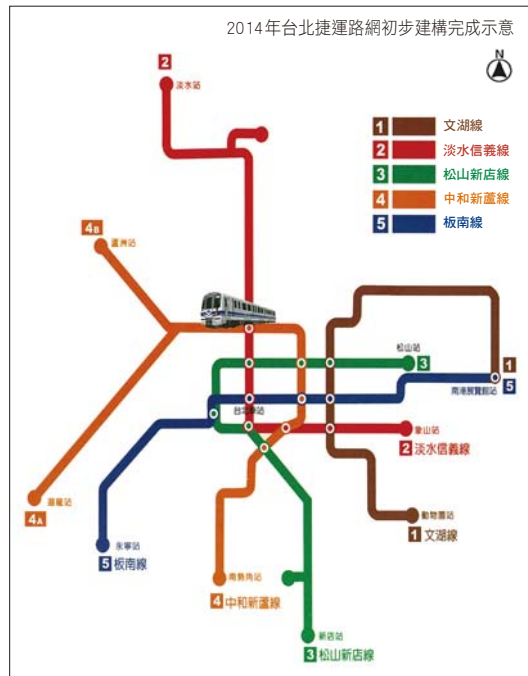
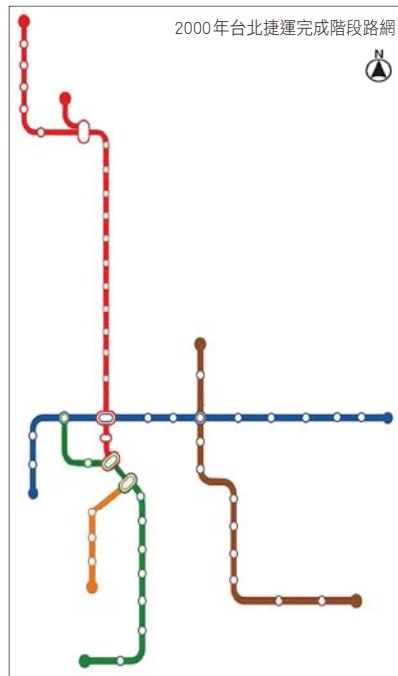
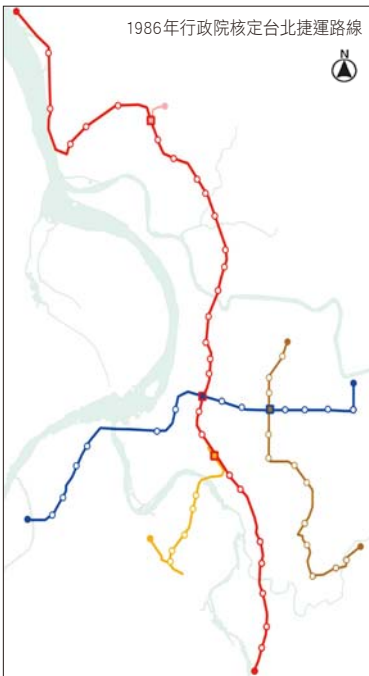


# 土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

February  
2015



ISSN 0253- 3804  
9 770253 380006

NT\$300



Volume 42, No. 1

社團法人  
中國土木水利工程學會 發行  
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

專輯  
地工結構物的  
維護管理

從無到有的  
台北捷運  
特別報導

# 分毫不差

## 才足以教人驚豔

搏得滿堂喝采的每一場演出，廣為客戶信賴的每一回肯定，  
台灣世曦連番榮耀背後的，永遠都只是「專業」的累積，  
以及「用心」的執著。

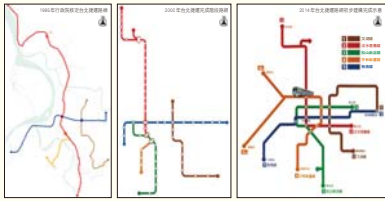


Creativity · Excellence · Conservation · Integrity



台灣世曦  
工程顧問股份有限公司

台北市11491內湖區陽光街323號  
Tel:(02) 8797 3567 Fax:(02) 8797 3568  
<http://www.ceci.com.tw> E-mail:[pr@ceci.com.tw](mailto:pr@ceci.com.tw)



上圖：蘇花公路溯自清治1870年中期的行人步道，1930年前後日治時期的臨海道路，及1940年代後期的現代化公路。

下左圖：1986年行政院核定台北捷運路線

下中圖：2000年台北捷運完成階段路網

下右圖：2014年台北捷運路網初步建構完成示意

# 土木水利雙月刊

## 中國土木工程學會會刊



發行人：呂良正

出版人：社團法人中國土木工程學會

主任委員：宋裕祺（國立台北科技大學土木工程系教授）、（兼總編輯）、（編輯出版委員會）

副主任委員：王華弘（明新科技大學土木工程與環境資源管理系副教授）

委員：王昭烈、李維森、周中哲、周功台、周頌安、徐景文、高邦基

張添晉、劉格非、陳立憲（依姓氏筆劃排序）

定價：每本新台幣300元、每年六期共新台幣1800元（航郵另計）

繳費：郵政劃撥00030678號 中國土木工程學會

會址：110055 台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：http://www.ciche.org.tw

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

文字編輯：周力強

印刷者：中禾實業股份有限公司

地址：22161 新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

### 社團法人中國土木工程學會第二十一屆理監事

理事長：呂良正

常務理事：曹壽民 沈景鵬 張荻薇 陳仲賢

理事：莫若楫 曾大仁 楊偉甫 歐來成 歐善嘉 龔誠山 王昭烈

李咸亨 周永暉 鄭國雄 馬俊強 黃洪才 丁澈士 張武訓

蔡清標 吳瑞賢 陳存永 鄭文隆

常務監事：周南山

監事：楊永斌 李建中 張培義 許俊逸 黃燦輝 賴世聲

秘書長：倪惠妹

副秘書長：賴勇成

## 土木水利半月集

圖多刷閱

土木社群 網頁  
www.ciche.org.tw

### 先進工程社群

- 混凝土工程
- 運輸工程
- 資訊工程
- 系統工程
- 非破壞檢測
- 鋼結構
- 鋪面工程
- 工程管理
- 先進工程

### 永續發展社群

- 永續發展
- 水資源工程
- 海洋工程
- 景觀工程
- 能源工程
- 工程美化
- 國土發展
- 大地工程
- 環境工程
- 綠營建工程
- 天然災害防治工程
- 營建材料再生利用

### 國際兩岸社群

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

### 教育學習社群

- 工程教育
- 土木史
- 大學教育
- 學生活動
- 終身學習
- 工程教育認證
- 技專院校

### 學會活動社群

- 學會選舉
- 土水法規
- 專業服務
- 學會財務
- 會務發展
- 公共關係 [工程倫理]
- 學術活動
- 介紹新會員
- 學會評獎
- 年會籌備
- 會士審查

### 出版活動社群

- 中國土木工程學刊
- 土木水利雙月刊
- 土木水利半月集

### 分會活動社群

- 土水學會
- 土水中部分會
- 土水南部分會
- 土水東部分會

## 中國土木工程學會任務：

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第518號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第0248號

## 「從無到有的台北捷運」特別報導

- 📖 「捷運人」回首台北捷運 朱旭 3
- 📖 北捷松山線 挑戰工程難度 余念梓／薛春明 7

## 土工結構物的維護管理專輯

- 📖 土工結構物的維護管理 — 專輯序言 周功台 13
- 📖 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／邱雅筑／李佳翰／陳正勳／黃燦輝 14
- 📖 捷運隧道積極式維護管理策略探討 邱雅筑／王泰典／林志權／李佳翰／黃燦輝 26
- 📖 地下電纜洞道巡查重點與維護管理 蕭勝任 32
- 📖 水之養命 — 自來水管網之省力化及延壽維管新思維  
范煥英／范川江／吳世紀／李順敏／周永川／林俊良 40
- 📖 臺北市人工邊坡之調查與維護管理 黃立遠／林士淵 48
- 📖 山區隧道損壞之檢測調查 — 以台 20 線嘉寶隧道為例 王慶雄／林蔚然 54
- 📖 公路總局山區公路邊坡分級管理建置與實施 陳俐穎／孟伯鈞／陳進發 64
- 📖 台 88 線萬大大橋橋梁先建後拆換底工法之設計與分析 林俊和／胡傑信／蕭天任 67
- 📖 擋土牆功能檢視、調查及維護 徐明志／李守原／蔡皓川／江政恩／黃筱卿／謝孝維 73

## 工程技術及發展

- 📖 簡述土壤壓實度快速控制法於土壩填築之應用 蔡宗翰 84



社團法人中國土木水利工程學會

「文明躍境

翻轉土木

讓生活更美好！



社團法人中國土木水利工程學會 與您在一起 !!

28年來從無到有，台北捷運已連續5年獲評全球最可靠的捷運系統，這是全體「捷運人」胼手胝足打造出來、足以自豪的台灣驕傲。

# 「捷運人」回首台北捷運

朱 旭／中華顧問工程司執行長·台北前捷運系統工程局籌備處技正  
台北市政府前捷運工程局副局長、總工程司，交通部前高速鐵路工程局局長

每當坐上我們親手打造台北捷運，總是不由自主回憶起曾經奉獻大半生讓我的生命倍加充實最具意義的歲月。去年11月台北捷運松山線通車，台北捷運網初步建構完成。回首二十八年前的台北捷運草創，正值都會區人口不斷增加，汽、機車快速成長，台北交通日益惡化，民眾飽受塞車之苦，尤其上下班尖峰時間更是寸步難行，民眾無奈地陷入無止盡都市夢魘，夜間噪音之刺耳，白日空氣之汙染，嚴重影響都市生活品質與環境。

## 二十年催生·起步建捷運

民國七十五年六月二十七日，對台北都會區民眾是一個值得紀念日子，政府在歷經二十年研究、討論、觀摩、規劃及妥協整合，終於成立「台北捷運系統工程局籌備處」，雖然在亞洲四小龍最殿後（至少落後十年），唯總算跨出一步，正式向普天下宣告開始推動台北捷運系統。

捷運工程可謂政府有史以來最龐大，而且最複雜的重大工程建設，更是自六十年代十大建設之後最引人矚目的公共工程，由工程專業能力與領導能力備受肯定的工程界「大老」齊寶錚先生受命負責籌建我國第一個捷運系統並擔任創局（首任）局長。

草創之初，我有幸追隨首任局長齊先生赴歐、亞各國，考察其先進之捷運系統，隨行者尚有後來出掌工程會范良鏐主委及交通部賀陳旦次長，當我站在異國各大名城捷運車站月台上，聆聽解說員說明，看著電聯車由遠而近，然後穩穩靠站，幾十秒之後再由身邊飄然遠去！那種呼嘯著捲起一陣涼風的進站、猶如千軍萬馬奔騰卻又俯首聽命於看不見的指揮的出站情

境，的確是「強國」的氣勢！深深撼動我心，有為者亦如是！不久在我們自己土地上也將有捷運，我們的生活品質也將從「擾人的交通噪音」，升級到傾聽「世界級現代捷運所發出之聲音」。

雖然早期中央及地方作了相關研究規劃，但也僅止於草繪了幾條路線、捷運路網圖及基本規劃，實際推動仍需從頭開始辦理地質、管線、建物調查及測量，都市計畫變更，土地徵收，對外溝通宣導，擬定標準作業程序，編列預算等，更創下我國立憲以來，史無前例三年內快速通過一、二、三期特別預算4,400餘億元，使捷運可以順利展開。捷運業務推動以人為本，雖然待遇不高，事情多多，仍吸引了有理想、有抱負青年人（最高峰達2,500人），無怨無悔，義無反顧投入又忙又累，風險又大的捷運事業，開始規劃設計國人殷切期望的台北捷運。

## 技術生根策略成功·厚植國內軌道產業

台北捷運推動初期，國內毫無經驗可言，必須借重國外有經驗顧問公司擔任總顧問，協助辦理計畫管理及諮詢服務，工程初步規劃與基本設計，土建、機電系統細設文件審查及各類專業顧問之諮詢。透過中外人員合署辦公、實際參與、努力學習逐步技術轉移捷運局同仁與總顧問合作之本地顧問人員，培養本國人員及早具備獨立規劃、設計與計畫管理之能力。歷經八年，總顧問全面撤離，捷運局不負眾望，透過核心能力成功移轉，成為國內捷運工程技術的傳承者，不僅可獨立作業，更協助並提供國內後起高雄捷運、桃園捷運、台中捷運優質技術服務。這班「捷運人」後來也有被各級政府或鐵

路機構爭相挖角，擔任各項要職，為國家社會作出重大貢獻。捷運局同時透過不同招標策略，於契約中訂定「聯合承攬」及「技術合作」要點，要求具豐富經驗國外顧問公司及國外廠商實施強制性技術轉移予國內缺乏經驗合作之顧問公司及廠商。歷經初期階段淬煉及經驗快速累積自板橋線開始迄今國內顧問公司至少有十家已有獨立細部設計能力，國內廠商至少有七十家以上有能力承辦捷運土建或機電系統工程。此種根留民間，技術生根各產業策略，厚植了本土產業捷運技術能量及實力，可說是台北捷運對國家產業發展的重大貢獻。

台北捷運為國內推動首樁捷運系統，國內並無前例可依循或參考，在規劃初期歷經國外顧問評估及捷運局縝密檢討，訂定以下重要規劃原則，並成為後續國內各地捷運參採遵循標準。

- 一、靠右行車 — 摒棄部訂鐵路行車規則，而依循國人道路行車習性。
- 二、捷運線與台鐵不共線 — 推翻國外顧問原提以台鐵取代東西向捷運線（藍線）方案。
- 三、採世界通用標準軌距（1,435 mm）。
- 四、採第三軌供電系統 — 推翻國外顧問原提架空線供電系統，不僅確保了都市景觀。而其全生命週期成本反較經濟。
- 五、地下段路線採駝峯斷面佈設，將車站設置於駝峯

位置，既能降低車站造價，又能節能減碳。

- 六、捷運交會站（轉乘站）佈設採平行交會方式（同一條捷運線上下行線不設於同一平面，而分設於上下層月台）大大提昇旅客轉乘方便及效率（詳圖 1 之 1 及圖 1 之 2）。
- 七、全面採用自動收票系統及非接觸式票證系統。
- 八、順應民族特質，站站廣設公用廁所並開放非捷運旅客使用。
- 九、充分照顧身心障礙旅客提供各項無障礙設施。
- 十、推動站區開發，促進都市更新及發展。

### 流淚撒種歡呼收割·急起直追從無到有

首任局長齊寶錚先生面對台北交通嚴重惡化，推動捷運建設，已無優先路線可言，每一條都有急迫性，一條一條慢慢蓋（對照大台北都會區鐵路地下化

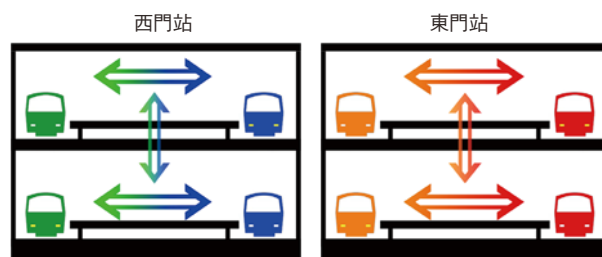


圖 1 之 1 台北捷運系統平行交會站配置示意圖

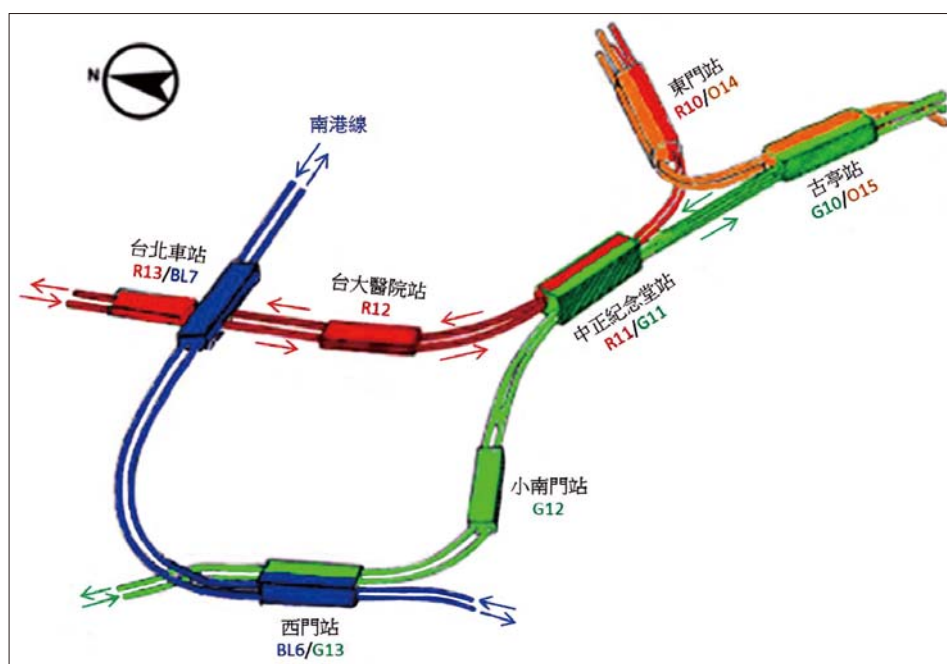


圖 1 之 2 台北捷運市中心區交會站配置示意圖

(板橋 — 南港) 工程採此模式，歷經 28 年於民國 100 年全線完工)，根本解決不了台北交通問題，為求縮短工期早日建構路網，採「六線齊發」策略，以多線（木柵線、淡水線、新店線、中和線、南港線及板橋線）齊頭並進方式，全面動工。對各線之施工採時間重疊多頭展開，加速趕工。

自民國 77 年台北捷運開工，特別在進入全面開挖時，台北都會之重要幹道，開腸剖肚，台北交通頓時陷入「交通黑暗期」，民怨四起，各界撻伐，工程人員疲於奔命，歷經「長痛不如短痛」的陣痛後，民國 85 年國內第一條中運量（木柵線）捷運完工通車，翌年國內第一條高運量（淡水線）捷運完工通車，台北都會區民眾開始享受一年通一條，五年通六條（八階段）通車美果。

經過十四年至 2000 年，台北捷運（詳圖 2）營運長度達 65 公里，車站 62 座，每日載客量達 78 萬人次，台北都會區民眾享受到安全、舒適及便捷之捷運服務，台北交通走出「交通黑暗期」邁入「捷運年代」，當然這樣成果除應歸功參與本計畫「捷運人」默默犧牲奉獻，無怨無悔的付出外，更讓人由衷敬佩齊

先生高瞻遠矚，力排眾議的決心及堅持。

本世紀以來陸續再投入 2,600 億元持續興建後續路線，迄今又歷經第二個十四年陸續完成板橋土城線、內湖線、新莊線、蘆洲線、南港線東延段、信義線及松山線等七條線，一舉將台北捷運營運長度擴增為 129.2 公里，車站 116 座，每日載客量達 200 萬人次。

## 台北捷運改變台北・後來居上揚名世界

歷經二十八年台北捷運整體路網初步建構完成（詳圖 3），在捷運公司強力宣導及民眾全力配合下，台北捷運各路線回歸原規劃理念（以顏色識別）得以重組串接，改變以往以台北車站為中心，而代之以三條串連起來 L 型運輸走廊搭配板南線、文湖線相互銜接成網路服務（紅線—淡水線 + 信義線、綠線 — 新店線 + 松山線、藍線 — 南港線 + 板橋土城線、橘線 — 中和線 + 新莊線 + 蘆洲線、棕線 — 木柵線 + 內湖線）這樣改變在全球捷運亦不多見，不僅提供都會區民眾最佳運輸及多元多點轉乘服務，同時提高營收及車輛運轉效率。

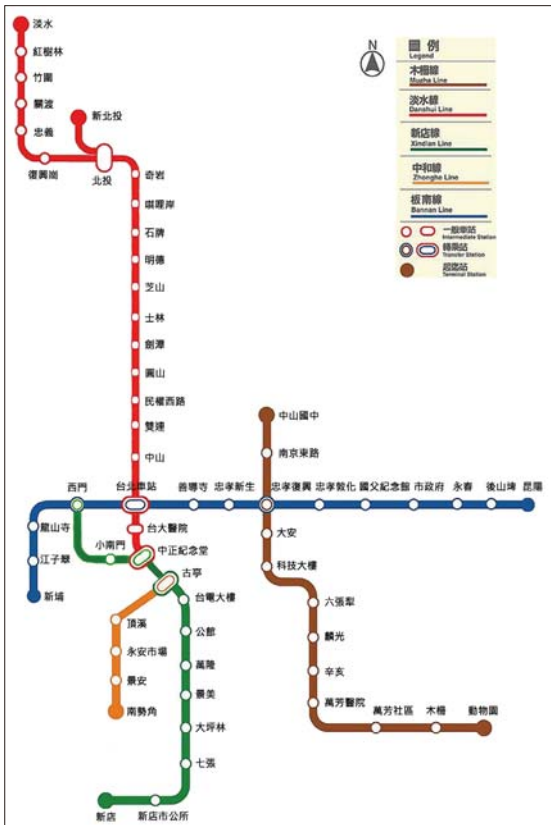


圖 2 2000 年台北捷運完成階段路網

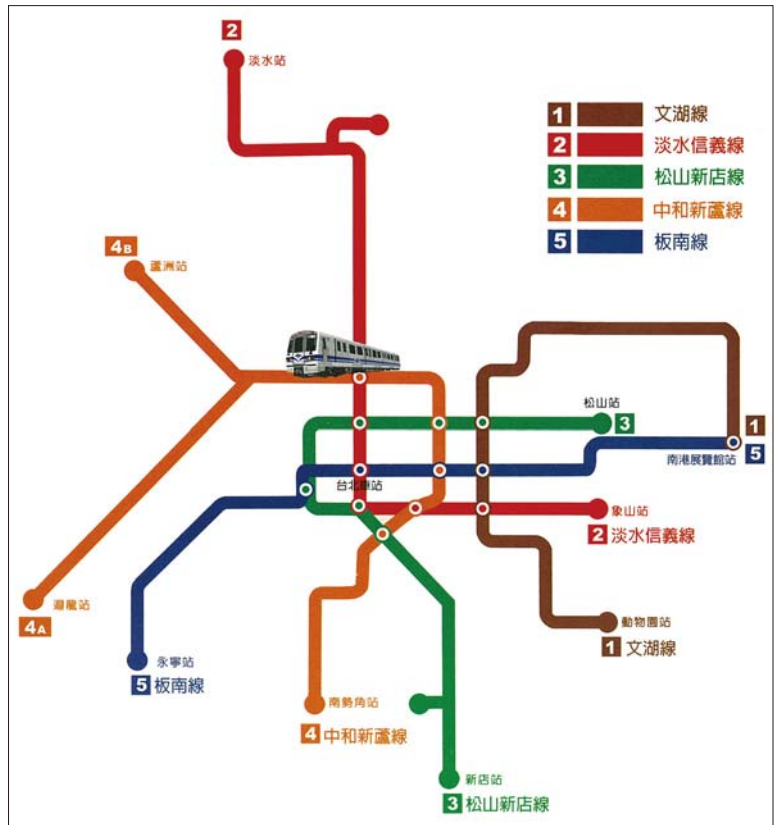


圖 3 2014 年台北捷運路網初步建構完成示意





台北捷運起步甚晚，距全球第一條誕生捷運（倫敦地鐵）晚了 133 年，不僅是亞洲四小龍殿後，在全球排名台北是第 124 位擁有捷運城市，承接後棒捷運公司亦發揮急起直追的精神，通車十九年總載運量已超過 67 億人次，目前每日平均運量已突破 195 萬人次，在全球排行已擠身前 21 位，更難能可貴的台北捷運已連續五年獲評最可靠的捷運系統，可靠度排名世界第一。

台北捷運從無到有，胼手胝足建造了優質捷運，捷運技術完全生根在國內，現在我們會自己規劃，國內顧問公司會自己設計，國內廠商除部分機電系統因缺經濟規模受制於人外，會自己製造、安裝及施工，捷運工程品質因全面實施三級品管倍受肯定，包辦每年金質大獎，歷經二十八年「捷運人」也自當時平均年齡 34 歲邁入 62 歲花甲之年，日前回局探望同仁，見到陸續有人即將屆齡開始打包準備退休，更聽到有

主管業務負荷過重，壓力過大，重病開刀，觸景生情，令人感傷。「捷運人」一生最黃金歲月投入捷運事業，共同推動台北捷運，我們在自己的土地上親手建造屬於我們的捷運，雖然一路走來坎坷艱辛，有血、有淚、有汗，但皆能再接再厲，克服重重難關，不負所託，完成任務。

眼見一條一條捷運線建構起來最終串聯成一個整體路網，台北捷運除了提供四通八達交通服務，更見證了台北捷運改變了台北整個城市及大台北市人文素養——讓位排隊、輕聲細語、整潔有禮，展現了城市生命力，更引領形塑了乾淨、友善、有禮的「捷運文化」，如今台北捷運不僅是政府公共建設的典範，更成為民眾不可一日或缺的交通生命線，雖是規模不大，里程不長，歷史不長的捷運系統，卻贏得全世界的讚賞，不僅是全體「捷運人」驕傲，更是國人引以自豪的「台灣驕傲」。

### 台北捷運大事紀

- 1986.6.27 「台北捷運系統工程局籌備處」成立。 齊寶鏗先生擔任創局（首任）局長。
- 1987.2.23 臺北市政府捷運工程局（簡稱臺北市捷運局）成立。 定下「六線齊發」興建策略。
- 1988 台北捷運開工。
- 1996.3.28 國內第一條中運量木柵線捷運完工通車，台北捷運開始營運。 八年後，捷運局成功移轉捷運工程技術，具備獨立規劃、設計與計畫管理之能力。
- 1997 國內第一條高運量淡水線捷運完工通車。 台北捷運營運長度達 65 公里，車站 62 座，每日載客量達 78 萬人次。
- 2000 五年六條八階段通車：木柵線、中和線、新店線、南港線、板橋線、小南門線，台北交通邁入「捷運年代」。 陸續完成板橋土城線、內湖線、新莊線、蘆洲線、南港線東延段、信義線及松山線等七條線，台北捷運營運長度擴增為 129.2 公里（世界第 26 位），車站 116 座，每日載客量達 200 萬人次。
- 2001.9.17 納莉颱風襲臺積水成災，營運嚴重受創。3 個月後，高運量路線即全部恢復營運。
- 2014.11.15 松山線通車，台北捷運路網初步建構完成。

**2014 年運量 67 億 9 千萬人次，總載運量全球排行前 21 位！可靠度排名世界第一！**

### 各線各段通車時間

文湖線（文山線 1996 年、內湖線 2009 年）

淡水信義線（淡水線、新北投支線 1997 年、信義線 2013 年）

中和新蘆線（中和線 1998 年、蘆洲線 2010 年、新莊線大橋頭站至忠孝新生站 2010 年、

新莊線大橋頭站至輔大站 2012 年、新莊線東門站 2012 年、新莊線迴龍站至輔大站 2013 年）

松山新店線（新店線 1999 年、小南門線 2000 年、小碧潭支線 2004 年、松山線 2014 年）

板南線（南港線 1999 年、板橋線 2000 年、土城線 2006 年、南港線南港站 2008 年、南港線南港展覽館站 2011 年）

（土水學會秘書處整理）



通車後路網效益大增，不僅更經濟、更便捷，  
愈來愈多乘客享受多點轉乘的便利性。

## 北捷松山線 挑戰工程難度

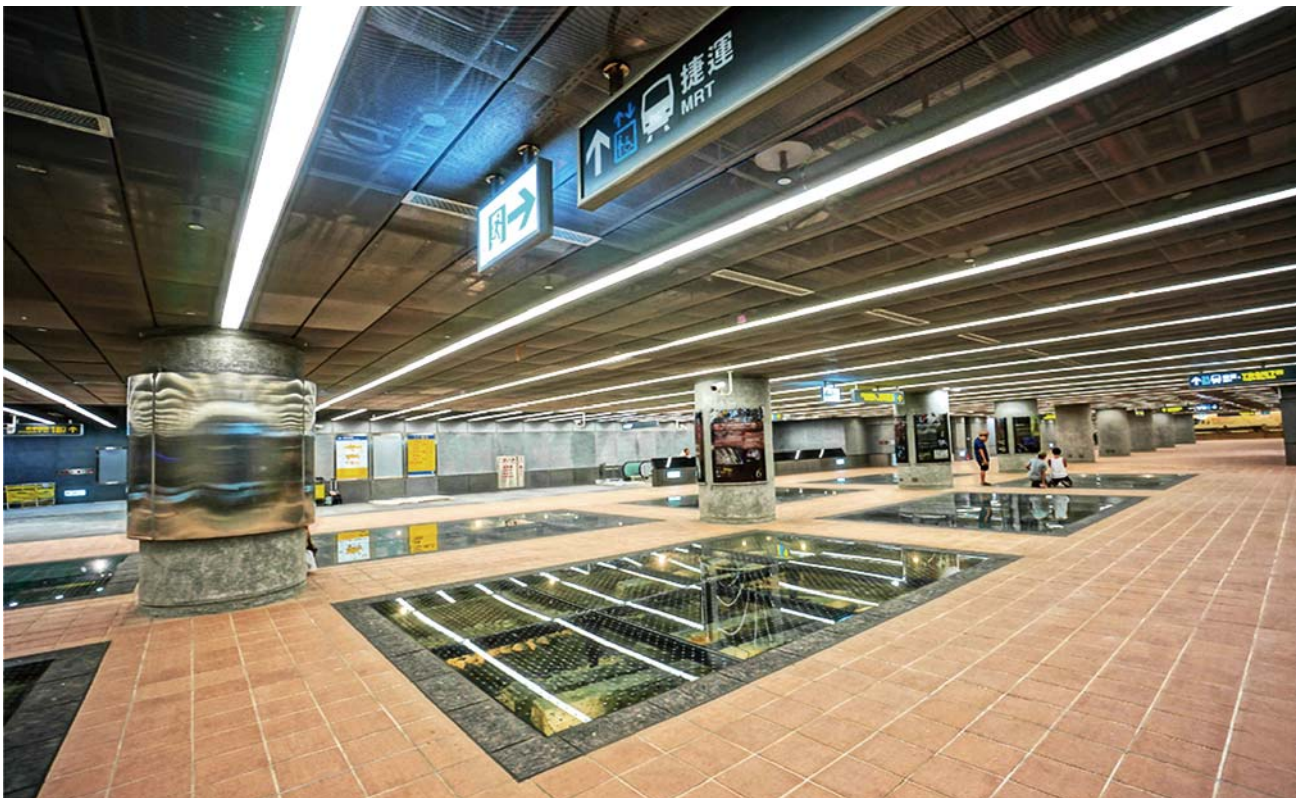
余念梓／臺北市政府捷運工程局中區工程處處長

薛春明／臺北市政府副秘書長

臺北捷運松山線於 103 年 11 月 15 日正式營運通車，通過商業活動非常活絡的南京東西路，同時也是第三條東西向路網，松山線在西門站、中山站、松江南京站以及南京復興站分別與板南線（5 號線）、淡水信義線（2 號線）、中和新蘆線（4 號線）以及文湖線（1 號線）交會轉乘，在八德路 4 段捷運松山站也可經由站內連通道與台鐵松山火車站連接轉乘，而北門站業已完成地下轉乘通廊，亦可與未來桃園機場捷運線端點台北站連接轉乘。前臺北市郝龍斌市長在通車後

市政會議提到捷運松山線是臺北捷運路網中最複雜的一條路線，不單指工程複雜性，因為更是路線調整、分流，以及中樞轉乘的樞紐。

捷運松山線通車，臺北捷運路網長度將達 134.6 公里，車站總數增加至 116 座，預估平均每日運量將達 200 萬人次以上。臺北捷運系統自 2004 年起連續 5 年在國際鐵路標竿組織 NOVA/CoMET 會員中被評定為世界最可靠的捷運系統，顯見工程興建品質以及營運服務品質都具有世界一流水準。



北門站（非付費區）通道層（謝傳儒攝）

## 總經費 499 億元

臺北捷運松山線接續新店線、小南門線，由南港線西門站西側經中華路接塔城街向北過鄭州路後轉天水路經南京西路、南京東路 1 段至 5 段，偏向東南轉入八德路 4 段東行至台鐵松山站後站廣場止。興建路線長 8.5 公里，沿線興建 7 座地下車站、1 座高架轉乘設施以及 1 座主變電站，全線屬地下高運量捷運系統設計及施工。捷運松山線總經費為 499 億元，除中央補助 141 億元外，臺北市政府負擔 358 億元，其中工程經費（施工費）不含用地設施補償費、工務管理費及細部設計費約為 387 億元。

## 典型箱型雙牆結構

全線地下車站為典型箱型雙牆結構，施工方法採用挖覆蓋工法，北門站為地下 4 層車站，中山站、松江南京站、南京復興站以及小巨蛋站都屬地下 3 層車站，南京三民站以及捷運松山站則屬地下 2 層車站，由於地理區位關係全線有較多車站出入口地面層防洪高度（200 年洪水位加上 110 公分）超過 1 層樓高度，因此防洪設施改採於地下穿堂層設置水密門方式處

理。另外南京復興站為了提供松山線地下至高架文湖線轉乘需求，於慶城街以高架構造形式增建將近原高架車站 1.5 倍轉乘空間。松山線主變電站則受限用地不足等因素，只得設計向下發展，建造深達 32 公尺地下 6 層建物。以往捷運車站每站只設置 1 座無障礙電梯，而松山線（東西向路線）車站南北側都各設置 1 座無障礙電梯（每站共 2 座），大幅提升服務品質。

站間隧道按施工方式，分為潛盾隧道及明挖覆蓋隧道兩類，潛盾隧道為內徑 5.6m 圓形隧道，總長度為 11.146 公里，全線共使用 7 部土壓平衡式潛盾機施工，襯砌環片採 25 cm 厚之混凝土預鑄環片，每環由 3 個 A 片、2 個 B 片及 1 個 K 片，三種不同型式共六片環片組成，每環寬度 1,000 mm。位於建成圓環、關稅總局及塔城公園下方，由於上行隧道與下行隧道距離過於接近，考慮隧道近接效應及抗浮考量，裝設全國隧道首次使用之球墨鑄鐵環片。配合路線列車調度及營運安全設計，設置於松江南京站兩側（東側及西側）、松山站西側橫渡線（又稱轉轍段）以及南京復興站西側中央避車線（又稱袋式儲車軌），則採用挖覆蓋隧道方式施作。



北門站北端公共藝術牆面（臺北城及臺灣鐵路發展紀事）（謝傳儒攝）

捷運軌道系統皆採標準軌距 1,435 mm 及無接縫長焊 UIC60 鋼軌，松山線軌道正線長度上行線 8,023 公尺，下行線 8,022 公尺，總計軌道長約 16,045 公尺。10 號道岔 12 組、7 號道岔 2 組以及菱形岔心 2 組。道床型式主要為無道碴道床，但是為了降低行車振動及地傳噪音影響（減振抑噪），全線設置 2,830 公尺浮動式道床以及約 2,600 公尺高隔振無道碴道床，也是目前設置比例最高的路線。

核心機電系統工程則包括載運乘客電聯車、號誌系統（包括月台門系統、旅客資訊顯示系統、行控中心系統、車載、道旁以及車站）、供電系統、通訊系統係應用數據、語音及影像通訊技術，以提供捷運行控中心、列車、機廠及車站等所有資訊來往的服務，以及自動收費系統（包括車站處理機、驗票閘門、單程票售票機、站務員售票機、查詢機以及後端數幣包裝機）。至於水電環控工程則是營運中提供乘客及車站工作人員舒適乘車及工作環境之服務設施，以及塞車及發生緊急事故時，提供適當通風、新鮮空氣以及逃生路徑的機電設施。

全線電扶梯共計 115 台，屬於重載型、耐候性電扶梯，可逆轉踏階寬度 1,000 mm，踏階深度 400 mm，傾斜部相鄰踏階高度差 210 mm、踏階公稱速度 0.65 公尺／秒且可切換為 0.5 公尺／秒，並附無人搭乘怠速運轉功能。電梯共計 27 台，分為液壓間接驅動鋼索懸吊型電梯及無機房鋼索捲揚式電梯。車站載客用電梯限重為 1,000 Kg（人數限載 15 人），車廂內部尺寸為寬

1,600 mm，深 1,500 mm，高 2,300 mm。液壓型電梯昇降速度為 30 ~ 45 公尺／分鐘，無機房電梯昇降速度為 60 公尺／分鐘。

## 市政建設

依共同管道法大眾捷運系統應優先施作共同管道，將共同管道系統實施計畫列入該重大工程計畫一併執行，據此西起新生北路西側、經南京東路二~五段至塔悠路口，全長約 4.5 公里共同管道工程因此納入捷運松山線工程範圍內施作。共同管道主幹管道多數以明挖覆蓋工法施作單孔或雙孔箱型結構，少部分由於位處重要路口則以推管工法施作直徑 2.4 公尺圓形斷面結構。此外共同管道路徑上大約 200 公尺至 300 公尺會設置突出地面的自然或強制通風口以及人員物料進出口，並依共同管道設計規範之防洪標準設計。

部分街道復原工程須配合臺北市政府都市發展局「南京東西路公共環境更新改善工程」之規劃執行，自圓環（重慶北路口）沿南京西路經中山北路往東沿南京東路一段至五段，全長約 5.6 公里，將人行道拓寬增設自行車道，以植栽帶及設施帶與自行車道區隔，且不同於以往街道復原，除施作人行道設施（高壓混凝土磚、植栽、排水溝、路燈、號誌、標誌及標線等），位於人行道上共管分歧部及共管用戶端供給管亦列入施作，由於接戶管線資訊不明確、或民宅及維生管線老舊，施作更新用戶端管線往往變成擾民問題，吃足苦頭。南京東西路長廊式候車亭合計 19 座，亦委



松江南京站電扶梯側牆瑤瑯版公共藝術（謝傳儒攝）



南京三民站穿堂層付費區（李建春攝）

託由捷運工程主辦機關代辦，其中頂棚為膠合熱硬化白膜玻璃，其顏色亦經審查選用與信義線不同，採略帶白灰色系之玻璃，相較於信義線頂棚玻璃更具有遮陽效果。另外內照式禁制指示交通標誌及太陽能危險標記亦增列為復原工項，不得已另外辦理發包，由此可見整個松山線捷運工程內容，可謂包羅萬象。

### 施工風險及遭遇障礙

臺北捷運松山線全段工程均位於台北都會區交通繁重之大同、中山、松山區域，也是臺北捷運最後一條地下重運量捷運路線，但是松山線工程複雜度更勝以往捷運路線，施工期間預期遭遇施工問題包括西門站至北門

站間潛盾隧道，必須穿越營運中高速鐵路及台鐵下方，為國內首次在營運中高速鐵路下方穿越的隧道施工；北門站至中山站間潛盾隧道穿越塔城公園地下停車場群樁基礎，必須開艙至潛盾機頭外切除基樁進行障礙排除；中山站至松江南京站潛盾隧道穿越惠通橋，由於橋臺基礎結構未明，施工風險未知，施工前必須再詳加探勘及評估施工方式；捷運松山站至尾軌間玉成橋改建工程，必須維持橋面通行情形下進行，整個改建工程期程因應交通維持計畫不易掌握；南京復興站於文湖線已營運車站增設地上以及地下轉乘設施工程，地下連通轉乘結構位於復興北路與南京東路口下方開挖深度 16.65 公尺，路口管線複雜且交通繁忙，開挖支撐僅



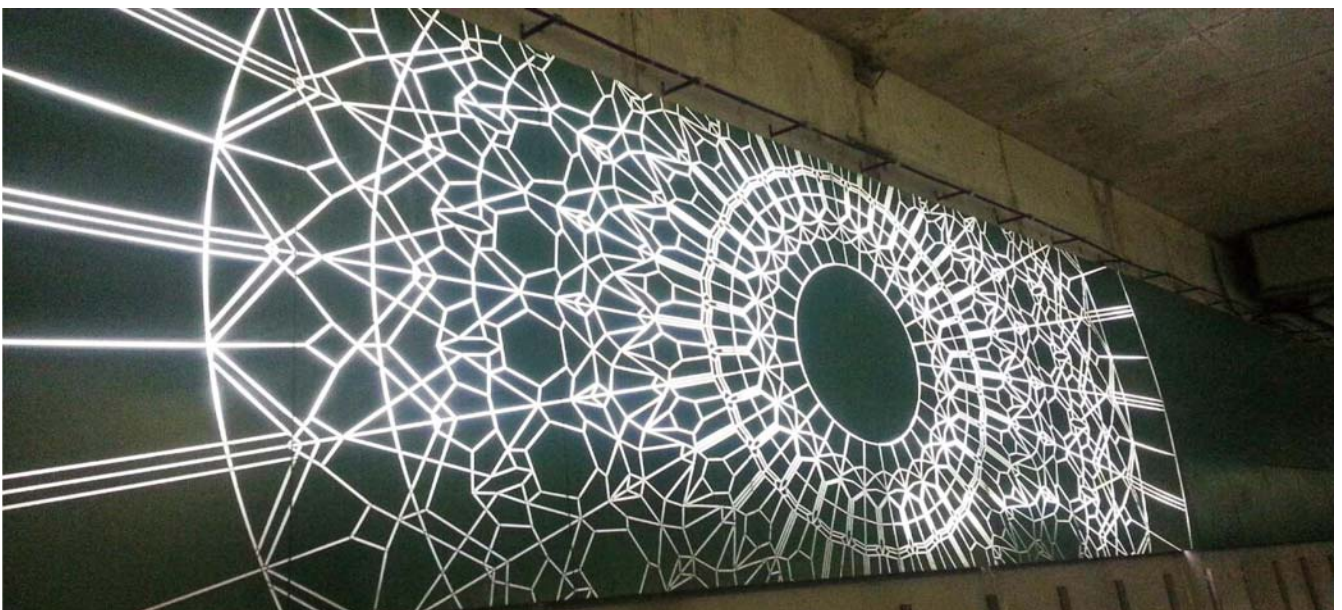
南京三民站月台層 (謝傳儒攝)



