

# LPWAN 物聯網系統於大地工程之運用 —以捷運萬大線站體開挖工程為例

吉聯資源開發股份有限公司 / 吳智偉  
三聯科技股份有限公司 / 林大鈞  
臺北市政府捷運工程局第二區工程處土木第三工務所 / 蘇瑞麟  
【本文轉載自《地工技術》2020 年第 166 期】

## 一、前言

台灣從民國 60 幾年起，不斷引進新的量測技術於在大地工程至今，安全觀測系統對深開挖工地安全的重要性與日俱增。由於開挖期間的監測儀器變化攸關著工地安全訊息加上人力成本越來越高，只藉由開挖監測的頻率量測報告來反映現場開挖安全，往往緩不濟急。近年來設計單位為了施工單位能有效的掌握工地安全狀況，更會規劃即時自動化觀測，來了解現場工地開挖變化情形，以達到防災預警效用。

早期地工自動化監測量測擷取方式，都是將感測器拉到資料多工掃描箱，再將訊號透過有線方式連接到紀錄器後，透過 RS485 或 RS232 模式連接到中控室電腦設備端，透過電腦及儀表板顯示方式做呈現。隨著工業科技發展，電子、軟體及通訊的不斷更新進步，除感測器的元件製成演化精進，讓感測器量測品質及精度上大幅提升外，在通訊上，遠端資料傳送方式除實體 Cable 網路 (ADSL)，另可選擇各種無線通訊模式 (ZigBee、Wi-Fi、GSM-3G-4G 等) 方式做遠端資料的回傳。

近十幾年全球智慧城市的持續發展，各種 IoT 應用不斷拓展，例如電錶、水錶、瓦斯錶、交通設施等物聯感知設備，其在低耗電且能遠距離無線傳輸小資料量的需求。近年也興起的 LoRa、Sigfox、NB-IoT、LTE-M 等這類長距且低功耗的無線網路技術，其這種低功耗遠距離廣域網技術稱為 (Low-Power Wide-Area Network, LPWAN)。

目前 LPWAN 系列中 LoRa 技術在大地工程運用案例中，以邊坡防災自動化監測最為廣泛發展跟使用。捷運深開挖案，多半是長條形狀開挖，因為現場監測儀器斷面較多，若規劃自動化讀取，則需要設置多個的開關箱。傳統多半是透過實體線路將各區監測多點式掃描箱拉回記錄器，再由無線或有線傳送到資料庫處理。但往往在建置監測箱所要訊號及電源線路繁雜且與之間訊號線易損壞而查修上較費時，有鑒於此，本工程案例是嘗試以捷運萬大線 LG02 站深開挖自動化監測原有架構，將分散性掃描箱，運用 LoRa 為構成區域網路方式，最終傳到資料記錄箱以透過 NB-IoT 方式將監測資料上傳雲端資料庫。建置後，除後期維護上更加方便，也同時大幅降低通訊上的費用。

Photo by Freepik.com

## 二、LPWAN 簡述

### (一)、什麼是 LPWAN

LPWAN 是一種遠距離、低功耗、低頻寬的無線通訊網路，多數 LPWAN 技術在市區環境可以實現幾公里，空曠環境甚至可以幾十公里的網路覆蓋，也同時解決物聯網產業存在的終端功耗高、海量終端連接、廣域覆蓋能力不足和成本高等困難，適合大規模佈署。

就 LPWAN 而言並不是單指某一種技術，而是各種低功耗、廣域網路技術的組合，與 RFID、藍牙、蜂巢式 M2M 和 ZigBee 等其他無線網路通訊協定相較，它們都普遍擁有以下特點：

1. 低功耗：電池壽命可長達 10 年。
2. 遠距離：覆蓋範圍廣，可達十幾公里，在城市環境中的工作範圍通常也超過 2km。
3. 低資料：佔用頻寬小、傳輸的資料量少、通訊頻率低。
4. 傳輸延遲不敏感：對資料傳輸即時性要求不高。
5. 低成本：由於規模大，要求佈署的成本低。

### (二)、LPWAN 的不同技術區分

在物聯網需求迅速成長的同時，物聯網技術標準化持續不斷升級，LPWAN 中技術流派的競爭可謂異常激烈。總括來說 LPWAN 可分為兩類：一類是工作於未授權頻譜的 LoRa、SigFox 等技術，也可稱為非蜂巢式 LPWAN；另一類是由 3GPP 主推基於授權頻譜，採用蜂巢式通訊技術的 EC-GSM、LTE Cat.1/0/M1 (eMTC)、NB-IoT 等，也可稱為蜂巢式 LPWAN。

在眾多 LPWAN 技術中，NB-IoT、eMTC 與 LoRa 是目前使用最多，也是爭議最多的，因此在實際運用上常被用來互相比較，但其實他們在技術定位和應用領域也都各有區別，而在土木工程的運用上 NB-IoT 與 LoRa 最為常見。

## 三、案例

### (一)、案例簡介

本案例是位於台北植物園園區捷運萬大線 CQ842 標的 LG02 植物園站，詳圖 1。LG02 站為地下 3 層島式月台車站，車站淨長度約 126 m，車站淨寬度約 18.4 m。

