

由預壓觀測結果探討台北盆地

北沿軟弱地層的壓密行爲

CONSOLIDATION BEHAVIOR OF SOFT CLAY  
DEPOSIT AT THE NORTH BOUND OF TAIPEI  
BASIN BASED ON MONITORED RESULT OF  
PRELOADING

黃俊青，張培義，杜保興

C.C. Huang, P.Y. Chang and P.H. Toh

原著載於台北捷運工程研討會,1993年

*Reprinted from Proceedings of  
Symposium of Taipei Metropolitan Rapid Transit Systems,  
Vol.C, pp.34-45, Taipei, 1993*

# 由預壓觀測結果探討 台北盆地北沿軟弱地層的壓密行為

黃俊青—亞新工程顧問公司工程師

張培義—台北市政府捷運局北區工程處副處長

杜保興—亞新工程顧問公司捷運專案(一)副理

## 摘要

台北捷運淡水線地面段的R28、R29、R30及R32等車站座落於關渡平原北緣與淡水河洪泛台地，由於地質軟弱，採淺基礎設計的車站預料將發生過量沉陷，故以填土預壓工法先行地質改良，打設垂直排水帶加速地層排水。本文比較各站的實測沉陷行與分析計算所得的預估沉陷行為，顯示由單向度壓密試驗結果於有效垂直應力變化範圍選取代表性之壓密參數，計算預估的沉陷行為與實測情形大致符合，唯選擇參數時應細察土壤物理性質，確定試體與主要壓密地層一致，且應考慮基地地層過去所受之荷重歷史及客觀環境之特性與變化。本文亦彙整各車站土層壓縮性質於有效覆土壓力下之土壤壓密參數( $m_v$ 、 $e_v$ )與黏土含量、自然含水量、液性限度等物理性質之關係，發現其相關性甚佳，可供將來本區類似土層進行沉陷分析時選用壓密參數之檢核參考。

## Consolidation Behavior of Soft Clay Deposit at the North Bound of Taipei Basin Based on Monitored Result of Preloading

C. C. Huang — Engineer, Moh and Associates, Inc.

P. Y. Chang — Deputy Director, NDPO, Department of Rapid Transit Systems, Taipei Municipal Government

P.H. Toh — Deputy Project Manager, GESC I, Moh and Associates, Inc.

## Abstract

Stations R28, R29, R30 & R32 of the at-grade section of Tamshui Line, TRTS, are located either at the northern rim of Kuandu Plain or the flood terrace of Tamshui River. Due to the existence of thick soft clay deposit, the station structures on shallow foundations are expected to experience excessive settlement. Preloading with surcharge and vertical drains were employed to improve the ground within a limited period. This paper compares the result of field monitoring with analytical prediction to indicate that settlement prediction with consolidation parameters obtained from one-dimensional consolidation test, corresponding to the average values measured for stress range imposed, agrees reasonably well with the field data, provided that the physical properties of the testing samples are closely examined to be representative of the compressive stratum of interest. The stress history of the ground and environmental changes, if any, should also be considered. Consolidation parameters ( $m_v$ ,  $c_v$ ) from laboratory testing are plotted against relevant physical properties (clay content, natural water content, liquid limit) to indicate some correlations which could be helpful reference for selecting consolidation parameters for similar subsoil.

## 壹、前言

台北捷運淡水線地面段的R28、R29、R30及R32車站座落於大台北盆地北側的關渡平原北緣與淡水河洪泛台地(如圖1所示)，各站均為單層至三層之鋼筋混凝土結構，重量不大，故採淺基礎設計(擴展基腳及小部份筏基)以節省造價。然而由於各站基地均含有厚度不等(十餘公尺至三十公尺)的軟弱粉質黏土層，雖然結構及填土之荷重有限，預期仍將造成十餘公分不等之過量沉陷，故設計以填土預壓工法先行改良地質，期能降低車站結構完成後之沉陷量至結構容許範圍以內(總沉陷量小於10公分，差異沉陷小於1/250)。限於淡水線的通車時程及車站結構體與相關設施施工所需之時間，須於四個月內完成填土預壓工作，並達到90%以上的壓密度，因而設計垂直排水帶以加速地層排水、縮短預壓期間，並以沉陷板及水壓計等儀器量測追蹤改良成效。

## 貳、基地土層及工程概述

### 一、基地土層概述

R28至R30等三個車站位於台北盆地北緣，為關渡平原之一部份，地勢低平，平均地表高程約為海拔5公尺，地下水位甚高，約在地表下0至1.2公尺範圍。本區地層大致包含(一)覆蓋表土層；(二)沉積層：以粉質黏土或黏土質粉土為主，厚度在11公尺至31公尺之間，標準貫入試驗N值在5以下，屬極軟弱至軟弱稠度之壓縮層，下方或有粉土質砂層；(三)安山岩塊堆積層夾崩積岩層，偶夾有土層，N值變化甚大，低者僅8，高者大於100。

淡水河與大屯火山群之間狹長洪泛平原，地層分佈較不規則，就R32車站所在基地而言，表土層以下為沖積層，包括厚約10至16公尺之粉質黏土或粘土質粉土，以及厚約2至9公尺不等的粉土質砂層；沖積層以下為崩積層、安山岩塊或風化粉砂岩。

以R28及R29車站為例，基地土層柱狀圖、標準貫入試驗N值、自然含水量、阿太堡限度、粒徑分佈與體積壓縮係數隨高程變化情形如圖2及圖3所示。

### 二、工程概況

各車站地質改良工程依序為整地、鋪設砂毯、打設排水帶、填土預壓及解壓等五個步驟，垂直排水帶依規範為塑膠浪形板外包不織布濾層，寬十公分，厚約三至六公厘，以導桿直接壓入地層；排水帶打設係採正三角形分佈，其間距於R28、R32車站為1.8公尺，R29、R30車站則為2.0公尺，打設深度依各站壓縮土層厚度而不同，由R32車站的18公尺至R28車站的31公尺不等，大都穿過壓縮性高之粉質黏土層而達其下方之粉質細砂層、風化砂岩層或安山岩塊層。依原設計預定填土靜置期間為四個月，實際各站土方工程施工狀況不一致，預壓靜置時間依實際土層沉陷情形而調整為二至五個月不等。

為追蹤壓密改良成效而於現場裝設的觀測儀器有氣壓式水壓計及沉陷板兩項，四個車站的裝設平面配置大致相似，以R28車站之配置示意如圖4。

### 參、儀器觀測結果整理及分析

填土預壓及垂直排水帶的地質改良工法在國外已廣泛應用多年，國內案例則

遠者有1983年台北市基隆河廢河道[1]，近者有台北捷運北投機廠之地質改良，均為規模龐大之工程，相形之下本文所述的四個車站地質改良工程規模較小，使用的觀測儀器也較簡單(只有沉陷板和水壓計兩種)，然而本案R29車站基地含受限水層，對預壓荷重的反應有其特殊之處，另外一些參數相關性的歸納，筆者認為值得提出來報告。

