# 捷運深開挖自動化之發展

中興工程顧問股份有限公司軌道二部工程師 / 謝君毅
中興工程顧問股份有限公司軌道二部組長 / 張正憲
中興工程顧問股份有限公司軌道二部技術經理 / 曾紀緯
中興工程顧問股份有限公司軌道二部協理 / 賴建名

關鍵字：捷運工程、深開挖設計、自動化設計

**摘要**

國內捷運工程已發展三十餘年，隨著第一批專業人才功成身退，如何有效傳承設計經驗為一項重要課題，且傳統設計流程耗時費力，成果品質管控不易，亦需要創新精進的作為以面對數位轉型趨勢之挑戰。本文說明傳統深開挖設計流程及過去經驗遇到問題，如何透過開發深開挖設計自動化平台一一突破及解決。

中興工程顧問公司（以下簡稱中興公司）自2016年開始啟動捷運設計數位轉型，從使用者角度出發，思考傳統設計作業遭遇之困難，於2019年開發完成深開挖設計自動化。透過開發設計自動化網頁平台，整合各項Excel工作表、連動地工分析軟體，自動迭代計算將分析結果上傳更新於網頁平台，提升設計效率及品質，並於平台資料庫上有系統性的保存與傳承設計資料與經驗。

過去人工利用施工端監測值回饋至設計端，而後有中興社研發之最佳化程序及類神經網路預測後續施工階段壁體變形量，然目前中興公司正研發施工階段設計參數回饋自動化程式，預期連結設計及施工平台，自動回饋相關參數，並預測施工階段壁體變形量。

## 一、前言

中興公司過往執行捷運大地工程深開挖設計作業流程時，工程師需使用數個不同的Excel工作表進行設計、檢核，流程耗時費

力，人工且重複性作業繁多，出錯不易檢查，且各工程師使用之Excel工作表版本可能未更新或遭修改，造成成果品質不易管控。而於施工階段需查閱施工紀錄表單，比對設計成果與施工監測值，並依據監測成果回饋反算調整設計參數。

中興公司於2016年啟動捷運設計數位轉型，提供使用者友善的視窗化網頁平台，整合設計、分析與檢核介面，統一設計流程與工具，並可協助設計參數檢核，降低人為錯誤。中興公司亦將自動化迭代程式寫入平台，透過程式自行運算取得最佳化結果，取代過往人工反覆運算分析再調整設計成果之重複性作業，提升設計效率及品質。

## 二、傳統深開挖設計作業流程

中興公司傳統捷運大地工程深開挖設計作業流程如圖1，深開挖分析步驟包含訂定地工參數（地層參數、地下水條件等）、擋土壁穩定性檢核（內擠、隆起、砂湧、上舉等）、開挖工序設定、分階降水及水壓力設定、擋土壁體與支撐系統力學分析、支撐系統材料應力檢核（支撐、圍令、中間樁）及擋土壁體配筋設計檢核（垂直主筋、剪力筋、水平筋），以上分析檢核流程各自有其對應之Excel工作表，大多數表單以儲存格參照及Excel VBA巨集等半自動化方式連結，透過Excel VBA巨集產生RIDO軟體之輸入檔以及擷取分析完成輸出檔之各階變位與支撐軸力，但包括地工參數輸入、RIDO軟體分析、支撐系統材料應力檢核之設計軸力輸入、擋土壁彎矩剪力及其配筋之包絡線圖繪製等仍有多處須手動操作的部分。此外，設計流程中間尚有穿插兩個軟體程式的使用，用於內擠檢核的Inward程式係是中興公司自行研發撰寫，而擋土壁體與支撐系統力學分析採用之RIDO軟體則是商用程式，工程師需熟稔設計分析流程及其對應之工作表單與軟體程式依序操作。

在深開挖設計作業過程中，工程師首先以補充地質調查成果相關鑽孔資料訂定簡化地層、地下水位及其地工參數，輸入在對應之Excel工作表內，後續與地工參數相關運

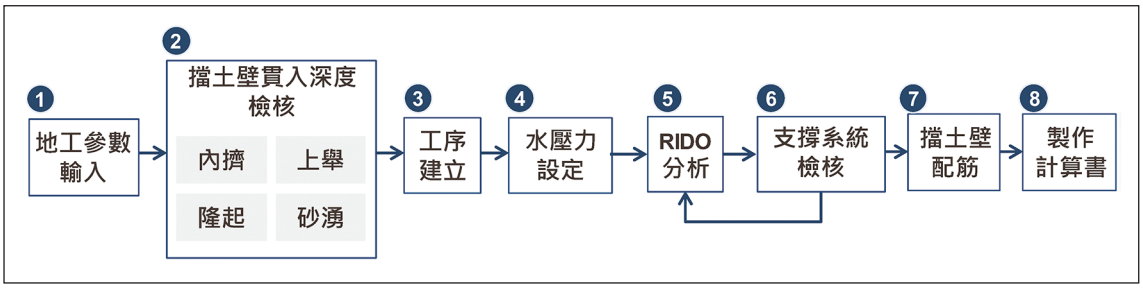
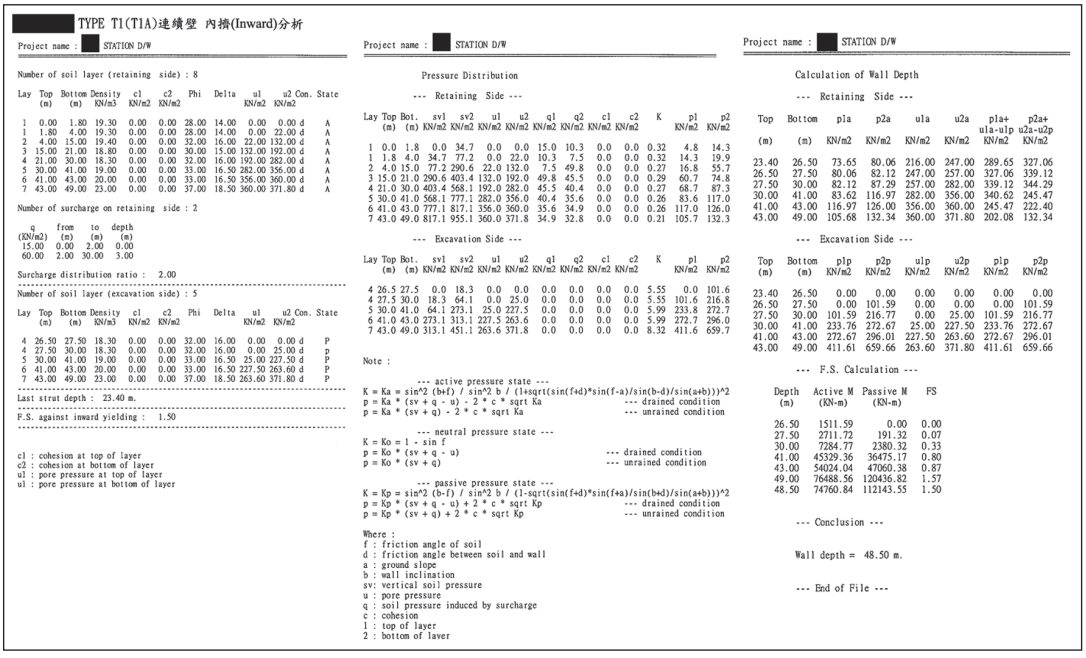



**圖 1　傳統深開挖設計流程**

算會依公式連結自動抓取儲存格數值。接著依開挖深度、地下結構物之頂、底板及樓板位置初步規劃開挖工序，並按照內政部營建署於2001年頒布之「建築物基礎構造設計規範」進行開挖面穩定分析，包含了內擠、隆起、砂湧及上舉等四項檢核，其中內擠檢核以Inward程式分析（圖2），以計算符合規範要求之擋土壁最小貫入深度，隆起檢核在Excel工作表內以VBA巨集運算及產製剖面圖（圖3），砂湧檢核及上舉檢核則在Excel工作



