

深開挖中土水壓力行為探討  
**EARTH PRESSURES  
DURING DEEP EXCAVATIONS**

張兆麟，汪安邦，郭國振，高祥生  
J. L. Chang, A. B. Wang, K. J. Kuo and H. S. Kao

原著載於營建知訊第 172 期  
1997 年 5 月，第 10~19 頁

*Reprinted from Construction News Record  
Taipei, Taiwan  
May, 1997, No. 172, pp.10~19*

# 深開挖中土水壓力行為探討

張兆麟

汪安邦 郭國振 高祥生

台北捷運工程局南工處 總工程司

亞新工程顧問公司

## 摘要

台北捷運中和線南勢角站CC278標位於台北盆地之邊緣，在地表下有一層深厚的軟弱粘土層。本文根據南勢角站之土水壓計相關監測資料進行探討，由其觀測結果顯示，主動側土壓計及水壓計之量測值皆隨開挖深度之增加而降低，在開挖結束後逐漸回升。被動側土壓計之量測值隨開挖深度之增加而增加。依評估結果，對擋土壁設計中所考慮之土壤與壁面間之摩擦效應，建議其摩擦角等於土壤內摩擦角。由本案例相關資料顯示中和舊沖積層中，厚度較大之粘土層可以採用總應力計算，砂、礫層或排水路徑3m左右之凝聚性土壤可以採用有效應力之模式進行評估。

## 一、前言

在深開挖工程中，由於連續壁承受土壓力之作用，所產生土壤與連續壁間之互制關係，是在設計上須要考慮之因素。土壓力有許多推估之模式，可藉由土/水壓計的裝設與量測，比較各種推估模式之合理性。然而由於裝設土/水壓計除費用高外，另外失敗率亦高。因此除了大型之公共工程外，一般民間工地甚少安裝。故對於實際觀測之土壓力與理論值比較回饋文獻較少。因此本文藉由台北捷運工程之案例，探討不同土層量測之土/水壓力，及支撐應變計反推土壓力與理論值之比較結果。希望提供工程界作一參考。

## 二、地層概況

本案例之基地位於台北盆地之南側中和地區，地質或可稱為中和舊沖積層，其下則為景美礫石層及岩盤，礫石層或岩盤之頂部高程則變化頗大。主要是位於台北盆地邊緣受基地南方丘陵地延伸的影響。中和舊沖積層主要由粘性土壤組成，上部多為粘土而靠近下部則出現粘土及砂土互層，表一為土/水壓計該斷面附近之鑽孔資料。

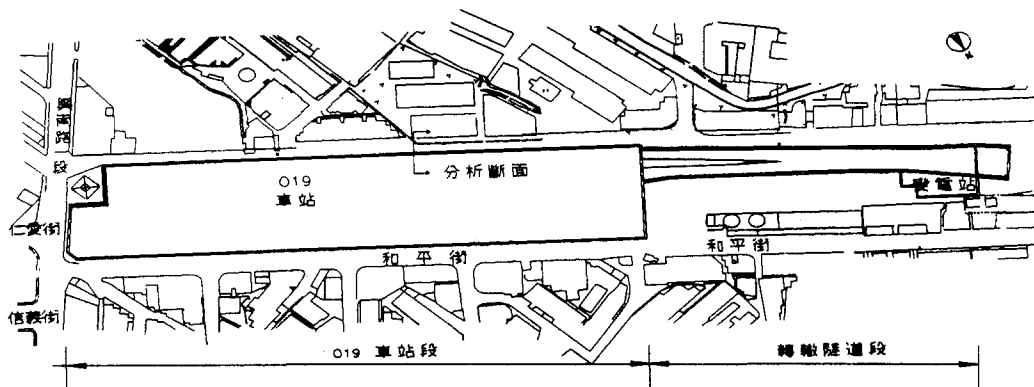
表一 分析斷面附近土層簡化參數表

深度(m)	土壤分類	N 值	$\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	$\Psi$ n(%)	Ip(%)	Su(kN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (deg)
0-4	CL	4-11	18.5	29	14	40	-
4-13	CL	3-13	18.1	35	15	37	-
13-21.1	CL	6	18.1	35	15	54	-
21.1-30	CL	7-12	18.3	35	15	80	-
30-32.7	SM	12-21	19.1	28	-	-	35
32.7-36	CL	15-23	19.4	28	13	-	31
36-45	GM/SM	>100	23.7	22	-	-	38

