



交通部台灣鐵路管理局

南迴線金崙等七座隧道安全檢測 評估報告

台東工務段

中華民國九十七年六月

目 錄

	頁次
目 錄	I
表目錄	IV
圖目錄	VII
前 言	XI
第一章 緒論	1-1
1.1 計畫緣起	1-1
1.2 工作項目及內容	1-1
1.2.1 現場檢測調查	1-1
1.2.2 檢測資料處理、判釋與安全評估	1-1
1.2.3 補強方案規劃設計	1-4
1.3 報告內容	1-4
第二章 相關資料蒐集彙整	2-1
2.1 地理位置及地形	2-1
2.1.1 地理位置	2-1
2.1.2 地形	2-3
2.2 地質概述	2-4
2.2.1 地層	2-5
2.2.2 構造	2-5
2.3 氣象、水文與土石流	2-6
2.3.1 氣象	2-6
2.3.2 水文	2-7
2.3.3 土石流	2-8
2.4 地震	2-10
2.5 隧道基本資料	2-11
2.5.1 隧道施工方法簡介	2-12
2.5.2 金崙隧道	2-14
2.5.3 多良一號隧道	2-17

2.5.4	大竹二號隧道	2-19
2.5.5	大竹一號隧道	2-20
2.5.6	大鳥隧道	2-21
2.5.7	大武二號隧道	2-23
2.5.8	安朔隧道	2-25
第三章 現場檢測與資料處理判釋		3-1
3.1	地電阻影像剖面探測 (RIP)	3-1
3.1.1	野外作業說明	3-1
3.1.2	資料處理	3-3
3.1.3	成果評估	3-13
3.2	中線測量	3-14
3.3	隧道內橫斷面淨空測量	3-17
3.4	地表現場勘查	3-20
3.5	裂縫、滲水之調查 (攝影及測繪)	3-25
3.5.1	GRP5000 隧道影像掃描	3-25
3.5.2	目視檢查	3-28
3.6	隧道襯砌及背後空洞調查	3-38
3.6.1	透地雷達野外作業說明	3-38
3.6.2	透地雷達資料處理	3-39
3.6.3	透地雷達成果評估	3-40
3.6.4	敲擊回音檢測野外作業說明	3-49
3.6.5	敲擊回音檢測資料處理	3-52
3.6.6	敲擊回音檢測成果評估	3-53
3.7	裂縫寬度與深度探查	3-55
3.7.1	野外作業說明	3-55
3.7.2	資料處理及成果	3-56
3.7.3	資料評估	3-58
3.8	混凝土強度錘試驗	3-59
3.8.1	野外作業	3-59
3.8.2	資料處理成果及研判	3-60
3.9	隧道鑽孔探查、取樣及室內抗壓強度試驗	3-59
3.9.1	鑽孔探查及取樣	3-67

3.9.2	室內抗壓強度試驗	3-67
3.10	混凝土中性化試驗	3-72
3.11	水質取樣及定性分析	3-75
3.11.1	水質取樣、分析方法與結果	3-75
3.11.2	水質分類	3-77
3.11.3	水質腐蝕性評估	3-79
第四章	隧道安全評估	4-1
4.1	隧道異狀種類及原因	4-1
4.2	評估標準	4-9
4.3	評估方法	4-14
4.4	評估結果	4-14
第五章	結論與建議	5-1
參考文獻		

表目錄

	頁次
表 1.2-1 本案工作項目及工作內容說明表 (1/2)	1-3
表 1.2-1 本案工作項目及工作內容說明表 (2/2)	1-4
表 2.1-1 各隧道區間里程及長度總表	2-1
表 2.3-1 2000~2006 年台東大武測站降雨量統計表	2-6
表 2.3-2 2000~2006 年對本工程影響性較大之颱風統計表	2-7
表 2.3-3 鄰近隧道洞口之土石流列表	2-9
表 2.4-1 計畫區域內較大震度地震一覽表	2-10
表 2.5-1 隧道地質破壞模式說明表	2-11
表 2.5-2 隧道營運里程與施工里程對照表	2-12
表 2.5-3 新奧工法支撐系統型式表	2-13
表 2.5-4 金崙隧道地質條件總表	2-15
表 2.5-5 金崙隧道施工工法配置表	2-16
表 2.5-6 金崙隧道施工階段特殊區段災變位置及描述	2-17
表 2.5-7 多良一號隧道地質條件總表	2-18
表 2.5-8 多良一號隧道施工工法及施工過程說明	2-19
表 2.5-9 大竹二號隧道地質條件總表	2-20
表 2.5-10 大竹一號隧道地質條件總表	2-21
表 2.5-11 大鳥隧道地質條件總表	2-22
表 2.5-12 大鳥隧道施工階段特殊區段災變位置及描述	2-23
表 2.5-13 大武二號隧道地質條件總表	2-24
表 2.5-14 大武二號隧道施工階段特殊區段災變位置及描述	2-24
表 2.5-15 安朔隧道地質條件總表	2-25
表 2.5-16 安朔隧道施工階段災變位置及描述 (1/4)	2-26

表 2.5-16	安朔隧道施工階段災變位置及描述 (2/4)	2-27
表 2.5-16	安朔隧道施工階段災變位置及描述 (3/4)	2-28
表 2.5-16	安朔隧道施工階段災變位置及描述 (4/4)	2-29
表 3.1-1	地電阻影像剖面測線位置及探測目的說明表	3-1
表 3.1-2	疑似危害區說明表	3-4
表 3.4-1	隧道洞門型式及邊坡保護工法	3-21
表 3.6-1	透地雷達數量說明表	3-39
表 3.6-2	透地雷達劣化影像說明表	3-40
表 3.6-3	透地雷達縱向施測成果表 (1/3)	3-41
表 3.6-3	透地雷達縱向施測成果表 (2/3)	3-42
表 3.6-3	透地雷達縱向施測成果表 (3/3)	3-43
表 3.6-4	透地雷達橫向施測成果表 (1/3)	3-44
表 3.6-4	透地雷達橫向施測成果表 (2/3)	3-45
表 3.6-4	透地雷達橫向施測成果表 (3/3)	3-46
表 3.6-5	南迴鐵路隧道敲擊回音檢測位置及成果表	3-50
表 3.7-1	南迴鐵路隧道超音波檢測結果表	3-57
表 3.8-1	史密特錘現場施作成果表 (1/5)	3-61
表 3.8-1	史密特錘現場施作成果表 (2/5)	3-62
表 3.8-1	史密特錘現場施作成果表 (3/5)	3-63
表 3.8-1	史密特錘現場施作成果表 (4/5)	3-64
表 3.8-1	史密特錘現場施作成果表 (5/5)	3-65
表 3.9-1	混凝土鑽心取樣及抗壓試驗結果 (1/3)	3-68
表 3.9-1	混凝土鑽心取樣及抗壓試驗結果 (2/3)	3-69
表 3.9-1	混凝土鑽心取樣及抗壓試驗結果 (3/3)	3-70
表 3.10-1	混凝土中性化成果表	3-73
表 3.11-1	水質物理性質檢測成果表	3-76

表 3.11-2	水質化學性質檢測成果表	3-77
表 3.11-3	水質檢測結果與混凝土腐蝕標準檢核表	3-80
表 4.1-1	隧道異狀原因分類表(譯自日本土木學會，2002)	4-1
表 4.1-2	塑性壓、鬆動土壓與偏壓之代表性異狀(譯自日本土木學會，2003)....	4-4
表 4.1-3	隧道異狀損害模式彙整表(黃燦輝等，2006年)(1/2)	4-7
表 4.1-3	隧道異狀損害模式彙整表(黃燦輝等，2006年)(2/2)	4-8
表 4.2-1	隧道安全等級分類與評估標準(黃燦輝與鄭富書，1997)	4-9
表 4.2-2	因外力變化產生異狀之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997)	4-10
表 4.2-3	裂縫寬度變形速率之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997)	4-10
表 4.2-4	龜裂有進展性時之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997).....	4-11
表 4.2-5	龜裂無進展性時之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997).....	4-11
表 4.2-6	襯砌混凝土之浮起與剝落之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997)	4-11
表 4.2-7	因襯砌材質劣化產生異狀之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997)	4-12
表 4.2-8	無法確認異狀是否有進展性時之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997)..	4-12
表 4.2-9	因漏水產生異狀之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997).....	4-13
表 4.2-10	漏水部位與程度對行車影響之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997)...	4-13
表 4.4-1	南迴線金崙等七座隧道安全等級統計表	4-14
表 4.4-2	南迴線金崙等七座隧道安全等級統計表	4-14
表 4.4-3	隧道安全等級丁級之里程區間統計表	4-15

圖目錄

	頁次
圖 1.2-1 各階段工作項目及作業流程圖	1-2
圖 2.1-1 南迴線金崙隧道至安朔隧道地理位置圖	2-2
圖 2.1-2 地形圖	2-3
圖 2.2-1 區域地質圖	2-4
圖 2.3-1 颱風侵台路徑圖(中央氣象局).....	2-6
圖 2.3-2 水系圖	2-8
圖 2.3-3 鄰近隧道洞口之土石流分佈位置圖	2-10
圖 2.4-1 本計畫區域震度 4 以上之震央分佈圖	2-11
圖 2.5-1 單線隧道美國鋼支保工法標準斷面圖	2-16
圖 2.5-2 單線隧道新奧工法標準斷面圖	2-16
圖 2.5-3 雙線隧道美國鋼支保工法標準斷面圖	2-26
圖 2.5-4 雙線隧道新奧工法標準斷面圖	2-26
圖 3.1-1 大武二號隧道 RIP 施做位置示意圖	3-2
圖 3.1-2 大鳥隧道 RIP 施做位置示意圖	3-2
圖 3.1-3 多良一號隧道 RIP 施做位置示意圖	3-2
圖 3.1-4 節點盒及電探儀	3-3
圖 3.1-5 大武二號隧道 RIP 電壓降曲線圖	3-5
圖 3.1-6 大鳥隧道海側 RIP 電壓降曲線圖	3-5
圖 3.1-7 大鳥隧道山側 RIP 電壓降曲線圖	3-6
圖 3.1-8 多良一號隧道 RIP 電壓降曲線圖	3-6
圖 3.1-9 大武二號隧道 RIP 視電阻擬似剖面圖	3-7
圖 3.1-10 大鳥隧道海側 RIP 視電阻擬似剖面圖	3-7
圖 3.1-11 大鳥隧道山側 RIP 視電阻擬似剖面圖	3-8

圖 3.1-12	多良一號隧道 RIP 視電阻擬似剖面圖	3-8
圖 3.1-13	大武二號隧道 RIP 地質剖面示意圖	3-9
圖 3.1-14	大鳥隧道海側 RIP 地質剖面示意圖	3-9
圖 3.1-15	大鳥隧道山側 RIP 地質剖面示意圖	3-10
圖 3.1-16	多良一號隧道 RIP 地質剖面示意圖	3-10
圖 3.1-17	大武二號隧道 RIP 模型成果圖	3-11
圖 3.1-18	大鳥隧道海側 RIP 模型成果圖	3-11
圖 3.1-19	大鳥隧道山側 RIP 模型成果圖	3-12
圖 3.1-20	多良一號隧道 RIP 模型成果圖	3-12
圖 3.2-1	中線測量現場作業照片	3-14
圖 3.2-2	中線測量現場標樁	3-14
圖 3.2-3	多良一號隧道中線測量平面圖	3-15
圖 3.2-4	多良一號隧道中線測量縱斷面圖	3-16
圖 3.2-5	多良一號隧道縱坡示意圖 (竣工圖)	3-17
圖 3.3-1	隧道橫斷面淨空點位座標量測成果範例	3-18
圖 3.3-2	隧道橫斷面淨空測繪成果範例	3-19
圖 3.3-3	隧道橫斷面淨空測量與電化淨空套繪成果範例	3-19
圖 3.4-1	隧道洞口現況照片 (1/4).....	3-22
圖 3.4-1	隧道洞口現況照片 (2/4).....	3-23
圖 3.4-1	隧道洞口現況照片 (3/4).....	3-24
圖 3.4-1	隧道洞口現況照片 (4/4).....	3-25
圖 3.5-1	GRP5000 隧道影像掃描系統	3-26
圖 3.5-2	隧道影像掃描現場作業照片	3-26
圖 3.5-3	隧道影像掃描成果範例	3-27
圖 3.5-4	隧道影像展示軟體 GRP RAILCLOUD VIEWER 展示範例	3-28
圖 3.5-5	隧道影像掃描與判釋成果範例 (轉繪成 AUTOCAD 圖檔).....	3-29
圖 3.5-6	金崙隧道內襯砌現況及說明	3-30

圖 3.5-7	金崙隧道橫坑現況及說明	3-31
圖 3.5-8	多良一號隧道內襯砌現況及說明	3-32
圖 3.5-9	大竹二號隧道內襯砌現況及說明	3-33
圖 3.5-10	大竹一號隧道內襯砌現況及說明	3-34
圖 3.5-11	大鳥隧道內襯砌現況及說明	3-35
圖 3.5-12	大武二號隧道內襯砌現況及說明	3-36
圖 3.5-13	安朔隧道內襯砌現況及說明	3-37
圖 3.6-1	GPR 主機及現場施測照片	3-38
圖 3.6-2	透地雷達基本探測說明圖	3-39
圖 3.6-3	各隧道透地雷達檢測成果圖 (1/2).....	3-48
圖 3.6-3	各隧道透地雷達檢測成果圖 (2/2).....	3-49
圖 3.6-4	敲擊回音儀器及現場施作照片	3-52
圖 3.6-5	各隧道敲擊回音檢測成果圖	3-55
圖 3.7-1	裂縫深度及寬度檢測實況	3-56
圖 3.7-2	超音波裂縫深度檢測原理	3-56
圖 3.7-3	超音波裂縫深度分析圖	3-58
圖 3.8-1	PROCEQ 公司 L-TYPE 史密特錘	3-59
圖 3.8-2	史密特錘檢測說明	3-59
圖 3.8-3	史密特錘原廠數值代換圖	3-60
圖 3.8-4	各隧道史密特錘檢測成果圖	3-66
圖 3.9-1	鑽心取樣現場作業照片	3-67
圖 3.9-2	各隧道混凝土鑽心抗壓試驗分析圖	3-71
圖 3.10-1	混凝土中性化試驗成果(範例).....	3-72
圖 3.10-2	各隧道中性化試驗結果圖	3-74
圖 3.11-1	水質採樣及物性分析儀器照片	3-75
圖 3.11-2	水質物性分析結果圖	3-76
圖 3.11-3	PIPER 水質分類圖	3-78

圖 3.11-4	水質腐蝕性分析圖	3-81
圖 4.1-1	隧道異狀原因關係圖(改繪自日本土木學會, 2003)	4-2
圖 4.1-2	隧道襯砌破裂模式示意圖(改繪自劉啟川, 2006)	4-5
圖 4.1-3	隧道襯砌因外力變化產生之異狀特徵	4-5
圖 4.1-4	隧道襯砌劣化之物理及化學機制(改繪自 MEHTA & MONTEIRO,1993)	4-6
圖 4.1-5	環境、材料及施工等因素之隧道異狀(改繪自日本鐵道總合技 術研究所, 1998)	4-6
圖 4.2-1	滲漏水程度狀態示意圖(黃燦輝與鄭富書, 1997)	4-14
圖 5-1	襯砌起拱線以上局部剝落填補示意圖 (TYPE A1).....	5-2
圖 5-2	襯砌起拱線以下局部剝落填補示意圖 (TYPE A2).....	5-2
圖 5-3	襯砌鋼板補強示意圖 (TYPE A3)	5-2
圖 5-4	襯砌碳纖維網補強示意圖 (TYPE A4)	5-3
圖 5-5	襯砌裂縫補強(止水)灌漿示意圖 (TYPE B1)	5-3
圖 5-6	岩栓補強工法示意圖 (TYPE B2)	5-4
圖 5-7	固結灌漿補強工法示意圖 (TYPE B3)	5-4
圖 5-8	施工縫止水工法示意圖 (TYPE C1)	5-4
圖 5-9	側壁單排導水工法示意圖 (TYPE C2).....	5-5
圖 5-10	施工縫導水工法示意圖 (TYPE C3)	5-5
圖 5-11	導水版導水工法示意圖 (TYPE C4)	5-5
圖 5-12	背填灌漿工法示意圖 (TYPE D1).....	5-6
圖 5-13	鋼肋補強工法示意圖 (TYPE D2).....	5-6

前 言

本段轄內南迴鐵路，其隧道佔整體路線總長約百分之三十九，全長為 24,942 公尺，興建時大多採用傳統工法，而其建齡皆已逾 20 年，且因此路段皆位於沿海，長期遭受侵蝕性特強之海風摧殘，加上近年來發生多次大地震及大颱風承受了異於平常的邊坡滑動及偏壓等外力作用，故南迴隧道群之狀況實可謂“先天不良，且後天失調”，為保行車安全，必須立刻著手改善，進行維修補強或改建。然對老舊交通隧道而言，仍須維持鐵路原有之運輸營運需求，基於經費有限及環境等因素之考量，將與一般隧道新建工程不同。如何考量利用既有隧道支撐及襯砌，減少對隧道開挖面之擾動，且達到節省工期，亦為補強隧道之設計及施工另一考量重點。

為達成以最少經費、最短工期，完成最有效之改善措施，本段決定針對 7 座狀況較差之隧道進行全面性之安全評估及安全檢測，並以數值分析方法研究隧道之影響，進而考慮日後隧道設計及施工補強之重點。其實隧道安全檢測工作類似於身體健康檢查，其目的主要在於早期發覺異狀，及早找出病因(調查)，以利對症下藥(評估及維修)，使身體恢復健康。本勞務採購案在本段段長陳主安、副段長楊志斌、施工主任宋建龍及主辦工程司陳志榮努力下，已於 97 年 7 月 27 日由聯合大地工程顧問股份有限公司如期完成現場檢測報告。本段為傳承經驗，追求精進，爰將資料整理，以作借鑑，惟資料浩繁，掛漏殊多，尚請各位先進，惠予指正。

第一章 緒論

1.1 計畫緣起

台灣鐵路管理局(以下簡稱 貴局)台東工務段發現南迴鐵路之金崙、多良一號、大竹二號、大竹一號、大鳥、大武二號及安朔等 7 座長大隧道內有多處裂縫、滲水、襯砌剝落等異狀。為避免上述隧道異狀持續惡化進而影響列車行車安全，委請聯合大地工程顧問股份有限公司(以下簡稱本公司)針對南迴線金崙等 7 座隧道進行安全檢測與改善設計。

本公司於契約簽訂正式開工後，隨即動員公司曾參與南迴鐵路長大隧道現場地質顧問工作之地質師、南迴線枋野一號、枋野二號、安朔三號、加津林、多良一號等隧道營運階段襯砌安全檢測人員、北迴線和仁、清水、崇德等隧道檢測調查及改善設計人員、北迴線蘇澳－南澳間原有隧道檢測調查及改善設計人員以及台北捷運隧道全線 60.5 公里之維護檢測及安全評估人員，進行本案之現場檢測調查、檢測資料處理、判釋與安全評估，現提出成果報告書如后。

1.2 工作項目及內容

本案工作主要可概分為三大部分：(一)現場檢測調查；(二)檢測資料處理、判釋與安全評估；(三)補強方案規劃設計。各階段工作項目及作業流程如圖 1.2-1 所示並概述如下。

1.2.1 現場檢測調查

現場檢測調查之工作項目及工作內容重點如表 1.2-1 所示。

1.2.2 檢測資料處理、判釋與安全評估

1. 檢測資料處理與判釋

就高度精密儀器(GRP 5000、GPR、超音波儀等)對隧道裂縫、滲水、白華及剝落等異狀之影像及測繪紀錄資料進行解析、研判及解釋比對，並依里程清楚標示裂縫、滲水、白華及剝落等於隧道影像掃描與判釋展開圖中。

2. 隧道安全評估

根據前階段隧道裂縫、滲水、白華及剝落等異狀之檢測判釋成果，探討隧道發生異狀之原因，並依此進行隧道整體穩定性之安全評估。

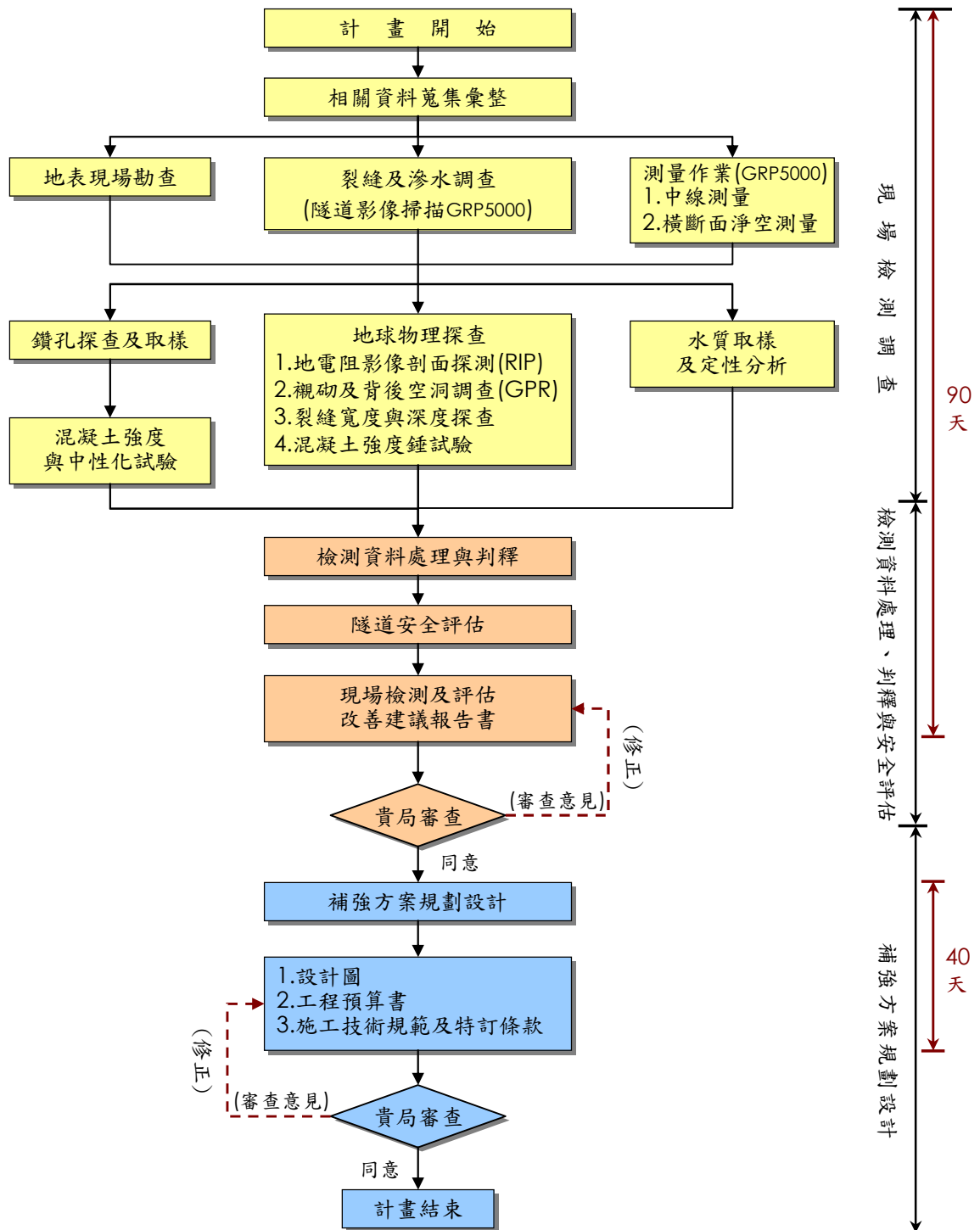


圖 1.2-1 各階段工作項目及作業流程圖

表 1.2-1 本案工作項目及工作內容說明表 (1/2)

項次	工作項目	數量	工作內容
一	現場檢測調查	—	—
1	相關資料蒐集	1 式	(1)相關興建歷史。 (2)基本地質資料。 (3)其他可供參考資料。
2	地電阻影像剖面探測(RIP)	1,000m	(1)施測方式：以雙極排列方式進行現地施測。 (2)測點間距：5m。 (3)報告內容：地電阻影像剖面探測電壓降曲線圖、地質剖面示意圖、視電阻率彩色擬似剖面圖及地電阻彩色影像剖面。
3	中線測量(僅施作於多良一號隧道)	1,649m	(1)施測方式：利用經緯儀及水準儀量測鐵軌中心線之座標及高程。 (2)測點間距：原則上每 100m 設置標樁，變化區段得加設標樁。 (3)報告內容：鐵軌中心線平面及縱斷面圖。
4	隧道內橫斷面淨空測量	383 處	(1)施測方式：採用 Leica GRP5000 隧道影像掃描系統進行隧道斷面淨空量測。 (2)測點間距：原則上每 50m 施測，變化區段得加測之。 (3)報告內容：隧道橫斷面淨空測繪圖。
5	地表現場勘查	7 處	(1)勘查範圍：以隧道洞口及淺覆蓋段為主。 (2)勘查項目：地形、地貌、植被、岩層露頭、水系及周邊交通。
6	裂縫、滲水之調查(攝影及測繪)	19,046m	(1)調查方式：採用 Leica GRP5000 進行隧道影像掃描。 (2)調查項目：滲水及裂縫位置調查、目視檢查。
7	隧道襯砌及背後空洞調查	3,650m	(1)調查方式：以透地雷達探查為主，敲擊回音為輔。 (2)調查原則：於異狀嚴重區段，施測隧道頂拱及橫斷面位置。
8	裂縫寬度與深度探查	20 處	探查方式：採用裂縫尺與超音波儀進行探查。
9	混凝土強度試驗 錘試驗	204 處	(1)試驗方式：史密特錘試驗。 (2)試驗原則：針對異狀嚴重區段，於隧道側壁或頂拱位置試驗。
10	鑽孔探查及取樣	94 組	(1)鑽孔尺寸：鑽孔尺寸原則上採 NX 型式，混凝土鑽心直徑不小於 50mm。 (2)取樣原則：針對異狀嚴重區段取樣。 (3)處理原則：取樣之試體施作混凝土中性化及室內抗壓強度試驗各一組。
11	室內抗壓強度試驗	94 組	(1)試驗方式：依 CNS1238 A3051 規定，進行混凝土鑽心試體抗壓強度試驗。 (2)試驗成果：正式檢驗報告、試驗過程與破壞形式。

表 1.2-1 本案工作項目及工作內容說明表 (2/2)

項次	工作項目	數量	工作內容
12	混凝土中性化試驗	94 組	(1)試驗方式：採用酚酞酒精溶液指示劑進行檢測。 (2)試驗成果：正式檢驗報告、試驗過程與結果。
13	水質取樣及定性分析	15 組	(1)調查項目：外觀、pH 值、導電度、溫度、陰離子含量、陽離子含量。 (2)調查成果：正式檢驗報告。
二	檢測資料處理判釋與安全評估	一式	(1)就 Leica GRP5000 隧道影像掃描資料，針對裂縫、滲水、白華及剝落等異狀，進行解析、研判及解釋比對。並依里程清楚標示裂縫、滲水、白華及剝落位置於隧道影像掃描與判釋展開圖中。 (2)隧道整體穩定性之安全評估。
三	補強方案規劃設計	一式	隧道改善措施規劃設計。

1.2.3 補強方案規劃設計

首先利用第一階段之檢測資料處理與判釋成果，探討隧道異狀發生原因，並根據各異狀種類(或原因)以及第一階段之隧道安全評估成果，提出具體補強方案、規劃及設計，以供 貴局發包施作。

1.3 報告內容

本計畫報告內容共分為五大章節：第一章為緒論，敘述本計畫之源起、工作項目及內容等；第二章為相關資料蒐集彙整，介紹本計畫範圍施作隧道之地理位置、地形、地質概況、氣象條件、水文條件、土石流資料、地震資料以及隧道基本資料；第三章為現場檢測與資料處理判釋，包括 RIP、中線測量、隧道淨空測量、地表勘查、襯砌異狀調查、史密特錘試驗、鑽孔探查、抗壓強度試驗、混凝土中性化試驗以及現地水質調查之各項檢測與判釋結果；第四章為隧道安全評估，主要參考交通部委託國立台灣大學土木工程研究所進行「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，將本計畫隧道安全性分為甲、乙、丙、丁四個等級；第五章為結論與建議，根據前述章節之各項成果，作出結論並研擬建議方案。

第二章 相關資料蒐集彙整

2.1 地理位置及地形

2.1.1 地理位置

本計畫係針對南迴鐵路之金崙、多良一號、大竹二號、大竹一號、大鳥、大武二號及安朔共 7 座長大隧道進行安全檢測與評估，全區路線橫跨台東縣太麻里鄉、大武鄉及達仁鄉，東臨太平洋，西與屏東縣以中央山脈相隔，其地理位置詳見圖 2.1-1。各隧道區間里程及長度如表 2.1-1 所示，惟實際隧道影像掃描里程請詳見附冊一隧道影像掃描、判釋、現場檢測資料暨安全等級成果圖。

表 2.1-1 各隧道區間里程及長度總表

項次	隧道名稱	營運里程		長度(m)	備註
1	金崙	64K+127	68K+519	4,392	單線
2	多良一號	58K+967	60K+616	1,649	單線 (北口 80m 雙線)
3	大竹二號	55K+807	57K+043	1,236	單線
4	大竹一號	53K+513	54K+965	1,452	單線
5	大鳥	46K+145	49K+797	3,652	單線
6	大武二號	44K+018	45K+199	1,181	單線
7	安朔	32K+649	38K+130	5,481	雙線
七座隧道合計長度 19,043 公尺					

註：表中各隧道營運里程係 貴局台東工務段提供。



圖 2.1-1 南迴線金崙隧道至安朔隧道地理位置圖

2.1.2 地形

本計畫區內地形以山坡丘陵為主，地形陡峻，鄰近山脈標高 200~1000 公尺不等，全區嶺線大致成東西走向，高度均自西向東遞減至海岸附近，嶺線末端受三角形切面所限，坡度急遽下降，直逼海岸。各嶺線的高度亦有北高南低的趨勢，大鳥山以北之嶺線高度常在海拔七百公尺以上，大鳥山以南的高度逐漸下降至五百公尺左右，地形漸趨平緩。各嶺線間為東西走向之溪流所隔，在各溪的河口處，發育成規模不一的三角洲，成為本區僅有的平地，人口及農業均集中在此。詳細地形詳見圖 2.1-2。

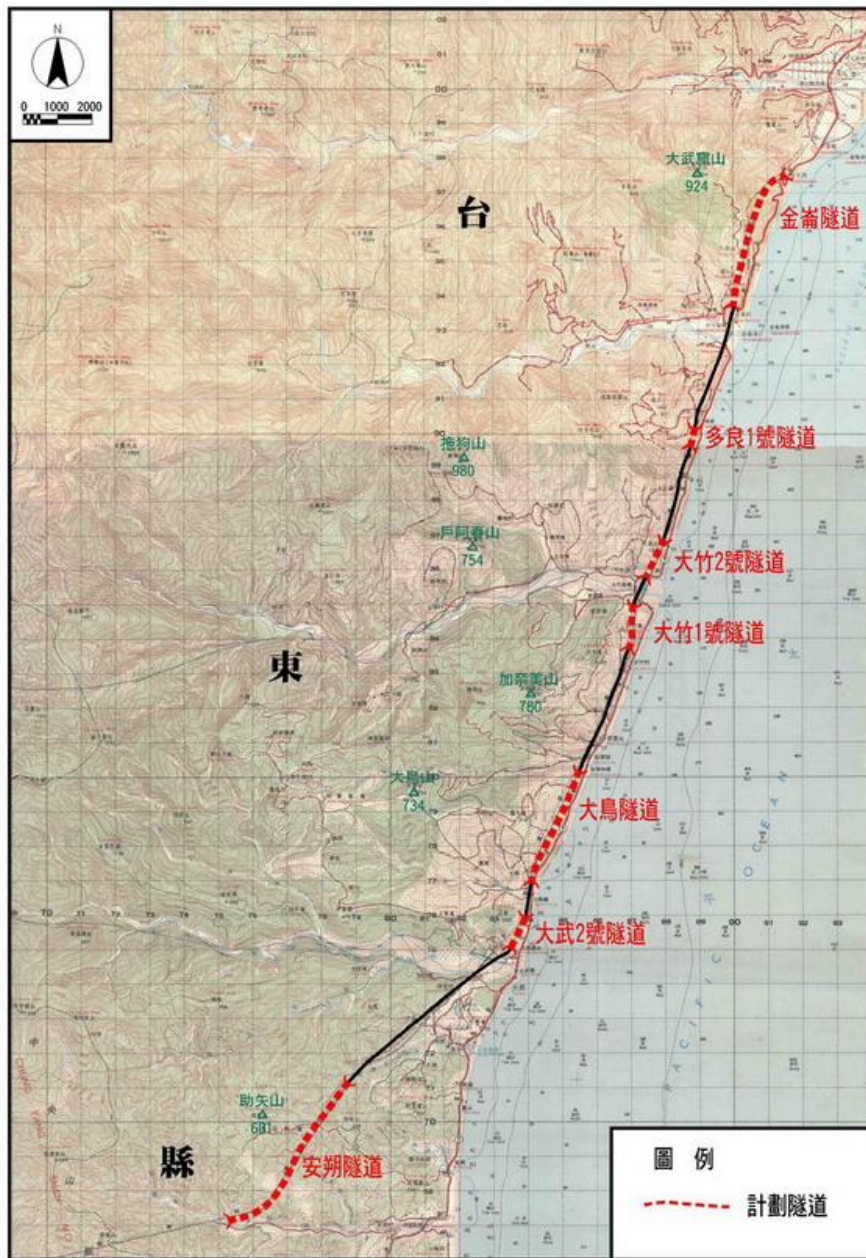


圖 2.1-2 地形圖

2.2 地質概述

本計畫沿線之區域地質圖如圖 2.2-1 所示，並分述如后。

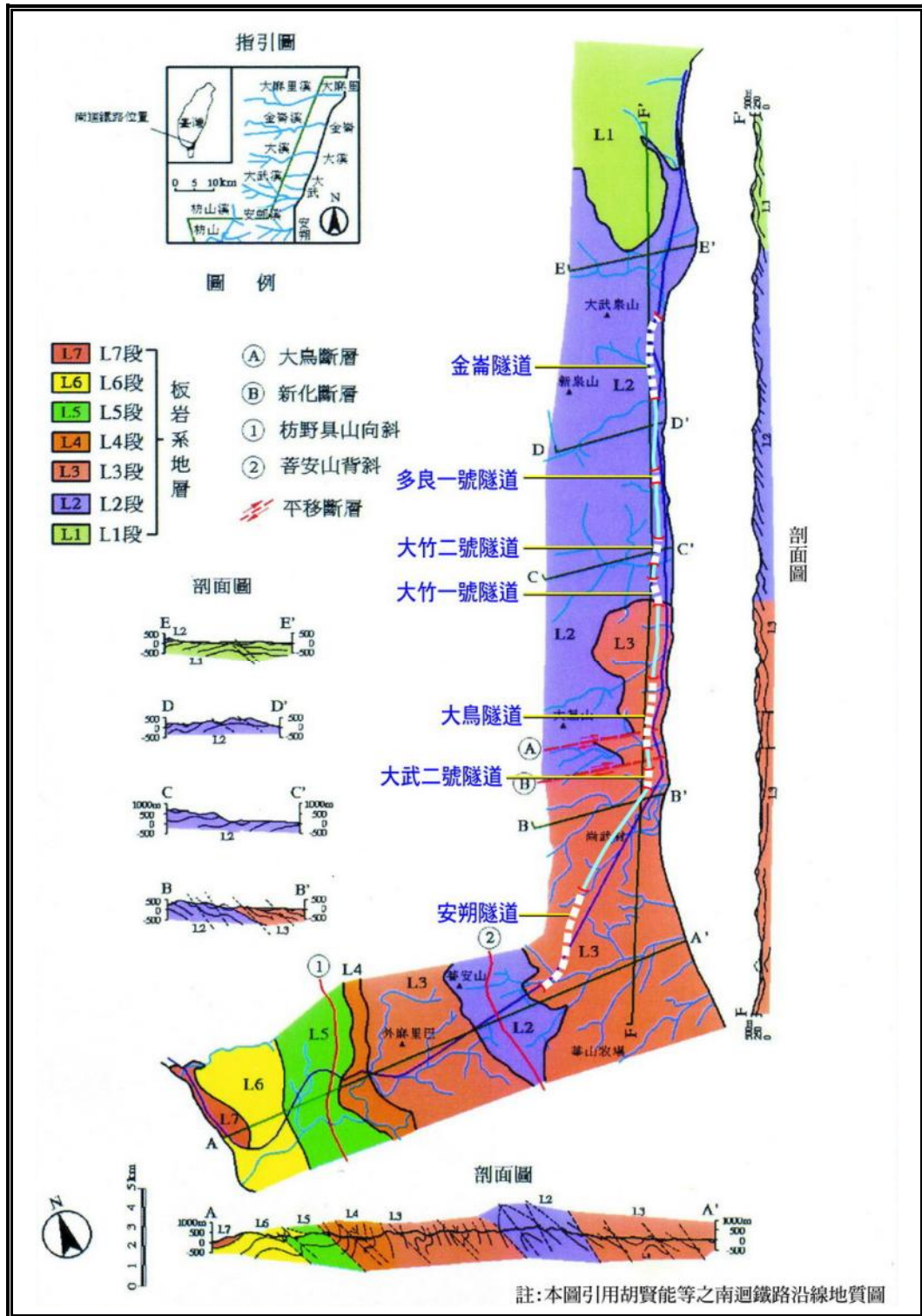


圖 2.2-1 區域地質圖

2.2.1 地層

依據「南迴鐵路工程-工程輯要」報告中，其將南迴鐵路沿線地層劃分為七個岩段，而本計畫路線範圍內之地層為第二岩段(L2)及第三岩段(L3)。

1. 第二岩段(L2)

整合覆蓋於第一岩段之上，分佈範圍從香蘭至大溪地區、大武溪中及上游地區、以及菩安山背斜軸附近地區，由於分佈廣，岩性在各地略有變異。於菩安山背斜軸附近出露的岩層，屬於本段上部，主要由厚塊狀硬頁岩或板岩及少數厚層變質砂岩所組成。硬頁岩由粉砂質泥岩輕微變質而來，時夾有薄紋狀細砂岩，質地堅硬有劈理面發育。變質砂岩以層狀細至中粒砂岩為主，夾薄層硬頁岩或板岩，有時單一砂岩層底部有礫石及泥粒出現，且顆粒越往上越細。變質砂岩厚度可達百公尺以上，出露於大武溪，且相當於上述層位之岩層，其所含之變質砂岩量有顯著的增加。再往北至金崙溪，變質砂岩含量最高，厚度亦增大，有時可達兩百公尺以上。此段下部常有雜砂岩出現，薄層次雜砂岩與影頁岩成互層狀，常具級層沈積構造。次雜砂岩內亦具有變質造成之片理結構。

2. 第三岩段(L3)

本段出露於菩安山背斜之東、南、西三側，也以整合關係覆蓋圍繞著出露位於軸部位置的第二岩段。此段與第二岩段的分界在於一厚層變質砂岩，岩層幾全由硬頁岩所組成，只有少許變質砂岩夾雜於其中。硬頁岩劈理不甚發達，新鮮時呈灰黑色、塊狀、緻密，風化後表面受鐵銹染成褐色，也常出現洋蔥狀剝理構造。

2.2.2 構造

本計畫區域之主要地質構造由南而北包括菩安山背斜、新化斷層及大鳥斷層。菩安山背斜由數個較小的倒轉褶皺所組成，其本身亦為一倒轉褶皺，只不過範圍較廣。新化斷層及大鳥斷層均為右移斷層，其斷面走向約為東西向。菩安山背斜位於安朔隧道之西方約 3 公里處，新化斷層於大武二號隧道出口北方約 2 公里處通過，大鳥斷層則通過大鳥隧道，其構造性質說明如下：

1. 菩安山背斜

此背斜由數個背斜及向斜褶皺所組成之一大倒轉背斜構造，其範圍相當大，幾乎涵蓋本區全部。此背斜東翼岩層大多以小角度向東傾斜，西翼岩層則多數以高角度倒轉位態向東傾斜。此背斜軸部大致位於中央山脈脊線附近。由於岩性的追蹤，同一岩層似乎往南漸漸相接繞過背斜軸，即整個背斜構造有向南傾沒的現象。

2. 新化斷層及大鳥斷層

發生於本計畫區域岩層內的斷裂、滑動現象非常多，然其範圍均很小，真正可表示於圖上者僅此兩斷層。此兩斷層均位於大武的北方，其斷面呈近似東西走向，南側岩塊都相對的往西移動，屬右移斷層。由斷面走向與移動方向，推測其生成於第二次構造運動時期。

2.3 氣象、水文與土石流

2.3.1 氣象

1. 氣象

依據中央氣象局台東大武測站 2000 年 1 月~2006 年 12 月之統計資料，本計畫範圍之降雨量如表 2.3-1 並說明如下：

表 2.3-1 2000~2006 年台東大武測站降雨量統計表

單位：公厘

年份 \ 月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年降雨量
2000	15.6	42.2	16.9	45.1	53.4	365.5	693	447.8	78.6	421.8	128.2	117.3	2425.4
2001	64.3	45.7	20.1	37.6	462.7	524.3	362.4	145.1	462.3	51.7	14.5	23.4	2214.1
2002	50.6	43.7	30.4	7.7	155.3	209.5	332.2	390.8	331	44.1	22.5	84.3	1702.1
2003	57.6	19.8	41.6	60.4	15.0	432.7	172.9	675.3	300.7	94.9	275.1	8.1	2154.1
2004	17.4	26.4	16.7	32.6	142.3	202.4	903.6	114.1	470.5	18.5	4.0	217.9	2166.4
2005	11.1	30.0	34.5	13.0	114.6	644.3	1105.8	453.4	872.4	96.5	103.5	51.4	3530.5
2006	30.1	22.0	39.1	78.3	281.9	641.4	936.5	154.8	201	54.5	16.2	18.0	2473.8

資料來源：中央氣象局

本地區全年平均累積降雨量為 2380.9 公厘，其中大部份集中於 5 月至 10 月。

2. 颱風

中央氣象局統計過去侵台颱風的路徑，將之分成七類，如圖 2.3-1 所示，並針對本工程範圍，列出 2000 年 1 月~2006 年 12 月期間颱風侵台路徑屬 2~7 類且強度中度以上之颱風資料，詳見表 2.3-2。

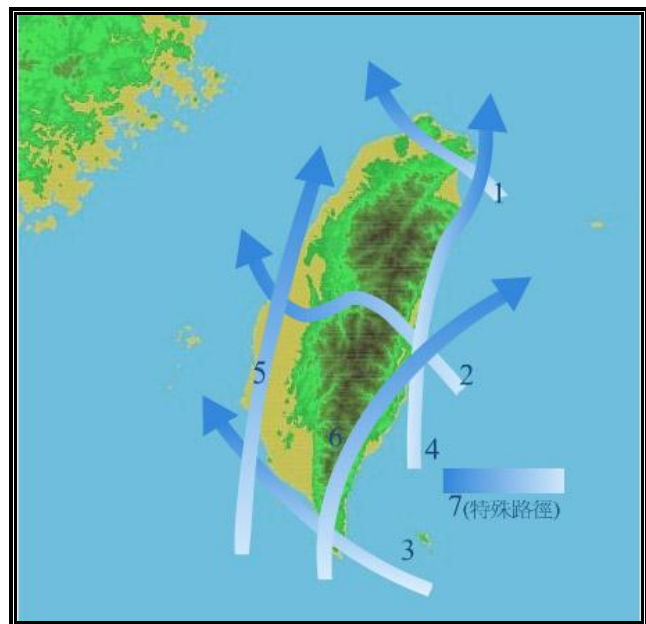


圖 2.3-1 颱風侵台路徑圖(中央氣象局)

表 2.3-2 2000~2006 年對本工程影響性較大之颱風統計表

日期	颱風名稱	強度	侵台颱風路徑	大武站累積雨量(公厘)※
2000/07/06	啟 德	中度	4	319.1
2000/08/21	碧利斯	強度	2	247.0
2000/10/30	象 神	中度	4	310.5
2001/06/22	奇 比	中度	5	157.0
2001/07/03	尤 特	中度	3	95.0
2001/07/28	桃 芝	中度	2	33.7
2001/09/08	納 莉	中度	7	59.4
2001/09/23	利奇馬	中度	2	277.0
2003/08/31	杜 鵬	中度	3	94.5
2004/06/28	敏督利	中度	4	523.1
2004/12/03	南瑪都	中度	6	202.1
2005/08/30	泰 利	強度	2	289.8
2005/09/30	龍 王	強度	2	23.4

資料來源：中央氣象局

註：※為颱風警報期間之累積雨量。

2.3.2 水文

本計畫區域內之主要溪流，自南而北依序為安朔溪、大武溪、大鳥溪、加津林溪、大竹溪及金崙溪等，皆發源於大武山嶺線東側，自西向東注入太平洋，各溪流分佈位置見圖 2.3-2。

區內之溪流特性，可藉由安朔溪之特徵，概觀了解之。安朔溪發源於大武山嶺線南延脊線上的菩安山，向東於安朔村東方注入太平洋，依據「南迴鐵路工程-工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)，河道平均坡度降比 1:60，河道在下游處的寬度為四百至五百公尺，堆積作用較侵蝕作用盛行，河川發育屬於老年期，但向上游其侵蝕作用逐漸顯著，為壯年期至幼年期河流。由於本流域內岩層以板岩及硬頁岩為主，厚層砂岩較少，岩性相當均勻，且無大的斷層構造，因此安朔溪水系呈樹枝狀。安朔溪的主流及其各支流的橫剖面均相當開敞，兩岸地形平緩，甚少斷崖峭壁，山崩現象亦較少見。

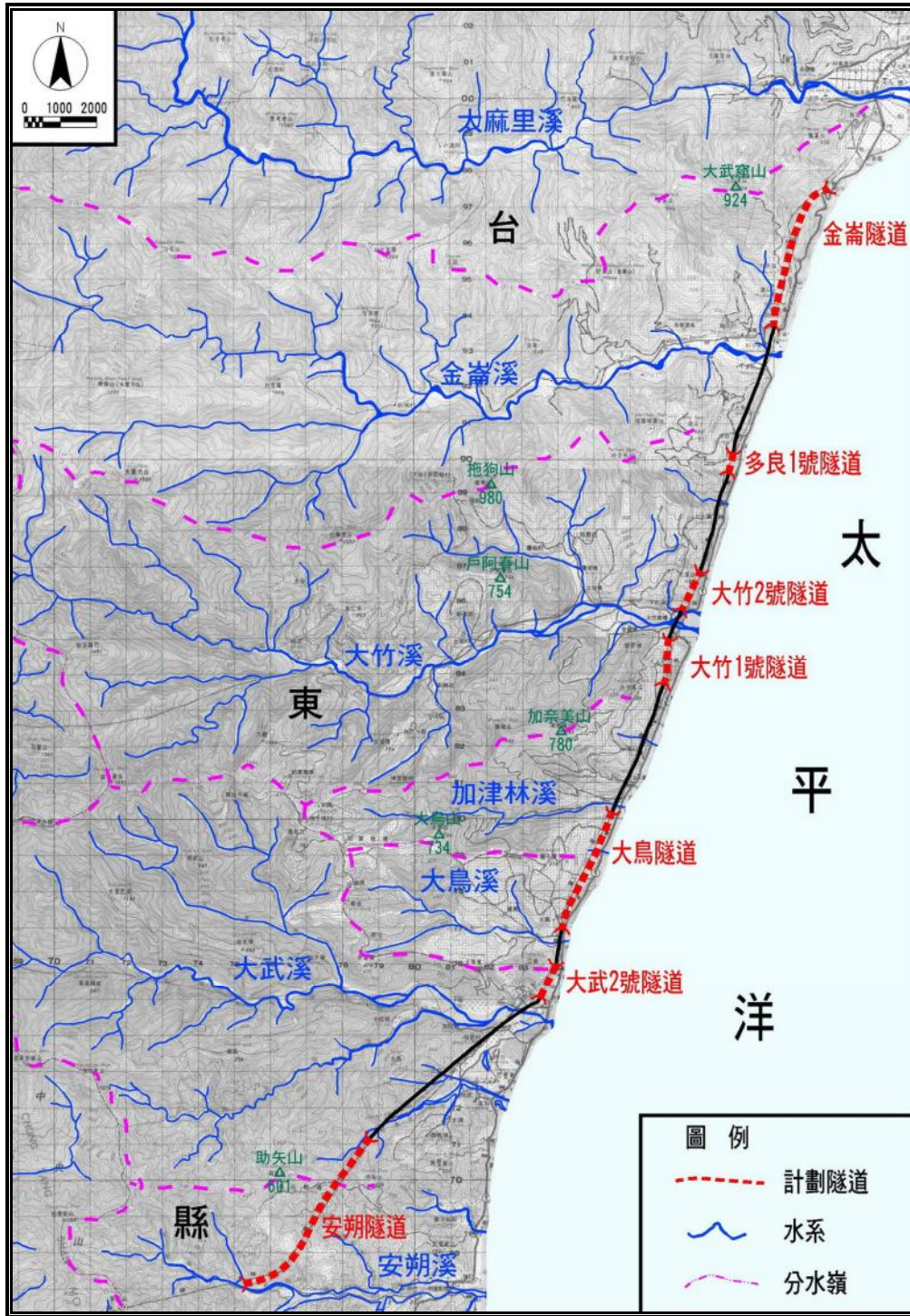


圖 2.3-2 水系圖

2.3.3 土石流

依據行政院農委會公佈之土石流潛勢溪流分佈，鄰近本計畫隧道洞口之土石流數量總計有 9 條，分佈位置請見圖 2.3-3，其編號及潛勢能見表 2.3-3。

表 2.3-3 鄰近隧道洞口之土石流列表

隧道名稱	位置	土石流編號		
	南口	潛势能	北口	潛势能
金崙	—	—	台東 041	持續觀察
多良 1 號	—	—	台東 047	低
大竹 2 號	—	—	台東 049	低
大竹 1 號	—	—	—	—
大鳥	台東 060/台東 061/台東 A126	中/低/低	台東 059	低
大武 2 號	台東 062	中	—	—
安朔	台東 067	中	—	—

