

捷運隧道積極式維護管理策略探討

邱雅筑／國立台北科技大學資源工程研究所博士後研究員

王泰典／國立台北科技大學資源工程研究所教授

林志權／台灣世曦工程顧問公司地工部正工程師

李佳翰／聯合大地工程顧問公司規劃設計部經理

黃燦輝／國立台灣大學土木工程學系教授

前言

因應人口成長之交通運量需求，我國捷運系統網絡漸密，2013年每日總運量逼近200萬人次，連結市政服務與民生活動，已成為都會區日常生活密不可分的一部分。針對重要性與日俱增，路網逐年加長的捷運隧道，現今維護管理方式如何？是否足以因應未來的龐大需求？如何更有效地管理並維持捷運隧道之營運？本文首先介紹各種維護管理策略之特色，說明以往捷運隧道全線檢測所建議之維護管理關鍵，並探討維護管理策略由目前預防式管理提升至最高等級之積極式管理的實際作法與內容。

維護管理策略

工程設施的維護管理依據檢測作業頻率、維修實施條件及對使用者造成的影響等，可分為反應式、預防式、預測式以及積極式幾種策略^[1-3]，說明如后：

1. 反應式維護 (breakdown maintenance; run-to-fail maintenance)：檢測作業頻率甚低或無，工程設施或構件使用至損壞後才採取修復或更換措施，為早年傳統的維護管理策略。每次修復費用較高，設施整體穩定運營承擔較大的風險，服務品質隨時間變異較大，長期的維護成本亦高。反應式維護在學理上僅適用於設施或構件損壞不致造成人員傷亡、且對設施停止運營影響程度極低的狀況。
2. 預防式維護 (preventive maintenance)：定期全面實施維修作業，避免工程設施或構件因突發性破壞影響設

施整體的營運，確保管理單位執行工程設施維護管理的照顧責任 (duty of care)。例如採每六個月或是5,000個使用小時為間隔，實施設施某構件的全面更換，避免不定時地更換零星損壞構件。預防式維護策略有利於維護管理人力、物料與實施時程的規劃安排，然而檢測與維修頻率的決定為其一大挑戰，同一工程設施中不同的構件是否應採用不同的維修頻率？每次維修時，設施或構件仍可繼續使用至下次維修並且維持其功能與性能的比例如何？因而經常衍生關於維護間隔時間的討論—為什麼是三年而不是五年？維修的頻率是否過高，因而付出過多維護成本？因此，預防式維護策略較適用於檢測作業不易實施、成本較高、檢測成效較低或是設施中各構件使用年限相近的情況，並逐漸促成了預測式維護管理策略的發展。

3. 預測式維護 (predictive maintenance)：預測式維護透過各種非破壞性檢測技術掌握設施現況，評估工程設施或構件破壞的可能時機，提供維修作業實施決策的依據。若與預防式維護結合，則稱為預防式／預測式維護 (preventive/predictive maintenance, PPM)。相較於預防式維護強調預先定義的定期維修或更換可能劣化或損壞的構件，預測式維護則更重視安全檢測作業以及檢測結果的觀察與判斷，著眼於能反映潛在更大問題的前兆，並依據檢測及研判結果，進行必要的監測。
4. 積極式維護 (proactive maintenance)：基於全生命週期觀點，在設施或構件損壞不可避免的認知下，主動掌握設施或構件特性隨時間的演化行為，研析造成損害的可能原因與影響因素，據以研訂維護管理計畫，

並在設施破壞前完成維修補強作業，避免過多無修復需求的檢測作業。積極式維護的實施必須奠基在對工程設施可能的破壞型態、引致破壞之潛在因子的瞭解上，對主要的潛在致災因子長期及定期監測、分析與評估，以決定是否需要更換或補強工程設施及構件。

圖 1 基於全生命週期觀點整理反應式、預防式、預測式以及積極式等不同維護策略耗費的維護總成本，由左往右隨著維護等級提升，總維護成本中檢測、評估以及維護管理等所佔費用比例隨維護等級提升而增加，但維修補強所佔費用逐漸減少，整體比較而言，積極式維護策略所需的總維護成本最低，且對於設施營運與服務品質的影響亦較小。