本標因位處植物園遺址範圍，故在車站正式開挖初期，需用人工挖掘方式進行範圍內地下 6 m 遺址搶救，所屬範圍遺址搶救作業共約施作 44 個月。在考古作業後，才進行本標擋土壁施作及開挖支撐相關作業。

本工程站體採厚度 1.2 m，深度為 50 m 之連續壁；東西井開挖較深，設計深度為 55 m 之連續壁。基礎採用挖內支撐方式進行開挖作業。

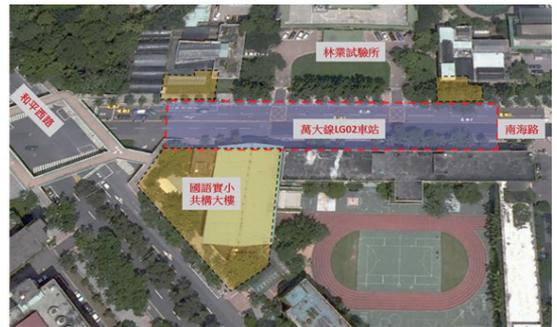


圖 1. LG02 站平面位置示意圖 (摘錄捷運局網頁)

站體為七撐八挖，開挖深度約 25.5 m；站體兩側東西井為八撐九挖，開挖深度約 28.25 m。由於第六層開挖深度到 18.9 m 須配合景美層降水，以確保開挖期間上舉之安全性。故本工程經過抽水試驗後，在連續壁內埋設 26 只，深度達 85 m 之直徑 60 cm 鋼管，並利用 120HP 沉水馬達進行各階段降水。

### (二)、土層狀況

本工程位於植物園區南海路上，此區根據本標 60 m 鑽孔地質報告書共分為 6 個地層，各土層分布如表 1。

### (三)、安全監測系統規劃

本案例為了解開挖期及構築期間，對於開挖區內擋土系統之安全性以及周邊建物或地面道路之影響。設計單位會在各斷面設計的監測儀器，來觀測開挖構築期間變化情形。圖 2 跟圖 3 分別是基地內外側監測儀器之配置。

表 1. 土層分布

地層	土層深度 (m)	土層分類	$r_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$C'$ (t/m <sup>2</sup> )	$\phi'$	$S_u$ (t/m <sup>2</sup> )
1	0.6	SF	1.92	0	30	-
2	9.6	CL	1.90	0	27	2.3
3	16.3	SM	1.93	0	31	-
4	21.9	CL	1.83	0	28	6.1
5	32.7	SM	1.93	0	33	-
6	44.8	CL	1.85	0	31	11.3
7	60.0	GM	2.20	0	34	-

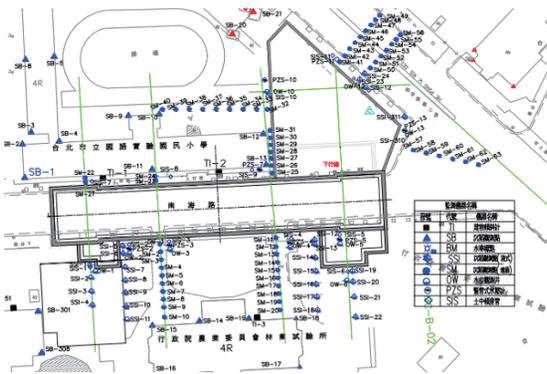


圖 2. LG02 站基地外監測儀器配置平面圖

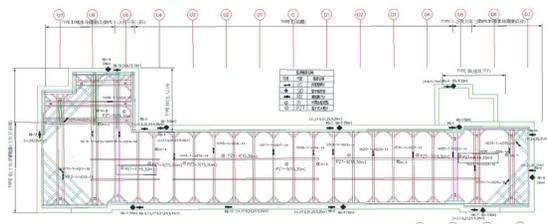


圖 3. LG02 站基地內監測儀器配置平面圖

本工程除按設計規劃開挖頻率做各種儀器觀測外，施工單位預想知道開挖構築期間及拆除支撐時軸力的變化情形，其規劃支撐應變計以自動化量測方式做即時化量測，另外也在基

地開挖斷面，將鋼筋應力計納入自動化觀測項目，以了解連續壁鋼筋受力狀況。為了解基地內開挖降水及土體水壓力情形，將基地內水壓計也規劃成自動化方式進行量測。

### (四)、自動監測儀器數量

本案設置自動化監測儀器種類數量及配置如表 2 及圖 4 所示。

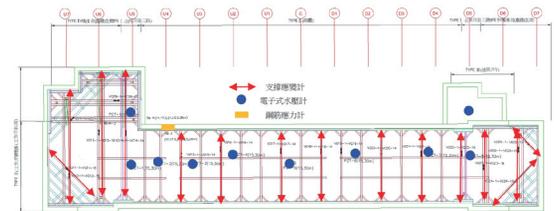


圖 4. 基地內自動化儀器規劃平面圖

表 2. 自動化監測儀器種類數量表

監測儀器名稱	代號	斷面數量(處)	各斷面儀器數量
支撐應變計	VG	20	站體(7組,14只) 東西井(8組,16只)
鋼筋應力計	RS	1	5組10只
基地內水壓計	PZT	10	1處2深度
景美層水壓計	PZS	1	1處1深度