資料來源：行政院農委會

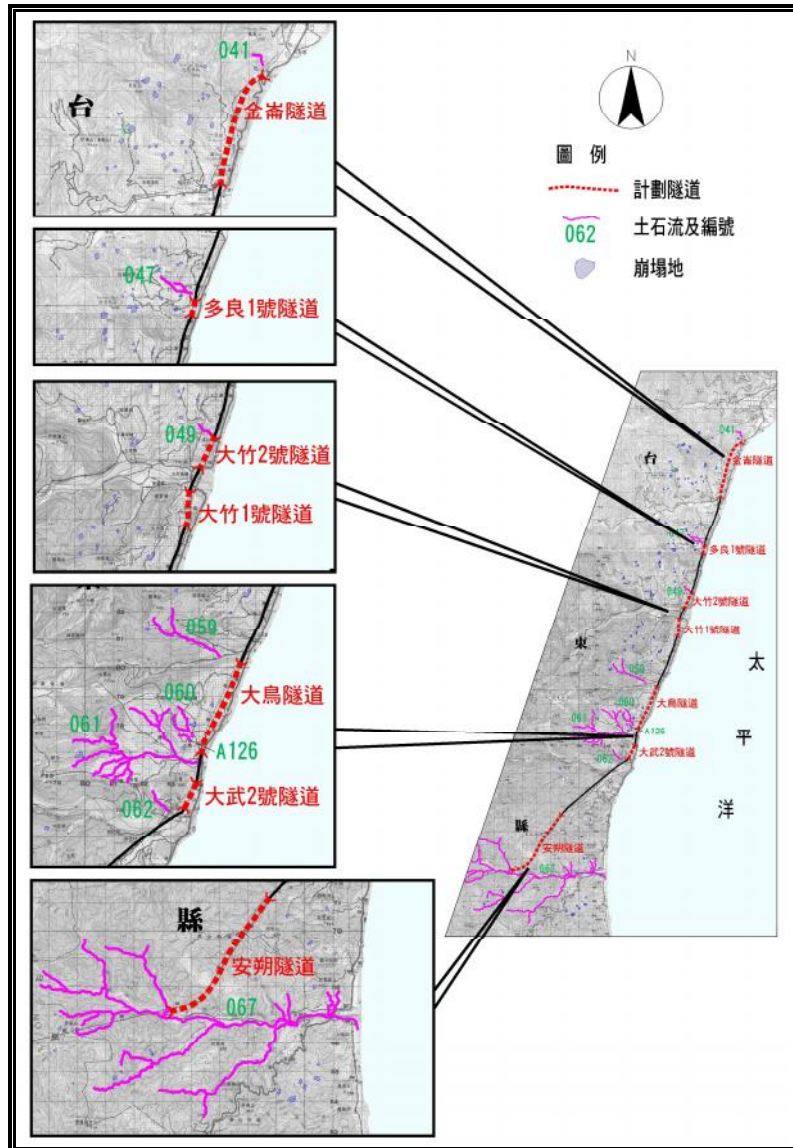


圖 2.3-3 鄰近隧道洞口之土石流分佈位置圖

2.4 地震

依區域地質圖所示，本計畫路線通過新化及大烏斷層，雖未列入中央地質調查所所頒佈之活動斷層中，但為確保隧道安全仍須針對此地區地震特性予以瞭解。根據中央氣象局發佈之地震月報資料，整理出自西元 2000 年 1 月至 2006 年 12 月有感地震，且本計畫區域內震度 4 級以上之地震，共計 11 次，其相關資料見表 2.4-1 及震央分佈位置圖 2.4-1。

表 2.4-1 計畫區域內較大震度地震一覽表

日期	規模	震源深度(Km)	震度(級)	震央
2001/01/16	4	9.5	4	台東嘉蘭地震站西南方 7.2 公里
2001/03/01	4.5	11.9	4	台東安朔地震站北偏西 16.2 公里
2002/06/20	4.5	7	4	台東卑南地震站西方 19.8 公里
2003/10/10	4.6	5	4	台東大武地震站東方 16 公里
2004/05/19	6.5	8.7	4	台東市地震站東偏南 25.6 公里
2004/06/06	5	3.3	5	台東大武地震站北偏東 21.1 公里
2005/01/31	4.8	16.1	4	台東大武地震站北偏東 7.6 公里
2005/08/23	4.4	13.6	4	台東大武地震站北偏東 17.0 公里
2006/04/01	6.2	7.2	5	台東卑南地震站北方 7.0 公里
2006/05/13	4.3	7.1	4	台東市地震站西南方 20.0 公里
2006/06/01	4.4	7.9	4	台東卑南地震站南偏西 6.0 公里

資料來源：中央氣象局

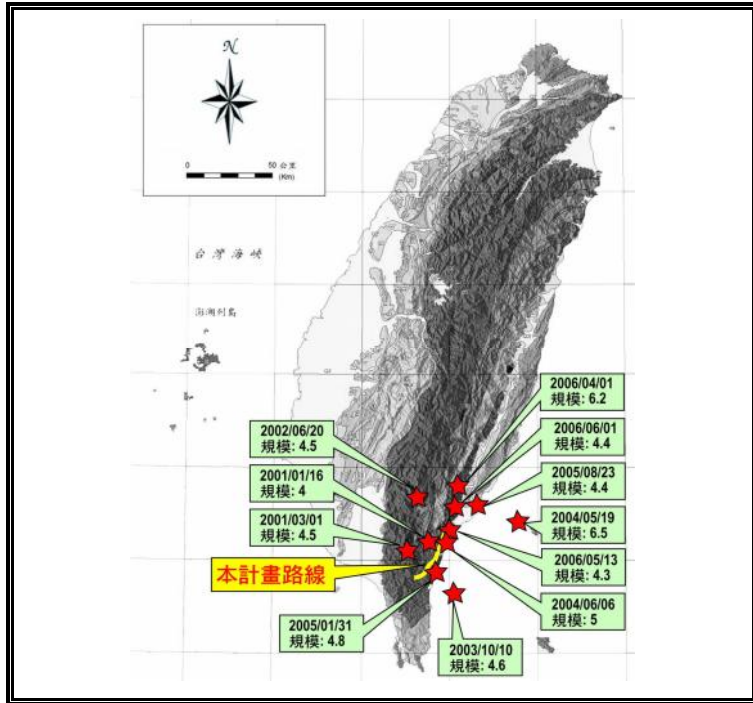


圖 2.4-1 本計畫區域震度 4 以上之震央分佈圖

2.5 隧道基本資料

根據「南迴鐵路工程-工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)暨「南迴鐵路長大隧道現場地質師顧問工作總結報告」(聯合大地工程顧問公司，民國 80 年)，摘錄本次工作範圍金崙、多良一號、大竹二號、大竹一號、大鳥、大武二號及安朔共七座隧道之地質記錄於以下各節。唯因隧道施工初期採用傳統工法 (ASSM) 施工，直至民國 75 年方才引進新奧工法 (NATM) 施工，因此，對於傳統工法施工區段則無地質記錄，僅新奧工法區段有現場地質師進行隧道開挖面之地質記錄及 CSIR 岩體評分。另附錄 B 隧道地質剖面圖中之地質破壞模式定義詳見表 2.5-1。

表 2.5-1 隧道地質破壞模式說明表

地質破壞模式	符號	說明
岩塊墜落	RF ₁	斷層破碎帶通過頂拱
	RF ₂	開挖進入褶皺軸之破碎帶
	RF ₃	兩組以上節理在頂拱交切形成自由岩塊或岩楔
	RF ₄	其它
岩塊滑動	RS ₁	主要不連續面傾向和開挖方向相逆
	RS ₂	主要不連續面向隧道中心線傾斜
	RS ₃	長直開口裂隙向隧道中心線傾斜

	RS ₄	其它
岩塊翻倒	RT ₁	主要不連續面傾向和開挖方向相同
	RT ₂	主要不連續面向隧道側壁外傾斜
	RT ₃	長直開口裂隙向隧道側壁外傾斜
	RT ₄	其它
材料破壞	MF ₁	岩體破碎軟弱或疏鬆膠結不良
	MF ₂	高度節理易小塊崩落岩體
	MF ₃	高度劈理或片理易片狀剝落岩體
	MF ₄	低強度岩層小角度傾斜時所形成之岩板破壞
	MF ₅	高度風化岩體材料強度低且不均勻
	MF ₆	其它

另根據「南迴鐵路工程-工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)暨各隧道新建工程竣工圖(東部鐵路改善工程局，民國 81 年)，摘錄本計畫範圍金崙等七座隧道之設計及施工方法於以下各節。且由於各隧道施工里程與現行之營運里程有差異，整理其相關里程對照說明如表 2.5-2 所示。

表 2.5-2 隧道營運里程與施工里程對照表

隧道名稱	營運里程		長度(m)	施工里程		長度(m)
金崙	64K+127	68K+519	4,392	62K+848	67K+240	4,392
多良一號	58K+967	60K+616	1,649	57K+690	59K+330	1,640
大竹二號	55K+807	57K+043	1,236	54K+532	55K+720	1,188
大竹一號	53K+513	54K+965	1,452	52K+250	53K+702	1,452
大鳥	46K+145	49K+797	3,652	44K+882	48K+536	3,654
大武二號	44K+018	45K+199	1,181	43K+520	44K+700	1,180
安朔	32K+649	38K+130	5,481	32K+167	37K+650	5,483

註：表中各隧道施工里程係依據「南迴鐵路工程-工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)暨各隧道新建工程竣工圖(東部鐵路改善工程局，民國 81 年)。

2.5.1 隧道施工方法簡介

南迴鐵路隧道初期規劃採傳統工法 (ASSM) 隧道斷面設計與施工，嗣後因沿線地質變化過於頻繁，傳統隧道施工法應變彈性較差，每遇災害均造成工期延誤及增加鉅額搶修費用，故引進新奧隧道施工方法 (NATM)，以較新之地盤支撐觀念與較富彈性應變能力之支撐方式克服地質多變之困難。本計畫範圍內之安朔、金崙

及大鳥隧道即係由傳統工法變更為新奧工法施工。

1.傳統隧道施工法(ASSM)

傳統工法亦稱為美國鋼支保工法(American Steel Support Method)簡稱ASSM，基本上係於隧道開挖後立即架設重型鋼支保，並配合打設木矢板支撐岩盤壓力，然後再施作襯砌混凝土，以構成隧道整體支撐系統。其主要工作程序為鑽孔、開炸、出渣、架設鋼支保，構成一作業循環，開挖一適當長度後再進行襯砌。一般傳統工法為因應不同地質情況及相關機具設備其開挖方式可分為：(1)全斷面開挖；(2)上下半斷面開挖；(3)底設導坑先進上半斷面開挖；(4)側壁導坑先進上半環狀斷面開挖。

2.新奧隧道施工法(NATM)

新奧工法(New Austrian Tunneling Method)簡稱NATM，乃於隧道開挖後首先利用鋼絲網及噴凝土封面以防止岩屑掉落與繼續風化現象，然後再以岩栓及輕型鋼支保等柔性支撐系統作為首次襯砌，提供岩體約束力量，使隧道周圍之地盤構成一承載環，作為隧道支撐之一部份，同時再配合計測地層變位，襯砌應力變化與岩栓軸力等資料，據以研判支撐是否足夠，彈性修正支撐方式與支撐材料數量，調整開挖斷面與開挖程序，俟計測岩盤變位穩定後再行辦理二次襯砌，其目的為外表修飾及提高結構安全係數之用。隧道工程主要施工程序為鑽孔、開炸、出渣、架設柔性支撐系統(包括噴凝土、岩栓、輕型鋼支保等)、計測，構成一作業循環。依計測結果與開挖長度始決定二次襯砌施工時機與施工方式。一般地質情況下，隧道設計依開挖順序其施工方式可分為：(1)全斷面開挖；(2)上下半台階開挖；(3)多段台階開挖。另依岩體類別不同，新奧工法支撐系統則分為A、B、C、D、E五種支撐型式，如表2.5-3所示。

表 2.5-3 新奧工法支撐系統型式表

支撐型式 (Typ.)	噴凝土厚度	鋼支保型式	岩栓	前進 鋼筋	適用範圍	
					Rock Type	RMR
A 型	第一層 10cm 第二層 10cm	H150x150	打設3m與5m長度之岩栓	有	V	<20
B 型	第一層 5cm 第二層 10cm	H150x150	打設3m與5m長度之岩栓	有	IV	21-40
C 型	第一層 5cm 第二層 10cm	H150x150	打設3m與4m長度之岩栓	無	III	41-60
D 型	第一層 5cm 第二層 10cm	H125x125	打設3m與4m長度之岩栓	無	II	61-80
E 型	第一層 5cm 第二層 10cm	無	打設3m與4m長度之岩栓	無	I	>81

資料來源：「南迴鐵路工程－工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國81年)

2.5.2 金崙隧道

1. 地質概述

本隧道沿線地質剖面如附錄 B 圖一所示，岩性以變質砂岩、板岩及兩者互層為主，CSIR 岩體分類為第 III 至 V 類，岩石單壓強度約 10 至 80MPa，地下水狀況為乾燥至嚴重湧水，主要不連續面為斷層帶、剪裂帶、劈理和節理，三組節理位態為 J1=N17E/65NW、J2=N52E/65NW、J3=N43E/64SE，主要劈理位態為 C1=N70~75E/27~34SE，破壞型式以岩塊墜落、岩塊滑動及材料破壞為主，詳見表 2.5-4。

2. 設計說明

金崙隧道以單線馬蹄型斷面設計，淨高 6.01 公尺，起拱線淨寬 4.96 公尺。隧道開挖除由南北兩端進行外，另於 64K+640 處增闢施工橫坑以增加工作面。施工工法在洞口段採用明挖覆蓋及美國鋼支保支撐工法(傳統工法)，如圖 2.5-1 所示；在一般段則採用新奧工法施作，如圖 2.5-2 所示。各區段隧道施工工法配置如表 2.5-5 所示。

表 2.5-4 金崙隧道地質條件總表

隧道	施工里程	岩性	構造	岩體分類 (CSIR)	岩石單壓 (MPa)	地下水	破壞型式
金崙	62k+848~62k+985.1	—	—	—	—	—	—
	62k+985.1~63k+305.1	板岩為主，變質砂岩次之	斷層帶 剪動帶	IV~V	30~60	乾燥~微滲 (少部分湧水)	岩塊墜落 材料破壞 岩塊滑動
	63k+305.1~63k+436.8	硬頁岩為主，板岩次之	—	IV	40~60	乾燥~微濕	岩塊滑動 岩塊墜落
	63k+436.8~63k+701.6	板岩、變質砂岩及兩者互層	—	III~IV	50~60	乾燥~中度湧水	岩塊墜落
	63k+701.6~63k+821.9	板岩	剪裂泥	IV	20~50	乾燥~微滲	材料破壞 岩塊滑動
	63k+821.9~64k+020.1	板岩、變質砂岩及兩者互層	—	IV~V	25~70	乾燥~微滲	岩塊墜落 材料破壞 岩塊滑動
	64k+020.1~64k+230	變質砂岩與板岩互層	剪裂帶 斷層	IV~V	25~60	乾燥~湧水	岩塊墜落 材料破壞
	64k+230~64k+647.7	變質砂岩、板岩及其互層	剪裂泥擾動帶	IV~V	25~60	乾燥~大量湧水	岩塊墜落 材料破壞
	64k+647.7~64k+744.4	板岩	剪動破碎帶	V	30~50	中度~大量湧水	岩塊墜落 材料破壞
	64k+744.4~66k+030	變質砂岩、板岩及其互層	剪裂泥	IV~V	25~70	乾燥~大量湧水	岩塊墜落 材料破壞
	66k+030~67k+076.5	變質砂岩為主，板岩及兩者互層次之，少數夾硬頁岩	剪裂泥帶	IV~V	25~80	乾燥~大量湧水	岩塊墜落 材料破壞
	67k+076.5~67k+101.2	硬頁岩為主，少部分為變質砂岩	—	IV	10~20	微滲~中度湧水	岩塊墜落
	67k+101.2~67k+240	—	—	—	—	—	—

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

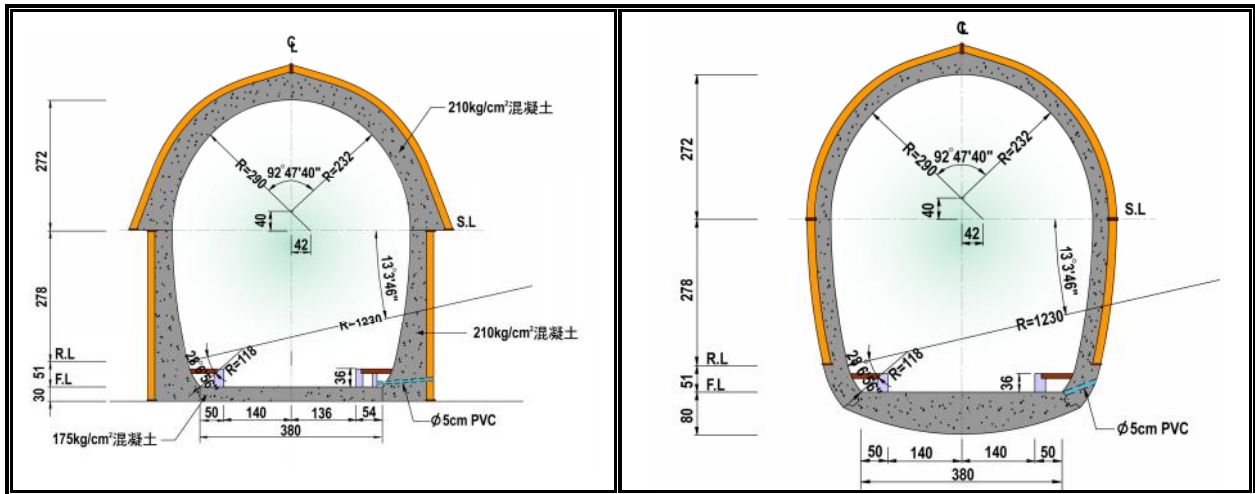


圖 2.5-1 單線隧道美國鋼支保工法標準斷面圖

圖 2.5-2 單線隧道新奧工法標準斷面圖

表 2.5-5 金崙隧道施工工法配置表

項次	施工里程		施工工法
	起點	迄點	
1	62K+848	62K+849.86	明挖覆蓋
2	62K+849.86	62K+897.5	ASSM
3	62K+897.5	62K+932	NATM (C 型)
4	62K+932	63K+055.4	NATM (B 型)
5	62K+055.4	63K+142.6	NATM (C 型)
6	63K+142.6	63K+334.2	NATM (B 型)
7	63K+334.2	63K+367.8	NATM (C 型)
8	63K+367.8	63K+588.9	NATM (B 型)
9	63K+588.9	63K+600.9	NATM (C 型)
10	63K+600.9	64K+230	NATM (B 型)
11	64K+230	67K+136	NATM (B 型)
12	67K+136	67K+235.14	ASSM
13	67K+235.14	67K+240	明挖覆蓋

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

3. 施工過程

施工階段經過特殊地段時曾發生災變，災變因素係由開挖面大量湧水誘發抽心、落盤等所造成。災變位置及說明如表 2.5-6 所示。

表 2.5-6 金崙隧道施工階段特殊區段災變位置及描述

項次	施工里程		岩體類別	施工方式	施工災變
	起點	迄點			
1	63K+152	63K+154	V	NATM	尚未開挖之開挖面遭遇惡劣地質，岩盤軟弱破碎，節理發達，自然坍塌抽心高達 10 公尺。
2	64K+138.3	64K+141.9	V	NATM	正在噴凝土時，開挖面頂拱突然大量湧水並夾帶大量土石沖下，造成抽心坍塌。
3	64K+316.7	64K+324.7	V	NATM	地質惡劣，岩體鬆散軟弱，頂拱突然大量湧水（每分鐘約 4 噸）致開挖面前上方坍塌大量土石造成架設完成之鋼支保扭曲變形，採行加固處理。
4	64K+708.4	64K+711.4	V	NATM	岩體破碎，湧水致自然崩塌抽心。
5	66K+014.7	66K+018	IV	NATM	岩體鬆弱，夾帶泥層，自然崩塌。
6	66K+432.1	66K+435.9	IV	NATM	岩石劈理發達，板岩內含水層豐富，在開挖面大量湧水（3T/min），造成抽心落盤。
7	66K+611.8	66K+617.3	IV	NATM	地質惡劣，岩體破碎且大量湧水，自然落盤崩塌高達 6 公尺。

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」（南迴鐵路工程處，民國 81 年）

2.5.3 多良一號隧道

1. 地質概述

本隧道沿線地質剖面如附錄 B 圖二所示，岩性以硬頁岩及硬頁岩與變質砂岩互層為主，CSIR 岩體分類為第 IV 至 V 類，岩石單壓強度約 20 至 70MPa，地下水狀況為輕微滲水至中度湧水，主要不連續面為劈理和節理，三組節理位態為 J1=N13E/79NW、J2=N49~54E/70NW~77SE 及 J3=N24~36W/75NE~78SW，主要劈理位態為 C1=N55~81W/24~26SW，破壞型式以岩塊墜落、及材料破壞為主，詳見表 2.5-7。

表 2.5-7 多良一號隧道地質條件總表

隧道	施工里程	岩性	構造	岩體分類 (CSIR)	岩石單壓 (MPa)	地下水	破壞型式
多良一號	57k+690~57k+705.2	—	—	—	—	—	—
	57k+705.2~58k+050.9	硬頁岩板岩	剪裂泥	IV~V	30~60	微滲~中度湧水	岩塊墜落 材料破壞
	58k+050.9~58k+701.1	硬頁岩板岩 變質砂岩	剪裂泥	IV~V	30~60	微滲~輕度湧水 (部分大量湧水)	岩塊墜落
	58k+701.1~59k+100	硬頁岩 變質砂岩	—	IV	25~60	微滲~中度湧水 (部分大量湧水)	岩塊墜落
	59k+100~59k+205	硬頁岩與變質砂岩互層及變質砂岩為主	—	IV~V	30~70	微滲~輕度湧水	岩塊墜落
	59k+205~59k+231.8	硬頁岩板岩	—	IV	20~30	微滲	岩塊墜落
	59k+231.8~59k+330	—	—	—	—	—	—

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

2.設計說明

多良一號隧道主要以單線馬蹄型斷面設計，淨高 6.01 公尺，起拱線淨寬 4.96 公尺，施工工法係採用美國鋼支保支撐工法(傳統工法)進行施作，隧道標準斷面圖如圖 2.5-1 所示。惟配合多良站場交會列車使用，在北端里程 59K+250~330 區間採雙線明挖覆蓋工法施作。

3.施工過程

屬美國鋼支保支撐工法(傳統工法)，因屬風化破碎頁岩，地質甚為惡劣，施工階段遭逢多次邊坡崩坍等困難，施工過程說明如表 2.5-8 所示。

表 2.5-8 多良一號隧道施工工法及施工過程說明

項次	施工里程		岩體類別	施工方式	施工過程及應變工法說明
	起點	迄點			
1	57K+692	57K+696	—	明挖覆蓋	—
2	57K+696	57K+760	—	ASSM	底導坑上半環狀工法。
3	57K+760	57K+810	IV V	ASSM	原設計採全斷面工法，因地質屬破碎頁岩及軟弱岩層，變更為底導坑上半環狀工法。
4	57K+810	57K+860	IV V	ASSM	底導坑上半先進工法。
5	57K+860	58K+010	IV V	ASSM	底導坑上半環狀工法。57K+985.7~58K+034.3 間計 48.6m，因地質惡劣，故採用封板，鋼矢板工法。
6	58K+010	58K+450	IV V	ASSM	原設計採底導坑上半先進工法，因地質屬風化破碎頁岩，變更為底導坑上半環狀工法。
7	58K+450	59K+240	IV V	ASSM	底導坑上半環狀工法
8	59K+240	59K+250	—	明挖覆蓋 (單線)	—
9	59K+250	59K+330	—	明挖覆蓋 (雙線)	59K+260~59K+330 原設計為臨時邊坡，但施工期間遭逢二次崩坍後，故變更為永久性邊坡，分三階施工，由上往下鉆設 8~12m 擴座式地錨，第一次噴凝土約 5cm 待施拉 40 噸預力完畢，再進行第二次噴凝土後約 10cm，將整座地錨十字座架噴滿處理。

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

2.5.4 大竹二號隧道

1. 地質概述

本隧道沿線地質剖面如附錄 B 圖三所示，岩性以板岩為主，硬頁岩及變質砂岩次之，CSIR 岩體分類為第 IV 至 V 類，岩石單壓強度約 10 至 60MPa，地下水狀況為輕微至中度湧水，主要不連續面為劈理和節理，主要節理位態為 J1=N05 ~ 13E/85SE，三組劈理位態為 C1=N58W/22SW ~ 14NE、C2=N43E/15SE 及 C3=N89E/34SE，破壞型式以岩塊墜落、岩塊滑動、材料破壞為主，詳見表 2.5-9。

表 2.5-9 大竹二號隧道地質條件總表

隧道	施工里程	岩性	構造	岩體分類 (CSIR)	岩石單壓 (MPa)	地下水	破壞型式
大竹二號	54k+532~54k+948.5	—	—	—	—	—	—
	54k+948.5~55k+080	硬頁岩	斷層破碎帶	IV~V	20~50	輕微~中度湧水	—
	55k+080~55k+277	硬頁岩板岩	—	IV	30~50	輕度~中度湧水	材料破壞
	55k+277~55k+531	板岩	—	IV~V	10~60	輕度~中度湧水	岩塊墜落 材料破壞 岩塊滑動
	55k+531~55k+720	變質砂岩	—	IV	25~60	輕度~中度湧水	岩塊墜落 材料破壞

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

2.設計說明

大竹二號隧道以單線馬蹄型斷面設計，淨高 6.01 公尺，起拱線淨寬 4.96 公尺，隧道標準斷面圖如圖 2.5-1 所示。

3.施工過程

屬美國鋼支保支撐工法(傳統工法)，採用底導坑工法以及全斷面工法施作。

2.5.5 大竹一號隧道

1.地質概述

本隧道沿線地質剖面附錄 B 圖四所示，岩性以硬頁岩、板岩為主，變質砂岩次之，CSIR 岩體分類為第 III 至 V 類，岩石單壓強度約 20 至 100MPa，地下水狀況為輕微滲水至中度湧水，少數區段發生大量湧水，主要不連續面為劈理和節理，三組節理位態為 J1=N22E/86SE、J2=N42~49E/80~83SE、J3=N28~34W/79~83NE，主要劈理位態為 C1=N68W/24SW，破壞型式以岩塊墜落、岩塊翻倒、材料破壞為主，詳見表 2.5-10。

表 2.5-10 大竹一號隧道地質條件總表

隧道	施工里程	岩性	構造	岩體分類 (CSIR)	岩石單壓 (MPa)	地下水	破壞型式
大竹一號	52k+250~52k+256	—	—	—	—	—	—
	52k+256~52k+264	硬頁岩及變質砂岩	—	IV	40~60	輕度滲水	—
	52k+264~52k+306	硬頁岩及板岩	—	V	20~40	中度湧水	岩塊墜落
	52k+306~52k+381	硬頁岩及板岩為主，夾少許變質砂岩	—	IV	40~60	中度湧水	岩塊墜落
	52k+381~52k+409	硬頁岩及板岩	—	V	20~40	輕度滲水	—
	52k+409~52k+860	硬頁岩及其與變質砂岩互層	—	IV	40~60	輕度滲水 (極少處大量湧水)	岩塊墜落
	52k+860~52k+956	硬頁岩及變質砂岩	—	IV~V	20~40	中度湧水以下	—
	52k+956~53k+206	板岩為主，少部分為硬頁岩及板岩	—	V	20~40	輕度~中度湧水	岩塊墜落 材料破壞
	53k+206~53k+336	變質砂岩	—	IV~V	20~40	輕度~中度湧水	岩塊翻倒 材料破壞
	53k+336~53k+420	變質砂岩為主，硬頁岩次之	—	III	60~100	輕度滲水	—
	53k+420~53k+687.4	硬頁岩及板岩為主，變質砂岩次之	—	IV	40~60	輕度滲水	—
	53k+687.4~53k+702	—	—	—	—	—	—

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

2.設計說明

大竹一號隧道以單線馬蹄型斷面設計，淨高 6.01 公尺，起拱線淨寬 4.96 公尺，隧道標準斷面圖如圖 2.5-1 所示。

3.施工過程

屬美國鋼支保支撐工法(傳統工法)，採用底導坑工法施作。

2.5.6 大鳥隧道

1.地質概述

本隧道沿線地質剖面如附錄 B 圖五所示，岩性以硬頁岩為主，硬頁岩與變質砂岩互層次之，CSIR 岩體分類為第 IV 至 V 類，岩石單壓強度約 5 至 60MPa，地下水狀況為輕微滲水至中度湧水，少數區段發生大量湧水，主要不連續面為劈理、節理及斷層破碎帶，三組節理位態為 J1=N70~83E/76NW、J2=N74~83W/89NE、J3=N25W/77SW，二組劈理位態為 C1=N19E/41SE、C2=N36W/21NE，破壞型式以岩塊墜落、岩塊翻倒、岩塊滑動、材料破壞為主，詳見表 2.5-11。

表 2.5-11 大鳥隧道地質條件總表

隧道	施工里程	岩性	構造	岩體分類 (CSIR)	岩石單壓 (MPa)	地下水	破壞型式
大鳥	44k+882~44k+969	—	—	—	—	—	—
	44k+969~45k+020	硬頁岩為主，大部分為斷層破碎帶	斷層破碎帶	IV~V	10~40	輕度滲水	—
	45k+020~45k+160	硬頁岩及板岩	—	IV	20~40	輕度滲水	材料破壞
	45k+160~45k+680	硬頁岩	斷層破碎帶	IV~V	20~50	輕度~中度湧水 (極少處大量湧水)	岩塊墜落 岩塊滑動 材料破壞
	45k+680~45k+864	硬頁岩	—	IV	30~60	輕度滲水	材料破壞
	45k+864~45k+882	硬頁岩	斷層破碎帶	V	10~30	中度湧水	材料破壞
	45k+882~46k+125	硬頁岩	斷層破碎帶	IV~V	20~50	輕度滲水	岩塊翻倒
	46k+125~46k+528	硬頁岩及變質砂岩	—	IV~V	20~50	輕度滲水~ 中度湧水	材料破壞
	46k+528~46k+900	硬頁岩為主，夾少許變質砂岩	—	IV	20~50	輕度滲水	岩塊墜落
	46k+900~47k+005	硬頁岩	斷層破碎帶	IV~V	20~30	輕度~中度湧水	材料破壞
	47k+005~47k+685	硬頁岩	斷層破碎帶	IV~V	5~25	輕度~中度湧水	岩塊墜落 材料破壞
	47k+685~48k+478.6	硬頁岩、板岩及變質粉砂岩	—	IV~V	10~60	輕度~中度湧水	岩塊墜落 材料破壞
	48k+478.6~48k+536	—	—	—	—	—	—

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

2.設計說明

大鳥隧道以單線馬蹄型斷面設計，淨高 6.01 公尺，起拱線淨寬 4.96 公尺。隧道全線採新奧工法施作，隧道標準斷面圖如圖 2.5-2 所示。

3.施工過程

隧道施工通過湧水區段及異常擠壓段，造成開挖面頂拱抽心及擠壓，嚴重者發生鋼支保斷裂及仰拱隆起等現象，特殊區段災變描述詳表 2.5-12。

表 2.5-12 大鳥隧道施工階段特殊區段災變位置及描述

項次	施工里程		岩體類別	施工方式	施工災變
	起點	迄點			
1	45K+826	45K+840.9	IV	NATM (B 型)	自 45K+817.8 開始開挖面逐漸出現剪裂帶，岩盤有褶皺現象，故每輪均打設 5 至 10 支三公尺長前進鋼筋或鋼管，開挖時仍發生數次小規模之坍落，依檢測資料顯示，該處的變位速率曾高達 24.1 公釐/日，鋼支保亦有下陷及扭曲現象。
2	45K+837.6	45K+874.6	IV	NATM (B 型)	本區段開挖進行期間由檢測資料獲知有嚴重的擠壓現象，尤其在 45K+854.2 計測斷面曾於一天內變位 138 公釐，雖立即以型鋼加固及固結灌漿處理，惟變位速率平均仍大於 50 公釐/日，其後開挖進行至 45K+874 時突然大量湧水，造成山側頂拱大量抽心，其深約 4 公尺，水壓甚大，故持續坍落。
3	46K+714	—	IV	NATM (B 型)	開挖面前進至 46K+714 處時，湧水量大增，估計約為每分鐘六噸，強大水壓夾雜著頂拱破碎岩塊及軟泥，沿著劈理滑落，造成頂拱約 20 立方公尺的土石方坍落，並壓毀開挖面附近鋼支保。
4	46K+930	47K+365	V	NATM (A 型)	本區段施工期間，開挖面遇鬆軟岩質及斷層泥，經淨空變位檢測，測得變形量異乎尋常，造成已完成開挖斷面（尚未收斂及未襯砌部份）嚴重變形，發生上、下半斷面支保接頭斷裂及側壁支保內移及淨空不足現象，已完成之仰拱部份有隆起現象。
5	47K+594	47K+599	V	NATM (A 型)	開挖中山側發生嚴重擠壓，並有湧水現象，山側支保位移，噴凝土面龜裂，復因湧水大量噴出，產生嚴重坍落，導致鋼支保 6 組壓毀，並產生位移。

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

2.5.7 大武二號隧道

1. 地質概述

本隧道沿線地質剖面圖如附錄 B 圖六所示，岩性以硬頁岩為主，板岩次之，里程 44k+510~44k+623.4 公尺為斷層破碎帶，CSIR 岩體分類為第 III 至 V 類，岩石單壓強度約 10 至 60MPa，地下水狀況為輕微滲水至嚴重湧水，主要不連續面為劈理和節理，四組節理位態為 J1=N76W/81NE、J2=N83E/74NW、J3=N67W/71SW 及 J4=N24W/73SW，三組劈理位態為 C1=N13E/45~67SE、C2=N16W/33NE 及 C3=N44E/53SE，破壞型式以岩塊墜落及材料破壞為主，詳見表 2.5-13。

表 2.5-13 大武二號隧道地質條件總表

隧道	施工里程	岩性	構造	岩體分類 (CSIR)	岩石單壓 (MPa)	地下水	破壞型式
大武二號	43k+520~43k+973.7	—	—	—	—	—	—
	43k+973.7~44k+180	硬頁岩為主，板岩和粉砂岩次之	—	III~V	10~60	中度~嚴重湧水	岩塊墜落 材料破壞
	44k+180~44k+510	硬頁岩為主，板岩次之	—	IV	40~60	輕度滲水 (少部分中度以上湧水)	材料破壞
	44k+510~44k+623.4	硬頁岩及斷層泥為主	斷層 破碎帶	IV~V	10~50	輕度~嚴重湧水	材料破壞
	44k+623.4~44k+700	—	—	—	—	—	—

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

2.設計說明

大武二號隧道以單線馬蹄型斷面設計，施工工法係採用美國鋼支保支撐工法(傳統工法)及小區段明挖覆蓋工法施作，隧道全線以底導坑先進工法為主，上半斷面為輔，在惡劣地質段採用特殊工法作為輔助，隧道標準斷面圖如圖 2.5-1 所示。隧道沿線分別設置大型避車洞 2 處及小型避車洞 41 處。

3.施工過程

隧道施工過程中曾發生大小災害有七次之多，其中以 44k+145 附近因湧水引致落盤災變較為嚴重，災變位置及說明如表 2.5-14 所示。另施工中遭遇軟弱地質時，所採用處理方式包括：(1)導坑封板開挖工法；(2)底設導坑先進工法拱圈封板開挖工法；(3)側壁橫撐鋼矢板及木矢板工法；(4)上半及底導坑鋼支保腳混凝土加固工法；(5)化學灌漿改良地質工法。

表 2.5-14 大武二號隧道施工階段特殊區段災變位置及描述

項次	施工里程		岩體類別	施工方式	施工災變
	起點	迄點			
1	44K+145	—	IV	ASSM	開挖面湧水每分鐘約 8 噸，處理步驟依序為：(1)抽排水；(2)開挖面以混凝土加鐵絲網封面固結；(3)鑽孔及打設排水孔；(4)水玻璃灌漿作業；(5)以小斷面開挖方式突破湧水段，共計 15m。
2	44K+640	—	—	ASSM	地質鬆落抽心開天窗而見光，經實測覆蓋厚度在 10~15m 之間，乃改採上半明挖覆蓋工法施工。

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

2.5.8 安朔隧道

1.地質概述

本隧道沿線地質剖面圖如附錄 B 圖七所示，岩性以硬頁岩為主，硬頁岩及變質砂岩互層次之，里程 36k+419~36k+672.4 公尺為斷層破碎帶，CSIR 岩體分類為第 III 至 V 類，岩石單壓強度約 10 至 50MPa，地下水狀況為輕微滲水至嚴重湧水，主要不連續面為劈理和節理，三組節理位態為 J1=N37~47W/89NE、J2=N69~84E/85SE 及 J3=N33~43E/86SE，二組劈理位態為 C1=N20E/48SE 及 C2=N26W/38NE，破壞型式以岩塊墜落、岩塊翻倒、材料破壞為主，詳見表 2.5-15。

表 2.5-15 安朔隧道地質條件總表

隧道	施工里程	岩性	構造	岩體分類 (CSIR)	岩石單壓 (MPa)	地下水	破壞型式
安朔	32k+167~32k+262	—	—	—	—	—	—
	32k+262~32k+654	硬頁岩為主，少部分變質砂岩	破碎帶	III~V	20~40	輕微滲水	—
	32k+654~33k+848	硬頁岩	—	IV~V	20~50	輕度~中度湧水	岩塊墜落 岩塊翻倒 材料破壞
	33k+848~34k+033	硬頁岩	—	IV~V	25~40	輕度~嚴重湧水	岩塊墜落
	34k+033~36k+419	硬頁岩及硬頁岩與變質砂岩之互層為主	破碎帶	IV~V	20~40	輕微滲水~中度以上湧水	岩塊墜落 材料破壞
	36k+419~36k+672.4	斷層泥為主	斷層 破碎帶	III~V	10~40	輕度滲水	岩塊墜落
	36k+672.4~37k+650	—	—	—	—	—	—

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

2.設計說明

隧道斷面以雙線馬蹄型設計，起拱線淨寬 9.1 公尺，路基面寬 8.15 公尺。施工工法分別採用明挖覆蓋工法、美國鋼支保支撐工法(傳統工法)如圖 2.5-3 及新奧工法如圖 2.5-4 所示。隧道沿線每 600 公尺設置一處大型避車洞，另每 40 公尺設置一處小型避車洞。

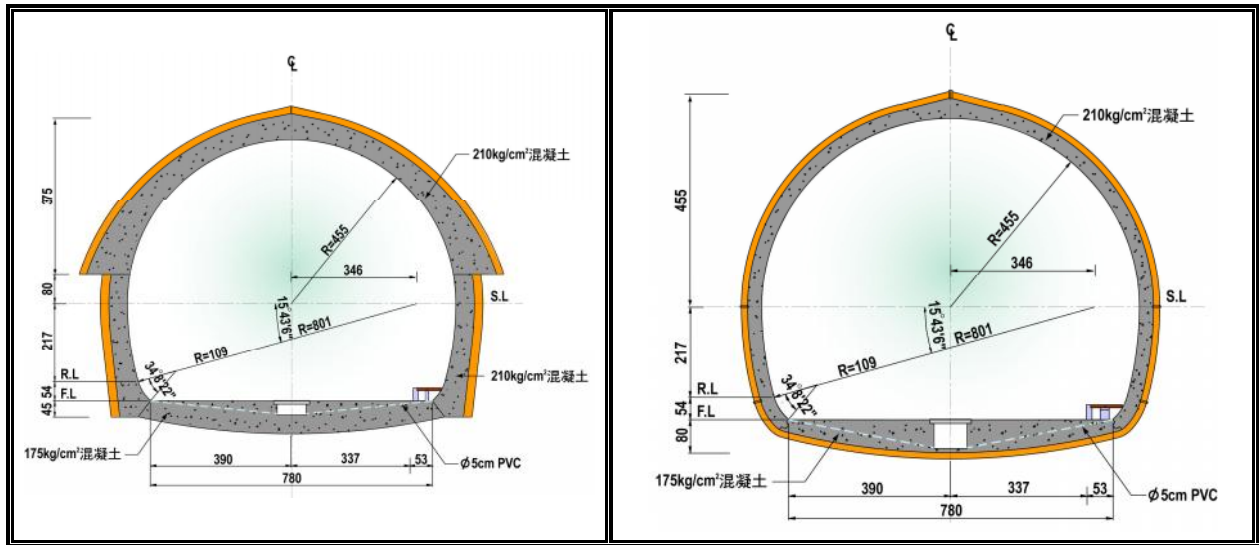


圖 2.5-3 雙線隧道美國鋼支保工法標準斷面圖 圖 2.5-4 雙線隧道新奧工法標準斷面圖

3. 施工過程

隧道施工時曾遭遇到多次災變，且均發生於 IV、V 類岩體，災變原因則以擠壓、落盤、湧水、抽心及少部份底部隆起等因素為主，災變位置及說明如表 2.5-16 所示。

表 2.5-16 安朔隧道施工階段災變位置及描述 (1/4)

項次	施工里程		岩體類別	施工方式	施工災變
	起點	迄點			
1	33K+046	—	V	ASSM(底設導坑)	底設導坑 33K+046~047.2 山側 60° 上方大量湧水(水量估計約 5T/Min)及夾帶角礫質泥土石約 20 立方公尺。
2	33K+321	33K+329	IV	ASSM(底設導坑)	上半開挖至 33K+323 頂拱岩盤抽心範圍高達 4 公尺，屬剪力楔形岩塊坍塌。並逐漸擴大鬆動範圍。
3	33K+495	33K+515	IV	ASSM(底設導坑)	底設導坑 33K+510 抽心落盤 15 組鋼支保變形，併有大量湧水流砂湧出，附近已開挖面因岩壓逐漸增加，致 33K+503~33K+512 上半斷面支保扭曲變形需重建。
4	33K+646	—	IV	ASSM(底設導坑)	底設導坑 33K+646 處開挖面大量湧水達 5T/min 並持續至 78-04-16 湧水量達 12T/min，洞內因抽水管線不足，積水淹沒至 33K+350 處已開挖之底設導坑淹沒約 120 公尺施工受阻。
5	33K+653	—	IV	ASSM(底設導坑)	上半開挖至 33K+653 處，因岩盤破碎含大量粘土層及風化岩屑，瞬間大量抽心且有滲水現象，部份支保受擠壓變形。抽心空洞位於右側拱頂計 18M 長×11M 寬×6M 高。

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

表 2.5-16 安朔隧道施工階段災變位置及描述 (2/4)

項次	施工里程		岩體類別	施工方式	施工災變
	起點	迄點			
6	33K+880	—	IV	ASSM(底設導坑)	底導坑 33K+880.6 處，開挖面大量湧水，支保受擠壓變形，因逢颱風雨季地下湧水不斷由 3.5T/min 增至 7~8T/min 水量，洞內施工受阻，淹水達 2 公尺深。
7	33K+824	—	IV	ASSM(底設導坑)	上半開挖至 33K+830.8 處，頂拱抽心坍塌，上半支保六組壓毀埋入岩石中，另五組傾斜移位及底導坑鋼支保 16 組變形，需重建。
8	34K+041.9	34K+049.1	IV V	ASSM(底設導坑)	上半開挖至 34K+047.5，因岩盤鬆動產生巨大岩壓，上半鋼支保扭曲變形計 7 組，未開挖面之拱頂上方土石鬆動有過載岩壓情形。
9	34K+119.9	34K+224.5	IV	ASSM(底設導坑)	上半開挖鋼支保上方因過載岩壓致已組立之鋼支保有兩區段支保扭曲變形沉陷，分別為 5 組及 9 組，開挖作業受損。
10	34K+304	34K+311	IV	ASSM(底設導坑)	上半擴挖進行至 34K+310，因受拱頂背向節理之粘土層破碎頁岩產生過載岩壓，鋼支保破壞 4 組抽心坍塌。
11	34K+436.5	34K+450	IV	ASSM(底設導坑)	上半鋼支保 8 組受上方岩石落盤破壞壓毀，下方底導坑 12 組鋼支保壓毀抽心範圍約 1,800 平方公尺。
12	34K+589.2	—	IV	NATM(上半先進)	開挖面海側肩部發生湧水現象，並造成大量土石坍塌，體積約 100 立方公尺。
13	35K+431.8	35K+437.5	V	NATM(上半先進)	自 35K+436 開始，山側逐漸有碎岩屑及粘土夾層出露，且所佔比例漸次增加，湧水量約 4T/min，造成山側肩部受擠壓落盤 50 立方公尺，5 組支保被擠壓變形。
14	35K+526.5	35K+572.7	IV	NATM(上半先進)	本區段之岩盤，劈理相當發達，岩質疏鬆，膠結不良，並具多處夾泥層，厚度不一，自開挖後岩盤即發生嚴重擠壓現象，噴凝土面出現多道裂縫，鋼支保亦扭曲變形。亦使隧道淨空有不足現象。
15	35k+579.4	—	IV	NATM(上半先進)	開挖面頂拱偏海側發生抽心，深度達 3 公尺左右。坍塌物均為含泥量高之破碎硬頁岩及其碎屑。
16	35K+584.2	—	IV	NATM(上半先進)	頂拱偏山側出現大量湧水，造成深達 8 公尺之抽心，並使附近之支保及噴凝土產生變形及龜裂。
17	36k+444	36k+460	V	NATM(上半先進)	海側擠壓現象嚴重，呈現約 50 公分之變形量，導致淨空不足。

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

表 2.5-16 安朔隧道施工階段災變位置及描述 (3/4)

項次	施工里程		岩體類別	施工方式	施工災變
	起點	迄點			
18	36K+460.9	36K+548.6	IV V	NATM(上半先進)	該區段岩盤屬破碎之泥岩(疑係斷層帶)。隧道支撐受擠壓變形,曾進行測量發現頂拱部份最高下陷約 1 公尺,側壁往內擠壓 30 公分,底部向上隆起 26 公分。
19	36K+512.3	—	V	NATM(上半先進)	36K+512.3 上半開挖面因開挖面通過斷層破碎帶致開挖面發生嚴重落盤,高約 5.5 公尺長約 7 公尺,開挖工作被迫停止。
20	36K+546.4	36K+560.8	V	NATM(上半先進)	該處位置距上半斷面開挖面約 96 公尺至 80 公尺,且開挖時間亦已達三個月之久,但仍在靠山側部份發生擠壓落盤,坍塌之土石方約 250 立方公尺。鋼支保壓毀 8 組。
21	36k+877.4	36k+887.4	V	ASSM(底設導坑) ASSM(側壁導坑)	1.地質鬆軟破碎,海側土壓甚大,開挖後即先以 H 型鋼加強支撐,並準備進行混凝土加固作業時,臨近開挖面#850~#839 等 11 組鋼支保扭曲及坍塌土石方 290 立方公尺。 2.H200×200 上半鋼支保#846~#856 計 11 組全毀,須全部抽換。
22	36k+915 開挖面	—	V	—	36K+915 處底設導坑(#679 組)鋼支保山側於修挖時發生大量湧水,經測得湧水量約達 4.5T/Min。湧水發生時#679 組鋼支保尚未組立,#678 鋼支保即因受水壓猛烈沖擊導致變形,#678~#672 等七組鋼支保靠山側支保腳受側壓內移 15~25 公分,另造成臨時施工用軌道因底部地質軟弱隆起約 30 公分。
23	37k+065.4	37k+076.4	V	ASSM(底設導坑)	1.上半斷面因地質破碎軟弱,在開挖面 37K+065.4 處準備組支保時開挖面左上方(海側)發生落盤並湧水,使#612 組鋼支保無法架設。 2.為顧及臨近開挖面部份鋼支保之安全即著手組立模板準備以混凝土加固鋼支保,惟 14 時組立完成後,適因施作中央隧道高壓輸配線改善工作而停電,無法澆置加固混凝土,以致該 11 組鋼支保因承受不了壓力瞬間塌落,鋼支保全部壓毀。 3.災情如下: a.#601~611 上半鋼支保全毀。 b.落盤量約 450 立方公尺。 c.931B 裝載機 2 台被鋼支保壓住受損。 d.損失已加固支保混凝土 16 立方公尺。 e.模板損毀 102 平方公尺。

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處,民國 81 年)

表 2.5-16 安朔隧道施工階段災變位置及描述 (4/4)

項次	施工里程		岩體類別	施工方式	施工災變
	起點	迄點			
24	37k+195.76	37k+208.76	V	ASSM(底設導坑)	底設導坑開挖到達 37K+208.76 處即遭遇破碎帶並發生 30l/min 之湧水，開挖工作遭遇困難。
25	37k+211.4	37k+222.4	V	ASSM(底設導坑)	該區間於底設導坑開挖時發現地質異常軟弱並且湧水，上半開挖到達 37K+222.4 處即遭遇異常軟弱地質而發生落盤，必須利用鋼軌為矢板先進打設，預先防止落盤發生。
26	37k+394.54	37k+402.54	V	ASSM(底設導坑)	上半鋼支保組立完成後準備鉗孔時開挖面右上端(山側)發生落盤 30 立方公尺。
27	37k+571.74	—	V	ASSM(底設導坑)	上半鋼支保#85 組(37K+571.74)組立完成繼續開挖中，上半海側微量落盤，立刻以 H 型鋼支撐阻擋，當推進至第八支時突發生大量落盤，支撐工作被迫停止，落盤持續擴大，迄隔日晨落盤穩定，經測定落盤量約 125 立方公尺。
28	37k+588.46	37k+590.86	V	ASSM(底設導坑)	因地質破碎，鋼支保因承受不了巨大土壓，海側支保變形，襯砌淨空不足，必須立即處理使淨空達到設計標準以上。
29	37k+601.84	37k+605.84	V	ASSM(底設導坑)	該區間因地質破碎，隧道覆蓋層下陷，鋼支保承受巨大壓力，開挖進度到達 37K+597.84 處暫停，#1~#44 鋼支保間開始組立模板準備施作加固混凝土，日夜不停組模工作中，#45~#49 組鋼支保海側端 45° 附近被擠壓變形向隧道中心，侵入設計襯砌線內，並繼續快速移動，必須儘速加強支撐以防止擴大。
30	37k+607.26	37k+647.26	IV V	NATM(上半先進) ASSM(底設導坑) ASSM(側壁導坑)	因地質軟弱隧道覆蓋厚度僅 5-12 公尺，開挖後地層滑動，土壓加劇鋼支保扭曲，地表滑動縫隙約 80 公分-100 公分裂縫走向與隧道向交叉約 60°-70° 長度達 50 公尺。

