

105-039-7875

MOTC-IOT-104- H1DA004a

# 西南沿海地質資料建檔及地層下 陷量測分析(1/2)



交通部運輸研究所

中華民國 105 年 5 月

105-039-7875

MOTC-IOT-104-H1DA004a

# 西南沿海地質資料建檔及地層下 陷量測分析(1/2)

著者：陳志芳、謝明志、曾文傑

交通部運輸研究所

中華民國 105 年 5 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

西南沿海地質資料建檔及地層下陷量測分析.  
(1/2) / 陳志芳, 謝明志, 曾文傑著. -- 初版. --  
臺北市 : 交通部運研所, 民 105.05  
面 ; 公分  
ISBN 978-986-04-8490-8(平裝)

1.地質調查 2.地層下陷

356.33

105006218

西南沿海地質資料建檔及地層下陷量測分析(1/2)

著 者：陳志芳、謝明志、曾文傑  
出版機關：交通部運輸研究所  
地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號  
網 址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版>中心出版品)  
電 話：(04)26587176  
出版年月：中華民國 105 年 5 月  
印 刷 者：九易數碼科技印刷有限公司  
版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊  
本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站  
定 價：150 元  
展 售 處：  
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880  
國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207  
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN : 1010500515

ISBN : 978-986-04-8490-8 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

105

西南沿海地質資料建檔及地層下陷量測分析  
(1/2)

交通部運輸研究所

GPN: 1010500515

定價 150 元

## 交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：西南沿海地質資料建檔及地層下陷量測分析(1/2)			
國際標準書號 ISBN978-986-04-8490-8(平裝)	政府出版品統一編號 1010500515	運輸研究所出版品編號 105-039-7875	計畫編號 104-H1DA004a
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：陳志芳 研究人員：謝明志、曾文傑 參與人員：王欣郁、陳義松、李春榮、何木火 聯絡電話：04-26587113 傳真號碼：04-26564418			研究期間 自 104 年 01 月 至 104 年 12 月
關鍵詞：資料庫、地層下陷、監測 摘要： 臺灣之西南沿海縣市，包括雲林、嘉義與臺南等港灣地區，其地層大都屬現代沖積層，土層疏鬆軟弱且壓密固結尚未全部完成，極易因附近地區地下水抽取、大規模海埔新生地回填及結構物荷重或地震力等原因造成地層下陷，而影響公共工程及港區各樣設施之安全。因此，為維護工程設施之功能與安全，有必要蒐集西南沿海地區地質資料與彙整，並對港區之地層下陷、地下水壓進行長期之監測。 本計畫將蒐集雲林地區地質資料，並採用無線電波層別沉陷儀定期與震後量測布袋港、大鵬灣、臺中港及安平港等港區分層地層下陷量，港區震後速報系統更新等，並將資料進行分析與建檔。 因此，本計畫於 104 年度完成西南沿海地質資料建檔及地層下陷量測工作，期望相關研究成果可供各港務分公司等相關單位之碼頭維護管理及設計人員參考。 研究成果效益： 1. 港區地震災況速報系統，能提供震後碼頭液化安全評估相關資訊，可作為防災人員救災決策之參考。 2. 各港地層下陷及地震資料，可供未來港灣結構物設計及地震工程相關研究之用。 提供政府單位應用情形： 1. 港區地層下陷及地震監測資料，供港務公司管理單位維護港區結構物之參考。 2. 出版研究報告將相關研究成果供產官學界參考應用。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
105 年 5 月	186	150	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 (解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密) <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS  
INSTITUTE OF TRANSPORTATION  
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

<b>TITLE:</b> Development of the regional geological database and analysis of subsidence measurement in the southwestern coastal area of Taiwan (1/2)			
<b>ISBN</b> 978-986-04-8490-8 (pbk)	<b>GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER</b> 1010500515	<b>IOT SERIAL NUMBER</b> 105-039-7875	<b>PROJECT NUMBER</b> 104-H1DA004a
<b>DIVISION:</b> HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER <b>DIVISION DIRECTOR:</b> Chiu Yung-Fang <b>PRINCIPAL INVESTIGATOR:</b> Chen Jyh-Fang <b>PROJECT STAFF:</b> M.J. Hsieh, W.J. Tseng. <b>PROJECT TECHNICIAN:</b> Y.H. Wang, Y.S. Chen, C.R. Lee, M.H. Ho. <b>PHONE:</b> 04-26587113 <b>FAX:</b> 04-26564418			<b>PROJECT PERIOD</b> FROM January 2015 TO December 2015
<b>KEY WORDS:</b> database, ground subsidence, monitoring			
<b>ABSTRACT:</b> <p>The soil deposits in the southwestern coastal area, which includes Yunlin county, Chiayi county, and Tainan city, are Holocene alluvium with loose packing and under consolidation. These deposits are prone to ground subsidence due to excess loadings from water pumping, hydraulic fills, surface structural loads, and seismic activities. Significant ground subsidence will affect the safety of infrastructures and harbor facilities.</p> <p>The ongoing project will collect the regional geological data related to subsidence analysis in this area. In situ subsidence measurements using wireless profile-settlement gauges are performed in ports of Pudai, Dapeng Bay, Taichung, and Anping to establish the temporal settlement profiles. These data are collected to develop a database for subsidence analysis of port area and integrated to update the earthquake rapid reporting system.</p> <p>Therefore, this project carried out in 2014, is port monitoring earthquakes and subsidence of stratification. With expectation the research results will provide references for terminal design and maintenance in the future.</p> <p><b>Benefits of Research Results :</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. A rapid damage assessment system based on liquefaction analysis model and the in situ monitoring data in harbor area provides information for disaster management of associated authorities.</li> <li>2. The subsidence and downhole array data in the harbor area provide details of ground responses for earthquake engineering study and development of seismic design guides for harbor facilities.</li> </ol> <p><b>Current situations in application:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. The settlement profile and variations of ground water pressures in harbor area can benefit the design and maintenance of harbor structures.</li> <li>2. The published research report can be potentially useful for industry, government, and academic research.</li> </ol>			
<b>DATE OF PUBLICATION</b> May 2016	<b>NUMBER OF PAGES</b> 186	<b>PRICE</b> 150	<b>CLASSIFICATION</b> <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 西南沿海地質資料建檔及地層下陷量測分析(1/2)

## 目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目 錄.....	III
圖目錄.....	VI
表目錄.....	XI
第一章 前言.....	1-1
1.1 研究緣起.....	1-1
1.2 研究範圍.....	1-1
1.3 研究方法與內容.....	1-2
第二章 地層下陷行為與分析.....	2-1
2.1 有效應力增量分布.....	2-2
2.2 地層下陷行為.....	2-7
2.2.1 超抽地下水之下陷.....	2-7
2.2.2 地表荷重下陷.....	2-8
2.2.3 地震引起之下陷.....	2-9
2.3 地層下陷分析方法.....	2-10
2.3.1 Terzaghi 壓密理論.....	2-10
2.3.2 Biot 耦合壓密理論.....	2-12
2.3.3 群樁壓密沉陷.....	2-13
2.3.4 地震液化沉陷.....	2-15

2.4 地層下陷模擬預測 .....	2-21
第三章 西南沿海地區地質與下陷 .....	3-1
3.1 西南沿海地質資料 .....	3-1
3.2 雲林地區 .....	3-1
3.2.1 地質特性 .....	3-1
3.2.2 水文地質 .....	3-2
3.3 台 78 線與高鐵交會地區 .....	3-3
3.4 港灣地區 .....	3-8
3.4.1 臺中港 .....	3-8
3.4.2 布袋港 .....	3-11
3.4.3 安平港 .....	3-15
3.4.4 大鵬灣 .....	3-19
3.5 地層下陷情形 .....	3-22
3.5.1 雲林地區地層下陷 .....	3-22
3.5.2 土庫國中下陷監測站 .....	3-24
3.5.3 港區地層下陷 .....	3-27
第四章 地層下陷監測與分析 .....	4-1
4.1 分層沉陷觀測井設置 .....	4-1
4.2 雲林地區下陷監測 .....	4-4
4.2.1 土庫國中監測站 .....	4-4
4.2.2 台 78 線與高鐵交會處監測站 .....	4-10
4.3 港區下陷監測 .....	4-13
4.3.1 布袋港監測站 .....	4-13
4.3.2 布袋港平面水準測量 .....	4-24

4.3.3 大鵬灣監測站.....	4-35
4.3.4 臺中港監測站.....	4-37
4.3.5 安平港監測站.....	4-39
第五章 資料庫在地理資訊系統上之應用.....	5-1
5.1 資料庫系統操作程序.....	5-1
5.2 雲林地區土層及下陷基本資料查詢.....	5-3
5.2.1 鑽探資料功能查詢展示.....	5-3
5.2.2 水準檢測資料功能查詢展示.....	5-5
5.3 港區震災速報系統.....	5-17
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-3
6.3 研究成果之效益.....	6-3
6.4 提供政府單位應用情形.....	6-3
參考文獻.....	參-1
附錄一 期末審查意見及辦理情形說明表.....	附錄 1-1
附錄二 期末報告簡報資料.....	附錄 2-1

## 圖 目 錄

圖 2.1	沉陷分析之流程圖.....	2-2
圖 2.2	自由水位下降引致之有效應力增量分布.....	2-3
圖 2.3	受壓水位下降引致之有效應力增量分布.....	2-4
圖 2.4	填土荷重引致之有效應力增量分布.....	2-5
圖 2.5	結構物荷重引致之有效應力增量分布.....	2-6
圖 2.6	群樁之壓密沉陷圖.....	2-14
圖 2.7	體積應變與反復剪應力比及 N 值之相關經驗圖(Tokimatsu & Seed,1987).....	2-18
圖 2.8	N 值, qc 值, 抗液化安全係數及體積應變之相關經驗圖 (Ishihara et al., 1991, 1996).....	2-20
圖 2.9	布袋港沉陷模擬分析與分層下陷觀測資料之比較.....	2-22
圖 3.1	彰雲地區之區域地質圖 (中央地調所, 2000).....	3-2
圖 3.2	濁水溪沖積扇之水文地質概念模型 (賴典章等, 2003).....	3-3
圖 3.3	台 78 線與高鐵交會處鑽探孔位平面圖(公路總局, 2013).....	3-4
圖 3.4	台 78 線與高鐵交會處地層柱狀圖(STA2-5-8).....	3-4
圖 3.5	台 78 線與高鐵交會處地層柱狀圖(STA1-2-3).....	3-5
圖 3.6	台 78 線與高鐵交會處地層柱狀圖(STA1-4-7).....	3-6
圖 3.7	布袋港地理位置.....	3-13
圖 3.8	臺灣西海岸地形圖.....	3-13
圖 3.9	布袋港區地層柱狀.....	3-14
圖 3.10	布袋港區地層柱狀圖.....	3-14
圖 3.11	布袋港區地層柵狀圖.....	3-15

圖 3.12 安平港及其鄰近地區地質分布 .....	3-16
圖 3.13 安平港規劃平面圖 .....	3-17
圖 3.14 安平港碼頭地層柵狀圖 .....	3-18
圖 3.15 大鵬灣地理位置圖 .....	3-19
圖 3.16 海濱所見之沉積地形 .....	3-20
圖 3.17 大鵬灣區基地地質圖 .....	3-20
圖 3.18 大鵬灣區鑽探位置圖 .....	3-21
圖 3.19 大鵬灣區地層柱狀圖 .....	3-22
圖 3.20 雲林地區民國 81~88 年累積下陷量圖(水利署, 2013).....	3-23
圖 3.21 雲林地區民國 90~102 年累計下陷量圖(水利署, 2013).....	3-23
圖 3.22 雲林地區民國 102 年下陷速率等值線圖(水利署, 2013).....	3-24
圖 3.23 土庫國中 GPS 固定站三維坐標變化圖 .....	3-25
圖 3.24 雲林土庫國中地層柱狀圖及相對於井底之累計壓縮量.....	3-26
圖 3.25 雲林地區地下水位站與與降雨量關係圖 .....	3-27
圖 4.1 沉陷計安裝示意圖 .....	4-3
圖 4.2 磁感式層別沉陷計安裝示意圖 .....	4-3
圖 4.3 土庫國中監測站位置平面圖 .....	4-4
圖 4.4 土庫國中分層沉陷及水壓量測觀測站地層柱狀圖 .....	4-6
圖 4.5 台 78 線與高鐵交會處監測站平面圖 .....	4-10
圖 4.6 高鐵沿線累積下陷量圖 .....	4-11
圖 4.7a 台 78 線與高鐵交會處墩基斷面示意圖(填土高 2.55m).....	4-12
圖 4.7b 台 78 線與高鐵交會處墩基斷面示意圖(填土高 5.5m).....	4-12
圖 4.8 布袋港分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖 .....	4-15
圖 4.9 布袋港地層下陷監測井位置圖 .....	4-18

圖 4.10a 布袋港分層水位變化圖(自記式).....	4-19
圖 4.10b 布袋港分層水位變化圖(自記式).....	4-19
圖 4.10c 布袋港分層水位變化圖(自記式).....	4-20
圖 4.11 布袋港(200m)分層水位變化圖(手動量測).....	4-20
圖 4.12 布袋港(300m)分層水位變化圖(手動量測).....	4-21
圖 4.13 布袋港(200m)分層累積下陷圖(手動量測).....	4-21
圖 4.14 布袋港(300m)分層個別下陷量圖.....	4-22
圖 4.15 布袋港(300m)分層累積下陷量圖.....	4-22
圖 4.16a 布袋港(400m)水準基站累積下陷量圖(92/09/04~97/05/30).	4-23
圖 4.16b 布袋港(400m)水準基站累積下陷量圖(98/07/03~103/11/17)	4-23
圖 4.17 嘉義縣布袋鎮及布袋港區監測點水準測量工作範圍圖.....	4-28
圖 4.18 嘉義縣布袋鎮及布袋港區監測點水準測量水準測線、環線佈置 圖.....	4-29
圖 4.19 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(93~101 年).....	4-30
圖 4.20 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(93~102 年).....	4-31
圖 4.21 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(101~102 年).....	4-32
圖 4.22 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(93~103 年).....	4-33
圖 4.23 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(102~103 年).....	4-34
圖 4.24 大鵬灣分層水位變化圖(手動量測).....	4-36
圖 4.25 大鵬灣地層分層下陷觀測圖.....	4-36
圖 4.26 臺中港分層水位變化圖(手動量測).....	4-38
圖 4.27 臺中港分層累積下陷量圖(200m).....	4-38
圖 4.28 安平港分層水位變化圖(手動量測).....	4-40
圖 4.29 安平港分層累積下陷量圖.....	4-40

圖 5.1 查詢主畫面 .....	5-6
圖 5.2 雲林縣土層鑽探與水準檢測資料查詢表單下拉展示圖 .....	5-6
圖 5.3 雲林地區土層鑽探資料查詢表單下拉展示圖 .....	5-7
圖 5.4 雲林地區土層鑽孔資料報表查詢展示圖 .....	5-7
圖 5.5 雲林地區土層鑽孔資料報表展示圖 .....	5-8
圖 5.6 雲林地區土層鑽探資料柱狀圖查詢展示圖 .....	5-8
圖 5.7 雲林地區土層鑽探單孔或多孔非排序查詢展示圖 .....	5-9
圖 5.8 雲林地區土層鑽探單孔非排序柱狀圖展示圖 .....	5-9
圖 5.9 雲林地區土層鑽探多孔展示排序查詢展示圖 .....	5-10
圖 5.10 雲林地區土層鑽探多孔展示_由西向東柱狀展示圖 .....	5-10
圖 5.11 雲林地區土層鑽孔液化機率分析查詢展示圖 .....	5-11
圖 5.12 雲林地區土層液化機率地震強度查詢展示圖 .....	5-11
圖 5.13 雲林地區土層液化機率分析展示圖(Liao_液化機率) .....	5-12
圖 5.14 雲林地區土層液化機率分析展示圖(Lai_賴聖耀_判別模式) .....	5-12
圖 5.15 雲林地區土層 Liao_液化機率分析展示圖 .....	5-13
圖 5.16 雲林地區土層 Ishihara 地震下陷分析查詢展示圖 .....	5-13
圖 5.17 雲林地區土層 Ishihara 地震下陷分析展示圖 .....	5-14
圖 5.18 雲林地區水準檢測點位置圖展示圖 .....	5-14
圖 5.19 雲林地區水準檢測點位說明展示圖 .....	5-15
圖 5.20 雲林地區水準檢測點位說明(高程資訊)展示圖 .....	5-15
圖 5.21 雲林地區水準檢測資料查詢展繪分年下陷量圖 .....	5-16
圖 5.22 雲林地區地層下陷分年下陷量圖年份選取對話框 .....	5-16
圖 5.23 雲林地區水準檢測地層下陷量展示圖 .....	5-17
圖 5.24 港區地震災況速報系統儀器配置示意圖 .....	5-18

圖 5.25 臺中港區地震即時監測畫面示意圖.....	5-18
圖 5.26 安平港區地震即時監測畫面示意圖.....	5-19
圖 5.27 高雄港區地震即時監測畫面示意圖.....	5-19
圖 5.28 蘇澳港區地震即時監測畫面示意圖.....	5-20
圖 5.29 臺北港區地震即時監測加速度歷時圖.....	5-20

## 表 目 錄

表 3-1	台 78 與高鐵交會處鑽探土層物理特性 .....	3-7
表 4-1	土庫國中監測井座標高程一覽表 (TWD97) .....	4-5
表 4-2	土庫國中沉陷計感應環安裝深度一覽表(水利署).....	4-5
表 4-3	土庫國中地下水壓觀測站水壓計埋設表 .....	4-5
表 4-4	土庫國中監測站土層分類表 .....	4-7
表 4-5	土庫國中分層沉陷量測表(水利署：2013).....	4-9
表 4-6	土庫國中分層沉陷量測表(港研中心：2015) .....	4-9
表 4-7	台 78 線 22K+700 與高鐵交會處鑽探孔座標一覽表-TWD974-11	
表 4-8	環線閉合差分析表.....	4-27
表 4-9	BM9803~井 BM3 高程變化量 .....	4-27

# 第一章 前言

## 1.1 研究緣起

臺灣西南之臺中、雲林、彰化、嘉義、臺南等縣市沿海地區，包括臺中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港區，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，極可能因附近地區地下水抽取、結構物荷重、大規模海埔新生地回填或地震等原因造成地層下陷，而影響港區工程及各樣設施之安全。

近年來由於地下水大量之開發引致之地層下陷問題，在臺灣各地區，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，依據水利署地層下陷資料截至民國 103 年止，其中以屏東地區累積最大下陷量達 3.4 公尺為最嚴重，彰化濱海地區最大累積下陷量 2.5 公尺，雲林地區最大累積下陷量 2.47 公尺，雲林縣土庫鎮之台 78 線與高鐵交會處更是因為嚴重之下陷受到政府各界重視，整個西南沿海地區幾乎均有地層下陷現象。由於超抽地下水易造成區域性之地下水位下降，港灣地區雖無超抽地下水，但受到附近沿海地區超抽地下水之影響，其地下水位大多已降到海平面以下，有引發海水入侵之疑，若水位繼續下降，恐會導致土壤鹽化、地層下陷及淹水等問題。尤其是運輸的快速與貨櫃碼頭裝卸朝自動化設計，軌道或碼頭地面少許之差異沉陷，皆易使行車及碼頭自動化設備損壞或喪失使用功能。因此，為維護行車安全與港區工程及各樣設施之安全，港研中心於港區設置地層下陷及地下水壓監測站，進行長期監測。

## 1.2 研究範圍

在地震及動態水壓監測部份，第一年(104 年)主要以蒐集西南沿海之雲林地區地質與地層下陷資料，並進行長期量測港灣地區地層下陷，最後並建置成資料庫。第二年(105)年增加蒐集西南沿海之彰化地

區地質與地層下陷資料，港灣地區下陷監測部份，持續監測布袋港、大鵬灣、安平港及臺中港等港區地層下陷與分析，並進行布袋港永久水準基站之測量工作。

### 1.3 研究方法與內容

本所港研中心研究計畫之目標，主要是維護各港區沉陷及水位觀測井之正常監測，平時定期量測各港區之沉陷及水位變化，以探討地下水位及水壓變化對各港區地層下陷之影響。地震後，以無線電波層別沉陷儀量測分層地層下陷，分析各土層地震時之沉陷量。

本(104)年彙整臺灣西南沿海與雲林地區地質與下陷資料，並於臺中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港區設置之沉陷井與水位觀測井，持續以無線電波感應式層別沉陷儀進行港區地層分層沉陷之長期監測，與瞭解地下水位及水壓變化對港區地層下陷之影響，其目的可維護港區現有各樣工程設施安全監測，並可做為港區碼頭、堤防等擴建工程規劃設計之參考。

在本文中第二章是文獻回顧部份，主要介紹西南沿海地區地層下陷行為與分析方法，第三章蒐集西南沿海之雲林縣土庫與各港地區地質及下陷情形，第四章為監測與蒐集各地區土層分層沉陷及地下水壓的結果等相關性分析，第五章將地質與監測所得資料依港研中心所發展的地理資訊系統資料庫建檔儲存，第六章將相關成果做成結論，所得資料可供公路養護工務與各港務分公司等相關單位之碼頭維護管理及設計人員參考。

## 第二章 地層下陷行為與分析方法

港灣地區地層下陷之原因，非常複雜，如大地應力作用所引致地殼之升降，地震作用引致港灣地區沖積砂土層與海埔新生地發生液化而產生嚴重之下陷，防波堤為港灣之重要構造物，大都由大型沉箱連接而成，有極大的荷重，亦會產生嚴重之下陷；另港灣碼頭設施大都由抽砂填土而成，大規模之填土易造成區域性之不均勻沉陷，及港灣附近地區超抽地下水易造成區域性之地下水位下降，導致港區地層下陷等，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，台灣西南海岸港灣地區之地層下陷亦然。因此本文特就超抽地下水之下陷行為，分述如下：

一般而言，無論是超抽地下水、填土荷重或構造物荷重造成之地層下陷，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布情形，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 2.1 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布之研判極為重要。

茲就超抽地下水、填土荷重或構造物荷重，其所引致有效應力增量之分布情形、下陷行為、分析方法等，分述如下：

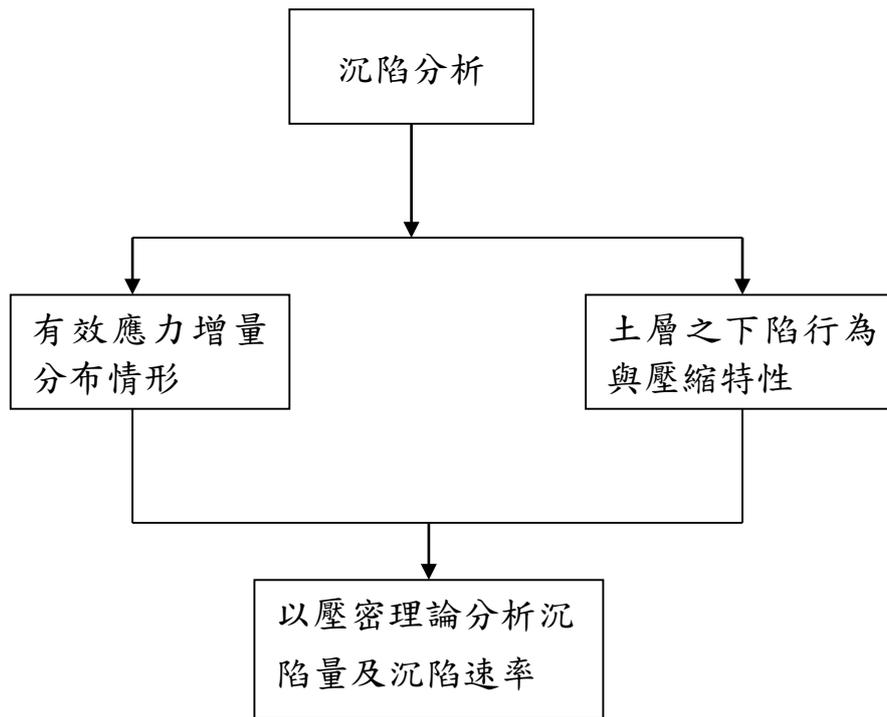


圖 2.1 沉陷分析之流程圖

## 2.1 有效應力增量分布

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布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 2.2 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 2.3 所示，除分布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。

填土與建造結構物也會因為荷重的增加，土壤受壓力作用後，土壤孔隙中的水份及空氣被擠壓而向外排出，孔隙因而減少，顆粒排列變得更緊密，土壤因壓縮變形後將造成基礎的沉陷，其有效應力增量分布情形如圖 2.4 與圖 2.5 所示。

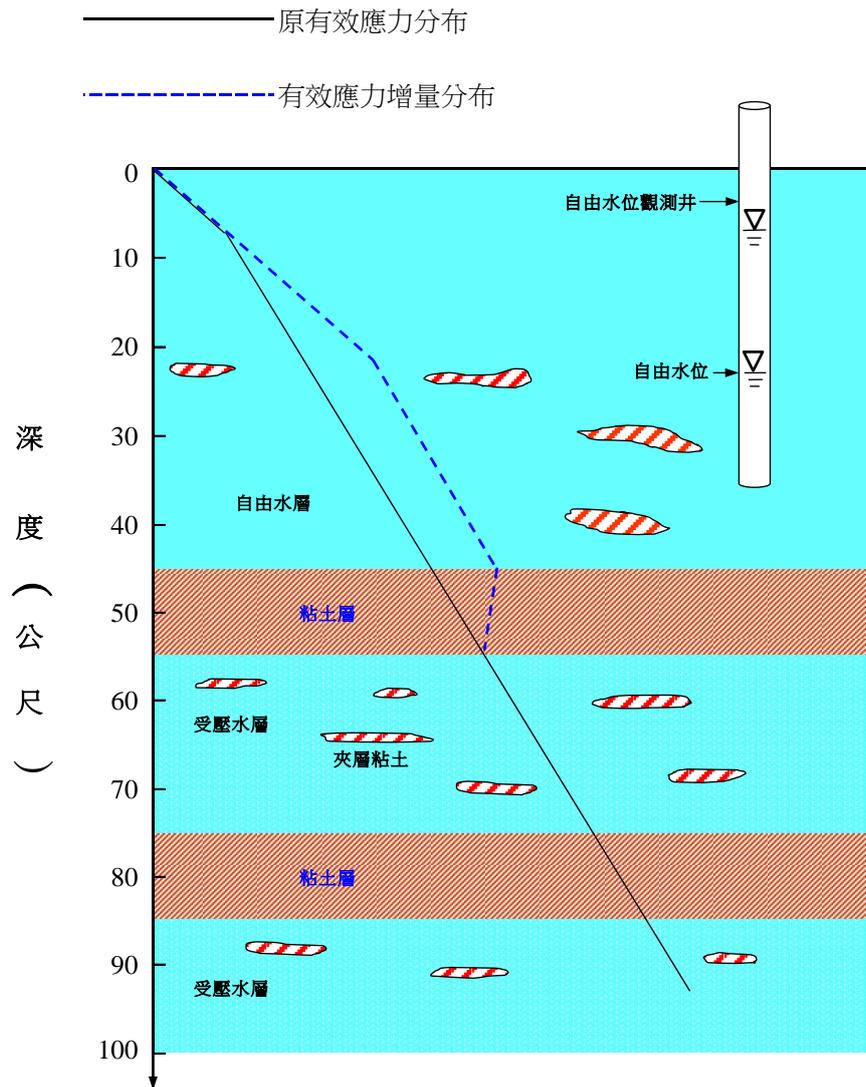


圖 2.2 自由水位下降引致之有效應力增量分布

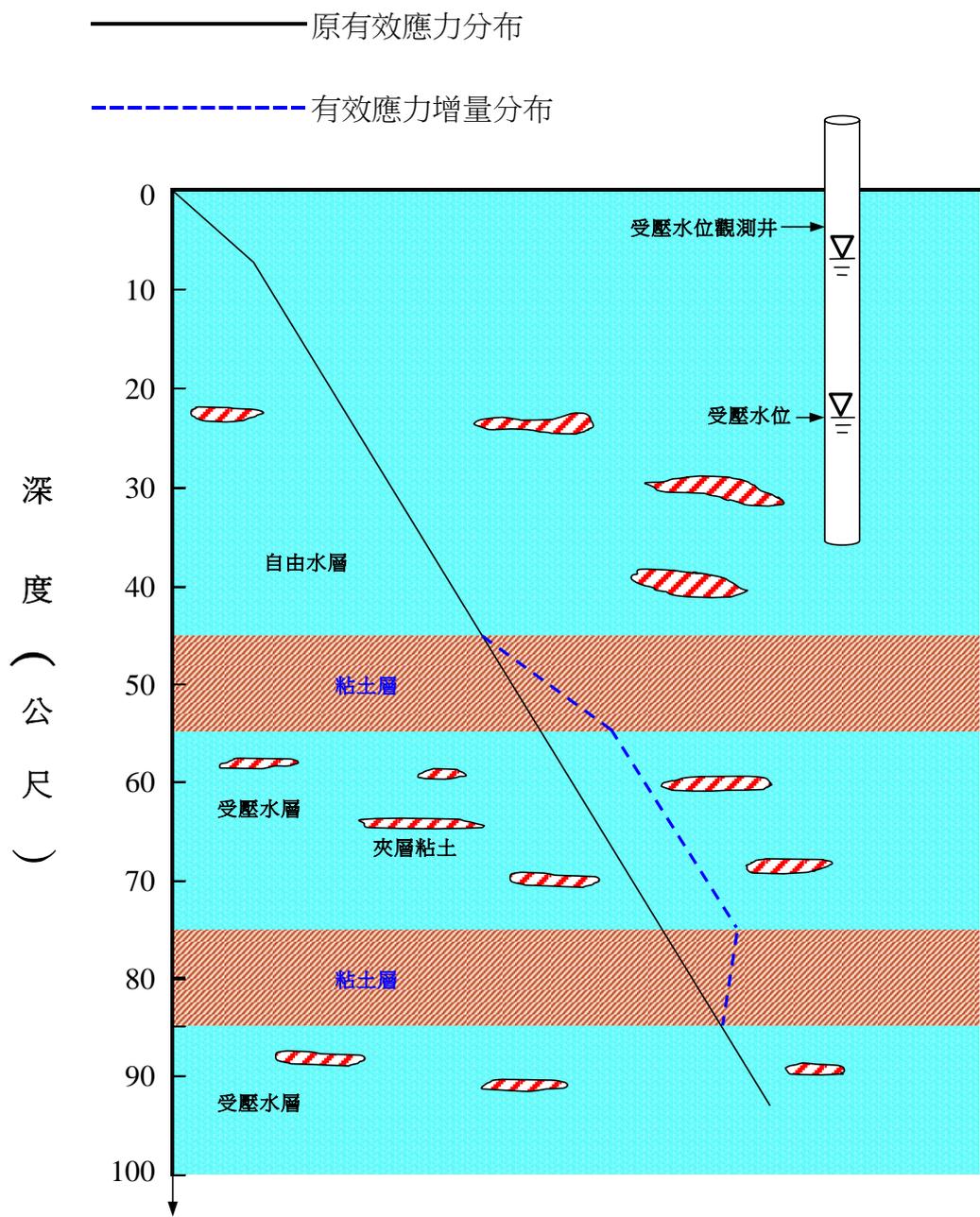


圖 2.3 受壓水位下降引致之有效應力增量分布

— 原有效應力分布  
 - - - 有效應力增量分布

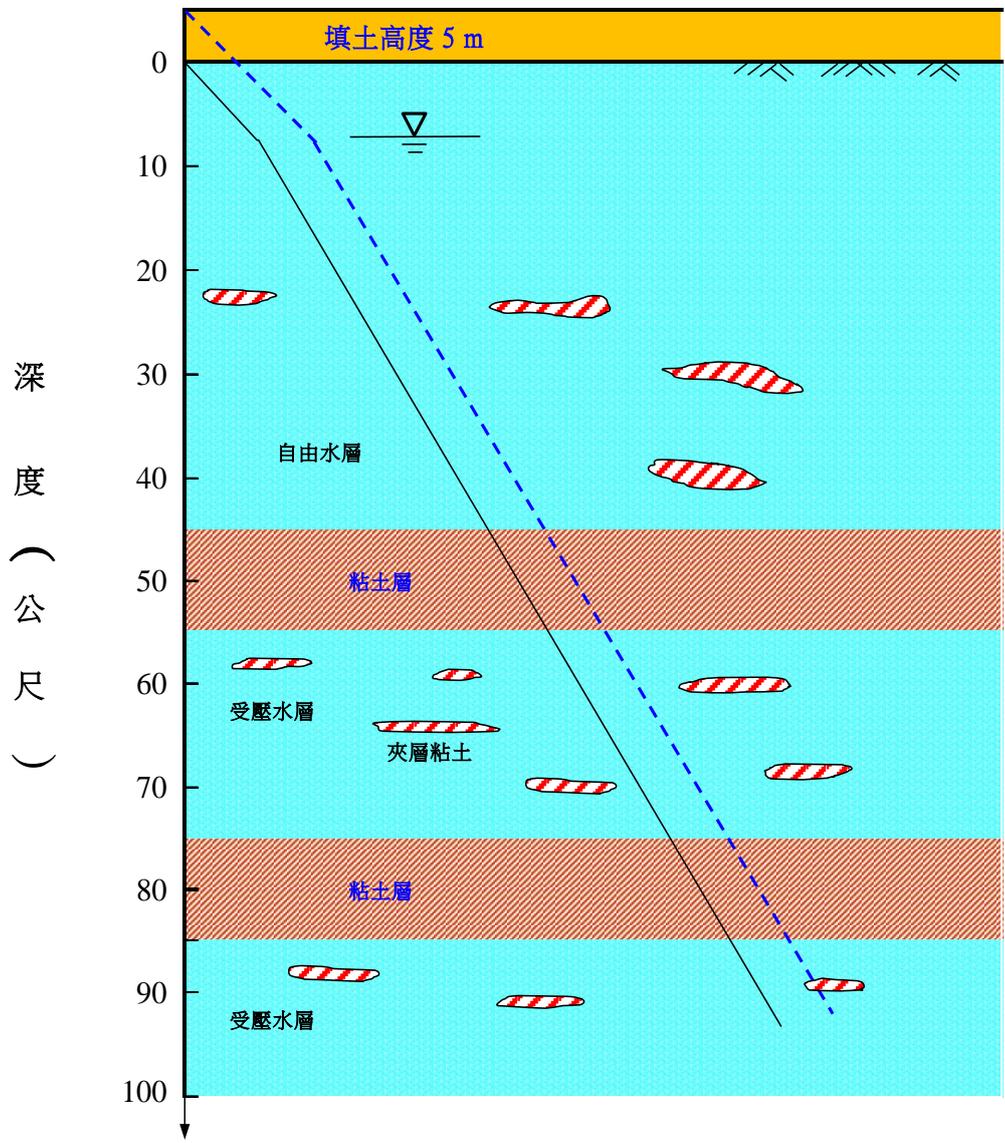


圖 2.4 填土荷重引致之有效應力增量分布

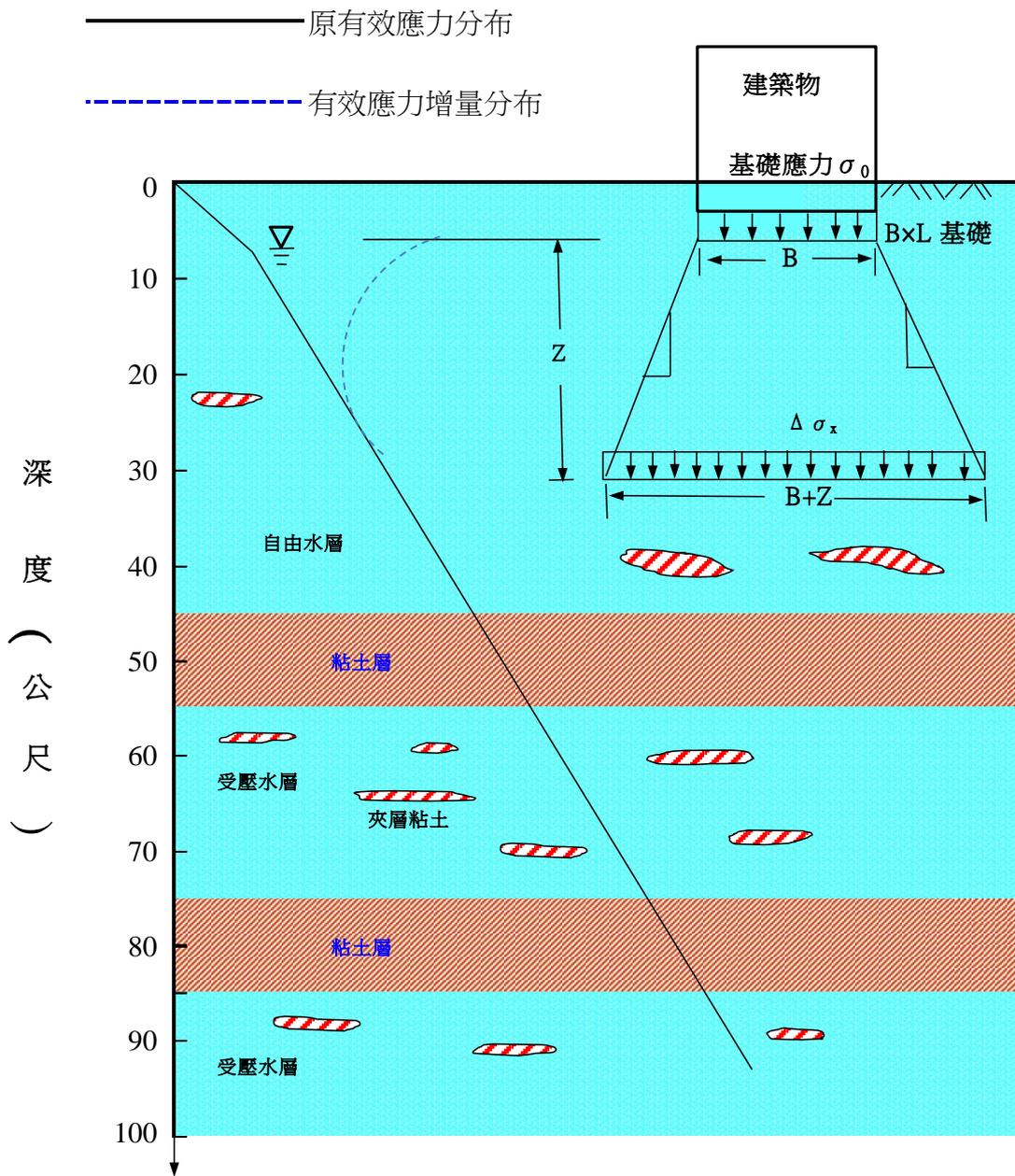


圖 2.5 結構物荷重引致之有效應力增量分布

## 2.2 地層下陷行為

### 2.2.1 超抽地下水之下陷

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。

### 2.2.2 地表荷重下陷

當土壤承受荷重，例如填土工程或建造結構物時，土壤將發生變形，由於荷重造成表面垂直總變形量即為沉陷。在工程結構基礎設計中，由於荷重增加所造成的沉陷量，是否於允許變形範圍值，也是我們需要進行評估的一項，過度的沉陷量皆會造成結構性或其它的損害，尤其是沉陷發生的速度很快時更易發生。

於原有地層上進行填土或興建結構物工程，除了要進行穩定性分析外，還需估算沉陷量是否於允許變形範圍內，或採取地質改良以減少沉陷量的產生。土層在荷重作用下，總沉陷變形量，依據沉陷的順序與原因可分為即時沉陷、主要壓密沉陷、次要壓密沉陷等三種，分別簡述如下：

1. 即時沉陷：即時沉陷是受載重後在很短時間內發生，是土粒的彈性變形或局部性重排，引起土粒的側向擠出使土體壓縮為主。即時沉陷實際上不為彈性但通常以彈性理論估算，在設計淺基礎工程時必需考慮。
2. 主要壓密沉陷：土壤在荷重作用下產生超額孔隙水壓，隨時間的進行，超額孔隙水壓將逐步消散，土粒間的孔隙水被排出，土體體積因而縮小而使地表產生沉陷，主要壓密沉陷的計算對總沉陷及完工沉陷量影響最大。

3. 次要壓密沉陷：次要壓密沉陷通常發生於高壓縮性之軟弱粘土層或有機質土壤，於主要壓密完成後在有效應力維持不變之狀況下，隨時間而持續發生之沉陷，又稱二次壓縮。此種沉陷可能是由粘土顆粒與粘土團間鍵結的壓縮土壤結構重組所造成。

除了填土或建造結構物引起的沉陷外，基礎工程施工常使用樁基方式以傳遞上部結構物載重達到土層中所產生的沉陷也需考慮。單樁之載重支承力，一般可依其樁身摩擦力及樁尖支承力來估算，但決定群樁之載重支承力是非常困難的問題，這是因各樁之安置距離相近，因此群樁傳遞至土壤之應力會重疊，而將減低樁的總體支承力，理想情況是經過設計安排後之一組群樁，其總體的之承力應不小於單一樁體支承力總和。

群樁除了有群樁支承力效率要考慮外，尚有群樁貫入粘土層中的壓密沉陷與負表面摩擦力產生的沉陷也需一起評估。此外，群樁的壓密沉陷可能附近的填土，相接樓板載重及降低地下水位等因素而產生。

### 2.2.3 地震引起之下陷

由於基礎底面以下之土壤，在受到地震之動態作用力時，將使土壤產生體積壓縮，引致基腳沉陷，一般砂土層於承受震動時，均有趨於緊密之現象，對於乾燥或低飽和之砂土，因孔隙中空氣迅速被壓縮及擠出，而立即產生體積壓縮現象。對於飽和之砂土，因孔隙水無法立即排出，而有孔隙水壓累積增大現象，俟震動過後，則隨著超額孔隙水壓之消散，有再壓密現象而產生體積壓縮。此外，飽和之粘土，在受到震動時，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象發生，唯其孔隙水壓消散較慢，乃發生長期沉陷，且其沉陷量較砂土層為大。

現地土壤承受反覆荷重作用所產生的壓密和液化問題，是值得研究的問題。土壤液化後，在孔隙水壓消散過程將使得土壤產生壓密現象而使基礎結構物產生超額之差異沉陷，致使結構物發生破壞或傾斜。

探討現地土壤因受到地震作用引致液化所產生之土層沉陷來源，經蒐集相關參考文獻約有 4 種，分別簡述如下：

1. 乾燥或飽和但能充分排水的砂土，因振動作用而有壓實的產生。
2. 若砂土為飽和且未能排水，則在振動作用期間產生的殘留變形。
3. 在振動停止後，超額孔隙水壓消散使砂土再壓密造成沉陷。
4. 飽和粘土在承受反復剪力載重後，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象，而發生長期沉陷。

## 2.3 地層下陷分析方法

因地下水位下降、填土、建造結構物或地震造成之地層下陷，其下陷量大小與土壤種類有關。砂質土層的下陷速度較快但下陷量較小；而粘性土層之壓縮則較具延滯性且下陷量也較大。

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<sup>[30]</sup>，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。

因水位下降、填土、建造結構物與地震造成之地層下陷其評估理論方法分別簡述如下：

### 2.3.1 Terzaghi 壓密理論

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) 土壤顆粒及水為完全不可壓縮，(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。



$$T_v = \frac{C_v \times t}{H_{dr}^2} \dots\dots\dots (2.5)$$

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：

$$S(t) = S_u \times U(t) \dots\dots\dots (2.6)$$

### 2.3.2 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：

$$\left. \begin{aligned} G\nabla^2 S_x + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - \frac{\partial \rho}{\partial x} &= 0 \\ G\nabla^2 S_y + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \frac{\partial \rho}{\partial y} &= 0 \\ G\nabla^2 S_z + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - \frac{\partial \rho}{\partial z} &= 0 \\ k\nabla^2 \rho &= \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + n\beta \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.7)$$

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)， $E$ 、 $\nu$ 、 $G$  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  $G = E/2(1 + \nu)$ 。 $k$ 、 $n$ 、 $\beta$  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(2.7)簡化如下：

$$2\eta G \frac{\partial^2 S_z}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial z} = 0,$$

$$-k \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 S_z}{\partial z \partial t} + n\beta \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

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(2.8)解析得如下所示：

$$S_z = \frac{4P_0H}{\pi^2\eta G} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \times \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{(2n+1)\pi}{2H_d} \right)^2 C_v t \right] \right\} \dots\dots\dots(2.9)$$

式中，壓密係數  $C_v = \frac{k}{n\beta + \frac{1}{2\eta G}}$ ， $H_d$  為排水路徑長，若為單向排水

$H_d = H$ ，若為雙向排水  $H_d = H/2$

### 2.3.3 群樁壓密沉陷

粘土層中群樁之壓密沉陷<sup>[2]</sup>，可採用 2:1 應力分布法近似估計出，其計算程序如下(如圖 2.6)：

1. 群樁貫入深度為  $L$ ，承受一總載重  $Q_g$ ，若樁帽低於原地表高度，則  $Q_g$  等於上層結構物載重減去因開挖而移去之有效土重。
2. 假設載重自裝頂以下  $2L/3$  深度處，開始將載重傳送至土層如圖所示，亦即由  $z=0$  處起載重  $Q_g$  之分布為 2(垂直)：1(水平)方式向下傳遞。

線 aa'和 bb'為此 2 : 1 之兩線。

3. 計算每層土壤中央因載重  $Q_g$  而產生之應力增加量。

$$\Delta p_i = \frac{Q_g}{(B_g + Z_i)(L_g + Z_i)} \dots\dots\dots(2.10)$$

其中  $\Delta p_i = i$  層中央之應力增加量。

$L_g, B_g =$  群樁平面之總長度及寬度。

$Z_i =$  由  $z=0$  至第  $i$  層年土中央之距離。

4. 計算因應力增加而導致各層粘土之沉陷。

$$\Delta s_i = \left[ \frac{\Delta e_{(i)}}{1 + e_{0(i)}} \right] H_i \dots\dots\dots(2.11)$$

$\Delta s_i =$  土層之壓密沉陷量。

$\Delta e_{(i)} = i$  土層因應力增加產生之空隙比改變量

$e_{(0)} = i$  土層之起始空隙比(建築之前)

$H_i = i$  土層之厚度(第二層粘土厚為  $L_1$ ，第三層為  $L_2$ ，第四層為  $L_3$ )

5. 群樁之總體壓密沉陷量為  $\Delta s_{g(c)} = \sum \Delta s_i$

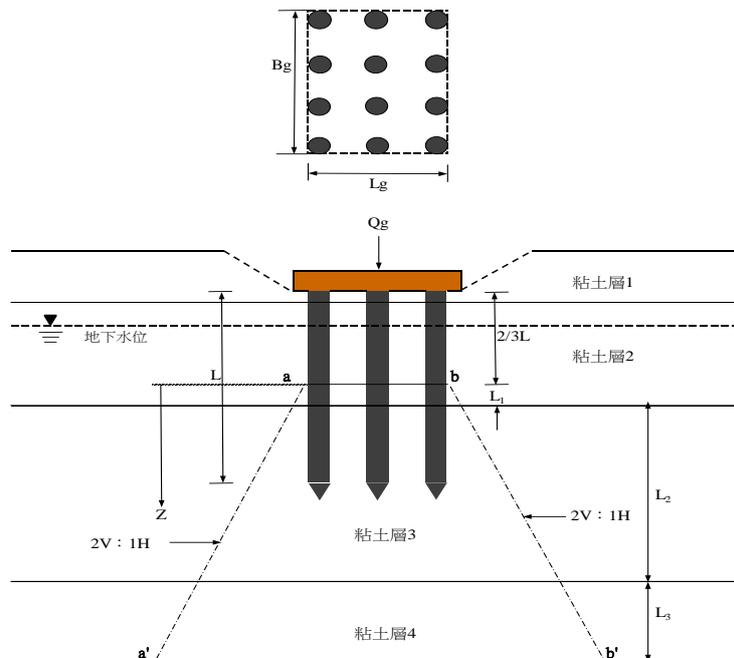


圖 2.6 群樁之壓密沉陷圖

### 2.3.4 地震液化沉陷

地震力引致之沉陷對於較為深厚且疏鬆之沖積土層，尤其是抗液化安全係數小於 1.6 之土層 (Tokimatsu & Seed, 1987)，應對此項沉陷之影響作審慎之考慮。對於此項沉陷之研究，一般均如同液化潛能分析一樣，將其邊界條件簡化為水平地盤且無結構物荷重影響之情況，而於此情況下，土體將呈現單向度壓縮行為，亦即其垂直應變量等於其體積應變量。

現地土壤因受到地震之振動作用，產生沉陷的來源可歸納四個因素：(1) 乾燥或飽和但能充分排水的砂土，因振動作用而有壓實的產生；(2) 若砂土為飽和而且未能排水，則在振動作用期間所產生的殘留變形；(3) 在振動停止後，超額孔隙水壓消散使砂土再壓密造成沉陷。(4) 飽和粘土在承受反復剪力載重後，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象，而發生長期沉陷。

而目前以現地試驗評估土層沉陷方法有兩種<sup>[31]</sup>：一為 Tokimatsu & Seed (1987) 曾綜合許多飽和砂土之試驗結果，建議一反覆剪應力比 ( $\tau_{av}/\sigma'_0$ )、N 值及體積應變之關係，如圖 2.7 所示；另一為 Ishihara et al. (1991, 1996) 建議之 N 值、qc 值、抗液化安全係數及體積應變之經驗關係，如圖 2.8 所示，以上均可作為沉陷推估之參考。

#### 1. Tokimatsu & Seed (1987) 震陷量評估法

Tokimatsu & Seed (1987)<sup>[9]</sup> 所建議之體積應變與反復剪應力比及 N 值之相關經驗圖，其分析步驟如下：

##### a. 計算地震引致之反復應力比

地震引致土層的作用強度參數，以無因次之反復應力比  $\tau_{av}/\sigma'_0$  表示，根據 Seed et al. (1985) 方法，反復應力比為飽和砂土層因地震作用引起的平均剪應力  $\tau$ ，與砂土之有效覆土壓力  $\sigma'_0$  之比值，以 SR 表示，其計算式如下所示：

$$SR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_o} = 0.65 \cdot \frac{r_d}{r_m} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_o}{\sigma'_o} \dots\dots\dots (2.14)$$

其中，

$\tau_{av}$ ：地震引致土層之平均剪應力，kg/cm<sup>2</sup>。

$a_{max}$ ：地表最大水平加速度，m/sec<sup>2</sup>。

$g$ ：重力加速度，m/sec<sup>2</sup>。

$\sigma_o$ ：最初垂直覆土壓力，kg/cm<sup>2</sup>。

$\sigma'_o$ ：有效覆土壓力，kg/cm<sup>2</sup>。

$r_d$ ：應力折減因數。

$r_m$ ：地震規模影響因素。

b.修正 SPT-N 值至有效覆土壓力 1kg/cm<sup>2</sup> 及落錘能量為 60%

土壤抗剪力強度參數以 SPT-N 值表示，不過由於 SPT-N 值，在鑽探時，易受有效應力之影響。因此以現場資料和 SPT-N 值評估土壤液化及沉陷之前，均需將 N 值加以修正，以求得抗剪力強度之相關經驗式，本文以 Liao et al. (1986)方法修正如下表示：

$$N_1 = C_n \cdot N = \sqrt{1/\sigma'_o} \cdot N \dots\dots\dots (2.15)$$

其中，

$N_1$ ：修正至有效覆土壓力為 1kg/cm<sup>2</sup> 之正規化貫入 N 值。

$C_n$ ：有效覆土壓力之修正係數。

$N$ ：標準貫入試驗值。

$\sigma'_o$ ：有效覆土壓力，kg/cm<sup>2</sup>。

由於目前世界各國之標準貫入試驗並無統一規範，所得 SPT-N

得值實際上是使用不同擊錘，以不同效率和不同施放能量系統，不同鑽孔穩定液和不同取樣器所量測而得。因此為了使評估土壤抗剪力強度所需之標準貫入值能夠一致，Seed et al.(1985)建議使用一個新的標準化參數 $(N_1)_{60}$ 值，其為進行標準貫入試驗時，施加於鑽桿之能量，為理論自由落錘能量之 60%所量測的貫入值，根據此提議， $(N_1)_{60}$  值應為：

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot N_1 = N_m \cdot C_n \cdot N \dots\dots\dots (2.16)$$

式中：

$(N_1)_{60}$ ：修正至落錘能量為 60%之正規化貫入值。

$N_m$ ：落錘能量之修正係數。

c.計算體積應變量  $\varepsilon_v$

由(a)、(b)步驟所得之反覆應力比(SR)，及修正之 $(N_1)_{60}$ ，利用圖 2.7，Tokimatsu & Seed(1987)所建議之體積應變與反復應力比及 $(N_1)_{60}$ 之關係圖，計算各深度之體積應變量  $\varepsilon_v$  值。

d.重覆步驟(a)~(c)計算每一點 i 之  $\varepsilon_v$  值，再以下列公式將每一點 i 的沉陷量加以累計計算總沉陷量  $S_d$

$$S_d = \sum_{i=1}^N \varepsilon_v \cdot i \cdot \Delta h_i \dots\dots\dots (2.17)$$

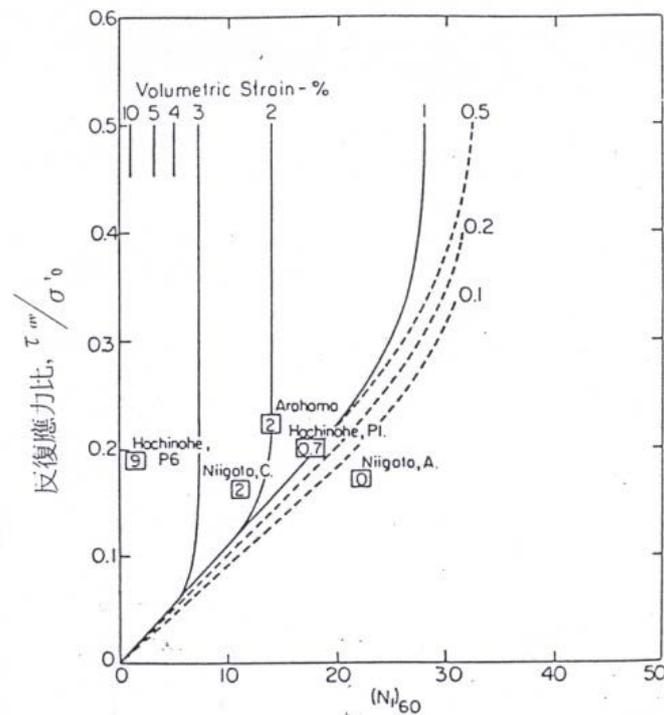


圖 2.7 體積應變與反復剪應力比及 N 值之相關經驗圖  
(Tokimatsu & Seed,1987)