## 一、地下水位、水壓變化及填土沉陷測讀結果

各車站基地在地質鑽探調查階段的地下水位隨地勢高低而起伏，一般均在地表以下0至1.2公尺範圍。經過整地、鋪設砂毯，R28、R30兩站的地下水位趨於均整，平均而言其高程與調查階段差不多。R29車站地層呈現受壓水層現象，水壓計測得的孔隙水壓高於靜態水壓分佈，研判該水壓來自基地北側的丘陵地(大屯山火山群)。查早年在與R29站相鄰的台北捷運北投機廠北側進行地質鑽探時，亦曾發現類似現象。R28及R29兩站基地於填土及排水帶打設前的地下水壓分佈概略如圖5a及圖5b所示，車站整地及土壤改良時程、填土厚度、量測期間測得超額孔隙水壓與地表沉陷量歷時變化如圖6及7所示，其中超孔隙水壓量測值均考慮水壓計沉陷量而加以修正。

R28及R29兩站沉陷量均西側較小、東側較大，與基地黏土層厚度及填土厚度均由西往東增加之特性一致，部份亦受到基地上舊有房屋預壓效應之影響。根據沉陷量估算，各站於結束預壓時的壓密度均達90%以上。

圖6顯示R28車站地層孔隙水壓於排水帶打設期間小幅上升0.5至1噸/平方公尺，排水帶打設完畢後隨即消散，於此期間地表沉陷了三至七公分，推測為排水帶打設擾動或擠壓地層，以及部份砂毯荷重之壓密效應所致。圖7中R29車站部份(中央及西側)水壓計的行為恰與R28相反，在排水帶打設期間孔隙水壓反而下降，研判係排水帶為地層中既有之受限水壓提供了宣洩管道，在無填土拘束而可較自由排水狀況下產生降壓作用。在填土後，排水路徑加長及預壓土層之拘束等因素可能導致超額水壓之積存或受限水壓之恢復，抵消了填土的部份有效應力增量，減低其預壓效應及沉陷量。

圖6及圖7所示最高超額孔隙水壓力僅為填土荷重增量的40%(R29)至70%(R28)，推測除一部份超額孔隙水壓在填土過程中已同步消散外，地層之側向變形可能吸收一部份荷重應力(即現場壓密並非絕對單向度)。R29車站超額孔隙水壓與荷重增量之比特別偏低，應與其地層既有之受壓水層現象有關。另外，同一基地且深度相近的不同水壓計所測超額孔隙水壓增幅不同，應係排水帶與水壓計

的裝設均非完全垂直，在地層中偏斜後排水帶與水壓計之距離遠近不一所致。

## 二、填土沉陷分析

本分析主要目的在以實測沉陷歷時曲線與計算值相印證，以探討計算模式及參數的適當與否。本分析以Boussinesq公式求解荷重應力分佈[2]，以彈性理論計算即時沉陷，以有效應力變化範圍的平均體積變化係數( $m_v$ )計算壓密沉陷，地層變形行為與單向度壓密模式之差異則以Skempton-Bjerrum之建議方式[3]加以修正。推估沉陷與時間的關係曲線時，垂直方向排水之壓密沉陷分析係以Terzaghi的單向度壓密理論為依據，水平方向排水(主要為垂直排水帶範圍內)之分析則採Barron[4]之理論；對於隨時間逐漸增加或減少載重之平均壓密度計算則依Olson[5]之建議方式。

綜合R28、R29兩車站由土壤調查及試驗所獲得之土層資料如N值、自然含水量、阿太堡限度、粒徑分佈及試驗所得 $m_v$ 、 $c_v$ 值(考慮範圍為填土前後有效覆土荷重)隨高程變化之情形(如圖2及圖3)，並考量兩車站實際填土沉陷行為而選用之土壤參數如表一所示。

本分析之沉陷量主要係針對填土層下方之軟弱黏土層，假設所打設之排水帶都能發揮橫向排水功能。由於欠缺水平方向之壓密試驗資料，假設水平方向壓密係數( $c_h$ )與垂直方向( $c_v$ )相等。

R28及R29車站填土沉陷預估曲線與實測值之比較如圖8及圖9所示，其中R28車站之計算沉陷行為與實測值頗為一致，R29車站測實則值僅達計算值之77%，應與上一節所述基地既有之受壓水層現象有關。如將超出靜態分佈之孔隙水壓自有效應力增量中予以扣除，重新計算所得的沉陷量與實測值差距縮小為8%。

檢討本案對R28~R30及R32車站填土沉陷推估值與實測值間之差異，除壓密試驗資料少(每個車站少則一組，最多三組)，取樣之代表性、取樣擾動及試驗誤差等因素造成壓密參數之誤差外，R29車站基地原有房屋之預壓效應及其黏土層之受壓水層現象，應係導致實測沉陷量小於計算值之主因。由於水壓計裝設深度僅達黏土層中央，欠缺黏土層下方及地表層之水壓量測資料，無法詳細描繪及計算受壓水層之水壓分佈變化及其對沉陷之影響。綜合上述可見沉陷分析除需依據各區土層狀況慎選壓密參數外，對於有關基地的荷重歷史，土地利用情況及其他客觀環境之影響，均應詳加考量。一般而言，本文採用垂直應力變化範圍內之平均 $m_v$ 及 $c_v$ 值計算沉陷行為，其結果大致尚稱合理。

### 三、壓密參數與物理性質之相關性

一般土壤調查均會採取較多土樣執行一般物理性質試驗(顆粒分析、自然含水量、塑性、單位重等)，其他強度、壓密試驗則基於成本及時間上之考量，通常數量較少，因此人們頗常嘗試建立壓密參數與物理性質之關係，期能(一)用以檢核特定壓密試驗之結果是否與一般同性質土壤之行為相近；(二)在欠缺壓密試驗資料的情況下，作為初步估計有關壓密參數之依據。壓密沉陷量之計算可採用壓縮指數， $c_c$  (Compression Index) 或體積變化係數， $m_v$  (Coefficient of Volume Change)，理論上每種土壤的 $c_c$ 值應為特定值， $m_v$ 值則隨試驗之有效應力而改變，因此一般文獻如[6]、[7]所提供者均為各類黏土之 $c_c$ 值與物理性質之經驗關係。然而應用 $c_c$ 值須先判斷有效應力是否已超過最大前期應力，將再壓密與正常壓密的沉陷量分別計算；在實務上如應力增加幅度不大，人們頗常取其簡易而使用應力變化範圍內之平均 $m_v$ 來計算沉陷量，因此歸納 $m_v$ 值與物理性質之關係有其實務上之意義。

