

新加坡捷運施工托底案例
UNDERPINNING OF STRUCTURES FOR
CONSTRUCTION OF SINGAPORE MRT

黃南輝，藤堂博明，T. Hulme
R.N. Hwang, H. Todo and T. Hulme

原著載於地工技術雜誌第40期，1992年12月

*Reprinted from Sino-Geotechnics, No. 40,
December, 1992*

Underpinning of Structures for Construction of Singapore MRT

Hwang, R.N. Todo, H. Hulme, T.

Synopsis

The paper presents the settlement records for four buildings which were underpinned during the construction of the Mass Rapid Transit System in Singapore. The first two are modern, reinforced concrete buildings of 12 and 20 stories in height. The third is a pre-World-War-II building of 3 stories in height and the fourth is a chapel built in the 19th century. The observations were: (1) underpinning operation caused settlements of various magnitudes, (2) transferring building loads prior to excavation reduced settlements, and (3) even so, settlement were still significant during excavation.

新加坡捷運施工托底案例

黃南輝(1)，藤堂博明(2)，T. Hulme(3)

- (1) 亞新工程顧問有限公司，中華民國，臺灣，臺北
- (2) 基礎地盤株式會社，日本，東京
- (3) 新加坡地鐵工程局，新加坡共和國

一、前 言

托底工法經常應用於深開挖以減少工程對鄰近建築物之傷害，其理念極為單純 - 將部份荷重經由托底樁傳至不動層。經常使用之托底樁包括微型樁、高壓噴射樁、型鋼、連續壁或其他容易安放之材料。在某些狀況下，托底為順利完工之唯一選擇，但一般人誤以為托底工法可以適用於任何地質狀況，可以解決一切問題。殊不知在托底過程中，結構物即可能沉陷，即使在托底完成後，後續沉陷亦相當可觀。

以新加坡捷運系統（在新加坡稱為地鐵）為例，托底工法曾被應用於四棟建築物，包括一棟十九世紀初興建，列為新加坡一級古蹟之大教堂，兩棟國民住宅及一棟政府辦公大樓。四棟中之兩棟係以連續壁托底，另外兩棟以微型樁托底。在施工期間，地面沉陷及結構物之沉陷皆有持續觀察。本文中所引用之資料大部份取材於 Todo, Hwang and Hulme (1992)。托底案例雖多，但大部份文獻著重理論之探討，而欠缺數據，尤其批評性之文章更絕無僅有。該文備有完整之監測資料得以評估托底之效益，彌足珍貴，因此特將其介紹給國內工程界同仁以為參考。在臺北捷運沿線，受施工影響之建物上百，日後其他城市之捷運施工所影響之建物將更多，希望本文對此等建物保護方案之擬定有所助益。

二、托底案例

2.1 案例一：第 206 號國宅

第 206 號國宅建於 1974 年，係一棟十二層高之鋼筋混凝土大樓，其下有空心水泥樁支撐。該樓位於捷運南北線路徑之上，須將部份水泥樁截斷，捷運之雙軌隧道方能由其下方穿越，因此托底為保全該樓之唯一途徑。

圖一表示該樓與捷運隧道之相對位置及其下方之土層分佈。大抵而言，該地靠近一已被回填之古河床，河床下方之土層係完全風化之花崗岩，在土壤分類中，屬粉質黏土或砂質黏土，代表性級配為 30% 砂土、30% 粉土及 40% 黏土。標準貫入試驗之 N 值隨深度增加而增加，在地表約為 5，在深度 25m 處增至 50 以上。

托底即借用明挖隧道之連續壁以支撐其上之結構物，連續壁厚 800 mm，深達地表下 23 m，該處之圓錐貫入阻抗達 3.2 至 7.8 MPa。兩壁中心至中心之間距為 11.8 m，兩壁之上再架上一 1.5 m 厚之承載版以承受原來由水泥樁基所承受之荷重。圖二表示托底之步驟，托底作業始於 1984 年二月，受影響之一樓及二樓住戶已事先由政府安排遷移他處，以便拆除樓板然後進駐機具。連續壁作業於 1984 年 4 月中開始，5 月初完成，總共有 14 單元，平均每三天完成一單元。連續壁槽溝內以皂土液維持壁面穩定，溝底以幫浦抽取污泥，然後以特密管澆置混凝土。連續壁完成後二樓之樓板即予復原。

1984 年六月初，兩壁體間進行開挖，六月底開挖深度達 4.5m，七月中架於連續壁之上之承載版澆置完成。承載版與水泥樁之間並以塑膠布隔離，日後樁帽上頂時，兩者之間才不致有互制作用。一樓之樓板於八月中復原。

1984 年十月中，在承載版下方開始開挖以便切斷水泥樁，在切斷水泥樁之前，須先將荷重傳至承載版以及其下之連續壁以收托底之效。此動作係以油壓千斤頂施作，所用之千斤頂油壓可達 120 bars，最大衝程 25 mm。作業之第一步係將千斤頂置於樁帽與承載版間預留

之間隙內，加壓將樁帽頂起，並以鋼版塞進間隙之內，然後減壓將千斤頂取出。其後再將該樁帽下之水泥樁一一鋸斷，原先由水泥樁所承受之荷重於是全部傳遞至承載版之上，托底作業於焉完成。一共有十個樁帽受工程影響，每個樁帽之下有一至八支樁徑 300 mm 至 450mm 之水泥樁須被切除。十個樁帽逐一施作，自 1985 年 3 月中開始至 5 月初方竟全功。總共有 37 支水泥樁，平均一天一支，可謂迅速。

為確實掌握結構物之沉陷量使其在容許範圍之內，在 17 根受影響之支柱上，各裝有一沉陷點。圖三顯示第 15 號沉陷點之歷時曲線，在所有沉陷點中該點之沉陷量為最大。同圖中並顯示各項作業之後後次序及時程。量測工作於 1984 年 5 月 2 日開始，在各時段之累積沉陷量可歸納如下：

累積沉陷量 (mm)

時 段	作 業	範 圍	平均值
1984 - 5	連續壁施作	1 - 6	3.2
1985 - 5	開挖至 8.5 m 托底及鋸樁	4 - 12	8.3
1985 - 6	開挖至底	7 - 18	13.1
1985 - 12	完工	13 - 24	18.6

以上資料顯示，大部份沉陷發生在托底完成之後，而此後續沉陷量之平均值竟達 10mm。此量可分兩部份：

- (a) 兩連續壁間之開挖減少內側壁面與土壤之摩擦力，造成連續壁之下陷約 5 mm (由 8.3 增至 13.1 mm)
- (b) 永久結構體之澆置及承載版與隧道頂版間空隙之回填導致 5 mm 之沉陷 (由 13.1 增至 18.6 mm)

另外值得一提的是在上頂過程中，樁帽與承載版之間空隙加大 20 至 30 mm。而在此期間，安裝於支柱上之沉陷點所量得之沉陷量有限，意即樁帽並未下沉，因此推論空隙加大起因於承載版之下沉。而

承載版之下沉有兩分量，即連續壁之沉陷及承載版本身之變形。可惜的是連續壁之沉陷量不得而知，但估計在 15 至 20 mm 之間。因此承載版之變形當在 5 至 10 mm 左右。假如樁帽未曾上頂，結構體之總沉陷量當較上表所列多 20 至 30 mm。由此推論：托底樁之預壓（上頂）有效地減少結構體之後續沉陷量。

2.2 案例二：第 116 號國宅

第 116 號國宅建於 1970 年，係一棟 20 層高之鋼筋混凝土大樓，其下亦有基樁支撐。如圖四及圖五所示，捷運布萊德站之連續壁緊貼大樓之外緣，該站係一雙層車站，第一層為大廳，其下為捷運南北線之雙軌車道。站體開挖深度達 13.5 m，係採用挖覆蓋順打工法施工。連續壁為 800 mm 厚、21 m 深。為恐連續壁之施作及站體之開挖導致基樁之破壞甚至結構體之傾塌，因此將最外側之樁帽以托底工法加以保護。

該址之土層係完全風化之花崗岩，此點與前例相似。如圖四所示，標準貫入試驗之 N 值隨深度增加而增加，在近地表處其值為 10 至 20 之間，在深度 25 m 處其值達 50。

如圖五所示，靠近車站最外一排樁帽是由 16 支基樁所支撐。基樁為直徑 430 mm 之水泥樁，深度不得而知，每單支之設計承載力為 100 噸。托底之理念係以一 U 形承載樑從外側將樁帽夾住，如有任何一根基樁因連續壁施作或站體開挖而嚴重受損甚至破壞，其所負擔之荷重可由承載樑承受，如此結構物方不至傾塌或損壞至不堪使用。承載樑兩端各有一托底樁支撐，托底樁係以連續壁工法施作，兩樁皆為 600 mm 厚、2.85 m 寬、深達樁帽下 11.4 m、各有 185 噸之承載力。

托底作業於 1984 年 10 月間完成，站體開挖於 1985 年 4 月初開始，7 月初完成。圖六顯示第 13 號沉陷點之歷時曲線，該點與連續壁最為接近，其沉陷量亦為 15 個沉陷點中之最大者。如圖所示，因為基樁未受影響，托底作業所導致之沉陷量幾乎為零，連續壁施作所引起之沉陷約為 11 mm，開挖期間之累積沉陷為 23 mm，最終沉陷量為 34 mm。此值與附近地表沉陷量相當。

