

台灣公路隧道維護管理系統開發與挑戰

蕭富元¹, 高憲彰¹, 邵厚潔², 林庭彥², 許鈺漳³

(1. 財團法人中興工程顧問社 大地工程研究中心, 台北 11494; 2. 公路總局蘇花公路改善工程處, 宜蘭 27050;
3. 公路總局, 台北 10863)

摘要:公路隧道多位在地形險峻或交通要道上,若隧道無法繼續營運或服務功能大幅降低時,對交通運輸影響衝擊極大,故營運隧道的妥善維護管理極為重要。隧道維護管理所涉及的領域與資料類型甚廣,資料量龐大且繁瑣,傳統的紙本紀錄方式長期保存不易,易造成資料散失,同時資料調閱耗時,並且零散無系統性,資料無法有效管理與充分利用。在管理資源有限情形下,目前全球許多先進國家已採用資料庫系統進行營運隧道的管理,透過瞭解隧道結構安全性能與服務品質變化,進而採取相對應的管理作為與資源的調度分配。本文乃介紹臺灣公路隧道維護管理系統的開發情形,說明系統架構及主要模組功能,並且進一步探討所面臨的挑戰與因應對策,期待臺灣公路隧道工程可朝向全生命週期管理目標邁進。

关键词:營運隧道;維護管理;資料庫系統

中图分类号: O 319.56

文献标志码: A

0 引言

臺灣山多平原少,海拔在五百公尺以上的山地約占全島面積的 54%,隧道在台灣交通運輸網中扮演重要的角色。隨著臺灣社會發展漸趨成熟穩定,新的交通運輸建設需求已趨緩,在建設高峰期已過,新建量體成長率趨緩情形下,隨之而來的則為建設高峰期所留下的大量基礎設施的營運維護與改善問題。台灣現在目前營運中省、縣、鄉公路隧道將近 300 座,總長度近 50 公里^[1],同時根據 2017 年公路總局統計資料顯示,臺灣公路隧道長度近年來以每年約 9500 公尺的速率增加^[2]。目前營運中的公路隧道,部分已有二、三十年的營運歷史,甚至四、五十年者亦不在少數,而所有隧道都有其使用壽命,營運中隧道可能因外力變化、襯砌材質老化或漏水等因素,導致其使用年限或服務品質降低。由於隧道多位在地形險峻或交通要道上,當隧道無法繼續營運或服務功能大幅降低時,對交通衝擊影響極大,因此適當的維護管理,提昇隧道服務品質,並延長其使用壽命實為必要。

隧道維護管理所涉及領域與資料類型甚廣,包括設計資料、施工資料(如圍岩地質、襯砌支撐工、開挖出水量、隧道變形監測、重大抽坍事件、竣工圖資等)、維管資料(如檢監測資料、巡檢資料、襯砌異狀變化、結構劣化等),資料量龐大且繁瑣,傳統書面紙本紀錄方式,資料長期保存不易,易造成資料散失,同時資料調閱耗時,且零散無系統性,無法進行有效管理與充分利用,因此架構於資料採集、儲存、分析及顯示之資料庫系統,已成為當前隧道營運管理的潮流與趨勢。

近年來在管理資源有限情形下,要進行有效的維護管理,確保隧道用路人安全,目前許多先進國家已採用資料庫系統進行隧道維護管理作業,透過瞭解隧道結構安全性能與服務品質變化,進而採取相對應的管理作為與資源的調度分

