

北宜高速公路之 工址調查技術

◆張文城 台灣區國道新建工程局結構組地工科科长

一、前言

爲因應台北都會區之急遽發展，及促進東部區域之繁榮，且有鑑於台北與宜蘭間，因中央山脈之阻隔，交通至爲不便，故政府乃決定著手興建北宜高速公路，以縮短台北與宜蘭間之行車時間，加速東部區域之開發與繁榮。

由於北宜高速公路爲國內第一條貫穿中央山脈之高速公路，且因高速公路之服務品質要求極高，故本公路百分之八十之路段皆爲隧道及橋樑所組成，至於非橋樑及隧道之路段，亦面臨大規模邊坡開挖之可能，因此本工程之高困難度應可預見。爲使工程規劃設計時，能充份考量地質因素，進而降低工程經費與風險，並避免工程施工時，因遭遇未預見之地質因素而導致工程失敗，因此充份之工址調查，實爲順利完成本公路建設之首要工作。

本計劃除安排一般國內傳統之公路工址調查項目與技術（如鑽探、地表地質調查等）外，亦引用某些國外或國內其他領域之調查技術（如水力破裂法之當地應力量測等），以期提昇相關之調查技術，進而提昇工程規劃，設計與施工品質。

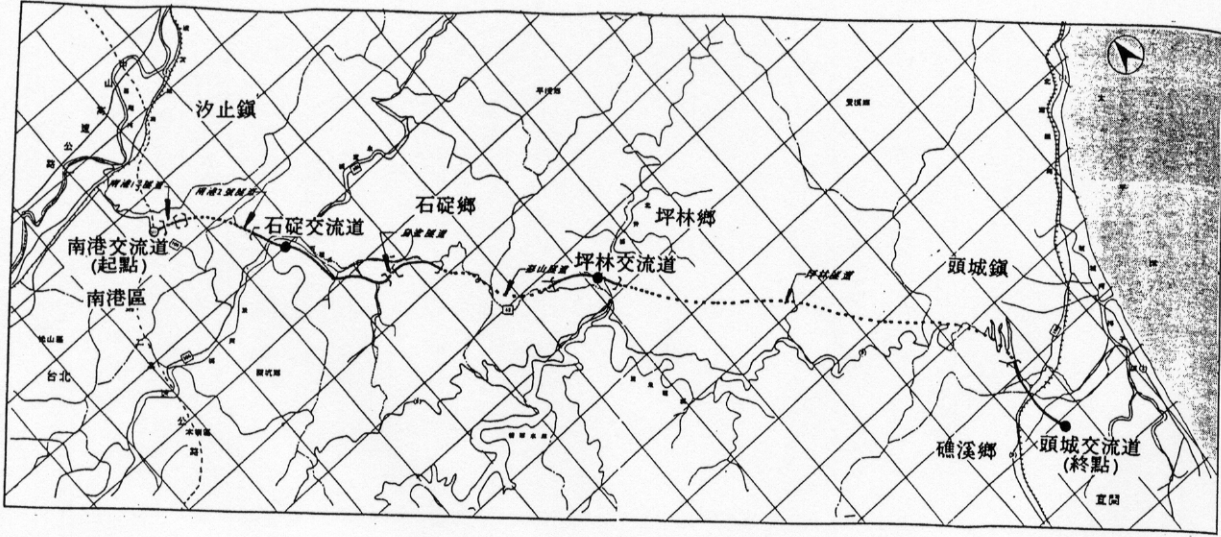
二、工程概述

北宜高速公路以台北市南港區爲起點，經石碇、坪林兩鄉而終止於宜蘭縣頭城鎮（如圖一），目前並計劃延伸至蘇澳港。自南港至頭城全線長約31公里，爲雙向四車道之公路。由於穿越崎嶇之山區，因此隧道總長度達20公里，其中最長之坪林隧道長12.9公里，爲目前東南亞最長之公路隧道。