台北捷運系統隧道結構安全檢測

歷年隧道結構安全檢測

台北捷運自 1996 年通車營運後逐漸擴建路網，並展開路線結構的維護作業。捷運隧道的維護作業分為故障檢修與預防檢修兩類型，前者係構件發生破壞且不堪使用時進行更換，後者包括平時檢查、定期檢查與特別檢查。整體而言，預防檢測的作業內容與黃燦輝等^[4-6]建議的隧道結構安全檢測相似。

平時檢查主要由捷運公司人員執行，除了配合路線巡查每週執行的數次經常性檢視外，檢測工程師每半年乘車進行一次車巡，每年步行進行巡視檢查，採目視檢查隧道表面及附屬設施是否出現異常狀態，例如滲漏水、襯砌裂縫或破損（以下以異狀簡稱之），或是既有異狀是否出現顯著的變異，記錄方式以照片、文字及表格式為主。定期檢查則委託專業工程顧問公

司辦理，約每 5 ~ 6 年檢查一次，詳細調查隧道表面異狀，評估隧道結構各部件的狀況及整體營運安全的評級，記錄方式包括照片、文字、表格、襯砌表面影像以及異狀分佈展開圖，並針對異狀顯著區段，考慮隧道整體穩定性進行初步分析評估，確保隧道結構穩定及營運安全。特別檢查係於特殊情況，例如水災或地震發生後進行的臨時性檢查，掌握隧道結構受影響的狀況以及採取緊急措施的必要性及適當性，評估持續營運的安全性或建議快速恢復營運之對策。

台北捷運營運後，於 2002 及 2008 年分別完成一次全線定期檢查，檢測項目大致相同，包括隧道表面影像掃描、襯砌背後空洞、混凝土強度、裂縫深度、鋼筋腐蝕及水質檢測等（表 1）。檢測成果依據結構體的特性以及異狀種類、位置、規模、發展狀況及對隧道結構安全等因素，並考慮對營運影響的程度及維修的迫切性等，自狀態「佳」至「劣」分為 A、B、C 至 D 共 4 級，表 2 為潛盾隧道常見幾種異狀的分級標準。最後再以整座隧道或車站之間的隧道區段為單位，參考 DERU 評估準則及黃燦輝等^[6]的建議，評估不同隧道之間的安全等級差異，提供維護作業的參考依據。有關隧道結構檢測成果的安全評估，可參考「隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發總結報告書」^[6]和「捷運設施維護管理研討會」^[7]等研究成果相關建議。

表 1 台北捷運全線隧道定期檢測項目與數量^[8]

		2002 年	2008 年
隧道總長		68 km	78.3 km
檢測階段	初步檢測	隧道結構影像掃描檢測	TS360 (68 km) / GRP5000 (78.3 km)
		過河隧道覆土厚度檢測	3.3 km / 3.7 km
		隧道目視檢查異狀評估	隧道 68 km 及附屬設施 / 隧道 78.3 km 及附屬設施
	詳細檢測	隧道斷面檢測評估	TS360 每 50 m 施測一處 / GRP5000 每 50 m 施測一處
		隧道襯砌背後空洞檢測 (透地雷達)	1790 m / 2355 m
		混凝土強度試驗 (史密特錘)	186 組 / 215 組
		裂縫深度檢測 (超音波)	106 組 / 135 組
		鋼筋腐蝕檢測 (鋼筋腐蝕儀)	0 組 / 1 組
		滲漏水水質檢測 (鈉、鎂、氯等有害物質)	20 組 / 4 組

