

深開挖工程中側向土壓力變化
**LATERAL EARTH PRESSURES
DURING DEEP EXCAVATION**

黃南輝，范陳柏，廖健智

R. N. Hwang, C. B. Fan and C. C. Liao

原著載於地工技術雜誌第 53 期
1996 年 2 月，第 25~34 頁

*Reprinted from Sino-Geotechnics,
Taipei, Taiwan
February, 1996, No. 53, pp.25~34*

深開挖工程中側向土壓力變化

黃南輝 廖健智

亞新工程顧問公司

范陳柏

台北市政府捷運工程局南區工程處

關鍵字：互制行為、土水壓、深開挖

摘 要

本文根據台北捷運系統新店線 CH219 標中正紀念堂站於開挖施工期間，藉由擋土壁兩側之土、水壓計監測資料回饋推論深開挖過程中，當忽略土壤與擋土壁間摩擦效應時，垂直向壓力將不等於覆土壓，否則垂直向壓力於主動側將被高估、而於被動側將被低估。因此在擋土壁設計中必須考量土壤與壁面間之摩擦效應，且針對軟弱至中等堅實土壤時，可假設擋土壁與土壤間之摩擦角等於土壤的內摩擦角。

LATERAL EARTH PRESSURES DURING DEEP EXCAVATION

HWANG R.N., LIAO CHIEN-CHIH

Moh and Associates, Inc.

FAN CHEN-BOU

Dept. of Rapid Transit Systems, Taipei Municipal Government

Key Words: interaction、earth pressures、deep excavation

ABSTRACT

This paper evaluates earth pressures recorded during the excavation of C.K.S Memorial Station of Hsintien Line of the Taipei Rapid Transit Systems. The main theme is on wall friction and vertical earth pressures. It can be demonstrated that the assumption normally adopted in the design of retaining structures for braced excavations that the vertical earth pressures equal to the overburden pressures could be erroneous if wall friction is considered. As a result, the vertical pressures on the active side are often over-estimated and those on the passive side under-estimated. Based on field measurements,

it is appropriate for soft to medium stiff sites to assume that the angles of wall friction equal to the angles of internal friction of soils in computing the limiting active and passive earth pressures in designing retaining structures of braced excavations.

一、前言

在深開挖工程中，擋土壁的受力及變形屬土壤與結構間的互制行爲，由於此種互制行爲很難加以定位及分界，因此，在擋土壁的設計過程中，如何估計並模擬側向土壓力的變化，以掌握擋土壁在土壤與壁體結構互制行爲下之應力狀態，則爲決定設計成果之關鍵。雖然側向土壓力的估算有多種理論模式可供使用，但是完整且大規模的側向土壓力觀測資料則難以獲得，因此有關此方面文獻亦多所闕如。本文即以台北捷運系統新店線CH219標爲案例，將開挖及部份結構體施作期間，擋土壁內外兩側之土、水壓計監測資料加以整理，藉由側向土壓力隨開挖施工而變化之情形，進而推估垂直向土壓力與擋土壁及土壤間摩擦角之關係作一探討，以供工程界參考。

二、工程案例

2.1 基地概況

本案工程平面位置圖示於圖一，監測區域主要分爲車站段及轉轍段兩部份，其中中正紀念堂車站主體爲探明挖覆蓋半逆打施工之地下三層鋼筋混凝土結構，站體呈南北向之長方形，南北向長約410公尺，東西向寬約25公尺，開挖深度約23.4公尺，擋土壁採用1.2公尺厚、41公尺深之連續壁。轉轍段爲探明挖覆蓋順打施工之地下二層鋼筋混凝土結構，因施工時程不同而區分成南北兩區，但只有南側區域配置有土、水壓計，南側工區呈南北向之長方形，南北向長約43公尺，東西向寬約11公尺，開挖深度約24公尺，擋土壁亦採用1.2公尺厚、41公尺深之連續壁。上述兩監測區域的支撐系統均爲七層H型鋼內支撐系統，每階段開挖係在支撐架設及預壓完成後爲之，預壓值爲設計值的50%，而各層支撐之拆除係配合結構體構築進度。

2.2 地層概況

本案之地層屬台北盆地T2分區，爲典型的松山層，松山層主要分爲六個次層，由粉土質黏土層及粉土質細砂層交互組合而成，即松六、松四、松二次層爲

粉土質黏土層，松五、松三、松一為粉土質細砂層，簡化後地層及地層參數如表一所示。

三、現場監測儀器配置概述

本案施工標之土、水壓計共裝設二十四組，分別裝設於七個連續壁單元內外兩側的不同深度，由於部份單元儀器於開挖施工期間遭受損壞或量測值有不穩定現象，因此本文僅選取其中六個壁體單元共計十六組土、水壓計的量測資料作為分析來源，而此六個壁體單元中，有五個壁體單元(編號 1~5)位於中正紀念堂站車站段，而另一個壁體單元(編號 6)則位於轉轍段南側工區，各壁體單元之平面位置可參考圖一所示。而十六組土、水壓計所在單元、儀器編號及裝設概況依主動側及被動側分別列於表二及表三，此外，這六個連續壁單元亦均裝設有壁體內傾度管作為施工觀測。

四、土壓力與擋土壁摩擦力之關係

一般於擋土壁設計時均將土壤性質予以模擬，以建立分析模式，而最常被採用的分析方法之一為樑模式(Beam models)，此分析模式係將擋土壁簡化成一支樑，而擋土支撐及開挖面下土壤則當作支點，將土體側向壓力視為外力而據以分析擋土壁受力及變形行為。而在計算主動與被動土壓力時，一般假設 $\sigma_v = \gamma H$ ，嚴格來說此假設僅適用於擋土壁為完全剛性且壁面平滑的情況下，而在這種情況下的開挖過程中，此時擋土壁兩側某深度之垂直向總壓力的計算理論上應如圖二(a)所示，但是這種完全剛性且平滑的擋土壁事實上並不太可能做得到；相反地，若擋土壁為完全柔性，則擋土壁兩側某深度之垂直向總壓力計算理論上應如圖二(b)所示，如此開挖過程中垂直向總壓力又該如何估算才適當？為解決這個問題，本文將分成主動側及被動側分別討論。

4.1 主動側之主動土壓力

在擋土壁主動側某一深度的有效水平向壓力 (effective horizontal pressure) σ_h' 乃是由該深度土壓計所量到的水平向總壓力 σ_h 減去該深度水壓計所量到的水壓力 u ，亦即 $\sigma_h' = \sigma_h - u$ 。而垂直向總壓力 σ_v 之計算，在此先暫以圖二(a) 模式運算，亦即等於覆土壓 γH ，由於此側並無開挖動作，因此 σ_v 應為定值，如此在某一深度的有效垂直向壓力 σ_v' 等於 σ_v 減去該位置水壓計所量到的水壓力 u ，亦即 $\sigma_v' = \sigma_v - u$ 。此處將 σ_h' 與 σ_v' 之比值定義為視主動土壓力係數 (Apparent coefficient of active pressures) R_a ，即 $R_a = (\sigma_h - u)/(\gamma H - u)$ ，而