南京三民站 3 號出入口 (謝傳儒攝)



台北小巨蛋站 4 號出入口 (謝傳儒攝)



松山站軌道側牆面公共藝術 (謝傳儒攝)

能施作排樁，且整個路口分成 20 宮格逐格施工，耗時長、施工風險高，高架轉乘區則因為施工區域與文湖線營運區域無法完全區隔，基於營運安全考量，施工方法及施工工時與一般工地全然不同；南京東西路沿線配合共同管道設置，增設用戶端供給管，除了人行道及慢車道全面開挖外，管線遷移範圍增加，增加施工工期也必須在管制通車期程內完成。雖然都是挑戰但是至少瞭解所需面對問題的所在。

然而有些工程障礙或施工風險是事前未知或無法預期的，突如其來發生對施工團隊而言就是極大考驗，除了必須克服解決外，還要控制影響層面，例如前述西門站至北門站間潛盾隧道，必須穿越營運中高速鐵路及台鐵下方興建，始料未及其中臺鐵隧道採 SMW 工法 (Soil Mixing Wall) 施作擋土牆，仍有殘留型鋼未拔除，迫使在台鐵及高鐵隧道下方還要開艙去切除殘留整支型鋼，迫使得原本就是高風險施工項目，更加困難。南京復興站至台北小巨蛋站間潛盾隧道施作時，則遭遇地錨障礙物，由於地錨鋼鍵這類地中障礙物，與前者型鋼相較屬於柔性棒狀物，潛盾機推進時地錨很容易纏繞在切刃盤造成機損，所以在松山線施作潛盾隧道，兩種極端鋼材都同時遭遇，實實在在給予施工團隊最嚴厲的考驗，當然相對於南京三民站至捷運松山站間潛盾隧道掘進時，遭遇正氣橋殘留基樁，以及中山站至北門站間潛盾隧道掘進時，遭

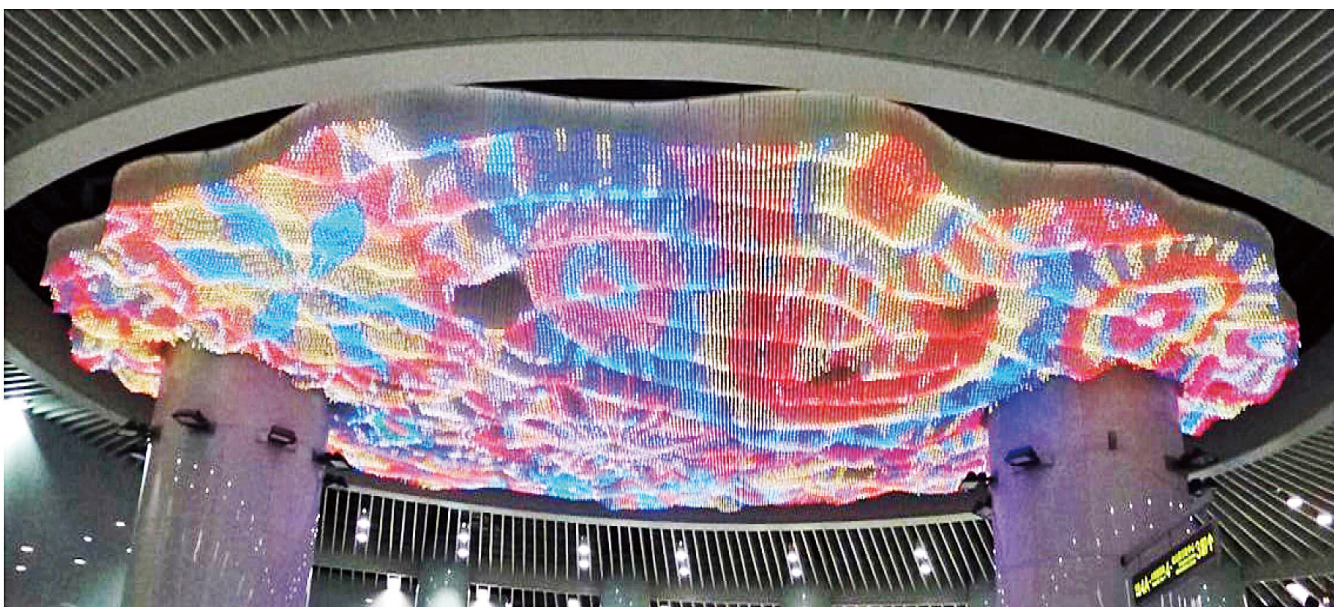
逢 84 年鄭州路地下街災變殘留障礙物時，對我們而言都應該屬於輕而易舉的障礙排除。

北門站於開工整地時發現年代已久石砌牆及條狀石板路，遂向地方主管機關臺北市政府文化局提報，之後由中研院劉益昌研究員率領團隊展開將近 4 年考古探挖研究，北門站體停工 1 年而且出入口也重新變更調整位置及範圍，但也因此造就國內第一個將原地探挖古蹟文物，直接陳列在捷運車站的古蹟文物館，乘車之餘帶領乘客旅客穿越時空，回到百年以前清代及日治時期。

位於塔城街及鄭州路台北工廠為臺北市政府公告 3 級古蹟，座落位置與北門主站體有 4.8 公尺重疊，為了達到古蹟保存與捷運建設兼容並顧雙贏局面，將整個台北工場挪移 30 公尺以保存歷史建物。



北門站通道層古蹟探挖展示  
(地面降板方式陳列) (謝傳儒攝)



捷運松山站公共藝術 — 河流彎曲之處，域見繁花光穹 (謝傳儒攝)



貴賓馬總統、行政院江宜樺院長出席通車典禮（謝傳儒攝）



南京復興站月台層挑空區（謝傳儒攝）

松山線主變電站設置因為民意阻擾無法動工，松山線全線動工 5 年後，才確定改設位置並重新設計及發包，為達成通車管制期程整個工程被壓縮 2 年工期，施工團隊日夜全力趕趕才能如期完工。

此外施工期間帶給民眾的交通不便，對周圍環境及生活品質的影響，也都是施工期間負面阻力，前述施工障礙或施工風險在過程中只要稍有處理不當，都會造成嚴重後果，松山線順利達成完工通車之使命，實賴捷運團隊兢兢業業努力不懈的結果。

## 通車後路網效益

臺北捷運至今已營運 18 年，過去配合捷運建設進行多次階段性營運模式調整，捷運松山線通車後與同為綠線的新店線銜接，臺北捷運路網營運模式將回歸

行政院核定規劃，路線整併為 5 條，路網內各路線依棕色（文湖線）、紅色（淡水信義線）、綠色（松山新店線）、橘色（中和新蘆線）、藍色（板南線）區分，同時路線賦予阿拉伯數字編號，對國際性大都市而言，捷運路網搭乘識別及易讀性大幅提升，每條路線都有固定候車月臺，不會誤搭其他路線列車，轉乘車站數增加至 12 個，轉乘次數明顯減少，透過輕鬆的站內轉乘，即可到達全路網 116 座車站的任一車站，除了有效分散目前特定路線尖峰時間方向性之人潮，也因為『松山～新店』及『淡水～象山』新營運模式，使得淡水信義線尖峰班距由 6 分鐘縮短為 3 分鐘，新店站至台電大樓站增開班車，班距可由 6 分鐘縮短為 4～5 分鐘，台電大樓站至捷運松山站班距則由 6 分鐘縮短為 3 分鐘，同時共計 346 個票價區間單程票價調降 5 元，捷運松山線通車後悠遊大臺北捷運路網因此將更省錢、省時而且更方便，估計至少每日約有 12.2 萬人次受惠。在松山線通車營運模式調整後，新通車路段每日平均運量約 26 萬人次，整個捷運路網每日服務運量增加至 200～220 萬人次，台北車站轉乘人潮至少明顯減少 25%～30%，越來越多乘客體驗到路網多點轉乘的便利性。

最後以台北市政府捷運工程局的願景『優質建設、效率捷運、台北悠遊行』作為結尾，這個成立 27 年的捷運團隊，從當初成立平均年齡不滿 30 歲到現在平均年齡超過 50 歲，唯一永遠不變的堅持就是為台北都會區持續打造可靠度第一，世界一流的都會捷運系統。

# 地工結構物的維護管理

專輯客座主編 周功台／台灣世曦工程顧問股份有限公司總工程師

國內重大公共工程、土木建設之興建，隨著經濟發展相繼推出也陸續完成，同時呈現逐年減少的趨勢，由於面對未來人口老化、勞動人口減少及醫療費用、年金等社會福利支出增加，以及經濟成長減緩，將使政府財政日漸困難，相對地公共工程預算勢必減少，再加上環保意識抬頭、工程用地取得困難，預期將促使後續工程建設逐漸由新建工程轉變為維護工程。世界各主要先進國家亦經歷大量基礎建設階段，而今其公共工程維護管理費用占公共工程投資費用之比例可高達3~4成，更足以引證國內工程設施維護管理時代的來臨。再者，台灣自然環境條件上地質破碎、雨量豐沛、地震頻繁及加上全球極端氣候等因素，使得國內工程設施維護管理作業更形重要，並且早年建設完成的工程、設施部份已因其構件、零件的老化、劣化現象，原有功能健全度與使用安全性業已大幅降低，甚至已達危及公共安全的地步（高雄氣爆事件即為一例），正視與積極進行工程設施維護管理工作有其急迫性。

地工結構物之維護管理目的在於及早發現地工結構物之異狀，進而研判異狀發生的原因，作為判斷地工結構物是否須維修與補強之依據，並藉此進行修復設計與施工。由於地工結構物與地層間之互制行為較複雜且位於地表下，故其機能狀況除非已發生明顯異狀，否則大部份難由目視判斷而發現，因此地工結構物維護管理之特徵為資料取得相對困難、改善效果不易以定量方式評估，此點有異於其他土木結構物。

地工結構物維護管理制度的建立有幾點觀念值得參考：

- 可將工程設施視為資產，導入生命週期成本概念，進行資產管理，客觀地預估中長期的資產狀態，考

慮於適當的時間，以適當的維修補強手段，執行維護管理工作，以最低的成本，得到最佳（或最適宜）的結構物機能及延長工程壽命。

- 在地工結構物機能下降至影響安全之前，即採行事先預防式的維護管理，其成效往往高於結構物發生異狀而機能下降至安全界限下之事後維護管理，而且成本較低。
- 新思維之維護管理流程應從規劃設計階段開始，審慎周詳地考量營運後之維修問題及成本，視規劃、設計、施工、營運後維護管理等階段為不可分割之一貫作業，以達成提高（或維持）結構服務機能、延長使用壽命及降低維護管理成本之目的。

本期地工結構物維護管理專輯之編寫，係將地工結構物概分為車行隧道、維生洞道、邊坡保護工及結構物基礎等四類，並邀集國內產官學界對該四領域經驗豐富之專家學者，從工程實務面分享地工結構物維護管理相關研究成果、實務應用及操作現況。在車行隧道方面，將有兩篇文章分別探討隧道之積極維護管理策略及營運期間結構行為演化；在維生洞道方面，亦有兩篇文章分別說明地下電纜洞道巡查重點與維護管理及輸水管線延壽問題；在邊坡方面，會有三篇文章介紹邊坡分級與維護管理及滑動調查；在結構物基礎方面，將有兩篇文章分享橋梁基礎換底工法經驗及擋土牆之維護管理。最後，希望藉由本專輯介紹，能讓工程界朋友較深入瞭解不同地工結構領域之維護管理作為，若能參考前述幾個維護管理重要觀念，共同思考如何精進管理、重視管理，將此等社會資產好好保存，那將會是編寫本專輯的最大收穫。🏡

# 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、地下水經年流蝕侵損、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.,<sup>[1]</sup>；Lee and Wang<sup>[2]</sup>；王泰典等<sup>[3]</sup>；Chiu et al.,<sup>[4]</sup>；Wang et al.,<sup>[5]</sup>），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<sup>[6]</sup>；Wang and Lee<sup>[7]</sup>）。

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<sup>[7]</sup>）。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

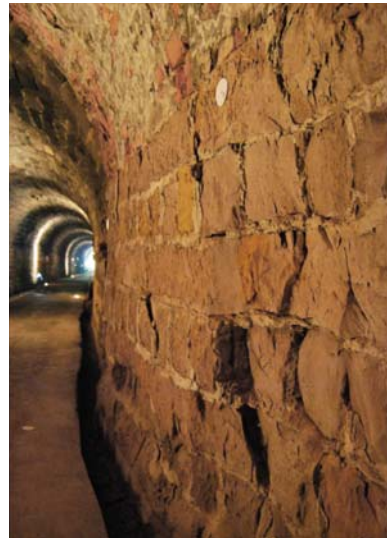


圖 2 獅球嶺隧道建於 1880 年代，因路線線型不佳，營運不及 7 年即廢棄。隧道採用磚塊及塊石疊砌支撐，因圍岩荷重持續作用造成過應力現象，磚塊及塊石中可以發現平行隧道周壁的裂縫，隧道壁面呈凹凸狀，地面有掉落的磚塊及塊石薄片。攝於 2008 年春。



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<sup>[8]</sup>）。

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<sup>[9]</sup>；陳營富與王泰典<sup>[10]</sup>、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，

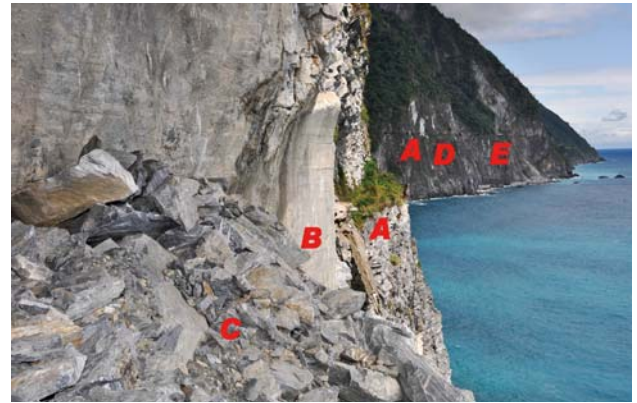


圖4 蘇花公路的修建可溯自清治1870年中期的人行步道，1930年前後日治時期的臨海道路，以及1940年代後期公路局陸續開建的現代化公路。圖中為清水隧道段，A處為1930年代臨海道路路跡、B處為1970年代建成的舊清水隧道襯砌殘垣、C處為崩落於舊清水隧道的土石、D處為清水斷崖、E處為大清水隧道南口、照片自己廢棄的清水隧道（1990年代完工）與舊清水隧道（1970年代完工）交會處向東北方拍攝，目前該路段公路通行2000年代建成的匯德隧道。

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<sup>[11,12]</sup>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<sup>[13]</sup>）、「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<sup>[14]</sup>），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<sup>[15]</sup>）以及「隧道補強技術與材料之開發總結報告書」（黃燦輝等<sup>[16]</sup>）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<sup>[17]</sup>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<sup>[18]</sup>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<sup>[19]</sup>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<sup>[20]</sup>）、「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<sup>[21]</sup>）、「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<sup>[17]</sup>）

[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。

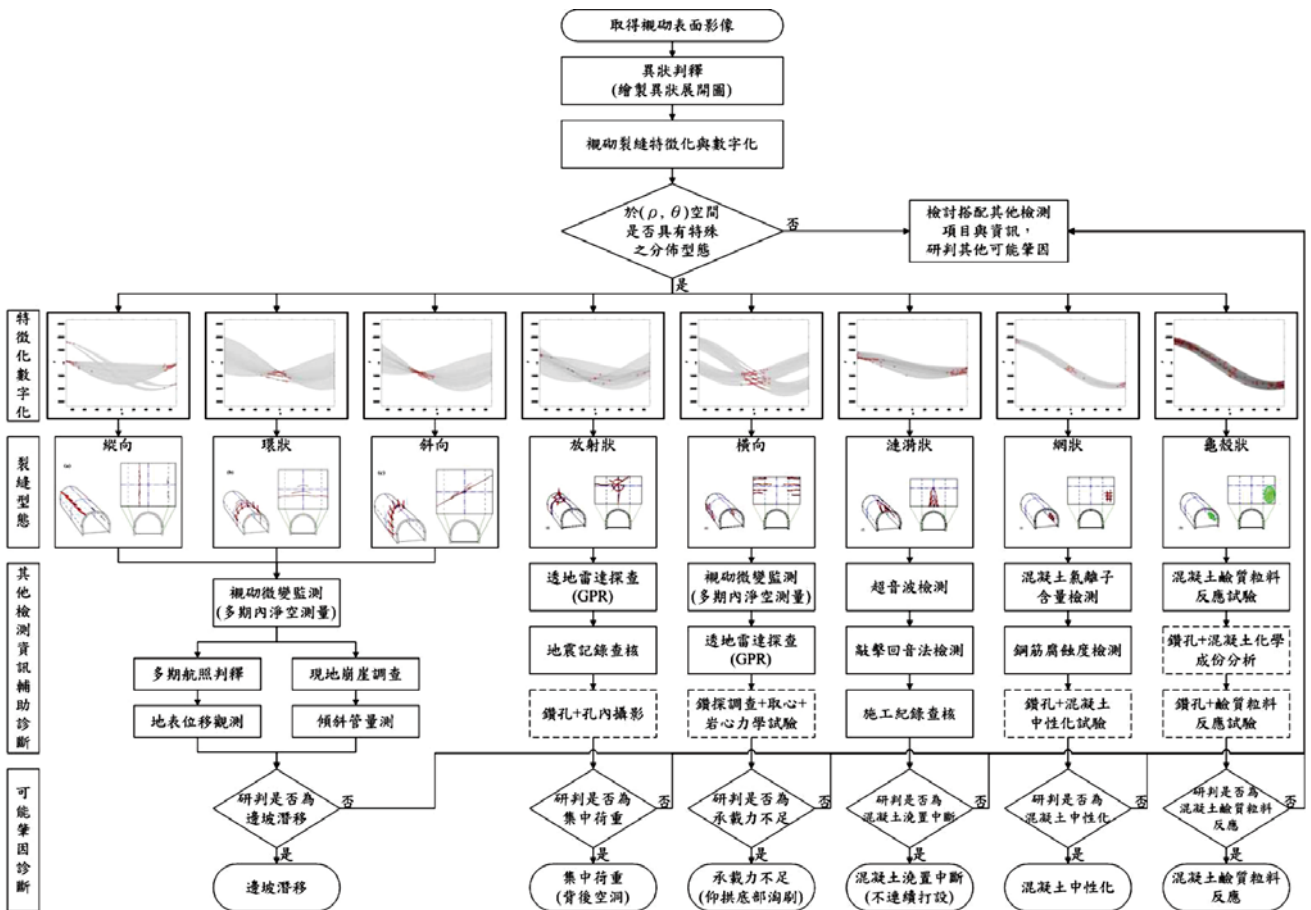


圖 6 李佳翰 [23] 建議的隧道襯砌異狀技術

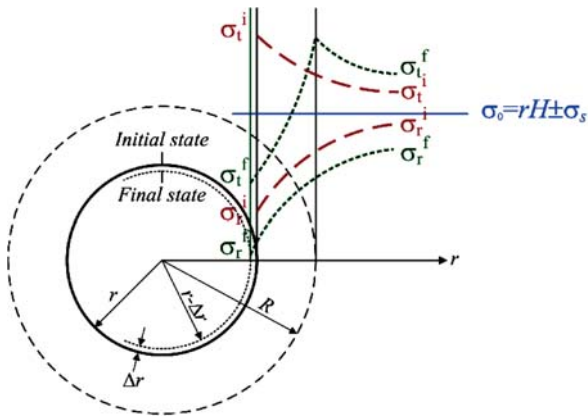


圖 7 現地應力為均向條件下圓形隧道開挖後圍岩應力分佈示意圖

Lombardi<sup>[37]</sup> 基於 Kirsch<sup>[32]</sup> 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<sup>[38]</sup> 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<sup>[39, 40]</sup> 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<sup>[34]</sup> 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<sup>[32]</sup> 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。

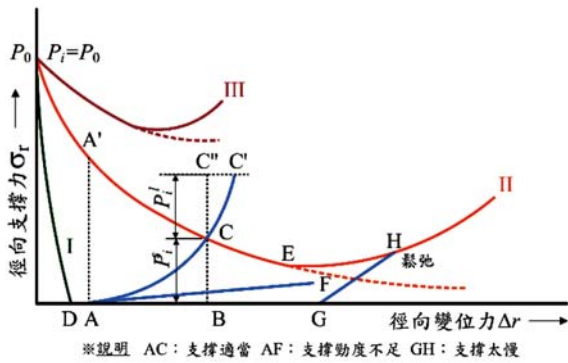


圖 8 岩石隧道開挖面附近圍岩—支撐系統閉合收斂關係簡化示意圖

朱晃葵等<sup>[41]</sup>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。

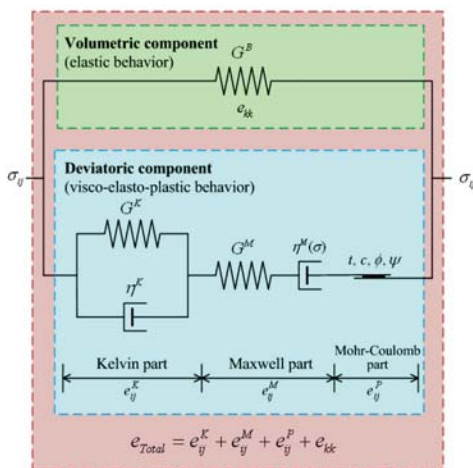


圖 9 朱晃葵等<sup>[41]</sup>所提非線性黏彈塑性模式

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<sup>[44]</sup>）。

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<sup>[16]</sup>）。

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<sup>[42]</sup>)，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<sup>[8]</sup>)。

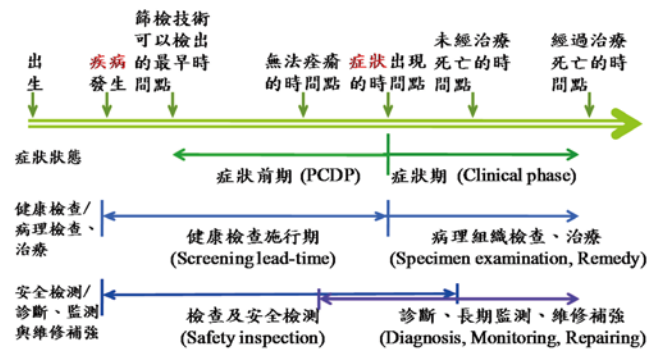


圖 10 現代化醫學公共衛生及家庭醫學領域有關人體病症自然史與檢查的適當時機以及隧道襯砌結構維護管理之安全檢測、診斷、監測與維修補強的關係。

## 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<sup>[42]</sup>；王泰典等<sup>[81]</sup>）

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之要求。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.,<sup>[43]</sup>)，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<sup>[44]</sup>)。

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<sup>[45]</sup>）。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<sup>[22, 26]</sup>；李佳翰<sup>[23]</sup>；邱雅筑<sup>[24]</sup>）。

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)。

# 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<sup>[1-3]</sup>，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<sup>[4-6]</sup>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<sup>[6]</sup>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」<sup>[6]</sup>和「捷運設施維護管理研討會」<sup>[7]</sup>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<sup>[8]</sup>

		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。

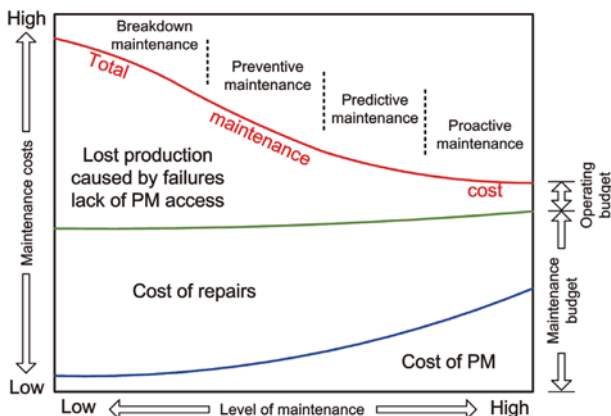


圖 1 維護管理策略與維護成本關係

表 2 台北潛盾隧道異狀分級表<sup>[8]</sup>

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<sup>[8,9]</sup>。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<sup>[8]</sup>

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<sup>[10-12]</sup>(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

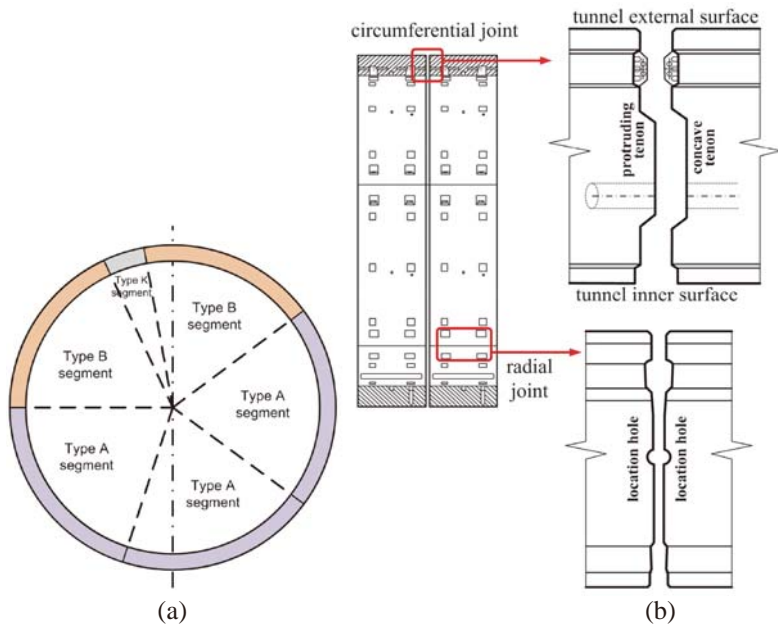


圖 3 潛盾隧道環片襯砌組件示意圖

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）<sup>[10,12-14]</sup>。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<sup>[15]</sup>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.<sup>[12]</sup>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.<sup>[16]</sup>，Shiba et al.<sup>[17]</sup>，Shiba et al.<sup>[18]</sup>，Wang<sup>[19,20]</sup>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.<sup>[10]</sup>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。

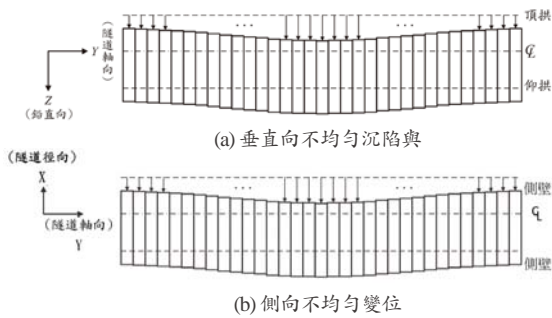


圖 4 捷運隧道常見變形行為

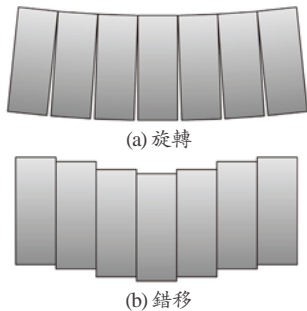


圖 5 潛盾隧道垂直向不均匀沉陷引致之襯砌變位形態

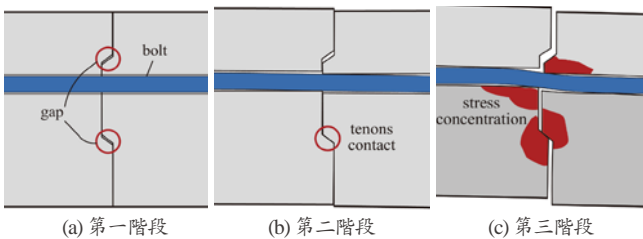


圖 6 潛盾隧道垂直向不均匀沉陷引致之頂拱環片變位過程

## 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鑿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<sup>[21]</sup>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<sup>[22]</sup>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<sup>[23]</sup>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<sup>[8]</sup>，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)。

# 地下電纜洞道巡查重點與維護管理

蕭勝任／台灣電力公司高屏供電區營運處處長

## 前言

目前台灣隨著經濟發展及大都會區建設的要求，即使能取得架空輸電線路地權，因受民眾抗爭及有礙觀瞻，亦很難興建架空輸電線路。取而代之之電力電纜具有本身安全、美觀的特點，已愈來愈多被採用，其數量也隨之大幅增加，電力電纜網的發展已成必然趨勢，因此，台電在都會區為解決電網建設問題及克服地下障礙物問題，對於電力網之建設已無法採一般管路方式佈設，需採涵洞或潛盾洞道佈設方式設計。同時，客戶對供電可靠性也有愈來愈高的要求。這就是需要建設成一個運轉可靠、維護即時、調度靈活的地下電力電網。而這樣的地下電網從規劃設計、基礎施工至運轉維護等各環節密不可分。然而，洞道電力電纜及附屬設備（諸如偵溫、照明、通風、冷卻等系統）是一個技術較高的專業，因此，必須針對以往洞道缺陷改善基礎建設至建立一套維護管理制度等兩方面，方可提高電纜的運轉維護管理。

在近幾年來各項先進技術不斷被引進，亦得到有效運用，因此，單一或分散的電纜運轉狀態監測手段是無法滿足實際管理的需要，必須建立多狀態監控系統，發展多狀態、多參數的電纜在線上監測，對電纜線路巡查及維護管理才有所助益，也為大都會區經濟建設提供可靠的電力網。

## 電力電纜之構造

目前台電所使用之電力電纜主要有充油電纜（以下亦稱 OF 電纜）及交連 PE 電纜（以下稱 XLPE 電纜）兩種<sup>(1)</sup>，就其構造及優缺點之比較分述如下：

### 充油電纜構造及優劣簡述

充油電纜之構造如圖 1 所示<sup>(1)</sup>，係利用電纜內環

形導體之中空部做為油的通路，其內注滿低粘度的絕緣油，然後，將油通路與設置在線路終端或其中點的油槽相互連通。當電纜通電溫度上昇時，油槽能承受絕緣油膨脹的擠壓，當溫度下降時，油收縮，油槽能供給電纜補油。如此，電纜的絕緣體經常受絕緣油的壓力，縱使導體溫度有任變化，絕緣體內部亦不產生氣泡（Void），故電纜劣化的現象可以防止，亦即電纜的使用壽命可以延長。電纜之容許溫度規定：(1) 常時間 85°C；(2) 短時間（緊急運轉）90°C；(3) 故障瞬時 150°C。

### ● 採用充油電纜之優缺點分析

A. 充油電纜之優點：(1) 設有油壓指示及警報系統，如線路有被挖掘傷及電纜漏油時，容易查覺，故維護容易，供電穩定可靠；(2) 絕緣體外側採波形鋁被套作為遮蔽，可承受系統之短路電流容量及具有機械強度之保護；(3) 導體中設有環形油通路，與油槽相互連接形成通路，並加絕緣油保持一定壓力，電纜絕緣體內無氣泡產生，則老化現象可以消除，故使用壽命長（至少 40 年）。

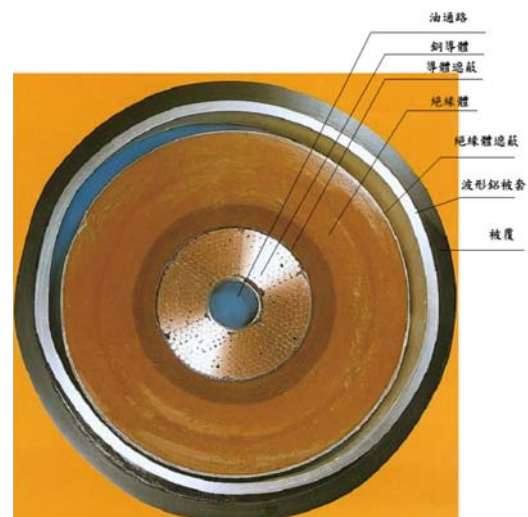


圖 1 充油電纜構造

B. 充油電纜之缺點：(1) 器材種類多，施工過程繁雜，工期長；(2) 線路縱斷圖須力求精確，以做為油壓計算及設定；(3) 線路兩端之高低差不能過大，否則補油設計有困難；(4) 線路需補油設備，其終端須設壓力調節槽 (Pressure Tank)，變電所須有足夠空間設置。如線路太長須於線路中間設置止油接續匣 (Stop Joint；S.J) 分段補油，但 S.J 處之道路其寬須有足夠空間施築油槽人孔；(5) 線路傾斜過大，電纜體心 (Cable Core) 有下滑現象，其裝設固定有困難；(6) 電纜廢油需予以回收，並須定期向環保單位繳交額外之環保處理費；(7) 導體容許最高溫度僅達 85°C，送電容量小於 XLPE (Cross-linked Polyethylene) 電纜；(8) 若兩端均為連接站，補油系統之警報器裝設困難，須利用管路敷設控制電纜連接至最近之變電所，再轉接至監控中心。

### XLPE 電纜構造及優劣簡述

XLPE 電纜是交連聚乙烯，其絕緣材料是將熱可塑性的 PE 經高壓高溫下加硫反應使其分子鏈強化，而具有耐高溫且不變形之特性，到目前為止 XLPE 是所有材料中能耐溫度最高者，構造如圖 2 所示<sup>[1]</sup>，其容許溫度如下：(1) 常時間 90°C；(2) 短時間 (緊急運轉) 130°C；(3) 故障瞬時 250°C。

#### ● 採用交連 PE 電纜之優缺點分析

A. XLPE 電纜之優點：(1) 器材種類少，施工較易；(2) 不需補油計算，線路縱斷圖除有明顯斜坡須考

慮止滑設計外，可簡化；(3) 不需補油設施，降低變電所空間，也可避免民眾對油槽之疑慮；(4) 耗材污染度低；(5) 導體容許最高溫度可達 90°C 較充油電纜 (85°C) 高，故送電容量大；(6) 無充油電纜所列上述劣點；(7) 附屬器材種類簡單，不如充油電纜多；(8) 介電損失 (Dielectric Loss； $\epsilon$  及  $\tan \delta$ ) 較充油電纜小，故電纜所產生之溫昇小於充油電纜，可減少線路損失。

B. XLPE 電纜之缺點：(1) 電纜被挖掘受傷無預警；(2) 電纜如有外傷其絕緣層易受水樹 (Water Tree) 之影響而劣化。如 161 kV 者需加止水層及遮水層二層保護絕緣層。

### 地下電纜的巡查重點管理

地下電纜線路至目前為止已有 345 kV 超高壓線路運轉實績，且在構成都市區之系統上佔有極重要的位置，並且肩負極大的輸電容量任務，針對電纜線路進行點檢、診斷等維護技術再精進是不可缺的，因此，實施例常的巡視和點檢早期發現異狀並安排停電作業予以改善，俾使設備維持一個正常的運作，防止重大事故發生，這是一個非常重要的作法。

XLPE 電纜和充油電纜相互比較，在維護管理上比較容易是其特徵，且年年有增加的趨勢。但是由於外傷或是施工不良等其他原因及電纜劣化等事故案例有之，而異常或以劣化診斷技術或將拆除品調查而去找出造成經年劣化狀態變化原因是值得去重視的。

另一方面充油電纜自運轉至今歷經年久之高齡設備今後也會一直增加著，但是使用年久而產生自然經年劣化，以致於絕緣破壞事故案例並沒有，反而是因鉛工接續部不良漏油或施工不良、金屬被異常等成為造成事故的主因。以下是介紹一般地下電纜之巡視、點檢、異常及劣化診斷<sup>[2]</sup>。

#### 巡視、點檢技術

地下電纜之巡視、點檢主要是執行外觀點檢，在電纜部份彎曲狀態、彎曲半徑等，而在接續匣方面則為防蝕層、接續匣移動、接地以及交錯狀態之點檢，此外充油電纜鉛工部份有無漏油、給油槽之油量高低、油壓監視等等之點檢等。

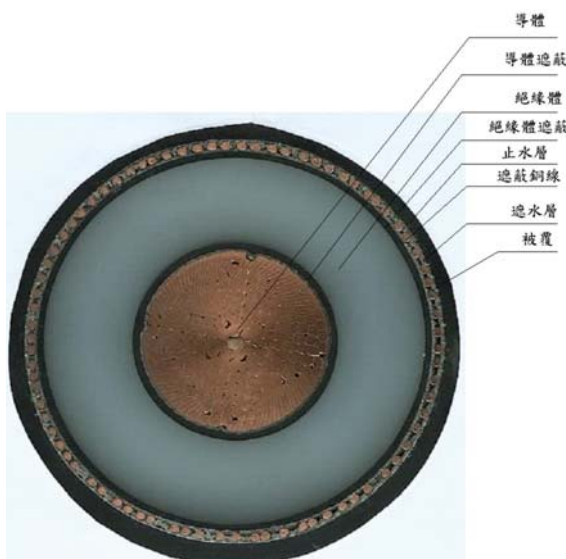


圖 2 XLPE 電纜構造

巡視分為一般巡視及豪雨、地震後巡視等二種，一般巡視項目如表 1 所示<sup>[2]</sup>，其週期：(1) 電纜經過路徑每月最少巡視一次；(2) 電纜防蝕外覆之絕緣電阻測試每二年一次；(3) 電纜絕緣體之絕緣電阻測試每二年一次；(4) 金屬遮蔽層連續性、人孔與終端之接地電阻測試每二年一次；(5) 電纜終端、人孔裝置物及電纜接頭等附屬設備之點檢每半年一次；(6) 電纜絕緣電阻小於 1000 MΩ 時，須作直流高壓洩漏電流測試；(7) 單電源線路每四年須作直流高壓洩漏電流測試一次。如遇豪雨、地震後巡視如表 2 所示<sup>[2]</sup>。

點檢項目主要分為初期檢點、定期點檢及臨時點檢三大部份分述如下：

(1) 初期檢點：一般新設備於初期發生異常之機率較

表 1 電纜洞道一般巡視項目

巡視項目	巡視內容
電纜沿線 (地上部份)	道路下陷、開挖、釘樁等之地形變化及第三者之行為
人孔蓋 直井 涵洞	出入口金屬蓋等有無破損、磨損，路面之高低狀態。金屬蓋緣與基座有無蓋妥及鬆弛、龜裂，出入口上有無放置不當物品之狀況
道路上通風孔	關閉有無良好
電纜終端及附屬設備	終端匣、電纜終端匣油液面高度、回線牌、電纜膨脹、損傷等異常，設備固定架之生銹、螺栓之脫落及生銹、接地線之固定狀態等。
連接站	監視設備 CAM 及 DPS 設備無異狀、無銹蝕。避雷器之破損、龜裂、計數器狀況，電纜之滑動、滑落，電纜固定匣之狀況。導線有無斷股。鐵構台架之生銹、損傷，螺栓之脫落，標識牌之損傷、脫落、剝離等
通風冷卻系統	送風機之機殼、基礎等有無異狀。冷卻水塔皮帶、散水槽、散水箱、浮球開關、水盤等是否良好。冰水主機運轉、管路及控制台無異狀。空調箱之恆溫儀表有無正常。水泵外觀、運轉振動有無異常。冷卻水水質自動監視系統等。
其他	偵測系統、滅火器... 等其他設備之有無異常

表 2 豪雨、地震後巡視

巡視項目	巡視內容
洞道內電纜及鐵器	電纜固定有無良好、有無破損，各項鐵器螺栓、螺帽有無生銹、脫落或鬆動
冰水管路	管路有無洩漏、鬆動
抽排水泵	排水功能正常、運轉有無異狀
冷風機	各裝置上螺栓有無鬆動、管路有無洩漏、濾網有無清潔
四用氣體測定器	指示功能有無正常
周圍牆壁	有無龜裂現象、嚴重滲水情形

多，必須對各相關設備詳細調查，以確認設備是否異常。初期點檢為輸電線新設竣工一年後；一年以內全部設備均為點檢對象。

- (2) 定期點檢：輸電線路全區間做定期設備之全部調查，以確認是否異常。定期點檢之週期由初期點檢實施後起算。
- (3) 臨時點檢：於初期點檢、定期點檢、事故等相同設備發現之異常，應假設其他處所亦有相同情況，而執行必要範圍相關異常項目之檢查，以資確認。臨時點檢時，電纜連接站支持物、礙子及導線等之點檢應同時實施之。

以下提出對於地下電纜線路點檢的項目、方法，對於實施之週期，建議依地區環境狀況斟酌調整，實施之週期分述如下：(1) 地下電纜管路人手孔、涵洞及橋梁等點檢實施週期為 1~3 年，實施外觀檢查；(2) 電纜終端匣及接續匣之點檢實施週期為 1~3 年，實施外觀檢查；(3) 給油裝置油槽、給油管、開閉閥、控制電纜、閘盤及警報器等之點檢實施週期為 1~3 年，實施外觀檢查；(4) 電纜連接站（鐵塔部分）避雷器、保護裝置點檢實施週期為 1~3 年實施外觀檢查。對於洞道點檢包涵土木結構物、機電及附屬設備等如表 3 至表 5 所示<sup>[2]</sup>。

