



公務出國報告

(出國類別：研究)

99 年度台奧技術合作人員訓練計畫
奧地利隧道工程技術研習
出國報告書

服務機關：經濟部水利署

出國人職稱：副工程司

姓名：蔡政育

出國地區：奧地利

出國期間：99 年 8 月 14 日

至 99 年 9 月 4 日

報告日期：99 年 11 月 17 日

公務出國報告

(出國類別：研究)

99 年度台奧技術合作人員訓練計畫
奧地利隧道工程技術研習
出國報告書

服務機關：經濟部水利署

出國人職稱：副工程司

姓名：蔡政育

出國地區：奧地利

出國期間：99 年 8 月 14 日

至 99 年 9 月 4 日

報告日期：99 年 11 月 17 日

摘要

台灣地區雖然雨量豐沛，但由於豐枯水期分配不均，有賴各大小水庫及水工結構物之調蓄水源，以滿足農業、民生及工業等用水需求，近幾年來因氣候變遷造成異常降雨情況頻繁出現，雨水夾帶著大量泥砂入庫，造成水庫淤積日益嚴重，為水庫之永續利用，利用排砂隧道水利排砂方式排除入庫淤泥實屬必要，另水資源開發工程中多有導水隧道及引水隧道，引水隧道又常為長隧道，故隧道工程為水資源工程中一重要工作項目。

奧地利是位於歐洲中部的內陸國，阿爾卑斯山貫穿奧地利的西部和南部，山地占國土面積的 70%，處於這樣的地理環境，境內交通多需仰賴建造隧道以利於國內及聯外之交通運輸，因此該國隧道工程理論及實務上均有先進之技術及經驗，尤以隧道施工之新奧工法(NATM) 即以其發源國家奧地利而命名，因奧地利建造隧道歷史較久，本次研習即赴該國隧道相關單位，研習及獲取其施工技術及經驗，並配合現地隧道工地之參訪，期對國內相關技術之提昇有所助益。

目 錄

摘要	I
目錄	II
圖目錄	III
照片目錄	IV
壹、研習目的、過程及拜訪單位簡介	1
貳、研習心得	12
一、奧地利水力發電設施	12
二、隧道施工工法	13
三、施工災害及處理	22
參、結論與建議	25
肆、謝誌	28
附錄 出國行程表	29

圖目錄

圖 1 Mobile ASFiNAG 網站交通資訊系統	3
圖 2 奧地利主要水力發電廠分布圖	12
圖 3 隧道斷面主要區域名稱	14
圖 4 隧道主要開挖流程圖	15
圖 5 隧道襯砌及隧道內主要硬體設施示意圖	15
圖 6 潛盾工法 TBM 示意圖	18
圖 7 TBM 及 NATM 成本曲線	21
圖 8 隧道工程常見施工災害發生情況	23
圖 9 隧道工程內各點位位移監測紀錄表	23
圖 10 隧道內變形量、時間與風險關係圖	24
圖 11 位移量監測儀器及監測點位示意圖	24

照片目錄

照片 1	Simmering 的公路隧道入口	3
照片 2	Simmering 的公路隧道內緊急求救系統	4
照片 3	高速公路行控中心與 Günter Rattei 合影	4
照片 4	維也納管推進工法隧道工地	6
照片 5	Waidhofen/Ybbs 市 NATM 工法隧道工地	6
照片 6	與 Wulf Schubert 教授 (最左) 合影於 3G 公司	8
照片 7	Koralpe 隧道工地	8
照片 8	Dr-Karl-v.-Terzaghi 道路之揭幕活動	9
照片 9	與 Peter Tschernutter 教授 (圖右) 合影	10
照片 10	維也納科技大學試驗室內水力電廠模型	11
照片 11	Freudenau 水力發電廠內部發電機組	11
照片 12	噴凝土施工機具	16
照片 13	隧道壁防水布鋪設	16
照片 14	襯砌鋼模及進行襯砌混凝土澆置	17
照片 15	隧道完成襯砌	17
照片 16	管推進工法工作豎井	19
照片 17	預鑄環型混凝土管	20
照片 18	管 (隧道) 內土壤之運離	20

壹、研習目的、過程及拜訪單位簡介

奧地利東北部是維也納盆地，東南部和北部為丘陵地型及高原。多瑙河流經東北部，在境內長約 350 公里。奧地利由 9 個聯邦州（Bundesland）組成，包含奧地利布爾根蘭州、凱恩藤州、下奧地利州、上奧地利州、薩爾茨堡州、施泰爾馬克州、蒂羅爾州、福拉爾貝格州、維也納州，聯邦州以下設 84 個區（Bezirk），區以下設市（Stadt）和鎮（Gemeinde）。

本研習計畫前往之單位包括奧地利政府機關、學校研究單位、隧道及大地工程相關學會、工程顧問公司等，並配合各單位安排之工地參訪行程，使技術及理論可密切配合，提高學習效果。主要前往維也納（Vienna）、薩爾茨堡（Salzburg）及格拉茲（Graz）三個城市進行研習，以下就本次研習計畫所造訪之單位進行簡單介紹：

一、ASFiNAG 公司（Autobahnen- und Schnellstraßen -Finanzierungs-Aktiengesellschaft）

ASFiNAG 公司是在 1982 年成立，是奧地利聯邦政府官股公司，負責奧地利境內 2,178 公里的高速公路規劃、興建、維護、操作及財務運作等，於 1997 年更與聯邦政府簽訂合約，藉由該合約，使該公司擁有更多權力及責任，並可對使用者進行收費。

該公司主要分為興建、管理（包含操作及客戶服務）、財務及國際四個主要部門。該公司於各公路工程（含隧道）興建前會先進行財務及經濟效益分析，提出整體興建計畫，送交通創新技術部（Ministry for Transport, Innovation and Technology）進行審核，俟該部審核通過後即可開始興建。該公司 98 年度總收費收入為 13.88 億歐元，99 年度總投資為 10.27 億歐元（其中新建工程 3.55 億歐元、既有道路維護 6.72 億元），顯見該公司高速公路興建及營運之資金已可全數自籌。

該公司目前已營運高速公路總長度達 2,170 公里，規劃中及興建中共 320 公里，進行中之重要工程為首都維也納市之環狀高速公路建置，預計 2018 年可完成。至於營運中公路隧道共 142 個，總長度 331 公里，其中最長隧道長度約 13 公里。