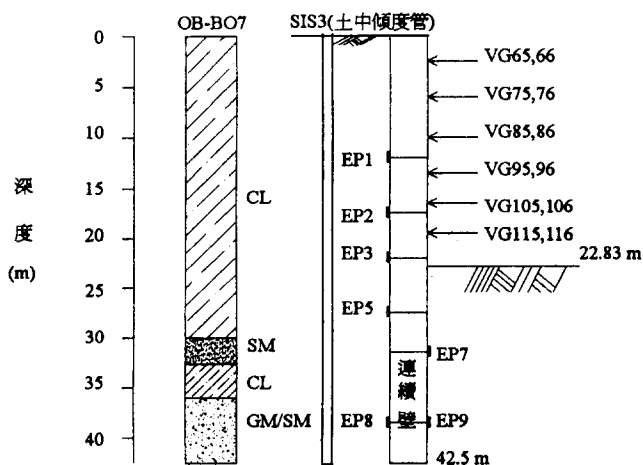
## 三、基地及監測儀器配置概述

本工程案例之開挖以明挖順打施工法施作，基地主要分二部份，一部份為轉轍隧道，另一部份為車站及機廠，其平面圖如圖一所示，車站及機廠之範圍長300m、寬為60m、開挖深度約22.83m，開挖採用七層開挖，六層水平支撐架設。本基地之土/水壓計皆裝設於車站。

在分析過程中，排除裝設失敗與不合理數據，



圖一 基地平面位置及分析斷面位置圖



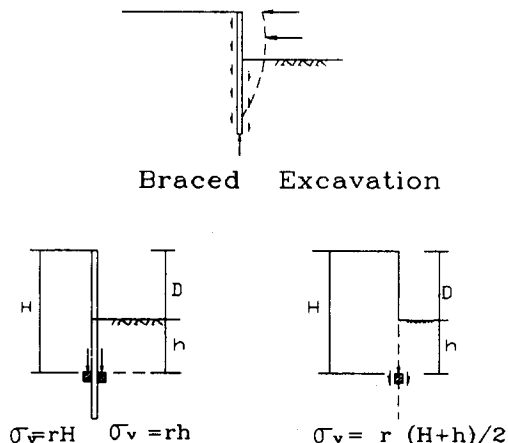
圖二 分析斷面監測儀器剖面圖

取一分析斷面位置如圖一所示。圖二為分析斷面之土/水壓計及支撐應變計剖面圖。

#### 四、深開挖中土、水壓力探討

在深開挖工程中分析開挖過程擋土壁承受之土壓力，一般而言，可利用總應力及有效應力二種模式來進行分析。基本上總應力模式適用於較厚及排水狀況不佳之凝聚性土壤，而有效應力則適用於非凝聚性土壤或土層較薄且排水條件較好之凝聚性土壤。

一般假設未開挖側垂直向總應力 $\sigma_v$ 等於覆土壓 $\gamma H$ 及開挖側垂直向總應力 $\sigma_v$ 等於覆土壓 $\gamma h$ （參考圖三），嚴格來說此項假設應僅適用在剛性且壁體平滑的情形下，因此在開挖面過程中垂直向總應力 $\sigma_v$ 大小將與擋土壁型式有所差異，圖三為垂直向壓力與擋土壁型式為柔性或剛性關係示意圖。在稍後將上述模式分析與實測值比較，探討其合理性。