由本案土壤試驗資料選取各車站於原地有效覆土荷重下體積變化係數繪成與黏土含量、自然含水量之關係如圖10及圖11所示。各圖中數據點經剔除兩個異常數據(一個為有機含量偏高)，再以指數型曲線(Exponential line)求得最合適曲線(Best fitting curve)顯示其相關性尚可。圖12a取原地有效覆土應力下之壓密係數 $c_v$ ，求其與液性限度之關係，相關性尤佳。圖中亦繪示莫若楫博士等[6]于1989年所提出之台北市土層壓密係數與液性限度相關性函數，顯示本案分析對象一台北盆地北緣軟弱地層之壓密係數普遍略高於台北盆地土層之平均值。有關台北盆地土層於不同地理或地質位置所呈現之不同特徵，尚有待更進一步的資料收集、歸納與分析。

圖12b比較本工程與國外經驗[7]求得之壓密係數與液性限度關係，顯示本工程之 $c_v$ 值約在正常壓密範疇，略偏向於再壓密範疇之下限。

### 結論與建議

(一)本案由有效垂直應力變化範圍選取平均體積變化係數( $m_v$ )及壓密係數( $c_v$ )，考慮即時沉陷及主要(primary)壓密沉陷，沉陷量計算結果與實測情形大致尚稱符合，唯除土壤試驗取樣及試驗過程之品質控制外，選擇參數時應注意試驗樣品之物理性質是否與主要壓密地層一致，且應考慮有關基地之荷重歷史及客觀環境之變化，例如大地水位昇降、既有結構物之移除、填土後排水系統之效能及其他施工活動等。

- (二)R29車站基地有受限水層現象，在排水帶打設與預壓期間之孔隙水壓變化與沉陷行為均異於其他車站。爾後遇此情況，宜在自由水層及受限水層頂(或排水砂毯及阻水層底部)各加裝水壓計，在打設排水帶前及早測定初始值，以利追蹤各層水壓之變化行為並評估其對填土預壓工程之影響。
- (三)水壓計之量測結果，受排水距離遠近之影響甚巨。施工中裝設水壓計及鄰近垂直排水帶應力求垂直並維持等距關係。
- (四)由各車站土壤試驗資料歸納原地有效覆土荷重下體積變化係數， $m_v$ 與黏土含量及自然含水量之關係，以及壓密係數， $c_v$ 與液性限度之關係如圖10至圖12b所示，顯示相關性甚佳，在實務上可供將來本區進行沉陷分析選取之檢核參考。

#### 誌謝

本文之製作承蒙台北市捷運局北工處及施工承商榮民工程事業管理處提供資料，並蒙亞新工程顧問公司游協理坤指導及捷運專案一部同仁協助，謹此致謝。

#### 參考文獻

- [1] Z. C. Moh, C. D. Ou, & K. Yu, "Soil improvement with preloading and vertical drains". Third International Geotechnical Seminar : Soil Improvement Methods, Singapore, 1985, pp.137-146.
- [2] H. G. Poulos and E. H. Davis, Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics, John Wiley & Sons, 1974.
- [3] A. W. Skempton and L. Bjerrum, "A contribution to the settlement analysis of foundations on clay," Geotechnique, Vol. 77, 1957, PP. 168-179.
- [4] R. A. Barron, "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", Transactions, ASCE, Vol. 113, paper no.2346, 1948, pp718-754.
- [5] R. E. Olson, "Consolidation under time dependent loading", JGED, ASCE, Vol. 103, No.GT1, Technical Notes, 1977, pp.50-60.
- [6] Z. C. Moh, C. T. Chin and S. M. Woo, "Engineering correlations for soil deposits in Taipei", Journal of Chinese Inst. of Engineers, Vol. 12, No.3, 1989, pp.273-283.
- [7] U. S. NAVY, Soil Mechanics, NAVFAC Design Manual DM-7.1, 1982, pp.143-144.

表一 R28及R29車站分析用簡化土層狀況表

土壤層次	高程公尺	土壤描述	$\gamma_t$ t/m <sup>3</sup>	E t/m <sup>2</sup>	$\nu$	A	$m_v \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /t	$c_v \times 10^{-3}$ cm <sup>2</sup> /sec
R28車站:SP1								
SF	105.44 102.8	回填土層	1.85	1000	0.4	0.8	5	2.98
I	85.3	黏土質粉土或粉質黏土，低至中塑性	1.8	1000	0.4	0.8	42	2.98
II	76	黏土質粉土或粉質黏土，低至中塑性	1.8	1400	0.4	0.8	34	2.98
III	71.5	粗中細砂，具緊密至非常緊密程度	2	12000	0.3	1	0	0
IV		安山岩碎屑層含砂或砂質粉土，礫石	2	—	—	—	—	—
R29車站:SP6								
SF	104.35 103.35	回填土層	1.85	800	0.4	0.8	5	4.76
I	95.65	黏土質粉土或粉質黏土，低至中塑性	1.8	880	0.4	0.8	50	4.76
II	88.2	黏土質粉土或粉質黏土，低至中塑性	1.8	1200	0.4	0.8	40	4.76
III	82.7	粗中細砂，中等緊密程度，含貝屑、腐木	1.9	5000	0.3	1	0	0
IV		高度風化安山碎屑層或砂岩層	2	—	—	—	—	—

註：1.表中高程係以海平面高程定為100公尺表示。

2.表中 $\gamma_t$ 為土壤總單位重，E為土壤彈性模數， $\nu$ 為柏松比，A為孔隙水壓參數， $m_v$ 為體積變化係數， $c_v$ 為壓密係數。

表一 R28及R29車站分析用簡化土層狀況表

土壤層次	高程公尺	土壤描述	$\gamma_t$ t/m <sup>3</sup>	E t/m <sup>2</sup>	v	A	$m_v \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /t	$c_v \times 10^{-3}$ cm <sup>2</sup> /sec
R28車站:SP1								
SF	105.44 102.8	回填土層	1.85	1000	0.4	0.8	5	2.98
I	85.3	黏土質粉土或粉質黏土，低至中塑性	1.8	1000	0.4	0.8	42	2.98
II	76	黏土質粉土或粉質黏土，低至中塑性	1.8	1400	0.4	0.8	34	2.98
III	71.5	粗中細砂，具緊密至非常緊密程度	2	12000	0.3	1	0	0
IV		安山岩碎屑層含砂或砂質粉土，礫石	2	—	—	—	—	—
R29車站:SP6								
SF	104.35 103.35	回填土層	1.85	800	0.4	0.8	5	4.76
I	95.65	黏土質粉土或粉質黏土，低至中塑性	1.8	880	0.4	0.8	50	4.76
II	88.2	黏土質粉土或粉質黏土，低至中塑性	1.8	1200	0.4	0.8	40	4.76
III	82.7	粗中細砂，中等緊密程度，含貝屑、腐木	1.9	5000	0.3	1	0	0
IV		高度風化安山碎屑層或砂岩層	2	—	—	—	—	—