根據此定義，將主動側六個壁體單元共十一組土、水壓計的觀測資料整理所得之 R_a 與開挖施工時程之相對關係以圖形表示，因限於篇幅無法全部列出，本文僅以圖三至圖五為代表，將所有十一組 R_a 之最小值整理列於表二，由表可知 R_a 最小值分布範圍從0.22到0.49，當主動側土壤完全達到主動狀態時，此時之 R_a 即定義為主動土壓力係數 K_a 。而根據法國學者 Caquot 及 Kerisel 於1948年所提出有關土壓力係數 (K_a 及 K_p)、土壤內摩擦角(ϕ')及土壤與擋土壁間之摩擦角(δ')相互關係之理論曲線(詳見圖六)，將前面十一組 R_a 最小值及其所對應之土壤內摩擦角標示於圖六上圖後顯示，有九組資料落於 $\delta'/\phi'=1.0$ 曲線的上方，但亦有兩組資料落於 $\delta'/\phi'=1.0$ 曲線下方，此兩組資料所代表的意義為 $\delta' > \phi'$ ，但是理論上 δ' 不應大於 ϕ' ，最多等於 ϕ' ，即使 $\delta' = \phi'$ 仍難解釋為何 R_a 值落在相對於 $\phi' = 30^\circ$ 及 $\phi' = 32^\circ$ 兩曲線之下方，有一個可能就是 σ_v 被高估之故。因此針對前面垂直向總壓力 σ_v 等於覆土壓 γH 之說法需作適度修正，亦即在開挖過程中，主動側某深度實際上的垂直向總壓力 σ_v 應小於覆土壓 γH 。因此，當忽略擋土壁與土壤間的摩擦效應時，即以圖二(a)模式估算將高估主動側垂直向總壓力。從另一個角度來瞭解 σ_v 與 δ' 及 ϕ' 之間的關係，作者先假設 $\delta' = \phi'$ ，如此由圖六上圖之對應關係，當 $\phi' = 32^\circ$ 時， K_a 約為0.25，將上述兩組量測資料由 σ_h' 反推 σ_v ，可得表四之推估值及圖七左側兩組資料與擋土壁型式之關係，顯示推估之 σ_v 介於圖二(a)及(b)剛性及柔性牆之間，如此之結果乃屬合理，而據此推論 $\delta' = \phi'$ 之假設亦可成立。

4.2 被動側之被動土壓力

在擋土壁被動側某一深度的有效水平向壓力 σ_h' 及有效垂直向壓力 σ_v' 之求法同4.1節所述，其中 σ_v' 隨著開挖深度及區內降水而變化，此處將 σ_h' 與 σ_v' 之比值定義為視被動土壓力係數(Apparent coefficient of passive pressures) R_p ，即 $R_p = (\sigma_h' - u)/(\gamma h - u)$ ，根據此定義，同樣地比照4.1節，將被動側五個壁體單元共五組土、水壓計的觀測資料整理所得之 R_p 與開挖施工時程之相對關係以圖形表示，本文僅以圖八至圖十為代表，如此得到五組 R_p 之最大值並整理列於表三，由表三可知 R_p 最大值分布範圍從2.01到36.88，當被動側土壤完全達到被動狀態時，此時之 R_p 即定義為被動土壓力係數 K_p 。將此五組 R_p 最大值標示於圖六下圖後顯示，有四組資料落於 $\delta'/\phi'=1.0$ 曲線下方，且有一組資料(單元編號 6-P1)落於 $\delta'/\phi'=1.0$ 曲線上方，此組資料所代表的意義為 $\delta' > \phi'$ 。經由單元編號 6-P1於圖十中間之歷時曲線可見，由於此組壓力計位於松二黏土層，且在最後開挖階段初期因降水因素影響，而導致初期水壓力較高，因此此階段 R_p 有很大跳動現象，且落於圖六下圖中 $\delta' = \phi'$ 所對應 $\phi' = 32^\circ$ 曲線之上方，面對這樣的結果，有一個可能就是 σ_v 被低估之故，因此在開挖過程

中，被動側某深度實際上的垂直向總壓力 σ_v 應大於覆土壓 γh 。因此，當忽略擋土壁與土壤間的摩擦效應時，即以圖二(a)模式估算將低估被動側垂直向總壓力。比照4.1節的處理方式，假設 $\delta' = \phi'$ ，由圖六下圖之對應關係，當 $\phi' = 32^\circ$ 時， K_p 約為 6.7，將單元編號 6-P1 量測資料由 σ_h' 反推 σ_v 可得表五之推估值及圖七右側一組資料，顯示推估之 σ_v 亦介於圖二(a)及(b)剛性及柔性牆之間，此結果與4.1節一致，因此假設 $\delta' = \phi'$ 當可成立。

五、土壓力與擋土壁壁體變位之關係

本案例基地開挖深度約23.4m至24.0m，由圖三至圖五及圖八至圖十之 R_a 及 R_p 的極小或極大值出現時機來看，位於最終開挖面以下之主動側(圖四、圖五)及被動側(圖八至圖十)儀器而言，其極值大致均出現在開挖到底且底版澆置之前，而圖九編號 5-P1之極值出現在開挖完成後約三個多月，乃因底版澆置時機延後所致。而最終開挖面以上之主動側(圖三)儀器，極值則出現在底版結構澆置完成以後。將六個壁體單元共十六組土、水壓計之 R_a 及 R_p 達極值時所對應的壁體內傾度管側向位移整理後示於圖十一，左圖中主動側位於最終開挖面以下之各組儀器中，單元編號 6-A2 所對應之側向變位較其他各組為大，且其 R_a 極值亦最小。至於最終開挖面以上之四組儀器，由於受支撐系統加壓、解壓或建物保護擠壓灌漿之影響，其 R_a 極值與壁體側向位移並無一定關係。因此針對主動側最終開挖面以下之部份而言，從本案例中得到：當主動側儀器所在位置對應壁體側向位移達20mm時，主動土壓力得以完全發揮。而右圖中被動側部份，由於受區內降水時機及儀器所在土層或底版澆置時機等因素之影響，目前尚看不出 R_p 極值與壁體側向位移之關係。為了更方便瞭解十六組 R_a 及 R_p 極值與土壤性質及深度之關係，茲以圖十二顯示最後結果。

六、結論

綜觀所有資料，主動側有兩組 R_a 極值小於理論值，而被動側有一組 R_p 極值大於理論值，作者認為此乃因主動側 σ_v 被高估、而被動側 σ_v 被低估所致，其他各組則因裝設位置所對應的側向變位尚不足以完全發揮到 K_a 或 K_p ，而此等超出理論極限值之數據，在台北捷運系統板橋線亦有數組足以佐證及 Moh and Hwang (1993) 亦有報導。誠然，擋土壁於施作期間受多項施工因素(如穩定液、壁溝底淤泥、水中混凝土澆置…等等)及施工方式(如順打、半逆打工法)所影響，而土壓力係數與壁體變位及施工時程均有密切關聯，本文之結論在設計階段估算垂直向總壓力 σ_v 時，仍以圖二(a)模式運算，亦即 σ_v 等於覆土壓 γH ，但

必須將壁體與土壤間的摩擦效應納入考量，而針對軟弱至中等堅實土壤時，可假設 $\delta' = \phi'$ ，此結論與 Moh and Hwang 於1993所建議者相同。

誌謝

亞新工程顧問公司受台北市政府捷運工程局聘為大地工程專業顧問，參與本工程之設計審查及施工諮詢。本文承蒙台北市政府捷運工程局惠准發表，並承九泰營造工程有限公司提供詳盡資料，在此謹誌謝忱。

參考文獻

亞新工程顧問公司(1995)「台北都市區捷運系統新店線CH219標中正紀念堂站及中正紀念堂站至古亭市場站間隧道工程觀測結果總報告」

Z.C. Moh and R.N. Hwang (1993) "Earth Pressures on Walls of A Deep Excavation", Proc, 3rd Int. Conf. on Case Histories in Geot. Engrg, St. Louis, Missouri, USA

Caquot, A., and Kerisel, J.(1948) "Tables for the Calculation of Passive Pressure, Active Pressure, and Bearing Capacity of Foundations", Gauthier - Villars, Paris.

