

安平港長期性地下水位變化 與分層地層下陷監測研究

執行單位：大地工程組

執行期間：民國八十五年七月一日至
民國八十六年六月三十日

計劃主持人：賴聖耀副研究員

協同主持人：李豐博、陳志芳

參與人員：陳義松 技術員

李春榮 技術員

張阿平 技術員

張惠華 技術員

安平港長期性地下水位變化 與分層地層下陷監測研究

摘 要

安平港位處於台南市安平區，鹽水溪南岸之濱海地區，其地層大都屬現代沖積層，土層疏鬆軟弱壓密固結尚未全部完成，極可能因地下水抽取、大規模海埔新生地回填、港灣構造物等原因造成地層下陷。

本計劃為一年之短期計劃，於港區內設立一孔150m之水位監測井及152m之沉陷監測井，經地下水位監測結果，淺層地下水位無多大變化，約在-0.5~-1.5公尺間反復振盪，而深層之95及148公尺處之地下水位已分別降至-2.5m及-4m。由地層下陷監測結果顯示，安平港一年之沉陷量約為0.8公分，其中百分之五十之沉陷在142~152m處發生，因此152m以上更深之處亦有可能沉陷發生，亦即安平港之每年沉陷可能大於0.8公分，由水位及沉陷監測結果及分析顯示，安平港區附近有超抽深層之地下水，引致區域性之深層水位下降，致使港區內每年有0.8公分以上之沉陷。

本計劃亦對安平港目前剛完成之抽砂填土區及北防波堤荷重可能引致區域性之差異沉陷進行分析，由分析結果顯示：抽砂填土5m高可能引致之最大沉陷量約為75.22公分。而由北防波堤荷重引起之沉陷分析，結果亦顯示可能之最大沉陷亦有69.31公分。

綜合上述沉陷監測與分析結果，期能對安平港擴建之港灣工程提供規劃設計之參考，並成為港灣安全監測之一環。

目 錄

摘 要	i
目 錄	ii
表目錄	iii
圖目錄	iv
一、前 言	賴聖耀 1
二、安平港地質概況及相關資料分析	陳志芳、賴聖耀 2
2-1 安平港之位置與地形	2
2-2 安平港地層	2
2-3 安平港地質	4
2-4 安平港附近地區之沉陷	20
三、地層下陷行為與分析方法	賴聖耀、李豐博 24
3-1 超抽地下水引致之有效應力增量分佈	26
3-2 超抽地下水之下陷行為	26
3-3 地層下陷分析方法	29
四、地層下陷與水壓監測	賴聖耀、陳志芳 35
4-1 監測系統規劃與安裝	35
4-2 監測井地質分析	39
4-3 監測結果分析	44
4-4 安平港下陷潛能分析	60
五、安平港其他沉陷因素探討分析	賴聖耀、李豐博 69
5-1 安平港填土之沉陷分析	69
5-2 北防波堤荷重引起之沉陷分析	82
六、結論與建議	賴聖耀 88
參考文獻	89
附 錄	A-1

表目錄

表4-1 安平港淺層水位井之量測資料-----	47
表4-2 安平港分層沉陷之量測資料-----	57
表4-3 安平港地層各層次之沉陷特性參數-----	62
表4-4 各種土壤之壓縮係數 C_u 值-----	62
表5-1 安平港填土5m引致各土層之沉陷分析表 ($C_u=\text{mean}$) ---	74
表5-2 安平港填土5m引致各土層之沉陷分析表 ($C_u=\text{max}$) ----	75
表5-3 安平港北防波堤荷重引致之沉陷分析表 ($C_u=\text{mean}$) ---	85
表5-4 安平港北防波堤荷重引致之沉陷分析表 ($C_u=\text{max}$) ----	87

圖目錄

圖 2-1	安平港附近地區地質分佈圖-----	3
圖 2-2	安平港平面規劃佈置圖-----	5
圖 2-3	安平港#1、#2、#3、#4 碼頭地層柱狀圖-----	6
圖 2-4	安平港#1、#2、#3、#4 碼頭地層剖面圖-----	7
圖 2-5	安平港#5A、#5、#6、#7 碼頭地層柱狀圖-----	9
圖 2-6	安平港#5A、#5、#6、#7 碼頭地層剖面圖-----	10
圖 2-7	安平港#8、#9、#10 碼頭地層柱狀圖-----	11
圖 2-8	安平港#8、#9、#10 碼頭地層剖面圖-----	12
圖 2-9	安平港北內堤及北護岸地層柱狀圖-----	14
圖 2-10	安平港北內堤及北護岸地層剖面圖-----	15
圖 2-11	安平港南內堤及南護岸地層柱狀圖-----	16
圖 2-12	安平港南內堤及南護岸地層剖面圖-----	17
圖 2-13	安平港外防波堤地層柱狀圖-----	18
圖 2-14	安平港外防波堤地層剖面圖-----	19
圖 2-15	安平港碼頭地層柵狀圖-----	21
圖 2-16	安平區沉陷等值線圖-----	23
圖 3-1	沉陷分析之流程圖-----	25
圖 3-2	自由水位下降引致之有效應力增量分佈-----	27
圖 3-3	受壓水位下降引致之有效應力增量分佈-----	28
圖 4-1	安平港地下水壓及地層下陷監測井位置圖-----	36
圖 4-2	儀器相關位置圖-----	37
圖 4-3	電子式地下水壓計裝設圖-----	38
圖 4-4	磁感式層別沉陷計裝設圖-----	40
圖 4-5	沉陷計安裝示意圖-----	41
圖 4-6	安平港地層柱狀圖及沉陷計、水壓計埋設深度-----	42
圖 4-7	台南地區月平均雨量分佈-----	45
圖 4-8	台南地區 85、86 年之日降雨量統計圖-----	46
圖 4-9	安平港 8m 之地下水位變化圖-----	49

圖4-10	安平港27m之地下水位變化圖-----	50
圖4-11	安平港57m之地下水位變化圖-----	51
圖4-12	安平港95m之地下水位變化圖-----	52
圖4-13	安平港120m之地下水位變化圖-----	53
圖4-14	安平港148m之地下水位變化圖-----	54
圖4-15	安平港分層地下水位變化圖-----	55
圖4-16	安平港分層個別下陷量圖-----	58
圖4-17	安平港地層分層下陷量累積圖-----	59
圖4-18	台南仁德站之地層柱狀圖-----	61
圖4-19	安平港淺層水位下降之沉陷曲線-----	64
圖4-20	安平港深層水位下降之沉陷曲線-----	65
圖4-21	安平港淺層水位下降10m之各層沉陷曲線-----	67
圖4-22	安平港深層水壓下降 $10t/m^2$ 之各層沉陷曲線-----	68
圖5-1	安平港8-12號碼頭填土區-----	69
圖5-2	I與m和n之變化-----	70
圖5-3	安平港8-12號碼頭區填土5m之應力增量圖-----	72
圖5-4	安平港8-12號碼頭區填土5m之分析結果-----	76
圖5-5	安平港8-12號碼頭區填土5m之沉陷等值線圖-----	77
圖5-6	安平港8-12號碼頭區填土5m之立體沉陷圖-----	78
圖5-7	距填土邊界長度與沉陷量之關係圖-----	79
圖5-8	安平港填土5m引致健康路之沉陷-----	80
圖5-9	安平港填土5m引致1-7號碼頭之沉陷-----	81
圖5-10	北防波堤-11M -12M斷面-----	83
圖5-11	中間點A應力分析分解圖-----	83
圖5-12a	路堤載重-----	84
圖5-12b	路堤載重之影響值（取自Osterberg, 1957）-----	84

一、前言

安平港位處於台南市安平區，鹽水溪南岸之濱海地區，其地層大都屬現代沖積層，土層疏鬆軟弱壓密固結尚未全部完成，極可能因地下水抽取、大規模海埔新生地回填港灣構造物，及地震等原因造成地層下陷。

近年來由於地下水大量之開發引致之地層下陷問題，在台灣各地區已是一種普遍現象。而在沿海地區，亦由於養殖業大量開發抽取超額之地下水，導致愈演愈烈之地層下陷，其中以屏東地區累積最大下陷量 2.88 公尺為最嚴重，雲林、嘉義地區累積最大下陷量約 1.5~2.0 公尺次之，而安平港附近地區有多處之魚塭及工業區，超抽地下水極可能發生，由於超抽地下水易造成區域性之地下水位下降，安平港地區，其地下水位已降到海平面以下，有引發海水入侵之疑，若水位繼續下降，恐會導致地層下陷。

港灣碼頭設施大都由抽砂填土而成，安平港回填工程共分九區，面積共達 129 公頃，目前已完成第一區貨櫃碼頭 21 公頃之抽砂回填，大規模之填土易造成區域性之不均勻沉陷，致使碼頭產生龜裂或破壞，尤其貨櫃碼頭之貨櫃裝卸及堆置漸朝自動化設計，（如荷蘭鹿特丹港貨櫃碼頭之無人電動導引車（AGV）自動系統），碼頭地面少許之差異沉陷，皆易使碼頭自動化之機械設備損壞或喪失使用功能。

本計劃為一年之短期計劃，除對安平港之地下水位與地層下陷進行監測，探討地下水位下降引致港區之下陷行為與下陷潛能外，亦對安平港目前剛完成之抽砂填土區可能引致區域性之差異沉陷進行分析，綜合上述沉陷監測與分析結果，期能對安平港擴建之港灣工程提供規劃設計之參考，並成為港灣安全監測之一環。

二、安平港地質概況及相關資料分析

2-1 安平港之位置與地形

安平港位於台南市西側近鹽水溪出海口南側，此區域屬海岸沖積平原，尚為幼年期，故瀕海地區尚為卑濕之沼澤地，海岸遠而淺，沿海砂洲甚為發達，平原面除有少數新成河與延長河切割成漸淺河溝外，地面尚稱完整，地勢平坦且低窪，地形高度均不超過5公尺屬於相當平坦地區，安平港北側約10公里處為曾文溪之出海口，曾文溪挾帶之沉積物間接影響安平港附近海岸地形。

2-2 安平港地層

安平港地區為全新世沉積區，主要以砂嘴與濱海沉積，新潟湖沉積為主，鄰近周圍尚有台南層，潟湖及沼澤沉積、三角洲沉積等。

曾文溪挾帶沉積物，部份沿著安平港附近沿岸形成砂嘴與濱海沉砂洲。而鹽水溪則挾帶較細粒沉泥質土壤堆積於砂洲東側較低窪處形成了新潟湖沉積。

安平港及其鄰近地區地質分佈情況如圖 2-1 所示，茲將說明如下：

(1) 砂嘴與濱海沉積

砂嘴為海濱最常見的沉積現象之一，是一長條砂礫所形成的狹脊陸地上的海灘延伸入海中，大致和海岸線平行，砂嘴沉積由其外形容易分辨出來，其分佈在安平港附近海濱，主要由砂丘形成。

(2) 新潟湖沉積

新潟湖沉積主要分佈在潟湖及沼澤沉積區，安平港附近均屬此種沉積層，土地利用大都以鹽田及魚塭為主。

(3) 三角洲沉積

三角洲沉積主要分佈在曾文溪入海口前之兩岸，沉積物部份含鹽份，本區在安平港北側與新潟湖沉積及台南層呈不規則之相接。

2-3 港區地質

規劃之安平港除了主航道之南、北、內、外防波堤外，尚有客貨、散雜貨、水泥及化學品等 31 席各類用途碼頭如圖 2-2，其中 #1 ~ #4 為散雜貨及客貨碼頭，#5A ~ #7 皆是散雜貨碼頭，#8 ~ #14 為環保中心、貨櫃及散雜貨碼頭，#15 ~ #20 為水泥專用碼頭，#21 ~ #31 大都是散雜貨碼頭，僅 #21、#22 是化學品及油類使用碼頭。

地質大部分屬於漁塭區之地層，表層含有貝殼之細砂或鬆軟之砂質壤土，下層為泥質壤土之沖積層，砂礫則來自曾文溪、鹿耳門溪、鹽水溪及二仁溪。而根據已搜集之安平港鑽探資料，可將港區分為 6 個區域來分析，各個區域之鑽探深度約在 25 公尺 ~ 55 公尺左右，而土層大致以 6 ~ 8 個層次來研判，茲依各不同區域土層自上而下概述如下：

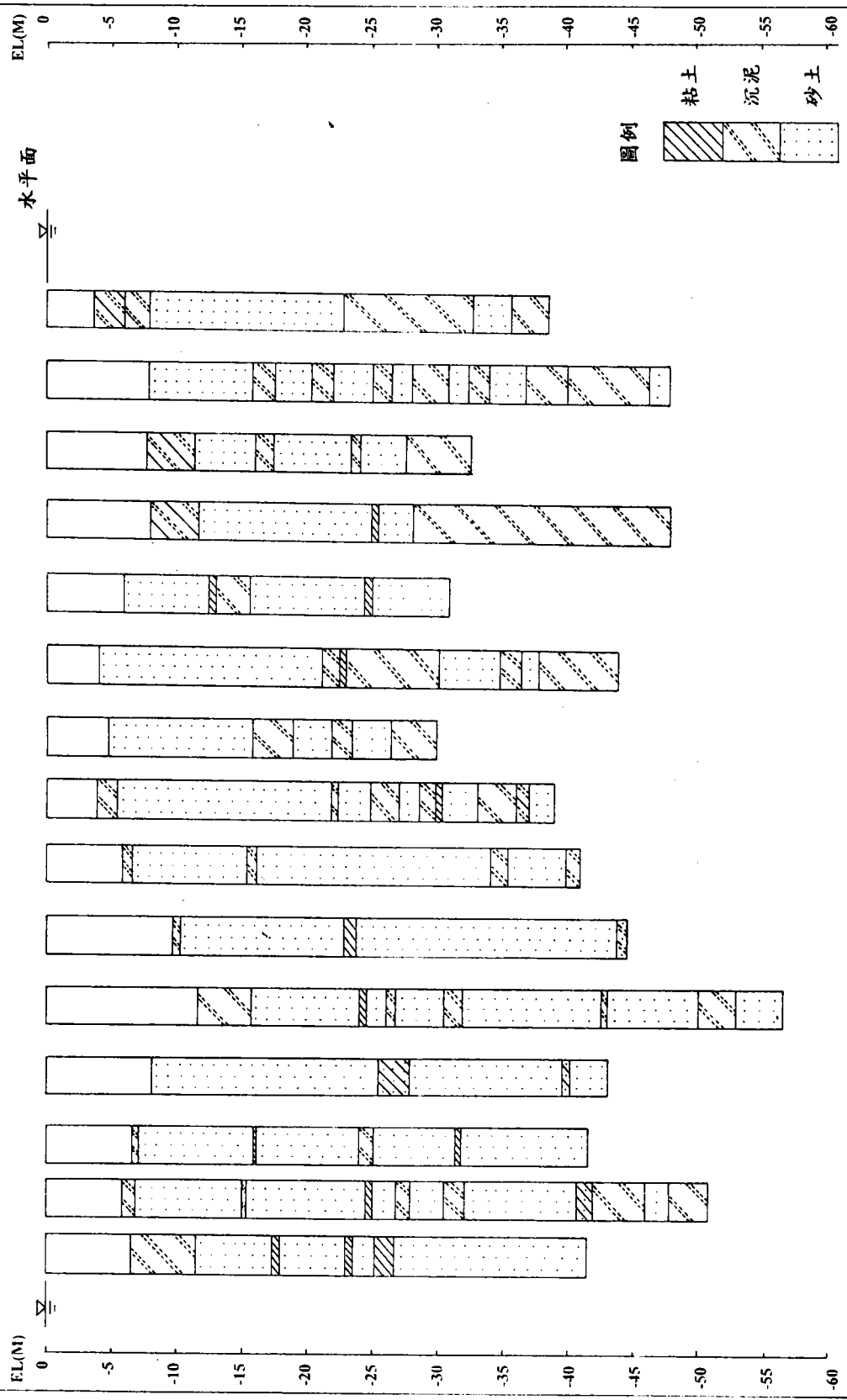
(1) 1、2、3、4 號碼頭：

#1 ~ #4 碼頭共收集 15 個間距在 25 公尺 ~ 50 公尺之海上鑽孔如圖 2-3、2-4，各鑽孔深度為 30M ~ 57M，海床至海平面平均約 6 公尺。土層大略以沉泥質細砂(SM)、砂質沉泥(ML)或夾沉泥質粘土(CL)薄層等三種土層沖積而成。靠近海床面，為 2 至 4 公尺厚之砂質沉泥或夾粘土薄層，其標準貫入 N 值在 2 至 5 屬極軟弱稠度。

海床表土層下至 EL. 25M 以中等緊密之灰色沉泥質砂土層為主，但於 -16M 及 -23M 處各有平均約 2 公尺厚之灰色沉泥或黏土層。

-25 公尺至 -53 公尺深皆以沉泥與砂土層分佈，其中 -28 公尺 ~ 33 公尺及 -36 公尺 ~ -48 公尺是較厚之灰色黏土質沉泥層，且有

圖 2-3 安平港#1、#2、#3、#4 碼頭地層柱狀圖



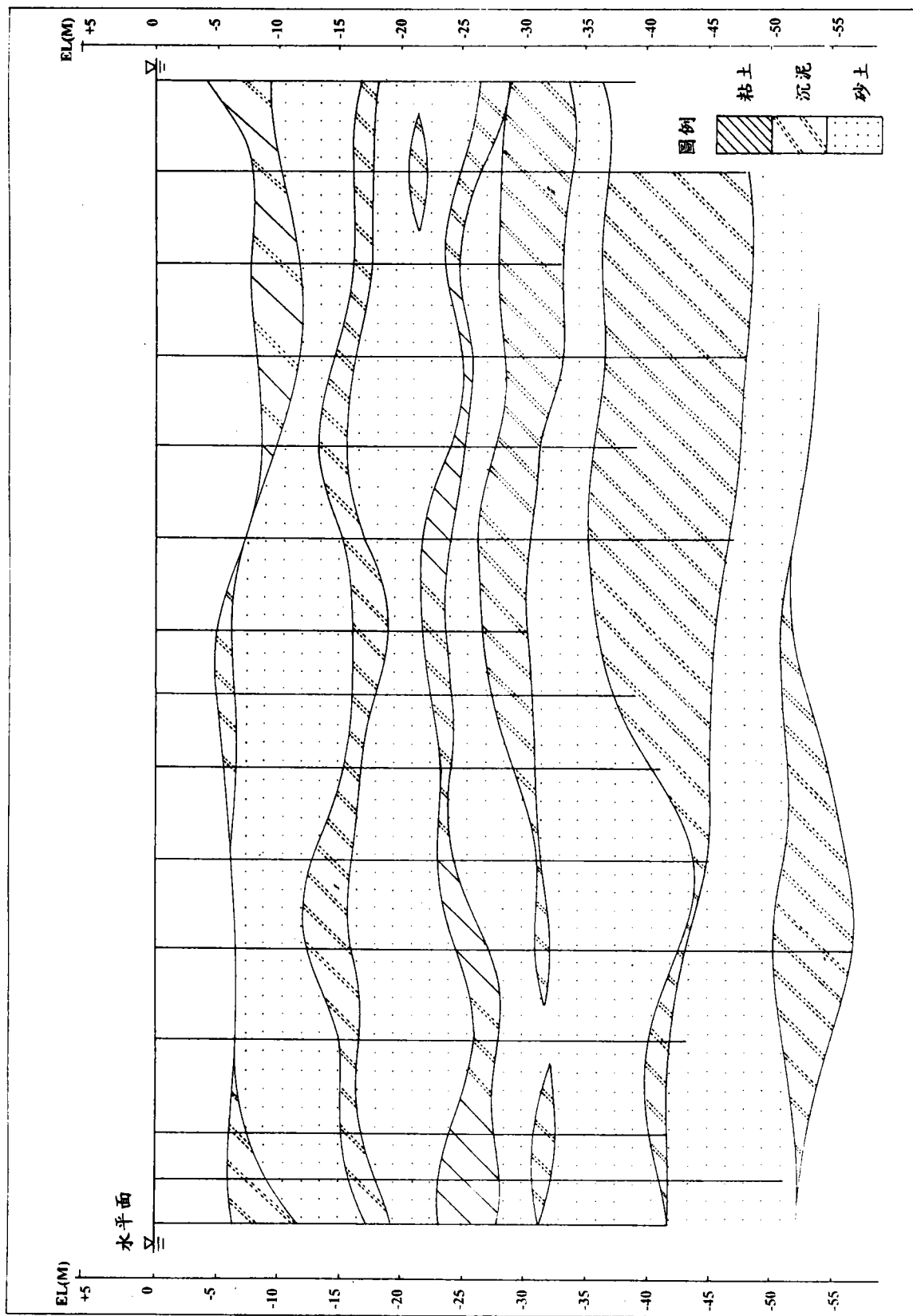


圖 2-4 安平港#1、#2、#3、#4 碼頭地層剖面圖

由 # 4 碼頭逐漸向 # 2 、 # 1 碼頭尖減消失之趨勢。

(2) 5A 、 5 、 6 、 7 號碼頭：

本區地質鑽探，沿著碼頭線共有 25 個孔距皆為 25M 之鑽孔，平均深度在海水面下 27 公尺，鑽探位置較靠近內陸，故水深為 0.5 公尺至 3 公尺左右如圖 2-5 、 2-6 。

海床面以下約有平均 2.5 公尺厚之極軟弱粘土層，其標準貫入 N 值在 0 ~ 1 ， -5 公尺至 -10 公尺為灰色沉泥層，N 值在 2 ~ 10 間。

在 -10 公尺以下至 -27 公尺處，則以沉泥質細砂(SM)土層較為明顯，分別是 -10 公尺 ~ -17 公尺及 -20 公尺 ~ -24 公尺，而 -17 公尺至 -20 公尺及 -24 公尺至 -27 公尺則為沉泥層，且靠近 # 7 碼頭區為中塑性黏土層。

(3) 8 、 9 、 10 號碼頭：

本所於 84 年 9 月分別在 # 8 、 # 9 、 # 10 碼頭等區共進行 17 孔 30 公尺深之荷式錐貫入試驗(CPT)，根據試驗得知整個地區之土層剖面變化不大，依錐頭阻力研判本區土層(如圖 2-7 、 2-8)可細分為 6 個次層：

表土層厚度約為 2 公尺，屬於砂質沉泥，因表土層水份受到蒸發，含水量低，錐頭阻力約為 80 ~ 140Kg/cm²，屬較緊密沉泥層。

第二次層為厚約 2 公尺之沉泥質細砂，錐頭阻力小於 20Kg/cm²，為極疏鬆之砂土層。

地表下 4 公尺至 5 公尺有約 1 米厚之軟弱黏土層，在 EL. -5.0M ~ -8M 間為厚約 2 ~ 3 米之沉泥質細砂或砂質沉泥層，且由 # 8 碼頭向西邊之 # 10 碼頭漸變為含有細黏土顆粒較多之砂質沉泥。

第五次層 -8 公尺 ~ -13 公尺為厚 5 米之軟弱黏性土層，偶夾 1 米厚之疏鬆砂土層，錐頭阻力在 35 ~ 50Kg/cm²。

深度自 13 米至 25 米為較緊密之沉泥質砂土層(SM)，且有些試孔在深度約 20 米處夾有 1 公尺厚之黏土層。

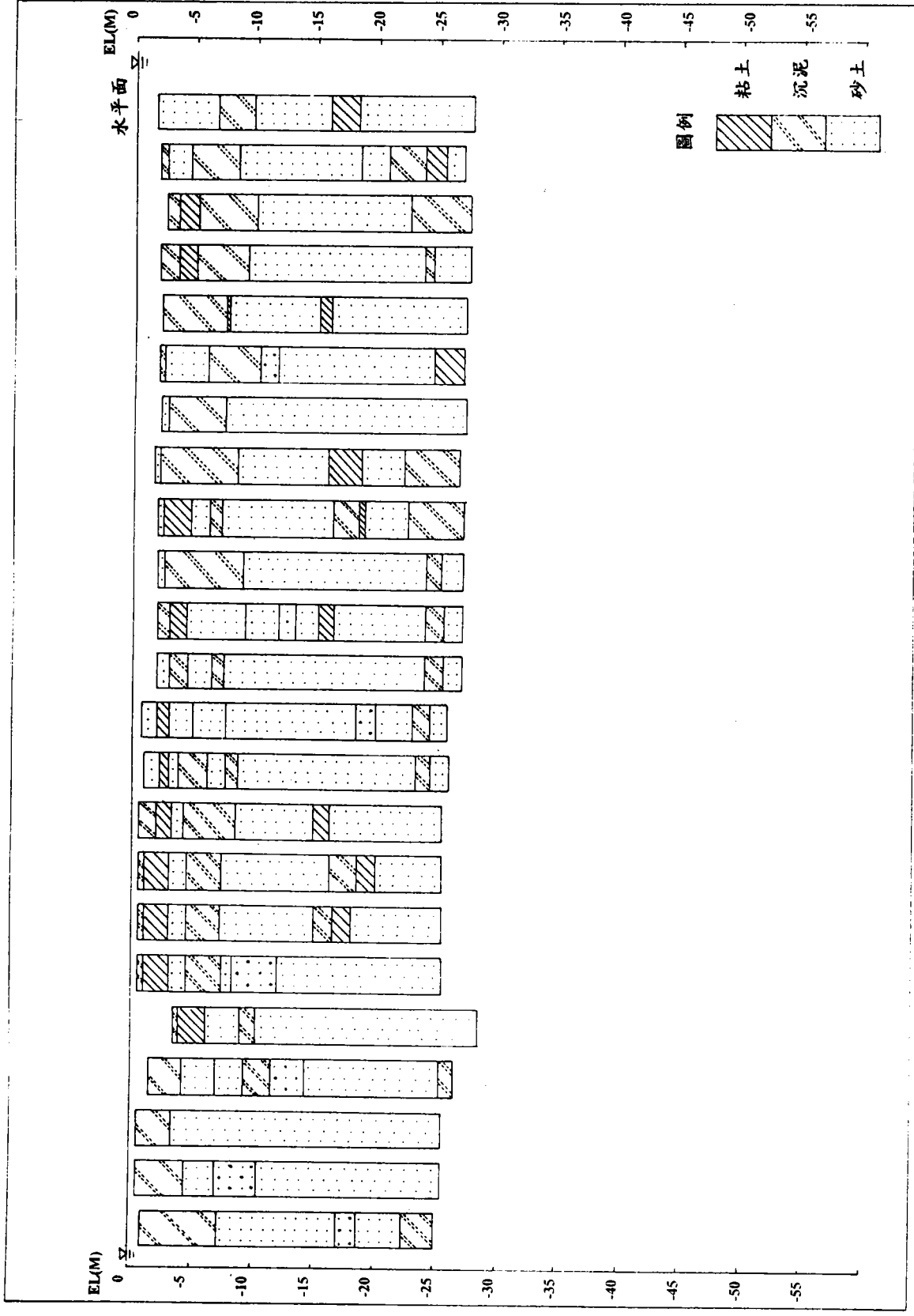


圖 2-5 安平港#5A、#5、#6、#7 碼頭地層柱狀圖

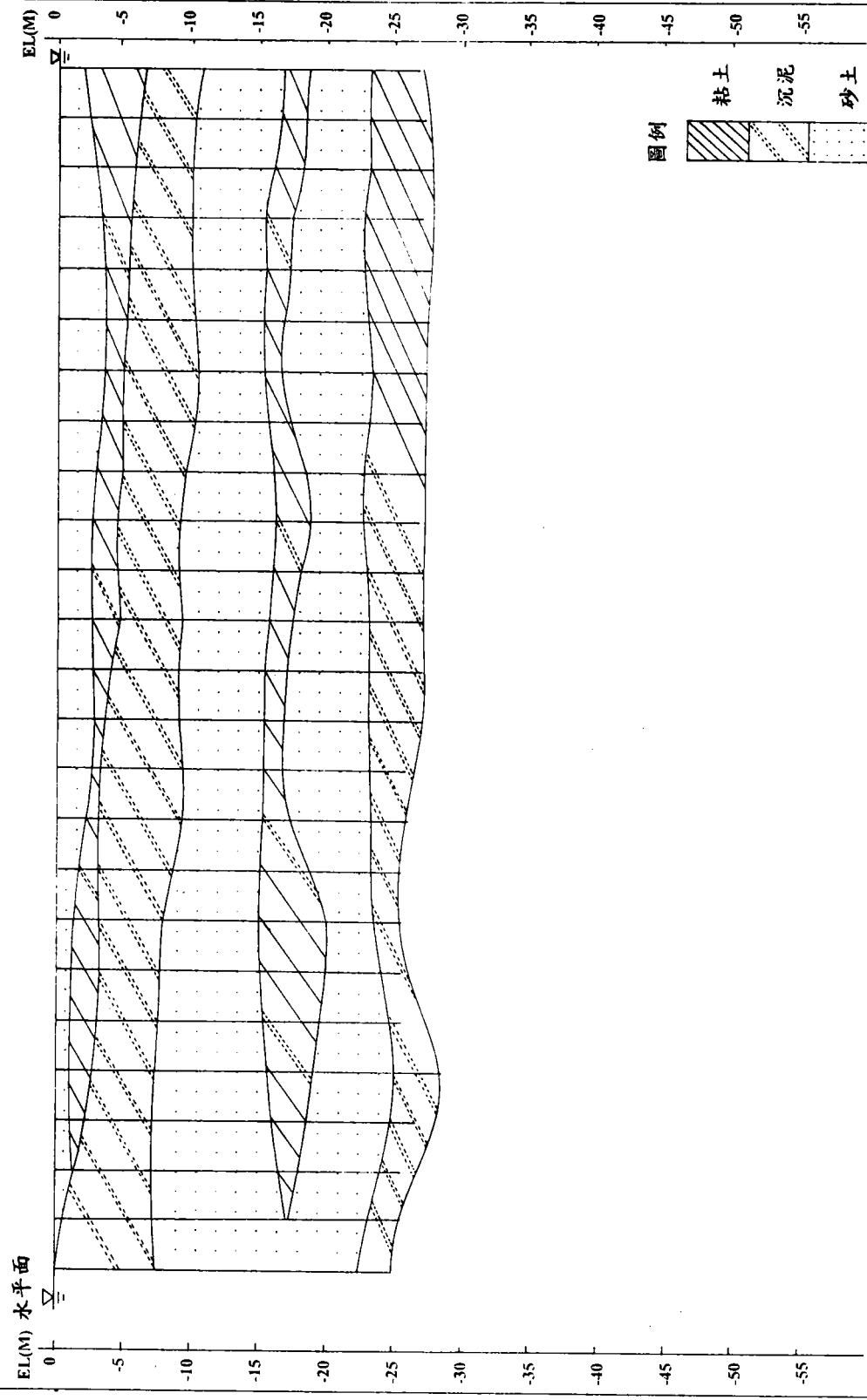


圖 2-6 安平港#5A、#5、#6、#7 碼頭地層剖面圖

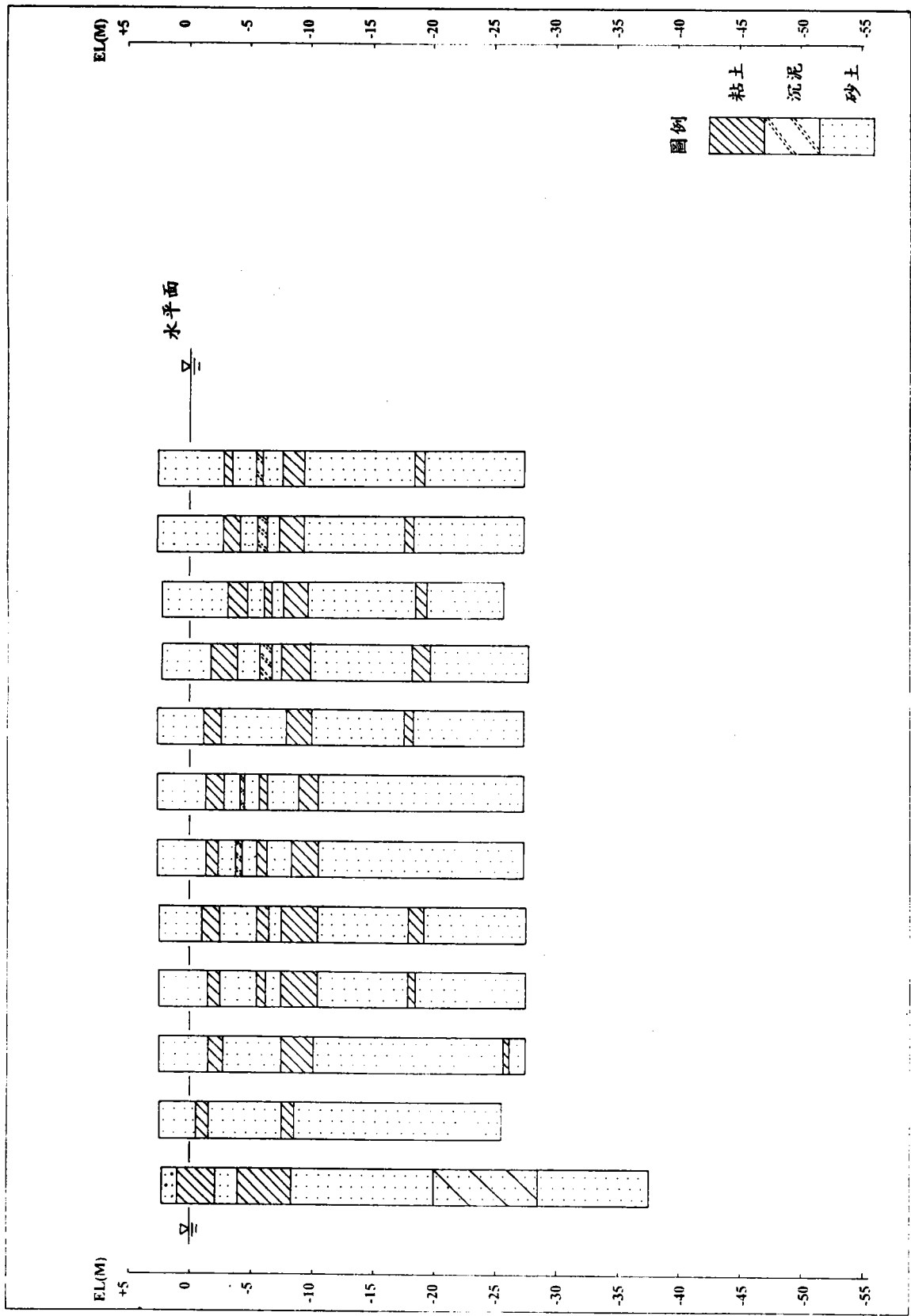


圖 2-7 安平港#8、#9、#10 碼頭地層柱狀圖

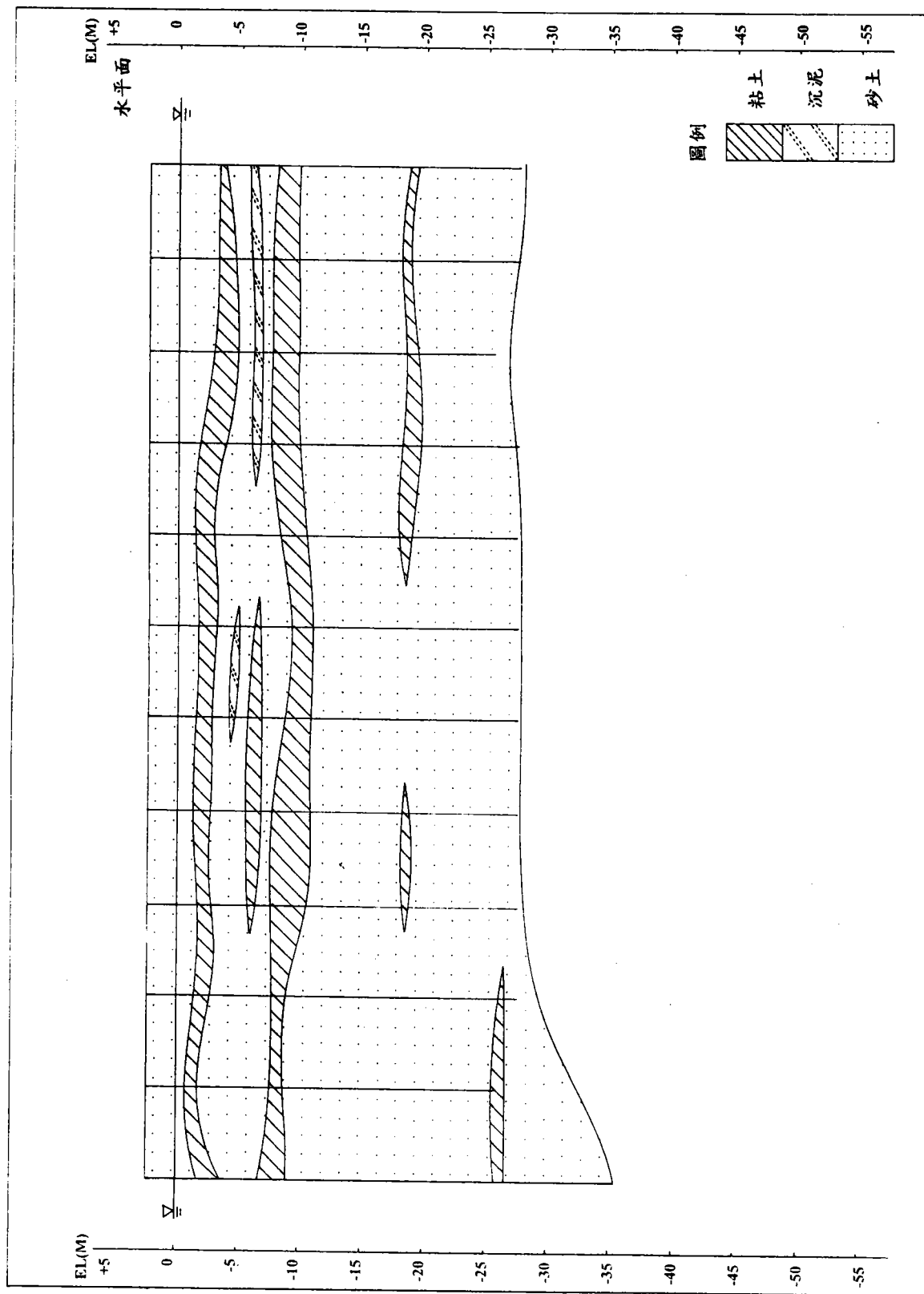


圖 2-8 安平港#8、#9、#10 碼頭地層剖面圖

(4) 北內堤、北護岸：

本區域之鑽探位置在主航道以北之內堤及護岸，海床面自港區外海沿主航道往護岸逐漸升高，直到北護岸處則是海平面上之陸地。

由地層剖面如圖 2-9、2-10 可知，護岸自地表面以下至 GL. -3.0M 間為灰色細砂夾礫石層，而整個區域自海床面以下至 EL. -43M 間皆以灰色細砂或沉泥質細砂層為主，其中於 EL. -17M ~ -22.0M 及 -30M ~ -33M 則為沉泥質細砂夾薄黏土層，並向西側外海逐漸尖滅消失。

