

簡介 **FREW** 程式於深開挖工程分  
析之應用

**THE APPLICATION OF COMPUTER PROGRAM  
FREW TO THE ANALYSIS OF DEEP  
EXCAVATION**

蘇鼎鈞，陳國隆  
Ting-Chun Su and Kou-Lung Chen

原著載於地工技術雜誌第41期，  
1993年3月，28-37頁

*Reprinted from Sino-Geotechnics Magazine,  
No.41,  
March, 1993,  
pp.28-37*

## THE APPLICATION OF COMPUTER PROGRAM FREW TO THE ANALYSIS OF DEEP EXCAVATION

Y. H. CHEN, T. C. CHEN, AND C. C. CHEN

### ABSTRACT

This article describes the application of computer program FREW in the analysis of deep excavation. Discussion is also given to the model of analysis, basic assumption, input of parameters, and limitations in the use of this program. Finally, a feedback analysis on two sites in Taipei by using the FREW program was performed by input the data obtained from instruments monitoring to verify the feasibility of this program.

Keywords: computer program; deep excavation; feedback analysis; instruments monitoring; Taipei.

# 簡介FREW程式於深開挖工程分析之應用

蘇鼎鈞 陳國隆

亞新工程顧問股份有限公司

## 摘 要

現今國內各大顧問公司採用之深開挖分析程式至少有SHEET PILE 2, RIDO, FLAC, WALL及FREW等, 其中FREW為近期方引入國內之程式, 此程式曾被新加坡大眾捷運系統NEWTON CIRCUS STATION (Nicholson, 1987)及香港捷運系統, 上海銀行等(Humpheson et al, 1986)之深開挖工程採用, 作為擋土結構行為分析之軟體。

本文主旨在針對FREW程式於深開挖工程分析上之應用一概略性之介紹, 對其所採分析模式, 基本假設等擇要加以說明; 此外, 並以台北市淡二區的二個深開挖工程為例, 進一步評估實際觀測資料與回饋分析之結果。

# 簡介 FREW 程式於深開挖工程分析之應用

蘇鼎鈞\*陳國隆\*

## 一、前言

台灣大都會區由於工商業迅速發展，人口相繼擁入而遽增，為解決大量人口居住及交通問題，導致許多建設工程往地下發展，建築方面大樓愈建愈高，基礎亦愈挖愈深，因而都會區地盤之深開挖工程便應運而生，關係到深開挖工程安全及鄰近既有建物保護問題之擋土結構行為則逐漸受到重視。有關深開挖過程中擋土結構之行為模式係屬土壤—結構互制 (Soil-Structure Interaction) 之行為，因此互制行為相當複雜，實不易分界定位，故目前深開挖工程所採用之分析方法通常均加以簡化，即將土壤及結構性質予以適當模擬，建立合理之分析模式後，再依純結構行為進行分析。

據筆者等之了解，現今國內各大顧問公司採用之深開挖分析程式至少有 SHEET PILE 2, RIDO, FLAC, WALL 及 FREW 等，其中 FREW 為近期方引入國內之程式，此程式曾被新加坡大眾捷運系統 NEWTON CIRCUS STATION (Nicholson, 1987) 及香港捷運系統，上海銀行等 (Humpheson et al, 1986) 之深開挖工程採用，作為擋土結構行為分析之軟體。

本文主旨在針對 FREW 程式於深開挖工程分析上之應用作一概略性之介紹，對

其所採分析模式，基本假設等擇要加以說明；此外，並以台北市淡二區的二個深開挖工程為例，進一步評估實際觀測資料與回饋分析之結果，以供讀者參考。

## 二、FREW 程式之分析模式及基本假設

為配合工程實際狀況，FREW 程式可依開挖工程施工程序，藉由既定之分析模式，推求各開挖階段因狀況改變引致之位移增量，再以疊加方式求得自初始狀態至該開挖階段之總位移量，進而計算出土壤應力、撐材荷重及擋土結構之彎矩及剪應力。有關本程式採用之分析模式及基本假設如以下之說明：

### 2.1 分析模式

圖一為 FREW 程式數值模擬分析模式之示意圖。此模式中，擋土結構乃視為以一系列節點 (Node) 連結之彈性梁單元 (Elastic Beam Element)，擋土結構兩側之土壤則可藉由不同方法模擬其勁度 (將於下節中述及) 而連結於擋土結構之節點上；支撐或地錨則視為具壓縮軸力之彈簧作用於其對應之節點上方。分析時，各開挖施工階段計算程序包含：