圖七表示所有沉陷點之最終沉陷量，沉陷量隨著與連續壁距離之增加而減少。承載樑之兩端之沉陷量一為 34 mm，一為 26 mm，平均 30 mm。在距連續壁約 35 m 處有一伸縮縫將結構體一分為二。該處之沉陷量為 5 mm，而在十八樓樓頂，該伸縮縫伸張 28 mm，但結構體並未受損。

雖然托底之後結構體之沉陷量與地表沉陷相當，但此不足以否定托底之效益，因與附近地面相較，

(a) 結構體之荷重理應增加沉陷，但

(b) 基樁與土壤之互制作用理應減少沉陷

此兩者目前尚無法精確估算，是否相互抵消，不得而知。從另一個角度來看，此案托底之主要目的倒不在減少沉陷，而在避免大樓因基樁破壞以致傾塌。雖然無法驗證是否有基樁破壞，但結構物未曾遭受任何嚴重損傷是一事實，以此觀點而論，托底已達其預期目的。

2.3 案例三：政府大廈

政府大廈位於新加坡河畔，建於二次大戰之前，是一棟三層磚造樓房。其下有 4.5 m 長，未經處理之原木木樁支撐，樁徑由 50 至 100mm 不等。捷運過河段在其旁通過，此段係以明挖覆蓋順打工法施工。上部土層以鋼版樁支撐，下部土層以兵樁支撐。大廈外側支柱（見圖八）距兵樁僅 3 m，而樁帽之外緣距鋼版樁僅 2m。捷運南北線與東西線在此交會，因此隧道共有四孔，開挖最深處達地面下 27 m。

如圖九所示，在近地表處有一層 3 m 厚之回填土，其下是一層 2 至 3 m 厚之海砂，再下係古沖積層。回填土及海砂十分鬆軟，其標準貫入試驗之 N 值少於 5。古沖積層係過壓密後之更新世沉積物，其 N 值在上部 15 m 之土層中為 20 至 50，其下皆大於 50。

隧道係於 1984 年 5 月開始開挖。原設計一共有七層支撐，每支支撐皆須預壓至設計荷重之半。同年七月間開挖至第三階時，大廈前方發現有龜裂現象，此時開挖深度約為 10 m。承商迅速將大廈之前部結構以型鋼支撐以免結構受損並建議在前排四根支柱之下以微形樁托底以減少後續沉陷。開挖作業因此暫停至九月底托底完成後方才恢復。

托底作業於 1984 年 8 月 10 日開始，於 8 月 23 日完成。如圖八所示，每根支柱之四角各有一微形樁貫穿樁帽伸至地面下 26 至 28 m，即 45 度影響線下 5 m 之處。微形樁之孔徑為 107 mm，孔內插一直徑 38 mm 之鋼筋，並以強度 30kg/cm 之水泥砂漿充實所有空間。每支樁之設計載重為 24 噸。

開挖作業於 9 月底恢復，大廈前部結構仍不斷出現新裂痕。在 10 月中開挖至 13 m，第四階支撐安裝完畢時，第二階之支撐荷重超過設計值，承商立即增加數支支撐以免挫屈。十一月底，開挖繼續至 22 m，第 6 階支撐安放完畢時，亦發現有支撐超載之情形，承商在第五階及第六階之間增加一階支撐，因此最後一共有八階支撐。

第一排支柱之沉陷可以圖十中之 SP-4 歷時曲線為代表。在開挖區之東側有一地表沉陷點，MD-12，其與鋼版樁之距離與 SP-4 同。此兩點之沉陷量比較如下：

時 段	作 業	累 積 沉 陷 量 (mm)	
		SP-4	MD-12
1984 - 7	開挖至 10 m	8	4
1984 - 8	托底作業	14	4
1985 - 1	開挖至底	48	40
1985 - 10	完工	52	40

托底完成後，第一排支柱之後續沉陷為 $52 - 14 = 38$ mm，而地表之後續沉陷為 $40 - 4 = 36$ mm 反而較小，因此難以斷言托底是否達到預期效果。仔細探討可以發現樁身上部是在滑動區內，在後續開挖時承受負摩擦力，對結構物並無支撐作用，必待樁身下部與土壤有相對位移才會有摩擦抵抗及尖端阻抗。一般而言，即使是反循環樁清底已夠困難，何況微型樁。在此案例中雖有鋼條伸至底部，除非有足夠之相對位移，否則托底樁之尖端阻抗微不足道，因此對結構物之支撐全靠托底樁在影響線下部份之樁身摩擦，所以效果不彰。

2.4 案例四：聖嬰堂

聖嬰堂建於 1854 年，歷史悠久，被列為古蹟之一。教堂係磚造，大廳挑高至頂，側廊有二層，鐘塔有四層。因為捷運東西線之兩隧道由其正下方穿過，有必要以托底確保結構物之安全。

該址之地質狀況見圖十一。表層回填土約 1 至 2 m 厚，其下有一層海砂及沉泥夾層，再下是古沖積層。海砂及沉泥甚為鬆軟，其標準貫入試驗之 N 值在 5 以下，古沖積層則甚為堅硬，除上部 2m 外，其標準貫入試驗之 N 值皆在 50 以上。捷運兩個直徑 6 m 之隧道係以土壓平衡式潛盾機在古沉積層之中掘進。

聖嬰堂之結構物是建在獨立基腳之上而其底部距地面不到 2m，此點出乎意料之外因為海砂之承载力甚低理應無法承受太大荷重。托底係以微型樁施作，但其設計與政府大廈之情形略有不同。在政府大廈之案例中，微型樁是直接貫穿樁帽，而後在鑽孔內灌漿將微型樁及樁帽連成一體，而在此案例中，是在地表處打設一 75 公分厚之承載版從側向將基腳連成一體，然後再貫穿承載版以安裝微型樁。

微型樁之直徑為 22 公分，有一直徑 14 公分，厚 1 公分之鋼管置於其中，然後再將所有之空隙以水泥漿充實。此鋼管之上部塗以柏油以減少在潛盾推進時因土壤沉陷所引起之負摩擦力。微型樁之樁身長度不一，原則上以貫入影響線下至少 10 m 為準，每支樁之設計載重由 7.5 至 65 噸不等。

鐘樓部份托底之設計又與大廳不同，係以地梁將支柱連成一體，其下再以微型樁支撐。如圖十二所示，微型樁樁長 24 至 33 m 不等，內有一 28 mm 之鋼條。樁身上部 11 至 22 m 之部份套以直徑 100 mm 之塑膠管以阻絕與土壤之負摩擦力，因此洞口直徑達 140 mm，托底樁下部樁徑僅 63 mm。

在各個階段所量測之支柱沉陷量見圖十三，大廳之沉陷量可以第 73 號沉陷點之記錄為代表，而鐘樓之沉陷量可以第 92 號沉陷點之記錄為代表。第一條隧道於 1985 年 7 月發進，在 11 月間到達距教堂約 23 m 處，因為托底作業尚未完成而停止至翌年一月中再發進，迅即由教堂下方通過。第二條隧道遲至九個月後才由教堂下方通過。在第一條隧道通過後，惟恐在承載版下有空穴，再次灌漿以擠壓土壤。

記錄顯示鐘樓之沉陷量顯然較大廳之沉陷量為大，而大部份之沉陷發生在 1985 年 11 及 12 月之間，也就是托底作業之後半期，此時潛盾機停留在距第 73 號沉陷點 23 m，距第 92 號沉陷點 31.5 m 之處。圖十四顯示此兩沉陷點是在 30 度影響線外，沉陷應係托底作業所引起與潛盾掘進無關。大廳及鐘樓之平均沉陷量各為 45 及 70 mm，最大沉陷量各為 50 及 90 mm。其後在第一條隧道通過時沉陷量僅增加 7 mm，第二條隧道通過時增加 3 mm，遠較因托底所引起之沉陷為小。

在此例中，托底樁是否發揮其功效又是一值得爭論之話題，雖然托底成功地減少後續沉陷，但托底作業本身導致大量沉陷。"如果"潛盾操作正常，即使沒有托底，結構體之沉陷亦不致達到量測之值。但反言之，如有意外則後果堪虞。從技術觀點而言，托底並不是最佳選擇，而是應公眾保護古物之壓力而採之權宜措施。此類情事屢見不鮮，亦突顯工程師之無奈。