表一 CH219標簡化地層與地層參數一覽表

次層	深度 (m)	土壤分類	N值 (打擊數/30cm)	rt (t/m ³)	Wn (%)	Ip (%)	\bar{c} (t/m ²)	$\bar{\phi}$ (deg)	Su (t/m ²)
6	0.0-6.5	CL	5	1.90	32.0	15	0	32	1.0
5	6.5-16.0	SM	15	2.00	21.0	-	0	30	-
4	16.0-21.5	CL	10	1.95	30.0	13	0	30	7.5
3	21.5-30.0	SM	18	2.00	24.0	-	0	32	-
2	30.0-34.0	CL	21	1.95	24.0	10	0	32	17.0

表二 主動側土/水壓計裝設一覽表及Ra極值

單元-儀器編號	裝設深度(m)	土壤分類	Ra
1-A1	18.3	CL	0.24
1-A2	29.4	SM	0.38
2-A1	17.9	CL	0.31
2-A2	29.6	SM	0.38
3-A1	28.7	SM	0.38
4-A1	30.0	SM	0.40
5-A1	16.0	SM	0.48
5-A2	31.9	CL	0.49
6-A1	16.6	CL	0.39
6-A2	27.7	SM	0.22
6-A3	32.9	CL	0.32

表三 被動側土/水壓計裝設一覽表及Rp極值

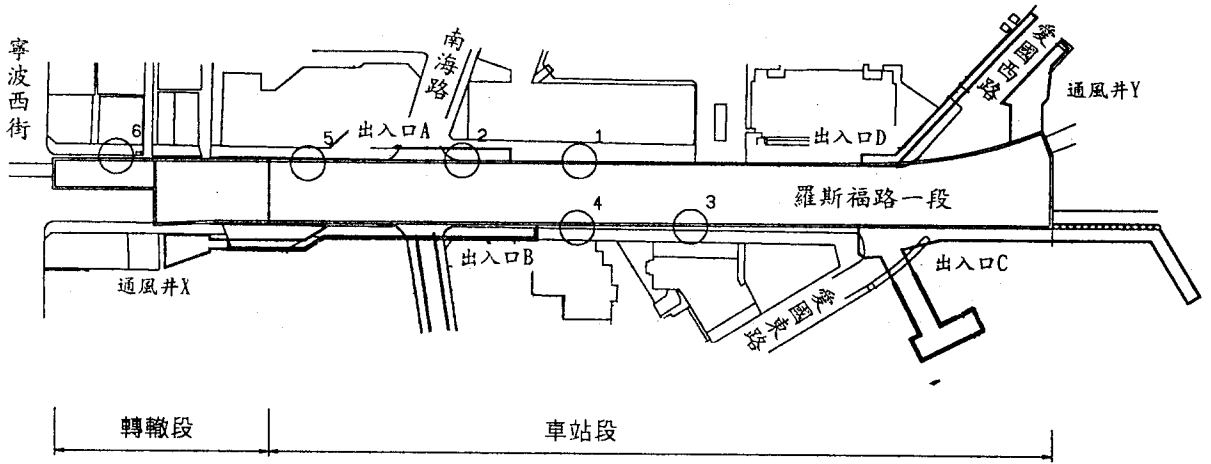
單元-儀器編號	裝設深度(m)	土壤分類	Rp
1-P1	29.4	SM	2.01
2-P1	29.6	SM	3.66
3-P1	28.7	SM	2.65
5-P1	31.9	CL	5.80
6-P1	32.9	CL	36.88

表四 主動側垂直總壓力推估值(t/m²)

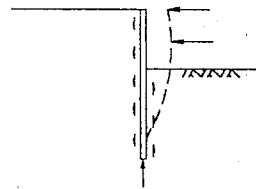
深度(m)	由 σ_n' 推估	剛性且光滑擋土壁	柔性擋土壁
18.3	34.8	35.8	-
24.0	-	47.1	24.1
27.7	48.5	54.5	30.9

表五 被動側垂直總壓力推估值(t/m²)

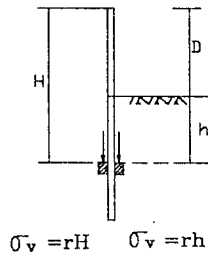
深度(m)	由 σ_n' 推估	剛性且光滑擋土壁	柔性擋土壁
23.4	-	0	22.9
30.0	-	13.2	36.1
32.9	22.0	18.9	41.8