註：1.表中高程係以海平面高程定為100公尺表示。

2.表中  $\gamma_t$  為土壤總單位重，E為土壤彈性模數，v為柏松比，A為孔隙水壓參數， $m_v$ 為體積變化係數， $c_v$ 為壓密係數。

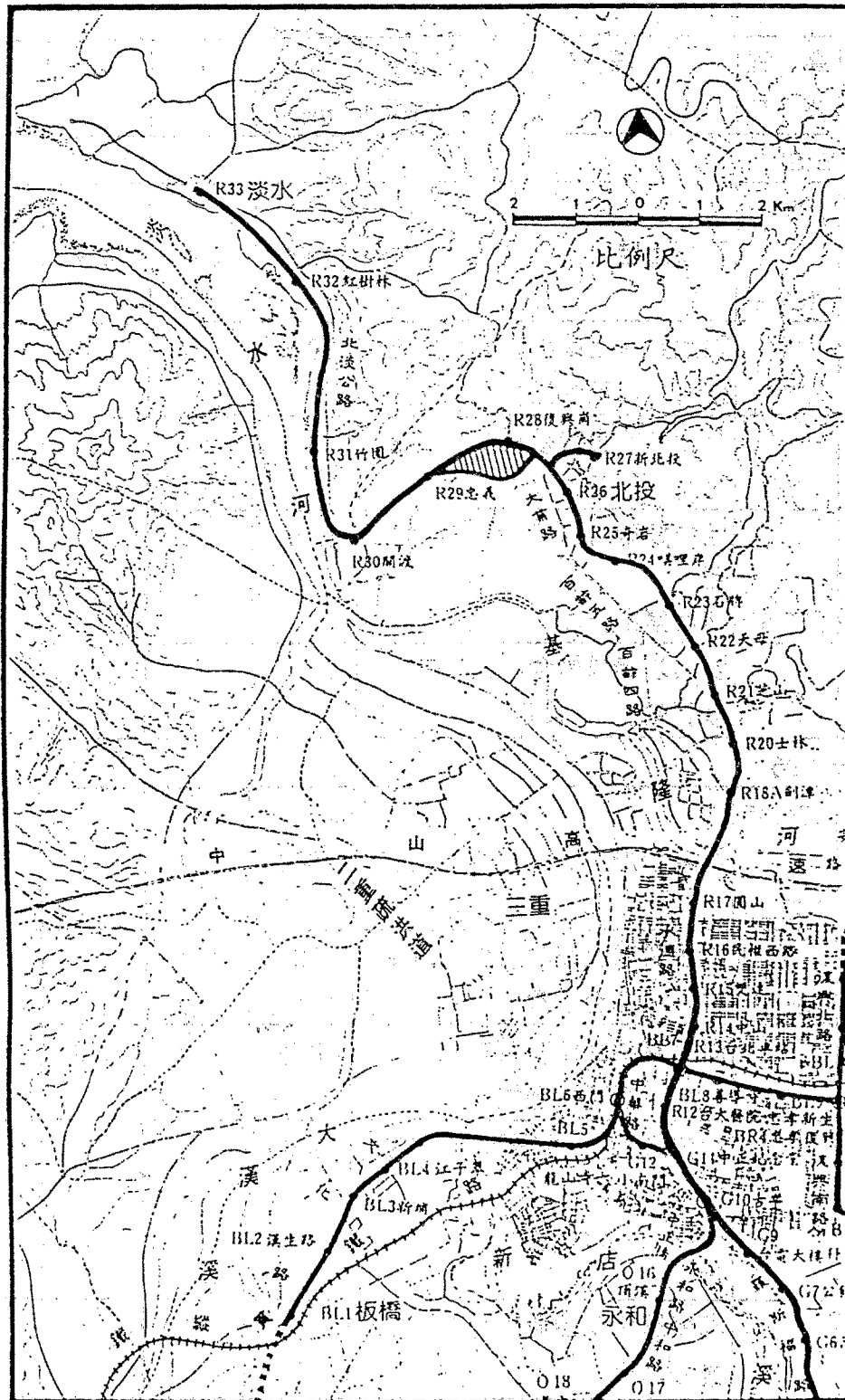


圖 1 台北捷運淡水線 R28、R29、R30 及 R32 車站基地平面位置圖

