需配合緊急分區輪流供電[8]。

日本北海道在 2018 年 9 月 6 日發生規模 6.7 地震，基礎設施災情主要為北海道北海道所有火力發電廠都停止運作，全境 295 萬戶大規模停電，更因此造成包含航空、陸運、軌道等運輸第一時間全面中斷[9]。

日本熊本地震主震發生於 2016 年 4 月 16 日芮氏規模 7.3，前震發生在 14 日芮氏規模 6.5，前震與主震最大震度皆為震度 7，其前震、主震及餘震於九州各地引發災情，除造成 59 人死亡、262 人重傷、1,006 人輕傷外，更導致逾千棟建物損壞傾倒、交通系統中斷、維生設施服務中斷，熊本地震災情如圖 3 彙整所示[10]。

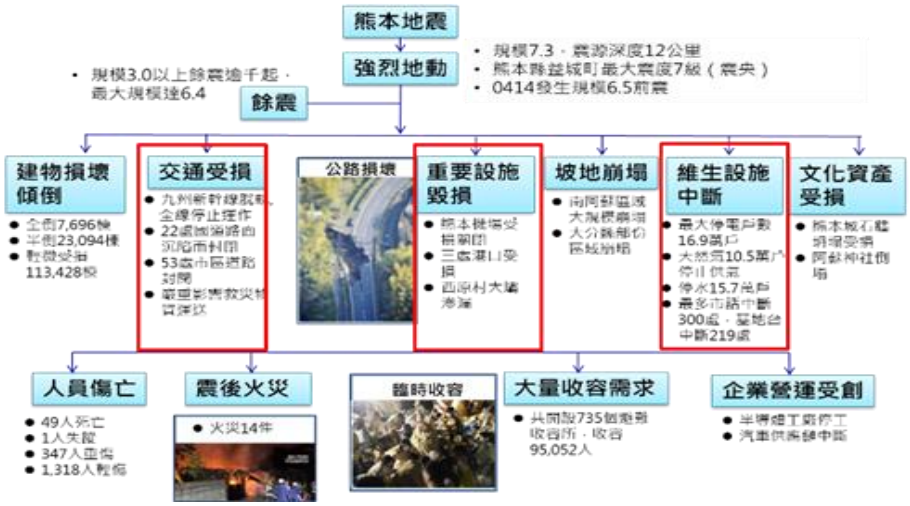


圖 4 熊本地震災情彙整[10]

(資料來源：日本內閣府應變對策本部，本中心彙整)



圖 5 熊本地震運輸設施災情

(照片來源：本中心勘災團隊)

1999 年 9 月 21 日凌晨 1 點 47 分於臺灣中部發生芮氏規模為 7.3 的集集地震，為臺灣百年來陸上規模最大的地震，震央位於北緯 23.85 度、東經 120.82 度，位於南投縣集集鎮境內，震源深度為 8 公里[11]，由於係屬淺層地震，強震區內(如圖 4)造成 2,415 人罹難、超過 5 萬棟房屋倒塌、路面隆起以及及跨河橋梁損毀，供水網絡與供電網絡系統亦受到嚴重損壞，除了影響國內民生活動、經濟發展外，高科技產業供應鏈中斷，更撼動全球晶圓製造與數位科技發展。

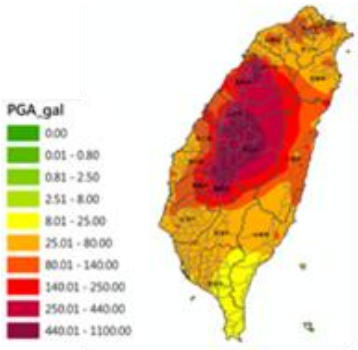


圖 4、921 地震震度圖[11]

(資料來源：中央氣象署，本中心繪製)

2.3 複雜性理論

李家儂[12]認為應用複雜理論於都市系統時，可從「自我組織與共同演化」、「驅動力與突變」及「動態與平衡」等三項特質進行探討，基於複雜理論，並藉由「空間形構法則」(Space Syntax)理論及空間量化方法，針對臺北環狀線捷運系統進行研究，以實例分析方式進行路網空間結構分析。

張世賢[13]複雜性理論觀點發現：複雜性理論提供正確、有系統、快速強化都市跨域救災治理能力。可用複雜性理論詮釋都市災害跨域治理現象，並也以複雜性理論強化都市跨域治理能力。

GAO[14]利用 Pajek 軟體及採用複雜網路技術，建立危險品道路運輸事故網絡，藉由事故干擾源(disturbance source)之間的相關關係以分析網路整體拓撲特性，利用此理論，發現影響危險品道路運輸事故發生和發展的因素，並提供危險品道路運輸事故預防參考。

Gallopín[15]以全球情境分析為例，提出城市可能面臨的分岔點與未來路徑，城市的複雜性與快速變化使得傳統的線性規劃方法難以應對其動態挑戰，城市作為耗散結構，其永續性需納入與環境的互動。

Deng *et al.* [16]以網路理論和 FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)方法為基礎框架，以網路理論和 FMECA 風險矩陣(Risk Matrix)分析網路效率形式研究地鐵系統脆弱性，然後，利用案例研究來證明該框架在識別地鐵系統中脆弱和關鍵功能模組以及評估其故障模式的嚴重程度方面的有效性和可行性。

Ouyang *et al.* [17]以複雜網路模型研究基礎設施系統在各種類型的攻擊和危害下的性能和脆弱性在捕捉其真實回應的有效性仍然是一個值得研究的問題。該研究以鐵路系統為例，選擇了三個典型的複雜網路模型，包括純拓撲模型、純短路徑模型和基於重量的最短路徑模型，以分析鐵路的可及性和基於流量的脆弱性，並將其結果與真實列車流量模型進行比較。

蘇昭郎等人[18]綜整提出支持都市系統運作的實質部門大致歸類為：土地使用、運輸、公共設施、運輸、環境等部門，從都市基礎建設單元結合經濟學的投入產出模型，探討災害衝擊時之系統關聯與影響，並討論災害及危機管理。

Wang *et al.* [19]採用複雜網路方法，檢視航空運輸網各個城市的網路結構和節點。Hopkins(2001)與 Lai(2018)皆認為城市發展決策主要呈現 4 個特徵，包含相互依存性性(interdependence)、不可分割性(indivisibility)不可逆性(irreversibility)和不完全預見性(imperfect foresight)，基此建構城市複雜性條件；而城市運作仰賴維生設施提供服務，各項設施系統間彼此亦具有相互依存性的特性。

2.4 運輸設施受災衝擊

Ahmed *et al.* [20]於考量韌性量化因子內，特別指出運輸流量在 5 項指標皆需被考量，另在未來研究方向亦指出，運輸系統與不同關鍵基礎設施相互依存性與災後系統旅運路線選擇等重要性。

鄧敏政等人[21]針對地震危害事件進行道路系統衝擊風險之評估，分析結果顯示道路衝擊高風險區域主要因素為高直接損壞機率、影響人口較多與衝擊產業家數較多等，此外道路與其他外部基礎設施相依關連性等，建議可再進行深入研究。

謝承憲利用相依性系統方法及脆弱調整因子分析法[22]，針對都會區道路系統、及偏遠山區公路系統進行脆弱度與回復力評估，其在結論特別提到，分析路網脆弱度需考量因子間相依性。

胡大瀛等人[23]，設計三種不同的最大累積雨量情境，使用總疏散時間、車輛延滯數及平均旅行距離三項指標來評估路網可靠度。數值結果顯示以旅行時間可靠度表示路網可靠度，可進一步評估路網之風險。

Rinaldi *et al.* [24] (2001)、Dudenhoeffer *et al.* [25]針對系統相依與關聯性進行研究，系統網絡間相依關聯性如圖 6 所示。

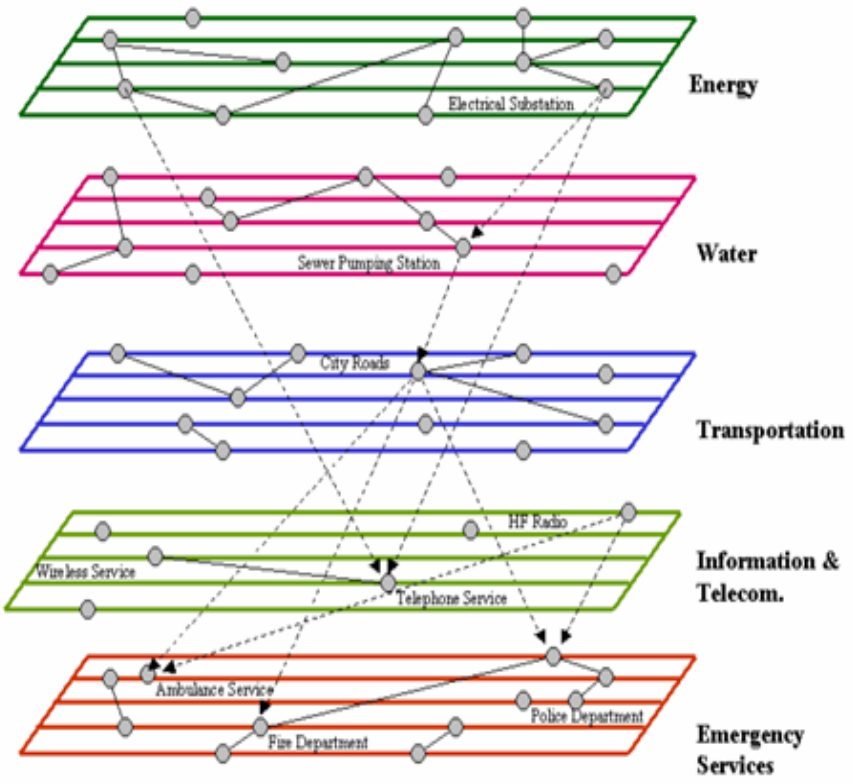


圖 6 維生設施系統相依關聯圖[25]

三、研究方法

過去災害歷史經驗顯示，運輸服務水準下降，除實體結構破壞外，其服務功能受到電力中斷相依無法正常營運之影響甚巨，故電力設施失效將引發運輸設施鏈鎖性衝擊後果亦需加以重視。

依據文獻研究發現，目前要進行運輸設施災害衝擊分析實質上仍具困難性；由於運輸設施管理者分屬不同權責機關負責，且經營者亦會牽涉到私部門公司，因不同設施系統間相互依賴權重參數研究更是闕如，故要直接進行多系統相依性研究誠屬不易。

基此，本研究範疇將限縮至示範區之運輸設施系統，並以示範區內電力與運輸設施網絡為例，說明如何應用複雜性理論，利用商業應用軟體建置系統複雜網路模型，最後進行運輸設施耐災韌性防災策略之探討。

3.1 建構設施營運複雜網絡

目前研究僅針對單一設施系統進行探討，有鑑於目前國內外相關文獻中，尚未有跨系統複雜網絡整體架構之分析，基此本文嘗試結合運輸設施與電力系統為例，整合系統相依性與網絡脆弱性概念，並利用 Pajek 商業軟體，進行建構複雜網路模型方法之初步研究。

建立的複雜網路模型中，以運輸系統為例，可應用於運輸的分析，特別是在處理交通網絡、路徑選擇與流量分析等方面，利用 Pajek 進行運輸系統分析的流程主要可分為以下幾個步驟：

1. 步驟一：收集並整理運輸系統的資料(如廠站位置、路線圖等)，建構資料節點與邊的格式，後續將收集的資料轉換成適合的格式，通常為節點(Node)與邊(Edge)的結構，每條邊可帶有權重。
2. 步驟二：節點與邊的定義，在網絡會被表示為圖(Graph)，其中每個廠站位置是為一個節點，每條連接路線是邊。邊的權重可反映各條路段的運量。利用 Draw 功能將運輸網絡可視化，讓使用者直觀地理解網絡中節點和邊之間的關係。
3. 步驟三：分析交通流與運輸效率，如最短路徑分析，利用最短路徑算法，分析從起點到終點的最短路徑，並計算行駛時間或距離。交通流量與瓶頸分析，網絡中邊的權重，識別出交通流量較高或容易出現擁堵的區域，幫助尋找潛在的瓶頸。網絡連通性分析，檢查網絡中節點與邊的連通性，了解交通系統在不同條件下的可靠性，特別是對於系統故障或路段封閉的韌性分析。
4. 步驟四：模擬與預測不同交通需求情境下的系統表現，例如不同交通流量條件下的最短路徑選擇和交通瓶頸的形成，最終結果輸出與報告，將分析結果如節點度數、最短路徑、交通流量等數據匯出，生成報告支持運輸規劃與決策。圖 7 為利用 Pajek 軟體建構單一交通網路之範例。

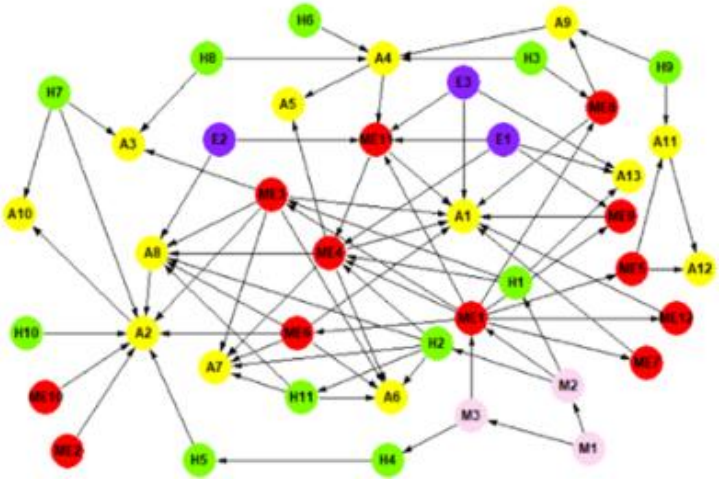


圖 7 運輸系統網絡模型[16]

都市內各基礎設施相互依賴通常具有跨系統複雜的相依關係，根據 2.2 節歷史災害紀錄顯示，基礎設施以電力、運輸，在災後受衝擊影響較大，特別是位於都市機能運作上上層的電力系統，設施失效經常會導致都會區運輸二次或間接鏈鎖性衝擊。

本研究除建立運輸設施網絡外，亦結合電力系統進行相依性影響之探討(詳如圖 8)為利用 Pajek 軟體建構交通與電力網路架構圖，供電系統重要設施包括發電廠、超高壓變電所、一次變電所、一次配電變電所。

使用 Pajek 的「Partitions」欄位進行節點分類的網絡子群分析，或利用內建的演算法分析子群結構(如圖 9)。

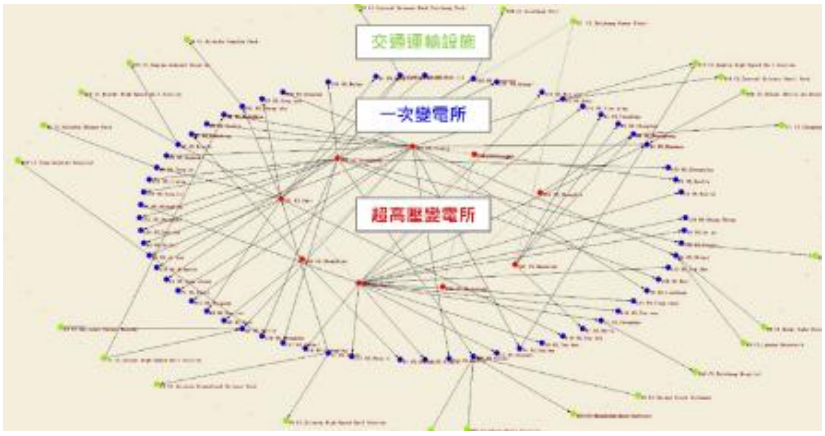


圖 8 交通與電力系統網絡結構圖模型

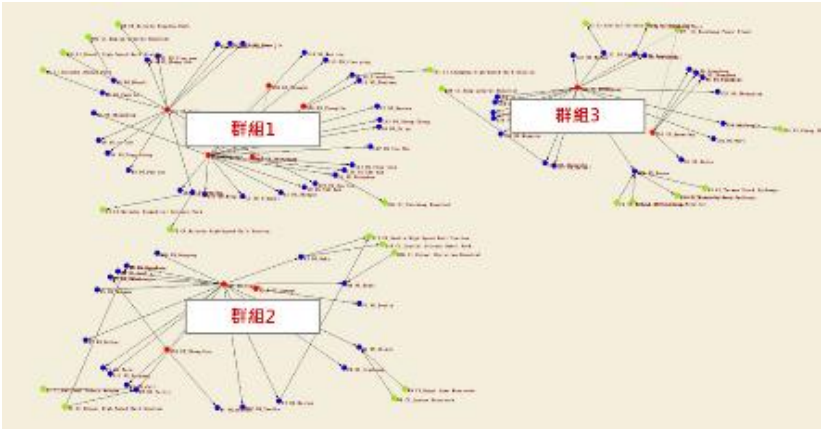


圖 9 交通與電力系統子群結構圖

3.2 設施複雜網路相依衝擊探討

都市高度依賴水、電、通訊、交通等設施，為避免設施受災導致傳播蝴蝶效應，對於設施防災韌性的強化目標，可導入企業持續營運概念，例如於災害持續營運計畫中設定恢復時間目標(Recovery Time Objective，RTO)，針對特定關鍵設施與系統，從災害初期發生損壞或服務中斷，到恢復正常運作所需的最長可接受時間。它決定了設施應運停擺的最長容忍度， RTO 的目標值越短，代表設施越能夠快速從災害中恢復運作，但相對事前防災整備成本也越高。本次研究示範例之電力設施網絡相依特性可歸納如下:

1.實體相依性:電力系統損壞時，將衝擊都市供電網絡穩定度，民生或產業復原時間及服務。

2.地理相依性: 電力系統網絡因超高壓變電所 (E/S)、一次變電所(P/S)損壞，將間接影響系統傳輸網絡涵蓋空間的用電供應問題。

3.邏輯或組織相依性: 災後都市電力網絡失效中斷，將衝擊供水、資通訊以及交通路網救災或緊急醫療救援通行時間及服務能力。

3.3 防災韌性策略建議

運輸設施的防災韌性策略，將以降低營運服務中斷風險與提升設施複雜網絡關鍵節點的防災韌性為主，並強化防救災資源，與緊急應變決策平台與跨機關協調，本研究提出防災韌性策略建議如下：

1.強化運輸設施風險管理與韌性能力

成立跨部門(包含公、私權責機關)設施防護專責單位，進行設施風險評估資料盤點，結合風險危害識別與風險分級管理，落實應用災害風險治理與韌性的持續營運管理。

2.建置運輸設施災害衝擊評估模型

針對設施複雜網絡中關鍵的設施節點，建置結合設施脆弱度、相互依賴性與災害衝擊評估模型，據以強化異地備援系統與冗餘設計，提升設施韌性以降低災害或其他突發事件所帶來之損失衝擊。

3.風險評估與持續營運計劃

針對運輸設施複雜網絡進行風險評估，識別潛在設施弱點，並制定設施持續營運計劃。設定恢復時間目標，制定設施的具體災害復原措施，強化緊急應變能力、系統預警與回復力，並定期實施持續營運應變演練。

4.建立支援決策共享平台

設施營運中，跨部門、跨領域的公、私機關資訊傳遞至關重要。建議加強運輸設施營運夥伴間聯繫與合作，透過建立支援決策共享平台與協調通報機制，整合都市災害應變與資源調度，增進跨部門協調與應變決策支援力。

四、結論與建議

提升運輸設施複雜網絡的防災韌性是一項跨領域、跨部門的挑戰，需從系統性風險管理、相依性分析、政策整合與技術創新等多面向著手，本研究歸納結論與建議如下：

4.1 結論

1.本研究以示範區內電力與運輸設施網絡為例，建構電力與運輸設施複雜網路模型，電力系統損壞時將影響運輸設施服務水準。

2.運輸設施耐災設施能在災後快速恢復運作，減少交通中斷對於民生與經濟活動的衝擊，例如能在災後迅速掌握道路、橋梁復原、救災物資配送、車流交控，並調度車輛進行民眾撤離疏散作業。

3.針對運輸設施進行系統性研究，可在災害衝擊的威脅思維下，進行不同災害情境組合的衝擊評估與關聯分析，進而將耐災韌性概念轉化在運輸設施規劃中納入災害風險評估，例如推估災害下的交通需求變化趨勢，並提前納入資源調度之策略。

4.2 建議

1.本研究彙整相關文獻，藉由複雜性理論分析框架，建立運輸設施系統模型範例，以都市運輸系統與電力網絡為例，進行網絡關鍵節點的脆弱行為分析，建議未來可深入探討運輸系統與電力網絡系統相依性分析。

2.為強化運輸設施持續營運的防災韌性目標，建議可建構不同跨系統複雜網絡分析架構，利用多元模式模擬，以降低運輸設施系統性風險。

3.運輸設施的災害防護策略，除將災害情境與風險納入交通規劃外，亦需強化運輸設施與人員的防救災演練，藉以強化設施管理相關利害人的應變能力。

參考文獻

[1] The Department of Homeland Security (2013), National Infrastructure Protection Plan 2013: Partnering for Critical Infrastructure Security and Resilience, https://www.cisa.gov/sites/default/files/2022-11/national-infrastructure-protection-plan-2013-508.pdf, 2013.

[2] Dilanthi A., Pournima S., and Richard H. (2019), Making Cities Resilient. UN Office for Disaster Risk Reduction Report, UNDRR, https://pure.hud.ac.uk/en/publications/making-cities-resilient-report-2019-a-snapshot-of-how-local-gover.

[3] Arup (2026), City Resilience Index, Retrieved August 11, 2026, website: https://www.arup.com/insights/city-resilience-index/.

[4] 交通部、工程會、內政部、經濟部、國科會、農業部 (2023)，維生基礎設施領域氣候變遷調適行動方案 (112-115年)。

[5] Brezar, A., Clea S.. and Spain (2025), Portugal and Southern France Hit by Massive Power Outage, Retrieved August 11, 2026, website: https://www.euronews.com/my-europe/2025/04/28/spain-portugal-and-parts-of-france-hit-by-massive-power-outage.

[6] 徐筱晴 (2025)，智利大停電！首都陷黑暗交通亂、民生癱瘓全國宵禁應對，擷取日期：2026年8月11日，網站：https://www.nownews.com/news/6651981?srsltid=Afm-BOoqdHUDHg5uQOch7zNGaEXz57YLnwG_D1HMtEDQojne71jTdxIw8。

[7] 中央災害應變中心 (2022)，0918 池上地震災害應變處置報告結報，擷取日期：2026年8月11日，網站：

https://bear.emic.gov.tw/Upload-Files/DFile/D_DOC/9001841/9AFAAA5TAS2EBI2R.PDF。

[8] 監察院 (2021)，815 停電事故調查報告，擷取日期：2026年8月11日，網站：https://www.cy.gov.tw/CyBsBoxContent.aspx?n=133&s=6149。

[9] 日本內閣府 (2018)，平成30年北海道胆振いぶり東部地震に係る被害状況等について，擷取日期：2026年8月11日，網站：http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin_hok-kaido/pdf/300920_jishin_hokkaido_01.pdf。

[10] 日本內閣府 (2016)，平成28年(2016年)熊本県熊本地方を震源とする地震に係る被害状況等について，擷取日期：2026年8月11日，網站：https://www.bousai.go.jp/updates/h280414jishin/index.html。

[11] 中央氣象署 (1999)，921大地震地震報告，擷取日期：2026年8月11日，網站：https://scweb.cwa.gov.tw/zh-tw/page/iframe?txtUrl=/spe-cial/19990921/19990921014712730 43.htm&title=921集集大地震-地震報告。

[12] 李家儂、謝翊楷 (2023)，「以複雜都市系統探討空間與社會邏輯關係—以臺北捷運南環段 Y3 站為例」，*複雜學*，第一卷第二期，頁1-23。

[13] 張世賢 (2023)，「都市災害跨域治理：複雜性理論觀點」，*複雜學*，第二卷第一期，頁5-17。

[14] GAO, S.S. (2023), “Analysis on Disturbance Source in Road Transport of Dangerous Goods Based on Accident Cases,” *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, Vol. 40, No.8, pp.163-167.

[15] Gallopín, G. C. (2020),“ Cities, Sustainability, and Complex Dissipative Systems. A Perspective. Frontiers in Sustainable Cities,” Retrieved August 11, 2026, website: https://doi.org/10.3389/frsc.2020.523491.

[16] Deng, Y., Li, Q., and Lu, Y. (2015),“ A Research on Subway Physical Vulnerability based on Network Yheory and FMECA,”, *Safety Science*, Vol.80, pp. 127-134.