### 四、自動化系統架構演化

#### (一)、電子式監測儀器

近年來隨著工業科技不斷的演化跟進步，用於大地工程領域上自動化儀器跟資料擷取器模組設備，可以有更多元性的選擇。目前常用大地工程深開挖儀器可用自動化量測感應器跟儀器規格如表 3 所示。

表 3. 深開挖常用的自動化感應器跟儀器規格

裝設位置	監測項目	感應器	儀器規格
基地內	擋土變位(位移)	電子式傾斜儀	微機電式(MEMS)
	鋼筋應變(應力)	鋼筋應力計	電阻式/振弦式
	支撐軸力	支撐應變計	振弦式
	支撐/地錨荷重	電子式荷重計	電阻式/振弦式
基地外	基地內水壓	電子式水壓計	振弦式/4-20mA/電阻式
	鄰房傾斜量	電子式傾斜儀	微機電式(MEMS)/電漿式
	基地外水位/水壓	電子式水壓計	振弦式/4-20mA/電阻式
	結構裂縫	裂縫儀	振弦式/電壓式

### (二)、自動化模組設備

在工業 4.0 物聯網的時代，除感測器元件不斷的提升外，用在工業的資料擷取記錄器更是玲瓏滿目。早期用於在深開挖工地自動化監測資料擷取器模組，以美國 Campebl 1、澳洲 dataTaker 兩家大廠為主流。近十幾年來國內儀器模組供應商有鑑於儀器設備商品本土化需求，積極開發屬於 MIT 的感知器或資料記錄模組。以滿足國內自動化市場需求。

### (三)、原規劃自動化模組設備

在本文案例中，配合工地儀器需佈設的範圍，初期在規劃上考慮使用 Campebl 1 系統模組搭配 2.4G 無線通訊方式做自動化架構 (如圖 5)，但考慮工地儀器數量上，配置時須建構 2 套硬體架構 (1 組資料記錄器 Data logger、1 組振弦轉換模組、1 組通訊模組及 7 個多工掃描箱 (Multiplexer)。再加上每個開關箱需獨力拉兩組訊號線到資料記錄器 Data logger 端，除建置硬體設備較多外，往返訊號線耗材過於繁複且訊號維修上較不易。

### (四)、工地使用的自動化模組設備

在本案例自動化建置上，因儀器皆為振弦式感測器，最後採用本土 MIT 生產 VW HUB

振弦式掃描箱 (以下稱開關箱)，作為儀器資料擷取設備，每個開關箱有 16 頻道可以做使用。另外掃描箱可以用串連方式做連結，相較於原規劃設備上更適合本案例做使用，最後系統只需使用一組廠商所開發的資料記錄器並搭配 2.4G 無線通訊設備，即完成本案例自動化系統架構 (如圖 6)。

以往深開挖工地的安全自動化監測系統，在設置自動化開關箱上，多半選擇附掛在靠近監測斷面施工圍籬或安全欄杆上 (圖 7)，以利每階段的儀器增設。本案由於是既有道路捷運深開挖工地，基地內只會留取土口位置，其餘皆鋪滿覆工系統，初期開挖一、二階段，因開挖深度不深，可以藉由預留孔增設感應器訊號線 (圖 8)。考慮後續開挖階數遞增，在增設感應器訊號線上就不易處理，故第三階支撐系統架設後，將開關箱移置此階安全步道欄杆上 (圖 9)，以解決感應器增設上問題。另外在建置過程中，曾發生幾次開關箱串聯訊號線不慎被弄斷，造成後面開關箱訊號無法回傳或短路跳電狀況，雖資料斷訊或沒回傳可藉由簡訊告知，並適時處理。但在本案例中，開關箱以串連方式，因距離較遠且開關箱較多，異常斷線查修上較費工費時。故建構系統後期，有研究討論要如何以其他方式做改善與精進。

