

出國報告(出國類別：參加會議)

# 參加 2017 年國際隧道工程學會 研討會報告

服務機關：交通部臺灣區國道新建工程局

姓名職稱：黃裔炎 副總工程司

派赴國家：挪威

出國期間：106年6月9日至6月18日

報告日期：民國 106 年 8 月 24 日

## 摘 要

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，2017年世界隧道研討會於2017年6月在挪威卑爾根(Bergen)隆重舉行。本次大會主題為“地面問題，地下解決”(Surface Problems - Underground Solutions)。由於現在全世界各地均面臨氣候變遷與高度都市化問題，一半以上人口集中在都市，地面公共設施空間明顯不足，而地下空間尚僅微幅利用，本主題意在表彰協會與其會員致力於國際間知識分享與技術合作之努力，共同解決地下空間利用的問題及加強工程技術的提昇，以維人類的永續發展。

本屆會議超過1,500人以上參加，在3天的研討會議中，大會主辦單位共規劃安排了16場次的座談會、研討會以及張貼論文展示會，發表了340篇以上論文。本文分別簡要介紹本次會議專題演講、研討會論文、張貼論文、廠商展覽及工地參觀之相關內容。會後前往瑞典斯德哥爾摩，參訪E4高速公路隧道工程以及隧道機具廠商Atlas Copco公司總部；瑞典E4斯德哥爾摩外環高速公路是通往瑞典首都歐洲高速公路網的新路線之一，它連接斯德哥爾摩的南部和北部地區，減緩了主幹道路和內部城市交通之壅塞；為了盡量減少對敏感自然和環境的影響，全長21公里的路線，隧道就佔了18公里。本計畫預定建設期程為10年，總工程費為31億歐元。

最後係參加本次會議的心得感想，內容包括隧道施工建議採用預灌漿(Pre-injection)工法降低湧水風險同時降低水壓，將三維隧道掃描技術應用於隧道施工，隧道內道路分岔處景觀與照明應加以特別設計處理；此外也陳述北歐國家十分重視工人合理工作時數以及對施工機具的妥善保養維護。

## 目 次

一、前 言.....	4
二、行 程.....	6
三、會議活動與內容.....	7
四、瑞典參訪.....	13
五、心得與感想.....	17

## 一、前言

### 1.1 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，2017年世界隧道研討會於2017年6月在挪威卑爾根(Bergen)隆重舉行，國工局鑒於參與本研討會將有助於與國際隧道工程界的直接交流，俾利隧道新理念、新技術的引進及相關工程案例的參考，以作為隧道工程在規劃設計及施工管理等業務執行之借鏡，故派員與會。本研討會除筆者奉派參加外，台灣尚有台灣大學土木系黃燦輝教授、中興工程顧問社蕭富元博士、中興測量公司阮英彥副總經理與聯合大地工程顧問公司李佳翰博士等，共5人與會(如圖1)。



圖 1. 台灣與會人員合影

### 1.2 會議主題

本次大會主題為“地面問題，地下解決”(Surface Problems - Underground Solutions)。由於現在全世界各地均臨氣候變遷與高度都市化問題，一半以上人口集中在都市，地面公共設施空間明顯不足，而地下空間尚僅微幅利用，本主題意在表彰協會與其會員致力於國際間知識分享與技術合作之努力，共同解決地下空間利用的問題及加強工程技術的提昇，以維人類的永續發展。

### 1.3 會議地點

本次會議係由挪威隧道協會(Norwegian Tunnelling Society, NFF)主辦，舉行地點在挪威第二大城卑爾根。卑爾根擁有900年多年歷史，建於維京時代，在中世紀時是斯堪的那維亞其中一個重要城市，直到1299年前都是挪威的首都。卑爾根

雖是挪威的一座大都市，卻有小鎮的魅力和風情。這裡的居民心懷愛國熱情，驕傲於城市的多面性、歷史和文化傳統。他們中不少人非常樂意為遊客帶路，引領他們去自己最喜歡的當地景點、咖啡店或餐廳。

在長達數百年的漫長歲月裡，卑爾根一直連通挪威和歐洲其他地區的繁華貿易中心。到今天仍然可以在一個叫布呂根（Bryggen）的碼頭(圖2)周圍地區找到當年的情況，而布呂根也是獲聯合國教科文組織選為其中一個世界文化遺產的地方。如今昔日繁華的港口已被鱗次櫛比的餐廳、酒吧、工藝品店和歷史博物館佔據。

會議場所在卑爾根音樂廳(圖3與圖4)，位於市中心公園旁，風光明媚，筆者下榻旅社Scenic Byparken亦在附近，走路僅約5分鐘可達，無須再搭乘交通工具。



圖2. 卑爾根布呂根碼頭(世界文化遺產)