[17] Ouyang M., Zhao L., Hong L., Pan Z. (2014),“Comparisons of Complex Network based Models and Real Train Flow Model to Analyze Chinese Railway Vulnerability,” *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 123, pp. 38-46.

[18] 蘇昭郎、李洋寧、鄧敏政 (2013)，「都市基礎設施系統運作的災害管理模型」，*環境工程會刊*，第二十四卷第二期，頁1-13。

[19] Wang J., Mo H., Wang F., Jin F. (2011),“Exploring the Network Structure and Nodal Centrality of China’s Air Transport Network: A Complex Network Approach,” *Journal of Transport Geography*, Vol. 19, No. 4, pp. 712-721.

[20] Ahmed, S. and Dey K. (2020),“Resilience Modeling Concepts in Transportation Systems: A Comprehensive Review based on Mode, and Modeling Techniques,” *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, Vol. 1, No. 8, pp. 1-20.

[21] 鄧敏政、許智豪 (2023)，「道路運輸系統受災之衝擊風險」，*危機管理學刊*，第二十卷第二期，頁41-48。

[22] 謝承憲、馮正民 (2016)，「臺灣公路系統之脆弱度與回復力評估」，*運輸計劃季刊*，第四十五卷第三期，頁235- 250。

[23] 胡大瀛、陳奕瑋、何偉銘 (2015)，「天然災害下路網可靠度模式之建立與研擬」，*科技部人文與社會科學簡訊*，第十六卷第二期，頁69-77。

[24] Rinaldi, Steven M., James P. Peerenboom, and Terrence K. Kelly (2001),“Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies,” *IEEE Control Systems*, Vol. 21, pp. 11-25.

[25] Dudenhoeffer, D.D, M. R. Permann, and Manic M. (2006), “CIMS: A Framework for Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis,” , *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey*.

都市交通半年刊
第四十一卷第一期
民國一一五年六月
頁 31 ～ 46

Urban Traffic Biannually
Volume 41 Number 1
June 2026
pp. 31 ~ 46

高雄環狀輕軌大順路段之效益分析

Benefit Analysis of the Dashun Road Section of Kaohsiung Light Rail

張淑娟[1]、許乃文[2]、李啓源[3]、張哲瑋[4]、陳俞君[5]、林大鈞[6]、陳怡如[7]

Chang, Shu-Chuan, Hsu, Nai-Wen, Lee Chi-Yuan, Jhang, Jhe-Wei, Chen, Yu-Jun, Lin, Da-Chun, Chen, Yi-Ru

摘要

本研究以高雄環狀輕軌大順路段(C24 愛河之心站至 C32 凱旋公園站)為對象，探討都市平面輕軌通車對既有混合車流環境之旅次行為、交通安全與環境碳排放之實證效益 。研究採用前後比較法，整合事故統計、大眾運輸運量、人行工程資料，並首度與電信業者合作，運用隱藏式馬可夫模型(HMM)追蹤行動信令座標點以精準推估旅次路徑與交通活動數據 。實證結果顯示，輕軌大順路段通車後帶來顯著之多維度永續效益：在交通安全方面，年事故件數由 424 件降至 306 件(降幅 27.8%)，死傷人數亦由 601 人大幅減至 425 人(降幅 29.3%)，其中側撞與轉彎違規行為在路口重新優化與禁左管制下獲得實質抑制 ；在旅次行為方面，該路廊整體旅次量雖增長 33%，但汽機車使用比例由 93%顯著下降至 84%，證實部分私有運具使用者已成功轉移至公共運輸 ；在碳排效益方面，每趟旅次碳排放量平均降低 21.6%，每日共減少 16,202 公斤之碳排放，其減碳效益相當於 49 萬棵樹之年固碳量 。此外，同步完工的 7.1 公里人行道改善工程亦有效優化沿線步道體驗，實踐人本交通理念 。綜上所述，大順路輕軌與 TPASS 票價政策的軟硬體結合，成功促進公共運輸成長並推動都市低碳轉型，其量化實證與數據治理經驗，能為台灣高密度混合車流城市之永續交通規劃提供重要之決策依據與示範。

關鍵詞： 輕軌運輸、旅次行為、交通事故、碳排放、永續交通

[1] 高雄市政府交通局局長(聯絡地址：800301高雄市新興區中正三路25號8樓，電 話：07－2299825)。

[2] 高雄市政府交通局智慧運輸中心主任(聯絡地址：800301高雄市新興區中正三路25號8樓，電話：07－2299825)。

[3] 高雄市政府交通局運輸規劃科技正(聯絡地址：800301高雄市新興區中正三路25號8樓，電 話：07－2299825)。

[4] 鼎漢國際工程顧問股份有限公司交通工程部門規劃師(聯絡地址：110048臺北市信義區松山路130號5樓，電話：02-2748-8822)。

[5] 鼎漢國際工程顧問股份有限公司高雄分公司規劃師(聯絡地址：807398高雄市三民區博愛一路28號7樓，電話：07-322-1772)。

[6] 資拓宏宇國際股份有限公司智慧物聯部組長(聯絡地址：105台灣台北市松山區民生東路四段133號，電 話：(02)8969-1969)

[7] 中華電信資訊技術分公司智聯處股長(聯絡地址：100台灣台北市中正區信義路一段21號，電話：0800-080-123)

Abstract

This study evaluates the empirical impacts of the Kaohsiung Circular Light Rail's Dashun Road section (stations C24 to C32) on travel behavior, traffic safety, and carbon emissions in a high-density, mixed-traffic urban environment. Employing a before-and-after study approach, this research synthesizes multi-source data including traffic accident statistics, ridership records, and sidewalk engineering data, while collaborating with a telecommunications provider to utilize a Hidden Markov Model (HMM) for precise trip trajectory tracking and macro-level carbon emission estimations. The empirical results demonstrate significant, multidimensional sustainable benefits following the rail transit's deployment. Regarding traffic safety, annual accidents dropped from 424 to 306 cases (a 27.8% reduction) and casualties decreased from 601 to 425 persons (a 29.3% reduction); side-impact collisions and illegal turns saw a substantial decline due to channelization and turn restrictions. In terms of travel behavior, despite a 33% increase in total trips, the modal split of private vehicles and motorcycles fell from 93% to 84%, indicating a distinct modal shift toward public transit. Environmentally, per-trip carbon emissions decreased by an average of 21.6%, translating into a daily reduction of 16,202 kilograms of carbon emissions—equivalent to the annual carbon sequestration of 490,000 trees. Furthermore, the concurrent completion of a 7.1-kilometer sidewalk improvement project effectively optimized the pedestrian infrastructure and fostered people-oriented mobility. In conclusion, the strategic integration of physical rail infrastructure with soft policy tools like the TPASS fare subsidy has successfully boosted public transit ridership and driven low-carbon urban transformation, offering robust evidence and crucial decision-making insights for sustainable transportation planning across similar urban contexts.

Keywords: Light Rail Transit, Travel Behavior, Traffic Safety, Carbon Emissions, Sustainable Transport

一、前言

高雄市作為南臺灣重要的港灣城市，其交通系統的發展與轉型至關重要。其中，大順路不僅是串聯北高雄與市中心的核心幹道，也長期面臨龐大的車流量與頻繁的機車事故。為了改善此困境並推動都市永續發展，高雄市政府積極建置環狀輕軌，於2023年大順路段通車完成輕軌成圓目標。

輕軌的導入改變了既有的道路空間配置，將原本雙向三車道的路型調整為雙向兩車道，並賦予軌道優先通行權。這項重大變革不僅為市民提供了新的公共運輸選擇，也對沿線的交通安全、旅次模式與環境產生深遠影響。本研究旨在透過量化分析，全面評估大順路輕軌通車後的具體效益，包括：

1. 旅次行為的轉變：輕軌如何吸引私人運具使用者轉向公共運輸？
2. 交通安全的提升：輕軌是否有效降低沿線的交通事故？
3. 環境永續的貢獻：輕軌如何透過減少碳排放，助力城市的淨零目標？

透過實證分析，本研究期望能為台灣其他城市在推動軌道建設與人本交通政策時，提供重要的參考依據與決策洞見。

二、文獻回顧

2.1 輕軌對旅次行為與交通量的影響

學界普遍認為，輕軌系統的建設能夠有效吸引私人機動車使用者轉向公共運輸，尤其在特定路廊上，這類「運具轉移」(Modal Shift)現象有助於緩解交通壅塞，並減少道路上的車輛數，進而帶來環境效益。例如，Litman[1]的研究強調軌道建設能產生多重外部效益，包括交通擁塞舒緩與環境改善。

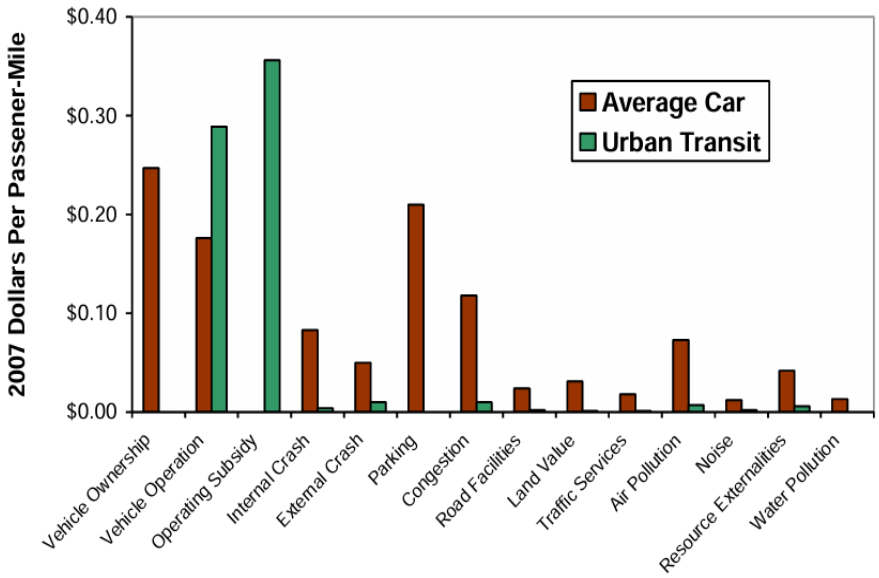


圖1 尖峰時間私有運具與公共運輸成本之估算比較[1]

相關研究結果進一步證實了輕軌導入對道路交通量的影響。例如，Ewing *et al.* [2] 在一項針對美國猶他州輕軌的「事前-事後」研究中，估計輕軌導入的路廊年平均每日交通量減少了 7,500 至 21,700 輛車。Webb *et al.* [3] 針對明尼蘇達州 Green Line 輕軌的研究也指出，該路線在營運前兩年，使路廊上的道路交通量減少了 22%。這些研究說明輕軌建設確實能改變旅次行為，並對緩解交通量產生實質貢獻。

2.2 輕軌與交通安全的交互影響

輕軌建設對交通安全既有潛在風險，也能有效改善道路安全。Ahmed & Bulut [4]認為平面輕軌(At-grade LRT)在與一般車輛共用路權時，會增加輕軌車輛與脆弱用路人(VRUs，包括行人與機車騎士)的碰撞風險，進而改變事故型態。然而，Vuchic [5]指出，輕軌建設通常伴隨道路空間重劃與交通工程改善，例如道路橫斷面的調整、車道數量的縮減以及路口設計改善，可有效管理車輛速度並減少人車衝突點，從而降低交通事故的發生率，提升整體交通流的效率與安全性。

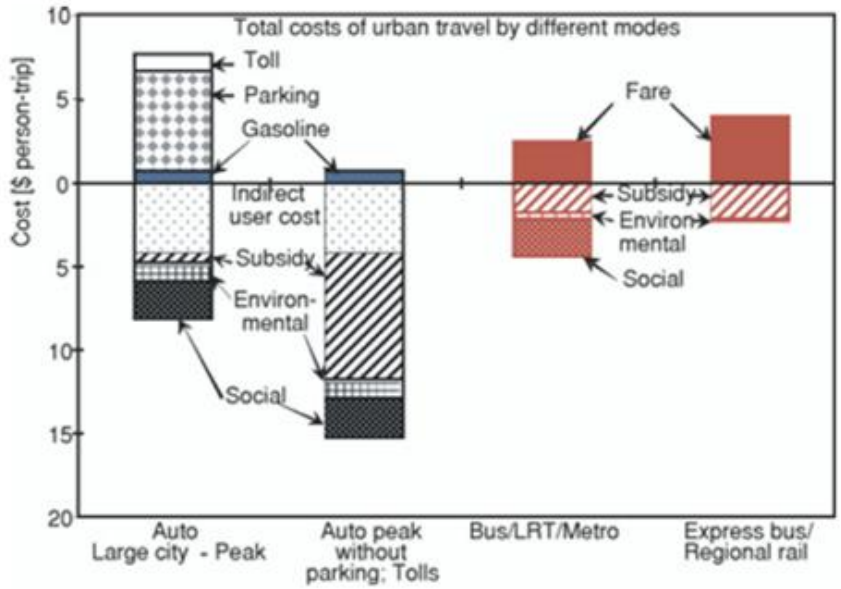


圖2 不同運具間直接成本與間接成本之關係[5]

進一步的實證研究也提供了量化證據。Naznin *et al.* [6]針對澳洲墨爾本輕軌系統研究發現，導入「車道優先」(Lane Priority)與「號誌優先」(Signal Priority)措施後，路廊總事故件數下降了約16.4%，顯示專用路權的劃設與交通工程優化，是提升混合車流路廊安全的重要策略。此一研究結果為後續城市道路與輕軌系統的安全設計提供實務依據。

2.3 本研究的貢獻

綜合上述，國內外既有研究在軌道運輸效益的探討上仍存在若干缺口。首先，在研究維度上，多數國外實證研究採取單一面向分析，例如 Naznin *et al.* (2016) 聚焦於交通安全效益，而 Ewing *et al.* [2] 則專注於交

通量變化；其次，在地情境方面，國內相關研究多著重於運量或經濟層面的探討，較少針對高雄此類高密度且機車比例偏高的混合車流環境進行實證分析。為回應上述不足，本研究以高雄市大順路輕軌為案例，建構結合交通安全、旅次行為與碳排放等多元指標進行整合性實證分析，進一步探討輕軌導入所帶來的永續效益，為台灣都市永續交通的政策制定提供更堅實的基礎。

三、研究方法

本研究採用多重分析方法與多元資料來源，以確保評估結果的客觀性與全面性。

3.1 研究範圍與資料來源

1. 研究範圍：鎖定高雄環狀輕軌大順路段，精確範圍為 C24「愛河之心站」至 C32「凱旋公園站」。



圖3 高雄環狀輕軌路線圖[7]

2. 資料來源

(1) 交通事故數據：高雄市警察局提供之 2022 年至 2024 年(輕軌通車前後)事故資料，包含事故類型、肇因與死傷人數。

(2) 輕軌運量數據：由高雄捷運公司提供，用以分析輕軌的實際載客成效。

(3) 行動信令數據：與中華電信合作，透過其「行動信令碳排分析」成果，宏觀推估區域旅次行為與碳排放變化[8]。

(4) 人行道工程數據：高雄市政府工務局提供之人行道改善工程專案資料，用於評估人本環境的變遷[9]。

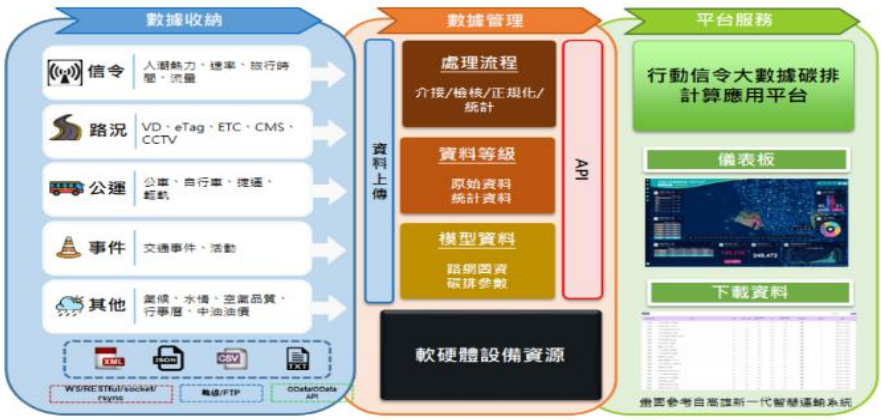


圖4 高雄市新一代智慧運輸系統資料庫運作情形

3.2 分析方法

1. 前後比較法(Before-and-After Study)：這是評估交通工程效益最常見的方法。本研究將輕軌通車前的數據(2022 年)與通車後的數據(2024 年)進行比較，客觀分析輕軌所帶來的影響。
2. 交通數據分層分析
   (1) 事故熱點與肇因分析：深入探討事故發生地點與主要肇因的變化，例如「未保持安全距離」或「轉彎未依規定」等。
   (2) 行動信令巨觀推估：利用大數據分析不同時間與區域旅次結構，推估運具使用比例變化，並進一步計算碳排放量。
3. 現場觀察法：研究團隊對大順路沿線的路口與行人環境進行實地觀察，記錄車流、人行動線與臨停狀況的變化，以補充量化數據的不足。

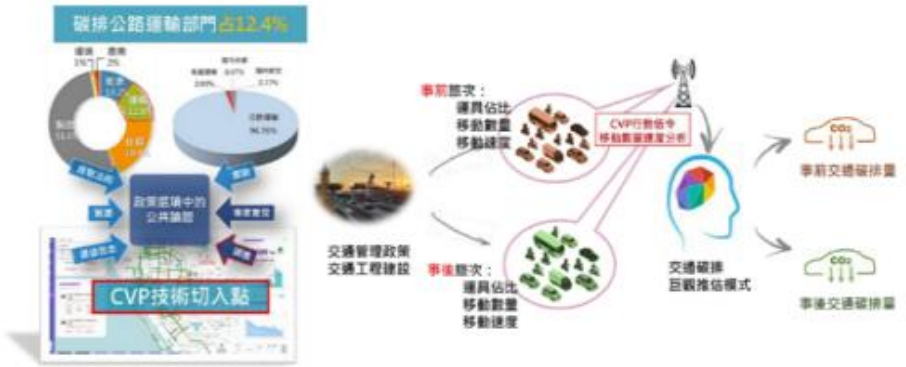


圖5 CVP 行動信令於交通碳排巨觀推估模式之應用

四、實證分析與研究成果

4.1 運量成長與旅次行為轉變

根據高雄捷運公司的統計[10]，2024年環狀輕軌全線通車後，年度累計運量突破 1,157萬人次，成功串聯亞洲新灣區、駁二藝術特區、美術館、多所學校與醫院等重要生活節點。輕軌不僅成為獨立的公共運輸選項，更與捷運、高鐵、台鐵形成完整的複合式運輸網路，有效擴大公共運輸的可及性與便利性。

4.2 交通事故顯著改善

大順路輕軌的導入對交通安全產生了立竿見影的效果。輕軌設置前(2022年)，該路段每年事故數約 424件，死傷人數達 601人；而通車後(2024年)，事故數大幅下降至 306件，死傷人數也減至 425人，分別降低27.8%與29.3%。

在事故型態方面，改善幅度亦出現顯著轉變。最常見的側撞事故降幅高達57.9%，而同向擦撞、路口交岔撞亦分別降低36.6%與47.1%，顯示輕軌導入後，道路重新配置與禁左管制有效抑制車輛爭道及交織行為。然而，值得留意的是，自撞及自摔事故反而增加40%，此現象可能與用路人不熟悉新道路環境有關。

進一步從事故主要肇因角度觀察， 數據同樣呈現下降趨勢。輕軌通車後，左轉彎未依規定與右轉彎未依規定更分別下降94.4%與68.6%，反映出經號誌管制、路口車道重新優化下，車輛轉向行為更加規範，交織衝突明顯減少。此一成果，凸顯了交通工程設計與管制措施在降低違

規行為與改善道路安全上的實質效果。

綜上所述，大順路輕軌的導入不僅降低了整體事故件數與死傷人數，更在事故型態與肇因結構上反映出用路人的違規行為顯著減少。

表 1 輕軌通車前後事故件數、傷亡人數概況

項目	事故件數			傷亡人數		
	A1	A2	A1+A2	死亡人數	受傷人數	傷亡人數
通車前 (2022 年)	1	423	424	2	599	601
通車後 (2024 年)	1	305	306	1	424	425
下降幅度 (%)	0%	27.9%	27.8%	50.0%	29.2%	29.3%

備註： A1事故係指造成人員當場或24小時內死亡之交通事故；A2事故係指造成人員受傷或超過24小時死亡之交通事故。

資料來源：《高雄市大順路輕軌通車效益分析內部資料》[7]。

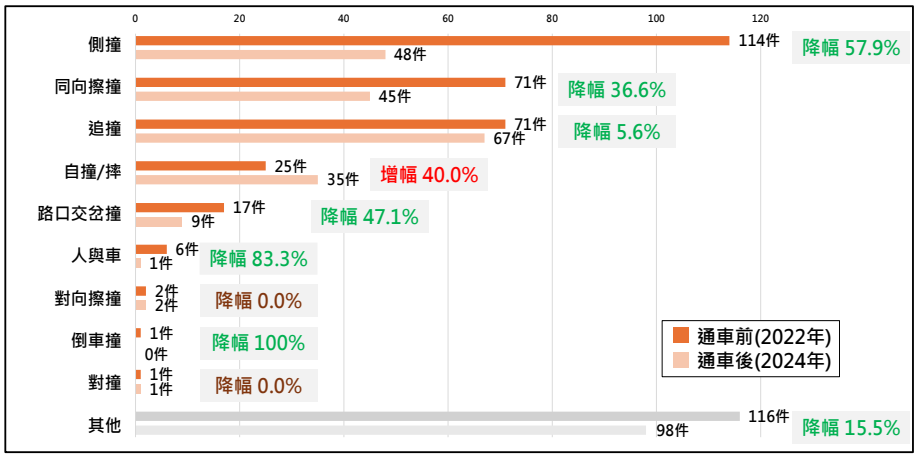


圖6 輕軌通車前後碰撞型態變化

資料來源：《高雄市大順路輕軌通車效益分析內部資料》，高雄市政府交通局 [7]。

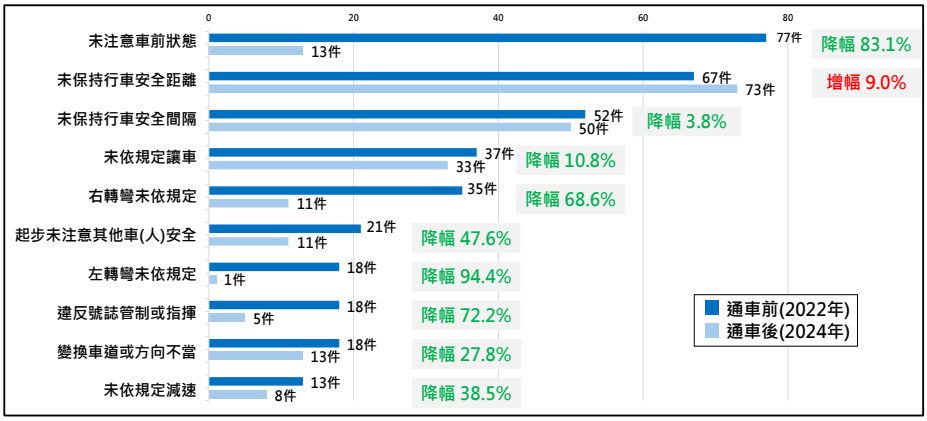


圖7 輕軌通車前後主要肇因變化

資料來源：《高雄市大順路輕軌通車效益分析內部資料》，高雄市政府交通局[7]。

在平日情境下，輕軌通車後，大順路段整體車流量下降31%，同時旅行速率績效提升約11%。此現象顯示部分民眾多利用輕軌取代私人運具，顯示運具轉移之成效。此外，大順路之替代路徑車流量較通車前增加約10%，惟其旅行速率績效仍提升約20%，僅建工路段旅行速率績效出現約4%的輕微下降。

