

隧道施工之現況與改善

張文城

交通部台灣區國道新建工程局

壹、前言

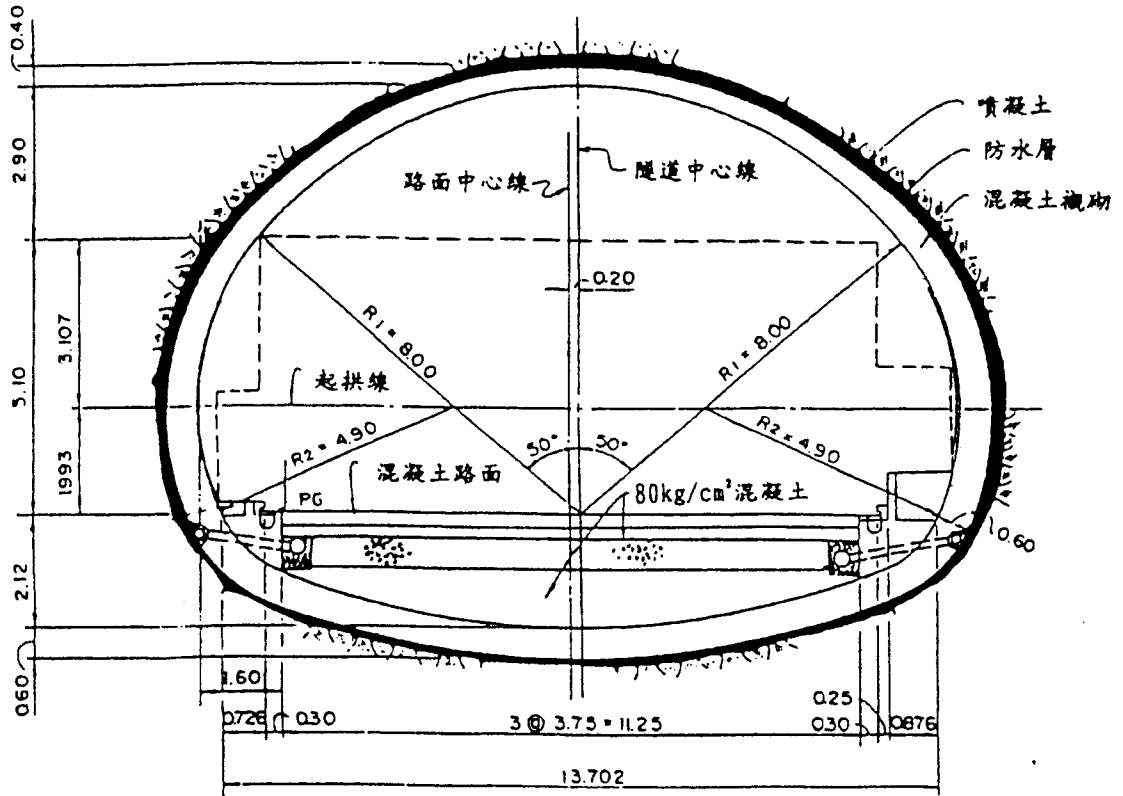
台灣地區由於百分之七十以上之土地屬於山坡地，且地形崎嶇，故交通的連絡常甚為不便，而隧道正是縮短兩地交通距離最直接的方法之一。此外由於山高水急，水利資源的儲存與利用便顯得格外的重要，也因此一系列與水利和發電有關的隧道工程乃應運而生。而隨著經濟的發展，人民交通活動的頻繁及隧道工程新技術的引進與推廣，民國六十年代以後，國內的隧道工程無論在數量、規模及技術上都有明顯的成長。

以公路隧道而言，主要為全省省道的新建及改善工程，其特色為隧道長度較短（通常小於 1km），數量較多，如七十年代台 1 4 線的中潭公路改善工程[1]。其次為八十年代相繼完成的北部第二高速公路隧道工程，本工程之特色為單孔三車道隧道的標準斷面跨徑達 16m，開挖斷面積約 160m²（如圖一），尤其是其中的新店隧道部份斷面採用四車道，跨徑達 22m，為目前國內開挖面積最大的交通隧道。

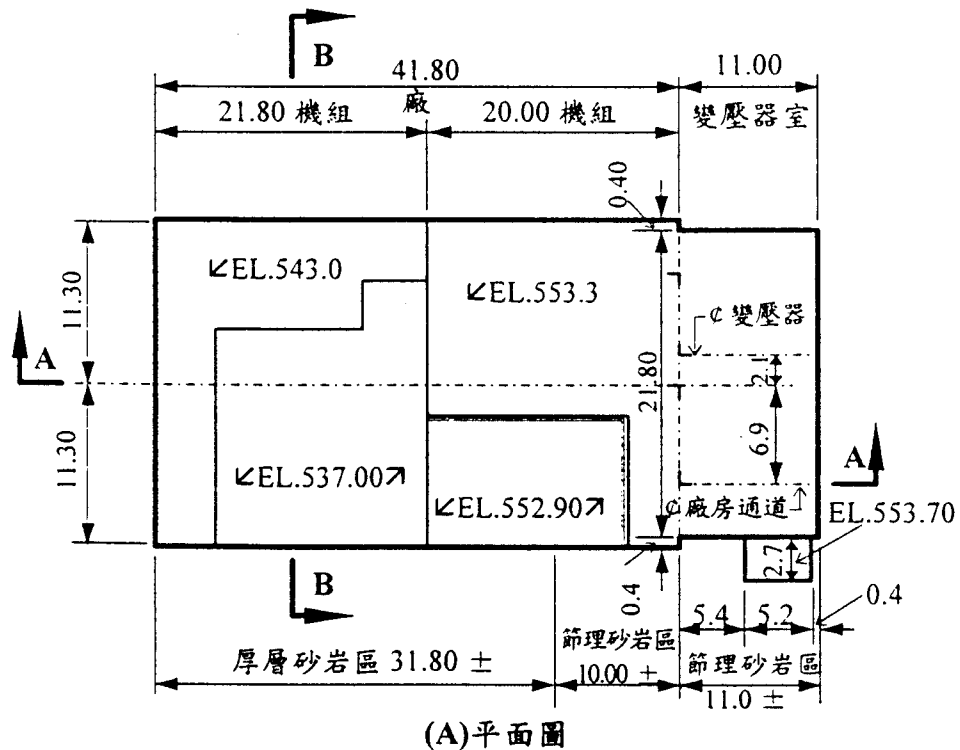
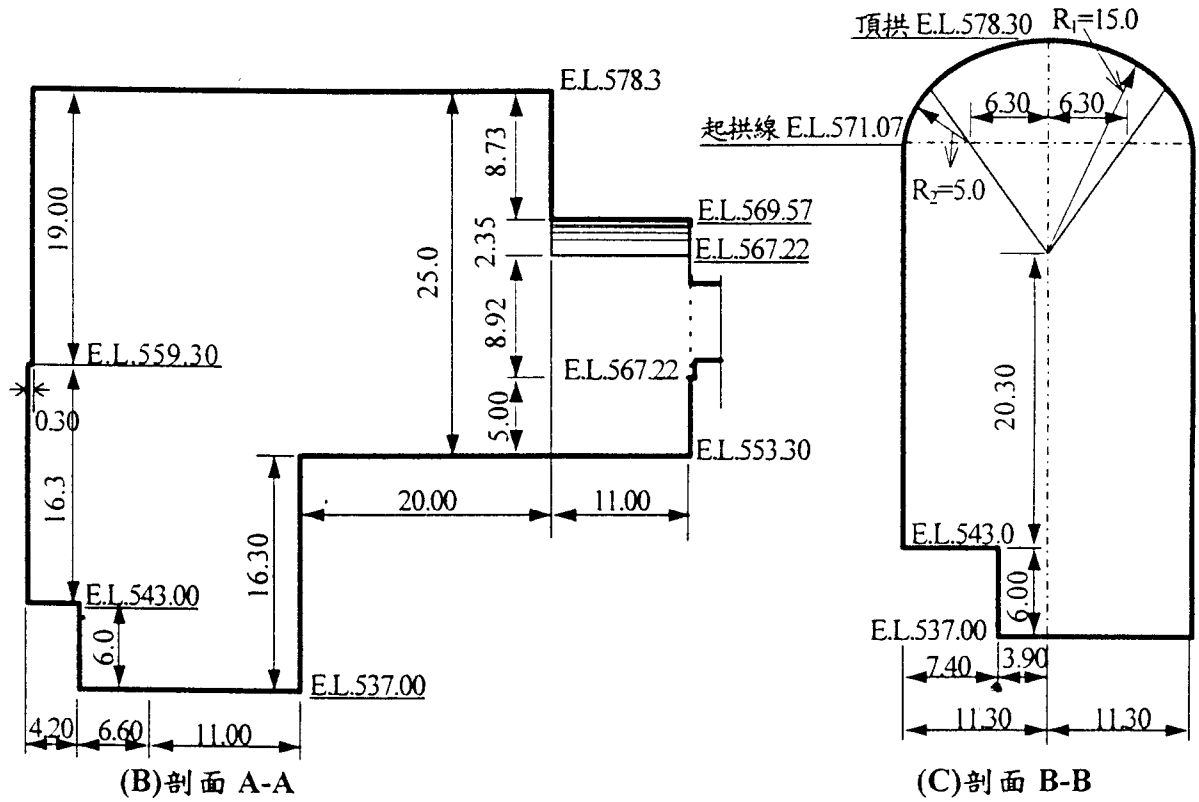
以鐵路隧而言，則主要為六十年代完成的北迴鐵路隧道群及七十年代完成的南迴鐵路隧道群，其中南迴鐵路的中央隧道長度約 8 公里，為目前國內已施工完成最長的交通隧道[1]。

以水利及電力隧道而言，主要有翡翠水庫，鯉魚潭水庫，南化水庫，明湖抽蓄發電、明潭抽蓄發電、新天崙水力發電及馬鞍水力發電等導水、引水及輸水隧道與地下廠房等隧道工程，其特色為隧道斷面較小且近於圓形（一般直徑約為 4~6m），長度也較長（通常大於 1km），而地下廠房之開挖則斷面甚大，以新天崙計畫為例[2]，其開挖之長 X 寬 X 高達 53m X 23m X 41m（詳如圖二）。

