

出國報告（出國類別：開會）

參加 2025 年國際隧道工程協會研討會

服務機關：交通部高速公路局

姓名職稱：王鴻基副組長

派赴國家/地區：瑞典

出國期間：114.5.9~114.5.17

報告日期：114.7.21

行政院及所屬各機關出國報告提要

系統識別碼：C11400929

頁數：22

附件：無

出國報告名稱：參加 2025 年國際隧道工程協會研討會

出國計畫主辦機關：交通部高速公路局

出國人員：王鴻基

出國類別：開會

出國地區：瑞典斯德哥爾摩

出國期間：114 年 5 月 9 日至 5 月 17 日

報告日期：114 年 7 月 21 日

分類號/目：交通建設/交通運輸

關鍵詞：國際隧道工程協會、ITA、2025WTC、隧道

內容摘要：國際隧道工程協會(ITA)所舉辦 2025 年世界隧道研討會(World Tunnel

Congress 2025)於 2025 年 5 月 9 至 15 日在瑞典斯德哥爾摩(Stockholm)舉行，本次研討會以永續發展（Tunnelling Into A Sustainable Future – Methods and Technologies）為主題，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，介紹各國目前隧道工程的發展與應用狀況。研討會最後 1 天，大會另安排現場參訪行程，由於參加本次會議的人數達 3,000 人以上，大會安排多達 9 處工程參訪地點，包含汙水處理設施、礦場、地下油庫、高速公路隧道工程、地下鐵路隧道工程等不同領域及地點。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工程參觀、專題演講及分組會議中講者案例分享以及各國目前的應對與準備情形等，分述於前言、行程紀要、技術參觀、會議過程等章節，並於最後提出心得與感想，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.....	3
壹、前言.....	4
一、目的.....	4
二、會議主題.....	5
三、會議地點.....	5
四、行程紀要.....	6
貳、過程.....	7
一、Muir Wood 講座.....	7
二、論文發表.....	10
三、廠商展覽.....	12
參、工程參訪.....	15
一、瑞典 Epiroc 公司總部及設備組裝工廠參訪.....	15
二、地鐵工程參觀.....	16
肆、心得及建議.....	21

圖目錄

圖 1 臺灣與會人員合影.....	4
圖 2 斯德哥爾摩地鐵月台層.....	6
圖 3 基礎建設計畫永續發展的挑戰.....	8
圖 4 基礎建設計畫永續發展的挑戰.....	8
圖 5 過去隧道開挖工程的成效影響因素.....	9
圖 6 不同合作風格對計畫成效指標的影響.....	9
圖 7 以夥伴關係為基礎的採購模式效益比較.....	10
圖 8 隧道開挖時，灌漿對垂直有效應力(a)及水壓力(b)分布影響.....	11
圖 9 倍思特工程顧問公司李佳翰博士論文發表.....	11
圖 10 隧道擴建案例示意圖.....	12
圖 11 Elios 局限空間無人機照片	13
圖 12 Spot 機械狗照片	13
圖 13 Maccaferri 公司研發之鋼支保與傳統施工作業比較	14
圖 14 Maccaferri 公司研發之鋼支保組立作業	14
圖 15 鑽堡搭載掃描定位功能，並自動修正前進面鑽孔位置.....	15
圖 16 利用鑽堡配置感應器紀錄扭矩及鑽掘速率，評估開挖面岩體性質.....	16
圖 17 Epiroc 公司待出貨之隧道施工機具展示	16
圖 18 斯德哥爾摩新地鐵路線圖.....	17
圖 19 藍線索菲亞(Sofia)站及哈馬碧運河(Hammarby_kanal)站間路線剖面....	18
圖 20 索菲亞(Sofia)站模擬圖	18
圖 21 昇井工法示意圖及擴孔完成照片	19
圖 22 索菲亞站電梯井施工照片	19
圖 23 哈馬碧運河(Hammarby_kanal)站剖面圖	20
圖 24 哈馬碧運河站站體開挖施工照片	20
圖 25 隱身於地鐵站各角落之公共藝術作品.....	22
圖 26 隱身於地鐵站各角落之公共藝術作品.....	22

表目錄

表 1 出國行程表.....	6
表 2 研討會議程表.....	7

壹、前言

一、目的

國際隧道協會(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，2025 年世界隧道研討會(World Tunnel Congress 2025)於 2025 年 5 月 9 日至 15 日在瑞典斯德哥爾摩(Stockholm)隆重舉行，研討會內容包含：培訓課程、Muir Wood 講座、論文發表、海報張貼講演、廠商展覽、工程參訪等。

為與國際隧道工程界直接交流，引進世界各國隧道規劃設計及施工管理的新理念、新技術、新材料與新工法，我國除筆者奉派代表本局參加外，國內產、官、學界另有多人一同前往，包含台灣大學土木系王泰典教授、中興大學水保系邱雅筑助理教授、公路局蘇花公路改善工程處李宗仁處長、黃琳婷工程司、中興工程顧問公司江政恩協理、王元度計畫副理、台灣世曦工程顧問公司楊智堯副理、翁贊鈞副理、大域工程顧問公司蕭富元副總、福清營造公司江國權總經理、江國葳技師、王依偉副總、李健鴻協理、威建公司陳宏銘執行董事、周培淳經理、黎明工程顧問公司尤芊翔技師、中興測量公司黃明萬副總、安石公司柳厚安總經理、聯合大地工程顧問公司劉曉樺工程師、倍思特工程顧問公司李佳翰總經理與烏普薩拉大學林佳靜博士生等人(如圖 1)。



圖 1 臺灣與會人員合影

二、 會議主題

本次大會主題為「Tunnelling into a Sustainable Future – Methods and Technologies」，以隧道工程的永續發展及應用為主，論文主題涵蓋了隧道和地下工程領域的廣泛主題，包括：

1. 隧道施工創新
2. 地下安全
3. 地下空間利用
4. 勘察與地層特徵描述
5. 地下空間規劃與設計
6. 傳統隧道施工
7. 機械化隧道施工
8. 複雜幾何形狀，包括豎井和坡道
9. 注漿與地下水控制
10. 儀器與監測
11. 營運、檢查與維護
12. 合約方面、融資與風險管理
13. 氣候變遷的影響

三、 會議地點

本次研討會選在瑞典的首都斯德哥爾摩(Stockholm)舉辦，該市也是瑞典最大城市，位於瑞典的東岸梅拉倫湖入海處，緊鄰波羅的海，風景秀麗，是著名的旅遊勝地。斯德哥爾摩市區由 14 座島嶼組成，透過 70 餘座橋梁將這些島嶼聯為一體，因此享有「北方威尼斯」的美譽。