TYPE T1(T1A)連續壁 內擠(Inward)分析

Project name : [redacted] STATION D/W

Number of soil layer (retaining side) : 8

| Lay | Top (m) | Bottom (m) | Density KN/m3 | c1 KN/m2 | c2 KN/m2 | Phi | Delta | u1 KN/m2 | u2 KN/m2 | Con. State |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.00 | 1.80 | 19.30 | 0.00 | 0.00 | 28.00 | 14.00 | 0.00 | 0.00 d | A |
| 1 | 1.80 | 4.00 | 19.30 | 0.00 | 0.00 | 28.00 | 14.00 | 0.00 | 22.00 d | A |
| 2 | 4.00 | 15.00 | 19.40 | 0.00 | 0.00 | 32.00 | 16.00 | 22.00 | 132.00 d | A |
| 3 | 15.00 | 21.00 | 18.80 | 0.00 | 0.00 | 30.00 | 15.00 | 132.00 | 192.00 d | A |
| 4 | 21.00 | 30.00 | 18.30 | 0.00 | 0.00 | 32.00 | 16.00 | 192.00 | 282.00 d | A |
| 5 | 30.00 | 41.00 | 19.00 | 0.00 | 0.00 | 33.00 | 16.50 | 282.00 | 356.00 d | A |
| 6 | 41.00 | 43.00 | 20.00 | 0.00 | 0.00 | 33.00 | 16.50 | 356.00 | 360.00 d | A |
| 7 | 43.00 | 49.00 | 23.00 | 0.00 | 0.00 | 37.00 | 18.50 | 360.00 | 371.80 d | A |

Number of surcharge on retaining side : 2

| q (KN/m2) | from (m) | to (m) | depth (m) |
|---|---|---|---|
| 15.00 | 0.00 | 2.00 | 0.00 |
| 60.00 | 2.00 | 30.00 | 3.00 |

Surcharge distribution ratio : 2.00

Number of soil layer (excavation side) : 5

| Lay | Top (m) | Bottom (m) | Density KN/m3 | c1 KN/m2 | c2 KN/m2 | Phi | Delta | u1 KN/m2 | u2 KN/m2 | Con. State |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 26.50 | 27.50 | 18.30 | 0.00 | 0.00 | 32.00 | 16.00 | 0.00 | 0.00 d | P |
| 4 | 27.50 | 30.00 | 18.30 | 0.00 | 0.00 | 32.00 | 16.00 | 0.00 | 25.00 d | p |
| 5 | 30.00 | 41.00 | 19.00 | 0.00 | 0.00 | 33.00 | 16.50 | 25.00 | 227.50 d | P |
| 6 | 41.00 | 43.00 | 20.00 | 0.00 | 0.00 | 33.00 | 16.50 | 227.50 | 263.60 d | P |
| 7 | 43.00 | 49.00 | 23.00 | 0.00 | 0.00 | 37.00 | 18.50 | 263.60 | 371.80 d | P |

Last strut depth : 23.40 m.

F.S. against inward yielding : 1.50

c1 : cohesion at top of layer
c2 : cohesion at bottom of layer
u1 : pore pressure at top of layer
u1 : pore pressure at bottom of layer

Project name : [redacted] STATION D/W

Pressure Distribution

--- Retaining Side ---

| Lay | Top (m) | Bot. (m) | sv1 KN/m2 | sv2 KN/m2 | u1 KN/m2 | u2 KN/m2 | q1 KN/m2 | q2 KN/m2 | c1 KN/m2 | c2 KN/m2 | K | p1 KN/m2 | p2 KN/m2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.0 | 1.8 | 0.0 | 34.7 | 0.0 | 0.0 | 15.0 | 10.3 | 0.0 | 0.0 | 0.32 | 4.8 | 14.3 |
| 1 | 1.8 | 4.0 | 34.7 | 77.2 | 0.0 | 22.0 | 10.3 | 7.5 | 0.0 | 0.0 | 0.32 | 14.3 | 19.9 |
| 2 | 4.0 | 15.0 | 77.2 | 290.6 | 22.0 | 132.0 | 7.5 | 49.8 | 0.0 | 0.0 | 0.27 | 16.8 | 55.7 |
| 3 | 15.0 | 21.0 | 290.6 | 403.4 | 132.0 | 192.0 | 49.8 | 45.5 | 0.0 | 0.0 | 0.29 | 60.7 | 74.8 |
| 4 | 21.0 | 30.0 | 403.4 | 568.1 | 192.0 | 282.0 | 45.5 | 40.4 | 0.0 | 0.0 | 0.27 | 68.7 | 87.3 |
| 5 | 30.0 | 41.0 | 568.1 | 777.1 | 282.0 | 356.0 | 40.4 | 35.6 | 0.0 | 0.0 | 0.26 | 83.6 | 117.0 |
| 6 | 41.0 | 43.0 | 777.1 | 817.1 | 356.0 | 360.0 | 35.6 | 34.9 | 0.0 | 0.0 | 0.26 | 117.0 | 126.0 |
| 7 | 43.0 | 49.0 | 817.1 | 955.1 | 360.0 | 371.8 | 34.9 | 32.8 | 0.0 | 0.0 | 0.21 | 105.7 | 132.3 |

--- Excavation Side ---

| Lay | Top (m) | Bot. (m) | sv1 KN/m2 | sv2 KN/m2 | u1 KN/m2 | u2 KN/m2 | q1 KN/m2 | q2 KN/m2 | c1 KN/m2 | c2 KN/m2 | K | p1 KN/m2 | p2 KN/m2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 26.5 | 27.5 | 0.0 | 18.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.55 | 0.0 | 101.6 |
| 4 | 27.5 | 30.0 | 18.3 | 64.1 | 0.0 | 25.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.55 | 101.6 | 216.8 |
| 5 | 30.0 | 41.0 | 64.1 | 273.1 | 25.0 | 227.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.99 | 233.8 | 272.7 |
| 6 | 41.0 | 43.0 | 273.1 | 313.1 | 227.5 | 263.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.99 | 272.7 | 296.0 |
| 7 | 43.0 | 49.0 | 313.1 | 451.1 | 263.6 | 371.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 8.32 | 411.6 | 659.7 |

Note :

--- active pressure state ---
K = Ka = sin^2 (b+f) / sin^2 b / (1+sqrt(sin(f+d)*sin(f-a)/sin(b-d)/sin(a+b)))^2
p = Ka * (sv + q - u) - 2 * c * sqrt Ka --- drained condition
p = Ka * (sv + q) - 2 * c * sqrt Ka --- unrained condition

--- neutral pressure state ---
K = Ko = 1 - sin f
p = Ko * (sv + q - u) --- drained condition
p = Ko * (sv + q) --- unrained condition

--- passive pressure state ---
K = Kp = sin^2 (b-f) / sin^2 b / (1-sqrt(sin(f+d)*sin(f+a)/sin(b+d)/sin(a+b)))^2
p = Kp * (sv + q - u) + 2 * c * sqrt Kp --- drained condition
p = Kp * (sv + q) + 2 * c * sqrt Kp --- unrained condition

Where :
f : friction angle of soil
d : friction angle between soil and wall
a : ground slope
b : wall inclination
sv: vertical soil pressure
u : pore pressure
q : soil pressure induced by surcharge
c : cohesion
1 : top of layer
2 : bottom of layer

