

台灣隧道設計與施工

張吉佐 侯秉承 張博翔

中興工程顧問股份有限公司

摘要

台灣位處於板塊劇烈碰撞帶上，地質條件多變且複雜，導致在地下施工的隧道工程遭遇相當大的挑戰，卻也累積了多樣化且豐碩的工程經驗。這段華路藍縷、胼手胝足的百年歷史資料實彌足珍貴。有鑑於此，本文乃網羅各不同領域之隧道案例與史料，重點式地針對圍岩認知、支撐系統及開挖工法之演進加以介紹，並以幾個代表性之案例說明台灣隧道工程之現況，為保存珍貴的工程經驗貢獻一份心力。

DESIGN AND CONSTRUCTION IN TAIWAN TUNNELLING

C. T. CHANG, P. C. HOU, P. H. CHANG

SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.

ABSTRACT

Taiwan is located on the rim of plate collision zones. The geological condition is quite complicated and full of variety, therefore, tunnel construction often encounters considerable challenges. Nevertheless, abundant and diverse tunnel engineering experience is also accumulated at the same time. The difficult, hard-won experience and history of more than a century of tunneling in Taiwan are extremely precious. To reserve the valuable engineering experience, this paper collects data of different fields of tunnel projects and schematically introduces the development of surrounding rock mass theories, support systems and excavation methods. Furthermore, typical cases of tunnels are also embraced in this paper to introduce the tunnels nowadays in Taiwan.

一、前言

台灣地區人口稠密，土地資源有限，為有效利用地下空間、減少徵用民地，故在交通、水力及電力等各項較具規模的國家公共工程建設中，大多含有相當比例之隧道工程。回顧台灣隧道工程發展，從西元1890年完成之獅球嶺隧道開始，到新近通車的北宜高速公路雪山隧道為止，算來已有逾百年之歷史，完成之隧道總長度已超過800公里，在面積如此狹小的台灣地區，隧道分佈的密度幾已達世界之冠，所累積的經驗亦相當可觀。以下即分別針對圍岩認知、支撐系統與開挖工法之演進加以介紹，並列舉部分案例說明台灣隧道工程之現況。

二、圍岩認知之發展

隧道相較於一般建築物，其力學機制較為複雜，主要荷重來自於現地應力(in-situ stress)。而隧道承力元素可概分為自然材料與人工材料兩部份：所謂自然材料係指隧道周圍岩體，將於本章說明；至於人工材料則指隧道支撐系統，將於下章闡述。

回顧台灣隧道工程發展的歷程，正如人類文明的進展，總是不斷地與時俱進，對圍岩行為的了解也是經過不斷地經驗累積，才有今日的基本認知。從早期先民憑藉著毅力與勇氣，一步一腳印地開闢隧道，當時對圍岩的認知只得聽天由命，也因此作業安全常面臨重大的考驗；而後Terzaghi的「岩壓理論」(rock load method)於西元1946年提出，主張作用於隧道之岩體荷重，大致與隧道跨度及高度等尺寸成正相關，而與覆蓋厚度無關。此一概念的誕生，將台灣後續的隧道發展帶入了一個新紀元；直至西元1962年，嶄新的新奧工法(NATM, New Austrian Tunnel Method)所強調的「限制變形理論」於國際上提出並迅速發展，才演變成至今隧道施工的主要概念。其精神在強調隧道圍岩之應力狀態會於開挖過程中重新分佈，當岩體經過適當變形以調適新應力場後，自身即具備因地質狀況而定之自承能力，故為維持隧道穩定，僅需給予補助性之支撐措施，俾加強圍岩強度使其形成一承載拱圈，即可確保隧道不致引發漸進破壞。(圖2.1)

三、支撐系統之發展

伴隨著Terzaghi所提出的岩壓理論，在1950年代後期至1970年代之間，隧道支撐構件已逐漸由鋼支保取代木支保，以抵抗隧道頂拱可能產生之岩石荷重，支撐設計上屬於剛性支撐之觀念，即利用尺寸較大、剛度較強的構件，如：重型鋼支保配合矢板、楔塊，以確保隧道穩定。此一支撐設計法又稱美國鋼支保工法(ASSM)，相較於現今的支撐技術，亦稱為「傳統工法」。

