

出國報告（出國類別：開會）

參加 2026 年國際隧道工程學會研討會

服務機關：交通部高速公路局

姓名職稱：陳宏仁副局長

派赴國家/地區：加拿大

出國期間：115.5.15~115.5.23

報告日期：115.7.31

行政院及所屬各機關出國報告提要

系統識別碼：C11500802

頁數：27

附件：無

出國報告名稱：參加 2026 年國際隧道工程學會研討會

出國計畫主辦機關：交通部高速公路局

出國人員：陳宏仁

出國類別：開會

出國地區：加拿大蒙特婁

出國期間：115 年 5 月 15 日至 5 月 23 日

報告日期：115 年 7 月 31 日

分類號/目：交通建設/交通運輸

關鍵詞：國際隧道工程學會、ITA、2026WTC、隧道

內容摘要：國際隧道工程學會(ITA)每年均舉辦世界隧道研討會(World Tunnel

Congress)，今年(2026)於 5 月 15 至 21 日在加拿大蒙特婁舉行，本次研討會主題為「Connecting Communities through Underground Infrastructure」(透過地下基礎設施連結社區)，會中針對新科技、施工材料與施工方法等議題在隧道工程中的應用安排多場演講，介紹各國目前在隧道工程方面的發展與應用狀況。大會並在研討會最後 1 天安排工程參訪行程。本報告綜整參加本次研討會之過程與見聞，將會議期間所參與之專題演講、技術論文發表、講者案例分享、展覽廠商資料、工程參訪施工經驗等，分述於前言、行程紀要、會議過程、工程參訪等章節，並於最後提出心得與建議，作為國內未來公共工程興建隧道工程之參考。

目錄

行政院及所屬各機關出國報告提要.....	1
目錄.....	2
圖目錄.....	3
表目錄.....	4
壹、前言.....	5
一、目的.....	5
二、會議主題.....	6
三、會議地點.....	7
四、行程紀要.....	8
貳、過程.....	9
一、開幕式.....	9
二、專題演講(Keynote Speech).....	9
三、技術論文發表.....	13
四、廠商展覽.....	19
參、工程參訪.....	23
一、Louis-Hippolyte-La Fontaine 隧道修復工程.....	23
肆、心得及建議.....	27

圖目錄

圖 1	臺灣參加人員合影.....	6
圖 2	蒙特婁區位圖.....	7
圖 3	蒙特婁會議中心位置圖.....	7
圖 4	講者 Dr. Karina Lange	10
圖 5	芬蘭核廢料處置地下洞道規劃.....	10
圖 6	瑞典核廢料洞室儲存概念.....	10
圖 7	講者 Remo Grandori	10
圖 8	在義大利同時參與 41 部 TBM 施工.....	11
圖 9	最適潛盾機選擇的要素 (鏡面穩定、地盤擾動、瓦斯、受壓水層).....	11
圖 10	潛盾選擇之關鍵因素考量 (黏土/效率/複合式土層之軟硬岩施工).....	11
圖 11	瓦斯地層之潛盾機設計除須注意通風外尚需增設專管抽排氣體.....	11
圖 12	採綠電為動力整合施工的潛盾機避免空汙.....	11
圖 13	潛盾機自動化大量整合以提升施工功率與效能.....	11
圖 14	潛盾機最佳施工進尺為 582m/月(每月平均為 382m/月，19 環/天).....	12
圖 15	DUAL MODE TBM 潛盾機施工功率與效能高.....	12
圖 16	海瑞克於軟弱土層之多面向潛盾機.....	12
圖 17	潛盾機遭遇特殊地質環境須合作始能成功.....	12
圖 18	潛盾機大型化、量身訂做、智慧化、自動化.....	12
圖 19	潛盾機 AI 化.....	12
圖 20	潛盾機與展望.....	12
圖 21	講者 Larry Beasley.....	13
圖 22	營運中隧道雨後滲漏異狀.....	13
圖 23	隧道水文地質解析與滲漏研判.....	13
圖 24	營運中隧道雨後滲漏異狀.....	14
圖 25	隧道水文地質解析與滲漏研判.....	14
圖 26	透地雷達訊號精細化解析.....	15
圖 27	工作井出入管制人臉識別.....	15
圖 28	即時出土重量感測.....	15
圖 29	倍思特工程顧問公司李佳翰博士論文發表.....	16
圖 30	潛盾上下近接施工掘進.....	17
圖 31	地表沉陷監測大致良好.....	17
圖 32	壓密沉陷介於 1~2mm.....	17
圖 33	地中體積沉陷估算.....	17
圖 34	車站結構建立 BIM 模型.....	17
圖 35	BIM 界接結構分析程式解算.....	17
圖 36	不同模型解算做最佳化配筋.....	17

圖 37	潛盾控制要因.....	17
圖 38	TBM 壓力控制及表現.....	18
圖 39	淺覆蓋(<1.5D)之 TBM 表現.....	18
圖 40	目前開挖之施工流程.....	18
圖 41	未來施工開挖自動化(鹿島).....	18
圖 42	隧道開挖出土自動化.....	18
圖 43	隧道噴凝土施工自動化.....	18
圖 44	新加坡隧道及環境建物敏感.....	18
圖 45	EPB 出土量比較.....	18
圖 46	TBM 出土量管理系統.....	18
圖 47	TBM 出土量管理成果彙總.....	18
圖 48	本屆參展廠商.....	19
圖 49	本屆主要贊助廠商.....	20
圖 50	展場(1).....	20
圖 51	展場(2).....	20
圖 52	展場(3).....	20
圖 53	蒙特婁捷運藍線延伸工程廣告.....	20
圖 54	展場海瑞克攤位.....	20
圖 55	展場海瑞克攤位潛盾機模型.....	20
圖 56	BROKK®遙控拆除機器人.....	21
圖 57	Normet 公司隧道用噴漿機.....	21
圖 58	隧道掘進管理系統(GAMUDA).....	21
圖 59	Sica 介紹新材料.....	21
圖 60	FAMA 環片 5 道止水.....	22
圖 61	GINA 止水接頭.....	22
圖 62	隧道平面、縱斷面、3D 剖面示意圖及興建照片(網路資料).....	23
圖 63	隧道異狀照片(Habimana et al., 2023).....	24
圖 64	利用 FLAC 3D 模型評估橫向預力鋼索的損壞情況(Habimana et al., 2023).....	24
圖 65	參訪工程施工情形.....	26

表目錄

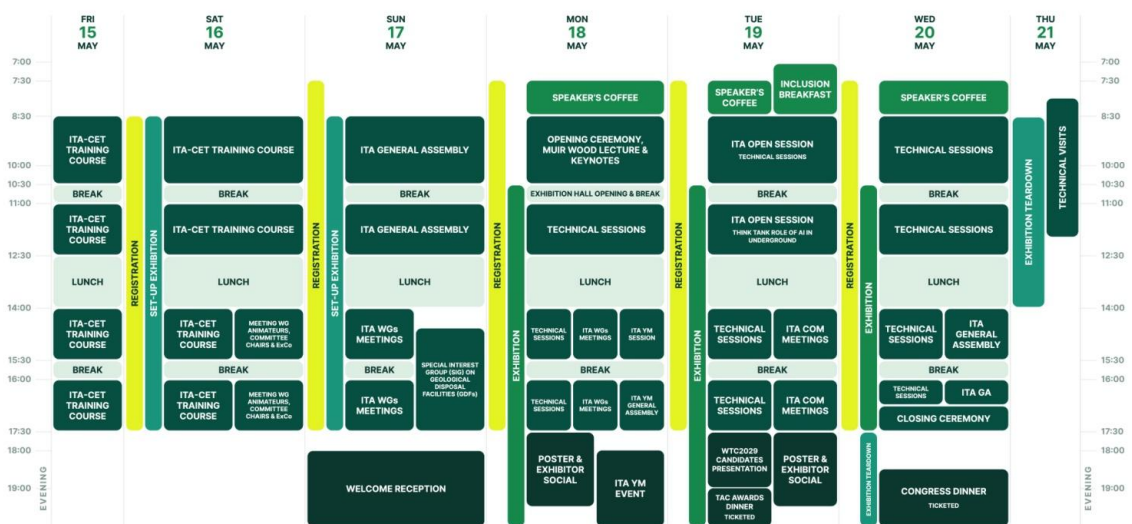
表 1	WTC2026 世界隧道研討會議程表.....	5
表 2	出國行程表.....	8

壹、前言

一、目的

國際隧道工程協會(International Tunnelling and Underground Space Association, ITA) 每年舉辦一次的世界隧道研討會(World Tunnel Congress, WTC)，為國際間隧道領域之年度盛會，2026 年世界隧道研討會(World Tunnel Congress 2026)於 5 月 15~21 日在加拿大蒙特婁(Montréal)隆重舉行，主要邀集加、美、日、德、義等國之產、官、學界人員共同參與，探討隧道與地下工程領域之最新技術發展與未來趨勢，參與之大學院所及相關企業的專家及學者計有 40 餘國、600 餘人。研討會內容包含：培訓課程、專題演講(Keynote Speech)、技術論文(包括口頭發表及海報張貼)、廠商展覽、及工程參訪等(詳表 1)。