本計劃自民國七十六年由交通部運輸研究所辦理可行性研究開始，經路線評選及基本設計，目前已進入細部設計階段。此外全線之關鍵工程，即坪林隧道，其爲辦理地質調查之先期導坑工程，亦已於民國八十年六月開工。本工程預定於民國八十八年底全部完工通車。

以地質觀點而言，大致上可以屈尺斷層（約位於坪林鄉與石碇鄉之交界處）將本公路經過之路段，區分爲西部麓山帶與雪山山脈兩地質區。屈尺斷層以北屬西部麓山帶，地形以低緩之丘陵地爲主，海拔高度一般在七百公尺以下。屈尺斷層以南則屬雪山山脈地質區，地形特徵爲山高谷深，海拔高度在七百公尺以上。本計劃即針對本地區之地質特性，研擬相關之

工址調查計劃。



圖一 北宜高速公路地理位置圖

三、調查內容

由於本計劃分為可行性研究、路線評選、基本設計、細部設計及施工等階段，故其相關之工址調查，亦配合前述之各階段分別進行。

在可行性研究階段，主要係以蒐集相關之地質文獻為主，並配合局部之野外踏勘工作。其目的主要在提供可能計劃路廊之大區域之工程地質與區域地質資料，以做為所選擇路廊工程可行性評估之依據。

路線評選階段，工址調查之主要目的為查明路線及其鄰近地區之地質構造，岩層特性，工程材料及可能之地質災害等之位置及其分佈之範圍，以供選線及工程費用概估之依據。本階段之工址調查項目包括：

1. 遙感探測與航照判讀。
2. 野外地質調查(1/5000)。
3. 折射法震測。
4. 鑽探。
5. 現地與室內試驗。

其中以遙感探測與航照判讀及全面性之野外地質調查為本階段之工作重點。

基本設計階段調查項目，除前述路線評選所述之項目外，並增加槽通開挖，橫坑探查及煤坑調查等項目。本階段之調查目的，係針對選定之路線做必要之補充調查與試驗，以確定

最後之路線位置，並完成初步之工程功能設計，故調查項目係以野外地質詳查、折射法震測及較深層之鑽探為主。

細部設計階段之調查目的，主要在提供設計時所需之力學性質，並確定工程結構物所在位置之相關地質資料（如橋墩基礎之岩盤深度）。本階段之調查項目包括：

1. 野外地質調查(1/200至1/1000)。
2. 鑽探。
3. 槽溝開挖。
4. 現地及室內試驗。
5. 剝洗。

其中以各工程結構物所在位置之野外地質精查(1/200至1/500)，鑽探及室內試驗為主。

由於本計劃主要以隧道工程為主，因此施工中之工址調查主要係以隧道為重點。目前坪林隧道之導坑工程已進行施工，其調查項目包括：

1. 開挖面地質記錄。
2. 當地應力試驗。
3. 孔內變形試驗。
4. 平鈹載重試驗。
5. 隧道開挖後之變形量測，包括收斂儀、伸張儀及計測岩栓。
6. 岩石物理及力學性質試驗。

表一 北宜高速公路各階段之工址調查費用表

單位：仟元

計畫階段	費用	佔總工程費比例	備註
可行性研究	未單獨列項	—	總工程費 601億元 (內含用 地費60億 元)
路線評選	41,700	0.07%	
基本設計	108,600	0.18%	
細部設計	64,000	0.11%	
坪林隧道導坑施工	60,618	0.10%	
合計	274,900	0.46%	

前述調查之主要目的，係為了解沿線之地質構造，岩體之力學行為及當地應力之大小及方向，以為坪林隧道主坑設計及施工時之參考。

本計劃之工址調查，大致上係配合各階段之工作循序漸進，各階段皆有其不同之調查範圍、程度與精度。大致上在可行性研究與路線評選階段，其調查範圍較廣，精度與程度較低，而在設計階段，精度與程度較高，且範圍較小，集中在主要結構物之處。