五、 結論

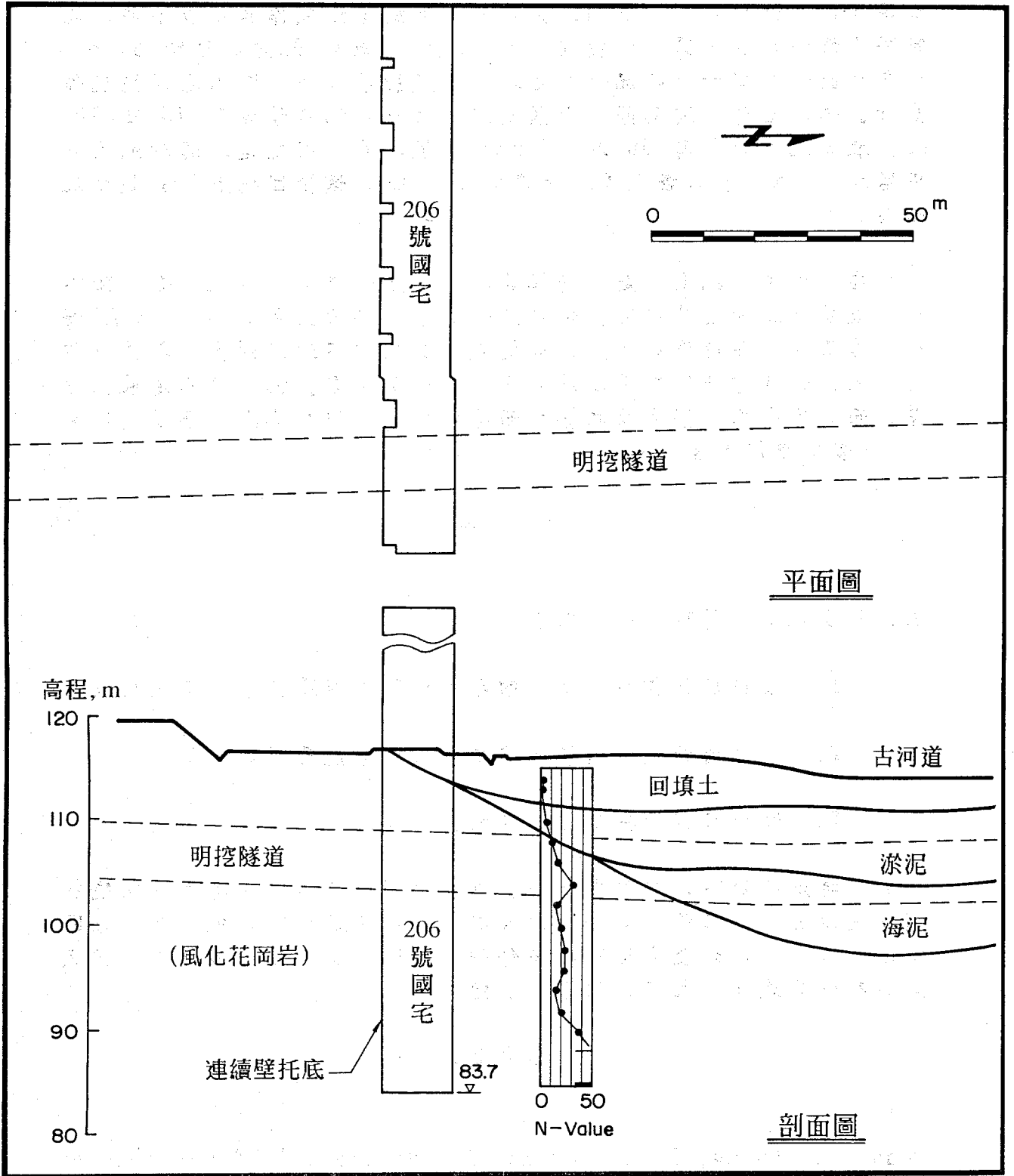
上文所呈現之資料可歸納成以下之結論：

1. 在托底作業時，結構體即可能因土壤遭受擾動而產生沉陷
2. 托底樁必須在後續沉陷相當大時才能發揮其作用
3. 預力可減少托底完成後之後續沉陷

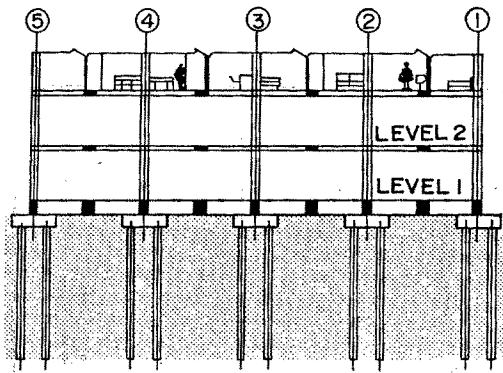
托底在特殊情況下，絕對有其必要。如案例一所示，基樁被切除後有賴托底以支撐結構體。此外，因土壤流失以致建物下方被淘空，或因潛盾施工不當以致產生地陷之事件時有所聞，在此種情形之下，托底顯然有保護建物使之不致傾塌之功能。

參考文獻

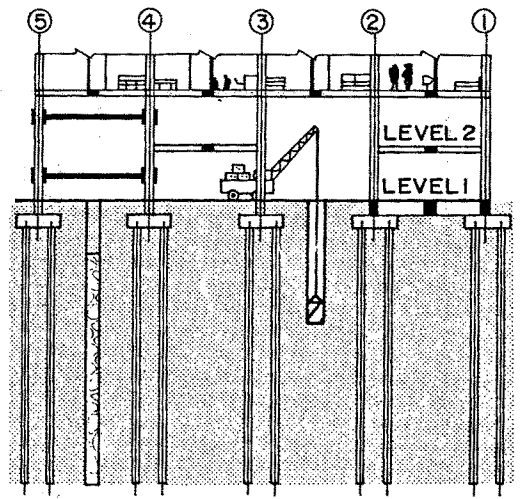
Todo, T., Hwang, R. and Hulme, T. "Settlement of Underpinned Structures in Singapore", International Geotechnical Conference, New Technology for Foundation Engineering and Construction (NTFE92), Hanoi, Vietnam, October 1-3, 1992