## 2. Ishihara et al. (1991, 1996)震陷量評估法

因應用 Tokimatsu & Seed (1987)評估震陷量的方法需利用查圖才能得到體積應變量，較不方便，而利用 Ishihara et al.(1991, 1996)建議之方法，因紀雲曜(1997)已更進一步將該法程式化，如分析資料數量非常龐大時，可節省許多時間，其計算方式簡單介紹如下：

- a. 選擇標準貫入試驗(SPT-N)或荷式錐貫入試驗(CPT-qc) 評估抗液化潛能求得安全係數 FS。
- b. 計算砂土相對密度  $D_r(\%)$

以 SPT-N 值或 CPT-qc 值之經驗公式求得土層之相對密度

$$D_r = 16\sqrt{N_1} \quad \text{Ishihara, 1993}$$

$$D_r = -85 + 76\log(q_{c1}) \quad \text{Jamiokowski, 1985}$$

式中， $N_1$  為將覆土壓力修正至  $1\text{kg/cm}^2$  之 SPT-N 值

$q_{c1}$  為覆土壓力修正至  $1\text{kg/cm}^2$  之錐端阻抗( $\text{kg/cm}^2$ )

c. 計算迴歸係數  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$

$$b_1 = (-7.3825 - 2.1981D_r + 0.1124D_r^2 - 0.001D_r^3) \times 10^{-4}$$

$$b_2 = 0.5331 + 0.0042D_r - 1.34 \times 10^{-4} D_r^2 - 1.151 \times 10^{-6} D_r^3$$

$$b_3 = 2 - 12.25b_1 - 3.5b_2$$

d. 計算最大剪應變  $\gamma_{\max}$

$$\gamma_{\max} = 0.5 \cdot (0.5741F_L - b_2 - \sqrt{(b_2 - 0.5741F_L)^2 - 4b_1b_3}) / b_1 \leq 8\%$$

e. 計算體積應變量  $\Delta\varepsilon_v$

$$\Delta\varepsilon_v = (-1.131 \log D_r + 2.347) \cdot \gamma_{\max}$$

f. 重複步驟 a~e，計算每一點 i 的  $\Delta\varepsilon_v$ ，再將每一點 i 的沉陷量累加，可求得液化後之沉陷量  $\Delta s$ 。

$$\Delta s = \sum_{i=1}^n \Delta h_i \cdot \varepsilon_{v,i} \dots\dots\dots (2.18)$$

而評估土壤抗液化安全係數 FS 的方法眾多，大致可分為理論或數值分析方法及採用經驗或半經驗公式之簡易分析法。由於理論或數值分析法通常需採用電腦程式進行複雜的運算，故於工程界較少使用。

常用之簡易分析法其計算工作可分為兩大部份，第一部份是利用地震時最大地表加速度 PGA (peak ground acceleration)，以半經驗之簡易公式計算地震時土層所受之反覆剪應力比 (cyclic stress ratio)，第二部份則是估計土層之抗液化強度 (以反覆剪應力比表示)，此部份之抗液化可採取現地不擾動土樣於室內進行動態強度試驗求得，稱為室內試驗法；或是採用現地試驗參數，如 SPT-N 值、CPT- $q_c$  值或震測剪力波 Vs 等，然後再利用地震液化案例反求之經驗曲線求得，稱之為現地經驗法。

上述兩種方法各有優缺點，而目前應用最廣泛之現地試驗評估土壤抗液化潛能分析法有使用標準貫入試驗 (SPT-N 值)及荷式錐貫入試驗(CPT-qc 值)法，其中使用 SPT-N 值評估法約有五種，分別為 Seed (NCEER, 1997)、Tokimatsu and Yoshimi (1983)、Iwasaki (1985)、日本道路橋簡易經驗法(1996)及最近發表之 Lai et al.之液化分析模式法。而荷式錐貫入試驗(CPT-qc 值)液化評估法有三種，為 Shibata and Teparaksa (1988)，Roberson and Wride (1998)與 Olson (1998)，以上之各種方法一般文獻中皆有詳細記載。

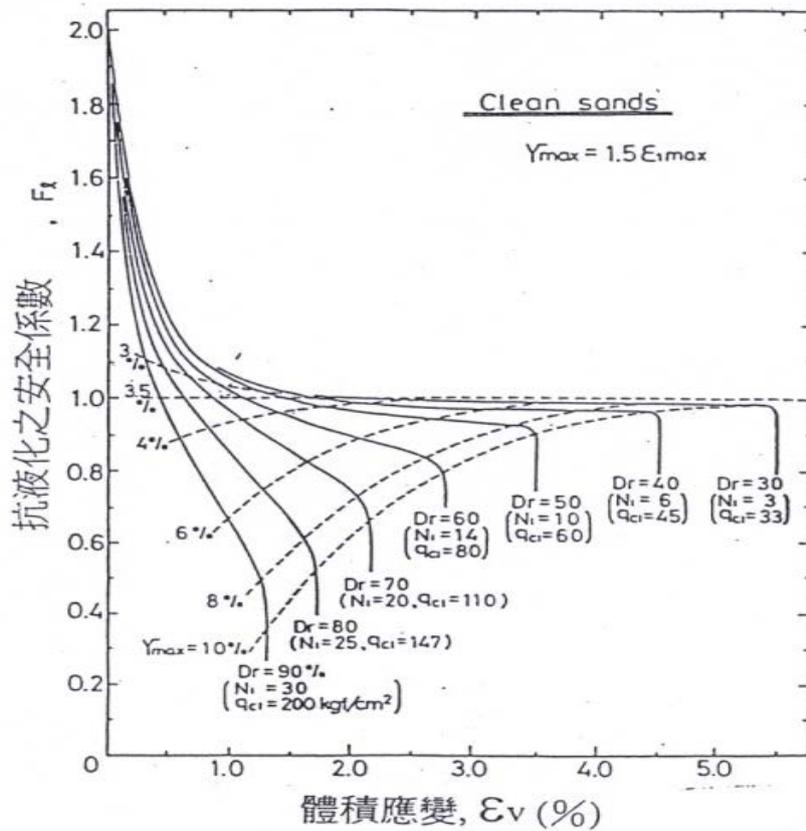


圖 2.8 N 值,qc 值,抗液化安全係數及體積應變之相關經驗圖  
(Ishihara et al., 1991, 1996)

## 2.4 地層下陷模擬預測

本節地層下陷之模擬預測，是根據分層之水位資料及地層之土壤分類，來求地層之沉陷歷線，並與定期量測之沉陷資料比較，以了解地層下陷之力學行為。賴聖耀、謝明志（1995）以 Biot（1941）壓密理論為基礎，發展階段性荷重模式（Step-loading model）之地層下陷預測模式，唯該文僅考慮水位下降過程，土壤有效應力增加之加壓變形，而忽略了水位上升及再下降過程中之解壓及再壓所產生之微量變形。賴聖耀（1998）以大地工程界所熟悉之 Terzaghi（1943）壓密理論為基礎，且考慮水位下降、上升、再下降之加壓、解壓、再壓等變形特性，發展另一個階段性荷重模式。茲將賴聖耀（1998）之階段性荷重模式<sup>[30]</sup>，簡述如下：

$$S(t) = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{8H_i}{\pi^2} \sum_{j=1}^k \left\{ C_{\varepsilon ij} \times \log \frac{P'_{ij} \pm \gamma_w h_{ij}}{P'_{ij}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \times \left[ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{(2n+1)\pi}{2H_{di}} \right)^2 \times C_{vi} \times (t - t_{ij}) \right] \right] \right\} u(t - t_{ij}) \right\} \dots \dots \dots (2-10)$$

式中，S(t)：第 t 時間之地層下陷量。

m：土層數。

H<sub>i</sub>：第 i 層土壤厚度。

k：水位變化階段數。

C<sub>εij</sub>：第 i 層土壤在第 j 個水位變化階段之土壤壓縮、回彈或再壓縮係數。

水位下降時：C<sub>ε</sub> = C<sub>cε</sub> = C<sub>c</sub> / (1 + e<sub>0</sub>)，C<sub>cε</sub> 為壓縮係數、C<sub>c</sub> 為壓縮指數、e<sub>0</sub> 為初始孔隙比。

水位上升或水位再下降時：C<sub>ε</sub> = C<sub>rε</sub> = C<sub>r</sub> / (1 + e<sub>0</sub>)，C<sub>rε</sub> 為回彈係數，C<sub>r</sub> 為回彈指數。

P'<sub>ij</sub>：第 i 層土壤在第 j 個水位變化階段之有效應力。

$\gamma_w$ ：水之單位重。

$h_{ij}$ ：第  $i$  層土壤在第  $j$  個水位變化階段之水位變化量。水位下降為正，水位上升為負。

$H_{di}$ ：第  $i$  層土壤之排水路徑長度，單向排水， $H_{di} = H_i$ ，雙向排水  $H_{di} = H_i / 2$

$C_{vi}$ ：第  $i$  層土壤之壓密係數。

$t_{ij}$ ：第  $i$  層土壤在第  $j$  個水位變化階段之起始時間。

$u(t - t_{ij})$ ：為 Heaviside Step 函數，當  $t < t_{ij}$  時， $u(t - t_{ij}) = 0$ ，當  $t \geq t_{ij}$  時， $u(t - t_{ij}) = 1$ 。

賴聖耀（1998）之階段性荷重模式，經由布袋港沉陷模擬分析結果，如圖 2.9 所示，並與分層地層下陷之觀測資料比較，比較結果極為相近。

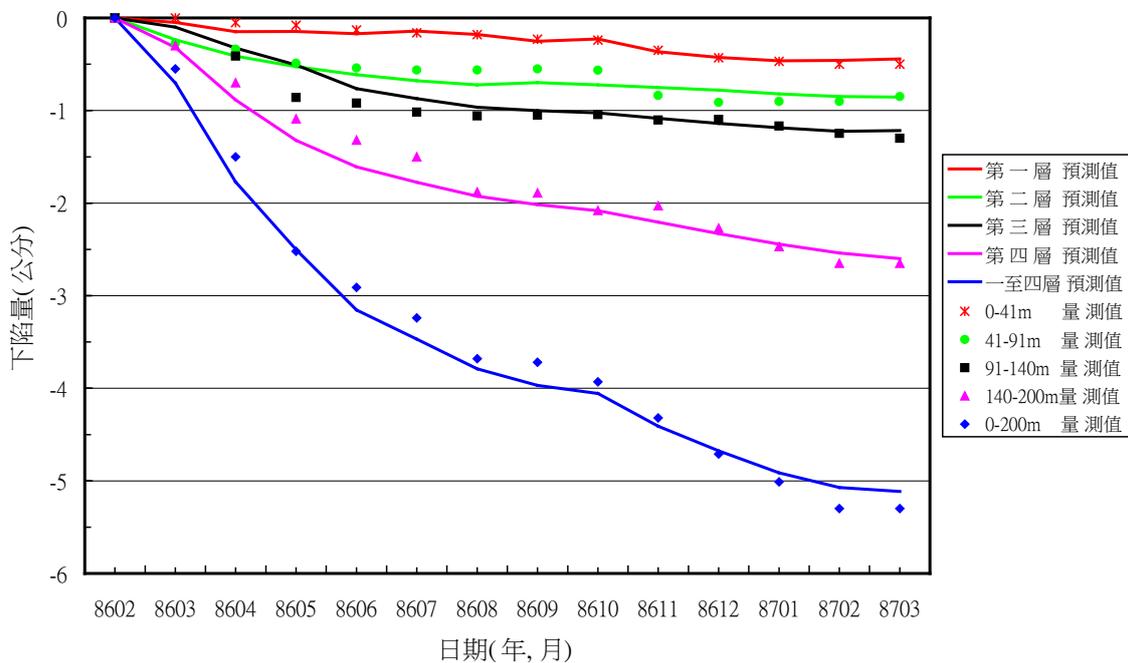


圖 2.9 布袋港沉陷模擬分析與分層下陷觀測資料之比較

## 第三章 西南沿海地區地質與下陷

### 3.1 西南沿海地質資料

地質資料有助於研判各港區的地質年代，地質組成情況地層變化情形及土層大地工程性質，不穩定地層及斷層分布等。本章主要蒐集臺灣西南沿海地區，包含臺中、布袋、安平與大鵬灣等港區與雲林下陷量嚴重地區進行蒐集港區地形、地質與地層下陷資料，最後將資料彙整建置成資料庫，以提供碼頭結構物設計及港區工程設施維護之參考。

臺灣西南沿海地質屬濱海平原，其中西南沿海各港區之地質大多為沖積砂土層，新開發之海埔新生地亦多為細砂與沉泥質細砂所組成，分別就雲林地區與各港區之地質及土層分布資料簡述如下：

### 3.2 雲林地區

雲林地區位於臺灣西部海岸平原之中段，其平原帶為濁水溪沖積而成，又稱為濁水溪平原，以行政區域劃分包括彰化縣和雲林縣之平原部份。本區範圍北起濁水溪，南至北港溪，東起八卦山台地西麓和斗六丘陵以西，西止於臺灣海峽。本區主要為平原地帶，在平原東緣緊鄰山麓丘陵。

#### 3.2.1 地質特性

地質上，本分區的地面地質大部分為現代沖積層<sup>[28]</sup>(圖 3.1 所示)，東側周緣之丘陵地出露有頭嵙山層及台地堆積層。沖積扇地層皆屬於全新世未固結的礫石、砂、粉砂及黏土等所組成，厚度超過 200m。砂礫質沉積物為河道狀分布，由扇頂向西呈輻射展開；扇央及扇尾部分則顆粒較細，含泥質亦較多，其地層多半為細砂與黏土交錯層組成，一般表層覆土在 2 至 4m 之間，平均約 3m (陳文福、江崇榮，1999；工研院，2003)<sup>[29]</sup>。

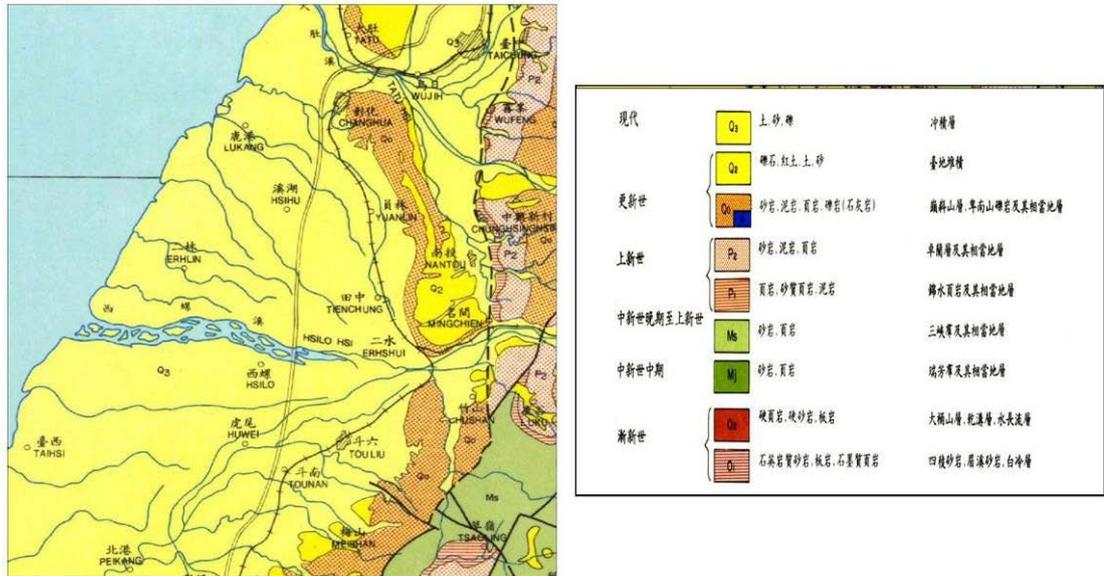


圖3.1 彰雲地區之區域地質圖（中央地調所，2000）

### 3.2.2 水文地質

雲林地區可分為兩個地下水文系統（楊萬全，2000），即濁水溪沖積扇地下水系統及北港溪系統。其中以濁水溪沖積扇範圍最大，總面積約 1,800 平方公里，為本省最大沖積扇，濁水溪為臺灣第一大河，在八卦山南端流出山谷後，河谷突然變寬，流速驟減，搬運之石、砂及泥依次沉積下來，谷口扇頂以礫石及砂為主，扇末端則以細砂及泥為主。濁水溪沖積扇上游有廣大之流域面積，當豐沛之河水流到扇頂區，河道的滲漏和滲入流形成本區地下水之補注來源；除此之外因本沖積層地層之孔隙發達，扇面上散布有放射狀之分支流如濁水溪、西螺溪、虎尾溪及北港溪等，亦可使這些地表水與地下水互相暢流，因此本區地下水極其豐富且水位極淺。圖 3.2 為濁水溪沖積扇水文地質概念模型（賴典章等，2003）<sup>[29]</sup>，圖中顯示主要地下水補注區位於東側之扇頂，以厚層礫石為主，分層並不明顯，沒有主要的阻水層（泥層），地下水上下流通並無限制；西側扇頂以外部份，深度 330 公尺範圍內，由上而下有四個含水層及四個阻水層。

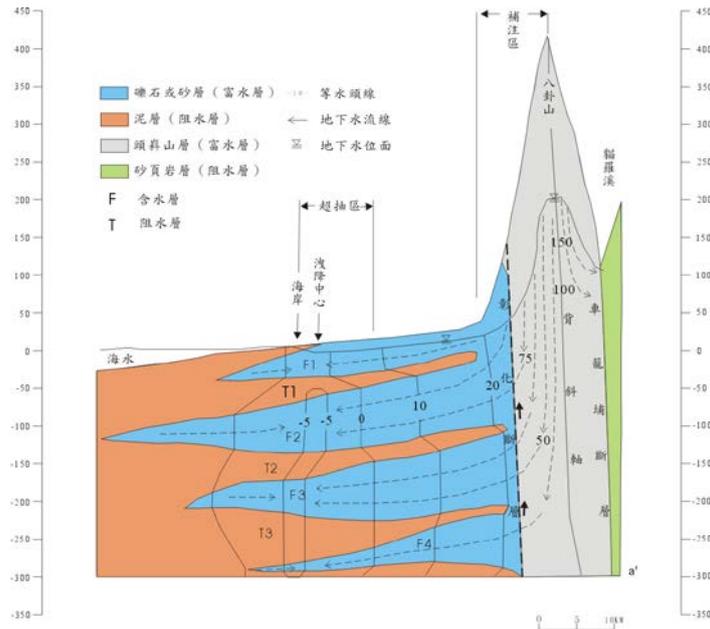


圖3.2 濁水溪沖積扇水文地質概念模型（賴典章等，2003）

### 3.3 台 78 線與高鐵交會地區

本年度主要以蒐集雲林地區地層下陷較嚴重地區的地質資料為主，為了解該交會處的土層狀況、地下水壓分布與分層地層下陷情形，交通部公路總局委託萬鼎工程服務公司 2013 年於該地區分別進行地質鑽探<sup>[16]</sup>，並依土層斷面分布情況，於各鑽探孔位分別進行設置地下水壓與分層地層下陷監測井，交會處之地層鑽探孔位平面如圖 3.3 所示，孔位的安排依高鐵橋墩樁基與台 78 線沿線呈矩形面積分布，其中 300m 與 70m 皆為 4 孔，50m 深 1 孔，共計 9 孔。

依鑽探資料報告顯示，以 STA-1 號孔位(300m)之土層為例分類，大致以灰色粉質粘土、粉質細砂、粉質中細砂居多。粉質粘土大約分布於深度 16.7m~19.7m、25m~44.7m、115m~125m、166m~177m、198m~206m、218m~222m、248.6m~255.8m 與 281.9~296.6m 為主。灰色砂質粉土分布於地表~3.9m 與 177.4m~189.5m。

各鑽探孔之斷面圖如圖 3.4、圖 3.5 與圖 3.6 所示。STA-1 孔位之物理特性如表 3-1 所示。

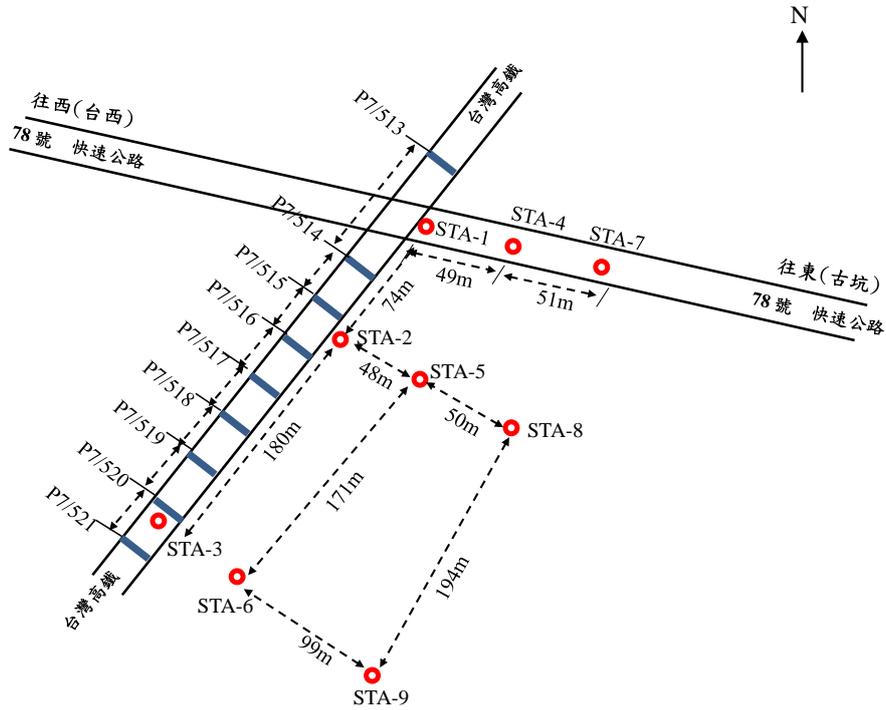


圖 3.3 台 78 線與高鐵交會處鑽探孔位平面圖(公路總局，2013)

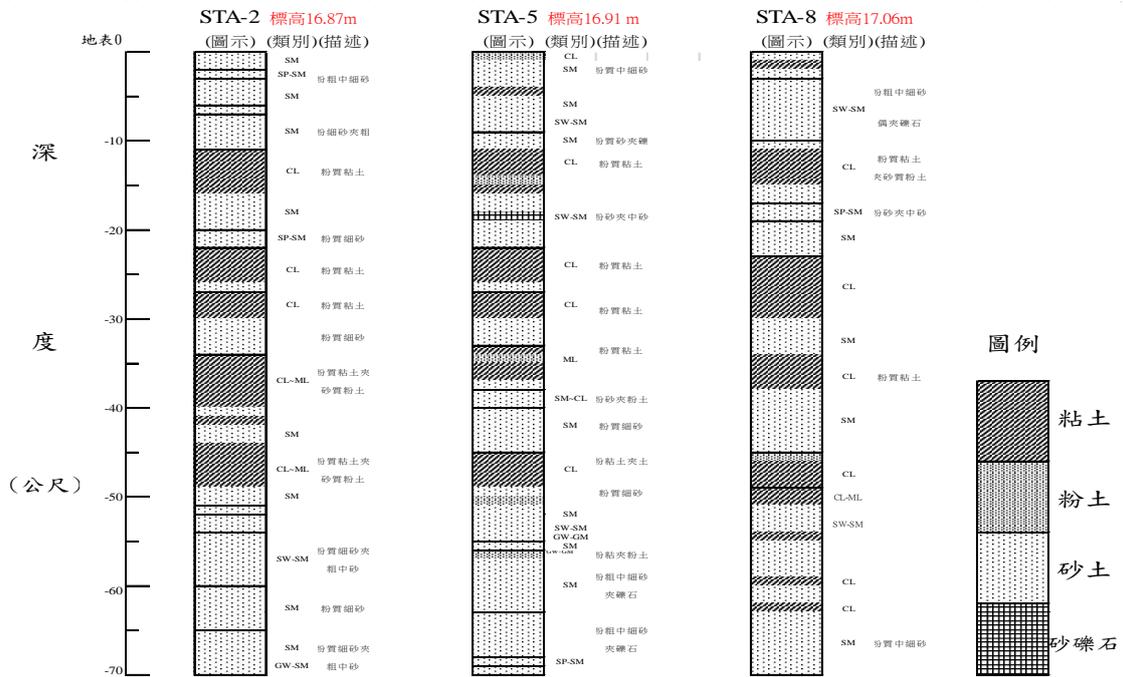


圖 3.4 台 78 線與高鐵交會處地層柱狀圖(STA2-5-8)



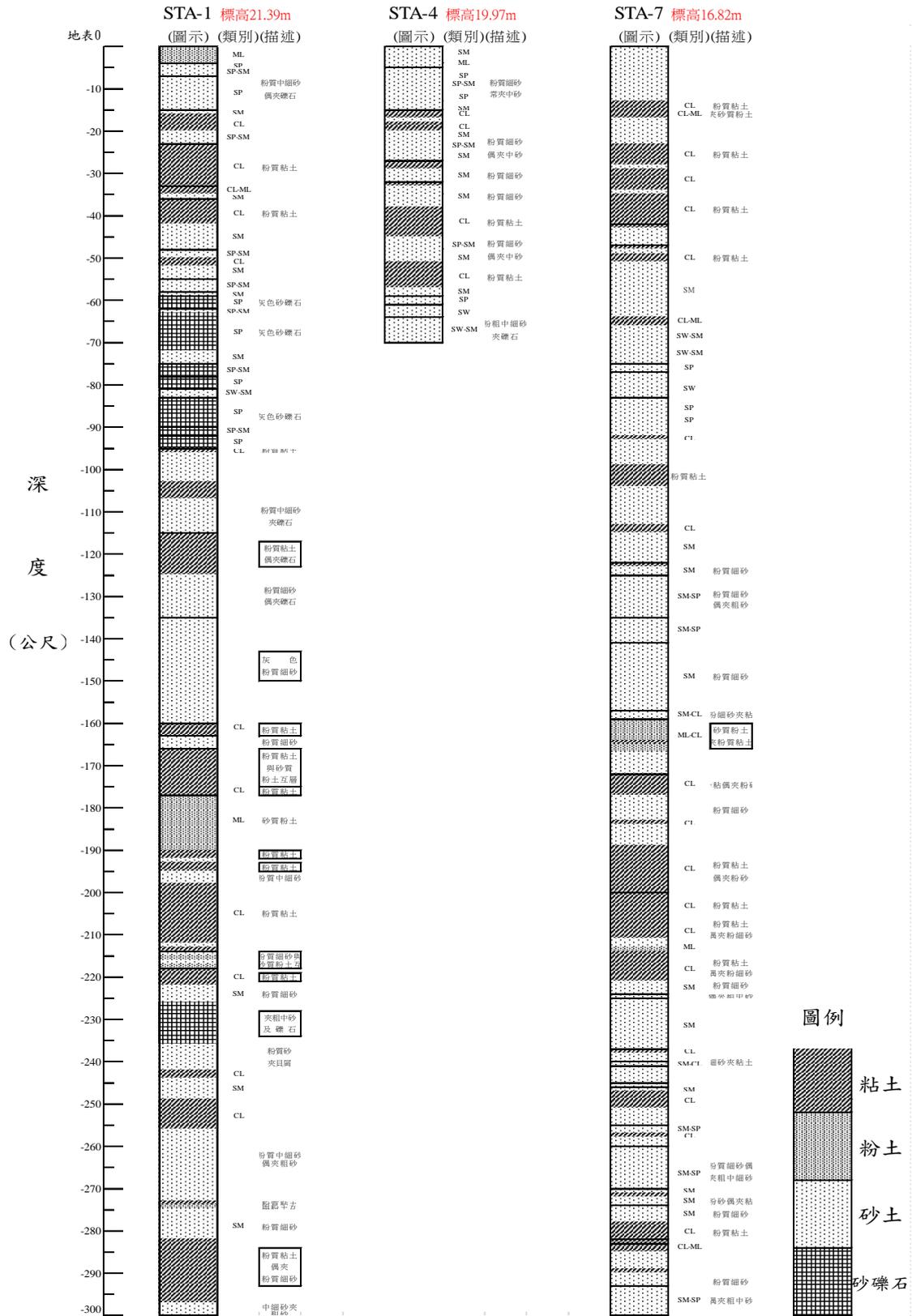


圖 3.6 台 78 線與高鐵交會處地層柱狀圖(STA1-4-7)

表 3-1 台 78 與高鐵交會處鑽探土層物理特性

台78線與高鐵交會處地層鑽探土壤之物理特性(孔號：STA-1)

試驗編號	深度(m)	N值	比重	孔隙比	統體單位重 (t/m <sup>3</sup> )	含水量 (%)	液性限度(%) (LL)	塑性限度(%) (PL)	塑性指數(%) (PI)	粒 徑 尺 寸(%)				土壤分類
										礫石	砂	粉土	粘土	
S-1-2	1.05-1.50	38	2.67	0.42	2.15	13.7	-	-	-	1	44	48	7	ML
S-2-2	2.55-3.00	20	2.66	0.59	1.97	18.4	-	-	-	18	39	35	8	ML
S-3-2	4.05-4.50	11	2.61	0.85	1.69	20.1	-	-	-	4	94	2	0	SP
S-4-2	5.55-6.00	14	2.62	0.98	1.7	28.6	-	-	-	0	95	5	0	SP-SM
S-5-2	7.05-7.50	14	2.61	1.00	1.61	23.2	-	-	-	0	99	1	0	SP
S-6-2	8.55-9.00	10	2.62	0.82	1.77	23	-	-	-	4	93	3	0	SP
S-7-2	10.05-10.50	12	2.61	1.02	1.61	25.2	-	-	-	0	97	3	0	SP
S-8-2	11.55-12.00	43	2.62	0.84	1.69	18.8	-	-	-	0	96	4	0	SP
S-9-2	13.05-13.50	26	2.66	0.56	2.04	20.1	-	-	-	0	77	18	5	SM
S-10-2	14.55-15.00	24	2.64	0.58	2.00	20.3	-	-	-	0	87	11	2	SM
S-11-2	16.05-16.50	21	2.71	0.75	1.94	25.4	26.6	19.5	7.1	0	8	37	55	CL
S-12-2	17.55-18.00	20	2.72	0.75	1.96	26.2	28.7	20.6	8.1	0	47	42	11	CL
S-13-2	19.05-19.50	19	2.65	0.64	2.00	23.5	35.9	20.4	15.5	0	84	11	5	SM
S-14-2	20.55-21.00	25	2.62	0.65	1.95	22.6	-	-	-	0	93	6	1	SP-SM
S-15-2	22.05-22.50	23	2.64	0.77	1.87	24.8	-	-	-	0	86	10	4	SM
S-16-2	23.55-24.00	14	2.71	0.65	2.03	23.4	26.5	19.3	7.2	0	19	40	41	CL
S-17-2	25.05-25.50	26	2.71	0.78	1.90	25.2	27.5	20.4	7.1	0	44	39	17	CL
S-18-2	26.55-27.00	27	2.72	0.82	1.89	26.3	27.2	16.8	10.4	0	29	50	21	CL
S-19-2	28.05-28.50	13	2.72	0.80	1.89	25.5	28.2	19.2	9	0	25	40	35	CL
S-20-2	29.55-30.00	12	2.73	0.83	1.92	28.6	33.9	20.9	13	0	3	37	60	CL
S-21-2	31.05-31.50	13	2.73	0.87	1.90	29.5	36.7	20.7	16	0	1	43	56	CL
S-22-2	32.55-33.00	14	2.73	0.95	1.85	31.8	35.5	20.7	14.8	0	1	44	55	CL
S-23-2	34.05-34.50	13	2.71	0.70	1.97	23.2	26.5	19.5	7	0	46	45	9	CL-ML
S-24-2	35.55-36.00	31	2.73	0.397	1.82	32	34.3	19.9	14.4	0	9	39	52	CL
S-25-2	37.05-37.50	26	2.73	0.98	1.82	32.1	35.3	21.4	13.9	0	3	41	56	CL
S-26-2	38.55-39.00	15	2.72	0.91	1.89	32.5	33.6	21.3	12.3	0	6	42	52	CL
S-27-2	40.05-40.50	13	2.73	1.03	1.80	33.9	37.1	21.1	16.0	0	1	40	59	CL
S-28-2	41.55-42.00	14	2.73	0.94	1.87	32.6	37.9	20.8	17.1	0	0	48	52	CL
S-29-2	43.05-43.50	14	2.65	0.70	1.93	23.7	-	-	-	0	81	14	5	SM
S-30-2	44.55-45.00	19	2.64	0.49	2.07	16.7	-	-	-	0	85	11	4	SM
S-31-2	46.05-46.50	23	2.62	0.66	1.95	23.7	-	-	-	0	91	7	2	SW-SM
S-32-2	47.55-48.00	29	2.62	0.59	1.99	21.0	-	-	-	0	91	8	1	SP-SM
S-33-2	49.05-49.50	29	2.61	0.75	1.86	24.2	-	-	-	0	93	7	0	SP-SM
S-34-2	50.55-51.00	34	2.71	0.67	2.00	23.5	26.4	19.3	7.1	0	26	46	28	CL
S-35-2	52.05-52.50	34	2.67	0.71	1.94	24.4	-	-	-	0	75	22	3	SM
S-362	53.55-54.00	37	2.62	0.54	2.04	20.2	-	-	-	0	87	9	4	SM
S-37-2	55.05-55.50	42	2.61	0.55	2.03	20.7	-	-	-	0	88	10	2	SP-SM
S-38-2	56.55-57.00	37	2.63	0.65	1.94	22.1	-	-	-	0	90	9	1	SP-SM
S-39-2	58.05-58.50	42	2.64	0.71	1.90	22.5	-	-	-	0	87	9	4	SM
S-40-2	59.55-60.00	40	2.61	0.80	1.81	24.9	-	-	-	0	98	2	0	SP
S-41-2	61.05-61.50	46	2.61	0.61	1.89	16.5	-	-	-	6	92	2	0	SP
S-42-2	62.55-63.00	47	2.62	0.71	1.86	21.7	-	-	-	6	89	5	0	SP-SM
S-43-2	64.05-64.50	42	2.62	0.67	1.92	22.4	-	-	-	4	92	4	0	SP
S-44-2	65.55-66.00	46	2.62	0.75	1.83	22.1	-	-	-	0	98	2	0	SP
S-45-2	67.05-67.50	48	2.62	0.73	1.85	22.3	-	-	-	0	96	4	0	SP
S-46-2	68.55-69.00	52	2.61	0.70	1.90	23.6	-	-	-	0	97	3	0	SP
S-47-2	70.05-70.50	54	2.61	0.79	1.87	28.1	-	-	-	0	98	2	0	SP
S-48-2	73.05-73.50	56	2.67	0.66	1.98	22.7	-	-	-	0	60	35	5	SM
S-49-2	76.05-76.50	43	2.62	0.66	1.92	21.6	-	-	-	4	92	4	0	SP-SM
S-50-2	79.05-79.50	60	2.61	0.75	1.83	22.2	-	-	-	6	93	1	0	SP
S-51-2	82.05-82.50	59	2.63	0.53	2.04	18.7	-	-	-	3	85	11	1	SW-SM
S-52-2	85.05-85.50	49	2.62	0.63	1.95	21.2	-	-	-	4	94	2	0	SP
S-53-2	88.05-88.50	52	2.62	0.65	1.94	21.8	-	-	-	0	97	3	0	SP
S-54-2	91.05-91.50	54	2.61	0.60	1.97	20.3	-	-	-	0	94	6	0	SP-SM
S-55-2	94.05-94.50	66	2.61	0.78	1.82	24.3	-	-	-	0	99	1	0	SP
S-56-2	97.05-97.50	71	2.61	0.80	1.83	26.2	-	-	-	0	98	2	0	SP
S-57-2	100.05-100.50	83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## 3.4 港灣地區

### 3.4.1 臺中港

臺中港位於臺灣西南岸之中部，即位於臺中沿海平原之南邊，距北部的基隆港與南部的高雄港航程各約 110 海浬，距大陸福建省晉江約為 80 海浬，港區面積共約 4000 公頃。

#### 1. 地質特性

臺中港區原地形為由大甲溪和大肚溪沖積形成之西部海岸平原，基地地盤構造屬臺灣地三紀地槽盆地中之臺西-臺中構造盆地，地表為現代沖積層所覆蓋<sup>[17]</sup>。

臺西-臺中構造盆地於地三紀早期原為兩個個別獨立之構造盆地其間為北港高地所分離，漸新世晚期由於北港高地下陷，使臺中、臺西兩構造盆地合而為一，此後由於間歇性之海進、海退現象持續至上新世晚期，而使臺西-臺中構造盆地形成數個含煤相及海相互層之沉積，上新世晚期之造山運動，一直延續到現在為臺灣最主要之造山運動，屬間歇性之造山運動並伴隨間歇性之海進及海退現象，致使本構造盆地中心軸由東向西漸移，而形成本構造盆地上部之第四紀沉積（更新世及全新世），由於海侵及海退現象，致使平均海水面因時而異，海侵時期平均海水面曾高於目前平均海水面約 180m（大南灣海侵期），而 15,000 年前之海退期平均海水面地於目前平均海水面約 140m，顯示本基地之地層所經歷之沉積環境及應力過程極為複雜。

本基地近地表之地層為由河川沖積及海洋沖積雙重作用所形成之巨厚現代沖積層所覆蓋，其下依次為上新世及更新世未固結之頭嵙山層，上新世之卓蘭層及錦水頁岩層等，現代沖積層主要由粘土、沉泥、砂和礫石所組成，厚度甚厚，由鑽探結果顯示，地表下 100 至 130m 內大多為沉泥質砂層間夾沉泥或粘土薄層，130m 以下才有礫石出現。

## 2.港區土層分布

臺中港區地表地層為由河川沖積及海洋沖積雙重作用所形成之巨厚現代沖積層所覆蓋，主要為沉泥質砂、砂質沉泥、粘土質沉泥及沉泥質粘土等互相交雜而成。有關於沉積土層之厚度，根據臺中港務分公司在臺中港區內進行的鑽探資料顯示，鑽探深度至 60m 深時仍為沉積砂土層，而根據台灣電力公司在臺中火力電廠的地質調查顯示<sup>[17]</sup>，鑽探深度在 150m 時，僅在深度 115m 處發現 0.6m 厚之卵礫石層，在深度 147m 至 150m 間，偶含礫石礫石粒徑在 6cm 以下，故現代沖積層為厚層砂土層，其詳細厚度未知，惟根據鑽探資料可確定沖積厚度應在 150m 以上。

根據本所港研中心蒐集之鑽探資料，臺中港地區之土層層次變化在深 150m 範圍內，大致可分為六個層次分別說明如下：

### (1)細中砂、沉泥質砂(SP、SM)：

自地表至高程-10m 之間為灰色細中砂或沉泥質細砂，尤其靠近地表處大都屬不良級配中細砂，平均厚度約為 3m，而自地表 3m 以下至高程-10m 間為沉泥質細砂偶夾砂質沉泥或粘土質沉泥薄層，惟數量不多。

根據現地標準貫入試驗結果，本層次標準貫入試驗 N 值變化甚大，在 5 至 30 之間，屬疏鬆至中等緊密程度，土壤平均含水量 23% 至 30%，土壤單位重為 1.90 至 2.0t/m<sup>3</sup> 間。

### (2)沉泥質細砂夾粘土質沉泥或沉泥質粘土薄層(SM、ML、CL)：

本層次呈灰色，其分布範圍在高程-10m 至-22m 之間為沉泥質細砂含粘土質沉泥或沉泥質粘土薄層，薄層厚約 2 公尺，大約分布在高程-12 公尺至-16m 間此層並非均勻分布，大致斷斷續續出現，從一號碼頭到台中火力電廠均有發現。

根據現地標準貫入試驗結果，本層次標準貫入試驗 N 值變化甚大，在 15 至 40 之間，屬疏鬆至中等緊密程度，土壤單位重及

含水量平均約為  $1.91 \pm 0.05 \text{ t/m}^3$  及  $28 \pm 3\%$ ，沉泥質粘土薄層 N 值約在 7 至 15 間，土壤單位重  $1.90 \pm 0.07 \text{ t/m}^3$ ，自然含水量及液性限度分別為  $28 \pm 5\%$  及  $30 \pm 4\%$ 。

### (3) 沉泥質粘土及沉泥質細砂層 (CL、SM)

高程 -22m 至 -40m 之間為灰色沉泥質粘土層及沉泥質細砂層，在臺中港現有碼頭區此兩層次交互出現，平均厚度約在 2 至 5m 之間，而在火力發電廠區則幾乎全為厚層沉泥質粘土，僅在厚層粘土間夾一層厚 1 至 3m 之沉泥細砂次層。

本層次砂性土壤標準貫入試驗 N 值在 20 至 45 間屬中等緊密至緊密程度，粘性土壤 N 值在 6 至 32 間中等堅實至極堅硬稠度，土壤一般物理性質試驗結果，砂性土壤，土壤單位重  $1.97 \pm 0.05 \text{ t/m}^3$ ，自然含水量  $25 \pm 5\%$ 。粘性土壤，土壤單位重  $1.91 \pm 0.04 \text{ t/m}^3$ ，自然含水量  $29 \pm 4\%$ ，液性限度  $29 \pm 4\%$ 。

### (4) 沉泥質砂層含砂質沉泥或沉泥質粘土薄層 (SM、CL)

本層次呈灰色分布高程約在 -40m 至 -80m 間，以沉泥質砂土層為主，夾有許多沉泥質粘土或粘土質沉泥薄層，薄層厚度約 1m 至 2m，本層次特色為砂層標準貫入試驗 N 值平均在 50 至 80m 間，屬極緊密程度，粘性土壤薄層 N 值，則顯著降低，約在 8 至 30 之間。

### (5) 沉泥質粘土 (CL)

高程 -80m 至 -100m 之間為灰色沉泥質粘土層，此層以厚層沉泥質粘土為主，間夾沉泥質細砂薄層，偶含有機質，標準貫入試驗 N 值變化範圍亦甚大在 19 至 100 間，屬極堅硬稠度，平均自然含水量及土壤單位重分別為  $27 \pm 4\%$  及  $1.98 \pm 0.03 \text{ t/m}^3$ 。

### (6) 沉泥質細砂夾沉泥質粘土薄層 (SM、CL)

本層次大致分布於高程 -100m 至 -150m 之間，呈灰色，並於高

程-150m 至-105.6m 及-137m 至-140m 間偶夾卵礫石，最大粒徑約在 4 至 6cm 之間，本層次標準貫入試驗 N 值，大部份均大於 100，屬極緊密程度之砂土層，其自然含水量及土壤單為重約為  $19\pm 3\%$  及  $2.03\pm 0.03 \text{ t/m}^3$ 。

本層次在鑽探過程發現含有大量沉泥質粘土薄層，其厚度約在 1m 至 6m 之間，標準貫入試驗 N 值在 30 至 100 以上，屬極堅硬稠度，土壤自然含水量及單為重平均約為  $26\pm 3\%$  及  $1.96\pm 0.03 \text{ t/m}^3$ 。

a 總結臺中港區地層分布以沉泥質砂土層為主，間夾有許多沉泥質砂土薄層或厚層，但常不延續而間斷出現，頗為複雜，鑽探資料顯示標準貫入試驗 N 值，在同一深度中分布甚為散亂，可見本區土層有交錯沉積之現象，一般而言，地震引致土層液化或沉陷之土層深度為地表至地下-20m，即臺中港區第一、二層較易受地震而引致壓縮或壓密沉陷。

### 3.4.2 布袋港

#### 1. 位置與地形

布袋港位於本省西南部嘉義縣境內，布袋鎮以西濱海地區，面臨台灣海峽，北及西北側海域有統仙洲、箔子寮汕及外傘頂洲所構成之峽長沙洲，形成天然屏障，在兩沙洲軸線以東之內灘地，除環繞周邊之潮溝兩側低窪地被用於牡蠣養殖外，中央部較高灘地已開發完成海埔新生地約 126 公頃(如圖 3.7)。

本區海岸線向陸地凹入形成灣澳灘地，由於海岸分別有北港溪、朴子溪、八掌溪及急水溪等四溪在附近海入海裡以及外傘頂洲所帶下之沙量，將會間接對布袋港海岸地形發生影響(如圖 3.8)。

#### 2. 港區地質

布袋港開發計劃包括南北向之海堤、防波堤及散貨、雜貨、客貨、砂石貨等各項用途碼頭 20 席外，尚有新生地、防風林、堆貨場等港

埠設施。而整個區域地層屬海岸沖積土層，根據本中心搜集布袋港 10 餘孔海上鑽探資料顯示，在深度-30m 範圍內，綜合其剖面土層(如圖 3.9、圖 3.10、圖 3.11)<sup>[30]</sup>簡述如下：

(1)沉泥質細砂(SM)

本層次大致分布於 EL.0m ~ EL.-6m 之間，土層分佈以沉泥質細砂(SM)為主，標準貫入試驗 N 值為 6~14 間之疏鬆土層，而深度-0.6m~-3m 之間偶夾有 N 值為 2-9 之軟弱沉泥層(ML)，以內港之第一期海埔新生地較明顯。

(2)粘土質沉泥(ML)

本層次分布於 EL.-6m ~ EL.-27m 之間，為一層 10~20 米厚軟弱至堅硬之粘土質沉泥層(ML)，N 值約在 4~20 之間，但於 -13.0M~-21.0m 處有一層約 3~5m 厚之中等緊密沉泥質細砂(SM)，N 值在 10~30 之間，分佈以南海堤較厚並逐漸向外海之航道口尖滅消失。

(3)沉泥質細砂(SM)

本層次分布於 EL.-27m ~ EL.-30m 之間，由地層柱狀圖得知深度-27.0m 至-30.0m 處為中等緊密到緊密之沉泥質細砂(SM)土層，N 值約在 20~35 間，土層大致分佈在南海堤及外海處。



圖 3.7 布袋港地理位置

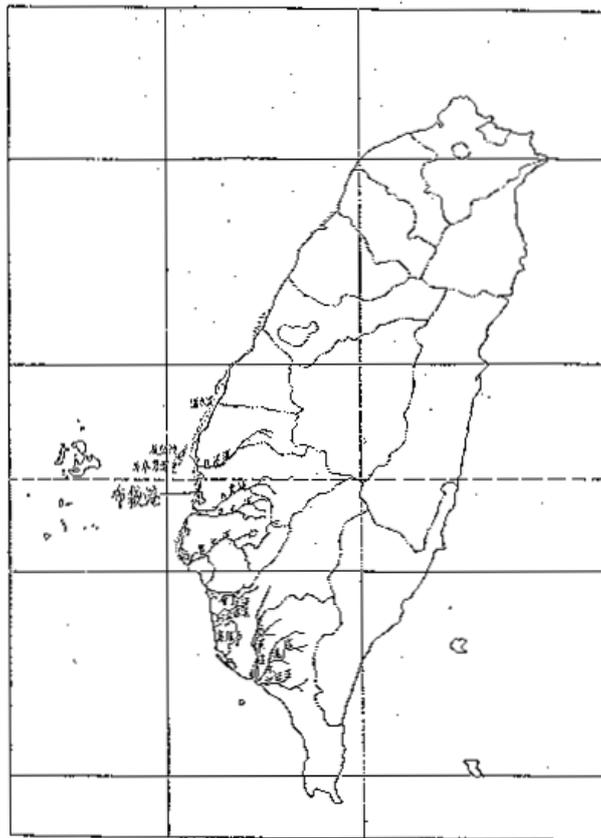


圖 3.8 臺灣西海岸地形圖

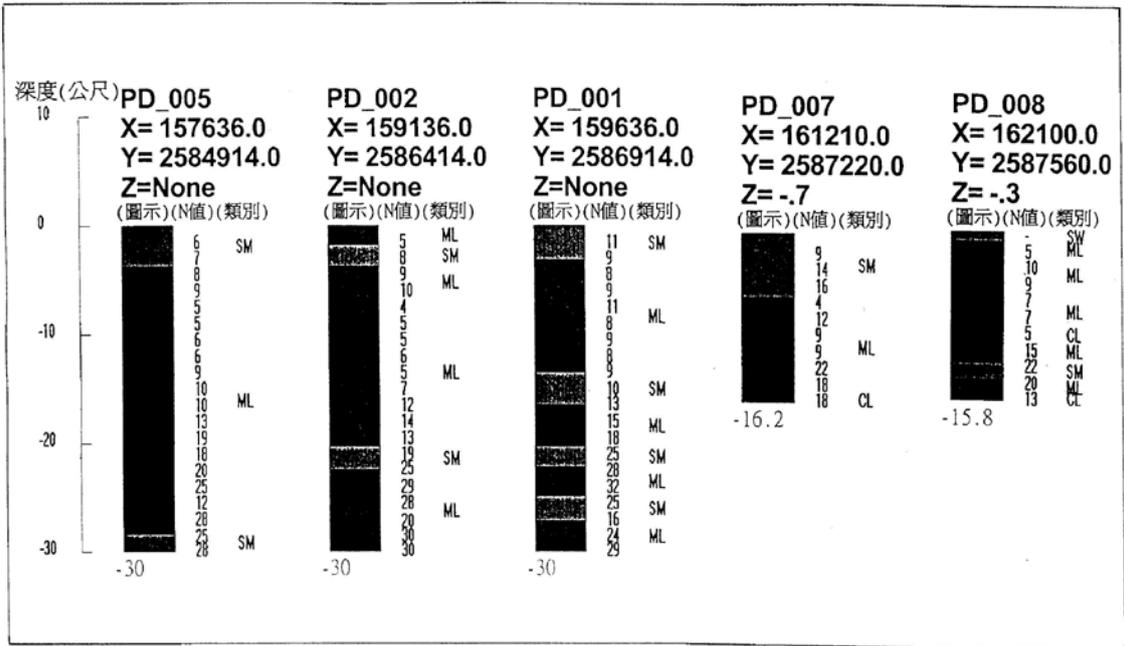


圖 3.9 布袋港區地層柱狀圖

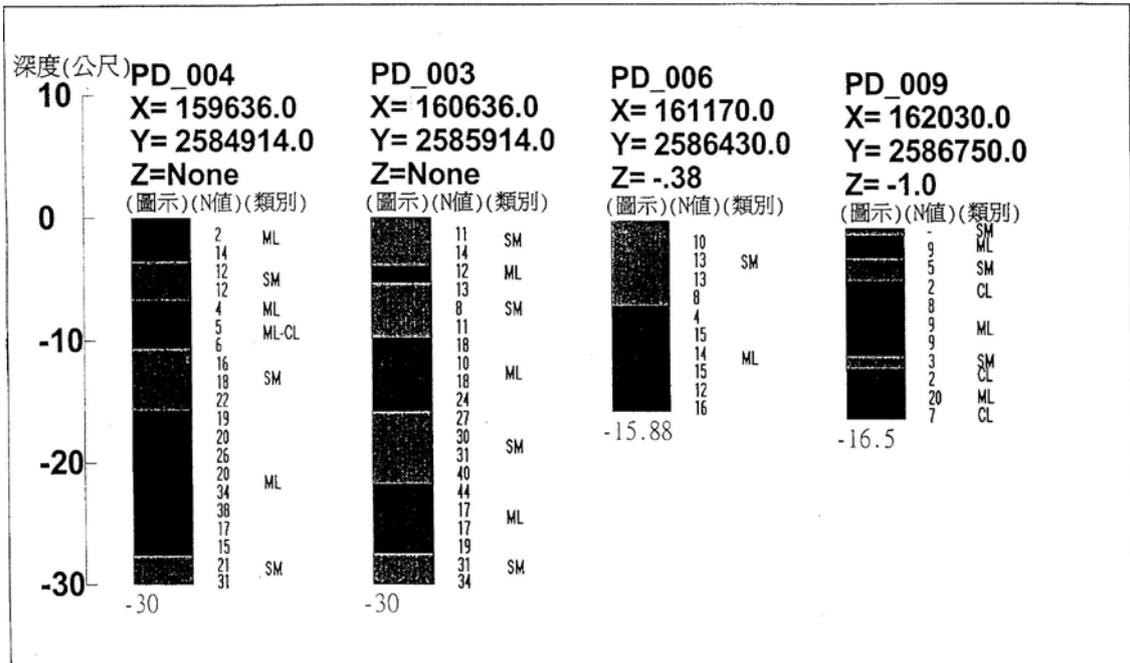


圖 3.10 布袋港區地層柱狀圖

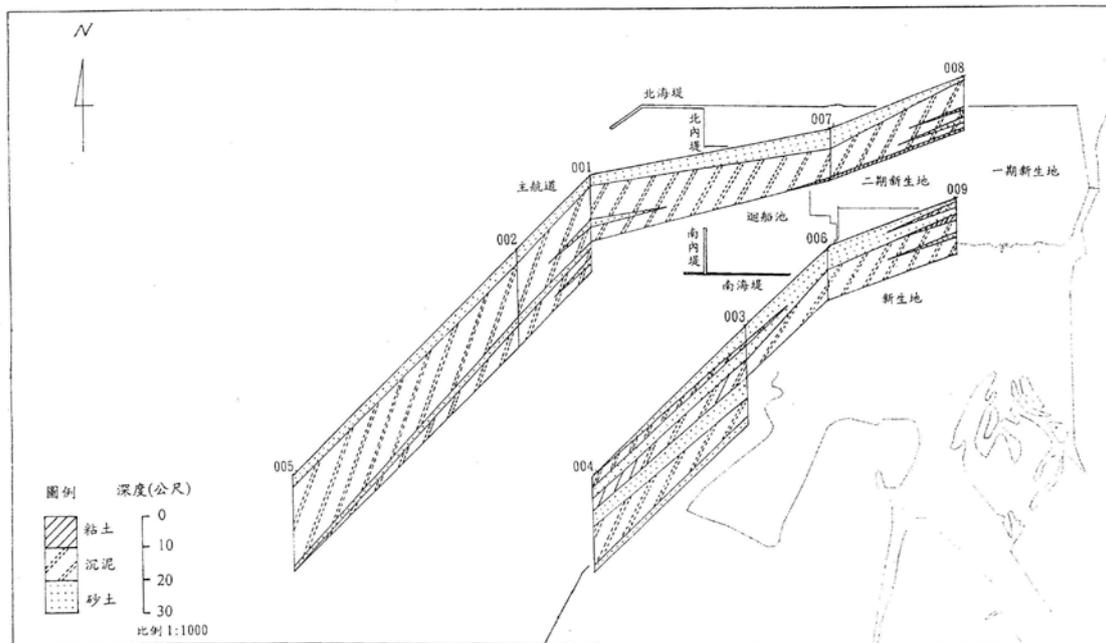


圖 3.11 布袋港區地層柵狀圖

### 3.4.3 安平港

安平港位於臺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<sup>[10]</sup>。

#### 1. 港區地質

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，鄰近周圍尚有臺南層，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粉土質土壤堆積於砂洲東側較低窪瀉形成了新潟湖沉積。安平港及其鄰近地區地質分布情況如圖 3.12 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)新瀉湖沉積

