

國道隧道工程之回顧與展望

鄭文隆¹ 蔡茂生²

國道新建工程局¹局長²結構組組長

一、前言

台灣為一海島地形，山多平原少，加以中央山脈縱貫南北，全島被區隔為東西兩半，西部地區平原較多，東部多縱谷地形。近年來由於經濟的快速發展，交通急遽成長結果，更使得台灣西部各主要公路的交通情況日趨擁擠；為紓解西部平原中山高速公路車流，以及平衡台灣東西部的發展，交通部乃於民國七十九年成立台灣區國道新建工程局，專責辦理全島國道公路網的規劃設計與興建事宜，以配合未來持續發展的運輸需求，並逐步建立環島公路網。

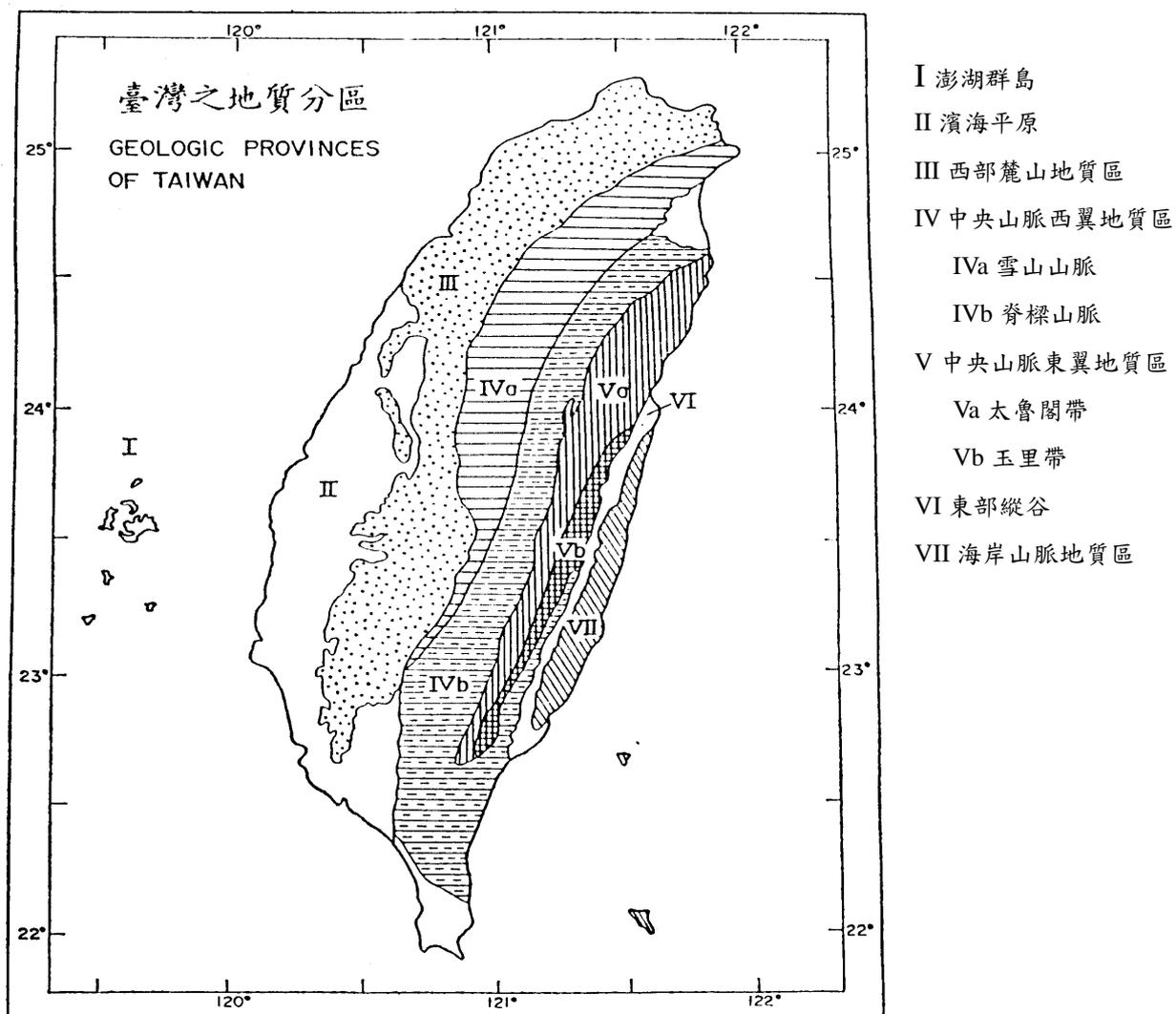
國工局成立後即曾訂定近、中、長程計畫，目標為規劃及完成整體國道公路網路。最近已完成北部第二高速公路建設計畫，使得北部都會區的交通瓶頸大為改善，而目前主要工作為辦理第二高速公路後續計畫以及國道北宜高速公路計畫。此外，國道東部、中橫快速公路及南橫快速公路等計畫，亦正積極推動中。而上述計畫皆包括為數甚多的橋梁與隧道工程，尤其隧道工程在各計畫中所佔的比重逐漸增加，且皆為計畫是否能順利執行之重要關鍵，因此隧道工程是本局往後環島路網建設中極為重要之一環。