表 3 地下電纜洞道之點檢項目

點檢項目	點檢內容
相位識別帶及線路名牌	有無脫落
電纜	電纜外表清潔有無受傷；固定座無鬆脫；OFFSET 彎曲半徑為 15D 以上
電纜接續匣	有無漏油或過熱（手觸與他處比較）
接地電纜	有無鬆脫、接地良好、感應電流無較高
附屬鐵配件、支架、支持礙子等	有無鏽蝕或鬆脫
電纜被覆保護裝置	鏽蝕、滲水或鬆脫
引出管路	防水圈位置正常、止水情形良好；管路有無滲水或滲油；管塞無遺失或脫落
洞道內	內壁有無滲水、有無積水
照明裝置、自動排水裝置	有無正常
冷風機	有無異狀
冷卻水管	有無異狀
感測器	溫度感測器有無異狀；四用氣體感測器有無異狀；其他感測器有無異狀
廣播系統	有無異狀
電纜沿線道路	有無下陷及開挖、釘樁等施工
人孔蓋（含內蓋）	有無破損、鬆動、銹蝕、凹凸及有無蓋妥影響交通四用氣體測定器
道路上通風孔（正常是關閉）	有無異狀

表 4 電纜線路終端及連接站點檢

點檢項目	點 檢 內 容
避雷器	外觀清潔有無裂痕或破損；噴氣孔有無噴氣現象；絕緣電阻測定及功率因素測定（初檢第一年及每十年一次。）
礙子及電纜終端匣	終端匣絕緣油面有無正常；礙子連外觀清潔有無破損；礙管清潔有無破損
電纜	引上電纜有無滑脫；電纜外被加墊廢電纜皮；電纜外被清潔、有無受傷或鼓脹；彎曲半徑為 15D 以上
接地電纜	有無鬆脫、接地良好、感應電流無較高
彈簧式固定座	有無良好
電纜支撐台架	有無鬆脫、銹蝕、標示牌有無異狀
附屬鐵配件及支架	有無鬆脫、銹蝕
引下線、接頭及端子板	有無鬆脫；引下線張力（避免太緊）；引線及支持物安全距離有無足夠；接續端子清潔及塗抹電氣接觸膏
電纜被覆保護裝置	有無鏽蝕、滲水或鬆脫
攝影機（CAM）	有無異狀
DTS 設備	有無異狀
控制電纜	有無正常

表 5 冷卻系統點檢

點檢項目	點 檢 內 容
冷卻水塔	管路有無漏水，螺絲是否鎖緊；散水（槽）箱有無異物阻塞，散熱片良好；皮帶有無磨損或太鬆，馬達運轉良好；水皿或出水網有無雜物；浮球開關水位正常；風車角度正常；順風板固定良好
空調箱	過濾網有無污垢；排水盤有無積垢；軸承上黃油或皮帶有無鬆動龜裂
送風機	螺絲有無鬆動，位置有無傾斜
冷風機	螺絲有無鬆動或管路接頭有無洩漏；濾網或盤管上有無灰塵（每年清洗過濾網一次，每二年清洗冷卻盤管一次）；凝結器有無污垢；運轉有無不尋常噪音；控制台警報有無異狀
冰水主機	管路有無漏水；運轉有無不尋常噪音；控制台警報有無異狀
冷媒值	高壓值 680 ~ 950 kpa；低壓值 193 ~ 414 kpa
冷凍油油壓值	966 ~ 1380 kpa
冷卻水溫度值	出水溫度值 29.5 ~ 37.0°C；進水溫度值 27.0 ~ 32.0°C
冰水溫度值	出水溫度值 6.8 ~ 8.5°C；進水溫度值 9.3 ~ 13.5°C
冷凍油油溫值	55.0 ~ 70.0°C
蒸發器溫度值	1.0 ~ 16.0°C
冷凝器溫度值	30.0 ~ 40.0°C
冷卻機房水泵	依規定維修保養（查保養卡）
壓縮機	有無漏油
加藥系統	控制台、液體位置有無異狀

## 電力電纜異狀管理

現場維護人員檢查與巡視電纜設備後，需填寫表 1 至表 5 相關引伸檢查紀錄、異狀紀錄和異狀報告單，並根據異狀之輕重緩急情況，分別交由管理或設計部門，以備安排計畫或配合停電處理。比較重大的電纜

設備異狀消除以後，應將發生異狀的時間地點、處理情形和施工負責人等紀錄登記在電纜保養卡內。如無需停電即可處理的電纜設備異狀，由檢查維護人員與管理或檢修部門等相關技術人員列出具體研究處理方案，以便隨時安排檢修處理。需要停電處理的電纜異狀應由管理或檢修部門統一計畫，申請臨時停電或配合檢修計畫處理。管理內容與控制要求如下<sup>[2,3]</sup>：

- (1) 設備異狀係指運轉中設備發生異常情況，設備性能改變，不能滿足運轉標準產生不良後果者。
- (2) 緊急異狀：指嚴重程度已使設備不能繼續安全運轉，隨時可能導致事故的異狀。緊急異狀包括：電纜接續匣過熱，電纜線路發生短路或接地故障，試送不良，變電所內開關設備嚴重電弧現象等。
- (3) 重大異狀：指異狀比較嚴重，但設備仍可短期運轉。重大異狀包括：洞道通風機故障、電纜接續匣過熱，電纜終端匣電暈，電纜接續匣表面電弧，電纜引接線燒損、斷股嚴重，接地線過熱、燒損、斷裂，OF 電纜本體滲油，避雷器絕緣不良，避雷器上下接線燒損，電纜孔蓋破損等。
- (4) 一般異狀：對安全運轉影響不大者。一般異狀包括：OF 電纜接續匣鉛工滲油，電纜洞道滲水、積水，通風設備起動不良，鐵器銹蝕等。
- (5) 設備異狀規定解除時間：(a) 緊急異狀：必須儘快解除（一般不超過 24 小時）或採取必要的安全技術措施進行臨時處理。緊急異狀立即向權責部門主管報告確定處理情形；(b) 重大異狀：應在短期內（10 天）解除，解除前應加強監視。重大急異狀應與權責部門主管報告研究處理情形；(c) 一般異狀：應列入年、月工作計畫內解除、異狀處理工作由現場管理部門根據異狀內容，要求維護班安排在計畫檢修工作中或非計畫檢修時進行處理。在工作前一天應將異狀交付維護班，每年異狀解除率應不得低於 95%。

## 異常及劣化診斷技術

XLPE 電纜長期劣化，水樹是重要劣化原因，需掌握這些劣化狀態之各種診斷方法檢討，及實施電纜拆除調查殘餘性能之確認。不過近年來電纜皆已加裝防水層，在 XLPE 電纜接續匣有超過 30 年之設備，電纜預鑄型絕緣體的析出物及矽油漏出等，都為經年劣化的現象，需透過事故資料分析等，掌握下一步情況。

### XLPE 劣化診斷技術 [1-3]

XLPE 電纜以非破壞方式檢出水樹劣化診斷之損失電流法、殘留電荷法等方法並介紹其測定之案例。

- (1) 損失電流法：將流在電纜絕緣體中之充電電流之損失電流第 3 次諧波成分作為劣化信號使用之診斷方法，依據第 3 次諧波成分之振幅和相位作劣化判定。
- (2) 殘留電荷法：加壓之直流電壓於接地放電之後再加交流電壓測定所放出之電荷加以評斷診斷劣化狀況手法，依照被檢出殘留電荷之交流帶電電壓，執行劣化程度的判斷。

另一方面，在 XLPE 電纜接續部診斷技術中，以非破壞診斷方法檢測之部份放電測定亦經常被應用。部份放電測定作線路檢出之例不勝枚舉，表 6 表示關於主要 XLPE 電纜的診斷方法。

表 6 XLPE 電纜之診斷方法

診斷方法	概要
損失電流法	應用充電電流中之損失電流第 3 高諧波成分，檢出水樹劣化狀態
殘留電荷法	依直流加壓被累積在水樹劣化部份之電荷依交流加壓放出檢出
耐電壓法	依 AC 耐壓電壓法加壓破壞性能已降低之弱點部份
部分放電測定	在固體絕緣物中空隙之內部放電、絕緣介面之介面空隙，檢知發生沿面放電等之部份放電

### 充油電纜的異常診斷技術 [1,2]

在充油電纜的異常現象方面常因振動，熱伸縮導體滑動及放電，並伴隨著氣體的發生。

- (1) 油中氣體分析：即使巡視並無法發現電纜內部的異常診斷方法，但從接續匣採取絕緣油加以分析是一種有效的方法。有異常徵兆時，該被判斷有問題之設備應繼續執行管控追蹤。
- (2) 導體移動測定：充油電纜之鋁被套其構造上與電纜導體之間有若干的安全絕緣間距，若佈設於傾斜地的情況，在兩者間將發生相對移動，接續匣內之止油部將會產生絕緣紙移動及損傷，伴隨著遮蔽層的凌亂及接地部份放電的發生，而引起絕緣破壞致導體移動現象。此對策係以 X 光線攝影接續匣內部情形判定導體移動量。但是因為在實施 X 線攝影時必須停電，比起活線採取絕緣油、採油、分析等，可作為其替代方式。
- (3) 油量、油壓之監視：由於充油電纜外傷及金屬疲勞

所引起之金屬遮蔽層微小龜裂，為了漏油異常的早期發現，對於給油槽之油量、油壓下降之監視是有效的。在最近以感知器作為信號傳輸，致使成本能夠降低，並構築一個監測系統，在給油槽設置了感知器，而將該信號資料傳輸送到維護單位，實務上有採用執行監視系統之案例，充油電纜之異常診斷技術方法如表 7。

表 7 充油電纜的診斷方法

診斷方法	概要
油中氣體分析	從接續匣所採取之絕緣油，其中溶解放電及熱分解等分解生成氣體（乙炔、可燃性氣體總量等）分析之
X 光線攝影	依 X 光射線對電纜及接續匣內部加以攝影，但不解剖，而調查導體移動等之內部狀況
部份放電測定	檢測出在電纜內部所發生之部份放電

### 地下電纜事故點測定技術 [1-3]

地下電纜幾乎都是埋在地底下，以目視點檢之範圍實在是非常的有限，因此一旦事故發生要發現事故點確實不容易，且為了表示各式各樣的地下輸電電纜的事故故障相別，有必要選擇其對應之測定方法，其流程圖如圖 3 所示。選定各式的測定方法，應考慮事故類別（接地、斷線）及接地之阻抗值，而採取最適當方法，以下逐一介紹測定方法。

- (1) 電橋法（10 MΩ 以下事故點抵抗適用）：其原理是利用惠斯登電橋的平衡，在遠端短路構成回路事故相和健全相並接續比例邊電阻，施加直流電壓，依調整比例邊電阻，再從所求取之電橋平衡條件至線路全長之導體電阻和至事故點導體電阻的比率而算出事故點位置，如圖 4 所示。地下電纜事故大部份是 1 相接地故障較多，本測定法是事故點測定方法中使用最多的一個，其誤差 10% 以下，故測定精確度高。
- (2) 脈衝波雷達法（斷線事故或高阻抗接地事故適用）：其原理是在事故相重覆施加電壓，使用示波器觀測故障點所反射回來之脈衝波，計算出從往回傳輸時至故障點之距離。本方法即使沒有健全相也是可以測定出事故點是其特徵，脈衝波的波形在傳輸中因有彎曲問題，需要熟練地往復來回時間的判讀，測定誤差在 1 ~ 4% 之間為此缺點，但電橋法對事故點為高阻抗並無法適用。

## 電力電纜隧道維護管理

台電公司在 1997 年建置第一條電纜專用隧道，目前已運轉中電纜隧道共有 40 公里，電纜隧道建造的方式有三種<sup>[3-7]</sup>：潛盾、推管和明挖，由於市區內地下設施交錯複雜，隧道建設多採用三維定向推管或潛盾推進方式，可巧妙的穿越地鐵，避開建築物的基礎等。但對於早期建造的電纜隧道以及建設場地條件較好的隧道多採用明挖方式建造。電纜隧道根據其建造方式不同分為矩形隧道和圓形隧道兩種，推管和潛盾方式建造的隧道都為圓形，明挖方式建造的隧道都為矩形。隧道的內徑取決於電纜佈設的密度，目前運轉中的圓形電纜隧道常見規格內徑為 2.5φ 米和 3φ 米，如圖 5 所示；矩形的電纜隧道常見規格尺寸為 2.2 m × 2.4 m 和 2.7 m × 2.7 m，斷面圖如圖 6 所示。

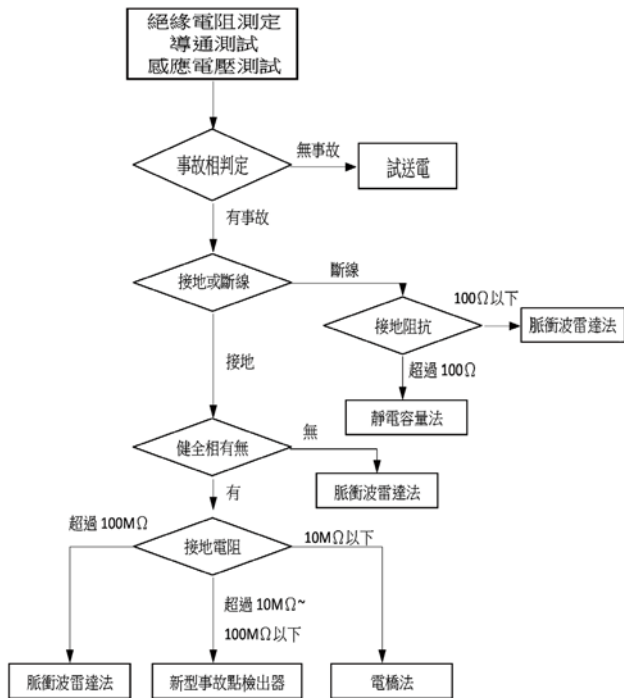


圖 3 事故點測定方法選定流程圖

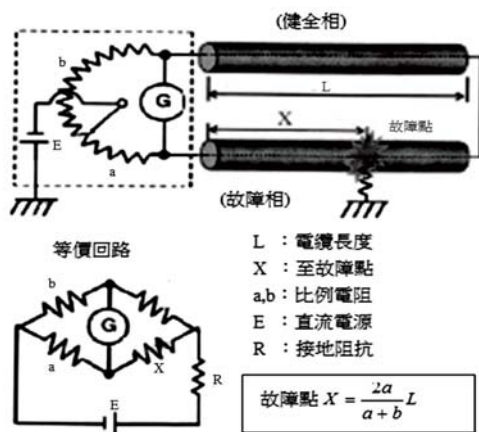


圖 4 電橋回路法測定原理

- (3) 新式事故點測定器：近年來隨著地下電纜範圍的擴大，在同一管路內設置了多回線且長距離化，又因為是並排左右施設常有互相感應電壓問題。在以往有充分實績測定事故點之電橋法，在互相感應電壓之測定下有 2 點是較不易解決：(a) 邊電阻燒損 (b) 電橋無法平衡。此對策是不使用邊電阻直接對事故相、健全相測定電壓，再從其比例算出故障點的距離，依此原理開發了新式事故點測定器，本測定器因有搭載了遮斷感應電壓之低域通過濾波器和測定電壓增幅回路，對於感應電壓在 300 伏特以下不受影響且能夠應用於事故點接地阻抗在 100 MΩ 以下之線路。



圖 5 電纜圓形隧道斷面圖



圖 6 電纜矩形隧道斷面圖

## 電纜隧道消防

台電公司電纜隧道消防理念是「預防為主、消防結合」，首先是杜絕火源，其次是掌握現場的溫度情況，及時消除隱憂，最後是採取隔離方法自熄。目前電纜隧道防火設施主要有幾類：目前 XLPE 電纜製造係根據 IEC60332 規定採用阻燃電纜防止電纜被覆層延燃，降低金屬遮蔽層溫升速率保護電纜主絕緣；在電纜表面或隧道安裝光纖感溫電纜，感溫電纜能實際檢測隧道溫度及電纜周為火災情形，並具備有警報功能。

## 電纜隧道的缺陷

電纜隧道的缺陷可分為附屬設備缺陷和土建設備缺陷兩類，其中附屬設備（如水泵、照明、控制電器等）缺陷佔大多數。根據缺陷原因分為設計、決策、施工、產品類形及品質原因等，其中又以設計和決策原因造成的缺陷修改較困難，且成本較高。以下列舉了幾項隧道典型缺陷。

- (1) 電纜隧道排水系統及通風孔高程缺陷：電纜隧道排水系統直接接入縣市政府排水溝內，如接入位置不理想會導致外面水倒灌，隧道積水。1989 年建造南部科學園區 345 kV 電纜隧道，其通風口設計未考慮曾文溪溪水暴漲問題，在一次颱風侵襲造成溪水暴漲，河水通過通風口倒灌進入電纜隧道，導致通風井和隧道被水淹沒，隧道附屬及電器設備損壞。
- (2) 施工原因隧道積水：電纜隧道內溫度和地面溫度存在溫差，在通風後地面暖濕氣流進入隧道後會凝結成水滴，大量的水滴滴落在地面會形成水流。如果通道地面沒有斜度或平路存在凹凸不平的情況就會形成大面積積水，如圖 7 所示，且排水工作也較困難，影響正常的巡視管理工作或造成隧道內鐵鋁配件銹蝕。
- (3) 電纜隧道牆體滲水：電纜隧道滲水幾乎是每條隧道的共通性問題，但是只要加強對關鍵滲水點（如人



圖 7 隧道積水

工井口、伸縮縫、過牆管、接縫處與通風口等）進行監控管理，還是會達到較好的效果。

牆體滲水會造成密封不良的信號；箱體進水將導致電器設備受潮短路；水滴滴落在光纖電纜會造成光纖傳輸衰減；牆體混凝土剝落造成結構體強度問題如圖 8、9 所示；固定電纜附屬鐵鋁配件銹蝕，如圖 10 所示；照明及有害氣體偵測系統損壞等，長時間會威脅電纜運轉之安全。

## 電纜隧道維護管理應注意的問題和解決辦法 [3-5]

- (1) 附屬設備選擇型號要合理化，型號要統一：電纜隧道採用的電器設備和附屬設備應盡量滿足型號統一為原則，有利於備品的統一。在選用的電器設備要滿足防水、防銹、長壽命的要求，選擇的附屬設備要滿足防銹、防霉、免維護的要求。



圖 8 伸縮縫漏水造成隧道積水



圖 9 隧道頂壁混凝土龜裂及鋼筋銹蝕



圖 10 鐵鋁配件銹蝕



- (2) 洞道施工要源頭管理：提前參與洞道地質調查、環境危害評估、設計、施工、監控等環節，及時消除洞道前期建設中暴露的問題。
- (3) 施工工期合理：洞道的基礎建設施工工期合理，避免為了趕工期而降低施工品質。避免洞道的基礎工程和電纜機電工程同時併行施工。
- (4) 採用防腐蝕之混凝土與鋼材：電纜洞道若位於臨海地區，洞道之滲水將深受海水成份影響，海水內所含之氯離子，進一步將引發洞道之混凝土龜裂、鋼筋鏽蝕等。其混凝土應採用第 II 型水泥（即抗硫水泥），另鋼筋宜依近海情形使用環氧樹脂鋼筋或鍍鋅鋼筋，防止鏽蝕。
- (5) 採用防腐蝕之塗料：電纜洞道避免污水或含有鹽份較重之水所侵蝕，其鐵鋁配件在安裝前應先行塗上船舶漆，如圖 11 所示。
- (6) 引進診斷技術：對於混凝土構造物的異常診斷，在診斷中可使用色素注入及超音波判斷龜裂深度測定，及依核心採取作壓縮強度測定、應用鋼筋腐蝕檢討作鹽分測定。
- (7) 建立分散式測溫系統：洞道監控系統；洞道消防系統的應用，總結出運轉管理經驗，使得更好的運轉服務，不斷提高洞道運轉管理效率<sup>[7]</sup>。
- (8) 提升工作要管理效益：設備管理要從被動故障檢修轉為主動維護保養，加強運用維護管理工作，減少設備故障，延長使用壽命，降低管理成本。

### 建立電纜洞道巡查智慧化管理模式<sup>[3-7]</sup>

- (1) 電纜洞道的建設應著重在：照明、機械通風、自動排水、通信、光纖測溫、通風或出入口集中監控、視頻監控等系統建置與互聯監控。
- (2) 改善電纜運轉維護管理模式應著重在：維護管理機制、方法、局部放電量測、紅外線熱像技術監測、電纜線路接地系統接地電流檢測、地理資訊系統的建立與應用、數據收集系統的建設與應用、洞道和電力電纜路徑的巡視與監測等機制之建立。

### 結論

以管理電力設備的標準來監控和管理電纜洞道，實現現有電纜洞道的智慧化，是保證電纜線路安全運轉的前提與基礎，洞道內設置光纖檢測溫度並設置溫度異常警報，實際監測環境溫度與洞道濕度是有其必



圖 11 鐵鋁配件塗船舶漆防銹蝕

要性。另外以科學的手段檢測電纜洞道的本體情況也是不可或缺的。

用狀態監測逐漸取代預防性試驗是未來發展趨勢，在線上量測可以及時瞭解電纜線路運轉狀態，以求維護管理的合理化，狀態監測技術的關鍵在於被測資訊的收集和抗干擾，量測裝置必須保證不影響電纜線路安全正常運轉，同時還要保證人身安全。

週期巡視、計畫檢修安全型和經濟技術角度來說有很大侷限性，無法保證電纜系統的安全運轉，更談不上及時發現問題預防事故。在靠大量增加運轉維護人員來應對已經不符現實要求的情況下，必須轉換電力電纜運轉管理模式，依靠電纜洞道的智慧化和對狀態監控系統，將運轉管理模式由原來的固定式的週期巡視、檢修模式逐步轉換到狀態監測和狀態檢修。單一或者分散的電力電纜運轉狀態監測已無法滿足實際運轉管理的需要，必需建立多狀態監控系統，發展多狀態、多參數的電纜在線上監測，對電纜線路本體外界環境實現集中管控，實現電力電纜網「可控、能控、在控」，達到預防事故、運轉安全可靠的目的。

### 參考資料

1. 台灣電力公司（1991），電纜維護手冊。
2. 台灣電力公司（2012），345 kV 電纜維護作業標準暨工作指導書。
3. 那瑩（2009），「沈陽供電公司電力電纜運行維護管理模式研究」，吉林大學管理學院碩士論文。
4. 李四川（2001），「共同管道及電力輸電線冷卻節能系統之研究」，國立臺北科技大學電機工程系碩士論文。
5. 竺文彥、李宗坤、鍾仁金、盧之偉（2005），「曲線推進工法規劃設計與施工」，地工技術雜誌，第 106 期，第 5-14 頁。
6. Duddeck, H. (1985), "Analysis of Linings for Shield Driven Tunnels", *Tunnelling in soft and water-bearing Grounds*, A. A. Balkema, pp. 235-241.
7. 蕭勝任、陳建富（2012），「345 kV 電力電纜表面溫度線上檢測技術之應用」，電機月刊第二十二卷第十二期，第 66-74 頁。

# 水之養命 — 自來水管網之 省力化及延壽維管新思維

范煥英／臺北自來水事業處工程總隊總隊長

范川江／臺北自來水事業處工程總隊科長

吳世紀／臺北自來水事業處工程總隊股長

李順敏／台灣世曦工程顧問股份有限公司資深協理

周永川／台灣世曦工程顧問股份有限公司副理

林俊良／台灣世曦工程顧問股份有限公司正工程師

## 前言

臺灣位處地震帶且地盤條件不佳，自來水管網面臨嚴峻之耐震考驗，於人口密集且日益繁榮之都會區，不僅空間狹小，各類地下管線亦多，加以國民生活水準提高，都會區民眾對道路交通、路面等環境品質要求高，於道路下大面積開挖進行老舊幹管汰換、維修等工作均面臨困難處境，推行不易。故有限空間之省力化檢修、汰舊維護兼顧耐震作為，逐年降低滲漏水率、延長使用年限、確保供水安全已為供水主管機關之重要課題。

本文將以臺北自來水事業處（簡稱北水處）針對大口徑輸水幹管所採行之省力化維護及快速化維修實務作法，進行主要幹管清洗、檢視及修復等設計及施工實務探討，並就國外技術與思維進行檢討，俾利後續策進改善及推廣適用，同時可為其他單位之參考。

## 管線漏水致因

自來水供水系統與都市建設發展同步，主要幹管多屬早期建置埋設，管齡普遍老舊，復隨都市進步與繁榮，其他民生管線包括衛生下水道、瓦斯、光纖、固網、通訊等各類管線相繼於後期施設，於有限之道路空間層疊交錯佈設，導致早期建置之自來水幹管常

被其他地下管線覆蓋，造成老舊幹管汰換及維護困難，因此，老舊管線長年使用下，無法獲得適當之維護及補強，導致管材之惡化，致使漏水率亦逐年攀升。

漏水率高之另一主因係自來水管線多位處覆土淺（3～8m）之易擾動帶，管身或管件受到過大外力或過大內壓力或不均勻荷重時，易引致管體的破裂、斷裂之破管或爆管現象；另於接頭部位，其間縫隙常因劣化並加以外力荷重而逐漸變大，如止水塑膠墊圈材質老化或受侵蝕、地震、震動移位；亦有管體因水質或土質之腐蝕影響產生破洞而有滲漏，或為閥栓閉鎖不全、設備損壞而滲漏；管線滲漏異狀如圖 1<sup>[1]</sup>。

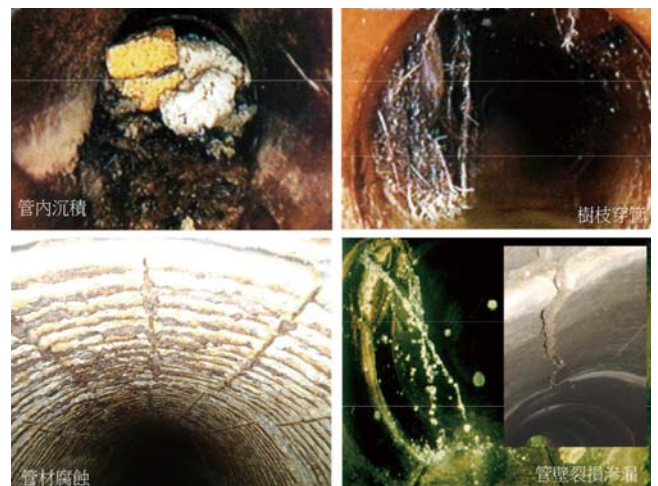


圖 1 地下維生管線之常見異狀（引自子申應用材料公司）

造成前述之漏水並非單一，可能為多項複合因素，然依呂崇德、黃文吉（2004）之調查，管線材料質劣化問題應為首要，尤其埋設環境若交通量大且有重車輾壓，此甚易造成破管問題；除上述材質問題外，規劃設計不良（如荷重條件採擇不佳）、操作不當（如抽水機不當關機造成水錘壓力）、施工品質不佳（如接合時橡皮墊未確實安放及接頭螺栓未鎖緊）、施工意外挖損、埋設環境變異（如沉陷、地震、邊坡滑動）等因素亦為部份之可能肇因。

### 幹管省力化免開挖檢視

管線埋設於地下，狀態檢修以明挖辨識最為直接且效果佳，但於現地以大面積破壞之調查方式，費用不僅高、困難度大且需辦理管制、復舊等配合作業，因耗時較長，長期衝擊交通而造成不便，而常引致民怨，故研發出透地雷達（Ground Penetration Radar）、漏水探知器、金屬管探測器、聽音棒等小口徑管線免開挖且省力之檢測方法，施行依管線管種、管徑需求辦理，所得效果亦不同；管徑 700 mm 以下則利用自走式電視檢視器（CCTV）逐段檢視管內損壞狀況並錄影保存。對於自來水管徑 1,000 mm 以上（含）之檢測，則可以人員進入管內方式直接檢查，配合工具則有採用攝錄影機、照相等，將管體損壞狀況拍攝錄影存證，作為清理、修膳之依據。此免開挖檢視工法說明如下：

#### ● 自走式 CCTV 管內攝影調查

免開挖維護工法主要係藉由人孔進入管內，以人工目視及量測方式檢視。口徑小於 700 mm 以下之管線則採機械自走式攝影機 CCTV 進行管內調查，調查內容包括接頭、管身及內襯等，並依檢視結果再進一步評估是否該修復或補強；如北水處轄區口徑 700 mm 以上之輸水管材以延性鑄鐵、一般鑄鐵管以及鋼襯預力混凝土管為主，在正常使用環境下，少數管身雖發現有嚴重腐蝕、鑄造品質不良或遭受外力破壞之管斷問題，整體而言，大口徑輸水管管身破裂所導致之漏水較少發生，主要漏水多於接頭因素所造成。

以目前自來水業最普遍使用之延性鑄鐵管為例，採柔性承插式 K 型接頭為接合方式，故檢視之內容為目視管身狀況以及丈量內部接頭間隙是否超出容許值，接頭間隙容許值包括二個指標：有效插入深度及撓角（如圖 2），若

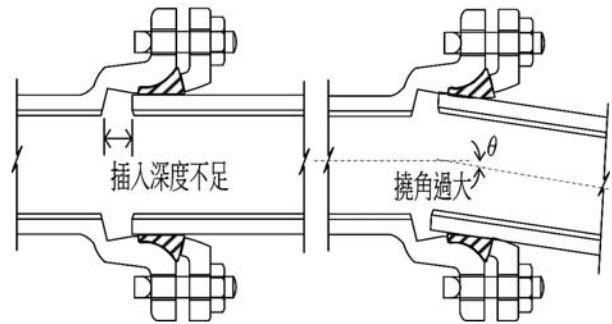


圖 2 接頭插入深度及撓角異常示意

大口徑輸水幹管有效插入深度或撓角超過容許範圍則有脫落爆管危機，可能釀成巨大災變，不得不慎。其容許撓角及間隙值隨口徑大小而異（如表 1），管徑越大則其容許撓角越小、容許間隙越大，而接頭檢視修復之最主要目的即在於確認接頭現況是否超出容許值，並及時進行補強措施，防範於未然。

表 1 K 型接頭容許撓角及間隙

管徑 (mm)	800	900	1000	1200	1500	1650	2000	2600
容許撓角	2°10'	2°00'	1°50'	1°30'	1°30'	1°30'	1°30'	1°30'
容許間隙 (mm)	64	64	72	72	72	90	105	141

#### ● AMI 智慧化水錶

美國加州舊金山之 EBMUD（East Bay Municipal Utility District）公司為減少漏水率，近期於用戶端採用了 Advanced Metering Infrastructure（AMI）智慧化水錶，藉以搜集用戶每日用水量資料，透過分析可更方便了解用戶區域之用水狀態，以更有效地確認區域之滲漏及用水狀態，期達省水及供水分配目的。EBMUD 的智能電錶每隔一小時可讀取用水資料、更新與記錄用水讀數。目前此屬初期階段，EBMUD 可配合提出需求之用戶提供免費安裝之服務。

#### ● 快速非破壞檢漏及定位技術

區域掌握有滲漏水問題，然如何精確偵測到實際水管漏水位置，以明確降低施工修復造成之開挖破壞，此技術有其發展必要；EBMUD 比較現今數種非破壞性測漏系統之優劣，包括有 Berkeley Pipeline Leak Detection System、Smart Ball、Sahara Tethered System、Leakfinder RT 等方式，各方法以非破壞性之電磁法、超音波法配合音差原理等物理方式探測應用；經其將

各方法初步應用於舊金山 Berkeley 區域（管線總長約 250 miles），以 Berkeley Pipeline Leak Detection System（詳圖 3）較佳，此法於各不同管種檢測，檢測成效以於 Cast iron pipe 之準確率達 71% 為最佳。國內則以 Smart Ball 有執行實績。

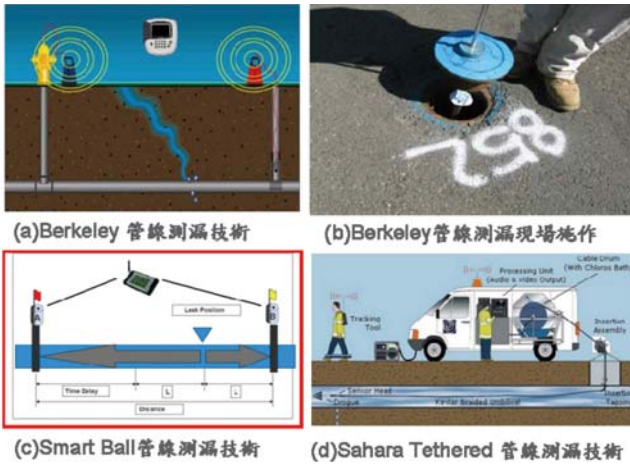


圖 3 舊金山 EBMUD 之非破壞檢漏技術

## 幹管免開挖修復實務探討

### 免開挖修復工法概述

免開挖工法係指以免開挖或儘量減少開挖之方式，完成地下管線設置、修復或更新之技術。經蒐集國內外可運用於自來水管線工程之各種免開挖工法，於中、大管徑管線汰換之免開挖修復工法可以區段修復新設（Installation）、線上置換（Renew）及局部修補（Rehabilitation）三大方式進行區分，詳表 2。

表 2 免開挖工法分類

區段修復	內襯工法	水泥砂漿內襯、環氧樹脂內襯、現場固化內襯、
	內套管工法	傳統內套管、緊貼內套管、鋼管內套管法
線上置換	裂管工法	-
局部修補	接頭套環修漏	-

### 國內免開挖修復案例

近年來，北水處主要應用於幹管維護修，復施工方法包括有內套環工法、鋼襯板工法、內套環及鋼襯板組合修復工法、現場內襯固化工法（CIPP）等四種，適用性各自有異，茲分述如下：

### 1. 內套環工法

此法係利用人力進入管內針對單點組裝內套環之止水工法，內套環首先於管內組成片狀止水膠圈並於施加預力於不銹鋼邊框，將膠圈環外撐於舊管管壁上固定，而達到止水之目的，屬於一種柔性修復方式；橡膠圈環及不銹鋼邊框，一般較常應用於柔性接頭處修復，完成後仍維持原有接頭吸收變形之能力（如圖 4）。

此法為北水處目前最廣運用之幹管維護修復方式，幹管可修復口徑最小為 700 mm，北水處之清一幹線（與清二幹線互為備援管線），於 73 完工啟用至今已近 30 年，此幹管徑自最上游淨水廠出口端之 3,400 mm 出水管接至下游配水池端 1000 mm 進水管，此區段長達 3,500 m，藉由沿線排氣閥人孔進入管內利用高壓噴水槍洗清管壁深褐色管垢（圖 5），再檢視接頭及管身有無異常，並逐一量測接頭間隙；檢視此區段之預力混凝土管（PCCP）及延性鑄鐵管段（DIP），局部管段發現包括 2,500 mm-3 處及 1,000 mm-4 處之接頭異常且具漏水之虞。修復方式后經評估后採內套環修復補強（圖 6）。

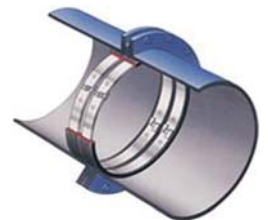


圖 4 內套環修復工法



圖 5 內套環不銹鋼固定框施預力



圖 6 2500 mm 內套環完成

## 2. 鋼襯板工法

因北水處清一幹線上游隧道段壁體曾有明顯滲漏情況，該管段先前曾採用玻璃纖維 FRP 塊狀補丁方式及鋼襯板結構修補管壁，經多年後檢視，部分修復板有整塊剝離壁面而遭水流沖至下游卡住閘類造成維護問題。後續隧道段之檢修設計採內套鋼襯板之工法補強修復（圖 7），此法係採塗覆環氧樹脂之鋼板（厚度 10 mm）或不鏽鋼板於大口徑輸水幹管內焊接組合成連續性之內套管，屬剛性修復方式，鋼襯內套管與舊管內壁間隙採無收縮水泥填補，內套管二端採膨脹螺栓穿孔環狀加固固定，避免補強板與舊管間之錯動或脫離，長度較短管段則採 SUS304 不銹鋼卷（圖 8），此工法較適用於幹管口徑大於 2,000 mm 有鋼筋混凝土襯砌或管壁較厚之隧道結構型式輸水管段。

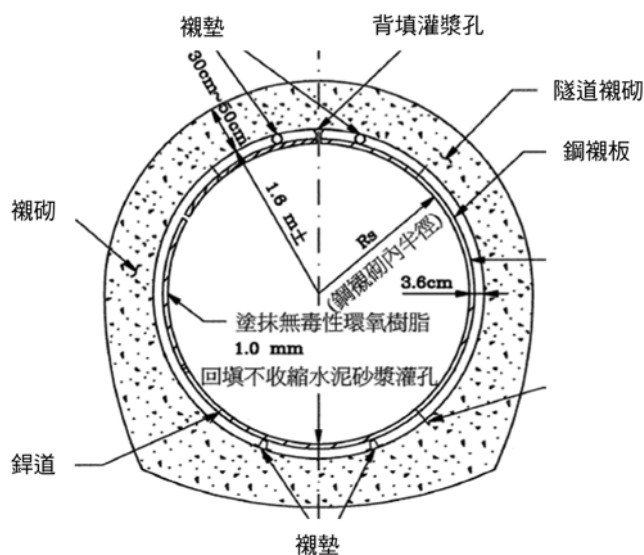


圖 7 清一幹線內襯以鋼襯板補強



圖 8 鋼襯板補強施工

## 3. 內套環及鋼襯板組合修復工法

北水處位於新店寶慶街之供水幹管係以推進工法穿越路口之 RCP 內穿 1,000 mm DIP 管段，作為備援管線暫未通水，經管內檢視結果發現管身破損嚴重，有遭污水下水道推進掘進機頭穿破（如圖 9）問題，因管段為推進段深度極深且上方為重要幹道無法以明挖方式補強。經評估，破損管段以就地保護原則採內套環及鋼襯板工法修復，此法係以不銹鋼板內襯包覆破損處，並於二端點處以內套環加固止水（如圖 10），補強施工主要係利用鄰近既有排氣閘人孔進出吊運人員、物料及機具，由於施工人員位於管徑 1,000 mm 之狹小局限空間內進行鋼襯板運輸及銲接組合，銲接作業會產生大量有害氣體，故管內通風排氣等勞安措施均作嚴格要求及落實。

## 4. 現場內襯固化工法

於口徑 500 mm ~ 1,000 mm 之幹管，北水處曾應用內管更生方式，此法係於欲修復之管段兩端開設工作井，斷管後利用水壓將塗有 EPOXY 之不織布內襯軟管穿入舊管內緊貼管壁，再將水加溫固化形成 EPOXY 內襯軟管，固化後內襯管具有半結構強度，管身或接頭可獲連續性之線狀修復；以公館污泥管之修復例進行說明，該處管材為 RCP 內穿 500 mm 之 DIP，穿越最熱鬧且行人車輛密集之商圈路段，有多次發生漏水現象，因本管段係管中管形式，致 DIP 管之確切漏水點難以覓得，且現場環境交通繁忙難以封路全段開挖汰換，故經評估後採全段內襯固化工法（Cured-In-Place Pipe, CIPP）進行約 120 m 長之內襯更生（圖 11）。

考量到達管段末端為立面彎管，必須增加內襯管穿管水頭壓力，因此，加高發進塔高度俾使水頭壓力足以突破內襯軟管與舊管間之摩擦阻力進而穿越立面彎頭出坑。此外，鑒於到達井位處行人稠密區，亦縮小範圍以避免影響行人通行（圖 12），於二週之停水期間內順利完成舊管清洗、排水、穿管、加熱固化、端點處理及全段試水等作業，成效良好。此法建議適用於受損範圍大、密度高或老化程度較嚴重管段，施工需於空管狀態施工，備援供水系統需予配合及考量。

## 管網設施延壽／抗震技術與思維

台灣位處於地震帶，為確保震災後能正常供水，針對重要供水設施進行耐震評估、提升自來水設施耐



圖 9 管身遭污水管橫向穿破



圖 10 鋼視板及內套環之組合

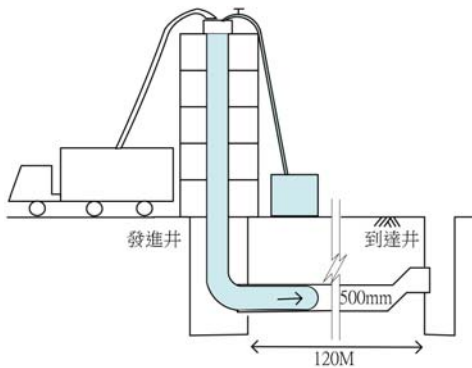


圖 11 污泥管內視固化工法示意圖

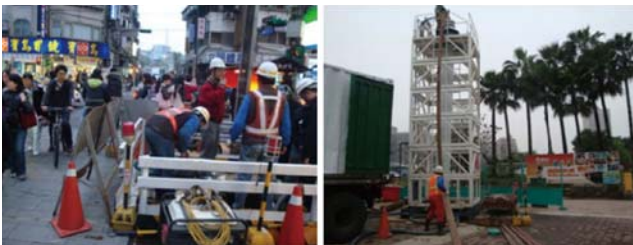
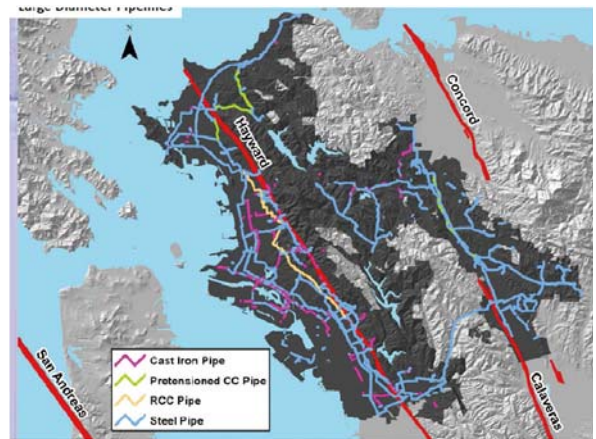