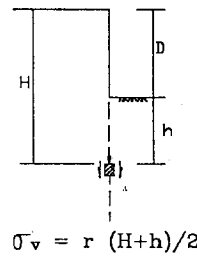
圖一 工區平面位置及儀器單元示意圖



Braced Excavation



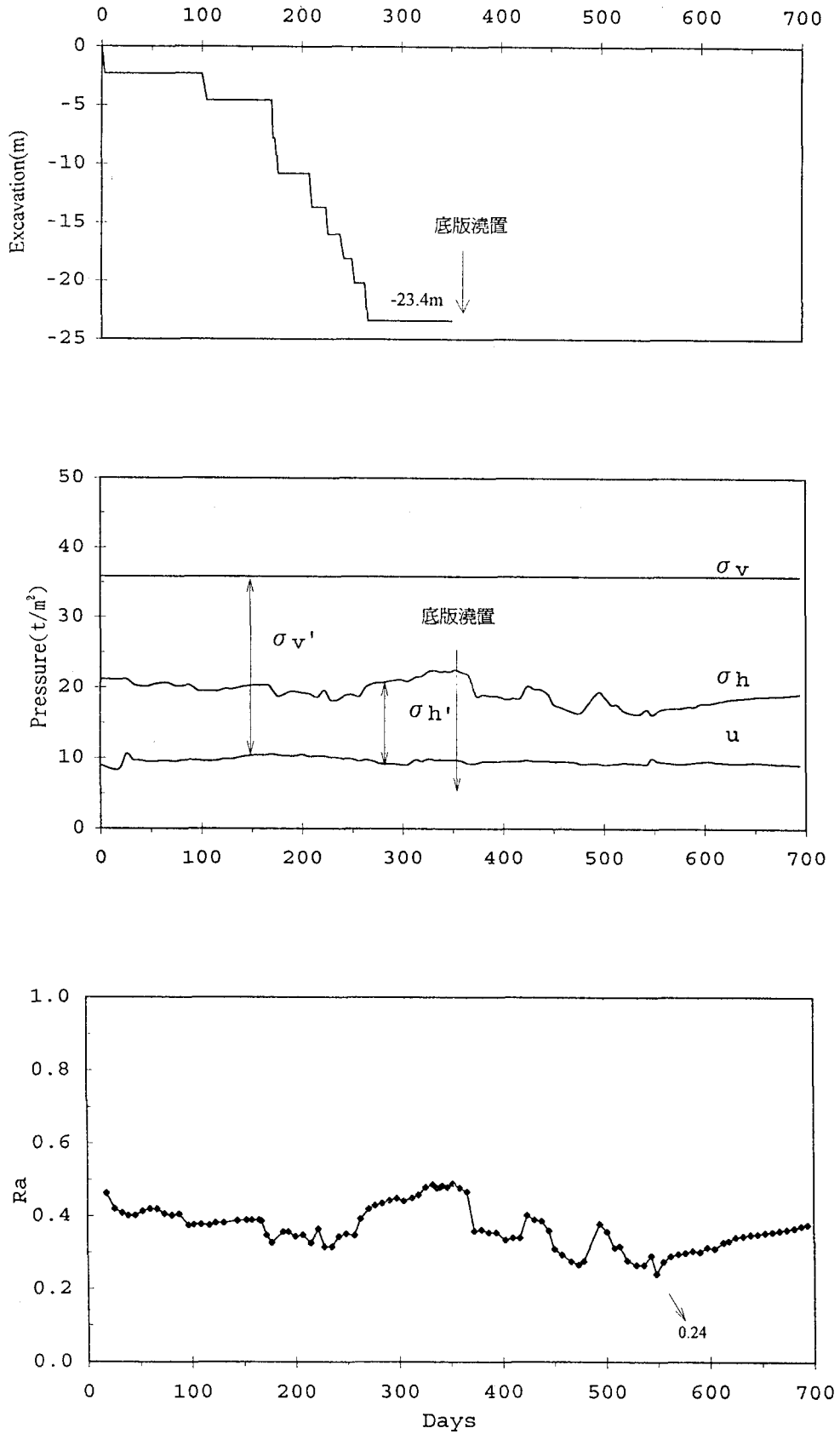
(a) Rigid Frictionless Wall



(b) Flexible Wall

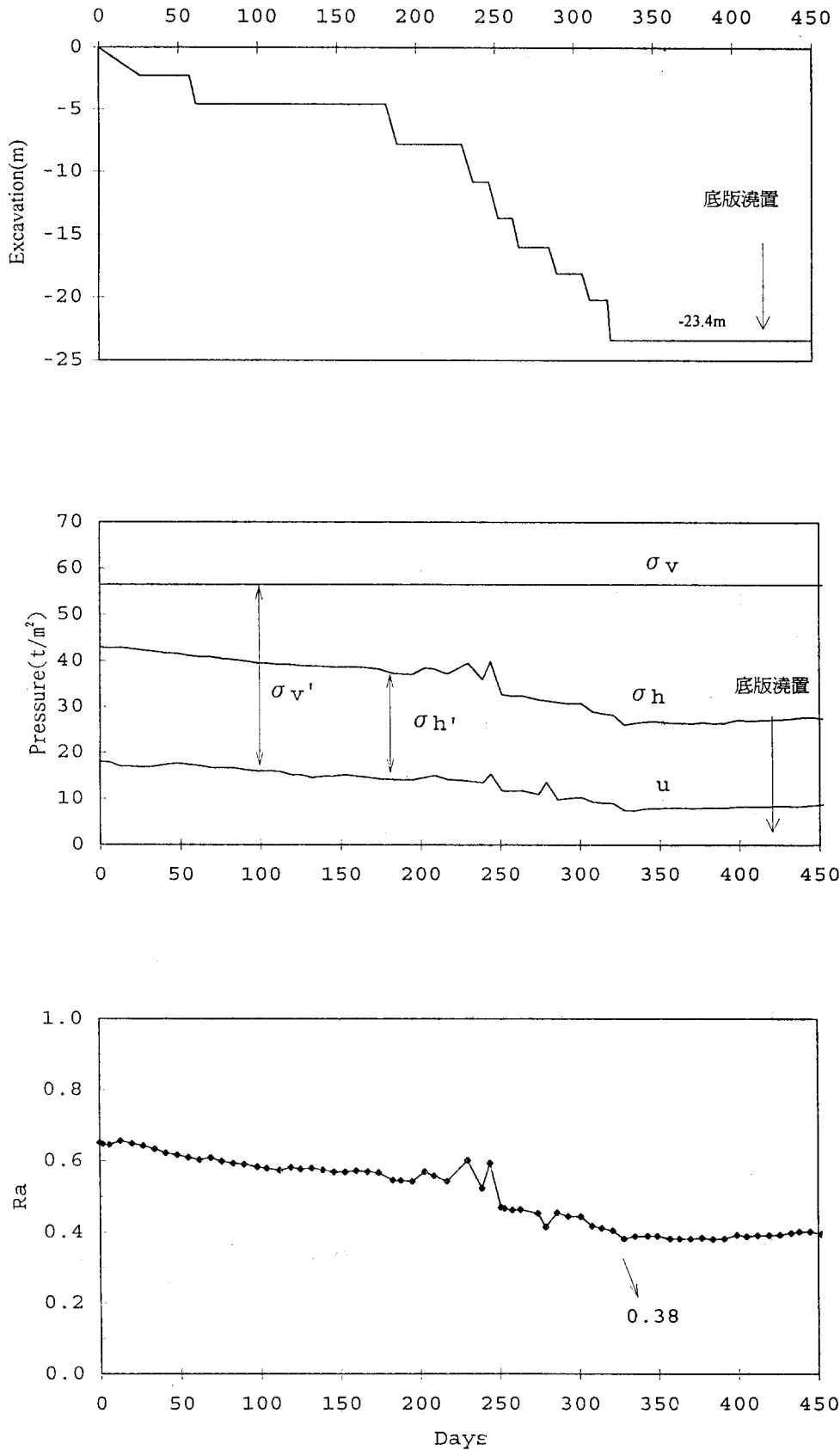
圖二 垂直向壓力與擋土壁型式關係示意圖

Section 1-A1 (GL.-18.3m)