(5) 南內堤、南護岸：

主航道以南之內堤及護岸，共搜集 9 個鑽探孔，由圖 2-11、2-12 之剖面概略顯示，海床面亦是由此外海之防波堤漸往內護岸升高，土層主要以灰色細砂、沉泥質細砂或沉泥質黏土夾細砂為主。

海床面以下至 -28.0M 深皆為灰色細砂或沉泥質細砂層，有些鑽孔在 -16.0M ~ -19.0M 深則偶夾薄層黏土。

深度自 -28.0M 至 -32.0M 間是沉泥質細砂夾薄黏土或夾薄層沉泥。-32M 至 -45.0M 間則是中等緊密至緊密之沉泥質細砂，N 值在 22 ~ 40 間。-45.0M 以下約有 5 米至 15 米厚之沉泥質黏土夾細砂或細砂夾薄黏土互層，且以內防波堤之土層較厚。

(6) 外防波堤：

新建之外廓防波堤地層剖面層次簡單分明，可由 5 個水上鑽孔剖面如圖 2-13、2-14 概示如下：

海床面至水面約在 8 米 ~ 14.5 米左右，土層自 EL. -8M 至 -55M 深皆以灰色沉泥質細砂、中細砂為主，海床表土層為 2 米厚之中等緊密砂層，標準貫入試驗 N 值約在 10 ~ 16 間，自 -3.5M 以下則為中等緊密至緊密之土層，且隨深度而增加，N 值大致在 13 ~ 50 間。

在深度 -17.5M、-28.0M 及 -47.5M 深各有一層厚約 0.5 米至 3 米之沉泥質黏土層，其 N 值為 6 ~ 12，屬軟弱至中等堅實土層。

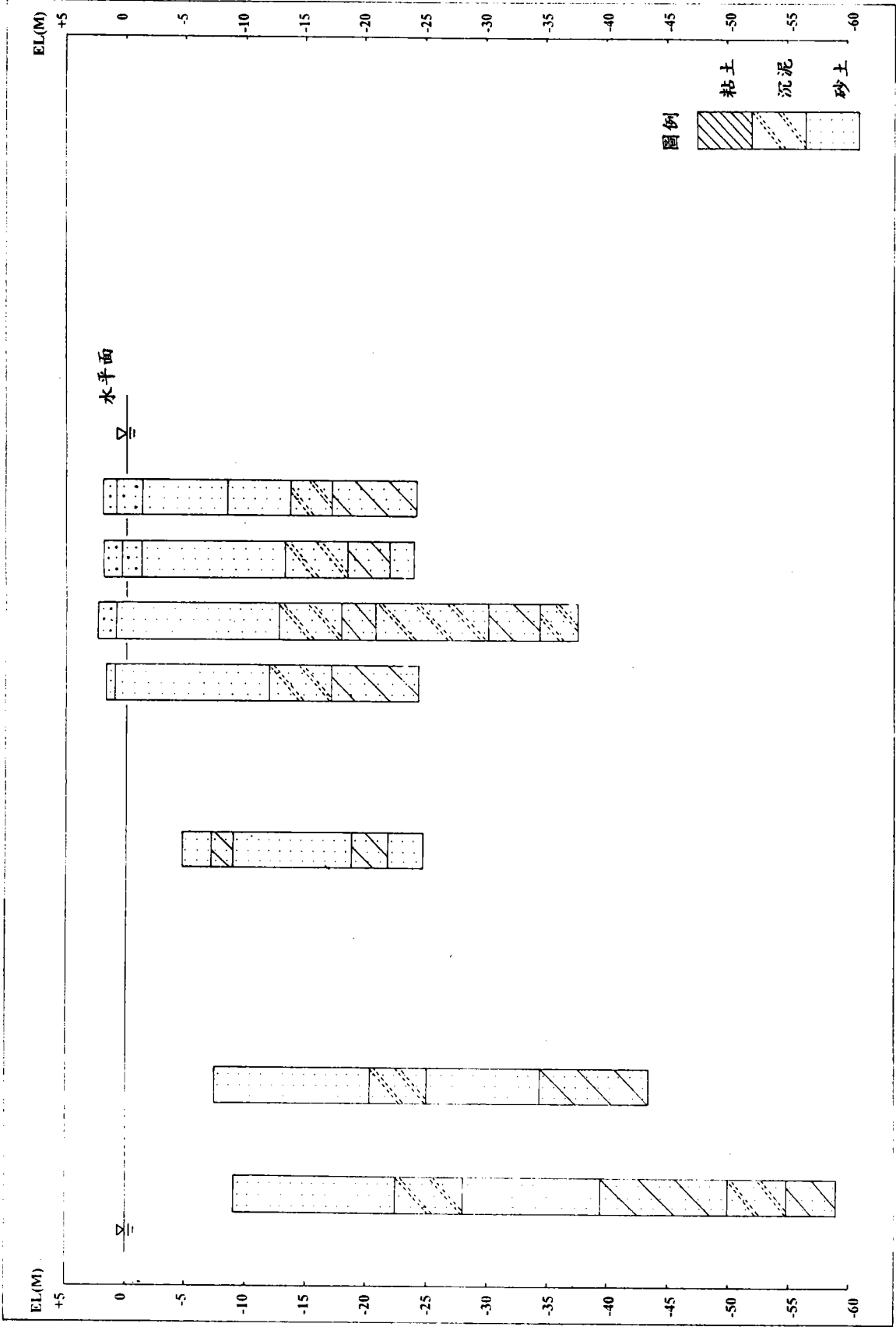


圖 2-9 安平港北內堤及北護岸地層柱狀圖

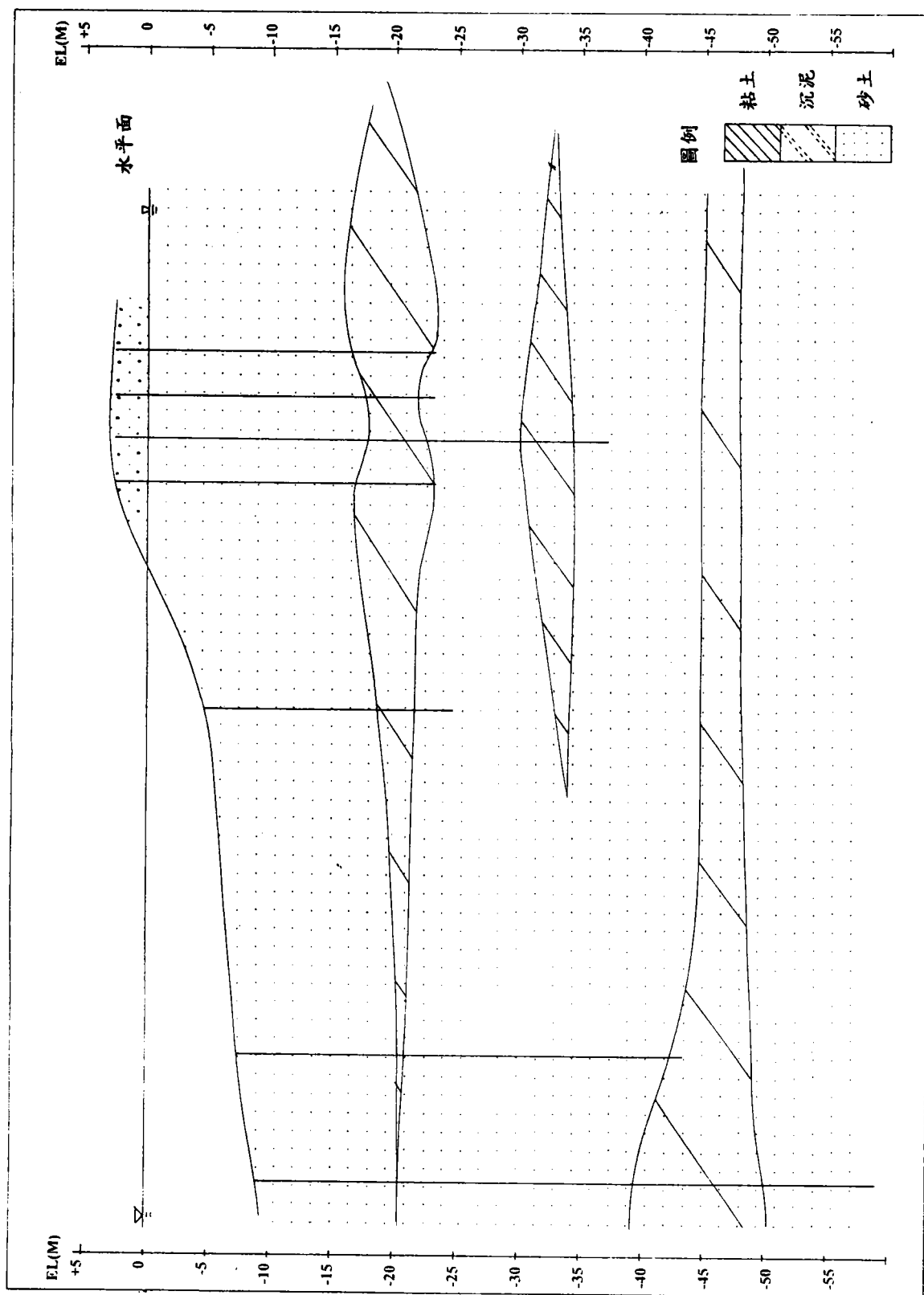


圖 2-10 安平港北內堤及北護岸地層剖面圖

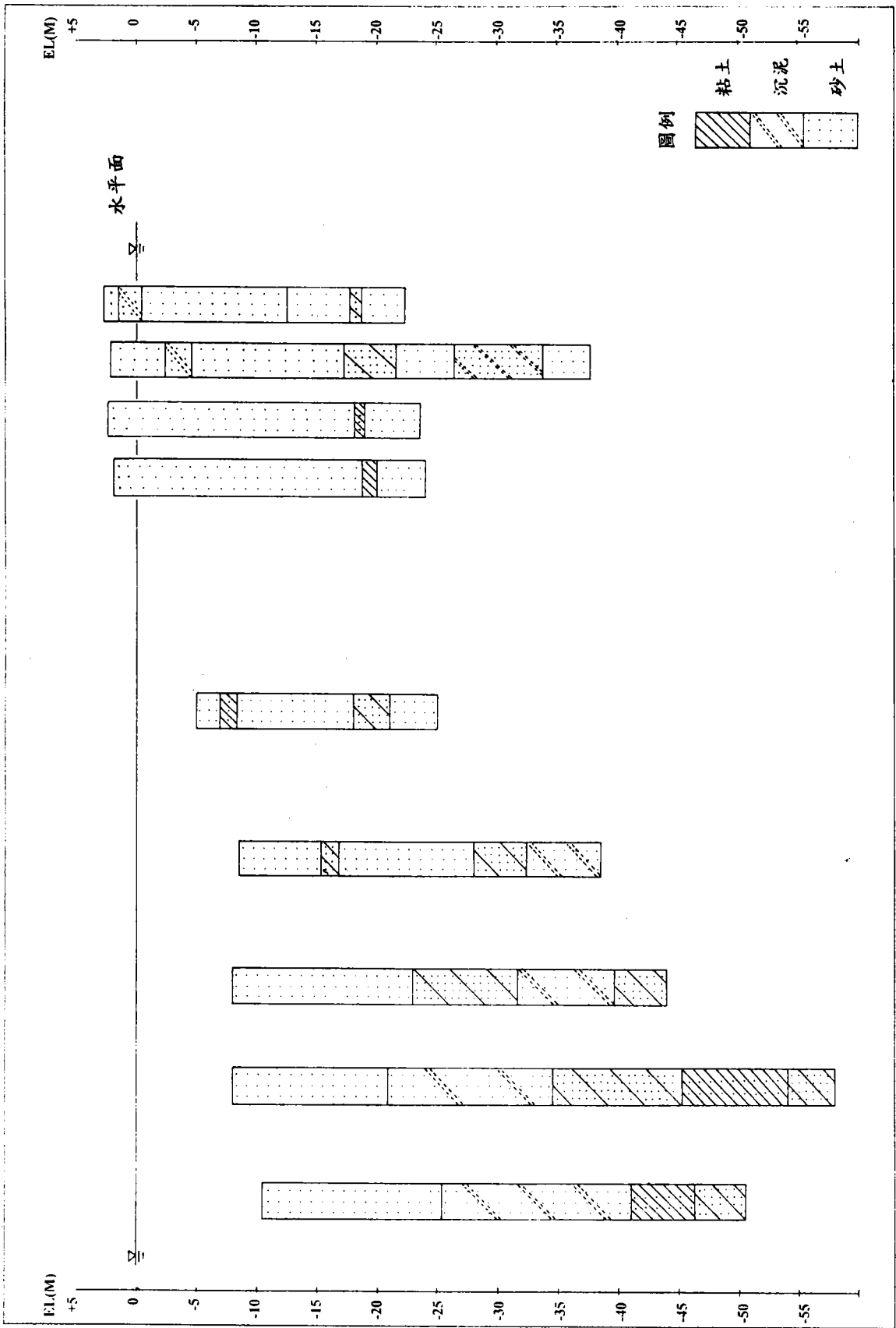


圖 2-11 安平港南內堤及南護岸地層柱狀圖

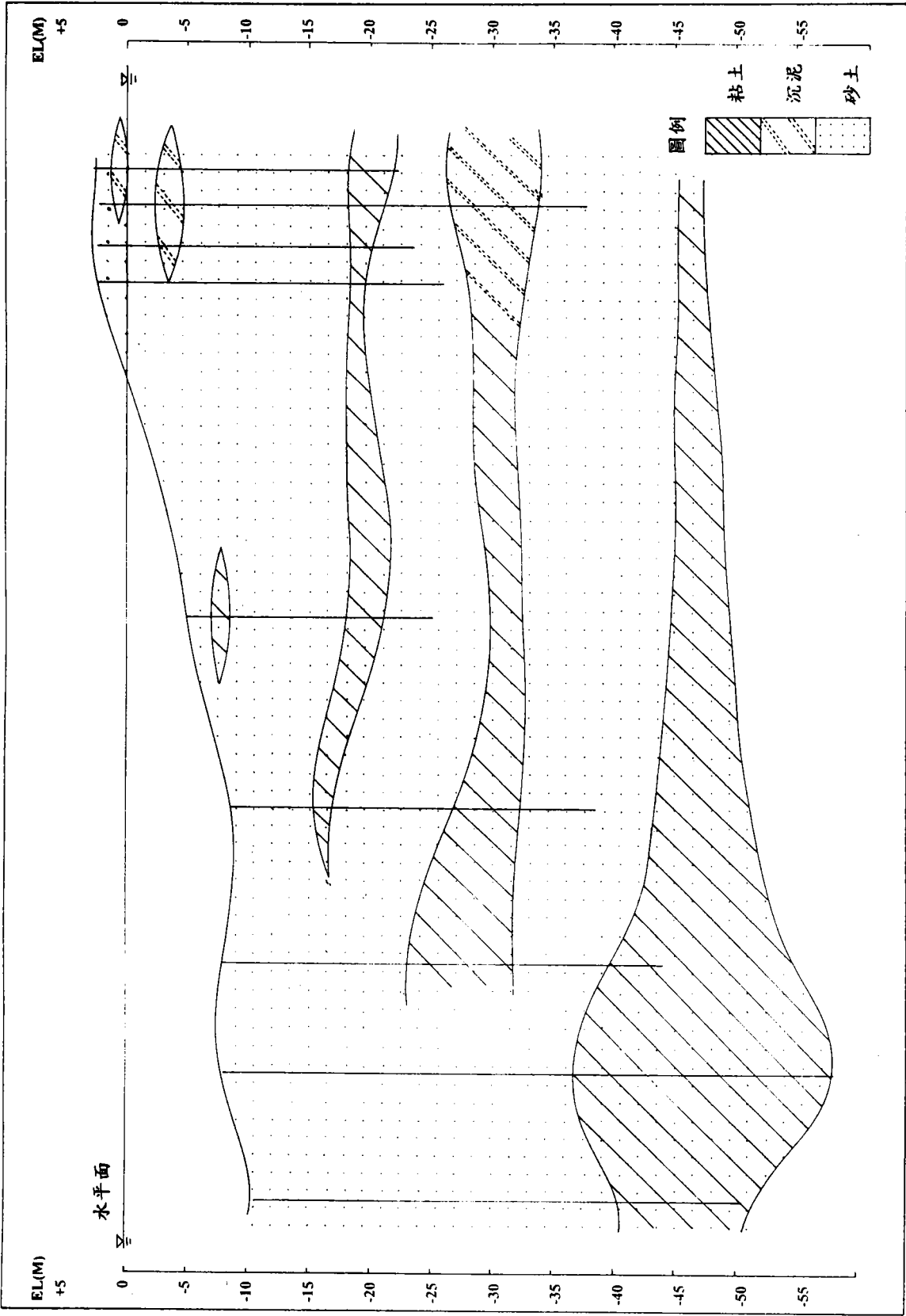


圖 2-12 安平港南內堤及南護岸地層剖面圖

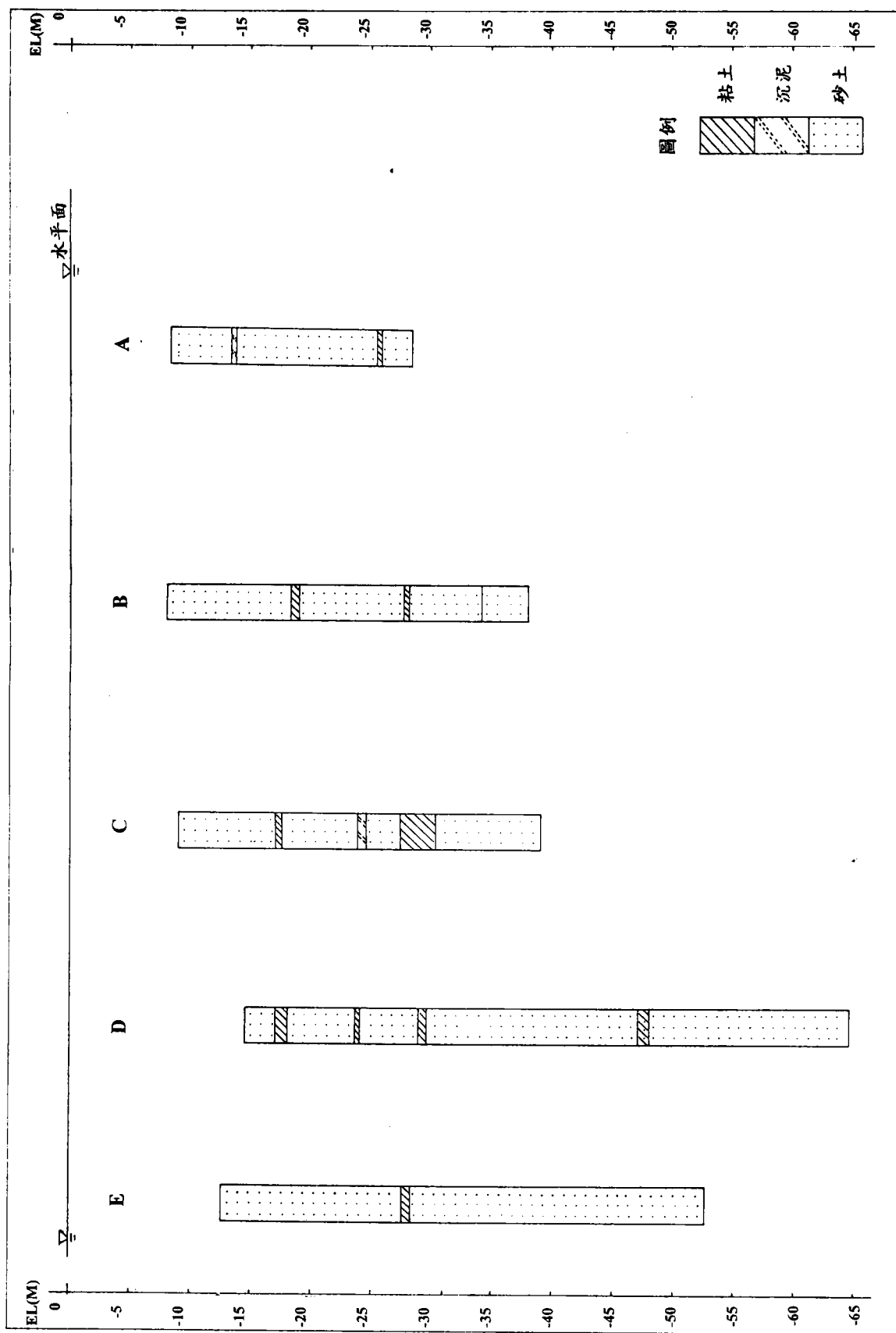


圖 2-13 安平港外防波堤地層柱狀圖

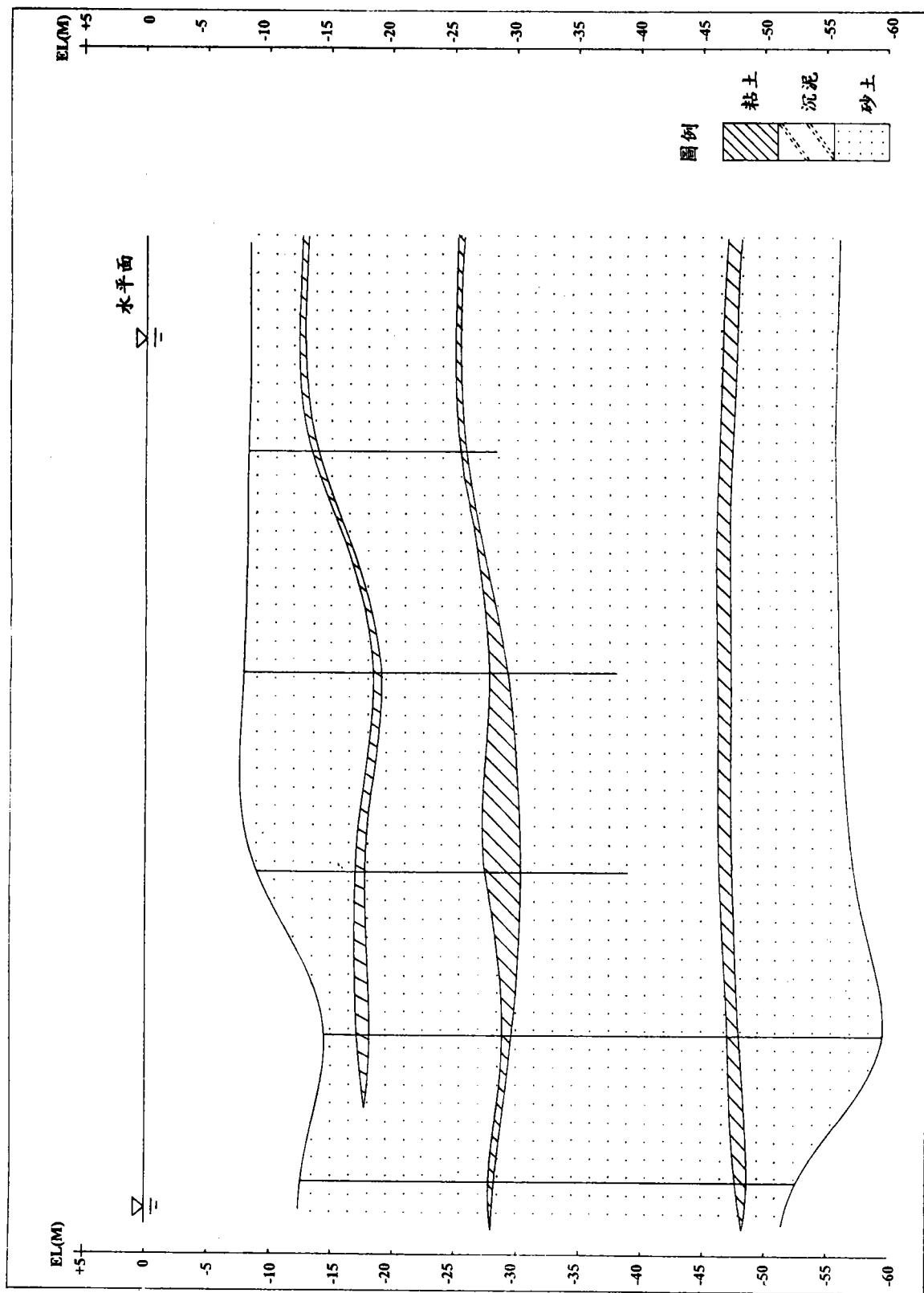


圖 2-14 安平港外防波堤地層剖面圖

(7) 綜合地層分析

整體而言，安平港在深度-50 公尺範圍內，綜合各區剖面土層（如圖 2-15）簡述如下：

1. EL. 0M ~ EL. -15M：土層分佈以灰色沉泥質細砂(SM)為主，海床面以下 2 ~ 4 米為軟弱之沉泥層(ML)，深度-5M 及-10M 間偶夾有 N 值為 2 ~ 10 之軟弱沉泥或黏土薄層。
2. EL. -15M ~ EL. -20M：具有一層平均為 2 ~ 3 米厚之灰色黏土(CL)或沉泥層(ML)，N 值在 6 ~ 30 間，屬中等堅實至極堅實稠度土層，其中以外防波堤土層較軟弱。
3. EL. -20M ~ EL. -35M：大致以緊密之沉泥質砂(SM)居多，但於-28M ~ -33M 間有一層厚約 2 ~ 5 米之沉泥質細砂夾黏土或沉泥層，N 值為 22 ~ 60 間之極堅實至堅硬土壤。
4. EL. -35M ~ EL. -50M：大部分為灰色沉泥質砂土層，但於-45 ~ -50M 間為一層厚約 2 ~ 8 米之灰色沉泥質粘土夾細砂土層，N 值約在 22 ~ 45 間，此土層分佈以航道之內防波堤較厚。

2-4 安平港附近地區之沉陷

台南沿海地區，各該鄉鎮區皆濱臨台灣海峽，濱海公路臨境貫穿南北，並成漁塭和鹽田的明顯經營分界區，而再深臨境內則以中央公路為界，其間以漁業養殖和農業耕作綜合性發展。近年來，海埔新生地在政府有週密計劃下，陸續完成北門和七股海埔地之開發，為新生之漁業養殖場，由於地表不足及遭受污染情況嚴重，無法配合養殖業者亟需淡水補注，使用地下深水井抽取地下水乃是必然趨勢，在水源匱乏下一旦從事養殖開發，使用地下水必定超量，也是營運養殖業逕行採用之較佳經濟用水之有效途徑。

而台南市之安平區，區內有安平工業區，由於市區及工業區之用水量皆大，在用水不足之情況下，亦有可能抽用地下水，而致使地下水位下降，引發地盤下陷。

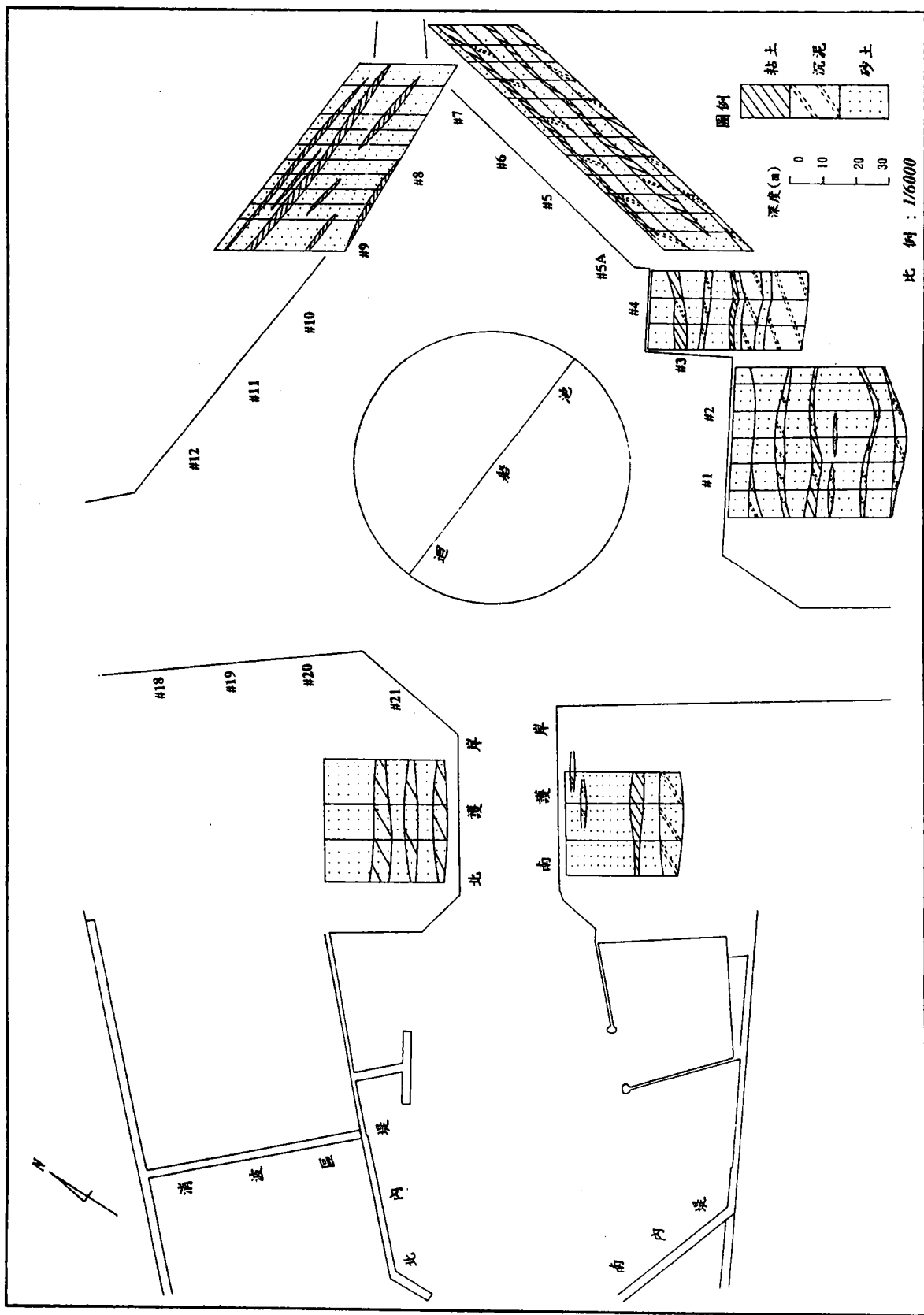


圖 2-15 安平港碼頭地層柵狀圖

根據水利局之台南地區地盤下陷檢測報告，台南地區有三個沉陷區，分別為北門海埔地、七股海埔地及台南市之安平區，本研究地點安平港位於安平區內。根據水準測量結果顯示，民國 76 年至 84 年間，安平區之最大沉陷量為 11 公分，安平區沉陷等值線圖，如圖 2-16。