至於自1970年代後期迄今，隧道施工的主流已由傳統工法所代表的剛性支撐，逐漸蛻變成新奧工法所倡導的半剛性支撐。西元1982年東線鐵路拓寬工程之自強隧道，為台灣首次全面採用此一支撐系統之案例。所謂半剛性支撐系統係以噴凝土、輕型鋼支保與岩栓作為主要支撐構件(圖3.1)；其中噴凝土扮演著關鍵性的角色，此元件能在開挖初期迅速地噴附於開挖面，並於短時間內形成一薄殼狀結構，配合後續施工的輕型鋼支保與岩栓等構件，形成一完整而具有基本約束力的承載拱圈，使岩盤本身在經過適當變形後，得以在支撐系統與岩盤自持力間尋求一穩定之平衡點，以確保隧道安全。此外，這種支撐方式常配合靈活的開挖方式進行，即視地盤好壞，彈性運用台階開挖或導坑開挖，藉由縮小一次開挖之斷面積俾確保隧道穩定；而配合計測回饋分析的「邊施工、邊設計」(on-going design)之施工理念，更是半剛性支撐系統為因應複雜而多變之地質條件，所強調之基本概念。

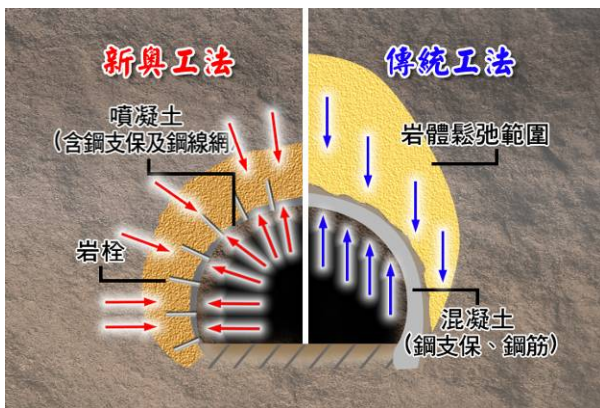


圖2.1 限制變形理論與岩壓理論比較圖



圖3.1 半剛性支撐系統

四、開挖工法之發展^[1]

台灣最早期之隧道工程，因規模較小，主要係用人工以鋼杵、鎚子等工具鑿洞開挖，施工方式較為原始、開挖速度有限、施工作業亦較為危險。

1950年代以後，工業逐漸發達，鑽孔已改用手提式鑽機，開炸則以導火索引爆，此為鑽炸法之濫觴。1960年代以後從石門水庫、曾文水庫至北迴鐵路等隧道工程仍沿用傳統之鑽炸法，開挖方式則有全斷面開挖、台階開挖及導坑先進等方式，機具部份由於日本廠商的引進，鑽堡乃逐漸取代手提式鑽機。1980年代新奧工法引進國內以來，開炸逐漸改良為以延時雷管或非電氣雷管引爆，以改善作業安全、施工品質與速度，開炸技術並進步到以「勻滑開炸」之方式進行，鑽堡則進化為多臂型式之鑽堡機（圖4.1），目前，此種鑽堡已廣泛應用於隧道工地。此外，國外尚已發展出以雷射及電腦定位之鑽堡機，可根據前輪開炸資料，自動設計最佳佈孔型態，此種自動化鑽堡勢將成為未來施工之利器。

隧道開挖除了鑽炸法之外，亦有採用機械作為掘進工具者，目前常用的有：潛盾機（圖4.2）、旋臂式掘削機（圖4.3）及隧道鑽掘機（簡稱TBM，如圖4.4）三種。潛盾機多用於軟弱地層，旋臂式掘削機則用於強度中等以下之岩石隧道，而TBM則因為經過近五十年之不斷改進，加上施工經驗的累積，迄今已有為數甚多之長大隧道以TBM工法順利開挖完成，因其具有平均速度快、使用人力少、支撐需求低及對環境影響小等優點，對於長隧道而言，已有逐漸廣為採用之趨勢。