圖3. 會場(卑爾根音樂廳)及與場外機具展示

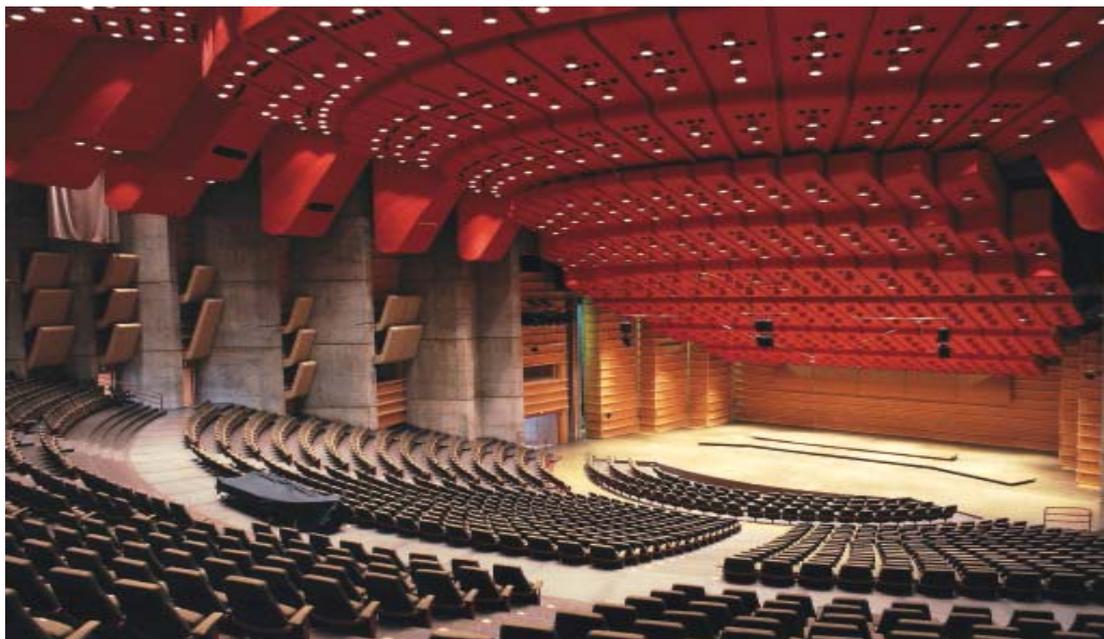


圖4. 開幕典禮會場(Concert Hall)

## 二、行 程

本次出國行程參加會議行程配合大會舉辦時間，奉核定為自6月9日起程至6月18日返程共10日，大會議程6月11日至6月14日，除參加大會安排之工程參觀外，另於會後6月16日與台灣參加大會人員前往瑞典斯德哥爾摩，參訪E4高速公路工程以及隧道機具廠商Atlas Copco公司總部，結束後於6月18日下午返國，其行程內容詳如下行程表：

日期	時間	行 程	地點
6/9	下午	桃園國際機場 → 曼谷蘇汪納蓬國際機場	機上
6/10	全日	曼谷機場 → 奧斯陸機場 → 卑爾根機場	機上
6/11	全日	會場報到及領取資料	卑爾根
6/12	上午	參加大會開幕式及專題講演	卑爾根
	下午	參加論文研討會” Innovation in drill & blast Tunnelling” (隧道鑽炸工法創新)	卑爾根

6/13	上午	參加綜合研討會	卑爾根
	下午	挪威 E39 公路隧道工程工地參觀	卑爾根郊區
6/14	全日	參加論文研討會、參觀張貼論文及展覽場	卑爾根
6/15	全日	卑爾根機場 → 斯德哥爾摩國際機場	機上
6/16	上午	參訪 E4 the Stockholm bypass (斯德哥爾摩外環高速公路工程)	斯德哥爾摩
	下午	參訪 Atlas Copco 公司總部	
6/17~ 6/18		斯德哥爾摩國際機場 → 曼谷蘇汪納蓬國際機場 → 桃園國際機場	機上

### 三、會議活動與內容

大會議程包括Muir Wood獎得主演講(Muir Wood Lecture)、專題演講 (Keynote Lectures)、綜合座談會(Open Sessions)、技術論文研討會(Technical Sessions)、張貼論文展示(Poster Sessions)、廠商展覽(Exhibition)及工地參觀(Technical Site Visit)等。本屆Muir Wood Lecture得主為Emeritus Håkan Stille，其文章題目為”Geological Uncertainties in Tunnelling - Risk Assessment and Quality Assurance”(全文可至ITA網站下載)。

本屆會議超過1,500人以上參加，在3天的研討會議中，大會主辦單位共規劃安排了16場次以上的座談會、研討會以及張貼論文展示，發表了340篇以上論文。以下分別簡要介紹專題演講、研討會論文、張貼論文、廠商展覽及工地參觀之部分內容。

#### 3.1 專題演講

會議的專題演講中以Nick Barton所演講之”Rock as the Construction Material for Tunnels”最為精采，Barton博士首先說明隧道於高應力狀態下開挖所產生之脆性破壞(fracture)現象(圖5(a))及其分析模式(FRACOD)；惟當岩體內存在既有之優勢節理，則隧道開挖易沿節理產生剪力破壞或超挖(Over-break)之現象(圖5(b))；接著闡述挪威隧道工法(Norwegian Method of Tunnelling, NMT)之設計理念與隧道實際支撐後之行為，其觀念認為隧道開挖後應只需要依岩體評分(Q法)之支撐建

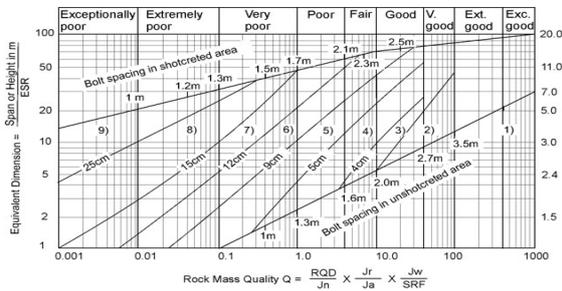
議表(圖5(c))給予適當之鋼纖維噴凝土與岩栓支撐(岩體較差時則改採用混凝土)，無需施作鋼支保，因鋼支保之存在可能會使外支撐無法與岩盤面密合(圖5(d))；此外，由於挪威隧道工程之地下水位或水壓較高，因此NMT工法建議採用預灌漿(Pre-injection)措施(圖5(e))，以有效於開挖前降低隧道湧水之機率與風險；最後則強調斷層破碎帶會嚴重影響TBM工法施工之工期，因此其發展 $Q_{TBM}$ 評估法(圖5(f))用以評估各種岩體狀況採用TBM工法施工之難度。