表 1 WTC2026 世界隧道研討會議程表



本次研討會由中華民國隧道協會組團，除筆者奉派代表高公局參加外，包含有臺灣大學土木系王泰典教授、雲科大營建系郭治平副教授、中興大學水保系邱雅筑助理教授、公路局林聰利副局長等 4 人、桃園市政府水利局陳文龍主秘及捷運工程局等 5 人、臺北自來水事業處工程總隊廖信誠主秘等 2 人、台灣世曦工程顧問公司周永川協理等 2 人、中興工程顧問公司李榮瑞經理等 2 人、亞新顧問公司周忠仁協理、倍思特顧問公司李佳翰總經理、黎明顧問公司黃貞凱董事長等 3 人、福清營造公司江國權總經理等 3 人、安石公司柳厚安總經理等，總計有 28 人與會(如圖 1)。



圖 1 臺灣參加人員合影

二、 會議主題

本次大會主題為「Connecting Communities through Underground Infrastructure」(透過地下基礎設施連結社區)，代表地下工程不只是挖隧道，而是城市韌性(Resilience)、永續發展(Sustainability)、能源轉型(Energy Transition)、都市發展(Urban Development)的重要設施，論文主題涵蓋隧道和地下工程領域的廣泛議題，包括：

1. 契約實務、保險和風險管理
2. 地下空間規劃與利用
3. 場地勘察與地質特徵分析
4. 複雜條件下的常規隧道施工
5. 開挖順序與新奧工法(NATM)
6. 複雜條件下的機械化隧道施工
7. 沉埋隧道
8. 洞室和發電廠
9. 小口徑隧道

- 10.豎井設計
- 11.支撐與襯砌設計
- 12.灌漿/地下水控制與防水
- 13.儀器儀表、監測與遙感
- 14.運行/偵測/維護與修復
- 15.隧道安全
- 16.創新隧道技術
- 17.人工智慧與機器學習
- 18.機器人與自動化
- 19.數位化與資訊科技
- 20.隧道領域的公平/多元與包容
- 21.永續發展/淨零排放

三、 會議地點

本次研討會選在加拿大蒙特婁市的會議中心舉辦，該市是魁北克省的最大城、加拿大第二大城及北美第十五大城(如圖 2、3)，位於魁北克西南部聖羅倫斯河與渥太華河匯流處的蒙特婁島，距離首都渥太華以東約 190km，距魁北克首府魁北克市約 260km，距安大略省首府多倫多東北 539km。該市位處五大湖至大西洋航道的咽喉，獨特的地理位置造就了蒙特婁發達的海運，且是世界上最大的內陸港。



圖 2 蒙特婁區位圖

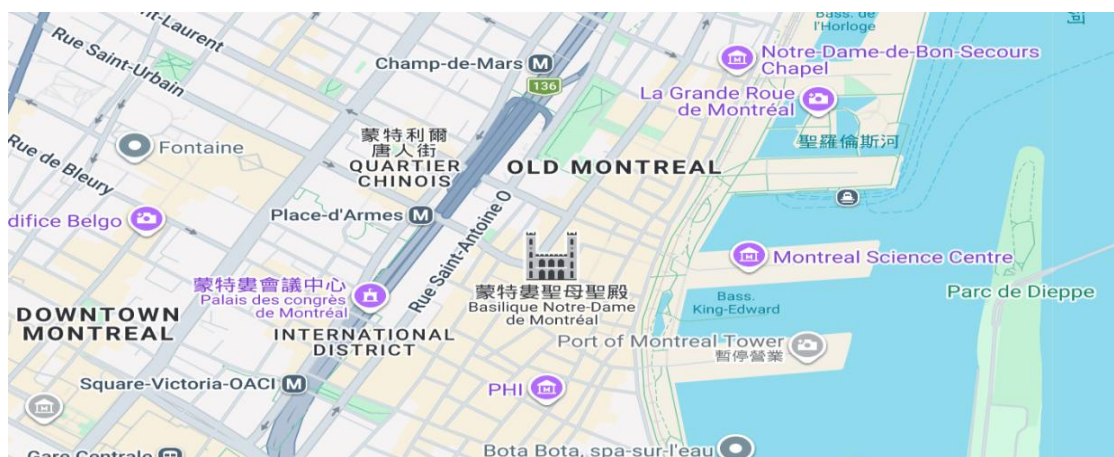


圖 3 蒙特婁會議中心位置圖

四、 行程紀要

本次出國行程自 115 年 5 月 15 日至 5 月 23 日，包含往返交通時間共 9 天，除參加專題演講各相關場次論文發表外，並參加大會所安排的工程參訪行程，行程整理如表 2 所示。

表 2 出國行程表

日期	地點	活動內容
5 月 15 日	桃園→蒙特婁	去程
5 月 16、17 日	蒙特婁	參觀市區交通建設及報到
5 月 18~20 日	蒙特婁	參加大會開幕式、專題演講、論文發表及廠商展覽
5 月 21~23 日	蒙特婁→桃園	工程參訪及回程

貳、過程

本次研討會議程包括開幕式、專題演講(Keynote Speech)、技術論文發表(包括口頭發表及海報張貼)、廠商展覽、及工程參訪等，詳述如下：

一、開幕式

主席致詞歡迎來自全球的隧道及地下工程領域的專家齊聚蒙特婁，加拿大很榮幸舉辦 WTC2026，提供國際交流平台，期望促進跨國合作與知識分享。加拿大是擁有全球最先進隧道工程技術的國家之一，大多數主要城市不僅擁有隧道交通系統，更多城市公用設施依賴隧道；鐵公路隧道不僅打通了洛磯山脈(Rocky Mt.)連接各地區，加拿大的水力發電設施也為該國的綠色能源轉型做出重大貢獻。

加拿大近期完成了許多隧道工程項目，從尼加拉水力發電引水隧道工程(Niagara Tunnel Facility Project)，使用世界最大的岩石隧道掘進機(直徑 14.4m TBM)，再到分別在曼港輸水隧道和Second海峽供水隧道突破土壓平衡式(EPB)和泥漿加壓隧道掘進技術的極限。加拿大未來之隧道工程產業將繼續發展壯大，並始終處於隧道技術的前端。

蒙特婁以其地下路網(「Le Montréal souterrain」-串聯蒙特婁市中心的重要設施)而聞名，另擁有可追溯到 1912 年 7 月開工長達 5km 的皇家山隧道。該隧道在經歷了第一次世界大戰和西班牙流感造成的延誤後，於 1918 年 10 月 21 日正式通車。近期蒙特婁正經歷著穩定且不斷增長的地下工程數量，部分原因是人們對擴展現有公共交通網絡和更新現有供水和污水處理基礎設施的需求。

另一方面，基礎設施老化以及為符合新的消防安全要求，現有地鐵系統和公路隧道都需要進行大規模的改造，加拿大的隧道工程目前隨著各行業的發展而持續推動。隨著人口的成長，除供水和污水處理基礎設施、城市快速公車系統以及連接社區的公路交通系統；還需要建設輸送自然資源(採礦、石油和天然氣)和能源(水力發電、核能)等基礎設施。

二、專題演講(Keynote Speech)

大會開幕後，即分別由國際專家進行專題演講，摘述如下：

(一)The Role of the Underground for Nuclear Waste-Dr. Karina Lange：卡琳娜·蘭格博士為地質環境工程專業，目前擔任國際原子能機構地下研究設施網路科學秘書，加入國際原子能總署前，蘭格博士曾任加拿大核安委員會高級許可官員和檢查員。身為國際原子能總署的放射性廢棄物處置專家，她的主要

工作是與處於放射性廢棄物處置計畫初期階段的國家分享技術專長。她透過協調對東道國現有設施的科學考察、培訓活動和研討會來支持這項工作，積極倡導核能領域的多元性。另外她參加國際原子能總署(IAEA)與國際隧道工程協會(ITA)，得以國際原子能總署身分在 ITA 中擁有觀察員地位，支持地質處置設施(GDF)領域發展。這項合作使雙方多年來的建設性交流正式化，並提供了一個結構、非政治性的平台，將科學計畫與地下工程專業知識聯繫起來，以加強全球地質處置設施的發展(詳圖 4~圖 6)。