Project name : [redacted] STATION D/W

Calculation of Wall Depth

--- Retaining Side ---

| Top (m) | Bottom (m) | p1a KN/m2 | p2a KN/m2 | u1a KN/m2 | u2a KN/m2 | p1a+u1a-u1p KN/m2 | p2a+u2a-u2p KN/m2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23.40 | 26.50 | 73.65 | 80.06 | 216.00 | 247.00 | 289.65 | 327.06 |
| 26.50 | 27.50 | 80.06 | 82.12 | 247.00 | 257.00 | 327.06 | 339.12 |
| 27.50 | 30.00 | 82.12 | 87.29 | 257.00 | 282.00 | 339.12 | 344.29 |
| 30.00 | 41.00 | 83.62 | 116.97 | 282.00 | 356.00 | 340.62 | 245.47 |
| 41.00 | 43.00 | 116.97 | 126.00 | 356.00 | 360.00 | 245.47 | 222.40 |
| 43.00 | 49.00 | 105.68 | 132.34 | 360.00 | 371.80 | 202.08 | 132.34 |

--- Excavation Side ---

| Top (m) | Bottom (m) | p1p KN/m2 | p2p KN/m2 | u1p KN/m2 | u2p KN/m2 | p1p KN/m2 | p2p KN/m2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23.40 | 26.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 26.50 | 27.50 | 0.00 | 101.59 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 101.59 |
| 27.50 | 30.00 | 101.59 | 216.77 | 0.00 | 25.00 | 101.59 | 216.77 |
| 30.00 | 41.00 | 233.76 | 272.67 | 25.00 | 227.50 | 233.76 | 272.67 |
| 41.00 | 43.00 | 272.67 | 296.01 | 227.50 | 263.60 | 272.67 | 296.01 |
| 43.00 | 49.00 | 411.61 | 659.66 | 263.60 | 371.80 | 411.61 | 659.66 |

--- F.S. Calculation ---

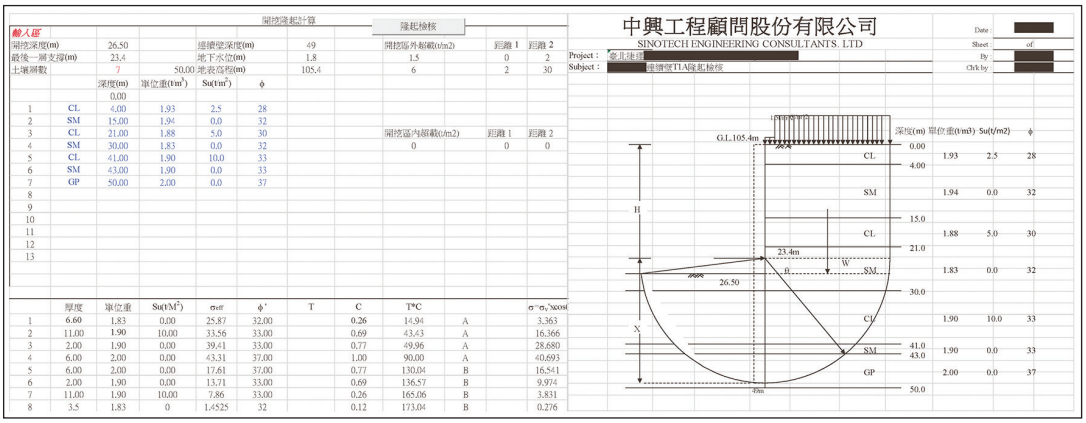
| Depth (m) | Active M (KN-m) | Passive M (KN-m) | FS |
|---|---|---|---|
| 26.50 | 1511.59 | 0.00 | 0.00 |
| 27.50 | 2711.72 | 191.32 | 0.07 |
| 30.00 | 7284.77 | 2380.32 | 0.33 |
| 41.00 | 45329.36 | 36475.17 | 0.80 |
| 43.00 | 54024.04 | 47060.38 | 0.87 |
| 49.00 | 76488.56 | 120436.82 | 1.57 |
| 48.50 | 74760.84 | 112143.55 | 1.50 |

--- Conclusion ---

Wall depth = 48.50 m.

--- End of File ---

**圖 2　以 Inward 程式進行內擠檢核**



開挖隆起計算

輸入區

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 開挖深度(m) | 26.50 | | 連續壁深度(m) | 49 | |
| 最後一層支撐(m) | 23.4 | | 地下水位(m) | 1.8 | |
| 土壤調整 | 7 | 50.00 | 混凝強程(m) | 105.4 | |

| | | 深度(m) | 單位重(t/m³) | Su(t/m²) | ϕ |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.00 | | | |
| 1 | CL | 4.00 | 1.93 | 2.5 | 28 |
| 2 | SM | 15.00 | 1.94 | 0.0 | 32 |
| 3 | CL | 21.00 | 1.88 | 5.0 | 30 |
| 4 | SM | 30.00 | 1.83 | 0.0 | 32 |
| 5 | CL | 41.00 | 1.90 | 10.0 | 33 |
| 6 | SM | 43.00 | 1.90 | 0.0 | 33 |
| 7 | GP | 50.00 | 2.00 | 0.0 | 37 |
| 8 | | | | | |
| 9 | | | | | |
| 10 | | | | | |
| 11 | | | | | |
| 12 | | | | | |
| 13 | | | | | |

隆起檢核

| 開挖區外超載(t/m2) | 距離 1 | 距離 2 |
|---|---|---|
| 1.5 | 0 | 2 |
| 6 | 2 | 30 |

| 開挖區內超載(t/m2) | 距離 1 | 距離 2 |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |

| | 厚度 | 單位重 | Su(t/M²) | σvr | ϕ' | T | C | T*C | | σ'=σv-Ncosϕ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6.60 | 1.83 | 0.00 | 25.87 | 32.00 | | 0.26 | 14.94 | A | 3.363 |
| 2 | 11.00 | 1.90 | 10.00 | 33.56 | 33.00 | | 0.69 | 43.43 | A | 16.366 |
| 3 | 2.00 | 1.90 | 0.00 | 39.41 | 33.00 | | 0.77 | 49.96 | A | 28.680 |
| 4 | 6.00 | 2.00 | 0.00 | 43.31 | 37.00 | | 1.00 | 90.00 | A | 40.693 |
| 5 | 6.00 | 2.00 | 0.00 | 17.61 | 37.00 | | 0.77 | 130.04 | B | 16.541 |
| 6 | 2.00 | 1.90 | 0.00 | 13.71 | 33.00 | | 0.69 | 136.57 | B | 9.974 |
| 7 | 11.00 | 1.90 | 10.00 | 7.86 | 33.00 | | 0.26 | 165.06 | B | 3.831 |
| 8 | 3.5 | 1.83 | 0 | 1.4525 | 32 | | 0.12 | 173.04 | B | 0.276 |

中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD

Project : [redacted]
Subject : [redacted]

Date : [redacted]
Sheet : of
By : [redacted]
Chk by : [redacted]



**圖 3　隆起檢核及產製剖面圖**

表內以公式檢核擋土壁體穩定性，若隆起、砂湧及上舉等三項檢核有不符合規範安全係數之情況，則視需要加長貫入深度，最終以符合四項檢核所需之最小擋土壁長度作為後續分析使用。

除地工參數輸入之Excel工作表外，在進行擋土壁體與支撐系統力學分析前，還有分階開挖工序（圖4）及分階降水水壓力（圖5）兩個主要工作表單，在Excel工作表內以VBA巨集產製工序剖面圖、水壓力分布圖及RIDO輸