圖 5. Barton 博士發表演說之相關內容圖表

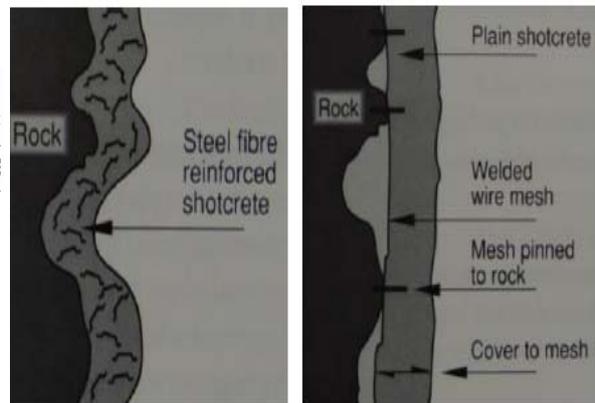


(a)

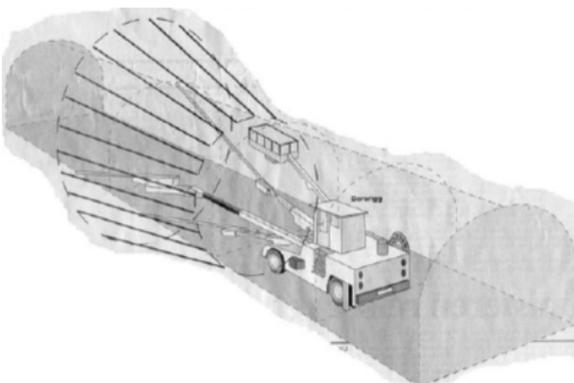
(b)



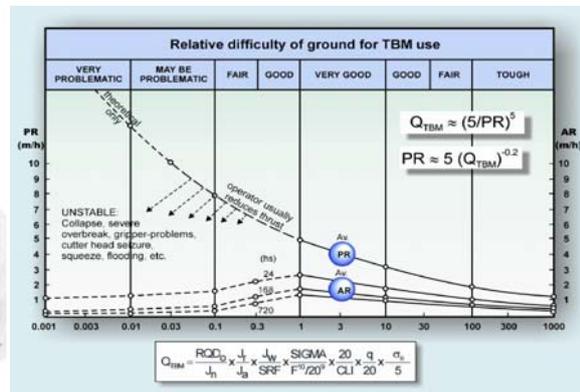
(c)



(d)



(e)

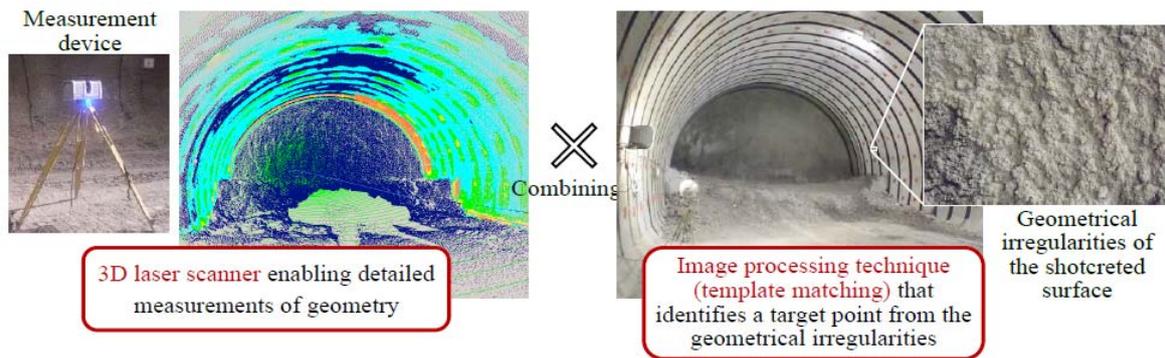


(f)