本文僅就本局已施工完成及目前正進行規劃、設計與施工之隧道作一簡要介紹，並略述未來隧道工程應考慮之重點課題，冀望全體同仁，不僅以完成工程為目標，也要在工作中累積傳承經驗，為早日完成環島路網而努力。

二、國道隧道工程之地形與地質條件

隧道工程施工之順利與否，主要繫於先期隧道路線之選擇以及沿線隧道所通過地區地質情況之瞭解，因此，地形與地質條件之掌握，往往為隧道工程規劃前期作業須先考量之主要項目。台灣本島由於板塊作用，地形上高山疊起，且在短距離內常有陡急之縱坡變化，地質上有極為複雜之褶皺與斷層構造，並且岩盤內常有高度應力集中現象。台灣地質依據地層與構造之差異，可以劃分為七大分區(何春蓀,1975)，如圖一所示。而目前國道隧道工程通過的地質背景以第三紀與第四紀之沉積岩分佈範圍為主，但隨東部路廊的開發，中央山脈東翼地質區的變質

岩區將會是國道隧道工程所須面臨的新課題。



圖一、台灣地質分區圖(何春蓀，1975)

三、 國道隧道工程資料統計暨工程特色

國道隧道工程建設自中山高速公路中興大業隧道迄今，目前已完工通車的隧道有北二高的隧道群，共 24 座隧道，總長 16.1 公里；正在施工的有北宜高速公路隧道 11 座，總長 53.2 公里，二高後續計畫隧道 10 座，總長 11 公里；而規劃設計中的中部、東部、中橫、南橫等快速公路隧道約計 120 座隧道，總長約達 320 公里。相關資料如表一所示，而目前規劃的國道路網如圖二所示。

表一、國道隧道資料統計

計畫名稱		計畫總長 (公里) A	隧道 座數	單向隧道 長度(公里) B	隧道總長 (公里)	B/A (%)	計畫中 最長之 隧道長度 (公里)	現況
中山高速公路		382	2	0.5	1.1	0.13	0.5	通車
北部第二高速公路		117	24	8.1	16.1	6.9	1.8	通車
第二高速公路後續計畫		388	10	5.5	11.0	1.4	1.8	施工中
北宜高 速公路	南港-頭城段	31	11	20.1	53.2	65.3	12.9	施工中
東部快 速公路	蘇澳-花蓮段	93	22	42.1	82.0	45.4	9.8	規劃中
	花蓮-台東段	147	8	6.8	13.6	4.8	3.4	規劃中
	台東-太麻里段	24	2	3.6	7.4	15.0	3.6	設計中
中部橫貫 快速公路	霧峰-埔里段	38	8	5.4	10.5	14.2	2.5	設計中
	埔里-花蓮段	89	44	47.4	116.2	53.3	15.1	規劃中
台中環線豐原霧峰段		30	22	11.3	22.7	37.7	2.9	設計中
南部橫貫快速公路		53	11	24	66.8	45.3	12.9	規劃中
總計		1,386	166	163.8	400.6	11.8	15.1	



圖二、國道整體路網示意圖

綜合多年來規設及施工經驗，本局主辦的隧道工程具有以下特色：

(一) 大斷面隧道

為因應台灣地區繁忙之交通流量，西部走廊之國道隧道多規劃為三車道，如北部第二高速公路及其後續計畫的主線隧道皆為三車道，開挖斷面達 120~160 平方公尺，其中第二高速公路中的新店隧道局部為四車道斷面，開挖面積更高達 230 平方公尺以上，屬世界罕見之超大斷面公路隧道，亦為國內首次興建如此大斷面之公路隧道。

