

108-022-7B13

MOTC-IOT-107- H1DA001d

# 港區地震監測及地層下陷調查 分析研究



**交通部運輸研究所**

中華民國 108 年 2 月

108-022-7B13

MOTC-IOT-107-H1DA001d

# 港區地震監測及地層下陷調查 分析研究

著者：陳志芳、謝明志

交通部運輸研究所

中華民國 108 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

港區地震監測及地層下陷調查分析研究 / 陳志芳, 謝明志著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 108.02  
面 ; 公分  
ISBN 978-986-05-8366-3(平裝)

1.地質調查 2.地層下陷

356.33

107023549

港區地震監測及地層下陷調查分析研究

著 者：陳志芳、謝明志  
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)26587181  
出版年月：中華民國 108 年 2 月  
印 刷 者：采峰實業有限公司  
版(刷)次冊數：初版一刷 60 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：250 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：1010800099 ISBN：978-986-05-8366-3 (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。

港區地震監測及地層下陷調查分析研究

交通部運輸研究所

GPN: 1010800099

定價 250 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：港區地震監測及地層下陷調查分析研究			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-05-8366-3 (平裝)	政府出版品統一編號 1010800099	運輸研究所出版品編號 108-022-7B13	計畫編號 MOTC-IOT-107-H1DA001d
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：朱金元 計畫主持人：陳志芳 研究人員：謝明志 參與人員：魏瓊蓉、陳義松、李春榮、何木火 聯絡電話：04-26587181 傳真號碼：04-26564418			研究期間 自 107 年 01 月 至 107 年 12 月
關鍵詞：資料庫、地震、地層下陷、監測			
摘要： 臺灣西南沿海縣市，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。 本計畫將蒐集臺南嘉義地區地質資料，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 107 年度完成高雄港區地震分析、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，可作為各港務公司救災與工程維管人員決策之參考。 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
108 年 2 月	216	250	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**

TITLE: The study of monitoring seismic and subsidence measurement in port area.			
ISBN (OR ISSN) 978-986-05-8366-3(pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010800099	IOT SERIAL NUMBER 108-022-7B13	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-107- H1DA001d
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chin-Yuan Chu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jyh-Fang Chen PROJECT STAFF: Ming-Jyh Hsieh PROJECT TECHNICIAN: C.R. Wei, Y.S. Chen, C.R. Lee, M.H. Ho. PHONE:04-26587181 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD  FROM January 2018 TO December 2018
KEY WORDS: database, earthquake, ground subsidence, monitoring			
ABSTRACT:  <p>The soil deposits in Southwestern coast area, which includes Yunlin , Chiayi, 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 collects the regional geological data related to subsidence analysis in these areas. In situ subsidence measurements using wireless profile-settlement gauges are performed in ports of PuDai, DaPeng Bay, Taichung, and AnPeng 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 2018 of port monitoring earthquakes and subsidence of stratification. With expectation research results will provide reference for terminal design and maintenance in the future.</p>			
Benefit of Research Results :			
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. An rapid damage assessment system based on liquefaction analysis model and in situ monitoring data in harbor area was provided 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>			
Current situations in application:			
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. The settlement profiles and variations of ground water pressures in harbor area provides harbor company for the design and maintenance of harbor structures.</li> <li>2. The report can be potentially useful for industry, government, and academic research.</li> </ol>			
DATE OF PUBLICATION February 2019	NUMBER OF PAGES 216	PRICE 250	CLASSIFICATION <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.			

# 港區地震監測與地層下陷調查分析研究

## 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
目 錄 .....	III
圖目錄 .....	VII
表目錄 .....	XV
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 地震監測系統與安裝 .....	2-1
2.1 地震監測規劃 .....	2-1
2.2 地震及動態孔隙水壓監測系統 .....	2-2
2.2.1 系統規劃與安裝 .....	2-4
2.2.2 資料傳輸與監控 .....	2-5
2.2.3 港區地震監測站 .....	2-7
2.3 港區地震速報系統 .....	2-12
第三章 港區地震監測分析 .....	3-1
3.1 高雄港之地理位置與地質 .....	3-1
3.1.1 高雄港概況 .....	3-1
3.1.2 高雄港地質概況 .....	3-2

3.1.3	高雄港地層分布 .....	3-3
3.2	高雄港區之斷層與地震規模 .....	3-7
3.2.1	高雄港區附近的活動斷層 .....	3-7
3.2.2	斷層長度與地震規模.....	3-11
3.3	高雄港區的設計地震力.....	3-12
3.3.1	高雄港測站地震類型.....	3-12
3.3.2	高雄港區建築物耐震設計 .....	3-19
3.3.3	高雄港區水平加速度反應譜 .....	3-19
3.4	高雄港區場址效應.....	3-22
3.4.1	一維地盤反應分析假設與理論 .....	3-23
3.4.2	土壤模型.....	3-27
3.4.3	輸入參數.....	3-29
3.4.4	地震輸入運動.....	3-30
3.4.5	資料處理.....	3-32
3.4.6	分析結果.....	3-35
3.5	臺北港區的設計地震力.....	3-41
3.5.1	臺北港區建築物耐震設計 .....	3-41
3.5.2	臺北港區水平加速度反應譜 .....	3-41
3.6	花蓮港地震站資料.....	3-43
3.6.1	花蓮港測站地質.....	3-43
3.6.2	花蓮港區地動特性.....	3-45
3.6.3	花蓮港區建築物耐震設計 .....	3-49
3.6.4	花蓮港區水平加速度反應譜 .....	3-49
3.6.5	花蓮港區土壤剪應變量 .....	3-50

3.6.6	花蓮港區地震災況.....	3-58
3.7	花蓮港地震資料時頻分析.....	3-63
第四章	嘉南地區與港區下陷監測.....	4-1
4.1	地層下陷分析方法.....	4-1
4.1.1	Terzaghi 壓密理論.....	4-1
4.1.2	Biot 耦合壓密理論.....	4-3
4.2	監測儀器規劃.....	4-5
4.2.1	電子式水壓計.....	4-5
4.2.2	開放式水壓計.....	4-7
4.2.3	地盤分層沉陷觀測井.....	4-7
4.3	嘉南沿海地質資料.....	4-10
4.4	嘉南平原地區地質.....	4-10
4.4.1	地理概況.....	4-10
4.4.2	地質概述.....	4-11
4.4.3	水文概述.....	4-12
4.5	嘉南地區地層下陷.....	4-13
4.6	港區地層下陷監測.....	4-19
4.6.1	布袋港監測站.....	4-19
4.6.2	大鵬灣監測站.....	4-32
4.6.3	臺中港監測站.....	4-36
4.6.4	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	縣市分區土層及下陷資料庫系統.....	5-1
5.2	雲林與嘉義地區土層及下陷資料查詢.....	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
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-4
6.3 研究成果之效益 .....	6-4
6.4 提供政府單位應用情形 .....	6-4
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 港區地震監測系統規劃與流程圖.....	2-3
圖 2.2 機房及設備外觀示意圖.....	2-5
圖 2.3 整體擷取、傳輸與監測控制流程.....	2-6
圖 2.4 機房構造與配置示意圖.....	2-6
圖 2.5 安平港區井下地震監測站圖.....	2-8
圖 2.6 臺中港區井下地震監測站圖.....	2-8
圖 2.7 布袋港區井下地震監測站平面圖.....	2-9
圖 2.8 布袋港區井下地震監測站圖.....	2-9
圖 2.9 臺北港區井下地震監測站平面圖.....	2-10
圖 2.10 臺北港區井下地震監測站圖.....	2-10
圖 2.11 高雄港區井下地震監測站圖.....	2-11
圖 2.12 蘇澳港區井下地震監測站圖.....	2-11
圖 2.13 基隆港地震速報監測站圖.....	2-13
圖 2.14 花蓮港地震速報監測站圖.....	2-13
圖 2.15 港區地震速報系統儀器配置示意圖.....	2-14
圖 2.16 布袋港區地震即時監測畫面圖.....	2-14
圖 2.17 臺中港區地震即時監測畫面圖.....	2-15
圖 2.18 安平港區地震即時監測畫面圖.....	2-15
圖 2.19 高雄港區地震即時監測畫面圖.....	2-16
圖 2.20 蘇澳港區地震即時監測畫面圖.....	2-16
圖 2.21 臺北港區地震即時監測畫面圖.....	2-17
圖 3.1 高雄港整體規劃發展計畫圖.....	3-2

圖 3.2 高雄港區砂質土壤內摩擦角土壤乾土單位重之關係圖.....	3-5
圖 3.3 高雄港區粘性土壤無圍壓縮強度隨深度之變化情形圖.....	3-5
圖 3.4 高雄港區粘性土壤液性限度與塑性指數關係圖 .....	3-6
圖 3.5 高雄港區粘性土壤壓縮指數 Cc 與自然含水量的關係圖 .....	3-6
圖 3.6 高雄港砂質土壤剪力模數與剪應變之關係圖.....	3-7
圖 3.7a 旗山斷層地質圖(中央地調所) .....	3-8
圖 3.7b 潮州斷層地質圖-北段(中央地調所) .....	3-9
圖 3.7c 潮州斷層條帶地質圖-南段(北幅)(中央地調所) .....	3-10
圖 3.7d 潮州斷層條帶地質圖-南段(南幅)(中央地調所) .....	3-10
圖 3.8a 高雄港 A 類型地震歷時圖 .....	3-17
圖 3.8b 高雄港 B 類型地震歷時圖 .....	3-17
圖 3.8c 高雄港 C 類型地震歷時圖 .....	3-17
圖 3.9a 高雄港 A 類型地震加速度富氏譜圖 .....	3-18
圖 3.9b 高雄港 B 類型地震加速度富氏譜圖 .....	3-18
圖 3.9c 高雄港 C 類型地震加速度富氏譜圖 .....	3-18
圖 3.10a 高雄港 A、B 類型地表地震水平加速度反應譜曲線圖(0.20g) .. .....	3-20
圖 3.10b 高雄港 A、B 類型地震水平加速度反應譜曲線圖(0.23g) ..	3-21
圖 3.10c 高雄港 A、B 類型地震水平加速度反應譜圖(0.2g、0.23g)	3-21
圖 3.11 分析流程圖 .....	3-22
圖 3.12 地震波傳遞示意圖 .....	3-24
圖 3.13 一維土層系統剖面(Schnabel et al.,1972) .....	3-26
圖 3.14 多重塑性降伏表面空間(Cyclic1D,2004) .....	3-27
圖 3.15 高雄港地震監測站位置示意圖.....	3-28

圖 3.16 現地土層柱狀圖與土壤模型對照圖.....	3-28
圖 3.17 高雄港地震監測站剪力波速隨深度變化圖.....	3-29
圖 3.18 輸入之剪力模數和阻尼比(SHAKE91) .....	3-30
圖 3.19 地震輸入運動(292.5 公尺 Y 向) .....	3-31
圖 3.20 輸入地震延時.....	3-32
圖 3.21 尖峰地表加速度圖.....	3-32
圖 3.22 單自由度系統之加速度反應示意圖(Kramer,1996) .....	3-34
圖 3.23a 現地與 Cyclic1D 加速度歷時比較圖(地表) .....	3-36
圖 3.23b 現地與 Cyclic1D 加速度歷時比較圖(-14.7m) .....	3-36
圖 3.23c 現地與 Cyclic1D 加速度歷時比較圖(-30.8m) .....	3-37
圖 3.24a 現地與 Shake91 加速度歷時比較圖(地表) .....	3-37
圖 3.24b 現地與 Shake91 加速度歷時比較圖(-14.7m) .....	3-38
圖 3.24c 現地與 Shake91 加速度歷時比較圖(-30.8m) .....	3-38
圖 3.25a 各深度加速度歷時比較圖(Cyclic1D) .....	3-39
圖 3.25b 各深度加速度歷時比較圖(Shake91) .....	3-39
圖 3.25c 各深度加速度歷時比較圖(現地) .....	3-40
圖 3.26 最大加速度放大係數隨深度變化圖.....	3-40
圖 3.27a 臺北港 A、B 類型地表地震水平加速度反應譜曲線圖(0.264g) .....	3-42
圖 3.27b 臺北港 A、B 類型地震水平加速度反應譜曲線圖(0.23g) .	3-42
圖 3.28 花蓮港地震站土層鑽探與波速剖面圖(中央氣象局) .....	3-43
圖 3.29 民國 2018 年 2 月 6 日花蓮地震報告圖(中央氣象局) .....	3-44
圖 3.30 民國 2018 年 2 月 6 日花蓮地震報告圖(中央氣象局) .....	3-44
圖 3.31 花蓮港地震站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震圖(港研中心)	

.....	3-45
圖 3.32a 花蓮港地震站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震加速度歷時圖 (港研中心) .....	3-46
圖 3.32b 花蓮港地震站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震加速度比較圖 .....	3-46
圖 3.33 花蓮港地震站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震速度圖 .....	3-47
圖 3.34 花蓮港地震站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震位移圖 .....	3-48
圖 3.35a 花蓮港區地震水平向反應譜比較圖 .....	3-49
圖 3.35b 花蓮港區地動垂直向反應譜比較圖 .....	3-50
圖 3.36 乾砂之單剪儀試驗反復應變控制圖(Silver and Seed, 1971) .....	3-53
圖 3.37 孔隙比變化與反復次數之反復剪應變圖(Youd, 1972) .....	3-53
圖 3.38 飽和砂土在三軸應變控制試驗之孔隙水壓量測圖(Dobry and Ladd, 1980) .....	3-54
圖 3.39 花蓮港實測地震地表加速度歷時圖 .....	3-55
圖 3.40 花蓮港實測地震地表速度歷時圖 .....	3-56
圖 3.41 花蓮港實測地震土層剪應變量歷時圖 .....	3-57
圖 3.42 花蓮港#23 與#24 碼頭面後線龜裂圖 .....	3-58
圖 3.43 花蓮港#24 碼頭面龜裂下陷圖 .....	3-59
圖 3.44 花蓮港#24 與#25 碼頭面龜裂下陷圖 .....	3-59
圖 3.45 花蓮港#24 碼頭面龜裂下陷圖 .....	3-60
圖 3.46 花蓮港#25 碼頭地質鑽探平面示意圖 .....	3-60
圖 3.47 花蓮港#25 碼頭地質鑽探 BH-1 圖 .....	3-61
圖 3.48 花蓮港#25 碼頭地質鑽探 BH-2 圖 .....	3-61
圖 3.49 花蓮港#25 碼頭地質鑽探 BH-3 圖 .....	3-62
圖 3.50 花蓮港#25 碼頭地質鑽探 BH-4 圖 .....	3-62

圖 3.51 花蓮港地震站水平加速度歷時圖(ch1)	3-63
圖 3.52 花蓮港地震站能譜圖(ch1)	3-63
圖 3.53 花蓮港地震站傅氏頻譜圖(ch1)	3-64
圖 3.54 花蓮港地震站水平加速度歷時圖(ch2)	3-64
圖 3.55 花蓮港地震站能譜圖(ch2)	3-64
圖 3.56 花蓮港地震站傅氏頻譜圖(ch2)	3-65
圖 3.57 花蓮港地震站水平加速度歷時圖(ch3)	3-65
圖 3.58 花蓮港地震站能譜圖(ch3)	3-65
圖 3.59 花蓮港地震站傅氏頻譜圖(ch3)	3-66
圖 4.1 系統儀器架構流程圖	4-6
圖 4.2 電子式地下水壓計安裝示意圖	4-6
圖 4.3 開放式水壓計安裝示意圖	4-8
圖 4.4 沉陷計安裝示意圖	4-9
圖 4.5 磁感式層別沉陷計安裝示意圖	4-9
圖 4.6 嘉義地區地形分區圖	4-11
圖 4.7 嘉義地區區域地質圖(中央地質調查所，2000)	4-12
圖 4.8 嘉義地區地質剖面及水文地質概念分層(水利署，2014)	4-13
圖 4.9 嘉義地區民國 93 至 103 年累積下陷量圖(水利署，2014)	4-14
圖 4.10 嘉義地區民國 80 至 103 年累積下陷量圖(水利署，2014)	4-14
圖 4.11 嘉義地區民國 102 至 103 年平均下陷速率等值線圖(水利署，2014)	4-15
圖 4.12 嘉義地區民國 101 至 102 年與 102 至 103 年平均下陷速率等值線圖	4-16

圖 4.13 臺南地區民國 100 至 103 年平均下陷速率等值線圖(水利署，2014)	4-17
圖 4.14 臺南地區民國 99 至 100 年與 100 至 103 年平均下陷速率等值線圖(水利署，2014)	4-17
圖 4.15 臺南地區民國 90 至 103 年累積下陷量圖(水利署，2014)	4-18
圖 4.16 布袋港監測站位置圖	4-19
圖 4.17 布袋港分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖	4-23
圖 4.18a 布袋港分層水位變化圖(自記式)(86/7/22-92/08/14)	4-27
圖 4.18b 布袋港分層水位變化圖(自記式)(98/08/06-101/5/25)	4-27
圖 4.18c 布袋港分層水位變化圖(自記式)(102/10/8-106/10/30)	4-28
圖 4.19 布袋港(200m)分層水位變化圖(手動量測)	4-28
圖 4.20 布袋港(300m)分層水位變化圖(手動量測)	4-29
圖 4.21a 布袋港(200m)分層累積下陷量圖(手動量測)	4-29
圖 4.21b 布袋港(200m)分層累積下陷量圖(手動量測)	4-30
圖 4.22 布袋港(300m)分層個別下陷量圖	4-30
圖 4.23 布袋港(300m)分層累積下陷量圖	4-31
圖 4.24a 布袋港(400m)水準基站累積下陷量圖(92/09/04~97/05/30)	4-31
圖 4.24b 布袋港(400m)水準基站累積下陷量圖(98/07/03~107/05/23)	4-32
圖 4.25 大鵬灣監測站位置圖	4-33
圖 4.26 大鵬灣分層水位變化圖(手動量測)	4-35
圖 4.27 大鵬灣地層分層下陷觀測圖	4-36
圖 4.28 臺中港監測站圖	4-37
圖 4.29 臺中港分層水位變化圖(手動量測)	4-39

圖 4.30 臺中港分層累積下陷量圖(200m).....	4-39
圖 4.31 安平港監測站位置圖 .....	4-40
圖 4.32 安平港分層水位變化圖(手動量測) .....	4-42
圖 4.33 安平港 18~19 號碼頭地層分層下陷觀測圖(88 年~93 年) ...	4-42
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.....	5-7
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.....	5-8
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.....	5-9
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.....	5-10
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.....	5-11
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.....	5-12
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) .....	5-13
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.....	5-14
圖 5.17 雲林地區土層 Ishihara 地震下陷分析展示圖.....	5-14
圖 5.18 嘉義地區水準檢測點位置圖展示圖.....	5-15
圖 5.19 嘉義地區水準檢測點位說明展示圖.....	5-15

圖 5.20 嘉義地區水準檢測點位說明(高程資訊)展示圖 .....	5-16
圖 5.21 嘉義地區水準檢測資料展繪分年下陷量圖查詢選單.....	5-16
圖 5.22 嘉義地區地層下陷分年下陷量圖年份選取對話框.....	5-17
圖 5.23 嘉義地區水準檢測地層下陷量展示圖 .....	5-17

## 表 目 錄

表 2-1 各港區設置井下地震監測站資料表 .....	2-7
表 2-2 基隆與花蓮港區設置地表地震速報系統資料表 .....	2-12
表 3-1a 高雄港 2005~2007 年井下地震監測資料表 .....	3-13
表 3-1b 高雄港 2008~2009 年井下地震監測資料表 .....	3-14
表 3-1c 高雄港 2010~2012 年井下地震監測資料表 .....	3-15
表 3-1d 高雄港 2013~2018 年井下地震監測資料表 .....	3-16
表 3-2 港區地震紀錄.....	3-31
表 3-3 花蓮地震花蓮港測站紀錄表 .....	3-45
表 4-1 臺南地區民國 90 年至 103 年下陷面積分析表(水利署，2014) .....	4-18
表 4-2 布袋港監測井座標高程一覽表(200m).....	4-20
表 4-3 布袋港沉陷計感應環安裝深度一覽表(200m) .....	4-20
表 4-4 布袋港地下水壓觀測站水壓計埋設資料表(200m) .....	4-21
表 4-5 大鵬灣沉陷計感應環安裝深度一覽表 .....	4-33
表 4-6 大鵬灣地下水壓觀測站水壓計埋設資料表 .....	4-34
表 4-7 臺中港沉陷計感應環安裝深度一覽表 .....	4-37
表 4-8 安平港 18~19 號碼頭沉陷磁環安裝深度表 .....	4-40



# 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，也會造成區域性之下陷。依本中心於布袋港區監測所得資料其最大累積沉陷量達 80 餘公分，另依水利署地層下陷資料截至民國 103 年止，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。本所職司運輸科技應用研究，為維護行車安全與港區各樣設施工程安全，蒐集臺灣西南地區地質及地層下陷資料，並於港區設置地層下陷及地下水壓監測站，進行長期監測與資料建檔，藉以提供公路及碼頭管理單位參考，降低災害損失。

## 1.2 研究範圍

本計畫為持續量測港區地層下陷並蒐集西南沿海縣市地質資料進

行建檔工作，就縣市地質資料庫的部份，104 年度已完成建置雲林縣地區土層及下陷資料庫，105 年完成彰化縣地區資料庫，106 年完成嘉義縣地區資料庫。本(107)年主要完成布袋港區地震即時災況速報系統建置，提供港區碼頭液化安全評估相關資訊。在地層下陷監測部份，主要以蒐集西南沿海之臺南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。預計 108 年增加蒐集西南沿海之屏東、高雄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自動監測工作。

### 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(107)年彙整臺灣西南沿海與臺南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。

本文中第二章是地震速報系統規劃建置，第三章進行港區井下地震站所監測的資料與分析，包含高雄港區的設計地震力分析、港區附近活動斷層的影響，第四章蒐集西南沿海之臺南縣與各港區土層分層沉陷及地下水壓的監測結果分析，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 地震監測系統與安裝

為確保位於港區軟弱沖積土層結構設施之安全，需針對地震或地層下陷所產生之效應進行監測，以作為設計港灣結構物與維護工程之參考，因此於港區適當地點設置地震反應監測系統，依功能與目的可將其歸納為：地震監測、動態孔隙水壓監測、地層下陷監測、碼頭及地層之傾斜變位監測等四種。另外，當強烈地震作用下港區碼頭設施可能受損，為迅速完成碼頭設施的災後修復巡檢，需設置地震災後速報系統以簡訊方式即時傳達至各港設施維護管理人員，本章就港區井下地震及動態孔隙水壓監測與地震災後速報等兩種系統之規劃與設置分別敘述如下：

### 2.1 地震監測規劃

港區設置地震監測站依功能可概分為，地表自由場地震力監測、地震在軟弱土層之放大效應監測、重要構造物之地震反應監測、碼頭及地層之傾斜變位監測等，分別敘述如下：

1. 地表自由場地震力監測：自由場之地震監測為港灣地區最基本之地震監測，其是以三向式之地表地震儀，設置於寬度空曠地區之地表，再以電纜線連接至室內之監測記錄器。
2. 地震在軟弱土層之放大效應監測：港灣地區地層大都為疏鬆軟弱之沖積土層及浚砂回填土所構成，因此地震在鬆軟地層之放大效應，悠關港灣構造物之安全甚巨，為了瞭解地震時，地層中震波之傳遞特性，鑽數口井至各個地層，分別於最深之堅硬地盤及不同深度之軟弱土層，分層安置埋入型地震計，分層監測(本研究分層設計深度規劃為 GL-15m、GL-30m、GL-100m、GL -300m，得依現地土層變化狀況而調整。)，以瞭解當地地層之地震放大效應。

3. 重要構造物之地震反應監測：港灣地區有棧橋式、板樁式、沉箱式等各種不同型式之基礎及碼頭、防波堤、海堤、過港隧道等各種不同構造物，其對地震之反應皆各有不同，為瞭解地震時，重要構造物之地震反應，亦需安裝地震儀加以監測。
4. 碼頭及地層之傾斜變位監測：地震不但會造成地層下陷，亦會產生側向力使港灣構造物造成位移、傾斜，日本阪神地震造成港灣碼頭位移 1-5m，臺灣 1999 年 921 地震造成臺中港 1-4A 碼頭外移 0.5~1.7m，傾斜 2~4%，因此對碼頭及地層之傾斜變位之監測亦為地震反應安全監測之項目。

## 2.2 地震及動態孔隙水壓監測系統

在強烈地震之反復作用下，土壤之孔隙水壓會逐漸上升，土壤之承載力會逐漸減低，當土壤之超額孔隙水壓之上升累積至與土壤之垂直壓力相等時即所謂之土壤液化。當此種現象發生的時候，土壤的承載力會瞬間驟降甚至到零的地步，築在其上的結構物也因基礎失去支撐而傾斜或倒塌，而側向之構造物如碼頭、護岸、河海堤亦會因土壤液化增加之側向力，而產生向海側(河側)位移或傾斜等破壞。因此地震時動態水壓之監測，對港灣構造物之安全極為重要。

由於地震在鬆軟地層之放大效應，悠關港灣構造物之安全，為瞭解地震時，地層中震波之傳遞特性，鑽數口井至各個地層，分別於最深之堅硬地盤及不同深度之軟弱土層，分層安置埋入型地震計分層監測，以瞭解港區地層之地震放大效應。

目前本中心在安平港、臺中港、布袋港、臺北港、高雄港與蘇澳港均已個別完成設置一組動態水壓即時監測系統，本研究分層設計深度規劃為 GL-4m、GL-8m、GL-10m、GL -15m、GL -30m，可依現地土層變化狀況而調整，以監測地震時淺層動態水壓之即時變化。

此外，在臺中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港區亦分別設置 1 組 200M 分層地下水壓監測系統，除了可以監測港區平時之水壓變化外，亦可監測地震前後深層地下水壓之變化。

本系統依序分別於各港區自由場選擇適當位置安置地震及動態孔隙水壓監測系統，其各站監測系統規劃與流程設計如圖 2.1 所示，另為消除地震監測速報系統因外力產生之雜訊，特將網路型地表地震儀與一台井下地震計連結，並設定各頻道接收之地表加速度須達門檻值時才觸發速報系統作為精進系統之方式。監測站依設置目的採統一之系統規劃設計，其特性摘要說明如下：

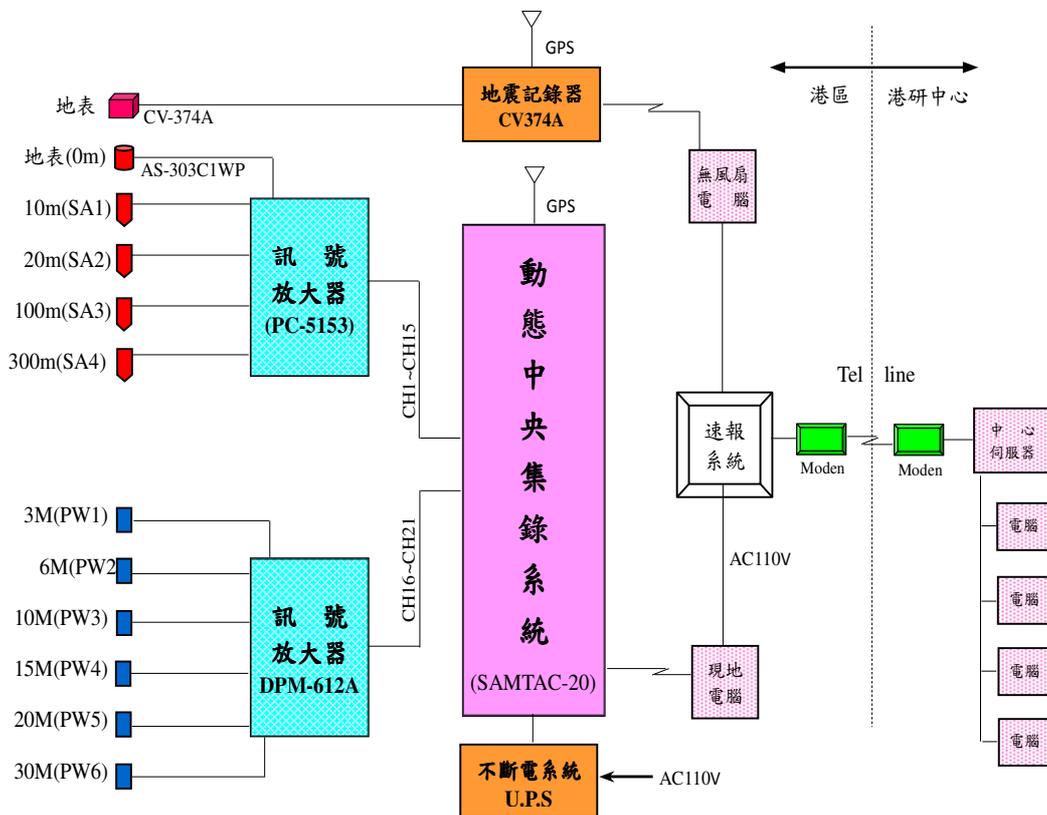


圖 2.1 港區地震監測系統規劃與流程圖

## 2.2.1 系統規劃與安裝

### 1. 採分層安裝與同步監測

每個系統規劃監測儀埋設井各 7 孔，分別為水壓計監測井 3 孔及地震監測井 4 孔。水壓計安裝設計深度為 4m、8m、12m、15m、20m、30m 等 6 支分置於 3 孔，地震計安裝設計深度為 15m、30m、100m、(200m 或 300m) 等 4 組分置於 4 孔，另於地表安裝地震儀 1 組後，藉由電纜線組合一起延長到觀測房以自動記錄方式將資料記錄保存在電腦。每支地震計均記錄 X、Y、V 三方向之振波，包括水壓計共 21ch 之訊號同步觀測記錄，各土層地震與即時動態水壓反應均採同步監測。記錄方式依不同之啟動設定分為(a)定時激發記錄，係於每日整點(即一天記錄 24 次)，不分振動原因或大小，與地下水壓一併同時記錄。(b)即時感測記錄，係於系統預設一基本激發起動值，不分振動原因，只要振波大於基本激發起動值，系統即予自動啟動記錄。

### 2. 資料擷取與集錄

電子式水壓計監測井 3 孔，是量測地下水的壓力，並與地震計配合可以測得地震來時的地下水位變化，以求得地震時土壤液化的變化情形，所有電子式水壓計經由配管接到觀測房的集錄器上，各測站機房設備外觀參考示意圖如圖 2.2。

地震監測井 4 孔，主要在監測地震波在不同土層的震波變化，地震計雖分層安裝，監測資料卻是同時啟動、同步監測。全站 21ch 之感測資料均以 Cable 聯結至現地測站機房之先進數位化自動記錄集錄系統 IC 卡內，再取回分析，也可經電腦連線再自動傳輸或強迫傳輸送回港研中心，透過數位專線可由港研中心直接遙控或監視現地監測狀況，亦可直接到集錄器的螢幕上觀看波形。

各站並設獨立式地震計及記錄器，主要用於地震時監測地表的波動及強度，並提供與埋入式地震計做比較，並配備 GPS 做自動校時的功能。監測時亦與分層埋設之部份同時啟動且同步監測，亦以 Cable 串聯傳到觀測房。

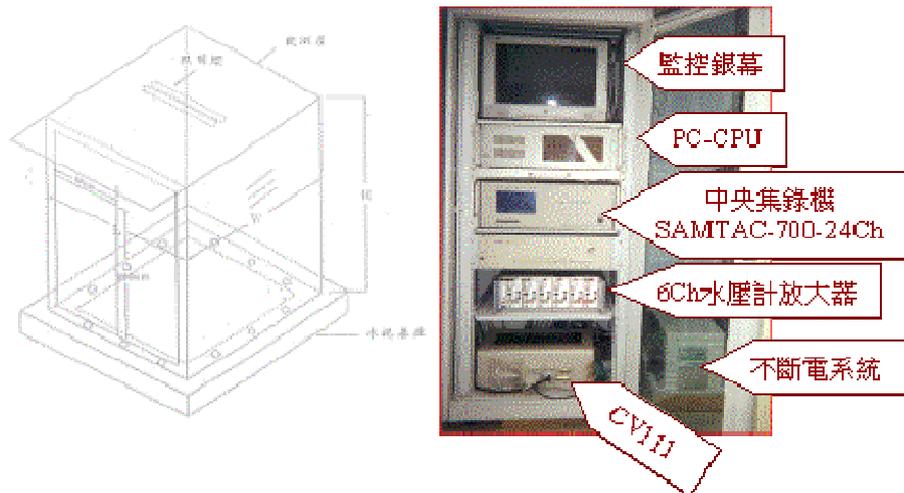


圖 2.2 機房及設備外觀示意圖

### 2.2.2 資料傳輸與監控

整體系統主要係由現地感測系統、現地監測擷取系統、數位專線傳輸系統及港研中心之監控與接收系統組成。設定包括，電信局數位專線與 Modem 之設定(含傳輸速率)、放大器之設定、Data logger 之設定等(含基本資料、擷取頻率與啟動設定)。

本研究系統資料擷取頻率設定為 200 Hz。現地監測擷取共有地層震動反應感測 5 層測點，每點均包括水平(東西、南北)向及垂直向 3ch 之感測。水壓反應感測 6 層測點，每點以 1ch 感測，地層震動反應與水壓反應共計感測 21ch，全部以 Cable 連結至現地測站機房，採同步監測與訊號傳輸，21ch 之即時感測資料首先集錄預存於機房內之中央集錄系統，再利用電信局之數位專線傳輸網路，與港研中心監控站之電腦軟體，將預存中央集錄系統之資料傳輸至港研中心監控站收錄之，整體擷取、傳輸與監測控制流程如圖 2.3，測站機房構造如圖 2.4。

於港研中心設置接收與監控站，利用電腦與軟體，除可收錄資料外，亦可直接遙控現地測站之感測設定與監視感測狀態，並設定控制記錄方式分為定時激發啟動記錄與即時感測啟動記錄。

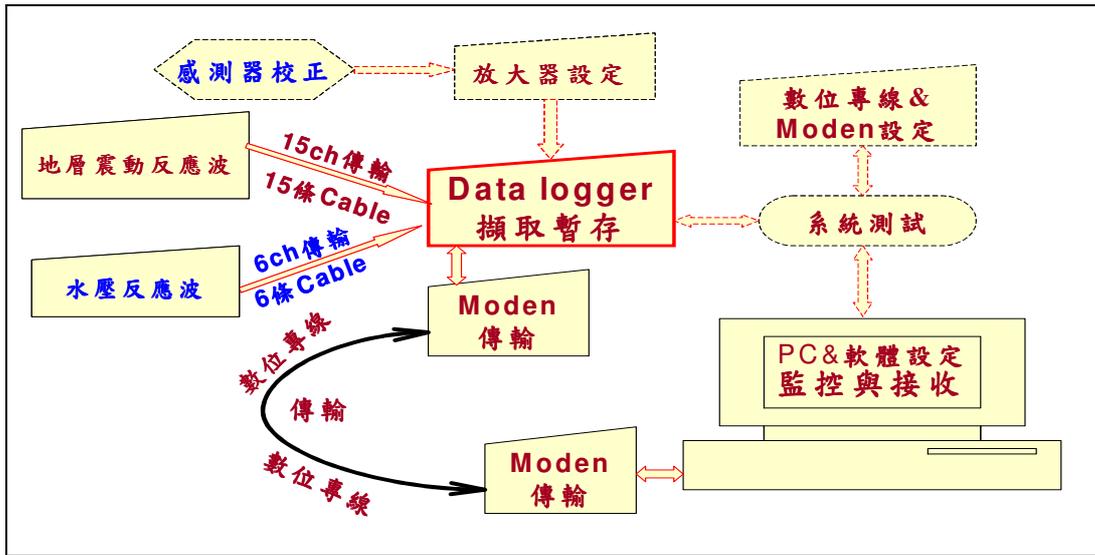


圖 2.3 整體擷取、傳輸與監測控制流程

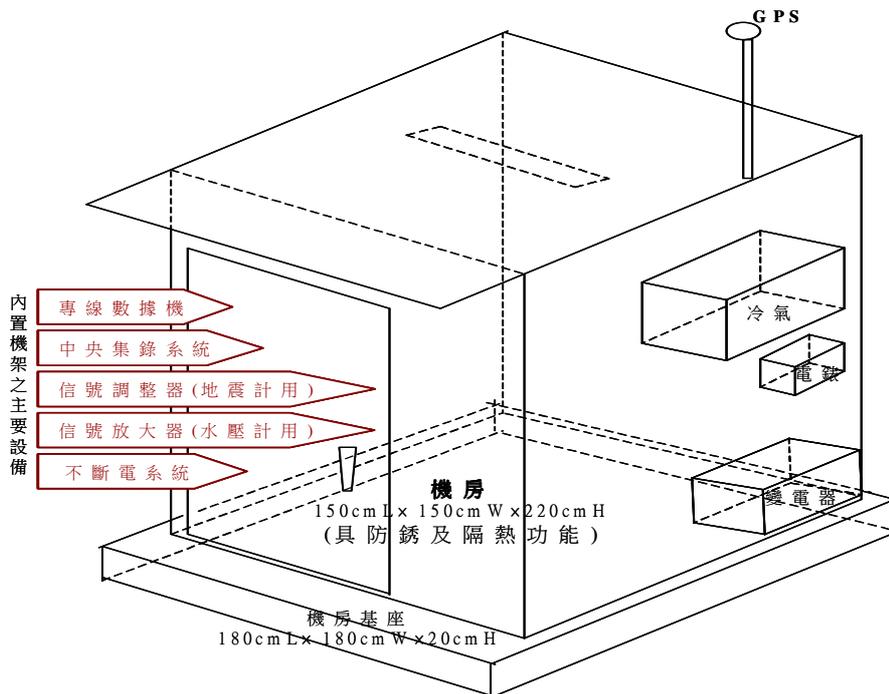


圖 2.4 機房構造與配置示意圖

### 2.2.3 港區地震監測站

本所港研中心自民國 89 年起陸續於安平港、臺中港、布袋港、臺北港、高雄港、蘇澳港及臺中火力電廠等逐年分別設置完成一組 300 m 深之井下地震及動態孔隙水壓監測站進行震波放大分析外(如表 2-1)。自另各港監測站概述如下：

1. 安平港區井下地震監測站，係第一座完整的港區地震分層監測系統，監測站設置平面與外貌狀況，如圖 2.5 所示。
2. 臺中港地震監測站，於 90 年 8 月建置完成，監測站如圖 2.6。
3. 布袋港地震監測站於 91 年元月建置完成，監測站如圖 2.7 與圖 2.8。
4. 臺北港地震監測站於 91 年建置完成，監測站如圖 2.9 與圖 2.10。
5. 高雄港地震監測站於 92 年建置完成，監測站如圖 2.11。
6. 蘇澳港地震監測站於 93 年建置完成，監測站如圖 2.12。
7. 臺中火力電廠地震監測站於 94 年建置完成。

表 2-1 各港區設置井下地震監測站資料表

測 站	設置位置	經緯度(度)	深度	設置日期
安平港	8 號碼頭空地	經度 22.980 緯度 120.177	201m	89 年
臺中港	26 號碼頭空地	經度 24.273 緯度 120.520	283m	90 年
布袋港	砂石碼頭空地	緯度 23.375 緯度 120.133	300m	90 年
臺北港	大樓前花園	經度 25.151 緯度 121.393	297m	91 年
高雄港	船舶管理中心花園	緯度 22.598 緯度 120.283	292m	92 年
蘇澳港	棧埠所對面	經度 24.5909 緯度 121.863	35m	93 年
臺中火力電廠	圍牆外側綠地	緯度 24.206 緯度 120.486	200m	94 年