除了擁有得天獨厚的美景與溫和的氣候外，瑞典位於古老的歐亞大陸板塊中心，其地質年代屬於最古老的前寒武紀，前寒武紀形成時期可追溯自地球誕生(約 45 億年前)至 4 億 5 千萬年前，因此瑞典地質以堅硬的火成花崗岩及變質岩為主，幾乎沒有地震與斷層，對地下構造物開挖及隧道鑽掘極為有利，加上瑞典擁有鐵、銅、鋅、鉛、銀等珍貴礦產資源，因此造就了瑞典在地下開挖及隧道施工機具產業的蓬勃發展，其中最廣為人知的炸藥發明人諾貝爾(Alfred Bernhard Nobel)即出生於瑞典斯德哥爾摩。

筆者本次在斯德哥爾摩搭乘地鐵時，即隨處可見許多地鐵車站壁體以裸岩型式呈現，或局部以噴漿被覆後即做為完成面(如圖 2)，極少有地下水浸潤的痕跡，可見其地質條件良好，具有極佳的自立性與水密性，與臺灣以中新世至更新世沉積岩為主的年輕地質，以及位於菲律賓海板塊與歐亞板塊兩大板塊碰撞的邊界，地震活

動頻繁的地質特性迥異，因此臺灣鐵公路隧道在施工過程遭遇之挑戰與困難，與瑞典大相逕庭，亦不免令人稱羨其得天獨厚之先天條件。



圖 2 斯德哥爾摩地鐵月台層

四、 行程紀要

本次出國行程自民國 114 年 5 月 9 日至 5 月 17 日，包含往返交通時間共為期 9 天，除參加各場次相關專題演講外，並參加大會所安排的工程參訪行程，行程整理如表 1 所示。

表 1 出國行程表

日期	地點	活動內容
5 月 9 日	桃園→德國法蘭克福	去程，搭乘中華航空自桃園機場飛抵德國法蘭克福機場轉機
5 月 10 日	德國法蘭克福→瑞典斯德哥爾摩	去程，搭乘漢莎航空自法蘭克福機場飛抵斯德哥爾摩阿蘭達機場
5 月 11~12 日	斯德哥爾摩國際博覽會場	參加大會開幕式及 Muir Wood 講座得主專題演講
5 月 13 日	瑞典 Epiroc 公司	參觀隧道用鑽堡之製造、組裝過程，以及該公司最新型隧道施工機具之開發功能
5 月 14 日	斯德哥爾摩國際博覽會場	參加分組研討會、論文張貼發表及隧道施工軟、硬體設備展覽
5 月 15 日	斯德哥爾摩地鐵工地	參訪斯德哥爾摩地鐵(藍線)延伸工地，世界第 2 深的地鐵站建設工地

演講內容說明現今的各類基礎建設計畫在永續發展的挑戰，在於需要同時滿足複雜的經濟、社會與環境等因素(如圖 3)，並提出一個定性的價值評估系統，以環境、成本、期程、組織流程、品質功能、職業安全及社會共識等 7 大面向做為衡量一個計畫成效的指標(如圖 4)。

