

從我國岩石隧道檢修經驗 探討營運期間結構行為演化及維護管理

王泰典／國立台北科技大學資源工程研究所教授

邱雅筑／國立台北科技大學資源工程研究所博士後研究員

李佳翰／聯合大地工程顧問公司規劃設計部專案經理

陳正勳／台灣世曦工程顧問公司大地工程部副理

黃燦輝／國立台灣大學土木工程學系教授

前言

岩石隧道常被視為是堅固而且耐久的構造物。我國近十幾年來的隧道結構安全檢測結果發現，超過 2/3 以上的岩石隧道出現襯砌混凝土裂縫、錯移、剝落等病態（以下簡稱襯砌異狀或異狀），其中許多隧道是採用所謂的新奧工法設計與建造，混凝土襯砌僅是提高結構安全性與提昇視覺感受之用，理論上在建成之後不會受力，或是承受應力遠小於混凝土強度。然而建成之後多數隧道未達設計年限一半之際，部分隧道甚至建成不到 10 年，襯砌混凝土受力即因超過其強度而發生異狀，顯示我國建成岩石隧道的力學行為迥異於國外發展新奧工法的基本假設。

本文回顧我國岩石隧道結構安全檢測與維修補強作業，探討襯砌異狀及影響因素，繼而研析岩石隧道變形機制及營運期間結構行為的演化，闡明現代化隧道理論不完全適用於我國隧道工程地質環境的窘境，最後依據公共工程永續經營觀點，提出我國岩石隧道全生命週期維護管理作業在體制面、技術面以至於學理科研面的現況與未來發展方向。

我國岩石隧道結構安全檢測與維修補強作業

我國自十九世紀末邁向現代化開發以來，不論是交通運輸的需求，或是水力資源的開發，隧道工程總

是關鍵建設項目。百餘年來的成果十分斐然，迄今已完成約 1000 座隧道，總長度達 1000 km 以上，成為各地交通旅運的捷徑。然台灣位於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊斜向聚合帶，板塊運動持續作用造成地質具變異性，岩體成岩年代輕，工程特性較差；加上地處西太平洋亞熱帶氣候區，潮濕多雨，地下水位高。營運中隧道因岩土壓力長期作用、地下水經年流蝕侵蝕、襯砌結構年久老化、或是強震侵襲造成襯砌龜裂，甚至結構損害不堪使用，亦時有報導（Wang et al.,^[1]；Lee and Wang^[2]；王泰典等^[3]；Chiu et al.,^[4]；Wang et al.,^[5]），除嚴重影響運旅之外，修復或重建費用往往相當高昂（孫琪等^[6]；Wang and Lee^[7]）。

早期建設的隧道以水利用途為主，除了設計觀念及施工技術相對原始，工程材料品質變異較大外，水流磨蝕造成襯砌受損嚴重；加上當年建造的目的與功能已不敷現代化需求，以致清治、日治時期以及光復初期建造的許多水利隧道瀕臨損壞狀態，歷經多次修補仍無法復原其設計功能及結構性能，廢棄不用者亦不在少數，前者如烏山嶺隧道（圖 1）、新武界隧道，後者如能高大圳隧道等（Wang and Lee^[7]）。可惜這類隧道的建造、使用與修補紀錄多有逸散，加上營運期間檢測調查困難，難以系統地窺探建成後隧道結構行為的演化。

水利用途之外，鐵路運輸亦為早期建造隧道的另

一主要目的。當時隧道施工皆未考慮防水，因此滲漏水現象相當常見。鐵路機車在 1980 年以前自蒸汽、柴油、柴電動力為主，對於隧道內漏水問題要求不高，隧道襯砌除因地震局部損害、或因不明劣化原因造成嚴重剝落外，大多逕行修復未加記錄，缺乏維護紀錄可以追溯（圖 2、圖 3）。

西部縱貫線鐵路於 1975-1979 年進行電化工程，襯砌頂拱必須安裝電車線架，結構須承載電車線振動造成的外力增量，並且避免起拱線以上滲漏水，此等需求對於已建成逾 70 年、磚塊疊砌式支撐的隧道形成極大的考驗，因此配合電化工程實施了電車線架附近局部的襯砌補強，以及部分隧道的襯砌全面加固措施，迄今仍可於竹南 — 彰化（山線）間廢棄的隧道中觀察到。惟電化工程以既有鐵路運能提升為主要目的，有關鐵路隧道補強的記載甚少。

1979 年電化工程完工通車後，電力動力機車牽引力加大，列車載重及行車速度皆隨之提高，鐵路加

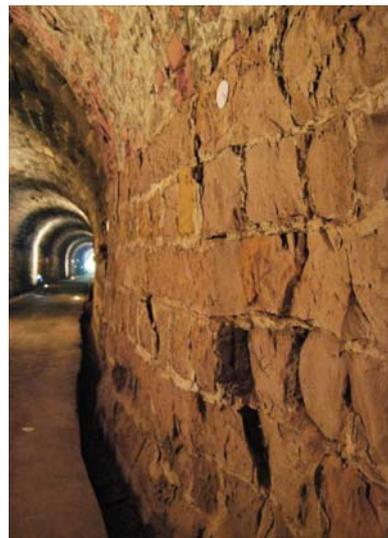


圖 2 獅球嶺隧道建於 1880 年代，因路線線型不佳，營運不及 7 年即廢棄。隧道採用磚塊及塊石疊砌支撐，因圍岩荷重持續作用造成過應力現象，磚塊及塊石中可以發現平行隧道周壁的裂縫，隧道壁面呈凹凸狀，地面有掉落的磚塊及塊石薄片。攝於 2008 年春。



圖 1 烏山嶺隧道建於 1920 年代，建成後歷經 1950 年代末期、1970 年代初期以及 2000 年代中期 3 度修補，仍無法復原其設計功能及結構性能。上圖為 2004 年初檢測發現之襯砌環狀剝落，圍岩可見；下圖為斜向裂縫，襯砌錯移沿裂縫發展，有明顯的滲漏水及白華現象。嘉南農田水利會即將建造新烏山嶺隧道，確保烏山頭水庫水源。

載與升速運行也加大了路基與結構的荷載，路基碴道養護工作頻繁，橋梁與隧道的營運維護問題受到了重視。在我國鐵路開始運行 97 年後，交通部於 1988 年公佈了交通技術標準規範鐵路類工務部「1067 公厘軌距軌道橋隧檢查養護規範」，為我國鐵路橋梁與隧道在營運期間結構安全檢查與養護最早的規範。針對鐵路隧道部分，規範了隧道檢查項目及檢查頻率，隧道檢查結果開始採用表格、文字方式留存。此規範並於 1997 年修訂。

1993 年全面推動宜蘭線電化與北迴線電化工程，期間於 1995 年引入新式的隧道襯砌表面影像掃描設備，檢查結果採用數位化記錄及呈現，提供了隧道補強設計以及養護作業可靠的依據，也揭露了建成的岩石隧道並未若傳統認知般的堅固與耐用，極需要定期檢查與必要的維護。此後，竹南 — 彰化（山線）間的三義一



圖 3 集集線鐵路建於 1920 年前後，隧道採用磚塊壘砌支撐，於 1999 年集集地震中受損後採鋼線網噴凝土補強，因勁度差異過大，不過幾年即可見噴凝土龜裂甚至剝落。隧道已於 2010 年再度維修補強。攝於 2007 年秋。

號隧道於 2001 年實施結構安全檢測、2006-2011 年南迴線鐵路隧道隨之實施、2014 年基於電化工程需求，再次針對南迴鐵路隧道群進行全面性的結構安全檢測與補強作業，且皆納入襯砌表面影像掃描、完整性調查及背後孔洞探查。運行百年後，我國的鐵路隧道邁向結構安全維護與服務年限延壽的里程（王泰典等^[8]）。