圖 2.5 安平港區井下地震監測站圖



圖 2.6 臺中港區井下地震監測站圖

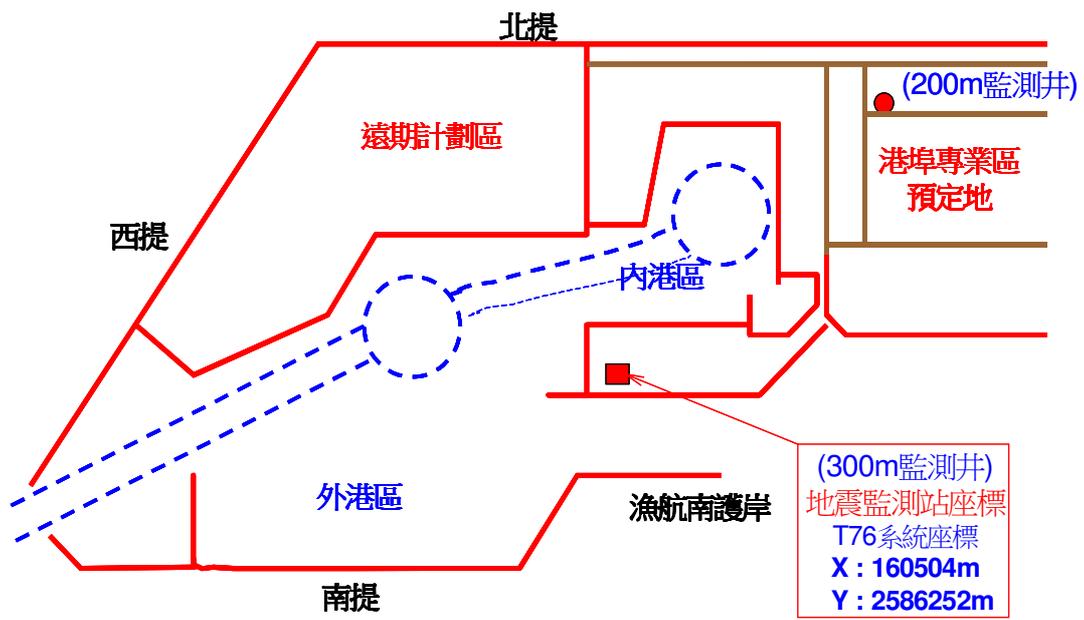


圖 2.7 布袋港區井下地震監測站平面圖



圖 2.8 布袋港區井下地震監測站圖



圖 2.9 臺北港區井下地震監測站平面圖



圖 2.10 臺北港區井下地震監測站圖



圖 2.11 高雄港區井下地震監測站圖



圖 2.12 蘇澳港區井下地震監測站圖

## 2.3 港區地震速報系統

港研中心自 98 年起逐年於各港區設置地震災後速報系統，其中臺中、安平、高雄、蘇澳、臺北、布袋等 6 站是將速報系統安裝於井下地震站之機房內，如此可減少儀器或外部干擾造成產生雜訊，港區地震速報系統是將三向度地表地震儀連接井下地震監測儀匹配組裝完成。

花蓮港與基隆港兩站因場地有限，僅將地表地震計安裝於港區自由場之保護箱內，速報系統再以網路線連接至辦公室內，測站位置如表 2-1 及表 2-2，監測站示意圖如圖 2.13 及圖 2.14，港區地震速報系統儀器配置如示意圖 2.15。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，此時地震訊號可藉著中華電信 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 2.15，即時畫面顯示如圖 2.16 至圖 2.21 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。

表 2-2 基隆與花蓮港區設置地表地震速報系統資料表

編號	測站	設置位置	經緯度(度)	儀器	備註
1	基隆港	西案貨櫃儲運場 北櫃場機車棚邊	25° 8'50.50" 121° 44'52.45"	加速度計	CV374A
2	花蓮港	港務大樓前花園	23°58'48.65" 121°37'12.44"	加速度計	CV374A



圖 2.13 基隆港地震速報監測站圖



圖 2.14 花蓮港地震速報監測站圖

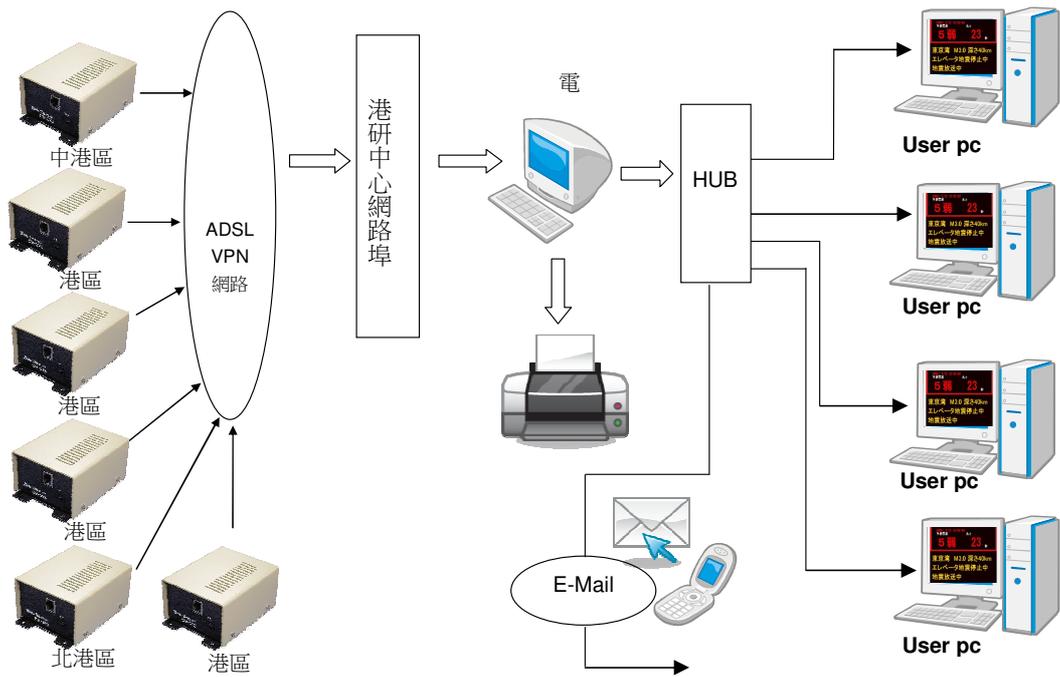


圖 2.15 港區地震速報系統儀器配置示意圖

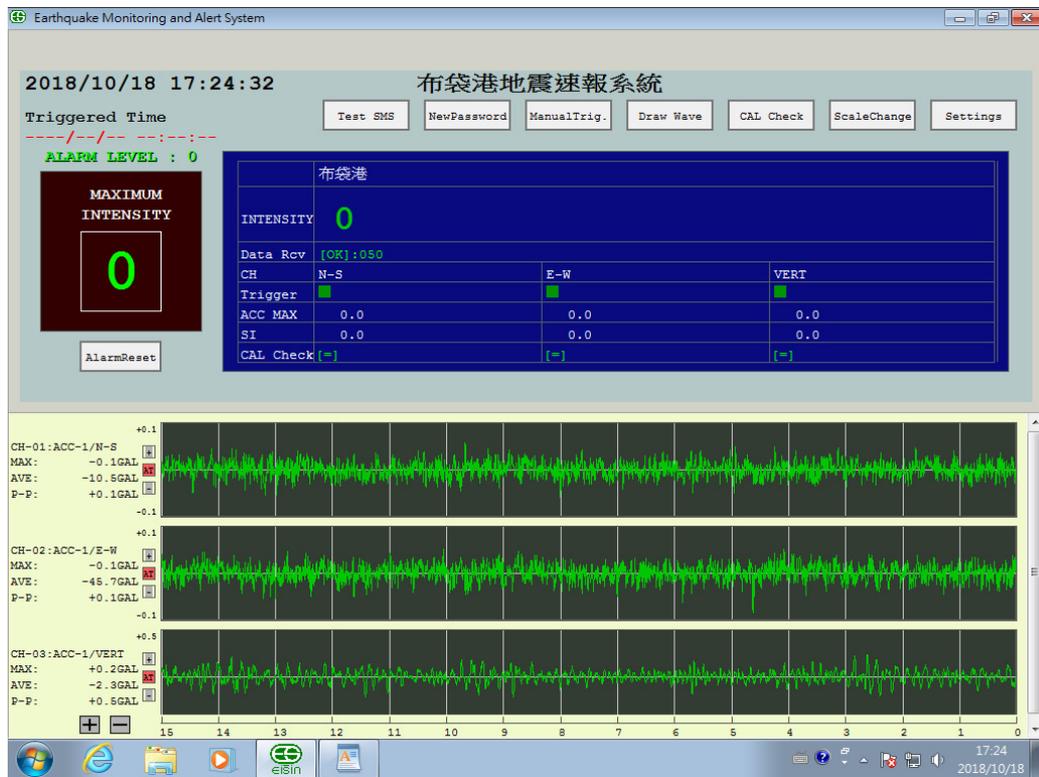


圖 2.16 布袋港區地震即時監測畫面圖

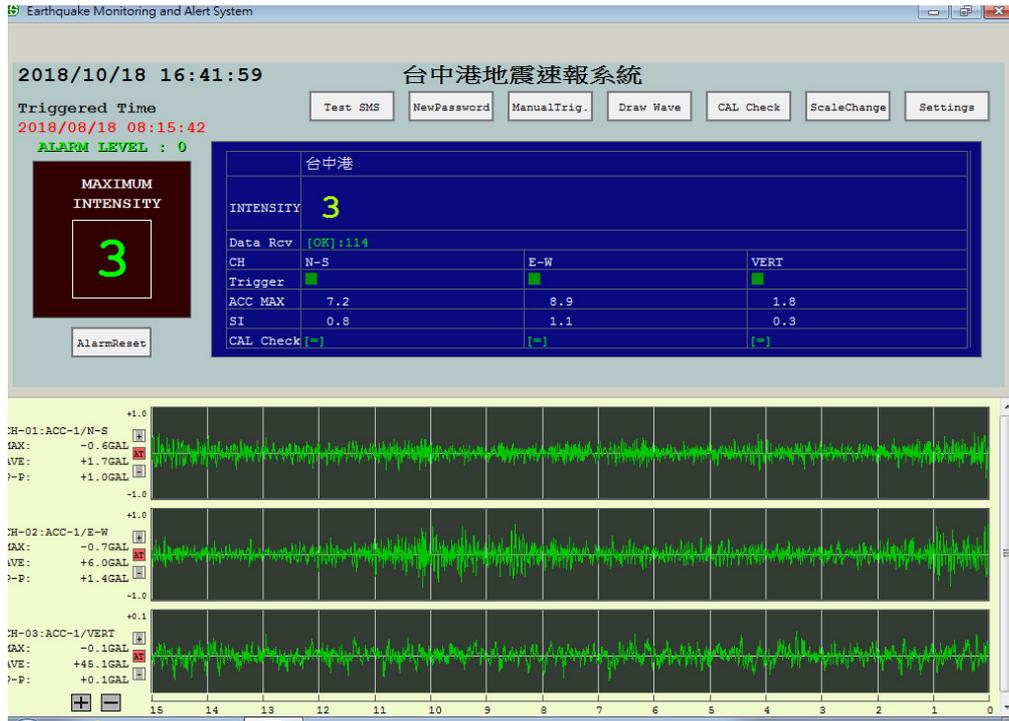


圖 2.17 臺中港區地震即時監測畫面圖

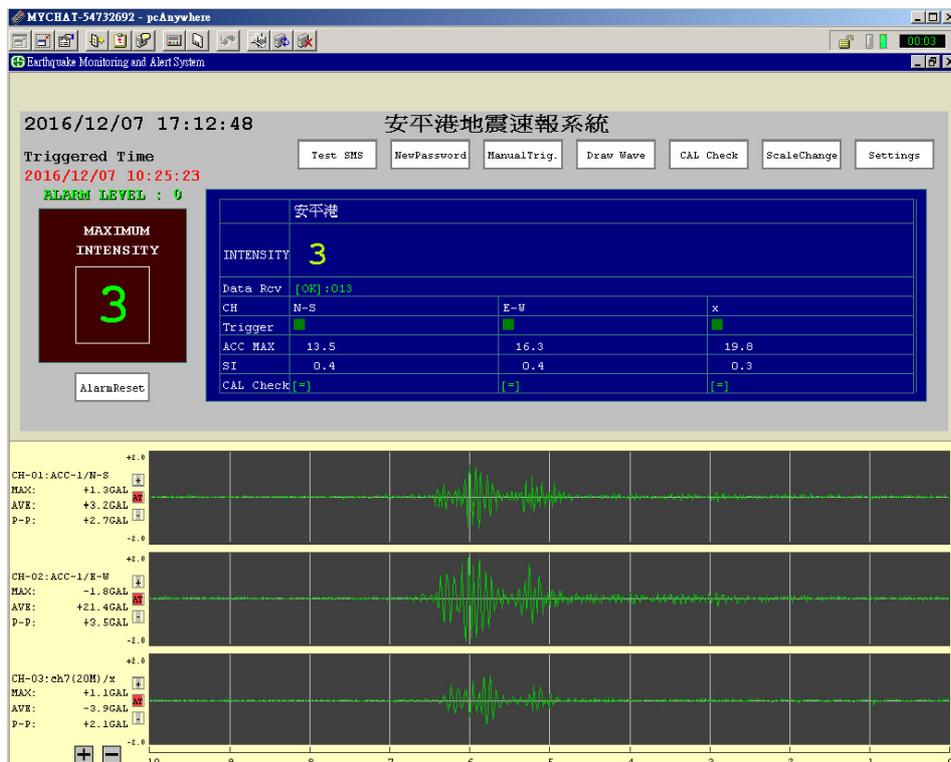


圖 2.18 安平港區地震即時監測畫面圖

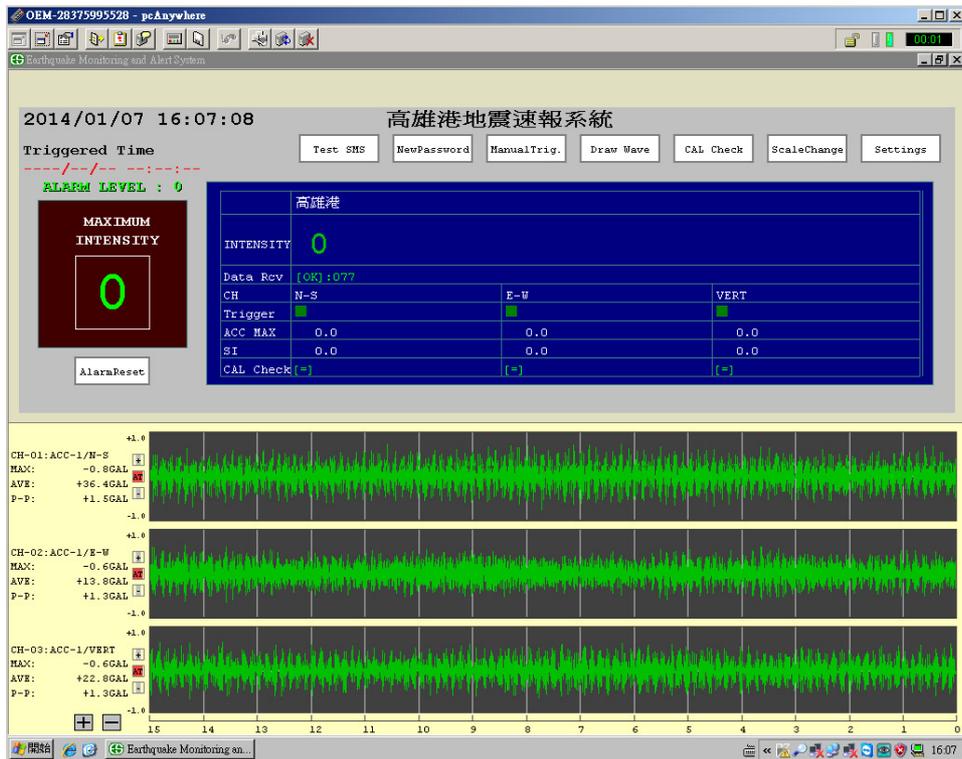


圖 2.19 高雄港區地震即時監測畫面圖

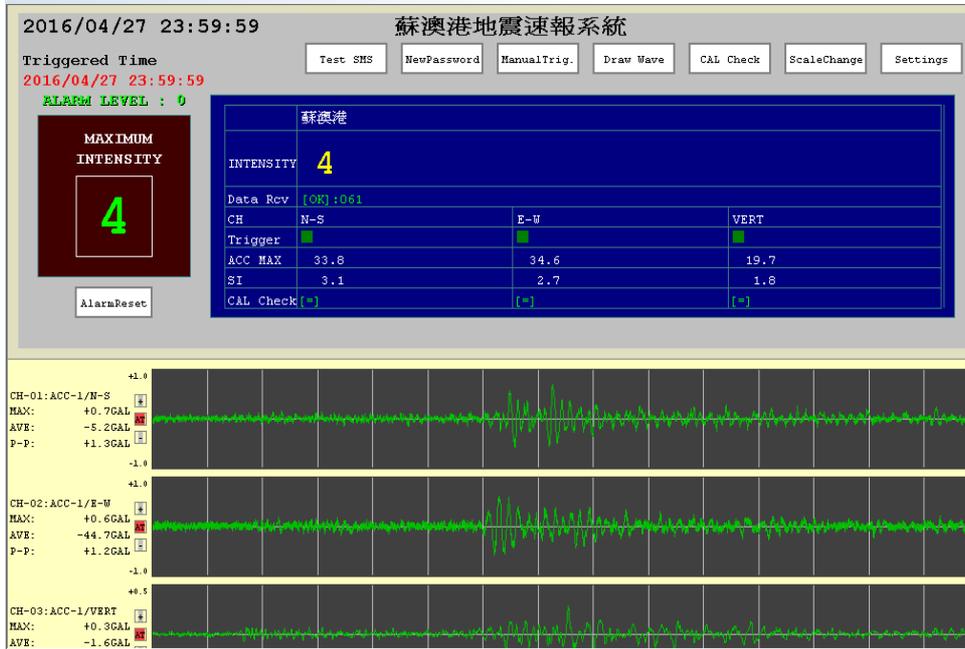


圖 2.20 蘇澳港區地震即時監測畫面圖

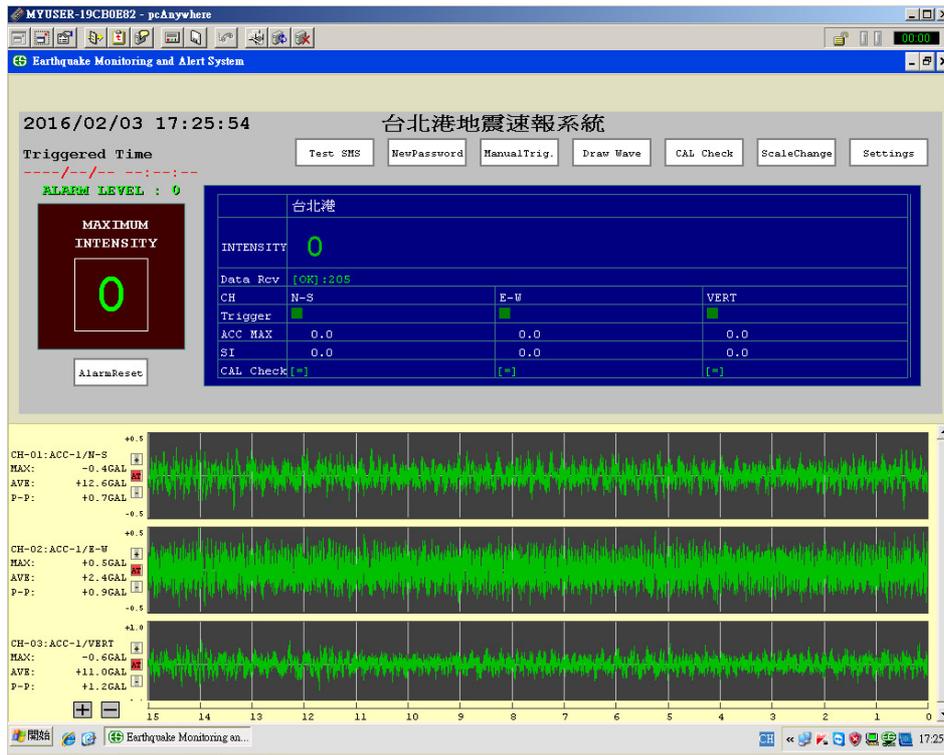


圖 2.21 臺北港區地震即時監測畫面圖



## 第三章 港區地震監測分析

港區地震監測站設置的主要目的，除了可供各港務分公司之碼頭管理人員作為地震災後修復速報訊息外；並可將監測所得資料經彙整分析後，進行檢核現有結構物承受地震力影響後之安全性評估。本章彙整高雄港地震監測站資料，蒐集港區地形、地質、歷史地震資料與附近活動斷層進行探討地震對該區結構物的影響等，並進行高雄港區的設計地震力分析、場址效應分析，回顧臺北港區的水平加速度反應譜，彙整 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分震央發生在花蓮東部海域，芮氏規模 6.2，彙整花蓮港地震站監測地表加速度所得資料進行地動特性分析。最後將分析資料彙整建置成資料庫，以提供碼頭結構物設計及港區地震工程研究之參考。

### 3.1 高雄港之地理位置與地質

高雄港是臺灣最大的國際港埠，位於臺灣西南海岸，且港域遼闊腹地廣大，氣候溫和，臨海有狹長沙洲為港灣的天然防波堤，地理條件優良港灣形勢成為一個天然良港。

高雄港地處臺灣海峽與巴士海峽航道交匯之要衝，是歐、美、亞海運必經之道，為臺灣進出口貨物之首要門戶與集散中心。

#### 3.1.1 高雄港概況

蒐集高雄港務分公司 107 年資料，高雄港區面積為 17,736 公頃，其中陸域面積 1,871 公頃，佔全港面積之 10.5%，水域面積 15,865 公頃，佔全港面積之 89.5%，港區配置以碼頭作業區為主，其次為工業區，其餘則為港務行政、漁港、造船廠、台電、中油等用地。

高雄港目前進出港航道有第一港口及第二港口，第一港口之內港口水深 12.5 公尺，港口寬 130 公尺，航道有效寬度 98 公尺；第二港口



## 2.地質

高雄地區地質大多屬於第四紀中之沖積層，層位平鋪，未曾受過變動，此平坦海岸平原，大部份屬於潟湖及沼澤沉積環境，其位置在濱外沙洲之後，為較寧靜的沉積環境，沙洲外由於海浪潮汐影響，粘土、沉泥、細砂懸浮於海水中，一旦受潮汐海浪影響而進入潟湖或沼澤、細砂、沉泥及粘土即依次沉積下來。因此本區地質組成主要為沉泥質砂或砂質沉泥及沉泥質細砂交互而成。

### 3.1.3 高雄港地層分布

高雄港原屬於潟湖及沼澤沉積環境，由於受潮汐海浪影響，細砂、沉泥及粘土進入潟湖或沼澤即依次沉積下來，故本區地質組成為砂、沉泥質砂、砂質沉泥或砂質粘土交互而成，各層次分布厚度變化極大且極不均勻。

本節參考高雄港務分公司於民國 69 年 7 月出版之「高雄港土壤特性之研究」報告<sup>[47]</sup>，該出版品係高雄港務局歷年於港區進行地質鑽探試驗及蒐集中鋼、中船、中油等公司提供之地質調查資料彙整後完成，對港區地質詳細情況極具參考價值。

高雄港由於建港極早，港區經不斷的浚挖結果原地形已有很大的變化，而早期地質調查，鑽探孔位多無地面高程，加以港區遼闊，故港區的地層分布情況無法整理出較具代表性的剖面。就地質調查資料研判，高雄港自第一港口出海口至加工出口區亦即台肥三廠附近之間之地層分布大致自地表至深度 25 公尺為粗中砂或沉泥質砂，而深度 25 公尺以下為厚層砂質沉泥層。

自台肥三廠附近一直到大林蒲石油化學工業區大部份之地質鑽探資料均顯示，接近地表有一層厚度約 5 至 10 公尺之沉泥質粘土層，越往大林蒲方向粘土層次越多，在高雄造船廠至大林蒲之間於接近地表，深度 15 至 25 公尺和深度 35 至 45 公尺間分別有一層厚約 5 公尺厚之粘土層。

## 1. 土壤強度特性

高雄港區由於土層變化複雜，很難整理出一具有代表性之土層特性，根據現地標準貫入試驗結果，沉積土層 N 值大都在 30 以下。整體而言，接近地表 5 公尺部份土質極為鬆軟，平均 N 值為 8，屬極疏鬆程度，其下則視土壤性質而定，沉泥質砂層 N 值隨深度而增加，至高程-50m 以下 N 值有高於 30 者，但一遇砂質沉泥層或粘土質沉泥層即有明顯降低現象，故對高雄港整體地層變化而言，在目前最大鑽探深度 80 公尺範圍並無明顯的承載層，深基礎承載力以土壤之摩擦阻抗為主。

圖 3.2 為整理高雄港區砂質土壤內摩擦角土壤乾土單位重之關係圖，資料顯示高雄港區砂質土壤內摩擦角約在 30 度至 40 度間，大致隨土壤乾土單位重之增加而增加，惟其間關係不明顯。

高雄港區粘性土壤無圍壓縮強度隨深度之變化情形如圖 3.3 所示，資料顯示在地表深度 10m 以內之粘性土壤，無圍壓縮強度  $q_u$  值在 2 至  $7t/m^2$  之間，屬極軟弱至軟弱稠度，而深度 30m 以下  $q_u$  值介於  $7t/m^2$  至  $20t/m^2$  至  $20t/m^2$  間，屬中等堅實至堅硬稠度之粘土。

## 2. 土壤體積變化特性

圖 3.4 為高雄港區粘性土壤液性限度與塑性指數關係圖，該資料顯示高雄港區粘性土壤液性限度在 20 至 50 間，塑性指數平均約介於 10 至 30% 間，屬低至中等塑性粘土，統一土壤分類以 CL 及 CH、ML 為主。根據單向度壓密試驗結果，壓縮指數 Cc 與自然含水量的關係如圖 3.5 所示，粘性土壤壓縮指數大致隨含水量之增加而增加。

## 3. 土壤其它工程特性

高雄港區由於沉積土層層次變化複雜，故土壤工程性質無法歸納出代表性的結果，根據試驗室透水試驗結果，砂質土壤之透水係數在  $10^{-4}cm/sec$  至  $10^{-5}cm/sec$  之間，砂質沉泥或粘土質沉泥透水係數在  $10^{-5}cm/sec$  至  $10^{-7}cm/sec$  之間，粘質土壤則在  $10^{-7}cm/sec$  以下。

土壤動態性質剪力模數與土壤所受之圍壓有關，圖 3.6 為本區砂質土壤剪力模數及阻尼比與剪應變之變化關係圖。

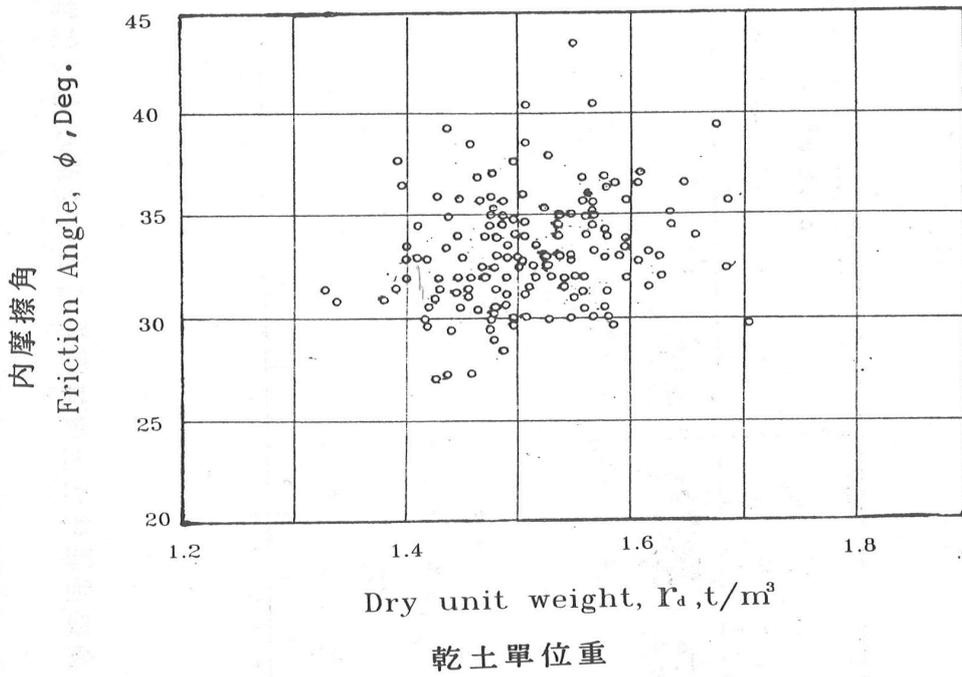


圖 3.2 高雄港區砂質土壤內摩擦角土壤乾土單位重之關係圖

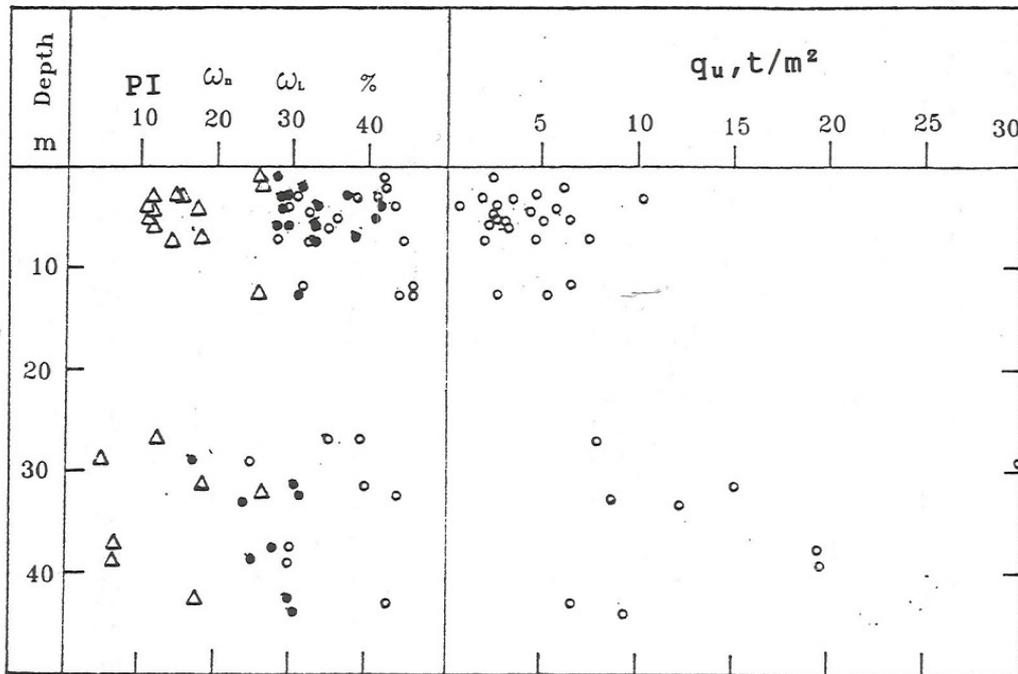


圖 3.3 高雄港區粘性土壤無圍壓縮強度隨深度之變化情形圖

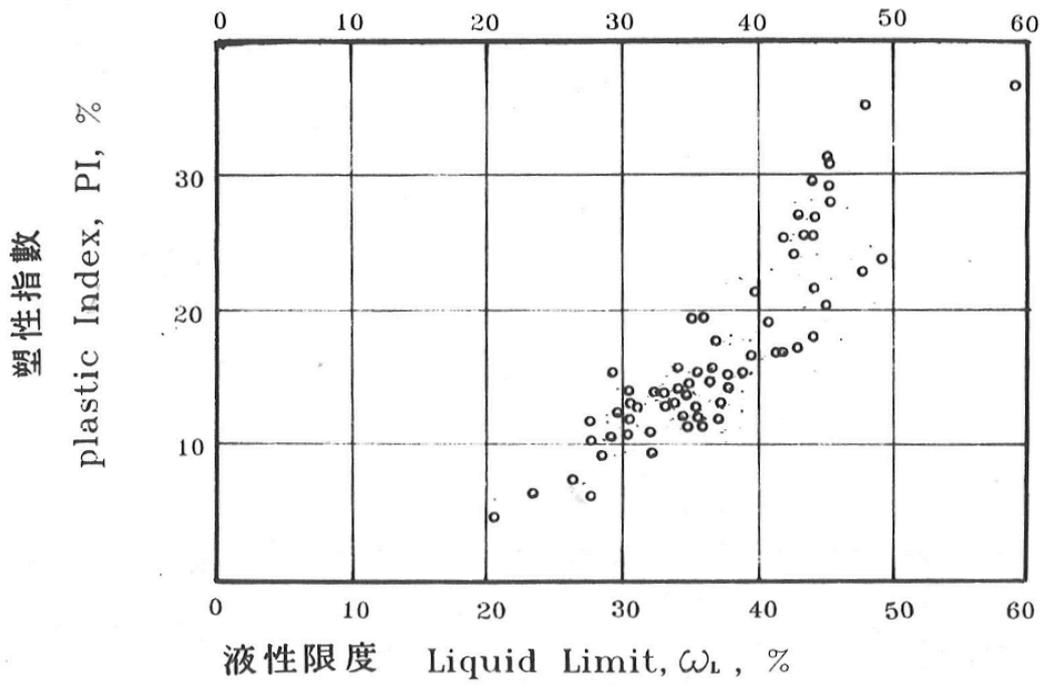


圖 3.4 高雄港區粘性土壤液性限度與塑性指數關係圖

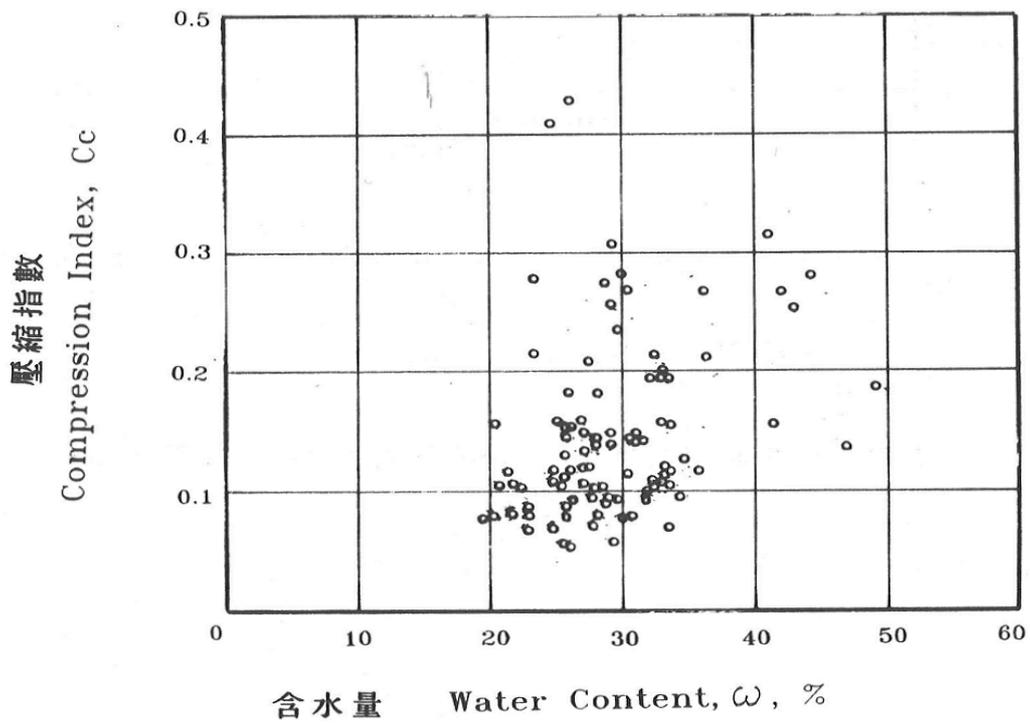


圖 3.5 高雄港區粘性土壤壓縮指數 Cc 與自然含水量的關係圖

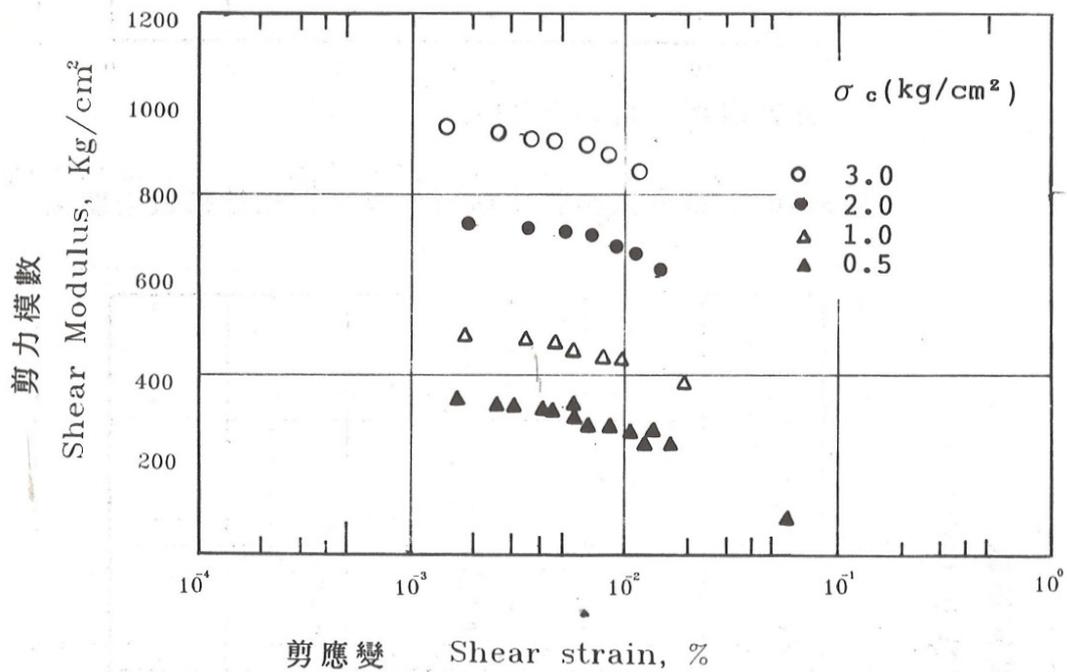


圖 3.6 高雄港砂質土壤剪力模數與剪應變之關係圖

## 3.2 高雄港區之斷層與地震規模

### 3.2.1 高雄港區附近的活動斷層

依據經濟部中央地調所<sup>[39]</sup>2009年出版的調查報告，臺灣南部的活動斷層有6條分別是小崗山斷層、旗山斷層、六龜斷層、潮州斷層、鳳山斷層與恆春斷層等，其中距離高雄港較近的活動斷層，有旗山斷層與潮州斷層，分別簡述如下。

#### (1) 旗山斷層

旗山斷層為逆移斷層，呈北東走向，由高雄市旗山區附近向南延伸至高雄市仁武附近（圖 3.7a），長約 30 公里（吉田要，1932；鳥居敬造，1933；耿文溥，1967；Tsan and Keng, 1968）。以往認為斷層向北連接內英斷層（大井上義近等，1928），最近的調查結果顯示兩斷層的特性不同（陳文山等，2005b）。

旗山斷層，為逆移斷層，呈東北走向，由一個主斷層以及多個分支斷層組成的斷層變形帶，變形帶寬度約 40~400 公尺之間，主斷層的

變形帶寬度為 9~30 公尺。旗山斷層主斷面擦痕及斷層帶中破裂面上的擦痕，均反應斷層的運動形式為逆滑兼具左滑性質。旗山斷層近期的大地測量結果，仍有明顯的壓縮量，顯現逆移斷層的特性，由於旗山斷層截切全新世的砂礫石層，列第一類活動斷層。