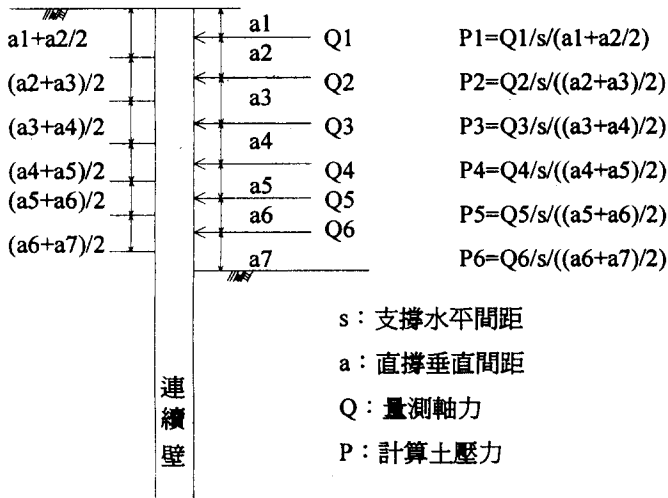


(a) Rigid Frictionless Wall (b) Flexible Wall

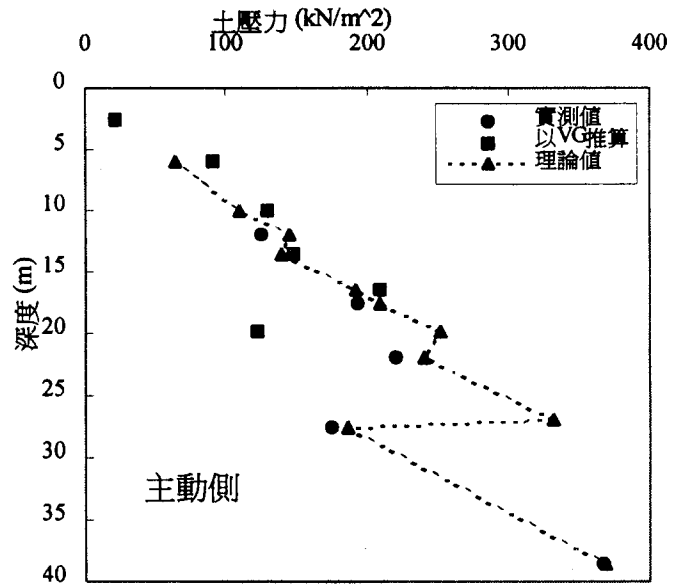
圖三 垂直向壓力與擋土牆型示關係示意圖

#### (1) 應力分析模式與監測資料

本案例中將利用支撐系統來驗證土壓力理論，表二為分析斷面支撐系統相關資料。此斷面中之支撐軸力利用Terzaghi-Peck(1967)[3]建議之二分一分攤法，支撐應變計之量測值推估支撐位置之土壓力，其模式如圖四所示。支撐應變計推估之土壓力與土壓計實測值總土壓力頗為接近，其結果如圖五所示。再依一般之厚層凝聚性土壤以總應力計算其理論總土壓力，但粘土層深度27.5m處之土壓計實測值卻遠較總應力理論計算值為低，而與有效應力理論計算值相當，土壓力計算將在稍後說明。因此以本案例之相關資料推估，排水路徑在3m左右之凝聚性土壤，可以採用有效應力模式。綜合上述各項因素，根據本案例土層特性及監測結果顯示，在深度0~27m處採用總應力分析，其餘之土層則採用有效應力分析，依上述原則之理論推估土壓力亦示於圖五中，由圖中可知本案例之土壓力相關資料，



圖四 二分之一分攤法計算模式



圖五 支撐應力推算、土壓計實測值及理論值比較圖

表二 分析斷面支撐系統相關資料

支撐層數	支撐型式	設計值(N/支)	設計預力(N/支)	實測預力(N/支)
1	1x1H350x350x12x19	112	45	48
2	2x1H350x350x12x19	142	60	57
3	2x2H400x400x13x21	138	58	64
4	2x2H400x400x13x21	138	58	64
5	2x2H400x400x13x21	138	58	58
6	2x2H400x400x13x21	163	71	64