新瀉湖沉積主要分佈在瀉湖及沼澤沉積區，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

三角洲沉積主要分布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瀉湖沉積及臺南層呈不規則之相接。

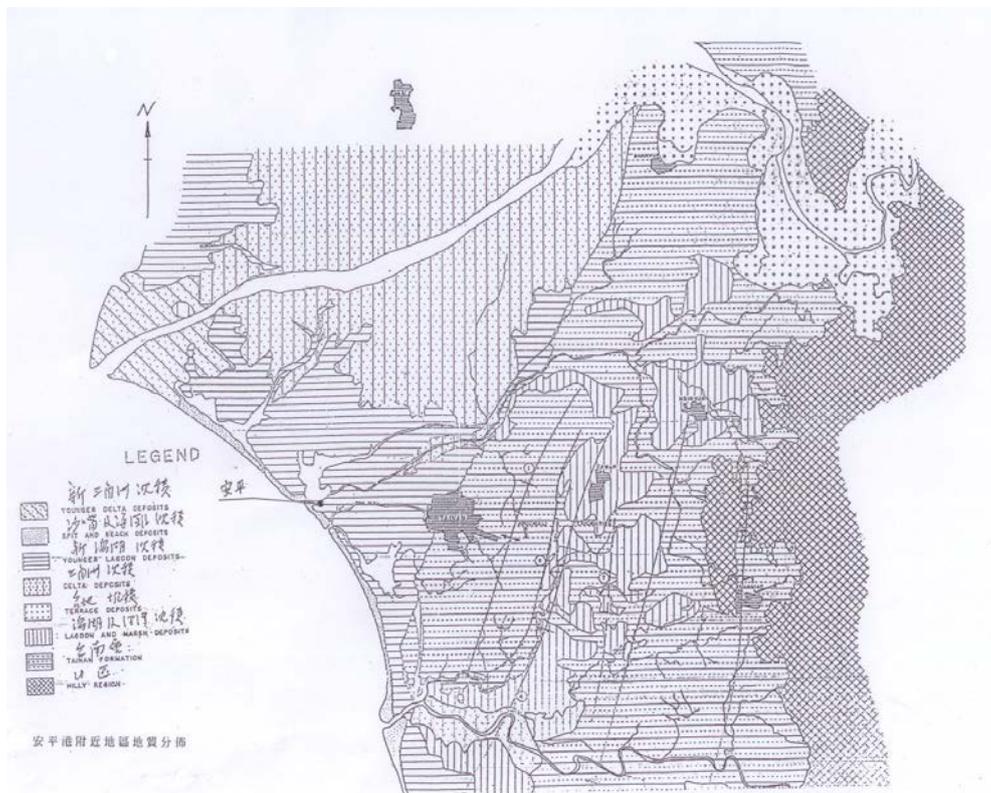


圖 3.12 安平港及其鄰近地區地質分佈

## 2.港區土層分布

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 3.13 所示，其中 1~4 號碼頭為散雜貨及客貨碼頭，5A~7 號碼頭皆是散雜貨碼頭，8~14 號碼頭為環保中心、貨櫃及散雜貨碼頭，15~20 號碼頭為水泥專用碼頭，21~31 號碼頭大都是散雜貨碼頭，僅 21、22 號碼頭是化學品及油類使用碼頭。

港區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，各個區域之鑽探深度約在 25 公尺~55 公尺左右，土層大致可以 6~8 個層次來研判。

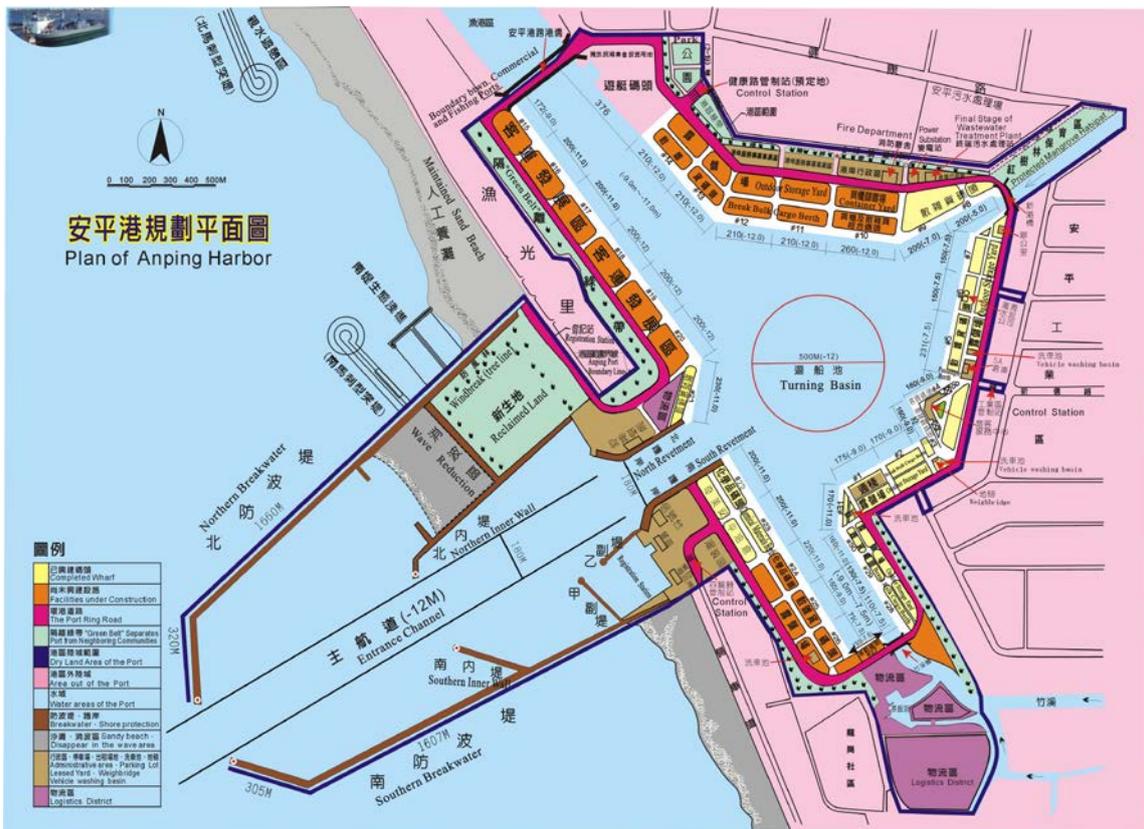


圖 3.13 安平港規劃平面圖

### 3.綜合地層分析

整體而言，安平港在深度-50m 範圍內，綜合各區剖面土層，如圖 3.14 所示，簡述如下：

- (1)EL.0m~EL.-15m：土層分佈以灰色粉土質細砂(SM)為主，海床面以下 2~4m 為軟弱之粉土層(ML)，深度-5m 及-10m 間偶夾有 N 值為 2~10 之軟弱粉土或黏土薄層。
- (2)EL.-15m~EL.-20m：具有一層平均為 2~3m 厚之灰色黏土(CL)或粉土層(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：大致以緊密之粉土質砂(SM)居多，但於-28m~-33m 間有一層厚約 2~5m 之粉土質細砂夾黏土或粉土層，N 值為 22~60 間之極堅實至堅硬土壤。
- (4)EL.-35m~EL.-50m：大部分為灰色粉土質砂土層，但於-45m~-50m 間為一層厚約 2~8m 之灰色粉土質粘土夾細砂土層，N 值約在 22~45 間，此土層分佈以航道之內防波堤較厚。

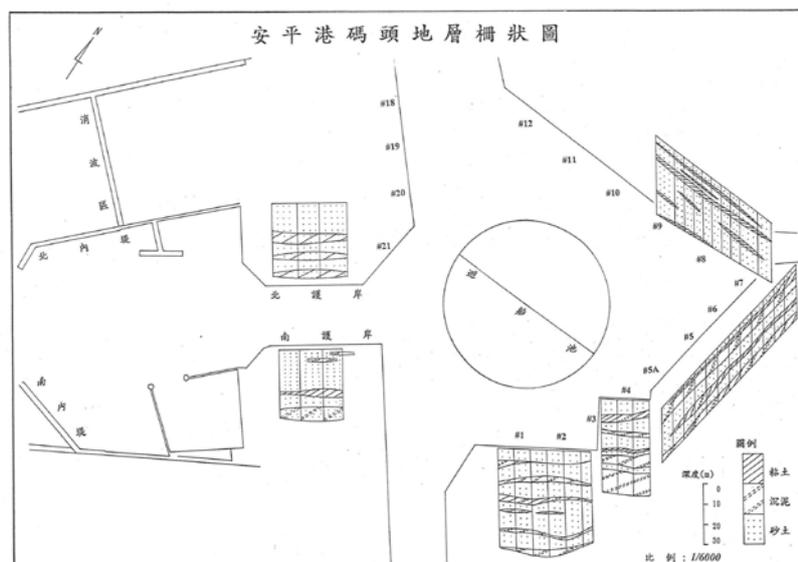


圖 3.14 安平港碼頭地層柵狀圖

### 3.4.4 大鵬灣

#### 1.環境與地形

大鵬灣位於本省西南部，行政區域主要位於屏東縣東港鎮及林邊鄉之一部份，基地西北距高雄市約 25 公里，北距屏東市約 30 公里，灣內現有水域長約 3,500 公尺，寬約 1,800 公尺，面積 532 餘公頃，連同毗鄰陸域、海域，合計總共面積約 1438.4 公頃(如附圖 3.15)<sup>[12]</sup>。

大鵬灣為台灣地區唯一之潟湖地形，其形成乃由海濱的沉積現象 (Depositional Features of Shore)，為波浪侵蝕和沿岸流搬運的沉積物，在海岸邊能量低的地方造成不同地形和沉積作用。而大鵬灣則是東港溪和林邊溪自上游挾帶泥沙入海，再經海流、季風漂送形成沙嘴 (Spit) 沉積現象，而沙嘴是一長條砂礫形的狹脊，如沙嘴將橫越海灣的出口全部封閉，則造成海灣封閉沙洲 (Bay Barrier)，即是形成潟湖 (Lagoon)，大鵬灣即為此種潟湖，(如附圖 3.16)，如沙嘴將橫越海灣的出口全部封閉，則形成封閉形海灣，即是潟湖 (Lagoon)。

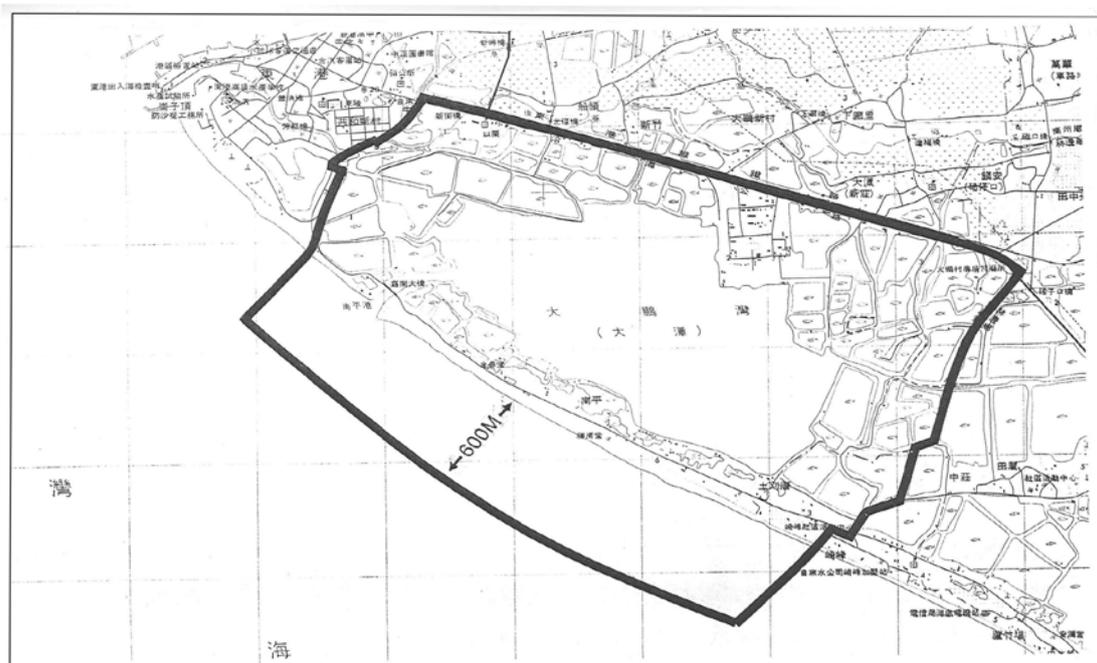


圖 3.15 大鵬灣地理位置圖



### 3.港區土層

本地區主要為砂質之沖積層，根據本所搜集之 5 孔陸上地質鑽探資料顯示(如附圖 3.18)：

#### (1)砂土層(SM)

沿海狹長沙洲皆屬砂土層，自地表至地下 30m 深為中等緊密之砂土層(SM)，標準貫入試驗 N 值約在 10~30 之間，EL.-30m 以下為一層 3 公尺~8m 厚之粘土層(CL)，N 值約為 13~15 左右。

#### (2)粘土與沉泥互層(CL~ML)

環繞內陸地帶之土層係粘土與沉泥相間之地層，地下水位極高約在地表下 1m 左右，淺層部份因多為魚塭區，有機物含量甚高，大部份為軟弱淤泥土層，而 EL.-6m~EL.-10m 以下為 N 值 6~11 之疏鬆砂土層(如圖 3.19)。

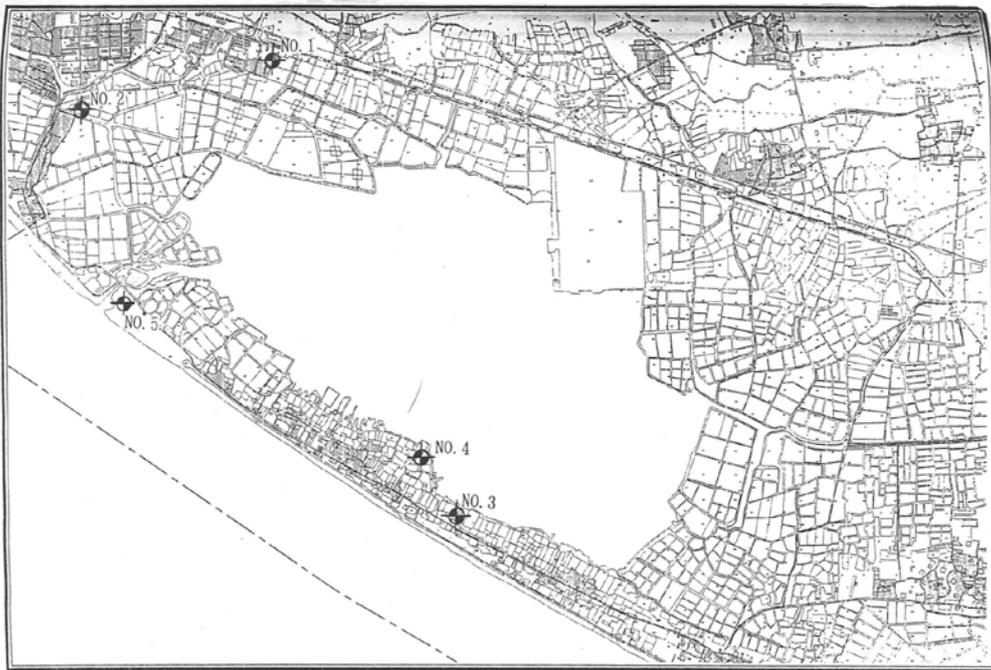


圖 3.18 大鵬灣區鑽探位置圖

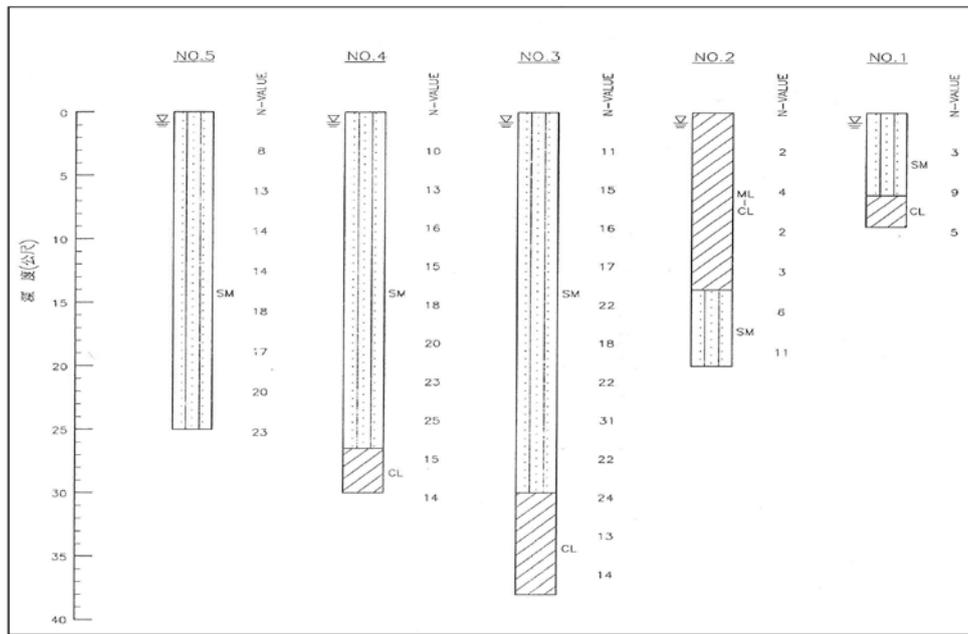


圖 3.19 大鵬灣區地層柱狀圖

### 3.5 地層下陷情形

#### 3.5.1 雲林地區地層下陷

雲林地區處濁水溪沖積扇南半部，為重要的養殖、農業縣之一，早期雲林地區於民國 70 年末與 80 年初有兩個下陷中心，一個位於金湖附近，另一個位於台西蚊港附近。早期雲林地區於 80 年主要下陷中心以沿海的麥寮為主，如圖 3.20。民國 85 年之後，雲林下陷中心逐漸移往內陸，民國 88 年以後下陷中心集中於褒忠鄉、土庫鎮、虎尾鎮與元長鄉，民國 90~102 年累計下陷量達 80 公分。整體評估雲林地區近 20 年的總下陷量，內陸地區已超過 150 公分的下陷量<sup>[25]</sup>。

依據高鐵公司的監測資料顯示，雲林地區高鐵沿線在西螺地區無明顯下陷，進入虎尾地區後快速下陷，而土庫地區為最大下陷地區。雲林地區民國 90 年~民國 102 年累積下陷量，如圖 3.21。

雲林地區民國 102 年的水準檢測結果如圖 3.22 所示，雲林地區主要下陷地區有虎尾鎮、土庫鎮、褒忠鄉及元長鄉，最大年下陷速率為

虎尾鎮「水利雲 96」的 3.8 公分，持續下陷(年下陷速率超過 3 公分)面積 16.51 平方公里，較 101 年持續下陷面積 261.02 平方公里為少，顯示 102 年下陷情況較 101 年為趨緩，但年下陷速率超過 2.5 公分之面積仍有 83.42 平方公里。

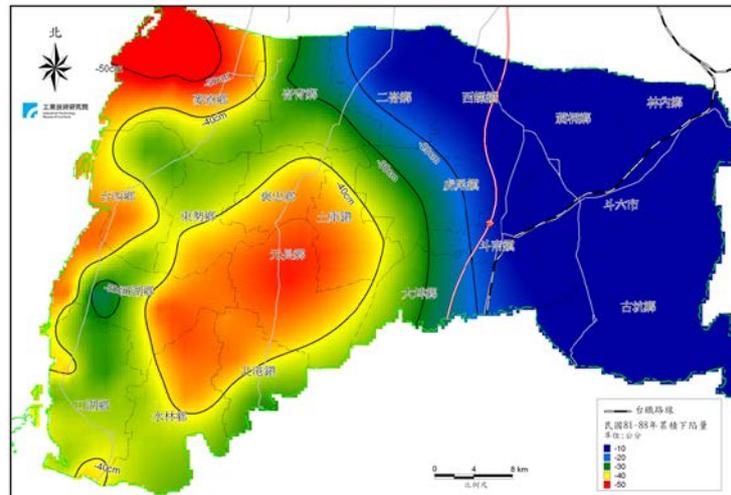


圖 4-2-10 雲林地區民國 81 年至 88 年累積下陷量圖  
4-71

圖 3.20 雲林地區民國 81~88 年累積下陷量圖(水利署，2013)

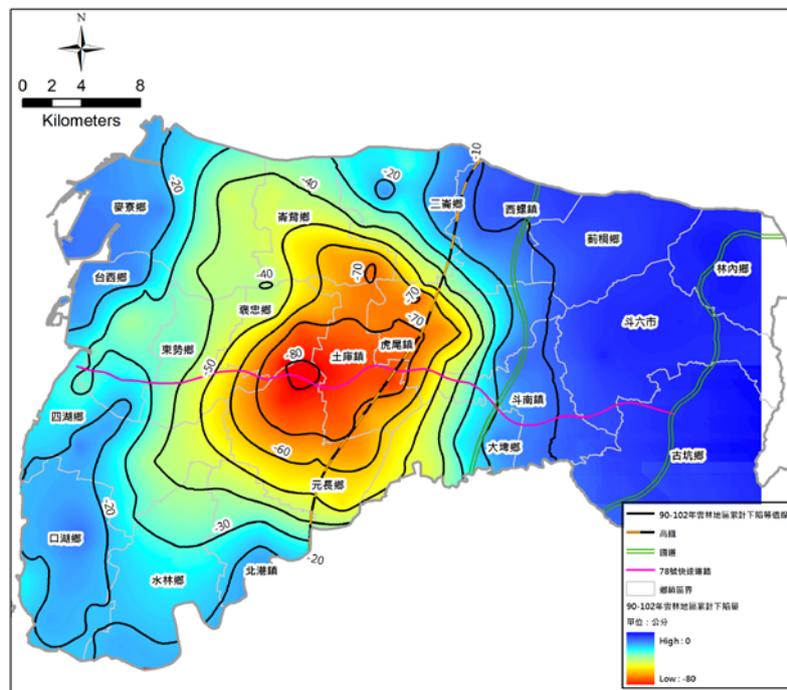


圖 3.21 雲林地區民國 90~102 年累計下陷量圖(水利署，2013)

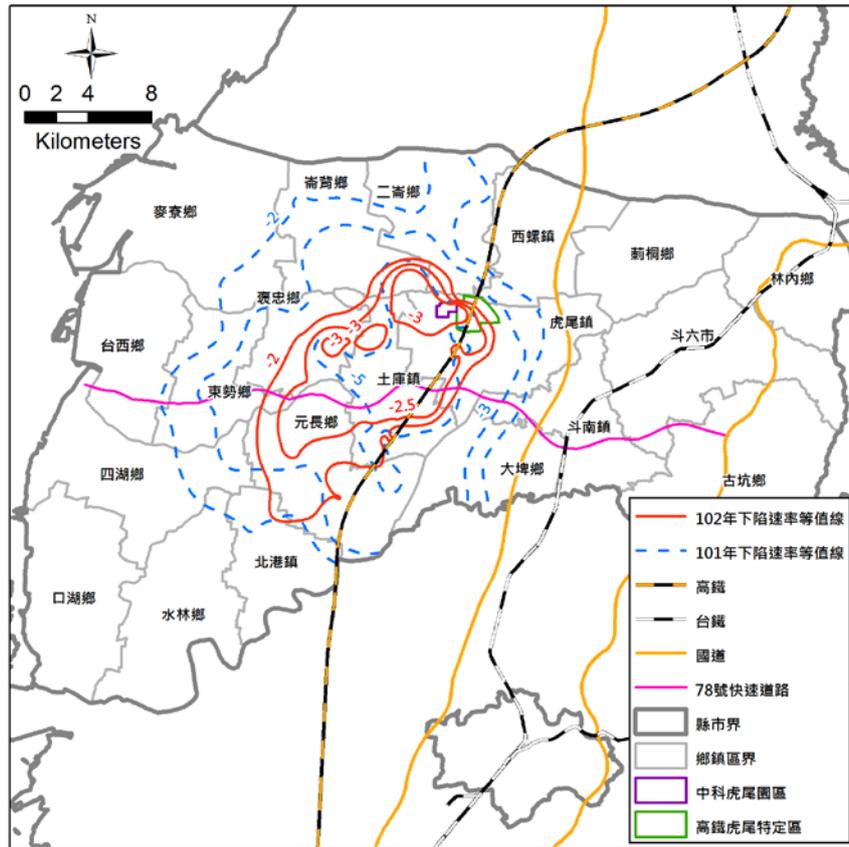


圖 3.22 雲林地區民國 102 年下陷速率等值線圖(水利署，2013)

### 3.5.2 土庫國中下陷監測站

雲林地區地層下陷較嚴重之土庫國中監測站，該地區與高鐵交會處之土庫國中，蒐集水利署設置之地層下陷監測站資料，就其測站歷年監測情形概述如下<sup>[25]</sup>：

#### 1.土庫國中 GPS 固定站

如圖 3.23 顯示，民國 95 年 3 月底至民國 102 年 9 月底期間，水平方向無明顯變動，高程累積下陷量約 46.0 公分。

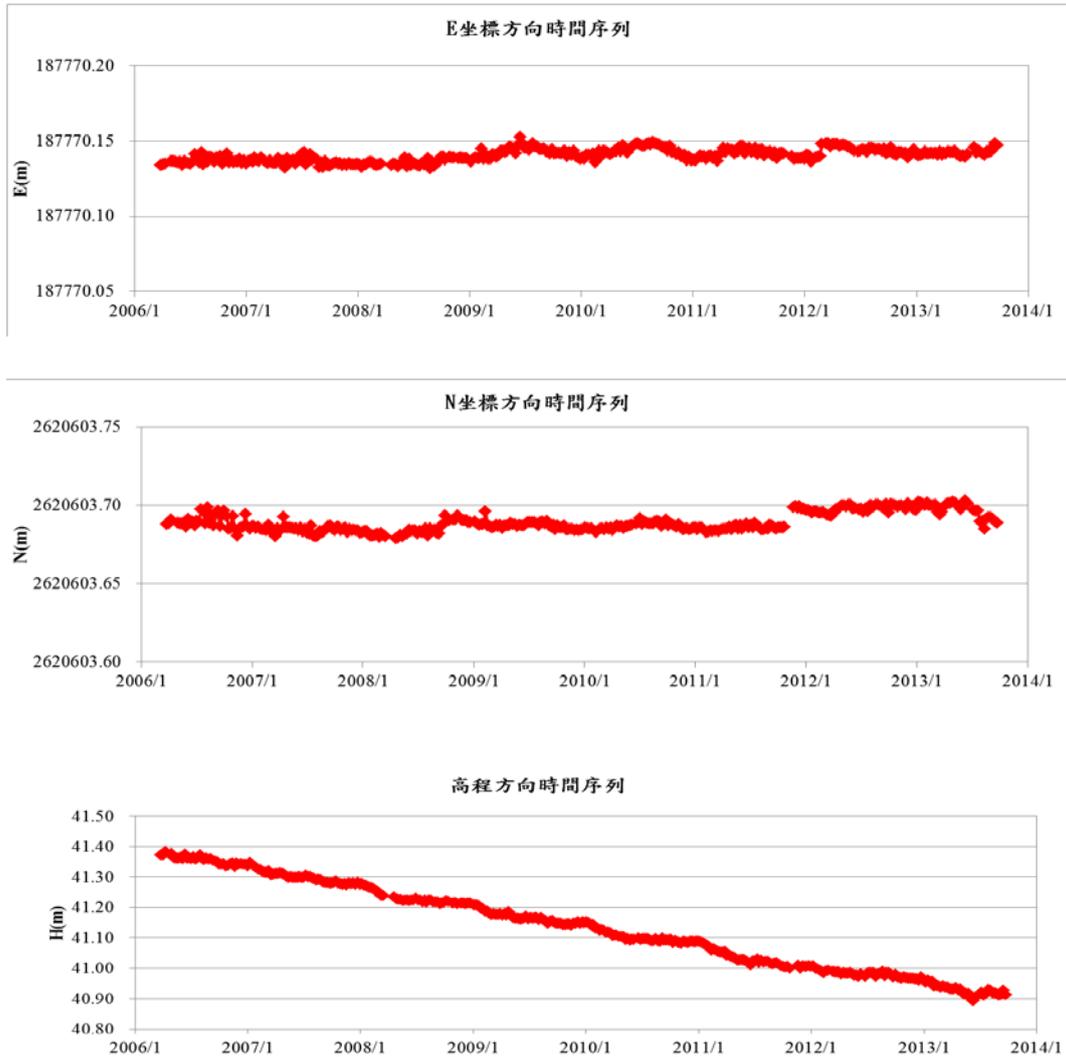


圖 3.23 土庫國中 GPS 固定站三維坐標變化圖

## 2.地層壓縮

圖 3.24 為土庫國中的地層柱狀圖與相對於井底之壓縮量，由地層柱狀圖顯示，地表至深度 155 公尺主要為砂層，而深度 155 至 300 公尺以粉砂與泥層為主，其中在深度約 170 至 220 公尺為厚泥層與粉砂層。由壓縮量圖顯示，自民國 92 年 12 月至 102 年 10 月，整體地層壓縮量達 45 公分；民國 93 至 96 年之年壓縮量呈現逐年減少的趨勢，而民國 97 至 100 年之年壓縮量，除民國 99 年的年壓縮量較小外（3.2 公分），其餘年度壓縮量皆大於 4 公分，其值約在 4.1 至 5.1 公分之間。地層主要壓縮發生在較深的地層，深度約 220 至 300 公尺，

該地層屬於含水層 3 至含水層 4 (深度 218-300 公尺)，次要壓縮發生在深度約 49 至 220 公尺的地層，該地層屬於含水層 2 至阻水層 2 (深度 48-218 公尺)。因深層壓縮顯著，表示應有更深層的壓縮發生。

### 3.各含水層壓縮

由地層柱狀圖推估，深度 0~34 公尺為自由含水層(含水層 1)，49~115 公尺、121~197 公尺、218~277 公尺為受壓含水層(含水層 2、含水層 3、含水層 4)，阻水層分別位於深度 34~49 公尺、115~121 公尺、197~218 公尺處。雲林地區地下水位站與與降雨量關係圖，如圖 3.25。

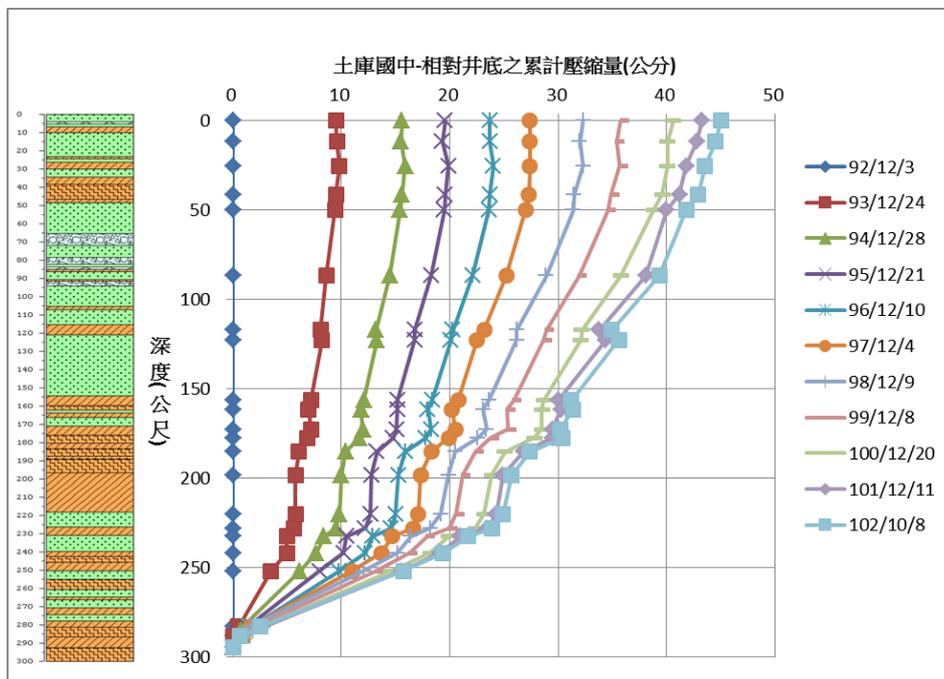


圖 3.24 雲林土庫國中地層柱狀圖及相對於井底之累計壓縮量

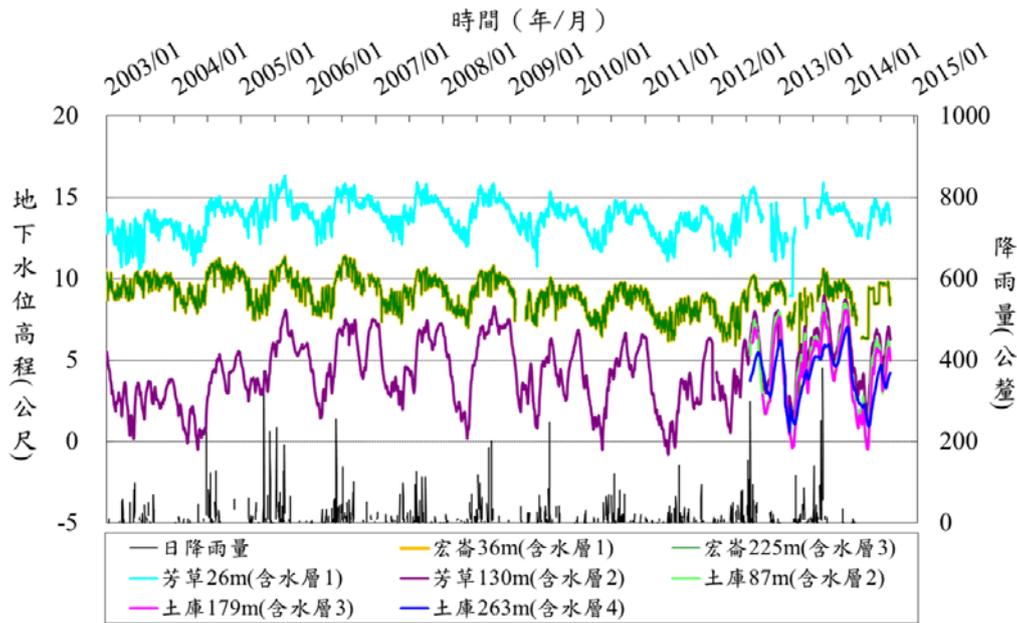


圖 3.25 雲林地區地下水位站與與降雨量關係圖

### 3.5.3 港區地層下陷(布袋、臺中、大鵬灣)

#### 1. 布袋港區：

分別於第二期海埔地之西北角隅及商港近南堤之砂石碼頭區設置一組 200m 深與 300m 深之下陷與水壓監測井，經長期量測港區下陷如下，200m 地層下陷站經量測結果，自 86 年 2 月至 103 年 10 月止，總累積沉陷量約為 63 公分，其中百分之 48 以上之沉陷在深度-140~-200m 地層發生，屬深層沉陷，近 3 年來年平均沉陷量約為 2.7 公分。300m 地層下陷站經量測結果，自 89 年 10 月至 103 年 10 月止，共 14 年總累積沉陷量約為 75.8 公分，103 年度總沉陷量為 2.7 公分，整體而言，布袋港區近年來地層下陷有趨緩現象。

#### 2. 臺中港區：

臺中港區第 26 號碼頭綠地之位置，設立 199 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 0、3、10、18、27、31、54、73、90、110、138、157、164、179、181、189、199 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 17 個磁環。自 88 年 6 月開始量測，而 94 年 8 月起因儀器卡管，

故累積沉陷量僅能自地表量測至 181m 深，累積總沉陷量至 103 年 10 月止約為 5.7 公分，其中自 0m~90 m 深之沉陷量約 4.6 公分，佔總沉陷量 80% 以上，其間以 88 年 9 月至 10 月，因地震產生之總沉陷量 3.2 公分最多，而 88 年 10 月至 98 年 11 月止，總沉陷量為 1.8 公分。

### 3. 大鵬灣港區：

於大鵬灣風景區西南角隅，設立 200 m 深之分層地層下陷與分層水壓觀測站，分別在深度 4、26、31、51、55、62、90、101、103、108、115、119、124、129、138、146、155、161、173、177、188、189 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 22 個磁環，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。從 87 年 3 月至 103 年 10 月止，共 16 年 6 個月期間，大鵬灣地表下 4 m 至 189 m 間之沉陷總量為 13 公分，而其中地表~51.3 m 之沉陷量為 10 公分，佔總沉陷量之 80% 以上，由此資料顯示，大鵬灣之沉陷屬於淺層沉陷。

## 第四章 地層下陷監測與分析

臺灣之西南沿海縣市與港灣地區，由於地下水大量開發、海埔新生地回填或結構物荷重等引致之地層下陷問題已是普遍現象。雲林縣土庫鎮之台 78 線與高鐵交會處更是因為高鐵橋墩基礎之差異沉陷量超過容許值，高鐵之行車安全受到政府各界重視。因此，為維護行車安全與港區工程及各樣設施之安全，港研中心於各港區設置地層下陷及地下水壓監測站，進行長期監測。

為維護西南沿海地區之工程及各樣設施安全，本計畫於布袋港、大鵬灣、臺中港、安平港等港區所設置 200 m 或 300m 深地層下陷及靜態水壓監測站，持續採手動方式以無線電波感應式層別沉陷儀，定期進行港區地層分層沉陷之長期監測，主要是維護各港區沉陷及水位觀測井之正常監測，平時定期量測各港區之沉陷及水位變化，以探討地下水壓變化對各港區地層下陷之影響。地震後，亦可量測分層地層下陷，分析各土層地震時之沉陷量。

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，因此地質、雨量、地下水位、地層下陷存在著某種相關性，茲就各港分別說明其量測結果及其相關性。

本章就沉陷觀測井之設置、蒐集雲林縣土庫國中監測資料與長期量測各港區地層下陷、地下水位結果及其相關性敘述於後：

### 4.1 分層沉陷觀測井設置

埋設土層分層沉陷計之深度需依各監測站地質狀況而定，先於主要土層層次變化之位置安裝沉陷磁環，設置完成後，定期再以無線電波層別沉陷儀測量沉陷環之深度變化，此量測結果可以顯示個別層次之土層沉陷變化量，進而求得各深度土層沉陷之變化情形。

分層沉陷觀測井採用日本 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，安裝步驟敘述如下：

1. 鑿井到達預定深度時，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位置，並將量測管安裝摩擦切管排列於地面，並依序編號及記錄長度再固定沉陷磁環於預定安裝深度，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便量測導管順利及垂直下井，並於止水活閥處以鋼纜牽引避免導管下放時因過重產生失敗。
4. 待量測井依秩序完成後，再利用燃燒樹脂機打開磁環，使安卡可順利固定於土壤上，便可進行回填工作，回填原料以河砂，慢慢回填以防崩孔造成量測管損害，所有作業完成後便可進行孔口保護台及洗孔作業，並待測孔穩定後可做初值設定。
5. 安裝示意圖如圖 4.1、圖 4.2 所示。

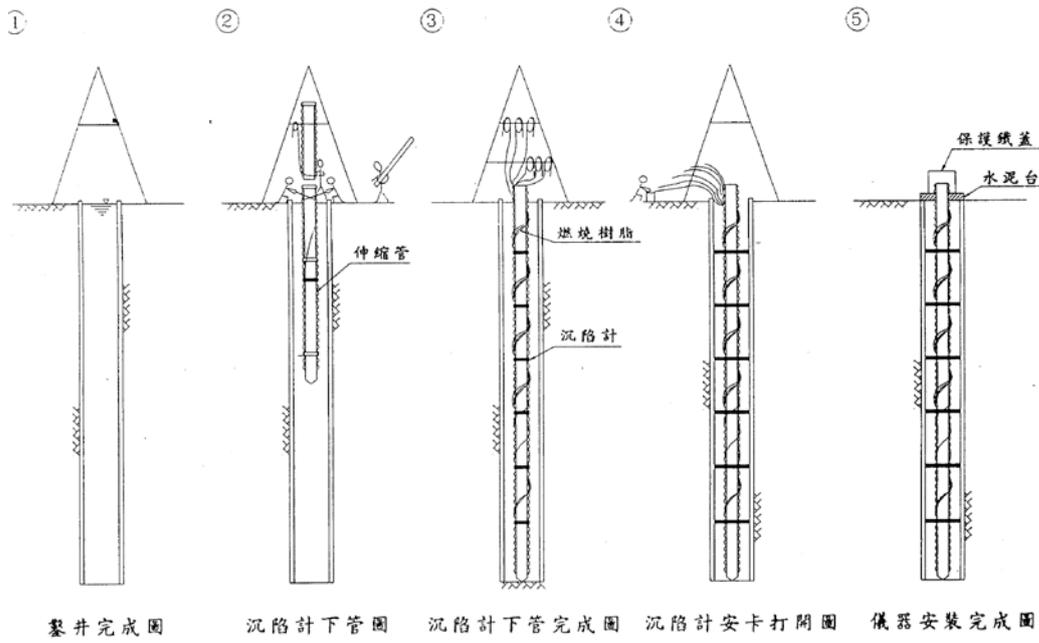


圖 4.1 沉陷計安裝示意圖

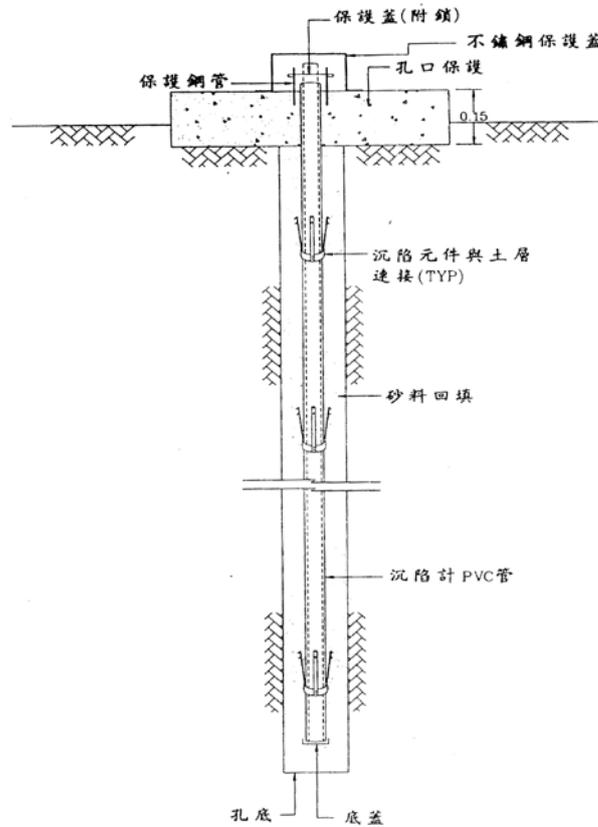


圖 4.2 磁感式層別沉陷計安裝示意圖

## 4.2 雲林地區下陷監測

本節就雲林地區與各港區下陷監測站之設置情形與量測分析敘述如下：

### 4.2.1 土庫國中監測站

依經濟部水利署調查報告<sup>[25]</sup>，雲林縣土庫國中監測站選擇位於校區之東北角隅之適當位置(如圖 4.3)，設置一組 300m 深之下陷與水壓監測井，各監測井之座標如表 4-1。

本監測站共計二孔，分別為分層沉陷觀測井 1 孔，水壓計觀測井 1 孔，並採用自動記錄方式，其內容如下：

- (1) 電磁場式分層沉陷觀測井 1 孔，其深度為 300 m，安裝沉陷計感應環 25 個，安裝深度如表 4-2 所示。
- (2) 電子式水壓計觀測井 1 孔。
- (3) 水壓監測井共有 3 組電子式水壓計，3 組安裝於鑽探試驗孔內，前 3 組其安裝深度為 90m、185、269 m，所有電子式水壓計經由配管接至同一個自動記錄器，水壓計安裝深度如表 4-3 所示。



圖 4.3 土庫國中監測站位置平面圖(google earth，2015)

表 4-1 土庫國中監測井座標高程一覽表 (TWD97)

監 測 井	深度(m)	高程(m)	縱座標 N(m)	橫座標 E(m)
沉陷井(土庫)	300	17.45	2620610	187771
水壓井(土庫)	300	17.45	2620610	187771

表 4-2 土庫國中沉陷計感應環安裝深度一覽表(水利署)

序 號	埋設深度(m)	序 號	埋設深度(m)
S1	9.02	S14	185.44
S2	12.18	S15	198.46
S3	25.85	S16	220.36
S4	41.81	S17	228.43
S5	50.53	S18	232.85
S6	67.67	S19	242.02
S7	87.10	S20	252.20
S8	117.59	S21	272.57
S9	122.96	S22	283.18
S10	156.69	S23	288.49
S11	162.03	S24	294.47
S12	172.98	S25	296.72
S13	177.85		

表 4-3 土庫國中水壓監測井水壓計埋設表

水壓監測井	鑿井深度	埋設深度(m)	備 考
水壓井(土庫)	300	90m	電子式水壓計
		185m	電子式水壓計
		269m	電子式水壓計

## 1. 監測井地質

土庫國中監測站在深度 300 公尺之土層，根據地層柱狀圖資料所示(如圖 4.4)，約可分為 47 個次層(如表 4-4)，由地層柱狀圖顯示，地表下至深度 154m 大多為砂土層，地表下 155m 至 300m 以粉土及泥質粘土為主，在深度 171m 至 220m 有一層較厚之泥質粘土與粉土層，分別簡述如下：

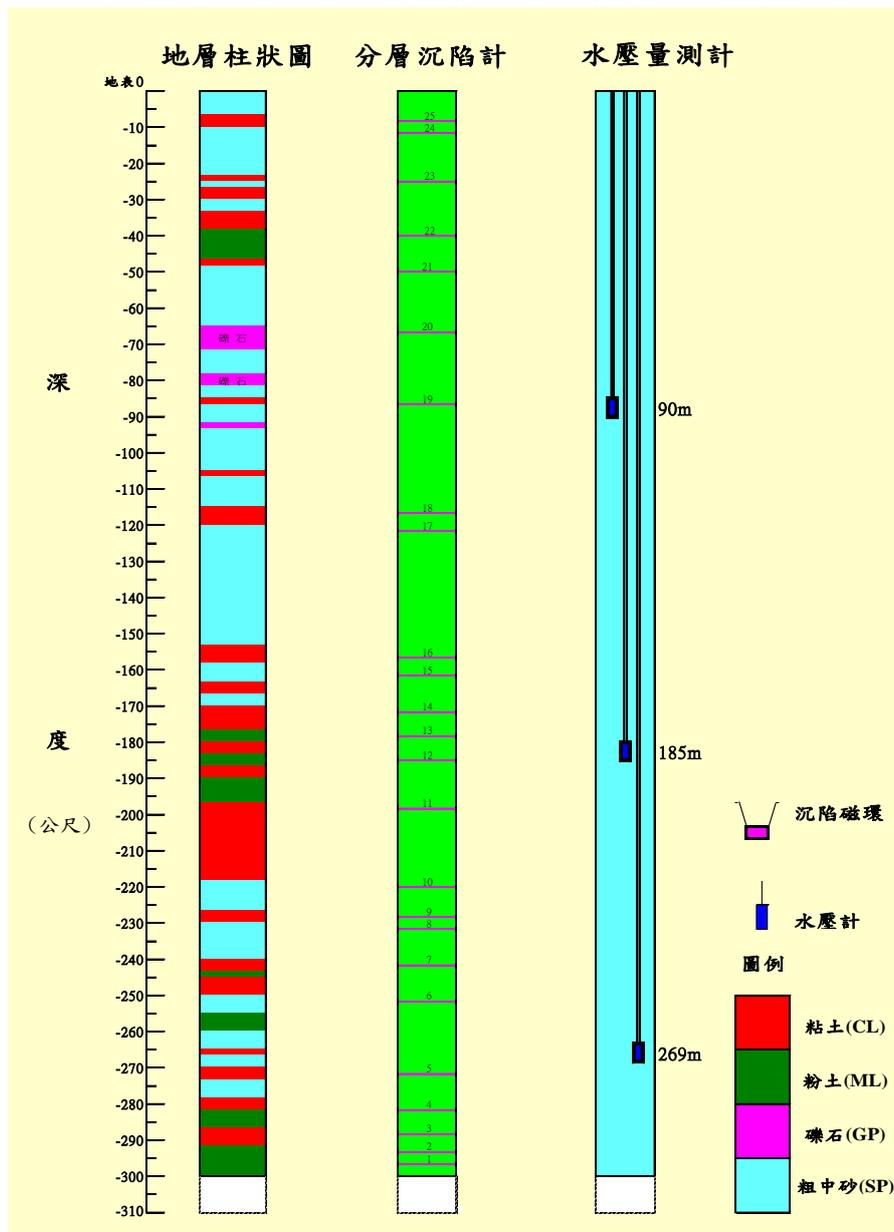


圖 4.4 土庫國中分層沉陷及水壓監測站地層柱狀圖

表 4-4 土庫國中監測站土層分類表

層次	深 度(m)	土層分類	層次	深 度(m)	土層分類
1	地表下 0~6.8m	SP	25	地表下 176.0~180.3m	ML
2	地表下 6.8~10.2 m	CL	26	地表下 180.3~183.8m	CL
3	地表下 10.2~23.0m	SP	27	地表下 183.8~187.6m	SP
4	地表下 23.0~24.6m	CL	28	地表下 187.6~189.1m	CL
5	地表下 24.6~26.1m	SP	29	地表下 189.1~196.3m	ML
6	地表下 26.1~30.0m	CL	30	地表下 196.3~218.2m	CL
7	地表下 30.0~34.2m	SP	31	地表下 218.2~226.0m	SP
8	地表下 34.2~38.4m	CL	32	地表下 226.0~230.8m	CL
9	地表下 38.4~46.4m	ML	33	地表下 230.8~239.6 m	SP
10	地表下 46.4~48.3m	CL	34	地表下 239.6~242.4 m	CL
11	地表下 48.3~85.0m	SP~GP	35	地表下 242.4~245.5 m	ML
12	地表下 85.0~86.4m	CL	36	地表下 245.5~250.4 m	CL
13	地表下 86.4~90.5m	SP	37	地表下 250.4~255.5 m	SP
14	地表下 90.5~91.5m	CL	38	地表下 255.5~260.5 m	ML
15	地表下 91.5~105.0m	SP	49	地表下 260.5~265.6 m	SP
16	地表下 105.0~107.2m	CL	40	地表下 265.6~266.3m	CL
17	地表下 107.2~115.1m	SP	41	地表下 266.3~270.4 m	SP
18	地表下 115.1~120.9m	CL	42	地表下 270.4~274.5 m	CL
19	地表下 120.9~154.1m	SP	43	地表下 274.5~277.9 m	SP
20	地表下 154.1~159.6m	CL	44	地表下 277.9~281.0 m	CL
21	地表下 159.6~163.5m	SP	45	地表下 281.0~286.5m	ML
22	地表下 163.5~166.7m	CL	46	地表下 286.5~292.7 m	CL
23	地表下 166.7~171.2m	SP	47	地表下 292.7~300.0m	ML
24	地表下 171.2~176.0m	CL	-	-	-

## 2. 地下水位

由於土庫國中缺少地下水位資料，水利署爰選擇位於沉陷監測井旁之適當位置安裝三孔深層水壓監測井，其深度為分別為 90m、185 及 269m，每孔埋設一支水壓計共三支，由第三章之圖 3.25 所示，90m 之地下水位高程介於 2~8m 之間，變化較少，185m 之地下水位高程約介於-0.5~9m 之間，269m 之水位介於 1~7m 之間，3 支水壓計以 185m 之變化最大，監測期間自民國 92 年 1 月~101 年 1 月止，缺少水位資料。

此外，參考附近宏崙與芳草地下水位觀測站的水位資料，宏崙與芳草站各設 2 支水位監測井，其中宏崙站深度為 36m、225m，芳草站深度為 26m、130m。由圖 3.25 顯示，自 2003 年~2015 年監測期間，宏崙 225m 之地下水位高程介於 6.5~11.5m 之間，2011 年 1 月至 2012 年 7 月止略下降至 6.5~8.5m 間。芳草 26m 之地下水位高程介於 10.5~16.5m 之間，130m 之地下水位高程變化較大，約介於-0.6~7.5m 之間，應是受到超抽地下水的關係；整體來說，地下水位的變化與降雨量相關。

## 3. 分層地層下陷

分層地層下陷監測井分別在深度 9、12、25、41、50、67、87、117、122、156、162、172、177、185、198、220、228、232、242、252、272、283、288、294、296m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 25 個磁環，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，資料值由鈰鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

蒐集水利署量測資料，土庫國中監測站自民國 92 年 12 月至 102 年 10 月期間下陷資料，累計壓縮量為 45.0 公分，如圖 3.25 所示。102 年量測資料，如表 4-5 所示，102 年累積下陷量約為 20 公厘。

港研中心亦配合水利署地層下陷防治團，採用無線電波分層沉陷儀器於 104 年 5 月與 11 月前往土庫國中進行量測，如表 4-6 所示。

表 4-5 土庫國中分層沉陷量測表(水利署：2013)