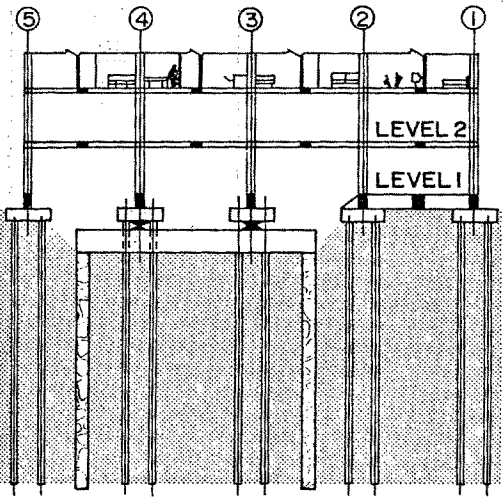
圖一 第206號國宅之位置及土層狀況



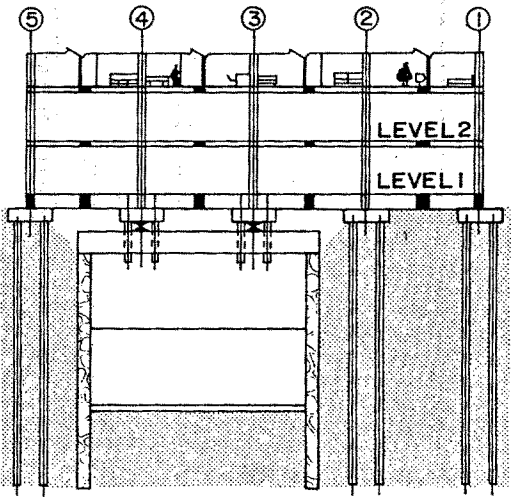
(1) 施工前狀況



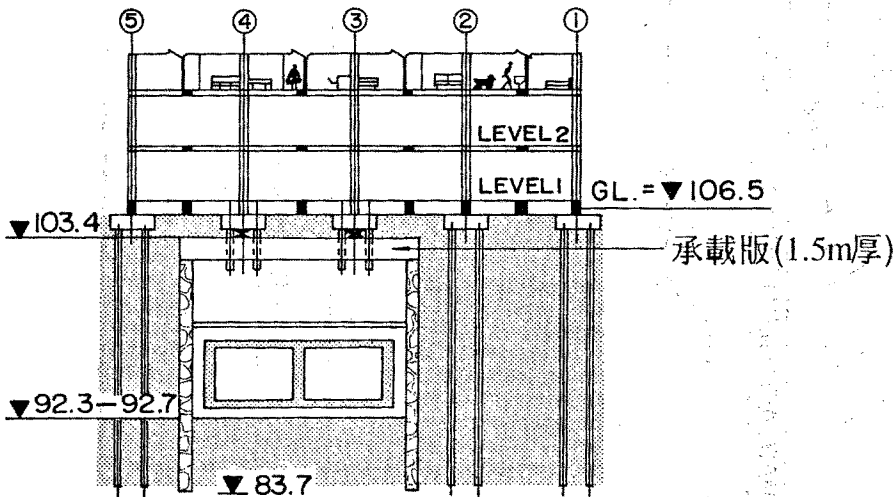
(2) 連續壁施作



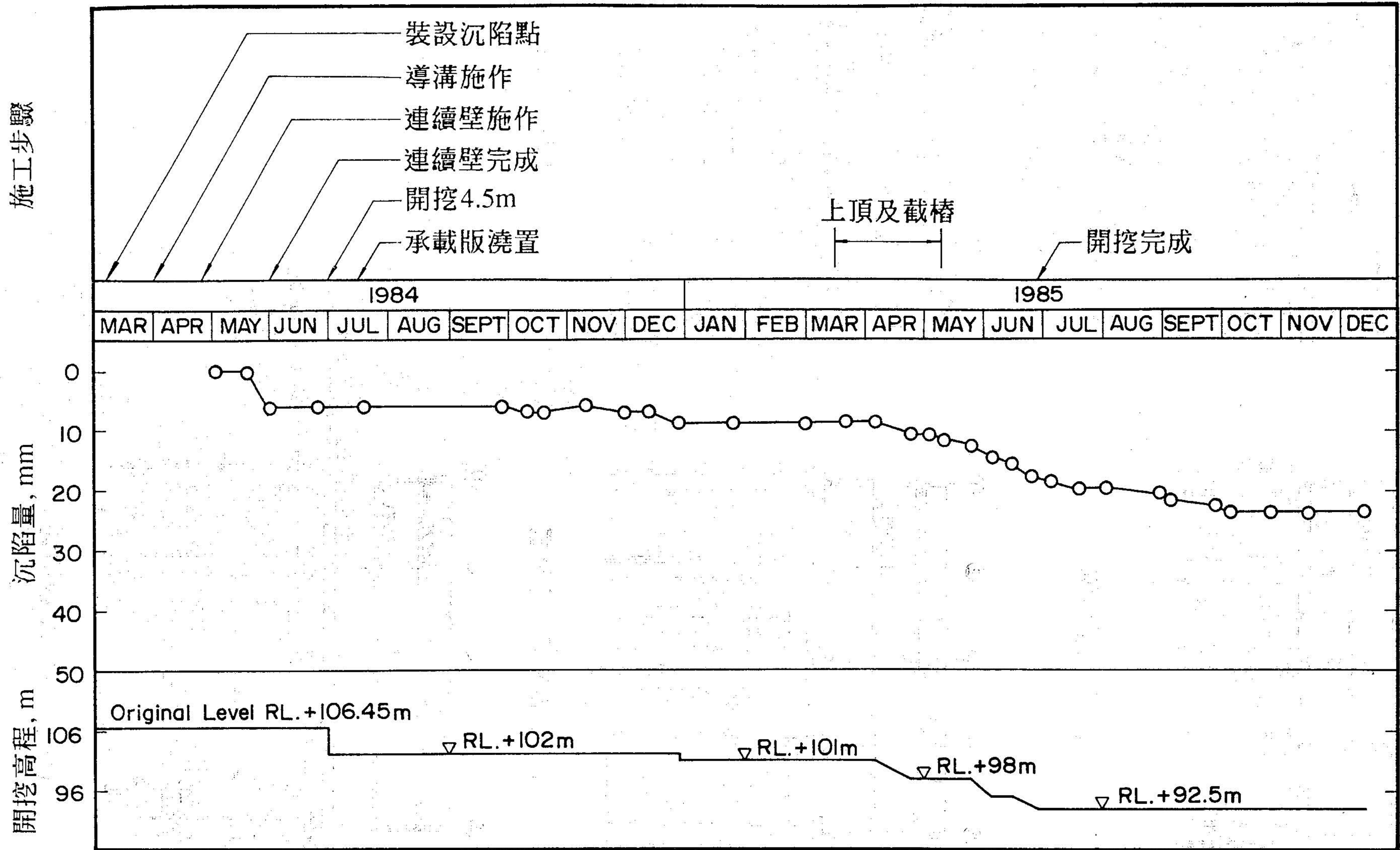
(3) 開挖及承載版澆置