※ 初步檢測係針對全線進行普遍性的異狀檢查、記錄及統計分類，詳細檢測係依初期檢測成果，針對典型或特殊之異狀，進行破壞性檢測，據以研擬維修補強對策。

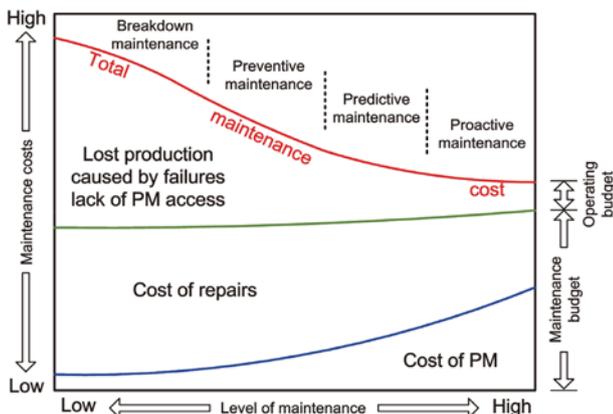


圖 1 維護管理策略與維護成本關係

表 2 台北潛盾隧道異狀分級表^[8]

異狀等級	等級分類原則
A	1. 裂縫寬度小於 0.2 mm。 2. 裂(接)縫或螺栓孔/灌漿孔有滲水(潮濕)狀況。 3. 無異狀或雖曾有變形、移動、沉陷等,但已停止亦無再次發生之可能。
B	1. 裂縫寬度大於 0.2 mm,小於 0.5 mm。 2. 裂(接)縫或螺栓孔/灌漿孔滴水且有疑似銹染狀況。 3. 雖有變形、移動、沉陷等,但惡化速度緩慢。
C	1. 裂縫寬度大於 0.5 mm,小於 1 mm。 2. 裂(接)縫或螺栓孔/灌漿孔滲水狀況略帶水壓(噴水)且帶出土砂、軌道區上方有滴水。 3. 因變形、移動、沉陷等,將隨即導致結構物之功能降低。
D	1. 裂縫寬度大於 1.0 mm。 2. 裂(接)縫或螺栓孔/灌漿孔湧水嚴重,且有大量銹染。 3. 鋼筋鏽蝕外漏。 4. 因變形、移動、沉陷等,使結構物之功能明顯降低。

台北捷運為提供早出晚歸民眾更便捷的服務,每日營運時間甚長,隧道檢測作業僅能在凌晨 1 點 30 分至 3 點 30 分之間進行,因此必需採用現代化檢測設備快速精準地掃描襯砌表面影像,縮短現場檢測作業時間,配合室內作業透過軟體判釋襯砌表面異狀並繪圖標示註記後,再赴現場查核比對。例如 2002 及 2008 年的檢測作業即分別採用瑞士 Amberg 公司的 TS360 系統以及德國 Leica 公司的 GRP5000 系統執行襯砌表面影像掃描作業。

台北捷運隧道常見異狀

依據台北捷運 2002 年及 2008 年所執行之全線定期檢測成果以及平時檢查報告,捷運隧道狀態良好,結構安全無虞。隧道異狀發生在局部區段,其種類、位置與隧道結構型式受開挖施工方式影響。明挖覆蓋隧道的場鑄襯砌結構具有類似山岳隧道常見的襯砌裂縫異狀,但無顯著的單一裂縫。明挖覆蓋隧道與潛盾隧道交界處則有平行於隧道軸向的縱向裂縫出現^[8,9]。潛盾隧道以預鑄環片為襯砌,結構設計剛度與施工品質俱佳,每環長 1.0 m,包含 6 片環片(3A+2B+K,圖 3a),相鄰環與環之間的 K 環片位置交錯出現,設計應力相較於其他環片形式如 5A+1K,所受彎矩較小,因此環片裂縫極為罕見,僅有部分角隅位置略有破損,滲漏水則是最常

見異狀。滲漏水常發生於:1. 環片片間接縫(圖 2a)、2. 環片片間螺栓孔(圖 2b)、3. 背填灌漿孔(圖 2c)、4. 車站與隧道連接段界面(圖 2d)以及 5. 仰拱等位置(圖 2e)。環片片間滲漏呈線狀,螺栓孔及背填灌漿孔附近則呈點狀,多屬潮濕至滴水以下的等級(區分原則如表 3)。然連接界面區段滲漏水量較大,並有水漬與碳酸質白華結晶等現象出現。

表 3 因漏水產生異狀之評定基準^[8]