配。本文乃介紹台灣公路總局隧道維護管理系統的發展構想與進展,期待台灣公路隧道的維護管理能朝向優質化的目標邁進。

1 現行公路隧道養護方式

台灣公路隧道數量龐大,而且種類繁多(包括裸岩隧道、混凝土隧道、明隧道、長大隧道、單線小斷面隧道、深埋隧道等),隧道完工年代及施工方法不一(如 ASSM 工法、NATM 工法等),隧道營運所面臨的問題亦不盡相同。目前台灣公路隧道的養護作業主要依循 2012 年所頒行的「公路養護規範」,規範說明:「隧道內一旦發生事故易致重大災損,故隧道主體及附屬設施必須經常維護,以維持交通安全。公路養護管理機關應透過各種養護巡查、檢測與維修程序等,以維持隧道之安全」。公路總局乃根據上述「公路養護規範」內容,於 2013 年針對所轄管公路頒布「公路養護手冊」^[3]。「公路養護手冊」對於巡查方式有詳細規定,說明如下:

■經常巡查:經常巡查從車上以目力檢視公路各種狀況。若發現有疑惑時,應下車詳查。

■定期巡查:在設定期間內,以目力或輔以簡易器具巡查轄區內公路,以維護公路應有之功能。個別設施得以定期檢查(測)為之。

■特別巡查:在颱風來臨前後,豪雨、洪水、震度 4 級以上之地震或重大交通事故後,立即巡查公路構造物。

巡查人員攜帶的器具包括攝影機(行車紀錄器)、照相機、卷尺、粉筆、手電筒等;特別巡查應視情形酌加其他檢驗量測儀器,以備應用;出發前宜檢核及攜帶交通管制用之臨時器材(如交通錐、警示燈或紅旗等)。構造物損壞部位照片拍攝時,可將標準尺置於附近,同時納入攝影範圍內,可供日後估計構造物損壞規模;如構造物損壞範圍過廣,無法

第一作者:蕭富元(1966-),男,台灣台東人,博士,主要從事岩土工程、地下工程等領域的科研與技術服務工作。E-mail: fuyuan@sinotech.org.tw

清晰地納入同一鏡頭時,除應拍攝構造物全景外,其損壞部位可分段或於不同角度拍攝數幀,以瞭解構造物損壞實態。照片應註明拍攝地點、拍攝日期及巡查項目,並可附於巡查報告表。巡查如發現缺失應於巡查報告表或相關電子系統上登載,並於缺失位置依該性質辦理特別檢查或檢測。

隧道養護除例行巡查外,「公路養護規範」並規定公路養護單位應進一步辦理隧道檢測。隧道檢測類別包括:

■定期檢測:為掌握隧道的健全,及早發現並評估造成功能減低或異常之損傷及其原因,而定期進行之檢測。

■特別檢測:當重大事故或災害發生後,為了解損傷程度及防止災害擴大而實施之檢測。

有關公路隧道檢測頻率,各級養護管理單位則視公路重要性及單位編制,自行訂定檢測頻率。原則上完工五年內的新建隧道若無特殊情況,應自完工後第六年起進行第一次定期檢測,爾後定期檢測的間隔以不超過兩年為原則。定期檢測項目則包括襯砌裂縫、襯砌剝落、襯砌材料劣化、內空變形、滲漏水、洞口邊坡、鋪面、排水及機電、消防設施等;而重大事故災害發生後,或巡查發現翼狀級養護單位認為必要時,得辦理特別檢查,特別檢查項目則視事故、災害的嚴重狀況巡查發現特殊翼狀之情形,訂定檢測項目。

隧道檢測結果評估,乃依據劣化程度與範圍,評定對隧道結構安全與服務影響程度。檢測結果應留存建檔,建立資料庫,以便後續檢測時資料比對,追蹤瞭解隧道結構安全性與服務性的變化情形。對於隧道通過地質敏感區(如斷層、順向坡等)或施工過程曾出現抽坍不穩定的區段,必要時應安裝監測系統,監測隧道及洞口邊坡長期穩定狀況;隧道襯砌如發現具有:(1)異狀或損壞、(2)襯砌或路面滲水、(3)襯砌鋼筋腐蝕或混凝土剝落、(4)隧道鋪面隆起、沉陷、錯開或開裂、(4)隧道洞口段襯砌因邊坡滑動造成損壞等情形時,應查明原因,並採用適當方法予以修復。若嚴重損壞,經評估後無法修復時,可考慮改建。