關於調查經費方面，本計劃各階段之調查費用詳如表一，約佔總工程費之0.46%，大致上應已充份反映一般工程所應有之工址調查規模。

四、調查成果

本計劃調查項目甚為廣泛，目前調查成果已充份反映於設計成果中，由於大部份的調查方法與國內一般傳統之大型土木工程之調查方法相同，故本文不擬贅述，以下僅針對本計劃所採用之調查方法，說明其調查成果。

4.1 遙感探測與航照判讀

遙感探測與航照判讀為第一次有系統的應用於國內公路之規劃設計，以往第一高速公路建設時，僅利用航空照片圖之立體成像效果，以輔助工程師了解所選定路線是否恰

當。遙感探測之原理，為利用地表各種物體之幅射或反射能力之差異，以空載（如人造衛星，飛機等）感應器感應，記錄並顯示之，以辨認各物體之現象。航照判讀則主要係透過立體鏡，藉由浮現於觀察者眼前之立體影像，以獲取所需之地質資料（如崩塌地之分佈等）。關於遙感探測與航照判讀之詳細原理，可參考地工技術雜誌12期“工址調查（上）”（洪如江，民國74年10月）及台灣營建研究中心，工址調查，“遙測在工址調查之應用”潘國樑，民國74年）。

一般遙感探測與航照判讀應於可行性研究階段即辦理較為合適，惟本工程之主辦單位，國道新建工程局於接辦本計劃時，已進入路線評選階段，因此在辦理時機上已稍嫌落後。本項工作於路線評選階段，係委託工業技術研究院能源與資源研究所辦理，而基本設計階段，則委託給中興工程顧問社（與美國Bechtel 公司合作）辦理。

本計劃應用遙感探測與航照判讀之主要目的，為對候選路線及延伸至線外2公里範圍內之區域，進行線型、崩塌地、水系及影像色調之分析。各項分析之重點說明如下：

(1) 線型分析：

主要用以了解地質構造（如斷層、節理、層面等）之分佈與方向，以了解工程上之地質弱帶及大區域大地應力之可能方向。

(2) 崩塌地分析：

用以了解崩塌地之分佈範圍，並進而判讀崩塌地之屬性，即老崩塌、新崩塌地或可能之潛在崩塌地。

(3) 水系分析：

用以了解水系之分佈，方向性及型態，進而推估可能之岩性及地質構造等影響工程之地質因素。

(4) 影像色調分析：

由於本工程之坪林隧道穿過四稜砂岩層，新鮮之四稜砂岩其單壓強度可達2000 kg/cm²以上，因此本項分析之主要重點，係利用黑白航空照片上色調之差異，以評估四稜砂岩之分佈範圍。

遙感探測與航照判讀所使用之資料包括法國SPOT衛星影像，美國Landsat 衛星影像，台灣側視雷達影像及航空照片圖。不過由於衛星及側視雷達之比例尺甚小，因此判讀之工具仍以航空照片為主，尤其是崩塌地的分析。前述之各項判釋，除影像色調分析，因受植生、地形、陽光等因素之影響，便四稜砂岩無法於影像上凸顯，致成效不彰外，其餘線型，崩塌地及水系皆有相當豐碩之成果。惟遙感探測與航照判讀僅能提供大區域可能之地質特徵，其成果則須配合後續之其他調查（如野外地質調查、鑽探、雷測等）技術，加以進一步之確認。

4.2 煤坑調查

台灣煤礦之蘊藏並非十分豐富，惟由於本身可用能源的缺乏，因此探煤活動相當頻仍。台灣的煤層主要分佈在基隆至苗栗一帶，煤礦之開採自日據時代即已開始，而於民國五十年代達到全盛時期。由於開採成本的增加，目前多數煤礦皆已停採。北宜高速公路由於通過採煤活動甚為活躍之南港、石碇地區，尤其是其中長2.7公里之南港隧道恰通過採煤區，因此本計劃乃針對路線經過區域之煤坑分佈，做一詳細之調查，以期充