即土壓計實測值，支撐應變計推估值與理論值，三者相當一致。

## (2)主動側土/水壓力探討

圖六至圖八為主動側之土水壓計量測結果之歷時曲線，由圖中顯示土、水壓力隨開挖深度之增加而遞減，直至開挖停止後，土、水壓力才逐漸回升。總應力分析時假設土壤內摩擦角 $\phi=0$ 、主動土壓係數 $K_a=1.0$ ，故

$$\sigma_h = \gamma H - 2S_u$$

$$\sigma_h : \text{側向土壓力}$$

其中  $S_u$  為土壤不排水剪力強度

$H$  : 覆土深度

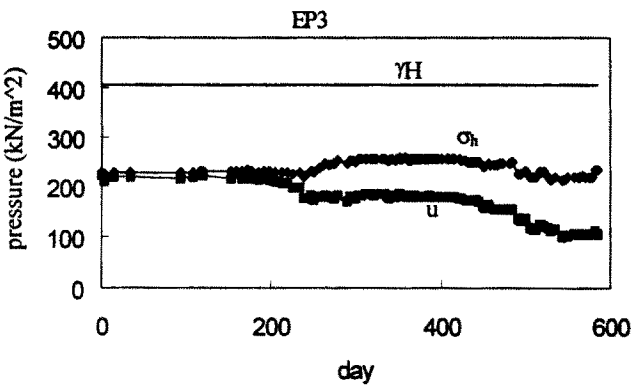
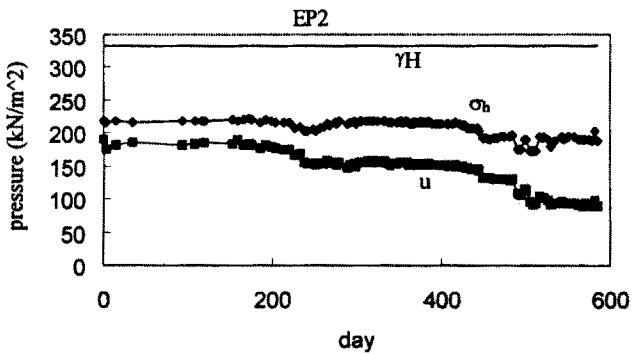
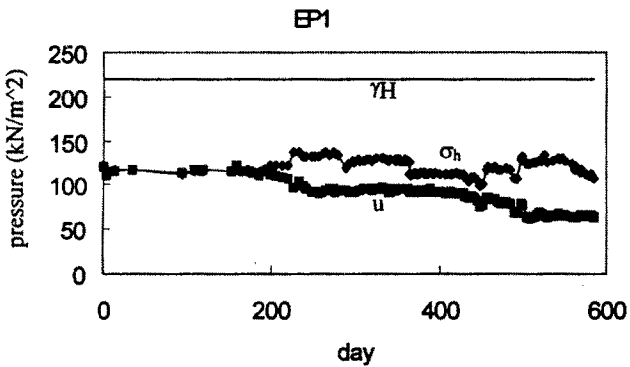
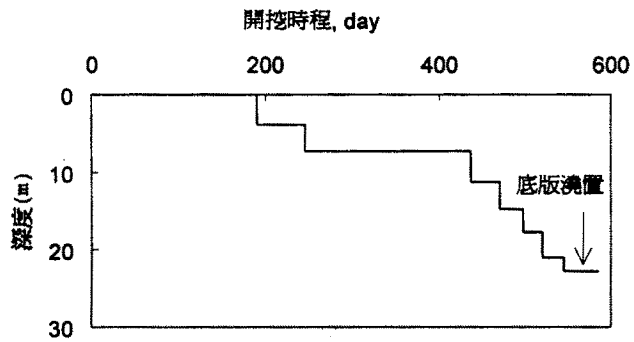
有效應力模式分析時，側向土壓力可利用下式計算