(1) 假設各節點無側向位移之情況下，計算擋土結構兩側之初始土壓力及不平衡之

\* 亞新工程顧問股份有限公司大地工程師

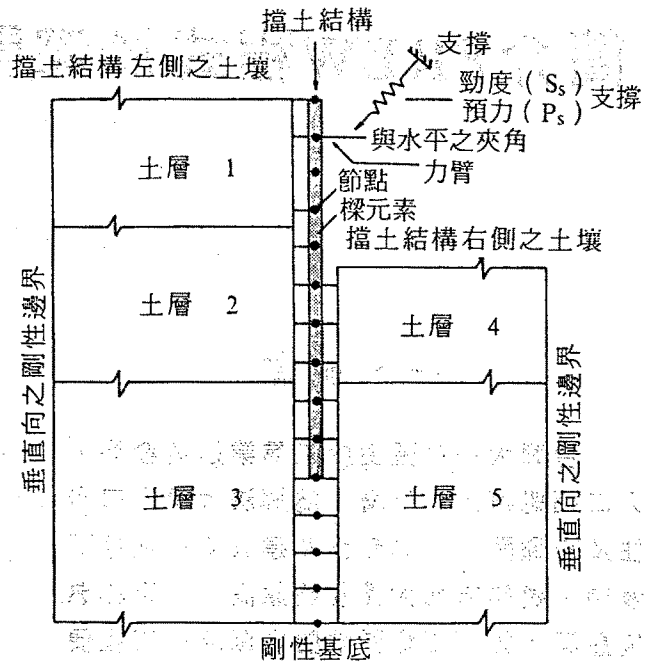
節點作用力。

- (2) 建立擋土結構本身及其兩側土壤之勁度矩陣。
- (3) 結合支撐或地錨之勁度矩陣組成一總勁度矩陣。
- (4) 假設於線彈性行為情況下，計算節點應力作用於總勁度矩陣時，各節點之位移增量。
- (5) 依各施工階段引致之土壓力增量，重新計算作用於各節點之土壓力。土壓力增量係由節點位移增量與土壤勁度矩陣之乘積求得。
- (6) 比較(5)求得之土壓力是否超過土壓力之界限（即主被動土壓力），如超出其界限值，則藉由考慮土壤之塑性行為，產生一修正應力（Correction Force）。
- (7) 將(6)計算求得之修正應力與(1)中求得之節點應力相加，重新組合為一組新的節點作用力。
- (8) 重覆(4)至(7)直至符合收斂條件為止。
- (9) 計算各節點總位移量、土壓力、支撐應力、擋土結構之剪應力及彎矩等。完成特定階段之分析後，再進行下一階段之分析。

## 2.2 基本假設

### 2.2.1 總應力及有效應力

與一般採用之分析模式相似，FREW程式可依土壤之透水性，進行將土壓力及水壓力分別考慮之有效應力分析；或將水壓力併入土壓力中一併考慮之總應力分析。有關有效應力分析和總應力分析之適用狀況主要視土層之排水情況而定，若土層中具深厚之粘土層，則可視之為不排水情況而以總應力法進行分析，反之則以有效應力法分析，惟對於砂、粘土交互出現之土層，則有賴具經驗之大地工程師進行研判，才能得到較合理之分析結果。



圖一 FREW程式數值模擬分析示意圖

### 2.2.2 土壤性質

FREW程式基本上係假設擋土結構兩側之土壤為一線彈性材料，而為模擬土壤之彈塑性行為，本程式藉由土壤之主、被動土壓力為其強度限制(Strength Limitation)，當土壓力到達主、被動土壓力時，土壤即展現其塑性行為。圖二為模擬土壤彈塑性行為之示意圖。本程式可藉由以下三種不同模式推求土壤之勁度矩陣，茲說明如下：

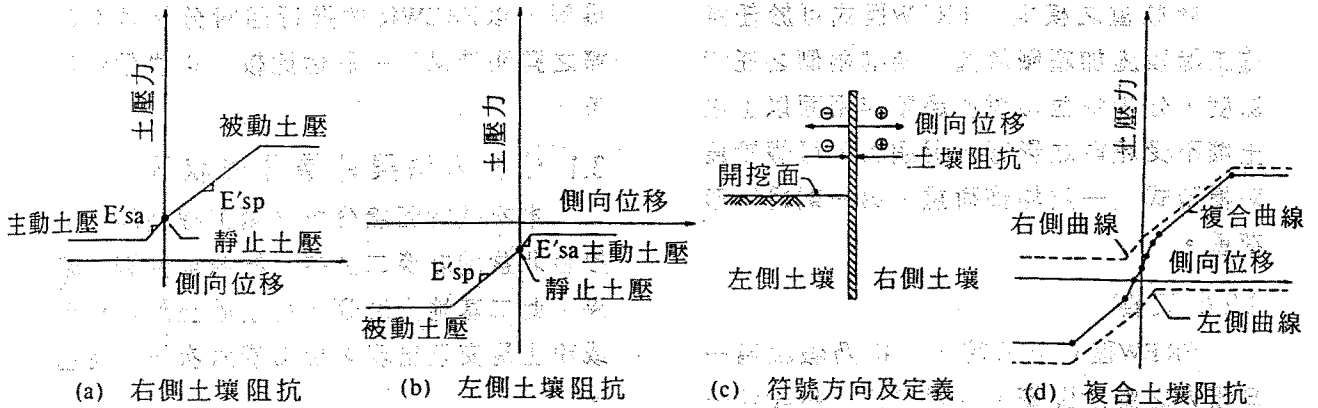
#### (1) 地盤反力模式 (Subgrade Reaction Model)

此模式假設土壤為一組不相互作用的彈簧，彈簧的勁度則依下式求得，即

$$K=EA/L$$

式中，E為土壤之楊氏模數，A為節點上下兩點元素中點間之距離，L則為彈簧長度。

此模式一般認為大多數情況下與擋



圖二 柔性擋土結構兩側土壓力關係圖 (Haliburton, 1968)

