

台 8 線 38k 隧道損壞與修復案例之研究〔一〕

張明欽

更新日期：2010 年 04 月

摘 要

現行老舊隧道沿線或因選線條件限制，地質、地形條件不佳或因使用年限將至材質劣化或因鄰近開發影響均可能使得既有隧道之營運功能受損；再加以遭受強烈地震外力，使隧道之穩定情況更加惡化。本文特介紹中橫台 8 線 38k 馬陵隧道受強震後產生異常狀態或損壞其調查、修復改善及現行施工可能或已發生之問題，以供老舊隧道修復改善之參考。

一、前 言

88 年 9 月 21 日凌晨日月潭附近發生芮氏地震規模 7.3 的強烈地震，造成臺灣中部地區嚴重的災情，二千餘人死亡，萬餘棟房屋全倒或半倒，二十餘線鐵、公路發生坍方、崩塌等，交通中斷嚴重影響救援人力、物資與機具的運送動線，延誤救災行動甚巨。臺中縣境中橫公路路段雖未位於震央，但其因此烈震對此區域仍產生了極大之損害，其中台 8 線 38k 鄰近隧道群更由於此次烈震亦受損嚴重，並造成隧道襯砌龜裂、掉落，隧道因結構受損嚴重導致交通中斷，嚴重影響該地之運輸功能，應採取必要之緊急措施，避免因後續頻繁而強烈的餘震或其他之地震更惡化隧道的穩定情況。中橫公路為早期先民在山勢陡峭之惡劣環境胼手胝足刻苦開發而成，沿線隧道更是於技術不成熟及物資不足之條件下開鑿而成，歷經時代環境的變遷，沿線公路隧道在營運近 40 年後，終因地形、地貌的陡變及後續人為過度開發影響而有所損壞。本文介紹之台 8 線里程 38k 之馬陵隧道，由於位於河曲攻擊坡之地勢上，在河谷解壓、偏壓地形等地形不利條件下，及鄰近隧道群相鄰過近之影響，於民國 85 年間曾受強烈地震後，隧道產生嚴重的龜裂。以下將針對本隧道之調查成果、設計理念及施工實務等問題加以說明。

二、隧道基本資料及環境狀況

- (一) 地形、地質及水系 本區域之地形分區為雪山山脈，其地形屬於幼年期河谷地形，河川快速下切，造成河谷兩岸山勢陡峻，平均坡度大約在 45 及 60 度之間。本區域之水系主要為大甲溪，其溪流短促，河床陡急，在本計畫區域形成一河曲攻擊坡。隧道沿線之地層為始新世至漸新世之白冷層，出露之岩層以厚層白色或淺灰色粗至中粒石英岩為主，夾有少數頁岩及炭質頁岩。節理在本區域相當發達，節理面多有銹染現象，部份可發現擦痕。節理位態稍嫌紊亂，其原因應與當地崖坡的崩移活動有關。地層的走向約為北偏東 10 度左右，向東南傾斜約 40 度，屬於逆向坡。
- (二) 隧道現況 本計畫區自橫貫公路開闢迄今，已進行多次改善工程，目前本路段

已有三座現有隧道及一座計畫興建隧道，其相關位置如圖 1 所示，茲分述如下：

1. 現有的下行隧道 為橫貫公路開闢時所建之隧道，緊臨邊坡開鑿，其斷面較小，僅能容一般貨車通行，目前較新型之雙層遊覽巴士無法進入，限制了其服務功能，本隧道為本文所述修復隧道之一，長度約 76 公尺，其使用期限應已超過 40 年。
2. 廢棄隧道 位於現有的下行隧道之右側（如照片 1），其開挖斷面較大，研判應為改善左側隧道而興建，後因為不明原因而廢棄。
3. 現有的上行隧道 為本文介紹修復隧道之一，也是本路段主要通行之單線隧道，長度約 360 公尺，營運至今約 35 年。
4. 計畫興建隧道 利用現有的下行隧道擴挖約 40 公尺後（如照片 2），再新建長約 120 公尺之隧道。東洞口進洞後由於地質破碎發生崩坍抽心後，目前處於停工之狀態。