到了八十年代隧道工程建設仍持續推動，尤其是為了配合環島高速公路網的形成及提高環島交通的運量，諸如北宜高速公路，國道東部公路，中橫快速公路，高速鐵路及東部鐵路改善等大型公共建設相繼推出，其特色為隧道的長度更長，如正施工中之東部鐵路改善計畫的新觀



圖一、北部第二高速公路三車道隧道標準斷面圖(單位:m)



圖二、新天崙水力發電工程廠房及變壓氣室配置圖[2](單位:m)

音隧道長約 10.3km[3]，北宜高速公路的坪林隧道長約 12.9km[4]，而規劃中的中橫快速公路，其中最長的隧道更達 15km[5]。由於長度增加，施工的困難度也因此比以往更高，而另一方面這也代表新的技術與管理必須積極的引進與改善，以期能如期、如質的完成此等重大建設。

貳、隧道施工現況

目前國內正積極推動的隧道工程大致上可分為公路工程、鐵路工程及水力與電力工程三大類（詳如表一），雖然因為功能需求不同，開挖的斷面有所差異，但設計之理念及施工時採用的工法則極為接近，故其規劃、設計乃至施工階段的經驗可互相交流，以提昇國內隧道的技術。

表一、國內目前施工中之主要隧道工程

工程名稱	單向長度（大約）	斷面（大約）	主要開挖工法
東西向快速道路 漢寶草屯段八卦山隧道	5000m	140m ²	挖溝機
東西向快速道路 萬里瑞濱段	4座,合計長約3600m	100~130m ²	破碎機,鑽炸法
基隆暖暖至宜蘭大溪 改善工程,基平隧道	2560m	70m ²	鑽炸法
北宜高速公路 彭山隧道	3800m	80~100m ²	破碎機,鑽炸法
北宜高速公路 坪林隧道	12900m	120m ²	破碎機,TBM法
第二高速公路 基隆汐止段	3座,合計長約2500m	150m ²	破碎機,鑽炸法
第二高速公路 蘭潭隧道	1200m	170m ²	挖溝機
第二高速公路 中寮隧道	1800m	120~150m ²	破碎機,鑽炸法
東部鐵路改善計畫 新永春隧道	4460m	40m ²	鑽炸法
東部鐵路改善計畫 新南澳隧道	5340m	40m ²	鑽炸法
東部鐵路改善計畫 新觀音隧道	10300m	80m ²	鑽炸法
鯉魚潭水庫士林水力	5500m	16m ²	鑽炸法,TBM工法

發電工程頭水隧道			
南化水庫越域引水工程 輸水隧道	3100m	40m ²	鑽炸法

2.1 公路隧道

公路工程大致上可分為兩類，第一類為省級以下的道路，第二類為國道。目前施工中省級道路的隧道工程，可以東西向快速道路萬里瑞濱段一至四號隧道、漢寶草屯段八卦山隧道與基隆暖暖至宜蘭大溪改善工程的基平隧道為代表。其中萬里瑞濱段 4 座隧道總長約 3600m，最長的隧道約 1100m，地層主要為砂頁岩互層，主要採用破碎機及鑽炸法施工，皆由國內包商所承作，平均開挖進度約為 50m/月，最佳開挖進度約 70m/月。漢寶草屯段的八卦山隧道長約 5000m，地層主要為卵礫石層，故採用挖溝機直接開挖，承包商為中華工程公司，至 87 年 9 月已開挖約 1600m，平均開挖進度約 60~70m/月，而最佳之開挖度則達 105m/月。此外基平隧道長約 2560m，地層主要為砂岩、頁岩及其互層，採用鑽炸法施工，由森榮營造有限公司承作，至 87 年 9 月已施工長度約 900m，平均開挖長度約 50~60m/月，最佳進度為 97m/月。

在國道建設方面，主要有北宜高速公路及第二高速公路正積極推動中。北宜高速公路隧道共五座，總長度約 20km，其中以彭山隧道及坪林隧道為代表。彭山隧道長約 3800m，地層主要為砂岩及硬頁岩，主要採用破碎機及鑽炸法施工，承包商為義大利公司，目前隧道已開挖貫通，平均開挖進度約 70~80m/月，最佳之開挖進度則達 138m/月。坪林隧道包含兩條主坑及一條導坑分別長約 12900m，為目前國內施工中最長之交通隧道，地層主要為硬頁岩及四稜砂岩，採用鑽炸法及 TBM 工法施工，由榮工處承包。鑽炸法的施工以主坑為例，至 87 年 9 月止施工長度約 1200m，平均進度約為 50m/月，最佳為 67m/月。TBM 工法由於係國內第一個採用的施工案例（TBM 設備詳如圖三），故施工時無論在技術、經驗及地質上皆遭遇相當大的困難，致施工進度一直不甚理想，以導坑的施工為例，其開挖進度詳如圖四，由 82 年開挖至 87 年止，計開挖約 1100m，最佳進度為 205m/月，此外由圖中亦顯示，TBM 有十次因機頭上方岩盤崩坍，致須停機處理而無法進行開挖。

第二高速公路目前施工中的計有基隆汐止段的三座隧道及南二高的蘭潭與中寮隧道。基隆汐止段三座隧道總長約 2500m，最長的

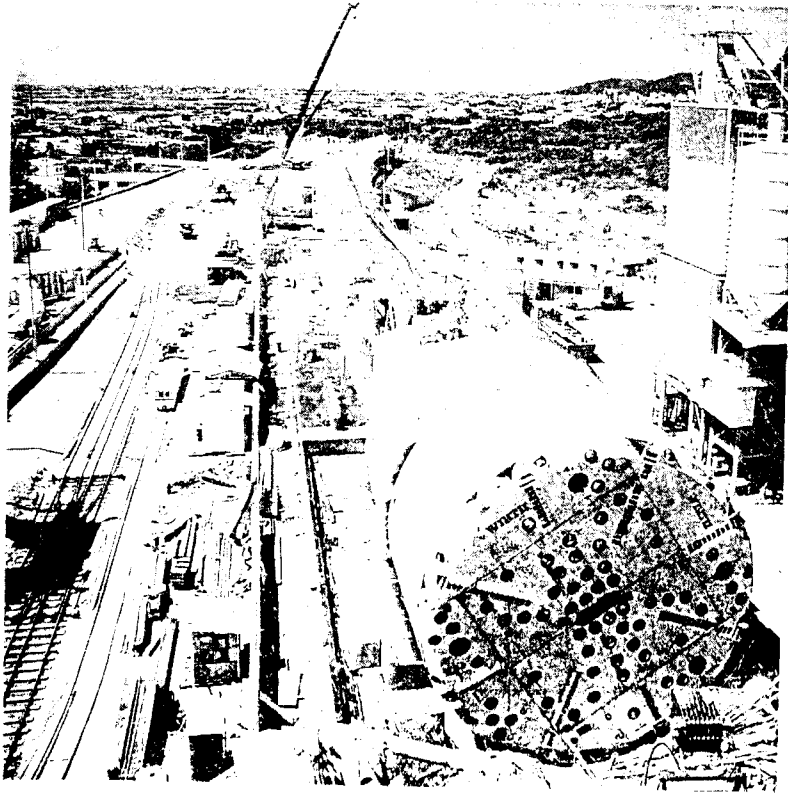
隧道長約 1250m，地層主要為砂岩、頁岩及砂頁岩互層，採用破碎機及鑽炸法施工，皆由國內包商承作，目前有多座隧道已貫通，其開挖之平均進度約 40~50m/月，最佳進度約 70m/月。蘭潭隧道長約 1200m，地層主要為泥岩及膠結疏鬆的砂層(岩)，採用挖溝機開挖，由大陸工程公司承包，至 87 年 9 月止已施工長度約 300m，平均開挖進度為 30m/月，最佳開挖進度為 45m/月。中寮隧道長約 1800m，地層主要為砂岩及頁岩，主要採用破碎機開挖，亦由大陸工程公司承建，目前開挖已接近貫通，平均開挖進度約 35m/月，最佳開挖進度為 67m/月。

另外國道隧道仍有多項計畫正積極推動中，包括中二高豐原霧峰段[6]，中橫快速公路[5]及東部公路蘇澳花蓮段[7]等。其中豐原霧峰段目前規劃有十座隧道，總長約 10km，最長的隧道長約 2.1km。中橫快速公路由霧峰經埔里至花蓮，隧道目前規劃有 25 座，總長度約 54km，最長之隧道長約 15km，覆蓋層厚度亦高達 1600m，預測技術上將面臨高難度之挑戰。國道東部公路蘇澳台東段目前規劃有 13 座隧道，總長約 47km，最長之隧道長約 10km，覆蓋層厚約 1000m，不過因路廊大致與北迴鐵路平行，故可參考北迴鐵路之施工經驗，因此預測工程之困難度應不若中橫快速公路為大。

