

山區隧道損壞之檢測調查

— 以台20線嘉寶隧道為例

王慶雄／公路總局第三區養護工程處 甲仙工務段段長

林蔚然／台灣世曦工程股份有限公司 大地工程部 正工程師

前言

台灣地理條件主要屬山區地形，交通路網中不管鐵路均有穿山越嶺而行之隧道，而且地理位置位處菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊碰撞的交界帶，受到板塊間相互擠壓作用之影響，且板塊間相對運動頻繁，造成地質構造複雜且破碎。在這種特殊地質條件下，隧道工程又是地下開發空間，因此，地層變化及地下水等因素嚴重威脅著隧道結構。

由於隧道為一特殊空間，具有封閉、可及性低、狀況不明、聯絡與救援困難等特性，故近年來各項研究著重於增進隧道安全、降低隧道事故發生機率，以及利用逃生設備降低事故傷害程度，但對於隧道結構體安全性評估及外在惡劣地質條件之大地調查與監測，亦是主管機關應關心之重要課題。尤其，早期隧道在技術較未成熟，及工作環境惡劣的條件修築而成，歷經長期營運及後續地形地貌的改變或開發，部分隧道有必要作全面之調查，以判斷其營運功能是否正常。

隧道損壞的原因甚為複雜，主要外在地質水文條件較難掌握洞悉，若欲確保原隧道之安全營運功能，則需於調查階段採用正確大地調查技術，準確研判隧道致災原因，方能進一步補強加固改善，達到安全延壽目標。針對隧道發生異常現象，初步可分為：外力變化因素（擠壓、潛移、滑動等情形）、襯砌結構體劣化、漏水等三大因素。有鑑於此，為能防患未然及制止災害發生，本文歸納目前隧道致災基本特性、隧道大地調查技術，以利隧道安全檢測作業推展；並藉由

台20線嘉寶隧道安全評估及大地調查成果作為實例說明，讓讀者對於公路隧道之大地調查技術有進一步的認知。

山區隧道致災基本類型

公路隧道完工通車後，可能因設計及施工管理上之缺失、襯砌結構體劣化或大地應力之力學上之破壞等因素，導致襯砌結構體形狀與尺寸改變，甚至產生龜裂變形等，隧道發生異狀而影響原來使用功能。隧道所產生之異狀原因，大致可分為外在與內在因素兩大類，外在因素包括側向偏壓、邊坡潛移及滑動、地下水壓、地震等；而內在因素主要係由於設計考量未能周全、材質使用不良及施工品質瑕疵等。隧道發生異狀原因大致可分為下列三項^[1]，依序整理如下：

- 外力變化：如鬆動土壓、偏壓、邊坡潛移、地層滑動、塑性壓、水壓、地盤下陷、地盤承载力不足、地震等。
- 襯砌結構體劣化：包括混凝土老化、骨材析離、鹹骨材反應、材料不良等。
- 漏水或其他原因：漏水造成淘空、襯砌背後空洞、襯砌厚度不足、無設置仰拱等。

另外，山區隧道損壞之原因常與邊坡滑動關係密切，由於隧道開挖或進洞時改變地貌，破壞原有邊坡的應力平衡，隧道洞口附近邊坡可能會發生地層滑動或坡面崩壞等現象^[2]，而隧道內則產生潛移、崩壞、偏壓、頂拱落盤、地層承载力不足等現象。列舉常見致災類型如下：

- 地層滑動、坡面崩壞：邊坡滑移為最常見的破壞現象，進而導致隧道異常變形，如鋼支保兩側不均勻沉陷、頂拱沉陷量過大、甚至崩塌等問題發生。其誘因包括：(1) 洞口段隧道開挖引致的地層的鬆動、(2) 潛移地層滑動邊坡的坡趾進行洞口邊坡開挖、(3) 潛移地層進行隧道開挖、(4) 地下水沿著地層鬆動產生的裂隙流入地層內等，導致地層的滑動或坡面崩壞。
- 偏壓破壞：隧道洞口段之橫斷面地形不對稱、地層傾斜、有斷層破碎帶等地質弱帶存在，隧道可能會發生偏壓現象，常造成隧道不均勻沉陷、單側下陷或支撐破壞等行為。
- 地盤承载力不足：隧道洞口段的覆蓋厚度較淺，地拱效應無法形成，隧道頂拱以上地層全部荷重均須由隧道內支撐構造所承受，若地盤承载力不足，常會發生隧道整體下陷的現象，甚至會危及地表面的安定。
- 河岸侵蝕：邊坡下方坡趾如受河岸侵蝕破壞、向源侵蝕及沖蝕溝等作用，常誘發邊坡滑動，其滑動面之生成，造成隧道內形成剪力及張力裂縫，嚴重時甚至可能發生隧道內淨空不足及隧道錯動等現象。

隧道大地調查技術

隧道安全等級評估分類

橋梁檢測工作早已系統化，並且發展出一套

D.E.R.U 目視評等法作為檢測之準則。然而，隧道之檢測技術建置則因眾多之主客觀因素，遲至 1996 ~ 1998 年間交通部委託國立台灣大學土木系進行「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術」^[3] 之研訂，始完成「隧道安全檢測手冊」與「隧道維修與補強手冊」，該研究將隧道維護管理之實施步驟區分為檢查、安全檢測與修復等三階段進行。隧道安全檢測主要係經由各種調查方法進行異常原因推估，冀找出隧道問題所在，並進行隧道改善策略及適當維修補強方案之研擬。

隧道安全等級區分可參考交通部所頒布「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂」之研究成果，分別就行車安全、結構之安全性、維護管理作業及異常狀況之發展性四個評估要點，將隧道等級分為甲、乙、丙、丁四級，如表 1 所示。其中以甲級最為安全，接下來安全性遞減，至丁級時安全性最差。