感應環編號	102/1/21	102/02/05	102/03/06	102/04/23	102/05/21	102/06/06	102/07/15	102/08/12	102/09/11	102/10/08	102/11/12	102/12/10
NO.1	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250
NO.2	12.0030	12.0035	12.0000	12.0020	12.0000	12.0010	11.9990	11.9985	12.0010	12.0025	12.0015	12.0015
NO.3	25.6655	25.6675	25.6610	25.6625	25.6595	25.6620	25.6610	25.6620	25.6645	25.6650	25.6660	25.6640
NO.4	41.6370	41.6400	41.6350	41.6335	41.6350	41.6375	41.6340	41.6350	41.6390	41.6370	41.6395	41.6360
NO.5	50.3590	50.3605	50.3560	50.3535	50.3575	50.3610	50.3590	50.3585	50.3620	50.3585	50.3600	50.3580
NO.6	67.4535	67.4515	67.4455	67.4425	67.4470	67.4495	67.4485	67.4480	67.4520	67.4470	67.4505	67.4495
NO.7	86.9625	86.9590	86.9545	86.9520	86.9575	86.9605	86.9585	86.9570	86.9630	86.9560	86.9590	86.9595
NO.8	117.4580	117.4530	117.4515	117.4515	117.4550	117.4560	117.4555	117.4540	117.4620	117.4520	117.4540	117.4535
NO.9	122.8440	122.8410	122.8390	122.8380	122.8420	122.8420	122.8410	122.8390	122.8485	122.8365	122.8400	122.8400
NO.10	156.5845	156.5800	156.5745	156.5745	156.5775	156.5795	156.5815	156.5810	156.5900	156.5780	156.5800	156.5780
NO.11	161.8715	161.8685	161.8635	161.8650	161.8690	161.8690	161.8715	161.8705	161.8800	161.8670	161.8700	161.8685
NO.12	172.8815	172.8790	172.8670	172.8675	172.8750	172.8750	172.8805	172.8780	172.8855	172.8735	172.8755	172.8750
NO.13	177.6915	177.6855	177.6750	177.6770	177.6835	177.6805	177.6875	177.6850	177.6935	177.6820	177.6840	177.6835
NO.14	185.3600	185.3540	185.3415	185.3450	185.3535	185.3490	185.3530	185.3520	185.3590	185.3470	185.3485	185.3490
NO.15	198.3805	198.3720	198.3580	198.3620	198.3700	198.3670	198.3710	198.3730	198.3810	198.3700	198.3720	198.3745
NO.16	220.2955	220.2885	220.2760	220.2775	220.2865	220.2855	220.2880	220.2905	220.2975	220.2845	220.2875	220.2890
NO.17	228.3615	228.3530	228.3425	228.3445	228.3520	228.3495	228.3540	228.3560	228.3630	228.3510	228.3525	228.3555
NO.18	232.7825	232.7760	232.7635	232.7680	232.7780	232.7760	232.7785	232.7810	232.7885	232.7745	232.7750	232.7780
NO.19	241.9475	241.9410	241.9310	241.9320	241.9430	241.9410	241.9425	241.9430	241.9480	241.9350	241.9335	241.9385
NO.20	252.1485	252.1415	252.1290	252.1300	252.1400	252.1375	252.1405	252.1420	252.1460	252.1350	252.1340	252.1390
NO.21	272.4635	272.4575	272.4415	272.4405	272.4485	272.4500	272.4495	272.4530	272.4590	272.4490	272.4460	272.4515
NO.22	283.1475	283.1405	283.1250	283.1250	283.1345	283.1365	283.1350	283.1385	283.1440	283.1330	283.1305	283.1350
NO.23	288.4505	288.4455	288.4335	288.4325	288.4395	288.4395	288.4400	288.4420	288.4465	288.4340	288.4305	288.4340
NO.24	294.4430	294.4365	294.4250	294.4230	294.4290	294.4305	294.4310	294.4325	294.4395	294.4275	294.4255	294.4285
NO.25	296.6345	296.6255	296.6140	296.6135	296.6195	296.6185	296.6220	296.6220	296.6290	296.6150	296.6135	296.6155

表 4-6 土庫國中分層沉陷量測表(港研中心：2015)

地層下陷觀測站測量值							
磁環 編號	104.05.21	磁環 編號	104.05.21	磁環 編號	104.11.03	磁環 編號	104.11.03
No.1	8.7096	No.14	185.1042	No.1	8.7102	No.14	185.1164
No.2	11.8672	No.15	198.1210	No.2	11.9445	No.15	198.1335
No.3	25.5350	No.16	220.2260	No.3	25.5361	No.16	220.0429
No.4	41.4963	No.17	228.0882	No.4	41.4982	No.17	228.1022
No.5	50.2165	No.18	232.5010	No.5	50.2194	No.18	232.5210
No.6	67.2892	No.19	241.6632	No.6	67.2874	No.19	241.6775
No.7	86.7820	No.20	251.8550	No.7	86.7854	No.20	251.8652
No.8	117.2584	No.21	272.2124	No.8	117.2700	No.21	272.2250
No.9	122.6297	No.22	282.8261	No.9	122.6339	No.22	282.8378
No.10	156.3555	No.23	288.1273	No.10	156.3660	No.23	288.1421
No.11	161.6356	No.24	294.1132	No.11	161.6465	No.24	294.1280
No.12	172.6458	No.25	296.3655	No.12	172.6582	No.25	296.3766
No.13	177.4417			No.13	177.4538		

#### 4.2.2 台 78 線與高鐵交會處監測

臺灣高速鐵路自八卦山以南路線所經為臺灣西南部平原區，表層地層屬鬆軟具高壓縮性及低承载力之近代沖積層，故設計上均採高架橋由樁基礎支承<sup>[23]</sup>。雲林土庫地區之地層下陷為近年來累積下陷量較大的地區，又是高鐵路線經過位置，其中以台 78 線與高鐵交會處之下陷量最嚴重，行政院為了解該地區地層下陷主因與解決方法，後經交通部公路總局委託顧問公司於該交會處進行監測調查，監測地區規劃鑽探孔位與深度共計鑽孔 9 孔，經鑽孔取樣後並規劃設置土層分層沉陷監測站與地下水位監測站，其中 300m 深沉陷監測井有 4 孔，70m 監測井有 4 孔及 1 孔 50m 監測井，地下水位監測井共計 8 孔，平面配置圖，如圖 4.5 所示。鑽探孔號之座標與高程、深度如表 4-7。

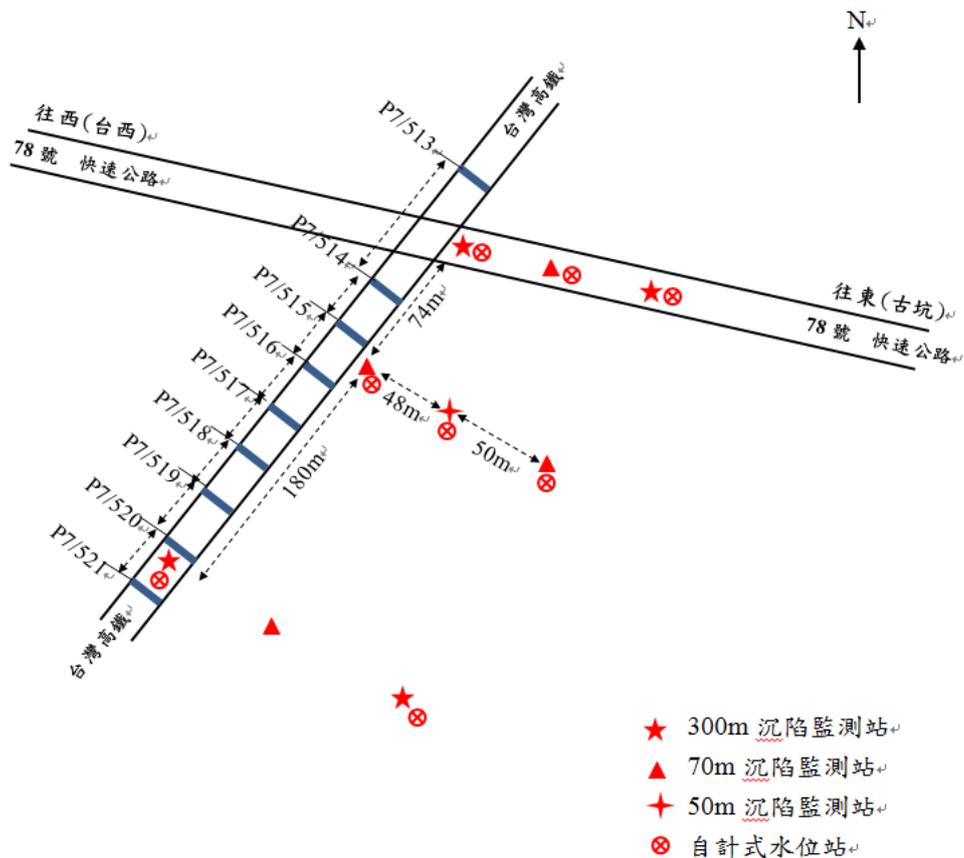


圖 4.5 台 78 線與高鐵交會處監測站平面配置圖(公路總局，2013)

表 4-7 台 78 線 22K+700 與高鐵交會處鑽探孔座標一覽表-TWD97

孔 號	縱座標-N	橫座標-E	鑽孔標高(m)	深度(m)	備 註
STA-1	2620856.45	187690.14	21.390	300.00	
STA-2	2620789.91	187646.85	16.870	70.45	
STA-3	2620640.95	187528.05	16.820	300.00	
STA-4	2620843.88	187741.40	19.970	70.45	
STA-5	2620761.71	187688.54	16.910	70.45	
STA-6	2620622.58	187567.23	16.700	70.45	
STA-7	2620832.45	187792.42	18.930	300.00	
STA-8	2620752.60	187733.03	17.060	70.45	
STA-9	2620562.05	187642.02	16.580	300.00	

依據台灣高鐵公司監測資料報告所示，該公司自 92 年起每年即定期對高鐵墩柱下陷進行監測，量測墩柱因差異沉陷所產生的累積角變量是否超過高鐵土木結構設計容許值之 1/1500。並且也進行沿線之水準測量，依該公司 102 年水準測量評估報告，高鐵沿線目前下陷最嚴重地區為高鐵與台 78 線東西向快速道路跨交處，累積最大下陷量已達 78.6 公分<sup>[21]</sup>，如圖 4.6。

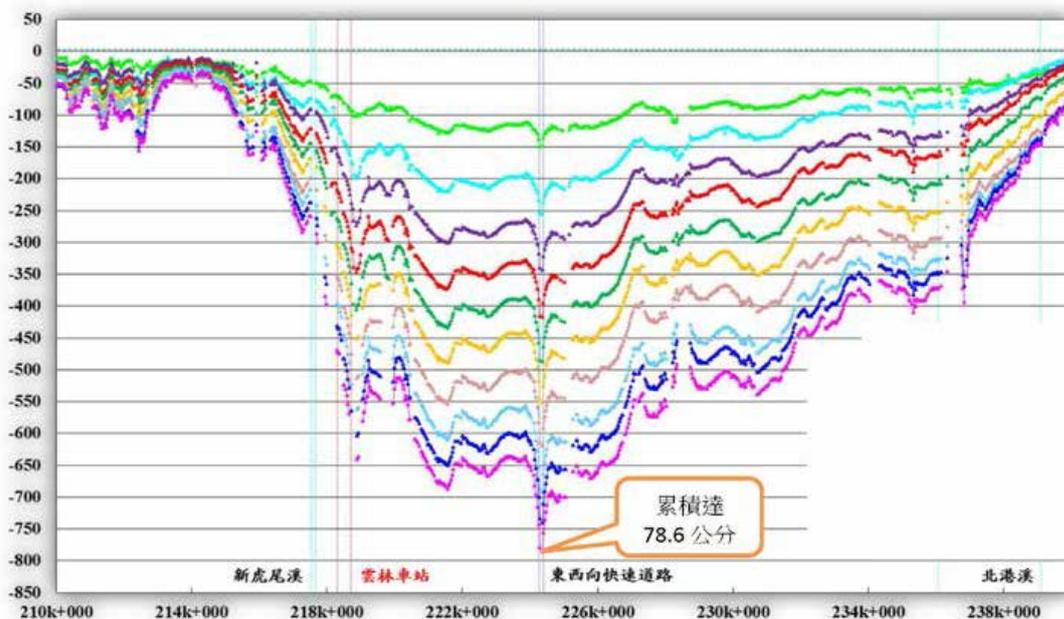


圖 4.6 高鐵沿線累積下陷量圖(高速鐵路工程局，2014)

台 78 線與高鐵交會處產生地層沉陷所造成墩柱之差異沉陷，依公路總局及高鐵局資料所示，台 78 線東西向快速道路是於 1998~2004 年分兩階段填築路堤方式建造完成，而高鐵是於 2002 年採三跨連續梁結構橫跨台 78 線路堤上方，再加上三跨連續梁群樁基礎數量不一之荷重造成不均勻沉陷，台 78 線高鐵交會處兩階段填土斷面示意如圖 4.7a 及圖 4.7b 所示。

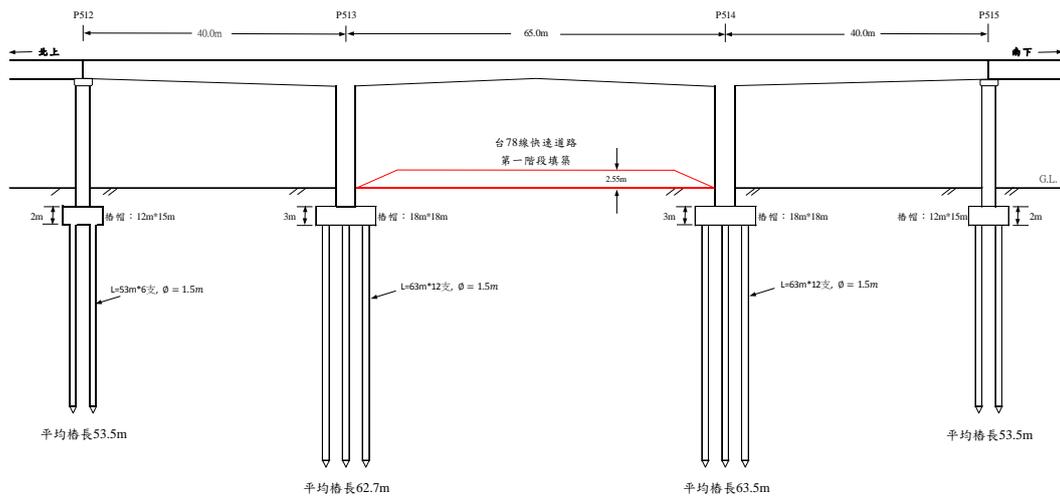


圖 4.7a 台 78 線與高鐵交會處兩階段填土斷面示意圖(填土高 2.55m)

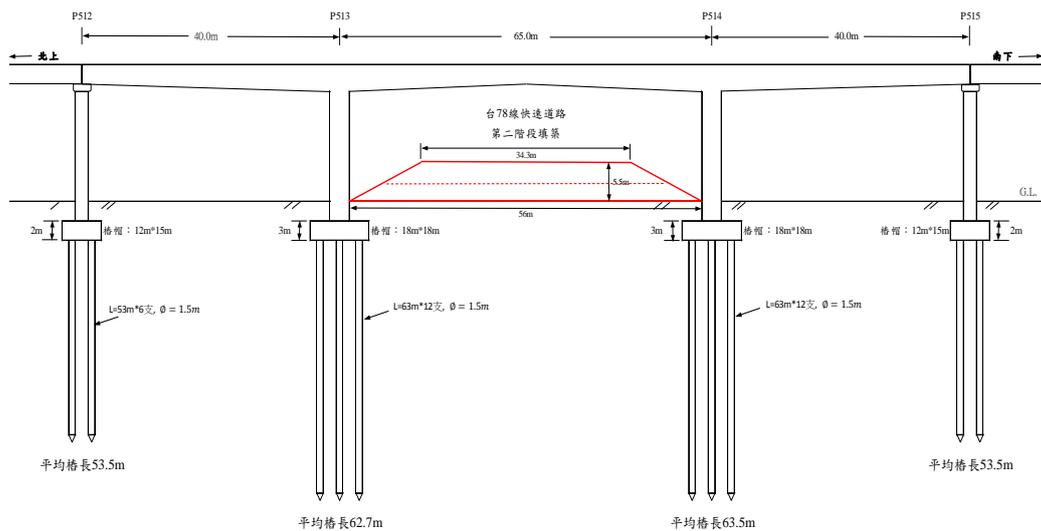


圖 4.7b 台 78 線與高鐵交會處兩階段填土斷面示意圖(填土高 5.5m)

## 4.3 港區下陷監測

### 4.3.1 布袋港監測站

#### 1. 監測井地質分析

布袋港監測站在深度 200 公尺之土層，根據現場鑽探資料所示(如圖 4.8)，約可分為 24 個次層，分別簡述如下：

1. 棕黃色細砂(SP)：分布在地表下深 0~9.5 m 且含有貝屑，SPT-N 值為 8~17 間，表土層有 0.45 m 之回填礫石夾棕黃色細砂。
2. 灰色砂質沉泥(ML)：分布於地表下 9.5~11.6 m 深，其 N 值為 3，屬軟弱土層。
3. 灰色細砂(SP)：分布於地表下 11.6~14.1 m，N 值為 13 屬中等緊密土層。
4. 灰色細砂夾薄粘土層(SM+ML)：約分布於地表下深度 14.1~32.8 m，其 N 值自 7~24 之間，屬軟弱粘土及中等緊密砂土層。
5. 灰色細砂(SM)：分布於地表下 32.8~36.5 m，N 值平均為 25 之中等緊密土層。
6. 灰色粘土或砂質沉泥層(CL~ML)：分布於地表下 36.5~41.1 m，N 值在 12~16 間，屬中等堅硬土層。
7. 灰色沉泥質細砂(SM)：分布於地表下 41.1~48.7 m，N 值為 41 之中等緊密土層。
8. 灰色泥質粘土至砂質沉泥(CL~ML)：分布於地表下 48.7~75.3 m，N 值為 15~34 間，屬中等堅硬土層，其中於深度 52~52.5 m，58~60 m，64~66 m 為沉泥質細砂(SM)土層，N 值為 34~40 間之中等緊密土層。
9. 灰色泥質細砂含泥質粘土(SM+CL)：分布於地表下 75.3~82.4 m，N 值於 28~74 之間。

- 10.灰色沉泥質粘土(CL)：分布於地表下 82.4~84.75 m，N 值約為 40。
- 11.灰色砂質沉泥(ML)：分布於地表下 84.75~87.2 m，N 值約為 41。
- 12.灰色沉泥質細砂(SM)：分布於地表下 87.2~91.15m，SPT-N 值為 45。
- 13.青灰色沉泥質粘土(CL)：分布於地表下 91.15m~95.8 m，N 值介於 28~36 之間。
- 14.青灰色沉泥質細砂(SM)：分布於地表下 95.8~108.2 m，SPT-N 值在 50~77 時貫入土層為 4~9 cm。
- 15.灰色泥質細砂含砂質粘土(CL+SM)：分布於地表下 108.2~115.2 m，N 值為 31 及 50 時貫入土層約 4 cm。
- 16.灰色沉泥質細砂(SM)：分布於地表下 115.2~132.2 m，其 SPT-N 值為 60 時貫入土層約 7cm。
- 17.灰色粘土含泥質細砂(CL+SM)：分布於地表下 132.2~139.3 m，N 值為 100 時貫入土層約 13 cm。
- 18.褐色或灰色粘土含沉泥質細砂(CL+SM)：分布於地表下 139.3~147.35 m，N 值為 30 時貫入土層約 3 cm。
- 19.灰色粘土(CL)：分佈於地表下 147.35~157 m，N 值為 50~60 時貫入土層約 38~40 cm。
- 20.灰色沉泥(ML)：分布於地表下 157~164.35 m，N 值為 60 時貫入土層約 4 cm。
- 21.灰色細砂含灰色粘土(SM+CL)：分布於地表下 164.35~170.15m，SPT-N 值在 60 時貫入土層約 4 cm。
- 22.灰色粘土(CL)：分布於地表下 170.15~172.5 m，SPT-N 值在 100 時貫入土層約 7 cm。
- 23.灰色細砂(SM)：分布於地表下 172.5~175.8 m，N 值在 100 時貫入深度約 7 cm。

24.灰色粘土(CL)：分布於地表下 175.8~200 m，N 值為在 100 時貫入土層約 5~13 cm。

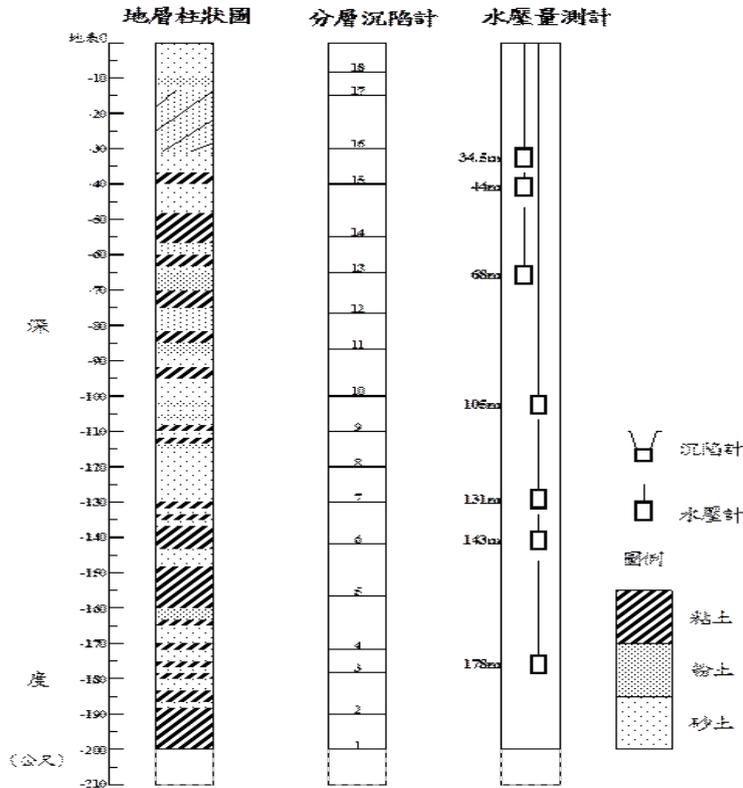


圖 4.8 布袋港分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖

## 2. 布袋港地下水位

本中心於布袋港區第二期海埔地之西北角隅設置一組 200m 深之下陷與水壓監測井，另選擇於布袋商港近南堤之砂石碼頭區，亦設置一組 300m 深之下陷與水壓監測井，其位置如圖 4.9 所示。

### (1)200m

200 公尺監測井共埋設 7 支水壓計，其深度分別為 34 m、44 m、68 m、105 m、131 m、143 m、178 m，自 86 年 7 月 22 日起至 104 年 12 月為自動量測系統資料，量測期間曾因儀器故障而資料中斷，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。發生於民國 99 年 3 月 4 日 8 時 18 分的甲仙強烈地震，布袋港 200m 水壓自動監測站於 3 月 4 日中午 12 時亦成功的記錄到超額之孔隙水

壓資料。由於其中 34 m、105 m、143 m、178 m 之水壓計為開放式，故採手動量測，手動量測自 86 年 4 月至 104 年 10 月止，每月定期量測一次，自 94 年 1 月起因人力有限，故每 2~3 個月量測一次，99 年 1 月起，每 3 個月量測一次，資料不足的部份以內插法補充，量測結果如圖 4.10 所示。

由圖 4.10 顯示，105 m 處之水位變化極大，最高水位-16.6 m，最低水位-27.6m，91 年及 93 年降雨量較少時，水位明顯降低。131 m 處之水位變化亦很大，最高水位-17 m，最低水位可能為-24 m，其水壓大小及變化與 105 m 處屬同一含水層，143 m 及 178 m 水位大小及變化亦很相當，亦屬同一含水層，其最高水位為-17.8 m，最低水位為-26 m，其變化與 105m、131 m 處相似。

綜合各地層之地下水位資料，如圖 4.10 及圖 4.11 示，布袋港水層約可分為 4 個層次，34 m 水位為第 1 含水層之水位，44 m、68 m 水位為第 2 含水層，105 m 及 131 m 水位為第 3 含水層，143 m、178 m 水位為第 4 含水層。由水位變化現象顯示，第 1、2 層水位變化較小，較無超抽地下水現象，第 3、4 層地下水位低且變化極大，超抽地下水現象明顯，而且以旱季時，水位相對較低，表降雨量減少時，超抽地下水更為嚴重。

## (2)300m

於 90 年度選擇位於沉陷監測井旁之適當位置安裝兩孔深層水壓監測井，分別為 100 公尺及 300 公尺，每孔埋設四支水壓計，其深度為 35m、50m、85m、103m、150m、200m、250m、303m 共八支，並自 90 年 9 月起進行定期量測，如圖 4.12 顯示，35 及 50m 之水位介於-2.4~-3.5m 之間，屬淺層水位，85 及 103m 為較深層之水位介於-15~-24m 之間且屬同一含水層，其中以 91 年 5 月及 93 年 6 月之水位分別降至-22m 及-24m 較明顯變化，150m 及 200m 之水位介於-19.2~-23.3m 之間亦屬同一含水層，250m 深層之水位介於-21~27m 之間，而 303m 之水位又屬另一含水層，其水位介於-22~-25m 之間變化。

### 3. 布袋港地層下陷

#### (1)200m

於布袋港區第二期海埔地西北角隅之位置，設立 200 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 8、16、30、41、56、66、76、85、100、110、120、131、140、157、170、181、190、200 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 18 個磁環，每個月之中旬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，資料值由鈰鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 4.13 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖顯示，從 86 年 2 月至 104 年 10 月之 18 年 8 個月期間，布袋港地表下 8 m 至 200 m 間之沉陷總量為 65 公分，而其中 140~200 m 之沉陷量 33 公分，佔總沉陷量之 50% 以上，由此資料顯示，布袋港之沉陷屬於深層沉陷，且較 200 m 更深之處仍可能有沉陷發生，因此布袋港之總沉陷量應比監測所量測之壓縮總量還大。

#### (2)300m

另於商港近南堤之砂石碼頭區，亦完成設置 300 公尺深之地層下陷監測井，分別於深度 3、7、11、21、31、35、51、66、83、94、102、109、112、123、134、142、156、163、178、190、202、212、218、231、241、261、278、285、294、300m 之位置各安裝一個沉陷磁環，共計 30 個。圖 4.14 為至民國 104 年 10 月止，不同深度地層之個別壓縮量，可發現較深之地層壓縮量較小，壓縮量較大之地層為 66~83m 及 94~102m 之深度，因屬粘土層，故壓縮量較大。

由圖 4.15 分層觀測圖顯示，自 89 年 10 月~104 年 10 月止，15 年之累積總沉陷量約 80 公分，設置初期與 93 當年因缺水故沉陷量較大，分別為 90 年沉陷 7.4 公分、91 年沉陷 7.1 公分、92 年沉陷 11.6 公分及 93 年沉陷 13.6 公分，自 90 至 93 年止，四年期間共下陷 39.7 公分，近 5 年(99 至 104)總沉陷量約 18.6 公分。監測期間 90 年 8 月時該區進行鑿井，導致 90 年比 91 年沉陷量較大，92 年 2 月時該區

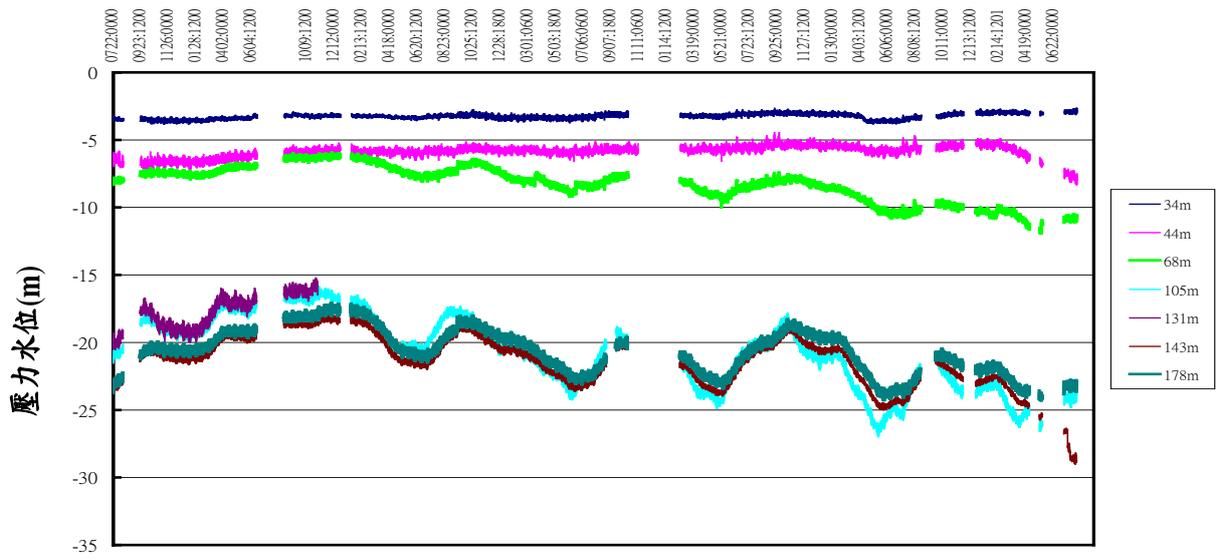
再進行新填土約 2m，104 年 6 月時該區再進行新填土至約 6m，導致 92、93 年及 104 年沉陷增大許多。各分層沉陷量大約可區分為 7~66m、66~102m、102~190m、190~300m 等 4 個層次來分析，66~102m 之累積沉陷量 25.5 公分，約佔總沉陷量之 35%。其中以 102~190m 之沉陷量為 31.7 公分所佔比例最大，約佔總沉陷量之 45%，190~300m 之沉陷量較少為 1.2 公分，約佔總沉陷量之 2%，綜合以上得知，66~190m 深度之累積沉陷量為 62 公分約佔總沉陷量之 80%，與 200m 監測井監測結果比較，總沉陷量較大一些，而且主要沉陷之深度不同，因此需要進行長期之監測以探討原因。

### (3)布袋港水準基站

布袋港 400m 深之水準基站，自民國 92 年設置於商港區的西北角隅，為一個長期之地層下陷自動監測站，設定時間為每 6 小時自動記錄一筆，經監測結果，自 92 年 9 月至 104 年 12 月為止共 12 年之總累積下陷量約為 36 公分，如圖 4.16a 及 4.16b 所示，其中 92 年 9 月至 97 年 4 月累積下陷量約 17 公分，98 年 7 月至 104 年 12 月之累積下陷量約 18.9 公分，97 年 5 月至 98 年 7 月因儀器故障缺少資料。

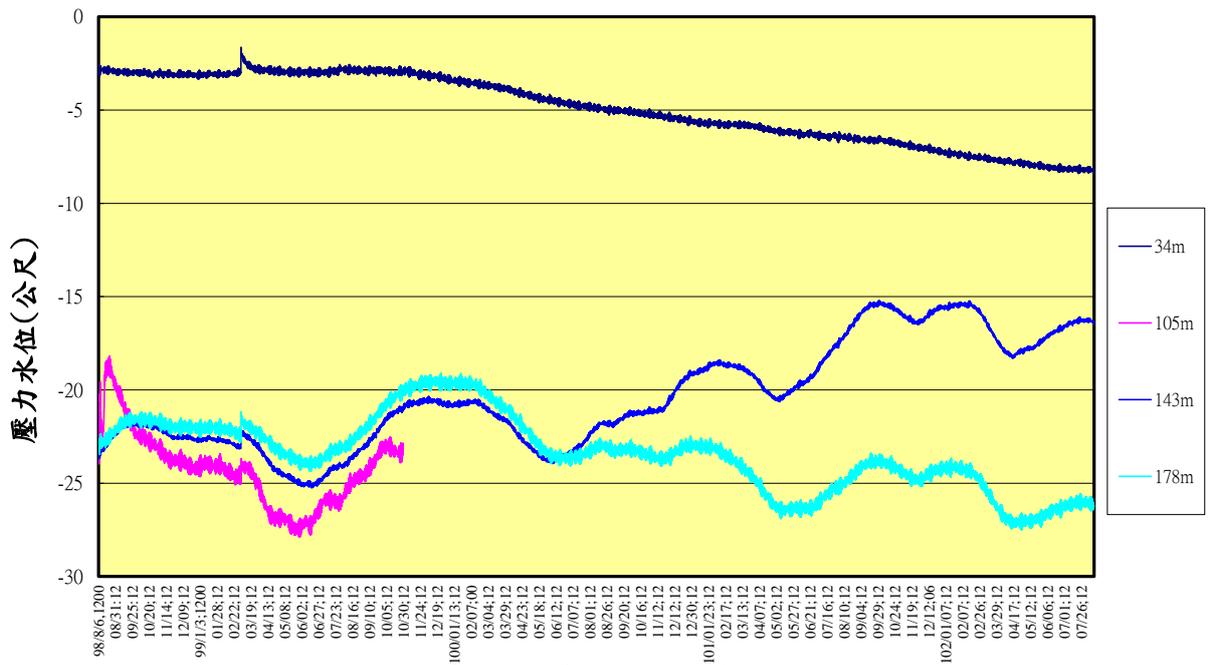


圖 4.9 布袋港地層下陷監測井位置圖



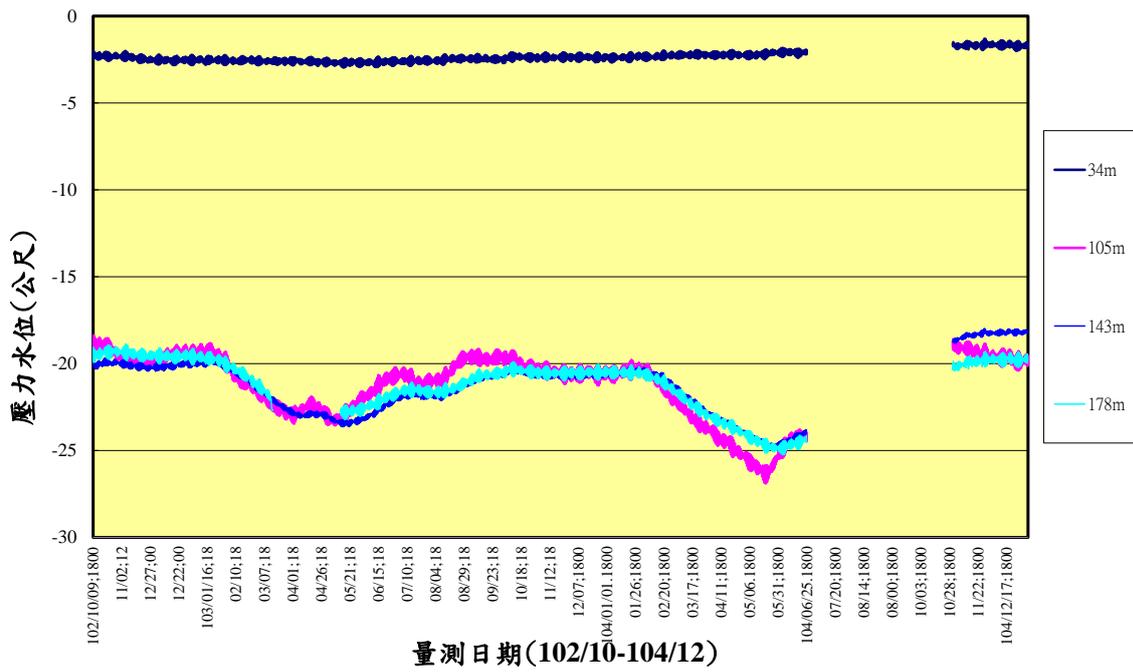
日期(86/7/22--92/8/14)

圖 4.10a 布袋港分層水位變化圖(自記式)



量測日期(98/08-102/8)

圖 4.10b 布袋港分層水位變化圖(自記式)



4.10c 布袋港分層水位變化圖(自記式)

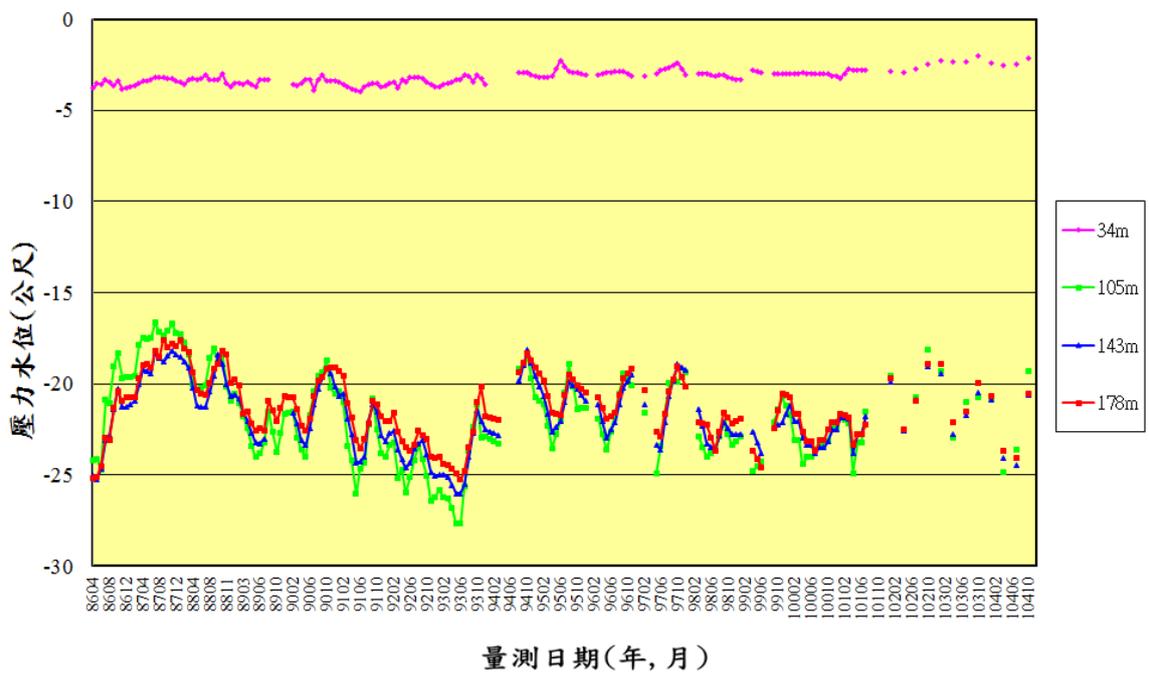


圖 4.11 布袋港(200m)分層水位變化圖(手動量測)

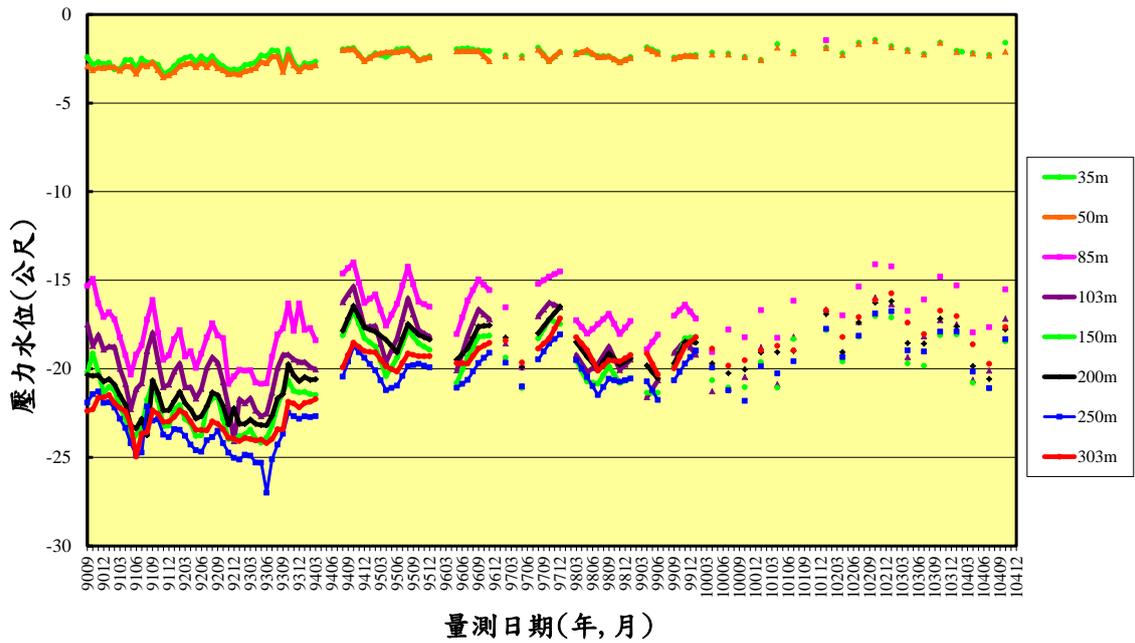


圖 4.12 布袋港(300m)分層水位變化圖(手動量測)

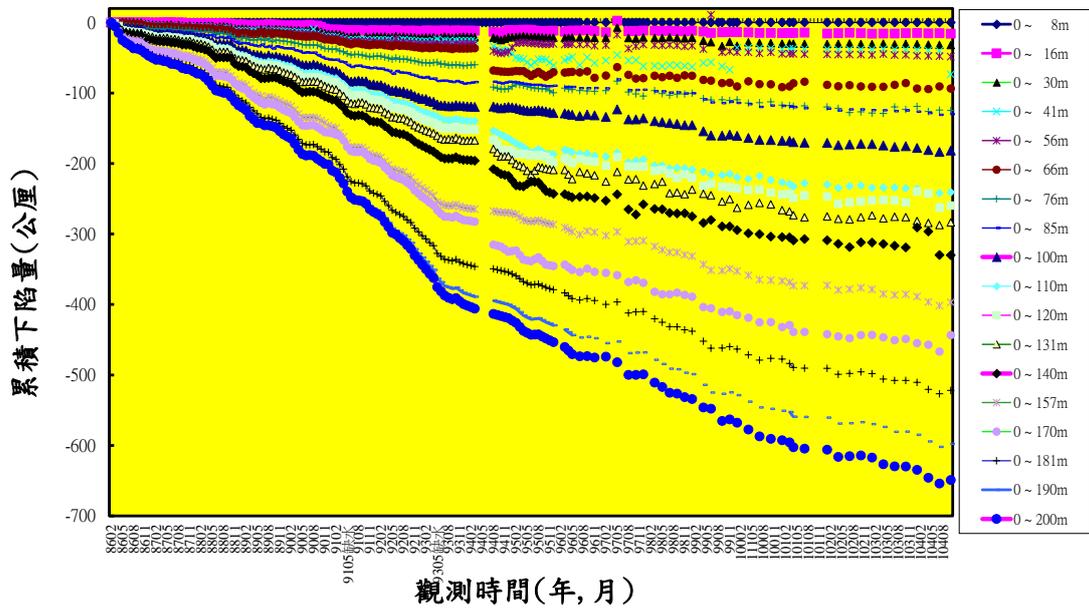


圖 4.13 布袋港(200m)分層累積下陷圖(手動量測)

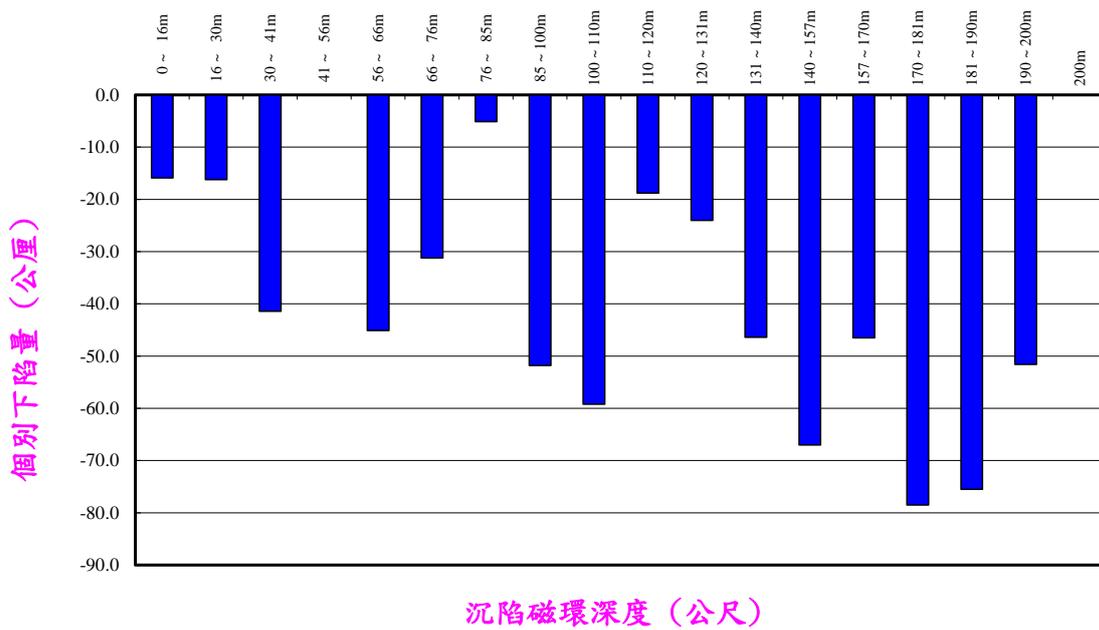


圖 4.14 布袋港(200m)分層個別下陷量圖

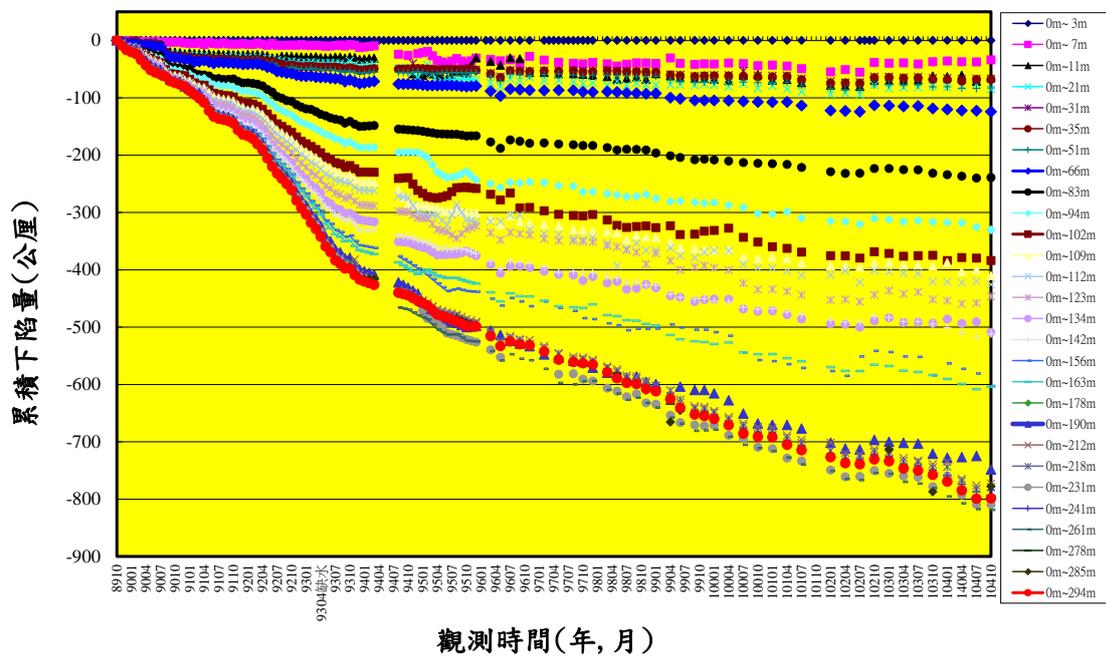


圖 4.15 布袋港(300m)分層累積下陷量圖

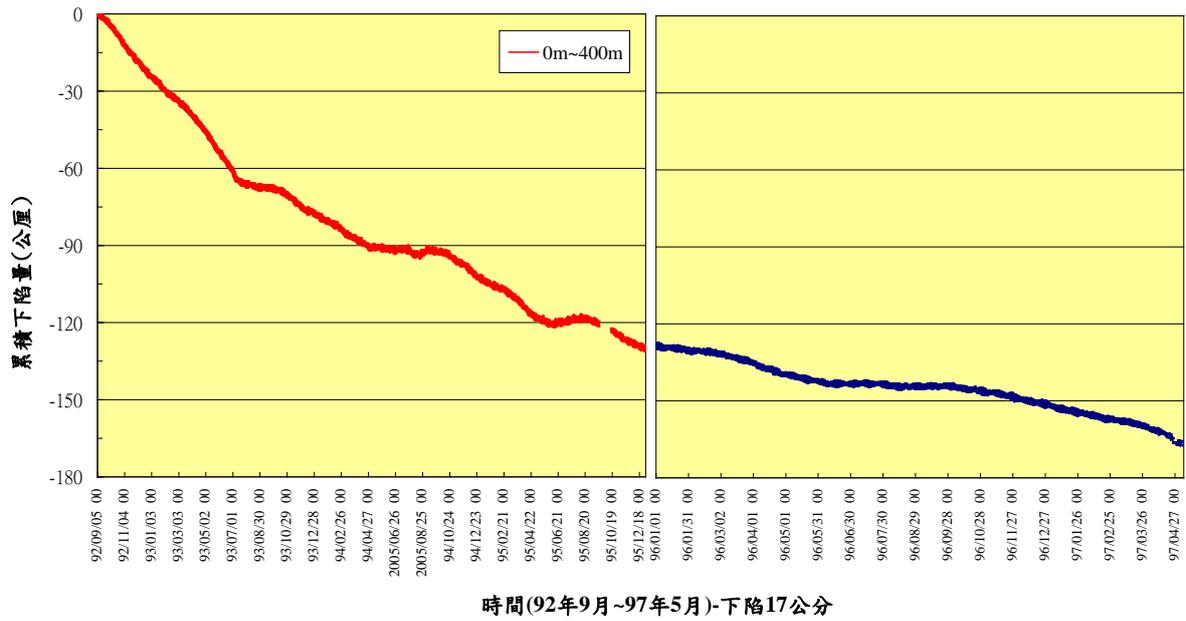


圖 4.16a 布袋港(400m)水準基準累積下陷量圖(92/09/04~97/05/30)

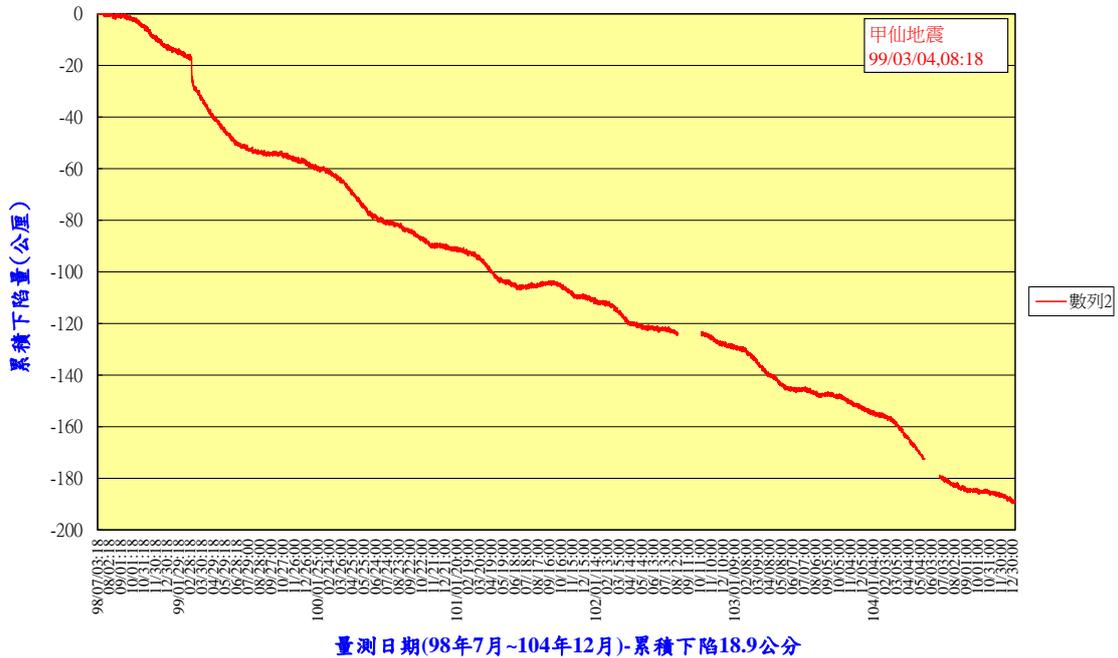


圖 4.16b 布袋港(400m)水準基準累積下陷量圖(98/07/03~104/12/31)

### 4.3.2 布袋港平面水準測量

布袋港自 89 年至 92 年實施水準測量後即缺少檢測資料，故自 101 年起至 103 年持續檢測布袋港區地層下陷及檢核 400m 水準基站之下陷量，實施港區的平面一等水準測量。一來可了解港區自 93 年至 103 年地層下陷情形，二來可藉著 400m 水準基站微小的下陷量作為港區水準基點，作為後續引測港區地盤下陷水準檢測之基準點。

#### 1. 水準測量檢測範圍

水準測量檢測範圍，自 101 年起至 103 年止，近 3 年檢測布袋港地層下陷平面水準測量區域如圖 4.17 所示，首先檢測布袋港區內深層水準樁「井 BM3」，校對高程無誤後，作為監測點水準測量之依據，並引測至布袋鎮及布袋港區內。

#### 2. 水準測量網形規劃

水準網形規劃主要任務是擬定水準網的施測方案，包括測量路線的進行方式與水準測網的構成。水準路線的行進方式及水準網形的設計，是為能考慮提高觀測值的精度與可靠度，藉由施測前的規劃與網形設計，可探討出觀測值對於沉陷資訊的檢測能力。水準網形說明如下：

本次布袋港地層下陷平面水準測量，進行布袋鎮及布袋港區監測點水準測量，佈置四個環線閉合網，各測線及環線佈置如圖 4.18。

#### 3. 水準測量作業方法與規範

水準測量作業的重點是藉由測量程序與步驟的安排來消弱誤差的影響。野外作業相關之方法與規範依本所港研中心委辦測量規範、內政部規範及聯勤總部測量隊之作業手冊而釐定作業準則手冊，有關於規範部分簡述重點如下：