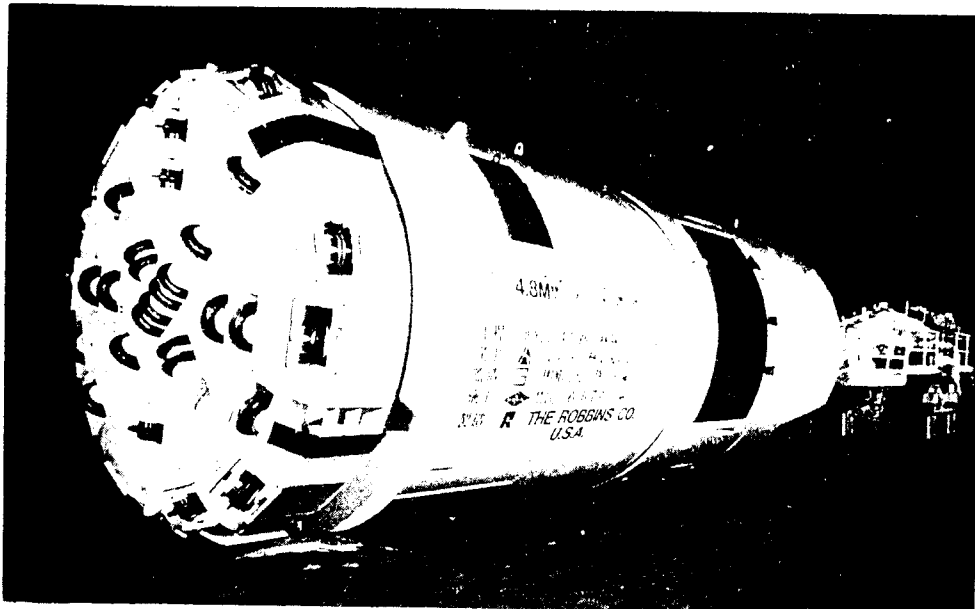
2.2 鐵路隧道

目前施工中的鐵路隧道工程為東部鐵路改善計畫中的北迴鐵路擴建雙軌及電氣化工程，隧道共有 14 座合計總長度約 33.7km，其中有 6 座正在施工，而以新永春、新南澳及新觀音三座長隧道為代表。新永春隧道長約 4460m，地層主要為板岩、片岩、大理石及長石質砂岩，採用鑽炸法施工，由工信工程公司所承作，惟該公司另外再與義大利之工程公司合作執行隧道之開挖工作，至 87 年 9 月止已開挖約 2300m，平均開挖進度約 50~60M/月，最佳之開挖進度為 139m/月。新南澳隧道長約 5340m，地層主要為片岩、片麻岩及角閃岩，採用鑽炸法施工，由國內之介興工程公司與日本之國土開發共同協建，至 87 年 9 月止已施工約 2400m，平均開挖進度約 80m/月，而最高之開挖進度則達 150m/月（詳如圖五[8]），為目前國內施工中之隧道（不含 TBM 工法）進度最佳者（詳如表二）。新觀音隧道長 10300m，地層主要為片岩，亦採用鑽炸法施工，由榮工處承建，至 87 年 9 月止已施作約 1500m，平均開挖進度約 50~60m/月，最佳之開挖進度約 80m/月。

以鐵路隧道而言，剛完工貫通的山線竹南至豐原間改線與雙軌

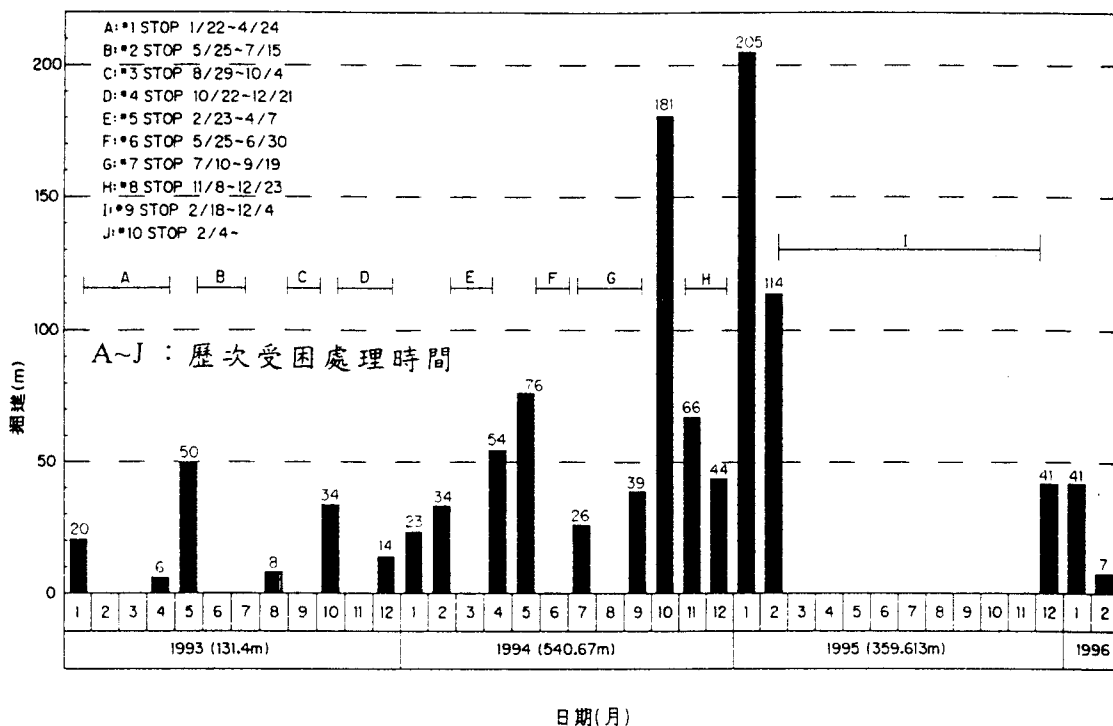


(b) 主坑 TBM(直徑 11.8)

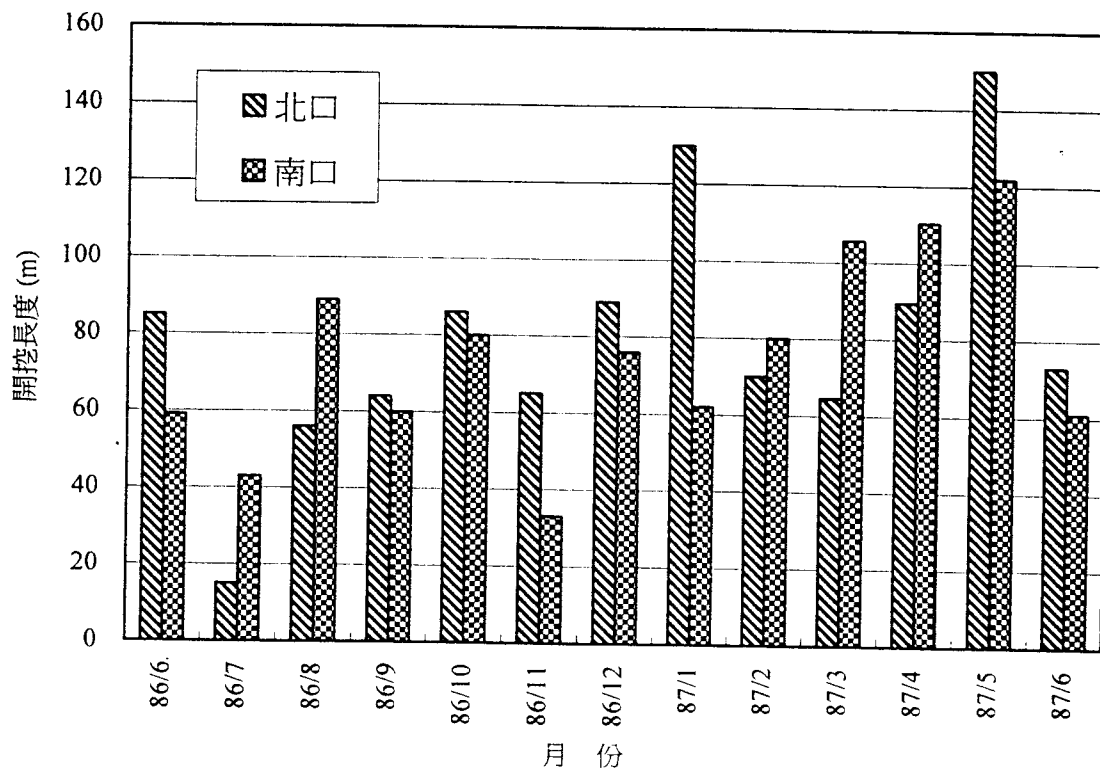


(a) 導坑 TBM(直徑 4.8)

圖三、坪林隧道 TBM



圖四、坪林隧道導坑工程 TBM 每月開挖進度統計表[15]



圖五、新南澳隧道開挖月進度表[8]

工程計畫的三義一號隧道亦頗具代表性[9]。該隧道的特色為於卵礫石層內及高地下水位下進行隧道之開挖，且由於通過中山高速公路的下方僅約十公尺，隧道開挖期間仍必須維持高速公路的暢通，故施工中必須有嚴謹的監測與施工技術，以避免高速公路路面產生過大的沉陷而影響交通。該隧道長度約 6700m，主要地層為卵礫石層、砂岩、頁岩及其互層，主要採用挖溝機及鑽炸法施工，施工單位為榮工處，其開挖之平均進度為 50~60m/月，最佳之開挖進度為 72m/月。

至於目前正在規劃設計而即將進入施工階段的鐵路隧道則為高速鐵路的隧道群[10]，該計畫目前規劃之隧道約三十餘座，總長約 60km（含明挖覆蓋），其中最長者依序為八卦山隧道（約 7.4km），林口隧道（約 6.4km）及湖口隧道（約 4.3km），尤其是八卦山及林口隧道不但長且位於卵礫石層內，對於隧道施工而言，技術上將是另一波的挑戰。

表二、國內近年來主要隧道工程開挖進度統計表

隧道名稱	設計長度 (m)	已開挖長度 (m)	平均進度 (m/月)	最佳進度 (m/月)	施工單位
八卦山隧道	5000	1600	60~70	105	中華工程公司
萬里瑞濱段 四號隧道	1100	250	50	70	新亞建設公司
基平隧道	2560	900	50~60	97	森榮營造有限公司
彭山隧道	3800	已貫通	70~80	138	義大利 TORNO 等
坪林隧道(主 坑)	12900	1500	50	67	榮工處
基隆汐止段 基隆隧道	1250	已貫通	40~45	67	太平洋建設及 盛泰工程公司
蘭潭隧道	1200	300	30	45	大陸工程公司
中寮隧道	1800	已貫通	35	67	大陸工程公司
新永春隧道	4460	2300	50~60	139	工信工程公司
新南澳隧道	5340	2400	80	150	介興工程公司及日 本國土開發
新觀音隧道	10300	1500	50~60	80	榮工處
三義一號隧道	6700	已貫通	50~60	72	榮工處

註：1.表內之長度及進度為概估值

2.統計資料之時間至 87 年 9 月止

3.新永春隧道工信工程公司之協力廠商為義大利公司

表三、鯉魚潭水庫士林水力發電工程頭水隧道 TBM 施工進度統計表[11]

