

出國報告（出國類別：其他）

參加2016年國際隧道協會世界隧道大會 報告

服務機關：交通部臺灣區國道新建工程局

姓名職稱：楊慕泉 副工程司

派赴國家：美國

出國期間：105年4月

報告日期：105年7月

摘 要

國際隧道協會之世界隧道大會（World Tunnel Congress, WTC）為國際間隧道領域之年度盛會，國工局鑒於參與世界隧道大會將有助於與國際接軌以及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。今（2016）年大會在美國加州舊金山隆重舉行，計有來自 100 個以上的國家，超過 2,500 名與會者，主題為“業界團結(An Industry United)”。

本文係參加 2016 年世界隧道大會之報告，內容包括：行程紀要、大會中國際隧道協會公開會議、建築資訊模型研討會、技術性研討會議及其中筆者認為較具特色之內容，與舊金山中央地鐵計畫施工中之華埠站實地考察等。本次大會在世界各國代表的熱烈參與下順利成功落幕，縱然隧道業界於全球各地面臨著諸多的挑戰，但透過大會的舉辦更能深刻感受到國際間隧道工程界知識與經驗交流平台的力量，建議後續仍派員參與此年度大會以獲取寶貴之經驗與技術。

目 錄

一、 前言.....	1
二、 目的.....	2
三、 行程紀要.....	2
四、 世界隧道大會	4
4.1 大會主題及議程	4
4.2 大會內容概要	6
4.2.1 國際隧道協會公開會議（ITA Open Session）	6
4.2.2 建築資訊模型研討會（BIM Workshop）	7
4.2.3 技術性研討會議（Technical Session）	8
4.2.4 隧道通過斷層帶之襯砌設計	10
4.2.5 噴塗式防水層經驗	14
4.2.6 現地量測隧道灌漿壓力	16
4.2.7 採用可縮式支保補強襯砌案例	17
4.2.8 實地考察	19
五、 心得與感想.....	24

表目錄

表 3-1	出國行程概要.....	4
表 4-1	2016 年世界隧道大會議程一覽表	5
表 4-2	國際隧道協會工作小組一覽表.....	6

圖目錄

圖 4-1	國際隧道協會建築資訊模型研討會議程.....	7
圖 4-2	BIM 在隧道工程之實際應用範例 (Žibert et al., 2016)	8
圖 4-3	隧道沿線地質剖面圖 (Greunen et al., 2016)	11
圖 4-4	美國洛杉磯污水隧道之襯砌設計與分析 (Greunen et al., 2016)	11
圖 4-5	匈牙利低及中級放射性核廢料處置場暨通達隧道平面圖 (Borbély et al., 2016)	12
圖 4-6	通達隧道數值模擬與現地量測 (Borbély et al., 2016)	12
圖 4-7	歐亞大陸隧道 (Eurasia Tunnel) 平、剖面圖 (Kim et al., 2016)	13
圖 4-8	具有抗位移能力的地震接頭與柔性／過渡襯砌環片之配置 (Kim et al., 2016)	13
圖 4-9	地震接頭之防火保護 (Kim et al., 2016)	14
圖 4-10	噴塗式防水層設計指導之封面 (ITA, 2013)	15
圖 4-11	傳統防水膜與噴塗式防水層示意圖 (BASF 公司提供)	15
圖 4-12	隧道灌漿壓力量測系統 (Tunbridge & Tønnesen, 2016)	16
圖 4-13	灌漿孔佈置與壓力量測結果暨判釋 (Tunbridge & Tønnesen, 2016)	16
圖 4-14	原 C6 隧道之標準形式及開採出渣情形 (Nitschke et al., 2016)	17
圖 4-15	隧道典型之損壞情形 (Nitschke et al., 2016)	17
圖 4-16	TH 系統之主要構件與支撐系統組合示意 (Nitschke et al., 2016)	18

圖 4-17	裝設 TH 系統之隧道斷面 (Nitschke et al., 2016)	18
圖 4-18	C6 隧道之高架施工平台斷面示意及完工後實況 (Nitschke et al., 2016)	18
圖 4-19	中央地鐵計畫 (T Third Phase 2) 平面圖 (摘自計畫網頁)	19
圖 4-20	中央地鐵計畫沿線之地形與隧道地質剖面 (摘自計畫網頁)	20
圖 4-21	華埠站透視圖 (摘自 flickr : Central Subway)	23

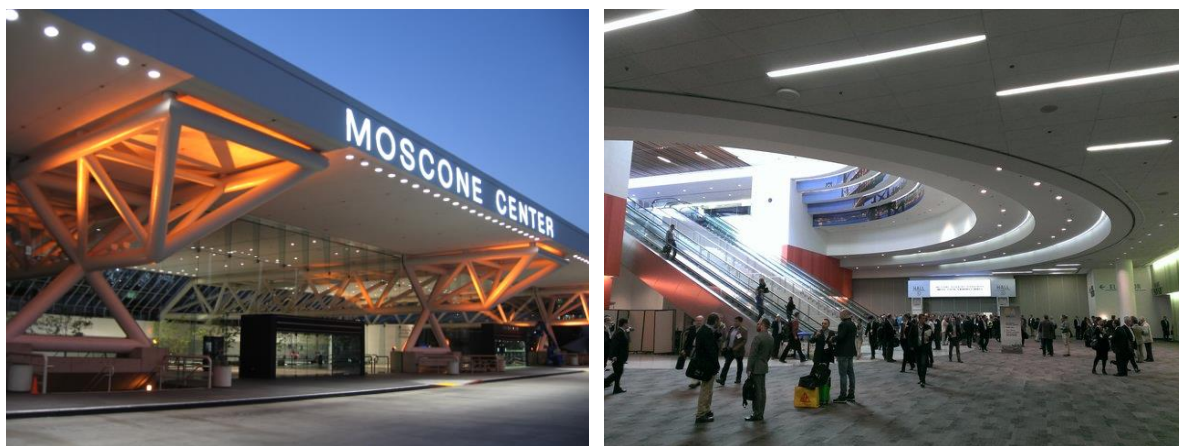
照片目錄

照片 1-1	舊金山莫斯科尼會議中心.....	1
照片 3-1	筆者參加本次大會現場情形.....	3
照片 4-1	技術性研討會議會場情形	10
照片 4-2	斯托克頓街隧道以南現況	21
照片 4-3	斯托克頓隧道以北現況.....	22
照片 4-4	華埠站工區現況.....	23

一、前言

國際隧道協會（International Tunnelling and Underground Space Association, ITA）世界隧道大會（World Tunnel Congress, WTC）為國際間隧道領域之年度盛會，藉由年會的舉辦提供世界各國隧道專家學者技術及學術交流的機會，與最新隧道工程案例展現、研究技術、施工設備及材料資訊的交流平台。

今(2016)年大會於4月22日至28日在美國加州舊金山(San Francisco)莫斯克尼會議中心(Moscone Center, 如照片 1-1)隆重舉行，係由地下建築協會之礦冶及探勘學會(The Underground Construction Association of Society for Mining, Metallurgy & Exploration, UCA of SME)主辦，計有來自100個以上的國家，超過2,500名與會者，而本次大會中華民國隧道協會並未正式組團參加，臺灣計有於大會發表論文的中興大學土木系壽克堅教授、臺北科技大學材料及資源工程系王泰典教授、聯合大地工程顧問公司李佳翰博士，及交通部臺灣區國道新建工程局(以下簡稱國工局)筆者等4人以個別身分參加。



照片 1-1 舊金山莫斯克尼會議中心



二、目的

臺灣因位處歐亞板塊及菲律賓海板塊衝撞處，地質構造錯綜複雜，且由於板塊互相擠壓作用，島內山巒疊起，約有四分之三的面積為山脈、丘陵等山區，在此山多平原少的先天環境下，加上平原區土地之開發利用漸趨飽和，致使公路建設之路廊勢必要往山區發展，隧道之興建實無可避免，且未來來隧道工程所面臨的挑戰必將更加嚴峻。

國工局有鑒於參與世界隧道大會將有助於與國際接軌以及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參考借鏡，故多年來均派員參與本大會。

三、行程紀要

本次參加於美國加州舊金山舉辦之 2016 年世界隧道大會，自 105 年 4 月 23 日出發至 4 月 30 日返國，全程共計 8 日，以參加大會開幕式、專題演講（**Keynote Lectures**）、國際隧道協會公開會議（**ITA Open Session**）、建築資訊模型研討會（**Building Information Modeling Workshop, BIM Workshop**）及各技術性研討會（**Technical Session**）為主，此外，於展覽會場亦有論文海報展示（**Poster Presentation**）可直接與論文作者當面交換意見，以及施工機具、材料供應廠商之參展區間，另於當地時間 4 月 28 日下午赴舊金山市中央地鐵計畫施工中之華埠站（**Central Subway / Chinatown Station**）現地觀摩。筆者參加本次大會現場情形略如照片 3-1，此行行程概要彙整如表 3-1。

	<p>2016年世界隧道大會（WTC 2016）會場前廳，後方為展覽會場入口</p>
	<p>國際隧道協會公開會議（ITA Open Session）會場</p>
	<p>中央地鐵計畫施工中之華埠站工區，實地考察</p>