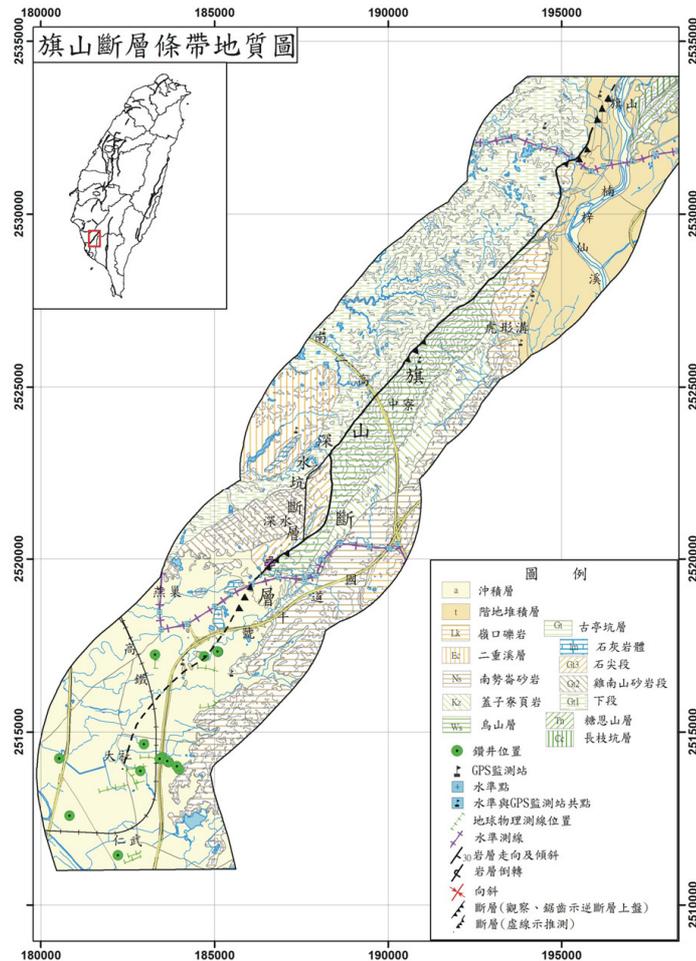


圖 3.7a 旗山斷層地質圖(中央地調所)

## (2)潮州斷層

潮州斷層，為逆移斷層兼具左移性質，呈南北走向。斷層可以分為 2 段：北段由高雄市六龜區寶來村向南延伸至屏東縣三地門鄉大津村，長約 28 公里，本段又稱土壟灣斷層（鳥居敬造，1933），南段由大津村向南延伸至枋寮鄉加祿村，長約 61 公里（Tomita, 1955），總長約 89 公里。(如圖 3.7b~圖 3.7d)

潮州斷層為高角度向東傾斜的逆移斷層，兼具左移性質。斷層的北段為階地礫岩層或沖積扇礫石層所掩覆，為盲斷層的形式；而在斷層南段的新埤附近，斷層在近地表處造成沖積扇礫石層的撓曲，板岩逆衝於礫石層之上，研判潮州斷層在更新世晚期可能有活動。潮州斷層改列第二類活動斷層。

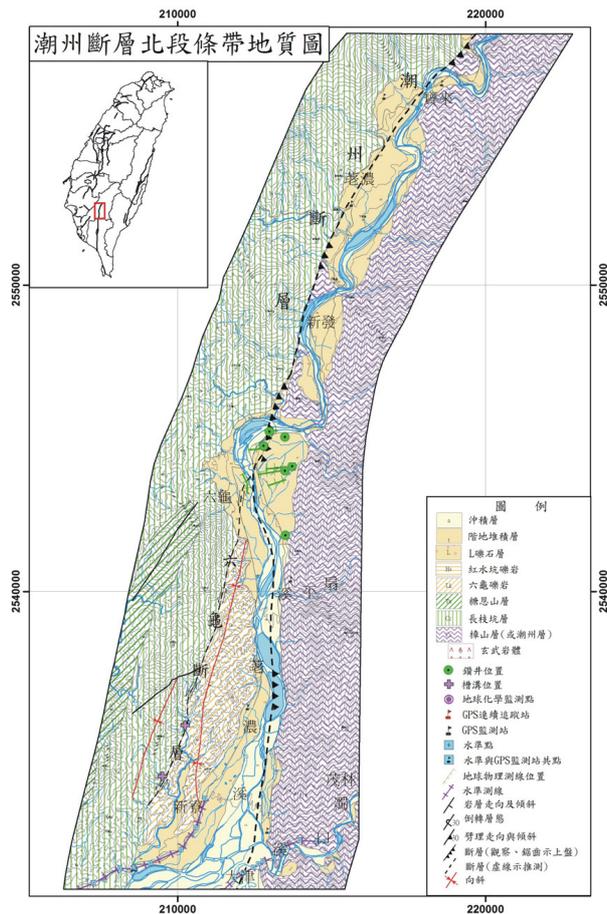


圖 3.7b 潮州斷層地質圖-北段(中央地調所)

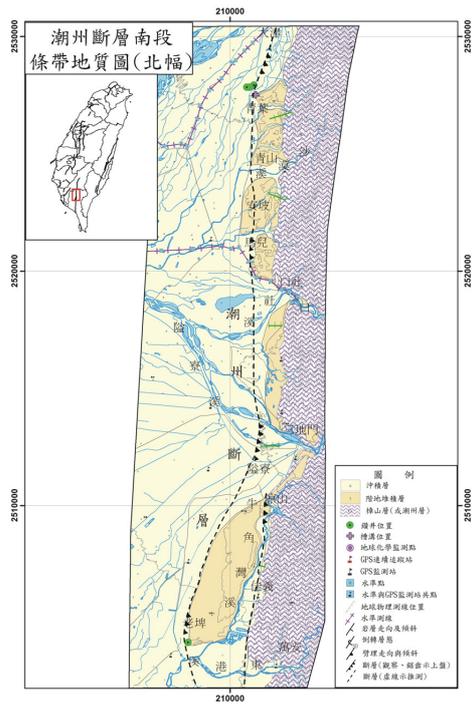


圖 3.7c 潮州斷層條帶地質圖-南段 (北幅) (中央地調所)

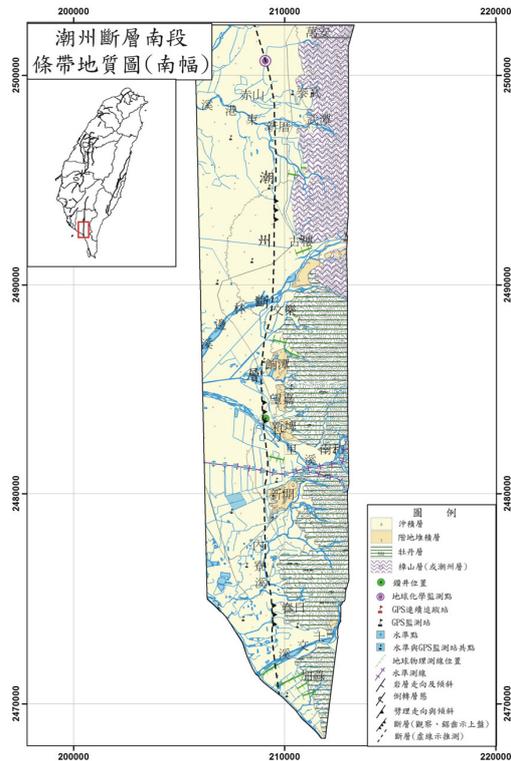


圖 3.7d 潮州斷層條帶地質圖-南段 (南幅) (中央地調所)

### 3.2.2 斷層長度與地震規模

在大地震發生後，常出現地表破裂的現象，一般稱該地表破裂之長度為斷層長度，它亦是影響地震規模之重要因素。蒐集學者 Tsai et al.,(1987)<sup>[45]</sup>、Wells and Coppersmith (1994)<sup>[4]</sup>等學者發展出來的斷層長度和變位的幅度與地震規模之間的關係，如 3-1、3-2、3-3 式所示：

Tsai et al., (1987) 針對斷層長度與規模關係所發展之經驗式：

$$L = \exp [ 1.006M_L - 3.232 ] \dots\dots\dots (3-1)$$

上式中，L：斷層破裂長度 (km)， $M_L$  = 芮氏地震規模。

Wells and Coppersmith (1994)亦根據全球 244 個大地震資料，迴歸得到地表地震斷層長度、地震規模、最大錯位量的經驗式如 3-2a 式、3-2b 式所示：

$$M_w = 5.16 + 1.12 * \log(SRL) \dots\dots\dots (3-2a)$$

$$SD = 0.28$$

$$M_w = 5.00 + 1.22 * \log(SRL) \dots\dots\dots (3-2b)$$

$$SD = 0.28$$

上式中，3-2a 式用於正移(strike slip)斷層，3-2b 式用於逆斷層， $M_w$  表示地震矩規模，SRL 為地表破裂長度(公里)；SD 表示 1 個標準偏差值。

而地震規模  $M_w$  與  $M_L$  之間的轉換關係，可根據 Wu et al.(2000)<sup>[45]</sup> 依據臺灣地震紀錄所建立之經驗式換算。

$$M_L = 4.533 \ln(M_w) - 2.091 \pm 0.14 \dots\dots\dots (3-3)$$

歸納以上幾種經驗式，可依不同估算式簡單來區分，評估地震潛勢時，建議以定值法<sup>[45]</sup>之 Tsai et al., (1987)與 Wells and Coppersmith (1994) 經驗式來估算地震規模  $M_L$ ，考慮統計偏差時可採用其上限之芮氏規模  $M_L$ 。用於液化分析時可採用 Wu et al.(2000)之經驗式來換算成地震矩規模  $M_w$ 。

旗山斷層根據中央地調所調查資料，斷層長度為 30 公里，由以上 2 種不同學者之經驗式分別來估算出地震規模：地震規模分別為  $M_L=6.6$  與  $M_w=6.80\pm 0.28$ ， $M_w$  轉換成芮氏規模為  $M_L=6.59\pm 0.14$ 。

潮州斷層根據中央地調所調查資料，可分為南段與北段，斷層長度分別為北段 28 公里與南段 61 公里，共計 89 公里，由不同學者之經驗式分別來估算出地震規模。當斷層長度  $L=28$  公里時：地震規模分別為  $M_L=6.53$  與  $M_w=6.76\pm 0.28$ ， $M_w$  轉換成芮氏規模為  $M_L=6.57\pm 0.14$ 。當斷層長度  $L=61$  公里時：地震規模分別為  $M_L=7.3$  與  $M_w=7.17\pm 0.28$ ， $M_w$  轉換成芮氏規模為  $M_L=6.83\pm 0.14$ 。當潮州斷層南北段相加長度  $L=89$  公里時：地震規模分別為  $M_L=7.58$  與  $M_w=7.37\pm 0.28$ ， $M_w$  轉換成芮氏規模為  $M_L=6.96\pm 0.14$ 。

### 3.3 高雄港區的設計地震力

#### 3.3.1 高雄港測站地震類型

本章彙整高雄港井下地震監測站歷年監測所得，經中央氣象局定位之地震紀錄，依測站距離、地震規模大小與測站震度，將地表地震資料分為 A、B、C 三種不同類型。A 類型地震為震央距測站超過 30 公里，芮氏規模 3.8 以上(介於 3.8~6.9)、測站震度為 4 級以下之地震紀錄(如圖 3.8a)。B 類型地震為震央距測站超過 30 公里，芮氏規模 5.6 以上(介於 5.6~7.0)、測站震度為 4 級以上之地震紀錄(如圖 3.8b)。C 類型地震為震央離測站小於 30 公里，芮氏規模 5.4 以下、測站震度為 4 級以下之地震紀錄，屬於較近距離之地震紀錄(如圖 3.8c)。高雄港彙整地震規模超過 3.7 以上，自 2005~2017 年井下地震監測資料如表 3-1a~3-1d，地震之加速度歷時、加速度富氏譜分別如圖 3.9a~3.9c 所示。

表 3-1a 高雄港 2005~2007 年井下地震監測資料表

編號	發震時間(臺北時間)	震央位置		深度 (km)	規模 (ML)	測站 震度
		北緯(度)	東經(度)			
1	2005-07-20; 18:49:44.20	22.84	120.78	22.5	4.3	2
2	2005-11-08; 13:49:25.20	22.87	120.68	9.7	4.7	1
3	2005-11-16; 17:14:45.30	21.9	121.77	133.2	5.5	2
4	2005-12-31; 05:07:32.50	22.55	121.13	54.8	4.9	1
5	2006-03-09; 12:07:28.80	23.64	120.6	9.9	5.1	1
6	2006-04-01; 18:02:19.50	22.88	121.08	7.2	6.2	4
7	2006-04-16; 06:40:55.40	22.86	121.3	17.9	6.0	2
8	2006-06-13; 00:14:42.30	22.26	121.66	119.8	5.0	1
9	2006-06-17; 05:33:34.50	22.49	120.30	31.1	4.1	3
10	2006-06-17; 10:04:47.90	23.10	120.19	15.9	4.3	2
11	2006-08-12; 07:51:06.10	22.54	121.4	25.4	5.4	2
12	2006-08-13; 02:15:36.40	22.91	120.5	16	4.2	1
13	2006-09-15; 02:10:31.40	22.37	120.1	32	3.7	2
14	2006-10-09; 18:01:45.60	20.77	119.9	28	6.1	2
15	2006-12-26; 20:26:21.00	21.69	120.6	44.1	7.0	4
16	2006-12-26; 20:34:15.10	21.97	120.4	50.2	7.0	5
17	2006-12-26; 23:41:44.70	22.07	120.3	41.2	5.5	3
18	2006-12-27; 10:30:39.80	22.05	120.4	49.5	5.8	3
19	2007-01-25; 18:59:15.50	22.63	122.0	25.8	6.2	2
20	2007-02-19; 05:04:59.60	21.79	120.4	44.3	5.1	1
21	2007-06-24; 22:39:04.00	22.79	120.46	25.4	3.8	1
22	2007-07-03; 15:18:26.40	22.4	120.2	29.2	3.9	2
23	2007-08-09; 08:55:47.40	22.65	121.1	5.5	5.7	1
24	2007-10-17; 22:40:00.00	23.5	121.6	42.1	5.4	1
25	2007-10-19; 22:25:20.50	22.96	120.6	18.7	4.3	2
26	2007-10-22; 03:57:39.40	22.96	120.6	17.8	4.1	2
27	2007-12-05; 09:41:42.50	23.07	121.2	11.3	5.1	2

表 3-1b 高雄港 2008~2009 年井下地震監測資料表

編號	發震時間(臺北時間)	震央位置		深度 (km)	規模 (ML)	測站 震度
		北緯(度)	東經(度)			
1	2008-02-18; 04:33:02.30	23.31	121.46	28.3	5.4	2
2	2008-03-05; 01:31:47.50	23.21	120.70	11.3	5.2	2
3	2008-03-05; 06:42:32.60	23.21	120.71	12.0	4.6	1
4	2008-04-14; 23:39:44.50	22.83	121.33	27.2	5.1	1
5	2008-04-24; 02:28:42.00	22.87	121.68	11.1	5.6	2
6	2008-04-24; 06:04:15.50	22.83	121.69	13.3	5.2	1
7	2008-04-25; 22:33:48.70	22.32	120.23	27.0	3.8	2
8	2008-05-01; 03:22:26.40	21.82	120.4	38.4	4.6	1
9	2008-05-14; 02:27:55.30	22.77	121	7	5.0	2
10	2008-06-15; 07:29:24.40	22.9	120.6	16.9	4.8	2
11	2008-07-03; 08:05:37.40	23.19	120.7	15.1	4.3	1
12	2008-10-31; 06:25:24.90	23.07	120.2	16	4.0	1
13	2008-10-31; 16:38:15.70	23.07	120.2	15.4	4.6	1
14	2008-12-02; 11:16:54.20	23.34	121.5	31.7	5.7	1
15	2008-12-08; 05:18:37.20	23.85	122.2	35.1	5.9	1
16	2008-12-23; 08:04:43.80	22.95	120.6	17.1	5.3	3
17	2009-01-02; 09:39:51.60	21.65	119.91	65.1	5.1	2
18	2009-01-11; 01:26:35.80	23.03	120.22	15.0	3.8	1
19	2009-01-22; 09:40:24.50	23.03	120.51	18.3	4.0	1
20	2009-06-22; 18:48:25.80	23.42	120.42	8.6	4.5	1
21	2009-07-14; 02:05:02.60	24.02	122.20	18.1	6.0	1
22	2009-08-17; 08:05:45.90	23.37	123.88	43.3	6.8	2
23	2009-08-22; 04:57:44.20	22.27	120.3	50.5	5.6	4
24	2009-10-04; 01:36:06.30	23.65	121.58	29.2	6.1	2
25	2009-10-11; 14:42:08.70	21.93	120.63	42.0	5.0	1
26	2009-10-18; 20:15:51.00	23.02	120.58	20.2	4.0	2
27	2009-11-05; 17:32:57.70	23.79	120.72	24.1	6.2	2
28	2009-11-05; 19:34:21.30	23.77	120.76	24.0	5.7	2
29	2009-12-19; 21:02:16.30	23.79	121.7	43.8	6.9	3

表 3-1c 高雄港 2010~2012 年井下地震監測資料表

編號	發震時間(臺北時間)	震央位置		深度 (km)	規模 (ML)	測站 震度
		北緯(度)	東經(度)			
1	2010-01-09; 07:40:24.60	22.61	120.58	34.2	4.4	2
2	2010-01-10; 11:24:31.10	22.48	121.33	84.9	4.8	1
3	2010-01-19; 14:09:26.80	23.8	121.67	37.3	5.6	1
4	2010-02-07; 14:10:00.30	23.33	123.77	88.0	6.6	2
5	2010-03-04; 08:18:52.10	22.97	120.71	22.6	6.4	4
6	2010-03-04; 16:16:16.30	22.96	120.93	19.0	5.7	3
7	2010-07-25; 11:52:10.20	22.84	120.69	19.6	5.7	2
8	2010-09-24; 08:39:17.50	22.52	120.4	35.6	4.1	2
9	2010-11-12; 23:39:06.00	23.21	120.41	17.5	5.2	3
10	2010-11-21; 20:31:45.60	23.85	121.69	46.9	6.1	2
11	2011-03-20; 16:00:51.20	22.44	121.38	27.5	5.8	2
12	2011-09-09; 11:26:59.10	22.31	121	10.4	5	1
13	2012-02-26; 10:35:0.90	22.74	120.78	20.4	6.1	3
14	2012-04-28; 05:08:18.00	22.73	120.73	24	4.4	2
15	2012-05-30; 15:25:42.00	23.21	121.01	6.6	4.7	1
16	2012-06-06; 09:08:34.00	22.39	121.43	16.6	5.9	2
17	2012-06-08; 06:22:44.50	22.93	120.6	9.7	4.4	2
18	2012-06-09; 12:41:21.2	22.92	120.58	23	4.8	2
19	2012-06-10; 05:00:17.90	24.47	122.39	61.9	6.5	1
20	2012-09-05; 04:00:18.30	22.22	121	9.9	5.2	2
21	2012-10-25; 18:31:19.2	22.43	120.37	40.7	5.4	4
22	2012-11-21; 01:09:01.7	22.47	121.4	26.9	5.4	1
23	2012-12-31; 00:03:25.80	23.47	120.9	4.4	5.3	1

表 3-1d 高雄港 2013~2018 年井下地震監測資料表

編號	發震時間(臺北時間)	震央位置		深度 (km)	規模 (ML)	測站 震度
		北緯(度)	東經(度)			
1	2013-02-19; 14:52:39.40	22.91	120.6	15.6	4.7	2
2	2013-03-07; 11:36:45.70	24.3	121.5	5.6	5.9	1
3	2013-03-27; 11:36:45.70	24.3	121.5	5.6	5.9	2
4	2013-06-02; 13:43:03.20	23.86	121	14.5	6.5	3
5	2013-09-06; 19:33:51.20	20.05	122.3	206.2	6.8	1
6	2013-10-31; 20:02:09.50	23.37	121.4	15	6.4	2
7	2014-01-15; 02:38:13.00	22.89	121.1	8.3	5.1	1
8	2014-05-21; 08:21:14.40	23.74	121.5	18	5.9	1
9	2014-09-25; 18:35:03.00	22.79	121.3	18	5.3	1
10	2015-03-23; 18:13:50.70	23.7	121.8	26.3	6.0	1
11	2015-04-20; 09:42:58.50	24.05	122.4	17.5	6.3	1
12	2015-09-24; 13:58:03.70	22.62	120.7	21.1	4.5	2
13	2015-11-02; 05:09:42.80	22.73	121.6	18.8	5.9	1
14	2015-12-03; 22:31:13.90	22.6	121.4	25.9	5.3	1
15	2016-02-06; 03:57:26.10	22.92	120.54	14.6	6.6	4
16	2016-05-22; 04:51:40.90	22.9	120.61	18.1	5.3	2
17	2016-05-31; 13:23:46.40	25.49	122.68	256.9	6.9	1
18	2017-02-11; 01:12:53.20	22.9	120.12	18.4	5.6	4
19	2017-04-30; 09:57:20.60	21.41	121.65	122.3	6.0	2
20	2017-05-16; 07:12:54.50	23.28	121.43	24.9	5.7	2
21	2017-06-16; 05:29:19.50	22.63	120.41	34.2	4.3	2
22	2017-09-20; 22:29:57.00	23.32	121.78	29	5.8	1
23	2017-11-22; 22:20:09.40	23.58	120.72	15.2	5.6	2

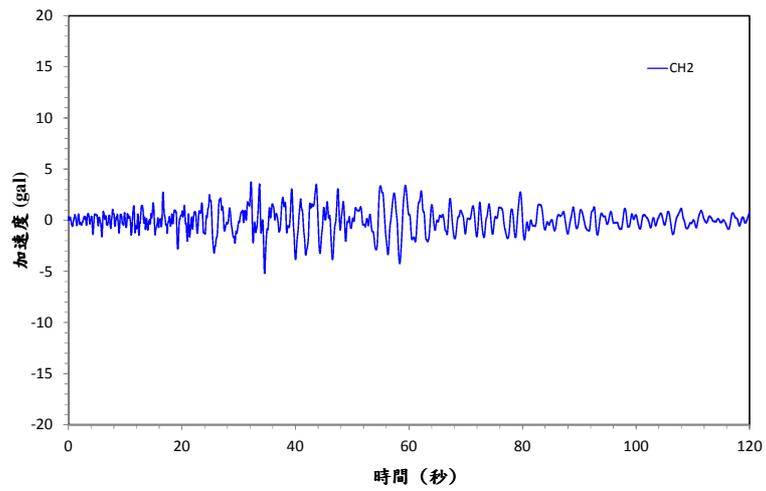


圖 3.8a 高雄港 A 類型地震歷時圖

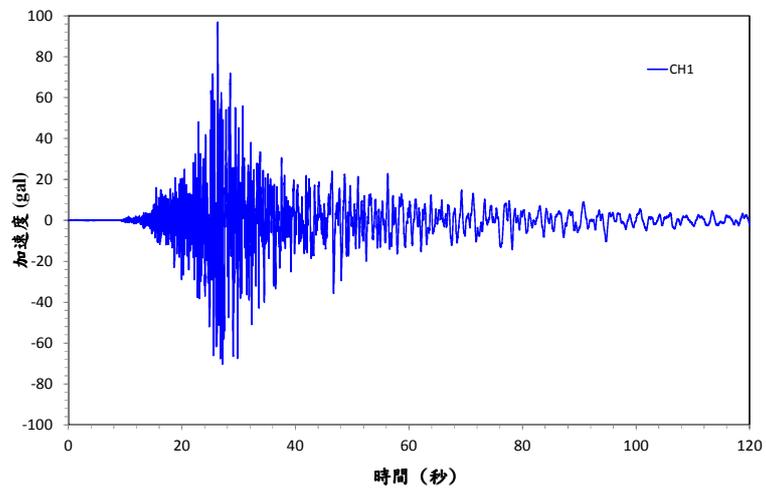


圖 3.8b 高雄港 B 類型地震歷時圖

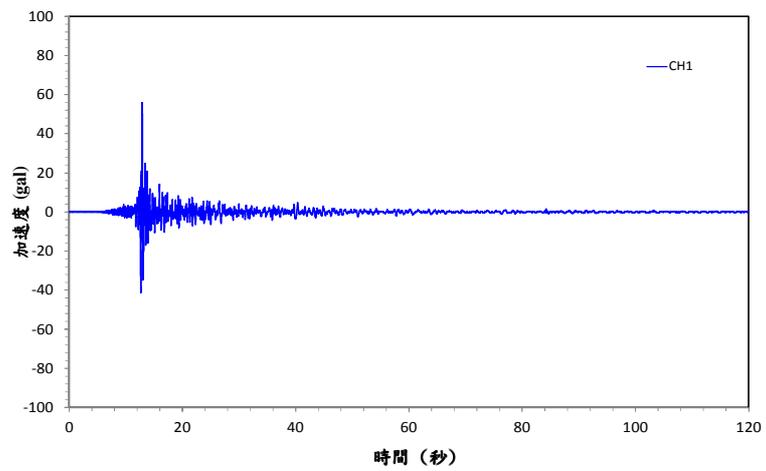


圖 3.8c 高雄港 C 類型地震歷時圖

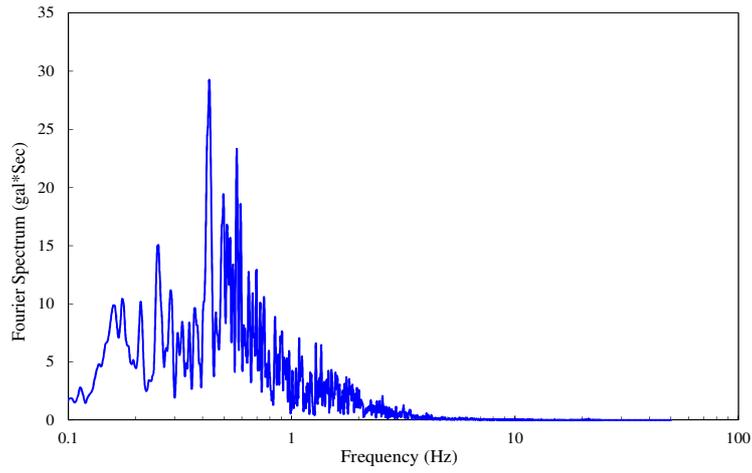


圖 3.9a 高雄港 A 類型地震加速度富氏譜圖

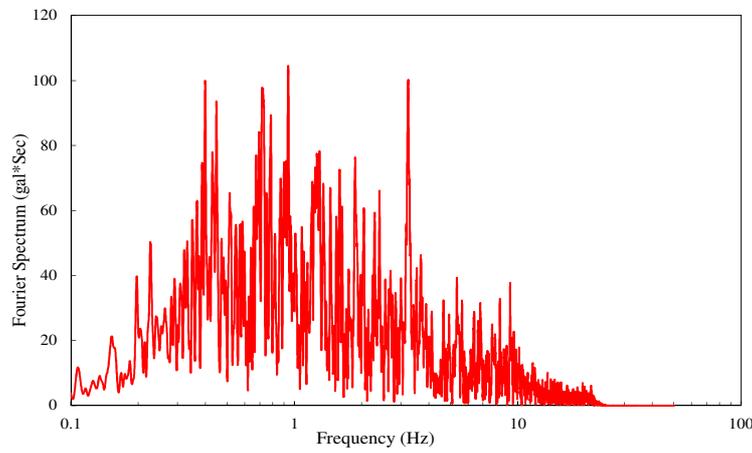


圖 3.9b 高雄港 B 類型地震加速度富氏譜圖

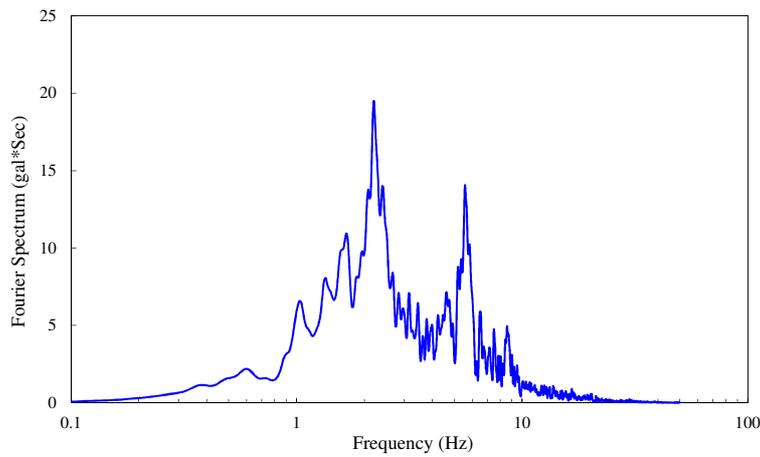


圖 3.9c 高雄港 C 類型地震加速度富氏譜圖

### 3.3.2 高雄港區建築物耐震設計

建築物耐震設計規範的設計地震力<sup>[17]</sup>，主要是以回歸期 475 年的地震水準為標的，相當於 50 年使用期限內具有 10% 的超越機率。一般製作設計反應譜之步驟，是選擇同一測站之多筆不同地震記錄，將每筆地震記錄強度調整至設計地震大小(475 年回歸期)，然後進行反應譜分析後，分別得到擬加速度、擬加速度及相對位移等反應譜，最後再平均化、平滑化並繪製成反應譜曲線。

本節依內政部頒「建築物耐震設計規範」之靜力分析法，彙整高雄港自 2005 年至 2017 年止共 103 起經中央氣象局定位之地震紀錄，選擇地表水平方向加速度歷時地震資料，其中震央距離測站超過 30 公里之 A、B 類型地震共有 88 起，水平兩方向地表加速度有 176 筆，將地震強度調整到 475 年設計地震大小，進行反應譜分析、彙整、平均化等步驟後得到水平譜加速度曲線圖，最後與規範中 475 年設計地震水平譜加速度曲線圖比較。

### 3.3.3 高雄港區水平加速度反應譜

依內政部頒建築物耐震設計規範之規定，震區短週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數  $S_s^D$  與  $S_1^D$  分別代表工址所屬震區在堅實地盤下，設計地震作用時之短週期結構及一秒週期結構之 5% 阻尼譜加速度與重力加速度  $g$  之比值。我國之震區係以鄉鎮市等行政區為單位劃分，各微分區內之震區設計水平譜加速度係數  $S_s^D$  與  $S_1^D$  乃根據 50 年 10% 超越機率之均布危害度分析訂定，地震回歸期為 475 年，震區最大考量水平譜加速度係數  $S_s^M$  與  $S_1^M$  乃根據 50 年 2% 超越機率之均布危害度分析訂定，地震回歸期為 2500 年。

靜力分析法，依內政部頒建築物耐震設計規範，靜力分析時，工址設計水平譜加速度係數不得低於  $0.4S_{DS}$ ，以避免長週期建築物的設計地震力過低。

依規範係數表中，高雄港之行政區劃分為旗津區，其短週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數分別為 0.5 及 0.35，港區土層由地表至地下 30 公尺深的土層平均剪力波速為 304.3m/sec，為第一類地盤，屬堅實地盤，工址短週期設計水平譜加速度係數， $S_{DS} = S_S^D F_a$ ，所以，

$$PGA = 0.4 \times S_{DS} = 0.4 \times S_S^D \times F_a = 0.4 \times 0.5 \times 1.0 = 0.20$$

上式中， $F_a$ ：為反應譜等加速度段之工址放大係數(短周期結構)，隨地盤種類與震區短週期水平譜加速度係數  $S_S(S_S^D)$  而改變。

因此，將高雄港 A、B 類型各組地震調整至 0.20g 後進行反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 3.10a 所示，反應譜曲線平台約介於 0.14~0.7 秒。

另依交通部 99 年部頒之港灣構造物設計基準<sup>[19]</sup>，於民國 88 年 921 地震後將臺灣之震區劃分為地震甲區及地震乙區，其對應之加速度係數分別為 0.33 及 0.23，高雄港區位於高雄市屬地震乙區，其加速度係數為 0.23，因此，將高雄港 A、B 類型各組地表水平向地震調整至 0.23g 後進行反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 3.10b~圖 3.10c。

高雄港測站2005~2017年地震水平加速度反應頻譜圖

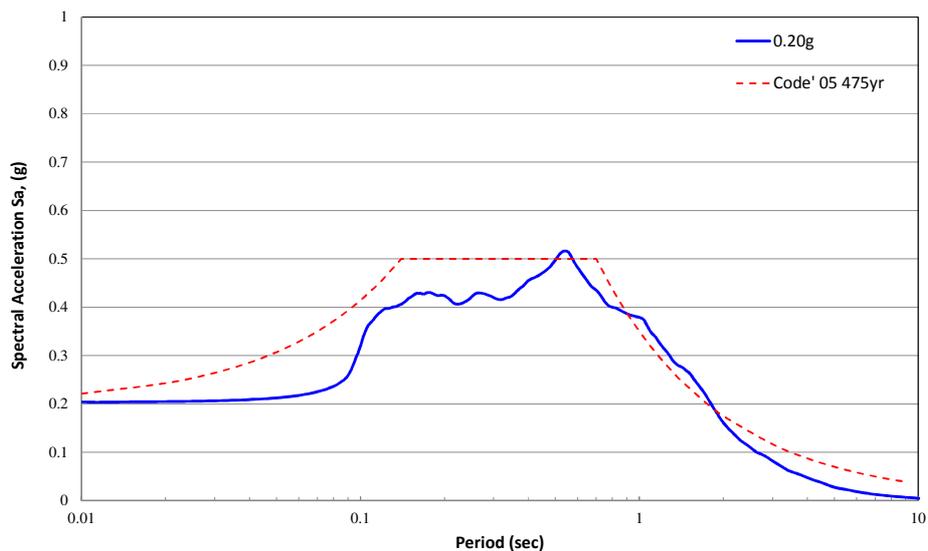


圖 3.10a 高雄港 A、B 類型地表地震水平加速度反應譜曲線圖(0.20g)

高雄港測站2005~2017年地震水平加速度反應頻譜圖

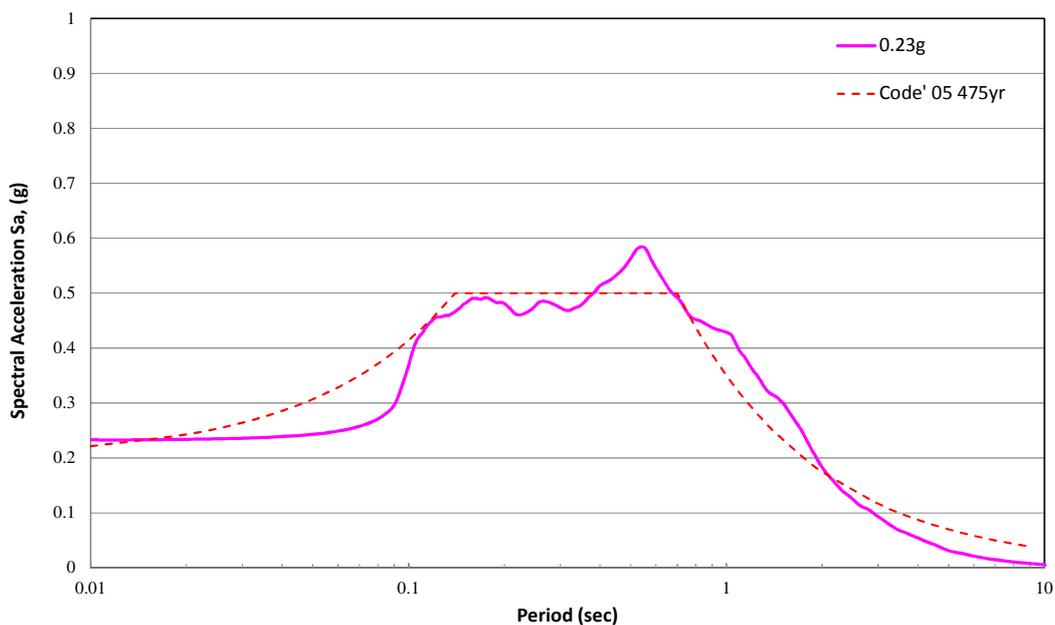


圖 3.10b 高雄港 A、B 類型地震水平加速度反應譜曲線圖(0.23g)

高雄港測站2005~2017年地震水平加速度反應頻譜圖

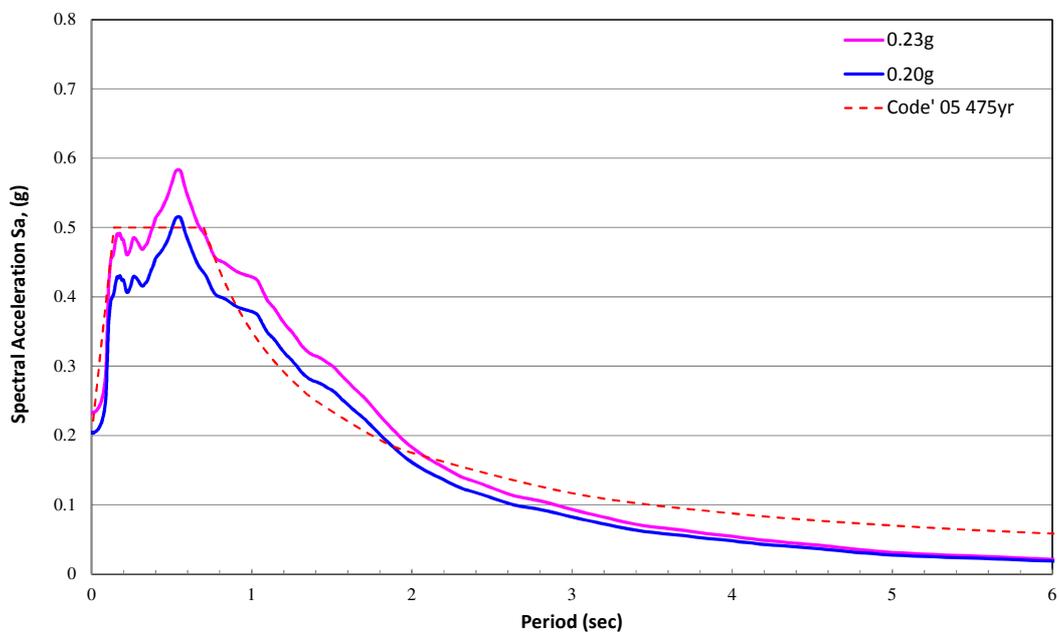


圖 3.10c 高雄港 A、B 類型地震水平加速度反應譜圖(0.2g、0.23g)

### 3.4 高雄港區場址效應

本節以高雄港監測站在地下各深度量測到的小振幅地震加速度歷時曲線作為現地實際資料，並以高雄監測站之土層柱狀圖建立土層模型，將位於監測站底部 292.5 公尺量測到的小地震加速度歷時曲線作為輸入運動，同時使用非線性分析程式 Cyclic1D 與擬線性分析程式 Shake91 對高雄港場址進行模擬，同時校正土壤模型使模型接近現地土壤情況，最後探討淺層土壤(30.8 公尺以上)對地震的反應影響。分析流程如圖 3.11。

