

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塌、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。

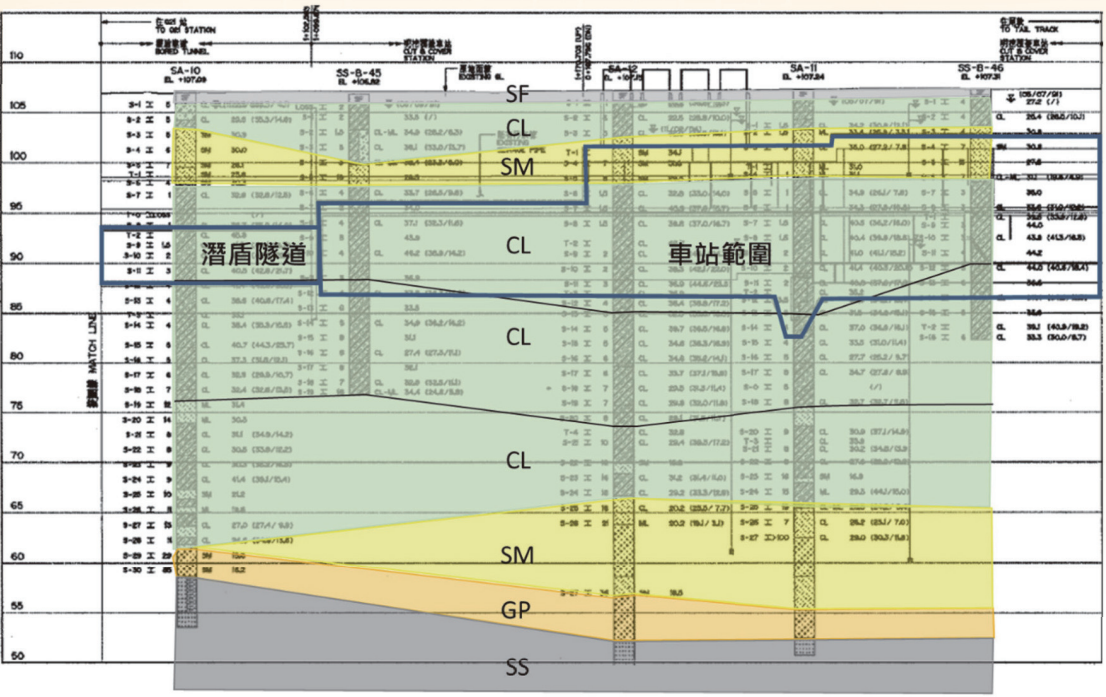


圖 2 G22 站地層分佈示意圖

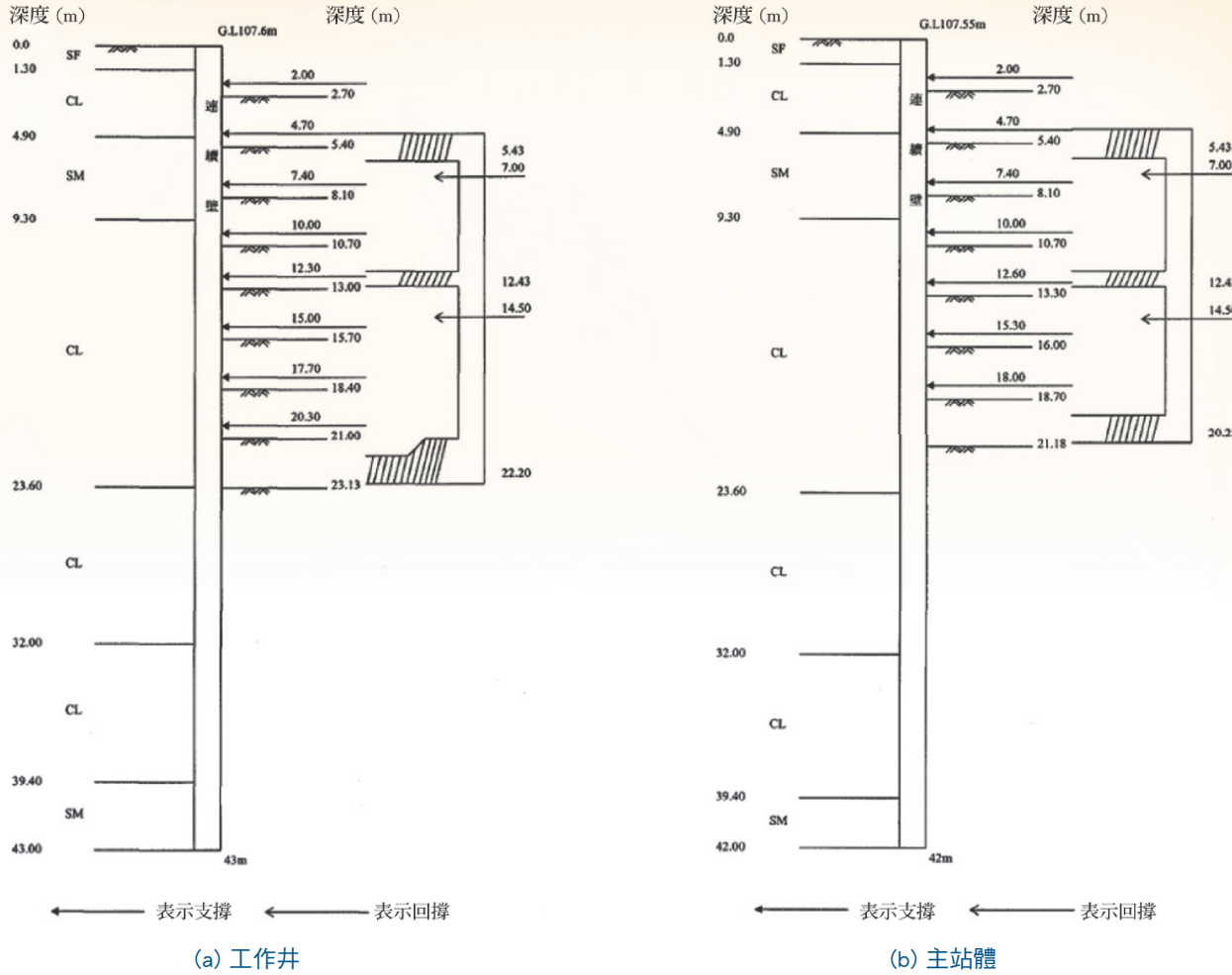


圖 3 G22 站開挖支撐施工順序圖

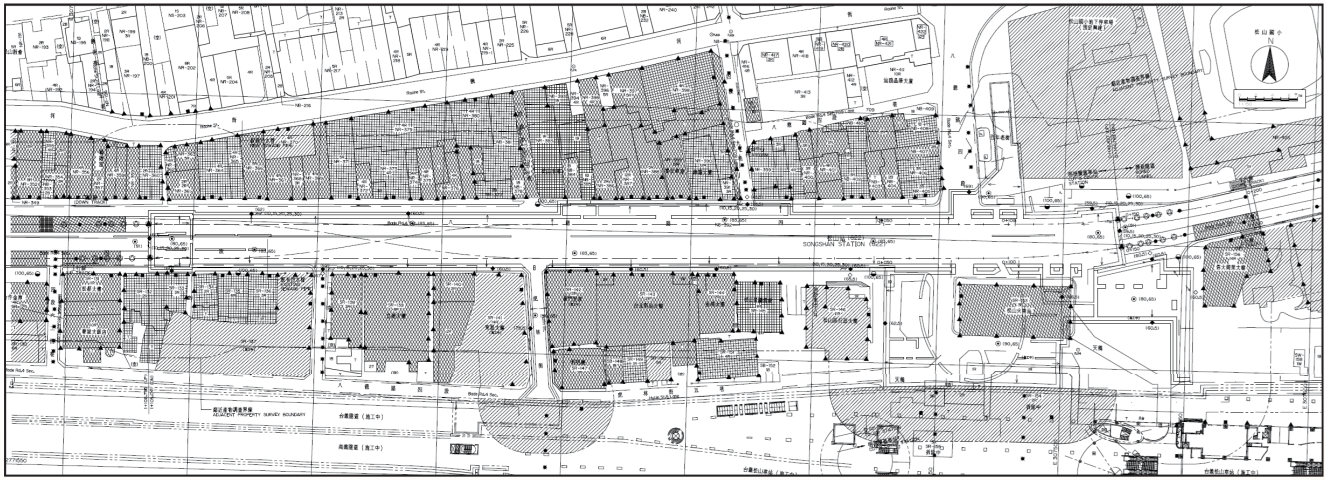