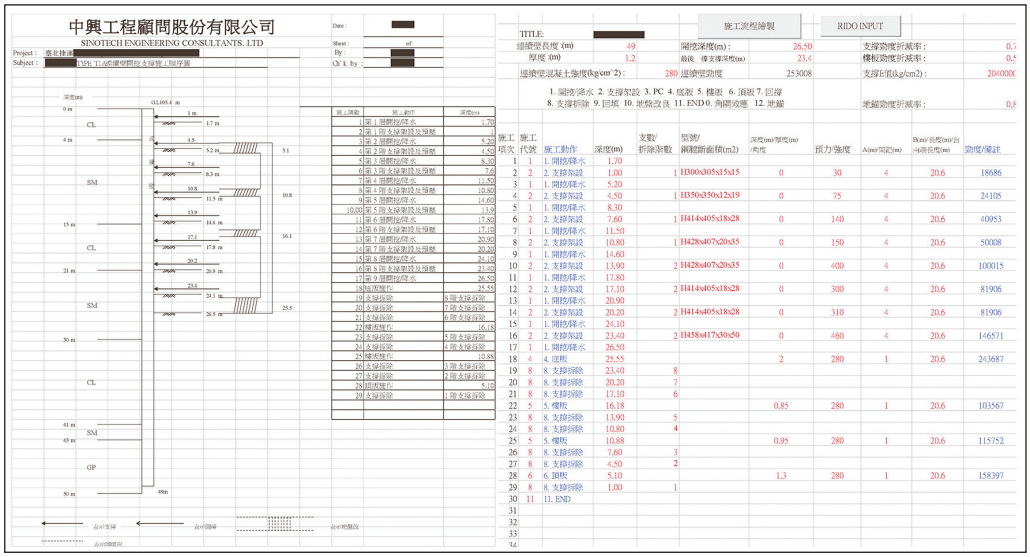



**圖 4　建立分階開挖工序及繪製工序剖面圖**

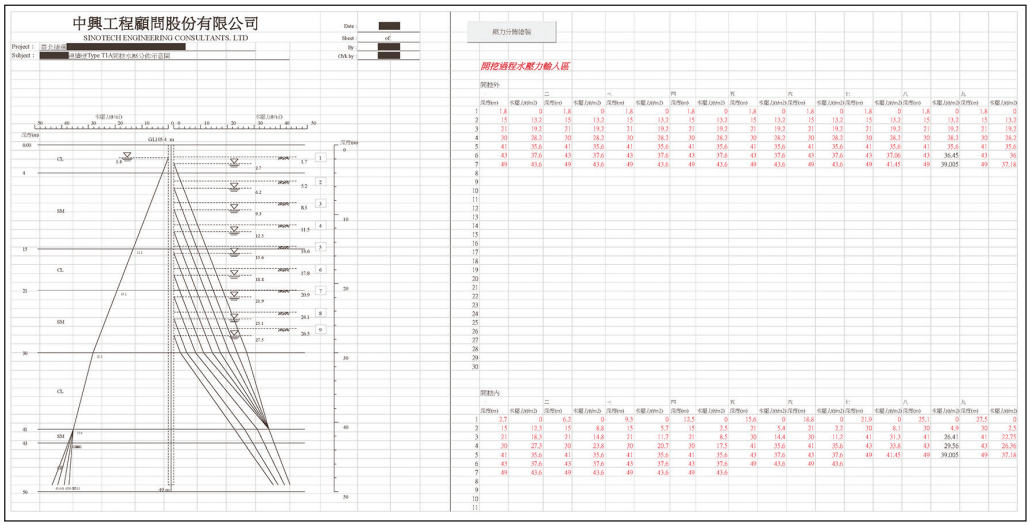



**圖 5　建立分階降水水壓力及繪製水壓力分布圖**

入檔，將輸入檔以RIDO軟體進行支撐系統力學分析，軟體分析結果之輸出檔可藉由Excel工作表VBA巨集擷取各階變位與支撐軸力，工程師再將分析結果（支撐軸力）輸入支撐檢核及圍令檢核之Excel工作表進行支撐系統檢核，並視分析檢核結果判斷是否達到設計需求，或須調整支撐尺寸及預力後再次運算，為符合支撐預力比之設計準則規定、型鋼材料強度檢核符合安全需求以及型鋼尺寸之經濟性考量，工程師常需人工針對支撐預力及型鋼尺寸反覆進行修正，以達設計成果最佳化之目標，其過程相當耗時費工。

以上檢核作業完成後方可進行擋土壁體配筋，此時要先將RIDO軟體分析結果產出之EVP檔貼附於Excel工作表內，透過Excel繪圖功能產出擋土壁深度範圍依開挖工序分析之彎矩圖及剪力圖，工程師依據擋土壁受力需求進行擋土壁垂直主筋及剪力筋之分段配置，其設計成果彙整及展現於擋土壁彎矩剪力及其配筋之包絡線圖（圖6及圖7）。於深開挖設計完成後將各Excel工作表之列印頁面依序產製及彙整成計算書，至此方完成地下結構物數種擋土壁型式之一的設計作業。

中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.

Project: 臺北捷運 [redacted]
Subject: [redacted] 連續壁Type T1A鋼筋設計

Date: [redacted]
Sheet: of
By: [redacted]
Ch'k by:

1. 設計參數 — 受力狀態 1

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 連續壁厚 ( t ) | = | 1.2 | m | | |
| 混凝土強度 $f'_c$ | = | 280 | kg/cm² | | |
| 鋼筋強度 ( ϕ >= D19 ) $f_y$ | = | 4200 | kg/cm² | | |
| 鋼筋強度 ( ϕ < D19 ) $f_y$ | = | 4200 | kg/cm² | | |
| +M max from RIDO (0~11m) | = | 98.2 | (t-m/m) | (擋土側) | |
| +M max from RIDO (11~27m) | = | 240.8 | (t-m/m) | | |
| +M max from RIDO (27~49m) | = | 124.5 | (t-m/m) | | |
| +M max from RIDO (0~16m) | = | 120.8 | (t-m/m) | (開挖側) | |
| +M max from RIDO (16~38m) | = | 266.7 | (t-m/m) | | |
| +M max from RIDO (38~49m) | = | 50.8 | (t-m/m) | | |
| V max from RIDO(5~12m) | = | 64.9 | (t/m) | V max from RIDO(0~5m) | 26.5 |
| V max from RIDO(12~30m) | = | 165.9 | (t/m) | V max from RIDO(48~49m) | 19.0 |
| V max from RIDO(30~48m) | = | 44.1 | (t/m) | | |
| 撓曲筋設計 ϕ | = | 0.9 | | | |
| 剪力筋設計 ϕ | = | 0.85 | | 常時 載重因子(F) : 1.7 | |
| 載重減小係數 ( ORF ) | = | 1.2 | | 常時 (RF=1.2 | |

2. 垂直筋設計

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $m = f_y / ( 0.85 \times f'_c )$ | = | 17.647 | | |
| 最大鋼筋比 $\rho_{max}$ | = | $0.75 \times 0.85 \times 0.85 \times f'_c/f_y \times 6100/(6100+f_y)$ = | | 0.02139 |
| 最小鋼筋比 $\rho_{min}$ | = | $14 / f_y$ = | 0.00333 | |