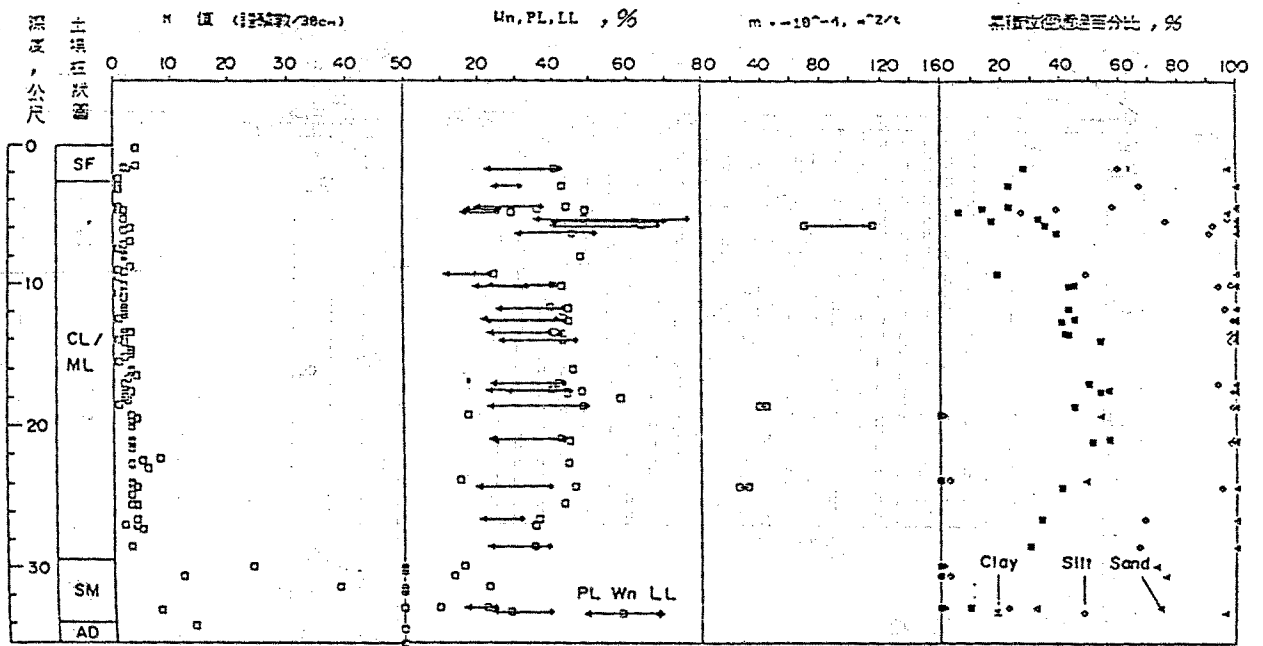


圖 2 R28 車站基地土層N 值、自然含水量、阿太堅限度、粒徑分佈與體積壓縮係數隨高程之變化圖

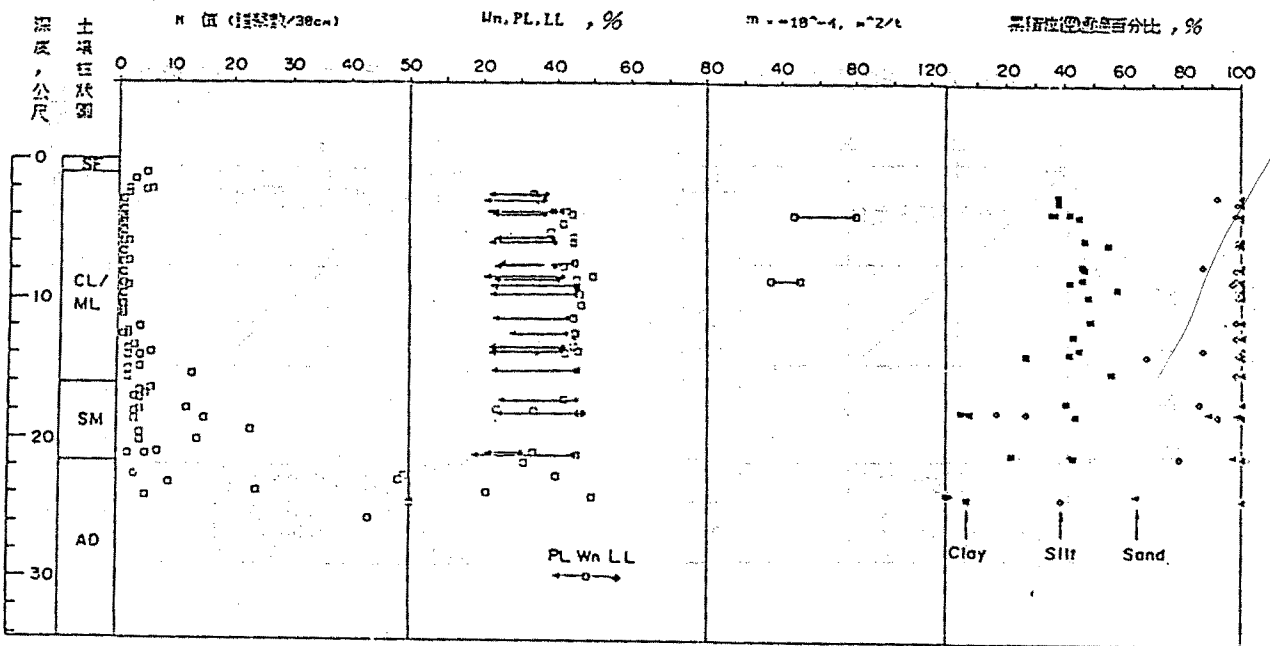
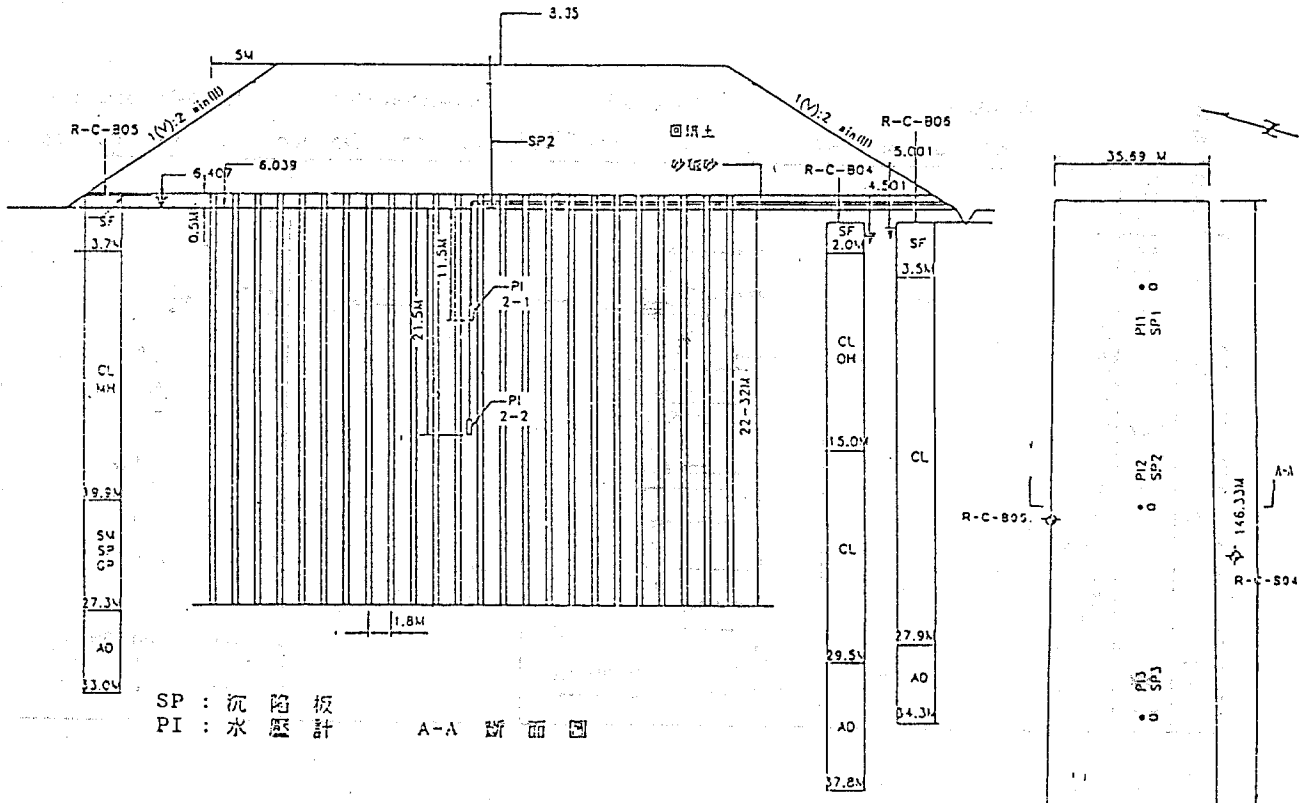