圖 4 G22 站監測儀器布設平面圖

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。

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

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。

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

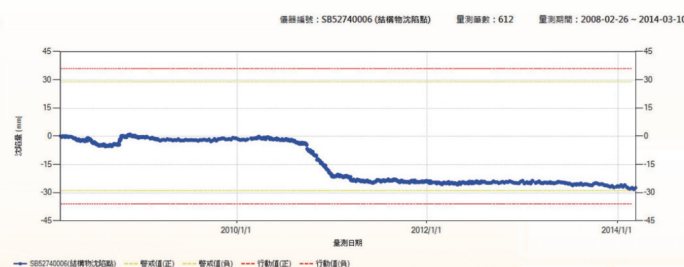


圖 7 建物沉陷點監測查詢成果



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。

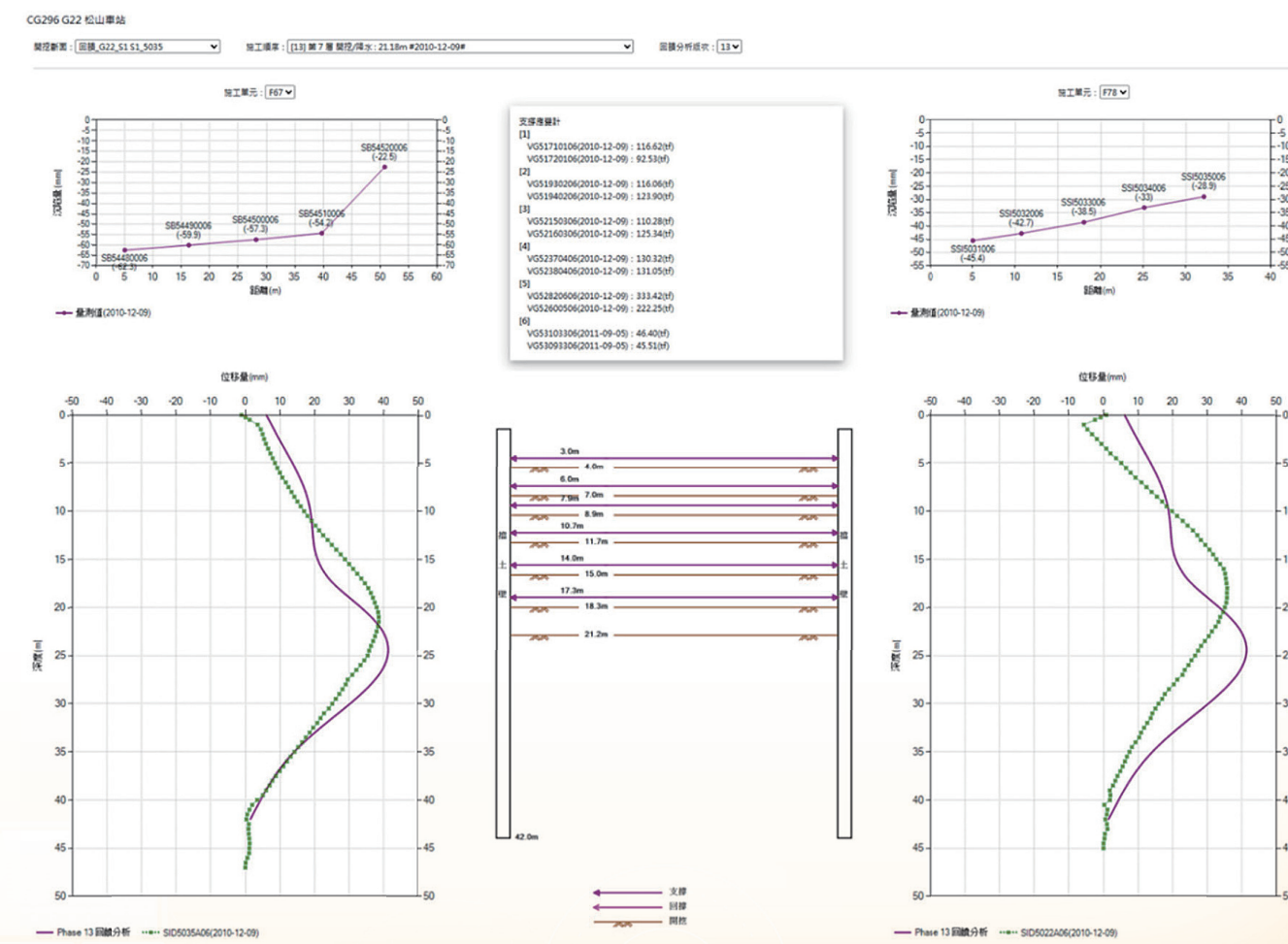


圖 10 G22 站壁體變形、沉陷槽及支撐應變計受力情形之展示

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 ²)	SID5023	
				Original Kh (t/m ³)	Feedback Kh (t/m ³)