隧道檢測技術

公路隧道營運階段對其安全檢測，常以調查隧道是否出現異狀或既有異狀是否出現變化為重點，為確保隧道的安全性、耐久性，並適時施予必要加固改善措施，以延長隧道的服務年限。由於隧道異狀包括外在及內部因素條件，故隧道安全檢測對象亦應包含隧道外在周遭地質環境及隧道內襯砌結構體。由於隧道

表 1 隧道等級分類與評估標準

隧道等級	判定因素				處理對策之緊急性
	對用路人及車輛安全之影響	對結構物安全之影響	對維護管理作業之影響	異狀之程度	
甲	目前尚無影響	目前尚無影響 (如裂縫 $L < 5 \text{ m/w}$ $< 3 \text{ mm}$)	幾乎無影響 (無剝落)	輕微 (裂縫長變化速率 $< 1 \text{ mm/年}$)	經安全檢測後，無異狀或異狀輕微，目前對行車尚無影響，惟仍須進行監視或平時檢查
乙	將來會變成危險	將來會變成重大 (未來可能達丙等級) (如裂縫 $L < 5 \text{ m/w}$ $> 3 \text{ mm}$)	中等 (有局部材料劣化)	異狀進行中， 有功能降低之可能 (裂縫長變化速率 $< 1-3 \text{ mm/年}$)	經安全檢測後，有異狀之發生，將來可能達到丙等級並對行車造成危險，須進行重點監視，並須擇期實施處理對策
丙	遲早造成威脅，異常外力作用下危險	遲早會變成重大 (如裂縫 $L > 5 \text{ m/w}$ $< 3 \text{ mm}$)	大 (即將具閉合裂縫)	異狀進行中，功能亦持續降低中 (裂縫長變化速率 $< 3-10 \text{ mm/年}$)	經安全檢測後，有異狀之發生，且異狀仍持續進行中，遲早對行車造成危險，須儘快採取處理對策
丁	危險	重大 (如裂縫 $L > 5 \text{ m/w}$ $> 3 \text{ mm}$)	明顯 (已有剝離)	重大 (裂縫長變化速率 $> 10 \text{ mm/年}$)	經安全檢測後，異狀嚴重，對行車造成危險，須立即採取處理對策

襯砌，係為擋土結構的一環，若襯砌破壞則易有安全之虞，故非破壞性檢測為隧道安全檢測重要的技術。非破壞性檢測技術依其應用的原理，可概分為光學技術、導電與電子技術、物理波動技術與其他檢測技術四大類^[4]。光學檢測技術之類型有目視及攝影檢測、隧道淨空測量及襯砌影像掃描，而導電與電子檢測技術之類型有透地雷達、多相線性陣列電磁波雷達、自然電位法探測鋼筋腐蝕及電阻法探測鋼筋腐蝕，另外，物理波動檢測技術之類型有敲擊回音法及超音波檢測，在其他檢測類型有混凝土強度錘與測試槍。

隧道外在影響安全因子，主要因山區隧道損壞原因常與邊坡滑動關係密切，因此，調查探測滑動肇因、深度及滑動因子等課題，須靠大地調查技術，才能研析致災原因。首先，大地調查技術包含有初步資料收集（踏勘及現地調查）、現場探測鑽探、地下水位觀測、地球物理探測等。其中，地球物理探測應用於工程地質調查之地層構造探測、岩盤探測、地層動態性質探測、耐震設計資料探測、地層震動特性探測、地下埋設物探測及地下水調查各方面技術成熟，但地球物理探測方法之選擇，須依調查之目的而定，同時必須考慮探測現場之環境、地形、地質、土層性質以及土地利用狀況等，且一般最好有地質及鑽探資料配合比對作完整的判釋。

地球物理探測中之地電阻探測法（Resistivity Image Profiling, RIP），為探測研析邊坡滑動資訊及地下水文之主要技術，因地層組成材料及膠結等狀況不同，可利用物質表現出不同的導電特性加以分類判釋，一般以電阻率代表物質的導電性質。不同地層岩性及不同含水狀況所對應的電阻率分佈情形稱為地電阻譜，再輔以適當地質資訊，可瞭解地下地層的岩性分佈，進而判釋地質構造、裂隙分佈、地下水層等資訊^[5]。

台 20 線嘉寶隧道案例研析

基本資料及歷史沿革

嘉寶隧道為台 20 線南橫公路上重要聯絡通道，位置如圖 1 所示，全長為 300 公尺，車道淨寬 7.5 公尺雙向通行。舊嘉寶隧道於民國 61 年 10 月完工通車後，隧道西洞口區段陸續發生擠壓與崩坍現象，導致車道淨空間不足，遂於民國 76 年 11 月開始辦理雙車道公路

隧道改建工程，施工中曾因岩質軟弱破碎，而頻發生頂拱岩塊掉落及湧水事件，惟仍克服困境，於民國 78 年完工通車。然民國 80 年隧道西洞口範圍發現襯砌有開裂異狀，兩側側壁與頂拱亦有裂縫分布。經主管機關經年戮力維護管理及研析異狀發生原因，工址範圍可能位處於活躍的大規模崩場地。雖於民國 87 ~ 88 年期間再採隧道頂拱背填灌漿、襯砌龜裂處掛網噴漿、樹脂岩栓打設、側壁埋設水平集水管及預力岩錨等隧道改善加固補強措施，惟完成迄今隧道襯砌仍持續發生龜裂剝離、側壁斷面擠壓錯動及鋪面下陷等異狀，如圖 2 所示，且隧道連外道路及邊坡亦發生路基下陷及大小規模不等之崩塌現象，如圖 3 所示。

地質概述

嘉寶隧道東側鄰近新武呂溪，新武呂溪為卑南溪上游主流，發源於中央山脈卑南主峰，流經中央與海岸山脈間，出口為太平洋。溪流方向主要由西向東流，部分河岸區域因崩塌及堆積作用，致階地堆積層頗為發達。依蒐集之文獻資料及現場勘查研判，新武