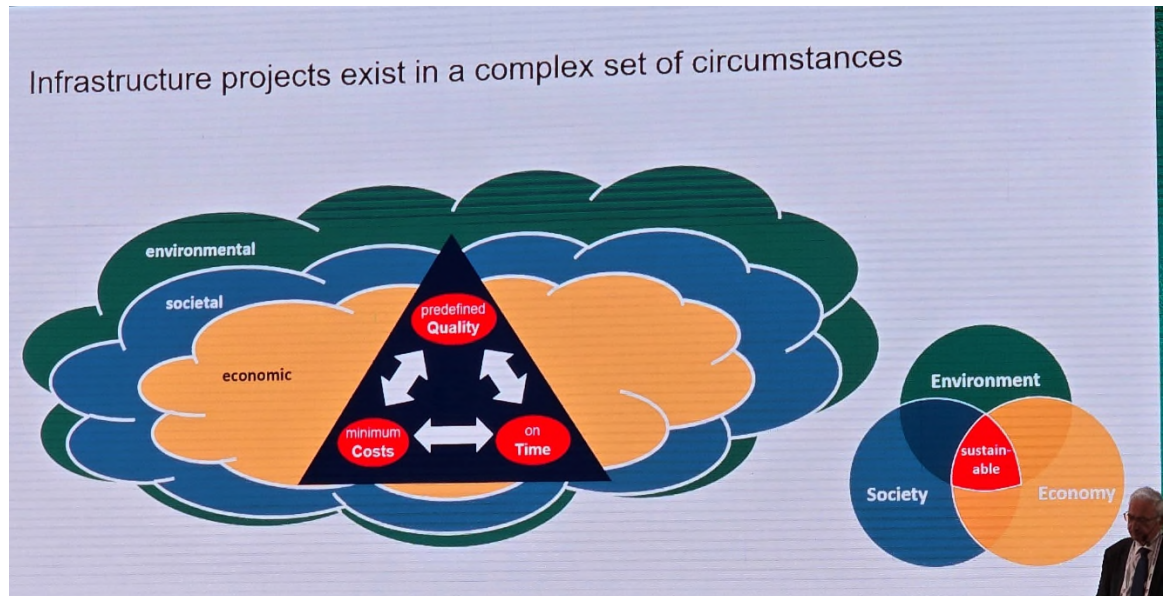


圖 3 基礎建設計畫永續發展的挑戰

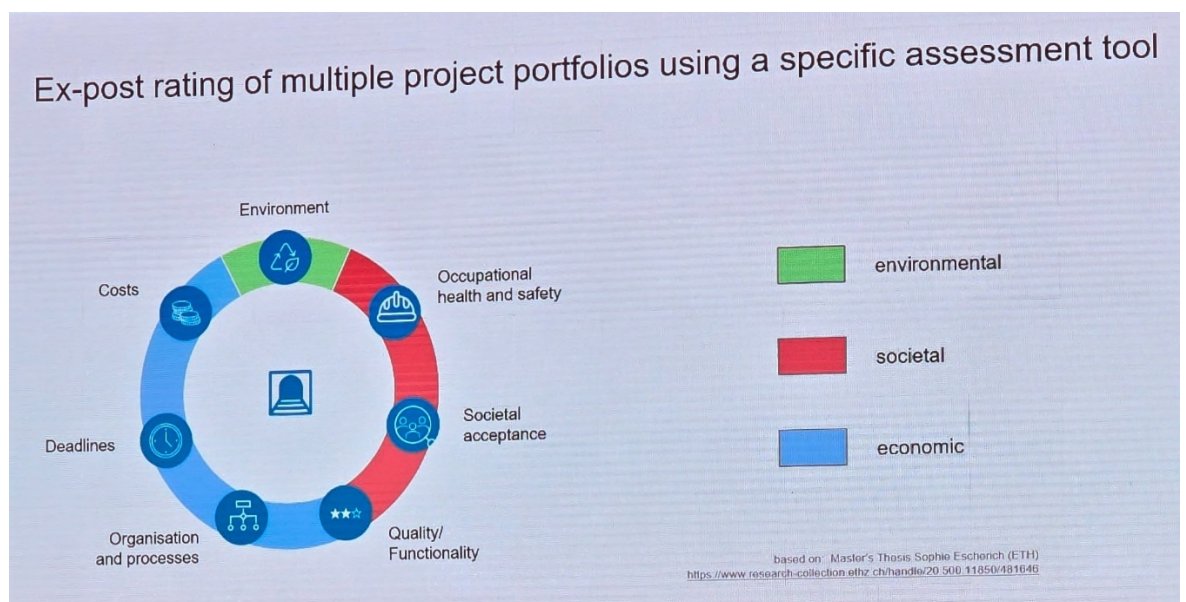


圖 4 基礎建設計畫永續發展的挑戰

Heinz 指出過去一個世紀以來，瑞士的基礎建設計畫在 7 項衡量計畫成效的指標均有進步，尤其是在職業安全的指標獲得大幅的成長與重視(如圖 5)。

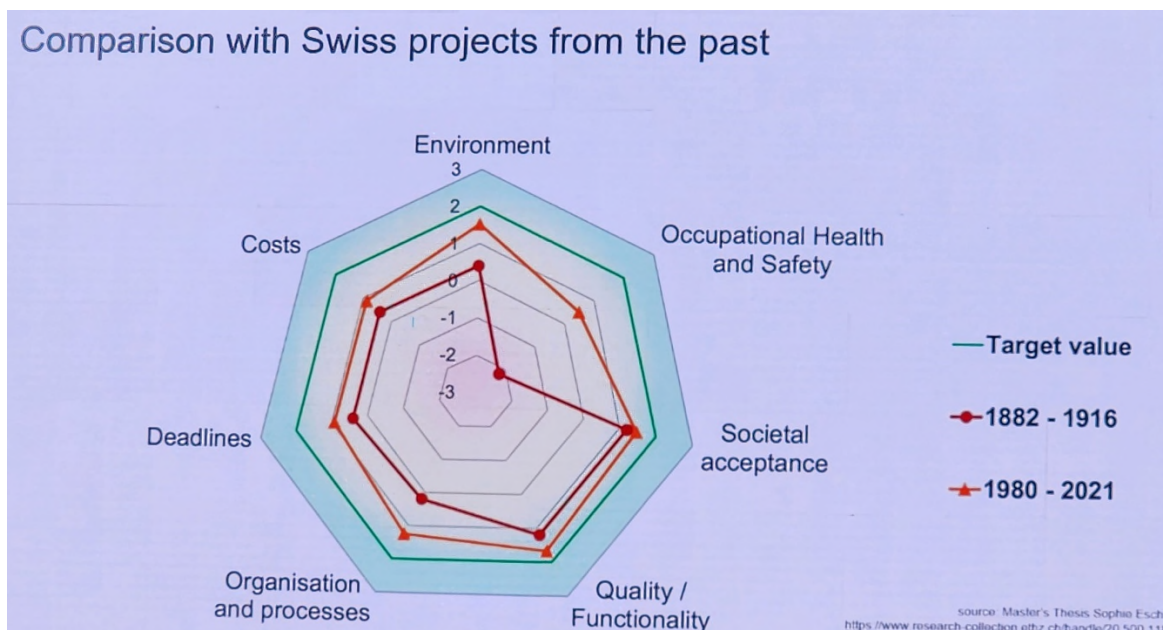


圖 5 過去隧道開挖工程的成效影響因素

另外 Heinz 針對不同合作風格的計畫執行成效進行了分析比較，結果顯示計畫團隊成員採取合作模式的專案計畫，在計畫成本、期程與組織流程效率等面向的指標，成績明顯大幅優於團隊成員間採取對抗模式的計畫(如圖 6)。

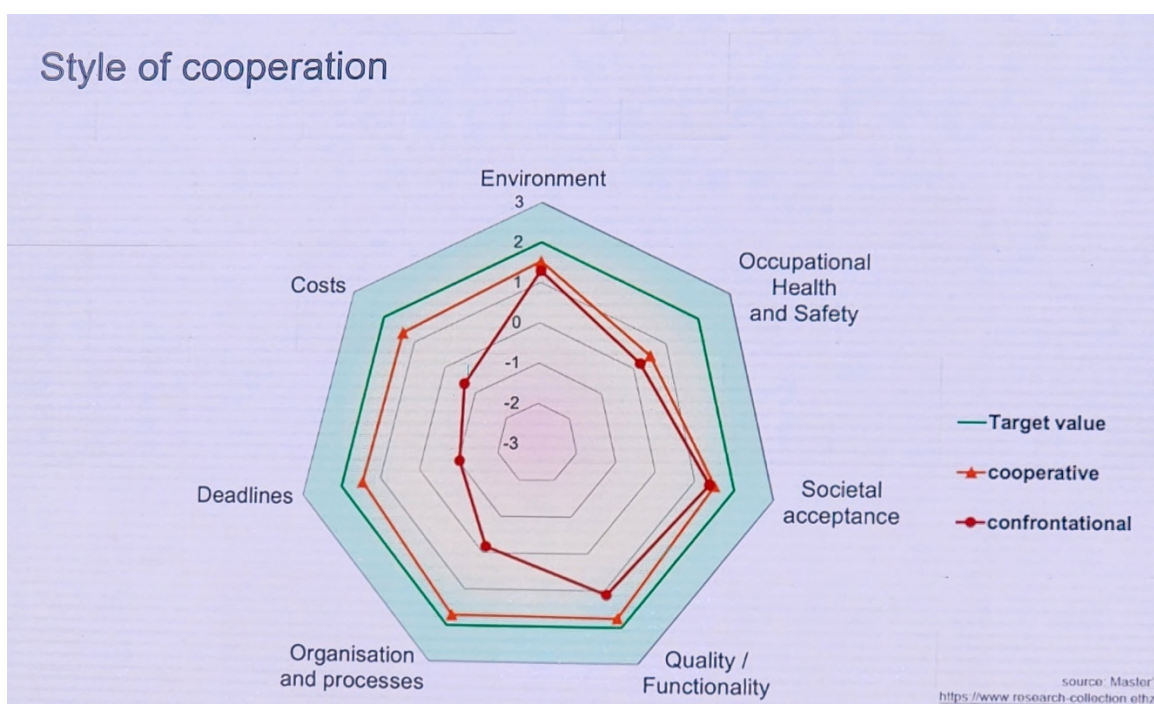


圖 6 不同合作風格對計畫成效指標的影響

Heinz 同時引用了澳洲維多利亞省財政金融部門 2014 年的研究成果，亦顯示採

用夥伴關係為基礎的採購案，不論是在計畫期程延宕的風險控制，或是計畫成本的變動控制上，均比採取傳統採購模式的成效要來的良好(如圖 7)，印證了 Heinz 的研究成果。