圖 3 R29 車站基地土層N 值、自然含水量、阿太堅限度、粒徑分佈與體積壓縮係數隨高程之變化圖



SP : 沉陷板  
PI : 水壓計  
A-A 剖面圖

基地平面圖

註 1 排水帶打設深度, 數量, 間距等資料係根據廠商提供之報表。  
2 SP1 4.5公尺範圍內之排水帶(19支)平均打設深度為 31.179M。  
SP2為 29.458M, SP3間為 23.260M

圖 4 R28 車站基地填土預壓地質改良工程(含儀器裝設)示意圖

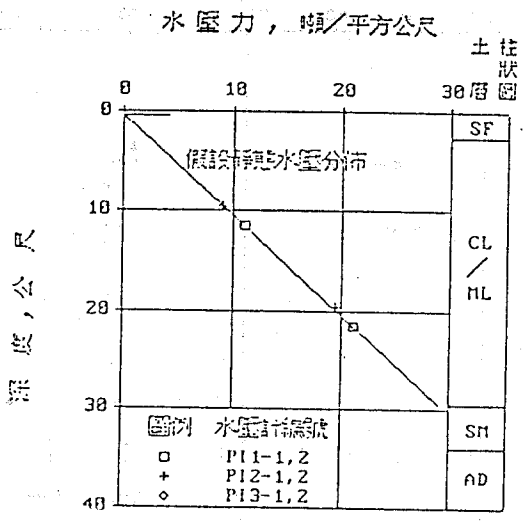


圖 5a R28 車站排水帶打設前地下水壓分佈圖

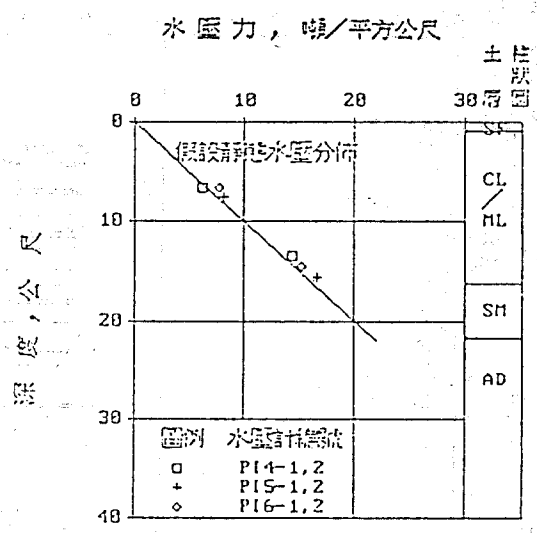


圖 5b R29 車站排水帶打設前地下水壓分佈圖

頂土厚度 (公尺)

沉陷量 (公厘)

超額孔隙水壓 (張/平方公尺)

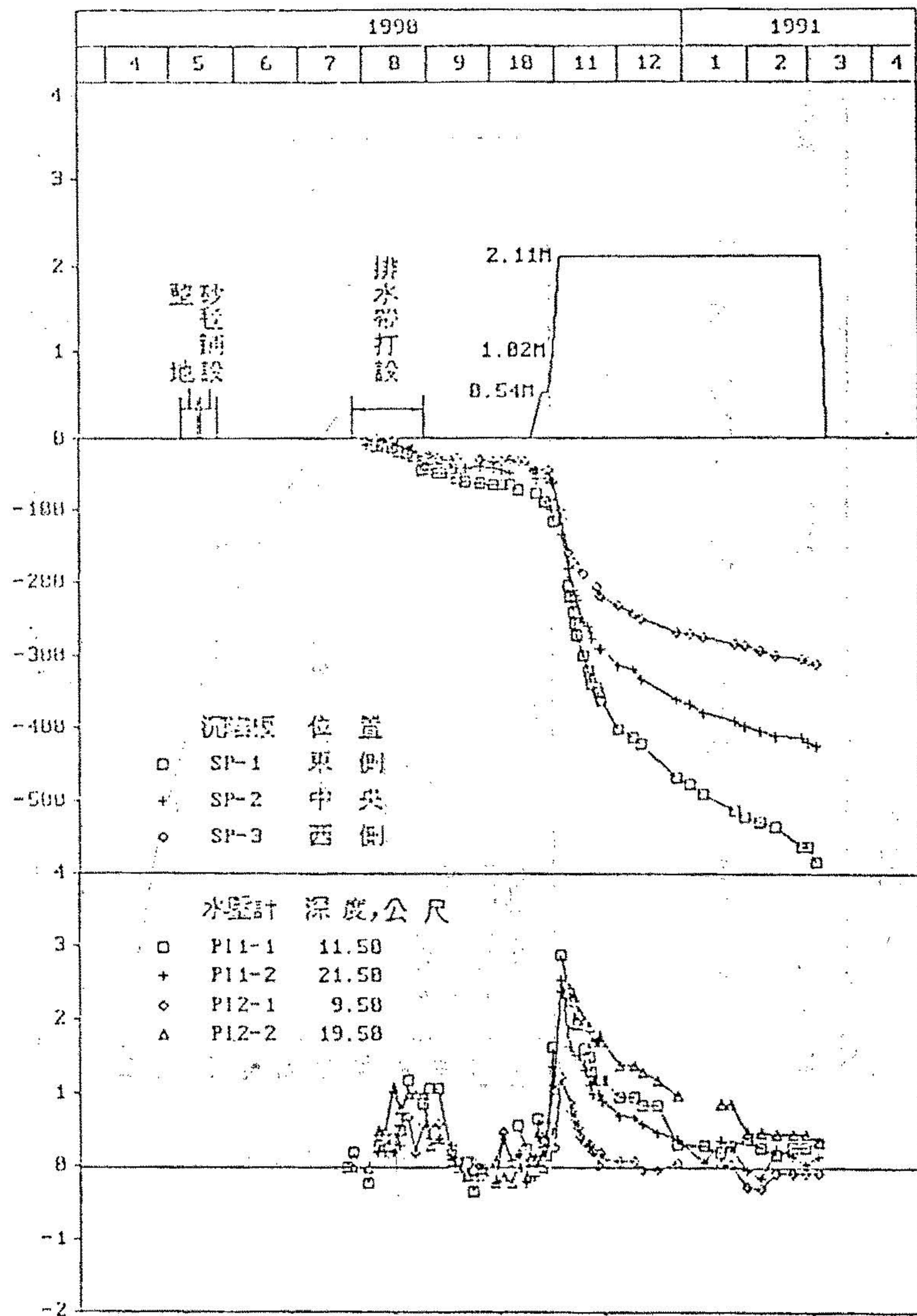


圖 6 R28 車站頂土厚度、超額孔隙水壓暨地表沈陷量歷時變化圖

頂土厚度 (公尺)