公路隧道大多建於 1950 年代以後，初期以蘇花公路以及中橫公路沿線最多。此時期建成的隧道斷面小、長度短，多瀕臨陡峭邊坡或穿越山脊急彎處，部分隧道在 1970 ~ 1990 年代隨我國經濟起飛帶動的一系列交通建設計畫中已廢棄，如烏石鼻隧道、錐麓隧道（舊）、流芳隧道（舊）。另有部分因邊坡失穩而損害廢棄，如蘇花公路清水隧道（圖 4）陳福勝等^[9]；陳營富與王泰典^[10]、中橫公路馬陵隧道群以及 1960 年代建造的南橫公路嘉寶隧道（舊）等；或是歷經修補而仍在營運者，如新澳隧道舊線、金馬隧道、匡廬隧道等。

1980 年代末期推動的第二高速公路計畫，採用新奧工法理念設計建造了一系列三車道大斷面隧道，

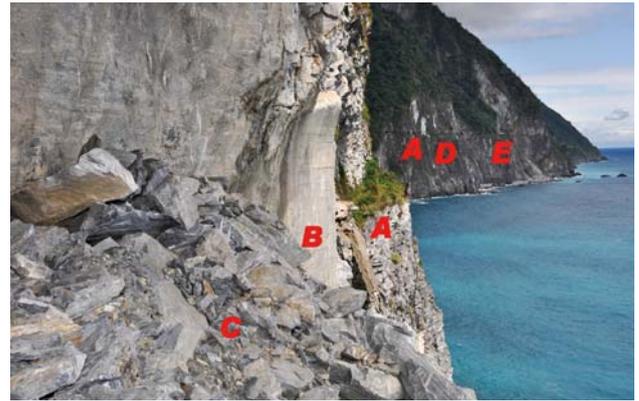


圖 4 蘇花公路的修建可溯自清治 1870 年中期的人行步道，1930 年前後日治時期的臨海道路，以及 1940 年代後期公路局陸續開建的現代化公路。圖中為清水隧道段，A 處為 1930 年代臨海道路路跡、B 處為 1970 年代建成的舊清水隧道襯砌殘垣、C 處為崩落於舊清水隧道的土石、D 處為清水斷崖、E 處為大清水隧道南口、照片自己廢棄的清水隧道（1990 年代完工）與舊清水隧道（1970 年代完工）交會處向東北方拍攝，目前該路段公路通行 2000 年代建成的匯德隧道。

我國岩石隧道工程迅速發展，不論是隧道力學理論、數值模擬方法、施工機具設備以及工程技術與品質管理等，在當時皆達到了前所未有的一波高峰。然而這些依據國外發展、當代隧道力學經典理論所設計、施工，並在嚴格品質管理制度下建成的大斷面隧道，建成後僅約 20 ~ 30 年，襯砌與仰拱皆出現了類型不同、程度不一的異狀，且有依時變異的跡象，岩石隧道營運期間結構行為演化及維護管理，已是我國隧道工程界必須嚴肅面對的課題。

襯砌異狀與影響因素探討

黃燦輝等^[11,12]展開「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂（I、II）」研究計畫，為我國山岳隧道維管理研究工作之濫觴，隨後「震後隧道結構快速診斷手冊之建立與震後隧道結構快速補強手段」研究成果（黃燦輝等^[13]）、「橋梁隧道材料腐蝕劣化原因之探討及防治對策（二）— 隧道篇」（洪宏基等^[14]），恰提供 1999 年集集地震引致山岳隧道受震損害調查以及修補作業的技術準則。此等研究成果在實例應用約 10 年後，依本地化經驗與需求，增修完成「隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發」（黃燦輝等^[15]）以及「隧道補強技術與材料之開發總結報告書」（黃燦輝等^[16]）等研究報告，可提供山岳隧道結構安全檢測、維修補強作業的參考。

王泰典等^[17]以我國隧道為背景，蒐集整理 1990-2006 年間安全檢測作業調查所得的異狀（圖 5），並納入相關報導中早期隧道的破壞案例，繼而區分不同的異狀及其類別，探討採用磚（石）砌、混凝土與鋼筋混凝土等不同的襯砌材料、以及不同構築方式之隧道所發生的異狀形態。其研究依據目視是否可以直接觀察判別，將襯砌異狀區分為「目視可識別」以及「目視無法識別」兩大類。其中「目視可識別」的異狀絕大多數為發生在襯砌表面者，而與襯砌完整性以及襯砌背後孔洞有關的異狀，則多數無法直接目視識別。

李佳翰等^[18]探討鐵路隧道結構安全檢測作業，依據異狀發生部位區分鐵路隧道異狀為：(1) 隧道洞口；(2) 襯砌；(3) 避車洞；(4) 仰拱等。其中隧道洞口常見的異狀包含：(1) 洞門開裂；(2) 洞門前傾；(3) 側抱式擋牆開裂；(4) 側抱式擋牆位移；(5) 排水溝阻塞等。另亦曾傳出數次洞口邊坡塌坍或落石引致行車事故。襯砌常見的異狀包含：(1) 裂縫或開裂；(2) 剝離或剝落；(3) 滲漏水；(4) 白華；(5) 鋼筋鏽蝕；(6) 變形入侵；(7)

襯砌不良；(8) 空洞等。避車洞常見的異狀包含：(1) 裂縫；(2) 剝落；(3) 滲漏水；(4) 白華；(5) 鋼筋鏽蝕等。仰拱常見的異狀則包含：(1) 隆起；(2) 噴泥；(3) 積水；(4) 軌道變形等。

日本土木學會^[19]統計日本鐵路隧道結構安全檢測結果，異狀類型中以襯砌裂縫及施工縫開裂（34%）發生比例最高，其次依序為漏水（32%）、表面剝離及剝落（23%）、施工縫錯位（6%）、結冰及冰柱（5%）。台灣位處亞熱帶地區，尚無隧道結冰及冰柱的案例，前述其餘的異狀類型則亦常見於台灣鐵路隧道。

鑑於檢測所得的襯砌異狀多元，隧道變位及變形的機制與影響的原因卻不易查明，部分隧道儘管已實施結構安全檢測與維修補強作業，仍有異狀未明顯改善，甚至持續惡化的案例。因此，國內也展開了一系列隧道變形機制與長期穩定的相關研究，包括「隧道長期穩定影響因素之研究」（王泰典^[20]）、「隧道襯砌影像判釋與異狀特徵化技術暨安檢資料庫之開發」（林信宏^[21]）、「隧道襯砌異狀肇因診斷與安全評估技術之研究」（王泰典