另該公司為服務使用者客戶，於網站建置一套交通資訊系統（mobile ASFiNAG，如圖 1），可顯示各高速公路路況、交通事故、天氣及即時影像等資訊，使用者藉此獲得充分資訊以利高速公路之通行。

現地訪查部分，由 Günter Rattei 先生帶領參觀 Semmering 的公路隧道及行控中心（照片 1~3）。

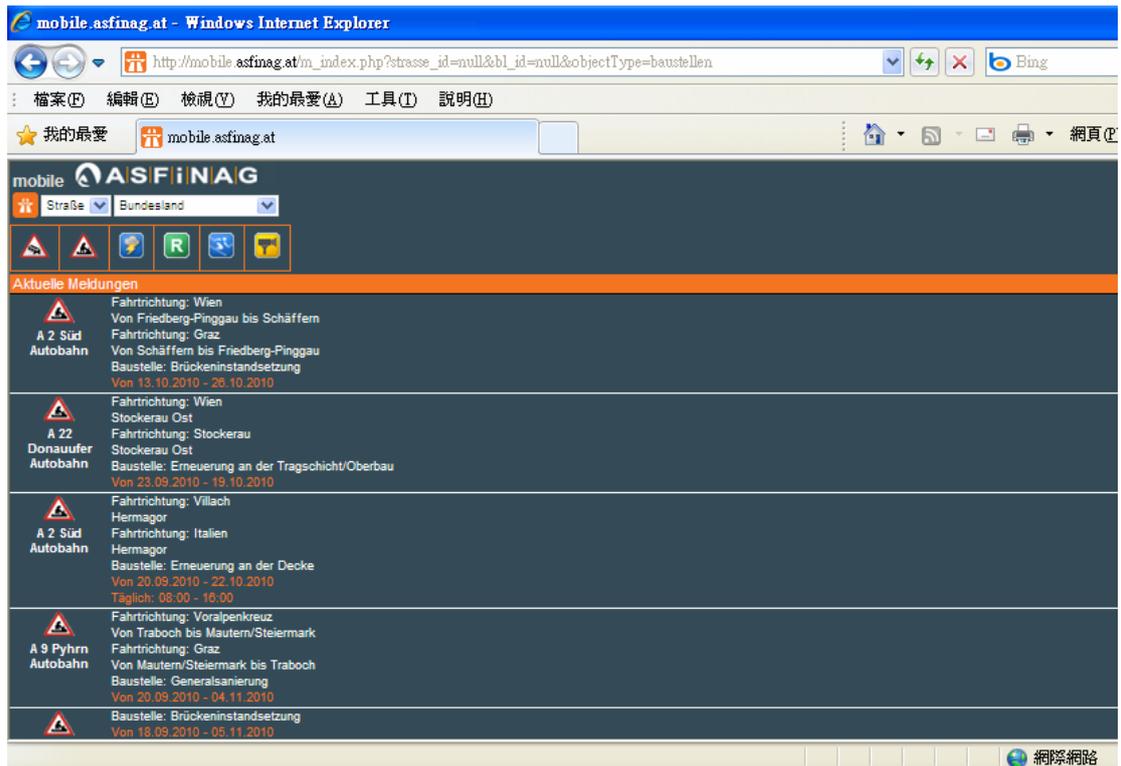


圖 1 Mobile ASFiNAG 網站交通資訊系統



照片 1 Simmering 的公路隧道入口



照片 2 Simmering 的公路隧道內緊急求救系統

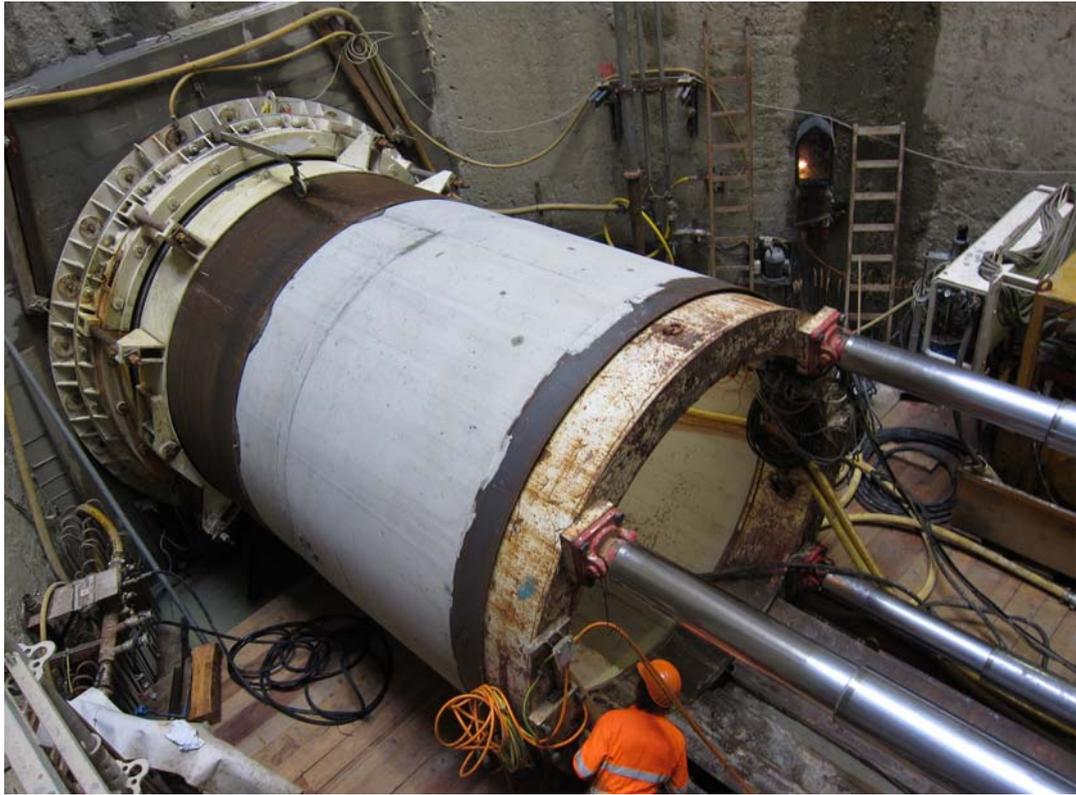


照片 3 高速公路行控中心與 Günter Rattei 合影

二、PORR 公司

PORR 是奧地利大規模工程顧問公司，主要進行建築物、土木工程、專案開發、道路工程及隧道工程等之工程設計監造及專案管理，除了奧地利國內工程外，該公司亦參與國際工程。本次 PORR 公司參訪行程，係由奧地利隧道協會（ITA Austria）理事長 Wolfgang Stipek 先生安排，Stipek 先生同時為該公司董事長，因此安排了解該公司相關隧道工程業務之執行概況。