項 目	5 月 (85 年)	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月 (86 年)	5 月	6 月	7 月	合計
TBM 掘 進長度 (m)	141	338	459	395.7	184	252.6	28.3	58.5	365.1	228.1	398.5	560.3	3409
開挖工作 天(日)	21	23	27	19	19	20	9	9	26	15	22	28	—
日平均進 度(m/日)	6.71	14.69	17.0	20.82	9.68	12.63	3.14	6.5	14	15	18	20	—

註：86 年 2 月~4 月因現場進行地質處理工作，故 TBM 未開挖。

2.3 水力與電力隧道

繼日月潭及大甲溪一系列水力發電計劃相繼完成運轉後，目前施工中的水力與電力隧道以鯉魚潭水庫士林水力發電工程最具代表性，該工程的主要特色為國內第二個引進 TBM 開挖的隧道，且由於遭遇嚴重的可燃性氣體入滲問題，更突顯了工程的困難度與挑戰性。士林水力發電計畫隧道總長度約 8.7km，其中頭水隧道長約 5.5km，以鑽炸法（約 2.0km）及 TBM 工法（約 3.5km）混合施工，主要地層為砂岩、頁岩及其互層，施工單位為中華工程公司，目前已接近貫通階段，關於 TBM 工法施工部份，雖如坪林隧道遭遇若干困難，惟整體而言，仍較坪林隧道順利許多，表三為其開挖進度統計表[11]，平均開挖進度約為 230m/月，最佳之開挖進度為 560m/月，充份發揮了 TBM 在開挖上較鑽探法為快速之優點。

目前施工中的另一水利隧道為南化水庫越域引水工程，該工程之輸水隧道長約 3100m，採用鑽炸法施工，隧道主體已貫通，正進行襯砌作業。

至於規劃中的水力與電力隧道，可以新武界隧道及和平溪碧海水力發電計畫為代表[12]。由於日月潭水源係依賴現有武界引水隧道引取武界壩上游水量，因現有武界隧道使用已超過 60 年，襯砌混凝土已嚴重龜裂剝落，故擬建造一條新武界隧道以取代現有隧道。新武界隧道之引水路主要由四座隧道組成，總長約 16km，其中最長的隧道長約 7.2km，地層主要為板岩，目前正進行規劃及地質調查的工作。和平溪碧海水力發電計畫則係為滿足東部地區用電之迫切需求而成立，主要係於宜蘭與花蓮縣界之和平南溪中游建一混凝土重力壩，以便引水發電，目前規劃中之頭水隧道長約 7km，地層主要為片岩，現正進行地質調查工作。

參、施工遭遇之困難與對策

一般隧道施工時遭遇之困難，大致上可分為地質因素，技術因素及管理因素三大類。以地質觀點而言，由於地質是無法改變的，故解決工程問題的上策是在規劃、設計階段，避開地質不利因素對工程的影響，不過除非完全挖開，否則以人類目前的科技實無法完全正確預測地底下的地質情況，是故地質風險為隧道工程所無法避免的，也因而必須仰賴技術與管理來降低地質風險的衝擊。此外技術雖可藉由科技、研發及經驗等的累積而不斷的提昇，不過地質的不確定性是永遠存在的，因此技

術上遭遇困難與挑戰自也無可避免。至於施工管理及契約管理則完全為人為之因素，良好的施工管理及合理的契約制度，常可有效的降低地質風險，發揮施工技術，進而順利克服施工中遭遇之困難。

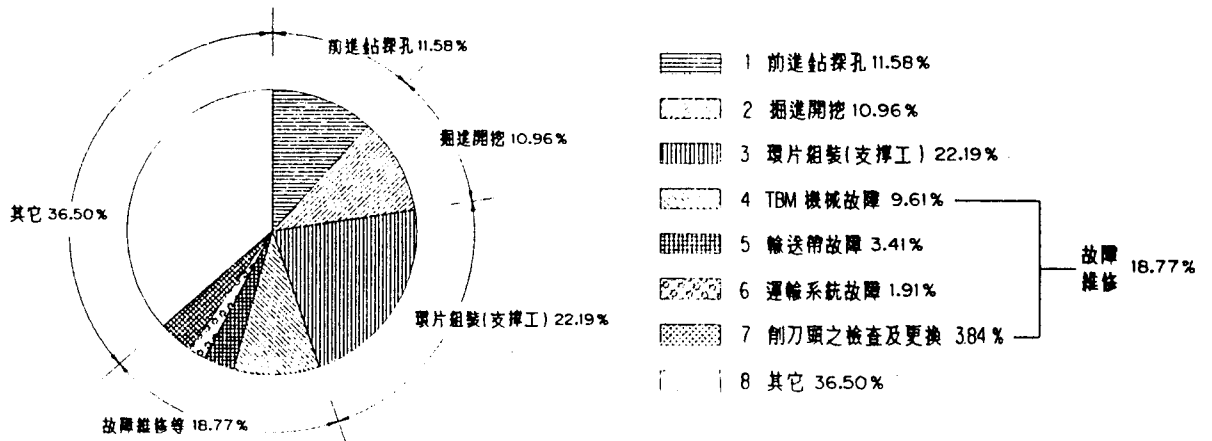
3.1 地質調查

規劃設計階段再詳細的地質調查，也無法百分之百準確的預測地底下的地質情況，因此施工中的輔助調查常常是必須的，尤其是長度較長或是地質情況較複雜的隧道。由開挖面向前方施鑽前進探查孔為施工中常用的調查方法之一，例如鯉魚潭水庫士林水力發電工程，當開挖廠房通達隧道產生抽坍災害時，即利用長 40m 及 70m 的探查孔，成功的探查了前方的岩性及抽坍帶的範圍，並兼做排水孔之用，而做為後續災害搶救工作的依據[13]。不過並不是每次的探查孔都可獲得預期的成果，尤其是地質情況愈惡劣而愈需要充份瞭解前方之地質情況時，前進探查孔施鑽往往會耗費極長的時間，而獲得的成果也可能極為有限[14]。圖六為坪林隧道導坑 TBM 開挖掘進分項時間統計[15]，由圖中顯示自民國 82 年至 85 年 TBM 開挖 1080m 期間，因施作前進探查孔（每次孔深約 30m）所耗費的時間竟然超過了 TBM 掘進開挖的時間，而雖然施作了前進探查孔，但這期間 TBM 仍然發生了十次受困停機的事件（參考圖四），從結果來看，前進探查孔的成效似乎不如預期中理想。不過雖然如此，鑽探仍應是施工中用來瞭解前方地質最直接的方法，故尋求技術的突破似乎才是正途。

一般施工中所施作長數十公尺的探查孔，僅能做為短期內隧道施工的依據，而若欲做較長期的施工規劃，或是採用 TBM 的開挖工法時，則隧道內施鑽長幾百公尺的水平長距離鑽孔，應是可以考量的輔助調查方法。圖七為目前在坪林隧道導坑內配合 TBM 工法採用的兩種水平長距離鑽孔施作方式[16]，其中一種為鋼索式，另一種為反循環式，分由南非及日本技師所施作。該兩鑽孔原都預計施鑽 300m，不過最後都因地質情況極為惡劣而僅鑽進約 100m 後即停止，尤其是南非人員施作的鋼索式鑽探，以同一組人員及機具曾在鯉魚潭士林水力發電計畫，以約 42 天的時間完成 700m 的鑽孔，但在坪林隧道 2 個月的時間卻僅能完成約 107m 的長度，其中最主要的原因即是地質情況的差異（坪林隧道為高度破碎的石英砂岩，士林計畫為岩體較好的砂、頁岩），故如何考量地質情況，而做適當的施工安排，以發揮最大的施工技術，實為水平長距離鑽孔面臨最大的挑戰。此外目前規劃中的新武界引水計畫，曾由加拿大技師以約

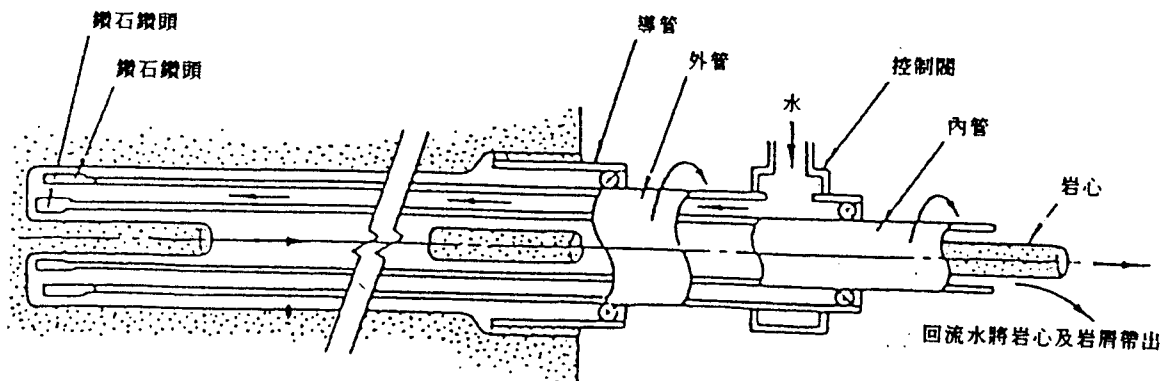
57 天及 31 天的時間分別完成 900m 長的水平鑽孔及 735m 長的 45° 斜孔，創下了目前國內最佳的鑽探記錄，顯示以水平長距離鑽孔做為施工中的輔助調查方法，確實有極大發展的空間。

鑽探雖為瞭解開挖面前方地質情況最直接有效的方法，不過若地質惡劣時，欲單獨以鑽孔的方法完成詳細的地質探查，則時效上可能大有問題，因此目前國內已有多處工地開始採用地球物理方法，以便能迅速、廣泛而初略的瞭解前方的地質。目前採用的地球物理方法主要分為 HSP (Horizontal Seismic Profile) 反射法震測及 TSP (Tunnel Seismic Prediction) 反射法震測兩種，並已先後應用於坪林隧道、士林計畫頭水隧道及新觀音隧道，以期獲得充份之地質資料，做為後續施工之參考。不過根據開挖後之實際地質與震測所預測者比對之結果顯示，利用震測以預測前方之地質，仍有待震測軟硬體設備與施測方式的改進及判釋經驗的累積，以提高其準確性。