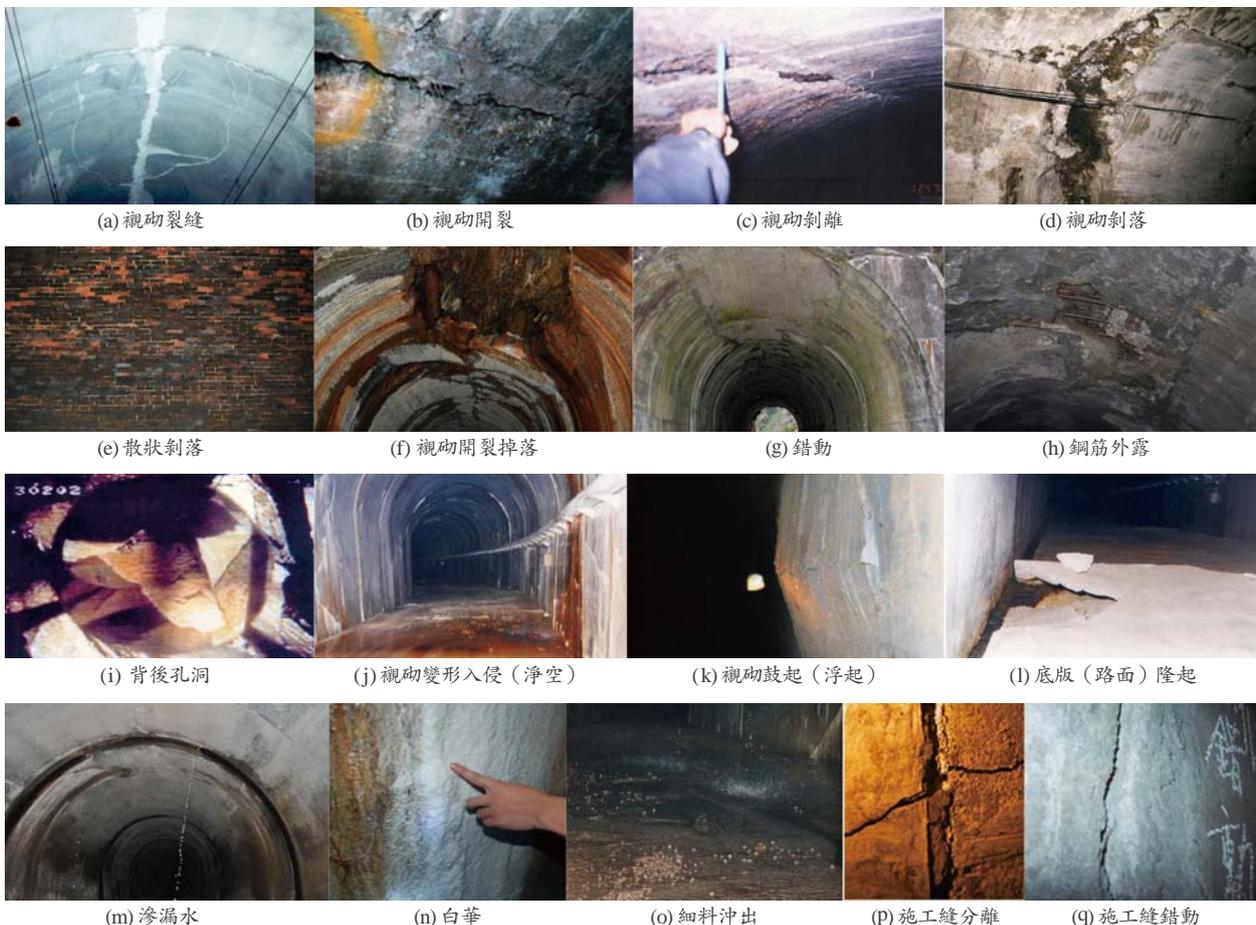


圖 5 數種常見的隧道襯砌異狀（修改自王泰典等^[17]）

^[22]、「山岳隧道襯砌異狀肇因診斷技術研究」(李佳翰^[23])以及「營運中隧道變位模態解析與高精度監測技術之研究」(邱雅筑^[24])等研究,皆報導了技術上的進展。

Wang^[25] 探討邊坡失穩引致地層剪變形造成的襯砌異狀,提出透過襯砌裂縫空間分佈特性診斷異狀肇因的概念,並提出應用影像判釋暨特徵化及數字化技術(王泰典等^[26]),有助於凌亂多變的襯砌裂縫中客觀地診斷異狀。李佳翰^[23] 繼而彙整國內外 266 個隧道安全檢測與維修補強案例,探討襯砌異狀特性及其肇因的關聯性,提出因應的診斷技術,可以有效地診斷 8 種肇因引致的襯砌異狀(圖 6)。Huang 等^[27] 提出襯砌變位分離法暨隧道變形特徵曲線,可以透過隧道變位監測結果,診斷遠域及近場應力變化特性。邱雅筑等^[28] 繼而提出襯砌微變位監測技術,突破山岳隧道精密監測的技術瓶頸。邱雅筑^[24]、Chiu 等^[29] 並進一步提出特徵矩陣法,可以將複雜多變的隧道變位解析為簡單基本變位模態的組合,包括不同方向的平移、旋轉以及不同週期的變形等,提供診斷異狀肇因十分有利的基礎。另外,陳正勳^[30]、陳正勳等^[31] 應用隧

道受震數值分析成果及相關研究,探討隧道受震損害的原因。提出山岳隧道受震損害區段皆落於覆蓋深度接近 0.25 倍岩體波長的範圍,即隧道覆蓋與岩體特性的組合強化了震波受地表自由面反射與隧道周壁散射的效應,導致襯砌受震引致應力大幅增加而造成破壞。而襯砌縱向裂縫、環向裂縫或環向施工縫錯動、環狀剝落以及斜向裂縫與剝落等 4 種不同的裂縫顯著類型,主要受到 P 波、S 波、R 波與 Love 波自不同方向入射、地盤互層的應變差異以及隧道襯砌結構勁度特性所影響。

岩石隧道變形機制與營運期間結構行為演化

Kirsch^[32] 提出的二維無限域圓形孔洞周圍應力分佈彈性解以及後續延伸的彈塑性解(圖 7),最常為岩石力學與隧道工程界引用說明現代化隧道力學理論(Jaeger and Cook^[33]; Hoek and Brown^[34])。Rabcewice^[35, 36] 據以延伸,提出新奧工法理念,成為 20 世紀下半葉國內外岩石隧道設計及施工最常用的方法。