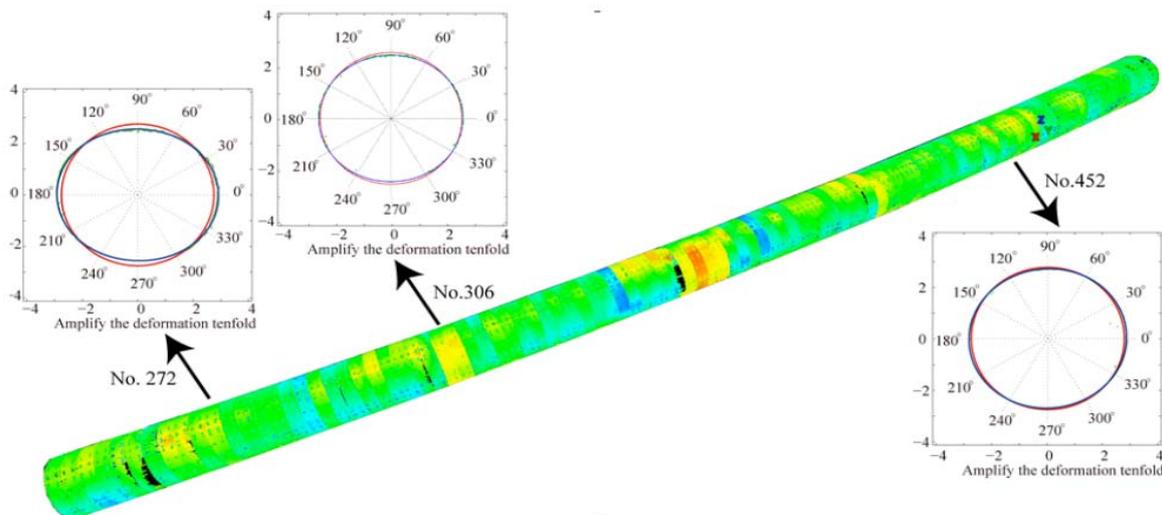
### 3.2 研討會論文

本次研討會從世界各地投稿上千篇摘要中經過嚴謹之審查共挑選340篇文章撰寫全文於會中發表，其中130篇文章為現場口頭報告發表，其餘則安排以海報張貼發表。從研討會口頭報告發表的論文中可發現，隨著測量(與掃描)技術之進步，許多國家之隧道工程已逐漸將三維隧道掃描技術應用於隧道施工階段，例如：日本鹿島建設(Kajima Corporation)結合三維雷射掃描與影像處理技術，應用於隧道開挖支撐後之三維變形監測(圖6(a))；中國同濟大學應用三維光達(LiDAR)點雲資料進行上海地鐵11號線之環片變形監測(圖6(b))；加拿大皇后大學研究利用光達(LiDAR)掃描資料轉化成裂隙岩體網絡(Discrete Fracture Network, DFN)所需資訊，並採用有限元素法(FEM)進一步模擬與分析岩體狀況(圖6(c))；奧地利3GSM公司開發三維攝影(拍照)技術進行隧道開挖面岩體評估，利用其技術可判釋隧道開挖面弱面位態(圖6(d))；挪威Norconsult顧問公司則嘗試將各階段所有資訊利用BIM (Building Information Modeling)整合應用於隧道工程(圖6(e))。

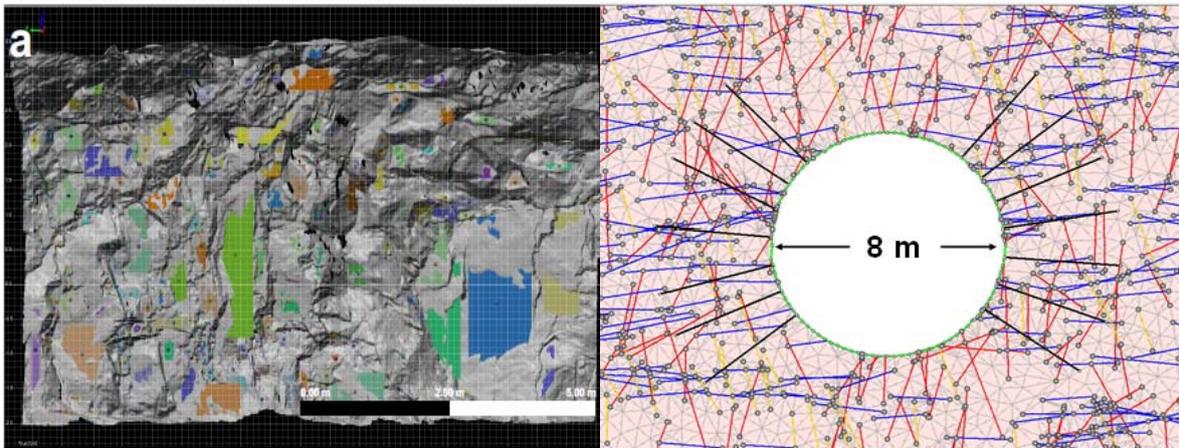
圖 6. 研討會發表論文相關內容圖表



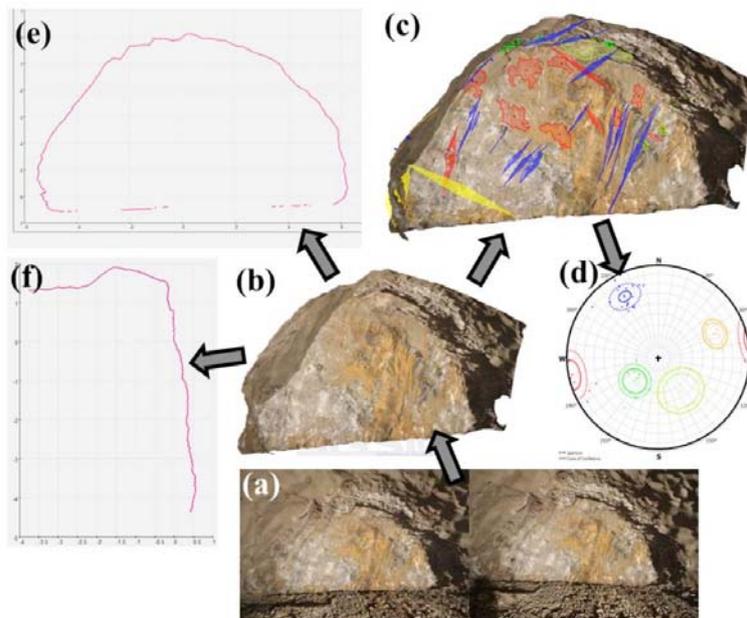
(a) 3D matching (Kitamura et al., 2017)



(b) Overall deformation nephogram of the Shanghai Metro Line 11 (Zhao et al., 2017)



(c) DFN-LiDAR-optical sensor method (Vazaios et al., 2017)



(d) Digital mapping of a top heading (Pötsch et al., 2017)