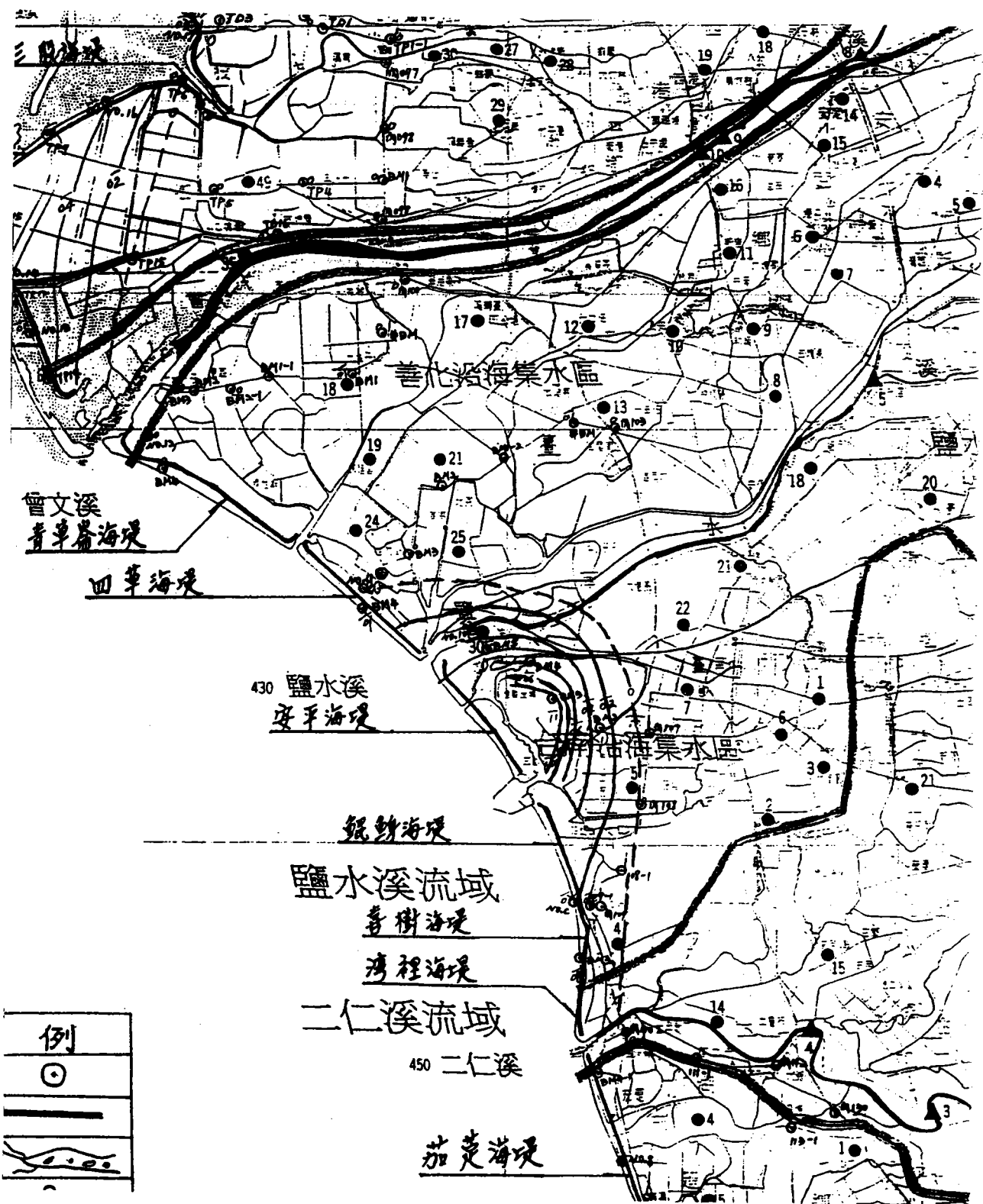


圖2-16 安平區沉陷等值線圖

三、地層下陷行為與分析方法

一般地層下陷之原因，非常複雜，如大地應力作用所引致地殼之升降，地震作用引致砂性土壤之沉陷，地表建築荷重、填土荷重及過量抽取地下水引致之地層下陷等，依據世界各地研究觀察結果，大部分之地層下陷，皆因過量開發地下水資源而產生，台灣西南海岸地區之地層下陷亦然，其中以屏東地區累積最大下陷量 2.88 公尺為最嚴重，雲林、嘉義地區累積最大下陷量約 1.5~2.0 公尺次之，其他如高雄永安地區、台南安平地區、彰化濱海地區等亦都有下陷問題，整個西海岸地區幾乎均有地層下陷現象。

一般而言，無論是地表建築物荷重或超抽地下水造成之地層下陷，大都因土層受到外力而產生壓縮所致，所以欲對地層下陷進行分析之前，首需對整體土層所受有效應力增量之分佈情形，及整體土層之下陷行為與各分層土壤壓縮特性進行瞭解，然後再應用壓密理論進行沉陷分析，如圖 3-1 所示。

從土壤力學中壓密理論的觀點來看，地層下陷的主要原因是土壤受到壓力，使土壤內之孔隙水逐漸排出，體積發生變化導致土壤壓密現象，由於壓密作用，地層表面將有沉陷變形產生。所謂之土壤受到壓力，是指土壤在土層中受到比原來存在土層中有效應力更大之應力，即有效應力增量，亦即有效應力增量存在之土層才有土壤壓密或壓縮現象，而有效應力所指為地層中土壤顆粒之間（即架構）所承受的應力，與孔隙水壓力共同組成地層中的總應力，一般認為只有有效應力的部份才會影響地層的架構，其改變為造成地層下陷的主因，因此對土層內有效應力增量分佈之研判極為重要。

茲就超抽地下水，其所引致有效應力增量之分佈情形、下陷行為、分析方法等，分述如下：

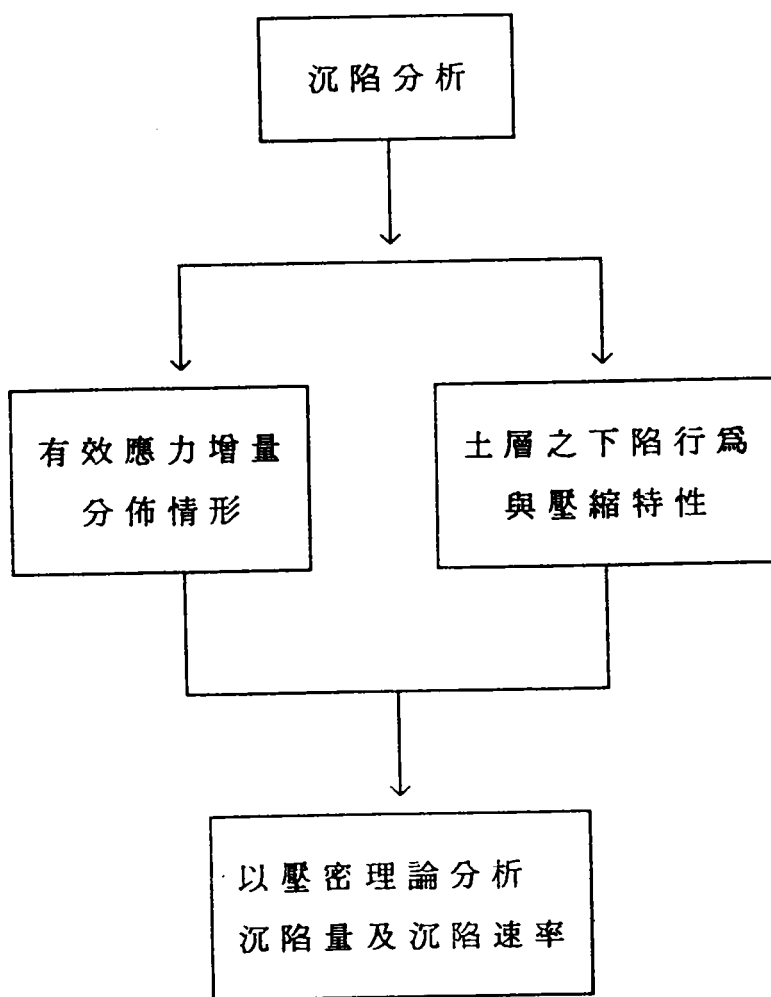


圖 3-1 沉陷分析之流程圖

3-1 超抽地下水引致之有效應力增量分佈

超抽地下水引致地層下陷，一般可分為二類，一為自由水位下降引致之淺層沉陷，另一為受壓水位下降引致之深層沉陷。若由於自由水層受到過量抽水，引致自由水位下降，其有效應力增量僅分佈於最淺層自由水層及其下之難透水層(Aquitard)或粘土層，而其他之受壓水層(Aquifer)及粘土層則無有效應力增量產生，其分佈情形如圖3-2所示，由於在有效應力增量存在之土層，才有土壤之壓密或壓縮現象，因此超抽自由水層產生之沉陷屬於淺層沉陷。若由於受壓水層受到過量抽水，而致受壓水位下降，其有效應力增量如圖3-3所示，除分佈於該超抽受壓水層外，並分佈於其上下之難透水層或粘土層，而最淺層之自由水層及其他之受壓水層與粘土層則無有效應力增量產生，由於超抽受壓水層引致之有效應力增量產生於土層深處，土壤之壓密或壓縮亦發生於深處，因此此種沉陷屬於深層沉陷。

3-2 超抽地下水之下陷行為

超抽地下水引致之沉陷，不論是超抽自由水層或受壓水層，由於其影響之區域範圍均很廣大，因此其沉陷特性屬於區域沉陷，亦由於屬於均勻沉陷，且是無聲無息的情況下進行著沉陷，一般均不易察覺，往往等到發生海水倒灌、排水情況惡化等災害時，才察覺到地層下陷。

大部分海岸地層下陷皆因過量抽取受壓含水層中地下水而產生之沉陷，此種沉陷不但其影響達於土層深處，更由於其沉陷主因，是土層深處之受壓含水層及其上下之難透水層或粘土層，受壓縮而產生地層下陷，故稱為深層沉陷(Deep subsidence)，此種沉陷行為，相當於一水力起重機(Hydraulic jack)將荷重舉高後突然水壓力減少時之情形，此時荷重即漸漸下降。在發生區域沉陷時，主要因受壓含水層中水壓因過度抽取地下水而下降，受壓含水層及其上下之粘土層受到壓縮，此稱為受壓縮土層，而此受壓土層至地表面間之土層並未受到壓縮，只是整體隨受壓縮土層之壓縮而向下移動產生地層下陷，故地面之沉陷與受壓含水層中水

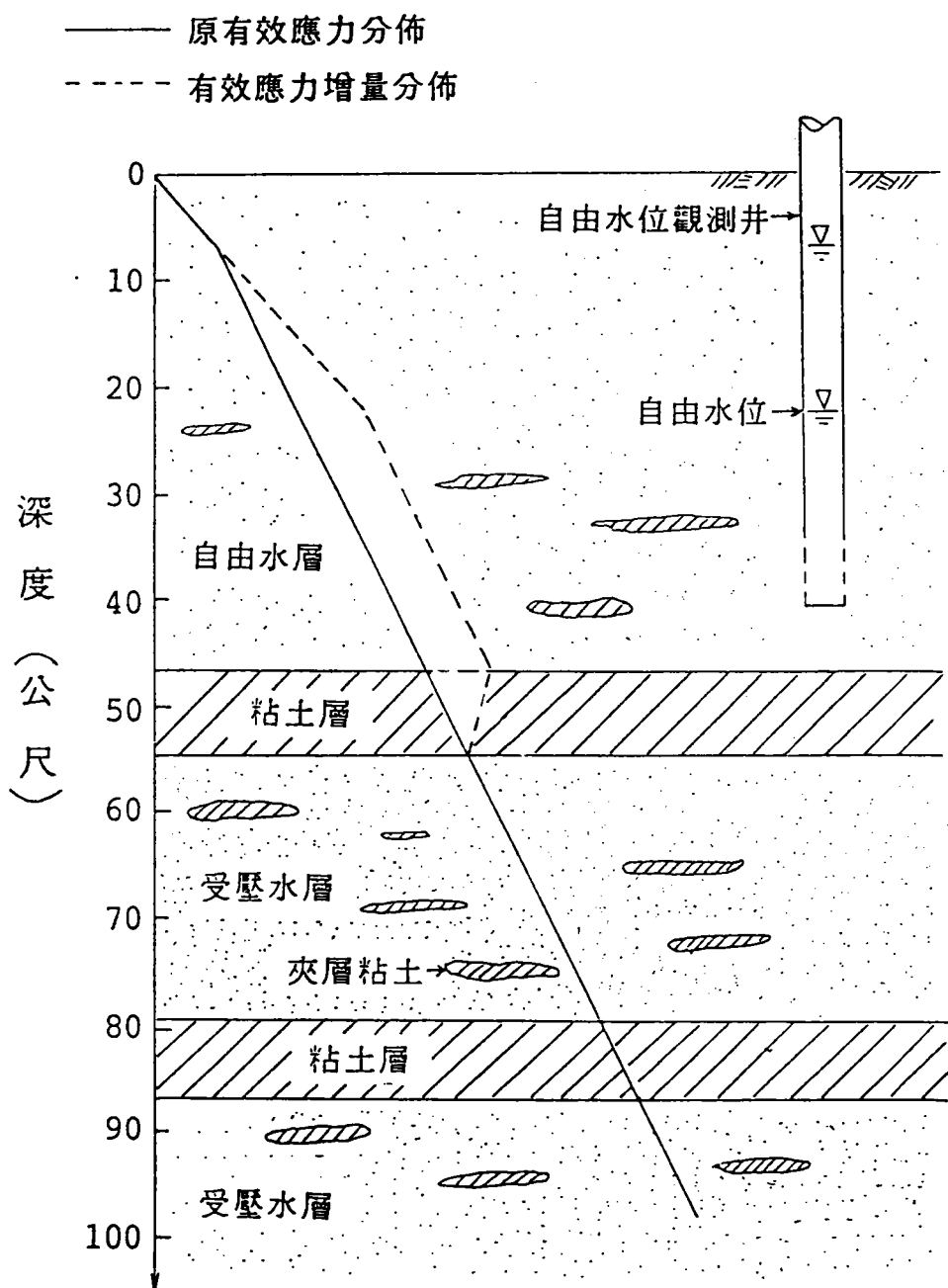


圖 3-2 自由水位下降引致之有效應力增量分佈

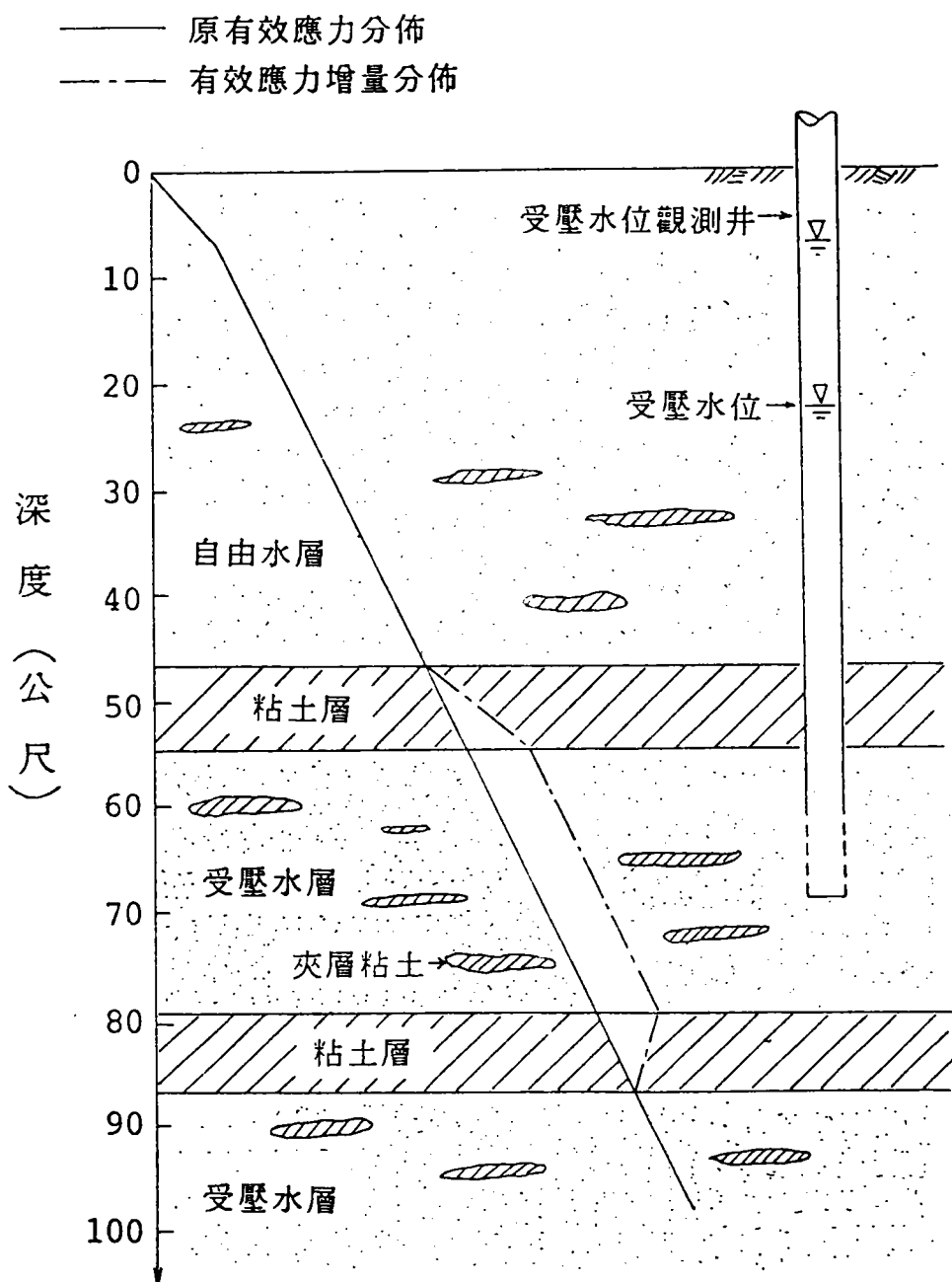


圖 3-3 受壓水位下降引致之有效應力增量分佈

壓之減少量成正比。當地下水繼續超抽時所發生之沉陷，在地下水文學裡稱為活性沉陷(Active subsidence)。當過量抽水已遏止，地下水壓已趨穩定後，地面之沉陷並不立即停止，而仍將持續一段時間，惟其沉陷速率隨時間而漸趨緩和，最後始停止，此期間所發生之沉陷，在地下水文學裡稱為「稽延沉陷」(Lag subsidence)或「殘餘沉陷」(Residual subsidence)，通常在活性沉陷後，殘餘沉陷仍將繼續數十年，而後沉陷方可認為全部停止。

在整個壓縮之土層中，受壓含水層中之砂土層為立即壓縮，即在超抽受壓含水層之地下水位下降時，立即壓縮，此為活性沉陷之主要部分。受壓含水層中亦含有大部分之夾層粘土(Interbeds)，由於含水層之水流是互通的，因此夾層粘土產生全面排水之壓密沉陷，其壓密速率較快，夾層粘土之厚度，雖然很薄，但受壓含水層中有多層夾層粘土，累積之總壓密沉陷量亦很可觀，此夾層粘土之沉陷影響部分之活性沉陷量及大部分初期之稽延沉陷。

受壓含水層上下之難透水粘土層，雖為高壓縮性之土壤，但在受壓含水層過量超抽地下水時，產生單向受壓之壓密沉陷，其總沉陷量為雙向受壓沉陷之一半而已，且其土層較厚，壓密速率極慢，對活性沉陷影響極微，為稽延沉陷之主要來源。

若地層下陷是由於自由水層超抽地下水而引起者，則其沉陷主要來源，為自由水層中砂土之立即壓縮，及自由水層中夾層粘土全面排水之壓密，與自由水層下一層難透水粘土層之單向、受壓之壓密現象。

3-3 地層下陷分析方法

地層下陷分析方法，一般可分為二種，即：(1)理論分析法(2)統計經驗法，茲分述如下：

3-3-1 理論分析法

因地下水位下降造成之地層下陷，其下陷量大小與土壤種類有關。砂質土層的沈陷速度較快但沈陷量較小；而粘性土層之壓

縮則較具延滯性且沈陷量也較大。

因地下水位下降所引致的地表壓密沉陷之分析方法大致可區分為兩類，一為基於Terzaghi壓密理論之“分離式方法”(decoupled approach)與另一為基於Biot理論之“耦合式方法”(coupled approach)。前者是先求出孔隙水壓力之分佈，再應用有效應力觀念計算土層之應變及地表壓密沉陷量。後者是基於孔隙水與介質之間存在某種互制關係，以介質位移和孔隙水壓力為基本變數之耦合壓密理論。

(1) Terzaghi壓密理論

本文以 Terzaghi(1943)之單向壓密理論分析地層下陷問題。該理論係利用飽和土壤內孔隙水在穩定層流情況下之連續條件，及有效應力原理和土壤本身之應力—應變關係推得計算式。其基本之假設為(1)土壤是飽和狀態，(2)土壤顆粒與水有不同壓縮度，(3)孔隙水流符合達西定律(Darcy law)，(4)土壤之壓縮性與滲透性在受壓過程中保持不變。

依據 Terzaghi 建議，正常壓密土壤之極限沉陷量之計算，如下所示。

$$S_u = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \left(\frac{P'_0 + \Delta\sigma'_{vo}}{P'_0} \right) \dots\dots\dots (3-1)$$

式中， S_u ：極限沉陷量
 e_0 ：初始孔隙比
 H ：土層厚度

C_c ：壓縮指數
 P'_0 ：初始壓密應力
 $\Delta\sigma'_{vo}$ ：有效應力增加量

若土壤之壓密性質或孔隙比隨深度有很大的變化，或截然為不同土層，則總沉陷量 S 為各土層沉陷量之總和。

極限沉陷量求得之後，利用以下壓密方程式，則可計算歷時性之沉陷量 $S(t)$ 。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (3-2)$$

式中， u ：孔隙水壓
 t ：時間

C_v ：壓密係數
 z ：深度

Taylor(1948)對上式壓密方程式，提出一個以 Fourler 級數展開的方式來表示的數學精確解，如下所示：

$$U(t) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left[\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} T_v \right] \dots\dots\dots (3-3)$$

式中， $U(t)$ ：平均壓密度，定義如式(3-4) T_v ：時間因數

$$U(t) = 1 - \frac{\int \Delta u dz}{\int \Delta u_0 dz} \dots\dots\dots (3-4)$$

而式(3-3)中之時間因數 T_v 與時間 t 之關係如下所示：

$$T_v = \frac{C_v \times t}{H_{dr}^2} \dots\dots\dots (3-5)$$

式中， H_{dr} ：最長之排水路徑長

因此各土層在各壓密應力之歷時性沉陷量 $S(t)$ 如下所示：

$$S(t) = S_u \times U(t) \dots\dots\dots (3-6)$$

(2) Biot 耦合壓密理論

有關土壤的耦合壓密理論首先係由 Biot (1941) 提出的。Verruijt (1969)、Bear & Corapcioglu (1981) 等曾對 Biot 壓密理論作過研究，以地下水流動觀點推導壓密模式，其基本假設為：(a)土壤完全飽和；(b)孔隙水可壓縮，且其壓縮性僅與孔隙水壓力有關；(c)土壤之固體顆粒不可壓縮；(d)孔隙水滲流遵循 Darcy 定律；(e)土壤為均質且均向性之線彈性介質；(f)土壤介質之應變量微小；(g)影響孔隙率之主要因素為介質的有效應力。根據以上假設，該壓密理論之基本方程式如下所示：

$$\left. \begin{aligned} G\nabla^2 S_x + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ G\nabla^2 S_y + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ G\nabla^2 S_z + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \\ k\nabla^2 p &= \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + n\beta \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-7)$$

式中 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2}$ ， S_x 、 S_y 、 S_z 分別表土壤介質在 x 、 y 、 z 方向上的位移。 $\varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ 為介質之體積應變量， p 表超額孔隙水壓力(excess pore water pressure)， E 、 ν 、 G 分別表土壤在排水情況下所測得之平均楊氏係數(Young's modulus)、平均柏松比(Poisson's ratio)、以及平均剪力係數，其中 $G=E/2(1+\nu)$ 。 k ， n ， β 亦分別表土壤之滲透係數(permeability)，孔隙率(porosity)及孔隙水之壓縮係數(compressibility)。

由於地下水位觀測井所測得之水位變化，可代表鄰近區域亦有相同之水位變化，而且地下水位變化引致之地層下陷屬於區域沉陷，因此若考慮為單向度之壓密過程，即 $S_x = S_y = 0$ ， $\varepsilon = \frac{\partial S_z}{\partial z}$ ， $\frac{\partial S_x}{\partial x} = \frac{\partial S_y}{\partial y} = 0$ ，可將基本方程式(3-7)簡化如下：

$$\begin{aligned} 2\eta G \frac{\partial^2 S_z}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial z} &= 0, \\ -k \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 S_z}{\partial z \partial t} + n\beta \frac{\partial p}{\partial t} &= 0 \dots\dots\dots (3-8) \end{aligned}$$

其中 $\eta = (1-\nu)/(1-2\nu)$ 。式中土壤位移 S_z 與孔隙水壓力 p 同時出現在方程式中，為一耦合壓密模式。

若考慮一土壤厚度為 H ，受到瞬間荷重 P_0 ，則其壓密沉陷，經式(3-8)解析得如下所示：

$$S_z = \frac{4P_0H}{\pi^2\eta G} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \times \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{(2n+1)\pi}{2H_d} \right)^2 C_v t \right] \right\} \dots\dots\dots (3-9)$$

式中，壓密係數 $C_v = \frac{k}{\left(n\beta + \frac{1}{2\eta G} \right)}$ ， H_d 為排水路徑長，若為

單向排水 $H_d = H$ ，若為雙向排水 $H_d = H/2$

3-3-2 統計經驗法

本文之統計經驗法，主要是針對超抽地下水所引致地層下陷之分析方法，茲分五種方法說明如下：

(1) 下陷與時間之關係

此法假設下陷量為一時間函數，而不考慮下陷原因，乃根據原始資料所形成之自然曲線加以判斷；常用之函數有一次函數、二次函數、對數函數及指數函數等，假設 S 為下陷量， X 為時間， a ， b ， c ，為常數：

$$(a) \text{一次函數 } S = aX + b \dots\dots\dots (3-10)$$

$$(b) \text{二次函數 } S = aX^2 + bX + c \dots\dots\dots (3-11)$$

$$(c) \text{對數函數 } \log S = \log a + b \log X \dots\dots\dots (3-12)$$

$$(d) \text{指數函數 } S = aX^b \dots\dots\dots (3-13)$$

此法最為簡單，但因未考慮土壤壓縮特性，最不準確。

(2) 下陷與地下水位之關係

此法係假設下陷速率與地下水位變化成正比，Wadachi(1940)提出其關係式如下所示：

$$\frac{ds}{dt} = K(P_0 - P) \dots\dots\dots (3-14)$$

式中， $\frac{ds}{dt}$ 為下陷速率， P_o 為參考水位， P 為地下水位， K 為常數。之後 Yamoguchi(1969)根據上式理論，修改為下式：

$$\frac{ds}{dt} = KS \left\{ (P_o - P)t - \frac{dp}{dt} \right\} \exp \{ -K(P_o - P)t \} \dots\dots\dots (3-15)$$

式中， $\frac{ds}{dt}$ 為下陷速率， S 為最後下陷量， P_o 則為起始水位， P 仍為地下水位， t 為時間， K 為常數。

(3) 下陷與抽水量之關係

Yamamoto(1984)由 Niigata 天然氣之抽取中觀察指出，地層下陷與流體抽取量有相當之關係，其關係式如下：

$$S = aQ + b \dots\dots\dots (3-16)$$

$$\text{或 } S = a\sqrt{Q} + b \dots\dots\dots (3-17)$$

式中， Q 為流體抽出量， a 、 b 為常數。

(4) 下陷與含水層厚度之關係

此法是假設下陷量除以水頭降($S/\Delta P$)與有效應力變化量除以受壓含水層厚度($\Delta\sigma'_{vo}/H_p$)成正比關係。

(5) 下陷與粘土含量之關係

Gabrysch(1969)提出下陷量與水頭降之比值($S/\Delta P$)與受壓含水層粘土含量百分比成正比關係。

四、地層下陷與水壓監測

4-1 監測系統規劃與安裝

(一)位置與深度

地下水壓的大小、水位之深度及變化皆對地層下陷有極大影響，且水壓計必須埋設在透水性良好之受壓水層裡，並在其上下不透水層以皂土進行封層，才能量得正確水壓；本計劃則選擇位於港區#3碼頭後側停車場（如圖4-1）之適當位置，設置150公尺深之分層沉陷及水壓觀測站。其中水壓計共埋設6支分別於8m、27m、57m、95m、120m、148m等透水性較好之砂土層，分層沉陷計則以每隔約10公尺深安裝一個沉陷磁環共16個，其深度分別為152m、142m、132m、122m、113m、102m、92m、82m、72m、62m、52m、42m、32m、26m、12m、7m等，兩站相距約10公尺（如圖4-2）

(二)安裝方法

1. 水壓計埋設步驟

採用日本 DOBOKU 生產，型式為電阻式 5 Kg/cm^2 、 10 Kg/cm^2 及 20 Kg/cm^2 耐水壓型水壓計（如圖4-3）。

- (1) 為避免孔壁崩孔，於鑽孔時先採用皂土保護孔壁，待鑽探至預定深度後再以清水置換，直到迴水無皂土成份，再開始安裝儀器。
- (2) 依據鑽探資料決定埋設各深度後，水壓計先於地面上接妥電纜線長度並註明安裝深度，且檢測飽和初始值。
- (3) 鑽探完成時，將水壓計逐一放入孔內最佳位置，量測其水壓值是否合理再開始回填粗砂直到欲封層位置，利用 PVC 管將水泥及皂土混合液以灌漿機打入預定封層位置，然後再回填粗砂。
- (4) 各組水壓計皆重覆(2)、(3)步驟，直到回填至表面為止，再將

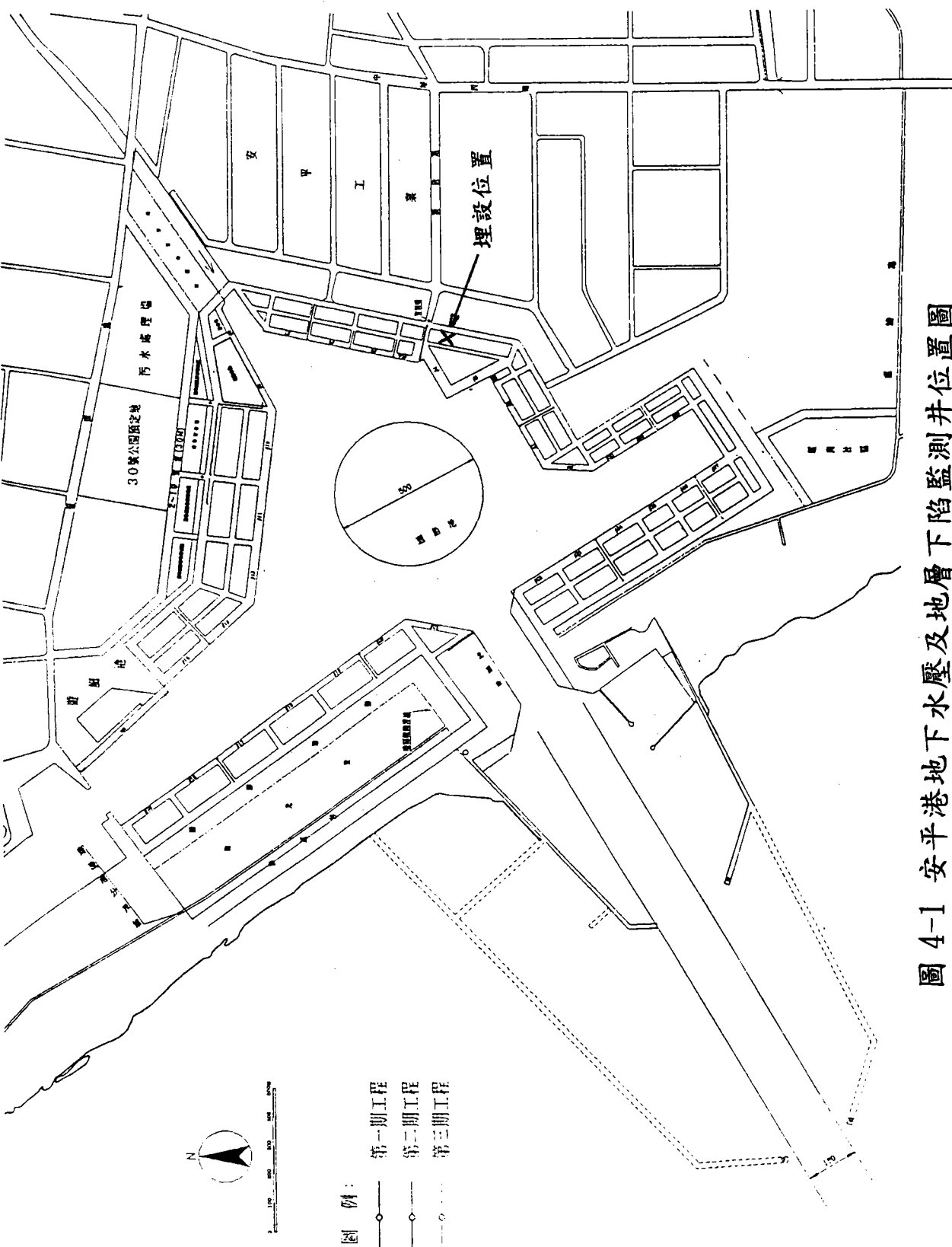


圖 4-1 安平港地下水壓及地層下陷監測井位置圖

電子式水壓計

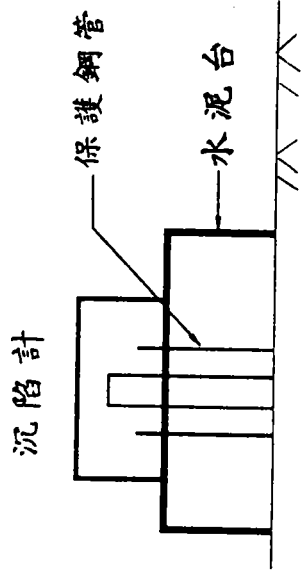
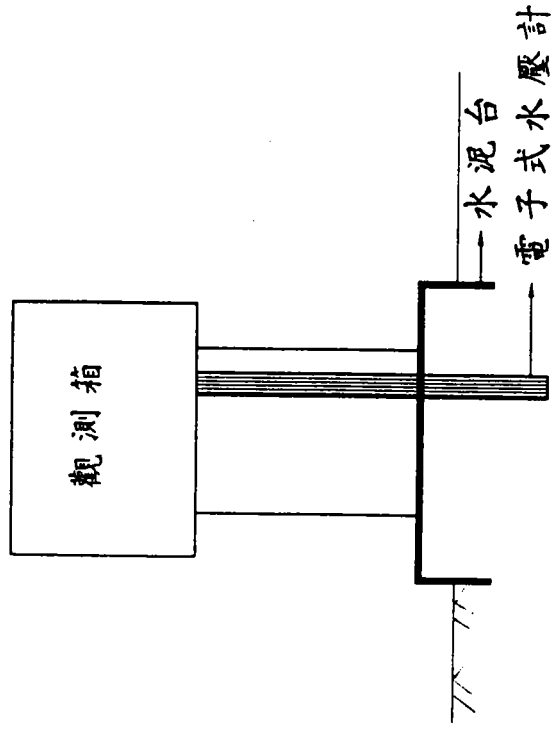
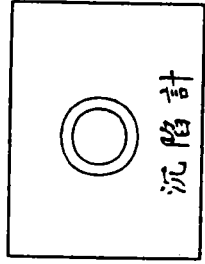
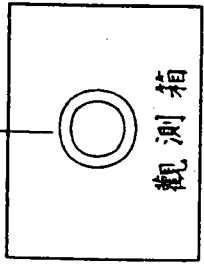