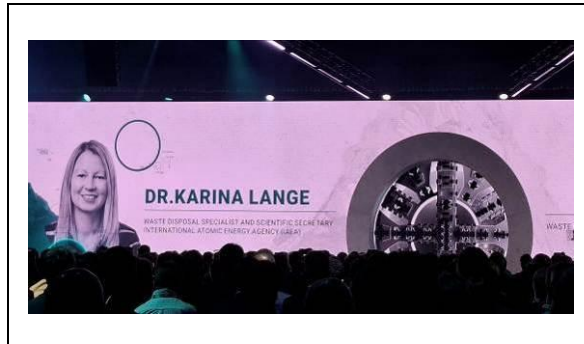


圖 4 講者 Dr. Karina Lange

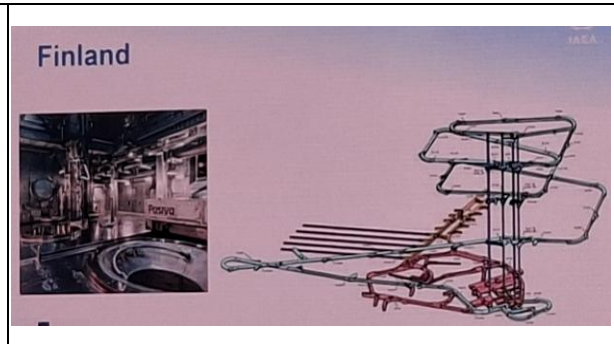


圖 5 芬蘭核廢料處置地下洞道規劃

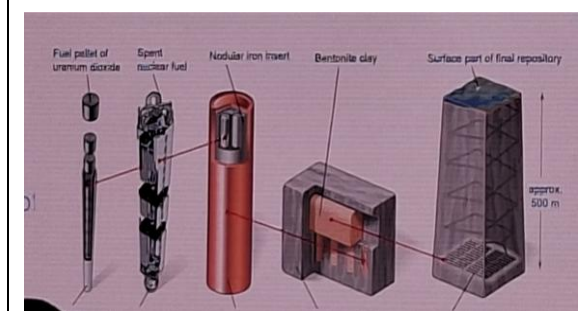


圖 6 瑞典核廢料洞室儲存概念



圖 7 講者 Remo Grandori

(二)TBMs at the Forefront： Challenges, Innovations and Logistics in Large-Scale Underground Construction-Remo Grandori(圖 7)(Muir Wood Lecturer)：由隧道鑽掘機和隧道專家雷莫·格蘭多里(Webuild 公司設備總監)主講。他的講座題目為“先進的隧道鑽掘機”，探討複雜環境下大型機械化地下工程建設所面臨的挑戰。以目前國際缺工及安全管理需求下，自動掘進的隧道鑽掘機引領國際潮流，尤其是在複雜岩土環境的大型地下工程，是隧道安全掘進的未來推動趨勢。雷莫·格蘭多里於 1984 年取得機械工程學位，畢業論文即以 TBM 及岩石切割為研究主題。此後 40 餘年間，他一直從事 TBM 隧道挖掘工作，曾擔任承包商和 TBM 製造商(隸屬於 SELI 公司)工作，在五大洲各種地層中參與了超過 120 個 TBM 項目，隧道總長超過 1200 公里，積累了豐富的經驗。

在其職業生涯中，他曾為多家公共機構和承包商提供 TBM 設計和運作方面的諮詢服務，並與主要 TBM 製造商(羅賓斯、洛瓦特、維爾特、三菱、川崎、NFM、博雷泰克、泰拉泰克、海瑞克、CREG、CRCHI)合作，共同開發新技術和新型 TBM(詳圖 8~圖 13)。

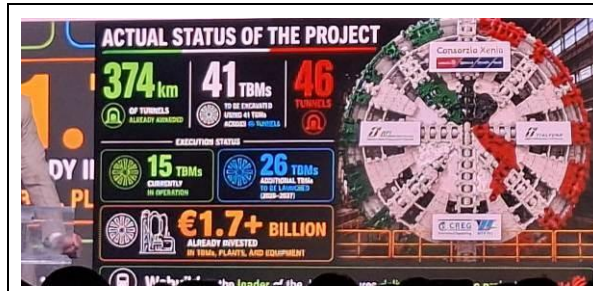


圖 8 在義大利同時參與 41 部 TBM 施工



圖 9 最適潛盾機選擇的要素
(鏡面穩定、地盤擾動、瓦斯、受壓水層)

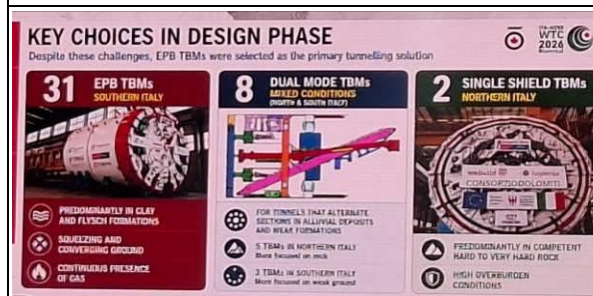


圖 10 潛盾選擇之關鍵因素考量
(黏土/效率/複合式土層之軟硬岩施工)

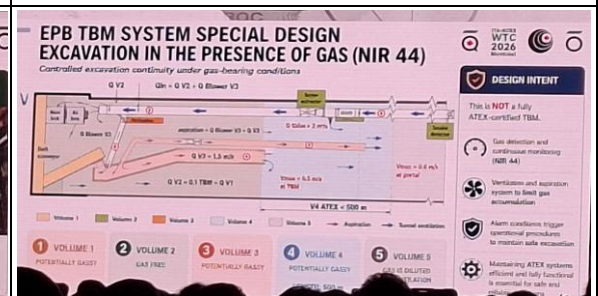


圖 11 瓦斯地層之潛盾機設計除須注意
通風外尚需增設專管抽排氣體

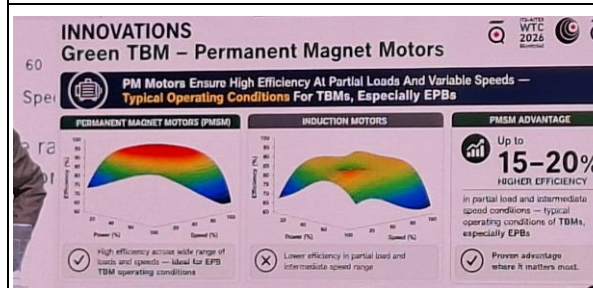


圖 12 採綠電為動力整合施工的潛盾機避免空汙



圖 13 潛盾機自動化大量整合以提升施工
功率與效能

自 2020 年起，他擔任 WeBuild 集團的設備及隧道鑽掘機總監，負責管理該集團在 2026 年底前同時運作的 60 台 TBM。他負責全球 60 多台 TBM 的開發和後續維護工作，遍及澳洲、美國和歐洲等地。在義大利，他協助 WeBuild 建造超過 300 公里的隧道，這些隧道均採用機械化鑽掘技術。也介紹了土壓平衡式及泥水加壓式潛盾機的選擇考量因素。雙模盾構機(Dual Mode TBM)是一種配備兩種不同挖掘模式的隧道鑽掘機，能夠在單一工程中應對複雜多變的混合地質條件，如土壓平衡(EPB)與泥水式(Slurry)潛盾機係適用於軟土與砂礫層，可在壓力平衡模式和泥水輸送模式間切換，以保持鏡面穩定，而硬岩(Hard Rock)與單盾(Single Shield)潛盾機則適用於岩石與軟土交錯的地層，須具備較高的主動支撐與岩石掘進能力的潛盾機；故 Dual Mode TBM 靈活性高，能無縫切換挖掘模式，避免在不同地層中反覆拆卸或更換機具，大幅降低施工風險與停機時間，在地質不均勻的長距離隧道中，一機多用能節省大量設備投資與人力成本(詳圖 14~圖 20)。



圖 14 潛盾機最佳施工進尺為 582m/月(每月平均為 382m/月，19 環/天)

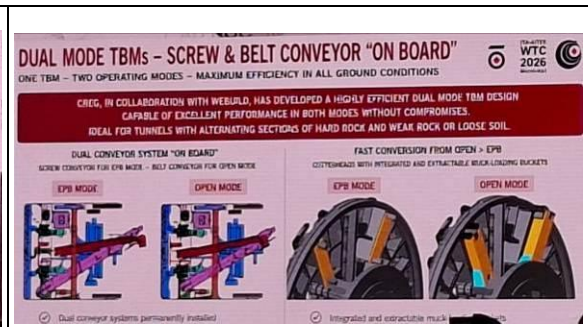


圖 15 DUAL MODE TBM 潛盾機施工功率與效能高

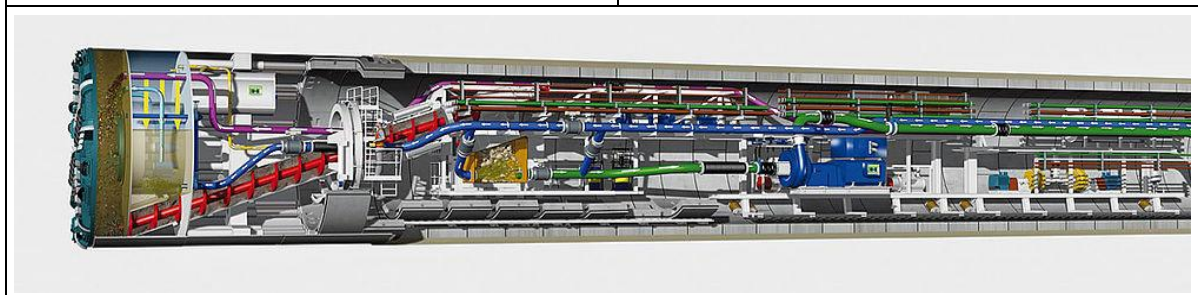


圖 16 海瑞克於軟弱土層之多面向潛盾機



圖 17 潛盾機遭遇特殊地質環境須合作始能成功

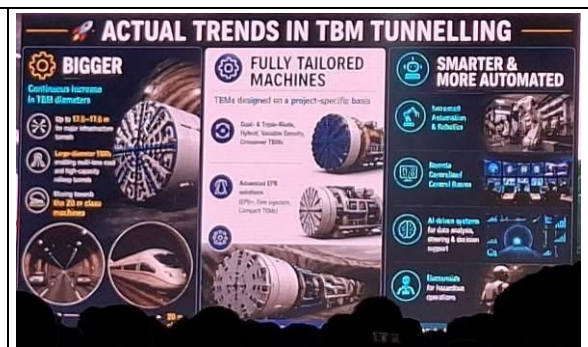


圖 18 潛盾機大型化、量身訂做、智慧化、自動化

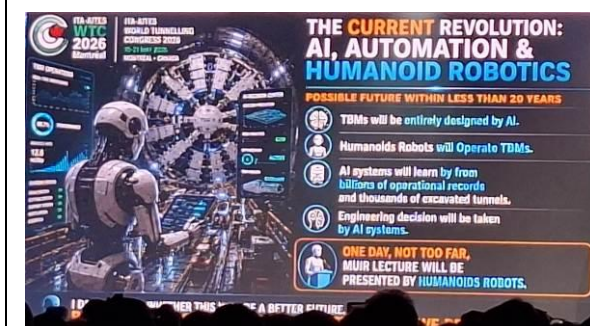


圖 19 潛盾機 AI 化

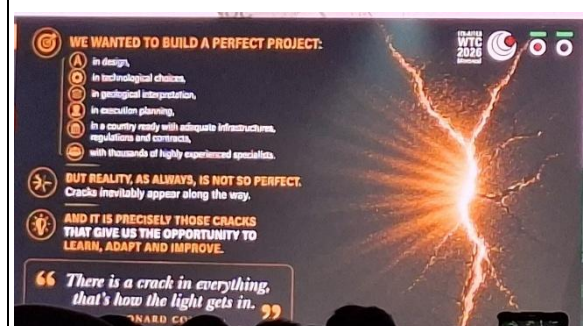


圖 20 潛盾機與展望

(三)The 3D - Up and Down City : The Potential Transformation Ahead with Urban Tunnelling - Larry Beasley(圖 21): 由國際知名的城市規劃師拉里·比斯利(Larry