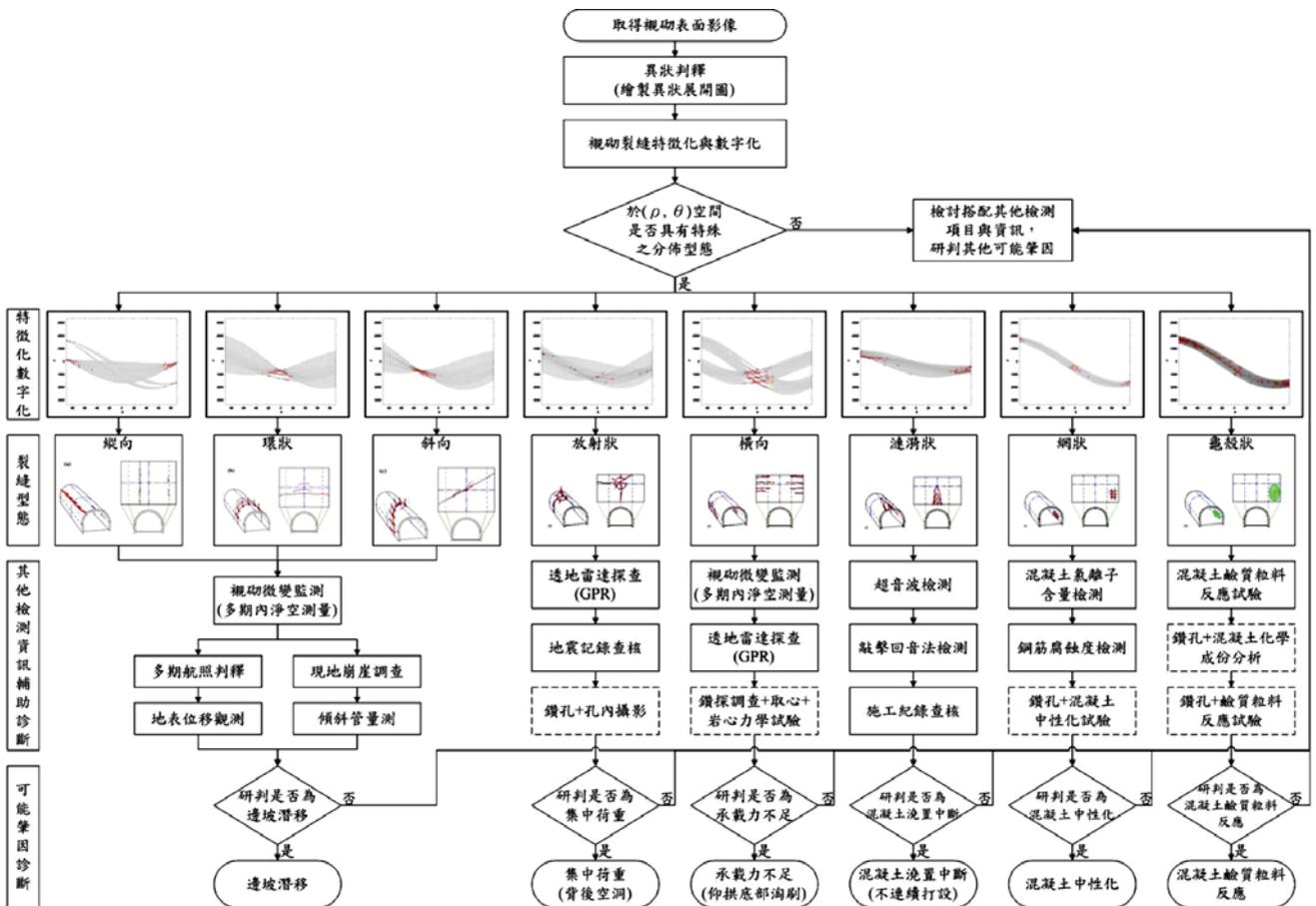


圖 6 李佳翰^[23] 建議的隧道襯砌異狀技術

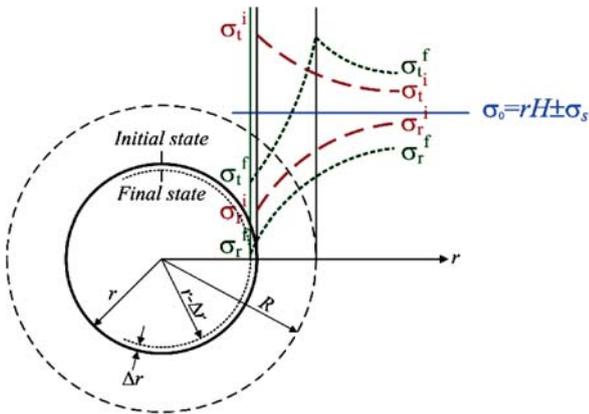


圖 7 現地應力為均向條件下圓形隧道開挖後圍岩應力分佈示意圖

Lombardi^[37] 基於 Kirsch^[32] 彈性解，探討圍岩工程特性對地下坑道開挖後穩定性的影響；Lananyi^[38] 繼而在第 3 屆國際岩石力學會議中建議，利用岩體長期強度決定隧道襯砌支撐力。Daemen^[39, 40] 探討隧道支撐設計問題，提出前進面效應的概念，其繪製的閉合收斂曲線圖被 Hoek and Brown^[34] 所著的「岩石工程之地下開挖 (Underground Excavations in Rock)」收錄引用，並由英國鑛冶工程學會出版。該書自 1980 年迄今仍為岩石地下工程最具代表性的論著之一，且為岩石隧道工程入門的經典教科書，加上 1980 年代以後計算機科技蓬勃發展，岩石隧道工程逐漸採用數值模擬輔助支撐設計或是檢核設計成果，因此，Kirsch^[32] 彈性解所描述的隧道周圍應力分佈，以及圍岩 — 支撐系統的閉合收斂互制行為，遂在高等教育系統推廣以及計算機快速發展雙重的推波助瀾下，成為目前國內外岩石隧道設計的主流方法。

圖 8 為岩石隧道開挖面附近圍岩 — 支撐系統閉合收斂關係簡化示意圖，橫軸為圍岩徑向變位，縱軸為徑向支撐應力，以頂拱所需支撐應力表示。強硬地盤中開挖隧道，開挖後圍岩變位極小，且不需支撐即可穩定，圍岩徑向應力自 P_0 減降為零，如圖中 I 的情況。反之，軟弱地盤中開挖隧道，一開挖圍岩即喪失自立性，並引致極大的鬆動範圍，圍岩破壞處於峰後弱軟狀態，穩定隧道所需支撐應力極大，甚至可能超出初始現地應力 P_0 ，如圖中 III 的情況。一般地盤中開挖隧道，圍岩需要支撐協助達成穩定狀態，開挖後圍岩向內變位，鄰近開挖面的圍岩可能因為變位量較大而處於峰後弱軟化狀態，透過適時設置的支撐系統提供支撐應力，可以將開挖面徑向應力自零提升至 P_s ，形成三維應力狀態並提昇岩體的強度，進而與圍岩達

成平衡穩定，如圖中 II 的情況。現代化的岩石隧道設計，常透過岩體分類法半定量劃分圍岩的行為，繼而考慮所需支撐勁度 (圖中支撐曲線的斜率) 以及支撐應力 (P_s)，規定輪進距離與支撐設置時機，使施工中適時達成圍岩 — 支撐系統閉合收斂的狀態。

圖 8 所示的岩石隧道開挖面附近圍岩 — 支撐系統閉合收斂關係物理意義鮮明，搭配地質師透過圍岩分類概念描述開挖面地質條件，依據隧道設計圖說選擇開挖方式、輪進距離以及支撐系統，形成了現代化隧道施工作業的基本架構。更可進一步由地質師依據開挖面圍岩變位行為，或配合監測系統監測圍岩變位，比較設計預測值並適度地回饋或修正設計，即為新奧工法所謂「邊施工邊設計」的概念。此等現代化隧道工法的概念自 1980 年代廣為流傳以後，也帶動了地球物理探查、前進鑽孔探查等技術發展。透過前進探查技術預先瞭解開挖面岩體條件，繼而將開挖可能遭遇圖 8 中 III 情況的圍岩，透過地盤改良的方式，強硬化岩體轉化為 II 的情況，或是採用前進支撐如管幕工法方式，仰低圍岩變位，減少開挖引致弱軟的圍岩範圍。再加上隧道施工機具性能一再提昇，透過現代化工法建成的岩石隧道，不論在斷面、長度、岩覆方面，皆較以往大幅提昇，而且在以往困難施工的惡劣地質條件，亦有不少突破。

儘管現代化工法的基本概念有效地描述了岩石隧道開挖面附近圍岩 — 支撐系統的閉合收斂行為，但就公共工程全生命週期觀點而言，現代化岩石隧道設計理論僅著重了開挖後時間極為短暫的一段，對於圍岩 — 支撐系統達成平衡穩定後的行為欠缺描述；再者，新奧工法強調岩石隧道襯砌設置時機係在圍岩變位穩定後，作用主要為提高結構安全性，並基於隧道屬承壓結構特性，建議可以採用無筋混凝土襯砌。新奧工法及相關的設計理論在地質穩定地區或許成立，但就我國岩石隧道結構安全檢測所得，襯砌存在結構性裂縫的比例甚高可知，現代化隧道理論在全生命週期的結構行為演化部分考慮是不足的。除了輕忽了地震引致地盤震動過大造成的襯砌應力增量過大、導致不同形態的襯砌裂縫、甚至是剝落或掉落外，亦欠缺圍岩材料依時性變化潛能、隧道所處環境改變對於結構穩定性影響的考慮。此等缺失不僅涉及岩石隧道襯砌的結構角色與設計依據，並且可能造成營運過程龐大及長期的維護管理負擔。

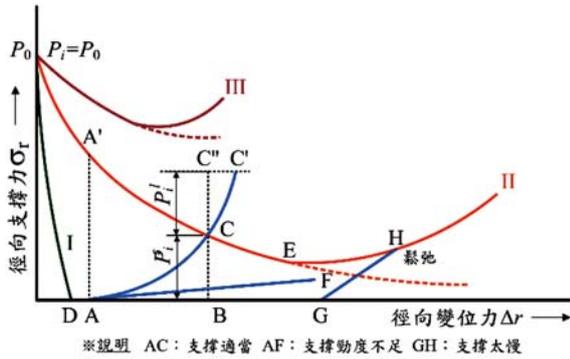


圖 8 岩石隧道開挖面附近圍岩—支撐系統閉合收斂關係簡化示意圖

朱晃葵等^[41]考慮岩土材料承受應力達特定門檻以上時常顯露依時變形行為，其特性迥然不同於廣泛應用的彈塑性組成模式所描述者，造成地工構造物在營運期間結構行為具有依時變化的現象。基於岩土材料依時性行為受軸差應力與體積應力影響，朱晃葵等（2009）提出一非線性黏彈塑性模式（圖 9），考慮不同應力狀態下軸差應力可能造成的 4 類依時變化行為，透過一國內隧道案例模擬分析顯示，若隧道圍岩存在依時變形行為，則圍岩應力狀態隨時間而趨近均向狀態，例如支撐應力隨時間增加。