圖 4-2 儀器相關位置圖

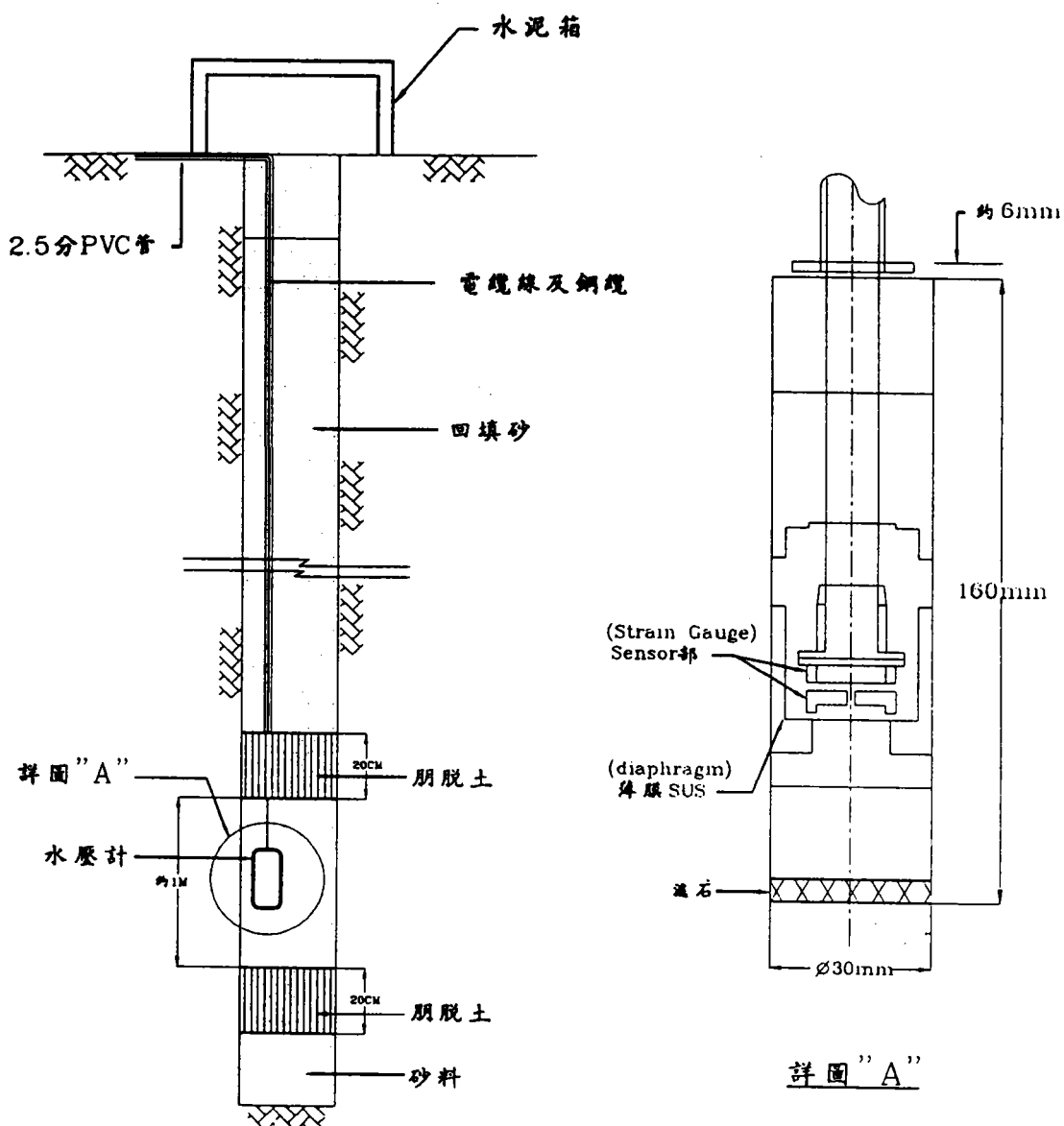


圖 4-3 電子式地下水壓計裝設圖

電纜線連接至觀測箱內。

2. 分層沉陷計埋設步驟

採用日本 DOBOKU 生產之磁感式沉陷環，磁環及安卡皆為防腐蝕不銹鋼材質，井管為南亞 2.5 英吋井管，為耐腐蝕及酸鹼材質。

- (1) 以 6 吋口徑鑿井機進行鑿井到達預定深度 152 公尺時，儘量清除孔內沉泥，靜置 1 小時後檢查孔深以作為安裝深度及沉砂管長度之依據。
- (2) 依據土層資料決定沉下磁環安裝深度，並將沉陷磁環固定於摩擦量測切管上，並連接燃燒樹脂導線。
- (3) 於量測井管底部安裝沉砂管及止水活閥以順利量管垂直下井。
- (4) 待量測井依序連接完成後，再利用燃燒樹脂機打開磁環，使安卡順利固定於土壤上，便可進行河砂回填工作，並須防止因回填速度太快所造成之崩孔而損害量管。
- (5) 所有作業完成後則須以混凝土澆置孔口保護台及洗孔工作，並待測孔穩定後可做初始值設定。
- (6) 分層沉陷裝設見圖 4-4，安裝示意圖如圖 4-5。

4-2 監測井地質分析

安平港監測站在深度 150 公尺之土層狀況，根據現場鑽探資料如圖 4-6 所示，大致而言，約可分為 14 個次層，分別簡述如下：

1. 灰色沉泥質細砂 (SM)：約分佈於地表下深度 0.4 ~ 4.0m 且含有貝屑，SPT-N 值為 10 ~ 13 間，而表土層有 0.4m 厚之棕黃色之砂質沉泥夾卵礫石。
2. 灰色沉泥質砂夾黏土薄層 (SM、CL)：分佈於地表下深度 4.0m ~ 31.2m，其 N 值自 4m ~ 15m 為 7 ~ 21 間，15m ~ 31.2m 為

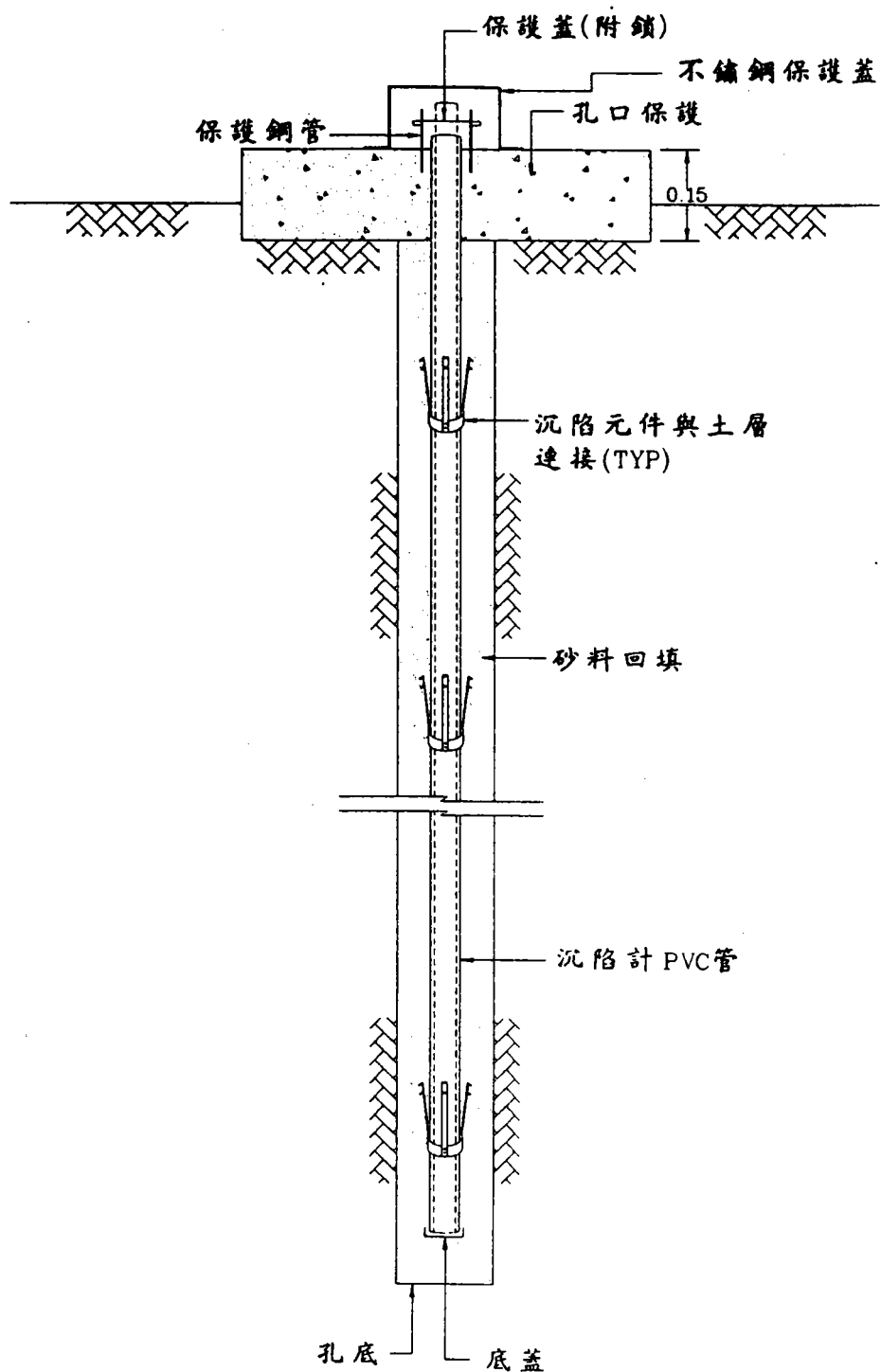


圖 4-4 磁感式層別沉陷計裝設圖

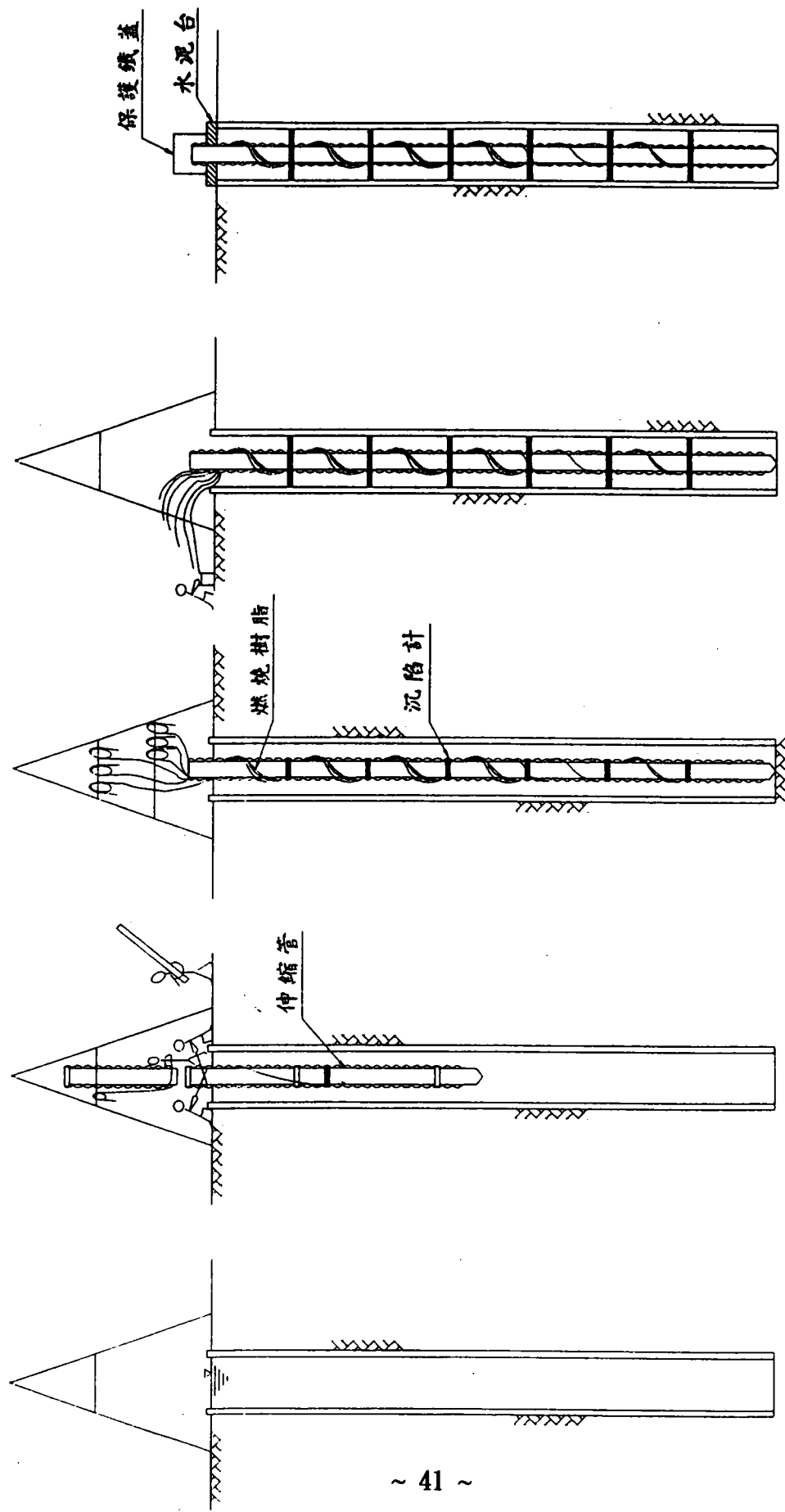
①

②

③

④

⑤



鑿井完成圖 沉陷計下管圖 沉陷計下管完成圖 沉陷計安卡打開圖 儀器安裝完成圖

圖 4-5 沉陷計安裝示意圖

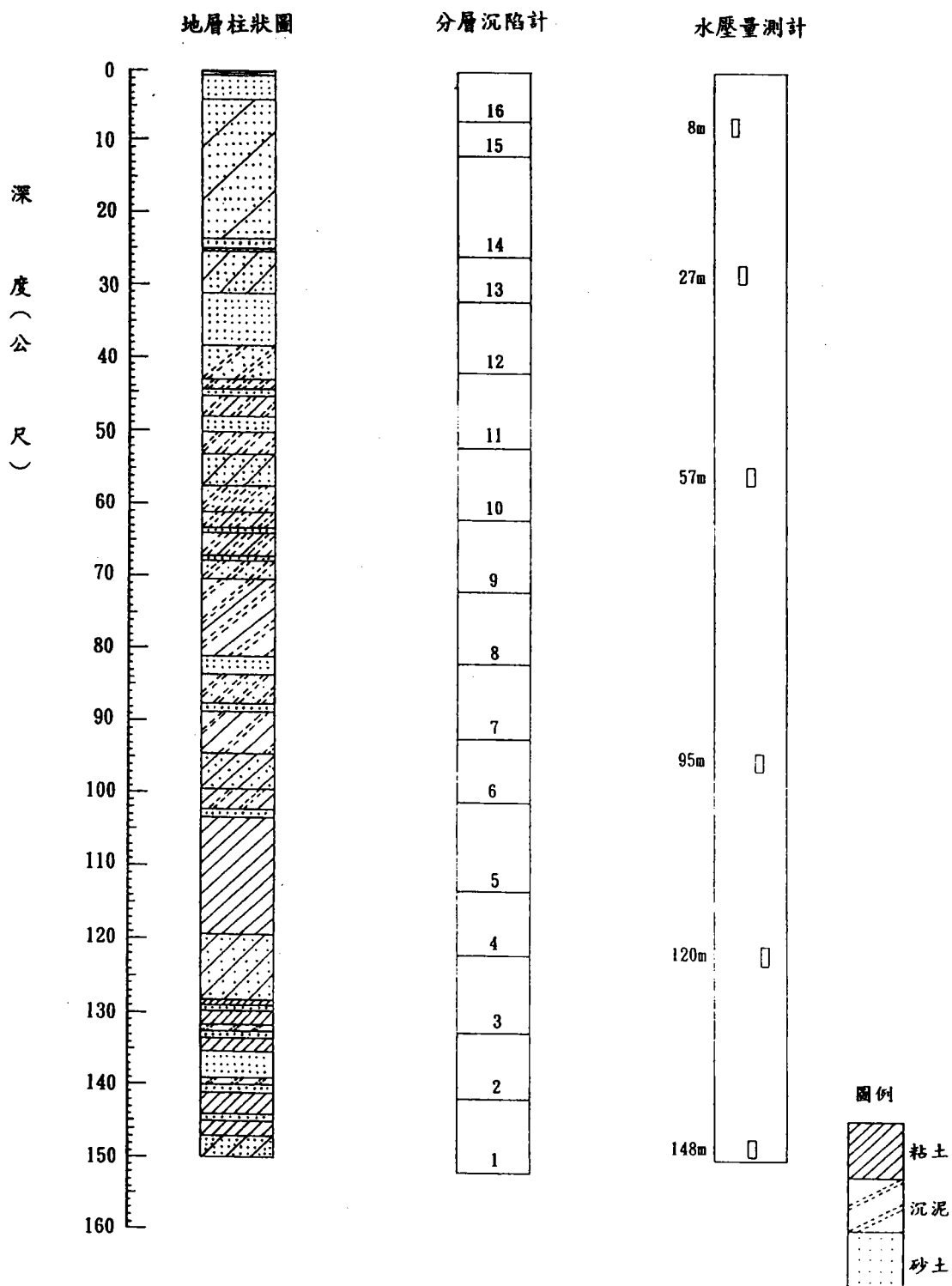


圖 4-6 安平港分層沉陷及水壓量測觀測站地層柱狀圖

23 ~ 59 間，隨深度增加有愈大之趨勢。

3. 灰色沉泥質細砂 (SM) : 分佈於地表下 31.2m ~ 38.4m , SPT-N 值自 45 ~ 75 屬緊密砂土。
4. 灰色黏土質沉泥或沉泥質砂夾黏土薄層 (ML 、 SM) : 分佈於地表下 38.4m ~ 57.5m , 其中 43.2 ~ 44.4m 及 50.2 ~ 53.1m 深為黏土質沉泥層 , N 值為 23 ~ 31 , 其餘之土層其 N 值約 63 ~ 89 。
5. 灰色砂質沉泥夾黏土或夾細砂薄層 (ML 、 CL 、 SM) : 分佈於地表下 57.5m ~ 81.2m , N 值約自 49 ~ 70 間 , 而 70.5m ~ 81.2m 有約 10m 厚之砂質沉泥夾黏土薄層。
6. 灰色沉泥質細砂 (SM) : 分佈於地表下 81.2m ~ 83.7m , SPT-N 值為 86 。
7. 灰色砂質沉泥夾黏土或細砂薄層 (ML 、 CL) : 分佈於地表下 83.7m ~ 94.7m , SPT-N 值約為 62 ~ 90 。
8. 灰色沉泥質黏土與沉泥質細砂互層 (CL 、 SM) : 分佈於地表下 94.7m ~ 103.4m , SPT-N 值為 35 ~ 50 間。
9. 灰色沉泥質黏土 (CL) : 分佈於地表下 103.4m ~ 119.5m , SPT-N 值為 40 ~ 55 , 而於 105.5m 及 108.2m 處約夾有 0.5m 之細砂土層。
10. 灰色沉泥質砂夾黏土薄層 (SM) : 分佈於地表下 119.5m ~ 128.5m , SPT-N 值在 100 時貫入土層約 10cm 。
11. 灰色沉泥質黏土夾細砂或沉泥薄層 (CL 、 SM) : 分佈於地表下 128.5m ~ 135.3m , 其 SPT-N 值在 100 時約貫入土層 3 ~ 5cm 。
12. 含有機物之灰色沉泥質砂夾黏土薄層 (SM 、 CL) : 分佈於地表下 135.3m ~ 141.2m , SPT-N 值在 100 時貫入土層約 13cm 。

13. 灰色沉泥質黏土層 (CL): 分佈於地表下 141.2m ~ 147.10m , SPT-N 值約為 56 左右, 而深度 144m ~ 145.2m 則有 1.2 公尺厚之沉泥質砂層。
14. 灰色沉泥質砂夾黏土薄層 (SM、CL): 約分佈於地表下 147.1m ~ 150m , SPT-N 值在 100 時貫入土層為 8cm 左右。

4-3 監測結果分析

地下水位變化會引起地層之變化, 而雨量及地下水抽取量會引起地下水位及地下水壓之變化, 因此雨量、地下水位、地層下陷三者存在著某種相關性, 茲分別說明其量測結果及其相關性。

4-3-1 雨量

安平港位於台南市郊, 其雨量分析乃依據中央氣象局台南氣象站記錄, 每年降雨量皆集中在 6、7、8 月, 其餘月份雨量不大, 月平均雨量分佈如圖 4-7 所示, 有關年平均降雨日數統計結果如下:

年平均降雨量: 1751.0mm

最大日降雨量: 443.2mm (民國 45 年 9 月 17 日)

年平均降雨日數: 104.4 日

而民國 85 年 1 月至 86 年 6 月之每日降雨量如圖 4-8 所示, 85 年降雨量較大月份集中在 5、6、7、8 月, 其餘月份雨量較少。

4-3-2 地下水位分析

本所曾於安平港 8、9、10 號碼頭後側之填土區埋設 10 多孔淺層水位井, 由於本區正在施工中, 所以多數水位井多因施工而遭破壞, 故僅有幾個月之量測資料, 如表 4-1 所示。

而於 3 號碼頭後側埋設 150 公尺深之分層水壓觀測站, 共埋設 6 支水壓計, 其深度分別為 8m、27m、57m、95m、120m、

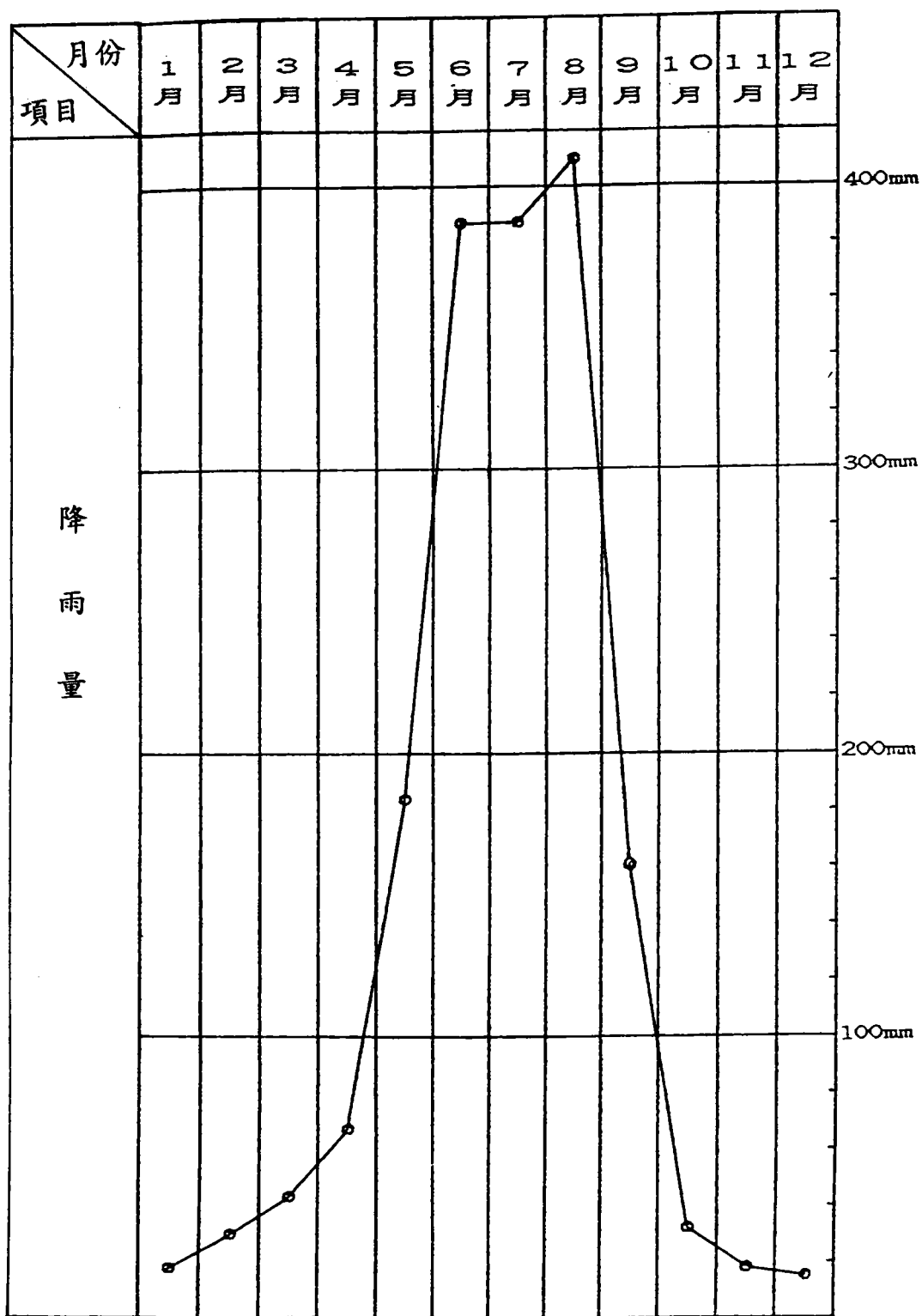


圖4-7 台南地區月平均雨量分佈

圖 4-8 台南地區 85、86 年之日降雨量統計圖

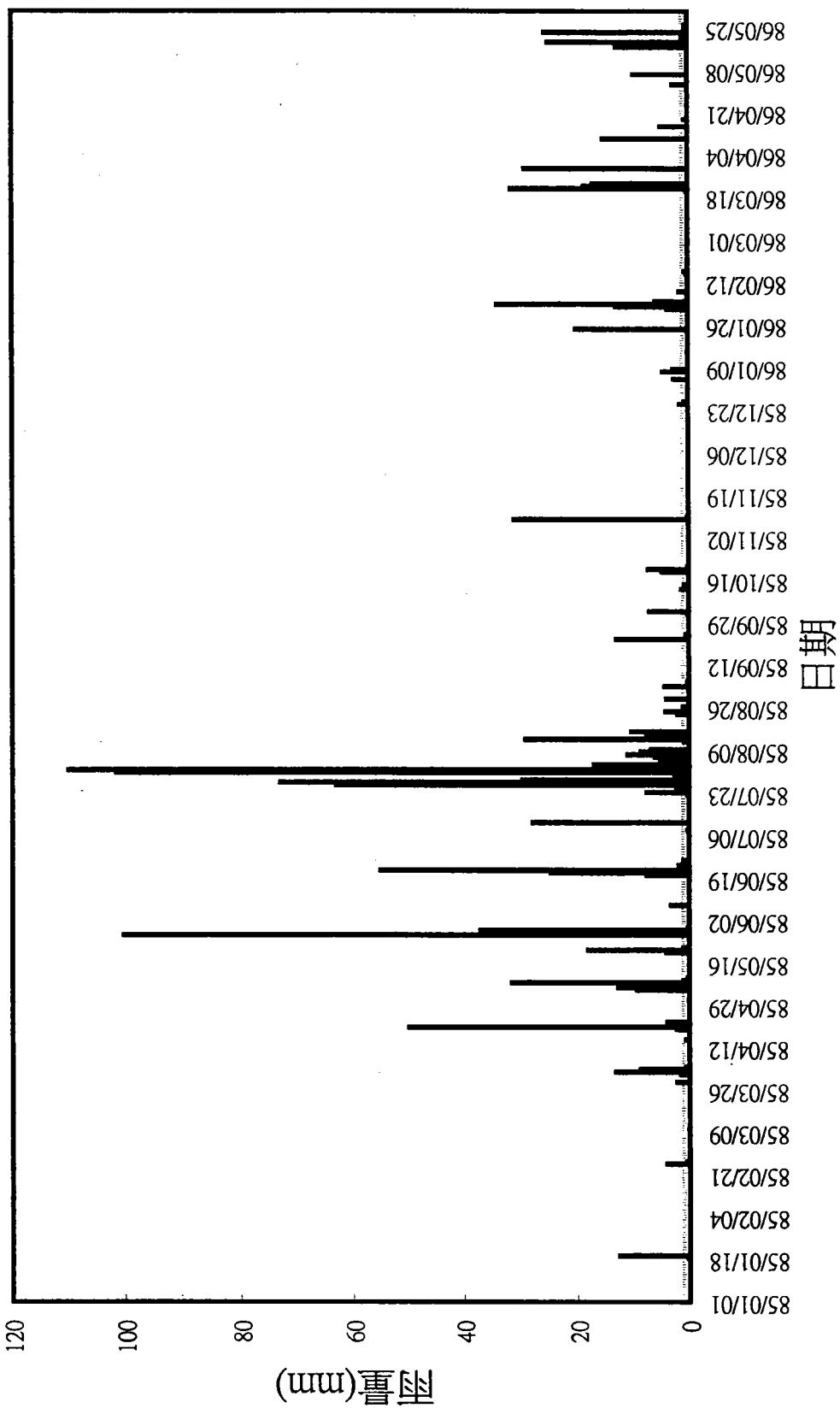


表 4-1 安平港淺層水位井之量測資料

地面標高：約3.8公尺

孔 號 (NO)	觀 測 日 期					最高水位 (公尺)	最低水位 (公尺)	最大位差 (公尺)
	850426	850628	850716	850816	850916	851016	851106	
BH-1	-	-	-	-	-	-	-	-
BH-2	1.278	1.458	1.473	-	-	-	-	1.278
BH-3	1.208	1.413	1.455	-	-	-	-	1.208
BH-4	1.283	1.408	1.313	1.558	1.443	-	-	1.283
BH-5	1.308	1.458	1.470	1.698	1.601	1.548	1.478	1.308
BH-6	1.248	1.533	1.522	1.988	-	-	-	1.248
BH-7	1.358	1.493	1.525	1.888	1.734	1.648	1.566	1.358
BH-8	1.318	1.488	1.538	1.938	1.722	1.628	1.558	1.318
BH-9	-	-	-	-	-	-	-	-
BH-10	1.263	1.443	1.463	1.806	-	-	-	1.263
BH-11	1.238	1.398	1.418	1.733	-	-	-	1.238
BH-12	1.453	1.583	1.613	2.220	-	-	-	1.453
BH-13	-	-	-	-	-	-	-	-
BH-14	1.448	1.723	1.786	2.468	-	-	-	1.448
BH-15	-	-	-	-	-	-	-	-
BH-16	1.483	1.723	1.791	2.437	2.283	-	-	1.483
BH-17	0.988	1.238	1.256	1.641	-	1.373	1.288	0.988

148m，自 85 年 4 月 2 日開始量測，其中 85 年 4 月 9 日至 4 月 15 日、4 月 27 日至 6 月 20 日、10 月 3 日至 11 月 5 日、86 年 1 月 6 日至 1 月 17 日，因水壓自動量測系統故障而缺乏資料，而深度 27m、57m 兩支水壓計，亦於 85 年 7 月 26 日損壞，未能繼續量測，茲將分層地下水壓(t/m^2)正規化為分層地下水位(m)，以利比較，分別如圖 4-9 至圖 4-14 所示。由圖 4-9 顯示：8m 之水壓計其地下水位變化介於-0.4~-2m 之間，7、8 月雨季時水位較高，11、12 月旱季時，水位較低，其餘時期水位僅反復震盪，並無多大變化。由圖 4-10 顯示 27m 處之水位介於 0.4~-0.2m 之間，由於量測期間較短，其水位僅在 0.6m 間反復性之震盪，並無多大變化，唯其水位高出地表面，表示此層並無超抽地下水現象。

由圖 4-11 顯示：57m 處之水位，最高為-0.8m，最低為-1.8m，水位變化不大，由圖 4-12 顯示：95 處之地下水位變化較大，最高水位-0.5m，最低水位為-2.5m，7、8 月雨季水位較高，11、12 月旱季水位較低，而且整體地下水位有漸下降之趨勢，表示此層有超抽地下水現象。由圖 4-13 顯示：120m 處之地下水位，最高水位-0.2m，最低水位-1.6m，整體水位無多大變化，僅是反復性之震盪，且不太受季節性影響，顯示此層無超抽地下水現象。由圖 4-14 顯示：148m 處之地下水位變化最大，最高水位-2.4m，最低水位-4.1m，7、8 月雨季時，水位較高，旱季時水位較低，整體地下水位與 95m 水位相似，有漸下降之趨勢，亦表示此層有超抽地下水現象。

綜合各地層之地下水位資料，如圖 4-15 所示，由圖 4-15 顯示 27、57m 處之地下水位變化，由於量測時間較短，無法判斷水位變化趨勢，而 8、120m 處之水位幾乎相似，僅在-1~-1.5m 間反復性之震盪，無多大變化，而 95、148m 兩處之水位下降較為明顯，有超抽地下水位現象，而且在 85 年 11、12 月旱季時，水位下降至最低，表示旱季時，超抽地下水更為嚴重。