（三）隧道檢測調查結果及研判 本工程於隧道調查前已據初步之勘查進行了緊急防護工程（如照片 3），詳細之調查係依據隧道受損之情形（如照片 4）分別對上、下行隧道進行環境調查、坑內調查及襯砌材料劣化調查等項目，詳細調查作業詳如表 1。其中利用透地雷達（GPR）進行襯砌厚度及背面空調查其成果如圖 2 所示，由 GPR 對隧道全線襯砌及其背後之情況有一初步瞭解後，再選取適當位置進行鑽心取樣（如照片 5 及照片 6）及中性化檢驗其成果如表 2 所示，以作進一步之驗證。對於全線之調查作業如水質 PH 值檢驗（如照片 7），鋼筋腐蝕探測（如圖 3）抗壓試驗及施密特鎚等之試驗於施作完成後綜合其成果及分析進行下列之研判及歸納。隧道發生異常現象之因素依黃燦輝等人（1997 年）研究報告，可分為：外力變化因素、襯砌劣化因素漏水及其他因素等三大類。根據前述隧道安全檢測調查結果，針對外力變化、襯砌劣化以及漏水等三大因素之詳細評估與分析，本隧道產生異常現象之原因可以歸納如表 3 所示。其中被評定為主要影響原因者包括：地盤鬆弛應力、鄰近施工影響（若計畫隧道繼續施工），有害水，常年累月作用等。而列為次要因素者則包括：偏壓、地震、襯砌背面空隙，襯砌厚度不足，襯砌混凝土分次澆置之契合處施工不良，施工縫接縫不良，防水施工不良等。其餘之成因則對本隧道之異常狀態影響輕微或無影響。

（四）隧道安全等級分類 隧道之安全性要求，視隧道之功能、設計標準與位置而不同。公路隧道除了重視結構安全性之外，隧道之通風、照明、消防（尤其是長隧道）對隧道是否能維持預期之服務水準有重大影響；而小量滲水，可能影響不大。因此，不同之道路型式與道路等級，對安全性之要求不一樣，在訂定安全等級時，須分別加以考量。隧道等級分類主要是以隧道之安全性及是否能維護隧道原功能為分類依據，並針對異狀之進展狀況及特徵等決定之，依據交

通部「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂（I）」之隧道安全評估等級將本案詳細檢測結果，依處理措施之緊急次序分為甲、乙、丙、丁四級，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。

三、設計原則及方法

- (一) 設計原則 依據隧道之調查、安全檢測及異狀原因推估後，為即時排除隧道之異狀，除選擇適當的維修補強工法外，並應檢討實施之規模與範圍、施工性、經濟性及施工時期等。因此選擇維修與補強工法之最重要考量因素為正確掌握隧道異狀原因，才能對症下藥，恢復隧道功能。惟隧道修復改善如欲完備則應依流程圖 4 所示進行。由於隧道係地下結構物，作用於襯砌之外力及襯砌狀態甚難充分明確掌握，一般均依異狀之特徵或簡單之檢測結果，據以推估異狀原因，其推估過程中，經驗因素比重仍大。由於交通隧道之維修與補強施工上，常有時間性限制，往往須在晚時間內完成，以維護交通順暢，故本案改善措施係採用機動性高且施工簡便快速之施工法為維修與補強技術考慮重點。惟施工法之選擇必須依安全檢測及隧道異狀原因推估結果（如鬆動土壓、材質劣化、滲漏、背面空洞、襯砌厚度不足等），並對隧道之重要性及異狀作綜合性安全評估，研判隧道體有無結構穩定之問題後，方可選擇有效解決隧道病因、恢復營運功能及延長使用年限之最佳施工方式。
- (二) 隧道整體改善方案 本計畫在完成緊急防護設計，現場檢測調查及隧道修復及安全可行性評估等工作，綜合各階段成果，納入本區所有隧道擬定三種整體改善方案進行評估，其考量重點如下：
 - A. 針對計畫區之整體交通改善進行評估。
 - B. 隧道修復期間之交通維持。
 - C. 長久穩定性之考量。
 1. 整治方案說明
 - (1) 第一方案：下行隧道局部擴挖及上行隧道擴挖為雙車道，為考量上行隧道擴挖為雙車道（如圖 5）施工期間之交通維持（工期約需 15 月），先行局部擴挖下行隧道（如圖 6）供單線通車。
 - (2) 第二方案：下行隧道明挖及上行隧道擴挖為雙車道，本方案擬在上行隧道擴挖為雙車道施工期間，先行將緊臨溪側之下行隧道明挖成為路工段，如圖 7。
 - (3) 第三方案：上行隧道襯砌修復之同時另規劃繞過馬陵一號、二號隧道之新線隧道，新線隧道長度約 1000 公尺，如圖 8 新線隧道位置圖。