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

第三章 現場檢測與資料處理判釋

3.1 地電阻影像剖面探測(RIP)

地電阻影像剖面法 (RIP) 是地電阻測量技術中，結合水平電性剖面法及地電阻垂直測深法的先進施測方式。此種方式可以同時達到探測垂直測深及側向地層電阻變化的功效，在山區進行工程地質、地下水資源和地下地質調查時，地電阻影像剖面法對岩性變化與地下水富集區具有高度敏感性。RIP 可做地形效應修正，探測深度可經由調整電極數量、電極間距、遠電極佈置等方式加以適當調整，非常適用於調查斷層破碎帶、剪裂帶、地下水分佈之調查。為達到深層探查效果，本案探測使用雙極法電極排列方式，電極間距 5 公尺。

本次探測目標主要針對隧道洞口段、淺覆蓋段與開挖時曾發生湧水區段進行地下水調查，故探測目標集中在隧道覆蓋層厚度 100~150 公尺以內，以大武二號隧道北口、大鳥隧道南口及多良一號隧道北口為探測目標，以確實瞭解地質構造斷層破碎帶之位置、延伸狀態及地下水分佈狀態，詳細位置如圖 3.1-1~3.1-3。

3.1.1 野外作業說明

地電阻影像剖面法探查共佈置 4 條測線，測點間距 5 公尺，可同時兼顧探測之解析度與探測深度。測線標號以軌道里程為標記，測線佈設位置、長度及探測目的說明如表 3.1-1。測線佈置以四個原則為基準：(1)既有資料中，具可疑地質危害構造之區段(主要以隧道洞口段、淺覆蓋段或曾經發生重大施工災變者為優先)。(2)開挖過程中，單位長度(100 公尺)內開挖面曾發生嚴重滴水或湧水現象者。(3)開挖過程中，單位長度(100 公尺)內開挖面 CSIR 岩體類別等級屬於四或五者。(4)既有資料中，曾經因地質脆弱之節理發達處，以及地下水富集而導致結構受損的案例。

表 3.1-1 地電阻影像剖面測線位置及探測目的說明表

測線編號	隧道名稱	位置	測線長度 (m)	座 標		作業目的
				起 點(m)	終 點(m)	
RIP-44994	大武二號	北口	250	N2475090.4 E240766.3	N2474901.1 E240604.3	地質破碎帶 及含水裂隙
RIP-46415-E	大鳥	南口 (海側)	250	N2476198.2 E241026.5	N2475959.8 E240951.2	地質破碎帶 及含水裂隙
RIP-46445-W	大鳥	南口 (山側)	250	N2476238.5 E241001.5	N2476000.1 E240926.2	地質破碎帶 及含水裂隙
RIP-60361	多良一號	北口	250	N2489393.8 E245607.8	N2489166.0 E245504.9	地質破碎帶 及含水裂隙



圖 3.1-1 大武二號隧道 RIP 施做位置示意圖



圖 3.1-2 大鳥隧道 RIP 施做位置示意圖

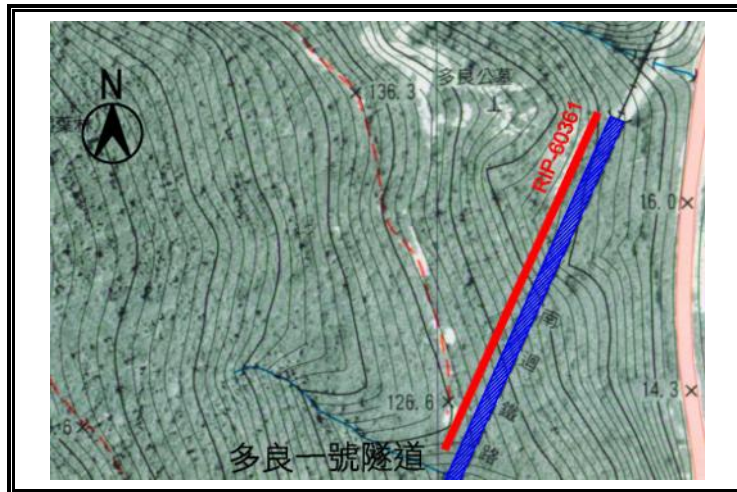


圖 3.1-3 多良一號隧道 RIP 施做位置示意圖

地電阻影像剖面調查系統以微電腦全自動控制(包含全自動自然電位修正、自動調整輸出電流、訊號加強之數位化累計及施測過程錯誤訊息顯示)，資料收集過程中可適時顯示必要資訊，有效增進資料正確性。電探主機連接智慧型控制網絡，適合多電極自動切換系統運作。儀器主機器針對二維及三維地電阻測勘設計，依所設定的電極變換、電流值、放大器增益、疊加數目等施測條件自動操作儲存於主機記憶體中，有效縮短量測時間，以獲得高品質資料。連接各電極節點之電纜內含七蕊獨立包覆，每蕊之間皆有保護隔絕，以確保優良的資料記錄品質。

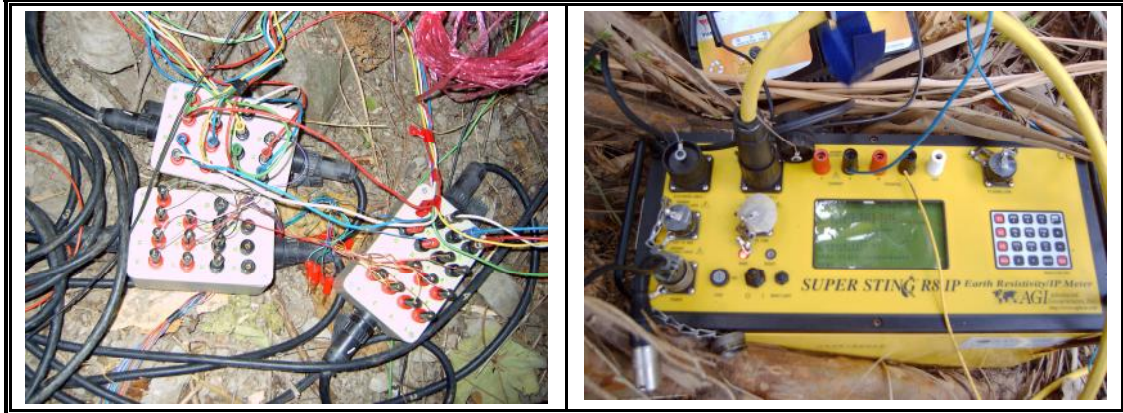


圖 3.1-4 節點盒及電探儀

電阻率探測使用二支電極棒將電流通入地層中以造成人為電場，另外二支電極棒測量此電場的電位差。此電位差與通入地下的電流強度、電極間的相對位置及各地層的導電性有關。佈置好之電極，以智慧型節點電纜相連，控制盒與電探儀主機連結，並將預先設置好之二條遠極線與主機連結，成為基礎地電阻探測系統。探測前必須檢查各電極與遠電極之接地電阻與聯通狀況，確定各電極之接地電阻狀況良好，儀器設備佈置即告完成。儀器設備就緒後，將預先設計好之施測程序與參數輸入電探儀中，根據電極之接地電阻狀況與探測深度決定輸出電壓，即可開始進行量測，量測過程需隨時注意儀器面板上所顯示之訊息，並觀測所量測到數據之變化，以期能掌握量測資料之正確與穩定性。量測收集之資料，需於現場轉錄到電腦上，並做初步之檢視，確定無誤後，即可移動電極進行下一步之量測動作。為避免雨季影響並有效增進工作進度，現場作業集中在 95 年 12 月下旬完成。

3.1.2 資料處理

本案 RIP 探測使用雙極排列法 (Pole-Pole Array) 施測，地層的電阻率與地層中水的含量、鹽度及分佈狀態有關，也與組成地層的固體顆粒的導電性有關。地層中若存在有空洞或孔隙，亦會造成地層電阻率之異常變化。區域地下水含量愈高，地層的粒度愈細，游離離子愈多，電性連通性愈佳，則地層電阻率愈低。由地層的電阻率來研判地層的含水程度、粒度及岩性，藉以研判地層的形貌及構造。通常地電阻影像剖面上所呈現地層的形貌及構造主要受到地下水分布、斷層破帶、地層裂隙等因素所控制，但在地層構造過於複雜的狀況中，地層電性會受到

綜合因素的干擾，電阻影像剖面上所呈現地層的形貌及構造與真實地層層面之間符合的程度，會略受影響。

本案資料處理採用地球物理界電阻探測法中，最廣泛使用的 Res2dinv 程式 (Loke, 1998)。Res2dinv 之順演過程使用有限元素法 (Finite Element Method) 作數值計算，逆演過程使用平滑限制最小平方法 (Smoothness Constrained Least-squares Method)。資料解釋程式可將地形資料一併納入元素區塊，消除水平地表模型需作地形效應修正的困擾。Res2dinv 程式之順演與逆演過程，可透過多次疊代運算達到結果收斂至數值穩定，因此可獲得極為接近現地真實地電阻分布之實況。

依據資料分析所獲得的地電阻分布範圍來看，此區域地電阻值大多在 250Ω-m 以下，並且以大武二號隧道 RIP 模型中里程 45K+180 的地電阻數值，比對地表小型逕流的相對地電阻數值，以 4Ω-m 為界定低地電阻之邊界值；一般以隧道周邊應力變化的危害範圍常例來說，隧道直徑 2 倍範圍之內的疏鬆狀態均有可能構成潛在危害，因此在 RIP 模型成果圖中，以接近隧道 15m 以內且小於 4Ω-m 的區域，列為對隧道的「疑似危害區」。疑似危害區分成滲水潛能區及地下水富集區，以分布位置、影響範圍、危害延伸性作為可能產生危害的評估標準，表 3.1-2 為疑似危害區主要的判釋基礎說明。

表 3.1-2 疑似危害區說明表

疑似危害區種類	特性	分布位置	影響範圍	危害延伸性
滲水潛能區	狹長型疏鬆區 或線型破碎帶	隧道上方(相對 隧道具有向下移 動位能)	局部(<10m)	可能形成地下水的 流通延伸來源
地下水富集區	大範圍疏鬆區	隧道下方(對隧 道周邊應力分布 有影響)	廣域(>10m)	可能造成大範圍 應力分布不均現象

圖 3.1-5 至圖 3.1-8 為各隧道上方施做 RIP 探測之原始紀錄，經依照距離與電壓之關係，繪製成之電壓降曲線圖，由圖中可發現本次地電阻影像剖面探測，除了少部份測點因現地因素造成電流無法送入地下，資料品質較差，整體來看資料品質良好。圖 3.1-9 至圖 3.1-12 為依照各隧道上方施做 RIP 探測之原始紀錄，繪製成之視電阻率擬似剖面圖，由擬似剖面圖中可發現本次地電阻影像剖面探測，於探測範圍內，存在部份低電阻區，此低電阻區推估與地下水及破碎帶之存在有關，但其與既有隧道間之相互關係，則需透過進一步之資料處理。圖 3.1-13 至圖 3.1-16 為地質剖面示意圖，修改自南迴鐵路長大隧道現場地質師顧問工作總結報告 (聯合大地工程顧問公司，民國 80 年)。圖 3.1-17 至圖 3.1-20 為各隧道上方施做 RIP 探測，經過 Res2dinv 逆推之後所獲得的地電阻模型成果。橫貫圖中的長條型白色區域為隧道 (投影) 位置，滲水潛能區及地下水富集區則分別以圖框標示出區域，以供綜合判釋中里程定位之用。

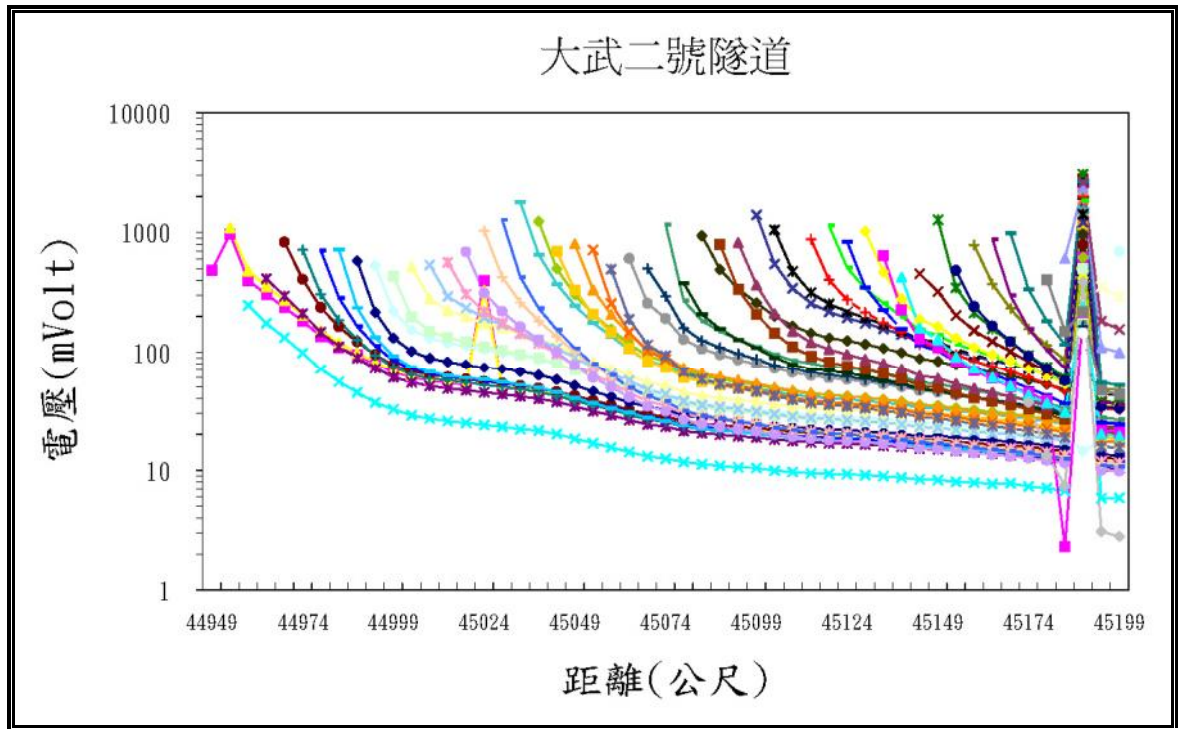


圖 3.1-5 大武二號隧道 RIP 電壓降曲線圖

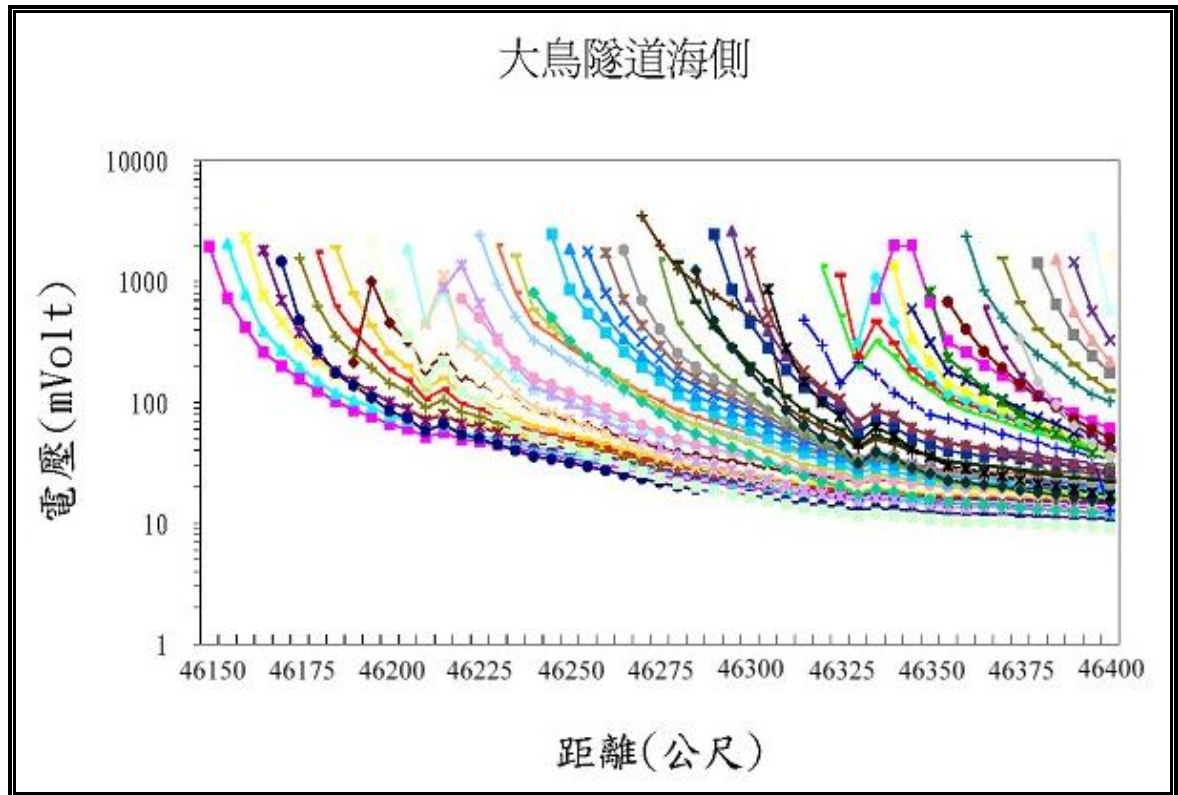


圖 3.1-6 大鳥隧道海側 RIP 電壓降曲線圖

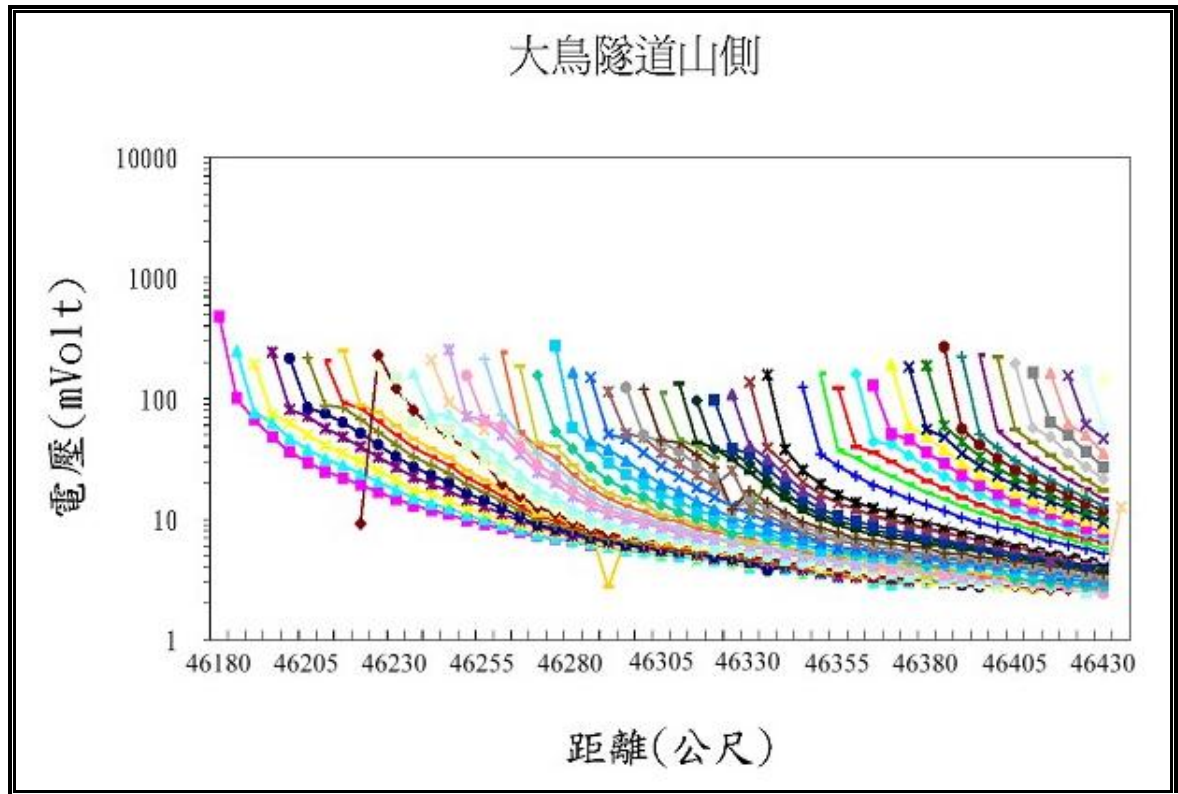


圖 3.1-7 大鳥隧道山側 RIP 電壓降曲線圖

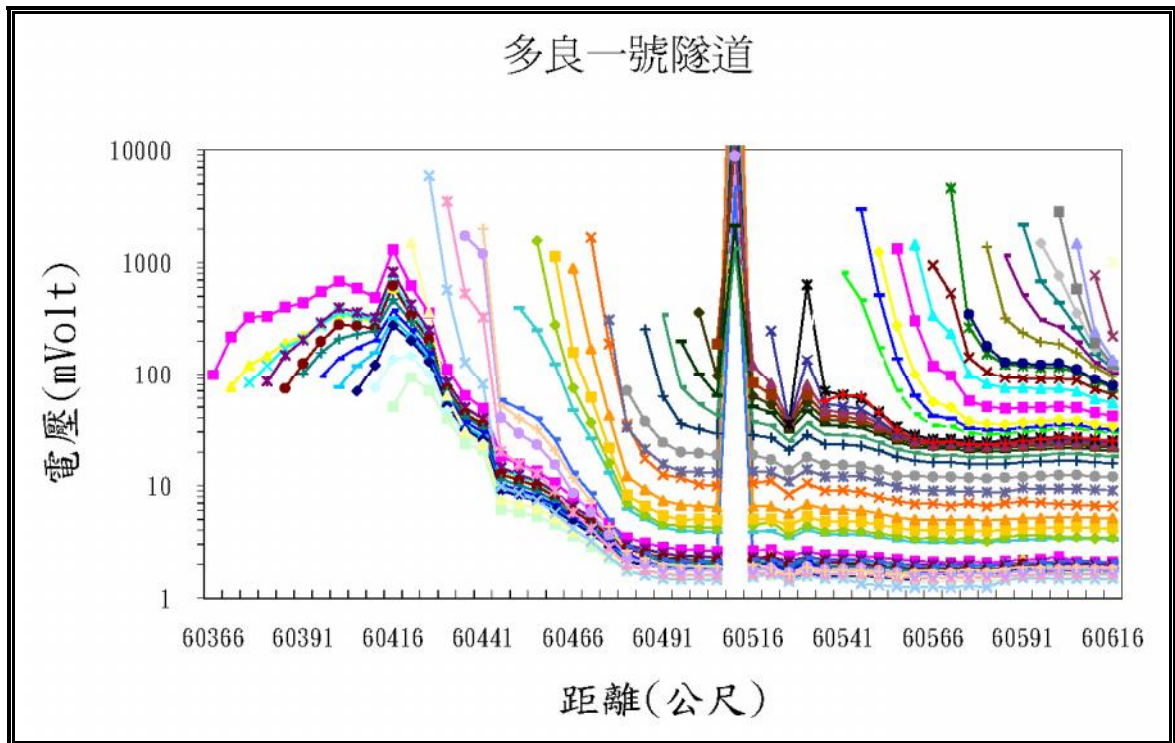


圖 3.1-8 多良一號隧道 RIP 電壓降曲線圖

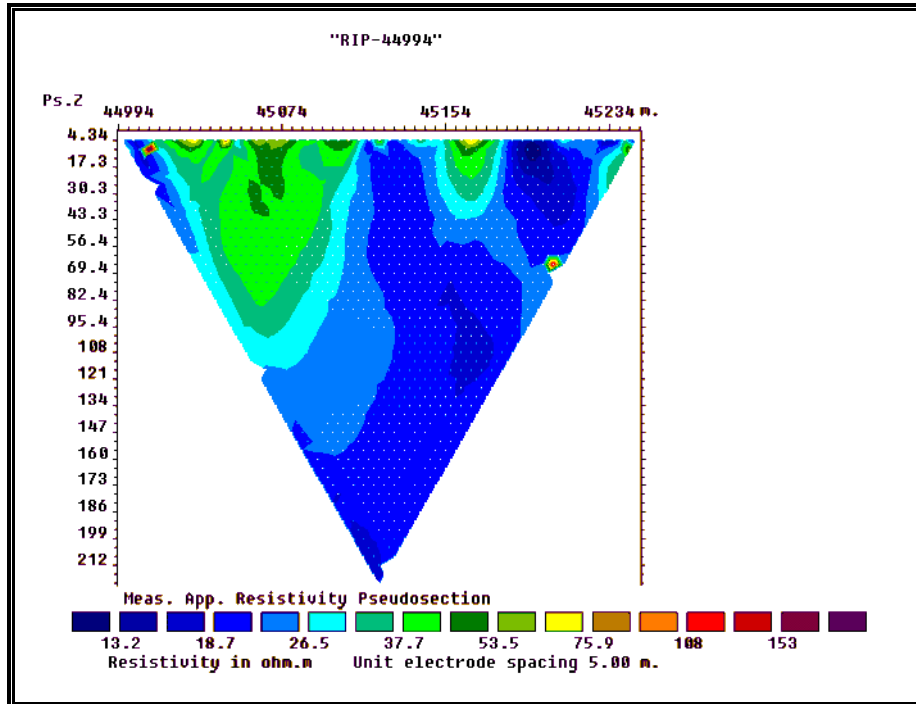


圖 3.1-9 大武二號隧道 RIP 視電阻擬似剖面圖

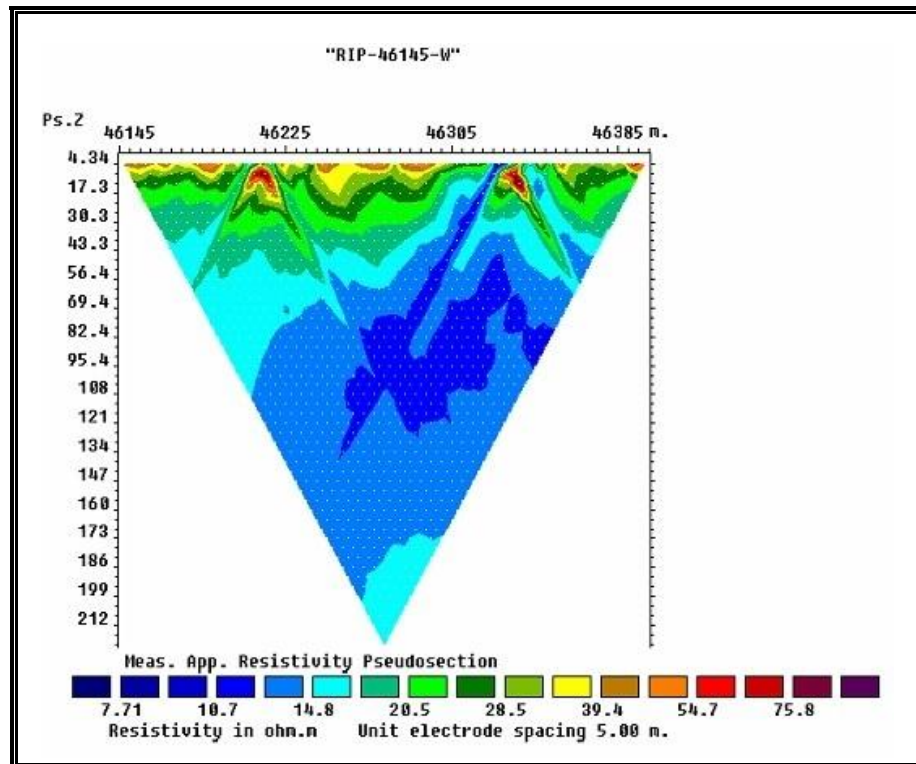


圖 3.1-10 大鳥隧道海側 RIP 視電阻擬似剖面圖

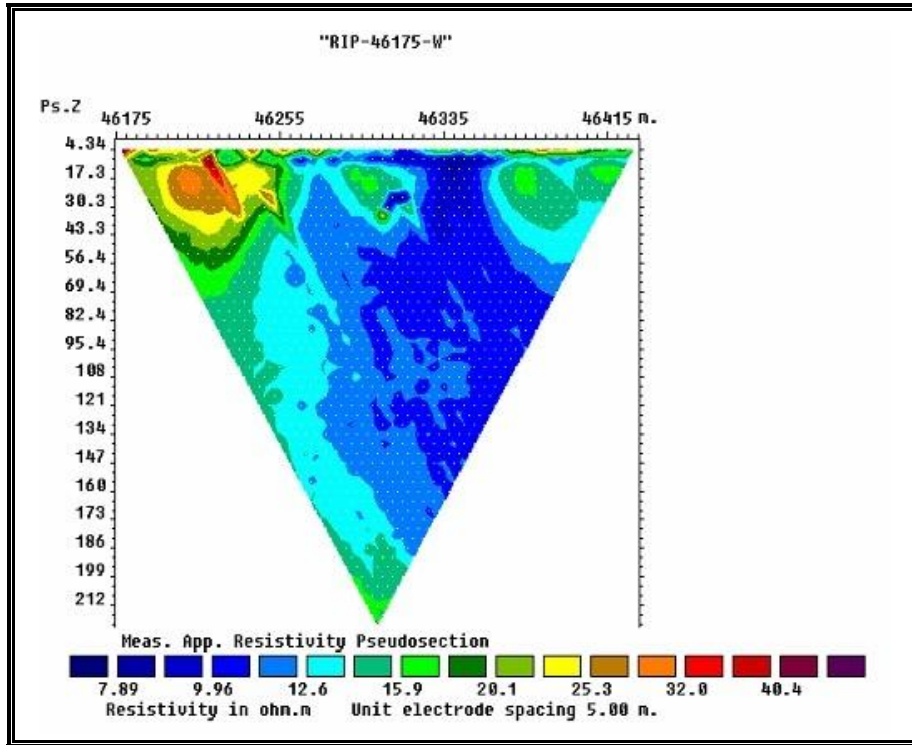


圖 3.1-11 大鳥隧道山側 RIP 視電阻擬似剖面圖

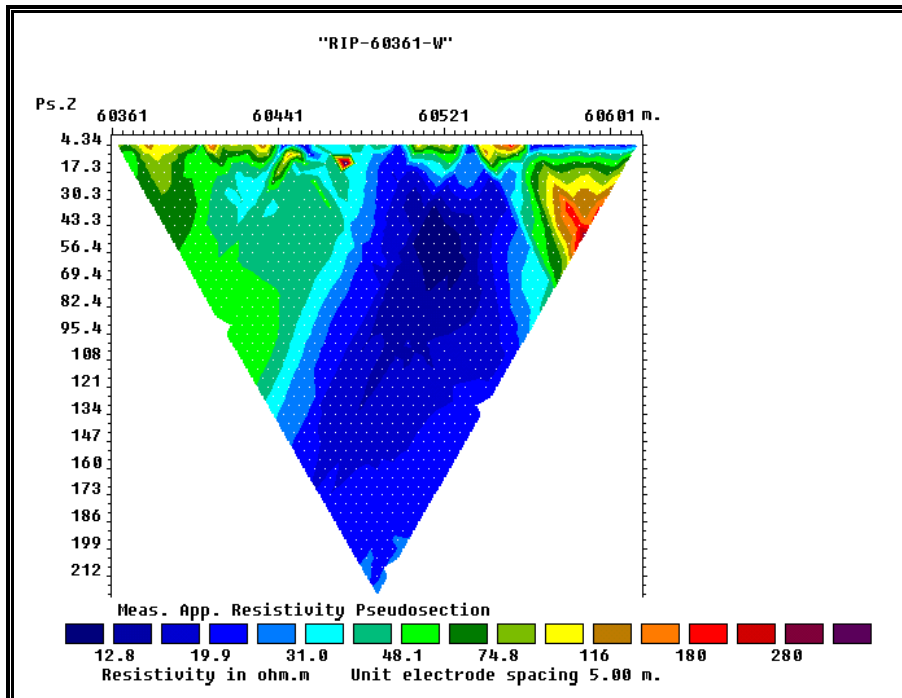


圖 3.1-12 多良一號隧道 RIP 視電阻擬似剖面圖

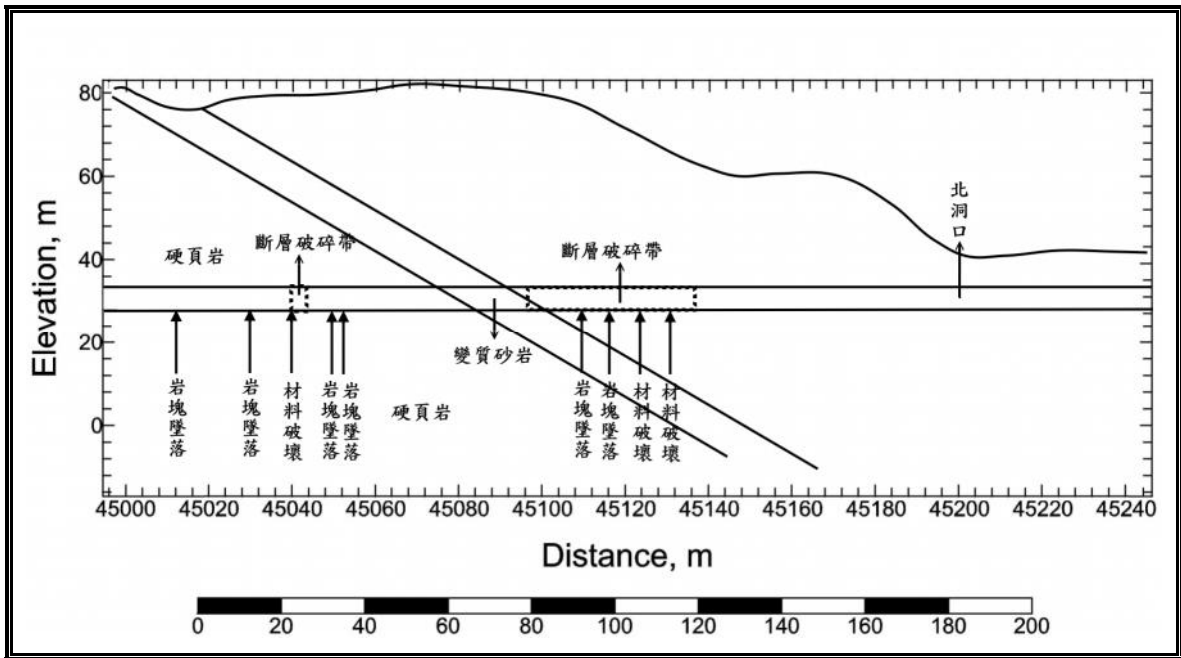


圖 3.1-13 大武二號隧道 RIP 地質剖面示意圖

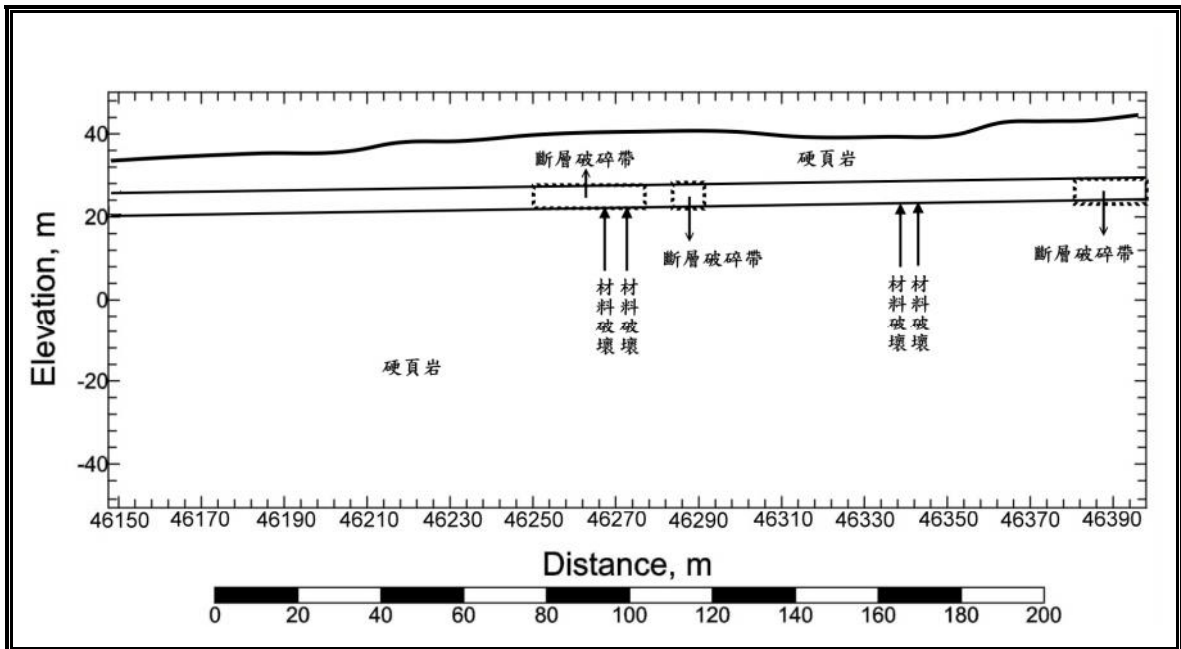


圖 3.1-14 大鳥隧道海側 RIP 地質剖面示意圖

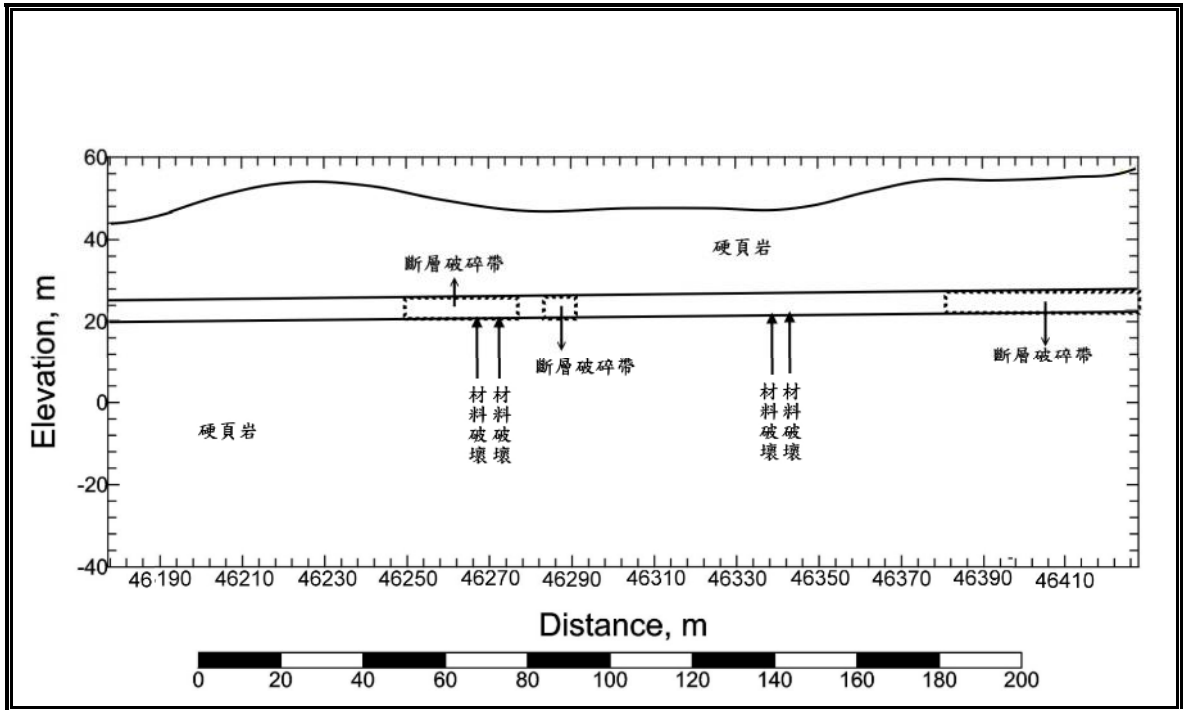


圖 3.1-15 大鳥隧道山側 RIP 地質剖面示意圖

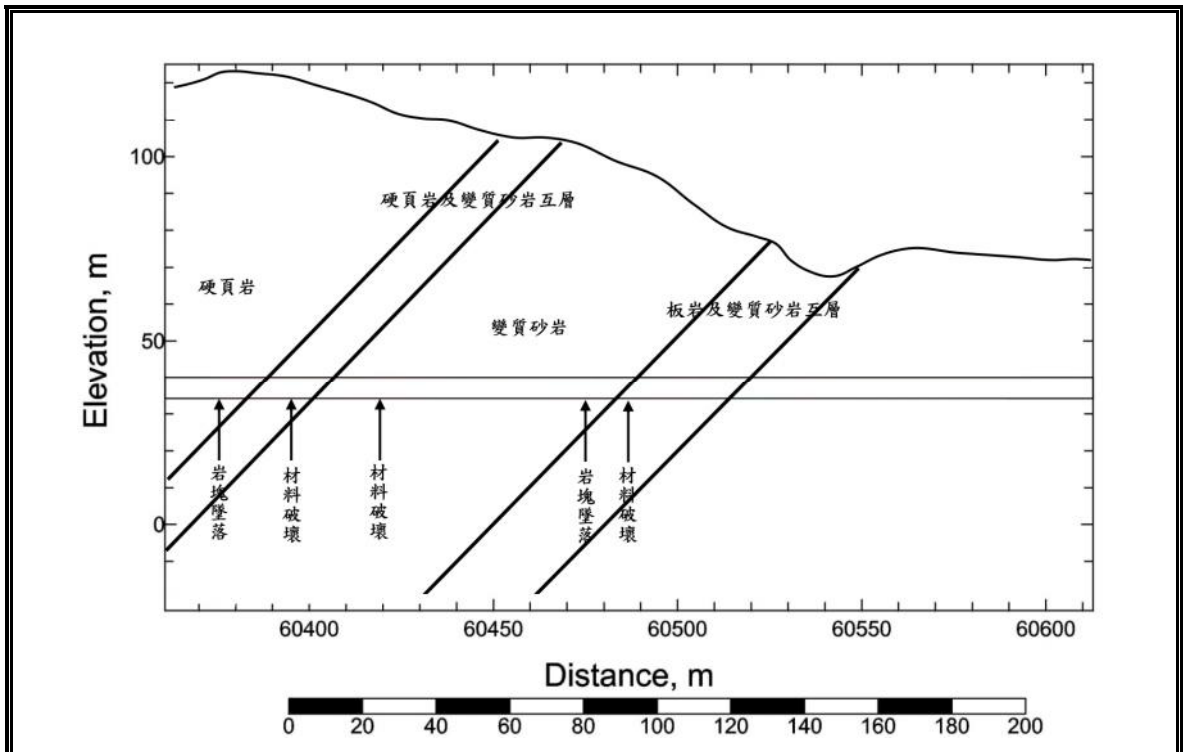


圖 3.1-16 多良一號隧道 RIP 地質剖面示意圖

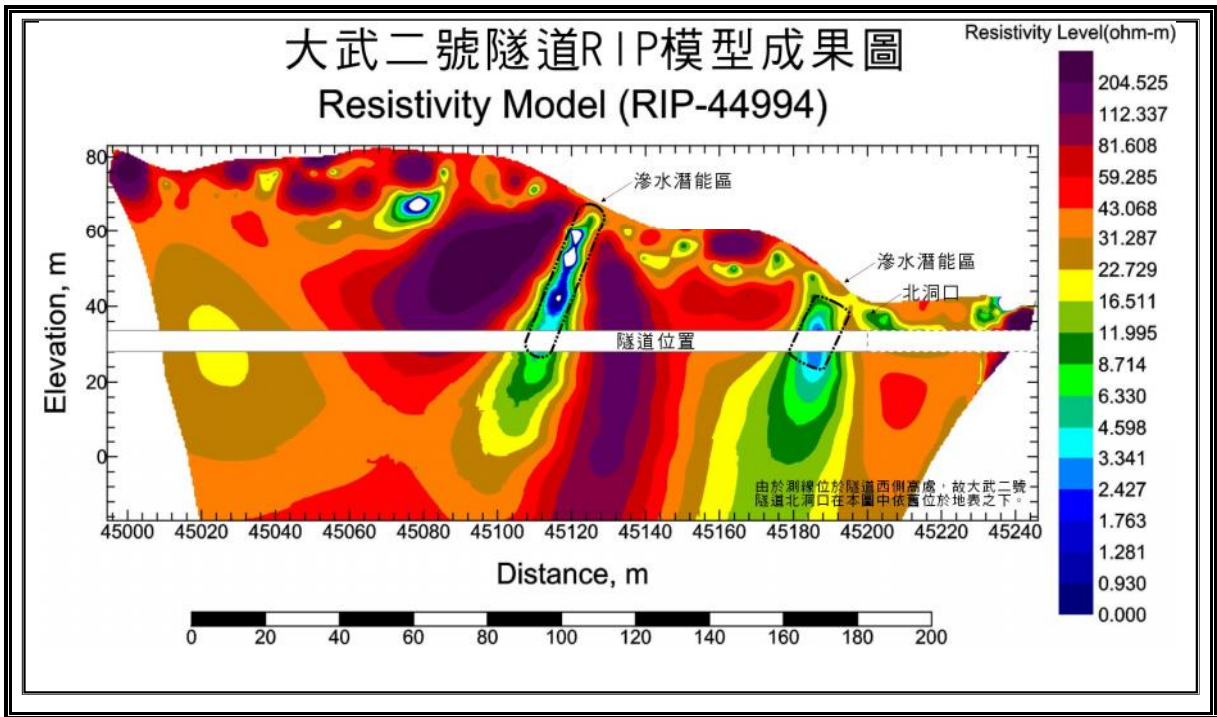


圖 3.1-17 大武二號隧道 RIP 模型成果圖

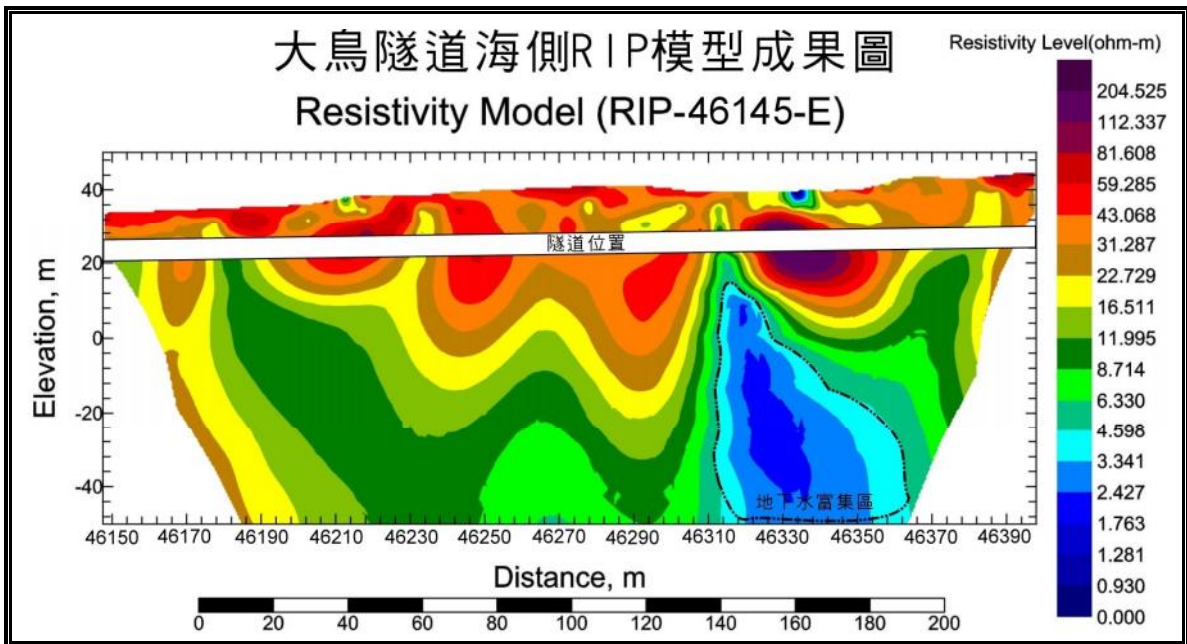


圖 3.1-18 大鳥隧道海側 RIP 模型成果圖

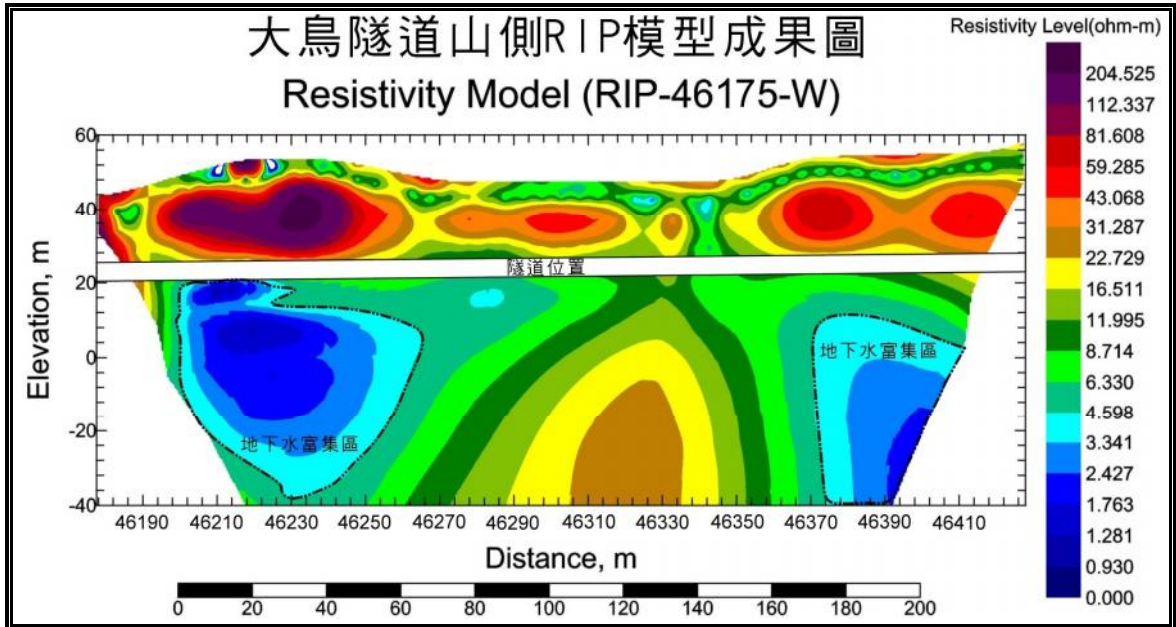


圖 3.1-19 大鳥隧道山側 RIP 模型成果圖

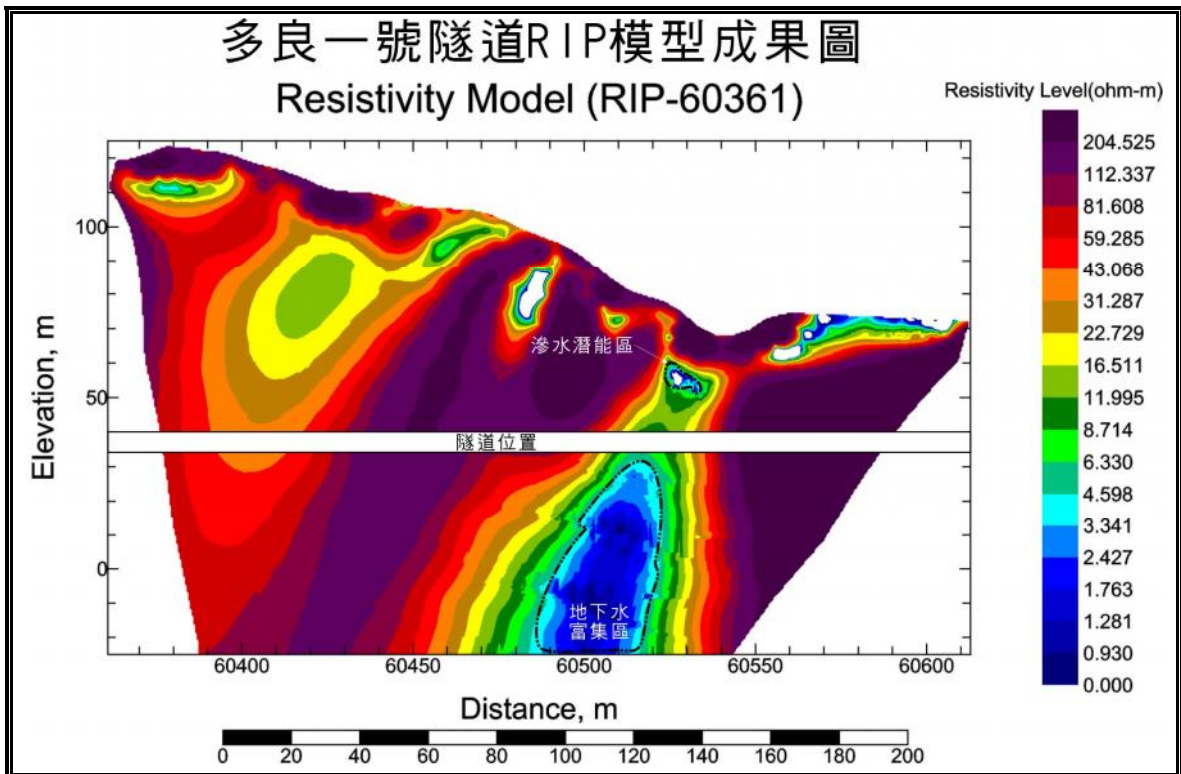


圖 3.1-20 多良一號隧道 RIP 模型成果圖

3.1.3 成果評估

本案地電阻影像剖面探測測線，計有大武二號隧道北口 RIP-44994、大鳥隧道南口海測 RIP-46145-E、大鳥隧道南口山側 RIP-46175-W、多良一號隧道北口 RIP-60361 等四條，茲將地電阻影像剖面調查評估之可能產生外力劣化的位置分別述敘如下：