4-3-3 分層地層下陷分析

為了探討安平港不同深度地層之壓縮行為，於 3 號碼頭後側

日期

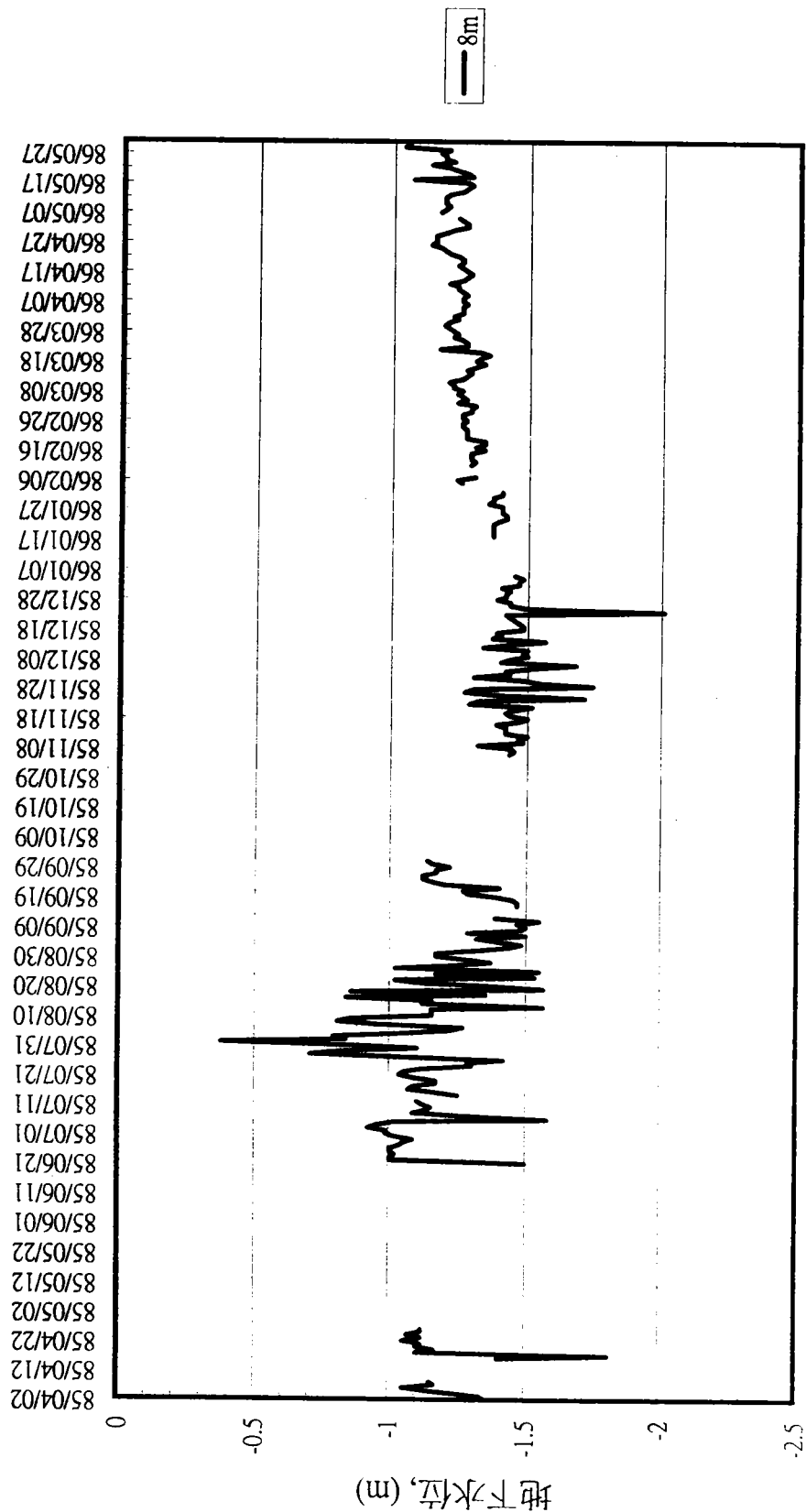


圖 4-9 安平港8m之地下水位變化圖

日期

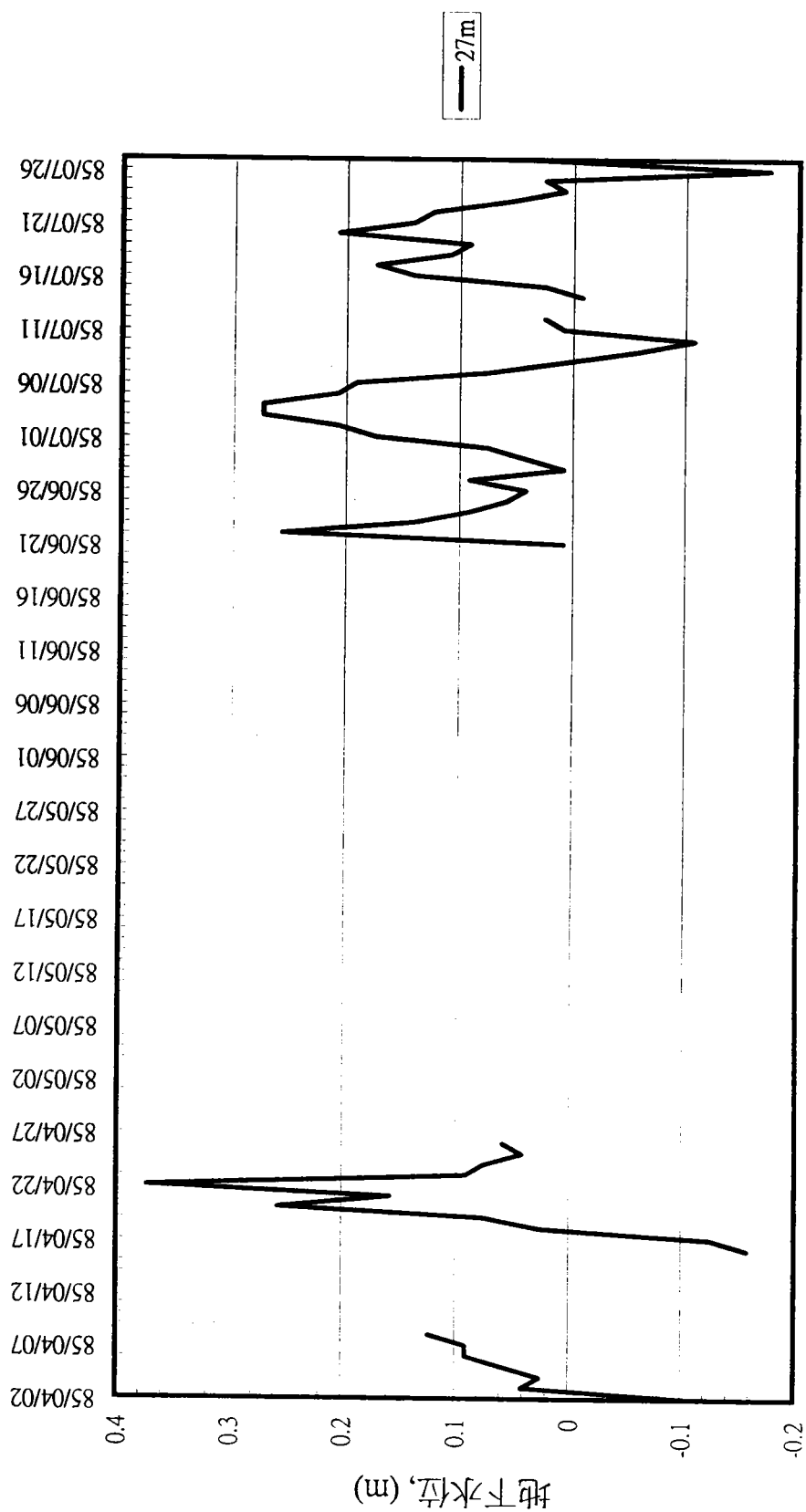


圖4-10 安平港27m之地下水位變化圖

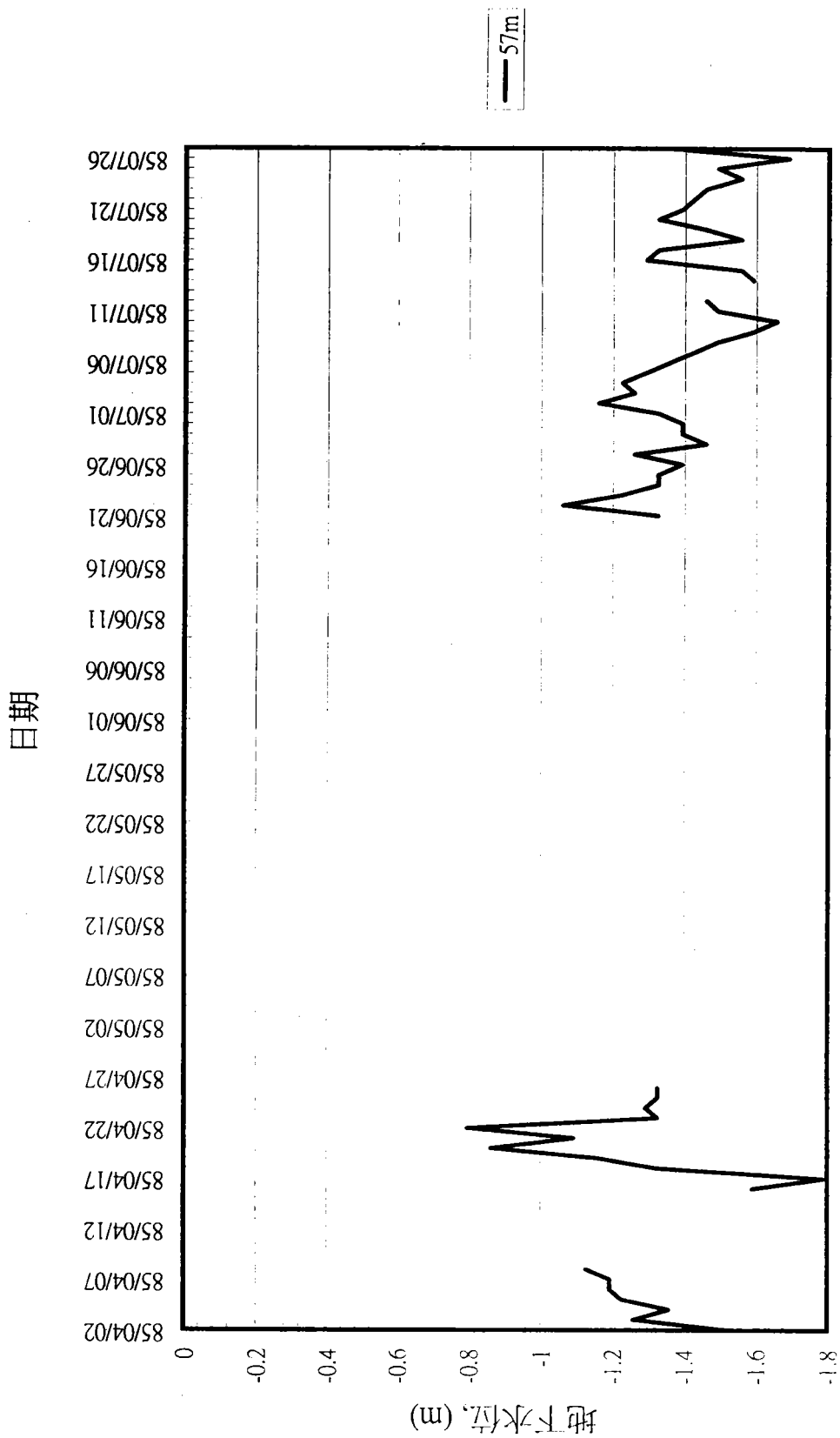


圖4-11 安平港57m之地下水位變化圖

日期

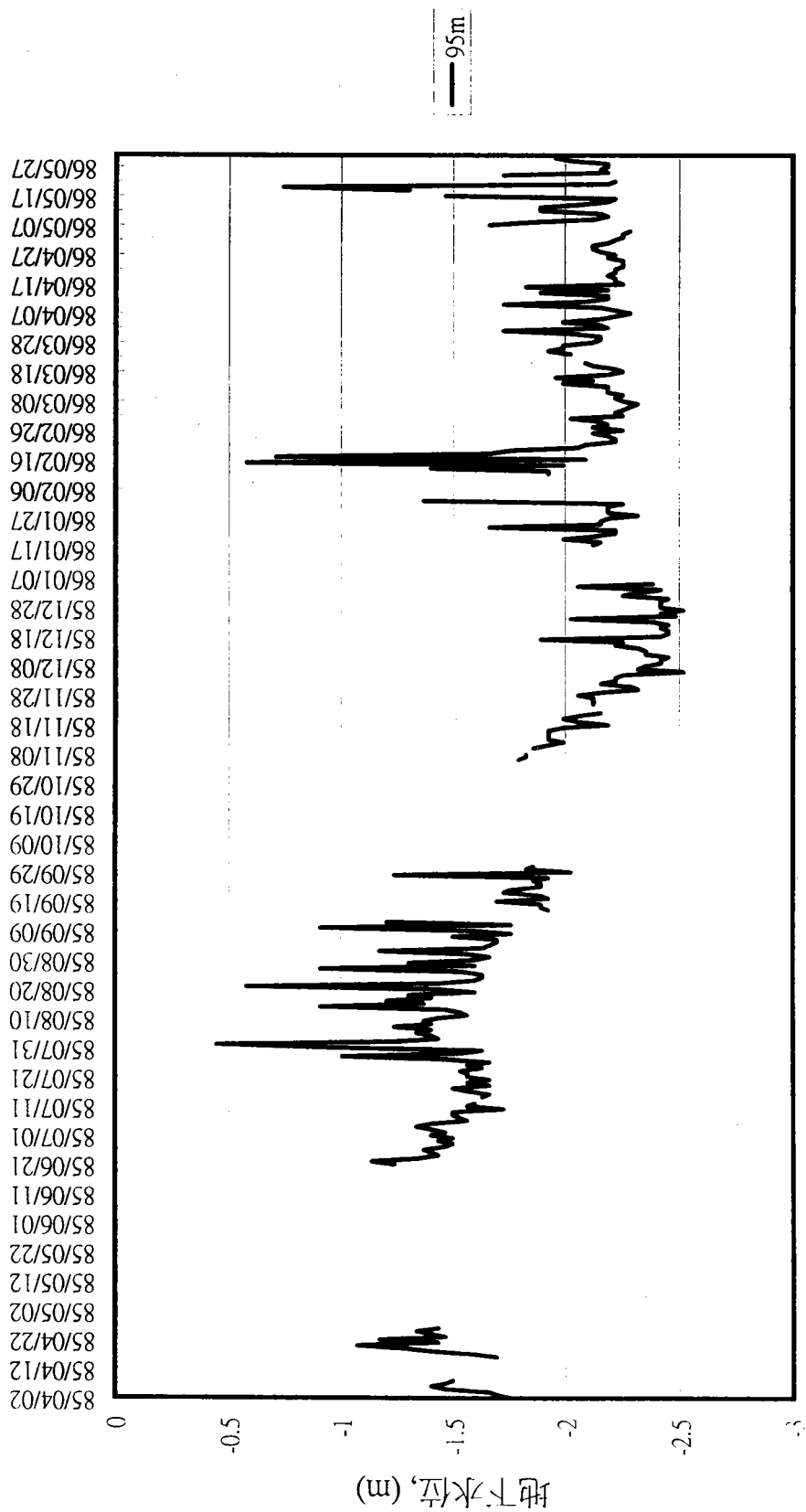


圖4-12 安平港95m之地下水位變化圖

日期

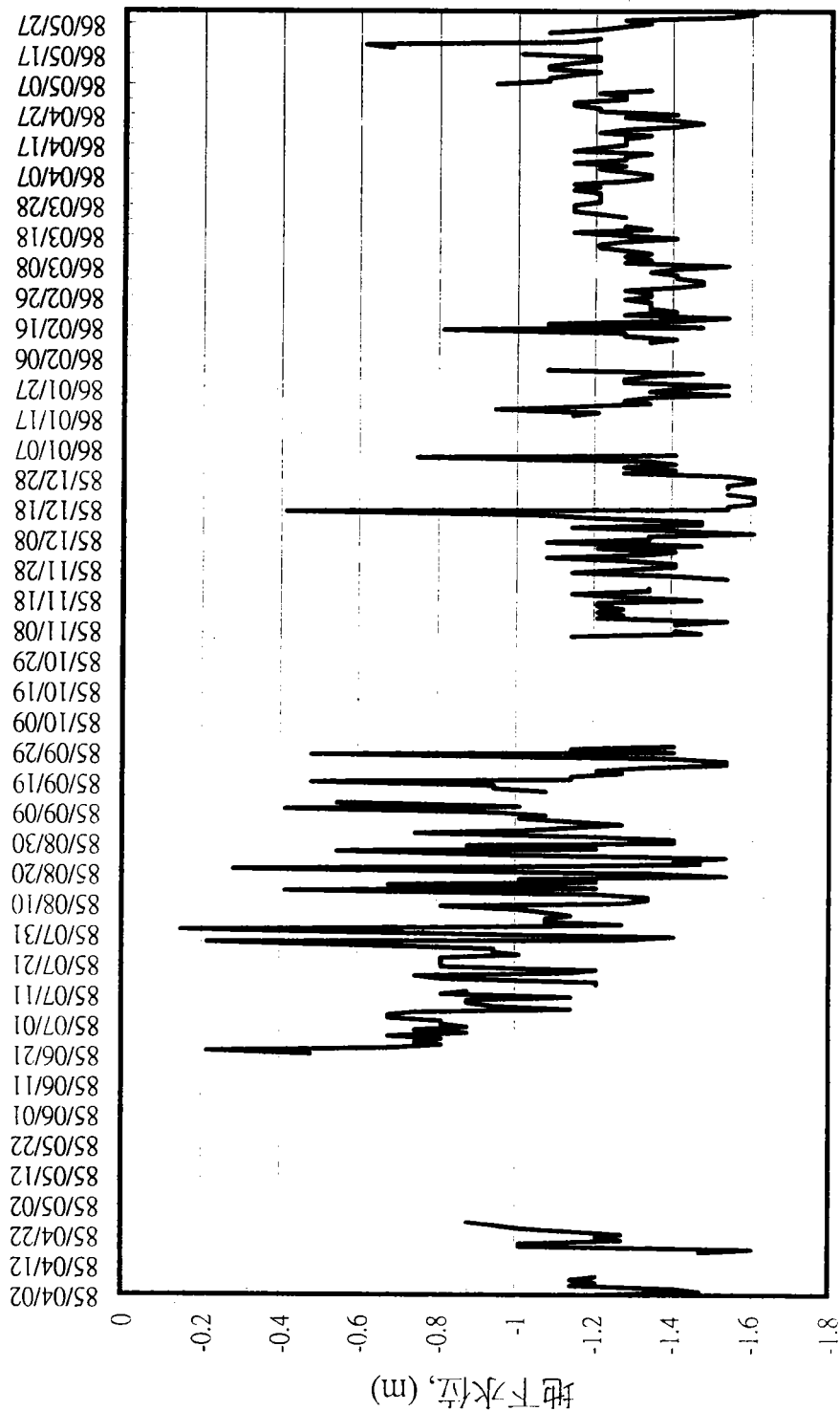


圖4-13 安平港120m之地下水位變化圖

日期

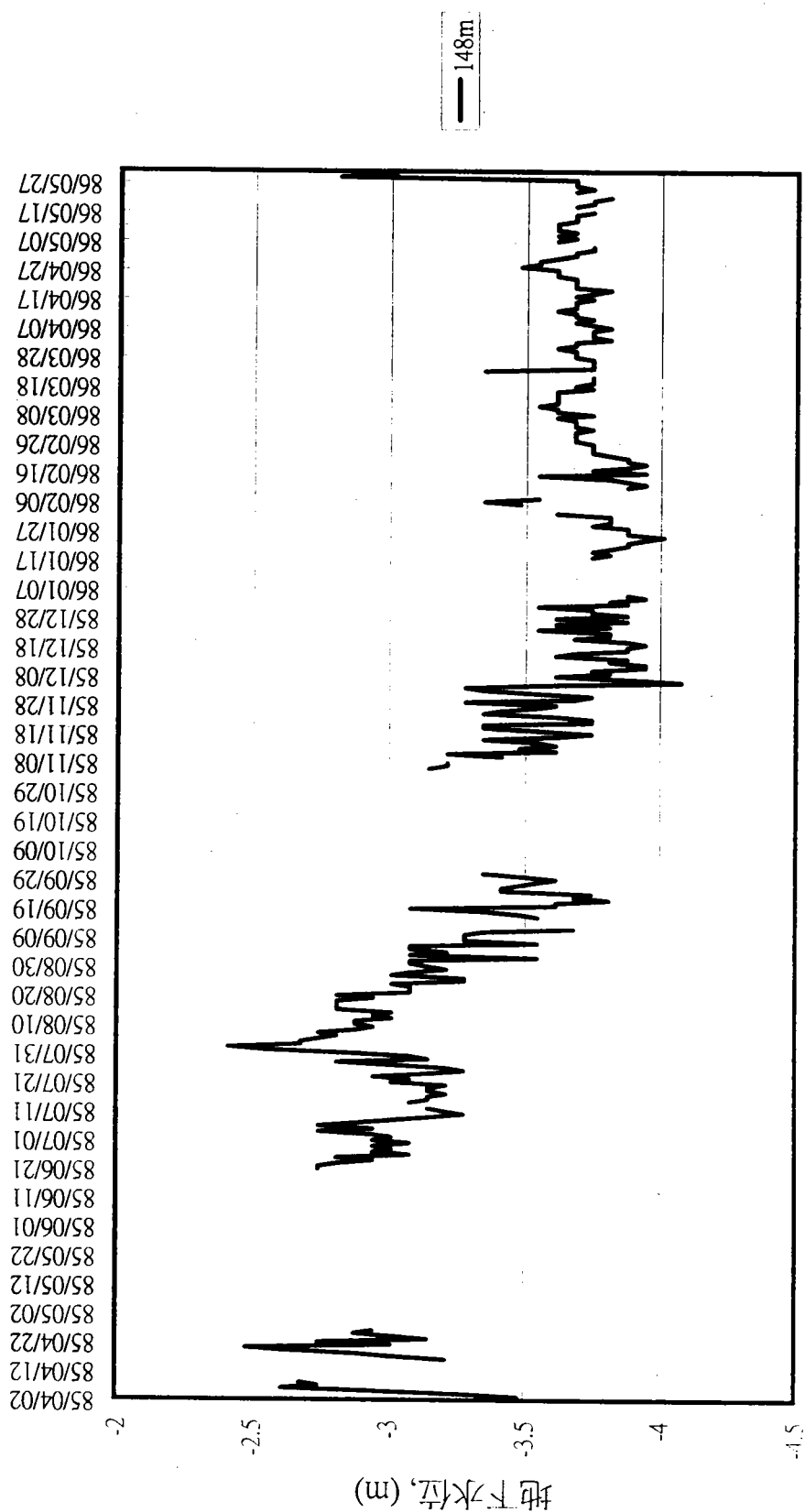


圖4-14 安平港148m之地下水位變化圖

日期

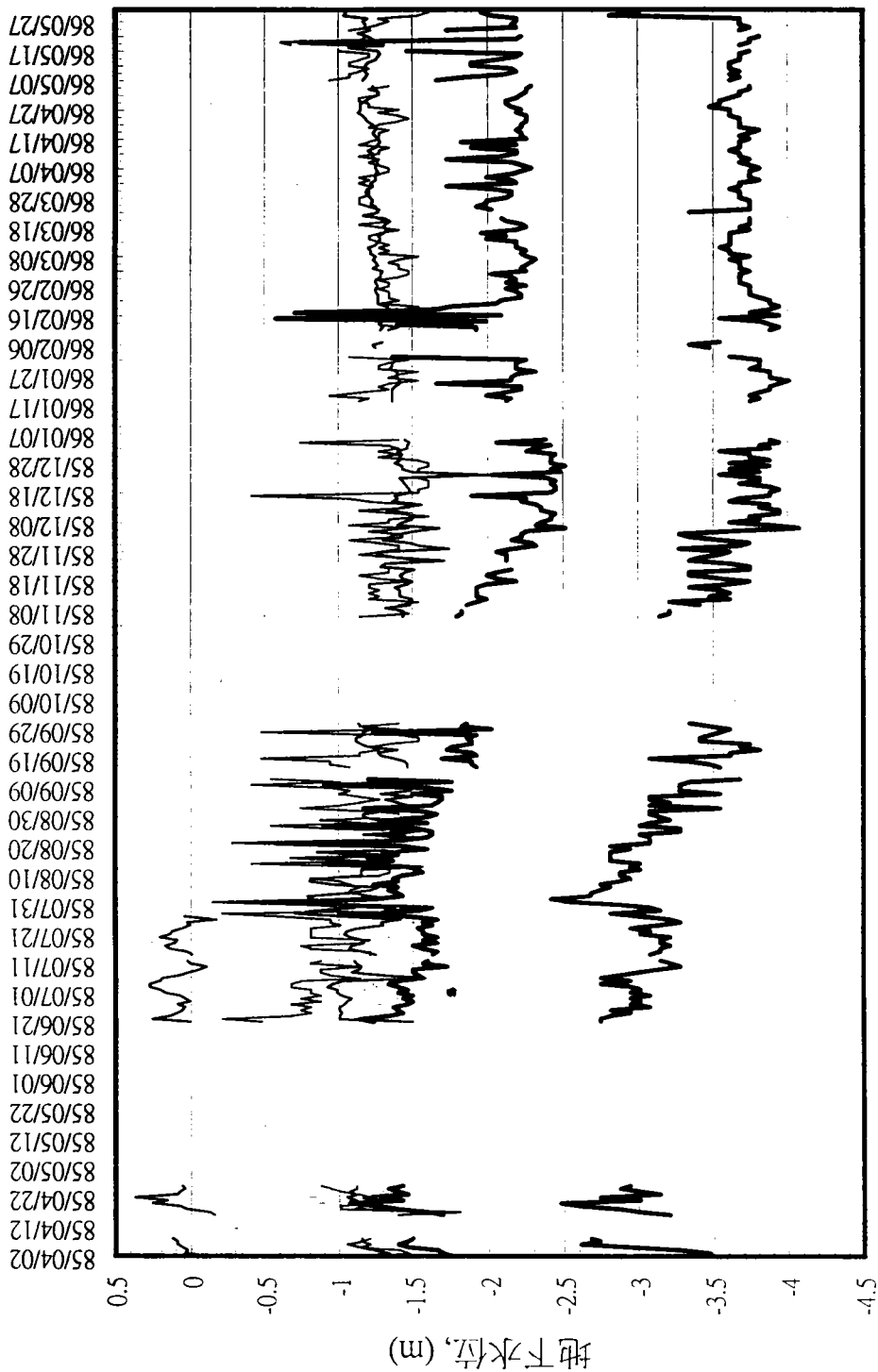


圖4-15 安平港分層地下水水位變化圖

停車場之位置設立 150m 深之分層地層下陷監測井，每隔 10m 安裝一個沉陷磁環，其位置分別在深度 7、12、26、32、42、52、62、72、82、92、102、113、122、132、142、152m 共 15 個，每 1 至 2 個月定期以無線電波監測儀量測各沉陷磁環之相對移動變化量，以量測不同深度地層之壓縮量，其量測過程及方法請參考附錄 A，觀測從民國 85 年 4 月 2 日開始，資料值由鋼鋼尺上之刻度讀取其最小刻度為公厘，各次量測記錄，列於表 4-2。

圖 4-16 為至民國 86 年 5 月 29 日，不同深度地層之壓縮量，以柱狀圖形表示，負值表壓縮，正值表回脹，因為感應磁環之最大深度為 152 公尺，所以圖中所有的量測數值均以此為參考點所計算之相對壓縮量，由圖 4-16 可發現較淺之地層壓縮行為較不規則，變異性較大，其可能與淺層地層結構較鬆，易受雨量、水位變化等地表環境之影響，且因覆蓋應力（初始有效應力）較小，因此加壓（水位下降）或解壓（水位上升）時反應之壓縮量或回脹量均較大，由圖 4-16 亦顯示壓縮量較大之地層為 142~152m 及 12~26m 之深度，其沉陷量分別為 4.8mm 及 5.4mm，唯 12~26m 之壓縮量，可能非真正之壓縮量，可能因鑽孔時淺層孔徑較大，安裝沉陷磁環時回填砂較多，致使 12m 處之磁環錨插於較鬆之回填砂，而未錨插於原始地層，因而沉陷磁環容易鬆動，因此 12~26m 處壓縮 5.4mm，而 7~12m 處膨脹 3.4mm，其實 7~26m 之總壓縮量僅 2mm，若 12m 處之沉陷磁環未鬆動，12~26m 處之壓縮量應小於 2mm，遠小於深層 142~152m 之 4.8mm 壓縮量，因此安平港之深層沉陷較淺層沉陷為大。

圖 4-17 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 152 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖 4-17 顯示，從 85 年 4 月 2 日至 86 年 6 月 27 日之 14 個月期間，安平港地表至 152 公尺間之沉陷總量 8 公厘，而其中 142~152m 之沉陷量 4.8mm，佔總沉陷量之 50% 以上，由此資料顯示，安平港之沉陷屬於深層沉陷，且較 152m 更深之處仍可能有沉陷發生，因此安平港之總沉陷量應比監測所量測之壓縮總量還大。

表 4-2 安平港分層沉陷之量測資料

安平港地層分層下陷觀測站測量值及下陷量計算值												
項目	元 件	單位:公厘										
項目	編 號	850402	850509	850716	850816	850916	851016	851106	851219	860305	860415	860529
量	NO.16	6.9875	6.9878	6.9880	6.9883	6.9883	6.9873	6.9876	6.9865	6.9870	6.9868	6.9860
	NO.15	12.0050	12.0055	12.0069	12.0073	12.0081	12.0075	12.0085	12.0070	12.0075	12.0075	12.0069
	NO.14	25.9035	25.9033	25.9040	25.9033	25.9028	25.9020	25.9025	25.9008	25.9001	25.9015	25.9000
	NO.13	32.1850	32.1860	32.1865	32.1855	32.1850	32.1853	32.1850	32.1830	32.1835	32.1822	32.1826
	NO.12	42.0335	42.0333	42.0335	42.0328	42.0326	42.0318	42.0320	42.0300	42.0300	42.0300	42.0297
測	NO.11	52.1280	52.1280	52.1285	52.1278	52.1268	52.1268	52.1263	52.1246	52.1250	52.1243	52.1238
	NO.10	62.1460	62.1463	62.1465	62.1450	62.1452	62.1443	62.1440	62.1425	62.1430	62.1420	62.1424
	NO. 9	72.1260	72.1273	72.1273	72.1270	72.1263	72.1258	72.1253	72.1240	72.1240	72.1230	72.1230
	NO. 8	82.0290	82.0290	82.0300	82.0285	82.0288	82.0278	82.0278	82.0255	82.0255	82.0251	82.0256
	NO. 7	91.9790	91.9800	91.9800	91.9790	91.9788	91.9783	91.9778	91.9759	91.9758	91.9750	91.9756
值	NO. 6	101.9860	101.9865	101.9870	101.9855	101.9853	101.9850	101.9843	101.9825	101.9827	101.9815	101.9822
	NO. 5	113.2810	113.2815	113.2823	113.2805	113.2800	113.2798	113.2793	113.2770	113.2770	113.2767	113.2780
	NO. 4	121.9900	121.9898	121.9888	121.9892	121.9885	121.9885	121.9878	121.9858	121.9860	121.9856	121.9855
	NO. 3	132.4510	132.4508	132.4513	132.4508	132.4503	132.4495	132.4480	132.4465	132.4460	132.4455	132.4453
	NO. 2	141.9670	141.9678	141.9680	141.9670	141.9668	141.9660	141.9650	141.9638	141.9631	141.9620	141.9638
地 表	NO. 1	151.9450	151.9427	151.9430	151.9423	151.9420	151.9405	151.9400	151.9380	151.9370	151.9368	151.9370
	NO.16	144.9575	144.9549	144.9550	144.9540	144.9537	144.9532	144.9524	144.9515	144.9500	144.9500	144.9510
	NO.15	139.9400	139.9372	139.9361	139.9350	139.9339	139.9330	139.9315	139.931	139.9295	139.9293	139.9301
	NO.14	126.0415	126.0394	126.0390	126.0390	126.0392	126.0385	126.0375	126.0372	126.0369	126.0353	126.0370
	NO.13	119.7600	119.7567	119.7565	119.7568	119.757	119.7552	119.7550	119.7550	119.7535	119.7546	119.7544
元	NO.12	109.9115	109.9094	109.9095	109.9095	109.9094	109.9087	109.9080	109.9080	109.9070	109.9068	109.9073
	NO.11	99.8170	99.8147	99.8145	99.8145	99.8152	99.8137	99.8137	99.8134	99.8120	99.8125	99.8132
	NO.10	89.7990	89.7964	89.7965	89.7973	89.7968	89.7962	89.7960	89.7955	89.7940	89.7948	89.7946
	NO. 9	79.8190	79.8154	79.8157	79.8153	79.8157	79.8147	79.8147	79.8140	79.8130	79.8138	79.8140
	NO. 8	69.9160	69.9137	69.9130	69.9138	69.9132	69.9127	69.9122	69.9125	69.9115	69.9117	69.9114
之	NO. 7	59.9660	59.9627	59.9630	59.9633	59.9632	59.9622	59.9622	59.9621	59.9612	59.9618	59.9614
	NO. 6	49.9590	49.9562	49.9560	49.9568	49.9567	49.9555	49.9557	49.9555	49.9543	49.9553	49.9548
	NO. 5	38.6640	38.6612	38.6607	38.6618	38.6620	38.6607	38.6607	38.6610	38.6600	38.6601	38.6590
	NO. 4	29.9550	29.9529	29.9542	29.9531	29.9535	29.9520	29.9522	29.9522	29.9510	29.9512	29.9515
	NO. 3	19.4940	19.4919	19.4917	19.4915	19.4917	19.4910	19.4920	19.4915	19.4910	19.4913	19.4917
Z	NO. 2	9.9780	9.9749	9.9750	9.9753	9.9752	9.9745	9.9750	9.9742	9.9739	9.9748	9.9732
	NO. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	地表	0	-2.3	-2.0	-2.7	-3.0	-4.5	-5.0	-7.0	-8.0	-8.2	-8
	7m	0	-2.6	-2.5	-3.5	-3.8	-4.3	-5.1	-6.0	-7.5	-7.5	-6.5
	12m	0	-2.8	-3.9	-5.0	-6.1	-7.0	-8.5	-9.0	-10.5	-10.7	-9.9
各	26m	0	-2.1	-2.5	-2.5	-2.3	-3.0	-4.0	-4.3	-4.6	-6.2	-4.5
	32m	0	-3.3	-3.5	-3.2	-3.0	-4.8	-5.0	-5.0	-6.5	-5.4	-5.6
	42m	0	-2.1	-2.0	-2.0	-2.1	-2.8	-3.5	-3.5	-4.5	-4.7	-4.2
	52m	0	-2.3	-2.5	-2.5	-1.8	-3.3	-3.3	-3.6	-5.0	-4.5	-3.8
	62m	0	-2.6	-2.5	-1.7	-2.2	-2.8	-3.0	-3.5	-5.0	-4.2	-4.4
下	72m	0	-3.6	-3.3	-3.7	-3.3	-4.3	-4.3	-5.0	-6.0	-5.2	-5
	82m	0	-2.3	-3.0	-2.2	-2.8	-3.3	-3.8	-3.5	-4.5	-4.3	-4.6
	92m	0	-3.3	-3.0	-2.7	-2.8	-3.8	-3.8	-3.9	-4.8	-4.2	-4.6
	102m	0	-2.8	-3.0	-2.2	-2.3	-3.5	-3.3	-3.5	-4.7	-3.7	-4.2
	113m	0	-2.8	-3.3	-2.2	-2.0	-3.3	-3.3	-3.0	-4.0	-3.9	-5
S	122m	0	-2.1	-0.8	-1.9	-1.5	-3.0	-2.8	-2.8	-4.0	-3.8	-3.5
	132m	0	-2.1	-2.3	-2.5	-2.3	-3.0	-2.0	-2.5	-3.0	-2.7	-2.3
	142m	0	-3.1	-3.0	-2.7	-2.8	-3.5	-3.0	-3.8	-4.1	-3.2	-4.8
	152m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	地表	0	0.3	0.5	0.8	0.8	-0.2	0.1	-1.0	-0.5	-0.7	-1.5
各	7m	0	0.2	1.4	1.5	2.3	2.7	3.4	3.0	3.0	3.2	3.4
	12m	0	-0.7	-1.4	-2.5	-3.8	-4.0	-4.5	-4.7	-5.9	-4.5	-5.4
	26m	0	1.2	1.0	0.7	0.7	1.8	1.0	0.7	1.9	-0.8	1.1
	32m	0	-1.2	-1.5	-1.2	-0.9	-2.0	-1.5	-1.5	-2.0	-0.7	-1.4
	42m	0	0.2	0.5	0.5	-0.3	0.5	-0.2	0.1	0.5	-0.2	-0.4
個	52m	0	0.3	0.0	-0.8	0.4	-0.5	-0.3	-0.1	0.0	-0.3	0.6
	62m	0	1.0	0.8	2.0	1.1	1.5	1.3	1.5	1.0	1.0	0.6
	72m	0	-1.3	-0.3	-1.5	-0.5	-1.0	-0.5	-1.5	-1.5	-0.9	-0.4
	82m	0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.4	0.3	-0.1	0.0
	92m	0	-0.5	0.0	-0.5	-0.5	-0.3	-0.5	-0.4	-0.1	-0.5	-0.4
量	102m	0	0.0	0.3	0.0	-0.3	-0.2	0.0	-0.5	-0.7	0.2	0.8
	113m	0	-0.7	-2.5	-0.3	-0.5	-0.3	-0.5	-0.2	0.0	-0.1	-1.5
	122m	0	0.0	1.5	0.6	0.8	0.0	-0.8	-0.3	-1.0	-1.1	-1.2
	132m	0	1.0	0.7	0.2	0.5	0.5	1.0	1.3	1.1	0.5	2.5
	142m	0	-3.1	-3.0	-2.7	-2.8	-3.5	-3.0	-3.8	-4.1	-3.2	-4.8
S	152m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