西元1976年台北市衛生下水道B主幹管工程，首先引進潛盾機施作，自此台灣正式邁入隧道全斷面機械化掘進之新里程碑，此後潛盾機大量運用於都市上下水道主幹管、捷運系統隧道及高壓電纜隧道等工程。1977年中山高大業隧道首先引進旋臂式掘削機施作，此後，二高之新店隧道群，以及北宜高之彭山隧道西段，亦相繼採用此種機械進行開挖。至於TBM之引進，則始於1992年北宜高雪山隧道之導坑工程，當時由於該隧道東段斷層密佈且含水量豐富，以致施工進度不甚理想，但也因此累積了不少寶貴經驗，為後續的主坑工程、士林發電計畫頭水隧道及新武界計畫引水隧道等，奠定了良好的基礎。



圖4.1 多臂式鑽堡機



圖4.2 潛盾機

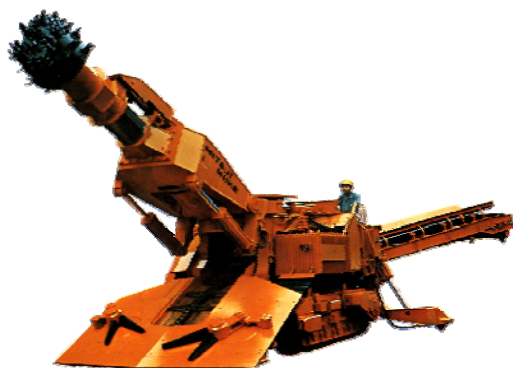


圖4.3 旋臂式掘削機

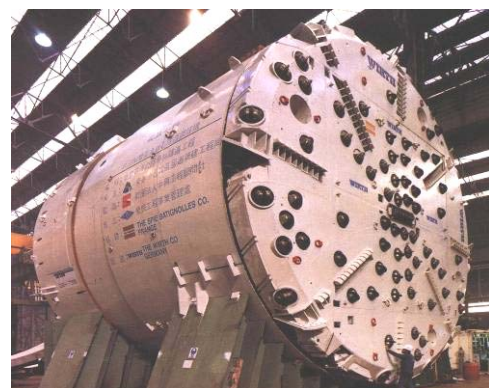


圖4.4 隧道鑽掘機

五、台灣隧道發展現況之案例簡介

5.1 雪山隧道

為縮小城鄉差距，促進東部觀光及產業發展，並完成環島快速路網，全長31km的北宜高速公路之興建為最受矚目之計畫（圖5.1.1），其中以長12.9km、貫穿雪山山脈之雪山（原名坪林）隧道最為關鍵。

雪山隧道，乃一單向各雙車道之雙孔隧道，是目前亞洲最長、世界第五長之公路隧道。於兩主隧道間另有一長度相同之導坑，其高程略低但與主隧道平行（圖5.1.2），用以瞭解地質情況、降低地下水並預先處理不良地質，做為主坑施工中及完工後之輔助坑道。此外，雪山隧道尚包括橫向之28條人行聯絡隧道、8條車行聯絡隧道、6座通風機房、6座通風中繼站及6座通風豎井，其規模之大於國內實屬罕見（透視圖詳圖5.1.3）。

雪山隧道最大覆蓋厚度達750m，沿線遭遇多處褶皺及斷層，因而增添了施工困難性。其中，隧道東段位於雪山山脈北支末段，受板塊運動影響，岩層較為破碎，斷層及剪裂帶密佈，規劃期間即預知將遭遇高壓湧水；施工期間，最大湧水曾達750 l/sec，幸經施工團隊鍥而不捨地鑽灌補強處理，始能順利克服。

由於該隧道兩端洞口外之沿線無法覓得適當位置打設橫坑增闢工作面，加上施工期間同時有多項隧道工程進行，勞工來源極端缺乏；復以沿線地質複雜、作業危險性高及水源保護區內污染管制嚴格等，均對施工作業有所限制，經綜合評估後，決定引進TBM工法，乃吾人率先採用TBM之山岳隧道工程（圖5.1.4及圖5.1.5）。

然而，在施工過程中TBM曾發生多次夾埋，最嚴重的都發生在四稜砂岩區段，輕則延滯工期，重則導致機具嚴重受損及工法變更。分析歷次災變過程，原因多是突發性大量高壓湧水及其伴隨而生的土石湧出所致。

