



# 大地技師

大地技師

Journal of Professional Geotechnical Engineers No.30

第三十期

二〇二五・六

中華民國大地工程技師公會



中華民國大地工程技師公會

地址：115 台北市南港區成功路一段 32 號 4 樓之 8

電話：02-27820022

傳真：02-27820272

網站：www.pgea.org.tw



## 跨河谷吊橋之大地安全監測介紹

- 深入探討了在河谷特殊環境下，吊橋工程所面臨的大地安全挑戰
- 詳盡介紹了吊橋錨定機制及相應的監測技術與設計回饋

## 地下隧道工安監測之智慧應用

- 本文聚焦於地下隧道施工安全監測的智慧化應用
- 展示了如何透過科技手段，提升隧道施工的安全性與效率

## 人工智慧模型應用於離岸風電 CPT 數據異常檢測

- 探索如何運用 AI 模型，有效辨識 CPT 數據中的異常
- 為綠色能源基礎設施的建置提供更堅實的依據

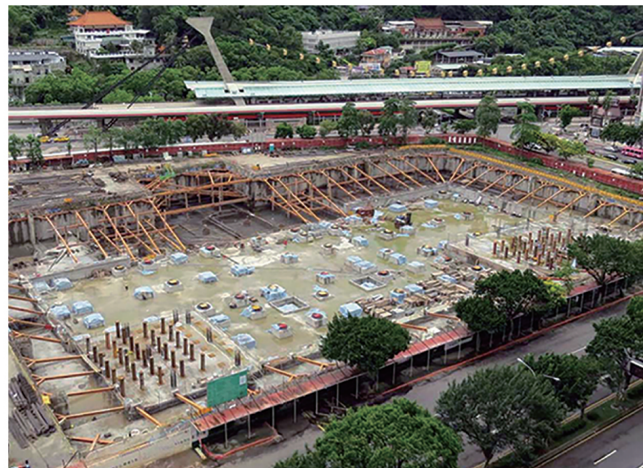
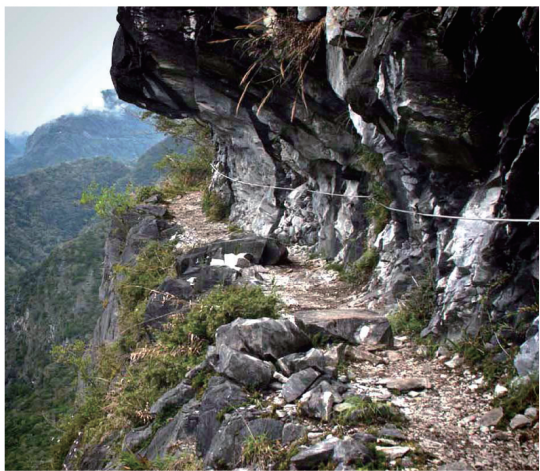




# 社團法人中華民國大地工程技師公會

## Taiwan Professional Geotechnical Engineers Association

1. 提供政府與民間機構各類建築、土木、水利、道路、隧道、海洋、環境、下水道等工程中  
有關大地工程(含土壤工程、岩石工程、工程地質及基礎工程)與地質法、水土保持法及其他  
法令規定得由大地工程科技師辦理工程之研究、評估、審查及鑑定等相關服務。
2. 參與相關之災害防治與勘災工作。
3. 辦理基礎開挖、地工防災、水土保持、地下構造及設施等業務相關講習會。
4. 辦理大地工程薪傳講座及各項專業技術研討會。
5. 辦理鄰高鐵(或捷運)近接施工之安全影響評估、施工計畫等之審查作業。
6. 辦理建築管理因地工防災需求之特殊結構設計、施工計畫等之審查及相關巡檢作業。
7. 土壤液化潛能評估分析及諮詢顧問服務。



### 社團法人 中華民國大地工程技師公會

(115) 台北市南港區成功路一段 32 號 4 樓之 8  
電話：02-2782-0022 傳真：02-2782-0272  
E-MAIL: pgea@pgea.org.tw  
網址：www.pgea.org.tw

#### 桃竹辦事處

(330) 桃園市桃園區新埔六街 77 號 12 樓之 1  
電話：03-3230975 傳真：03-3605752

#### 中部辦事處

(427) 台中市潭子區中山路二段 135 號 15 樓  
電話：04-25346986 傳真：04-25340823

#### 雲嘉南辦事處

(711) 台南市仁德區中山路 758 巷 2 弄 68 號  
電話：06-2493720 傳真：06-2495365

#### 高屏辦事處

(804) 高雄市鼓山區中華一路 350 號 2 樓之 2  
電話：07-5537936 傳真：07-5530290

#### 基隆辦公室

(200) 基隆市仁愛區愛九路 1 號 6 樓  
電話：02-24294812 傳真：02-24251970

#### 花東辦公室

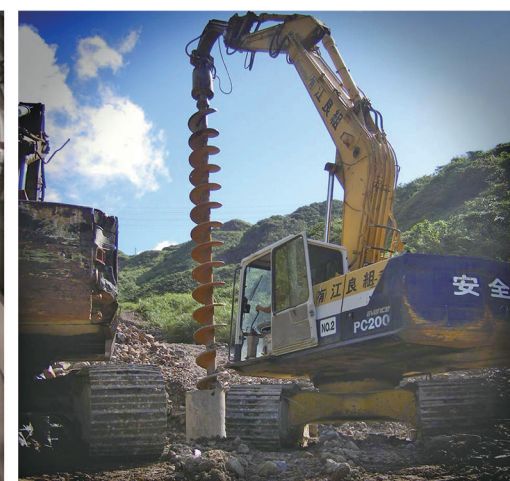
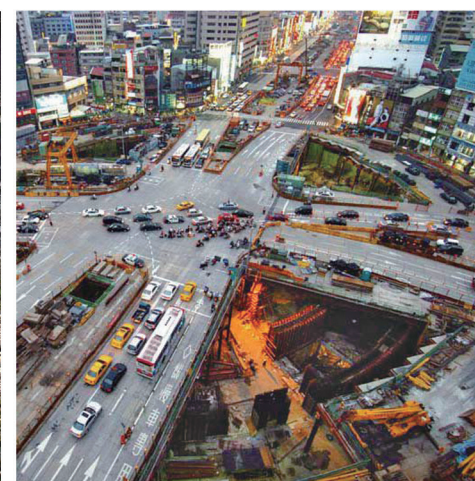
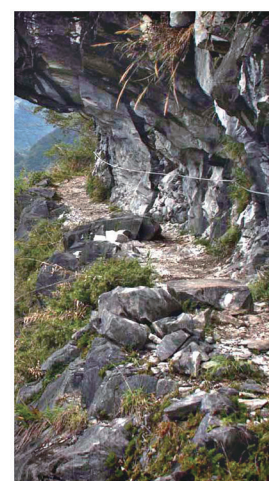
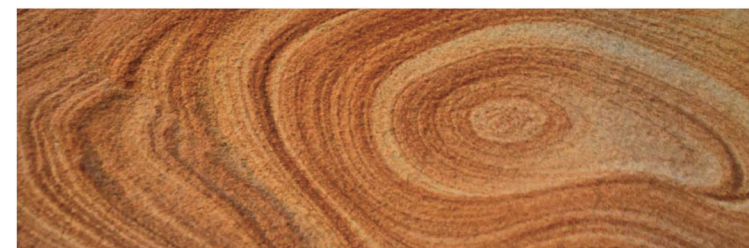
(973) 花蓮縣吉安鄉中正路二段 206 巷 2 號  
電話：03-8267159 傳真：03-8540098



# 中華民國大地工程技師公會

## Taiwan Professional Geotechnical Engineers Association

- 1990 National examination of geotechnical engineering division was set up by Ministry of Examination.
- 1996 Taiwan Professional Geotechnical Engineers Association and Taipei Professional Geotechnical Engineers Association were established.
- 2000 Kaohsiung Professional Geotechnical Engineers Association was established.
- 2010 The first issue of "Journal of Professional Geotechnical Engineers" published in October Tenth.
- 2011 Professional Engineers Associations could be merged into unique national association according to Technical Act Amendment.
- 2012 Different geotechnical engineers' associations merged into unique "Taiwan Geotechnical Engineers Association" by meeting resolution.
- 2013 Taiwan Geotechnical Engineers Association was officially established in April thirteenth.
- 2015 The Specifications of a Two-Stage Exam for licensing the professional geotechnical engineers were approval and conducted.



- Geotechnical engineering relating building, civil, hydraulic, road, tunnel, ocean, offshore, environment, sewer etc.
- Survey and disaster prevention.
- Research, assessment, investigation, identification.
- Workshop and conference.
- Proximity construction safety assessment and examination of Mass Rapid Transit and High Speed railway
- Soil liquefaction assessment and professional consultation.

4F.-8, No. 32, Sec. 1, Chenggong Rd., Nangang Dist., Taipei City 115, Taiwan

TEL: 02-2782-0022

FAX: 02-2782-0272

E-MAIL: pgea@pgea.org.tw

www.pgea.org.tw





中華民國99年10月10日創刊

第30期  
June 2025

# 大地技師

「大地技師」四個字乃拓自國畫大師張大千早年墨跡，為右上左下大千體，仿魏碑筆法，蒼勁有力，一氣呵成，字法結構以“大”字頂天立地，磐石永固；“地”字老藤盤繞，身經百戰；“技”字中規中矩，才華洋溢；“師”字行雲流水，永續工程。寓語大地工程未確定性高，師法自然，破格創新，用心經營，開創無限的可能。



(照片由江承家技師提供，特此致謝)

## 《封面說明》

這張封面照片，為美國黃石國家公園中著名的大稜鏡溫泉。它是美國最大的熱泉，也是世界上第三大的熱泉，其直徑約為 112 公尺，深度超過 37 公尺。從熱泉中心深邃的藍色，向外逐漸過渡到綠色、黃色、橘色，最終在邊緣呈現深紅色，生長在溫泉邊緣不同溫度水域中的嗜熱細菌所形成，創造出如同彩虹般的光譜。

本刊文責由作者自負，版權概屬本會所有，未經本會同意禁止翻印或轉載。

發行人：賴世屏理事長

副理事長：王貽德、吳佳陵、呂彥龍、林衍竹  
陳昭維、顏呈仰

理事：江鑑清、李守原、吳維揚、林石源  
高振誠、張浼珣、曾孝欽、洪英州  
曾展晏、黃筱卿、楊智堯、趙衛君  
蔡岱佑、謝曜光

常務監事：施志鴻

監事：沈銘閔、陳江淮、陳廣祥、張正憲  
黃宗宸、劉永發

總編輯：鄭清江

副總編輯：高秋振、曾孝欽

本期主編：江承家

助理編輯：施承斌

編輯委員：周坤賢、張永漢、張景明、黃柏仁  
鄭會文、賴可捷

(以上均按姓氏筆劃排列)

發行所：社團法人中華民國大地工程技師公會

會址：11570 台北市南港區成功路一段32號4樓之8

電話：(02) 2782-0022

傳真：(02) 2782-0272

本會網址：<http://www.pgea.org.tw>

E-mail：[pgea@pgea.org.tw](mailto:pgea@pgea.org.tw)

排版印刷：麥田資訊股份有限公司

地址：10055 台北市仁愛路二段一號四樓一六八室

電話：(02) 2322-1930

傳真：(02) 2392-4260

網址：[www.dneinfo.com](http://www.dneinfo.com)

E-mail：[dneinfo@pgea.org.tw](mailto:dneinfo@pgea.org.tw)

ISSN 221956300-3



NT\$250

9 772219 563003

大地工程技師公會服務項目：

- 一、協助政府機關進行相關災害搶救及原因鑑定、震災後建築物分級評估、山坡地住宅社區安全檢查工作、水土保持計畫（規劃書）審查、施工計畫審查、雜項工程設計審查、特殊結構審查及安全鑑定。
- 二、鄰高鐵路設施之開挖影響審查及安全鑑定。
- 三、提供有關大地工程技術諮詢服務。
- 四、受委託辦理各類建築、土木、水利、道路、隧道、海洋、環境、下水道等工程中有關大地工程（含土壤工程、岩石工程及工程地質）與地質法、水土保持法及其他法令規定得由大地工程科技師辦理之工程研究、評估、審查及鑑定等相關服務。



## 目 錄

|   |      |     |
|---|------|-----|
| 4 | 編者的話 | 江承家 |
|---|------|-----|

### 《人物專訪》

|   |                      |     |
|---|----------------------|-----|
| 6 | 三聯科技教育基金會董事長 — 林廷芳先生 | 江承家 |
|---|----------------------|-----|

### 《技術論文》

|    |                |                     |
|----|----------------|---------------------|
| 14 | 跨河谷吊橋之大地安全監測介紹 | 廖慧菁、張嘉峰、廖振程、徐力平、黃鑑水 |
|----|----------------|---------------------|

### 《工程技術》

|    |                          |                         |
|----|--------------------------|-------------------------|
| 26 | 地下隧道工安監測之智慧應用            | 曾孝欽、黃士翹、陳文通、王東海、謝明達、余維文 |
| 32 | 人工智慧模型應用於離岸風電 CPT 數據異常檢測 | 許景瀚、李安勸、陳立軒、江承家         |

### 《工程案例》

|    |                                      |                     |
|----|--------------------------------------|---------------------|
| 40 | 捷運地下車站監測系統規劃及監測成果回饋分析 — 以松山線 G22 站為例 | 張正憲、曾紀緯、賴建名         |
| 48 | 高雄燕巢地區之西部麓山帶邊坡地質調查及監測案例探討            | 羅俊宏、孫漢豪、孫維政、魏佳韻、陳琨曜 |
| 60 | 公路隧道長期監測案例探討                         | 林衍丞、何金益、歐皓智、劉正隆、王豐仁 |
| 70 | 桃園國際機場多功能大樓施工中桃園捷運潛盾隧道安全監測           | 何金益、歐皓智             |
| 78 | 新竹寶山地區逆向坡滑動調查及監測案例探討                 | 江承家、陳湧文             |

### 《活動花絮》

|    |              |     |
|----|--------------|-----|
| 86 | 典藏南九州・櫻花季五日遊 | 陳昭男 |
|----|--------------|-----|



## 編者的話

主編

江承家

各位親愛的讀者、大地工程先進與同業夥伴：

很榮幸能擔任本期《大地技師公會期刊》的主編，並與大家一同探索「大地監測」這個極具深度與廣度的主題。首先，我要特別感謝萬鼎張副總的推薦與信任，讓我在繁忙的工作之餘，能有幸投入這項意義非凡的任務。擔任主編的過程，不僅讓我得以近距離學習和欣賞各位前輩所撰寫的精采文章，更讓我對於大地工程領域的廣度與精深，有了更深刻的體會。這無疑是一段充實且充滿學習的旅程。

在我們所處的時代，極端氣候事件日益頻繁，加上都會區工程開發密度不斷提高，使得大地工程面臨前所未有的挑戰。如何在複雜的地質條件下，確保工程的安全性、穩定性與永續性，成為大地工程師的首要任務。而大地監測，正是我們應對這些挑戰的關鍵利器。它不僅是風險管理的基礎，更是工程創新與優化的重要驅動力。透過即時、精確的數據，我們得以「看見」地底下的動態，預防潛在的災害，並為工程的生命週期提供堅實的依據。如同醫師診斷病情一般，精準的大地監測能讓我們對工程結構的「健康狀況」瞭如指掌，及早發現並處理問題。

本期特邀三聯科技教育基金會董事長林廷芳先生進行人物專訪。林董事長數十年來深耕大地工程的發展與推廣，不僅在業界擁有豐富的實務經驗，更積極投入人才培育與知識傳承，對台

灣大地工程界貢獻良多。透過這次訪談，我們有機會深入了解林董事長對於大地監測領域的獨到見解、技術發展趨勢，以及如何透過教育與實踐，為台灣大地工程界注入新活水。他的視野與熱情，相信能為所有讀者帶來深刻的啟發。

本期收錄的八篇技術論文及工程案例，涵蓋了大地監測的多元面向，從宏觀的區域性研究到微觀的個案分析，從傳統工法到新興科技應用，為讀者呈現了大地監測領域的廣度與深度：

跨河谷吊橋之大地安全監測介紹：這篇文章深入探討了在河谷特殊環境下，吊橋工程所面臨的大地安全挑戰，並詳盡介紹了吊橋錨定機制及相應的監測技術與方法。對於在高風險水域或山區進行工程的讀者而言，提供了極具價值的參考，讓我們更能理解如何為這些宏偉的跨越工程保駕護航。

地下隧道工安監測之智慧應用：隨著科技進步，人工智慧、物聯網、大數據等技術已逐漸應用於工程領域。本文聚焦於地下隧道施工安全監測的智慧化應用，展示了如何透過科技手段，提升隧道施工的安全性與效率，這是未來工程發展的重要方向，預示著監測技術的革新。

人工智慧模型應用於離岸風電 CPT 數據異常檢測：離岸風電是台灣能源轉型的重要策略，而地質鑽探數據（CPT）的精確性對於離岸風場的開發至關重要。本研究探索了如何運用 AI 模型，有效辨識 CPT 數據中的異常，進一步提高

地質判斷的準確性與可靠性，為綠色能源基礎設施的建置提供更堅實的依據。

捷運地下車站監測系統規劃及監測成果回饋分析以松山線 G22 站為例：城市軌道交通建設是現代都市發展的基石。本文以台北捷運松山線 G22 站為實例，詳細解析了地下車站監測系統的規劃理念、監測技術選擇，以及如何透過監測成果回饋分析，優化設計與施工，為複雜都會區的捷運工程提供了寶貴的經驗。

高雄燕巢地區之西部麓山帶邊坡地質調查及監測案例探討：台灣地質條件複雜，山坡地開發與防災是不可忽視的議題。本篇論文針對高雄燕巢地區的西部麓山帶，進行了深入的邊坡地質調查與監測案例分析，對於了解台灣特殊地質條件下的邊坡穩定性評估與監測策略，提供了重要的實務參考，提醒我們對土地的尊重與防範。

新竹寶山地區逆向坡滑動及監測案例探討：逆向坡滑動是一種特殊大地問題。本文聚焦新竹寶山地區的逆向坡滑動案例，詳細分析了其形成機制、潛在風險，並分享了具體的監測方法與應對策略，對於面臨類似地質災害威脅的地區，提供了寶貴的借鑒，突顯了預警與防災的重要性。

桃園國際機場多功能大樓施工中桃園捷運潛盾隧道安全監測：大型建築工程與既有交通設施的共構或鄰近施工，往往伴隨著高度的挑戰與風險。本研究探討了桃園國際機場多功能大樓施工期間，如何有效地對鄰近的桃園捷運潛盾隧道

進行安全監測，確保機場建設與捷運營運互不影響，展現了複雜工區的監測規劃與執行能力，是跨領域協調的典範。

公路隧道長期監測案例探討：公路隧道是重要的交通基礎設施，其長期穩定與安全至關重要。本篇論文透過實際案例，分享了公路隧道從設計、施工到營運期間的長期監測策略與成果，強調了持續監測對於維護隧道結構健康與延長使用壽命的重要性，為我們的交通命脈提供保障。

大地監測不僅是一項工程技術，更是一門結合大地工程、結構工程、資訊科技、風險評估與防災思維的綜合科學。透過這些論文的分享，我們希望能夠促進產學界的交流與合作，激發更多對於大地監測技術的創新與應用，共同提升台灣大地工程的整體水準。

再次感謝所有作者的辛勤付出，還有編輯委員會同仁的鼎力協助，讓本期期刊得以順利付梓。更要感謝所有讀者的支持，您的閱讀與回饋是我們不斷進步的最大動力。

期盼本期的內容能為您的專業工作提供實質的幫助，並在閱讀之餘，激發您對大地監測更深入的思考與探索。讓我們共同努力，為台灣大地工程的發展與公共安全貢獻一份心力。🇹🇼

祝大家閱讀愉快，收穫豐碩！

主編 敬上



## 三聯科技教育基金會董事長

## 林廷芳先生專訪

記錄整理 江承家 大地技師

從配電盤到智慧監測——  
技術傳承與跨域整合，  
站上世界舞台，  
打造台灣智慧地工典範



## 主題 | 監測技術於大地工程之應用與發展

在大地工程領域，「監測」已不再只是附屬配備，而成為安全與決策的關鍵依據。本期《大地技師期刊》專訪三聯科技教育基金會董事長林廷芳，帶領我們回顧台灣工程監測產業的歷程，見證三聯科技從 1967 年創立至今，如何跨足拓展至陸 (Soil)、海 (Sea)、空 (Sky)、太空 (Space) 等 4S 領域，實現自製儀器外銷、建構智慧預警系統，並積極推廣工程知識，將艱深技術轉化為社會理解與信任。

## 一、三聯科技公司簡介與發展歷程

## 提問 1



林董事長您好，首先感謝您接受公會的邀請進行這次專訪。我們知道三聯科技在監測領域有非常深厚的經驗，今天想請您先為我們介紹一下公司的成立背景與整體發展脈絡。

**林董事長：**非常感謝施理事長與各位公會代表來訪。三聯科技的起點其實可以回溯到 1967 年，由我父親林榮渠先生所創辦。他在創業之前，曾在台電公司服務超過 15 年，當時主要從事配電與儀控系統的工作，是非常紮實的現場技術人才。那時候他已經是台電裡面技術穩定、待遇優渥的中堅工程師，但他非常有理想，也看見當時台灣工業化初期對電力與設備需求的迅速成長。於是毅然離開公職，創立三聯科技，一開始的重點就是生產配電盤，當時這樣的技術在國內其實還是相對稀缺的。

到了 1972 年，以巴戰爭爆發，造成全球油價飆升與經濟衰退，台灣當時也受到波及。但政府隨即啟動十大建設來帶動內需，這對我們公司反而是一個轉型的契機。我父親當時看見這個方向，開始把公司的重心從單一設備製造，轉向公共工程、基礎建設的工程配套與監控系統服務，進入如高速公路、抽水站、水庫、電廠等國家級建設案。

所以也可以說，三聯科技就是伴隨台灣基礎建設一起成長的。我們公司一直秉持著一個信念，就是「技術要根植本土，服務要對應國情」。這樣的精神到現在我們依然堅持不變。

## 提問 2



從配電盤一路走到智慧監測，聽起來不只是業務轉型，更像是對整體產業需求的回應？

**林董事長：**是的，我們的轉型其實是「被需求推動」的。早期我們做配電盤設備，後來服務的單位越來越多樣，包括工業區、水資源處理、交通建設等。我 1981 年進入三聯科技，把我個人的土木背景帶進來，開始思考這些設備能不能用在地工領域？可不可以拿來解決邊坡、地層下陷這些風險？

我慢慢觀察到，大地工程的現場，其實比工廠還複雜。它暴露在自然環境中，變化快速、風險大，而且一出事往往影響非常深遠。這時候，如果沒有資訊輔助判斷，其實非常危險。

## 二、監測技術於大地工程之應用

## 提問 3



董事長剛剛提到很多基礎建設上的應用，那我們也很好奇，現在很多都市更新、大型建築也開始做智慧監測與節能管理，三聯在這方面是否也有新的嘗試？

**林董事長：**當然有，我們現在也跟集團旗下的璞真建設密切合作，將智慧監測技術真正落實在建築施工與永續設計中。像我們已經完工的台中「勤美之森」建案，就是一個很典型的例子。

「勤美之森」的基地大概有 4,000 坪，規劃要興建地上 35 層、地下 5 層的大樓。如果用傳統工法，在開挖階段可能要設置超過 20 口地下水井才能應付抽水需求，這不但會造成水資源及電力的浪費，也會增加施工期間的環境擾動。





所以我們在這案子中導入了智慧大數據分析與地下水位模擬技術，根據歷史資料、當地地質特性與即時監測結果，動態調整抽水策略。在即時監測配合的條件下原本預估需設置 21 口井，實際只挖了 13 口，且僅需抽其中的 5 到 8 口井即可完成降水目標。

### 節能、節水與社會共享：與台積電建立產業水資源鏈

**林董事長：**除了在施工端節水、減井之外，我們也思考這些抽出的地下水能不能有更大的價值？

所以我們在「勤美之森」這個案子裡，採取了一個全新的策略 — 無償提供所抽出的地下水給周邊工業與民生使用。我們主動與台中科學園區聯繫，後來甚至與台積電展開溝通，願意將抽出的水供應給他們作為產業用水使用。

這個作法其實很簡單，但背後的關鍵在於我們有完善的監測系統與數據支持，能確保抽水不過度、不破壞原水位、也不危及鄰房或地層。

這不只是工程的一部分，更是我們對環境永續與公共利益的承諾。

### 關鍵效益 - 智慧監測成為建築決策輔助的「隱形工程」

#### 提問 4



聽起來這不僅是工程效益，也是一種對城市資源更高層次的管理與共享。

**林董事長：**完全正確。我們內部常說，監測是一種隱形的公共建設。它可能不是每個人看得到的設備，但它卻是讓整體工程可以更聰明、更穩定、更對社會負責的底層支撐。

「勤美之森」就是很好的例子，它證明了：當工程背後有智慧系統在支撐，施工可以更環保、建設可以更負責任，甚至可以帶動社區、產業與城市間的資源共享循環。

#### 提問 5



監測看起來也不只是安全用途，它其實在成本與施工管理上也有助益？

**林董事長：**監測讓你能提前發現問題、做預防措施。這比等災害發生後再來補救，成本低太多了。我們曾經在一個工地中，監測發現側壓異常，立刻調整支撐結構，最終避免了一起潛在的滑動災害。光是避免這個事件，為業主省下千萬以上的潛在損失。

更進一步地，我們也發展出一套施工階段監測與施工管理整合模組，可以根據監測數據調整施工順序、工法、進度，非常有助於大型專案的風險控管與資源調度。

### 三、監測技術發展趨勢與挑戰

#### 提問 6



從技術角度來看，您認為監測系統未來會朝什麼方向發展？

**林董事長：**我們觀察到幾個明確趨勢：一是感測器小型化與低功耗，二是 AI 模型結合預測與判讀能力，三是系統整合性越來越高，甚至與設計、營運、維護階段緊密連動。

以我們的實務經驗來說，監測系統不再只是「裝了就好」，而是要能自己判斷、預警、甚至提出建議。我們現在推動的系統，可以將感測器收集的資訊送進我們雲端平台，由 AI 進行趨勢擬合與風險分類，進一步產出簡報、圖像、甚至語音提示。

### 面對困難，就是找到機會的起點

當然，這一路上並不輕鬆。監測技術真正的挑戰，往往不在於技術，而在「野外的現實」裡。

像我們在布設邊坡、溪流、山區、甚至水下監測時，最大問題其實是電源、無線訊號穩定性、感測器精度會隨環境變動，還有颱風、野獸干擾、甚至蛇爬進箱體的狀況都遇過。

但我始終相信一句話：「面對困難，解決它，就是機會。」因為這些挑戰逼得我們必須去優化系統，讓它更穩定、更自動化、更能容錯。這反過來也讓我們累積了大量野外環境的運作經驗與大數據，這是很多只做實驗室模型的人得不到的。

### 地震儀監測數據的延伸應用

另外，我們有一項很有價值的資料，就是地震儀器長期紀錄下來的地動反應。這些不是只有防災用途，其實未來可以回饋給大地設計使用。

像我們在國內累積了將近十年的微震數據，搭配加速度、位移反應與不同深度的波傳記錄，這些資料對土壤液化分析、地層變形模型參數設定都有幫助。我們也希望未來這些能成為台灣大地工程設計的一部分基礎資料庫。



## 四、產學合作與人才培育

### 提問 7



我們公會一直非常重視產學合作與技術傳承，想請問三聯科技在這方面有什麼具體作法與經驗？您怎麼看產學界在監測技術上的角色扮演？

**林董事長：**我非常認同這一點，其實三聯科技從早期就不只是做案子，也很重視知識的整理與傳承。我們在 1985 年就開始編輯與發行《三聯技術期刊》，初衷是把現場的實務經驗、監測案例、儀器應用方式，用工程師能理解的語言寫下來，讓同業、學界、政府單位都能參考。我們從未間斷，這個期刊至今已經出了四十年了。

### 知識傳承與公開教育：從技術期刊到影音平台

近年來，我們發現新世代的接收方式變了，所以我們也開始嘗試用影音來講工程。我們建立了自己的 YouTube 頻道，會將監測的原理、現場操作流程、甚至軟體平台的使用方法，拍成動畫與實景影片上傳。像我們有一支關於地震預警系統影片，已經有超過 90 萬次的點閱。

這也表示，其實社會是關心工程的，只是我們過去說的方式太專業、太艱澀，導致大眾無法理解我們現在嘗試用圖像化、故事化的方式來說明，讓學生、市民甚至國外客戶都能理解這些技術在現實中如何應用。

### 提問 8



這樣的做法我覺得非常有意義，等於是讓工程專業「走出實驗室」，進入社會對話與教育場域。

**林董事長：**是的，我們始終相信：技術不只是會操作而已，還要會分享、會說明，才能真正發揮影響力。這也是我們在推動監測產業時，一直很重視的「知識公共性」。

### 人才培育：從實習到跨域歷練

### 提問 9



除了知識傳播以外，您對人才培育方面的策略是什麼？

**林董事長：**我們的內部有一套「跨域歷練制度」，新人進公司後不會只在單一部門，而是會歷經案場、研發、系統設計、客戶溝通這四個核心環節，讓他們理解「監測」不只是操作儀器，而是整個系統與使用者之間的橋梁。

我們也每年提供十幾個實習名額給大專院校學生，甚至國外學生來我們這邊實習。我們要培養的是未來能溝通、能整合、能跨界的人才，而不是只會看數據表的操作員。

## 對年輕技師的期待：讓專業「說得懂、講得出」

### 提問 10



對於剛進入這個領域的年輕技師，您會給什麼建議？

**林董事長：**我會說：專業不是閉門造車，而是要能轉譯成讓別人理解的語言。

未來的技師要能「看得懂圖，寫得出程式，說得清道理」。你可能會用到 AI、用到感測網、資料平台，但最重要的是，你要能把這些資訊「講給別人聽」，讓客戶懂、讓主管懂、讓社會大眾也懂。

## 五、公會交流與合作展望

### 提問 11



大地工程技師公會非常希望未來能與三聯科技建立更深層的合作關係，除了技術交流，也包含人才交流、國際連結。您這邊有什麼建議？

**林董事長：**我們非常樂意。我其實一直很希望公會可以多往國際串聯這一塊前進。像我們公司正在籌備一場在泰國舉辦的 AIT 國際研討會，那次主題是關於東南亞地區的地震與地工災害防治，背景是因為緬甸剛好發生了地震，對整個中南半島的地質穩定與工程安全提出挑戰。

這個會議很特別，除了泰國當地學者與政府官員外，還有日本、印度、越南的地震與工程專家。我們受邀參加，代表台灣介紹我們在地震監測、地層反應觀測、即時預警與系統整合方面的技術實績，也包含我們在台中、南投、花蓮等高震區的實際應用案例。



### 將台灣技術輸出國際，是產業的責任與機會

我在那場研討會裡，特別強調一件事：台灣雖然地震多，但我們不只是受災戶，更是有能力輸出解決方案的技術提供者。我們不只自己會做，還知道怎麼教別人做。

包括像我們自己開發的監測系統、傾斜與沉陷儀器，甚至整合平台、災前模擬演算模組，對國際學界與業界來說是非常有參考價值的。

所以我也建議，大地技師公會未來可以主動牽線、協助串聯這些國際會議，讓台灣的大地工程技師有站上國際舞台的機會，不只是聽講，也可以是分享者、輸出者，這樣我們的影響力才會真正被看見。





## 建議與公會未來合作方向

### 提問 12



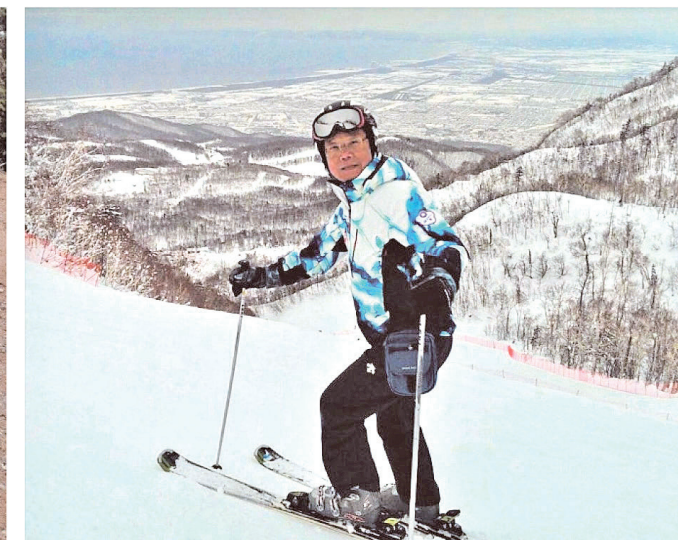
這真的是非常實質的國際交流碩果，未來如果要建立制度化的合作方式，董事長有沒有具體建議？

林董事長：我有幾個建議：

1. 公會可以與我們或其他企業聯合組團出國際研討，針對特定主題（如邊坡、隧道、地震等）去參與國際論壇。
2. 設立「台灣地工監測推廣平台」網站，並有雙語版本，讓國際找得到我們的案例與技術。
3. 鼓勵年輕技師參與國際工作坊、實地演講機會，由我們這些業界前輩協助培訓上場。

這樣，台灣的技師不只技術夠，也可以在國際社群裡成為「能說的代表」。

三聯科技教育基金會董事長林廷芳喜歡爬山，不但鍛鍊體能，挑戰極限，也能享受獨處時間；儘管不再是選手，他也帶領中華台北代表隊參加亞洲冬季運動會。



## 結語：從一家工廠到一個平台，三聯科技的智慧轉身

三聯科技的發展歷程，正是一部台灣地工監測技術演進的縮影。從 1967 年的工業設備製造者，到如今的智慧感測與資料整合平台建構者，三聯用實力與理想實踐技術本土化、知識透明化與市場國際化的三大目標。

林廷芳董事長所強調的「工程的責任、技術的溝通、知識的分享」，不僅是三聯的價值，也是整個大地工程界邁向未來的方向。

◆ 監測不是加選項，而是基本配備；技術不是冰冷的設備，而是讓社會安心的語言。



專訪後合影，左起曾孝欽技師、江承家技師、鄭清江技師、林廷芳董事長、施志鴻理事長、謝志龍經理、楊智堯技師、高秋振技師



# 跨河谷吊橋之大地安全監測介紹

廖慧菁 財團法人臺灣營建研究院 / 組長

張嘉峰 財團法人臺灣營建研究院 / 所長

廖振程 財團法人臺灣營建研究院 / 主任

徐力平 財團法人臺灣營建研究院 / 副院長

黃鑑水 應用地質技師

## 摘要

山區跨河谷吊橋因不在溪床落墩，則吊橋兩端的邊坡穩定及地質狀況攸關吊橋本體的安全，目前一般藉由定期的吊橋檢測以達到發現缺失適時維護的目的，然而在各縣市政府吊橋觀光產業的推動下遊客眾多，加以吊橋多位於深山險峻的位置，為能即時掌握常時或颱風與地震過後吊橋的安全情況，以達到人員管制避免生命財產損失，必須仰賴即時安全監測，本文藉由跨河谷實際吊橋案例由地質調查、吊橋型式選擇、吊橋及周遭大地環境的監測配置，及後續維運期間之橋體例行檢測與維護、3D 雷射掃描與橋體主索震動頻率、地錨預力、邊坡步道位移等監測資料，說明安全監測於吊橋管理單位維護管理的應用。

## 一、前言

根據內政部國土測繪中心民國 99 年至 110 年之測製資料，在將近 3.6 萬平方公里的臺灣面積中，海拔 500 m 以上占 46.8%、1,000 m 以上占 31.9%，而超過海拔 3,000 m 則占 1.2%（其中涵蓋 268 座高山），是全世界高山密度極高的島嶼之一，如圖 1，山區中並有許多早期住民通行的古道，而早期河谷兩側之住民往來除涉溪橫渡外，常見的方式即是架設人行吊橋橫跨山谷兩側。近來各縣市政府為活絡原住民經濟，山區跨河谷吊橋成為熱門的觀光景點，除早期既有的舊吊橋外，並陸續經建大規模的人行觀光吊橋如南投縣「雙龍瀑布七彩吊橋」

長度 342 m、嘉義縣「太平雲梯」長度 281 m、屏東縣「山川琉璃吊橋」長度 262 m 等，在吊橋多位於深山險峻的地點及台灣多颱風及地震的環境下，如何確保吊橋的安全避免危及當地

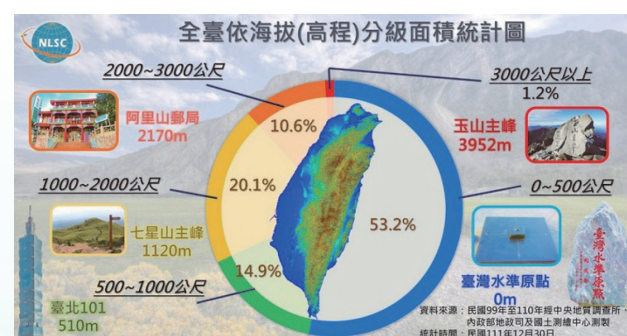


圖 1 臺灣海拔分級面積圖（圖片來源：內政部國土測繪中心）

住民與光觀客的生命財產為一重要課題，本文藉由屏東縣「山川琉璃吊橋」為案例說明吊橋管理單位為即時掌握吊橋安全狀況的安全監測作為。

瑪家鄉、三地門鄉及內埔鄉水門村早期重要的聯絡道路三地門吊橋於民國 78 年完工，民國 98 年莫拉克颱風期間，三地門吊橋因不堪風雨侵襲，橋台基礎裸露，成為危橋。經屏東縣政府進行三地門吊橋結構補強評估，發現除三地門吊橋結構體老舊，部分主索鋼纜斷裂外，當初設計缺少抗風索等設施，不符現行法規安全規範要求，而且三地門吊橋三地門端引道遭隘寮溪水冲刷，部分已坍塌滑落河道，建議採易地重建，由瑪家端原住民族文化園區停車場新建吊橋至三地門端富谷灣飯店後方，新建的「山川琉璃吊橋」於 103 年 9 月 5 日開工後，104 年 12 月完工，於 105 年試營運，正式營運後開放至今，吊橋長度 262 m，寬度 4 m（淨寬 1.2 m），二端高程約 183.0 m，中央高程則約 168.0 m，距河床高度平均約 45 m，串連三地門鄉與瑪家鄉（如圖 2），具有兩地通行之實用性與推動在地觀光產業興盛之價值，亦為屏東縣熱門觀光景點，其日遊客量最高可達 5,000 ~ 7,000 人，以下針對本文案例「山川琉璃吊橋」的吊橋場址地質調查、吊橋型式及棧道選址及安全監測配置與現況作介紹。



圖 2 山川琉璃吊橋位置圖

## 二、吊橋場址地質調查

依據經濟部地質調查及礦業管理中心全球資訊網—地質資料整合系統查詢，距基地最近之地質構造為平頂山斷層及潮州斷層，分別距基地約 1.7 公里及 3.6 公里，如圖 3 所示。因此，依經濟部地質調查及礦業管理中心「台灣活動斷層概論」，本基地不受活動斷層之相關法規（建築技術規則，第十三章第 262 條），地震規模  $M > 7$ ，斷層帶兩側各 100 公尺不得開發建築之限制。其區域地質圖如圖 4 所示，本基地屬隘寮溪流域，地層以板岩為主，本基址所在地區出露地層以中新世中之潮州層（Cc）為主，鄰近區域尚有第四紀臺地堆積層（t）與第四紀沖積層（a）。其中，潮州層以板岩、硬頁岩及變質砂岩與板岩互層為主，臺地堆積層及沖積層則以礫石、砂及黏土為主。

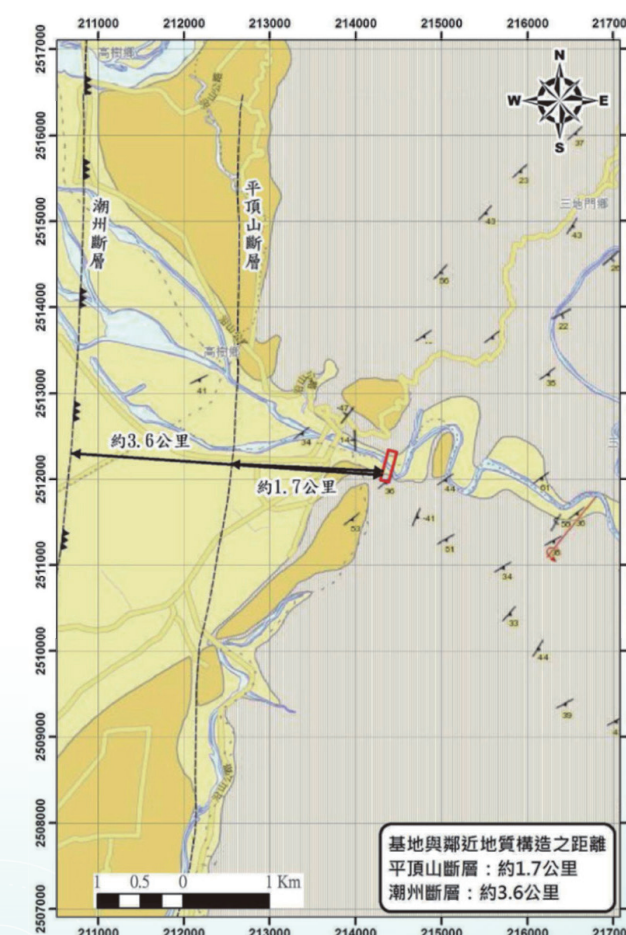


圖 3 計畫位置與活動斷層關係圖





圖 4 區域地質圖

本地區最大的地質構造為西側呈南北延伸的潮州大斷層。潮州大斷層為東側中央山脈山地與西側平原地區之主要分界線，為一斷面傾向東的逆衝斷層，它運動的方式是東側中央山脈地塊沿此斷層向西上衝於屏東谷地之上，由於壓縮逆衝作用影響而致上盤地區（即吊橋位置附近）在岩盤內形成眾多大小不等的褶曲及小斷裂，寬達數百公尺，稱為拖曳褶皺帶（詳圖 5 及圖 6）。潮州大斷層之斷層帶約位於吊橋西側 1 公里以上。由於潮州斷層以東之中央山脈受擠壓相對上升，致東側隘寮溪兩側多分布有高程不等的河階地

