

潛盾隧道施工效應超額孔隙水壓力探討  
**STUDY ON THE EXCESS PORE PRESSURE DUE  
TO SHIELD TUNNELLING**

左大晶，張兆麟，楊鵬飛，黃姿連  
D. J. Tso, J. L. Chang, P. F. Yang and T. L. Huang

原著載於營建知訊第 174 期  
1997 年 7 月，第 6~15 頁

*Reprinted from Construction News Record  
Taipei, Taiwan  
July, 1997, No. 174, pp.6~15*

# 潛盾隧道施工效應超額孔隙水壓力探討

左大晶、張兆麟

楊鵬飛、黃姿連

台北市政府捷運工程局南區工程處

亞新工程顧問公司

## 摘要

於台北捷運系統中和線 CC277 標潛盾隧道施工期間，藉由電子式水壓計 (ELP) 量測斷面的設置，對潛盾隧道施作所激發的超額孔隙水壓力進行密集量測。結果顯示，超額孔隙水壓力在粉質粘土層與粉質砂土層的反應截然不同，且與當時潛盾機的相對位置有密切關係。此外，於評估潛盾施工所引致之孔隙水壓力變化時，可將盾尾通過視為主要控制因素。

## 一、前言

隨著潛盾隧道施工設備、技術的進步，潛盾工法已逐漸成為如大眾捷運系統、下水道系統等都會區地下工程的施工主流，相關的研究報告也如雨後春筍般陸續發表，但大部份文獻仍以隧道施作引起的地層變位或開挖面的穩定性為主要探討課題，較少觸及施工所激發的超額孔隙水壓力變化。為簡化潛盾隧道施工導致地層沉陷的問題，常將地層沉陷分為盾尾孔隙閉合引起的立即沉陷與超額孔隙水壓力消散造成的壓密沉陷兩大部份，兩者之行為機制完全不同，經由瞭解超額孔隙水壓力的變化情形，將有助於釐清潛盾隧道施工導致地層沉陷的問題。

軟弱地盤中潛盾隧道施作，將改變周圍土壤原

始的靜定平衡狀態，並造成主應力軸(Principal stress axes)方向旋轉。從材料組成律(Constitutive law)的觀點來看，土壤應力狀態產生變化亦將伴隨應變發生，除引致地盤沉陷外，亦將激發超額孔隙水壓力。由台北捷運系統的實際施工經驗得知，於砂土質地盤，因為砂土的透水係數較高，激發的超額孔隙水壓力將迅速向四周傳遞並消散；而於黏土質地盤，因黏土的低滲透性，一方面激發的超額孔隙水壓力將因為消散不及而持續累積，另一方面孔隙水壓力將隨時間的增加而逐漸消散，此時則伴隨壓密沉陷發生[1]。

受限於量測資料取得不易，數值方法遂成為研究孔隙水壓力變化情形的重要手段。Samarasekera & Eisenstein (1992)[2]將眾多影響超額孔隙水壓力變化的複雜因素予以簡化，並對主要影響參數予以無因次化(nondimensionalization)與正規化(normalization)處理後，依襯砌與相鄰土壤的應變比值大小，提出不同的超額孔隙水壓力分佈圖。Urciuoli et al (1996)[3]以有限差分程式 FLAC 探討黏土層中，襯砌分別具透水性與不透水性以及土壤模式分別為彈性與彈塑性對超額孔隙水壓力之大小、分佈及消散速率的影響。陳堯中等(民國 86 年)[4]結合平行隧道中心線方向之縱斷面與垂直隧道中心線方向之橫斷面，模擬潛盾機掘進的三向度

行爲，並利用台北捷運系統 CP261 標之砂土層中量測資料驗證此分析架構之適用性，進一步探討推力對超額孔隙水壓力與壓密沉陷的影響。儘管以數值方法研究超額孔隙水壓力變化，截至今日已有不錯的成績。但實際上這仍是一個相當複雜的問題，且明顯地受現場施作細節及地質狀況的影響。例如是盾首土倉壓力的變化、背填灌漿時機與地質狀況的變異性等均是數值方法所無法完全掌握的。藉由瞭解現場水壓計的實際量測資料，除了具備反應現場狀況的代表性外，一方面做爲日後可能發生壓密沉陷量的指標，另一方面亦可反應地盤受擾動程度[5]。以下將探討台北捷運系統中和線 CC277 標潛盾機通過電子式水壓計(ELP)量測斷面(T2 斷面)的密集量測結果。

## 二、地質狀況

T2 斷面位於中和市的景安路與明禮街交叉路口處，斷面大致成東、西走向並與景安路垂直。附近區域屬中和老沖積區，土層分佈以棕黃色及灰色粉質黏土(CL)爲主，於地表下約 23.5 m 處夾有一層厚約 1.5 m 之灰色粉質細砂(SM)層，土層分佈及一般物理性質如表 1 所示。台北盆地在 50 至 60 年代因於景美礫石層內長期抽取地下水，導致盆地內地下水位下降，使得上部土層具輕度過壓密性。T2 斷面鄰近地區之不排水剪力強度隨深度的變化如圖 1 所示[6]，基本上不排水剪力強度與深度略成正比關係，由圖上各資料點可以繪出其不排水剪力強度隨深度變化之代表曲線，由曲線得知，下行隧道中心線深度附近的平均不排水剪力強度約爲 70 kPa。本地區的平均地下水位約在地表下 1.3 m 左右，由 T2 斷面各電子式水壓計的長期觀測結果得知，地下水壓分佈略低於靜態水壓，如圖 2 所示。

## 三、施工概況

CC277 標潛盾隧道包括南勢角站(O19 站)至景安站(O18 站)間之短隧道與景安站至永安市場站(O17 站)間之長隧道兩部份，其中短隧道部份因隧道最小曲率半徑僅 200 m，爲減少潛盾機轉向必須的擴挖所造成之地層沉陷，承商採用中折式之土壓平衡式潛盾機(Earth pressure balance shield)，機身分成兩