經由萊奧本科技大學 Robert Galler 教授帶領參觀施工工地。第一個工地位於維也納，採用管推進工法（Pipe Jacking）進行地下隧道施工，此工法於隧道前端進行開挖及出渣，施工豎井處以油壓千斤鼎施力於預鑄混凝土管推進（照片 4）。第二個工地位於上奧地利州的 WAIDHOFEN/YBBS 市，隧道總長約 1.8 公里，因隧道沿線地質狀況複雜，施工時採用 NATM 工法施工，以鑽掘方式進行隧道開挖，隧道共兩個施工面，東面隧道施工已完成，正進行防水層鋪設及襯砌混凝土澆灌作業，至於西面目前尚進行開挖作業（照片 5），預計整體工程於 2012 年可完成並正式營運。



照片 4 維也納管推進工法隧道工地



照片 5 WAIDHOFEN/YBBS 市 NATM 工法隧道工地

三、奧地利大地工程學會 (Austrian Society for Geomechanics)

奧地利大地工程學會成立於 1968 年，該學會主要的宗旨為促進地質與大地工程的科學研究，並使投身於大地科學研究、興建、管理、興建及建築工法之研究者可藉該學會進行經驗交流，此外該學會亦出版論文及準則規範。每年學會出版 5 本大地工程及隧道期刊 (Geomechanics and Tunnelling) 並固定十月份時於薩爾茲堡 (Salzburg) 舉辦地質力學座談會。本次拜訪該學會之接待人員為秘書 Christine Santos Martinez 小姐，除了解該學會運作狀況外，藉由該學會圖書館內收藏書籍，獲取隧道工程技術資訊。

四、格拉茲科技大學岩石力學及隧道研究所 (Graz University of Technology, Institute for Rock Mechanics and Tunneling)

格拉茲科技大學 Wulf Schubert 教授 (照片 6) 是奧地利隧道工程界之權威學者，本次赴格拉茲科技大學即與該教授討論隧道施工方法、遭遇問題及解決對策等，另由於該教授亦於 3G 大地工程公司擔任合作夥伴，爰帶領參觀格拉茲市西南方之 Koralm 隧道 (照片 7)，該隧道為該公司近期設計之隧道，由格拉茲 (Graz) 通往克拉根福 (Klagenfurt)，為東歐南北交通要道，全長約 32.9 公里。



照片 6 與 Wulf Schubert 教授（最左）合影於 3G 公司



照片 7 Koralm 隧道工地

五、維也納資源及應用生活科學大學大地工程研究所

(University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Institute of Geotechnical Engineering)

本行程訪問該研究所吳偉 (Wei Wu) 教授，該教授原服務瑞士之工程顧問公司，後轉而任職於該研究所擔任教授，本次赴該研究所參觀室內實驗室，較特別的是實驗室內一台離心機可以模擬人造重力場以提升模型相似性，另由教授帶領參加 Dr-Karl-v.-Terzaghi 道路之揭幕活動 (照片 8)，一般很少以工程或學術界名人為道路命名，算較難能可貴處。



照片 8 Dr-Karl-v.-Terzaghi 道路之揭幕活動

六、維也納科技大學水利工程及水資源研究所 (Vienna University of Technology, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources)

本行程拜訪該研究所 Peter Tschernutter 教授 (照片 9)，討論奧地利水利設施概況，並帶領參觀該校的水工模型試驗室，目前試驗室內正進行水力電廠發電進水口改建模型試驗 (照片 10)，以物理模型定性分析結果作為工程設計參考。

另由 Boris Huber 博士帶領參觀 Freudenau 水力發電廠內部之發電機組等 (照片 11)，該電廠於 2007 年建造完成。



照片 9 與 Peter Tschernutter 教授 (圖右) 合影



照片 10 維也納科技大學試驗室內水力電廠模型



照片 11 Freudenau 水力發電廠內部發電機組

貳、研習心得

一、奧地利水力發電設施

奧地利主要水利隧道為水庫之水力發電隧道，因高差較大之水力發電廠多位於深山內交通不便，本次僅參訪位於維也納市的Freudenau水力發電廠。奧地利約有90個水力發電廠（圖2），本次參觀之Freudenau水力電廠是多瑙河（Donau River）主流上九個水力發電廠的其中一個，發電量可達1,052GWh（Gigawatt hour），由於本電廠位於主流河道上，水位高差較小，電廠設施無隧道，是美中不足的地方，再則由於奧地利水利設施已臻完備，目前幾乎沒有建設中之水利隧道，下次有機會再到訪奧地利，仍應安排參觀興建中水力電廠之引水隧道。



圖 2 奧地利主要水力發電廠分布圖

二、隧道施工工法

1. 新奧工法 (New Austrian Tunneling Method, 簡稱 NATM)

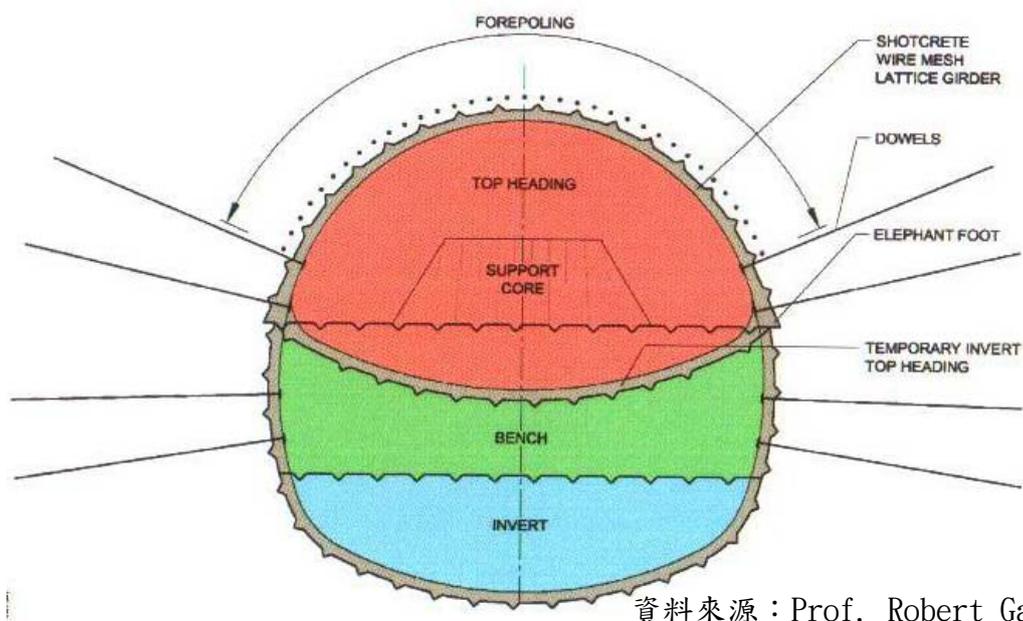
本工法基本概念為利用岩體之自持能力特性，在容許適當變形狀況下，以噴凝土 (Shot Crete)、岩栓 (Rock Bolt)、鋼支保 (Steel Ribs) 等支撐系統，達到隧道開挖後應力平衡之目的。最重要的是於施工中藉由量測儀器觀察岩體行為，據以辦理施工應變措施，並可回饋原始設計，以達到安全開挖之目的。其工法主要施工流程如下：