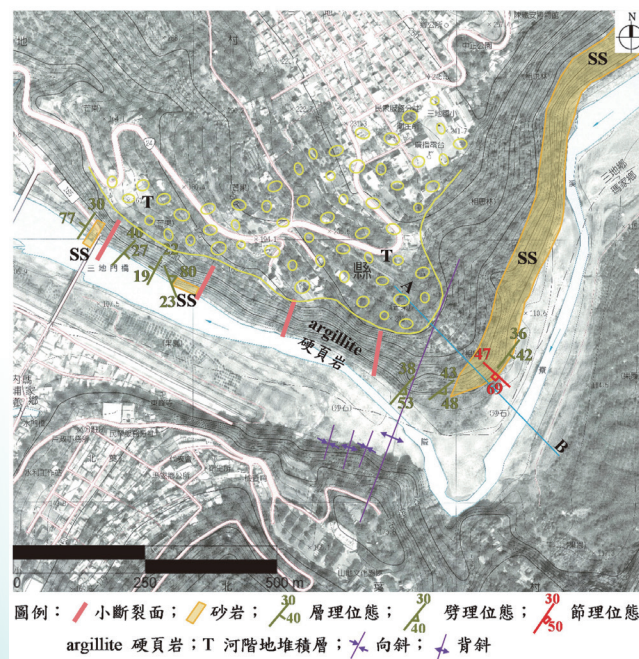


圖 5 基地地質圖

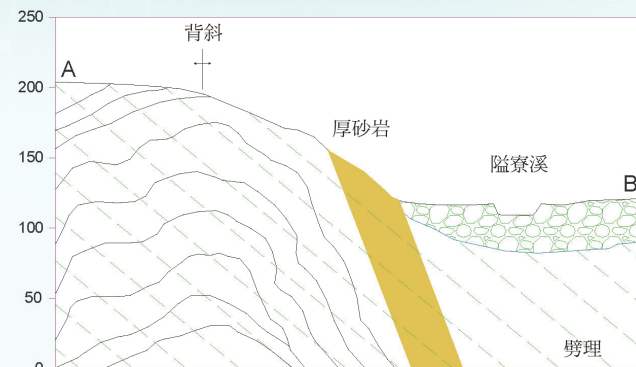


圖 6 地質剖面圖（AB 剖面）

（台地，瑪家鄉及三地門鄉聚落均位於此等上升河階地上）。

由接近連續露頭的觀查可發現本段屬潮州大斷層上盤之拖曳褶皺帶，除了各種大小、規模及形狀不同之拖曳褶皺（詳圖 7、圖 8）之



圖 7 南岸之褶皺



圖 8 北岸之褶皺近照

外，並夾有甚多小斷裂面或帶，由詳細之觀查，吊橋軸線所經之處似與一條拖曳複背斜軸線一致，詳圖 6。本地區岩層（體）主要的不連續面為發育於岩層內之劈理（cleavage），係岩層在受到大地壓縮應力後垂直於主應力軸方向的一種不連續面，岩層易沿此不連續之劈理面張裂，這種劈理面普遍發育於岩層內，且位態約略一致為北東走向，向東南方傾斜約 40° 至 80°。此外，在厚層砂岩內偶可見 2~3 組節理，最主要的節理位態大致為北西走向，向西南傾斜 69°，此與岩層或劈理之走向大致為垂直，應屬縱向節理，另有略平行於地形面（尤其是平行於河谷兩側陡壁坡面）發展的解壓節理等。以上兩組主要節理面均屬高傾角，當其逐漸張裂而掉落時，為造成陡立邊坡零星落石之來源。

綜整基地地質調查資料則本地區邊坡大略可以分為兩段加以分析，即以隘寮溪原由北往南突然作 90° 向西大轉彎流出之轉折點為界，可區分為西側向南傾下之邊坡及東側向東傾下之邊坡兩段。

#### (1) 向南傾下之邊坡

本邊坡主要由隘寮溪河道所切割出的北面陡坡，其上接平緩之三地門河階地。陡坡部分露出硬頁岩及板岩岩層。因邊坡之走向與岩層層理或劈理之走向接近垂直，為一側交坡，理論上應屬岩盤穩定區，不致有順向坡大量岩層滑動災害，但因岩層受風化侵蝕影響，在各種不連續面

逐漸張裂情況下，易有零星或局部落石災害，使陡坡緩慢向後退縮。

#### (2) 向東傾下之邊坡

此邊坡即指三地門鄉河階地東側向隘寮溪傾下之陡坡，邊坡走向接近南北高或北微偏東，因岩層層理或劈理之走向與邊坡走向較接近（夾角小於 30°），且均向東或東南東方向傾斜，故結構上屬於較敏感之順向坡。若一順向坡之坡腳受到人為或自然力的破壞下，易引致順向坡岩層大量沿層理面或劈理面向下滑動而造成災害。惟本順坡上半段之坡度遠小於岩層或劈理之傾角，故本順向坡之坡腳並無見光現象，故目前屬於一安全穩定之邊坡，此現象主要因本邊坡之坡腳（面臨河流之直接攻擊）由一層厚層堅硬抗蝕力極強的砂岩構成，因河流向西侵蝕受阻而改道南下，故形成坡腳之穩固屏障，間接保護三地門鄉台地之安全，如圖 5 及圖 6 所示。其他可能地質災害包含因地形坡度陡，表土或崩積土石通常較薄，易引起局部落石或落屑現象，及地表逕流之侵蝕下易有表土層流失或沖蝕現象，惟面積、規模不大。

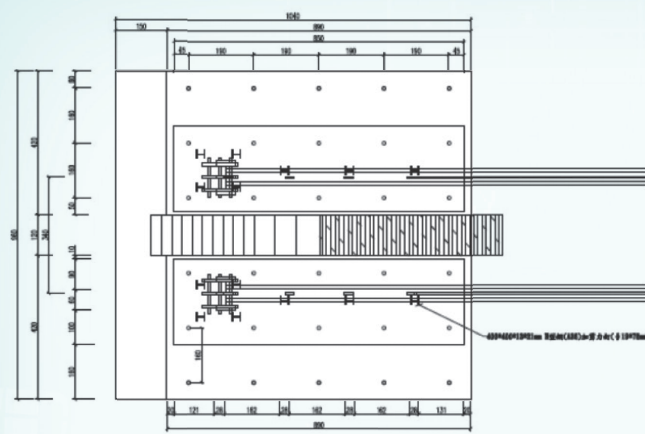
### 三、吊橋基本資料

為減少大型橋塔與大面積垂吊索對景觀之影響，以及考量兩岸橋台高程不同之需求採吊床式之吊橋型式設計，基本資料如表 1，橫斷面圖如圖 9 所示，現況照片如圖 10。

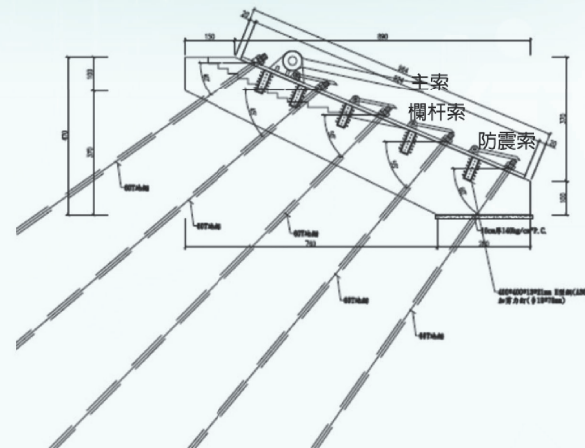
表 1 山川琉璃吊橋基本資料

| 地點           | 屏東縣三地門鄉、瑪家鄉                                                        | 援建單位          | 中華民國紅十字會總會                                                          |
|--------------|--------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------|
| 開工日期         | 103.09.05                                                          | 完工日期          | 104.12                                                              |
| 橋梁長度         | 262 m                                                              | 橋梁寬度          | 4 m (淨寬 1.2 m)                                                      |
| 吊橋型式         | 吊床板式                                                               | 橋梁高程          | 二端 183.0 m、中央 168.0 m                                               |
| 主索錨碇座型式      | 預力地錨                                                               | 抗風索錨碇座型式      | 預力地錨                                                                |
| 主索錨碇座 (瑪家端)  | 10.4 m × 9.6 m，高 4.7 m，施設長度 20 m、預力 60 T 之預力地錨計 20 支，亦為防震索、欄杆索錨碇座。 | 主索錨碇座 (三地門端)  | 110.8 m × 9.6 m，高 6.3 m，施設長度 20 m、預力 60 T 之預力地錨計 20 支，亦為防震索、欄杆索錨碇座。 |
| 抗風索錨碇座 (瑪家端) | 2.0 m × 2.0 m，高 2.0 m，施設預力地錨計 4 支，地錨長度 20 m，預力 60 T。               | 抗風索錨碇座 (三地門端) | 2.5 m × 2.5 m，高 2.5 m，施設預力地錨計 4 支，地錨長度 20 m，預力 60 T。                |

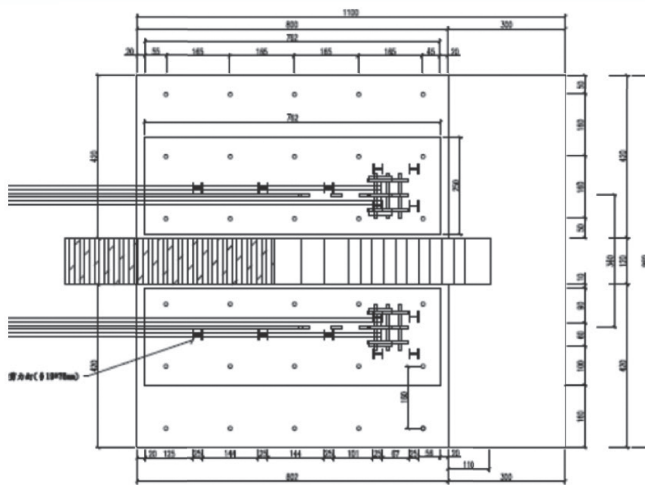




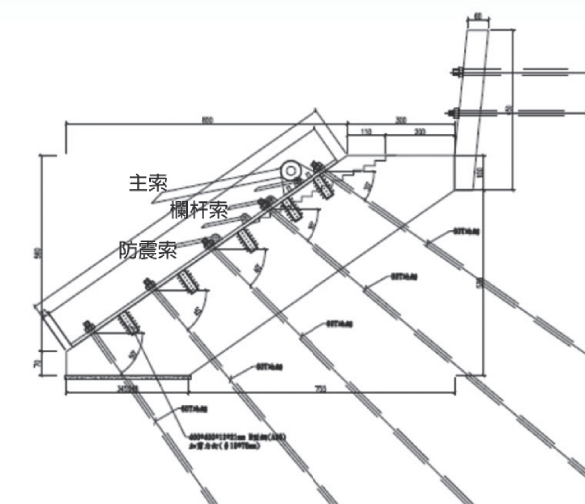
(a) 平面圖 (瑪家端)



(b) 縱斷面圖 (瑪家端)



(c) 平面圖 (三地門端)



(d) 縱斷面圖 (三地門端)

圖 9 主索錨碇座圖

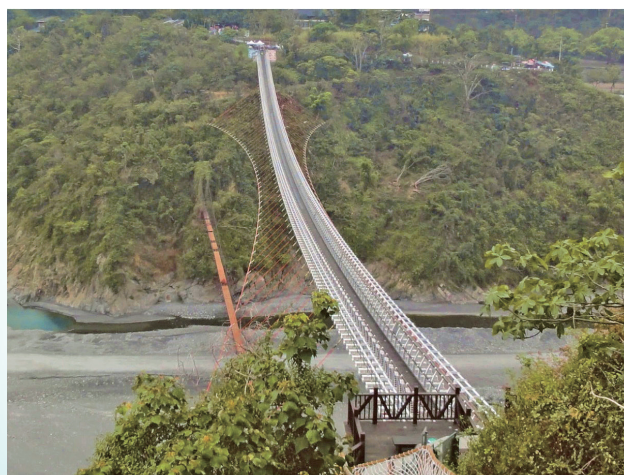


圖 10 山川琉璃吊橋現況照片

#### 四、安全監測配置與現況

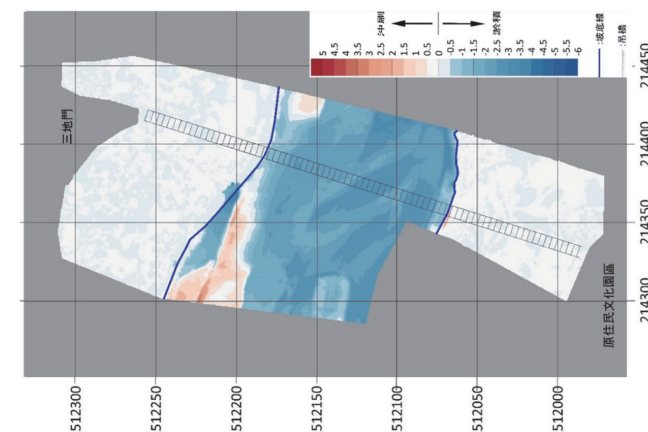
本案吊橋及周遭大地環境的安全監測可區分為定期人工檢測與自動化即時監測兩部分，其中定期人工檢測主要是針對吊床式吊橋本體整體結構的變化量測包含 3D 雷射光達掃描與全橋測量，自動化即時監測則包含地錨預力、無限加速規及無線傾度等。

##### 4.1 3D 雷射光達掃描

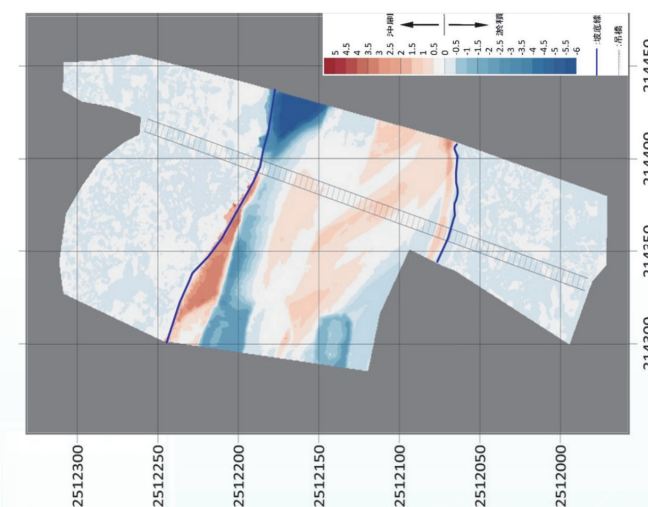
光達或稱激光雷達，主要為利用雷射光束進行測距或量測物體物理特性的光學遙測技術，

其工作原理為雷射發射器所發出的脈衝雷射光，由載具射出至地面上，打到植生或建物後引起散射和反射。一部分光波經由反向散射返回到載具上的接收器中，將光信號轉變為電信號記錄下來。同時由搭配的計時器，記錄同一個脈衝光信號由發射到被接收的時間，即可得到載具到目標物的距離。

由吊橋點雲資料比對，顯示 112/07 與 113/04 之掃描成果如圖 11(a)，其顯示三地門端之河床有冲刷現象，其平均冲刷深度約 1.0 ~ 1.5 m，最大冲刷深度約 3.5 m，瑪家端河道則有輕微之淤積，最大淤積變位約 3.0 m，二端邊坡則皆無明顯之變化；113 年 4 月與 113 年 8 月之掃描成果比對如圖 11(b)，其顯示三地門端下游側



(a) 112/7 與 113/4 比對



(b) 113/4 與 113/8 比對

圖 11 113 年點雲資料比對成果

河床及河道中央有冲刷現象，其平均冲刷深度約 1.0 ~ 1.5 m，最大冲刷深度約 3.5 m，三地門端上游側河床及二端河道邊緣則有淤積現象，最大淤積變位約 6.0 m，惟淤積範圍不大，二端邊坡則皆無明顯之變化。

由三地門端崩塌處點雲資料比對，三地門端邊坡之鄰近區域雖分別於 105 年、108 年發生表層冲刷與土石坍塌現象，惟透過後續掃描成果進行比對，將該區域切數個剖面，並比對個剖面之點雲資料如圖 12 所示，其顯示該處崩塌邊坡下方自 113/04 ~ 113/08 有部份土石持續因冲刷滑落（最大位移量約 6 m），然無較大崩塌發生。

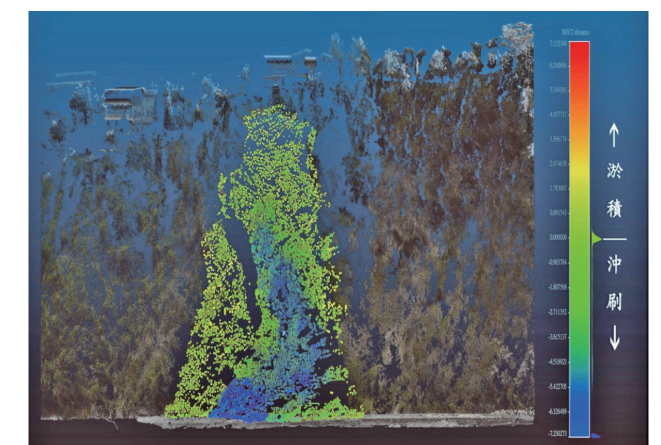


圖 12 三地門端下游側冲刷邊坡現況比對 (113/4 與 113/8)

##### 4.2 全橋測量

依據地面光達資料，將點雲資料轉繪 AutoCAD，並以 Autodesk Land Dsektop 地形圖繪製軟體繪製 1/1000 地形圖，如圖 13 所示，換算山川琉璃吊橋全橋各纜繩長度，再與歷次光達掃描資料進行比較，並透過繪製歷次掃描之主索長度變化圖研判主索預力的影響程度。以光達掃描進行全橋測量，並換算山川琉璃吊橋全橋各纜繩長度，除列出 105/11 本橋援建單位測量之資料供參考外（因測量與換算之標準不同，無法比較之），並與本橋 104/12 開放通行前及歷年光達掃描資料進行比較，由 3D LiDar 掃描結果顯



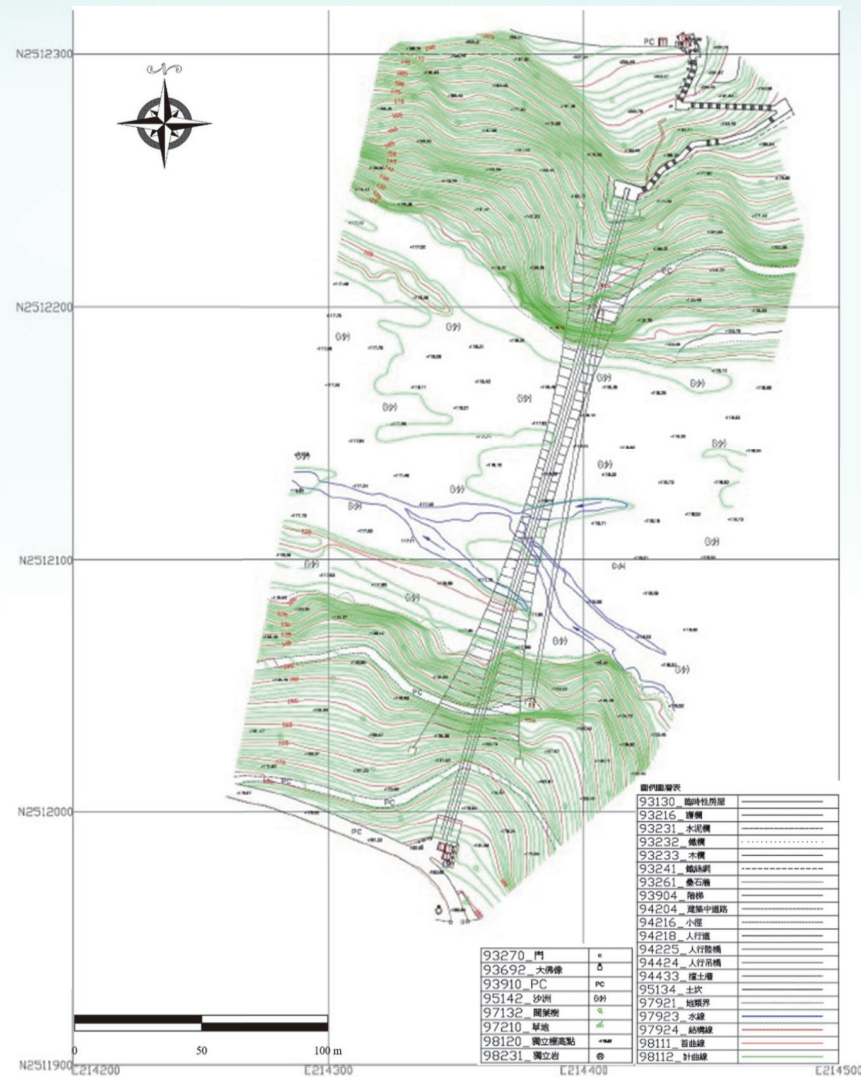


圖 13 本吊橋周圍 1/1000 地形圖(縮圖)

示，本橋主索增長約  $-31\text{ mm} \sim 39\text{ mm}$ ，其增長比例約為  $-0.012\% \sim 0.015\%$ （負表示縮短），因本橋之主索長達  $264\text{ m}$ ，因此，主索之長度變化量對主索預力無顯著影響；抗風支索增長約  $-43\text{ mm} \sim 51\text{ mm}$ ，其增長比例約為  $-1.02\% \sim 1.20\%$ ；垂吊索增長約  $-16\text{ mm} \sim 17\text{ mm}$ ，其增長比例約為  $-1.41\% \sim 1.47\%$ 。此外，考量本橋掃描作業二端可佈設測站之距離遠，測站佈設不易，致部份抗風索、抗風支索及垂吊索為吊橋其他構件或樹木所遮蔽，或距離過遠致點雲資料不易判讀，而造成掃描成果之誤差較大，因此抗風支索及垂吊索長度於此處僅供參考。繪製歷次掃描之主索長度變化圖，如圖 14 所示，顯示主索之長度變化不大，研判對主索預力尚無顯著影響。

### 4.3 即時監測系統

即時自動化監測包含「地錨監測系統」、「傾度盤監測系統」、「動態量測系統」、「伺服器資料庫（加速規）」、「瑪家端票亭太陽能系統」、「網路通訊模組」等。伺服器接收到現場監測資料時，以網頁方式直接呈現即時監測結果，維護管理單位可以使用一般電腦或智慧型手機以連結網路方式瀏覽，以達可隨時進行監測之目的。

#### 1. 地錨預力監測

吊床式吊橋其主索及抗風索皆利用預力地錨以錨碇於山谷兩側邊坡岩體上，無論是吊橋結構本體或地錨本身構造所造成地錨預

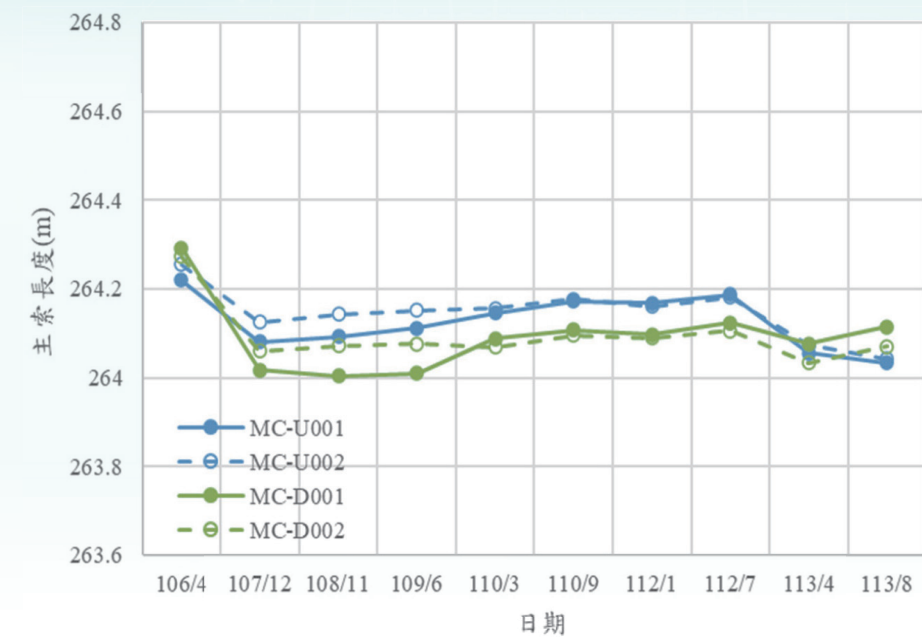


圖 14 主索長度變化圖

力的改變，皆攸關吊橋及兩側邊坡的穩定，因此地錨預力的即時監測為有效提供事先預警防災的必要手段，地錨監測配置包含瑪家端（文化園區側）、三地門端主索錨碇塊各 4 組地錨荷重計，透過資料擷取器、無線通訊單元與遠端伺服器對荷重計之受力狀況，進行自動資料擷取與傳輸，以監測地錨之預力變化如圖 15 與圖 16。

地錨荷重計安裝及測試完成後，即進行初值量測與設定，每支地錨之預力設計為 60 噸，而 S1 ~ S8 計 8 支地錨荷重計之初值分別為 S1：60.60 噸；S2：59.29 噸；S3：63.15 噸；S4：57.04 噸；S5：61.50 噸；S6：61.40 噸；S7：

60.95 噸；S8：61.90 噸。考量山川琉璃吊橋主索錨碇之地錨預力皆為 60 噸，因此，本計畫監測警戒值暫訂為地錨設計預力值之  $1 \pm 20\%$ ，由圖 17 與圖 18 可得知，地錨預力監測系統除瑪家端 S4 以外，於量測期間內皆正常穩定運作，112 年 10 月 ~ 113 年 12 月中旬之監測成果顯示山川琉璃吊橋之地錨預力監測數值皆小於監測警戒值，亦即橋梁處於穩定狀態。

#### 2. 無線加速規

本案採用無線三軸加速規安裝在吊橋主索

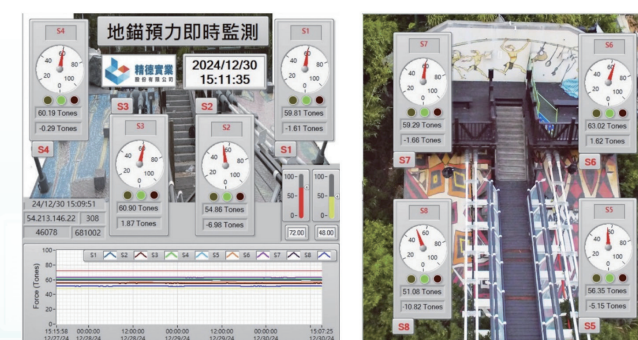


圖 15 山川琉璃吊橋地錨監測系統畫面

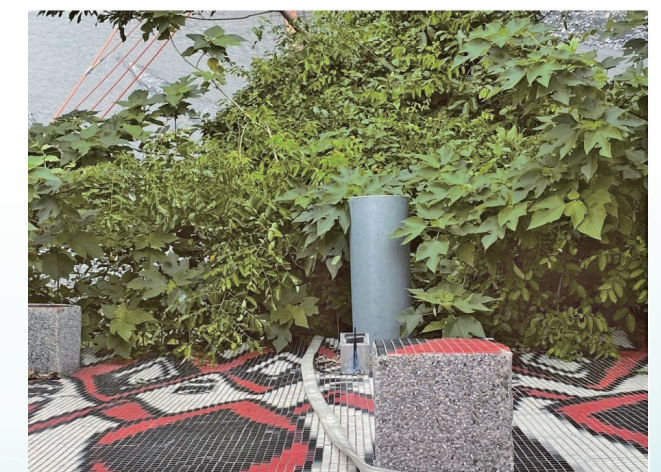
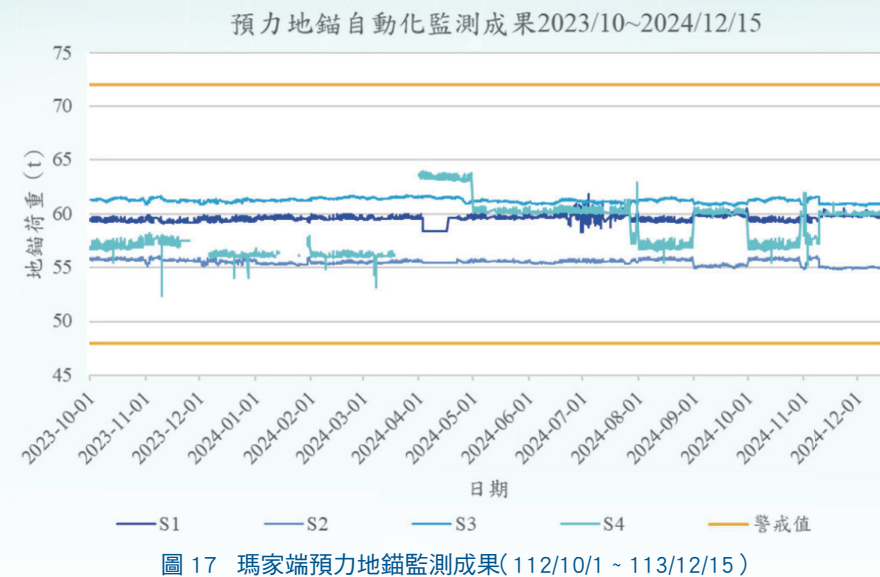


圖 16 山川琉璃吊橋地錨監測照片





鋼纜上進行無線動態量測，如圖 19 所示，總計安裝 6 個無線加速規，無線通訊距離約 100 m ~ 200 m，每日定時進行 3 次動態量測，取樣頻率為 200 Hz，每次取樣 200 秒執行快速富利葉轉換 (FFT)，所得頻譜解析度為 0.005 Hz。圖 20 為量測到之吊橋自然振動頻率，從頻譜上可以很清楚識別出前 3 個振動模態之頻率，而第 4 與第 5 自然振動頻率也可以在頻譜上找到。後續利用監測到之吊橋鋼纜振動頻率可進行鋼纜之拉力分析與預測，圖 21 顯示主索水平振動 (y 向) 可清楚觀察到兩類特徵；第一類為與鋼纜張力無關之橋體吊桿與質量所形成之單擺類



圖 19 加速規之現場安裝與監測照片

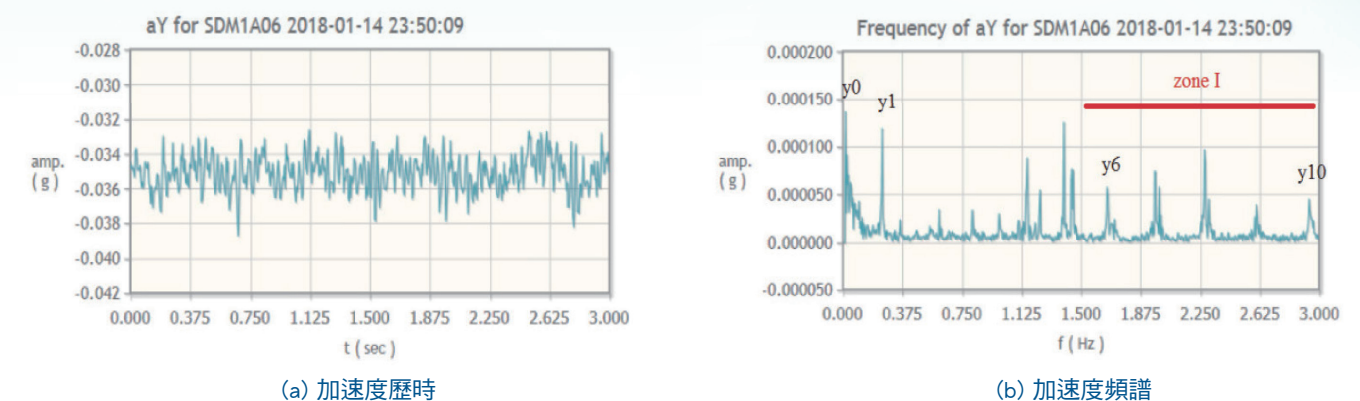
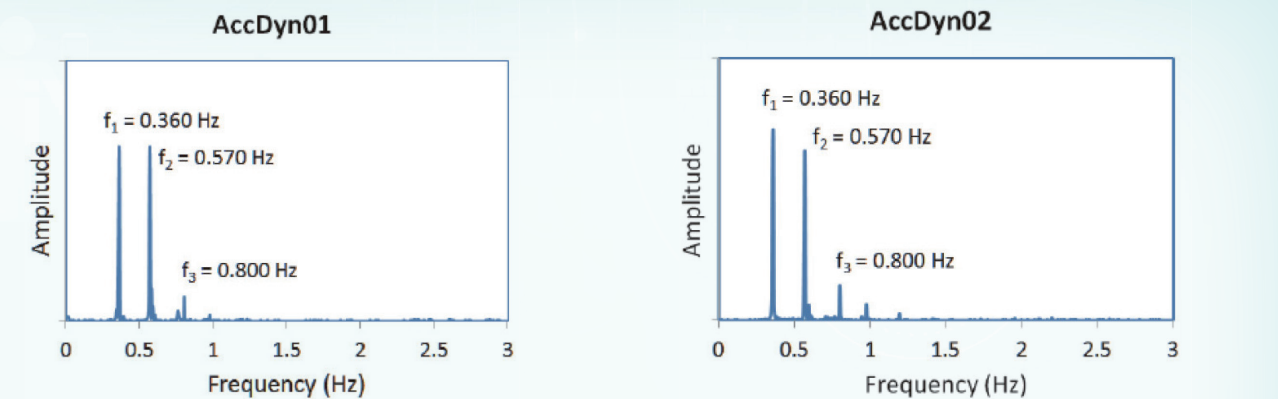


圖 21 典型 y 方向 (水平) 加速度歷時圖與頻譜圖

擺動訊號，標示為  $y_0$ ，此行為發生在極低頻；第二類為 x-y 平面上之直線鋼纜振動行為，標示為  $y_i$ ，i 代表振態序，此 x-y 平面之振動行為主要由主索張力控制。圖 22 顯示橋體垂直振動 (z 向)，可觀察到標示為 zone II 範圍內明確之連續規則尖峰，標註為  $z_i$ ，此為 x-z 平面之下垂傾斜鋼纜振動行為。此振動行為由主索及防震

索共同組合的張力控制，亦受抗風索系統影響，資料顯示具有振態超越的現象，因此判讀時需以對應之分析方式應對。此垂直向振動行為可反映整體吊牆縱斷面系統之幾何改變及支索束制變化之程度，輔以上述 y 向訊號所得主索資訊後，可做為分析與診斷吊橋整體及個別組合系統特徵的參考依據。

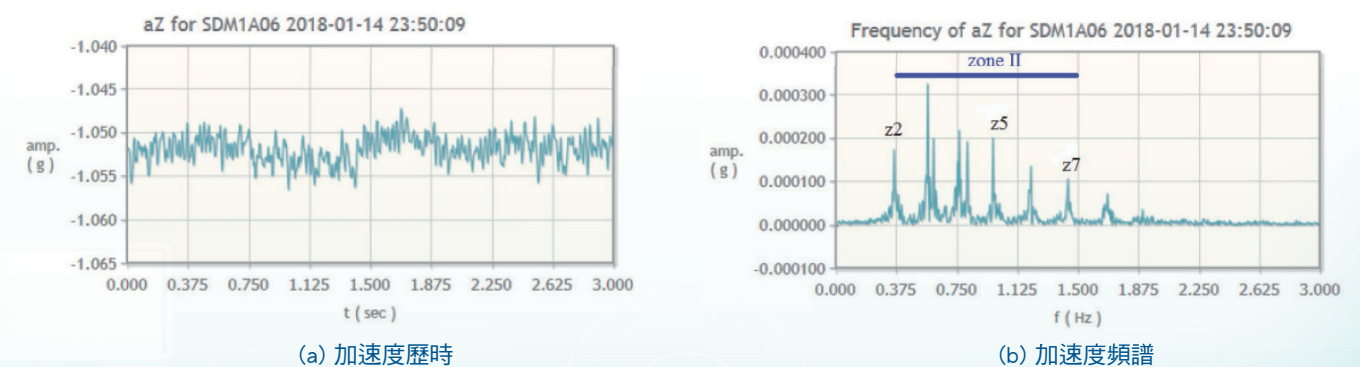


圖 22 典型 z 方向 (垂直) 加速度歷時圖與頻譜圖



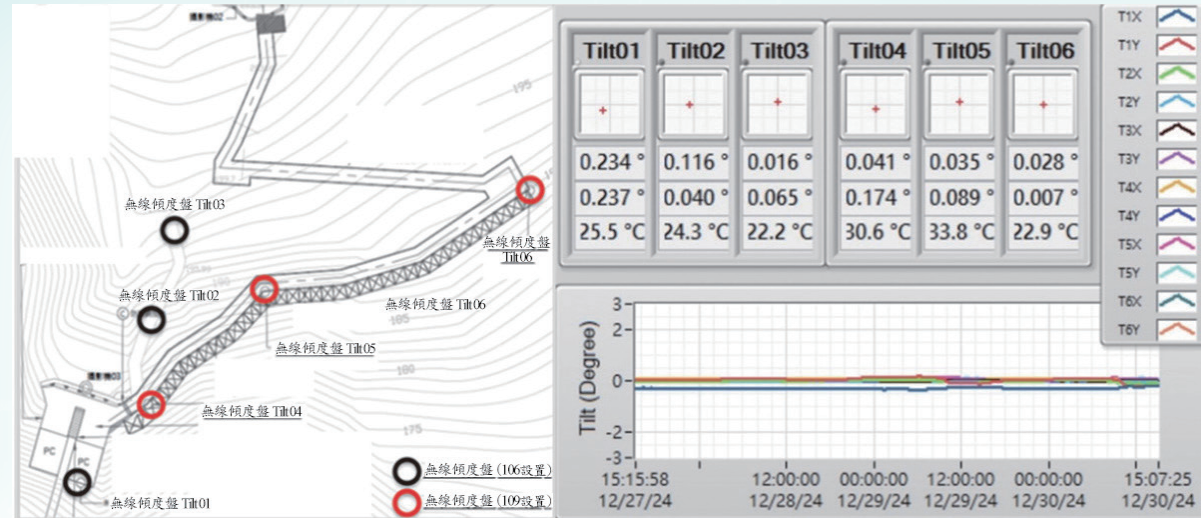


圖 23 傾度盤安裝位置（三地門端步道）與監測系統畫面

### 3. 無線傾度盤

於三地門端邊坡與步道設置 6 處傾度盤，其中 1 組安裝於三地門端主索錨碇塊，2 組安裝於舊木棧道基礎，3 組安裝於新步道基礎，其安裝位置圖如圖 23 及圖 24 所示，以即時掌握該邊坡與步道基礎之狀況，另依據「建築物基礎構造設計規範 (90.10.02)」表 - 解 4.4.1 角變量與建築物損壞程度，在考量本計畫傾度盤裝設於邊坡之步道，傾斜量易因邊坡表層坍滑而增加，故取  $\pm 8^\circ$  為警戒值、 $\pm 10^\circ$  為行動值，圖 25 與圖 26 顯



圖 24 無線傾度盤裝置照片

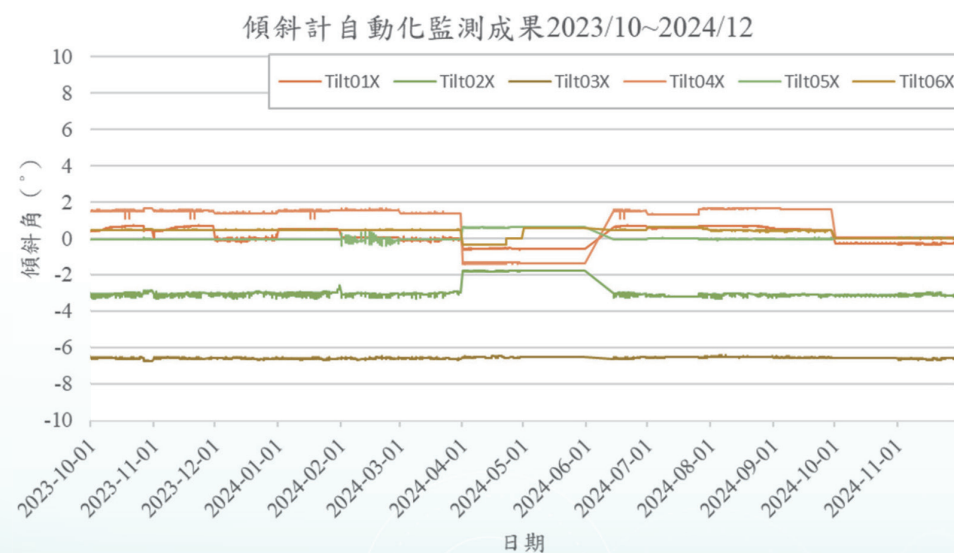


圖 25 傾度盤 x 向監測成果(112/10 ~ 113/12)

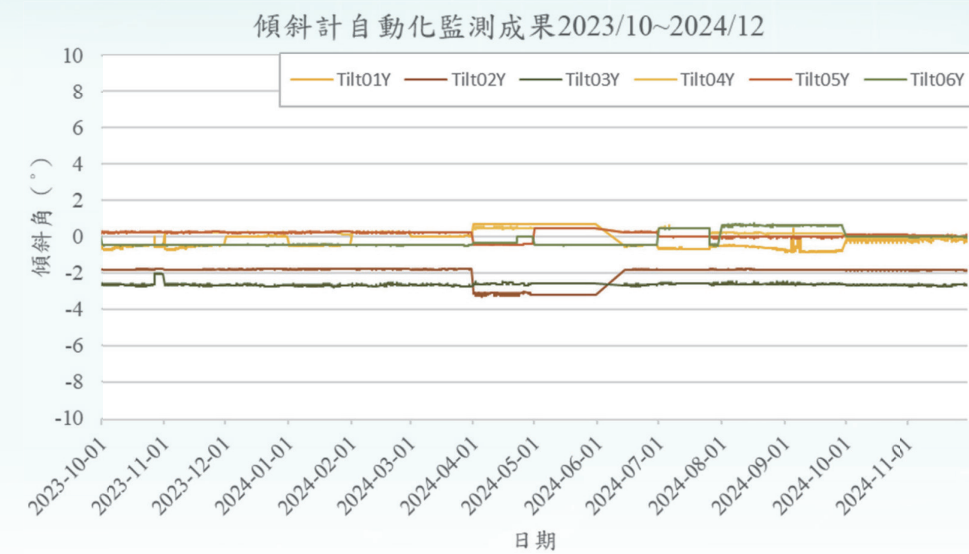


圖 26 傾度盤 y 向監測成果(112/10 ~ 113/12)

示 113/7/28 ~ 113/8/1 因通訊線路遭山區獼猴破壞致部份監測值異常跳動（約  $3.06^\circ$ ），惟各點位變異皆在  $1.57^\circ$  以內，經人員至現場檢視儀器紀錄原始檔及查看邊坡現況後，確認三地門端邊坡處於穩定狀態。

### 五、結語

山區跨河谷吊橋尤其是吊床式吊橋，其主索及抗風索多固定山谷兩側邊坡岩體上，因此就邊坡岩體而言吊橋為施加在邊坡上的載重，故於防災預警監測規劃除吊橋本體的結構安全監測外，亦須涵蓋兩側邊坡的大地安全監測，本文案例為國內少見整合吊橋結構與大地領域的安全監測，除利用常見的自動化監測儀器外，並運用 3D 雷射光達掃描及全橋測量的定期檢測資料，以掌握吊橋全生命週期的安全穩定情形供維護管理單位應用。

### 誌謝

「山川琉璃吊橋」檢監測暨維護計畫與三地門端新闢棧道路線評估計畫承蒙屏東縣政府交通旅遊處提供相關經費與執行中的行政支援，特此表達感謝之意。

### 參考文獻

- 偉域工程實業股份有限公司（2012），『三地門吊橋結構安全檢測委託技術服務案』地質鑽探工作報告書。
- 財團法人台灣營建研究院（2014），「屏東縣三地門吊橋新建工程」竣工報告書，中華民國紅十字會總會。
- 財團法人台灣營建研究院（2024），「111 年吊橋檢測及步道設施維護委託專業服務（後續擴充）」總結報告書，屏東縣政府。
- 財團法人台灣營建研究院（2017），「山川琉璃吊橋三地門端新闢棧道路線評估」總結報告書，屏東縣政府。
- 大宇地工技術有限公司（2014），「屏東縣瑪家鄉三地門吊橋工程地質調查及鑽探工程」地質鑽探報告書，屏東縣政府。
- 冠達工程顧問有限公司（2014），『屏東縣三地門吊橋新建工程』設計圖說。
- 昌佑工程技術顧問有限公司，『三地門吊橋周邊引道、琉璃意象及光雕計畫』竣工验收圖說。
- 摩爾土壤基礎材料試驗工程有限公司（2016），『山川琉璃吊橋旅客服務中心及景觀綠美化工程』地基調查報告書。