異狀種類 隧道等級	等級分類原則	結冰及土砂流出
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。
乙	由襯砌混凝土之龜裂處滴水,在最近將來可能損及車輛之安全。	因排水不良,可能導致路面積水。
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。
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。

捷運隧道變位機制及異狀影響因素

台北捷運隧道大多數建造於土層中,而且除了車站以及軌道系統營運需求必要的橫渡線區段外,主要採用潛盾機開挖配合預鑄環片支撐及襯砌,隧道結構在橫斷面上的整體剛度遠高於周圍土層或軟弱岩層,在縱斷面上連接車站或橫渡線明挖覆蓋段的邊牆可視為固定端,隧道長度皆為直徑的百倍以上,因此縱向勁度遠小於橫向勁度,一旦隧道因周圍環境的變化造成襯砌環片變位,軸向前後相鄰環片變位易於橫向左右相鄰環片,量值通常也較大;加上環片係預鑄鋼筋混凝土構造,螺栓榫接^[10-12](圖 3b)處因施工無可避免的公差,造成勁度減降,隧道受力後每一環片的變位相對難於其四週的榫接處,因此隧道結構主要以環片為單元進行應力應變調整,變位機制迥異於採用一

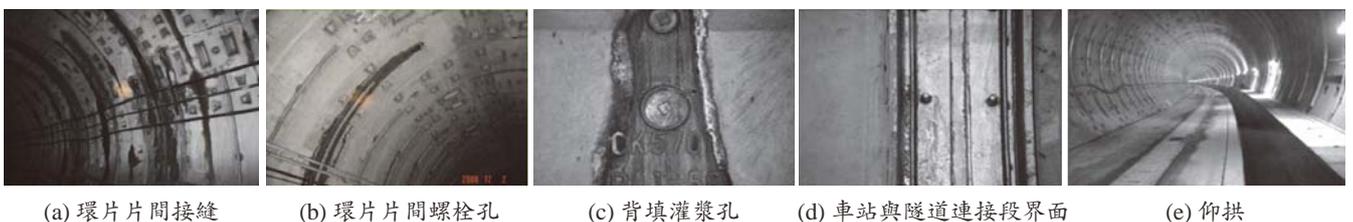


圖 2 台北捷運隧道常見滲漏異狀

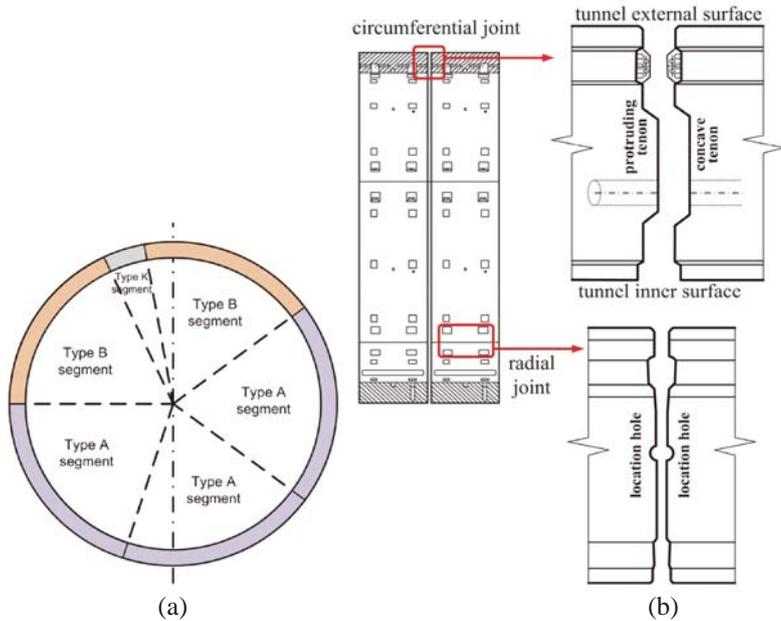


圖 3 潛盾隧道環片襯砌組件示意圖

次支撐與二次襯砌構成的岩石隧道行為。台北捷運隧道滲漏水現象最常發生於環片之間，即說明了潛盾開挖環片支撐隧道的變位機制。

捷運隧道周圍環境變化的影響因素包括地震、地下水位升降、地層差異沉陷、近接施工及材料弱軟化等因素，並且可能交互影響。例如地震可能造成液化，致使土層材料弱軟化；人為抽水造成的局部地下水位升降可能造成滲流應力，淋洗土層中的細粒料造成弱軟化，並導致差異沉陷；捷運隧道若建造於靈敏性土層中，列車行駛引致振動亦可能逐漸弱軟化周圍岩土。另外，都會區常因捷運帶來的便捷交通而大興土木，高樓建築基礎施工可能對鄰近捷運形成近接施工效應，而建成後結構載重復形成二次擾動，造成隧道沿線地表垂直差異沉陷（圖 4a）或水平不均變位（圖 4b）^[10,12-14]。圖 4a 為隧道上方／下方局部地層不均勻沉陷、或超額荷載造成沿隧道軸向產生的垂直沉陷，其量值變化特性類似高斯分布的鐘形曲線；圖 4b 則示意近接施工導致開挖周圍地層解壓，捷運隧道因而朝向解壓側變位。若地層具非均質與非均向特性，隧道可能同時出現垂直向與水平向不均變位。依據台北捷運 2002 及 2008 年檢測成果進一步比對異狀發生位置顯示，近接施工的相關程度最高。