(1) 水準點之間每一測段至少應作往返觀測各一測回，且按先往測再返測順序進行。

- (2)控制系統檢測，各測段的往測與返測的差值，其允許誤差為  $3\text{mm}\sqrt{k}$  ( $k$  為公里數)。
- (3)主水準路線，各測段的往測與返測的差值以及環線的閉合差，其允許誤差為  $3\text{mm}\sqrt{k}$  ( $k$  為公里數)。
- (4)兩水準點高程觀測應由同一台儀器自一水準點出發，閉合於另一水準點，不可用不同水準儀施測於臨時節點的高程值相加組合。
- (5)水準測量使用的儀器是 Zeiss Dini-12 一等精密電子自動水準儀，配合精密鋼尺作業，精密鋼尺皆附有圓形水準器及扶尺，減少標尺的晃動。
- (6)觀測時標尺與儀器距離約 50 公尺，前後視距約相等，以減除視準軸誤差及折光誤差。作業時觀測手配備雷射槍，達到快速量距及精準調整前後視距相等；最大前後視距差：每一測站前後視距差為 0.5 公尺至 1 公尺。
- (7)各測段以直接水準測量進行往返觀測，各節點為同一標尺放置(即測站的次數為偶數)。
- (8)往返兩次觀測整置儀器及標尺位置不得為同一地點。亦不可用反號之結果作為返測或往測。
- (9)高程所有計算及提送成果均至公尺後小數點第五位。

水準測量內業成果計算的檢核分為三個階段，首先檢討每一測段往返高程差的差值是否小於規範允許誤差的限定值，如超過則必須重測。第二階段依幾何條件檢核閉合誤差，判定環線閉合網的閉合差是否小於規範允許誤差的限定值。第三階段依據最小二乘法理論整體平差，以高程差為觀測量，距離的倒數為權，組成間接觀測方程式，整體平差並加入觀測值的可靠度分析。

#### 4. 水準環線分析

嘉義縣布袋鎮及布袋港區監測點水準網各閉合環線及觀測高差

明細列印於附錄三，環線內各測線觀測高程差明細列印於附錄四。閉合環線的觀測精度分析如表 4-8，每個閉合環線的閉合差觀測精度皆在允許誤差內。

## 5. 平面水準測量結果

布袋港區於 101 年 7 月中旬進行港區平面水準測量，經檢測量結果，自 93 年至 101 年止布袋港區之累積下陷量如圖 4.19 所示，累積最大下陷樁位是井 BM2(300m 沉陷井)，下陷量為 34.23 公分。井 BM1(200m 沉陷井)下陷量為 26.28 公分。最小下陷樁位為 IHMT01 的 4.95 公分。101 年度檢測，年平均最大下陷速率是井 BM2 樁位的 4.2 公分，最小下陷樁位為 IHMT01，年平均下陷速率為 0.6 公分。

布袋港區 102 年 6 月中旬進行水準測量結果，自 93 年至 102 年止港區之累積下陷量如圖 4.20 所示，累積最大下陷樁是井 BM2(300m 沉陷井)，下陷量 36.23 公分。井 BM1(200m 沉陷井)下陷量 27.57 公分。最小下陷樁位為 IHMT01 的 4.8 公分，年平均最大下陷速率是井 BM2 樁位的 4 公分。101 年至 102 年累積下陷量，如圖 4.21。

布袋港區 103 年 6 月中旬進行平面水準測量，經檢測結果，自 93 年至 103 年止布袋港區之累積下陷量如圖 4.22 所示，累積最大下陷樁是井 BM2(300m 沉陷井)，下陷量 38.17 公分。井 BM1(200m 沉陷井)下陷量為 29.34 公分，102 年至 103 年累積下陷量，如圖 4.23。

綜合以上水準測量檢測結果，布袋港自 101 年 7 月至 103 年 6 月中旬止，井 BM2(300m 沉陷井)下陷量約 4 公分，井 BM1(200m 沉陷井)累積下陷量約 3 公分。

檢核 400m 水準基站之下陷量，係參考歷年水利署地層下陷及本所布袋港地層下陷平面水準測量報告文獻，即以嘉義縣水上鄉台 1 線之水準樁(BM9803)為起始點，引測至井 BM3 (400m 沉陷井)為終點，兩點間之距離為 41.8 公里，自 92 年度測量高程差值為

-20.75756 公尺至 102 年度測量高程差值為-20.79151 公尺，故其高程差變化量年平均值為 3.395mm，皆在允許誤差 19.39mm 之範圍內（允許誤差  $3\text{mm}\sqrt{k}$ ， $k$  為公里數），詳如表 4-9 所示，由此可證明水準樁「井 BM3」也相對穩定。

**表 4-8 環線閉合差分析表**

水準閉合環線編號	測線關係	閉合環線總長度(km)	環線閉合差(mm)	允許誤差(mm)
環線四	-L12 -L14 -L16 -L15	4.887	1.134	6.63
環線五	-L14 -L21 -L22 -L13	5.075	1.564	6.76
環線六	L18 + L19	2.517	0.702	4.76
環線七	L09-1 -L09 +L11 -L12	3.224	1.053	5.39

**表 4-9 BM9803~井 BM3 高程變化量**

起點	終點	92 年高差(m)	93 年高差(m)	101 年高差(m)	102 年高差(m)
BM9803	井 BM3	-20.75756	-20.75121	-20.79232	-20.79151

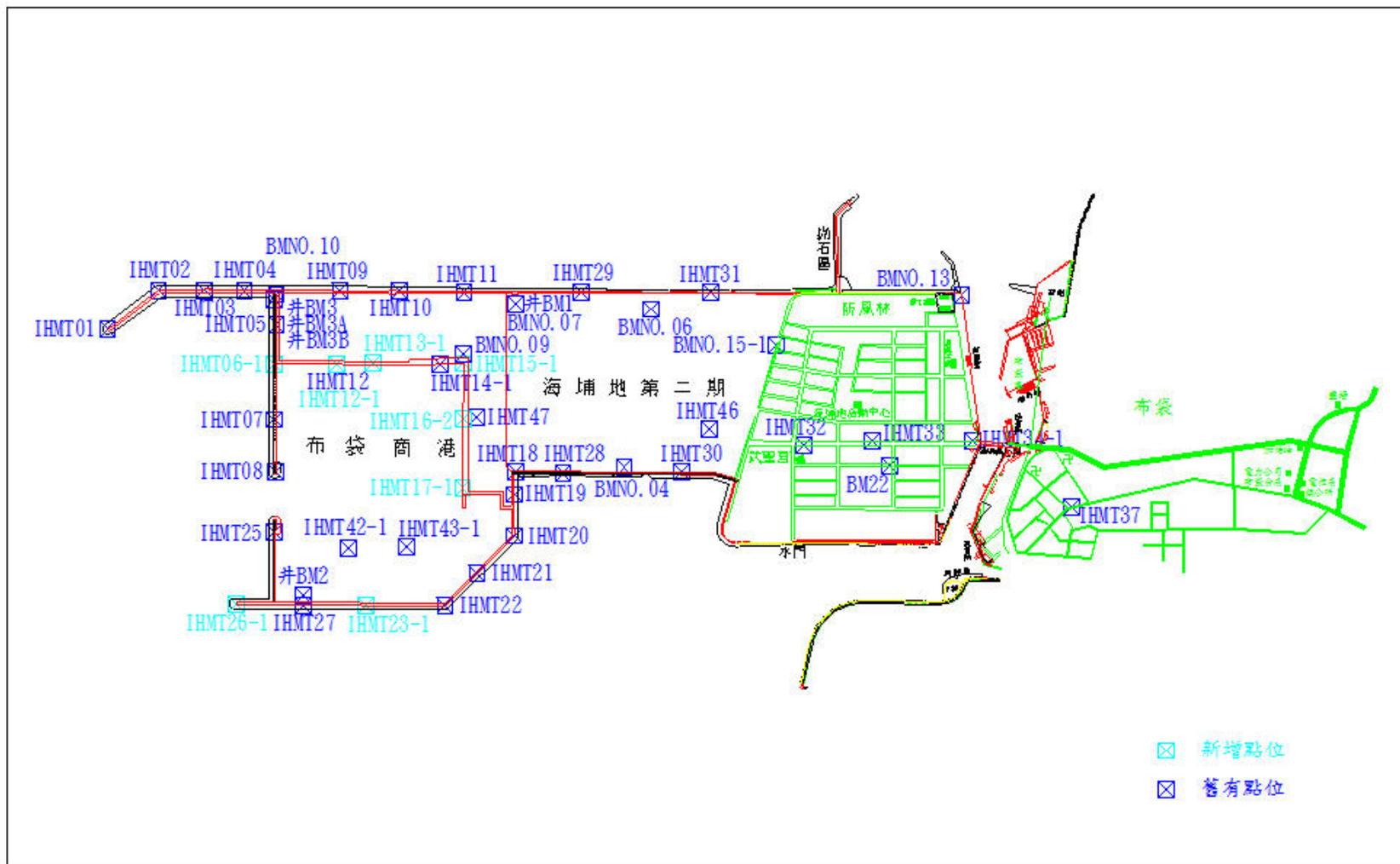


圖 4.17 嘉義縣布袋鎮及布袋商港區監測點水準測量工作範圍圖

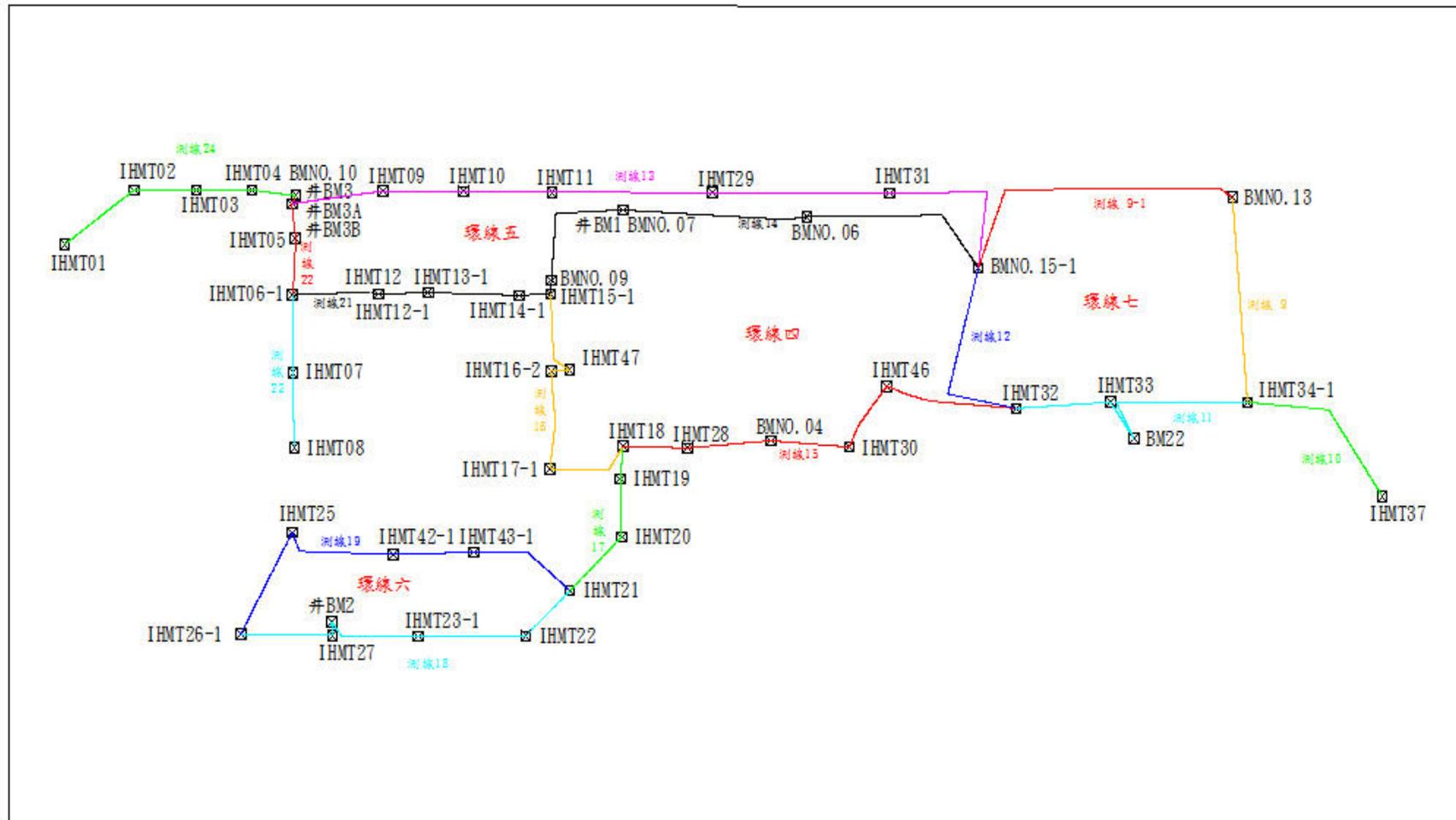


圖 4.18 嘉義縣布袋鎮及布袋港區監測點水準測量水準測線、環線佈置圖

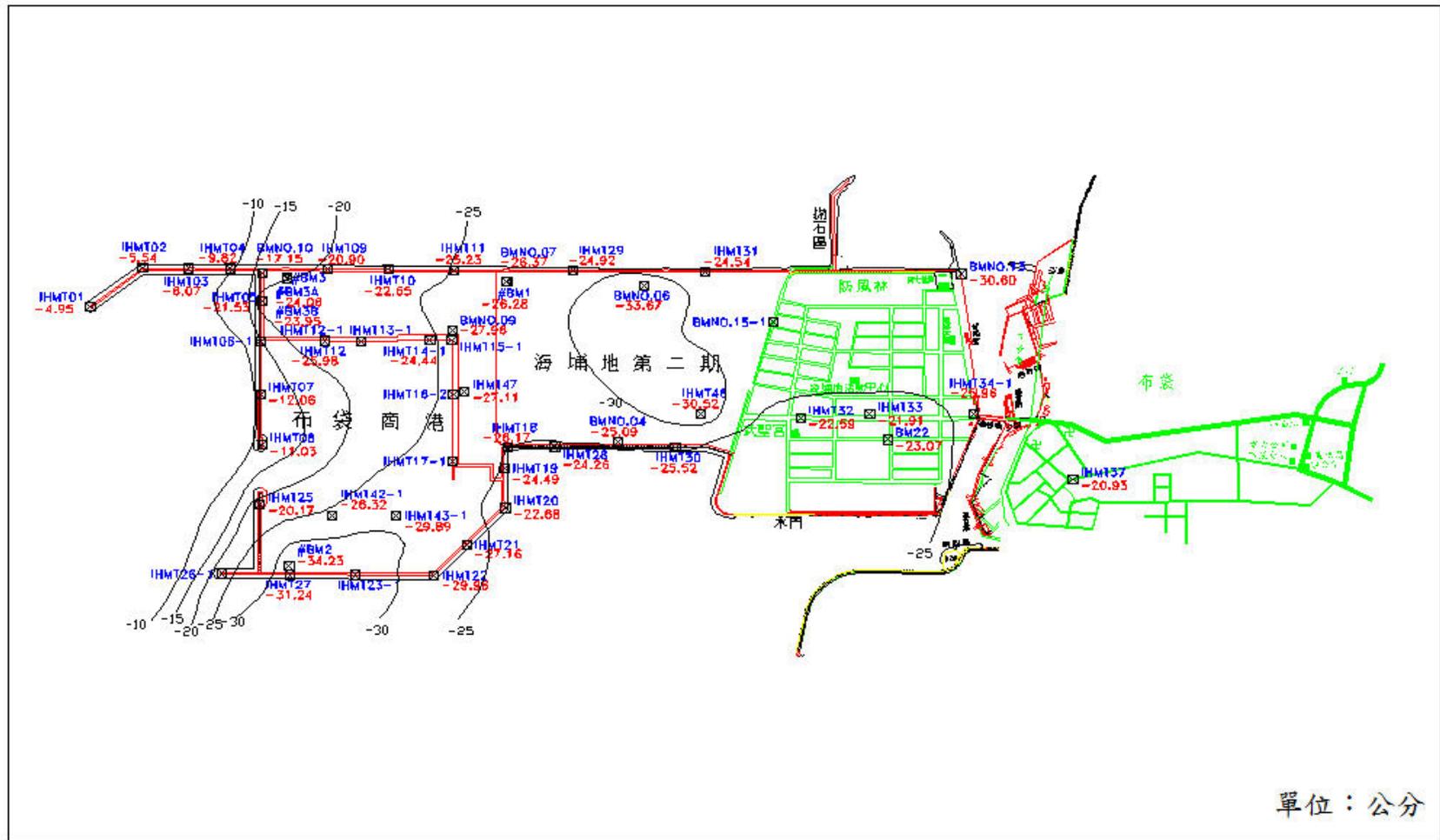


圖 4.19 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(93~101 年)

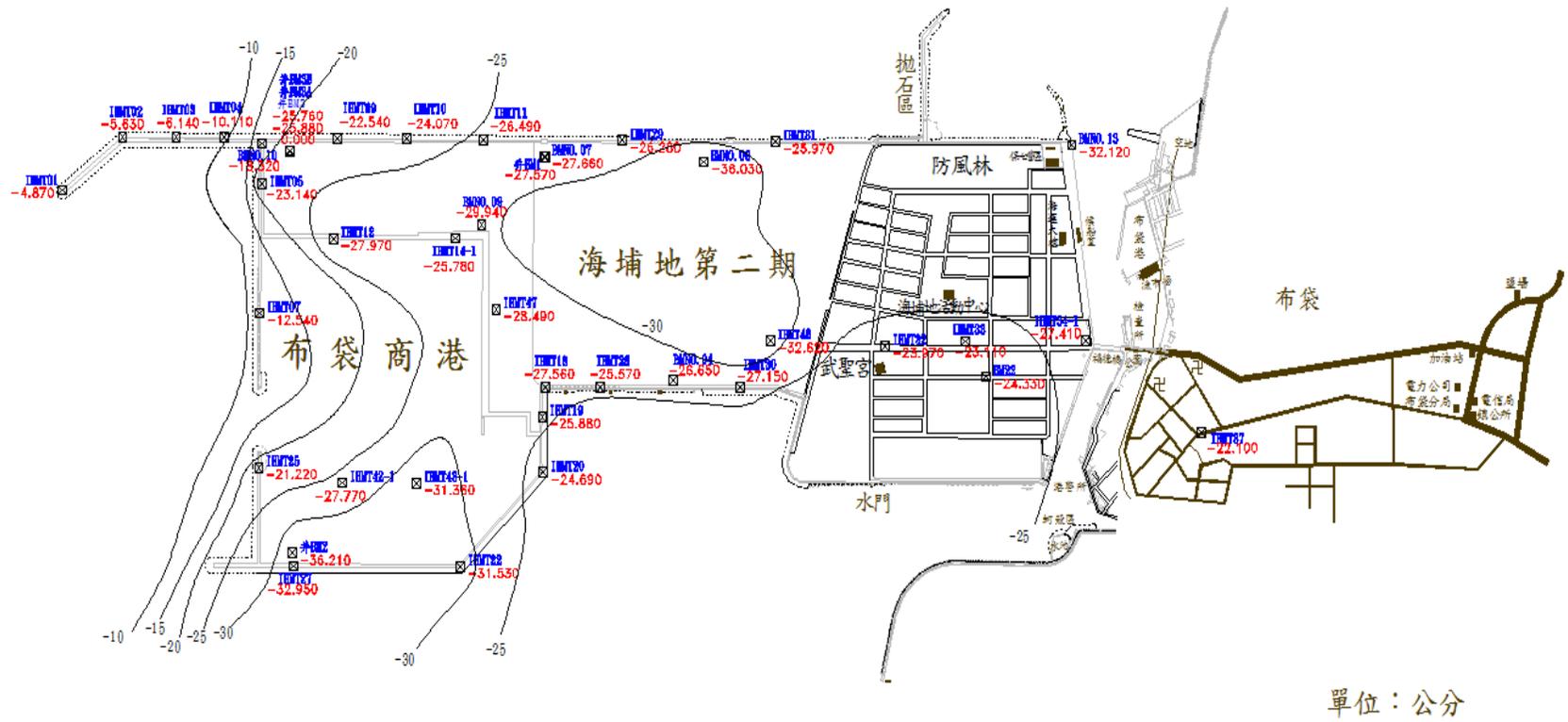


圖 4.20 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(93~102 年)





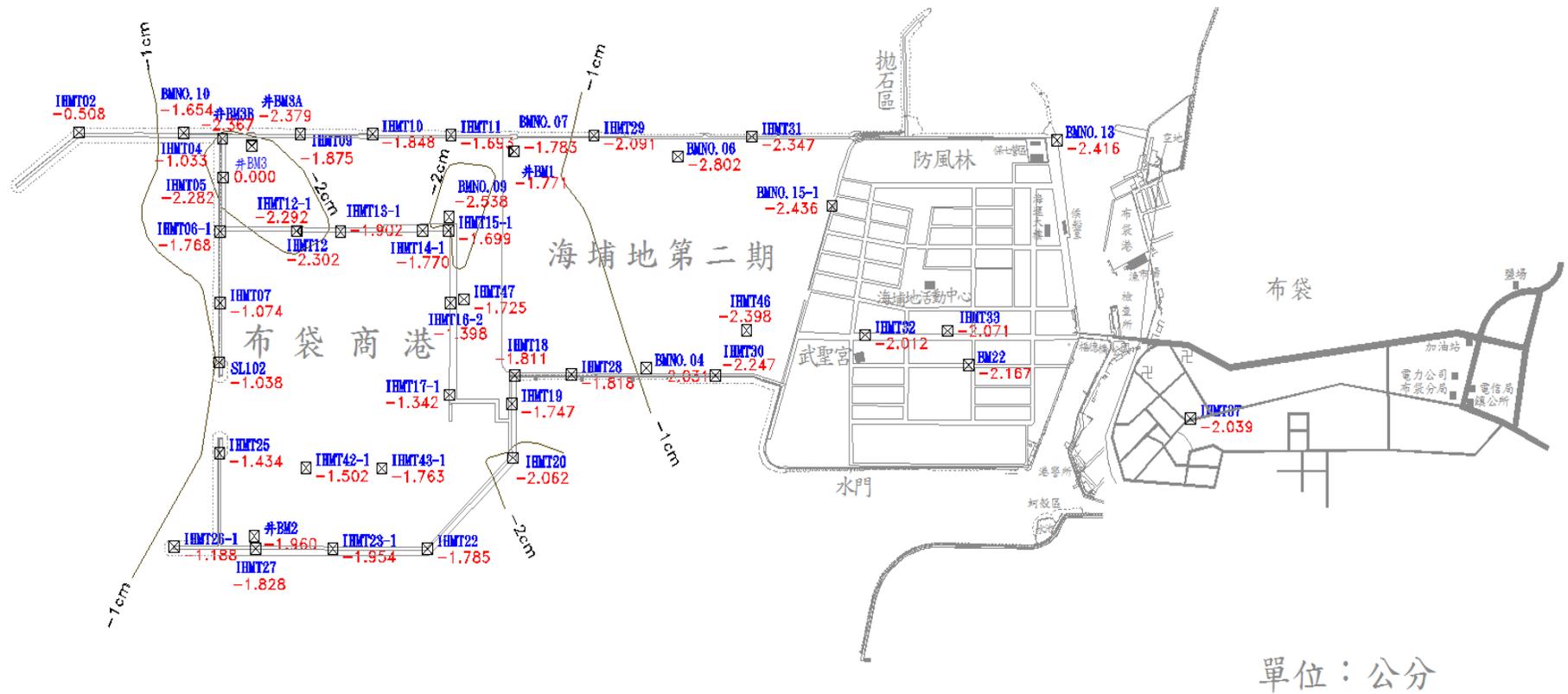


圖 4.23 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(102~103 年)

### 4.3.3 大鵬灣監測站

#### 1. 地下水位分析

於大鵬灣風景區西南角隅，埋設 202 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 5 支水壓計，其深度分別為 35 m、58 m、105 m、142 m、202 m，以手動及自動兩種方式進行量測，時間自 87 年 3 月 15 日起至 104 年 10 月止。其中 87 年 9 月 14 日至 10 月 30 日、88 年 7 月 13 日至 9 月 14 日及 89 年 10 月 17 日至 12 月 30 日止，因自動量測儀故障，而缺乏資料。由於水位井為開放式，亦可以手動量測水位，手動量測自 87 年 3 月開始，每月量測一次，99 年 1 月開始，每 3 個月量測一次，其結果如圖 4.24 所示：

#### 2. 分層地層下陷分析

為了探討大鵬灣不同深度之壓縮行為，於水壓觀測站旁之位置，設立 200 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 4、26、31、51、55、62、90、101、103、108、115、119、124、129、138、146、155、161、173、177、188、189 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 22 個磁環，每個月之中旬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，以分析不同深度地層之壓縮量，資料值由鈹鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 4.25 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖 4.25 顯示，從 87 年 3 月至 104 年 10 月止，共 17 年 6 個月期間，大鵬灣地表下 4 m 至 189 m 間之沉陷總量為 13.5 公分，而其中地表~51.3 m 之沉陷量為 10 公分，佔總沉陷量之 80% 以上，由此資料顯示，大鵬灣之沉陷屬於淺層沉陷。

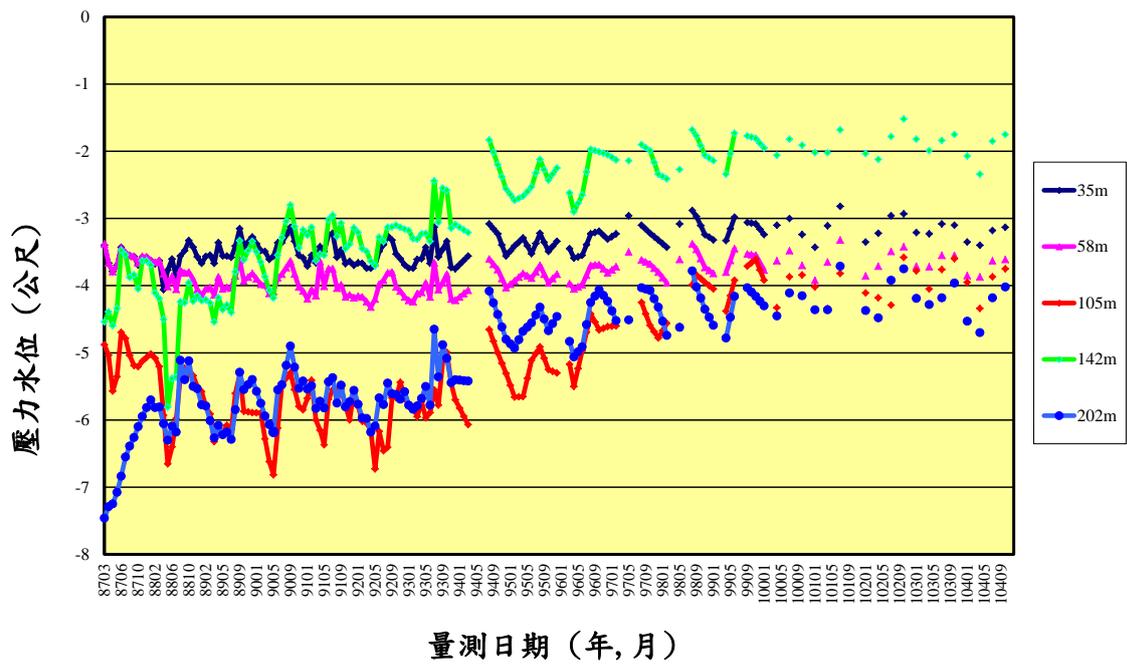


圖 4.24 大鵬灣分層水位變化圖(手動量測)

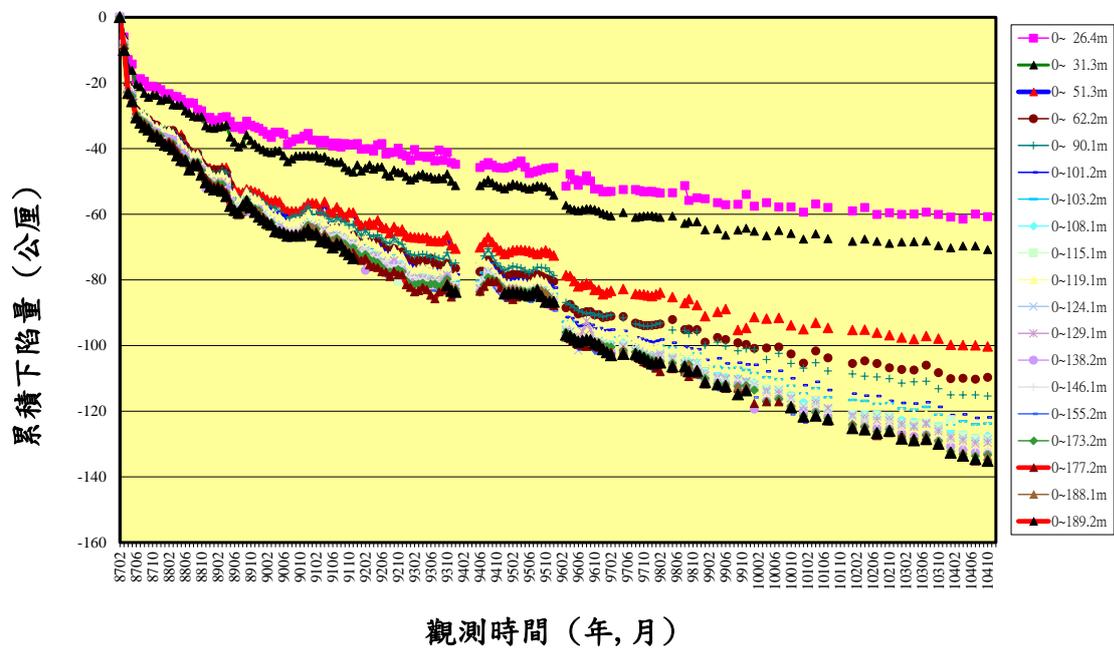


圖 4.25 大鵬灣地層分層下陷觀測圖

## 4.3.4 臺中港監測站

### 1. 地下水位分析

於臺中港之 26 號碼頭綠地區，設置 200 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 5 支開放式水壓計，其深度分別為 29 m、63 m、100 m、145 m、173 m，自動量測資料自 88 年 6 月 29 日起至 91 年 6 月 7 日止，因儀器故障而改以手動量測。手動量測自 88 年 7 月開始，每月量測一次。94 年起，改以每兩個月量測一次，97 年 8 月至 98 年 8 月因水位井卡管而缺記錄，資料記錄截至 104 年 10 月止，其結果如圖 4.26 所示。

因臺中港受到 921 大地震影響，導致港區 1~4 號碼頭有液化現象，地下水壓監測站亦取得記錄，如 88 年 9 月 21 日 00 時 00 分之各分層水位原約於 -3~-5 m，地震後 9 月 21 日 06 時 00 分之各分層水位約為 -0.2 m，因地震時間為 9 月 21 日 01 時 47 分，故印證各層水位是因地震後才上升。

### 2. 分層沉陷分析

於臺中港區第 26 號碼頭綠地之位置，設立 199 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 0、3、10、18、27、31、54、73、90、110、138、157、164、179、181、189、199 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 17 個磁環。自 88 年 6 月開始量測，而 94 年 8 月起因儀器卡管，故累積沉陷量僅能自地表量測至 181m 深，累積總沉陷量至 104 年 10 月止約為 57 公厘，其中自 0m~90 m 深之沉陷量約 46 公厘，佔總沉陷量 80% 以上，其間以 88 年 9 月至 10 月，因地震產生之總沉陷量 32 公厘最多，而 88 年 10 月至 98 年 11 月止，總沉陷量為 18 公厘，如圖 4.27 所示。

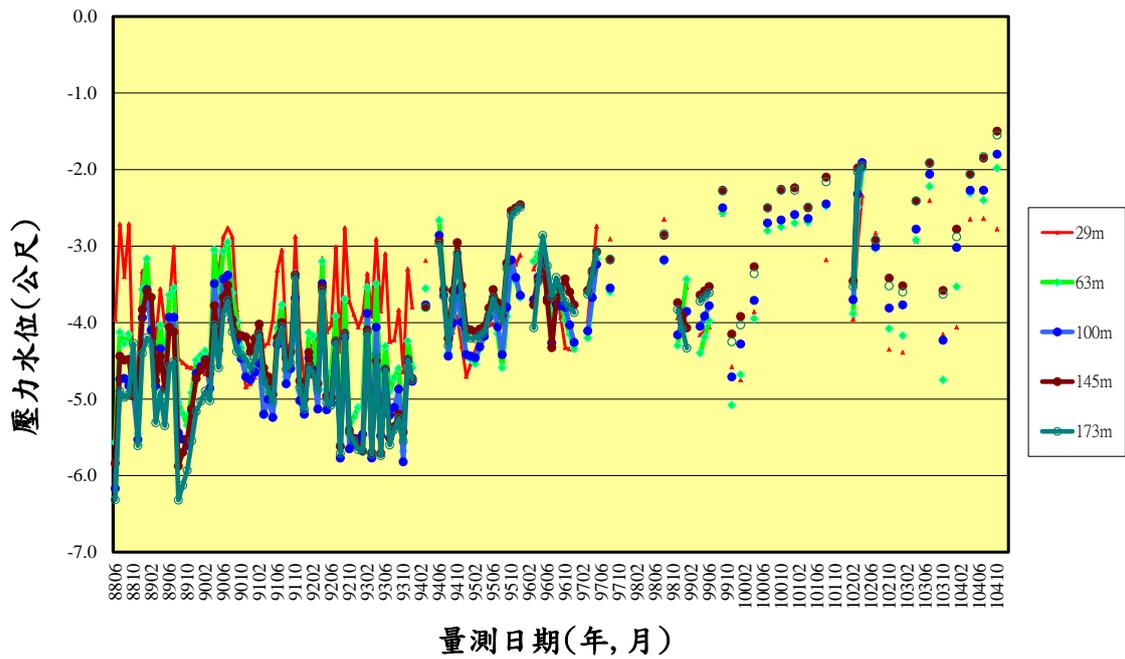


圖 4.26 臺中港分層水位變化圖(手動量測)

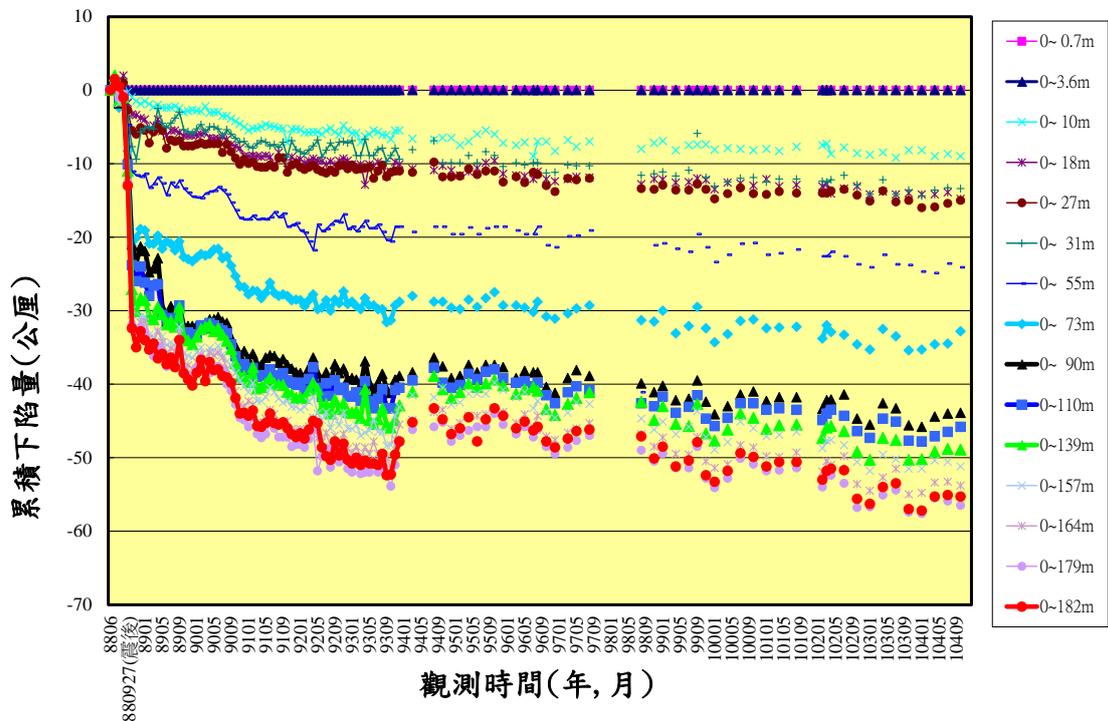


圖 4.27 臺中港分層累積下陷量圖(200m)

### 4.3.5 安平港監測站

#### 1. 地下水位分析

於安平港之 18-19 號碼頭綠地區，埋設 200 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 5 支開放式水壓計，其深度分別為 40 m、75 m、105 m、145m、182 m，自 88 年 7 月開始量測，每月量測一次，99 年 1 月起，每 3 個月量測一次，其結果如圖 4.28 所示。

由圖 4.28 顯示，各地層之地下水位，40 m 及 75 m 為第 1 含水層之水位，105 m 為第 2 含水層，145m 為第 3 含水層，182 m 為第 4 含水層，由水位變化顯示，第 1 含水層之 40 m 及 75 m 含土層之水位變化較大，超抽地下水現象明顯，第 2 含水層之 105m 含水層之水位變化不大，第 3、4 層之 145m 及 182 m 之水位變化較大，唯水位不降反升，顯示此層水位有回補現象。整體來說，安平港附近地區近年來 (96 至 104 年) 應沒有受到超抽地下水影響，故地下水位呈現上升現象。

#### 2. 分層地層沉陷分析

於安平港之 18-19 號碼頭綠帶地區，設立 250 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 0.6、4、10、20、30、40、52、55、79、94、110、133、149、174、180、200、210、220、230、239、248、249 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 22 個磁環，每個月中旬定期以無線電波儀量測各沉陷磁環之相對移動變化量，求得不同深度土層之壓縮量，銜鋼尺讀數之最小刻度為公厘。

圖 4.29 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖顯示，從 88 年 7 月至 94 年 3 月之 5 年 8 個月期間，安平 18-19 號碼頭區地表下 0 m~200 m 間之沉陷總量為 73 公厘，而其中 0~56 m 之沉陷量為 67 公厘，佔總沉陷量之 88% 以上，由資料顯示，安平港 18-19 號碼頭區之沉陷屬於淺層沉陷，自 94 年 3 月起因測站儀器故障故量測資料中斷。

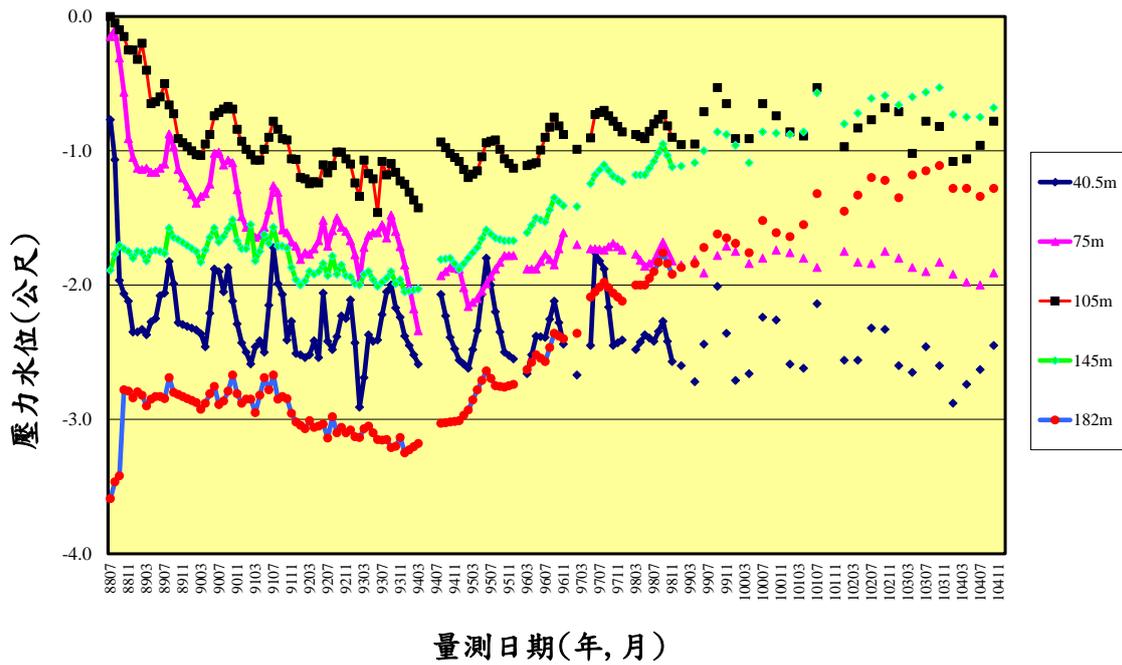


圖 4.28 安平港分層水位變化圖(手動量測)

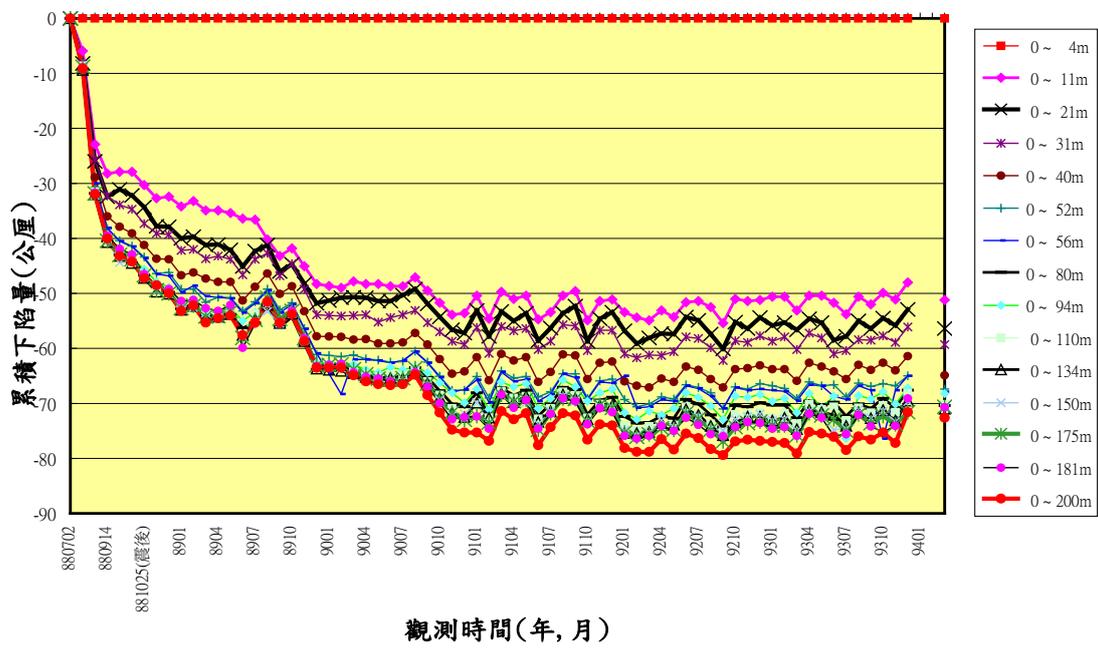


圖 4.29 安平港分層累積下陷量圖

## 第五章 資料庫在地理資訊系統上之應用

### 5.1 資料庫系統操作程序

由於西南沿海地區地質資料與長期監測的地層下陷資料非常龐大，需以資料庫方式建置，故全部資料以本所港研中心自行開發的「縣市分區土層及下陷基本資料庫」建置。在本所港研中心所開發的「縣市分區土層及下陷基本資料查詢系統」內主選單即為「鑽探資料」與「水準檢測資料」兩種選單，使用者可在此選單下查詢鑽探資料及水準測量資料，系統操作程序如下所示：

1. 在視窗作業環境下，執行 MapInfo 系統，進入該系統內。
2. 點選功能 Tools\Run MapBasic Program，選擇 D:\Taiwan\_sw\_1 內的執行檔 Taiwan\_sw\_2016\_N\_BK.MBX，按開啟選鈕，即進入縣市分區土層基本資料查詢系統。
3. 此時螢幕會展繪出臺灣縣市區位圖，並標示如臺中、彰化、雲林、嘉義、臺南、高雄與屏東等地區的分布位置。
4. 利用滑鼠，點選其中任一縣市，則螢幕展繪出該縣市的地圖，地圖以綠色標示陸面區域位置。如欲查詢「鑽探資料」時，可點選「鑽探資料」主功能選項下之第一選單「顯示鑽孔位置圖」，系統則展示該縣市之鑽孔位置圖。鑽孔位置圖以藍色標誌標記。
5. 系統顯示鑽孔位置圖後，可先點選一個孔位，後再點選「鑽探資料」主功能項下之第三選單「鑽孔報表資料」，資料則展示該鑽孔之編號、座標、深度、土壤岩層說明、N 值、含水量等基本物理性質。
6. 欲查詢孔位柱狀圖時，可任意點選一個孔位，再點選「鑽探資料」主功能項下之第四選單「柱狀圖」後，則出現三個選項可供選擇，分別是「單孔或多孔非排序展示」或「多孔展示\_由西向東排序」或「多孔展示\_由北向南排序」。

7. 點選「鑽探資料」主功能項下之第五選單至第 10 選單，係以不同判別模式來進行鑽孔土層的液化機率分析，分析方法有「Liao\_ 液化機率分析」、Lai\_賴聖耀\_判別模式液化機率分析、Seed\_液化分析、TokimatsuYoshimi\_液化分析、NJRA\_日本道路協會\_液化分析與Lai\_賴聖耀\_判別模式液化分析」等共六種方法可進行比較分析。
8. 點選「鑽探資料」主功能項下之第十一選單為「Ishihara 地震下陷分析」，點選本選單可進行鑽孔土層震陷量的分析。
9. 點選「鑽探資料」主功能項下之第十二選單為「選擇其他縣市」，點選後會回到「臺灣縣市區位圖」畫面，此時可隨意點選其他縣市。
10. 如欲查詢系統另外一個主功能項目「水準檢測資料」時，可利用滑鼠，於「臺灣縣市區位圖」點選其中任一縣市，則螢幕展繪出該縣市的地圖，然後點選「水準檢測資料」主功能選項下之第一選單「顯示水準檢測點位置圖」，系統則展示該縣市之水準檢測點位置圖。檢測點位置圖以藍色標誌標記。
11. 系統顯示水準檢測點位置圖後，可任意點選一個檢測點，然後點選「水準檢測資料」主功能項下之第三選單「顯示水準點點位說明圖」，資料則展示該點位之點名、號碼、座標、埋設日期、單位、點位詳圖與照片，點位說明圖之(高程資訊)亦包括歷年來之檢測日期、檢測高程、檢測單位、引用基點與基點高程等資料。
12. 欲查詢檢測點位之「下陷量圖」時，可點選「水準檢測資料」主功能項下之第四選單「展繪分年下陷量圖」後，則出現「起迄年份輸入對話框」選項可供選擇，分別是「下陷起算年份」與「計算終止年份」，使用者可依需求年份點選「確定」後即可出現該縣市起迄年份之「展繪分年下陷量圖」。
13. 如欲回到「臺灣縣市區位圖」畫面，可點選「水準檢測資料」主功能項下之第七選單為「選擇其他縣市」後即回到「臺灣縣市區位圖」畫面。

14. 利用工具箱內的放大、縮小、平移等工具，可作地圖縮放，以更精細地查詢資料。
15. 結束查詢，可於「縣市分區土層基本資料查詢系統」之「臺灣縣市區位圖」畫面關閉系統後則可停止本程式的執行。

## 5.2 雲林地區土層及下陷基本資料查詢

本節以雲林縣之土層及下陷量測資料查詢系統展示為例，本節依「鑽探資料」與「水準檢測資料」兩大主功能項目查詢展示操作程序說明如下：

### 5.2.1 鑽探資料功能查詢展示

1. 按照 5.1 節程式操作程序 1 至 3，使用者可進入查詢系統的主畫面，此時螢幕視窗會展繪出臺灣全島地圖與西南沿線建置主要縣市（如臺中、彰化、雲林、嘉義、臺南、高雄與屏東等港區）的分布位置，如圖 5.1 所示。
2. 將滑鼠遊標移至雲林標示文字區內，按滑鼠左鍵，可叫出雲林縣基本地圖圖層，地圖以綠色標示雲林縣轄區位置。雲林縣土層鑽探與水準檢測資料查詢表單下拉展示如圖 5.2 所示。
3. 出現雲林縣轄區位置後，可點選「鑽探資料」主功能項下之第一選單「顯示鑽孔位置圖」，系統則展示該區之鑽孔地點位置圖。鑽孔位置圖以藍色圓形標誌標記，表示所有雲林縣各鄉鎮所建置之土層鑽孔位置圖。雲林縣土層鑽探資料查詢表單下拉展示如圖 5.3 所示。
4. 系統顯示鑽孔位置圖後，可任意點選一個孔位，然後點選「鑽探資料」主功能項下之第三選單「鑽孔報表資料」，查詢方式如圖 5.4 所示。點選後即展示該鑽孔之編號、座標、深度、土壤岩層說明、N 值、含水量等基本物理性質。鑽孔報表資料展示如圖 5.5 所示。

3. 點選「鑽探資料」主功能項下之第四選單「柱狀圖」，可下拉出三個選項可供選擇，分別是「單孔或多孔非排序展示」或「多孔展示\_由西向東排序」或「多孔展示\_由北向南排序」。柱狀圖查詢展示如圖 5.6，點選「單孔或多孔排序顯示」展示如圖 5.7，單孔展示柱狀圖如圖 5.8 所示。
4. 如點選「鑽探資料」主功能下「柱狀圖」之「多孔展示\_由西向東排序」系統，展示圖查詢如圖 5.9，多孔柱狀圖展示如圖 5.10 所示。
7. 點選「鑽探資料」主功能項下之第五選單至第十選單，係以不同判別模式來進行鑽孔土層的液化機率分析，分析方法有「Liao\_ 液化機率分析」、Lai\_賴聖耀\_判別模式液化機率分析、Seed\_液化分析、TokimatsuYoshimi\_液化分析、NJRA\_日本道路協會\_液化分析與 Lai\_賴聖耀\_判別模式液化分析」等共六種方法可進行比較分析，液化機率分析查詢展示圖如圖 5.11。
8. 任意點選一種「液化機率分析」皆可下拉出四種分析方法可供選擇，分別是「單孔或多孔非排序展示」或「多孔展示\_由西向東排序」或「多孔展示\_由北向南排序」與「Lai 全區液化危險性指數分布分析」等，如圖 5.11 所示。
9. 如點選「Liao\_ 液化機率分析」下拉之「單孔或多孔非排序展示」後，會出現可供選擇地震強度之「地震規模 M」與「最大加速度 g」畫面，如圖 5.12 所示。如選擇「地震規模 7.3」與「最大加速度 0.163g」之地震強度後液化機率分析圖如圖 5.13。
10. 點選「Lai\_賴聖耀\_判別模式液化機率分析」下拉之「單孔或多孔非排序展示」後之畫面，如圖 5.14 所示。選擇「地震規模 7.3」與「最大加速度 0.163g」之地震強度後液化機率分析圖如圖 5.15。
11. 點選「鑽探資料」主功能項下之第十一選單為「Ishihara 地震下陷分析」，點選本選單可進行鑽孔土層震陷量的分析，如圖 5.16 與圖 5.17 所示。

12. 點選「鑽探資料」主功能項下之第十二選單為「選擇其他縣市」，點選後會回到「臺灣縣市區位圖」畫面，此時可隨意點選其他縣市。

### 5.2.2 水準檢測資料功能查詢展示

1. 按照 5.1 節程式操作程序 1 至 3，使用者可進入查詢系統的主畫面，即臺灣全島地圖與西南沿線建置主要縣市（臺中、彰化、雲林、嘉義、臺南、高雄與屏東等港區）的分布位置，如圖 5.1 所示。
2. 欲查詢系統另外一個主功能項目「水準檢測資料」時，可利用滑鼠，於「臺灣縣市區位圖」點選其中任一縣市，則螢幕展繪出該縣市的地圖，然後點選「水準檢測資料」主功能選項下之第一選單「顯示水準檢測點位置圖」，系統則展示該縣市之水準檢測點位置圖。檢測點位置圖以藍色標誌標記，水準檢測點展示如圖 5.18 所示。
3. 系統顯示水準檢測點位置圖後，可任意點選一個檢測點，然後點選「水準檢測資料」主功能項下之第三選單「顯示水準點點位說明圖」，資料則展示該點位之點名、號碼、座標、埋設日期、單位、點位詳圖與照片，點位說明圖之(高程資訊)亦包括歷年來之檢測日期、檢測高程、檢測單位、引用基點與基點高程等資料，水準檢測資料展示如圖 5.19、圖 5.20 所示。
4. 欲查詢檢測點位之「下陷量圖」時，可點選「水準檢測資料」主功能項下之第四選單「展繪分年下陷量圖」後，則出現「起迄年份輸入對話框」選項，分別是「下陷起算年份」與「計算終止年份」，如圖 5.21、圖 5.22，使用者可依需求年份點選「確定」後即可出現該區起迄年份之「展繪分年下陷量圖」，下陷量展示如圖 5.23。
5. 如欲回到「臺灣縣市區位圖」畫面，可點選「水準檢測資料」主功能項下之第七選單為「選擇其他縣市」。