份考量煤坑對於工程之影響程度，事先謀求因應解決之道。本項調查工作乃委託亞新工程顧問公司辦理。

由於沿線煤礦開採歷史久遠，且除三民煤礦外，目前皆已停採。因此有關煤礦開採資料大部皆已散失，經多方面蒐集後，僅獲得六張礦區平面圖，當礦坑記錄之有關資料蒐集整理完成後，即進行現場野外調查工作。本調查之目的是查証有資料可循的礦場及儘可能尋找未立案的廢棄礦坑，調查內容主要包括：

- (1) 查証及標示各廢棄礦坑坑口的位置及型態。
- (2) 尋找煤層露頭。
- (3) 了解區域之地質構造。
- (4) 查訪採煤引起的地表沈陷證據。

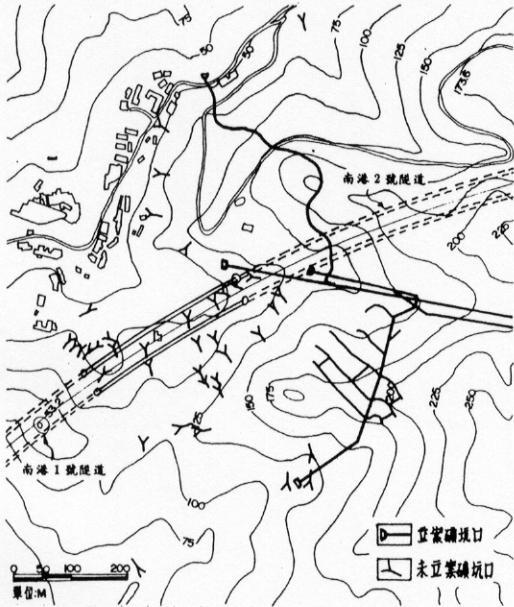
由於沿線煤礦大部份均已廢棄，現場亦均無人看守，因此調查除僱用熟悉當地礦場之老礦工為嚮導及助手外，並多方訪查礦業人士，其他礦工及當地居民等，以為建立資料之佐証。此外為了解煤層之分佈及其位態，亦進行相關之震測及鑽探作業，以期建立隧道與煤層之相對關係。

根據前述之調查過程，查明在本調查區內共有12家經政府核准的煤礦，並發現77個坑口，其中有52處為政府未立案者，因此可以想像非法採煤活動之活躍程度。圖二為本公路南港隧道洞口附近之調查成果。由於坑口皆已崩毀，因此經立案之礦坑，其分佈乃根據礦物局提供之資料而套繪者，而未立案者，僅能得知坑口之位置，至於其開採後之分佈則已無從考查。

一般於礦坑附近進行大規模之工程活動時，因礦坑所引起之主要工程災害大致可分為以下幾種：

- (1) 礦坑口之崩塌。
- (2) 採煤坑道之崩塌。
- (3) 地表沈陷。
- (4) 高壓地下水櫃及水污染。
- (5) 甲烷及其他有毒氣體。
- (6) 煤層之氧化自燃。
- (7) 煤礦棄渣之不穩定。

本計劃在基本設計階段，經過前述詳細之調查，並考量所可能之工程災害後，目前在細部設計階段，將妥擬適當之因應對策。圖三為目前針對公路通過廢棄坑口附近時之初步處理方式之建議，原則上以改良及強化原有地盤為原則。至於前述之其他工程災害，亦將分別於設計時，加以妥善之考量。