節，以中折千斤頂(Articulated jack)連接，利用該設備使機身彎折，可降低轉向須要之擴挖量而有助於轉向施工，潛盾機外觀如圖 3 所示。在長隧道部份，潛盾機由景安站發進後即沿著景安路往永安市場站前進。隧道採下行隧道在下而上行隧道在上的垂直重疊配置，下行隧道首先施作，通過 T2 斷面處隧道中心深度約在地表下 22.9 m 處。潛盾機外徑 6270 mm、長 6400 mm。隧道襯砌由 6 塊厚 250 mm、寬 1000 mm 長度不等的預鑄混凝土環片組成，襯砌外徑 6100 mm，理論上盾殼與襯砌環片間空隙爲 85 mm。爲減少盾尾空隙閉合造成之地層沉陷，潛盾機掘進時同步進行背填灌漿，灌漿位置在盾尾後第一環，漿材的主要成分如表 2 所示。接近 T2 斷面處所使用的背填灌漿壓力約在 190 至 310 kPa 之間。爲瞭解下行隧道通過所激發的超額孔隙水壓力分佈，於 T2 斷面上共裝設 14 支電子式水壓計，於 1995/2/25 及 1995/2/28 間，採用每 5~10 分鐘量測一次的密集量測頻率，藉以獲取詳細的孔隙水壓力變化。電子式水壓計使用最大容許壓力爲 1 MPa，靈敏度爲 0.5 kPa 的美國 GEOKON 4500S 型電子式水壓計。T2 斷面各電子式水壓計的裝設位置則如圖 4 所示。

## 四、孔隙水壓力觀測結果

T2 斷面於下行隧道第 37 環處，潛盾機盾首、盾尾分別在 1995/2/26 02:30 及 1995/2/26 22:25 通過此斷面。潛盾機通過 T2 斷面的過程中，僅部份與隧道較接近的電子式水壓計感應到潛盾機施作造成的孔隙水壓力變化，由這些電子式水壓計的量測結果並配合與隧道襯砌間的相對距離，可以初步推估激發超額孔隙水壓力的影響範圍，大致在距離襯砌約 1 倍潛盾機直徑的同心圓內，但實際的超額孔隙水壓力分佈並非如此簡單。圖 5 及圖 6 分別爲 ELP54 與 ELP55 的歷時資料曲線，其中 ELP54 裝設於粉質砂土層，因爲砂質土壤的高滲透性，激發的超額孔隙水壓力能迅速消散，使得孔隙水壓力隨著施作過程不斷的激發與消散，歷時資料曲線因而呈現明顯跳動地“鋸齒狀”；而 ELP55 裝設於粉質黏土層，低滲透性拘限了孔隙水壓力的傳播，使得孔隙水壓力的變化趨勢較平順，沒有如粉質砂土層般劇烈跳動的現象。

以粉質黏土層中 ELP55 的反應為例，當盾首距離 T2 斷面前 6 m 處，施工動作開始對孔隙水壓力造成影響，當盾首通過 T2 斷面時，孔隙水壓力從初始的 230 kPa 降至 220 kPa；圖 7 為盾尾位置與孔隙水壓力關係圖，盾首通過 T2 斷面後，孔隙水壓力有較明顯的變化，以盾尾通過第 35 環的反應為例，孔隙水壓力隨著潛盾機的掘進與背填灌漿的進行由 195 kPa 緩慢累積上升至 202 kPa，一旦潛盾機暫停開始組立環片或維修時，孔隙水壓力卻又逐漸消散至 195 kPa，但就整體而言在盾尾通過前之孔隙水壓力是呈現緩慢下降的趨勢，直到盾尾通過 T2 斷面，孔隙水壓力最低降至 190 kPa 左右；當盾尾通過 T2 斷面後，理論上除背填灌漿外，其它施工動作將不致對電子式水壓計造成影響，隨著背填灌漿位置與斷面距離的增加，孔隙水壓力的變化量漸趨平緩並持續回升。

再以粉質砂土層中 ELP54 的反應為例。限於密集量測資料的數量，無法確切瞭解施工引致超額孔隙水壓力的傳遞範圍有多遠，但就目前資料而言，至少在 1 倍潛盾直徑以上的距離，台北捷運系統板橋線 CP261 標有影響範圍遠達 4 倍潛盾機直徑距離以上的施工實例[3]。ELP54 歷時資料曲線的趨勢恰好與 ELP55 相反，當潛盾機於掘進及背填灌漿期間孔隙水壓力下降，而在潛盾機暫停時卻上升；在潛盾機施作的影響下孔隙水壓力不升反降，此現象的確令人困惑，同一個施工動作，不應該在相鄰土層中分別有合理與不合理的結果。詳細檢視歷時資料得知，此現象於整個密集量測階段均存在，而當盾尾愈接 T2 斷面處孔隙水壓力的變化愈明顯，意味著此現象應是受盾尾空隙閉合或背填灌漿的影響，但空隙閉合與背填灌漿係於盾尾同步進行，目前尚無直接證據說明主要為何者之影響；再者，細看盾尾於第 35 環的歷時資料，在整個第 35 環的施作過程中，孔隙水壓力變化可區分三階段，如圖 8 所示，A 階段大致與潛盾掘進及背填灌漿的時程相同，孔隙水壓力由 208 kPa 降至 190 kPa；而 B 階段的孔隙水壓力由 190 kPa 降至 158 kPa，隨後的 C 階段孔隙水壓力又從 158 kPa 急速回升至 208 kPa，在 B 及 C 階段潛盾機處暫停期間，對周圍土壤並無任何擾動的動作，但孔隙水壓力卻有如此明顯的變化，的確耐人尋味。在潛盾工法中，常以背填灌漿填補盾尾空