吳宗翰等^[15]採用三維有限差分法，考慮台北市松山層工程特性及典型的捷運隧道結構，模擬近接施工造成的地層與隧道變位。在捷運隧道覆蓋深度 20 m、施工範圍距離隧道中心 9 m、開挖寬度及深度分別為

40 m 及 40 m 的條件下，隧道變位量超過 1.5 mm 的範圍約 40 m，超過 1 mm 的範圍約 60 m。Shen et al.^[12]以上海地鐵隧道實際監測所得沉陷值為依據，透過數值模擬研析預鑄環片襯砌變位形態（圖 5），顯示相鄰的環和環之間兼有旋轉與錯移現象，但錯移行為主控了隧道變位特性，類似的研究成果包括 Nishino et al.^[16]，Shiba et al.^[17]，Shiba et al.^[18]，Wang^[19,20]等。

以潛盾隧道沿線地層不均勻沉陷造成頂拱位置環片變位為例，頂拱環片之間的變位過程可分為三個階段（圖 6），第一階段錯移量小於相鄰環片之間榫接的間隙，榫接相對移動但於垂直向未接觸，環間螺栓逐漸受影響而拉伸（圖 6a）。第二階段隧道垂直

變位增加至環間榫接恰接觸，隧道內相鄰環片有約數毫米的相對錯移（圖 6b）。第三階段中，相鄰環片榫接接觸位置和螺栓穿越榫接處因環片向下垂直變位而出現應力集中，螺栓的 S 形變位、剪應力與拉應力漸增，持續至環片榫接的接觸點或螺栓通過榫接處超出強度而破壞，或是螺栓發生剪力／張力破壞。爾後倘隧道不均勻沉陷繼續累積，相鄰環片可能因榫接接觸邊界破壞而碎裂至襯砌表面，螺栓突然發生大規模錯移後致使軌道扭曲、仰拱噴泥／湧水，大量地下水自頂拱入滲隧道內。

Wang et al.^[10]依據上海地層沉陷資料以及地鐵隧道結構特性參數，強制隧道仰拱變位模擬結果顯示，地層沉陷造成隧道仰拱陷落達 50 mm 時，環間錯移量約 0 ~ 4 mm（圖 6a 第一階段）；仰拱沉陷量約 37 mm 時，環間錯移量約 5 mm，相鄰環片分離約 1.5 mm（圖 6b 第二階段）；仰拱沉陷 50 mm 時，環間錯移 7 mm 且張開約 3 mm。此結果說明採用預鑄環片為襯砌結構為主的捷運隧道，在損壞過程中隧道的絕對變位遠大於相對變位，換言之，隧道內空變形、真圓度等指標僅反映局部的隧道變位，不利於掌握營運中隧道整體的變位特性。