該模式不僅具有描述隧道開挖面附近的彈塑變形能力，亦可反映開挖面遠離後不同應力狀態下圍岩變位以及支撐應力隨時間的變化特性，惟模式所需之岩土材料黏性參數、與黏性變形特性有關的體積應力與軸差應力門檻等參數，目前仍不多見，有待透過更多的工程實例反算分析與試驗加以推求，以供分析與應用。

隧道全生命週期的維護管理

全生命週期的思維係公共工程永續經營的核心。

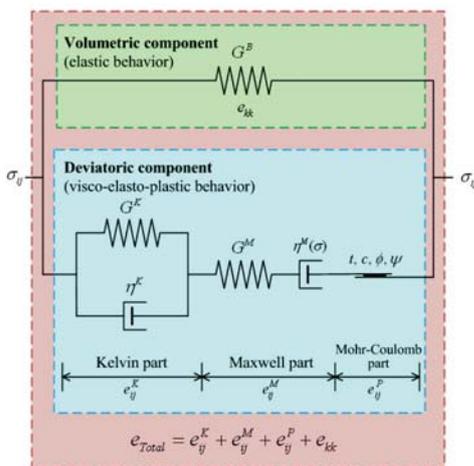


圖 9 朱晃葵等^[41]所提非線性黏彈塑性模式

就建設期程的時間面向而言，涵括了基礎設施自倡議、可行性評估、規劃、調查、設計、施工、建成到營運管理、維護延壽、甚至解編改為他用或是廢棄等階段，時間軸上形成一個工程演化的過程；再就基礎設施的空間維度觀之，則包括了設施用途、其在整個環境、經濟、社會體制中的功能需求以及與其他設施相互依存的影響，空間群體中屬於一個建設競合的關係。在永續發展的框架下，全生命週期的工程思維不僅追求建設經濟成本與財務效益的最大化，更需在地球資源有限的基礎上，朝向最小化使用能源、消耗資源的整體方向上邁進。本文僅就已建成隧道的結構安全維護管理工作，分別自體制、技術以及學理基礎等三方面加以探討。

體制面

早期的安全檢測作業，多數係因應建設高峰期後施工缺陷或瑕疵而進行，沿續新建工程慣用的「一次性」調查、設計、施工思維的情況十分普遍。隧道襯砌結構安全檢測計畫常要求透過十分有限的檢測項目與作業時間，作出安全等級的判定，再針對安全等級不足區段，採用「一次性補強」的作法，新建工程「一勞永逸」的觀念至為明顯。然而，隧道係線狀地下構造物且位於地中，涉及結構安全之異狀徵兆或現象種類眾多，不僅影響因素多、非僅單一旦判定複雜，維護工作欲透過有限的檢測作業時間與人力，掌握襯砌異狀，評估隧道穩定影響因素，量化分析隧道安全程度，實務上仍存在諸多的困難。近年來受惠於非破壞性檢測技術的普及化，襯砌完整性與背後孔洞的檢測項目快速地增加，程度與精度亦大幅提高，營運中隧道結構安全檢測作業已自單一裂縫活動性的調查，逐漸轉化為尺度變異的監測。隧道結構安全檢測與維護管理已基於長期穩定的觀點，納入襯砌結構行為與破壞模式的考量，運用非破壞性檢測技術特性，陸續展開全面性與綜合性的檢測與配合監測作業掌握變異。以往一次性安全檢測的觀念，已轉化為「防災」與「延壽」導向，由長期、定期的檢測與監測作業思維，而以更嚴密、謹慎地方式確保隧道長期的穩定行為與服務品質（王泰典等^[44]）。

隧道結構安全維護管理的架構在先進國家雖已發展多年，但仍無系統性的作法。日本土木學會 2003 年整理了該國國土交通省、道路公團、JR 與東京電力公司的隧道安檢管理流程，提出了隧道結構維護管理的雛型，針對不同階段的隧道提出安全檢測的目的與頻率，但有關實施的具體措施、對應的技術以及掌握異狀的後續處理的作法，仍有許多探討的空間（黃燦輝等^[16]）。

隧道結構的異狀猶如人體的疾病，其察覺發現以及後續處理，由現代醫學歷經長期且大量的研究，已發展出成熟的經驗與系統性的做法，並為許多公共衛生領域與家庭醫學領域的醫生所倡議實施。以人體疾病的發生與症狀的出現時間點為例，醫學界已針對病症狀態、健康檢查、病理檢查與相關的治療時期，建議了適當的時機與對應的對策，如圖 10 所示，其中有關人體病歷紀錄以及健康檢查的觀念，頗值得隧道結構維護管理借鏡參考。

在理念上，早期發現以利早期治療，甚至預防勝於治療，為現代醫學對於疾病防治的最高原則。從疾病的發生、病症的顯露以至於治療有效、及時與否的疾病演化史觀點，俟該疾病的病症顯露，即所謂的症狀期 (clinical phase)，可能存在延誤治療的風險，而病理檢查可能因為病症的糾纏出現，益形複雜與困難，因此現代醫學建議在病症出現前，即所謂的症狀前期 (preclinical screen-detectable phase，又稱 Sojourn time)，經常性地進行各種疾病的篩檢 (screening)，即所謂的健康檢查，且依據了各種疾病的發展演化，有不同的檢查項目與頻率。但是受限於健康檢查的篩檢技術通常無法在疾病一發生即有效檢出，因此必需儘可能地建立個人的病歷史，以利追蹤與早期檢出疾病。

在做法上，一旦病症出現，必需針對該病症進行病理檢查 (specimen examination)，確定病因以對症下藥進行治療 (remedy)，而非進行項目較多、相對而言是比較費時而無目的性的健康檢查。換言之，健康檢查的施行期，應以病症出現以前為佳；病症出現後，則應進行病理組織的細部檢查。

我國的隧道工程維護管理亦有類似現代化醫學公共衛生與家庭醫學領域的倡議。例如在台灣世曦工程顧問公司的經費支持下，由財團法人地工技術研究發展基金會開展的「鐵路隧道維護管理準則與解說之研訂」研發計畫 (地工技術研究發展基金會^[42])，針對我國安全檢測與維修補強經驗相對較多的傳統鐵路隧道，基於國內外現行檢測技術、作業規範以及檢測報告，參考最新的研究成果，考量我國地形與地質特性、以及隧道施工方法等，並納入有關公共工程設施維護策略以及全生命週期維護管理等新觀念，研訂鐵路隧道維護管理準則與解說草案，共七章 26 條，並列舉重要的國內外實際案例與相關技術於 20 個附錄中，可供參考運用。表 1 整理該準則章節架構與條文概述 (王泰典等^[8])。

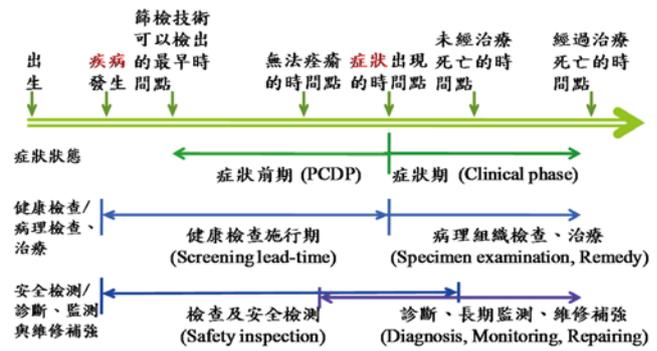


圖 10 現代化醫學公共衛生及家庭醫學領域有關人體病症自然史與檢查的適當時機以及隧道襯砌結構維護管理之安全檢測、診斷、監測與維修補強的關係。

技術面

營運中隧道維護管理體制面的落實包括結構安全檢測、異狀肇因診斷與安全評估、以及維修補強等不同的層面，結構安全檢測的技術課題在於研訂系統化與標準化的作業需求，異狀肇因診斷與安全評估則在探討隧道結構行為偏離設計條件的原因以及對於隧道穩定安全的影響程度，而維修補強則係針對結構安全穩定不足的範圍，透過工程手段恢復其設計功能及結構性能。茲針對隧道維護管理作業體制面最直接相關的部分—結構安全檢測，依據隧道襯砌檢測對象的空間位置與檢測目標的特性，區分為 4 種類型探討如后：