土結構兩側之土壤行為不甚符合，故建議不予採用。

(2)安全撓性模式 (Safe Flexibility Model)

——此模式假設土壤為一彈性連體 (Elastic Continuum)，而土壤的勁度矩陣則依有限元素法求得。在平面應變情況下，無論土壤之楊氏模數考慮為定值或隨深度而呈線性增加，本模式均可提供一良好的近似值。一般分析時均採用此模式，並假設最低節點為一剛性基底。

(3)Mindlin模式 —— 此模式亦假設土壤為彈性連體，其土壤勁度則依Mindlin彈性方程之積分程式 (Vazirietal, 1982) 求得。

有關上述之土壤勁度矩陣推求之基本假設及分析方法可參考Pappin et al (1986) 之研究，於此不再贅述。

2.2.3 主被動土壓力

FREW程式之主被動土壓力係依下式求得

$$P_a = \{ K_a \sigma'_v - 2C\sqrt{K_a} \} + u$$

$$P_p = K_p \sigma'_v - 2C\sqrt{K_p} + u$$

式中  $P_a$ 、 $P_p$  為主被動土壓力，

$K_a$ 、 $K_p$  為主被動土壓力係數。

$$\Delta\sigma'_v = \int_z^{z_s} \nu dZ - u + \sigma_{zudl}$$

式中  $u$  為孔隙水壓，

$\gamma$  為土壤單位重，

$Z$  為任一點高程，

$Z_s$  為地表高程，

$C$  為有效凝聚力或不排水剪力強度，

$\sigma_{zudl}$  為所有超載重所產生之垂直應力。

本程式可考慮土壤與擋土結構之摩擦角 (Wall Friction) 及粘著力 (Wall Adhesion)，此外亦可考慮拱效應 (Arching Effect) 而選擇土壓重新分配 (Redistribution) 與否。

2.2.4 開挖和回填影響

在擋土結構不考慮側向位移的情況下，水平向之有效應力增量，可先計算因開挖或孔隙水壓變化將產生垂直向之有效應力增量，然後依下式求得，即

$$\Delta\sigma'_h = K_r \Delta\sigma'_v$$

對均向 (Isotropic) 之彈性材料言，

$$K_r = \frac{\nu}{1-\nu}$$

式中  $\nu$  為土壤之柏松比。

在排水情況下，土壤之  $\nu$  值介於 0.1 至 0.5 之間，在不排水情況下，土壤之柏松比一般採用 0.5，故  $K_r$  值為 1。

### 2.2.5 超載重

超載重之模擬，FREW程式可於任意施工階段施加超載於擋土結構兩側之任意深度，分析中並假設於超載作用面以上之土壤不受超載之影響，另超載重可假設為兩種型式，一為均佈荷重，另一則為條形荷重。