# 地下隧道工安監測之智慧應用

曾孝欽 亞新工程顧問股份有限公司 / 大地技師

黃士翊 鎧烽科技有限公司 / 負責人

陳文通 台灣電力公司輸變電工程處 / 副處長

王東海 台灣電力公司輸變電工程處北區施工處 / 副處長

謝明達 台灣電力公司輸變電工程處北區施工處 / 經理

余維文 台灣電力公司輸變電工程處北區施工處 / 經理

## 摘要

本文係以台電 161kV 大潭（甲）—梅湖管路統包工程（一工區）高風險施工項目，導入運用新型態之科技管理方式，提供更高標準之安全衛生措施案例。介紹推管工程採用之智慧安全監控系統，其系統功能包括即時影像、人員管制、控制中心、主動警報、4G 無線網路訊號、氣體偵測等。透過 4G 及 WiFi 架設，建置全覆蓋之網路環境，並以整合式之控制中心作為控管，用以進行安全衛生管理，達到人員管制、主動警報、氣體偵測、即時影像之功能，達到強化工安管理、降低施工風險之目標。

## 一、前言

本文係以 161kV 大潭（甲）—梅湖管路統包工程（一工區）設計階段導入電纜隧道工安監測智慧應用為例，考量本案之地下洞道工程屬局限空間作業場所，於推管工程中可能造成勞工暴露於缺氧、中毒、爆炸之作業風險，屬高風險施工項目，需特別注意管內施工人員之作業安全，故於推管作業進行之場域，規劃運用新形態之科技管理系統，實施雙向主動式安全管理系統，提供更高標準的安全措施。本文將介紹該系統架構、功能與實際應用情形，提供讀者作為相關案例之參考。

## 二、工程概述

台灣電力股份有限公司為提昇北部地區離岸風電併網容量及供電品質，依行政院核定之「離岸風電加強電力網」第一期計畫規劃新建 161kV 大潭（甲）—梅湖線。本線路由桃園市觀

音區大潭電廠（以下簡稱大潭 G/S）向東南至新竹縣湖口鄉梅湖一次變電所（以下簡稱梅湖 P/S），總長度約 27.8 公里，全線共分為兩個工區，並採統包方式辦理工程發包。本工程為第一工區，位於桃園市觀音區、新屋區、新竹縣新豐鄉、湖口鄉，自桃園市觀音區大潭 G/S 起，沿台 61 線，過大波溪後轉台 15 線，再轉至 117 縣道，最終沿湖口鄉德興路過德豐路後與第二工區交界處銜接，全長約 18 餘公里，如圖 1 所示。

本工程全線主要以明挖管路施設電纜，過河段則採用推管工法施作推管洞道。本工程共計 4 處推管洞道段，包含：穿越小飯壠溪、新屋溪及 114 縣道（下田溪）以及福興溪等。其中穿越小飯壠溪、新屋溪及 114 縣道（下田溪）須容納六回線電纜，採  $\Phi 2.4$  m 推管段；另穿越羊寮溪（福興溪）須容納八回線電纜，將採  $\Phi 2.0$  m 推管段上、下層配置（上、下層各容納四回線電纜），如圖 2 所示。



圖 1 本工程平面位置圖

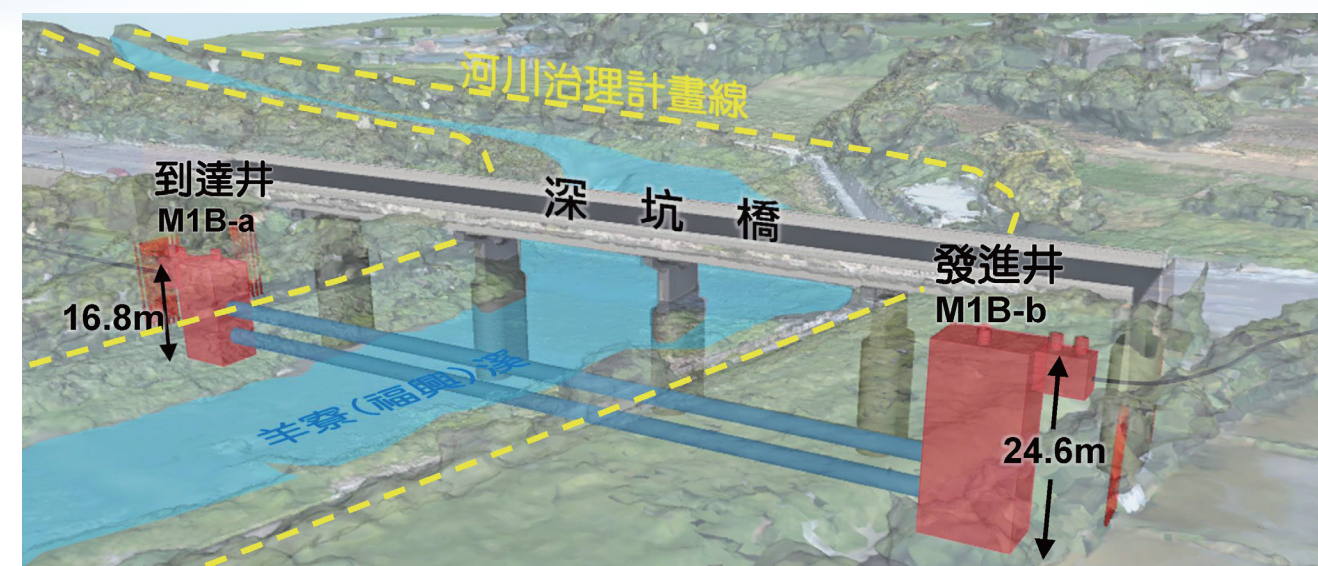


圖 2 福興溪電纜洞道示意

前述推管段兩側須設置直井以銜接明挖管路，其中穿越福興溪推管段直井（兼工作井）採壓入式沉箱工法施作，其餘推管工作井採鋼襯板擋土（配合降水及地盤改良）明挖工法施作，推管完成後再施作直井及電纜涵洞結構。

## 三、系統特色與功能

本案例藉由隧道內覆蓋率完整之網路、即時連接整合型基地台、資訊傳遞整合及隧道內外雙向溝通之控制中心，建構新型態科技應用之安全管理系統，達到人員管制、主動警報、氣體偵測、即時影像之功能。本系統特色及功能詳如圖 3 所示。

## 四、系統架構簡介

地下隧道由於環境阻隔，地面的 4G/5G/ 網路訊號難以到達隧道深處，可以透過無線網路橋接 / Mesh / 強波... 等技術，將隧道內佈滿無線網路訊號，讓隧道內的氣體偵測設備回傳資料到雲端，遠端工務所以及地面人員可以即時監看隧道內氣體資訊。

隧道施工時，地下隧道人員無法與外界通話聯繫，透過本系統，地下人員可以接收工務所警報，也可對外發出警報與通話。進入隧道前，可使用本系統在地面監看氣體指標，中控平台自動統計隧道內人員，以維護施工安全。





圖 3 系統特色與功能

本雙向主動式安全管理系統架構如圖 4 所示，只需於施工現場安裝包含：4G/5G 網路轉換器、氣體偵測人員定位器，工務所與施工人員即可透過工安 APP 或中控平台來查看氣體與人員定位資訊。相關管理系統組成與功能詳如表 1 所示。

本系統由五大部分組成，分述如下：

#### 1. 雲端伺服器

氣體與人員定位資訊皆儲存於雲端伺服器，可簡化施工現場與工務所設備，讓管理人員可以遠端查看隧道氣體資訊與人員定位。

表 1 雙向主動式安全管理系統組成與各功能

| 品項   | 功能               | 備註                               |
|------|------------------|----------------------------------|
| A    | 雲端伺服器            | 儲存氣體偵測數值、人員位置資訊                  |
| B    | 4G/5G 網路轉換器      | 傳送網路訊號至使用場域、串聯為單一域               |
| C    | 五合一氣體偵測人員定位器     | 網路傳送氣體偵測數值、燈光/聲音警示與工安 APP 協作人員定位 |
| D    | 工安 APP           | 觀看氣體資訊、傳送位置資訊發送/接收警報             |
| E    | 中控平台             | 觀看氣體資訊與人員位置發送/接收 APP 警報訊息        |
| 數量限制 | B、C、D、E 無數量限制    |                                  |
| 系統容錯 | A、B、C、D、E 各自獨立運作 |                                  |

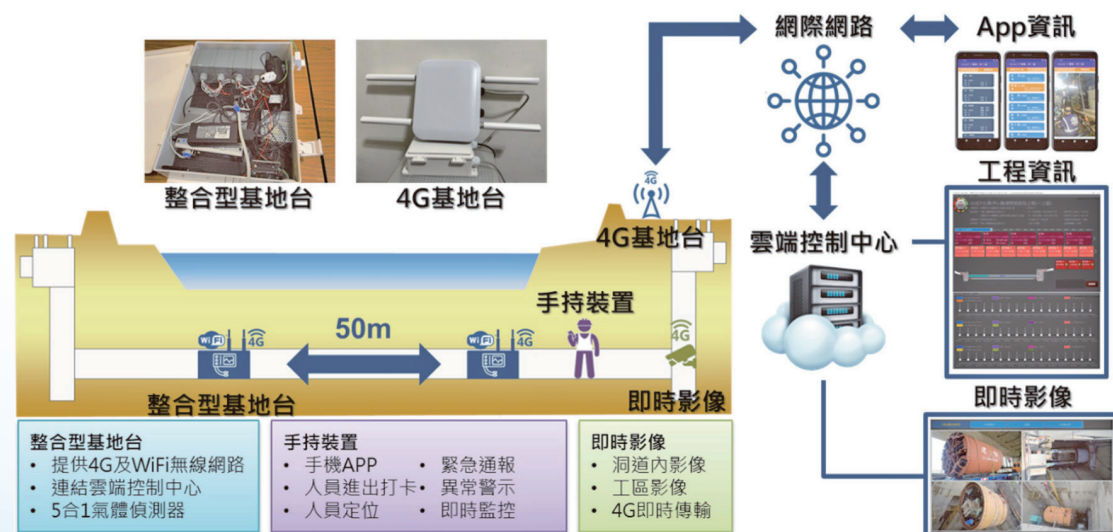


圖 4 系統架構圖

#### 2. 4G/5G 網路轉換器

負責將地面 4G/5G 網路訊號轉入地下隧道，讓隧道內透過網路訊號，即使隧道最深施工處，也可連上網路，確保施工人員與設備可與地面交換訊息。圖 5 是網路測速圖，整條隧道需通體測試，確保網路訊號均勻覆蓋，確認設備資訊可以即時回傳雲端伺服器。

#### 3. 五合一氣體偵測人員定位器

氣體偵測人員定位器透過網路，傳送資料至雲端伺服器，佈署氣體偵測人員定位器時，只需要提供電力，不需安裝其他線材，可簡化安裝工程。氣體偵測人員定位器必須採主動式氣體交換，以維持氣體偵測精準度，兼具防水潑濺與防塵，以耐受嚴苛施工環境。

當網路斷網時，氣體偵測人員定位器依然可以離線運作，可單機偵測氣體，氣體超標時提

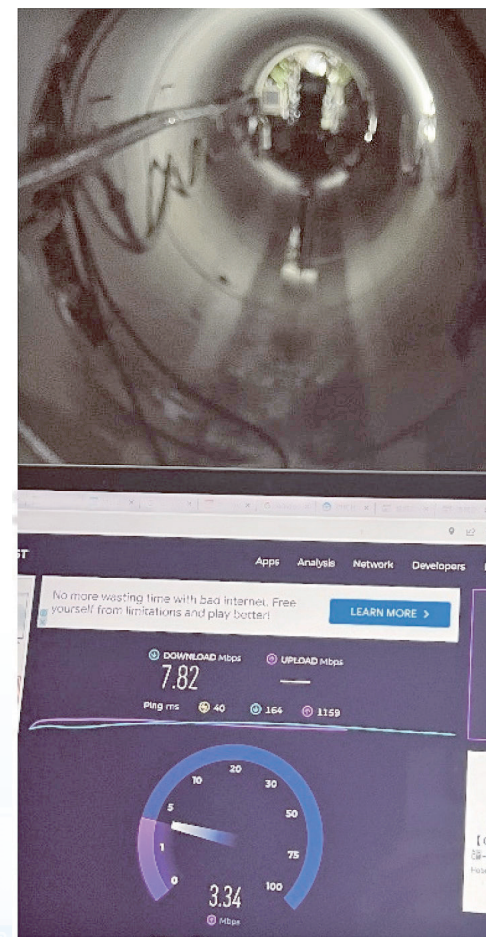


圖 5 隧道網路測速圖

供燈光與聲音警報。聲音警報可於 30 公尺外聽到，以維施工安全。

圖 6 與圖 7 為氣體偵測人員定位器實際安裝圖，可單人施工安裝，同時不影響施工空間與機具進出，圖中左中藍光代表氣體指標正常，施工人員可以藉由燈光顏色檢視氣體指標（紅光是氣體指標異常）。

隧道入口與地面距離 20 多公尺，實測氣體指標異常時，可在地面聽到隧道內氣體偵測人員定位器的警報聲，施工人員進入隧道前，可透過聲音，確認隧道氣體環境。相關氣體警報值設定如表 2 所示。



圖 6 氣體偵測人員定位器



圖 7 五合一氣體偵測人員定位器



表 2 氣體警報值

| 偵測氣體項目                 | 容許值          |
|------------------------|--------------|
| O <sub>2</sub> (氧氣)    | 18% 以上       |
| CO (一氧化碳)              | 35 PPM 以下    |
| CO <sub>2</sub> (二氧化碳) | 5,000 PPM 以下 |
| H <sub>2</sub> S (硫化氫) | 10 PPM 以下    |
| 其他可燃性氣體                | 爆炸下限值 30% 以下 |

#### 4. 工安 APP

施工與管理人員可使用手機 APP 觀看氣體與人員定位資訊，可於遠端即時獲取隧道資訊，如圖 8 所示。

工安 APP 可接收警報，也可發送警報到中控平台。工安 APP 定時將定位資訊回傳雲端伺服器，遠端管理人員可以透過工安 APP 或中控平台，得知施工人員於隧道位置。

圖 9 是工安 APP 發送警報介面，預設警報類型，使用者長按即可發送警報，無需打字，減少發送警報時間與複雜度。

#### 5. 中控平台

隧道氣體與人員定位資訊皆儲存於雲端伺服器，工務所可如圖 10 觀看氣體與人員定位資訊，自動標示人員於隧道位置。中控平台可以多套同時開啟，讓多位管理人同時多地觀看。當超標氣體發生時，或隧道內施工人員長時間沒移動，中控平台可以發出聲音警報與顏色警示，通知管理人員。此外，中控平台可標誌施工進度資訊，視覺化顯示整體工程進度，如圖 11 所示。



圖 8 工安 APP 氣體資訊



圖 9 工安 APP 發送警報

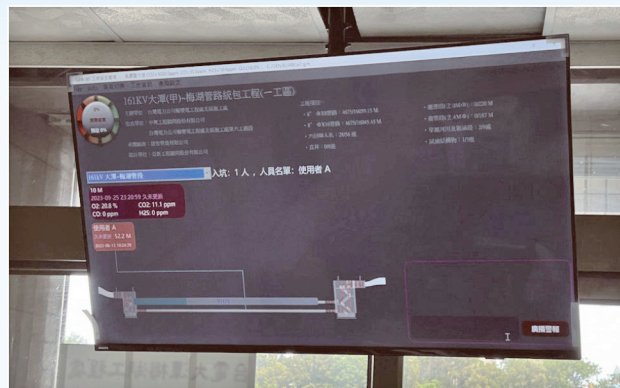


圖 10 工務所之中控平台



圖 11 整體進度管控

### 五、系統成效

經本工程實際應用後，初步達成以下成效：

#### 1. 遠端警報

透過工安 APP 與中控平台，可以多人多地同時監看隧道氣體與入隧道人員。

工務所人員可以透過中控平台發送警報給遠端工安 APP，中控平台也可接收遠端工安 APP 的警報。

#### 2. 現場警報

氣體偵測人員定位器有燈光與聲音警示，現場人員可藉由燈光與聲音，遠端監看隧道氣體環境。

#### 3. 安裝便利

只需提供電源，就可讓氣體偵測人員定位器運作。可單人安裝佈署，不影響施工機具運作。

#### 4. 智能警示

本系統自動識別氣體指標、人員定位，提供聲音／燈光／畫面警示，免除人力維護。

#### 5. 隧道內通訊

本系統內施工人員可與地面通訊聯絡，確保施工安全。

#### 6. 無數量限制

本系統智能識別，可多隧道於同一中控平台監看，氣體偵測人員定位器數量無上限，可適用各種隧道長度。

本系統自隧道施工起即逐步安裝相關設備，在歷經泥水噴濺、環境溫度及局限空間等種種嚴苛的施工條件下，設備均可持續良好運作，施工完成後亦可成功拆除並投入下個工程使用（如圖 12 所示），充分顯示其設備之耐候性與耐用性。



圖 12 本案例設備卸除後照片

### 六、結論

本案成功導入智慧化工安監控系統於 161kV 大潭（甲）－梅湖統包工程推管段施工期間，透過即時影像、人員管制、主動警報與氣體偵測等整合功能，有效提升施工現

場之安全防護層級，確保隧道內外通訊順暢與資訊透明。

本系統應用 4G/5G 無線網路與雲端技術，建立完整之網路環境，並整合工安 APP 與中控平台，達到遠端多點即時監控與警示功能，實現高效率且低人力依賴之安全管理模式。

採用之氣體偵測人員定位器具備高頻率監測與聲光警報功能，即便在斷網狀態下亦可持續離線運作，確保突發狀況下仍能即時發出警示，提升施工人員作業期間之防災應變能力。

系統安裝簡便，僅需電源即可運作，且不影響推管設備與作業動線，具備高耐候性與重複使用性，顯示其於地下工程環境下具備實用與經濟價值。

經實際應用驗證，本系統可適用於多隧道及不同長度之地下工程場域，具備良好之擴充性與操作彈性，未來可作為推廣智慧工安管理系統之參考範例。

### 誌謝

亞新工程顧問股份有限公司受建智營造有限公司委託辦理「161kV 大潭（甲）－梅湖管路統包工程（一工區）」細部設計服務工作，本計畫執行期間承蒙台灣電力股份有限公司輸變電工程處北區施工處及建智營造有限公司之協助，特表謝忱。本文為本工作的成果之一，承蒙台灣電力股份有限公司輸變電工程處北區施工處、建智營造有限公司與亞新工程顧問股份有限公司同意發表，在此一併表達謝意。

### 參考文獻

- 「161kV 大潭（甲）－梅湖管路統包工程（一工區）」丁類危險性工作場所申請書，建智營造有限公司，民國 111 年 7 月。
- 「161kV 大潭（甲）－梅湖管路統包工程（一工區）」技術專刊，建智營造有限公司，民國 114 年 4 月。



# 人工智慧模型應用於離岸風電 CPT 數據異常檢測

許景瀚 國立臺灣科技大學營建工程系 / 碩士生

李安叡 國立臺灣科技大學營建工程系 / 教授

陳立軒 萬鼎工程公司 / 工程師

江承家 萬鼎工程公司 / 大地技師

## 摘要

近年來，台灣積極推動離岸風電的開發，對於海底基礎設計之安全與效益有更嚴謹的要求。圓錐貫入試驗（Cone Penetration Test, CPT）因具備高效率與連續量測優勢，被廣泛應用於海域土層調查。然而，受到儀器狀態、海床環境變動及施工操作等因素常導致數據出現各種異常值（outliers），進而影響土層判釋與基礎設計。傳統依賴人工或簡單統計方法篩選異常，在面對數十口鑽孔與數萬筆記錄時，不僅耗時，更難以保證一致性。

本研究針對 CPT 量測資料，結合多尺度卷積神經網路與雙向長短期記憶網路（Long Short-Term Memory, LSTM），以建立自動化的異常偵測機制。首先對 CPT 原始數據進行前處理（包含標記整合、缺失值補足及資料標準化），透過多尺度卷積層提取局部與全局特徵，再利用雙向 LSTM 捕捉時間序列中的長期依賴性，最後經融合分類層進行二分類判斷。研究結果顯示，在辨識多種潛藏或非典型異常方面表現良好，可作為離岸風電土層調查的輔助工具，提升地質參數的可信度及後續工程設計的安全性。

此外，該技術為離岸風電基礎設計、荷載分析與數值模擬提供了更穩健的數據支援，並展現出與即時監測、預警系統及多源數據融合整合的應用潛力。

## 一、前言

台灣近年來積極推動離岸風電發展，目前已進入第三階段的大規模開發。然而，海域環境的複雜性與不確定性，使得風力機組基礎設計必須依賴詳細且可靠的地層資訊進行評估。在離岸風電場場址調查中，圓錐貫入試驗（Cone Penetration Test, CPT）因具備高效率、

連續量測能力與直接獲取地層參數的優勢，成為國際間廣泛應用的地質勘測技術。但隨著鑽探深度、海床條件與操作因素的多元化，CPT 數據在測試過程中常出現異常值（如數值偏高、偏低或波動劇烈），若未能及時辨識並剔除，將可能影響後續土層判釋與基礎設計，甚至引發工程安全隱患。

傳統上，工程師多以人工判讀或利用簡單統計方法來識別潛在異常值。然而，離岸風電場常涉及數十口鑽孔及數萬筆 CPT 記錄，手動判讀不僅耗時，更難以確保判斷的一致性與準確性。此外，一些非典型異常（如局部硬層存在或鑽桿加長過程中引起的高值飆升）可能未超出傳統設定的「容許範圍」，進而難以察覺。因此，如何有效且自動化地檢測與剔除 CPT 異常數據，成為大地工程與風電產業亟待解決的重要挑戰。

近年來，人工智慧（Artificial Intelligence, AI）與機器學習（Machine Learning）技術在地質與大地工程領域逐步崛起。其中，長短期記憶網路（Long Short-Term Memory, LSTM）因其在處理時間序列資料與捕捉長期依賴關係上的優勢，受到廣泛關注。LSTM 模型能夠學習深度與貫入阻力、摩擦阻力及孔隙水壓等測量值之間的複雜關聯，自動識別出不易察覺的異常模式。若能將 LSTM 模型成功導入 CPT 異常值檢測，不僅可大幅降低人工審核的工作量，亦能提升數據篩選的準確性與穩定性，進一步確保地層剖面資料的可靠性。這對於離岸風電基礎設計、荷載分析及數值模擬（如 PLAXIS 3D 模擬）等環節均具備顯著助益。

## 二、CPT 數據與異常成因

### 2.1 背景

圓錐貫入試驗（Cone Penetration Test, CPT）在離岸風電場環境中，通常同時量測錐尖阻抗（Cone Resistance）、局部摩擦（Friction Resistance）與孔隙水壓（Pore Water Pressure）這三項主要參數（參見圖 1）。

這些量測值可幫助工程師瞭解海床土層的強度與滲透特性，並進一步評估風機基礎的設計需求。然而，由於施工方式與海域環境等因素干擾，CPT 數據時常出現各類異常值。

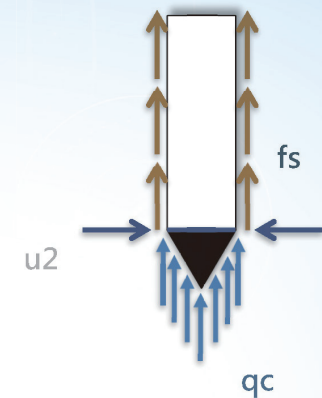


圖 1 三項量測參數的概念示意

### 2.2 常見異常類型

#### (1) 清孔效應

在 CPT 鑽探過程中，工程人員為進行儀器校正或保養，往往會暫停推進並重新開始量測，導致錐尖阻力、局部摩擦與孔隙水壓在重新啟動時出現明顯跳躍或歸零現象（CPT-Guide-6th-Edition-2016）。若後處理時未剔除或調整，可能誤判地層突然變硬或變軟。

#### (2) 鑽桿加長效應

在多階段鑽探中，鑽桿逐步加長會改變探頭與地層之間的力學傳遞。將造成錐尖阻力、局部摩擦或孔隙水壓的局部跳變或飆升，而若未在後處理階段明確識別與修正，可能把加長效應誤解成地層的真实突變。

#### (3) 硬質地層的影響

當 CPT 探頭遇到局部硬土層、礫石或岩塊時，錐尖阻力（Cone Resistance）往往會呈現出極端高值；相反，在鬆軟土層中，則可能顯示偏低 Lunne *et al.* [2]。硬質地層引起的異常數據既可能反映出地層的不均勻性，也可能是由探頭與硬質物質碰撞後瞬間反饋造成的。

### 2.3 異常值對後續影響與風險

CPT 數據中的異常值，若未能及時剔除或校正，將直接影響土層分層的精度及基礎參數的估算，進而對工程設計產生重大影響。



異常數據可能導致對基礎承載力的評估出現顯著偏差：

- **基礎承載力評估偏差**：過高的阻力值可能使工程師誤判土層具備更高承載力，而過低的數據則會導致設計過於保守，進而影響風機基樁設計。
- **工程風險與成本增加**：過於保守的設計參數不僅會增加施工材料費用與工期，同時也提高了工程整體風險。精確識別並修正異常數據是降低工程風險與成本的重要前提。

綜合上述可見現有方法在識別 CPT 數據異常方面仍存在不足，尤其是在大規模離岸風電場環境下，傳統人工及簡單統計方法難以保證數據處理的一致性與準確性。這使得利用人工智慧技術來進行自動化異常檢測成為解決該問題的潛在方向，亦為本研究後續工作奠定了堅實的理論基礎。

### 三、訓練資料前處理

在進行深度學習模型之訓練前，必須先對原始圓錐貫入試驗（Cone Penetration Test, CPT）量測資料進行整理與清洗。本研究之離岸風電 CPT 量測作業中，探頭每推進 2 公分即自動記錄一次量測結果，包括錐尖阻力（Cone Resistance）、局部摩擦（Local Friction）與孔隙水壓（Pore Pressure）等三項參數。圖 2 為資料的範例，每一列對應一個量測深度。經過初步蒐集後，所有量測數據會依序進行前處理（包含人工標記異常值整合、缺失值處理、以及資料庫分割），以確保後續模型訓練與評估更具精準度與穩定性。

|    | A              | B                  | C                 | D                   |
|----|----------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| 1  | Test length[1] | Cone resistance[2] | Local friction[3] | Pore pressure u2[6] |
| 2  | 0.02           | 0.2110057          | 0.000679028       | 0.001040422         |
| 3  | 0.04           | 0.2336001          | 0.000752194       | 0.000240535         |
| 4  | 0.06           | 0.2802345          | 0.000972212       | -0.001458868        |
| 5  | 0.08           | 0.3253186          | 0.00107046        | -0.00056505         |
| 6  | 0.1            | 0.3764363          | 0.002070483       | -0.001743525        |
| 7  | 0.12           | 0.3664641          | 0.001977563       | 0.001172788         |
| 8  | 0.14           | 0.3999211          | 0.002435143       | -0.002080844        |
| 9  | 0.16           | 0.4100189          | 0.002489076       | 6.40479E-05         |
| 10 | 0.18           | 0.4123757          | 0.002145858       | -0.000293197        |
| 11 | 0.2            | 0.3977             | 0.002019799       | 0.00711216          |

每兩公分產出一筆資料

圖 2 CPT 數據示意圖

### 3.1 人工標記異常值處理

在離岸風電 CPT 量測作業後，工程師透過「\*」符號將疑似異常的測點或深度位置記錄下來，如圖 3 所示。此類異常通常由各種非穩定因素造成，例如：

- **施工暫停與清孔**：重新開鑽時可能導致錐尖阻力或孔隙壓力瞬間跳躍；
- **鑽桿加長或接頭鬆脫**：機械操作造成間歇性的數據偏離；
- **硬層或礫石含量突變**：引發極端高值，明顯高於鄰近土層分布。

將上述標記整合用於後續的模型訓練，研究採用以下步驟：

#### 1. 人工標記去除與轉換

若該筆資料含有人工標記，則於數據中賦予 1（表示異常），否則為 0（表示正常）。

#### 2. 異常標籤

數據隨後成為監督式學習的真實標籤，使得後續模型能夠學習「人為判定」的異常模式，對潛在不穩定測值進行自動化判讀，如圖 3。

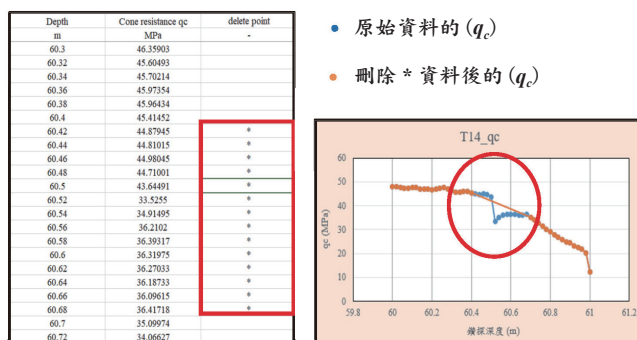


圖 3 CPT 數據的結構和異常點的分布

### 3.2 缺失值處理

由於海域環境複雜及儀器操作可能暫停，CPT 紀錄中偶爾會產生缺失值。若未處理，模型可能在讀取序列時產生錯誤或引入不合理的中斷。本研究採用以下策略：

#### 1. 線性插值（Linear Interpolation）

線性插值是一種常見的數值方法，用於填補相鄰測點之間的缺失數據，確保土層性質隨深度變化的連續性。在地質與土壤力學分析中，維持測試數據的平滑性有助於提高模型計算的準確度。

#### 2. 前後值填補

當數據序列的開頭或末端存在缺失值時，線性插值無法補足這些數據。因此，使用前向填補與後向填補方法，以最近的有效值延伸填充缺失數據，確保深度數據完整且不影響模型計算。

#### 3. 缺失數據標記

為使模型能夠識別人工填補的數據，本研究在填補後增加異常標記（Missing Flag）。凡經過線性插值或前後填補的數據，均標記為 1，原始測值則標記為 0。這樣，模型在學習時能區分填補數據與實測數據，並避免將填補值誤認為真實測量結果。

標記方式為原始測值標記為 0，插值／填補值標記為 1 讀取成異常值。

經此處理，不但保留了測試深度的實際分布，也減少空值影響模型訓練的可用樣本量。

### 3.3 資料集分割

為了評估模型在不同階段的學習及泛化能力，本研究依照常見做法，將收集到的 CPT 資料集依 7:1:2 的比例拆分為「訓練集（Train）」、「驗證集（Validation）」與「測試集（Test）」三部分。

- Train (70%)**：提供模型主要的學習樣本；模型於此資料上反覆更新參數以降低預測誤差。
- Validation (10%)**：用於調整超參數（hyperparameters）並監控是否發生過度擬合（overfitting），亦可輔助早期停頓（early stopping）策略的判斷。
- Test (20%)**：最終評估模型在未見資料上的泛化能力，確保研究結果的客觀性與可信度。

如此分割方式符合大多數深度學習應用的最佳實務，亦能維持訓練效率與評估嚴謹度間的平衡。

## 四、LSTM 理論與應用

### 4.1 LSTM 理論基礎

#### 4.1.1 RNN 面臨的挑戰

傳統全連接神經網路（Feedforward Neural Network）在處理時間序列數據時，無法捕捉各時間步之間的依賴關係，導致模型難以反映數據的動態變化。為解決此問題，循環神經網路（RNN）引入隱藏狀態，使得前一時刻的資訊可以傳遞到後續時間步。然而，Bengio *et al.* 指出 [3]，當序列過長或包含複雜長期依賴時，RNN 由於梯度消失或梯度爆炸問題而難以學習有效特徵，這使其在實際工程應用中表現不佳。

#### 4.1.2 LSTM 的創新與閘門機制

針對 RNN 的不足，Hochreiter 與 Schmidhuber 於 1997 年提出了 LSTM 模型 [4]。LSTM 引入了細胞狀態與多重閘門（遺忘閘、輸入閘、輸出閘），以靈活控制資訊的保留與更新，從而有效防止長距離傳遞過程中關鍵資訊的丟失。尤其是遺忘閘，使模型能根據當前輸入與過往記憶自動調整資訊保留比例，從而使得模型在面對長序列數據時仍能保持穩定擬合效果。此外，為進一步提升模型對序列上下文的捕捉能力，本研究採用雙向 LSTM，從正向與反向同時學習數據特徵，以彌補單向結構在提取隱藏依賴性時可能的不足。

#### 4.1.3 LSTM 與 CPT 異常偵測關係

離岸風電 CPT 測試數據在深度方向上連續記錄錐尖阻力、局部摩擦與孔隙水壓，但由於環境變化、儀器不穩與地層不均的影響，數據中常混雜雜訊與異常值。傳統統計方法或基本機器學習技術往往無法有效捕捉這些非典型異常，而 LSTM 擁有強大的時序學習與長期依賴捕捉能



力，可結合前後趨勢進行更精確的異常判斷。當某一測點出現異常時，雙向 LSTM 可利用正反向信息更全面地反映內在關聯性，從而顯著提高檢測準確率 [5]。

## 4.2 模型架構設計與參數設定

混合模型由三大模組構成：多尺度 CNN 層、雙向 LSTM 層以及融合分類層，各部分設計均基於 CPT 數據的實際特點與工程需求，如圖 4。

### 4.2.1 多尺度卷積層

為捕捉 CPT 數據中不同尺度的局部特徵，本研究採用多組卷積層，卷積核尺寸分別為 3、5 與 7 個連續點的範圍。

- 卷積核尺寸：尺寸 3 對局部細微變化敏感，而尺寸 7 有助於抽取較大範圍的結構性趨勢。多尺度設計使得模型在局部與全局特徵提取間達到平衡，但若卷積核過大則可能引入噪聲與計算負擔 [6]。
- 濾波器數量：每層濾波器數量設定在 64 個，既能充分反映數據豐富性，又避免過多參數導致過擬合與資源浪費。這一設計經過反覆實驗調整，以確保模型的表達能力與運算效率。

### 4.2.2 雙向 LSTM 層

經過多尺度卷積層後，特徵經由雙向 LSTM 層進行時序依賴學習。

- LSTM 單元數量：本研究選擇中等規模的單元數量（128 單元），既能捕捉數據中隱含的長期依賴，又避免因過多單元而增加模型複雜度與運算成本。
- 激活與正則化：採用 ReLU 激活函數與 L2 正則化，以確保學習過程穩定並防止數值波動，同時維持模型的良好性能。

### 4.2.3 融合與分類層

在 LSTM 層之後，全連接層進行特徵融合與分類決策。

- 全連接層與 Dropout：全連接層將高維時序特徵進一步整合，並引入適中比例的 Dropout 以防止過擬合。若 Dropout 過高則可能損失有用資訊；過低則無法抑制過擬合。
- 輸出層與損失函數：輸出層採用 Sigmoid 激活函數，輸出異常檢測概率。為解決 CPT 資料中類別不平衡問題，使用自定義 Focal Loss，其參數  $\gamma$  與  $\alpha$  需在提高難分類樣本識別與兼顧正常樣本資訊間取得平衡。

## 4.3 模型設計總結與應用

本模型結合多尺度卷積神經網路（CNN）與雙向長短期記憶網路（BiLSTM），以提高離岸風電 CPT 數據的異常檢測能力。多尺度 CNN 透過不同大小的卷積核提取局部與全局特徵，強化模型對異常模式的識別能力。BiLSTM 則利用雙向結構捕捉時間序列的長期

依賴，提升對數據變化趨勢的理解。最終，融合層將 CNN 和 BiLSTM 的特徵綜合，確保模型在高噪音與非典型異常條件下仍能保持穩定性與準確性。

模型設計基於離岸風電 CPT 數據的特性，並參考 Hochreiter & Schmidhuber、Malhotra *et al.*、Goodfellow *et al.* 等人的研究成果進行優化 [4,5,7]。結果顯示，該方法能有效識別異常數據，提升檢測準確率與穩健性，為離岸風電地基工程提供可靠的數據分析支援。

## 五、實驗結果與分析

### 5.1 模型概要與訓練配置

本研究所提出之 CMC\_LSTM 模型結合了多尺度卷積層（與雙向 LSTM（Bidirectional LSTM）），並在後端透過全連接層（Dense Layer）輸出二分類結果。表 1 統整了模型的主要結構與參數量，顯示總參數量約 350,017。該模型良好平衡。為解決異常樣本相對稀少的問題，本研究結合了類別權重調整與 Focal Loss 策略，以提升模型對於難分類樣本的學習效果。

表 1 CMC\_LSTM 模型結構與參數

| 層級        | 組件            | 設定                                                      |
|-----------|---------------|---------------------------------------------------------|
| 總參數量      |               | 350,017                                                 |
| 類別權重調整    |               | {0: 0.5659, 1: 12.8772}                                 |
| 輸入層       | Input         | 維度：(None, 20, 4)                                        |
| 多尺度卷積層    | Conv1D(三組)    | Filters = 64, Kernel Sizes = [3,5,7], Activation = ReLU |
|           | 批次正則化         | 加速訓練並提高模型穩定性                                            |
|           | 最大池化          | 用於降維並提取關鍵特徵                                             |
| 雙向 LSTM 層 | BiLSTM        | Units = 128, 雙向合併後輸出維度 = 256                            |
| 全連接層      | Dense Dropout | 神經元數 = 64、防止過擬合                                         |

### 5.2 訓練過程與收斂情形

本研究透過早期停頓（EarlyStopping, patience = 5）與模型檢查點機制，於驗證集損失表現自動儲存最佳模型權重，從而有效避免過長訓練後的過擬合與性能退化。圖 5 展示了模型在 30 個 Epoch 中的訓練損失與驗證損失變化情形，主要觀察點包括：

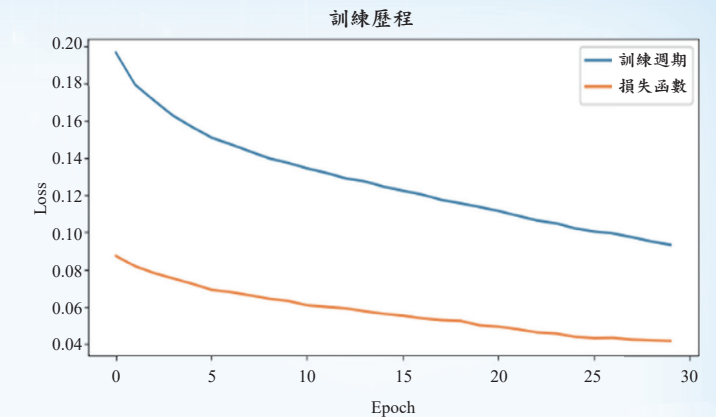


圖 5 CMC\_LSTM 的訓練與驗證損失

1. 初期損失快速下降：在前 5 個 epoch 中，模型對基礎特徵有初步掌握，驗證損失由 0.0875 逐漸下降至約 0.0694。
2. 中後期持續優化：隨著 epoch 增加，模型逐步修正權重，最終在第 30 個 epoch 達到最小驗證損失約 0.0419，顯示整體收斂良好。
3. 訓練與驗證損失趨勢一致：在全程訓練過程中並未出現嚴重的過擬合或震盪現象，說明採用 Focal Loss 與適度的 Dropout/L2 正則化能維持模型穩定性。

### 5.3 閾值動態搜尋

為了兼顧精確率與召回率的平衡，本研究在驗證集上針對不同閾值進行 F1-Score 的動態搜尋，最終選擇閾值約 0.58 作為判斷異常的標準。此閾值可在防止誤報與避免漏報之間取得相對穩定的折衷。

### 5.4 指標評估 (Metrics)

為全面評估模型在異常偵測任務中的性能，研究同時採用了以下指標：

- 正確率：衡量模型整體預測正確率。
- 精確率：重視模型判定為異常時的準確性，對工程中避免誤報至關重要。
- 召回率：反映模型檢出所有真實異常的能力，特別適用於安全監控場景。

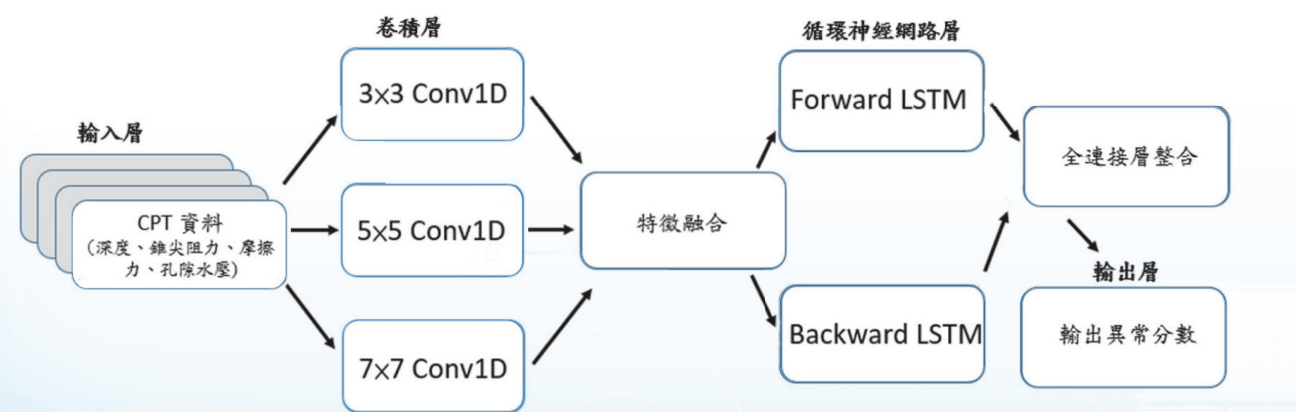


圖 4 模型架構示意圖



- F1 分數：綜合 Precision 與 Recall 的調和平均，能較全面反映模型性能。
- AUC：衡量模型在不同閾值下區分異常與正常樣本的能力，AUC 越接近 1 表示區分效果越好。

### 5.5 測試集評估結果

在測試集階段，CMC\_LSTM 模型於閾值 = 0.58 下獲得以下主要指標，如表 2。

混淆矩陣顯示模型對正常與異常樣本皆有不錯的判別能力，其中對異常類別的召回率達到七成以上，仍有進一步優化空間。然而整體曲線下面積（AUC）高達 0.93 以上，意味著在不同判斷閾值下仍能維持良好的區分度。此結果也反映出多尺度卷積架構與雙向 LSTM 協同學習，能有效提取 CPT 數據中的深層特徵與序列依賴性，大幅提升了異常偵測的精準度，圖 6 為測試集中人工標記異常（左）與模型預測異常（右）的比較示意圖。

表 2 CMC\_LSTM 模型評估指標

| 正確率    | 精確率    | 召回率    | F1 分數  | AUC    |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.9391 | 0.7647 | 0.7297 | 0.7468 | 0.9368 |

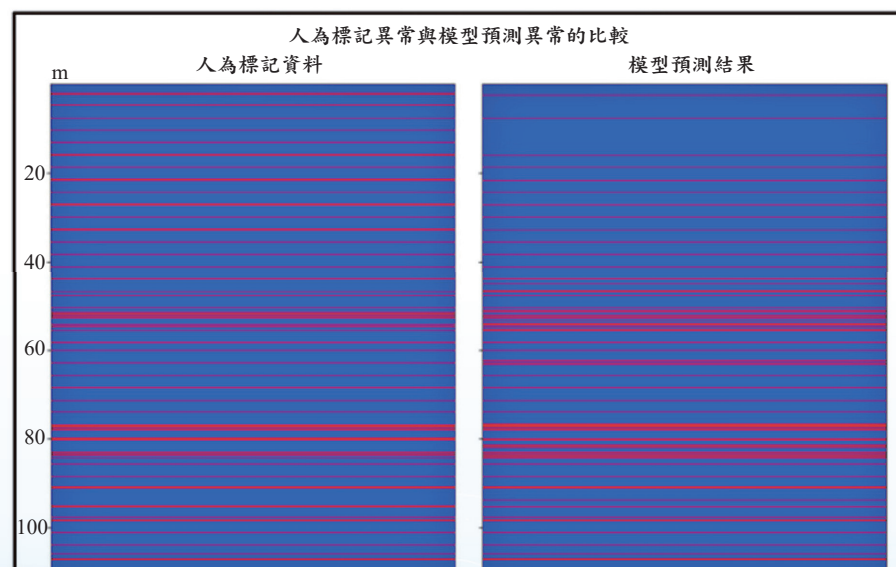


圖 6 人工標記異常（左）與模型預測異常（右）深度位置的示意圖

### 5.6 結果討論

1. **高 AUC 表現**：模型在不同閾值下均具備良好的異常／正常區分能力，對於工程應用可根據需求調整閾值。若更重視安全性，可提高 Recall（即降低閾值），但需容忍較高的誤報率。
2. **召回率與精確率平衡**：F1-Score 為 0.7468，顯示本研究透過 Focal Loss 與權重調整在平衡 Precision 與 Recall 上取得不錯的效果；但若未來應用於極端安全場景，仍可再行優化以提高 Recall。
3. **多尺度 CNN 與雙向 LSTM 結合**：實驗結果佐證了多尺度卷積對局部特徵的敏銳捕捉，以及雙向 LSTM 在跨深度依賴學習上的優勢，兩者結合在離岸風電 CPT 資料的高雜訊情境下，能降低模型對異常樣本的漏判。
4. **後續改進方向**：若需要進一步提升異常檢出率，可考慮擴充資料量、調整序列長度、加入更多特徵（如施工暫停或儀器加長的記錄）或採用多層 LSTM 結構；同時也需兼顧模型複雜度與計算資源的限制。

## 六、結論與建議

### 6.1 結論

本研究針對離岸風電場中 CPT 數據所面臨的異常問題，提出一套結合多尺度卷積神經網路與雙向 LSTM 的自動異常偵測方法。整個流程從數據前處理、缺失值補全到人工標記異常點，再到模型架構設計與參數調校，都力圖降低人為誤差，並提高工程應用時的數據可信度。經過實驗評估，模型在高雜訊環境下仍能精準辨識由施工操作、鑽桿加長效應及地層變異等因素引發的異常數據，主要指標如 AUC 超過 0.93、F1-Score 約 0.75，均顯示出不錯的辨識效果。與傳統人工判讀及單純統計方法相比，此方法不僅大幅減少了現場人力成本，亦能在關鍵時刻提供可靠的數據參考，為離岸風電基礎設計提升效率的技術基礎。

### 6.2 建議

為進一步推動本研究成果在實際工程中的應用，並提升異常偵測技術的整體效能，未來可以從以下幾個方向進行：

#### 1. 即時監測與預警系統整合

考慮到本模型具備自動化與即時預測的潛力，建議將其與現場監測系統無縫整合。一旦偵測到異常數據，系統可立即發出警示，使工程師得以及時介入檢核，有效降低因數據異常而導致的施工風險與後續維修成本。

#### 2. 多源數據融合

除了 CPT 數據外，離岸風電場同時還涉及地震波探勘、聲納掃描、風浪流量測等多種監測數據。未來可考慮將本方法擴展到多源數據的融合應用，或引入更多外部環境特徵（如水深、海床地貌等），以進一步提升異常偵測的準確度及模型對環境變化的適應性。

#### 3. 與基礎設計軟體的結合

在離岸風電基礎設計階段，常依賴數值分

析軟體（如 PLAXIS 3D）進行地盤與結構互動模擬。建議未來將自動化異常檢測所得的 CPT 結果與這些設計軟體整合，使工程師能在設計初期就針對可能出現的異常狀況採取對策，從而提高設計參數的可靠性與工程安全性。

此外，還能進一步擴充數據庫，進行跨區域與不同施工條件下的模型驗證，並探索加入其他輔助參數（如設備運作狀況、現場環境監控資料）優化模型結構與演算法。透過跨領域合作，不僅能更深入理解 CPT 數據中異常產生的機制，也有助於構建一套更完整、穩健的離岸風電數據監控與預警系統。

## 參考文獻

1. Robertson, P. K. (2016). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering (6th ed.). Gregg Drilling & Testing, Inc.
2. Lunne, T., Robertson, P. K., and Powell, J. J. M. (1997). Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. John Wiley & Sons.
3. Bengio, Y., Simard, P., and Frasconi, P. (1994). Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult. IEEE Transactions on Neural Networks.
4. Hochreiter, S., and Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. Neural Computation.
5. Malhotra, P., Vig, L., Shroff, G., and Agarwal, P. (2015). Long Short Term Memory Networks for Anomaly Detection in Time Series. In Proceedings of the 23rd European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning (ESANN).
6. Lu, Y.-X., Jin, X.-B., Liu, D.-J., Zhang, X.-C., and Geng, G.-G. (2023). Anomaly detection using multiscale C-LSTM for univariate time-series. Security and Communication Networks, 2023.
7. Goodfellow, I., Bengio, Y., and Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.