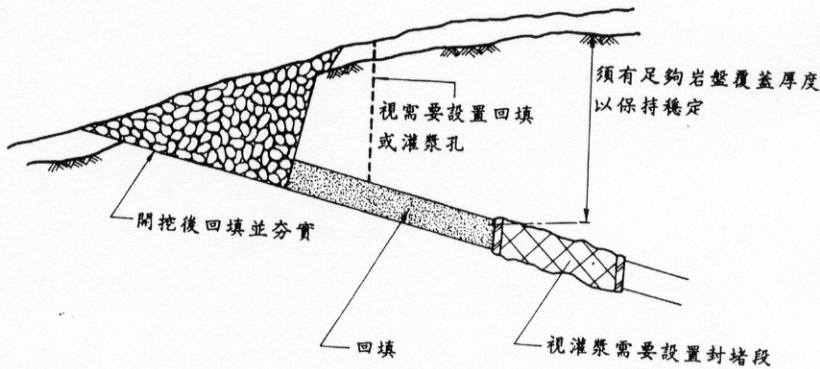


圖二 北宜高速公路南港隧道附近之煤坑口分佈調查成果圖

，因此隧道分析設計時，對於大地應力之了解，實為首要之工作。

關於當地應力之量測，目前國內僅有東部花蓮建安計劃，南部南迴鐵路計劃及中部之明湖、明潭與新天崙計劃，有實際之量測資料，且全部皆係採用套鑽法(Over coring Method)量測而得者。因套鑽法之當地應力量測，一般係於橫坑內進行，由於一般施工前之探查橫坑，基於經費之考慮無法太長，因此前述各計劃之套鑽法量測，其覆蓋深度約為200公尺左右。本計劃之坪林隧道，因沿線設計有三處通風豎井，為配合豎井之鑽探作業，本計劃乃另外嘗試首次於國內應用水力破裂法(Hydraulic Fracturing Method)，以量測隧道沿線之當地應力。與套鑽法比較，水力破裂法之最大優點，為配合鑽探之鑽孔作業，即可於設計深度量測所需之當地應力，而不需進行費時費力之橫坑開挖。

水力破裂法之量測原理如圖四所示，於預定之量測深度，利用加壓設備於鑽孔內施加一壓力P，理論上當壓力P夠大時，鑽孔將沿與孔壁周圍岩盤所受之最小水平主應力之垂直方向產生一裂縫，因此由記錄之裂縫產生前後之壓力及岩石之抗張強度，即可推



圖三 高速公路通過煤坑口附近時之工程處理示意圖

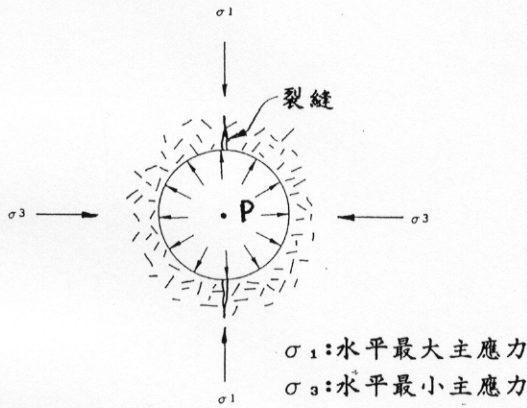
4.3 當地應力量測

台灣由於位於歐亞大陸板塊與太平洋菲律賓海板塊之碰撞處，地震頻仍，地質構造非常複雜。此外本計劃之坪林隧道，其最大之覆蓋層厚度達七百多公尺，當隧道開挖後，因應力集中可能引起地盤破壞等之工程問題