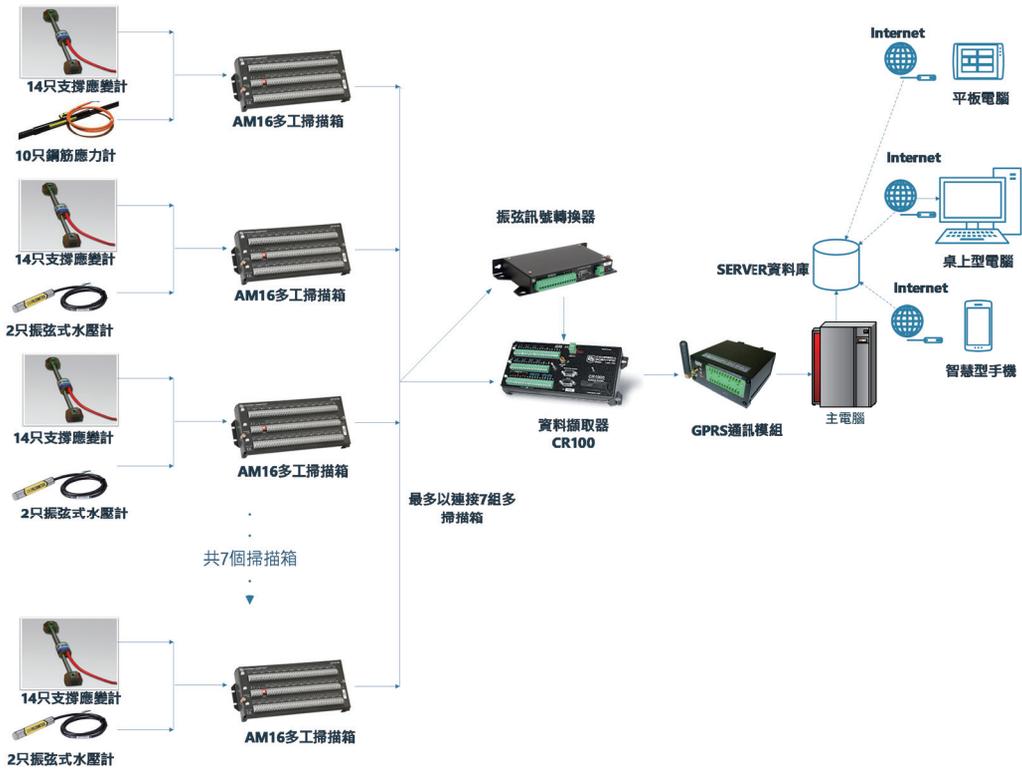


圖 5. 原規劃自動化系統架構

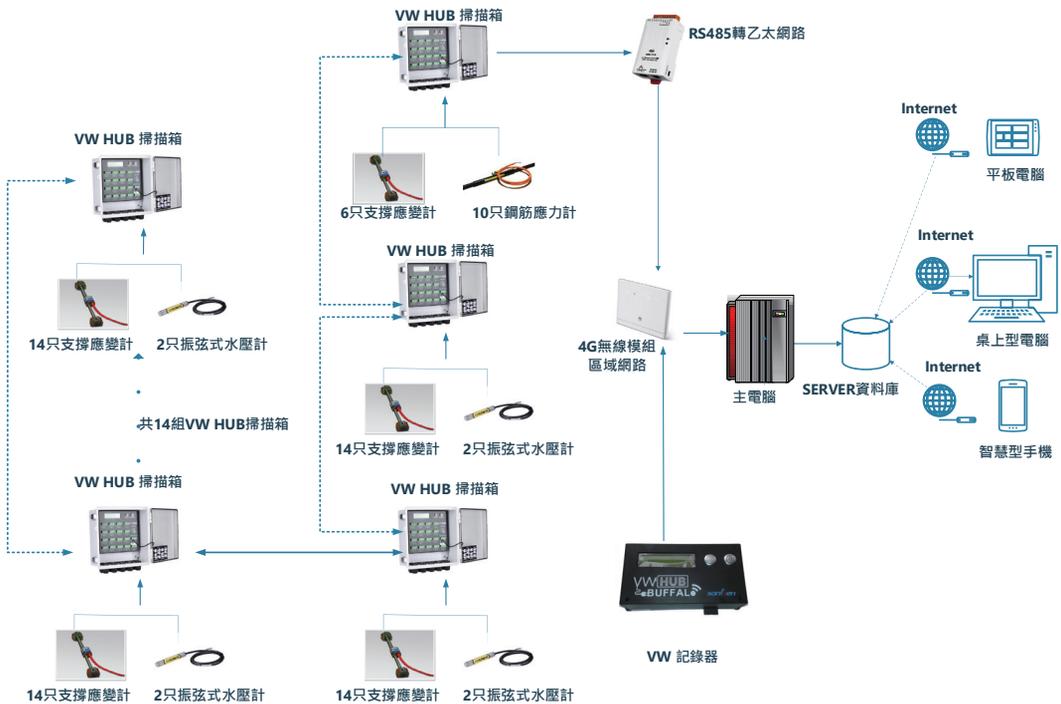


圖 6. 工地使用的自動化系統架構圖



圖 7. 開關箱設置在安全圍籬上



圖 8. 初期開關箱設置位置



圖 9. 第三層安全走道開關箱

### (五)、導入 LoRa 通訊模式優化系統架構

由於工地屬於長向型基地，各掃描箱傳輸，除有實體線路外，若以無線通訊技術更可適用此工地做使用。有鑑於此，本案例改善初期可考慮以 Zigbee 這種低功耗、短距離、無線通訊方式，做分區式的傳輸。但以現場施工環境，部分開關箱通訊易受到阻擋，資料容易漏報情形。最後在數款物聯網通訊模組的測試下，找到一款結合性佳、穩定高且成本較可接