沉陷量 (公厘)

超額孔隙水壓 (張/平方公尺)

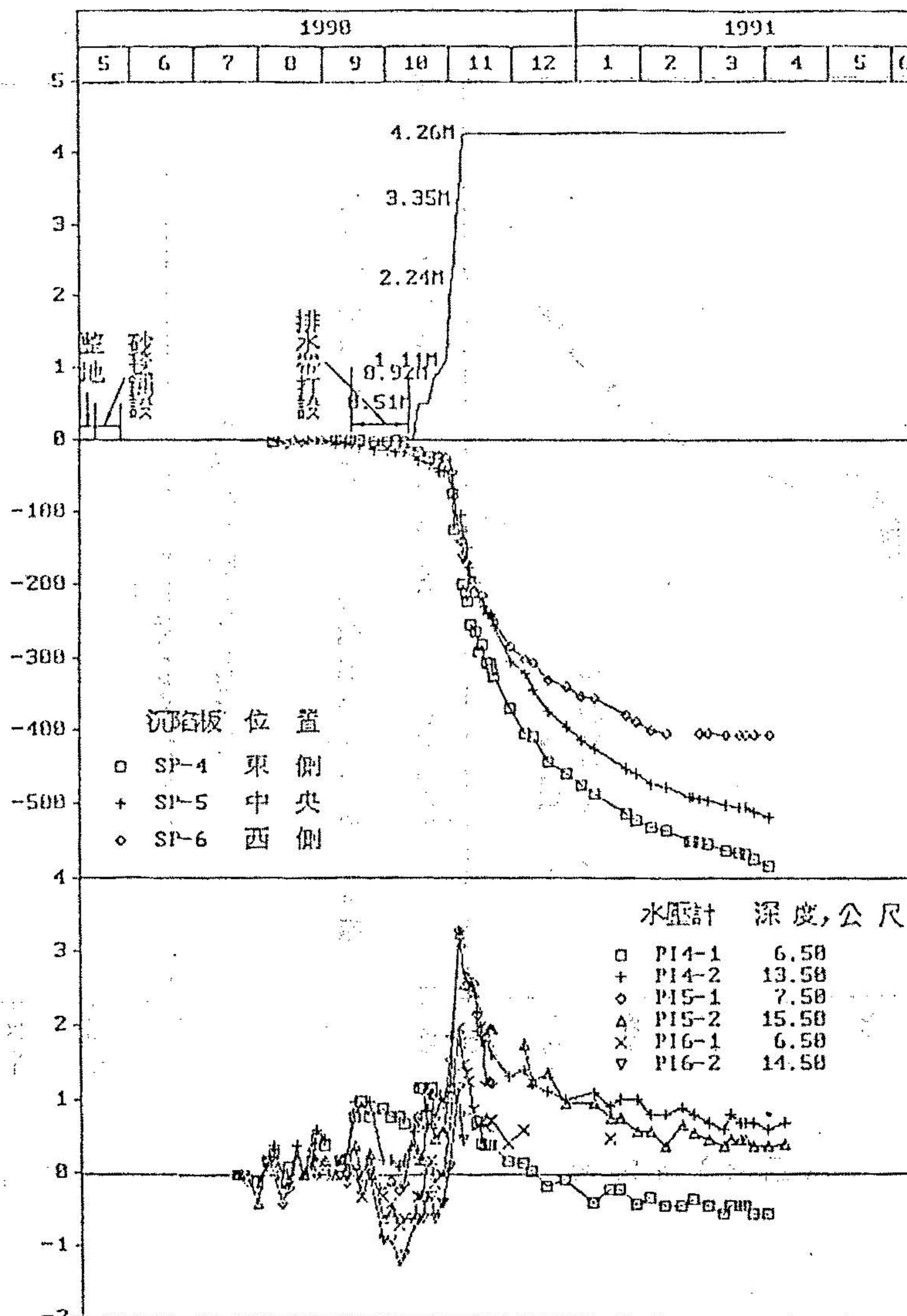


圖 7 R29 車站頂土厚度、超額孔隙水壓暨地表沈陷量歷時變化圖

復興港車站(R28)填土預壓沉陷分析

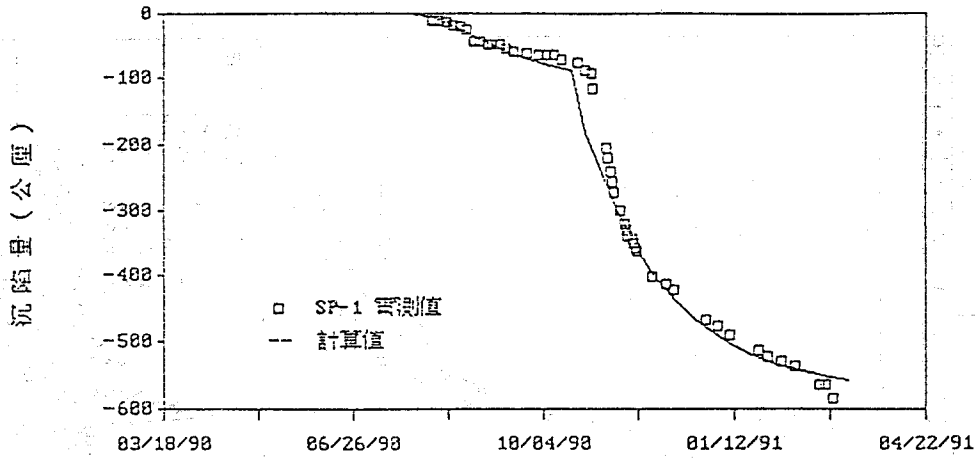


圖 8 R28 車站填土沉陷分析曲線與實測值比較圖

忠經車站(R29)填土預壓沉陷分析

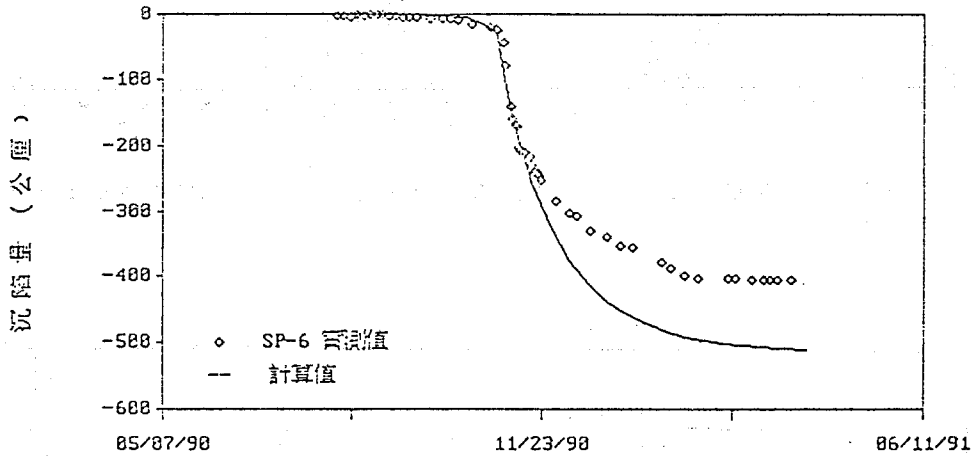


圖 9 R29 車站填土沉陷分析曲線與實測值比較圖