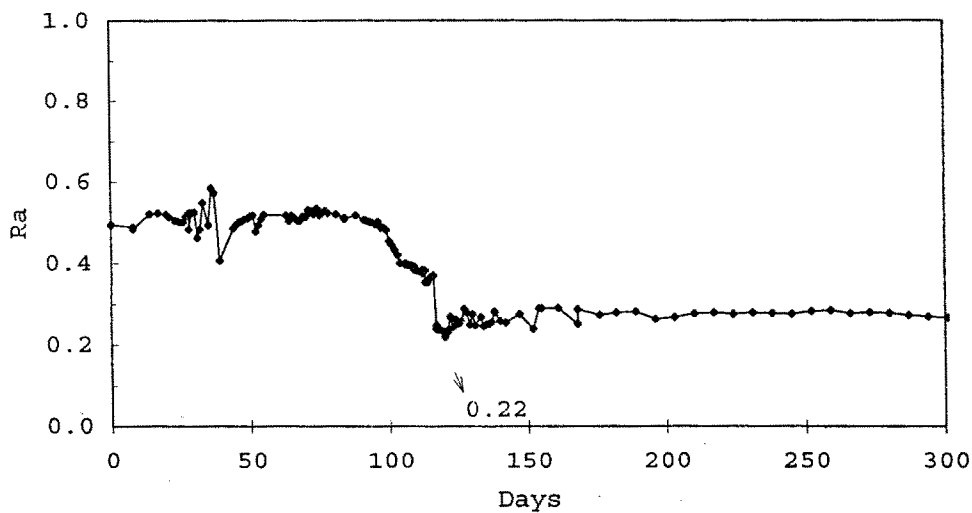
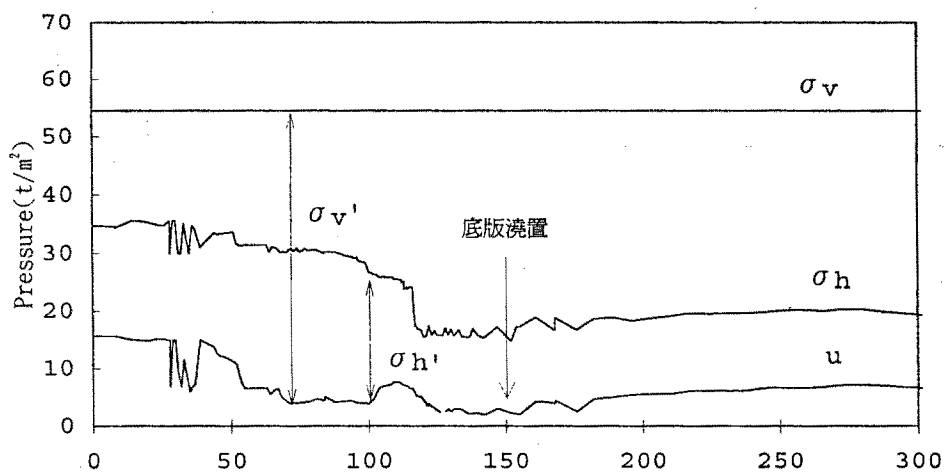
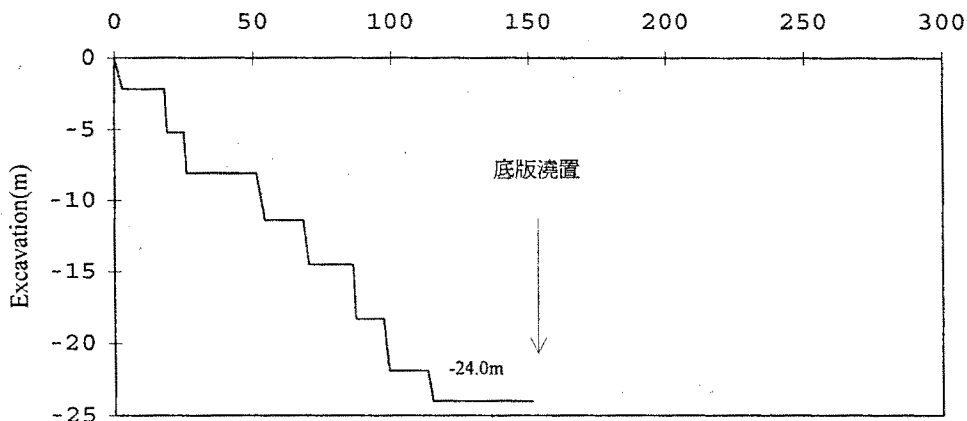
圖三 單元編號1-A1主動側儀器量測值與開挖時程關係圖

Section 3-A1(GL.-28.7m)

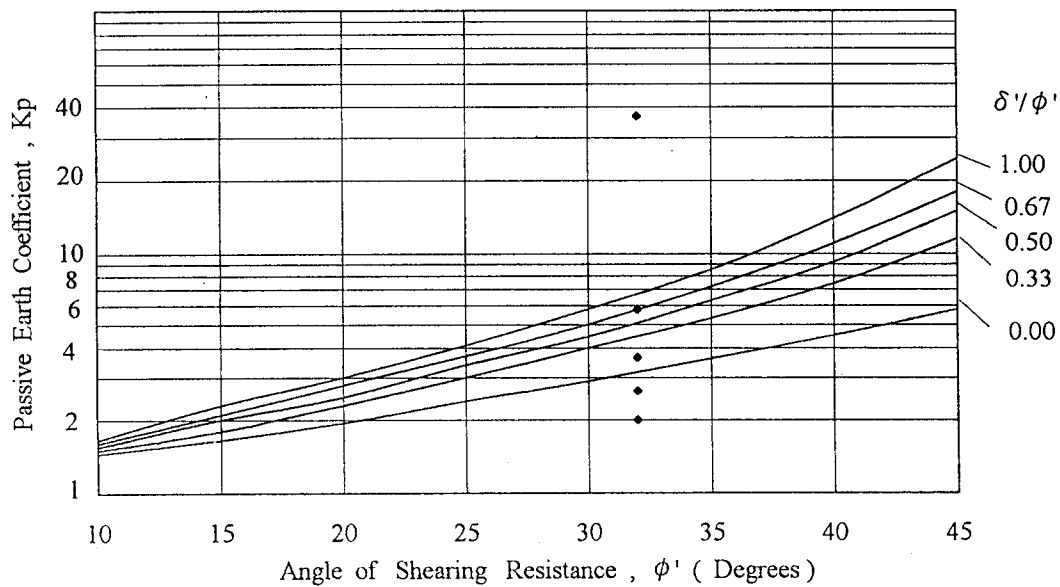
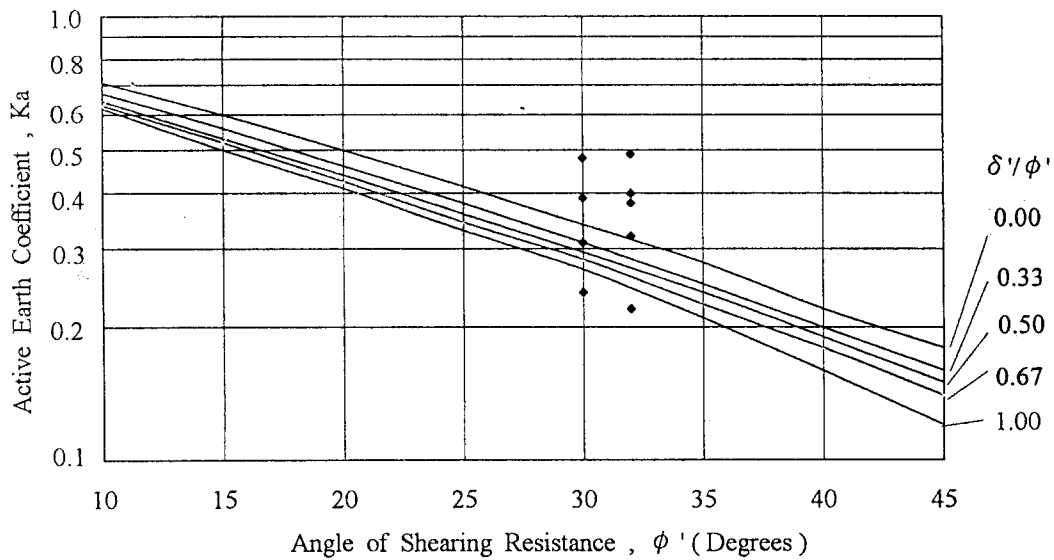