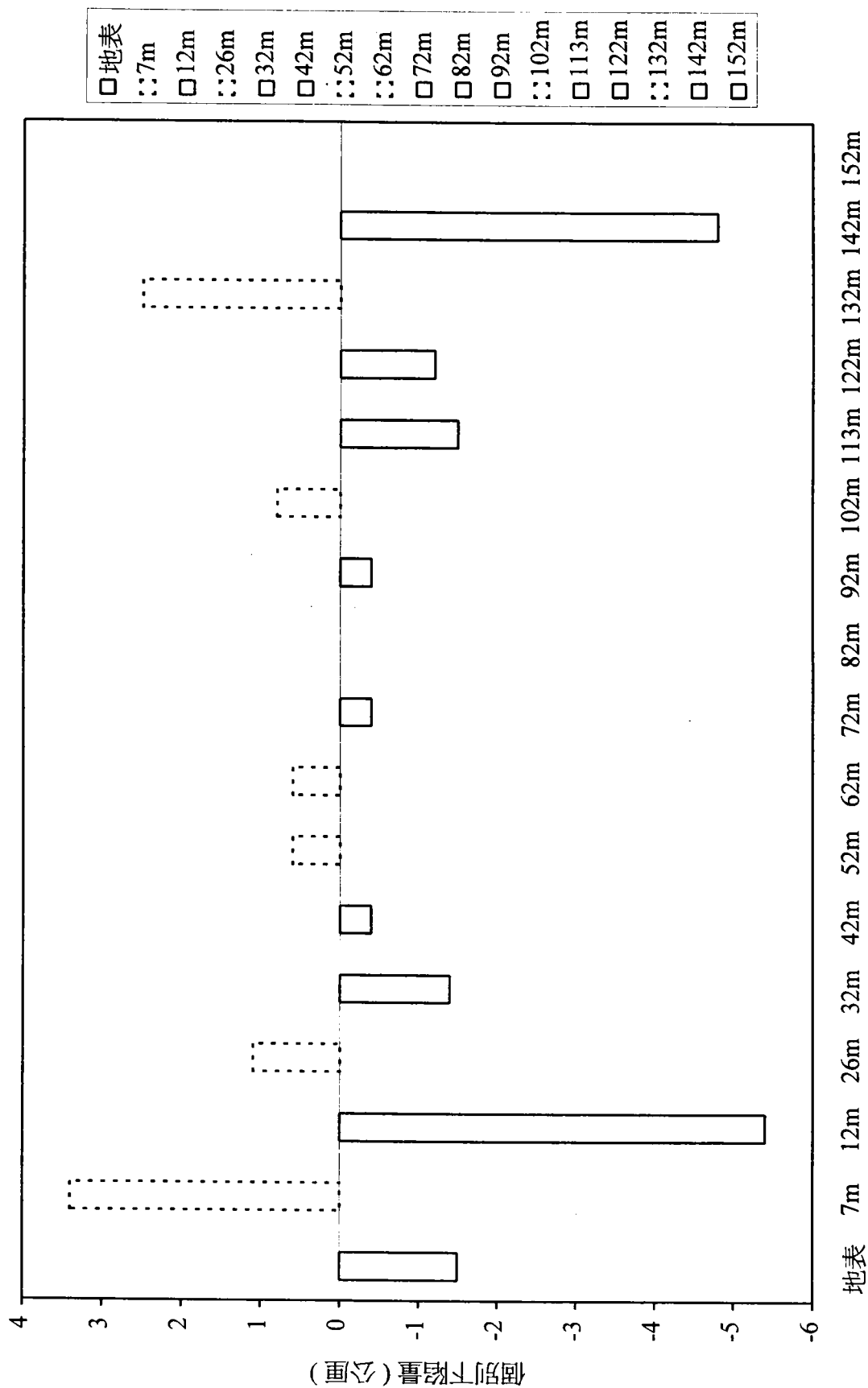


圖4-16 安平港分層個別下陷量圖

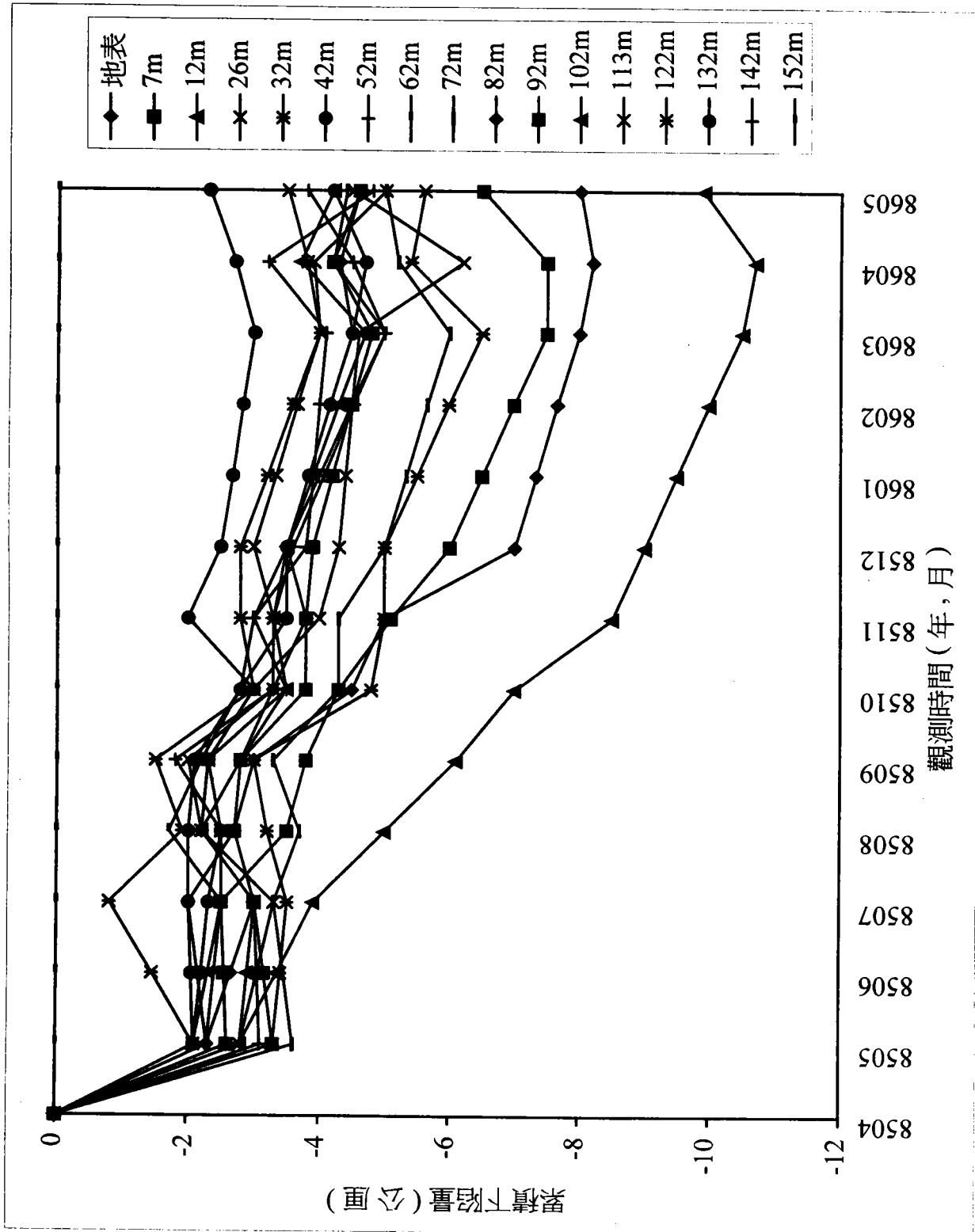


圖4-17 安平港地層分層下陷量累積圖

4-3-4 相關性分析

綜合上述雨量之統計分析，分層地下水位及分層地層下陷之分析，本節簡要之探討其間之相關性。淺層地下水位屬於局部性，其受港區抽水之影響，若是鄰近區域之抽水，則較不影響，而深層之地下水位屬於區域性，港區及附近區域之抽水皆會對其影響，由於港區並無抽水現象發生，淺層水位應無多大變化，但淺層水位除了受漲退潮之潮位影響外，受到雨量之影響最大，7、8月雨季時，水位上升，11、12月旱季時，水位下降，因此淺層土層若無抽水引致壓密水位下降之影響，僅受季節性雨量之影響，則淺層土層僅會因水位上升受解壓而微小之膨脹，水位下降時受再壓而微小之壓縮，整體而言不太會有沉陷發生；而深層之地下水位理應較不受到雨量變化之影響，而受到深層抽水之影響較大，120m處之水層可能無超抽地下水，水位僅微小之反復振盪，並無多大變化，亦不太受雨量分佈之影響，因無水位變化，該處之土層亦無沉陷發生，但95m、148m處之水位變化極為明顯，因此95m及148m處之土層沉陷亦很明顯，95m、148m之水位屬於深層之水位，理應不太受雨量分佈之影響，若有受雨量補注之影響，亦應有一段延遲現象，但此二處深層水位，卻於7、8月雨季時水位上升，11、12月旱季時水位下降，其原因何在？依本研究之見解，乃因雨季時地面水源充足，附近工業區或漁塭區減少使用地下水，而較少抽水，故深層水位上升，而旱季時，地面水源缺乏，引起附近工業區或漁塭區，大量抽取地下水，致使深層水位急速下降，亦引發深層之地層下陷。

4-4 安平港區下陷潛能之分析

為了分析安平港區地層下陷之潛能，吾人須對港區之含水層、阻水層及各地層之深度及厚度進行瞭解，由於經費之限制，本計劃之鑽探深度僅150m，其地層柱狀圖如圖4-6所示，為了對更深層之地層狀況有所了解，我們參考水利局台南仁德站200m深之地層資料，如圖4-18所示，綜合兩地之地層資料，我們將安平港200m深之可能地層分成15個層次，如表4-3所示，其各個層次土層之沉陷特性參數 C_u 值及 C_v 值，說明如下：其中影響沉陷量之

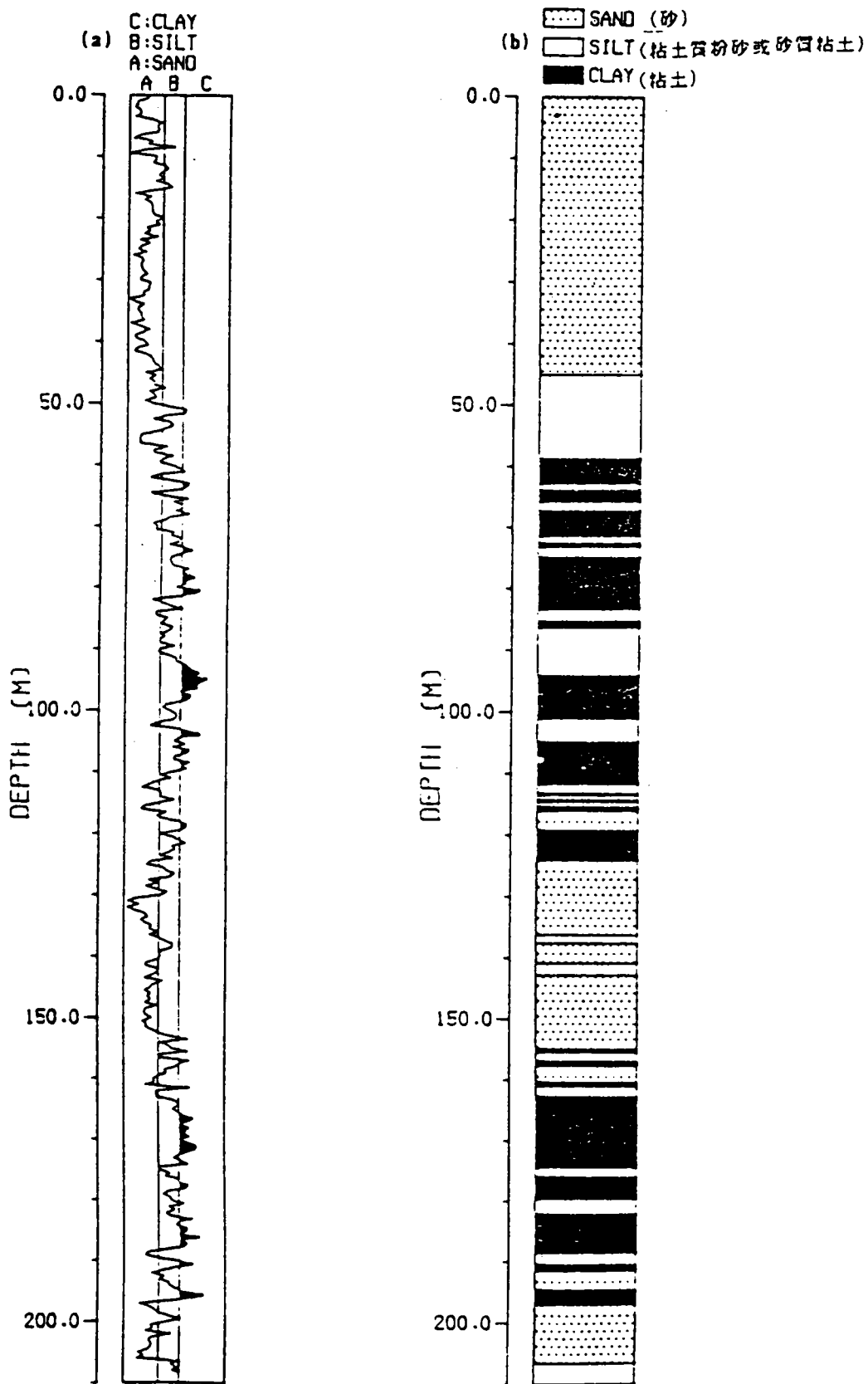


圖4-18 台南仁德站之地層柱狀圖

表 4-3 安平港地層各層次之沉陷特性參數

層次	土壤分類	土層深度 (m)	厚度 (m)	壓縮係數 $C_u = C_c / (1 + e_0)$	壓密係數 C_v $m^2/year$
1	SM	0.5~1.5	1	0.028	30
2	SM + CL	1.5~28.5	27	0.035	25
3	SM	28.5~40.5	12	0.028	30
4	ML	40.5~50.5	10	0.075	15
5	SM	50.5~55.5	5	0.028	30
6	ML	55.5~92.5	37	0.075	15
7	SM + CL	92.5~100.5	8	0.08	25
8	CL	100.5~117.5	17	0.15	8
9	SM	117.5~127.5	10	0.028	30
10	CL	127.5~132.5	5	0.15	8
11	SM	132.5~138.5	6	0.028	30
12	CL	138.5~144.5	6	0.15	8
13	SM	144.5~160.5	16	0.028	30
14	CL	160.5~193.5	33	0.15	8
15	SM	193.5~203.5	10	0.028	30

表 4-4 各種土壤之壓縮係數 C_u 值

土壤分類	C_u 值範圍
砂	0.005~0.05
粉土	0.05~0.1
粘土	0.1~0.3
泥炭土	0.2~0.8

壓縮係數 C_u 值 ($C_u = C_c / (1 + e_0)$) 參考表 4-4，並假設安平港土壤之壓縮係數 C_u 值皆介於表 4-4 之中間值，即沉泥質砂 (SM) C_u 值取 0.028，沉泥 (ML) C_u 值取 0.075，粘土 (CL) 之 C_u 值取 0.15，而沉泥質砂夾薄層粘土 (SM+CL) 之 C_u 值取 0.035，而影響沉陷速率之壓密係數 C_v 值，亦隨各種土壤而有所區別，粘土質土壤 (CL) 之 C_v 值假設為 $8 \text{ m}^2/\text{year}$ ，沉泥質土壤 (ML) 之 C_v 值假設為 $15 \text{ m}^2/\text{year}$ ，沉泥質砂 (SM) 之 C_v 值假設為 $30 \text{ m}^2/\text{year}$ ，而沉泥質砂夾薄層粘土 (SM+CL) 之 C_v 值假設為 $25 \text{ m}^2/\text{year}$ ，各土層之土壤分類、深度、厚度、 C_u 值及 C_v 值，亦如表 4-3 所示，唯表中之土層深度與前述圖 4-6 之深度表示方法不同，圖 4-6 之深度是以地表為 0m 之表示法，而表 4-3 之深度是以海平面為 0m 之表示法，其約有 2.5m 之差距。

由表 4-3 之土壤分類及土層厚度顯示，安平港之主要含水層有兩處，一為第 1~3 層次之砂質土壤，厚度共 40.5m，此為淺層之自由水層，另一處為第 13 層次之砂質土壤，厚度為 16m，此為深層之受壓水層，其他之含水層厚度則較薄。淺層自由水層抽水可能引起沉陷之影響深度約為 0~50.5m，深層受壓水層抽水可能引起沉陷之影響深度約為 100.5~203.5m，而土層 50.5~100.5m 間含水層較薄，大部分為沉泥偶夾砂層或粘土，因此本文不予考慮 50.5~100.5m 抽水引致之下陷潛能。

本文以 Terzaghi 壓密理論，探討淺層抽水，自由水位下降，可能引起淺層沉陷之下陷潛能，如圖 4-19 所示，由圖 4-19 顯示：淺層水位下降 3 年 (36 個月) 後之可能沉陷量分別為，水位下降 1m 沉陷 2.5cm，水位下降 5m 沉陷 11.5cm，水位下降 10m 沉陷 20.5cm，水位下降 15m 沉陷 28cm，水位下降 20m 沉陷 35cm，由此可知水位下降愈大，沉陷亦愈大，但並非成比例放大，亦即水位下降 20m 之沉陷量並非 2 倍於水位下降 10m 之沉陷量。

本文亦以 Terzaghi 壓密理論，探討深層抽水，水壓下降可能引起深層沉陷之下陷潛能，如圖 4-20 所示，由圖 4-20 顯示：深層水壓下降 3 年 (36 個月) 後之可能沉陷量分別為，下降 1 t/m^2 沉陷 1.5cm，下降 5 t/m^2 沉陷 6.8cm，下降 10 t/m^2 沉陷 13cm，下

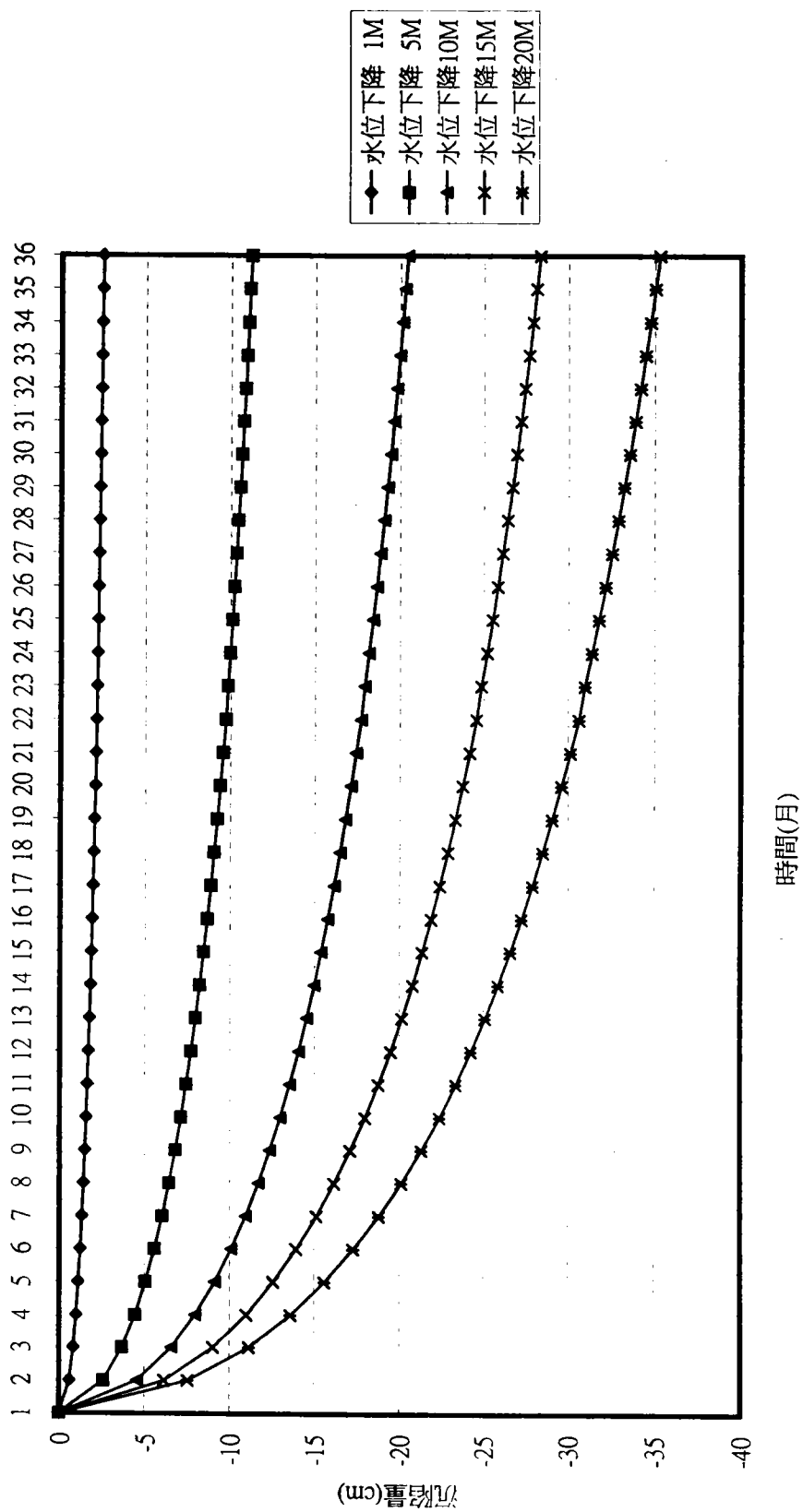


圖4-19 安平港淺層水位下降之沉陷曲線

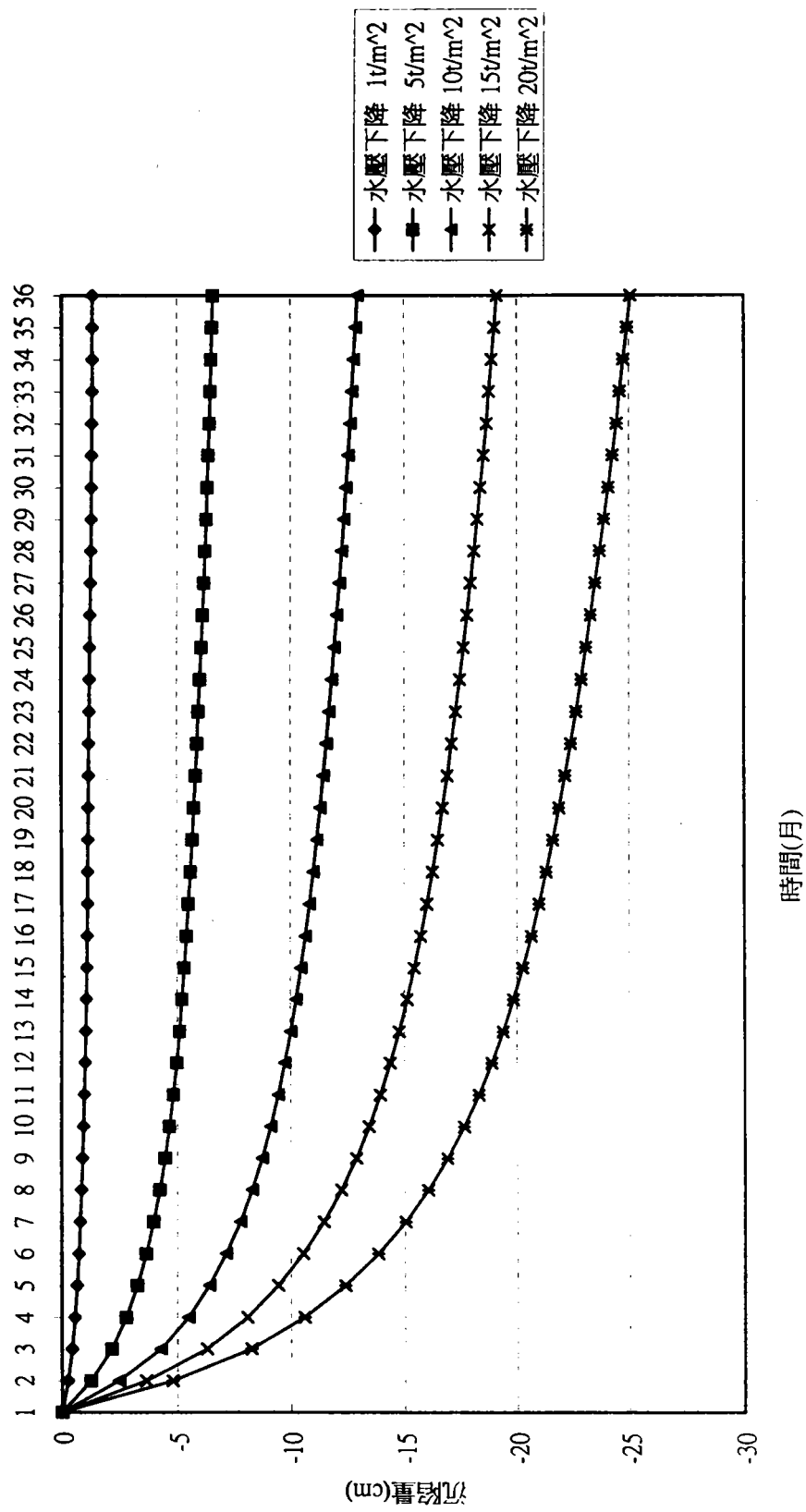
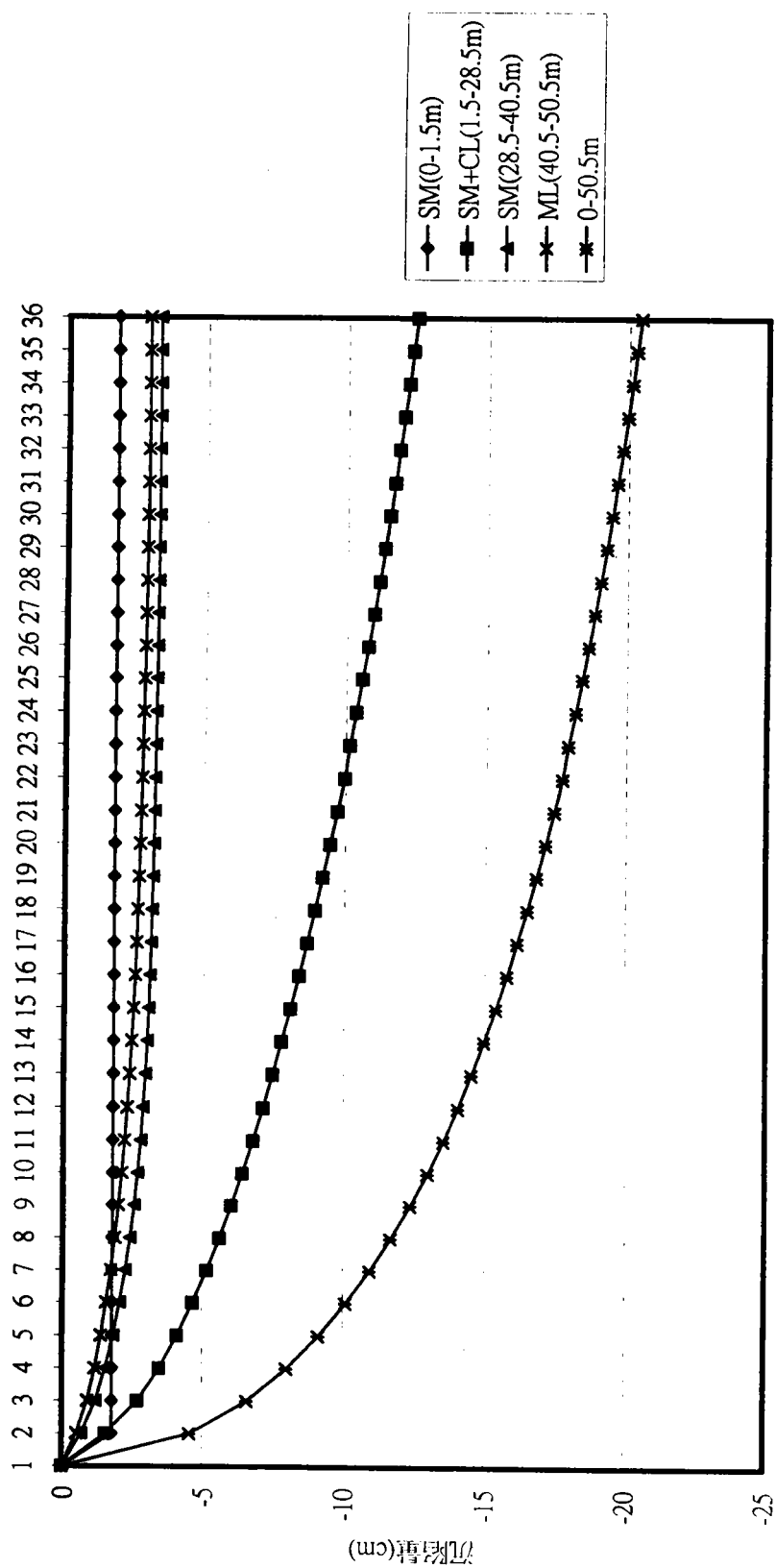


圖4-20 安平港深層水位下降之沉陷曲線

降 15 t/m^2 沉陷 19cm，下降 20 t/m^2 沉陷 25cm，即水壓下降愈大沉陷量亦愈大，但並非成比例放大，亦即水壓下降 20 t/m^2 之沉陷量並非 2 倍於水壓下降 10 t/m^2 之沉陷量。

另為了瞭解各土層之下陷潛能，本文亦分別分析淺層水位下降 10m 之各土層沉陷曲線，及深層水壓下降 10 t/m^2 之各土層沉陷曲線，分別如圖 4-21、4-22 所示，由圖 4-21、4-22 顯示：淺層自由水位下降時，沉陷量最大者為，第二層次之沉泥質砂夾薄層粘土（SM+CL），而深層水壓下降時沉陷量較大者，初期為第 10 層次及第 12 層次之粘土層（CL），後期為第 8 層次及第 14 層次之粘土層。



時間(月)

圖4-21 安平港淺層水位下降10m之各層沉陷曲線

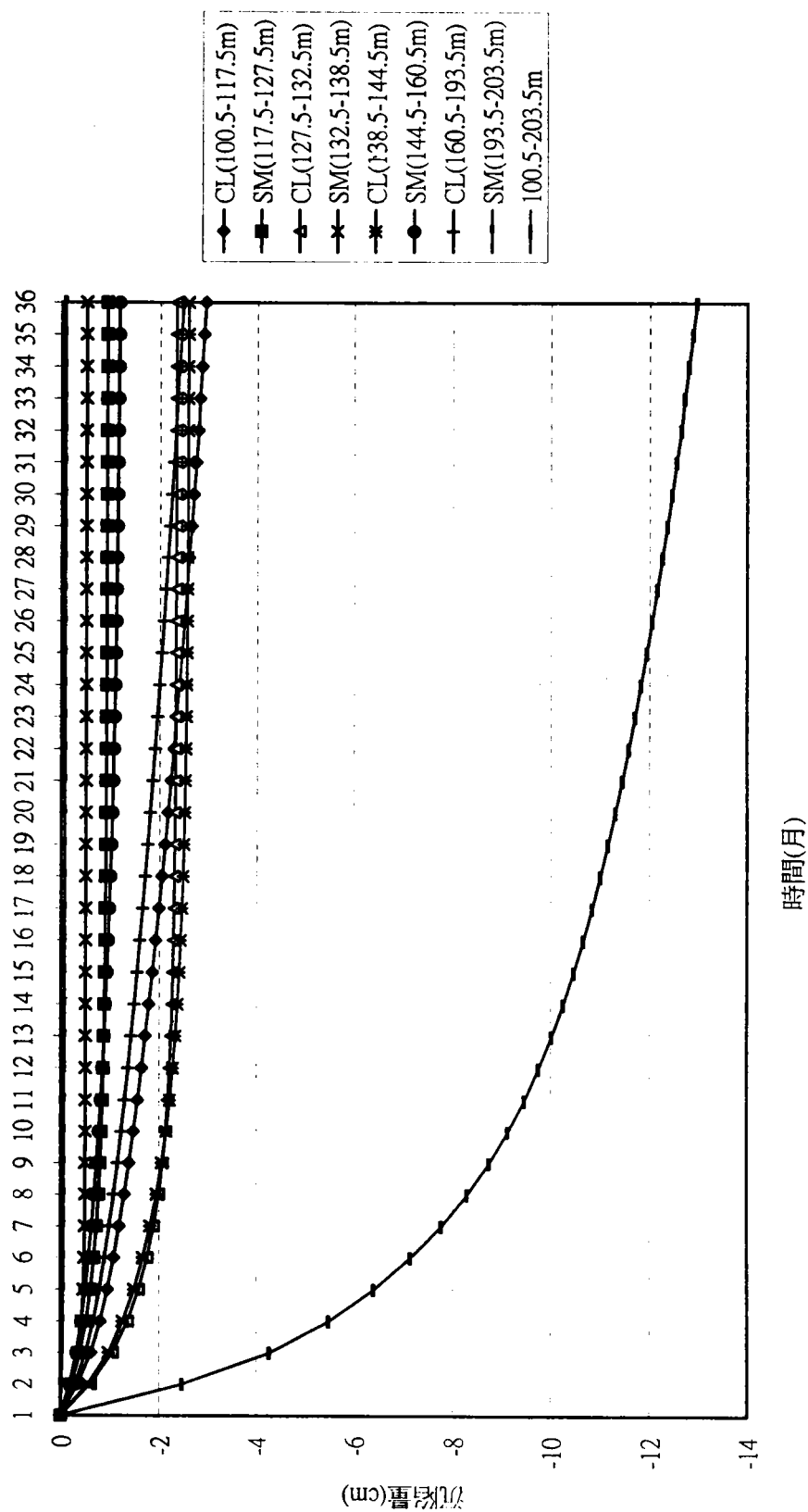


圖4-22 安平港深層水壓下降 10 t/m^2 之各層沉陷曲線

五、安平港其他沉陷因素探討分析

5-1 安平港填土之沉陷分析

安平港 8~12 號碼頭區，目前正以港域內浚挖所得之土質，以水力回填方式排填，回填土引致之沉陷分析，除了可供回填土實方量估算外，施工後原地層壓密現象產生之不均勻沉陷，亦可能影響貨櫃起重機等碼頭設施之功能。

原填築區為魚塢用地，其高程約為-0.5m，填土高程+2.5m，再加上超堆 2m 之預壓，填土共 5m，其回填區寬 300m 長為 1080m 與 680m 之梯形面積，如圖 5-1 所示。

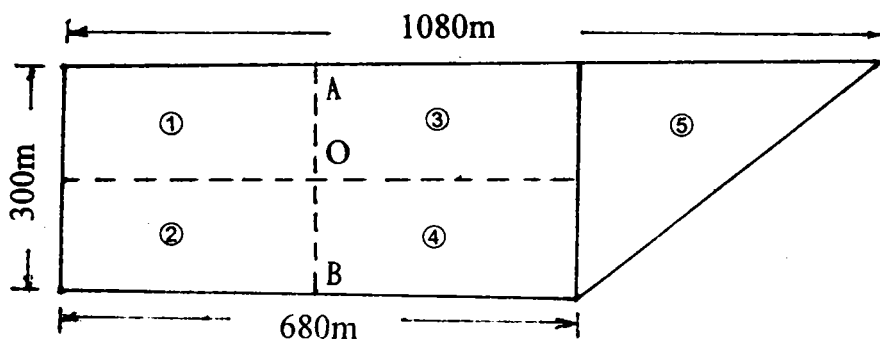


圖 5-1 安平港 8~12 號碼頭填土區

5-1-1 應力分析

Boussineq 1885 年發展一套數學式來決定因表面上之點荷重下任何一點之應力，使用其公式之積分技巧，可得位於撓性矩形載重面積角隅下已知點之垂直應力，如式(5-1)：

$$\Delta P = \int_{y=0}^L \int_{x=0}^B \frac{3q_0(dx dy)Z^3}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} = q_0 I \dots\dots\dots (5-1)$$