# 捷運地下車站監測系統規劃及 監測成果回饋分析 ——以松山線 G22 站為例

張正憲 中興工程顧問股份有限公司軌道二部 / 組長、大地技師

曾紀緯 中興工程顧問股份有限公司軌道二部 / 技術經理、大地技師

賴建名 中興工程顧問股份有限公司軌道二部 / 協理、大地技師

## 摘要

近年來深開挖災害頻繁發生，除常見的受連續壁施工品質影響外，於基地開挖過程中因擋土壁貫入深度不足或開挖面穩定性的問題亦屢見不鮮，其中，因設計階段與實際施工遭遇之地質變異性仍可能存在較大之差異，故地工設計參數之訂定亦可能為致使災害發生之因素。本文以實際捷運地下車站開挖擋土設計成果、布設監測儀器之構想及施工中監測結果進行說明，並搭配本公司近期開發之深開挖回饋分析程式以相關設計參數進行敏感度分析，找出符合現地之參數組合，由實際開挖監測成果配合數值模擬方法進行回饋，藉此建立回饋流程與地層參數資料庫，以供未來設計者參考。

## 一、前言

捷運工程已成為臺灣各縣市都會區發展之重要指標之一，而在臺北市、新北市、桃園市、臺中市、高雄市等都會區業已成為民眾重要之交通工具，且目前施工中以及即將進行細部設計之捷運路線多朝地下化進行，對於都市景觀再造、創造友善用路人環境等，皆有顯著的提升。而因部分路線與既有路線交會，導致車站開挖深度需再加深，使深開挖工程難度提高，對於鄰近建物與既有車站之保護更為嚴峻。另近幾年深開挖工程常有造成道路坍陷、損鄰等案件發生，如 114 年 1 月新北市三重區六張街建案、112 年 9 月臺

北市大直建築案、112 年 5 月臺北市信義區崇德街建案、109 年 7 月永和文化路建案等，使深開挖工程安全性再度受到重視。本文以松山線 G22 站為例，介紹捷運地下車站深開挖設計與監測系統規劃，現場監測儀器觀測成果及回饋成果，作為後續地下車站開挖設計之參考。

## 二、松山線 G22 站簡介

台北都會區大眾捷運系統松山線 DG168 設計標之工程範圍如圖 1 所示。其路線西起小巨蛋站（G19）東側，向東沿南京東路四、五段，經塔悠路轉八德路四段，續向東行，至台鐵松山車



圖 1 松山線 DG168 設計標工程範圍圖

站附近捷運松山站（G22），並止於車站東側之尾軌段，全線長約 2.90 公里，其間包括二座地下車站（G21 站及 G22 站）、一座橫渡線及三段潛盾隧道，本文主要說明 G22 站之開挖設計及相關監測規劃。

松山線 G22 站於營運階段之站名為捷運松山站，其主因為連接臺鐵松山車站而得名，基地位於臺鐵松山火車站北側廣場前的八德路四段，為松山新店線之末端站。車站型式屬地下 3 層島式月台，車站及橫渡線總長約 386.7 m、寬約 24 m、開挖深度約 21.2 ~ 23.1 m，與臺鐵松山車站以地下方式連通，以提供轉乘服務。

G22 站採用挖覆蓋工法施作，東側潛盾工作井開挖深度約為 23.1 m，車站主體部分開挖深度為 21.2 m，均採用厚度 1.2 m 之連續壁，其中潛盾工作井以 9 挖 8 撐進行開挖配置、車站主體則採 8 挖 7 撐進行配置。

## 三、G22 站開挖設計規劃

### 3.1 地層概述及地下水位

G22 站位於臺北盆地東側區域，位於臺北盆地第四紀沖積層上部之松山層內，在地質分區方面屬於基隆河流域之基一區（K1 區），地層分布主要以粉土質黏土為主，且其松三層之分布並不明顯，而松山層下方則由景美礫石層所組成，其簡化地層如表 1 所示。

表 1 G22 站地層分佈

| 項次 | 地層           | 深度 (m) | 平均 N 值 |
|----|--------------|--------|--------|
| 1  | 地表回填層 (SF)   | 1.3    | 2.8    |
| 2  | 粉土質黏土層 (CL)  | 4.9    | 2.8    |
| 3  | 粉土質砂層 (SM)   | 9.3    | 7.6    |
| 4  | 粉土質黏土層 (CL)  | 23.6   | 2.8    |
| 5  | 粉土質黏土層 (CL)  | 32     | 6.2    |
| 6  | 粉土質黏土層 (CL)  | 39.4   | 10.3   |
| 7  | 粉土質砂層 (SM)   | 44.6   | 19     |
| 8  | 卵礫石層 (GP)    | 51.7   | > 50   |
| 9  | 砂岩夾薄層頁岩 (SS) | > 51.7 | > 50   |

G22 站結構主要位於松山層中，其主要地層分布地表回填層厚度約 1.3 m；其下為一平均厚度約 3.6 m 之軟弱粉土質黏土層（平均 N 值約 2.8）；其下為一平均厚度約為 4.4 m 之鬆散粉土質砂土層（平均 N 值為 7.6）；其下為一平均厚度約為 14.3 m 之軟弱粉土質黏土層（平均 N 值為 2.8）；其下為一平均厚度約為 8.4 m 之中度稠密粉土質黏土層（平均 N 值為 6.2）；其下為一平均厚度約為 7.4 m 之堅硬粉土質黏土層（平均 N 值為 10.3）；其下為一平均厚度約為 5.2 m 之中度密實粉土質砂土層（平均 N 值為 19）；其下為一平均厚度約為 7.1 m 之極密實卵礫石層（平均 N 值大於 50）；其下至鑽探最大深度為砂岩層（N 值大於 50），地層分布如表 1 所示。另外，本標沿線之淺層地下水位約位於地表下 2 m 左右，而卵礫石層之水位則約在地表下 11 m 左右，圖 2 為 G22 站地層分佈示意圖。



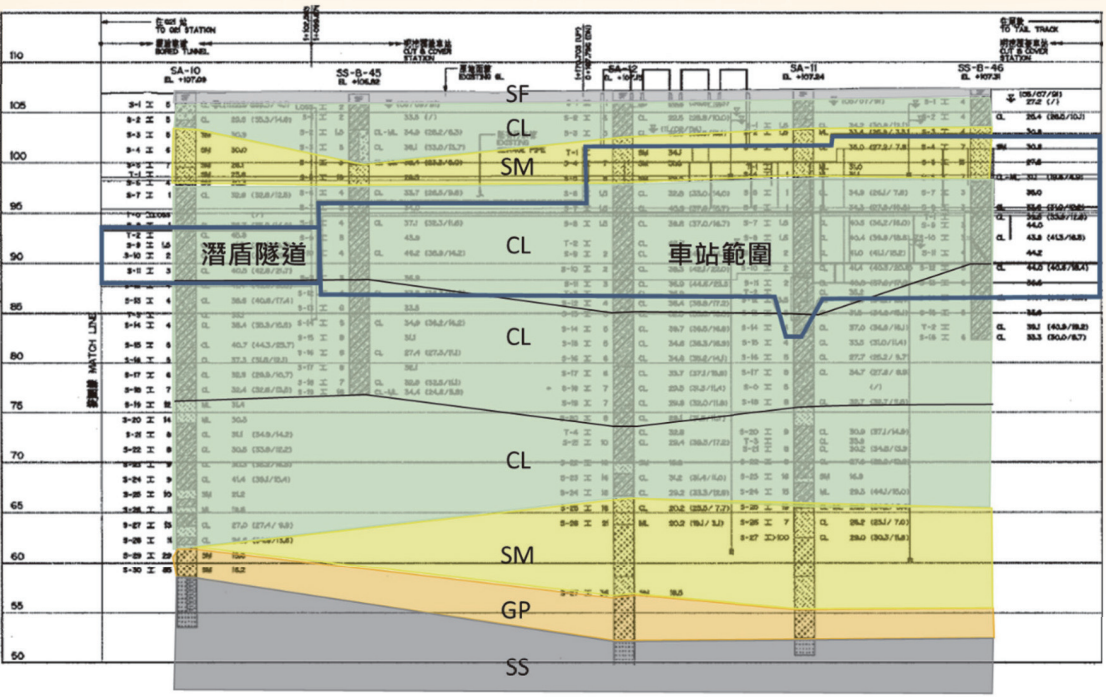


圖 2 G22 站地層分佈示意圖

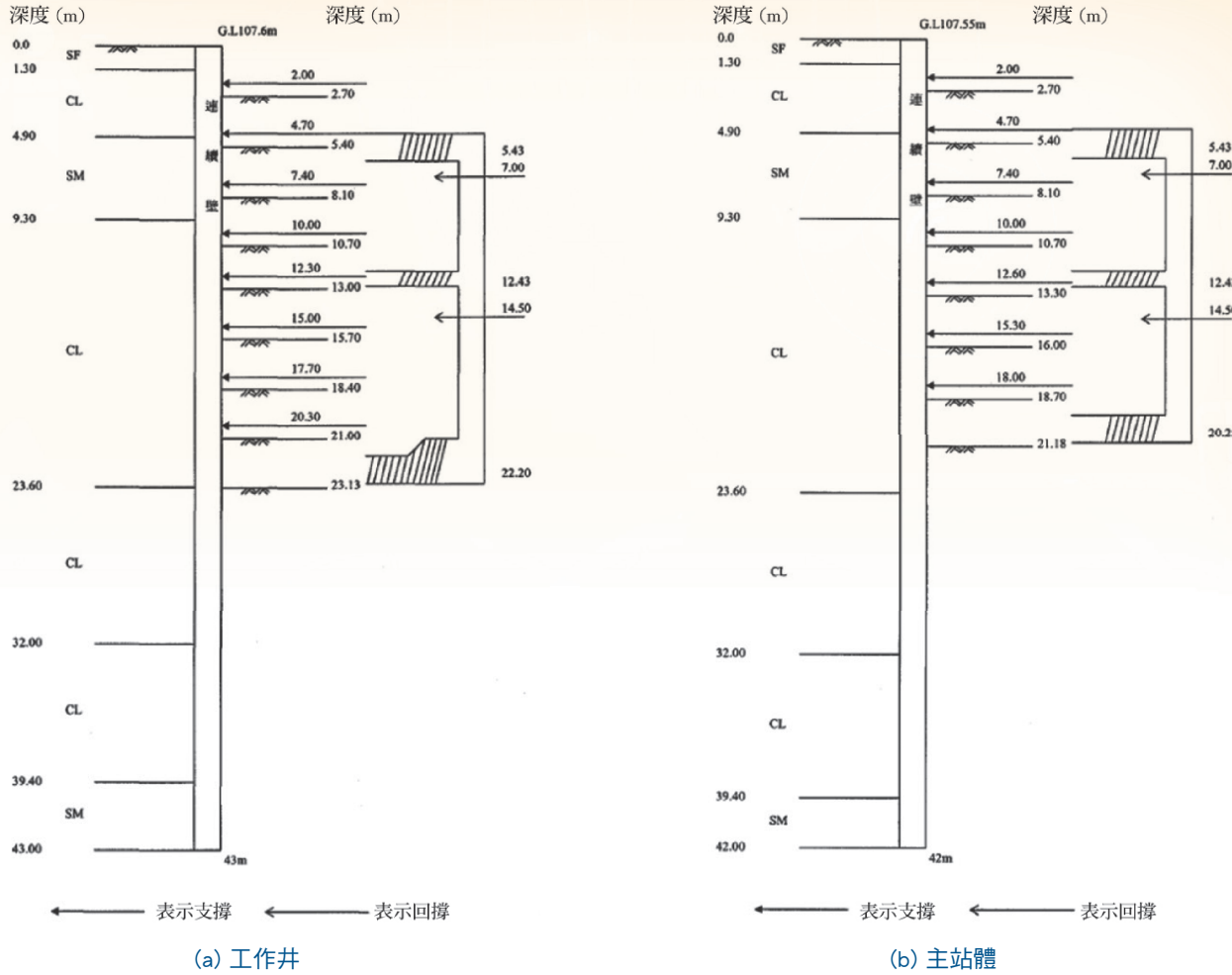


圖 3 G22 站開挖支撐施工順序圖

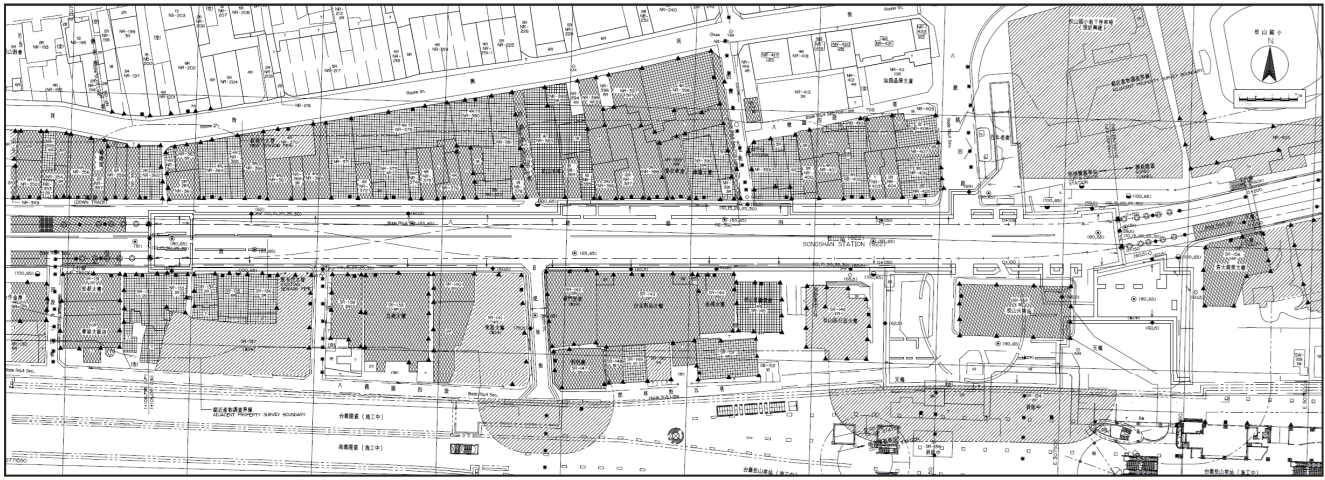


圖 4 G22 站監測儀器布設平面圖

|    |      |       |    |      |        |    |      |        |    |      |         |
|----|------|-------|----|------|--------|----|------|--------|----|------|---------|
| 圖示 | 儀器代號 | 儀器名稱  | 圖示 | 儀器代號 | 儀器名稱   | 圖示 | 儀器代號 | 儀器名稱   | 圖示 | 儀器代號 | 儀器名稱    |
| ☆  | BM   | 永久水準點 | ●  | SM   | 地面沉陷點  | ◆  | SID  | 壁中傾度管  | ●  | CB   | 柔性接頭變位點 |
| ▲  | SB   | 建物沉陷點 | ⊖  | PS   | 豎管式水壓計 | ◇  | SIS  | 土中傾度管  |    |      |         |
| ■  | TI   | 建物傾斜計 | ⊙  | CP   | 隧道收斂點  | ⊙  | ELP  | 電子式水壓計 |    |      |         |
| ※  | SSI  | 淺層沉陷點 | ⊗  | EXM  | 桿式伸縮儀  | —  | RS   | 鋼筋計    |    |      |         |

3.2 開挖及支撐規劃

在 G22 站站體的部分，配合車站功能需求，車站工作井因潛盾作業需求，開挖深度較深約 23.1 m，其他主站體開挖深度約 21.2 m，在擋土開挖系統皆依「臺北捷運土木設計手冊（CEDM）第十一版」及民國 90 年內政部頒之「建築物基礎構造設計規範」辦理，內擠安全係數要在 1.5 以上，隆起、上舉的安全係數要在 1.2 以上，依上述標準計算成果，在工作井採用 1.2 m 厚連續壁，深度 43 m，站體其他區域則採 1.2 m 厚連續壁，深度為 42 m。在支撐系統規劃工作井，採 9 階開挖與 8 層 H 型鋼支撐，站體其他區域則採 8 階開挖與 7 層 H 型鋼支撐，G22 站之開挖深度及擋土措施彙整如表 2。圖 3 為 G22 站開挖支撐施工順序圖。

四、監測儀器布設規劃

細部設計階段布設之監測系統主要係基於以下目的進行布設：

1. 驗證設計基準，確保設計品質與安全；
2. 即時偵測施工品質，如有施工不良以便快速採取應變補救措施；
3. 協助施工品質之營建管理。

捷運車站施工期間，為確保鄰近結構物及本身於開挖時之安全，監測項目主要為鄰近結構物之沉陷與傾斜、開挖擋土措施之變形、支撐之應力、區內外水壓變化等，G22 站佈設之監測儀器系統包含結構物沉陷點、地面沉陷點、傾斜計、支撐應變計、水壓計與連續壁傾度管、土中傾度管及鋼筋計等，相關布設原則說明如下，監測儀器布設圖如圖 4 所示。

表 2 G22 站開挖深度及擋土措施彙整表

| 位置  | 開挖深度 (m) | 擋土壁 |        |        | 支撐系統        |
|-----|----------|-----|--------|--------|-------------|
|     |          | 型式  | 厚度 (m) | 深度 (m) |             |
| 工作井 | 23.1     | 連續壁 | 1.2    | 43     | 9 階開挖 8 階支撐 |
| 主站體 | 21.2     | 連續壁 | 1.2    | 42     | 8 階開挖 7 階支撐 |



## 1. 地面與建物沉陷監測

開挖影響範圍線內之既有建物，於基地開挖時可能引起鄰近建物及道路之沉陷，一般將於鄰近建物、道路或地面裝設沉陷點，常見之建物沉陷點設置方法為兩點於建物之前側，兩點於建物之後側，以利觀測開挖過程中建物之沉陷情形。而道路及地面沉陷點則沿與開挖基地正交之街道進行埋設，以利了解開挖區外沉陷槽之發展情形。

## 2. 側向位移

連續壁壁體內裝設傾度觀測管，施工期間以傾度儀量測連續壁之側向變形與撓曲程度，以研判連續壁之安全性。此外，為獲取連續壁外土壤之側向位移，亦於壁體外之土壤中設置土中傾度管。

## 3. 建物傾斜

於較可能有差異沉陷而致損壞之建物裝設建物傾斜計，以量測開挖過程中建物之傾斜量。

## 4. 地下水壓

開挖側與擋土側之地下水壓對深開挖基礎之安全與否甚具重要影響性。於擋土側將水壓計設置於連續壁外側 5 公尺內的土層中，以監測開挖側抽降水對於擋土側之地下水壓之變化情形。

## 5. 支撐荷重

支撐荷重可藉由裝設於支撐尾端之荷重計或支撐 H 型鋼中之應變計直接量測之，倘使用應變計安裝時，應於 H 型鋼支撐之中軸兩側對稱裝設，裝設時應距支撐兩尾端半公尺至一公尺，以減少彎矩產生之應變。



圖 6 水壓計監測查詢成果

## 6. 連續壁之應變與彎曲力矩

為校核地下連續壁中傾斜管觀測資料推導彎曲應變與彎曲力矩之正確性，故於連續壁中裝設有鋼筋應力計。

## 五、監測儀器觀測成果查詢及展示

藉由中興工程顧問公司監測平台的建立，同仁可於公司內藉由平台直接查詢監測成果，只要於平台中點選任意監測點位（監測平台展示畫面如圖 5），可快速查詢歷時曲線，經由平台中查詢水壓計、建物沉陷點、支撐應變計及建物傾斜計等相關成果如圖 6 至圖 9 所示。

於設計過程中，主要係以設計分析之壁體變形來控制施工安全，且壁體變形將引致開挖區外地表沉陷，該地表沉陷將導致擋土壁外之建物受影響而傾斜，甚至發生危害，故於設計過程中需針對周遭受影響之建物做相關保護措施，以減少因開挖施工對鄰近建物的影響。

在主要監測斷面之儀器配置上，於連續壁內設置壁中傾度管，並視需求於連續壁外加設土中傾度管，以利確認壁體與土壤之變形是否一致，此外，亦於路口處配置垂直連續壁方向之沉



圖 5 監測平台展示監測點位畫面

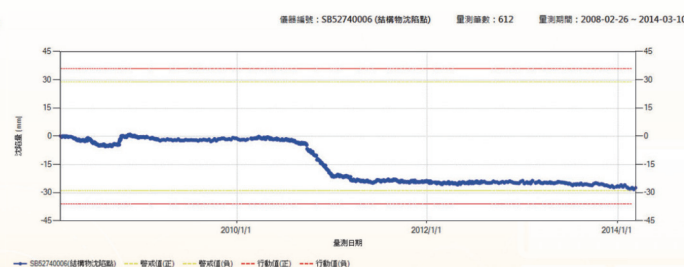


圖 7 建物沉陷點監測查詢成果



圖 8 支撐應變計監測查詢成果



圖 9 建物傾斜計監測查詢成果

陷觀測點，以利監測開挖過程中之壁體變形及地表沉陷之情形。

在監測平台除可分別查詢壁體變形量及地表沉陷點外，亦考量使用者欲查詢壁體變形、沉陷槽及支撐應變計受力之情形，故於平台中採剖面方式進行相關成果之展示，相關展示成果如圖 10 所示。

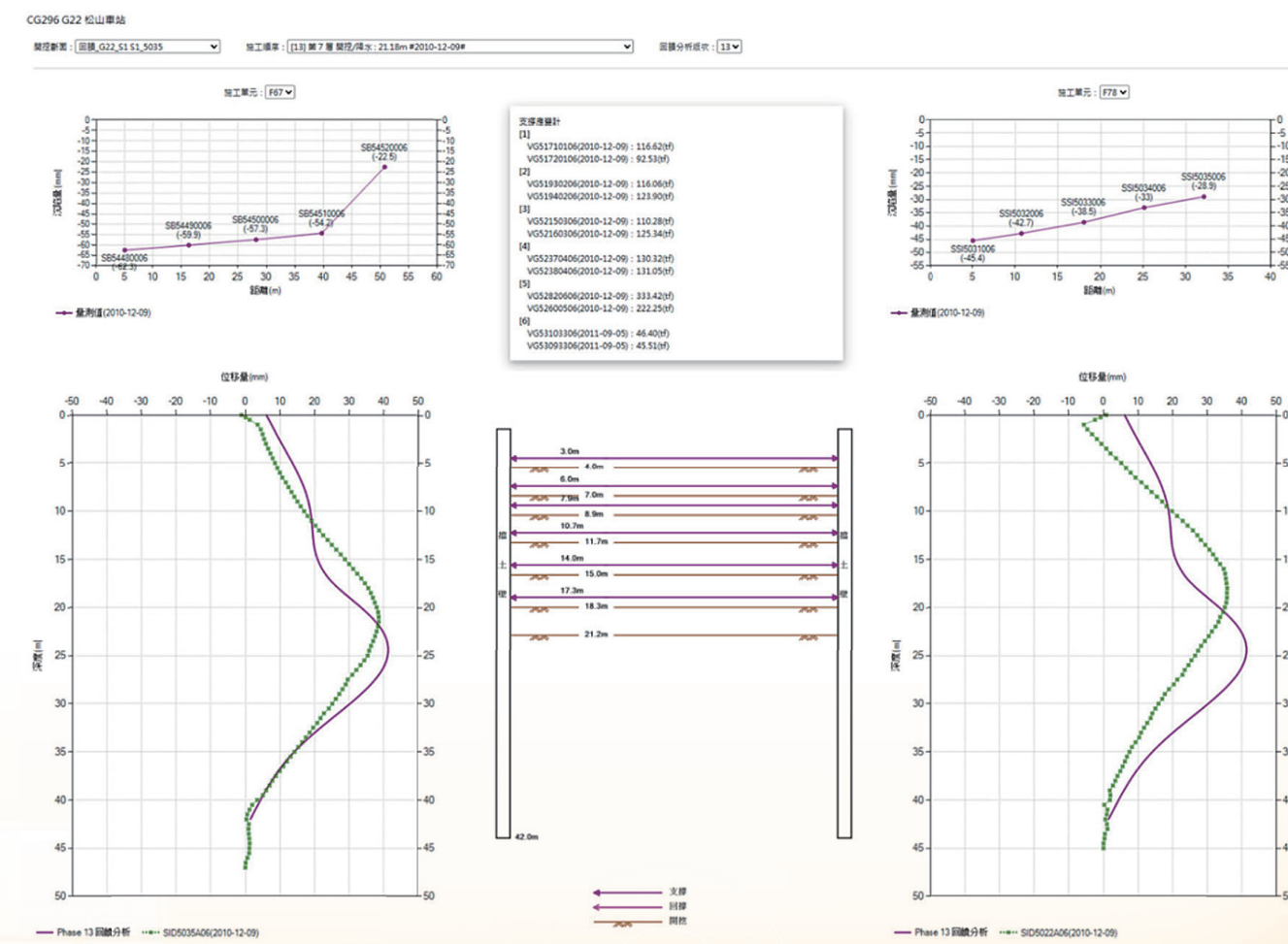


圖 10 G22 站壁體變形、沉陷槽及支撐應變計受力情形之展示



設計參數直至分析成果與實際壁體變形相近後，方可視為回饋完成。

回饋分析之流程大致上以圖 11 所示，係以實際監測成果作為回饋分析之目標值，並依前述所提之設計參數（本文以地盤反力係數為例），加密原設計階段之地層分層，進行反算分析使分析之壁體變形趨近實際監測數值。

而在進行回饋分析時，係將傾度管之監測成果視為真值，作為後續回饋分析計算之基準，並利用目前電腦核心運算之能力，於各分層位置設定其目標值，包含最大變形深度、最大變形量以及可接受之差距百分比，以利程式自動反覆計算，最後求得與實際壁體變形相符

（符合預期目標值）之地盤反力係數（如圖 12）。

監測儀器之選用亦將影響回饋分析成果之合理性，而開挖過程將承受許多因素之影響，故選擇較符合過往開挖經驗之傾度管（SID5023）進行後續回饋分析，傾度管位置如圖 14。

本文係以一維分析軟體（RIDO）進行回饋分析與監測數據成果比較，對於傳統標設計者而言，於設計階段大多希望分析成果能略大於實際監測成果，以為保守之設計；在此邏輯之下，回饋分析之目標值亦希望能獲得大於實際監測之數值，而依照圖 13 回饋成果顯示，其回饋分析成果尚能符合期待，反覆計算所取得之參數如表 3 所示。

表 3 G22 站回饋分析之參數

| Soil Layer | Depth (m) | SPT-N | Su (t/m <sup>2</sup> ) | SID5023                         |                                 |
|------------|-----------|-------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|            |           |       |                        | Original Kh (t/m <sup>3</sup> ) | Feedback Kh (t/m <sup>3</sup> ) |
| SF         | 1.3       | 2.8   |                        | 196                             | 400                             |
| CL         | 4.9       |       | 2.5                    | 500                             | 300                             |
| SM         | 9.3       | 7.6   |                        | 532                             | 350                             |
| CL         | 14.1      | 3.9   |                        | 780                             | 200                             |
|            | 18.9      |       |                        | 780                             | 427                             |
|            | 23.6      |       |                        | 780                             | 605                             |
| CL         | 27.8      | 5.3   |                        | 1,060                           | 700                             |
|            | 32        |       |                        | 1,060                           | 1,000                           |
| CL         | 35.7      | 7.5   |                        | 1,500                           | 1,500                           |
|            | 39.4      |       |                        | 1,500                           | 2,500                           |
| SM         | 44.6      | 19    |                        | 1,330                           | 3,000                           |

此回饋分析之目標係透過調整地層參數來使連續壁變形與監測數據匹配。從本案例回饋結果顯示，深度 0 ~ 35 m 之 Kh 值在回饋分析相比設計階段來得小，但大致上仍隨著深度增加而增加，但實際狀況仍與地層及其他配置有關。過往的經驗公式中，Kh 值的增加與 Su 或 SPT-N 值的高低是正相關的，本案例之側向變形量主要發生在厚層黏土層，依照回饋分析成果反推其經驗公式，於深度 18.9 ~ 32 m 之黏土層低於經驗公式常用範圍，其公式約可修正為 110Su ~ 190Su，而 32 ~ 39.4 m 之黏土層則與經驗公式常用範圍相當，可調整為 200Su ~ 333Su 不等，惟實際地層參數仍有待未來更多經驗值回饋後進一步確認。

然而，在分析過程中將地層設定為較厚的土層時，會使得經驗方程式無法很好的模擬與現況相近之土壤行為。

## 七、結論與建議

本文介紹 G22 站深開挖工程，由細部設計階段之設計參數訂定、開挖支撐配置與至施工階段監測儀器監測成果等規劃進行說明，並配合中興工程顧問公司近年來數位轉型所發展之設計、施工與監測平台，可快速整合及查詢相關設計與施工階段之成果。

除可查詢監測成果外，中興工程顧問公司亦建立及開發回饋設計之流程與方法，以自動化反覆計算的方式來求得貼近實際地層狀況之地工參數，並期望能優化設計階段之支撐配置。

此外，於回饋過程中亦發現，由於一般捷運基地開挖範圍較大，常採用分區開挖的方式進

行，監測時間與實際工進難以匹配，且在實際施工紀錄中難以有效查詢，導致各區域之壁中傾度管難以分辨其與實際開挖工序之關係，因此，未來於此類大型基地中，亦須增加紀錄實際開挖範圍與日期，以利有效與監測系統進行配對，取得真正的監測時間與實際開挖期程之關係。

未來中興工程顧問公司亦將持續發展相關資料庫系統，逐步累積回饋分析之地工設計參數，搭配實際物理性質試驗及力學試驗成果等，並與其他相關參數進行關聯，以利未來於大區域中搜尋其他可精進設計參數之方式，提高設計階段之準確性、確保設計成果，提高工程師設計之信心，並期望此回饋分析流程及未來資料庫之建立能提供設計者之參考。

## 參考文獻

- 內政部營建署（2001），「建築物基礎構造設計規範」，內政部營建署。
- 臺北都會區捷運工程，土木工程設計手冊（CEDM）中文版第十一版。
- 臺北都會區大眾捷運系統松山線計畫 DG168 標 CG296 施工標松山站（G22）地下連續壁及支撐系統設計計算書。
- 臺北都會區大眾捷運系統松山線計畫 DG168 標監測結果總結報告。
- 臺北都會區大眾捷運系統松山線 CG590C 區段標工程安全監測系統施工計畫書。
- 張正憲、陳耀基、葉錦德、張睿庭、曾紀緯、賴建名（2024），透過數值模擬方法校正地工設計參數～以台北某捷運深開挖為例，地工技術，第 182 期，第 53-58 頁。
- 張正憲、黃靖惠、劉執敏、陳又誠、曾紀緯、賴建名（2023），「深開挖設計自動化與施工回饋智慧化之挑戰」，地工技術，第 173 期，第 15-22 頁。
- 張正憲、劉執敏、曾紀緯、賴建名（2022），「深開挖分析自動化與施工監測平台指結合與運用」，第十九屆大地工程學術研討會暨科技部成果發表會（Geotech2022）論文集。
- Liou, C. M., Hung, C. W., Chang, C. H., and Lai, C. M. (2022). "Geotechnical De-sign from the Inside Out-Development of Automation Design Platform and BIM of MRT Geotechnical Engineering." AIJR Proceedings, 166-179.
- 林承瀚、張正憲、賴建名（2020），「大地工程設計的自動化發展」，地工技術，第 166 期，第 93-97 頁。

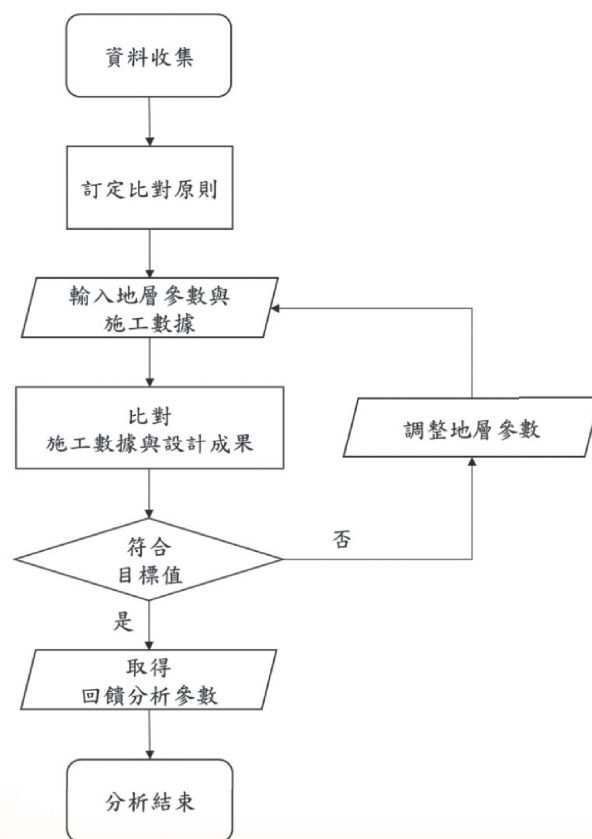


圖 11 回饋分析流程

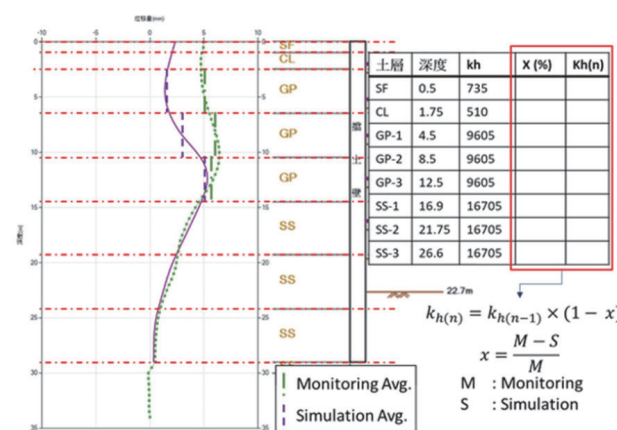


圖 12 回饋分析之目標值訂定及計算方式

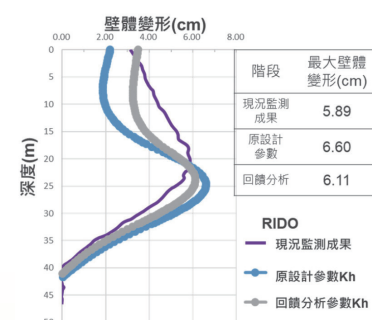


圖 13 RIDO 回饋與連續壁變形結果比較



圖 14 G22 站傾度管（SID5023）位置圖



# 高雄燕巢地區之西部麓山帶邊坡地質調查及監測案例探討

羅俊宏 萬鼎工程服務股份有限公司 / 大地技師

孫漢豪 萬鼎工程服務股份有限公司 / 大地技師

孫維政 萬鼎工程服務股份有限公司 / 土木設計部經理

魏佳韻 交通部高速公路局工務組 / 副工程司

陳琨曜 交通部高速公路局南區養護工程分局屏東工務段 / 副段長

## 摘要

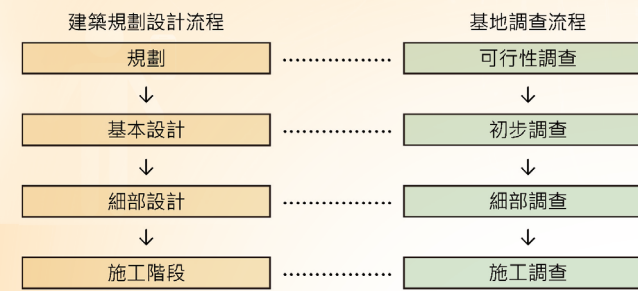
本文以位於高雄市燕巢地區屬台灣西部麓山帶地質區之邊坡為例，探討如何在設計階段有限地時間與工程經費等條件下，進行全面性的地質調查與監測，以獲取最高效益之成果。同時，亦能夠對於案例邊坡之地質構造與地層特性有充份的瞭解，除供作為監測期間邊坡安全性評估與緊急應變措施研擬之參考依據外，亦可作為後續規劃設計與營運管理之基礎。

## 一、前言

近年來極端氣候事件頻繁，豪雨成災亦時有所聞，其中坡地災害對於台灣農業及維生基礎設施衝擊影響甚鉅，經常造成人民生命財產鉅大的損失，因此政府單位相當重視坡地防災，每逢颱風豪雨，除對於高風險之坡地社區進行疏散撤離外，山區道路亦實施預警性封閉，以減少人員傷亡。

為確保邊坡或其設施之穩定性，於全生命週期之不同階段可妥適規劃監測系統，以確保安全。進行坡地開發與整治前，首要應對於所處坡地條件有足夠之瞭解，依據建築物基礎構

造設計規範 3.2.2 節：「建築物基地之調查可配合建築計畫之規劃設計及施工作業階段逐步辦理，調查之精度由低至高，並視工程之重要性與地層之複雜性，採取不同之步驟。調查步驟包括資料蒐集、現場踏勘、初步調查與細部調查。為特殊目的或施工之需要，亦可在進行特殊調查、補充調查或施工環境調查。」基地調查與建築規劃設計流程之關係，如圖 1。惟受制於有限地時間與經費等條件，此調查流程對於小型工程實不易達成，因此如何在有限條件下獲取最高效益之地質調查成果，一直以來被大地工程師視為重要的課題之一。



（改繪自建築物基礎構造設計規範）

圖 1 基地調查與建築規劃設計流程之關係

## 二、案例基址區域地質、地形與環境現況

案例基址位於高雄市燕巢區，緊鄰國道 3 號與國道 10 號系統交流道，屬台灣西部麓山帶地質區範疇，基址位置如圖 2，其地質、地形與環境現況概述如下：

### 2.1 基址區域地質

西部麓山帶為台灣帶狀地質分區之一，位於雪山山脈、中央山脈以西與濱海平原之間，如圖 3，為台灣造山帶之最西側，屬較年輕且低矮的山脈，海拔約數百至二千多公尺之間，由東向西山脈逐漸降低，與平地接壤處呈丘陵地形。

依據經濟部地質調查及礦業管理中心五萬分之一旗山地質圖幅（2013），案例基址係位於南勢崙砂岩與嶺口礫岩層交界，以嶺口礫岩層為

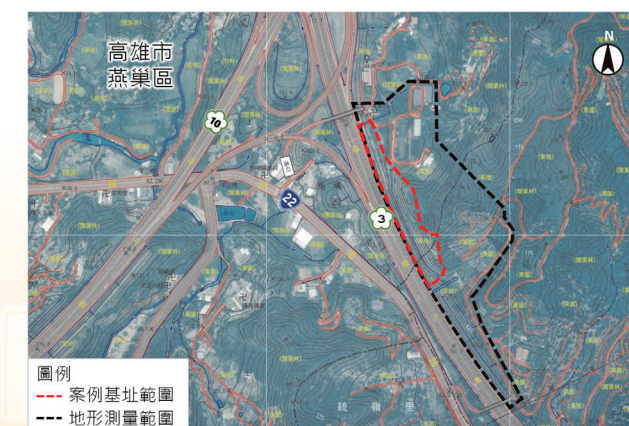


圖 2 案例基址位置概要圖



（摘自經濟部地質調查及礦業管理中心地質知識網絡）

圖 3 台灣地質分區圖

主，鄰近區域出露之地層，包括有中新世晚期之烏山層、上新世早期之蓋子寮頁岩、上新世之南勢崙砂岩、上新世晚期至更新早期之古亭坑層、更新世之嶺口礫岩、階地堆積層及全新世之沖積層等，區域地質如圖 4，其中嶺口礫岩與烏山層、蓋子寮頁岩、南勢崙砂岩為交角不整合接觸，與大社層呈現局部不整合接觸（吳樂群，1993）；南勢崙砂岩則與下伏蓋子寮頁岩為整合接觸，而與上覆嶺口礫岩間有地層缺失（Chi，1979）。