圖 12 到達井位於行人稠密區及發進壓力塔配置

震能力，已成為我國自來水單位主管機關重要政策之一，為減少震損、停水期間及例行維修耗費，國外於相關之技術與作為分述如下：

### 管網風險、脆弱性評估及強化計畫

美國加州位於太平洋板塊及北美板塊間，地震活動頻繁，1906.4.18 聖安德列斯斷層（San Andreas fault）在舊金山持續斷裂，毀損了上萬建築物與公共設施及引起大火。地震造成 3 千多人喪生，此斷層橫跨美國加州西部、南部以及墨西哥下加利州北部和東部，活躍性甚高，除此斷層外，舊金山灣區鄰近之斷層尚有 Calaveras, Concord-Green Valley, Greenville, Hayward, Rodgers Creek, and San Gregorio Faults，斷層不僅活躍，每年經測量估算約可達 6 ~ 30 mm / 年以上之變化速率，對主要供水之 EBMUD 公司，斷層對自來水設施／管網之影響除需評估其可能之發生風險外，管網設施之脆弱性亦需整體評估，以為耐震補強措施執行之考慮依據。EBMUD 公司發展自來水系統震後災損預估系統，配合 USGS 的格網、SHAKE MAP 與 GIS MAP 為底圖及其它相關資料，模擬評估於主要地震事件下其所管轄之 29 處土石壩、147 處儲水槽及 360 miles 幹管之脆弱性，所獲結果可供 EBMUD 人事訓練調動調整、應變計畫擬定、供水量評估及結構／管線提昇加強、預算控制／調配之參考依據（詳圖 13）。



Total Percent Summary

Pipe Material	G1	G2	H3	H4	H5	SA6
Cast Iron	85%	81%	73%	73%	73%	65%
Reinforced CC	71%	57%	31%	31%	31%	24%
Pretensioned CC	12%	8%	6%	6%	6%	6%
Steel < 1950	15%	14%	14%	14%	14%	8%
1950 < Steel < 1970	6%	6%	6%	6%	6%	0%
1970 < Steel	2%	2%	2%	2%	2%	0%
<b>Total</b>	<b>18%</b>	<b>17%</b>	<b>15%</b>	<b>15%</b>	<b>15%</b>	<b>10%</b>

圖 13 自來水幹管 GIS 脆弱性及不同震度規模之各管種破壞分析

EBMUD 針對所屬設施進行受損風險、耐震能力與耐震強化型式進行評估，並依結構設施評估、財務分析與預計復舊需求就各類設施進行耐震強化，強化處理對象包括淨水場之樑柱配筋加強、建物與設備加強錨定、抽水站管線與版結構以 FRP 包覆加強、儲水槽 (water storage tank) 用鋼絞線索束帶與噴凝土方式強化混凝土型式儲水槽。

### 震後應變及管材、接頭抗震強化

日本活斷層多達 2000 餘條，阪神地震 (1996 年) 後各類管線管材及接頭震損嚴重，之後於管線及接頭部份發展有多款之抗震接頭及抗震管材，於積極推廣及佈設下，東日本 311 大地震 (2011 年) 之管線抗震效益已有顯現；依 311 地震後調查了解，鄰近震央附近千葉縣 (Iwate)、宮島縣 (Miyagi)、福島縣 (Fukushima) 之供水設施、原水幹管、供水分支管等均嚴重受損，造成 250 萬戶無法供水。其中，千葉縣水道局服務客戶達 300 萬戶，每日供水量約達 100 萬 m<sup>3</sup>，管轄有 4 處取水站、5 處淨水場、14 處抽水站、8,700 Km 管線，震後有 83% 之災損發生於開墾區，並有 766 處滲漏，漏水主因為接合處之脫落，由於無法於短期內修復，水道局於學校及鄰近抽水站等處緊急供水；另震後調查於 NS type 接頭無災損，耐震具成效，美國加州相關供水及學術單位則針對此類型接頭進行研究及合作發展。

近期日本於管線抗震之其他新發展，包括有針對發生斷層錯動時之影響幹管位置不易確定問題研析防災對策，一般遭遇此狀況設計施工多採鋼製管材穿越斷層，然斷層移位型式不同，管材受震則可能發生有拉伸 (正斷層)、壓縮 (逆斷層)、多方向變位 (平移斷層) 行為，一般鋼管管材受斷層錯動，管壁易開裂漏水，日本 JFE Engineering Corp. 生產 SPF 特殊鋼管材料具彈塑性，於斷層錯動受震變位後其管壁延展形成脊背形塑性區<sup>[6]</sup>，不易開裂特性而於震後仍可維持斷面大部份供水，幹管穿越大型之斷層變位區域可考量運用。另日本推動供水幹線耐震化多年，積極採用耐震延性鑄鐵管 (Earthquake Resistant Ductile Iron Pipe)，其接頭除能抗拉脫外，並能提供約 ±1% 管長之拉伸與收縮量，及約 6 ~ 8 度之彎曲角度，已於歷次重大地震事件中獲得驗證，能有效抵抗震害。(詳圖 14)

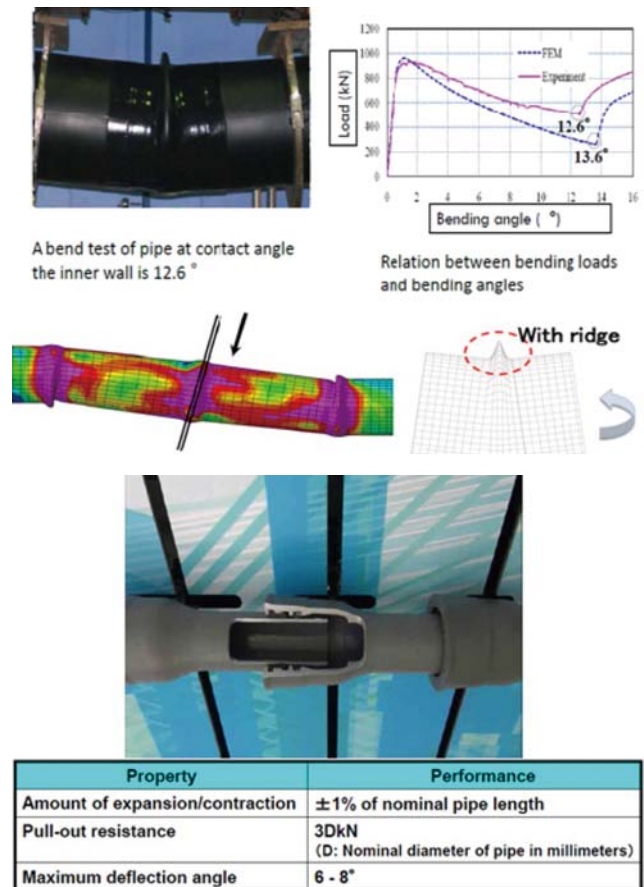


圖 14 JFE 之 SPF 自來水幹管抗彎曲變形試驗分析及 ERDIP 耐震管

### 淺覆蓋層幹管之穿越活斷層對策

加州 Hayward 斷層屬平移斷層，幹管穿越處之該斷層每年平均位移量調查得知可達 6 mm，主要可能之地層破裂帶寬約 23 m，第二可能之裂損之區域則約達 60 m。為確保此區段供水系統之耐震性及達供水不中斷之目的，加州州政府舊金山公用事業委員會 (SFPUC) 考量幹管穿越交流道處覆土尚淺，搶修尚屬可行，又另考量斷層變位具多方向變位特性，SFPUC 所採穿越活斷層之幹管抗震設計係採預留空間及中置鋼管之策略，其箱涵為可滑動式混凝土箱涵 (七段，箱涵間僅設有簡易止水條)，箱涵兩側各至少留設有 1.5 m 以上空間，平時兼作維修巡檢步道；對各方向可能之斷層變位，鋼管考量於兩端設有球型 (Ball Joint，具 12 度可彎曲能力) 及配有千斤頂承受壓縮或拉伸之可滑型 (Slip Joint) 等抗震設施，詳圖 15 ~ 16。

### 深覆蓋層幹管之穿越活斷層對策

EBMUD 輸水幹管於 Claremont 附近穿越 Hayward

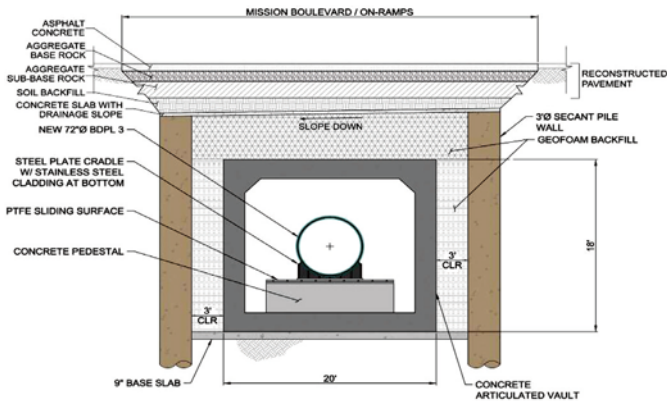


圖 15 穿越 Hayward fault 幹管斷面 [7]

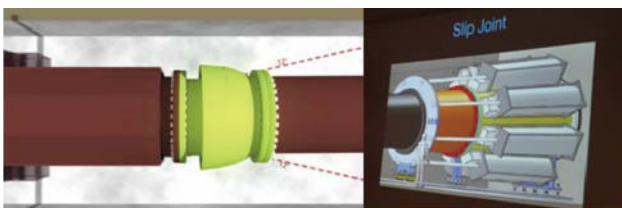


圖 16 球型 (Ball Joint) 及可滑型 (Slip Joint) 接頭 [7]

斷層，斷層區段覆土厚達 200ft (約 60 m)，無法以明挖箱涵方式穿越，幹管抗震對策需配合所採用之山岳隧道方式研擬；依調查，Hayward 斷層每年變位速率達

0.25” (6.35 mm) / 年，故以 M = 7 規模之錯動量約 5ft + 16% 超越機率之可能產生之 2.5ft + 50 年生命週期估算潛變變位量  $50 \times 0.25 \div 1ft$ ，總計水平變位為 8.5ft (約 3 m)，故山岳隧道開挖時於兩側擴挖側導坑以預留所考量之變形空間 (約 3 m，完成後以低強度混凝土填充)，中間主坑則置放一直徑  $\phi 2$  m，長 85ft 之鋼管 (兩側增設基座)，以於緊急狀況時兩端非斷層位置則可以混凝土填充後而與明渠段 / 界面段銜接，由鋼管提供緊急供水 (詳圖 17)。

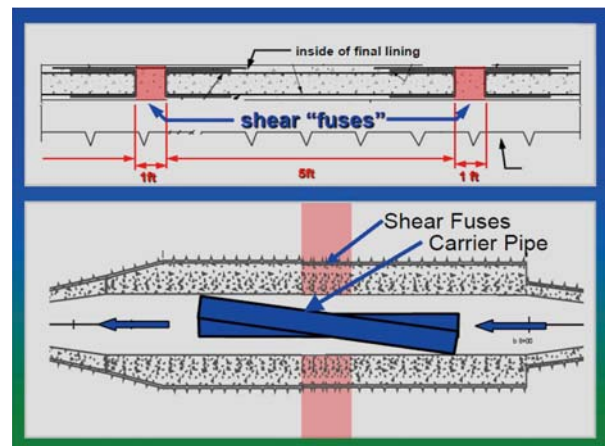


圖 17 穿越 Hayward 斷層隧道設計 [5]

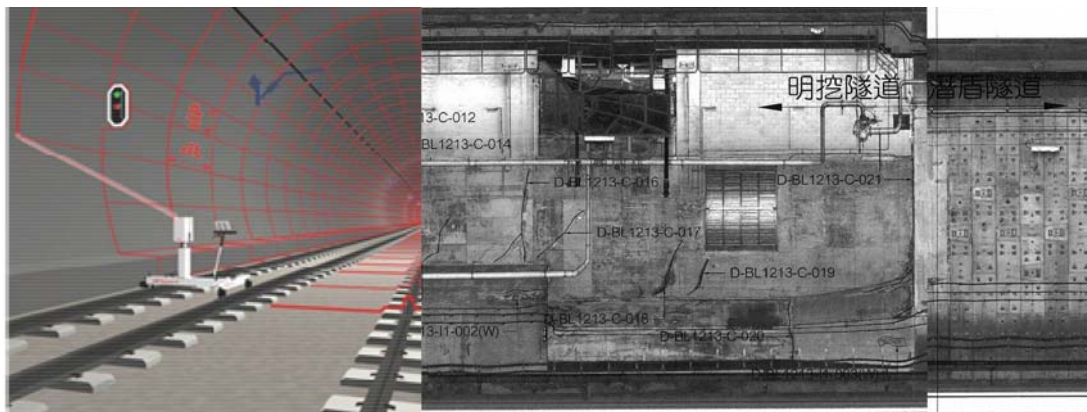


圖 18 GRP5000 影像掃描及管線陀螺定位儀 (引自宏遠及佑益測量公司資料)



## 管線系統之永續管理


地下管線系統有營運時段與斷水時限限制，輸水幹管傳統係以人為目視方式進行檢測調查記錄，此不僅耗時且所獲得之調查成果記錄易有疏漏。考慮縮短檢測時間、減少調查疏漏、提高效率精度、及降低營運衝擊等維護管理需求。一定管徑（2.5 m 以上較佳）之混凝土襯砌型式輸水隧道，可比照鐵路、捷運系統之利用雷射或光源攝像（配合光源）全周面掃描系統（如 GRP5000、TS360、CDS、LTSS 等）進行連續之電子化影像記錄，所得之裂縫、滲漏水等異狀檢測成果可以電子化資料庫方式建置，供生命週期內隧道異狀變化比對、安全評估研判及維修補強之參考依據。

另鑑於國內管線常因圖資不明致施工挖掘遭破壞而衍生二次災損，為利管線管理及避免影響，管線位置定位（Pipeline Mapping）及配合 GIS 資料庫建置有其必要，此可利用陀螺儀定位原理之慣性定位儀施測，此於舊管線或完工後之新設管線（直徑約 5 ~ 80 cm）進行 X、Y、Z 座標量測定位（50 m 長之量測誤差約 3.75 cm），可供日後道路現場挖掘精確辨識參考或管線衝突之管理檢討。（詳圖 18）

## 結論

地下自來水幹管之檢視與維護需要長時間停水，在不能影響用水之原則下，必須有足以替代供水之備援管線，因此，重要供水幹管建立備援系統並定期停水檢修維護，延長自來水幹管系統使用壽命，已成為自來水事業永續經營發展之必然趨勢；此外，都會區老舊管線汰換、健全管網以降低漏水率及建立地下管線精確定位資訊則亦為重要之長期目標，如何有效應用有限之人力資源，配合環境擇定最佳之省力化檢修方式、因地制宜採免開挖工法修復及管線定位 / 資料庫建置技術，也是未來供水管網管理維護之重要課題；另臺灣地質條件不佳，用地受限且地震頻繁，自來水管網設施除應重視管線之耐震、抗震及備援外，更應於有限之人力財力狀況下，有效就細部區域進行風險與效益研析，依風險程度訂定國內自來水管線工程 / 設施之未來發展與抗震量能提昇策略，以提高供水可靠度及建構更安全有保障之供水系統。

## 參考文獻

1. 呂崇德、黃文吉，「台灣地區自來水漏水問題與對策之研究」，(2004)。
2. 中華民國自來水協會，「自來水開挖設施維護管理指南」，(2008)。
3. 中華民國自來水協會，「自來水設備工程設施標準解說」，(2006)。
4. 中華民國地下管道技術協會，「免開挖技術指南」，(2000)。
5. David Wallenstein, EBMUD, "AMI and Leak Detection Pilots at EBMUD", Oakland, CA, USA, 8th WaterRF/JWWA/CTWWA Water System Seismic Conference, Aug., (2013)
6. Mr. Takuji Okubo, JWWA, "2011 The Great East Japan Earthquake and Activities of JWWA", Oakland, CA, USA, 8th WaterRF/JWWA/CTWWA Water System Seismic Conference, Aug., (2013)
7. Mr. Nobuhiro Hasegawa, "Development of Steel Pipe for Crossing Active Fault, Part 2: Example of Application", Oakland, CA, USA, 8th WaterRF/JWWA/CTWWA Water System Seismic Conference, Aug., (2013)
8. "Design of Water Transmission Pipelines Crossing the Hayward Fault", SFPUC, Julie L. Labonte、Stephanie A. Wong, Oakland, CA, USA, 8th WaterRF/JWWA/CTWWA Water System Seismic Conference, Aug., (2013)
9. "EBMUD Seismic Improvement Program", EBMUD, David Lee, Oakland, CA, USA, 8th WaterRF/JWWA/CTWWA Water System Seismic Conference, Aug., (2013) 

熱聚酯標線材料

彩色鋪面材料

(熱熔式、反應型、冷噴型)

透水性標線

特殊機能型標線材料

標線施工機械、機具



# 臺北市人工邊坡之調查與維護管理

黃立遠／臺北市政府工務局大地工程處處長

林士淵／臺北市政府工務局大地工程處科長

## 前言

臺北市周圍群山環繞，山坡地面積計有 15,004 公頃，占全市面積約 55%，山坡地範圍內存在著許多人工構築之擋土或護坡等用以保護邊坡或臨近設施安全之人工邊坡。依據臺北市數值地形圖資研判山坡地範圍內之人工邊坡計約 34,000 筆以上，有些人工邊坡可能已經興建超過 30 年以上，現況穩定與否攸關鄰近保全對象之安全。因此，為預防山坡地災害發生，臺北市政府工務局大地工程處（以下簡稱臺北市大地處）於 99 年起分年度有計畫地針對山坡地人工邊坡進行現場調查建檔，並由專業人員安全評估，針對不同風險等級之人工邊坡訂定因應對策與巡勘機制，建立人工邊坡之分級管理維護制度。

## 何謂「人工邊坡」

目前國內尚無相關法令對人工邊坡有明確之定義，惟參考「水土保持技術規範」第 117 條規定：「擋土牆係指攔阻土石、砂礫及類似粒狀物質所構築之構造物。」，以及「建築技術規則建築設計施工編山坡地建築專章」第 265 條所稱『擋土牆』，係指為攔阻土石之崩場所構築高度在 1.5 公尺以上之構造物，據此，臺北市大地處將「人工邊坡」定義為：泛人為挖填整地所形成且具有擋土或護坡設施之邊坡，包含噴凝土護坡、型框護坡、土/岩釘護坡、噴植護坡、打樁編柵護坡、重力式擋土牆、加勁擋土牆、三明治擋土牆、乾砌石擋土牆、漿砌石擋土牆、疊式擋土牆、懸臂式擋土牆、扶壁式擋土牆、半重力式擋土牆、混凝土版樁式擋土牆、排樁排土牆、背拉地錨等。

此外，為調查建檔及後續管理維護工作順利執行，以 1.5 公尺以上之人工邊坡為主要調查對象，並界定如下：

1. 同一型式同一年代人工邊坡為 1 筆資料。
2. 同一型式不同年代興建之人工邊坡為不同筆資料。
3. 不同型式人工邊坡應區分為不同筆資料。
4. 多階人工邊坡應區分為不同筆資料。

## 人工邊坡調查建檔工作

初步估計臺北市山坡地人工邊坡約 34,000 筆以上，為完成這麼龐大數量人工邊坡的建檔與管理，臺北市大地處擬定將調查與建檔工作分 4 個階段執行，分別為「訂定標準作業程序」、「建置資訊系統」、「全面調查建檔及分級管理維護」及「裝設標示牌」，流程如圖 1。

### 第一階段：訂定標準作業程序

現場調查工作勢必須投入大量人力同時進行，為了使每位調查人員能有統一的調查標準，充份掌握調查成果的品質，首要工作就是建立「調查建檔標準作業程序」。

參考國內外有關擋土牆或邊坡調查工作與安全評估的相關文獻，包含：營建署建立的「山坡地住宅社區安全檢查紀錄表」、內政部建築研究所的「既有山坡地住宅社區邊坡擋土設施安全診斷基準之研究」及香港 GEO 評估法等資料，訂定調查建檔標準作業程序（如圖 2）以及相關調查表格（S01 ~ S04）。

調查者針對欲調查之地點，先進入「臺北市山坡地人工邊坡資訊系統」（Man-made Slope Information System, MSIS），並根據該系統之地理資訊及地形圖等

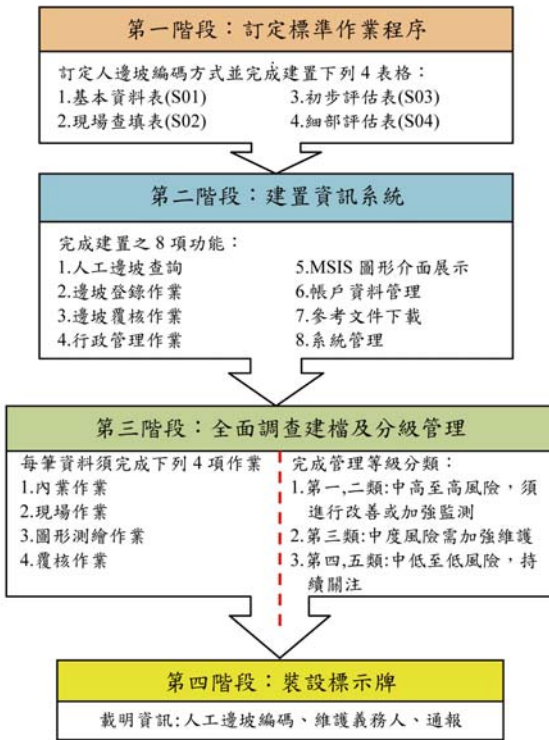


圖 1 臺北市人工邊坡調查建工作執行流程

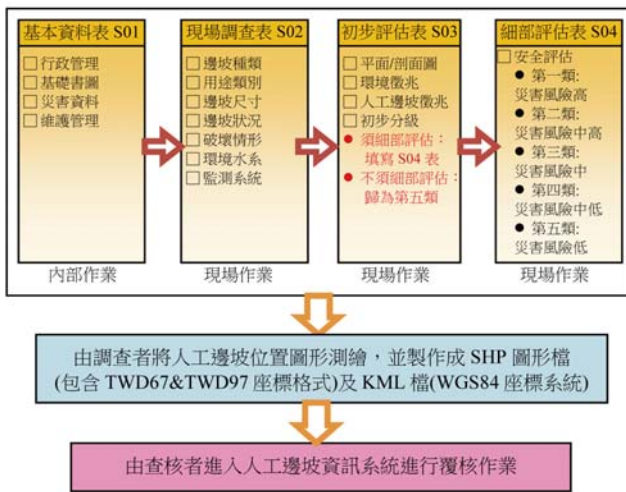


圖 2 臺北市人工邊坡調查建檔標準作業程序

相關資料，查填人工邊坡基本資料，再經由系統產生並列印人工邊坡基本資料表 (S01)、現場調查表 (S02)、初步評估表 (S03) 及細部評估表 (S04)，接著根據評估流程至現場調查並填寫表格，調查完成後將現場調查表 (S02)、初步評估表 (S03) 及細部評估表 (S04) 資料填入並暫存於資訊系統中，待覆核完成後將調查成果正式上傳至資訊系統，完成 1 筆資料的建檔。

1. 基本資料表 (S01)：為提升現場勘查之時效及精確度，應於現場調查作業前先搜集人工邊坡基本資料，包含 (1) 行政管理、(2) 基礎書圖查詢、(3) 設計

資料、(4) 災害資料、(5) 維護管理等 5 大類資料，並預先查詢人工邊坡所在位置之地質，以利現場調查與評估。

2. 現場調查表 (S02)：以目視檢查搭配測量工具，詳加調查與記錄人工邊坡型式、尺寸、興建年代、保全對象、異常徵兆、環境水系、週遭建物情形、監測系統等資料，以作為後續評估的依據。

3. 初步評估表 (S03)：將現場邊坡狀況分為環境徵兆、人工邊坡結構徵兆及保全對象重要性等 3 類指標，快速研判人工邊坡的危險程度與風險，篩選有異常徵兆的人工邊坡，異常徵兆較明顯或保全對象較重要者，將進細部評估，將有限的資源應用在需特別注意的人工邊坡，可提升調查效率。

4. 細部評估表 (S04)：將人工邊坡的先天因素（如興建年代、所在位置之地質狀況）、後天因素（如擋土護坡型式、尺寸）及現況因素（如裂縫、排水等異常徵兆）綜合評估，量化人工邊坡的破損程度，同時考量保全對象之重要性，以半定量的風險評估概念，將人工邊坡分 5 類管理等級。

## 第二階段：建置資訊系統

臺北市山坡地人工邊坡資訊系統係臺北市大地處針對人工邊坡調查作業建置之建檔及查詢平台，系統架構如圖 3，系統主要包含 8 個作業功能，提供人工邊

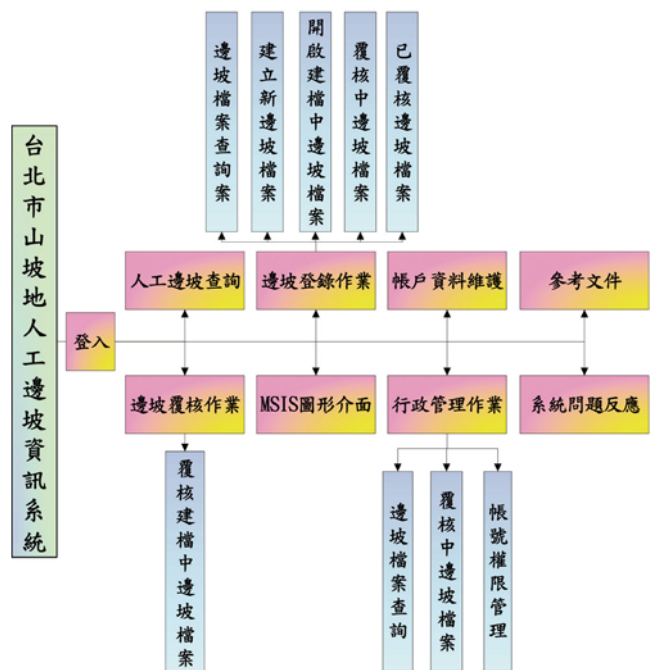


圖 3 臺北市山坡地人工邊坡資訊系統架構

坡建檔案件資料管理，即人工邊坡 S01 至 S04 表之邊坡登錄作業、邊坡覆核作業及行政管理三種作業方式。

此外，另一主要功能為人工邊坡圖台資料展示，可藉由輸入人工邊坡編碼、地址或地籍等資料，查詢人工邊坡調查結果，讀取詳細資訊，亦可於圖台上呈現位置，藉由圖層控制套疊相關圖層（如順向坡、河川侵蝕區域等），有利資料管理及加值運用（如圖 4）。

### 第三階段：全面調查建檔及分級

調查者依據人工邊坡調查建檔標準作業程序並配合資訊系統，逐筆辦理人工邊坡現場調查及建檔，主要包含下列工作：

1. 內業作業：調查者登入人工邊坡資訊系統，依據 GIS 查詢系統，填寫人工邊坡基本資料表 (S01)。
2. 現場調查：調查者至現場勘查（如圖 5），填寫現場調查表 (S02)、初步評估表 (S03)，以及細部評估表 (S04，須視 S03 初評結果以決定是否需填寫)，所有表格之查填方式與規定，包含量測人工邊坡尺寸、拍攝異常徵兆照片、繪製邊坡剖面圖等，並將調查結果登載於人工邊坡資訊系統，人工邊坡調查成果示意圖如圖 6。
3. 圖形測繪：調查者於現場勘查時，同時繪製與標定人工邊坡現場位置並製作成 .shp 圖形檔（包含 TWD 67 及 TWD 97 坐標格式），並同步在 Google 系統繪製出 .kml 檔（WGS 84 坐標系統）。

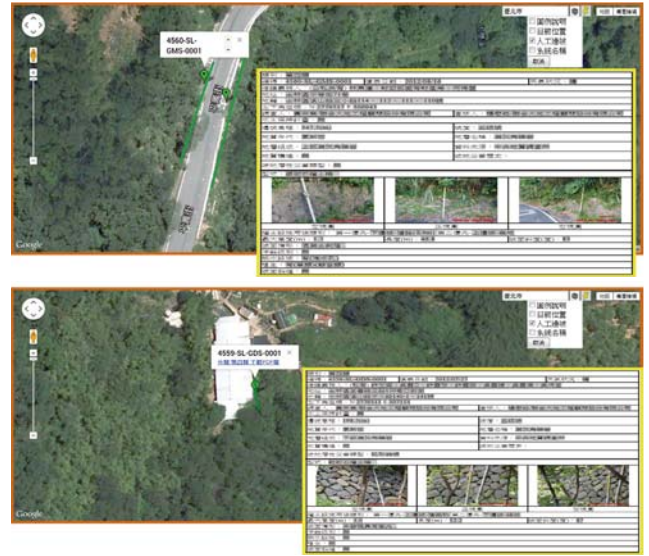


圖 4 資訊系統資料管理及加值運用案例

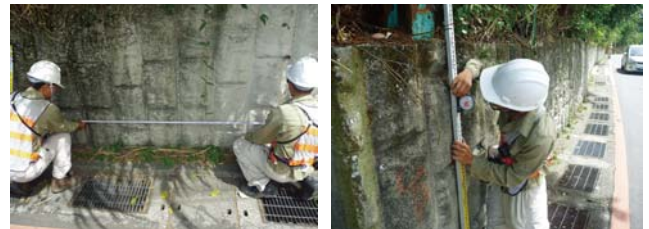


圖 5 人工邊坡現場勘查

4. 覆核作業：為避免調查過程中，因個人主觀判斷以致發生缺失，本工作需同儕覆核，由查核者進入人工邊坡資訊系統進行覆核作業，針對有問題之項目立即勾選填寫並通知調查者修正，以確保調查資料之正確性。



圖 6 人工邊坡調查成果示意圖

### 第四階段：裝設人工邊坡標示牌

完成前述調查與建檔作業後，臺北市大地處會陸續對公有人工邊坡裝設標示牌（如圖 7），牌上標明人工邊坡編碼，明確標示管理維護義務人，在人工邊坡資訊系統輸入編碼即可查詢檢查結果，有助提升人工邊坡管理效率。此外，亦可讓民眾及政府救災單位在人工邊坡發生災害時，準確通報災害地點，以掌握黃金救災時間，提升防災效率。



圖 7 人工邊坡標示牌

### 人工邊坡維護管理

人工邊坡多作為開發建築、道路、堤岸、農業護坡等用途，依其不同興建目的與功用，在建築法、公寓大廈管理條例、公路法、水利法、水土保持法等相關法令皆對於管理維護義務人有所定義，據此，臺北市大地處將人工邊坡管理維護義務人分類如表 1，俾執行後續管理工作。

截至 103 年 8 月，臺北市大地處已完成 30,913 筆人工邊坡之調查建檔，其分布情形如圖 8，逐一釐清管理維護義務人，並依風險程度及保全對象重要性，將人工邊坡分 5 類管理等級，訂定處理與維護原則如圖 9。



圖 8 臺北市山坡地人工邊分布情形（圖中綠線部分）

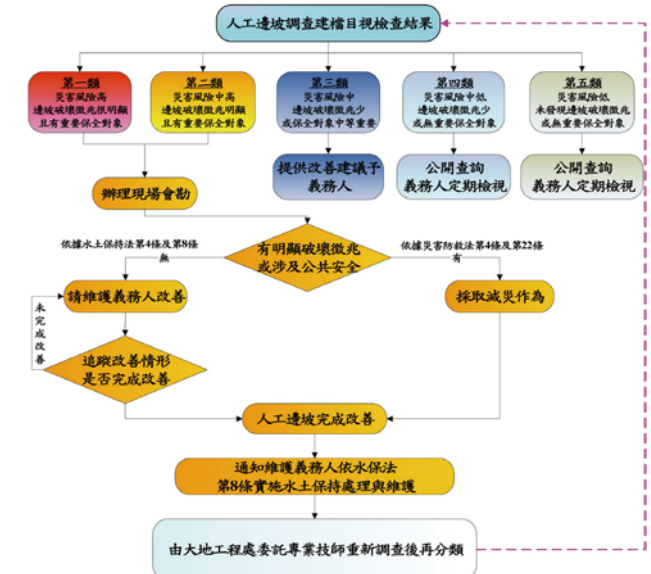


圖 9 臺北市山坡地人工邊坡處理與維護原則

表 1 臺北市人工邊坡管理維護義務人

種類	相關法令	管理維護義務人
山坡地建築	建築法第 77 條 公寓大廈管理條例第 28、29、36 條	建築物所有權人、使用人 起造人、管理負責人、管理委員會
公路邊坡	公路法第 3、26 條	公路主管機關
溪溝護岸	水利法第 51、73 與 76 條 水利法施行細則第 7 條	興辦水利事業人 水利事業管理機關
單一人工邊坡 (非屬上述各類)	水土保持法第 4 條	水土保持義務人

依臺北市大地處人工邊坡管理等級，第一、二類人工邊坡風險程度較高，會先邀集管理維護義務人現場會勘，如未涉及公共安全者，依據「水土保持法」第 4 條及第 8 條規定，提供建議請管理維護義務人改善，如涉及公共安全，則由主管機關依據「災害防救法」第 4 條及第 22 條規定協助緊急處理改善，並交由管理維護義務人後續管理。

第三類人工邊坡之災害風險程度為中等，表示有部分徵兆，但尚無立即危險，安全評估結果及相關建議事項則提供邊坡管理維護義務人參考辦理改善。

第四、第五類人工邊坡屬災害風險為中低至低，臺北市大地處將透過資訊公開方式將調查發現之缺失徵兆提供民眾查詢，配合教育宣導與免費技師轉導服務，推動管理維護義務人自主管理。

### 目前成效

依目前完成的人工邊坡評估分級結果（如圖 10），其中第一、二類風險程度較高之人工邊坡約占 0.26%，臺北市大地處均立即邀集專業技師、管理維護義務人及相關單位研議改善方案，共計已辦理 102 場現場會

勘，21 場專家學者會議，提供管理維護義務人改善意見，並持續追蹤至改善完成為止，期能透過及早維護而避免人工邊坡發生災害。

在邀集管理維護義務人會勘時，往往管理維護義務人對於人工邊坡需定期維護的概念相當缺乏，在臺北市大地處解說及輔導下（如圖 11），管理維護義務人都會負起維護責任，藉由這樣的現場會勘，也慢慢提升市民自主維護管理的觀念與習慣。

此外，臺北市大地處調查共發現 27 筆人工邊坡涉及公共安全，臺北市大地處立即依「災害防救法」協助緊急改善（如圖 12），維護市民的安全，避免災害發生。

依據 30,913 筆調查結果，統計人工邊坡異常徵兆分布情形如圖 13，其中以混凝土剝落、龜裂、牆面突出及鋼筋出露等四種異常徵兆最常見，共佔近 9 成之多，臺北市大地處透過提供摺頁與管道的宣導，讓市民可經由簡單的目視自主檢視住家周遭環境之擋土牆是否有異常徵兆情形發生，一發現異常徵兆即應辦理改善，以維生命財產安全。

臺北市大地處同時針對人工邊坡管理建立完整的巡查機制，著重於平時的維護及檢查，目前規劃巡檢頻率如表 2，除了定期巡檢，當颱風、地震或豪大雨事件發生時，臺北市大地處也會立即啟動機動巡檢，以預防災害發生。

若具潛在風險之人工邊坡已由管理維護義務人完成改善，則調整其管理等級並修正巡檢頻率，若有異常徵兆擴大情形，則立即再邀管理維護義務人現場勘查及輔導改善，並追蹤至管理維護義務人完成改善。

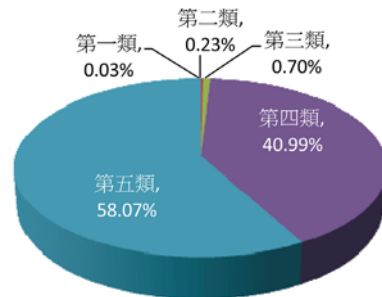


圖 10 臺北市人工邊坡評估分級結果



圖 11 臺北市大地處現場解說與輔導



(A) 竹子湖路案例



(B) 翠雲街案例



圖 12 臺北市大地處協助緊急改善涉及公共安全疑慮之人工邊坡案例

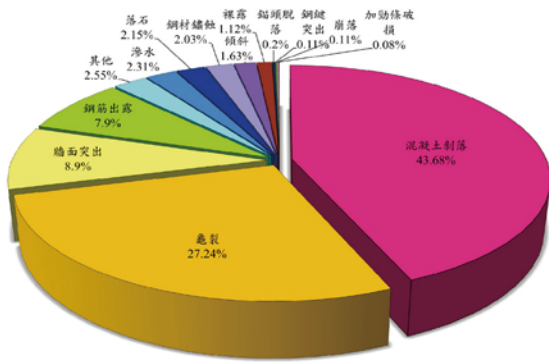


圖 13 人工邊坡異常徵兆分佈情形

表 2 臺北市山坡地人工邊坡巡檢頻率

管理等級	風險程度	巡檢頻率
一	高	立即辦理安全評估，進行改善處理。 定期辦理巡查，每月至少 1 次為原則。
二	中高	機動性巡勘，於臺北市發布陸上颱風警報解除後 5 日內辦理。
三	中	定期辦理巡查，每年至少 1 次為原則
四	中低	不定期視需要及實際情況辦理巡查。
五	低	



### 結語

要完成全臺北市人工邊坡調查建檔非一蹴可幾，必須有完整的規劃與步驟，因此，臺北市大地處分四個階段循序建立整個管理制度，包含前置作業的建立標準調查程序、建立調查表格以及建置資訊系統，再赴現場逐一檢視每筆人工邊坡現況並建檔與評估分級，最後設置人工邊坡標示牌，建立完整的調查建檔制度。

截至 103 年 8 月，臺北市大地處已完成 30,913 筆人工邊坡之調查建檔，其中第一、二類風險較高之人工邊坡約占 0.26%，臺北市大地處皆已完成會勘督導管理維護義務人改善，其中 27 筆人工邊坡涉及公共安全，則由臺北市大地處立即依「災害防救法」協助緊急改善，目前全市山坡地人工邊坡的風險都在臺北市大地處的掌握中。

此外，人工邊坡完成建檔後，後續的管理也很重要，大地處訂定各類不同風險等級人工邊坡的處理對策，風險較高的人工邊坡立即邀請管理維護義務人改善，風險中

等與較低的人工邊坡則提醒管理維護義務人自主維護，並透過定期巡檢的制度，督導管理維護義務人自行維護的情形，並滾動式的調整人工邊坡風險程度。

未來，大地處將持續針對有安全疑慮之人工邊坡進行巡勘檢查，並追蹤及輔導管理維護義務人改善情形，並將調查資訊適度公開，讓民眾可自行瞭解居家周邊人工邊坡異常徵兆，藉由提高市民防災意識，提升本市防災效能。

### 參考資料

- 黃立遠 (2014)，「臺北市人工邊坡分級管理制度介紹」，技師期刊 64、65 合輯，pp. 42-49
- 臺北市政府工務局大地工程處 (2012)，「山坡地人工邊坡分級管理—以臺北市為例」
- 臺北市大地工程處 (2010)，「臺北市山坡地邊坡調查及建檔研究計畫成果報告書」
- 內政部建築研究所 (2008)，「既有山坡地住宅社區邊坡擋土設施安全診斷基準之研究」。

# 山區隧道損壞之檢測調查

## — 以台20線嘉寶隧道為例

王慶雄／公路總局第三區養護工程處 甲仙工務段段長

林蔚然／台灣世曦工程股份有限公司 大地工程部 正工程師

### 前言

台灣地理條件主要屬山區地形，交通路網中不管鐵路均有穿山越嶺而行之隧道，而且地理位置位處菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊碰撞的交界帶，受到板塊間相互擠壓作用之影響，且板塊間相對運動頻繁，造成地質構造複雜且破碎。在這種特殊地質條件下，隧道工程又是地下開發空間，因此，地層變化及地下水等因素嚴重威脅著隧道結構。

由於隧道為一特殊空間，具有封閉、可及性低、狀況不明、聯絡與救援困難等特性，故近年來各項研究著重於增進隧道安全、降低隧道事故發生機率，以及利用逃生設備降低事故傷害程度，但對於隧道結構體安全性評估及外在惡劣地質條件之大地調查與監測，亦是主管機關應關心之重要課題。尤其，早期隧道在技術較未成熟，及工作環境惡劣的條件修築而成，歷經長期營運及後續地形地貌的改變或開發，部分隧道有必要作全面之調查，以判斷其營運功能是否正常。