式中， ΔP 為應力增量，

I 為影響因素，如圖 5-2 所示，圖中 $m=B/Z$ ， $n=L/Z$

茲計算安平港填土區中點 O ，土層第 8 層次，深度

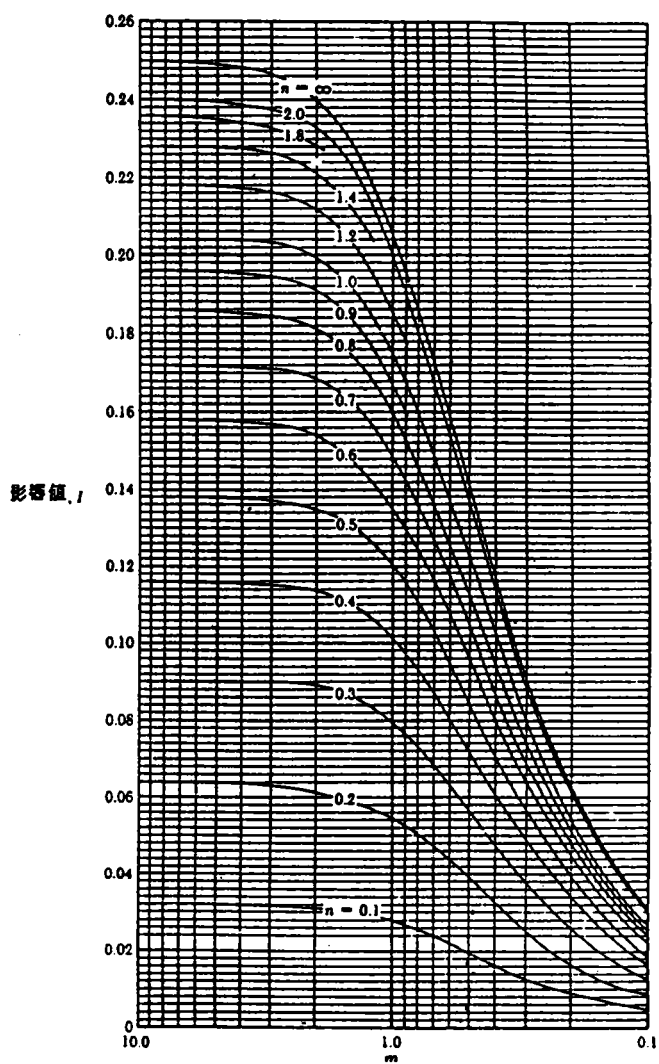


圖 5-2 I 與 m 和 n 之變化

100.5m~117.5m 之粘土層應力增量，以說明應力增量之計算方法。

(1) 矩形填土區

$$Z=108.5\text{m} \quad B=300/2=150\text{m} \quad L=680/2=340\text{m}$$

$$q_0=2 \times 4.5 + (2-1) \times 0.5=9.5\text{t/m}^2$$

$$m=B/Z=150/108.5=1.382$$

$$n=L/Z=340/108.5=3.134$$

$$\text{查圖 5-2 得 } I_1=I_2=I_3=I_4=0.2245$$

$$\Delta P_1 = q_0 \times (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) = 8.531\text{t/m}^2$$

(2) 三角形填土區對 o 點粘土層之應力增量

$$\text{以積分公式得 } \Delta P_2 = 0.022\text{t/m}^2$$

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = 8.553\text{t/m}^2$$

依照(1)(2)步驟可計算填土區其他點各個層次土層之應力增量，茲將矩形填土區 AB 剖面 200m 深之應力增量繪成應力增量等值線色階圖，如圖 5-3 所示。由圖 5-3 可知，同一深度之應力增量，在填土區中點最大，然後漸遞減至填土邊緣。

5-1-2 沉陷量分析

茲以填土區中點 o，土層第 8 層次，深度 100.5m~117.5m 粘土層之沉陷量分析，說明沉陷量之計算方式

$$S = H \times \frac{C_c}{1+e_0} \times \log \frac{\sigma'_0 + \Delta P}{\sigma'_0}$$

$$S = H \times C_u \times \log \frac{\sigma'_0 + \Delta P}{\sigma'_0}$$

$$H=17\text{m}, C_u \text{ 值參考表 4-4, 假設 } C_u=0.15$$

$$\sigma'_0=(2-1) \times 108.5=108.5\text{t/m}^2$$

填土厚度 5m

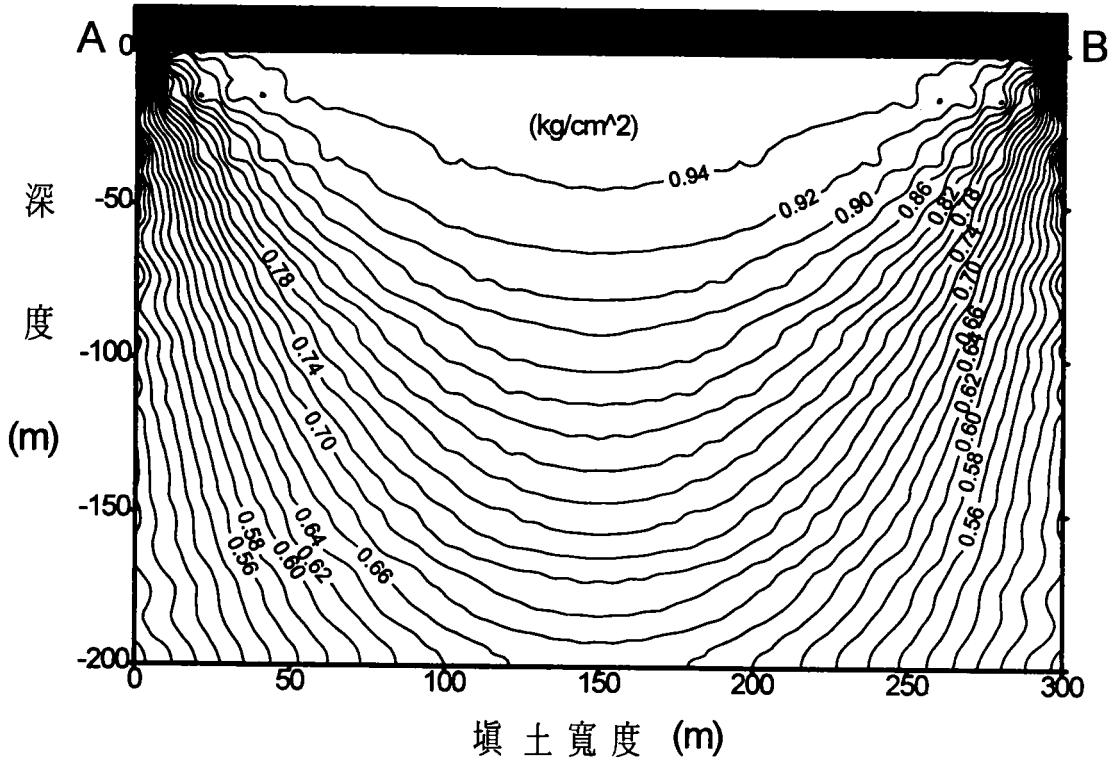


圖5-3 安平港8-12號碼頭區填土5m之應力增量圖

$$\begin{aligned}\Rightarrow S &= 17 \times 0.15 \times \log \frac{108.5 + 8.553}{108.5} \\ &= 0.08403\text{m} \\ &= 8.403\text{cm}\end{aligned}$$

其他層次之土層應力增量及沉陷量之計算方法同上。

假設安平港土壤之壓縮係數 C_u 值皆介於表 4-4 之中間值，即沉泥質砂之 $C_u=0.028$ ，沉泥之 $C_u=0.075$ ，粘土之 $C_u=0.15$ ，而沉泥質砂夾薄層粘土之 C_u 值取 0.035，則矩形填土區中點 O 之各個層次之沉陷量如表 5-1 所示。其總沉陷量為 75.22 公分。

由於港灣之砂質土壤較細且含泥量較高，若沉泥質砂之 C_u 值取砂之 C_u 值的上限即 C_u 取 0.05，而沉泥質砂夾薄層粘土之 C_u 值取 0.06，沉泥之 C_u 值取 0.08，粘土之 C_u 值仍然取中間值即 $C_u=0.15$ ，則矩形填土區中點 O 之各個層次之沉陷量如表 5-2 所示，其總沉陷量為 99.82 公分。

依據上述方法亦可計算填土區各點之總沉陷量，而非填土區受附近填土荷重而引致之沉陷，亦可計算而得，圖 5-4 為填土區及附近三角形非填土區各點之總沉陷量，將其繪成沉陷等值線色階圖及立體沉陷圖，其分別如圖 5-5、5-6 所示，由圖 5-4、5-5、5-6 顯示：填土區之沉陷量較非填土區沉陷量為大；由填土區之沉陷分析顯示：填土區之中點沉陷量最大，然後沉陷量漸遞減至填土邊緣；由非填土區之沉陷分析顯示，距離填土區愈近，沉陷量愈大，距離填土區愈遠，其沉陷量愈小。

為了瞭解填土荷重對附近地區影響之程度，本文分別分析距填土區邊界長度與沉陷量之關係、填土區荷重對健康路沉陷之影響，填土區荷重對舊有 1-7 號碼頭之沉陷影響，並分別以表 5-1 之 C_u 值及表 5-2 之 C_u 值分析，其分析結果分別如圖 5-7、5-8、5-9 所示。由圖 5-7 顯示：距填土邊界愈遠其沉陷量愈小，其沉陷量由填土邊界之 391mm 遞減至離填土邊界 100 公尺之 0.06mm。由圖 5-8 顯示填土區對健康路之影響極微，其最大之沉陷量僅

表 5-1 安平港填土 5m 引致各土層之沉陷分析表($C_u=\text{mean}$)

層次	土壤分類	土層深度 (m)	厚度 (m)	壓縮係數 $C_u=C_c/(1+e_0)$	有效應力 (t/m^2)	應力增量 (t/m^2)	沉陷量 (cm)
1	SM	0.5~1.5	1	0.028	0.5	9.500	3.643
2	SM+CL	1.5~28.5	27	0.035	14.5	9.496	20.674
3	SM	28.5~40.5	12	0.028	34.0	9.455	3.580
4	ML	40.5~50.5	10	0.075	45.0	9.399	6.179
5	SM	50.5~55.5	5	0.028	52.5	9.346	0.996
6	ML	55.5~92.5	37	0.075	73.5	9.123	14.101
7	SM+CL	92.5~100.5	8	0.08	96.0	8.780	2.432
8	CL	100.5~117.5	17	0.15	108.5	8.553	8.403
9	SM	117.5~127.5	10	0.028	122.0	8.287	0.799
10	CL	127.5~132.5	5	0.15	129.5	8.133	1.984
11	SM	132.5~138.5	6	0.028	135.0	8.018	0.421
12	CL	138.5~144.5	6	0.15	141.0	7.891	2.128
13	SM	144.5~160.5	16	0.028	152.0	7.656	0.956
14	CL	160.5~193.5	33	0.15	176.5	7.133	8.516
15	SM	193.5~203.5	10	0.028	198.0	6.686	0.404
總沉陷量							75.217cm

表 5-2 安平港填土 5m 引致各土層之沉陷分析表($C_u=\max$)

層次	土壤分類	土層深度 (m)	厚度 (m)	壓縮係數 $C_u=C_c/(1+e_0)$	有效應力 (t/m^2)	應力增量 (t/m^2)	沉陷量 (cm)
1	SM	0.5~1.5	1	0.05	0.5	9.500	6.505
2	SM+CL	1.5~28.5	27	0.06	14.5	9.496	35.442
3	SM	28.5~40.5	12	0.05	34.0	9.455	6.393
4	ML	40.5~50.5	10	0.08	45.0	9.399	6.590
5	SM	50.5~55.5	5	0.05	52.5	9.346	1.779
6	ML	55.5~92.5	37	0.08	73.5	9.123	15.042
7	SM+CL	92.5~100.5	8	0.08	96.0	8.780	2.432
8	CL	100.5~117.5	17	0.15	108.5	8.553	8.403
9	SM	117.5~127.5	10	0.05	122.0	8.287	1.427
10	CL	127.5~132.5	5	0.15	129.5	8.133	1.984
11	SM	132.5~138.5	6	0.05	135.0	8.018	0.752
12	CL	138.5~144.5	6	0.15	141.0	7.891	2.128
13	SM	144.5~160.5	16	0.05	152.0	7.656	1.707
14	CL	160.5~193.5	33	0.15	176.5	7.133	8.516
15	SM	193.5~203.5	10	0.05	198.0	6.686	0.721
總沉陷量 99.822cm							

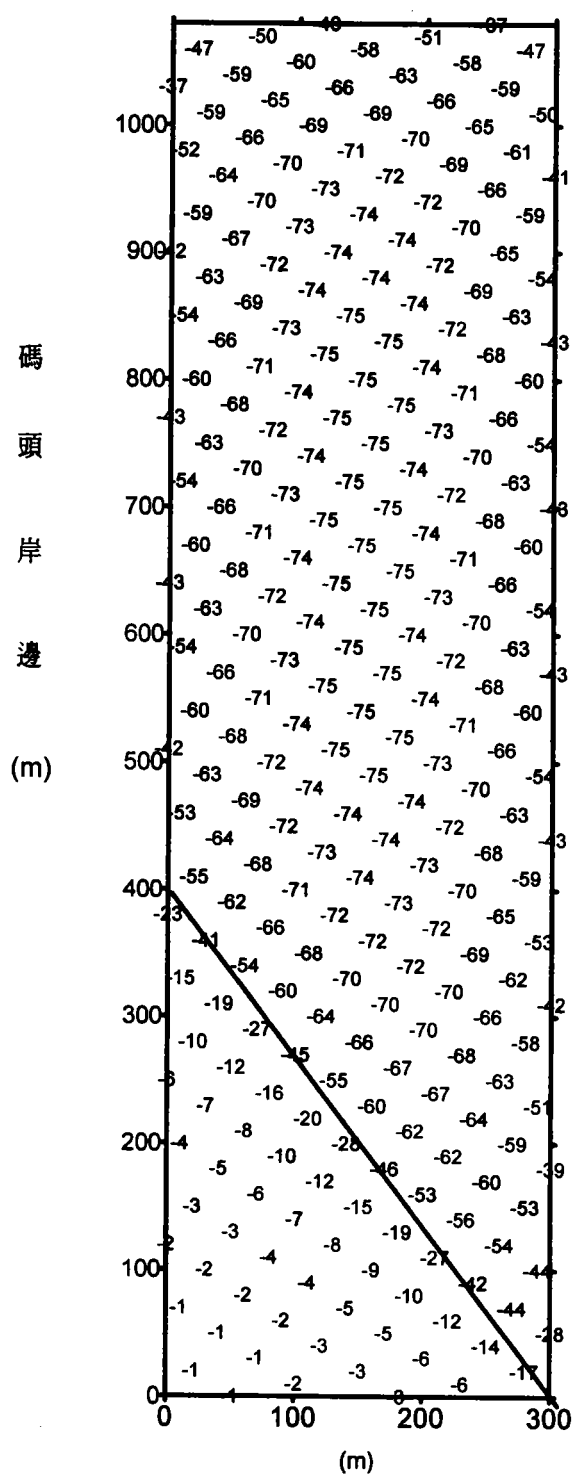


圖5-4 安平港8-12號碼頭區填土5m之沉陷分析結果(cm)

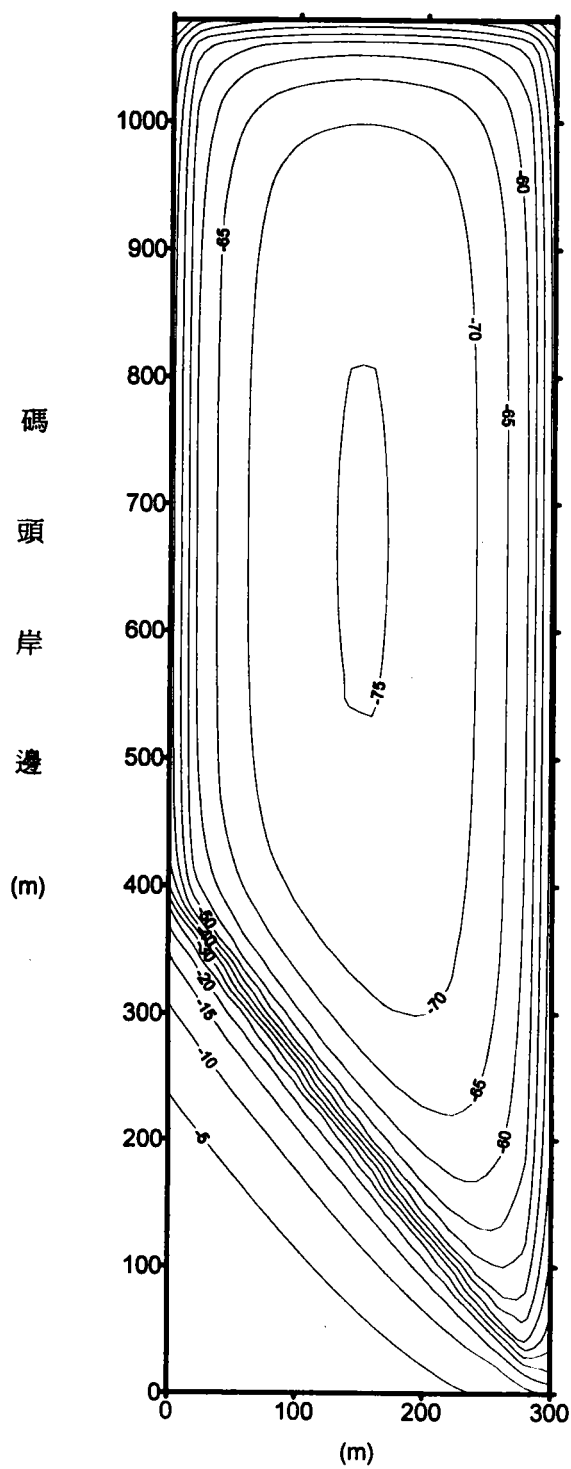


圖5-5 安平港8-12號碼頭區填土5m之沉陷色階圖

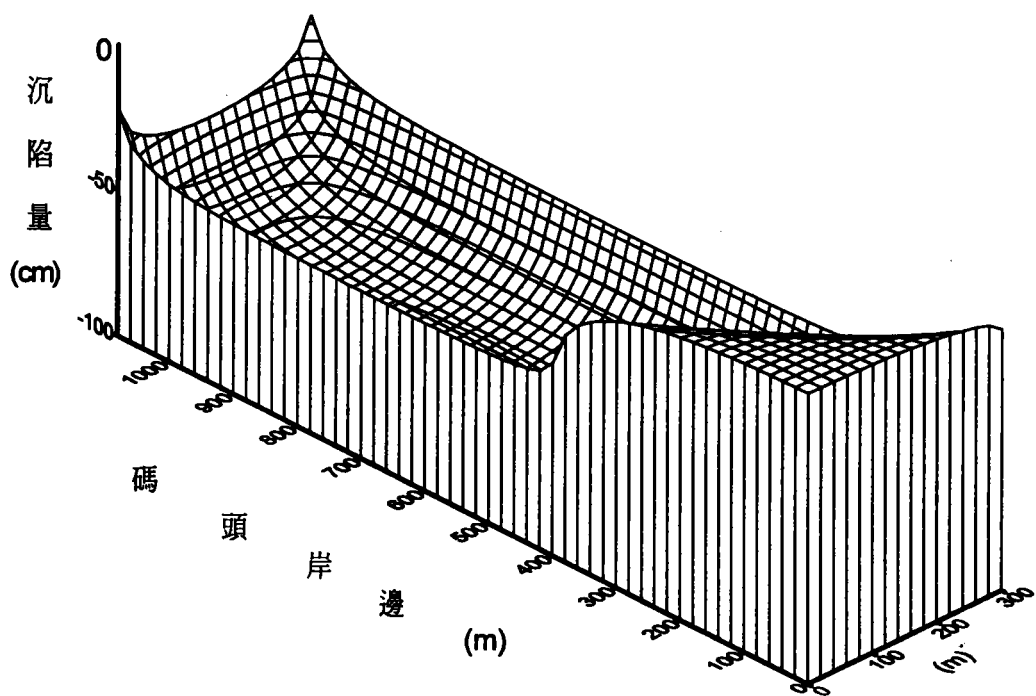
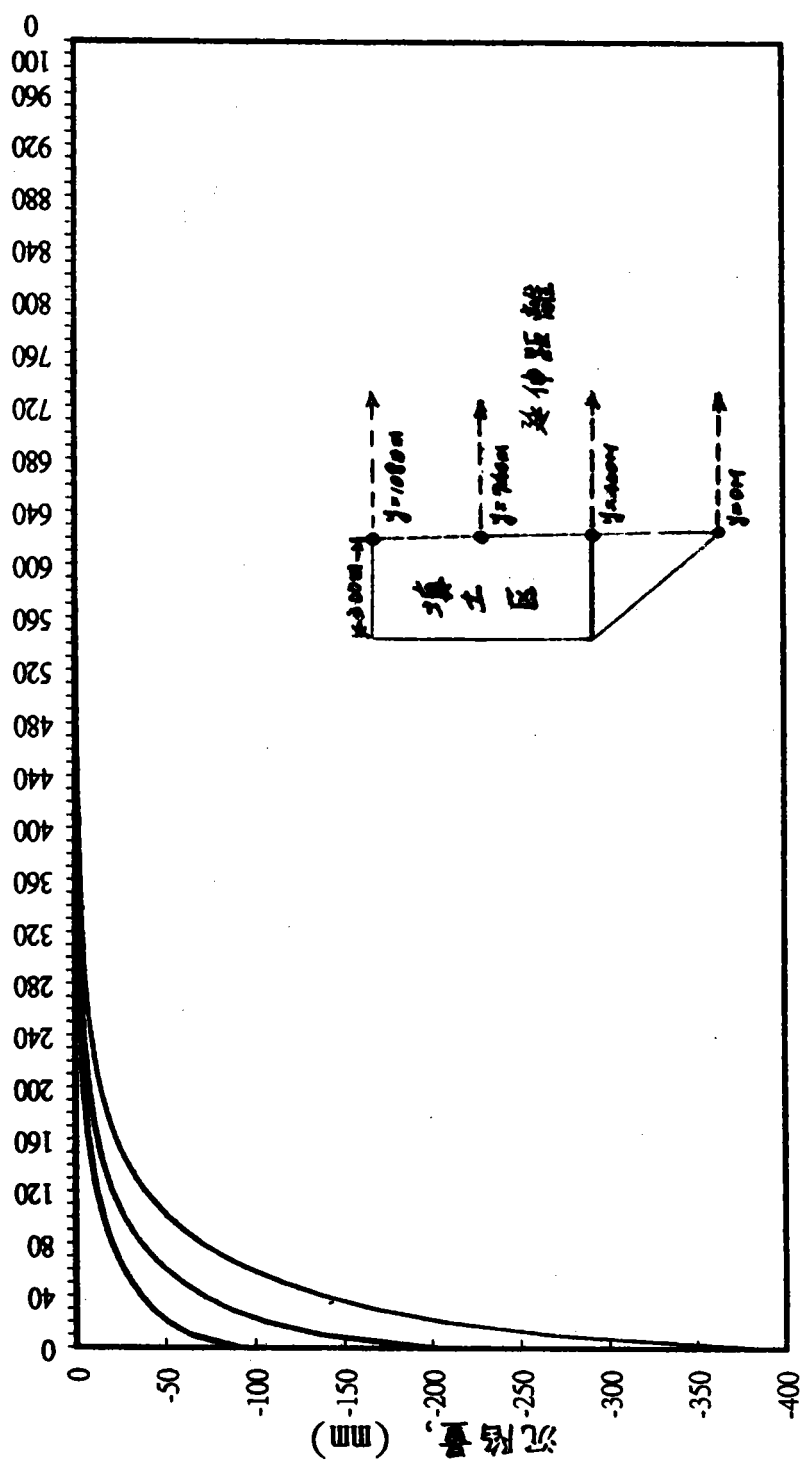


圖5-6 安平港8-12號碼頭區填土5m之立體沉陷圖

安平港填土5M引致之沉陷



距填土邊界(m)

圖 5-7 距填土邊界長度與沉陷量之關係圖

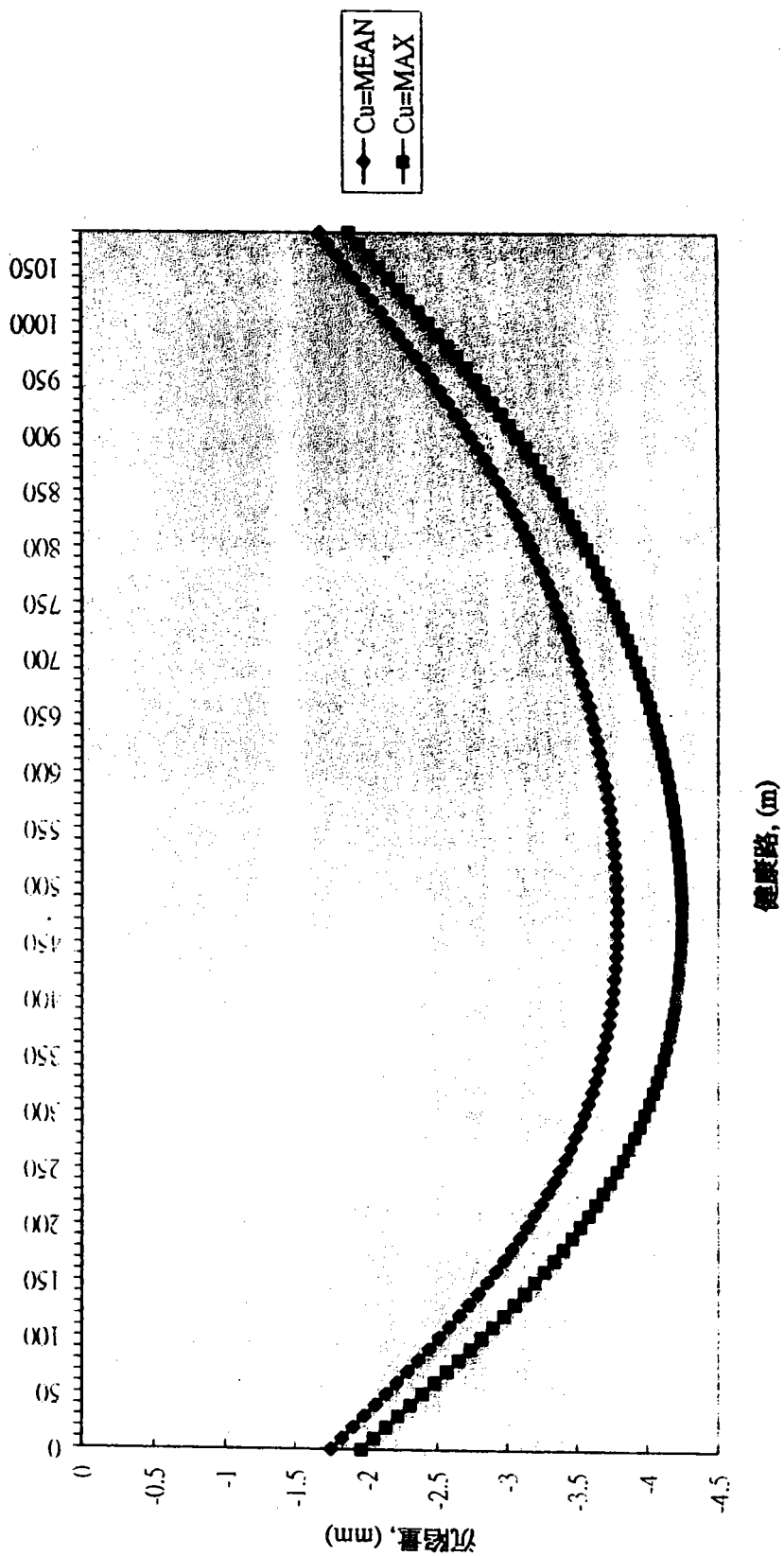


圖 5-8 安平港填土 5M 引致健康路之沉陷

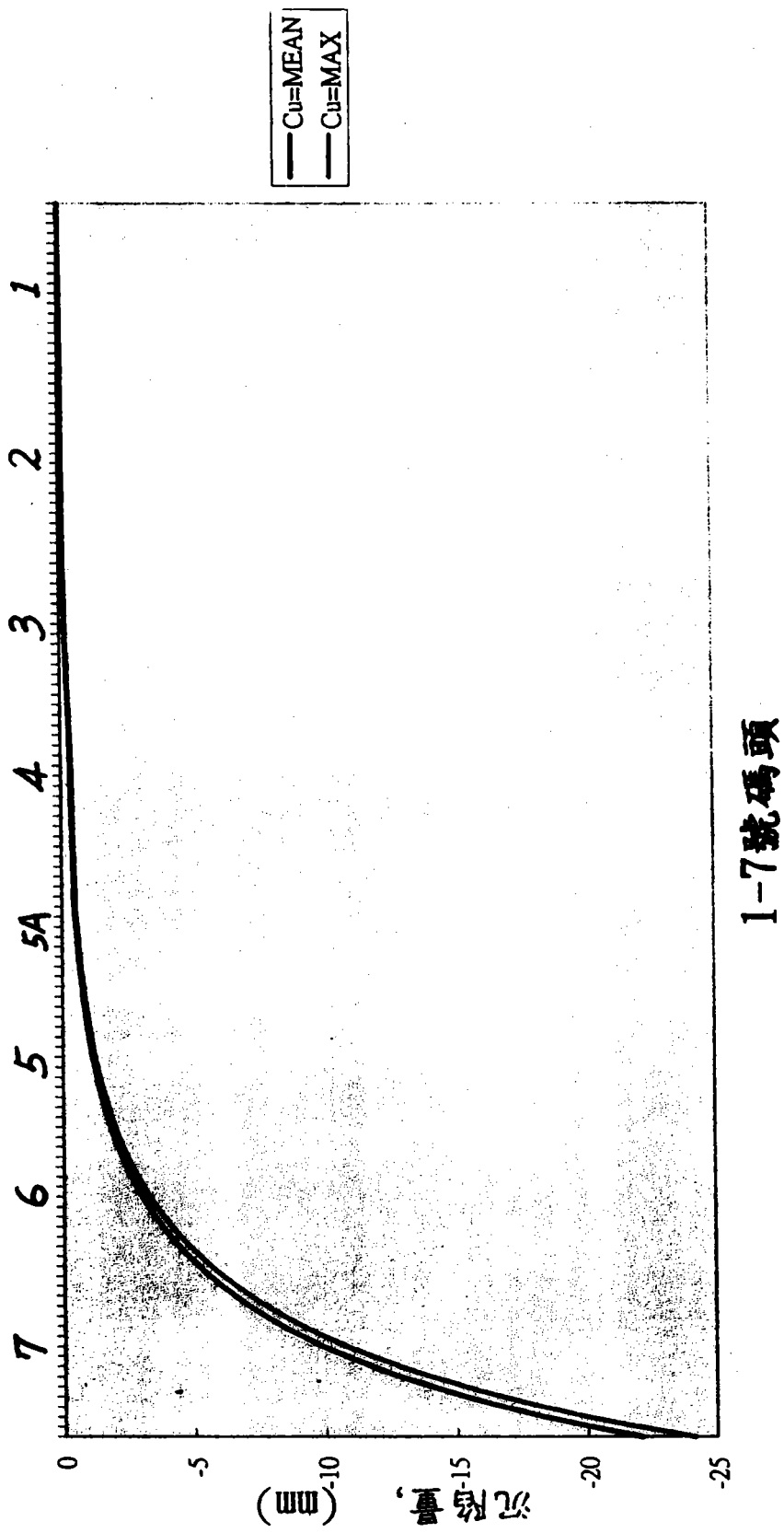


圖 5-9 安平港填土 5M 引致 1-7 號碼頭之沉降

4.25mm。由圖 5-9 顯示：填土區對舊有碼頭 7 號影響最大，其沉陷量達 24.17mm，對 1 號碼頭影響最小，其沉陷量僅 0.08mm。

5-2 北防波堤荷重引起之沉陷

安平港北防波堤規劃長度為 1495m，以 7 種沉箱型式設計連接而成共須 74 座，本文以 -11m~-12m 之防波堤為沉陷分析例，其斷面如圖 5-10 所示。

(1) 應力分析

分析堤下第一層次中間點 A 之應力增量 ΔP ，其應力分析分成 3 部份，如圖 5-11 所示，再以圖 5-12 路堤載重下之應力影響值進行分析，分別得 $\Delta P_1 = 5.499 \text{ t/m}^2$ ， $\Delta P_2 = 14.62 \text{ t/m}^2$ ， $\Delta P_3 = 0.312 \text{ t/m}^2$ ，因此 $\Delta P_A = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 20.431 \text{ t/m}^2$

(2) 沉陷量分析

$$\begin{aligned} S &= H \times \frac{C_c}{1+e_0} \times \log \frac{\sigma'_0 + \Delta P}{\sigma'_0} \\ &= H \times C_u \times \log \frac{\sigma'_0 + \Delta P}{\sigma'_0} \end{aligned}$$

$H=16.5\text{m}$ ， C_u 值參考表 4-4，由於第一層次為沉泥質砂夾薄層粘土，若取平均值 $C_u=0.035$

$$\begin{aligned} \sigma'_0 &= 1 \times 8.25 = 8.25 \text{ t/m}^2 \\ \Rightarrow S &= 16.5 \times 0.035 \times \log \frac{8.25 + 20.431}{8.25} \\ \Rightarrow S &= 0.3116\text{m} = 31.16\text{cm} \end{aligned}$$

其他層次之土層應力增量及沉陷之計算方法同上，若 C_u 值皆取表 4-4 中各類土壤之中間值，則各土層沉陷分析結果如表 5-3 所示，其總沉陷量為 69.31 公分。