(二) 完善之隧道安全設施

隧道為一封閉空間，對用路人之安全特別重要。因此本局主辦之隧道工程其安全措施與國外其他先進國家比較，毫不遜色。如隧道內之照明措施即可配合洞外照明度及洞內狀況，自動控制洞內照明亮度，及備有停電時緊急發電機與緊急通訊設備。同時隧道內之通風設施可配合洞內偵測系統，通風機會依偵測結果，自動啟動所需通風機台數，以達隧道內最佳通風狀態。此外隧道內之消防設施與逃生設施也一應俱全，隧道內固定距離並設有車行連絡橫坑與人行連絡橫坑以提供人員車輛緊急疏散之用。更為特殊者為隧道內裝設有無線電漏波電纜，用路人可在隧道內收聽廣播以隨時瞭解路況。

(三) 自動化施工機械的引進

隧道施工採用自動化機械，是世界的潮流趨勢。在北部第二高速公路新店隧道施工中，首次引進懸臂式削岩機(Roadheader)取代傳統之鑽炸法(Drilling and Blasting)開鑿隧道，以減少爆破震動對週遭環境之影響。此外在北宜高速公路坪林隧道工程亦引進國內首次使用的全斷面鑽掘機(TBM)進行施工。

(四) 新材料、新技術的應用

國道隧道工程對於新材料與新技術之引進一向不遺餘力，如北宜高速公路之彭山隧道以濕式噴凝土施噴，且以機械臂代替人工，不僅效率高，隧道內工作環境亦較佳。又如第二高速公路後續計畫中之蘭潭隧道採用鋼纖維噴凝土(Steel Fiber Shotcrete)，鋼支保則捨傳統 H 型鋼而採用桁型鋼肋(Lattice Girder)。新材料、新技術之應用可以說是因應台灣多變地質的結果。

(五) 融合當地自然景觀與兼具環保要求

隧道之開闢可能影響環境因素之層面相當廣泛，舉凡地形、土壤、地質、水質、噪音、震動、空氣、生態、景觀及社會經濟等均可能受到某種程度之衝擊。

因此本局在所有隧道工程規劃初期即重視自然環境之景觀及環保法規之要求，務使工程儘量不破壞或干擾大自然的原貌並融合當地之風格特色。

四、 隧道工程之重點課題回顧

隧道工程施工時遭遇之困難，究其原因，大致可分為地質、技術及管理等三類因素，回顧本局過去隧道施工曾遭遇的問題綜合檢討如下：

(一) 地質因素

1. 軟弱地層與斷層構造

台灣因位於板塊擠壓帶，隧道施工難免遭遇斷層與剪裂帶或其他軟弱地盤。斷層對隧道之影響最主要者為其強度低，易產生大量變形，以及斷層泥阻隔兩側岩層中地下水之流通，於隧道挖近斷層泥時，造成水壓差而發生岩屑泥流沖出之危險。而隧道通過擠壓性惡劣地層時，如處理不當往往發生過量變形以及抽坍事件。而擠壓性地盤的變形往往持續很長的時間，有時在開挖面數百公尺之遙，變形仍未收斂。以北部第二高速公路之木柵一號隧道為例，在隧道開挖經過灣潭斷層後，隧道內空逐漸產生擠壓變形達 1.5 公尺以上，造成初期支撐損害嚴重，受影響隧道長度近 1 公里。處理方式為在隧道頂拱、側壁增設預力鋼腱與兩隧道間岩柱對拉預力鋼腱，隨即修挖入侵淨空部位再重新施做支撐工及襯砌，最後在工程人員謹慎的處理下終於完成修挖工作，並使隧道處於穩定狀態。

2. 不利地形產生之偏壓與洞口邊坡處理

由於路線的需求或用地取得之限制，隧道常須傍鄰山坡邊緣開挖，由於路線位於地形不對稱之範圍內，致隧道承受偏壓現象，進而影響隧道及邊坡之穩定。以北部第二高速公路之新店一號隧道為例，北上線隧道穿越高約七十餘公尺之邊坡，施工中邊坡首先產生翻覆型破壞(Toppling Failure)，復因連續颱風豪雨的侵襲，造成邊坡再次發生大規模蠕動並影響已開挖之北上線隧道產生擠壓變形。本案採取的整治措施為在邊坡坡腳處回填六萬餘方土石，坡面打設岩錨鋼腱並於坡趾加設擋土排樁；南下線則由原設計之明挖段改隧道段施工，並以雙側導坑開挖及隨挖隨襯方式通過。

此外過去北二高隧道洞口設計考量上係以儘量開挖至岩盤面以減少進洞的困難度為原則，但實際施工中遭遇數項困難；如大量邊坡開挖導致地表環境遭到破壞，對水土保持與環境衝擊有負面影響並且造成邊坡保護工數量增加甚多。目前在二高後續計畫及北宜計畫中之隧道設計已大幅減少洞口開挖範圍，並且儘量利用原地形進洞，必要時再施作管幕鋼管等輔助工法以克服