隧道損壞的原因甚為複雜，主要外在地質水文條件較難掌握洞悉，若欲確保原隧道之安全營運功能，則需於調查階段採用正確大地調查技術，準確研判隧道致災原因，方能進一步補強加固改善，達到安全延壽目標。針對隧道發生異常現象，初步可分為：外力變化因素（擠壓、潛移、滑動等情形）、襯砌結構體劣化、漏水等三大因素。有鑑於此，為能防患未然及制止災害發生，本文歸納目前隧道致災基本特性、隧道大地調查技術，以利隧道安全檢測作業推展；並藉由

台20線嘉寶隧道安全評估及大地調查成果作為實例說明，讓讀者對於公路隧道之大地調查技術有進一步的認知。

### 山區隧道致災基本類型

公路隧道完工通車後，可能因設計及施工管理上之缺失、襯砌結構體劣化或大地應力之力學上之破壞等因素，導致襯砌結構體形狀與尺寸改變，甚至產生龜裂變形等，隧道發生異狀而影響原來使用功能。隧道所產生之異狀原因，大致可分為外在與內在因素兩大類，外在因素包括側向偏壓、邊坡潛移及滑動、地下水壓、地震等；而內在因素主要係由於設計考量未能周全、材質使用不良及施工品質瑕疵等。隧道發生異狀原因大致可分為下列三項<sup>[1]</sup>，依序整理如下：

- 外力變化：如鬆動土壓、偏壓、邊坡潛移、地層滑動、塑性壓、水壓、地盤下陷、地盤承载力不足、地震等。
- 襯砌結構體劣化：包括混凝土老化、骨材析離、鹹骨材反應、材料不良等。
- 漏水或其他原因：漏水造成淘空、襯砌背後空洞、襯砌厚度不足、無設置仰拱等。

另外，山區隧道損壞之原因常與邊坡滑動關係密切，由於隧道開挖或進洞時改變地貌，破壞原有邊坡的應力平衡，隧道洞口附近邊坡可能會發生地層滑動或坡面崩壞等現象<sup>[2]</sup>，而隧道內則產生潛移、崩壞、偏壓、頂拱落盤、地層承载力不足等現象。列舉常見致災類型如下：



- 地層滑動、坡面崩壞：邊坡滑移為最常見的破壞現象，進而導致隧道異常變形，如鋼支保兩側不均勻沉陷、頂拱沉陷量過大、甚至崩塌等問題發生。其誘因包括：(1) 洞口段隧道開挖引致的地層的鬆動、(2) 潛移地層滑動邊坡的坡趾進行洞口邊坡開挖、(3) 潛移地層進行隧道開挖、(4) 地下水沿著地層鬆動產生的裂隙流入地層內等，導致地層的滑動或坡面崩壞。
- 偏壓破壞：隧道洞口段之橫斷面地形不對稱、地層傾斜、有斷層破碎帶等地質弱帶存在，隧道可能會發生偏壓現象，常造成隧道不均勻沉陷、單側下陷或支撐破壞等行為。
- 地盤承载力不足：隧道洞口段的覆蓋厚度較淺，地拱效應無法形成，隧道頂拱以上地層全部荷重均須由隧道內支撐構造所承受，若地盤承载力不足，常會發生隧道整體下陷的現象，甚至會危及地表面的安定。
- 河岸侵蝕：邊坡下方坡趾如受河岸侵蝕破壞、向源侵蝕及沖蝕溝等作用，常誘發邊坡滑動，其滑動面之生成，造成隧道內形成剪力及張力裂縫，嚴重時甚至可能發生隧道內淨空不足及隧道錯動等現象。

## 隧道大地調查技術

### 隧道安全等級評估分類

橋梁檢測工作早已系統化，並且發展出一套

D.E.R.U 目視評等法作為檢測之準則。然而，隧道之檢測技術建置則因眾多之主客觀因素，遲至 1996 ~ 1998 年間交通部委託國立台灣大學土木系進行「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術」<sup>[3]</sup> 之研訂，始完成「隧道安全檢測手冊」與「隧道維修與補強手冊」，該研究將隧道維護管理之實施步驟區分為檢查、安全檢測與修復等三階段進行。隧道安全檢測主要係經由各種調查方法進行異常原因推估，冀找出隧道問題所在，並進行隧道改善策略及適當維修補強方案之研擬。

隧道安全等級區分可參考交通部所頒布「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，分別就行車安全、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，將隧道等級分為甲、乙、丙、丁四級，如表 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。

### 隧道檢測技術

公路隧道營運階段對其安全檢測，常以調查隧道是否出現異狀或既有異狀是否出現變化為重點，為確保隧道的安全性、耐久性，並適時施予必要加固改善措施，以延長隧道的服務年限。由於隧道異狀包括外在及內部因素條件，故隧道安全檢測對象亦應包含隧道外在周遭地質環境及隧道內襯砌結構體。由於隧道

表 1 隧道等級分類與評估標準

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 (如裂縫 $L < 5 \text{ m/w}$ $< 3 \text{ mm}$ )	幾乎無影響 (無剝落)	輕微 (裂縫長變化速率 $< 1 \text{ mm/年}$ )	經安全檢測後，無異狀或異狀輕微，目前對行車尚無影響，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) (如裂縫 $L < 5 \text{ m/w}$ $> 3 \text{ mm}$ )	中等 (有局部材料劣化)	異狀進行中， 有功能降低之可能 (裂縫長變化速率 $< 1-3 \text{ mm/年}$ )	經安全檢測後，有異狀之發生，將來可能達到丙等級並對行車造成危險，須進行重點監視，並須擇期實施處理對策
丙	遲早造成威脅，異常外力作用下危險	遲早會變成重大 (如裂縫 $L > 5 \text{ m/w}$ $< 3 \text{ mm}$ )	大 (即將具閉合裂縫)	異狀進行中，功能亦持續降低中 (裂縫長變化速率 $< 3-10 \text{ mm/年}$ )	經安全檢測後，有異狀之發生，且異狀仍持續進行中，遲早對行車造成危險，須儘快採取處理對策
丁	危險	重大 (如裂縫 $L > 5 \text{ m/w}$ $> 3 \text{ mm}$ )	明顯 (已有剝離)	重大 (裂縫長變化速率 $> 10 \text{ mm/年}$ )	經安全檢測後，異狀嚴重，對行車造成危險，須立即採取處理對策

襯砌，係為擋土結構的一環，若襯砌破壞則易有安全之虞，故非破壞性檢測為隧道安全檢測重要的技術。非破壞性檢測技術依其應用的原理，可概分為光學技術、導電與電子技術、物理波動技術與其他檢測技術四大類<sup>[4]</sup>。光學檢測技術之類型有目視及攝影檢測、隧道淨空測量及襯砌影像掃描，而導電與電子檢測技術之類型有透地雷達、多相線性陣列電磁波雷達、自然電位法探測鋼筋腐蝕及電阻法探測鋼筋腐蝕，另外，物理波動檢測技術之類型有敲擊回音法及超音波檢測，在其他檢測類型有混凝土強度錘與測試槍。

隧道外在影響安全因子，主要因山區隧道損壞原因常與邊坡滑動關係密切，因此，調查探測滑動肇因、深度及滑動因子等課題，須靠大地調查技術，才能研析致災原因。首先，大地調查技術包含有初步資料收集（踏勘及現地調查）、現場探測鑽探、地下水位觀測、地球物理探測等。其中，地球物理探測應用於工程地質調查之地層構造探測、岩盤探測、地層動態性質探測、耐震設計資料探測、地層震動特性探測、地下埋設物探測及地下水調查各方面技術成熟，但地球物理探測方法之選擇，須依調查之目的而定，同時必須考慮探測現場之環境、地形、地質、土層性質以及土地利用狀況等，且一般最好有地質及鑽探資料配合比對作完整的判釋。

地球物理探測中之地電阻探測法（Resistivity Image Profiling, RIP），為探測研析邊坡滑動資訊及地下水文之主要技術，因地層組成材料及膠結等狀況不同，可利用物質表現出不同的導電特性加以分類判釋，一般以電阻率代表物質的導電性質。不同地層岩性及不同含水狀況所對應的電阻率分佈情形稱為地電阻譜，再輔以適當地質資訊，可瞭解地下地層的岩性分佈，進而判釋地質構造、裂隙分佈、地下水層等資訊<sup>[5]</sup>。

## 台 20 線嘉寶隧道案例研析

### 基本資料及歷史沿革

嘉寶隧道為台 20 線南橫公路上重要聯絡通道，位置如圖 1 所示，全長為 300 公尺，車道淨寬 7.5 公尺雙向通行。舊嘉寶隧道於民國 61 年 10 月完工通車後，隧道西洞口區段陸續發生擠壓與崩坍現象，導致車道淨空間不足，遂於民國 76 年 11 月開始辦理雙車道公路

隧道改建工程，施工中曾因岩質軟弱破碎，而頻發生頂拱岩塊掉落及湧水事件，惟仍克服困境，於民國 78 年完工通車。然民國 80 年隧道西洞口範圍發現襯砌有開裂異狀，兩側側壁與頂拱亦有裂縫分布。經主管機關經年戮力維護管理及研析異狀發生原因，工址範圍可能位處於活躍的大規模崩場地。雖於民國 87 ~ 88 年期間再採隧道頂拱背填灌漿、襯砌龜裂處掛網噴漿、樹脂岩栓打設、側壁埋設水平集水管及預力岩錨等隧道改善加固補強措施，惟完成迄今隧道襯砌仍持續發生龜裂剝離、側壁斷面擠壓錯動及鋪面下陷等異狀，如圖 2 所示，且隧道連外道路及邊坡亦發生路基下陷及大小規模不等之崩塌現象，如圖 3 所示。

### 地質概述

嘉寶隧道東側鄰近新武呂溪，新武呂溪為卑南溪上游主流，發源於中央山脈卑南主峰，流經中央與海岸山脈間，出海口為太平洋。溪流方向主要由西向東流，部分河岸區域因崩塌及堆積作用，致階地堆積層頗為發達。依蒐集之文獻資料及現場勘查研判，新武



圖 1 台 20 線嘉寶隧道位置圖



圖 2 嘉寶隧道襯砌損壞狀況



圖 3 嘉寶隧道週遭地理環境現況



圖 4 嘉寶隧道等高線地形圖

呂溪下切作用極為劇烈，地形亦受切蝕作用之影響呈 V 字形。研究區域內地形崎嶇、地勢高差頗大，海拔介於 500 ~ 1,000 m 之間，地形大致由西南往東北方向傾斜。嘉寶隧道穿過地形鞍部，一般而言地形呈現鞍部形狀，代表為地質條件較差之區域，如圖 4 所示。

該區域地質係屬中央山脈東翼地質區，由第三紀變質雜岩所組成，岩性主要包括黑色片岩、綠色片岩及矽質片岩等，並夾各類岩脈及石英脈，此區岩性可統稱為大南澳片岩。隧道位置及其附近以石英雲母片岩夾板岩為主，為高溫低壓變質作用之產物，岩體強度易受風化程度及不連續面影響，並受複雜且強烈之應力擠壓作用，片理面呈現長短交錯褶皺行為，故具有片理方位較不一致且傾角有高有低之特性。就地質構造而言，隧道位處區域受板塊交界帶的大地應力擠壓或剪切影響，沿地層葉理易產生剪裂錯動的剪裂破碎帶、斷層破碎帶等，葉理亦受擠壓作用滑動牽引，形成許多的局部區域性的褶皺現象。本區域地質構造主要受一不對稱之複背斜影響，即位於複背斜軸西翼，片理面大致與層面一致，呈北東至北方向，向西北傾斜，如圖 5 所示。

### 前期監測成果

嘉寶隧道主體結構距西洞口 40 m 內之襯砌為開口裂縫，且以環向破壞為主，多處鋪面有因陷落產生段差之情形；而 40 ~ 60 m 內之裂縫型態則已轉化為斜向之剪力裂縫，局部谷側襯砌則有剝離錯位情形，顯現差異沉陷逐漸轉大並趨近地盤滑動界面，而於 60 ~

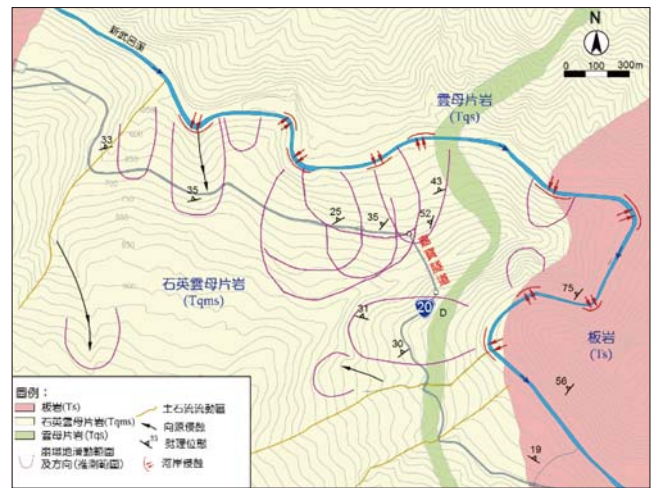


圖 5 嘉寶隧道區域地質圖

120 m 間則存有大型縱向裂損 ( $L > 10 \text{ m} / W > 3 \text{ cm}$ ) 之開口型裂縫，及多處山側襯砌嚴重擠壓裂損、錯位達 50 cm 以上之情形。自民國 88.10 起迄今辦理監測與調查評估等工作，計佈設有地滑計、地中傾斜管、水壓計及雨量計等監測儀器，其中綜整地中傾斜管成果如表 2。

彙整歷年監測資料（中興顧問社、青山工程顧問公司、鹿島工程技術顧問公司、永碁工程顧問有限公司、易鼎工程顧問有限公司），因嘉寶隧道西口附近邊坡持續滑動，使得隧道異狀持續惡化。就各項監測儀器之歷時曲線資料瞭解如下：

- 地表裂縫持續擴大

地滑計監測資料顯示，於較大降雨量發生時，邊坡滑動導致之地表裂縫有明顯變化趨勢。其中地滑計

表2 地中傾斜管歷年監測成果

孔號	民國88.10-89.7 (青山工程顧問公司)				民國90.12-92.11 (鹿島工程技術顧問公司)				民國94.3-95.7 (永昌工程顧問有限公司)			
	深度 (m)	位移 速率 (cm/月)	可能 滑動 深度 (m)	活 動 性	位移 速率 (cm/月)	可能 滑動 深度 (m)	活 動 性	位 移 速 率 (cm/月)	可 能 滑 動 深 度 (m)	活 動 性		
A-5	70	0.91 ~ 2.15	28		傾斜管損壞，無法量測							
A-6	110	2.24	22 ~ 58	活躍	改善電子式水壓計							
A-7	120	2.12 ~ 3.07	34 ~ 100		位移量過大，無法量測 (原深度120m，目前可量 深度30m)				傾斜管損壞，無法量測			
A-9	90	0.78 ~ 1.67	62		0.69	55 ~ 65	活躍					
A-10	60	0.7	38		傾斜管損壞，無法量測							
IA2	60							12.6	36 ~ 48	活躍		
IA7	80							10.8	20 ~ 30	活躍		

LS1 於民國 94.7.12 ~ 96.12.31 期間裂縫擴增量達 114.3 mm，顯現地表裂縫的發展持續進行中，如圖 6 所示。

● 隧道內裂縫持續擴大

隧道內設一處水平孔內伸縮儀，水平距離各為 10 m、20 m 及 30 m，量測資料顯示，在幾次極端氣候事件前後，隧道襯砌裂縫均有增加趨勢，自民國 94.7.9 ~ 96.12.31 裂縫增大約 49.4 mm。受限於此區域地質岩性特殊，邊坡滑動機制與滑動成因複雜，且非單一原因。為進一步瞭解工址地層種類分佈、地下水位高程及致災原因，因此，進而採大地調查技術研析可能滑動機制及滑動範圍。

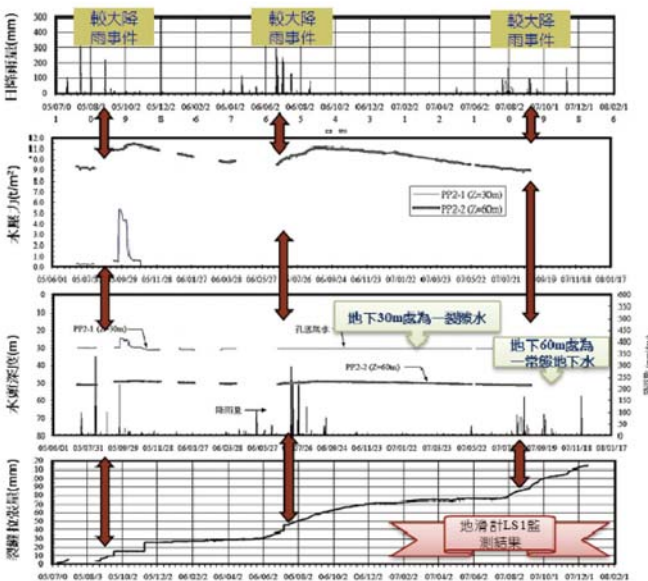


圖 6 降雨與地表裂縫監測成果

評估隧道鄰近之邊坡崩塌區

透過歷年航照判釋與現地測勘，評估該區域邊坡滑動地表地貌特徵的變動，整理影響嘉寶隧道周遭各大小及深度不一之滑動體，以隧道西口東側及西側作為編號依據，東側編號由 E1 至 E3，西側編號由 W1 至 W8，初步分為 11 處可能滑動塊體，如圖 7 所示，其中原由航照判釋之 W-1 及 W-2 滑動體於 102 年天兔颱風來襲時，結合為同一塊體產生滑動。

針對上述 11 處可能滑動塊體，經現地實際調查相關崩場地位置，結合歷年來監測成果，本研究將焦點置於影響隧道結構破壞之三個主要的滑動區，如圖 8 所示。

研判邊坡滑動機制

由現場調查可根據地滑的地表滑動現象與受影響或欲保護之對象的重要性等，可將滑動體危險度依下



圖 7 嘉寶隧道研判滑動塊體分區

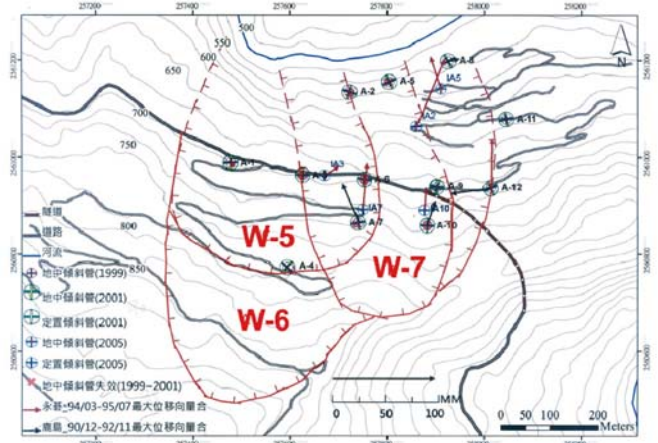


圖 8 綜合判釋嘉寶隧道鄰近邊坡崩塌區

列準則劃分為 A、B、C 三個等級（藤原明敏，1979）<sup>[6]</sup>，以供規劃整治對策輕重緩急之參考：

**A 等級（危險度 A）：**出現初生裂隙（Primary crack）之活動中的滑動土體，具明顯的地滑地形特徵，寬度在 100 m 以上，即使不在其上進行挖填等人為活動，一旦自然環境發生變化，即可誘發滑動而直接危及住家、道路或其他公共設施等。A 等級之滑動土體應立即以目前可行之技術緊急處理，以防止地滑發生。

**B 等級（危險度 B）：**未出現滑動變形現象，但具明顯的地滑地形特徵，且其寬度在 50 m 以上，可能因人為的環境變化，直接誘發滑動而危及住家、道路或其他公共設施等。B 等級之滑動土體應再施予適當的保護措施，以防止地滑發生。

**C 等級（危險度 C）：**雖具有地滑地形特徵，規模在 100 m 以下，且目前堪稱穩定，即使有人為的環境變化而誘發地滑，尚不致直接影響到重要結構物等。C 等級之滑動土體可暫緩處理，或先施予適當之地表排水，但需加以監測。

依據鑽探岩心判釋、地表地質調查及監測儀器量測結果，綜合研判此區域邊坡滑動的機制。W-5、W-6、W-7 三個主要滑動區中，埋設於 W-7 區的監測儀器量測到該區相對於 W-5 及 W-6 區更為活躍。由於地滑大多均具某些共同特徵，其地貌具有所謂之「地滑地形」，例如在發生地滑邊坡上，其地表常會出現一些裂隙，此等裂隙可分為發生在地滑頂部的張力裂隙，與發生在地滑側面的側面裂隙及發生在地滑趾部的壓力裂隙。綜上資訊，W-5、W-6、W-7 三個主要滑動區根據滑動體危險度準則劃分，其調查結果如表 3 所示，皆屬於危險度 A 等級。

表 3 滑動體危險度等級及活動性調查結果

滑動體編號	危險度等級	滑動體說明	活動性研判
W-5	A	活動中的滑動土體，具明顯的地滑地形特徵，寬度在 400 m 以上。	<ul style="list-style-type: none"> <li>淺層滑動為緩慢運動中~活潑運動中之間</li> <li>深層滑動為為緩慢運動中</li> </ul>
W-6	A	活動中的滑動土體，具明顯的地滑地形特徵，寬度在 800 m 以上。	<ul style="list-style-type: none"> <li>深層滑動為為緩慢運動中</li> </ul>
W-7	A	活動中的滑動土體，具明顯的地滑地形特徵，寬度在 280 m 以上。	<ul style="list-style-type: none"> <li>淺層滑動為活潑運動</li> <li>深層滑動為為緩慢運動中</li> </ul>

## 地電阻調查判釋

針對各個滑動體總計編列 15 孔鑽孔辦理鑽探及取樣試驗，深度共 1,100 公尺並裝設傾度管，以瞭解滑動體深度及滑動特性，另對嘉寶隧道西口活動性較高滑動體，施作地電阻地球物理探測，測線 6 條長度總計 3,650 公尺，配合鑽孔資料綜合評估，連結鑽孔的點資料及地電阻的面資料，套繪出整個範圍的 3D 柵狀圖，以便對滑動體有完整的概念。另外，於適當的地層取標準貫入試驗土樣及岩層之岩心試樣，以獲得設計所需之力學與材料性質參數，及瞭解地下水文分佈及隧道段地層等分佈情形，相關配置詳見圖 9。

地電阻影像剖面探測，測線總長度為 3,650 公尺測線 6 條，編號分別為 RIP-1 ~ RIP-6。

本次地電阻探測成果為提升資料可靠度，除於地表進行露頭電阻值量測，另配合鑽孔編號 BH-3 裝設孔內電極，於孔內直接量測地層電阻率，用以分析比較地表地電阻影像探測成果，以提升資料品質。由各測線電阻率分佈特性推估的崩積層分佈及地下水位面，於圖面中分別以黑色與白色虛線所示，各測線探測成果地質解釋以極 - 偶極排列探測成果為主，並輔以偶極 - 偶極排列探測成果。探查成果剖面及對應地質解釋如圖 10 ~ 16 所示，其中上圖為偶極 - 偶極排列（dd array）探測成果圖；下圖為極 - 偶極排列（pd array）探測成果圖地質解釋圖。茲將地電阻影像探測成果詳述如下<sup>[7]</sup>。

### ● RIP-1 測線成果

圖 10 中顯示表層電阻率多大於 1000 (ohm-m)，研判組成為崩積塊石，地層導電性差，地層電阻率偏高。其中水平距離（70 m ~ 370 m）、（435 m ~ 620 m）為厚

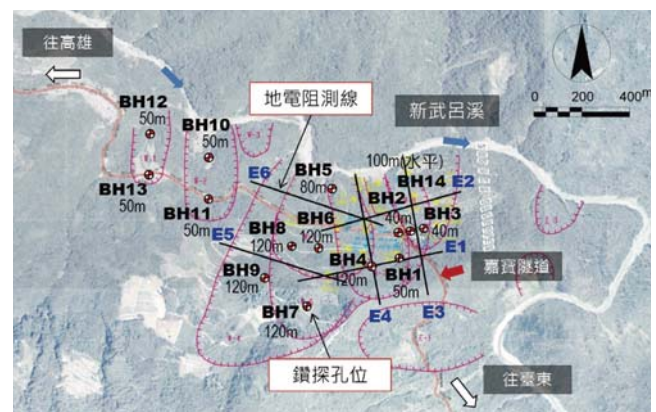


圖 9 鑽孔暨地球物理探查配置圖

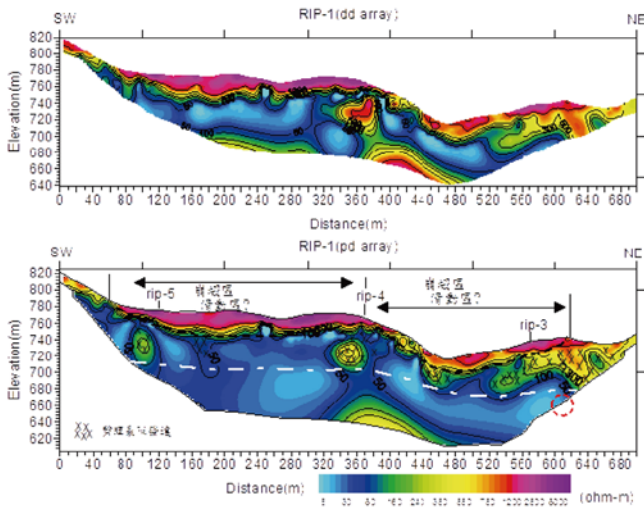


圖 10 測線 RIP-1 探查成果剖面圖

層崩積層，厚度約 28 m 及 15 m，研判為舊崩塌堆積區，大量的塊石可能形成未來崩塌或滑動高潛勢區。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100 (ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中水平距離 90 ~ 110 m、160 ~ 180 m、330 ~ 370 m、440 ~ 470 m、520 ~ 680 m，為裂隙發達區，由淺部往下延伸至高程 700 ~ 720 m，其中 520 ~ 680 m 裂隙延伸至鄰近隧道面。

● RIP-2 測線成果

圖 11 中顯示表層電阻率多介於 400 ~ 1000 (ohm-m)，研判組成崩積塊石夾崩積土。崩積層厚約 10 ~ 12 m。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100

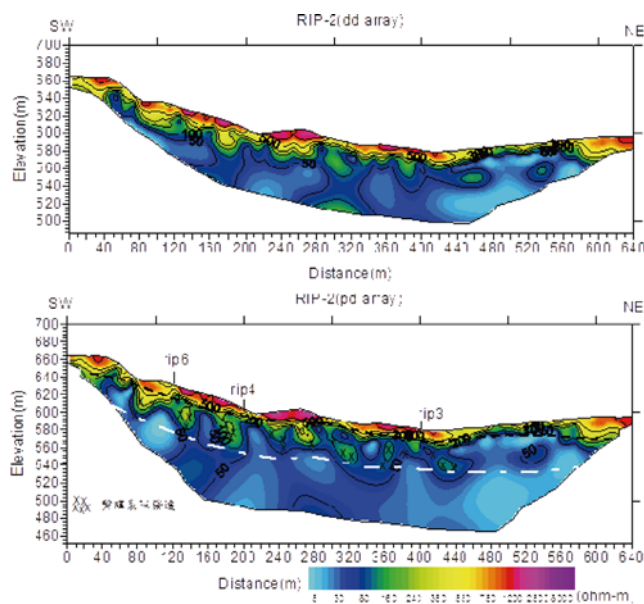


圖 11 測線 RIP-2 探查成果剖面圖

(ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中顯示，探測區域多小裂隙，分佈於水平距離 75 ~ 90 m、125 ~ 145 m、170 ~ 195 m、225 ~ 250 m、260 ~ 285 m、295 ~ 325 m、355 ~ 375 m、415 ~ 440 m，由淺部往下延伸至高程 540 ~ 600 m。

● RIP-3 測線成果

圖 12 依電阻率特徵輔以地質資料解釋，顯示表層電阻率多大於 400 (ohm-m)，研判組成崩積塊石夾崩積土，其中水平距離 320 ~ 510 m 地層電阻率偏高，為厚層崩積塊石，厚度約 28 m，研判為舊崩塌堆積區，大量的塊石可能形成未來滑動高潛勢區。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100 (ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中水平距離 40 ~ 60 m、130 ~ 170 m、220 ~ 285 m、365 ~ 380 m、455 ~ 470 m，為裂隙發達區，其中 130 ~ 170 m 及 220 ~ 285 m 裂隙分別往深部延伸至高程 468 m 及 508 m，研判該處開裂較深。測線約 390 m，高程 650 ~ 660 為隧道位置。

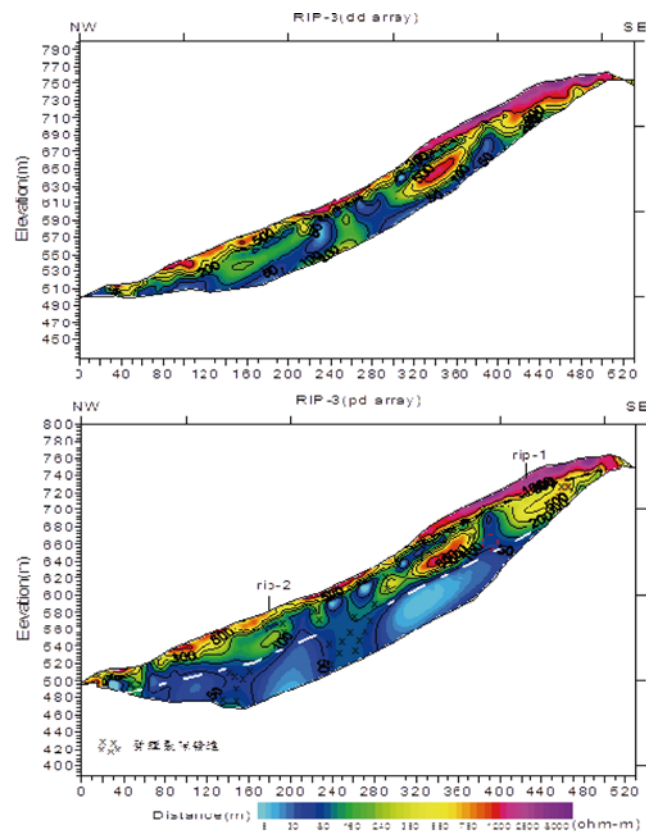


圖 12 測線 RIP-3 探查成果剖面圖

本次探測特於鑽孔 BH-3 施作孔內電阻率量測，鑽孔深度為 60 m，電極間距為 1 公尺，有效探測深度為 58.5 m。鑽孔 BH-3 鄰近測線 RIP-3，藉由孔內與地表探測成果相互比較，更能掌控探測資料可信度。圖 13 為鑽孔 BH-3 孔內電阻率量測與 RIP-3 成果比較圖，圖中顯示地層電阻率對應良好，孔內量測深部電阻率較低，研判為施測時於孔內灌水導致水位面上升所致。

● RIP-4 測線成果

圖 14 顯示表層電阻率多大於 400 (ohm-m)，研判組成崩積塊石夾崩積土，其中水平距離 240 ~ 510 m 地層電阻率偏高，為崩積塊石，厚度約 8 ~ 10 m。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100 (ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中水平距離 90 ~ 130 m、225 ~ 260 m、280 ~ 320 m、330 ~ 370 m、395 ~ 450 m，為裂隙發達區，其中 90 ~ 130 m 及 280 ~ 320 m 裂隙分別往深部延伸至高程 500 m 及 580 m，研判該處開裂較深。

此外由崩積層厚度變化亦顯示 225 ~ 260 m、280 ~ 320 m、330 ~ 370 m 岩盤有崩滑跡象。

● RIP-5 測線成果

圖 15 中顯示表層電阻率多大於 1000 (ohm-m)，研判組成崩積塊石，地層導電性差，地層電阻率偏高。其中水平距離 (35 m ~ 255m)、(360 m ~ 600 m) 為厚層崩積層，厚度約 10 ~ 20 m 及 20 ~ 40 m，研判為舊崩塌堆積區，大量的塊石可能形成未來滑動高潛勢區。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100 (ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、

角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中水平距離 55 ~ 80 m、295 ~ 360 m 為裂隙發達區，其中 295 ~ 360 m 由淺部往下延伸至高程 660 m，研判該處開裂較深。

● RIP-6 測線成果

圖 16 顯示表層電阻率多介於 400-1000 (ohm-m)，研判組成崩積塊石夾崩積土。崩積層厚

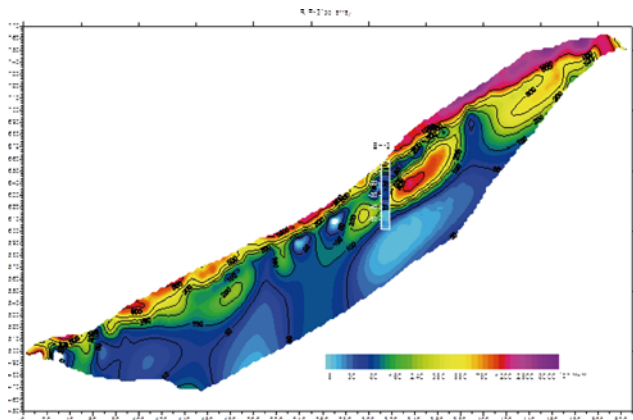


圖 13 BH-3 孔內電阻率量測與 RIP-3 成果比較圖

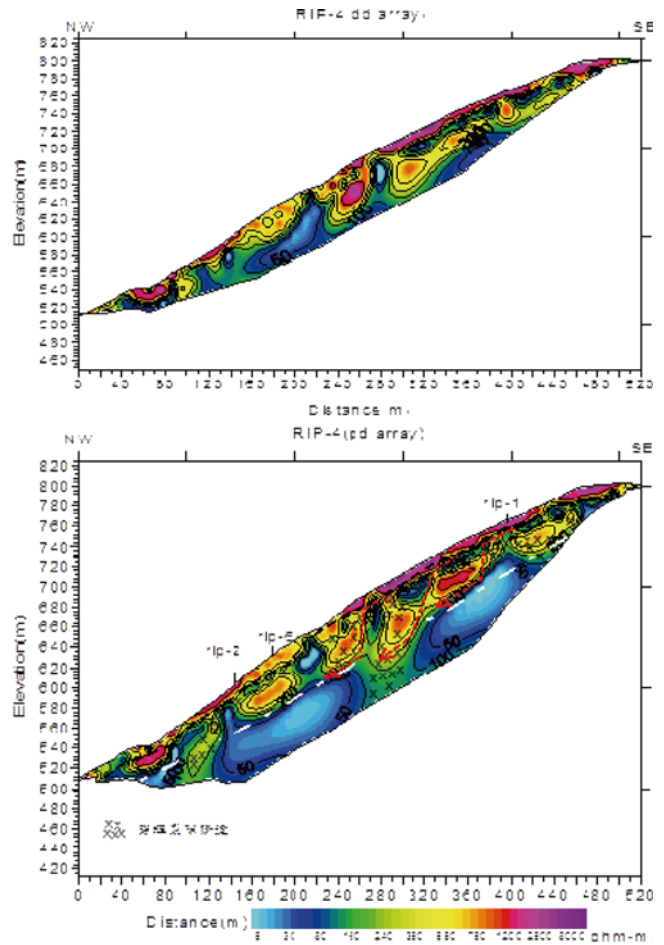


圖 14 測線 RIP-4 探查成果剖面圖

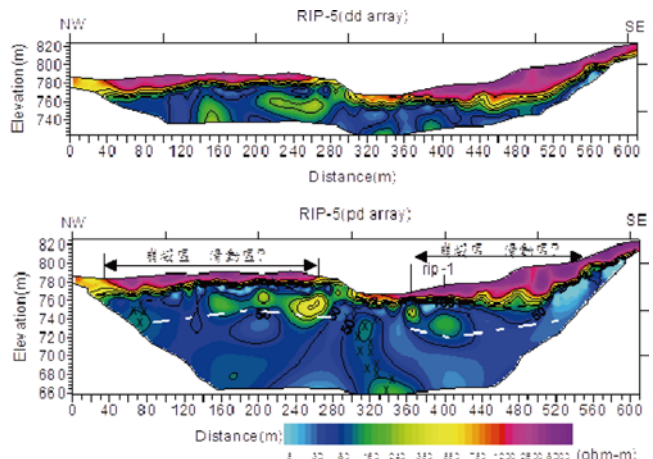


圖 15 測線 RIP-5 探查成果剖面圖

約 10 ~ 12 m。崩積層下方為岩盤，電阻率多低於 100 (ohm-m)，岩盤若無特殊構造或裂隙，電阻率等值線形貌為連續、角度依地層位態而定。若有裂隙發育，電阻率等值線呈現垂直狀分佈且橫向連續性差。如圖中水平距離 85 ~ 100 m、275 ~ 310 m、340 ~ 435 m、455 ~ 510 m、570 ~ 610 m 為裂隙發達區，由淺部往下延伸至高程 580 m。

● 電阻影像剖面探測成果綜合檢討

將各測線依相對位置繪製如圖 17 柵狀圖，圖中顯示各測線在淺部覆蓋或崩積地層對應較佳，可明顯判釋覆蓋層厚度，其中在調查區南側或隧道西南側有較厚的崩積層，北側或鄰溪側劈理裂隙發達。另外，調查區北側（鄰溪側）地形低區，覆蓋層較薄，顯示調查區內雖劈理裂隙發達，但並無明顯因崩塌或滑動造成下邊坡有大量土石堆積，顯見由於工址現地邊坡陡峭，北側河川下切作用持續，邊坡受到水及重力影響，有持續位移的情形。

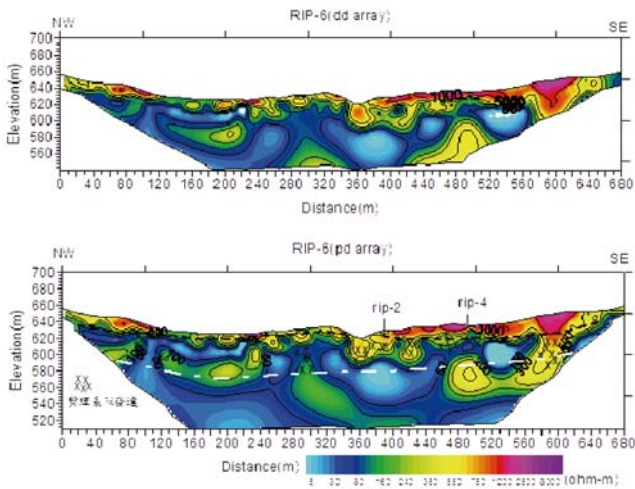


圖 16 測線 RIP-6 探查成果剖面圖

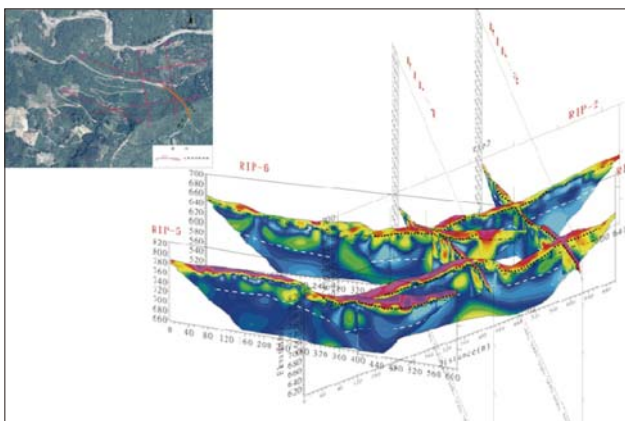


圖 17 各測線彙整柵狀成果圖

● 隧道致災原因探討

依各期鑽探成果，配合地質調查及監測成果報告等彙整，此區域因屬變質岩區，受大地應力影響，褶皺作用發達及包含多組劈理位態，岩體較為破碎。以 BH-3 鑽孔為代表（詳圖 18），隧道西口附近地質於地表下 30 m 處附近岩體較為破碎，30 m 以上岩體銹染情形較明顯，30 m 以下岩體銹染情形較不明顯。

初步評估滑動模式主要係由於河川下切，造成 V 型山谷及河岸解壓所引致，而片岩單壓強度較高，故本區域之邊坡滑動一般均為地表解壓節理造成，如圖 19 所示。然而由於本區之第三紀變質雜岩特性，岩體強度易受風化程度及不連續面影響，岩盤受複雜且強烈之應力擠壓作用，片理面呈現長短波長交錯之褶皺行。推估可能因河川下切、河岸解壓後，風化作用由河岸之自由面逐漸向岩體內部發展，造成研究範圍邊坡之岩體存在深淺不一之裂縫，因而形成大小不一之塊體（如圖 20 所示），相互牽制及推移作用，且各塊體滑移時間並非同時，以致由歷年之監測成果無法繪出如同土層邊坡之滑動層面。

● 後續處理對策

綜整不同致災肇因評估對邊坡位移之影響如表 4，其中河川淘刷坡趾、岩體風化節理發達及地中水壓力影響較劇。經評估嘉寶隧道損壞主要係由邊坡坍塌造成，地滑區範圍廣大，難僅以抗滑樁或擋土牆等工法