$$\text{其中 } R_a = (\sigma_h - u) / (\gamma H - u)$$

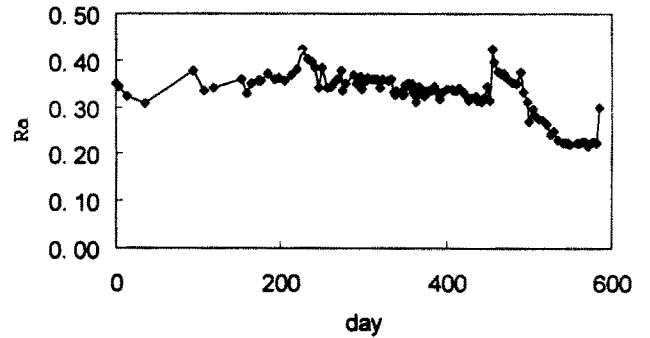
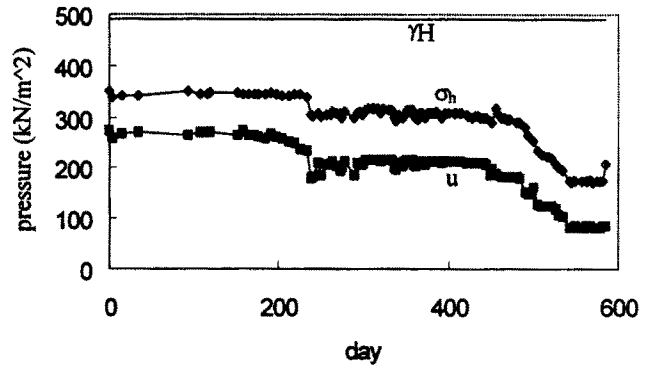
$u$  : 水壓計量測水壓

而主動側土壤完全到達主動狀態時， $R_a$ 即定義為主動土壓係數 $K_a$ 。

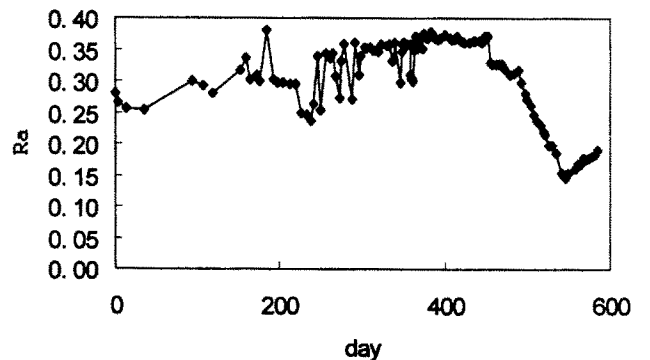
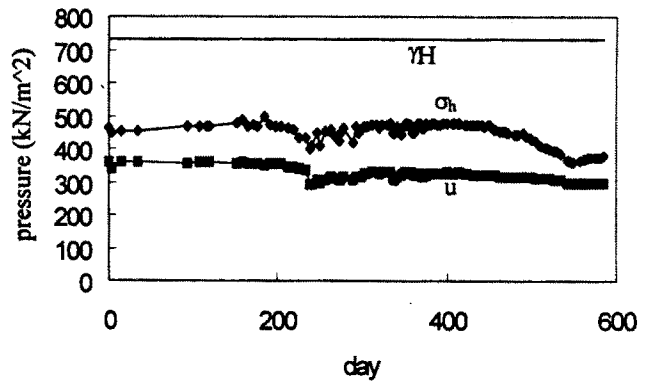
在利用有效應力來分析時 $K_a$ 之決定，可利用法國學者Caquot及Kerisel於1948年[1]所提出之主動及被動土壓係數( $K_a$ 及 $K_p$ )，土壤內摩擦角( $\phi'$ )及土壤與擋土牆間之摩擦角 $\delta'$ 相互關係之理論曲線，在本案例之分析斷面中，主動側有二組土、水壓計(EP5, EP8)，依前述說明應以有效應力模式來推估，由圖九顯示其 $K_a$ 值皆落於 $\delta'/\phi'=1$ 之下方，但理論上 $\delta'$ 不應大於 $\phi'$ ，且最多等於 $\phi'$ ，因此有可能垂直覆土壓力 $\sigma_v$ 有被高估之可能，即開挖過程中以 $\sigma_v$ 等於 $\gamma H$ 計算垂直總應力，應作適當之修正。此一現象在黃南輝、廖健智之深開挖中土壓力變化之論文[5]亦有提出。在本案例中主動側有二組土水壓計是位於有效應力分析之範圍，假設 $\delta'=\phi'$ 時土、水壓計之量測值( $\sigma_h$ )反推垂直覆土壓力 $\sigma_v$ ，略低於 $\gamma H$ ，其結果如圖十所示，由圖結果顯示本案例推估之 $\sigma_v$ 之連續壁是介於柔性牆與刚性牆之間，且偏向刚性牆。因此判斷若假設 $\delta'=\phi'$ 應屬合理。