隙減少地層沉陷，由上述電子式水壓計提供的訊息可推論，背填灌漿對超額孔隙水壓力變化亦有相當的影響，因此，無論是在設計或施工階段，實有必要對背填灌漿時機及漿材配比做進一步探討。

將孔隙水壓力歷時曲線轉換成孔隙水壓力以及盾尾與 T2 斷面間距離之關係，如圖 9 及圖 10 所示。假設該斷面附近土壤在垂直隧道中心線的平面上，對隧道中心線呈軸對稱，亦就是隧道中心線兩側的土壤性質相同，配合圖 9 及圖 10 資料，將隧道左、右兩側的超額孔隙水壓力重疊繪於同側，並以與 T2 斷面之關係為橫軸，如圖 11 所示。於計算潛盾施作所激發的超額孔隙水壓力時，必須對初始孔隙水壓力有明確的定義，否則將無法從隨時改變的孔隙水壓力選取具代表性數值，並得到正確的結果。本文以該環片在掘進過程中所激發最大與最小孔隙水壓力之差值為超額孔隙水壓力，正值代表孔隙水壓力上升，負值則為孔隙水壓力下降。由圖 9 及圖 11 可大致歸納出粉質黏土層的孔隙水壓力變化流程，在盾首到達 T2 斷面前約 1 倍潛盾機直徑處，開始激發負超額孔隙水壓力，待盾首通過斷面後超額孔隙水壓力逐漸由負值轉變為正值，但整體孔隙水壓力是持續降低，盾尾通過斷面後孔隙水壓力又漸趨向靜態水壓力；而在粉質砂土層中的反應則詳圖 10 及圖 11，盾首前的確實影響範圍無法從圖中推測，盾首通過斷面前、後所激發的超額孔隙水壓力大致相同且均為負值，盾尾通過斷面後孔隙水壓力漸趨向靜態水壓。

## 討論：

儘管由各電子式水壓計的讀值仍可看出潛盾機施工過程中的孔隙水壓力變化，但是，最接近潛盾機之電子式水壓計是在約 2.5 m 的距離外，致使得到的最大變化量在砂土層約為 50 kPa，而在黏土層更不及 15 kPa，相對其它如儀器誤差、非正常施工狀況等對結果的影響將更明顯。因此，為得到更具代表性之量測結果，可考慮將電子式水壓計與隧道間距離縮短，但也不可與潛盾機距離過近，南港線 CN256 標即有多處與隧道距離約 1 m 的電子式水壓計於潛盾機通過時遭損壞的案例。所以，電子式水壓計的裝設深度與位置須視現場地質、施工狀況予詳細考量，方能得到最有價值的結果。

## 五、結論

本文僅探討中和老沖積區的一個土層斷面，並不足以完全代表此地區的施工經驗，但仍可歸納出下列數點結論以供後續工程的參考：

1. 由於滲透性的差異，潛盾隧道施作所激發的超額孔隙水壓力在粘土層與砂土層之反應將各不相同。黏土層內的孔隙水壓力變化趨勢較滑順；而砂土層則呈現上、下跳動的“鋸齒狀”。
2. 藉由此次探討超額孔隙水壓力變化的經驗得知，隧道周圍土層超額孔隙水壓力的分佈情形，不僅和土壤種類，也與當時潛盾機的相對位置有密切關係。例如是盾首或盾尾通過斷面所激發的超額孔隙水壓力變化即不相同，但以盾尾通過所造成的影響較大，可視為主要控制因素。
3. 由水壓計的反應可概略估計在黏土層中，潛盾機的影響範圍約在襯砌環片四周 1 倍潛盾直徑的距離內，可藉此評估潛盾施工是否對鄰近地下結構造成影響。
4. 監測斷面中水壓計之配置，須考量隧道周圍土壤性質，由其在低滲透性之黏土層，水壓計與隧道距離過遠將無法獲得有效之資料。

## 參考文獻

- [1] Hwang, R.N., Moh, Z.C. and Chen, M. (1996). Pore pressure induced in soft ground due to tunnelling, Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. April, London, UK.
- [2] Samarasekera, L. and Eisenstein, Z. (1992). Pore pressures around tunnels in clay, Can. Geotech. J. 29, pp. 819-831
- [3] Urciuoli, G., Russo, C., Desideri, A., and Picarelli, L. (1996). Pore pressure generation and equilization around a circular tunnel in soft clays, Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. April, London, UK, pp. 539-543
- [4] 陳堯中、賴建宏、黃南輝及林國禎(民國 86 年)，“潛盾施工引致孔隙水壓變化之量測與分析”，地工技術第 60 期，第 97-106 頁
- [5] Yi, X., Rowe, R.K., and Lee, K.M. (1993). Observed and calculated pore pressures and deformations induced by an earth balance shield, Can. Geotech. J. 30, pp. 476-490
- [6] 亞新工程顧問公司(民國 77 年)，“台北都會區捷運系統中和線地質與土壤工程性質調查報告”

表1 0B-B16鑽孔之土層分佈及一般物理性質表

層次	土層描述	深度 m	N值	總體單位重 t/m <sup>3</sup>	自然含水量 %	液性限度 %	塑性指數 %
1	棕黃色粉質粘土	0.0 ~ 5.4	10 ± 2	1.95 ± 0.02	30 ± 1	-	-
2	灰色粉質粘土， 含少至微量有機質及腐木	5.4 ~ 23.7	5 ± 1	1.86 ± 0.05	35 ± 10	31 ± 8	9 ± 5
3	灰色粉質細砂	23.7 ~ 25.3	15 ± 7	1.87 ± 0.03	28 ± 2	-	-
4	灰色粉質粘土， 含微量砂及粒石	25.3 ~ 30.0	8 ± 2	1.84 ± 0.04	33 ± 3	31 ± 9	12 ± 8