受的 LoRa 無線通訊模組，作為後續開關箱互聯通訊傳輸的設備。見圖 10 ~ 12 所示。



圖 10. 結合 LoRa 模組振弦感測器掃描箱



圖 11. 透過 LoRa 將資料傳回記錄器端

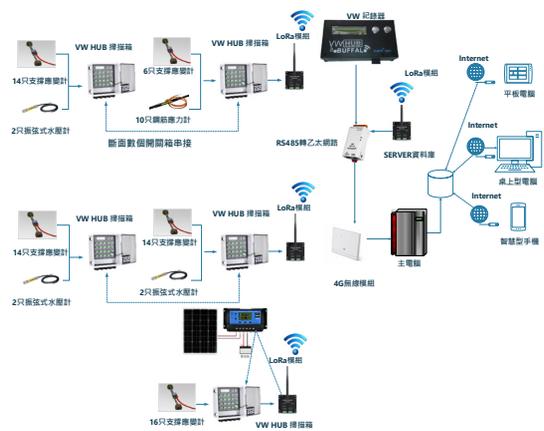


圖 12. 加入 LoRa 自動化系統架構圖

## (六)、LoRa 設備耗電量及 LoRa 通訊傳輸可靠度評估

本案由於西工作井儀器設置開關箱上，電源取得不易。故在設置開關箱電源上，嘗試以太陽能加蓄電池搭配電力調節器方式執行。整體 LoRa 開關箱系統可區分為耗電、充電、及蓄電三大部分。利用原廠所提供之設備耗電功率及 10W 太陽能充電電量計算 (如表 4)。依表 4 電力計算方式，在無法充電情況下，12V7Ah 電池可提供開關箱 5~6 天電力 (蓄電量 84Watts\* 保守值 60%/ 耗電量 8Watts  $\approx$  6 天)。另外在考慮電池壽命及容量耗損，定期每半年會更換新電池，以確保電持蓄電不足之虞慮。現階段以太陽能蓄電方式，開關箱在電量維持 95% 情況下已運作約 5 個多月 (如圖 13)。

表 4. LoRa 開關箱電力系統計算表

項次	系統耗電量	10W太陽能充電量	電池蓄電量
1	VW記錄器功耗:5V 125mA耗電量 =5*0.125=0.625W1天耗電量 =0.625*24=15Watts	10W*95%*8小時 (保守一天8小時日照)=76Watts	蓄電量 12V*7Ah=84Watts
2	LoRa通訊模組功耗24V 15mA 耗電量=24*0.015=0.36W1天耗電量 =0.36*24=8.64Watts	-	-
原合計	約24Watts/天	76Watts	84Watts
利用調節器 省電裝置	A.目前資料30分鐘擷取一次,利用電力調節器將電源關掉 25分鐘再開啟5分鐘方式執行 B.經過電力調節器後1-2項耗電合計=24Watts/(開10分鐘 +放電損耗10分鐘)/60分=8Watts	-	-
改善後合計	約8Watts/天	76Watts	84Watts

另外為了解本案加入 LoRa 通訊後對於傳輸可靠度及漏失率的情形。現場以 2 分 -1kb/ 筆方式進行測試，從 24 小時測試結果顯示，傳回資料完整度約達 99%，漏失率都可控制在 0.5% 以內 (如圖 14)。

## (七)、未來結合 NB-IoT 系統打造深開挖工地物聯網概念

本案例自動化系統優化精進上、除以 LoRa 通訊方式做結合外。在資料紀錄及回傳電腦主機方式上，目前嘗試以 LPWAN 技術的中 NB-IoT 通訊方式回傳。未來深開挖自動化工地可導入 LoRa 及 NB-IoT 這兩項技術做使用如圖 15。未來可隨工地環境及儀器的多寡，利用物聯網這兩

項通訊技術可以更多元化運用 (圖 16、圖 17)。



圖 13. 利用太陽能供電方式開關箱





圖 16. NB-IoT 結合 LoRa 系統傳輸



圖 17. NB-IoT 結合 VW HUB 系統傳輸

## 五、運用 LPWAN 物聯網技術案例成果介紹

### (一)、LG02 站體開挖支撐軸力、連續壁鋼筋應力及基地內水壓變化

利用本案例自動安全監測系統，在開挖除協助了解每階段開挖軸力變化情形，更可了解無支撐的狀態下，開挖潛變對支撐軸力的影響程度。另外一般深開挖工地較容易忽略折撐時候，對於上層支撐軸力安全的重要性。若以人工方式讀取，較無法有效了解上層支撐受力的穩定狀況，且若軸力過大時，無法立即得知及處理。在本案例中，利用遠端調整頻率，以每 5 分鐘擷取方式，即時了解拆除支撐時，對於各層支撐的受力變化，以有效掌握支撐的安全性如圖 18。

另外本案例中對於開挖時連續壁鋼筋應力變化，除可以藉由自動化監測曲線，完整了解開挖鋼筋應力變化情形如圖 19。另外在配合基地內電子式水壓計的監測，更可以了解基地內抽降水的壓力變化如圖 20。