### 2.2 基址地形與環境現況

案例基址為一路塹邊坡，走向約呈 N22°W，向西南傾斜，邊坡全長約 220 m，坡高約 60 m，採階梯式配置，共計有 6 階，每階高度約 10 m，各階並設有 1~3 m 寬巡檢平台及排水溝，排水流向由北向南，除二端外坡面



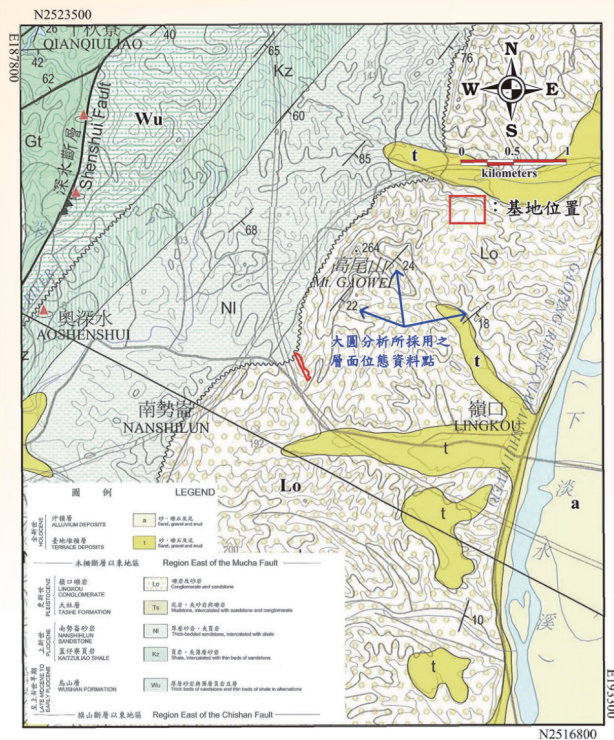


圖 4 案例基址 1/50,000 區域地質圖

間並無設置縱向排水。邊坡地形陡峭，坡度  $V:H = 2:1$ ，根據現場地形測量結果，坡面最高處高程約為 EL.+170m，最低處則約 EL.+108m。

為防止坡面冲刷及逕流入滲，現況邊坡係採噴凝土等人工構造物覆蓋保護，於基址東北側存有許多混凝土平台，並留有陸軍單位遺留之軍事樁，推估為已裁撤之陸軍馬場營區舊址。經查，該營區房舍已於 2017 年全數拆除，僅留下房舍之混泥土坪，基址現況照片如圖 5。



圖 5 案例基址現況空拍影像

### 三、地質調查規劃與地質圖繪製

就多數土木人員而言，對於地質調查之認知多與「地質鑽探」劃上等號，此觀點於一般地層均勻性較高之沖積平原，或許尚能滿足規劃設計之需求，惟若位於地質條件複雜且多變之山區，單就地質鑽探恐不易獲取充足之地層資訊，因此本案例建議應執行包括：可涵蓋「面」的地表地質調查、「線」的地球物理探測及「點」的地質鑽探與相關試驗，將先經由較巨觀、全面的廣域調查，再視工程需求調整局部區域之調查的精細度，方能於有限地時間與經費等條件下，獲取最高效益之地質調查成果，作為後續規劃設計與營運管理之基礎。針對本案例地質調查作業方式，概述如下：

#### 3.1 面—地表地質調查

案例基址經地表地質調查結果顯示，現況邊坡大部分由噴凝土等人工構造物所覆蓋，僅於基址東北側鑽探孔位 B3-1 及 B3-3 之間（露頭點 1）及基址南端（露頭點 2）發現主要由礫岩夾砂岩組成之岩層露頭，如圖 6 所示。由露頭點 1 量測到之岩層層面位態為  $N50^\circ E/13^\circ S$ ，無觀察到節理面；露頭點 2 則無層理面可供觀察。由於露頭點 1 之層面為礫岩及砂岩之界面，岩質較為鬆散，於清理層面時，常有礫石掉落而破壞原本完整之層面，故所量測到之層面位態可能存有誤差，因此參考案例基址區域地質圖及前期調查結果之岩層位態進行大圓分析。經採用鄰近位態  $N50^\circ E/18^\circ S$ 、 $N42^\circ E/24^\circ S$ 、 $N40^\circ E/22^\circ S$  及  $N28^\circ E/22^\circ SE$ ，可求得基址代表性位態為  $N41^\circ E/20^\circ S$ 。



圖 6 案例基址嶺口礫岩露頭

#### 3.2 線—地球物理探測

為瞭解案例基址所處邊坡廣域之地層及地下含水層分佈狀況，本案例係規劃利用地球物理探測方式，採地電阻影像剖面法（Resistivity Image Profiling, RIP）進行探測，測線依據基址地形進行佈設，如圖 7，共計佈設 6 條測線，測線總長約 1,017.5 m。探測原理在此不做贅述，僅就探測結果概述如下：

##### 1. 測線 1（第一階平台）

探測結果顯示，第一階平台以下岩層以泥岩為主，南側深度 40 m 內主要為疏鬆砂岩，整體概可分為四個部分，如表 1 及圖 8(a) 所示。

##### 2. 測線 2（第二階平台）

探測結果顯示，第二階平台北側以泥岩為主，南側以疏鬆砂岩為主，並夾有礫石，整體概可分為四個部分，如表 1 及圖 8(b) 所示。

##### 3. 測線 3（第三階平台）

探測結果顯示，第三階平台北側為泥岩，南側以疏鬆砂岩及礫石為主，整體概可分為四個部分，如表 1 及圖 8(c) 所示。

##### 4. 測線 4（第四階平台）

探測結果顯示，第四階平台推測皆為疏鬆砂岩，地表下深度 40 m 內夾有礫石，整體概可分為四個部分，如表 1 及圖 8(d) 所示。

##### 5. 測線 5（邊坡南側縱斷面）

探測結果顯示，邊坡南側地表下 25 m 內主要為礫石層夾薄層黏土，整體概可分為三個部分，如表 1 及圖 8(e) 所示。

##### 6. 測線 6（邊坡北側縱斷面）

探測結果顯示，邊坡北側深度 30 m 內主要為乾燥砂岩，深度 30 m 以下為泥質砂岩，整體概可分為二個部分，如表 1 及圖 8(f) 所示。

綜整地電阻探測結果，案例基址主要為泥岩、砂岩及礫岩交互沉積所構成，其中北側以泥岩夾砂岩或砂岩夾泥岩為主，南側則以礫岩夾砂岩為主，岩性並隨深度變化。



圖 7 地電阻探測測線配置圖



表 1 地電阻探測結果綜整表

| 測線 | 位置 (m)   | 深度 (m)   | 電阻率 (Ω-m) | 色調     | 岩性                |
|----|----------|----------|-----------|--------|-------------------|
| 1  | 0 ~ 32   | 0 ~ 48   | 70        | 綠色     | 泥質砂岩              |
|    | 0 ~ 180  | 50 以下    | 40        | 淺藍色    | 泥岩                |
|    | 22 ~ 112 | 0 ~ 36   | 6.4 ~ 25  | 淺藍~深藍色 | 濕潤風化層與濕潤泥岩        |
|    | 90 ~ 220 | 15 ~ 90  | 70        | 綠色     | 疏鬆砂岩偏泥質、泥質砂岩      |
| 2  | 0 ~ 68   | 10 ~ 100 | 10 ~ 40   | 淺藍~深藍色 | 黏土與泥岩             |
|    | 0 ~ 68   | 100 以下   | 70        | 綠色     | 泥質砂岩              |
|    | 68 ~ 220 | 20 以下    | 60        | 綠色     | 疏鬆砂岩偏泥質           |
|    | 108      | 40       | 150       | 黃色     | 疏鬆砂岩夾礫石           |
| 3  | 0 ~ 90   | 0 ~ 147  | < 40      | 淺藍~深藍色 | 泥岩                |
|    |          | 60 以上    | 30        | 淺藍色    | 濕潤泥岩              |
|    | 70 ~ 220 | 50 ~ 147 | 70        | 綠色     | 疏鬆砂岩、疏鬆砂岩偏泥質、泥質砂岩 |
|    | 84 ~ 116 | 18 ~ 36  | 150       | 黃色     | 疏鬆砂岩夾礫石           |
| 4  | 2 ~ 20   | 5 ~ 35   | 40        | 淺藍色    | 泥岩                |
|    | 32 ~ 50  | 15 ~ 35  | 150       | 黃色     | 疏鬆砂岩夾礫石           |
|    |          | 35 ~ 112 | 80        | 綠色     | 疏鬆砂岩              |
|    | 65 ~ 165 | 60 ~ 100 | 60        | 綠色     | 疏鬆砂岩偏泥質           |
|    | 160      | 5        | 700       | 紅色     | 礫石層               |
| 5  | 0 ~ 13   | 0 ~ 6    | 770       | 紅色     | 礫石層               |
|    |          | 6 ~ 12   | 15        | 藍色     | 黏土層               |
|    |          | 12 ~ 40  | 80        | 綠色     | 疏鬆砂岩              |
|    |          | 0 ~ 20   | 770       | 紅色     | 礫石層局部夾有黏土層        |
|    | 13 ~ 45  | 20 以下    | 150       | 黃色     | 疏鬆砂岩夾礫石           |
| 6  | 0 ~ 116  | 0 ~ 30   | 60        | 綠色     | 疏鬆砂岩局部夾有乾燥砂岩      |
|    |          | 30 以下    | 6.4 ~ 30  | 淺藍~深藍色 | 濕潤泥質砂岩            |

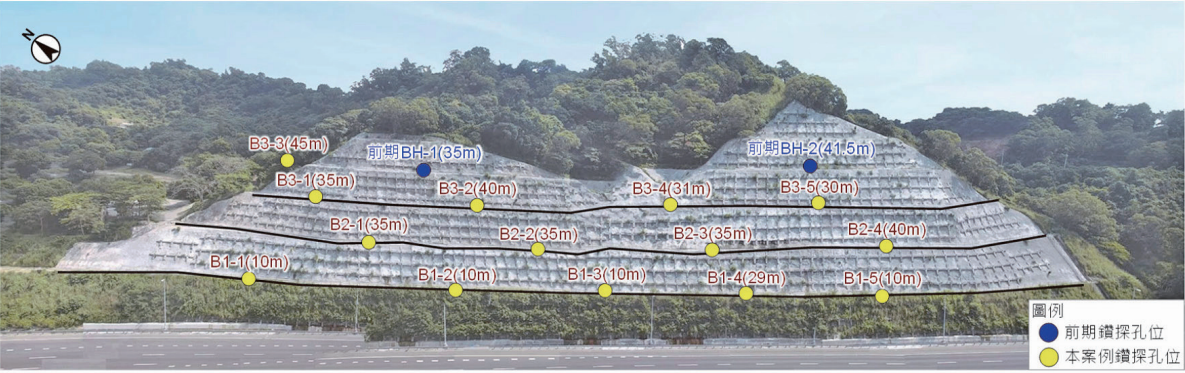


圖 9 基址地質鑽探孔位分佈

依據 B1-2、B2-2、B3-2、BH-1 之鑽探結果初步判釋，基址北側上半部地層以礫岩層偶夾砂岩為主，下半部則主要為泥岩層或砂質泥岩層所組成，基址北側地層剖面如圖 10 所示；而依據 B1-4、B2-4、B3-4、BH-2 之鑽探結果初步判釋，顯示基址南側地層呈現礫岩及泥岩層交錯分佈情形，基址南側地層剖面如圖 11 所示。

1. 灰色砂岩偶夾泥岩（SS/MS）：以中粒砂岩為主，偶夾粗粒砂岩及礫岩，因本層未完全出露，無法估計其厚度。
2. 灰至灰棕色泥岩偶夾砂岩（MS/SS3）：砂岩及部份泥岩因風化呈灰棕色，部份岩體受節理面影響較為破碎，厚度約為 10 m。
3. 灰色砂岩夾泥岩（SS/MS）：為細至粗粒砂岩偶具平行紋理，部分有互層現象，厚度約為 9~11 m。
4. 灰棕色泥岩偶夾砂岩（MS/SS2）：砂岩及部分泥岩因風化呈灰棕色，部份岩體受節理面影響較為破碎，厚度約為 5 ~ 8 m。
5. 灰色礫岩夾砂岩（Cg/SS2）：本層為主要出露之礫岩段，礫岩膠結鬆散，砂岩約 1 至數公尺，厚度約為 20 ~ 25 m。

3.4 二維及三維地質圖製作

綜整本案例地表地質調查、地球物理探測及地質鑽探結果，研判基址地層分佈及其性質。經判釋，本基址共計出露 7 層岩層，各岩層由下至上（由老至年輕）分述如下，並以地質圖作圖法繪製基址 1/1,000 地質圖如圖 12 所示。

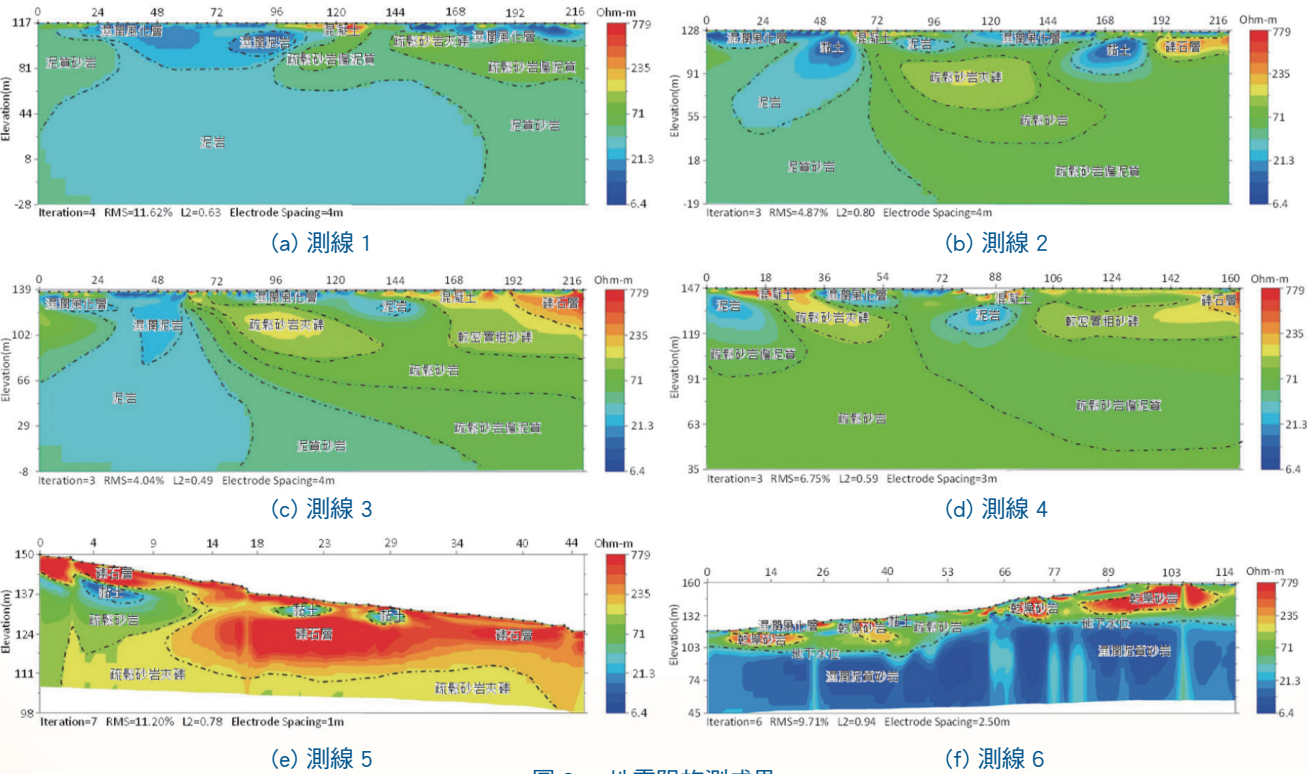


圖 8 地電阻施測成果

3.3 點—地質鑽探與相關試驗

地質鑽探作業主要為取樣供岩性種類判釋並獲取相關物理及力學性質，其結果可供地表地質調查及地球物理探測結果相互檢視

驗證。本案例共計佈設 14 孔地質鑽孔，鑽探深度根據路塹邊坡平台高程差異，介於 10 ~ 45 m，鑽孔分佈如圖 9 所示，鑽探深度總計 395 m。

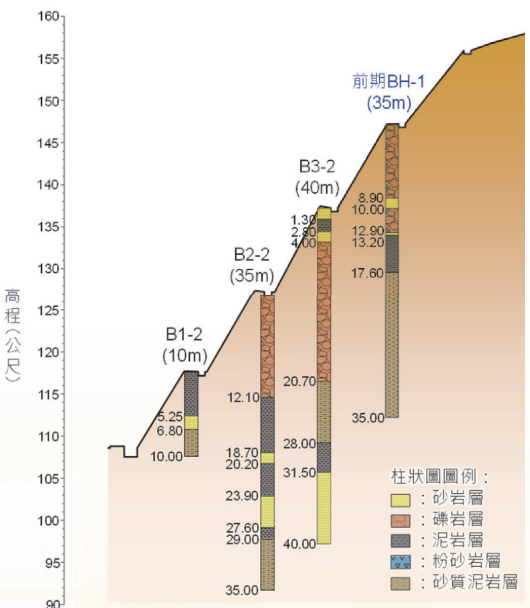


圖 10 基址北側地層剖面

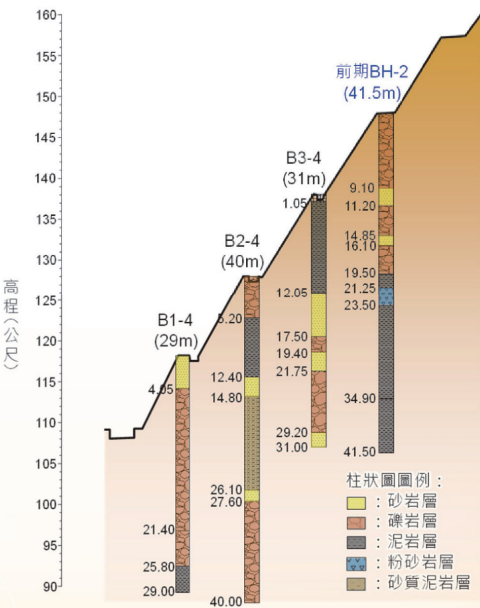


圖 11 基址南側地層剖面



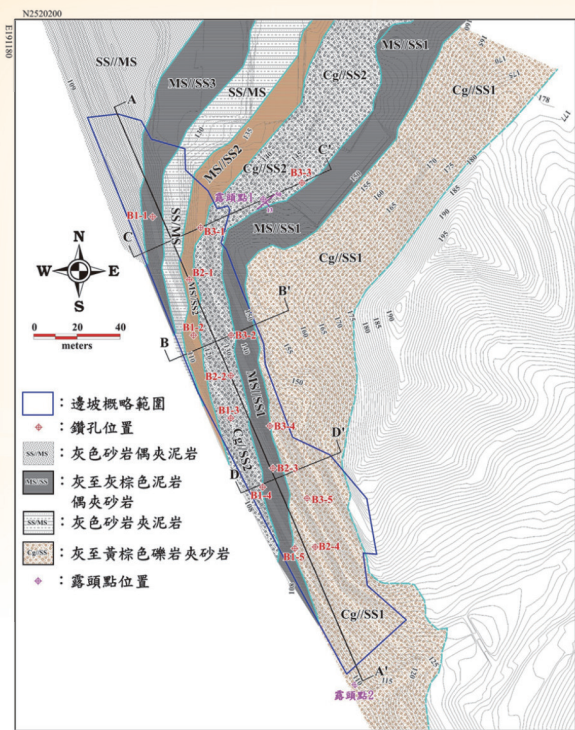


圖 12 案例基址 1/1,000 地質圖

6. 灰色泥岩偶夾砂岩 (MS/SS1): 以泥岩為主, 偶夾細粒砂岩, 砂岩偶具平行紋理, 厚度約為 10 m。
7. 黃棕色礫岩夾砂岩 (Cg/SS1): 以黃棕色礫岩夾砂岩為主, 礫岩膠結鬆散, 砂岩約 1 至數公尺, 因本層未完全出露, 無法估計其厚度。

另由 3.1 節可知, 基址代表性位態為 N41°E/20°S, 基址邊坡走向約為 N22°W, 與位

態走向夾角約為 63°, 研判基址應屬斜交坡, 基址剖面如圖 13 至圖 15。由於基址邊坡南北側所出露之地層不盡相同, 依北側之地層剖面 (如圖 14), 主要出露之地層以泥岩偶夾砂岩及砂岩夾泥岩為主; 南側之地層剖面 (如圖 15), 主要出露之地層以礫岩為主, 推估厚度可能達 20 m 以上。茲就地形測量結果, 並套繪基址地質圖, 以 3D 透視圖方式呈現基址地質, 如圖 16 所示。

#### 四、監測系統設置與觀測結果

本案例基址除進行全面性地質調查外, 並利用地質調查期間進行邊坡監測系統設置, 包括: 傾斜管、水位觀測井及光達變位監測系統等, 系統設置後並為期 2 年監測, 以瞭解基址邊坡之變動性、可能滑動深度及地下水位分佈情形, 作為後續安全評估之依據。茲就各項安全監測系統設置與觀測結果, 分述如下:

##### 4.1 傾斜管位移監測

為獲取較全面的邊坡位移資訊, 本案例隨地質鑽探作業, 於邊坡 1 ~ 3 階平台進行傾斜管埋設, 包括 B1-2 (10 m)、B1-4 (29 m)、B2-1 (35 m)、B2-2 (35 m)、B2-4 (40 m)、B3-1 (35 m)、B3-2 (40 m)、B3-3 (45 m)、B3-4 (31 m) 等 9 孔, 加上位於第 4 階平台之前期 BH-1 (35 m) 孔, 共計 10 孔傾斜管進行監測, 傾斜管配置如圖 17。

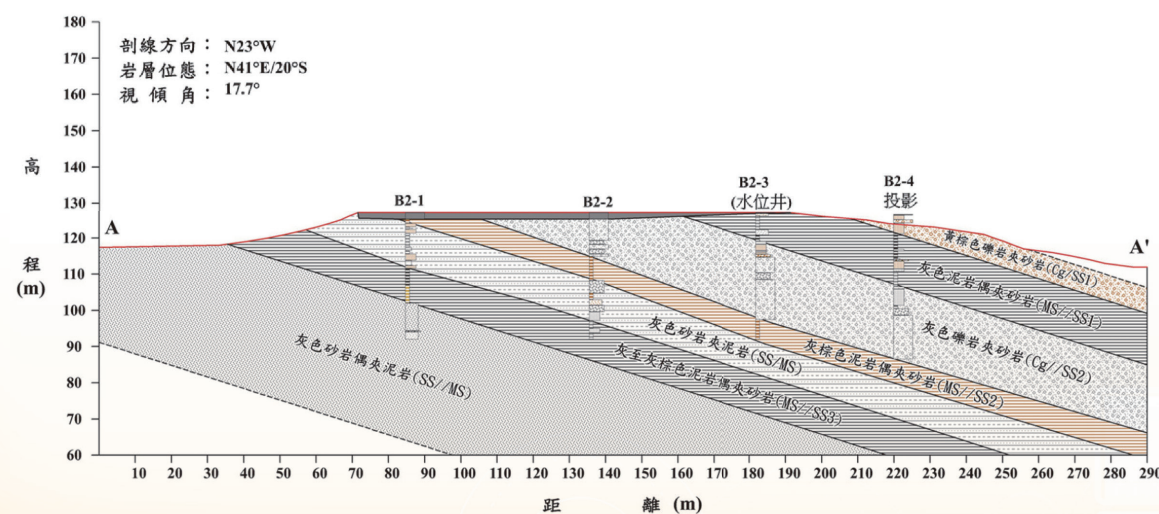


圖 13 地層縱向 A-A' 剖面圖

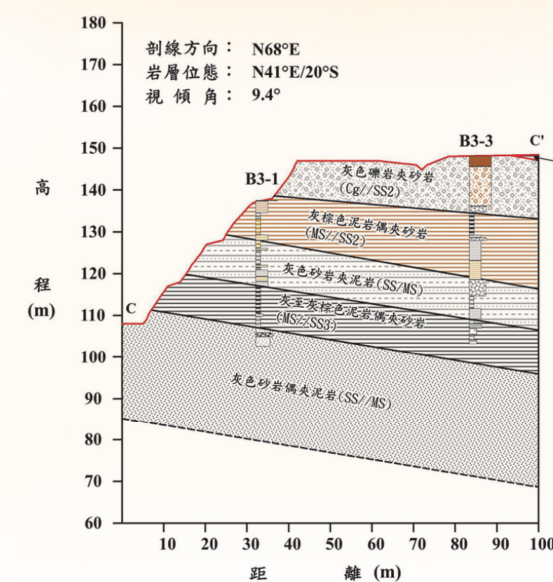


圖 14 北側地層 C-C' 剖面圖

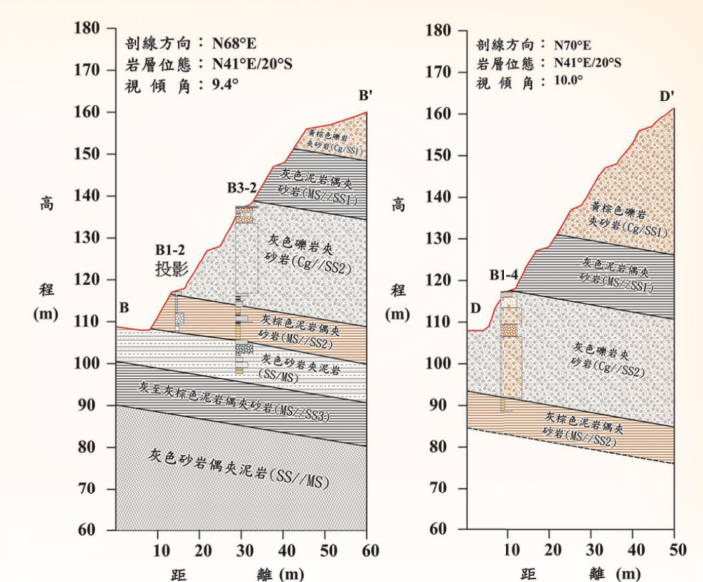


圖 15 南側地層 B-B' 及 D-D' 剖面圖

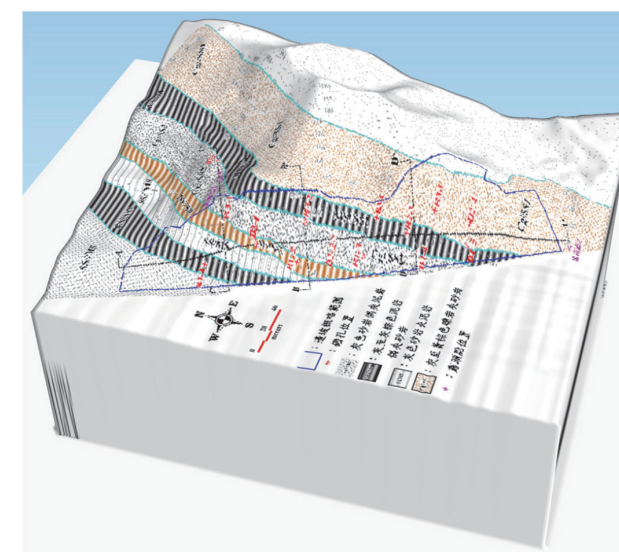


圖 16 案例基址 3D 地質透視圖

傾斜管採用 2.75 吋 ABS 管材, 參考前期監測記錄, 埋設深度均達可能滑動範圍以下深度, 透過各階傾斜管不同深度之位移反應, 了解基址邊坡可能之滑動行為與變動趨勢。監測方式採人工記讀, 頻率為每月 1 次, 遇鄰近區域地震震度達 5 級 (含) 以上或颱風、豪大雨事件, 鄰近測站 24 小時累積雨量超過 350 mm 時進行加測。

為期 2 年之傾斜管觀測結果如圖 18, 顯示垂直邊坡之最大位移量約為 13.15 mm, 其中北側邊坡最大位移量介於 7.06 ~ -13.15 mm 之間, 南側邊坡則介於 7.83 ~ -7.90 mm 之間, 均遠小於警戒值 50 mm, 整體位移量並不顯著, 且略呈北側內縮、南側外擴趨勢。經參閱日本地滑對策

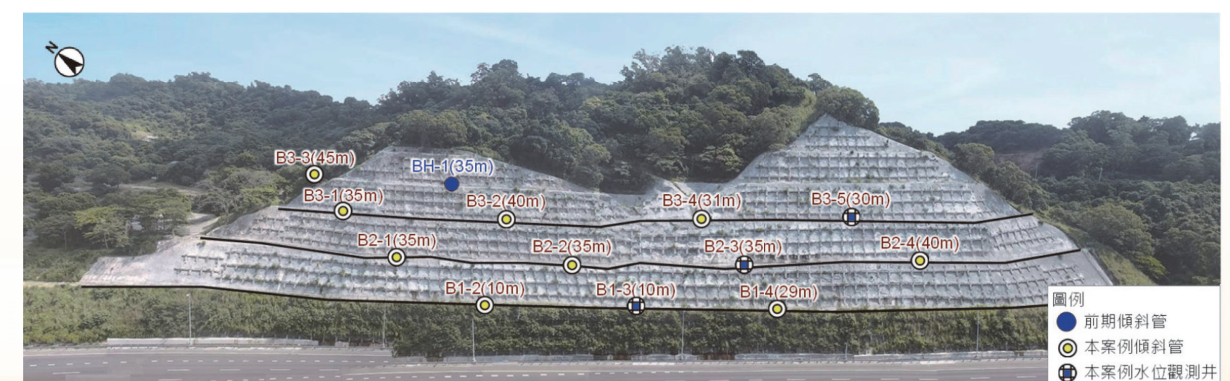


圖 17 案例邊坡監測儀器配置概要圖



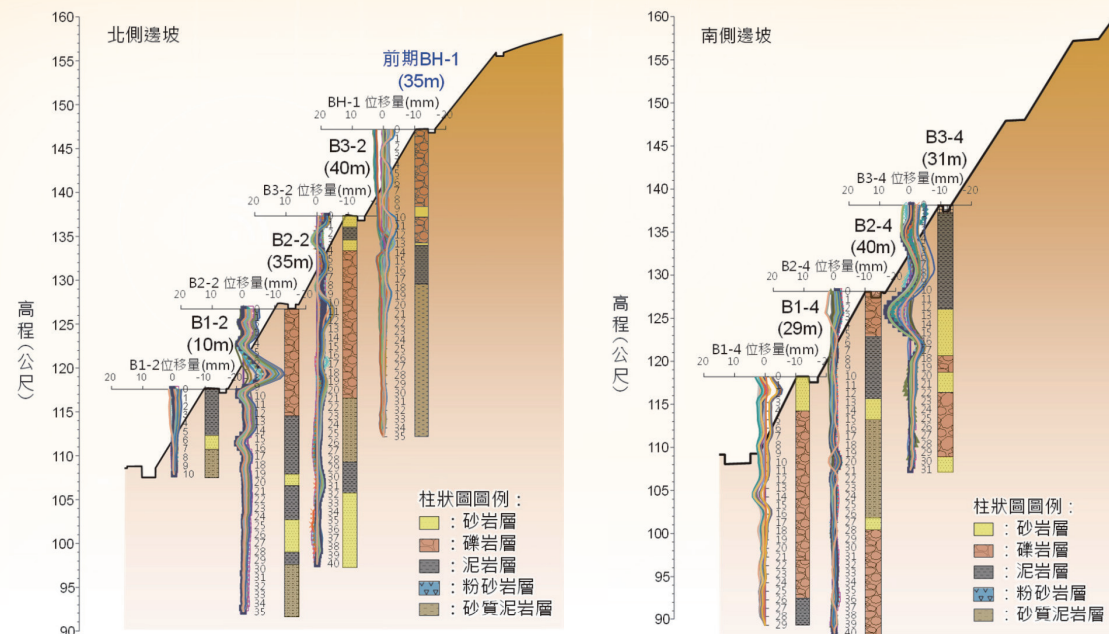


圖 18 案例邊坡傾斜管觀測結果

技術協會之邊坡滑動標準（1978），如表 2，以位移速率為判斷標準，則案例邊坡整體平均日變化量介於 0.22 ~ 0.01 mm，考量監測儀器容許誤差範圍，屬準確定變動~未變動情形。

表 2 日本地滑對策技術協會邊坡滑動標準（1978）

| 變動種別  | 日變化量<br>(mm) | 月變化量<br>(mm) | 一定方向<br>趨勢 | 活動性判斷 |
|-------|--------------|--------------|------------|-------|
| 緊急變動  | 20 以上        | 500 以上       | 非常顯著       | 急速崩壞  |
| 確定變動  | 1 以上         | 10 以上        | 顯著         | 活潑運動  |
| 準確定變動 | 0.1 以上       | 2 以上         | 略顯著        | 緩慢運動  |
| 潛在變動  | 0.02 以上      | 0.5 以上       | 稍有         | 待持續觀測 |
| 未變動   | —            | 儀器誤差內        | 無          | 現況穩定  |

## 4.2 地下水位監測

除傾斜管外，本案例亦隨地質鑽探作業分別於第 1 ~ 3 階平台的 B1-3、B2-3 及 B3-5 等 3 孔鑽孔埋設自記式水壓計，以利案例邊坡地下水位之連續性記錄，水位觀測井配置如圖 17 所示，採 2 吋 PVC 管，監測頻率為每小時記錄一筆。

為期 2 年之地下水位觀測記錄如圖 19，顯示位於第 2、3 階平台之 B2-3 及 B3-5 孔水位隨降雨量變化遠較位於第 1 階平台之 B1-3 孔顯著，監測期間 B1-3 孔水位介於 EL.+109.75 ~

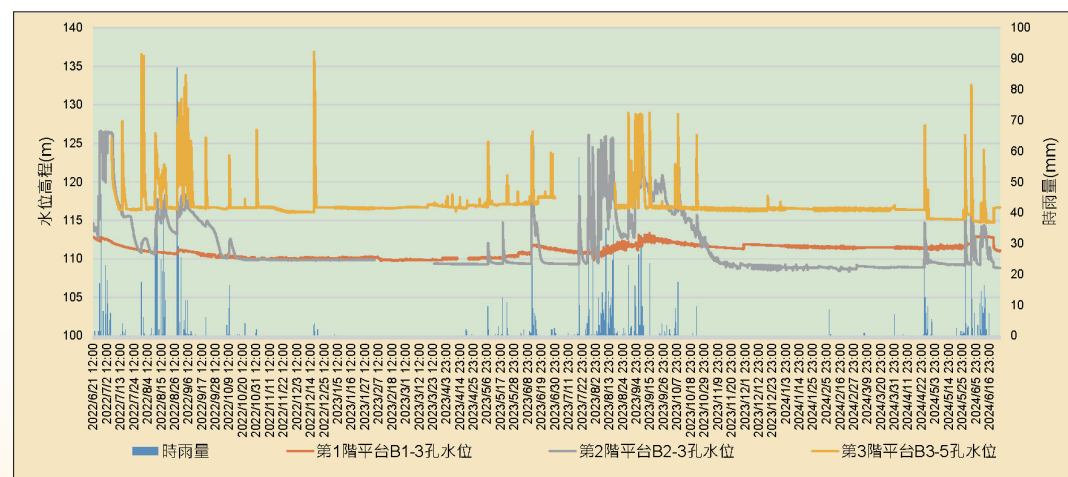


圖 19 案例邊坡地下水位觀測結果

113.39m，約位於地表下 3.76 ~ 7.40m 間；B2-3 孔水位介於 EL.+108.36 ~ 126.62m，約位於地表 ~ 地表下 18.26m 間；B3-5 孔水位則介於 EL.+114.69 ~ 136.87m，約位於地表 ~ 地表下 22.15m 間。根據監測期間現場勘查，第 2、3 階水位達地表處，係受排水溝堵塞積水所致，經現場清除後，水位係有明顯下降情形。此外，推估亦與觀測井所埋設地層之含水特性有關，基址北側主要為泥岩偶夾砂岩及砂岩夾泥岩，基址南側則以礫岩夾砂岩為主，基址南側地層相對有較佳的含水特性。

## 4.3 智能 LiDAR 變位預警監測系統

傳統之結構物變位監測，多半利用全測站儀，以人工測繪方式進行單點、線狀量測，量測過程除費時費工且操作過程易生誤差外，獲取之測繪資料又因數據龐大整理不易，實難以即時資訊呈現並達預警效果。鑒此，本案例使用光達（LiDAR）變位監測系統進行全天候邊坡掃描，利用光達面狀掃描特性獲取邊坡三維形貌，掃描獲取之點雲資料透過人工智能物聯網技術自動濾除雜訊並將資料即時上傳雲端伺服器，經以法國 Rennes 大學開發之 M3C2 三維分析理論進行變位即時解算，並比對不同時序之空間資訊後，進而獲得邊坡即時位移狀況，以預測可能之破壞行為。此外，配合管理值之設

定，可透過物聯網之告警裝置連動，達到即時變位監測預警之效益。

本案例採用之光達監測系統，以不移動、不拆卸之固定方式進行設置，並透過內置之自記式傾度儀掌握監測期間資料擷取之穩定性。共計裝設 4 座光達監測機站於本案例路塹邊坡對向之交控桿與燈桿，機站配置如圖 20 所示，掃描面積達 6,680 m<sup>2</sup>，總計約 600 萬個點雲資訊，光達掃描範圍及點雲分布如圖 21。

歷經 2 年的光達系統全天候掃描，結果如圖 22，監測期間單月最大位移量介於 -4.01 ~ 2.27 cm，整體邊坡位移亦呈北側內縮、南側外擴趨勢；單月最大平均位移量僅約 1.79 cm，考量儀器容許誤差，顯示監測期間邊坡並無明顯位移。

而為確認光達監測結果是否受環境等因素而影響觀測結果之正確性，本案例於監測期間不定期進行複測，以了解監測系統是否存有異常跡象，俾利維管單位進行維護。複測方式以全測站儀配合基址邊坡 11 處較不受植生等環境影響區域設置之規標點位進行量測比對，如圖 22，複測結果顯示案例監測期間並無異常狀況，可提升監測結果之可信度。

## 4.4 整體監測結果比較

案例邊坡經 2022 年 6 月 ~ 2024 年 6 月為期 2 年監測，期間並歷經 2022 年 9 月 17 日關山地



圖 20 案例邊坡光達變位監測系統機站配置概要圖



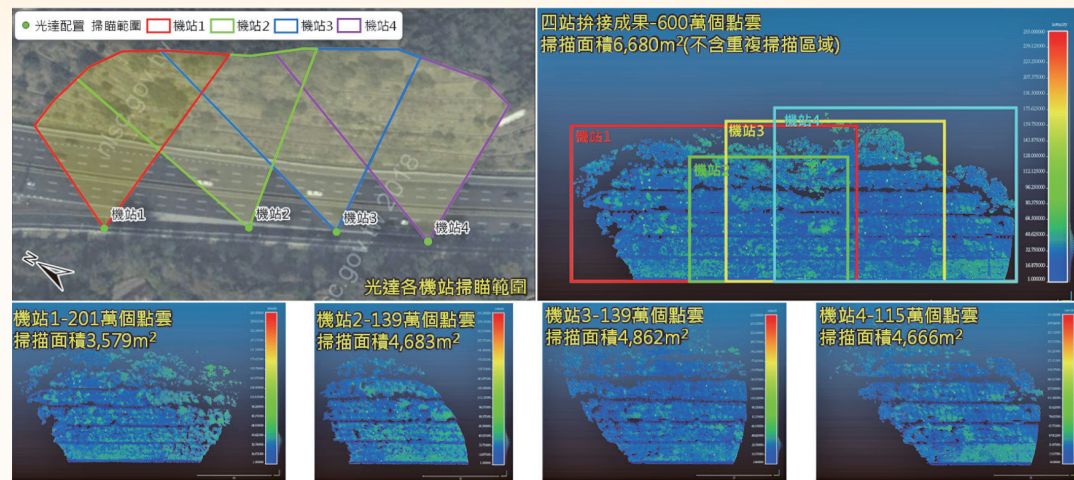


圖 21 案例邊坡光達掃描範圍及點雲分佈

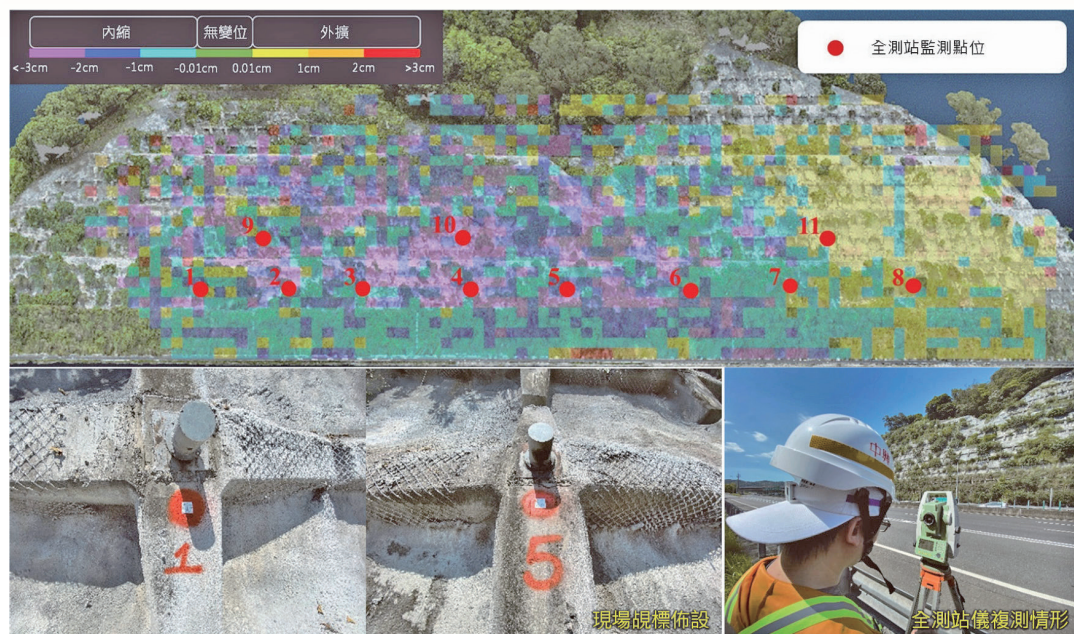


圖 22 案例邊坡光達變位監測結果及監測系統複測

震（規模 6.6）、2022 年 9 月 18 日池上地震（規模 6.8）、2023 年 6 月 10 日山地門地震（規模 5.4）、2024 年 4 月 3 日花蓮地震（規模 7.1）、2023 年 7 月杜蘇芮颱風、2023 年 8 月蘇拉颱風、2023 年 9 月海葵颱風、2023 年 10 月小犬颱風等地震及颱風豪雨事件。

監測結果顯示，傾斜管最大垂直位移量僅約 13.15 mm，平均日變化量小於 0.22 mm，屬準確定變動～未變動情形；水位觀測井則顯示第 2、3 階受降雨量變化影響較第 1 階顯著，第 1 階水位約位於地表下 3.76 ~ 7.4 m；第 2、3 階水