- (1) 隧道工作面開挖或鑽炸 (Drilling and Blasting)：利用鑽堡鑿岩機及手提式鑿岩機鑽孔及開炸 (包括週邊圓滑開炸) 等。
 - (2) 出渣 (Mucking)：將工作面產生之渣料運往隧道外。
 - (3) 鋼絲網 (Steel Mesh) 裝設及噴凝土保護 (Shot Crete)：已開挖之隧道面，於側壁打設岩栓並安裝鋼絲網後施以噴凝土 (施作機器詳照片 12)，以發揮足夠之開挖面強度。
 - (4) 混凝土襯砌 (Inner lining)：俟隧道岩壁之變形量緩和，即代表岩栓及噴凝土受力且發揮支撐周圍岩體效用，此時即進行隧道內混凝土襯砌澆置 (照片 13~15)。
- 隧道斷面由隧道頂部而下分為頂部導坑 (Top Heading)、

台階 (Bench) 及內底 (Invert) 三個部分 (圖 3)，其施工亦依此順序進行開挖，如圖 4。另隧道內主要硬體設施則尚包括襯砌 (Inner lining)、防水層 (Water Proofing) 及排水管 (Drainage Pipe、Waste Water Pipe) 等部分 (如圖 5)。

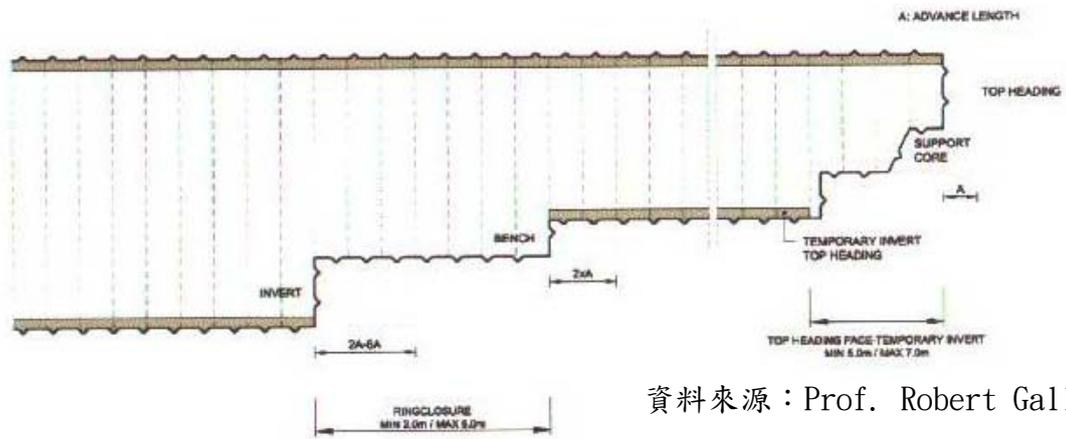
最後，NATM 工法主要適用於以下狀況：

- (1) 高度變化之地質條件
- (2) 隧道形狀變化處
- (3) 有水流流入隧道之高風險處
- (4) 複雜的入口或路線交接點
- (5) 短隧道



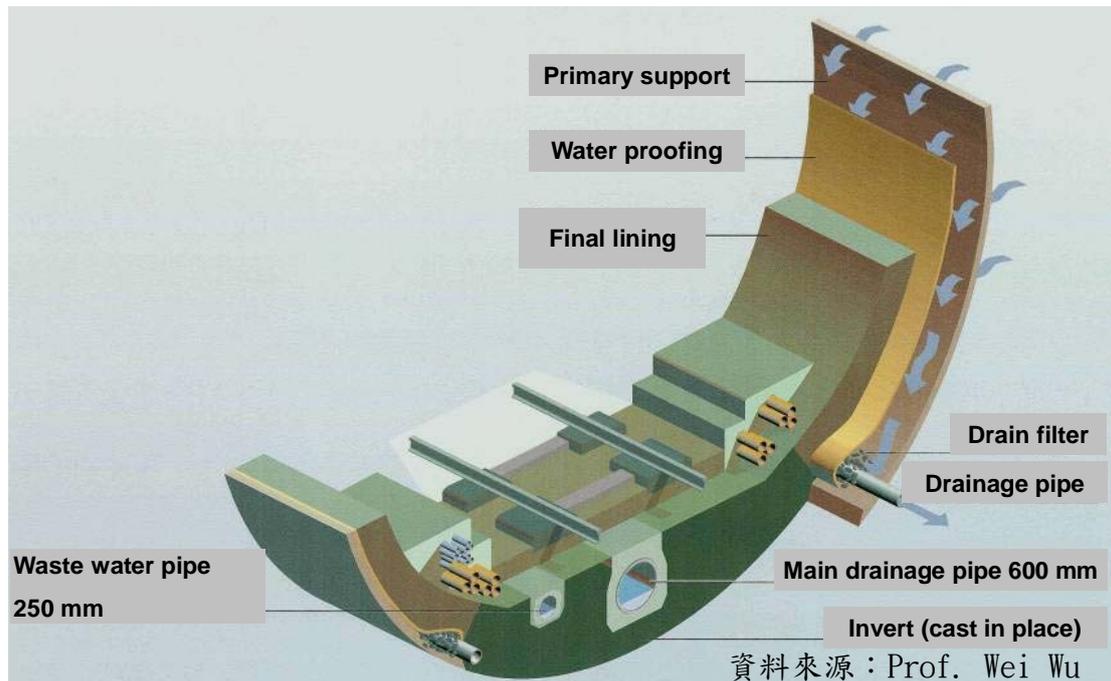
資料來源：Prof. Robert Galler

圖 3 隧道斷面主要區域名稱



資料來源：Prof. Robert Galler

圖 4 隧道主要開挖流程圖



資料來源：Prof. Wei Wu

圖 5 隧道襯砌及隧道內主要硬體設施示意圖



照片 12 噴凝土施工機具



照片 13 隧道壁防水布鋪設



照片 14 襯砌鋼模及進行襯砌混凝土澆置



照片 15 隧道完成襯砌

2. TBM 工法

全斷面隧道鑽掘機 (Tunnel Boring Machine, 簡稱 TBM) 是專門使用於開鑿隧道的大型機具。該機具具有一次開挖即可完成隧道的特色，從開挖、推進及支撐等全由該機具完成，開挖速度可達傳統鑽炸工法的 5 倍，然因機具完全無法模組化，僅可依開挖隧道的直徑訂作，因此價格較貴。