圖四 單元編號3-A1主動側儀器量測值與開挖時程關係圖

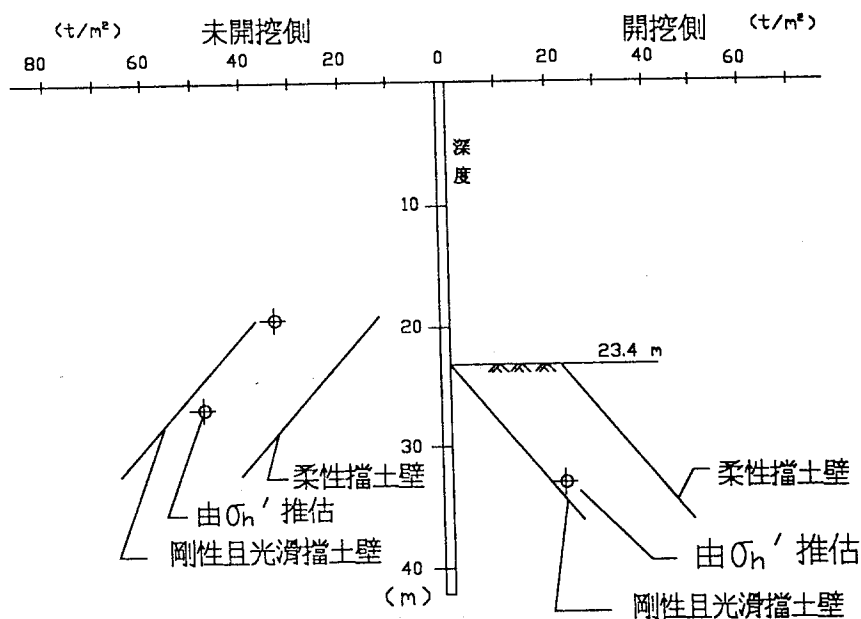
Section 6-A2(GL.-27.7m)



圖五 單元編號6-A2主動側儀器量測值與開挖時程關係圖

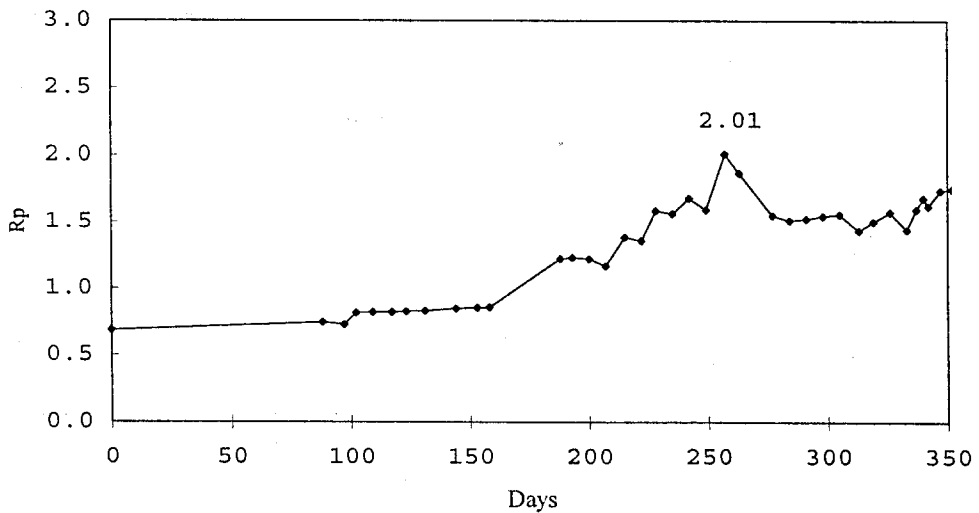
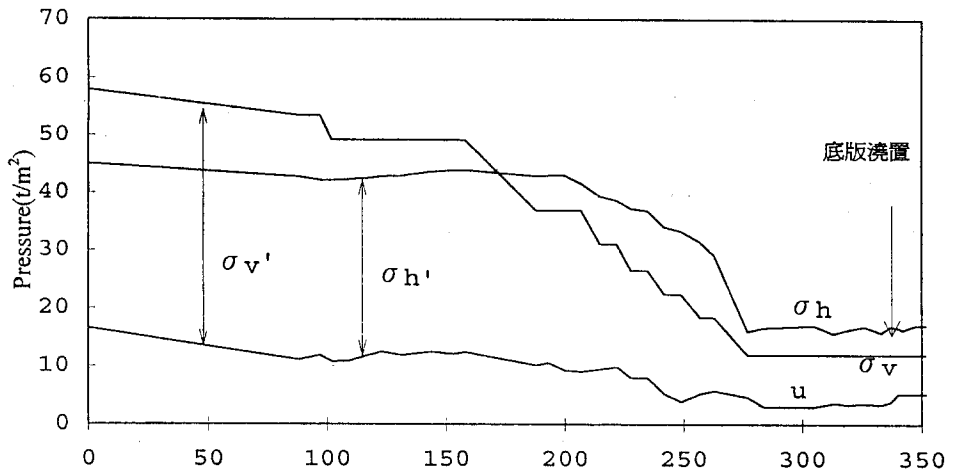
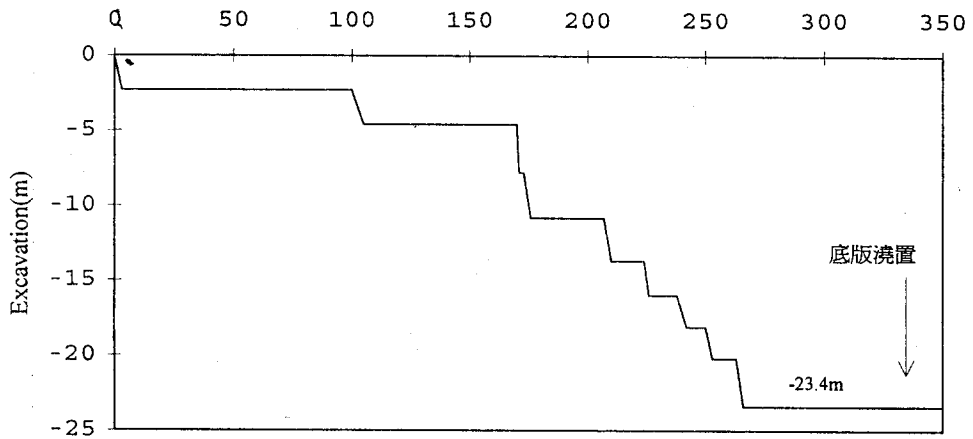