位則分別位於地表～地表下 18.26 m 及 22.15 m，除受排水溝堵塞積水影響外，推估亦與觀測井所埋設地層之含水特性有關；光達監測則顯示單月最大位移量介於 -4.01 ~ 2.27 cm，平均最大位移量僅 1.79 cm，無明顯位移。

綜整監測結果，案例邊坡於監測期間並無明顯變動情形，係屬穩定。而透過傾斜管及光達監測結果可發現，邊坡整體變動趨勢略呈北側內縮、南側外擴情形，惟幅度甚微。建議仍應對邊坡持續進行監測，以作為預警及安全評估之參考依據。

## 五、結論

綜整本案例地質調查及監測結果，歸納結論如下：

1. 對於多數土木人員而言，地質調查多等同「地質鑽探」，此觀點於一般均勻性高之沖積平原，或許尚能滿足規劃設計需求，惟若於地質條件複雜多變之山區，單就地質鑽探恐不易獲取充足之地層資訊。建議執行包括：可涵蓋「面」的地表地質調查、「線」的地球物理探測及「點」的地質鑽探與相關試驗，由較巨觀且全面的整體調查，再視需求調整局部之調查精細度，以獲取最高效益。
2. 本案例基址經地表地質調查、地球物理探測及地質鑽探等調查，經判釋，共計出露 7 層岩層，北側主要出露地層以泥岩偶夾砂岩及砂岩夾泥岩為主；南側主要出露地層則以礫岩為主。基址代表性位態 N41°E/20°S 與基址邊坡走向 N22°W 夾角約為 63°，研判基址應屬斜交坡。
3. 本案例除地質調查外，並利用地質調查期間進行邊坡監測系統設置，包括：傾斜管、水位觀測井等，系統設置後並為期 2 年監測，以瞭解基址邊坡之變動性、可能滑動深度及地下水位之分佈。監測結果顯示，傾斜管最大垂直位移量僅約 13.15 mm，遠小於警戒值，整體變動甚微；若就位移速率，平均日變化量介於 0.01 ~ 0.22 mm，屬準確定變動～未變動情形；水位觀測結果則顯示第 2、3 階受降雨量變化影響較第 1 階顯著，第 1 階水位約位於地表下 3.76 ~ 7.40 m；第 2、3 階水位則分別位於地表～地表下 18.26 m 及 22.15 m，除受排水溝堵塞積水影響外，推估亦與觀測井所埋設地層之含水特性有關。
4. 有別於傳統多利用全測站儀，以人工測繪方式進行結構物變位監測，本案例使用光達變位監測系統進行全天候邊坡掃描，獲取之點雲資料透過人工智能物聯網技術自動濾除雜訊並將資料即時上傳雲端伺服器，經即時解

算、比對不同時序之空間資訊，進而獲得邊坡位移狀況，以預測可能之破壞行為。另配合管理值設定，透過物聯網之告警裝置連動，達到即時變位監測預警之效益。光達監測結果顯示，監測期間單月最大位移量介於 -4.01 ~ 2.27 cm，平均最大位移量僅 1.79 cm，邊坡整體變動略呈北側內縮、南側外擴趨勢，與傾斜管觀測結果有其一致性。

5. 本案例於 2022 年 6 月 ~ 2024 年 6 月監測期間，歷經 2022 年 9 月 17 日關山地震（規模 6.6）、2022 年 9 月 18 日池上地震（規模 6.8）、2023 年 6 月 10 日山地門地震（規模 5.4）、2024 年 4 月 3 日花蓮地震（規模 7.1）、2023 年 7 月杜蘇芮颱風、2023 年 8 月蘇拉颱風、2023 年 9 月海葵颱風、2023 年 10 月小犬颱風等地震及颱風豪雨事件，並無邊坡明顯變動情形，顯示監測期間邊坡均屬穩定。後續仍應對邊坡持續進行監測，以作為預警及安全評估之參考依據。

## 參考文獻

1. 中華民國大地工程學會（2017），「山坡地監測準則」。
2. 內政部（2023），「建築物基礎構造設計規範」。
3. 林啟文（2013），「五萬分之一臺灣地質圖幅及說明書 - 旗山」，圖幅第五十六號，經濟部中央地質調查所。
4. 青山工程顧問股份有限公司（2021），「國道 3 號北上 383k+348~383k+719 邊坡地質鑽探、觀測儀器設置及邊坡安全評估工作」報告書。
5. 萬鼎工程服務股份有限公司（2023），「國道 3 號北上 383k+348~383k+719 邊坡整治工程委託測量、地質調查及設計技術服務工作」邊坡測量大地調查成果報告書。
6. 陳文山，「臺灣西南部的造山演化史」，中央大學地球科學系演講簡報。
7. 陳文山、吳逸民、楊耿明、葉柏逸、洪嘉佳、楊清淵、柯明淳、柯孝勳（2024），「臺灣地震帶」，國家災害防救科技中心。
8. 廖瑞堂、陳昭維、紀宗吉、林錫宏（2013），「由台灣監測案例探討邊坡位移量之管理值」，土工技術，第 136 期，第 59-70 頁。



# 公路隧道長期監測案例探討

林衍丞 台灣世曦工程顧問股份有限公司 / 計畫副理、大地技師、應用地質技師

何金益 台灣世曦工程顧問股份有限公司 / 計畫工程師、大地技師

歐皓智 台灣世曦工程顧問股份有限公司 / 工程師、土木技師

劉正隆 勝田工程技術顧問有限公司 / 工程師、應用地質技師

王豐仁 勝田工程技術顧問有限公司 / 負責人、應用地質技師

## 一、前言

台灣自民國 60 年代十大建設開始，公路、鐵路、輸水…等各類隧道工程即快速蓬勃發展，包括民國 80 年代國道 3 號一系列隧道陸續完工，國內最長公路隧道（雪山隧道）於民國 95 年通車，象徵東部、南部居民擁有一條安全回家的路，蘇花改與南迴改隧道工程於民國 109 年完工啟用，近期有更多長大隧道工程規劃、設計與施工中。隨著國內重大交通建設相繼完成，營運階段之維護與管理需求增加，故有必要落實全生命週期管養制度及引入新科技應用技術，以提升隧道維管執行效能。

本文以某營運中隧道為例，先介紹隧道工程全生命週期理念，應從規劃與設計階段即詳加考量通車後之營運管理、維修及成本問題，包括：(1) 建立完整之地質資料以供研析圍岩—支撐互制系統，及檢核於全生命週期中，地質條件隨時間之變異情形；(2) 可能涉及地質、環境敏感區之調查分析成果、風險評估及因應對策；(3) 全光譜方案思維進行研擬、比較，以公路設施全生命週期之觀點詳加評估各量化指標；(4) 記錄與研析施工中重要事件，以供後續設施維護補強工法決策之參考；(5) 建置施工中與營運階段監測

系統，採長期監測之觀念於隧道地質弱帶區段安裝監測儀器，瞭解圍岩特性及期達預警之功效；(6) 統整歷年監、檢測及維修紀錄，評估異狀原因，以及時對症下藥。最後探討該隧道目前辦理營運階段長期監測之相關作為與觀測結果，期能提供日後建構新世代公路隧道工程之參考。

## 二、隧道監測之工程地質調查與風險評估

本案例隧道沿線地質主要為潮州層之硬頁岩為主偶夾粉砂岩，區域性地質構造為複褶皺，局部地區具緊密拖曳褶皺及破碎帶（如圖 1），亦常見沿劈理面發育之剪裂帶，工址整體地質構造複雜且岩性單調（羅國峯，2019），增加地質調查工作難度，為掌握隧道沿線地質情況，設計階段採用長距離水平探查孔（600 m），及隧道全線地電阻影像剖面（RIP）探查，如圖 2 所示，以掌握隧道地質及施工高風險路段。

為提供隧道工程分析、設計及監測使用之完整地質資料，可進一步建立工址地質概念模型，從區域地質文獻回顧、地表地質調查、地球物理探測、地質鑽探（確認地層、構造、補充及取得大地工程參數）等，並經由有經驗之地質師

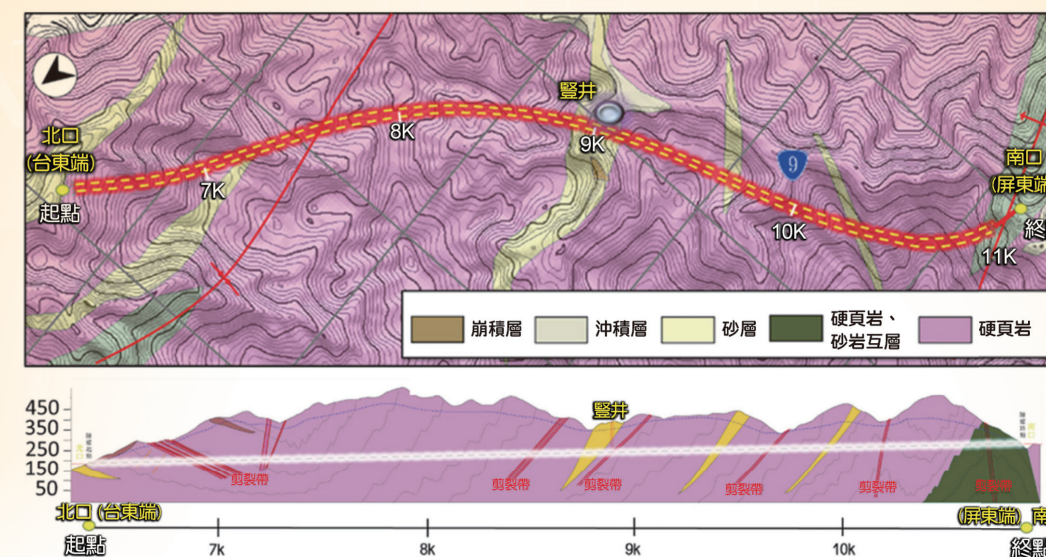


圖 1 隧道地質平、剖面圖

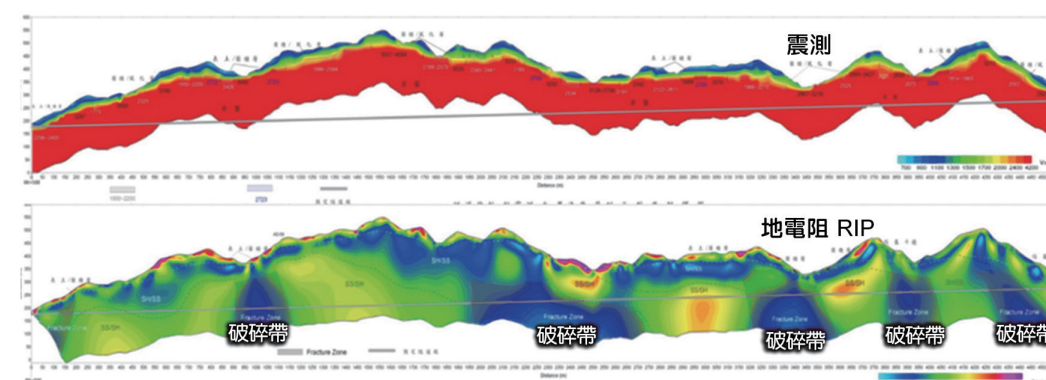


圖 2 隧道全線地球物理探測成果

綜合各項資訊，建構出合理之三維地質模型，在隧道興建之初即掌握剪裂帶、破碎帶及湧水潛能，可作為後續施工中監測配置及完工營運監測重點之參考。

## 三、隧道全光譜設計思維及監測考量

### 3.1 路線設計

設計階段考量節能減碳，採減少土方開挖及結構材料使用，藉由詳細之路線方案研擬，隧道全長由規劃階段之 5,000 m，縮短 400 m 之隧道段，以中長跨度之橋梁替代，且調降原規劃縱坡由 3% 至 2%，可增加隧道營運安全及降低車行排廢與耗油量，有利維管及隧道延壽。

### 3.2 隧道設計

主隧道考量長期穩定、斷面設計納入維修補強淨空餘裕、排水容量與襯砌設計水壓，於重點區段（湧水或破碎帶）安裝襯砌背側水壓計，以長期監測隧道結構全生命週期之水壓變化情形，本案例營運監測、檢測及維管流程如圖 3 所示。

通風豎井設計考量後續營運維護，於井側設置樓梯及隔間牆，以供人員進行管線巡檢及維護，井口預留設備材料孔，可供吊放儀器做定期檢測（豎井襯砌狀況記錄），或必要時可供人員施做結構補強。



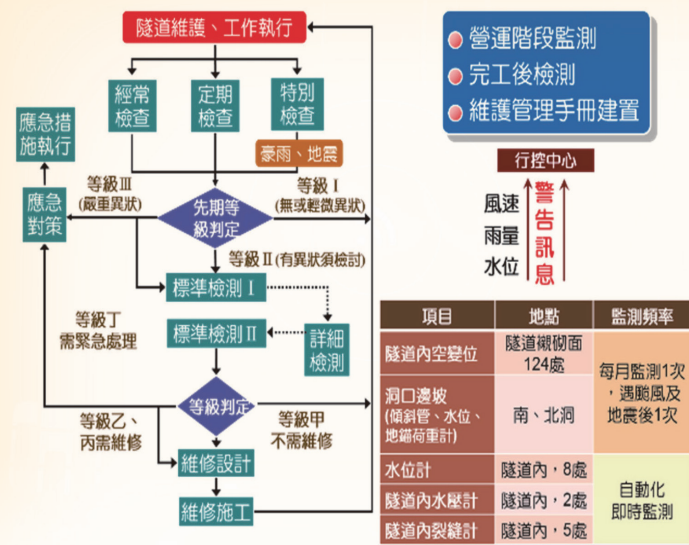


圖 3 隧道維護管理流程圖

施工中每 10 ~ 30 m 設置 1 處副計測斷面（收斂岩釘），及每 200 m 左右設置 1 處主計測斷面（收斂岩釘、伸縮儀、計測岩栓及噴凝土應變計），於安裝與降挖後 7 天內，每天監測 1 次，1 個月後頻率改為每週監測 1 次，監測 6 個月後如經評估隧道變位已屬穩定狀態則改為每月監測 1 次。本計畫亦針對隧道營運階段規劃監測，於襯砌面上安裝 124 處收斂岩釘斷面，並每個月辦理 1 次內空變位監測。

### 3.3 地質風險評估與監測規劃

本工程整合各階段成果（地質資料、抽坍與湧水事件位置、規模、致災模式…），對隧道沿線作地質風險評估（如圖 4），依風險程度規劃佈設營運階段監測，以瞭解病症、找出真正病因，以對症下藥。本隧道各類風險地質模式說明如後。

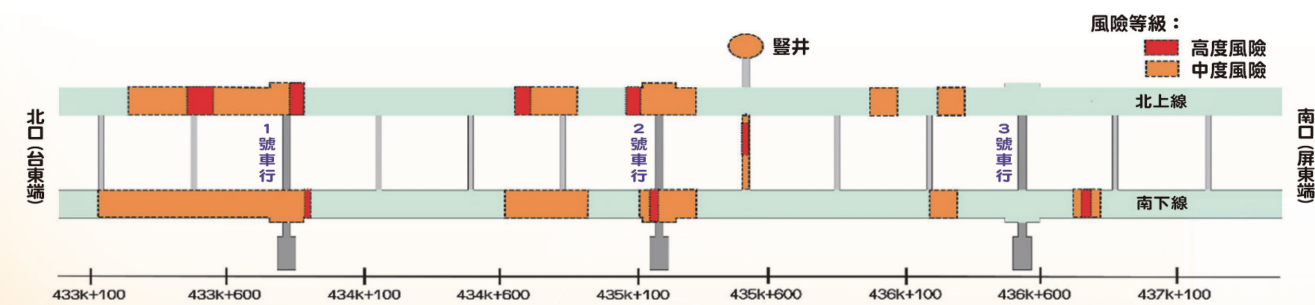
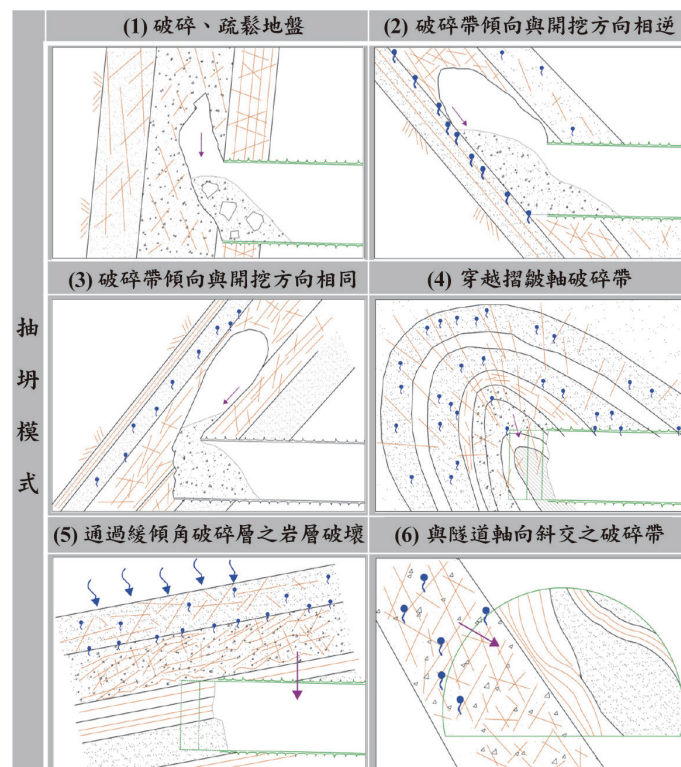


圖 4 隧道地質風險分類平面圖

### 1. 隧道開挖抽坍模式分類

歸納本隧道抽坍模式，可概略分為：(1) 破碎、疏鬆地盤，破壞時多為垂直坍落；(2) 破碎帶傾向與開挖方向相逆，破壞時多沿弱面順向滑動；(3) 破碎帶傾向與開挖方向相同，破壞時多為小規模高角度坍滑；(4) 穿越褶皺軸破碎帶，向斜區易湧水，背斜區易鬆弛坍落；(5) 通過緩傾角破碎地層之岩板破壞，破壞多為頂拱落盤且抽坍規模較大；(6) 與隧道軸向斜交之破碎帶，破壞時多為側壁擠壓，相關類型如表 1 所示。

表 1 本隧道抽坍模式彙整表



隧道開挖過程遭遇不良地盤之抽坍段，長期若地盤隨時間弱化可能對襯砌造成不良影響，因各類抽坍模式，於日後對襯砌施加之壓力大小、方向、範圍均不相同，故災害歷史之瞭解對日後營運階段監測甚為重要。

### 2. 隧道開挖湧水模式分類

本隧道湧水模式可概略分為：(1) 斷層破碎帶型、(2) 構造富水型、(3) 微裂隙型等類型，如表 2 所示。開挖過程中曾發生 27 T/min 之突發巨量湧水，經緊急處理、補充地質調查建構地質模式，及打設密集排水管與灌漿（羅國峯等，2018），終順利通過湧水破碎段，惟湧水地盤未來仍可能持續出水造成岩體弱化或襯砌滲水等問題，故針對向斜構造軸部或剪裂破碎帶等區域，及施工中曾遭遇較大湧水位置規劃長期監測，以關注（地表降雨過後）地下水位與隧道出水量之變化關係。

### 3. 隧道外支撐異狀成因分類

隧道開挖外支撐異狀（噴凝土裂縫、鋼支保挫屈）可能成因可概略分為：(1) 岩體強度低，如位於破碎硬頁岩夾剪裂泥帶、(2) 岩體弱面異向性，尤其為砂頁岩互層時，因岩性強度、透水性及異向性等差異，弱面因水浸潤而弱化，易沿其滑動引致變形及噴凝土開裂、(3) 地下水因素，造成岩盤細粒料流失或岩體弱化、(4) 擠壓性岩盤，岩盤強度比（岩體強度／現地應力）越低擠壓潛能越高、(5) 依時變形特性，岩體受地下水弱化影響，隨時間有強度降低情況，致隧道

產生塑性潛變（超過潛變應力門檻）、(6) 應力交互影響，包括施工順序及雙孔互制之效應、(7) 大地應力，板塊擠壓造成之岩體應力增加。

隧道施工階段曾出現支撐異狀區段，考量岩體可能俱依時變形潛勢而持續弱化，故於營運階段加以規劃襯砌微變位監測，以獲得斷面精密變位及探討襯砌受力行為，有利隧道安全評估。

### 4. 隧道風險回饋營運階段監測配置

營運階段監測佈設考量歷次抽坍與湧水事件、施工中監測變形趨勢、沿線地盤特性、易受震損壞區段及施工補強紀錄等，針對高風險區段及預期可能變形或產生異狀之關鍵位置，優先配置相關監測項目包括：洞口邊坡傾斜管、水位井及地錨荷重計，隧道內空變位、微變位監測、裂縫計、水壓計、流速計、水位計、襯砌影像掃描及豎井襯砌紀錄等，除定期關注趨勢變化外，亦可作為日後比對研判之參考，以充分掌握隧道現況。本工程營運監測配置詳如圖 5。

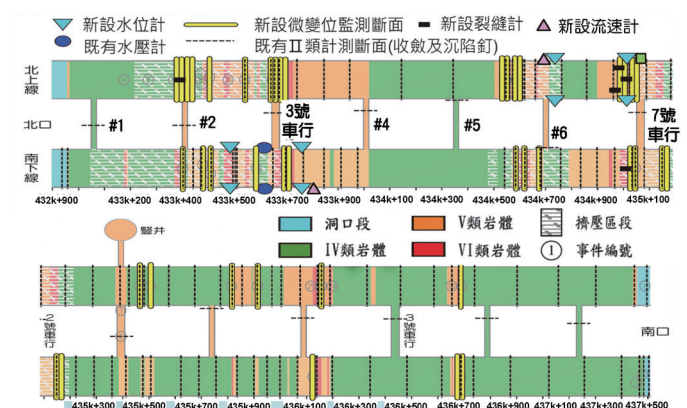
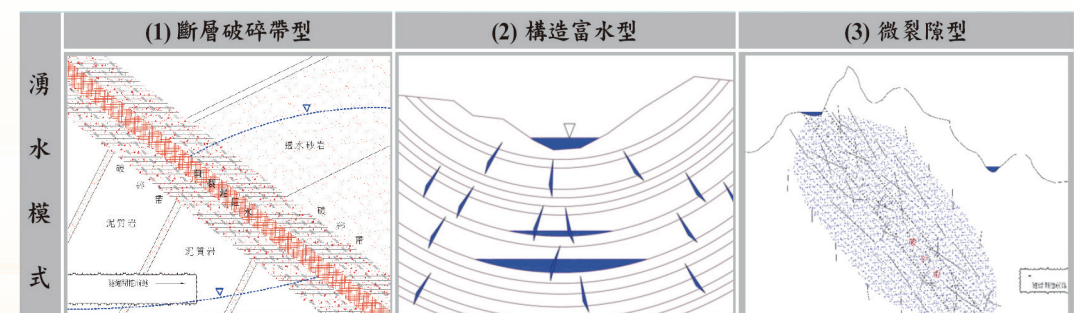


圖 5 隧道監測配置平面圖

表 2 本隧道湧水模式彙整表





#### 四、營運階段監測作業

本案例營運中隧道長期監測包括：洞口邊坡監測、隧道內空變位、排水量、裂縫、微變位監測、襯砌影像掃描及豎井襯砌錄影等，並參考黃燦輝等（1997、1998、2008）建議之隧道安檢準則，據以辦理之隧道安全評估及等級分類，相關作業分別說明如後。

##### 4.1 洞口邊坡監測

洞口是隧道進出的唯一通路，故需確保

其穩定性，本隧道洞口係採格樑護坡加地錨，施工中配置傾斜管、水位井、沉陷點及地錨荷重計等觀測儀器進行量測。隧道南洞口南下線施工中曾因地質變異（風化破碎岩段較北上線為長）問題，監測顯示邊坡有位移情況，經現場採打設補強岩栓及地錨，終抑制邊坡滑動。營運階段仍持續辦理監測，量測頻率為每月1次，目前觀測結果呈穩定情況（如圖6），後續仍持續關注及辦理定期觀測。

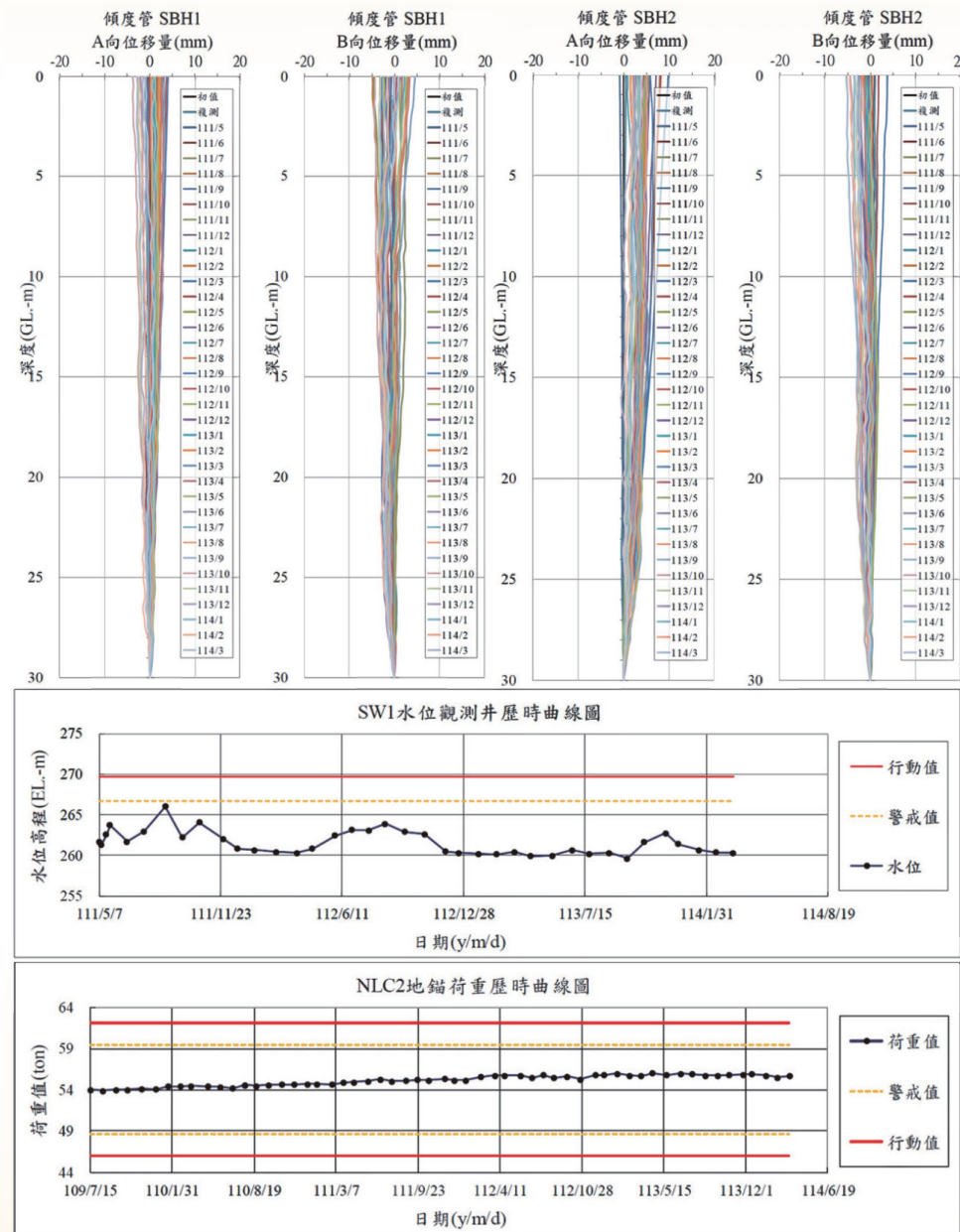


圖 6 隧道洞口邊坡監測結果

##### 4.2 隧道內空變位監測

施工期間為瞭解隧道周圍地盤與支撐互制行為，爰於外支撐上佈設包括：內空變位（收斂釘及頂拱沉陷釘）、伸縮儀、計測岩栓、噴凝土應變計等觀測儀器，以確保隧道安全性及經濟性。營運階段於隧道兩側襯砌面及通風隔板中央下緣設置反光規標（如圖7），觀測結構是否有異常變位趨勢，藉以輔助評估隧道安全。

以施工中某次抽坍事件為例，開挖當時因遭遇裂隙水滲流使細粒料流失，加上岩盤解壓致破碎岩塊鬆動呈漸進式坍落，鬆弛範圍擴大使上方岩壓增加造成支撐遭壓毀。施工中隧道內空變位監測如圖8所示，各測線之監測歷時曲線顯示，位移量有隨隧道開挖輪進增加，惟尚未超出警戒值且經抽坍處理已順利通過，經監測穩定後已完成鋼筋混凝土襯砌，並完工通車。

營運階段於同一里程之隧道襯砌上裝設收斂岩釘持續監測，監測成果如圖8所示，隧道各淨空測線累計變位量測結果介於 $\pm 5$  mm左右，無持續沿同方向之異常變化趨勢，僅觀察到隧道通風隔板結構有隨季節溫度變化，及混凝土潛變

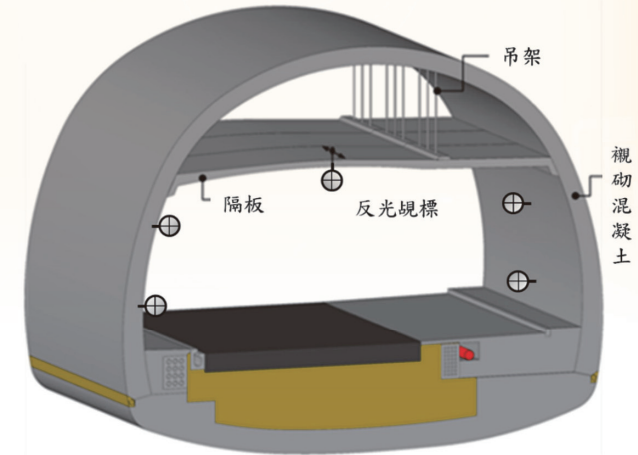


圖 7 營運階段隧道內空變位監測配置示意圖

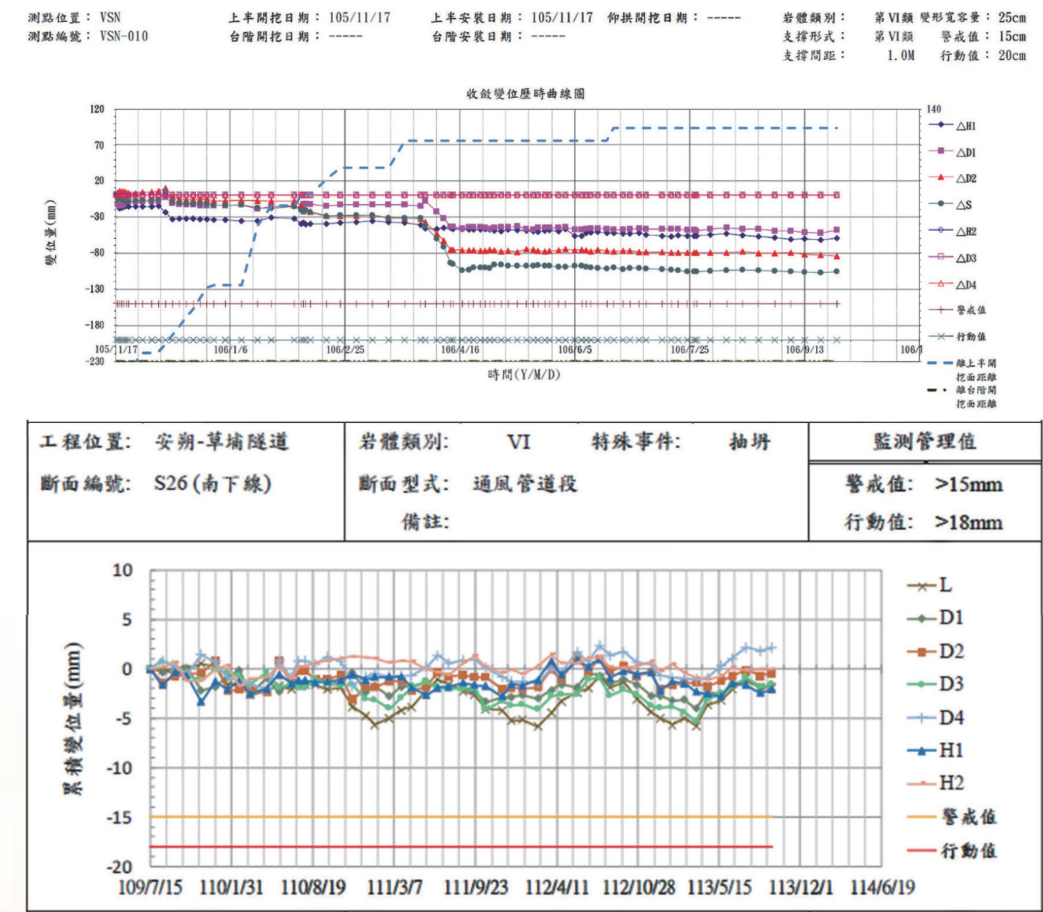


圖 8 施工中隧道內空變位監測結果



與乾縮所引起之長期變位值，且均小於警戒值，現況隧道襯砌尚屬安全狀態。

#### 4.3 地質弱帶監測

該隧道為瞭解營運期間襯砌背後岩盤之水壓力變化、硬頁岩地盤之擠壓或剪裂帶位移對隧道襯砌之影響，本案針對施工中遭遇抽坍、湧水、擠壓等地質脆弱敏感區段佈設營運階段監測儀器（水壓計、水位計、流速計及裂縫計等，詳表 3 及圖 9），以建立現況監測資料庫作為未來長期維護管理之評析基準。本隧道地質弱帶監測為獲得即時觀測數據，採建置自動化即時傳輸系統（如圖 10），數據資料匯整於網路監測管理平台之資料庫，可供維管人員查詢掌握隧道現況。

表 3 本隧道地質弱帶監測儀器彙整表

| 儀器項目 | 水壓計               | 超音波水位計             | 流速計               | 電子裂縫計                |
|------|-------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| 設置位置 | 襯砌側壁外             | 集水井壁面              | 排水溝底              | 地質弱帶段施工縫，或新增擴展裂縫     |
| 數量   | 2 處               | 8 處                | 2 處               | 5 處                  |
| 觀測目的 | 瞭解岩體水壓變化，評估隧道襯砌受力 | 觀測水位高低變化，瞭解隧道出水量變化 | 配合水位計量測結果，推估隧道出水量 | 觀測裂縫變化，以評估裂縫狀況與結構安全性 |

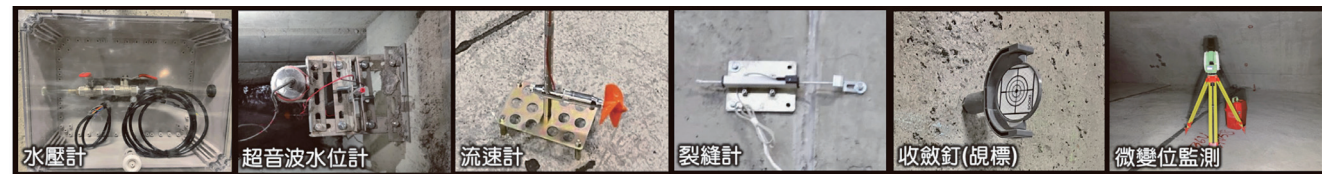


圖 9 本隧道地質弱帶監測儀器照片

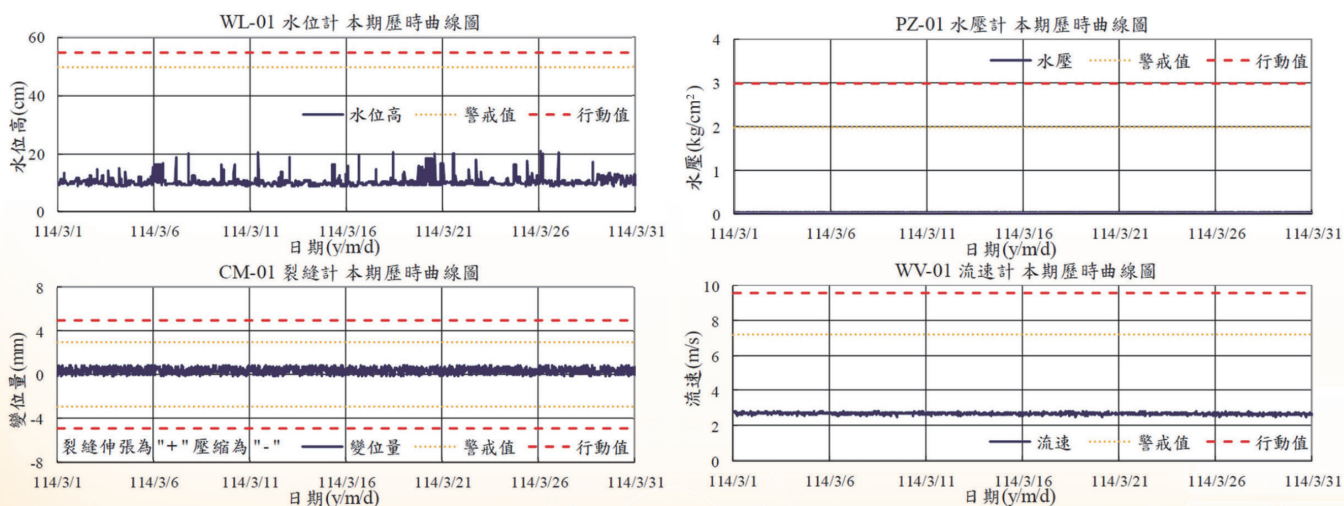


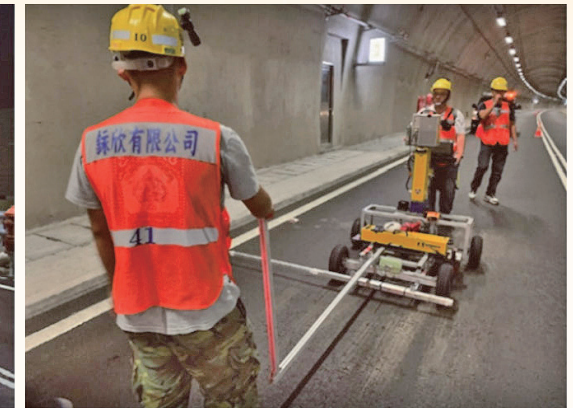
圖 10 本隧道自動化監測歷時曲線圖

#### 4.4 襯砌影像掃描作業

本案利用瑞士 Amberg 公司 GRP5000 雷射掃描系統建立隧道襯砌完工後影像，定期每 5 年掃描監測 1 次，透過襯砌掃描影像可快速記錄隧道襯砌及通風隔板現況，由影像展開圖進行異狀判釋與描繪，記錄異狀種類、里程位置等，並至現場作目視檢查予以查核，最後製成隧道襯砌異狀展開圖，可供日後比對研判隧道襯砌有無新增異狀。本案掃描範圍包括主隧道、連絡通道及通風管道內，為國內首次於通風管道內辦理襯砌影像掃描之隧道，及首創以空拍機搭配吊架辦理豎井襯砌錄影，相關現場掃描作業照片如圖 11 所示。



(1) 主線隧道掃描作業



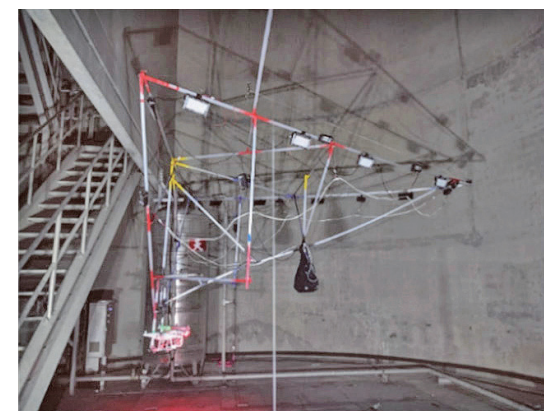
(2) 通風管道掃描作業



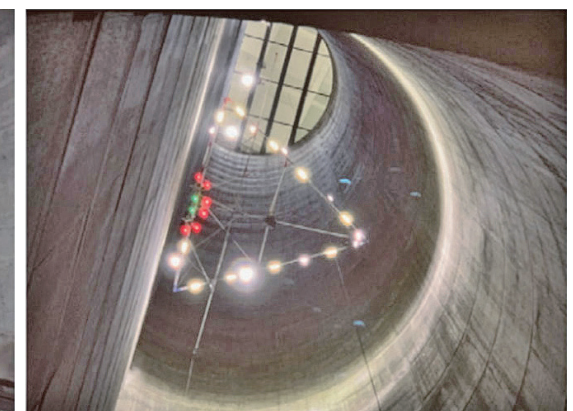
(3) 通風管道掃描作業



(4) 連絡通道掃描作業



(5) 豎井錄影作業



(6) 豎井錄影作業

圖 11 襯砌影像掃描及豎井錄影作業現場照片

掃描儀係記錄 360° 壁面影像，解析度可判釋寬度 0.5 mm 以上與長度 1.0 cm 以上之裂縫，及壁面滲水或白華情況。考量隧道已營運通車，於掃描作業時如遇車輛行經將有殘影現象，故主隧道掃描需分階段交維管制內外車道，採二次掃描以獲得完整影像並拼接校正，如圖 12 所示。

#### 4.5 隧道斷面微變位監測

一般隧道於營運初期無明顯裂縫分布，尚無法由襯砌影像繪製之異狀展開圖判斷受力變化，亦無法據以推斷肇因，且營運階段因周圍岩體變形已收斂，襯砌異狀發生區之初期徵兆有限（變形量不足），造成判斷困難，故為儘早



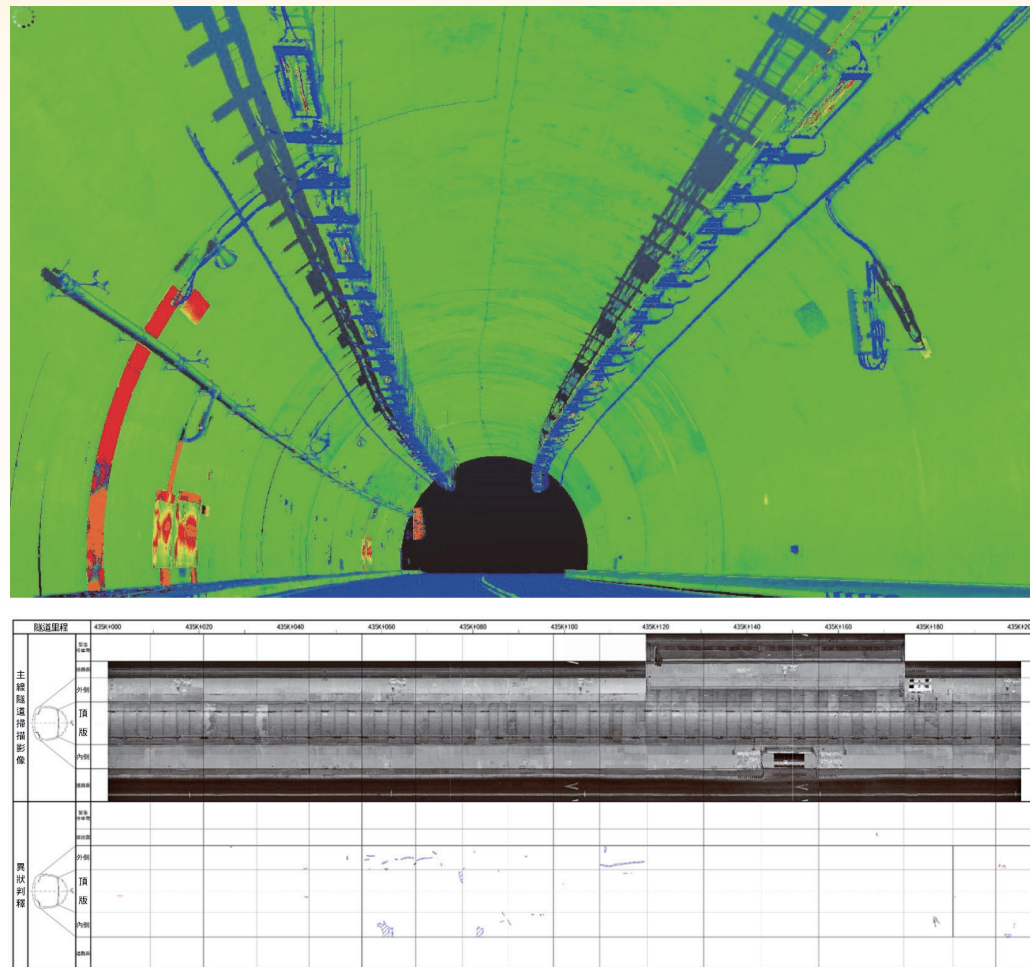


圖 12 襯砌影像掃描成果

掌握襯砌變形肇因，本隧道引入以高精度、三維絕對座標、全斷面多測點之變位監測成果，依邱雅筑（2014）建議之襯砌位移分離技術（將測量結果拆解為水平平移、垂直平移與旋轉，以及扣除掉剛體運動的斷面實際變形量），藉以評估現況受力機制及其變化，提供關鍵資訊以利維護作業安排。