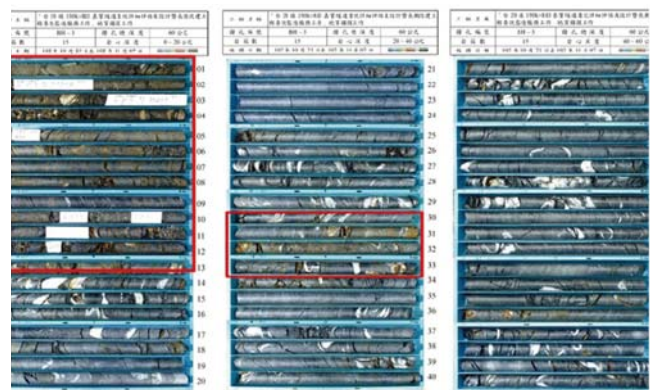


圖 18 BH-3 鑽孔岩心照片 (0 ~ 60 m)



圖 19 河岸淘刷照片





圖 20 滑動塊體推移示意照片

表 4 邊坡滑動肇因評比表

項次	致災肇因	現況調查情形	可能性初步評估
1	河川淘刷坡趾	河岸調查發現有多處淘刷，造成解壓岩體滑落。	中~高
2	岩體風化節理發達	節理發達夾泥，鑽探不迴水時顯示，地下水易於地層中儲存及流竄。	中~高
3	地中水壓力	豪雨或颱風季節集中降雨造成地中水壓力，由相關監測資料研析，此現象明顯。	高
4	順向坡地層	節理及劈理位態與坡度相近，但並無大規模與急速滑動發生。	低~中
5	地表排水不良	除地表裂隙之入滲外，於局部排水溝有雜物阻塞情形。	低
6	地震	近 10 年 4 級以上地震 4 次，現場無異狀，監測資料亦無發現明顯曲線變化。	低

抑止。再由前期監測成果評析，降雨、地下水與地滑關係密切，應以排除災害誘因的地表水及地下水，以減少滲流力產生滑動面之推移作用，減緩嘉寶隧道破壞速率。

地滑的整治工法中，以上邊坡挖方解除土壓及下邊坡回填增加穩定性最易獲得成效，惟本案之邊坡陡峭，挖填不易，故採用對環境影響最小之集水井工法抑制邊坡滑動，相關結構配置及內容說明詳圖 21。另外，從岩心判釋及現地野外露頭調查結果顯示，研究範圍附近的岩盤具有許多的片理及剪裂帶，遇水可



圖 21 邊坡整治排水工法設置

能發生強度降低或變形開裂，故排水極為重要。惟欲徹底阻止水滲入坡體及岩盤極為不易，因此藉由集水井內部鑽設輻射狀排水管，以利豪雨時坡體能迅速排水。施作集水井及橫向集水管應能減緩並抑制地層的持續滑動，減少因邊坡滑動對現有嘉寶隧道的影響。並建議監管單位應對此一地區持續觀測，並尋求長治久安之工程方案，必要時應跨單位配合河川整治及邊坡抑制工程減緩邊坡下滑趨勢。

### 參考資料

1. 臺灣鐵路管理局，「南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告」，台北 (2008)。
2. 王宗堅、陳淑季，「隧道洞口段工程問題之因應對策與處理研究」國立台灣海洋大學河海工程學系碩士論文 (2003)。
3. 交通部，「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂」，台北 (1998)。
4. 蕭牟淵、游本志、王泰典、蕭興臺，「台灣公路隧道安全檢測及評估之研究」，臺灣公路工程，第 36 卷，第 5 期，第 25 ~ 44 頁 (2009)。
5. 李維峰、張嘉峰、梅興泰、蔡道賜，「地電阻影像剖面探測法於地下工程之應用」，土工技術，第 108 期，第 91 ~ 104 頁 (2006)。
6. 藤原明敏，「地滑解析及防止對策」，理工圖書株式會社，日本 (1979)。
7. 交通部公路總局，「台 20 線 190k+840 嘉寶隧道詳細評估 - 期中報告」，台北 (2014)。

### 秘書處報告

本學會於 104 年 1 月 16 日已登記更名為社團法人中國土木水利工程學會



電話：(02) 2392-6325  
傳真：(02) 2396-4260  
e-mail: service@ciche.org.tw

## 歡迎加入學會

一個凝聚產官學土木專業知識的團體  
一個土木人務必加入的專業學術團體  
一個國際土木組織最認同的代表團體  
一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體



http://www.ciche.org.tw  
請上網下載入會申請表

社團法人  
中國土木水利工程學會  
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

# 公路總局山區公路邊坡分級 管理建置與實施

陳俐穎／交通部公路總局養路組道路工程科工務員

孟伯鈞／交通部公路總局養路組道路工程科科长

陳進發／交通部公路總局副總工程司兼公路防災中心執行秘書

## 山區公路邊坡管理問題

### 主體條件

臺灣位於太平洋板塊交界處，山區約佔地百分之70，在海洋板塊與大陸板塊互相擠壓下，不僅地震頻繁，山區地質年輕，地形及地質條件更是軟弱、破碎又複雜，又近幾年來發生豪大雨次數頻率增加，邊坡坍塌情況更趨嚴重。

### 客體條件

臺灣公路網縱橫全省各城鎮，不僅是維繫經濟運輸之命脈，更是國人親情連繫的通道，山區公路開發常伴峽谷及溪流而行（如圖1），易形成路塹及路堤邊坡，邊坡管理為道路維護工作重要一環。

公路總局轄管省道近5,000公里，其中山區路段約1,200公里，邊坡數量龐大，常因自然性風化造成無預警坍塌。

為防止邊坡因自然風化、地震、豪雨等因素引致坍塌造成道路中斷，甚至發生災情，公路總局不僅藉由日常的巡查機制，及早發現徵兆，特別針對高風險路段進行較高頻率的養護巡查及防災應變警戒，於未有災害發生前進行整治、養護，或對人工設施及邊坡進行安全監測及公路防災預警管理，以提供用路人通行安全。

## 執行方法

### 邊坡分級管理建置

#### ● 有效管理，明確掌握高風險路段

公路總局山區公路邊坡採分級管理，結合經濟部中



圖1 山區公路開發常伴峽谷而行

央地質調查所地質災害潛勢圖與轄管省道路線圖資套疊（如圖2），逐案現地確認並設置邊坡銘牌（如圖3）以供辨識，全面清查後再進行個案邊坡分級。

各邊坡資料逐段建置於公路總局邊坡資訊系統內，以「定期巡檢、發現問題、及早改善」為原則，所列邊坡逐案現地清查後，將各高潛勢邊坡基本資料輸入於邊坡資訊系統內，依據歷史災害紀錄、有無護坡設施及邊坡不穩定徵兆三大項目，分為A、B、C、D四級管理（目前約1,600餘處）（分級方式如圖4），截至103年9月16日止省道邊坡分級統計如圖5。

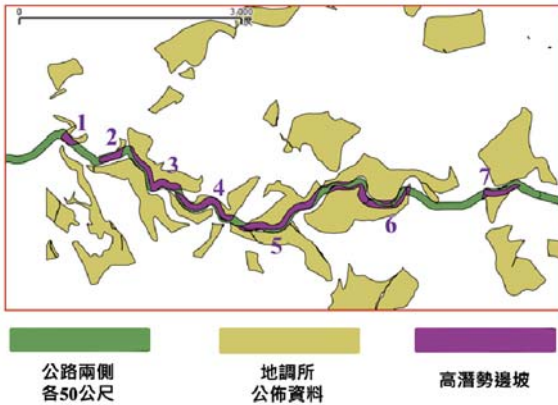


圖 2 災害潛勢圖與省道路線圖資套疊案例 (7處高潛勢邊坡)



圖 3 邊坡銘牌

邊坡分級	2年內災害紀錄	5年內災害紀錄	護坡設施	邊坡不穩定徵兆
A	有	-	復(興)建中	明顯
B	有	-	無法設置	疑似
C	-	有	-	無
D	-	未有	-	無

- A** 2年內有災害紀錄，且尚未復建完成，或有明顯不穩定徵兆之邊坡
  - B** 2年內有災害紀錄，且因地形地質因素無法設置護坡設施，或有潛在不穩定徵兆之邊坡
  - C** 5年內有災害紀錄，後續無明顯不穩定徵兆之邊坡
  - D** 5年內未有災害紀錄，且無明顯不穩定徵兆之邊坡
- 註：(1)災害紀錄來源為指「公路防災資訊系統(bobe168.tw)」及「公共設施災害復建經費申請補助明細表」內資料  
(2)歷年災害紀錄除了Bobe系統資料認定外，可由工務段於巡查過程中若發現邊坡有顯著變化，可將邊坡等級提升

圖 4 邊坡分級方式

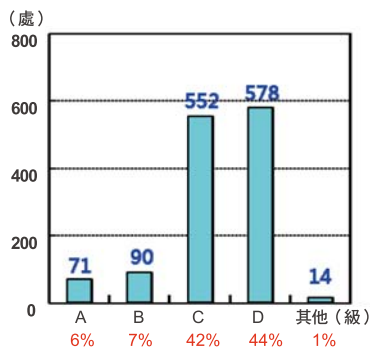


圖 5 省道邊坡分級統計 (資料日期：104年1月9日)

邊坡分及各級次依其不同屬性分別訂有養護管理及防災應變機制(如圖6、7)，明定颱風豪雨期間，各邊坡處置方式，如實施巡查作業、保全駐點守視、朝巡制度及實施不同強度的公路防災預警機制。並依現況定時滾動檢討，調整邊坡分級。

各情境之處置方式	A	B	C	D	大型地滑、順向坡
1.3小時累積雨量達120mm以上	1	1	1	1	1
2.前期(48小時)累積雨量達350mm以上	2	1	--	--	2
3.海上颱風警報解除後	1	1	1	1	1
4.震度6級以上區域	3	3	3	1	2
5.無預警大規模坍方搶通後	4	4	4	4	4
6.鄰河側上游發布土石流紅色警戒	1	1	1	1	1

- 處置1 2日內實施特別巡查
  - 處置2 14日內完成特別檢測
  - 處置3 (1)7日內完成特別檢測 (2)實施朝巡1週 (3)取得空中或衛星影像
  - 處置4 (1)實施朝巡、暮巡1週 (2)取得空中或衛星影像
- 註：(1)情境5無預警大規模坍方：20,000M<sup>3</sup>以上者，執行處置4(1)及(2) 5,000-20,000M<sup>3</sup>者，執行處置4(1)  
(2)無預警大規模坍方5,000M<sup>3</sup>以上者，原邊坡屬B、C、D及大型地滑、順向坡分級者，情境1-6皆比照A級邊坡處置作為執行。

圖 6 養護管理機制

各情境之處置方式	A	B	C	D	大型地滑、順向坡
1.3小時累積雨量達120mm以上	3	3	4	4	-
2.前期(48小時)累積雨量達350mm以上	1	1	2	2	2
3.海上颱風警報解除後	5	5	5	5	5
4.震度6級以上區域	6	6	6	6	6
5.無預警大規模坍方搶通後	7	7	7	7	7
6.鄰河側上游發布土石流紅色警戒	8	8	-	-	8

- 處置1 降低雨量門檻值
  - 處置2 加強水情監控
  - 處置3 實施巡查作業
  - 處置4 揭露路段強降雨訊息
  - 處置5 颱風警報期間，依「公路防災預警機制」辦理
  - 處置6 依「交通部公路總局因應大規模震災標準作業程序」辦理
  - 處置7 保全守視(必要時交通管制)
  - 處置8 擬定加碼部警策略，按計畫執行
- 註：(1)情境2之大型地滑及順向坡邊坡之分屬A及B級邊坡者，處置修正為1。  
(2)無預警大規模坍方20,000M<sup>3</sup>以上者，執行處置7。

圖 7 防災應變機制

### 全時掌握強降雨動態

#### ● 即時監控高風險路段

公路總局研發「全時高風險路段自動預警系統」(如圖8說明)，以資訊系統自動比對取代過往人工監看作業。系統由中央氣象局發布每小時累積雨量圖原始色階自動篩選強降雨路段後，比對邊坡分級及歷史災害資料。

若強降雨路段具A級或B級邊坡，對內(公路總局)則由系統自動發送簡訊通知養護單位，俾利就現況或後續預期研判並做適當處置，防災預警進入全面自動化(圖9案例說明)。

若強降雨路段具A級或B級邊坡，對外(用路人)聯繫部分預計於今(104)年汛期前完成上線，藉由八大管道(圖10)主動傳遞即時風險訊息予用路人。



圖 8 全時高風險路段自動預警系統

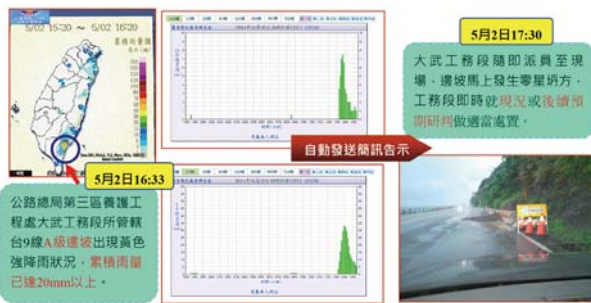


圖 9 全時高風險路段自動預警系統—防災自動化執行案例說明



圖 10 對外聯繫八大管道

### 封路預警機制及執行成果

公路總局針對颱風期間之高風險路段，採用「公路防災預警機制」，將以往被動等候通報才啟動現場相關應變機制，改進為災前預判部署、災中預警應變、災後救援應變之防災預警應變機制（參考圖 11），整套機制著重於預警，爰要如何取得預警之前置時間，公路總局檢討數次嚴重災情後，於橋梁方面以有空間縱深之流域為監測主體，將警戒區拉至保全橋梁之上游，監控其水情變化，以流域空間縱深之特點取得前置預警時間（通常可有 1~3 小時），是謂「流域管理」。

另於山區公路方面，因公路邊坡之地形並未具有空間縱深之特性，爰以風險管理概念評估選出致災風險較高之山區公路及降雨因素作為重點監控路段及觀測指標，惟以目前之科技水準，實無法精準掌握公路邊坡坍塌時機，公路單位係依相關紀錄及經驗（致災風險較高之路段）監控路段部署保全人力，目的在降低用路人於該路段罹災之機率，是謂「風險管理」。

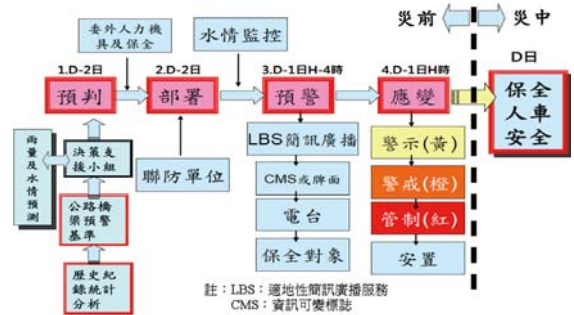


圖 11 公路預警機制 4 階段

公路總局為有效提升公路風險管理之效益，並配合公路邊坡分級管理的實施，將重點監控路段，檢討劃分為一級監控路段 30 處、二級監控路段 41 處；103 年汛期前共完成 11 場、565 人次防救災教育訓練，以及 6 場複合式災害兵棋推演、33 場實地演練，並加強各項橫向聯合，達區域聯防之效。總計 103 年公路預警封閉 84 次，其中 53 次封閉道路後發生災情，由於災前預警封閉得宜，所轄路段未發生用路人受災傷亡情事。

### 結論

公路總局藉由日常巡查機制，及早發現邊坡不穩定徵兆，續擬訂邊坡治理計畫或視徵兆嚴重性啟動安全管理，治理計畫亦須藉由地錨檢測、邊坡監測等各項成果擬訂，以盡力預防無預警坍方所造成的災害，此巡查維護管理的執行，期達「逐年減少公路重點邊坡數量」之目標；另針對豪大雨、地震、無預警坍方等情境，以邊坡分級加強管理高潛勢邊坡、大型地滑及順向坡，訂定養護、防災管理機制進行各種情境之處置，此項機制公路總局目前仍採滾動式檢討以持續精進公路防災預警作業。公路總局秉持「料敵從寬、禦敵從嚴」、「每一次颱風都當成是第一次颱風來準備」之公路防災預警核心思維，與時俱進加碼部署，依災前、災中及災後之節奏完成各項部署應變作為，配合全時高風險路段自動預警系統之執行，以提升用路安全性，讓用路人快樂出門、平安回家是為公路總局持續努力的原動力。

### 參考資料

- 交通部公路總局 (2012),「交通部公路總局公路養護手冊」,第二章。
- 交通部公路總局 (2012),「公路防災年報」。
- 交通技術標準規範公路類公路工程 (2012),「公路養護規範」,交通部,第二章。
- 陳俐穎、李家順、楊秉順、孟伯鈞、陳進發 (2014),「公路總局省道邊坡巡查養護制度介紹」,地工技術,第 141 期,第 61-70 頁。

# 台88線 萬大大橋 橋梁先建後拆 換底工法之設計與分析

林俊和／交通部公路總局第三區養護工程處高雄工務段段長

胡傑信／交通部公路總局第三區養護工程處高雄工務段主辦工程司

蕭天任／林同棧工程顧問股份有限公司專案工程師

## 前言

台灣位於環太平洋地震帶及亞洲颱風鏈島上，常受地震、強風及暴雨之威脅，且台灣河川坡陡流急，令橋梁基礎遭洪水冲刷而裸露，加上許多老舊橋梁不符現行耐震規範之標準，造成耐震及耐洪能力不足。是台灣許多跨河橋梁的典型問題。

高雄市與屏東縣間主要跨越高屏溪之橋梁為：里嶺大橋、高屏大橋、萬大大橋及雙園大橋，自雙園大橋斷橋後，台88線成了主要替代道路，車輛改道導致道路服務水準不佳，服務水準已降至E級，而周邊道路如台1線、台21線、縣道188之道路服務水準也有明顯之下降。

台88東西向快速公路西端位於高雄市鳳山區銜接中山高速公路，東行至竹田鄉與南二高相連，全長約20.5公里。沿線經高雄市鳳山、大寮、大發工業區、屏東縣萬丹及潮州等地，計畫工址「萬大大橋」為台88線及188縣道跨越高屏溪路段，總長2.4公里，為往來高雄與屏東縣主要橋梁之一（圖1）。

台88線萬大大橋經歷莫拉克風災，大量洪水夾帶土石冲刷萬大大橋（圖2），其洪水量超過200年重现期距，造成部份橋墩基礎因冲刷而裸露達3公尺，經評估後，顯示萬大大橋深槽區之橋墩耐震及耐洪能力不足（圖3），包含：橋柱耐震能力不足、基樁強度不足、基樁承载力不足及通洪斷面不足等等。



圖1 台88線萬大大橋位置圖



圖2 莫拉克風災時萬大大橋與洪流照

## 橋梁改建與原橋補強方案評估

### 原橋補強方案

在優先考量不影響橋上交通之條件下，一般橋墩補強工法包括：RC 包覆補強、鋼板包覆補強、FRP 包覆補強等（圖 4），以增加其橋柱強度及韌性。

而基礎補強方面，一般採用增樁方式補強其承載力，但是因為向外增樁的關係，將導致通洪斷面更加縮小，並使沖刷加劇，裸露情形將更加嚴重（如中沙大橋，圖 5），日後仍需持續辦理基礎補強，故此一補強方式恐治標不治本。

### 原橋改建方案

如考量橋梁使用之長遠性則採用橋梁改建方案，半半施工為降低橋上交通衝擊之施工方式。本案依據萬大大橋之橋梁配置特性及交通流量，因當時雙園大橋已遭沖毀阻斷，故考量 2 種情境進行分析：情境一為雙園便橋尚未完成；情境二為雙園便橋通車。分析成果彙整於下表 1。

由表 1 可知，無論雙園便橋通車與否，台 88 線之服務水準皆為 F 等級，故本案若採「半半施工」之方式進行改建，除了影響台 88 線及 188 縣道之車行速度外，更將波及其他聯外道路，如台 1 線或台 17 線等，恐引起民怨並增加民眾繞行之油耗及時間上之社會成本，本方案對該地區造成之衝擊有待克服。

表 1 各情境下半半施工之交通流量分析成果

路線編號	方向	雙園便橋未通（情境一）				雙園便橋通車（情境二）					
		施工階段	尖峰小時流量	道路容量	V/C	等級	施工階段	尖峰小時流量	道路容量	V/C	等級
台 88 線	往東	一	2,998	1,600	1.87	F	一	2,463	1,600	1.54	F
	往西	一	2,996	1,600	1.87	F	一	2,531	1,600	1.58	F
縣道 188	往東	一	1,580	1,300	1.22	F	一	1,082	1,300	0.83	E
	往西	二	1,343	1,300	1.03	F	二	1,055	1,300	0.81	E

## 設計方案評估

為免橋梁改建方案施工期間衍生龐大之社會成本，又需排除傳統補強方案造成日後橋梁管理維護額外花費，經評估後以「橋河並治」理念，從「生命週期整體考量」思考，採取原橋補強方案，上部結構不改建，但以「下構改建」方式達到「耐洪」及「耐震」能力提昇之目的。

其中新建之下構是依最新之耐震設計規範設計，故能整體提昇萬大大橋之耐震能力。並且重新進行水力分析，將基礎下降，以增加其通洪斷面，從根本解決橋梁耐洪能力不足之問題。

## 國內首座先建後拆下構改建工法

### 工程概述

由於莫拉克颱風造成台 88 線萬大大橋橋墩基礎裸露，經評估極需補強墩柱基礎自 P4 至 P25 墩，如圖 6 所示，本案所需經費約 10 億元，施工期程規劃為 2 年。

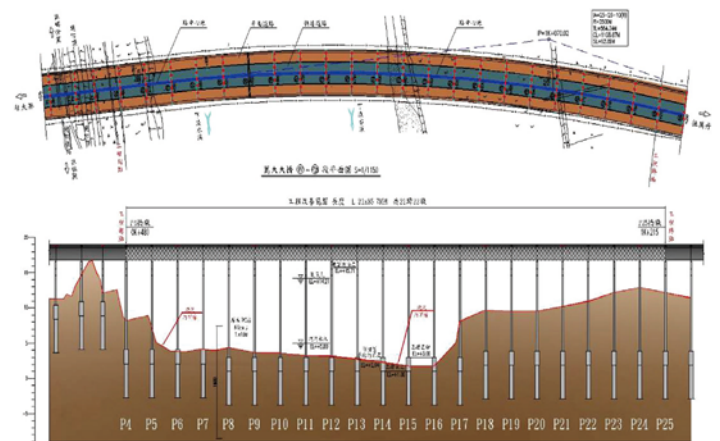


圖 6 萬大大橋補強工程範圍圖

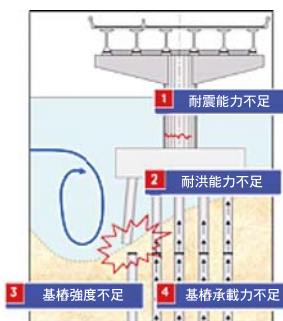


圖 3 萬大大橋橋墩耐震及耐洪能力不足



圖 4 傳統 RC 包覆及鋼板包覆補強示意圖



圖 5 基礎增樁使沖刷加劇

## 工法說明

如何在不影響上部結構及車行之情況下進行下部結構改建，是本案是否可行之關鍵課題，故本案採用的是國內首座帽梁施加預力之「先建後拆下構改建工法」，以下針對此一工法進行說明。

原萬大大橋是屬於 4 支獨立之單柱橋柱，本案之改建是於原萬大大橋兩旁及中間設立新基礎及橋柱後，施作擴大式帽梁連結舊帽梁，成為 7 柱式門架結構。並於新帽梁內施拉預力之後依序切除舊橋柱並打除，即完成下部結構改建。其施工順序示意圖如圖 7 所示。

## 施工變位控制

由於本案在切除原橋柱時上方仍維持車輛通行，故本案利用於帽梁內施加預力，以控制切除舊橋柱後的帽梁變形。

依據等值載重理論，我們配置折線線型的預力鋼腱並施加預力，使鋼腱折角處產生四個集中力以抵抗原橋柱及上部結構的重量（圖 8），最後分析的結果顯示：切除舊橋墩後帽梁僅變形 0.3 公分，不影響上部結構及用路人安全。

## 安全檢核

為確保施工中及完工後之結構安全，本案利用 SAP 2000 V14 進行施工步驟模擬，並針對各階段之應力逐一檢核。於各施工步驟中，混凝土應力需依據 98 年 12 月所頒布「公路橋梁設計規範」第八章之內容進行檢核，其中壓應力不得大於  $0.55f_{ci}'$ ；拉應力不得大於  $2\sqrt{f_{ci}'}$ ，施拉預力時各混凝土強度如下：新澆鑄時混凝土強度為  $350 \text{ kg/cm}^2$ ；原結構混凝土強度為  $280 \text{ kg/cm}^2$ ，施工中容許應力彙整於表 2 所示。

階段分析中之應力如下所示：

### 步驟一、原萬大大橋興建及拓建

原萬大大橋於民國 81 年 5 月完工，其懸臂帽梁施

拉有  $1281.6 \text{ Ton}$  之預力；隨後在 87 年 1 月拓建完成側車道，上部結構皆為簡支 PCI 梁。經過分析，其既有帽梁之最大壓應力 ( $\sigma_{\min}$ ) 為  $-80 \text{ kg/cm}^2$  符合規範所規定；而最大拉應力 ( $\sigma_{\max}$ ) 為  $35.3 \text{ kg/cm}^2$ ，發生於拓建之 RC 帽梁（圖 9）。

### 步驟二、包覆舊帽梁建立新下構

建立新橋柱後包覆舊帽梁，成為 7 柱式門架結構，如圖 10 所示。整體結構僅增加新帽梁及新橋柱自重，對原帽梁內預力影響輕微。

### 步驟三、施拉預力

於 7 柱式門架橋墩情況下施拉新預力，新預力將導入原帽梁內（圖 11），需檢核主橋內帽梁應力，最大壓應力 ( $\sigma_{\min}$ ) 為  $-130 \text{ kg/cm}^2$ ，依然符合規範要求，而最大拉應力 ( $\sigma_{\max}$ ) 為  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ 。

### 步驟四、拆除舊橋墩

依順序拆除舊橋墩：當拆除舊橋墩時，其力量將轉移置未拆除結構（圖 12）。拆除完成後，其梁頂及梁底應力均符合規範之要求（圖 13）。

## 各階段之力量轉移

表 2 混凝土容許應力表

原結構僅考慮上構重量時，主橋及側橋分別承受  $1050 \text{ Ton}$  及  $670 \text{ Ton}$  之軸力，建立新橋柱及連接帽梁時，

項目	應力 ( $\text{kg/cm}^2$ )	
	舊帽梁	新帽梁
$f_{ci}'$	280	350
拉應力	33.5	37.4
壓應力	154.0	192.5

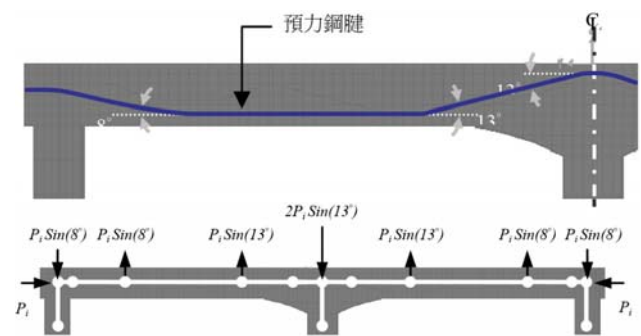


圖 8 預力鋼腱線型及等值載重示意圖

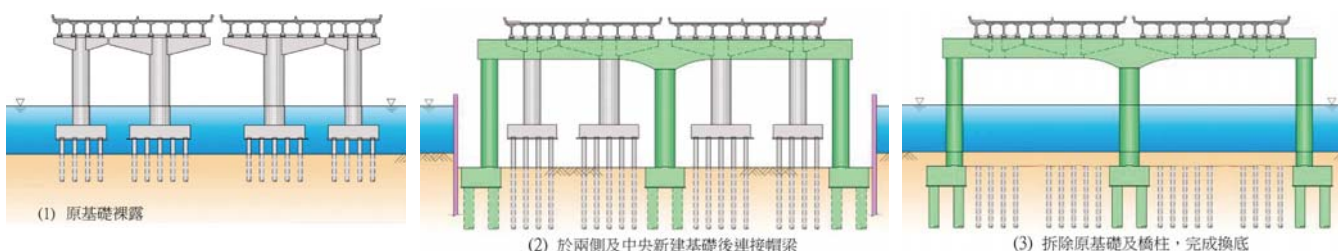


圖 7 先建後拆下構改建工法施工步驟示意圖

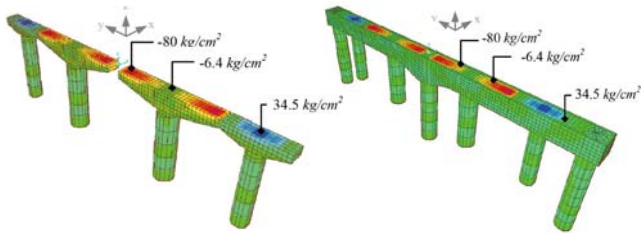


圖 9 原萬大大橋應力圖

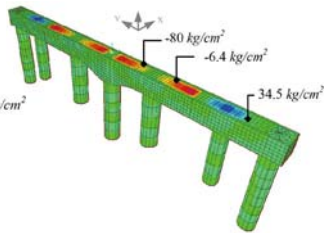


圖 10 新建新橋柱及外擴帽梁階段應力圖

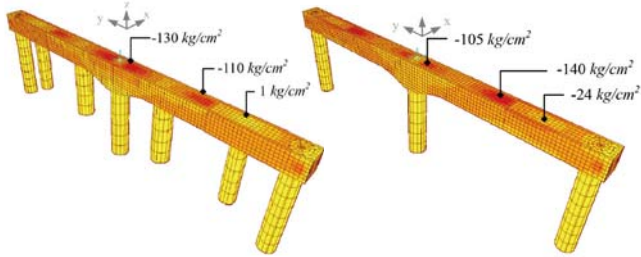


圖 11 施拉預力後應力圖

圖 12 拆除完成後結構應力圖

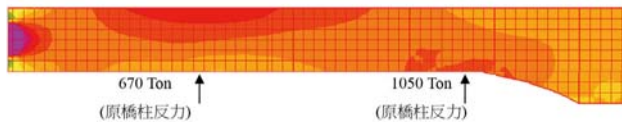
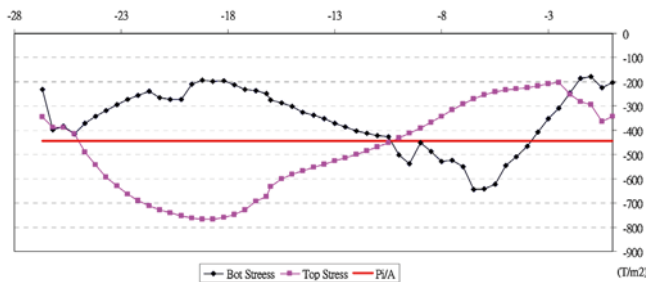


圖 13 施工完成梁頂及梁底應力圖

新帽梁之自重將分配至 7 柱式結構，舊橋柱依然承受大部分之力量，其軸力彎矩如圖 14 所示。

當新帽梁施拉預力後，其預力效果將導入 7 柱式門架結構：因預力之等值效益，其將產生 4 個向上之力量於舊橋柱 P-1~P-4，原 P-1、P-4 之軸力由 834 Ton 降至 365 Ton；P-2、P-3 之軸力由 1245 Ton 降至 415 Ton，藉此將力量由舊橋柱轉移至新橋柱。

此時切除 P-1 ~ P-4 原橋橋柱，切除時使用鏈鋸切割，其橋柱勁度將慢慢下降，其橋柱之力量將隨勁度之下降轉移至其他未切除橋柱，最後力量將如圖 16 ~ 圖 19 所示。

### 新舊混凝土設計細節

本案帽梁接合處，新舊混凝土澆鑄時間不同，且兩者界面平滑，為使力量能有效傳遞，其接合方式亦為此工法成功與否之重要關鍵之一（圖 20）。

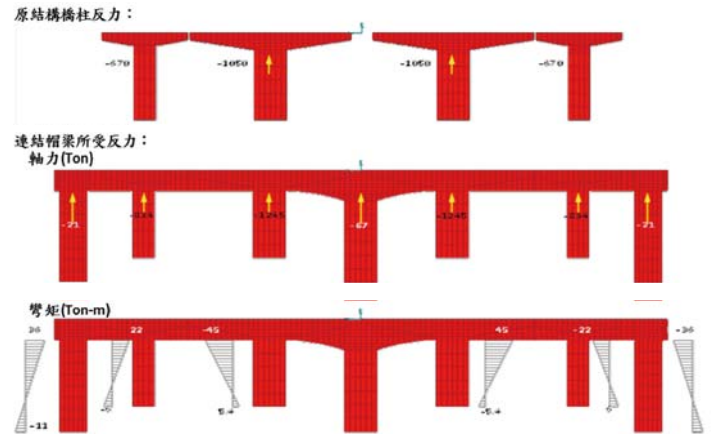


圖 14 力量轉移（一）

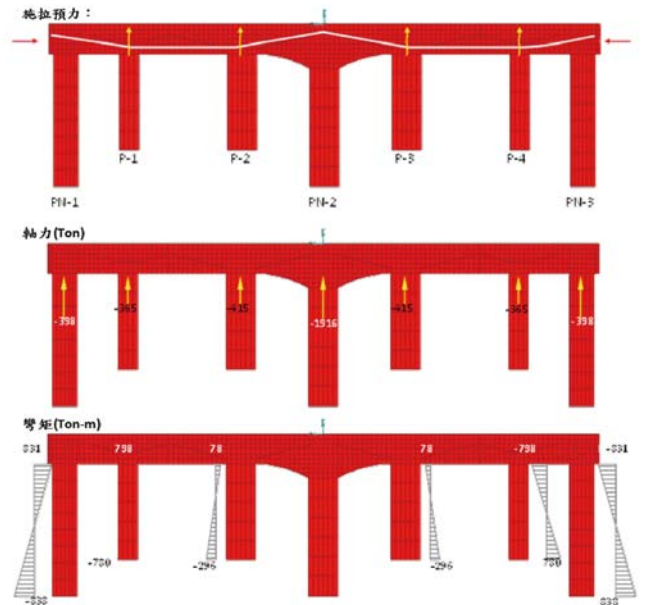


圖 15 力量轉移（二）

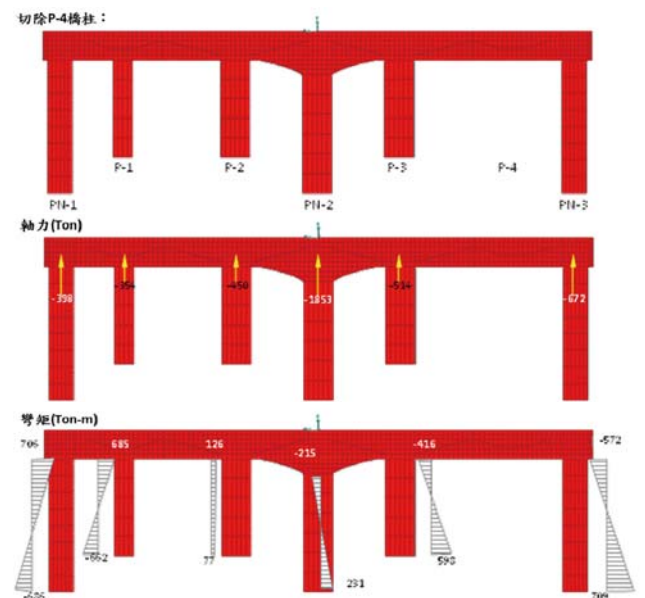


圖 16 力量轉移（三）



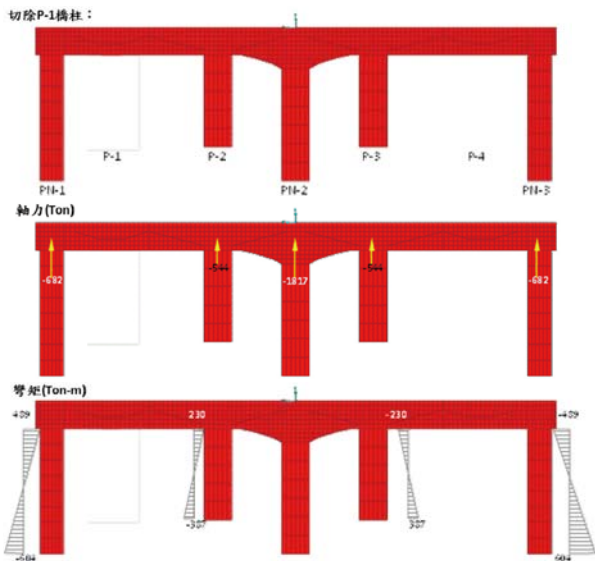


圖 17 力量轉移 (四)

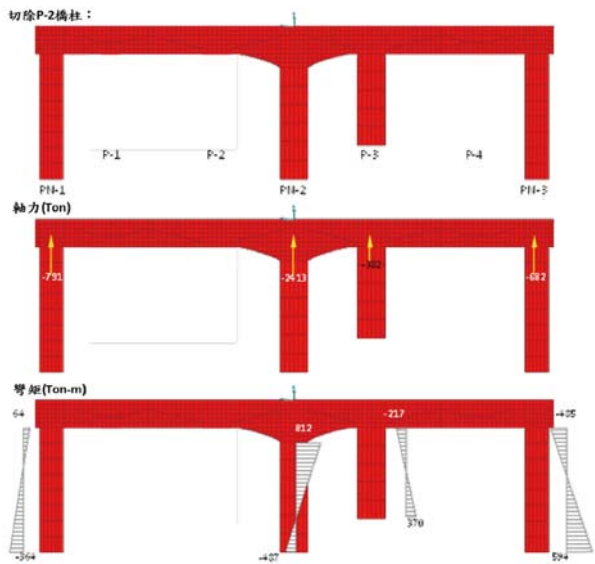


圖 18 力量轉移 (五)

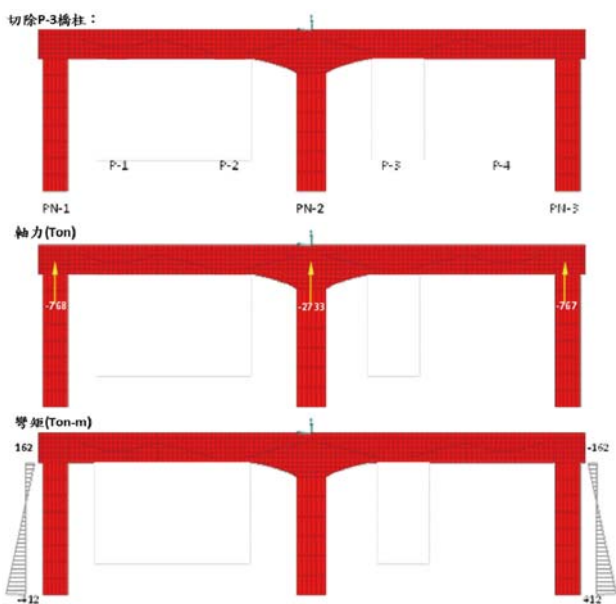


圖 19 力量轉移 (六)

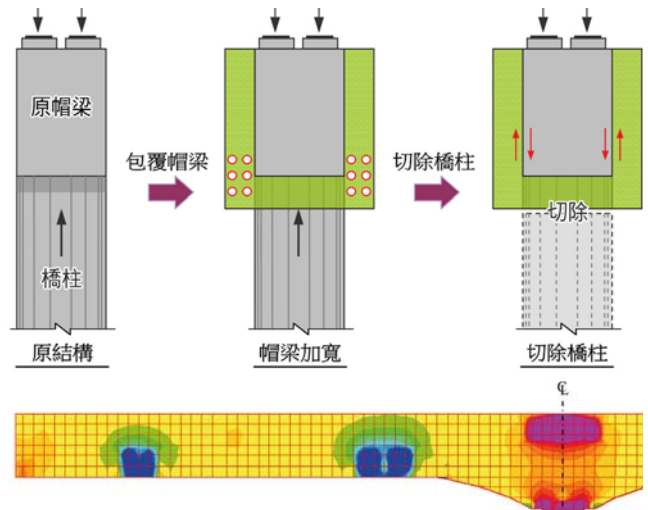


圖 20 新舊帽梁間剪力分佈

為連接帽梁並施拉預力，原帽梁將於兩邊各擴大 87.5 cm，於拆除舊橋柱及施拉預力時，新舊帽梁間將藉由垂直剪力傳遞自重及預力，分析發現：剪力多半由原柱頭處承受，其中最大承受 8.8 kg/cm<sup>2</sup> 之剪力。

若不進行 3D Solid 分析，可假設原橋柱所受之自重 (1050 Ton) 將完全由柱頭處部份混凝土面積 (3 m × 2 m) 承擔，計算所得之混凝土面剪應力為 8.75 kg/cm<sup>2</sup>，與有限元素分析結果相近。