表2 潛盾隧道背填灌漿施工漿材配比一覽表

每立方公尺含量	重量
水泥	450 kg
飛灰	200 kg
細砂	1160 kg
皂土漿 (Bentonite Slurry)	45 kg
強塑劑 (Superplasticizer) (Rheobuild 1000, MBT)	11.52 kg
水	300 kg

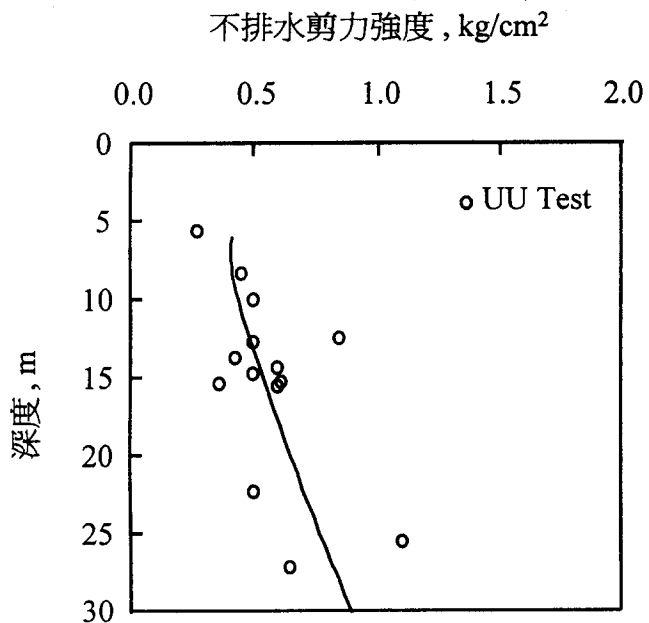


圖1 T2斷面不排水剪力強度與深度之關係

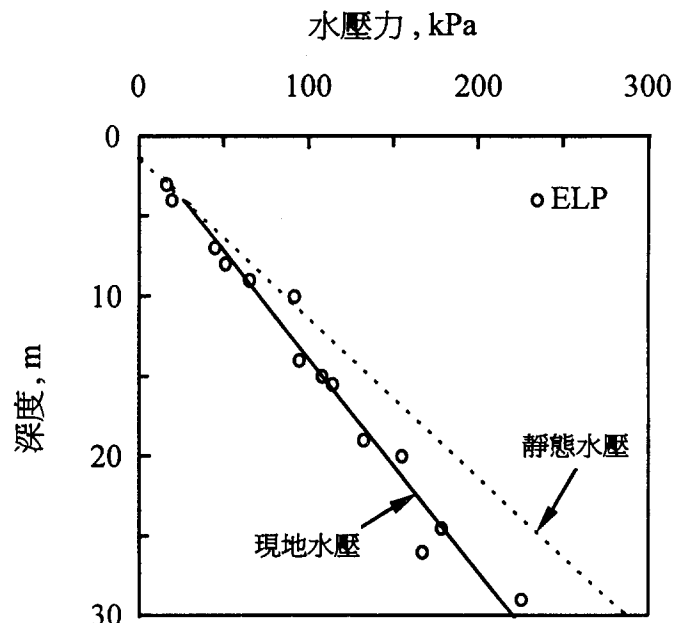


圖2 T2斷面地下水壓力分佈

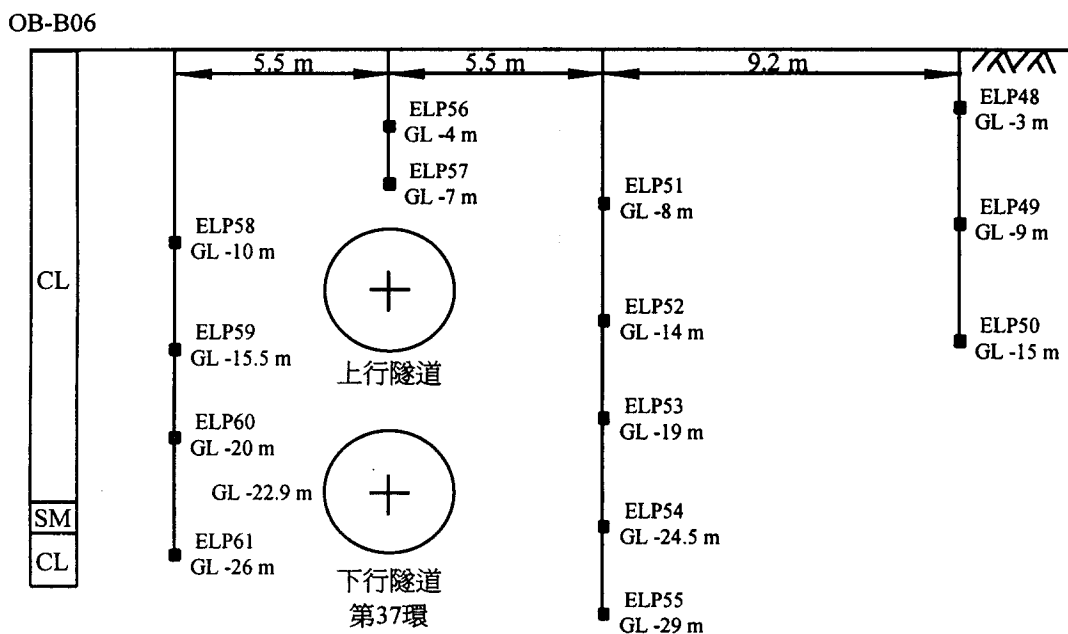


圖4 T2斷面水壓計(電子式)裝設位置