1.大武二號隧道 RIP-44994 測線：

由圖 3.1-17 所得電阻影像剖面圖發現，此測線底下地層電阻率分佈範圍多在 $30\Omega\text{-m}$ 以上，整體地層電阻率屬於中電阻率地層，整體推估應為少裂隙節理岩盤。主要低電阻區分布範圍在隧道里程 45K+104 至 45K+130 及 45K+184 至 45K+200 附近，位處隧道上方，此兩處屬於裂隙發達或含水量豐富之地層，列為滲水潛能區，走向皆略呈 70° 傾斜，應與地表逕流及局部小型地質構造有關。

2.大鳥隧道海測 RIP-46145-E 測線：

由圖 3.1-18 所得電阻影像剖面圖發現，此測線底下地層電阻率分佈範圍多在 $10\Omega\text{-m}$ 以上，整體地層電阻率屬於低電阻率地層，整體推估應為多裂隙節理岩盤；接近隧道上方的地層電阻率均可達 $40\Omega\text{-m}$ 以上，屬於少裂隙節理岩盤，穩定性佳。主要低電阻區分布範圍在隧道里程 46K+314 至 46K+362 附近，位處隧道下方，具有向下延伸特性，屬於裂隙發達或含水量豐富之地層，列為地下水富集區，走向略呈 80° 傾斜，並且在接近地表處有地電阻區延伸跡象，推測與地質破碎構造有關。

3.大鳥隧道山側 RIP-46175-W 測線：

由圖 3.1-19 所得電阻影像剖面圖發現，此測線底下地層電阻率分佈範圍多在 $10\Omega\text{-m}$ 以上，整體地層電阻率屬於低電阻率地層，整體推估應為多裂隙節理岩盤；局部區域地層電阻率達 $30\Omega\text{-m}$ 以上，屬於少裂隙節理岩盤。主要低電阻區分布範圍在隧道里程 46K+202 至 46K+262 及 46K+370 至 46K+410 附近，兩處皆位於隧道下方，屬於裂隙發達或含水量豐富之地層，列為地下水富集區。46K+202 至 46K+262 區段具有低電阻區集中特性，無明顯走向；46K+370 至 46K+410 區段具有低電阻區向下延伸特性，走向略呈 75° 傾斜。此兩處低電阻區段均屬於大範圍疏鬆區，可能對隧道周邊應力分布產生不良影響。

4.多良一號隧道 RIP-60361 測線：

由圖 3.1-20 所得電阻影像剖面圖發現，此測線底下地層電阻率分佈範圍多在 $50\Omega\text{-m}$ 以上，地層電阻率屬於中高型電阻率地層，推估應為偶有裂隙節理岩盤。主要低電阻區分布範圍在隧道里程 60K+515 至 60K+535 及 60K+480 至 60K+520 附近。60K+515 至 60K+535 位於隧道上方，列為滲水潛能區，無明顯走向，60K+480 至 60K+520 位於隧道下方，走向略呈 80° 傾斜，列為地下水富集區。此兩處皆屬於裂隙發達或含水量豐富之地層，具備低電阻區域(疑為地下水)連通態勢，可能形成該處應力不穩定的來源，或是隧道滲水的主因。

3.2 中線測量

中線量測僅施作於多良一號隧道，利用經緯儀及水準儀量測鐵軌中心線之座標及高程。測量儀器為 Leica TCR803，測角精度 3"，測距標準誤差 $2\text{ mm}\pm 2\text{ ppm}$ 以內。其中線位置即現有兩鐵軌之中心點，於多良一號隧道南口佈設導線點 D1 為出發點，D2~D5 位於台九線上，D6 位於多良車站南側，D7 位於多良一號隧道北口，由北往南測量軌道面高程及實際線形資料，閉合於隧道南口。由隧道洞口測起，於直線段每隔 20 公尺施測一點，並沿中線每 100 公尺設置標樁，另在曲線之起終點加設標樁。現場施測過程及標樁詳見圖 3.2-1、圖 3.2-2。

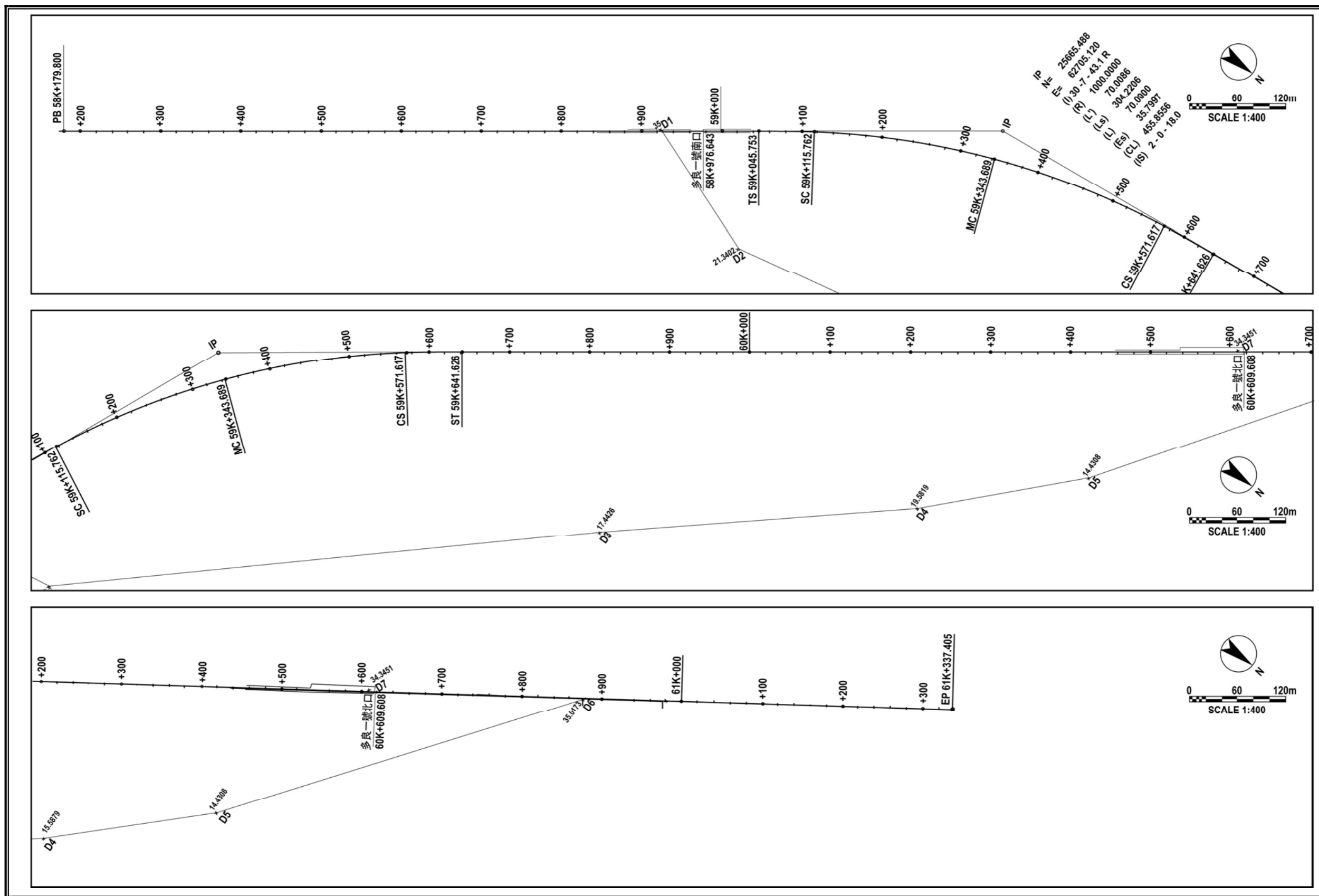
多良一號隧道中線測量成果如圖 3.2-3 和圖 3.2-4 所示。經與竣工圖比對結果顯示，其平面線型與竣工圖一致，惟其縱斷面既有軌面高程起伏不規則，無法正確計算豎曲線資料，竣工圖中之豎曲線資料詳見圖 3.2-5。



圖 3.2-1 中線測量現場作業照片



圖 3.2-2 中線測量現場標樁



3.2-3 多良一號隧道中線測量平面圖

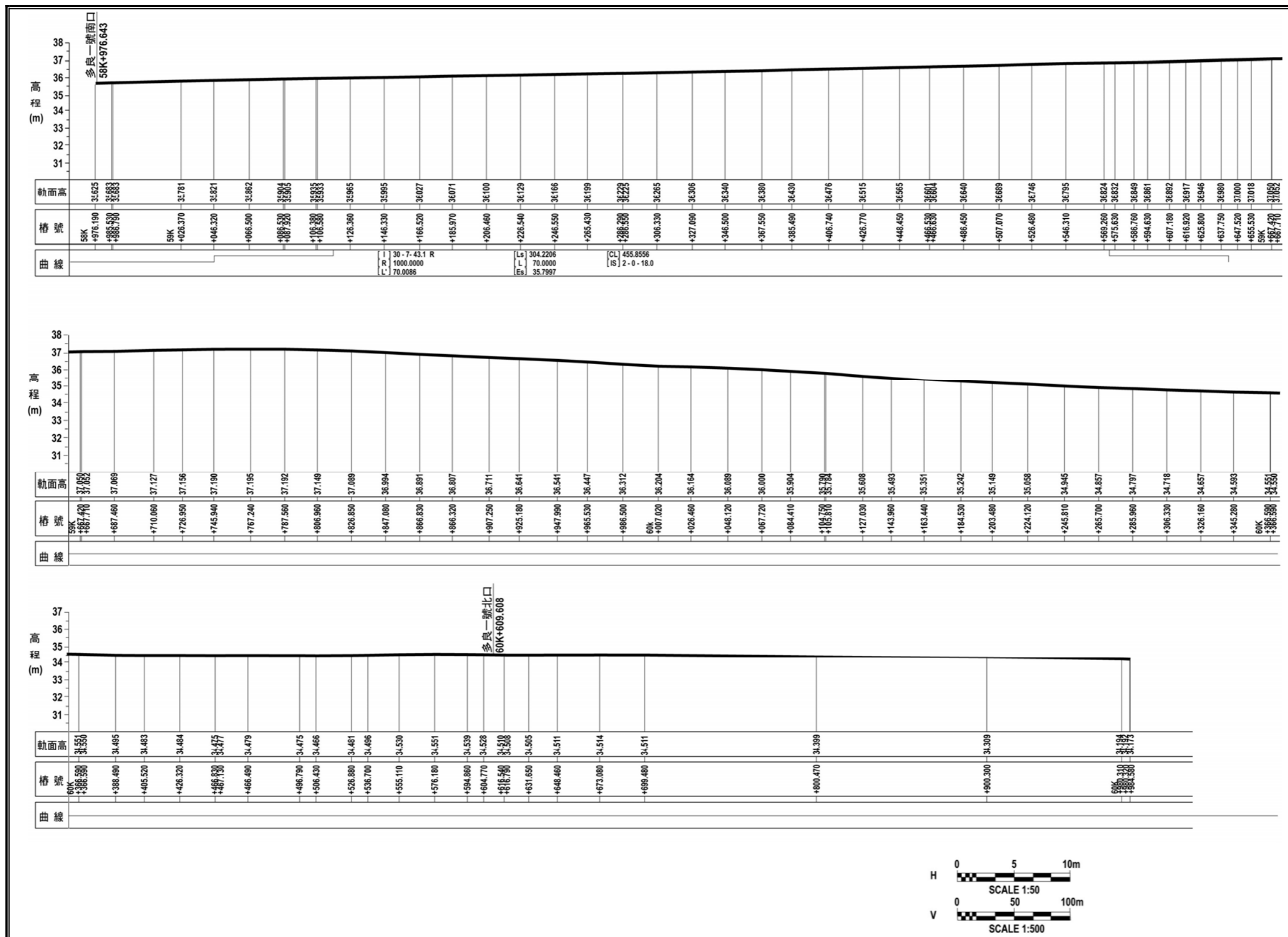


圖 3.2-4 多良一號隧道中線測量縱斷面圖

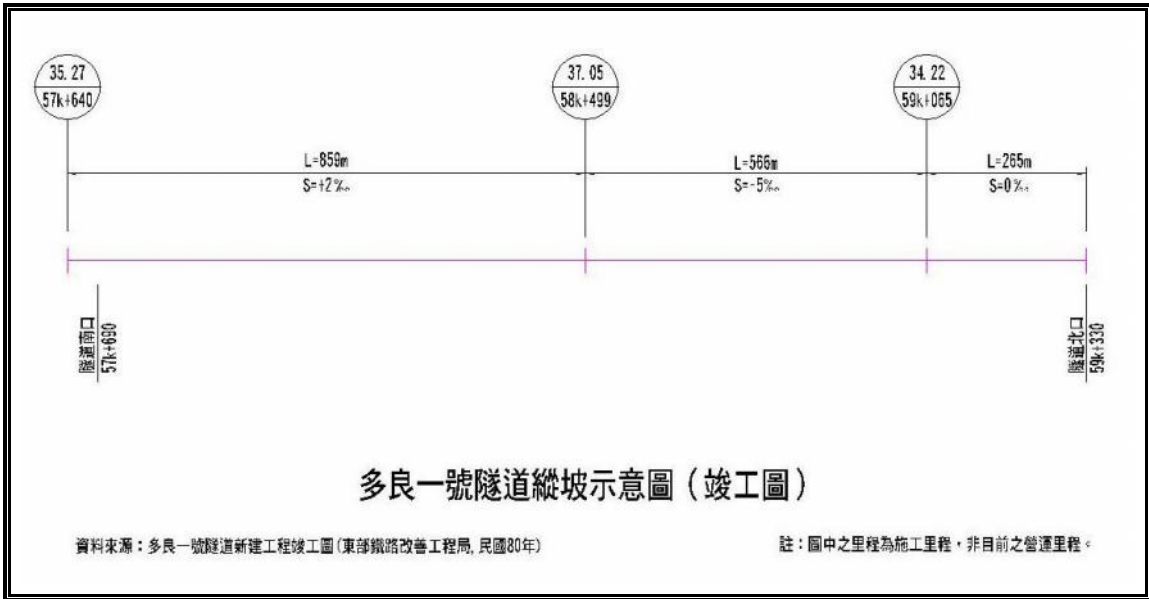


圖 3.2-5 多良一號隧道縱坡示意圖 (竣工圖)

3.3 隧道內橫斷面淨空測量

隧道內橫斷面淨空測量工作，採用 Leica GRP5000 隧道影像掃描系統，於影像掃描時可一併量測隧道斷面淨空，其精度可達 10mm 以內，每一斷面最多可量測至 20,000 點。

隧道內橫斷面淨空量測位置之選取點，原則上以平均每隔 50m 距離量測一處，並於隧道橫斷面變化區段另額外增加施測點。經影像掃描過後之隧道橫斷面，其量測結果輸出型式包含點位座標資料以及橫斷面淨空測繪圖，測點座標量測成果範例如圖 3.3-1 所示，其包含該斷面所有測點詳細座標資料，亦可將各測點繪製成淨空橫斷面圖，成果範例如圖 3.3-2 所示，圖中右側欄位述明施測點位置、施測日期、軌距、超高以及橫斷面總測點數等資訊，左側欄位則為橫斷面淨空測繪成果，可顯示該斷面之軌道、管線及凹槽設施等位置。另將隧道內橫斷面淨空測量成果與 貴局工務規章(民國 87 年)之改建電化路線隧道建築界線圖套繪，成果範例如圖 3.3-3 所示，可反應目前隧道內淨空是否已侵入改建電化路線隧道建築界線。各隧道內橫斷面淨空測量成果套繪圖，請詳見附錄 C。由附錄 C 可知，七座隧道全線內淨空均符合基本界線，惟部份隧道因側壁管線附掛、大鳥隧道因隧道內單側排水邊溝加高而侵入普通隧道加寬建築界線，另多良一號隧道 60K+083、大竹二號隧道 56K+544、56K+594、56K+794、大竹一號隧道 53K+619、安朔隧道 37K+998 等隧道內橫斷面淨空已侵入電化隧道內加寬建築界線。

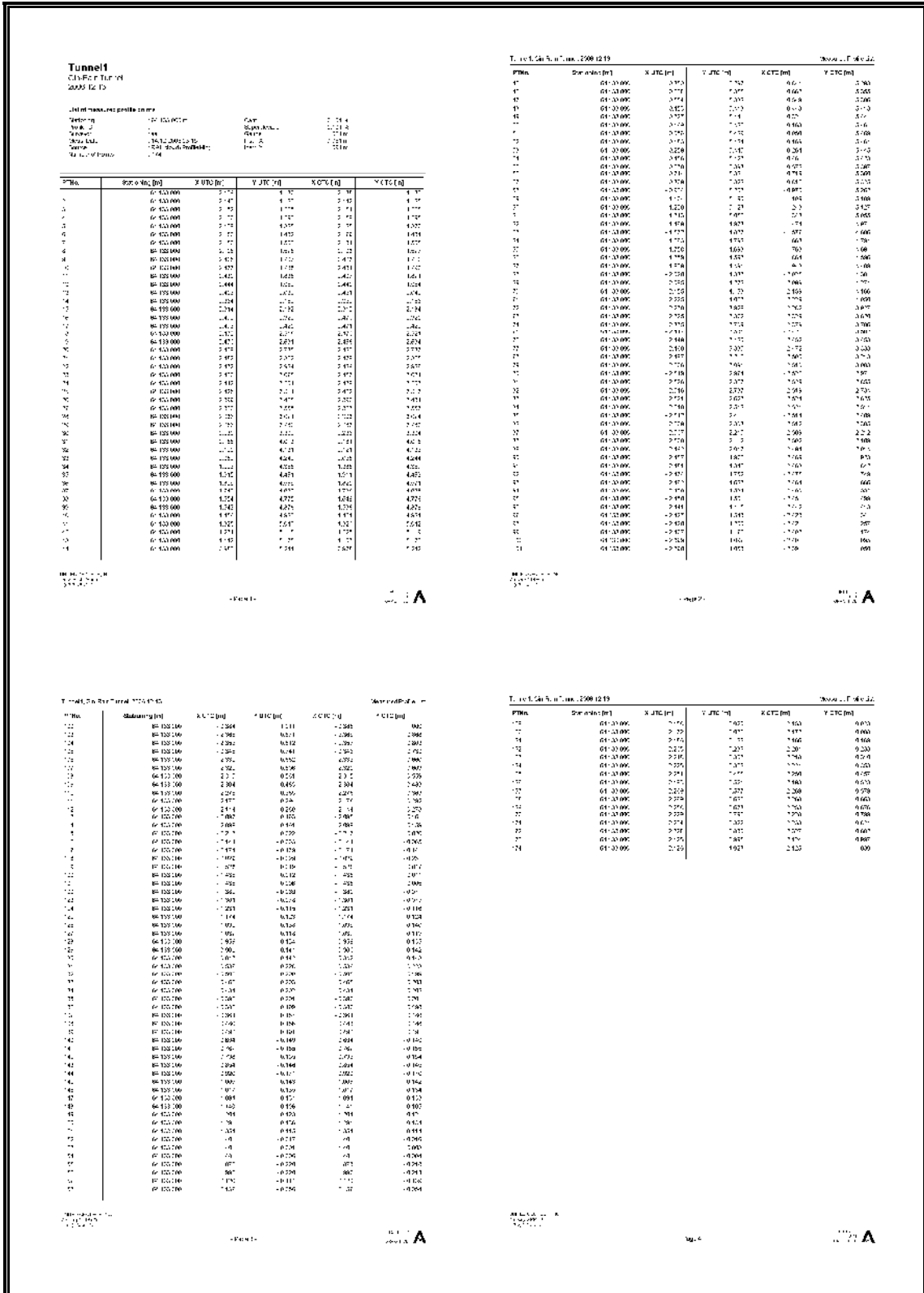


圖 3.3-1 隧道橫斷面淨空點位座標量測成果範例

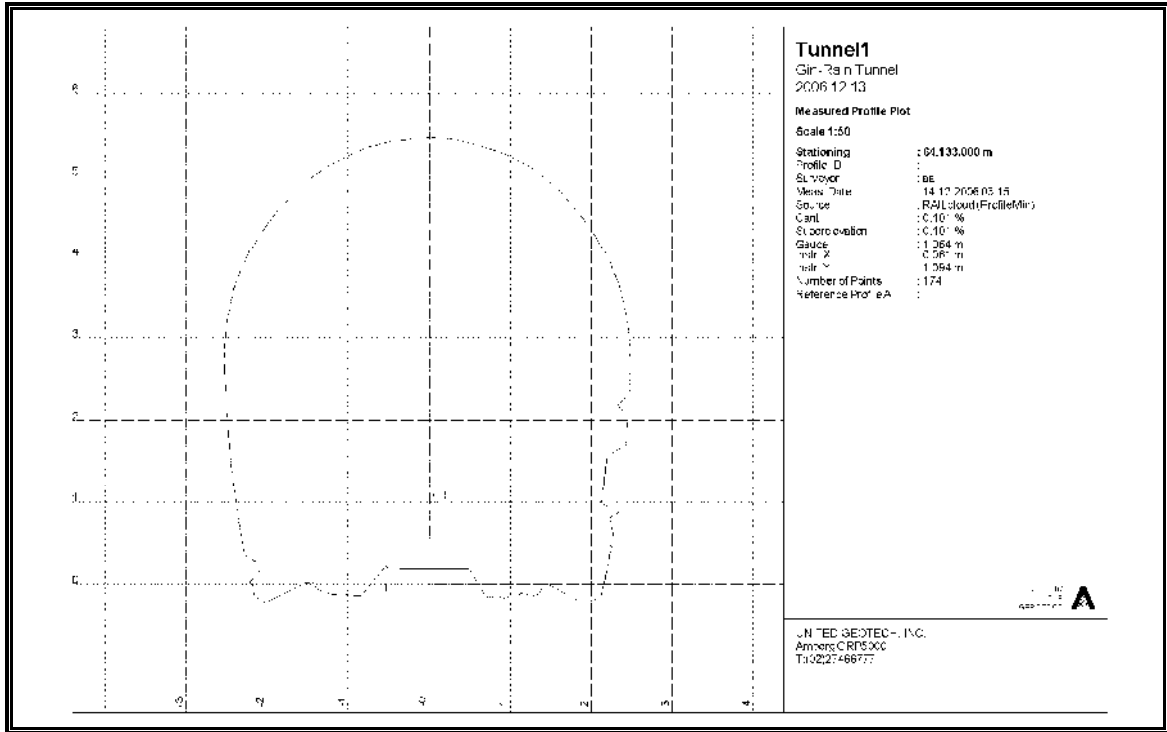


圖 3.3-2 隧道橫斷面淨空測繪成果範例

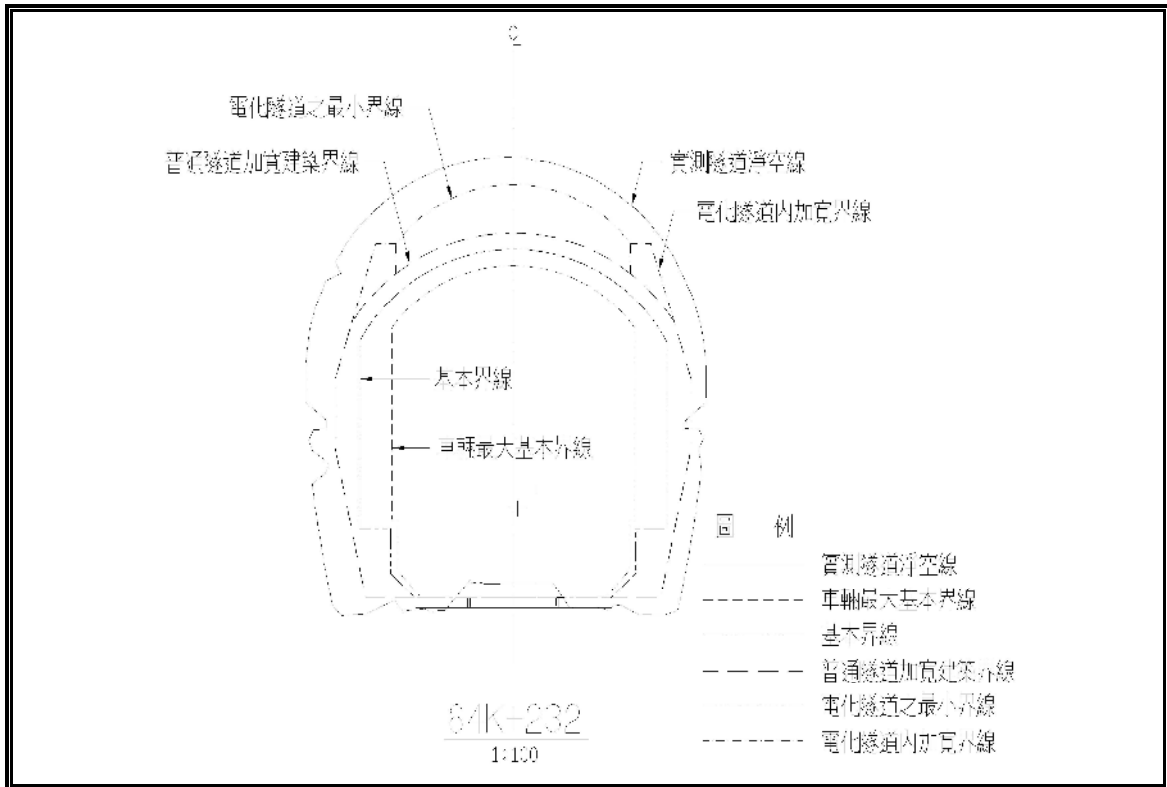


圖 3.3-3 隧道橫斷面淨空測量與電化淨空套繪成果範例

3.4 地表現場勘查

地表現場勘查之目的在取得現場地形、地貌、植被、岩層露頭、水系及周邊交通之狀況等資料。現場勘查範圍將以各隧道洞口為主，其中多良一號隧道北口區段屬淺覆蓋段，亦將延伸勘查範圍，以涵蓋淺覆蓋區段。本計畫範圍各隧道洞口地表現場勘查及現況描述如下：

1. 金崙隧道

隧道洞口植被覆蓋良好，屬金崙溪水域。以流速及排水溝斷面積估算隧道出水量，北洞口山側排水溝出水量約為 350L/min，海側約為 250L/min，但出口處遭接管取水，實際出水量應大於此數量；南洞口山側及海側排水溝隧道出水匯流後，估算其出水量約為 350L/min。隧道南端設有金崙站，東 66 可通達金崙村。

2. 多良一號隧道

隧道北端臨靠太平洋，南端近拉布拉溪水域。北洞口於山側護坡後方出露一小範圍之灰色砂岩露頭，多不規則裂面，一組系統節理位態為 $N40^{\circ}E/52^{\circ}W$ ，山側隧道出水量極少，海側出水量則約為 170L/min；南洞口下方小路擋土牆上方出露灰黑色硬頁岩，表面局部鏽染呈黃棕色，岩體大致完整堅實，劈理位態為 $N80^{\circ}W/15^{\circ}S$ ，不甚發達，兩組節理位態分別為 $N50^{\circ}W/20^{\circ}S$ 、 $N40^{\circ}E/75^{\circ}W$ ，未能量得隧道出水量，洞口植被覆蓋良好。多良站設於多良一號隧道北洞口北側，附近既有道路可聯絡金崙與多良。

3. 大竹二號隧道

大竹二號隧道與大竹一號隧道分別位於大竹溪左、右岸，兩隧道間(大竹二號隧道南洞口端)設有瀧溪站。大竹二號隧道北洞口未見地下水流出，南洞口山側擋牆上方出露黃棕色砂岩，疑似近期曾發生邊坡破壞，岩盤裸露，未見系統不連續面，稍破碎，未能量得隧道出水量。

4. 大竹一號隧道

隧道北洞口正面邊坡陡直，洞口上方及海測岩盤面均有噴凝土保護，山側出露黃棕色砂岩，層理位態約為 $N70^{\circ}W/20^{\circ}S$ ，層理走向大致與隧道平行，向海側傾斜，山側隧道出水經過鐵路下方與海側出水匯流，遭接管取水，未能量得隧道出水量。隧道南洞口則未見地下水流出。

5. 大鳥隧道

隧道北端緊臨加津林溪，南端屬大鳥溪水域，亦臨靠大鳥村。北洞口正面邊坡陡直，出露黃棕色砂岩，層理位態約為 $N60^{\circ}E/30^{\circ}S$ ，一組系統節理位態為 $N70^{\circ}E/35^{\circ}N$ ，隧道出水量以水桶盛裝概估，山側出水量約為 500L/min，海側則約為 50L/min；南洞口以流速及排水溝斷面積估算隧道出水量，山側及海側排水溝水量均約為 900L/min，唯山側地下水遭接管取水，實際水量應大於此數量。

6.大武二號隧道

隧道北端臨靠太平洋，南洞口近大武溪。洞外設有大武站，大武村周遭除台九線外，亦有東 70 及產業道路可聯絡其他村鎮。北洞口山側排水溝水量約為 1000L/min，海側水量則約為 100L/min，唯海側出水遭接管取水，實際水量應大於此；南洞口地表可見風化岩層，未見地下水流出，植被覆蓋良好。

7.安朔隧道

隧道北端僅有產業道路可通尚武，朝庸溪流經隧道北洞口下方，隧道南端鄰靠安朔溪水域，憑產業道路可聯絡達仁鄉，洞口地表植被覆蓋良好。

各隧道洞口地表勘查現況如圖 3.4-1 所示，另各隧道洞口洞門型式及邊坡保護工法詳見表 3.4-1。

表 3.4-1 隧道洞門型式及邊坡保護工法

隧道名稱	位置	洞門型式	邊坡保護工法
金崙	北口	重力式	擋土牆
	南口	重力式	漿砌卵石護坡
多良一號	北口	重力式	預力地錨護坡
	南口	重力式	擋土牆
大竹二號	北口	重力式	擋土牆
	南口	重力式	漿砌卵石護坡
大竹一號	北口	重力式	自然邊坡
	南口	重力式	預力地錨護坡
大鳥	北口	重力式	自然邊坡
	南口	重力式	擋土牆
大武二號	北口	重力式	擋土牆
	南口	重力式	擋土牆
安朔	東口	重力式	擋土牆
	西口	重力式	自然邊坡



圖 3.4-1 隧道洞口現況照片 (1/4)



大竹二號隧道北洞口現況

大竹二號隧道南洞口現況

大竹二號隧道南洞口地表破碎砂岩層

大竹一號隧道北洞口上邊坡砂岩層露頭

大竹一號隧道北洞口現況

大竹一號隧道南洞口現況

圖 3.4-1 隧道洞口現況照片 (2/4)



圖 3.4-1 隧道洞口現況照片 (3/4)



圖 3.4-1 隧道洞口現況照片 (4/4)

3.5 裂縫、滲水之調查(攝影及測繪)

隧道襯砌表面裂縫調查在瞭解各隧道全線襯砌表面裂縫的位置、分佈情形等資料，而滲水調查則欲瞭解襯砌表面的滲水位置、滲水情形等。本項調查工作分為二大部分，其一為隧道影像掃描，另一則為全線目視檢查，現分述如后。

3.5.1 GRP5000 隧道影像掃描

本計畫隧道影像掃描採用瑞士 Leica 公司與 Amberg 工程顧問公司共同合作發展之 GRP5000 隧道影像掃描系統(如圖 3.5-1)，進行隧道表面裂縫及滲水的影像掃描。

1. 調查原理及設備規格

GRP5000 隧道影像掃描系統係專為隧道內部檢測工作而設計，可做 360 度環狀掃描，將隧道內側斷面四周的情形一次紀錄下來。其原理是利用稜鏡之旋轉反射與偏轉功能將掃描器之雷射光束照射探測區域，接收反射回來的光束，這些光束的強度會反映出探測區域的光線強弱，將接收的光線訊號轉換成電子訊號，經電腦處理分析，即可反映出探測區域的影像及物理特性。

隧道影像掃描系統功能及精度規格簡介如下：

- (1) 本系統可擷取隧道表面影像及斷面淨空量測分析。
- (2) 本系統可適用於各種不同軌距，如 1.000m/1.067m/1.435m/1.524m/1.6000m 等。
- (3) 可量測軌道軌距，精度可達 0.5mm 以內。
- (4) 可量測軌道超高，精度可達 1mm 以內。

- (5)可量測隧道斷面淨空，精度可達 10mm 以內。
- (6)可使用於各種線形，如直線、圓曲線及克羅梭、三次拋物線、正弦半波長等緩和曲線。
- (7)可於現場電腦螢幕上即時顯示斷面淨空圖形及里程、軌距、超高等資料。
- (8)可顯示隧道斷面與車廂邊緣之淨空值及每一量測點的 X/Y 值。
- (9)使用雷射掃描，自動 360 度旋轉量測，每一個隧道斷面最多可量測至 20,000 點，每秒可量測至 500,000 點。
- (10)所有量測成果皆可自動儲存於電腦與報表列印及輸出至 DXF/ASCII/JPG/TIFF/PDF/RTF/XLS 等。

2.現場工作執行

現場量測儀器之架設、操作及隧道全線之量測工作，由原廠指定代理商之工程師提供技術協助，並配合本公司技術人員共同執行。為獲得較佳之影像品質，本次測量工作預定採隧道襯砌表面測點密度為 5x5mm 之方式進行量測，前進速度為每小時 700 公尺。現場檢測作業如圖 3.5-2 所示。

本階段之現場工作重點著重於襯砌異常狀況之調查，其包括裂縫、滲水、白華、混凝土剝落等現象，當遭遇此類異常狀況時，將登錄記載異常狀況、里程、位置、嚴重程度及其他相關資料，尤其針對裂縫寬度達 0.3mm 以上者將予以註記並記錄。



圖 3.5-1 GRP5000 隧道影像掃描系統 圖 3.5-2 隧道影像掃描現場作業照片

3.檢測資料影像處理、展示及判釋成果

現場掃描之記錄於室內進行影像資料之處理，由於隧道斷面為一拱形，且掃描旋轉鏡之位置並未置於隧道斷面之中心點，由旋轉鏡至隧道壁之距離會隨旋轉角度之不同而改變，導致在不同位置時掃描密度會不同，因此影像會呈現扭曲 (distorsion) 的現象，此處將利用已知之隧道斷面形狀來修正垂直面 (垂直隧道軸) 之影像，而水平方向 (沿隧道軸向) 之影像，則根據量測時之移動速率來修正。此

外，依量測目的，修正影像亮度及明暗對比，凸顯隧道內異常部分之影像，即可獲得隧道襯砌表面之影像成果圖，如圖 3.5-3 所示。

而所有隧道襯砌表面之影像暨橫斷面內淨空測量資料，均可利用 Leica 公司與 Amberg 工程顧問公司共同研發之軟體 GRP RAILcloud Viewer 於電腦上觀看，其軟體並具有交談式可展示任意位置隧道壁影像之功能，以便日後查詢之用，如圖 3.5-4 所示，圖中左側為隧道襯砌表面影像，右側則為指定橫斷面之內淨空測量成果。

隧道影像掃描成果判釋係就各隧道襯砌表面之主要異常狀態，區分為四大類：裂縫、滲水、白華及剝落。並根據全線目視檢查時之記錄與影像資料配合比對，將各異常狀態依類別分層標示繪製於 AutoCAD 圖檔中（範例如圖 3.5-5 所示），並配合其他檢測項目成果做一整體性之安全評估，評估成果詳見附冊成果圖。

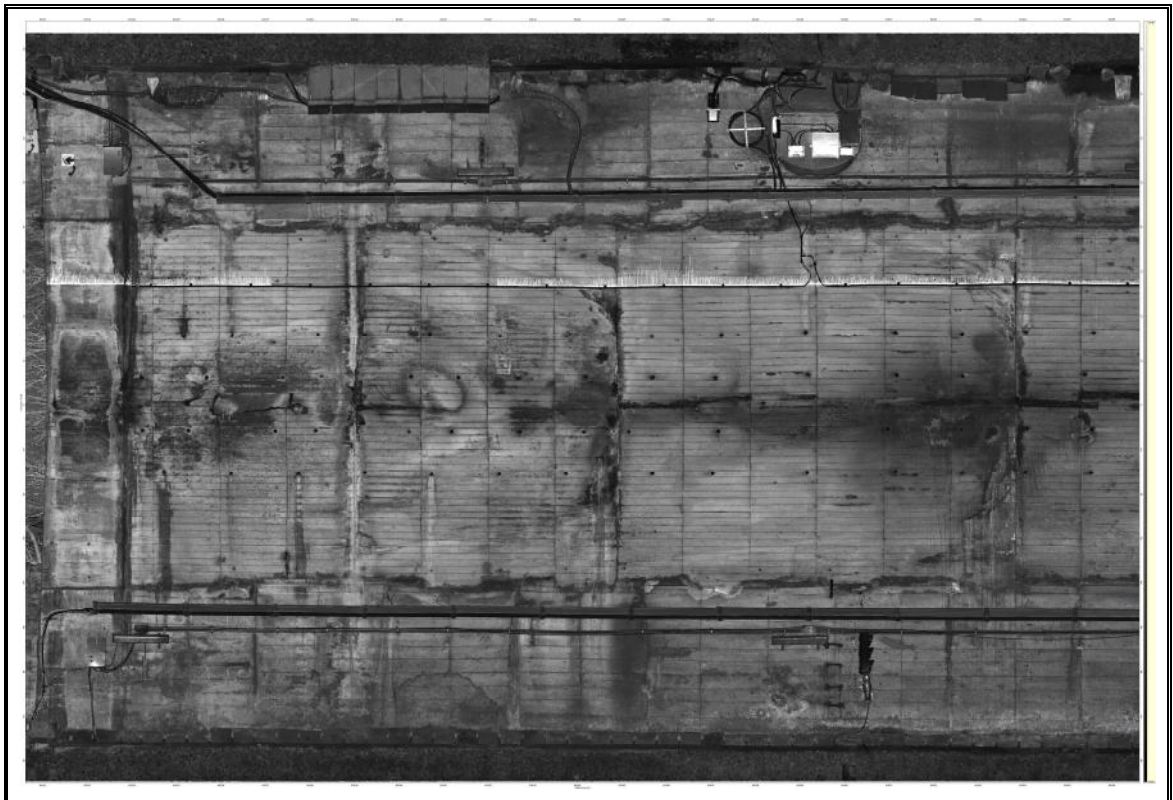


圖 3.5-3 隧道影像掃描成果範例

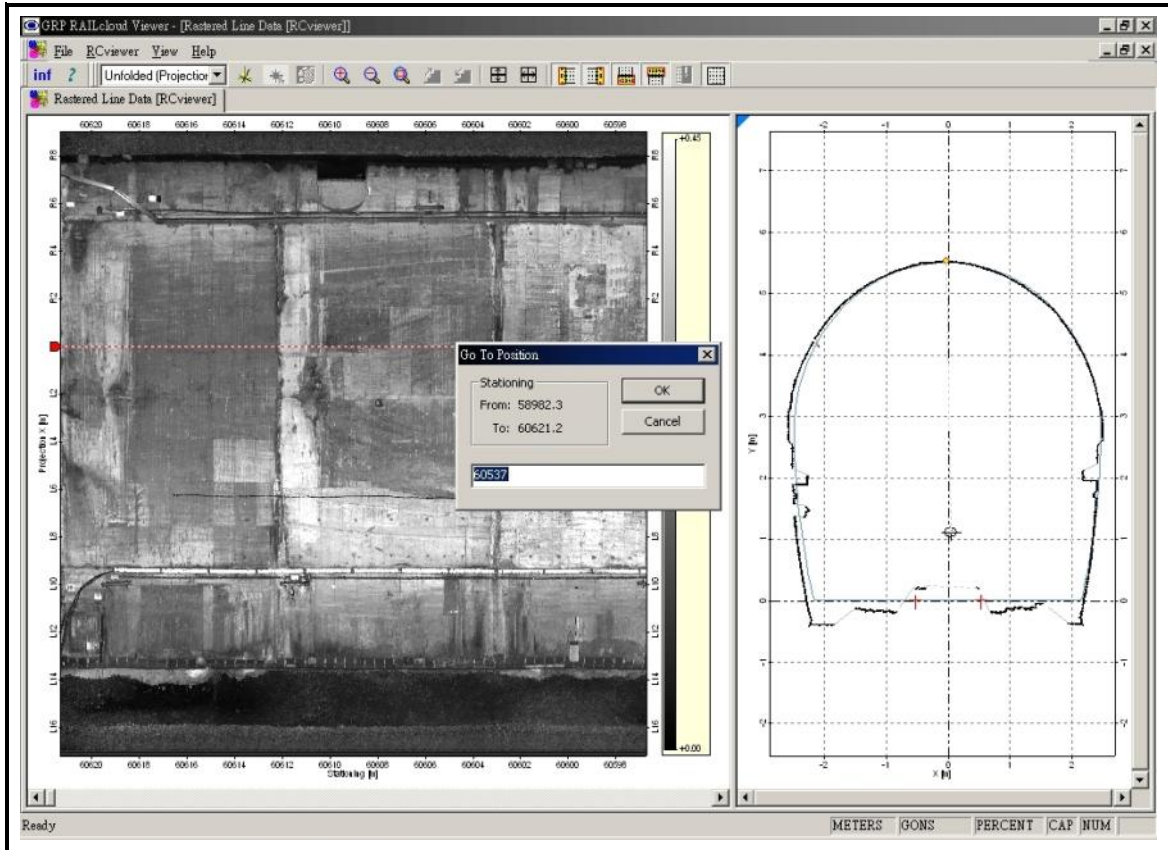


圖 3.5-4 隧道影像展示軟體 GRP RAILcloud Viewer 展示範例

3.5.2 目視檢查

隧道主線段以及橫坑段皆進行人員目視檢查及判定，並於異常程度較嚴重或較複雜區段，使用噴漆於現地標定範圍。目視檢查之目的在於可確實瞭解各隧道現況情形，其中主線段部分之目視判定成果亦與影像掃描成果互相校核比對，以利於後續資料處理及判釋之正確性。

1. 金崙隧道

隧道內襯砌常見環狀滲水，以及延伸至頂拱的斜裂縫所造成之水路，地下水滲入隧道處亦可看見碳酸鈣結晶或銹染現象，另在避車洞及豎井均可見到大量地下水流入隧道內。隧道現況照片如圖 3.5-6 所示。

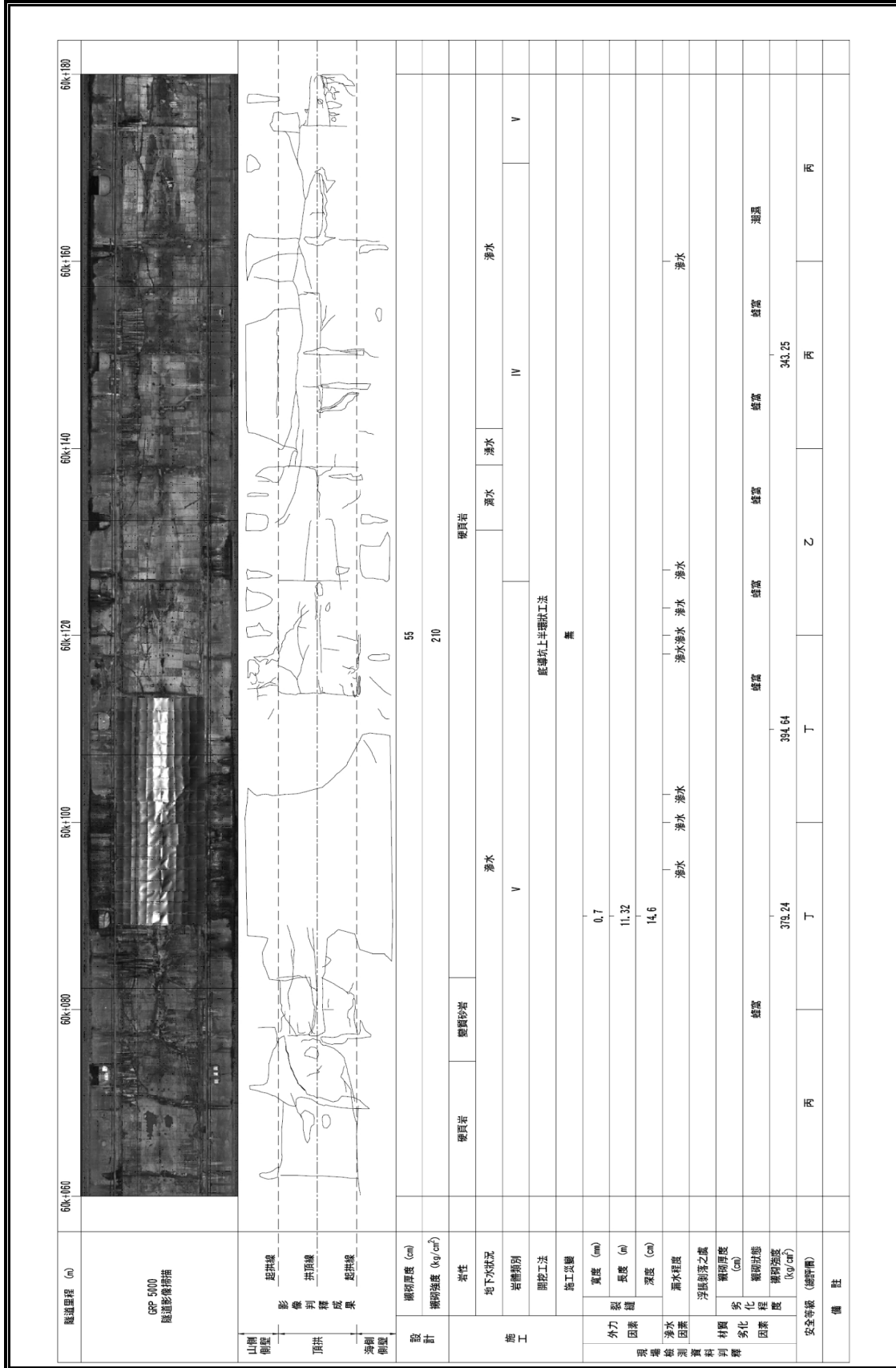


圖 3.5-5 隧道影像掃描與判釋成果範例 (轉繪成 AutoCAD 圖檔)