豎井，則是雪山隧道的另一特色。其中一號豎井採用昇井工法（圖5.1.6），二、三號豎井則採降挖工法施作。深逾500m的一號排氣井，是目前最深的豎井工程。值得一提的是在昇井工法第一階段的導孔施鑽過程中，雪山隧道引進國外之D.D.S.導向系統，其貫通時距中心點只有7cm左右之誤差，遠優於規範要求之3~5m。

該隧道導坑已於2003.10全線貫通；至於其主坑西行線與東行線分別於2004.3及2004.9貫通；而豎井中最後完成貫通的一號豎井，則於2004.10完成開挖工作。聯絡隧道、通風機房及通風中繼站等橫向隧道亦於2005.5全部開挖完成，全線於2006.6通車營運。



圖5.1.1 北宜高速公路計畫路線圖



圖5.1.2 雪山隧道主坑與導坑相關位置



圖5.1.3 雪山隧道透視圖



圖5.1.4 雪山隧道導坑工程之TBM

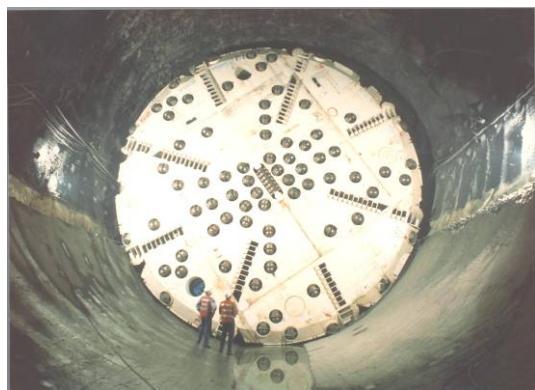


圖5.1.5 雪山隧道主坑工程之TBM



圖5.1.6 雪山隧道一號豎井昇井鑽機與承載座

5.2新店隧道群

為滿足經濟發展之交通運輸需求，並有效紓解中山高的車流，遂有北二高的誕生。全計畫包括主線、台北聯絡線及內環線，全長約108km。其中汐止中和段經過台北都會區，為減少拆遷及徵收土地，以穿越山區邊緣的方式進行，因此隧道甚多，新店隧道群即為其例。該隧道群通過台北盆地東北山區周緣之南港層，沿線以厚層泥質砂岩及薄層砂頁岩互層為主，邊坡屬逆向坡。

該隧道群係由新店一號至四號隧道連接而成，為南北向分離之單向三車道公路隧道，設有一處聯絡隧道，主隧道淨高5.1m。隧道內採混凝土剛性路面，隧道外路工採柔性瀝青混凝土路面。於1991.4開工，1997.5完工。

其中，新店一號隧道曾大幅修正設計，將一部分交流道匯入主線的邊坡開挖段改為隧道段，因而產生了四車道斷面（開挖跨徑約22m，如圖5.2.1），為舉世罕見的淺覆蓋大斷面隧道。施工過程中，由於地表覆蓋僅8~10m，在大斷面開挖又淺覆蓋的條件下，施工極為困難，故採垂直鋼筋樁預先加勁頂拱上方之岩盤，以增加其自持力；另以雙側導坑開挖方式（圖5.2.2），以縮小開挖斷面、增加隧道穩定。

前述之大斷面，隧道內車道寬由洞口之四車道（寬15m）向內漸縮為三車道（11.25m），而洞口造型則維持原45°之斜面，因此產生了一喇叭狀之變化襯砌斷面，為此特設計出五心圓之襯砌鋼模，其設計雖較複雜，但施工卻較為容易。該鋼模長8m，分為左右兩側及中間漸變段三部份（詳圖5.2.3），可大幅節省修改鋼模的時間，以配合趕工需求。上述變化斷面之襯砌設計實為當時之創舉。

另外，新店隧道群因鄰接社區、民房密集，若採鑽炸施工，其震動與噪音可能損鄰並影響安寧，且市區夜間開炸亦受法令限制，故改採兩套旋臂式掘削機（圖5.2.4）進行新店二號至四號隧道之開挖工作；然因施工時之粉塵問題及高故障率，使得進度較不理想。