Beasley)主講，主題為三維城市，隧道帶來都市未來的興革，他探討了城市發展、規劃和地下基礎設施。比斯利先生富有遠見的理念和全球經驗影響各地城市的塑造。未來城市將朝向地上與地下同步發展，透過地下交通、公用設施和公共空間的整合，打造永續性韌性及適宜居住的城市。



圖 21 講者 Larry Beasley

三、 技術論文發表

(一)、 台灣論文發表

本次研討會台灣方面共發表 5 篇論文，口頭發表有台灣大學土木系 王泰典教授及中興大學水保系 邱雅筑助理教授，海報發表有雲科大營建系 郭治平副教授、臺北自來水事業處工程總隊 廖偉丞工程師及倍思特工程顧問公司 李佳翰博士，摘述如下：

1. 台灣大學土木系 王泰典教授「Investigation on water inrush during tunnel in operation」：本文透過國內某公路隧道於營運期間發生湧水事件，探討這起獨特的湧水事件的可能原因。研究結果顯示，極端降雨提供了豐富的地下水補給，地下水滲入高角度剪切帶並接近隧道後，由於排水系統容量的限制，地下水流入受阻，導致隧道周圍出現滲流壓力。隧道內的排水溝也出現壓力流，沿著隧道內相互連通的公用設施廊道湧向隧道和機電室頂部，造成大範圍滲漏。排水溝容量不足導致壓力流從檢修孔噴出，隧道路面混凝土板下方的過大滲流壓力也導致路面隆起。目前隧道湧水案例的研究主要集中在施工階段，本研究填補了營運階段的隧道湧水研究。它還建立了開挖面地質資訊與施工現象之間的關聯，以及已完成的隧道中潛在的湧水災害，為類似案例提供了參考應用(如圖 22～圖 23)。

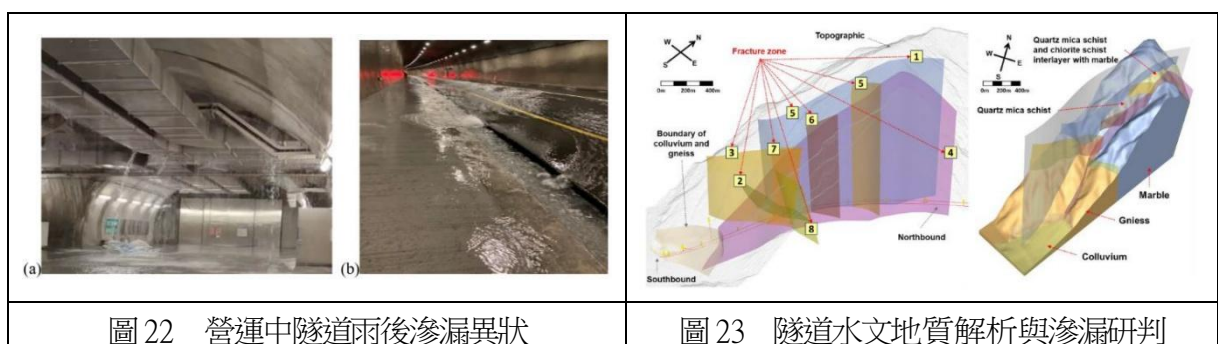


圖 22 營運中隧道雨後滲漏異狀

圖 23 隧道水文地質解析與滲漏研判

2. 中興大學水保系 邱雅筑助理教授「DEM Simulation on Tunnel Excavation Instability Induced by Groundwater Seepage in Cobble and Gravel Layers」：台灣西部河谷和丘陵地區廣泛分佈著高孔隙和滲透性的卵礫石層，這些地層通常是優良的含水層，在地下工程建設中也常遇到。當雨季或抽水活動導致地下水位波動時，滲流會引發細顆粒流失，導致顆粒結構鬆散，自支撐能力下降。這些變化會使隧道開挖面不穩定，甚至可能引發地表沉降，對施工安全構成重大威脅。本研究旨在探討地下水滲流作用下隧道開挖過程中卵礫石層顆粒破壞和細顆粒遷移的機制。本文採用 FLAC 和 PFC2D 軟體，結合有限差分法和離散元素法，建立了一個數值模型，並引入特殊模組來模擬卵礫石層內的地下水流路徑和孔隙水壓力分佈。進一步計算滲流條件下細顆粒的脫離和遷移，從而能夠詳細評估這些過程如何影響周圍顆粒結構的穩定性。此外，本研究也檢視了不同深度的地下水行為對隧道穩定性以及地層與結構相互作用的影響。研究結果為含水顆粒地層的隧道開挖設計、水文地質條件評估和施工風險管理策略提供了科學基礎(如圖 24～圖 25)。

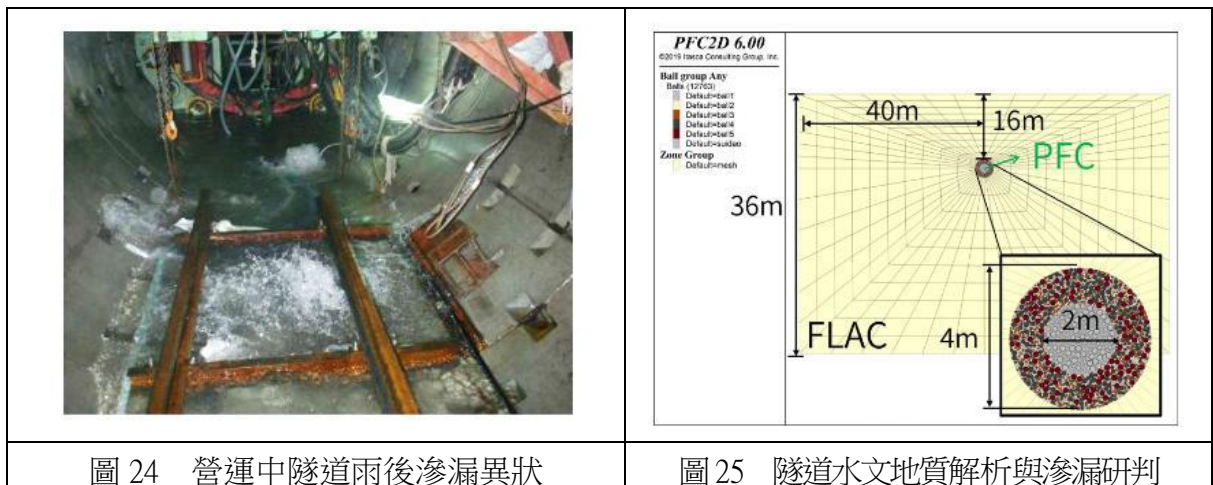


圖 24 營運中隧道雨後滲漏異狀

圖 25 隧道水文地質解析與滲漏研判

3. 雲林科技大學營建系 郭治平副教授「A Study on Depth Refinement of Tunnel Lining Cracks Detected by Ground Penetrating Radar」：隧道完工後，由於應力重分佈、土壤壓力、水文條件和風化作用等因素，隧道襯砌會開始劣化。裂縫是劣化最明顯的標誌，可透過目視或光學方法在襯砌表面進行檢測。然而，裂縫深度受施工空間的限制，目前最常使用的檢測方法是超音波法。近年來，利用透射雷達(GPR)進行裂縫辨識的方法日益受到重視。本研究的目標包括：比較室內隧道模型試驗和現場隧道試驗的結果、及透射雷達訊號的精細化方法，最終目標提高訊號的準確性及精確度(如圖 26)。
4. 臺北自來水事業處工程總隊 廖偉丞工程師「Application of AI Technology with Automatic Sensing Devices in Shield Tunneling Projects for Construction Management」：本研究目的為提升潛盾工法安全管理、掌握關鍵危害因子並改善效率，並以臺北自來水處備援管線工程為案例進行驗證，導入 AI 感測包含三項子系統：(1)工作井入口人臉識別出入管制，同時檢查個人防護具配戴；(2)工作井天車作業區人員辨識與預警系統，透過攝影機與 AI 模型辨