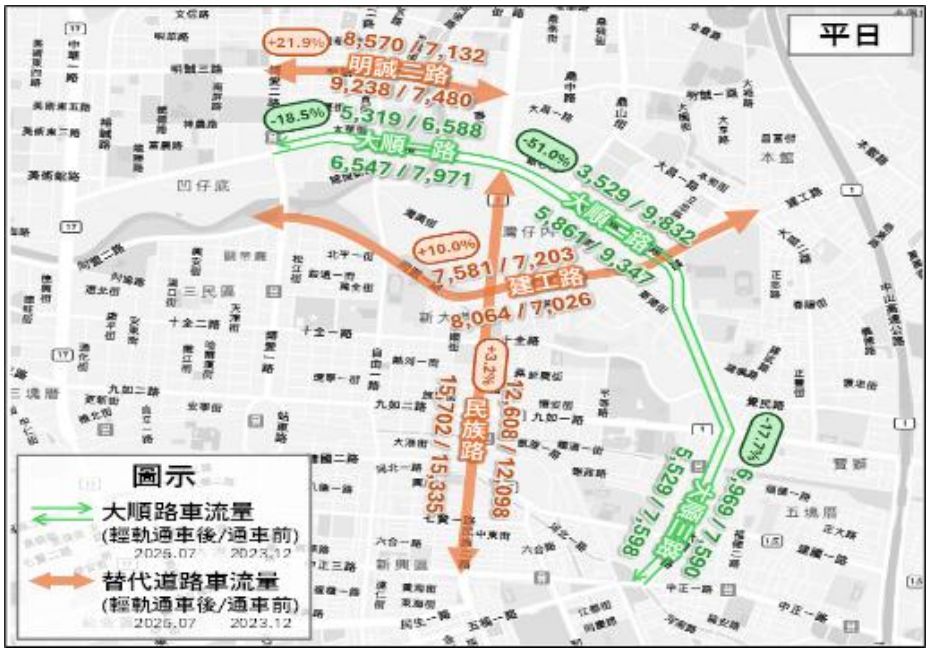


圖8 輕軌通車前後－平日大順路及替代道路車流量變化

資料來源：《高雄市大順路輕軌通車效益分析內部資料》，高雄市政府交通局 [7]。

表 2 輕軌通車前後 – 平日尖峰旅行速率

		大順路段							
主要道路	尖峰旅行速率 (km/hr)	大順一路 (博愛一路~民族一路)		大順一路 (民族一路~建工路)		大順一路 (建工路~九如一路)		大順一路 (九如一路~中正一路)	
		東向	西向	北向	南向	北向	南向	北向	南向
	通車前 (2023/12)	18.5	19.0	16.9	23.7	20.8	20.0	15.9	16.9
	通車後 (2025/07)	19.4	22.3	18.2	24.9	23.7	22.3	18.7	19.1
	與通車前差異	4.9%	17.4%	7.7%	5.1%	13.9%	11.5%	17.6%	13.0%
替代道路	尖峰旅行速率 (km/hr)	明誠路段		大昌路段		建工路段		民族路段	
		明誠二路 (博愛二路~民族一路)		大昌一路 (民族一路~九如一路)		建工路 (博愛一路~大順一路)		民族一路 (大順一路~中正三路)	
		東向	西向	北向	南向	東向	西向	北向	南向
	通車前 (2023/12)	15.8	16.7	18.2	19.0	23.4	18.0	15.4	17.7
	通車後 (2025/07)	18.1	17.1	18.8	19.2	22.1	17.4	25.0	23.9
	與通車前差異	14.6%	2.4%	3.3%	1.1%	-5.6%	-3.3%	62.3%	35.0%

資料來源：《高雄市大順路輕軌通車效益分析內部資料》，高雄市政府交通局 [7]。

在假日情境下，大順路段(博愛一路-民族一路)及大順路段(九如一路-中正一路)較通車前增加10%，但旅行速率績效仍提升約11%，顯示整體道路運作效率未因車流增加而受顯著影響。於替代路徑方面，明誠路較通車前雖增加17.0%之車流量，惟旅行速率績效仍有提升約8%；僅建工路段旅行速率績效約略下降7%；而九如路段則因車流量減少，道路績效則有明顯提升。

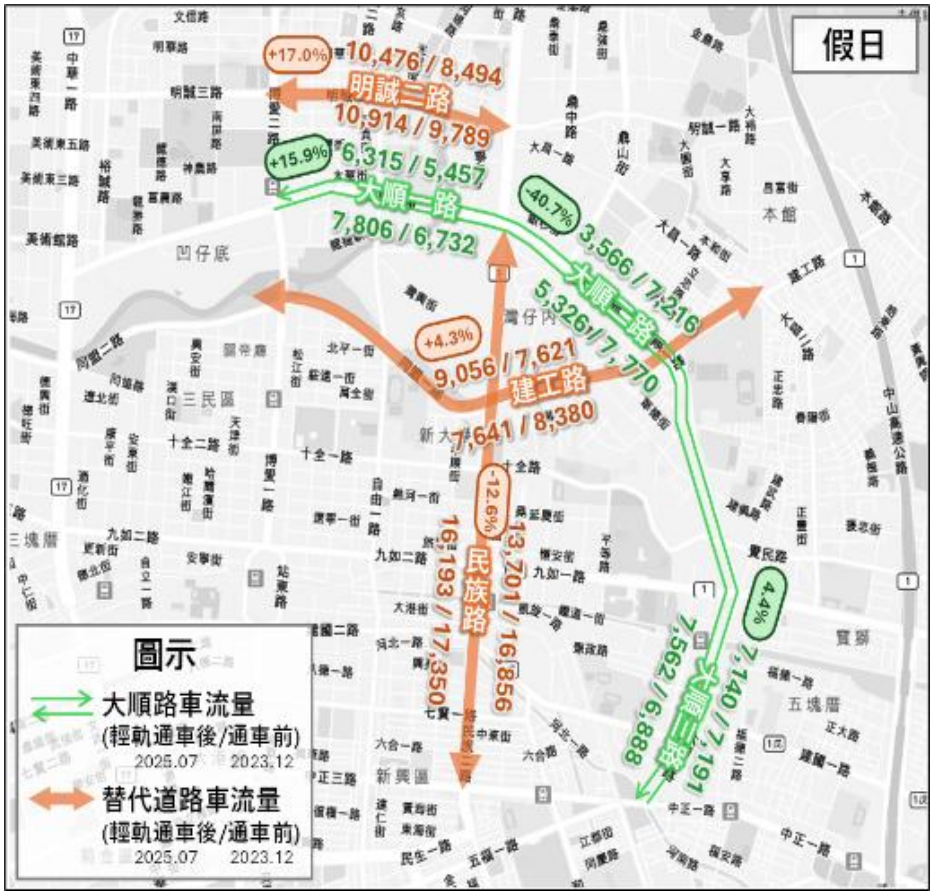


圖9 輕軌通車前後－假日大順路及替代道路車流量變化

資料來源：《高雄市大順路輕軌通車效益分析內部資料》，高雄市政府交通局 [7]。

表 3 輕軌通車前後－假日尖峰旅行速率

主要道路	尖峰旅行速率 (km/hr)	大順路段							
		大順一路 (博愛一路~民族一路)		大順一路 (民族一路~建工路)		大順一路 (建工路~九如一路)		大順一路 (九如一路~中正一路)	
		東向	西向	北向	南向	北向	南向	北向	南向
	通車前 (2023/12)	18.3	19.9	19.0	23.9	22.3	21.8	18.7	18.6
	通車後 (2025/07)	20.5	22.3	21.0	27.1	24.6	24.1	20.2	21.3
	與通車前差異	12.0%	12.1%	10.5%	13.4%	10.3%	10.6%	8.0%	14.5%
替代道路	尖峰旅行速率 (km/hr)	明誠路段		大昌路段		建工路段		民族路段	
		明誠二路 (博愛二路~民族一路)		大昌一路 (民族一路~九如一路)		建工路 (博愛一路~大順一路)		民族一路 (大順一路~中正三路)	
		東向	西向	北向	南向	東向	西向	北向	南向
	通車前 (2023/12)	12.8	13.4	18.3	19.0	22.1	19.7	13.5	14.0
	通車後 (2025/07)	15.4	14.5	18.6	19.0	19.8	19.0	23.7	21.1
	與通車前差異	20.3%	8.2%	1.6%	0.0%	-10.4%	-3.6%	75.6%	50.7%

資料來源：《高雄市大順路輕軌通車效益分析內部資料》，高雄市政府交通局 [7]。

4.3 碳排放減量與永續效益

本研究採用創新的行動信令分析，精確量化輕軌的碳排效益。城市交通碳排量之計算係以「排放係數」與「交通活動數據」之乘積加總為基礎。排放係數資料主要參考交通部運輸研究所公布之《公路車輛燃料成本及動態碳排係數對照表》，並依高雄市現況交通條件進行調整與校估，以確保計算結果之在地化精度。

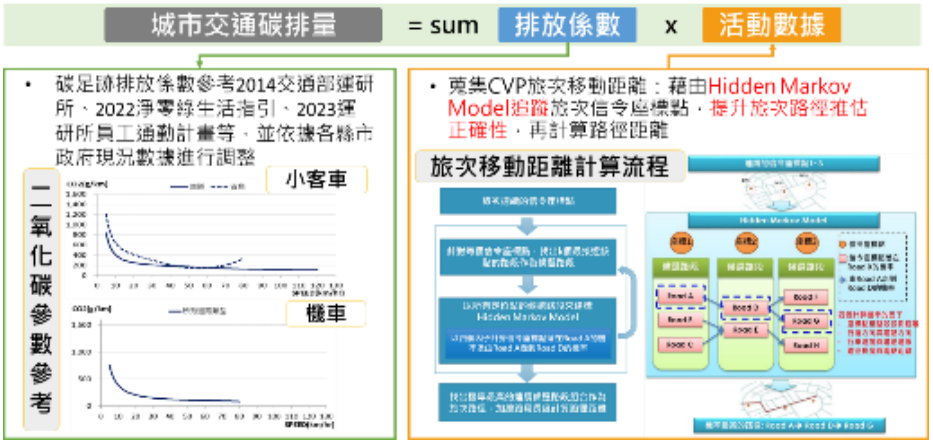


圖10 行動信令碳排分析流程

資料來源：《行動信令導入碳排分析應用於智慧城市治理計畫成果報告》，中華電信 [8]。

在行動信令旅次移動距離推估方面，本研究採用隱藏式馬可夫模型(Hidden Markov Model)進行行動信令座標點之追蹤與比對。模型中，觀測機率依據信令點與候選道路間之距離進行評估，信令點越接近道路，其屬於該道路之機率越高。同時，模型亦納入信令點間直線距離與路徑距離的相似性、用戶行進方向與道路方向的一致性，以及旅行速度與道路速限之相似性等因素；相似性越高則對應的轉移機率越大。最終，模型選取最大機率之路徑作為用戶實際行駛軌跡，有效修正傳統僅依起訖點直線距離估算所產生之誤差，並顯著提升旅次路徑推估與整體碳排計算之準確度。

本研究以高雄輕軌沿線之大順路為主要分析範圍，統計輕軌施工前後所有抵達、離開及行經大順路之旅次，並計算各旅次之移動距離及行動信令運具別(包含汽機車、軌道運輸與步行)，以進行後續碳排放量統計。最後，根據行動信令所推估之移動活動數據，分別乘以各運具類型對應之碳排係數，據以推算高雄輕軌建置前後交通碳排量之差異，評估輕軌運行所帶來之碳減效益，分析結果如下：

1. 運具使用比例：輕軌通車後，大順路段的汽機車比例由 93%下降至 84%；同時，公車比例由 1.3%提升至 6.0%，輕軌運具比

例也從 0%成長至 2.2%，顯示民眾明顯轉向使用公共運輸。

2. 總旅次與碳排效益：整體旅次總量增加 33%，顯示輕軌的便利性鼓勵更多人出行，且多數為公共運輸旅次。
3. 每趟旅次所產生的碳排放量平均下降 21.6%。每日碳排放量減少 16,202 公斤，此減量效益約相當於 49 萬棵樹一年的固碳量。

這些成果證明，輕軌與 TPASS 等票價政策的雙軌並行，不僅帶動公共運輸的成長，也實質性地推動了市民交通行為的低碳轉型。



圖11 高雄碳排計算平台畫面

資料來源：《行動信令導入碳排分析應用於智慧城市治理計畫成果報告》，中華電信 [8]。

4.4 人行環境優化

除了軌道建設，輕軌工程也同步帶動周邊環境的改善。2024年底，工務局完成了 C24至 C32全長7.1公里的人行道改善工程，擴寬步道並採用無障礙設計，大幅提升行人步行體驗。實地觀察發現，過往人行道被中古車商與私人車輛佔用的情況顯著減少，讓出空間給行人與自行車，成功營造「車少了、人多了」的友善人本城市氛圍。

五、討論與綜合分析

本研究的實證結果明確展示，大順路輕軌的通車效益絕非單一面向，而是涵蓋交通安全、永續發展與城市空間品質的多重效益整合。

1. 多重效益的協同作用：輕軌通車不僅直接降低交通事故，更透過路型調整與運具轉移，間接減少了道路上的汽機車流量，從而進一步降低了碳排放。這證明交通安全與永續發展並非互斥，而是可以透過智慧的交通工程規劃達到互補與協同。
2. 數據治理的創新應用：傳統的交通研究往往依賴耗時且昂貴的家戶問卷或路邊攔截調查。本研究透過與電信業者合作，利用行動信令大數據進行宏觀碳排推估，為公部門提供了更即時、精確且低成本的交通治理工具，有效彌補了傳統方法的不足。

3. 政策工具的整合效應：輕軌建設是硬體基礎，而 TPASS 等票價優惠政策則是軟體工具。兩者結合產生了顯著的協同效應，共同促進公共運輸運量成長。這提示未來在推動重大交通建設時，應同時考量相關政策工具的配套，才能最大化其效益。
4. 挑戰與後續優化：儘管效益顯著，部分路口仍存在事故熱點反彈與高齡者涉入比例上升的現象。這可能與新路型適應期有關，也突顯了未來在號誌設計與交通安全教育上仍有持續優化的空間。

六、結論與建議

6.1 結論

本研究透過嚴謹的實證分析，證實高雄市大順路輕軌通車後，在交通、環境與社會層面均帶來顯著的正面影響：

1. 交通安全大幅改善：事故件數與死傷人數均顯著下降，驗證軌道運輸不僅提供便捷服務，更能有效提升行車安全。
2. 城市邁向淨零目標：輕軌通車促使運具轉移，使每趟旅次碳排量減少 21.6%，為高雄市的淨零轉型目標做出具體貢獻。
3. 人本交通基盤奠定：人行道改善與臨停減少，讓出更多城市空間供行人與非機動車使用，逐步建構起以人為本的交通體系。

6.2 建議

為持續擴大並優化輕軌的效益，本研究提出以下政策建議：

1. 持續優化熱點路口設計：針對少數事故仍頻繁發生的路口，應持續監測並優化其號誌系統與標線，例如增設行人專用時相或車道導引設施。
2. 強化使用者交通安全教育：考量部分使用者對新路型適應較慢，應強化宣導，並在相關路口設置醒目的警示標誌，提升用路人的安全意識。
3. 捷運建設與人行環境同步規劃：未來高雄捷運黃線等重大交通建設，應借鏡輕軌經驗，在規劃初期即將人行道改善納入工程範疇，避免後續二次施工，以達到交通建設與城市景觀同步優化的綜效。

參考文獻

[1] Litman, T. (2021), “Evaluating Rail Transit Benefits: A Comment on Saiz,”

Transport Policy, Vol. 103, pp. 11-18.

[2] Ewing, R., Tian, G., Spain, A., and Goates, J. P. (2014), "Effects of Light-Rail Transit on Traffic in A Travel Corridor," *Journal of Public Transportation,* Vol. 17, No. 4, pp. 93-113.

[3] Webb, A., Tao, T., Valikhani, A., Cao, J., and Wu, X. (2021), Impact of Transitways on Travel on Parallel and Adjacent Roads and Park-and-ride Facilities (Report No. MN 2021-03). University of Minnesota, Center for Transportation Studies & Department of Civil, Environmental, and Geo-Engineering.

[4] Ahmed, S. and Bulut, R. (2021), Safety of Vulnerable Road Users (VRUs) in Light-rail Transit (LRT) Environment (Report No. 20SAOSU06). Transportation Consortium of South-Central States (Tran-SET) & Louisiana State University.

[5] Vuchic, V. (2027), *Urban Transit Systems and Technology*, Hoboken: John Wiley & Sons.

[6] Naznin, F., Currie, G., Sarvi, M., and Logan, D. (2016), "An Empirical Bayes Safety Evaluation of Tram/streetcar Signal and Lane Priority Measures in Melbourne," *Traffic Injury Prevention*, Vol. 17, No. 1, pp. 91-97.

[7] 高雄市政府交通局 (2025)，高雄市大順路輕軌通車效益分析內部資料。

[8] 中華電信 (2024)，行動信令導入碳排分析應用於智慧城市治理計畫成果報告。

[9] 高雄市政府工務局 (2024)，大順路 C24-C32 人行道改善工程專案資料。

[10] 高雄捷運股份有限公司 (2024)，高雄輕軌運量統計資料。

[11] 交通部運輸研究所 (2023)，都市軌道建設對交通行為與安全影響之研究。

[12] Kaohsiung City Government (2024), Kaohsiung Light Rail Ten-Year Completion Report, presented at the 2024 Annual Conference of Chinese Institute of Transportation.

都市交通半年刊
第四十一卷第一期
民國一一五年六月
頁 47 ～ 74

Urban Traffic Biannually
Volume 41 Number 1
June 2026
pp. 47 ~ 74

國道1號堤頂交流道之交通改善

Traffic Improvement for the Tiding Interchange on National Highway No. 1

紀韋廷[1]、陳昇陽[2]、劉信宏[3]、丁培倫[4]、陳威瑀[5]

Chi, Wei-Ting, Chen, Sheng-Yang, Liu, Sin-Hong, Ting, Pei-Lun, Chen, Wei-Yu

摘要

內湖科技園區作為臺北市重要產業基地，國1堤頂交流道為內科主要進出國1孔道，其周邊舊宗路、堤頂大道等聯絡道尖峰時段車流量極大，導致地區道路壅塞且國1進出效率低落。本研究針對該處現況平日下午尖峰交通壅塞問題進行探討，提出「堤頂交流道北向匝道動線改善」及「國1南向堤頂至環北路段開放路肩」改善方案，並從路網交通、地區旅行時間及服務水準(LOS)等面向進行預期與實際改善效益分析。預期效益結果顯示，各方案實施後相關路段及路口服務水準皆有提升；堤頂交流道往北匝道動線方案通車後，根據TOMTOM 實際調查數據驗證，堤頂大道南北向平均旅行時間均明顯下降，證實上述改善措施確有助於紓解平日下午尖峰內科之交通壓力。

關鍵字：交通改善、交通效益分析

Abstract

As a critical industrial hub in Taipei, the Neihu Technology Park (NTP) relies heavily on the Tiding Interchange of National Highway No. 1 as its primary gateway. Massive peak-hour traffic volumes on connecting arteries, such as Jiuzong Road and Tiding Boulevard, have historically caused severe regional congestion and reduced operational efficiency for expressway access. This study investigates the current bottlenecks and evaluates two major improvement schemes: "Ramp Realignment for the Northbound Tiding Interchange" and "Hard Shoulder Opening on the Southbound

[1] 臺北市政府交通局股長 (聯絡地址：110臺北市信義區市府路1號6樓，E-mail: ibra_880927@hotmail.com)。

[2] 臺北市政府交通局技士。

[3] 美聯華工程顧問股份有限公司總經理/執業交通工程技師；社團法人中華民國交通工程技師公會 理事 (聯絡地址：104台北市中山區南京東路三段208號8樓，電話：02-2741-6066#202，E-mail:sinhong@ctc-taiwan.com.tw)。

[4] 美聯華工程顧問股份有限公司計畫經理。

[5] 美聯華工程顧問股份有限公司交通工程師。

Section from Tiding to Huanbei." The research analyzes both projected and empirical benefits across dimensions including network traffic flow, regional travel time, and Level of Service (LOS). The results indicate that the proposed measures effectively improve LOS across relevant road segments and intersections. Furthermore, empirical data from TomTom following the implementation of the northbound ramp realignment confirms a significant reduction in average travel times along Tiding Boulevard, demonstrating the effectiveness of these interventions in alleviating PM peak-period congestion within the Neihu Technology Park.Keywords: Traffic Improvement, Traffic Benefit Analysis

Keywords: Traffic Improvement, Traffic Benefit Analysis

一、前言

1.1 研究動機

內湖科技園區為臺北市重要的產業發展基地，隨著進駐企業增加，每日進出車流已遠超周邊道路負荷。國道1號堤頂交流道作為內科主要進出國1孔道，現況於下午尖峰時段龐大的車流量，導致其舊宗路、堤頂大道聯絡道與交流道周邊地區車流壅塞，亦影響國道主線之運轉效率，如圖1所示。為改善內科進出國1堤頂交流道周邊交通運轉效率及因應捷運東環線施工所帶來之交通衝擊，針對國道1號堤頂交流道周邊進行交通改善。

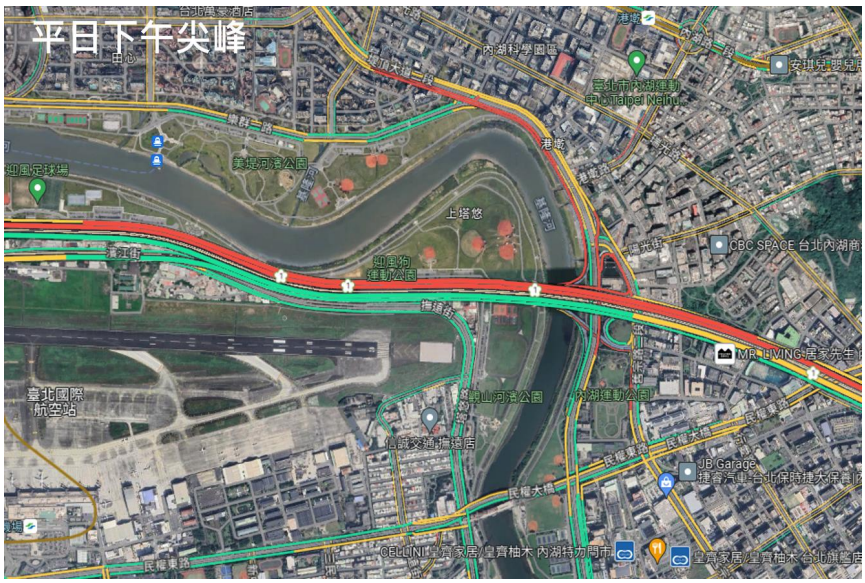


圖1 堤頂交流道平日下午尖峰歷史路況

資料來源: Google 歷史路況資料。

1.2 研究目的及內容

本研究目的為解決國1堤頂交流道周邊現況平日下午尖峰交通壅塞問題，以紓解平日下午尖峰內科之交通壓力。

本計畫以交通量資料、現地車流情形、CCTV 及 VD 等資料了解國1堤頂交流道、舊宗路及堤頂大道等聯絡道於尖峰時段的壅塞成因，並針對交通壅塞問題提出「堤頂交流道北向匝道動線改善」(如圖2)及「國1南向堤頂至環北路段開放路肩」改善方案，針對北向匝道動線調整方案進行改善預期效益分析與通車後實際效益分析，而南向主線路肩開放進行方案效益，則利用交通模擬來進行效益評估。

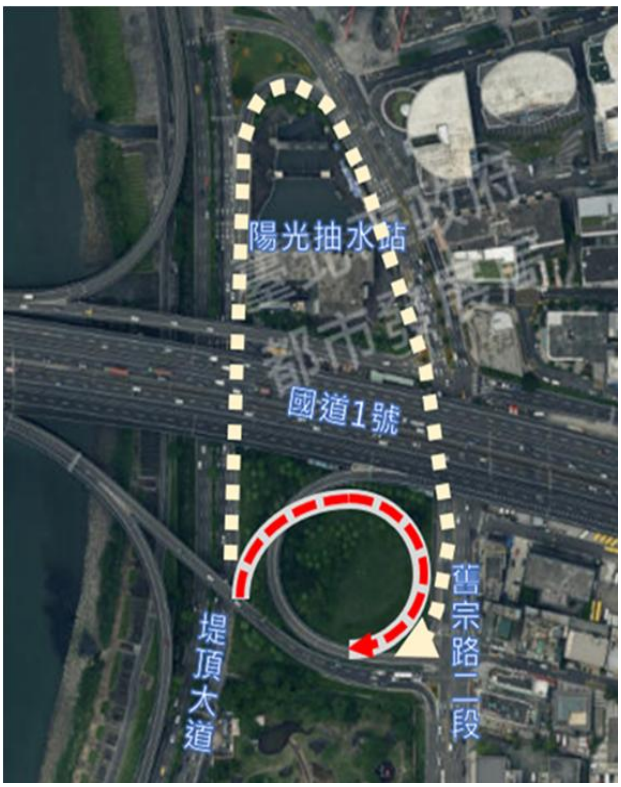


圖2 堤頂交流道往北匝道動線改善示意圖

1.3 研究流程

本計畫之研究流程如圖3所示。



圖3 研究流程圖

二、國1堤頂交流道配置及現況交通問題

2.1 國1堤頂交流道配置

國1堤頂交流道配置為北出匝道(舊宗路及堤頂大道)、北入匝道、南出匝道及南入匝道(港墘路及舊宗路)共6支匝道。其主要聯絡道為舊宗路二段及堤頂大道，而以下針對國1汐五高架主線路段及堤頂交流道匝道進行服務水準分析，分述如下：