5.3員山子分洪隧道

往年基隆河流域每逢颱風、豪雨，常造成低窪地區氾濫成災，為有效解決洪患，遂有基隆河整體治理計畫之催生，員山子分洪工程即為其優先推動之項目（圖5.3.1），而該計畫之分洪隧道則是其主體結構之一。上述工程採200年重現期之洪峰流量進行水理分析及工程配置，其目的在導引超過基流量之洪水，以北偏東之方向排入東海，俾降低中、下游之洪峰而發揮減災功能；最大分洪量可達1310cms。

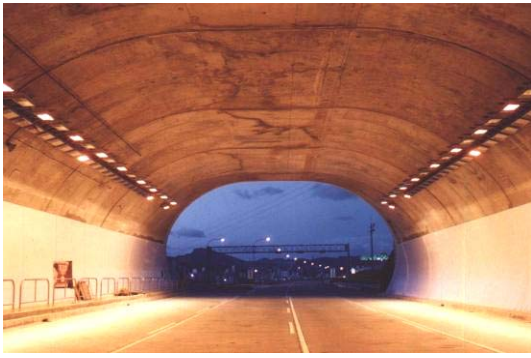


圖5.2.1 新店一號隧道北口南下線四車道斷面



圖5.2.2 新店一號隧道雙側導坑開挖方式

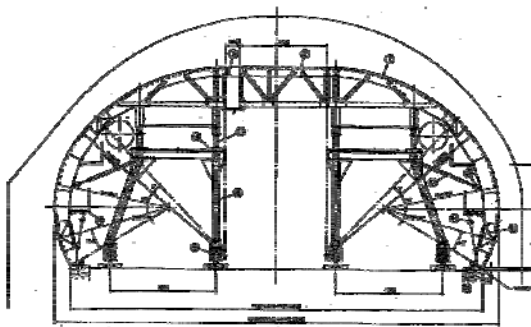


圖5.2.3 四車道變化斷面之襯砌鋼模



圖5.2.4 新店隧道群所使用之旋臂式掘削機

該分洪隧道沿線岩性主要為砂岩、頁岩及砂頁岩互層，另外尚通過含煤地層及多條斷層（圖5.3.2）。全長約2.48km，直徑12m，開挖斷面積達175m²，漸變段最大更達342m²（圖5.3.3）。此外，過河段岩覆僅4m左右，當時乃先從地表對溪床進行地質改良與止水，再將河床面以混凝土配合卵塊石設置固床工來減緩溪流冲刷，終能順利通過此一過河段（圖5.3.4）。

另外，考量洪水輸砂之磨損效應，為確保營運年限及維護考量，乃使用強度450kg/cm²之襯砌混凝土（圖5.3.5），並採用多項配套措施以降低水合熱、抑制溫度裂縫。至於可密集佈設、快速施測並減少施工干擾的3D光學量測系統（圖5.3.6），亦是該工程的特色之一。

該計畫因執行時程緊迫，且施工困難度較高，故採用統包及最有利標之發包方式，是工程能順利推動、如期如質完工的主要關鍵；該分洪隧道已於完工前先後多次發揮分洪效果，最大分洪量曾達600cms，減少災害損失新台幣數十億元。



圖5.3.1 員山子分洪工程平面配置圖



圖5.3.2 開挖面含煤層及斷層



圖5.3.3 分洪隧道漸變段

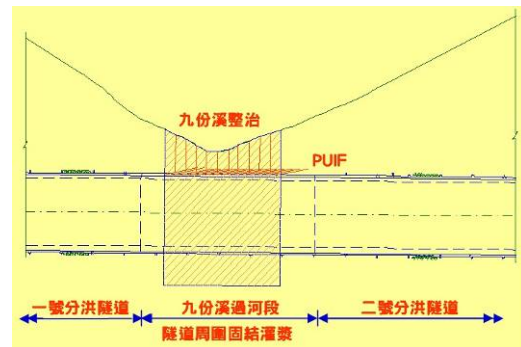


圖5.3.4 隧道過河段施工示意圖



圖5.3.5 仰拱襯砌混凝土澆置作業



圖5.3.6 3D光學量測系統監測作業

5.4 高鐵路林口（龜山）隧道^[2]