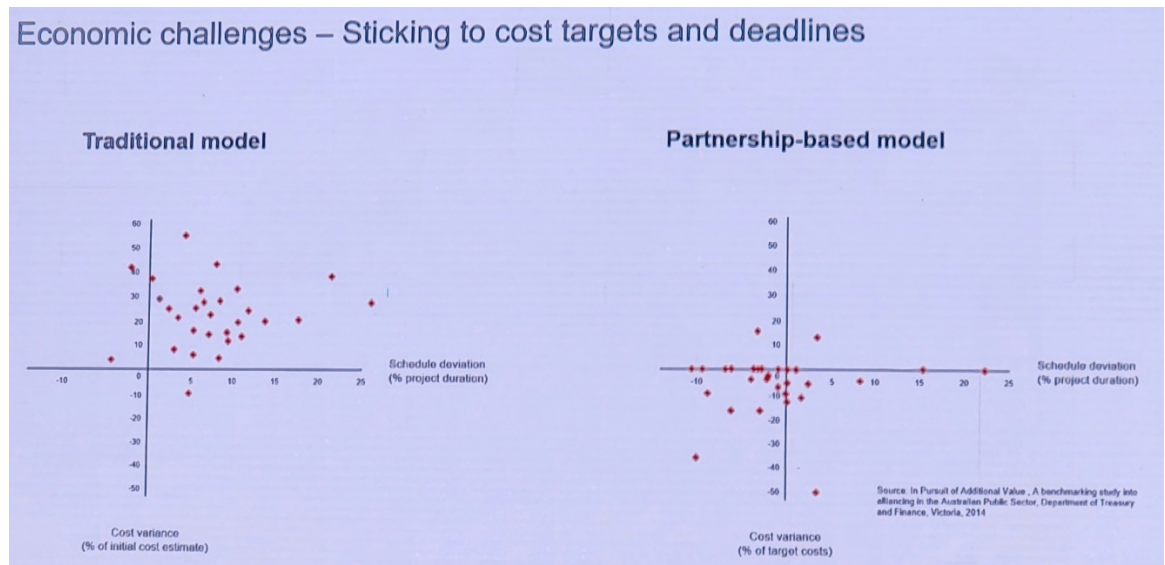


圖 7 以夥伴關係為基礎的採購模式效益比較

因此 Heinz 認為，在面對現今隧道工程的不確定性與風險時，施工團隊各成員間之風險與利益具有一致性，並能互相分享時，有利於計畫達成品質與成效的目標，此外，良好的人力、機具與技術資源是計畫得以成功推動的關鍵因素，尤其是施工團隊間的良好資訊傳遞及溝通，尤為重中之重。

二、 論文發表

本次研討會台灣方面共發表 2 篇論文，分別由中興大學水保系邱雅筑助理教授與倍思特工程顧問公司李佳翰博士以海報講演型式發表，作者需先於電子海報旁以英文口頭說明 5~10 分鐘研究內容，再由與會人士提問與回答問題 5~10 分鐘，簡要說明如下。

(一)、 中興大學邱雅筑助理教授

中興大學水保系邱雅筑助理教授發表「Hydro-mechanical coupling study on the influences of grouting on tunnel structure」(如圖 8)，針對灌漿及相關因素對隧道結構的影響，採用二維水力耦合分析，考慮側向土壓力係數、邊界水壓力、灌漿範圍、襯砌是否防水等不同情況，對隧道襯砌結構應力的影響。研究結果表明，孔隙水壓力在灌漿外邊界處聚集；且灌漿可使襯砌彎矩增加到未灌漿時的約 113-150%。

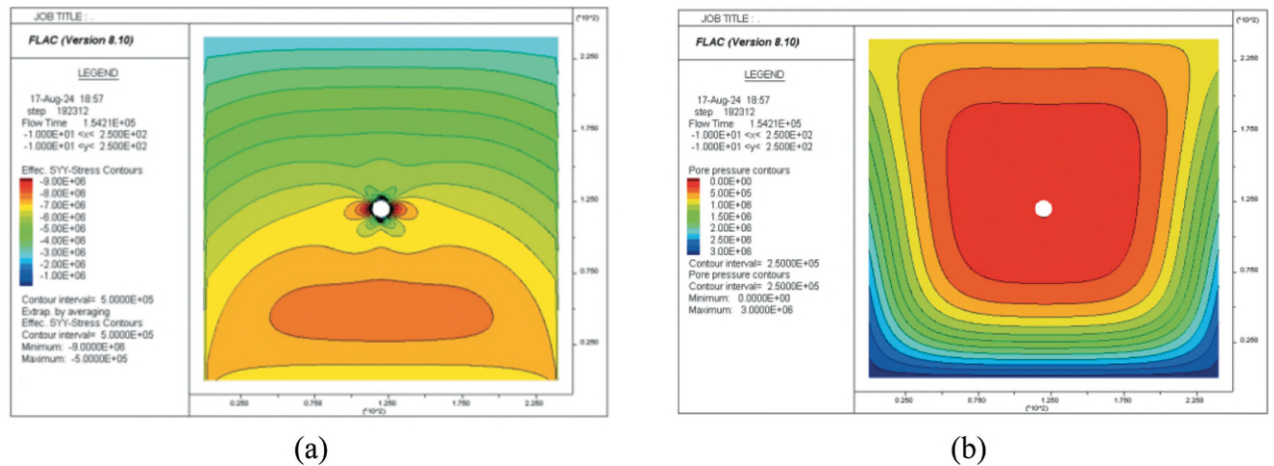


圖 8 隧道開挖時，灌漿對垂直有效應力(a)及水壓力(b)分布影響

(二)、 倍思特工程顧問公司李佳翰博士

倍思特工程顧問公司李佳翰博士發表「Tunnel enlarging methods and case study」(圖 9)，李博士收集了全球 12 個隧道擴建案例(圖 10)，針對隧道擴建規劃與設計的技術包括調查內容、擴建方向、交通考量、襯砌結構型式、擴建方式、支撐設計、爆破震動影響等。並以倍思特工程顧問公司協助南美洲某公路隧道擴建規劃與設計實際案例，闡述了既有隧道擴建的規劃與設計流程，並採用數值分析方法驗證隧道擴建各階段支撐的穩定性與安全性，為未來隧道擴建規劃與設計提供參考。