TBM 工法主要適用於固定斷面之長隧道，使用於岩石堅硬地盤 (Rock Ground) 時，開挖後使用臨時支撐 (Temporary Support) 後再進行襯砌混凝土澆置。若使用於軟弱地盤 (Soft Ground) 時則以含盾 (Shield) 之 TBM 進行隧道開挖，並於隧道開挖面後方以塊狀環型預鑄式混凝土塊進行襯砌安裝，即所謂潛盾工法 (圖 6)，常用於大都市地下捷運系統之興建。

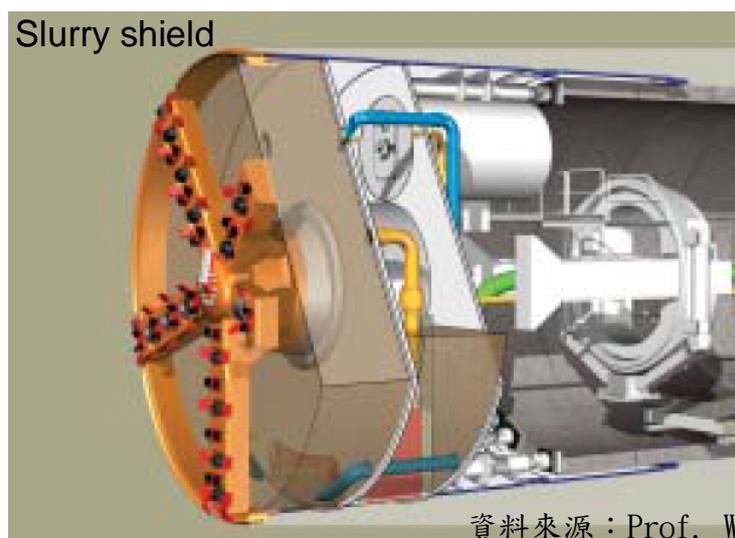


圖 6 潛盾工法 TBM 示意圖

3. 管推進工法 (Pipe Jacking)

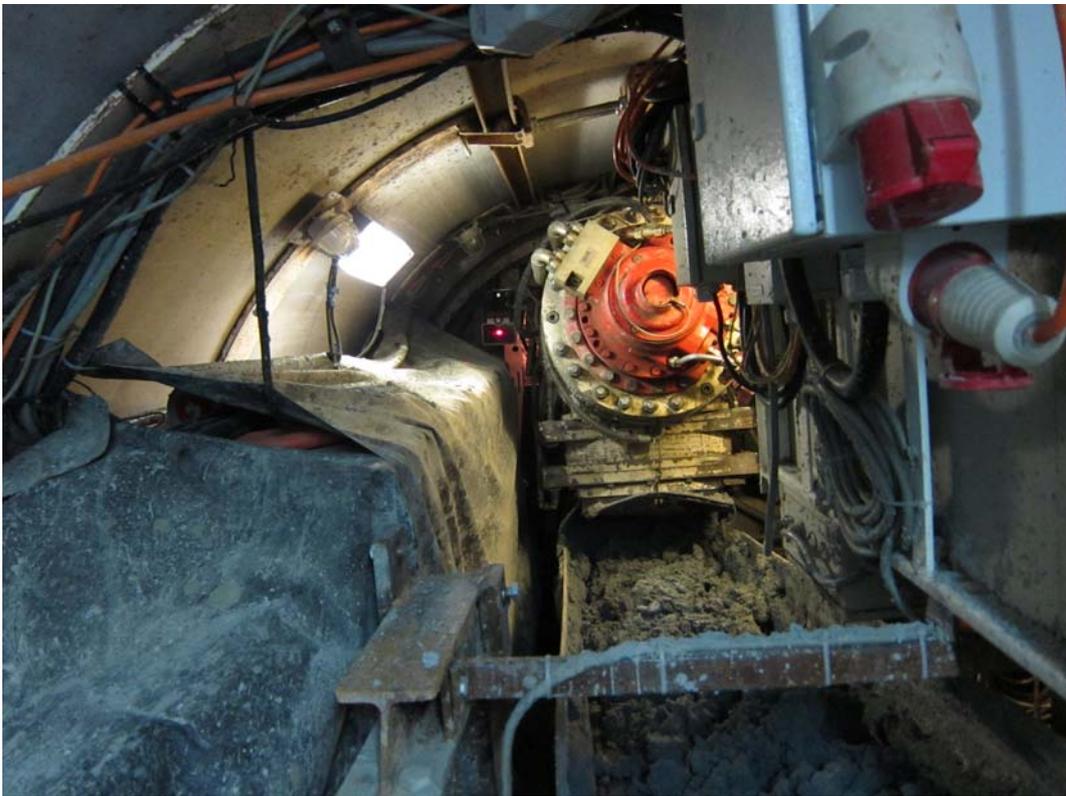
此工法先以一個工作豎井 (照片 16) 為起始工作面，於豎井處以千斤頂將預鑄環型混凝土管 (照片 17) 向土層推進，同時將管推進方向所產生之土壤向工作豎井方向運輸 (照片 18)，並由豎井上方運離，俟第一節混凝土管完成後，將第二節混凝土管接在第一節管後推進，只要千斤頂之力量可克服推進時之阻力，整個推進過程就可循環重覆進行，持續朝目的地推進。此工法通常適用於小管徑之隧道，及大都市小管徑地下隧道之施工。