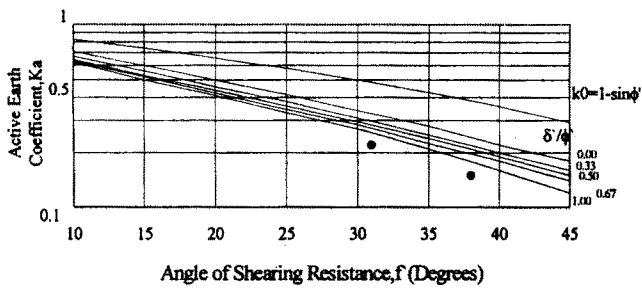
圖六 主動側土水壓計EP1~EP3相關資料



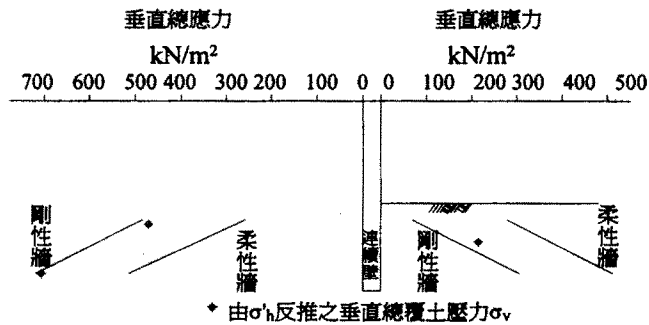
圖七 主動側土水壓計EP5量測相關資料



圖八 主動側土水壓計EP8量測相關資料



圖九 主動土壓係數與土壤內摩擦角理論曲線



圖十 假設 $\delta'=\phi'$ 土、水壓計之量測值( $\sigma'_{h}$ )反推垂直覆土壓力 $\sigma_v$

### (3) 被動側土壓力之探討

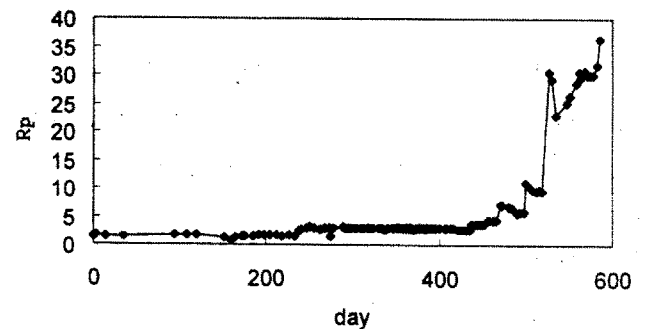
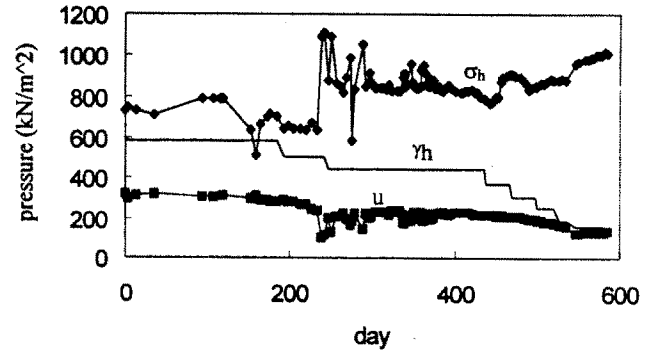
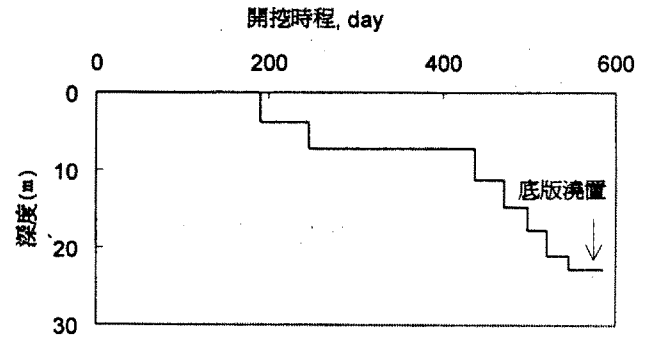
圖十一及圖十二為被動側土、水壓計量測結果之歷時曲線，基本上土壓力隨開挖深度增加而增加，水壓計之量測結果顯示，水壓力由於受到開挖階段降水之影響，水壓力隨開挖深度增加而遞減，而至開挖停止後逐漸回升。