### 2.2.6 支撐

FREW程式分析時，支撐乃假設為一具預力之勁度彈簧，且可於任一階段任一節點輸入或移走，而地錨則模擬為一具較小勁度及預力之支撐進行分析。

## 三、FREW程式之回饋分析

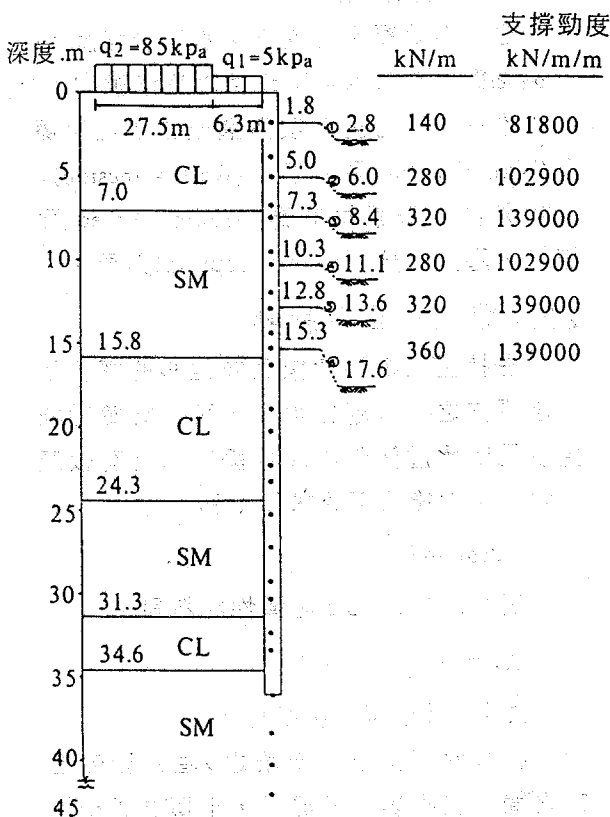
為說明FREW程式於實際深開挖工程擋土結構分析中之應用，本文中嚐試以台

北盆地淡二區(T<sub>2</sub> Zone)某二個深開挖工程為例，以FREW程式進行回饋分析並與實際之監測結果作一評估比較，以供讀者參考。

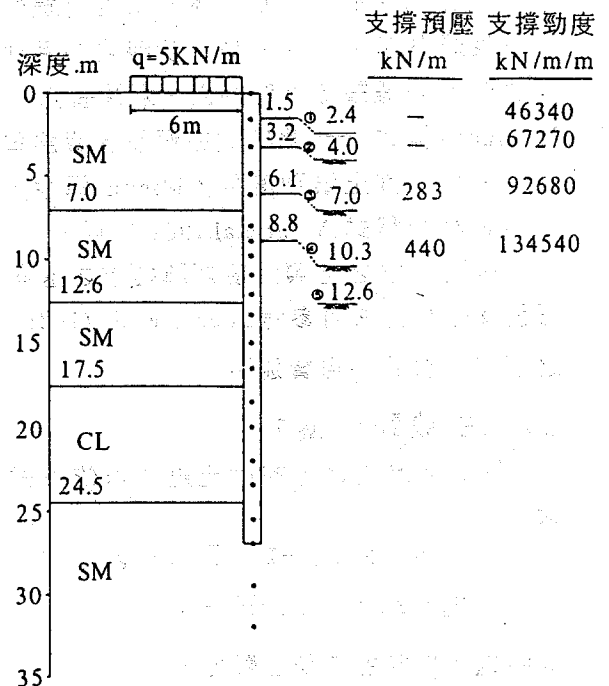
### 3.1 分析方法與地層分佈狀況

本次進行回饋分析之兩工程基地均位於台北盆地之淡二區中，根據地質調查結果，此二基地土層分佈均呈砂土層與粘土或粉土層交互出現之松山層六次層的特色。

本次分析係採有效應力分析模式，分析中各步驟均依現場實際開挖程序進行，而其目的主要集中於開挖最終階段實際監測與回饋分析所得之結果比較。分析中基地A、B所採用之分析斷面如圖三及四所示。其開挖深度分別為17.6公尺及12.6公尺，連續壁厚度均為1.2公尺，長度則分別為36公尺及27公尺。



圖三 A基地分析斷面圖



圖四 B基地分析斷面圖

### 3.2 輸入參考

#### 3.2.1 土壤參數

分析採用之基本土壤參數如表一所示。分析中靜止土壓力係數  $K_0 = 1 - \sin \phi'$ ，主被動土壓力係數  $K_a$ 、 $K_p$  依圖五之 Caquot and Kerisel 圖表並考慮牆摩擦角為  $\delta = \phi'/2$  求得。有關土壤之楊氏模數則依圖六 Stroud (1974) 之關係圖推求。由於本文中兩基地粘性土層之塑性指數  $I_p$  大致為 10，故其楊氏模數採用  $2500N \text{ kN/m}^2$  進行推估，其中  $N$  值為標準貫入試驗 (SPT) 打擊數；另圖六中顯示，砂土層之楊氏模數變化大致介於  $2500N$  至  $7000N \text{ kN/m}^2$  之間，於本分析中採  $E_s$  值為  $4000N \text{ kN/m}^2$ 。

表一 回饋分析採用之土壤參數

| 層次 | 土壤分類 | 總單位重 $\gamma, \text{KN/m}^3$ |      | 有效摩擦 $\phi', \text{度}$ |     |
|----|------|------------------------------|------|------------------------|-----|
|    |      | A基地                          | B基地  | A基地                    | B基地 |
| 6  | CL   | 18.7                         | —    | 30                     | —   |
| 5  | SM   | 19.4                         | 19.4 | 33                     | 33  |
| 4  | CL   | 18.7                         | 18.7 | 32                     | 32  |
| 3  | SM   | 19.4                         | 19.4 | 33                     | 33  |
| 2  | CL   | 18.7                         | —    | 33                     | —   |
| 1  | SM   | 19.7                         | —    | 33                     | —   |

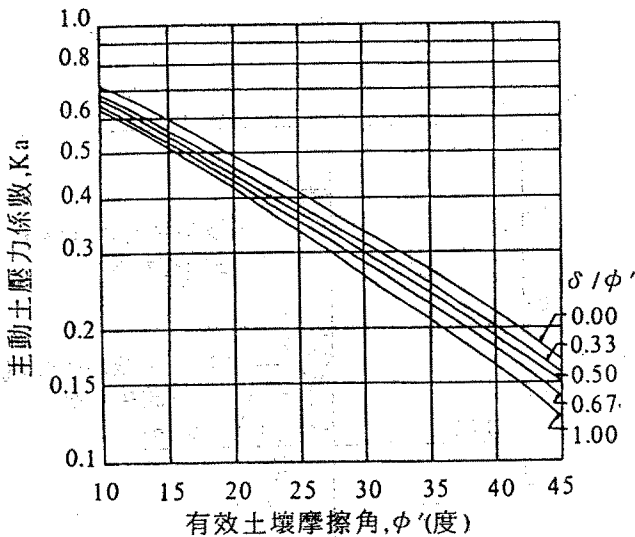
土壤楊氏模數

砂土  $E_s' = 4000N (\text{kN/m})$

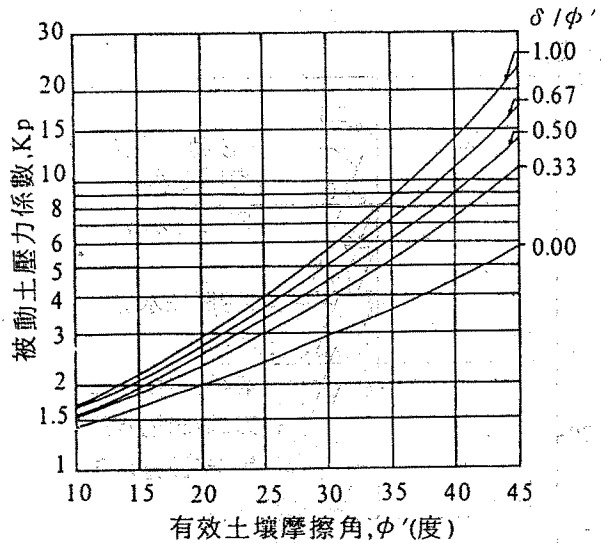
(Parry, 1971 & D'Appolonia et al, 1970)