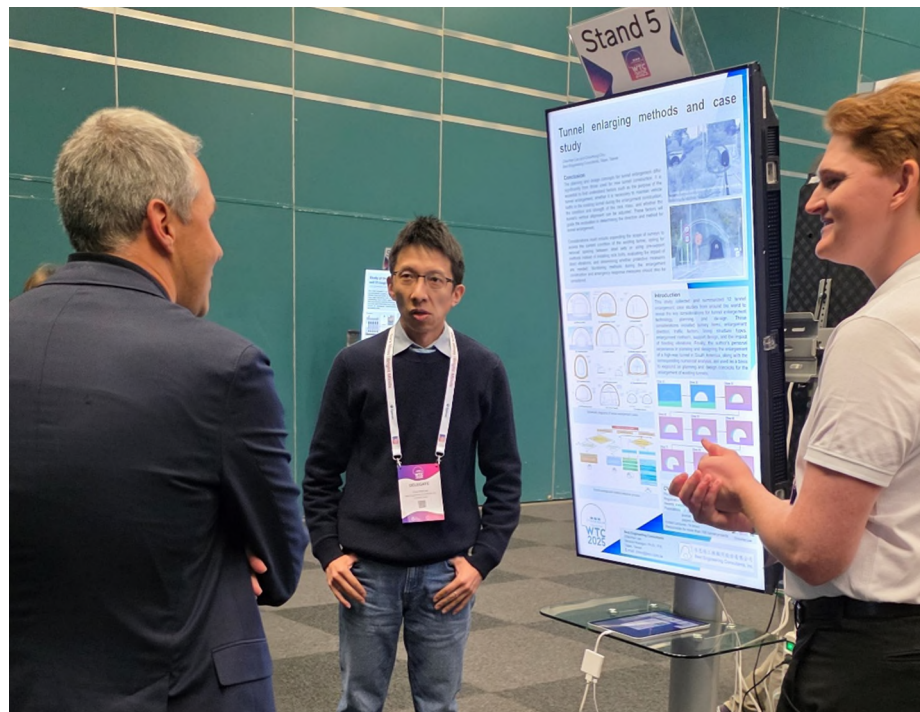
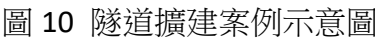


圖 9 倍思特工程顧問公司李佳翰博士論文發表



1. *Journal of the American Medical Association*, 2000; 284: 2689-2695.

主要業務包括採礦、提煉和加工鐵礦石，同時也在探索和開發可持續的鐵礦石生產方法和替代產品。LKAB 公司基於採礦需求，分別自瑞士 Flyability 公司引進 Elios 局限空間無人機(如圖 11)；自美國 Boston Dynamics (波士頓動力公司)引進 Spot 機械狗(如圖 12)，這 2 項無人檢測設備皆用於採礦過程之開炸成效、人員安全、機具設備狀況等現場探查與確認，或許可考量引進並應用於隧道新建工程或將來營運期間之隧道檢測作業。



圖 11 Elios 局限空間無人機照片



圖 12 Spot 機械狗照片

(二)、義大利 Maccaferri 公司

Maccaferri 是一家義大利跨國公司，專門生產建築業的產品，包含：擋土結構、土壤加固、堤防穩定、河流和運河水利工程、海岸保護、侵蝕控制、落石緩解、泥石流和雪崩防護。

有鑑於傳統隧道鋼支保組立作業需要大量的人工作業，組立過程施工人員通常在距離開挖面很近的地方進行，以致於長時間暴露於岩塊掉落或支保坍塌之高度風險下，Maccaferri 公司研發利用絞鍊將鋼支保預先組立後，可大幅減少開挖面前方人工組立之作業時間，大幅降低人員施工風險，並增加開挖面輪進作業效率。



(a) 傳統鋼支保組立



(b) Maccaferri 鋼支保組立

圖 13 Maccaferri 公司研發之鋼支保與傳統施工作業比較



圖 14 Maccaferri 公司研發之鋼支保組立作業

參、工程參訪

由於本次大會參加人數眾多，因此主辦單位總共安排了 9 處工程參訪地點，包含了公路隧道工程、鐵路隧道工程、地下污水處理工程、各地下礦坑以及地質之旅等等不同行程，並依報名順序設有名額限制，筆者係參訪“斯德哥爾摩地鐵新線延伸擴建工程”。

此外，大地工程學會特別透過安石公司柳厚安總經理安排參訪瑞典 Epiroc 公司總部及設備組裝工廠，以瞭解該公司開發與製造隧道用鑽堡之組裝過程及其於地下工程之應用，以上工程暨工廠參訪說明如後。

一、瑞典 Epiroc 公司總部及設備組裝工廠參訪

Epiroc 公司為全球著名的採礦和隧道施工設備與服務供應商。該公司主要產品包括用於地下和露天採礦的硬岩鑽探設備、挖掘技術，以及相關的維修、備件和消耗品。

參訪瑞典 Epiroc 公司總部時，除說明該公司 152 年來的發展進程外，亦針對該公司目前最新型之鑽堡進行功能介紹，可搭載掃描設備，將隧道之內淨空與圍岩狀態掃描並建立 2D 剖面與 3D 影像(如圖 15)，並藉前一輪之開炸成果修正(或調整)下一輪之開炸佈置，此外，2 臂或 3 臂鑽桿可依布孔圖自動鑽掘，必要時也可採遠端遙控操作，而每孔鑽掘過程之掘進速率與扭矩均會記錄下來以供評估隧道開挖面前方之岩體狀態(如圖 16)。