同樣地，潛盾隧道側向出現不均變位時，環間最大錯移量出現於左右側壁，螺栓在水平向剪動及拉伸。

捷運隧道之滲水與白華現象成因並非單一，可能為非單次事件所致，包含環境條件的連續變化、環片結構／防水設施材料劣化及前期施工之影響等，都可能引致連續或是間歇的滲漏水現象，而因水中碳酸鈣析出，故滲漏處常見白華現象。

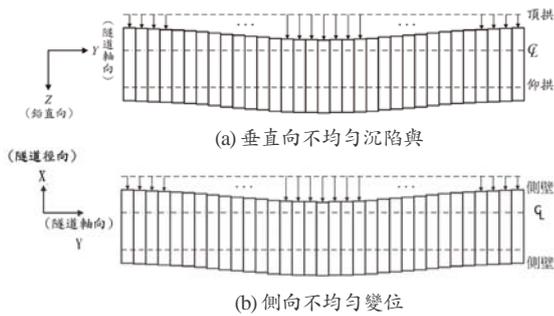


圖 4 捷運隧道常見變形行為

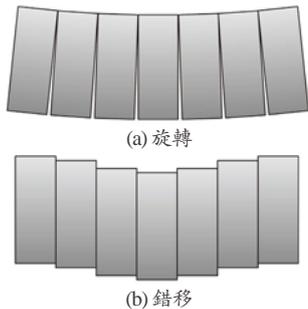


圖 5 潛盾隧道垂直向不均匀沉陷引致之襯砌變位形態

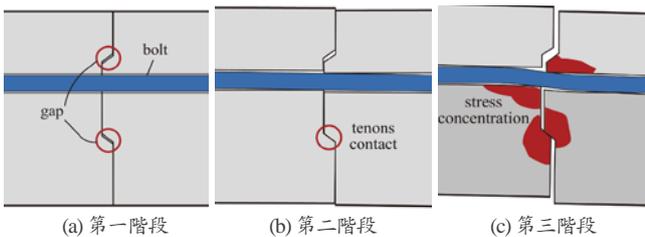


圖 6 潛盾隧道垂直向不均匀沉陷引致之頂拱環片變位過程

積極式維護管理策略

隨著捷運路網逐漸完善，營運路線里程隨之增加，隧道維護總長度漸漸攀升，全線最早興建完成（1992年）、位於台北車站至台大醫院間的潛盾隧道完工迄今已逾 22 年，投入營運服務也超過了 17 年。儘管捷運隧道整體結構穩定，性能良好，但維護工作日益繁重，成本也逐年增加；加上捷運路網的便捷加速了社會脈動，沿線各類型的開發計畫所造成的近接施工、構造物周圍環境變化等，持續考驗路線高服務品質的延續度；再者，全球氣候變遷造成極端氣候事件規模與頻度增加，基礎設施遭遇超越設計條件的不確定性大幅增加，捷運隧道維護管理時時面臨全新的挑戰。

實則全球捷運隧道因結構問題暫停或影響營運事件頻傳，例如 1994 年美國北嶺（Northridge）地震造成捷運隧道損壞、1995 年日本 Hyogoken-Nambu 地震造成神戶地鐵損害、1996 年美國洛杉磯紅線捷運隧道因地下水化學侵蝕（chemical-laced）造成結構穩定問題、2012

年美國紐約捷運隧道受 Sandy 颶風影響造成結構損壞、2014 年加拿大多倫多地鐵因近接施工不慎擊穿營運中隧道襯砌等事件，皆為都會區捷運隧道維護管理的夢魘。

地震造成營運中基礎設施的直接衝擊，透過維護管理途徑並無法全面防範，但是基礎設施受震影響程度以及其後續耐震能力的評估，有賴平時所建立基礎設施建成狀態、營運期間結構演化變位特性等基本資料交叉比對。而台北捷運隧道繼 2002、2008 年實施全線定期檢測後，已掌握潛盾隧道襯砌異狀的影響因素主要為近接施工造成隧道沿線地層的不均勻變位，經彙整比較國內外都會區捷運營運期間隧道結構特性變化相關研究與檢測報告，瞭解潛盾開挖預鑄襯砌環片支撐襯砌的隧道三維絕對變位，具有早期反映結構行為不同演化階段的意義。爰此，台北捷運潛盾隧道已具備實施積極式維護策略的基本條件。