2. 方案比較及建議 本計畫自緊急防護處理、現場檢測調查至隧道安全可行性評估，依據工作成果提出隧道整體改善評估比較（如表 4），其說明如下：
- (1) 第一方案，擬於現有之下行隧道局部擴挖為單線雙向通行之替代路線後，進行上行隧道之擴挖施工（雙向雙線）；本方案工期預計 1.5 年，造價 8 仟 9 佰萬元，施工可行性並無問題，惟擴挖施工之安全為必須特別注意之重點，擴挖時以"先撐後拆"為原則。
 - (2) 第二方案，於下行隧道位置明挖邊坡成單線雙向通行之替代路線後，進行上行隧道之擴挖施工（同方案一）；本方案工期預計 2 年，造價約需 1 億 5 仟 7 佰萬元，惟明挖邊坡可能影響既有之下行隧道結構，導致隧道破壞邊坡坍塌，故必須明挖施工前加固隧道，減低開挖之不良影響。
 - (3) 第三方案，對上行隧道進行隧道襯砌之修復作業之同時，規劃設計繞行馬陵一、二號隧道、新線隧道；本方案工期預計 3 年，造價約需 4 億 2 仟 9 佰萬元，可避免斷層及邊坡坍塌等之不利因素影響，惟造價遠高於其他方案。
 - (4) 就本計畫之整體考慮，包括環境、工期、造價、維修檢測等因素，本公司建議採用第一方案，即局部擴挖下行（下行）隧道後，再封閉上行（上行）隧道進行雙車道擴挖之作業，以改善本區之交通服務品質。
 - (5) 本案後因基於時程及公路局年度預算之問題，上述方案擬作為長期改善之方案；中期改善將採隧道結構體補強及外部岩盤改良等方式進行設計，並採用自動監測系統記錄後續隧道之變形情形，以作為長期改善方案之決定依據及參考。下節將針對中期改善之方法作一說明。

（三）設計方法

依據交通部委託臺灣大學土木研究所製訂之「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂（Ⅱ）」一書，針對外力變化、襯砌材質劣化與漏水及其他因素三項提出之對策工法（詳見表 5~7），選擇適合本工程特性，並考慮前節所述之經濟、規模及工期等條件，分別加以設計，以下將就本工程隧道內之修復改善設計步驟逐一概述：

1. 檢測及安全評估結果整合

首先應將各項之檢測結果及隧道之安全評估等整合（如圖 9），以作為各項因應對策之綜合研判。

2. 改善對策之選擇

依據前述「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂（Ⅱ）」所列之對策工法考慮其使用目的、效能、安全性與施工性等因素，選擇最適之工法再加以詳細之考量，並將其合併於前述之整合圖形上（如圖 9）。由

於隧道內之損壞甚少因單一因素所引致，故其改善對策可能有所重疊，為求經濟有效，應於全線改善對策初步佈設完全後，就隧道各斷面再作一通盤考量，刪除或調整選擇之改善對策。