照片 16 管推進工法工作豎井



照片 17 預鑄環型混凝土管



照片 18 管（隧道）內土壤之運離

4. NATM 工法及 TBM 工法之比較

因 TBM 機器昂貴、需配合隧道直徑特別訂製及僅可開挖固定斷面隧道等因素影響，一般實務上以隧道長度及工地位置等因素進行評估決定採用 TBM 或 NATM，如圖 7 即為 TBM 及 NATM 的成本曲線。一般狀況若隧道長度較長 TBM 成本較低，較具經濟性的，反之隧道長度較短則為 NATM 成本較低，另外在雙管隧道聯通道、隧道內車站或隧道入口處，因斷面較為複雜無法使用 TBM 工法開挖，仍需使用 NATM 等其他開挖工法，爰大部分隧道以 TBM 工法配合 NATM 工法施作，不僅提升效率，亦節省施作經費及確保施工安全。

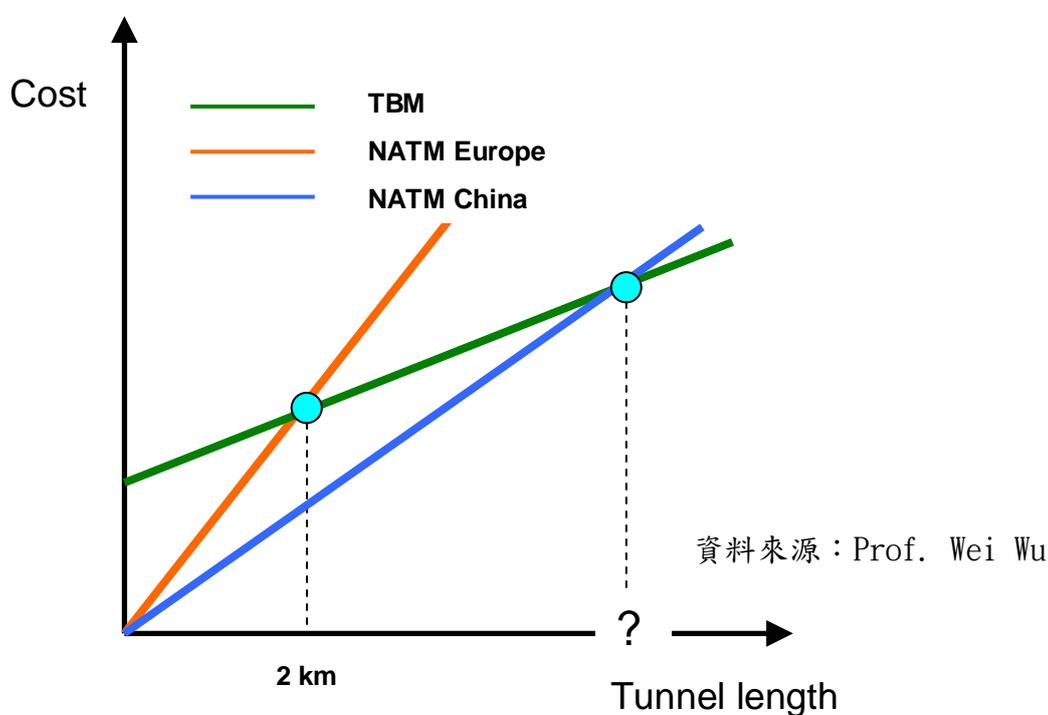
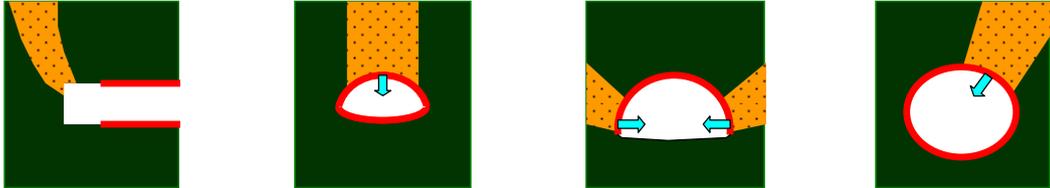
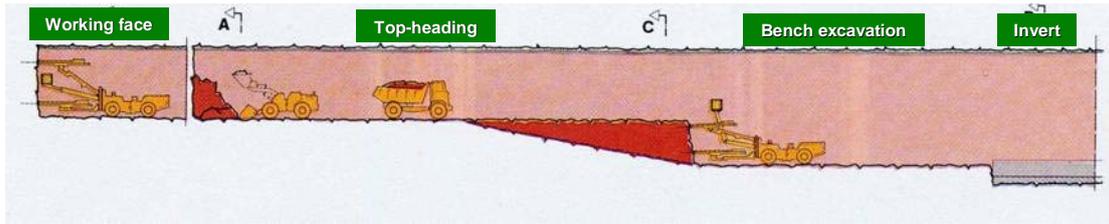


圖 7 TBM 及 NATM 成本曲線

三、施工災害及處理

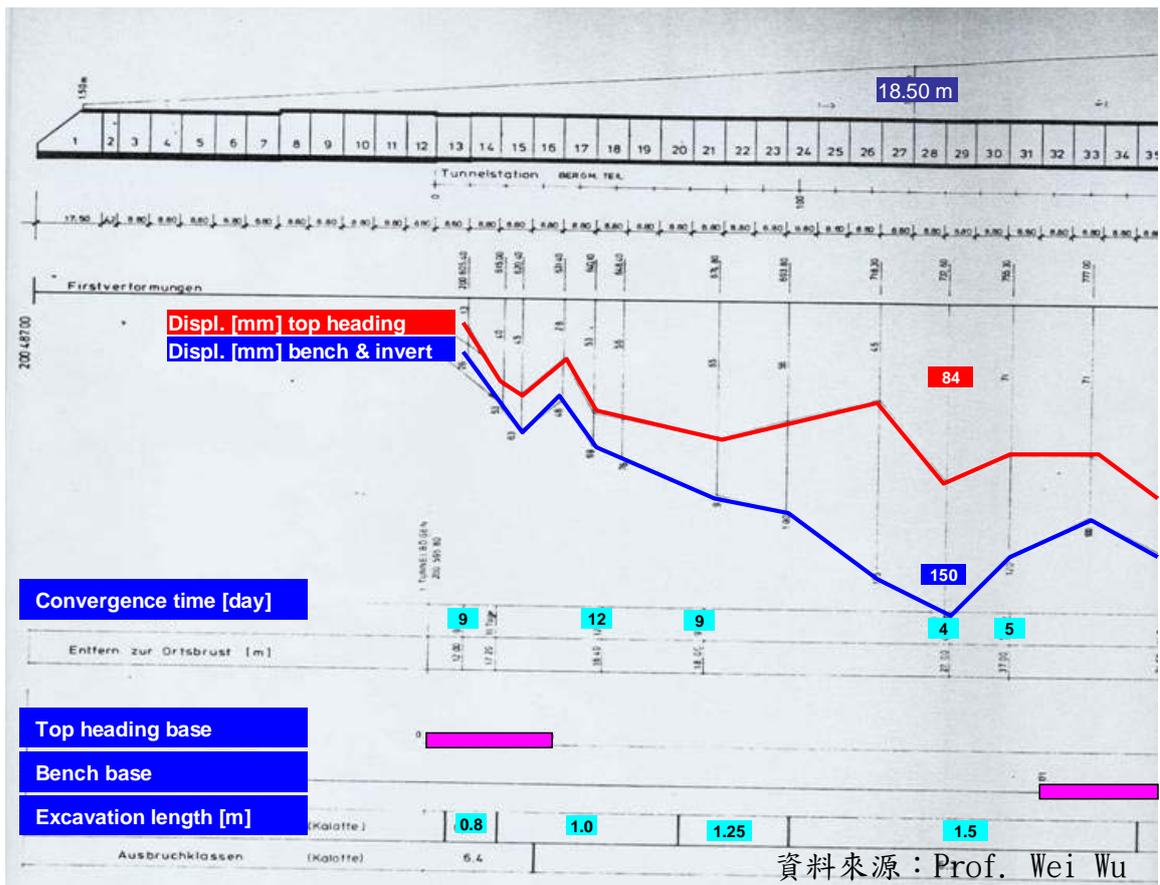
於隧道施工中，最重要的是施工安全，因此為減少施工災害及快速進行災害處理，以下事項需特別注意：