圖 3.5-6 金崙隧道內襯砌現況及說明

2. 金崙隧道橫坑

經目視檢查發現隧道橫坑側壁及頂拱處大部份縱向及環狀裂縫均已修補，惟仍有部份未修補，疑似裂縫有延伸現象。另因地下水滲入造成部份裂縫處有滲水及銹染現象，且地面有大量的積水。橫坑現況照片如圖 3.5-7 所示。

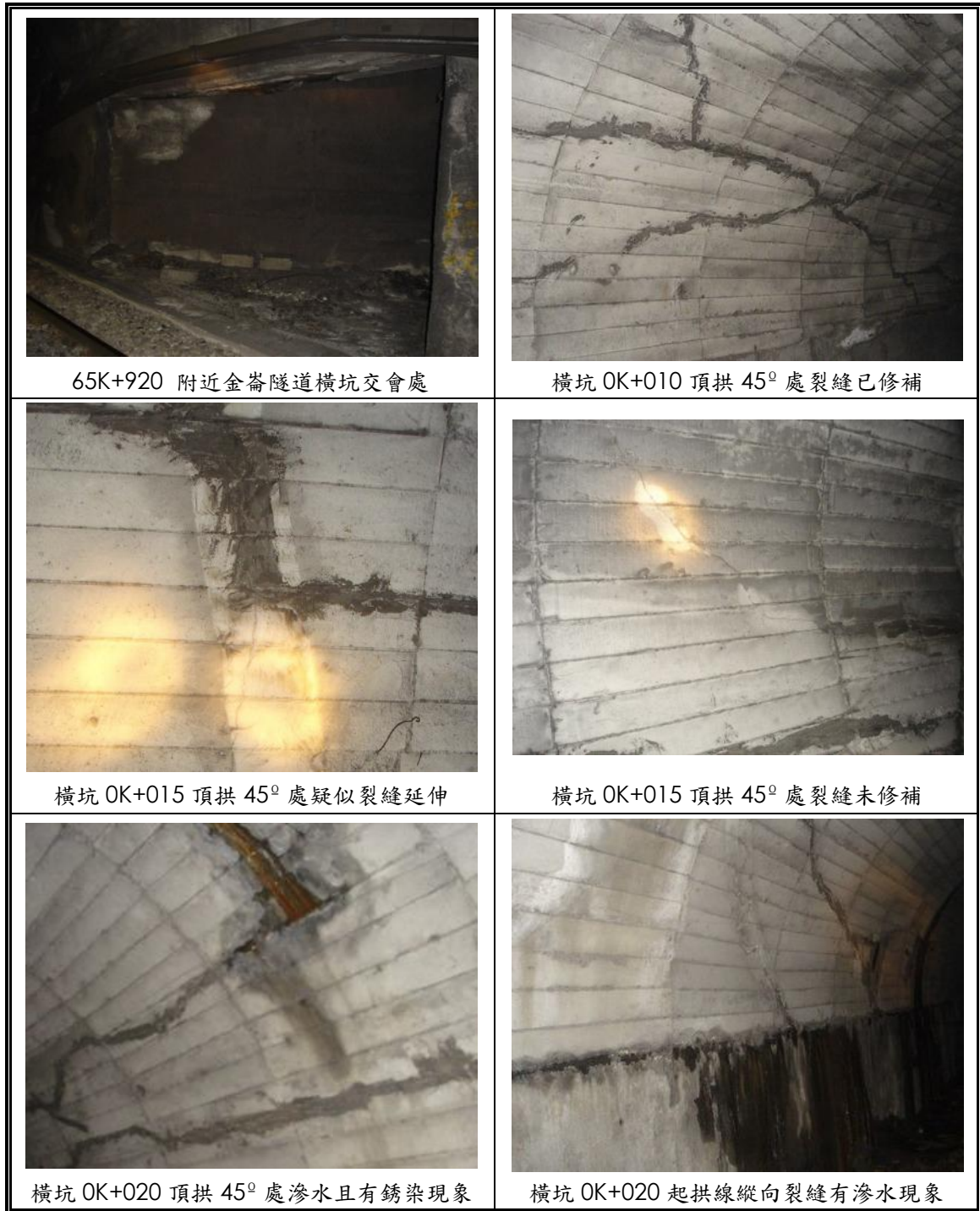


圖 3.5-7 金崙隧道橫坑現況及說明

3. 多良一號隧道

本隧道內襯砌常見位於起拱線上方的縱向裂縫、45°斜向裂縫及不規則裂縫，裂縫發生處均有地下水入滲形成白華現象，其中以 60K+100~60K+500 區段較為嚴重。部份區段有混凝土塊剝落及側壁混凝土壁破裂。隧道現況照片如圖 3.5-8 所示。

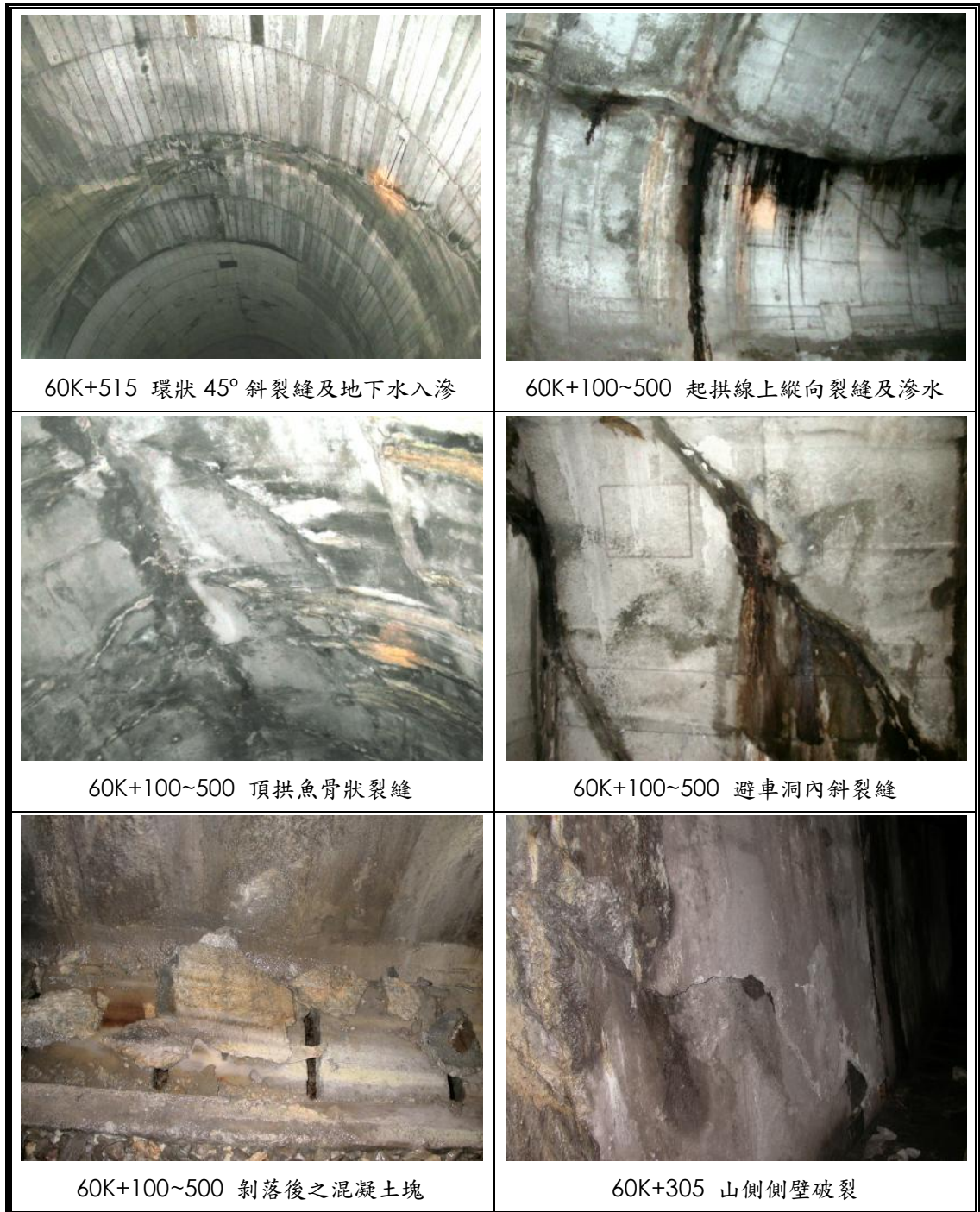


圖 3.5-8 多良一號隧道內襯砌現況及說明

4.大竹二號隧道

隧道內頂拱及側壁多斜裂縫，部分斜裂縫群成區塊狀惡化，混凝土出現蜂窩或剝落現象，地下水即由此弱面處湧出，且襯砌於滲水後亦出現鏽染以及白華現象。隧道現況照片如圖 3.5-9 所示。

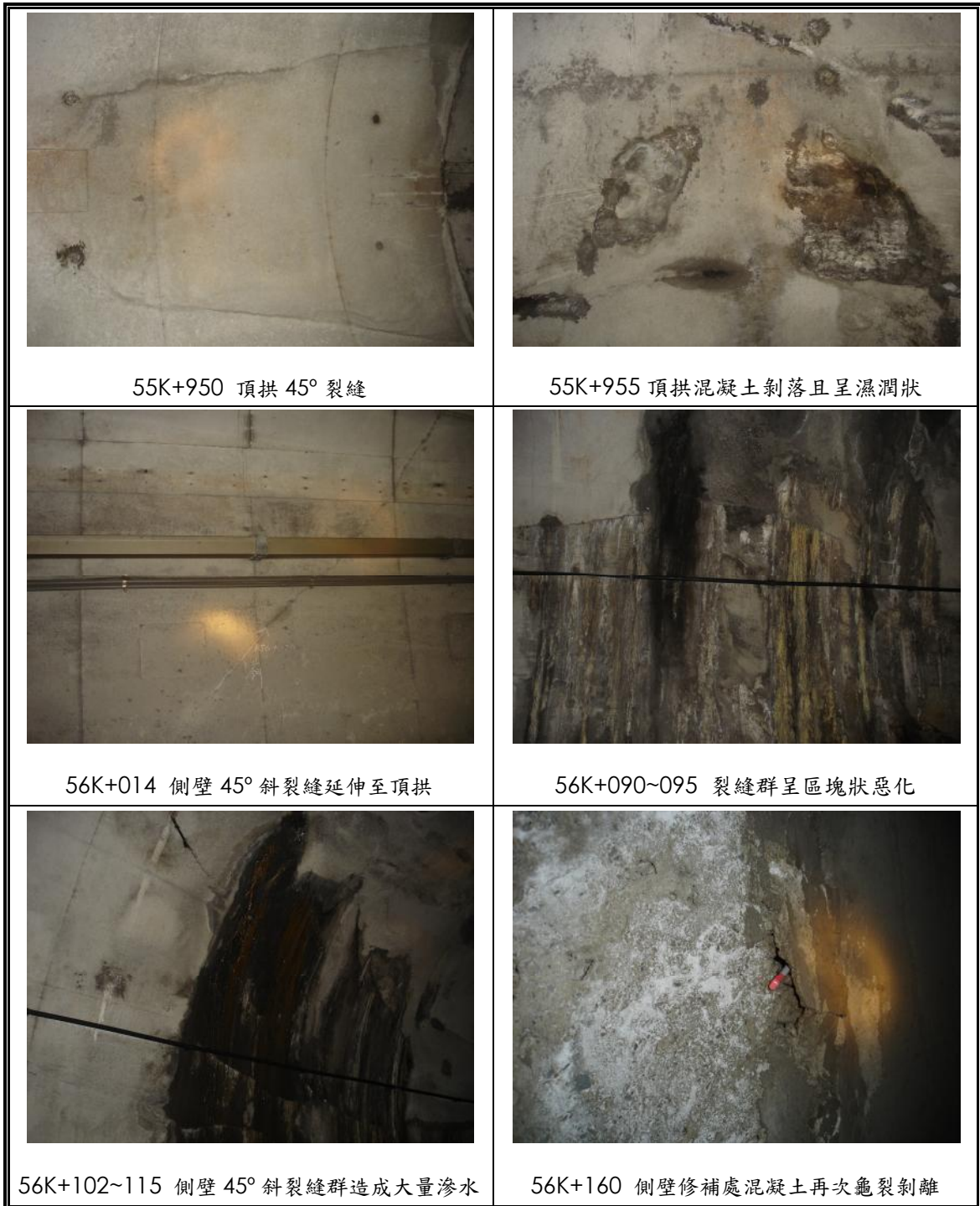


圖 3.5-9 大竹二號隧道內襯砌現況及說明

5.大竹一號隧道

隧道內可常見環狀滲水，地下水由環向裂縫及起拱線之混凝土澆置面滲入隧道內。在頂拱內襯砌亦可發現多處斜裂縫及蜂窩，同時為地下水入滲之路徑，另在起拱線上方可見許多斜裂縫群。隧道現況照片如圖 3.5-10 所示。



圖 3.5-10 大竹一號隧道內襯砌現況及說明

6. 大鳥隧道

隧道內襯砌有多處滲水，地下水係由隧道環狀裂縫、斜裂縫或起拱線入滲，嚴重者以滴水或噴水的方式流入隧道內。內襯砌常可看到 45° 斜裂縫延伸到頂拱，以及起拱線以上出現多道縱向裂縫，隧道現況照片如圖 3.5-11 所示。



圖 3.5-11 大鳥隧道內襯砌現況及說明

7. 大武二號隧道

隧道內襯砌多處頂縱向裂縫及環向裂縫，地下水則由此裂縫滲入隧道內，在裂縫寬度大且地下水豐沛段，更呈現滴水、噴水之現象。隧道現況異狀照片如圖 3.5-12 所示。



圖 3.5-12 大武二號隧道內襯砌現況及說明

8. 安朔隧道

隧道內可見修補痕跡，多處襯砌裂縫伴隨滲水情形，嚴重者則有噴水現象，滲水處混凝土多有白華現象，另有部分裂縫相互連結造成表面呈片狀剝落。隧道現況異狀照片如圖 3.5-13 所示。



圖 3.5-13 安朔隧道內襯砌現況及說明

3.6 隧道襯砌及背後空洞調查

3.6.1 透地雷達野外作業說明

透地雷達探測方法是以高壓線圈為探測源，產生高頻電磁波射入結構體內，在行經電磁特性如導電率或介電常數變化的界面或異常體時，會依斯涅爾定律(Snell's)將部份能量反射回來，分析反射波的走時、強度及相位，即可獲得隧道襯砌內電磁特性異常之幾何位置，進而可有效地瞭解探查區域襯砌厚度完整性及襯砌背填灌漿之狀況，對於日後補強設計與施工的特殊劣化區段確認，相當具有助益。

為求得高解析度的資料並同時兼顧探測深度，本案新購透地雷達探測採用美國 GSSI 公司新型透地雷達主機 SIR 3000，搭配 900MHz 天線；掃描影像依現地狀況對主機加以最佳化調整，估計可以適用於探測襯砌背後 1m 範圍內的可疑空隙。該主機具備即時彈性調整發射參數功能，記錄儀器依目標物可能深度範圍，適用於不同探測目的及探測場地之施測工作。現場施測參數設定之探測總歷時為 100 奈秒，每條掃描跡線取樣率 2048，每米進行 100 次掃描，內含 32 位元 Intel StrongArm RISC 206 處理器、1G compact Flash 記憶卡、高速數值轉換器、64K 彩色影像顯示、自充式 12V 電池包，儀器輕巧便於隧道檢測使用。GPR 主機與現場施測概況如圖 3.6-1 所示。

襯砌背後檢測主要依據開挖災變資料、初期目視檢查、GRP5000 影像檢測時所發現的可疑位置綜合彙整調查，在現場探測長度上會根據既有劣化區段予以實測。



圖 3.6-1 GPR 主機及現場施測照片

透地雷達探測方式分為縱向(頂拱線)與橫向(側壁-頂拱-側壁)兩種。縱向探測長度基本單位為 100m，部份區段減為 50m；橫向探測長度基本單位在單線隧道為 15m，雙線隧道為 18m，依此共計施作 9818m。詳細數量如表 3.6-1 所示。

表 3.6-1 透地雷達數量說明表

隧道名稱		安朔	大武二號	大鳥	大竹一號	大竹二號	多良一號	金崙
縱向	100	15	4	22	11	5	4	16
	50	0	0	2	2	1	0	0
小計		1,500	400	2,300	1,200	550	400	1,600
橫向	15	0	14	30	16	6	12	20
	18	11	0	0	0	0	0	0
小計		198	210	300	240	90	180	300
合計		9,618						

3.6.2 透地雷達資料處理

為明確分別出襯砌劣化反應以及干擾雜訊，本報告採用之透地雷達之施測剖面圖以灰階黑白圖示代表雷達波場振幅最為合適。基本探測成果判釋如圖 3.6-2 所示，當雷達波遭遇特殊的孔隙時，會在掃描呈現影像中顯示出繞射，暗色調位置代表反射能量較弱，亦即介電常數的差異較小，通常是地下水的低電阻特性導致，亮色調表示該位置下方具有與起始介質差異性較大的反射物質，影像反應在介質之間的介電常數變化劇烈時，可以偵測出襯砌異常的位置。

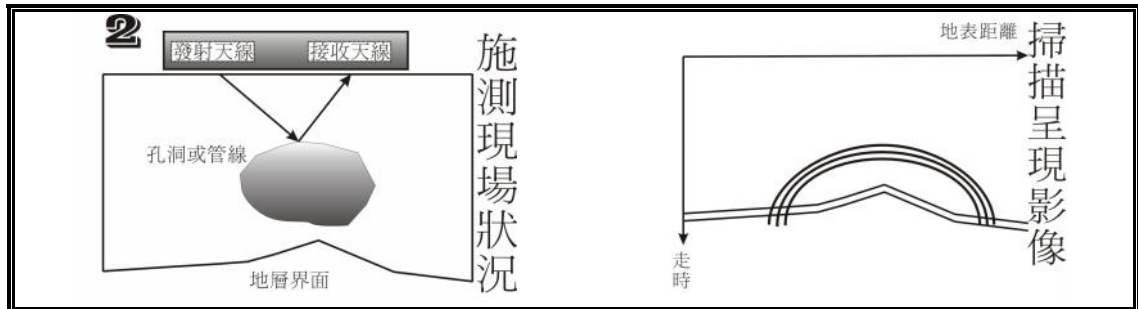


圖 3.6-2 透地雷達基本探測說明圖

由於透地雷達屬於電磁影像，在野外所看到的影像可能會因現地狀況產生扭曲，因此必須在室內進行後續資料處理，同時根據物質介電常數表加以確認施測物質之電磁特性，若掃描位置接近襯砌部分具有特殊金屬物或襯砌產生較大的空隙，可在反射剖面中判斷出空隙的位置。茲就透地雷達標準資料處理步驟概略介紹於下：

- 1.速度分析：由於深度轉換必須有精確的雷達波傳遞速度，以確保深度剖面正確無誤。藉由不同支距的雷達波掃描線作速度譜分析，求出雷達波在地層中的傳遞速度。
- 2.頻率濾波：濾掉和反射波不同頻率之雜訊。
- 3.解迴旋：將波連變成釘形或其它指定形狀，使雷達波掃描線直接反應地層界面位置。

- 4.傾斜濾波：濾掉側向來的干擾。
- 5.移位處理：當雷達波碰到繞射點時，會產生繞射現象使得無法分辨繞射點的真正位置、大小及個數。移位處理就是將繞射能量移回繞射點的位置，以提升在空間上的解析能力，也可利用移位處理找出最佳之雷達波傳遞速度。
- 6.影像處理：突顯特定構造影像使剖面影像更清晰，以利判釋。

3.6.3 透地雷達成果評估

根據透地雷達探測襯砌的影像，具代表性的異狀可歸納成三種不同型態，分別是：(A)裂縫發達、(B)背後疏鬆、(C)厚度改變。不同的劣化現象在透地雷達影像中有可能會呈現類似效果，表 3.6-2 說明以上三種不同型態的劣化現象所代表的特性。

裂縫發達種類(A)的影像代表透地雷達在襯砌結構的內部發現異常繞射現象，說明襯砌內部具有特殊的劣化現象；背後疏鬆種類(B)的影像代表透地雷達在襯砌結構的各個電性界面發現大範圍異常繞射現象，說明襯砌的各個電性介面發生大範圍的劣化現象；厚度改變種類(C)的影像代表透地雷達掃描範圍內發現異常繞射介面(或物體)，該異常繞射介面的影像延伸性相當完整，並且在襯砌均勻的層狀結構中的繞射振幅起伏較大者，可能屬於襯砌或圍岩間產生的不接合面。

表 3.6-2 透地雷達劣化影像說明表

影像種類	名稱	說明
A	裂縫發達	襯砌具劣化影像
B	背後疏鬆	襯砌外緣具劣化影像
C	厚度改變	襯砌或圍岩產生不接合面

透地雷達縱向及橫向的影像解析成果，可歸納成表 3.6-3 的縱向施測成果表與 3.6-4 的橫向施測成果表。在橫向施測成果統計表各對應的欄位中，Y 代表發現該項目的異狀，N 代表未發現該項目的異狀；而縱向成果統計表中，各種劣化型態的里程紀錄分別歸納至各種不同影像種類，N 代表未發現該項目的異狀。本案詳細的透地雷達影像剖面成果，詳見附錄 D。

附錄 D 中所繪頂拱可能襯砌厚度範圍線，是以反射最明顯的界線最為區分，所劃分的區域內可能包含內襯砌與外襯砌(噴凝土部分)，屬於襯砌與圍岩的介面。由於內襯砌與外襯砌噴凝土的介電常數差異值較小，內襯砌與外襯砌噴凝土之間的介面對電磁波的反射值相對較小，在透地雷達的影像剖面上不易顯示出明顯界面；但圍岩與混凝土襯砌的介電常數特性差異值較大，內襯砌與外襯砌噴凝土之間的介面對電磁波的反射值相對較小，在透地雷達的影像剖面上較能顯示出明顯界面。

表 3.6-3 透地雷達縱向施測成果表 (1/3)

隧道名稱	組數	編號	開始里程	結束里程	長度 (m)	A	B	C	頂拱可能襯砌厚度範圍 (cm)
安朔	15	1.	32K+800	32K+700	100	N	N	N	55~60
		2.	33K+250	33K+150	100	N	N	N	55~60
		3.	33K+590	33K+490	100	N	505~523	N	55~60
		4.	33K+800	33K+700	100	N	N	N	55~60
		5.	34K+200	34K+100	100	N	N	N	55~60
		6.	34K+300	34K+200	100	N	220~229	N	50~55
		7.	34K+500	34K+400	100	N	445~453	N	50~55
		8.	35K+100	35K+000	100	N	N	060~067	55~60
		9.	36K+000	35K+900	100	N	N	N	55~60
		10.	37K+100	37K+000	100	N	N	N	55~60
		11.	37K+300	37K+200	100	N	N	N	55~60
		12.	37K+500	37K+400	100	N	N	N	55~60
		13.	37K+600	37K+500	100	N	N	N	55~60
		14.	37K+700	37K+600	100	N	N	N	55~60
		15.	37K+900	37K+800	100	N	N	N	55~60
大武二號	4	16.	44K+600	44K+500	100	N	575~584	N	50~60
		17.	44K+700	44K+600	100	N	N	N	50~60
		18.	44K+800	44K+700	100	N	742~744 781~787	N	50~60
		19.	44K+900	44K+800	100	N	810~822 885~895	N	50~60
大鳥	24	20.	46K+200	46K+150	50	N	154~157 184~188	157~168 173~184	40~55
		21.	46K+400	46K+300	100	327~337	N	317~323	40~55
		22.	46K+500	46K+400	100	435~439, 441~453, 494~497	N	458~467	40~55
		23.	46K+600	46K+500	100	523~526, 530~533	N	574~578, 585~600	40~55
		24.	46K+700	46K+600	100	692~696	635~655	660~664, 673~682	40~55
		25.	46K+800	46K+700	100	766~771	722~727, 732~737, 743~748, 755~759, 768~777	738~742, 768~776	40~55
		26.	46K+900	46K+800	100	N	804~819, 872~874	N	40~55
		27.	47K+100	47K+000	100	N	085~091	N	40~55
		28.	47K+300	47K+200	100	N	203~211, 216~223	N	40~55
		29.	47K+400	47K+300	100	N	325~328, 338~343, 351~353	N	40~55
		30.	47K+500	47K+400	100	N	410~427, 429~432	N	40~55
		31.	47K+600	47K+500	100	547~551	N	501~505	40~55
		32.	47K+700	47K+600	100	631~634	680~685	689~695	40~55
		33.	47K+900	47K+800	100	N	N	N	40~55

表 3.6-3 透地雷達縱向施測成果表 (2/3)

隧道名稱	組數	編號	開始里程	結束里程	長度 (m)	A	B	C	頂拱可能襯砌厚度範圍 (cm)
大鳥	24	34.	48K+000	47K+900	100	N	N	N	40~55
		35.	48K+400	48K+300	100	N	N	320~338	40~55
		36.	48K+600	48K+500	100	N	N	N	40~55
		37.	48K+700	48K+600	100	N	609~627	N	40~55
		38.	48K+900	48K+850	50	N	863~865	N	40~55
		39.	49K+000	48K+900	100	950~953	N	N	40~55
		40.	49K+200	49K+100	100	N	186~200	148~159	40~55
		41.	49K+300	49K+200	100	N	241~249, 253~260, 261~298	261~300	40~55
		42.	49K+400	49K+300	100	N	360~369, 371~379	300~341, 345~355	40~55
		43.	49K+600	49K+500	100	N	N	N	40~55
大竹一號	13	44.	53K+600	53K+550	50	N	N	N	55~60
		45.	53K+700	53K+600	100	N	635~640	N	55~60
		46.	53K+900	53K+800	100	N	808~814	N	55~60
		47.	54K+000	53K+900	100	N	915~923, 924~933, 990~995	N	55~60
		48.	54K+200	54K+100	100	N	N	N	55~60
		49.	54K+300	54K+200	100	209~212, 218~225	N	N	55~60
		50.	54K+400	54K+300	100	N	335~339	N	55~60
		51.	54K+500	54K+400	100	N	N	N	55~60
		52.	54K+600	54K+500	100	N	N	N	55~60
		53.	54K+700	54K+600	100	N	N	N	55~60
		54.	54K+800	54K+700	100	N	N	N	55~60
		55.	54K+900	54K+800	100	N	N	N	55~60
		56.	54K+950	54K+900	50	N	N	N	55~60
		57.	55K+600	55K+500	100	N	515~530	N	55~60
大竹二號	6	58.	56K+200	56K+100	100	N	N	N	50~55
		59.	56K+500	56K+400	100	N	N	N	50~55
		60.	56K+800	56K+700	100	N	N	N	50~55
		61.	56K+900	56K+800	100	N	873~889	N	50~55
		62.	56K+950	56K+900	50	N	932~937	940~942, 946~949	50~55
多良一號	4	63.	60K+200	60K+100	100	N	N	N	40~45
		64.	60K+300	60K+200	100	N	N	N	40~45
		65.	60K+400	60K+300	100	N	N	N	40~45
		66.	60K+500	60K+400	100	N	N	N	40~45
金崙	16	67.	64K+700	64K+600	100	N	676~683	603~606, 631~634, 637~641	55-60
		68.	64K+800	64K+700	100	N	704~707, 738~743, 748~751, 752~757, 758~764, 768~773	700~707, 715~720, 720~724, 729~747, 752~768, 763~777, 779~793	55-60

表 3.6-3 透地雷達縱向施測成果表 (3/3)

隧道名稱	組數	編號	開始里程	結束里程	長度(m)	A	B	C	頂拱可能襯砌厚度範圍(cm)
金崙	16	69.	64K+900	64K+800	100	N	816~822	823~836, 863~888	55-60
		70.	65K+000	64K+900	100	N	978~981	N	55-60
		71.	65K+100	65K+000	100	N	022~027, 032~038, 071~078	004~015, 017~024	55-60
		72.	65K+600	65K+500	100	N	538~541, 564~568	N	55-60
		73.	66K+200	66K+100	100	N	178~180	146~152, 160~166	55-60
		74.	66K+700	66K+600	100	N	600~603, 615~617, 625~629, 663~667, 680~683	600~605, 606~623, 645~649, 654~658, 663~668, 673~677, 680~683	55-60
		75.	67K+600	67K+500	100	N	515~520, 535~542, 545~550, 554~559, 563~566, 581~587	521~530, 554~558, 563~567, 582~588	55-60
		76.	67K+700	67K+600	100	N	657~663, 680~690	646~662, 674~677, 681~688, 692~698	55-60
		77.	67K+800	67K+700	100	N	733~737	718~723, 737~748	55-60
		78.	67K+900	67K+800	100	N	N	N	55-60
		79.	68K+000	67K+900	100	N	926~935, 937~944, 949~956, 960~965, 967~974	927~934, 936~945, 947~988	55-60
		80.	68K+100	68K+000	100	N	N	010~020, 025~032, 037~043, 052~067, 074~078	55-60
		81.	68K+200	68K+100	100	N	116~118, 124~130, 197~200	N	55-60
		82.	68K+300	68K+200	100	N	233~237, 261~266	233~237, 246~249, 261~269, 275~284, 292~295	55-60
合計	82				7950				

表 3.6-4 透地雷達橫向施測成果表 (1/3)

隧道名稱	組數	編號	里程	長度(m)	A	B	C	頂拱可能襯砌厚度範圍 (cm)
安朔	11	1	33K+490	18	N	N	N	55-60
		2	33K+785	18	N	N	N	55-60
		3	34K+095	18	N	N	N	55-60
		4	34K+155	18	N	N	N	55-60
		5	34K+210	18	N	N	N	55-60
		6	34K+230	18	N	Y	N	55-60
		7	34K+495	18	N	N	N	55-60
		8	35K+990	18	N	N	N	55-60
		9	37K+085	18	N	Y	N	55-60
		10	37K+610	18	N	N	N	55-60
		11	37K+985	18	N	N	N	55-60
大武二號	14	12	44K+200	15	N	Y	N	50-60
		13	44K+245	15	N	Y	N	50-60
		14	44K+520	15	N	N	N	50-60
		15	44K+565	15	N	Y	N	50-60
		16	44K+660	15	N	Y	N	50-60
		17	44K+760	15	N	Y	N	50-60
		18	44K+850	15	N	Y	N	50-60
		19	44K+870	15	N	Y	Y	50-60
		20	44K+880	15	Y	N	N	50-60
		21	44K+900	15	N	Y	N	50-60
		22	44K+920	15	N	N	N	50-60
		23	45K+040	15	N	N	N	50-60
		24	45K+135	15	N	Y	N	50-60
		25	45K+165	15	N	N	N	50-60
大鳥	30	26	46K+160	15	N	N	Y	40-55
		27	46K+200	15	Y	N	N	40-55
		28	46K+285	15	N	N	Y	40-55
		29	46K+330	15	Y	N	N	40-55
		30	46K+360	15	Y	N	N	40-55
		31	46K+405	15	N	N	Y	40-55
		32	46K+435	15	Y	N	N	40-55
		33	46K+535	15	Y	N	N	40-55
		34	46K+630	15	N	N	Y	40-55
		35	46K+680	15	Y	N	N	40-55
		36	46K+700	15	N	N	N	40-55
		37	46K+765	15	N	N	Y	40-55
		38	46K+860	15	N	Y	N	40-55
		39	47K+305	15	N	Y	Y	40-55
		40	47K+380	15	N	Y	Y	40-55
		41	47K+495	15	N	Y	N	40-55
		42	47K+545	15	N	Y	N	40-55
		43	47K+645	15	N	Y	N	40-55
		44	47K+850	15	N	N	N	40-55
		45	47K+895	15	N	N	N	40-55
		46	48K+360	15	N	N	N	40-55
		47	48K+535	15	N	N	N	40-55
		48	48K+655	15	N	Y	N	40-55

表 3.6-4 透地雷達橫向施測成果表 (2/3)

隧道名稱	組數	編號	里程	長度(m)	A	B	C	頂拱可能襯砌厚度範圍 (cm)
大鳥	30	49	48K+865	15	N	Y	N	40-55
		50	49K+235	15	N	N	N	40-55
		51	49K+265	15	N	N	N	40-55
		52	49K+390	15	N	N	N	40-55
		53	49K+510	15	N	Y	N	40-55
		54	49K+580	15	N	N	N	40-55
		55	49K+715	15	N	Y	N	40-55
大竹一號	16	56	53K+635	15	N	N	N	55-60
		57	53K+690	15	N	Y	N	55-60
		58	53K+810	15	Y	N	N	55-60
		59	54K+110	15	N	Y	N	55-60
		60	54K+140	15	N	Y	N	55-60
		61	54K+200	15	N	N	N	55-60
		62	54K+275	15	N	N	Y	55-60
		63	54K+340	15	N	N	N	55-60
		64	54K+390	15	Y	N	N	55-60
		65	54K+430	15	Y	N	N	55-60
		66	54K+470	15	N	N	N	55-60
		67	54K+490	15	N	N	N	55-60
		68	54K+520	15	Y	N	N	55-60
		69	54K+540	15	Y	N	N	55-60
70	54K+625	15	N	Y	N	55-60		
71	54K+750	15	Y	N	N	55-60		
大竹二號	6	72	56K+165	15	Y	N	N	50-55
		73	56K+435	15	N	N	N	50-55
		74	56K+445	15	Y	N	N	50-55
		75	56K+650	15	N	Y	N	50-55
		76	56K+755	15	N	N	N	50-55
		77	56K+950	15	N	N	N	50-55
多良一號	12	78	59K+285	15	N	N	N	40-45
		79	60K+080	15	N	Y	N	40-45
		80	60K+115	15	N	N	N	40-45
		81	60K+125	15	N	N	N	40-45
		82	60K+135	15	N	N	N	40-45
		83	60K+145	15	N	N	N	40-45
		84	60K+155	15	N	Y	N	40-45
		85	60K+165	15	N	N	N	40-45
		86	60K+200	15	N	N	N	40-45
		87	60K+210	15	N	N	N	40-45
		88	60K+400	15	N	N	Y	40-45
		89	60K+515	15	N	N	N	40-45
金崙	20	90	64K+450	15	N	N	N	55-60
		91	64K+650	15	N	N	N	55-60
		92	64K+715	15	N	N	N	55-60
		93	64K+760	15	N	N	N	55-60
		94	64K+810	15	N	N	N	55-60
		95	64K+835	15	N	N	N	55-60
		96	64K+860	15	N	N	N	55-60

表 3.6-4 透地雷達橫向施測成果表 (3/3)

隧道名稱	組數	編號	里程	長度(m)	A	B	C	頂拱可能襯砌厚度範圍 (cm)
金崙	20	97	64K+995	15	N	N	N	55-60
		98	65K+110	15	N	N	N	55-60
		99	65K+595	15	N	N	N	55-60
		100	66K+060	15	N	Y	N	55-60
		101	66K+147	15	N	N	N	55-60
		102	66K+680	15	N	Y	N	55-60
		103	67K+265	15	N	N	N	55-60
		104	67K+910	15	N	Y	N	55-60
		105	68K+160	15	N	N	Y	55-60
		106	68K+185	15	N	Y	N	55-60
		107	68K+205	15	N	N	Y	55-60
		108	68K+230	15	N	Y	N	55-60
109	68K+240	15	N	N	Y	55-60		
合計	109			1668				

各隧道檢測結果整理如圖 3.6-3，並分項說明如下：

1. 安朔隧道

安朔隧道長度 5481 公尺，主要發生襯砌明顯背後疏鬆現象區段在縱向 33K+505~33K+520、34K+230~34K+220、34K+450~34K+460、以及 37K+050~37K+060，影響深度大約在 20~50cm 左右，少數疏鬆影像超過 60cm；在橫向剖面部份，34K+230 與 37K+085 亦發現可疑的背後疏鬆現象。安朔隧道 35K+980~35K+999 發現的厚度改變在襯砌範圍內，可能是鋼絲網繞射影像，而 35K+060~35K+070 發生在襯砌範圍外，可能是圍岩起伏所產生的小規模繞射影像，因此本隧道的厚度改變大多屬於僅為小範圍襯砌與圍岩的接觸面變化。由於 34K+100~34K+230 頂拱至山側側壁發生多處規模相當大的縱向裂縫，對於接近 34K+220~34K+230 所發現的背後疏鬆現象應持續進行追蹤，並採取適當的維修手段以補強襯砌受損之處。

2. 大武二號隧道

大武二號隧道長度 1181 公尺，主要發生襯砌背後劣化區段在縱向剖面 44K+584~44K+575、44K+742~44K+744、44K+781~44K+787、44K+810~44K+822、及 44K+885~44K+895 五個區段，影響深度約在 20~50cm 範圍之內；在橫向剖面部份，44K+600 至 44K+870 之間發現較為密集的裂縫發達與背後疏鬆等現象，大武二號隧道並沒有發現厚度改變現象。由於在 44K+400~44K+415、44K+715~44K+723、44K+745、44K+765、44K+880、44K+886、44K+913 及 45K+125 的襯砌表面，發現大小不等的縱向裂縫與混凝土剝落現象，本隧道應針對縱向掃描所發現五個劣化區段應採取適當的維修，以補強襯砌受損之處。

3.大鳥隧道

大鳥隧道長度 3652 公尺，發生襯砌明顯背後疏鬆現象區段的分布範圍相當平均，主要劣化區段分別在縱向剖面 46K+154~46K+553、46K+600~46K+777、47K+203~47K+695、47K+970~49K+386 等四個區段，影響深度約在 20~60cm 範圍之內，劣化影像的範圍延伸性相當大；在橫向剖面部份，46K+860~47K+675 與 48K+655~49K+265 兩個區段發現較為密集的背後疏鬆等現象。大鳥隧道發現的厚度改變影像大多發生在頂拱可能襯砌範圍以內，其中以 46K+157~46K+168、46K+173~46K+184、46K+770~46K+776、46K+802~46K+818、49K+300~49K+340 五處最為明顯，同時厚度改變的幅度相當大，可能已形成明顯的襯砌厚度改變；而 49K+147~49K+159 影像發生在襯砌範圍外，可能是圍岩起伏所產生的小規模繞射影像，因此本隧道的厚度改變首要注意 46K+157~46K+168、46K+173~46K+184、46K+770~46K+776、46K+802~46K+818、49K+300~49K+340 五個區段周邊的襯砌狀態是否有持續惡化。在襯砌現況調查時，在 46K+800、47K+390、47K+680、47K+900、48K+950、49K+020、49K+100 及 49K+350 發現混凝土剝落及頂拱及側壁漏水的現象，顯示襯砌表面劣化型態的分布範圍相當平均，因此對於縱向掃描所發現四個主要劣化區段與橫向掃描所發現兩個主要劣化區段應在短期間內進行適當維修，以補強受損襯砌。

4.大竹一號隧道

大竹一號隧道長度 1452 公尺，主要發生襯砌明顯背後疏鬆現象區段大部分集中在縱向剖面 53K+635~53+995 與 54K+209~54K+339 兩個區段之中，影響深度約在 30~50cm 左右，少數可達 70cm，幾乎已達襯砌與圍岩的交界處，大竹一號隧道頂拱縱向部份，僅在 54K+442~54K+448 的頂拱可能襯砌厚度範圍內發現小規模厚度改變現象，推估影響程度不大；在橫向剖面部份，53K+690、53K+810、54K+110、54K+140、54K+275、54K+390、54K+430、54K+490、54K+520、54K+540、54K+625、54K+750 均發現可疑的裂縫發達、背後疏鬆或是厚度改變的現象，但厚度變化範圍僅發生在襯砌與圍岩小範圍邊界，影響程度有限。依據現場襯砌調查所獲得的結果來看，53K+083 與 54K+390 環拱發生漏水現象，54K+205 與 54+440 側壁發生縱向裂縫，54K+467、54K+495 與 54K+542 側壁發生混凝土剝落現象，與透地雷達縱向掃描所發現的 54K+209~54K+339 區段最為接近，建議在本隧道該區段應持續進行細部調查，並進行適當的維修補強。

5.大竹二號隧道

大竹二號隧道長度 1236 公尺，主要發生襯砌劣化影像區段在縱向剖面 56K+873~56+889 與 56K+932~56K+949 兩個區段之中，深度分布範圍在 20~60cm 左右，劣化影像相當侷限，沒有擴大跡象，大竹二號隧道頂拱縱向部份，僅在 56K+122~56K+141 的頂拱可能襯砌厚度範圍內發現小規模厚度改變現象，並且發現小型金屬繞射散佈，推測可能是鋼絲網所產生；在橫向剖面部份，僅在 56K+165、56K+445、56K+650 三處發現可疑的背後疏鬆現象，沒有

發現厚度改變的影像。依據現場襯砌調查所獲得的結果來看，僅在 56K+165、56K+625 及 56K+755 側壁發生局部漏水現象，與透地雷達掃描所得可能的劣化區段尚有距離，推測該隧道僅在小範圍呈現滲水現象，劣化程度應不致過於嚴重，建議本隧道實行定期檢查漏水狀態是否繼續擴大，及持續追蹤 56K+873~56+889 與 56K+932~56K+949 兩個區段的襯砌狀態是否繼續惡化。

6. 多良一號隧道

多良一號隧道長度 1649 公尺，在縱向剖面並沒有發現襯砌明顯背後疏鬆現象，也沒有發現厚度改變的情況，但襯砌內影像各介面的連續性較差，推測襯砌材質可能產生整體性劣化現象，但依然可維持既有結構；在橫向剖面部份，60K+080 與 60+155 各發現一處可疑的背後疏鬆現象，60k+400 在可能襯砌厚度範圍內發現一處小型厚度改變的影像，但影響程度有限。由於 60K+100~60K+515 發生多處規模相當大的縱向裂縫與頂拱嚴重變形現象，這種現象反映在縱向掃描影像中即為影像各介面的連續性較差，並呈現出大範圍的疏鬆現象，建議該區段應在短期間內進行適當維修，以補強受損襯砌。

7. 金崙隧道

金崙隧道長度 4392 公尺，在透地雷達掃描中均有各項襯砌劣化影像的分佈相當平均，主要發生襯砌明顯背後疏鬆現象區段在縱向剖面 64K+600~65K+600、66K+100~67K+800 及 67K+900~68K+300 三個區段，影響深度大約在 20~50cm 左右，少數可達 60cm，厚度改變的位置多出現在頂拱可能襯砌厚度範圍內，其中以 64K+730~64K+792、64K+809~64K+838、66K+600~66K+625、67K+520~67K+565、67K+925~67K+989 四處的厚度變化延伸型態最明顯，並伴隨著背後疏鬆的情形，值得特別注意；在橫向剖面部份，64K+450、64K+715、64K+760、64K+810、64K+835、64K+860、64K+995、65K+110、66K+060、66K+147、66K+680、67K+265、67K+910、68K+160、68K+185、68K+205、68K+230 及 68K+240 等多處亦發現可疑的背後疏鬆現象，沒有發現厚度改變的情形。根據金崙隧道現場的襯砌調查，裂縫大多集中在 65K+600、66K+120~66K+165、66K+680、67K+910、68K+160~68K+275 等五處，側壁發生的裂縫型態以橫向較多，建議本隧道應針對縱向剖面所發現的三個區段進行襯砌破壞程度評估，並採取適當的維修手段以補強受損的部份。

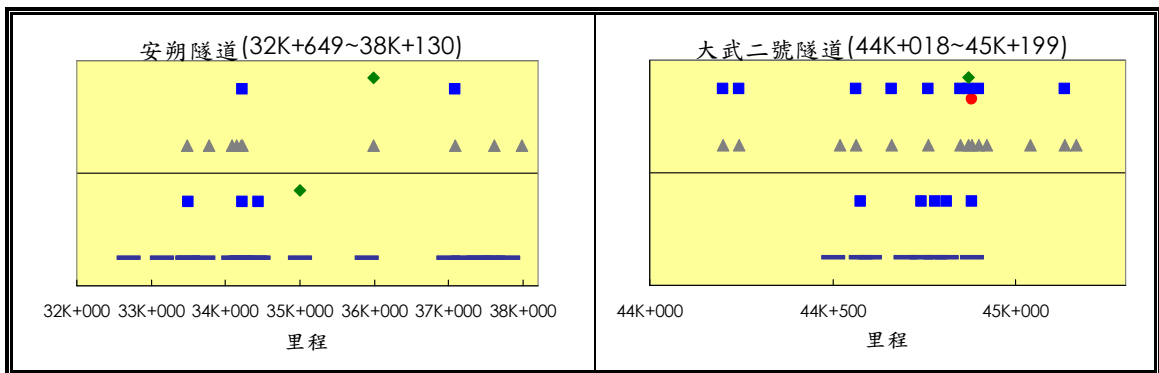


圖 3.6-3 各隧道透地雷達檢測成果圖(1/2)

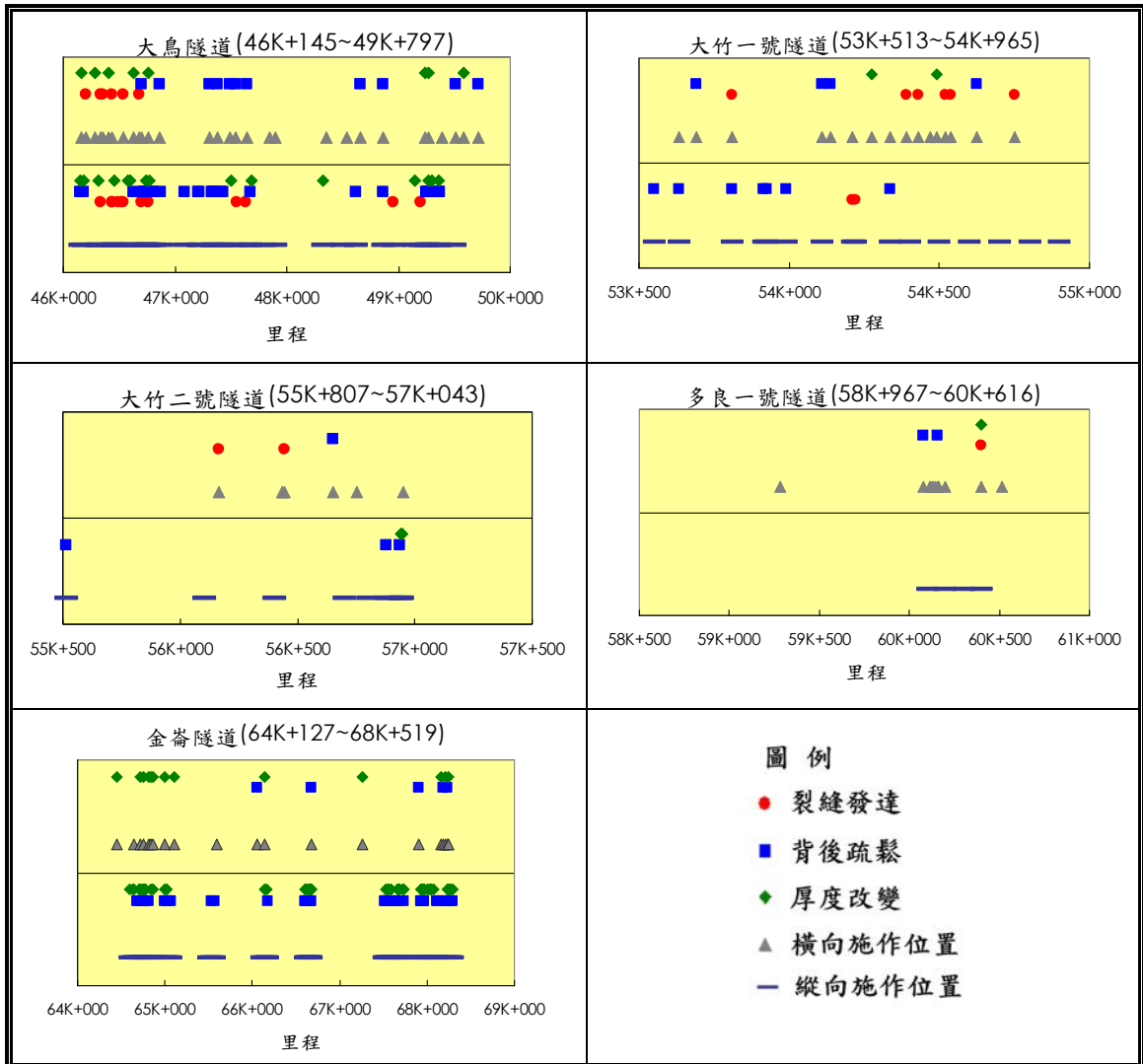


圖 3.6-3 各隧道透地雷達檢測成果圖 (2/2)

3.6.4 敲擊回音檢測野外作業說明

敲擊回音法是以敲擊表面的方法導入應力波(聲波)於混凝土內部，由結構體內瑕疵或邊界回傳之應力波所造成的反應來做非破壞評估的一種方法。此法可用來決定鋼筋及混凝土結構物中之瑕疵-例如垂直裂縫、斷層、孔隙、以及蜂窩之深度、位置與範圍，並可精確量測混凝土樓版或橋面版之厚度以及介面接合程度(例如新修補混凝土與舊混凝土、瀝青路面與鋼筋混凝土橋版、涵管坑道與岩壁或土壁等)。南迴鐵路金崙、多良一號、大竹二號、大竹一號、大鳥、大武二號及安朔等七座隧道內施作非破壞檢測作業，評估其襯砌厚度，共計有 16 個測點，測點相關位置詳如表 3.6-5 所示。