● 襯砌表面

係指隧道內可視的襯砌範圍，交通隧道通常為路面以上的側壁與頂拱，水利隧道則為全斷面的襯砌。襯砌表面檢測係基於隧道存在某種程度以上的異狀時，襯砌表面必然會有某些徵兆，觀察這些徵兆，即可研判隧道襯砌的穩定性或相應的變化。襯砌表面的檢測簡易、直接且迅速，為多數檢測作業所採用，其主要檢測項目包括裂縫分佈、寬度與發展速度、淨空變形、勾縫材料劣化鬆落、滲漏水等。

● 襯砌完整性

係指襯砌狀況與其設計條件的相符程度，包括襯砌厚度、裂縫深度、襯砌強度與劣化程度、鋼筋銹蝕程度與保護層厚度以及其他的襯砌內部缺陷如混凝土蜂窩、析離、中性化、氯離子含量過高、裂隙、含水孔洞等異常現象。檢測結果與設計條件的差異，即為襯砌完整性的缺陷。其中以襯砌厚度、裂縫深度、襯砌強度等檢測結果，較具直觀的量化指標。

表 1 我國鐵路隧道維護管理準則與解說（草案）之章節架構（土工技術研究發展基金會^[42]；王泰典等^[81]）

章節架構		條文概述
第一章 總則	1.1 目的	隧道維護管理之首要目的在於確保隧道應有之使用功能，並藉初次檢測、檢查以及檢測等調查方式，充分掌握影響隧道結構安全性與耐久性之異狀，並適時採取適當之處理對策。
	1.2 適用範圍	(1) 本準則為鐵路隧道維護管理之準則與解說，僅適用於鐵路隧道，其他功能隧道不完全適用。 (2) 本準則係以鐵路隧道之使用功能、結構安全與耐久性等需求綜合考量所制定，有關其他設施之功能需求、服務標準、維護管理作業等項目之詳細或特定要求，應視個案隧道之狀況與需求，另行訂定。
	1.3 名詞定義	略。
	1.4 各維護階段定義	鐵路隧道維護管理可概分為初次檢測、檢查與檢測三大階段辦理與執行。
第二章 基本準則	2.1 維護管理原則	(1) 隧道維護管理原則係先考量隧道之功能需求後，再進行維護管理計畫之規劃。 (2) 營運過程中，除定期進行檢查作業外，應視其需要另進行更加詳細之檢測作業。 (3) 依據隧道結構物檢查的結果與安全等級，採取必要的處理對策。 (4) 檢查的結果與處理對策等，應視隧道維護管理之需求項目，採適當的方法進行記錄，做為後續維護管理之依據。
	2.2 維護管理計畫	考慮隧道的維護管理需求，規劃推動隧道檢查作業及對策方法等維護管理計畫。
	2.3 性能要求	就隧道的維護管理需求而言，鐵路隧道需考慮三大性能要求，分別是(1)使用功能性；(2)結構安全性；(3)結構耐久性；後續安全評估之依據亦必須從這三方面來進行安全等級判定。
第三章 初次檢測	3.1 一般說明	「初次檢測」係指隧道結構物開始使用前所進行的檢測作業。對於老舊隧道或已實施維修補強作業的隧道，第一次檢測作業亦可視為初次檢測。
	3.2 檢測項目	「初次檢測」之首要目的在於建立隧道維護作業所需之基本資料庫，包含資料與文獻調查、環境與氣象調查、結構物調查、地形與地質調查等四大類。
	3.3 檢測方法	各項「初次檢測」項目應採用適當的設備與方法進行。其中結構物調查除採用目視方法檢測外，有關襯砌及結構體表面初始狀況之檢測作業，得採用光學技術類之隧道視砌影像掃描設備與技術為之，建立隧道全線視砌表面初始影像，以利後續隧道維護、檢查與檢測作業之依據。
第四章 檢查作業	4.1 一般說明	「檢查」之目的在於早期發現隧道異狀，可依據初次檢測成果比對研判。並於發現異狀存在時，概略地評估異狀之影響程度，進而判斷有無實施進一步檢測及修復處理措施之必要性。
	4.2 檢查項目	檢查作業主要針對軌道面、襯砌表面、完整性、背面狀態等對象，檢查隧道結構物是否出現異常狀況。
	4.3 檢查方法	主要由檢查員採目視方式，針對檢查項目進行檢查作業，並記錄發現之異狀。
	4.4 等級判定	依據目視檢查結果進行先期安全等級判定，並決定處理對策。
第五章 檢測作業	5.1 一般說明	「檢測作業」之目的在於進一步詳細掌握檢查階段所發現之異狀資訊，判定處理對策之必要性及緊急性，並取得修復設計與施工所需之資料。
	5.2 檢測項目	檢測項目選擇以達成「檢測作業」之目的為原則，除掌握隧道整體狀況外，取得成果應足以進一步探討異狀的原因，研判異狀可能的進展性，提供安全評估及後續維修補強設計等需求。
	5.3 檢測方法	同一檢測項目常可由數種不同方法與技術進行檢測。檢測方法與技術應視「檢測作業」之目的、需求與隧道現場狀況謹慎選擇。
	5.4 安全評估	隧道安全性之要求視隧道種類不同而異，惟皆須滿足 2.3 節有關使用功能性、結構安全性及結構耐久性的要求。安全評估應以「襯砌預鑄環片」或「每次混凝土澆置隧道軸向長度」為最小單元，並依據整座隧道評估結果綜合評述。
第六章 建議對策	6.1 一般說明	(1) 「建議對策」為考量隧道構造物的安全等級、重要性及列車運行需求所建議之對策方法與其實施時機。對策的目的在於減緩隧道構造物的性能下降速度，防範事故與災害的發生。 (2) 建議對策包括：緊急措施、長期監測、維修補強、擴挖或改建。或是同時採用多種對策適當地組合。
	6.2 緊急措施	經由 4.4 節檢查作業被評定為第 III 級，或經由 5.4 節檢測作業被判定為 AA 等級的隧道需實施緊急措施處理。
	6.3 長期監測	「長期監測」係基於可為掌握構造物之異狀變異性、發展性並確保隧道安全等目的而建議實施的對策。
	6.4 維修補強	維修補強以維持、回復或提升隧道構造物的性能為目的，需考量隧道檢測作業成果以及構造物的重要性、施工性、施工時期等，規劃實施。
	6.5 擴挖或改建	隧道維修補強對策或營運功能需求若無法符合淨空要求時，則可考量修挖襯砌或以擴挖隧道之方式進行維修補強作業。若維修補強已無法使隧道恢復原有結構安全與使用需求時，則必須考量隧道改建方案。
第七章 記錄	7.1 一般說明	隧道初次檢測、檢查作業、檢測作業及相關之維修補強資訊，皆應做適當的記錄並保存，以利永續維護管理作業。
	7.2 記錄項目	需記錄與保存之項目計包括：(1) 檢查及檢測作業結果；(2) 相關安全評估與建議對策；(3) 其他有關構造物維護管理所需項目。
	7.3 紀錄保存	檢查、檢測作業以及建議對策等紀錄，應利用適當的方法保存。

● 襯砌背後孔洞

係指襯砌與圍岩間存在間隙、孔洞、空洞、圍岩鬆動與周遭岩層脫離、或周圍存在水包等現象。

● 其他

包括隧道內的路面、排水溝、避車洞等附屬設施以及隧道周圍地盤狀況等。

依據檢測目的與對象的不同，因應的隧道安全檢測

亦有多種不同的對策與配套的技术，且以非破壞性檢測技術應用最多。按國際隧道協會隧道營運維護小組的分類 (Haack et al.,^[43])，非破壞性檢測技術依其應用的原理，可分為光學技術、導電與電子技術、物理波動技術與放射性技術等類別。各項檢測技術皆有其特性與適用情況，若能適時適地加以應用，可收事半功倍之效。反之，若未能妥適運用，則可能無法達成安全檢測之目的。