識，於人員進入吊掛危險區時即時示警；(3)即時出土重量感測，自動計算及檢核每環輪進的合理開挖量，防止超挖與地表坍塌之安全管理。實際佈署試驗結果顯示，人臉辨識進出管制及吊掛危害預警系統可有效提升工地安全與作業效率，但即時出土超挖管理系統尚須結合多參數，才能精準推估(如圖 27~28)。

5. 倍思特工程顧問公司 李佳翰博士「Case study on planning and design of rock tunnel intersection」：岩石隧道交叉段因受現地應力、岩體狀況、交叉角度、二次開挖擾動等因素影響，屬於複雜之三維力學行為，需要搭配三維工程地質模型與三維數值分析加以檢核。本研究首先蒐集全球岩石隧道交叉段理論分析，初步明瞭交叉角度與影響範圍之相關性；接著彙整 10 個實際案例之平、剖面圖、開挖支撐圖、施工順序圖或施工照片等資料，進一步瞭解實際設計方式與施工考量；最後以哥倫比亞某一隧道實際案例從三維工程地質模型建置、交叉段影響範圍規劃與開挖支撐設計、三維數值分析檢核，到施工工序規劃，完整呈現岩石隧道交叉段規劃與設計理念暨流程，供未來類似計畫參考與應用(圖 29)。

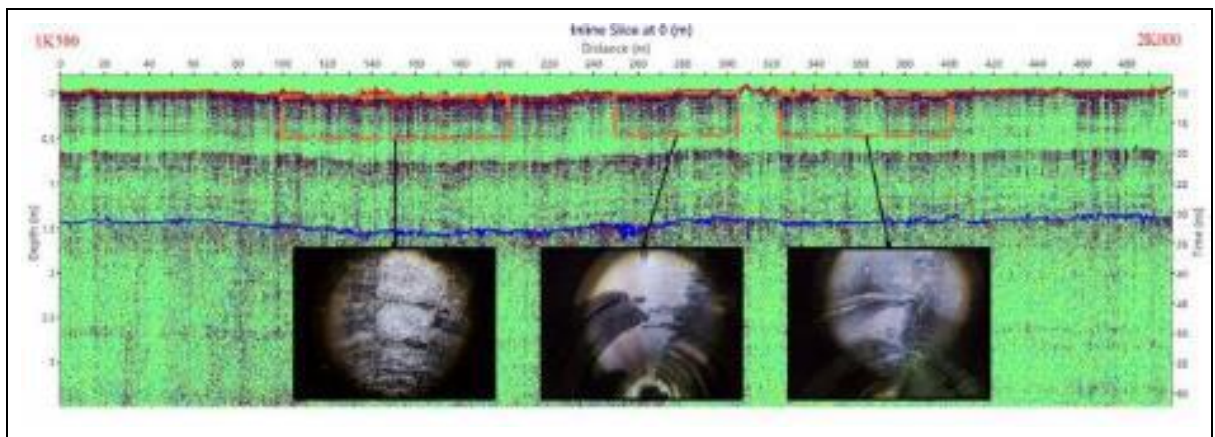


圖 26 透地雷達訊號精細化解析

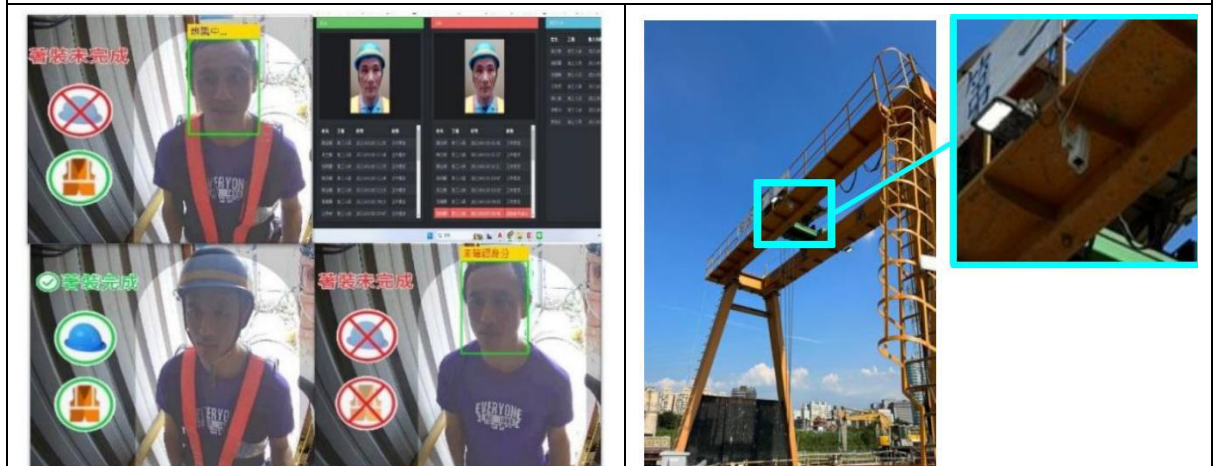


圖 27 工作井出入管制人臉識別

圖 28 即時出土重量感測

1. 1. 1 工源质近拉放工與評估 工主源质生行以減少損害 工主源质生行令引致管

- 16

沉陷避免危害，利用三步驟進行施工管控，(1)比較-施工與理論值之挖掘量比較，(2)評估-大數據統計比較誤差範圍，(3)應變-偏差量超過設定值，不同機型(Slurry vs. EPB)有不同之理論出土值，機內原則可利用輸送帶掃描及磅秤掌握出土重量，運送至機外則可利用土桶秤重方式掌握出土重與量，出土體積常含有水分與氣泡，屬鬆散土方，於土方量計算須注意及扣除(圖 44～圖 47)。

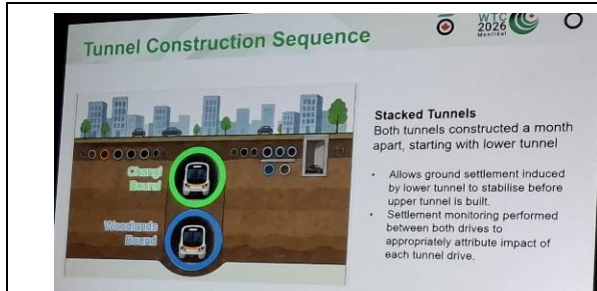


圖 30 潛盾上下近接施工掘進

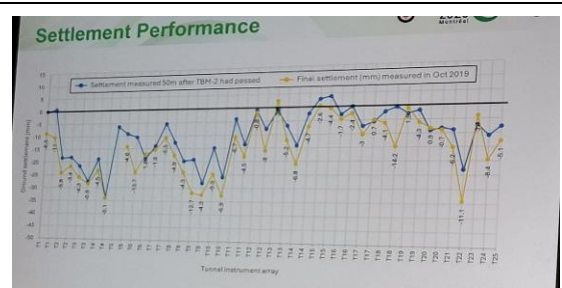


圖 31 地表沉陷監測大致良好

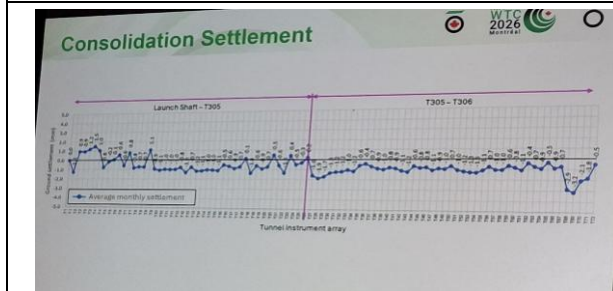


圖 32 壓密沉陷介於 1~2mm



圖 33 地中體積沉陷估算

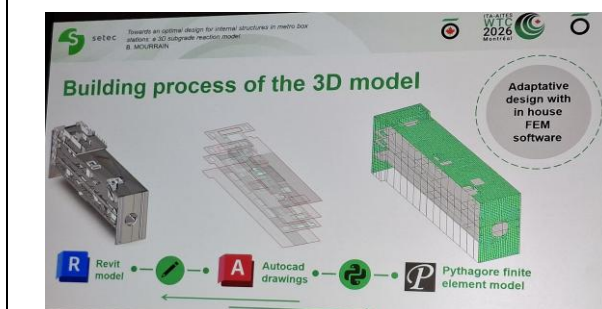


圖 34 車站結構建立 BIM 模型

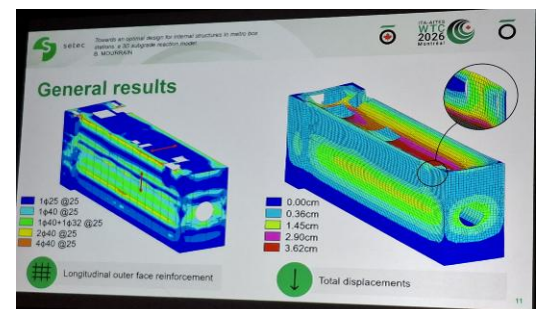


圖 35 BIM 界接結構分析程式解算

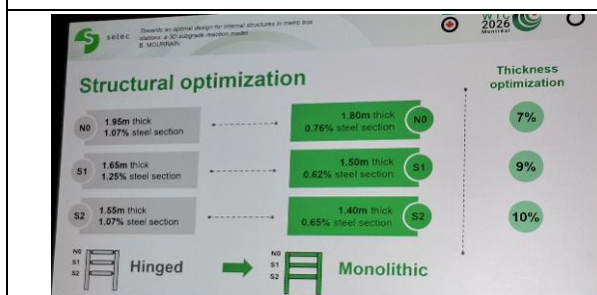


圖 36 不同模型解算做最佳化配筋



圖 37 潛盾控制要因

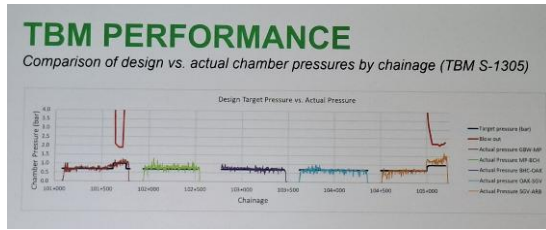


圖 38 TBM 壓力控制及表現

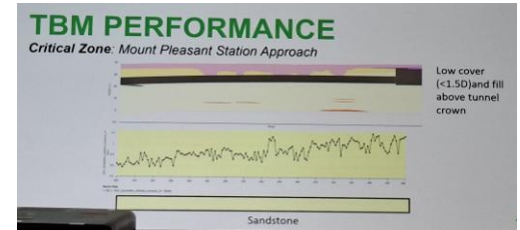


圖 39 淺覆蓋(<1.5D)之 TBM 表現



圖 40 目前開挖之施工流程



圖 41 未來施工開挖自動化(鹿島)