照片 3-1 筆者參加本次大會現場情形

表 3-1 出國行程概要

日期	起迄地點	行程摘要	備註
4/23 (六)	臺北至舊金山	去程	夜間出發
4/24 (日)		去程，大會報到	
4/25 (一)	舊金山	大會歡迎酒會	
4/26 (二)	舊金山	大會開幕式、專題演講、建築資訊模型研討會	
4/27 (三)	舊金山	國際隧道協會公開會議、技術性研討會	
4/28 (四)	舊金山	技術性研討會	
4/29 (五)	舊金山至臺北	中央地鐵計畫實地考察，回程	
4/30 (六)		回程	清晨返國

四、世界隧道大會

4.1 大會主題及議程

今（2016）年世界隧道大會主題為“業界團結（**An Industry United**）”：隧道業界於全球各地面臨著許多的挑戰。雖然地下空間被公認為是運送人員和材料的最有效方法之一，惟其優點通常被因其開發及使用最為受益的人們所誤解。我們都面臨著共同的挑戰，無論身在何處，「業界團結」因為我們已共享的知識與經驗將提供給於政府、企業和社會最好的服務。

本次大會於舊金山時間 4 月 22~30 日舉行，共為期 7 天，議程包含：訓練課程（**Training Course**）、國際隧道協會相關會議【大會（**ITA General Assembly**）、工作小組會議（**WG Meetings**）、公開會議（**ITA Open Session**）建築資訊模型研討會（**BIM Workshop**）】、開幕式（**Opening Ceremony**）、

專題演講 (Keynote Lecture)、技術性研討會 (Technical Session)、展覽及海報 (Exhibits and Posters) 及技術性導覽 (Technical Excursions), 詳如表 4-1 所示。

表 4-1 2016 年世界隧道大會議程一覽表

TIME	FRIDAY 22 APRIL	SATURDAY 23 APRIL				SUNDAY 24 APRIL			MONDAY 25 APRIL							
08:30 - 09:00	ITA CET Training Course	Registration	Set Up Exhibits	ITA CET Training Course	Lunch	Registration	Set Up Exhibits	Lunch	Registration	Exhibits and Posters	Opening Ceremony and Muir Wood Lecture					
09:00 - 09:30											WG Technical Session					
09:30 - 10:00																
10:00 - 10:30																
10:30 - 11:00											ExCo Meeting	ITA General Assembly				
11:00 - 11:30																
11:30 - 12:00																
12:00 - 12:30																
12:30 - 13:00																
13:00 - 13:30																
13:30 - 14:00																
14:00 - 14:30																
14:30 - 15:00																
15:00 - 15:30																
15:30 - 16:00												ExCo and WG Animateurs Meeting	WG Meetings			WG Meetings and Technical Sessions (5 Tracks)
16:00 - 16:30																
16:30 - 17:00																
17:00 - 17:30																
17:30 - 18:00																
18:00 - 18:30																
18:30 - 19:00																
19:00 - 21:00		ITA Reception			Welcome Reception			Open								

TIME	TUESDAY 26 APRIL				WEDNESDAY 27 APRIL			THURSDAY 28 APRIL							
08:30 - 09:00	Registration	Exhibits and Posters	ITA Open Session		Registration	Exhibits and Posters	Technical Session (5 Tracks)		Technical Excursions						
09:00 - 09:30															
09:30 - 10:00															
10:00 - 10:30															
10:30 - 11:00															
11:00 - 11:30															
11:30 - 12:00															
12:00 - 12:30															
12:30 - 13:00												Lunch	Lunch		
13:00 - 13:30															
13:30 - 14:00															
14:00 - 14:30															
14:30 - 15:00															
15:00 - 15:30															
15:30 - 16:00												Technical Session (5 Tracks)	ITA-COSUF ITA TECH	ITA General Assembly and Closing	Technical Session (5 Tracks)
16:00 - 16:30															
16:30 - 17:00															
17:00 - 17:30															
17:30 - 18:00															
18:00 - 18:30															
18:30 - 19:00															
19:00 - 21:00	Open			Congress Banquet											

4.2 大會內容概要

茲就本次大會中之國際隧道協會公開會議、建築資訊模型研討會、技術性研討會議及其中筆者認為較具特色之內容，與最後參加之實地考察等分別介紹如下：

4.2.1 國際隧道協會公開會議（ITA Open Session）

經瞭解國際隧道協會目前運作中的工作小組（Working Group, WG）共有 13 個，如表 4-2 所示，而國際隧道協會每年均會利用大會會議前召開各工作小組會議，藉此機會讓各工作小組成員討論該組年度計畫與執行情形。而臺灣方面計有北科大王泰典教授於會前參加 WG 9 - Seismic Effects（地震效應）及 WG 15 - Underground and Environment（地下及環境），另聯合大地顧問公司李佳翰博士則參加 WG 6 - Maintenance and Repair（維護及修復），據悉係於出國前主動與該工作小組主席聯繫，說明於該領域之相關研究並表達參加會議之意願，而獲得主席同意後與會。

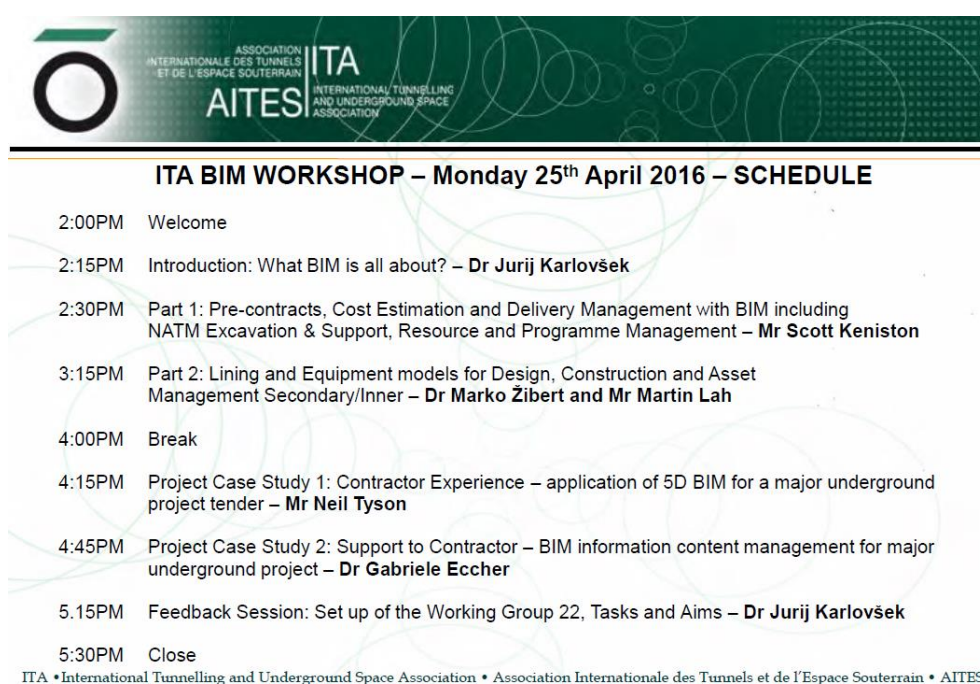
在公開會議中即由各工作小組輪流報告，或說明該小組的目標、年度計畫、執行情形及主要議題，或針對該小組最新之研究成果報告等出版品加以介紹，並開放現場提問及意見回饋。透過此會議之參與，除對於國際隧道協會工作小組之運作模式及相關發展方向有所瞭解，獲得非常多寶貴的參考資源外，對於會議中之踴躍發言及熱烈討論情景印象尤其深刻。

表 4-2 國際隧道協會工作小組一覽表

WG 2 Research	WG 3 Contractual Practices	WG 5 Health and Safety in Works	WG 6 Maintenance and Repair	WG 9 Seismic Effects	WG 11 Immersed and Floating Tunnels	WG 12 Sprayed Concrete Use	WG 14 Mechanized Tunnelling
WG 15 Underground and Environment	WG 17 Long Tunnels at Great Depth	WG 19 Conventional Tunnelling	WG 20 Urban Problems, Underground Solutions	WG 21 Life Cycle Asset Management			

4.2.2 建築資訊模型研討會 (BIM Workshop)

近年來隨著建築資訊模型 (Building Information Modeling, BIM) 技術之蓬勃發展，歐美各國已逐漸將 BIM 技術導入隧道工程領域，為此，國際隧道協會年輕會員 (Young Members) 主席 Jurij Karlovšek 博士特別於當地時間 4 月 25 日下午舉辦國際隧道協會建築資訊模型研討會 (ITA BIM Workshop)，期望藉此研討會凝聚共識，進而成立國際隧道協會第 22 個工作小組 (WG 22)，研討會議程如圖 4-1 所示。



The image shows a slide titled "ITA BIM WORKSHOP – Monday 25th April 2016 – SCHEDULE". The slide features the logos of AITES (Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain) and ITA (International Tunnelling and Underground Space Association) at the top. The schedule is as follows:

Time	Activity
2:00PM	Welcome
2:15PM	Introduction: What BIM is all about? – Dr Jurij Karlovšek
2:30PM	Part 1: Pre-contracts, Cost Estimation and Delivery Management with BIM including NATM Excavation & Support, Resource and Programme Management – Mr Scott Keniston
3:15PM	Part 2: Lining and Equipment models for Design, Construction and Asset Management Secondary/Inner – Dr Marko Zibert and Mr Martin Lah
4:00PM	Break
4:15PM	Project Case Study 1: Contractor Experience – application of 5D BIM for a major underground project tender – Mr Neil Tyson
4:45PM	Project Case Study 2: Support to Contractor – BIM information content management for major underground project – Dr Gabriele Eccher
5:15PM	Feedback Session: Set up of the Working Group 22, Tasks and Aims – Dr Jurij Karlovšek
5:30PM	Close

ITA • International Tunnelling and Underground Space Association • Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain • AITES

圖 4-1 國際隧道協會建築資訊模型研討會議程

從備標、規劃、設計到施工與後續營運維護階段，分別說明 BIM 於隧道工程之實際應用層面與案例，BIM 的主要優點如圖 4-2(a)。在備標階段，可利用 BIM 之 3D 展繪功能呈現計畫完成後之意象圖；在規劃階段，將各方案之隧道路線套繪 3D 數值地形則可用以評估隧道洞口位置、橫坑或豎井位置、淺覆蓋段長度等；在設計階段，可將地質調查所繪製之工程地質剖面圖以 3D 方式呈現，如圖 4-2(b)，以利瞭解隧道軸向與岩層位態之三維空間關係，將隧道開挖支撐與襯砌標準斷面圖匯入 BIM，如圖 4-2(c)，

則可直接計算各支撐工項、襯砌所需混凝土與鋼筋之總數量，輸入單價則可直接製作預算書，輸入施工功率則可評估所需工期；在施工階段，可將施工期間之監測資料匯入，以利掌握各工區之狀況，若新增工作面，亦會自動調整工期；至於後續營運維護階段，可將各項設施具體獨立圖描繪於3D模型以利後續之維護管理作業，如圖 4-2(d)。

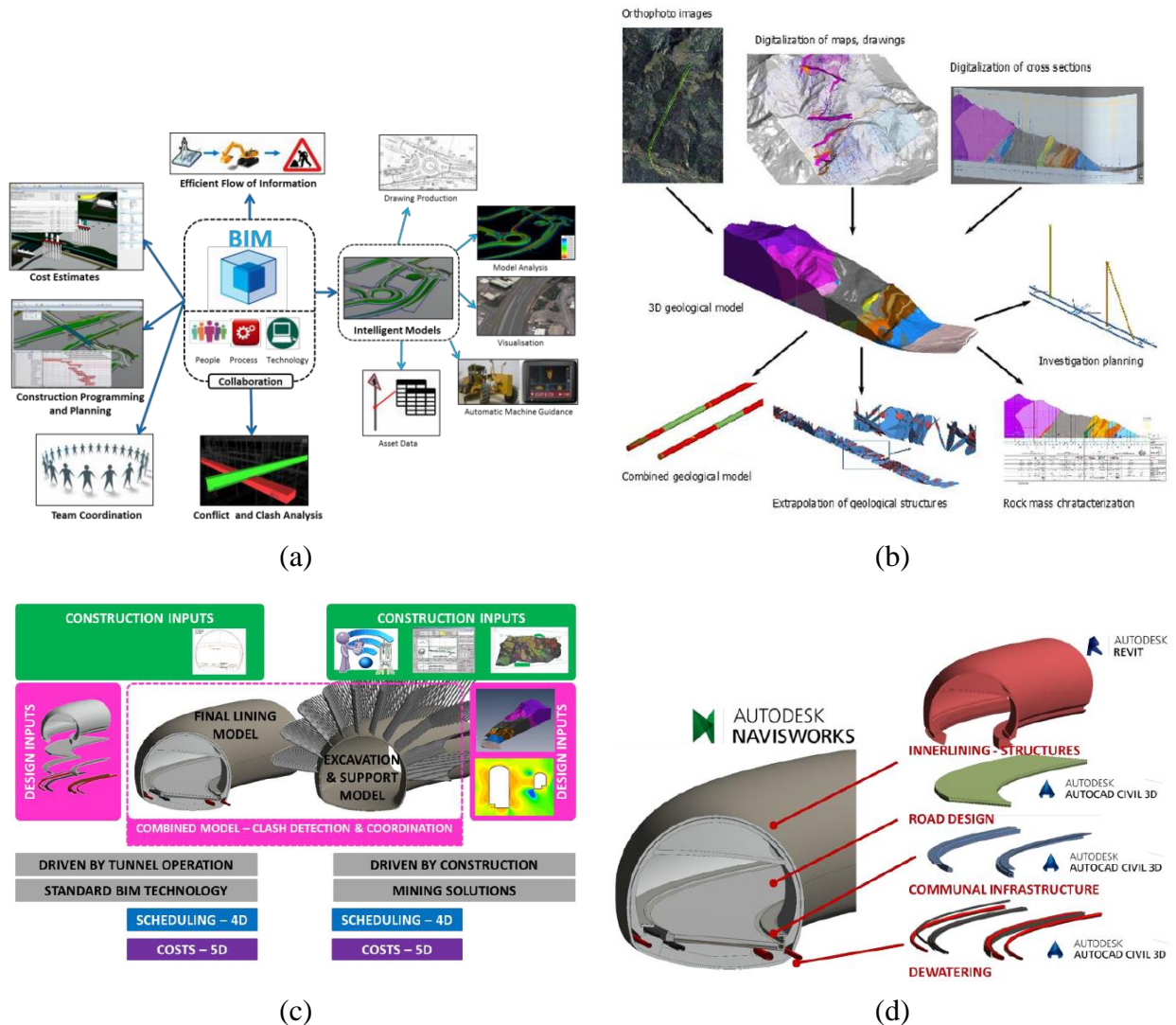


圖 4-2 BIM 在隧道工程之實際應用範例 (Žibert *et al.*, 2016)

4.2.3 技術性研討會議 (Technical Session)

本次技術性研討會議與海報展示部分共收錄 325 篇論文，分為 18 個子題，茲條列如下：

1. 地下的支撐－控制地盤（Underground Support - Controlling the Ground）；
2. 安全設計與施工（Safety in Design and Construction）；
3. 創新的隧道發展（Tunneling Advances Through Innovation）；
4. 連續開挖工法與洞穴（SEM and Caverns）；
5. 案例歷史及困難地盤（Case Histories and Difficult Ground）；
6. 隧道與地盤及結構物之相互作用（Tunnel Interactions with Ground and Structures）；
7. 岩盤中之複雜計畫及相關技術（Complex Projects in Rock and Related Technology）；
8. 儀器和監測（Instrumentation and Monitoring）；
9. 軟弱地盤－隧道鑽掘機及微型隧道（Soft Ground - TBMs and Microtunneling）；
10. 使用隧道鑽掘機之隧道及替代工法（TBM Tunnels and Alternative Approaches）；
11. 規劃、財政及現場調查（Planning, Finance, and Site Investigation）；
12. 地盤改良及豎井（Ground Improvements and Shafts）；
13. 風險管理與契約實務（Risk Management and Contracting Practices）；
14. 軟弱地盤隧道鑽掘機－預測、作業及分析（Soft Ground TBMs - Prediction, Operation, and Analysis）；
15. 修復與營運維護（Rehabilitation and Operation & Maintenance）；
16. 未來計畫（Future Projects）；
17. 環境與城市規劃（Environmental and Urban Planning）；
18. 軟弱地盤隧道鑽掘機－市區挑戰（Soft Ground TBMs - Urban Challenges）

本次技術性研討會議於當地時間 4 月 25~27 日分 3 天舉行，依上述子題分別於 5 個會場同時進行（照片 4-1），計有 185 篇論文於現場發表，為使會議進行流暢，會場主席對於各篇論文之發表及討論交流時間均嚴格控制，會議節奏分明，展現高度效率。另於展覽會場計有 50 篇論文以海報展示方式呈現，作者於指定時段到場和與會者直接面對面意見交流。



照片 4-1 技術性研討會議會場情形

4.2.4 隧道通過斷層帶之襯砌設計

一般隧道工程於選線規劃階段都會儘可能避開活動斷層，惟隨著開發、交通、用水或發電之需求，已逐漸面臨隧道無可避免通過活動斷層之設計、施工與營運維護等課題與挑戰。

本次大會論文中有下列 3 篇提到隧道通過斷層帶之襯砌設計議題：

其中一篇為美國洛杉磯計畫新建一座直徑 5.5 公尺、長約 11.3 公里之污水隧道，採隧道鑽掘機（TBM）及 0.5 公尺厚之預鑄混凝土環片開挖施工，主要設計之挑戰包括：隧道內部壓力（internal pressure）及斷層錯動（fault offset）等兩部分，其中針對斷層錯動部分預測此隧道將通過 Palos Verdes Fault Zone (PVFZ)與 Cabrillo Fault Zone (CFZ)等 2 處活動性斷層帶，其隧道沿線地質剖面如圖 4-3，其設計理念係於預鑄混凝土環片內加襯一層「鋼管內襯」，如圖 4-4(a)，利用鋼管內襯之延展性與撓度，使隧道允許變形但不斷裂為原則，以避免污水滲出而污染地層與地下水，並採用 FLAC 3D 軟體進行數值分析與設計，如圖 4-4(b)。(Greunen *et al.*, 2016)