隧道襯砌全斷面微變位作業係透過定期量測相同之控制點及導線的絕對座標，於隧道內相同斷面進行間距 0.3 ~ 0.5 m 之高精度全斷面測量，有效掌握襯砌變位，並配合其他隧道檢測成果，以綜合評估隧道外力肇因及其變化之影響。

本案參考歷史抽坍及擠壓事件，於地質弱帶佈設共計 40 處斷面進行襯砌微變位監測，初步量測比對成果如圖 13 所示，目前變位向量大

多無特定方向趨勢，整體運動量值極小，後續待監測時程拉長，可持續觀測隧道結構是否有變位之趨勢，以研判異狀成因及建議相關處理方式。

## 五、結語

公路隧道需引入全光譜設計理念，在設計階段即予以考量隧道工程全生命週期管理，透過建立完整之地質資料、施工中與營運階段之長期監測，及統整施工紀錄與監、檢測資料，採積極式維護理念，主動掌握隧道結構特性隨時間之演化行為，研判可能引致破壞之潛在因子及其模式，並透過自動化監測與定期觀測資料，與襯砌掃描影像進行比對及研判，方得嚴謹的診斷破壞機制及評估隧道安全，達兼顧行車安全、隧道耐久穩固，及全光譜隧道設計思維與監測之目標。

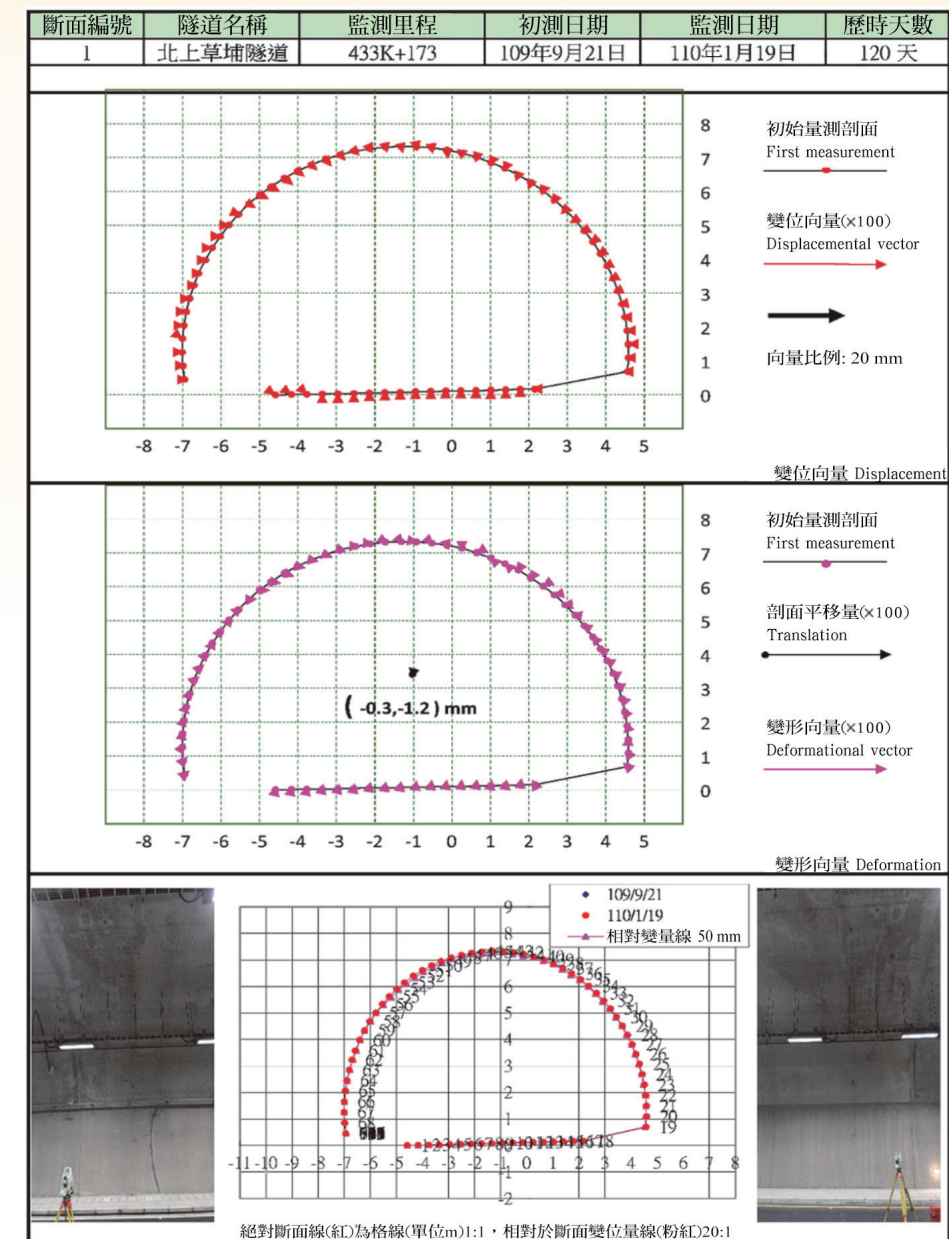


圖 13 隧道襯砌微變位監測成果展示圖

## 參考文獻

- 黃燦輝、鄭富書（1997），「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂 (I)」，交通部專題研究計畫成果報告。
- 黃燦輝、鄭富書（1998），「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂 (II)」，交通部專題研究計畫成果報告。
- 黃燦輝、林銘郎、王泰典（2008），「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。
- 邱雅筑（2014），「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。
- 羅國峯、林衍丞、陳正勳、吳文隆（2019），「南迴公路草埔隧道遭遇大量湧水案例探討」，第 18 屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會。
- 羅國峯、曾正郎、郭鑑智、王泰典（2018），「台 9 線南迴公路安朔草埔段隧道異常湧水案例」，地工技術，第 158 期，第 75-86 頁。



# 桃園國際機場多功能大樓施工中 桃園捷運潛盾隧道安全監測

何金益 台灣世曦工程顧問股份有限公司 / 大地技師

歐皓智 台灣世曦工程顧問股份有限公司 / 土木技師

## 摘要

桃園機場多功能大樓為第三航站區計畫之一部分，由於其位置在既有桃園捷運潛盾隧道正上方，且施工行為包含近接全套管基樁施作及大範圍開挖，施工前預計桃園捷運潛盾隧道可能因施工導致變位，因此在桃園捷運內採用全自動化監測儀器管控施工行為對於潛盾隧道之影響。本案例將介紹多功能大樓施工與既有捷運隧道之關係，並針對風險較大之區域採取監測手段，在施工過程中，監測成果除了可確認當前施工行為對於捷運之風險於控管範圍內，亦可作為施工順序調整之參考。

## 一、前言

桃園國際機場第三航站區位於第二航廈與華航園區之間（圖 1），基地面積約為 640,000 m<sup>2</sup>，主要開發內容包含第三航廈主體建築、登機廊廳及多功能大樓（MFB）等設施，位於桃園捷運機場段上方，而該捷運路段已於民國 106 年 3 月通車營運。依據《大眾捷運系統兩側禁建限建辦法》之規定，對於第三航站區鄰近工區之後續施工，須加強掌握其對捷運系統可能造成之影響，並作為未來相關責任歸屬釐清的依據。

第三航站區於捷運禁限建範圍內施工期間，必須辦理桃園捷運機場段之安全監測工作。至 113 年底於禁限建範圍內施工之工程包含：機坪整地工程、主體航廈土方及基礎工程、主體航廈結構施工、MFB 多功能大樓基樁工程、MFB 多功能大樓土方及基礎等工程。監測工作之主要

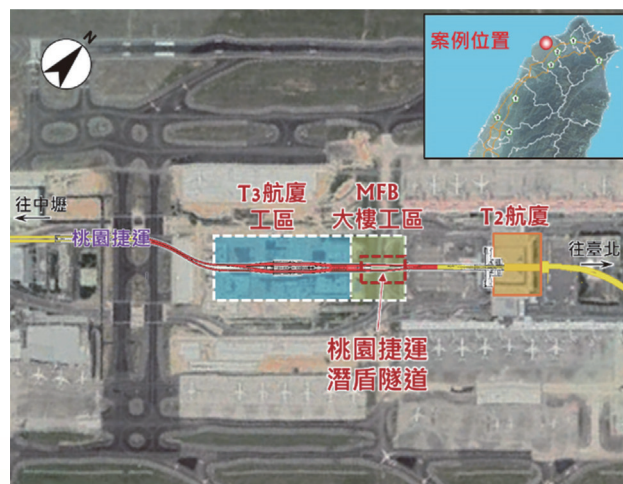


圖 1 桃園國際機場第三航站區工址位置及範圍

目的係掌握第三航站區於捷運禁限建範圍內施工對桃園捷運機場段設施之影響，監測範圍約 950 m，以確保桃園捷運於施工期間之安全性及營運舒適度。

本文將著重討論桃園國際機場第三航站區 MFB 多功能大樓施工期間，潛盾隧道內監測布設、隧道檢測，並以監測結果討論 MFB 多功能大樓施工行為對於潛盾隧道之影響。

## 二、案例工程背景

### 2.1 地形與地層概況

本工址位於桃園市西北隅，地形係位於桃園台地西緣，地勢大致平坦，惟由東向西緩傾，坡度甚小，工址地形高程約在 EL.10 ~ 30 m。

工址地層屬於桃園台地群之更新世「桃園層」，主要可區分為下部的礫石層與上部的紅土層。「桃園層」以下之地層未於本工程區出露，依區域地質推測，下伏層可能為楊梅層（厚度超過 800 m）與大茅埔礫岩（厚度約 80 m）。

蒐集鄰近鑽探資料計 160 孔，其中約 95 孔位於工址範圍內。經綜合檢視分析後，工址地層大致可分為三層（圖 2），分別為覆土層、卵礫石層及砂岩層。覆土層厚度主要分布於地表至下方 0.2 ~ 5.1 m 之間，部分區域存在厚度達 0 ~ 13 m 之回填層，其主要組成含砂質之卵礫石，粒徑約為 2 ~ 30 cm。卵礫石層深度範圍自地表下約 0.2 ~ 27 m，平均厚度約 25 m，標準貫入試驗 N 值大於 100，礫石粒徑亦多介於 2 ~ 30 cm，鄰近區域最大粒徑可達 60 cm。其下層為膠結性較差之砂層或泥質砂岩層，厚度大於 20 m。

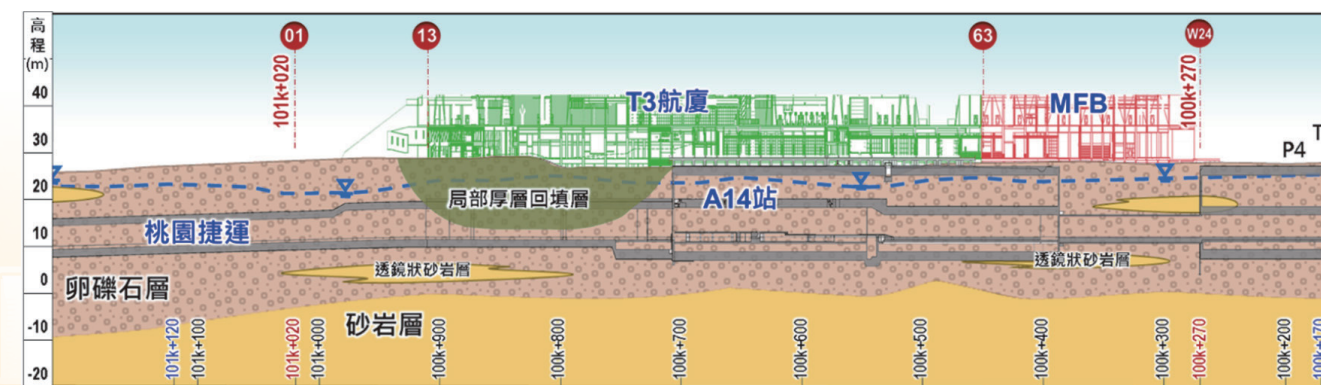


圖 2 工址地層剖面圖

### 2.2 施工範圍內既有捷運結構

工區範圍內桃園捷運區段包含 A13（第二航廈站）至 A14（第三航廈站）間地下結構及隧道、A14 車站結構及 A14 至 A14a（機場旅館站）間隧道。結構形式包含明挖覆蓋隧道、明挖覆蓋車站及潛盾隧道。明挖覆蓋隧道於採順打方式施作，依空間斷面需求，車站結構採雙層矩形明挖覆蓋，其餘為單層明挖矩形隧道；此外，桃園捷運施工時，為穿越桃園國際機場舊 WC 滑行道且不影響其服務，以  $\Phi 5.6$  m 潛盾隧道分上、下行線穿越滑行道下方，潛盾隧道通過長度約 113 m（盧與童，2008）。因明挖覆蓋隧道與潛盾隧道之斷面尺寸及結構勁度差異較大（圖 3），兩不同結構型式之隧道間以柔性接頭結合，允許接頭處可產生較大之差異變位，避免應力集中於接頭處造成結構破壞。

### 2.3 潛盾隧道上方施工行為

由平面圖（圖 1）可見，潛盾隧道上方主要為多功能大樓（MFB）施工區域。為減少大樓荷重對潛盾隧道可能造成之變位影響，設計階段於潛盾隧道南下線北側、北上線南側及雙孔間加設全套管基樁，總數共計 70 支（圖 4）。該基樁設計用以將多功能大樓之主要荷重傳遞至潛盾隧道下方較深層之地層。全套管基樁與潛盾隧道最近淨距離僅約 2 m（圖 5），施工行為屬高敏感度施工（圖 6）。





圖 3 潛盾段與明挖覆蓋段交接處

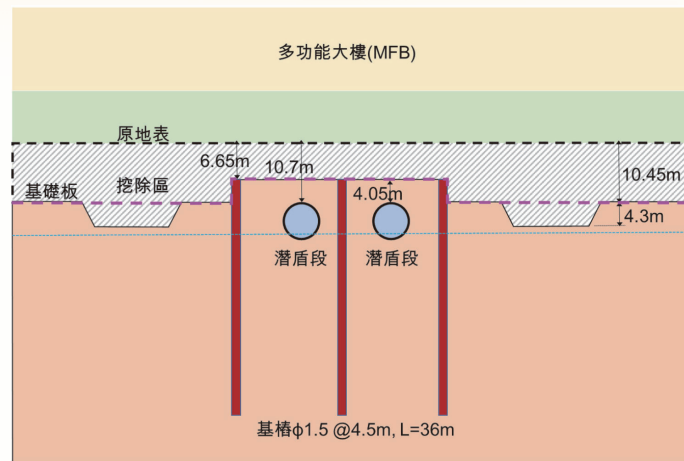


圖 4 捷運潛盾段上方開挖示意圖

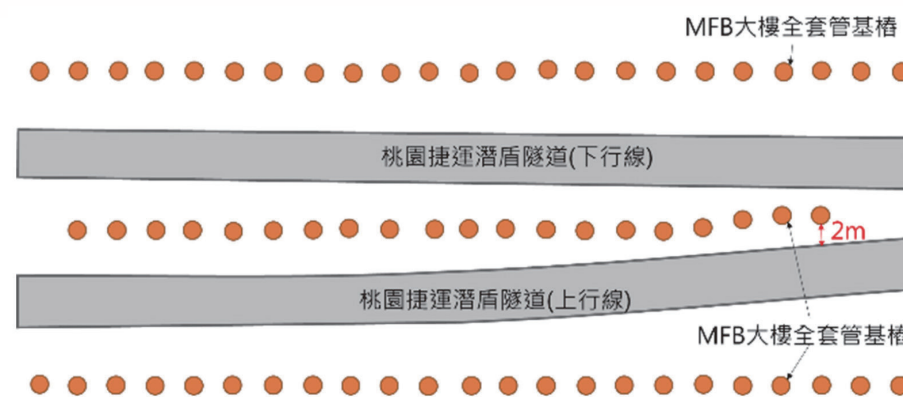


圖 5 MFB 基樁與潛盾隧道平面示意圖

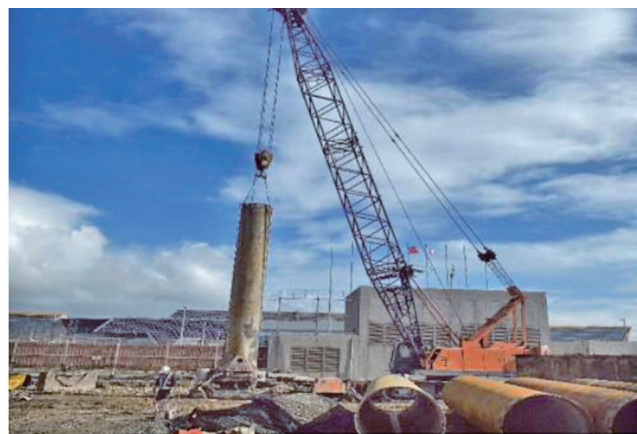


圖 6 全套管基樁施作現場照片



圖 7 潛盾隧道上方斜坡明挖

潛盾隧道正上方覆土厚度原有約 10.7 m，須開挖 6.65 m，開挖完成後剩餘覆土厚度剩餘 4.05 m，開挖方式斜坡式明挖方式施作（圖 7），開挖分 6 區塊施工，依潛盾監測成果調整開挖順序。

### 三、監測方式

#### 3.1 監測項目及布設原則

依據《大眾捷運系統兩側禁建限建辦法》（交通部，2019），於捷運禁建限建範圍內施工，

須確保捷運設施變形值低於容許值。參考交通部《大眾捷運系統兩側禁建限建辦法》、《桃園市辦理大眾捷運系統禁建限建範圍內列管案件管理及審核基準》之規定，潛盾隧道「徑向容許變形量 2 cm」，軌道位移以「垂直或水平總位移量 1 cm」及「5 m 內 3 mm 之垂直或側向扭曲」為管控值。因此在監測儀器方面，本案例至少須滿足潛盾隧道徑向變形及軌道變位等監測需求。

本案例考量監測標的為捷運行駛之隧道，人工量測較為困難，且監測頻率要求高，因此採用全自動監測儀器執行。主要以全測站經緯儀搭配菱鏡監測。由於潛盾結構整體勁度較明挖覆蓋箱涵結構低，預計其受施工影響較敏感，又潛盾與箱涵結構間以柔性接頭銜接，雖可避免銜接處結構破壞，亦可能因施工有較大的相對位移量，須確保施工期間相對位移於管理值內，以避免影響捷運行駛安全及舒適度。因此在潛盾隧道段，反光菱鏡監測斷面的布設間距為 5 m 一組斷面，每組斷面布設 4 組菱鏡以監測結構變位及內空變位，並設置陣列式位移計（SAA）加強量測軌床的位移量（圖 8）。

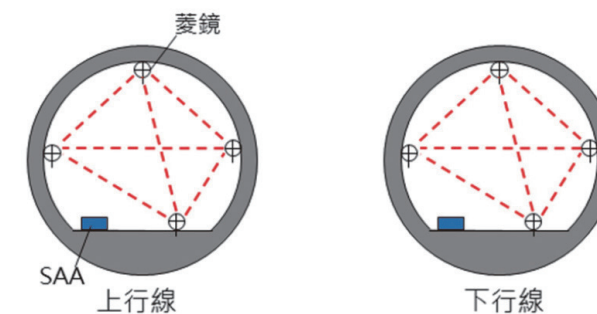


圖 8 潛盾隧道儀器內布設示意圖

此外，施工區域內原水位高程約略高於潛盾隧道，強降雨或施工抽降水亦會影響隧道結構位移量，因此本案例在沿線布設自動化水位計及雨量站。本案例於潛盾隧道之儀器項目及布設原則綜整如表 1（何等人，2024）。

#### 3.2 資料傳輸方式與監測頻率

本案例監測儀器皆採用自動化儀器，監測資料傳輸方式分為兩類，其中全測站經緯儀測量資料直接以 4G 無線方式傳輸至監測伺服器中心；水位計、SAA 等監測資料，則先以有線方式傳輸至集錄器（logger），再藉由 4G 模組傳輸至監測伺服器中心。監測伺服器中匯入監測資料庫，再由監測平台抓取資料庫內容，藉由網際網路供相關人員查看。同時電腦運算進行初步判斷，一旦監測值異常或超出管理值，則以電子郵件及手機通訊方式主動警報（圖 9）。

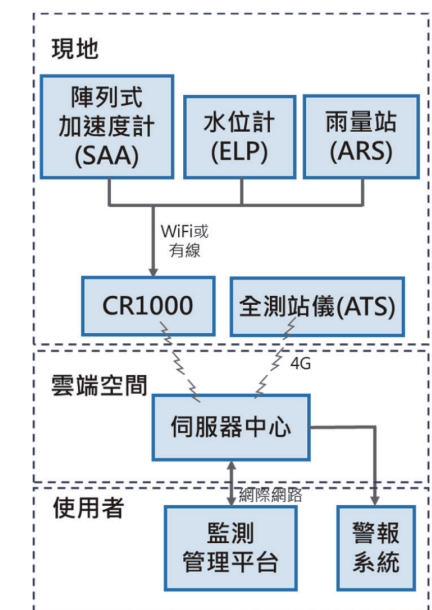


圖 9 本案例監測資料傳輸示意圖

表 1 隧道安全監測儀器配置

| 監測儀器   | 監測目的                  | 布設位置                    | 監測型式  |
|--------|-----------------------|-------------------------|-------|
| 全測站經緯儀 | 隧道結構體之沉陷、側移及淨空變化      | 上、下行線潛盾隧道口兩側壁處          | 自動化監測 |
| 菱鏡     |                       | 約 5 m 一監測斷面，每個斷面 4 組菱鏡。 | 自動化監測 |
| 陣列式位移計 | 潛盾段軌床位移量              | 上、下行線潛盾段隧道軌道床側壁         | 自動化監測 |
| 自動化水位計 | 藉由振弦式水壓計進行水位量測，確認降水效果 | 臨桃園捷運隧道外側雙邊裝設           | 自動化監測 |
| 自動化雨量站 | 監測降雨量                 | 開挖區外不受破壞位置              | 自動化監測 |



由於監測保護對象為捷運系統為重要交通建設，因此全測站及水位計之量測頻率為每小時至少 1 次，SAA 則為每小時至少 2 次。於 MFB 大樓基樁工程施作期間，為降低施工風險，將 SAA 量測頻率調整至每 5 min 至少 1 筆，並且施工期間須隨時注意監測值變化。至於全測站經緯儀，其監測值用以判斷變位趨勢相當可靠，惟其監測頻率受監測方式所限，為自動照準菱鏡，須進行正鏡及倒鏡量測，並且量測完範圍內設定之菱鏡後始能進行下一次量測，因此在量測頻率上會依現場環境狀況與量測菱鏡數量有所限制，在監測頻率設定上應有所考量。

### 3.3 全斷面襯砌影像掃描

為確認施工對於隧道之影響，除了自動化監測外，另以全斷面襯砌影像掃描紀錄各階段之潛盾隧道環片襯砌異狀，如其他案例中發生之環片龜裂、環片錯位、環片開裂、滲漏水等。本案例為提高檢測品質與效率，經綜合評估，採高精度之雷射光掃描儀器 GRP5000 進行影像掃描工作（圖 10）。

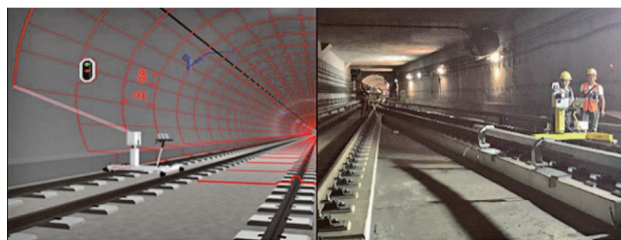


圖 10 本案例隧道襯砌影像掃描原理及現場作業

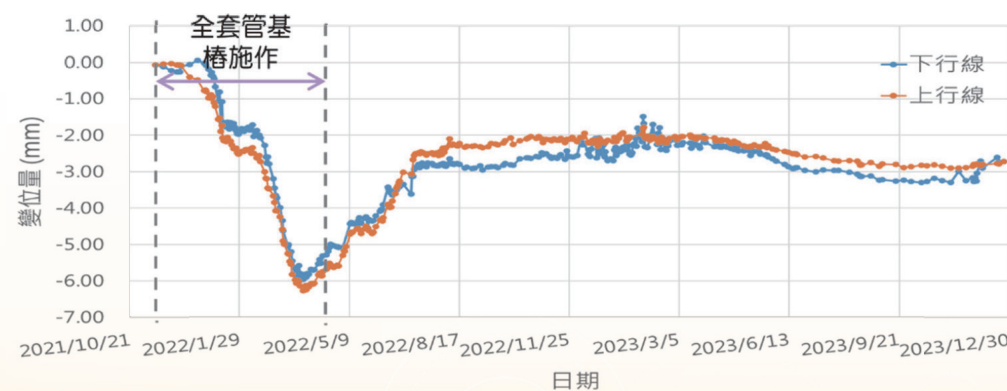


圖 11 潛盾隧道里程中點歷時曲線

## 四、監測成果分析

### 4.1 全套管基樁施作期間之影響

MFB 大樓全套管基樁自 110 年 10 月開始施作，至 111 年 3 月完成所有基樁施作。潛盾隧道變位以基樁施作前為初始值，紀錄全套管基樁施工對於潛盾隧道之影響。

取潛盾隧道里程中點之位移量歷時曲線（圖 11），在 MFB 大樓基樁施作期間，潛盾隧道里程中點有下沉的趨勢，下沉量最大值達將近 7 mm。而後隨基樁施作完成、基樁機具撤場，此沉陷量亦慢慢回彈至約 2 ~ 4 mm 後，潛盾隧道變位趨於穩定（圖 12）。依現場施工行為研判，此下沉趨勢可能源自於施工機具、材料之臨時載重及基樁置換原土層導致。

進一步取整段潛盾及前後明挖覆蓋段隧道變位繪製沿里程變位，成果顯示明挖覆蓋段隧道未因全套管基樁施作有相似於潛盾隧道之變位情形，導致兩隧道結構間有明顯的相對變位及角變位產生，須加以注意避免此角變位持續擴大影響捷運行駛中乘客舒適度及捷運行駛安全。

本案例監測資料回饋予施工單位及監造單位擬定施工策略參考，施工單位於明挖覆蓋結構上方以太空包施加载重，控制角變位量皆小於 3 mm/5 m，此角變位量遠小於影響乘客舒適度之標準。另外，針對此變位趨勢，施工與監造單位

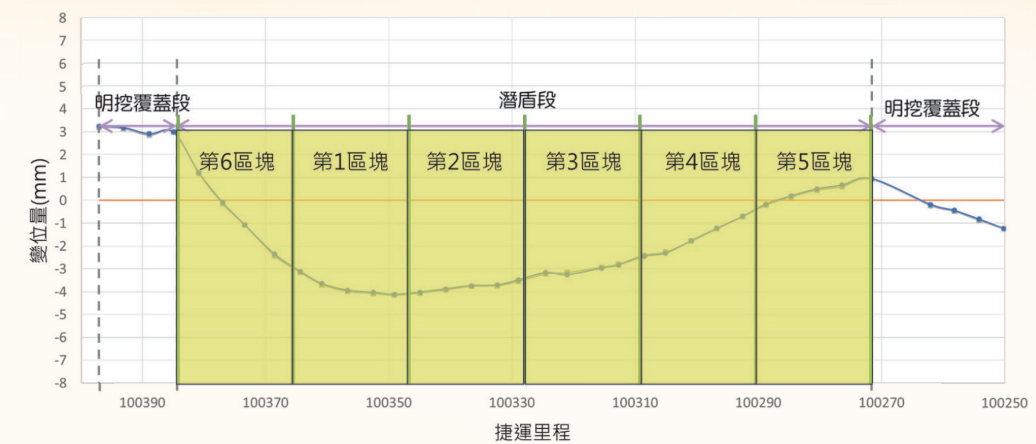


圖 12 基樁施工期間潛盾隧道沿里程變位及開挖分區

調整斜坡明挖分區及施作順序，將以潛盾隧道沉陷量最大之里程上方開始開挖，並將角變位最大之區段留至最後開挖區，試圖降低角變位，亦可先掌握此區域開挖對於潛盾隧道變位之影響，再行施作風險較高區域。

### 4.2 潛盾隧道正上方開挖期間之影響

自 113 年 12 月至 114 年 4 月，MFB 大樓於潛盾正上方開挖作業進度至第 2 區塊完成，取位於第 1 開挖區塊之角變位量最大之監測點及沉陷量最大之監測點追蹤潛盾隧道受開挖之影響，以確保施工行為對於潛盾隧道之風險於控管內。繪製兩監測點變位及角變位歷時曲線與施工行為比對（圖 13），於第 1 區塊開挖作業期間，對應至第 1 區塊下方潛盾隧道約上浮 2 mm 之趨勢，角變位量亦有略微下降趨勢。在第 2 區塊開挖期間，前述兩監測點位已無上浮趨勢，甚至有些微下沉趨勢，但整體而言施工對於潛盾隧道之風險相較於開挖前並無進一步上升。

截至本文完成時，第 6 區塊尚未進行開挖。依第 1 區塊開挖監測結果，第 6 區塊開挖時潛盾隧道仍有機會有上浮之變位，屆時可能導致角變位進一步上升，因此可觀察其餘區塊之 FS 版、BS 版施作完成後，是否可因此分攤開挖或加載之影響，以達到控制角變位之目的。

### 4.3 潛盾隧道影像掃描成果

MFB 大樓施工前，為比對該施工行為對於潛盾隧道是否有影響，於 110 年 6 月進行隧道襯砌影像掃描，掃描成果顯示（圖 14），此區段潛盾隧道結構狀態良好，無環片龜裂、錯位或開裂等結構異狀，僅有在少數環片接合處有水痕，經現場目視檢查後，該水痕無明顯滲水狀況。而在潛盾隧道結構與明挖覆蓋箱涵交界處，則有明顯滲水痕跡（圖 15），須持續觀察施工行為是否導致此處異狀增加或加劇。

## 五、結論

本案例為礫石層中淺覆蓋潛盾隧道上方受施工行為之監測，結果顯示在此條件下，施工機具載重、基樁施作及開挖等施工行為，皆會對潛盾隧道產生變位。本案例採用自動化監測儀器，可控管此變位之風險，並進一步使用此監測數據作為施工順序之依據。因此於近接既有重要結構之開挖時，妥善規劃監測布設，可降低風險及避免過度保守之施工。

## 誌謝

本文撰寫特別感謝桃園國際機場股份有限公司及桃園第三航站區主體航廈工程之設計、監造及施工團隊，提供標案資料及施工進度等資訊，使本文得以順利完成，特此致上謝忱。



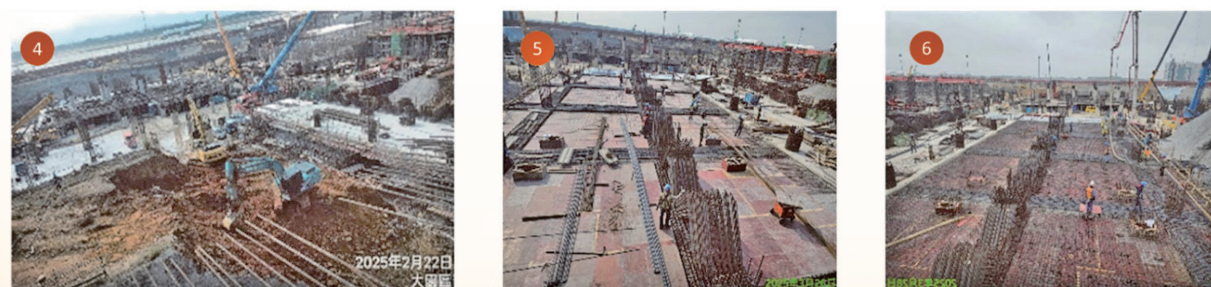
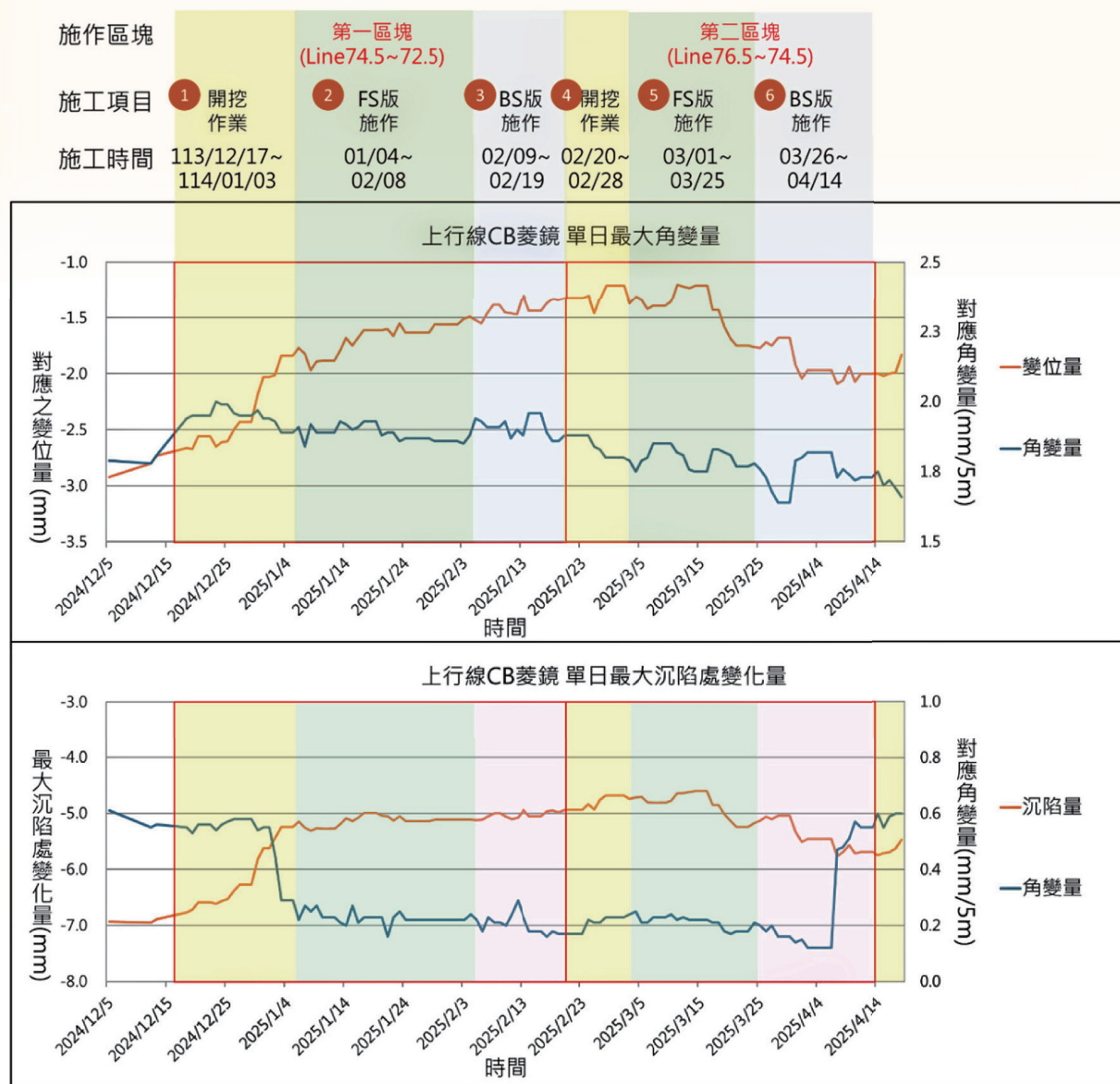


圖 13 潛盾隧道於 MFB 開挖期間歷時變位曲線及施工照片

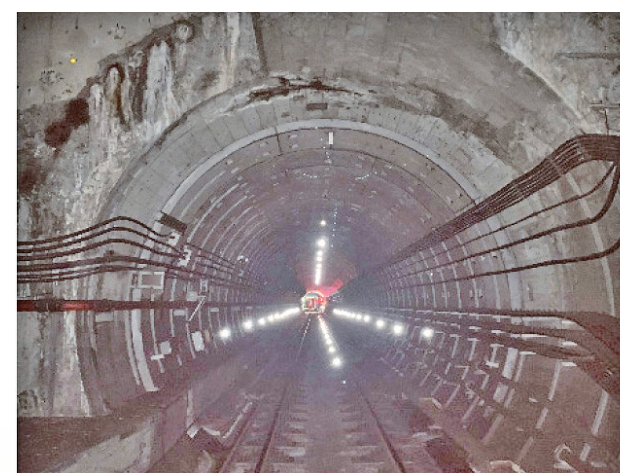
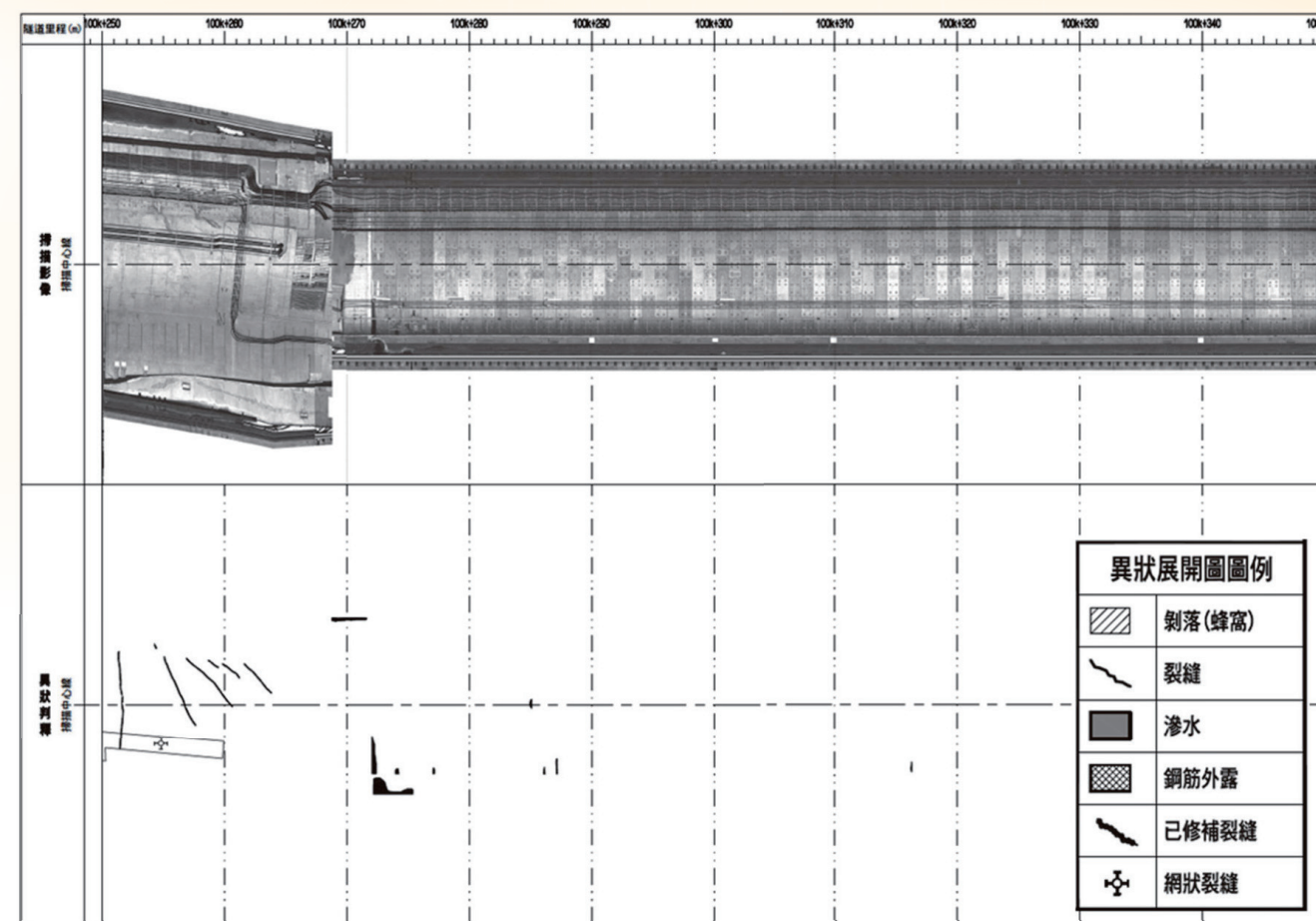


圖 15 潛盾隧道交界處異狀照片

## 參考文獻

- 台灣世曦工程顧問股份有限公司 (2017),「臺灣桃園國際機場第三航站區新建工程基地開挖及建造施工對機場捷運設施之安全影響評估第三階段 (柱線 13~W24)」, 桃園國際機場股份有限公司。
- 交通部 (2019),「大眾捷運系統兩側禁建限建辦法」。
- 何金益、黃慧仁、陳聰海、陳正勳、蕭秋安 (2024),「應用物聯網與雲端技術於特殊地工安全監測之案例分享」, 地工技術, 第 179 期, 第 43-50 頁。
- 盧協成、童念遠 (2008),「潛盾機於桃園卵礫石層之設計與施工案例探討」, 地工技術, 第 118 期, 第 59-68 頁。



# 新竹寶山地區逆向坡滑動調查及監測案例探討

江承家 萬鼎工程服務股份有限公司 / 大地技師

陳湧文 萬鼎工程服務股份有限公司 / 工程師

## 摘要

本案邊坡鄰近新竹寶山地區交通要道，除有自動監測系統外，亦有定期目視檢查作業。監測結果顯示，其中第一、二階邊坡現地傾度管及水位觀測井有變形、無法放置量測儀器情形，推測邊坡疑似有滑動破壞疑慮。後續經試坑作業、地質及水文調查作業、現地試驗、監測作業及邊坡穩定性等分析，研判本案屬少見之逆向坡滑動變位。由於現地無觀察到邊坡破壞之徵兆，數值分析模擬亦顯示除第五階邊坡有淺層滑動疑慮外，並無大範圍或深層活動之風險，再加上本地層位於柑子崎向斜上且持續受到新城斷層之大地應力，綜整評估本邊坡滑動應屬於地質構造所產生之層間滑動現象，加上邊坡開挖後解壓而產生解壓節理形成剪裂面狀況，分析過程可供未來寶山地區邊坡工程參考，文末亦提出後續監測作業之相關建議。