早年為紓解西部走廊之運輸瓶頸，陸續推動中山高、二高、西濱等建設，然而私人運輸激增的結果亦使相關交通建設逐漸不敷需求，且易污染空氣、消耗能源。因此，政府遂於1990年積極規劃高速鐵路，於2000.3開工，並於2004.2全線貫通，林口隧道即為該建設48座隧道之一。

林口隧道為單孔雙股隧道（圖5.4.1），全長6482.5m，是高鐵隧道群中僅次於八卦山隧道之長隧道，惟前者全線幾乎位在數十公尺水頭之地下水位下，其施工較地下水位上之八卦山隧道更為艱鉅。林口隧道呈東西走向貫穿林口台地南端。主隧道開挖寬度13.5m、高11.7m；另開挖兩直徑16m之豎井（深34.9m、41.5m）（圖5.4.2），並利用橫坑與主坑相連，施工中除可增闢工作面外，完工後尚可作為緊急逃生之用。林口隧道自2001.2開工，並於2003.7貫通。

該隧道覆土厚介於18~110m，屬淺覆蓋隧道，沿線地層以卵礫石層為主（圖5.4.3），其含量約佔50~80%，因此為穩定疏鬆含水之卵礫石層開挖面，約75%之隧道長度，採用噴凝土封面；另考量卵礫石層的特性，選用定性岩體分類系統。

該隧道之最大挑戰為穿越長900m左右之高水壓砂土層（圖5.4.4），當時先自地表打設多組深水井降水，於施工中並配合真空抽水以降低周圍水壓，俾防止細料流失；另配合管幕工法（圖5.4.5）、封面岩栓（圖5.4.6）、擴大支撐底部等方式順利通過此一困難段。



圖5.4.1 林口隧道南洞口



圖5.4.2 林口隧道豎井A



圖5.4.3 林口隧道南洞口開挖面

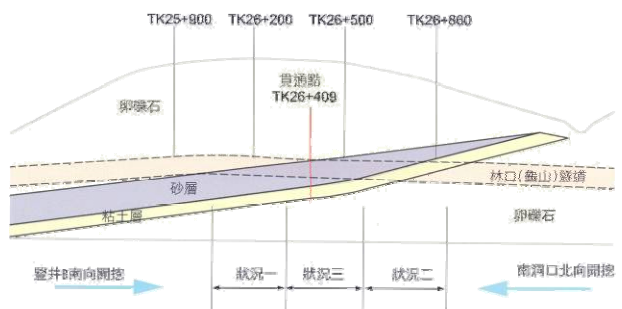


圖5.4.4 林口隧道地質不良區段示意圖

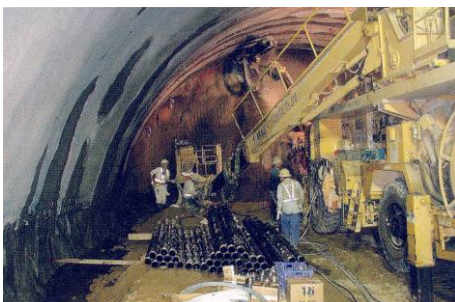


圖5.4.5 林口隧道管幕工法（AGF）鑽設



圖5.4.6 林口隧道封面岩栓鑽設

六、結語

本文提供台灣隧道工程之演進，自早期僅憑經驗簡陋地鑿挖演進至現代化的隧道工程施工。歷年來即使面對困難的地質及大斷面的隧道工程也都能一一克服貫通，前人累積的豐富經驗應可作為爾後隧道工程施工之借鏡。限於篇幅，案例中僅列舉若干較具代表性之工程以供參考。

參考文獻

1. 張吉佐、侯秉承、李民政、李怡德、張博翔(2006)，”隧道工程施工技術解說圖冊”，臺灣區國道新建工程局，第1~231頁。
2. 高速鐵路工程局編著（2005），”高速鐵路土木工程隧道新奧工法施工概述”，高速鐵路工程局，第106~127頁。