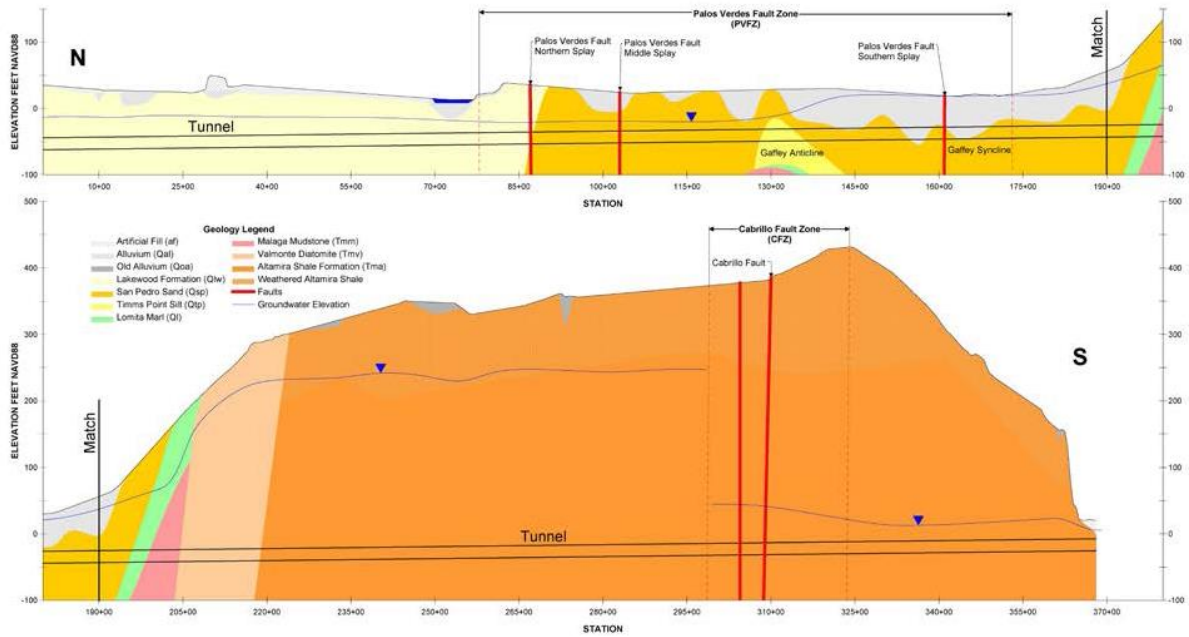


圖 4-3 隧道沿線地質剖面圖 (Greunen *et al.*, 2016)

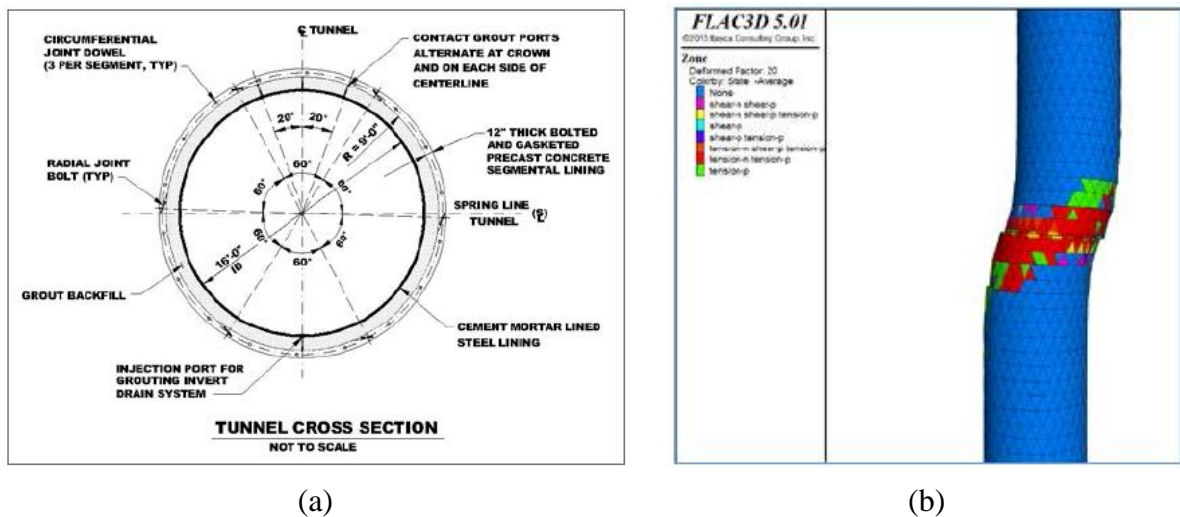


圖 4-4 美國洛杉磯污水隧道之襯砌設計與分析 (Greunen *et al.*, 2016)

另一篇為匈牙利低及中級放射性核廢料處置場之通達隧道將通過一斷層帶，如圖 4-5，為進一步瞭解隧道通過斷層帶相關的影響，作者採用數值軟體 FLAC 3D 模擬隧道通過此斷層帶之應力變化，如圖 4-6(a)，並於現地安裝伸縮儀、計測岩栓、內空變位監測、應力與應變計等監測設備，如圖 4-6(b)，以監測斷層活動之應力變化，並與數值模擬所得數值比較，以供未來永久襯砌設計之參考使用。

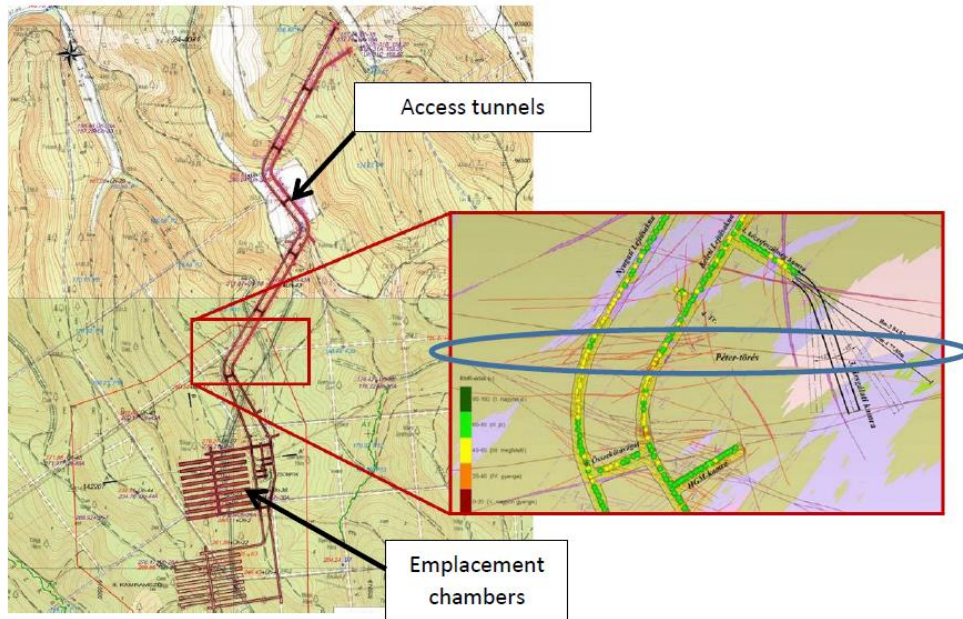


圖 4-5 匈牙利低及中級放射性核廢料處置場暨通達隧道平面圖
(Borbély *et al.*, 2016)