圖 1 台 20 線嘉寶隧道位置圖



圖 2 嘉寶隧道襯砌損壞狀況



圖 3 嘉寶隧道週遭地理環境現況



圖 4 嘉寶隧道等高線地形圖

呂溪下切作用極為劇烈，地形亦受切蝕作用之影響呈 V 字形。研究區域內地形崎嶇、地勢高差頗大，海拔介於 500 ~ 1,000 m 之間，地形大致由西南往東北方向傾斜。嘉寶隧道穿過地形鞍部，一般而言地形呈現鞍部形狀，代表為地質條件較差之區域，如圖 4 所示。

該區域地質係屬中央山脈東翼地質區，由第三紀變質雜岩所組成，岩性主要包括黑色片岩、綠色片岩及矽質片岩等，並夾各類岩脈及石英脈，此區岩性可統稱為大南澳片岩。隧道位置及其附近以石英雲母片岩夾板岩為主，為高溫低壓變質作用之產物，岩體強度易受風化程度及不連續面影響，並受複雜且強烈之應力擠壓作用，片理面呈現長短交錯褶皺行為，故具有片理方位較不一致且傾角有高有低之特性。就地質構造而言，隧道位處區域受板塊交界帶的大地應力擠壓或剪切影響，沿地層葉理易產生剪裂錯動的剪裂破碎帶、斷層破碎帶等，葉理亦受擠壓作用滑動牽引，形成許多的局部區域性的褶皺現象。本區域地質構造主要受一不對稱之複背斜影響，即位於複背斜軸西翼，片理面大致與層面一致，呈北東至北方向，向西北傾斜，如圖 5 所示。

前期監測成果

嘉寶隧道主體結構距西洞口 40 m 內之襯砌為開口裂縫，且以環向破壞為主，多處鋪面有因陷落產生段差之情形；而 40 ~ 60 m 內之裂縫型態則已轉化為斜向之剪力裂縫，局部谷側襯砌則有剝離錯位情形，顯現差異沉陷逐漸轉大並趨近地盤滑動界面，而於 60 ~



圖 5 嘉寶隧道區域地質圖

120 m 間則存有大型縱向裂損 ($L > 10 \text{ m}/W > 3 \text{ cm}$) 之開口型裂縫，及多處山側襯砌嚴重擠壓裂損、錯位達 50 cm 以上之情形。自民國 88.10 起迄今辦理監測與調查評估等工作，計佈設有地滑計、地中傾斜管、水壓計及雨量計等監測儀器，其中綜整地中傾斜管成果如表 2。

彙整歷年監測資料（中興顧問社、青山工程顧問公司、鹿島工程技術顧問公司、永碁工程顧問有限公司、易鼎工程顧問有限公司），因嘉寶隧道西口附近邊坡持續滑動，使得隧道異狀持續惡化。就各項監測儀器之歷時曲線資料瞭解如下：

- 地表裂縫持續擴大

地滑計監測資料顯示，於較大降雨量發生時，邊坡滑動導致之地表裂縫有明顯變化趨勢。其中地滑計

表 2 地中傾斜管歷年監測成果

孔號	民國88.10-89.7 (青山工程顧問公司)				民國90.12-92.11 (鹿島工程技術顧問公司)				民國94.3-95.7 (永昌工程顧問有限公司)			
	深度 (m)	位移 速率 (cm/月)	可能 滑動 深度 (m)	活 動 性	位移 速率 (cm/月)	可能 滑動 深度 (m)	活 動 性	位移 速率 (cm/月)	可能 滑動 深度 (m)	活 動 性		
A-5	70	0.91 ~ 2.15	28		傾斜管損壞，無法量測							
A-6	110	2.24	22 ~ 58	活躍	改善電子式水壓計							
A-7	120	2.12 ~ 3.07	34 ~ 100		位移量過大，無法量測 (原深度120m，目前可量 深度30m)				傾斜管損壞，無法量測			
A-9	90	0.78 ~ 1.67	62		0.69	55 ~ 65	活躍					
A-10	60	0.7	38		傾斜管損壞，無法量測							
IA2	60							12.6	36 ~ 48	活躍		
IA7	80							10.8	20 ~ 30	活躍		

LS1 於民國 94.7.12 ~ 96.12.31 期間裂縫擴增量達 114.3 mm，顯現地表裂縫的發展持續進行中，如圖 6 所示。

● 隧道內裂縫持續擴大

隧道內設一處水平孔內伸縮儀，水平距離各為 10 m、20 m 及 30 m，量測資料顯示，在幾次極端氣候事件前後，隧道襯砌裂縫均有增加趨勢，自民國 94.7.9 ~ 96.12.31 裂縫增大約 49.4 mm。受限於此區域地質岩性特殊，邊坡滑動機制與滑動成因複雜，且非單一原因。為進一步瞭解工址地層種類分佈、地下水位高程及致災原因，因此，進而採大地調查技術研析可能滑動機制及滑動範圍。