粘土  $E_s' = 2500N (\text{kN/m})$  (Stroud, 1974)

式中  $N$  = 標準貫入試驗 (SPT) 打擊數



(A) 主動土壓力係數,  $K_a$



(B) 被動土壓力係數,  $K_p$

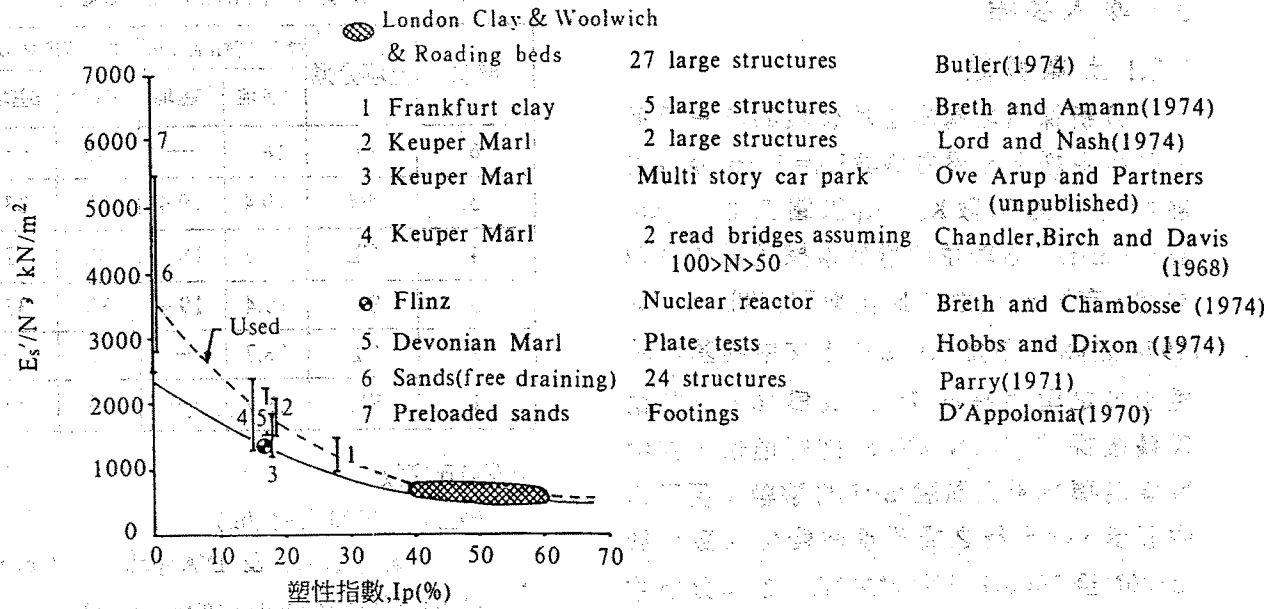
圖五 側向土壓力係數與土壤有效摩擦角關係—牆背側為水平狀況 (Caquot & Kerisel, 1948)

#### 3.2.2 水壓狀況

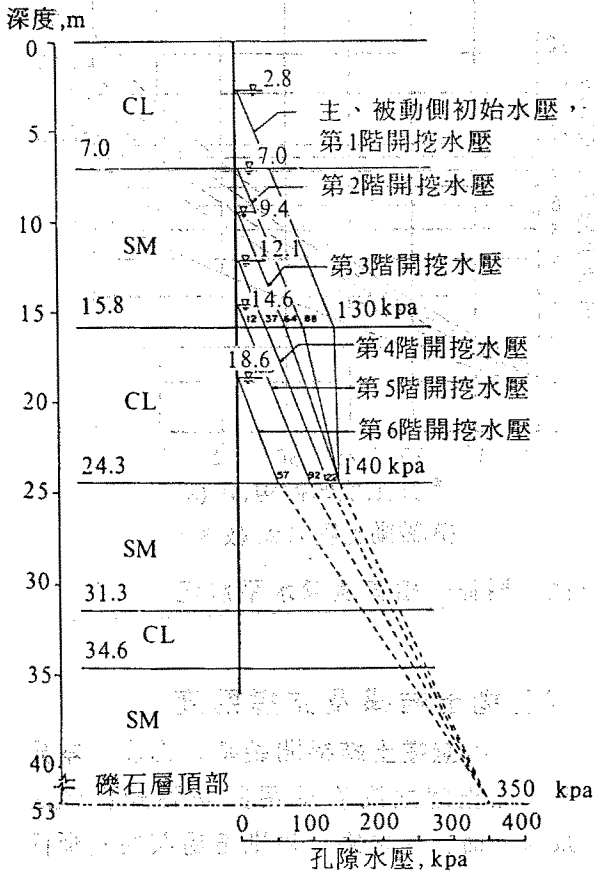
由於進行回饋分析之兩基地之水壓量測資料有限，因此當現有之水壓量測資料不足時，則配合合理之假設進行分析，有關分析採用之水壓分佈狀況如圖七及圖八所示。