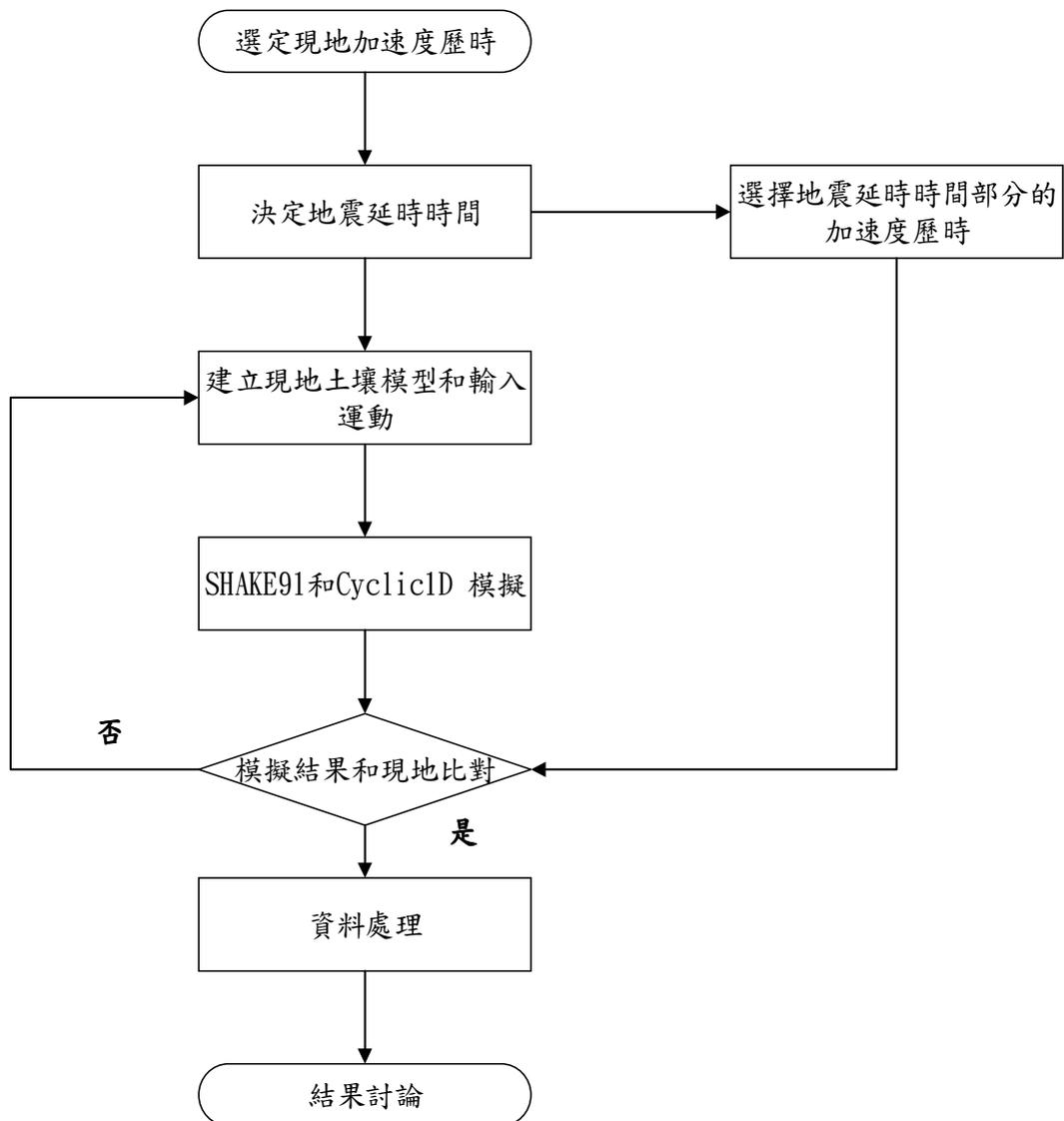


圖 3.11 分析流程圖

### 3.4.1 一維地盤反應分析假設與理論

Schanabel et al.(1972)<sup>[13]</sup>將地盤反應分析做了合理的簡化，使其可以在合理的假設下解決，其假設如下所述：

1. 當地震在地表下某一點發生時，地震波會從震源朝向四面八方傳遞，當到達不同的土壤材料邊界時，地震波會有折射和反射的現象產生，根據 Snell 折射定理，當波從波速大的物質進入波速小的物質，其入射角會越小，一般情況下接近地表之土層會越鬆軟，其波速越慢，越深層之土層，其波速會越快，因此當地震波從震源傳遞至地表時，經過無數次之折射，其入射角已接近垂直，故假設地震波從岩盤垂直入射，如圖 3.12 所示。
2. 在土壤中傳遞之實體波(body wave)依顆粒運動方向與波傳傳遞方向，可分為縱波(P-wave)、垂直向剪力波(SV-wave)、水平向剪力波(SH-wave)。實體波在土壤傳遞時均會產生折射與反射現象，在一維地盤分析只考慮土壤顆粒在水平向產生的震動，故僅考慮水平向剪力波(SH-wave)。
3. 土層剖面中不同土壤性質的土層和岩盤均視為水平，此對自然沉積產生之沖積層而言是合理的假設。
4. 土壤視為一個側向無限延伸之層狀系統，地震波不受側向邊界影響。
5. 土壤動態行為取決於每個土層的厚度、密度、剪力模數、阻尼，而土壤阻尼不受頻率影響。
6. 土壤的位移和剪應力在土層間具有連續性，且同一層的位移和剪應力相同。

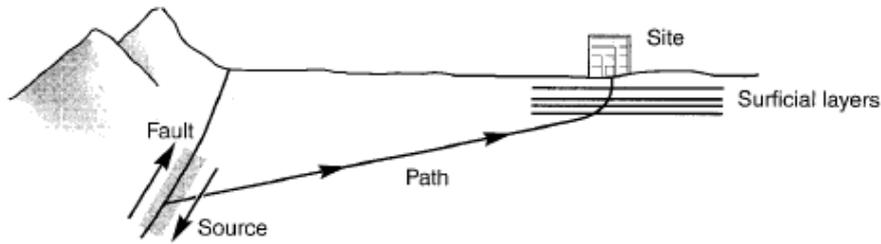


圖 3.12 地震波傳遞示意圖

## 1. 分析程序

近年來，在地盤反應分析方面，有許多相關的分析程序被發展出來，以不同的土壤組構模型及計算方法進行地盤反應模擬，本文針對所使用的 Shake91 與 Cyclic1D 地盤反應分析程序與理論進行介紹。

Schnabel et al. (1972)<sup>[13]</sup>發展 SHAKE 程式進行一維地盤反應模擬，以等值線性方法的迭代過程近似土壤非線性行為，並在頻率域透過轉換函數求取土層反應，最近之版本為 SHAKE91(Sun and Idriss 1991)，整個架構屬於總應力分析和頻域分析。

Elgamal et al. (2006)<sup>[5]</sup>為了評估土壤受到地震作用時產生的地盤反應與液化潛能，發展以有線元素法為基礎之 Cyclic1D 程式，其採用耦合固液相的 u-p 理論，並以非線性方式分析土壤在受震時的地盤反應與液化潛能，整個架構屬於有效應力分析和時域分析。

## 2. Shake91 理論模式

Schnabel et al.(1972)建立 Shake91 以一維的地盤反應分析模式進行擬線性分析，其假設如下：

- (1)土壤為均質黏彈性之沉積層,在水平方向無限延伸。
- (2)土壤下方為半無限空間。
- (3)地震波由岩盤垂直向上傳遞經由土層到地表。

分析過程對於土層之假設，如圖 3.13 所示。地震剪力波在土層垂直傳遞時所產生之水平向位移需滿足波動方程式，如式 3-4 所示。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial x^2 \partial t} \dots\dots\dots (3-4)$$

上式中， $\eta$ :土壤黏滯係數， $t$ :時間(sec)， $x$ :內部任一點的位置， $G$ :土壤剪力模數(kg/m<sup>2</sup>)， $\rho$ :土壤單位密度(kg/m<sup>3</sup>)。

SHAKE 對於土層在受地震力作用時，土層內部任何一點之反應(土層間相對運動情況、剪應力、剪應變、加速度)均可求出，在頻率域中，依據等值線性分析求得的土壤動態參數收斂解，計算各土層間的轉換函數(transfer function)或稱反應函數(response function  $H(\omega)$ )，使用傅立葉轉換(Fourier transform)對輸入地震由時間域轉換至頻率域，再對轉換的地震序列與轉換函數做卷積(convolution)，如 3-5 式所示，最後進行逆傅立葉轉換(inverse Fourier transform)得到土層時間域之地震反應。其頻率域計算如下：

$$R(\omega) = G(\omega) \cdot H(\omega) \dots\dots\dots (3-5)$$

式中  $G(\omega)$ :地震之傅立葉轉換， $H(\omega)$ :土層反應函數， $R(\omega)$ :反應之傅立葉轉換。

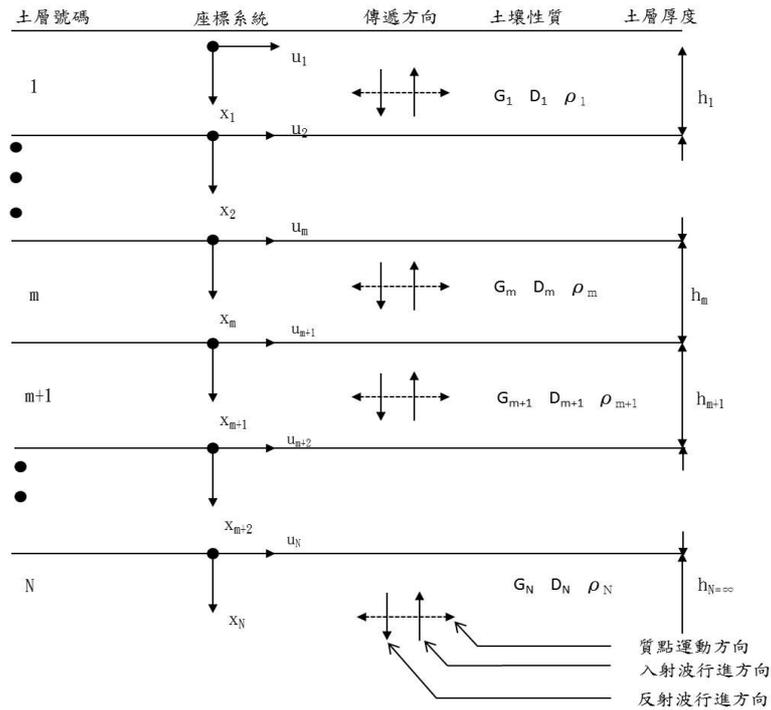


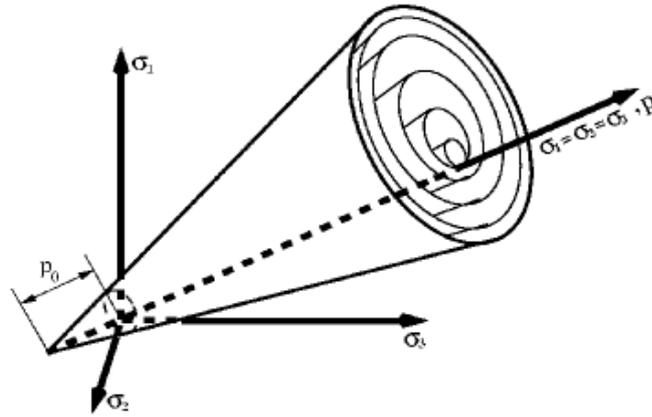
圖 3.13 一維土層系統剖面(Schnabel et al.,1972)

### 3. Cyclic 1D 理論模式

Elgamal et al.(2006)建立 Cyclic1D 以一維的地盤反應分析模式進行非線性分析，在有線元素法的架構下將土壤切割成多個元素在時間域利用差分的方式根據每個設定的土壤參數去計算各土壤元素的位移、剪應力、剪應變，再進一步推算其他的土壤動態參數，得到土壤動態反應行為，並結合固體與流體的有效應力模式模擬地震時土壤的液化反應，其液化模型採用多重塑性降伏表面空間，如圖 3.14 所示。在 Cyclic1D 中，由於動態之數值模擬分析必須考慮能量損失及黏滯現象，因此需考慮力學阻尼。一般結構力學考慮阻尼之影響時，由於 Rayleigh 阻尼較簡單且有效，因此常被引用。Rayleigh 阻尼是以矩陣  $C$  表示，其包含了質量阻尼  $M$  與勁度阻尼  $K$  兩項入如式 3-6。

$$C = A_{MC}M + A_{KC}K \dots\dots\dots (3-6)$$

式中  $A_{MC}$  = 質量阻尼係數 ，  $A_{KC}$  = 勁度阻尼係數



Principal effective stress space

圖 3.14 多重塑性降伏表面空間(Cyclic1D,2004)

### 3.4.2 土壤模型

高雄港監測站位置如圖 3.15 所示。利用現地鑽探得到的地層柱狀圖建立在 Shake91 使用的土壤模型，在土壤模型中忽略厚度小於一公尺的薄層，砂土夾黏土層及砂石含小石層在土壤模型中以砂土層處理，如圖 3.16 所示。

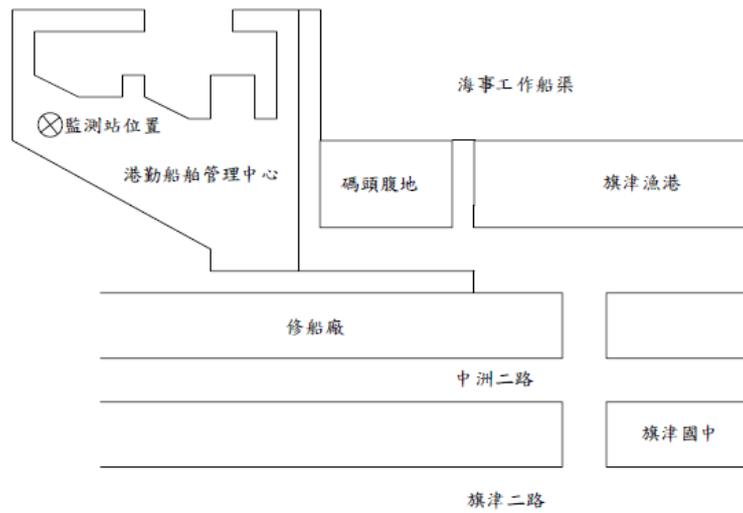


圖 3.15 高雄港地震監測站位置示意圖

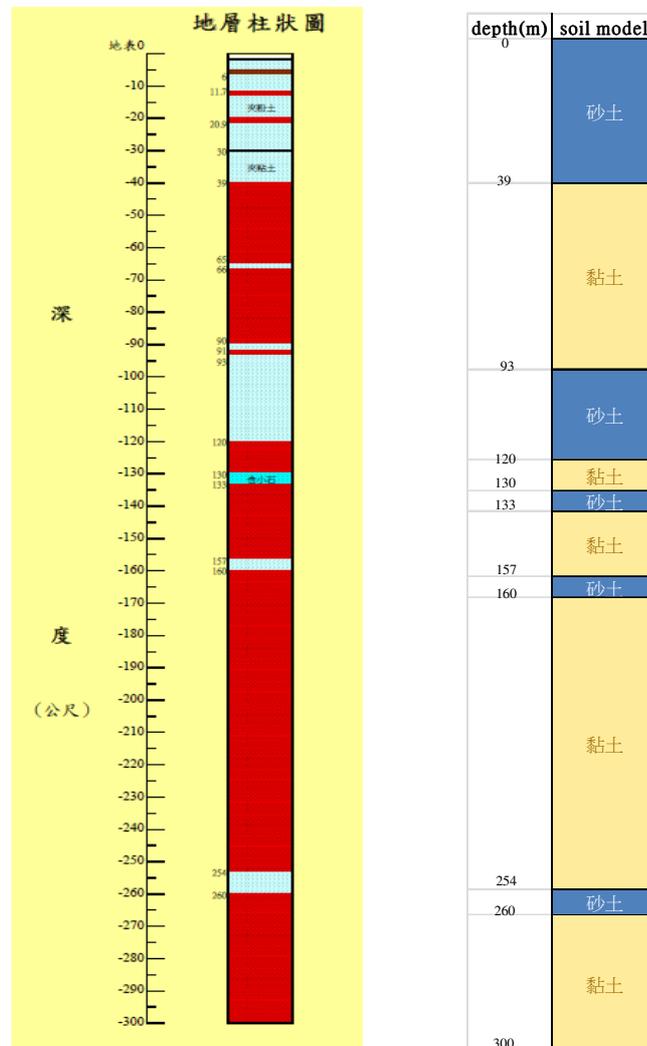


圖 3.16 現地土層柱狀圖與土壤模型對照圖

### 3.4.3 輸入參數

Shake91 中剪力波速  $V_s$  參考現地利用懸浮式井測量測的結果，如圖 3.17 所示。剪力模數方面採用 Seed and Sun(1988)提出的黏土剪力模數曲線和 Seed and Idriss(1970)提出的砂土剪力模數曲線皆選擇上邊範圍，阻尼比方面採用 Idriss(1990)提出的阻尼比曲線選擇下邊範圍，如圖 3.18 所示。土壤密度(Mass Density)黏土假設為  $2,000\text{kg/m}^3$ 、砂土假設為  $1,900\text{kg/m}^3$ 。

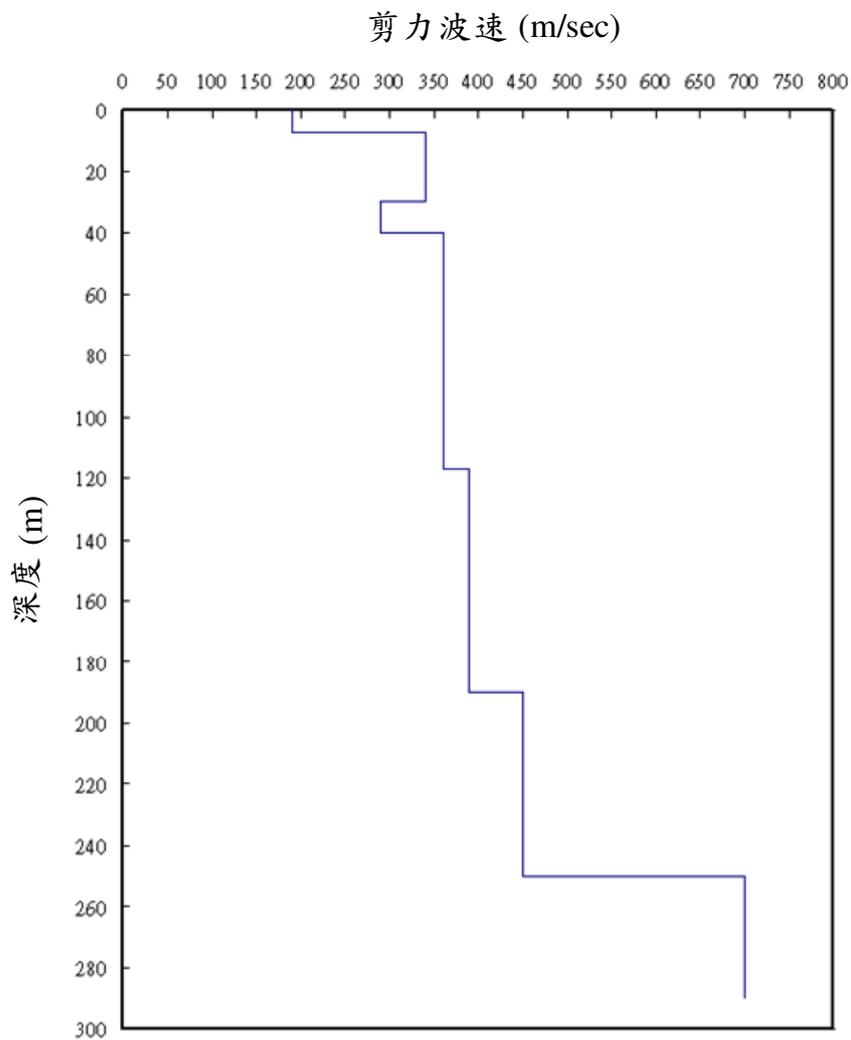


圖 3.17 高雄港地震監測站剪力波速隨深度變化圖

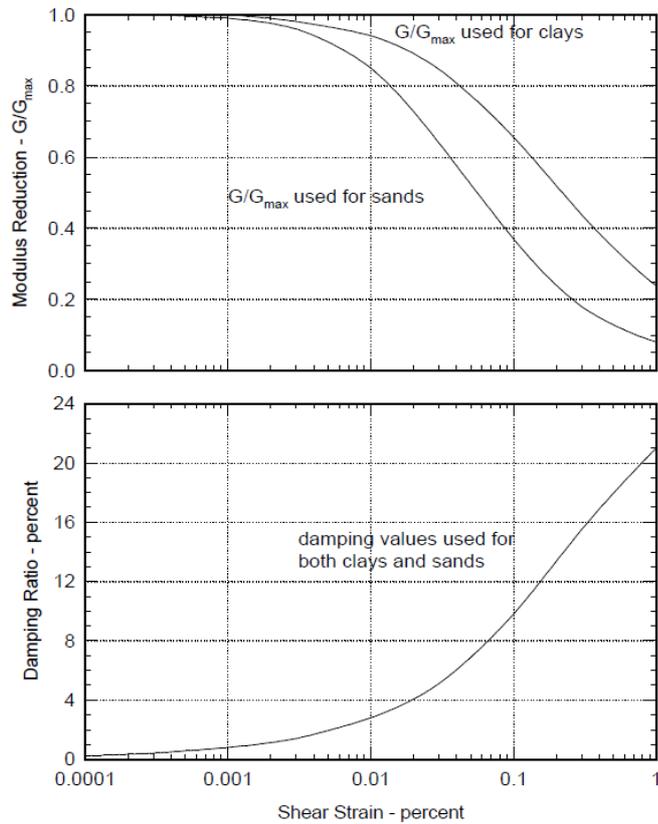


圖 3.18 輸入之剪力模數和阻尼比(SHAKE91)

#### 3.4.4 地震輸入運動

高雄港監測站分別設置五個地震計於地表面和地表面下 14.7 公尺、30.8 公尺、96.8 公尺、292.5 公尺處，每個點同時記錄 X 方向(南北向)、Y 方向(東西向)、Z 方向(垂直向)的地震加速度歷時，地震記錄的發生時間及各頻道的深度與 PGA，如表 3-2 所示。地盤反應分析中僅考慮向上傳遞且質點於水平向運動的水平剪力波 (SH wave)，因 292.5 公尺地震計是最接近測站土層底部，故選擇本深度東西向的地震加速度歷時來做為輸入地震，如圖 3.19 所示，在地震延時部分，地震波主要由縱波、剪力波以及表面波組成，為了分析完整地震波形，採用艾式震度，它是以類似能量來反應出完整地震歷時期間地表受到地動的強度，延時起點選擇縱波的記錄起始點，終點則選擇艾式強度 95% 處，震幅地震延時為 9.01 秒到 58.61 秒，如圖 3.20 所示。

表 3-2 港區地震紀錄

地震發生時間: 2006/12/27 10:30:53			
儀器紀錄時間: 120 秒			
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	備註
1(南北)	地表	21.38	
2(東西)	地表	13.85	
3(垂直)	地表	10.97	
4(南北)	14.7m	-9.42	
5(東西)	14.7m	-7.91	
6(垂直)	14.7m	3.85	
7(南北)	30.8m	-11.38	
8(東西)	30.8m	-7.51	
9(垂直)	30.8m	-3.03	
10(南北)	96.8m	-8.93	
11(東西)	96.8m	5.59	
12(垂直)	96.8m	2.83	
13(南北)	292.5m	-4.00	
14(東西)	292.5m	-4.37	
15(垂直)	292.5m	2.64	

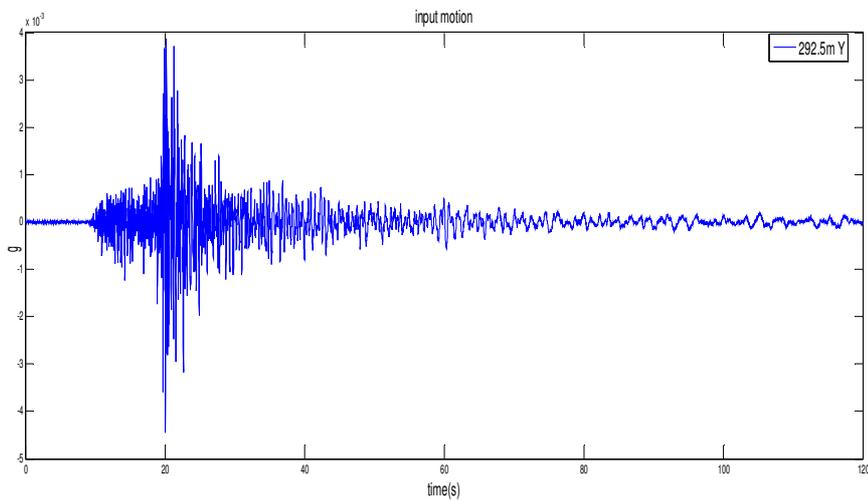


圖 3.19 地震輸入運動(292.5 公尺 Y 向)

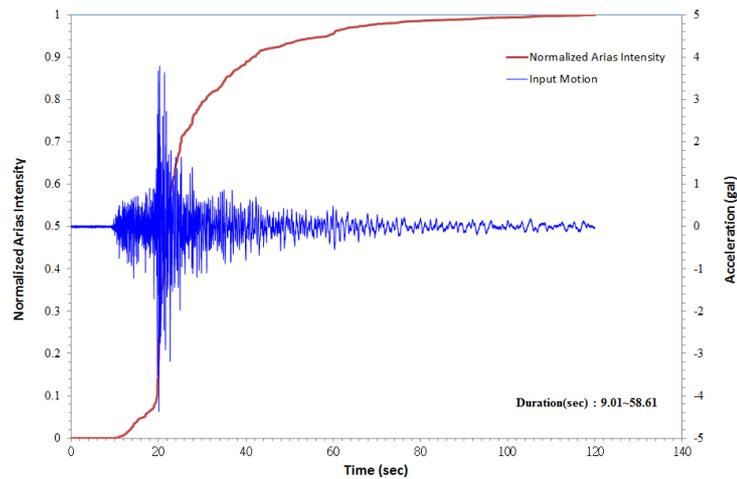


圖 3.20 輸入地震延時

### 3.4.5 資料處理

將 Shake91 和 Cyclic1D 分析出來的地表加速度歷時曲線利用地動參數(ground motion parameters)來描述地震反應的特徵，觀察不同深度及不同分析程式模擬的地震反應差異性。地動參數有尖峰地表加速度、傅式震幅譜、反應譜、艾氏強度、土層自然頻率等簡述如下。

#### 1. 尖峰地表加速度(Peak ground acceleration,PGA)

一般在測站量測到的地震波，主要由壓力波、剪力波、表面波所組成，其中以剪力波所傳遞的震幅最大，因在地盤反應分析中，剪力波的震幅是分析的重點，在加速度歷時中，最大的加速度稱為尖峰地表加速度，單位為 g 或 gal，如圖 3.21 所示。

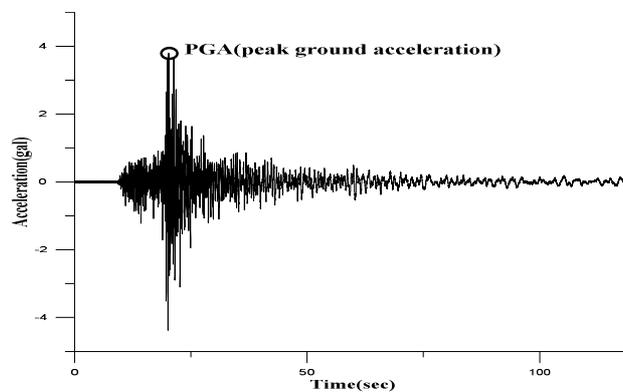


圖 3.21 尖峰地表加速度圖

## 2. 傅式震幅譜(Fourier amplitude spectra)

頻率域分析中，時間域的地震反應可以透過傅氏轉換(Fourier transform)將地震反應表示成不同頻率及不同震幅的弦波疊加而成，如式 3-7 所示：傅氏轉換將地震反應從時域分析轉換成頻域分析，將震幅對應到頻率即為傅氏震幅譜。

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \dots\dots\dots (3-7)$$

上式中， $C_n$ :振幅， $\omega_n$ :頻率， $\phi_n$ :相位角

## 3. 反應譜(Response Spectra)

反應譜是指具有不同基本振動週期和阻尼比的單自由度(single degree of freedom)結構，在地震力的作用下得到的最大反應值，可用來描述土壤受地震外力作用時的動力行為，如圖 3.22 所示。不同的地震外力以及不同的地盤狀況所得到之反應譜各不相同，而震源機制、地震規模、震源距離、地震強度都會對反應譜產生影響。整個計算利用單自由度運動方程式，如式 3-8 所示，使用杜式積分(Duhamel integral)可從式 3-8 得到位移解，如式 3-9 所示，再以求得的位移解取最大絕對值為位移反應譜，如式 3-10 所示：

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = Q(t) \dots\dots\dots (3-8)$$

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t Q(\tau) e^{-\omega\xi(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \dots\dots\dots (3-9)$$

$$S_d(\omega, \xi) = |u(t)|_{\max} = \left| \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t Q(\tau) e^{-\omega\xi(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \dots\dots (3-10)$$

上式中， $u$  為單自由度系統的質點位移； $Q$  為地震外力； $m$  為質量； $c$

為阻尼； $k$  為勁度； $\xi$  為阻尼比(設定 5%)； $\omega_d$  為阻尼作用下的頻率； $\omega$  為頻率； $t$  為地震歷時； $S_d$  為位移反應譜。

一般常見之工程結構物，在阻尼比不超過 20%的情況下，可以近似  $\xi^2 \cong 0$ 、 $\omega_d \cong \omega$ ，以  $\sin \omega_d(t-\tau)$  替代  $\cos \omega_d(t-\tau)$  之計算結果，藉由這樣近似的方式，速度反應譜與加速度反應譜可以表示成 3-11 式及 3-12 式。

$$S_v(\omega, \xi) = \omega S_d \dots\dots\dots (3-11)$$

$$S_a(\omega, \xi) = \omega^2 S_d \dots\dots\dots (3-12)$$

上式中， $S_v$  為速度反應譜； $S_a$  為加速度反應譜。

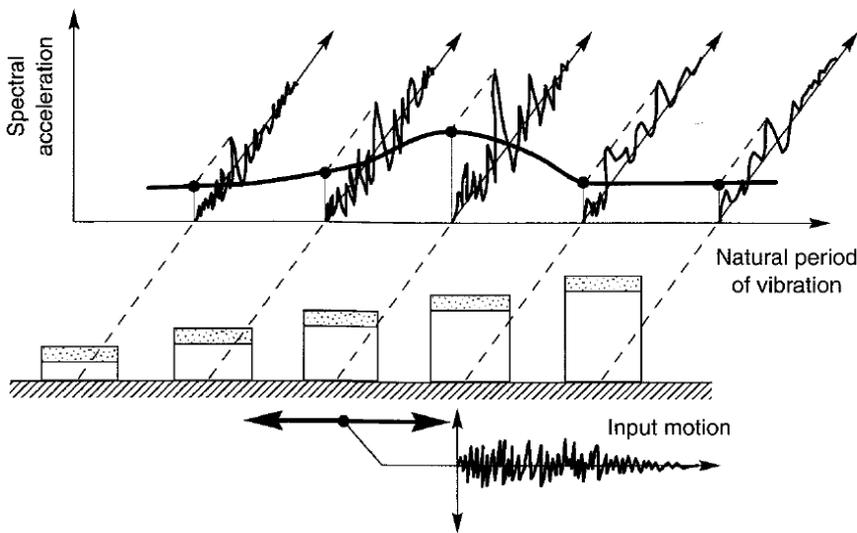


圖 3.22 單自由度系統之加速度反應示意圖(Kramer,1996) [8]

#### 4. 艾氏震度(Arias Intensity)

Arias (1970)提出一地震強度指數，稱為艾氏強度<sup>[1]</sup>，以能量的觀點反應出地盤在地震歷時期間所受的強度，因此艾氏強度可以表示地震對於區域內，在任何點所產生的能量，如式 3-13 所示：

$$I_a = \frac{\pi}{2g_0} \int_0^t [a(t)]^2 dt \dots\dots\dots (3-13)$$

上式中， $I_a$  為艾式震度； $g$  為重力加速度； $a$  為地震加速度； $t$  為地震歷時。

## 5. 土層自然頻率

土層與結構物都有其對應的自然頻率，不同的運動模態其對應的自然頻率也不同，當地震發生時地震波的頻率與結構物的自然頻率接近就會產生共振的行為，而土層在接近自然頻率時會有震波放大的現象，土層的自然頻率可以式 3-14 推估：

$$f_n = \frac{\bar{V}_s}{4H} (2n-1) \dots\dots\dots (3-14)$$

上式中， $n$  為模態數目； $f_n$  為模態對應的自然頻率； $\bar{V}_s$  為土層的平均波速； $H$  為土層的整體厚度。

### 3.4.6 分析結果

#### 1. 加速度歷時

Cyclic1D 分析結果與現地加速度歷時依深度如圖 3.23 所示，Shake91 分析結果與現地加速度歷時依深度如圖 3.24 所示，Cyclic1D 在表面與 14.7 公尺和 30.8 公尺最大加速度值皆發生在 22 秒左右與現地誤差約一秒左右，從圖 3.24 可看出 Shake91 最大加速值發生時間相較於 Cyclic1D 更接近現地值，但加速度值在三個深度 27 秒到 30 秒值都略大於現地值，從圖 3.25 可觀察到 Shake91 模擬的結果與現地加速度歷時從五個測點深度(292.5m、96.8m、30.8m、14.7m、0m)隨著深度有放大的趨勢，而 Cyclic1D 在底部的值與實際輸入運動相比略大，到了深度 30.8 公尺才開始有放大的趨勢出現，從圖 3.26 可以更明顯觀察三者放大係數與深度的變化，Shake91 放大係數相較於 Cyclic1D 更接近現地曲線。

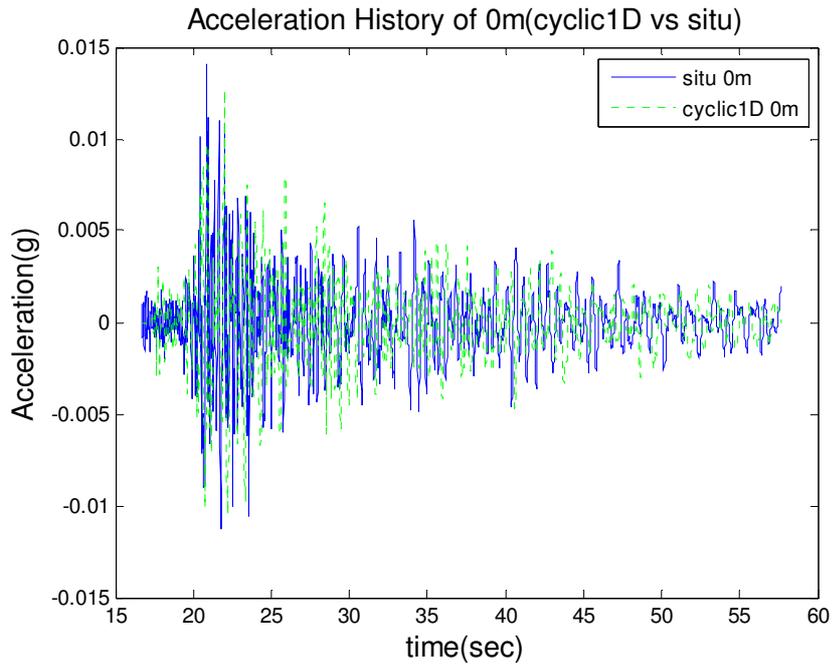


圖 3.23a 現地與 Cyclic1D 加速度歷時比較圖(地表)

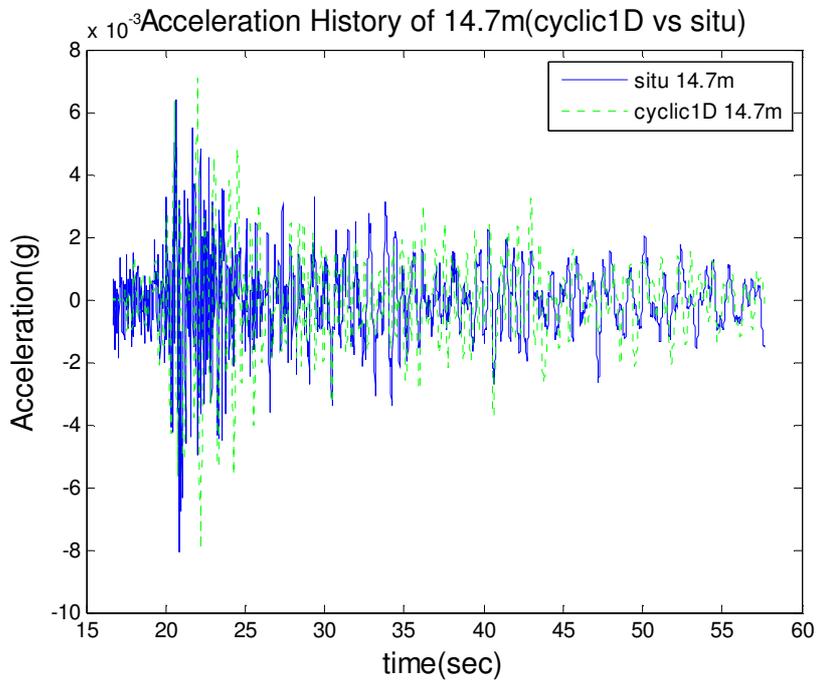


圖 3.23b 現地與 Cyclic1D 加速度歷時比較圖(-14.7m)

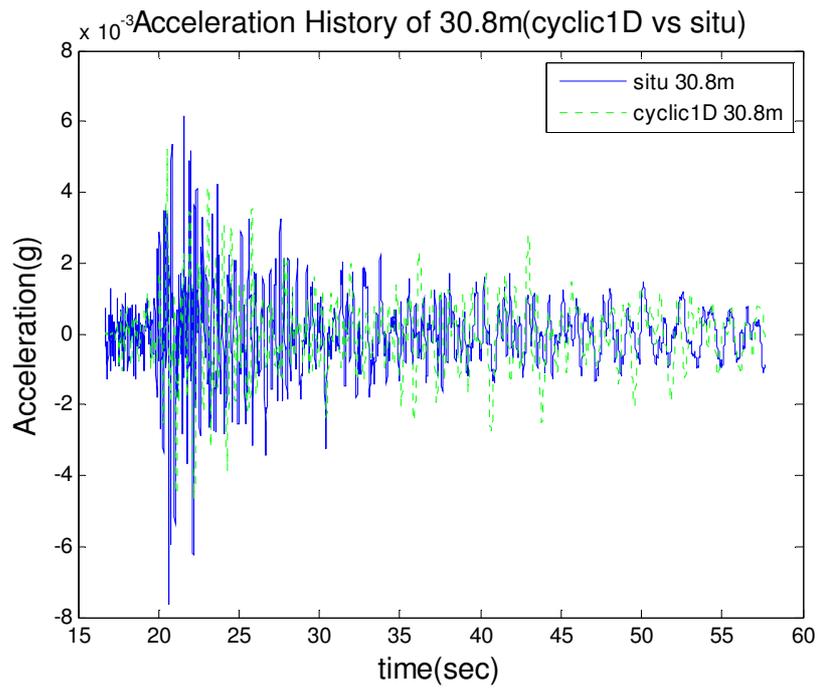


圖 3.23c 現地與 Cyclic1D 加速度歷時比較圖(-30.8m)

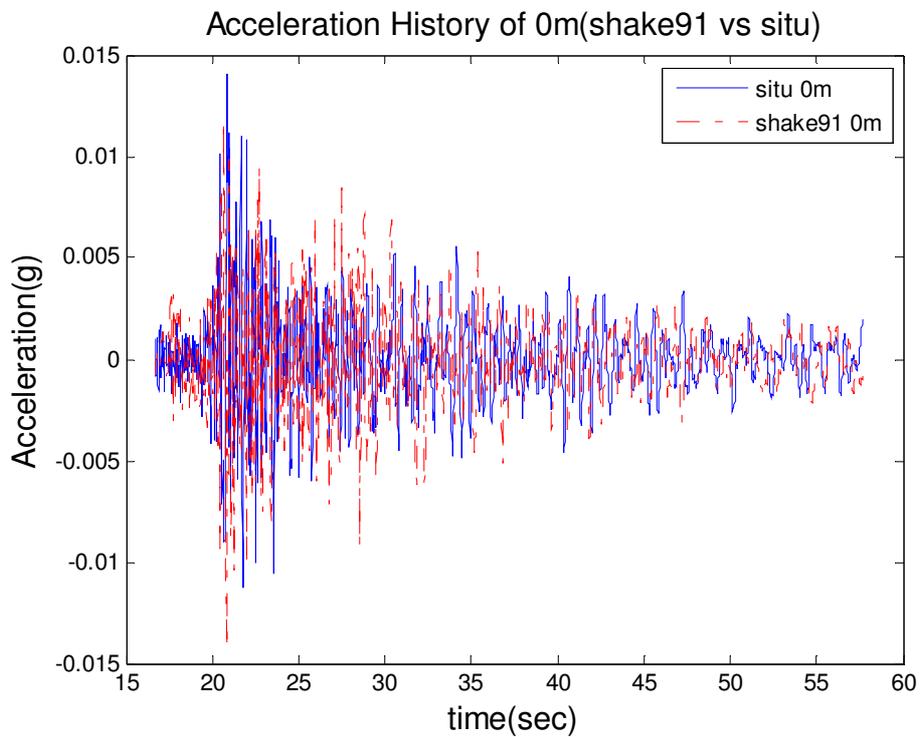


圖 3.24a 現地與 Shake91 加速度歷時比較圖(地表)