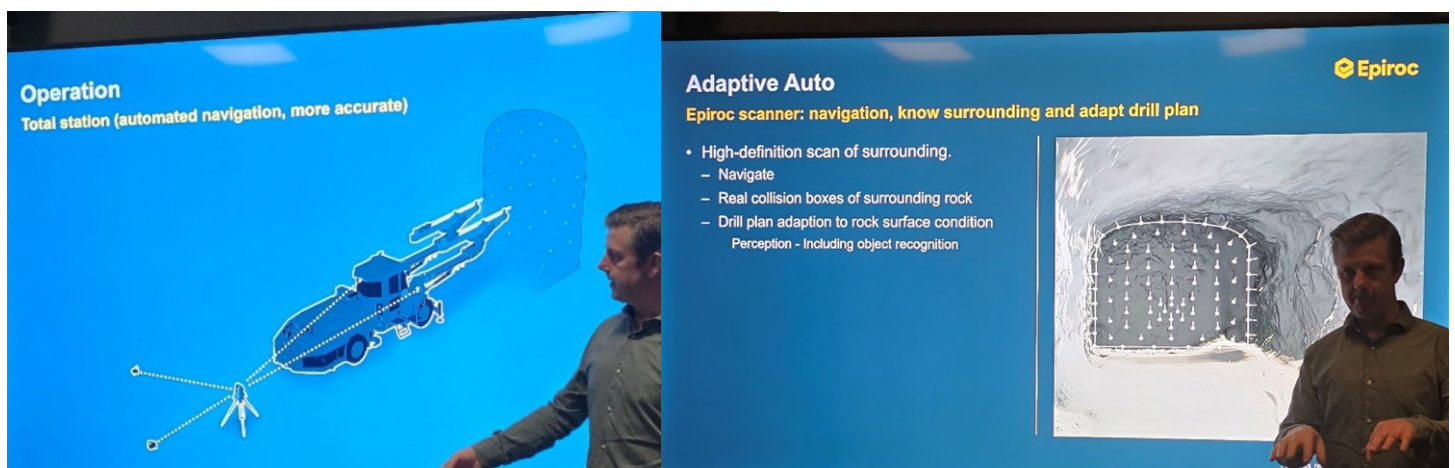


圖 15 鑽堡搭載掃描定位功能，並自動修正前進面鑽孔位置

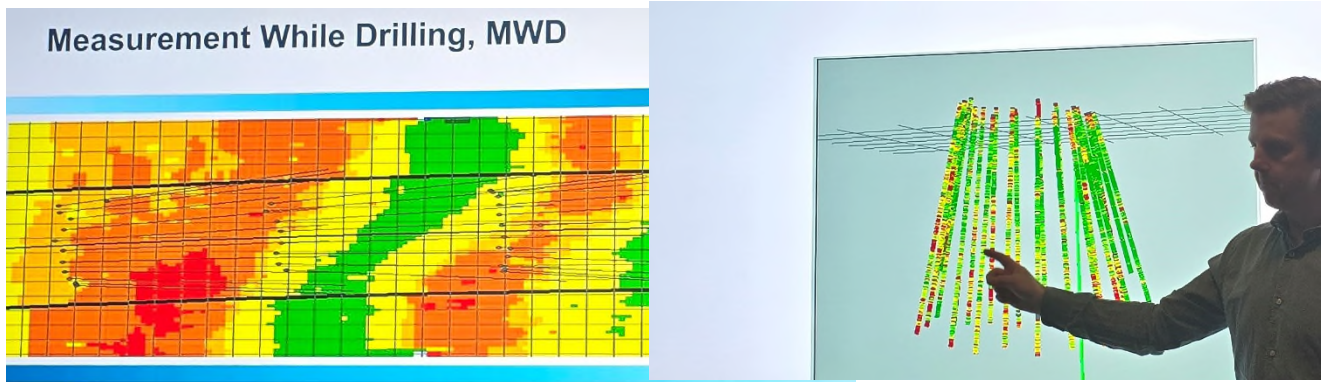


圖 16 利用鑽堡配置感應器紀錄扭矩及鑽掘速率，評估開挖面岩體性質

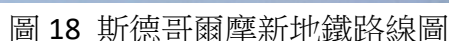


圖 17 Epiroc 公司待出貨之隧道施工機具展示

二、地鐵工程參觀

斯德哥爾摩地鐵為北歐最早地鐵路線之一，其中綠線最早於 1950 年投入營運，現今，斯德哥爾摩地鐵系統由三條主線（綠、紅、藍）組成，路線全長約 108 公里，設有 100 座車站，各路線自市中心沿輻射狀分布，核心轉乘站為 T-Centralen（中央車站），連接地鐵、火車及巴士網絡。

斯德哥爾摩地鐵的興建與營運管理分屬不同單位辦理，興建由地鐵延伸管理局 (Extended Metro Administration) 負責，營運管理則由斯德哥爾摩交通公司 (Storstockholms Lokaltrafik AB, SL) 負責，兩單位均向斯德哥爾摩議會負責(瑞典為內閣制國家)，其運作方式類似我國目前各地方政府的捷運興建管理，由捷運工程局負責捷運路線之興建、延伸擴建，完成後交由捷運公司則負責營運管理，不論捷運局或是捷運公司，均需向地方政府負責。



現場工程參觀部分則安排至 2 處施工中工地參訪，分別是索菲亞(Sofia)站及哈馬碧運河(Hammarby_kanal)站工地，其中索菲亞車站是未來斯德哥爾摩地鐵藍線延伸線的一個車站，位於地表下 100 公尺深度，完工後將是全世界最深的地鐵站之一(如圖 19)。

索菲亞(Sofia)站需要挖深的主要原因為，車站位於鹽湖海域(Saltsjön)旁，該段地下鐵路需穿越海床下方至堅實岩盤中，以避免遭遇沖積層與降低高水壓的施工風險。此外，為了因應車站地理條件的特殊性，索菲亞站與斯德哥爾摩其他地鐵站的設計不同，由於索菲亞站深度較深，車站將不設置電扶梯或樓梯，旅客全部以 8 部高速電梯將旅客直接由地表的車站入口，送至下方穿堂層及月台層(如圖 20 所示)，車站並採單一出入口設計，以一個大型電梯井容納 8 部電梯。