為抵抗此自重及預力所造成之垂直剪力，需於舊帽梁表面打毛 0.6 cm 以增加接觸面之摩擦力，並打設化學錨筋，其中化學錨筋係於利用改性環氧類或改性乙烯基酯類 (包括改性氨基甲酸酯) 的膠粘劑，將鋼筋錨植於原結構上，使鋼筋與原結構產生握裹力，從而達到預埋效果的施工技術。而化學錨筋之使用量則由剪力摩擦計算而得，其原理係由於鋼筋之拉力為正向力，並藉由混凝土面之摩擦力以抵抗剪力。

依據公路橋梁設計規範 7.3.6 節第 4 項內容所示：

$$v_n = A_{vf} f_y \mu$$

其中：

$A_{vf}$  = 錨筋面積

$f_y$  = 錨筋降伏強度

摩擦係數  $\mu = 1.4\lambda$  (整體澆鑄混凝土)

1.0 $\lambda$  (澆鑄於已硬化混凝土，表面粗糙處理)

0.6 $\lambda$  (澆鑄於已硬化混凝土，表面未粗糙處理)

0.7 $\lambda$  (錨定於型鋼表面)

$\lambda = 1.0$  (常重混凝土)

0.85 (輕質混凝土)

0.75 (全輕質混凝土)

除了強度上之考量，外界氯離子亦可能會經由新舊混凝土交接面侵入導致鋼筋腐蝕，故需於外界接觸面塗佈環氧樹脂，並利用對穿鋼筋或預力鋼棒使新舊兩混凝土交界面壓接在一起，如圖 21 所示，一方面係保護錨筋不受氯離子侵蝕，另一方面亦可提供正向力以抵抗新舊混凝土間剪力。

水平方向混凝土接合方面，可將新舊混凝土斷面視為一合成梁，由材料力學可知兩斷面間存在有劈裂之潛能，期間剪力應力如下所示：

$$\tau = \frac{VQ}{IB}$$

此剪應力由穿過潛在破壞面之鋼筋承擔，經由箍筋及化學錨筋之拉力提供混凝土潛在破壞面之正向力，再以此正向力產生水平方向之摩擦力抵抗其水平剪力（圖 22）。

### 結論與建議

萬大大橋深槽區之基礎由於受洪水沖刷而裸露 3 公尺，若採一般補強方式恐造成更嚴重的掏刷，並非

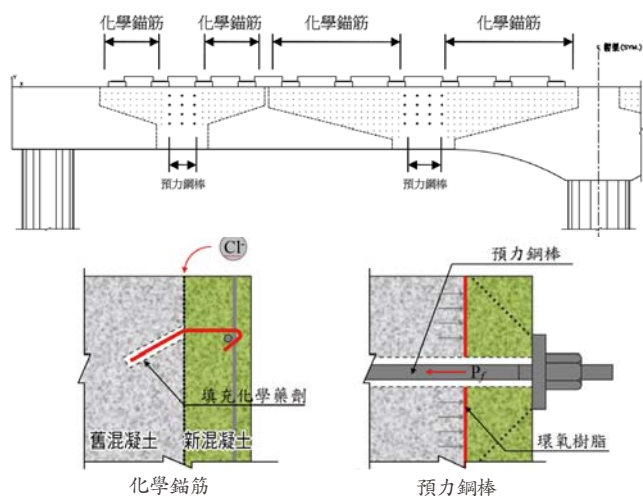


圖 21 化學錨筋與預力鋼棒設置示意圖

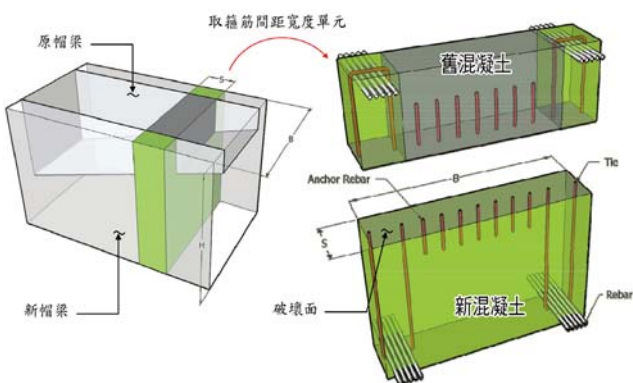


圖 22 垂直化學錨筋示意圖

治本之方法。故本段以「橋河並治」理念，從「生命週期整體考量」思考，並不建議以傳統方式補強，而是以「下構改建」方式達到「耐洪」及「耐震」能力提昇之目的。

採取的方式是創新之「先建後拆下構改建工法」，此一工法工程技術高，且施工過程將受限於橋下淨高，施工空間狹小，並不是一項容易的工程，但萬大大橋位於交通要道，肩負著高雄一屏東地區的聯繫任務，尤其是在雙園大橋斷橋後，此工法能在不影響上部結構及車行之情況下進行一場「無痛」的再造工程，除了能達成萬大大橋的耐震耐洪能力提昇之目的，也展現了公路總局對於「自然環境」及「道路使用者」的用心及細心。

萬大大橋現已完工，證明了本改建工法之可行性，足供日後施工之參考，施工及切除過程中並不影響用路人，節省因橋梁改建而交通改道需花費之龐大社會成本，其工程效益單就交通量之影響粗估結果，節省時間成本約 93 億元、車輛油耗成本約 45 億元、及降低排碳量約 7 萬噸。希望能以此成功的案例作為範本，推廣至其他有相同問題之橋梁。

### 參考文獻

1. 許資生，「潛變、乾縮、溫度對預力混凝土結構之影響」，國立台灣大學土木工程學研究所，博士論文，(1996)。
2. CEB-FIP, "CEB-FIP Model Code 90", CEB-Bulletin d' Information, (1991).
3. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures", ACI (1997).
4. Magura et al., "A Study of Stress Relaxation in Prestressing Reinforcements.", Journal Prestressed Concrete Institute, Vol. 9, No.2, p13-p57, (1964).
5. A F Daly, W Witarnawan, "Strengthening of Bridges using external post-tensioning", EASTA '97, (1997).
6. Waleed A. Thanoon et al., "Structural Response of Initially Loaded RC Beam to Different Retrofitting Techniques", Pertanika J. Sci. & Technol. Vol. 12 No.1, p103-p113, (2004).
7. Tarek Alkhrdaji, Jay Thomas, "Structural Strengthening Using External Post-Tensioning Systems.", STRUCTURE magazine, July 2009.
8. 交通部運輸研究所，「橋基保護工設計規範（草案）」，交通部運輸研究所，(2010)。
9. 張荻薇等，「換底工法於沖刷水害橋梁之應用—以台一線溪州大橋橋基加固工程為例」，中華技術，No. 71, p110-p121，財團法人中華顧問工程司，(2006)。
10. 交通部，「公路橋梁設計規範」，幼獅文化事業股份有限公司，(2009)。
11. 交通部，「公路橋梁耐震設計規範」，幼獅文化事業股份有限公司，(2009)。
12. AASHTO, "Standard Specification for Highway Bridges", (1992)。



# 擋土牆功能 檢視、調查及維護

徐明志／富國技術工程股份有限公司副總經理

李守原／富國技術工程股份有限公司技術經理

蔡皓川／泰興工程顧問股份有限公司工程師

江政恩／中興工程顧問股份有限公司計畫經理

黃筱卿／中興工程顧問股份有限公司工程師

謝孝維／北駿工程顧問有限公司負責人

## 前言

所有土木構造物於建造完成後均可能隨使用時間增加，逐漸降低其原有之設計功能；再加上台灣位處地震活躍之區域及每年受颱風或豪大雨的侵襲，故經常有構造物因「年久失修」而造成破壞的事件。因此除了於設計階段就必須適當考量及納入日後維護所需的設備及措施外，完工後使用階段之例行性檢查及必要的維護，為確保土木構造物機能及延長其使用年限的不二法門。

擋土牆為台灣地區常見的土木構造物，無論是建築、道路或護岸等工程均可見其蹤跡，一旦發生損壞常造成經濟或生命的重大損失。故工程實務上經常有針對擋土牆現況、安全、損害原因與責任進行鑑定之需要，因此中華民國大地工程技師公會囑由筆者六人組成編輯小組，進行「擋土牆鑑定手冊」之編輯作業，並於 2014 年 4 月付梓出版。該手冊內容原則性說明各類鑑定作業之程序、工作規劃與各種調查、評估所需之方法及注意事項，並提出修復補強建議。

然而目前國內對擋土牆定期檢查及維護之觀念並未普及落實，故本文首先介紹日本宅地擋土牆目視例行性檢查項目及危險度初步評估標準，供實務操作參考；然後針對經前述初步評估之危險度為中及大者，配合引用大地工程技師公會之「擋土牆鑑定手冊」中有關細部調查項目和方法、安全分析評估及修復補強之概念，提出擋土牆生命週期中有關定期初步檢視及評估、詳細調查及安全評估與維護等階段的說明，希望能引起國人對此

課題的重視，並建立相關之觀念及制度。

由於擋土牆之種類繁多，其構築方式與破壞機制亦不盡相同，本文主要介紹最常見之「剛性自重式鋼筋混凝土擋土牆」之檢視及評估方法，其他類型擋土牆可參酌其精神辦理。

## 擋土牆之生命週期

參考蕭秋安等人<sup>[4]</sup>彙整相關研究成果顯示，一般土木構造物之生命週期可分為三個階段：第一階段為完工後 0~20 年、第二階段為完工後 20~50 年、第三階段為完工後 50 年以上。其中損壞機率較高者為第一階段及第三階段，第一階段之異狀主要肇因於設計與施工上之缺陷；第三階段之異狀則主要源於構造物材質之老化。

另外，日本基礎工<sup>[6]</sup>「基礎工的維持管理」指出，土工構造物如能於適當的時間，以適當的方法進行補強維護，將可以較低的工程成本，獲得較佳的構造物機能維護及延長其工程使用年限，其觀念如圖 1 及圖 2 所示。由圖 1 可知，透過定期之事後維護可適當恢復土工構造物因損壞而減低之功能，但倘更積極地於事前採取預防性維護，甚至可略為提升維護當時構造物所保有之功能；另由圖 2 指出，不同之修補模式則會影響構造物所能回復之健全程度及所需之維護頻率，如採用最佳修補模式，將可使構造物恢復較高的健全程度及減少修補頻率，但若為一般修補模式，則所回復之健全程度較為有限，且需經常進行相關之修補及維護。

經由上述說明，建立及執行合理之檢視、調查程序及評估標準，配合於適當之時機點進行必要之修復、補強工程，應為擋土牆功能長期維護之核心工作。

### 初步檢視及評估

擋土牆破壞可能導因於牆體穩定破壞、整體（邊坡）穩定破壞及牆體構造損壞等模式。一般而言，倘若擋土牆功能受損或有持續變化導致破壞之可能性時，通常在牆體本身或周圍環境中均會呈現一些異常徵兆。

因此可將擋土牆之功能檢查分為 (1) 初步檢視評估與 (2) 詳細調查評估兩個階段，亦即先定期以目視或簡單量測工具對擋土牆進行例行性之檢視，如評估認為有明顯影響擋土牆功能或較重大之異常狀況，再進行全面性之詳細調查及評估，找出造成異常之原因並加以改善、修護或補強。

有關擋土牆之例行性初步檢視作業項目及評估標準，建議可參考日本國土交通省之「宅地擋土牆老朽化判定手冊（案）」之內容辦理，其評分項目及配分標準修改整理於表 1。該手冊將目視檢查評分項目分為基礎評分及變化評分兩大項，其中基礎評分 = 環境條件的最大配分值 (a) + 障礙狀況的最大配分值 (b)；變化評分 = 擋土牆變化的最大配分值 (c)，其中擋土牆老朽化的變化形態，依程度分為以下三類：

- (1) 小變化：雖然發生變化，但將該部分修補後即可回復機能（使用限度狀態）。
- (2) 中變化：已損害，但藉由修補或部分改建後可回復機能（損傷限度狀態）。
- (3) 大變化：受到致命的損害，已喪失機能，需進行整體改建才能回復功能（極限限度狀態）。

依表 1 分別完成基礎評分及變化評分後，計算擋土牆之危險度評價區分（分數的最大值）= 基礎評分 (a + b) + 變化評分 (c)，並參照表 2 分別以 5 分及 9 分為界限，將危險度評價區分為小、中、大三個等級，其評價內容及對應措施亦列於表 2 中。

依照前述之初步檢視及評估程序判定現況危險度為小的擋土牆，建議僅需定期進行例行性之檢查，持續追蹤是否有進一步異狀產生即可。但判定現況危險度為中或大的擋土牆，則宜進入第二階段之功能檢視，規劃進行全面詳細調查，以瞭解造成損壞之原因後，據以進行修復及補強工程；同時需考量施作緊急防災措施之必要性。有關詳細調查之項目及方法請參考下節之建議說明。

### 細部調查與檢測

經初步檢視有需要進一步深入調查及分析評估之擋土牆，其細部調查與檢測之項目及方法通常分為 (1) 既有資料蒐集與現場勘查、(2) 地形測量、(3) 土壤地質及地下水調查及 (4) 擋土牆構造調查等四項，可參酌初步檢視評估結果視需要選擇必要之項目辦理。各項內容簡要說明如後。

### 既有資料蒐集與現場勘查

進行擋土牆細部調查工作應先蒐集既有資料，以瞭解擋土牆設計及施工之背景條件，並作為後續現場勘查、調查、試驗與監測作業規劃之參考。既有資料應盡量蒐集完整，常用之資料項目有地形資料、區域地質資料、工址地層資料、水文及氣象資料、既有設計與施工資料等。

此外與擋土牆有關之特殊歷史紀錄，諸如地震、颱風、豪雨、水災及擋土牆構造本身之損壞或補強紀錄、災害歷史及演變紀錄、緊急搶救措施內容亦須盡可能蒐集。

除前一節所介紹之初步目視檢查內容外，現場勘

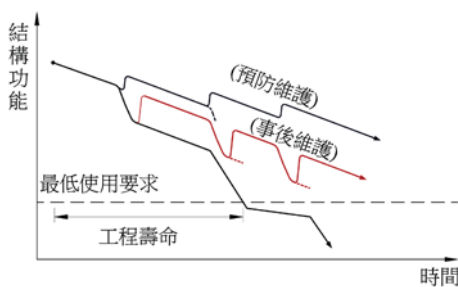


圖 1 土工構造物劣化與修補模式示意圖  
(修改自基礎工, 2003)

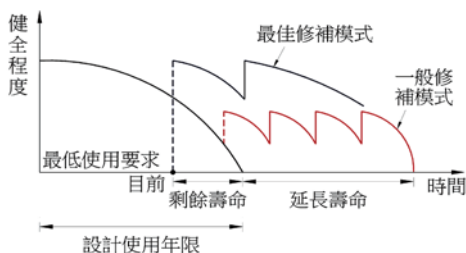


圖 2 土工構造物歷時劣化概念圖  
(重繪自基礎工, 2003)

查部分則需特別注意擋土牆構造外觀、擋土牆尺寸、擋土牆牆頂及牆趾地層勘查（須特別注意觀察擋土牆牆頂及牆趾地表面是否有裂縫、沉陷、隆起等現象，以及擋土牆牆趾附近之地層有無崩滑或土石崩落堆積等狀況）、擋土牆周圍排水系統狀況、周圍地形及環

境現況，以及現況與竣工圖說是否存在差異，必要時應繪製簡圖記錄鄰近設施之相對位置。除擋土牆之牆趾附近區域外，勘查範圍應涵蓋可能產生不穩定之區域，尤其是擋土牆上、下邊坡可能有地表張力裂縫或破壞面通過之位置均應詳加勘查。

表 1 宅地擋土牆之目視檢查評分項目及配分表（修改自日本國土交通省，2014）

區分	項目	分類	評價基準	配分		
				鋼筋 混凝土	重力式 混凝土	
基礎評分	環境條件 (a)	湧水	III	擋土壁表面乾燥	0.0	0.0
			II	擋土壁表面經常呈現濕潤狀態；由接縫及洩水孔感到擋土壁背後為濕潤狀態	0.5	0.5
			I	有水滲出、流出；雖然有洩水孔，但在頂部附近有水容易滲透之狀況、或有湧水之情況	1.0	1.0
	構造特徵	排水狀況等	III	每 3 m <sup>2</sup> 有 1 個以上、內徑大於 75 mm 的洩水孔及排水設施；或頂部附近有阻止雨水滲入地盤之情況	0.0	0.0
			II	雖然有洩水孔，但是在頂部附近有雨水滲透、或洩水孔阻塞之狀況	1.0	1.0
			I	未設置洩水孔；或未滿足每 3 m <sup>2</sup> 有 1 個以上、內徑大於 75 mm 的洩水孔，而且有雨水容易滲入之狀況	2.0	2.0
	擋土壁高度 (H)	-	1 m < H ≤ 3 m	0.0	0.0	
		-	3 m < H ≤ 4 m	1.0	1.0	
		-	4 m < H ≤ 5 m	1.5	1.5	
	障礙狀況 (b)	排水設施的障礙	-	無異常	0.0	0.0
			障礙 A	頂部排水溝堆積土砂、雜草茂盛等，損害排水機能。甚至於排水溝接縫部分有錯移等現象，造成水侵入擋土牆背面之狀況	0.5	0.5
			障礙 B	除障礙 A 外，有擋土牆洩水孔阻塞、由擋土牆裂隙及接縫湧水、牆頂背側有小陷落等狀況	1.0	1.0
			障礙 C	除障礙 B 外，有排水溝破損、沈陷、錯移等，喪失排水功能之狀況	1.5	1.5
		劣化障礙	-	無異常	0.0	0.0
			障礙 A	全面擋土牆到處可見不規則性之裂縫；或沿擋土牆長軸方向發生細裂縫	0.5	0.5
			障礙 B	除障礙 A 外，因鹼骨材反應發生龜甲狀的裂縫；或沿擋土牆端面周邊的長軸方向出現很多裂縫	1.0	1.0
		白色生成物障礙	-	無異常	0.0	0.0
			障礙 A	擋土牆表面裂縫一部分有白色生成物析出	0.5	0.5
			障礙 B	擋土牆表面數個裂縫有白色生成物析出	1.0	1.0
		變化評分 (c)	縱向裂縫	-	無縱向裂縫	0.0
小變化				於鉛直方向不特定間隔出現裂縫	1.0	1.5
中變化	於鉛直方向一定間隔出現裂縫			2.5	3.0	
大變化	於鉛直方向一定間隔出現裂縫、而且有銹染現象			4.0	4.5	
角隅部裂縫	-		角隅部無裂縫	0.0	0.0	
	小變化		角隅部出現斜方向之剪力裂縫	1.5	2.0	
	中變化		角隅部出現斜方向之剪力裂縫，而且有水漬	3.0	3.5	
	大變化		角隅部之斜方向剪力裂縫延伸，且產生錯移	4.5	5.0	
蜂窩 (冷縫)	-		無異常	0.0	0.0	
	小變化		局部粗骨材呈線狀出露(蜂窩)	2.5	3.0	
	中變化		打設面(冷縫)呈線狀出現，而且沿該面產生裂隙	4.0	4.5	
	大變化		很多打設面(冷縫)呈線狀出現，而且沿該面產生裂縫	5.5	6.0	
擋土牆變化 (c)	水平移動		-	無水平移動	0.0	0.0
			小變化	擋土牆的接縫部位可以看到大約未滿 5 mm 之錯移	2.0	2.5
			中變化	擋土牆的接縫部位可以看到大約 5 mm 以上、未滿 2 cm 之錯移	3.5	4.0
混凝土不均質造成之差異沉陷 (泌水・冷縫)	-		無異常	0.0	0.0	
	小變化		於擋土牆頂部附近一定間隔斷續地發生裂縫；另外，於擋土牆表面橫向斷續地發生短裂縫	3.0	3.5	
	中變化		於擋土牆施工時於表面產生打設面(冷縫)，於該處產生較上部大之裂縫	4.5	5.5	
地盤造成之差異沉陷	-	無異常	0.0	0.0		
	小變化	擋土牆的接縫部位產生未滿 5 mm 之高差	3.0	3.5		
	中變化	擋土牆的接縫部位產生 5 mm 以上、未滿 2 cm 之高差	4.5	5.5		
接縫之開裂 (角隅部)	-	無異常	0.0	0.0		
	小變化	擋土牆角隅部的接縫有未滿 5 mm 之開裂	3.0	-		
	中變化	擋土牆角隅部的接縫有 5 mm 以上、未滿 2 cm 之開裂	4.5	-		
傾斜・折損	-	無異常	0.0	0.0		
	小變化	擋土牆面稍微地向前(後)傾	4.0	3.5		
	中變化	擋土牆面明顯向前(後)傾，藉由目視即可清楚觀察	5.5	5.5		
鋼筋腐蝕 (鹽害・中性化)	-	無異常	0.0	-		
	小變化	擋土牆表面發生鉛直或水平向之短裂縫	4.5	-		
	中變化	擋土牆表面有較大範圍之鉛直、水平向短裂縫，可看見銹染	6.0	-		
		大變化	擋土牆表面有較大範圍之鉛直、水平向短裂縫，可看見銹染，而且可看到混凝土剝離、鋼筋銹蝕	8.0	-	

表 2 宅地擋土牆的危險度評價區分 (修改自日本國土交通省, 2014)

分數 最大值	危險度 評價區分	評價內容
不滿 5 分	小	進行小裂縫之修補；若能防止雨水滲透，則可視為目前無危險性之擋土牆
5 分以上 ~ 不滿 9 分	中	雖然為擋土牆變化程度較為明顯，但可以持續觀察為對應措施；若有持續變化之情況則繼續進行檢查。此外，根據變化之內容及規模，檢討發佈必要的勸告、改善命令，或進行相應防災工程的必要性
9 分以上	大	變化之程度特別地顯著，為危險的擋土牆。需檢討緊急對所有者發佈勸告、改善命令之必要，除進行防災工程，同時指導不使其影響周邊環境造成損害

### 地形測量

現況地形為影響擋土牆安全及穩定性之重要外在因素，通常擋土牆發生重大異狀時，地形地貌一般均會產生相應之變化。因此，必要時須重新進行地形測量，除與竣工時之地形互相比較外，並可做為後續擋土牆安全、穩定性研判、地層移動方向、移動模式，甚至滑移量評估之基本資料。如實測地形與竣工時有顯著不同，應研判造成差異之可能原因與可能產生之影響。

本項工作對於擋土設施附近崩塌邊坡範圍、地表陷落、裂縫或隆起位置、排水設施尺寸及排水方向、擋土或邊坡穩定設施尺寸、坡面裸露區域等，均須特別加以標示。

### 土壤地質及地下水調查

土壤地質調查部分可分為地表地質調查、鑽探調查、開挖調查及地球物理調查等項目；而地下水為影響擋土牆穩定之外在因素，亦應儘可能釐清其分布及變化狀況。

#### (1) 地表地質調查

地表地質調查工作重點在於地表覆蓋層材料種類、基盤之地層屬性確認，以及岩層露頭位態量測工作等，其中就地表覆蓋層而言，須詳加研判屬於人工回填土層或原狀土層。另可由植物生長狀態或構造物傾斜、裂縫發展狀況，輔助研判地層現況之穩定狀態；此外，對於如坍方、沖刷或沖蝕、地陷或隆起、泉水或伏流水、地下洞穴等動態現象亦宜加以記錄。

#### (2) 鑽探調查

鑽探調查則包含鑽孔與取樣，採用之設備與方法應依據調查對象、地盤種類、探查深度、需求樣品之品質與目的等決定。規劃補充調查鑽孔之數量時，應綜合考量擋土牆之長度、已取得之既有鑽孔資料之數量及品質、工址地盤之複雜程度等因素，沿擋土牆延伸方向佈設足夠數量鑽孔；若有整體穩定性分析需

求，則應於擋土牆上、下邊坡同一剖面位置進行不同深度鑽孔，以獲得所需之地層剖面及參數，且鑽孔深度需達可能潛在滑動面以下。鑽探所獲得之土樣及岩樣，可依需求進行合適之室內試驗以獲得分析參數。

#### (3) 開挖調查

開挖調查部分包含剝洗、槽溝、試坑、橫坑等調查方式，適用於岩盤露頭不佳、土層覆蓋而無法由地表觀察量測之岩盤調查、欲直接獲知卵礫石粒徑大小分佈，以及探測淺層地下水位等狀況。

#### (4) 地球物理調查

地球物理探測為量測地層之物理特性（諸如傳波速度、電阻率、密度、重力加速度、磁力等），藉由這些物理特性在地層中之變化或異常，研判地層中之界面（例如層面、不整合面、斷層、洞穴、水位等），及推估岩體及土體之工程特性。對大面積之基地而言，地球物理探測為快速經濟之調查方法，但地球物理探測屬間接方法，通常不宜單獨應用，而需與直接方法（例如鑽探、開挖、試驗室試驗及現地試驗等）之調查成果互相比對印證，但其運用可適量減少直接方法之數量。

工址調查作業中常用之地球物理探測方法包括表面波法、折射震測法、反射震測法、速度井測法、地層電阻率探測及透地雷達等，其適用性及限制視地層特性及調查目的而有不同，宜依基地特性及調查目的選擇合適之探測方式。常用之方法、原理及適用範圍摘要整理如表 3。

#### (5) 地下水調查

一般常利用鑽孔內埋設觀測井或水壓計進行地下水之調查，鑽孔過程中孔內水位若突然下降，此時可能鑽遇透水性高或有地下水流動之地層；但若遇受壓水層時水位可能突然升高，造成大量湧水。如擋土牆位於坡地，地下水位常呈現變化較大的狀況，針對邊坡進行整體穩定性評估時，除採水位觀測井或水壓計

表 3 各種地球物理調查法之適用性參考 (修改自日本地盤工學會, 2004)

調查方法	測定物理量	對象物理量	調查資訊	對應深度			調查效率	主要對象	備註
				-10 m	-100 m	100 m~			
折射震測法	傳播時間	彈性波速度	剖面層狀構造	○	◎	○	○	隧道、水壩、坡面等主要構造物基礎調查	岩盤分類等之力學特性評估
淺層反射震測法	彈性波動	聲波阻抗	剖面地層邊界		○	○	△	構造物周邊的基盤・斷層調查及地層分佈、性質調查	利用 S 波進行耐震評估
表面波調查	表面波	表面波速度	剖面層狀構造	◎	○		◎	構造物地盤、液化預測、堤防診斷、空洞調查	主動震源及被動震源法，單頻道或多頻道
地電阻率法	人工電場	電阻率	剖面	○	◎	○	○	地下水、地滑、隧道路線調查	電阻率特性外，自然電位法、感應極化法也可歸為地電阻探查
透地雷達	電磁波	電磁波形	剖面異常萃取	◎	△		◎	空洞、埋設管、埋設物及遺跡調查	亦有開發車輛搭載型機器
電磁調查	誘導電磁場	導電率 (電阻率)	面異常萃取	△	△	●	◎	地下水、地滑、斷層之概查	開發空中調查等多種方式

註：1. 對應深度 ◎：最適合 ○：適合 △：可  
 2. 調查效率 ◎：簡便地測定 ○：普通 △：可 ●：適用於資源調查 ●：大規模測定

量測外，必要時可配合現場地形研判地下水流可能方向，或以地球物理探測方法進行地下水探測。

### 擋土牆構造調查

對擋土牆構造進行調查及檢測，並記錄其現況與損壞之狀況，為評估擋土牆構造安全性之依據，亦可藉以推估擋土牆體或邊坡破壞之模式。擋土牆構造調查項目可分為 (1) 外觀、型式及尺寸調查、(2) 牆體裂縫調查、(3) 基礎型式、尺寸及埋置深度調查、(4) 鋼筋混凝土材料檢測與 (5) 排水狀況調查等項目，各調查項目內容、檢測方法簡要以圖 3 及表 4 說明。

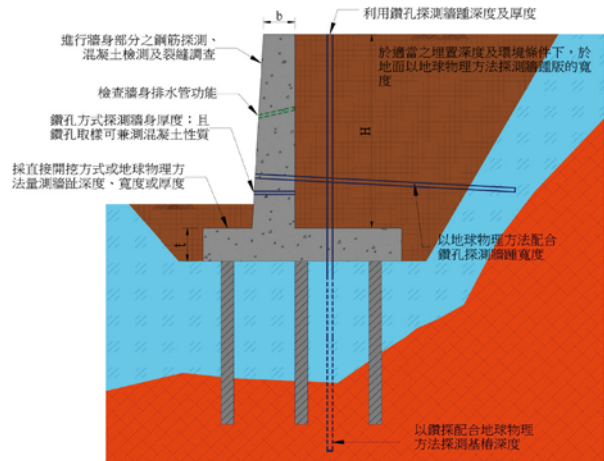


圖 3 擋土牆構造調查項目及方法示意圖

表 4 擋土牆構造調查內容及方法

項目	檢測方法	說明	
外觀、型式及尺寸調查	目視及直接量測	對外露部分以目視觀察及量測方式進行現況記錄	
	牆身鑽孔	採用牆身鑽孔方式量測擋土牆之牆身厚度	
牆體裂縫調查	目視及直接量測	記錄時應對裂縫形成原因進行初步之研判	
基礎型式、尺寸及埋置深度調查	開挖檢視調查	直接開挖檢視覆土較淺之部位 (如前趾版) 尺寸及擋土牆之型式 (如牆背有無扶壁等構造)	
	鑽孔探查	利用鑽孔探查推估覆土較深部分之底版寬度、厚度及覆土深度	
	地球物理調查	透地雷達探測	調查底版之深度、寬度；或配合鑽孔探測基樁深度
		震波測勘法	調查底版之深度、寬度；或配合鑽孔探測基樁深度
		時間域電磁法探測	配合鑽孔作業調查底版之深度、寬度或基樁深度
地電阻影像法探測		配合鑽孔，採跨孔方式探測地下構造物尺寸	
牆體材料鋼筋混凝土	鋼筋檢測	敲除保護層檢測	直接目視及量測鋼筋之尺寸、間距、排列方式與銹蝕情形，以及保護層厚度
		鋼筋探測儀檢測	檢測擋土壁體鋼筋排列、尺寸或混凝土保護層厚度
		透地雷達	探測牆身鋼筋排列間距
	混凝土檢測	鋼筋腐蝕探測	檢測鋼筋之腐蝕狀況
		鑽心取樣及抗壓強度試驗	鑽取混凝土試體，進行試驗室抗壓強度試驗
		施密特錘試驗	於現場利用施密特錘求取擋土牆表面混凝土強度
牆身排水狀況調查	目視及直接量測	目視及直接量測	

表 4 所列之擋土牆構造調查方法大多為土木工程中常用之方法，故不多贅述。但擋土牆之基礎型式及尺寸，為擋土牆之穩定性及安全評估之重要關鍵項目，然因其埋置於地層中常不易直接檢視或量測，且工程師通常較不熟悉此部分可使用之調查方法及可靠程度，故簡要整理介紹如后。

**(1) 開挖檢視調查及鑽孔調查**

一般擋土牆前趾版的覆土不深，可考慮採用直接開挖之方式檢視及量測擋土牆前趾覆土深度、寬度及厚度（圖 4 (a)）；而後踵版則因覆土較深，採用直接開挖調查之困難度通常較高，實務上可參考設計圖或竣工圖說之後踵版範圍（或以工程經驗，由牆高判斷），規劃適當數量、位置及深度之鑽孔，利用鑽孔探查推估後踵版的埋置深度、厚度及寬度。此外，對於擋土牆之型式，例如牆背有無扶壁等構造，可參照原設計或竣工圖說，於適當位置以怪手探挖牆背至適當深度加以確認（圖 4 (b)）。



(a) 前趾版開挖



(b) 牆背開挖

圖 4 擋土牆基礎開挖檢視調查

**(2) 地球物理探測**

對於不易進行開挖檢視調查，或採用鑽孔探查較難推估擋土牆基礎尺寸之狀況，可考慮採用適當之地球物理探測方式進行調查。

由於地球物理探測屬於間接調查方法，其調查結果易受到所使用儀器、方法、環境因素、信號狀況及解析能力與判釋經驗等因素所影響，宜根據擋土牆之現況、環境因素與擬調查目的詳加評估後謹慎選擇合適之方法。工程實務上曾有使用透地雷達、震波、電磁法及地電阻影像探測等方法進行基礎尺寸調查之案例，可作為選用調查方法之參考。茲簡單介紹如下：

**● 透地雷達探測**

透地雷達探測之原理是利用發射天線發出高頻電磁波（雷達波）穿透地層或被探測體，並在兩個不同電性介質的界面（地層層面、空洞、鋼筋與混凝土界面等）產生反射訊號，再由接收天線接收反射訊號，進而分析處理反射訊號，確認地層分佈或被探測體大小與位置。在地表上使用透地雷達檢測擋土牆前趾版寬度之案例圖 5 所示，檢測時於垂直擋土牆趾版位置掃描一條（或多條）測線，結果顯示靠近測線起點約 1.5 公尺範圍內為混凝土前趾版之反應。

另可配合鑽孔作業，以透地雷達井測法（單孔或跨孔法）檢測擋土牆基礎下方之基樁深度，當待測構造物材料與周圍地層介電常數變化越大則效果越好。圖 6 為採用單孔井測檢測基樁成果，圖中橫軸為時間軸（ns， $10^{-9}$  秒），縱軸為井深（m），檢測資料顯示在時間軸為 75 ns 處有一道強反射，經判讀後，接近井口處（5 公尺

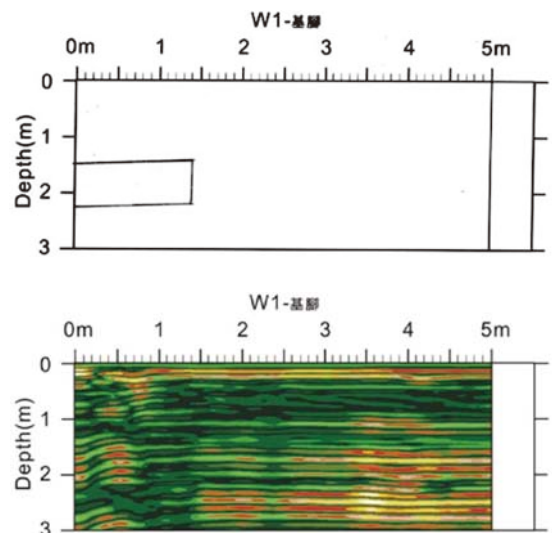


圖 5 透地雷達擋土牆前趾版寬度案例



內)，有許多雜訊，判斷是淺層地表人工構造物干擾所致，一道強反射由井口持續延伸至井深 8.9 公尺處，研判為基樁之深度。

● 震波測勘法

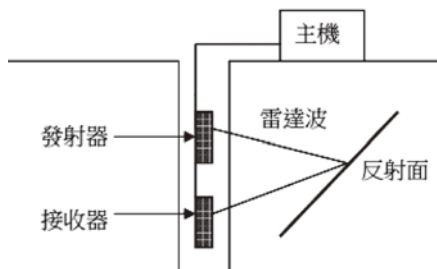
利用擋土牆混凝土之震波波速與周圍地層波速差異特性，經特殊安排的人造震源及受波器（檢波器）陣列組合也可用於擋土牆尺寸檢測，檢測示意如圖 7。其中圖 7 (a) 係於懸臂式擋土牆面裝設接收器，然後以重錘敲擊牆頂產生人工震波，利用「超震法」原理檢測牆身高度（或以震源、接收器互易方式施作）；以距頂部 3.2 公尺之波線訊號為例，所接收直達波及反射波到達時間分別為 2.0 ms 及 6.25 ms，用其時間差值之 1/2 乘以沿壁面傳遞之波列速度（表面波），可推估該接收器距牆底之距離約 3.0 公尺，故估計牆高約為 6.2 公尺。此外，圖 7 (b) 及圖 7 (c) 則是運用「平行震測法」原理，分別將接收器設置於懸臂式擋土牆牆背及牆前側之地表面，再以重錘敲擊牆面產生人工震波，圖中波列串之接收訊號顯示，距牆背側 3.0 m 及牆前側 1.0 m 左右分別

有較明顯之繞射波形（或波傳經不同材料介面），推估為擋土牆後踵版及前趾版之寬度（實務操作時，各檢測成果宜與設計尺寸對應單元相互檢核）。

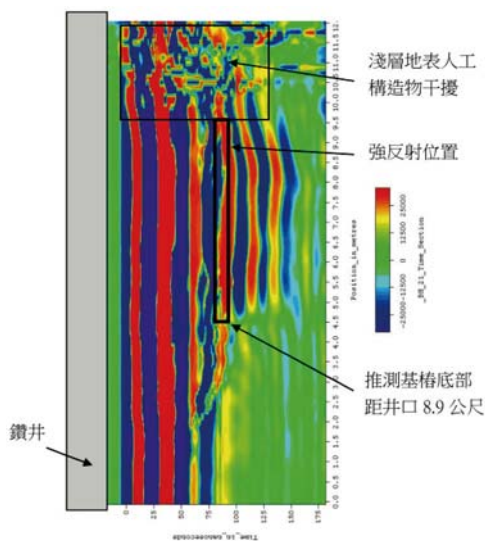
配合鑽孔作業也可使用垂直、水平方向或其他任意方向之平行震測法檢測擋土牆基礎；圖 8 為配合垂直鑽孔，使用平行震測法檢測橋梁基樁長度之案例，圖中橫軸為時間軸，縱軸為井深，圖中震波波列、頻率或視速度與對應基礎介面以不同顏色區分，可研判樁底之深度。

● 電磁法探測

時間域電磁法又稱為暫態電磁法或瞬變電磁法，係利用電磁場探測地下導體。其原理為瞬間切斷地面上線圈內的電流，導致原本由線圈電流所產生的磁場（稱為一次磁場）消失，使地下導體依據法拉第（Faraday's Induction Law）定律以及冷次定律（Lenz's law）感應產生感應電位與渦電流進而產生磁場（導體感應所產生的磁場稱為二次磁場），藉由量測此二次磁場的強度與極性以獲得地下導體的位置與深度等參數。

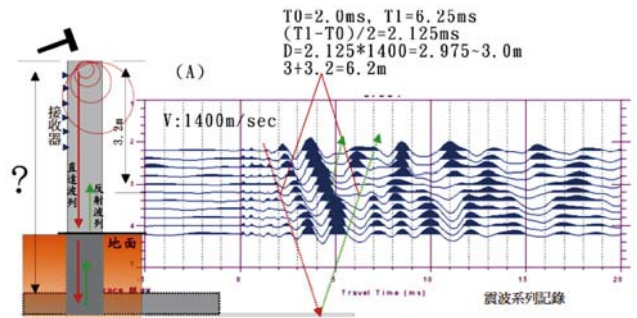


(a) 單孔井測法示意圖

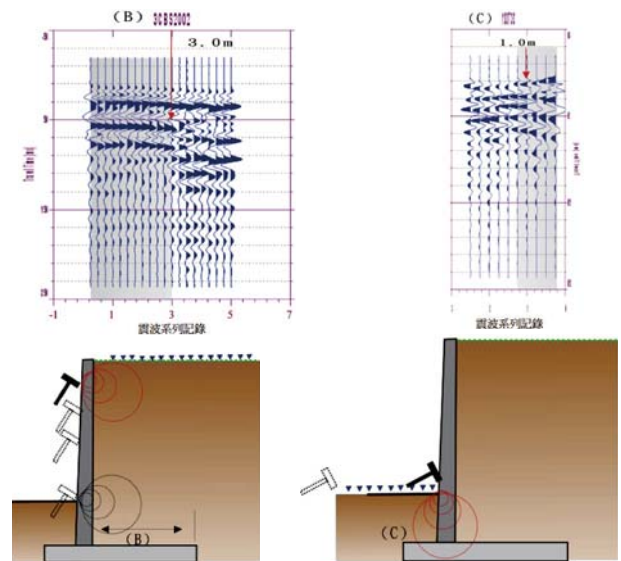


(b) 基樁長度檢測成果

圖 6 透地雷達檢測基樁深度（單孔井測）示意圖



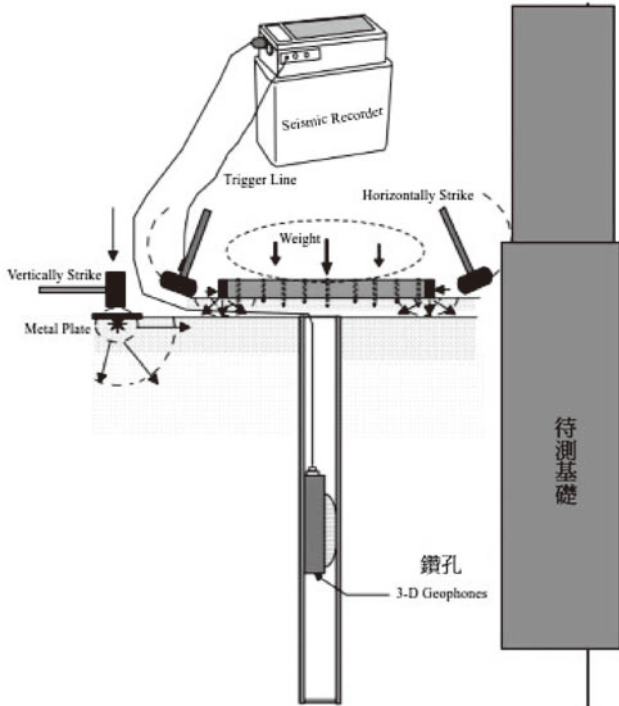
(a) 牆身高度檢測



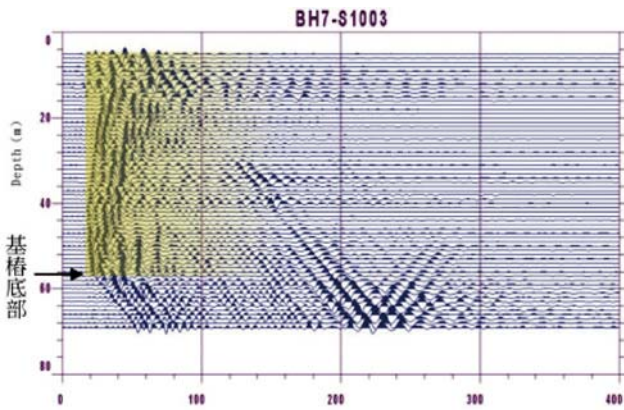
(b) 後踵版長度檢測

(c) 前趾版長度檢測

圖 7 震測法檢測懸臂式擋土牆尺寸示意圖



(a) 平行震測法施測示意圖

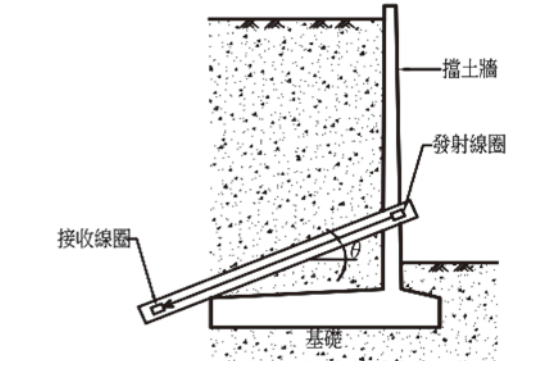


(b) 平行震測深度系列震波紀錄

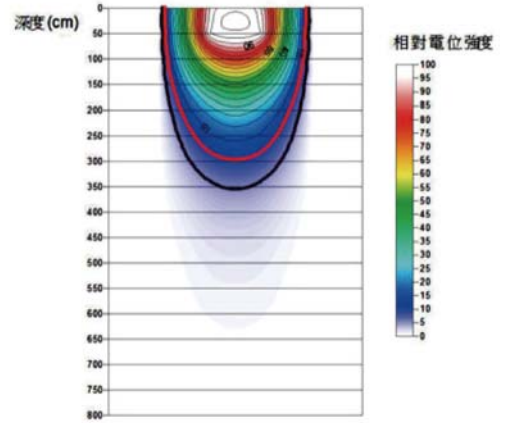
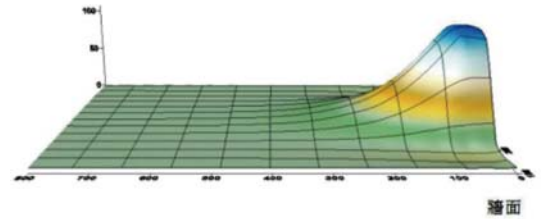
圖 8 平行震測法檢測基樁長度示意圖