2.1 擋土側垂直筋設計

+M max from RIDO (0~11m)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $+M_{max} = +M_{max\ from\ RIDO} / ORF$ | = | 81.80 | (t-m) | |
| $Mu = 1.7 (+Mmax)$ | = | 139.06 | (t-m) | |
| Try Reinforcing Steel: | D | 32 | | |
| d = (tx100)-10.0-(Bar Dia.)/2 | = | 108.40 | ( cm ) | |
| $R_n = Mu / (\phi bd^2)$ | = | 13.15 | | |
| $\rho_{req} = 1/m (1-(1-2mR_n / f_y)^{1/2})$ | = | 0.0032 | | |
| 因所需鋼筋比<最小鋼筋比，故使用最小鋼筋比 = 0.00333 | | | | |
| As req | = | 36.097 | ( $cm^2$ ) | |
| 使用 D 32 @ | = | 15 | (cm) | |
| + D @ | = | | (cm) | |
| D32@15cm+D @ cm, As | = | 54.43 | ( $cm^2$ ) ; $\rho$ = 0.0050 | < 最大鋼筋比, ' OK' |
| $a = As \cdot f_y / (0.85 f'_c b)$ | = | 9.61 | (cm) | > 最小鋼筋比, ' OK' |
| $M_n = \phi As \cdot f_y (d-a/2)$ | = | 213.16 | (t-m) | As(act)>As(req) O.K |
| Mu / 1.7 x ORF | = | 150.47 | (t-m) | |

圖 6　擋土壁配筋檢核

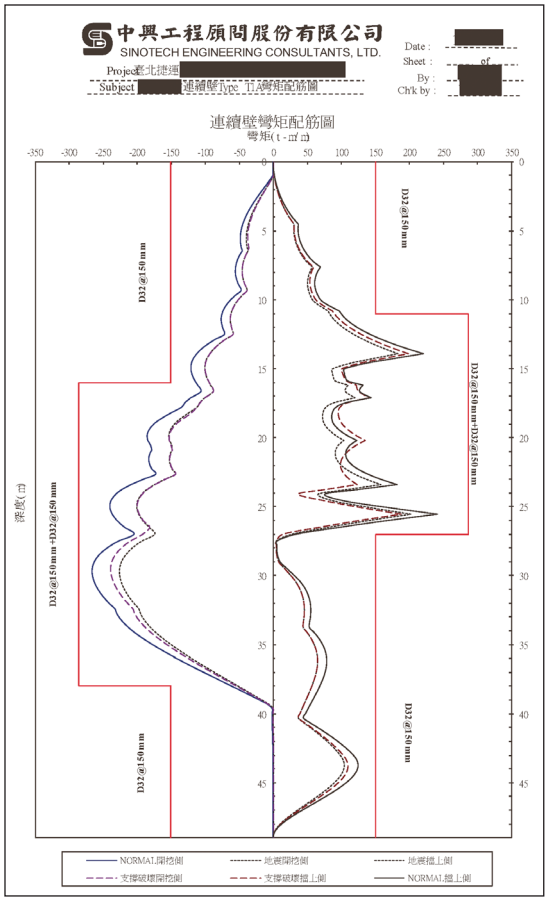



圖 7　擋土壁配筋包絡線圖

依據過去經驗，曾在設計階段時遇到下列問題：(1)為因應不同主管機關設計準則規定差異或Excel版本升級而更新修正VBA巨集，工程師未確認所使用之Excel工作表是否為最新版，造成設計成果品質不易管控；(2)數個Excel工作表中均需輸入相同數值，如支撐檢核及圍令檢核均需輸入RIDO軟體分析結果之支撐軸力，若未達設計需求而須調整支撐尺寸及預力後反覆運算，每次重新分析後之支撐軸力亦需同步更改支撐檢核及圍令檢核Excel工作表內容，作業效率低又相當耗時；(3)在前項反覆運算的過程中，產生大量過程中檔案不易管理，亦可能因反覆又繁複的人工作業造成錯誤而不自知；(4)設計成果檔案分散於紙本文件、公用硬碟或各工程師電腦，難以彙整及回饋應用予後續施工階段或其他設計計畫。

## 三、深開挖設計自動化內容

為優化及提升深開挖設計之效率與品質，解決過去設計階段遭遇之各項問題，中興公司從使用者角度出發，導入自動化設計流程，建立深開挖自動化設計網頁平台SinoExcavation（以下簡稱SinoExcavation平台），深開挖設計自動化作業內容主要可分為：（一）深開挖設計與分析自動化、（二）深開挖設計經驗累積與回饋，各階段主要功能說明如後（如圖8）。

### （一）深開挖設計與分析自動化

1. 統一化

過去工程師需執行數個Excel工作表，因應不同主管機關設計準則規定差異或Excel版本升級使用不同版本之Excel工作表與VBA巨集，於設計流程可能未確認設計使用之Excel工作表是否為最新版，造成設計成果不一。

SinoExcavation平台將分析、檢核項目整合，彙整設計流程對應之各Excel工作表並將其寫進網頁平台，使設計流程統一且皆為最新版次，工程師可建立不同標案，並依據設計需求於一個標案下建立多個分析斷面，從平台上亦可直觀地掌握目前設計、檢核作業流程與進度，如圖9所示。

2. 平台化

過去工程師在設計檢核流程進行反覆運算，需同步修改對應之Excel工作表內容，但

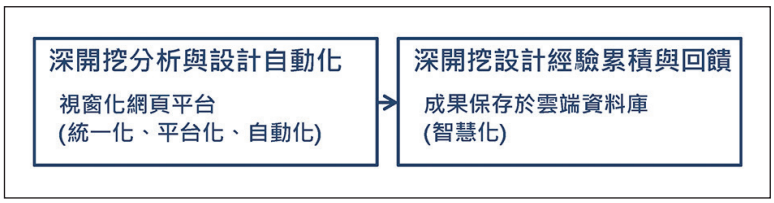



**圖 8　中興公司深開挖設計自動化作業內容**

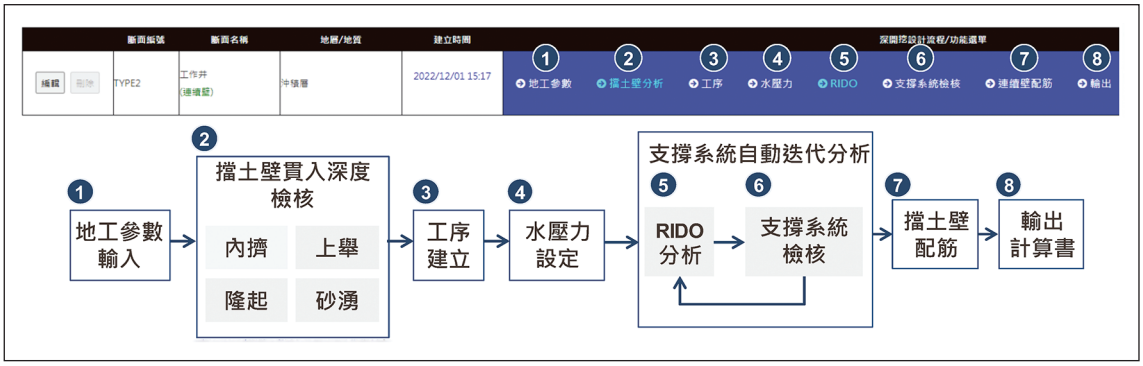



**圖 9　SinoExcavation 平台深開挖設計流程**

**圖 10　匯入已建立斷面之參數（地工參數、工序資料）**

可能在反覆又繁雜的人工作業中造成錯誤而不自知。

SinoExcavation平台以視窗化網頁平台引導工程師進行參數輸入及分析檢核，減少重複輸入參數之繁瑣步驟，亦可透過匯入參數方式帶入其他已建立之斷面參數，可匯入參數包含地工參數、開挖工序等，節省重複輸入時間，如圖10所示。建立地層參數及地下水條件後可於平台進行擋土壁體穩定性檢核（圖11），包含內擠分析、隆起分析、上舉檢核、砂湧檢核，工程師可於平台直觀檢視各項穩定性檢核計算過程及是否通過，若未通過除將於平台中以紅字提示外，亦將自動調整貫入深度後再進行各項分析，直至檢核完成。穩定性檢核通過即可初步訂定擋土壁體長度，於後續步驟建立開挖工序、設定分階降水之水壓力，平台依據設定之工序或數值自動繪製工序剖面圖及水壓力分布圖（圖12），並自動產出RIDO輸入檔，供RIDO軟體執行後續擋土壁體與支撐系統力學分析。