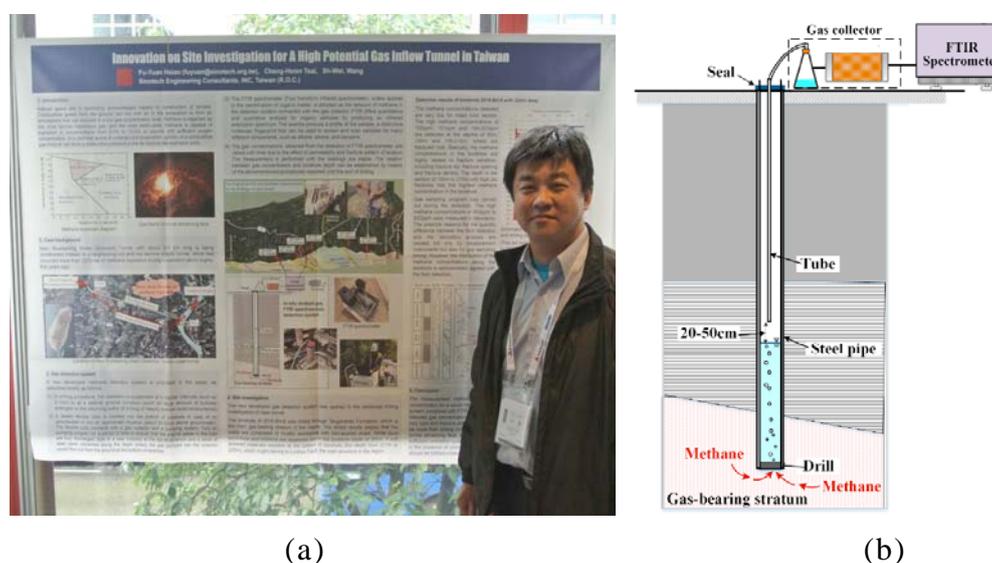
EXCAVATION	SURVEYING	TUNNELING	FORMWORK	REINFORCEMENT	CONCRETE
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometry directly from BIM</li> <li>• Automated operation of equipment (GPS steering)</li> <li>• Data collection for feedback to the designers</li> <li>• Fully digitalized workflow</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Setting-out directly from BIM</li> <li>• Photogrammetric survey with drones</li> <li>• Quantity calculations based on BIM</li> <li>• As-built documentation from the field</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Building plan for drilling directly from BIM</li> <li>• Data steering (robot) of jumbo</li> <li>• MWD collection and analysis</li> <li>• Geometric control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planning of formwork</li> <li>• Pre-fabrication of formwork for complex geometry</li> <li>• Geometric control and QC of formwork before casting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Easy identification and placement based on BIM</li> <li>• Digital xml bar bending schedules</li> <li>• Direct pre-fabrication based on model data</li> <li>• QA of bars based on comparison with BIM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• All relevant information available in BIM</li> <li>• Identification and installation of embedded parts based on BIM</li> <li>• Ordering concrete directly based on BIM quantities</li> </ul>

(e) Contractors processes based on BIM (Engelstad, 2017)

### 3.3 張貼論文

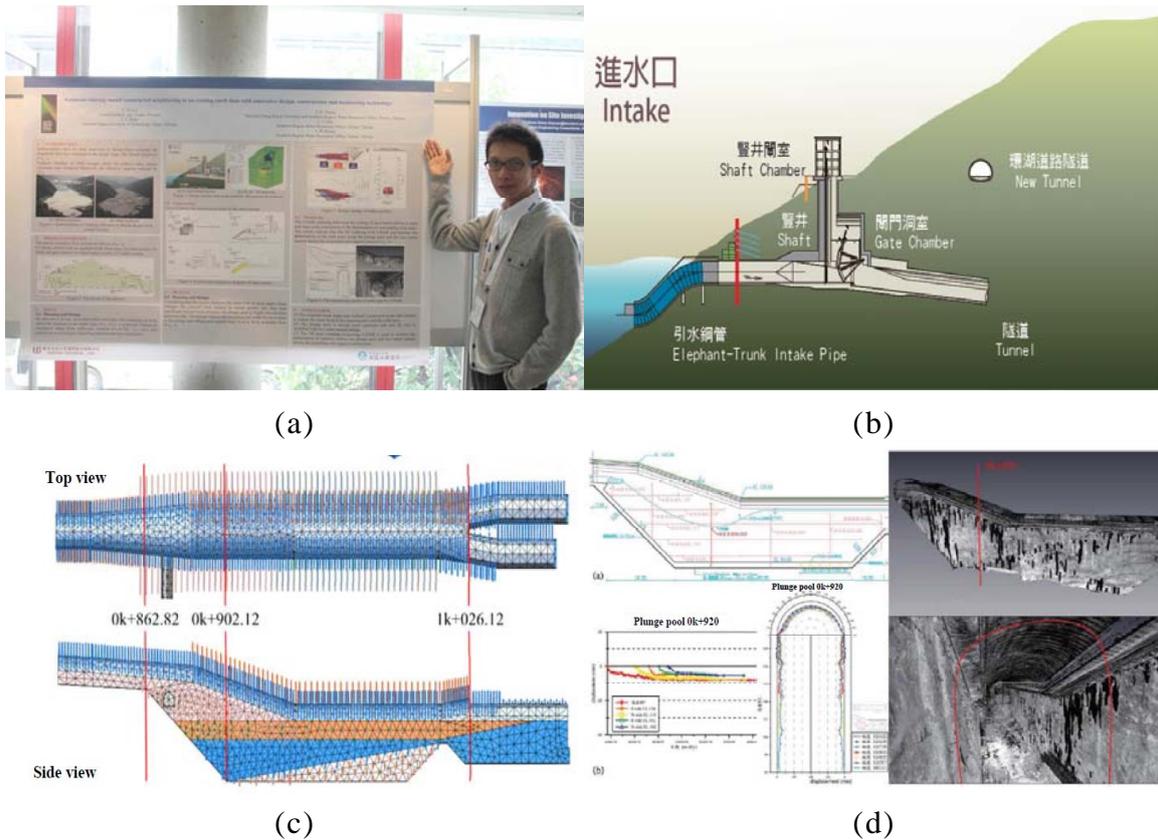
由於本屆張貼海報展示論文多達200篇以上，故分為3天4個場次進行，台灣出席者分別有中興工程顧問社蕭富元博士與聯合大地工程顧問公司李佳翰博士各發表論文1篇。蕭富元博士發表 ”Innovation on Site Investigation for a High Potential Gas Inflow Tunnel in Taiwan”(圖7(a))，係基於新烏山嶺隧道引水工程隧道開挖可能遭遇可燃性(有害性)氣體，首創開發利用FTIR霍式紅外線光譜儀建立「地層氣體紅外線光譜檢測系統」(圖7(b))，可成功量測地層各深度逸出甲烷( $\text{CH}_4$ )氣體濃度，有助於未來隧道開挖可燃性(有害性)氣體調查評估與因應對策研擬。