地質問題。

3. 地下水豐富

台灣地層因板塊運動作用，造成甚多之不連續面及破碎帶。破碎之沈積岩地層往往形成一絕佳之儲水層，加之台灣年平均雨量高達 2,500 公厘，地表水補注迅速，故地下水經常對隧道施工造成極大的影響。以北宜高速公路坪林隧道為例，該隧道單向長約 12.9 公里，為國內最長，全世界第三長之公路隧道。因其穿越雪山山脈北端以第三紀沉積岩為主之褶皺斷層構造區，本區之褶皺及數條斷層造成多處透水性極佳之破碎帶，隧道開挖迄今遭遇多次湧水，導坑在四稜砂岩段開挖曾數度遭遇高達 250 公升/秒之出水量，水頭壓力達 20 公斤/平方公分，地下水之噴流及開挖面之抽坍造成 TBM 被夾埋事故，施工受阻。目前正改用鑽炸法開挖，並輔以灌漿及水平長鑽孔導排地下水，以圖通過惡劣地質段。

再以二高後續計畫中的蘭潭隧道為例，本隧道位於嘉義市東方約四公里處，介於蘭潭水庫及仁義潭水庫之間，因通過岩盤地質為膠結疏鬆之砂層及砂、泥岩互層。覆蓋深度約 35~80 公尺，地下水位線高於隧道頂拱約 10~20 公尺，因此地下水極易軟化地層，影響隧道開挖面之自立時間，進而造成危險。因此施工中採用地表抽水井方式抽取隧道開挖高程之地下水，並視需要於施工面打設水平排水孔加強排水，隧道內小部份滴水處亦做好導水設施，將水抽離隧道，保持隧道內乾燥。因為地下水處理得宜，本隧道得以順利完工。

(二) 技術因素

1. 地質探查技術之限制

國內目前隧道工程在規設階段，常運用地表震測及鑽孔探查等方式以獲得隧道沿線與周圍之地質資料。進入施工階段以後，主要依據隧道開挖面之地質資料，並輔以前進鑽孔來推測開挖面前方地質。然上述方法各有其限制；以地質鑽探為例，隨著岩覆深度之增加，鑽孔深度常需達數百米以上，費用昂貴、費時，且無法做全面性之探查。另一方面，施工中之前進鑽孔，若因開挖面前方地質不佳，操作亦極為費時，往往影響隧道之施工進度，故目前如何突破地質探查技術，以能及早瞭解隧道沿線地質，實屬當務之急。

2. 施工技術之限制

施工技術所遭遇的瓶頸與地質條件有直接的關係。以北部第二高速公路採鑽炸法施工的隧道群為例，由於隧道沿線經過之岩盤較為軟弱(平均單壓強

度約為 10~20 MPa)，且開挖斷面積又大(約為 120~160 平方公尺)，需要採多階方式開挖、安裝較厚重之支撐構件及縮短開挖輪進長度，因此施工進度較慢，平均進度普遍皆小於 50 公尺/月，尤其施工中遭遇剪裂帶或斷層時，處理更為費時，而首次引進的懸臂式削岩機，因切削岩盤產生的粉塵未能妥善處理，亦曾影響整體工程進度。再以坪林隧道導坑為例，本工程由東向西開挖，於 80 年 7 月開工以來，以鑽炸法開挖 522 公尺即遭遇 13 次大小抽坍，隨後改以 TBM 鑽掘過程中，亦經歷了 10 次停機事件。本案例說明了惡劣地質及地下湧水對施工技術造成之極大挑戰。

(三) 管理因素

1. 隧道招標、發包制度

國內早期大型隧道工程之發包作業多由政府部門直接掌握營造單位，因此工期與經費易於控制，同時可以培養特定施工單位的經驗。但隨著政府角色的轉換，以及經濟自由化的提倡，以往與營造單位直接議價的模式已逐漸改變，目前隧道工程多以公開招標的方式發包。

近期隨著政府獎勵民間參與公共建設，以及為推動加入世界貿易組織(WTO)及改革採購制度之需要而制定政府採購法，其中招標方式包含了公開招標、選擇性招標及限制性招標，決標方式也由最低價得標方式擴充至最有利標決標，並將替代方案、共同投標、統包及 BOT 選商等不同的採購方式納入。此項採購制度的改革對於工程技術困難度高、資金需求量大及不確定因素多之隧道工程應有相當的助益。