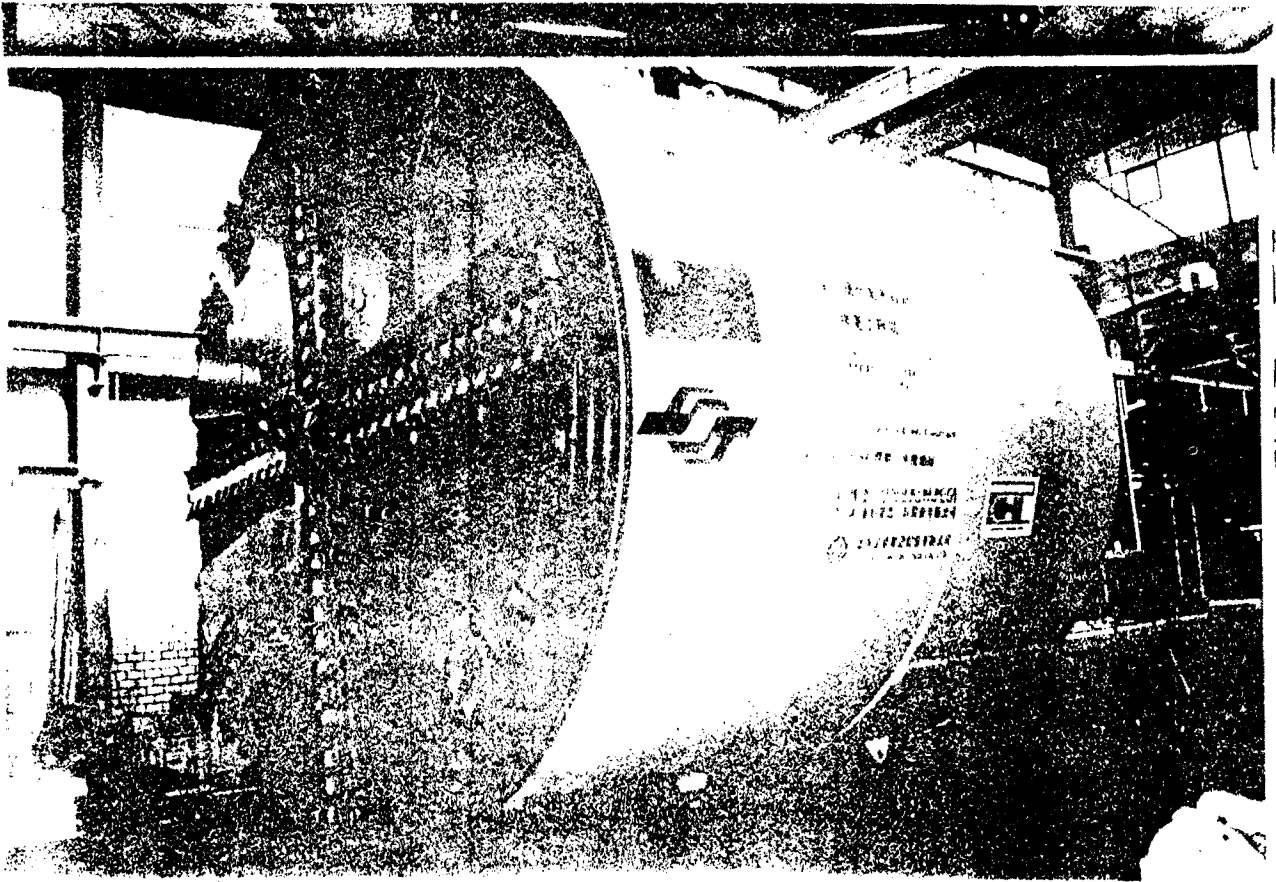


圖 3 潛盾機外觀

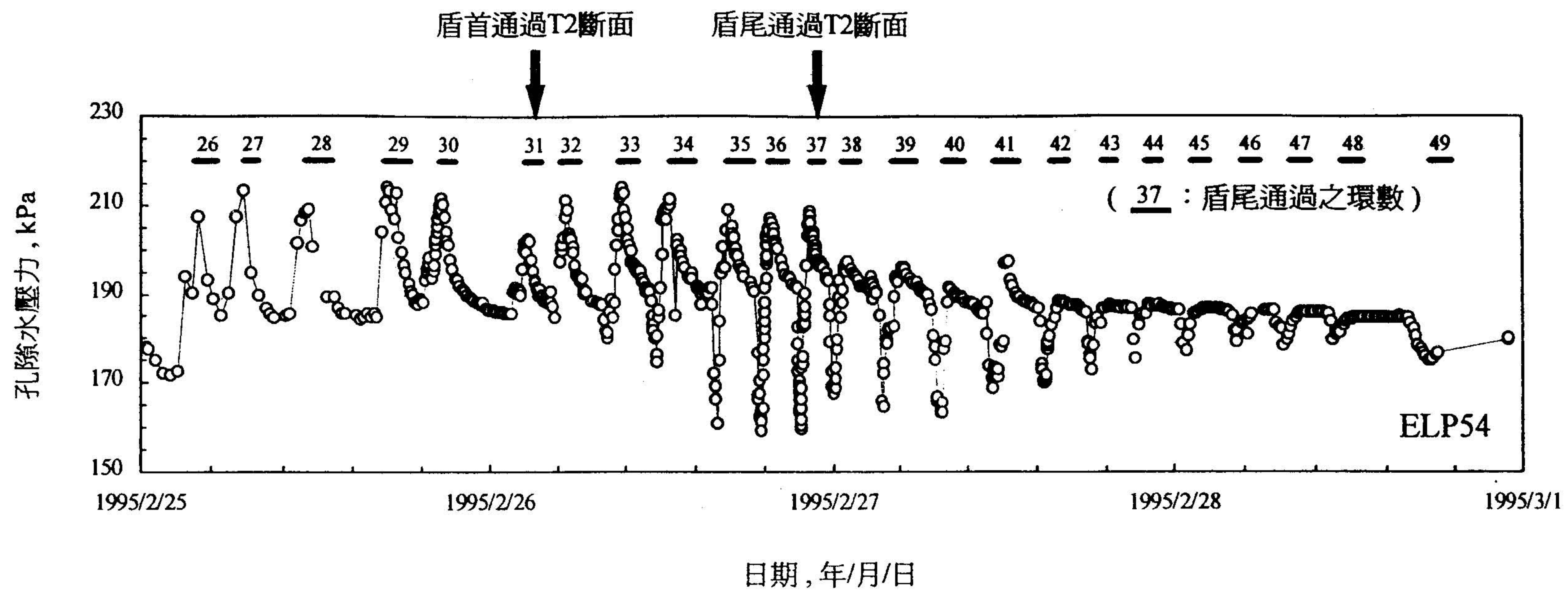


圖5 ELP54孔隙水壓力變化

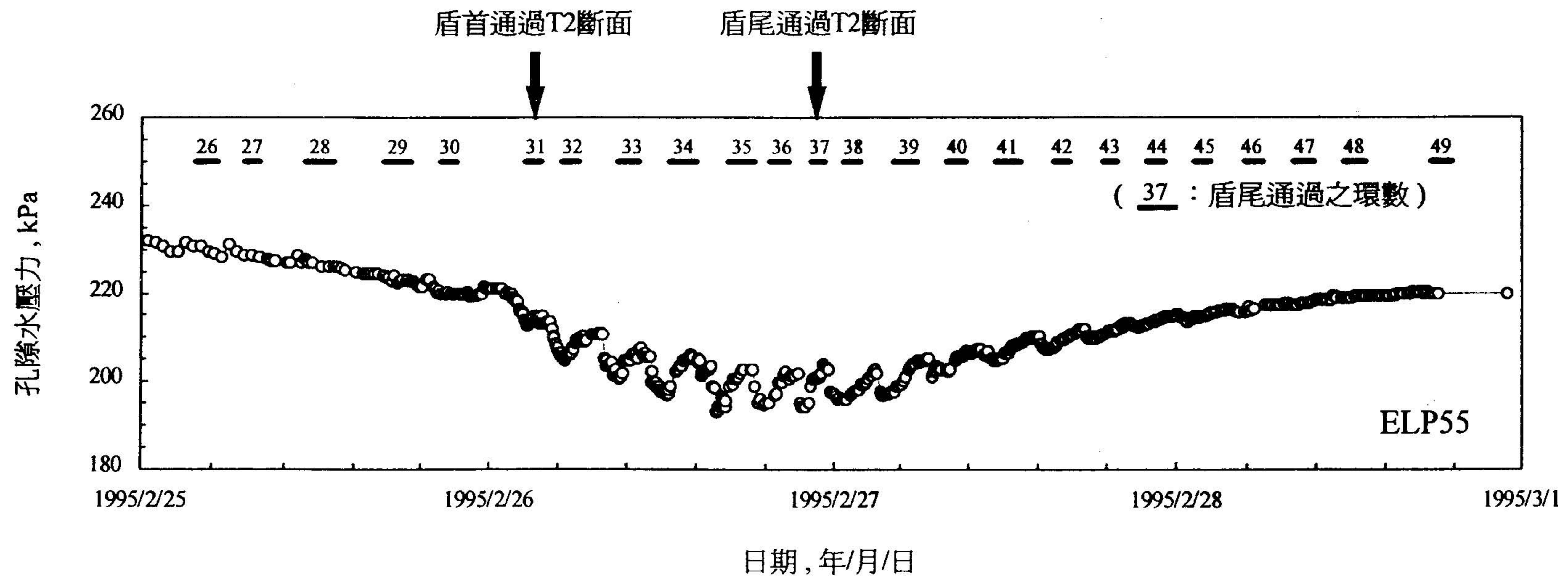


圖6 ELP55孔隙水壓力變化