圖 7. 中興工程顧問社 蕭富元博士發表論文



李佳翰博士發表”Sediment-slucing tunnel constructed neighboring to an existing earth dam with innovative design, construction and monitoring technology”(圖8(a))，其內容主要係闡述由於氣候變遷與極端氣候事件影響，台灣水庫陸續面臨嚴重之淤積問題，其中台灣最大庫容之曾文水庫於南區水資源局之大力推動下，由聯合大地工程顧問公司與巨廷工程顧問公司獨創開發「象鼻引水鋼管工法」(圖8(b))，且限於於出水口腹地有限，將長147公尺、寬18公尺、高35公尺之消能池設置於山體內(圖8(c))，並首次將地面光達(LiDAR)技術應用於豎井閘室、消能池與出水口隧道之計(監)測作業(圖8(d))，本工程經業主、總顧問與統包團隊之通力合作下，目前工程進度已達93%，此防淤隧道工程將能有效減緩曾文水庫之淤積情形，並可提供未來防淤(排砂)隧道工程之借鏡與參考。

圖 8. 聯合大地工程顧問公司 李佳翰博士發表論文



### 3.4 展示會

本次會議展覽場共有超過60個廠商參展，其展示內容可大致分為：(1)材料類(如：normet、MAPEI、BASF、Sika等)；(2)機具類(如：HERRENKNECHT、Bobbins、Atlas Copco、SANDVIK等)；(3)構件類(如：DSI、BEKAERT、epc等)；(4)測量類(如：dibit、3GSM等)；(5)顧問公司(如：Amberg、Multiconsult、Ramboll、SWS等)等眾多類型。

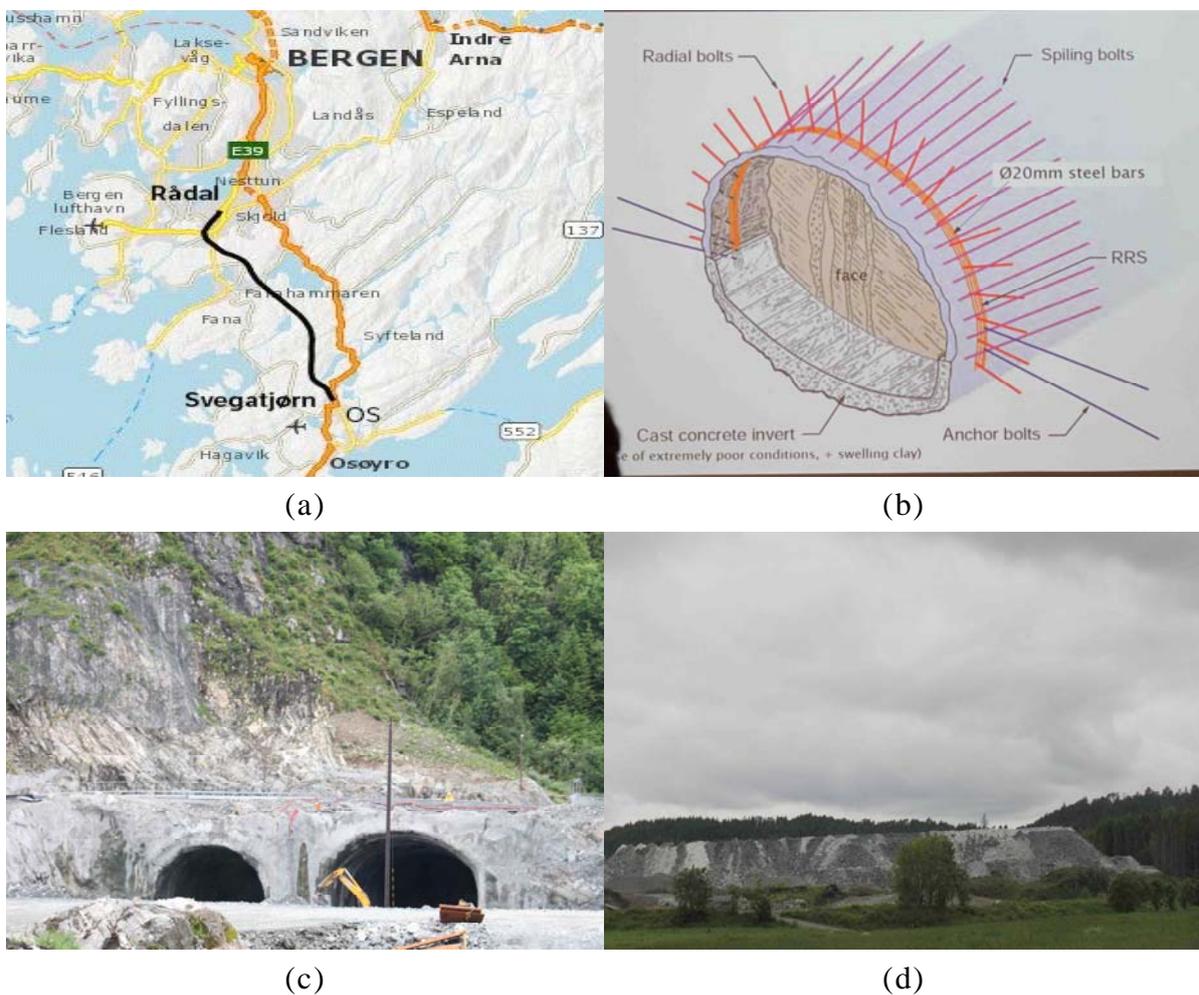
眾多展覽中比較特別的是有許多家鋼纖維噴凝土(Steel Fibres Shotcrete)與合成纖維噴凝土(Synthetic Fibres Shotcrete)廠商參展，北歐地區由於其地層年代古老、岩體強度高、隧道開挖後自立性佳、且幾乎無地震之困擾，故其隧道工程鮮少使用鋼支保與鋼筋混凝土襯砌，大都僅採用鋼纖維或合成纖維噴凝土&岩栓為外支撐(視需要採用先撐鋼棒)，並採用鋼纖維噴凝土或合成纖維噴凝土或純噴凝土為永久襯砌。其中合成纖維噴凝土與鋼纖維噴凝土之差異在於：(1)合成纖維噴凝土具有抗酸性與抗鹼性；(2)合成纖維不會銹蝕；(3)合成纖維噴凝土具有較高延展性，允許較大變形；(4)有些合成纖維噴凝土於高溫燃燒下具有抗爆裂性(anti-spalling)，可作為防火披覆。