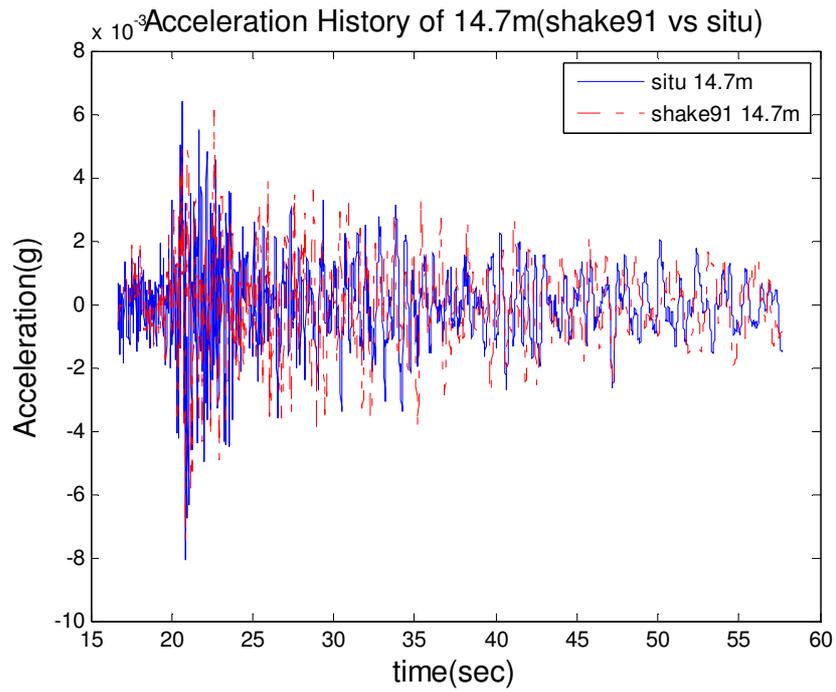


圖 3.24b 現地與 Shake91 加速度歷時比較圖(-14.7m)

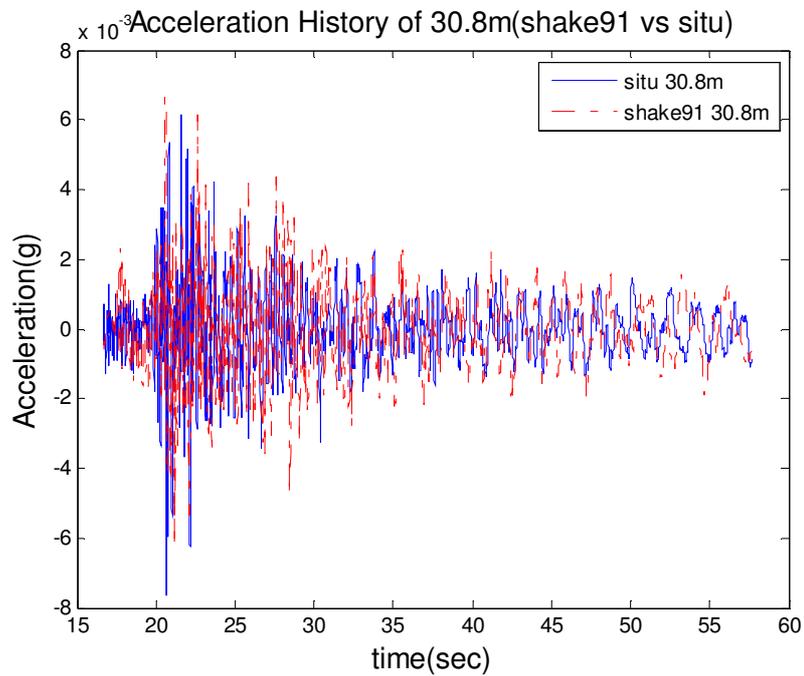


圖 3.24c 現地與 Shake91 加速度歷時比較圖(-30.8m)

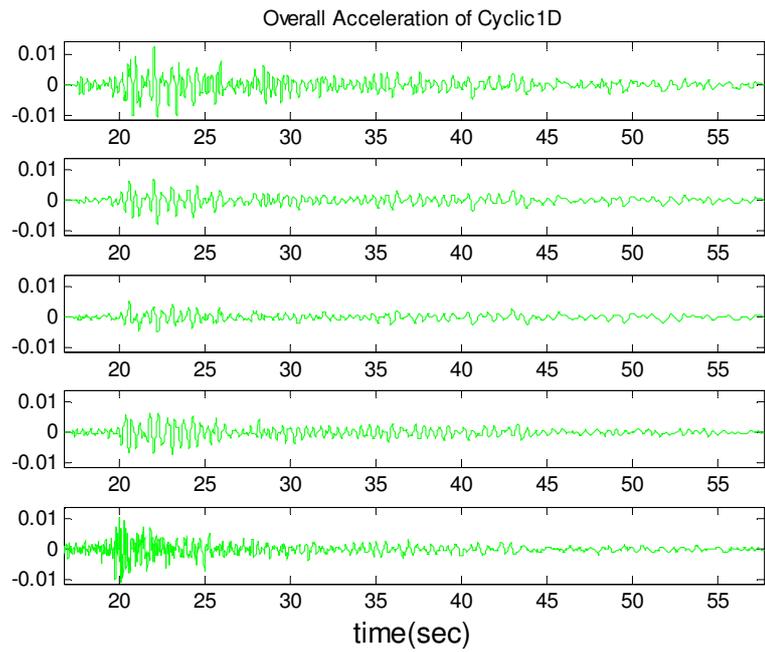


圖 3.25a 各深度加速度歷時比較圖(Cyclic1D)

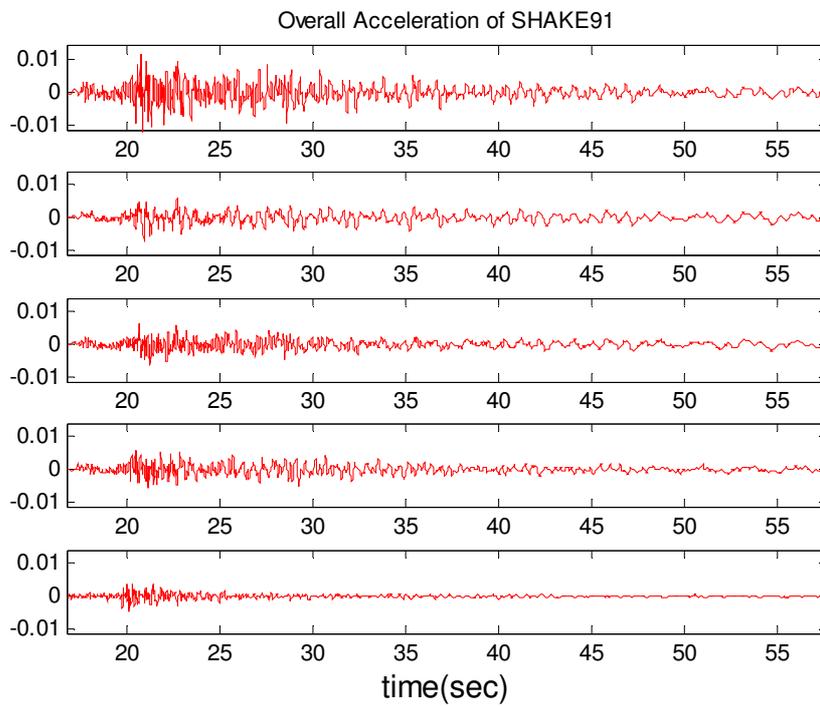


圖 3.25b 各深度加速度歷時比較圖(Shake91)

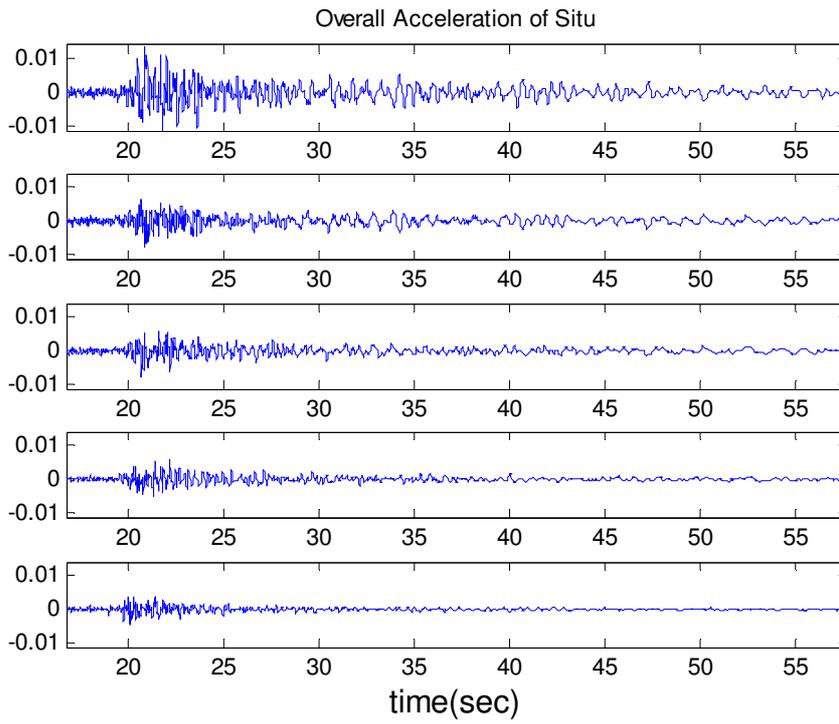


圖 3.25c 各深度加速度歷時比較圖(現地)

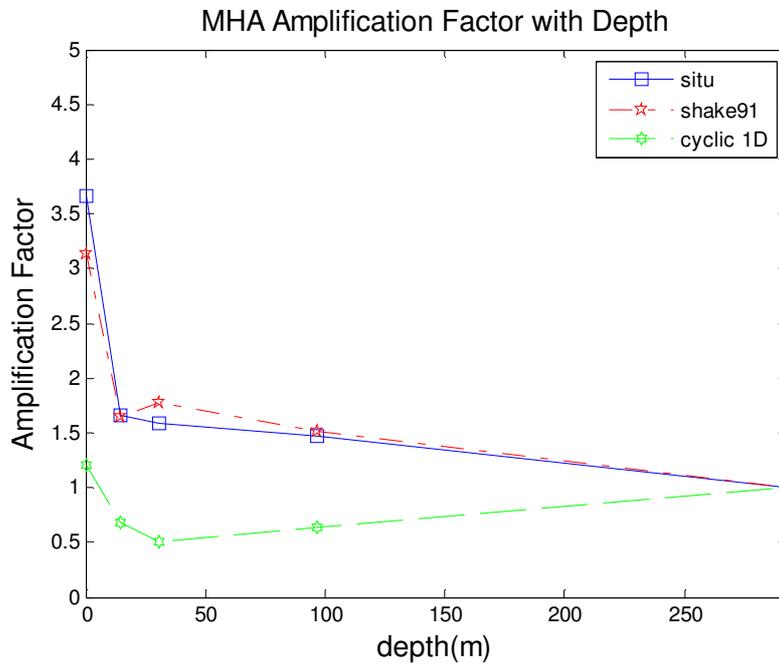


圖 3.26 最大加速度放大係數隨深度變化圖

## 3.5 臺北港區的設計地震力

### 3.5.1 臺北港區建築物耐震設計

本節依內政部頒「建築物耐震設計規範」之靜力分析法，彙整臺北港自 2004 年至 2016 年止共 110 次經中央氣象局定位之地震紀錄，選擇地表水平方向加速度歷時地震資料，其中震央距離測站超過 40 公里之 A、B 類型地震共有 220 筆，將地震強度調整到 475 年設計地震大小，並進行反應譜分析、彙整、平均化等步驟後得到水平譜加速度曲線圖，最後與規範中 475 年設計地震水平譜加速度曲線圖比較。

### 3.5.2 臺北港之水平加速度反應譜

依內政部頒建築物耐震設計規範之規定，震區短週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數  $S_S^D$  與  $S_I^D$  分別代表工址所屬震區在堅實地盤下，設計地震作用時之短週期結構及一秒週期結構之 5% 阻尼譜加速度與重力加速度  $g$  之比值。我國之震區係以鄉鎮市等行政區為單位劃分，各微分區內之震區設計水平譜加速度係數  $S_S^D$  與  $S_I^D$  乃根據 50 年 10% 超越機率之均布危害度分析訂定，地震回歸期為 475 年，震區最大考量水平譜加速度係數  $S_S^M$  與  $S_I^M$  乃根據 50 年 2% 超越機率之均布危害度分析訂定，地震回歸期為 2500 年。

依臺北市及新北市之臺北盆地微分區劃分表，臺北港之行政區劃分為八里區訊塘里，屬臺北二區，其短週期之設計水平譜加速度係數  $S_{DS}$  為 0.6，反應譜短週期與中週期分界之轉角周期  $T_0^D$  及  $T_0^M$  分別為 1.3 秒，港區土層由地表至地下 30 公尺深的土層平均剪力波速為 221.6m/sec，為第二類地盤，屬普通地盤，工址短週期設計水平譜加速度係數， $S_{DS} = S_S^D F_a$ ，所以，

$$PGA = 0.4 \times S_{DS} = 0.4 S_S^D F_a = 0.4 \times 0.6 \times 1.1 = 0.264 \text{。}$$

上式中， $F_a$ ：為反應譜等加速度段之工址放大係數(短周期結構)，

隨地盤種類與震區短週期水平譜加速度係數  $S_s(S_s^D)$  而改變。

因此，將臺北港 A、B 類型各組地震調整至 0.264g 後進行反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 3.27a 所示，反應譜曲線平台約介於 0.09~0.8 秒。

另依交通部 99 年部頒之港灣構造物設計基準，於民國 88 年 921 地震後將臺灣之震區劃分為地震甲區及地震乙區，其對應之加速度係數分別為 0.33 及 0.23，臺北港區位於新北市屬地震乙區，其加速度係數為 0.23，因此，將臺北港 A、B 類型各組地表水平向地震調整至 0.23g 後進行反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 3.27b 所示。

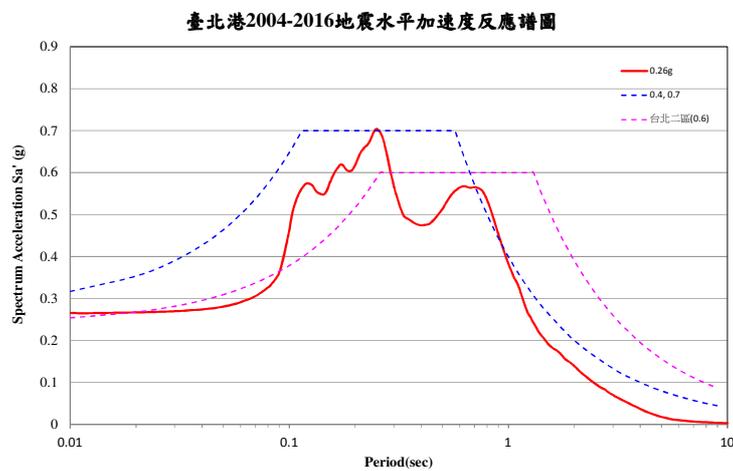


圖 3.27a 臺北港 A、B 類型地表地震水平加速度反應譜曲線圖(0.264g)

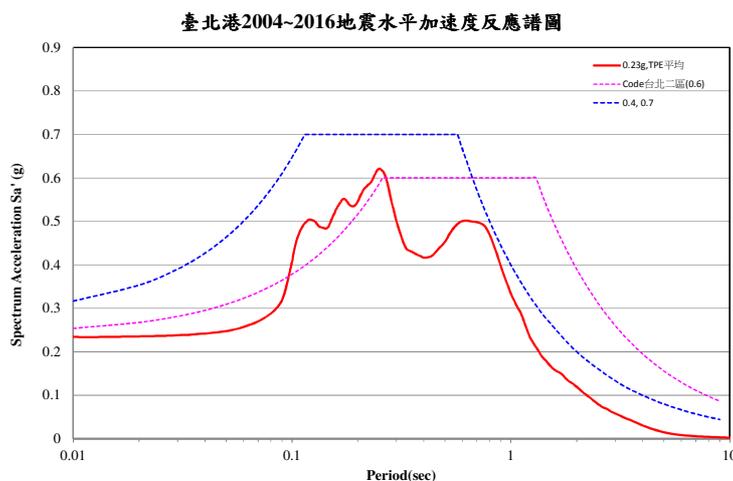


圖 3.27b 臺北港 A、B 類型地震水平加速度反應譜曲線圖(0.23g)

### 3.6 花蓮港地震站資料

#### 3.6.1 花蓮港測站地質

本所港研中心 101 年於花蓮港務大樓前花園之適當地點安裝三向度網路型地表地震儀完成設置地震災後速報系統進行自動長期監測，並逐年改善系統穩定性與精進速報功能，由於該場址缺少土層鑽探資料，故採用氣象局於花蓮市 HWA062 測站地質與波速資料，依鑽探資料顯示，地表至 35 公尺深之 SPT-N 值皆大於 50 之礫石層，平均剪力波速(S-Wave)約為 606m/sec，如圖 3.28 所示。

民國 107 年 2 月 6 日 23 時 50 分花蓮地區發生芮氏規模 6.2，地震深度 6.3 公里，震央在花蓮東北方立霧溪口的海上(如圖 3.29)，屬極淺層地震，花蓮市測站最大震度達 7 級，地表最大加速度 442gal(如圖 3.30)，因此也造成許多災害與傷亡。港研中心設置於花蓮港之地震災後速報系統也成功擷取本次資料，地表最大加速度 230gal(如圖 3.31)。

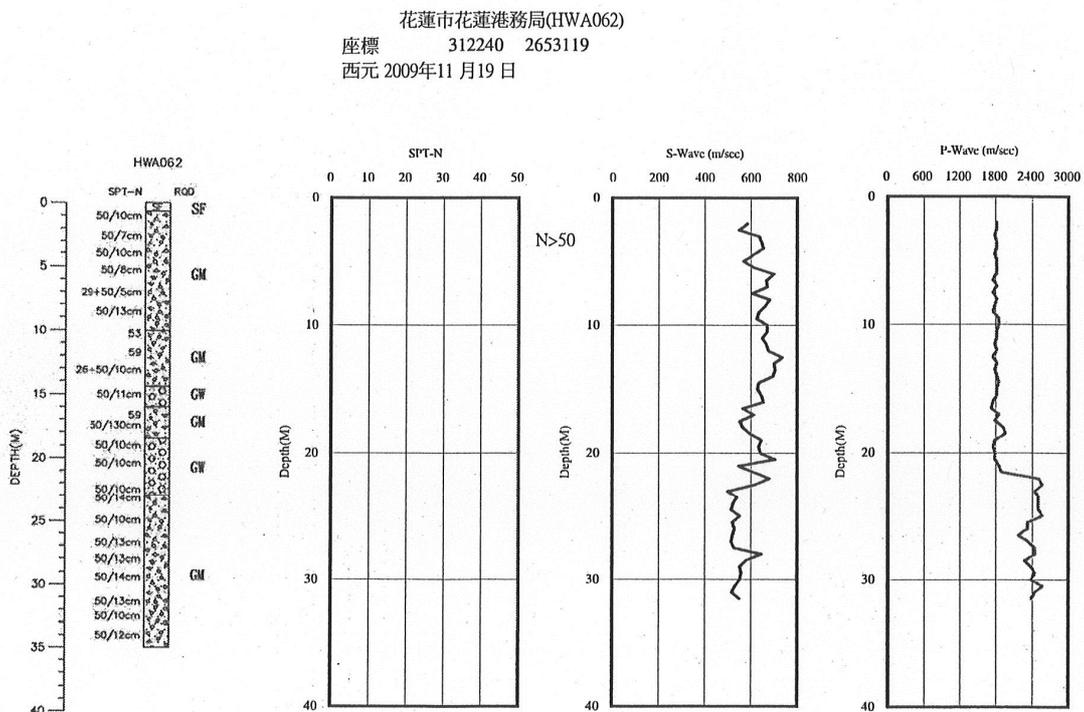


圖 3.28 花蓮港地震站土層鑽探與波速剖面圖(中央氣象局)

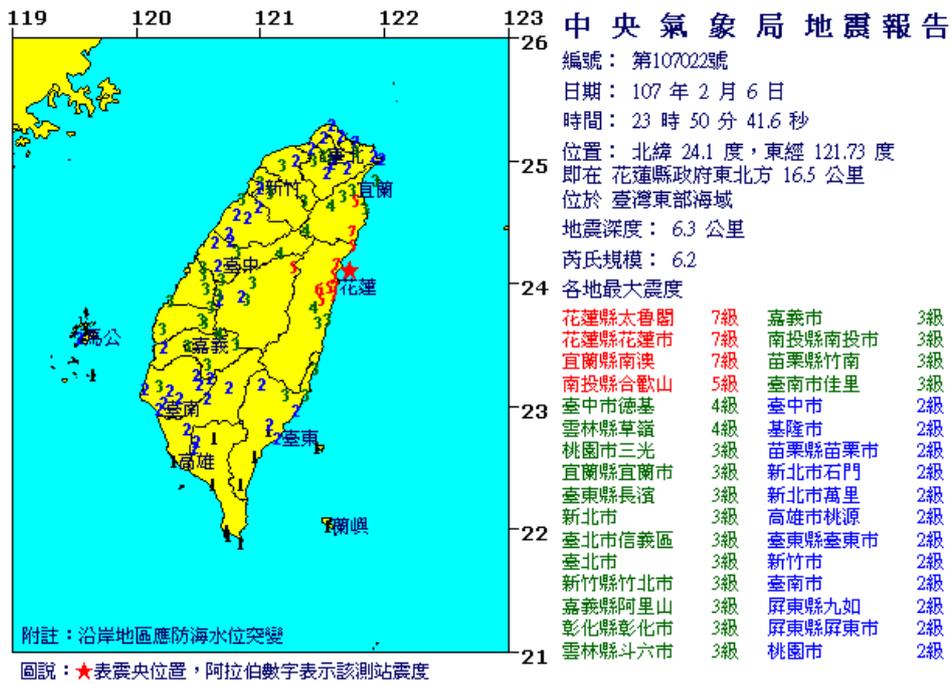


圖 3.29 民國 2018 年 2 月 6 日花蓮地震報告圖(中央氣象局)

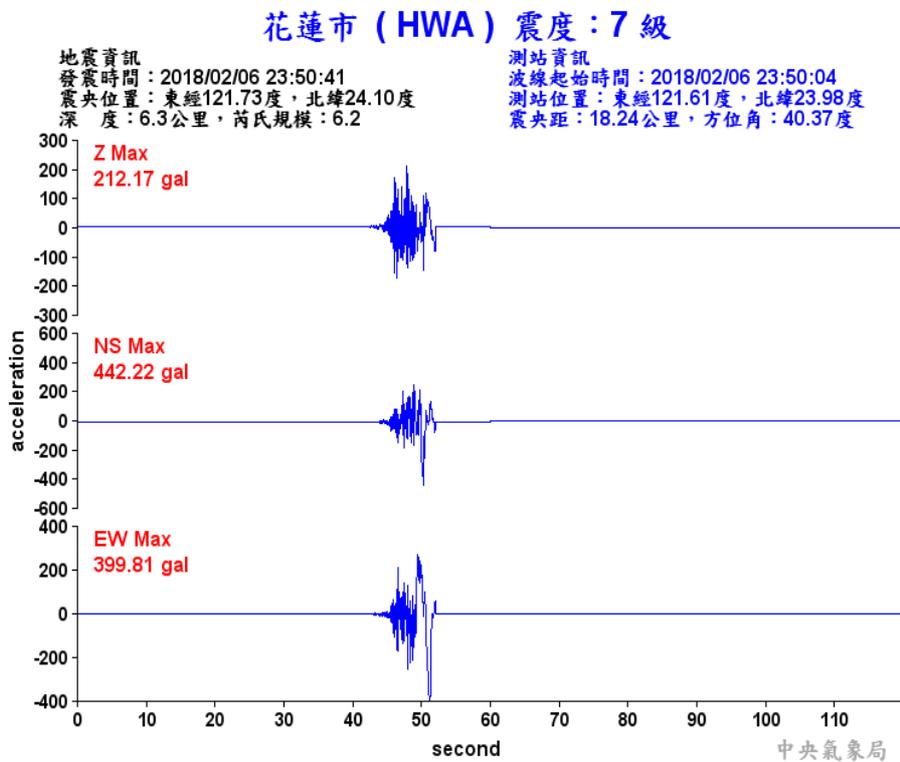


圖 3.30 民國 2018 年 2 月 6 日花蓮地震報告圖(中央氣象局)

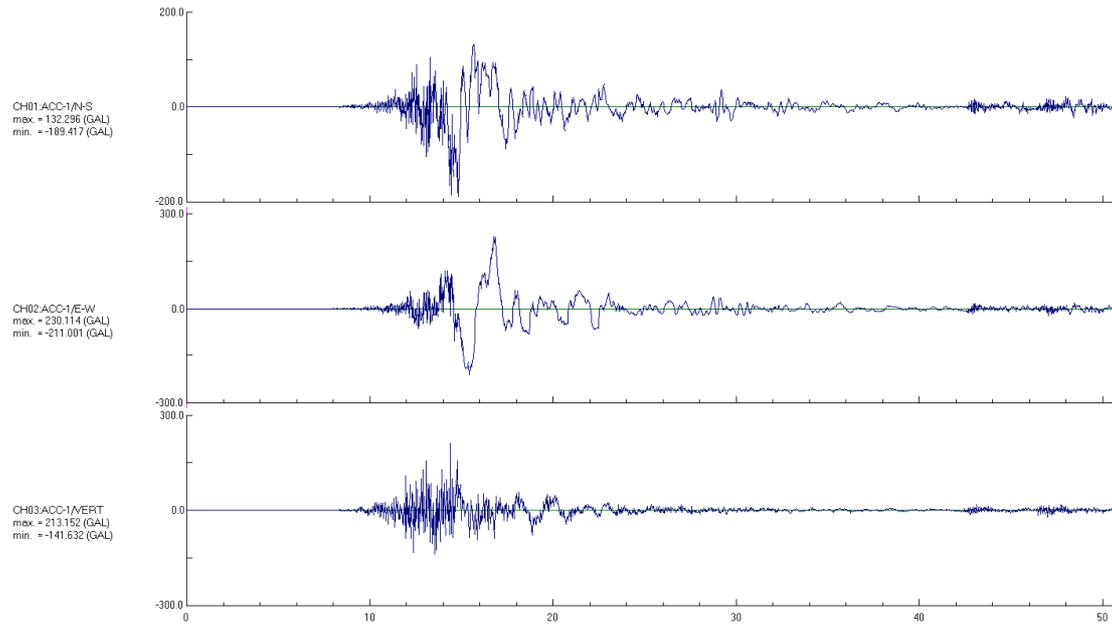


圖 3.31 花蓮港地震站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震圖(港研中心)

### 3.6.2 花蓮港區地動特性

107 年 2 月 6 日 23 時 50 分花蓮地區發生芮氏規模 6.2，港研中心於花蓮測站距離震央約 16.3 公里，測得震度為 5 級，水平兩個方向地表最大加速度 PGA 分別為 189gal 及 230gal，垂直方向最大加速度為 213gal，經積分後得到最大地表速度 PGV 與最大地表位移 PGD，如表 3-3 所示。花蓮測站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震加速度歷時如圖 3.32，速度歷時如圖 3.33，位移歷時如圖 3.34。

表 3-3 花蓮地震花蓮港測站紀錄表

測站	震度	距震央 距離(km)	延時 (sec)	方向	PGA (gal)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
花蓮港	5	16.3	70.0	NS	189.42	67.10	40.89
				EW	230.11	93.98	47.46
				UD	213.15	20.19	13.18

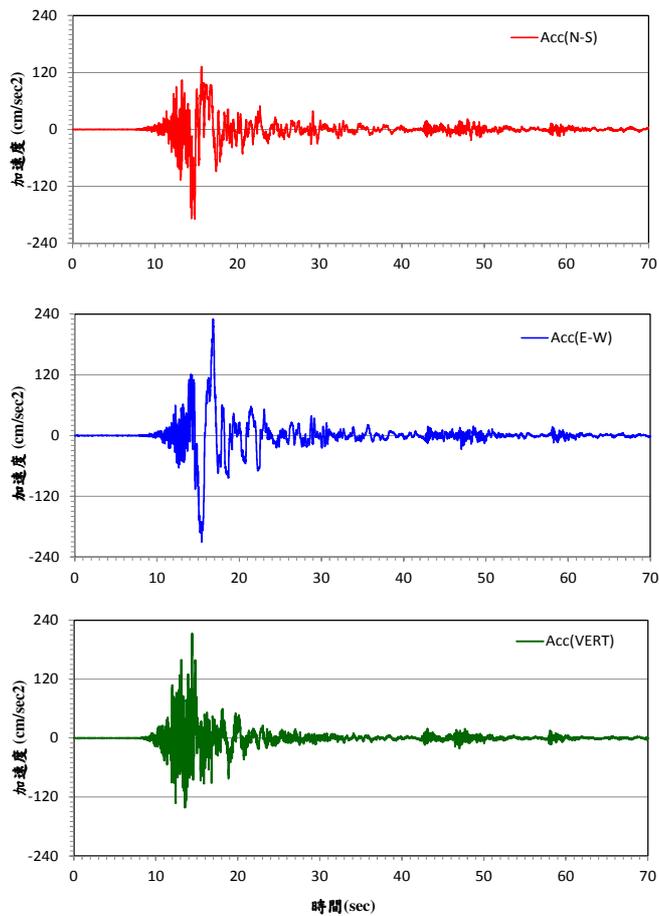


圖 3.32a 花蓮港地震站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震加速度歷時圖  
(港研中心)

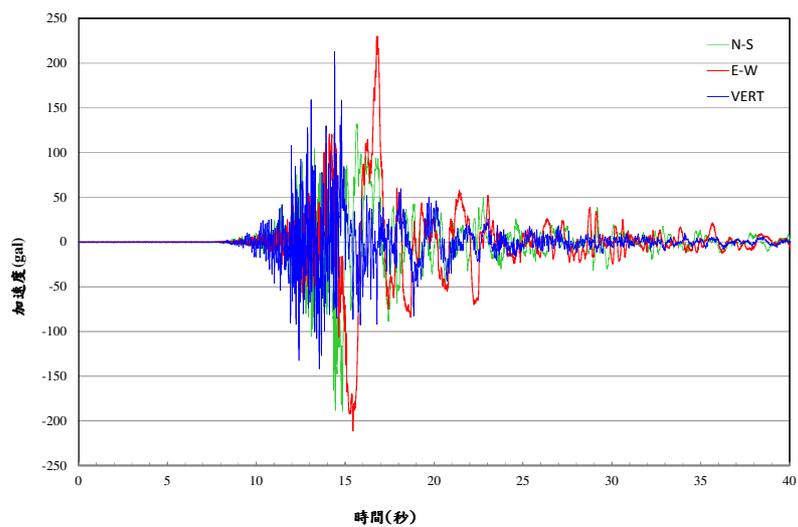


圖 3.32b 花蓮港地震站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震加速度比較圖

花蓮地震花蓮港測站速度歷時圖-(107/02/06, 23:50:48)

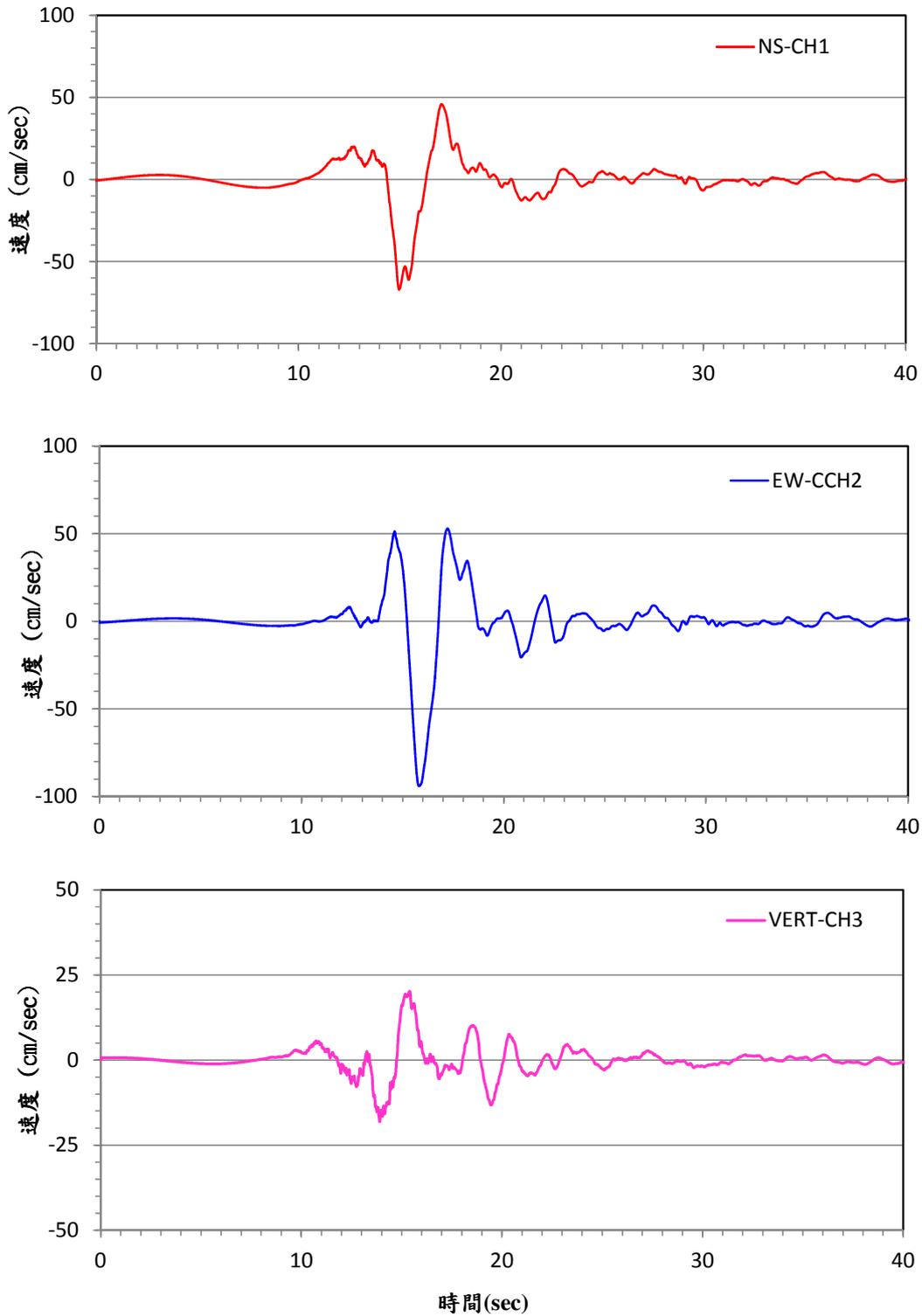


圖 3.33 花蓮港地震站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震速度圖

花蓮地震花蓮港測站位移歷時圖-(107/02/06, 23:50:48)

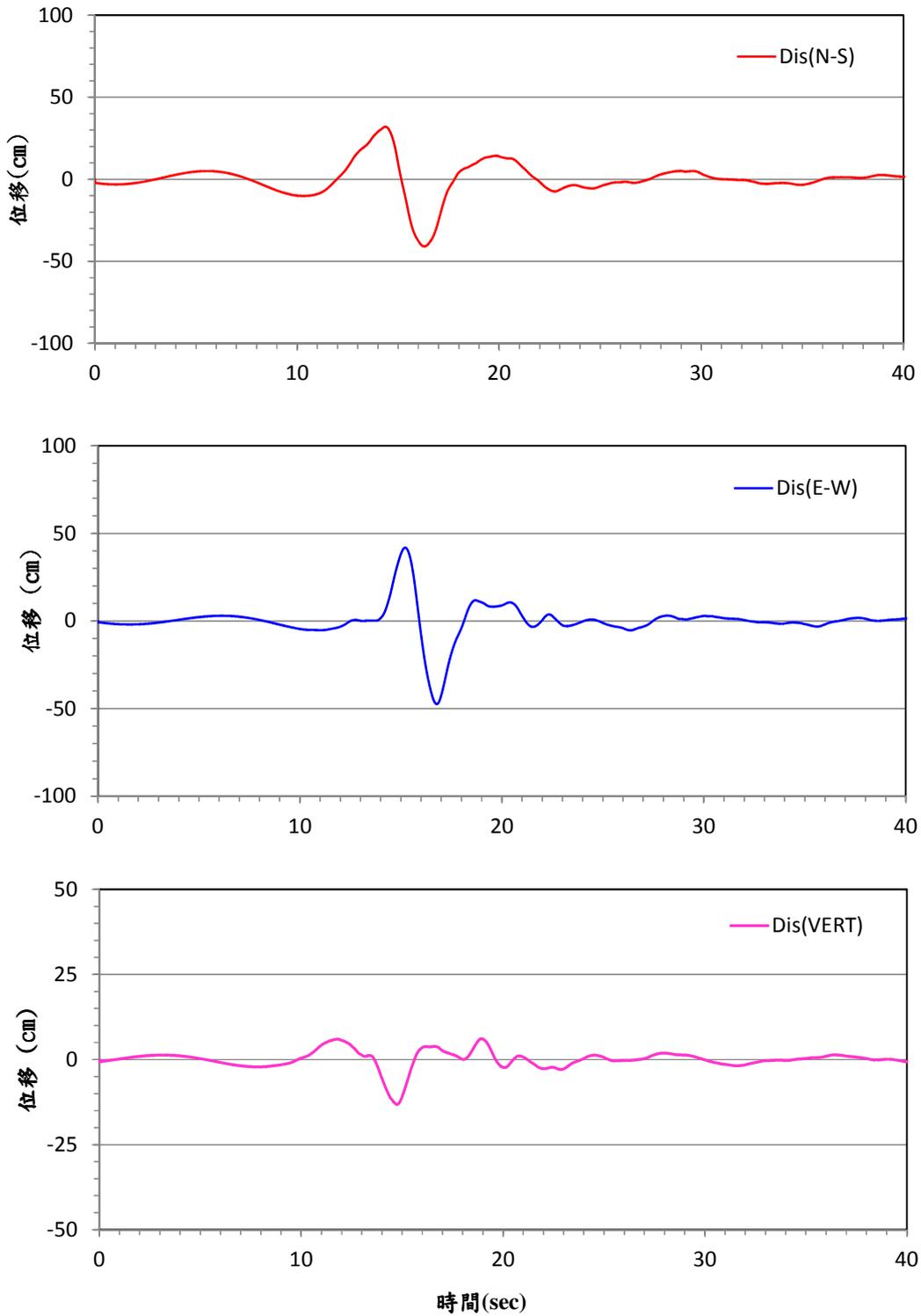


圖 3.34 花蓮港地震站 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震位移圖

### 3.6.3 花蓮港區建築物耐震設計

依建築技術規則之規範係數表，花蓮港之行政區劃分為花蓮市，其短週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數分別為 0.8 及 0.45。港區土層由地表至地下 30 公尺的土層平均剪力波速，依中央氣象局於花蓮港務局鑽探資料， $V_{S30}$  約為 606m/sec，為第一類地盤，屬堅實地盤，工址短週期設計水平譜加速度係數， $S_{DS} = S_S^D F_a$ ，所以，

$$PGA = 0.4 \times S_{DS} = 0.4 \times S_S^D \times F_a = 0.4 \times 0.8 \times 1.0 = 0.32$$

### 3.6.4 花蓮港區水平加速度反應譜

花蓮港 107 年 2 月 6 日 23 時 50 分地震之最大加速度 230g，以實測所得 0.23g 進行反應譜分析，得到水平譜加速度曲線圖，再與規範中 475 年設計地震水平譜加速度曲線圖比較，加速度反應譜如圖 3.35a 及圖 3.35b 所示，水平方向反應譜曲線在 1.3 秒及 1.7 秒以後明顯超出規範曲線，顯示該區域結構物會有損害發生。