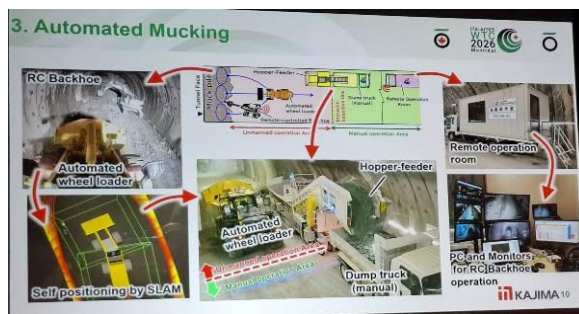


圖 42 隧道開挖出土自動化

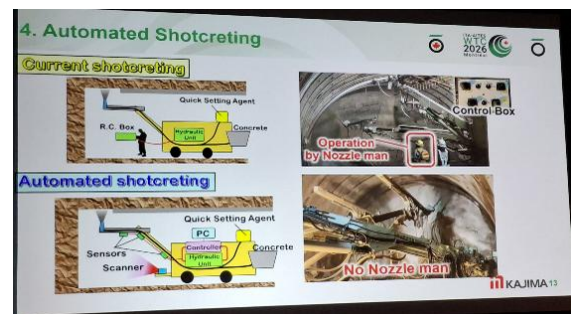


圖 43 隧道噴凝土施工自動化

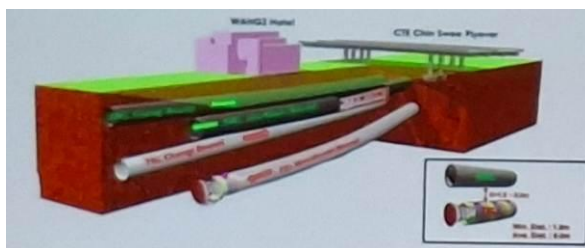


圖 44 新加坡隧道及環境建物敏感



圖 45 EPB 出土量比較

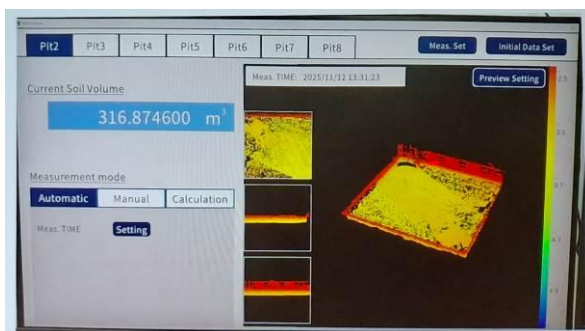


圖 46 TBM 出土量管理系統

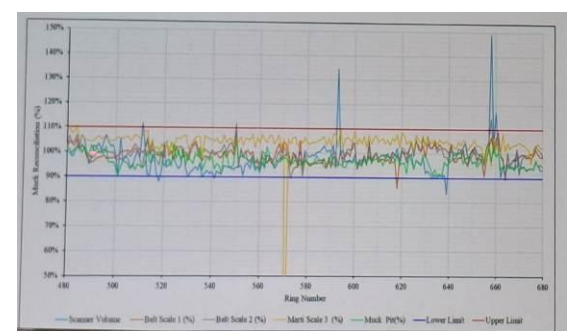


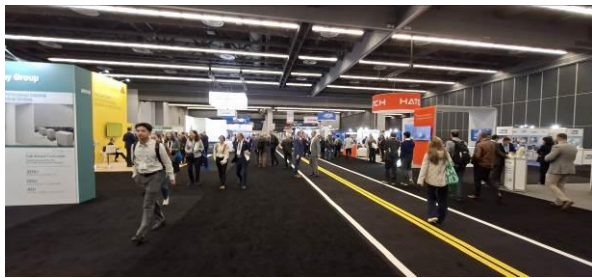
圖 47 TBM 出土量管理成果彙總

四、 廠商展覽

本次研討會共有百餘家材料、機具設備、施工、分析軟體開發廠商、美加顧問公司、韓日奧協會等參展贊助(如圖 48~圖 55)，可與相關技術人員交流吸取技術精華，謹擇幾家較特殊廠商摘述說明如下：



圖 48 本屆參展廠商

ITA PRIME SPONSORS  Bekaert  CRCHI  CREG WIRTH  HERRENKNECHT Tunnelling Systems  utt MAPEI  normet  Robbins  SANDVIK  seli overseas webuild group  Sika BUILDING TRUST  SINODRILLS	
ITA MEDIA PARTNERS  Tunnelling Journal  NBM&CW Infra Development & Const. Equipment Magazine  TunnelTalk  Tunnels & Infrastructures  TBM TUNNEL BUSINESS MAGAZINE	
圖 49 本屆主要贊助廠商	
	
圖 50 展場(1)	圖 51 展場(2)
	
圖 52 展場(3)	圖 53 蒙特婁捷運藍線延伸工程廣告
	
圖 54 展場海瑞克攤位	圖 55 展場海瑞克攤位潛盾機模型

(一) BROKK-是全球領先的遙控拆除機器人(Remote-Controlled Demolition Robots)製造商，總部位於瑞典。該品牌專為營造建築、隧道工程、礦業及核能工業等高

風險或狹窄環境，提供安全、強效且體積緊湊的機械設備與各式拆除工具。其核心產品與技術特點包括有(1)遙控操作：操作員可在安全距離外控制機器，遠離落石、粉塵及坍塌危險。(2)小巧強悍：機身設計緊湊，能進出標準門道或搭乘電梯，卻擁有傳統大型挖掘機的拆除力道。(3)電動驅動：多數機型採電力驅動，無廢氣排放，極適合室內或通風不良的坑道作業。(4)多元工具：可快速更換夾具、破碎機、鑽孔機及鏟斗，滿足不同工種需求(如圖 56)。

(二) Normet-是一家總部位於芬蘭的全球技術公司，專門為地下採礦和隧道工程提供先進的設備、建築化學品和數位解決方案。核心業務與產品採礦與隧道設備：提供用於岩石破碎、噴凝土、運輸和起重等專業地下工程設備。建築化學品：為隧道和採礦提供化學灌漿、防水材料、混凝土外加劑及地層加固產品。數位化解決方案：提供即時數據分析，優化地下採礦和隧道施工流程(如圖 57)。

(三) WIWA-是一家總部位於德國的全球領先製造商，專門研發與生產單組份(1K)與雙組份(2K)無氣噴塗設備、塗裝系統、擠出系統以及流體輸送泵浦。(1)主要產品與技術：該公司以高品質、耐用且適合高負載工業環境的泵浦與噴塗系統聞名；(2)無氣噴塗設備：提供高效率、低過噴的工業級表面塗裝解決方案；(3)多組份混合技術：精準計量與混合多組份塗料(如環氧樹脂、聚氨酯)，廣泛應用於重防腐工程。

(四) 其他-包括馬來西亞 GAMUDA 公司之隧道施工掘進管理系統、Sica 止漏新材料、FAMA 環片 5 道止水、GINA 止水接頭等(如圖 58~61)。

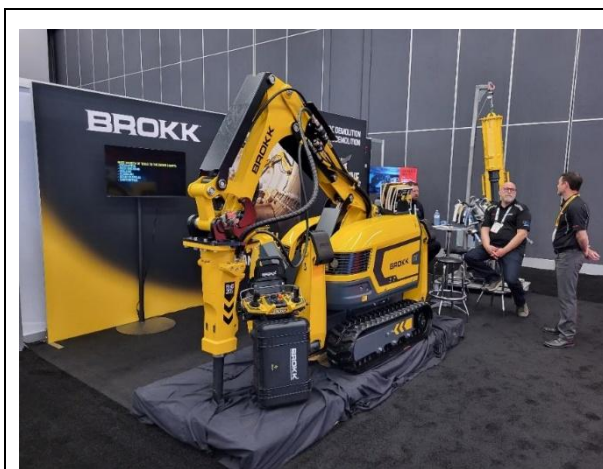


圖 56 BROKK®遙控拆除機器人

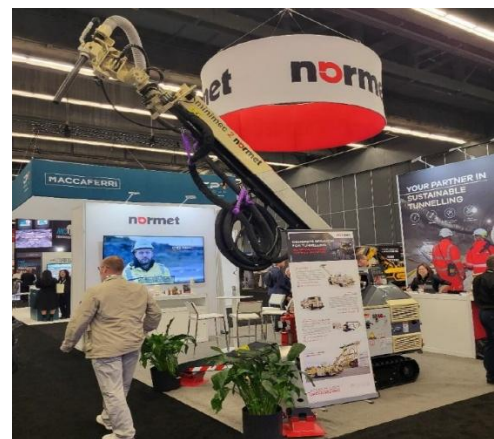


圖 57 Normet 公司隧道用噴漿機



圖 58 隧道掘進管理系統(GAMUDA)