在被動側有效應力模式分析時，側向土壓力可利用下式計算

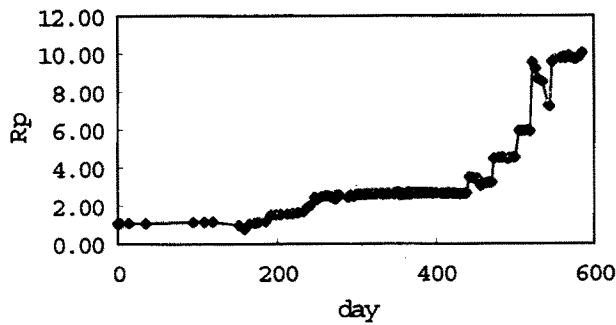
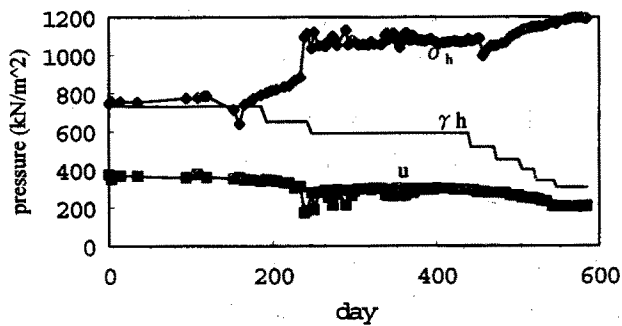
$$\text{其中 } R_p = (\sigma_h - u) / (\gamma h - u)$$

而被動側土壤完全到達被動狀態時， $R_p$ 即定義為主動土壓係數 $K_p$ 。在利用有效應力來分析時 $K_p$ 之決定，可利用法國學者Caquot及Kerisel於1948年[1]所提出之主動及被動土壓係數( $K_a$ 及 $K_p$ )土壤內摩擦角( $\phi'$ )及土壤與擋土牆間之摩擦角 $\delta'$ 相互關係之理論曲線，在本案例之分析斷面中，被動側有二組土、水壓計(EP7, EP9)，依前述說明應以有效應力模式來推估，由圖十三顯示EP7其 $K_p$ 值落於 $\delta/\phi=1$ 之上方，但理論上 $\delta'$ 不應大於 $\phi'$ ，且最多等於 $\phi'$ ，因此有可能垂直覆土壓力 $\sigma_v$ 有被低估之可能，