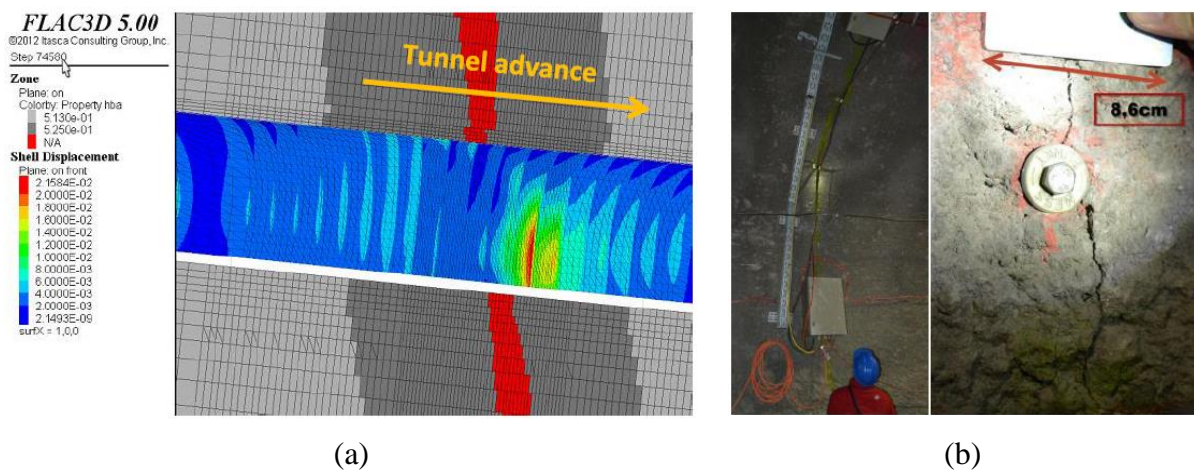


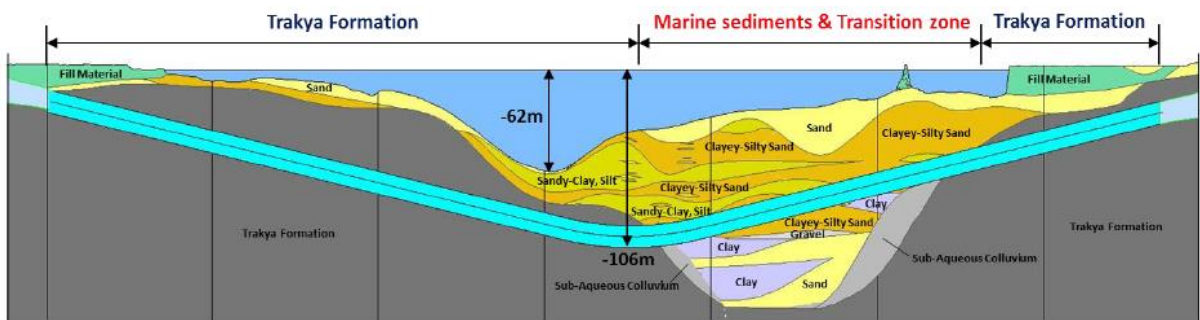
圖 4-6 通達隧道數值模擬與現地量測 (Borbély *et al.*, 2016)

還有一篇則為伊斯坦堡海峽公路穿越計畫 (Istanbul Strait Road Tube Crossing Project) 之歐亞大陸隧道 (Eurasia Tunnel)，其中通過博斯普魯斯海峽 (Bosphorus Strait) 下方為長達 3.34 公里的雙版鑽掘隧道，最大深度為海平面下 106 公尺，平、剖面圖如圖 4-7 所示，由於該隧道鄰近 North Anatolian 活動斷層，海底隧道需承受 7.5 級地震，且因隧道通過歐洲及亞洲兩端的岩盤及中段位於海峽底部之軟弱土層，故隧道襯砌環片於岩盤與

土層間採用「地震／柔性接頭（ seismic/flexible joints）」設計，如圖 4-8 所示，另因應海底隧道之防火需求另於地震接頭位置設置二層防火材，如圖 4-9 所示。（ Kim *et al.*, 2016）



平面圖



剖面圖

圖 4-7 歐亞大陸隧道（Eurasia Tunnel）平、剖面圖（Kim *et al.*, 2016）

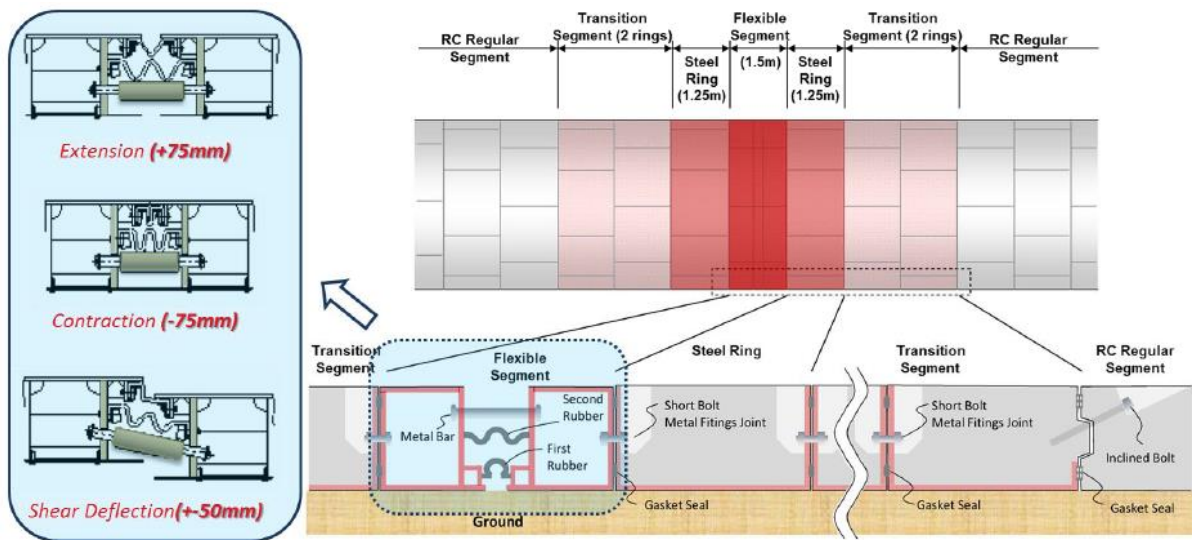


圖 4-8 具有抗位移能力的地震接頭與柔性／過渡襯砌環片之配置（Kim *et al.*, 2016）

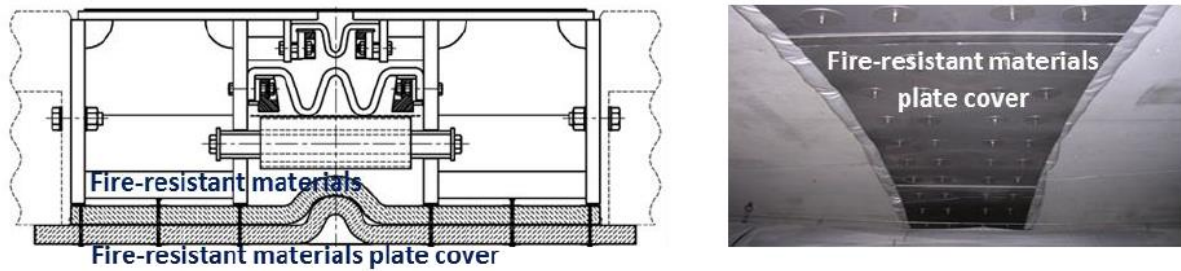


圖 4-9 地震接頭之防火保護 (Kim *et al.*, 2016)

4.2.5 噴塗式防水層經驗

以往隧道初期支撐與襯砌間之防水層多採用 PVC 等材質之防水膜，惟根據許多隧道之維護經驗顯示：隧道在消防／機電凹槽、人行／車行連絡通道與主隧道交接處、豎井與主隧道交接處易產生滲漏水現象；而實際施工經驗亦顯示前述凹槽或交接處之防水膜施工較為困難，易產生搭接或熱熔接瑕疵、或因鋼筋組立過程戳破防水層而未被察覺。因此，國際隧道協會 (ITA) 於 2013 年出版「噴塗式防水層設計指導 (ITAtch Design Guidance For Spray Applied Waterproofing Membranes)」，強烈推薦各國於特殊位置（如：凹槽或交接處）、區段（如：交叉段）或需求（如：快速施工、縮短工期、取消防水層施工架）下，考量採用「噴塗式防水層 (Spray Applied Waterproofing Membranes)」以取代傳統防水膜。

作者更進一步說明，比較傳統防水膜與噴塗式防水層之主要差異在於：因傳統防水膜無法與初期支撐之噴凝土面暨襯砌混凝土面緊密結合，故隧道外圍的水易沿著傳統防水膜經由襯砌混凝土的瑕疵處滲流進入隧道內，如圖 4-11(a)；而噴塗式防水層除可與初期支撐之噴凝土面暨襯砌混凝土面緊密結合，如圖 4-11(b)，因其本身具有延展性，可承受一定程度之拉伸與變形，且具有快速施工、適合各種凹槽與斷面形式之現場作業。

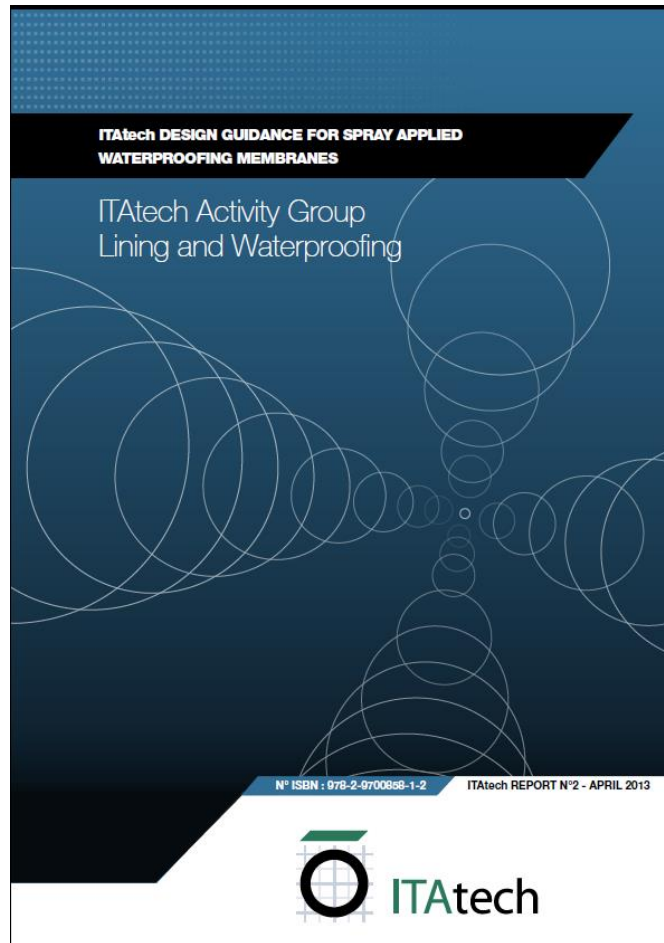


圖 4-10 噴塗式防水層設計指導之封面 (ITA, 2013)