圖 59 Sica 介紹新材料

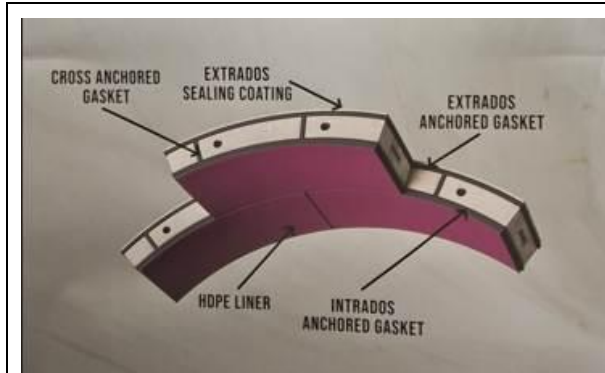


圖 60 FAMA 環片 5 道止水



圖 61 GINA 止水接頭

參、工程參訪

一、 Louis-Hippolyte-La Fontaine 隧道修復工程

本次大會安排參訪“Louis-Hippolyte-La Fontaine 隧道修復工程”，同團另有邱雅筑助理教授及李佳翰博士參加。

Louis-Hippolyte-La Fontaine 隧道是一條目前加拿大最長的沉埋管隧道，位於聖勞倫斯河下方，連接蒙特婁市與沙隆島和布謝維爾，沿著 25 號高速公路延伸。隧道於 1967 年建成，由七個預製隧道構件組成，每個構件長約 110 m，寬約 36.73 m，高約 7.70 m。隧道內有兩條交通隧道，中間由一條服務走廊隔開。每條隧道均設有 3 條單向車道，分別供北向和南向車輛通行。該隧道是蒙特婁市區聖勞倫斯河流的 5 條過河隧道之一，也是連接附近蒙特婁港的重要交通樞紐，這條長約 1.5 km 的隧道每天通行 12 萬輛汽車。由於該隧道服務港口，因此經常有高度高於一般隧道的重型貨車通行；然而，隧道內禁止運輸危險物品。圖 62 分別為隧道平、縱斷面、3D 剖面示意圖及當時興建照片。

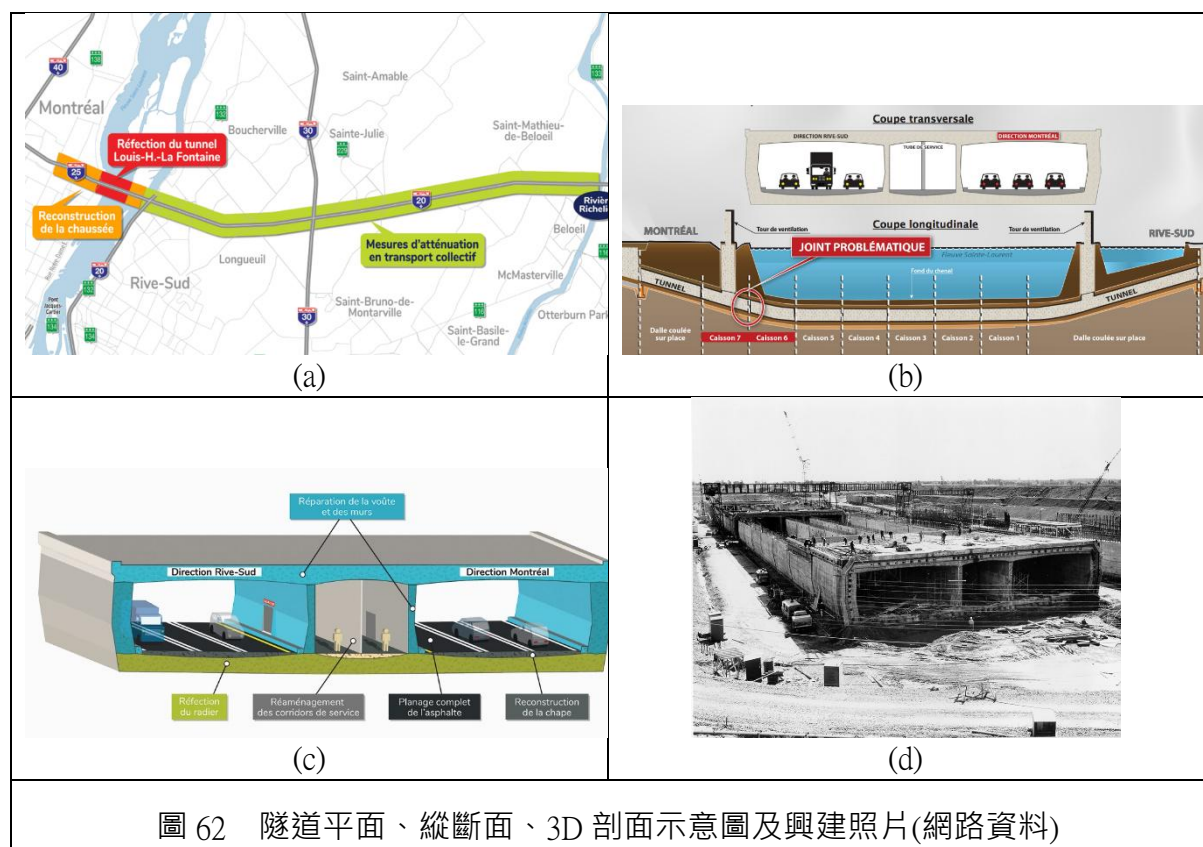


圖 62 隧道平面、縱斷面、3D 剖面示意圖及興建照片(網路資料)

當隧道使用 50 年後，由顧問公司進行縝密的詳細檢測與分析評估，以評估隧道結構和預力鋼索的現有狀況。隧道檢測過程中，在隧道拱頂內弧處觀察到了顯著且反覆出現的異狀。這些異狀主要為：混凝土剝落、預力管腐蝕、局部預力鋼絲斷裂；而引道段之頂梁(與高雄過港隧道相同結構)亦因車輛碰撞與長期凍溶效應導致混凝土剝落，如圖 63 所示。(Habimana et al., 2023)

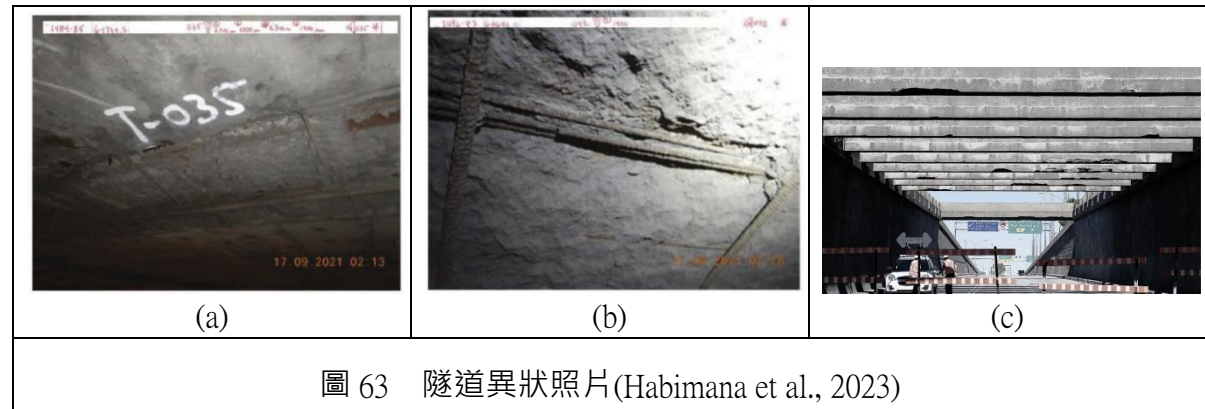


圖 63 隧道異狀照片(Habimana et al., 2023)

此外，透過分析拆除和修復工作之前的現有狀況，對結構完整性進行了評估。拆除和修復工作包括將現有混凝土鑿除至一定深度，在某些情況下還會暴露現有鋼筋，以確保新的修復混凝土與現有混凝土完全黏結。特別關注的是，這種拆除工作可以在多大程度上繞過現有的預力鋼索。因此，針對每種觀察到的情況進行了多次分析，這些分析結果用於評估不會影響隧道結構完整性的拆除極限，以及在拆除和修復混凝土養護期間是否需要任何特殊的預支撐措施。使用 FLAC 3D 進行分析，該軟體可以明確地模擬沉埋隧道幾何形狀、預力鋼索的配置以及任何加載配置下的土體結構相互作用，詳見圖 64。(Habimana et al., 2023)