1. 國1汐五高架主線路段服務水準分析

本計畫蒐集交通部高速公路局「交通資料庫」國道主線平日交通量資料，並依「2022年臺灣公路容量手冊」[1]進行評估(表1)。汐止端-堤頂主線路段平日下午尖峰單向交通量為1,980~2,983PCU，平均行車速率為77~84KPH，南北雙向服務水準為C3級以上；環北-下塔悠出口匝道-堤頂北向路段平日晨峰交通量2,703~3,186 PCU，平均行車速率為74~84KPH，服務水準為D3級

以上；堤頂-環北南下路段平日晨峰單向交通量為3,221PCU，平均行車速率為37KPH，服務水準為 D5級。

表1 汐五高架主線平日下午尖峰服務水準分析表

道路名稱	路段起迄	方向	平日下午尖峰				
			道路容量(PCU)	交通量(PCU)	平均行車速率(KPH)	V/C	服務水準
國道1號汐五高架	汐止端-堤頂	北上	3,900	2,983	77	0.76	C3
		南下	3,900	1,980	84	0.51	C2
	堤頂-下塔悠出口匝道	北上	3,900	2,703	84	0.69	C2
	下塔悠出口匝道-環北	北上	3,900	3,186	74	0.82	D3
	堤頂-環北	南下	3,900	3,221	37	0.83	D5

2. 國1堤頂交流道匝道服務水準分析

本計畫蒐集交通部高速公路局「交通資料庫」國道匝道平日交通量資料，如表2所示。平日下午尖峰堤頂交流道北出往舊宗路及堤頂大道匝道交通量分別為360PCU、1,049PCU，服務水準分皆為C級；北入匝道交通量為1,009PCU，服務水準為C級；南出匝道交通量為685PCU，服務水準為C級；南入港墘路及舊宗路匝道交通量分別為888PCU、838PCU，服務水準皆為C級。

表2 計畫周邊高速公路匝道服務水準分析

交流道名稱	匝道方向	設計速率	道路容量(PCU)	平日下午尖峰	
				交通量(PCU)	服務水準
堤頂交流道	北出匝道(舊宗路)	50	3,800	360	C
	北出匝道(堤頂大道)	50	1,900	1,049	C
	北入匝道	50	1,900	1,009	C
	南出匝道	50	3,800	685	C
	南入匝道(港墘路)	50	1,900	888	C
	南入匝道(舊宗路)	50	3,800	838	C

2.2 地區進出交流道問題

堤頂交流道往北匝道動線改善前，地區道路前往堤頂交流道北上入口及南下入口匝道對於周邊造成之瓶頸點 (如圖4所示)，分述如下：

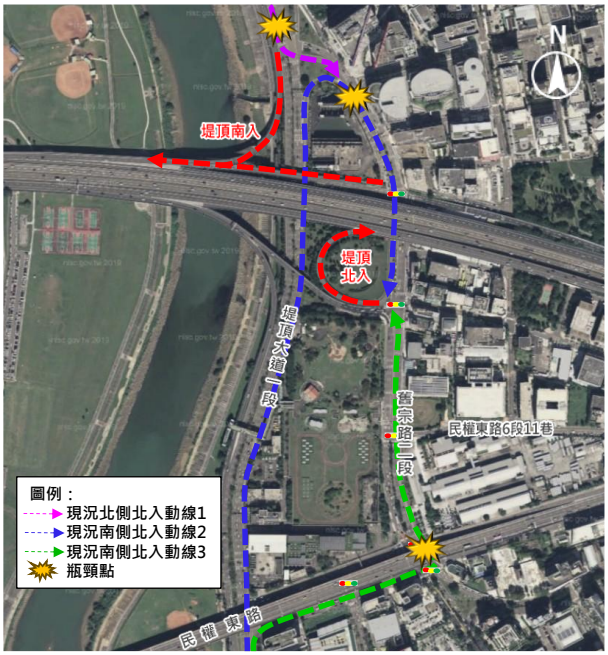


圖4 堤頂交流道周邊道路進出動線示意圖

1. 北上入口匝道

堤頂大道北向往國1汐止方向之車流有3條主要動線，北側北入動線1為大宗，約佔整體車流80%；南側北入動線2約佔整體車流8%，此動線需繞行陽光抽水站後，再往南行經舊宗路二段後方能進入北入匝道，又往堤頂交流道南下及北上入口匝道之動線1重疊導致匯入不易，有車流排隊停等之情形，如圖5所示；南側北入動線3約佔整體車流12%，此動線則經由民權東路左轉舊宗路二段前往堤頂交流道北上入口，該動線需經過多處號誌路口，故易遇到停等紅燈增加車行時間，且未來捷運東環線施工易亦將對該動線帶來衝擊。

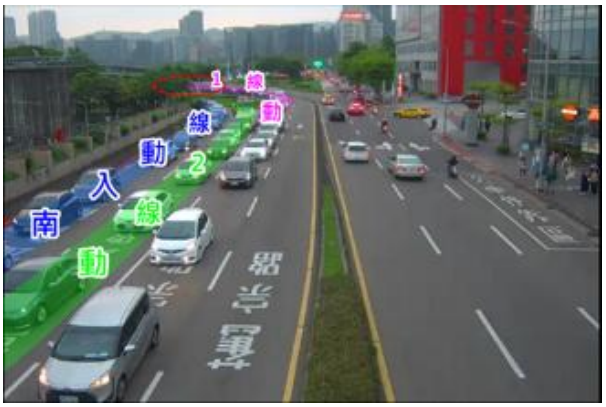


圖5 堤頂北入動線匯入問題

2. 南下入口匝道

由於國道1號汐五高架南下主線壅塞，造成平面路段如堤頂大道、舊宗路車輛停等進入國道1號，進而回堵至地區道路堤頂大道/港墘路路口及堤頂大道、舊宗路上游路口。因上述南下入口匝道車流無法匯入國1主線，亦影響堤頂交流道南側北入動線2。

2.3 汐五高架南下主線壅塞

根據觀察國道1號堤頂交流道的運轉，平日下午尖峰時段會有車輛無法進入南下入口匝道，以下就其交通問題進行探討。

1. 汐五高架主線壅塞情形

本計畫根據 Google 歷史路況資料(平日下午尖峰5:30、6:00、6:30等三時間點)觀察，星期一至星期五下午5:30，汐五高架主線皆在21k路段之前呈現路段壅塞，而經過汐五高架主線21k後，壅塞狀況才有所舒緩。於下午6:00，星期一、星期二和星期四汐五高架主線皆在21k 路段之前呈現路段壅塞，星期三和星期五汐五高架主線在22.5k路段之前呈現路段壅塞，經過壅塞終點後壅塞狀況才有所舒緩。於下午6:30時，星期一、星期二和星期四汐五高架主線皆在21k 路段之前呈現路段壅塞，星期三和星期五汐五高架主線在22.5k路段之前呈現路段壅塞，經過壅塞終點後壅塞狀況才有所舒緩，下午6:00與下午6:30的壅塞狀況一樣。經過上述可以發現，於平日下午尖峰時間汐五高架主線壅塞終點皆為22.5k處以前，如圖6所示。

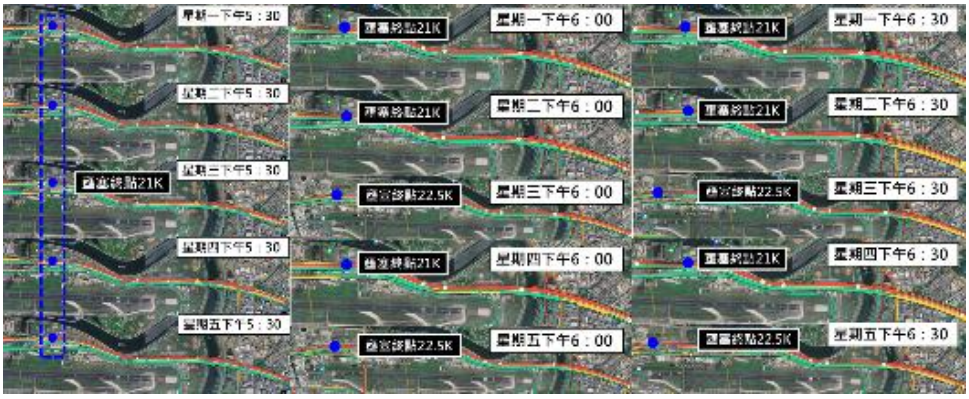


圖6汐五高架主線平日下午歷史路況

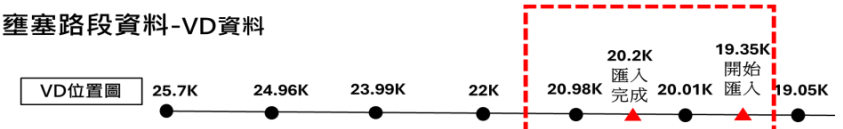
2. 汐五高架主線 VD 資料

本計畫彙整平日17:00至19:00汐五高架堤頂至環北交流道(19.05k~25.7k)間等7處 VD 資料，而汐五高架主線19.05k 為堤頂交流道南下出口，於19.35k 堤頂交流道南下入口匝道開始匯入，於20.2k 南下入口匝道匯入完成，因此這七處 VD 資料19.05k 為堤頂南下匝道匯入段前、20.01k 為堤頂南下匝道匯入段，其餘20.98k 至25.7k 為堤頂南下入匯入段後。

根據資料在19.05k 處，堤頂交流道南下入口匝道尚未匯入，其行駛速率除17:05到17:20為50公里/小時以下，其餘時間行駛速率皆有50公里/小時以上。在19.35k 堤頂交流道南下入口匝道開始匯入後，於下午尖峰時段堤頂南入匝道匯入主線路段20.01k 處，行駛速率約為17~23公里/小時，車速降低情形主要受匯入車流之影響。在堤頂南入匝道與主線匯入完成後20.98k 處行駛速率約為33~58公里/小時，行駛速率有稍微提升，到了22k 處恢復至匯入前之行駛速率，行駛速率皆有60公里/小時以上，最後在22k 之後行駛速率逐漸提高且恢復汐五高架主線之交通運轉，如圖7與圖8所示。

上述相同的17:30為例，雖於19.05k 堤頂南入匝道尚未匯入，但已稍有車速降低的情形，行駛速率為78公里/小時。到了19.35k 堤頂南入匝道開始匯入時，車速降低至19公里/小時，而到了20.98k 堤頂南入匝道已匯入完成時，車速提高至42公里/小時，最後於22k 後行駛速率已提升至73公里/小時。行車速率於22k 後開始提升與上述所提及之壅塞終點為22.5k 處前有所相同。

壅塞路段資料-VD資料



時間	25.7K 速率	24.96K 速率	23.99K 速率	22K 速率	20.98K 速率	20.01K 速率	19.05K 速率
17:00	87	95	85	73	47	22	70
17:05	86	97	88	75	44	20	45
17:10	83	91	88	75	43	23	47
17:15	82	93	87	70	46	19	66
17:20	85	95	84	72	45	21	49
17:25	86	95	87	74	44	19	51
17:30	87	95	86	73	42	19	78
17:35	87	97	89	75	45	18	80
17:40	87	93	80	71	41	19	87
17:45	76	92	79	67	33	17	84
17:50	76	86	71	75	40	15	81
17:55	84	95	86	74	41	20	72
18:00	74	93	87	77	47	17	86
18:05	81	91	79	70	46	19	91
18:10	79	87	84	69	41	21	90
18:15	76	87	84	66	42	21	87
18:20	75	85	75	68	51	20	87
18:25	79	88	82	54	72	22	86
18:30	82	89	80	66	52	23	89
18:35	80	85	85	66	43	17	95
18:40	81	88	84	70	41	21	90
18:45	81	87	80	75	46	19	79
18:50	83	89	86	69	42	22	90
18:55	77	84	80	72	47	21	95
19:00	82	87	80	65	58	21	92

圖7 汐五高架主線下午尖峰 VD 速率資料

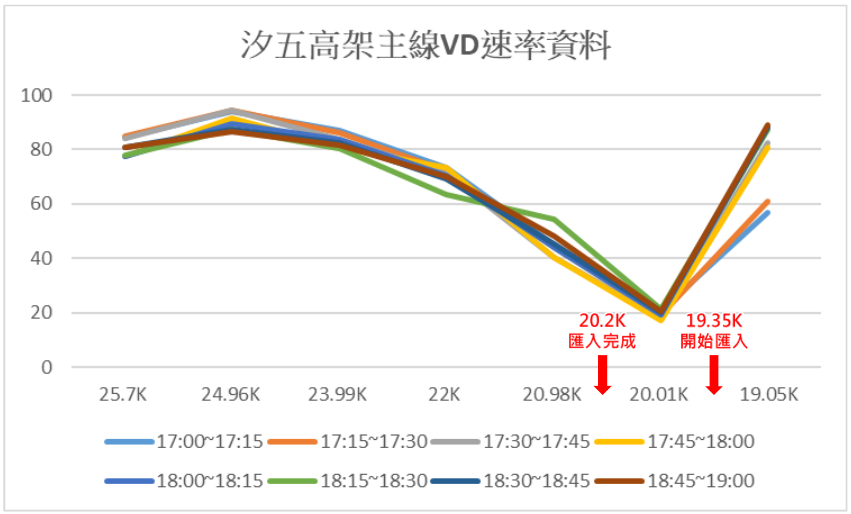


圖8 汐五高架主線下午尖峰速率變化圖

3. 汐五高架主線 CCTV 即時路況

本計畫於2024/06/26觀察汐五高架主線下午尖峰時段 CCTV 即時路況，如圖9所示。圖中可以看到2024/06/26之17:30、17:40、17:50和18:00在汐五高架主線19.29k、20.45k 和21.88k 之路況即時影像。在汐五高架主線19.29k 處無論是在17:30、17:40、17:50和18:00都呈現路段壅塞的情況，經觀察因受19.35k 堤頂交流道南下入口匝道開始匯入，進而導致19.29k 處車速降低造成後方有回堵的情形。

到20.45k 處匝道已匯入完成，此時主線交通量為最大。但根據觀察圖中紅色圓圈約20.6k 高速公路 ETC 門架後下游路段約21k 處有路段壅塞之情形，造成後方車輛有車速降低之情形，在17:30和17:40後方車輛行駛速率皆保持約30~40公里/小時速率行駛，而到了17:50和18:00因21k 處路段壅塞，造成後方車輛停止且回堵。而在17:50和18:00也可以發現其19.29k 處也有可能因為20.1k 處路段壅塞導致於後方汐五高架主線回堵，進而導致堤頂南入匝道無法匯入。

最後看到了21.88k 處，可以看到無論是在17:30、17:40、17:50和18:00，路段壅塞狀況才有所舒緩，行駛速率逐漸提高且恢復汐五高架主線之交通運轉。



圖9 汐五高架主線路段2024/06/26 CCTV 影像

4. 小結

綜合上述，根據觀察汐五高架主線 CCTV 即時路況後，現況交通問題主要有兩種情況。第一種情況為在汐五高架主線21k 處路段壅塞，因無法順利消化車流造成後方車流回堵至堤頂交流道南入匝道匯入主線處，間接影響堤頂南入匝道之車流匯入主線困難，最後車流回堵至內湖市區，使地區道路交通運轉受到影響。第二種情況為因19.35k 堤頂交流道南下入口匝道開始匯入，導致且回堵車流無法順利從南入匝道上去，造成車流回堵至內湖市區，使地區道路交通運轉受到影響，也造成汐五高架主線壅塞且回堵。

三、堤頂交流道北入動線改善

3.1 改善方式[2]

1. 為了避免由堤頂南端前往北入匝道車流與南入匝道車流的交織，提出新闢一匝道入口直接由堤頂右彎進入北入匝道，避開南入匝道，降低交織衝擊。方案路型配置如下：在原先舊宗路北入路口路段外側新增一車道，由堤頂大道右轉連接之，最外側車道僅供上匝道，不允許變換車道。最外側兩車道皆為上匝道使用，共用上匝道號誌。
2. 本項工程屬於國道區增設轉向彎道工程，轉向彎道斷面依「公路路線設計規範」[3](表 4.2.9.5 轉向彎道最小全寬)相關規定，配置內外路肩各 1.2m、1.8m，車道寬 4.5 m。
3. 於堤頂交流道北出匝道(RAMP"C")以北之堤頂大道以半徑 50m 岔出，繞行堤頂交流道北入環道編號 PB3 橋柱與國 1 高架主線橋梁空間，再右轉匯入舊宗路外側為第四車道，後續沿右轉向彎道匯入堤頂交流道既有北入環道，轉向彎道路線全長約 183 公尺，最大縱坡度約 2.4%。



圖10 堤頂交流道往北匝道動線改善平面圖

3.2 改善預期效益分析

本計畫預估目標年(民國140年)有無方案之交通量，且針對本計畫周邊之路段及路口進行分析。

1. 本計畫周邊路段服務水準分析

目標年零方案在平日下午尖峰時，堤頂大道各路段雙向交通量為1586~2949 PCU，速率為34.9~47.0公里／小時，服務水準皆為D級以上；舊宗路各路段雙向交通量為935~2419 PCU，速率為24.7~37.3公里／小時，服務水準有別於晨峰有E級之路段，其路段服務水準皆為D級以上；民權東路各路段雙向交通量為670~1339 PCU，速率為33.4~37.9公里／小時，服務水準均能維持在B級以上，如表3所示。

目標年有方案在平日下午尖峰時，堤頂大道各路段雙向交通量為1586~2949 PCU，速率為34.9~44.8公里／小時，服務水準皆為D級以上；舊宗路各路段雙向交通量為935~2319 PCU，速率為25.6~39.7公里／小時，服務水準有別於晨峰有E級和D級之路段，其路段服務水準皆為C級以上；民權東路各路段雙向交通量為670~1239 PCU，速率為33.4~40.2公里／小時，服務水準均能維持在B級以上，如表3所示。

綜整上述，在目標年零方案與有方案在數個路段之交通量皆有所變化，其中堤頂大道往北(舊宗路-民權東路)之交通量有所增加，道路容量為尚可負荷範圍內，其道路服務水準能維持在B級。而在舊宗路往南(陽光街-國1北入匝道)、舊宗路往北(國1北入匝道-民權東路6段)和民權東路往東(堤頂大道-舊宗路)路段之交通量有所減少，其道路服務水準能維持在D級以上，其中舊宗路往北(國1北入匝道-民權東路6段11巷)道路服務水準從原本D級上升至C級，而民權東路往東(堤頂大道-舊宗路) 道路服務水準從原本B級上升至A級。

表3 目標年有無方案平日下午尖峰路段交通量預測及服務水準分析

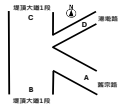
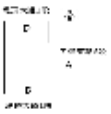
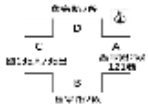
道路	路段	方向	容量	目標年零方案平日下午尖峰					目標年有方案平日下午尖峰				
				交通量(PCU)	V/C	平均速率(KPH)	V/V_L	服務水準	交通量(PCU)	V/C	平均速率(KPH)	V/V_L	服務水準
堤頂大道	港墘路-舊宗路	往南	3,550	2,949	0.83	35.4	0.51	C	2,949	0.83	35.4	0.51	C
		往北	4,850	1,586	0.33	37.4	0.53	C	1,586	0.33	37.4	0.53	C
	舊宗路-民權東路	往南	3,550	2,384	0.67	34.9	0.50	D	2,384	0.67	34.9	0.50	D
		往北	4,850	2,019	0.42	47.0	0.67	B	2,119	0.44	44.8	0.64	B
舊宗路	港墘路-陽光街	往北	2,050	1,408	0.69	26.6	0.53	C	1,408	0.69	26.6	0.53	C
	陽光街-國1南出匝道	往南	4,103	1,216	0.30	37.3	0.75	B	1,137	0.28	39.7	0.79	B
		往北	3,100	1,860	0.60	28.6	0.57	C	1,860	0.60	28.6	0.57	C
	國1南出匝道-國1北入匝道	往南	3,100	1,130	0.36	34.6	0.69	B	1,051	0.34	37.1	0.74	B
		往北	4,200	1,788	0.43	33.4	0.67	B	1,788	0.43	33.4	0.67	B
	國1北入匝道-民權東路6段11巷	往南	3,100	935	0.30	36.8	0.74	B	935	0.30	36.8	0.74	B
		往北	3,100	2,419	0.78	24.7	0.49	D	**2,319**	**0.75**	**25.6**	**0.51**	**C**
	民權東路6段11巷-民權東路6段	往南	3,100	1,177	0.38	34.2	0.68	B	1,177	0.38	34.2	0.68	B
		往北	3,100	1,756	0.57	29.4	0.59	C	**1,656**	**0.53**	**31.0**	**0.62**	**B**
民權東路	堤頂大道-舊宗路	往東	4,350	1,339	0.31	37.5	0.75	B	**1,239**	**0.28**	**40.2**	**0.80**	**A**
		往西	4,350	1,212	0.28	37.7	0.75	B	1,212	0.28	37.7	0.75	B
	舊宗路-行愛路	往東	2,250	670	0.30	37.9	0.76	B	670	0.30	37.9	0.76	B
		往西	2,250	904	0.40	33.4	0.67	B	904	0.40	33.4	0.67	B

2. 本計畫周邊路口服務水準分析

目標年有無方案各路口服務水準分析結果如表4所示。相關路口目標年零方案平日尖峰除堤頂大道/港墘路下午尖峰時段服務水準為E級外，其餘路口時段服務水準均有D級以上服務水準。

目標年零方案與有方案，於舊宗路/國1南入南出、舊宗路/國1北入北出兩路口總路口延滯變化較大，其中有方案改善後下午尖峰時段舊宗路/國1南入南出路口總延滯可以下降3%、服務水準維持C級，舊宗路/國1北入北出路口總延滯可以下降13%，服務水準可以由C級提升至B級。

表 4 目標年有無方案平日下午尖峰路口服務水準分析表

路口	路口示意圖	目標年零方案平日下午尖峰		目標年有方案平日下午尖峰	
		路口平均延滯(秒/輛)	服務水準	路口平均延滯(秒/輛)	服務水準
堤頂大道/港墘路		60.3	E	60.3	E
堤頂大道/舊宗路		27.2	B	27.2	B
堤頂大道/民權東路		21.7	B	21.7	B
舊宗路/國1南入南出		40.5	C	39.5	C
舊宗路/國1北入北出		31.6	C	**27.3**	**B**
舊宗路/民權東路6段11巷		35.2	C	34.5	C
民權東路/舊宗路(北)		33.7	C	33.1	C
民權東路/舊宗路(南)		38.4	C	36.4	C

3.3 改善後效益分析

臺北市於114年7月8日起開通國道1號堤頂交流道北上入口引道，本計畫利用 TOMTOM 調查堤頂大道南向 (樂群一路至南下入口匝道)與堤頂大道北向(民權東路至港墘路)之平均旅行時間來進行比較。

國道1號堤頂大道北上入口引道通車前後南北向之平均旅行時間如表5及圖11所示。堤頂大道南向(樂群一路至南下入口匝道)通車前後之平均旅行時間從原425秒下降至363秒，下降約15%；堤頂大道北向(民權東路至港墘路) 通車前後之平均旅行時間從原341秒下降至328秒，下降約4%，動線改善後對於地區道路各方向旅行時間皆有縮短。

表5 堤頂大道北上入口引道通車前後堤頂大道南北向之旅行時間

平均旅行時間	堤頂南向 (樂群一路-南下路口匝道)	堤頂北向 (民權東路-港墘路)
通車前	425	341
通車後	363	328

資料來源:TOMTOM 路段旅行時間調查資料，通車前資料為 113 年 11 月(工程施工前)平日下午尖峰 17:00-19:00，通車後資料為 114 年 9 月(開學後)平日下午尖峰 17:00-19:00。



圖11 堤頂大道北上入口引道通車後南北向節省時間

四、堤頂主線開放路肩評估[4]