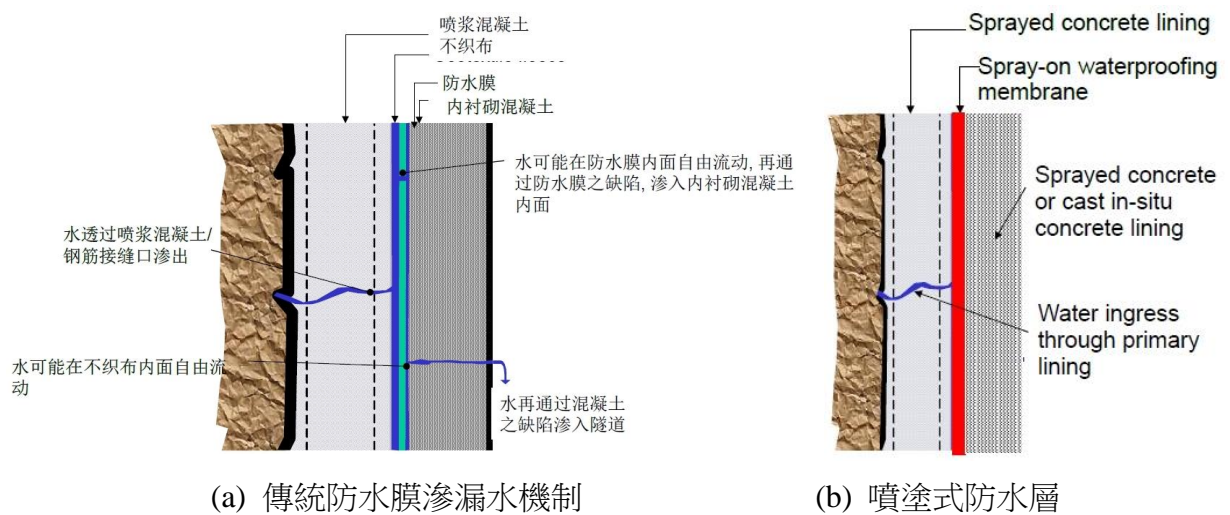


圖 4-11 傳統防水膜與噴塗式防水層示意圖 (BASF 公司提供)

4.2.6 現地量測隧道灌漿壓力

岩石隧道工程在需要進行固結灌漿以強化地盤、或止水灌漿以阻水、或錐體灌漿以止水／鞏固岩盤時，往往難以判斷所需之灌漿壓力、需要提高／降低灌漿壓力與停止灌漿的時機、甚至如何判定灌漿成效與實際灌漿範圍等。故作者設計一「灌漿壓力量測系統」如圖 4-12(a)所示，其實際將栓塞 (Packer) 含數據記錄儀 (Data logger) 等安裝於隧道開挖面之灌漿孔現場情形如圖 4-12(b)所示。經嘗試於隧道開挖面之不同灌漿孔如圖 4-13(a)，採用不同灌漿壓力，並量測各灌漿管壓力隨時間之變化如圖 4-13(b)，藉由灌漿紀錄的比對及分析以判斷岩體所需之灌漿量及壓力等。



(a) (b)
圖 4-12 隧道灌漿壓力量測系統 (Tunbridge & Tønnesen, 2016)

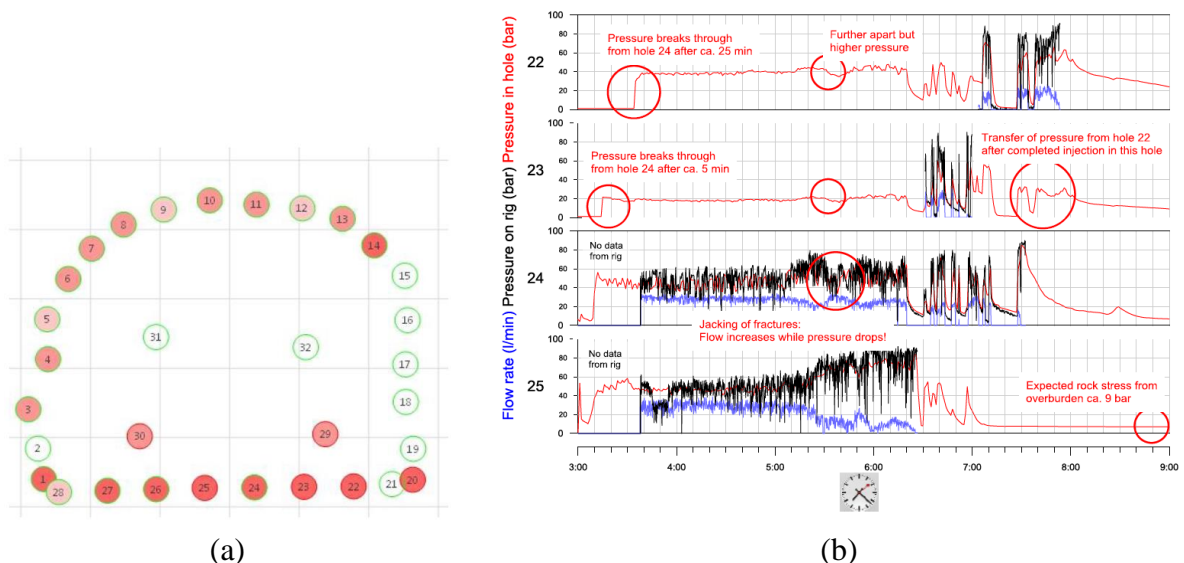


圖 4-13 灌漿孔佈置與壓力量測結果暨判釋 (Tunbridge & Tønnesen, 2016)

4.2.7 採用可縮式支保補強襯砌案例

美國猶他州鹽湖城某一礦區之 C6 隧道於 1959 年完工，該隧道原為馬蹄形之鐵路隧道，其後因輸送礦材之需求而改為輸送帶 (conveyor) 隧道，如圖 4-14。2014 年隧道內襯砌產生嚴重之剪力裂縫，且部分區段有混凝土塊掉落，如圖 4-15 所示，為避免襯砌持續惡化而損壞輸送帶或影響進出人員之安全，因此進行隧道之加固補強設計與施工。由於無法停止或拆除輸送帶，因此，隧道內作業空間十分有限，必須設計輕型、易於施工之加固補強構件。故作者採用一創新之構想與設計：(1)首先於襯砌表面鋪設一層鋼線網；(2)接著於預定安裝可縮式支保位置安裝「灌漿填充織物軟管 (Grout filled fabric hoses)」；(3)安裝「可縮式支保」，如圖 4-16 及圖 4-17 所示。有關 C6 隧道施工平台斷面示意及完工後實況如圖 4-18 所示。

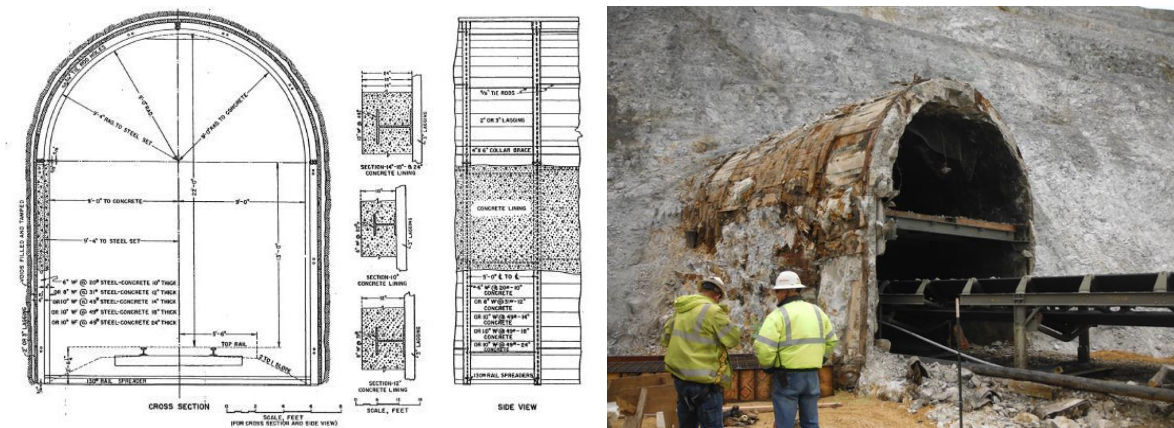


圖 4-14 原 C6 隧道之標準形式及開採出碴情形 (Nitschke et al., 2016)