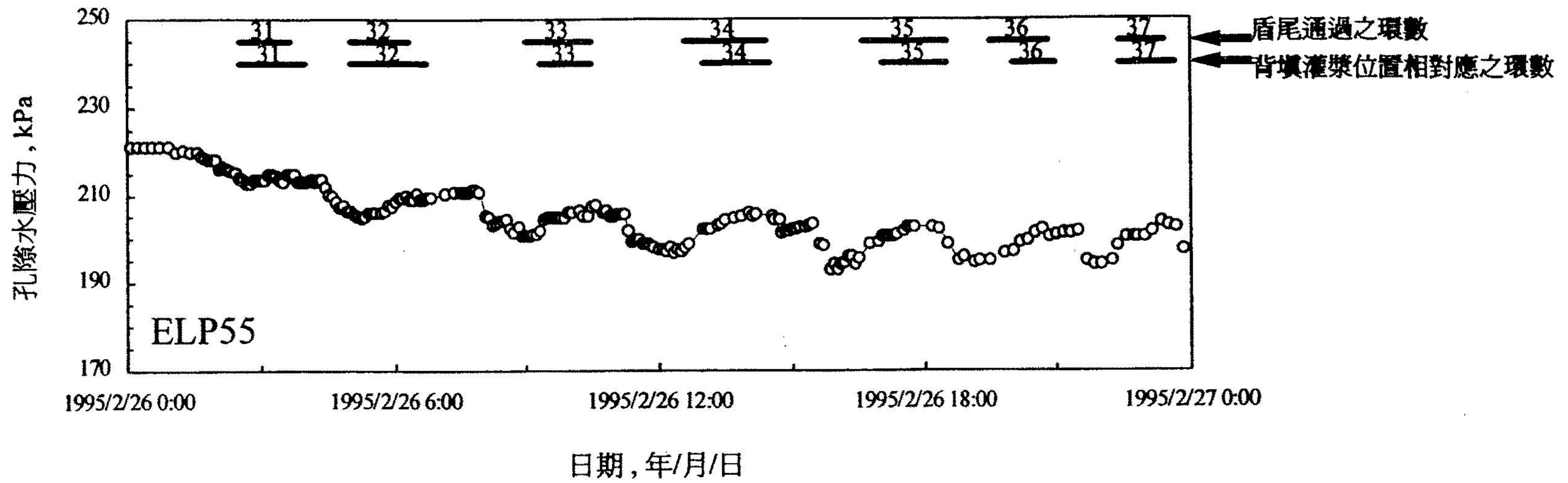


圖7 盾尾於第31環與第37環間ELP55之水壓變化

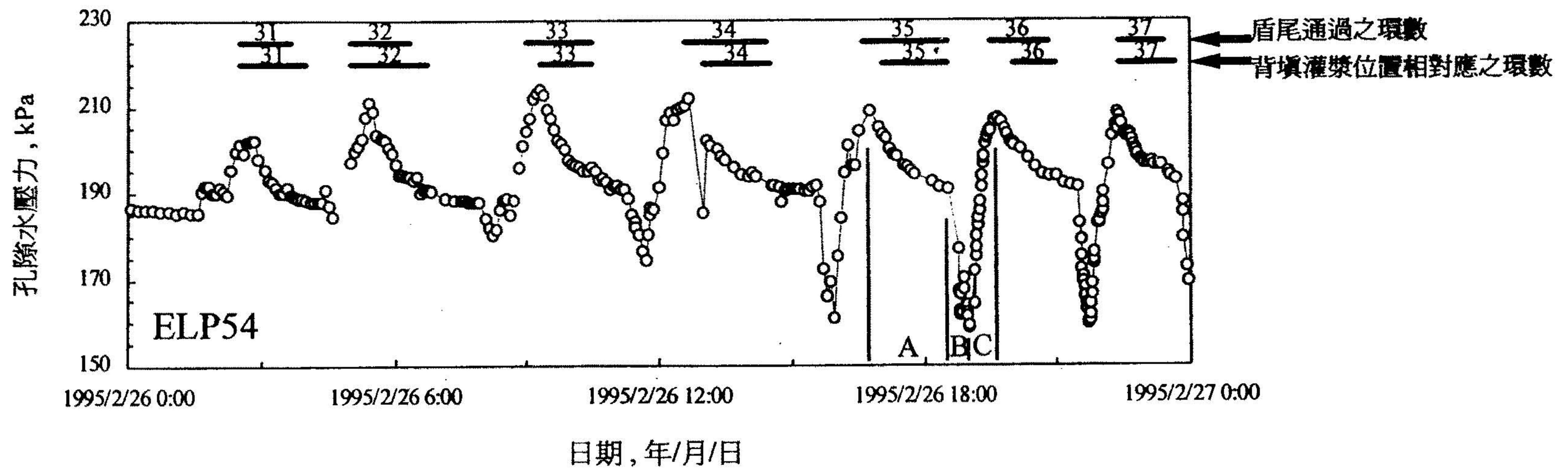


圖8 盾尾於第31環與第37環間ELP54之水壓變化

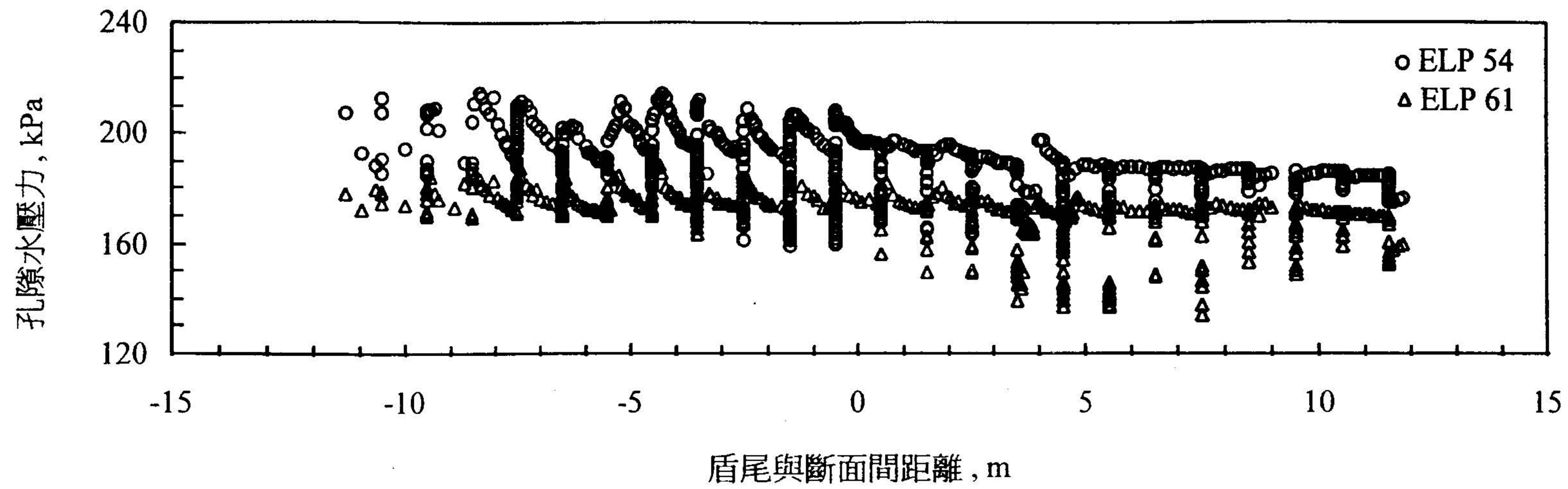