### 3.5 工地參觀－挪威E39公路隧道工程

挪威Os與Bergen之間原有的E39公路因交通量需求增大，必須再新建一條新

的E39公路(圖9(a))以紓緩其交通瓶頸。新建的E39公路將以4車道標準設計，公路全長為17公里，其中隧道長度就佔了13公里。本工程從2015年開工，預計2020年完工通車，預定工程費為65億挪威克朗(約為新台幣230億)。本次參訪之工地為Rådalen隧道與Sørås隧道，隧道施工採鑽炸法(Drill & Blast)，隧道標準斷面積為71 m<sup>2</sup>、最大開挖斷面積為224 m<sup>2</sup>，採全斷面開挖，每次輪進長度為5公尺，每一施工循環為9小時，隧道支撐順序為：(0)先撐鋼棒(視需要)；(1)岩栓；(2)鋼纖維噴凝土；(3)鋼筋(每環6支)；(4)永久噴凝土襯砌(不加鋼纖維)，如圖9(b)所示。圖9(c)~(d)為現地參訪之照片。

圖 9. 挪威 E39 公路隧道相關圖面與照片



#### 四、瑞典參訪

研討會結束後於6月15日直接從挪威卑爾根(Bergen)飛往瑞典斯德哥爾摩(Stockholm)參訪E4高速公路隧道工程與Atlas Copco公司總部，參訪過程與心得說明如后。

##### 4.1 瑞典E4高速公路隧道工程



本次參訪係透過Atlas Copco公司安排，主要參訪FSE403標隧道工程，其工程內容包含：(1) 2座3.6公里之主隧道；(2) 4座10公尺直徑、深度30~50公尺之通風豎井；(3) 60座人行聯絡道。本工程於2015年開工，預定2021年完工，工程費為21億瑞典克朗(約新台幣73億元)。本工程由於地下水位較高，故隧道支撐順序為：(1)預灌漿(pre-injection, 圖11(e))；(2)鋼纖維噴凝土；(3)岩栓；(4)預鑄襯砌板，詳見圖11(a)。圖11(b)~(d)為現地參訪之照片。

圖 11. 參方瑞典 E4 斯德哥爾摩外環高速公路隧道相關照片



(a)



(b)



(c)



(d)

#### 4.2 Atlas Copco公司總部

阿特拉斯科普柯集團(Atlas Copco)是一家創立於1873年的瑞典工業企業，主要製造工業用工具和設備。其總部位於斯德哥爾摩，雇員超過33,000人，在20個國家生產著68種各式各樣的產品。Atlas Copco 研發和製造工業用工具，壓縮空氣設備，建築和採礦設備，工業裝配流水線以及提供相關服務和設備租賃。通過

世界範圍內的銷售和服務網絡，產品在150多個國家，使用不同的品牌銷售和租賃。半數的產品是有其全資或合資持有的銷售公司所經營。集團的業務由空氣壓縮技術，建築和採礦設備，和工業技術這三個領域的子部門所運營。(維基百科，2017)

經由Atlas Copco台灣分公司的安排，本次得以參訪該公司瑞典斯德哥爾摩總部(圖12(a))，並由地下岩石開挖部門之東亞和澳大利亞區域業務經理Mr. Norefors與隧道應用專家Mr. Hansson介紹，Atlas Copco地下岩石開挖產品線(圖12(d))主要有：(1)鑽孔；(2)物料搬運；(3)基礎建設；(4)自動化四大種類。其中鑽孔類包含：(a)地面鑽機；(b)隧道開挖面鑽堡；(c)岩栓鑽堡(Bolting)；(d)豎井鑽機(Raise-boring)。基礎建設類則包括：(a)通風設備；(b)噴漿機。參訪人員並與該公司二位專家熱烈討論，圖12(c)。