3. 改善對策之細部考量

即使於改善對策選定後，此項對策仍受材料、機具、施工方法順序等因素而有影響。例如在本工程中對於結構物裂縫考慮其受力行為、灌漿控制之難易及效果與滲水控制等原因，係採具有剛性及止水效果之聚亞 一環氧樹脂聚合物，作為結構性裂縫補強之用，如圖 10。不考慮滲漏行為時則僅採剛性之環氧樹脂；對於上述措施同時應再考慮灌漿效果尚須配合鑽孔配置、深度及灌漿壓力等因素，方為完成一改善措施之設計。其餘側壁雙排導水施工（詳圖 11），頂拱襯砌補強（詳圖 12）與，修復改建施工（詳圖 13）亦均如上述之方式詳細考量後加以修正而成。即使經過詳細之調查及預測分析，隧道實際之受力行為亦甚難準確估算，上述各項對策在結構計算上不確定因素甚多，故欲完成改善對策之設計，除藉助部分的數值或理論分析外，仍應以經驗判斷為主要之設計考量。

4. 改善措施之施作順序訂定

由於隧道修復其採用之改善對策通常不只一種，可能多達十多種，就本案而言，即採用 12 種改善工法，因此就其改善之目的、功能及施工時可能產生相互之影響程度須決定其施作順序。本案採用之首要原則為由外而內施作，意即先施作隧道周圍岩盤改善之項目，其次再處理隧道結構與周圍岩體介面改善項目，最後才施作隧道結構體之改善工作，詳細之施工先後順序詳如表 8。四、實務上之探討 本隧道的修復雖在施工前均已有明確的標示各區段部位該採何種改善措施，但由於隧道裂縫及背後空洞等異常原因仍有可能因外力之持續作用隧道仍在持續變形中或其他因素之影響，各種改善措施於設計至施工仍可能有極大之變異性存在。以下將提出本案可能及已施措所發生之問題點加以探討。

5. 淨空量測誤差之影響

由於本案之隧道歷經年代久遠，早期之施工資料均已不可考，又調查階段雖施行少數（12 個）之斷面淨空量測，但因早期施工技術及外力擠壓變形等因素，隧道沿線淨空差異甚大（淨高量大差異達 50cm 以上），少數斷面之淨空量測甚難予以代表，此情形將影響設計時無法正確判斷隧道全線每一斷面是否有淨空不足之問題；其次則影響設計數量之估算，在現行體制下，若授權現場工程司視實際情況酌予調查，在數量差異甚大時，仍須辦理會勘甚至變更設計等程序，若因此而延誤修復時機，則可能須付出更大之代價。基於上述原因，解決方式有二：第一為增加淨空量測長度甚至施行全線量測，在此同時應考慮不得使調查之時間延長過久。欲達成此目的

則以具有機械觸桿之淨空檢測車配合電腦記錄器或採雷射量測儀等儀器則可達成。惟其缺點為此項儀器造價甚高，若採用此種方式亦相對需提高調查之費用，第二項則為充分授權監造工程司視現場狀況調整之權利，惟此將大為加重現場工程司之責任。

6. 裂縫認定之影響

無論採人工目視測繪或電腦雷射影響掃瞄器進行裂縫之調查工作，均可能因隧道持續變形產生新生裂縫，施工時原設計裂縫寬度增加或現場對裂縫嚴重性判定上之差異均大大增加施作時的複雜性。由於本項工作藉助經驗判斷之成分極大，因此若欲避免施工時之困擾，業主、承包商及設計單位應作好充分之溝通並對於裂縫評定除倚賴量測儀器作定量之評斷外，尚應就定性判斷如位置、延伸性等有共同之認知，方能減少施作上的困難。

7. 襯砌背後空洞或破碎岩盤處理之不可預期

襯砌背後空洞或破碎岩盤雖經透地雷達及鑽心取樣等調查，其全貌仍難完全掌握。本案於施作固結灌漿期間由於隧道外圍岩盤破碎程度遠超過預期之結果，灌漿時呈現大量吃漿之情況，雖經現場人員調整水灰比、灌漿壓力、時間及添加促凝劑等方式仍難達到設計之要求，進而造成預估數量與實作數量差異甚大之情況，若欲改善此一情形除倚賴現場灌漿人員對灌漿方式之有效調整外，充分授權監造工程司處理之權力仍為目前最省時有效之克服方法。