表 3.6-5 南迴鐵路隧道敲擊回音檢測位置及成果表

隧道名稱	測點點位	檢測位置	波速 (m/s)	敲擊源 (大小)	尖峰頻率 (kHz)	對應厚度 (cm)	備註	可能襯砌厚度 (cm)
安朔	34k+180	起拱線以上 30~50cm處	3569	大球(B)	3.843	48.7	-	48.7
				小球(S)	3.843	48.7	-	
	34k+295	起拱線以上 30~50cm處	3811	大球(B)	3.66	-	撓曲振動頻率	-
				小球(S)	6.222	30.1	明顯層隙裂縫深度	
大武二號	44k+850	起拱線以上 30~50cm處	3598	大球(B)	3.477	53.8	-	53.8
				小球(S)	6.405	29.2	疑似瑕疵深度	
	44k+880	起拱線以上 30~50cm處	4088	大球(B)	3.11	60.2	-	60.2
				小球(S)	12.811	14.6	疑似瑕疵深度	
大鳥	48k+360	起拱線以上 30~50cm處	3513	大球(B)	4.062	46.1	-	46.1
				小球(S)	4.062	46.1	可能為襯砌與噴凝土黏結良好狀況	
	48k+865	起拱線以上 30~50cm處	4015	大球(B)	-	-	N	-
				小球(S)	-	-	N	
大竹一號	54k+433	起拱線以上 30~50cm處	3514	大球(B)	5.49	34.1	明顯層隙裂縫深度	34.1
				小球(S)	5.49	34.1	明顯層隙裂縫深度	
	54k+540	起拱線以上 30~50cm處	3627	大球(B)	5.124	36.5	撓曲振動頻率	-
				小球(S)	15.556	12.0	明顯層隙裂縫深度	
大竹二	56k+435	起拱線以上 30~50cm處	3877	大球(B)	-	-	N	-
				小球(S)	-	-	N	
	56k+453	起拱線以上 30~50cm處	3877	大球(B)	4.758	39.3	-	39.3
				小球(S)	9.334	20.1	疑似瑕疵深度	
多良一號	60k+260	頂拱	3598	大球(B)	3.294	56.8	撓曲振動頻率	-
				小球(S)	9.517	19.7	明顯層隙裂縫深度	
	60k+380	頂拱	3844	大球(B)	7.138	26.2	明顯層隙裂縫深度	-
				小球(S)	7.138	26.2	明顯層隙裂縫深度	
多良一號	60k+400	頂拱	3812	大球(B)	2.745	68.2	可能為襯砌與噴凝土黏結良好狀況	68.2
				小球(S)	9.7	19.3	疑似瑕疵深度	
	60k+415	頂拱	3877	大球(B)	3.294	56.8	-	56.8
				小球(S)	3.294	56.8	-	
金崙	64k+458	路基面以上約 130cm處	3945	大球(B)	-	-	N	-
				小球(S)	-	-	N	
	68k+160	路基面以上約 130cm處	4015	大球(B)	4.392	42.6	可能為襯砌與噴凝土黏結良好狀況	42.6
				小球(S)	4.392	42.6	可能為襯砌與噴凝土黏結良好狀況	

註：無明顯厚度反應以 N 代表。

現場檢測時可有效檢測之瑕疵深度，與敲擊源直徑的選擇有關，敲擊源越大，敲擊時注入混凝土中之高頻能量越低，則較近表面的瑕疵或埋置物之檢測反應會因高頻能量不足而抑制。當敲擊源接觸地面時間(簡稱敲擊接觸時間)為 t_c 時，高於 $1.5/t_c$ 頻率之能量即可忽略。本檢測案檢測標的物為隧道混凝土襯砌，因此每

測點均以不同直徑之敲擊源施測以有效求取襯砌厚度及淺層瑕疵之反應，每種敲擊源均做三次重複敲擊以確定其檢測結果之穩定性。此外，敲擊回音法可以檢測到之瑕疵尺寸(b)須大於瑕疵深度(d)之1/3以上(即 $b/d > 1/3$)。舉例而言，瑕疵深度9 cm時，其水平尺寸為3 cm可被偵測，但深度在21 cm時則其水平尺寸須達7 cm才可被偵測。

現場進行施作敲擊回音檢測時，依照美國材料與試驗協會標準規範 ASTM C1383 所建議之配置進行施做，先於受測點位量取混凝土縱波波速後，再以敲擊源敲擊測點表面導入暫態之彈性應力波於混凝土內部量測其表面位移擾動訊號，在資料擷取方面每隔 2.668×10^{-6} 秒(2.668 μ s)抓取一筆資料，抓取2048筆而形成一筆記錄長度(record length)，經FFT轉換所得之頻譜解析度則分別為0.183kHz。在頻譜解析度誤差方面，以敲擊回音進行版厚頻率量測時會產生偏差值(Δf)乃為頻譜解析度誤差，檢測頻譜所得之厚度頻率(f)之最大可能偏差值(δf_{\max})為頻譜之解析度(Δf)之一半，在本案中偏差值即為0.0915 kHz，在波速固定為3900m/s的狀況下，檢測出厚度為50cm的誤差值在 ± 1.2 cm左右；40cm的誤差值在 ± 0.8 cm左右；30cm的誤差值在 ± 0.5 cm左右。

用敲擊回音技術量測混凝土縱波波速以及混凝土板厚度的方法，已在美國材料試驗標準(ASTM)審核通過，已納入ASTM C1383的規範。當利用機械性敲擊測試物體表面產生暫態應力波動，該應力波動內含之縱波(P-wave)及剪力波(S-wave)會以球狀的波形方式向物體內部傳動，遇到反射介面時，如版內部的裂縫及孔隙或版的底部時，將被反射回去；當這些反射波回到敲擊面時，則產生表面的位移。利用表面放置的接收器可監測到此位移反應，如果接收器被安排在靠近敲擊點時，則監測到的位移主要是因為縱波所造成。當鋼珠敲擊於混凝土表面時，會導入應力波於混凝土中，並由內部瑕疵或邊界反射回表面，而這些反射波所造成的表面擾動位移，將擾動靠近敲擊源的位移感應器。位移感應器會產生與位移量成正比的類比電壓訊號，這些隨著時間改變的訊號經由資料擷取系統數位化後，傳遞到電腦記憶體中，此一位移波形可用來決定壓力波在敲擊面及反射介面間來回一趟所需要的時間，若反射介面的深度(T)已知，則可推求得到壓力波在該物體內部行進的速度，反之，若波速已知，則可推算出此一反射介面的深度。相關施作儀器及資料接收照片如圖3.6-4。本試驗系統規格符合ASTM C1383之需求，分別說明如下：

- 1.可感測敲擊源：利用鋼珠內裝設感應元件開發之可感測敲擊時間原點裝置，當敲擊源敲擊測試物體的同時，嵌於鑽孔鋼珠內之壓電材料因受碰撞時之應力變化而產生電壓訊號，由波形圖上直接得到敲擊時間原點。敲擊鋼珠直徑有3mm、5mm及8mm，本案採用之鋼珠直徑為3mm。
- 2.接收器：目前敲擊回音法所採用的接收器，為一種寬頻的位移接收器，其與物體表面的接觸，為一種很小成倒錐體形之壓電材料，因此可視為類似點之接觸，所反應出來之訊號與垂直表面位移量成正比。介於壓電材料及混凝土表面間，使用一小片的薄鉛片或是不鏽鋼片來完成接收器之接觸，由於薄鉛片材質很軟，可使接收器與粗糙的混凝土表面緊密壓合而無須使用接合液或是對表面作

特別磨平處理。

- 3.鋼珠自動敲擊機構：可重複自動執行敲擊動作，須配合敲擊器使用。
- 4.類比/數位轉換卡 (Analog to Digital)：接收器接收連續之類比 (Analog) 訊號時，必須由 A/D 卡抓取並轉換成不連續之數位 (Digital) 之訊號，以便後續之訊號處理、分析及儲存。本案所使用之 A/D 為 Pico Technology Limited 型號 ADC-212 之訊號擷取盒，提供兩個 BNC 插槽以外接接收器，資料的最快擷取速率為 1.5MHz(每 0.667 μ s 紀錄一筆資料)，解析度為 12 bits。
- 5.筆記型電腦：A/D 卡轉換完成之數位訊號，可透過軟體抓取到記憶體中，再進行訊號處理、分析或儲存於硬碟裡。

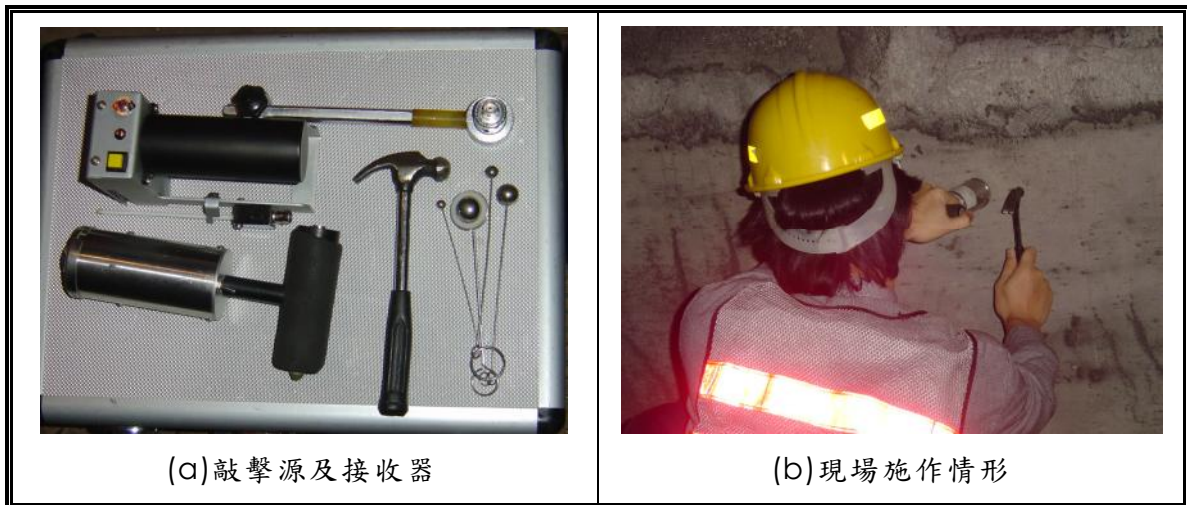


圖 3.6-4 敲擊回音儀器及現場施作照片

3.6.5 敲擊回音檢測資料處理

進行量測混凝土厚度試驗前需先求得壓力 P-波波速(C_p)。本案採用 ASTM C1383 所建議的配置，P 波波速試驗的儀器配置為敲擊源及接收器位於同一直線上，敲擊點與接收器之距離為 $H=300\text{mm}$ ，當敲擊產生時，應力波首先抵達第一接收器，且同時啟動訊號擷取系統，從波形圖上即可紀錄波到的時間(t_1)，接著應力波再行經第二接收器，由第二接收器紀錄到表面位移波形，同時紀錄波到時間(t_2)，由於兩接收器接收訊號起始時間相同，應力波從第一接收器到第二接收器傳輸所需耗費的時間為($t_2 - t_1$)，兩接收器的距離(H)已知，便可推算應力波波速等於距離除以時間($C_p = H / (t_2 - t_1)$)。

以測點編號 64k+458 波速量測結果為例，第一接收器所接收到之起始時間為 $-34.7\mu\text{s}$ ，而第二接收器所記錄之表面 P 波到達時間 t_2 為 $42\mu\text{s}$ ，第一接收器至第二接收器所行經路徑為 300mm ，可計算得表面壓力波波速 C_p 為 3911m/s 。同樣的檢測程序，對其他測點施作 P-波波速量測，所有表面 P-波波速列於表 3.6-6。從表 3.6-6 所列各檢測區之波速約介於 3513 至 4015m/s 之間，有明顯之波速變異，在此需再注意到的是於現場檢測時發現到如受測點位表面較平滑，所量測到

之表面壓力波波速約分佈在 4015m/s~3877m/s，而表面孔洞分佈較多之點位所量測到之壓力波波速較低，分佈在 3513m/s~3627m/s，研判是由於表面孔洞影響壓力波走時故量測到之波速較低，為消除此項誤差，在敲擊回音法頻譜領域分析中波速之基準均採一較合理的波速 3900m/s 作為計算基準。

3.6.6 敲擊回音檢測成果評估

本案共 16 個測點位置，測點編號為 34k+180-b 代表該點位為 34k+180 處之測點且該點位使用較大直徑鋼珠敲擊表面導入應力波於結構體；34k+180-s 則代表使用直徑較小之鋼珠敲擊表面導入應力波於結構體。

在本案中之隧道結構體在基本上而言，可謂之為三明治結構體，主要是由內襯砌、噴凝土、岩體等三種材料所組成，另一方面隧道襯砌在目視檢測時已發現有多處裂縫、滲水、襯砌剝落、修補介面等狀況發生，敲擊回音法在結構體上可能檢測到的瑕疵，有下列幾種可能狀態：

1. 狀態 A—襯砌內部有小範圍之層隙裂縫(或瑕疵)存在。
2. 狀態 B—襯砌內部有大範圍之層隙裂縫(或瑕疵)存在。
3. 狀態 C—襯砌內部無裂縫(或瑕疵)存在但與噴凝土層介面存在冷縫。
4. 狀態 D—襯砌內部無裂縫存(或瑕疵)且與噴凝土層黏結良好但噴凝土層與岩體界面分離。
5. 狀態 E—襯砌、噴凝土層、岩體等三材質黏結介面良好，且岩體聲阻係數小於混凝土。
6. 狀態 F—襯砌、噴凝土層、岩體等三材質黏結介面良好，且岩體聲阻係數接近混凝土。

一般而言，壓力波的波速可利用已知距離之雙接收器除以波的走時而得，有了波速後，即可偵測因瑕疵所形成的反射介面之深度(T)也就是瑕疵的位置。與本案有關之檢測訊號判斷可能反應，包括板狀構件反應，瑕疵反應，及介面黏結程度與撓曲振動反應，茲分述如下：

1. 板狀構件反應

在鋼珠敲擊檢測板表面時，由緊鄰之接收器所得之垂直位移波形，其中最顯著之位移為敲擊所產生之表面波，之後應力波在板底面與頂面間來回反射傳動而形成共振之訊號，其中以壓力波最為顯著。當產生一個共振條件，每次應力波到達頂面時，將引起一向下位移。此位移波形具有週期性。對靠近敲擊位置的點而言，P 波來回一趟行經的路徑為版厚(T)的兩倍，所造成的週期波形則為行經路徑(2T)除以 P 波的視波速，由於頻率(f)為週期的倒數，而檢測版之 P 波視波速為實際 P 波波速(Cp)之 96%。可由敲擊頻率及實際 P 波波速反推板厚。

2. 瑕疵反應

混凝土澆置過程中若是搗實振動不佳，再加上鋼筋配置過於密集，將可能在施工過程之中產生蜂窩或是孔隙，在敲擊回音試驗檢測時，這些孔隙將形成

較顯著之反射界面，應力波會在孔隙與敲擊面間來回反射，故在頻譜上會出現較明顯對應到孔隙深度頻率(f)之高振幅尖峰，藉以判斷其深度。

3.黏結程度

檢測標的若為兩層結合之複合層面(例如舊有混凝土與修補混凝土結合或隧道噴凝土層與內襯砌結合)，在檢測結果的頻譜分析上，主要有兩種相對的情況：黏結良好與黏結不良。就黏結良好而言，若兩層間複合緊密，即既存混凝土與覆蓋材料之間緊密結合；若兩者材料之聲阻系數值相近，則當波傳遞至黏結面時，可能不會造成明顯的反射現象(視為無反射界面)，就如同對單一介質進行敲擊回音試驗，故頻譜上顯示單一高振幅尖峰位於兩層相加之總版厚頻率(應力波來回版頂面及底面一趟所需時間的倒數)。

就黏結失敗而言，倘若既存混凝土與覆蓋材料之間因存有粉末、雜質或其他因素(如接著劑使用不當)導致黏結效果失敗，則可視同在黏結面上存有瑕疵，此瑕疵會造成入射波無法穿透而成反射波反射回來，其敲擊回音頻譜將會出現黏結介面深度所對應的頻率尖峰，而此時前面黏結良好情況之版厚頻率也將因黏結不良阻礙波之傳動而變小。

4.撓曲振動

在結構體中內部淺層隙之敲擊回音反應不同於深層隙，隨著不同層隙尺寸與不同敲擊位置的改變，淺層隙上方敲擊可激發出一個或是更多撓曲振動模態。而本案中之混凝土襯砌內部若有層隙裂縫存在，在此層隙上方敲擊，可能不僅造成層隙上方混凝土頸縮擴張造成版狀構件反應，也可能造成整個版上方之混凝土層產生彎曲變形之振動，此即為所激發之撓曲振動模態。

採用敲擊回音頻譜領域分析時基於此法對裂縫之靈敏度，會有較複雜之反應，各點位敲擊回音檢測結果列於表 3.6-6，並整理如圖 3.6-5，各測點檢測結果詳述如下：

- 1.襯砌、噴凝土層、岩體等三材質黏結介面良好且其材料之聲阻係數相近(狀態 **F**)，其典型之反應為波形圖中除表面位移波外無其他明顯反射訊號，近似於半無限域之反應，如測點編號 48k+865、56k+435、64k+458，由於無反射應力波介面故無法得到明顯的厚度訊號。
- 2.在應力波反射界面可能發生在噴凝土層與岩體之介面時，襯砌內部無裂縫存在(或瑕疵)且與噴凝土層黏結良好但噴凝土層與岩體界面分離(狀態 **D**)；或襯砌、噴凝土層、岩體等三材質黏結介面良好，但岩體聲阻係數小於混凝土之狀況(狀態 **E**)，如測點 48k+360、60k+400、68k+160，與原始設計襯砌厚度比對，因為加上噴凝土層檢測厚度較原始為厚。
- 3.敲擊源為大球之頻譜反應可看出襯砌厚度介面，但敲擊源為小球之頻譜有檢測出較不顯著的瑕疵訊號位於襯砌內部，推測瑕疵可能是小範圍裂縫或裂縫仍有部分混凝土黏結的狀況，此類型之測點有 44k+850、44k+880、56k+453，瑕疵相對應深度及襯砌厚度如表 3.6-6 中所示。

4. 襯砌內部無裂縫(或瑕疵)但與噴凝土層介面可能有冷縫存在(狀態 C)，如測點 34k+180 及 60k+415，敲擊源為小球時無明顯瑕疵訊號，應力波之反射介面應在襯砌與噴凝土間，故可檢測出明顯的襯砌厚度訊號。
5. 襯砌內部有明顯層隙裂縫訊號，如測點 54k+433 及 60k+380，由於敲擊源不論為大球或是小球在襯砌內部均有明顯的反射訊號，推測其層隙裂縫範圍可能大於四倍層隙裂縫深度。
6. 襯砌內部有明顯層隙裂縫訊號但亦伴隨撓曲振動的訊號，如測點 34k+295、54k+540、60k+260，測點在敲擊源為大球時有撓曲振動的訊號，而小球有層隙裂縫訊號，推測此層隙裂縫之範圍可能在其深度的二至四倍左右。
7. 檢視表 3.6-5 所列之檢測結果，可知大竹一號隧道 54k+540 點位及多良一號隧道 60k+260 點位檢測出大範圍明顯層隙裂縫深度較小，分別為 12.0 及 19.7 公分，需注意此處裂縫與隧道表面間混凝土可能會局部剝離。

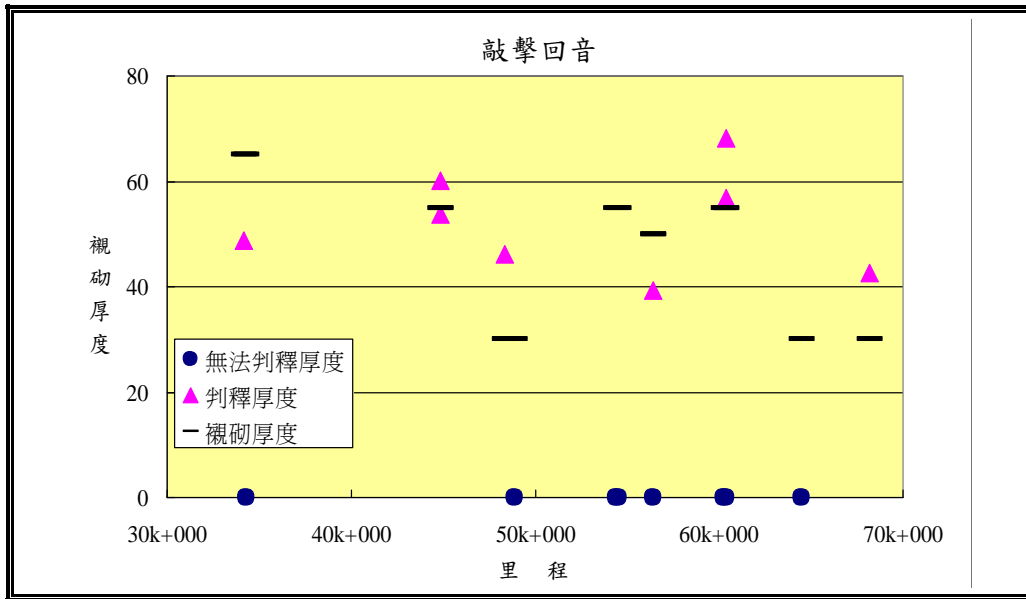


圖 3.6-5 各隧道敲擊回音檢測成果圖

3.7 裂縫寬度與深度探查

3.7.1 野外作業說明

詳細檢查階段的裂縫深度檢測，屬於不破壞受檢測物之原有特徵及其可用性，而能偵知其品質狀況的檢測方法。此項技術可針對混凝土表面發現的裂縫進行非破壞檢測，並成功地運用在新建土建工程的品質監管及建築物老劣化之診斷，對於混凝土的材料強度及其結構瑕疵可以有效地偵測。不僅迅速確實，且不破壞受檢結構物的完整性。圖 3.7-1 為本案實施裂縫深度及寬度檢測之實況。

以超音波波速量測材料品質選用適當頻率、確認超音波的傳遞時間並計算波在材料中移動的路徑長度，是最重要的品質要件。為使傳送端子與混凝土表面間

能有良好的連結，需以凡士林、液體肥皂或潤滑油等塗抹其間。因為超音波無法傳送穿過裂縫，若有裂縫存在於傳送路徑上，則超音波會繞過裂縫而尋找其他路徑，故儀器顯示的時間，係由繞行孔裂縫後所得者，利用此特性可測得裂縫存在。



圖 3.7-1 裂縫深度及寬度檢測實況

超音波的基本原理是在待測物體上一點發出超音波脈波，量取從 A 點傳到 B 點所需要的時間。由於波的傳遞速度是根據介質的性質及質量而定，若已知質量及波的傳遞速度，便可評估其彈性性質，因此只要依據材料性質及所量測速度，便可用來評估材料之現存狀況。本案量測波速穿過混凝土的技術採用同面法 (same face method)，此法是當僅有一面混凝土表面可接近時採用。混凝土裂縫超音波檢測法基本原則，是透過聲波速度的量取了解該物體的彈性模數，受測物彈性模數與其強度極具相關性。本案以隧道掃描影像判釋為基礎量測重大裂縫之深度，共計 21 處。

3.7.2 資料處理及成果

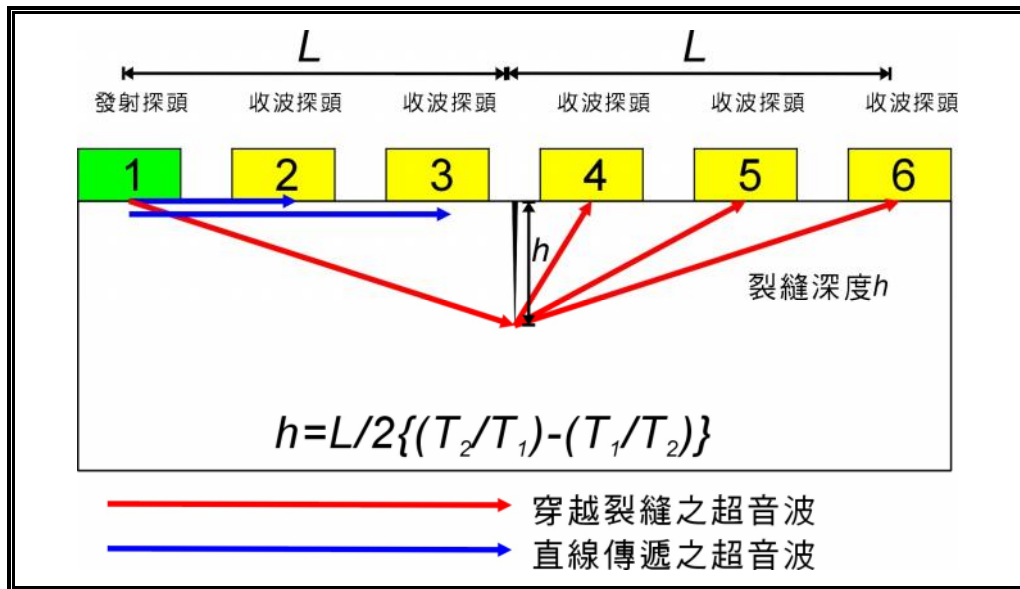


圖 3.7-2 超音波裂縫深度檢測原理

本案超音波最大能量大多受到混凝土劣化及地下水的影響，所接收到的訊號相當微弱，經由現場調整發射能量的強度後，亦能對於襯砌深層的混凝土裂隙進行檢測。如圖 3.7-2 所示，每個測站以 10cm 等距分佈；當裂隙位置在 3 號及 4 號之間時，超音波裂隙檢測首先放置發射探頭在 1 號位置，然後接收探頭依次放置在 2 號至 6 號位置；逐步紀錄超音波在不同位置所得到的初達波時間，即可構成該測站的超音波走時。

當發現裂隙位於 3 號與 4 號位置時，因波的行進受阻，所以會在此處產生 T_1 與 T_2 兩個時間落差。每個探頭間距 10cm ($L=25\text{cm}$)；由理論公式 $h(\text{裂隙深度})=L/2(T_2/T_1-T_1/T_2)$ 計算，可得此裂隙之計算深度。此外在量測深度時，亦使用裂隙量尺紀錄裂隙寬度，以增加裂隙觀測數值。詳細的裂隙量測成果列於表 3.7-1。隧道全線裂隙計算的相關數值，詳列於附錄 E。

表 3.7-1 南迴鐵路隧道超音波檢測結果表

隧道名稱	組數	編號	里程	施測位置	裂隙觀測寬度 (mm)	裂隙計算深度 (cm)	襯砌設計厚度 (cm)	裂隙深度比例 (%)
安朔	2	1	34k+100	山側	0.8	27.7	65	43%
		2	34k+210	山側	0.6	22.4	65	34%
大武二號	2	3	44k+565	海側	0.4	8.4	55	15%
		4	44k+900	山側	0.7	22.9	55	42%
大鳥	3	5	46k+630	山側	0.4	9.5	30	32%
		6	47k+495	山側	0.6	14.5	30	48%
		7	48k+655	頂拱	0.7	17.1	30	57%
大竹一號	6	8	53k+700	山側	0.7	11.1	55	20%
		9	54k+110	山側	0.9	17.6	55	32%
		10	54k+180	山側	1.0	20.9	55	38%
		11	54k+275	山側	0.5	9.3	55	17%
		12	54k+440	山側	1.2	41.1	55	75%
		13	54k+480	山側	0.7	17.3	55	31%
大竹二號	1	14	56k+755	山側	0.5	8.8	55	16%
多良一號	3	15	60k+090	頂拱	0.7	14.6	55	27%
		16	60k+300	山側	0.8	15.8	55	29%
		17	60k+510	山側	0.7	10.8	55	20%
金崙	4	18	64k+800	山側	1.0	29.8	30	99%
		19	66k+505	山側	0.5	8.8	30	29%
		20	67k+745	山側	0.8	33	55	60%
		21	67k+825	山側	0.4	10.7	30	36%
合計	21							

註：表中“襯砌設計厚度”係參考各隧道新建工程竣工圖(東部鐵路改善工程局，民國 81 年)。

3.7.3 資料評估

由探測結果統計顯示，南迴七座隧道檢測中，裂縫深度 0~20cm 者計有 14 處，裂縫深度介於 20cm 與 40cm 者計有 6 處，裂縫深度大於 40cm 者計有 1 處。將檢測結果之裂縫深度與原設計襯砌厚度作比較，可顯示襯砌損壞程度，結果如圖 3.7-3。以下是將所有數據綜合之後進行初步損害評估的結果：

1. 在裂縫計算深度與襯砌厚度比較的樣本中，以金崙隧道里程 67K+745 的 33.0cm 與 64K+800 的 29.8cm、大竹一號隧道里程 54K+440 的 41.1cm 以及大鳥隧道里程 48K+655 的 17.1cm，均已超過原隧道襯砌設計厚度 50% 以上，顯示此處的裂縫深度已經達到相當嚴重的破壞程度，應予以適當補強以維安全。
2. 在裂縫計算深度介於襯砌厚度 25%~50% 的樣本中，共計發現 12 處。(金崙隧道里程 67K+825 的 10.7cm、66K+505 的 8.8cm、多良一號隧道里程 60K+300 的 15.8cm、60K+090 的 14.6cm、大竹一號隧道 54K+480 的 17.3cm、54K+180 的 20.9cm、54K+110 的 17.6cm、大鳥隧道里程 47K+495 的 14.5cm、46K+630 的 9.5cm、大武二號隧道 44K+900 的 22.9cm、安朔隧道 34K+210 的 22.4cm、34K+100 的 27.7cm) 這 12 處破壞程度已經將屆襯砌厚度的 50%，未來應持續觀察這 12 處裂縫附近的襯砌狀態，是否有繼續劣化的現象。

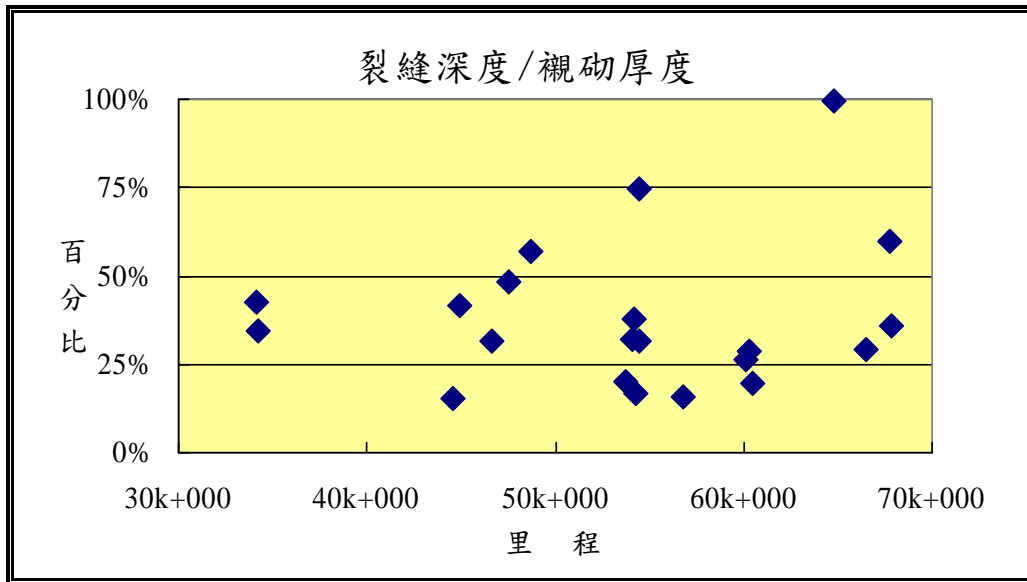


圖 3.7-3 超音波裂縫深度分析圖

3.8 混凝土強度錘試驗

3.8.1 野外作業

史密特錘試驗 (Schmidt hammer test) 為目前最常見的非破壞性混凝土簡易強度試驗。原本是處理混凝土品質檢測試驗，而後在岩石力學上被運用作為岩石強度評估的指數試驗，同樣也適用在混凝土強度檢測中。史密特錘試驗已列入 ASTM C805 規範之中，原理是利用彈簧壓縮釋放後，重錘撞擊岩石表面造成回彈，由重錘回彈位移的紀錄可得到試體強度的普遍特性。由史密特錘回彈值與岩石單壓強度關係的研究 (Deere & Miller, 1966) 中發現，回彈值與單壓強度間的關係受岩石之乾密度影響，根據此相關性可將成果繪製成試體單壓強度與不同乾密度下回彈值的關係，藉以快速修正回正確數值。本案共計施測 204 個測點，採用 Proceq 公司出品之 L-Type 型史密特錘 (見圖 3.8-1)，最大衝擊能量約 0.75N-m，可有效使用在本案混凝土強度的檢測試驗。



圖 3.8-1 Proceq 公司 L-Type 史密特錘

在隧道目視發現有特殊異常的位置進行強度試驗，並配合混凝土抗壓強度試驗的數值予以修正。施測角度分為 0 及 90 度兩種，前者為垂直側壁，後者為垂直頂拱。檢測時取劣化位置點周邊九個試點，各試點間距 10cm，而後將試錘的塞壓在試點的表面至退到錘體外殼邊緣，每個試點至少測試 2 次，如圖 3.8-2 所示；若各測點測試數值變化過大，則增加測試次數。當壓力達到釋放點時，試錘反彈高度的紀錄可作為反映硬度的指標。基本上每個施測位置最少可達 18 個紀錄數值，並取九個測點去除極大與極小的數值後綜合數值加以平均，作為該施測位置的標準讀數。

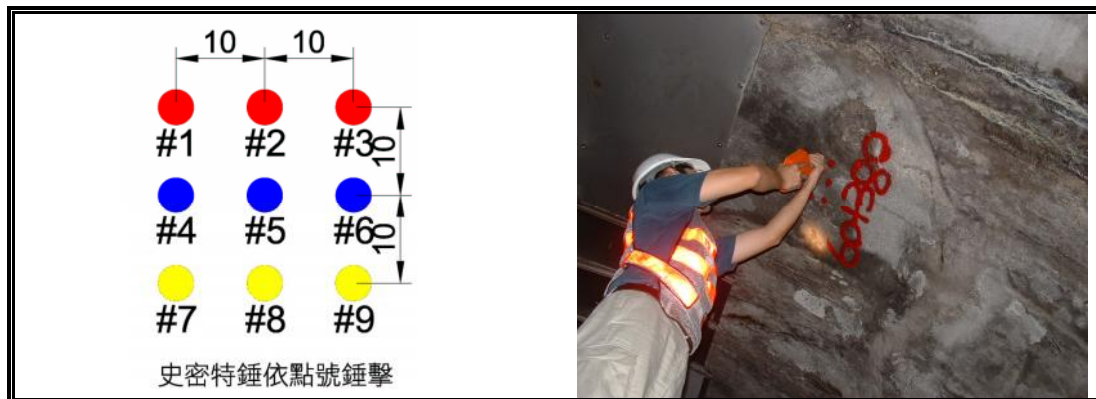


圖 3.8-2 史密特錘檢測說明

3.8.2 資料處理成果及研判

現場施測數量共計 204 組，詳細現場數據見附錄 F。將現場量測所得的史密特錘測試數據，根據原廠標準數值代換圖(如圖 3.8-3)進行數值讀取之後，即可得到表 3.8-1 的初步成果，進一步採用 ASTM 建議之程序修正史密特反彈錘之初步成果，根據混凝土鑽心之單壓強度與史密特反彈錘初步成果之比值，建立初步強度之修正係數，最大修正係數限定為 5，將史密特錘初步成果乘上修正係數，得到史密特錘之修正成果。

其中局部成果數值偏低，可能為現場施作位置多選擇為襯砌混凝土表面發生劣化現象處，致史密特反彈錘之初步成果數值偏低；另根據原廠數值代換圖(如圖 3.8-3)之建議，最終強度成果 (Z_m) 皆有極大值 (Z_{max}) 與極小值 (Z_{min}) 之分佈範圍，如強度為 100 kg/cm² 時分佈範圍分佈為 ±40 kg/cm²，強度為 200 kg/cm² 時分佈範圍分佈為 ±55 kg/cm²，鑒於此分佈之範圍相當大，建議本次利用史密特反彈錘推估之混凝土強度成果，僅具參考價值，混凝土實際強度仍以鑽心強度試驗成果代表為佳。

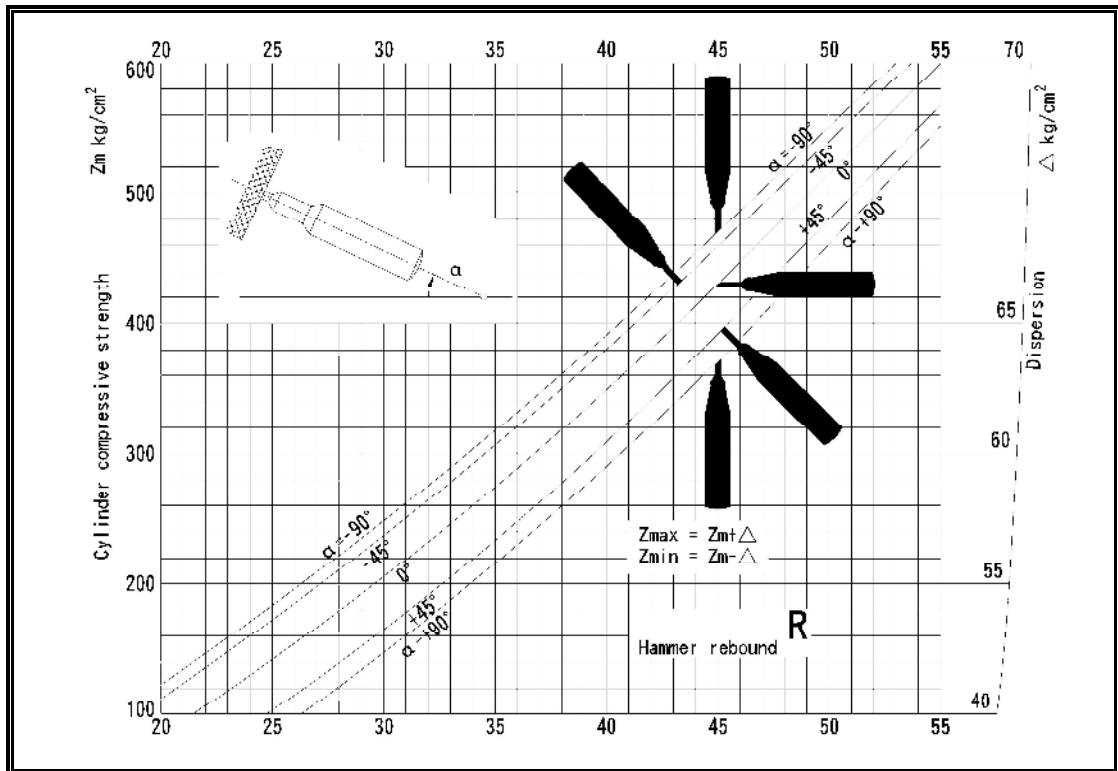


圖 3.8-3 史密特錘原廠數值代換圖

表 3.8-1 史密特錘現場施作成果表 (1/5)

隧道名稱	組數	編號	隧道里程	施測位置	初步成果 (kg/cm ²)	混凝土強度 (kg/cm ²)	修正係數	修正成果 (kg/cm ²)
安朔	26	1	32k+700	山側	55.7	565.74	5.00	278
		2	32k+730	山側	37.0	565.74	5.00	185
		3	33k+075	山側	82.7	565.74	5.00	414
		4	33k+150	山側	73.2	565.74	5.00	366
		5	33k+250	山側	110.0	565.74	5.00	550
		6	33k+490	山側	70.4	565.74	5.00	352
		7	33k+580	山側	48.8	440.94	5.00	244
		8	33k+795	山側	49.0	173.62	3.54	174
		9	34k+095	山側	21.6	233.73	5.00	108
		10	34k+100	山側	49.5	233.73	4.72	234
		11	34k+115	山側	31.5	229.52	5.00	157
		12	34k+155	山側	61.4	229.52	3.74	230
		13	34k+175	頂拱	84.1	398.43	4.74	398
		14	34k+210	山側	55.9	232.93	4.17	233
		15	34k+233	山側	48.0	232.93	4.85	233
		16	34k+295	山側	162.5	414.38	2.55	414
		17	34k+495	山側	27.2	329.95	0.00	0
		18	35k+050	山側	30.2	329.95	0.00	0
		19	35k+935	山側	39.5	329.95	5.00	197
		20	37k+085	山側	94.4	281.71	2.98	282
		21	37k+245	山側	30.9	312.23	3.31	102
		22	37k+435	山側	79.5	312.23	3.93	312
		23	37k+555	山側	17.0	312.23	0.00	0
		24	37k+610	山側	0.0	312.23	0.00	0
		25	37k+800	山側	73.3	350.87	4.78	351
		26	37k+985	山側	34.4	350.87	5.00	172
大武二號	23	27	44k+200	山側	27.2	411.56	0.00	0
		28	44k+245	山側	159.5	363.80	2.28	364
		29	44k+260	山側	83.5	363.80	4.36	364
		30	44k+530	山側	65.5	363.80	5.00	327
		31	44k+555	山側	135.4	363.80	2.69	364
		32	44k+565	山側	116.5	363.80	3.12	364
		33	44k+575	山側	172.4	363.80	2.11	364
		34	44k+585	山側	229.4	469.40	2.05	469
		35	44k+640	山側	97.6	469.40	4.81	469
		36	44k+660	山側	107.4	505.72	4.71	506
		37	44k+675	山側	184.5	505.72	2.74	506
		38	44k+740	海側	85.8	505.72	5.00	429
		39	44k+760	山側	144.7	406.24	2.81	406
		40	44k+770	山側	42.7	406.24	5.00	214
		41	44k+850	頂拱	184.8	406.24	2.20	406
		42	44k+860	頂拱	250.6	318.04	1.72	431
		43	44k+870	頂拱	228.7	447.08	1.95	447
		44	44k+880	頂拱	203.0	447.08	2.20	447
		45	44k+900	海側	116.0	266.08	1.31	152

表 3.8-1 史密特錘現場施作成果表 (2/5)

隧道名稱	組數	編號	隧道里程	施測位置	初步成果 (kg/cm ²)	混凝土強度 (kg/cm ²)	修正係數	修正成果 (kg/cm ²)
大武二號	23	46	44k+920	山側	78.9	266.08	3.37	266
		47	45k+040	山側	23.9	319.68	5.00	119
		48	45k+135	山側	192.3	462.60	2.41	463
		49	45k+165	山側	49.8	462.60	5.00	249
大鳥	55	50	46k+160	山側	198.3	320.56	1.62	321
		51	46k+200	山側	181.1	320.56	1.77	321
		52	46k+225	山側	296.7	346.70	1.17	347
		53	46k+285	山側	93.0	346.70	3.73	347
		54	46k+320	山側	77.9	306.08	3.93	306
		55	46k+330	山側	82.3	355.45	4.32	355
		56	46k+360	山側	135.8	411.14	3.03	411
		57	46k+405	山側	145.8	411.14	2.82	411
		58	46k+435	山側	237.6	524.87	2.21	525
		59	46k+490	山側	133.0	524.87	3.95	525
		60	46k+525	山側	193.9	524.87	2.71	525
		61	46k+535	山側	39.8	399.52	5.00	199
		62	46k+630	山側	144.7	317.41	2.19	317
		63	46k+650	山側	249.7	317.41	1.27	317
		64	46k+680	山側	187.9	317.41	1.69	317
		65	46k+700	山側	169.7	317.41	1.87	317
		66	46k+765	山側	138.3	446.62	3.23	447
		67	46k+860	山側	205.2	446.62	2.18	447
		68	46k+950	山側	213.8	446.62	2.09	447
		69	47k+055	山側	97.4	446.62	4.59	447
		70	47k+265	山側	234.8	446.62	1.90	447
		71	47k+305	山側	156.8	446.62	2.85	447
		72	47k+330	山側	192.8	446.62	2.32	447
		73	47k+380	山側	61.2	446.62	5.00	306
		74	47k+430	山側	256.1	446.62	1.74	447
		75	47k+450	山側	36.9	446.62	5.00	185
		76	47k+495	山側	132.8	332.71	2.50	333
		77	47k+545	山側	204.7	332.71	1.63	333
		78	47k+645	山側	126.5	266.44	2.11	266
		79	47k+675	山側	161.2	266.44	1.65	266
		80	47k+695	山側	49.1	266.44	5.00	245
		81	47k+850	山側	98.0	266.44	2.72	266
		82	47k+895	山側	167.2	299.14	1.79	299
		83	47k+910	山側	257.7	299.14	1.16	299
		84	47k+930	山側	232.3	299.14	1.29	299
		85	48k+020	山側	138.1	299.14	2.17	299
		86	48k+080	山側	112.7	299.14	2.65	299
		87	48k+105	山側	116.4	299.14	2.57	299
		88	48k+360	山側	53.1	222.04	4.18	222
		89	48k+535	山側	90.9	336.64	3.70	337
		90	48k+655	山側	308.8	336.64	1.09	337

表 3.8-1 史密特錘現場施作成果表 (3/5)

隧道名稱	組數	編號	隧道里程	施測位置	初步成果 (kg/cm ²)	混凝土強度 (kg/cm ²)	修正係數	修正成果 (kg/cm ²)
大鳥	55	91	48k+865	山側	174.5	383.00	2.20	383
		92	48k+915	山側	373.4	383.00	1.03	383
		93	49k+000	山側	78.3	383.00	4.89	383
		94	49k+035	山側	175.5	383.00	2.18	383
		95	49k+120	山側	156.6	383.00	2.45	383
		96	49k+201	山側	134.2	383.00	2.85	383
		97	49k+235	山側	194.7	502.68	2.58	503
		98	49k+255	山側	186.9	502.68	2.69	503
		99	49k+305	山側	144.4	502.68	3.48	503
		100	49k+390	山側	226.0	502.68	2.22	503
		101	49k+510	山側	224.3	335.60	1.48	333
		102	49k+560	山側	154.0	335.60	2.18	336
		103	49k+580	山側	134.7	335.60	2.49	336
		104	49k+715	山側	126.3	335.60	2.66	336
大竹一號	32	105	53k+590	海側	344.1	335.60	0.98	336
		106	53k+635	頂拱	150.6	335.60	2.23	336
		107	53k+650	頂拱	108.2	237.39	2.19	237
		108	53k+690	頂拱	130.7	237.39	1.82	237
		109	53k+810	頂拱	79.5	271.57	3.42	272
		110	53k+860	山側	46.5	271.57	5.00	232
		111	53k+900	山側	148.7	271.57	1.83	272
		112	53k+985	山側	29.6	271.57	0.00	0
		113	54k+110	山側	113.7	271.57	2.39	272
		114	54k+140	頂拱	57.1	457.82	5.00	285
		115	54k+180	山側	66.5	457.82	5.00	333
		116	54k+200	頂拱	93.8	435.05	4.64	435
		117	54k+243	山側	38.3	435.05	0.00	0
		118	54k+275	山側	52.0	435.05	5.00	260
		119	54k+320	頂拱	100.3	435.05	4.34	435
		120	54k+340	頂拱	92.1	240.72	2.61	241
		121	54k+390	山側	44.4	240.72	5.00	222
		122	54k+430	頂拱	257.6	240.72	0.93	241
		123	54k+440	山側	138.6	113.14	0.82	113
		124	54k+470	頂拱	189.2	81.02	0.43	81
125	54k+480	山側	80.7	81.02	1.00	81		
126	54k+490	頂拱	148.8	81.02	0.54	81		
127	54k+520	頂拱	95.7	429.87	4.49	430		
128	54k+540	頂拱	168.7	412.36	2.44	412		
129	54k+550	海側	58.0	412.36	5.00	290		
130	54k+595	山側	139.2	412.36	2.96	412		
131	54k+625	山側	80.9	412.36	5.00	405		
132	54k+675	山側	56.2	412.36	5.00	281		
133	54k+735	山側	245.4	412.36	1.68	412		
134	54k+750	頂拱	139.7	412.36	2.95	412		
135	54k+805	山側	134.6	412.36	3.06	412		
136	54k+945	山側	169.3	412.36	2.44	412		

表 3.8-1 史密特錘現場施作成果表 (4/5)

隧道名稱	組數	編號	隧道里程	施測位置	初步成果 (kg/cm ²)	混凝土強度 (kg/cm ²)	修正係數	修正成果 (kg/cm ²)
大竹二號	7	137	56k+165	山側	109.7	354.49	3.23	354
		138	56k+435	頂拱	119.8	286.30	2.39	286
		139	56k+445	頂拱	184.4	396.24	2.15	396
		140	56k+625	山側	108.6	319.26	2.94	319
		141	56k+755	山側	37.6	450.58	5.00	188
		142	56k+880	山側	0.0	450.58	0.00	0
		143	56k+975	山側	21.7	450.58	0.00	0
多良一號	24	144	59k+285	海側	155.5	450.58	2.90	451
		145	59k+378	頂拱	221.9	450.58	2.03	451
		146	60k+050	頂拱	184.3	450.58	2.45	451
		147	60k+080	頂拱	149.3	450.58	3.02	451
		148	60k+090	頂拱	87.8	379.24	4.32	379
		149	60k+115	頂拱	238.8	394.64	1.65	395
		150	60k+120	頂拱	210.9	394.64	1.87	395
		151	60k+150	頂拱	193.9	343.25	1.77	343
		152	60k+200	頂拱	33.3	460.09	5.00	167
		153	60k+240	頂拱	99.6	460.09	4.62	460
		154	60k+250	頂拱	143.3	460.09	3.21	460
		155	60k+260	頂拱	93.0	279.52	3.00	280
		156	60k+280	頂拱	125.3	279.52	2.23	280
		157	60k+300	頂拱	171.8	215.52	1.25	216
		158	60k+305	頂拱	163.0	315.32	1.93	315
		159	60k+315	頂拱	170.2	130.31	0.77	130
		160	60k+350	頂拱	172.9	130.31	0.75	130
		161	60k+370	頂拱	345.7	130.31	0.38	130
		162	60k+380	頂拱	97.3	321.87	3.31	322
		163	60k+390	頂拱	278.3	321.87	1.16	322
		164	60k+400	頂拱	177.8	314.50	1.77	315
		165	60k+450	頂拱	149.6	314.50	2.10	315
		166	60k+500	頂拱	55.2	122.95	2.23	123
		167	60k+515	頂拱	87.5	391.95	4.48	392
金崙	37	168	64k+700	山側	187.6	242.95	1.29	243
		169	64k+715	山側	159.2	242.95	1.53	243
		170	64k+730	山側	195.5	291.73	1.49	292
		171	64k+740	山側	81.9	291.73	3.56	292
		172	64k+750	山側	163.5	291.73	1.78	292
		178	64k+840	頂拱	129.2	188.44	1.46	188
		179	64k+860	頂拱	228.1	188.44	0.83	188
		180	64k+870	頂拱	119.9	188.44	1.57	188
		181	64k+950	頂拱	136.6	188.44	1.38	188
		182	64k+980	頂拱	168.9	418.21	2.48	418
		183	64k+990	山側	74.2	418.21	5.00	371
		184	64k+990	海側	223.8	258.94	1.16	259
		185	65k+000	海側	289.8	258.94	0.89	259