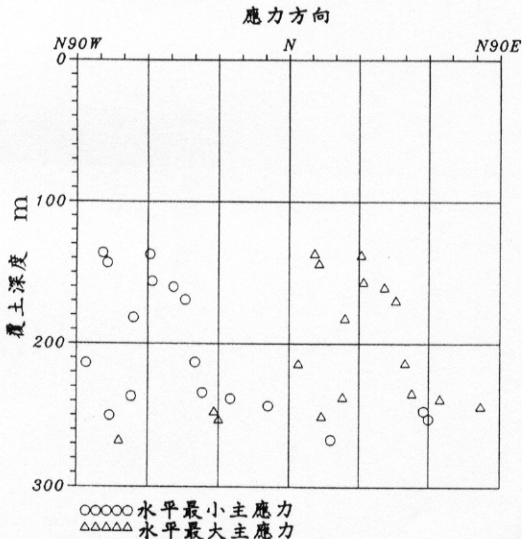
求當地水平最大與最小主應力之大小。至於裂縫方位之量測，則係利用橡皮布包裹於栓塞(Parker)上，而後栓塞放入已產生裂縫之量測處，將已產生裂縫之岩石再加壓撐開，使裂縫之裂痕拓印於橡皮布上，並配合設置於栓塞上之羅盤定位儀，以記錄裂縫之真正

方位。

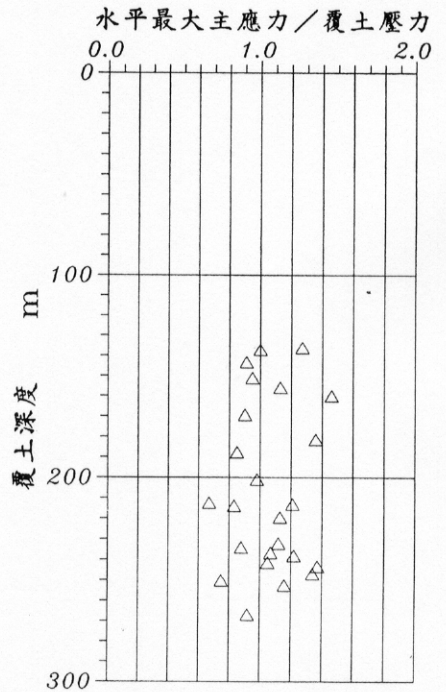
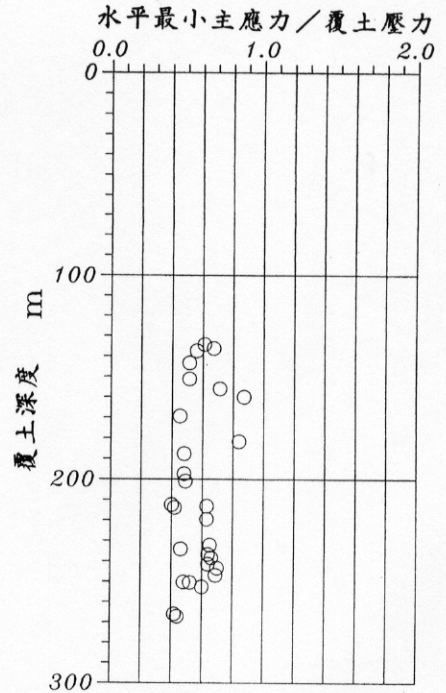
圖五、六分別為水力破裂法於豎井之不同深度之量測結果。由圖中顯示，大致而言最大水平主應力約與覆土壓力(Overburden Pressure) 相等，最小水平主應力則約為覆土壓力之0.7 倍，而最大水平主應力之方向約為N30° E，此與坪林隧道之方向約垂直。當坪林隧道進行分析設計時，其當地應力即採用前述之量測成果。目前根據不同的覆土深度與岩盤等級，將隧道之支撐分為六類。此外並設置監測系統(如收斂岩釘、伸張儀、計測岩栓等)，以期於隧道施工時，藉由監測系統之量測資料，反算分析岩體之變形行為與當地應力之大小，以進一步佐証水力破裂試驗之成果。