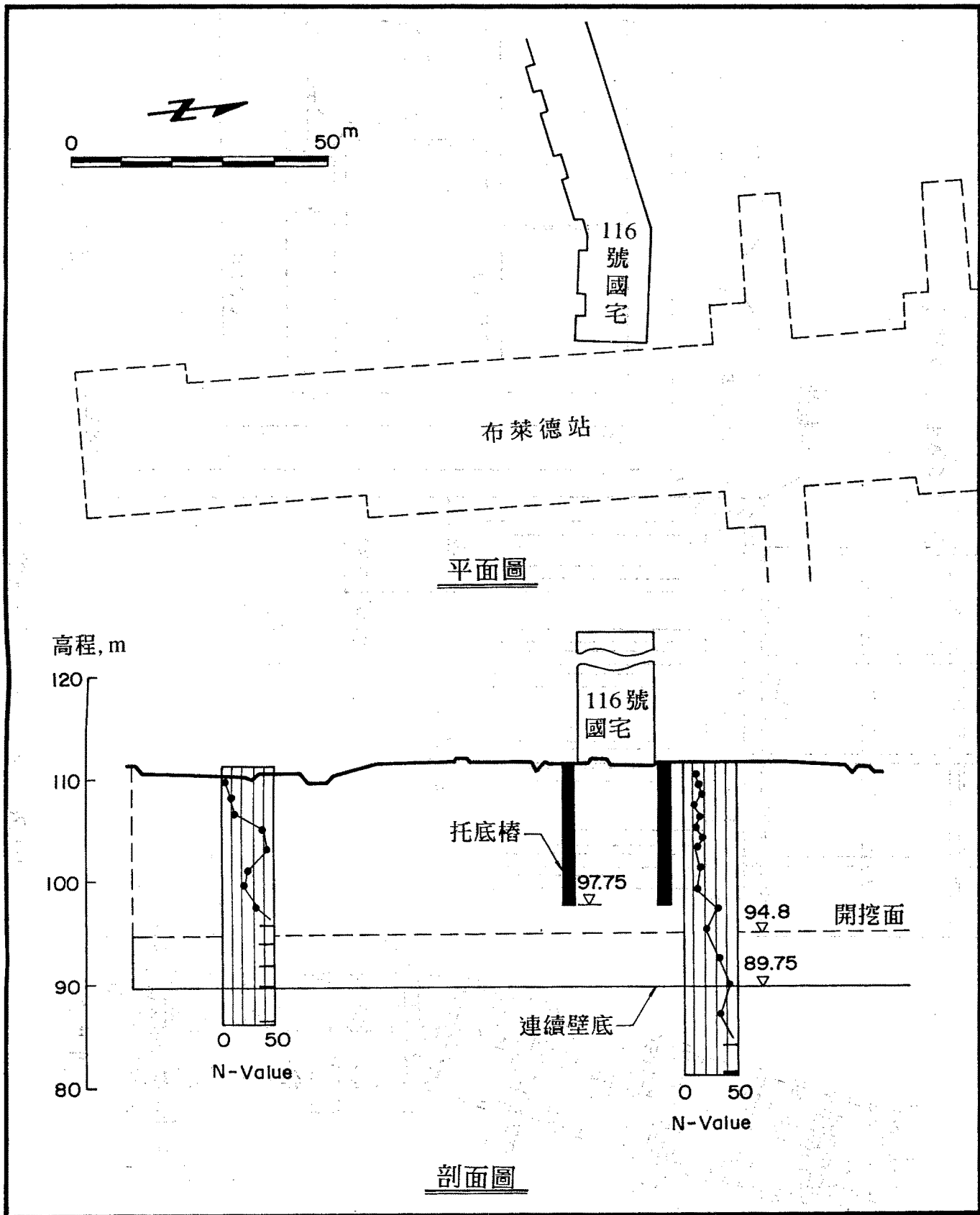
(4) 切樁及開挖



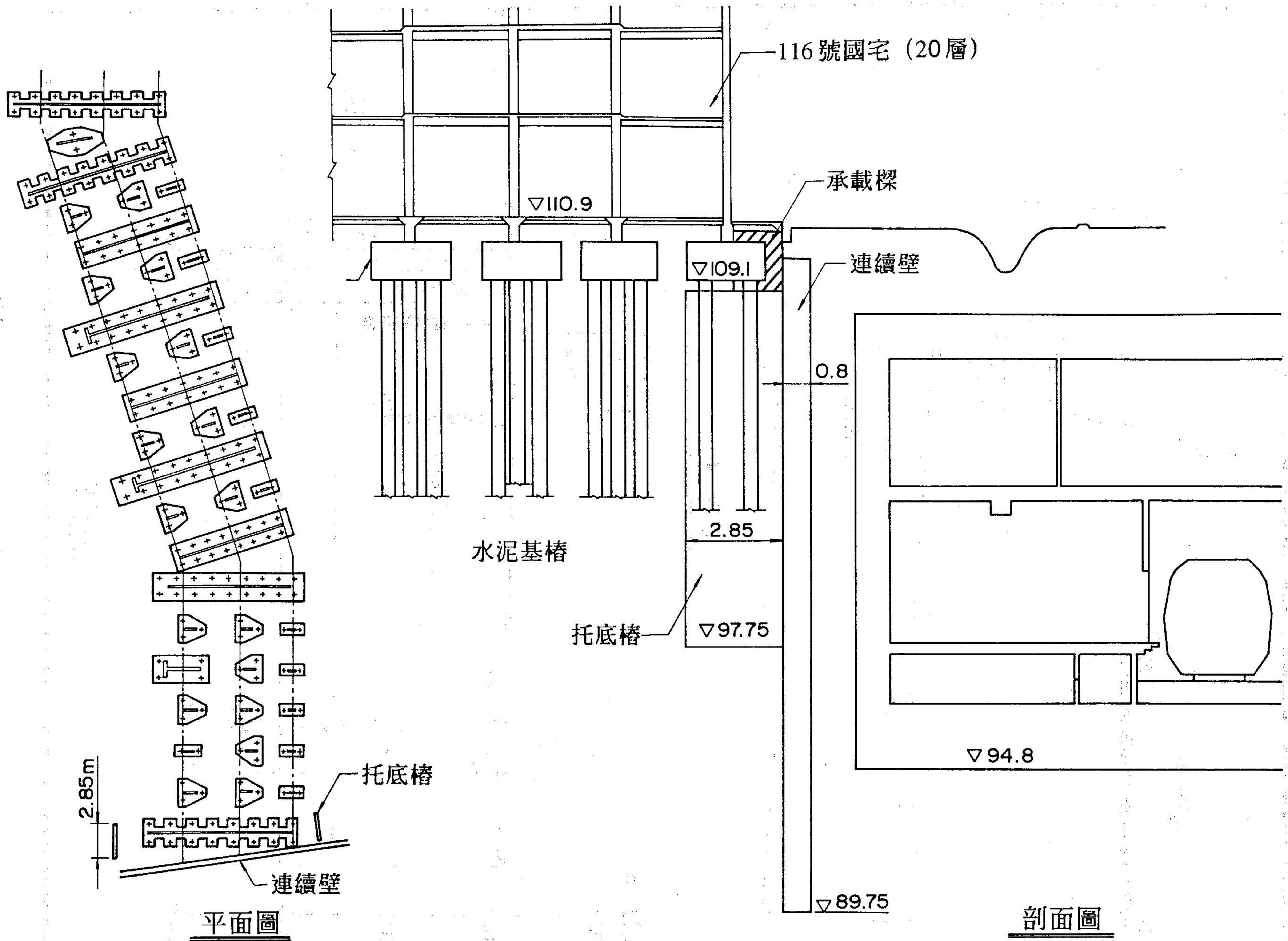
(5) 隧道永久結構澆置



圖三 第15號沉陷點之記錄



圖四 第116號國宅之位置及土層狀況

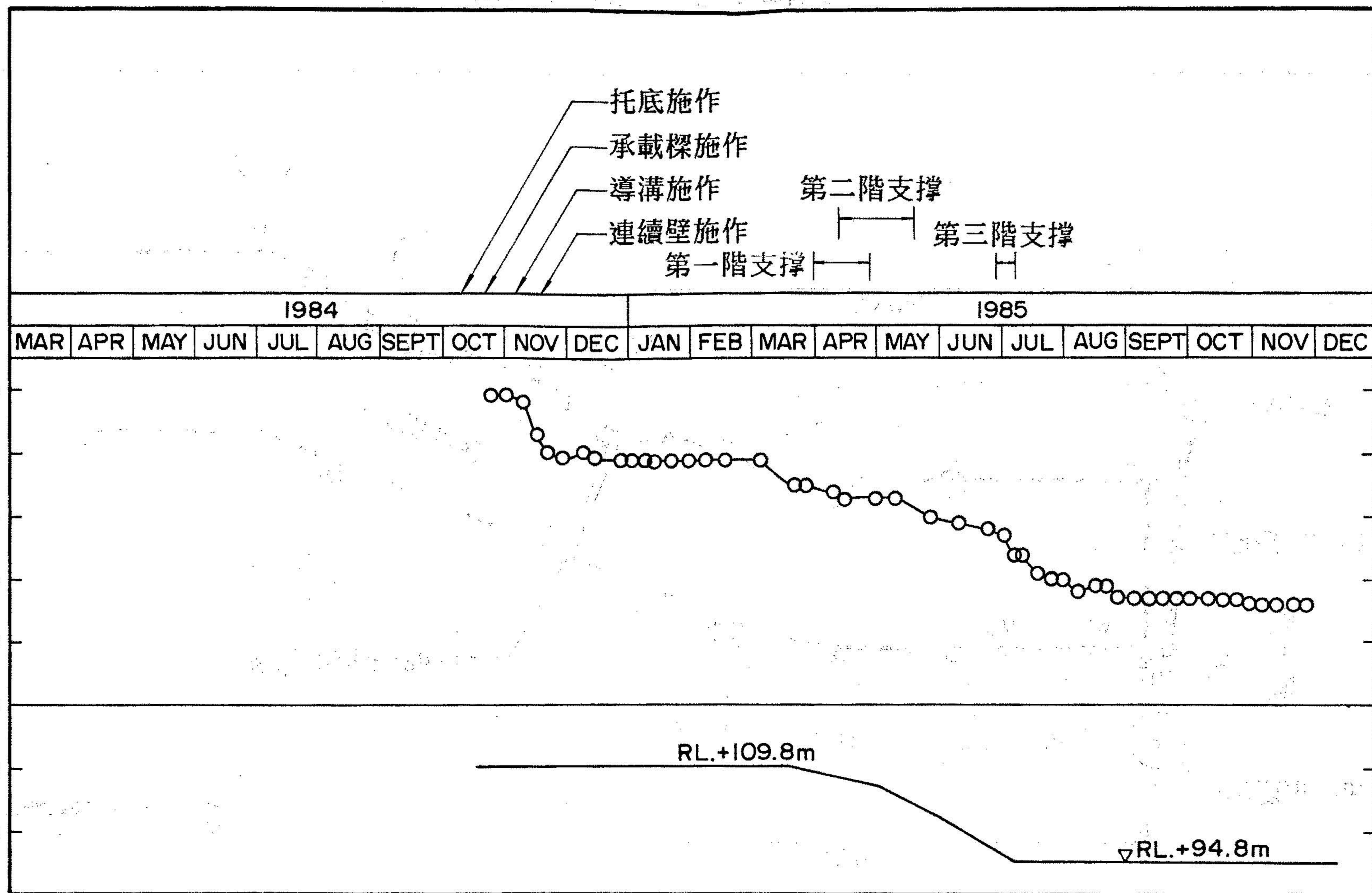


圖五 第116號國宅之托底理念