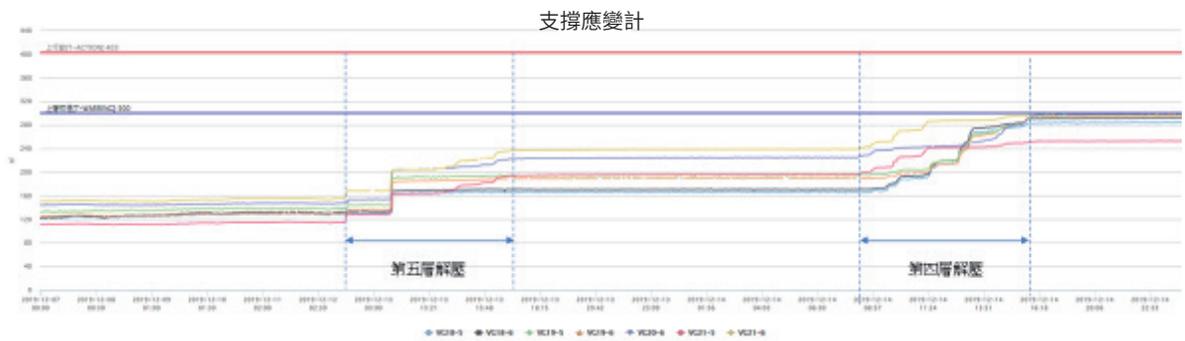


圖 18. 折撐對上層支撐軸力變化曲線

鋼筋應力計

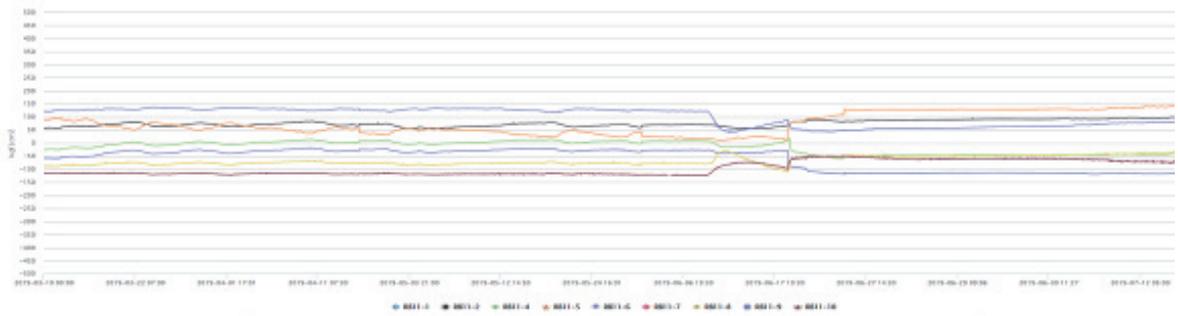


圖 19. 連續壁鋼筋計變化曲線

電子式水壓計



圖 20. 基地內水壓變化曲線圖

## (二)、LG02 站景美層降水變化監控

本工程開挖深度約達 28 m 深，設計開挖分析上，需在第八階段開挖至 24.35 m 前，將景美層水位由 11 m 降到 19.5 m 左右。在過去捷運松山線 CG590A 標的監測經驗，了解抽降景美層的水，亦會同時降低松山第三層透水層水位。故在自動化儀器設置上，除規劃一處景美層觀測井 (48 m) 外並選擇一處松三層 (30 m) 觀測井，以採電子式水壓計方式做為工地了解景美層水位及松三層水位的影響。此外降水期間除以自動監測了解 LG02 站景美層的降水變化外，同時在距離約 600 m 的 LG01 站 (圖 21)，另外再設置一處景美層水位監測站 (圖 22)，並利用 LoRa 低功耗遠距離傳輸特性。將資料回傳到 LG02 站記錄器內。此收集的景美層變化資訊，可給予設計單位了解景美層抽水洩降的情形 (圖 23 及圖 24)。



圖 21. LG01 到 LG03 站景美層觀測井距離



圖 22. 結合 LoRa 模組振弦感測器掃描箱

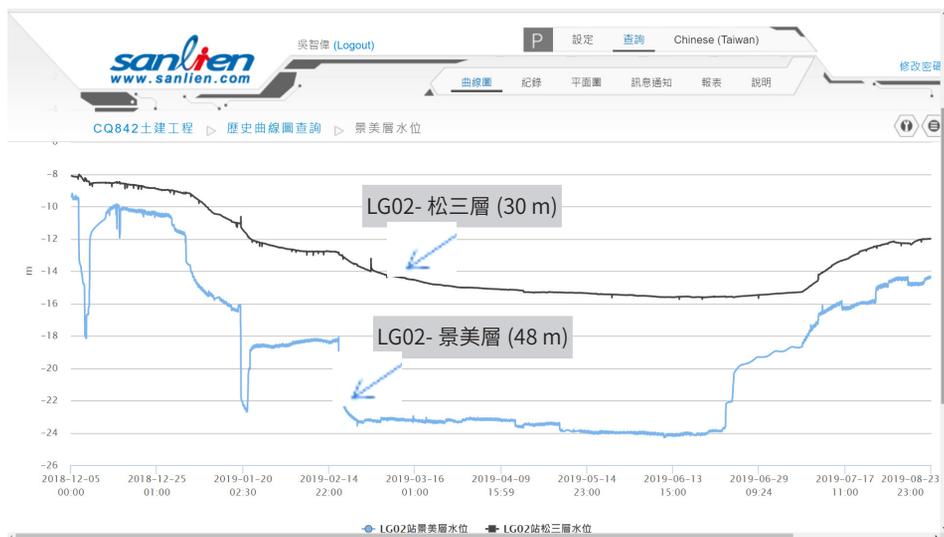


圖 23. LG02 站降水期間景美層及松三層水位變化



圖 24. LG01~LG03 站降水期間景美層水位變化

### (三)、LG02 東側出發井鏡面灌漿支撐軸力監控

捷運潛盾工程施作時，為了防止潛盾初期地下水的滲漏及增加出發井外土壤強度，故在潛盾機的出發端和到達端都會先進行地盤改良作業。並在出發前做鏡面鑽孔試水，以了解鏡面有無漏砂或地下水滲漏無法滿足規範之現象。