1. 量測儀器即時監測：大部分的土木工程均需裝設量測儀器，主要的量測儀器包括沉陷釘、伸張儀、計測岩栓、傾斜儀、應力計及應變計等。在隧道工程中，最重要的量測資訊是隧道開挖面之變形量（紀錄表如圖 9），變形量代表施工時的支撐是否足夠及允許變形量是否於設計容許範圍內，若是有瞬間大幅度的變形量，代表隧道內部處於不穩定的狀態，需進一步加強支撐或需緊急撤離隧道內施工人員，因此監測資訊的準確可有效確保施工人員的安全（變形量及時間風險關係如圖 10）。近年位移量量測技術更為提升，直接於隧道開挖岩壁上裝設接收反射器，於固定位置裝置儀器以雷射方式即可量測各該點位移量（圖 11），方便又迅速。
2. 設計值與現地量測值之比較及回饋：於上述監測資料經比較與設計值不同時，除可能現地地質狀況與原設計不同，亦可能施工品質不佳造成支撐強度不足，此時可由設計單位與施工單位儘速會同進行確認，若確有變更設計之必要，需即早因應。



資料來源：Prof. Wei Wu

圖 8 隧道工程常見施工災害發生情況



資料來源：Prof. Wei Wu

圖 9 隧道工程內各點位位移監測紀錄表

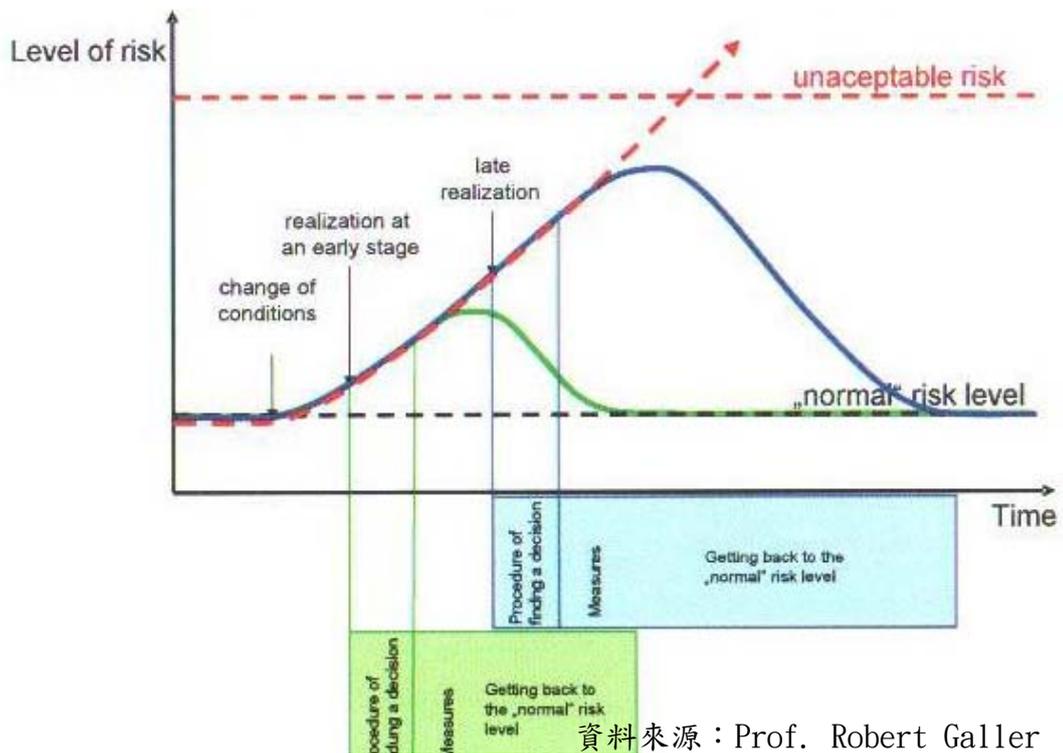


圖 10 隧道內變形量、時間與風險關係圖

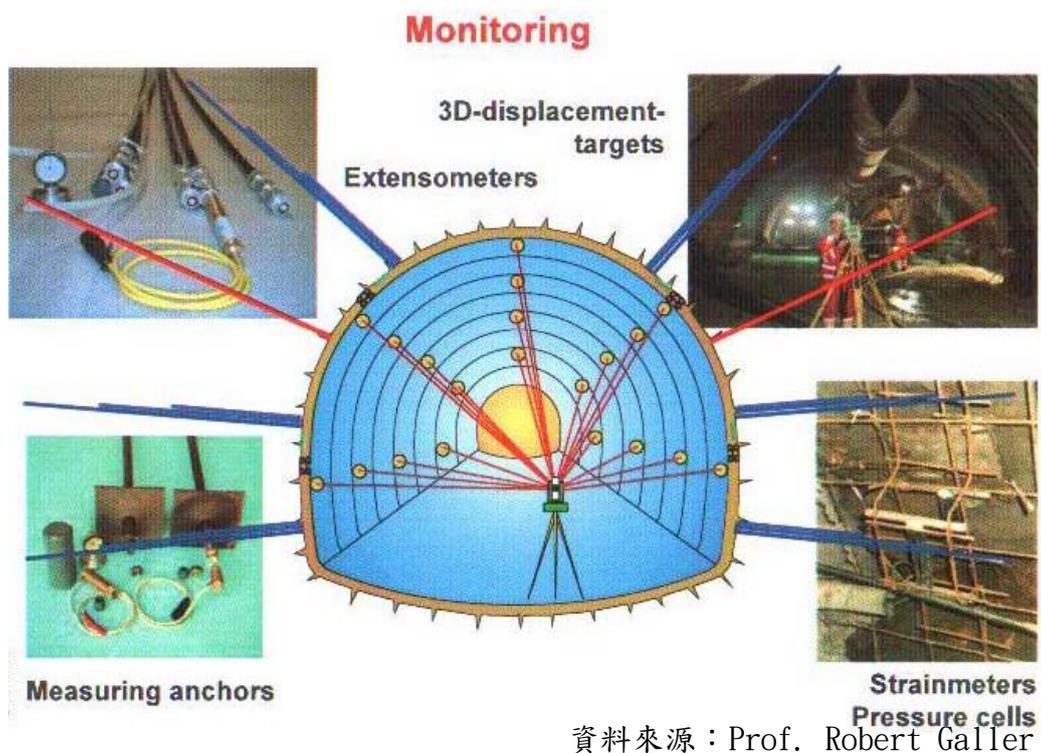


圖 11 位移量監測儀器及監測點位示意圖

參、結論與建議

- 一、隧道施工主要工法為 NATM 及 TBM，於設計時多依據隧道之長度、複雜度、施工速度及施工成本等影響因素，選擇適當施工工法，通常單純斷面及長隧道採取 TBM 施作，複雜斷面隧道及短隧道採取 NATM 施作。
- 二、隧道工程需要理論與現地實務結合，於隧道工地可能發生許多意想不到的突發狀況，如施工災害等，因此結合良好的設計者、施工廠商及即時的量測監控儀器，並佐以迅速的應變流程及措施，始可確保施工安全。
- 三、為確保隧道施工期間之安全，務必建置足夠密度之位移量測儀器，並配合建置安全預警系統，於隧道壁變形量急遽升高同時，及時通知現場施工人員進行支撐補強，甚而來不及補強時，亦可提前撤離相關施工人員及機具，降低損失。由於隧道於設計階段均經計算分析求得隧道內各位置設計位移量，可將該資訊輸入安全預警系統內，以進行即時危險性分析判斷。
- 四、大地工程受限地質條件之複雜度及難預測性，通常需視現地施工狀況進行設計工法及設計強度之修正，尤以隧道工程於地底施工，其不確定性更高，現地遭遇狀況及現地監測資料

若與設計者所提供之預測值差異過大時，需及早通知設計者進行設計變更，並確認主要異常狀況發生原因，予以解決，以減低隧道施工之不確定性。