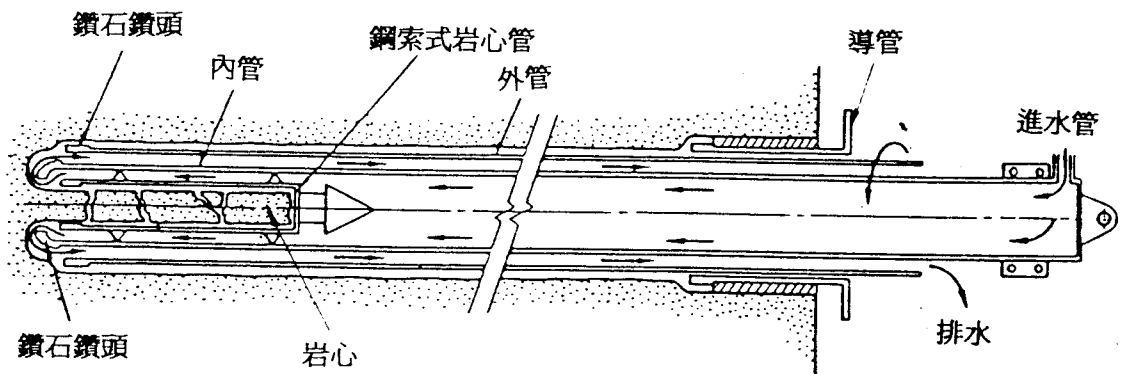


註：1. 本圖為 TBM 於運轉狀態中，各項作業時間所佔之百分比，不含受困期間。
 2. 其它項目包含：尾盾受夾處理，尾盾覆歸，拖曳支撐系統，鋪軌，測量，待料，環片補強，PEA GRAVEL，背填灌漿及地質處理。
 3. 自 82.01.05~85.02.04 共計開挖 1079.8m 組裝環片 893 環。

圖六、坪林隧道導坑 TBM 掘進分項時間統計[15]



(b)反循環式(Reverse Circulation)



(a)鋼索(Wire Line)

圖七、水平長距離鑽探取心示意圖[16]

3.2 施工技術

隧道的施工技術除與經驗的累積有必然之關係外，亦與使用的設備、材料及工法等有密切的關聯。以目前施工中的隧道而言，其技術上所遭遇的困難與對策主要有以下幾項。

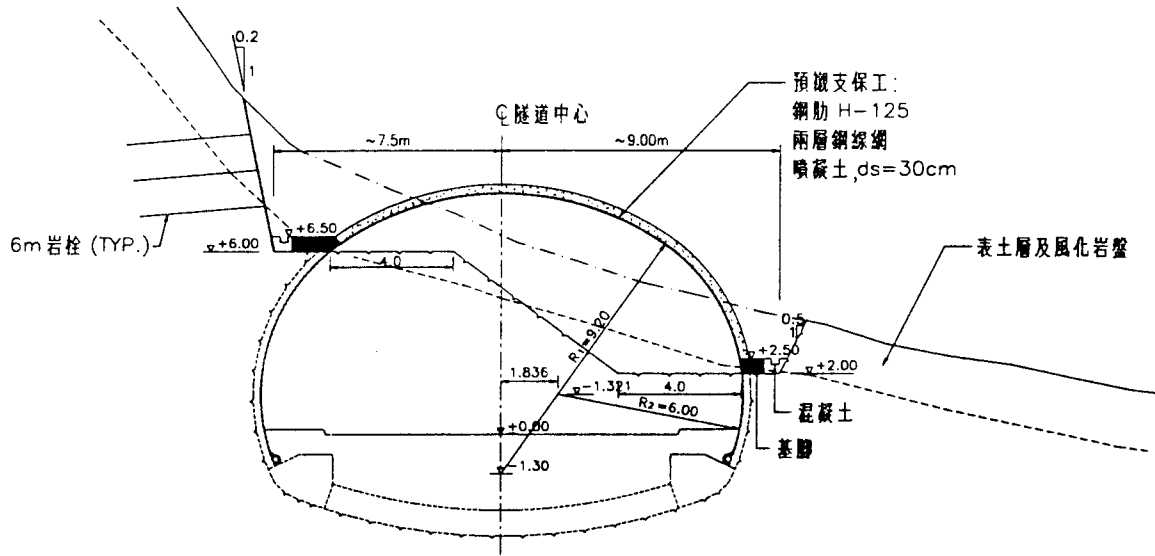
1. 洞口及淺覆蓋段

隨著環保意識的抬頭及施工技術的提昇，以往於洞口段採用大規模的邊坡開挖，待良好的岩盤出露後再進洞的施工方式已較為少見，取代的是儘量維持原地形地貌，且避免大規模的邊坡開挖而直接開挖進洞。因此近年來於洞口段及淺覆蓋段的施工方法便有許多的選擇與變化，根據目前施工中隧道的實際經驗，大致上有以下幾種主要的施工方法：

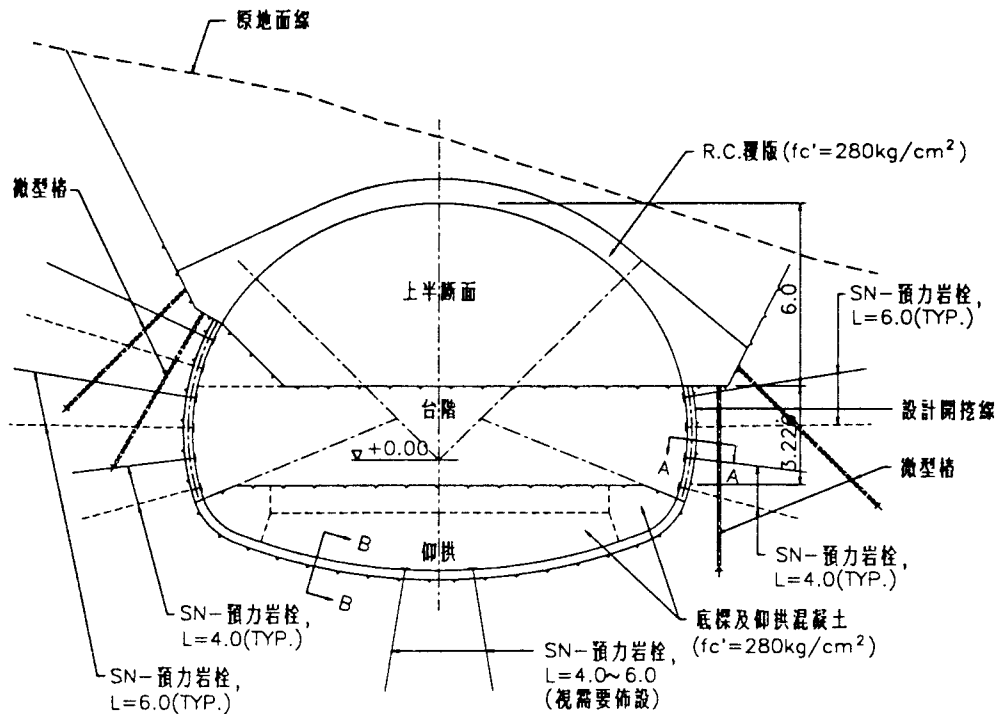
- (1) 預襯支保開挖工法：如圖八所示，本工法基本上與一般傳統假隧道的施工方法一樣，不過由於地形的關係，為避免洞口段路線兩側的邊坡開挖過大，故配合地形僅做局部的邊坡開挖後，即組立假隧道，而後以隧道開挖的方式進行後續的開挖工作。本工法已成功的應用於第二高速公路的基隆隧道及中寮隧道。
- (2) 覆版工法：如圖九所示，當覆蓋層較薄且岩盤性質不佳，隧道開挖後可能無法形成有效支撐的岩拱時，可採用此種工法。其施工方式為先挖除部份淺覆蓋層後，於隧道頂拱預定的位置施築一 R.C 覆版，而後再以隧道開挖的方式進行後續全斷面的開挖工作，通常為維持隧道開挖覆版的穩定性，覆版的基腳位置需依據實際的地質情況，以灌漿或施作微型樁等方式預做補強。本工法已先後應用於第二高速公路的汐止隧道、中寮隧道及東西向快速道路的八卦山隧道。
- (3) 垂直縫地工法：如圖十所示，當覆蓋層厚度介於 $1/2D \sim 2D$ (D 為隧道直徑) 之間，且極度破碎時，可考量採用此種工法。本工法係由地表面於隧道的頂拱上方及兩側壁外約 $1D$ 的範圍內進行固結灌漿，而灌漿管必要時可穿過頂拱的位置進入隧道的開挖線內，待後續隧道開挖通過後，再將灌漿管錨定於岩盤上。本工法已應用於第二高速公路的基隆隧道及北迴鐵路的新觀音隧道。

2. 高壓湧水及破碎地盤

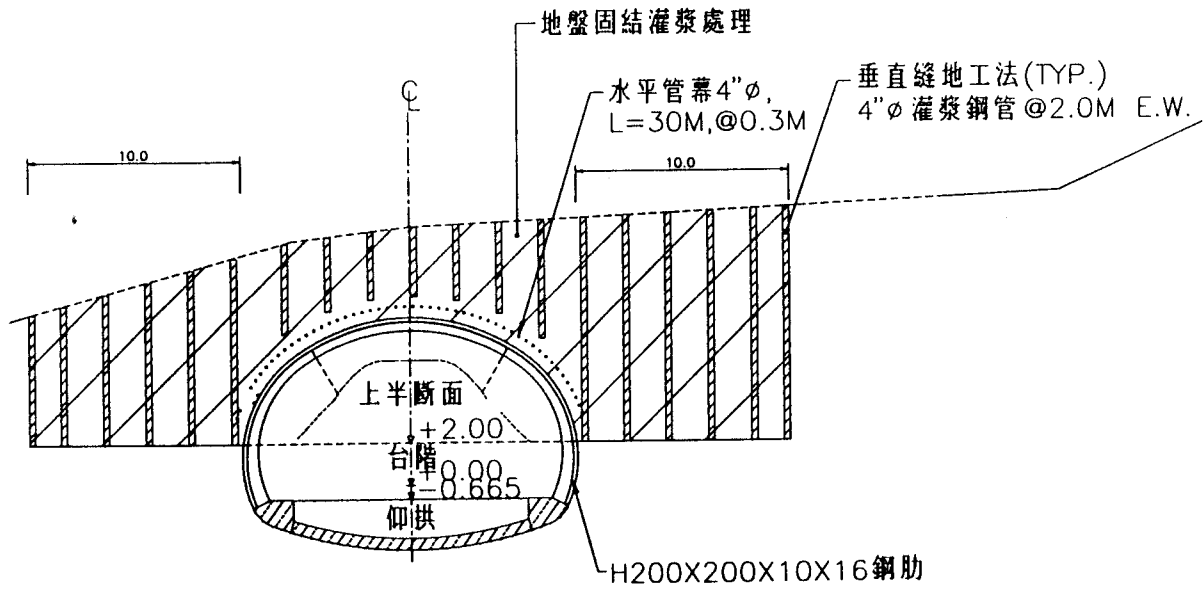
對於目前施工中的隧道而言，高壓湧水尤其是破碎地盤，常常是每個隧道所遭遇的工程問題，如圖十一所示即為坪林隧道導坑前