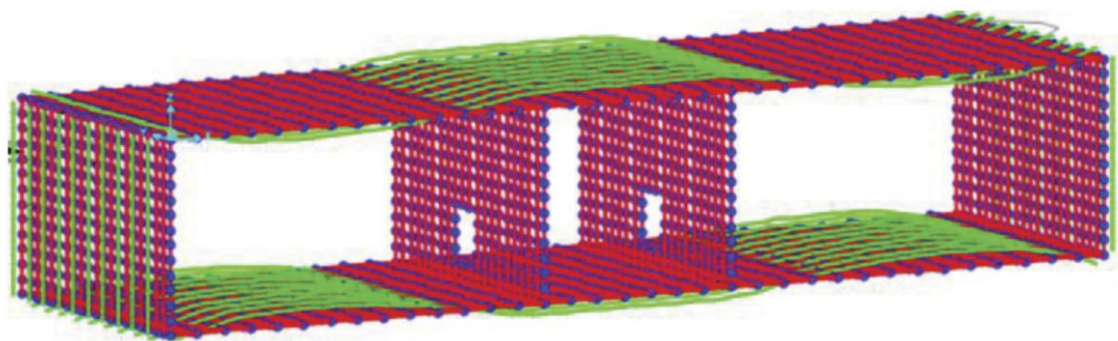


圖 64 利用 FLAC 3D 模型評估橫向預力鋼索的損壞情況(Habimana et al., 2023)

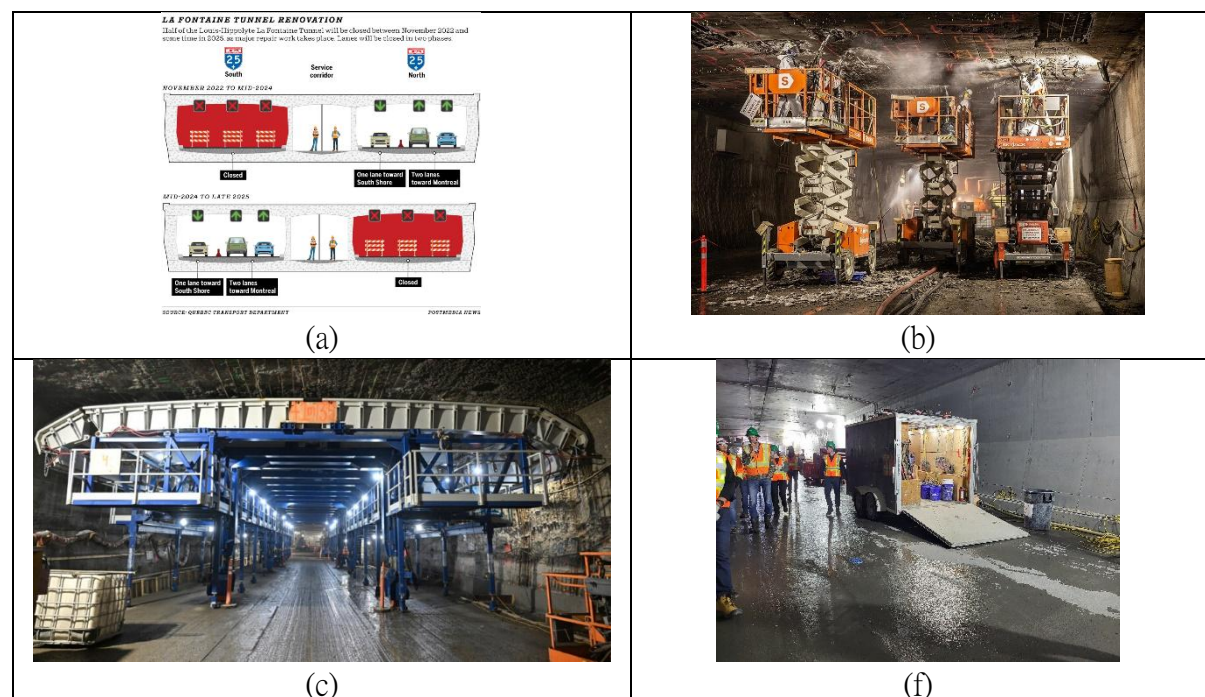
因此，加拿大魁北克省交通部啟動 Louis-Hippolyte-La Fontaine 隧道修復旨在對隧道進行維修和升級，使其符合現行規範標準，避免未來 40 年內對隧道進行任何重大修復。這項修復工程涵蓋：結構系統、通風、消防、給排水、機械、路面結構、電氣和照明系統、道路安全及使用者和工作人員的安全、通訊、交通號誌、交通管理和維護、施工期間的緩解措施，以及修復期間和修復後隧道內的公共交通系統。這項工程於 2021 年初由 Eurovia、Pomerleau 和 Dodin Campenon Bernard 組成的 Renouveau La

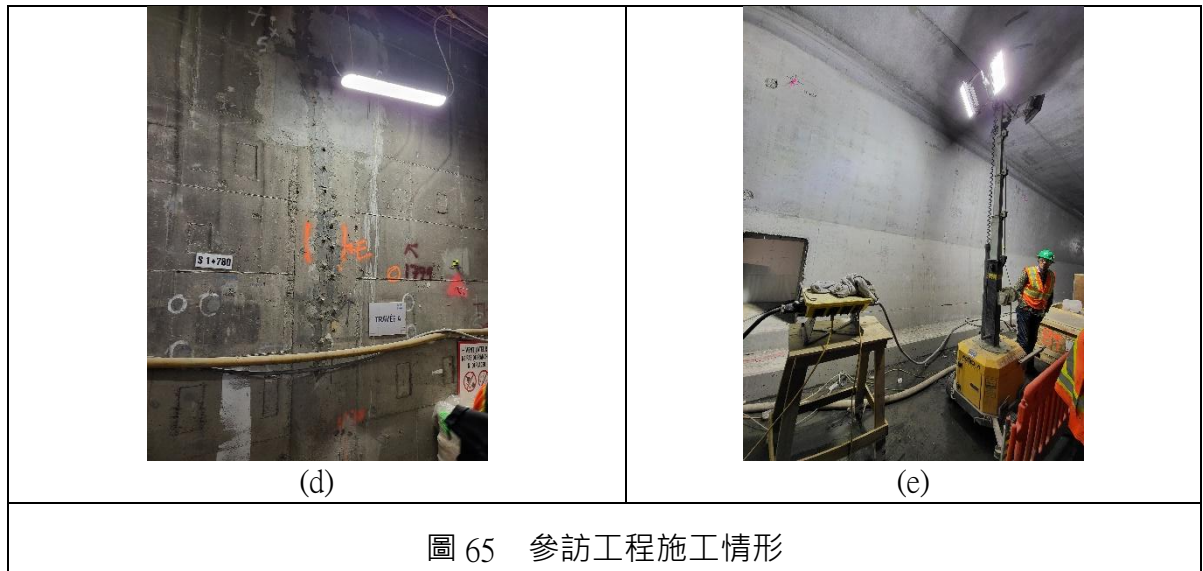
Fontaine (RLF)集團共同啟動，預計於 2027 年全面完工，總工程費高達 24 億加幣(約台幣 552 億)。

隧道及其引道的修復工程包括以下：

1. 修復隧道各部分，包括隧道壁、拱頂、接縫及排水系統
2. 重建蒙特婁市與沙隆島和布謝維爾之間隧道兩側 25 號高速公路的混凝土路面
3. 更新電氣、照明、通風、監控和通訊系統
4. 增設消防設備
5. 實施公共交通緩解措施，包括拓寬高速公路以及在省級公路網的不同路段增設公車專用道
6. 新建兩個獎勵性停車位並改造兩個現有停車位
7. 隧道建築特色，如隧道口拱門、照明和景觀綠化。

本計畫經理說明施工有以下特色：(1)本隧道為雙孔沉埋隧道，故施工期間採封閉單孔隧道施工，另 1 孔隧道改為雙向通行(圖 65(a))，交維方式並不困難；(2)隧道頂拱襯砌局部鑿除作業係利用剪刀式升降設備(圖 65(b))，而混凝土襯砌澆置作業則利用量身訂做大跨度之鋼模(圖 65(c))；(3)隧道中央廊道裂縫則採用裂縫灌注工法修補(圖 65(d))；(4)另為提升施工之機動性，本工程採用“移動式照明設備”(圖 65(e))與“移動式工具箱車”(圖 65(f))。





肆、心得及建議

- 一、本局除辦理既有隧道維護工程外，目前推動中之計畫包括國 1 甲新建工程、國 1 楊梅至頭份拓寬工程、國 5 銜接蘇花改工程均有隧道新建工程，建議每年仍應持續派員參加國外舉辦之隧道研討會，汲取最新隧道施工技術及維管經驗。
- 二、本次研討會國內有公務機關-臺北自來水事業處工程總隊投稿海報發表論文，建議未來亦可鼓勵本局同仁多於國際場合發表論文分享工程經驗，提升專業、語言能力及國際觀。
- 三、展覽會場馬來西亞 GAMUDA 公司展示隧道施工掘進管理系統，將規設階段收集之地形地質資料，利用 BIM 技術建立隧道 3D 數位孿生模型，除施工階段可預測及克服開挖過程遭遇之困難，亦可記錄地震影像及參數，作為後續管養使用。
- 四、主辦單位於報名工程參訪及會議過程，即不斷提醒參加人員務必穿著安全鞋，進入工區前工地經理更逐一檢查，不合格即當場要求更換，對於工地安全的嚴格要求值得學習。
- 五、參訪之隧道修復工程，大部分採機械設備施工，取代人力搬運與傳統施作，大幅減少施工人員需求，值得面臨缺工問題的台灣學習。
- 六、蒙特婁市雪季可達半年，反覆剷雪造成道路標線(包括車道線、斑馬線)模糊，但市區交通井然有序，路上亦少見執法員警，也許與成功的道路安全教育有關，值得我們省思與學習。