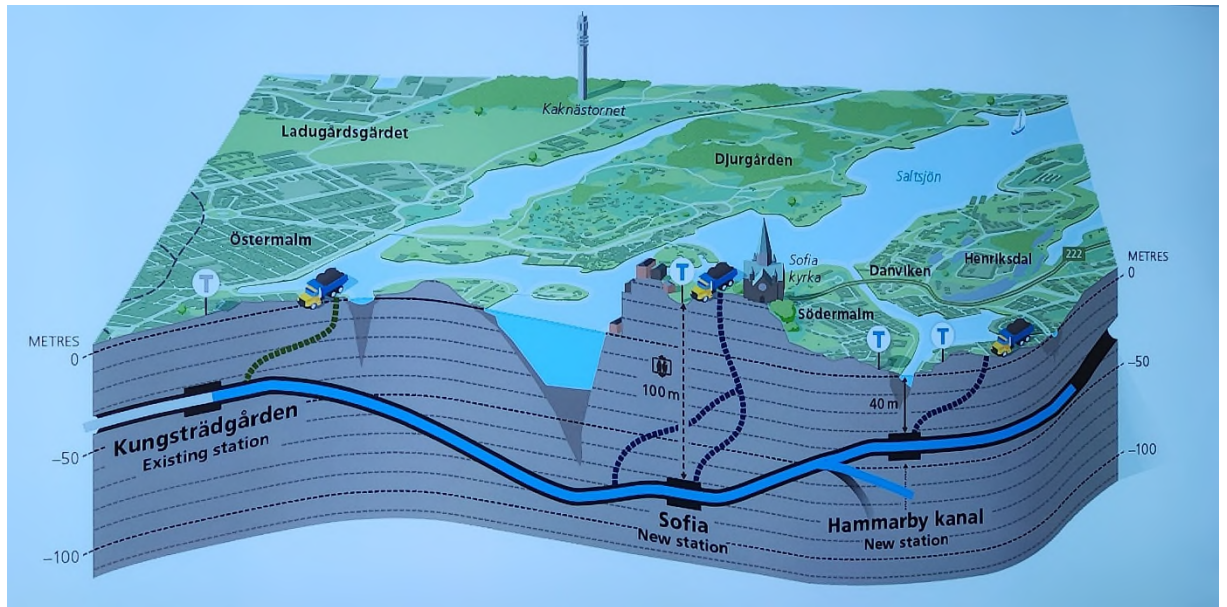


圖 19 藍線索菲亞(Sofia)站及哈馬碧運河(Hammarby_kanal)站間路線剖面

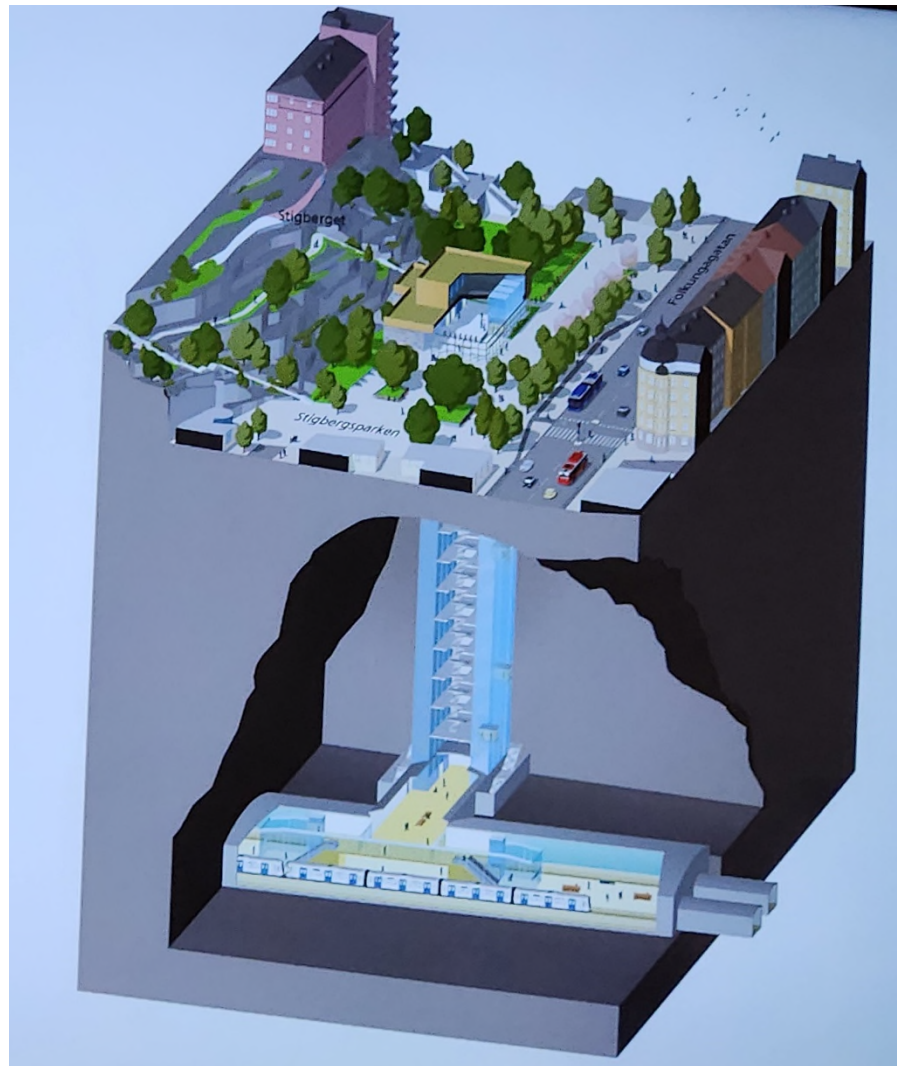


圖 20 索菲亞(Sofia)站模擬圖

因此本工程設計一 20M*20M 的垂直電梯井，如何安全有效率的完成電梯井開挖即為本車站的重要挑戰。

為克服垂直電梯井施工的障礙，施工團隊採用昇井工法(Raise Boring Method)，即先以小口徑(31cm)導孔(pilot hole)鑽掘至下方橫向隧道後，再由下向上進行擴孔，將導孔孔徑擴挖至 3.5M(如圖 21)，最後再以傳統鑽炸(D&B)方式，由上方逐階向下開挖，此工法的優勢在於由上向下逐階進行 20M*20M 的垂直電梯井開挖時，大量的岩方碴料可以直接向下推入擴挖後之導孔，由下方橫向隧道運離，大幅節省碴料吊運、地下水及施工污水全天候抽排所需之時間與費用。



圖 21 昇井工法示意圖及擴孔完成照片



圖 22 索菲亞站電梯井施工照片

哈馬碧運河站則是興建於哈馬碧運河(Hammarby_kanal)正下方約 35 至 40 公尺深度處，也是斯德哥爾摩第一個在水下建造月台的地鐵站，並於運河南北兩岸各設置一出入口(如圖 23)。



圖 23 哈馬碧運河(Hammarby_kanal)站剖面圖

由於瑞典的地質屬於火成岩、變質岩為主，地質條件良好，地盤自立性佳，車站站體開挖段斷面採取幾近於矩形斷面的扁拱形，輔以噴凝土及岩栓作為隧道支撐，岩體壁面亦僅有少量出水，因此，迥異於我國年輕、破碎地質進行隧道開挖時所遭遇之狀況(如圖 24)所示。