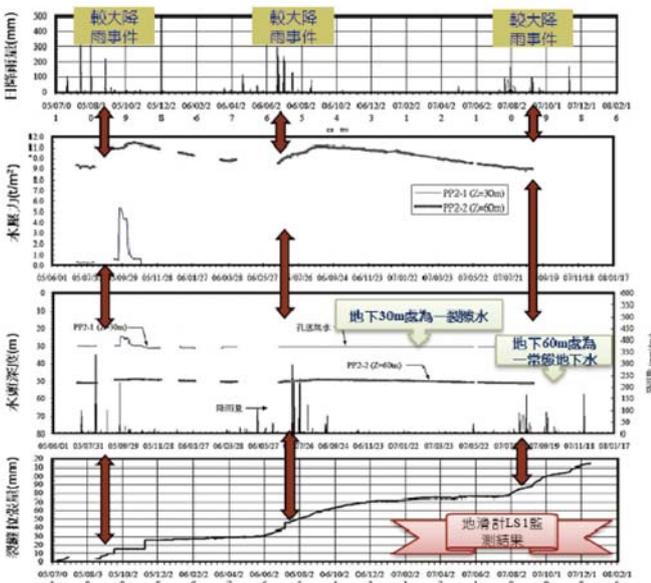


圖 6 降雨與地表裂縫監測成果

評估隧道鄰近之邊坡崩塌區

透過歷年航照判釋與現地測勘，評估該區域邊坡滑動地表地貌特徵的變動，整理影響嘉寶隧道周遭各大小及深度不一之滑動體，以隧道西口東側及西側作為編號依據，東側編號由 E1 至 E3，西側編號由 W1 至 W8，初步分為 11 處可能滑動塊體，如圖 7 所示，其中原由航照判釋之 W-1 及 W-2 滑動體於 102 年天兔颱風來襲時，結合為同一塊體產生滑動。

針對上述 11 處可能滑動塊體，經現地實際調查相關崩場地位置，結合歷年來監測成果，本研究將焦點置於影響隧道結構破壞之三個主要的滑動區，如圖 8 所示。

研判邊坡滑動機制

由現場調查可根據地滑的地表滑動現象與受影響或欲保護之對象的重要性等，可將滑動體危險度依下



圖 7 嘉寶隧道研判滑動塊體分區

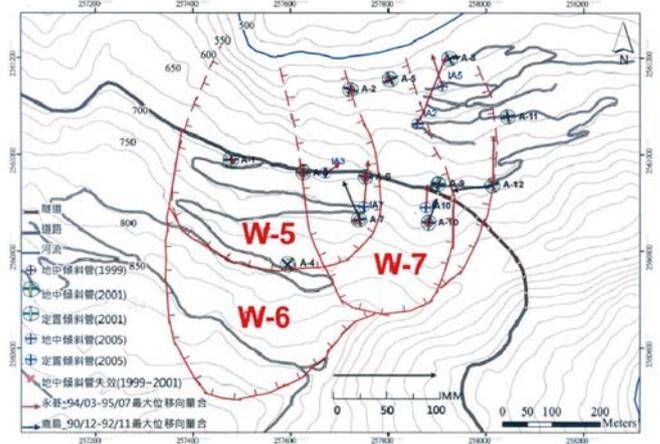


圖 8 綜合判釋嘉寶隧道鄰近邊坡崩塌區

列準則劃分為 A、B、C 三個等級（藤原明敏，1979）^[6]，以供規劃整治對策輕重緩急之參考：

A 等級（危險度 A）：出現初生裂隙（Primary crack）之活動中的滑動土體，具明顯的地滑地形特徵，寬度在 100 m 以上，即使不在其上進行挖填等人為活動，一旦自然環境發生變化，即可誘發滑動而直接危及住家、道路或其他公共設施等。A 等級之滑動土體應立即以目前可行之技術緊急處理，以防止地滑發生。

B 等級（危險度 B）：未出現滑動變形現象，但具明顯的地滑地形特徵，且其寬度在 50 m 以上，可能因人為的環境變化，直接誘發滑動而危及住家、道路或其他公共設施等。B 等級之滑動土體應再施予適當的保護措施，以防止地滑發生。

C 等級（危險度 C）：雖具有地滑地形特徵，規模在 100 m 以下，且目前堪稱穩定，即使有人為的環境變化而誘發地滑，尚不致直接影響到重要結構物等。C 等級之滑動土體可暫緩處理，或先施予適當之地表排水，但需加以監測。

依據鑽探岩心判釋、地表地質調查及監測儀器量測結果，綜合研判此區域邊坡滑動的機制。W-5、W-6、W-7 三個主要滑動區中，埋設於 W-7 區的監測儀器量測到該區相對於 W-5 及 W-6 區更為活躍。由於地滑大多均具某些共同特徵，其地貌具有所謂之「地滑地形」，例如在發生地滑邊坡上，其地表常會出現一些裂隙，此等裂隙可分為發生在地滑頂部的張力裂隙，與發生在地滑側面的側面裂隙及發生在地滑趾部的壓力裂隙。綜上資訊，W-5、W-6、W-7 三個主要滑動區根據滑動體危險度準則劃分，其調查結果如表 3 所示，皆屬於危險度 A 等級。

表 3 滑動體危險度等級及活動性調查結果

滑動體編號	危險度等級	滑動體說明	活動性研判
W-5	A	活動中的滑動土體，具明顯的地滑地形特徵，寬度在 400 m 以上。	<ul style="list-style-type: none"> 淺層滑動為緩慢運動中~活潑運動中之間 深層滑動為為緩慢運動中
W-6	A	活動中的滑動土體，具明顯的地滑地形特徵，寬度在 800 m 以上。	<ul style="list-style-type: none"> 深層滑動為為緩慢運動中
W-7	A	活動中的滑動土體，具明顯的地滑地形特徵，寬度在 280 m 以上。	<ul style="list-style-type: none"> 淺層滑動為活潑運動 深層滑動為為緩慢運動中

地電阻調查判釋

針對各個滑動體總計編列 15 孔鑽孔辦理鑽探及取樣試驗，深度共 1,100 公尺並裝設傾度管，以瞭解滑動體深度及滑動特性，另對嘉寶隧道西口活動性較高滑動體，施作地電阻地球物理探測，測線 6 條長度總計 3,650 公尺，配合鑽孔資料綜合評估，連結鑽孔的點資料及地電阻的面資料，套繪出整個範圍的 3D 柵狀圖，以便對滑動體有完整的概念。另外，於適當的地層取標準貫入試驗土樣及岩層之岩心試樣，以獲得設計所需之力學與材料性質參數，及瞭解地下水文分佈及隧道段地層等分佈情形，相關配置詳見圖 9。