邱雅筑等^[21]提出營運中三維微變位監測技術，透過差分全球定位系統與新型全測站之自動目標識別、照準及放樣功能，可高精度地測量隧道剖面 3D 絕對座標，並透過前後測量結果求得襯砌變形曲線，比對典型襯砌變形特徵曲線，從而掌握隧道周圍應力變化之趨勢差分。王泰典^[22]提出隧道潛在破壞預想模式，分別透過數值模擬分析與隧道內實際量測，驗證於長隧道中變位監測的可行性。賴彥儒等^[23]提出場址變位之跨尺度多時序量測整合技術，針對不同長度、曲線半徑隧道設計不同的測量控制網形，並經數值模擬實驗與大型木造隧道實驗驗證，對於頂拱位置 2 mm 變位具有 95% 信心水準可偵測度，顯示我國自行研發的隧道微變位監測技術已達 mm 級變位監測精度。

捷運隧道由預防式／預測式維護管理策略邁向積極式維護管理的過程，必須掌握反映隧道結構行為及可能影響營運的變位徵兆，建立有效的長期監測技術並針對具徵兆區段進行頻率較高的定期監測，藉此研析隧道結構特性長期的變化。具變位徵兆區段長度通常遠小於全線隧道長度，因此長期且頻率較高的監測作業不僅可以更有效地嚴密監測影響捷運營運的區段，並能透過長期監測結果建立隧道變位徵兆與潛在肇因之關係，回饋修正檢測頻率。此外，配合現行「大眾捷運系統兩側禁建限建辦法」於路線鄰近的開發行為執行的監測作業，亦可納入或結合全線維護管理作業取得資料，改善不易整合鄰近區域不同時期近接施工歷次累積的隧道總變位問題。

台北捷運潛盾隧道 2 次全線定期檢測取得了豐富而寶貴的成果，在國內隧道維護觀念漸趨成熟並建立自主性檢測與監測技術的基礎下，近期展開的第 3 次全線定期檢測作業即捨棄傳統施工控制用的真圓度檢測，改為三維絕對坐標測量，並建立各隧道、站間隧道區段控制點，未來可提供隧道具有變位徵兆區段三維微監測的基準，配合定期進行的襯砌表面影像掃描，應可早期發現襯砌表面異狀，適時掌握隧道結構行為演化，及時執行必要的修護作業，朝向積極式維護管理途徑邁進。

結論

隨著捷運系統逐漸成為都會區交通動脈，捷運隧道在歷經最長超過 17 年之營運後，未來勢將面對與日俱增之運量需求。奠基於過往夜以繼日，全年無休地提供便捷交通的經驗，最早開始提供服務的台北捷運隧道在 2002 年及 2008 年所執行之檢測作業^[8]，確保了過往捷運隧道之安全性。根據從前全線隧道檢測調查報告，近接施工係捷運隧道最主要變位肇因，然而捷運帶動鄰近區域蓬勃發展，商業與居住需求日益提升，更使鄰近區域工程活動越加頻繁。面對日漸增加的維護管理需求，引入新觀念和新方法，以更有效率、更經濟的方式維持捷運工程設施營運，為不可擋之趨勢。未來捷運隧道之積極式維護管理，將引入三維絕對坐標量測，掌握捷運隧道異狀徵兆於其微小之初，控管近接施工對捷運隧道之影響。