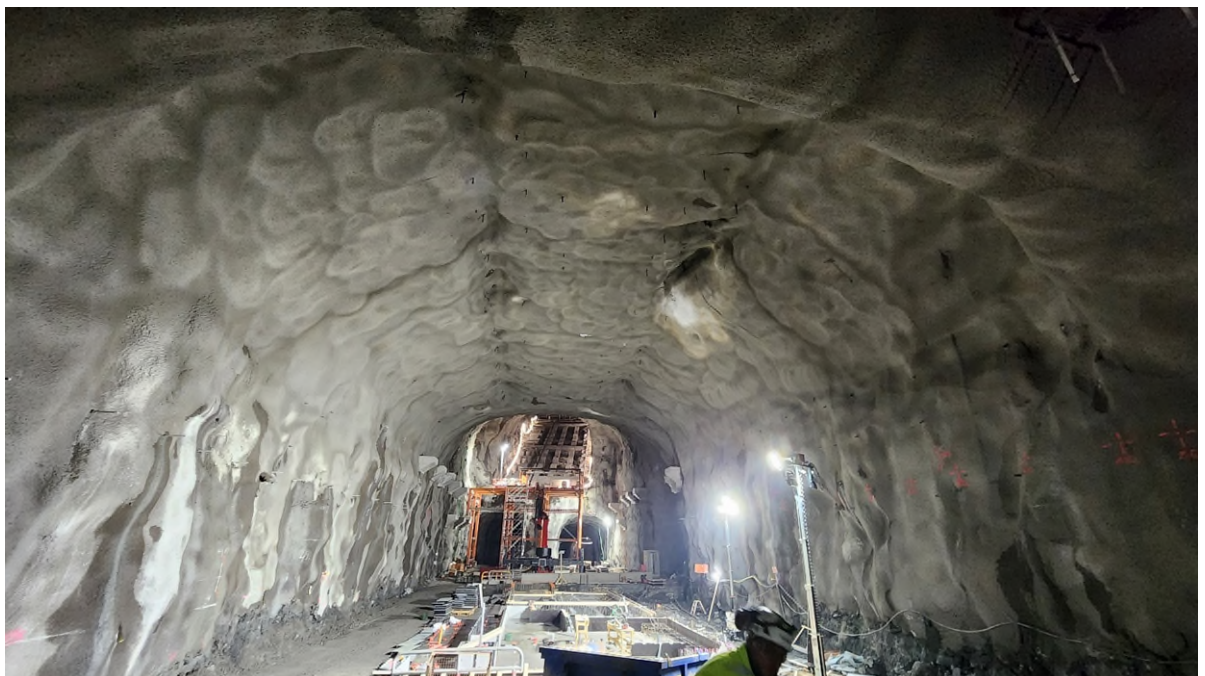


圖 24 哈馬碧運河站站體開挖施工照片

肆、心得及建議

- 一、隨著科技的進步，隧道施工機具與測量儀器設備越來越輕便與自動化，各國廠商漸漸在調查與設計階段即開始利用 BIM(建築資訊模型)技術，建立隧道 3D 數位孿生模型，除了用以預測及克服隧道在施工階段可能遭遇的困難外，當隧道實際進行開挖時，前進開挖鏡面所遇到的地質影像及位態參數如能一併紀錄並更新納入地質模型，將可以提供隧道未來在營運階段維護管理使用，建立隧道完整的生命週期履歷資料。
- 二、本次研討會主辦單位特別安排索菲亞(Sofia)站--世界最深的地鐵站之一進行工程參觀，施工團隊採用昇井工法(Raise Boring Method)順利在 10 周內即完成導孔(pilot hole)鑽掘及擴孔，令人印象深刻，事實上我國雪山隧道一號豎井(深度近 500 公尺)當初在施工時，亦採用相同的昇井工法，大幅降低開挖碴料出碴、地下水抽排所需時間及費用，此工法對深度較大的垂直豎井之開挖施工效益，在本工程案例又再一次被印證。
- 三、本次研討會期間，筆者多次搭乘當地的地鐵往返市區、會場與飯店之間，不論任何時段，即使是最繁忙的中央車站，均不會看見人潮壅擠到塞滿車廂的情形，因此當斯德哥爾摩地鐵延伸管理局副局長 Stefan Persson 說明議會同意繼續投資興建延伸地鐵路線時，不禁好奇詢問當地的地鐵運量，以及每年的票務收入是否可以維持負擔營運成本，甚至可以獲利，Stefan 回應目前斯德哥爾摩地鐵年運量超過 4 億人次，平均每日載運旅客超過 120 萬旅次，但是票務收入確實無法完全支應負擔營運成本，營運成本約一半靠票務收入，另一半需要倚賴政府預算撥補支應，此一現象與台灣現況雷同，以台北捷運每日近 200 萬旅次的運量，尚且無法完全倚靠票務收入維持營運，未來其他縣市捷運通車營運後，恐需面臨維持營運的財務壓力。
- 四、此外瑞典斯德哥爾摩地鐵最為人稱道的是公共藝術裝置，有「世界最長的藝術長廊」美譽，筆者經過地鐵車站，隨處可見公共藝術或沿著壁體裸岩呈現，或不經意抬頭可見藏身於天花板內(如圖 25)。



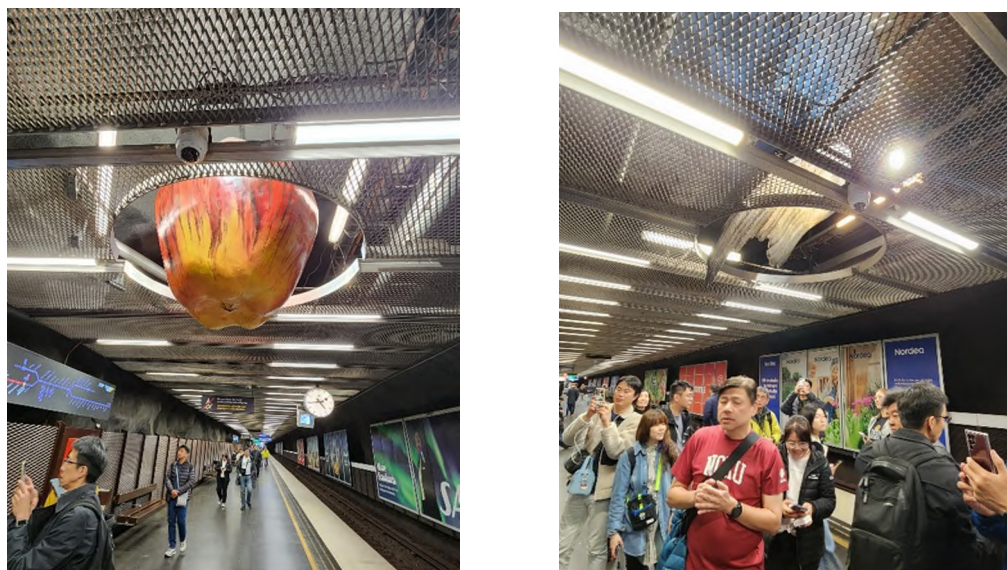


圖 25 隱身於地鐵站各角落之公共藝術作品

除了地鐵站內的公共藝術作品外，筆者在地鐵站外也看到道路設計為了公共藝術讓路的情形(如圖 26)，讓人訝異瑞典人民對於公共藝術與交通順暢間的取捨與價值判斷，同時也令人思考，同樣的情形如果發生在台北，我們的城市規劃者會如何在藝術性、功能性、安全性和交通效率之間取得平衡。



圖 26 隱身於地鐵站各角落之公共藝術作品