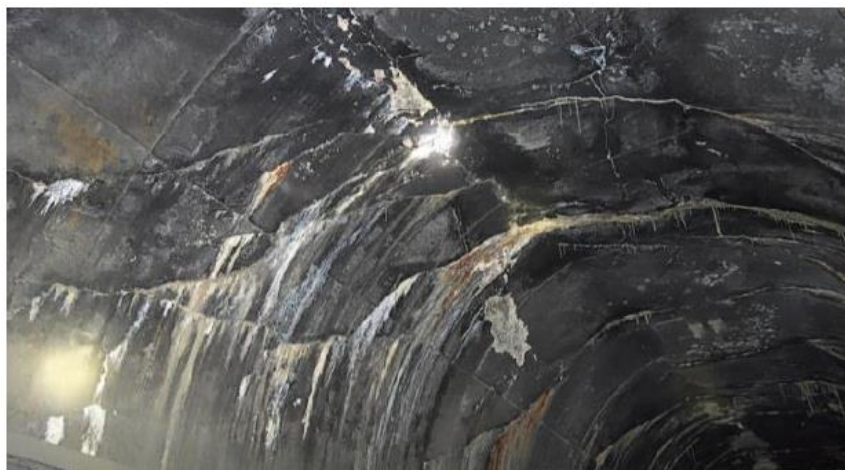


圖 4-15 隧道典型之損壞情形 (Nitschke et al., 2016)

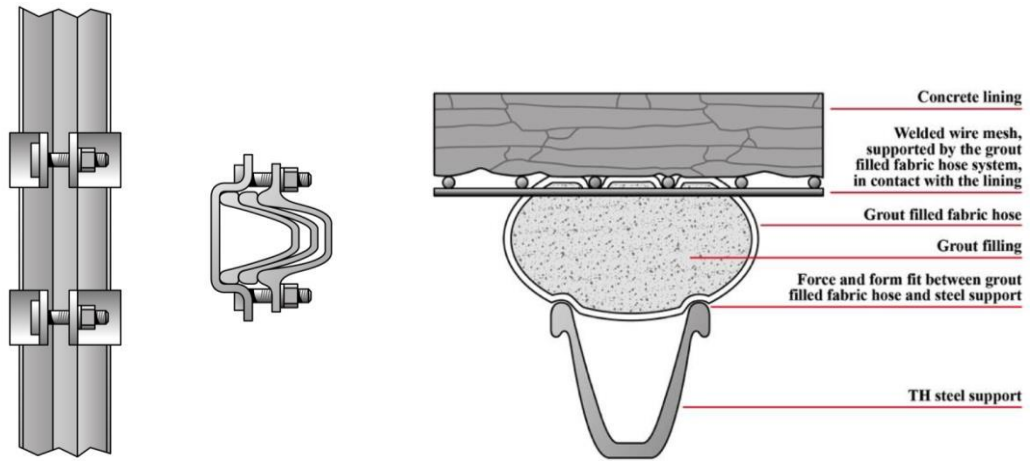


圖 4-16 TH 系統之主要構件與支撐系統組合示意 (Nitschke et al., 2016)

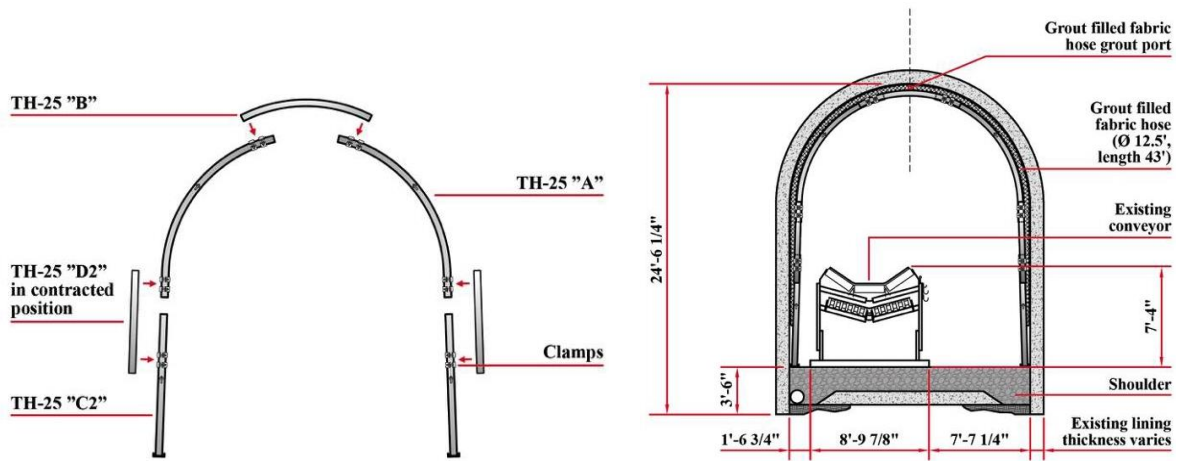


圖 4-17 裝設 TH 系統之隧道斷面 (Nitschke et al., 2016)

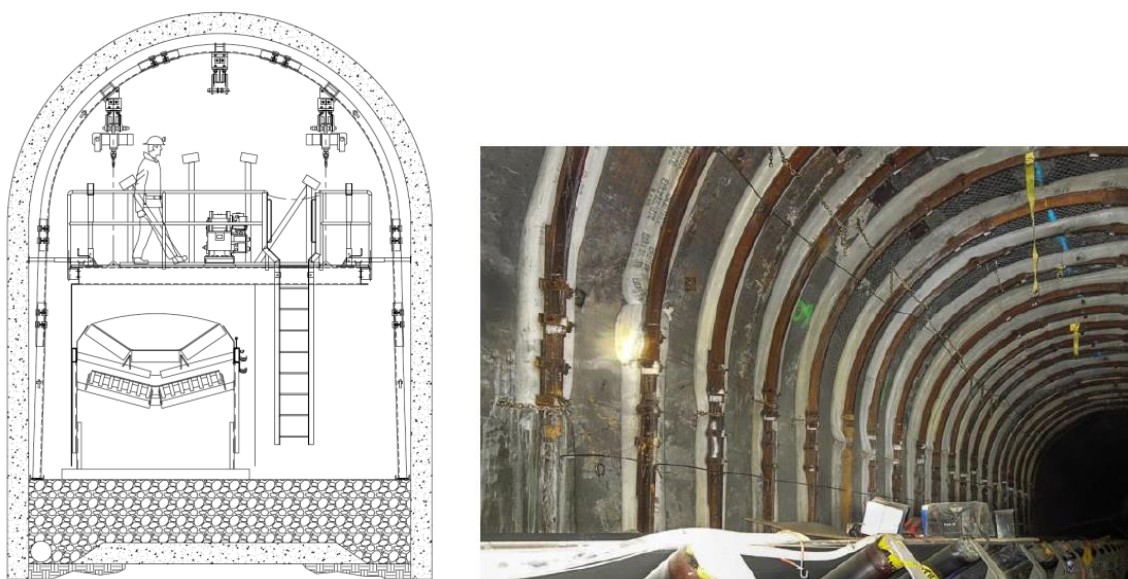


圖 4-18 C6 隧道之高架施工平台斷面示意及完工後實況 (Nitschke et al., 2016)

4.2.8 實地考察

舊金山市交通局（San Francisco Municipal Transportation Agency's , SFMTA）的第 3 街輕軌交通系統工程，是近數十年來最重要的一項基礎建設投資。首期工程是全長 6.8 英哩，沿第 3 街交通走廊，分 2 個階段施工的第 3 街輕軌路線。首期工程已經完成，並於 2007 年 4 月投入載客服務。第 3 街輕軌的落成，恢復了中斷達 50 多年為舊金山市乘客量眾多地區的輕軌電車服務。

中央地鐵計畫（Central Subway Project）是整項工程的第 2 期工程，是要延伸已投入載客服務的第 3 街 T 線輕軌到市中心及舊金山市人口最稠密的華埠。這條長 1.7 英哩的輕軌延伸路線將會為華埠（Chinatown）、聯合廣場（Union Square）、莫斯克尼會議中心、芳草地（Yerba Buena）及 AT&T 球場等地點提供輕軌服務。同時，中央地鐵將提供與「灣區捷運 BART」及「加州火車 Caltrain」和未來的「加州高速鐵路」等舊金山地區最大的通勤系統直接的接駁服務。中央地鐵計畫平面圖，如圖 4-19 所示。



圖 4-19 中央地鐵計畫（T Third Phase 2）平面圖（摘自計畫網頁）

中央地鐵計畫沿線之地形與隧道地質剖面如圖 4-20 所示，由北而南包含下列 4 座車站：

1. 華埠站（Chinatown Station）位於斯托克頓街（Stockton Street）與華盛頓街（Washington street）交叉口之地下車站。
2. 聯合廣場／市場街站（Union Square/Market Street Station）位於斯托克頓街（Stockton Street）之聯合廣場，為地下車站。
3. 芳草地／莫斯克尼站（Yerba Buena/Moscone Station）位於第 4 街與福爾瑟姆街（Folsom street）交叉口之地下車站。
4. 第 4 與布蘭南站（4th and Brannan Station）位於第 4 街與布蘭南街（Brannan street）交叉口之街道。