地電阻影像剖面探測，測線總長度為 3,650 公尺測線 6 條，編號分別為 RIP-1 ~ RIP-6。

本次地電阻探測成果為提升資料可靠度，除於地表進行露頭電阻值量測，另配合鑽孔編號 BH-3 裝設孔內電極，於孔內直接量測地層電阻率，用以分析比較地表地電阻影像探測成果，以提升資料品質。由各測線電阻率分佈特性推估的崩積層分佈及地下水位面，於圖面中分別以黑色與白色虛線所示，各測線探測成果地質解釋以極 - 偶極排列探測成果為主，並輔以偶極 - 偶極排列探測成果。探查成果剖面及對應地質解釋如圖 10 ~ 16 所示，其中上圖為偶極 - 偶極排列（dd array）探測成果圖；下圖為極 - 偶極排列（pd array）探測成果圖地質解釋圖。茲將地電阻影像探測成果詳述如下^[7]。

● RIP-1 測線成果

圖 10 中顯示表層電阻率多大於 1000 (ohm-m)，研判組成為崩積塊石，地層導電性差，地層電阻率偏高。其中水平距離（70 m ~ 370 m）、（435 m ~ 620 m）為厚

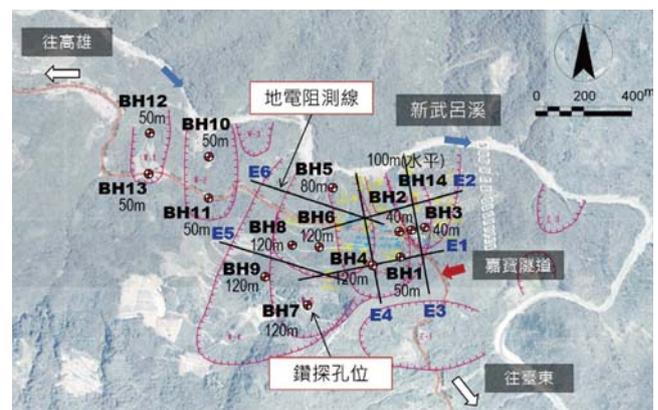


圖 9 鑽孔暨地球物理探查配置圖

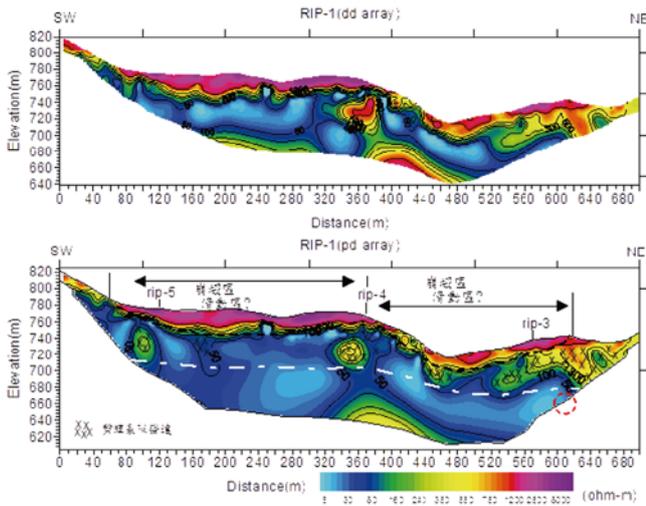


圖 10 測線 RIP-1 探查成果剖面圖

層崩積層，厚度約 28 m 及 15 m，研判為舊崩塌堆積區，大量的塊石可能形成未來崩塌或滑動高潛勢區。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100 (ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中水平距離 90 ~ 110 m、160 ~ 180 m、330 ~ 370 m、440 ~ 470 m、520 ~ 680 m，為裂隙發達區，由淺部往下延伸至高程 700 ~ 720 m，其中 520 ~ 680 m 裂隙延伸至鄰近隧道面。

● RIP-2 測線成果

圖 11 中顯示表層電阻率多介於 400 ~ 1000 (ohm-m)，研判組成崩積塊石夾崩積土。崩積層厚約 10 ~ 12 m。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100

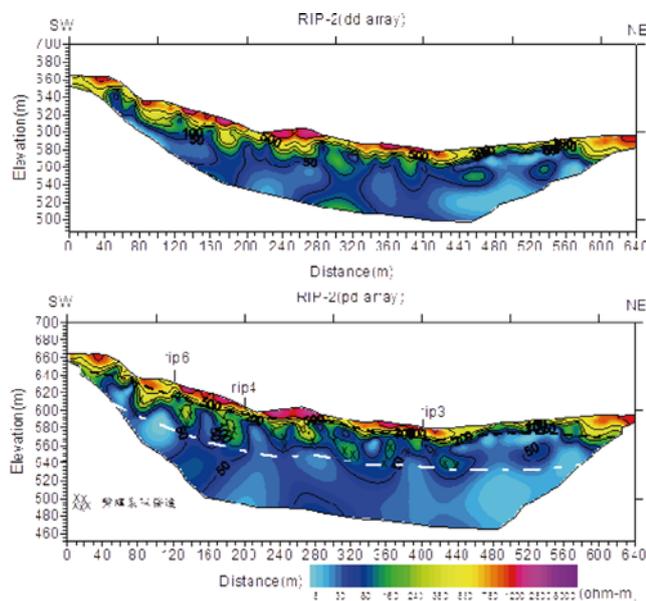


圖 11 測線 RIP-2 探查成果剖面圖

(ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中顯示，探測區域多小裂隙，分佈於水平距離 75 ~ 90 m、125 ~ 145 m、170 ~ 195 m、225 ~ 250 m、260 ~ 285 m、295 ~ 325 m、355 ~ 375 m、415 ~ 440 m，由淺部往下延伸至高程 540 ~ 600 m。