4.1 評估路肩開放範圍、時段、車種

1. 汐五高架主線車道配置及汐五高架相關交流道說明

(1) 汐五高架主線車道配置

汐五高架主線道路斷面如圖12所示，汐五高架主線車道配置為兩車道，主線車道寬度為3.75公尺，而外側路肩寬度為3公尺，內側路肩寬度為1公尺。

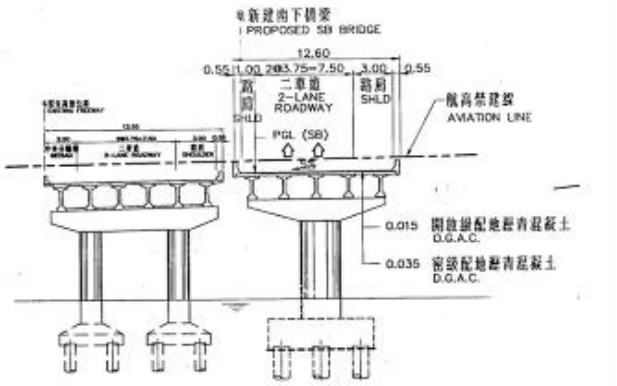


圖12 汐五高架主線道路斷面圖

(2) 汐五高架相關交流道

因本計畫開放路肩路段為汐五高架南向路段，因此汐五高架相關交流道為南向路段之堤頂交流道及環北交流道。堤頂交流道前交流道為汐五高架南向路段起點，而堤頂交流道有南下出口匝道和南下入口匝道(港墘路及舊宗路)，其車道配置除南下入口匝道(港墘路)為單車道，其餘皆為雙車道。而環北交流道只有南下入口匝道，並無南下出口匝道，車道配置為雙車道，如表6所示。

表6 本計畫汐五高架相關交流道配置

交流道名稱	匝道方向	車道配置
堤頂交流道	南下出口匝道	雙車道
	南下入口匝道(港墘路)	單車道
	南下入口匝道(舊宗路)	雙車道
環北交流道	南入匝道	雙車道

2. 因應現況交通路肩開放評估(範圍、時段、車種)

本計畫因應現況交通壅塞來評估路肩開放，以下個別說明路肩開放之範圍、時段及車種。

(1) 路肩開放之範圍

根據 Google 歷史路況分析，可以發現於平日下午尖峰時間汐五高架主線壅塞終點皆為22.5k處以前，而本計畫建議路肩開放之範圍區分成兩方式。一為開放汐五高架南向路段20.1k~24.8k(堤頂交流道至環北交流道)之路肩，共計4.7公里長，二為開放汐五高架南向路段20.1k(堤頂交流道) ~22.5k 之路間，共計2.4公里長。

(2) 路肩開放之時段

根據高公局汐五高架主線 VD 資料可以看到平日下午尖峰時段(17:00~19:00)之20.01k 處行車速率約為17~23公里/小時，而路肩開放之時段則參考平日交通壅塞時段為平日下午 17:00~19:00。

(3) 路肩開放之車種

路肩開放之車種為小型車，而根據國道主線實施開放路肩作業規定第三節開放路肩行駛規定:路肩開放通行時，開放通行之路肩速限原則為每小時60公里，惟個別開放路肩路段最小路肩寬度若達3.5公尺(含)以上，且線型及視距均符合「公路路線設計規範」標準，則速限可評估調整為每小時80公里以上和第八節規定:開放小型車以外車種行駛路肩(如大客車)，或匝道實施開放路肩措施，得參照本規定，另依個案辦理。根據相關規定，本計畫評估開放路肩路段依現況車道配置可以滿足路肩行駛速限60公里。

4.2 路肩開放配套措施

開放路肩配套分成開放路肩範圍兩方式，一為路肩開放之範圍為汐五高架南向路段20.1k~24.8k(堤頂交流道至環北交流道)，共計4.7公里長路段。二為開放部分路段，路肩開放範圍為汐五高架南向路段20.1k~22.5k，共計2.4公里，以下各別說明。

1. 開放至環河北交流道

根據國道主線實施開放路肩作業相關規定[5]，本計畫開放路肩終點為環北交流道，此交流道無輔助車道且僅有南入匝道而無南出匝道，不符合兩種開放路肩類型，因此為符合第二種類型需銜接輔助車道，個別說明，而開放路肩範圍為汐五高架南向路段20.1k~24.8k(堤頂交流道至環北交流道)，共計4.7公里長。

(1) 環北南入匝道縮減為 1 車道

此種路肩開放配套措施之標線調整如圖11所示[6][7]，環北南入匝道縮減為1車道，且汐五高架主線增設1車道，將1加速車道改為主線車道，車道呈現3主線車道和1加速車道做為道路配置。車流於汐五高架主線20.1k(堤頂交流道)開始行駛於路肩，而到了路肩終點24.8k時，原行駛於路肩車流向左變換車道至最外側主線車道作為銜接，以達到車道平衡。而標線調整後一般和開放路肩時段動線如圖13及圖14所示。



圖13 環北南入匝道縮減為1車道

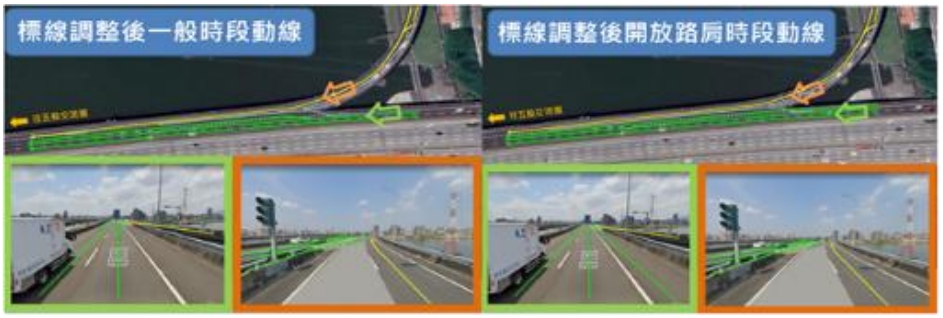


圖14 環北交流道南下入口匝道標線調整後一般和開放路肩時段動線

(2) 開放路肩時段以號誌管控封閉環北南入匝道內側車道

此種路肩開放配套措施之標線調整如圖15所示，環北南入匝道開放路肩時段以號誌管控封閉環北南入匝道內側車道，讓環北南入匝道內側車道用於路肩車作為匯入車道。車流於汐五高架主線20.1k(堤頂交流道)開始行駛於路肩，而到了路肩終點24.8k時，原行駛於路肩車流經過槽化線向右變換車道至環北南入匝道內側車道作為銜接，以達到車道平衡。



圖15 環北交流道南下入口匝道標線調整後一般和開放路肩時段動線

上述路肩開放至環北交流道之兩標線調整配套措施，環北交流道南入匝道都縮減為一車道進入汐五高架主線，經檢視環北南入匝道下午尖峰交通量為1300pcu，一車道配置可以滿足車道容量。

2. 開放部分路段

開放部分路段之開放路肩範圍為汐五高架南向路段如圖16所示，為20.1k(堤頂交流道) ~22.5k，共計2.4公里長。根據高公局汐五高架主線 VD 資料可以看到下午尖峰時段之行車速率，可以發現於汐五高架主線22k 以後行車速率已達60~70公里/小時，而路肩速限為60公里/小時，速限已低於主線之行車速率，因此開放路肩終點設為22.5k處，而此種開放方式無須進行標線調整配套措施。但根據國道主線實施開放路肩作業方式之規定:若為有需求，則開放路肩起點得設於路段中點，因此提出開放部分路段來進行路肩開放之範圍。



圖16 開放部分路段之開放範圍

開放路肩範圍評估：為避免因開放路肩影響到環北交流道南入匝道之交通運轉功能，因此建議以開放部份路段(20.1k~22.5k) 之路肩。

4.3 路肩開放效益評估

本計畫針對現況未開放路肩和現況有開放路肩下午尖峰堤頂南入匝道至汐五高架主線路段來進行交通模擬，模擬分析時段為下午尖峰時段(17:00-19:00)，而模擬器版本為 VISSIM 2024 SP5。

交通模擬也有將汐五高架南入匝道車配配置進行建置，現況中汐五高架在堤頂南入後，約在19.4k 處由4車道縮減為3車道、約在20.1k 處由3車道縮減為2車道。設定從20.1k 處開放路肩，路肩寬度為3公尺寬，路肩速限為60KPH，路肩車道內側禁止變換車道(即僅可路肩切換至主線，不可切換進路肩)，如圖17所示。



圖17 汐五高架主線之車道配置

交通模擬之路徑為堤頂交流道各匝道至汐五高架主線如圖18所示，北入匝道模擬路徑至汐五高架主線北向19K 處(高架 N19)迄點分別為堤頂基湖快車道、樂群基湖、港墘瑞光、堤頂民權和舊宗民權至高架 N19共五條模擬路徑。

南入匝道模擬路徑至高架主線南向20.98k 處(S20.98)迄點分別為堤頂基湖快車道、堤頂基湖快車道、樂群基湖、港墘瑞光、堤頂民權和舊宗民權至高架 S20.98六條模擬路徑，還有一條路徑為汐五高架主線南向堤頂交流道至環北交流道之路段，而本計畫為探討汐五高架南向路段路肩開放，僅就南入模擬路徑來進行效益評估。



圖18 堤頂匝道至汐五高架主線之路徑

1. 開放路肩前後汐五高架主線效益評估

開放路肩前後汐五高架主線之旅行時間與速率差額如表7所示，下午17-18點之旅行速率相較於未開放路肩汐五高架主線南向堤頂交流道至環北交流道之路段其行駛速率降低5.9公里/小時且旅行時間增加76秒。下午18-19點之旅行速率相較於未開放路肩汐五高架主線南向堤頂交流道至環北交流道之路段其行駛速率降低6.3公里/小時且旅行時間增加84秒，雖旅行時間提升約1分鐘，但整體通過量提升157PCU/hr。

表7 開放路肩前後汐五高架主線旅行時間與速率差異比較表

開放路肩前後	平日下午17-18		平日下午18-19	
	旅行時間(秒)	旅行速率(KPH)	旅行時間(秒)	旅行速率(KPH)
高架段:堤頂-環北	552→627 **(+76)**	48.4→42.5 **(-5.9)**	559→643 **(+84)**	47.7→41.5 **(-6.3)**

2. 開放路肩前後地區道路進入汐五高架路徑效益評估

開放路肩前後堤頂交流道南入匝道至汐五高架主線之旅行時間與速率差額如表8所示。下午17-18點之旅行速率相較於未開放路肩路徑之行駛速率與旅行時間皆有所改善，行駛速率增加8.7~19公里/小時，旅行時間則減少270~507秒。

表8 開放路肩前後旅行時間與速率差異比較表

開放路肩前後	平日下午17-18		平日下午18-19	
	旅行時間 (秒)	旅行速率 (KPH)	旅行時間 (秒)	旅行速率 (KPH)
1: 堤頂基湖(慢)-S20.98	943→435 **(-507)**	12.2→26.5 **(+14.3)**	1137→431 **(-706)**	10.1→26.8 **(+16.6)**
2: 堤頂基湖(快)-S20.98	872→526 **(-346)**	13.2→21.9 **(+8.7)**	810→496 **(-314)**	14.2→23.3 **(+9.0)**
3: 樂群基湖-S20.98	868→393 **(-475)**	13.8→30.4 **(+16.6)**	965→373 **(-593)**	12.4→32.0 **(+19.7)**
4: 港墘瑞光-S20.98	710→373 **(-336)**	13.3→25.3 **(+12.0)**	649→293 **(-356)**	14.5→32.2 **(+17.6)**
5: 堤頂民權-S20.98	603→298 **(-305)**	18.6→37.6 **(+19.0)**	534→285 **(-248)**	21.0→39.3 **(+18.3)**
6: 舊宗民權-S20.98	584→314 **(-270)**	16.8→31.2 **(+14.4)**	531→299 **(-232)**	18.4→32.7 **(+14.3)**

下午18-19點之旅行速率相較於未開放路肩各路徑之行駛速率與旅行時間皆有所改善，行駛速率增加9~19.7公里/小時，旅行時間則減少232~706秒，開放路肩改善效果顯著。

有開放路肩相較於未開放路肩在整體路網的延滯表現降低了約3%，並且整體路網在尖峰小時(17-18)可多通過約150PCU。最為顯著的改善則在平面道路的旅行時間上，由堤頂基湖路口至 S20.98處約可減少6~8分鐘(慢、快車道)；由樂群基湖路口至 S20.98可減少約8分鐘；由港墘瑞光至 S20.98處可減少約6分鐘；由堤頂民權至 S20.98處約可減少5分鐘；由舊宗民權路口至S20.98可減少約4分鐘。

整體路網在尖峰小時(18-19)可多通過約68PCU。最為顯著的改善則在平面道路的旅行時間上，由堤頂基湖路口至 S20.98處約可減少5~11分鐘(慢、快車道)；由樂群基湖路口至 S20.98可減少約10分鐘；由港墘瑞光至 S20.98處可減少約6分鐘；由堤頂民權至 S20.98處約可減少4分鐘；由舊宗民權路口至S20.98可減少約4分鐘。

3. 開放路肩前後路口效益評估

開放路肩前後現況平日下午尖峰交通模擬各路口各方向服務水準差額如表9所示。比照開放路肩前後交通模擬各路口各方向服務水準，路口3、4和5平均延滯與服務水準皆差異不大，而差異最大的為路口1之 C2和 D 方向和路口2之 D2方向，因開放路肩後南下匝道車流皆可順利上汐五高架主線南向路段，因此開放路肩後相較於未開放路肩服務水準有所提升。

表9 開放路肩前後現況下午尖峰各路口各方向服務水準比較表

		17-18		18-19	
		平均延滯(秒)	服務水準	平均延滯(秒)	服務水準
路口1	A1堤頂往西(快車道)	0.7	B➡B	1.0	B➡B
	A2堤頂往西(慢車道)	0.4	A➡A	-0.4	A➡A
	B 樂群往北	-1.1	C➡B	-5.8	C➡B
	C1堤頂往東(快車道)	0.1	D➡D	0.1	D➡ D
	C2堤頂往東(慢車道)	-4.0	D➡D	**-80.5**	**F➡ D**
	D 瑞光478巷	-1.4	D➡D	**-60.6**	**F➡ D**
	路口平均	-0.3	C➡C	**-15.7**	**D➡ B**
路口2	A 港墘	-7.6	F➡F	-9.1	E➡ D
	B1堤頂往北(快車道)	-0.3	C➡C	-0.5	C➡ C
	B2堤頂往北(慢車道)	0.5	A➡A	-0.7	A➡ A
	D1堤頂往南(快車道)	-8.5	D➡C	-14.0	C➡ C
	D2堤頂往南(慢車道)	**-34.1**	**E➡C**	**-105.3**	**F➡ C**
	路口平均	-6.4	D➡D	**-13.5**	**D➡ C**
路口3	A 舊宗路	-0.1	A➡A	-0.3	A➡ A
	B 堤頂往北	-2.7	D➡D	-0.2	D➡ D
	C 堤頂往南	0.5	A➡A	1.4	A➡ A
	路口平均	0.7	B➡B	0.5	B➡ B
路口4	A 下匝道	0.0	C➡C	0.4	C➡ C
	B 舊宗往北	-3.0	B➡A	-0.3	A➡ A
	D 舊宗往南	-7.0	D➡C	-3.7	C➡ C
	路口平均	-3.6	B➡B	-1.1	B➡B
路口5	A121巷	0.1	D➡D	0.0	D➡ D
	B 舊宗往北	-0.9	A➡A	-0.7	A➡A
	C 下匝道	-0.4	D➡D	-0.1	D➡ D
	D 舊宗往南	-0.9	B➡B	-2.7	B➡ B
	路口平均	-0.8	B➡B	-1.1	B➡ B

路口1方向分別有 A1、A2堤頂往西(快、慢車道)、B 樂群往北、C1、C2堤頂往東(快、慢車道)和 D 瑞光478巷，開放路肩前後比較時，17-18點時，各方向平均延滯差異不大。而18-19點時，C2方向平均延滯下降80.5秒，服務水準從 F 級提升為 D 級，D 方向平均延滯下降了60.6秒，服務水準從 F 級提升為 D 級，路口總平均延滯下降了15.7秒，服務水準從 D 級提升至 B 級。

路口2方向分別有 A1港墘、B1和 B2堤頂往北(快、慢車道)、D1和 D2堤頂往南(快、慢車道)，開放路肩前後比較時，A1、B1、B2和 D1平均延滯差異不大。17-18點時，D2方向平均延滯下降34.1秒，服務水準從 E 級提升為 C 級。而18-19點時， D2方向平均延滯下降了105.3秒

，服務水準從 F 級提升為 C 級，路口總平均延滯下降了13.5秒，服務水準從 D 級提升至 C 級。

4. 開放路肩前後模擬畫面

開放路肩前後現況下午尖峰堤頂交流道匯入汐五高架主線模擬畫面如圖19所示，未開放路肩現況下午尖峰堤頂交流道匯入汐五高架主線行駛速率皆為10~40公里/小時，行駛速率低。而有開放路肩現況下午尖峰堤頂交流道匯入汐五高架主線行駛速率為50~80公里/小時，相較於未開放路肩之行駛速率提升約40公里/小時，對於堤頂交流道匯入汐五高架主線之交通運轉有顯著的提升。

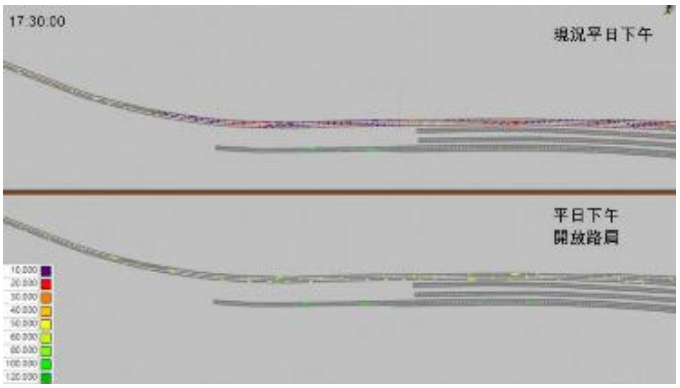


圖19 開放路肩前後現況下午尖峰堤頂交流道匯入汐五高架主線模擬畫面

開放路肩前後現況下午尖峰汐五高架段南向匯入段如圖20所示，針對路肩開放前後模擬畫面可以得知到開放路肩前因汐五高架主線壅塞導致堤頂南入匝`道之車流無法順利匯入，而開放路肩後可以看到堤頂南入匝道皆可以順利匯入至汐五高架主線，對於交通改善效果顯著。

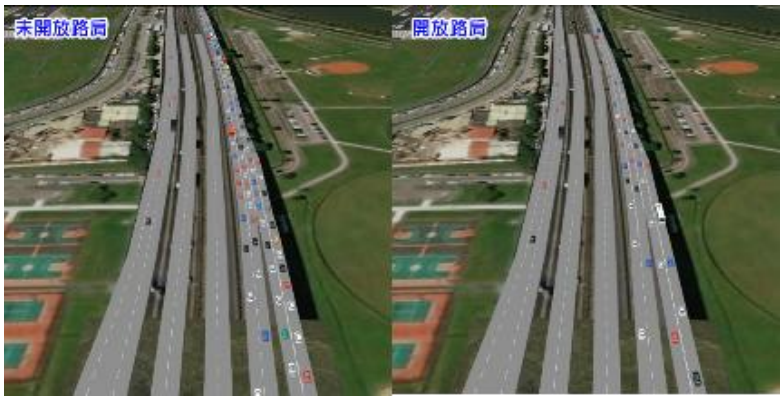


圖20 開放路肩前後現況下午尖峰汐五高架主線模擬

開放路肩前後現況下午尖峰堤頂南入匝道模擬畫面如圖21所示，針對路肩開放前後模擬畫面可以得知到開放路肩前因堤頂南入匝道(港墘路)之車流無法順利匯入至汐五高架主線，導致堤頂南下匝道車流嚴重回堵進而影響地區道路交通運轉。而開放路肩後可以看到堤頂南入匝道皆可以順利匯入至汐五高架主線，其開放路肩前後之回堵程度有明顯差異。另外也可以觀察到汐五高架主線往南順暢程度也有明顯差異，開放路肩對於交通改善效果顯著。



圖21 開放路肩前後現況下午尖峰堤頂南入匝道模擬

開放路肩前後現況下午尖峰舊宗/北入南入匝道模擬畫面如圖22所示，針對路肩開放前後模擬畫面可以得知到開放路肩前因舊宗南入匝道之車流無法順利匯入至汐五高架主線，導致堤頂南下匝道車流嚴重回堵進而影響地區道路交通運轉。而開放路肩後可以看到舊宗南入匝道皆可以順利匯入至汐五高架主線，其開放路肩前後對於交通改善效果顯著。

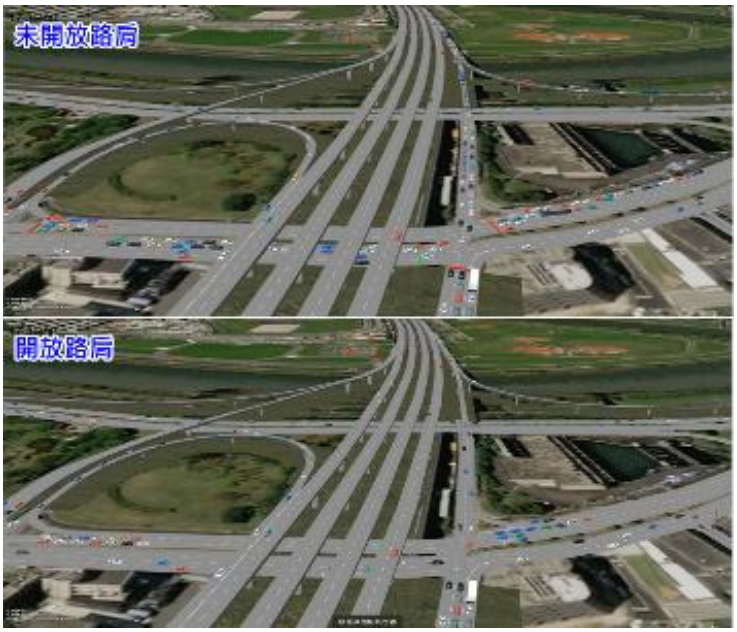


圖22 開放路肩前後現況下午尖峰舊宗/北入南入匝道模擬

五、結論

本研究旨在探討內湖科技園區進出國1堤頂交流道周邊交通問題，並評估兩改善方案預期效益。現況交通問題主要在於尖峰時段聯絡道車流量龐大，導致地區壅塞，其中國1汐五高架南下主線壅塞回堵至地區道路，嚴重影響堤頂南入匝道車流匯入主線 。同時，原先堤頂大道北向前往北入匝道的動線需繞行且與南入匝道車流動線重疊，造成車流交織和排隊停等，為了解決上述問題，本計畫進行兩項交通改善方案評估 。

1. 堤頂交流道往北匝道動線改善

(1) 堤頂交流道往北匝道動線改善為新闢一引道，使堤頂大道南端前往北入匝道的車流可以直接右轉進入，從而避開與南入匝道車流的交織衝突 。

(2) 改善預期交通效益為舊宗路往北(國 1 北入匝道-民權東路 6 段 11 巷)路段服務水準從原本 D 級上升至 C 級，而民權東路往東(堤頂大道-舊宗路) 道路服務水準從原本 B 級上升至 A 級；而舊宗路/國 1 北入北出路口總延滯可下降 13%，服務水準可由 C 級提升至 B 級，相關路口與路段服務水準皆有提升。

(3) 本計畫亦於 114 年 7 月 8 日通車，根據 TOMTOM 調查資料堤頂大道南北向之平均旅行時間以了解實際改善效益，堤頂大道南向(樂群一路至南下入口匝道)之平均旅行時間從原 425 秒下降至 363 秒，下降 15%；堤頂大道北向(民權東路至港墘路)之平均旅行時間從原 341 秒下降至 328 秒，下降 4%。

2. 國 1 南向堤頂至環北路段於下午尖峰開放路肩

(1) 國 1 南向堤頂至環北路段於下午尖峰開放路肩建議時段為平日下午 17:00 至 19:00，車種為小型車，開放路肩範圍建議開放 20.1k~22.5k 之路肩。

(2) 開放路肩交通效益經交通模擬結果顯示，開放路肩後汐五高架主線(堤頂-環北)的旅行時間略有增加約 1 分鐘，但整體通過量提升 157PCU/hr。

(3) 對於各地區道路進入汐五高架主線之路徑旅行時間均大幅改善，行駛速率增加 8.7~19.7 公里/小時，旅行時間減少 232~706 秒，而各相關路口服務水準也有提升，開放路肩後有助於平日下午尖峰內科交通壅塞紓解 。