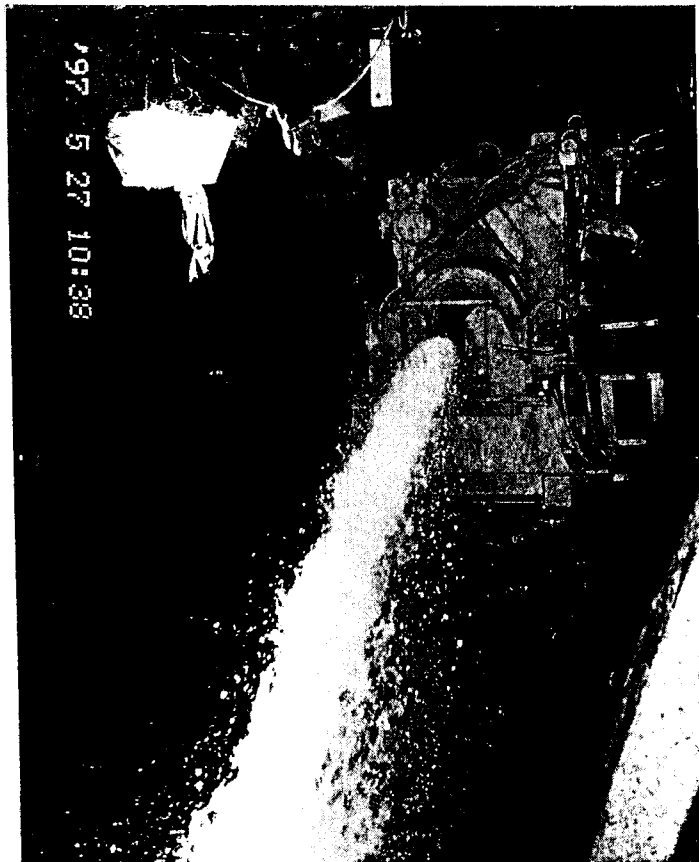
圖八、預襯支保開挖工法示意圖(單位:m)



圖九、覆版開挖工法示意圖(單位:m)



圖十、垂直縫地工法示意圖(單位:m)



圖十一、坪林隧道導坑里程 39k+079 鑽孔湧水情形[16]

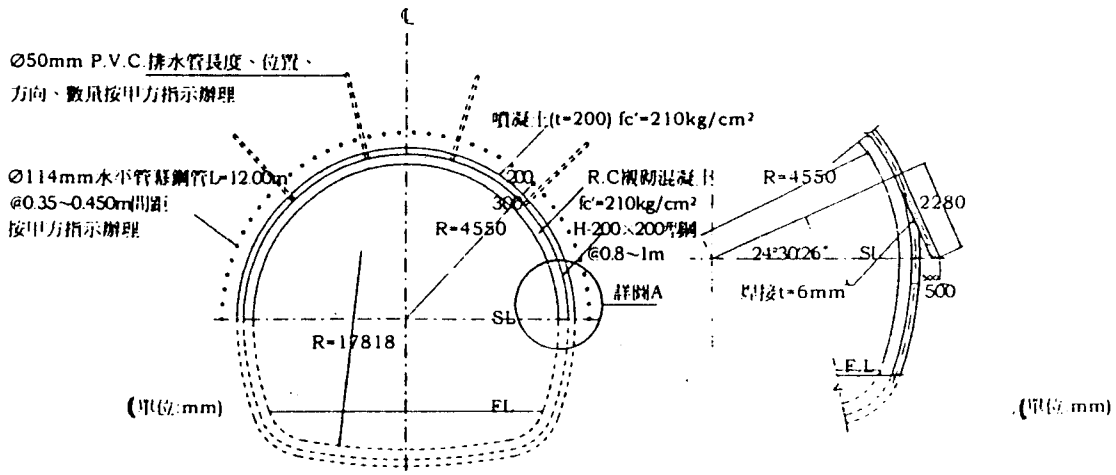
進探查時遭遇的地下水情形，該單一鑽孔的出水量即達 120 l/sec，水壓力約 $17\text{kg}/\text{cm}^2$ 。一般處理高壓湧水可分為排水及止水兩部份，排水可採用鑽孔或斷面較大的排水廊道。如士林水力計畫的頭水隧道廠房施工時，即同時採用了鑽設排水孔及開挖排水廊道的方式，克服了高壓湧水的問題[13]。至於止水的方式則主要為利用灌漿產生隔幕層，與破碎地盤採用固結灌漿的處理大致相同，一般採用水泥系列的材料進行固結灌漿，或採用水玻璃系列的材料進行止水灌漿。不過由於灌漿是一項極為專業的工作，而其使用的材料又常牽涉到商業機密 (know how) 的問題，因此合約內如何容納使用的條款及現場對於特殊的材料或工法如何進行驗證，是業主及施工單位值得進一步尋求共識的議題。

此外對於破碎地盤，近年來先撐管幕工法亦廣泛的為工程界所採用[17]。圖十二為新觀音隧道採用的先撐管幕工法示意圖，其採用的先撐鋼管長 12m，於頂拱的位置打設後即進行灌漿工作，而完成管幕工作後即進行隧道開挖，每次開挖 9m 以保留 3m 的安全距離。表四則為近年來國內較著名使用先撐管幕工法的案例彙整，由表中可知採用管幕工法大體上皆能符合原預期的目標克服工程的困難。

3. 卵礫石地層

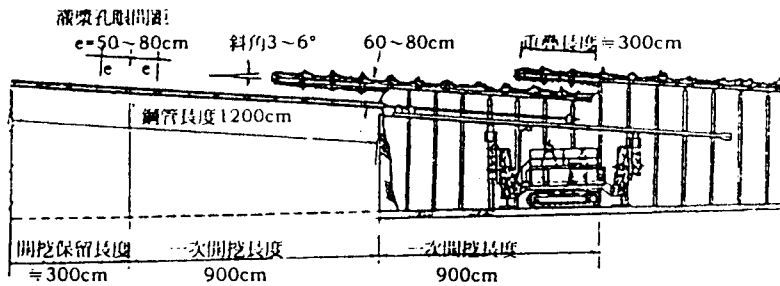
國內近年來由於竹南至豐原段改建的三義隧道，東西向快速道路漢寶草屯段的八卦山隧道及未來高速鐵路的林口隧道、八卦山隧道等長隧道皆將通過卵礫石地層，因此卵礫石地層中隧道的施工方式，成為近年來值得探討之主要議題。

卵礫石層為一複合材料，且一般膠結鬆散，透水性佳，因此其工程性質，受到卵礫石及細粒料之含量與地下水之影響甚大[18]。通常隧道開挖時，其側壁及開挖面之自立性較為良好，可以怪手直接開挖，但頂拱在重力作用下則極易崩坍而形成大量的超挖，並造成隧道的不穩定，因此常需配合施作先撐工法加以穩定，如三義隧道係採用先撐鋼管及先撐管幕工法（如表四），而漢寶隧道則採用支撐鋼管及自鑽式岩栓。



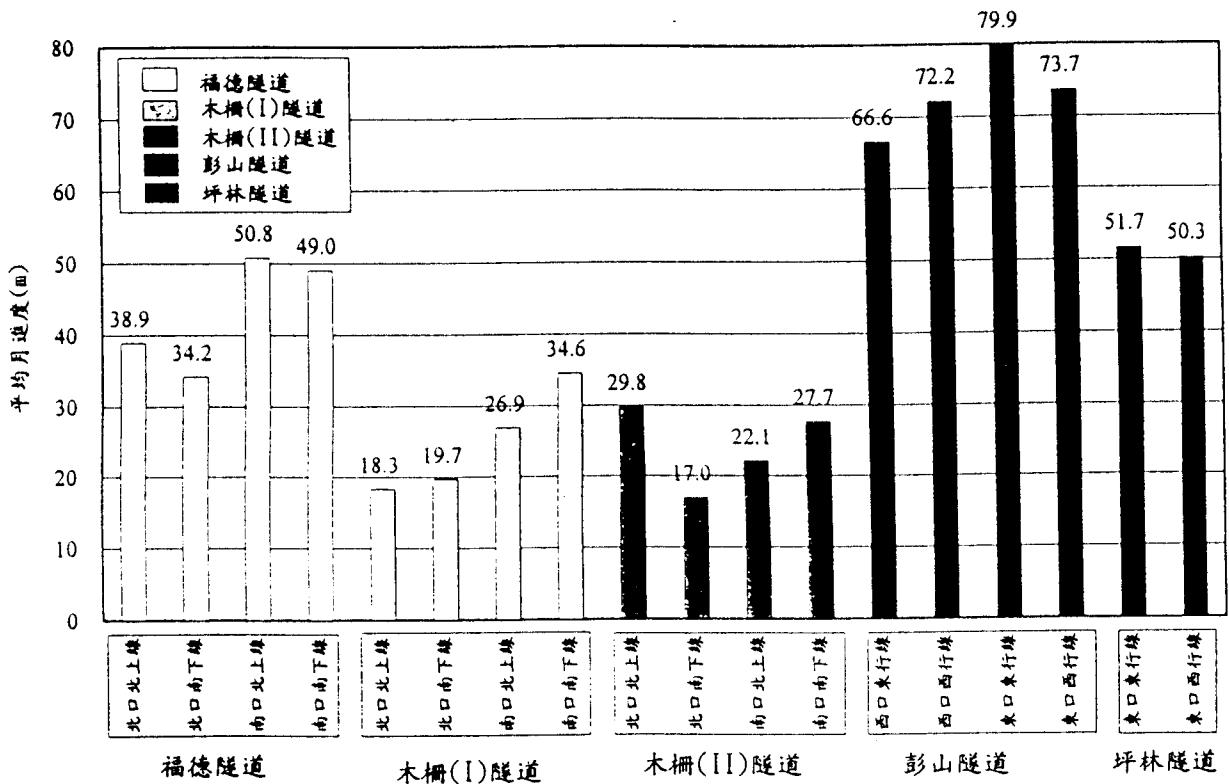
(a) 先撐管幕工法斷面圖

詳圖A 先撐管幕工法鋼支保加工圖



(b) 先撐管幕工法縱剖面

圖十二、新觀音隧道先撐管幕工法示意圖[17]