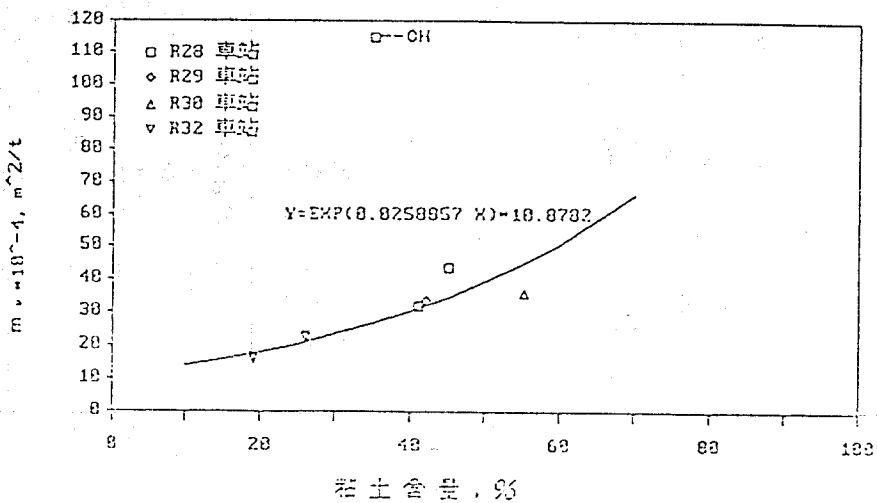


圖 10 各車站土層體積變化係數( $m_v$ )與黏土含量關係圖

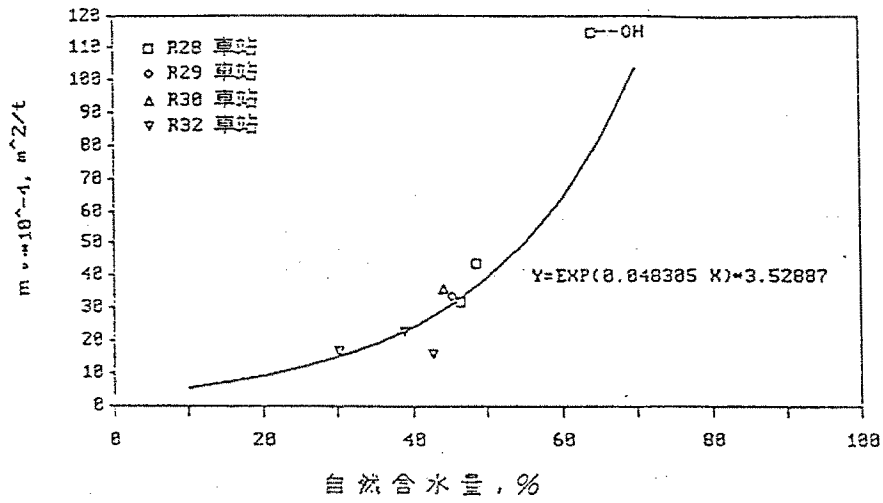


圖 11 各車站土層體積變化係數( $m_v$ )與自然含水量關係圖

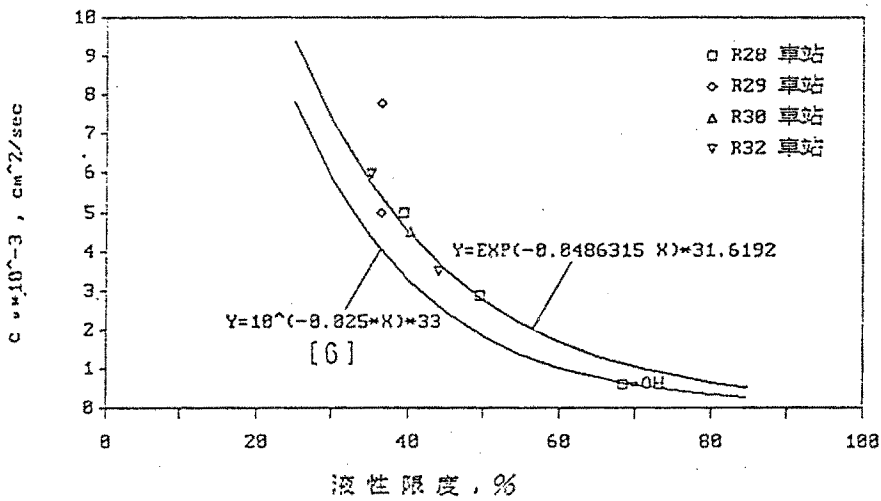


圖 12a 各車站土層壓密係數( $c_v$ )與液性限度關係圖

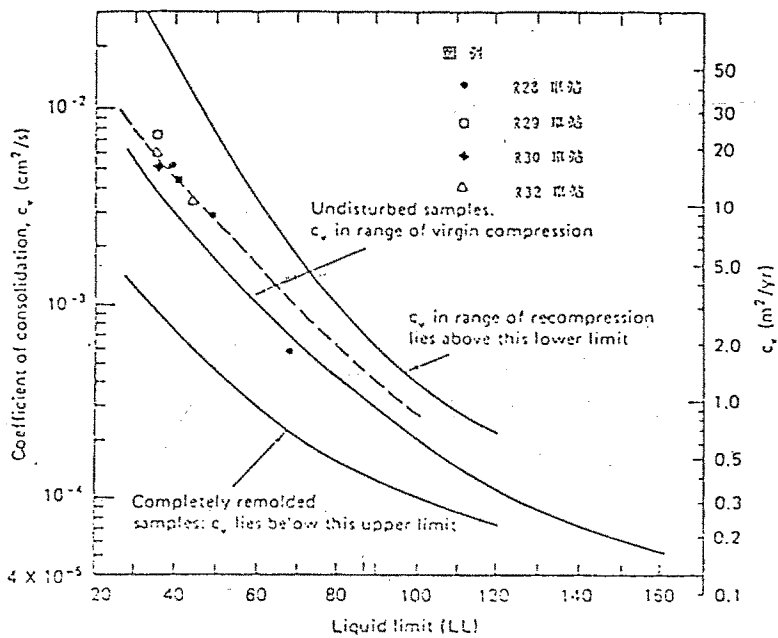


圖 12b 比較本工程與國外求得之壓密係數與液性關係