本案因東井在鏡面試水無法滿足參考值，故進行地質改良二次灌漿 (圖 25)。在補灌漿之前，

施工單位顧慮二次灌漿壓力會因初期灌漿地體區屬封閉情形，亦灌漿時會造成灌漿壓力擠壓到壁體，而造成支撐受力增加情形。故在配合灌漿階段，利用已建置好的監測自動化系統，以每分鐘監控的方式，即時了解壓力對支撐軸力的變化，過程中灌漿廠商也利用此系統，在灌漿管理值內完成二次補灌漿作業 (圖 26)，並順利完成鏡面試水工作。

#### (四)、LG02 潛盾隧道初期推進反力監控

潛盾在初期掘進時，需靠八卦型反力系統，透過假組力環片將潛盾機往前推進（圖 27）。施工單位想知道潛盾在推進時，支撐反力系統中斷面鋼材的受力情形。因潛盾推進的工作井較深，故採用掃描箱結合 LoRa 無線通訊方式將資料做回傳（圖 28）。資料呈現上，除可以了解支撐鋼材受力的是與設計分析是否一致外，藉由即時軸力變化趨勢，了解推力是否完全已由環片勁向土壤摩擦力所承受。以利後續設備轉換之依據（圖 29、圖 30）。



圖 25. 鏡面二次灌漿作業



圖 26. 二次灌漿支撐軸力影響



圖 27. 潛盾初期掘進施工照

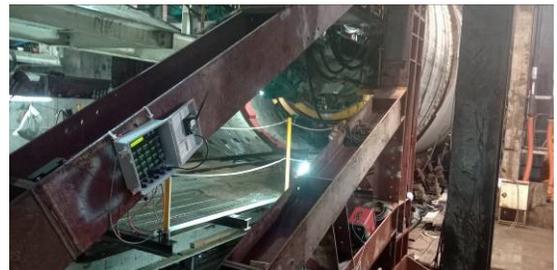


圖 28. 反力座支撐軸力監測箱

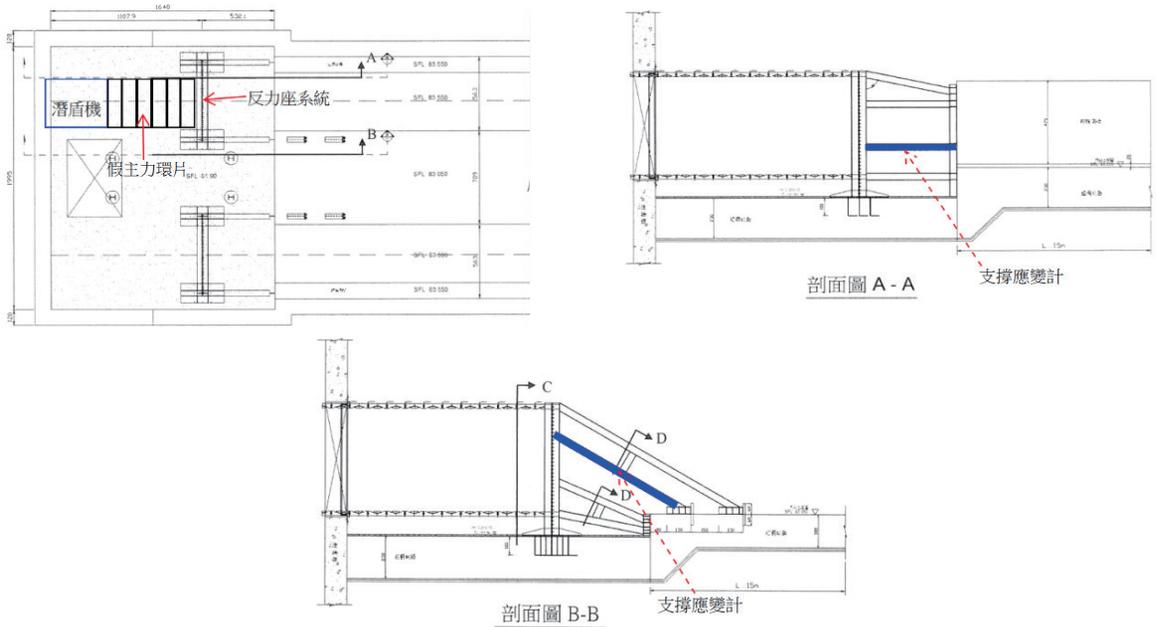


圖 29. 潛盾隧道反力座系統示意圖 (修改大陸工程潛盾反力座檢核計算書)