就技術面而言，應用光學原理的檢測技術適用於三維面狀的檢測，在襯砌表面的檢測作業最為適用，且可快速獲得隧道全斷面的影像，有效掌握異狀在隧道中的位置，因此為檢查與初期的標準檢測的利器。但是此類技術檢測結果多數侷限於襯砌表面的影像，雖可透過異狀形態的辨識與襯砌表面溫度分佈，推求襯砌完整性、背後空洞或異狀的原因，惟有關異狀程度方面的調查成果，需配合其他技術進一步調查。

應用物理波動原理、導電與電子學原理的檢測技術，大多數適用於線狀的調查，應用在隧道襯砌三維全面的調查，必須安排縱橫交錯的綿密測線，困難度甚高，且全斷面調查的作業效率遠不及光學技術類的檢測技術，故其勝場在於襯砌完整性以及背後空洞的檢測。應用物理波動技術的敲擊回音法可有效調查襯砌結構內的面狀裂縫、裂隙，而應用導電與電子原理的超音波、透地雷達與多相線性陣列電磁波雷達，則可檢測出襯砌結構內的異狀分佈位置。此類檢測若配合測量作業精確的定位施測位置，可有效掌握異狀在隧道中的幾何分佈、襯砌結構完整性，有利於後續安全評估作業 (王泰典與黃燦輝^[44])。

混凝土強度試驗採用的史密特錘與測試槍，則屬於局部點狀的檢測，必須結合其他檢測方式，方能提供有用的資訊。

由於應用物理波動原理、導電與電子學原理的檢測技術僅能進行二維線狀的檢測，混凝土強度試驗僅能進行局部點狀的檢測，此類檢測作業皆需配合隧道內測量工作，方能掌握施測位置。因此儘管檢測作業可能相當快速，但其他配合作業的時間與人力卻相當可觀，影響檢測作業整體的速度。黃燦輝等 (2008) 建議了營運中隧道初次檢測、檢查以及安全檢測等不同階段的檢測對象與項目，以及各檢測項目適用的非破壞檢測技術，並比較各種非破壞性檢測技術在不同

檢測階段的適用情況。

各種非破壞性檢測技術均有其使用之限制，如透地雷達之檢測深度有其極限，且襯砌結構若有鋼筋，襯砌鋼筋背後之空洞即不易檢測出來；其他非破壞性檢測技術亦是如此，應用時應特別注意。必要時需與其他現場破壞性檢測配合，驗證非破壞性檢測的結果，增加其可信度。

學理科研面

我國岩石隧道近三十年來大多基於現代化隧道工程理念—新奧工法進行設計與施工，新奧工法發展自歐洲阿爾卑斯山系古老地層的隧道工程，配合源自南非堅硬地層、高岩覆金礦開採所發展的岩體評級分類法 (Rock mass Rating, RMR)，著重快速開挖、輕量支撐，在兼顧隧道施工安全與經濟條件下，尋求開挖面的力學穩定。彼等現代化隧道工法起源的國家，不僅地層古老、地質構造活動穩定，並且岩體強硬、抗風化能力佳、力學特性依時變異輕微，因此隧道開挖後經常無需支撐即可穩定，建成之後亦可服務逾 150 年，建成的岩石隧道常被視為是堅固而且耐久的構造物。我國地處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊斜向聚合帶以及北半球亞熱帶氣候區，持續的板塊推擠在高溫多雨的環境下演化了多變的地形，常見崇山峻嶺與湍急河川，旺盛的地質活動更造成了複雜的地層與地質構造，尤多軟弱、破碎岩石。由我國近十幾年來的隧道結構安全檢測結果統計，超過 2/3 以上的岩石隧道出現襯砌混凝土異狀，包括裂縫、錯移、剝落、變形等，其中許多隧道是採用所謂的新奧工法設計與建造，而且隧道營運的時間未達設計年限一半，部分隧道甚至建成不到十年，襯砌混凝土受力即因超過強度而發生異狀，顯示我國建成岩石隧道的力學行為迥異於國外發展新奧工法的基本假設。

在自然的不利條件所形成的天然屏障下，穿山越嶺而且數量龐大的岩石隧道群遂成為全島社會經濟均衡發展的重要基礎建設，而其維護管理亦成為環境諧和永續發展的關鍵資產要項。相對於我國隧道施工困難，時有異常變形、抽坍、湧水情況，即便建成之後結構穩定仍遜於國外的窘境，我國岩石隧道工程的地質調查、場址特性描述、設計參數研析、設計理念與

設計準則、以至於開挖、支撐施工方式等現行做法，皆有進一步深入檢討與改善的必要。

公共工程委員會於 1999 年推動「台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立」計畫，彙整國內累積之隧道設計與施工實務經驗，成立隧道工程資料庫，據以探討 RMR、Q 等岩體分類法在國內的應用狀況，並發展適用於國內地質狀況之岩體分類系統，即 2002 年底建置完成的 PCCR 岩體分類系統（張吉佐等^[45]）。PCCR 岩體分類法在現行岩體分類系統的概念下，納入我國地質年代、地質構造、岩體強度、地下水對岩體之影響、岩層組成材料等因素進行分類，提供隧道支撐設計的建議。然而，有關開挖工作面遠離後的圍岩變形、以至於營運後隧道結構行為的演化，著墨不多。

依據國內已實施的岩石隧道的安全檢測作業結果，我國隧道襯砌結構常見的異狀形態與發生位置已可初步掌握，其形成的肇因以及主要的影響因素包括：隧道圍岩（土）材料力學特性的依時變化、襯砌材料的老劣化、隧道長期荷載的外力（如邊坡潛移、斷層剪裂帶擾動、襯砌內外水壓反覆、鐵路隧道列車振動、水利隧道仰拱長期的水流磨損）變化、周圍環境（如近接施工）改變、以及突發性外力（如地震、邊坡崩滑、火害）變化等。另外，目前國內已研發了探討岩石隧道營運過程結構行為演化的微變位監測技術、襯砌異狀肇因的診斷流程與相關技術，以及對應的維護對策等，並具數個監測、診斷、修補與成效評估的實際案例驗證，可應用於建成的營運中隧道。未來若能選擇隧道襯砌異狀不同的數個案例應用，探討不同類型結構行為的演化，將更有利於早期檢測診斷、適時適度維護管理，提昇結構穩定與安全，並延長服務年限（王泰典^[22, 26]；李佳翰^[23]；邱雅筑^[24]）。

然而此等本土實務寶貴的經驗尚未如橋梁、邊坡一般，回饋至設計與施工考量，未來如何將影響岩石隧道長期穩定的主要因素回饋至地質調查與工程設計階段，在地質調查與規劃設計階段釐清隧道工程場址特性在全生命週期中可能的變異，在設計階段如何研析岩石隧道開挖面附近圍岩－支撐系統閉合收斂關係可能存在的依時變化，探討其對隧道結構行為演化的影響，如何評估後續營運與維護的成本與資源消耗，

研擬營運階段的維護管理對策，以及研發適於我國地質環境與隧道工程的維修及延壽技術等，皆為我國岩石隧道全生命週期維護亟須精進的科研課題。

結論

我國岩石隧道的工程地質條件不若現代化隧道工法起源的國家，過去約莫三十餘年應用現代化隧道工法修建隧道工程中，遭遇了許多施工困難，孕育了適用於國內地質狀況之 PCCR 岩體分類系統。然而，地質環境差異的影響不僅僅在施工階段，基於強硬岩體穩定地質區發展的現代化工法建成、理論上襯砌承受應力遠小於混凝土強度的岩石隧道，部分開始因超過其強度而出現襯砌裂縫，衍生營運階段的維護課題，顯然已非國外發展的現代化隧道工程理論所能解析描述。基礎設施的維護作業極具地域性，我國岩石隧道的結構行為演化以及維護課題，亟待發展在地化的解決途徑，這部分有待國內各界共同努力，俾符公共工程永續經營的目標。