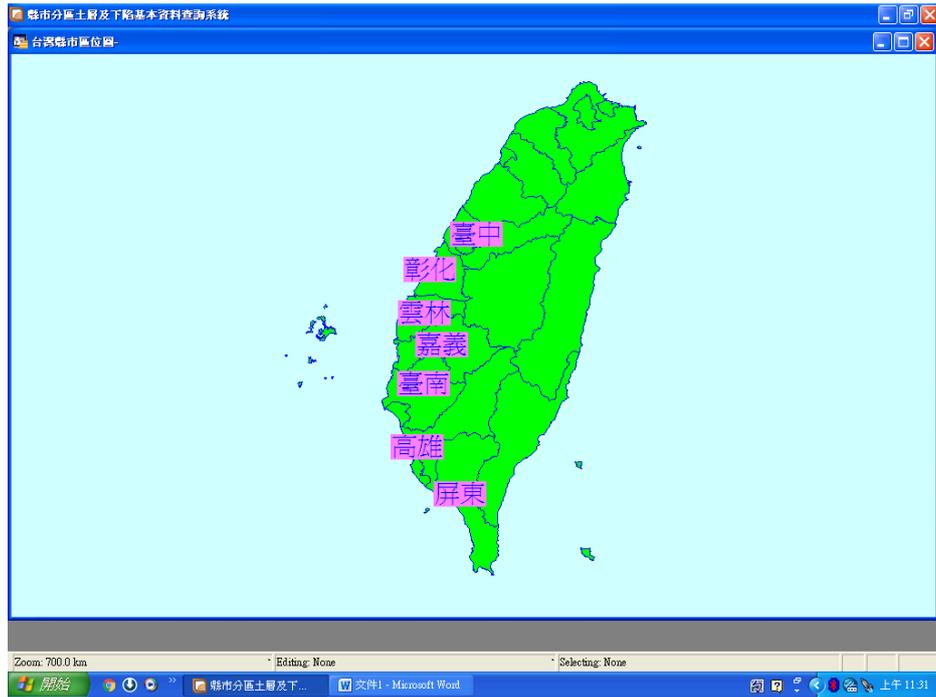


圖 5.1 查詢主畫面

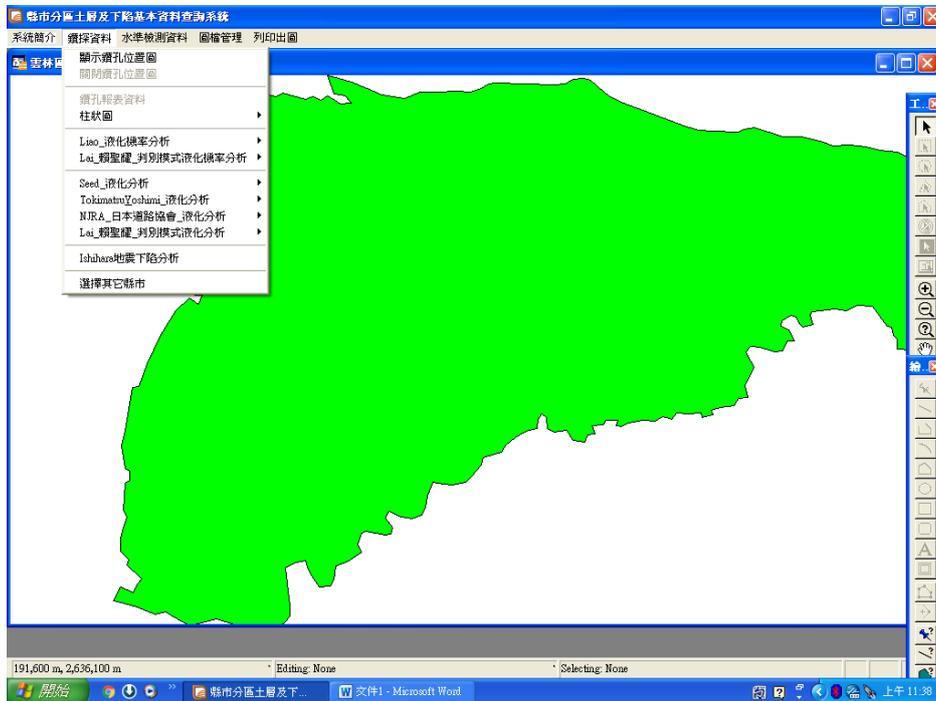


圖 5.2 雲林縣土層鑽探與水準檢測資料查詢表單下拉展示圖

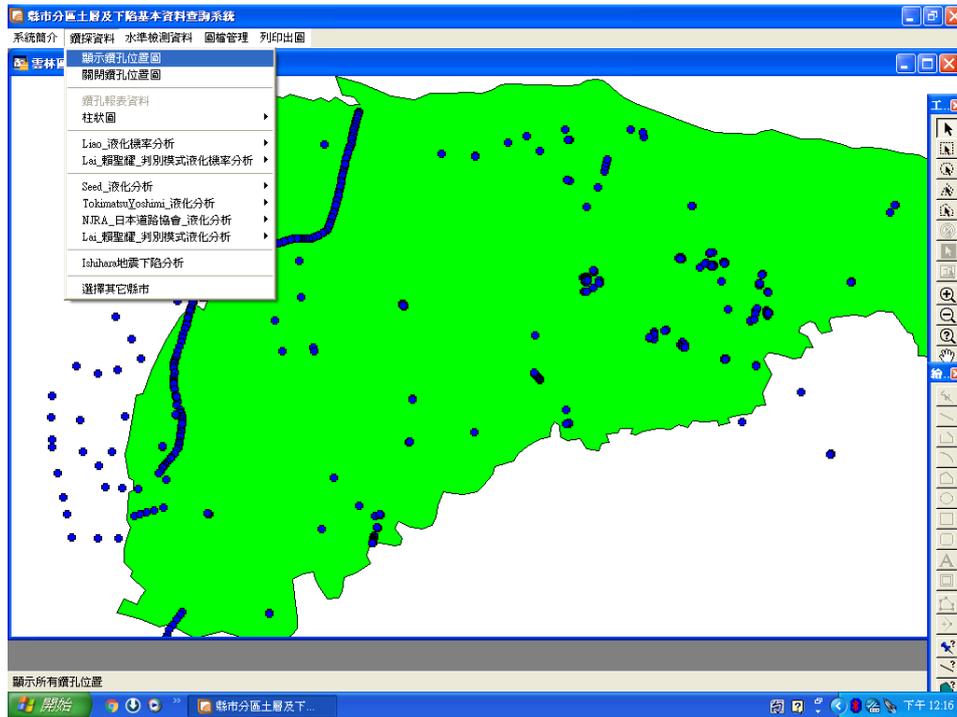


圖 5.3 雲林地區土層鑽探資料查詢表單下拉展示圖

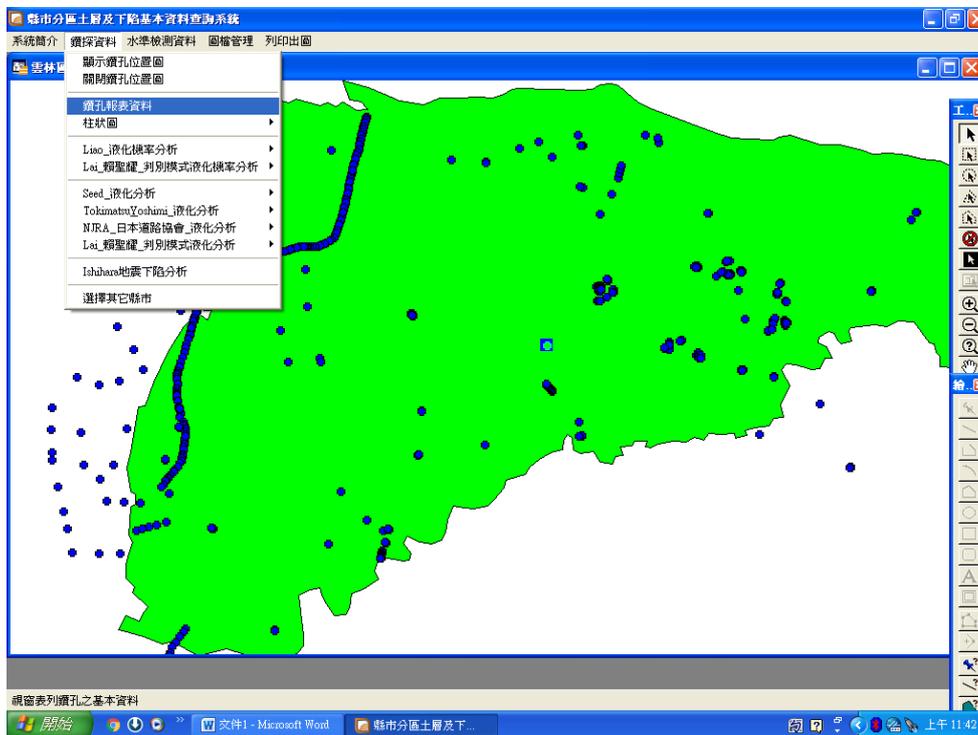


圖 5.4 雲林地區土層鑽孔資料報表查詢展示圖



圖 5.5 雲林地區土層鑽孔資料報表展示圖

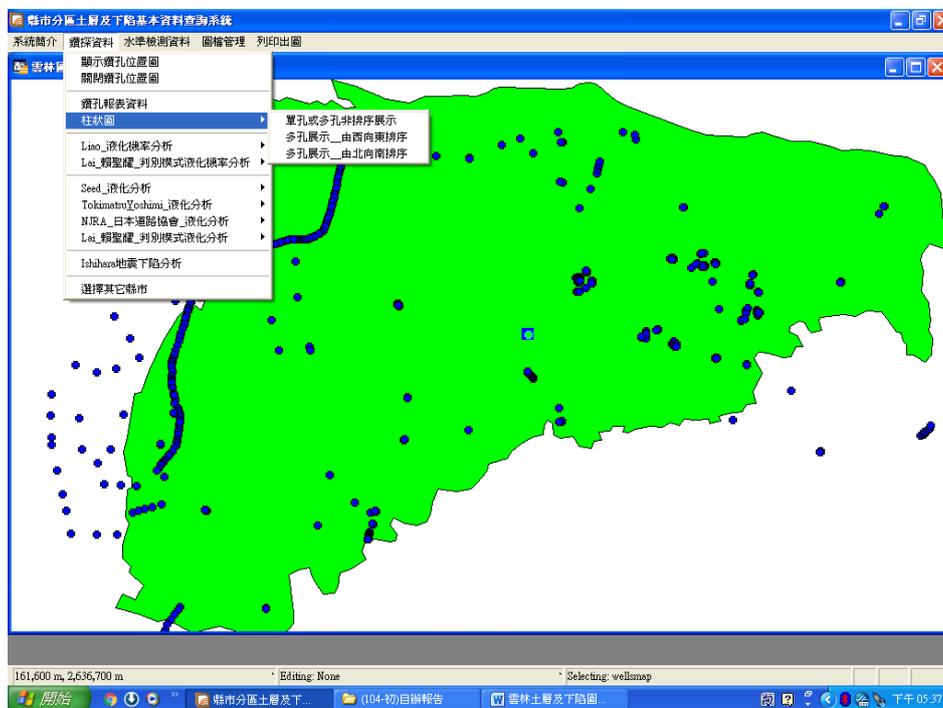


圖 5.6 雲林地區土層鑽探資料柱狀圖查詢展示圖

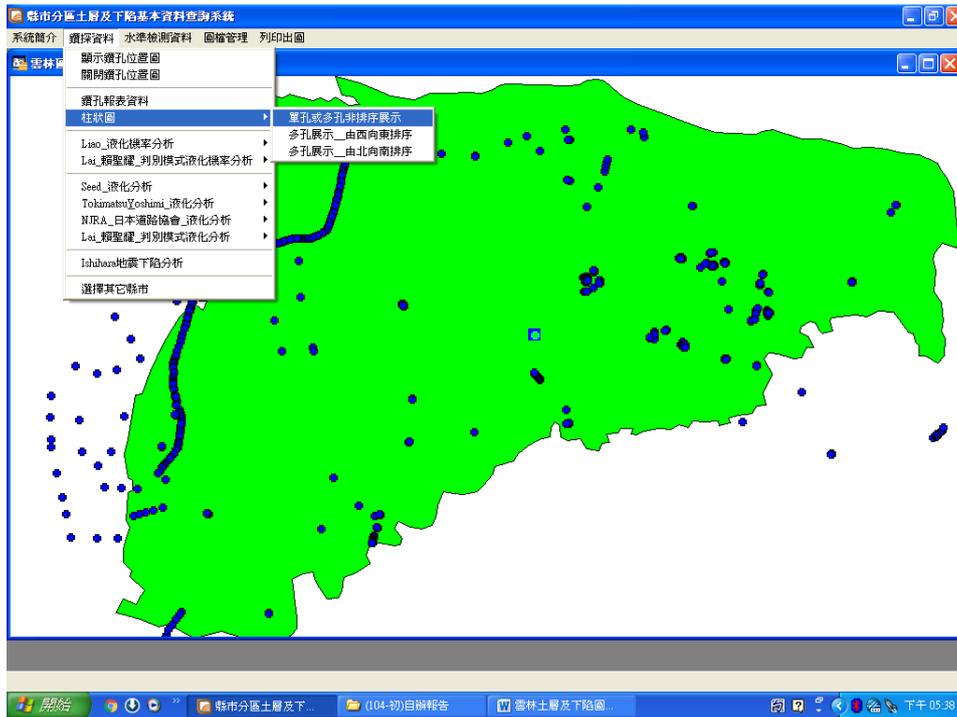


圖 5.7 雲林地區土層鑽探單孔或多孔非排序查詢展示圖

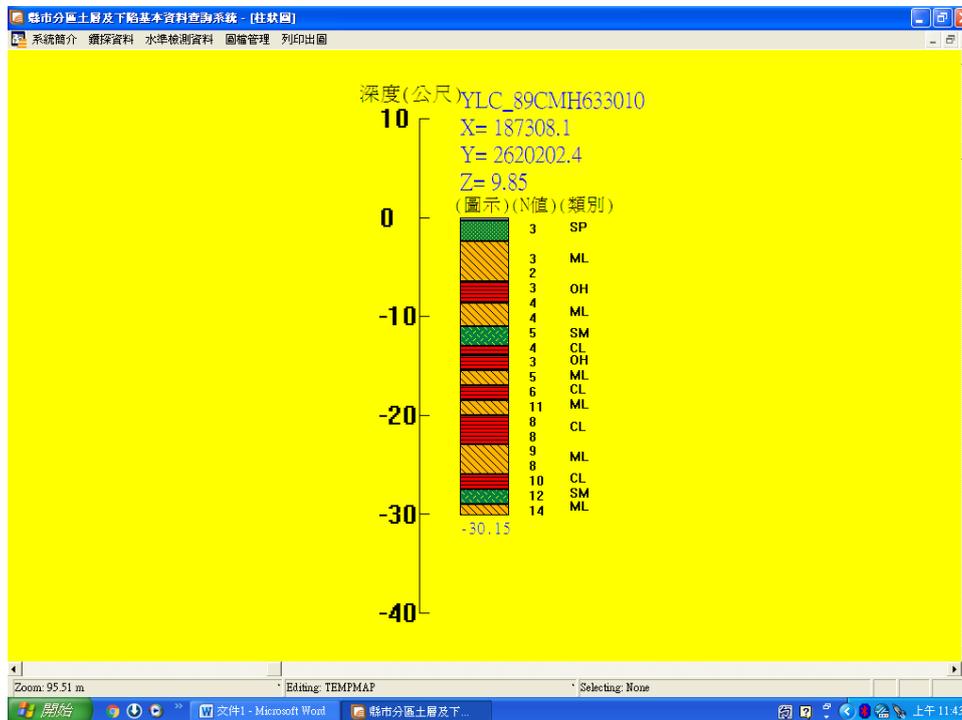


圖 5.8 雲林地區土層鑽探單孔非排序柱狀圖展示圖

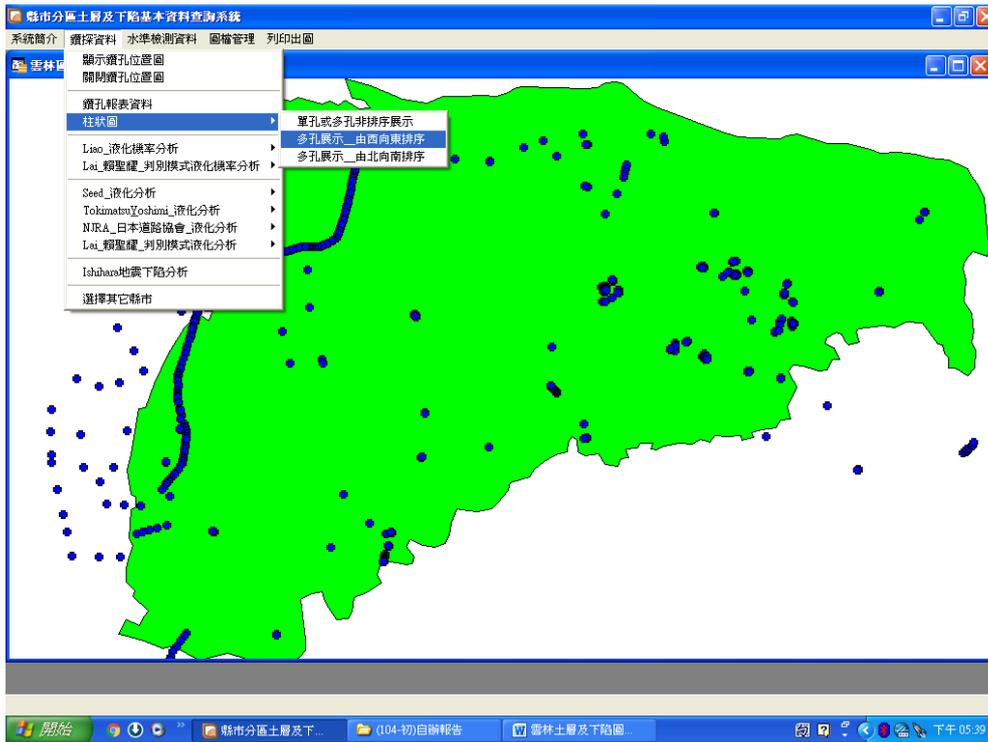


圖 5.9 雲林地區土層鑽探多孔展示排序查詢展示圖

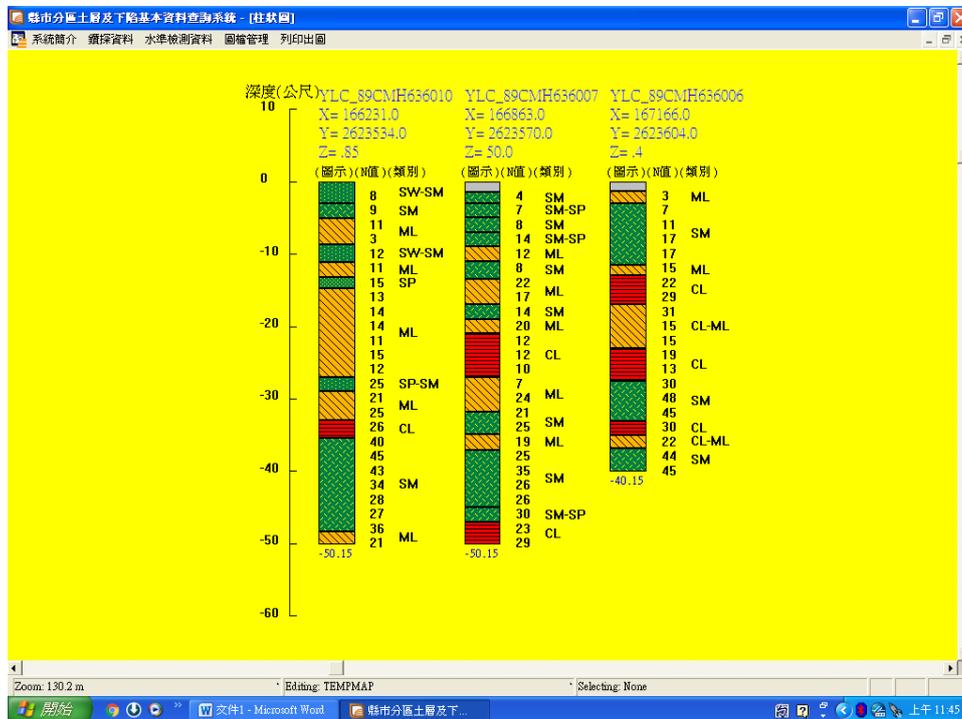


圖 5.10 雲林地區土層鑽探多孔展示\_由西向東柱狀展示圖

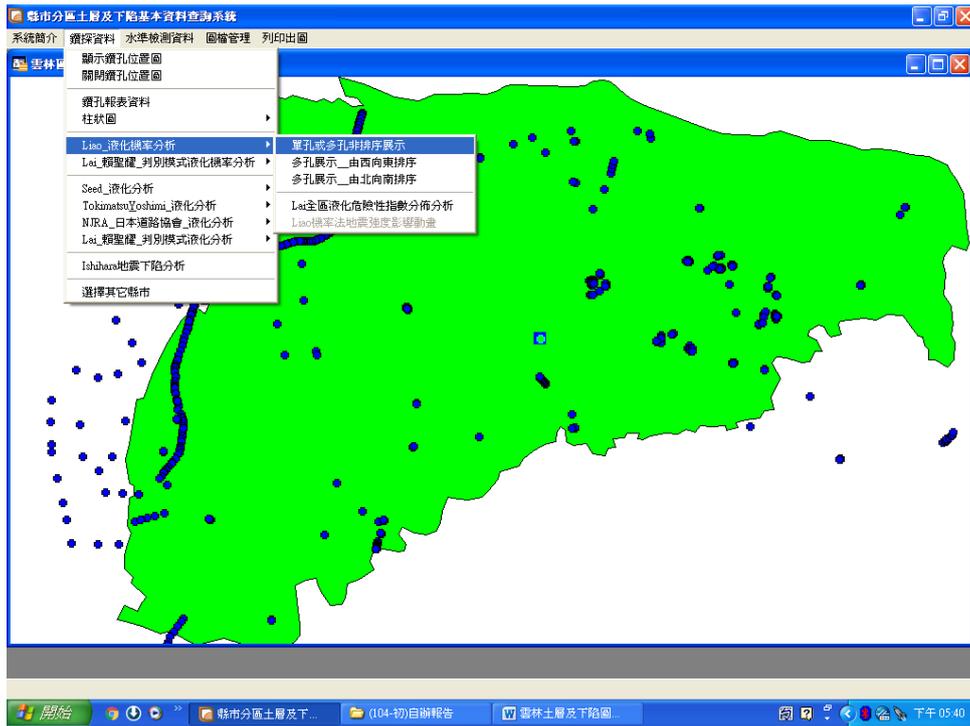


圖 5.11 雲林地區土層鑽孔液化機率分析查詢展示圖

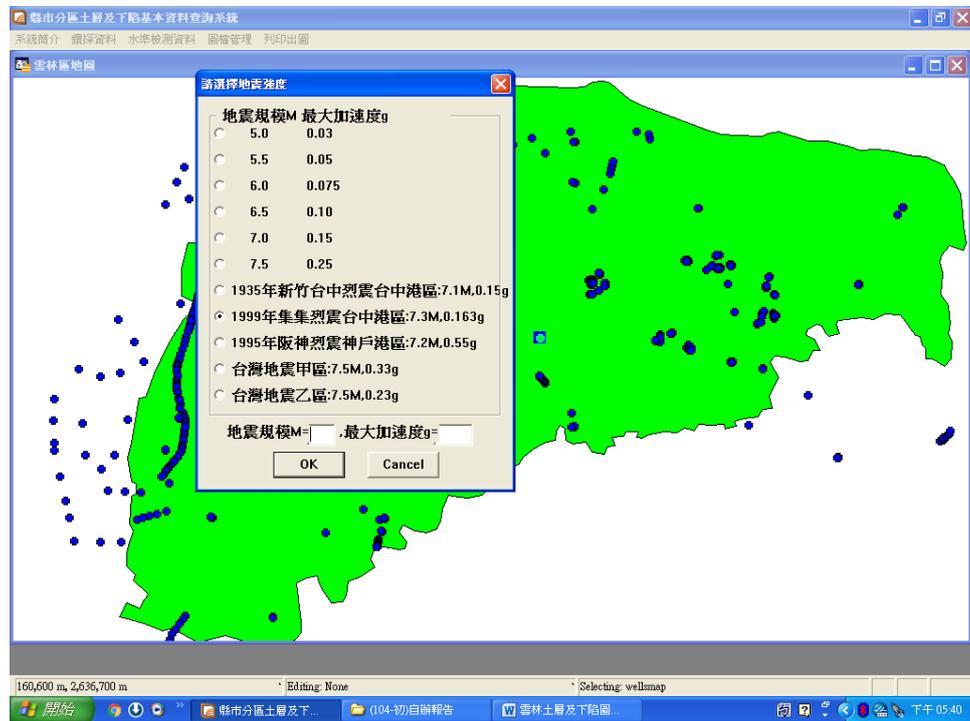


圖 5.12 雲林地區土層液化機率地震強度查詢展示圖

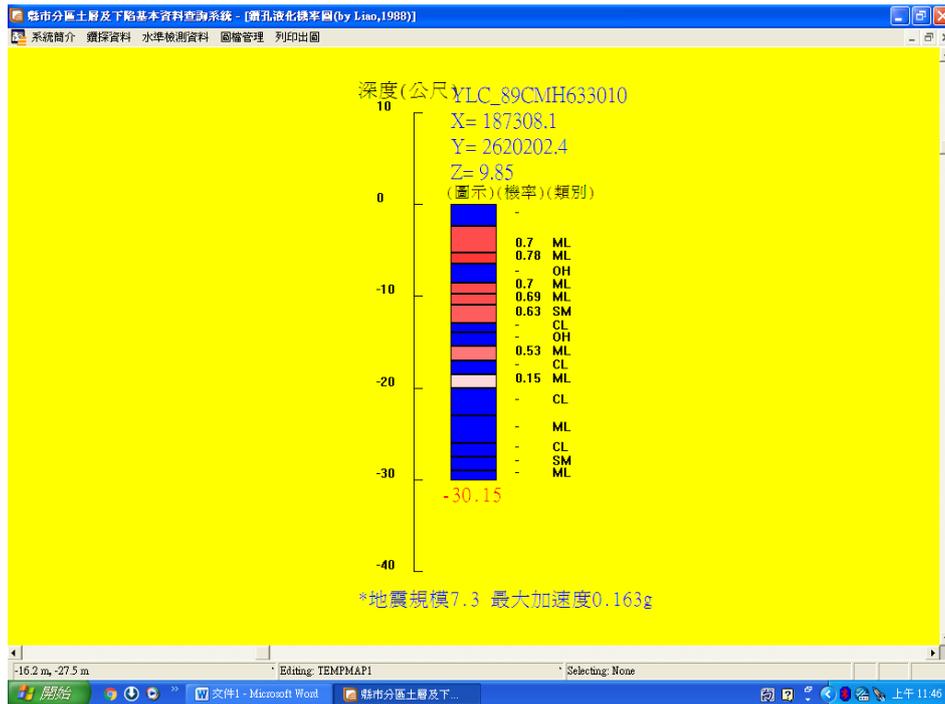


圖 5.13 雲林地區土層液化機率分析展示圖(Liao\_液化機率)

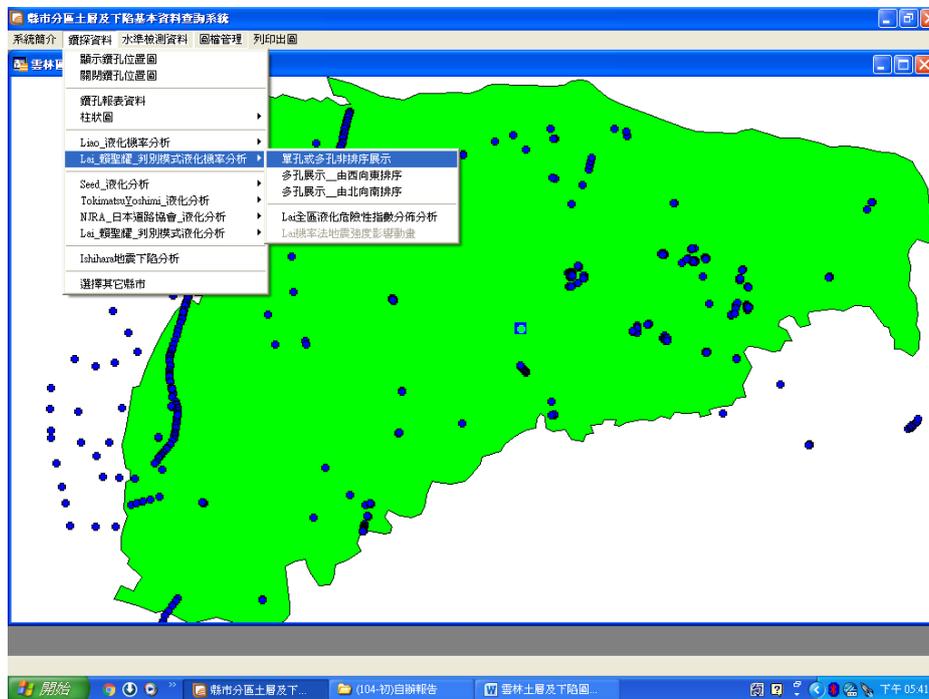


圖 5.14 雲林地區土層液化機率分析展示圖(Lai\_賴聖耀\_判別模式)

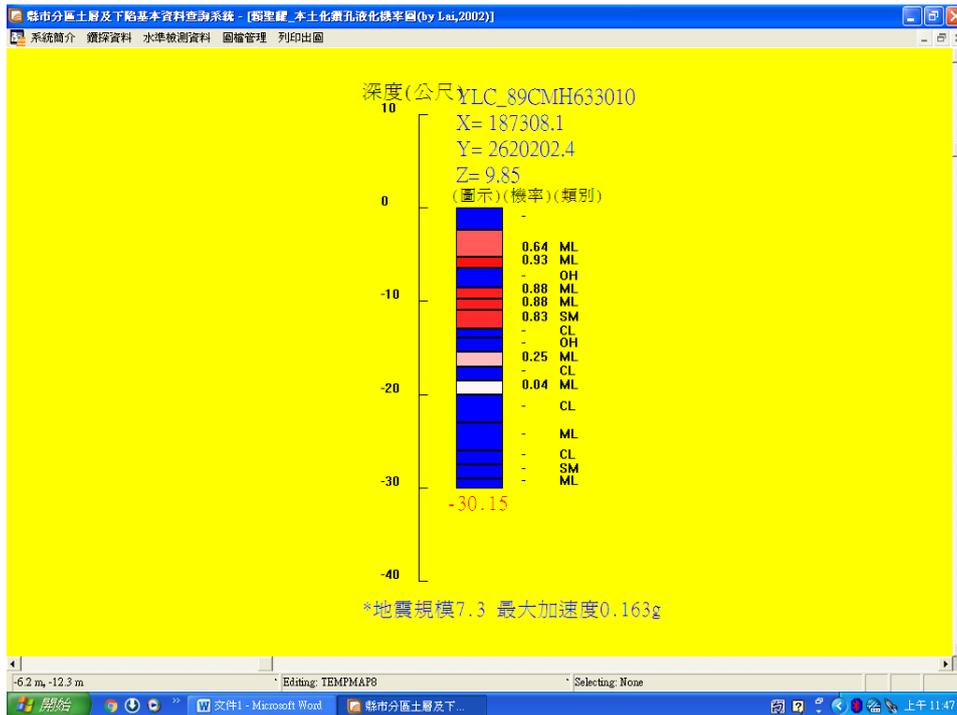


圖 5.15 雲林地區土層 Liao\_液化機率分析展示圖

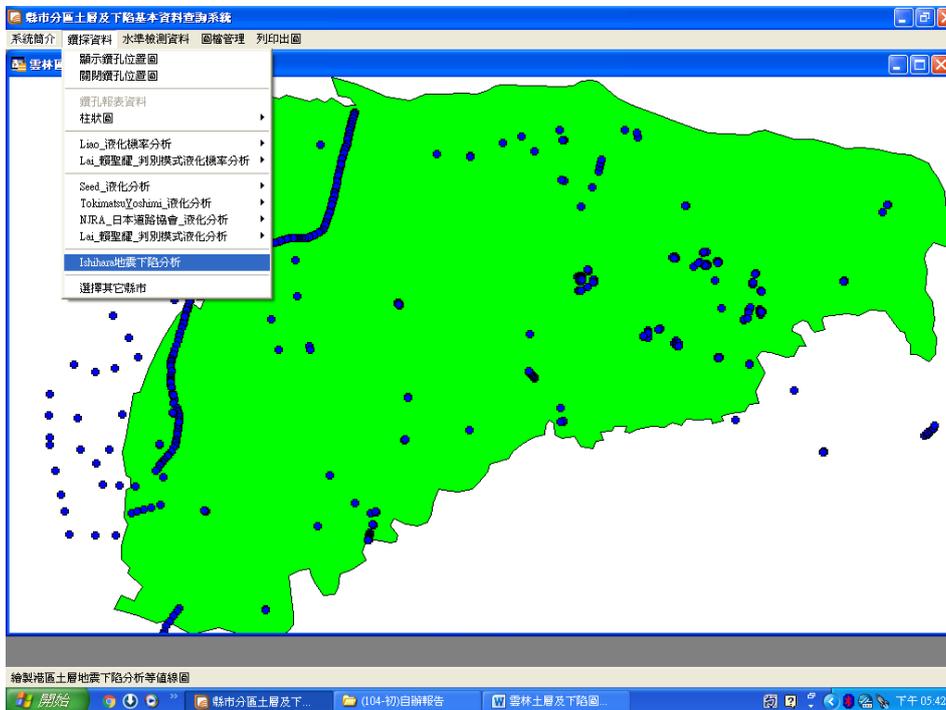


圖 5.16 雲林地區土層 Ishihara 地震下陷分析查詢展示圖

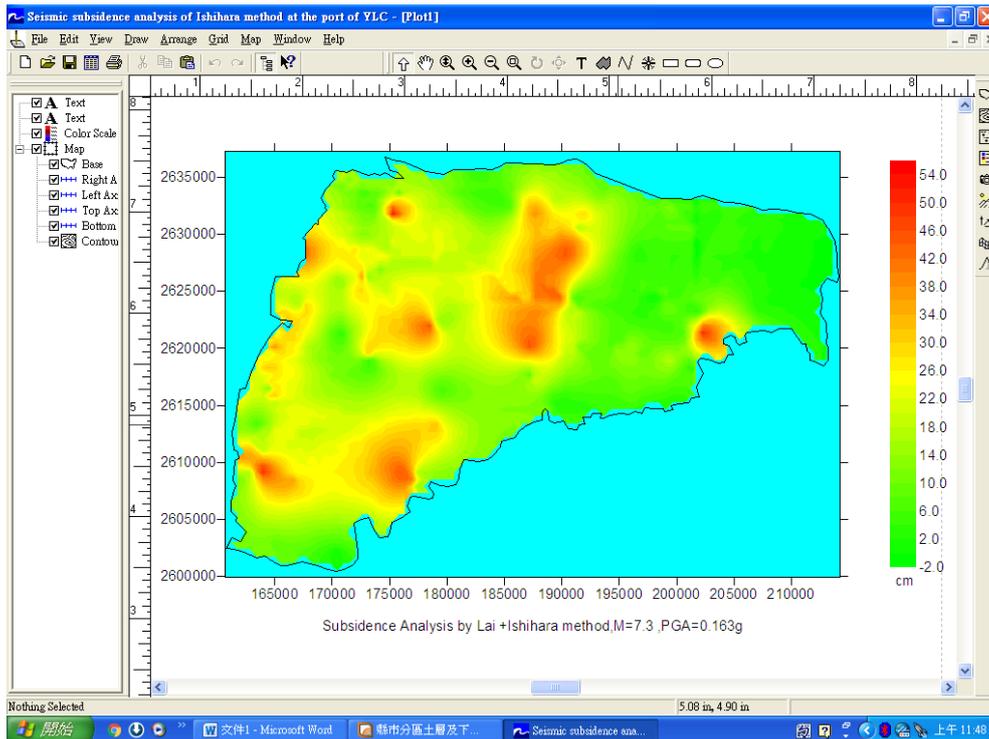


圖 5.17 雲林地區土層 Ishihara 地震下陷分析展示圖

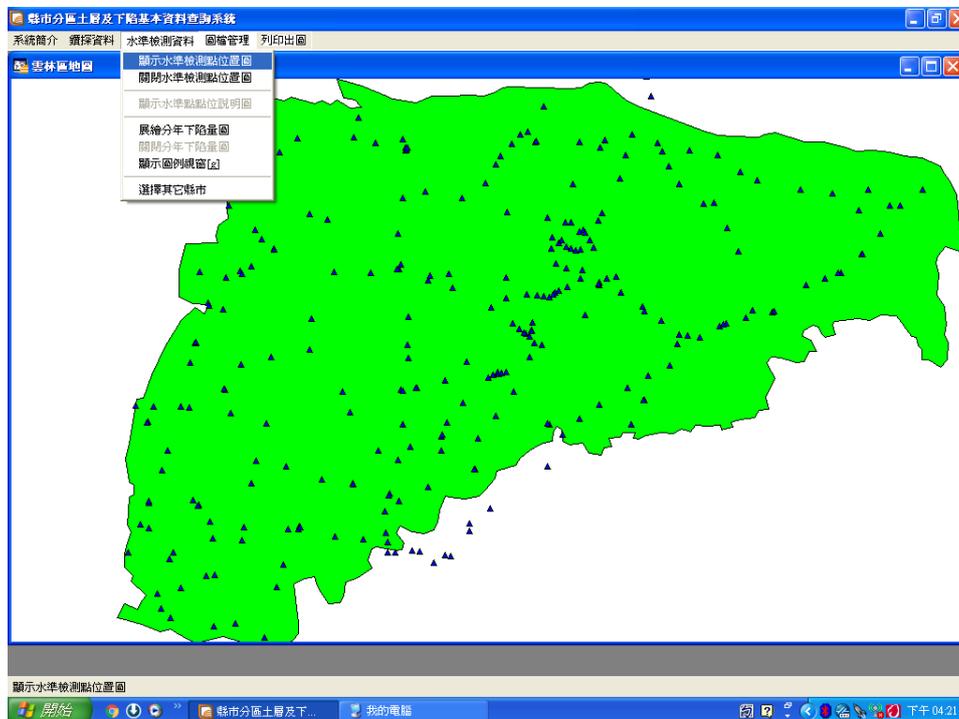


圖 5.18 雲林地區水準檢測點位置圖展示圖

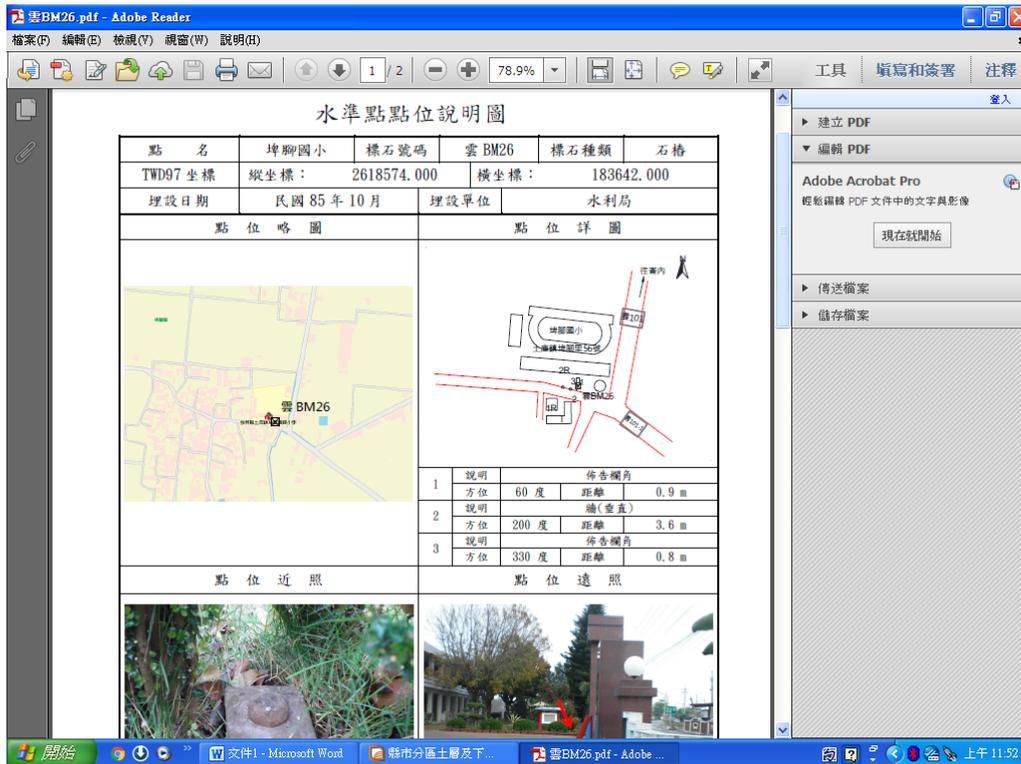


圖 5.19 雲林地區水準檢測點位說明展示圖

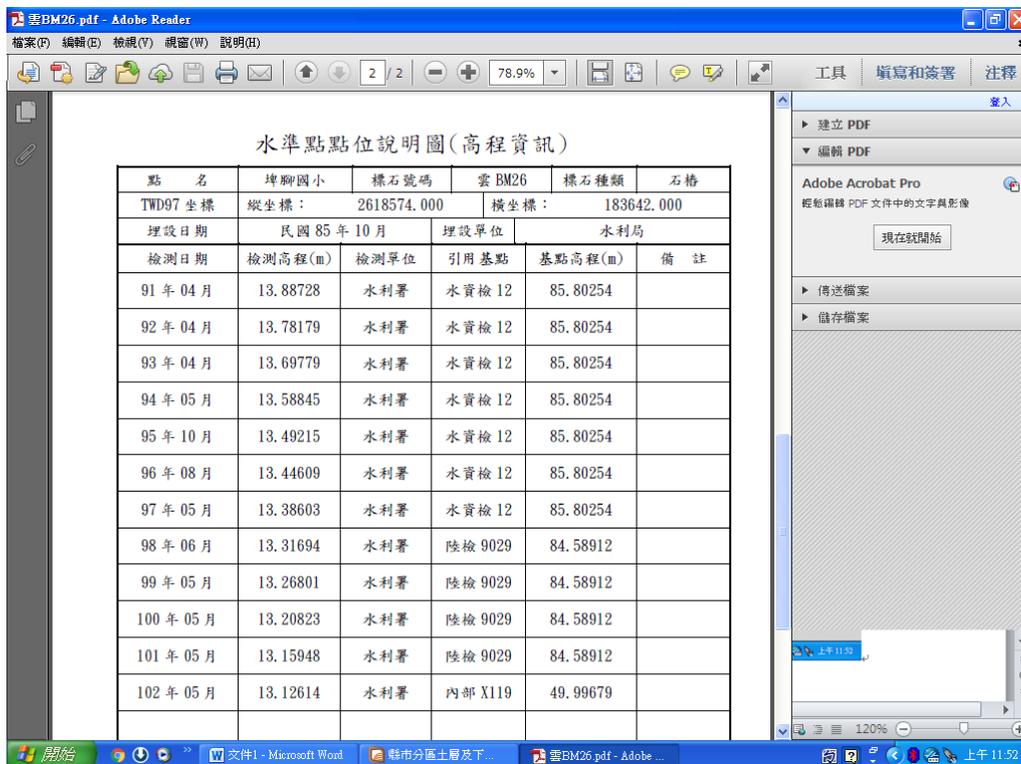


圖 5.20 雲林地區水準檢測點位說明(高程資訊)展示圖

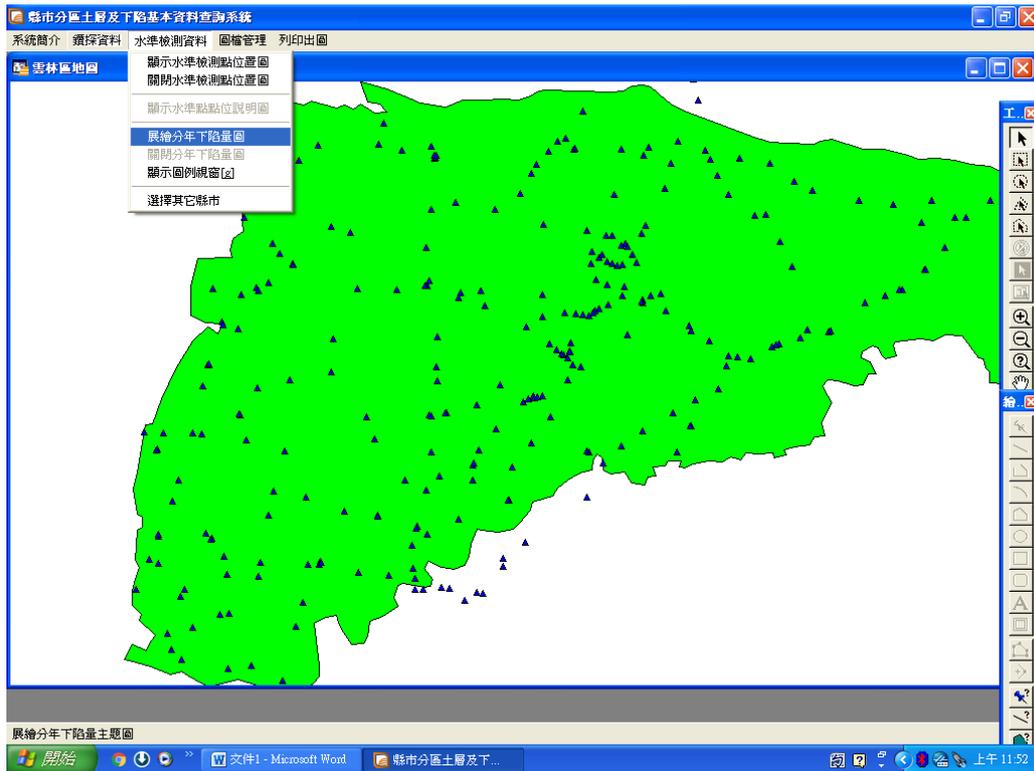


圖 5.21 雲林地區水準檢測資料查詢展繪分年下陷量圖

**起迄年份輸入對話框**

雲林地區地層下陷調查，起始於民國\_96年08月，逐年調查至\_102年05月，共計有7年資料，請輸入下陷量展繪起迄年份：

下陷起算年份:	計算終止年份:
96年08月	98年08月
97年08月	99年08月
98年08月	100年05月
99年08月	101年05月
100年05月	102年05月

確定      取消

圖 5.22 雲林地區地層下陷分年下陷量圖年份選取對話框

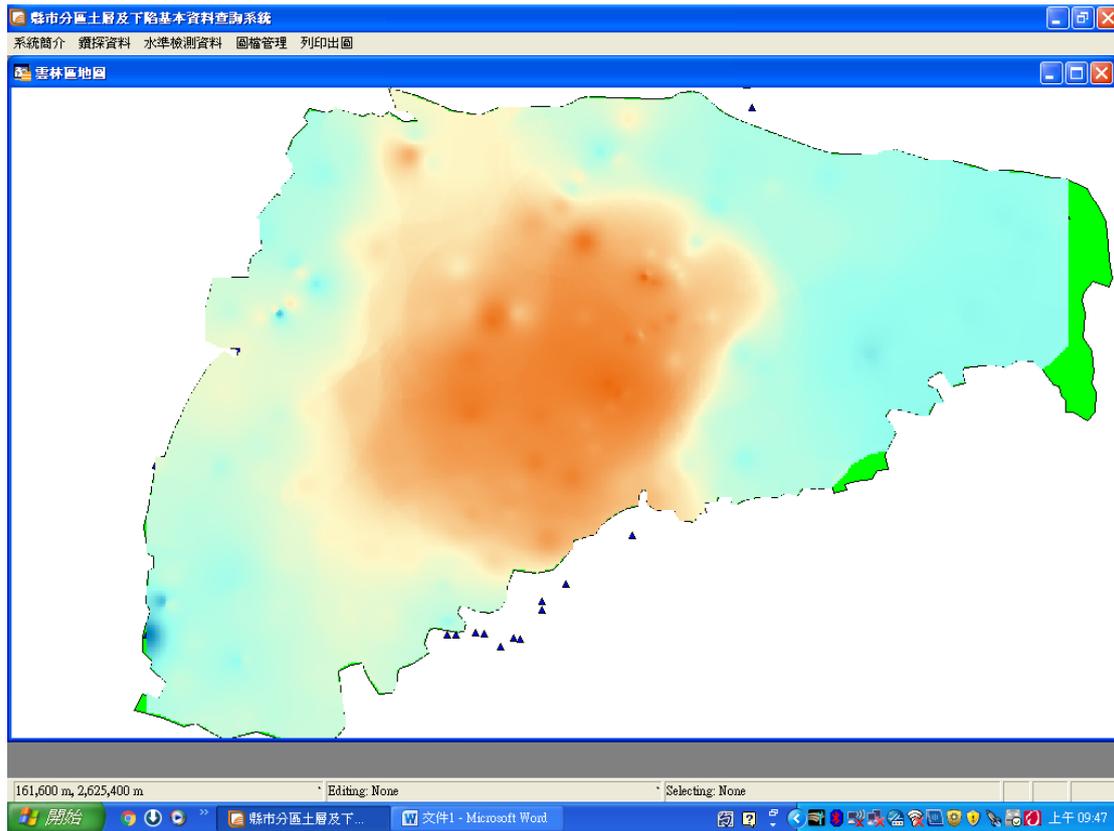


圖 5.23 雲林地區水準檢測地層下陷量展示圖

### 5.3 港區震災速報系統

本章另一個系統是港區震災速報系統，本所港研中心逐年分別於臺中港、安平港、高雄港、蘇澳港及臺北港井下地震監測站之儀器機房內安裝三向度網路型地表地震監測速報系統，當地表感震器接收到地震訊號後，先傳至儀器主機經運算後，再同時儲存到工地工業級無風扇小型電腦，可藉著中華電信ADSL網路將港區災況以簡訊方式依不同震度需求發送至各手機持用人，本系統可提供本中心或港區各港務管理單位及碼頭設施維修等相關人員作為災後檢修之參考，縮短救災時間並減少災損。監測儀器配置如圖5.24，即時畫面顯示如圖5.25至圖5.29所示。地震即時監測系統採用日製儀器，為三軸向網路型小型加速度計(CV-374型)，地震訊號取樣頻率100 Hz~1KHz，量測範圍自0gal~±2000gal。