圖六 土壓力係數與土壤內摩擦角理論曲線



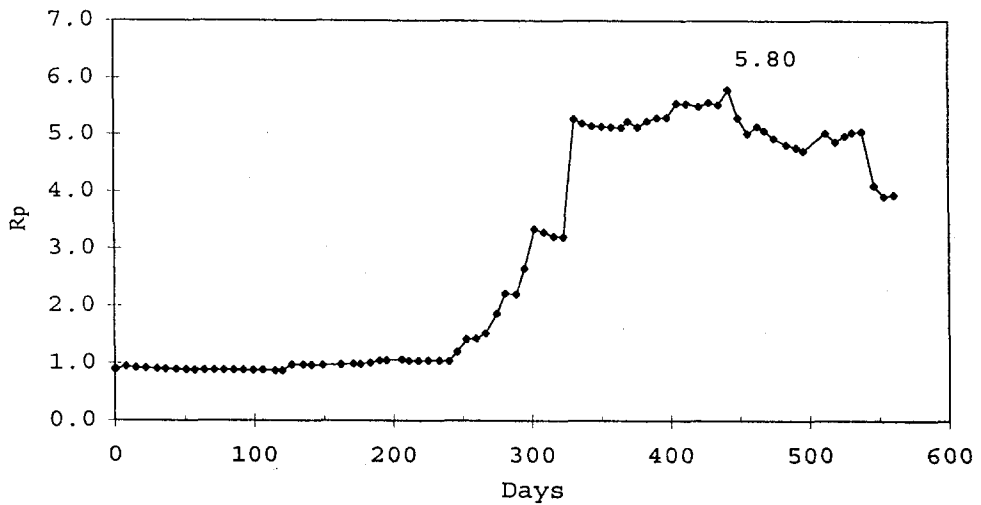
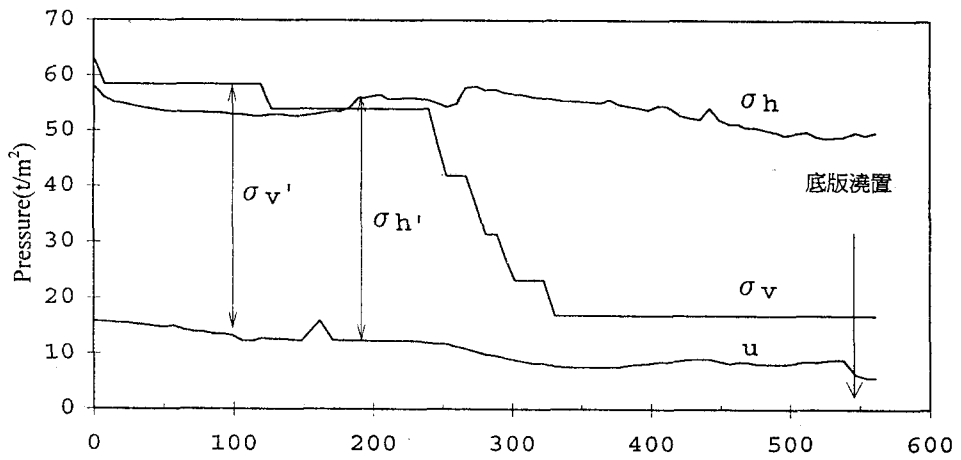
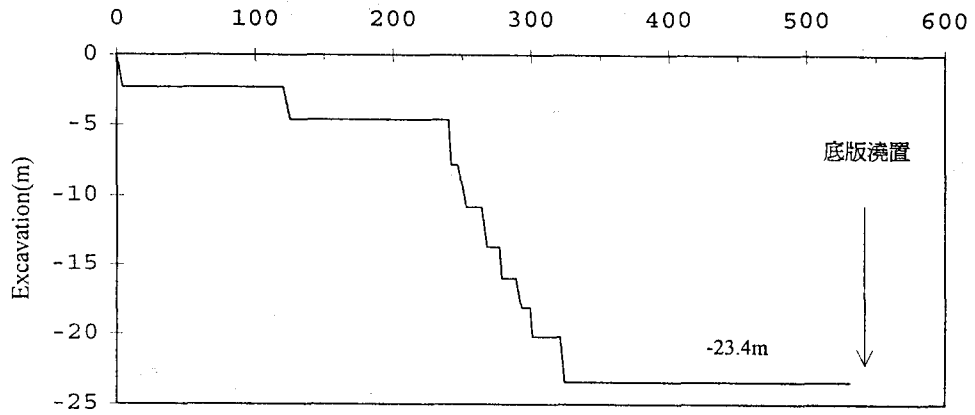
圖七 垂直向壓力推估值與擋土壁型式關係圖

Section 1-P1(GL.-29.4m)



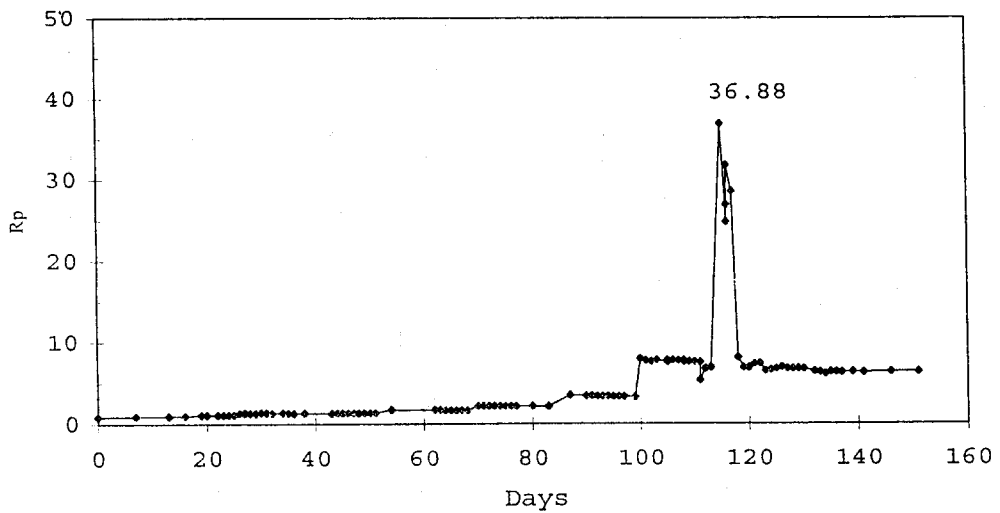
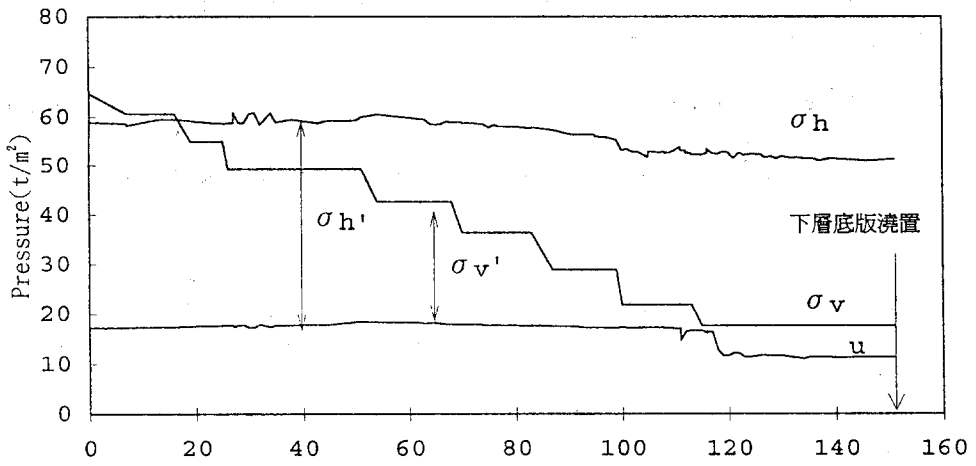
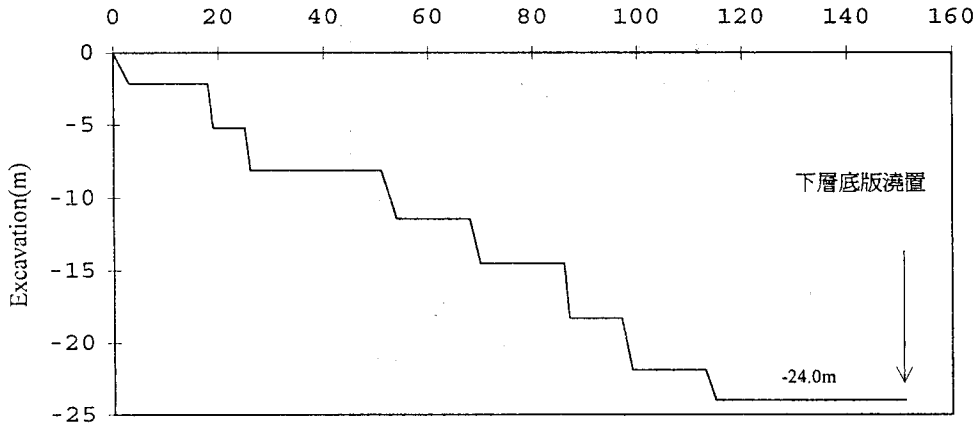
圖八 單元編號1-P1被動側儀器量測值與開挖時程關係圖