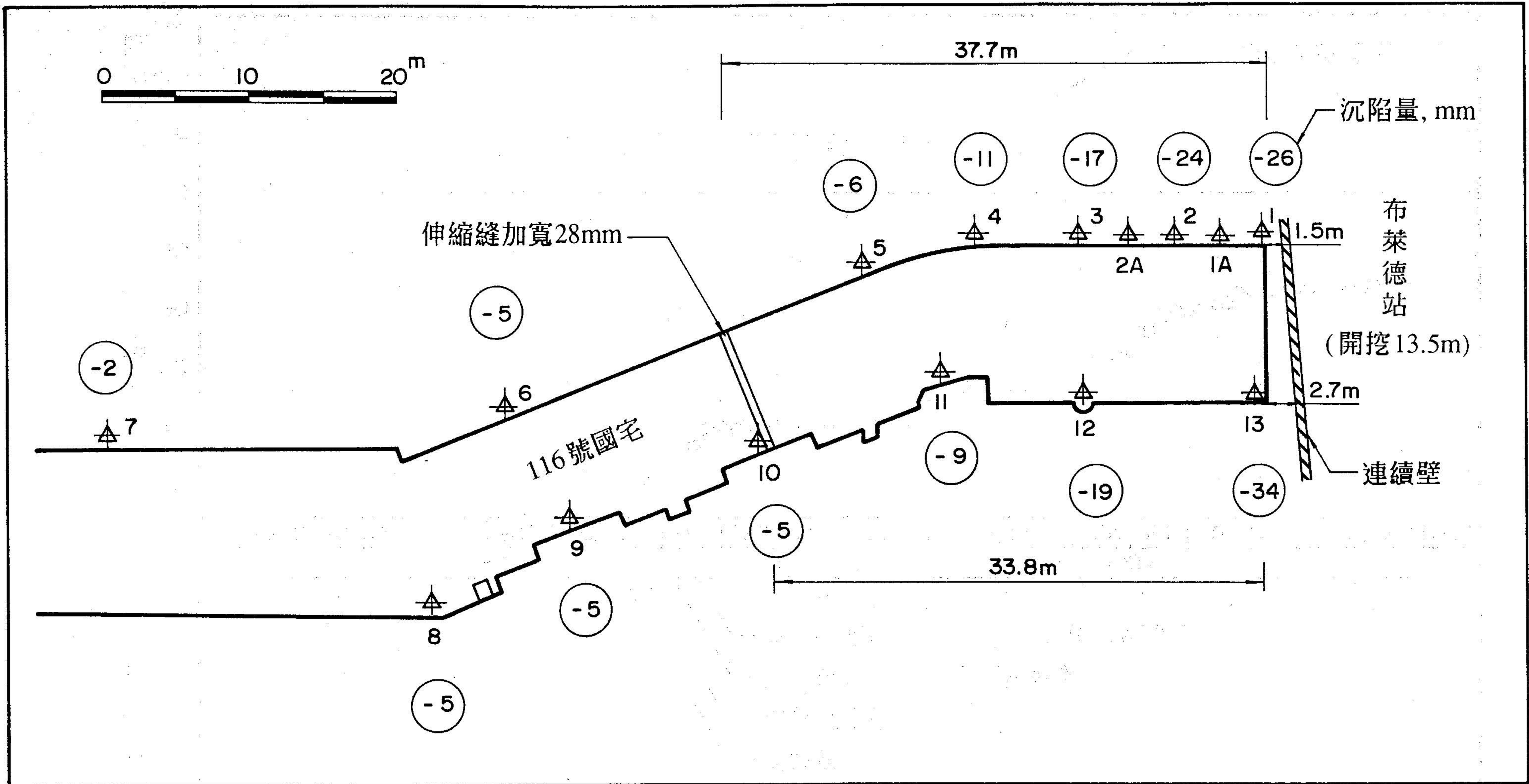
施工步驟

沉陷量, mm

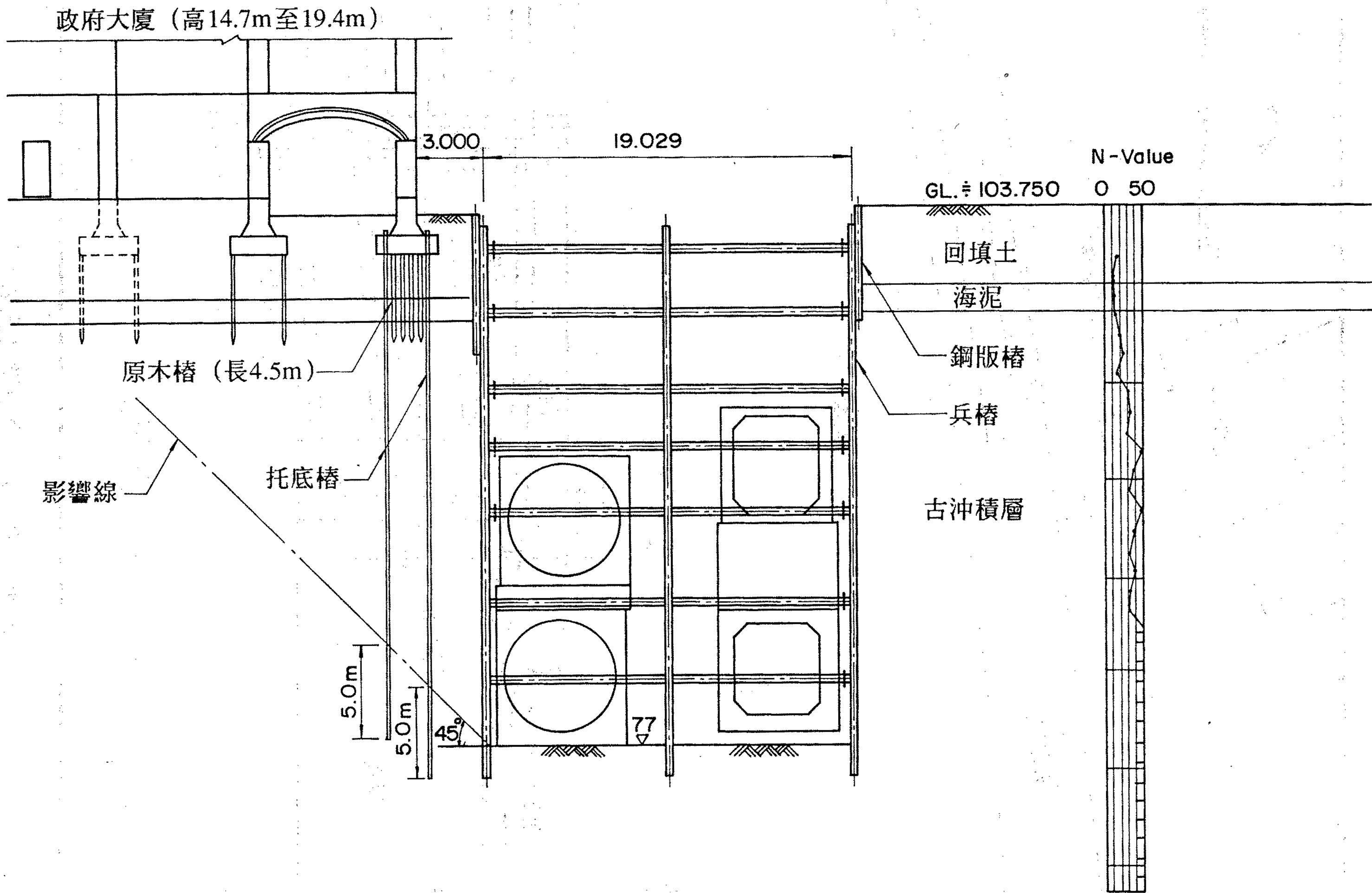
開挖高程, m



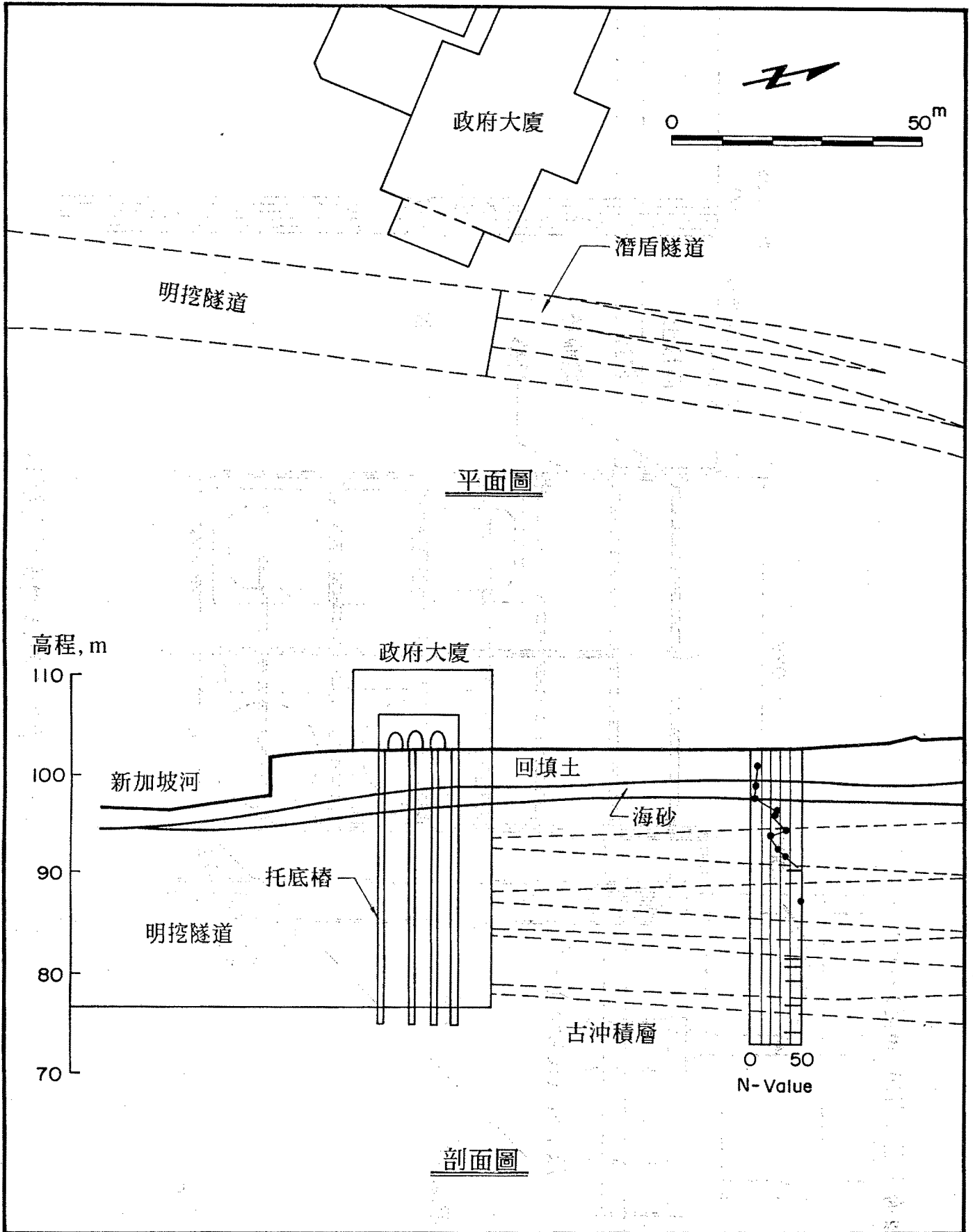
圖六 第13號沉陷點歷時曲線



圖七 第116號國宅之最終沉陷量



圖八 政府大廈基礎與捷運隧道

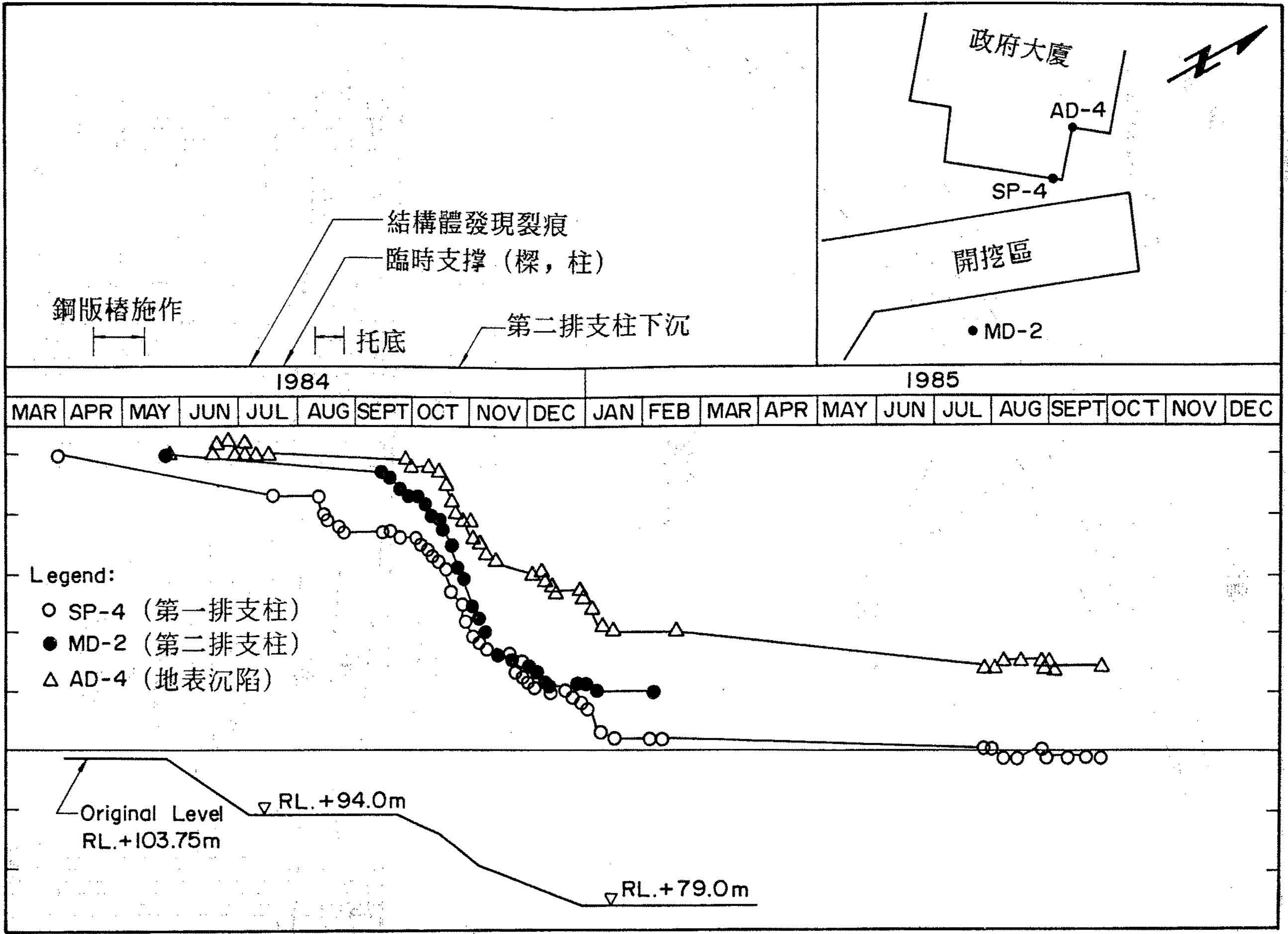