3. 自動化

過去執行擋土壁體與支撐系統力學分析

**圖 11　SinoExcavation 平台擋土壁體穩定性檢核（內擠、隆起、上舉、砂湧）**

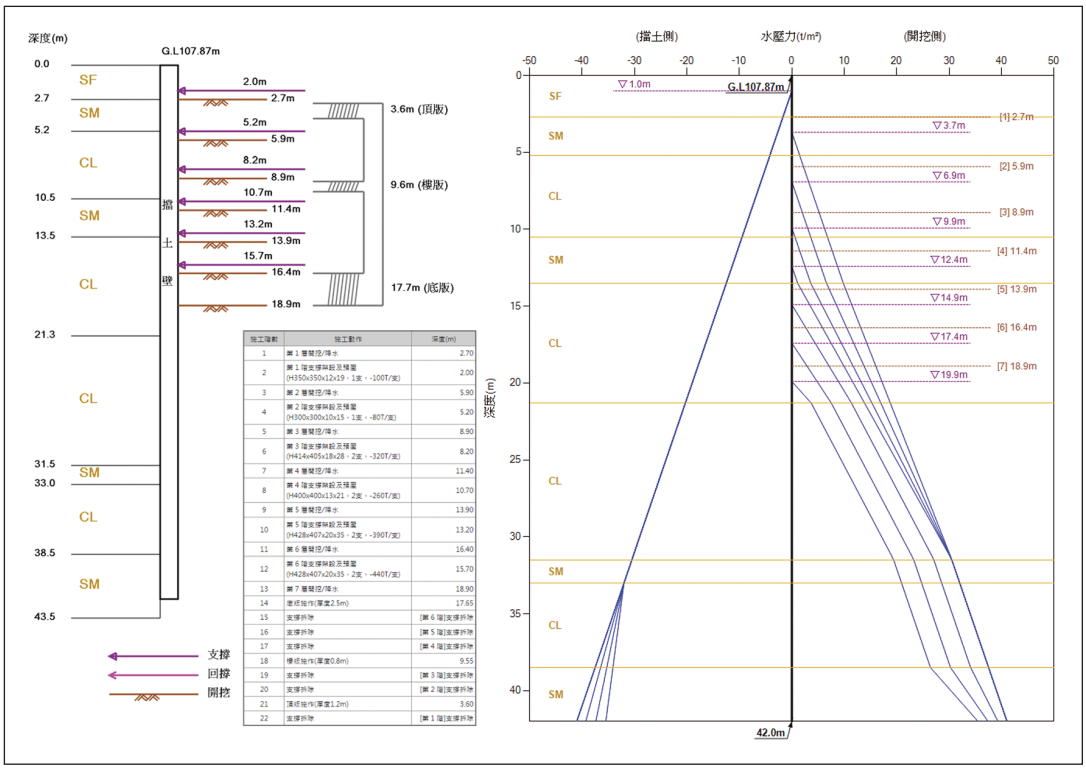



**圖 12　SinoExcavation 平台建立開挖工序、設定水壓力**

後，欲進行支撐檢核及圍令檢核時，需在Excel工作表輸入RIDO軟體分析結果之支撐軸力，若未達設計需求則需調整支撐尺寸及預力後反覆運算，每次重新分析後除需人工

同步確認預力及反力比值是否符合規定外，並需更改支撐檢核及圍令檢核Excel工作表內容，相當耗時且易有人工失誤之風險。

中興公司於SinoExcavation平台上利用自行開發之WinForm介面，自動呼叫RIDO軟體重複執行迭代分析、依據設定之預力比例值自動調整修正支撐尺寸及預力，直至結果收斂，並將分析成果（最大壁體變形量、支撐軸力、擋土壁承受之剪力與彎矩等）自動更新上傳至網頁平台上（如圖13），提供工程師快速檢視結果，並可作為後續支撐檢核、圍令檢核、中間柱檢核及擋土壁體配筋使用，若支撐、圍令、中間柱檢核未通過時可自由於WinForm介面或平台上調整支撐型號或預力，再次執行迭代分析直至檢核通過（圖14）。

而RIDO軟體分析完成後，其各深度分布之彎矩、剪力值亦將自動匯入至平台中，平台以常使用之配筋方式自動提供最佳之配筋成果，以保持一定程度之設計成果，亦可由使用者針對特殊深度或需求進行調整，以減少設計成果之差異（圖15）。