● RIP-3 測線成果

圖 12 依電阻率特徵輔以地質資料解釋，顯示表層電阻率多大於 400 (ohm-m)，研判組成崩積塊石夾崩積土，其中水平距離 320 ~ 510 m 地層電阻率偏高，為厚層崩積塊石，厚度約 28 m，研判為舊崩塌堆積區，大量的塊石可能形成未來滑動高潛勢區。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100 (ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中水平距離 40 ~ 60 m、130 ~ 170 m、220 ~ 285 m、365 ~ 380 m、455 ~ 470 m，為裂隙發達區，其中 130 ~ 170 m 及 220 ~ 285 m 裂隙分別往深部延伸至高程 468 m 及 508 m，研判該處開裂較深。測線約 390 m，高程 650 ~ 660 為隧道位置。

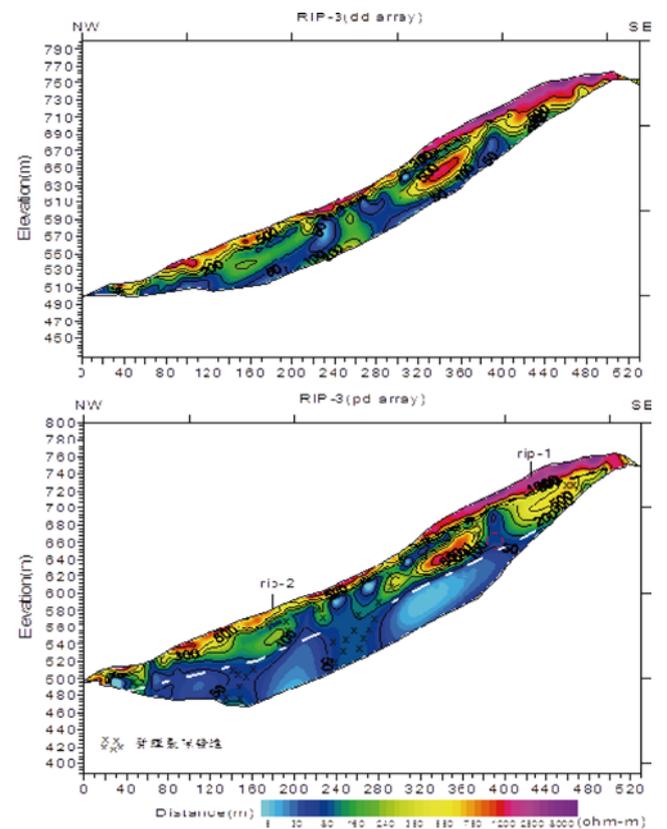


圖 12 測線 RIP-3 探查成果剖面圖

本次探測特於鑽孔 BH-3 施作孔內電阻率量測，鑽孔深度為 60 m，電極間距為 1 公尺，有效探測深度為 58.5 m。鑽孔 BH-3 鄰近測線 RIP-3，藉由孔內與地表探測成果相互比較，更能掌控探測資料可信度。圖 13 為鑽孔 BH-3 孔內電阻率量測與 RIP-3 成果比較圖，圖中顯示地層電阻率對應良好，孔內量測深部電阻率較低，研判為施測時於孔內灌水導致水位面上升所致。

● RIP-4 測線成果

圖 14 顯示表層電阻率多大於 400 (ohm-m)，研判組成為崩積塊石夾崩積土，其中水平距離 240 ~ 510 m 地層電阻率偏高，為崩積塊石，厚度約 8 ~ 10 m。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100 (ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中水平距離 90 ~ 130 m、225 ~ 260 m、280 ~ 320 m、330 ~ 370 m、395 ~ 450 m，為裂隙發達區，其中 90 ~ 130 m 及 280 ~ 320 m 裂隙分別往深部延伸至高程 500 m 及 580 m，研判該處開裂較深。

此外由崩積層厚度變化亦顯示 225 ~ 260 m、280 ~ 320 m、330 ~ 370 m 岩盤有崩滑跡象。

● RIP-5 測線成果

圖 15 中顯示表層電阻率多大於 1000 (ohm-m)，研判組成為崩積塊石，地層導電性差，地層電阻率偏高。其中水平距離 (35 m ~ 255m)、(360 m ~ 600 m) 為厚層崩積層，厚度約 10 ~ 20 m 及 20 ~ 40 m，研判為舊崩塌堆積區，大量的塊石可能形成未來滑動高潛勢區。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100 (ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、

角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中水平距離 55 ~ 80 m、295 ~ 360 m 為裂隙發達區，其中 295 ~ 360 m 由淺部往下延伸至高程 660 m，研判該處開裂較深。