參考文獻

[1] 交通部運輸研究所 (2022)，2022年臺灣公路容量手冊。

[2] 臺北市政府 (2024)，堤頂交流道往北匝道動線改善可行性評估報告書。

[3] 交通部 (2023)，公路路線設計規範。

[4] 臺北市政府 (2024)，國1汐五高架南下(堤頂-環北)開放路肩評估案。

[5] 交通部高速公路局 (2023)，國道主線實施開放路肩作業規定。

[6] 交通部高速公路局 (2025)，交通部高速公路局交通工程標準圖。

[7] 交通部高速公路局 (2023)，高速公路交通工程手冊(標誌標線篇)。

都市交通半年刊
第四十一卷第一期
民國一一五年六月
頁 75 ～ 102

Urban Traffic Biannually
Volume 41 Number 1
June 2026
pp. 75 ～ 102

應用元學習與多任務強化學習模型發展都會區單一化號誌控制架構[1]

The Development of a Unified Signal Control Architecture for Metropolitan Areas using Meta-learning and Multi-task Reinforcement Learning Models

張益城[2]、周家慶[3]、孫將瓟[4]、董尚義[5]、胡昱亭[6]、林佳欣[7]、林小淳[8]、郭哲維[9]、吳其為[10]

Chang, Yi-Cheng, Chou, Ja-Ching, Sun, Jiang-ling, Dong, Shang-Yi, Hu, Yu-Ting, Lin, Chia-Hsin, Lin Xiao-Chun, Guo, Zhe-Wei, Wu, Chi-Wei

摘要

近年因人工智慧發展進步，國內外交通號誌控制開始嘗試導入人工智慧強化學習的技術，因此應用強化學習於號誌控制之研究漸趨常見。過往許多研究皆以單目標獎勵函數探討交通號誌控制之課題，較少探討交通號誌控制之多目標獎勵函數特性，本研究則採用 Q-Pensieve 演算法結合 Pearl，並整合跨時段多任務模型，除具備多目標獎勵函數特性外，因採樣效率較高及具備隨機策略

[1] 本文為交通部運輸研究所「人工智慧號誌控制精進－多任務強化學習」(計畫編號：IOT-114-IC002)之部分研究成果，特此致謝。

[2] 交通部運輸研究所運輸資訊組 組長(聯絡地址：105臺北市松山區敦化北路240號，電話：02-23496789，E-mail：yi_cheng@iot.gov.tw)。

[3] 交通部運輸研究所運輸資訊組 高級運輸分析師(退休)(E-mail：jaching6756@gmail.com)。

[4] 交通部運輸研究所運輸資訊組 副研究員(聯絡地址：105臺北市松山區敦化北路240號，電話：02-23496789，E-mail：sltcv@iot.gov.tw)。

[5] 資拓宏宇國際股份有限公司 處長(聯絡地址：220新北市板橋區縣民大道二段7號6樓，電話：02-89691969，E-mail：samuel.tung@iisigroup.com)。

[6] 資拓宏宇國際股份有限公司 分析師(聯絡地址：220新北市板橋區縣民大道二段7號6樓，電話：02-89691969，E-mail：yuting.hu@iisigroup.com)。

[7] 資拓宏宇國際股份有限公司 分析師(聯絡地址：220新北市板橋區縣民大道二段7號6樓，電話：02-89691969，E-mail：jessie.lin@iisigroup.com)。

[8] 資拓宏宇國際股份有限公司 副理(聯絡地址：220新北市板橋區縣民大道二段7號6樓，電話：02-89691969，E-mail：kyana.lin@iisigroup.com)。

[9] 資拓宏宇國際股份有限公司 分析師(聯絡地址：220新北市板橋區縣民大道二段7號6樓，電話：02-89691969，E-mail：justin.kuo@iisigroup.com)。

[10] 資拓宏宇國際股份有限公司 專案經理(聯絡地址：220新北市板橋區縣民大道二段7號6樓，電話：02-89691969，E-mail：kiwi.wu@iisigroup.com)。

等特性，適合應用於都會區幹道號誌控制。本研究實驗場域選定臺南市關廟區台 86 線及台 19 甲線交叉路口，此路口為關廟區重要道路，由於路口近交流道，於尖峰時段常有車流回堵至國道三號情形，本研究以此地點作為強化學習號誌控制之實作範圍。由於此地點之平日晨峰、平日昏峰、平日離峰、假日昏峰時相數及分流方向皆不相同，本研究利用多目標強化學習之權重設計，並整合跨時段多任務模型建構，以探討此號誌路口交通改善之可能性。AI 模型實測結果為停等車輛數績效在平日晨峰、平日昏峰、平日離峰、假日昏峰能優於既有固定時制(Time of Day, TOD)計畫運行之結果。

關鍵詞：強化學習、多任務模型、幹道號誌控制

Abstract

Recent advancements in artificial intelligence have led to increased adoption of reinforcement learning for traffic signal control. While previous studies have primarily focused on single-objective reward functions, this research investigates multi-objective reward functions and meta-learning across distinct traffic patterns at different Time-of-Day (TOD). This study employs the Q-Pensieve algorithm with a multi-objective reward design, in conjunction with the Pearl algorithm to construct a cross-period multi-task model based on a variational autoencoder (VAE), with the goal of optimizing control on urban arterials. The proposed approach, characterized by high sampling efficiency and a stochastic policy, is applied to a critical signalized intersection in Guanmiao District, Tainan City, which frequently experiences congestion because of its proximity to a nearby freeway interchange. To address variations in signal phases and traffic flows across different periods (weekday morning peak, weekday evening peak, weekday off-peak hours, and weekend evening peak), the study adopts a weighted multi-objective reinforcement learning framework integrated with cross-period multi-task modeling. Experimental results show that, in all studied periods, the reinforcement-learning-based signal control outperforms the existing fixed Time-of-Day (TOD) plans in terms of the number of stopped vehicles, demonstrating the effectiveness and potential of the proposed method for urban traffic signal optimization.

Keywords: meta-learning, Multi-Task Learning, Arterial Traffic Signal Control

一、前言

交通號誌控制為智慧運輸系統中重要的交通管理策略，透過適當之號誌控制能有效紓解都市壅塞車流，而針對號誌控制邏輯部分，可區分定時號誌控制、觸動式號誌控制、適應性號誌控制、動態號誌控制，目前臺灣多數路口皆採用定時號誌控制邏輯，藉由過往歷史資料及經驗，研擬出全天候之時制計畫[1,2,3,4]。

近年因人工智慧(Artificial Intelligence, AI)發展進步迅速，在各領域上，不論軟體或硬體技術皆有卓越進步，回顧國內外相關研究，在構建動態交通號誌控制上，大多採用深度強化學習方法(Reinforcement Learning, RL)

以處理交通號誌控制高維度及複雜控制邏輯問題，然過往研究大多使用單一目標強化學習方法探討號誌控制，皆以單目標獎勵函數探討交通號誌控制之課題，較少探討交通號誌控制之多目標獎勵函數特性[5,6]。

本研究則採用 Q-Pensieve 演算法結合 Pearl，並整合跨時段多任務模型，除具備多目標獎勵函數特性外，因採樣效率較高及隨機策略等特性，適合應用於都會區幹道號誌控制，透過考量幹道、支道路口通過量及總停等延滯，依實務經驗及需求採用不同權重分配，以取得合適之號誌控制策略[7]。

本研究實驗場域選定臺南市關廟區台 86 線及台 19 甲線交叉路口，此路口為關廟區重要道路，台 86 線為連接臺南市區及國道一號往國道三號之重要道路，台 19 甲線則為連接新化與關廟之重要道路，該路口車流量大且左轉車道儲車空間不足，於尖峰時間常發生道路壅塞情形，另該路口之平日晨峰、平日昏峰、平日離峰、假日昏峰時相數及分流方向皆不相同，本研究選定此單一路口作為強化學習號誌控制之實作範圍。此外，由於強化學習模型在訓練過程中需嘗試各式策略組合，若直接於實際路口進行探索，將可能造成交通安全風險與壅塞影響。因此本研究進行模型訓練之前，會先建置車流模擬環境，利用 SUMO 交通模擬軟體搭配 TraCI 工具，重建臺南市關廟區台 86 線及台 19 甲線交叉路口之幾何特性、車流量、轉向比例及時制計畫，使模型能在安全可控之模擬環境中反覆試驗與學習。透過此車流模擬環境建置可使模型在不影響交通運作之情況下學習各時段交通特性，並驗證模型策略收斂與穩定性，為後續實地部署奠定基礎。

二、文獻回顧

本章首先整理以強化學習應用於交通號誌控制與匝道儀控之相關研究，說明不同研究在實務場景、代理人架構與狀態、動作、獎勵設計上的差異，並從中歸納出現行研究發展趨勢與限制。其後，將再從演算法與理論觀點出發，回顧強化學習與深度強化學習之基本概念及主要演算法，說明多目標、多模態與多任務方法之演進脈絡，作為本研究採用 Q-Pensieve with PEARL 架構之基礎。

過去交通號誌控制實作上，透過即時號誌動態資訊予各式車輛，以適應性號誌控制(Adaptive Traffic Signal Control, ATCS)為出發點，根據路口各方向即時交通變化作動態彈性調整號誌。然應用上仍存在限制，因演算法本身需給定適當假設條件，並取得一定程度簡化號誌控制，甚至納入預測模式結果後，再以最佳化方法求解號誌控制策略。故面臨較大範圍之路網範圍時，最佳化求解時間將非線性遽增[3,4]。

若欲於複雜環境、難以透過模型建構關係情況下求解，則強化學習(Reinforcement Learning, RL)適用於此問題；以號誌控制為例，當欲進行號誌控制時，可根據控制路口範圍內所能獲取到之車流環境狀態資訊，進行下一時相長度之決策，並透過具序列性之馬可夫決策過程，使整體控制路口範圍內車輛在該決策周期內有較佳通行效率。過往應用強化學習方法於號誌控制問題時，Noaeen 等人(2022)[5]主要分為兩種類別，第一類為單一 agent 之 DRL 應用，主要適用於單一路口或路口數較少環境之號誌控制問題；第二類為多個 agent 之多代理人深度強化學習(Multi-Agent Deep Reinforcement Learning, MADRL)應用，此方法則適用於範圍較大路網環境。

過往處理環境為單路口時，最早以 DQN 為號誌代理人；後續開始使用 DDPG 處理更精細且具有持續動作空間的問題[8]。多路口則會以多代理人深度強化學習為主，例如深度確定性策略梯度法(Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm，MADDPG)或 DQN(Multi-Agent DQN)協調不同號誌間操作[9,10]。相較基於 DQN 之方法，Mousavi 等人(2017)應用 Actor-Critic 方法於單一路口號誌控制問題，其中狀態輸入根據 SUMO 之車流模擬影像，以 CNN 方式進行轉換以檢測各車道車隊長度、車速、以及車輛位置，動作則設定為東西向或南北向之時相，獎勵則採用累積延滯差；該研究發現，相較於 DQN 方法，Actor-Critic 方法可找出更穩定策略。而 PPO 對於政策優化方面表現出色，經常用於單路口或多路口之交通管理[11]。近期也有許多文獻使用軟性動作評估(Soft-Actor Critic，SAC)，因其使用更新概念，使其探索隨機性較高的環境時會更為平衡與穩健[12]，以下回顧過往 AI 對於交通儀控的狀態、動作、獎勵之設定。

許添本等人(2022)[13]透過建構深度確定性策略梯度法(DDPG)模型，嘗試改善車輛於幹道續進之延滯，其概念為透過觀測前一周期之進端平均車流密度及速度後，輸出系統中交叉口下一周期的時比及時差。其中設定狀態為每 60 秒輸入平均密度及平均車速並做一次決策；動作之設定，由於該研究路網為虛擬三路口幹道路網且皆為二時相，故根據代理人產出之時比及時差，可得知各路口綠燈始亮時間及時差；獎勵則考量最大化路口通過量以及最小總延滯兩個目標。

許添本等人(2020)[14]在單一路口情況下，採用 DQN 結合 Double Q-learning、競爭網路架構構(Dueling Network Architecture)及優先經驗回放之技術方法，每 5 秒決定是否切換時相；該研究透過 CNN 將路口各方向進行格位轉換建立 Q 網路作為環境狀態輸入，動作考量固定時相順序下時相是否切換，獎勵則考量車輛停等時間及路口通過量所組成之加權指標，最終發現基於 DQN 方法可運用於國內混合車流環境，並即時因應各種車流變化。

Hu 等人(2024)[15]提出將高速公路主線與上下匝道視為一非對稱細胞傳遞模型 (Asymmetric Cell Transportation Model, ACTM)，並以宏觀車流理

論為基礎，以 William Vickrey 提出之浴缸模型(bathtub model) 作為都會區交通模型樣板，兩者模型皆有輸入量及輸出量之概念，故皆適用於分析壅塞情形之交通情況。該文獻使用 DQN 架構，周邊平面及匝道主線分為兩個 Agent。狀態(state)部分，匝道主線包含主線車流、上匝道車流及下匝道車流，共 15 維度；平面道路則包含平面道路車流，維度視都會區本身的上下游，以及主線 ACTM 的 source 及 sink cell 決定維度。動作(action)則為儀控率控制，共有增加儀控率、減少儀控率以及持平儀控率三種動作輸出，獎勵(reward)則為最小化路網中的平均旅行時間(ATT)。

黃業傑等人(2023)[6]提出以多目標方式處理號誌控制問題，其模型為 SAC 架構的改良，同時兼具 Q – learning 的功能。該模型之狀態(state)為道路資訊，包含車輛通過量、車輛停等情況以及上一周期的號誌資訊；動作(action)則為下一周期長度及各分相秒數；獎勵(reward)為通過量及延滯。由於該文獻以多目標模型求解，故實驗場域選擇較為繁忙之路口或路網。亦又調查各時段之車流量，並針對車流型態具有差異之時段進行模型訓練。

Lu 等人(2017)[16]提及過往匝道儀控，大多犧牲儀控率以換取高速公路主線暢通。當主線近於壅塞時，儀控策略大多為縮減儀控率，避免主線密度超過宏觀車流理論之密度臨界值[17]。其透過 Q 學習(Q-Learning)模型，並嘗試考量匝道停等公平性(equity)，目的為不論尖峰或離峰，車輛停等時間標準差不應太大。動作為設定匝道允許通過量(儀控率)，透過 reward 為最小化主線之旅行時間以達成主線優化目的。其特點為考量車輛數時，主線道及匝道車輛數皆納入評估，且在目標式中設定停等車輛標準差以及主線旅行時間之間權重，代表犧牲匝道儀控率情況會改善。

陳又均(2022)[18]應用多代理人獨立 Q 學習(Independent Q learning)，建立國道五號主線與匝道協控模型。其中主要考量狀態含儀控上下游主線之速率及流量，同時考量匝道儀控通過車輛數以及其他代理人之訓練指紋；其動作設定以現行離散儀控率做為儀控策略，並設定五分鐘進行一次代理人決策；針對國道五號，設定獎勵為每一時階最大通過瓶頸流量，並以現行流量作為獎勵比較基準，避免因採用最小化旅行時間與其動作間關聯性不足。

宋太龍等人(2024)[19]利用深度強化學習算法進行出口匝道相關連之道路路口信號控制優化，將信號燈設為智能體，通過設置檢測器，將高速公路出口匝道及交會路口之交通運行情況作為智能體獲取的狀態信息，引入以平面道路與出口匝道剩餘通行能力之比為動態修正參數的獎勵函數，在保證匝道交通運行效率下，完成交叉路口信號優化過程。並以中國北京市東三環快速路及某關聯交叉口為例，藉助 SUMO 交通模擬軟體及 Traci 進行實驗，結果表明，基於改進 A2C(advantage actor critic)演算法之信號控制

方法在控制效果上優於傳統信號控制以及基於深度 Q 網路(deep Q-network,DQN)算法之信號控制方法，在尖峰時間能夠有效降低匝道回堵發生機率，改善平面道路路口通行效率。

回顧強化學習方法應用於號誌控制研究，主要分為 DQN 以及 actor-critic 架構，並且依照路網的複雜程度，決定代理人的數量。又或者基於計算速度及模型複雜的考量，使用單目標及多目標求解。如何設定模型中代理人數量，以及代理人所需環境、狀態、動作及獎勵，皆為模型是否能良好運作重要因素。在回顧研究中，平面道路路口大多會透過通過車輛數、車輛延滯或平均旅行時間等交通績效指標，匝道儀控部分，則多數考量主線車流壅塞情況，以評估模型是否能夠改善交通現況[5,6,13,14,15,16,18,19,20]。

綜合上述可知，現有文獻已廣泛探討強化學習於各類交通控制情境之應用，並透過不同演算法與代理人設計驗證其在平面路口、幹道續進及匝道儀控上的潛力。然而，對於強化學習本身之學習機制、深度強化學習演算法差異，以及多目標與多模態擴充方式，仍有必要從方法論角度進一步釐清，以作為本研究選用演算法架構與模型設計之理論基礎。以下即從強化學習與深度強化學習之基本概念與演算法發展進行說明。

強化學習係為機器學習方法之一，旨在訓練學習者於未知且具有隨機性之動態環境，通過不斷試驗和錯誤，學習出最佳行動策略以達成特定目標，過程中學習者首先處於某狀態(State)，根據當前策略(Policy)選擇一個行動(Action)並執行，爾後環境將根據行動轉變成新狀態(New State)，並給予學習者獎勵(Reward)作為反饋。如此獎勵用於衡量該行動成效，幫助學習者調整和改進其策略，以便未來遭遇類似情境可得到更好決策。隨著此循環反覆進行，學習者逐漸學習到如何在各種狀態下選擇最大化累積獎勵行動，最終形成一個最優策略(Optimal Policy)，學習核心目標為持續改善當前的策略，以獲得的最大化長期累積獎勵[5]。

在交通號誌控制方面，強化學習可通過訓練適應不同交通情況和時制計畫，根據每個號誌周期之分相轉向和實際車流情況動態調整紅綠燈的時間，以實現交通流量最優化和提高運行效率。然市區路口環境較為複雜，導致狀態空間和行動空間的維度非常高，這使得傳統的強化學習方法(Q-learning)難以有效地識別和應用有用的特徵。因此，當前研究和應用多採用深度強化學習 (Deep Reinforcement Learning, DRL) 方法以應對高維度和複雜的交通號誌控制問題，如圖 1 所示[5]。

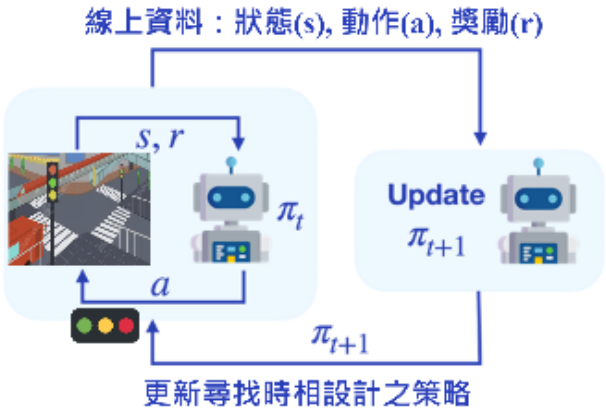


圖 1 強化學習學習模板

深度強化學習結合深度神經網絡與強化學習，通過訓練代理人於複雜環境制定決策，使其足以處理更高維度及更為複雜情境。根據環境複雜程度，演算法可以分為基於模型 (Model-Based) 和無模型 (Model-Free)，並且能基於策略學習或策略函數 (Q-Value) 進行延伸。以下將探討更適合應用於交通信號控制的演算法，並比較之間差異與特性，詳圖 2 所示[5]。

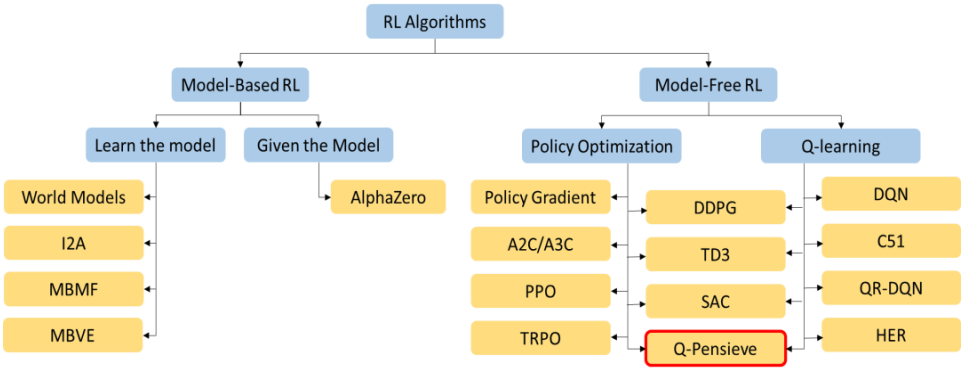


圖 2 強化學習演算法之歸納與衍生

Q 學習 (Q-learning) 為深度強化學習之核心概念，通過迭代優化行動價值函數，以取得更好決策。然而，由於 Q 學習無法有效處理多維行動空間和大規模環境，因此發展出其他不同演算法，如 DDPG、PPO、SAC、Q-Pensieve 演算法等，以下就各個演算法進行介紹[6,7,8,11,12,21]。

1. DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient)

適用於連續行動空間之演算法，結合策略梯度和 Q 學習，通過使用兩個神經網絡，如策略網絡和行動價值網絡，以能實現穩定的策略更新，但此演算法對於環境影響少的動作將無法進行有效率探索。

2. PPO (Proximal Policy Optimization)

採用一種限制策略更新幅度之方法，通過一個基於克利福德閥值之約束平衡探索與利用，能使策略更新且更加穩健，但此演算法只需近期經驗，導致容易陷入區域最佳解，無法處理從未觀察過的資料。

3. SAC (Soft Actor-Critic)

引入熵正則項以鼓勵策略之隨機性，從而在保持策略探索能力同時，仍能有效地最大化累積獎勵。此演算法在不同場景下提供應對複雜環境和多維行動空間之有效方法，使深度強化學習能更佳應用於如交通號誌控制等高維度問題上，但此演算法訓練時間長，且對於模型參數需要透更多實驗才能達成。

上述 DDPG、PPO、SAC 演算法係針對單模態中單一目標之模型而設計，主要目的在於訓練出一種模型策略，使其在不同的輸入資料中依舊能達成最佳化累積獎勵，例如在不同的交通流量中依舊能輸出最佳的綠燈分相秒數中最小化停等延滯。然而，當引入不同的獎勵函數，如最大化轉向量時，模型會需要重新訓練模型以適應新的獎勵目標。相較之下，單模態多目標強化學習演算法能在訓練時同時優化數個目標，無需針對不同獎勵重新訓練。使其讓多目標具有更高的靈活性處理交通領域裡多層次的任務如幹道與支道方向的延滯或轉向量作為優化指標。

4. Q-Pensieve

繼承 SAC 裡熵正值探索性與隨機性外，亦新增對於多目標訓練之權重計算與學習方式，使其演算法設計之模型可針對不同獎勵出現之環境狀態與動作進行知識共享。

因模型需同時優化數個獎勵目標，所以模型訓練時也增加其運算資源與收集資料時間，且獎勵層級大小亦影響模型收斂程度，甚或影響其他獎勵之績效，如在交通領域，當模型需要同時訓練幹支道延滯或通過量使其能最小化或最大化其指標，由於大多數情況下幹道流量比支道多，而在不同時段更為明顯，訓練當下模型有極大可能性去優化數量級較大獎勵從而忽略了其他數量級較小或變化較小之獎勵，導致在啟用多目標模型去訓練交通領域時，大多會需要額外處理將獎勵進行正規化。

然而，上述演算法大多數是針對單模態輸入資料設計，僅能處理來自單一時制資料。然實際於交通號誌控制應用情況，資料輸入面相往往屬多模態，包含多種不同形式和來源訊息，即使為單一路口，在不同時段下仍具備不同方向之交通流量及時制計畫。為因應如此複雜之情況，需探索多模態模型應用，例如 Task-Aware 與 Pearl 演算法，皆能處理多模態資料輸入情形，可在不同時制計畫下應對不同分相數或轉向需求，Task-Aware 與

Pearl 介紹如下。

1. Task-Aware

針對不同任務需求進行優化，考量多模態資料輸入，另針對具體任務進行適應性調整，以提高演算法於特定環境之效率和準確性。在交通號誌控制中，此方法能根據具體交通狀況或時間段動態調整號誌策略，使整個系統在各種情境下都能達到最佳化，但此方法需要大量訓練資料以及在線學習方式之運用，導致訓練緩慢，且在原始資料不足之情況訓練容易無法收斂。