#### 3.2.3 擋土結構及支撐勁度

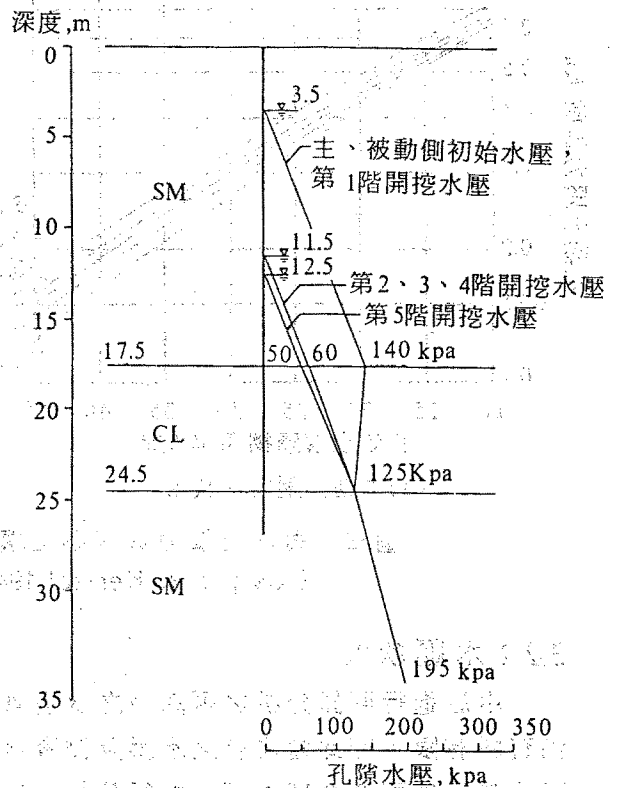
為考慮擋土結構開裂時之勁度，本分析中擋土牆之勁度採用其理論勁度值之 0.8 倍，而支撐之勁度值則考慮其材料斷面損耗及組裝過程中傾斜或其它不確定因素之影響，採用其理論值之 0.7 倍。支撐之理



圖六 土壤之楊氏模數 (-Stroud,1974)



圖七 A基地開挖面內各開挖階段水壓分佈圖



圖八 B基地開挖面內各開挖水壓分佈圖

論值係以公式 $K=EA/LS$ 計算，其中A為支撐斷面積，L為支撐之有效長而S則為支撐之水平間距。

### 3.2.4 超載重

本分析中考慮既有建物之超載重為每層樓 $12\text{KN/M}^2$ ，而施工超載則考慮為 $5\text{KN/M}^2$ 。

## 3.3 分析與實測結果之比較

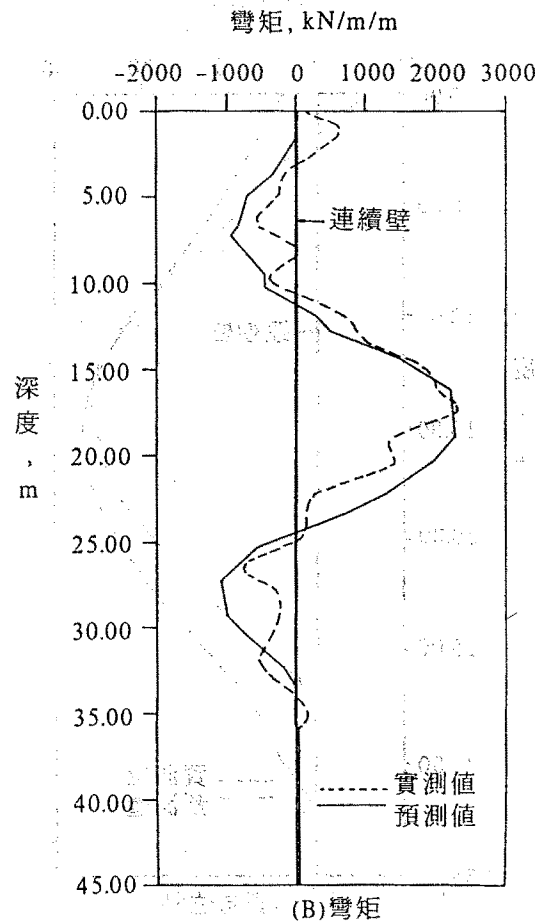
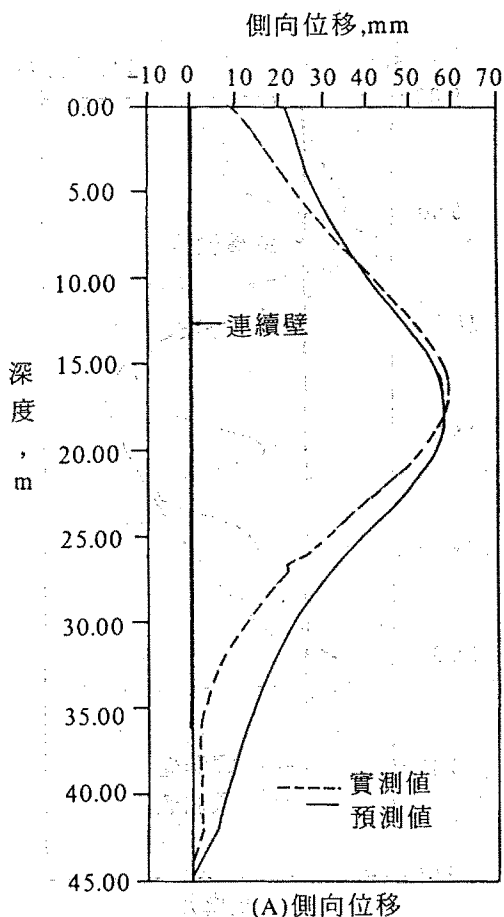
### 3.3.1 擋土結構側向位移