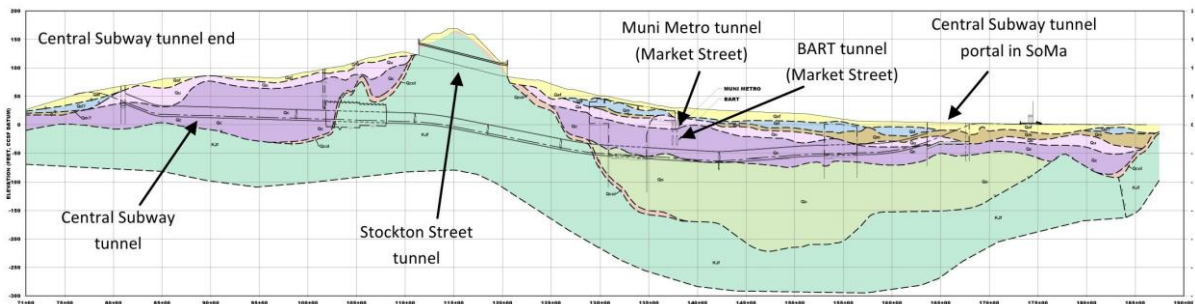


圖 4-20 中央地鐵計畫沿線之地形與隧道地質剖面（摘自計畫網頁）

本次筆者報名參加實地考察之標的為舊金山中央地鐵計畫目前施工中的華埠站（Chinatown Station），集合地點係位於布什街（Brush Street）之工地辦公室，由業主、設計及施工單位針對中央地鐵隧道沿線之地質、設計和施工等概況進行介紹後，即以步行方式由既有之斯托克頓街隧道（Stockton Street Tunnel）南口往下，北向穿過隧道前往華埠站工區現場。由於斯托克頓街隧道位於相對高處，而中央地鐵計畫即沿著斯托克頓街（Stockton Street）道路下方，南向可遠眺聯合廣場／市場街站的施工情形，現況如照片 4-2。當北向穿過斯托克頓街隧道，明顯可見斯托克頓街華埠區沿線建物及人口稠密、交通頻繁，現況如照片 4-3。位於斯托克頓街與華盛頓街（Washington street）交叉口之華埠站工區腹地狹小、作業空

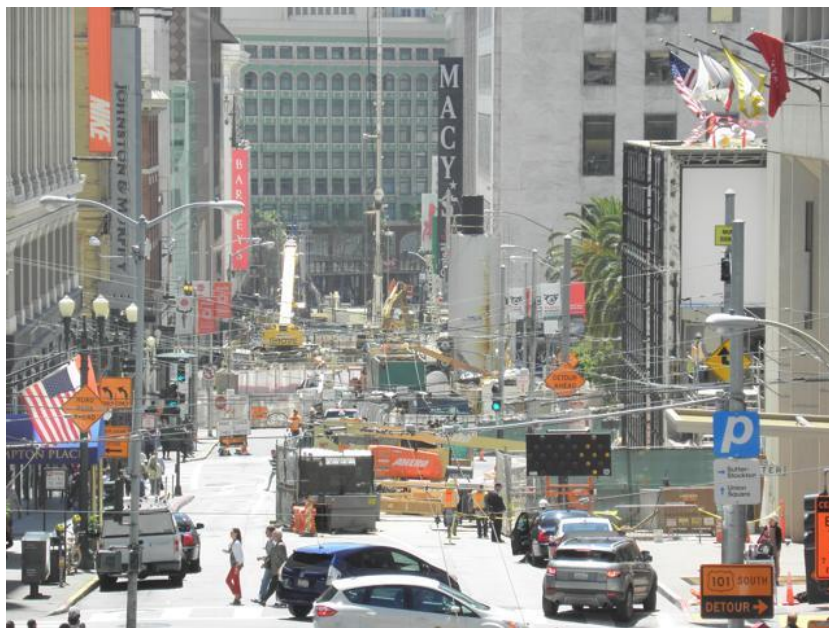
間受侷限，站區逐階開挖並採鋼管為水平內支撐，另為加強支撐系統之勁度，車站 1 樓之永久結構已先行施作，施作中之工項為與隧道之連通道先撐鋼管打設作業，如照片 4-4。至華埠站透視圖如圖 4-21 所示，有助於對工程內容進一步的瞭解。



斯托克頓街隧道南口



斯托克頓街（Stockton Street）南向



於斯托克頓街隧道南口上方遠眺聯合廣場／市場街站的施工情形

照片 4-2 斯托克頓街隧道以南現況



斯托克頓街隧道北口



斯托克頓街沿線建物稠密、交通頻繁

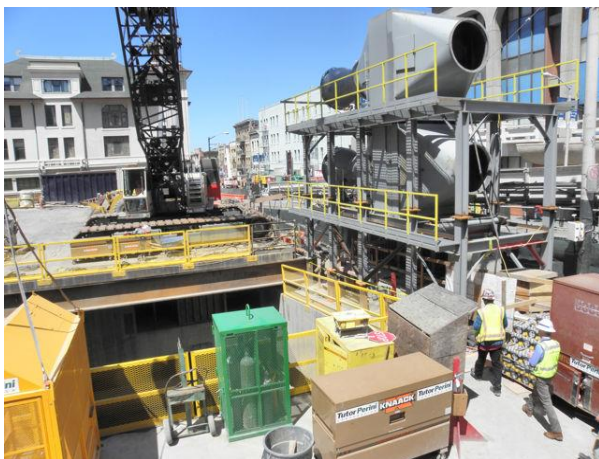


斯托克頓街 (Stockton Street) 北向



華埠站 (Chinatown Station) 工區

照片 4-3 斯托克頓隧道以北現況



華埠站 (Chinatown Station) 工區一覽



車站 1 樓之永久結構先行施作，以
增加支撐勁度



採鋼管水平支撐，共 4 階



與隧道之連通道先撐鋼管打設作業

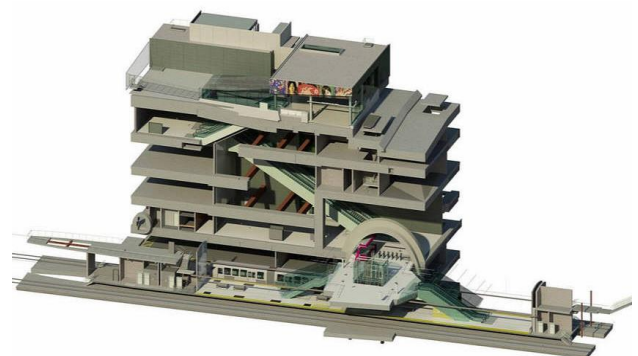
照片 4-4 華埠站工區現況



單一車站入口 (1 Station Entrance 2012-02-16)



車站橫向斷面 (CTS section through Washington, 2012-10-11)



車站縱向斷面 (CTS section through Stockton street, 2012-10-11)

圖 4-21 華埠站透視圖 (摘自 flickr : Central Subway)

五、心得與感想

筆者很榮幸獲派參加 2016 年世界隧道大會，能參與此隧道工程界之年度盛會，倍感與有榮焉，數天行程下來深感獲益良多，茲將此行之心得感想列述如后：

1. 隨著國際間建築資訊模型（**Building Information Modeling, BIM**）技術之蓬勃發展，歐美各國逐漸將 **BIM** 技術導入隧道工程領域，臺灣已有許多顧問公司投入大量人力及資源進行研發及實際應用，其應用層面包含備標、規劃、設計、施工到後續營運維護階段，運用在建築工程已有相當多成功案例，而對於大型土建工程，甚至是隧道工程之實際應用成效，似仍待觀察。本次建築資訊模型研討會中展示了若干隧道工程案例成果，或許是發展初期之因素，筆者感受到投資與成效的不對等，惟對此資訊技術之發展仍表支持，樂見其廣泛應用。
2. 當隧道無可避免地通過活動斷層帶時可能之設計對策有：(1)增加混凝土襯砌厚度；(2)擴大斷面、預留錯位空間；(3)採用損壞後可快速維修之概念。而本次研討會相關論文中則建議可考量：(1)先開挖試驗坑道進行現地量測；(2)利用三維數值軟體模擬；(3)設計可撓性內襯或柔性接頭等。
3. 根據許多隧道之維護經驗顯示：隧道在消防／機電凹槽、人行／車行連絡通道與主隧道交接處、豎井與主隧道交接處易產生滲漏水現象；而實際施工經驗亦顯示前述凹槽或交接處之防水膜施工較為困難，易產生搭接或熱熔接瑕疵、或因鋼筋組立過程戳破防水層而未被察覺。因此，隧道工程在凹槽或交接處等特殊位置、交叉段或相關施工需求時，施工技術上可考量採用「噴塗式防水層」以取代傳統防水膜。
6. 現行出國計畫參加人員之選派有其規定且行之有年，筆者因係首次獲派參加，所有的準備流程及對於世界隧道大會的運作情形均為陌生；

在瞭解北科大王泰典教授及聯合大地顧問公司李佳翰博士多次參與大會的經驗及參加國際隧道協會工作小組會議的過程並實際參與後，建議後續仍持續派員參加年度大會，並在經費許可之情況下，考量指派 2 人以上同行，且其中 1 人是有參與經驗為佳，1 加 1 的獲益必將大於 2，若能更進一步地參與此國際會議之內部會議，除可瞭解國際隧道工程界在各領域之發展現況與趨勢外，亦可增加臺灣隧道工程相關技術於國際上之能見度。