2. Pearl

可通過前資料處理階段，將多模態資料進行有效整合，使深度強化學習演算法能夠更準確地應對現實中複雜時制計畫問題。且此演算法亦可與前述所提之演算法進行整合，以找出符合不同時制與流量之最佳綠燈秒數，對未來交通管理提供一個更靈活和適應性更強之解決方案。

根據策略學習過程中數據使用方式，可分為 On-Policy 與 Off-Policy 兩種策略說明如下：

1. On-Policy 策略

On-Policy 為使用當前策略收集數據並更新，其優點為模型係以更新後數據而更新策略，所以能更穩定，且可隨時適應策略變化，然缺點則因模型訓練需要大量資料，但 On-Policy 係使用當前數據更新，代表每次模型更新，舊數據將無法使用需要重新收集一次，即表示樣本效率低，常用之演算法如 PPO 演算法。

2. Off-Policy 策略

Off-Policy 則能使用各種策略數據進行更新，代表舊數據都可以用於訓練與模型更新，其優點則因舊新資料均重複使用，樣本效率高，使其更適合用於複雜環境，缺點則因學習過程使用不同策略資料導致學習不穩定，且因舊數據較新數據多，若未針對樣本使用進行調整，模型可能過度依賴舊數據更新，進而缺乏探索，常用之演算法如 Q-learning、DDPG、SAC、Q-Pensieve 演算法。

表 1 強化學習主要演算法比較

項目	SAC	PPO	DDPG	Q-Pensieve	Task-Aware	Pearl
策略特性 (Policy)	隨機策略 (Stochastic)	隨機策略 (Stochastic)	確定性策略 (Determin-istic)	隨機策略 (Stochastic)	隨機策略 (Stochastic)	隨機策略 (Stochastic)
採樣效率 (Sample Ef-ficiency)	高	低	高	高	低	高
策略學習 (Policy Learning)	Off-policy	On-policy	Off-policy	Off-policy	On-policy	Off-policy
多目標 (Multi-Ob-jective)	否	否	否	有	有	有
多模態 (Multi-Modal)	否	否	否	否	有	有

資料來源：交通部運輸研究所(2024)[22]

Q-Pensieve 演算法與 PEARL 結合，可形成具備多任務與多模態處理能力之 Q-Pensieve with PEARL 架構。本研究採用之架構，將 Q-Pensieve 之多目標學習能力與 PEARL 之任務條件嵌入(Task Embedding)整合，使模型能同時學習多個時段、不同交通需求及多組獎勵函數，進而以單一模型完成多任務訓練。

Q-Pensieve with PEARL 具備以下特點：第一，該架構可同時處理多個獎勵目標，透過 Q-Pensieve 之多目標權重學習，模型可針對不同交通績效(如延滯、通過量等)同時優化，而非僅針對單一目標進行學習；第二，透過 PEARL 引入任務條件編碼(latent context)，模型能辨識不同時段交通模式，進而在相同架構下學習多個任務，提升跨時段的泛化能力；第三，由於 Q-Pensieve 為 Off-Policy 方法，可重複使用過往資料，使採樣效率高於 On-Policy 之 PPO 等演算法，適合資料收集成本高、模擬複雜且難以大量反覆取樣之問題；第四，Q-Pensieve 採用隨機策略，能維持探索能力，在交通狀態波動大場景中，能保持模型輸出策略彈性。

然而，Q-Pensieve with PEARL 亦具若干限制。由於同時處理多目標獎勵，若不同獎勵目標間尺度差異過大，模型傾向最先優化尺度大獎勵項目，造成部分小尺度獎勵被忽略，因此在模型訓練階段須進行獎勵正規化。此外，PEARL 任務條件嵌入(Task Embedding)需仰賴目標場域之交通資料才能正確學習各任務間差異，使得模型雖可支援多任務訓練，但無法在未重新訓練情況下直接移植至具不同幾何、不同時相數量或不同流量結構之路口。在運算層面，多目標與多任務的結合使模型參數量增加，需使用較高之計算成本與訓練時間。總體而言，Q-Pensieve with PEARL 具備多目標、多時段與高採樣效率的特性，能在交通號誌控制之多任務情境下有效提升模型效能；然而在獎勵尺度、不同場域等面向仍具有限制，本研究將搭配獎勵正規化及根據臺南實驗場域之幾何條件、時制計畫等基本條件訓練模型，確保模型於實務環境中達到穩定且可靠之控制效果。

三、研究方法

3.1 Pearl 深度強化學習模型說明

Pearl 演算法為處理多模態資料之強化學習方法，特別適合於處理具有複雜交互作用環境，並與 Q-Pensieve 相似，Pearl 演算法也屬於 Actor-Critic 類型之方法，專注於解決多模態輸入資料之不確定性與異質性，並將其整合為單一決策過程。Pearl 演算法通過一種名為「元學習」方法，在面對不同情境或任務時，自適應地調整其策略。

Pearl 演算法核心概念係利用上下文變數推算不同時段之情境，通過學習一個隱變數模型捕捉多模態資料之間隱藏關聯性，並利用變分推理(Variational Inference)估計上下文變數之概率分佈，在策略更新時納入該變數，從而於不同情境下產生相應行動策略。Pearl 優勢為可有效應對不同情境之間切換，並保持策略穩健性。

Pearl 演算法可於多變交通環境中處理各種不同多模態資料，並根據不同需求調整任務參數，但因其本身僅得處理資料問題，無法與環境互動評估出動作好壞，因而無法更新動作上策略。此限制使 Pearl 需結合其他能與環境交互並且能有效動態調整與優化決策之演算法。

因此，本研究以 Q-Pensieve 演算法結合 Pearl 進行整合，原因為 Q-Pensieve 同屬 Actor-Critic 類之分支架構演算法，可作為 SAC 演算法衍生，能與 SAC 相同都納入熵量(Entropy)為 Q 值函數之參數。差異為 Q-Pensieve 納入多目標強化學習，使其無需多次尋找最佳解下，也能在共同確定政策更新方向時進行數據分享，亦能提高樣本效率，成為補充 Pearl 在環境互動方面之理想工具。

3.2 Pearl 深度強化學習訓練架構

Q-Peniseve 利用 Q replay buffer 使其能根據 reward 訓練參數與從 replay buffer 中隨機抽樣 S,A,R,S'之向量進行 soft-policy iteration 進行多目標之應用。而關於模型參數設計如以下說明。

1. 狀態

本研究車流資訊選擇轉向通過量、停等車輛數為模型車流狀態之輸入，另外，為使代理人了解當下交通號誌資訊，號誌資訊輸入為綠燈相位之時制組態，因此，每當分相結束時，當前分相的時制組態、與各分相中分方向分車種的累積轉向通過量、停等車輛數作為模型狀

態的輸入，如表 2 所示。

表 2 模型狀態輸入表

定義	內容
號誌資訊	綠燈相位的時制組態
道路資訊	分相結束至決策時，分車種(大車/小車/機車)累積轉向通過量、停等車輛數

2. 動作

代理人於分相結束時決策，此時代理人根據綠燈相位之時制組態、轉向通過量、停等車輛數決策出下一分相秒數，代理人透過調整各分相綠燈秒數，影響車流效率與續進。

3. 獎勵

Q-Pensieve 為多目標強化學習演算法，故為使用多個獎勵目標使其針對經驗調配不同獎勵權重著重改善現場情況。參考文獻，獎勵目標多為通過量與停等時間，而本研究選擇臺南市關廟區「台 86 線–19 甲線」單一路口作為實驗場域，為使後續模型應用上能依據不同情況使用，如幹道優先或支道優先等，將獎勵目標分為台 86 線、台 19 甲線之績效，另外為使獎勵目標統計單位一致，訓練過程獎勵目標，將與現場固定時制相同時相之平均績效比較，因此本研究獎勵目標共計四項，分別為台 86 線每秒平均總延滯時間與 TOD 之變化量[11]、台 19 甲線每秒平均總延滯時間與 TOD 之變化量[12]、台 86 線每秒通過量與 TOD 之變化量[13]、台 19 甲線每秒通過量與 TOD 之變化量[14]。

4. 神經網路架構

狀態輸入層為交通偵測資訊及號誌資訊，其中交通偵測資訊為轉向通過量與停等車輛數資訊，號誌資訊為綠燈相位之時制組態，獎勵偏好為訓練過程中，代理人將訓練全部 0 至 1 之權重，其維度大小與目標獎勵維度一致，輸入模型前，交通偵測資訊、號誌資訊和獎勵偏好將串接成一個輸入用資料數據一併傳入模型中，輸入資料透過隱藏層之傳遞擷取特徵資料，並藉由通過激活函數 Relu，避免梯度消失問題，最終模型輸出平均數與變異數，以表示模型預測之動作機率分布，透過從機率分布抽樣，得到下個時相秒數，架構如圖 3 所示，

[11] $\frac{\text{TOD 每秒平均總延滯時間}-\text{台86線每秒平均總延滯時間}}{\text{TOD 每秒平均總延滯時間}} * \text{AI 時相秒數}$

[12] $\frac{\text{TOD 每秒平均總延滯時間}-\text{台19甲線每秒平均總延滯時間}}{\text{TOD 每秒平均總延滯時間}} * \text{AI 時相秒數}$

[13] 台86線每秒通過量 − (TOD 每秒通過量 * AI 時相秒數

[14] 台19甲線每秒通過量 − (TOD 每秒通過量 * AI 時相秒數)

其 Pearl 與 Q-Pensieve 搭配之最後訓練架構圖如圖 4 所示。

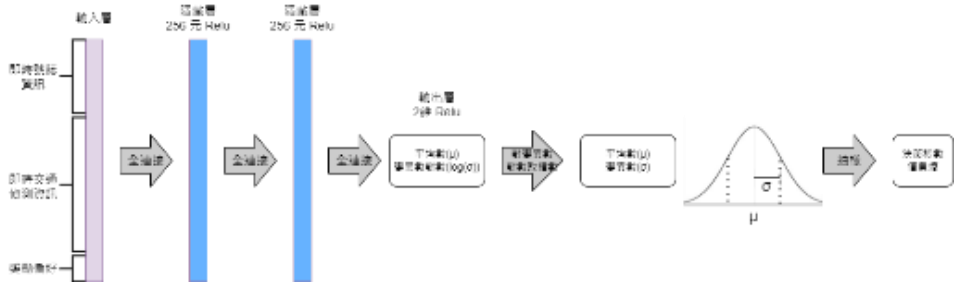


圖 3 神經網路架構圖

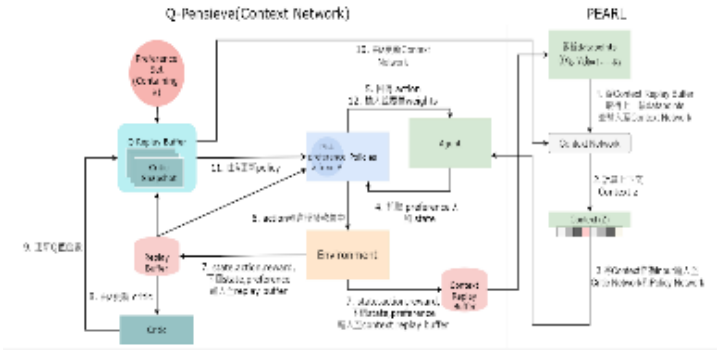


圖 4 Pearl 與 Q-Pensieve 訓練架構圖

(1) 輸入歷史資料與訓練資訊至 Context Network 之 Context Replay Buffer。

(2) 透過 Task Network 之神經網絡將各時段資料之狀態(state)、動作(action)、獎勵(reward)轉換並映射至隨機向量(latent vector)使其計算出不同任務(時段)之隱藏信息，如：時段特性、獎勵結構或動態分佈。所計算出之潛在變量為根據輸入資訊所推測出的時段向量(context_z)，該向量捕捉了當前任務的關鍵特徵。

(3) 關鍵特徵則於 Context Network 裡轉換，準備與代理人(agent)之狀態(state)進行互動產出其時段之週期與各時相秒數(action)。

(4) Policy Network 從模擬環境抓取狀態(state)與獎勵偏好(preference)並與時段向量(context_z)計算出其週期秒數與各時相秒數。

(5) 將模型決策回傳至代理人(Agent)。

(6) 將模型輸出輸入進模擬軟體產出下個環境(state)和獎勵(Reward)。

(7) 將此次環境(state)、動作(action)、獎勵(reward)和下個環境(state)梳理成數據資料(data transition)存進資料庫(replay buffer)。

(8) 上述步驟將重複直至資料庫含有一定數量後進行下一步。

(9) 從資料庫裡隨機選擇一定數量之環境(state)、動作(action)、獎勵(reward)和下個環境(state)給予 Critic Network 並評估產出此環境(state)策略預期價值(會有好有壞)。而後續將會持續更新和改進以更準確地估計此策略的預期價值。

(10) 而這價值係以 Q 值函數 Q(s,a)為輸出(output)，並儲存至另一資料庫(Q replay buffer)。Q replay buffer 將存取 Critic Network 所產出之 Q 值函數並以兩種資料：preference set(λ)、資料庫(replay buffer)之各種過去資料作為輸入。

(11) 從資料庫(replay buffer)裡隨機選擇一定數量的 experience，Q-replay buffer 會利用這些 Action 使用的 λ 和 preference set 抽取出不同 λ 產出不同的 Q 值函數來更新 Modulation Network 中的神經網並同時也用於更新代理人中的 Policy Network。

(12) 步驟十中的 Q 值函數也會用於更新代理人中的 Policy Network。

(13) 重複上述所有步驟直至模型收斂。

3.3 車流模擬環境構建

本研究以臺南市關廟區「台 86 線–19 甲線」單一路口作為實驗場域，透過現場偵測設備蒐集所需之交通調查資料，以號誌代理人透過與車流環境的互動，從經驗中學習出最佳化控制策略。

惟現實上無法允許模型直接在現場探索各種可能的控制策略，故須建置一套可供代理人探索各種策略組合可能性之環境進行模型訓練，因此利用 SUMO 車流模擬軟體建置整個實驗路網模擬環境，並透過 TraCI(Traffic Control Interface)工具包對運作中模擬即時的存取操作其中的各項設定與行為。因此可用於取得號誌、車輛狀態、偵測器數值等，亦可使用在動態控制號誌燈號，或是改變特定車輛的參數或行駛路徑等；讓代理人在車流模擬環境中，進行策略組合可能性之探索訓練，場域模擬建置如圖 5 所示。

為精進 AI 模型訓練成果，SUMO 模擬環境亦進行路網微調與校估作業，包括時制計畫更新、增加訓練資料量及交通量校估，其中交通量校估係為避免因數值於極大數值與極小數值狀況下造成偏誤，並呈現更客觀評估模擬與實際誤差狀況，校估指標採轉向交通量(流量)，計算方式為計算各方向、各轉向於 2 小時內通過 PCU 數量與實際調查值，以 GEH 統計量(Geoffrey E. Havers)做為衡量模型是否為良好適配指標，並參考美國內華達州運輸部門所建議做法，當 GEH 小於 10 視為車流模擬環境與實際現況具有一定相似程度，本 SUMO 模擬環境校估所有方向之 GEH 皆小於 10。



圖 5 研究場域之模擬環境

四、實驗場域與多任務強化學習模型實測成果

4.1 實驗場域特性

本研究對場域路口及周邊道路進行幾何及時制計畫調查，資料如下所述。

1. 道路特性

調查範圍道路包含台 86、19 甲、關廟交流道。其道路幾何特性資料彙整如表 3 所示，包含車道數、車道寬、分隔方式等。

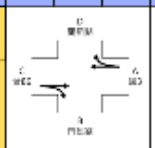
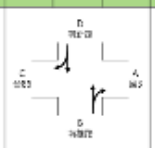
表 3 臺南市「台 86-19 甲」路口道路幾何特性

路名	道路類型	車道數	車道寬	分隔方式	車種管制
19 甲北向	一般道路	2+左轉袋+右轉槽化	4.0(直外)、3.5(直內)、3.3(左)、5.5(右)	實體分隔	內側禁行機車
19 甲南向	一般道路	2+左轉袋+右轉槽化	4.4(直外)、3.5(直內)、3.3(左)、5.5(右)	實體分隔	內側禁行機車
台 86	一般道路	2+2 左轉袋+右轉槽化	3.3(直外)、3.3(直內)、3.3(左外)、5.5(右)	實體分隔	內側禁行機車
關廟交流道	快速道路	2+2 左轉袋+右轉槽化	3.0(直外)、3.0(直內)、3.1(左外)、3.1(左內)、5.0(右)	實體分隔	內側禁行機車

2. 號誌時制計畫

表 4 節錄平日時段之台 86-19 甲線路口時制計畫內容，其上午晨峰及下午昏峰皆為五時相，且各分流方向不同；晨峰為進入國道三號方向，昏峰則反之。

表 4 臺南市「台 86-19 甲」路口平日時段時制計畫

時制	週期	時相1			時相2			時相3			時相4			時相5		
		G	Y	AR	G	Y	AR	G	Y	AR	G	Y	AR	G	Y	AR
0710~0800 0800~0930																
21	230	11	6	0	99	5	3	15	5	3	28	5	3	39	5	3
時制	週期															
0930~1600																
01	160	66	5	3	20	5	3	19	5	3	23	5	3			
時制	週期															
1600~1850																
06	240	10	6	0	100	5	3	24	5	3	30	5	3	38	5	3

本研究構建之多目標強化學習號誌控制模型透過前述所提之訓練架構，訓練 340,000 步後，觀察模型多目標每步損失函數之收斂程度，圖 6 代表各時段收斂圖，X 軸代表轉換每週期為一步，Y 軸則代表收斂幅度。

圖 6 顯示就整體趨勢而言，模型逐步整合四時段交通特性，Loss 於 200,000 步之後開始再度下降，最終在 250,000–340,000 區間趨於穩定並持續維持於較低值，顯示模型策略已逐漸收斂，具備較一致與可靠的決策能力。

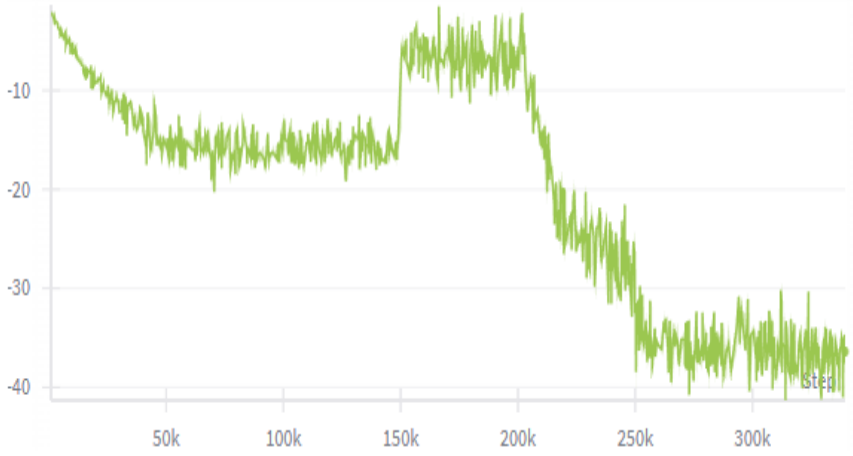


圖 6 臺南市實驗場域 Pearl 演算法收斂圖

4.2 多任務強化學習模型實測成果

多任務強化學習模型之實測成果，彙整如下：

1. 各時段績效表現
   (1) 平日晨峰於交通流量與趨勢相近，AI 號控正常運作情況下，旅行時間僅微幅增加 6 秒，路口平均延滯有效下降 1%，路口各方向停等車輛數則有效減少 10%以上之成效。
   (2) 平日離峰在交通流量與趨勢相近，旅行時間微幅提升但與動態 TOD 差異不大，路口平均延滯微幅劣化，服務水準仍維持 C 級之情況下，有效降低路口各方向停等車輛數。
   (3) 平日昏峰於實測期間之交通量高於事前 TOD 觀測日期之交通量約 500~700 輛車，在交通量較高、壅塞程度提升之情況下，旅行時間僅微幅增加 9 秒、路口平均延滯增加約 3 秒，劣化 3%，服務水準維持 C 級之情況下，仍有效降低路口各方向停等車輛數。
   (4) 假日昏峰於實測期間之交通量高於事前 TOD 觀測日期之交通量約 1,363 輛車，流量接近平日昏峰交通量；在交通量較高、壅塞程度提升之情況下，旅行時間接近平日昏峰之表現、路口平均延滯增加約 6 秒，劣化 19%，服務水準維持 C 級之情況下，仍有效降低路口各方向停等車輛數至少 15%以上。
2. 本研究透過單一多任務強化學習號誌控制模型，成功於都會區單一路口多時段之實測應用，依偵測器蒐集現場道路資訊、號誌資訊，AI 模型可自行辨識不同時段車流型態。
3. 各時段績效結果 AI 模型在車流浮動範圍(可接受範圍)內，旅行時間與路口平均延滯與動態 TOD 表現相似之表現下，降低各方向停等車輛數效果顯著，而其中以左轉保護時相之停等車輛數表現最明顯，幾乎所有方向之左轉停等車輛數皆有改善，顯示 AI 號控能即時反應實際需求給予適當綠燈秒數，增加紓解效率。
4. 本研究績效除透過人工調查至現場觀察 AI 模型運行狀況外，也透過 TomTom GVP 資料檢視路段之旅行時間與路口延滯。然依據調查人員實地觀察 AI 號控與動態 TOD 路口現況，發現 AI 號控運作時，路口每個方向每週期車隊已被紓解 80%以上，運行至時相秒數尾端車流因車間距拉大呈現自由流狀態，惟該成果 GVP 資料呈現效果不彰，推測造成該狀況因素包括：
   (1) 台 86/台 19 甲路口各方向皆具右轉專用，且右轉為自由右轉不受號誌控制、匯入主線位置靠近路口遠端，如圖 7 所示，當車流量較大之台 86

主線，有台 19 甲右轉車欲匯入時，主線車流速度明顯下降以保持安全距離，隨之可能影響包括車道空間未被有效利用、紓解效率下降、車隊回堵路口不淨空，造成 AI 模型產出部分綠燈秒數形成無效綠燈。



圖 7 台 19 甲右轉車匯入台 86 主線路況

(2) 臺南市實驗場域大型車比例高(表 5)，而大型車之特性包括起步延滯、駕駛反應時間所需作動時間較長，且對於道路運作之影響也較大，因此在本實驗場域大型車比例較高情況下，GVP 蒐集之資料易因大型車駕駛特性而影響。

表 5 臺南市實驗場域各時段大型車比例

號控類型	日期	平日晨峰	平日離峰	平日昏峰	假日昏峰
TOD	9/17(三)	19.1%	30.7%	15.6%	-
	9/18(四)	19.0%	29.0%	14.3%	-
	9/20(六)	-	-	-	9.0%
AI 號控	11/5(三)	19.8%	29.4%	13.1%	-
	11/6(四)	18.0%	29.6%	13.6%	-
	11/8(六)	-	-	-	8.5%

(3) GVP 之特性包括資料為部分即時、部分歷史蒐集之數據混合，以避免資料雜訊太多、受極端值影響；至於歷史資料與即時資料混合比例屬未公開資訊，本研究無法進一步確認造成 AI 號控實測以 GVP 計算之績效表現與現場觀察結果具差異原因。

5. AI 號控雖於旅行時間與路口延滯之績效表現不彰，經推測許多原因都可能導致這個結果，然本研究另規劃停等車輛數之交通調查與績效分析，採人工調查方式進行，詳實記錄實測當下狀況。AI 號控以最佳停等延滯做為獎勵機制，以停等車輛數調查進行分析，分析結果也顯示各方向直行、左轉車道停等車輛數，在實測期間有明顯下降趨勢，顯示在掌握各時段車流樣態與給予適當綠燈秒數之決策上，AI 號控已趨成熟。

五、歷年研究結果討論與發展建議

本研究延續 113 年「我國人工智慧車聯網之號誌控制(2/2)—匝道儀控與平面道路號誌協控實作」研究計畫(以下簡稱前期計畫)，並採用相同實驗場域，為臺南市「台 86 線－台 19 甲線」路段。以下說明前期計畫與本研究背景差異與各年度研究結果。