表 3.8-1 史密特錘現場施作成果表 (5/5)

隧道名稱	組數	編號	隧道里程	施測位置	初步成果 (kg/cm ²)	混凝土強度 (kg/cm ²)	修正係數	修正成果 (kg/cm ²)
金崙	37	186	65k+001	海側	223.7	258.94	1.16	259
		187	65k+100	山側	181.2	258.94	1.43	259
		188	65k+600	海側	56.7	360.88	5.00	284
		189	66k+060	山側	85.1	360.88	4.24	361
		190	66k+140	海側	229.5	360.88	1.57	361
		191	66k+165	海側	214.9	360.88	1.68	361
		192	66K+680	海側	128.4	343.54	2.68	344
		193	67K+265	山側	150.6	249.09	1.65	249
		194	67K+910	山側	123.4	249.09	2.02	249
		195	68k+120	海側	137.0	286.60	2.09	287
		196	68K+115	海側	174.5	286.60	1.64	287
		197	68K+160	山側	136.7	376.50	2.75	377
		198	68K+170	山側	142.2	376.50	2.65	377
		199	68K+185	山側	315.0	412.02	1.31	412
		200	68K+205	山側	117.5	412.02	3.51	412
		201	68K+215	山側	113.3	412.02	3.64	412
		202	68K+230	山側	73.9	306.55	4.15	307
203	68K+250	山側	86.3	306.55	3.55	307		
204	68K+275	山側	174.1	352.80	2.03	353		
合計	204							

考量史密特錘之試驗方法極易受混凝土表面狀況(蜂窩、裂縫、剝落)影響，故本項目之檢測數值僅可供作一般性襯砌強度檢驗之參考，依據部分偏低數值可用來判斷襯砌可能轉弱的區段，實際混凝土強度建議以鑽心抗壓試驗結果為準。若以南迴隧道襯砌原始混凝土設計強度為 210kg/cm² 作為基準，各隧道之檢測結果如圖 3.8-4。

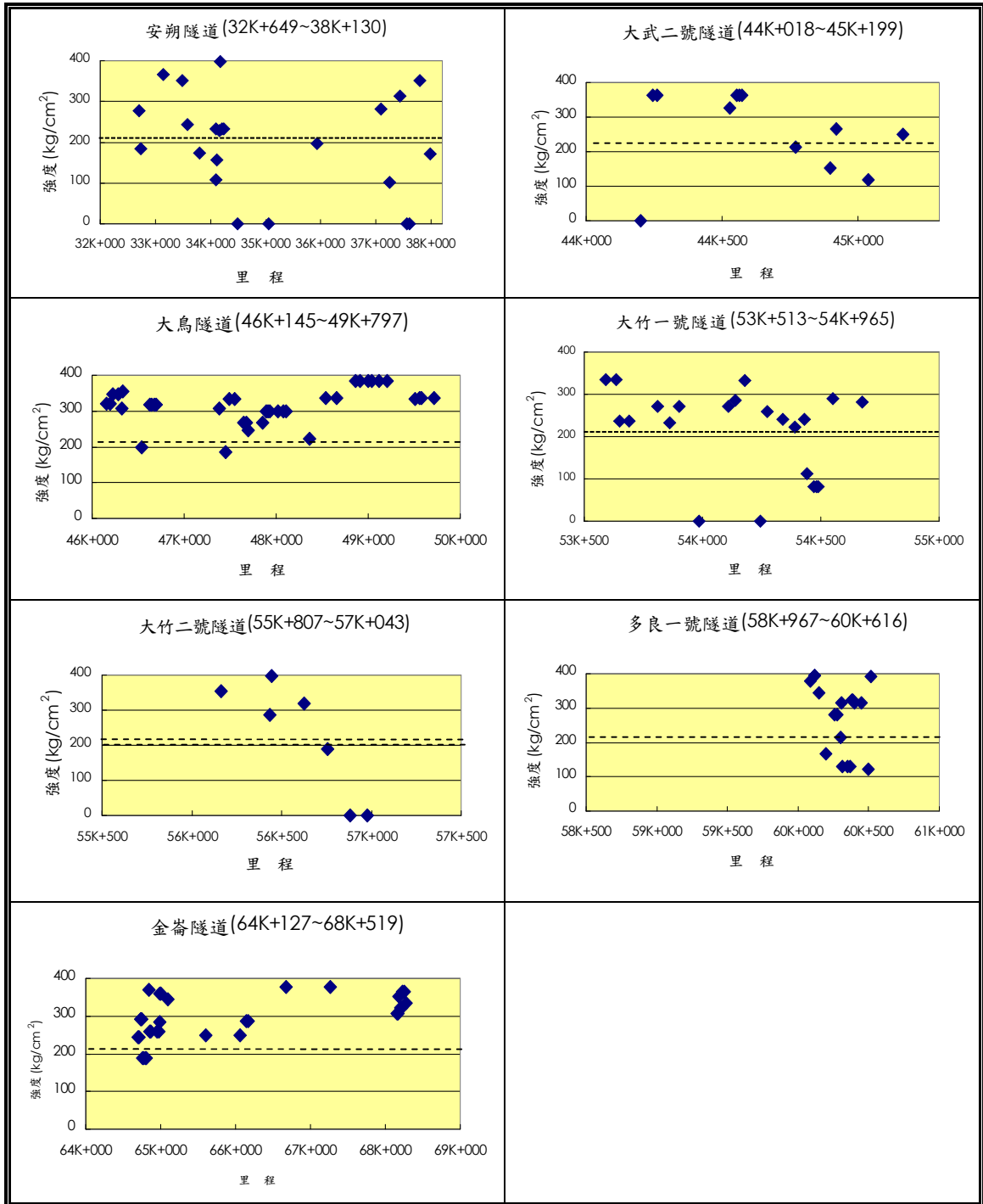


圖 3.8-4 各隧道史密特錘檢測成果圖

3.9 隧道鑽孔探查、取樣及室內抗壓強度試驗

3.9.1 鑽孔探查及取樣

本案鑽孔探查分別於隧道目視檢查之混凝土劣化處、襯砌剝落處、裂縫位置、混凝土膠結不良處、滲水位置等側壁或頂拱鑽孔取樣，共計 94 組鑽孔，每座隧道各取 1~2 處貫穿襯砌鑽心，以驗證襯砌真實厚度。詳細取樣數量及成果如表 3.9-1，現場作業實況如圖 3.9-1 所示，鑽孔取樣之混凝土試體照片詳見附錄 G。



圖 3.9-1 鑽心取樣現場作業照片

各隧道於鑽心取樣時均有部分鑽心穿透整個隧道襯砌，應可概略顯示隧道之襯砌厚度，可與設計厚度、透地雷達及敲擊回音檢測資料綜合研判襯砌厚度之變化。本案鑽孔探查時，因鑽心位置大多屬於混凝土劣化程度較高，或襯砌表面嚴重滲水的區段，在拔取不穩定鑽心時可能會因鑽心材質已經劣化，而導致鑽心邊緣受損斷裂的情況。

3.9.2 室內抗壓強度試驗

本工作共進行 94 組混凝土鑽心抗壓強度試驗，其中於金崙隧道計 18 組，多良一號隧道 12 組，大竹二號隧道 5 組，大竹一號隧道 10 組，大鳥隧道 20 組，大武二號隧道 13 組及安朔隧道 16 組，詳細試驗照片置於附錄 H，試驗結果整理

如表 3.9-1。鑽心破壞形式如下所示：

表 3.9-1 混凝土鑽心取樣及抗壓試驗結果 (1/3)

隧道名稱	組數	編號	里 程	取樣位置	長度 (cm)	長徑比 L/D	修正係數 (f)	最大荷重 (kgf)	試體面積 (cm ²)	抗壓強度 (kgf/cm ²)	破壞型態(*)
安朔	16	1	32K+691	海側	17.9	1.84	1	13441	23.76	565.74	C
		2	33K+491	山側	17.8	1.84	1	10476	23.76	440.94	C
		3	33K+784	海側	19.3	1.78	1	4125	23.76	173.62	C
		4	34K+093	海側	18.7	1.8	1	5553	23.76	233.73	C
		5	34K+114	海側	18.3	1.78	1	5453	23.76	229.52	B
		6	34K+156	山側	18.7	1.84	1	9466	23.76	398.43	B
		7	34K+176-3	山側	57.5	1.82	1	8409	23.76	353.94	A
		8	34K+206	山側	18.7	1.85	1	5534	23.76	232.93	C
		9	34K+241	山側	19.0	1.82	1	8614	23.76	362.57	A
		10	34K+293	山側頂	30.8	1.87	1	9845	23.76	414.38	A
		11	34K+490	海側	18.5	1.76	1	7839	23.76	329.95	A
		12	35K+987	山側	18.6	1.78	1	6693	23.76	281.71	A
		13	37K+087	海側	19.1	1.84	1	7418	23.76	312.23	A
		14	37K+617	海側	18.1	1.84	1	6406	23.76	269.63	C
		15	37K+621	海側	18.7	1.85	1	8336	23.76	350.87	C
		16	37K+987	山側	19.0	1.73	0.98	9778	23.76	411.56	B
大武二號	13	17	44K+202	山側	19.0	1.84	1	8368	23.76	352.20	A
		18	44K+244	山側	18.7	1.73	0.98	8643	23.76	363.80	A
		19	44K+585	山側	18.7	1.85	1	11152	23.76	469.40	B
		20	44K+660	海側	18.3	1.84	1	12015	23.76	505.72	A
		21	44K+743-2	海側	18.5	1.69	0.98	10294	23.76	433.28	C
		22	44K+760	山側	19.8	1.82	1	9652	23.76	406.24	B
		23	44K+854	山側頂	59.5	1.82	1	7556	23.76	318.04	A
		24	44K+867	山側	20.3	1.76	1	10622	23.76	447.08	C
		25	44K+884	海側	72.5	1.84	1	6322	23.76	266.08	A
		26	44K+962	山側	19.0	1.84	1	8330	23.76	350.61	B
		27	45K+023	海側	18.0	1.82	1	7595	23.76	319.68	C
		28	45K+070	山側	20.2	1.78	1	10991	23.76	462.60	B
		29	45K+172	山側	18.3	1.8	1	7904	23.76	332.70	C

表 3.9-1 混凝土鑽心取樣及抗壓試驗結果 (2/3)

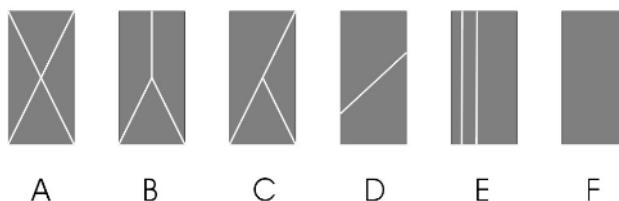
隧道名稱	組數	編號	里程	取樣位置	長度 (cm)	長徑比 L/D	修正係數 (f)	最大荷重 (kgf)	試體面積 (cm ²)	抗壓強度 (kgf/cm ²)	破壞型態(*)
大鳥	20	30	46K+160	海側	19.8	1.87	1	7616	23.76	320.56	C
		31	46K+220	海側	19.7	1.87	1	8237	23.76	346.70	C
		32	46K+320	海側	19.0	1.85	1	7272	23.76	306.08	A
		33	46K+330	海側	18.7	1.84	1	8445	23.76	355.45	A
		34	46K+360	海側	18.1	1.82	1	9768	23.76	411.14	B
		35	46K+435	海側	17.9	1.84	1	12470	23.76	524.87	B
		36	46K+535	海側	18.5	1.73	0.98	9492	23.76	399.52	C
		37	46K+630	海側	19.0	1.76	1	7541	23.76	317.41	B
		38	46K+765	海側	18.1	1.84	1	10611	23.76	446.62	B
		39	47K+495	山側	19.0	1.85	1	7920	23.76	333.36	A
		40	47K+546	山側	19.5	1.64	0.97	9906	23.76	416.96	A
		41	47K+641	山側	18.0	1.84	1	6330	23.76	266.44	B
		42	47K+851	山側	18.0	1.82	1	8053	23.76	338.96	B
		43	47K+894	山側	18.0	1.73	0.98	7107	23.76	299.14	A
		44	48K+358	海側	54.2	1.84	1	5275	23.76	222.04	C
		45	48K+532	山側	18.0	1.69	0.98	7998	23.76	336.64	A
		46	48K+657	海側頂	18.5	1.78	1	6517	23.76	274.32	A
		47	48K+865	海側	36.3	1.82	1	9099	23.76	383.00	A
		48	49K+234	山側	18.1	1.84	1	11943	23.76	502.68	B
49	49K+392	山側	19.0	1.82	1	7973	23.76	335.6	A		
大竹一號	10	50	53K+650	海側	18.0	1.84	1	5640	23.76	237.39	B
		51	53K+810	海側	19.0	1.87	1	6452	23.76	271.57	C
		52	54K+140	海側	18.7	1.84	1	10877	23.76	457.82	A
		53	54K+200	海側	18.1	1.82	1	10336	23.76	435.05	A
		54	54K+340	海側	18.2	1.82	1	5719	23.76	240.72	A
		55	54K+432	山側	30.6	1.89	1	2688	23.76	113.14	C
		56	54K+470	山側	19.7	1.84	1	1925	23.76	81.02	C
		57	54K+520	山側	19.3	1.82	1	10213	23.76	429.87	B
		58	54K+540	海側	52.9	1.85	1	9797	23.76	412.36	B
59	54K+965	海側	18.7	1.78	1	4996	23.76	210.27	D		
大竹二號	5	60	56K+165	海側	19.0	1.82	1	8422	23.76	354.49	B
		61	56K+435	海側	52.4	1.89	1	6802	23.76	286.3	C
		62	56K+445	海側	18.6	1.87	1	9414	23.76	396.24	D
		63	56K+625	海側	18.3	1.91	1	7585	23.76	319.26	B
		64	56K+755	山側	18.7	1.95	1	10705	23.76	450.58	B
多良一號	12	65	60K+090	海側	18.7	1.76	1	9010	23.76	379.24	B
		66	60K+110	海側	19.1	1.78	1	9376	23.76	394.64	A
		67	60K+150	山側	19.0	1.8	1	8155	23.76	343.25	A
		68	60K+200	山側	19.3	1.82	1	10931	23.76	460.09	A
		69	60K+260	山側	19.8	1.84	1	6641	23.76	279.52	C
		70	60K+300	山側	18.0	1.84	1	5120	23.76	215.52	D
		71	60K+305	山側	19.3	1.85	1	7491	23.76	315.32	C

表 3.9-1 混凝土鑽心取樣及抗壓試驗結果 (3/3)

隧道名稱	組數	編號	里程	取樣位置	長度 (cm)	長徑比 L/D	修正係數 (f)	最大荷重 (kgf)	試體面積 (cm ²)	抗壓強度 (kgf/cm ²)	破壞型態(*)
多良一號	12	72	60K+315	海側	18.1	1.78	1	3096	23.76	130.31	C
		73	60K+380	海側	43.5	1.84	1	7647	23.76	321.87	A
		74	60K+400	山側	17.7	1.84	1	7472	23.76	314.50	B
		75	60K+500	山側	18.3	1.82	1	2921	23.76	122.95	A
		76	60K+515	山側	18.0	1.87	1	9312	23.76	391.95	A
金崙	18	77	64K+450	海側-內	41.6	1.73	0.98	9547	23.76	401.84	B
			64K+450	海側-外	17.8	1.78	1	10857	23.76	456.98	D
		78	64K+675	海側	18.1	1.84	1	5772	23.76	242.95	B
		79	64K+720	海側	19.0	1.78	1	6931	23.76	291.73	C
		80	64K+760	海側	18.1	1.82	1	4477	23.76	188.44	B
		81	64K+820	山側	19.0	1.78	1	9936	23.76	418.21	D
		82	64K+860	山側	19.7	1.82	1	6152	23.76	258.94	B
		83	64K+990	山側	19.0	1.84	1	8574	23.76	360.88	B
		84	65K+100	海側	18.0	1.78	1	8162	23.76	343.54	C
		85	65K+600	海側	18.1	1.82	1	5918	23.76	249.09	D
		86	66K+060	山側	19.0	1.84	1	5918	23.76	249.09	D
		87	66K+140	海側	19.7	1.84	1	6809	23.76	286.6	A
		88	66K+680	海側	19.1	1.69	0.98	8945	23.76	376.5	B
		89	67K+910	山側	18.7	1.82	1	9789	23.76	412.02	A
		90	68K+160	山側	19.0	1.85	1	7283	23.76	306.55	B
		91	68K+185	山側	19.3	1.84	1	8382	23.76	352.8	B
		92	68K+205	山側	20.1	1.84	1	7626	23.76	320.98	A
		93	68K+230	海側	19.1	1.87	1	8691	23.76	365.81	C
94	68K+275	海側	18.0	1.84	1	10973	23.76	461.86	C		
合計	94										

*註：

鑽心破壞形式



因南迴隧道襯砌之混凝土設計強度為 210kg/cm²，故分析各隧道混凝土鑽心試體抗壓試驗結果，其中大竹二號、大鳥及大武二號隧道之試驗值均大於 210 kgf/cm²，金崙隧道則有一個試體試驗值低於 210 kgf/cm²，強度為 188.44 kgf/cm² (里程 64K+740)，多良一號隧道有二個試體試驗值低於 210 kgf/cm²，強度分別為 130.31 及 122.95 kgf/cm² (里程 60K+315、60K+500)，大竹一號隧道有二個試體試驗值低於 210kgf/cm²，強度分別為 113.14 及 81.02kgf/cm² (里程 54+432、54K+470)，安朔隧道有一個試體試驗值低於 210 kgf/cm²，強度為 173.62 kgf/cm² (里程 33K+784)，各隧道試驗結果分析如圖 3.9-2 所示。

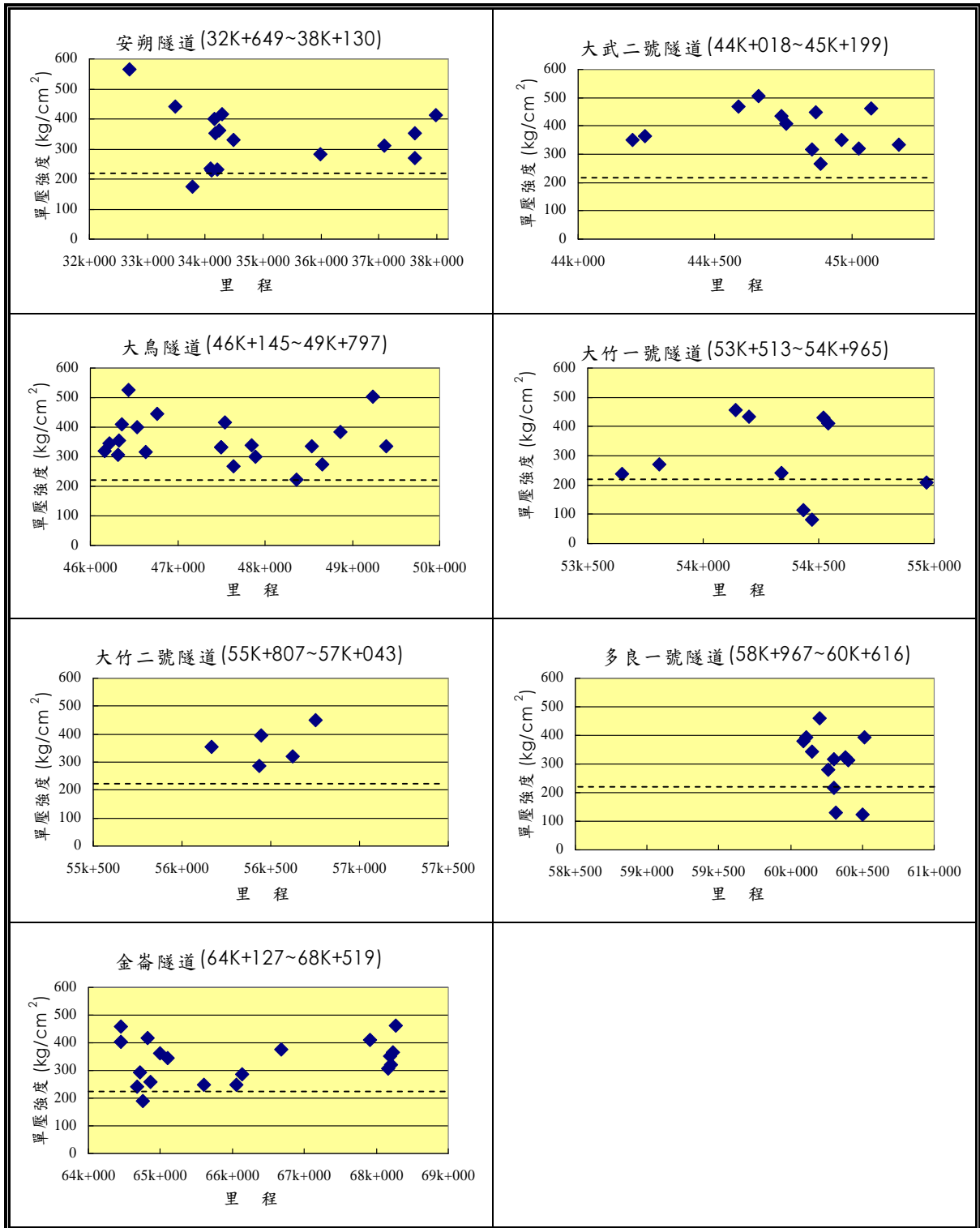


圖 3.9-2 各隧道混凝土鑽心抗壓試驗分析圖

3.10 混凝土中性化試驗

受到良好保護的混凝土 pH 值約 12~14，當混凝土中氫氧化鈣遇水後會解離為鈣離子及氫氧根離子，在鋼筋表面形成保護性鈍化膜。但是空氣中的酸性物質(如二氧化碳、二氧化硫等)，會降低混凝土的酸鹼度，使 pH 值降低到 7~9 左右，此即混凝土中性化。中性化會使混凝土失去保護鋼筋的作用，並破壞鋼筋表面的保護膜，使鋼筋(或隧道內鐵質金屬附件)在低 pH 值的環境下漸漸受到銹蝕。另外，中性化也會促使混凝土收縮加劇，產生裂縫與破壞，形成未來隧道結構體的潛在危害；因此對混凝土中性化程度，必須加以詳細檢查。

混凝土發生中性化是由最外層漸漸向內侵入，中性化的進行時間與二氧化碳在混凝土中反應或擴散的速率有關。一般而言，中性化深度(D)等於中性化係數(k)與中性化時間(t)的乘積。若保護層愈厚，鋼筋與混凝土表面的中性化速率愈慢。當混凝土材質的中性化係數固定(混凝土品質穩定)，保護層變成 2 倍時，則中性化時間可延緩 4 倍。本案檢驗混凝土中性化深度及區域的方法，是在現場所鑽取的混凝土試體表面塗抹 1% 酚酞酒精溶液指示劑，並詳加觀察指示劑顏色的變化。未中性化部份將會變成紫紅色，藉以比色方式判斷該試體之中性化深度與程度，試驗成果範例如圖 3.10-1 此部份的工作施作共計 94 組，詳細影像成果列於附錄 1，成果摘要列於表 3.10-1。

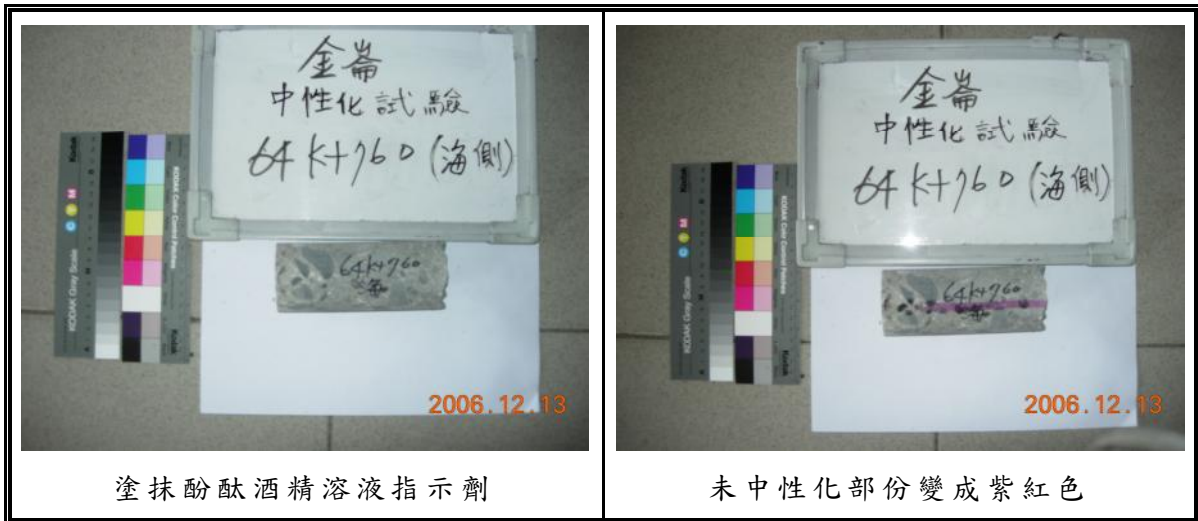


圖 3.10-1 混凝土中性化試驗成果(範例)

表 3.10-1 混凝土中性化成果表

隧道名稱	組數	編號	里程	試體長度 (cm)	中性化深度 (cm)	取樣位置	隧道名稱	組數	編號	里程	試體長度 (cm)	中性化深度 (cm)	取樣位置		
安朔	16	1	32k+691	14.2	0	海側	大竹一號	10	50	53k+650	15.8	1.5	海側		
		2	33k+491	16.5	0	山側			51	53k+810	15.3	0	海側		
		3	33k+784	14.3	2.5	海側			52	54k+140	15.6	1.0	海側		
		4	34k+093	16.4	2.0	海側			53	54k+200	16.6	2.0	海側		
		5	34k+114	17.9	0	海側			54	54k+340	15.1	0	海側		
		6	34k+156	16.1	2.0	山側			55	54k+432	30.6	0	山側		
		7	34k+176	57.5	1.0	山側			56	54k+470	15.3	1.0	山側		
		8	34k+206	17.3	3.0	山側			57	54k+520	15.6	0	山側		
		9	34k+241	16.6	2.5	山側			58	54k+540	52.9	1.0	海側		
		10	34k+293	30.8	0	山側頂			59	54k+965	14.5	1.0	海側		
		11	34k+490	18.1	1.0	海側			大竹二號	5	60	56k+165	12.8	3.4	海側
		12	35k+987	16.6	0	山側					61	56k+435	52.4	4.5	海側
		13	37k+087	17.5	2.0	海側					62	56k+445	13.9	1.1	海側
		14	37k+617	16.4	1.0	海側					63	56k+625	13.1	0	海側
		15	37k+621	18.5	0	海側					64	56k+755	12.3	1.1	山側
		16	37k+987	17.6	0	山側					多良一號	12	65	60k+090	18.8
大武二號	13	17	44k+202	14.5	1.5	山側	66	60k+110	16.1	0.1			海側		
		18	44k+244	15.9	2.5	山側	67	60k+150	15.3	0.1			山側		
		19	44k+585	14.1	1.5	山側	68	60k+200	16.3	0.1			山側		
		20	44k+660	16.2	0	海側	69	60k+260	12.4	1.2			山側		
		21	44k+743	15.2	0	海側	70	60k+300	12.5	1.1			山側		
		22	44k+760	13.5	1.0	山側	71	60k+305	13.6	0.9			山側		
		23	44k+854	59.5	1.0	山側	72	60k+315	14.7	0			海側		
		24	44k+867	15.3	1.5	山側	73	60k+380	43.5	2.2			海側		
		25	44k+884	72.5	1.0	海側	74	60k+400	13.6	2.1			山側		
		26	44k+962	15.3	2.5	山側	75	60k+500	15.5	4.2			山側		
		27	45k+023	15.3	3.0	海側	76	60k+515	13.3	1.6			山側		
		28	45k+070	14.2	1.5	山側	金崙	18	77	64k+450	41.6	1.4	海側		
		29	45k+172	16.5	0	山側			78	64k+675	18.5	1.7	海側		
大鳥	20	30	46k+160	16.6	1.5	海側			79	64k+720	19.1	2.1	海側		
		31	46k+220	15.7	4.0	海側			80	64k+760	19.0	2.4	海側		
		32	46k+320	17.2	3.0	海側			81	64k+820	22.6	2.9	山側		
		33	46k+330	15.0	1.5	海側			82	64k+860	22.6	2.8	山側		
		34	46k+360	15.3	0	海側			83	64k+990	21.2	2.1	山側		
		35	46k+435	15.0	0	海側			84	65k+100	18.8	1.5	海側		
		36	46k+535	14.1	0	海側			85	65k+600	17.8	1.9	海側		
		37	46k+630	16.5	1.0	海側			86	66k+060	16.2	0.1	山側		
		38	46k+765	15.5	0	海側			87	66k+140	15.6	1.1	海側		
		39	47k+495	15.0	0	山側			88	66k+680	16.1	1.3	海側		
		40	47k+546	16.0	0	山側			89	67k+910	12.5	1.2	山側		
		41	47k+641	16.7	1.0	山側			90	68k+160	13.2	0.1	山側		
		42	47k+851	15.6	1.0	山側			91	68k+185	15.6	0.3	山側		
		43	47k+894	15.6	0	山側			92	68k+205	14.6	0.6	山側		
		44	48k+358	54.2	0	海側			93	68k+230	15.4	0.3	海側		
		45	48k+532	15.5	0	山側			94	68k+275	11.5	1.1	海側		
		46	48k+657	15.3	0	海側頂	合計	94							
		47	48k+865	36.3	0	海側									
		48	49k+234	15.1	1.0	山側									
		49	49k+392	16.0	2.0	山側									

試驗結果分析如圖 3.10-2，顯示中性化深度多集中在 3 cm 以下，0~1 cm 者有 37 個；1~2 cm 者有 34 個；2~3 cm 者有 16 個；3~4 cm 者有 4 個；4~5 cm 者有 3 個。大竹一號隧道中性化深度集中於 0~2 cm 之間；安朔、大武二號及金崙隧道中性化深度集中於 0~3 cm 之間；大鳥隧道中性化深度部分為 3~4 cm，但主要仍集中於 0~2 cm 之間；大竹二號及多良一號隧道中性化深度部分為 3~5 cm，但主要仍集中於 0~2 cm 之間。

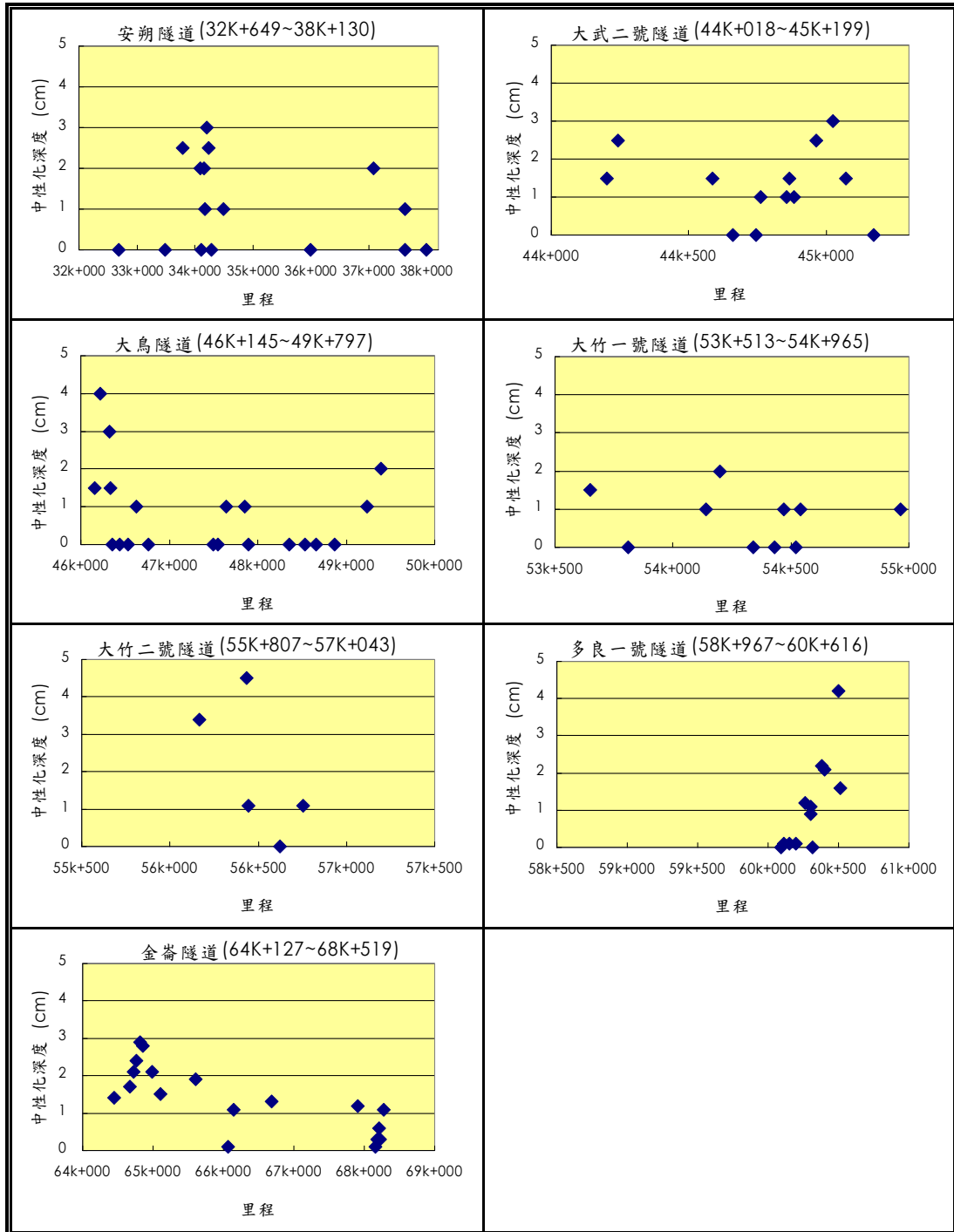


圖 3.10-2 各隧道中性化試驗結果圖

3.11 水質取樣及定性分析

3.11.1 水質取樣、分析方法與結果

在土木建物中，混凝土與鋼筋的劣化可能伴隨著滲漏水的出現程度形成某種程度的影響。在滲漏水水質檢測項目中，首要著重在滲出水質酸鹼度的定量特性。本案採集水質檢驗之地點主要以施工縫為主，採集足夠樣本後利用現場水質量測設備（EXTECH The oyster ph meter 攜帶型酸鹼度測定器及 CHEMIST COND5022 電導測試筆）如圖 3.11-1，量測滲水溫度、酸鹼度及比導電度，檢驗方法依據行政院環保署環境檢驗所公告之標準水質檢測方法 (NIEA W217.51A、NIEA W203.51B & NIEA W424.51A) 進行，而後將水樣送至實驗室進行水質化學性質分析。



圖 3.11-1 水質採樣及物性分析儀器照片

本案隧道採集水樣共計 15 組，安朔隧道 2 組、大武二號隧道 3 組、大鳥隧道 4 組、大竹一號隧道 2 組、大竹二號隧道 1 組、多良一號隧道 1 組及金崙隧道 2 組，除現場水質物性檢測外，另送衛宇科技股份有限公司(行政院環保署認可證字號：環署檢字第〇一六號)進行水質化性檢驗。茲將檢驗成果整合於表 3.11-1、圖 3.11-2 及表 3.11-2，水質物性檢測照片及樣品化性檢驗報告見附錄 J。

表 3.11-1 水質物理性質檢測成果表

隧道名稱	組數	編號	里程	溫度(°C)	比導電度(μmho/cm)	酸鹼度	有無特殊氣味(外觀)
安朔	2	1	33k+490	22.8	359	7.95	N
		2	37k+085	21.8	462	7.68	N
大武二號	3	3	44k+685	21.5	584	7.58	N
		4	44k+705	23.5	384	8.12	N
		5	44k+750	21.2	369	7.92	N
大鳥	4	6	46k+535	23.4	597	8.11	N
		7	47k+120	23.2	497	8.24	N
		8	47k+495	22.9	353	8.24	N
		9	47k+645	23.2	502	7.66	N
大竹一號	2	10	54k+110	24.2	485	7.88	N
		11	54k+150	21.2	476	7.69	N
大竹二號	1	12	56k+890	24.3	512	8.12	N
多良一號	1	13	60k+100	20.9	486	8.15	N
金崙	2	14	66k+120	22.1	368	8.52	N
		15	68k+262	21.6	367	8.13	N
合計	15						

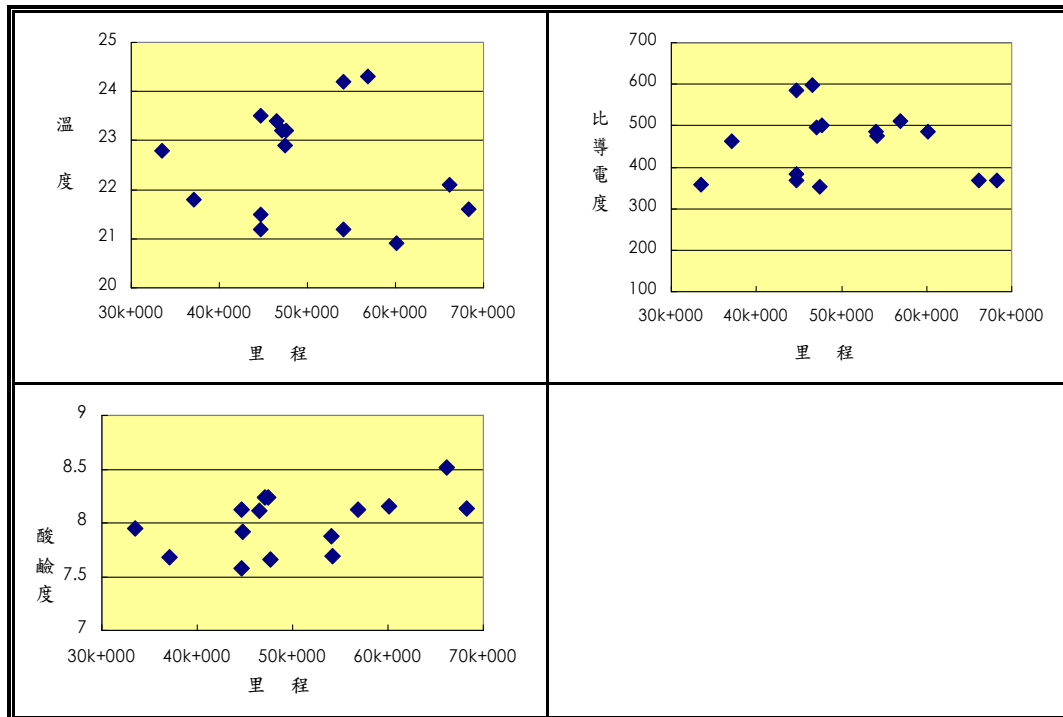


圖 3.11-2 水質物性分析結果圖

表 3.11-2 水質化學性質檢測成果表

隧道名稱	數量	編號	里程	色度	OH ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	K ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Mg ²⁺	濁度
				(外觀)	指數	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
安朔	2	1	33k+490	<5	5.8	16.9	29.6	10.7	9.59	2.98	120	1.87	14.6	0.1
		2	37k+085	<5	5.8	58.4	25	14.2	14.1	4.12	239	3.17	66.8	0.05
大武二號	3	3	44k+685	<5	5.8	160	110	22	23.5	3.7	236	3.44	42	0.25
		4	44k+705	<5	5.9	60	105	16	22.1	1.99	268	3.4	32.4	<0.05
		5	44k+750	<5	6	48.7	103	19.9	24.6	2.51	346	2.9	36.5	<0.05
大鳥	4	6	46k+535	<5	6.2	36.9	58.5	18.2	22.6	2.26	364	2.42	41.6	0.4
		7	47k+120	<5	5.9	63.3	56.4	21.7	15.7	2.32	256	2.92	28.8	<0.05
		8	47k+495	<5	5.9	39.3	47.8	11.5	14.6	1.54	192	2.55	18.2	0.1
		9	47k+645	<5	6.2	48.8	78.6	12.1	9.42	1.88	302	1.97	28.7	0.05
大竹一號	2	10	54k+110	<5	6	76.5	61.9	24.2	27.3	3	296	2.91	51.2	0.1
		11	54k+150	<5	6.1	53.9	52.4	23	29.1	2.01	240	1.81	34.2	0.1
大竹二號	1	12	56k+890	<5	5.8	215	116	23.6	28.4	3.18	245	3.77	41.5	<0.05
多良一號	1	13	60k+100	<5	5.8	219	129	25.8	23.3	4.01	332	5.06	66.6	0.1
金崙	2	14	66k+115	<5	6.2	233	90.4	31.8	23.2	7.08	272	1.62	50.8	0.05
		15	68k+262	<5	6.3	N.D.	125	28.7	N.D.	4.34	436	2.36	72.6	<0.05
合計	15													

註：“N.D.”表示測值低於方法偵測極限。

3.11.2 水質分類

根據以上水質化學性質檢測結果，計算主要陽離子(Na⁺與 K⁺)、鹼土金屬(Ca²⁺、Mg²⁺)、主要陰離子氯(Cl⁻)、硫酸根(SO₄²⁻)、以及碳酸根與重碳酸根(CO₃²⁻+HCO₃⁻)，佔各該陰陽離子當量濃度之百分比，進行 Piper 菱形圖水質分類，分析結果見圖 3.11-3，在菱形圖中分成四個區塊，各區塊水質特性分別如下：

- I 區：為鹼土類碳酸氫鹽類(Carbonate Hardness)，以碳酸氫鈣及碳酸氫鎂為主。主要由於碳酸之雨水滴於含鈣、鎂之岩石所致，故化學相為未遭受污染之正常地下水。一般在於淺層自由含水層，雨水與河水等在此範圍內。
- II 區：為鹼金類碳酸氫鹽(Carbonate Alkali)，以碳酸氫鈉為主，未受污染之深層正常地下水或受壓水層地下水屬此範圍。
- III 區：為鹼土類非碳酸鹽類(Non-Carbonate Hardness)，以硫酸鈣、硫酸鎂、氯化鈣、氯化鎂為主。為農業活動污染之地下水、工礦業、硬水及火山活動區(溫泉水)均屬於此區範圍。
- IV 區：為鹼金類非碳酸鹽(Non-Carbonate Alkali)，以硫酸鈉或氯化鈉為主，海水污染與海岸地區地下水等在此區範圍。

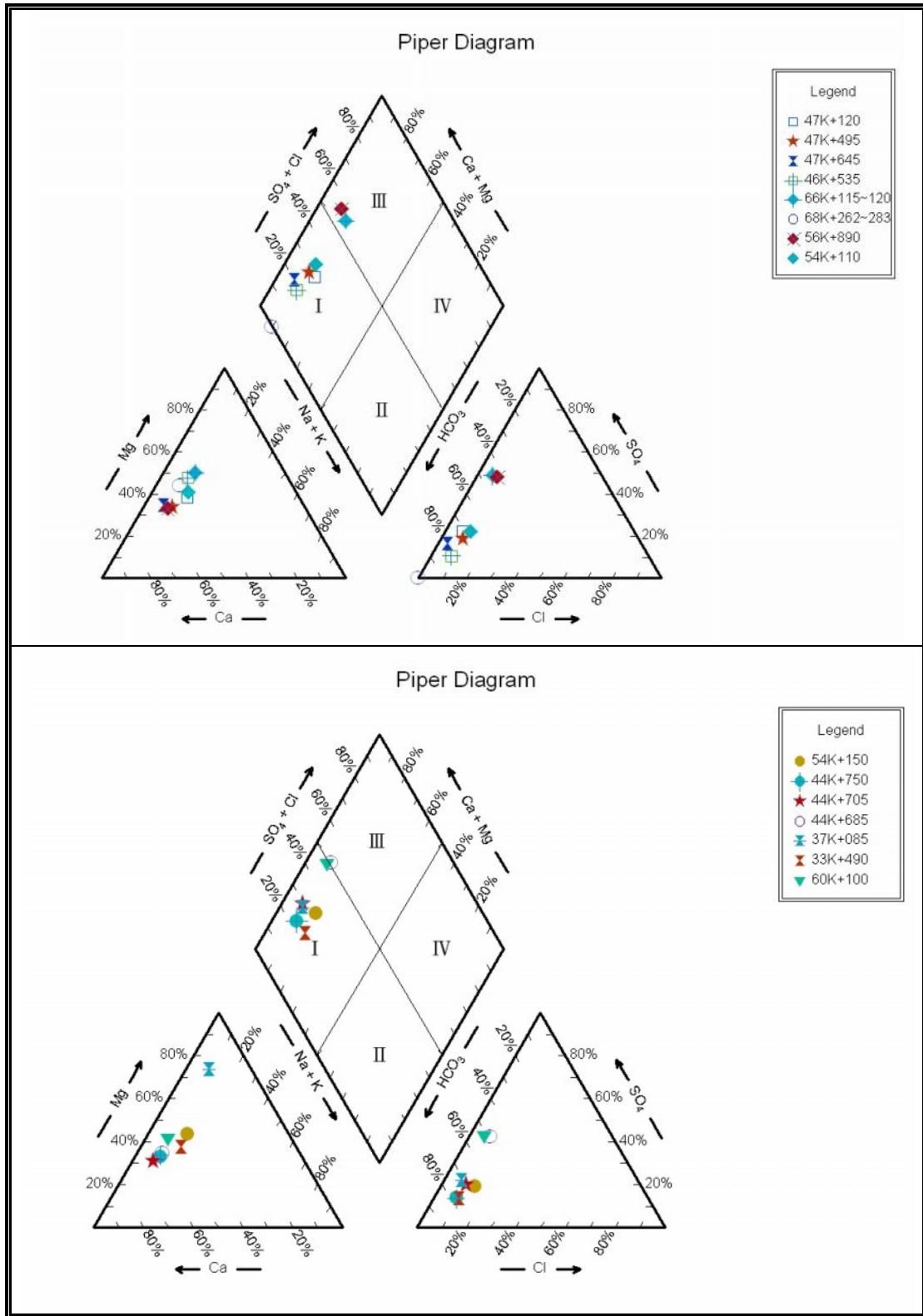


圖 3.11-3 piper 水質分類圖

分析結果顯示除了 56K+890 及 66K+115~120 兩個水樣之外，其餘皆歸類於 I 區，屬鹼土類碳酸氫鹽類，為雨水、河水等位於淺層自由含水層內之正常地下水，與隧道現況相符；另 56K+890 及 66K+115~120 水樣分析結果歸類於 III 區，屬鹼土類非碳酸鹽類，為農業活動污染之地下水、工礦業、硬水及火山活動區(溫泉水)，而計畫範圍區內亦有溫泉分佈，故此結果亦與隧道現況相符。

3.11.3 水質腐蝕性評估

隧道中混凝土襯砌常因環境中地質條件影響，受到侵蝕性地下水的侵蝕而劣化，使隧道使用功能和壽命逐漸衰減，就混凝土襯砌而言，環境水對其侵蝕是主要的，一般來說侵蝕作用主要分有溶出性侵蝕、酸性侵蝕及鹽類侵蝕。

1. 溶出性侵蝕

水質中的碳酸會分二次解離，第一次解離時會帶一個氫，變成酸式碳酸鹽 (HCO_3^-)，第二次解離後則變成碳酸根離子 (CO_3^{2-})。溶出性侵蝕主要原因是水中 HCO_3^- 含量過少，水泥處於水中，氫氧化鈣 [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] 首先被溶解，接著是矽酸二鈣 (C_2S) 及矽酸三鈣 (C_3S) 分解，成為低鹼度水化物，隨後鋁酸三鈣 (C_3A) 及鋁鐵酸四鈣 (C_4AF) 因失去平衡而滲蝕，最終結果即造成混凝土結構破壞而強度下降，溶出性侵蝕程度一般與混凝土密實性、水的流動性及水壓力、水的硬度等有關。

2. 酸性侵蝕

一般地下水常含有一些游離的酸類，如鹽酸 (HCl)、硫酸 (H_2SO_4)、游離碳酸 (CO_3^{2-}) 等，這些酸類易與氫氧化鈣反應生成鈣鹽，所生成之鈣鹽如氯化鈣 (CaCl_2) 易溶於水或如硫酸鈣 (CaSO_4) 在混凝土孔隙中結晶，造成混凝土體積膨脹而破壞。碳酸鈣 (CaCO_3) 與侵蝕性碳酸 CO_2 生成的碳酸氫鈣 [$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$] 是可逆反應，惟與一定量的侵蝕性 CO_2 達平衡時，才會中止反應，這部份的碳酸稱為平衡碳酸，而造成腐蝕原因主要是水中 CO_2 含量超過與 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 平衡所需的量。在侵蝕性 CO_2 作用下，混凝土表層 CaCO_3 易溶於水中，混凝土內的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 繼續與 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 或 CO_2 作用，如 CO_2 含量較多， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 將不斷發生化學反應而繼續流失，如此將破壞水化物的穩定性而使混凝土結構鬆散。