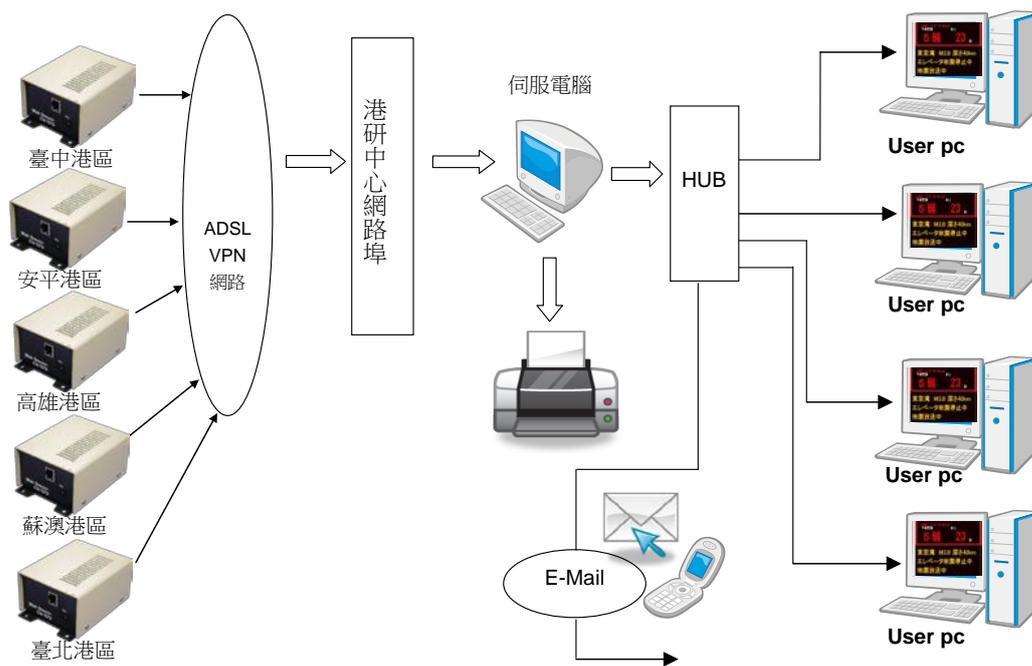


圖 5.24 港區地震災況速報系統儀器配置示意圖

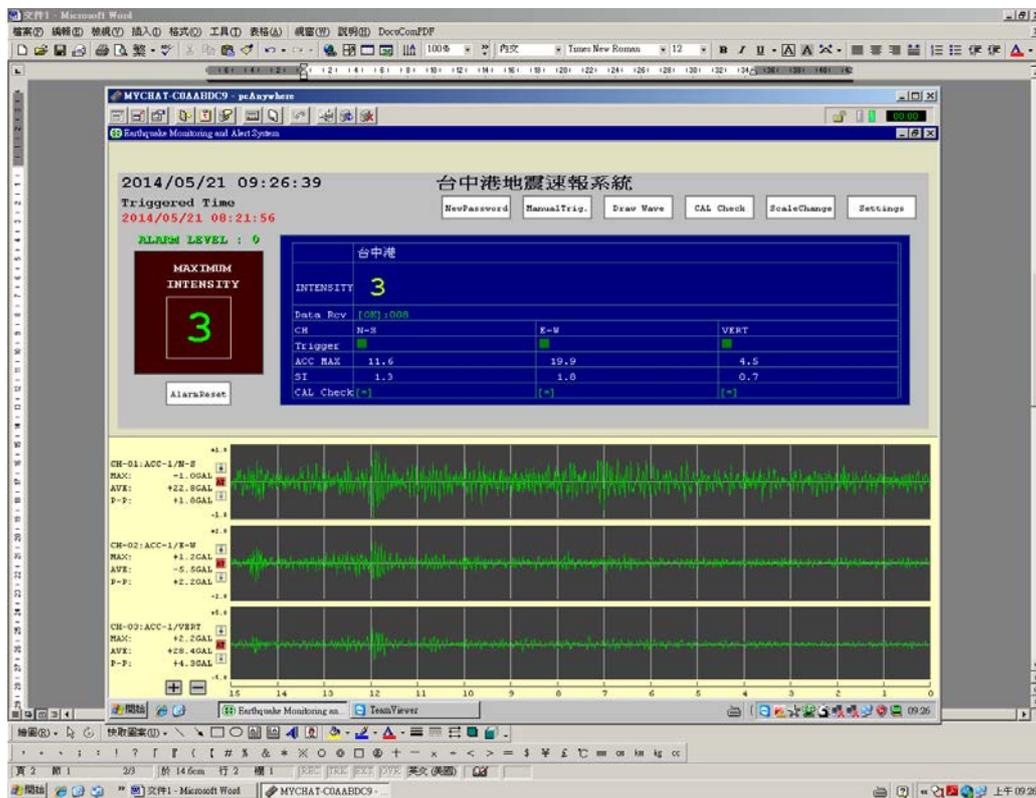


圖 5.25 臺中港區地震即時監測畫面示意圖

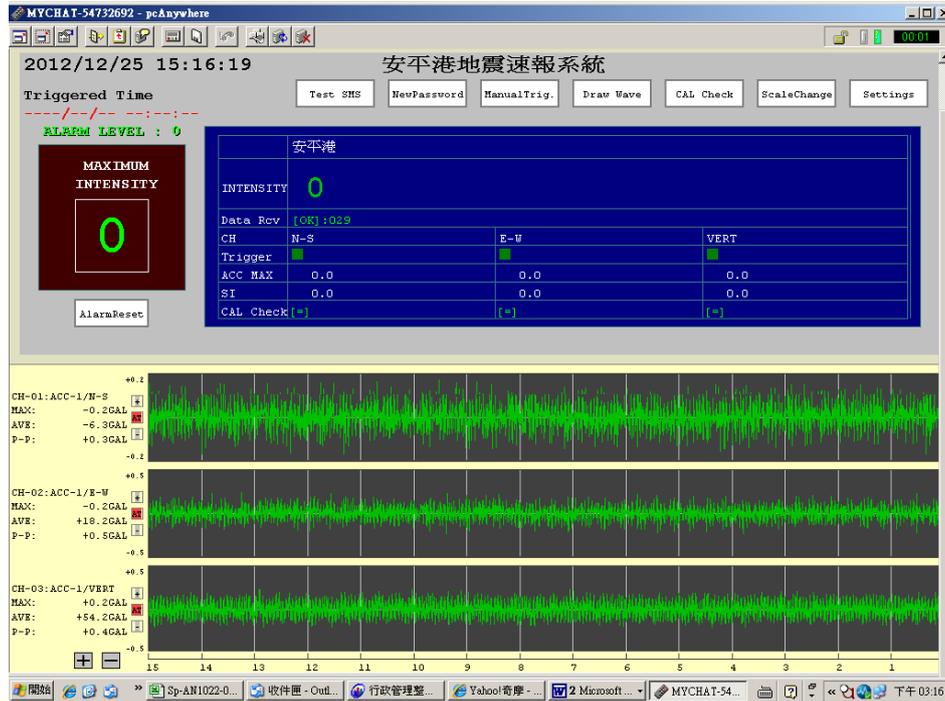


圖 5.26 安平港區地震即時監測畫面示意圖

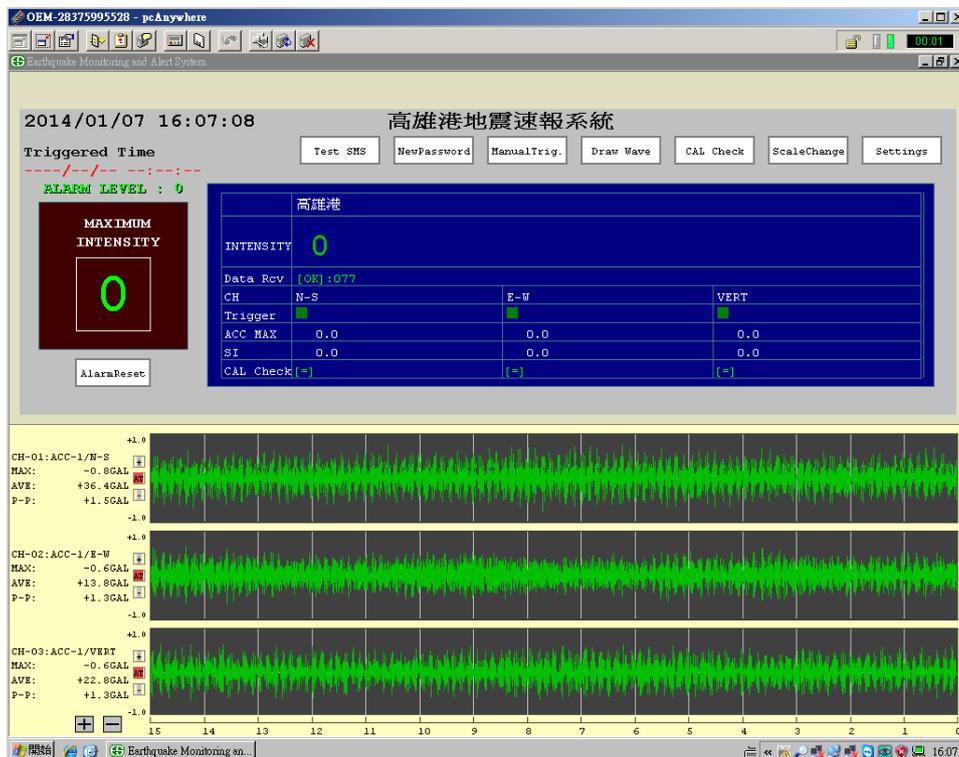


圖 5.27 高雄港區地震即時監測畫面示意圖



圖 5.28 蘇澳港區地震即時監測畫面示意圖



圖 5.29 臺北港區地震即時監測加速度歷時圖

## 第六章 結論與建議

臺灣重要的運輸工程大都建設在西部地區，而西部海岸的地層幾乎都屬於現代沖積層，該類土層較為疏鬆軟弱，極可能因附近地區地下水抽取、大規模海埔新生地回填、或強烈地震等原因造成地層下陷，而影響港區工程設施安全，高鐵自通車以後也因為超抽地下水造成彰雲地區高鐵沿線地層下陷，為維護港區工程及交通設施之安全，有必要對西南沿海地區進行地質資料調查建檔與各港區與地層下陷長期之監測。故本所港研中心於民國 89 年開始，陸續於安平港、布袋港、臺中港安平高雄大鵬灣等港區逐年設置地層分層下陷或地震監測站，期望藉由長期監測及分析的成果，能提供各港務分公司作為港區碼頭設施維護之參考依據。

本計畫全期為兩年，本年(104 年)為第一年，工作重點是蒐集西南沿海地質資料建檔與港區地層下陷監測，執行的工作內容包括：1.各港區地層下陷及地下水壓之量測與資料彙整分析，2.西南沿海地質資料建檔，3.地層分層下陷監測站與地震監測站儀器維修與更新。

### 6.1 結論

本計畫進行西南沿海地質資料建檔與地層下陷監測之研究，綜合結果如下：

1. 本年度彙整蒐集雲林地區由國內各大顧問公司之地質調查資料共計 526 孔，鑽孔累進深度 15,226 公尺。蒐集經濟部水利署自民國 96 年至 102 年之準點高程下陷監測資料，水準點數量共 425 處，水準實測里程 520 公里，建置於港研中心發展之「縣市分區土層及下陷基本資料庫」系統可供查詢。
2. 蒐集台 78 線與高鐵交會處之地質鑽探資料 9 孔，其中 300m 深 4 孔 70m 深為 5 孔。依鑽探資料報告顯示，以 STA-1 號孔位(300m)之土

層為例分類，大致以灰色粉質粘土、粉質細砂、粉質中細砂居多，地表下 160m 至 220m 有較厚的粘土層。粉質粘土大約分布於深度 16.7m~19.7m、25m~44.7m、115m~125m、166m~177m、198m~206m、218m~222m、248.6m~255.8m 與 281.9~296.6m 為主。灰色砂質粉土分布於地表至地表下 3.9m 與 177.4m~189.5m。

3. 蒐集水利署資料顯示，雲林地區於民國 80 年主要下陷中心以沿海的麥寮為主。民國 85 年後，下陷中心逐漸移往內陸，88 年後下陷中心集中於褒忠鄉、土庫鎮、虎尾鎮與元長鄉，民國 90~102 年累計下陷量達 80 公分。土庫國中下陷監測站之相對於井底之壓縮量，自民國 92 年 12 月至 102 年 10 月止，整體地層壓縮量達 45 公分。
4. 在港灣地層下陷監測部份，布袋港因水位監測站之-105 m、-143 m 及 -178 m 深度地下水位已降到地表下約 20 餘公尺，故布袋港附近地區有超抽深層之地下水，致使港區之深層水位下降而引起地層下陷的情形。200m 地層下陷站經量測結果，自 86 年 2 月至 104 年 10 月止，總累積沉陷量約為 65cm，其中百分之 50 以上之沉陷在深度-140~-200m 地層發生，屬深層沉陷，104 年沉陷量約為 2.5cm。
5. 布袋港 300m 地層下陷站經量測結果，自 89 年 10 月至 104 年 10 月止，共 14 年總累積沉陷量約為 80cm，103 年度總沉陷量為 2.7 公分，104 年度因測站又填土自 2.5 公尺至 6 公尺高，故總沉陷量略增加到 4 公分，整體而言，布袋港區近年來地層下陷有趨緩現象。
6. 布袋港 400m 深之水準基站，民國 92 年設置於商港區的西北角隅，地層下陷自動水準基站設定每 6 小時自動記錄一筆，經監測結果，自 92 年 9 月至 104 年 12 月為止共 12 年之總累積下陷量約為 36 公分。
7. 大鵬灣-105m、-142m 及-202m 深度之水位變化較大，105 m 之水位自 -6.8m 緩和上升約至-3.5 m，142 m 深度之水位自-4.2m 緩和上升約至 -1.5 m，近 5 年來水位有回升現象。地層下陷量測自 87 年 3 月至 104 年 10 月止，共 17 年 6 個月期間，大鵬灣地表下 4 m 至 189 m 間之沉陷總量為 13.5 公分，而其中地表~51.3 m 之沉陷量為 10 公分，佔總

沉陷量之 80% 以上，大鵬灣屬於淺層沉陷。

8. 本年度除了實施港區地層下陷量測工作外，各港地震監測站亦維持正常運作，當地震發生時，速報系統將地震資料自動傳回港研中心伺服器儲存並發布簡訊資料，最後展示於港研中心之港灣環境資料網站。

## 6.2 建議

港灣地層下陷監測及港區井下地震監測等研究，為長期性的監測工作，其設施特點為在地表及不同土層中置放監測儀器，如此不只可長期觀察其總量變化，更可獲知不同土層的反應數據，在港區規劃、防災處置及學術研究上，可提供長期的環境數據，值得持續研究。

## 6.3 研究成果之效益

1. 資料庫建置效益：蒐集彙整雲林地區地質資料及量測港區地層下陷資料，納入「縣市分區土層及下陷基本資料庫」中，可建立西南沿海地區防救災體系之相關資料庫，作為災時應變計畫與決策之參考依據。
2. 各港地層分層沉陷及水壓監測站監測資料，可供未來港灣結構物設計與維護之參考。

## 6.4 提供政府單位應用情形

1. 本年度設置港區地震即時災況速報系統，可於災後將相關評估訊息以簡訊傳至港務分公司維修人員作為防救災決策之參考。
2. 出版研究報告將相關研究成果供產官學界參考應用。

## 參考文獻

1. Chopra, A. K., "Dynamic of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering, " Prentice-Hall, pp.197-250 (2001).
2. Das. Braja M. " Principles of Foundation Engineering. " 2th Edition.
3. Holtz, R.D., and Kovacs, W.D. (1981), " An introduction to geotechnical engineering. " ,Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.
4. Ishihara, K., and Yoshimine, M., (1991), "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes," Soils and foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188.
5. Ishihara, K., Yasuda, S., and Nagase,H., (1996), Soil characteristics and ground damage, Special Issue of Soils and Foundations, pp.109-118
6. Kramer, S. L. (1996).Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
7. Nagase, H., and Ishihara, K., (1988), "Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, "Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.66-76.
8. Newmark, N. M. (1965), "Effects of earthquakes on dams and embankments. ", Geotechnique, 15(2), pp.139-159.
9. Tokimatsu, K. and Seed, H.B. (1987), "Evaluation of settlement in sands due to earthquake shaking, " Journal of ASCE, Vol.113, GT8, pp.861-878.
- 10.水利處(1995)，臺南地區地盤下陷檢測成果報告。
- 11.水利處(1996)，嘉義沿海地區地盤下陷檢測報告。
- 12.水利處(1997)，屏東縣沿海地區地盤下陷檢測報告。
- 13.交通部，港灣構造物設計基準—碼頭設計基準及說明，2000。
- 14.交通部運輸研究所，港灣構造物設計基準修訂，2005年2月。

- 15.交通部運輸研究所，「臺灣西南沿海地區軟弱地質交通結構物設計處理對策研究」，2006年3月。
- 16.交通部公路總局(2013)，「台78線22k+700附近地層監測委託服務工作工程地質探查報告書」。
- 17.李延恭，謝明志，「臺灣各港區地質調查分析及資料建檔研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所報告，民國83年。
- 18.徐鐵良，「地質與工程」，科技圖書，民國75年。
- 19.屏東縣政府(1997)，大鵬灣風景特定區整體發展規劃設計。
- 20.高雄港務局，(1970-1998)，安平港商港區地質鑽探工程報告書。
- 21.高速鐵路工程局，高鐵局簡訊220期，2014年6月。
- 22.陳志芳、賴聖耀，「布袋港地下水位及地層下陷監測研究」，24屆海洋工程研討會，2002。
- 23.陳明山、段紹緯、黃永和、謝添和，「高速鐵路橋梁樁基礎設計考量」 THE 10<sup>TH</sup> CONFERENCE ON RESEARCHES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING IN TAIWAN, OCT.2-4 2003, SANCHIH。
- 24.陳志芳，謝明志，「港區地震與地層下陷監測之研究(2/2)」，交通部運輸研究所報告，2015。
- 25.經濟部水利署(2013)，「102年度彰化及雲林地區地層下陷監測及整合技術分析應用」。
- 26.楊萬全，2000，揭開福爾摩沙的面紗－臺灣的自然地理（下冊）。臺灣的地下水。行政院文化建設委員會中部辦公室。
- 27.港灣研究中心，「臺中港1~4A碼頭921地震液化災損初步調查研究」港灣研究中心專刊172號，1999。
- 28.經濟部中央地質調查所，2000，臺灣地質圖。經濟部中央地

質調查所。

- 29.賴典章、費立沅、江崇榮，2003，臺灣地下水分區特性。水文地質調查與運用研討會論文集，第 1-24 頁。
- 30.謝明志、賴聖耀，「布袋港地層下陷監測與地質建檔研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所報告報告，1998。
- 31.賴聖耀、謝明志，「台灣各港區地震引致土層之沉陷研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所報告報告，1996。

## 附錄一

### 期末審查意見及辦理情形說明表

## 期末審查意見及辦理情形說明表

審查委員	審查意見	處理情形
<p>1. 港研中心前組長 賴聖耀委員</p>	<p>1. 本研究除了建立港區的地質與地層下陷監測資料之外，本年度亦彙整雲林地區 526 孔地質調查資料及 425 處水準測量資料，除了分析雲林地區的超抽地下水造成的下陷問題之外，亦分析了雲林地區地震引起的液化和下陷潛能；整體的研究，具有深度與廣度，研究成果極具參考價值。由於今年小年夜 2 月 6 日的高雄美濃地震，造成台南地區嚴重的液化災害，建議新的年度，以建置台南地區的地質資料，並分析地震引起的液化和下陷潛能，並以 0206 地震的監測資料，驗證液化和下陷分析模式的適用性。</p> <p>2. 本研究所建立港區震災速報系統，配合港區的液化分析，可迅速的提供港務管理單位作為災後搶修的參考，前年度建置臺中港、安平港及高雄港等 3</p>	<p>1. 感謝委員肯定與建議，將於未來計畫執行。</p> <p>2. 感謝委員肯定，將於未來計畫繼續執行。</p>

審查委員	審查意見	處理情形
	<p>港，去年度建置蘇澳港，本年度建置臺北港，宜將此震災速報系統繼續推廣至各港區。</p> <p>2. 今年小年夜 2 月 6 日的高雄美濃地震，雖未造成各港區的災害，但在安平、臺中等港區的監測站，卻監測到極寶貴的超額孔隙水壓資料，雖然本年度來不及分析，盼望新的年度，可以看見很精彩的分析成果，做為修正港區震災速報系統分析模式的依據。</p>	<p>3. 感謝委員指教與建議，將於未來計畫中修正。</p>
<p>2. 鼎興工程顧問公司 蔡瑤堂委員</p>	<p>1. 收集之資料非常完整保貴，其成果值的肯定。</p> <p>2. 地層下陷資料與民眾生活息息相關，設法讓大眾分享。</p> <p>3. 西南沿海颱風時海水倒灌嚴重，所收集之下陷資料與溢淹模式結合。</p>	<p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員指教與建議，將於未來相關計畫執行。</p> <p>3. 感謝委員指教與建議，將於未來相關計畫執行。</p>

審查委員	審查意見	處理情形
3.國立臺灣科技大學 廖國偉委員	<p>1.GIS 的操作介面建議考慮增加一些篩選的功能，例如可以自動篩選累積沉陷量大於某門檻值之地點。</p> <p>2.所開發的軟體是否有 API 的功能。</p>	<p>1.感謝委員指教與建議，將於未來相關研究計畫中新增。</p> <p>2.感謝委員指教與建議，目前港研中心開發的軟體尚無此功能。</p>
4.成功大學土木系 陳景文委員	<p>1.計畫名稱為「西南沿海地質資料建檔及地層下陷量測分析」，但計畫書內容為量測計算與建檔，這些均屬於量測與建檔，有關下陷原因與對策之分析工作若能作一些概略式分析，將使報告更完整。</p>	<p>1.感謝委員指教與建議，本(104)年計畫主要工作重點為蒐集資料，第二年(105)的工作會進行下陷量測分析。</p>

## 附錄二

### 期末審查簡報資料

# 西南沿海地質資料建檔與地層下陷量測分析(1/2)

■ 報告人：陳志芳



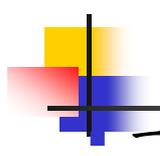
執行單位：港灣技術研究中心  
計畫時程：104.1.1~104.12.31



## 計畫緣起

- 臺灣西南之臺中、雲林、彰化、嘉義、臺南等縣市沿海地區，其地層大都屬疏鬆軟弱的沖積土層或海埔新生地。極可能因附近地區地下水抽取、結構物荷重、大規模海埔新生地回填或地震等原因造成地層下陷，而影響港區工程及各樣設施之安全。
- 依據水利署地層下陷資料民國103年止，雲林、彰化、屏東地區最大累積下陷量2.5~3.4m。雲林縣台78線與高鐵交會處因嚴重之下陷受到政府各界重視。
- 基於上述原因，港研中心進行地層下陷量測與地質資料蒐集建檔，以提供各港務分公司與公路養護單位參考。
- 本年是第一年計畫，主要工作是蒐集雲林地區資料與量測下陷。

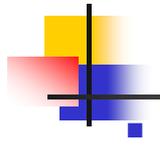
1



# 簡報大綱

- 一、前言
- 二、下陷分析方法
  - 應力分布、超抽地下水、地表荷重、震陷....
- 三、地質資料與下陷
  - 西南沿海地質、港區測站地質、下陷情形
- 四、地層下陷監測
  - 布袋港、大鵬灣、臺中港、安平港
- 五、資料庫
  - 雲林土層與下陷
- 六、結論

2

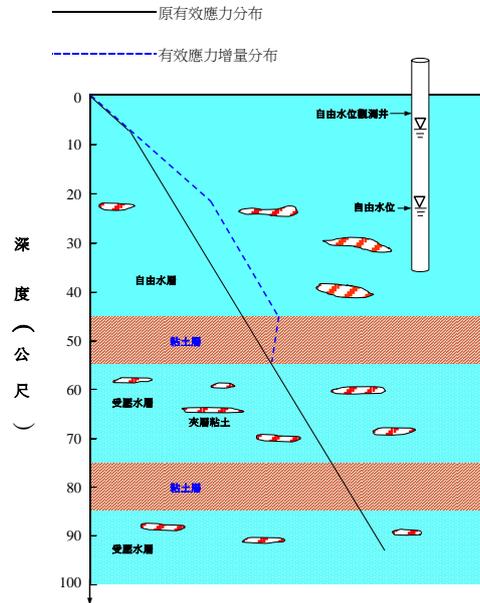
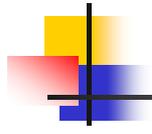


## 二、地層下陷行為與分析

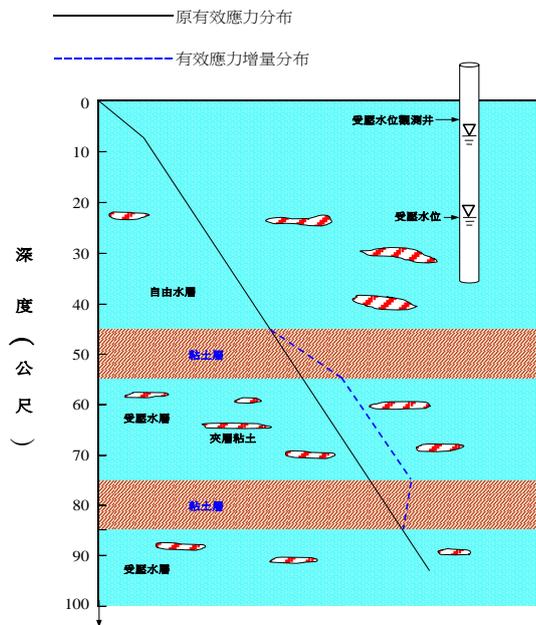
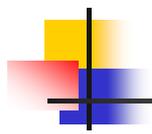
- 超抽地下水、填土荷重或構造物荷重造成之地層下陷，都因土層受到外力而產生壓縮所致，欲對地層下陷進行分析之前，需對整體土層所受有效應力增量之分布情形，及土層之下陷行為與各分層土壤壓縮特性進行瞭解，然後再應用壓密理論進行沉陷分析。
- 有效應力增量分布：
- 介紹超抽地下水、填土荷重或構造物荷重，所引致有效應力增量之分布情形

3

# 有效應力增量分布- 自由水位下降引致之有效應力增量分布

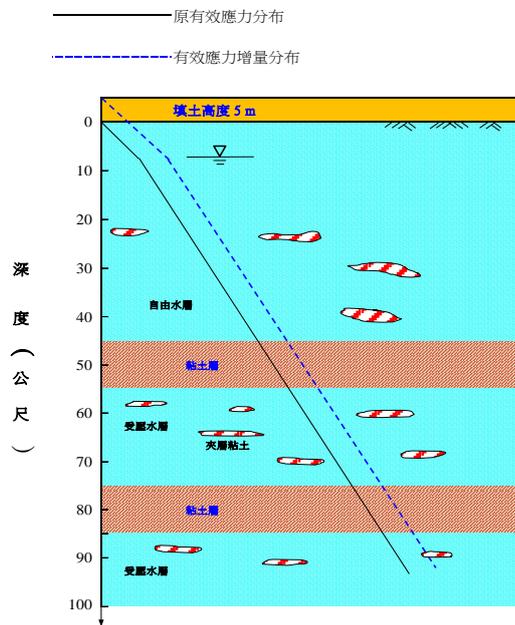
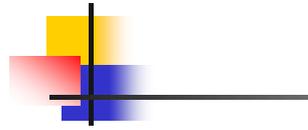


4



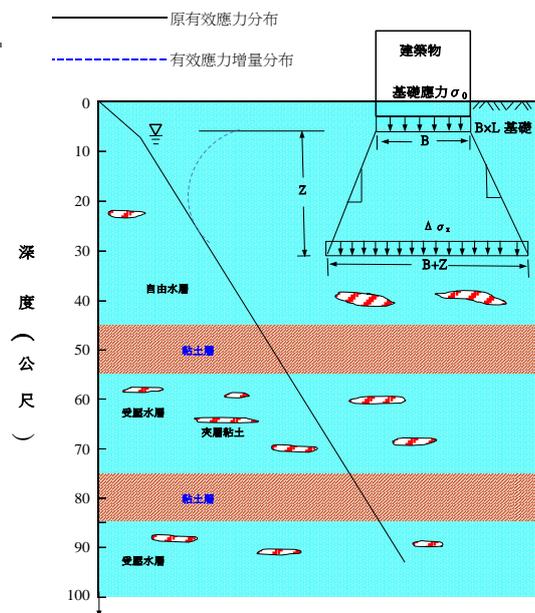
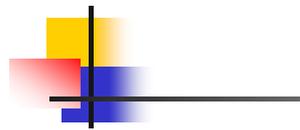
5

## 填土荷重引致之有效應力增量分布



6

## 結構物荷重引致之有效應力增量分布



7

## 地層下陷的估算

- 一般估算方法
- Terzaghi單向度壓密公式。  
工程上所採用
- 群樁壓密沉陷。  
粘土層中群樁壓密沉陷，用2：1應力分布法近似估計
- 地震液化沉陷。  
Tokimatsu & Seed (1987)震陷量評估法  
Ishihara et al. (1991,1996)震陷量評估法
- 地層下陷模擬預測

8

## 三、地質資料與下陷

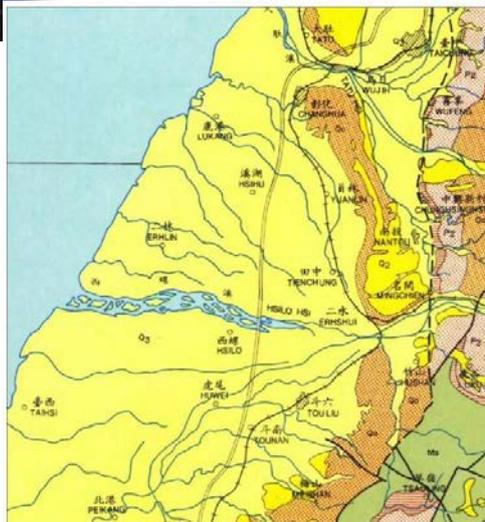
- 地質資料有助於研判各港區的地質年代，地質組成情況地層變化情形及土層大地工程性質等。主要蒐集臺灣西南沿海地區，包含臺中、布袋、安平與大鵬灣等港區與雲林下陷量嚴重地區進行蒐集港區地形、地質與地層下陷資料，最後將資料彙整建置成資料庫，以提供碼頭結構物設計及港區工程設施維護之參考。
- 由於西南沿海各港區之地質大多為沖積砂土層，新開發之海埔新生地亦多為細砂與沉泥質細砂所組成，分別就雲林地區與各港區之地質及土層分布資料簡述：

9

## 雲林地區地質

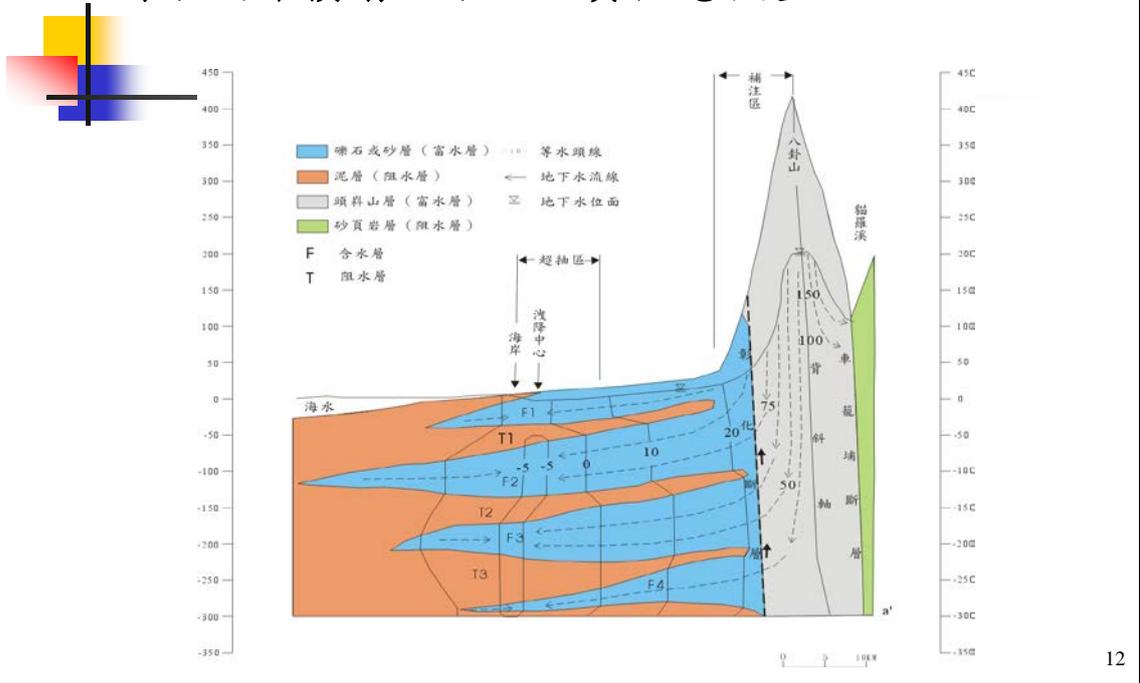
- 雲林地區位於臺灣西部海岸平原之中段，其平原帶為濁水溪沖積而成，又稱為濁水溪平原，以行政區域劃分包括彰化縣和雲林縣之平原部份。本區範圍北起濁水溪，南至北港溪，東起八卦山台地西麓和斗六丘陵以西，西止於臺灣海峽。本區主要為平原地帶，在平原東緣緊鄰山麓丘陵。

## 彰雲地區之區域地質圖（中央地調所，2000）

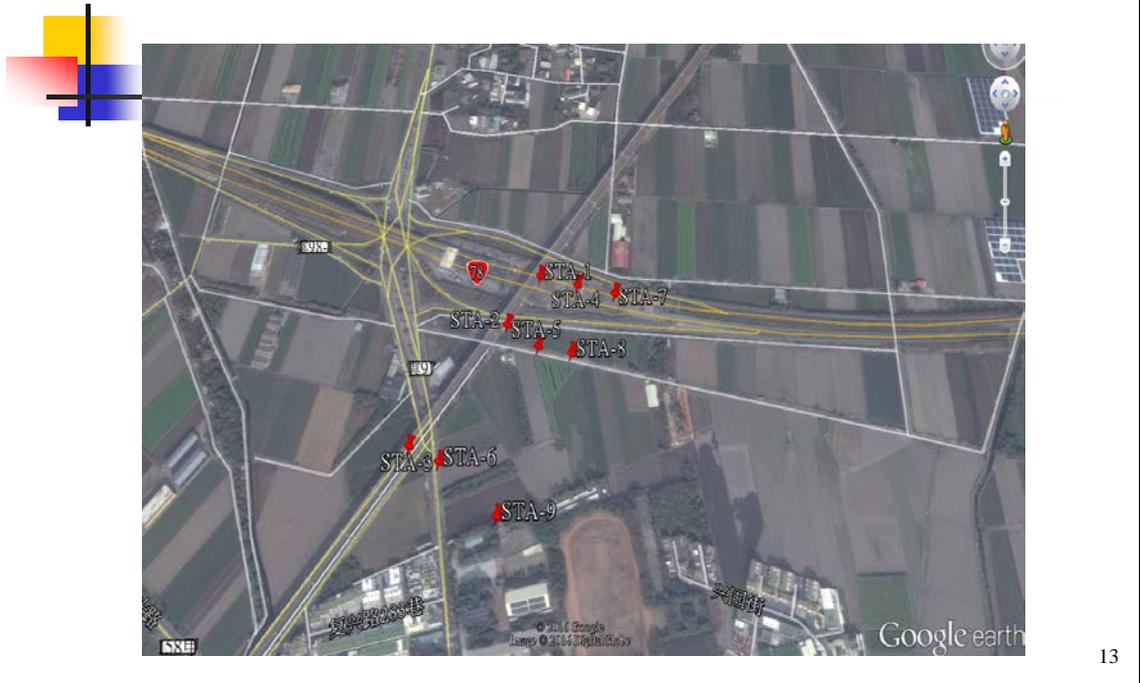


現代	Q1	土砂堆	沖積層
	Q2	礫石、粗土、土砂	臺地沖積
更新世	Q3	砂岩、泥岩、頁岩、礫岩(石灰岩)	鹿耳門山麓、馬鞍山礫岩及其沖積地層
上新世	P2	砂岩、泥岩、頁岩	羊寮層及其沖積地層
	P1	頁岩、砂質頁岩、泥岩	濁水頁岩及其沖積地層
中新世晚期至上新世	M3	砂岩、頁岩	三塊厝及其沖積地層
中新世中期	M2	砂岩、頁岩	瑞芳層及其沖積地層
漸新世	N1	塊頁岩、塊砂岩、板岩	大湖山層、北港層、水表流層
	N2	石灰岩質砂岩、板岩、石膏質頁岩	四塊砂岩、鹿港砂岩、白冲層

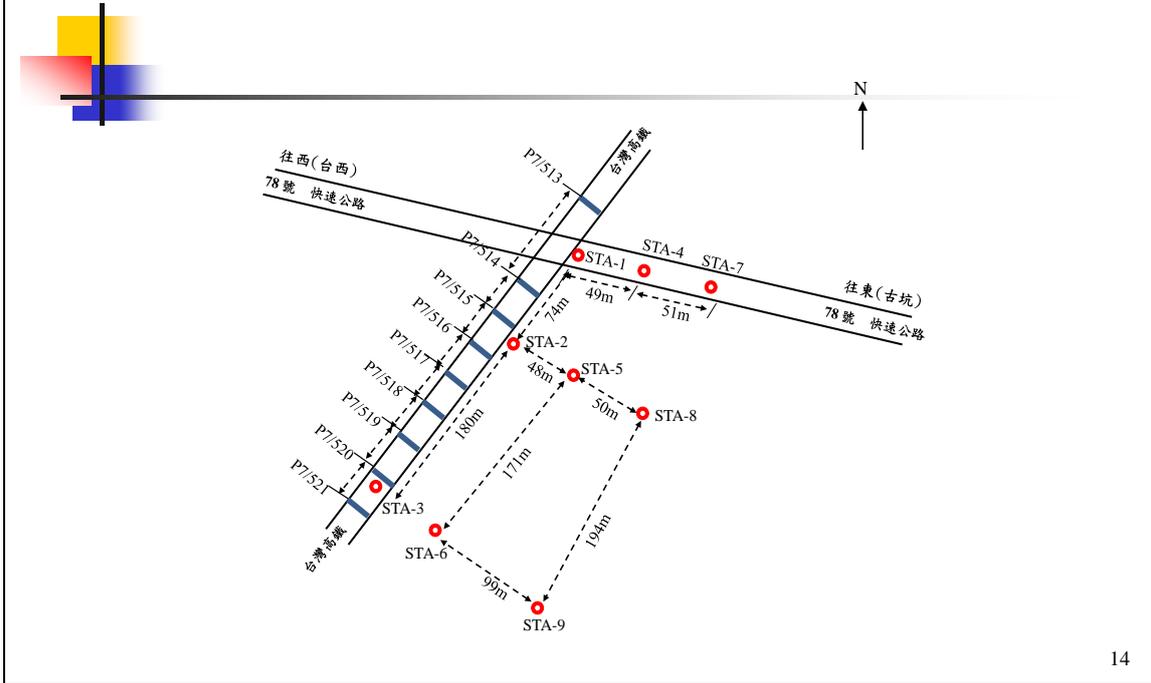
### 濁水溪沖積扇之水文地質概念模型 (賴典章等, 2003)



### 台78線與高鐵交會處監測站地質 (資料來源: google)

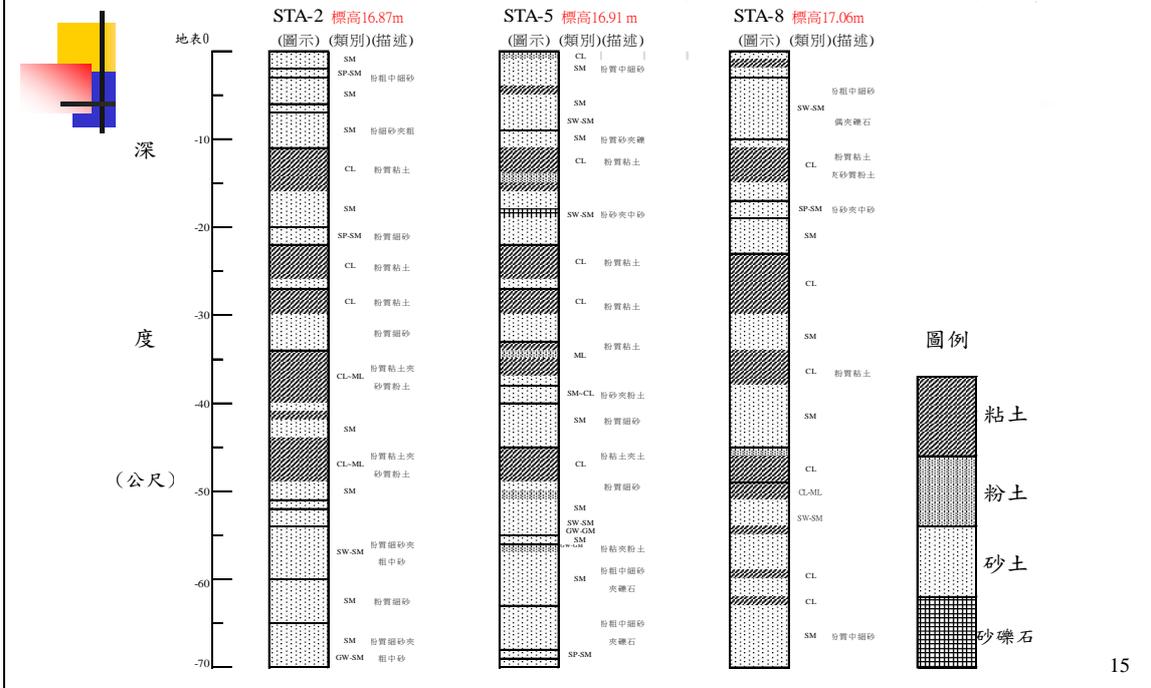


## 台78線與高鐵交會處鑽探平面圖 (交通部公路總局, 2013)



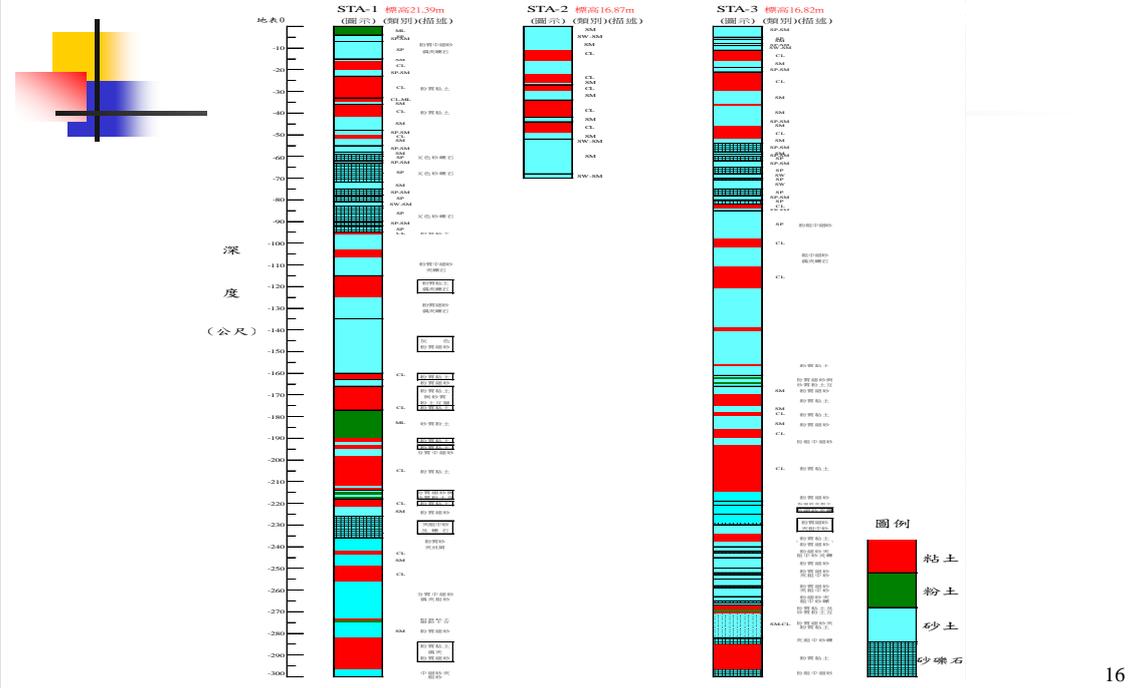
14

## 台78線與高鐵交會處地層柱狀圖 (STA2-5-8)

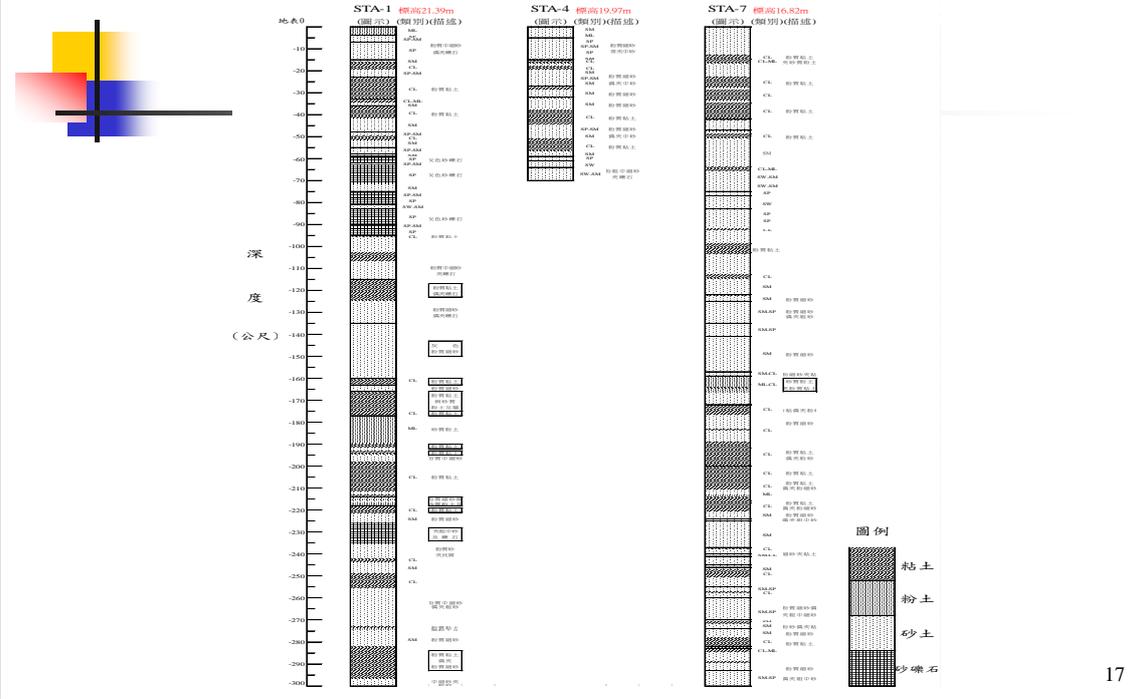


15

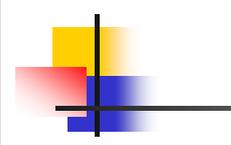
# 台78線與高鐵交會處地層柱狀圖(STA1-2-3)



# 台78線與高鐵交會處地層柱狀圖(STA1-4-7)



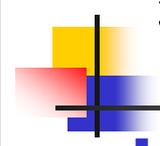
## 台78與高鐵交會處鑽探土層物理特性(公路總局，2013)



台78線與高鐵交會處地層鑽探土層之物理特性(孔號：STA-1)

試驗編號	深度(m)	N值	比重	孔隙比	含水量(w%)	含土率(%)	液性指數(I <sub>p</sub> )	塑性指數(IP)	砂	粉砂	粘土	土質分類		
S-1-2	1.05-1.50	38	2.67	0.42	2.15	13.7	-	-	1	44	48	7	ML	
S-2-2	2.55-3.00	20	2.66	0.59	1.97	18.4	-	-	18	39	35	8	ML	
S-3-2	4.05-4.50	11	2.61	0.85	1.69	20.1	-	-	4	94	2	0	SP	
S-4-2	5.55-6.00	14	2.62	0.98	1.7	28.6	-	-	0	95	5	0	SP-SM	
S-5-2	7.05-7.50	14	2.61	1.00	1.61	23.2	-	-	0	99	1	0	SP	
S-6-2	8.55-9.00	10	2.62	0.82	1.77	23	-	-	4	93	3	0	SP	
S-7-2	10.05-10.50	12	2.61	1.02	1.61	25.2	-	-	0	97	3	0	SP	
S-8-2	11.55-12.00	43	2.62	0.84	1.69	18.8	-	-	0	96	4	0	SP	
S-9-2	13.05-13.50	26	2.66	0.56	2.04	20.1	-	-	0	77	18	5	SM	
S-10-2	14.55-15.00	24	2.64	0.58	2.00	20.3	-	-	0	87	11	2	SM	
S-11-2	16.05-16.50	21	2.71	0.75	1.94	25.4	26.6	19.5	7.1	0	8	37	55	CL
S-12-2	17.55-18.00	20	2.72	0.75	1.96	26.2	28.7	20.6	8.1	0	47	42	11	CL
S-13-2	19.05-19.50	19	2.65	0.64	2.00	23.5	35.9	20.4	15.5	0	94	11	5	SM
S-14-2	20.55-21.00	25	2.62	0.65	1.95	22.6	-	-	0	93	6	1	SP-SM	
S-15-2	22.05-22.50	23	2.64	0.77	1.87	24.8	-	-	0	86	10	4	SM	
S-16-2	23.55-24.00	14	2.71	0.65	2.03	23.4	36.5	19.3	7.2	0	19	49	41	CL
S-17-2	25.05-25.50	26	2.71	0.78	1.90	25.2	27.5	20.4	7.1	0	44	39	17	CL
S-18-2	26.55-27.00	27	2.72	0.82	1.89	26.3	27.2	16.8	10.4	0	29	50	21	CL
S-19-2	28.05-28.50	13	2.72	0.80	1.89	25.5	28.2	19.2	9	0	25	40	35	CL
S-20-2	29.55-30.00	12	2.73	0.83	1.92	28.6	33.9	20.9	13	0	3	37	60	CL
S-21-2	31.05-31.50	13	2.73	0.87	1.90	29.5	36.7	20.7	1.6	0	1	43	56	CL
S-22-2	32.55-33.00	14	2.73	0.95	1.85	31.8	35.5	20.7	14.8	0	1	44	55	CL
S-23-2	34.05-34.50	13	2.71	0.70	1.97	23.2	36.5	19.5	7	0	46	35	9	CL-MI
S-24-2	35.55-36.00	31	2.73	0.97	1.82	32	34.3	19.9	14.4	0	9	39	52	CL
S-25-2	37.05-37.50	26	2.73	0.98	1.82	32.1	35.3	21.4	13.9	0	3	41	56	CL
S-26-2	38.55-39.00	15	2.72	0.91	1.89	32.5	33.6	21.3	12.4	0	6	42	52	CL
S-27-2	40.05-40.50	13	2.73	1.03	1.80	33.9	37.1	21.1	16.0	0	1	40	59	CL
S-28-2	41.55-42.00	14	2.73	0.94	1.87	32.6	37.9	20.8	17.1	0	0	48	52	CL
S-29-2	43.05-43.50	14	2.65	0.70	1.93	23.7	-	-	-	0	81	14	5	SM
S-30-2	44.55-45.00	19	2.64	0.89	2.07	16.7	-	-	-	0	85	11	4	SM
S-31-2	46.05-46.50	23	2.62	0.66	1.95	23.7	-	-	-	0	91	7	2	SP-SM
S-32-2	47.55-48.00	29	2.62	0.59	1.99	21.0	-	-	-	0	91	8	1	SP-SM
S-33-2	49.05-49.50	29	2.61	0.75	1.86	24.2	-	-	-	0	93	7	0	SP-SM
S-34-2	50.55-51.00	34	2.71	0.67	2.00	23.5	26.4	19.3	7.1	0	26	46	28	CL
S-35-2	52.05-52.50	34	2.67	0.71	1.94	24.4	-	-	-	0	75	22	3	SM
S-36-2	53.55-54.00	37	2.62	0.54	2.04	20.2	-	-	-	0	87	9	4	SM
S-37-2	55.05-55.50	42	2.61	0.55	2.03	20.7	-	-	-	0	88	10	2	SP-SM
S-38-2	56.55-57.00	37	2.63	0.65	1.94	22.1	-	-	-	0	90	9	1	SP-SM
S-39-2	58.05-58.50	42	2.64	0.71	1.90	22.5	-	-	-	0	87	9	4	SM
S-40-2	59.55-60.00	40	2.61	0.80	1.83	24.9	-	-	-	0	98	2	0	SP
S-41-2	61.05-61.50	46	2.61	0.61	1.89	16.5	-	-	-	6	92	2	0	SP
S-42-2	62.55-63.00	47	2.62	0.71	1.86	21.7	-	-	-	6	89	5	0	SP-SM
S-43-2	64.05-64.50	42	2.62	0.67	1.92	22.4	-	-	-	4	92	4	0	SP
S-44-2	65.55-66.00	46	2.62	0.75	1.83	22.1	-	-	-	0	98	2	0	SP
S-45-2	67.05-67.50	48	2.62	0.73	1.85	22.3	-	-	-	0	96	4	0	SP
S-46-2	68.55-69.00	52	2.61	0.70	1.90	23.6	-	-	-	0	97	3	0	SP
S-47-2	70.05-70.50	54	2.61	0.79	1.87	28.1	-	-	-	0	96	2	0	SP
S-48-2	71.55-72.00	56	2.67	0.66	1.98	22.7	-	-	-	0	60	35	5	SM
S-49-2	76.05-76.50	43	2.62	0.66	1.92	21.6	-	-	-	4	92	4	0	SP-SM
S-50-2	79.05-79.50	60	2.61	0.75	1.83	22.2	-	-	-	6	93	1	0	SP
S-51-2	82.05-82.50	99	2.63	0.53	2.04	18.7	-	-	-	3	85	11	1	SP-SM
S-52-2	85.05-85.50	49	2.62	0.63	1.95	21.2	-	-	-	4	94	2	0	SP
S-53-2	88.05-88.50	52	2.62	0.65	1.94	21.8	-	-	-	0	97	3	0	SP
S-54-2	91.05-91.50	54	2.61	0.60	1.97	20.3	-	-	-	0	94	6	0	SP-SM
S-55-2	94.05-94.50	66	2.61	0.78	1.82	24.3	-	-	-	0	99	1	0	SP
S-56-2	97.05-97.50	71	2.61	0.80	1.83	26.2	-	-	-	0	98	2	0	SP
S-57-2	100.05-100.50	83	-	-	-	-	-	-	-	0	94	1	5	SM

### 三、地質資料

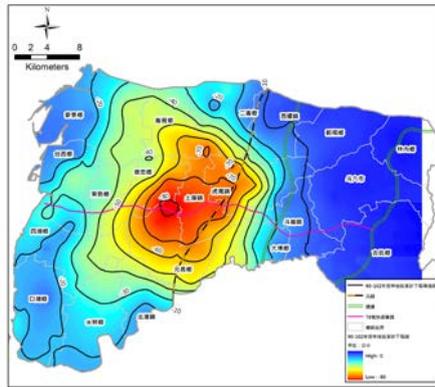


## 港區地質

- **臺中港**：港區面積共約4000公頃，原地形為由大甲溪和大肚溪沖積形成之西部海岸平原，地表為現代沖積層所覆蓋，主要為沉泥質砂、砂質沉泥、粘土質沉泥及沉泥質粘土等互相交雜而成。
- **布袋港**：已開發完成海埔新生地約126公頃，整個區域地層屬海岸沖積土層。
- **安平港**：為全新世沉積區，主要以砂嘴與濱海沉積，新潟湖沉積為主。港區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。
- **大鵬灣**：灣內現有水域長約3,500公尺，寬約1,800公尺，面積532餘公頃，為台灣唯一潟湖地形，位於高屏溪、東港溪及林邊溪之間，主要為砂質之沖積層。

## 地層下陷情形

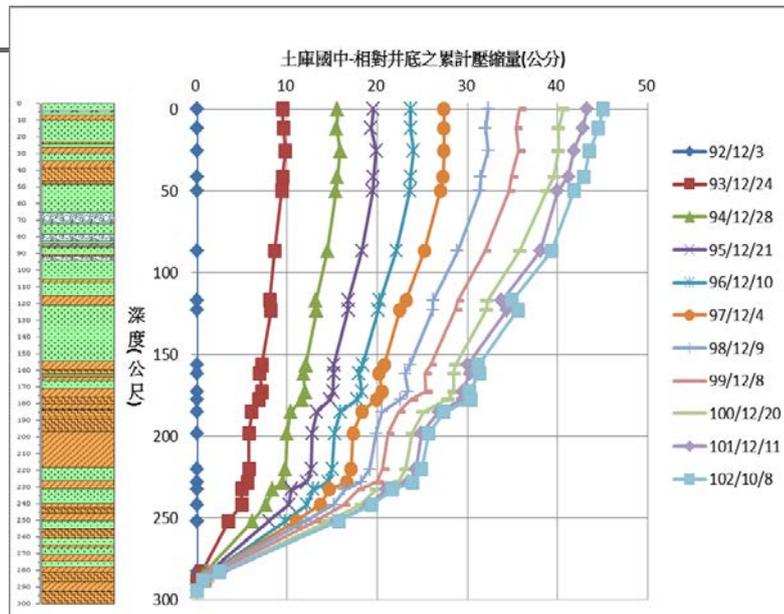
- 雲林地區：早期於80年主要下陷中心以沿海麥寮為主，民國88年以後下陷中心集中於褒忠鄉、土庫鎮、虎尾鎮與元長鄉，民國90~102年累計下陷量達80公分。整體評估雲林地區近20年的總下陷量，內陸地區已超過150公分。



20

## 土庫國中測站地層分層下陷圖 (資料來源：水利署)

- 由壓縮量圖顯示，自民國92年12月至102年10月，整體地層壓縮量達45公分。



21

## 地層下陷情形

- **布袋港**：200公尺下陷監測站，自86年2月至103年10月止，總累積沉陷量約63公分，300公尺測站自89年10月至103年10月止，總累積沉陷量約為75.8公分。
- **臺中港**：200公尺監測站自88年6月至103年10月止，累積總沉陷量約為5.7公分。
- **大鵬灣**：200公尺監測站自87年3月至103年10月止，累積總沉陷量約為13公分。

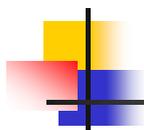
22

## 四、地層下陷監測

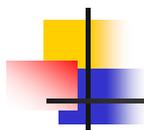
- 於布袋港、臺中港、安平港、大鵬灣等港區各設置200m及300m深地層下陷及靜態水壓監測站，採手動方式以無線電波感應式層別沉陷儀，定期量測分層沉陷。
- 平時量測各港區之沉陷及水位變化，以探討地下水壓變化對各港區地層下陷之影響。
- 地震後，亦可量測分層地層下陷，分析各土層地震時之沉陷量。