● RIP-6 測線成果

圖 16 顯示表層電阻率多介於 400-1000 (ohm-m)，研判組成為崩積塊石夾崩積土。崩積層厚

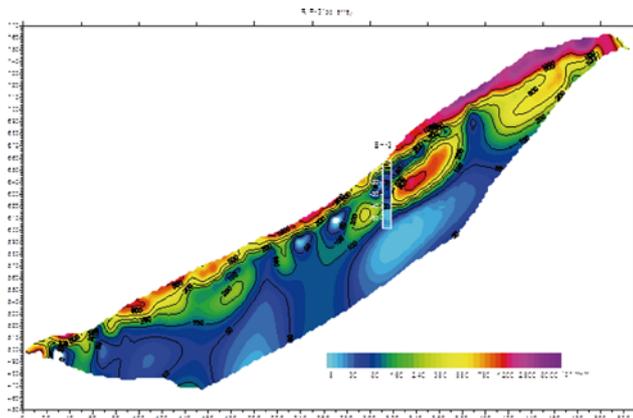


圖 13 BH-3 孔內電阻率量測與 RIP-3 成果比較圖

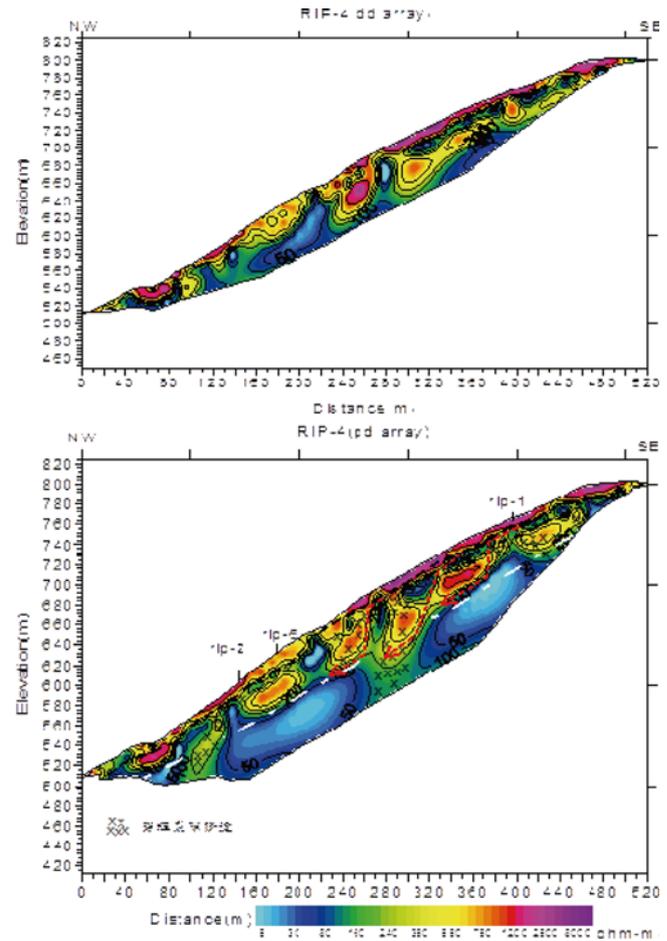


圖 14 測線 RIP-4 探查成果剖面圖

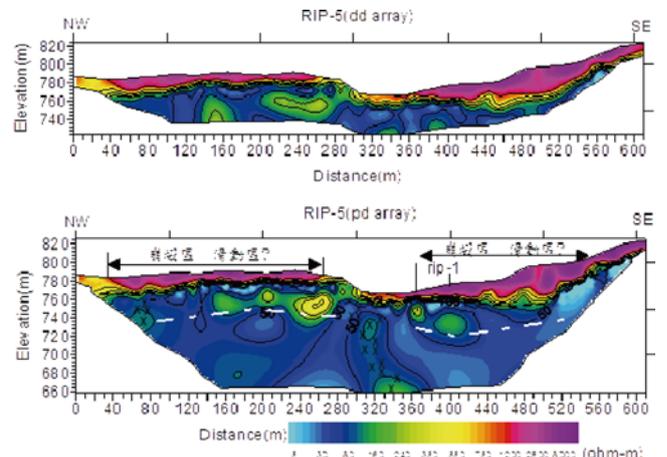


圖 15 測線 RIP-5 探查成果剖面圖

約 10 ~ 12 m。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100 (ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中水平距離 85 ~ 100 m、275 ~ 310 m、340 ~ 435 m、455 ~ 510 m、570 ~ 610 m 為裂隙發達區，由淺部往下延伸至高程 580 m。

● 電阻影像剖面探測成果綜合檢討

將各測線依相對位置繪製如圖 17 柵狀圖，圖中顯示各測線在淺部覆蓋或崩積地層對應較佳，可明顯判釋出覆蓋層厚度，其中在調查區南側或隧道西南側有較厚的崩積層，北側或鄰溪側劈理裂隙發達。另外，調查區北側（鄰溪側）地形低區，覆蓋層較薄，顯示調查區內雖劈理裂隙發達，但並無明顯因崩塌或滑動造成下邊坡有大量土石堆積，顯見由於工址現地邊坡陡峭，北側河川下切作用持續，邊坡受到水及重力影響，有持續位移的情形。

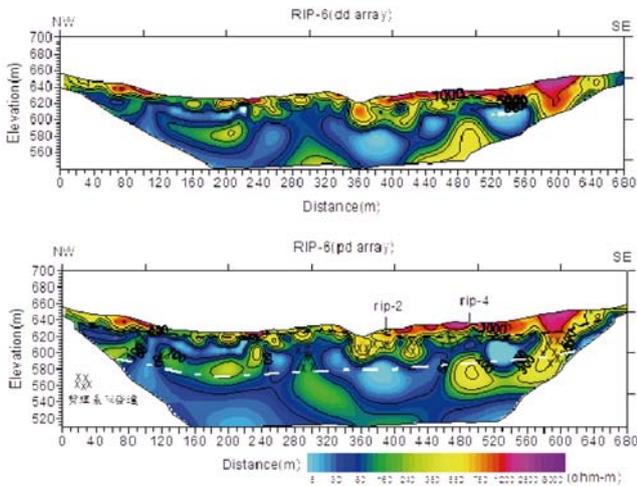


圖 16 測線 RIP-6 探查成果剖面圖

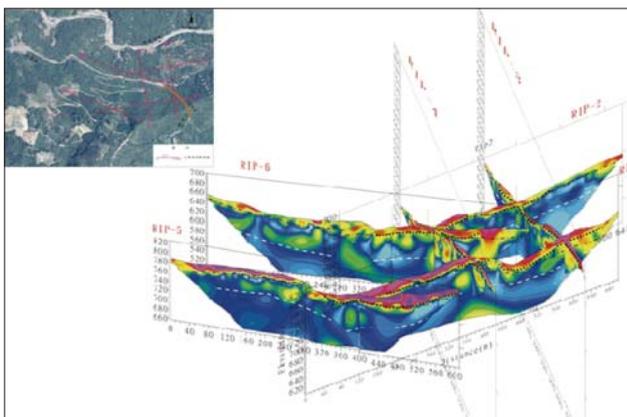


圖 17 各測線彙整柵狀成果圖

● 隧道致災原因探討

依各期鑽探成果，配合地質調查及監測成果報告等彙整，此區域因屬變質岩區，受大地應力影響，褶皺作用發達及包含多組劈理位態，岩體較為破碎。以 BH-3 鑽孔為代表（詳圖 18），隧道西口附近地質於地表下 30 m 處附近岩體較為破碎，30 m 以上岩體銹染情形較明顯，30 m 以下岩體銹染情形較不明顯。

