

## 技術講座

# 隧道工程的源起與發展

曾大仁\*

## 一、從童年經驗談起

在童年歲月中，我們或許都有過在海灘或公園玩砂的經驗，好好回憶一下，可能記起挖山洞是玩砂時常做的一種遊戲。在潮濕的砂土中，以人為的方式製造一個空洞，這個洞往往可以維持一段時間，不至崩塌。雖然兒童幼小的心靈，對其中複雜的力學機制並無法瞭解，其實這就是具體而微的隧道工程；相信在類似的活動中，原始人類已開始累積隧道工程的概念與經驗。在大自然中，知道挖掘隧道的動物不少數，譬如土撥鼠、野兔、土狼、水獺、穿山甲等，都會利用隧道憩息、避難或儲存食物，但仔細想想，我們發現人類卻是其中的僥倖者，而且使用地下空間的方式，已遠超過自然界動物的行為。

遠在史前穴居時代，人類已經懂得利用天然的地下洞穴遮蔽風雨，防止外力侵害；由於長期生活在洞穴中，基於空間上的需求，人類逐漸發展出原始的修挖洞穴技術，也可說是最原始的隧道施工行為。

## 二、原始隧道工程的出現

根據文字歷史的記載，大約在 4000 年以前，人類開始有目的、有計畫、有方法地開挖隧道並加以利用。巴比倫人於近東地區兩河流域（現今伊朗與伊拉克交界，靠近波斯灣地區）大量開鑿隧道，作

為灌溉之用；在 2180 至 2160 BC 間，成功地構築一條穿越幼發拉底河的河底人行隧道，長度達到 900 公尺，且具有磚襯砌，此為人類從事隧道工程最早完整的記錄。古希臘人於西元前六世紀，已有在石灰岩地盤中，完成  $2 \times 2$  公尺斷面，長度達 1 公里水路隧道的紀錄。到了公元前 36 年羅馬人發展出以火炬燒烤岩盤，再潑水急冷，破裂岩盤的技術 (fire quenching)，在僅有簡易手工具之情況下，亦可開鑿硬岩，這是人類首次運用熱脹冷縮物理現象，克服岩盤材料的自然強度。羅馬人所完成的隧道中，最具代表性者為位於今天義大利北部的 Pausilippo 隧道，長約 1.5 公里，8 公尺寬，9 公尺高，已頗具近代隧道之規模。在中國的歷史上，有關隧道工程的記載甚少，最早的文字見於距今二千餘年之春秋時代，魯隱公元年，左傳記載出現「隧以相見」的文字，其內容雖似與宮廷鬥爭有關，但應可視為中國早年使用隧道的證據。另於西漢武帝時代，亦有工匠在灌溉用水井之間開鑿地下渠道，以調節地下水的水位的記載，算是更具體的隧道工程的記錄。

在原始隧道工程中，運用奴隸或民伕的集體勞動力，加上簡單的手工具，配合基本測量知識進行施工，往往有大量的人命傷亡，因此隧道工程自古以來即蒙上了一層神祕色彩，至今尙未能完全消退。過去頗長的歲月中，台灣地區隧道開挖貫通之前，工人嚴格禁止女性進入隧道，因為

多由傳統礦工轉業而來的隧道工人相信，女人會帶來惡運，而惡運在施工中的隧道工地裡，幾乎就代表了死亡。隨伴著工程技術的成長進步，工程師對隧道開挖的掌控越來越有把握，災變傷亡的事故率大幅下降，過去種種的迷信也就漸漸消逝退色。相當有趣的是，從外國隧道施工營造廠商進入國內市場後，有一些施工中的隧道，已將西洋的隧道守護神聖巴巴拉(St. Babara)的塑像立在隧道洞口上方，而這位聖巴巴拉卻是一位女神；可見隧道這行業的迷信，中外皆有，只是巧妙各有不同。

### 三、現代隧道工程的萌芽

現代隧道工程施工技術的演化轉變，可以概分為三個階段；(1)鐵製工具普及黑色火藥的使用，工程師能掌握並有效運用化學能；(2)黃色炸藥的發明與使用，大幅提高隧道開挖的能力，鑽炸工法進入成熟階段；(3)大型隧道開挖機械出現，改變了現代隧道施工管理，使超長隧道施工可行性有效提高。