台灣目前對於隧道巡查與檢測頻率及執行方式有明確規定,但現行的養護作業仍停留在反應式維護階段,意即被動等待異狀或損壞發生後,再進行必要的因應作為。此種維護方式會降低隧道服務性能與使用年限,歐洲自1999年起連續發生多起重大公路隧道事故後,全面性安全風險評估與主動式維護管理作為逐漸引起廣泛重視。目前國際上的管理思維,已由以往一次性的安檢與修復觀念,轉化為預防式維護與「延壽」導向^[4],透過掌握隧道性能與風險承受程度,依據維修迫切性與經費狀況,進行預防性的隧道維護作業,避免服務性能提早大幅下降,並可達設施延壽的目的,如圖1所示。

而在維護預防與延壽的理念下,隧道資料的掌握便極為重要,資料型態包括「維護項目」、「空間位置」及「時間序列」等,資料量龐大繁瑣,保存不易,管理人員亦可能異動,因此架構於採集、儲存、分析及顯示之資料庫系統,已成為當前隧道營運管理之潮流與趨勢。

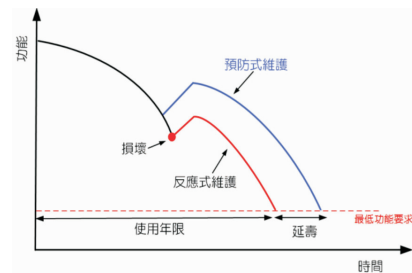


圖1 隧道服務性能與維護方式關係圖

Fig.1 Relationship between tunnel function level and maintenance concept

2 系統發展構想

公共工程自規劃、設計、施工、維護管理、到除役(或更新)等各個階段,視為一個整體的全生命週期觀念,已在國際間普遍獲得認同^[5-6]。本文所開發的隧道維護管理系統,乃將全生命週期概念導入公路隧道的維護管理作業,以新近通車或即將完工的蘇花公路改善工程隧道群(包括蘇澳隧道、東澳隧道、東岳隧道、武塔隧道、觀音隧道、谷風隧道、中仁隧道、仁水隧道等,總長24.5公里)及南迴拓寬工程-安朔草埔隧道(長約4.6公里)為對象,並依據上述公路養護手冊內容,建立一套具有積極性作為之全生命週期隧道維護管理系統。透過統整隧道設計、施工、安全檢查、監測及維修等資料,除可進行各項管理資料建置及查詢外,並可提供後續營運維護決策參考,提昇隧道維護管理效率及防災應變能力,以達預防式維護的目標。

系統開發初步設定6個功能模組,分別為:(1)隧道基本資料庫與查詢模組、(2)巡查及檢查資料管理模組、(3)隧道損傷型態與履歷資料管理模組、(4)長期監測資料管理模組、(5)襯砌影像掃描資料管理模組、(6)隧道維修施工資料管理模組。系統各模組架構關係如圖2所示。

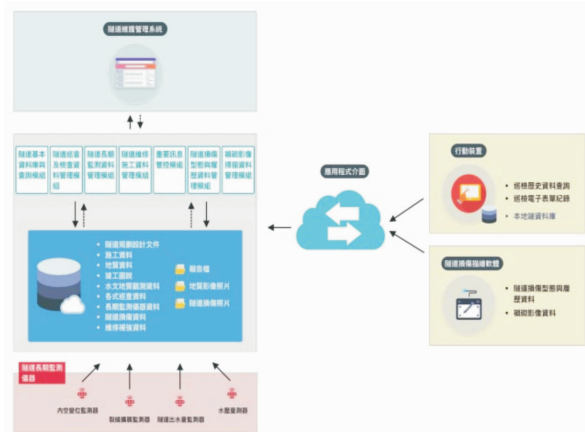


圖2 系統模組架構示意圖

Fig.2 Schematic structure of system module

3 模組功能介紹

系統開發係以人機互動為本,將數據資料以視覺化方式

呈現,同時使用者介面將著重在使用者經驗流程設計,使用者不需經過繁複的教育訓練,即可直覺使用系統。系統所開發的6個子模組主要功能概略說明如下:

■隧道基本資料庫與查詢模組

本模組將蒐集建立隧道全生命週期各階段資料,包括靜態及動態資料,其中靜態資料係指已完成且不再新增的資料,主要為規劃設計文件、施工資訊、地質資料、竣工圖說等;動態資料則主要為維護管理期間持續增加的資料,諸如巡查資料、檢監測資料、維修補強資料等。透過在關聯式資料庫架構,可快速查詢調閱所需資料(包括數據、圖片、照片、影像、報告等)。

■巡查及檢查資料管理模組

本模組主要提供巡檢人員手持行動裝置至隧道進行各種巡(檢)查工作,巡查人員可在巡查工作期間開啟本模組(圖3),查詢隧道相關資訊,掌握目前隧道狀況。巡查工作結束後,再將此行動裝置連結網路,更新行動裝置的巡查結果(巡查檢查表單資料及照片)至系統資料庫。本模組並提供巡(檢)查資料查詢功能,透過巡查或檢查年度、劣化項目等關鍵字搜索查詢相關巡查歷史紀錄。

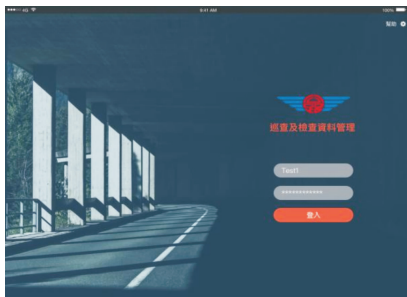


圖3 行動裝置巡檢資料管理模組登入示意圖

Fig.3 Interface of inspection data management login on mobile device

■隧道損傷型態與履歷資料管理模組

本模組針對隧道營運襯砌損傷情形,包含損傷型態(如混凝土剝離、剝落、滲水...等)、位置紀錄、損傷分佈描繪、巡(檢)查照片等,提供資料繪製與匯出入功能,建構隧道損傷型態與完整履歷資料。系統查詢介面如圖4所示,使用者可透過介面選取指定擬查詢的起迄里程,系統將搜尋該區段內資料庫已建置的損傷資料,建立隧道展開圖,將損傷資訊展示於其上(如圖4中央區塊所示),並將各損傷資訊(包含損傷編號、損傷種類、損傷面積、損傷長度、損傷寬度、損傷起始里程及損傷結束里程等)展示於畫面下方表格中,提供使用者快速查詢。

■長期監測資料管理模組

隧道維護管理常於關鍵區段(如地質不佳段、施工抽坍段、湧水區段等)設置各種監測儀器,長期觀測儀器資料(如變位、水量、水壓、沉陷量等)隨時間變化情形,協助研判隧道安全狀況變化。本模組目的旨在管理隧道長期監測儀器所產生的各項資料,將提供新增安裝儀器資料、監測點資料等,並依據不同量測儀器,可新增匯入及查詢量測記錄,如圖5所示。



圖4 隧道襯砌損傷履歷管理資料展示介面圖

Fig.4 Interface of tunnel lining damage data management



圖5 隧道出水量監測資料展示介面圖

Fig.5 Interface of tunnel inflow measurement data

■襯砌影像掃描資料管理模組

具有高精度及高效能的三維隧道掃描儀近年來逐漸引進於台灣隧道襯砌影像掃描,透過高精度影像資料可進行異狀判釋,瞭解隧道損傷分布狀況。本模組乃開發襯砌影像掃描資料匯入功能,並可擷取各類異狀分布位置與屬性資料,建置隧道襯砌影像資料庫,模組並具有隧道3D環景影像及瀏覽檢視功能(圖6),整合由影像掃描所產製之平面襯砌影像異常判釋成果,將異常判釋註記於掃描影像,可進行檢閱及比對。另本模組可進行720度視角旋轉、放大及縮小等功能,並能多站切換瀏覽。