圖十三、北二高與北宜高速公路隧道平均月進度比較圖[20]

表四、國內較著名使用先撐管幕工法案例一覽表[17]

隧道名稱	開挖斷面 開挖寬度 開挖高度	開挖長度 鑽孔角度 鋼管間距 每輪支數 鋼管長度	地質狀況	施 工 簡 述
鐵路 三義隧道	A=88m ² W=10.8m H=10.4m	L=9m $\theta=5\sim 8^\circ$ @=30cm P=38支/輪 l=12m	河階堆積礫石層，礫石含量約60~90%，主要粒徑約3~50cm。	穿越高速公路底下，隧道頂拱預先以超微粒水泥灌漿，再施作先撐管幕水泥漿灌漿。穿越段長183m，平均每輪管幕鑽灌約需7.8天。
北宜高 彭山隧道	A=104m ² W=11.6m H=11.18m	L=8.9m $\theta=7\sim 10^\circ$ @=35~40cm P=30支/輪 l=12m	施作範圍係針對屈尺斷層及鄰近剪裂帶，岩性主要為灰白色、粗粒、軟弱、剪碎及擾動劇烈之砂岩夾薄頁岩，並夾有破碎砂岩岩塊。	預先以鑽孔機取心探查前方地質，再依探查結果決定使用加強支撐及先撐管幕輔助工法，屬有預期狀況下之正常作業。每輪先撐管幕平均工進為5.6天，頂拱沉陷量不超過2cm。
鯉魚潭 士林頭水 隧道	A=16m ² D=4.53m	L=20m $\theta=3^\circ$ @=30cm P=32支/輪 l ₁ =2m/節， 總長l=32m	剪裂帶擾動範圍長約20m，岩性為砂岩夾薄層頁岩，層間偶夾泥岩，岩質膠結程度略鬆。	當TBM遭遇剪裂帶時，首先拆除TBM後方的隧道支撐並後退，隨後在切削頭後方擴挖5m長，1m深的工作室，以便施作每節2m，總長32m的管幕鋼管。其採用導管式灌漿法，並灌入稀皂土水泥漿。擴挖及鑽灌總共施作54天，但TBM僅用1天時間順利通過此20m剪裂帶。
中二高 蘭潭隧道	A=172m ² W=17m H=12.6m	L=10m $\theta=5\sim 6^\circ$ @=50cm P=22支/輪 l=12m	屬六雙層的厚層泥岩、膠結疏鬆砂層，砂質泥岩及砂泥岩互層，由於成岩作用不完全，膠結不良且塑性較高，遇水後強度降低而容易崩解。	除了泥岩層外之隧道全線及洞口段均採用先撐管幕工法作為雙側導坑開挖工法之輔助工法。考慮施工空間、工期及費用，僅於中央坑之頂拱施作，鑽桿與管幕鋼管同步打入孔內後，於鋼管孔口採用水泥漿灌漿方式固結地盤。目前仍施工中。
東改計畫 新觀音 隧道	A=80m ² W=10.0m H=10.0m	L=9m $\theta=3\sim 6^\circ$ @=35~45cm P=40支/輪 l=12m	地層以大南澳片岩為主，隧道北洞口及南北兩橫坑洞口均位於鬆軟的崖錐堆積層內。	於本坑及橫坑洞口段，總長約150m採用先撐管幕工法，管幕鋼管40支打設及灌漿約3.0天，隧道開挖約4.0天（上半斷面開挖），平均工率約1.3m/日。

另外地下水可說是卵礫石層隧道施工成敗的關鍵，因地下水的存在，易使開挖面因滲水而將礫石間的細粒料沖失，進而使礫石的自持力喪失，而導致開挖面的抽坍，同時開挖面的全面滲水，亦使噴凝土不易施噴，施工動線之路面亦會泥濘不堪。克服地下水的問

題，通常係於隧道沿線裝設抽水井進行抽水，或於開挖面向前鑽設排水孔，以降低地下水位，如三義隧道即於地下水滲流的上游處，施作一工作井進行抽水，以降低地下水位，而八卦山隧道則於開挖面向前鑽設排水管，進行導水工作。不過通常採用降水工法時，由於卵礫石層的透水性佳，故需考慮對大區域地下水位的影響，以避免影響當地水資源的利用。除了降水以外，施工中亦常需配合開挖，於開挖面進行灌漿止水工作。以三義隧道為例[19]，即配合先撐鋼管及先撐管幕施作的同時，使用 L.W.及超微粒水泥等材料進行灌漿工作，除了止水以外，亦可達到固結的效用。

通常若沒有地下水滲流問題的時候，由於隧道可以怪手直接開挖，故進度會比一般鑽炸法為快，不過若有地下水存在的時候，即使僅有少量的入滲，也必須配合其他輔助工法加以止水，故進度將大受影響，以目前三義隧道及八卦山隧道的施工經驗，對於爾後的類似工程，應有極正面的參考價值。

4. 有害氣體

國內隧道在施工時，偶而會發生有害氣體溢入隧道的情況，對隧道工作人員及施工安全造成極大的危害。目前鯉魚潭水庫的士林水力發電工程，施工中即遭遇可燃性氣體溢入隧道內，而使隧道開挖工作暫時停頓，並必須因此而投入額外之人力與財力。

一般對於有害氣體的對策，係於規劃、設計階段藉由調查的手段，大略判斷其是否存在，而施工中再藉由偵測器及前進探查，進一步瞭解其存在的位置及危害程度。而當施工中遭遇有害氣體時，其處理方式通常需視個案的實際狀況予以因應。以士林計畫為例，當施工中遭遇可燃性氣體時，其處理對策大致可分為兩個部份，第一個部份為從地表面鑽孔到達開挖面附近及於隧道內安裝通風管，同時進行通風排氣的作業，以降低可燃性氣體的濃度，另外一部份則係於開挖面的前方及四周進行灌漿的工作，以降低可燃性氣體溢入隧道內的濃度。士林計畫將有幾百公尺的長度，必須以前述的施工理念通過可燃性氣體危害的路段，因此其處理的經驗，對於後續的類似工程，應極有助益。

3.3 管理

隧道的管理可分為施工管理及合約管理兩部份，其中施工管理主要由施工單位所負責，而其對隧道施工效率的影響，往往會超過施工技術的層次。圖十三為北二高與北宜高速公路隧道平均月進度

比較圖，業主皆為國道新建工程局，故合約管理的型態大致上相同。其中彭山隧道係由義大利廠商承建，施工進度約為 70~80m/月，其餘隧道則皆由國內包商所承建，施工平均進度普遍皆小於 50m/月。經仔細探討其差異的原因，除了地質與技術因素外，施工管理的良窳應為其主要的關鍵所在[20]。

隧道施工管理的範圍相當廣泛，舉凡進度管理、安全管理、品質管理、環保管理等，都將影響隧道施工的成本與效率，不過畢竟管理仍是以「人」為主體，因此就人的因素來考量，施工管理主要可分為工地組織及作業分工兩個層次。在工地組織方面，一般國內承攬隧道工程的承包商有時並不從事第一線的施工，而是把隧道全部或依工作性質分包給較專業的分包商，而分包商可再找小包組織工作班底。其上下包之間一般都以合約型態來規範，故其遭遇的問題大致如下[20]：

1. 由於上下包以契約型態運作，因此在指揮上並無權威性，上下包之間，有時認知的不同或技術觀點不一致，常造成指揮上的困難。
2. 機具的調派不靈活，並常因機具維修人員與施工人員不同，產生延誤，特別是機具故障時造成的維修問題，更是造成延誤的主要因素。
3. 有時一個工地有多個工作面分屬不同的分包商負責，在需要互相支援機具及人力時無法靈活調度。
4. 由於上、下包界面多，且風險分擔並不清楚，因此在遇有狀況時常互相觀望，通常待各級包商對權責方面有共識後，才能繼續施工。
5. 附屬工程（排水、通風、照明）由於常成為模糊三不管地帶，因此工地環境難以維持，在以一式計價的情況下，對承包商不構成誘因也無懲罰，因此在品質上常被犧牲，而工作環境不良亦常導致效率低落。
6. 由於層層節制的關係，如總包商或分包商發生財物或人事上的問題，常導致工地停擺，整個組織具有高度的不確定性，有時上下包之間因糾紛而解約，在另覓新的下包時常耗費時日，且新的工作班又須適應新的環境，影響工作的效率。
7. 由於隧道工程常須在工地作隨機應變的處理，業主、監造顧問及總包商協商的結果，如須層層轉達及溝通，在效能及時間上常會打折扣，尤其在講究彈性施工的新奧工法，常造成杆格。

國外承商的組織情形則與國內有明顯不同，以北宜高速公路彭

山隧道工程為例，該工程係由瑞士商意台公司承攬，意台公司本身為五家公司的短期結合，隧道施工由 TORNO 公司主導，工地的事務由該公司統籌辦理，該公司在台設有計畫經理負責，旗下則有施工經理、隧道總領班、領班及工人，直接受雇於 TORNO 公司，其指揮採一條鞭式。機具則全由 TORNO 公司負責供應並由領班及工人負責維修。外商管理的優點主要在於事權統一，指揮靈活，而由圖十三之結果顯示，其施工進度約為國內包商的 1.5~2.0 倍。