2. 隧道施工管理

國內隧道工程的管理問題主要是施工介面過多、承商未能落實品質管理及地質風險之分擔常滋生爭議。尤其因隧道工程本身之不確定性及複雜性，上述問題所造成的負面效果更加嚴重，因此工程合約及施工管理制度的良窳對隧道工程施工效率有密不可分的關係。未來將要求承商以混合編組方式，工作面之作業人員具備正常開挖、支撐作業所需之人力且按固定時段交班，並要求於工作面交班，以減少工作介面及縮短停滯時間，相較國內以往隧道採專業分班而言(即隧道開挖支撐等作業分由不同作業班完成)必能減少工作界面及提高施工效率。

五、 未來展望

自從北部第二高速公路規劃初期，為避免拆除大量民房及減少對沿線周遭之環境衝擊，乃政策性的選擇沿台北盆地周緣山區通過，因而有數座大型斷面的公

路隧道建設。目前正向崇山峻嶺挑戰的北宜高速公路，以及後續的中部橫貫快速公路及南部橫貫快速公路等計畫都有更艱鉅的隧道工程尚待完成。從過去累積的經驗，應可做為後續工程借鏡與參考，未來國道隧道之規劃設計不僅需滿足安全性、功能性、經濟性，更需達到景觀協調與環境保護的要求。在此提出未來可考慮的課題如下：

(一) 嚴謹周全之地質調查

隧道工程的特性在於須面對複雜多變的地質條件，施工前若能確實掌握地質情況，並據以研擬周全之施工計畫，則可大幅降低施工中之風險，且地質調查工作應於隧道施工中持續進行，以獲取完整之地質資料。而為克服地質調查受到之限制，除致力於鑽探機具儀器之研發改良外，宜進一步開發航照判釋、物理探測等迅速廣泛之探測技術。

(二) 審慎之規劃、設計與施工

由於未來環島路網多向山區發展，因此須面對台灣複雜地質的挑戰。而地質的良窳多已天然生成，且隧道工程又與地質息息相關，故解決工程問題的策略應是在規劃、設計階段，儘量避開地質不利因素對工程的影響，並且以技術與管理來降低地質風險的衝擊。良好的施工管理，常可有效的降低地質風險，進而發揮施工技術，順利克服施工中遭遇之困難。

(三) 合宜之招標制度

針對隧道工程技術需求高、資金需求量大及不確定因素多等複雜特性，必須要有合宜的招標、選商制度才能使隧道工程順利進行。較具體的做法為建立包商預審制度，並就包商的資格、技術與投標價格予以考量，以挑選較有能力的承包商。投標時承包商須提供包括其財務、機具設備、技術班底等基本能力，得標後即必須依規定名冊上的人員、機具實際投入工作，並且藉由承包商自主性的品質管控，達成優良的工程品質。

(四) 彈性之合約執行

面對複雜多變之地質情況，施工方案之研擬須視地質與實地施作情況做彈性調整，工期、費用與計價方式須做特殊之考量，合約訂定應有彈性處理空間，執行時應允許包商技術作充分的發揮，並賦予施工單位較大之執行空間。此外在發包文件應針對各種可能的情況，編列備用計價項目，以減少不必要之合約變更。

(五) 合理之地質風險分擔

隧道工程具有地質無法完全預知之風險特性，目前雖有工程保險做為預防措施，但地質之風險甚難於保險條約中完全涵蓋，因此如何研訂合理之風險分擔條款，賦予充分之彈性應變能力並給付合理的費用，以使各項施工安全措施確實執行，減少因爭議而交付仲裁或訴訟所造成之工期延誤，實刻不容緩。

(六) 引進國際合作與技術交流

目前先進國家的隧道工程技術發展可說是日新月異，並且屢向高難度的工程挑戰，其中因應各種施工條件發展之技術與方法，頗值得學習。本局過去亦曾引進相當之技術與專業廠商來克服地質帶來的挑戰，部分外商帶來的管理制度與作法，也值得借鏡。今後更應配合新制採購法的實施及加入世界貿易組織(WTO)的機會，逐步開放國際廠商參與重大的隧道工程，除可引進新的技術及管理方式外，並達成技術轉移的目的。

最後謹向本局歷年來從事隧道工作的同仁們表達由衷的謝意，同時對於同仁盡忠職守、群策群力，屢屢化解困難之努力致最深之敬意。

七、 參考文獻

1. 何春蓀(1986)「台灣地質概論-台灣地質圖說明書」第二版，經濟部中央地質調查所。
2. 交通部台灣區國道新建工程局(1991)「北部第二高速公路隧道工程簡介」。
3. 鄭文隆(1995)「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。
4. 鄭文隆(1995)「鑽炸法公路隧道施工進度之案例分析」，中華道路，第三十四卷，第一期。
5. 鄭文隆(1999)「台灣隧道工程之過去、現況及展望」，第一屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集。