設計檢核作業完成後可於平台上選擇欲輸出項目，自動產出各項分析檢核計算書（圖16），縮減過去需從多個Excel工作表中彙整製作計畫書之作業時間。

## （二）深開挖設計經驗累積與回饋

過去計畫執行完成，將設計資料掃描歸檔結案後，相關設計經驗僅能從海量之技術文獻、案例資料中搜索或由資深工程師口述傳承，不利於資淺工程師學習。

除了將設計流程統一化、平台化及自動化外，中興公司亦透過SinoExcavation平台的建立，將所有輸入參數及分析結果保存於中

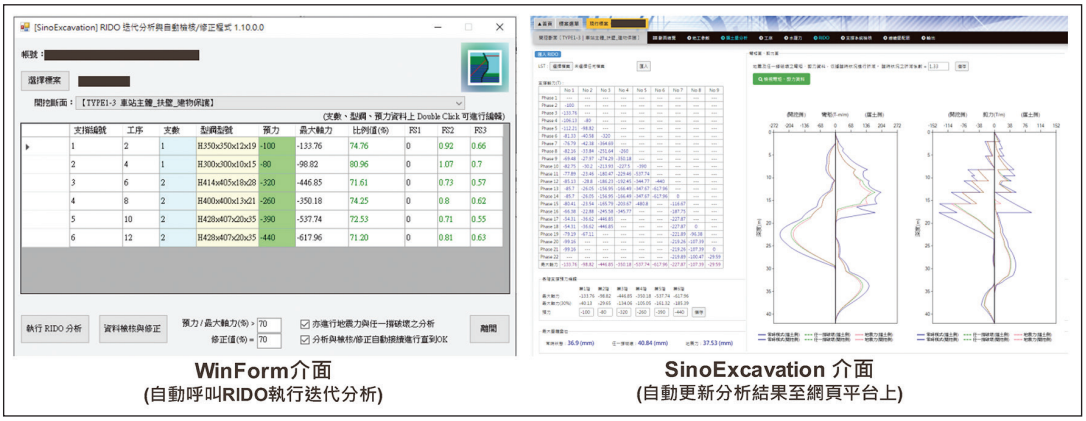



**圖 13　以 WinForm 介面執行 RIDO 自動迭代分析，並將成果更新於 SinoExcavation 介面**

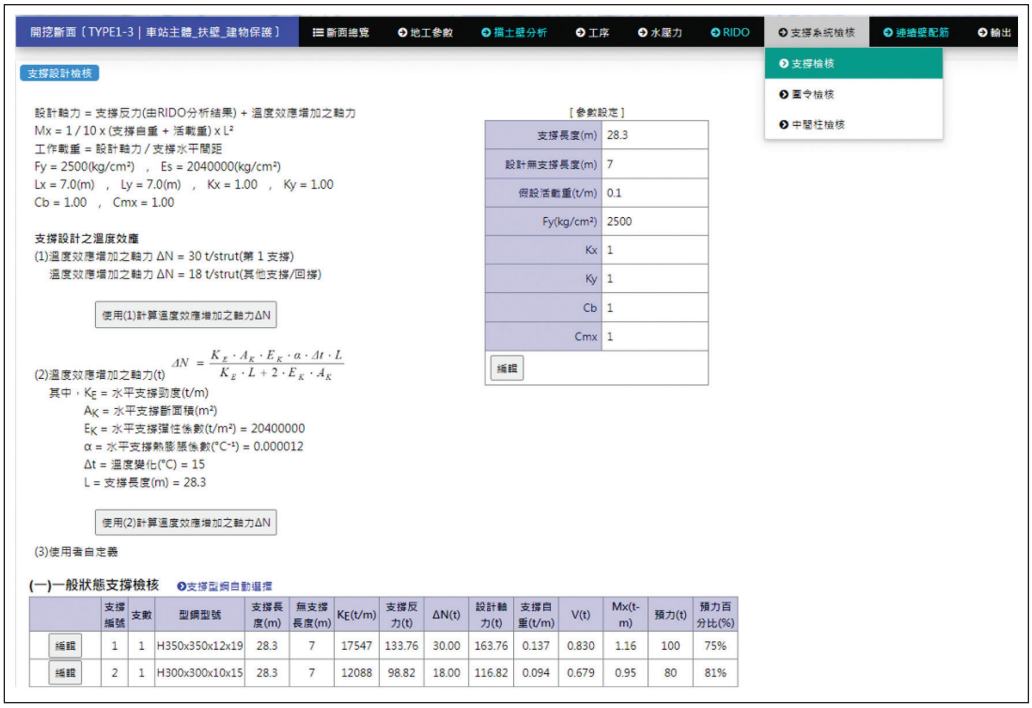



**圖 14　SinoExcavation 平台支撐系統檢核（水平支撐、圍令、中間柱）**

**圖 15　SinoExcavation 平台鋼筋設計（垂直、水平、剪力）**

**圖 16　SinoExcavation 平台輸出各項分析檢核計算書**

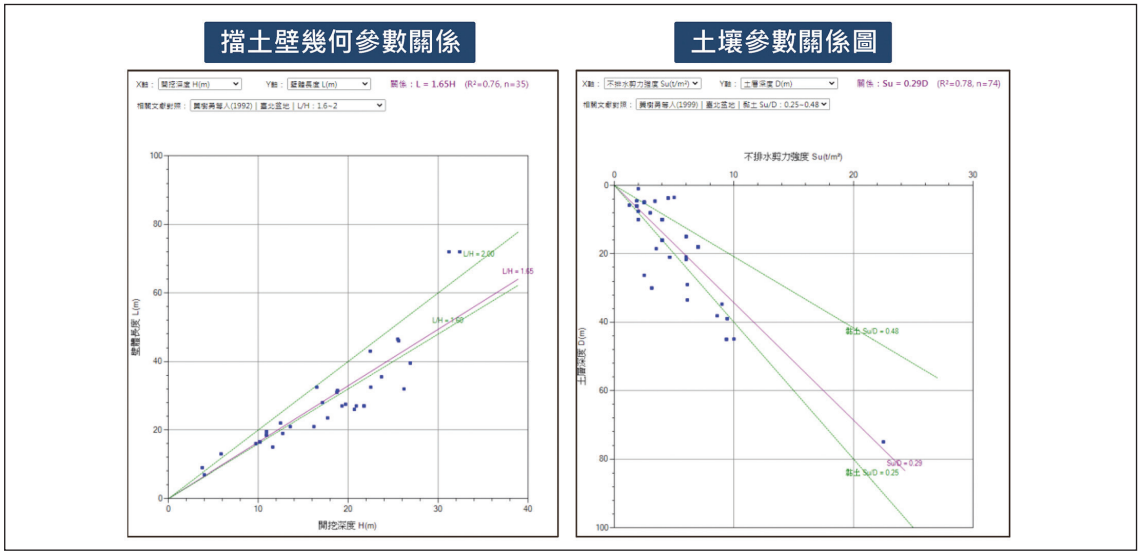



**圖 17　設計參數累積與回饋（如開挖深度、壁體長度、剪力強度等）**

興公司雲端資料庫中，透過設計案例參數的累積，可將數據資料反饋給使用者。未來執行計畫時，工程師可進入平台查閱過去其他計畫之設計參數，或依據工程場址或文獻經驗快速篩選相關參數（如圖17），作為設計參考。

## 四、施工監測壁體變形量回饋及預測

### （一）以深開挖施工訊息化系統預測施工監測壁體變形量

為避免工程災害發生，需依據設計階段

分析之最大壁體變形量及位置訂定安全管理值，並於施工階段監測擋土壁體變形量，如發生較大之非預期變形量時，需採取必要之補強措施。

過去中興公司以人工比對設計壁體變形量及監測壁體變形量，調整設計地層參數以求符合現場工地情形。而後使用中興社研發之深開挖施工訊息化系統，依據施工階段之監測變形資料，考量壁體厚度、開挖深度、樓板勁度、支撐勁度及地層參數等，透過最佳化模式及類神經網路，運算出符合監測壁體變形量之地層參數，並預測下一階開挖之壁體變形量（如圖18），據此計算可能之地表沉陷，提供施工單位作為安全評估之依據，此系統架構共分為五個模組：

1. RIDO：

以視窗化界面引導使用者建立RIDO輸入檔，並可即時將輸出檔內數值繪製成曲線，如壁體深度—位移曲線、壁體深度—彎矩曲線，方便使用者檢視。

2. RIDO反算：

透過最佳化模式對地層參數進行運算，以最佳化後的參數利用RIDO程式進行反算，得到符合監測數值之地層參數，據此預測下一階開挖之壁體變形量。

3. ANN預測：

包含學習及預測兩項功能，將過去深開挖監測資料輸入資料庫，透過類神經網路進行學習，並預測下一階開挖之壁體變形量。

4. 安全管理：

根據壁體變形量檢核壁體應力、基地周遭地表沉陷、鄰房傾度是否超過安全值。

5. 監測資訊：

匯入現場監測資料轉換成系統可讀取

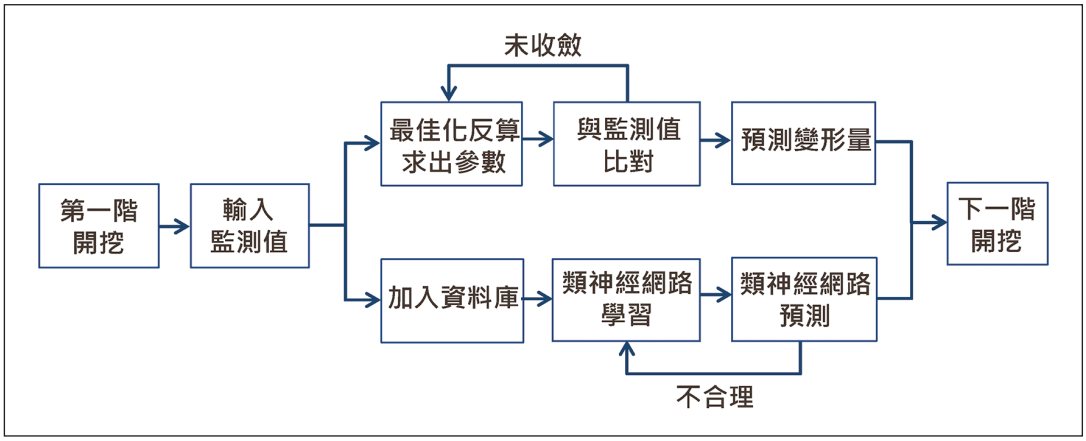



**圖 18　中興社深開挖施工訊息化系統運算流程（最佳化模式、類神經網路）**

格式，供RIDO反算及ANN預測兩個模組使用。

### （二）連結設計及施工平台，以自動反算程式將施工監測壁體變形量回饋至設計參數

中興公司現正開發施工階段設計參數回饋自動化程式，流程如圖19所示。預期將設計平台及施工平台連結，分別以設計階段之地層參數及支撐系統為基準，開發兩種回饋方式，其一於開挖階段將設計階段之地質分層更加細分縮小參數影響範圍，設定分析變形量與監測變形量之目標差距（例如小於10%）、欲回饋之施工階段、各地層最小$K_h$值，依據設計平台之分析壁體變形量及施工平台之監測壁體變形量，透過中興公司自行開發之WinForm介面比對兩者最大變形量、發生深度及曲線趨勢，針對差距較大處程式自動調整地層參數之Kh值，並呼叫RIDO軟體分析產出調整參數後之壁體變形量。程式透過持續比對及呼叫RIDO軟體進行迭代分析，直至兩者之最大變形量、發生深度差距符合目標需求（圖20），得到符合監測壁體