Section 5-P1(GL.-31.9m)

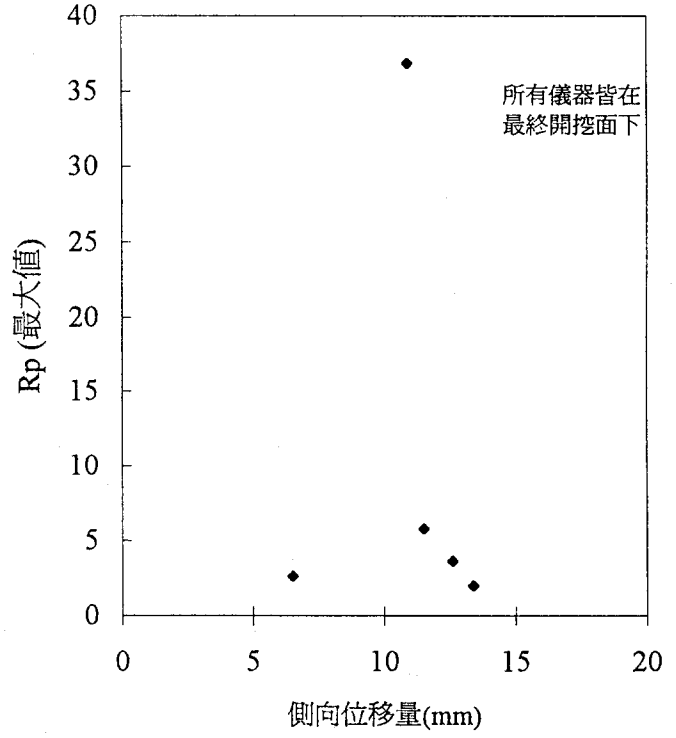
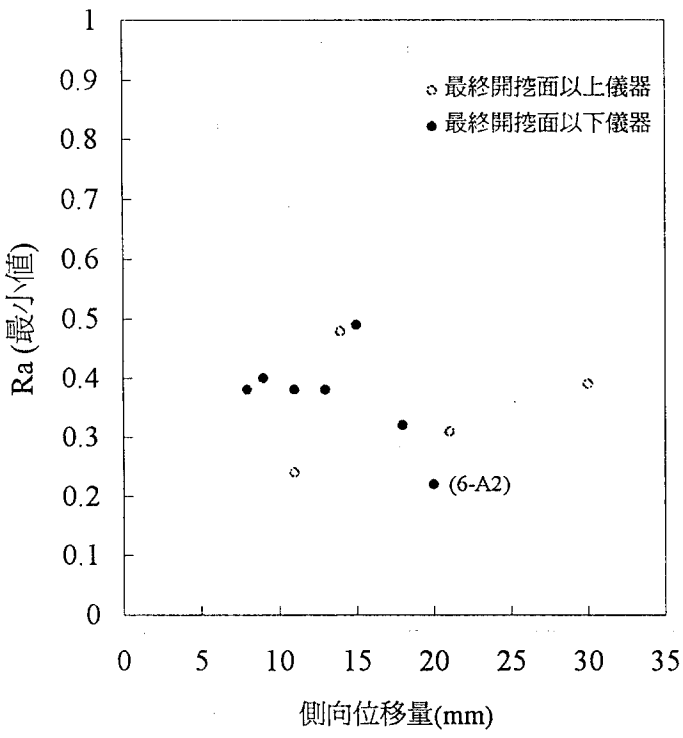


圖九 單元編號5-P1被動側儀器量測值與開挖時程關係圖

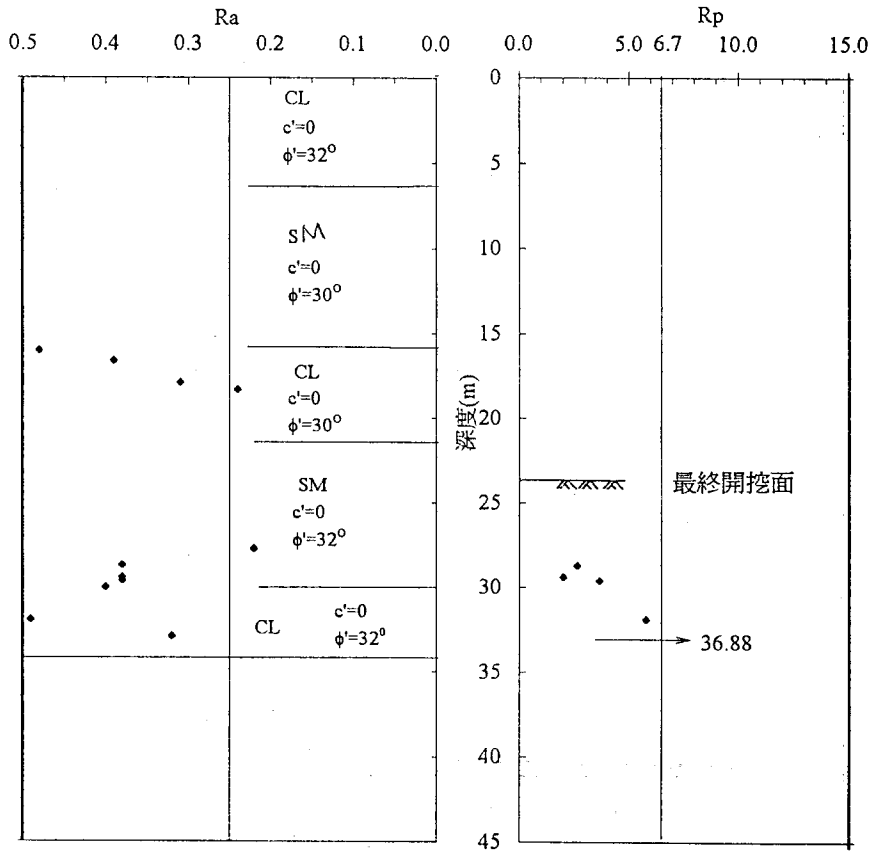
Section 6-P1(GL.-32.9m)



圖十 單元編號6-P1被動側儀器量測值與開挖時程關係圖



圖十一 各組 Ra 及 Rp 與壁體側向位移關係圖



圖十二 各組 Ra 及 Rp 與深度之關係圖