3. 鹽類侵蝕

此類大多發生在含有大量硫酸鹽或鎂鹽的海水、地下水中，鹽類侵蝕是由於溶於水之鹽類與混凝土中之化合物進行離子置換作用，生成難溶或易溶的物質，在混凝土中產生結晶而膨脹，破壞混凝土結構。通常這類侵蝕一般有硫酸鈉 (Na_2SO_4)、硫酸鎂 (MgSO_4)、硫酸鈣 (CaSO_4) 及氯化鎂 (MgCl_2) 等。 Na_2SO_4 與混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)，再與鋁酸鈣反應生成硫鋁酸鈣，此二種生成物均是結晶體，這些結晶物會在混凝土內產生膨脹，使混凝土

產生內應力而破壞。MgCl₂ 及 MgSO₄ 也易與 Ca(OH)₂ 反應，生成的 CaCl₂ 易溶於水而被水帶離，Mg(OH)₂ 則是無膠結性物質，而石膏又會與鋁酸鈣產生反應造成硫酸鹽侵蝕，因此鎂鹽侵蝕不但與鎂含量有關，也與水中的 SO₄²⁻ 含量有關，當 Mg²⁺ 及 SO₄²⁻ 兩者共同存在時，會造成混凝土破壞加劇。

根據本次水質檢驗分析結果，對照歐洲標準委員會 (European Committee for Standardization, 簡稱 CEN) prEN206、大陸出版之「隧道病害與防治」中水質對混凝土的腐蝕性標準、以及原蘇聯建築結構防蝕設計規範 CH549-63 環境水對混凝土和鋼筋混凝土結構的侵蝕特徵及標準，檢核各項離子對混凝土造成之影響見表 3.11-3 及圖 3.11-4 檢核結果，各水樣中 Mg²⁺、Cl⁻ 及 HCO₃⁻ 離子濃度皆屬於安全範圍內，但里程 44K+685、56K+890、60K+100 及 66K+115~120 等水樣之 SO₄²⁻ 濃度超過標準，屬中等腐蝕程度，可能會對混凝土襯砌造成侵蝕作用。

表 3.11-3 水質檢測結果與混凝土腐蝕標準檢核表

腐蝕性檢測指標		SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
引用規範		混凝土工程施工規範與解說 (土木 402-88)	CEN prEN206	CH549-63	隧道病害與防治 (大陸)
腐蝕程度	微弱腐蝕	0~150	-	<500	0.7~1.5
	中等腐蝕	150~1500	300~1000	500~5000	<0.7
	顯著腐蝕	1500~10000	1000~3000	>5000	-
	強烈腐蝕	>10000	>3000	-	-
隧道名稱	里 程	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
安朔	33k+490	16.9	14.6	9.6	120
	37k+085	58.4	66.8	14.1	239
大武二號	44k+685	160.0	42.0	23.5	236
	44k+705	60.0	32.4	22.1	268
	44k+750	48.7	36.5	24.6	346
大鳥	46k+535	36.9	41.6	22.6	364
	47k+120	63.3	28.8	15.7	256
	47k+495	39.3	18.2	14.6	192
	47k+645	48.8	28.7	9.4	302
大竹一號	54k+110	76.5	51.2	27.3	296
	54k+150	53.9	34.2	29.1	240
大竹二號	56k+890	215.0	41.5	28.4	245
多良一號	60k+100	219.0	66.6	23.3	332
金崙	66k+115	233.0	50.8	23.2	272
	68k+262	0.0	72.6	0.0	436

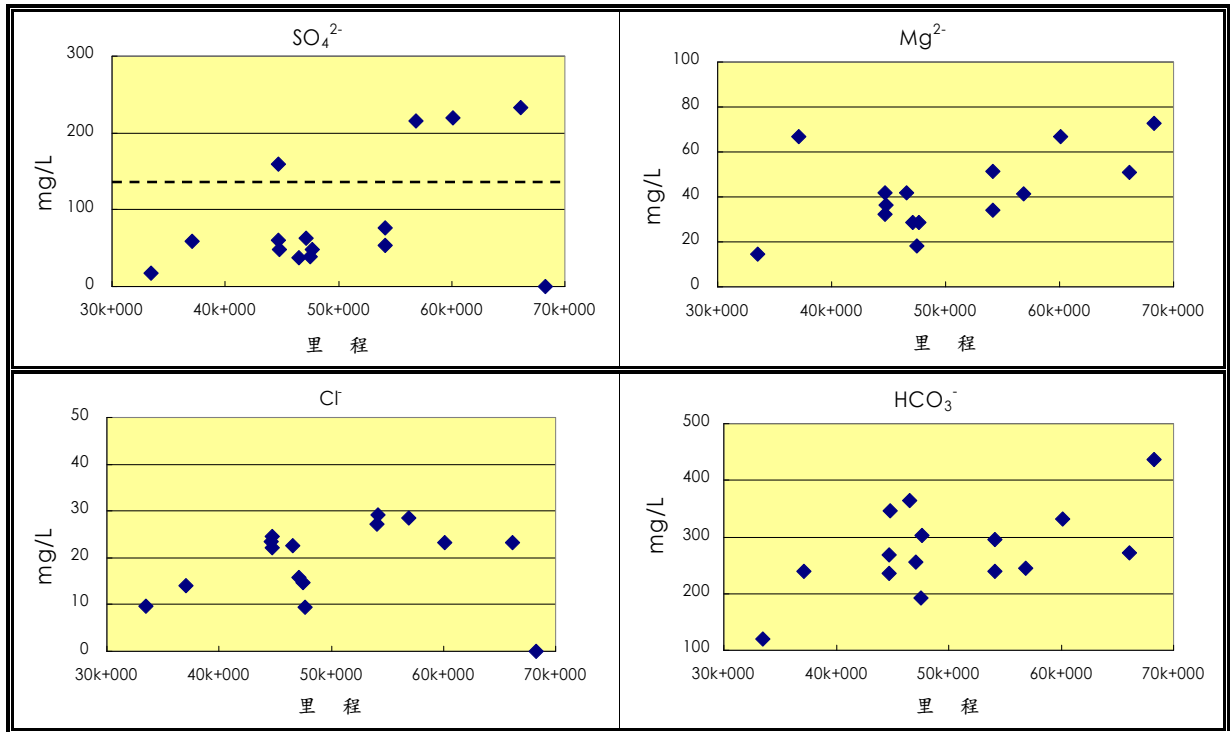


圖 3.11-4 水質腐蝕性分析圖

第四章 隧道安全評估

4.1 隧道異狀種類及原因

1. 隧道異狀種類

根據本次調查成果綜合歸納顯示，南迴鐵路金崙、多良一號、大竹二號、大竹一號、大鳥、大武二號及安朔等七座隧道具有裂縫、滲水、白華、襯砌剝落及頂拱擠壓變形等異狀。

2. 隧道異狀發生原因

隧道異狀之發生因素，大致上可分為外在因素與內在因素如表 4.1-1 所示，所謂外在因素泛指外在環境受改變所引致之外力增加或襯砌材料劣化；而內在因素係指在設計上或興建時施工不良所造成無法承受外力之現象。而各影響因素間之相互關係可以隧道異狀網狀關係圖(圖 4.1-1)來加以說明：隧道異狀的生成，其直接因素為荷重增加、支撐構件及周圍地盤之強度及勁度的減低；而間接關聯的滲漏水問題，則會增加對材質劣化及空洞生成的不利影響，進而加速異狀生成及惡化。

表 4.1-1 隧道異狀原因分類表(譯自日本土木學會，2002)

因素分類		自然因素	人為因素
外在因素	外力	地 形：偏壓、地滑。 地 質：膨脹壓、擠壓、隧道上方鬆動岩土重壓、地盤沈陷、基腳之地盤承載力不足。 地下水：水壓、凍脹壓。 其 它：地震、地殼變動。	鄰近施工(開挖、回填、蓄排水)。 其它(列車行駛振動、空氣壓力變動等)。
	環境	老 化：中性化、風化、劣化。 地下水：漏水、有害水。 其 它：鹽害、凍害。	火災 煙害
內在因素	材料		骨材含泥量、異常凝結、鹼骨材反應、溫差應力(與養護有關)、乾縮(與養護有關)。
	施工	混凝土打設時之氣溫、濕度	養護不良、過早拆模、拆模時引發之突發荷重、粒料分離、襯砌背後空洞、不均質之打設、混凝土模具下陷、接縫、施工縫施作不良、打設中斷(形成冷縫)、支保下沈、振動、防水工施作不良、襯砌厚度不足。
	設計		防水工設計不良、襯砌厚度不足、混凝土強度不足、側壁陡直、側壓土重不足、無設計仰拱、排水工不良、保護層不足，無隔熱設計。

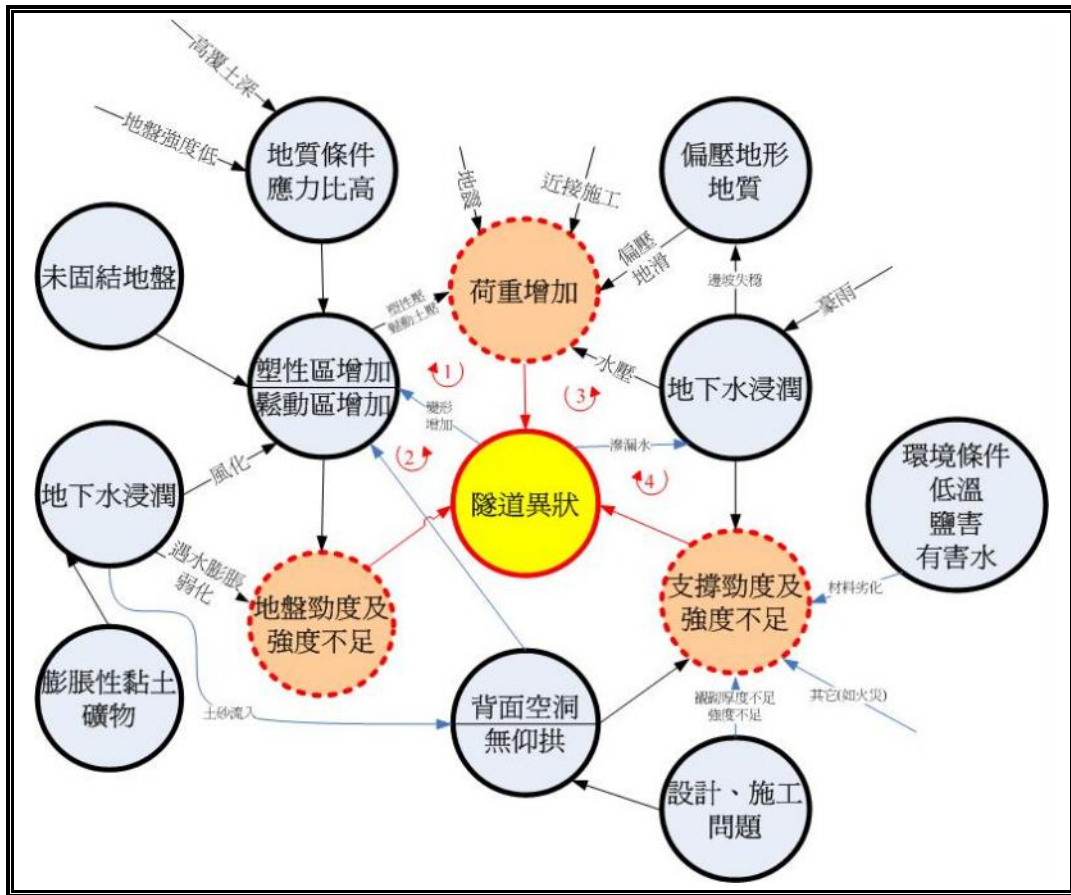


圖 4.1-1 隧道異狀原因關係圖(改繪自日本土木學會，2003)

而外在因素中之外力又可概分為三大類，即塑性壓、鬆動土壓及偏壓如表 4.1-2 所示。當襯砌厚度不足、背後空洞或施工接續不良則隧道易因周圍地盤塑性化所形成之壓力而產生異狀；而當襯砌背後空洞造成地盤鬆動落下，亦會造成隧道襯砌破壞；當襯砌長期承受左右非對稱之偏壓，也有可能引致隧道發生異狀。

若將襯砌採材料力學的自由體視之，其受外力而產生破裂之類型，可分為彎矩破壞、剪力破壞及軸力破壞，實際上則常混合各種類型，如圖 4.1-2 所示。混凝土類襯砌，亦常因化學作用生成膨脹性化合物，而產生內應力，造成襯砌剝離之現象。而隧道襯砌因外力變化產生之異狀特徵如圖 4.1-3 所示。

因環境之外在因素而導致隧道襯砌劣化之物理及化學機制如圖 4.1-4 所示。而因使用環境條件不良、材料不佳或施工不當所引致隧道襯砌異狀則如圖 4.1-5 所示。上述各項外在及內在因素所導致隧道襯砌異狀之損害模式，綜合整理如表 4.1-3 所示。

綜合上述外在及內在因素，歸納整理本計畫七座隧道異狀之可能原因如下：

(1)剝落：

剝落之原因包括(1)外力變化使裂縫閉合產生之剝落；(2)施工縫滲漏水侵蝕產生之剝落；(3)混凝土襯砌滲水濕潤劣化產生之剝落；(4)冷縫劣化閉合產生之剝落；(5)環向裂縫劣化閉合產生之剝落；(6)綜合上述裂縫閉合或劣化產生之剝落。例如：金崙隧道(64k+440、64k+650、64k+760、68k+170 等)、多良一號隧道(60k+240~60k+320 等)、大竹二號隧道(56k+430~56k+450 等)、大竹一號隧道(53k+650、53k+810、54k+125、54k+200、54k+340~54k+350、54k+470、54k+540 等)、大鳥隧道(48k+360、48k+860 等)、大武二號隧道(44k+850、44k+870、44k+885 等)、安朔隧道(34k+150 等)詳見附冊成果圖。

(2)縱向開口裂縫：

襯砌承受偏壓、塑性壓等外力時，襯砌受彎向內位移，內緣張應力大於襯砌極限強度，則襯砌內緣開裂，發生縱向開口裂縫。一般常見在起拱線位置或側壁中央部位，可單獨發生或伴隨其他裂縫出現在其他部位。例如：多良一號隧道(59k+220~59k+340、59k+940~60k+000、60k+140~60k+200 等)、大竹二號隧道(56k+620~56k+700 等)詳見附冊成果圖。

(3)縱向閉口裂縫：

襯砌兩側受擠壓，且頂拱背後圍岩疏鬆，則兩側起拱線位置可能發生縱向開口裂縫向內位移，而頂拱處則可能出現壓裂閉口裂縫，向上位移。例如：多良一號隧道(60k+200~60k+420 等)詳見附冊成果圖。

(4)環向裂縫：

隧道易因溫濕度變化引起混凝土襯砌之收縮應變，使混凝土襯砌面發生環向裂縫，一般常見在易受外界溫濕度影響之洞口段。例如：金崙隧道(64k+200~64k+460、64k+680~64k+880、67k+280~67k+820 等)、大鳥隧道(46k+240~46k+360、46k+950、47k+040~47k+080、47k+260~47k+280、47k+480~47k+540、49k+710~49k+780 等)詳見附冊成果圖。

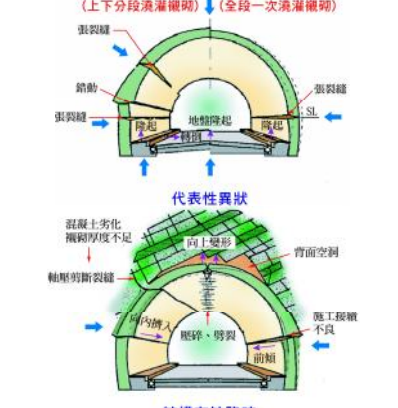
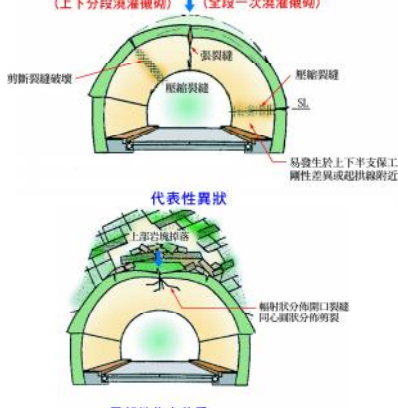
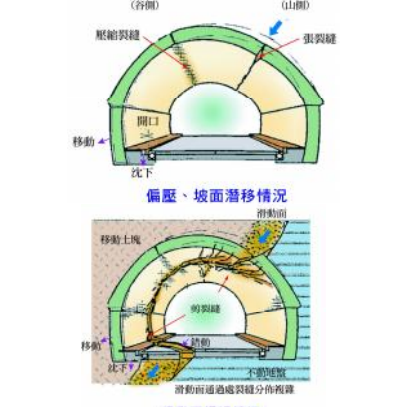
(5)滲水：

因南迴線金崙等七座隧道全線均無鋪設防水膜，ASSM 工法之水平施工縫起拱線處、垂直施工縫及冷縫等位置，易產生滲水現象，詳見附冊成果圖。

(6)白華：

「白華」是水泥水化物中的氫氧化鈣 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶於水滲出混凝土表面而析出，再與空氣中二氧化碳 CO_2 生成碳酸鈣 CaCO_3 ，固著於混凝土表面並呈白色。白華如果集中於一處，顯示該處混凝土搗實不均或已經產生裂縫。南迴線金崙等七座隧道襯砌表面部分位置有白華現象產生，詳見附冊成果圖。

表 4.1-2 塑性壓、鬆動土壓與偏壓之代表性異狀 (譯自日本土木學會, 2003)

外力因素	定義	隧道內之特徵	代表性異狀模式
<p>塑性壓</p>	<p>因隧道開挖造成周圍地盤塑性化，經長時間，塑性化區域擴大，所形成之壓力</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●側壁與肩部出現縱向張裂縫 ●側壁向內擠入造成淨空變小 ●地面隆起現象， ●頂拱處出現壓碎劈裂破壞 ●避車洞等擴挖處出現環狀之裂縫或剝落 	 <p>(上下分段澆灌襯砌) ↓ (全段一次澆灌襯砌)</p> <p>張裂縫</p> <p>錯動</p> <p>張裂縫</p> <p>地物隆起</p> <p>隆起</p> <p>隆起</p> <p>SL</p> <p>代表性異狀</p> <p>混凝土劣化</p> <p>襯砌厚度不足</p> <p>向上變形</p> <p>背面空洞</p> <p>軸壓剪斷裂縫</p> <p>可內擠入</p> <p>壓碎、劈裂</p> <p>施工接縫不良</p> <p>結構有缺陷時</p>
<p>鬆動土壓</p>	<p>因支保下沉、襯砌背後空洞造成地盤鬆動落下，其重量直接作用襯砌</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●頂拱附近沿隧道縱軸方向有張裂縫(與塑性壓異狀不同之處為地面無隆起現象) ●襯砌持續變形在側壁與肩部出現縱向壓剪裂縫 ●壓剪裂縫出現位置不定，需確認襯砌厚度劇變處 	 <p>(上下分段澆灌襯砌) ↓ (全段一次澆灌襯砌)</p> <p>剪斷裂縫破壞</p> <p>張裂縫</p> <p>壓縮裂縫</p> <p>SL</p> <p>易發生於上下半支保工隅性差異或起拱線附近</p> <p>代表性異狀</p> <p>上部岩塊掉落</p> <p>軸射狀分佈開口裂縫</p> <p>同心圓狀分佈剪裂</p> <p>局部性集中荷重</p>
<p>偏壓</p>	<p>襯砌承受左右非對稱壓力之總稱，受地形地質方向性的影響甚大</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●山側拱肩部水平開口張裂縫 ●頂拱、谷側肩部壓縮裂縫 ●山側施工接縫處錯動 ●沿斷面軸向頂部向谷側轉動 ●谷側側壁部水平開口張裂縫 	 <p>(谷側) (山側)</p> <p>壓縮裂縫</p> <p>張裂縫</p> <p>開口</p> <p>移動</p> <p>沈下</p> <p>偏壓、坡面潛移情況</p> <p>移動</p> <p>移動</p> <p>沈下</p> <p>移動</p> <p>移動</p> <p>不動區範圍</p> <p>滑動面通過處裂縫分佈複雜</p> <p>滑動面通過情況</p>

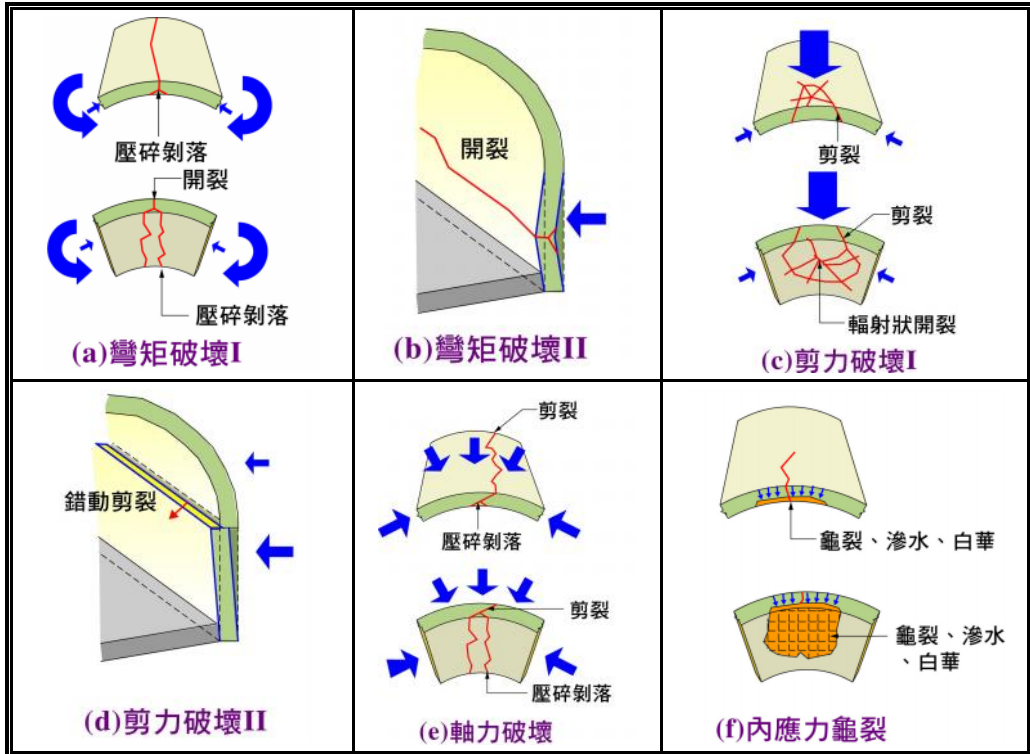


圖 4.1-2 隧道襯砌破裂模式示意圖 (改繪自劉啟川, 2006)

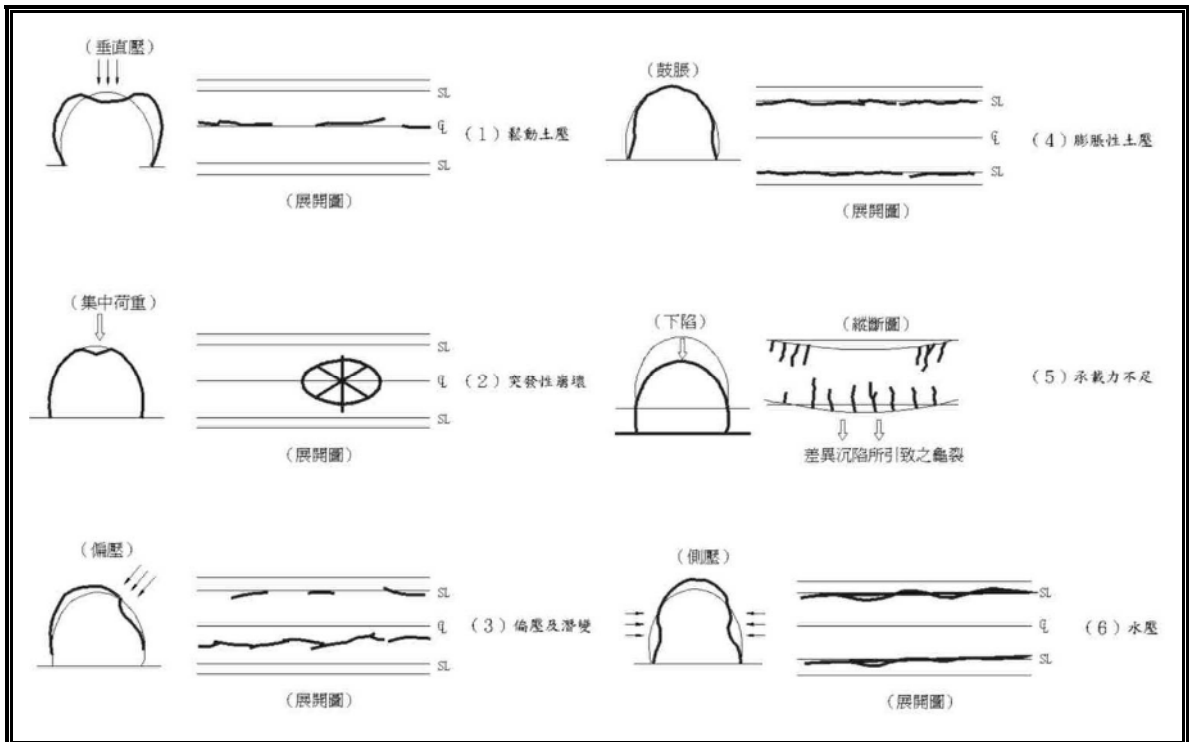


圖 4.1-3 隧道襯砌因外力變化產生之異狀特徵

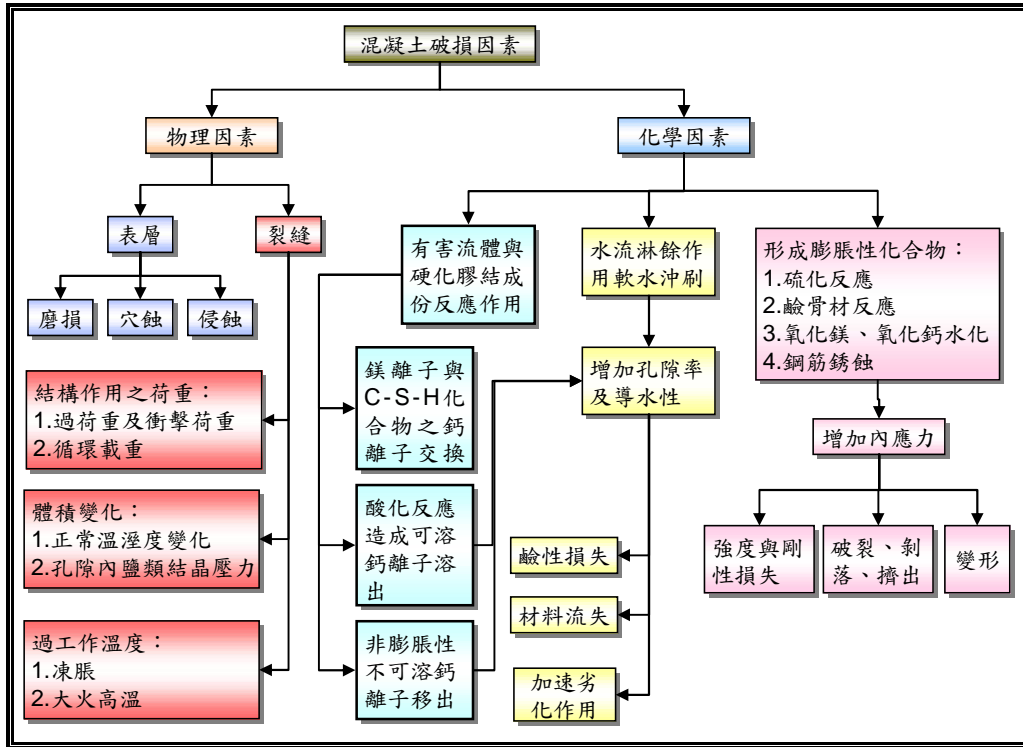


圖 4.1-4 隧道襯砌劣化之物理及化學機制(改繪自 Mehta & Monteiro,1993)

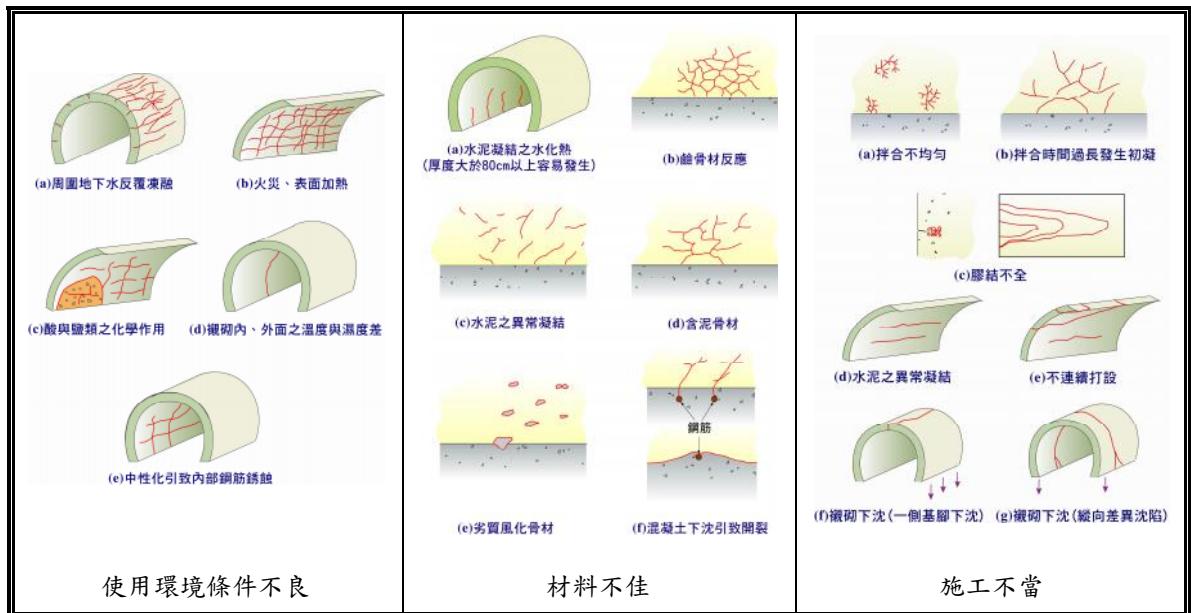


圖 4.1-5 環境、材料及施工等因素之隧道異狀(改繪自日本鐵道總合技術研究所，1998)

表 4.1-3 隧道異狀損害模式彙整表 (黃燦輝等, 2006 年) (1/2)

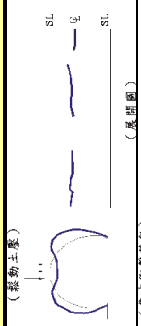

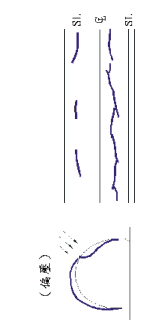

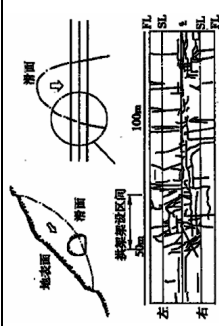
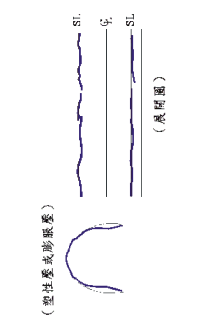
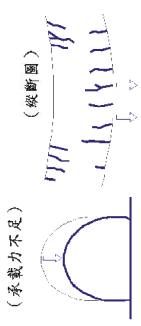


																																																																																																			
--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

表 4.1-3 隧道異狀損害模式彙整表 (黃燦輝等, 2006 年) (2/2)

	地 掛 豐水良					
	地 掛 豐水良					
	初、 溝嚴					龜、 裂
	初、 溝嚴					
	龜裂					龜、 裂
	龜裂					
	壓、 破、 裂區帶	網、 龜、 度、 裂、 龜、 裂				龜、 裂
	壓、 破、 裂區帶	網、 龜、 度、 裂、 龜、 裂				
	龜裂	低、 滲				龜、 裂
	龜裂	低、 滲				
	如、 。	滲、 龜、 裂、 入、 降	膠、 滲、 裂、 滲、 來	滲、 流、 滲	剝、 落	表、 滲、 滲、 滲
	如、 。	滲、 龜、 裂、 入、 降	膠、 滲、 裂、 滲、 來	滲、 流、 滲	剝、 落	表、 滲、 滲、 滲
	地泥	壓	蠕料雜	縫	鋼銹	惟化
	地泥	壓	蠕料雜	縫	鋼銹	惟化
	外因		內因			

4.2 評估標準

隧道安全性評估工作，主要係經由各種調查步驟以及異常原因推估，冀以找出隧道整體之弱點所在，並進行隧道改善評估，即維修補強方案之提出，其著眼點主要是欲達成下列之目的：

- 1.防止通行列車之危險發生。
- 2.隧道襯砌滲水之排除。
- 3.提高隧道結構之耐久性。

本計畫之隧道安全等級將參考交通部於民國 85 年委託國立台灣大學土木工程學系進行「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，分別就用人及車輛安全、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，將隧道安全等級分為甲、乙、丙、丁四級，如表 4.2-1 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。

表 4.2-1 隧道安全等級分類與評估標準(黃燦輝與鄭富書，1997)

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	幾乎無影響	輕微	經安全檢測後，無異狀或異狀輕微，目前對路人及車輛尚無影響，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)	中等	異狀進行中，有功能降低之可能	經安全檢測後，有異狀之發生，將來可能達到丙等級並對路人及車輛造成危險，須進行重點監視，並須有擇期實施處理對策。
丙	遲早造成威脅，異常外力作用下危險	遲早會變成重大	大	異狀進行中，功能亦持續降低中	經安全檢測後，有異狀之發生，且異狀仍持續進行中，遲早對路人及車輛造成危險，須儘快採取處理對策。
丁	危險	重大	明顯	重大	經安全檢測後，異狀嚴重，對路人及車輛造成危險，須立即採取處理對策。

而其評估之基準主要係考量造成隧道發生異常情況的原因，可分為外力變化、材質變化以及滲漏水影響共三大項主要異狀因素，分述如后：

1. 因外力變化產生之異狀

地形、地質條件因素之變化，如偏壓及背後空洞等影響，將造成襯砌變形、移動或產生裂縫等異狀，此類因外力變化產生異狀之隧道等級評定基準如表 4.2-2。有關襯砌混凝土之變形、移動、沈陷、龜裂、浮起與剝落等異狀之評定基準則參考表 4.2-3 至表 4.2-6。有關龜裂之評定基準分為有進展性與無法確認有無進展性兩種。

表 4.2-2 因外力變化產生異狀之評定基準 (黃燦輝與鄭富書，1997)

異狀之種類 隧道等級	一般之異狀與破壞			突發性之破壞 (事前無明顯變形徵兆)
	內襯砌之變形、移動與沈陷	襯砌混凝土之龜裂	襯砌混凝土之浮起與剝落	
丁	因變形、移動、沉陷等，使結構物之功能明顯降低。	龜裂大且密集。有剪力裂縫，且仍快速持續進行中。	頂拱之龜裂密集，擠壓造成浮起、剝落等，致混凝土塊有掉落之可能。	頂拱之襯砌背面有大型空洞、且有效襯砌厚度不足，背面地盤岩塊有坍塌之危險。
丙	因變形、移動、沉陷等，不久將來可能導致結構物之功能降低。	龜裂大且密集。有剪力裂縫，且仍持續進行中。	側壁之龜裂及擠壓造成浮起、剝落等，致混凝土塊有掉落之可能。	頂拱之襯砌背面有大型空洞，背面地盤岩塊有坍塌之危險。
乙	雖有變形、移動、沉陷等，但進行速度緩慢。	有龜裂，且仍持續進行中。	—	側壁之背面有空隙，可能因湧水淘空而擴大形成空洞。
甲	無異狀或雖曾有變形、移動、沉陷等，但已停止，亦無再次發生可能。	雖有龜裂，但已無進展性。	—	—

(1) 襯砌混凝土之變形、移動與沉陷

襯砌混凝土之變形、移動與沉陷之進展，一般均為漸進變化之發展，只有在遭遇地震、地滑或豪雨等才會急遽進展。另外，在寒冷地帶亦有因凍融導致反覆變形之現象。有關變形、移動與沉陷等變形速度之評定基準如表 4.2-3 所示。

表 4.2-3 裂縫寬度變形速率之評定基準 (黃燦輝與鄭富書，1997)

部位	位置	變形速率				隧道等級
		大於 10mm/年	3-10mm/年	1-3mm/年	小於 1mm/年	
襯砌 洞門 路面 路肩	襯砌 表面	○				丁
			○			丙
				○		乙
					○	甲-乙

(2) 襯砌混凝土之龜裂

有關襯砌混凝土龜裂之評定基準，當龜裂有進展性時可參考表 4.2-4，當無法確認龜裂有無進展性時則可參考表 4.2-5。表中所示之龜裂係以水平(縱向)方向龜裂或剪力裂縫為主，如係橫斷面方向龜裂時，其隧道等級可降一級處理(較不安全側，如丙降為丁)。又龜裂寬度達 0.3~0.5mm 以上、且密度(單位面積內之龜裂長度)達 200cm/m² 以上時，可將其隧道等級降一級(如丙降為丁)，亦或採較差等級(如丁~丙者採丁)。

表 4.2-4 龜裂有進展性時之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997)

部位	位置	龜裂寬度		龜裂長度		隧道等級
		3mm 以上	3mm 以下	5m 以上	5m 以下	
襯砌洞門	襯砌表面	○		○		丙~丁
		○			○	乙~丙
			○	○		乙
			○		○	甲~乙

表 4.2-5 龜裂無進展性時之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997)

部位	位置	龜裂寬度			龜裂長度			隧道等級	
		5mm 以上	3~5 mm	3mm 以下	10m 以上	5~10 m	5m 以下		
襯砌、洞門	襯砌表面	○			○			丙~丁	
		○				○		乙~丙	
		○					○	乙~丙	
			○			○			丙
			○				○		乙~丙
			○					○	乙
					○	○	○	○	甲~乙

(3) 襯砌混凝土之浮起與剝落

如混凝土塊有掉落之可能性時，其部位為頂拱時採丁、側壁採丙；如混凝土塊係非結構性破壞，而僅係防漏砂漿材質老化產生之剝落時，則隧道等級可提高一級(如丁升為丙)。表 4.2-6 係襯砌混凝土浮起與剝落之評定基準。

表 4.2-6 襯砌混凝土之浮起與剝落之評定基準(黃燦輝與鄭富書，1997)

部位	位置	浮起與剝落掉落之可能性		隧道等級
		有	無	
襯砌	頂拱	○		丁
			○	甲
洞門	側壁	○		丙
			○	甲

(4) 突發性之破壞

頂拱襯砌背面存有 30cm 左右以上之空洞時，且有效襯砌厚度小於 30cm 以下時，襯砌背面空洞上方地盤可能以岩塊方式掉落，衝擊隧道襯砌而易導致

突發性破壞事故。由類似事件之案例，可將上述情況分類為丙～丁等級，特別在
 施工階段曾發生落盤災害，或有大量漏水易導致層理剝離之地層構造，均必須
 加以注意。

2.因襯砌材質劣化產生之異狀

因襯砌材質劣化產生異狀之隧道等級評定基準可參考表 4.2-7。無法確認異狀
 是否有進展性之評定基準如表 4.2-8 所示。

表 4.2-7 因襯砌材質劣化產生異狀之評定基準 (黃燦輝與鄭富書, 1997)

異狀種類 隧道等級	襯砌混凝土強度不足	襯砌混凝土之浮起、剝落	鋼材銹蝕 (剛支保及鋼筋)
丁	因材料劣化導致斷面強度明顯降低，並明顯損及結構物之功能。	因頂拱之材料劣化導致浮起，致混凝土塊有掉落之可能或已掉落	鋼材嚴重銹蝕，已不足提供支撐功能，且會危及隧道安全。
丙	因材料劣化導致斷面強度產生相當程度之降低，並損及結構物之功能。	因側壁之材料劣化導致浮起，致混凝土塊有掉落之可能或已掉落。	因襯砌內部鋼材銹蝕導致斷面明顯缺陷，並損及鋼材在結構上之功能。
乙	因材料劣化導致斷面強度降低，有可能損及結構物之功能。	有輕微浮起、剝落現象，尚不足影響隧道安全及交通。	有穴蝕或鋼材全周之鏽蝕現象。
甲	雖有材料劣化之跡象，但對於斷面強度幾乎無影響。	無浮起、剝落之現象。	有表面性或局部之銹蝕現象。

表 4.2-8 無法確認異狀是否有進展性時之評定基準 (黃燦輝與鄭富書, 1997)

部位	主因	浮起及掉落之可能性		劣化程度 (有效厚度/設計厚度)			隧道 等級	
		有	無	1/2 以下	1/2~2/3	2/3 以上		
頂 拱	材質老化、凍害、鹼性骨材反應、設計及施工不良等	○					丁	
			○				甲	
				○			丙	
					○		乙	
側 壁			○				○	甲
				○				丙
					○			乙
							○	甲

註：有效厚度=襯砌混凝土強度大於設計強度部分之厚度

3. 因滲漏水等產生之異狀

因滲漏水等產生異狀之隧道等級評定基準可參考表 4.2-9 與表 4.2-10。

表 4.2-9 因漏水產生異狀之評定基準(黃燦輝與鄭富書, 1997)

異狀種類 隧道等級	漏 水	結冰及土砂流出
丁	由襯砌混凝土龜裂處噴水，因而損及通行車輛之安全。	在寒冷地帶因漏水結冰，而侵害內空斷面。漏水所伴隨之土砂流出，可能導致路面下陷或結構損壞。
丙	由襯砌混凝土龜裂處湧水，可能損及通行車輛之安全。	因排水不良，導致路面積水。
乙	由襯砌混凝土之龜裂處滴水，在最近將來可能損及通行車輛之安全。	因排水不良，可能導致路面積水。
甲	由襯砌混凝土之龜裂處滲水，但對通行車輛之安全幾乎無影響。	雖有漏水，但目前幾乎無影響。

表 4.2-10 漏水部位與程度對行車影響之評定基準(黃燦輝與鄭富書, 1997)

部位	主要現象	漏水之程度				對通行車輛之影響		等級分類
		噴水	湧水	滴水	滲水	有	無	
頂拱	漏水	○				○		丁
			○			○		丙
				○	○	○		乙
					○		○	甲
	結冰					○		丙
							○	甲
側壁	漏水	○				○		丁
			○			○		丙
				○	○	○		乙
					○		○	甲
	結冰					○		丙
							○	甲
路面	土砂流出					○		丙-丁
							○	甲
	積水					○		丙-丁
							○	甲
	凍結					○		丙-丁
							○	甲

註：(1)評定基準以對通行車輛造成之障礙為主要考量。如滲漏水屬噴出現象者，對行車造成影響頗大，評定等級採丁。

(2)滲漏水程度狀態詳圖 4.2-1。

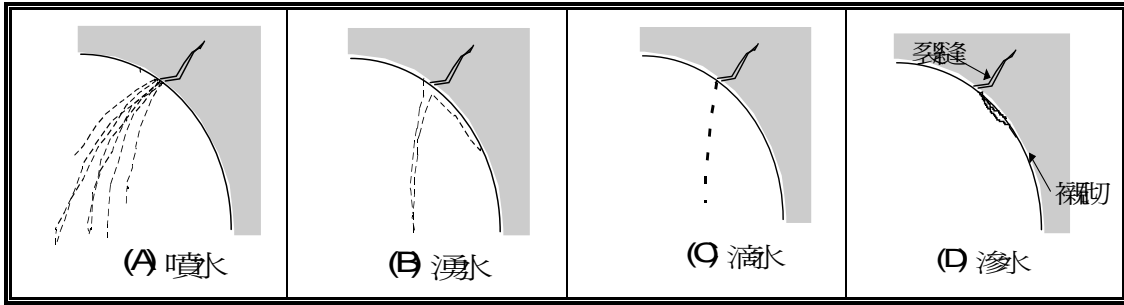


圖 4.2-1 滲漏水程度狀態示意圖(黃燦輝與鄭富書，1997)

4.3 評估方法

本計畫評估工作於各階段調查工作完成後，每座隧道各區間若有現場檢測資料，則依據上述隧道安全等級評估方式，以判定隧道目前之安全等級；若無現場檢測資料，則根據 GRP 5000 隧道影像掃描判釋成果之異狀展開圖，綜合評估目前隧道之安全等級，以及是否需進一步之維修補強及其時程之緩急。日後亦將依據安全等級評估結果，提供本計畫後續補強方案規劃設計之參考。

4.4 評估結果

將南迴線金崙等七座隧道現場檢測作業成果，依外力、滲水及材質劣化等三大因素分類，並參考上述之評估準則予以評定其安全等級，評估結果詳見附冊成果圖，並統計如表 4.4-1、表 4.4-2 及 4.4-3 所示。

表 4.4-1 南迴線金崙等七座隧道安全等級統計表(單位：m)

隧道安全等級	金崙	多良一號	大竹二號	大竹一號	大鳥	大武二號	安朔
甲	969	220	171	322	440	140	420
乙	2,260	681	580	720	1,640	620	2,363
丙	920	558	320	265	1,430	220	1,940
丁	240	180	160	140	140	200	760

表 4.4-2 南迴線金崙等七座隧道安全等級統計表(單位：百分比)

隧道安全等級	金崙	多良一號	大竹二號	大竹一號	大鳥	大武二號	安朔
甲	22%	13%	14%	22%	12%	12%	8%
乙	52%	42%	47%	50%	45%	52%	43%
丙	21%	34%	26%	18%	39%	19%	35%
丁	5%	11%	13%	10%	4%	17%	14%

表 4.4-3 隧道安全等級丁級之里程區間統計表

項次	金崙	多良一號	大竹二號	大竹一號	大鳥	大武二號	安朔
01	64k+320~340	59k+360~380	56k+080~120	53k+640~660	46k+260~280	44k+240~260	32k+720~740
02	64k+660~680	60k+080~120	56k+300~320	54k+160~180	46k+520~540	44k+380~420	32k+780~800
03	68k+080~280	60k+240~320	56k+640~680	54k+340~360	47k+100~120	44k+580~600	32k+820~860
04	—	60k+340~360	56k+700~760	54k+380~400	47k+180~200	44k+700~780	33k+260~280
05	—	60k+380~400	—	54k+440~460	47k+480~500	44k+880~900	33k+460~480
06	—	—	—	54k+540~580	48k+640~660	45k+020~040	33k+740~760
07	—	—	—	—	49k+740~760	—	34k+000~060
08	—	—	—	—	—	—	34k+120~300
09	—	—	—	—	—	—	34k+360~380
10	—	—	—	—	—	—	34k+580~600
11	—	—	—	—	—	—	34k+760~780
12	—	—	—	—	—	—	34k+860~880
13	—	—	—	—	—	—	35k+100~140
14	—	—	—	—	—	—	36k+040~060
15	—	—	—	—	—	—	36k+220~240
16	—	—	—	—	—	—	37k+200~220
17	—	—	—	—	—	—	37k+280~320
18	—	—	—	—	—	—	37k+520~540
19	—	—	—	—	—	—	37k+560~600
20	—	—	—	—	—	—	37k+840~880
21	—	—	—	—	—	—	37k+940~980
小計	240m	180m	160m	140m	140m	200m	760m

第五章 結論

由於南迴線金崙等七座隧道施工初期採用底導坑上半開挖、底導坑環狀開挖或側壁導坑等開挖工法，隧道外支撐則採用美國鋼支保工法 (ASSM)，直至民國 75 年方才引進新奧工法 (NATM) 施工；而施工期間因偏壓與地質條件較差等因素，曾發生多次災變與變更設計，因此，經由本次現場檢測資料與安全評估結果顯示，隧道安全等級與隧道施工工法 (ASSM 或 NATM) 具有相關性，如金崙及大鳥隧道全線大都採 NATM 工法施工，其丁級之百分比較低；多良一號、大竹二號、大竹一號、大武二號隧道全線採 ASSM 工法施工，丁級百分比較高，顯見採 ASSM 工法施工之隧道問題較多。另 ASSM 工法之水平施工縫起拱線處、垂直施工縫及冷縫等位置，因未鋪設防水膜且為結構之弱面，易產生滲水、裂縫、表面蜂窩及混凝土剝落等異狀。

根據現場之評估結果，七座隧道部分區段均已產生嚴重之劣化現象，甚至有些區段滲水嚴重、裂縫密集且即將閉合，未來若遭遇強烈之地震，恐發生混凝土剝落而危及列車行駛之安全，必須儘快維修補強。而隧道之維修補強對策，則需依據異狀種類、發生原因、劣化程度、範圍、規模大小與位置，妥善規劃設計隧道之維修補強作業。

參考文獻

1. 「南迴鐵路長大隧道現場地質師顧問工作總結報告」(聯合大地工程顧問公司，民國80年)
2. 「南迴鐵路工程-工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國81年)
3. 「金崙隧道(一、二期)新建工程竣工圖」(東部鐵路改善工程局，民國81年)
4. 「多良一號隧道新建工程竣工圖」(東部鐵路改善工程局，民國81年)
5. 「大竹一號隧道新建工程竣工圖」(東部鐵路改善工程局，民國81年)
6. 「大鳥隧道(一~二期)新建工程竣工圖」(東部鐵路改善工程局，民國81年)
7. 「大武二號隧道(一~二期)新建工程竣工圖」(東部鐵路改善工程局，民國81年)
8. 「安朔三號隧道(三~四期)新建工程竣工圖」(東部鐵路改善工程局，民國81年)
9. 「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(I)」(國立台灣大學土木工程研究所，民國86年)
10. 「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(II)」(國立台灣大學土木工程研究所，民國87年)
11. 「變狀隧道對策工設計導則(日文)」(日本鐵道總合技術研究所，1998)
12. 「山岳隧道覆工的現狀對策(日文)」(日本土木學會，2002)
13. 「隧道變狀機制(日文)」(日本土木學會，2003)
14. 「隧道異狀成因與判別模式之研究(碩士論文)」(劉啟川，民國95年)
15. 「隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發」(黃燦輝等，民國95年)