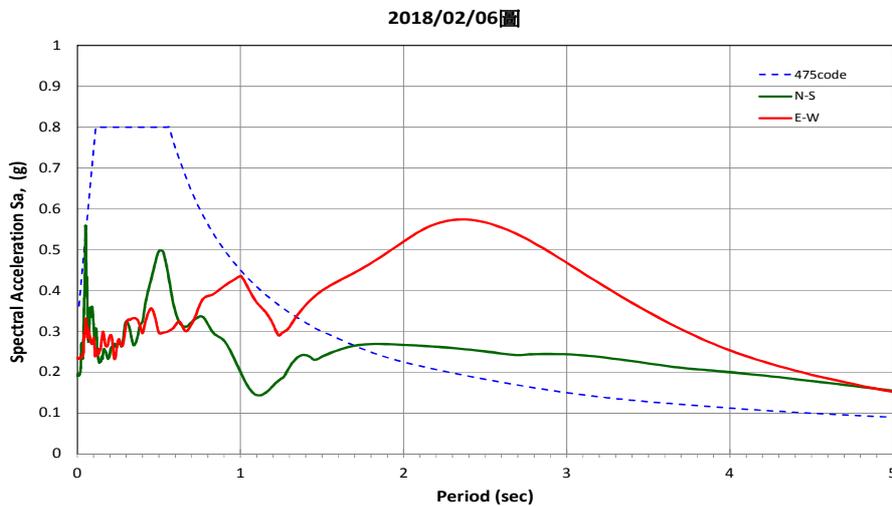


圖 3.35a 花蓮港區地震水平向反應譜比較圖

2018/02/06圖

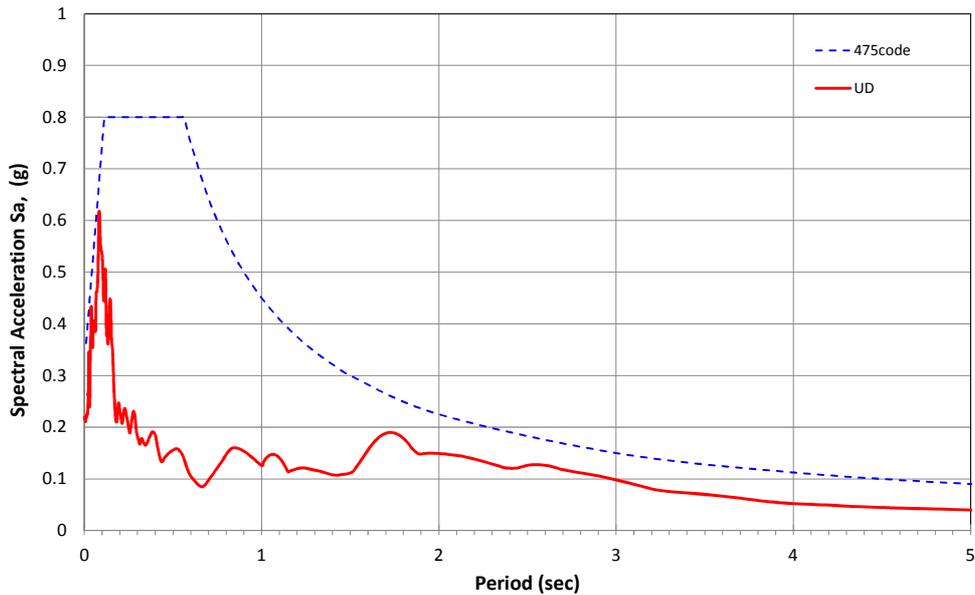


圖 3.35b 花蓮港區地動垂直向反應譜比較圖

### 3.6.5 花蓮港區土壤剪應變量

由於飽和疏鬆土層於遭受強烈地震反覆作用後，可能激發動態孔隙水壓上升造成液化現象，而造成此現象的原因是由於土壤剪應變量超過門檻值。本節以 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分發生在花蓮東部海域地震，花蓮港測站所得地表加速度進行分析，依所量測到之加速度歷時資料經一次積分後得到之速度歷時資料，再與測站之土壤剪力波速演算得到土壤之剪應變量，如 3-17 式，最後依其剪應變量，進一步判別是否達激發動態孔隙水壓之門檻值。

#### 1. 剪應變推導

依據 Richards et al. (1970)<sup>[12]</sup> 的建議，對於(一根)桿件的 P 波質點速度的計算如下所示：

$$\dot{u} = \frac{\sigma_x v_c}{E} \dots\dots\dots (3-15)$$

式中  $\dot{u}$  = 平行波傳方向的質點速度， $\sigma_x$  = x 方向的正向應力，

$v_c$  = P 波的速度， $E$  = 桿件的楊氏係數

相對於在水平平面剪力波傳的計算如下：

$$\dot{v} = \frac{\tau v_s}{G} \dots\dots\dots (3-16)$$

式中  $\dot{v}$  = 垂直方向質點速度

$\tau$  = 剪應力， $v_s$  = 剪力波速， $G$  = 剪力模數 (shear modulus of media)

因  $\tau = G\gamma \rightarrow$  由 5-2 式得  $\dot{v} = \frac{\tau v_s}{G} = \frac{G\gamma v_s}{G} = \gamma v_s$

所以， $\gamma = \frac{\dot{v}}{v_s} \dots\dots\dots (3-17)$

式中  $\gamma$  = 剪應變， $\dot{v}$  = 垂直向質點速度， $v_s$  = 土壤剪力波速

## 2. 土壤剪力波速

現地的動態液化試驗，用來計算動態應變的波傳播方法已廣泛用於地震工程 (White 1965; Richart 等, 1970)，而簡易評估土層剪應變量的方法，就是利用現地的平面剪力波法 (Plane Shear Wave Method, PSWM) 來進行，平面剪力波法是假設地震波以向上傳播之剪力波在土樣內傳遞，其剪應變為

$$\gamma_{yz} = \frac{PV_y}{V_s} \dots\dots\dots (3-18)$$

式中  $PV_y$  = 水平土壤速度，

$V_s$  = 剪力波速度。

量測剪力波速方法大致可分為破壞性與非破壞性，破壞性為採取現地不擾動土樣進行室內試驗，非破壞性是於野外進行現地試驗方法，現

地試驗又可分孔內波速試驗法(含下孔法、跨孔法、懸垂式 P-S 波探測法)、表面波譜試驗法(SASW)與多頻道表面波譜試驗法(MASW)等。剪力波速可採用國震中心與中央氣象局合作調查臺灣地區自由場強震站之剪力波速與 N 值及深度相關建立之迴歸經驗式進行計算， $V_s 30 = 124.964 \times SPTN^{0.247}$ 。

式中， $V_s 30$ 為地表下 30 公尺內之土層平均剪力波速，

N 為標準貫入試驗

### 3. 剪應變量門檻值

對於預測孔隙水壓力累積和飽和非粘性土壤液化的問題，Dobry 於 1982 年證實了反復應變方法將比目前的反復應力方法有明顯的優勢，本節參考 Dobry 等學者於 1982 提出研究的結果敘述如下：

首先 Sliver and Seed，於 1971 年實驗表明，是反復剪應變(cyclic shear strain,  $\gamma_c$ )  $\gamma_c = \frac{\tau_c}{G}$  (G 為剪力模數) 控制乾砂的密度，而不是反復剪應力(cyclic shear stress,  $\tau_c$ )。應變控制的反復簡單剪力試驗通過 Sliver and Seed 在乾 20 號砂砂上進行，使用一定範圍的相對密度  $D_r$ 、覆土壓力  $\sigma'_0$  和反復剪應變( $\gamma_c$ ) 發現，循環次數取決於  $D_r$  和  $\gamma_c$ ，獨立於  $\sigma'_0$ ，並且與  $\tau_c$  和  $G$  無關。這些測試的一些結果，如圖 3.36 所示。基於 Sliver and Seed 等人研究的結果，Martin et al 於 1975 成功開發了一個反復應變有效應力的模型用於預測不排水應力控制試驗中飽和砂中孔隙水壓力的累積，這些發現強烈地表明，是反復剪應變( $\gamma_c$ ) 控制砂中的稠密(Densification)和液化(Liquefaction)，而不是反復剪應力( $\tau_c$ )。

基於乾砂反復試驗的結果，Drnevich 和 Richart 於 1970 及 Youd 於 1972 和 Pyke 於 1973 得出結論，提出反復剪力的門檻值(threshold cyclic shear,  $\gamma_t$ )，約為  $10^{-2}\%$ ，低於此值時，不會發生 densification(稠密)現象(如圖 3.37)。反復剪力門檻值( $\gamma_t$ )約為  $10^{-2}\%$  的值也與圖 3.36 的乾砂實驗結果一致。最初由 Dobry 和 Swiger 於 1979 年提出的石英

砂簡單顆粒模型的理論研究，詳細介紹了該應變門檻值，當有效圍壓於 24 kPa 和 192 kPa 之間時，反復剪力門檻值( $\gamma_r$ )介於  $1 \times 10^{-2} \%$  至  $4 \times 10^{-2} \%$  之間，顯示孔隙水壓力累積的門檻值對於液化預測的重要。

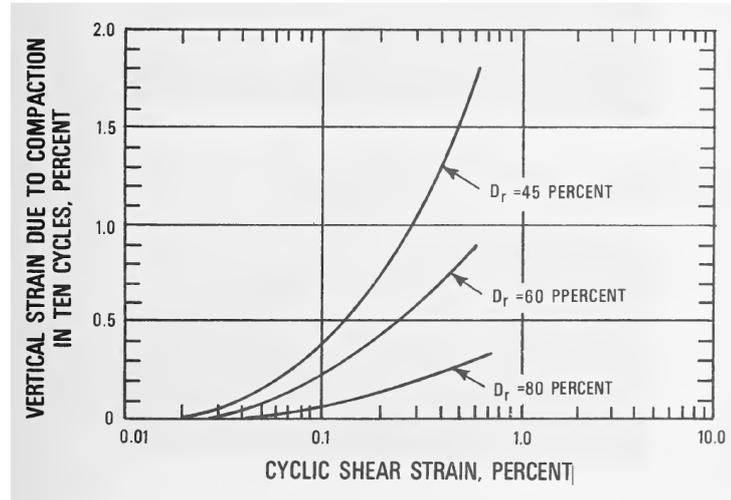


圖 3.36 乾砂之單剪儀試驗反復應變控制圖(Silver and Seed, 1971)

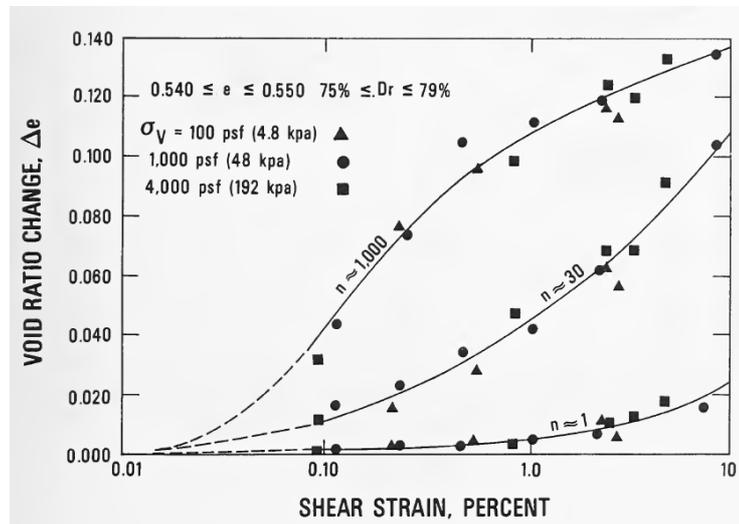


圖 3.37 孔隙比變化與反復次數之反復剪應變圖(Youd, 1972)

最後 Dobry 和 Ladd 於 1982 使用 1 號砂分階段應變控制反復三軸試驗結果(如圖 3.38 所示)，圖中這些小應變測量結果，在  $n = 10$  個循

環後，當  $\frac{\Delta u}{\sigma_3} = 0$  時，圖 3.38 得到了一個反復剪力門檻值( $\gamma_i$ )，即是  $\gamma_i = 10^{-2}$  %。由圖 3.38 得到的應變門檻值與 Dobry 和 Ladd 於 1980 年的圖非常一致，雖然它包括在兩個不同的砂土上進行的循環測試的結果，應變門檻值  $\gamma_i = 10^{-2}$  % 是該曲線的一個重要特徵，由圖 3.38 提供了孔隙水壓力累積清晰一致的圖像，這個方法比在相同砂土上採用應力控制試驗可以更簡單的獲得數據。

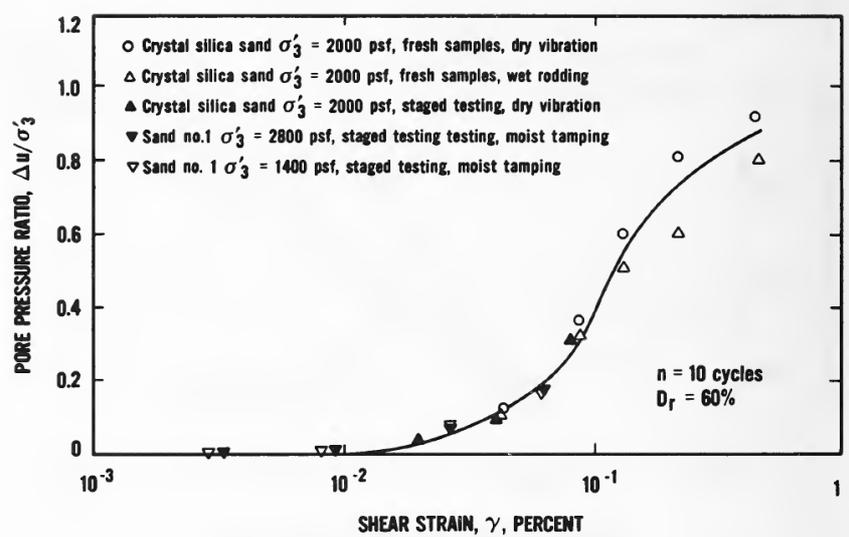


圖 3.38 飽和砂土在三軸應變控制試驗之孔隙水壓力量測圖(Dobry and Ladd, 1980)

#### 4. 花蓮港實測地震土壤剪應變量

本節依 3-17 式進行計算花蓮港實測地震土壤剪應變量，垂直向質點速度以測站實測地表加速度(圖 3.39)經一次積分後的速度歷時值代入(圖 3.40)，土壤剪力波速依氣象局於花蓮式測站 HWA062 之土壤平均剪力波速(S-Wave)約為 606m/sec 代入，土壤剪應變量經計算後如圖 3.41，由圖 3.41 顯示剪應變量已超出激發動態孔隙水壓之門檻值 ( $10^{-2}$  %) 許多，評估會有動態孔隙水壓激發產生。

花蓮港2018年2月6日地震地表加速度

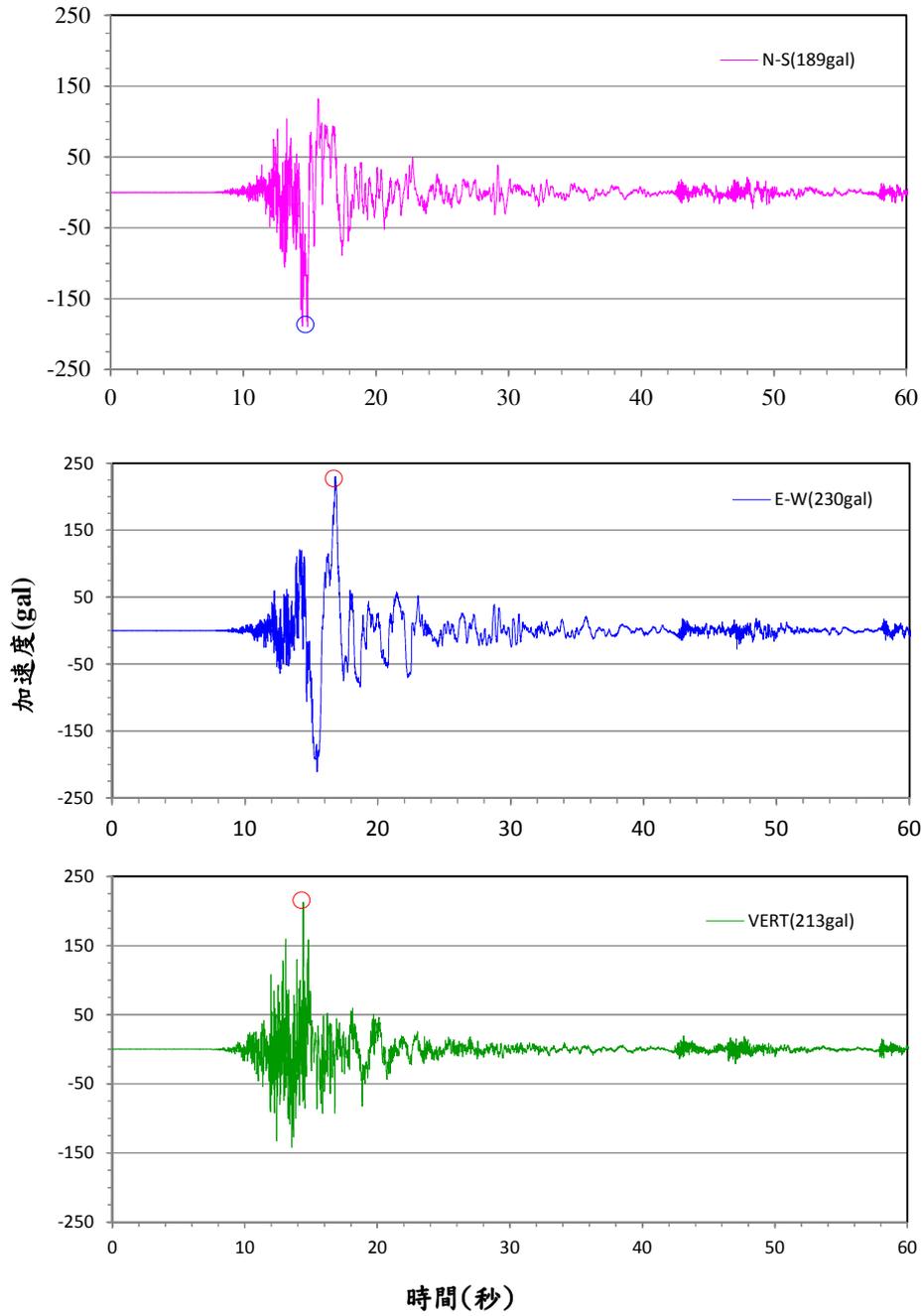


圖 3.39 花蓮港實測地震地表加速度歷時圖

花蓮港2018/02/06地震速度歷時圖-(107/02/06, 23:50:48)

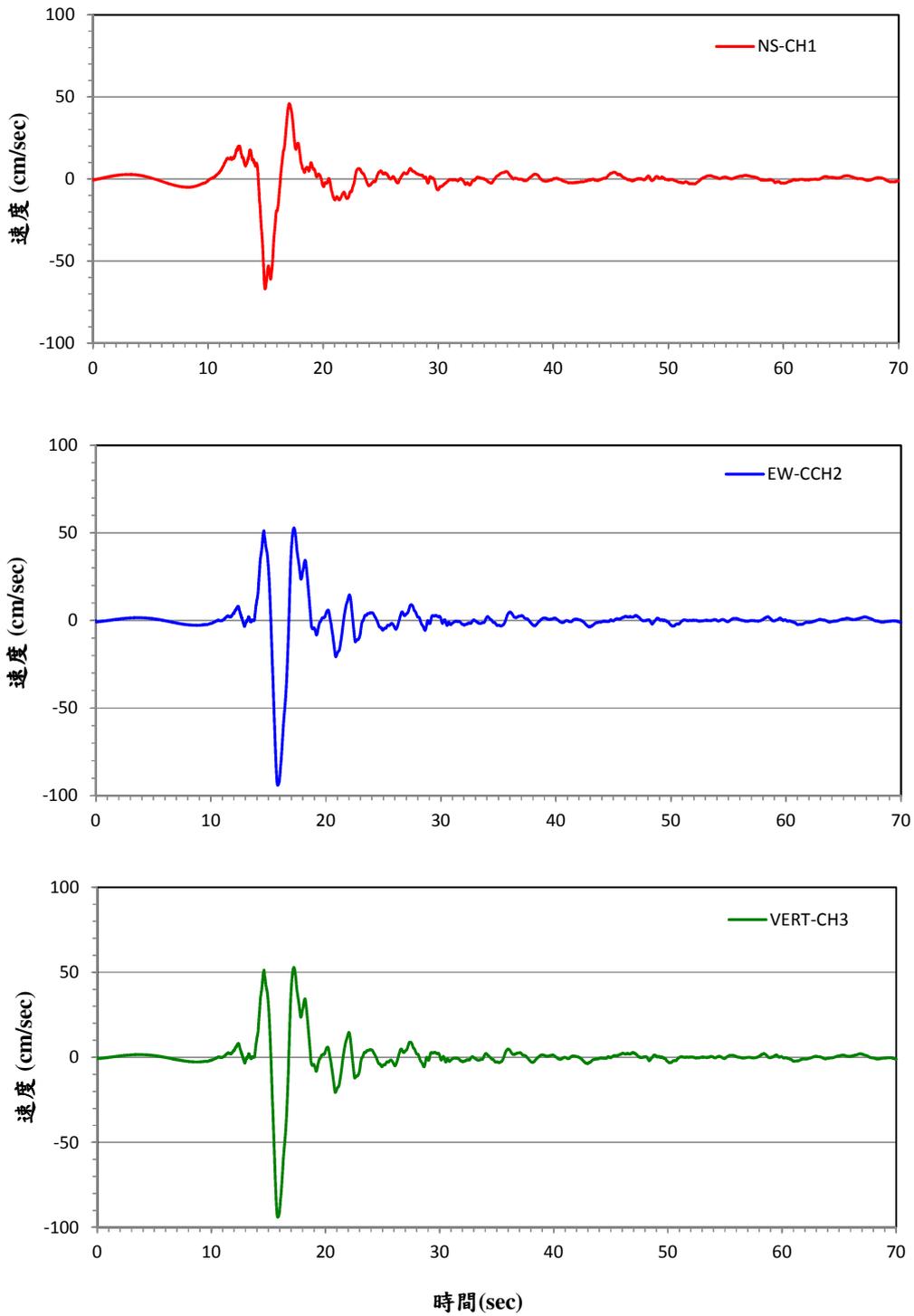


圖 3.40 花蓮港實測地震地表速度歷時圖

花蓮港2018/02/06地震剪應變量圖-(107/02/06, 23:50:48)

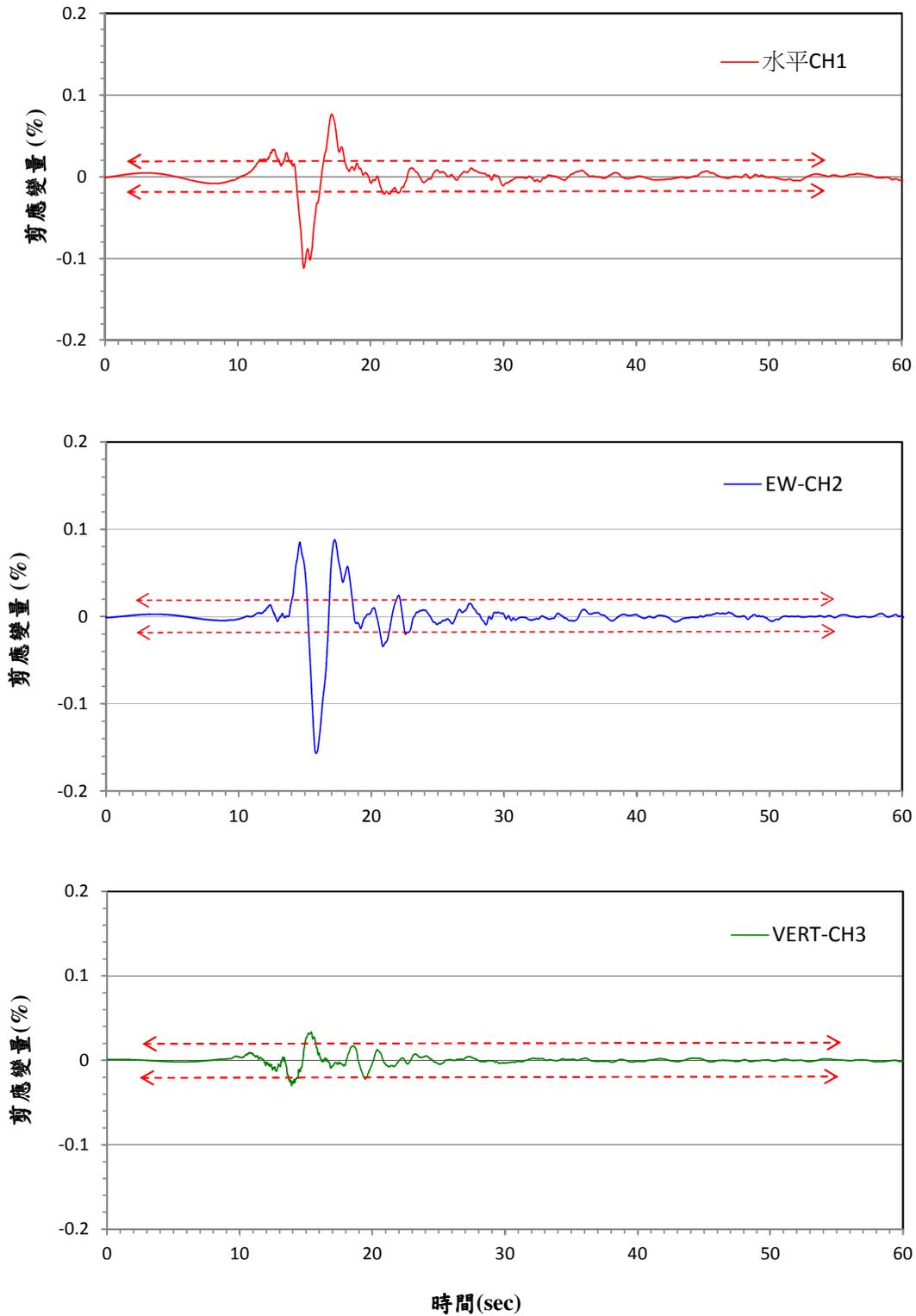


圖 3.41 花蓮港實測地震土層剪應變量歷時圖

### 3.6.6 花蓮港區地震災況

民國 107 年 2 月 6 日 23 時 50 分花蓮地區發生芮氏規模 6.2 地震，震央位於花蓮縣政府東北方 16.5 公里，深度 6.3 公里，最大震度為 7 級，氣象局於花蓮市測站震度 7 級，地表最大加速度 442gal，此次地震造成花蓮地區許多災害與傷亡，例如大樓倒塌，道路龜裂，花蓮港碼頭後線龜裂下陷，河床噴砂液化情形，港研中心於花蓮測站距離震央約 16.3 公里，此次地震監測到水平兩個方向地表最大加速度分別為 189gal 及 230gal，災害發生後港研中心邱主任率同仁前往花蓮港勘災與蒐集資料，如圖 3.42~圖 3.45。

依港研中心於花蓮港#25 碼頭進行 4 孔鑽探結果顯示，自地表至地下 10m 深度，除了表層有 25 公分厚混凝土外，大多為礫石層夾砂土層，如圖 3.46~圖 3.50。



圖 3.42 花蓮港#23 與#24 碼頭面後線龜裂圖

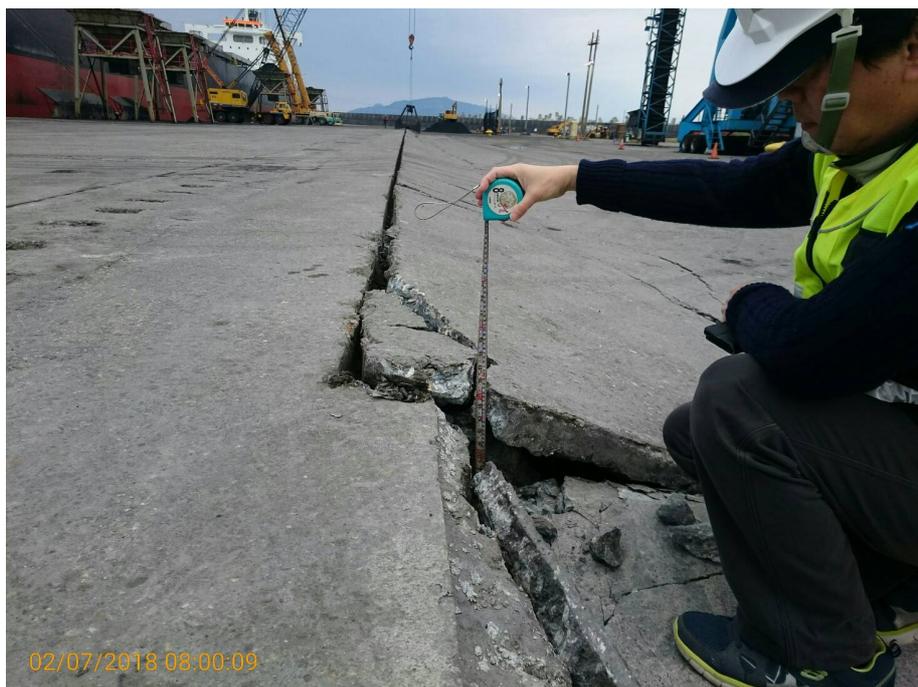


圖 3.43 花蓮港#24 碼頭面龜裂下陷圖



圖 3.44 花蓮港#24 與#25 碼頭面龜裂下陷圖



圖 3.45 花蓮港#24 碼頭面龜裂下陷圖

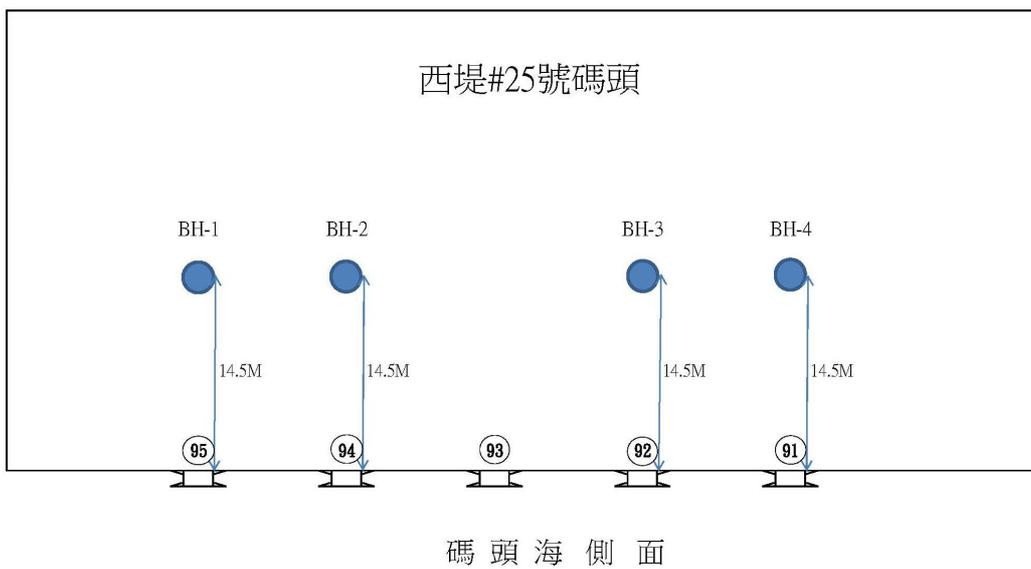


圖 3.46 花蓮港#25 碼頭地質鑽探平面示意圖

經濟部中央地質調查所  
鑽孔地質柱狀圖

工程名稱：花蓮港碼頭構造物沉箱鑽探調查  
地點：花蓮港25號碼頭  
鑽孔編號：BH-1  
鑽孔標高：1.00 M  
地下水位：0.00 M  
專業技師：王豐仁  
輸入人員：洪建國  
日期：1060930~1061001  
深度：10.00 M  
座標系統：TW97  
座標 N：2652342.00  
座標 E：313745.00  
鑽探公司：洪碩科技工程有限公司

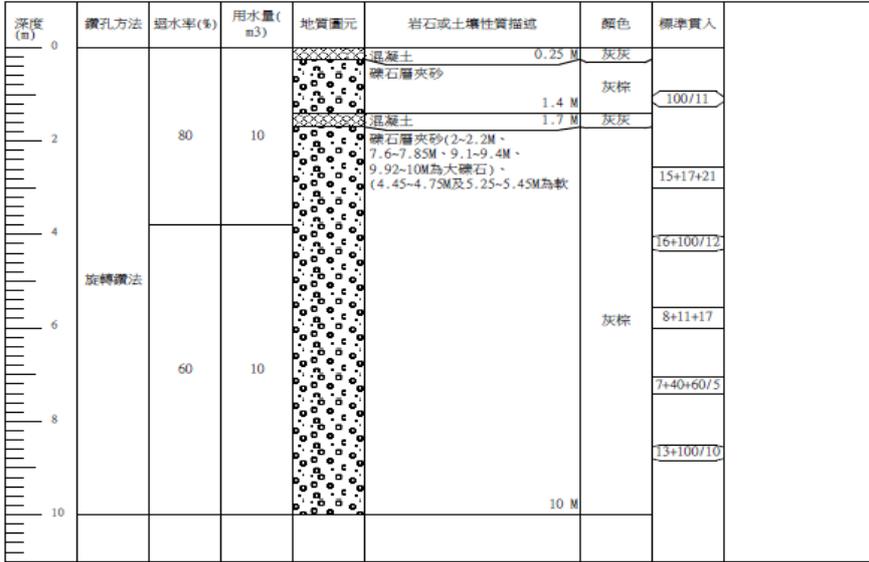


圖 3.47 花蓮港#25 碼頭地質鑽探 BH-1 圖

經濟部中央地質調查所  
鑽孔地質柱狀圖

工程名稱：花蓮港碼頭構造物沉箱鑽探調查  
地點：花蓮港25號碼頭  
鑽孔編號：BH-2  
鑽孔標高：1.00 M  
地下水位：0.00 M  
專業技師：王豐仁  
輸入人員：洪建國  
日期：1061002~1061003  
深度：10.00 M  
座標系統：TW97  
座標 N：2652359.00  
座標 E：313751.00  
鑽探公司：洪碩科技工程有限公司

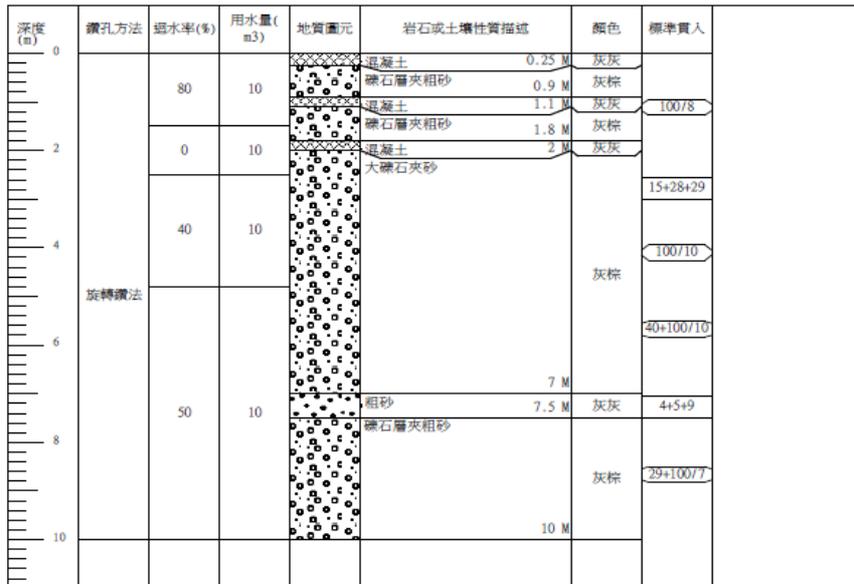


圖 3.48 花蓮港#25 碼頭地質鑽探 BH-2 圖

經濟部中央地質調查所  
鑽孔地質柱狀圖

工程名稱：花蓮港碼頭構造物沉箱鑽探調查  
地點：花蓮港25號碼頭  
鑽孔編號：BH-3  
鑽孔標高：1.00 M  
地下水位：0.00 M  
專業技師：王豐仁  
輸入人員：洪建國  
日期：1061004-1061005  
座標系統：TW97  
座標 N：2652408.00座標 E：313766.00  
鑽探公司：洪碩科技工程有限公司

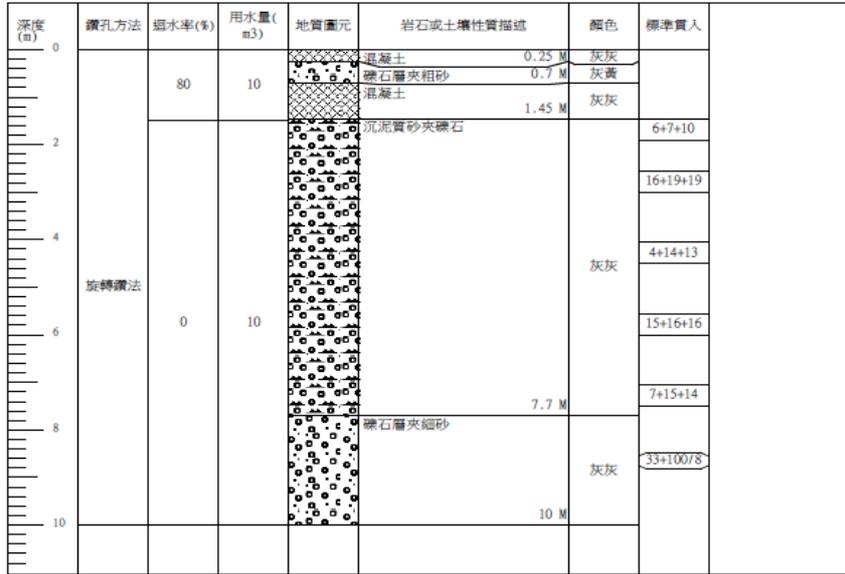


圖 3.49 花蓮港#25 碼頭地質鑽探 BH-3 圖

經濟部中央地質調查所  
鑽孔地質柱狀圖

工程名稱：花蓮港碼頭構造物沉箱鑽探調查  
地點：花蓮港25號碼頭  
鑽孔編號：BH-4  
鑽孔標高：1.00 M  
地下水位：0.00 M  
專業技師：王豐仁  
輸入人員：洪建國  
日期：1061008-1061009  
座標系統：TW97  
座標 N：2652432.00座標 E：313775.00  
鑽探公司：洪碩科技工程有限公司



圖 3.50 花蓮港#25 碼頭地質鑽探 BH-4 圖

### 3.7 花蓮港地震資料時頻分析

時頻分析(Time-Frequency Analysis)是逸奇科技公司研發的 Visual Signal 訊號分析軟體工具<sup>[29]</sup>，TFA 模組群它提供了 Short-Term Fourier Transform(短時傅立葉轉換)、Morlet Transform(小波轉換)及 Hilbert Spectrum(計算每個時間點的瞬時頻率)等時頻分析的計算，本節以該公司提供的軟體，進行分析 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分發生在花蓮東部海域地震，花蓮港地震站監測的資料，如圖 3.51、圖 3.54 及圖 3.57 所示，應用 Visual Signal 軟體，以 EMD (Empirical Mode Decomposition \_ Huang et al., 1998)模組先行作經驗模態分解，從而可得其隱模態函數組 (IMFs\_Intrinsic Mode Functions)，再透過 HHT (Hilbert-Huang Transform \_ Huang et al., 1998)模組作時頻分析並計算邊際頻譜 (marginal spectrum)，進而可得相關之時頻圖(圖 3.52、圖 3.55 及圖 3.58)及能譜圖(圖 3.53、圖 3.56 及圖 3.59)所示，由圖可知地震波振盪主頻約為 0.34Hz 之低頻。

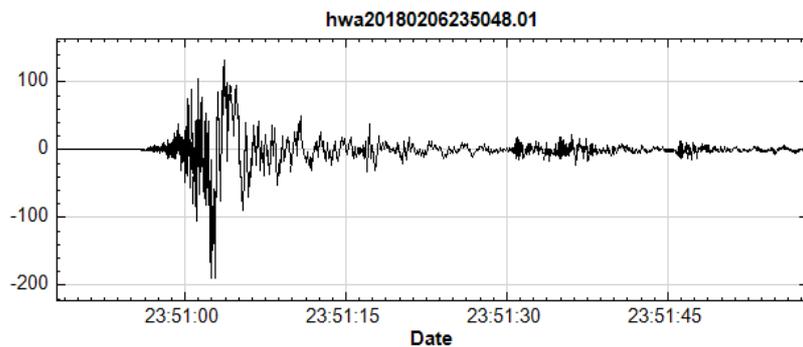


圖 3.51 花蓮港地震站水平加速度歷時圖(ch1)