圖九 政府大廈之位置及土層狀況

施工步驟

沉陷量, mm

開挖高程, m



圖十 政府大廈之沉陷記錄

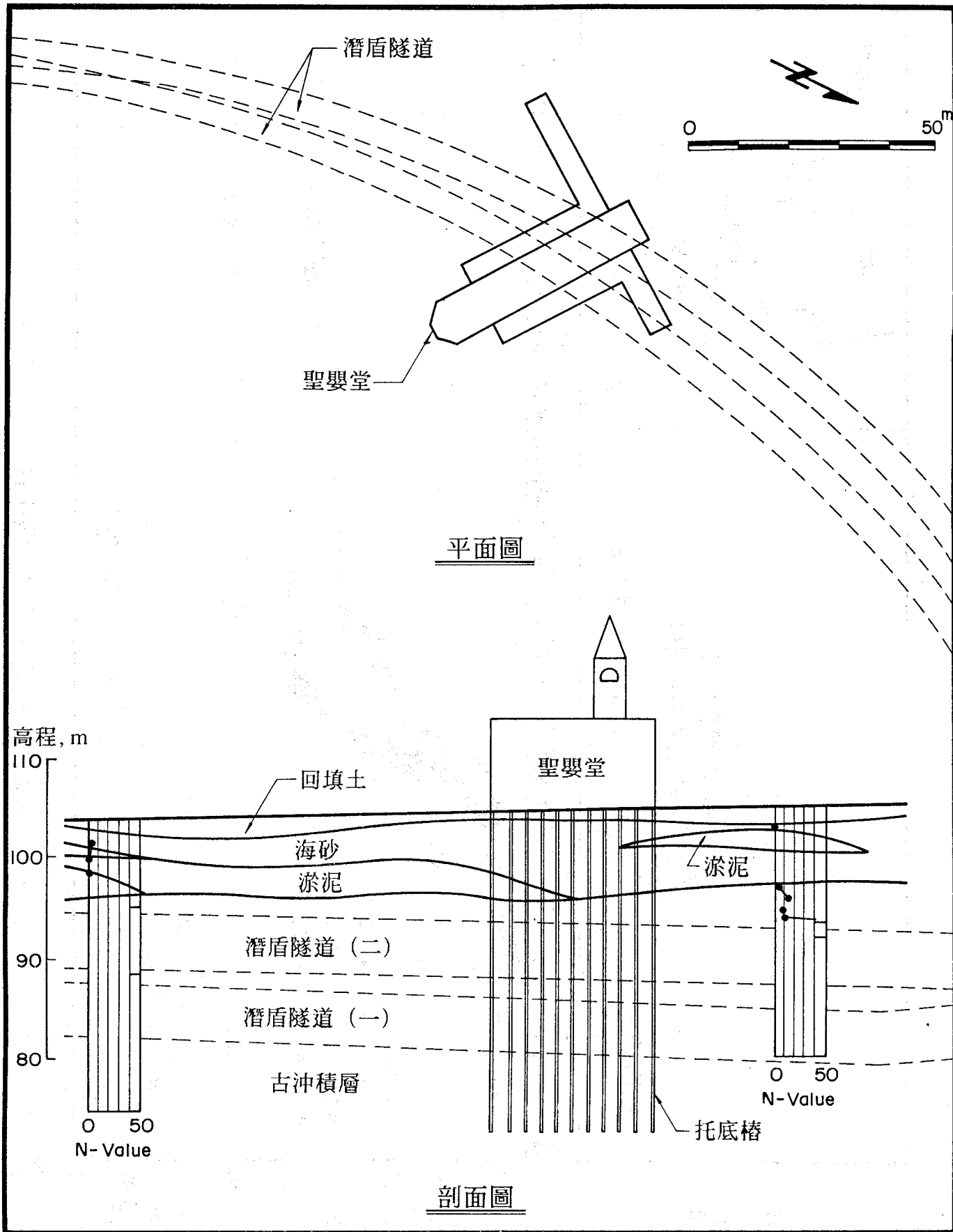
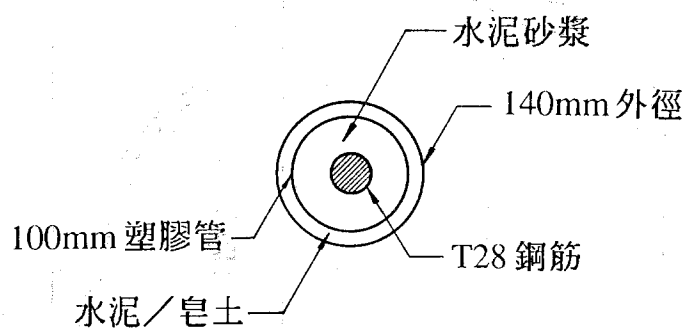
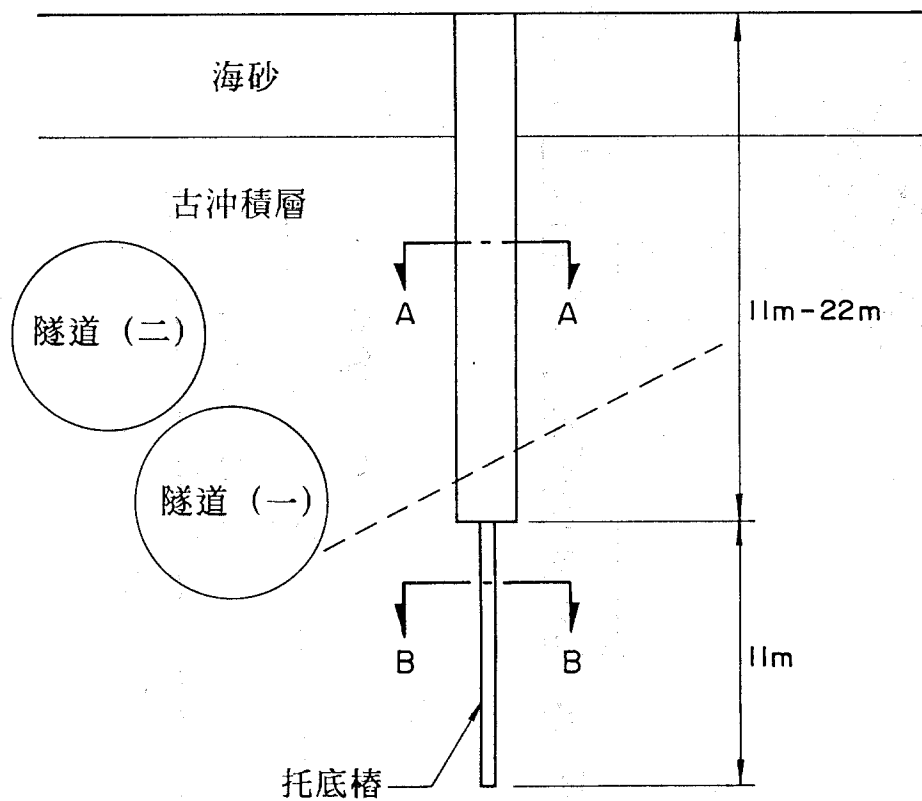
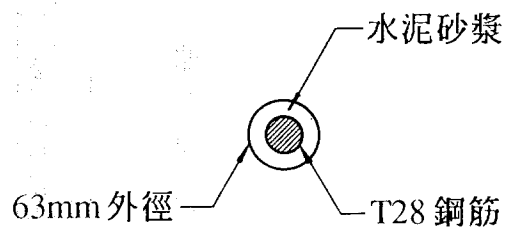