若除了粘土之 C_u 值取中間值，其餘各類土壤之 C_u 值取表 4-4

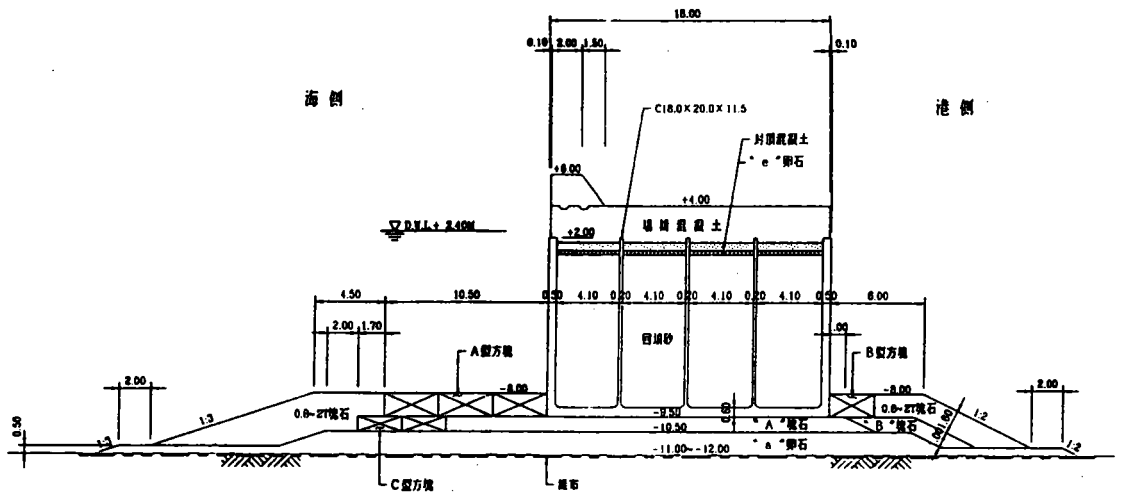


圖5-10 北防波堤-11M~-12M斷面

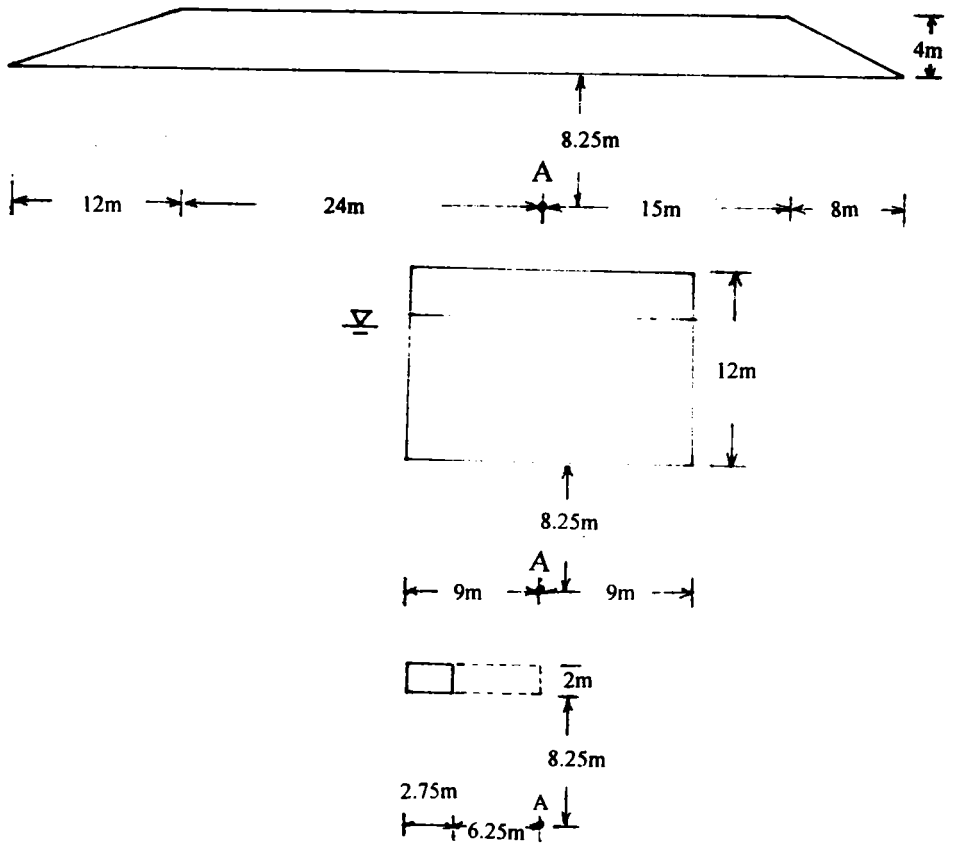


圖5-11 中間點A應力分析分解圖

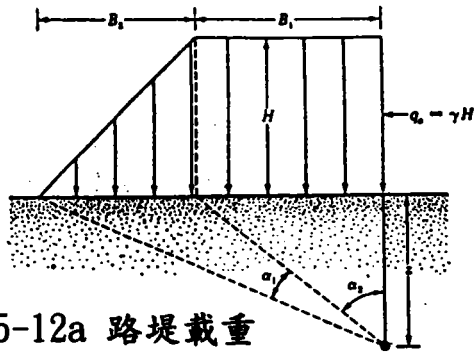


圖5-12a 路堤載重

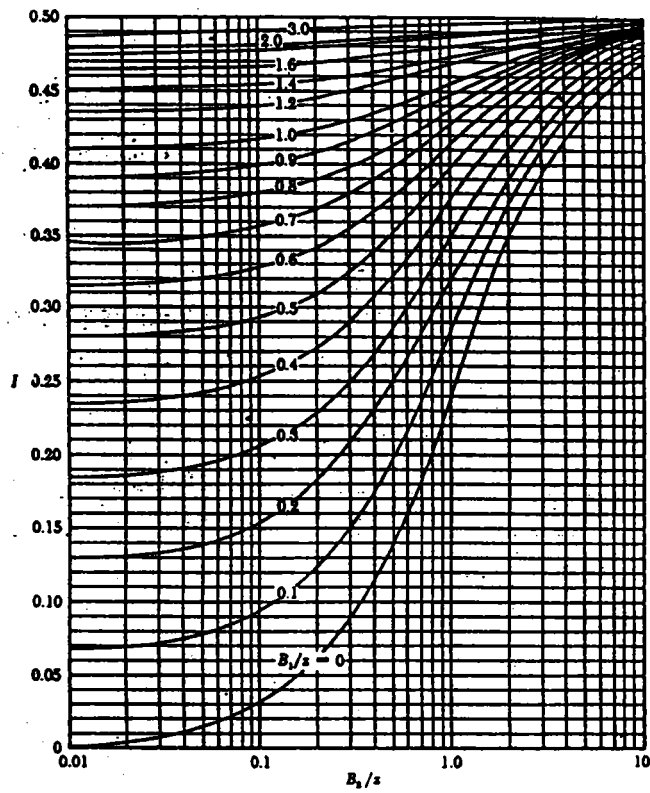


圖 5-12b 路堤載重之影響值 (取自Osterberg, 1957)

表 5-3 安平港北防波堤荷重引致之沉陷分析表($C_u=\text{mean}$)

層次	土壤分類	土層深度 (m)	厚度 (m)	壓縮係數 $C_u=C_c/(1+e_0)$	有效應力 (t/m^2)	應力增量 (t/m^2)	沉陷量 (cm)
2	SM+CL	12.0~28.5	16.5	0.035	8.25	20.431	31.159
3	SM	28.5~40.5	12	0.028	22.50	12.90	6.595
4	ML	40.5~50.5	10	0.075	33.50	9.70	8.280
5	SM	50.5~55.5	5	0.028	41.00	8.30	1.116
6	ML	55.5~92.5	37	0.075	62.00	5.80	10.760
7	SM+CL	92.5~100.5	8	0.08	84.50	4.40	1.397
8	CL	100.5~117.5	17	0.15	97.00	3.80	4.279
9	SM	117.5~127.5	10	0.028	110.50	3.40	0.366
10	CL	127.5~132.5	5	0.15	118.00	3.20	0.862
11	SM	132.5~138.5	6	0.028	123.50	3.00	0.177
12	CL	138.5~144.5	6	0.15	129.50	2.90	0.863
13	SM	144.5~160.5	16	0.028	140.50	2.70	0.366
14	CL	160.5~193.5	33	0.15	165.00	2.30	2.952
15	SM	193.5~203.5	10	0.028	186.50	2.00	0.131
總沉陷量 69.31cm							

之最大值，則各土層沉陷分析結果如表 5-4 所示，其總沉陷量為 99.71 公分。

表 5-4 安平港北防波堤荷重引致之沉陷分析表($C_u=\max$)

層次	土壤分類	土層深度 (m)	厚度 (m)	壓縮係數 $C_u=C_c/(1+e_0)$	有效應力 (t/m^2)	應力增量 (t/m^2)	沉陷量 (cm)
2	SM+CL	12.0~28.5	16.5	0.06	8.25	20.431	53.415
3	SM	28.5~40.5	12	0.05	22.50	12.90	11.778
4	ML	40.5~50.5	10	0.08	33.50	9.70	8.832
5	SM	50.5~55.5	5	0.05	41.00	8.30	1.994
6	ML	55.5~92.5	37	0.08	62.00	5.80	11.478
7	SM+CL	92.5~100.5	8	0.08	84.50	4.40	1.397
8	CL	100.5~117.5	17	0.15	97.00	3.80	4.279
9	SM	117.5~127.5	10	0.05	110.50	3.40	0.653
10	CL	127.5~132.5	5	0.15	118.00	3.20	0.862
11	SM	132.5~138.5	6	0.05	123.50	3.00	0.316
12	CL	138.5~144.5	6	0.15	129.50	2.90	0.863
13	SM	144.5~160.5	16	0.05	140.50	2.70	0.654
14	CL	160.5~193.5	33	0.15	165.00	2.30	2.952
15	SM	193.5~203.5	10	0.05	186.50	2.00	0.234
總沉陷量				99.71cm			

六、結論與建議

1. 由安平港之地下水位監測結果顯示：淺層地下水位變化不大，約在-0.5~-1.5 公尺間反復振盪，而深層之 95 及 148 公尺處之地下水位已分別降至-2.5m 及-4m，由此可知，安平港區內並無超抽地下水之現象，而安平港附近地區有超抽深層之地下水，致使港區之深層水位受影響而下降。
2. 由安平港之地層下陷監測結果顯示：安平港一年之沉陷量約為 0.8 公分，其中百分之五十以上之沉陷在深度 142~152 公尺處發生，因此在本計劃監測深度 152m 之外，即較 152m 以上更深之處亦可能有沉陷發生，亦即安平港每年區域性之沉陷可能大於 0.8 公分，而且大多是深層沉陷。
3. 本計劃亦對安平港目前剛完成之抽砂填土區及北防波堤荷重可能引致區域性之差異沉陷進行分析，由分析結果顯示：抽砂填土 5m 高可能引致之最大沉陷量約為 75.22 公分。而由北防波堤荷重引起之沉陷分析，結果亦顯示可能之最大沉陷亦有 69.31 公分。
4. 由地下水抽取、港區之抽砂回填及防波堤荷重等引致之地層下陷監測及分析結果顯示，其影響皆至深層土壤，傳統上由於鑽探深度有限，僅及於淺層之沉陷分析是不夠完整的，本計劃鑽孔深度雖已達 150 公尺，唯由監測及分析結果顯示，150 公尺以上更深之處，仍有可能發生沉陷，因此建議將來之監測井深度應至 200 公尺以上。

參考文獻

1. 水利局 (1995)「台南地區地盤下陷檢測成果報告」。
2. 工研院能資所, (1995)「地層下陷研討會」論文集。
3. 港灣技術研究所 (1992)「海岸土層下陷行為與預測之研究」, 港灣技術研究所 82-研(十)研究報告。
4. 高雄港務局 (1980)「安平港碼頭鑽探工程」。
5. 高雄港務局 (1993)「安平港商港區第一期地質鑽探工程報告書」。
6. 高雄港務局 (1994)「安平港商港區第一期工程地質鑽探工程之二報告書」。
7. 高雄港務局 (1990)「安平港第三、四號碼頭新建工程鑽探報告表」。
8. 高雄港務局 (1994)「安平港商港區第一期工程規劃設計」。
9. 賴聖耀、李豐博、謝明志, (1993)「地下水位歷時性變化與地層歷時性下陷之關係研究」, 第十七屆全國力學會議。
10. 賴聖耀 (1994)「雲林沿海地區地下水位變化與地層下陷之關係」, 港灣報導, No. 27。
11. 賴聖耀、李豐博、蘇吉立、陳志芳 (1995)「以 Rowe cell 壓密試驗探討海岸土層之沉陷特性」第六屆大地工程學術研究討論會。
12. Becker, D. E., (1981), Settlements under intermittent loading on a clay subsoil, Ph. D. thesis University of Western Ontario, Canada.

13. Biot, M. A. (1941), "General theory of three-dimensional consolidation", J. of applied physics 12(2).
14. Lay, S. Y. & Shieh, M. J. (1995) "The step-loading model of subsidence induced by groundwater level changes with time." Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence The Hague.
15. Leake, S. A. & Prudic, D. E. (1988), Documentation of A Computer Program to Simulate Aquifer-System Compaction Using the Modular Finite-Difference Ground-water Flow Model, U. S. Geological Survey, Report No. 88-482, Tucson, Arizona.
16. Helm, D. C. (1975), "One-Dimensional Simulation of Aquifer-System Compaction Near Pixley, California, 1, Constant Parameters", Water Resources Research, Vol. 11, No. 3, PP. 465~478.
17. Terzaghi, K. (1943), Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, New York.

附錄 A 無線電波分層地陷監測儀操作手冊

一、監測系統：日本 DOBOKU 公司，Model：SXL-200KB（參考圖-1）

(1) 無線電波受信指示器：Model：SXL-P02（參考圖-2）（調頻指示針、微調指示針、微電流計、平衡調波計、蜂鳴裝置、無線電波接收器）

(2) 鋼鋼量測尺裝置與無線電波探索器，Model：SXL-P01-200M、SXL-P01（參考圖-3）（孔口標高固定裝置、發射無線電波之探索器、探索器滑動管架、探索器固定裝置、鋼鋼尺滑動裝置、標準測讀標記、手動捲尺器）

(3) 量測用天線，Model：SXL-P04（參考圖-4）（天線 220M，重錘、捲線裝置）

二、儀器誤差：系統誤差約 2mm，測讀誤差約 1mm。

三、操作步驟：

1. 檢查監測儀器是否齊全？
2. 將監測器攜至設有感應環裝置之地陷監測井處。
3. 檢查監測儀器是否裝上電池？（參考圖-5、圖-6，探索器需 5.6V 之水銀電池（HM-4N）兩個，受信指示器需 1.5V 電池（UM-1）八個）。
4. 將監測井打開，放天線至井之底部。
5. 架鋼鋼尺與探索器裝置於井口（選擇最方便工作之方位）
6. 將受信指示器與天線裝置連接（連接線通常置於受信指示器之保護蓋內）

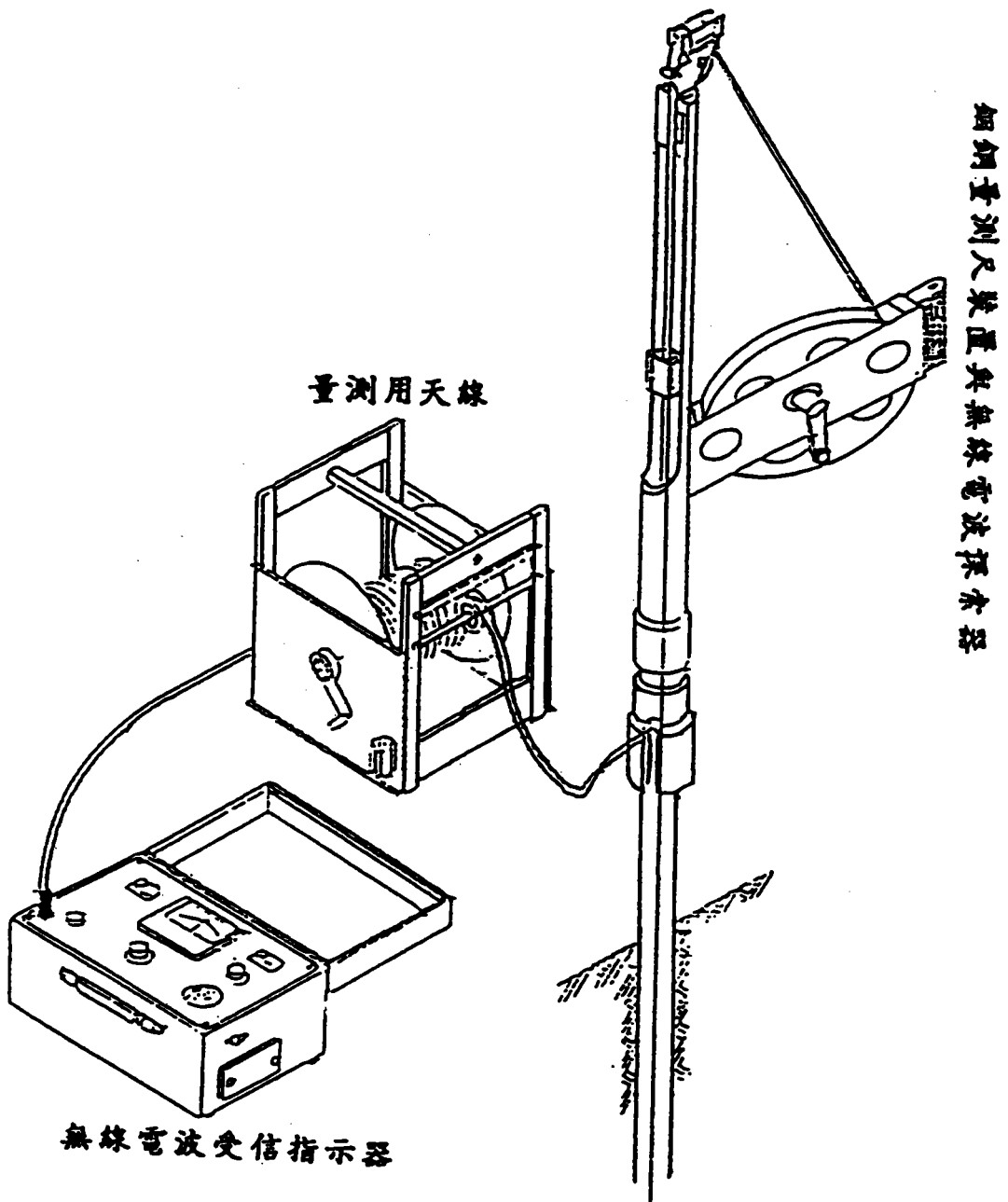


圖-1 無線電波地陷監測系統裝置圖

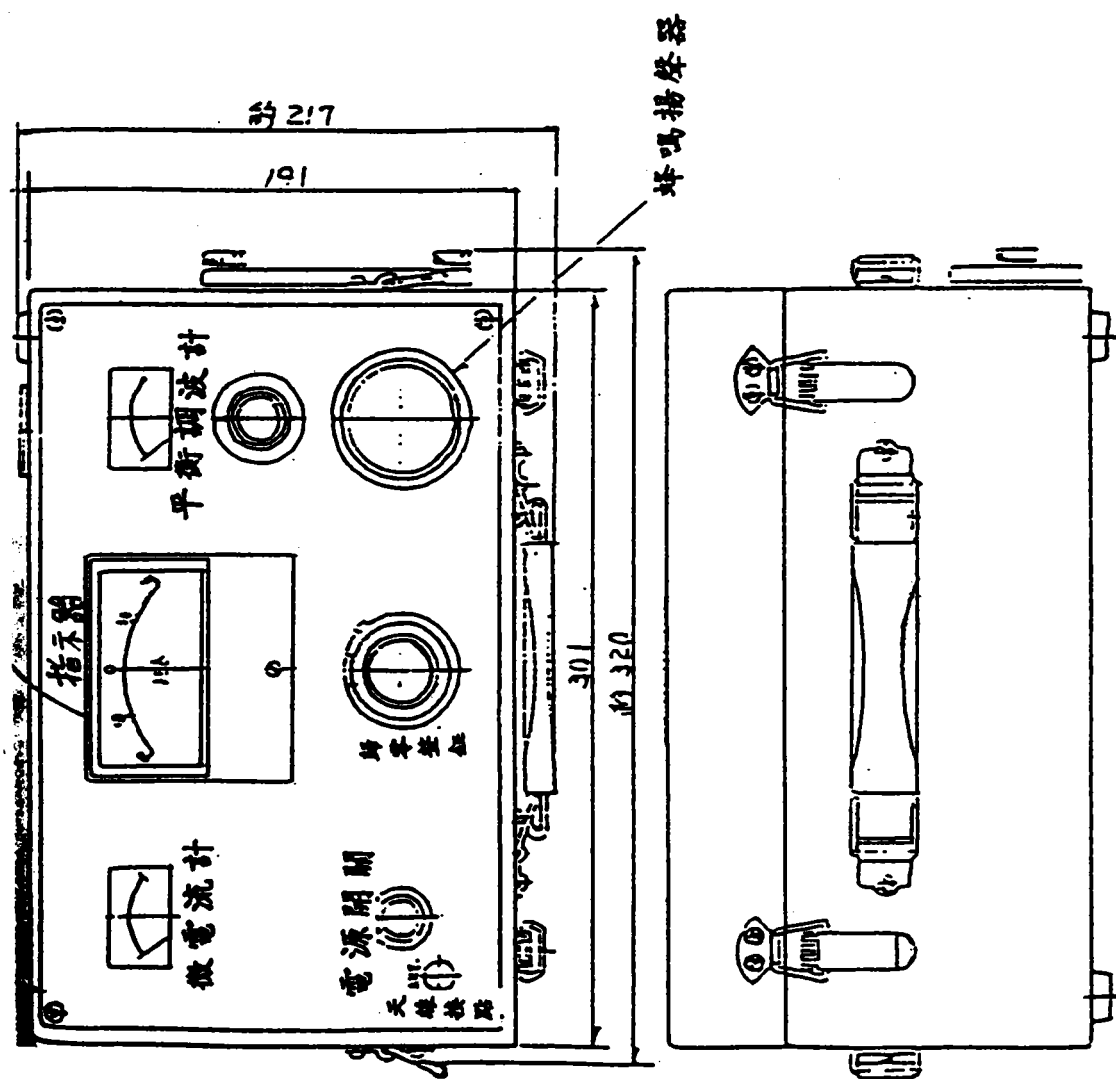
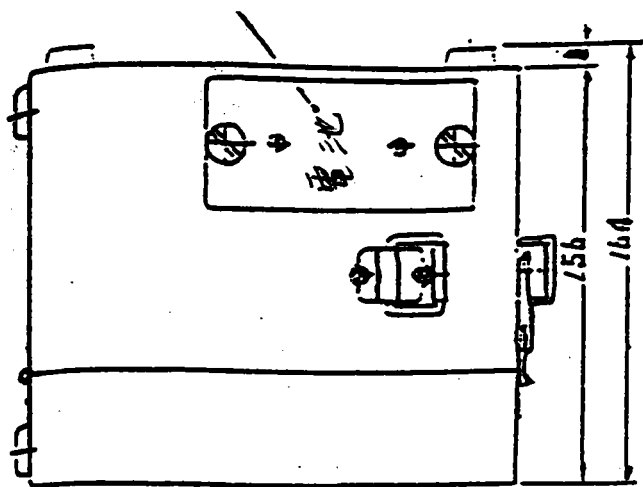


圖-2 電波接收指示器詳細圖

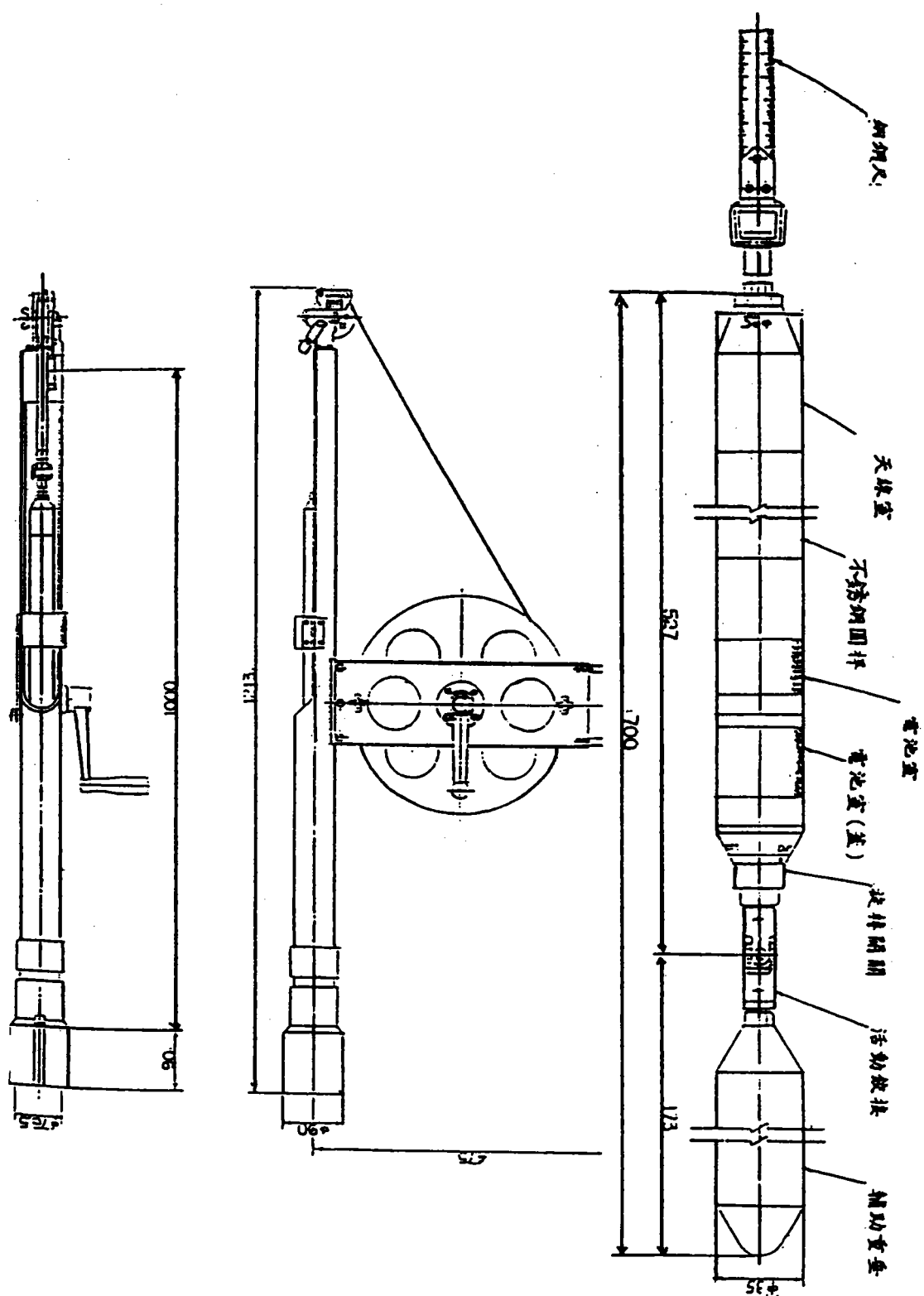


圖-3 鋼鋼尺量測裝置與探索器詳細圖

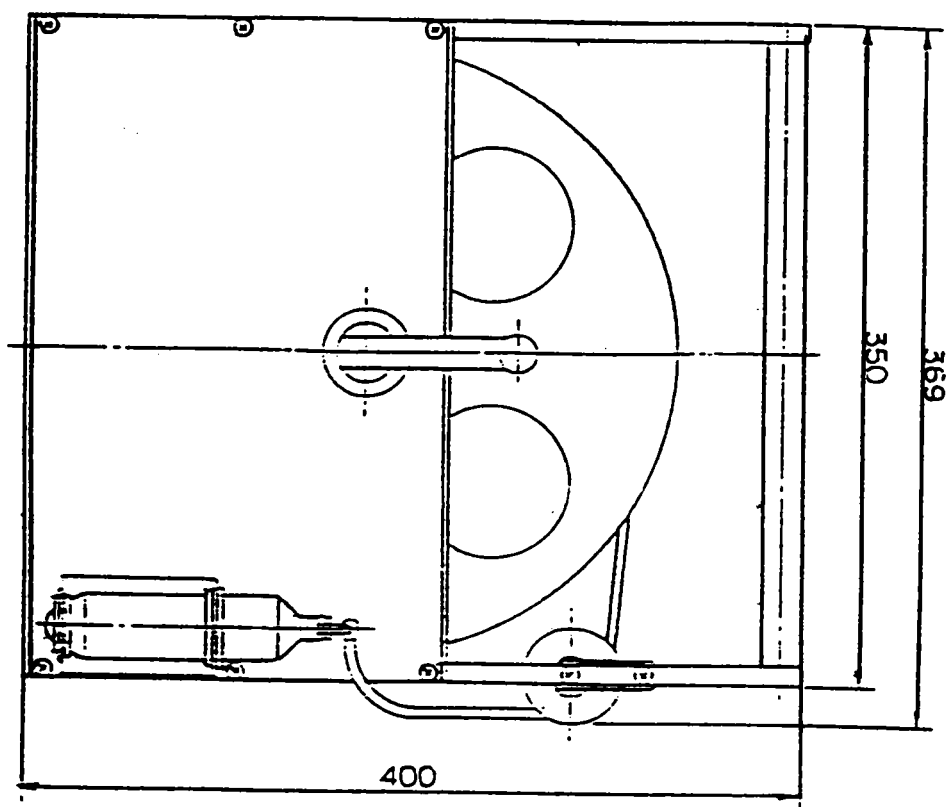
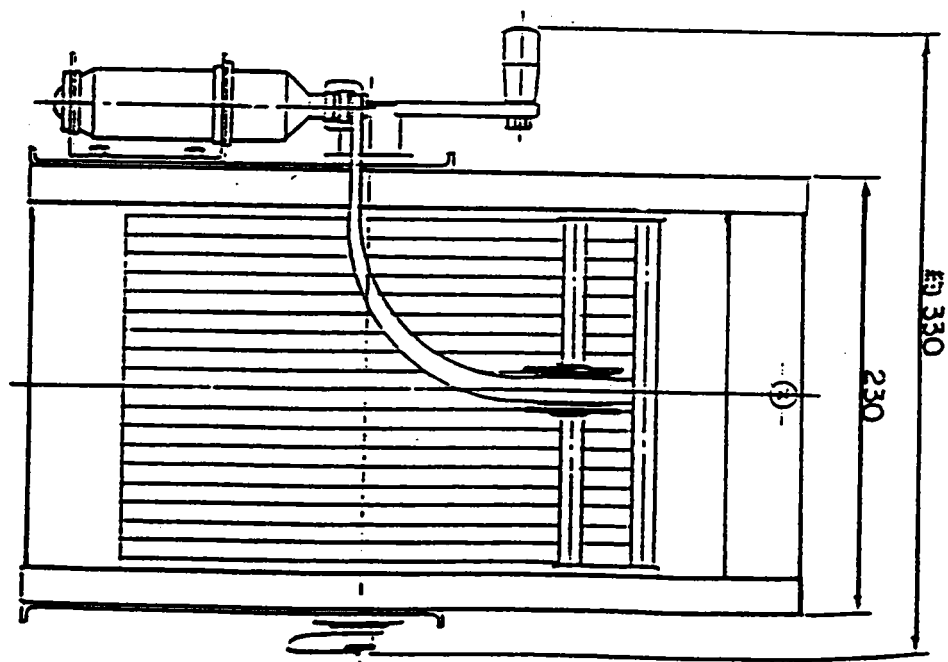


圖-4 量測天線詳細圖

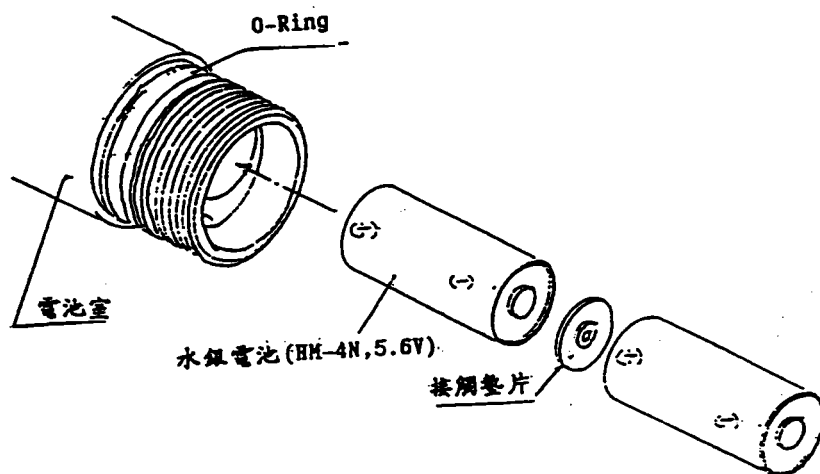


圖-5 探索器之電池換裝圖

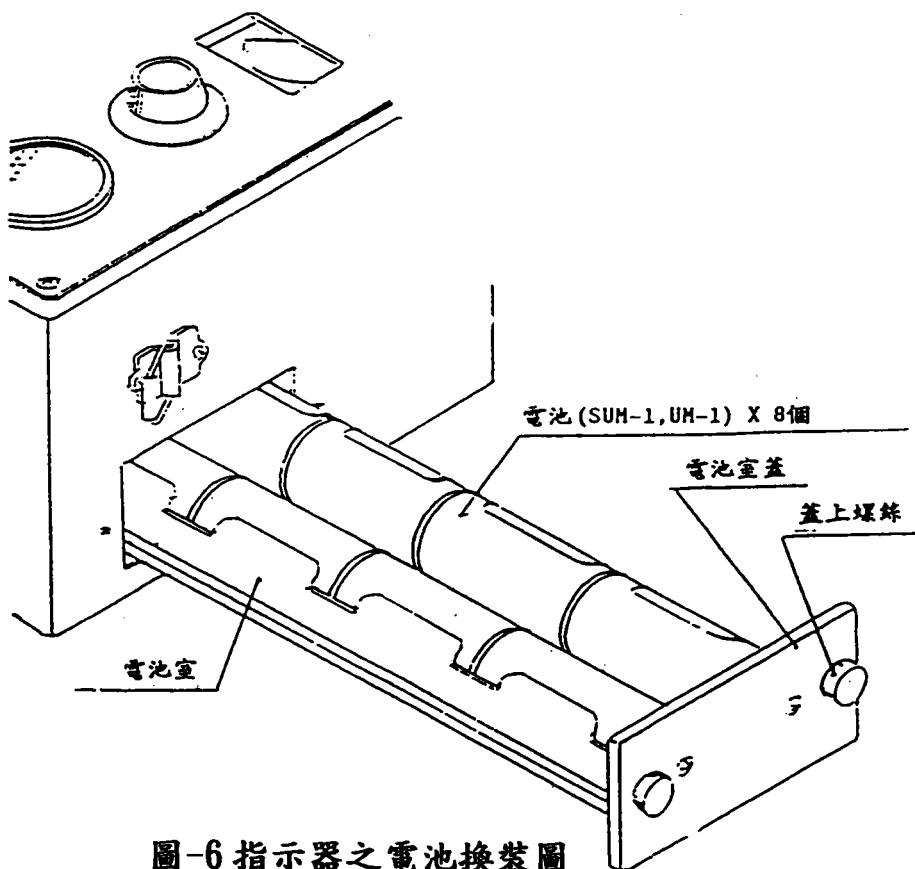


圖-6 指示器之電池換裝圖

7. 打開受信指示器與探索器之電源開關，此時出現蜂鳴聲音。
8. 注意受信指示器上之主指示針，若指針未歸零，則以微調鈕將指針歸零。
9. 慢慢將探索器放下，當探索器接近位於井口之測試感應環時，蜂鳴聲將轉為尖銳，此時指示器上之主指示針將產生如圖-7 的變化，依此電流變化找出感應環之正確位置，以確定此時監測儀器之功能正常。

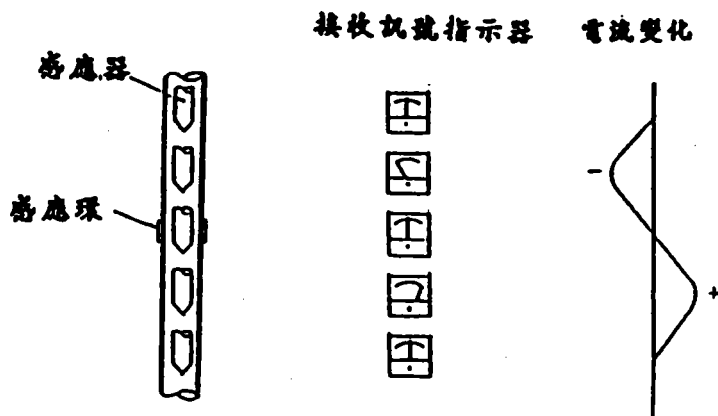


圖-7 訊號接收器探索過程示意

10. 將探索器繼續放下，參考前次的量測記錄，以步驟 9 將感應環之正確深度找出，並記錄於記錄紙上（深度量測以刻於鋼鋼尺量測架上之標記為準）
11. 重複步驟 10，直到將全部之感應環位置深度找出後，將探索器拉回井口。

12. 關掉探索器上之電源（注意：探索器相當耗電，若未關掉電源，則下次可能無法使用），並取下量測架。
13. 關掉指示器之電源，並將與天線連接之線收於保護箱內。
14. 將天線以捲線器收好。
15. 量測完畢，並清點儀器。
16. 監測井蓋上鎖。

四、注意事項

1. 當深度較深之感應環無法量測時，可能為探索器之電力不足，可換新電池試試看。
2. 當探索器與指示器之開關開啟後，無蜂鳴聲出現只有嘈雜聲音時，可能接觸不良或故障。
3. 換探索器之電池時，注意接觸墊片的正確位置（參考圖-5）。
4. 鋼鋼尺甚薄易傷人，收放時需注意安全。

安平港長期性地下水位變化與分層地層下陷監測研究

編輯者：賴聖耀 李豐博 陳志芳

發行人：張金機

發行所：台灣省政府交通處港灣技術研究所

打字排版：港灣技術研究所大地工程組

台中縣梧棲鎮臨海路 83 號

04-6564216

中華民國八十六年六月出版，印製 100 本，非賣品