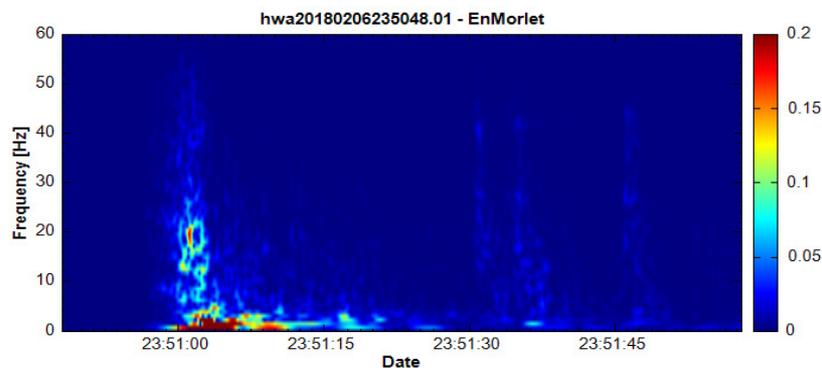


圖 3.52 花蓮港地震站能譜圖(ch1)

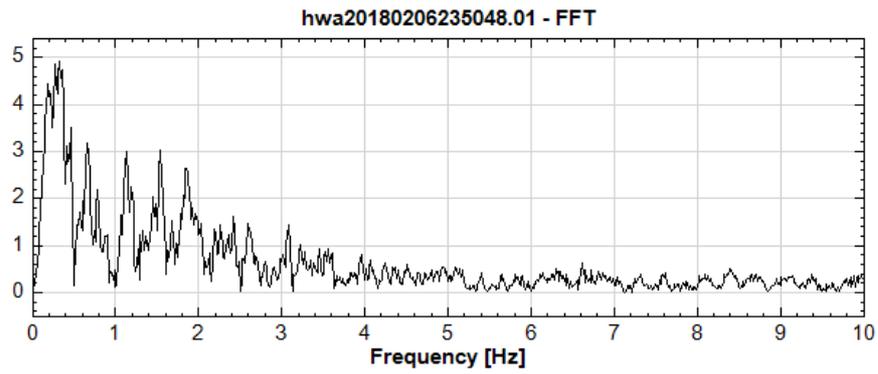


圖 3.53 花蓮港地震站傅氏頻譜圖(ch1)

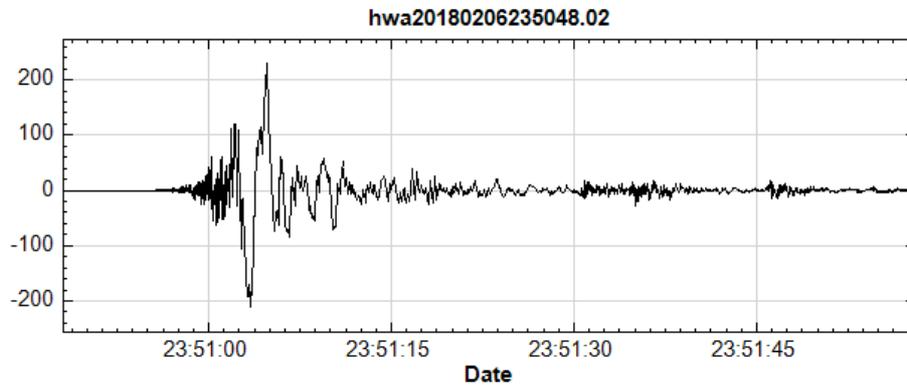


圖 3.54 花蓮港地震站水平加速度歷時圖(ch2)

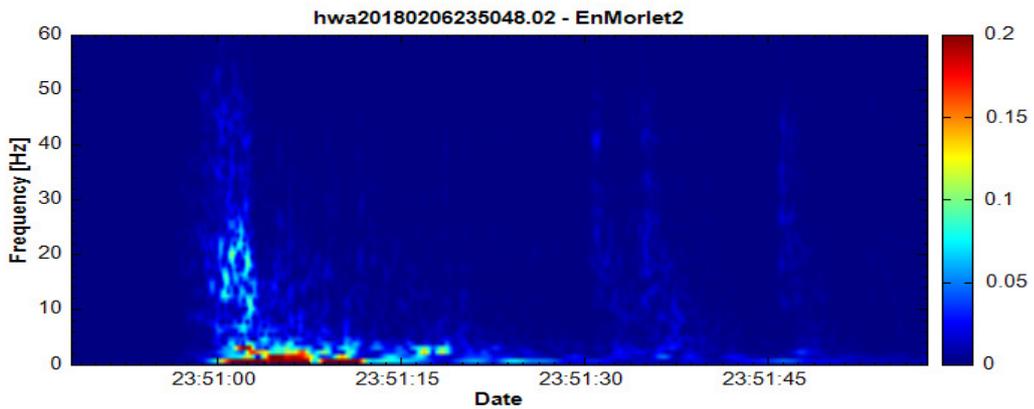


圖 3.55 花蓮港地震站能譜圖(ch2)

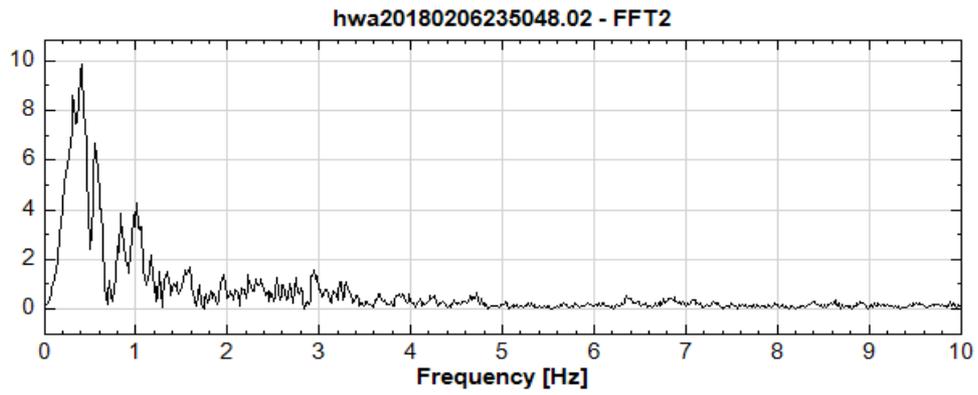


圖 3.56 花蓮港地震站傅氏頻譜圖(ch2)

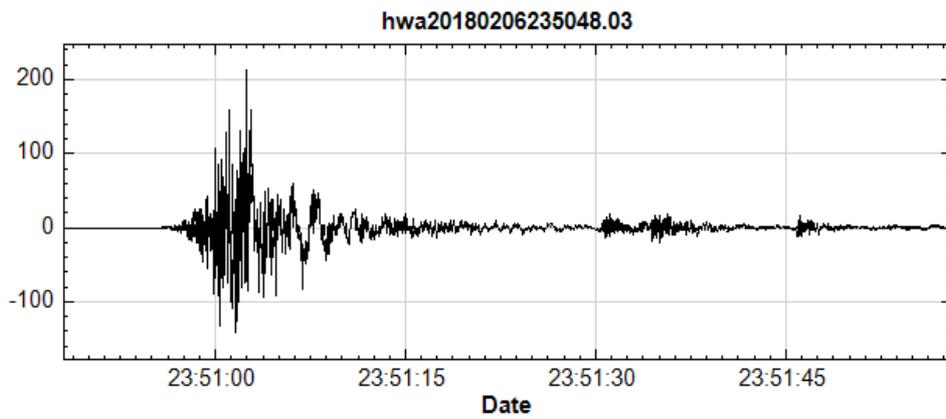


圖 3.57 花蓮港地震站水平加速度歷時圖(ch3)

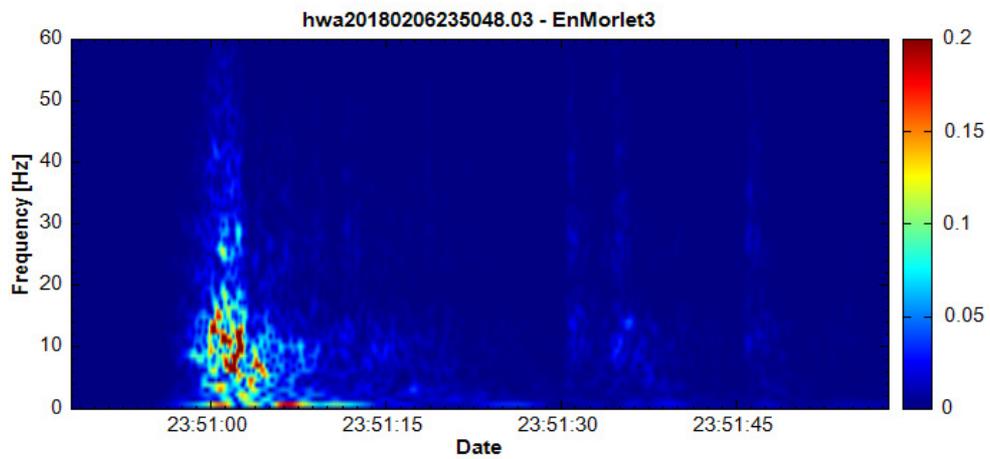


圖 3.58 花蓮港地震站能譜圖(ch3)

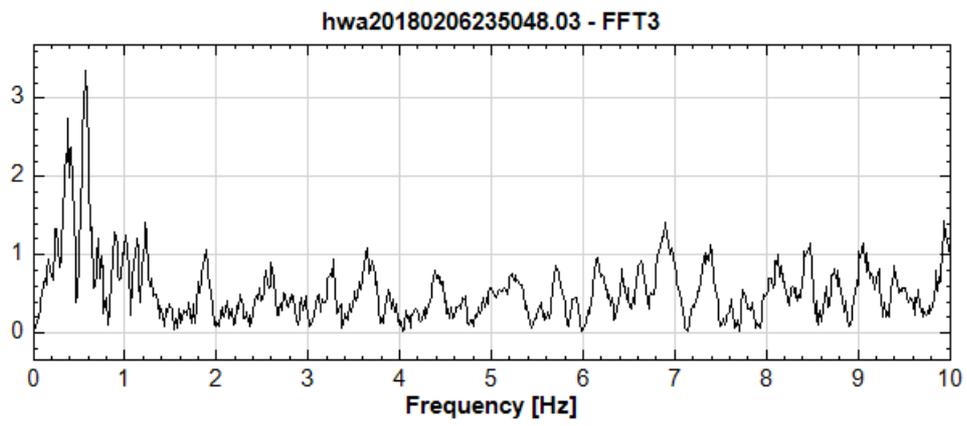


圖 3.59 花蓮港地震站傅氏頻譜圖(ch3)

## 第四章 嘉南地區與港區下陷監測

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，臺灣西南海岸港灣地區之地層下陷亦然，故本文僅就超抽地下水引起之地層下陷分析方法，簡述如下：

### 4.1 地層下陷分析方法

因地下水位下降造成之地層下陷，其下陷量大小與土壤種類有關。砂質土層的沉陷速率較快但沉陷量小；而粘性土層之壓縮則較具延滯性且沈陷量也較大。

因地下水位下降所引致的地表壓密沉陷之分析方法大致可區分為兩類<sup>[42]</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。

#### 4.1.1 Terzaghi 壓密理論

一般分析地層下陷問題是以 Terzaghi(1943)之單向壓密理論為基礎，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。

依據 Terzaghi 建議，正常壓密土壤之極限沉陷量之計算，如下所示。

$$S_u = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log\left(\frac{P'_0 + \Delta\sigma'_{vo}}{P'_0}\right) \dots\dots\dots(4-1)$$

式中， $S_u$ ：極限沉陷量

$C_c$ ：壓縮指數

$e_0$ ：初始孔隙比

$P'_0$ ：初始壓密應力

$H$ ：土層厚度

$\Delta\sigma'_{vo}$ ：有效應力增加量

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots(4-2)$$

式中， $u$ ：孔隙水壓

$C_v$ ：壓密係數

$t$ ：時間

$z$ ：深度

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

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

式中， $U(t)$ ：平均壓密度，定義如式(3-4)

$T_v$ ：時間因數

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

而式(2-3)中之時間因數  $T_v$  與時間  $t$  之關係如下所示：

$$T_v = \frac{C_v \times t}{H_{dr}^2} \dots\dots\dots (4-5)$$

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：

$$S(t) = S_u \times U(t) \dots\dots\dots (4-6)$$

#### 4.1.2 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：

$$\left. \begin{aligned} G\nabla^2 S_x + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - \frac{\partial \rho}{\partial x} &= 0 \\ G\nabla^2 S_y + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \frac{\partial \rho}{\partial y} &= 0 \\ G\nabla^2 S_z + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - \frac{\partial \rho}{\partial z} &= 0 \\ k\nabla^2 \rho &= \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + n\beta \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-7)$$

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(6-7)簡化如下：

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

$$-k \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 S_z}{\partial z \partial t} + n\beta \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots(4-8)$$

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：

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

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  $H_d = H/2$

## 4.2 監測儀器規劃

地下水壓的大小、水位之深度及變化皆對地層下陷有極大影響，且用來量測水壓大小之水壓計必須埋設在透水性良好之受壓水層裡，並在其上下不透水層以皂土進行封層，才能量得正確水壓。

埋設土層分層沉陷計之深度需依各監測站地質狀況而定，即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。

電子式、開放式水壓量測及土層分層沉陷量測可採用手動及自動記錄，其系統儀器架構流程如圖 4.1 所示。

### 4.2.1 電子式水壓計

本水壓計採用日本 DOBOKU 生產，型式為電阻式  $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $10\text{kg}/\text{cm}^2$  及  $2\text{kg}/\text{cm}^2$  耐水壓型水壓計。

- (1)因本地區位於海濱附近及鑽孔深度為 200 m，因此施鑽時先採用皂土保護孔壁以防崩孔，待鑽探至預定深度後再以清水置換，直到迴水無皂土成份，再開始安裝儀器。
- (2)水壓計於地面上先行接線，並於電纜線上註明安裝深度位置，並於接線位置確實做好防水措施，並先行飽和量測初值。
- (3)待鑽探完成後將預先準備好水壓計，放入孔內，並量測其水壓值是否合理再開始回填水洗石，並用 6 分 PVC 管搗實工作及量測其回填深度，待回填至欲灌漿(封層)位置，利用 PVC 管將水泥及皂土混合液以灌漿機打入預定位置，然後再回填七厘石。
- (4)第二組及第三組水壓計皆重覆(2)、(3)步驟，直到回填至表面為止，再將電纜線連線至觀測箱內，其安裝示意圖如圖 4.2 所示。

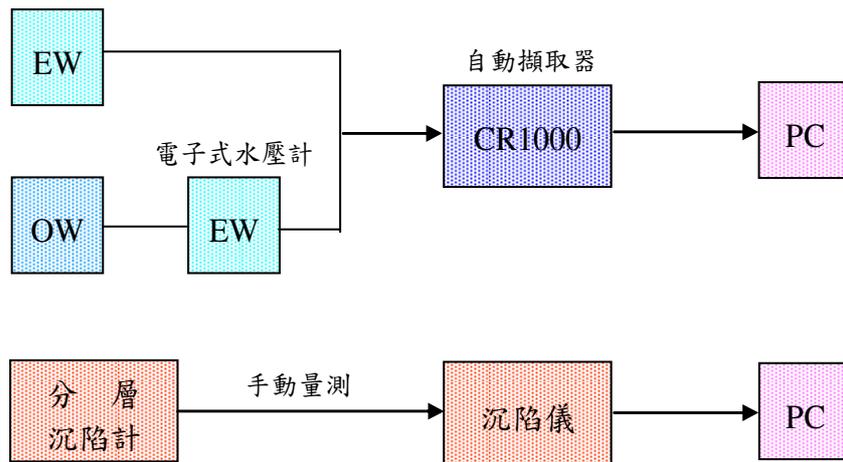


圖 4.1 系統儀器架構流程圖

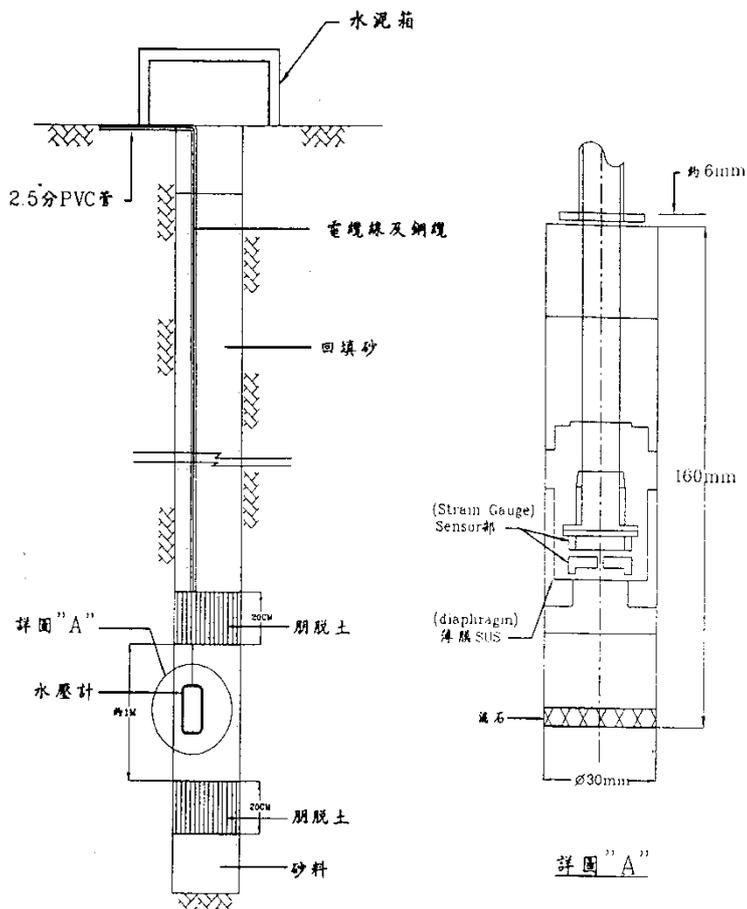


圖 4.2 電子式地下水壓計安裝示意圖

#### 4.2.2 開放式水壓計

- (1)安裝方式與電子式水壓計安裝步驟相同。
- (2)當開放式水壓計完成保護措施後，先用水位指示器量測其自然水頭高，然後再將電子式水壓計安裝於水頭水位下 10 m 處，再將電纜線連線至觀測箱內便完成，其安裝示意圖如圖 4.3 所示。

#### 4.2.3 地盤分層沉陷觀測井

本沉陷井採用日本 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 英寸井管，為耐腐蝕及酸鹼材質。

- (1)鑿井到達預定深度 210 m 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 4.4、4.5 所示。

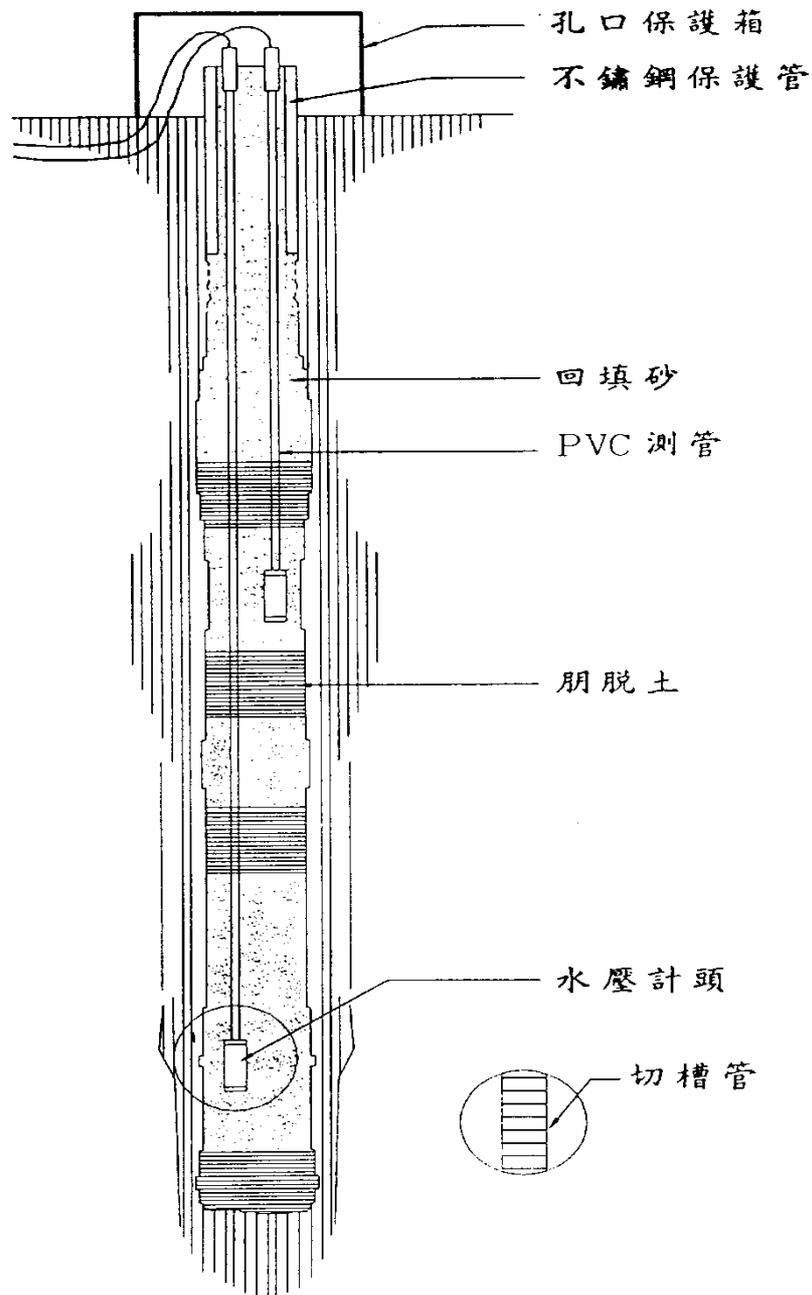


圖 4.3 開放式水壓計安裝示意圖

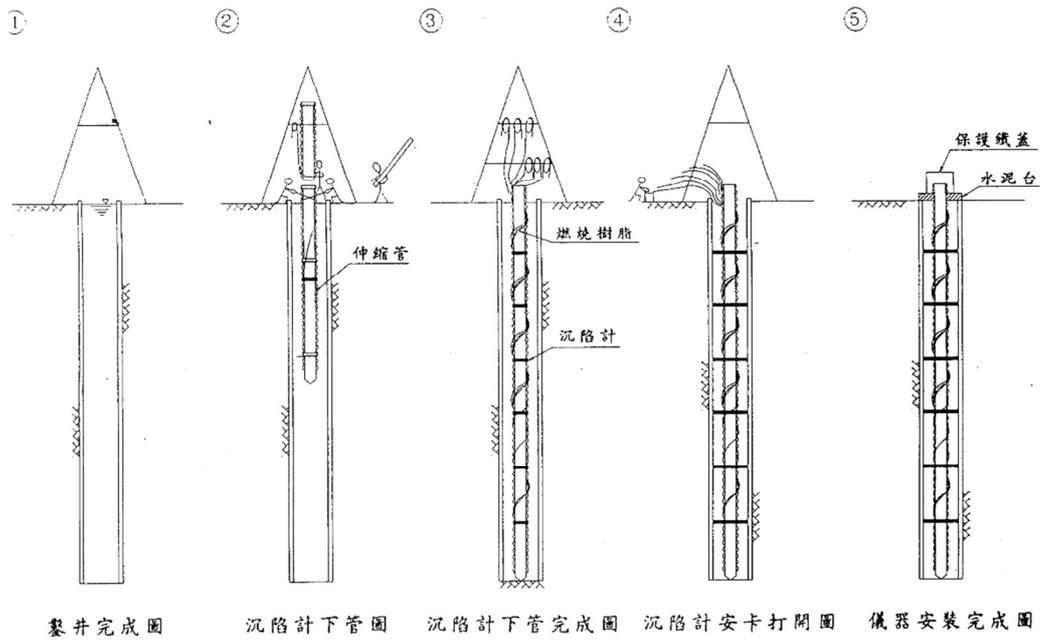


圖 4.4 沉陷計安裝示意圖

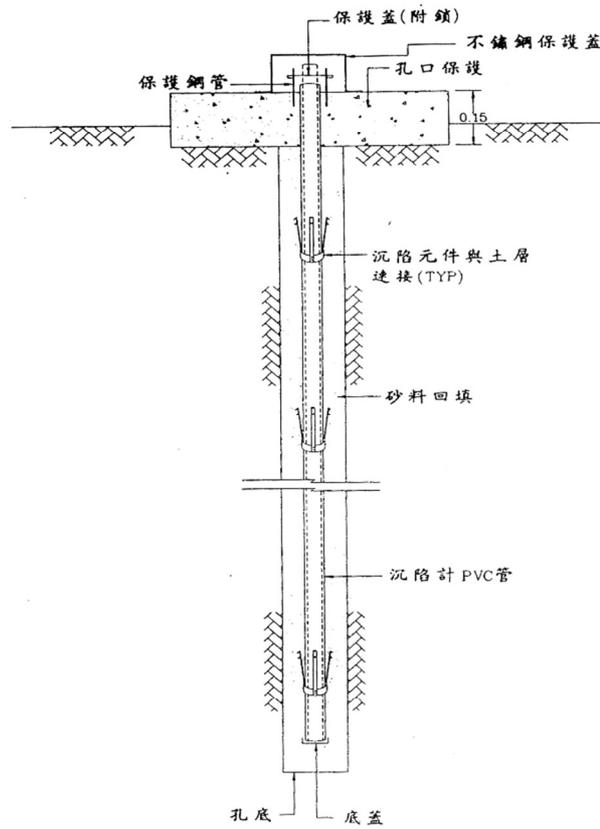


圖 4.5 磁感式層別沉陷計安裝示意圖

### 4.3 嘉南沿海地質資料

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嘉義、臺南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，分別就嘉義地區與各港區之地質及土層分布資料簡述如下：

### 4.4 嘉南平原地區地質

嘉南平原以鹽水溪界，分為南、北兩區，北區為沉積盆地系統，南區為活躍的新期構造運動控制區；就嘉南地區地理概況敘述如下。

#### 4.4.1 地理概況

嘉南平原地區位於臺灣本島西岸之南部，行政區域包括嘉義縣與嘉義市之平原部份。本區範圍北端以北港溪及支流倒孔山溪，與雲林地區為界，南至八掌溪及支流牛稠坑，與臺南地區為界，東起斗六丘陵—嘉義丘陵以西，西止於臺灣海峽。本區主要屬平原地帶，在平原東緣緊鄰山麓丘陵，其地形分區如圖4.6所示<sup>[33]</sup>。



圖4.6 嘉義地區地形分區圖

#### 4.4.2 地質概述

本分區的地面地質大部分為現代沖積層(如圖4.7)<sup>[33]</sup>，東側週緣為丘陵地(大尖山-觸口斷層為界以西部份)，出露有頭嵙山層及台地堆積層。區內的沖積層為河道堆積物、海岸風積砂與潟湖淤泥等物質所組合，透水性較差。區內雖有多條河川，惟上游多泥質岩層，因此沖積層中缺少粗鬆的沉積物，其厚度在東部邊緣最薄，向西部逐步增厚。

在臺灣中南部和「頭嵙山層」相當的更新世地層，有崁下寮層、二重溪層和六雙溪層等岩層。崁下寮層位於最下，由砂、頁岩互層組成；中間地層為二重溪層，由頁岩和細粒到中粒砂岩互層組成，砂岩內含豐富的海貝類化石和漂木碎塊；六雙層大部由暗灰色至青灰色泥岩和夾有砂岩與粉砂岩互層的頁岩組成。『台地堆積層』大多由未經膠結的礫石及夾在其中平緩的砂質或粉砂質凸鏡體組成，層理和淘選度都很差，其組成包括含紅土或不含紅土兩種。

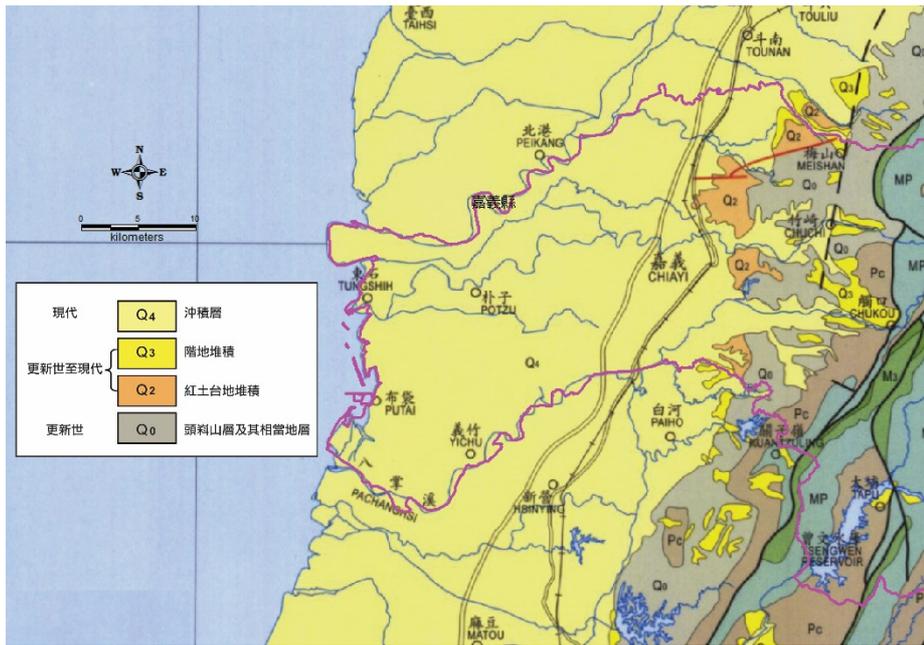


圖4.7 嘉義地區區域地質圖(中央地質調查所，2000)

#### 4.4.3 水文概述

嘉南平原的地層複雜，多為砂泥互層，分層明顯但延續性不佳，厚度變化大，且沒有顯著的阻水層(特別厚泥層)及含水層(砂層)，地下水上下連通性不佳。其水文地質特性大致以鹽水溪為界，粗分為南、北兩段，北段涵蓋嘉義及臺南等地區，嘉義地區位處於北段之北區，沉積速率受第四紀以來海水面變化的影響，沉積速率向南遞增，但粒度則反向南變細；地下水層連通性除了靠近麓山帶的區域外，一般尚佳(賴典章、費立沅、江崇榮，2003)<sup>[40]</sup>。

嘉義地區東石至錦湖的南北向地質剖面(如圖4.8)，在深度250公尺內之水文地質約可分為四層：第一層深度約自地表至地下60公尺處，含水層多分布於南側之新塭及錦湖兩站；第二層約分布於60~120公尺之間，含水層以北面的東石及過溝地區較厚，向南漸薄；第三層分布於120~210公尺間，亦以北面東石及過溝地區含水層較厚；第四層在210公尺以下，除北面之東石砂層較顯著外(砂層比例極低)，並無明顯的含水層存在，整體來看，嘉義地區以北面部份之含水層分布狀況較佳。

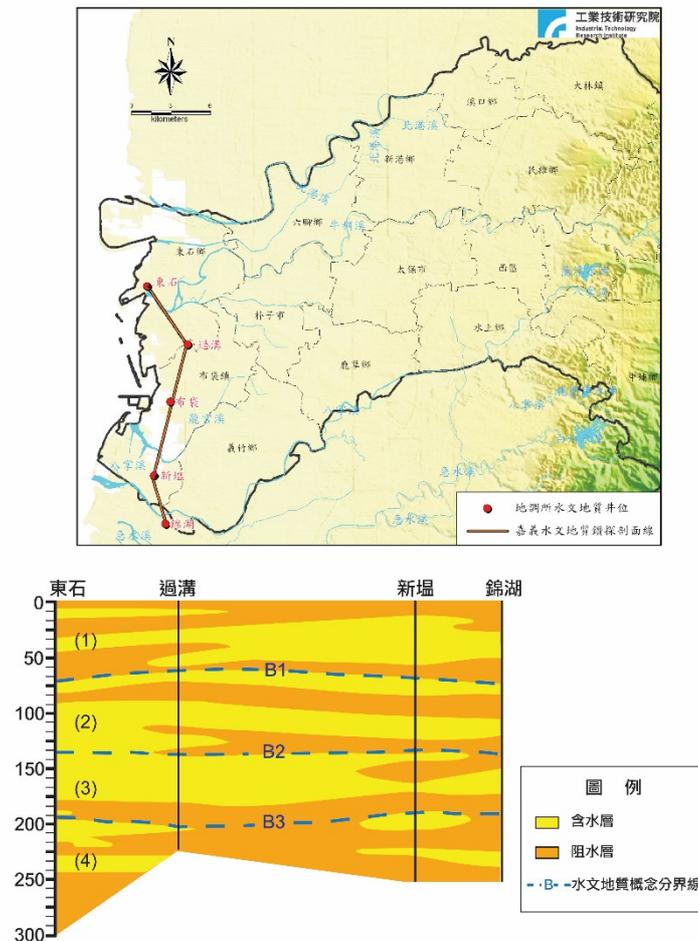


圖4.8 嘉義地區地質剖面及水文地質概念分層(水利署，2014)

#### 4.5 嘉南地區地層下陷

參考水利署資料顯示，嘉義地區過去 10 年(93~103)來以東石鄉與布袋鎮為主要下陷中心，下陷區域則以省道台 19 線以西為主(朴子市以西)。民國 94 年以前，嘉義顯著下陷面積都維持在 150 平方公里以上，民國 95 年~98 年顯著下陷面積快速下降至 30 平方公里以內，民國 99 年因為當年度有較為明顯乾旱，所以顯著下陷面積增加至 198 平方公里，100 年度至 103 年度從 36.5 平方公里減少為 0 平方公里。累加民國 93 至 103 年嘉義地區顯著下陷面積如圖 4.9<sup>[33]</sup>，顯示 10 年中累積下陷超過 20 公分以上的區域包括布袋鎮、東石鄉與義竹鄉之部分區域；由於該地區土壤主要以泥及黏土為主，因此該區的地層下陷會持續一段時間。

經由民國 80 年至 103 年之量測資料比較分析，嘉義地區 23 年來總下陷量在 60 公分以上之下陷區，涵蓋有東石鄉、布袋鎮、朴子市、義竹鄉等鄉鎮；其中最主要的下陷中心為東石鄉與布袋鎮，最大的累積下陷地區發生在東石鄉，累計下陷量等分布圖如圖 4.10 所示。

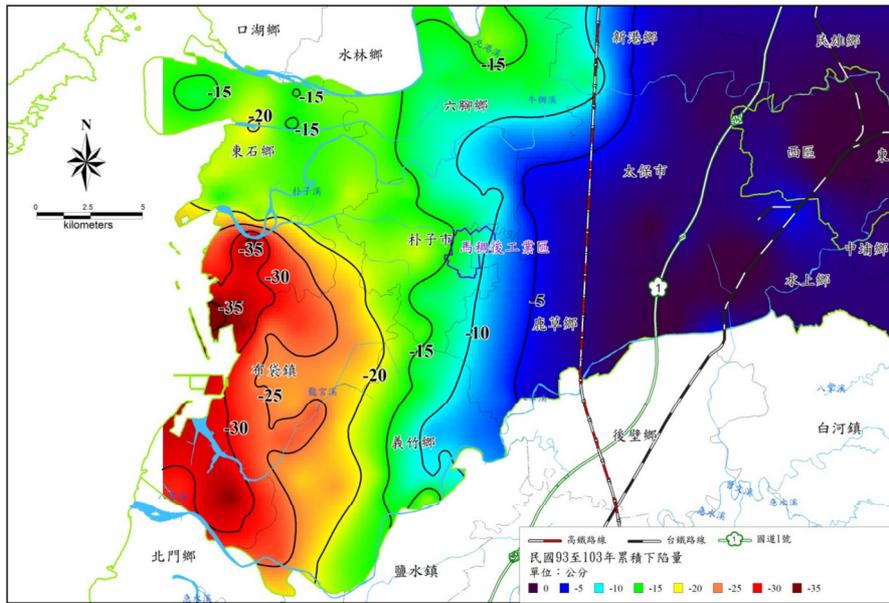


圖4.9 嘉義地區民國93至103年累積下陷量圖(水利署，2014)

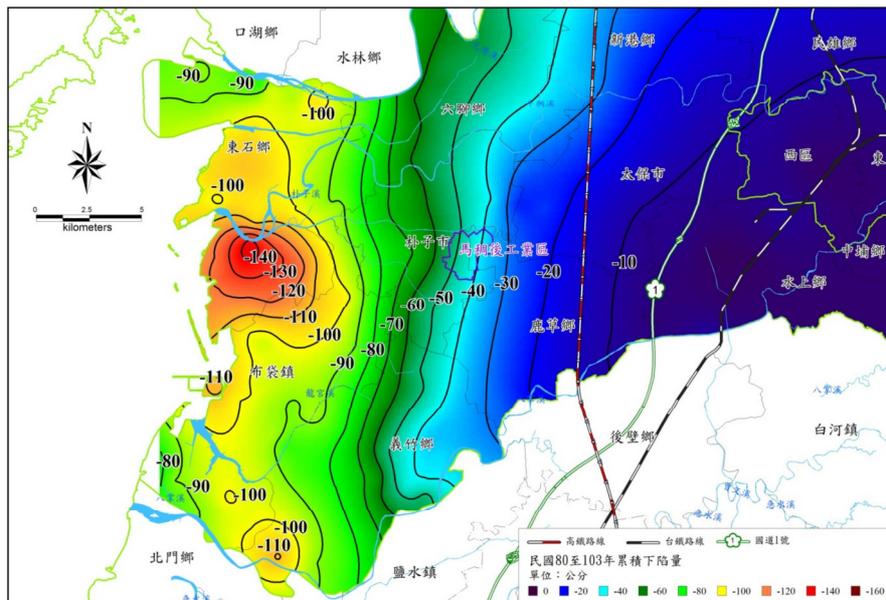


圖4.10 嘉義地區民國80至103年累積下陷量圖(水利署，2014)

嘉義地區民國102年8月~103年7月平均下陷速率圖4.11，顯示103年度嘉義縣並無明顯下陷，僅在六腳鄉、東石鄉、布袋鎮與義竹鄉有部分區域下陷量約在1-2公分/年之間，其餘點位下陷速率皆小於1公分/年，最大年下陷速率為1.8公分/年。

民國101至102年與102至103年平均下陷速率圖(圖4.12)，顯示近兩年嘉義地區主要下陷位置發生在布袋鎮與義竹鄉，下陷速率皆低於3公分/年。由歷史資料，民國98年以前，嘉義地區主要下陷區域集中在朴子市以西，民國99年與100年連續兩年，六腳鄉最大下陷速率都超過3公分/年以上，民國101年~103年六腳鄉下陷速率值皆未超過2公分/年，近兩年嘉義全縣年下陷速率皆未有超過3公分/年以上，顯示嘉義地區下陷已逐漸趨緩。



圖4.11 嘉義地區民國102至103年平均下陷速率等值線圖(水利署，2014)