此外在作業分工方面，目前隧道施工的作業分班有兩種，一種稱為時段分班，另一種稱為專業分班。時段分班是以時間點劃分成 2~3 個工作班，每一工作班每日固定工作 8 或 12 小時，在此時段內所有作業一律由該工作班施作，亦即任一工作班皆具有完成每一種作業的能力，故有時稱為全能班。而專業分班係將輪進工作分為 2~4 個專業分班，如鑽炸班、出碴班、噴凝土及岩栓班等，由於每個工作班只做固定的作業項目，每天交班的時間並不固定，導致每日各工作班作業時間都不確定。目前國內隧道承包商仍然以採用專業分班制為主，專業分班的主要問題包括[20]：

1. 工作界面多：由於交班的次數相當多，且時間並不固定，在每一個交班介面都可能發生延遲。
2. 責任不明：各個工作班只是想在最短時間內將所要的「數量」作出來，缺乏對品質要求的誘因，例如鑽炸班為了避免開炸不足產生的修炸，通常抱著寧可多炸不要少炸的心態，因此在超挖過多的情況下常造噴凝土及襯砌混凝土超量使用的情況。
3. 容易產生三不管的工作地帶：由於各工作班只圖完成本身的工作，對共同的部份常無人問津，例如路面的清理，臨時的排水等，造成工地環境不佳。
4. 由於施工班對隧道小包為合約關係，因此小包對施工班的指揮並不靈活，畢竟上下包之間之約束力遠不如同一家公司主管對下屬的約束力，因此隧道工地的管理非常鬆散，缺乏機動性及應變能力。

而採時段分班正可彌補上述的缺點。圖十四為北二高隧道分別採用專業分班及時段分班輪進比較圖[21]，由圖中顯示採用時段分班確實有較佳的施工效率。

根據前述存在於目前國內隧道施工管理的問題，建議可從下列幾點著手改善[20]：

1. 杜絕層層轉包的情況，確實要求承包商負起工地經營及日常管理的責任，並加重其工地負責人的責任。工地負責人應能靈活有效地調度人員及機械，並能隨時掌控進度、品質及處理突發狀況。
2. 在隧道作業編組方面，應以時段分班制度取代以往慣用的專業分班制度，而施工作業手應有受過職訓，以提昇作業效率及維護品質。
3. 工地應建立機具維修的制度，並充實維修的人力，如機具應有定期的保養、維修，以維持正常的操作，如有機具故障時應有應變的計畫。

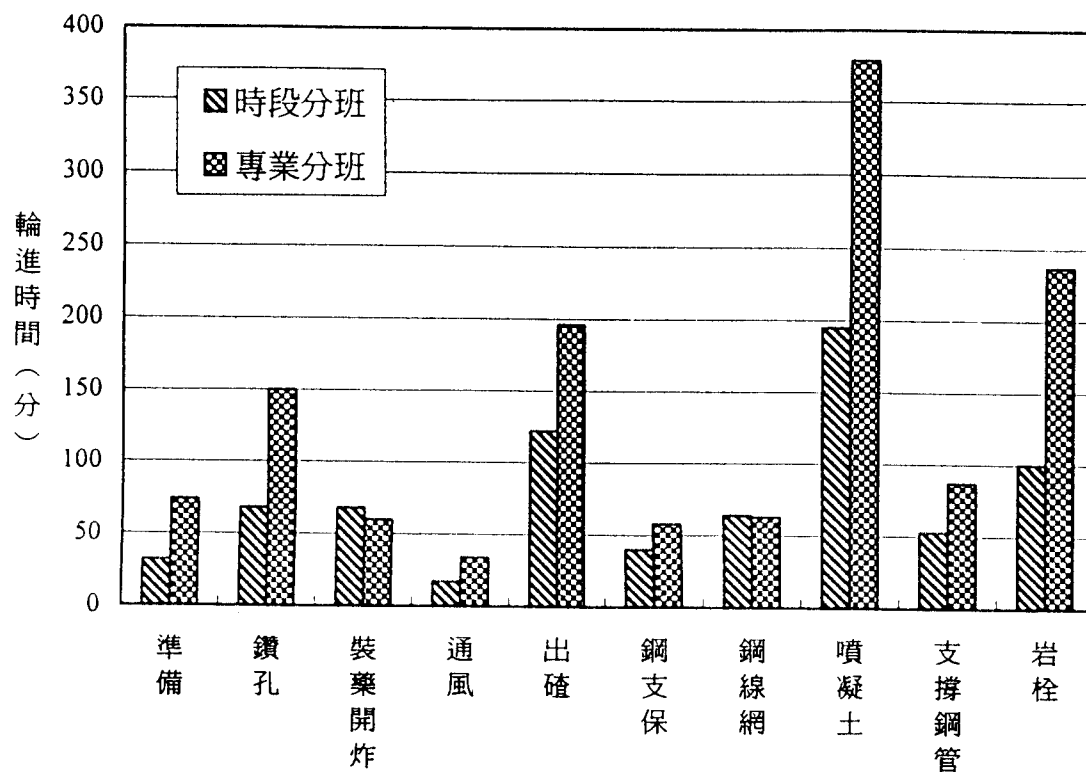
此外關於合約管理方面，包括發包策略，合約文件，風險分擔及施工保險等，由於這幾項都牽涉到相當專業的領域，須針對個案予以規劃，不過就目前國內的施工現況，應有以下幾個方面值得加以考慮[20]：

1. 逐步開放國際廠商來台參予重大的隧道工程，除可引進新的技術及管理方式外，同時可以帶動國內廠商之進步。
2. 實施包商預審制度，投標時包商須提供包括其財務、機具設備、技術班底等基本能力，得標後可以規定名冊上的人員、機具實際投入工作，否則以違約論處。
3. 政府單位如能調節公共工程的推出時間，使營建市場能穩定成長，避免公共工程暴起暴落，將有助於營建業者維持或擴充機具及人力，並改善其營運體質。
4. 由於隧道工程具有高度的不確定性，在設計階段應針對各種可能的情况，詳列備用的單價，以便需要時可以很快的利用，不必再辦理變更議價。而若需辦理變更設計時，常須耗費相當長的時間，因此就業主方面而言，應於合約層面研擬一縮短變更設計作業時間的條款，而對於承包商因變更設計冗長的作業時間所衍生的權益損失，亦應有所規範。
5. 業主、包商間的風險分攤模式，應更加以有效釐清，使雙方有所遵循，特別是因地質災害及用地問題所致的損失部份。

肆、結論

地質、技術及管理為影響隧道施工效率最主要的因素。其中地質情況是不能改變的，故只有藉由事先詳細的調查，儘量迴避地質的風險區，否則在施工階段，則必須藉由施工的技術加以克服，惟人類的技術

必定有其極限，且亦需要有經驗的累積，因此也必須要有適當對應的工期與費用。至於管理的成敗，則完全為人為的因素，而其對工程的影響，往往又遠超過技術的層次，故相信在國人共同的努力下，應可有一番作為。



圖十四、北二高隧道第IV類岩盤分別採用時段分班及專業分班輪進時間比較圖[21]

參考文獻

1. 中國土木水利工程學會大地工程委員會，「台灣地區隧道工程基本資料彙集」，台北（1995）。
2. 劉弘祥、潘以文，「大型地下洞窟開挖支撐之設計過程與實例」，地工技術，第31期，第64~77頁（1990）。
3. 傅子仁、郭顯群，「東部鐵路改善計畫執行情況簡介」，地工技術，第51期，第117~118頁（1995）。
4. 張文城，「坪林隧道之規劃、設計、施工與地工技術」，地工技術，第58期，第17~28頁（1996）。
5. 國道新建工程局，「中橫快速公路第二階段可行性研究總報告」，台北（1995）。
6. 國道新建工程局，「台中生活圈道路系統五號線初步規劃報告」，台北（1997）。
7. 國道新建工程局，「國道東部公路可行性研究總報告」，台北（1996）。
8. 國道新建工程局，「挪威工法（NMT）在台灣地區應用之可行性研究」，台北（1998）。
9. 翁世樑、謝玉山、劉姓，「中山高速公路下方之卵礫石層中隧道施工探討」，卵礫石層地下工程研討會，台北，第1~33頁（1996）。
10. 王明雄、陳名利，「高速鐵路與施工技術」，地工技術，第58期，第5~16頁（1996）。
11. 陳嘉男、李慶龍、劉弘祥、周文龍，「鯉魚潭水庫士林水力發電工程頭水隧道 TBM 簡介與施工概況」，地工技術，第59期，第51~60（1997）。
12. 謝季壽、趙芳成、陳敏村，「新武界隧道及栗栖溪引水工程規劃」，工程，第71卷，第5期，第50~59頁（1998）。
13. 傅重煥、李慶龍，「鯉魚潭水庫士林水力發電工程地下電廠區湧水及剪裂帶處理」，地工技術，第64期，第25~32頁（1997）。

14. 張文城，「北宜高速公路坪林隧道導坑工程 TBM 施工灌漿及地質調查工作概述」，岩盤工程研討會，桃園，第 59~67 頁（1995）。
15. 張文城，「全斷面隧道鑽掘機(TBM)之規劃、設計與施工」，岩石隧道施工技術研討會，台北，第 145~155 頁（1996）。
16. 鄭文隆、張文城，「高度破碎湧水帶 TBM 施工技術之案例探討」，地工技術，第 66 期，第 5~24 頁（1998）。
17. 郭正奇、劉弘祥，「先撐管幕工法應用於台灣隧道工程案例探討」，地工技術，第 66 期，第 25~36 頁（1998）。
18. 張吉佐、陳逸駿、嚴世傑、蔡宜璋，「台灣地區中北部卵礫石層工程性質及施工探討」，地工技術，第 55 期，第 35~46 頁，（1996）。
19. 謝玉山、劉琇琴，「三義隧道卵礫石層段之施工探討」，地工技術，第 55 期，第 71~80 頁（1996）。
20. 國道新建工程局，「隧道工程作業與流程之研究(一)」，台北（1997）。
21. 曾大仁，「北二高隧道工程鑽炸開挖施工管理探討」，第二屆國道建設技術研討會，第 22~31 頁，（1994）。