Atlas Copco地下岩石開挖部門基於現代科技的發展與用戶端的需求，不斷改良各項產品並致力於研發創新之產品，例如：BenchREMOTE (圖12(b))為Atlas Copco創新研發之遠端控制站，透過WiFi網路BenchREMOTE可同時操控距離100公尺遠之6台機具，對於危險之工作場所(環境)或為提高採礦生產率之需求，提供了最佳方案。

圖 12. 參訪 Atlas Copco 公司照片



(a)

(b)



(c)

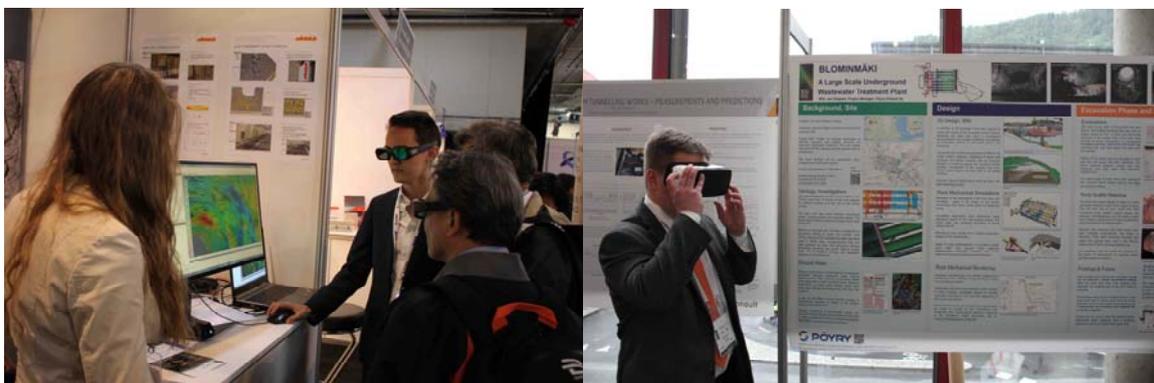
(d)

## 六、心得與感想

- (1) 北歐地區由於其地層年代古老、岩體强度高、隧道開挖後自立性佳、且幾乎無地震之困擾，故其隧道工程鮮少使用鋼支保與鋼筋混凝土襯砌，大都僅採用鋼纖噴凝土與岩栓為外支撐(視需要採用先撐鋼棒)，並採用鋼纖噴凝土為永久襯砌，惟為避免施工期間遭遇湧水，大都會採用預灌漿(Pre-injection)工法降低湧水風險同時降低水壓，此預先灌漿之觀念十分值得國內借鏡與參考。
- (2) 隨著測量與掃描技術之進步，許多國家之隧道工程已逐漸將三維隧道掃描技術應用於隧道施工階段，其原理(概念)係採用光達(LiDAR)、雷射或攝影等技術取得隧道開挖面岩盤影像、隧道周壁(噴凝土)影像與剖面測量，此資訊除有利於每輪進開挖之岩體評分以選用合適之支撐等級外，亦可評估超挖狀況、關鍵岩塊等，且經由多期掃描資訊亦可輔助隧道計測，以評估隧道變形是否已收斂達穩定狀態。目前國內曾文防淤隧道工程、台9線南迴公路安朔至草埔段C2隧道標新建工程、新北市新店區安坑1號道路隧道工程等皆已陸續採用此技術。
- (3) 由於科技之日新月異，三維資訊與VR (Virtual reality) 虛擬實境技術已逐漸應用於各領域，本次展覽場眾多廠商中，便有廠商採用3D立體成像技術，讓參觀者配戴3D眼鏡便可觀看隧道三維掃描影像(圖13(a))；此外，Poster Sessions中，更有作者利用VR技術，讓參觀者配戴VR眼鏡便可觀看發表文章中案例隧道之施工過程(圖13(b))，令人印象深刻。
- (4) 參訪挪威E39公路隧道工程時才得知，該工程工人每日作業10小時，每周作業6天，作業二周後便可休息一周(圖14(a))，其對作業人員休息時間的重視與國內相比，實在無法相提並論。
- (5) 參訪瑞典斯德哥爾摩E4高速公路隧道工程工地時，發現營造商Implenia所有

施工機具皆保養得宛如新品一樣，經詢問後才得知，施工承商將每一台施工機具用工程師的名字命名，除由該位工程師負責保養外，每位使用者也會更加愛惜與小心使用，例如圖14(b)的鑽堡和Linnea工程師一樣閃亮動人。

圖 13. 展覽場與張貼論文展示場照片



(a) 3D 眼鏡

(b) VR 眼鏡

圖 14. 挪威 E39 公路隧道與瑞典 E4 高速公路隧道工程參訪照片



(a) E39 公路隧道工程排班表

(b) E4 高速公路隧道工程師與鑽堡

(6)參訪期間行經挪威與瑞典許多公路隧道時發現，北歐之公路隧道可於隧道內設置交流道與圓環，且道路分岔之前的景觀與照明均精心設計(圖15)，以提醒用路人注意並增加美感；且北歐之地下車站與許多隧道均無打設混凝土襯砌，僅採用噴凝土作為永久襯砌，惟局部噴凝土位置呈現滲水與白華現象(圖16)，或許國內一些隧道施工與監測技術與經驗，可與此處互相交流與學習。



圖 15. 北歐隧道內分岔景觀(瑞典)



圖 16. 瑞典斯德哥爾摩地下鐵車站