在十七至十八世紀間，歐洲與北美洲對運輸的需求遽增，黑色火藥、鐵製工具亦漸普遍，隧道工程規模逐漸擴大，開挖效率也大幅提高。法國工程師 Pierre Riquet 於 1666 至 1681 年間，在法國南部靠近地中海葡萄產區的 Beziers，開鑿 Languedoc 水路隧道，斷面  $7 \times 8$  公尺，長度 155 公尺，為連接大西洋與地中海運河中的一段；此為第一次使用黑色火藥爆破開挖隧道，這時工程師已可掌握化學能進行硬岩開挖。

到了十九世紀，鐵路運輸快速興起，鐵路隧道的長度與數量，不斷增加。同一

時期，瑞典人 Alfred Nobel 於 1859 年發明黃色炸藥，隧道工程師在短期內，即將其強大的破壞力運用於隧道開挖。第一條採用黃色炸藥的隧道，為位於美國麻州西部的 Hoosac 隧道，斷面  $7 \times 7$  公尺，總長達 7.2 公里，於 1855 年開工，1876 年完成。在此隧道施工的過程中，發現岩石的硬度遠超過預期，當時慣用的手動鑽根本無法使用。為求隧道開挖能有效進行，在施工過程中陸續採用了氣動鑽等施工機具，並且發展出當時最先進的開炸技術，開始使用黃色炸藥、電氣雷管做為爆破的工具，此時隧道施工方式已與現今隧道工程十分相近。Hoosac 隧道最後完工工期變為原先預訂工期的七倍，而工程經費亦達到原預算的五倍，但是在工程進行的過程中，為隧道鑽炸工法技術奠定了後續發展的基礎；至此，鑽孔開炸成為主要隧道施工方法，直到今日，甚多隧道仍以鑽炸開挖施工。

另外在土質地盤中的隧道，也隨著人口集中，都市快速發展而出現；由於土壤的材料與岩石的性質差異甚大，因而發展出完全不同的技術，其中以出現於十九世紀中葉，最為人所熟知的潛盾工法為代表。英國工程師 Marc Brunel 在 1825 至 1845 年英國 Wapping-Rotherhithe 隧道工程中（穿越倫敦泰晤士河），第一次成功應用潛盾機挖掘隧道；其後潛盾隧道工法逐漸發展成熟，而演變為大尺寸軟土隧道的主流角色。其最重要的功能為，可在地下水位下軟弱地盤中，提供安全的隧道開挖支撐工作環境，同時對地面的既有建築與交通干擾最少。目前在世界各國的都會地區，凡屬地下鐵或捷運工程，都經常採用潛盾隧道工法作為主要的隧道施工方

式。也因為軟土隧道工法的成熟，使得現代化都會大眾運輸所必備的捷運系統，得以充份的運用都會區地下空間，間接地塑造了部份近代都會區的城市風貌。

## 四、隧道施工現代化的發展

隧道施工現代化是隨著工程的需求而逐漸演變，朝著更長、更大、克服更複雜地質條件的方向發展。在1857至1871年間，歐洲國家進行穿越阿爾卑斯山的Cenis鐵路隧道(也稱為Frejus隧道，長度達13.5公里)施工過程中，隧道工程師開始採用軌道裝載式鑽機，使開挖速率達到每日4.5公尺；工地設置完備的營區，提供施工人員宿舍、家庭住宿、醫療服務、學校等設施，在管理上已具有現代化的雛型。在後續的阿爾卑斯山區所開鑿的長隧道施工中，新的技術陸續開發使用，諸如隧道開挖中的遠距離通風、空壓動力運輸機車頭等；但是隧道工程師也不斷地遭遇到新的挑戰。總長19公里的Simplon鐵路隧道開鑿施工過程中(1898-1906年完成)，隧道覆蓋厚度高達2100公尺，在硬岩區段，經常發生岩爆所引起的岩塊飛射；在較軟弱的片岩與石膏岩中，卻需要使用厚達3公尺的磚石襯砌，以抑止地盤膨脹的趨勢，同時在局部的區段中，因地熱效應，使隧道中的溫度達到了54°C，這些困難最終都在工程師應用新的技術(如噴水降溫、導坑先進等方法)，逐項克服解決。