圖四 水力破裂試驗時，裂縫之形成與延伸示意圖



圖五 水力破裂試驗應力方向與覆土深度關係圖



圖六 水力破裂試驗應力大小與覆土深度關係圖

4.4 坪林隧道豎井鑽探

坪林隧道沿線設計有三處豎井，每處豎井各有一供氣井及排氣井，三處豎井之深度分別為270m、385m及465m，其外徑則約介於八至九公尺之間。由於豎井深度甚深，因此

為確保施工之安全及研擬適切之施工方法，乃於設計階段分別於三處豎井位置進行鑽探，以期了解其地質與地下水之狀況，供設計與施工之參考。

為確實掌握地質狀況，豎井之鑽探係全程提取岩心。由於一般傳統之淺層鑽探，係利用鑽桿連接取樣器，每次取岩心時，必須先將每根鑽桿取出，因此鑽孔深度較深時，其作業便甚為耗時。本計劃由於豎井深度已達四百多公尺，因此乃改採用鋼索吊取岩心之設備，以期縮短工期。目前國內除中國石油公司外，具有二百公尺以上鑽探能力者，僅有工業技術研究院之能源與資源研究所。因此本項工作乃於基本設計階段，透過中興顧問社委託給能資所辦理。

在鑽探過程中，一號豎井（深385m）及二號豎井（深270m）分別在預定之工期內（約二個月）順利的完成鑽探作業。三號豎井（深465m）則因地質惡劣，雖經六個多月久之作業，亦於達345公尺之深度後終告放棄。其主要原因為三號豎井穿過之地層屬堅硬之石英岩，其間之破碎帶，裂隙與節理皆極為發達，因此灌漿處理時極易吃漿而不易固結，造成孔壁岩屑崩落及鑽頭堵塞之情形，而導致卡鑽甚至鑽桿扭曲斷裂。由於三號豎井位置之地質甚為惡劣，因此乃考慮更改豎井之位置，並已於細部設計階段，於距離舊豎井位置約200公尺處重新鑽孔。新設鑽孔深度達490公尺，已於八十一年七月順利完工，前後工期約二個月，乃透過中興顧問社委託日本同和工營株式會社辦理，其鑽探亦採用鋼索吊取岩心之設備。

前述鑽探所得的地質資料，除做為設計之參考外，亦為研擬施工方法之重要依據。目前該地質資料已充份的反應於設計與施工方法中。

4.5 坪林隧道施工法研擬之相關調查

本計劃之坪林隧道長12.9公里，根據目前國內一般隧道工程採用之鑽炸法施工方式，每月之開挖進度約為50公尺，故若由隧道兩頭同時施工，則單單開挖工作便需十年左右方能貫通坪林隧道。為縮短工期，於隧道

兩頭外增加工作面為一可行之方法，惟由於受地形之限制，沿線中途缺少設置中間施工橫坑之地點，僅能勉強覓得一施工橫坑，然因其坡度達11.8%，且長度亦達二至三公里，故經濟上不太可行。此外利用豎井出碴以增加工作面，亦為一可行之方法，惟坪林隧道之豎井深度太深，皆位於深山內，運輸道路甚為不便，故此法在實際應用上有其困難之處。基於前述之理由，本計劃乃嘗試引進全斷面隧道鑽掘機（TBM）之施工方法，以期縮短施工工期。

TBM隧道鑽掘機為1952年由美國之James Robbins所發明，以坪林隧道之直徑11.8公尺而言，其一般進度約可達200至400公尺/月，為評估隧道鑽掘機於本計劃之適用性，除需評估其掘進速度外，尚有以下幾點地質因素，順序特別之考量，以免TBM於操作過程中沈陷或遭夾埋。

- (1) 斷層或破碎帶。
- (2) 高膨脹性或擠壓性之地盤。
- (3) 高壓地下水。

TBM之鑽掘速率主要與岩石之硬度與單壓強度有關，因此對坪林隧道沿線之岩性與其分佈範圍之調查及室內之單壓與硬度試驗為評估TBM可行性之首要工作。此外關於斷層，破碎帶，高膨脹性或擠壓性之地盤，則係利用前述之野外地質調查、鑽探、震測等方法進行調查。根據目前調查結果，主要斷層有六條，並預期沿線應無膨脹性或擠壓性之岩盤。至於高壓地下水，則為調查中最困難之項目，蓋影響地下水分佈範圍之因素甚多，諸如地形、斷層、節理、雨量等。規劃設計階段之調查，僅止於淺層或某些定點，故對於隧道通過之深層地下水狀況實無從評估。因此對於高壓地下水之克服，目前除考慮採用防水設計之TBM外，尚有以下幾點對策：