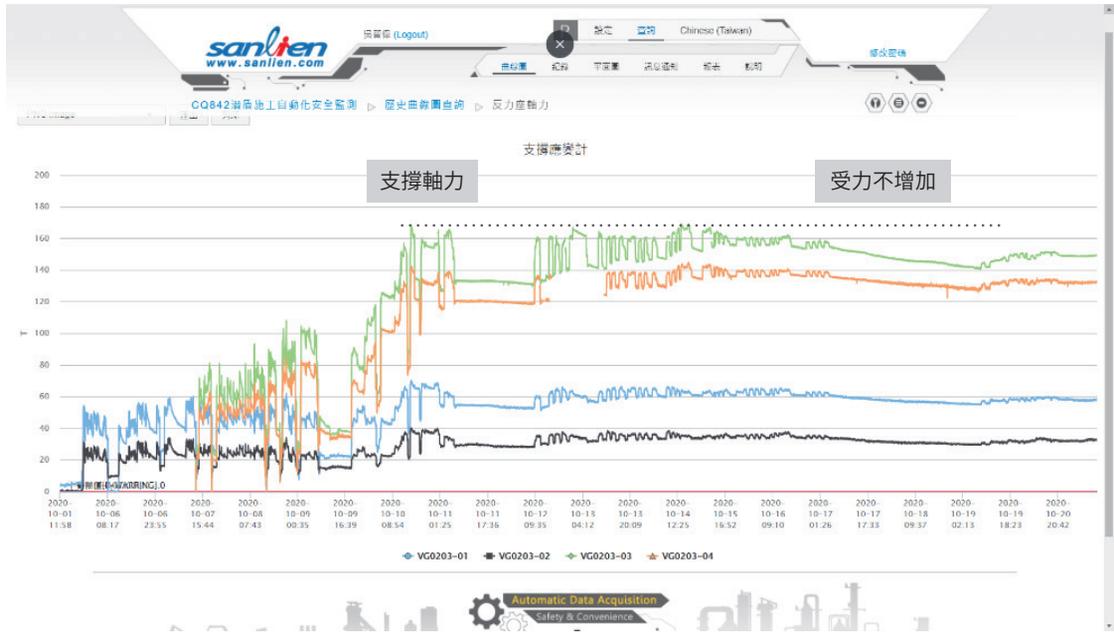


圖 30. 反力支撐系統軸力變化曲線

## 六、結論及建議

從 1987 年 3.5 微米 (3500 奈米) 製成到 2020 年 5 奈米製程，晶圓奈米科技不斷演化，使得工業 4.0 的年代，各類型的感測元件不斷的創新精進，使得感測器的精度及穩定度大幅提升。早期使用在大地工程領域自動化監測儀器，多較仰賴國外儀器及設備，近十年來國內在感測器或讀取設備元件上相繼取得國外

的技術，加上感測儀器的開發製程配合有 TAF 認證實驗室的校正，如今的地工所使用的儀器及設備品質已經可以跟國外大廠如出一轍。

深開挖自動化的通訊從早期實體線路、2G~4G、Wi-Fi 等通訊技術不斷的演變，如今通訊已走到 5G 的年代，各類型的通訊技術不斷的求新求變。在 IoT 的物聯網的年代，藉由 LPWAN 的技術開發，LoRa 及 NB-IoT 這兩項技術已經廣泛被結合在各種領域中。如今地工儀器貿易商或國內儀器開發商都積極在搶攻這塊市場。

目前現有市面上搭配 LoRa 及 NB-IoT 這兩項通運技術的地工儀器越來越多，監測廠商可以依照工地的屬性跟需求做搭配選用。若用在深開挖的工地常因為斷面儀器較多，故需要訊號 channel 較多的開關箱來建置，所以在系統評估上也是自動化監測系統考量的地方。

在本案監測成果上，透過 Web 即時化監測系統，了解抽水期間基地內、外水位洩降變化，開挖期間對支撐軸力、鋼筋應力變化也可適時了解。另外灌漿作業及潛盾推進監測上也因為此系統的運作，讓灌漿及推進軸力變化可即時

呈現，讓現場人員可以即時判斷和應變。

另外目前 LPWAN 技術除運用本案上，在台中一塊深開挖工地，也成功運用 LoRa 開關箱系統 (如圖 31)，即時監控基地內的水壓情形並結合智能抽水系統整合。有效幫助工地節省抽水量並降低用電量產出。未來透過 LPWAN 技術所結合監測儀器佈設會越來越多，且使用監測範圍更加廣闊，期待後續可以更多透過 LPWAN 物聯網技術的工地應用經驗陸續分享。



圖 31. 台中案例 基地內水壓計

## 誌謝

在這感謝三聯科技林大鈞董事長及三聯基金會林廷芳董事長，本著為科技作見證，為工業寫歷史的使命下，支持本案監測系統的初期設備，同時感謝本案系統規劃保志經理的協助讓 LoRa 及 NB-IoT 這兩項技術可以運用在既有設備上。也感謝本案工程同仁對於本案系統的建構上的幫忙，沒有你們無法完成本案的設置及監測。

## 參考資料

- [1] 江澤清 (2003)，「土木安全系統總論」，三聯技術，第 46 期與第 47 期，第 2-7 頁。
- [2] 鄭印呈 (2015)，「VW HUB 於建築開挖安全觀測工程之用運」，三聯技術，第 96 期，第 21-24 頁。
- [3] 謝志龍 (2015)，「WEB 版雲端即時監測軟體介紹」，三聯技術，第 96 期，第 28-32 頁。
- [4] 鞠志琨 (2016)，「系統整合篇 (監測系統構成)」，工程監測之基本理論與實務，第 3-1~3-37 頁。
- [5] 大陸工程股份有限公司 (2017)，「LG02 站、出入口及通風井開挖土之撐系統規劃設計書」。
- [6] 大陸工程股份有限公司 (2020)，「140N-FF-0156(反力座推力提升方案) 計算書」。