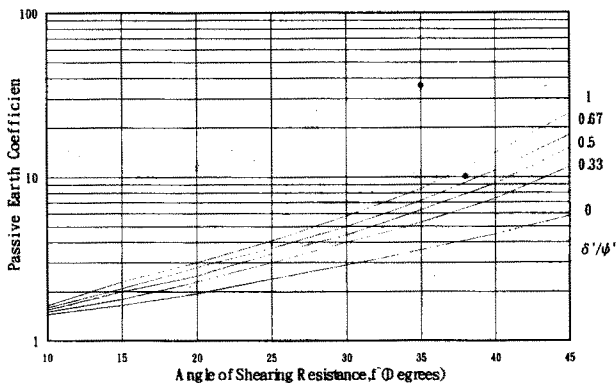
此一現象在黃南輝、廖健智之深開挖中土壓力變化之論文[5]亦有提出。在開挖側之垂直總應力 $\sigma_v$ 之推估與主動側之垂直向總應力方式相同，但在開挖側一般垂直覆土壓力 $\sigma_v$ 等於覆土壓 $\gamma h$ ，將會低估 $\sigma_v$ ，故仍需作適度之修正，在本案例中被動側有土水壓計(EP7)，在假設 $\delta'=\phi'$ 之量測值( $\sigma'_{h}$ )反推垂直覆土壓力 $\sigma_v$ ，其結果如圖十所示，由圖結果顯示本案例推估之 $\sigma_v$ 之連續壁是介於柔性牆與剛性牆之間，且偏向剛性牆。因此判斷若假設 $\delta'=\phi'$ 應屬合理。



圖十一 被動側土水壓計EP7量測相關資料



圖十二 被動側土水壓計EP9量測相關資料



圖十三 被動土壓係數與土壤內摩擦角理論曲線

#### (4)側向位移

主被動側土壓力之是否到達與側向位移之大小有著密切之關係，由本案例分析斷面之土中傾度管之觀測資料顯示，開挖過程中最大之變形量約有18 cm，但由於資料有限，無法在此判斷在此區域之地層位移多大，主被動土壓力才可完全發揮，因此有待收集更多資料再作進一之探討。

### 五、結論

由上述之土/水壓計、支撐應變計之量測結果與土壓力理論值探討可歸納下列結論：

1. 由本案例觀測結果顯示在中和舊沖積層中，厚層粘性土壤之土壓力推估可以利用總應力之模式。而排水路徑在3m左右之凝聚性土壤、砂層或礫石層之土壓力推估，可以利用有效應力之模式來進行。
2. 在有效應力之推估模式中，可以假設土壤與牆之摩擦角等於內摩擦角。

### 參考文獻

- [1] CAQUOT, A. and KERISEL, J. (1948) "Tables for the Calculation of Passive Pressure, Active Pressure, and Bearing Capacity of Foundations", *Gauthier-Villars, Paris*
- [2] MOH, Z.C. and HWANG, R.N. (1993) "Earth Pressures on Walls of a Deep Excavation" *Proc. 3rd Int. Conf. on Case Histories in Geot. Engrg*, St. Louis, Missouri, U.S.A
- [3] TERZAGHI, K. and PECK, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practices, New York, Wiley, 2nd Edition.*
- [4] 歐章煜、廖瑞堂 "軟弱粘土層中深開挖之土水壓力之變化", 中國土木工程學刊, 第七卷第三期, 第253~262頁
- [5] 黃南輝、廖健智、范陳柏 "深開挖工程中側向土壓力變化" 地工技術, 第53期, 第25~34頁