5.1 模型訓練背景差異

前期計畫之強化學習模型訓練受限於平日晨峰號誌時制組態變化與流量資料量不均，當時實施兩種不同號誌時制(四時相與五時相)，若直接將平日晨峰時段納入多任務訓練，將導致模型於同一任務中混淆不同時制特性，影響學習準確性與決策穩定性，故前期計畫針對平日晨峰建立獨立模型，以確保模型能專注學習其特定交通行為與控制策略；此外，若將平日晨峰、平日昏峰、平日離峰與假日昏峰等四個時段納入統一模型進行多任務訓練，將會因流量資料時長不一，導致樣本量失衡。係因平日晨峰實施兩種不同的號誌時制(四時相與五時相)，各時制僅得蒐集一小時流量資料，其餘三個時段(平日昏峰、平日離峰、假日昏峰)則各有兩小時資料，訓練時容易產生樣本抽取偏倚，使模型難以準確捕捉晨峰時段流量特徵，進而降低整體訓練穩定性與績效表現。為因應上述限制，前期計畫採取平日晨峰獨立訓練專屬模型，其餘三個時段(平日昏峰、平日離峰、假日昏峰)利用跨時段多任務分時段建模策略，以強化對不同時段車流模式與交通動態之適應能力，提升模型於異質性交通場景下泛化能力與穩健性。

經整體分析，前期計畫與本研究研究在號誌時制配置、交通流量狀態與模型訓練條件等層面，呈現明顯差異，亦反映出前期計畫於模型建構階段所面臨之挑戰。本研究彙整前期計畫面臨之限制條件，並說明本研究在交通環境與建模條件上具備之改善優勢。

1. 平日晨峰號誌時制調整

   目前該路口平日晨峰已全面改為五時相控制，消弭前期計畫時制不一致之問題，在四個時段(平日晨峰、平日昏峰、平日離峰與假日昏峰)皆能取得完整 2 小時的交通資料量作為訓練依據，有助於模型學習不同時段下之交通流量狀態。

2. 能以單一多任務模型進行跨四個時段的模型訓練

   因前期計畫晨峰時段有相異時制組態，需採用「晨峰專屬模型」與「跨時段多任務模型」分別建構方式進行訓練。然目前時制統一，

已具備使用單一多任務學習模型整合四個時段(平日晨峰、平日昏峰、平日離峰、假日昏峰)進行訓練條件，計畫模型將透過多任務架構自動判別四個時段特徵進行多任務模型學習。

3. 精進模型輸入的交通特徵

本研究嘗試於模型輸入更多交通特徵，包括分車道分車種(大型車、小型車、機車)之轉向量、停等車輛數與號誌狀態等，以豐富模型對於場域流量特性的辨識能力，並提高模型於不同交通流量下預測的準確性與穩定性。

4. 增加輸入的調查資料以提升各時段的交通樣態多樣性

前期計畫模型基於 1 平日與 1 假日調查資料建構模擬流量場景，本研究擴增為 10 平日與 4 假日的調查資料，大幅提高 SUMO 模型對實際交通情境之涵蓋範圍。流量資料擴增後，模擬場景能更準確呈現各時段之變異性與交通特徵，進而提高模型訓練績效。

5.2 各年度研究結果

近期人工智慧快速發展於各領域應用，在軟硬體技術上更是一大突破，可預期未來運用人工智慧、影像辨識、資通訊(ICT)、車聯網(V2X)與 5G 等技術，有助於紓緩因交通號誌控制智慧化不足。交通部運輸研究所於近年進行一系列智慧交通服務效能與安全車聯網研究計畫，針對我國都市交通號誌控制與車聯網整合部分優先探討，使各式車輛接收即時號誌動態資訊，以提供安全、優先通行與節能之道路交通環境。

本研究延續「我國人工智慧車聯網之號誌控制(2/2)-匝道儀控與平面道路號誌協控實作」研究計畫成果進行跨時段的人工智慧強化學習號誌控制模型發展，延續前期以強化學習(Reinforcement Learning, RL)為方法論與多目標 Q-Pensieve 演算法進行強化學習號誌控制模型優化，優化內容包括多目標獎勵(Reward)、不同的幹道與支道優先權重策略以及模型精進特徵。

1. 第一期：都會區幹道實作與交流道區域模式發展探討

(1) 文獻回顧與方法論

盤點與彙整國內外應用人工智慧強化學習(Reinforcement learning, RL)於號誌控制案例，包括交流道區域匝道儀控與平面號誌之協控，以及演算法之應用。本研究採用在連續動作控制領域裡先進之多目標強化學習方法 Q-Pensieve，可視為多目標強化 SAC 演算法，並針對 Q 值估算進行加強，啟用與 SAC 相同模型，並繼承 SAC 優點，除增加策略探索性與隨機性，確保了策略成長性和支持離線策略學習，也透過知識共享，有效率解決多目標強化學習效能議題。

(2) 都會區幹道強化學習號誌控制探討

計畫所提出人工智慧強化學習號誌控制模型可依據各路口各方向交通變化，即時計算下階段號誌時制內容；以臺南市「台 86-19 甲」單一路口為例，即時計算下一個時相號誌綠燈秒數，以共同號誌週期長度與不同時比方式來進行動態調整，兼顧車流續進。臺南場域 AI 依據不同偏好進行決策，且在各個時段均能產生一組偏好，大部分績效較固定時制佳；另多目標 AI 模型即使在不同時段與時制組態之情況共同訓練，仍有正向績效。

2. 第二期：匝道儀控與平面道路號誌協控實作

(1) 強化學習號誌控制模型優化

延續第一期計畫成果，持續發展車聯網與人工智慧強化學習之號誌控制模擬環境。為了確保評估方案與現實交通環境能有相同的表現行為，對於 SUMO 模擬模擬環境之時制計畫、流量及轉向量、路網幾何、參數進行調整後進行重新校估，採用 GEH 統計量(Geoffrey E. Havers)來做為衡量模型是否為良好適配的指標

表 6 第二期 AI 強化學習模型設計

	Context Network (Q-Pensieve)	Task Network (PEARL)
定義	該時段每個週期之內容	週期結束時存取於 Context Replay Buffer 與 Q-Pensieve Replay Buffer 中的各時段資訊
代理人數量	1	1
輸入	號誌資訊：上個週期之路口週期秒數及各時相秒數	號誌資訊：隨機取樣出各時段兩小時每週期之路口週期秒數及各時相秒數
	道路資訊：各分相結束時分車道分車種(大/小/機車)停等車輛數及總車輛數	道路資訊：隨機取樣出各時段兩小時每週期各分相結束時分車道分車種(大/小/機車)停等車輛數及總車輛數
輸出	下個週期 AI 控制路口之週期秒數及時相比例	判別之時段模型參數(context_z)
決策頻率	週期結束時決策	週期結束時決策
獎勵目標	台 86 線延滯數量與固定時制之變化值	台 86 線延滯數量與固定時制之變化值
	台 19 甲線延滯數量與固定時制之變化值	台 19 甲線延滯數量與固定時制之變化值
	台 86 線通過量與固定時制之變化值	台 86 線通過量與固定時制之變化值
	台 19 甲線通過量與固定時制之變化值	台 19 甲線通過量與固定時制之變化值
權重設定	向量組合：[幹道延滯，支道延滯，幹道通過量，支道通過量] 1.偏重幹道：[0.4, 0.1, 0.4, 0.1] 2.偏重通過量：[0.1, 0.1, 0.4, 0.4,] 3.偏重支道：[0.1, 0.4, 0.1, 0.4] 4.偏重延滯：[0.4, 0.4, 0.1, 0.1]	

(2) 強化學習號誌控模型實測結果

臺南場域實施 AI 號控後之事後平、假日績效表現整體優於事前，尤以假日績效改善最為明顯。顯見現行臺南場域實施動態 TOD 控制以具提升該路口運轉效率，但本計畫測試之 AI 號控為藉由上個週期收集到的場域路口資訊，產出下一週期分相時比，其控制效果能更貼合時時的車流變化。

3. 本期：人工智慧號誌控制精進-多任務強化學習

(1) 多任務強化學習號誌控模型精進與優化

AI 模型架構為 Pearl with Q-Pensieve，分為兩種網路架構個別處理任務目標，其中 Pearl(Context Network)負責讓模型學習各時段時制型態特性，區分不同時段模式，而學習後資料由 Q-Pensieve 使 AI 模型得以在每一分相結束時接收當前路口交通特徵(轉向流量、停等車輛數、號誌狀態)，立即預測符合該時段下一個分相秒數。

為求模型訓練之基本條件更完善，增加流量調查資料有助於提升模型對不同車流模式之適應能力。此外，特徵設計將綠燈秒數與轉向量與車流累積狀態隱含在可觀測之交通操特徵中，透過轉向量與停等車輛數讓模型從車流現象中反映時制秒數，使模型能夠學習相位秒數、車流累積狀態與秒數配置之隱性特徵，使模型在多任務環境下，更能有效學習不同時段的交通模式差異。臺南市實驗場域跨時段之 AI 模型訓練結果，就整體趨勢而言，模型逐步整合四時段交通特性，模型策略收斂，具備較一致與可靠的決策能力。

表 7 本期 AI 強化學習模型設計

模型架構	PEARL	Q-Pensieve
定義	收集 sumo 模擬環境中各時段的狀態 (state)、動作 (action)、獎勵 (reward)，並轉換映射至潛在向量 (latent vector)，此向量能夠代表不同任務(時段)的特徵	依據 sumo 模擬環境及時的狀態 (state)、獎勵偏好 (preference)與 PEARL 所產生的各時段潛在向量 (latent vector)，計算出各時相秒數
輸入模型特徵 (state)	號誌資訊: 綠燈相位的號誌狀態 **(新增)** 道路資訊: 分相的分車種(大車/小車/機車)轉向量 分相結束時的停等車輛數 **(新增)**	
獎勵目標 (reward)	台 86 延滯數量與固定時制之變化值 台 19 甲延滯數量與固定時制之變化值 台 86 通過量與固定時制之變化值 台 19 甲通過量與固定時制之變化值	
獎勵偏好權重 (prefer-ence)	組合：[幹道台 86 延滯，支道台 19 甲延滯，幹道台 86 通過量，支道台 19 甲通過量] 方案一 偏重延滯：[0.4, 0.4, 0.1, 0.1] 方案二 偏重通過量：[0.1, 0.1, 0.4, 0.4,] 方案三 偏重幹道：[0.4, 0.1, 0.4, 0.1] 方案四 偏重支道：[0.1, 0.4, 0.1, 0.4] 方案五 平均：[0.25, 0.25, 0.25, 0.25] 方案六 偏重支道台 19 甲延滯：[0.05, 0.8, 0.05, 0.1] **(新增)**	

在 SUMO 車流模擬環境部分，目前臺南市實驗場域晨峰兩種時制由原先四時相與五時相的組合，已改成五時相，除重新蒐集相關交通統計資料(包括 10 天平日與 4 天假日)，並針對 SUMO 模型軟體建置模型運用號誌時制、流量、轉向比例等予以調整及校估。另外，除上述項目調整，仍透過現地調查檢視車流模擬運行狀況，並進行路網微調，以期車流模擬環境可完整還原實地車流狀況。

(2) 多任務強化學習號誌控制實測結果

透過多任務強化學習號誌控制模型，成功於都會區單一路口多時段之實測應用，依偵測器蒐集現場道路資訊、號誌資訊，AI 模型可自行辨識不同時段車流型態。雖 AI 號控於旅行時間與路口延滯之績效表現不彰，經推測許多原因都可能導致這個結果，不過停等車輛數之交通調查與績效分析，採人工調查方式進行，詳實記錄實測當下狀況。

AI 號控以最佳停等延滯做為獎勵機制，在實測期間停等車輛數有相應下降趨勢，顯示掌握各時段車流樣態與給予適當綠燈秒數決策上 AI 號控已趨成熟。

4. 各年度實驗績效

本期計畫承接前期歷年研究成果，並持續針對模型穩定性與效能進行優化，使多任務強化模型於不同時段(晨峰、昏峰、離峰及假日)皆展現良好表現。結果顯示通過車輛數逐年提升、總旅行時間延滯持續下降，平均延滯秒數與服務水準亦同步改善，充分驗證本計畫所提出模型之成熟度與實務應用潛力。

表 8 歷年績效表現彙整表

時段	鄰近路口方向	方向	通過車輛數 (輛/小時)			總旅行時間延滯 (小時/秒)			平均延滯(秒)&服務水準					
			一期	二期	本期	一期	二期	本期	一期		二期		本期	
平日晨峰0700-930	關廟交流道往台86	↙	827	746	1010	1311	915	752	54.6	D	38.1	C	31.3	C
	南雄路二段往關新路一段	↖	831	744	1790	1853	1059	1027	77.2	E	44.1	C	42.8	C
	台86往關廟交流道	↗	1541	1490	1530	2467	1943	528	102.8	F	81	F	22	B
	關新路一段往南雄路二段	↘	976	604	993	2621	1492	966	109.2	F	62.2	E	40.2	C
路口整體平均表現			1044	896	1331	2063	1352	818	83.5	F	57.4	D	34.1	C
平日離峰1230-1430	關廟交流道往台86	↙	770	652	545	288	1662	719	36	C	69.3	E	30	B
	南雄路二段往關新路一段	↖	576	471	916	478	740	1000	59.8	D	30.8	C	41.7	C
	台86往關廟交流道	↗	805	894	475	462	693	322	57.8	D	28.9	B	13.4	A
	關新路一段往南雄路二段	↘	636	481	874	788	786	907	98.5	F	32.8	C	37.8	C
路口整體平均表現			697	624	703	504	970	737	57.6	D	43.3	C	30.7	C
平日昏峰1630-2030	關廟交流道往台86	↙	1441	2219	1046	883	1158	861	36.8	C	48.2	D	35.9	C
	南雄路二段往關新路一段	↖	952	1138	1560	1678	1628	1048	69.9	E	67.8	E	43.7	C
	台86往關廟交流道	↗	991	1944	704	1797	2203	570	74.9	E	91.8	F	23.8	B
	關新路一段往南雄路二段	↘	1161	1239	1783	3023	2124	1019	126	F	88.5	F	42.5	C
路口整體平均表現			1136	1635	1273	1845	1778	874	69.9	E	72.7	E	36.4	C
假日昏峰1630-2000	關廟交流道往台86	↙	767	1215	749	909	1346	828	48.4	D	56.1	D	34.5	C
	南雄路二段往關新路一段	↖	642	716	1577	1521	1584	1030	80.7	F	66	E	42.9	C
	台86往關廟交流道	↗	875	1124	613	2241	1704	634	111.9	F	71	E	26.4	B
	關新路一段往南雄路二段	↘	736	709	1766	2073	1645	960	108.5	F	68.5	E	40	C
路口整體平均表現			755	941	1176	1686	1570	863	85	F	64.8	E	36	C

5.3 後續發展建議

多任務強化學習模型透過上下文編碼與潛在向量，可即時辨識交通變化並動態調整號誌策略，使其能在單一模型下同時處理晨峰、昏峰、離峰與假日昏峰等不同車流模式，而不需維護多套時制計畫。尤其位於都會幹道、快速道路匝道銜接路口、交通流向變化大之廊道、鄰近大型設施之活動型路口等情境下，多任務強化學習的自適應機制能比 TOD 更有效率、更精準地反映實際交通需求，並即時產生具反應性的綠燈秒數配置。因此，多任務強化學習模型特別適用於車流波動大、需求不確定性高、模式變化具時段性或事件性之場域；本次臺南台 86 台 19 甲路口場域雖提供示範基礎，未來若導入動態變化程度更高的路口，將更能展現該模型於時段切分細碎、交通量變化大、時相變化性高之地點在號誌控制上的優勢。

整體而言，本期結果顯示強化學習模型在臺南實驗場域已經可以依即

時車流狀況，並配合時制計畫分配適當的秒數，有一定貼合路況需求之能力，但同時也顯示模型的訓練成果會因為道路幾何、車流模式及時制計畫等基礎條件不同，致使訓練完成後的模型本身無法直接移植至其他路口。然而，建模方法、特徵工程設計、資料校估程序以及多任務訓練架構等技術均具有高度可複製性，未來應以此為核心推動跨場域應用。以下將針對模型面、資料面、設備面進行後續發展說明。

1. 模型面

未來應持續深化演算法的變數設計，使其能處理更具複雜度的交通控制情境，例如將時制計畫調整、時相順序變動、鄰近路口群組控制、時差續進設定納入模型可調整之變數，使 AI 號誌控制具更高的彈性與適用性。本期多任務強化學習模型已可學習掌握四個不同時段車流的交通特性，惟在訓練的績效結果上仍有小部分美中不足在於路口通過量偶有略低於 TOD 之狀況，未來應進一步精進嵌入向量、時段潛在向量及獎勵偏好設計，提升模型辨識不同交通型態的能力。

強化學習模型學習內容極度依賴場域本身的道路幾何、流量模式、車種比例及時相結構，因此模型權重無法直接套用到其他路口。然而，本期模型的訓練邏輯與技術方法具備可複製性，未來新場域可依循相同特徵建置，建構出該場域專屬之多任務模型。

2. 資料面

未來於模型訓練建議納入行人安全之資訊，例如行人穿越量、行人專用時相、右轉車輛受行人影響之延滯變化等資料，皆為都市號誌控制的重要決策因素，使模型能兼顧交通效率與行人安全。此外，資料品質將直接影響模型輸入特徵之可靠性，因此須持續提升偵測器精準度、減少遮蔽與死角、提高回傳穩定度並降低資料遺失率，同時也需蒐集事故、惡劣天候、特殊活動等交通情境資料，強化模型對異常交通狀態之辨識能力。

3. 設備面

實測經驗顯示路側設備穩定性與即時性對 AI 模型運作至關重要。未來可持續提升路側偵測設備之準確度，包括對時確保偵測設備與現場時間一致、提升感測器對雨天、夜間與逆光的車種辨識能力以降低特徵誤差、控制器韌體更新至具逐秒控制能力之版本、建立資料缺漏與設備斷線之處理機制，以確保 AI 控制邏輯在實際場域可長期穩定運作。

本計畫模型如應用於其他場域，需視場域之道路幾何、轉向模式、車道配置與交通需求之相似度而定，尚無法直接套用。若場域條件接近，例如車道數、時制計畫與轉向比例相近者，可透過微調後進行

移植；若差異較大，則需重新蒐集該路口之交通資料並重新訓練模型。SUMO 模擬環境亦需透過 GEH 指標之校估流程進行調整，確保模擬與實際交通情境一致。雖 AI 模型本身無法直接跨場域移植，但建模方法具有高度可複製性，未來可透過建立跨場域導入標準，包括資料調查規格、校估程序、特徵建置方式、模型訓練流程與統一設備介面，逐步推動多場域應用，形成具普適性 AI 號誌控制框架，提升都市路網交通效率與交通安全。

參考文獻

[1] Shen Y. (2018), “An Optimization Model of Signal Timing Plan and Traffic Emission at Intersection based on Synchro,” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 189.

[2] 田永平 (2006)，號誌路口時制轉換時段長度之模擬研究，交通大學運輸科技與管理學系碩士論文。

[3] 江伊嵐、陳奕廷、葉梓銓 (2020)，「智慧型動態交通號誌控制系統－應用於台北市重點壅塞區域」，土木水利會刊，第四十七卷第四期，頁20-27。

[4] 陳麗雯、胡大瀛 (2020)，「都市幹道連鎖時制設計之研究與實例分析」，土木水利會刊，第四十七卷第四期，頁40-50。

[5] Noaeen, M., Naik, A., Goodman, L., Crebo, J., Abrar, T., Abad, Z. S. H., Bazzan, A. L. C., and Far, B., (2022), “Reinforcement Learning in Urban Network Traffic Signal Control: A Systematic Literature Review,” Expert Systems with Applications.

[6] 黃業傑、許添本、謝秉均、蕭偉政、董尚義、陳煒騰、吳承庭、林睿哲、吳東凌、周家慶 (2023)，「應用多目標深度強化學習於號誌控制策略–都會區幹道發展與探討」，中華民國112年運輸學會學術論文研討會論文集第六冊，頁604-628。

[7] Hung, W., Huang, B. K., Hsieh, P. C., and Liu, X. (2023), “Q-Pensieve: Boosting Sample Efficiency of Multi-Objective RL Through Memory Sharing of Q-Snapshots,” International Conference on Learning Representa-tions (ICLR).

[8] Silver, D., Lever, G., Heess, N., Degris, T., Wierstra, D., and Martin R. (2014), “Deterministic Policy Gradient Algorithms,” In International Conference on Machine Learning.

[9] Gupta, J. K., Egorov, M., and Kochenderfer, M. (2017), “Cooperative Multi-agent Control using Deep Reinforcement Learning,” Autonomous Agents and Multiagent Systems, Vol. 10642, pp. 66-83.

[10] Li, S. (2020), “Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient for Traffic Signal Control on Urban Road Network,” 2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA).

[11] Schulman, J., Wolski, F., Dhariwal, P., Radford, A., and Klimov, O. (2017), “Proximal Policy Optimization Algorithms,” Machine Learing.

[12] Haarnoja, T., Zhou, A., Abbeel, P., and Levine, S. (2018), “Soft Actor-critic: Off-policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor,” Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning, pp. 4522-4531.

[13] 許添本、黃建皓 (2022)，「深度確定性策略梯度法建構幹道即時號誌控制系統」，中華民國111年運輸學會學術論文研討會論文集，頁1-26。

[14] 許添本、程楷祐 (2020)，「以深度強化學習方式建構混合車流之 AI 最佳化號誌時制計畫」，中華民國109年運輸學會學術論文研討會。

[15] Hu, Z. and Ma, W. (2024), “Demonstration-guided Deep Reinforcement Learning for Coordinated Ramp Metering and Perimeter Control in Large Scale Networks,” Transportation Research.

[16] Lu, C., Huang, J., Deng, L., and Gong, J. (2017), “Coordinated Ramp Metering with Equity Consideration using Reinforcement Learning,” Journal of Transportation Engineering Part A: Systems, Vol. 143, No. 7.

[17] Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H., and Blosseville, J.-M. (1991), “ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-ramp Metering,” Trans-portation Research Record, Vol. 1320, No. 1, pp. 58-67.

[18] 許添本、陳又均 (2022)，「應用多代理深度強化學習於高速公路主線及匝道聯合儀控策略—以國道5號為例」，中華民國111年運輸學會學術論文研討會論文集，頁94-115。

[19] 宋太龍、郭明洋、陳一凡、賀玉龍 (2024)，「基於 A2C 的匝道相連交叉口信號控制優化」，深圳大學學報理工版，第四十一卷第二期。

[20] 胡大瀛、謝宜庭、李卓育 (2022)，「深度強化學習下匝道儀控的獎勵機制之分析」，中華民國111年運輸學會學術論文研討會論文集，頁194-219。

[21] Yang, G., Sun, Y., and Narasimhan, S. G. (2019), “Critic-Aware Multi-Modal Planning for Heterogeneous Multi-Robot Systems,” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5837-5843.

[22] 黃業傑、黃祖瑜、郭哲維、林小淳、謝秉均、董尚義、吳東凌、周家慶 (2024)，「應用多任務深度學習模型整合多時段於都會區號誌控制策略」，中華民國113年運輸學會學術論文研討會論文集第五冊，頁45-71。

[23] 周家慶、蕭偉政、許添本 (2010)，標準化都市交通管理之通訊協定研發(二)，交通部運輸研究所合作研究計畫期末報告(編號：99-IDB006)。

臺北市交通安全促進會個人入會申請書

<table>
<tr><td>會員編號</td><td colspan="2"></td><td>填表日期</td><td colspan="2">年　月　日</td></tr>
<tr><td colspan="6">本人經本會會員　　介紹，願參加　貴會為會員，遵守會章一切規定，謹附履歷如下，敬請准予入會。
申請人：</td></tr>
<tr><td>姓名</td><td colspan="2"></td><td>申請類別</td><td colspan="2">□ 一般會員
□ 永久會員</td></tr>
<tr><td>出生日期</td><td colspan="2">年　月　日</td><td>性別</td><td colspan="2">□男　□女</td></tr>
<tr><td rowspan="4">通訊地址</td><td rowspan="2">辦公</td><td rowspan="2"></td><td>公司電話</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>傳真電話</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">住家</td><td rowspan="2"></td><td>住家電話</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>行動電話</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">最高學歷</td><td colspan="2">校 (院) 名</td><td>科 (系) 別</td><td>學位名稱</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>現職</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="3">經歷</td><td colspan="2">機關單位</td><td>部門</td><td colspan="2">職稱</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>會員委員會審核意見</td><td colspan="2"></td><td>主任委員簽章</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

有意申請加入本會為會員者，請填妥申請書後逕傳真：(02)2764-7215

台北市交通安全促進會，聯絡人：施仕青小姐；電話：(02)2748-5280