就在施工技術的發展過程中，也遭遇許多悲慘的教訓，其中以Lotschberg鐵路隧道(總長14公里，1906-1911年完成)的案例最具代表性。於1908年，當

Lotschberg隧道開挖穿越Kander河谷時，突然發生大量夾雜土石的湧水，使隧道已完成開挖的區段被淹沒了1300公尺，工作中的25位施工人員全部罹難；原因是河床沖積層厚度達到290公尺，遠超過原先預估的厚度；隨後隧道只好選擇向上游方向改道1.6公里，避開此湧水區段，才得順利通過河谷；這個教訓顯示隧道地質風險的嚴重性，也使日後的隧道的地質調查作業受到更多的重視。至此，鑽孔開炸的技術已漸趨成熟，型鋼支保的使用也日益普遍，在美國著名工程學者Terzaghi 於1946年，根據岩盤分級與鋼支保的使用經驗，提出岩壓荷重表，且獲隧道工程界全面接受使用後，得到總結。這種鑽炸開挖並以拱形鋼支保支撐岩盤的作法，後被稱為美國鋼支保工法(American Steel Support Method, ASSM)，成為當時隧道施工最主要方式。

在鑽炸工法的領域中，最新的一次重要進展是1960年代出現的半剛性支撐工法(目前國內多慣稱為新奧工法，New Austrian Tunneling Method, NATM)。半剛性支撐工法可視為一種設計與施工理念的結合，相對應於美國鋼支保工法有相當大的改變。此工法整合了岩石力學中，岩盤強度與隧道支撐系統間的互制效應觀念，也同時兼顧施工的合理安排；較之傳統鋼支保隧道工法，更具經濟性，在周詳的施工管控下，更可使隧道施工安全大幅提高，目前已成為鑽炸工法中的主流工法。隨著經驗的累積，施工設備持續開發改進(如大型鑽機、雷射定位系統、非電氣雷管、…等)，隧道鑽炸施工方法逐漸完備，且精益求精；在此同時以重型機械開挖隧道的施工方法也有了快速的發展。

全斷面隧道鑽掘機(Tunnel Boring Machine, TBM)的發展，可說是隧道施工的最新里程碑；其概念是利用強大的機械力量鑽掘岩盤，一次完成全部斷面的開挖。這個概念最早由一位英國上校 Frederick Beaumont 在 1882 年提出，計劃用以建造英法海峽海底隧道，唯當時蒸汽動力機具能量過小，且冶金技術尚無法生產高硬度的鋼鐵，以供製造耐磨的鑽掘機切削刀片；因此，此種隧道開挖方式在一百多年前，並未能成功的使用。到了 1950 年代初期，大型電動機已可提供足夠的扭力，加上使用高度耐磨的鎢鋼鑄造切削刀片，終得以克服一般岩盤的硬度；全斷面鑽掘機直接鑽挖隧道的時代終於來臨。

TBM 工法與鑽炸工法最大不同之處，在於採連續的開挖程序，以工廠生產線作業方式管理施工，隧道開挖速度較之鑽炸開挖方式而言，以倍數增加，對長隧道施工經濟性助益極大。目前就美國的統計數字來看，尚在施工的隧道中有超過 90% 的長度採 TBM 開挖，而全世界每年約有 200 公里的隧道是以 TBM 開挖完成，其中最具代表性的工程為已通車的英法海峽鐵路隧道。此座隧道由兩條主隧道及一條導坑(Pilot Tunnel，並兼服務隧道使用)所組成，每單一隧道長度皆近於 50 公里，在施工尖峰時期，總共使用十部隧道鑽掘機同時鑽挖，不到三年半的時間內，即完成全部的開挖工作，就工程的意義而言，確屬非比尋常之成就。

目前隧道主要使用在公路、鐵路、捷運、灌溉水路、發電水路、地下管道、採礦、軍事設施、地下油氣槽。在寒帶地區為了節約暖氣空調的能源，甚至已以隧道

工程技術興建大型地下集會體育館，足見隧道工程的發展愈來愈多元化；而且凡與民生相關的土木工程亦大都和隧道工程密不可分。現今世界上最長的公路隧道為連接瑞士與義大利的聖格哈(St. Gotthard)隧道，總長 16.3 公里，於 1980 年完成。最長的鐵路隧道為連接日本本洲與北海道的清瀬(Seken)隧道，總長 54 公里，於 1988 年完成。