圖九及圖十所示分別為基地A、B於最終開挖階段分析所得之擋土結構側向位移、彎矩與實際監測結果之比較。由圖中顯示於兩基地A、B中預測之擋土牆最大側向位移與實測值相當一致，唯擋土結

構頂部之預測變位值較實測值為大，其原因之一可能係由於回饋分析中未將開挖區域頂部鋪設之覆蓋板(Decking)列入考慮所致，如將覆蓋板列入考慮，其預測結果應可較接近實測值。至於擋土結構底部預測之變位值亦較實測值為高，此一原因尚未加以檢討，因上述之誤差，已可視為不錯之回饋結果。

### 3.3.2 擋土結構彎矩

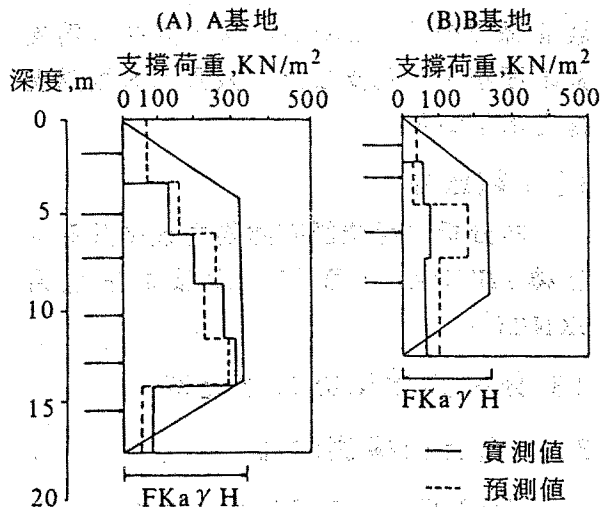
本分析中所謂“實測彎矩”係以實測之擋土結構側向位移量反推而得，由圖九及圖十中，分析求得之擋土結構彎矩與實測結果甚為吻合。



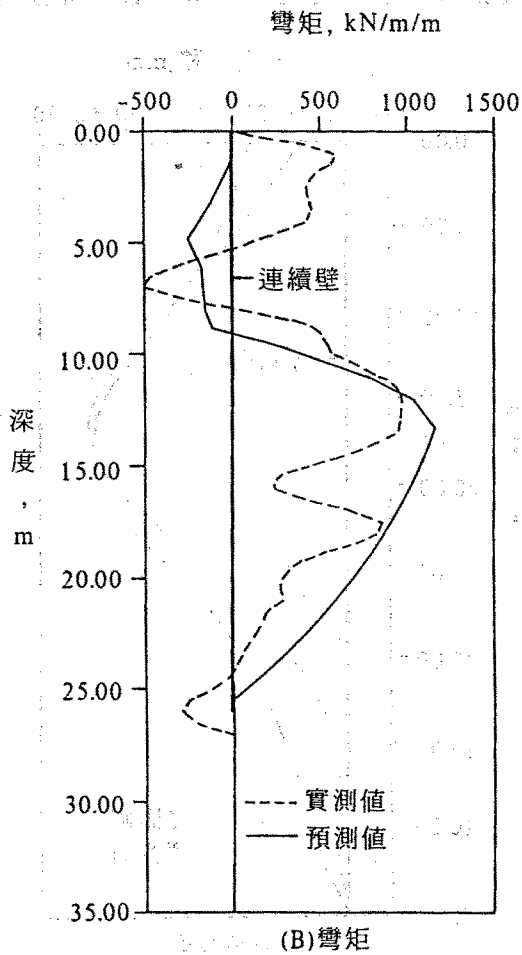
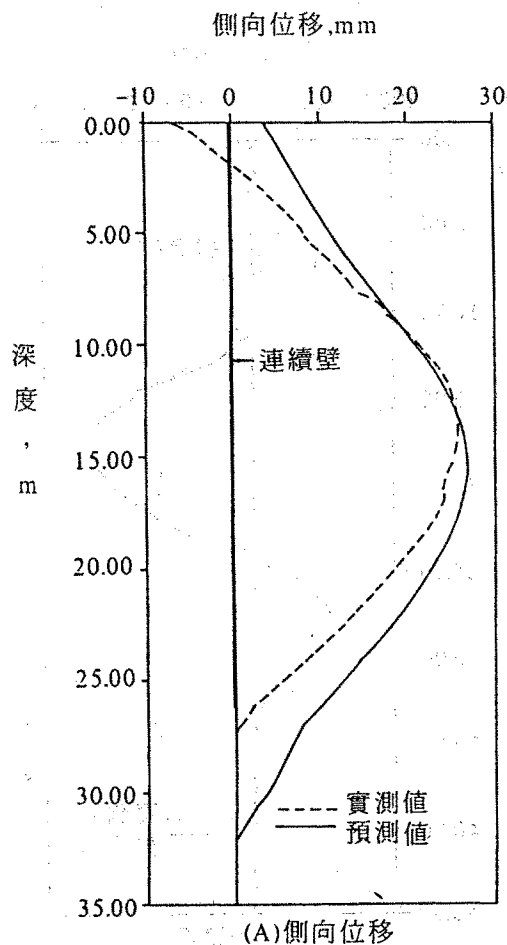
圖九 A基地最終開挖階段連續壁實測位移及彎矩與回饋分析結果之比較