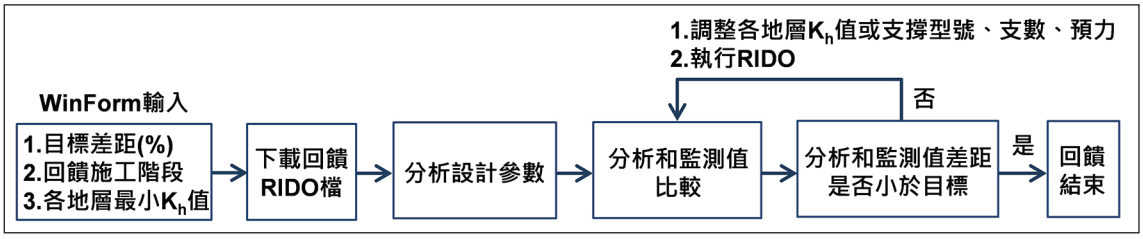



圖 19　中興公司開發施工階段設計參數回饋自動化程式流程

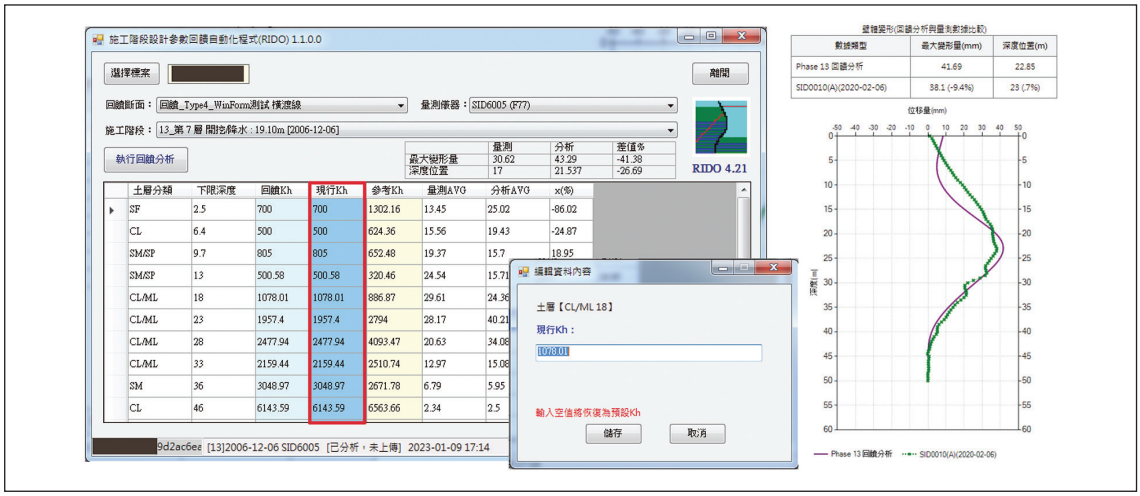



圖 20　以 WinForm 介面調整地層 Kh 值，使壁體最大變形量及發生深度接近實際監測值

變形量之地層參數，並可利用調整後之地層參數直接預測下一階開挖之壁體變形量。其二於架設支撐階段不調整地層Kh值，改為調整各階支撐型號、支數、預力，分析步驟與前述相同，直至分析值與監測值之最大變形量、發生深度之差距符合預定目標值。

## 五、結論與建議

中興公司透過制定深開挖設計自動化作業流程，建置SinoExcavation網頁平台，將設計作業流程統一化、平台化、自動化及智慧化，整合各項Excel工作表、於平台進行各項分析檢核作業、利用WinForm程式連動分析軟體進行自動迭代分析、由平台自動輸出各項計算書等，節省過去繁複之人工設計作業時間及減少重複性作業產生之錯誤，讓整體設計作業流程更有效率、更可掌握設計品質。

於設計階段，中興公司之深開挖設計自動化平台已取代傳統設計作業方式，並已於數個細部設計案例中實際執行，工程師可節省大量分析、檢核時間，來進行更細部的研析與討論，而設計新手亦可透過網頁平台快速上手深開挖設計作業，且所有設計經驗、設計參數皆儲存於平台資料庫中，可提供未來的使用者參考，或進行後續之應用。

於施工階段，中興公司開發施工階段設計參數回饋自動化程式，透過程式比對施工監測值與設計變形量，自動迭代反算回饋及調整地層參數或支撐型號、支數、預力，使設計參數更接近實際工址情況，並能預測後續施工階段變形量，除於施工階段可進一步反饋支撐配置外，亦能於未來鄰近基地或類似地層中回饋地層參數，使設計成果更符合實際情形，達到精進設計之目標。

**參考文獻**


1. 內政部營建署，「建築物基礎構造設計規範」，內政部營建署，臺北，2001。
2. 臺北市政府捷運工程局，「臺北都會區大眾捷運系統土木工程設計準則」，臺北市政府捷運工程局，中文版第 02 版，2019。
3. 洪晨瑋、張正憲、賴建名、嚴世傑、柳儒錚、謝尚賢，「設計流程自動化平台之開發：以捷運深開挖工程為例」，中國土木水利工程學刊，第五期，第三十二卷，P.463-P.469，2020。
4. 張正憲、洪晨瑋、賴建名，「深開挖設計自動化及自動建置 BIM 輔助設計模型」，電子計算機於土木水利工程應用研討會論文集，臺北，2019。
5. 林承翰、張正憲、賴建名，「大地工程設計的自動化發展」，地工技術，第 166 期，P.93-97，2020。
6. 張正憲、林承翰、洪晨瑋、賴建名、嚴世傑、柳儒錚、謝尚賢，「BIM 輔助設計 - 捷運深開挖與潛盾隧道工程」，中興工程 50 周年特刊，2020。
7. 張正憲、劉執敏、曾紀緯、賴建名，「深開挖分析自動化與施工監測平台之結合與運用」，第十九屆大地工程學術研討會暨科技部成果發表會（Geotech 2022）論文集，新北，2021。
8. 謝旭昇、程日晟、蔡宗鍠、楊明洲，「連續壁設計分析之實務考慮」，地工技術，第 53 期，P.35-P.44，1996。
9. 洪世勳、冀樹勇、陳錦清，「深開挖施工訊息化系統」，第 9 屆大地工程學術研討會論文集，桃園，2001。
10. 詹君治、冀樹勇、陳錦清，「類神經網路於深開挖壁體變形之預測」，中興工程，第六十九期，P.21-P38，2000。
11. Ou, C. Y., Hsieh, P. G., and Chiou, D. C. “Characteristics of ground surface settlement during excavation.” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 30,No. 5, 758-767, 1993