## 一、前言與工址概述

台灣板塊運動活躍，板塊在擠壓碰撞下持續抬升，形成大量的山坡地，在土地有限且土地開發需求日益增加之情形下，部分基礎設施難免開發山坡地範圍，進而導致崩塌、滑動的潛在風險，對大眾的生命財產構成威脅，故近年持續進行邊坡監測及檢查。

本案邊坡位於新竹縣寶山鄉和苗栗頭份鎮之交界，位置詳圖 1 所示，除位於高鐵路線旁，邊坡西側有排水溝渠，東側山谷亦有大面積果園，並有抽水灌溉需求，基地現況照片詳圖 2 所示。本工址邊坡為五階的挖方路塹，其中各階高度及坡度詳如下表所示。

| 邊坡  | 高度   | 回填坡度        |
|-----|------|-------------|
| 第一階 | 8 m  | V:H = 1:1.5 |
| 第二階 | 10 m | V:H = 1:1.5 |
| 第三階 | 10 m | V:H = 1:1.5 |
| 第四階 | 3 m  | V:H = 1:1.5 |
| 第五階 | 3 m  | V:H = 1:1.0 |



圖 1 本工址邊坡位置圖



圖 2 邊坡現況照片

依區域地質資料顯示，本邊坡出露之地層為更新世的頭嵙山層，出露地層主要為砂岩、頁岩、泥岩及其互層所組成，地質構造主要有東側的柑子崎向斜及西側的新城斷層。

新城斷層經調查可分成兩段，北段位於鳳山溪與頭前溪之間的飛鳳丘陵，南段位於與頭前溪與中港溪之間的竹東丘陵。其性質如下：(一) 為第一類活動斷層；(二) 以逆移斷層為主，斷層北起頭前溪中正大橋附近，向西南延伸至下坪，可能於當地結束或向南轉向，斷層總長約 15 公里；(三) 斷層面走向約北東 50°，傾向東南約 35°。斷層上盤北端出露以砂頁岩薄互層為主的卓蘭層，往南至新城附近，上盤出露楊梅層；岩性以砂岩為主，常可以發現貝類化石富集帶；斷層下盤則是以砂岩為主的楊梅層；斷層上下盤層位落差在北端較大，往南減少。斷層附近上下盤常呈拖曳褶皺，上盤為背斜，下盤為向斜，離開斷層附近區域，上下盤地層均向東南傾斜，上盤岩層傾斜較陡約 15°，下盤岩層傾斜較緩小於 10°。

於民國 98 及 99 年，分別於第一階及第二階平台之傾度管及水位觀測井在地表下約 1.5 m 處發現測管變形之情況，詳圖 3 照片所示，因而產



圖 3 傾度管及水位觀測井變形照片

生邊坡滑動之疑慮，故展開後續一系列現地試驗、調查、監測與評估作業。

## 二、區域地質及水文調查成果

本計畫鄰近區域既有之地形圖、航照基本圖及相關地質調查資料初步研判分析後進行現場踏勘工作，經由地形、地勢、水系之分布及現地地層出露情形、不穩定徵兆與排水狀況進行評估。依現地踏勘結果顯示本邊坡出露地層為頭嵙山層香山相，砂岩呈淡灰色，顆粒為細粒至中粒，膠結疏鬆。地層位態為北偏東 68 度向南傾斜 12° (N68°E/12°SE)，本邊坡位於柑子崎向斜西北翼，距向斜軸部約 500 公尺；新城斷層則位於邊坡西北側約 1.5 公里。道路以東北 - 西南走向通過本區域，與柑子崎向斜及新城斷層等構造走向相同，本邊坡為南側坡屬逆向坡。區域地質圖及地質剖面如圖 4 及圖 5 所示。

交通結構物沿線經過頭前溪與中港溪之間的竹東丘陵，竹東丘陵介於頭前溪和中港溪之間，東以竹東斷層為界，西臨台灣海峽。東西長約 16 公里，南北寬約 12 公里。竹東丘陵屬於第四紀紅土礫石台地，為更新世中期至晚期。本工址位於丘陵上之小支稜，自路塹邊坡開挖頂部往支稜上方處，地勢大致平緩上升，地表植生覆蓋良好無明顯地質災害徵兆。由水系分布圖（詳圖 6 所示）顯示區域水系順沿溝谷發育，主要為南北走向。

## 三、鑽探、試坑調查工作

本邊坡共實施二次目視檢查作業，觀察到第一、二階坡面於約坡頂下 1.5 m 左右有輕微外凸線型，而第三階平台有溝裂縫產生，另第五階邊坡亦有風化嚴重之情形，但邊坡整體並無發現邊坡破壞徵兆。邊坡目視檢查後安排鑽探、現地試驗及試坑調查工作，再依據調查結果進行邊坡穩定分析及大地監測，最後依據整理地質情況、現地試驗、邊坡穩定及監測初步結果，進行綜合評估。





圖 4 區域地質圖

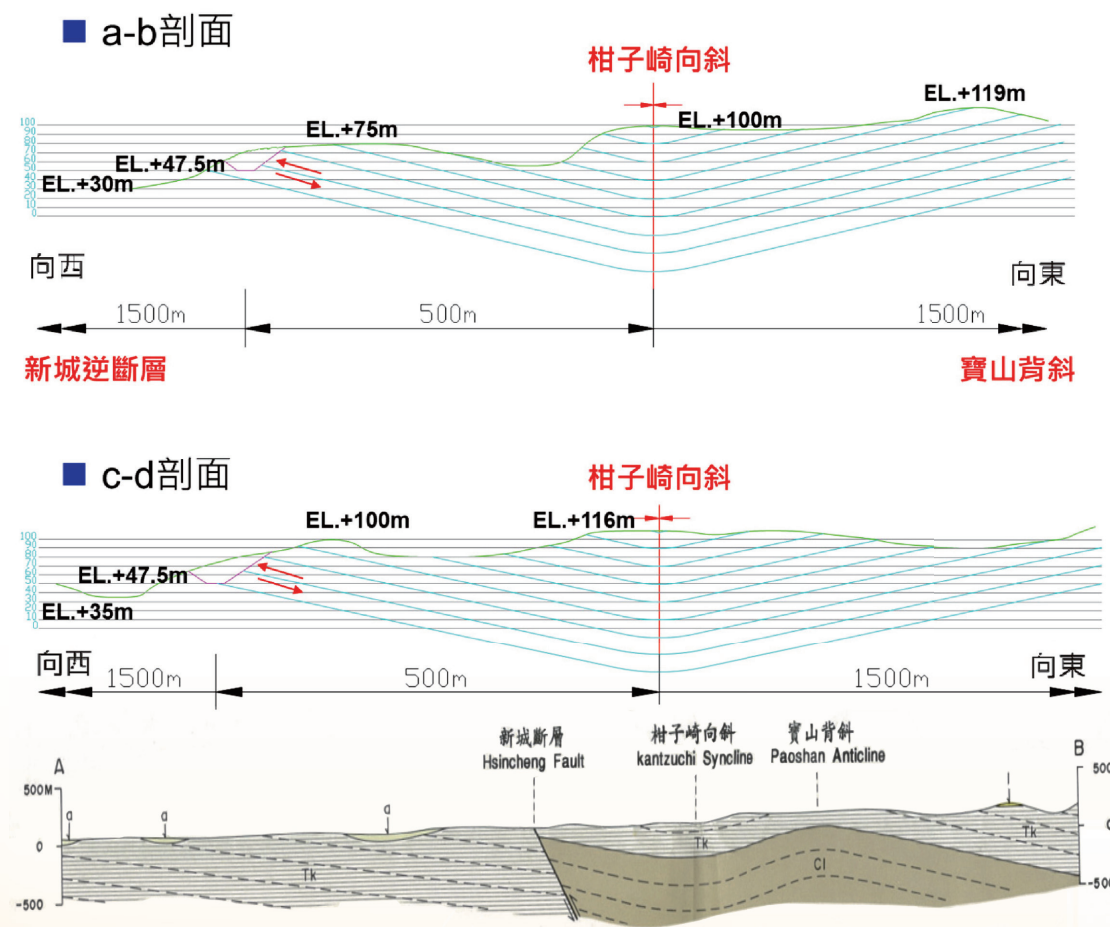


圖 5 地質剖面圖

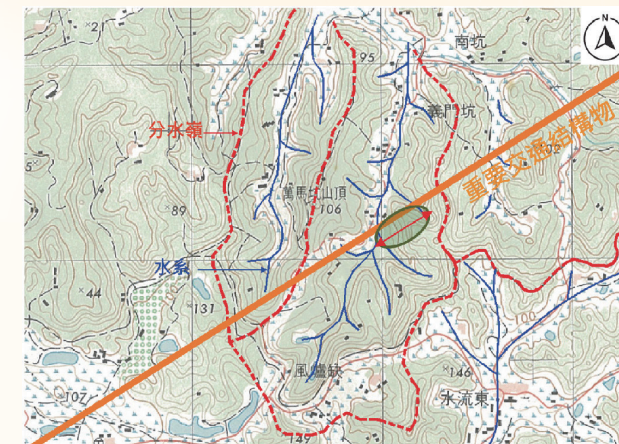


圖 6 水系分布圖

### 3.1 鑽探調查工作

邊坡之土壤鑽探工作共規劃 5 孔鑽探 BH-1 (25 m)、BH-2 (25 m)、BH-3 (35 m) 及 BH-5 (45 m) 鑽孔 (詳圖 7 所示)，各埋設傾斜管 1 支，BH-4 (35 m) 鑽孔完成時依實際地下含水層分佈狀況埋設 PVC 管 2 支水壓計 (深度 8.5 m、26 m) 與資料自動記錄器，合計共 165 m 的進尺深度。

地層設計參數之選取原則乃以試驗結果為主並參考設計階段之試驗成果，為避免因試驗未及或不足，或因試體擾動與泡水崩解之影響，則需經驗公式推估為輔助，再加上過去累積之工程經驗予以適度調整，做為邊坡穩定分析設計之依據。茲將此區域設計用之簡化地層參數綜整如表 1 所示。

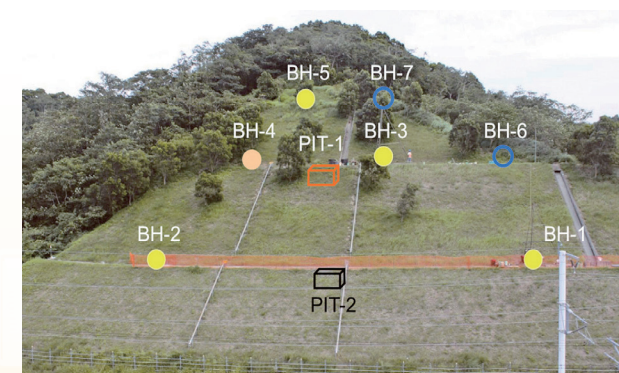


圖 7 鑽探及試坑調查位置

表 1 簡化地層剪力強度參數

| 層次  | 地層分類  | 平均厚度<br>(高程分佈 EL.+m) | 剪力強度                |                         |                       |                           |
|-----|-------|----------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
|     |       |                      | $c'$<br>( $t/m^2$ ) | $\phi'$<br>( $^\circ$ ) | $c'_r$<br>( $t/m^2$ ) | $\phi'_r$<br>( $^\circ$ ) |
| (1) | SS1   | 14.0 (53.8 ~ 58.1)   | 5.7                 | 30                      | 0                     | 30                        |
| (2) | SS/MS | 23.45 (25.0 ~ 28.0)  | 3.0                 | 28                      | 0                     | 26                        |
| (3) | SS2   | — (25.0 以下)          | 3.0                 | 30                      | 0                     | 30                        |

### 3.2 滲漏試驗 (Lugeon test)

依據現場鑽探成果 (邊坡第一階 2 孔；第二階 3 孔；第三階 2 孔) 顯示，本工址地層淺層以輕至中度風化粉質砂岩 (SS) 為主，厚度約 6.9 至 21.2 m；中層為新鮮粉質砂岩 (SS) 與泥岩 (MS) 互層，厚度約 20.1 至 25.8 m；深層為新鮮粉質砂岩 (SS) 偶夾泥岩 (MS)。依據水位觀測井資料，邊坡第一階水位約在 GL.-1.4m ~ GL.-6.9m；第二階水位約在 GL.-3.7m ~ GL.-15.5m；第三階水位約在 GL.-6.7m ~ GL.-14.0m。

本案於 BH-5~BH-7 進行滲漏試驗，其結果採直線迴歸法利用試驗值推算 10 kg/cm<sup>2</sup> 壓力下之 Lugeon 值，彙整如表 2 所示。一般而言 0 to 3 Lugeons - low leakage；3 to 20 Lugeons - moderate leakage；20 to 100 Lugeons - high leakage；> 100 Lugeons - very high leakage。本工址二階坡之黃棕色砂岩層屬 high leakage，在鑽探過程此深度僅部份迴水或不迴水，可判定此層為部份漏水層面，在本案水壓計監測過程中發現上層水壓計於暴雨發生時水壓上升，一天內水壓隨即消散，此現象亦可驗證。由地形及地層狀況其地下水可能沿層次往工址邊坡後山谷或兩側滲流漏水。由於此漏水層係屬一層面狀，將進一步分析其暴雨時邊坡受水軟化後之穩定性影響 (採用  $C = 0 t/m^2$ )。

表 2 滲透係數試驗結果表

| 試驗位置<br>(平台下深度 . M) | 滲透係數 K (Lugeon = $10^{-5}$ cm/sec)<br>(P = 10 kg/cm <sup>2</sup> ) |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|
| BH-5 (16.5 ~ 18.5)  | 46.58                                                              |
| BH-5 (18.5 ~ 20.5)  | 48.05                                                              |
| BH-6 (5.0 ~ 8.0)    | 92.91                                                              |
| BH-6 (8.0 ~ 10.0)   | 81.49                                                              |
| BH-7 (16.8 ~ 18.8)  | 46.85                                                              |



### 3.3 地下水位調查

本邊坡地下水位於鑽探期間，以水位觀測井及電子式水壓計進行量測。在鑽探中常量測到迴水，而試驗中發現有漏水層吃水嚴重，因此各鑽孔試驗過程中地下水位變化較大，第一階平台量測水位約在地表下深度 GL.-1.5 ~ 6.9m 之間，第二階平台量測水位約在地表下深度 GL.-3.7 ~ 15.5m 之間，第三階平台量測水位約在地表下深度 GL.-6.7 ~ 14.0m 之間。

第二階平台 BH-4 安裝 2 只電子式水壓計，第一只孔深 8.9 M，現場安裝深度為 8.5 m，孔口高於地面 20 cm，現場初值量測時無水；第二只孔深為 26.64 M，電子水壓計安裝深度為 26 M，孔口高於地面 20 cm，現場水深初值為 GL.-24.55M (EL.+30.45m)。

依據長期觀測井 5 年之歷史水位資料。顯示第一階平台水位觀測井資料，介於地表下 GL.-12.45 ~ -14.87 之間，常水位取 GL.-12m (EL.+43m) 進行分析；第二階平台水位觀測井資料，介於地表下 GL.-15.41 ~ -19.47 之間，常水位保守取 -15 m (EL.+50m) 進行分析。

### 3.4 現地試坑作業

為釐清第二階平台水位觀測井之測管變位（地表下 1.5 m）是否為監測異常之疑慮，故於



圖 8 試坑調查水位觀測井變形位置

觀測井下方進行長 2 m × 寬 1.5 m × 深 2 m 之人工試坑開挖作業，經檢視後發現於地表下 1.5 m 左右之變位處存在約 2 cm 之青灰色剪裂泥，造成觀測井 PVC 管向邊坡外側扭曲變形約 2 cm（詳圖 8 所示），此青灰色剪裂分布大致順沿層面分布（詳圖 9 所示），由坡面向邊坡內側傾斜，地層位態約為北偏東 68° 向南傾斜 12°，而坡面約為北偏東 56° 向北傾斜，顯示其屬逆向坡。另於第一階平台下約 1.5 m 處進行之第二組試坑調查，也發現傾度管扭曲變位約 5 cm，且同樣存在順沿層面之剪裂泥，但其變位方向朝邊坡內側。

### 四、邊坡穩定性分析

本文採用 SLIDE 程式進行邊坡穩定性分析，以了解本邊坡產生破壞之可能性。數值模型之地層分層係根據本次地質鑽探之土層柱狀圖、岩心箱照片與現場試坑結果綜合研判，分析模型如圖 10 及圖 11 所示。地層參數之選用，詳前節所述，除根據各地層之室內試驗結果，亦適度考量未來地層可能發生之風化現象。依民國 96 年至民國 100 年之水位觀測井資料，常時地下水位第一階平台採 GL.-12m；第二階平台採 GL.-15m，暴雨時地下水位，則由道路下 1 m 以約 27° 向上延伸至第二階平台 GL.-3.5m 處。



圖 9 試坑調查照片

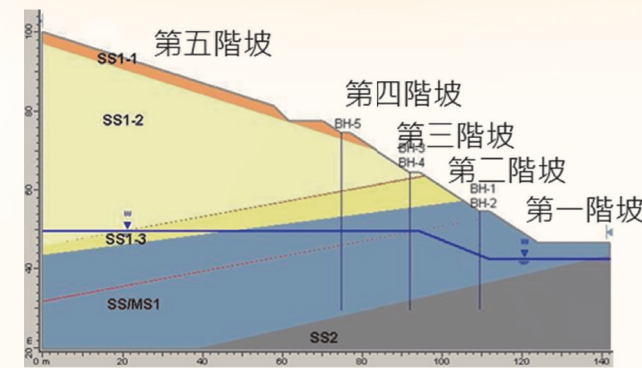


圖 10 分析地質模型(常時水位)

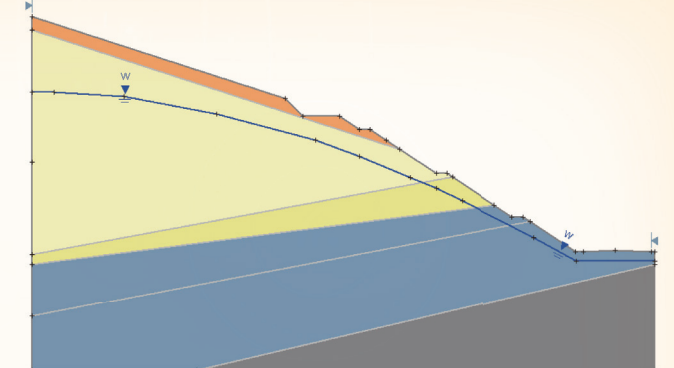


圖 11 分析地質模型(暴雨水位)

地震力係數依交通部 97 年 11 月頒布之「公路橋樑耐震設計規範」，於地震狀態時，採  $Z_i = 0.4 g$ ， $K_h = 0.2$ ， $K_v = \pm 0.1$ ；於地震 + 暴雨狀態時，採  $Z_{ii} = 1/3 (0.4) g$ ， $K_h = 0.067$ ， $K_v = \pm 0.033$ 。

就本邊坡可能之破壞機制進行分析後，其個別之分析成果說明如下：

#### 1. 圓弧形破壞：

本案地層屬軟岩，取樣岩心完整，惟單壓強度仍低，推估其破壞模式應較接近一般土壤，故採圓弧形破壞模式模擬。分析成果顯示，除第五階邊坡安全係數不足，可能發生淺層滑動外，皆符合規範需求。

#### 2. 複合式破壞 – 限制破壞面

試坑試驗結果顯示，第一階及第二階平台下方約 1.5 m 處皆存在一厚度約 2 cm 之灰色黏土薄層，且該弱面已有滑動跡象，故分析時以圓弧形破壞為主，當破壞圓弧發展至該滑動面時，則破壞面沿此兩階之弱面破壞，形成複合式破壞。分析成果顯示，除第五階邊坡安全係數不足，可能發生淺層滑動外，皆符合規範需求。

#### 3. 大範圍破壞：

為探討是否有可能發生更大範圍之破壞，以下將分析模型由原邊界往柑子崎向斜方向延伸約 1,200 m，大範圍模型之地層分佈則假設以現

階段發現之兩個滑動面往柑子崎向斜方向延伸，然後以柑子崎向斜為中心鏡射，再以相同角度延伸至地表分別探討破壞圓弧通過 EL.100m、EL.125m、EL.150m 三座山頭之安全係數皆符合規範需求。

因此依鑽探成果進行邊坡穩定性分析，除第五階邊坡（坡度約 45°）安全係數不足，可能發生淺層滑動外（對交通結構營運影響較小），其他可能影響營運之深層滑動及大範圍滑動之分析結果皆符合規範需求，彙整詳表 3 所示。

表 3 邊坡常時及暴雨穩定分析結果

| 破壞類型                         | 分析條件 | 分析最小安全係數 | 規定值        | 分析結果 |
|------------------------------|------|----------|------------|------|
| 圓弧型破壞 – 破壞面通過第一座山頭 (EL.100m) | 常時   | 1.820    | $\geq 1.5$ | O.K. |
|                              | 暴雨   | 1.724    | $\geq 1.2$ | O.K. |
| 圓弧型破壞 – 破壞面通過第二座山頭 (EL.125m) | 常時   | 10.383   | $\geq 1.5$ | O.K. |
|                              | 暴雨   | 11.326   | $\geq 1.2$ | O.K. |
| 圓弧型破壞 – 破壞面通過第三座山頭 (EL.150m) | 常時   | 13.095   | $\geq 1.5$ | O.K. |
|                              | 暴雨   | 10.573   | $\geq 1.2$ | O.K. |

### 五、大地監測

於鑽探作業完成時，為持續觀察邊坡變位情形，於 BH-1 (25 m)、BH-2 (25 m)、BH-3 (35 m) 及 BH-5 (45 m) 鑽孔，各埋設傾斜管 1 支，並以每 2 個月 1 次（颱風季期間每月 1 次）之頻率



進行量測，共量測 9 次，針對垂直及平行坡面之監測成果，套繪 A 向（垂直邊坡方向）與邊坡剖面詳圖 12 所示。其成果顯示，各孔垂直坡面之變位皆約在 0 ~ 4.0 mm 之間，僅 BH-5 有孔口不穩定之現象產生，但尚未發展成持續性之變位趨勢；各孔平行坡面之變位約在 0 ~ 2.8 mm 之間，其中 BH-1 向南變位約 2.2 mm，BH-5 向北變位約 2.8 mm，無一致性變位方向。為確保邊坡保持穩定狀態，有關監測系統之建議管理值詳表 4 所示。

## 六、地質綜整研判

就現場調查、試驗及監測成果，為進一步研判地層變位原因，茲將重點整理如下：

1. 本邊坡為砂頁岩互層之層狀地層逆向坡。本邊坡位於柑子崎向斜及新城斷層之間，新城斷層判定為全新世仍活躍之第一類活動斷層，來自東南方擠壓的大地應力持續作用中。
2. 邊坡呈平緩地形，邊坡上方側無明顯加載岩體，且並未觀察到邊坡破壞徵兆。

3. 試坑結果顯示，本邊坡出現之薄層剪裂泥皆順沿層面存在，此現象於鑽探作業中亦有發現，而除剪裂泥外，邊坡岩體大致完整。

基於上述調查成果及地質現象，首先可推估大區域邊坡滑動的可能性不高，且可研判地層變位現象應非邊坡破壞所引致，而於試坑試驗成果中，可發現剪動位移皆順沿層面發生，因此在考量邊坡位移之機制及成因後，應將「層間滑動」現象納入考量。一般而言，地體受擠壓產生皺褶時，由於層狀地層的層面間相對岩體強度較弱，為紓解平衡皺褶產生的大地應力，因此易順沿層面位置產生錯移變位，此現象為「層間滑動」，詳圖 13。而於向斜地質構造中，其兩翼之層面滑動則產生層面上部往軸部外，層面下部往軸部內滑動的現象，與本邊坡觀察到之層間活動運動模式相吻合，故縱整研判本邊坡滑動應為「層間滑動」現象，並推估其成因除大地應力持續作用外，也包含路塹開挖所造成蓄積之大地應力解壓，因而產生由外而內順沿層面解壓之層間滑動。

## 七、結論與建議

1. 本邊坡地質材料主要為頭嵛山層香山段之砂岩及泥岩偶爾夾粉土及黏土薄層，地質構造屬逆向坡（N68°E/12°SE）。
2. 依試坑成果，第一階邊坡平台下深度 1.5 m 處 pvc 管變位約 5 cm，第二階邊坡平台下深度 1.5 m 處 pvc 管變位約 2 cm，且皆存在順沿層面之剪裂泥。
3. 依現階段鑽探成果進行邊坡穩定性分析，除第五階邊坡（坡度約 45°）安全係數不足，可能發生淺層滑動外，其他潛在之深層滑動及大範圍滑動之分析結果皆符合規範需求。
4. 綜合相關地質文獻資料及本調查所能掌握之資料及調查結果研判，本邊坡位於柑子崎向斜及新城斷層之間，新城斷層為全新世仍活躍的斷層，來自東南方擠壓的大地應力持續作用中，故研判為向斜構造之地中應力因邊坡開挖解壓而形成「層間滑動」，說明本邊坡發現之剪動位移應為層間滑動所致，非為邊坡破壞引致，因此研判本邊坡無立即破壞問題。
5. 後續監測及整治作業建議如下：
  - (1) 地中傾度管及水壓計持續觀測。觀測警戒值及行動值詳表 4 所示
  - (2) BH-5 自動化地中傾度管監測。
  - (3) 邊坡地表沉陷監測。
  - (4) 第五階邊坡整治：建議採削緩坡方式減少邊坡下滑驅動力，或採土壤水泥回填方式來抑止其潛在之滑動風險。

## 參考文獻

1. 經濟部中央地質調查所（2007），「臺灣北部的活動斷層」經濟部中央地質調查所特刊 第 19 號。
2. 萬鼎工程（2011），「TK086+320 ~ 420 東側邊坡鑽探調查監測及穩定評估工作」期末報告（2011）。

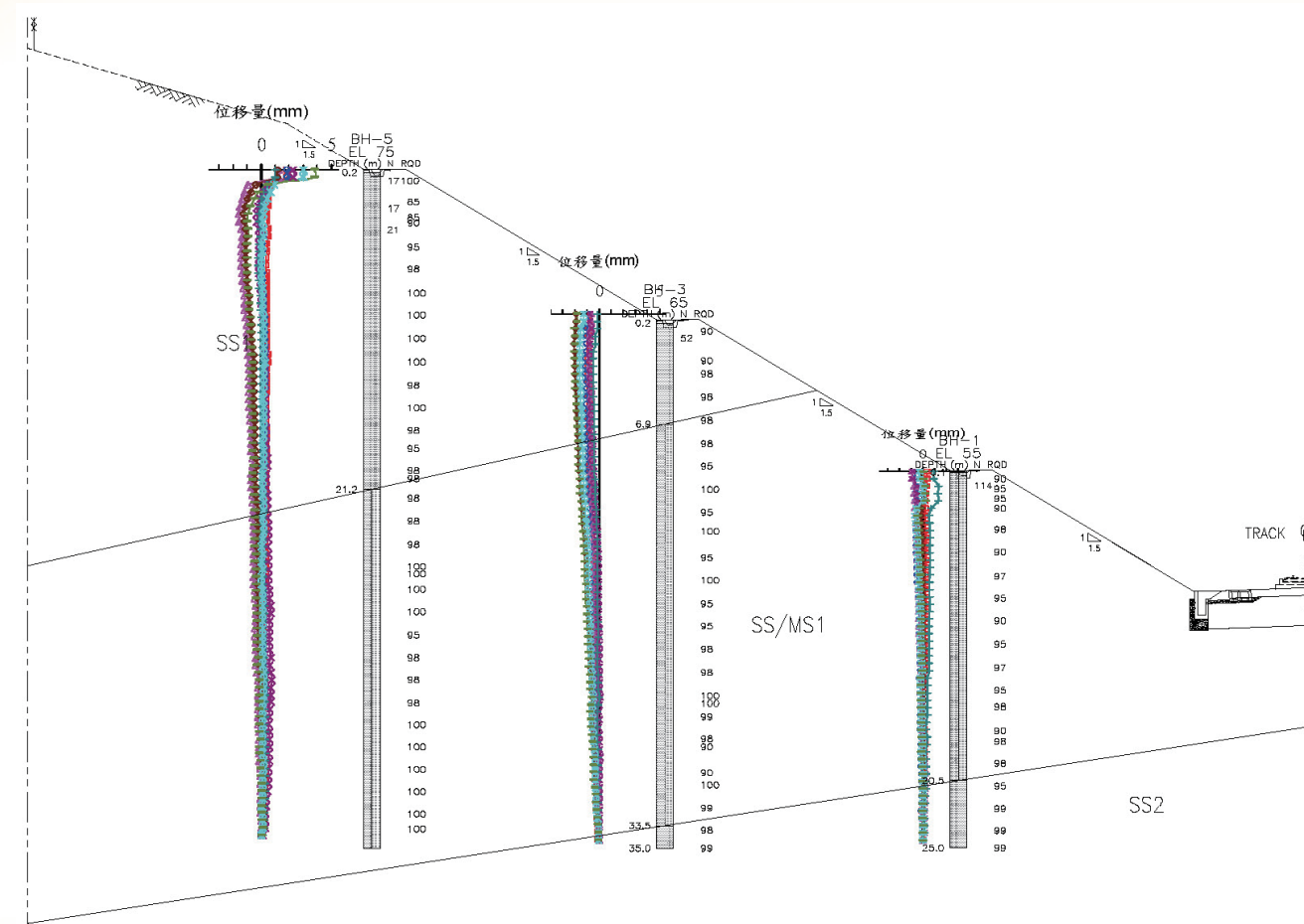


圖 12 傾度管量測結果與邊坡之關係

表 4 傾度管量測結果與邊坡之關係

| 觀測項目                 | 考量之因素              | 警戒值                                        | 行動值                                             |
|----------------------|--------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 地層移動<br>(傾斜觀測管)      | 1. 位移傾向<br>2. 位移速率 | 略有一致位移傾向<br>2 mm / 月                       | 略有一致位移傾向<br>10 mm / 月                           |
| 地下水水位及水壓<br>(電子式水壓計) | 設計地下水水位及水壓         | 設計水位，「第二階 GL.-3.5m (EL.+61.5m)」短時間（1 天）未消散 | 設計水位加 1 m，「第二階 GL.-2.5m (EL.+62.5m)」短時間（1 天）未消散 |

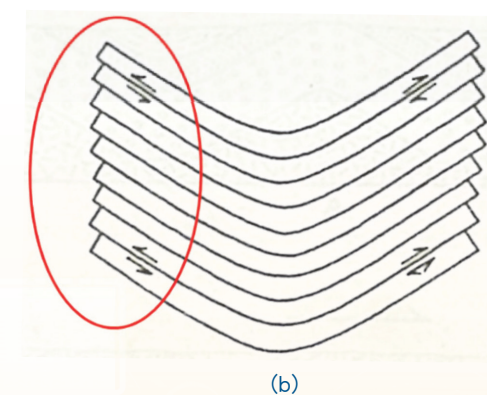
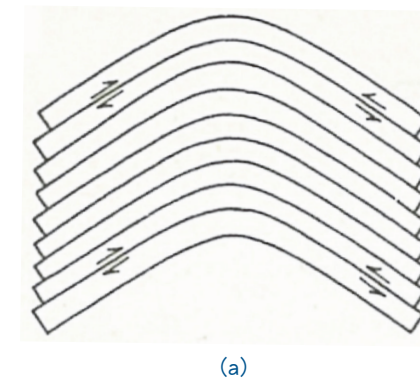


圖 13 背斜及向斜層間滑動示意圖



# 典藏南九州・櫻花季五日遊

## (114/3/25 ~ 114/3/29)

主辦：中華民國大地工程技師公會

陳昭男 陳昭男大地技師事務所 / 大地技師



JR 西大山車站

在三月櫻花綻放之際，迎著春風，我們啟程前往日本南九州，踏上一段融合自然景觀、人文歷史與溫泉饗宴的旅程。鹿兒島的火山煙霧之力、宮崎的海崖神宮、霧島的神木古道，風景處處都如畫，每站停留都是與心靈的對話。五天的行程，我們不僅看見了風景，更典藏了春光與人情。

### DAY 1 | 南國迎春，指宿溫泉初體驗

從桃園國際機場搭機直飛鹿兒島空港，踏上南九州的大地，空氣中便瀰漫著溫暖的氣息。迎接我們的是風景與美食交織的旅程。

午餐享用道地的釜飯定食，以陶鍋慢煮的鍋

巴米飯，散發木香與米香，隨個人喜好靈活調配茶泡飯比例，品味自成一格。餐後前往日本最南端的 JR 西大山車站，這座無人迷你車站以幸福黃色郵筒與壯麗的開聞岳（薩摩富士山）為背景，旅人最愛的打卡景點，手機、自拍桿紛紛出動，揭開了這趟旅程溫馨的序章。

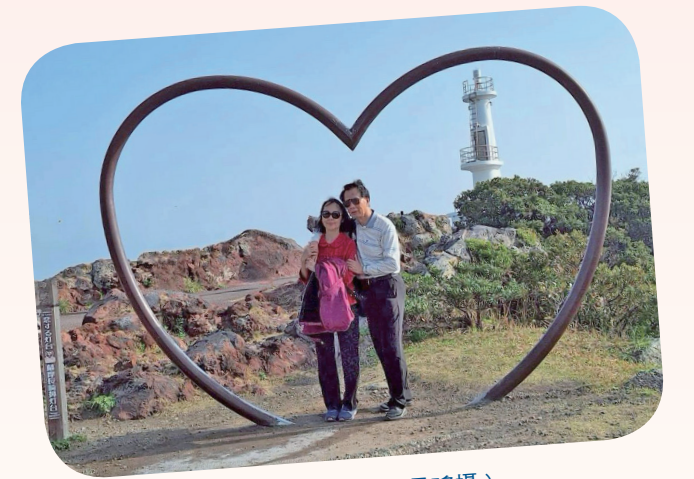
驅車來到薩摩半島最南端 - 長崎鼻燈塔，因心型地標又稱呼『戀愛燈塔』，站在海角眺望東海，雙雙、對對爭相拍照留影。坐落於燈塔旁的龍宮神社是日本民間故事主角「浦島太郎」出生地。別忘了在浦島太郎與福龜相伴的石雕旁繞上兩圈摸摸福龜，祈求良緣或健康。



龍宮神社

傍晚入住【指宿海上溫泉飯店】，面前一望無際的錦江灣風光優美卓絕，大廳供應啤酒、飲料無限暢飲，為砂浴做好暖身準備。令人期待，全世界少有的指宿砂浴 SPA，換上橘色浴衣，由工作人員協助將砂覆蓋在身上，讓全身埋入天然地熱砂中，剛開始體內微微發汗、接著全身暖流通暢，是前所未有的療癒體驗。

晚餐在飯店內享用精緻的會席料理，鹿兒島風味菜餚一應俱全，公會也特別安排了3月份慶生會及日式蛋糕，在櫻花季的夜晚舉杯共賀，溫馨又難忘的晚宴。



長崎鼻燈塔 (張曼瑤攝)



指宿溫泉飯店



慶生 3 月壽星

指宿砂浴溫泉 (陳昭男技師攝)



## DAY 2 | 黑酢之鄉與火山之島，靜與動的交響樂

清晨從指宿出發，前往日本黑酢的發源地—桺志田黑酢本舖，聯合國列入無形文化遺產。在這片田園與火山交會的陶甕庭園，桺志田堅持傳統釀酢技術，釀出了鹿兒島人的樸實與傳承。

午餐享用【黑酢健康煮料理】，佳餚中的新鮮蔬菜與豬排的厚實感讓人飽足，滴上釀造3年的黑酢後酸甜爽口，讓人吃得滿足無負擔又營養滿分。

飽足之後搭乘渡輪前往櫻島。渡輪上體驗「名物烏龍麵」，最受歡迎的是綜合口味，麵中的油蔥櫻花蝦入口即化香氣十足，坐在艙內邊吃麵邊眺望火山與海面，渡輪上的獨特體驗，稍縱即逝的20分鐘時光，當然要收錄在回憶中。

櫻島這座活火山至今仍會噴煙降下火山灰，登島後造訪有村溶岩展望所，位於1946年櫻島火山大爆發流出的熔岩小丘上，在熔岩步道途中，腳下是一片黑色岩石平原及遍地無盡的火成岩景



桺志田黑酢本舖（陳昭男技師攝）



黑酢健康煮料理



名物烏龍麵（陳昭男技師攝）

櫻島渡輪（陳明志技師攝）

觀。遠眺櫻島的主峰，火山頂白煙仍不時緩緩升起，不禁敬畏自然之威。為防止火山突然噴發島上有保護居民之退避壕設施，當地政府發放的黃色集灰袋，提供居民蒐集火山灰後再由政府回收。

下午走訪300多年歷史的霧島神宮是南九州最大神宮及信仰中心，進入到神宮前，會經過三座大型鳥居，仔細觀察建築的色彩豔麗分明，上頭細小的雕刻層次豐富，富麗堂皇的樣貌得有美名「西邊的日光」之稱，兩側千年杉木參道老樹聳立，櫻花盛開包圍著優雅端莊的朱紅色神社殿宇，宛如步入神明與森林之境。

連續兩晚入住【霧島國際飯店】，飯店位於霧島錦江灣國立公園內，擁有豐富的溫泉設施與寧靜山景，窗景望出煙霧噴發源源不斷迷漫整個山谷中，彷彿置身在山水畫中。夜晚在溫泉中消除一日疲憊，身心歸於平靜。



櫻島



霧島神宮

## DAY 3 | 雨中探幽，綾之照葉大吊橋與日南古道的記憶

小雨霏霏，山嵐輕繞，遊覽車司機為所有人準備了雨傘，清晨微涼空氣中卻因日本民族的人情感到暖暖的。前往宮崎深山中的綾之照葉大吊橋車程較遠，「照葉」是「溫帶雨林」之意。這座高懸於溪谷之上的吊橋身處九州中央山地國定公園的範圍，全長250公尺，漫步在山林包圍的美景橋上，雨水敲打傘面節奏緩慢、寧靜，像似開啟與森林對話，頓時感受山中無甲子。

中午來到飫肥城品嚐宮崎的經典名物—南蠻雞料理，蛋絲、雞絲、海苔絲，淋上特製雞骨高湯，意猶未盡回味無窮。

餐後步行至「九州小京都」之稱的飫肥城下町。飫肥城城廓是過往石牆的原貌，重現了藩主曾經有過的宏偉氣勢，踩踏舊石階而上，最頂端完整保留了建築和古物，百年杉樹林圍繞四周，古木高聳入雲，感受到城池雄偉與靜謐。

而飫，在日文發音為-飽足、飽食之意，提醒著人們曾經有過的繁華榮景。如今的飫肥城，已成為最能體驗江戶風情的景點之一，穿梭於古街石板

路充滿歷史文化風情的日式老屋之間，進行美味玩很大的【五項兌換券】自由尋寶，傳統小點、搭配飲品還可兌換紀念品，有吃又有的拿，真棒。

接著造訪被海浪及岩壁包圍著壯觀洞窟神殿的鵜戶神宮，鵜戶神宮位在鄰太平洋的日南海岸旁，整體建築在海岸岩壁的洞穴中，既是信仰的象徵，亦是療癒心靈的秘境。欣賞大自然的鬼斧神工，更要認識神話世界的故事。相傳海神的女兒豐玉姬臨產而來到此地，洞窟中的鐘乳石滴水哺育了日本的第一代天皇。走在神社境內，發現沿途有許多可愛的兔子石雕，傳說兔子是神明的使者。

神宮洞窟外的海蝕崖上有一個被稱為「龜石」的特殊岩石，龜背上有一個小洞，據說將特製的陶玉投進孔中可實現心願。雖然下大雨無法進行「運玉投擲」祈福，相信每個人心中的祈願是用各種進行式，時時守護著所愛的家人們。

傍晚途經著名的日南海岸「鬼之洗濯板」，鬼之洗濯板從海中隆起並露出之古老地層，由較強的砂岩和較弱的泥岩反覆疊加形成的沉積岩，因為抗蝕力差異，受到不同程度的波浪侵蝕影響，逐漸形成巨大的海蝕平台有著像洗衣板一樣外型。風雨加劇中仍匆匆下車遠眺著海浪與岩紋交織形成特殊的自然奇景，此時聯想起北海岸石門「老梅綠石槽」亦有異曲同工之妙。

夜晚返回霧島，晚餐前讓溫泉沉澱身心靈，細膩的溫泉泥塗抹全身再次感受原始森林浴，梳洗一番之後，身著浴衣的儀式感享用著晚餐，填飽五臟廟的同時也與團友們相談甚歡，並在舒適的夜晚進入夢鄉。



綾之照葉大吊橋





飫肥城（黃醒如攝）



鶴戶神宮（黃醒如攝）

## DAY 4 | 磯庭園、海豚與天文館，市街裡的輕盈一日

離開霧島，來到仙巖園：聯合國列入文化遺產，為日本明治時代的工業革命遺產（江戶庭園），這裡曾是薩摩藩主的別墅並作為迎賓館使用，也是一座歷史博物館。

想像我們是薩摩藩主的貴賓走進時空隧道來到仙巖園，探索著歷史價值融合的文化景點，依山傍海遠望漂浮在錦江灣上的櫻島，「庭園」利用借景的手法將自然與建築巧妙融合的日式名園，這裡也經常成為影視劇及拍攝婚紗的取景地。

園內保存了許多與島津家族相關的歷史建築和文物，園區中還有為了製造大砲而進行煉鐵

的設施：反射爐遺跡，尚古集成館展示了許多日本第一個近代工業區的核心物品。

參觀後品嚐著傳統在地特色點心「兩棒餅」，柔軟香甜的烤麻糬，麻糬用的兩根竹棒子像江戶時代武士攜帶的雙刀而得名。

隨後抵達用餐地點，傳統風味的【奄美雞御膳料理】，高湯沖泡飯，簡單卻深具家鄉感。

接著來到充滿童趣與水底生物的鹿兒島水族館，觀賞海洋生物與生態展示，重頭戲莫過於十分鐘的戶外海豚秀，海豚躍出水面的瞬間充滿力與美，帶來滿滿歡呼與驚喜，是旅行中最純真的時光。

眾所期待的天文館商店街踩點，「天文館」並



世界文化遺產博物館（陳昭男技師攝）



仙巖園庭園（陳昭男技師攝）

消耗能量之後該補充元氣了，安排的恰好，依個人喜好盡情點用多元的【黑豚涮涮鍋＋握壽司＋軟飲吃到飽】菜單，簡單的鍋底襯托出豚肉的軟嫩與鮮美，是味蕾與飽足的完美句點；前往飯店的車上團友們互相交換著購物心得與戰利品，笑聲不斷，這應該是身體健康的最佳良藥吧！

晚上入住【鹿兒島 ART 飯店】，夜幕低垂後可自由前往 Sky market 採買，補足旅程尾聲的小驚喜。

## DAY 5 | 道別南國，心已典藏

清晨，飯店的早餐，每一道料理似乎都變得特別可口，依依不捨地前往鹿兒島空港。櫻島的輪廓、溫泉的暖意、神宮的祈願、技師夥伴談笑風生的同遊，在煙嵐與櫻花之中啜飲春意，在鍋湯與盛筵之間典藏回憶。飛機劃破雲層，回到熟悉的日常…但，記憶中的南九州，春意櫻島如畫，美宴飲耐山谷。🍵



水族館（方明朗技師攝）

不是觀測天文設施，而是九州鹿兒島市中心最熱鬧美食與生活購物的商店街，瞬間變身購物特攻隊，穿梭在藥妝店之間完成超級任務，畢竟有福委會比價認證的商品當然不能錯過，街道中有在地人的優閒步伐，更有旅人匆忙為自己與家人們選購伴手禮使命必達的精神，短短兩個鐘頭都在這條街上一網打盡，心滿意足的收入囊中。

仙巖園



鹿耳島 ART 飯店海景（郭慧妹攝）