初步評估滑動模式主要係由於河川下切，造成 V 型山谷及河岸解壓所引致，而片岩單壓強度較高，故本區域之邊坡滑動一般均為地表解壓節理造成，如圖 19 所示。然而由於本區之第三紀變質雜岩特性，岩體強度易受風化程度及不連續面影響，岩盤受複雜且強烈之應力擠壓作用，片理面呈現長短波長交錯之褶皺行。推估可能因河川下切、河岸解壓後，風化作用由河岸之自由面逐漸向岩體內部發展，造成研究範圍邊坡之岩體存在深淺不一之裂縫，因而形成大小不一之塊體（如圖 20 所示），相互牽制及推移作用，且各塊體滑移時間並非同時，以致由歷年之監測成果無法繪出如同土層邊坡之滑動層面。

● 後續處理對策

綜整不同致災肇因評估對邊坡位移之影響如表 4，其中河川淘刷坡趾、岩體風化節理發達及地中水壓力影響較劇。經評估嘉寶隧道損壞主要係由邊坡坍塌造成，地滑區範圍廣大，難僅以抗滑樁或擋土牆等工法

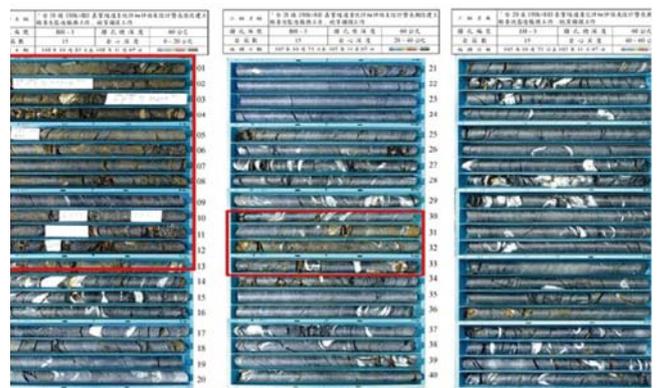


圖 18 BH-3 鑽孔岩心照片 (0 ~ 60 m)



圖 19 河岸淘刷照片



圖 20 滑動塊體推移示意照片

表 4 邊坡滑動肇因評比表

項次	致災肇因	現況調查情形	可能性初步評估
1	河川淘刷坡趾	河岸調查發現有多處淘刷，造成解壓岩體滑落。	中~高
2	岩體風化節理發達	節理發達夾泥，鑽探不迴水時顯示，地下水易於地層中儲存及流竄。	中~高
3	地中水壓力	豪雨或颱風季節集中降雨造成地中水壓力，由相關監測資料研析，此現象明顯。	高
4	順向坡地層	節理及劈理位態與坡度相近，但並無大規模與急速滑動發生。	低~中
5	地表排水不良	除地表裂隙之入滲外，於局部排水溝有雜物阻塞情形。	低
6	地震	近 10 年 4 級以上地震 4 次，現場無異狀，監測資料亦無發現明顯曲線變化。	低

抑止。再由前期監測成果評析，降雨、地下水與地滑關係密切，應以排除災害誘因的地表水及地下水，以減少滲流力產生滑動面之推移作用，減緩嘉寶隧道破壞速率。

地滑的整治工法中，以上邊坡挖方解除土壓及下邊坡回填增加穩定性最易獲得成效，惟本案之邊坡陡峭，挖填不易，故採用對環境影響最小之集水井工法抑制邊坡滑動，相關結構配置及內容說明詳圖 21。另外，從岩心判釋及現地野外露頭調查結果顯示，研究範圍附近的岩盤具有許多的片理及剪裂帶，遇水可



圖 21 邊坡整治排水工法設置

能發生強度降低或變形開裂，故排水極為重要。惟欲徹底阻止水滲入坡體及岩盤極為不易，因此藉由集水井內部鑽設輻射狀排水管，以利豪雨時坡體能迅速排水。施作集水井及橫向集水管應能減緩並抑制地層的持續滑動，減少因邊坡滑動對現有嘉寶隧道的影響。並建議監管單位應對此一地區持續觀測，並尋求長治久安之工程方案，必要時應跨單位配合河川整治及邊坡抑制工程減緩邊坡下滑趨勢。

參考資料

1. 臺灣鐵路管理局，「南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告」，台北 (2008)。
2. 王宗堅、陳淑季，「隧道洞口段工程問題之因應對策與處理研究」國立台灣海洋大學河海工程學系碩士論文 (2003)。
3. 交通部，「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂」，台北 (1998)。
4. 蕭牟淵、游本志、王泰典、蕭興臺，「台灣公路隧道安全檢測及評估之研究」，臺灣公路工程，第 36 卷，第 5 期，第 25 ~ 44 頁 (2009)。
5. 李維峰、張嘉峰、梅興泰、蔡道賜，「地電阻影像剖面探測法於地下工程之應用」，土工技術，第 108 期，第 91 ~ 104 頁 (2006)。
6. 藤原明敏，「地滑解析及防止對策」，理工圖書株式會社，日本 (1979)。
7. 交通部公路總局，「台 20 線 190k+840 嘉寶隧道詳細評估 - 期中報告」，台北 (2014)。

秘書處報告

本學會於 104 年 1 月 16 日已登記更名為社團法人中國土木工程學會



社團法人
中國土木工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

電話：(02) 2392-6325
傳真：(02) 2396-4260
e-mail: service@ciche.org.tw

歡迎加入學會

一個凝聚產官學土木專業知識的團體
一個土木人務必加入的專業學術團體
一個國際土木組織最認同的代表團體
一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體



http://www.ciche.org.tw
請上網下載入會申請表