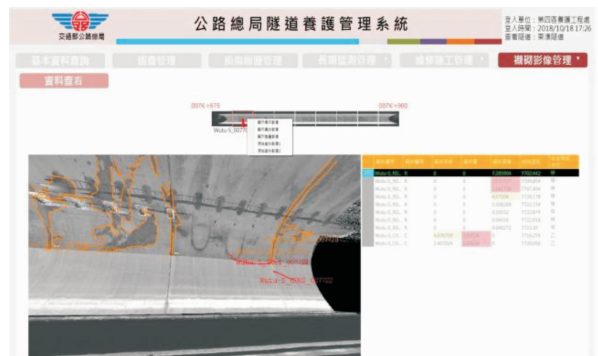


圖6 襯砌影像掃描資料管理模組介面圖

Fig.6 Interface of lining image scanning data management

■ 隧道維修施工資料管理模組

隧道維修工法可採用之工法甚多，本模組主要係提供當隧道經安檢或長期監測後，研判需進行維修補強或緊急搶修施工時，管理隧道維修施工資料的功能模組。提供使用者可新增及查詢歷年維修資料，或透過隧道名稱、區段、里程、維修工項等參數查詢相關維修紀錄。

4 巨量資料挑戰與因應

公路隧道維護管理系統目前仍持續發展當中，由於台灣公路隧道數量龐大，且資料將隨時間持續增加，對於系統資料庫的開發為一個艱鉅的任務，需克服議題包括：

(1) 資料型態具變動性：由於新檢監測儀器、新檢監測方法或巡查表單更新等，可能造成資料類型增加，故資料庫規劃需考慮未來具可擴充性。

(2) 資料量持續增加：隧道數量將隨新建工程陸續完工持續增加，同時已營運隧道的管理資料量，亦將隨時間持續累加，未來資料庫將面對巨量資料的挑戰。

針對上述巨量及變動資料問題，本系統資料庫乃依據其特性，分為結構化資料 (Structured data) 及非結構化資料 (Unstructured data)。其中結構化資料包括隧道基本資訊、設計及竣工資料、巡查資料、損傷資料、水文地質等，結構化資料具有查詢快速且儲存空間少等優點，另系統亦規劃非結構化資料，包括圖片、影片、影音、pdf 檔等，以保留資料庫儲存與擴充彈性。

除資料結構特性外，系統開發亦考慮資料存取頻率，將資料分為線上資料庫與歷史資料庫，線上資料庫主要儲存較頻繁存取的資料，例如施工期間的隧道靜態資料及近年所產製動態資料 (包括隧道監測資料、巡檢資料及損傷資料等)，而對於存取頻率較低的資料，則規劃存放到歷史資料庫中保留，例如多年前的動態資料，以降低系統資料庫負載，如圖 7 所示。系統定期將較舊的資料轉移到歷史資料庫中，可降低線上資料庫的負荷量。使用者透過本系統存取資料時，系統將於對應的資料庫中，蒐尋使用者所需資料，若該資料係屬於較頻繁存取的資料或近年新增的資料，則將被存放在線上資料庫；相反，若該資料屬於早期的舊資料，則將存放在歷史資料庫。此方式可減少線上資料庫的資料量，大幅提升頻繁存取資料的查詢效能，避免資料庫資料因長期累積而影響系統效率。