圖9 砂土層中孔隙水壓力以及盾尾與斷面距離之關係

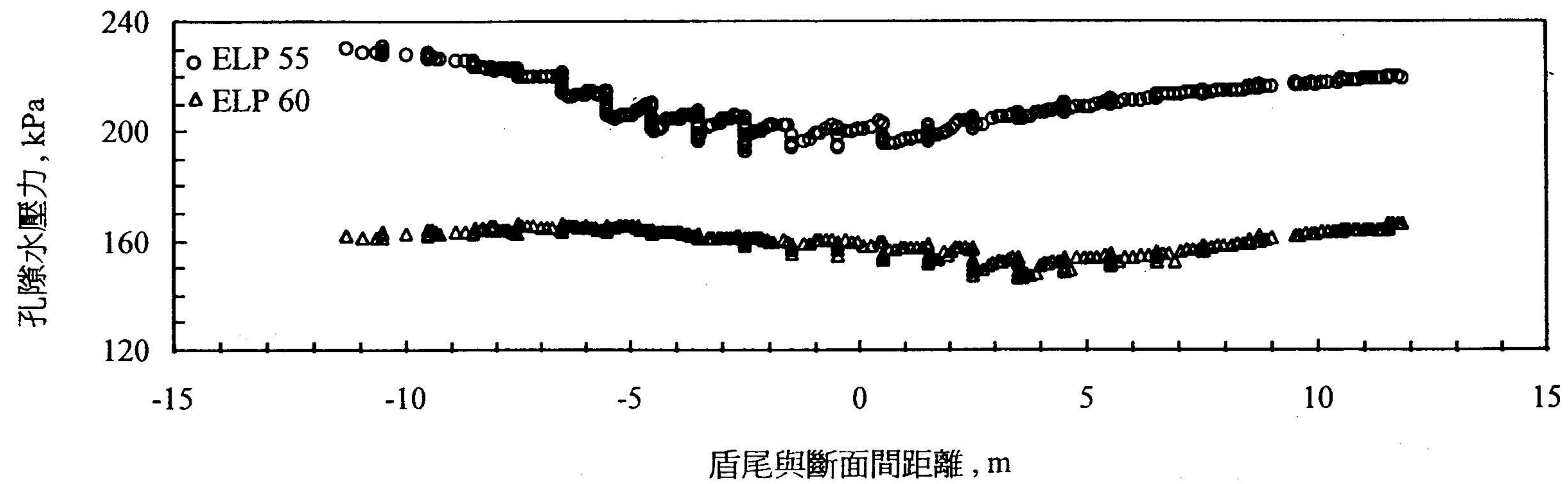


圖10 黏土層中孔隙水壓力以及盾尾與斷面距離之關係

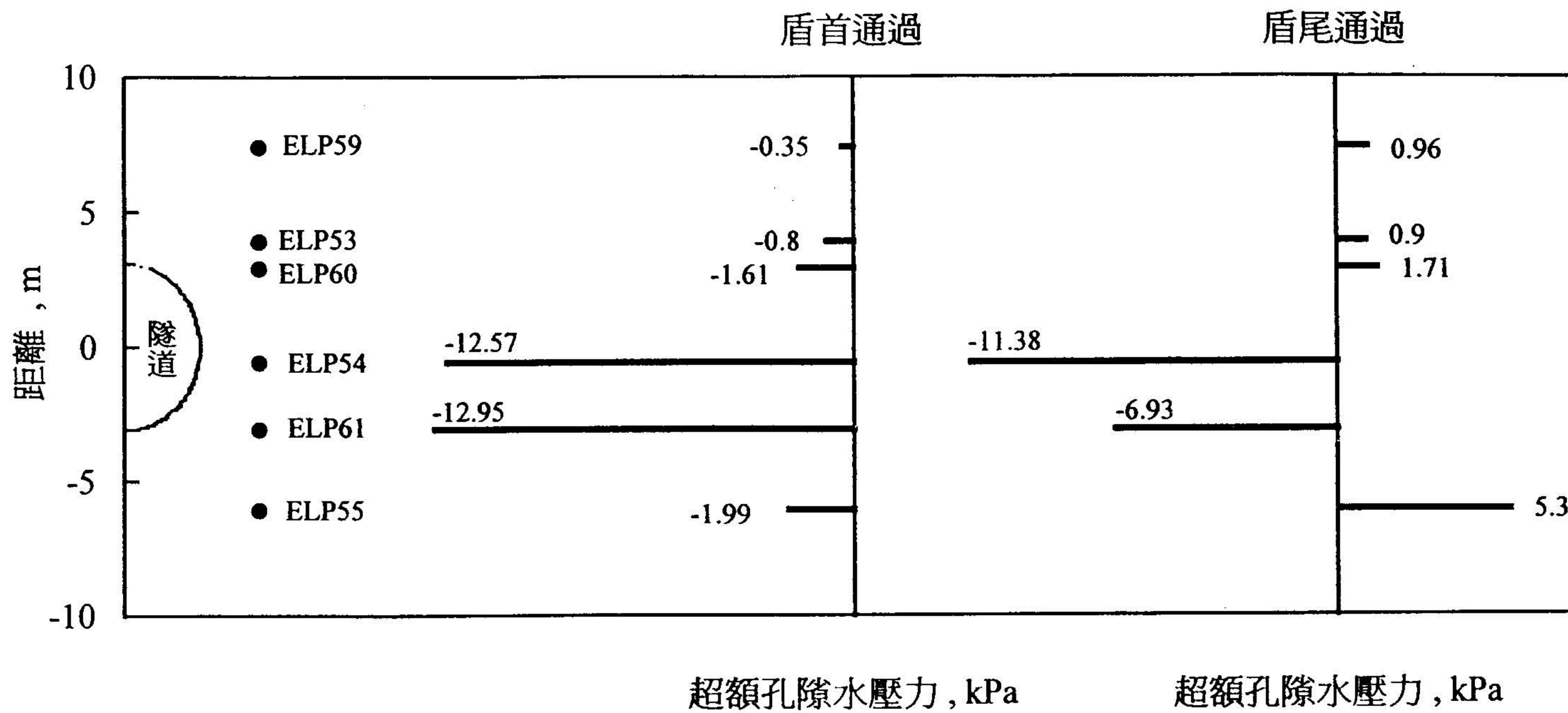


圖11 超額孔隙水壓分佈(縱斷面)