五、ASFiNAG 公司興建之奧地利高速公路隧道已不需要奧國政府之預算支助，可由營運之收費收入支應新建高速公路及隧道之支出，我國亦應思考採用使用者付費之精神提高高速公路收費費率，以達興建及營運損益兩平目標。也許參照奧國作法成立獨立公司，授與相關權力及責任，對於隧道興建是個不錯的作法。

六、依本次參訪數個奧地利隧道工程工地現況，施工材料及施工機具之放置位置及環境清理均十分有條理且整潔，相較於台灣之隧道工程工地多較為髒亂且施工機具材料隨意堆置，恐影響施工安全及工程進度，奧國隧道施工時對工地之施工管理十分值得我國學習。

七、歐洲大部分人都會於暑假期間安排長假期，像本次研習參訪安排於 8、9 月適逢暑假期間，部分學校教授及機關人員時間安排較不容易，有時需將室內討論及現地參訪行程併於同一天內辦理，致行程過於緊湊，若需更多時間進行詳細深入討論，應避開暑假期間安排行程。

八、本次參訪原預計參訪奧國農林環境及水利部，並參觀奧國水利設施及水利隧道，惟經聯絡後該部僅協助安排維也納科技大學水利工程及水資源研究所行程，及現地參訪水力發電廠，可惜無法參觀奧國水利隧道設施，日後有機會則建議洽請奧國安排水利隧道之現地參訪。

肆、謝誌

本次研習感謝經濟部國際合作處提供研習機會與經費，及承蒙該處葉組員士嘉、駐奧地利代表處經濟組陳秘書韻如、Sabine Glatz 秘書、國立交通大學土木工程系黃安斌教授協助，才得以順利成行；在奧地利承蒙維也納科技大學水利工程及水資源研究所 Peter Tschernutter 教授、維也納自然資源及應用生命科學大學大地工程研究所吳偉教授、格拉茲科技大學岩石力學及隧道研究所 Wulf Schubert 教授、ASFiNAG 公司之 Günter Rattei 先生、PORR 公司之 Arthur Göbl 先生…等之安排與接待，使這次之研習獲得許多寶貴之經驗與觀念，在此一併致上由衷之謝意。

附錄 出國行程表

時間	地點	研習內容
8/14-8/15	桃園-維也納	前往奧地利
8/16	維也納	拜訪駐奧代表處經濟組
8/17	維也納	赴維也納科技大學水利工程及水資源研究所 參訪水工模型實驗室、Freudenau 水力發電廠 並討論奧地利現有水利設施概況
8/18-8/19	維也納	赴 ASFiNAG 公司研習交通隧道興建技術及 參訪位於 Simmering 的隧道
8/20-8/25	薩爾茲堡	赴奧地利大地工程學會研習隧道興建技術並 使用學會圖書館查閱隧道相關期刊文獻
8/26-8/27	格拉茲	赴格拉茲科技大學岩石力學及隧道研究所討 論隧道施工新技術及施工災害並參訪 Koraln 隧道
8/29-8/31	維也納	赴 PORR 公司研習隧道施工技術及監測儀器 並參訪 WAIDHOFEN/YBBS 隧道
9/1-9/2	維也納	赴維也納資源及應用生活科學大學大地工程 研究所研習隧道興建新技術、新奧工法及 TBM 隧道等
9/3-9/4	維也納-桃園	返國



廉潔、效能、便民