- (1) 隧道由頭城向坪林方向開挖，此為上坡前進，因此當遭遇大量地下水時，湧水可因重力自然排出洞外，不致在隧道內積蓄而淹沒TBM。
- (2) 每輪開挖前，於TBM切削頭向前鑽

設探查孔，以了解開挖面前方含水情形，必要時並可兼做排水孔，以降低開挖面之地下水壓。

此外，為確保坪林隧道主坑採用TBM施工時之安全，最重要之地質調查項目，為在兩主坑間設置一地質調查導坑，該導坑約略與主坑平行，長度與主坑相同，直徑則為4.8公尺。以地質觀點而言，該導坑最主要之功能如下：

- (1) 在主隧道開挖前，提供詳細之地質，地下水等資料。
- (2) 由導坑改良主坑之地質（如斷層帶之灌漿或挖除），以提高主坑之開挖速率，並降低地質風險。
- (3) 導坑本身即為一排水廊道，因此可減輕高壓地下水對主坑之影響。

目前坪林隧道已決定採用兩部TBM，由頭城端之兩個主坑，同時向坪林方向施工。根據前述之各項調查成果，其平均開挖速率一般路段約介於300至400公尺／月，斷層帶則約為10至40公尺／月。當然，為了防止前面所述之地質災害，TBM本身的設計，亦是一大考驗。如TBM圓錐形的機身設計及切削頭之開挖斷面略較TBM機身為大，即是為TBM通過惡劣地盤，岩體產生過大之變形時，避免機身被夾埋之可行設計。總之，充份之地質調查（包括岩性、岩石強度、硬度、斷層、地下水等），為研擬隧道適當施工方法之必要步驟。

五、結論

台灣因位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊之碰撞處，地質非常複雜，再加上北宜高速公路正好通過北部崎嶇之山區，故完整而周延之

工址調查，實為工程成敗之首要關鍵。此外，工程主辦單位國道新建工程局對於新技術與新工法之推展與引進一向不遺餘力，故本計劃之調查過程中，亦嘗試應用若干新的調查技術。惟地質因素千變萬化，縱使將地盤全部挖開亦無法百分之百了解其地質狀況，因此調查成果仍有待最後施工階段時加以進一步印證。不過可以確定的，由於調查完整性的提高，地質風險亦將相對地減低，對於工程之工期與費用皆應有正面的貢獻。

關於此次之工址調查，吾人有以下幾點心得與建議，或可做為爾後相關工程之參考。

1. 完整的工址調查為工程成敗的首要關鍵，地質的不確定性應於規劃設計階段儘量予以釐清，而不要於施工階段時產生無窮的紛爭與災害。
2. 遙感探測與航照判讀屬於最先期的工址調查項目，最好在可行性階段或更前之階段即辦理。本計劃由於行政作業之影響，於路線評選階段方進行，時機上已稍嫌落後。至於相關人才之質與量的培養上，則仍有待各相關學術與顧問機構之努力。
3. 水力破裂試驗配合鑽探作業進行，對於鑽探時間與費用增加有限，因此相對於其他方法，應為一值得採用與推廣之當地應力量測方法。
4. 關於煤坑調查除現場野外調查外，係利用鑽探及折射法震測，以推求煤層之分佈，至於其他如地下水、瓦斯、煤層之自燃等項目之調查，或其他之地球物理探測等，由於設備或經費之不足致無法執行殊為可惜。爾後再有相關調查時，實應於調查前擬定計劃以求得更完整之成果。