8. 灌漿效果確認之困難

由於固結灌漿及襯砌裂縫灌漿，其施作之成效均須仰賴監造工程司全程之督導方可依據其施工程序，初步確認其成效，進而再根據灌漿記錄加以核對作為灌漿效果之確認。雖說固結灌漿可經由鑽心取樣作進一步之確認，惟其係以點作面之研判亦無法充分確認灌漿之效果，且因地盤之高度差異性及灌漿控制之困難度，即使該取樣點未完全達設計範圍，亦難以定論其灌漿未達要求。在裂縫灌漿方面由於灌漿效果為線狀或面狀之分佈，即使鑽心取樣進行試體抗壓試驗，亦難由其試體強度分辨係漿體或原混凝土材料之破壞。故於灌漿作業其前置作業如材料品質、種類以及漿液配比的審核及藉由監造工程司對於現場施作順序之管理與問題之立即處理仍為現階段最佳之管控方式，因此若欲達灌漿之要求，現場監造人力之安排應為一項最重要的因素。

9. 隧道改善規模之確認

隧道改善規模、範圍及成效常因各種考量而有所不同。本隧道初期係以恢復原有之結構功能為目標，並藉由後續之自動監測系統設置，作為改善成效之確認。然後續施工中，沿線居民則期許隧道改善工程有更佳之成效及助益。就原案及後者兩方觀點而言，隧道改善工作皆可達成，惟此一規模

的改變，則將影響現行工作的施作，輕則延遲工期，重則影響改善之時機及成效。由於公路隧道多為運輸動線中之關鍵，其各項改善工作皆會受沿線用路人及居民之特別關注而有所影響，此為後續隧道改善工作中，將極可能再發生之情事，特在此提出以供後續工程之參考。

五、結論與建議

早期隧道在技術未成熟及工作環境惡劣的條件修築而成，歷經 30 至 40 年之營運及後續地形、地物的改變或開發，該時期現有營運之隧道要有必要作一全面之調查，以判斷其營運功能是否正常，實為公路營運管理上一重要之課題。

隧道損壞的原因甚為複雜，若欲充分達成恢復原隧道之營運功能，則除需於調查階段適度增加調查之精確度，尚需於施工時給予現場人員更大之彈性及時間，方能竟全功。

調查、維修改善及長期監測為老舊隧道維持期營運功能之重要環節，本隧道已調查完成，正進行損壞改善，後續之自動監測亦將於改善完成後接續進行，本案之執行及成效或可供本局其他區處之參考。

六、參考文獻

1. 黃燦輝等人（1997、1998），老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研究（I）（II），交通部專提研究計畫成果報告。
2. 聯合大地工程顧問股份有限公司（1997），台 8 線 38k+579 右側隧道異常狀態委託調查及評估工程—隧道檢測調查成果報告。
3. 聯合大地工程顧問股份有限公司（1998），台 8 線 38k+579 右側隧道異常狀態委託調查及評估工程—隧道安全修復及可行性評估報告。
4. 聯合大地工程顧問股份有限公司（1999），台 8 線 38k+579 右側隧道異常狀態委託調查及評估工程—隧道修復改善設計圖。

表 1 38k+579 隧道異常狀態調查作業一覽表 調查對象 檢測項目 資料蒐集 原設計、施工圖、施工記錄 環境調查 地形、縱橫斷面測量及淨空檢查 地表地質調查、折射震測及航照判釋 地下水 PH 值檢驗 坑內調查 裂縫測繪、變位量測 襯砌厚度及背面空洞調查包含 GPR 檢測及襯砌鑽孔調查 襯砌材料劣化調查 施密特鎚強度檢驗、混凝土抗壓強度試驗 混凝土中性化試驗、鋼筋位置及腐蝕檢測。