參考文獻

- Leger, J.B. and Morel, G., "Integration of maintenance in the enterprise: towards an enterprise modelling-based framework compliant with proactive maintenance strategy," *Production Planning and Control*, Vol. 12, No. 2, pp. 176-187 (2001).
- Thompson, T. and Granger, M., "What Price Preventive Maintenance?" *Proceedings of the Water Environment Federation (WEFTEC)*, New Orleans, USA, Session 51 through Session 60, pp. 467-481 (2004).
- Muller, A., Suhner, M.C. and Iung, B., "Formalisation of a new prognosis model for supporting protective maintenance implementation on industrial system," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 93, No. 2, pp. 234-253 (2008).
- 黃燦輝、鄭富書、王文禮、傅子仁、張清秀、林銘郎、洪如江，「隧道工程技術及安全檢測規劃：老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂 (I)」，交通部委託研究計畫報告 (1997)。
- 黃燦輝、何泰源、楊國裕、鄭富書、黃泰霖，「隧道工程技術及安全檢測規劃：老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂 (II)」，交通部委託研究計畫報告 (1998)。
- 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 改建工程局東部工程處委託研究計畫報告 (2008)。
- 臺北市府捷運工程局、國立台灣科技大學公共資產與設施管理研究中心，「捷運設施維護管理研討會」，臺北市府捷運工程局 (2009)。
- 洪銘遠、李順敏、李魁士、周永川、林志權，「捷運隧道自動化檢測與異狀改善技術探討」，*地工技術*，第一百三十六期，第 7-14 頁 (2013)。
- 張武訓、莊建忠、黃志棟、王志欽，「新莊線 (市區段) 潛盾隧道環片灌漿孔封圈環塞止水裝置之實務探討—以 CK570A 標為例」，*捷運技術半年刊*，第四十二期，第 115-130 頁 (2010)。
- Wang, Z., Wang, L.H., Li, L.L. and Wang, J.C., "Failure mechanism of tunnel lining joints and bolts with uneven longitudinal ground settlement," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 40, pp. 300-308 (2014).
- Arnau, O. and Molins, C., "Three dimensional structural response of segmental tunnel linings," *Engineering Structures*, Vol. 44, pp. 210-221 (2012).
- Shen, S.L., Wu, H.N., Cui, Y.J. and Yin, Z.Y. "Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 40, pp. 309-323 (2014).
- Zhang, J.F., Chen, J.J., Wang, J.H. and Zhu, Y.F. "Prediction of tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft soil," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 36, pp. 24-33 (2013).
- Devriendt, M., Doughty, L., Morrison, P. and Pillai, A. "Displacement of tunnels from a basement excavation in London," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, Vol. 163, Issue GE3, pp. 131-145 (2010).
- 吳宗翰、王泰典、黃燦輝，「近接施工引致潛盾隧道三維變形特性之研究」，2012 岩盤工程研討會論文集，苗栗，第 429-438 頁 (2012)。
- Nishino, K., Yoshida, K., Koizumi, A., "In situ tests and consideration on shield tunnel in the longitudinal direction," *Proceedings of Japanese Society of Civil Engineering*, Vol. 12, pp. 131-140 (1986) (in Japanese).
- Shiba, Y., Kawashima K., Obinata N., Kano T., "An evaluation method of longitudinal stiffness of shield tunnel linings for application to seismic response analysis," *Proceedings of Japanese Society of Civil Engineering*, Vol. 10, pp. 319-327 (1988) (in Japanese).
- Shiba, Y., Kawashima, K., Obinata, N., Kano, T., "Evaluation procedure for seismic stress developed in shield tunnels based on seismic deformation method," *JSCSE* 1989, pp. 385-394 (1989) (in Japanese).
- Wang, R.L., "Factors influencing deformation of Shanghai soil metro tunnel and deformation analysis," *Underground Engineering and Tunnels* 2009, Vol. 1, 1-6 (2009a) (in Chinese).
- Wang, R.L., "Longitudinal deformation analysis for Shanghai tunnel constructed by shield method," *Underground Engineering and Tunnels* 2009, Vol. 4, pp. 1-6 (2009b) (in Chinese).
- 邱雅筑，「營運中隧道變位模態與高精度監測技術之研究」，博士論文，國立台灣大學土木工程學系，台北 (2014)。
- 王泰典，「國道長隧道維護管理系統—隧道襯砌潛在破壞模式研究」，中興顧問社委員研究計畫成果報告 (2012)。
- 賴彥儒、王泰典、黃燦輝，「場址變位之跨尺度多時序量測整合技術—以隧道工程為例」，2014 岩盤工程研討會 (已接受)。