23

## 港區地層下陷監測站

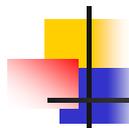


## 港區地層下陷監測資料

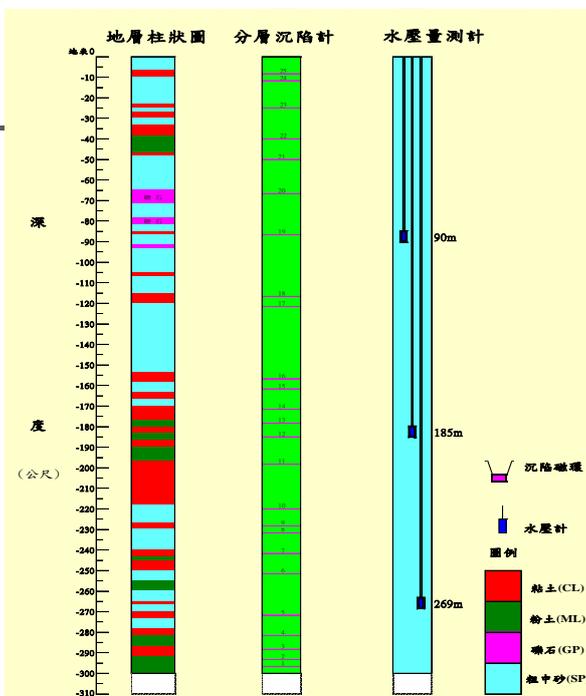
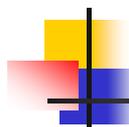


- 臺灣西南沿海地區近幾年以雲林、彰化、嘉義沿海地區地層下陷量最多，本章主要以土庫國中、布袋港區地層下陷監測站為主介紹。

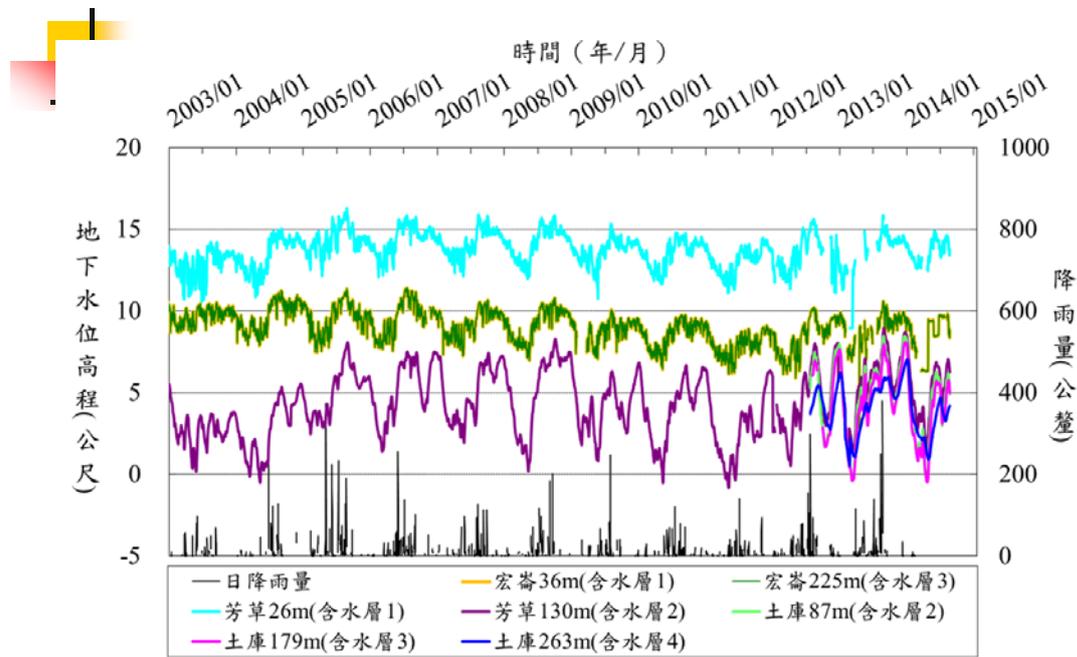
### 土庫國中地層下陷監測站 (資料來源：google earth)



### 土庫國中分層沉陷及水壓量測觀測站地層柱狀圖 (資料來源：水利署)



土庫國中測站分層水位變化圖(資料來源：水利署)



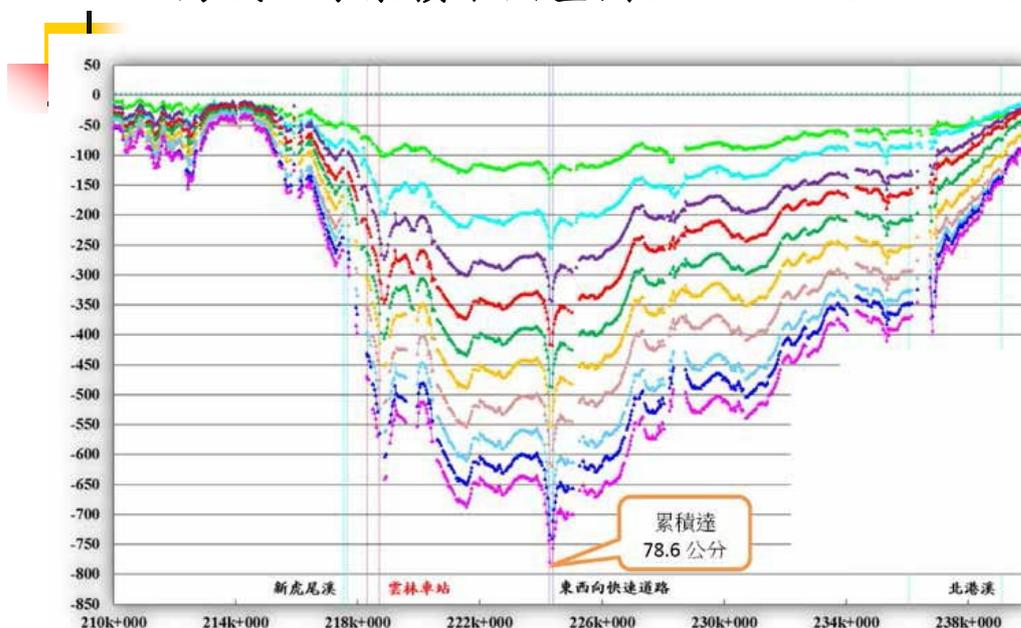
土庫國中分層沉陷量測表(水利署：2013)

感應器編號	102/1/21	102/02/05	102/03/06	102/04/23	102/05/21	102/06/06	102/07/15	102/08/12	102/09/11	102/10/08	102/11/12	102/12/10
NO.1	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250	8.8250
NO.2	12.0030	12.0035	12.0000	12.0020	12.0000	12.0010	11.9990	11.9985	12.0010	12.0025	12.0015	12.0015
NO.3	25.6655	25.6675	25.6610	25.6625	25.6595	25.6620	25.6610	25.6620	25.6645	25.6650	25.6660	25.6640
NO.4	41.6370	41.6400	41.6350	41.6335	41.6350	41.6375	41.6340	41.6350	41.6390	41.6370	41.6395	41.6360
NO.5	50.3590	50.3605	50.3560	50.3535	50.3575	50.3610	50.3590	50.3585	50.3620	50.3585	50.3600	50.3580
NO.6	67.4535	67.4515	67.4455	67.4425	67.4470	67.4495	67.4485	67.4480	67.4520	67.4470	67.4505	67.4495
NO.7	86.9625	86.9590	86.9545	86.9520	86.9575	86.9605	86.9585	86.9570	86.9630	86.9560	86.9590	86.9595
NO.8	117.4580	117.4530	117.4515	117.4515	117.4550	117.4560	117.4555	117.4540	117.4620	117.4520	117.4540	117.4535
NO.9	122.8440	122.8410	122.8390	122.8380	122.8420	122.8420	122.8410	122.8390	122.8485	122.8365	122.8400	122.8400
NO.10	156.5845	156.5800	156.5745	156.5745	156.5775	156.5795	156.5815	156.5810	156.5900	156.5780	156.5800	156.5780
NO.11	161.8715	161.8685	161.8635	161.8650	161.8690	161.8690	161.8715	161.8705	161.8800	161.8670	161.8700	161.8685
NO.12	172.8815	172.8790	172.8670	172.8675	172.8750	172.8750	172.8805	172.8780	172.8855	172.8735	172.8755	172.8750
NO.13	177.6915	177.6855	177.6750	177.6770	177.6835	177.6805	177.6875	177.6850	177.6935	177.6820	177.6840	177.6835
NO.14	185.3600	185.3540	185.3415	185.3450	185.3535	185.3490	185.3530	185.3520	185.3590	185.3470	185.3485	185.3490
NO.15	198.3805	198.3720	198.3580	198.3620	198.3700	198.3670	198.3710	198.3730	198.3810	198.3700	198.3720	198.3745
NO.16	220.2955	220.2885	220.2760	220.2775	220.2865	220.2855	220.2880	220.2905	220.2975	220.2845	220.2875	220.2890
NO.17	228.3615	228.3530	228.3425	228.3445	228.3520	228.3495	228.3540	228.3560	228.3630	228.3510	228.3525	228.3555
NO.18	232.7825	232.7760	232.7635	232.7680	232.7780	232.7760	232.7785	232.7810	232.7885	232.7745	232.7750	232.7780
NO.19	241.9475	241.9410	241.9310	241.9320	241.9430	241.9410	241.9425	241.9430	241.9480	241.9350	241.9335	241.9385
NO.20	252.1485	252.1415	252.1290	252.1300	252.1400	252.1375	252.1405	252.1420	252.1460	252.1350	252.1340	252.1390
NO.21	272.4635	272.4575	272.4415	272.4405	272.4485	272.4500	272.4495	272.4530	272.4590	272.4490	272.4460	272.4515
NO.22	283.1475	283.1405	283.1250	283.1250	283.1345	283.1365	283.1350	283.1385	283.1440	283.1330	283.1305	283.1350
NO.23	288.4505	288.4455	288.4335	288.4325	288.4395	288.4395	288.4400	288.4420	288.4465	288.4340	288.4305	288.4340
NO.24	294.4430	294.4365	294.4250	294.4230	294.4290	294.4305	294.4310	294.4325	294.4395	294.4275	294.4255	294.4285
NO.25	296.6345	296.6255	296.6140	296.6135	296.6195	296.6185	296.6220	296.6220	296.6290	296.6150	296.6135	296.6155

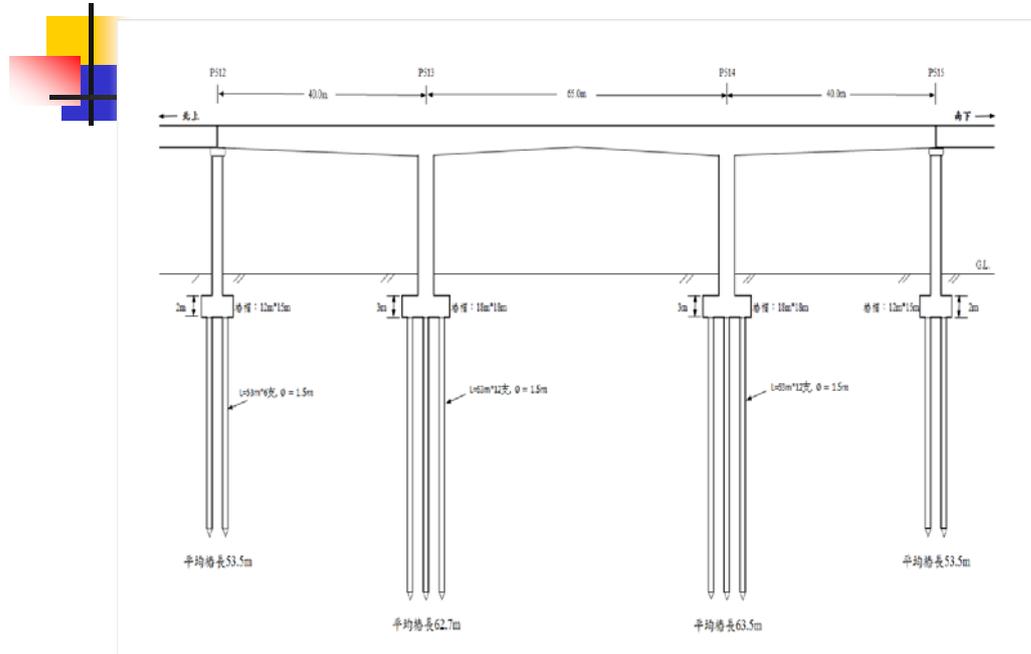
### 土庫國中分層沉陷量測表(港研中心：2015)

地層下陷觀測站測量值							
磁環 編號	104.05.21	磁環 編號	104.05.21	磁環 編號	104.11.03	磁環 編號	104.11.03
No.1	8.7096	No.14	185.1042	No.1	8.7102	No.14	185.1164
No.2	11.8672	No.15	198.1210	No.2	11.9445	No.15	198.1335
No.3	25.5350	No.16	220.2260	No.3	25.5361	No.16	220.0429
No.4	41.4963	No.17	228.0882	No.4	41.4982	No.17	228.1022
No.5	50.2165	No.18	232.5010	No.5	50.2194	No.18	232.5210
No.6	67.2892	No.19	241.6632	No.6	67.2874	No.19	241.6775
No.7	86.7820	No.20	251.8550	No.7	86.7854	No.20	251.8652
No.8	117.2584	No.21	272.2124	No.8	117.2700	No.21	272.2250
No.9	122.6297	No.22	282.8261	No.9	122.6339	No.22	282.8378
No.10	156.3555	No.23	288.1273	No.10	156.3660	No.23	288.1421
No.11	161.6356	No.24	294.1132	No.11	161.6465	No.24	294.1280
No.12	172.6458	No.25	296.3655	No.12	172.6582	No.25	296.3766
No.13	177.4417			No.13	177.4538		

### 高鐵沿線累積下陷量圖(資料來源：高速鐵路工程局)



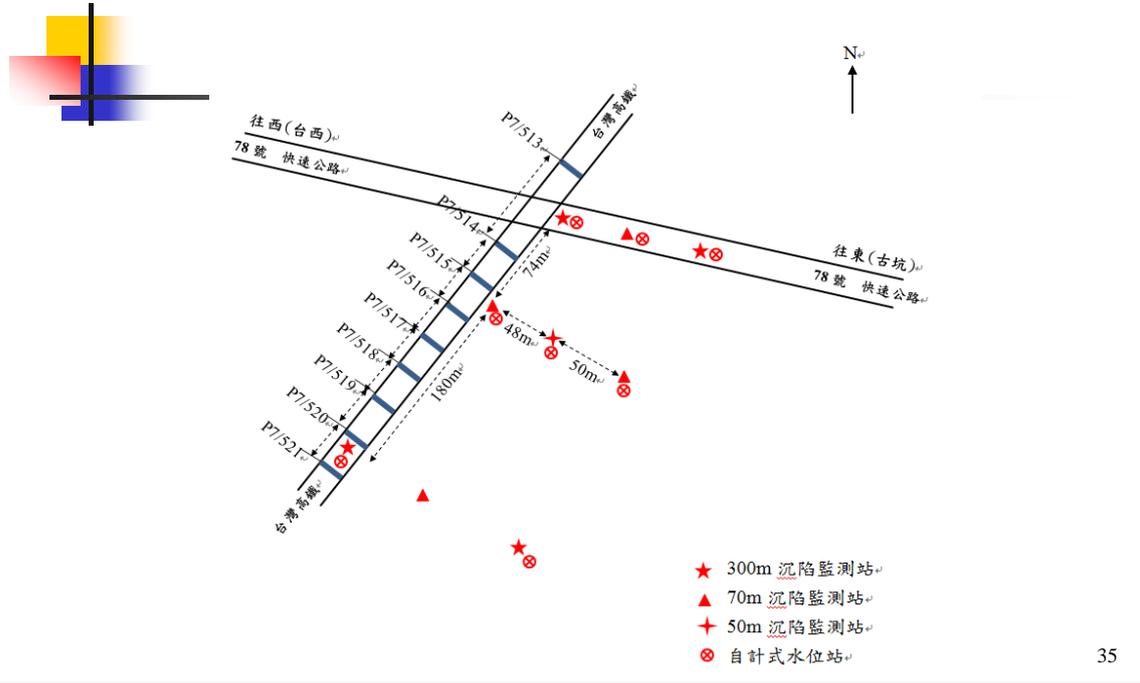
### 高鐵與台78線交會處連續梁示意圖(公路總局, 2013)



### 台78線與高鐵交會處監測站(google earth)



台78線與高鐵交會處監測站平面圖(公路總局, 2013)



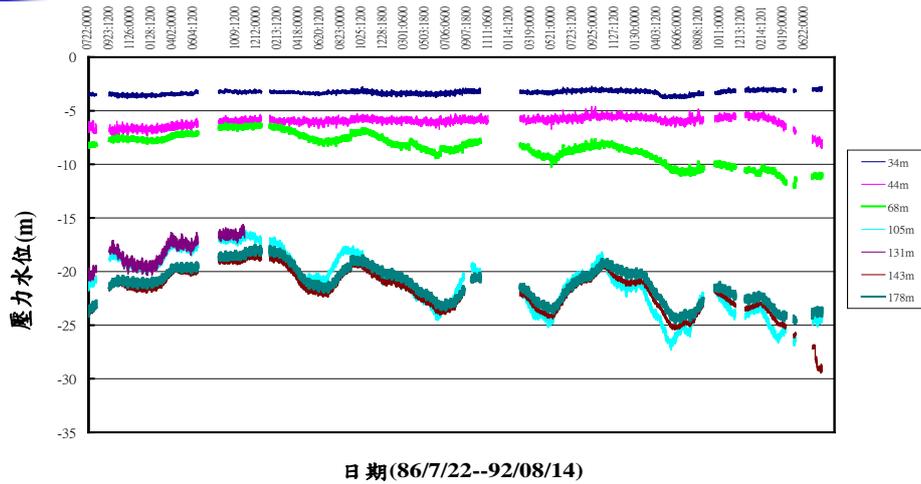
台78線22K+700與高鐵交會處鑽探孔座標一覽表-TW97

孔號	縱座標-N	橫座標-E	鑽孔標高(m)	深度(m)	備註
STA-1	2620856.45	187690.14	21.390	300.00	
STA-2	2620789.91	187646.85	16.870	70.45	
STA-3	2620640.95	187528.05	16.820	300.00	
STA-4	2620843.88	187741.40	19.970	70.45	
STA-5	2620761.71	187688.54	16.910	70.45	
STA-6	2620622.58	187567.23	16.700	70.45	
STA-7	2620832.45	187792.42	18.930	300.00	
STA-8	2620752.60	187733.03	17.060	70.45	
STA-9	2620562.05	187642.02	16.580	300.00	

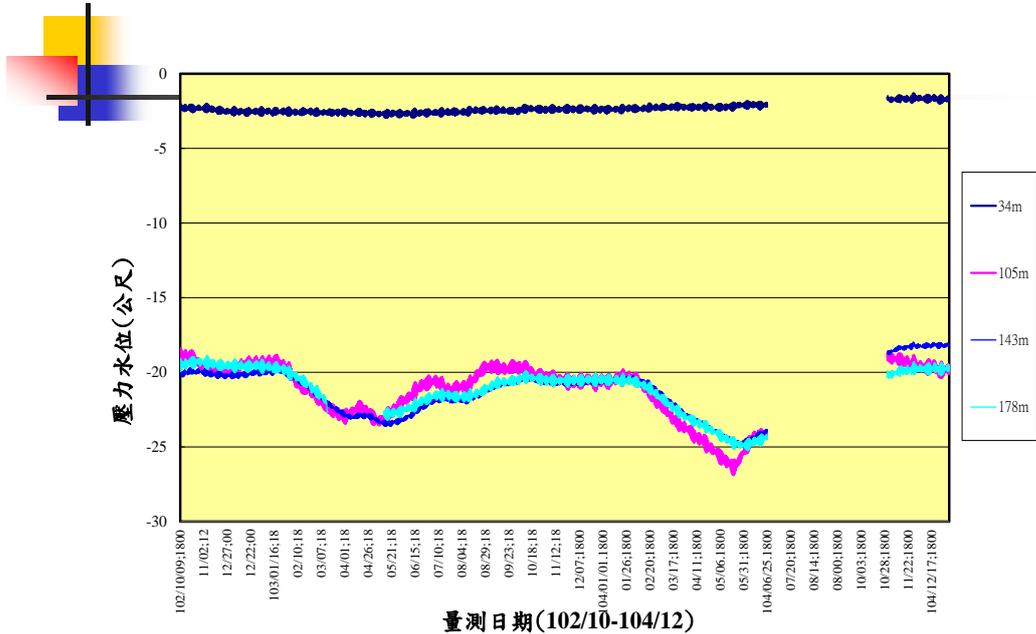
### 布袋港地層下陷站(整體規劃)



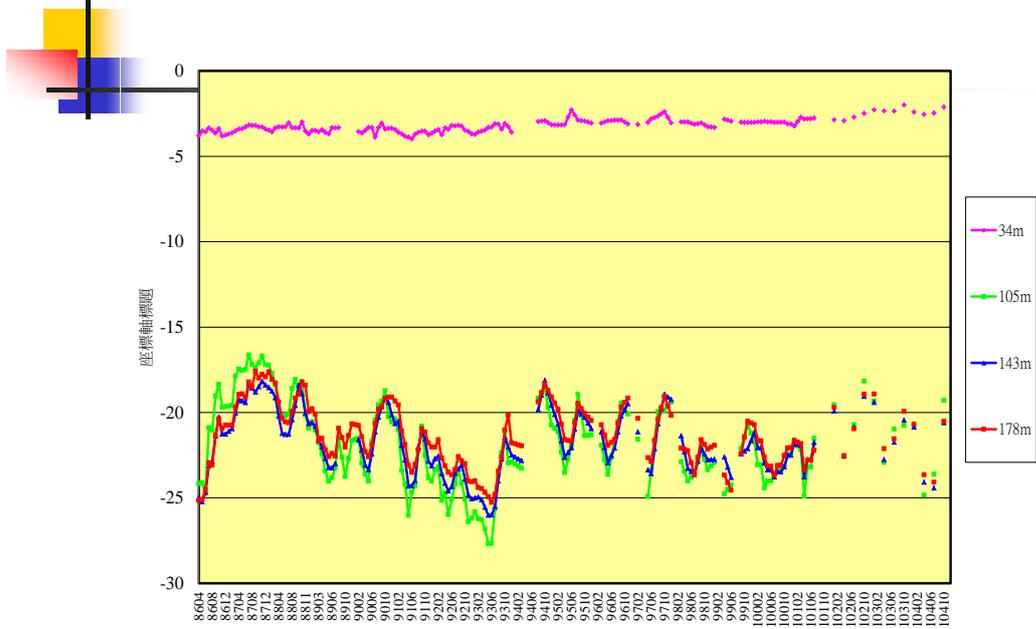
### 布袋港分層水位變化圖(自記式)



### 布袋港分層水位變化圖(自記式)

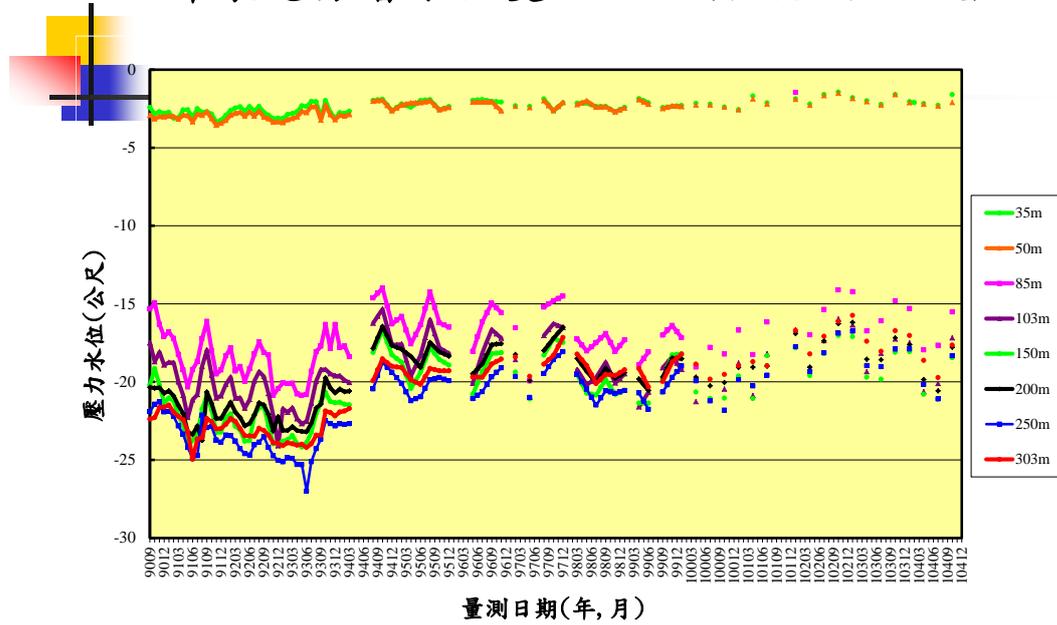


### 布袋港分層水位變化200m(手動量測86/04起)



四、地層下陷

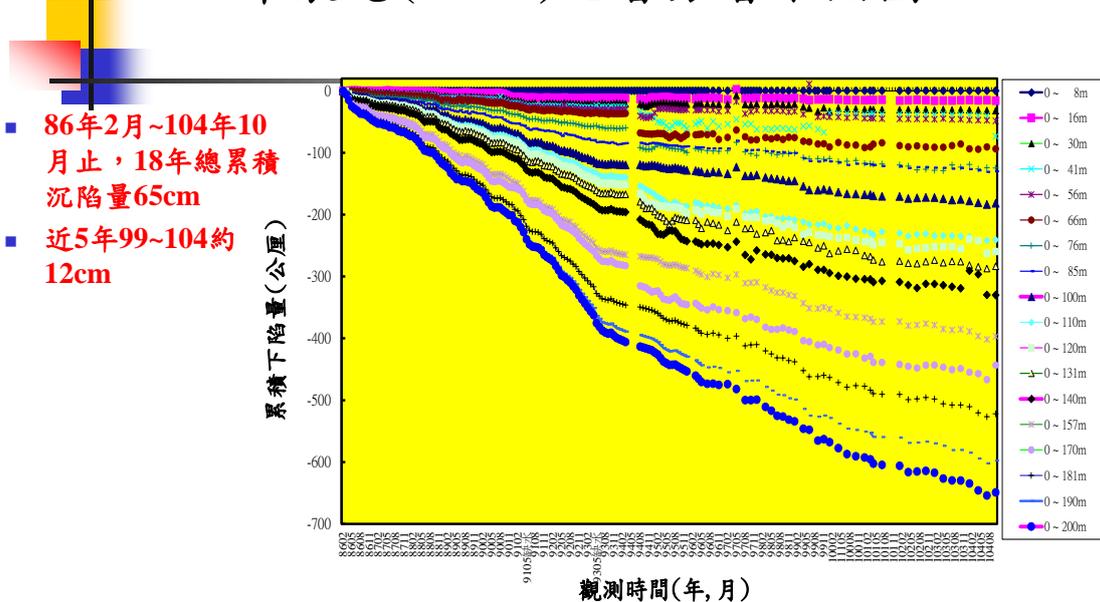
布袋港分層水位變化300m(手動量測90/09起)



41

四、地層下陷

布袋港(200m)地層分層下陷圖

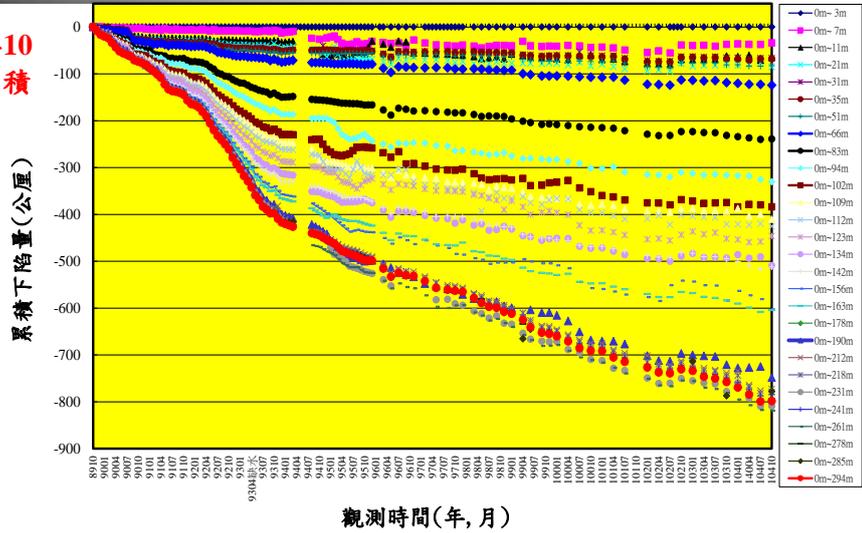


42

### 布袋港(300m)地層分層下陷圖



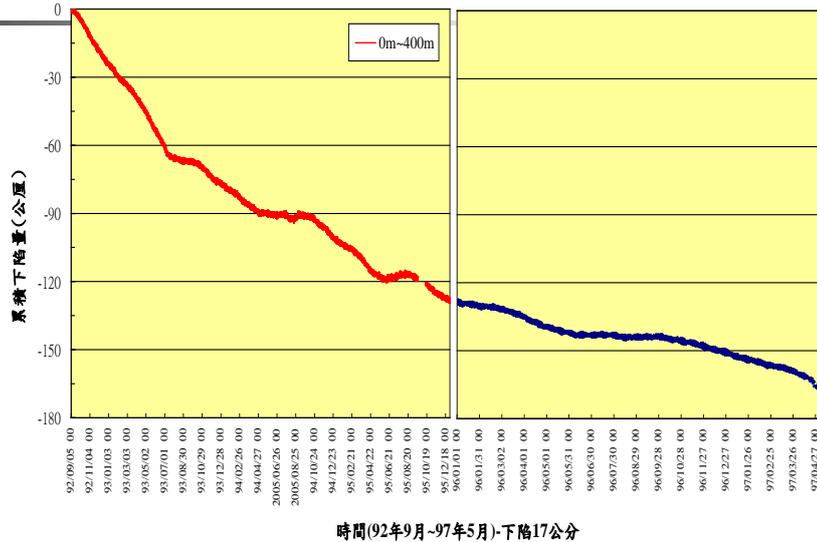
- 89年10月~104年10月止，15年總累積沉陷量80cm
- 近5年99~104約18.6cm



### 布袋港(400m)水準基準站累積下陷圖



- 每6小時一筆
- 自92年9月開始記錄。
- 自92年9月至97年5月止，總累積下陷量約為17公分。



## 布袋港(400m)水準基站累積下陷圖



- 92年9月至104年12月，共12年總累積下陷量約**36公分**。
- 98年7月~104年12月累積下陷量**18.9cm**。
- 97年5月至98年7月缺少資料。
- 因地震產生下陷量約**1.2cm**。

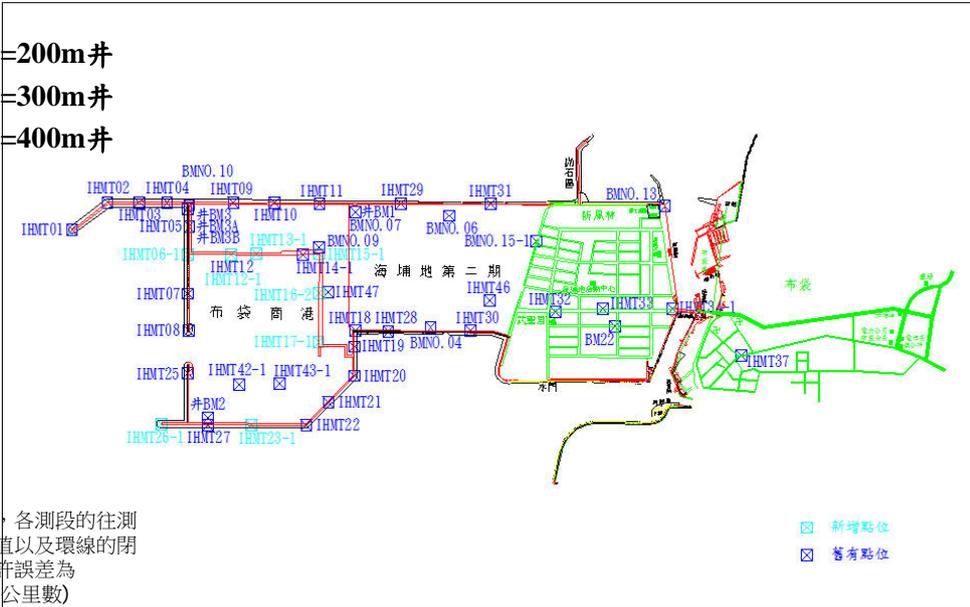


## 布袋港區平面水準測量



### 布袋港區沉陷水準測量工作範圍圖 (101~103年)

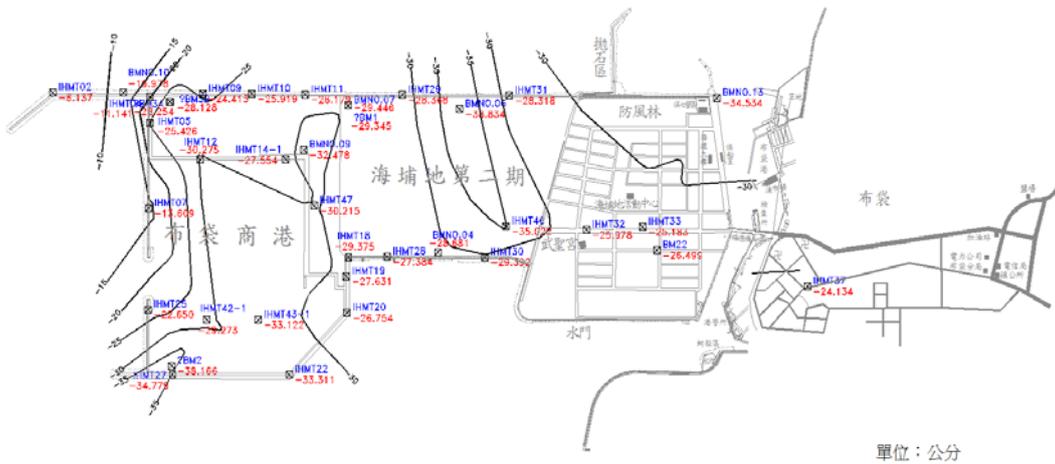
- #BM1=200m井
- #BM2=300m井
- #BM3=400m井



主水準路線，各測段的往測與返測的差值以及環線的閉合差，其允許誤差為  $3\text{mm}/k$  ( $k$ 為公里數)

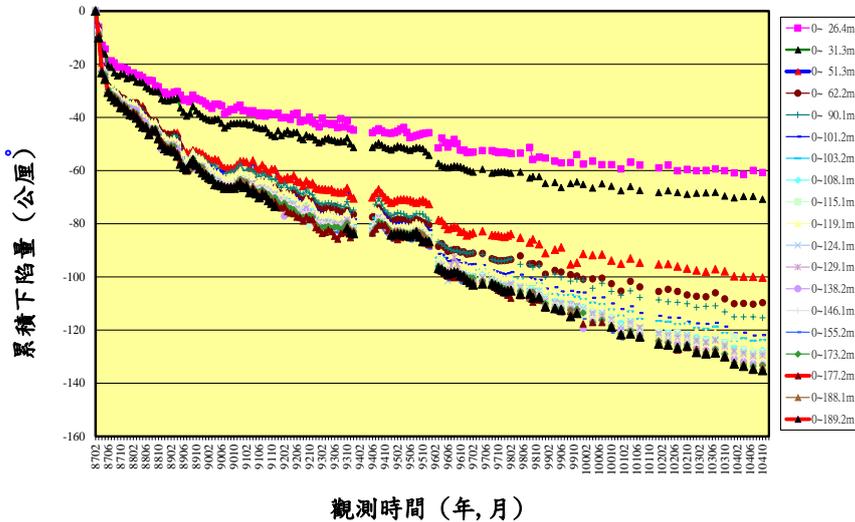
### 布袋港區沉陷水準測量總累積下陷圖(93-103)

- #BM1 : 29.34公分
- #BM2 : 38.17公分



## 大鵬灣地層分層下陷圖

- 87年3月~104年10月止16年6月，總累積沉陷量13.5公分。
- 其中0m~50m之沉陷量10公分。



## 五、資料庫在地理資訊系統上之應用

- 資料庫系統
  - 由於西南沿海地區地質資料與長期監測的地層下陷資料龐大，需以資料庫方式建置，故全部資料以港研中心自行開發的「縣市分區土層及下陷基本資料庫」建置。
  - 本年度彙整蒐集雲林地區由國內各大顧問公司之地質調查資料共計526孔，鑽孔累進深度15,226公尺。蒐集經濟部水利署自民國96年至102年之水準點高程下陷監測資料，水準點數量共425處，水準實測里程520公里。

## 資料庫在地理資訊系統上之應用

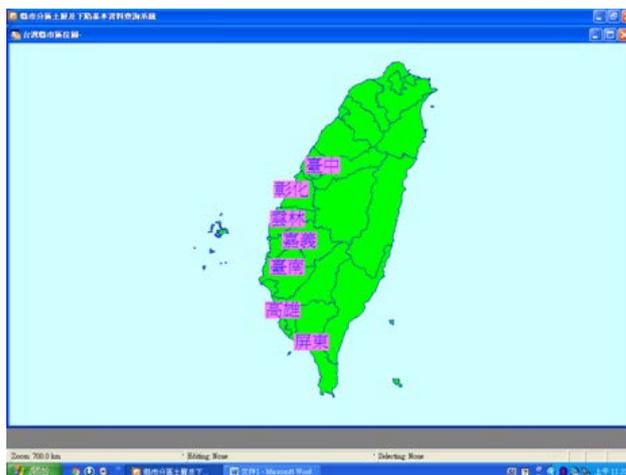
- 資料庫系統操作程序
- 在本所港研中心所開發的「縣市分區土層及下陷基本資料查詢系統」內主選單即為「鑽探資料」與「水準檢測資料」兩種選單，使用者可在此選單下查詢鑽探資料及水準測量資料，系統操作程序如下所示：

## 資料庫在地理資訊系統上之應用

- 以雲林地區土層及下陷基本資料查詢系統為例：
- 依「鑽探資料」與「水準檢測資料」兩大主功能項目查詢展示操作程序說明：
- 鑽探資料功能查詢展示：
- 在視窗作業環境下，執行MapInfo系統，進入該系統。
- 點選功能Tools\Run MapBasic Program，選擇D:\Taiwan\_sw\_1內的執行檔Taiwan\_sw\_2016\_N\_BK.MBX，按開啟選鈕，即進入縣市分區土層基本資料查詢系統。
- 按照操作程序，使用者可進入查詢系統的主畫面，此時螢幕視窗會展繪出臺灣全島地圖與西南沿線建置主要縣市（如臺中、彰化、雲林、嘉義、臺南、高雄與屏東等港區）的分布位置。

## 資料庫在地理資訊系統上之應用

### ■ 查詢主畫面



55

## 資料庫在地理資訊系統上之應用

### ■ 雲林地區土層及下陷基本資料查詢系統

#### ■ 雲林縣基本地圖圖層

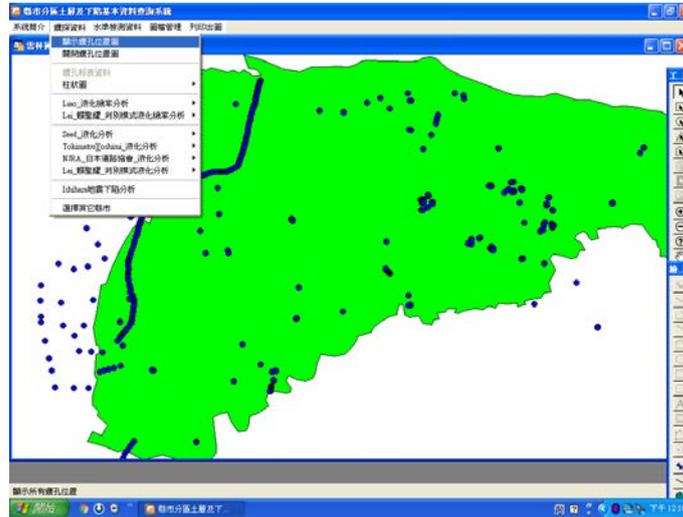
- 將滑鼠遊標移至雲林標示文字區內，按滑鼠左鍵，可叫出「雲林縣基本地圖圖層」，地圖以綠色標示雲林縣轄區位置。雲林縣土層鑽探與水準檢測資料查詢表單下拉展示如圖。

56



## 資料庫在地理資訊系統上之應用

### ■ 雲林縣土層鑽探資料查詢表單下拉展示圖



## 資料庫在地理資訊系統上之應用

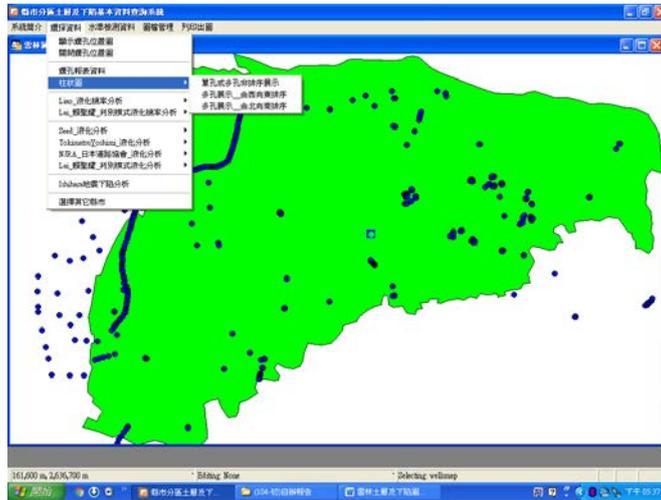
### ■ 雲林地區土層及下陷基本資料查詢系統

- 系統顯示鑽孔位置圖後，可任意點選一個孔位，然後點選「鑽探資料」主功能項下之第三選單「鑽孔報表資料」。點選後即展示該鑽孔之編號、座標、深度、土壤岩層說明、N值、含水量等基本物理性質。鑽孔報表資料展示如圖。



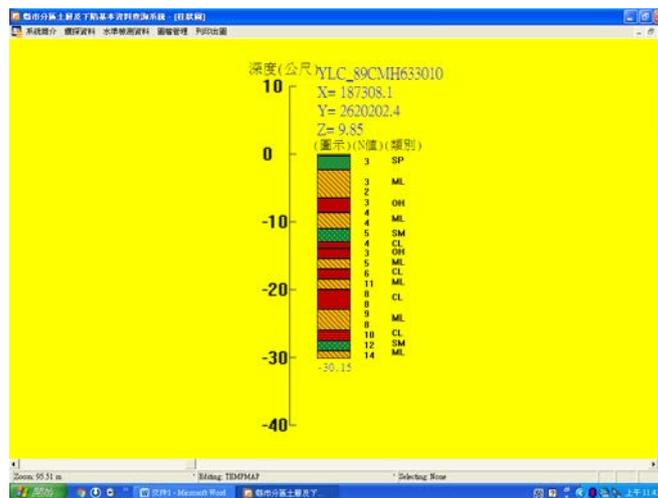
# 資料庫在地理資訊系統上之應用

- 雲林地區土層鑽探單孔或多孔非排序查詢展示圖



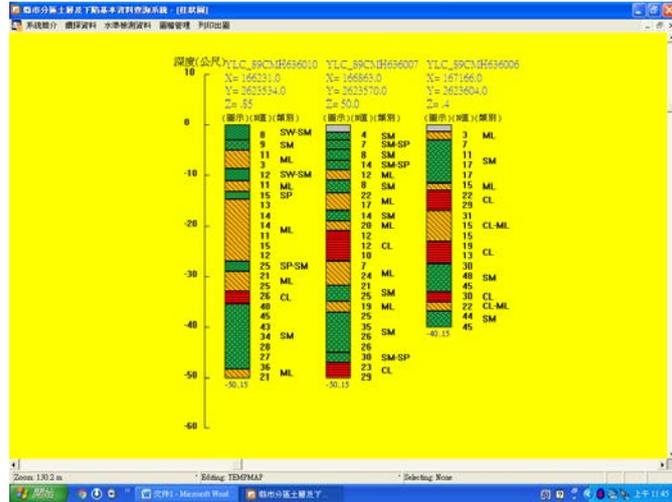
# 資料庫在地理資訊系統上之應用

- 雲林地區土層鑽探單孔非排序柱狀圖展示圖



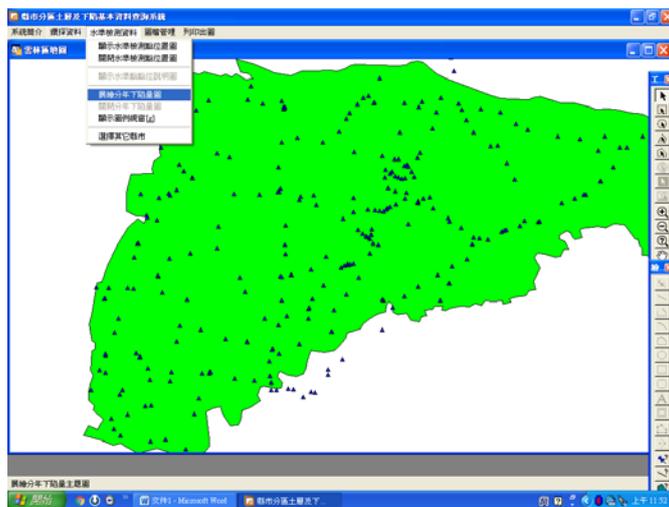
# 資料庫在地理資訊系統上之應用

## ■ 雲林地區土層鑽探多孔展示\_由西向東柱狀展示圖



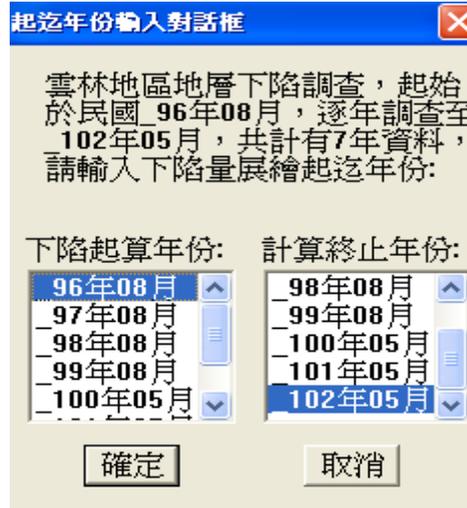
# 資料庫在地理資訊系統上之應用

## ■ 雲林地區水準檢測資料查詢展繪分年下陷量圖



## 資料庫在地理資訊系統上之應用

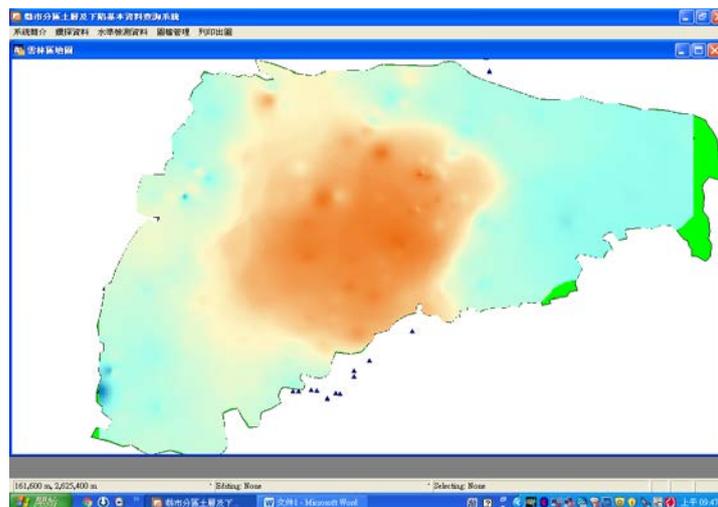
- 雲林地區地層下陷分年下陷量圖年份選取對話框



67

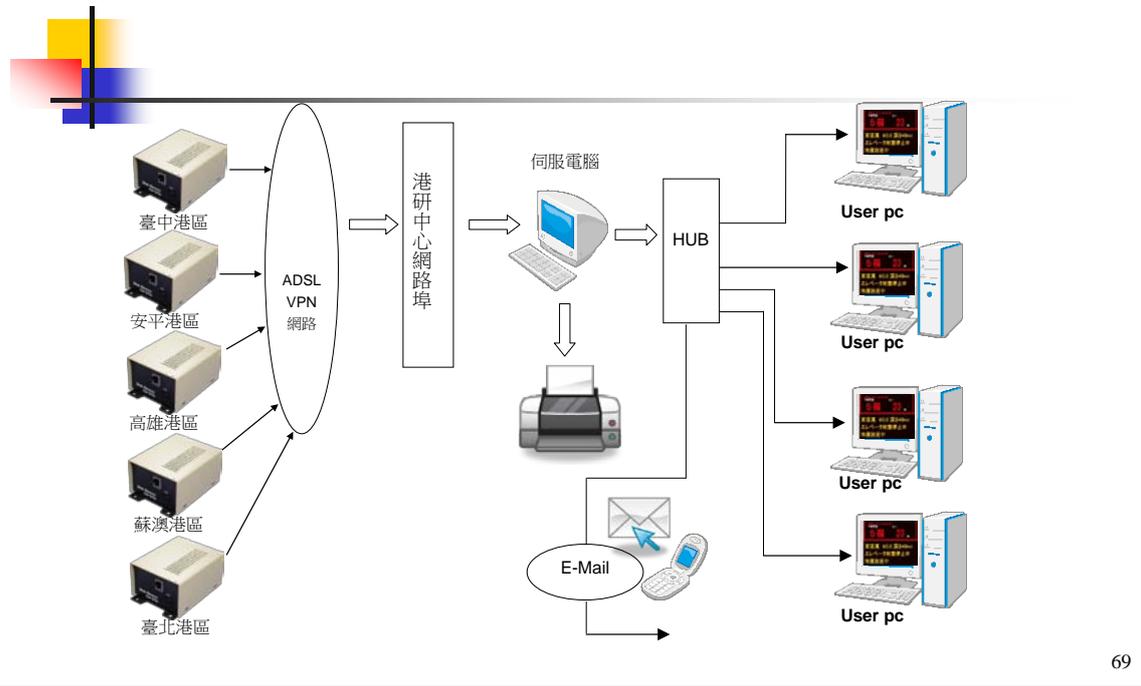
## 資料庫在地理資訊系統上之應用

- 雲林地區水準檢測地層下陷量展示圖



68

### 港區地震災況速報系統儀器配置示意圖



### 小結(1/4)-地質資料建檔

- 1. 本年度彙整蒐集雲林地區由各顧問公司地質調查資料共526孔，鑽孔累進深度15,226公尺。蒐集水利署自民國96年至102年之準點高程下陷監測資料，水準點數量共425處，水準實測里程520公里，建置於港研中心發展之「縣市分區土層及下陷基本資料庫」系統供查詢。
- 2. 蒐集台78線與高鐵交會處之地質鑽探資料9孔，300m深4孔，70m深5孔。依鑽探報告，STA-1號孔土層(300m)，大致以灰色粉質粘土、粉質細砂、粉質中細砂居多，地表下160m至220m有較厚的粘土層。

## 小結(2/4)-地層下陷量測

- 3. 蒐集水利署資料，雲林地區於民國80年主要下陷中心以沿海麥寮為主。85年後，下陷中心漸移內陸，88年後下陷中心集中於褒忠鄉、土庫鎮、虎尾鎮與元長鄉，民國90~102年累計下陷量達80公分。土庫國中下陷監測站相對於井底之壓縮量，自民國92年12月至102年10月止，整體地層壓縮量達45公分。
- 4. 布袋港因水位監測站之-105 m、-143 m及-178 m深度地下水位已降到地表下約20餘公尺，港區因水位下降引起地層下陷的情形。

76

## 小結(3/4)-地層下陷監測

### 1. 布袋港地層下陷：

- 200m：86年2月~104年10月止，累積沉陷量**65公分**，50%在-140~-200m。
- 300m：89年10月~104年10月止，累積沉陷量**80公分**，103年沉陷2.7公分，104年又填土自2.5公尺至6公尺高，沉陷量略增到4公分，平均每年約5.5公分。
- 400m：92~104年總下陷約**36公分**，99年震陷量1.2公分。

### 2. 港區下陷量趨緩，宜繼續監測。

### 3. 水準測量與分層沉陷量比較結果。(93-103)

比較結果	沉陷量	沉陷量
水準測量	200m：29.34公分	300m：38.17公分
分層沉陷	200m：24.9公分	300m：38.1公分

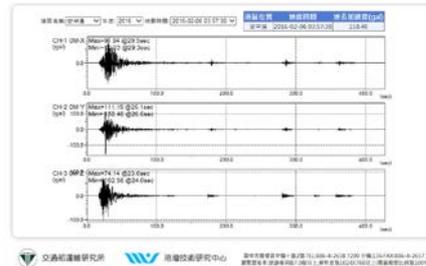
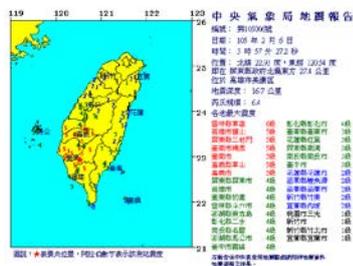
### 4. 大鵬灣地層下陷：

- 87年3月~104年10月止，累積沉陷量**13.5公分**。

77

## 小結(4/4)-地震速報系統

- 2016年2月6日3點57分，芮氏規模6.4之美濃地震，港研中心設置之安平、布袋、蘇澳、花蓮港之地震速報系統於2分鐘後發布地震簡訊到各港務分公司與本所相關人員。
- 地震速報系統與井下地震監測站：系統正常運作中。



## 本年度完成工作

1. 量測港區地層下陷與維護。
2. 監測港區地震資料與維護。
3. 建置臺灣西南沿海雲林地區地層下陷與水準測量等工程資料庫。
4. 改良港區地震災後速報系統。
5. 港灣季刊(102期,104年10月)。
6. 自辦計畫報告。

## 未來工作重點

- 1.持續量測港區地層下陷與維護。
- 2.監測港區地震資料與維護。
- 3.臺灣西南沿海彰化地區下陷資料。
- 4.建置工程資料庫。
- 5.精進港區地震災後速報系統。

80

簡報完畢  
恭請指正