利用本法探測前先於欲探測之區域佈置線圈，再於適當地點鑽孔後埋設 PVC 管，將感應器置入孔內進行探測。曾有案例於擋土牆牆身鑽設長度超過後踵版寬度之斜孔（與水平夾 20 度角），然於其內埋設 PVC 管，據以探測牆踵基礎埋置深度及寬度（見圖 9），其較強訊號（相對電位強度）約延伸到 3.5 公尺附近（餘弦值為 3.3 公尺）；故研判後踵版水平寬度距牆面約 3.3 公尺。

如欲進行擋土牆基礎下方之基樁深度探測，鑽孔深度須超過基樁之可能深度。圖 10 係於既有排樁附近鑽設垂直鑽孔，並將發射線圈放置於排樁頂部，較強訊號約延伸到 14 公尺，研判該位置為排樁底部深度。



(a) 現場施測示意圖



(b) 擋土牆底版尺寸判釋

圖 9 時間域電磁法探測懸壁式擋土牆底版尺寸案例

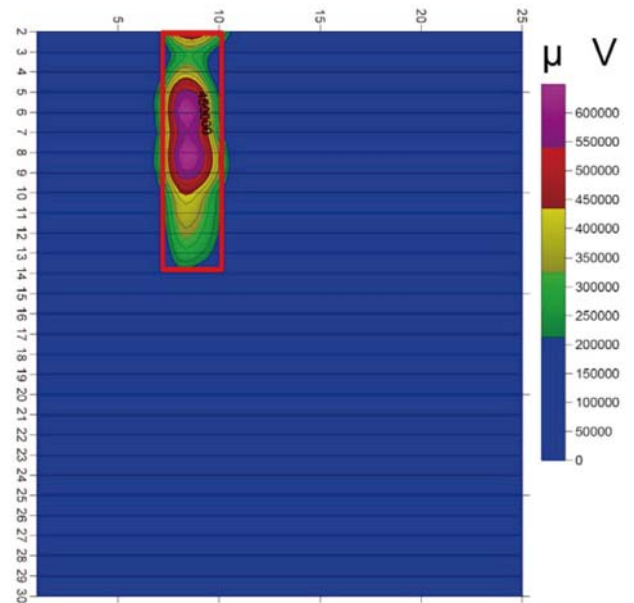


圖 10 時間域電磁法探測基樁長度案例

● 跨孔式地電阻率影像法探測

跨孔式地電阻影像探測是先以直流或低頻交替直流電流經孔內之一對電極（稱為電流偶極），當電流流經地層建立電場後，在孔內用另一對電極（稱為電位偶極）測得其間的電位差再換算成電阻率進行判釋，此電位差與電流強度、電極間的相對位置及各地層的導電性有關。適用於待測結構基礎之電導特性與週遭地層所組成之材料有較大差異之情形。

進行跨孔式地電阻影像探測時，將電極以等間距排列且固定在 PVC 管外側；然後將其置於鑽孔內，並將孔壁與電極間之空隙以水泥漿或砂土回填，使孔內電極與孔壁有良好接觸，以確保地下水面上探測資料的可靠度（若以裸孔施作，需注意井況）。圖 11 為 3D 跨孔式地電阻影像探測現地配置及成果示意，由圖中待測基礎（鋼筋混凝土）呈低電阻反應（寒色系）與周圍土體（相對較高電阻反應，暖色系）之比較，研判基礎深度約 20 公尺左右。

擋土牆之安全分析評估

進行擋土牆安全分析評估之首要工作為依據詳細調查之結果，辨識出擋土牆之破壞模式，並進一步評估其破壞機制及原因。

擋土牆之破壞模式大致可分為牆體滑動破壞、牆體傾覆破壞、基礎承载力不足、沉陷量過大、整體穩定破壞及牆體構造破壞等幾類；造成前述各種破壞之機制則有 (1) 擋土牆所受側向壓力過大、(2) 擋土牆之抵抗側向力不足、(3) 土壤工程性質不良與 (4) 其他因素（如牆體強度不足、整體穩定性破壞）等，其發生原因詳表 5 所示。

造成擋土牆破壞之原因甚多，其中同一種原因可能因為其他外在條件之不同，而引致不同之單一破壞模式，亦有可能引致不同之破壞模式同時發生，亦或單一破壞模式有可能為不同破壞原因組合造成。因此調查時須針對各破壞模式及可能破壞機制和原因詳加探討。

破壞模式及機制原因確定後之安全分析評估工作，原則上建議依現行之規範進行檢討，目前國內最常依循的規範為內政部於民國 90 年所頒佈之「建築物基礎構造設計規範」，其中第七章針對擋土牆設計時之作用力、穩定性分析必須考慮的因素，及材料設計之考量均有詳細之規定。此外，評估時須注意不同單位

之規範（如交通部主管之公路與橋梁設計規範），不一定有相同的安全標準。因此，在執行安全分析評估工作時，應考慮設計之時空背景及適用法規，才能有較合理之判斷。

一般進行擋土牆安全評估所需進行之項目如下，惟仍應視標的物之狀況，依專業經驗研判調整相關內容：

擋土牆牆體穩定分析

包括牆體滑動、牆體傾覆及基礎承载力檢核。其中應注意部份擋土牆可能因特殊用途、地權限制…等因素，而須設置在邊坡上或邊坡附近，此時受斜坡效

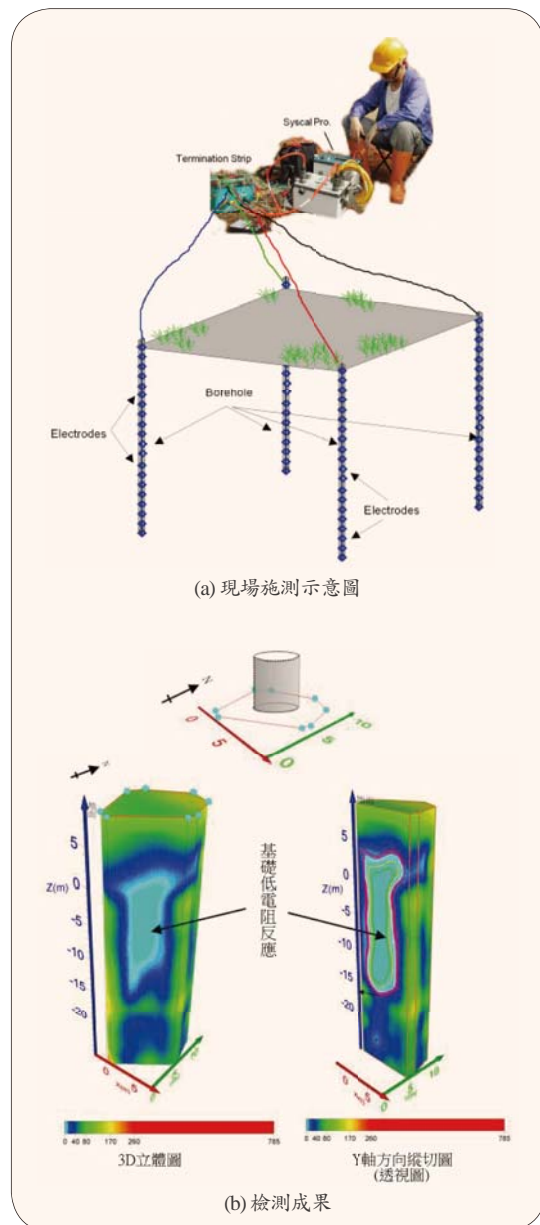


圖 11 3D 跨孔式地電阻影像探測地下構造示意圖

應影響，基礎承载力不應再以水平地面之條件進行估算。此外，若牆體以樁基礎承載時，尚需進行樁基礎承载力、拉拔力、水平抵抗力及樁體強度檢核，評估基礎之配置、數量及長度是否符合安全所需。

### 整體穩定分析

除牆體本身穩定分析外，當擋土牆座落於邊坡時，亦須配合邊坡現況條件，進行邊坡整體穩定分析。

### 沉陷量及角變量檢核

擋土牆基礎總沉陷量及差異沉陷量均應在符合擋土牆功能要求之容許限度內。惟目前尚無對擋土牆沉陷量及角變量之統一檢核標準，但若經現場目視或儀器量測發現該擋土牆之角變量已超出一定量，或研判擋土牆具沉陷變位有持續增加趨勢，且鄰近區域有重要保全對象時，應持續進行擋土牆之沉陷變位量測，並密切注意保全對象之可能變形狀況。

### 牆體構造安全評估

經由擋土牆構造調查獲得牆體尺寸、裂縫狀況及材料強度，並分析評估應考慮之作用力後，即可進行牆體安全評估，各項檢核可依相關學理及規範進行。

### 擋土牆之修復與補強

當擋土牆構造產生損壞時，除損壞狀況十分嚴重必須拆除重建外，其餘之處理方式大致可分成「修復」與「補強」兩種。「修復」係指在擋土牆構造現況為安全穩定情況下，復原受損壞之部分，通常需進行裂縫修復，但無法提昇整體構造強度；「補強」則指擋土牆經評估有安全破壞疑慮時，為提昇牆體構造強度

或擋土牆穩定性，避免擋土牆再次受損為目的之行為。

擋土牆之修復與補強可分為 (1) 擋土牆穩定性之補強改善與 (2) 牆體構造修復及補強兩類，其原則如下：

### 擋土牆穩定性之補強改善

對應各項造成破壞之機制，包括側向壓力過大、側向抵抗不足、土壤工程性質不良及邊坡有潛在滑動面等，與擋土牆穩定性有關的破壞原因及常用之改善對策與工法整理如表 5 所示。

### 牆體構造修復及補強

關於擋土牆牆體構造破壞之修復與補強問題，可歸納為裂縫之填補修復與牆體構造之斷面補強兩方面。

#### ● 裂縫修復工法

進行擋土牆構造的裂縫修復時，必須先研判裂縫之種類以及造成裂縫發生之原因，並移除不利於擋土牆構造安全之有害因素，才能控制構造型裂縫之繼續發展，如由穩定性問題誘發之擋土牆構造裂縫，必須先設法解決穩定性破壞問題，才能控制裂縫之發生。在移除構造型裂縫的誘發因素之後，最後再對於已發生之裂縫進行修復工作，抑止既有裂縫之擴大、繼續侵蝕。

擋土牆裂縫的修復乃為防止裂縫造成之劣化影響，維持擋土牆構造之強度與正常機能；其修復工法、填補材料之採用主要依據裂縫之寬度或規模而定，常用之修復工法及特性整理如表 6。

#### ● 斷面補強工法

可用於擋土牆斷面強度提昇之補強工法包括：混凝土斷面補強工法、鋼板斷面補強工法與纖維強化高分子複合材料補強工法，基於擋土構造補強的經濟性

表 5 擋土牆破壞原因與補強對策

造成破壞原因		改善對策		適用補強工法
側向壓力過大	側向土壓力過大	降低側向壓力	降低側向土壓力	削坡、土壤改良、輕質背填土置換 排水工法 削坡、移除地表載重
	水壓力過大		降低水壓力	
	牆頂載重		減少牆頂地表之超載	
側向抵抗不足	牆身自重或牆底版寬度不足	增加側向抵抗力	增加擋土牆的厚度及重量	增加斷面、堆置重石、蛇籠 擋土牆基底設置止滑樁或樁 地錨、抗滑樁、土釘
	牆前覆土深度不足		增加基礎深度	
	基礎底面與土壤間摩擦抵抗不足		增設穩定構件	
土壤工程性質不良	基礎土壤壓縮性過大、差異沉陷、 剪力強度與承载力不足	改善土壤工程性質	基礎土壤改良	灌漿工法、土壤加勁工法 排水工法 基樁、微型樁工法 地錨、抗滑樁、土釘 排水工法
			加強邊坡排水措施	
			變更基礎型式	
邊坡有潛在滑動面		增設整體穩定設施		地錨、抗滑樁、土釘 排水工法
		加強邊坡排水措施		

與重要性之考量，目前仍多採用傳統的混凝土斷面補強工法進行。進行混凝土斷面補強後，不僅加強擋土設施之構造強度，也可增加擋土構造之厚度與自重，提高擋土設施之穩定性。

表 6 裂縫修復工法種類及特性

修補工法		適用裂縫規模	修補材料種類
表面修補	塗刷工法	表面輕微龜裂 裂縫寬度小於0.2 mm	水泥砂漿 塗料 化學藥劑
	視面工法	表面發生劣化 裂縫深度較深者	聚合系水泥 樹脂砂漿 FRC-FRP
	噴塗工法	裂縫深度淺面積較大 大面積厚度小之龜裂	水泥砂漿 聚合水泥
填注修補	注入工法	裂縫寬度0.2~5 mm 間	高分子環氧樹脂
	充填工法	裂縫寬度5 mm 以上 鋼筋混凝土浮起脹裂	樹脂砂漿 無收縮砂漿 可撓性環氧樹脂

擋土設施經詳細分析設計後，對斷面不足之部分重新設計，經由模版組立、配筋及澆置混凝土程序，完成斷面補強之效果。澆置材料除一般混凝土外，亦常見無收縮混凝土、樹脂砂漿等。本工法施做時，應特別注意新舊混凝土之接著性、配筋之應力傳遞及各種構材之接頭處理，期能確保其補強效果。

## 結語

對於既有擋土牆進行定期之檢查與維護，可延長擋土牆之使用年限，並減少意外災害之發生。尤其是透過平時之例行性檢查，如能提早發現擋土牆之小障礙，例如排水孔阻塞、牆背排水溝淤積或擋土牆牆趾淘刷現象等狀況，就可及早進行排水孔清洗、排水溝清洗及回填淘刷區域等簡易之維護動作；此種早期維護作業所需之人力及經費均甚為輕微，但對於維持擋土牆之正常機能經常可收到極大的效果。此外，經由前述之例行性檢查，亦可及早發現與針對呈現較顯著問題之部位進行詳細調查及評估，及必要之修復與補強作業，以確保擋土牆之安全性及延長其使用年限。

希望藉由本文所提供之擋土牆檢視、調查與維護之觀念，強化國人對相關作業及程序之重視，使擋土牆能發揮其正常機能，確保周遭民眾生命及財產之安全。

## 謝誌

本文撰寫時承蒙中華民國大地技師公會周功台理事長提供宅地擋土牆老朽化判定手冊之日文資料，

陳佩玉小姐協助彩圖之繪製；俞清瀚、陳江淮、沈銘閩、郭晉榮與周揚國等技師於「擋土牆鑑定手冊」編輯期間提供許多寶貴意見及協助審視；李正兆博士及胡志昕先生對地球物理探勘方法之諮詢及建議，在此一併表示謝意。

## 參考資料

1. 大地工程技師公會（2002），「大地工程鑑定手冊」。
2. 中華民國大地工程技師公會（2014），「擋土牆鑑定手冊」。
3. 內政部（2001），「建築物基礎構造設計規範」。
4. 蕭秋安、吳瑞龍、周功台（2008），「土工結構物之維護管理」，中華技術，第77期，第72-85頁。
5. 日本地盤工學會（2004），「地盤調查的方法と解説」。
6. 日本基礎工（2003），「基礎工の維持管理における技術開發」，Vol. 31, No. 6, pp. 5-7。
7. 日本國土交通省（2014），「宅地擁壁老朽化判定マニュアル（案）」，網頁資料（[http://www.mlit.go.jp/crd/city/plan/kaihatu\\_kyoka/takuchi\\_gaiyo](http://www.mlit.go.jp/crd/city/plan/kaihatu_kyoka/takuchi_gaiyo)）。

**源隆 技術顧問有限公司**  
Yuan Long technologic consultant CO., LTD

● 雲林縣斗六市鎮東里大同路300-17號  
● TEL: 05-5332585  
● FAX: 05-5332507

專業 · 效率 · 服務

**公司簡介**  
源隆成立於民國90年8月，目前團隊人員共35人，其中包括2位土木技師、1位水利技師、2位水土保持技師及多位景觀專業工程人員，對道路、橋樑、水利、水保及景觀工程之規劃設計監造具有相當之專業與經驗。

**營業項目**  
業務範圍包括：從事土木、水利、水保及景觀工程之調查、規劃、設計、研究、分析、監造、支撐設計及鑑定等業務。

榮獲 99-102 年度優良農建獎工程

實績

# 簡述 土壤壓實度快速控制法 於土石壩填築之應用

蔡宗翰／經濟部水利署水利規劃試驗所工程師

土壤填方之壓實度與含水量為控制土壩之強度與水密性的重要因素，也是施工之品管指標。施工過程若含水量或壓實度控制不當，往往造成塌陷、掏空或破壞，對大壩穩定影響甚鉅，甚至蓄水後易造成滲漏，因此檢測的方法及過程相當重要。近年來，除傳統的 Proctor 夯實試驗外，尚有利用介電度量測（ADR、FDR 及 TDR）等之技術，惟受限於材料性質、施工便利性及推廣性等因素，因此，國內大壩施工經驗實務上，以目前國內近期完成的工程案例（寶山第二水庫及湖山水庫），皆使用的檢驗標準方法為土壤壓實度快速控制法，因此簡述該方法供實務參考應用。

## 理論基礎

一般將不同含水量與乾密度作圖（如圖 1），在最佳含水量處會有一最大乾密度存在，然而將夯實曲線改以濕密度與含水量表示，則在最佳含水量位置並不會有一最大值產生。因此，若定義一正規化之含水量  $z$  為

$$z = \frac{\omega - \omega_f}{1 + \omega_f} \quad (1)$$

其中， $\omega_f$  為選定之任一含水量，則濕密度與  $z$  之關係圖如圖 2，在最佳含水量  $z_m$  ( $z_m = \frac{\omega_o - \omega_f}{1 + \omega_f}$ ， $\omega_o$  為最佳含水量) 處仍非最大值，但若將濕密度皆除上其  $x$  座標值取得轉換後之濕密度曲線 (converted wet density)

$$\rho_{t,conv} = \frac{\rho_t}{1+z} = \frac{\rho_d(1+\omega)}{1+z} = \rho_d(1+\omega_f) \quad (2)$$

其中， $\rho_{t,conv}$  為轉換後之濕密度， $\rho_t$  為土壤濕密度， $\rho_d$  為土壤乾密度。則此轉換後之濕密度相當於乾密度放

大  $(1 + \omega_f)$  倍之結果，具有與乾密度之夯實曲線相同之特性（在最佳含水量，相對於  $z_m$ ）下有最大值。由此，若將  $\omega_f$  選定為現地土壤之含水量，則現地土壤之夯實度  $D$  為

$$D = \frac{\rho_d}{\rho_{d,max}} = \frac{\rho_d(1+\omega_f)}{\rho_{d,max}(1+\omega_f)} = \frac{\rho_{t,conv}}{\rho_{t,conv,max}} \quad (3)$$

其中， $\rho_{d,max}$  為最大乾密度， $\rho_{t,conv,max}$  為最大轉換濕密度。此即為快速控制法中對於夯實度控制之理論基礎。

## 試驗方法及流程

### 適用範圍

適用於通過 #4 號篩且 #200 號篩以下之細粒料含量超過 15% 以上之粘性土壤，在不須明瞭土壤含水量與乾土單位重下，快速測得夯實度之方法。

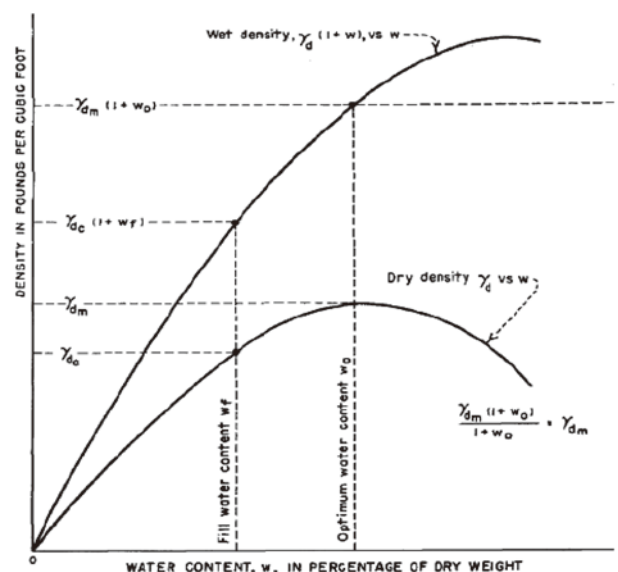


圖 1 密度與含水量之夯實曲線圖

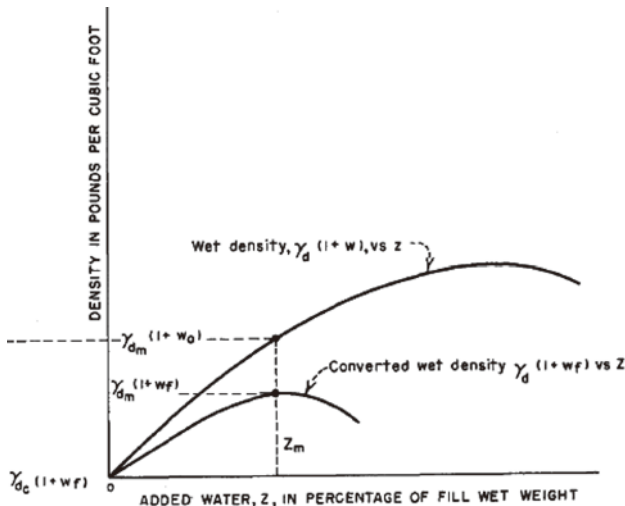


圖 2 密度與正規化含水量之夯實曲線圖

### 試驗方法

測試程序分為三個部份，求取工地密度、夯實試樣以獲得夯實曲線及計算最大乾密度、D 值及  $\omega_0 - \omega_f$ 。

- (1) 以砂錐法方式求取 #4 號篩以下之工地濕密度（若試驗包含粗粒料則需進行修正）。
- (2) 砂錐法完成後於該孔附近取回通過 4.75 mm 試驗篩至少 14 kg，以土壤夯實標準測試程序之 A 法（USBR 5500）進行第一個試樣夯打，求得試樣之濕密度，其記為  $\rho_{wet\ first}$ 。
- (3) 準備第二個試樣進行夯實試驗，將 3.5 kg 試樣放置在攪拌容器內，量測 70 g 的水，這個量使試樣增加 2% 之含水量，快速的攪拌試樣避免水分散失。
- (4) 進行夯實試驗並計算其濕密度， $\rho_{wet_c} = \frac{\rho_{wet}}{1 + \frac{z}{100}}$ 。
- (5) 準備第三個試樣，而第三個試樣須加水或減水，則須依據第一個與第二個試樣濕密度而定。若第二個試樣濕密度大於或等於第一個，則使用加水方式進行第三個試樣夯實；反之，則使用減水方式進行第三個試樣夯實。
- (6) 加水方式跟第二個試樣相同方式進行，假如第三個試樣之濕密度少於或等於第二個試樣濕密度，則可進行下一個步驟。反之，則繼續加水（2%）進行夯實，直至所得之濕密度小於或等於第二個試樣之濕密度。
- (7) 減水方式則將 3.5 kg 之試樣，在不減少試樣前提

下，以吹風機或熱能使試樣之水分散失 70 g 後進行夯實試驗。若第三個試樣所得之濕密度小於或等於第一個試樣濕密度，則夯實完成，可進行下一步驟。反之，依據上述方法減少試樣水分後進行夯實試驗，直至所得之濕密度小於或等於第一個試樣之濕密度。

- (8) 標示三個試樣之濕密度為 A、B、C，濕密度最高者標示為 B，少於 B 之含水量 2% 者標示為 A，多於 B 之含水量 2% 者標示為 C，如圖 1。
- (9) 定義  $x_A$ 、 $x_B$ 、 $x_C$  (%) 為 A、B、C 點之加水量（例 -2、0、+2）， $y_A$ 、 $y_B$ 、 $y_C$  為 A、B、C 點之濕密度。
- (10) 計算得  $x_1 = x_B - x_A$  及  $x_2 = x_C - x_A$ （若增量為 2%，則  $x_1 = 2$ 、 $x_2 = 4$ ）。
- (11) 計算得  $y_1 = y_B - y_A$  及  $y_2 = y_C - y_A$ 。

$$(12) \text{ 計算 } x_m = \frac{1}{2} \left[ x_1 + \frac{(x_2 - x_1) \left( \frac{y_1}{x_1} \right)}{\left( \frac{y_1}{x_1} \right) - \left( \frac{y_2}{x_2} \right)} \right]$$

$$(13) \text{ 計算 } z_m = x_A + x_m \text{ 及 } y_m = \frac{-(x_m^2 y_1)}{x_1(x_1 - 2x_m)}$$

$$(14) \text{ 計算現地含水量之最大濕密度 } \rho_m = y_A + y_m \text{ 及 } \omega_0 - \omega_f = (z_m + MA)$$

$$(15) \text{ 計算 } D_{value} = \frac{\rho_{wet_f}}{\rho_m} \times 100$$

$$(16) \text{ 次日砂錐法試驗之含水量求得，則可計算最大乾密度 } \rho_d = \frac{\rho_{wet}}{1 + (\omega_f / 100)} \text{ 及最佳含水量 } \omega_0 = \omega_f + [(1 + \omega_f / 100) \times (z_m)]$$
，詳細之流程圖詳圖 5。

### 快速控制法之優點

土壤壓實度快速控制法提供了迅速可求得含水量差值及密度值，對於趕工之輾壓工程，無需等待隔日含水量值，根據土料在三種不同含水量情況下之室內夯實試驗，當日就可算出壓實度 D 值及含水量差值  $\omega_0 - \omega_f$ ，可提供現場品管即時控管。試驗時間短，自申驗至數據完成，僅需 1 個半小時估計出現地之密度而在隔日獲得確認，不會耽誤升層的現場進度，因此廣為使用。

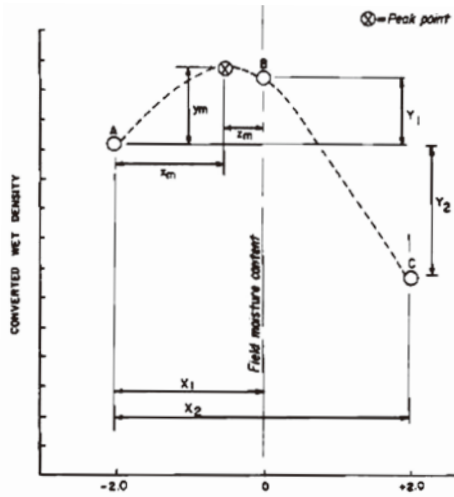


圖3 快速控制法夯實曲線圖

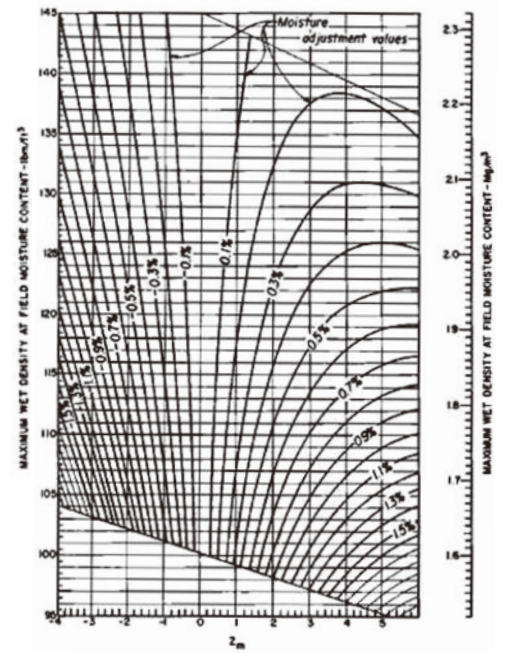


圖4 含水量調整圖 (MA圖)

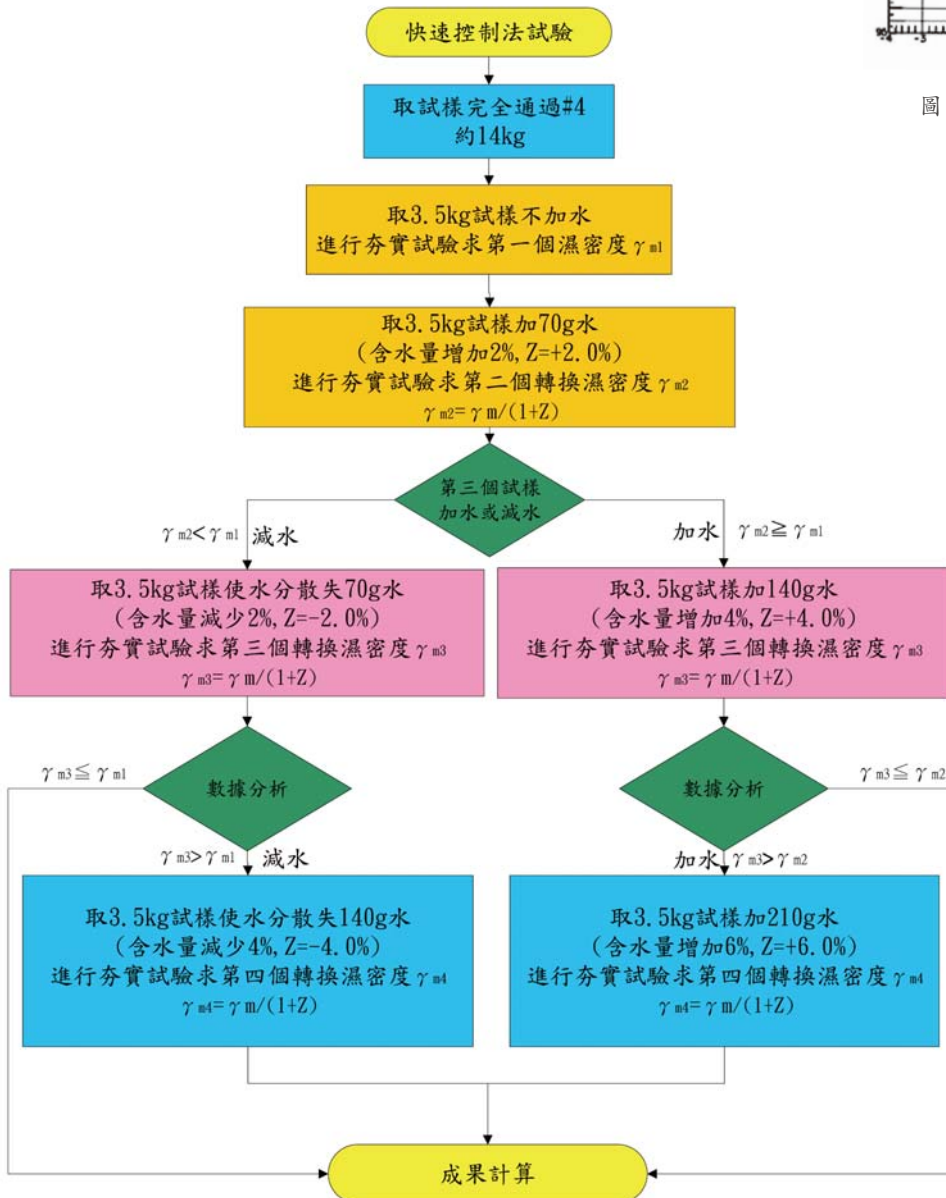


圖5 快速控制法流程圖

## 參考文獻

1. 研究報告1，國立交通大學防災與水環境研究中心，「輾壓土壤之含水量與壓實度品質技術研究總報告」，經濟部水利署水利規劃試驗所研究報告，台中（2010）。
2. 標準測試程序1，經濟部水利署水利規劃試驗所湖山水庫工地實驗室，「土壤壓實度快速控制法標準測試程序」，經濟部水利署水利規劃試驗所，台中（2011）。
3. 試驗規範1，USBR 7240，「Performing Rapid Method of Construction Control」，美國墾務局（1998）。



# 「土木水利」雙月刊 廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登地位	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏/封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3期9折， 4期以上8.5折	

茲附上廣告式樣一則  
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致  
社團法人中國土木工程學會

刊登月份：

42.2  42.3  42.4  42.5  42.6  43.1 共 次  
(4月) (6月) (8月) (10月) (12月) (2月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；  
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收摺據  
請於刊登後檢據洽收

機構名稱： (請蓋公司印)  
商號

負責人：

地址：

廣告聯絡人：

電話：

廣告訂單連絡電話：社團法人中國土木工程學會 (02) 2392-6325

email: ciche@ciche.org.tw

98-04-43-04

## 郵政劃撥儲金存款單

收款帳號	0 0 0 3 0 6 7 8	金額 新台幣 (小寫)	仟萬	佰萬	拾萬	萬	仟	佰	拾	元
通訊欄 (限與本次存款有關事項)		收款戶名 社團法人中國土木工程學會 寄款人 姓名 _____ 主管： _____ 地址 □□□□—□□□□ 電話 _____ 經辦局收款戳 _____								
報名費 <input type="checkbox"/> 繳納 _____ 研討會 報名費 _____ 元  繳納會費 <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,500 元 <input type="checkbox"/> 初級會員年費 300 元  訂閱土木水利雙月刊，一年六期 <input type="checkbox"/> 新台幣 1,800 元 自第 _____ 卷第 _____ 期起，_____ 年期雙月刊 _____ 份  訂閱中國土木工程學刊，一年四期 <input type="checkbox"/> 國內·會員 新台幣 800 元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800 元 <input type="checkbox"/> 國外·個人 美金 40 元 <input type="checkbox"/> 國外·機關團體 美金 100 元 自第 _____ 卷第 _____ 期起 _____ 年期學刊 _____ 份		虛線內備供機器印錄用請勿填寫								

◎ 寄款人請注意背面說明  
◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

## 郵政劃撥儲金存款收據

收款帳號戶名	
存款金額	
電腦紀錄	
經辦局收款戳	

# 社團法人中國土木工程學會

## 信用卡繳納通知書

姓名		款別 注：入會時請先填入會申請書，傳真學會審查，我們會立即通知您，資格符合時請繳費，入會費一人僅需繳交一次	報名費 <input type="checkbox"/> 繳納_____研討會 報名費_____元
會員證號碼			繳納會費 <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,500元 <input type="checkbox"/> 初級會員年費 300元
身分證號碼			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 <input type="checkbox"/> 新台幣 1,800元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
卡別 <input type="checkbox"/> VISA <input type="checkbox"/> MASTER CARD <input type="checkbox"/> JCB			訂閱中國土木工程學刊，一年四期 <input type="checkbox"/> 國內·會員 新台幣 800元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元 <input type="checkbox"/> 國外·個人 美金 40元 <input type="checkbox"/> 國外·機關團體 美金 100元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
信用卡卡號			白天聯絡電話
信用卡簽名欄最後三碼			通信地址
信用卡有效期限 (月/年)			
信用卡簽名			
繳費金額			

注：僅接受VISA, MASTER CARD, JCB

請傳真回覆：(02) 2396-4260

社團法人中國土木工程學會 電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260 email：service@ciche.org.tw 地址：100 台北市仁愛路四段一號四樓

### 郵政劃撥存款收據 注意事項

- 一、本收據請詳加核對並妥為保管，以便日後查考。
- 二、如欲查詢存款入帳詳情時，請檢附本收據及已填妥之查詢函向各連線郵局辦理。
- 三、本收據各項金額、數字係機器印製，如非機器列印或經塗改或無收款郵局收訖章者無效。

### 請寄款人注意

- 一、帳號、戶名及寄款人姓名地址各欄請詳細填明，以免誤寄；抵付票據之存款，務請於交換前一天存入。
- 二、每筆存款至少須在新台幣十五元以上，且限填至元位為止。
- 三、倘金額塗改時請更換存款單重新填寫。
- 四、本存款單不得黏貼或附寄任何文件。
- 五、本存款金額業經電腦登帳後，不得申請撤回。
- 六、本存款單備供電腦影像處理，請以正楷工整書寫並請勿摺疊。帳戶如需自印存款單，各欄文字及規格必須與本單完全相符；如有不符，各局應婉請寄款人更換郵局印製之存款單填寫，以利處理。
- 七、本存款單帳號與金額欄請以阿拉伯數字書寫。
- 八、帳戶本人在「付款局」所在直轄市或縣(市)以外之行政區域存款，需由帳戶內扣收手續費。

交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

本聯由儲匯處存查 600,000 束 (100 張) 94.1.210 × 110mm (80g/m<sup>2</sup> 模) 保管五年 (拾大)

工程碳足跡

探索綠色園區

綠色工程材料

技術專欄



綠色工程案例

綠色工程影片

# GESM

[www.gesm.com.tw](http://www.gesm.com.tw)

## 亞洲最大最專業綠色工程設計應用資訊中心

### 即將於 2015.03.02 正式上線



# 達欣工程

DACIN CONSTRUCTION

智慧、創新、務實、勤奮  
一步一腳印·向永續邁進



日勝生

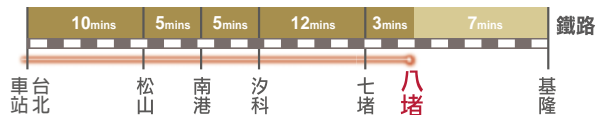
東京站

# 2字頭房價 台鐵捷運宅 新年搬新家



## 沿著軌道風景線 發現生活最美的動線

南港過去一點點，八堵站前「東·京站」，物超所值的2字頭房價，值得東區上班族特別關注。  
和車站當鄰居，搭火車、轉捷運的通勤方式，是上班族對抗塞車困擾的法寶，週末還可以搭著火車去旅行，無論是到基隆廟口嚐嚐排骨羹、鼎邊銼、奶油螃蟹、古早味豆花...，或到礁溪泡湯、平溪放天燈，都超方便的，想讓生活變得更精彩，選這裡就對了。



20分鐘到東區·附全套精品傢俱·全新完工

特別推薦

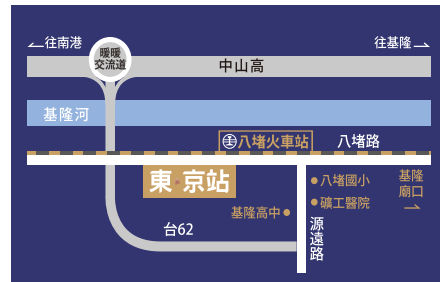
41坪 樓中樓 挑高六米 大露台



現場裝潢戶實景



現場裝潢戶實景



27% 低公設比 | 22~48 坪 | 接待會館 八堵火車站對面 貴賓專線 2456-9777

■投資興建：日勝生活科技 ■建築營造：泰誠營造 ■建築設計：吳毓廷建築師事務所 ■使照號碼：(102)基府都建使字第 00089 號 www.JSL.com.tw

## 憧れの東京鉄道の旅，台北生活の軌道に乗る