### 3.3.3 支撐荷重

圖十一所示為FREW程式分析求得之支撐荷重與其實測值之比較，圖中實線係表示實測之支撐荷重，虛線則為FREW程式之輸出結果，比較顯示，預測結果與實測值已頗為接近。圖十一中亦嚐試以一明視土壓力包絡線涵蓋各支撐之荷重，其土壓力之大小定義為“ $Fka\gamma H$ ”，其中於本次淡二區兩基地之分析中F取3， $Ka = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$ ， $\gamma$ 為開挖深度內擋土牆背側土壤之平均總單位重，H為開挖深度。圖十一顯示，FREW程式的結果，其預測值及傾向較包絡線的方式更接近實測結果。



圖十一 最大支撐荷重及明視土壓力包力絡線



圖十 B基地最終開挖階段連續壁實測位移及彎矩與回饋分析結果之比較

## 四、結論

- (1) 本文嚐試以FREW程式進行回饋分析，分析結果顯示預測之擋土結構變位、彎矩及支撐荷重與實測值均頗為接近。然而，為期使用者對此一程式之應用有更進一步之把握與信心，以更多案例進行回饋分析實屬必要。有關本次分析中採用之擋土結構及支撐勁度之折減與土壤勁度求取方式並非“標準”而不能變動，其仍應需更多的驗證。
- (2) 於分析設計中，擋土結構勁度之折減係數採用0.8、0.7或0.6實依施工狀況及設計者信心而異。唯其應包含於擋土結構構築過程中之缺陷及分析程式簡化程序中可能引致之折減因素。
- (3) 文中述及之淡二區兩基地內支撐開挖之明視土壓力包絡線於此僅供參考，建議應囊括更多案例予以進一步証實。
- (4) 由於擋土結構之行爲，實受開挖時之施工品質及諸多因素所左右，故欲於設計分析階段精確地描述其行爲實不可能。依筆者等之經驗，欲良好的控制擋土結構之行爲，除分析時仔細地將各施工程序可能引致材料及土壤變化之因素列入考慮外，仍需仰賴施工時良好的品質控制與施工管理方可獲致成效。
- (5) 以FREW程式進行回饋分析時，水壓狀況之掌握非常重要，一般大樓建築於基地土壤調查階段和施工階段雖都有進行地下水壓之量測，惟資料往往十分有限，故需收集其他案例之相關經驗並配合合理之假設，才能獲得滿意之結果。
- (6) FREW程式本身無法模擬土壤之潛變行爲，也不能預估因擋土結構變形所引致之鄰近地表沈陷。此外以彈塑性法去模

擬土壤之非線性行爲，亦有其基本限制存在，另嚴格來說，擋土結構本身亦屬非線性行爲，惟因配合實際之工程需要，以簡化之彈塑性模式來予以模擬，亦不失為一可行之道。FREW程式具一相當完整之理論基礎，若能配合良好之案例收集回饋及合理之經驗研判，應是一值得介紹應用之程式。

## 五、誌謝

本文於撰寫過程中，承蒙亞新工程顧問公司提供寶貴之資料，大地一部王劍虹經理和捷運專案秦中天博士之鼓勵與指正，同事Apollo S. Enriguez之參與討論，以及中華顧問工程司周功台先生和萬鼎工程顧問公司鍾毓東先生之不吝賜教，特此申謝。

## 參考文獻

- PAPPIN, J. W., SIMPSON, B., FELTON, P. J. and RAISON, C. (1985), "Numerical Analysis of Flexiable Retaining Walls.", *Proc. of the Numerical Methods in Engineering Theory and Applications 85 Conference, Swansea.*
- HALIBURTON, T. A. (1968), "Numerical Analysis of Flexiable Retaining Structures.", *Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, vol.94.*
- NICHOLSON, D. P. (1987), "The Design and Performance of the Retaining Walls at Newton Station.", *Proc. Singapore Mass Rapid Transit Conference.*
- HUMPHESON, C., FITIPATRICK, A. J. & ANDERSON, J.M.D. (1986), "The Basements and Substructure for New Headquarters of the Hong Kong & Shanghai