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。

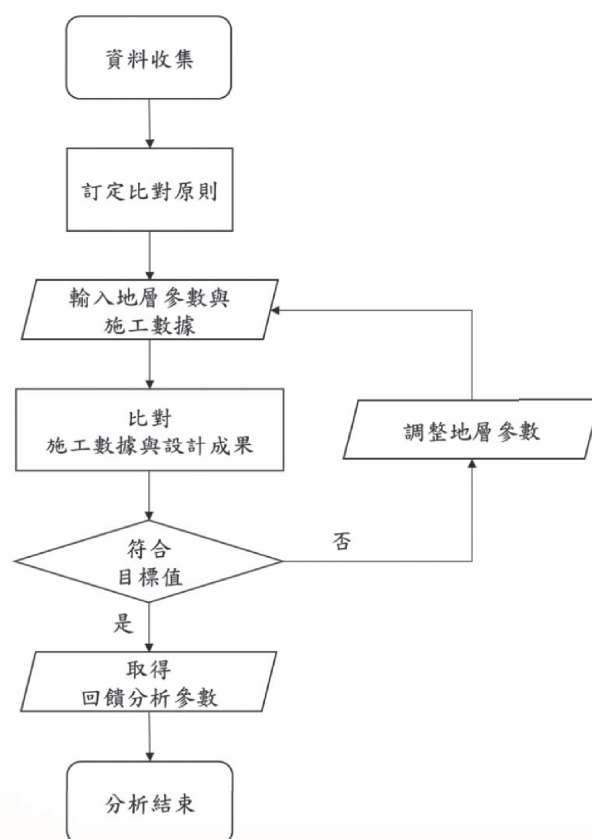


圖 11 回饋分析流程

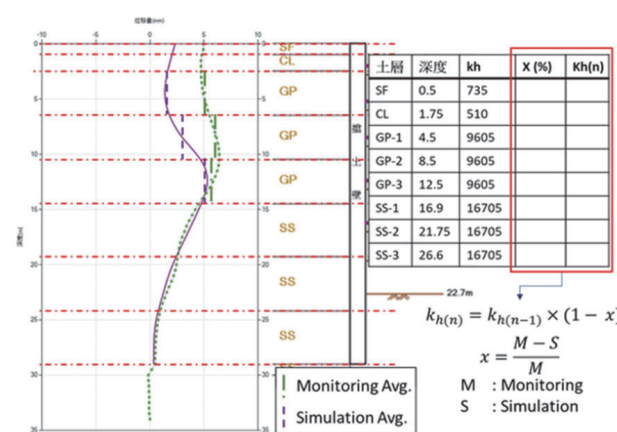


圖 12 回饋分析之目標值訂定及計算方式

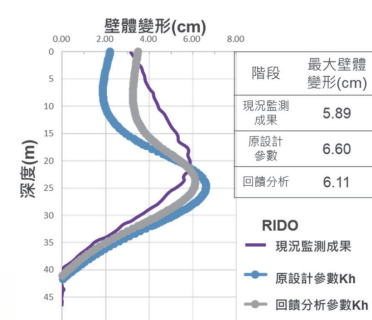


圖 13 RIDO 回饋與連續壁變形結果比較



圖 14 G22 站傾度管（SID5023）位置圖