## 五、台灣地區隧道工程的進展與現況

台灣地區最早出現的鐵路隧道，為劉銘傳治台時期所開鑿的縱貫線鐵路獅球嶺隧道，最早的水路隧道為日人據台時期所構築的龜山水力發電廠水路隧道，距今已有超過百年的歷史。在此之後，台灣地區經過長期的建設發展，配合電力開發、交通事業、水利事業及軍事用途等公共需求，已完成大量的隧道工程。根據中國土木水利工程學會大地工程委員會於 1995 年所完成的調查，台灣地區隧道累計長度已超過 667.4 公里。然單就後續重大工程中，計劃興建的隧道數量亦將超過 200 公里，其中已在施工中的坪林隧道(雙孔主隧道加一條導坑)長度達到 12.9 公里，完成後將為亞洲第一、世界第三長的公路隧道；就此看來，隧道工程的後續發展，在台灣的工程界，可說是佔有非常重要的地位。

台灣全島岩盤除少量的火成岩及多量的變質岩外，其餘屬於較為年輕的沈積岩，一般而言後者強度較低；加上位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊衝擊交接地帶，長期受造山運動的影響，山脈劇烈起伏，地層岩盤性質變化大，經常破碎且蘊

涵豐富的地下水。在如此惡劣的自然條件下，本島隧道施工常遭遇各種困難，也使參與隧道工程的工程師面臨較其它土木工程師更多的挑戰。

就施工技術的進展來看，我們已經走過傳統鋼支保工法，進入半剛性支撐工法(或稱新奧工法)的領域；目前更隨著長隧道的施工，在北宜高速公路坪林隧道與士林水力發電廠頭水隧道引用了全斷面鑽掘開挖工法(或稱TBM工法)。從世界隧道工程發展的過程來看，我們並不處於落後的地位；若從後續隧道工程的規模，以及可能面臨的挑戰來看，則更有機會開創領先的隧道工程技術；但是目前台灣本土隧道工程的發展，仍然存在幾項重大的障礙，有待我們工程人員去克服：

(1).地質調查技術的提昇。雖然隧道工程中的地質風險，無法完全避免，但是充份的先期地質調查加上施工中持續調查作業，將有助於降低施工風險。調查項目應視工區的地層特性而訂，諸如地盤基本性質、地層位態、地質構造、地下水文、大地應力、地熱、有毒氣體、地下孔穴、…等。

(2).培養本土技術掌握能力。國內的隧道施工先進機具設備已大量的進口(如潛盾機、全斷面鑽掘機等)，但是該等複雜機具的操作維護技術，大都還是掌握在原廠技師手裡，本國的技術人員，尚多無法獨立掌控；此一情形如未能改變，我們的技術仍將停留在「船尖炮利」的假象上，無法真正落實生根。

(3).隧道施工管理合理化。隧道施工屬特殊的技術，與其它土木工程施工技術相互轉換的可能性低；在台灣本地大多為師父帶徒弟的方式，培養有限的隧道施工

技術勞力。長久以來，國內隧道施工多由特定的工班團隊所掌握，施工分班一直延續傳統，採用依專長分班管理的方式，形成施工作業過程中界面過多，且工班之間的施工品質責任不明，對於工效提昇阻力甚大。隧道工程營造業者應有計畫地訓練隧道全能作業工班(可考量引用外勞)，以突破目前隧道工班的獨佔壟斷的現象，並強力要求時段分班的落實。

(4).應促使設計理念與施工實務二者之間更密切的結合。Hoek及Brown (1980)主張，在隧道工程中，工程師確實無法根據計算，提出開挖斷面穩定性的「安全係數」，這說明了在隧道開挖過程中，必須依賴所觀察到的地質條件、岩盤特性、監測資料適時作「工程師判斷」；另外Whittaker 及Frith (1990)在回顧隧道工程發展過程後，更指出直至現在，隧道工程的部份技術尚屬「藝術」(art)之範疇；這都說明了在隧道工程施工領域中實務經驗的重要性。但是我們同時應瞭解，在遭遇特殊狀況時，光憑施工經驗仍有可能不足，而必須要與理論相結合，方可事竟其功。因此，如何整理總結豐富的本土隧道工程經驗，使其與岩石力學的理論相結合，且能有系統的運用，確為當前重要的工作。