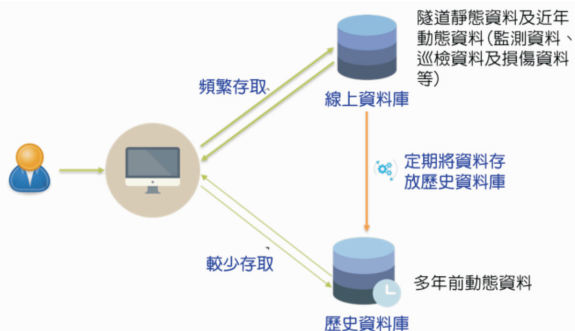


圖 7 系統資料庫依存取頻率分類構想示意圖

Fig. 7 System database classification based on access frequency

5 結論

台灣自 1889 年劉銘傳開鑿隧道使用迄今已達 119 年，使用隧道的歷史相當悠久，在經歷數十年的大興土木建設後，公路隧道遍佈全台，已漸趨飽和。台灣未來隧道工程的發展，新建隧道面臨環保意識高漲的限制，同時工程興建難度愈來愈高，包括高岩壓、地熱、湧水、瓦斯氣爆等地質挑戰；而在已完工營運隧道部分，則面臨維護管理資源有限，無法因應數量日益龐大隧道群所需的養護經費與人力，因此目前隧道維護作業仍停留在被動反應式維護方式，等待隧道出現問題後再進行必要的維護與維修，導致隧道結構安全與服務性能逐漸下降，目前台灣超過 2/3 的岩石隧道出現襯砌裂縫、錯移、剝落等異狀損傷。而隨隧道使用年齡逐漸老化，各種異狀損傷將持續惡化，可能影響未來使用年限，嚴重時或可能提早除役。

預防式隧道維護管理理念已成為當前的潮流趨勢，而要落實預防式的維護管理，隧道結構各項資料的掌握便極為重要，本文所提之隧道維護管理系統即蒐集建立隧道自設計、施工至營運維護各階段的資料，除瞭解隧道當前的安全與服務性能外，亦可研判結構劣化速率與外力影響程度，辨識營運可能風險與風險承受程度，再依據維修迫切性與經費狀況，進行預防性養護作業。本系統仍持續發展中，資料的建置實為本研究的初期目標，後續擬透過大量資料的累積，進一步進行大數據分析，研判影響各隧道營運的關鍵因子，研擬相關管理基準與因應作為，以達優質管理與延壽的目標。

參考文獻 (References) :

- [1] 蕭牟淵、游本志、王泰典等. 台灣公路隧道安全檢測及評估之研究 [J]. 台灣公路工程, 2009, 36(5) : 25-44.
Hsiao Mouyuan, Yiu Pench, Wang Taitien, et al. Study of tunnel safety inspection and assessment in Taiwan [J]. Taiwan Highway Engineering Journal, 2009, 36(5) : 25-44. (in Chinese)
- [2] 公路總局主計室. 2017 統計年報 [R]. , 公路總局, 2017. Directorate General of Highways. 2017 Statistical Yearbook [R]. , 2017. (in Chinese)
- [3] 趙興華、葉昭雄、吳瑞龍等. 公路養護手冊 [R]. , 公路總局, 2013. Chao Hsinhwa, Yeh Chaohsyung, Wu Jweilweng. Et al. Road Maintenance Handbook. Directorate General of Highways. [R]. , 2013. (in Chinese)
- [4] 李維峰. 隧道工程設施生命週期維護管理. 隧道結構安全檢測與管理研討會論文集 [C]. 台北, 2009 : 1-64. Li Weifeng. Life-cycle maintenance and management of tunnel structure. Symposium on Tunnel Structure Safety Inspection and Management [C]. Taipei, 2009 : 1-64. (in Chinese)
- [5] Moretti L, Cantisani G, Mascio P. D. Management of road tunnels: Construction, Maintenance and lighting costs [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51 : 84-89.
- [6] Mashimo, H, Ishimura, T. State of the art and future prospect of maintenance and operation of road tunnel. 23th International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC [C], 2006 : 299-302.