圖 十一 聖嬰堂之位置及土層狀況



A-A 剖面



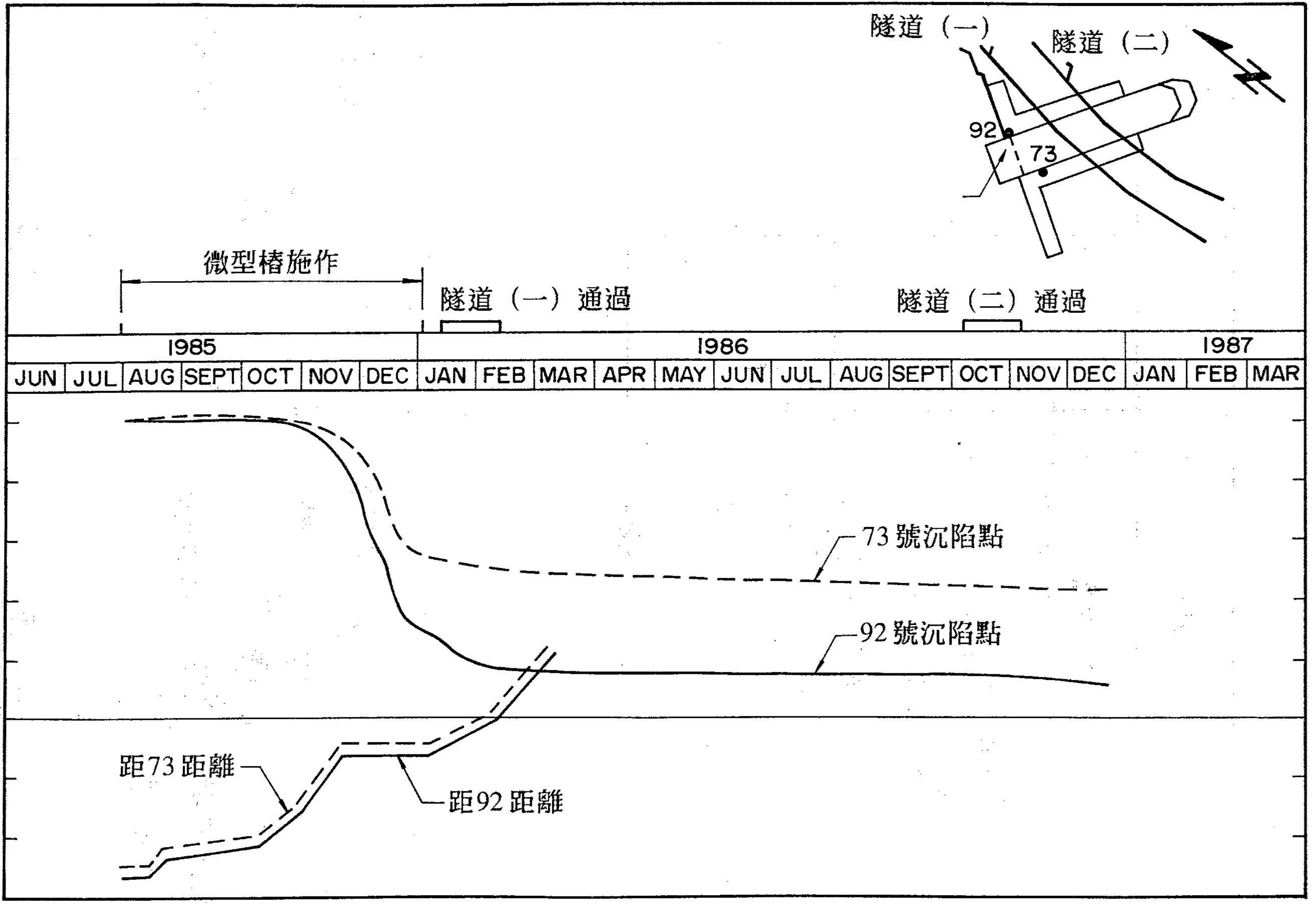
B-B 剖面

圖十二 鐘樓部份之托底樁

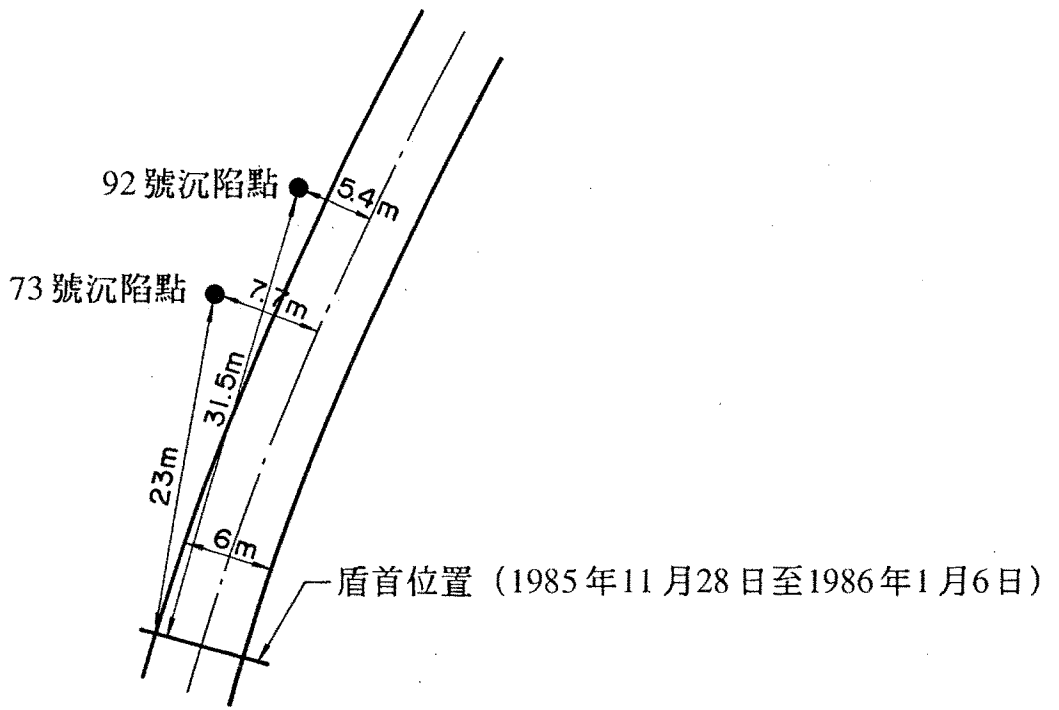
施工步驟

沉陷量, mm

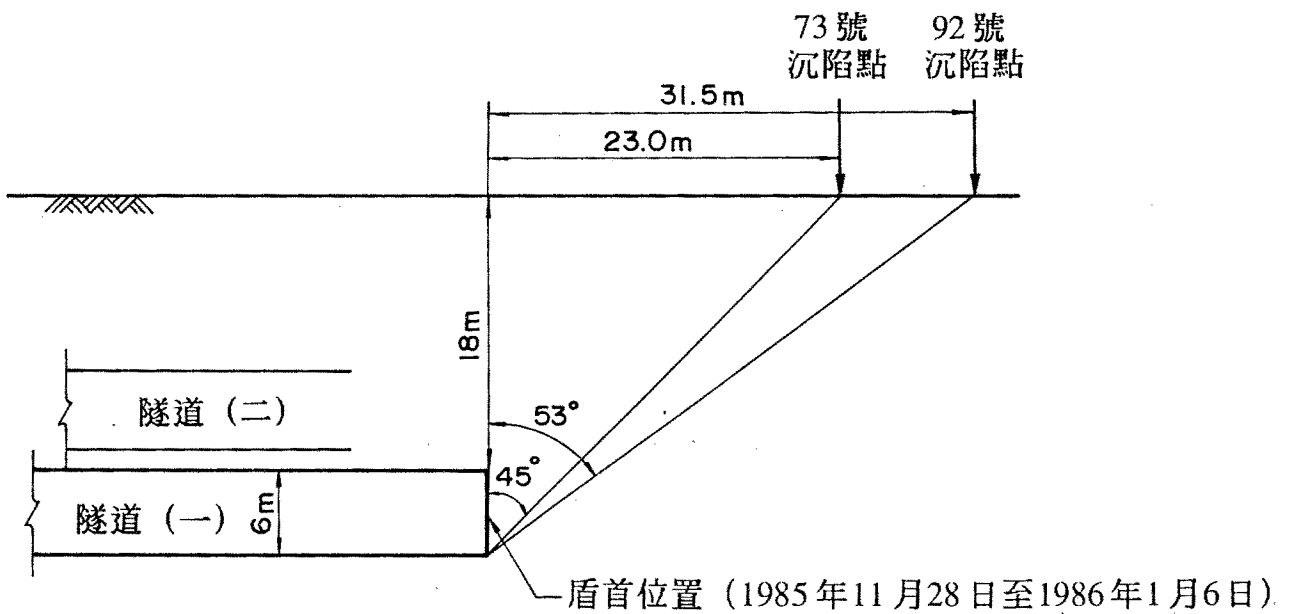
潛盾與沉陷點距離(m)



圖十三 聖嬰堂沉陷量



平面圖



剖面圖

圖十四 托底施作時盾首位置