(5).推廣風險分攤隧道工程合約的理念。目前國內隧道工程多由政府機關主辦，在其工程合約中，對地質風險的處理，大多採用整體性保險條款予以涵蓋。此種合約形式，在實際遇險時，如無發生毀損狀況，就無法獲得理賠，屬於被動式的避險方式；在實務上，對於處理突發的地質風險，所需採取的主動緊急應變措施，助益不大。現在甚至出現某隧道工程，在保

險業的評估之下，認為風險太大，無法購得保險的案例。較合理的方式，為採用國際隧道工程慣用的風險分攤合約理念，建立隧道施工災變風險責任劃分制度，讓現場工程師依風險狀況，做立即反應處理，以降低隧道災害的負面影響。

## 六、結語

隧道工程正如同其它土木工程一般，都有相當長遠發展的歷史，但也有許多本質上的差異，這些差異往往造成一般土木工程師對隧道工程的不瞭解。因此在探討如何改善隧道工程作業環境之前，先需要瞭解其工程特性；概要而言，其中至少應包括以下二點：

施工程序；隧道施工在開挖階段，採逐輪方式前進，每一輪開挖皆為下一輪的前置要徑作業，也可說隧道開挖為一典型的「線性施工」，除非有新增工作面或提高施工效率，否則無法有效縮短工期。然而，在隧道開挖階段，要新增工作面，所需的成本極大，甚至完全不可行；因此，隧道工程在開挖階段一旦發生延滯，工期必受嚴重影響。

風險因素；隧道工程所處理的對象為自然存在的岩盤材料，其本身即內涵相當之不確定成份；再者，隧道多具相當的長度，且有數十乃至數百公尺的覆土厚度，使得在設計施工前，辦理全面性的大地工程調查工作不可行亦不可能。因此在施工過程中，自然要面對因地質或地下水文變化所引起的工程風險。

以上所述的特性，使得隧道工程進步具有更多的困難，也更需要我們工程人員的投入。筆者將嘗試就國內隧道工程技術

發展的方向與所面臨的挑戰，做一個系統的整理，並將於地工技術陸續發表，以就教於工程界先進，並期對於本土隧道工程的進展，稍盡綿薄之力。

## 參考文獻

- 洪如江(民國74年), “工程地質在隧道工程之應用 (技術講座專欄)”, 地工技術雜誌, 第11期, 第67-75頁。
- 郭福隆, 廖同柏(民國80年), “岩石隧道開挖機械介紹”, 地工技術雜誌, 第33期, 第24-40頁。
- 曾大仁(民國83年), “北二高隧道工程鑽炸開挖施工管理探討”, 營建知訊, 第141期。
- 張森源(民國83年), “台灣高速公路山岳隧道之設計與施工”, 營建知訊, Vol. 141, June 1994。
- 鄭文隆(主編)(民國84年), “台灣地區隧道工程基本資料彙集”, 中國土木水利工程學會大地工程委員會出版。
- 程禹(民國85年), “台灣的隧道工程”, 岩石隧道施工技術研討會論文集, 台北市。
- TERZAGHI, K. (1946), *Rock Defects and Load on Tunnel Supports*.
- PROCTOR, R. V. AND WHITE, T. L. (1946), *Rock Tunneling with Steel Supports*.
- HOEK, E. AND BROWN, E. T. (1980), *Underground Excavations in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy 1980, London.
- WHITTAKER, N. AND FRITH, R. C. (1980), *Tunnelling-Design, Stability and Construction*, Institution of Mining and Metallurgy, 1990, London.
- “Public Works: Tunnels and Underground Excavations,” *Encyclopaedia Britannica*, 15th ed., vol.26, pp. 397-414.
- TARKOY, P. J. (1995), “Comparing TBMs with Drill+Blast Excavation,” *Tunnels & Tunnelling*, Oct. 1995, pp.41-44.