參考文獻

1. Wang, W.L., Wang, T.T., Su, J.J., Lin, C.H., Seng, C.R., and Huang, T.H., "Assessment of damages in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake," *Tunnelling and underground Space Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 133-150 (2001).
2. Lee, C.H., and Wang, T.T., "Rock tunnel maintenance in Taiwan," 6th Asian Young Geotechnical Engineers Conference, Bangalore, India, pp. 205-217 (2008).
3. 王泰典、邱雅筑、鄭富書、黃燦輝，「隧道結構安全管理新潮流與襯砌非破壞性檢測新技術」，*地工技術*，第 117 期，第 17-28 頁 (2008)。
4. Chiu, Y.C., Wang, T.T., Huang, T.H., and Lee, C.H., "Characterizing anomalies on tunnel masonry linings and associated maintenance consideration," 2nd International Tunnel Safety Forum for Road and Rail, Lyon, France, pp. 45-56 (2009).
5. Wang, T.T., Lee, C.H., Jeng, F.S., and Huang, T.H., "Recent researches on tunnel inspection and safety evaluation in Taiwan," 2nd International Tunnel Safety Forum for Road and Rail, Lyon, France, pp. 57-72 (2009).
6. 孫琪、王文禮、王泰典、曾威量，「集集大地震三義壹號鐵路隧道震害與修復」，*台鐵資料*，第 306 期，第 93-130 頁 (2001)。
7. Wang, T.T., and Lee, C.H., "Life cycle design considerations for hydraulic tunnels - lessons learned from inspection and maintenance cases," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 27, No. 6, pp. 796-806 (2013).

8. 王泰典、劉曉樺、邱文峰、陳俊樺、周永川、何泰源、黃燦輝，「鐵路隧道結構長期穩定影響因素探討暨與維護管理準則與解說研訂考慮」，隧道建設，第 34 卷，增刊，第 63-70 頁 (2014)。
9. 陳福勝、何泰源、趙基盛，「台九線清水隧道安全評估勘查報告」，臺灣公路工程，第 22 卷，第 8 期，第 11-32 頁 (1996)。
10. 陳營富、王泰典，「蘇花公路修築養護的演進與其受沿線工程地質特性的影響」，地工技術，第 131 期，第 47-58 頁 (2012)。
11. 黃燦輝、鄭富書，「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂 (I)」，交通部，台北 (1997)。
12. 黃燦輝、鄭富書，「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂 (II)」，交通部，台北 (1998)。
13. 黃燦輝、何泰源、張吉佐、姚錫齡，「震後隧道結構快速診斷手冊之建立與震後隧道結構快速補強手段」，行政院公共工程委員會委託研究報告，台北 (1999)。
14. 洪宏基等，「橋梁隧道材料腐蝕劣化原因之探討及防治對策 (二) — 隧道篇」，交通部，台北 (2000)。
15. 黃燦輝、林銘郎、王泰典，「隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發」，交通部鐵路改建工程局東部工程處委託研究計畫報告，宜蘭 (2008)。
16. 黃燦輝、鄭富書、王泰典、李維峰，「隧道補強技術與材料之開發」，交通部鐵路改建工程局東部工程處委託研究計畫報告，宜蘭 (2009)。
17. 王泰典、黃燦輝、鄭富書、薛文城、傅子仁，「台灣隧道襯砌異狀類別之探討」，隧道建設，第 27 卷，增刊，第 87-92 頁 (2007)。
18. 李佳翰、王泰典、秦 德，「鐵路隧道結構安全檢測之探討」，2008 岩盤工程研討會論文集，台北，第 579-588 頁 (2008)。
19. 日本土木學會，「トンネルの變狀メカニズム」，日本土木學會，東京 (2003)。(日文)
20. 王泰典，「隧道長期穩定影響因素之研究」，國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告，台北 (2010)。
21. 林信宏，「隧道襯砌影像判釋與異狀特徵化技術暨安檢資料庫之開發」，碩士論文，國立臺北科技大學資源工程研究所，台北 (2010)。
22. 王泰典，「隧道襯砌異狀肇因診斷安全評估技術之研究」，國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告，台北 (2013)。
23. 李佳翰，「山岳隧道襯砌異狀肇因診斷技術研究」，博士論文，國立臺北科技大學工程科技研究所，台北 (2013)。
24. 邱雅筑，「營運中隧道變位模態解析與高精度監測技術之研究」，博士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所，台北 (2014)。
25. Wang, T.T., "Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes," *Engineering Geology*, Vol. 115, No. 1-2, pp. 80-95 (2010) .
26. 王泰典、林信宏、李佳翰、鄭富書，「營運中隧道襯砌裂縫影像判釋暨特徵化與數字化技術」，隧道建設，第 30 卷，增刊，第 100-108 頁 (2010)。
27. Huang, K.P., Wang, T.T., Huang, T.H., and Jeng, F.S., "Profile deformation of a circular tunnel induced by ambient stress changes," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 25, No. 3, pp. 266-278 (2010) .
28. 邱雅筑、陳正勳、王泰典、鄭富書、黃燦輝，「襯砌剖面變形特徵曲線與微變監測技術應用於營運中隧道荷載變化之評估」，中國土木水利工程學刊，第 24 卷，第 2 期，第 101-109 頁 (2012)。
29. Chiu, Y.C., Wang, T.T., and Huang, T.H., "A novel characteristic matrix approach for analyzing displacement patterns of tunnels in operation," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 72, pp. 117-126 (2014) .
30. 陳正勳，「岩石隧道受震行為及破壞機制之研究」，博士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所，台北 (2011)。
31. 陳正勳、王泰典、黃燦輝，「山嶺隧道受震損害類型與原因之案例研究」，岩石力學與工程學報，第 30 卷，第 1 期，第 45-57 頁 (2011)。
32. Kirsch, G., "Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre," *Veit. Ver. Deut. Ing.*, Vol. 42, No. 28, pp. 797-807 (1898) .
33. Jaeger, J.C., and Cook, N.G.W., *Fundamentals of rock mechanics*, Chapman and Hall, London (1976) .
34. Hoek, E., and Brown, E.T., *Underground excavations in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London (1980) .
35. Rabcewice, L.V., "The new Austria tunneling method-Part 1," *Water Power*, Vol. 16, pp. 453-457 (1964) .
36. Rabcewice, L.V., "The new Austria tunneling method-Part 3," *Water Power*, Vol. 17, pp. 19-24 (1965) .
37. Lombardi, G., "The influence of rock characteristics on the stability of rock cavities," *Tunnels and Tunneling*, Vol. 2, pp. 104-109 (1970) .
38. Lananyi, B., "Use of the long-term strength concept in the determination of ground pressure on tunnel lining," *Proc. 3rd Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Denver, 2B, pp. 1150-1156 (1974) .
39. Daemen, J.J.K., "Tunnel support loading caused by rock failure," *Tech. Report MRD-3-75*, Missouri River Division, Corps of Engineers, Omaha (1975) .
40. Daemen, J.J.K., "Problems in tunnel support mechanics," *Underground Space*, Vol. 1, pp. 163-172 (1977) .
41. 朱晃葵、王泰典、黃燦輝，「大地材料依時變形對隧道收斂特性之影響」，第八屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集，台北，第 B7-1~12 頁 (2009)。
42. 財團法人地工技術研究發展基金會，「鐵路隧道維護管理準則與解說之研訂」，台灣世曦工程顧問股份有限公司 102 年度研發計畫成果報告 (2013)。
43. Haack, A., Schreyer, J., and Jackel, G., "State-of-the-art of non-destructive testing methods for determining the state of a tunnel lining," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 117-127 (1995) .
44. 王泰典、黃燦輝，「安全檢測管理準則之建議」，營建知訊，第 309 期，第 31-45 頁 (2008)。
45. 張吉佐、侯秉承、李民政，「台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立 (第三期九十二年度)」，行政院公共工程委員會委託研究報告，台北 (2003)。