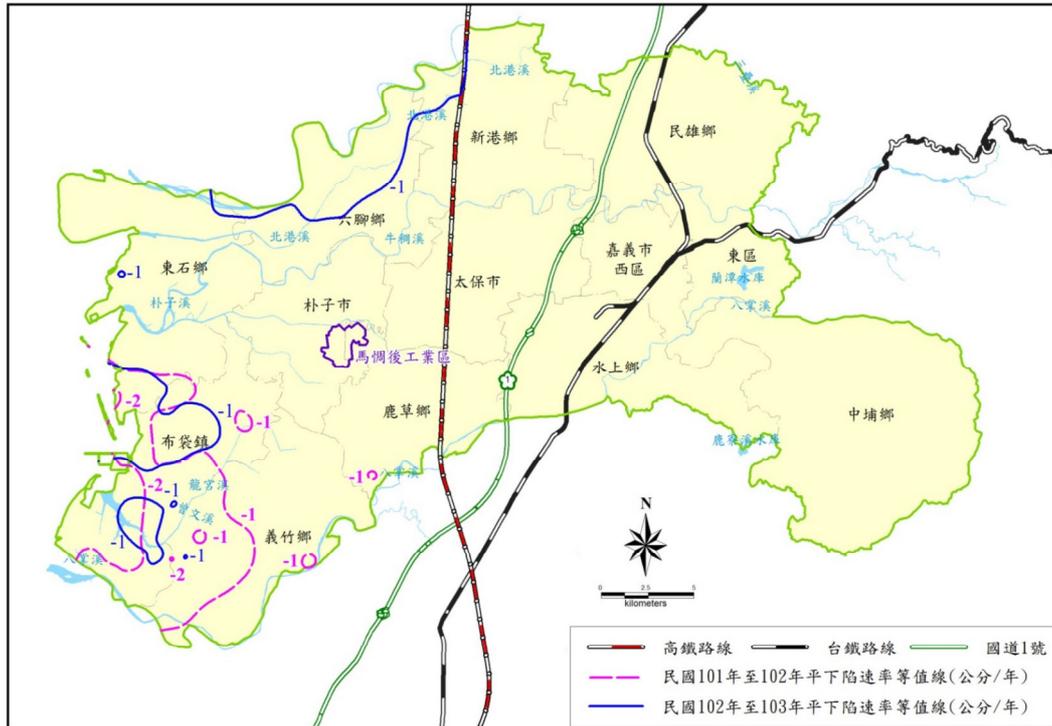


圖4.12 嘉義地區民國101至102年與102至103年平均下陷速率等值線圖

臺南地區於民國100年10月至103年8月，平均下陷速率如圖4.13所示，顯示臺南大部分地區的年平均下陷速率皆低於3公分/年，惟有在北門區、學甲區與鹽水區有部分區域下陷量約在1-2公分/年之間。臺南地區自99至100年與100至103年近5年期間的平均下陷速率(如圖4.14)，主要下陷區域為北門與學甲，最大下陷速率皆無超過3公分/年以上者，顯示臺南地區的下陷速率已有趨緩。

臺南地區103年度主要下陷檢測點為北門區與學甲區，該區年平均下陷速率皆已低於2公分/年。臺南地區民國90年至103年的累積下陷量如圖4.15，圖中顯示臺南地區過去13年時間，主要下陷地區發生在臺南市北門區、學甲區與安南區，期距內最大下陷速率與發生地點如表4-1。

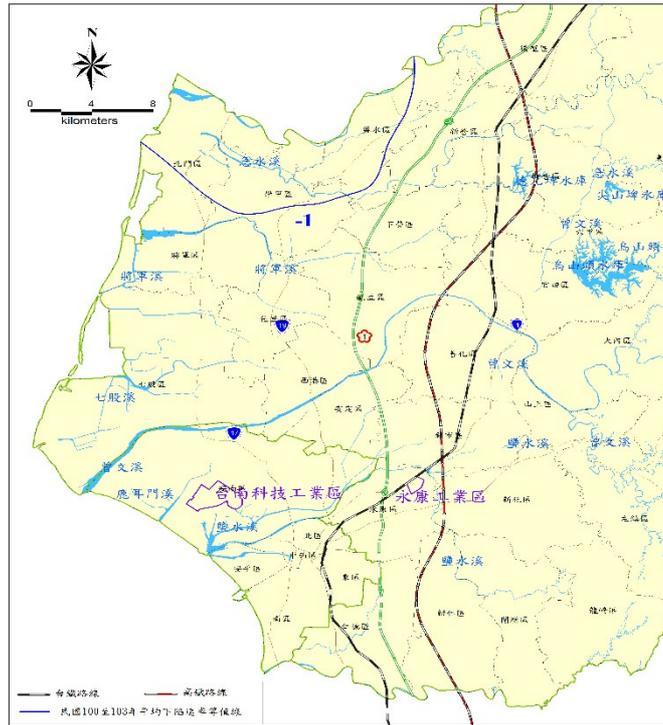


圖4.13 臺南地區民國100至103年平均下陷速率等值線圖(水利署，2014)

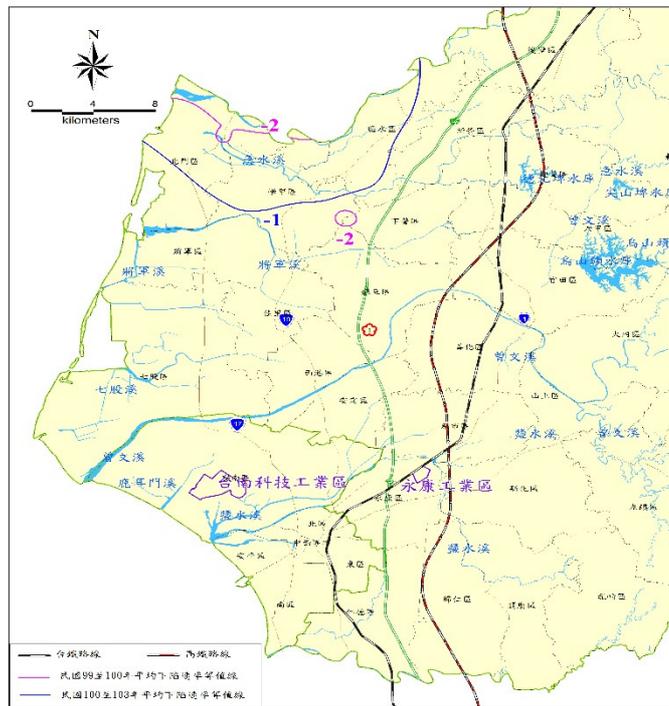


圖4.14 臺南地區民國99至100年與100至103年平均下陷速率等值線圖(水利署，2014)

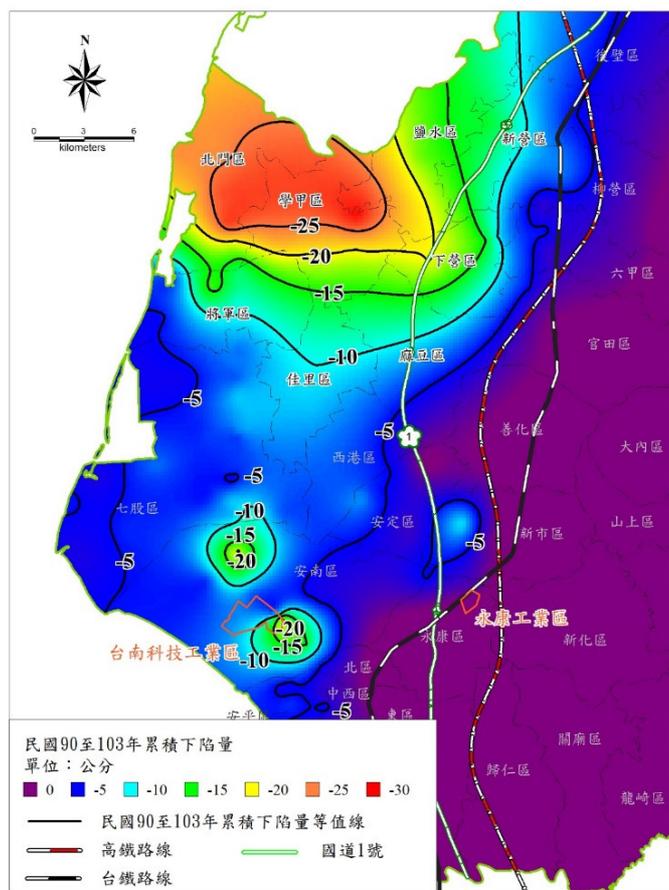


圖 4.15 臺南地區民國 90 至 103 年累積下陷量圖(水利署，2014)

表4-1 臺南地區民國90年至103年下陷面積分析表(水利署，2014)

觀測期距	90.06~ 92.06	92.06~ 94.08	94.08~ 96.10	96.10~ 98.01	98.01~ 99.08	99.08~ 100.10	100.10~ 103.09
最大下陷速率(公分/年)	6.5	4.0	2.9	5.5	4.3	2.4	1.4
最大下陷速率地點	安南區	北門區	東區	安南區	北門區	北門區	學甲區
速率超過(3公分/年)之面積(平方公里)	34.3	27.5	-	10.2	29.0	0.0	0.0
3.0~5.0公分	33.33	27.54	-	7.68	29.00	-	-
5.0~7.5公分	0.92	-	-	2.51	0.0	-	-



**表 4-2 布袋港監測井座標高程一覽表(200m)**

監測井編號	高程	縱座標 N(m)	橫座標 E(m)
水壓井 OW-1	3.166	2587280.959	161254.669
水壓井 OW-2	3.498	2587281.740	161268.649
沉陷井 S-B	3.416	2587281.574	161264.043

**表 4-3 布袋港沉陷計感應環安裝深度一覽表(200m)**

序 號	埋設深度 (m)	序 號	埋設深度 (m)
S1	8.262	S10	110.4515
S2	15.7775	S11	120.4515
S3	29.633	S12	130.7385
S4	40.5855	S13	140.441
S5	55.548	S14	157.4565
S6	65.563	S15	170.4380
S7	75.514	S16	180.6975
S8	85.469	S17	190.4455
S9	100.4705	S18	200.4735

表 4-4 布袋港地下水壓觀測站水壓計埋設資料表(200m)

儀器編號	原廠編號	埋設深度	記錄器編號	初值 (飽和)	較正係數	水頭高 (管口)	備考
OW-1	35549	44 m	CH2	27	0.00339	-	電子式水壓計
	35550	68 m	CH3	125	0.00331	-	電子式水壓計
	39332	131 m	CH5	-134	0.00680	-	電子式水壓計
OW-2	-	34 m	-	-	-	2.28m	開放式水壓計
	-	105 m	-	-	-	24.46 m	開放式水壓計
	-	143 m	-	-	-	24.81 m	開放式水壓計
	-	178 m	-	-	-	25.26 m	開放式水壓計
	120023	14.07 m	CH1	-70	0.00105	-	電子式水壓計
	25985	34.46 m	CH4	296	0.000673	-	電子式水壓計
	25987	34.81 m	CH6	147	0.000672	-	電子式水壓計
	25983	35.26 m	CH7	-315	0.000672	-	電子式水壓計

### 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 4.17)，約可分為 24 個次層<sup>[46]</sup>，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。

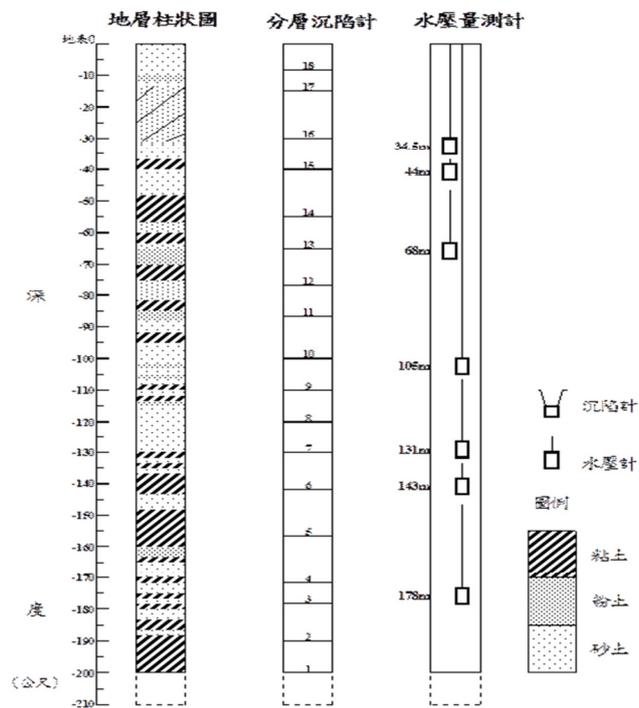


圖 4.17 布袋港分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖

## 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。

### (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 107 年 6 月為自動量測系統資料(圖 4.18a~4.18c)，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，如圖 4.18b。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 107 年 6 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 4.19 所示。

由 200m 地下水位圖顯示，105 m 處之水位變化極大，最高水位 -16 m，最低水位 -27.6m，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 -15.7 m，最低水位約為 -20.7 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，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 4.20 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，資料值由銹鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 4.21 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 107 年 10 月之 21 年 8 個月期間，布袋港地表下 8 m 至 200 m 間之沉陷總量約為 70 公分，而其中 140~200 m 之沉陷量約 34 公分，佔總沉陷量之 48% 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 4.22 為至民國 107 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 4.23 分層觀測圖顯示，自 89 年 10 月~107 年 10 月止，18 年之累積總沉陷量約 92 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(102 至 107)總沉陷量約 18 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 25.8 公分，約佔總沉陷量之 29%。其中以 102~190m 之沉陷量為 40.3 公分所佔比例最大，約佔總沉陷量之 43.8%，190~300m 之沉陷量較少為 9.5 公分，約佔總沉陷量之 1%，綜合以上得知，66~190m 深度之累積沉陷量為 66 公分，約佔總沉陷量之 72%，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 107 年 5 月為止共 14 年之總累積下陷量約為 43.2 公分，如圖 4.24a 及 4.24b 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 106 年 6 月之累積下陷量約 23 公分，106 年 1 月至 6 月下陷 2.2 公分，97 年 5 月至 98 年 7 月因儀器故障缺少資料。

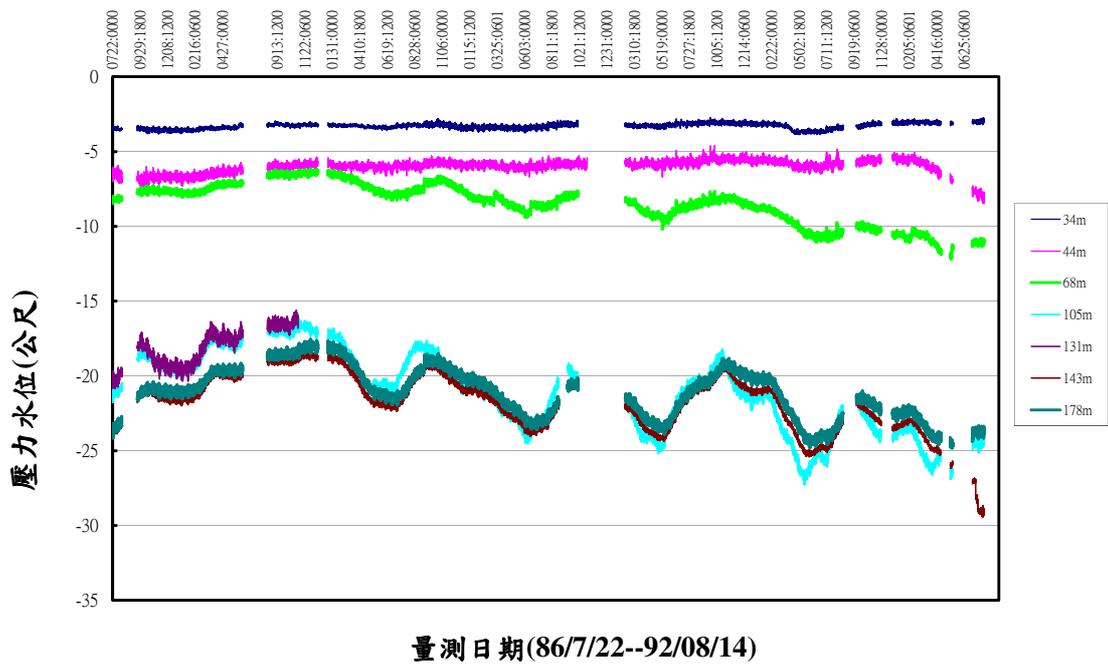


圖 4.18a 布袋港分層水位變化圖(自記式)(86/7/22-92/08/14)

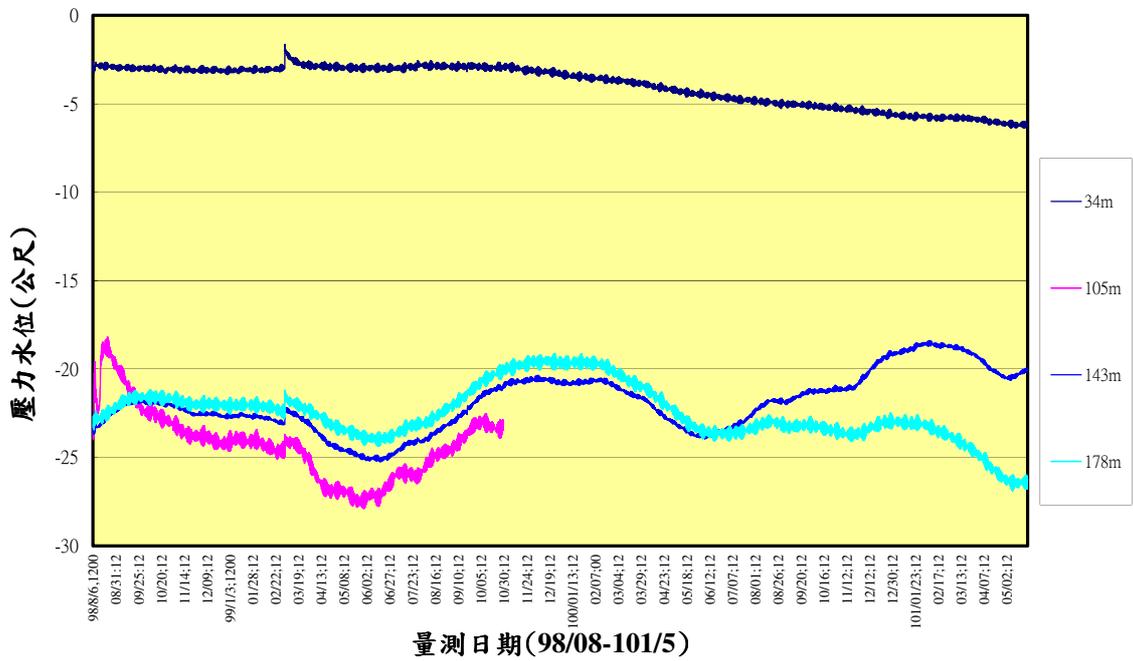
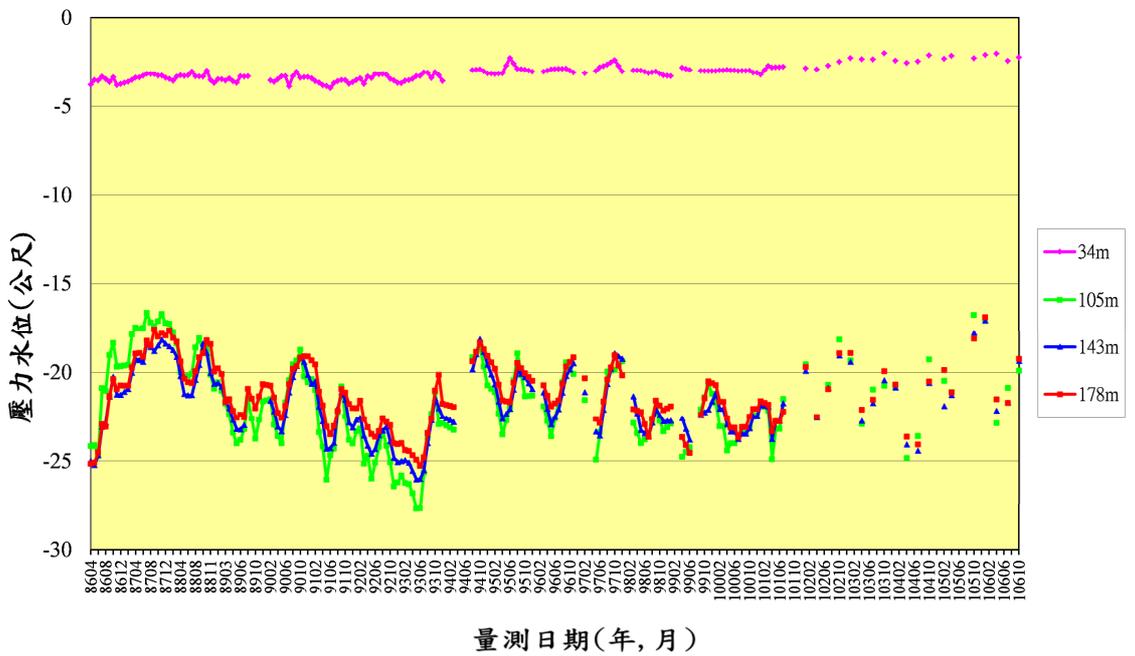
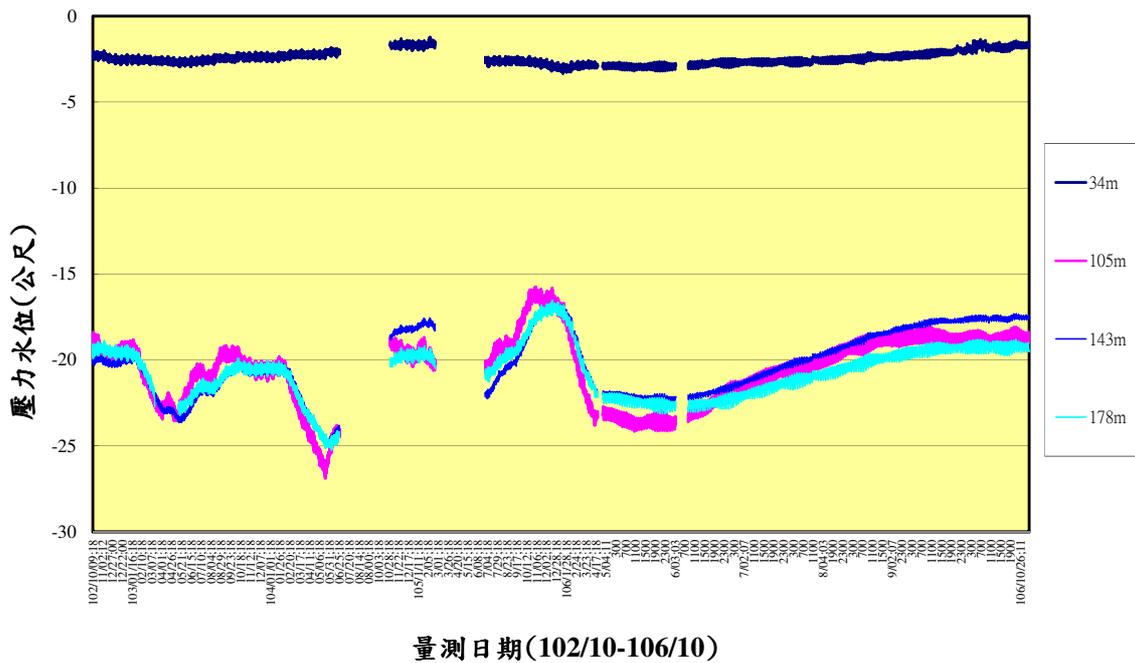


圖 4.18b 布袋港分層水位變化圖(自記式)(98/08/06-101/5/25)



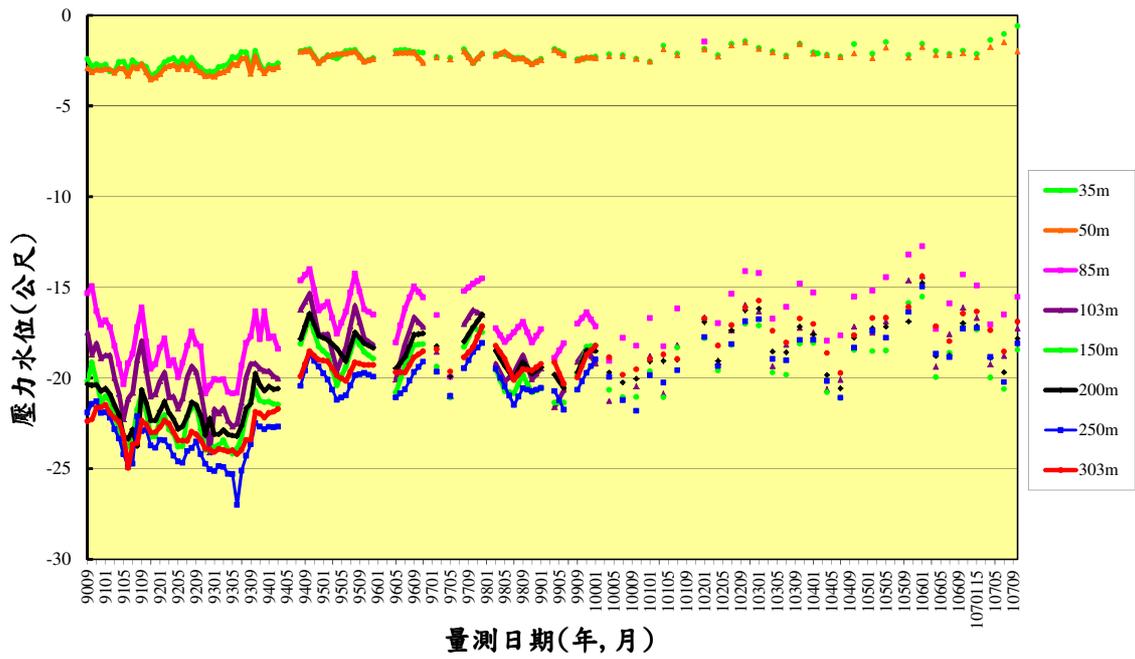


圖 4.20 布袋港(300m)分層水位變化圖(手動量測)

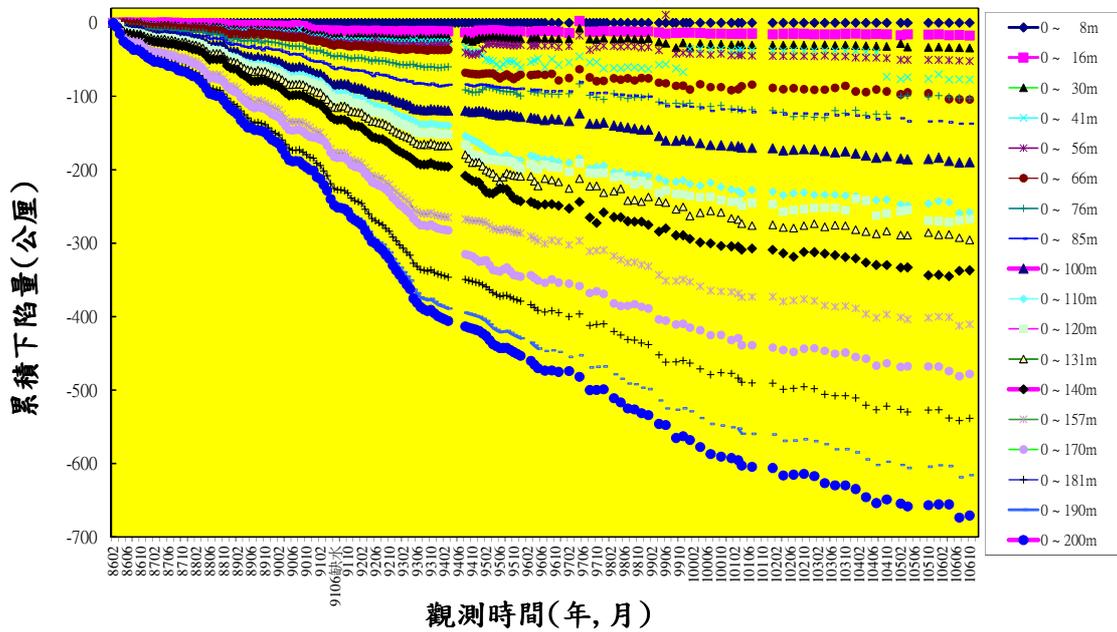


圖 4.21a 布袋港(200m)分層累積下陷量圖(手動量測)

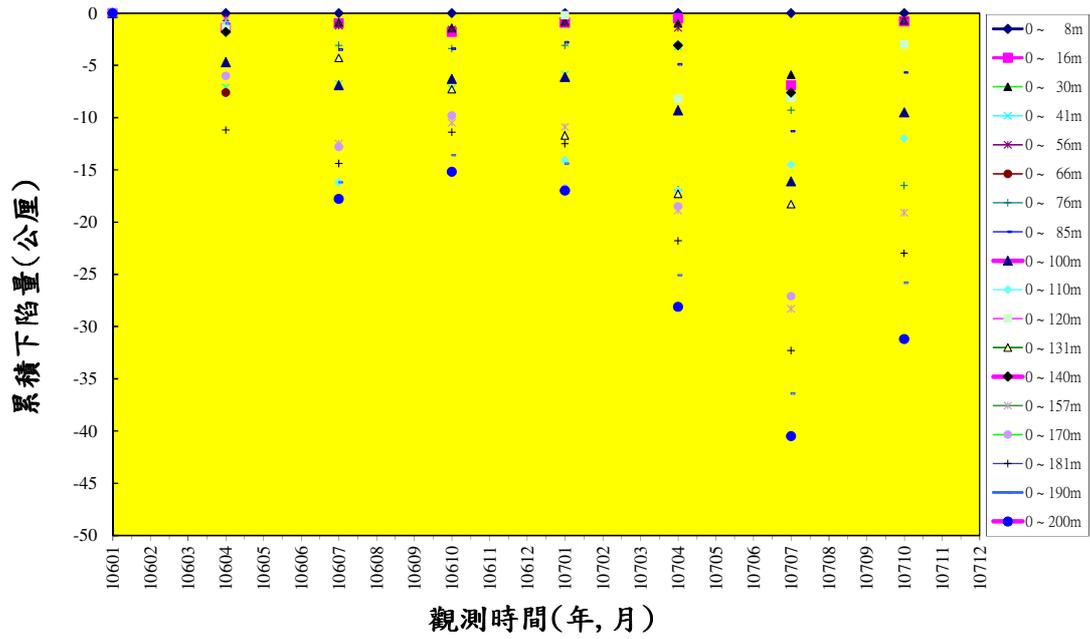


圖 4.21b 布袋港(200m)分層累積下陷量圖(手動量測)

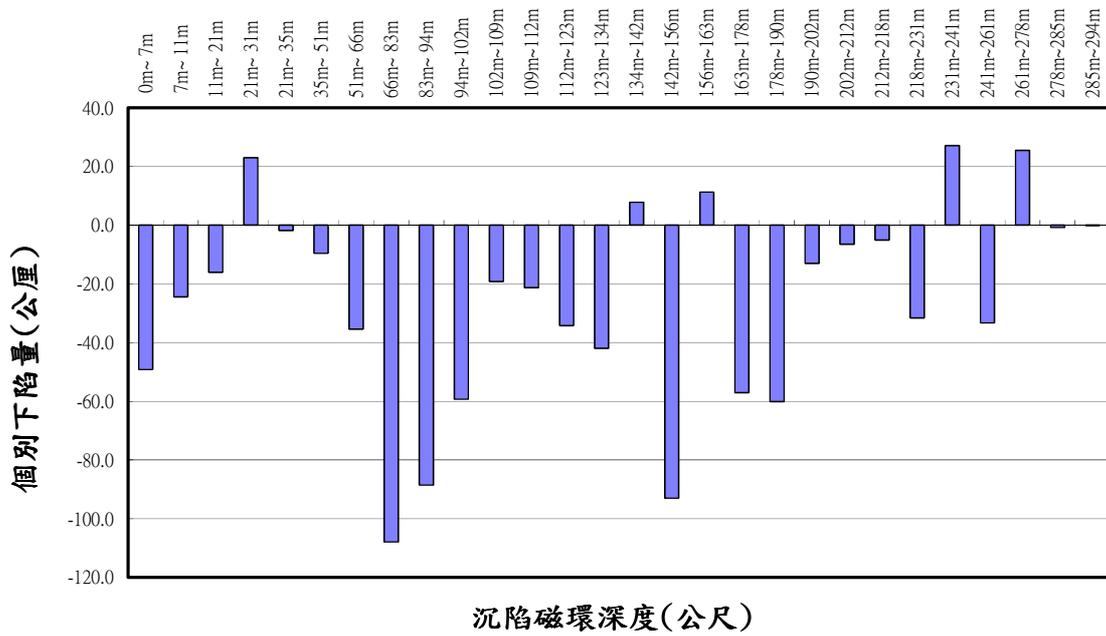


圖 4.22 布袋港(300m)分層個別下陷量圖

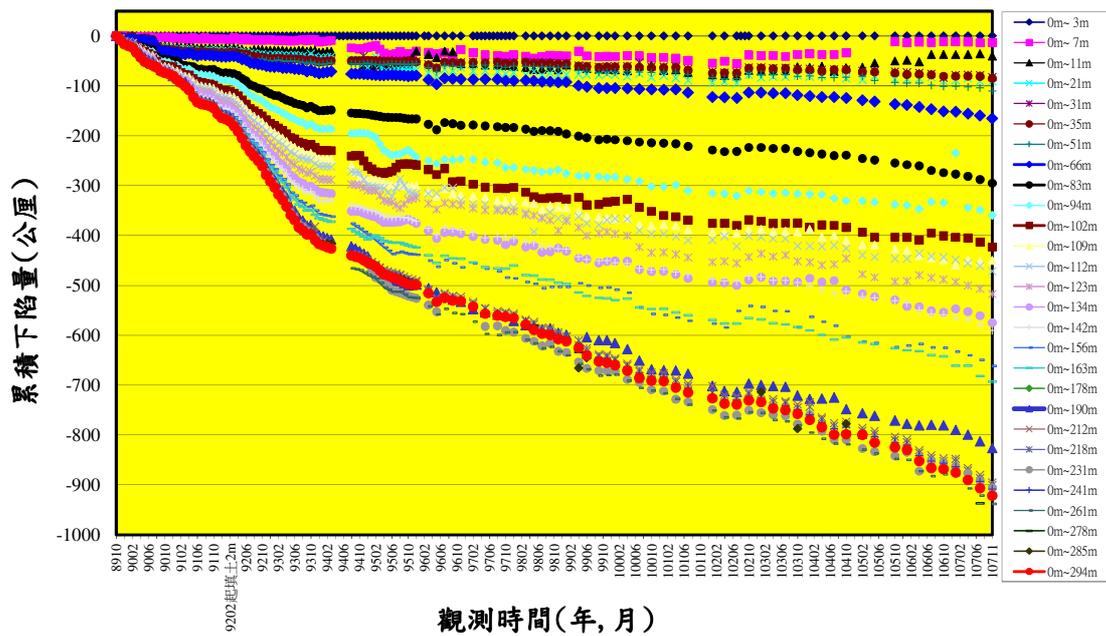


圖 4.23 布袋港(300m)分層累積下陷量圖

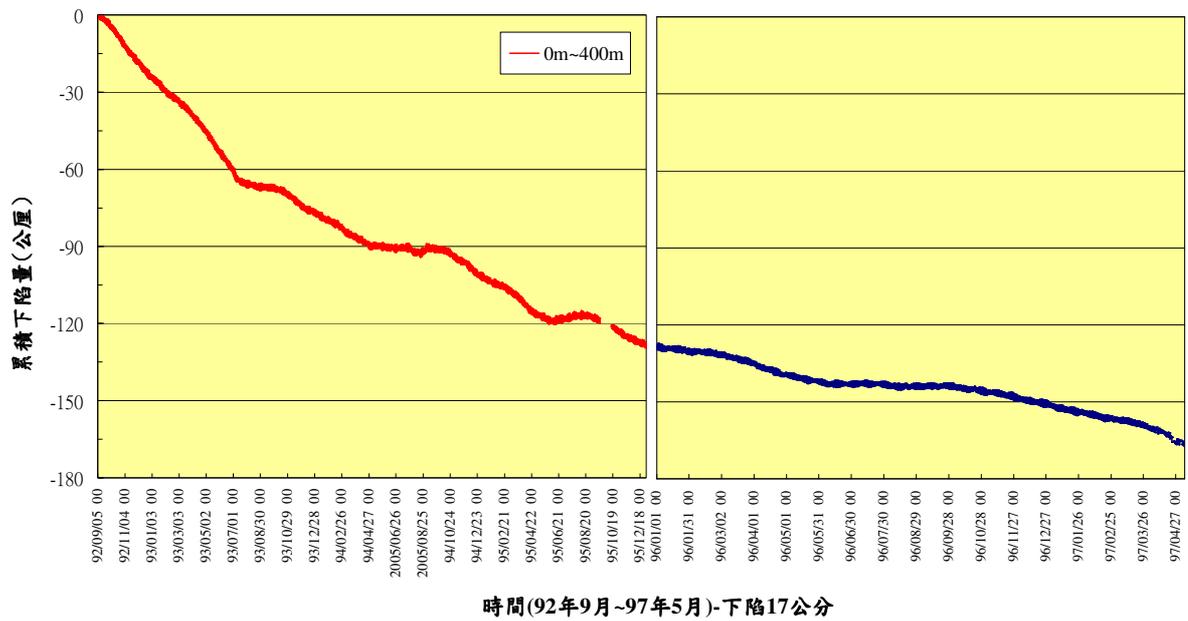


圖 4.24a 布袋港(400m)水準基準累積下陷量圖(92/09/04~97/05/30)

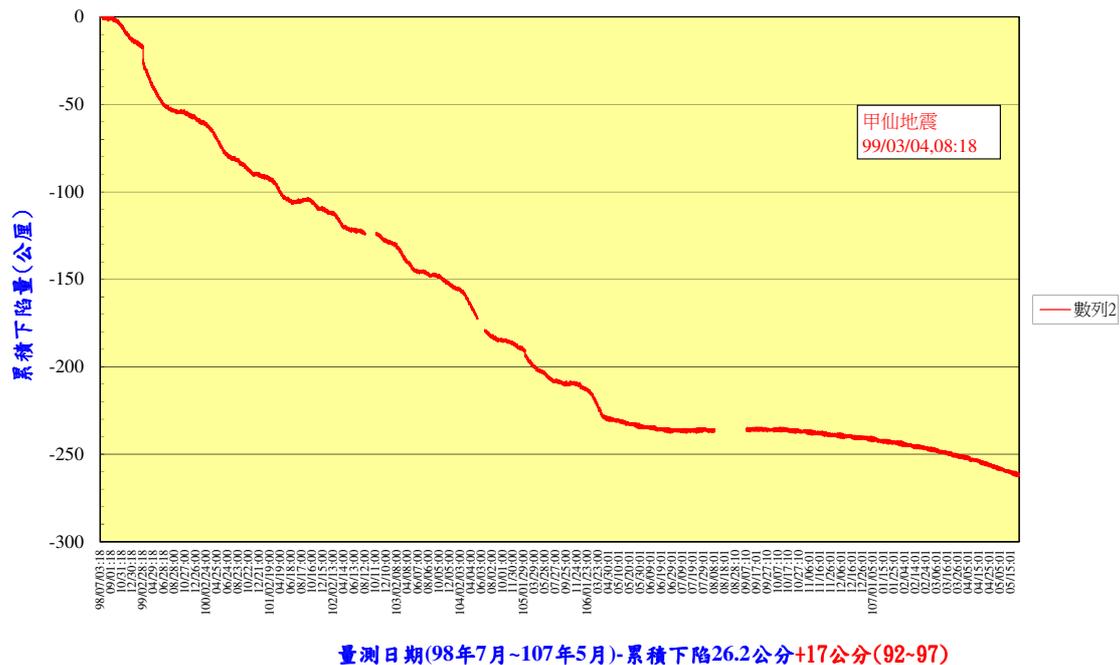


圖 4.24b 布袋港(400m)水準基準站累積下陷量圖(98/07/03~107/05/23)

#### 4.6.2 大鵬灣監測站

選擇位於大鵬灣原青洲濱海遊憩區內，靠近南平海堤前端處之適當位置（如圖 4.25），埋設監測儀器。本監測井共計二孔，分別為分層沉陷觀測井 1 孔，水壓計觀測井 1 孔，可採用手動及自動方式記錄，其內容如下：

- (1) 電磁場式分層沉陷觀測井 1 孔，其深度為 193 m，安裝沉陷計感應環 23 個，深度如表 4-5 所示。
- (2) 電子式水壓計觀測井 1 孔，共有 5 組電子式水壓計，安裝於開放式水壓計管口內，開放式水壓計安裝深度為 202 m、142 m、105 m、58 m、35 m，而電子式水壓計則安裝於壓力水頭下 10 m 處，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 4-6 所示。

表 4-5 大鵬灣沉陷計感應環安裝深度一覽表

序 號	埋設深度 (m)	序 號	埋設深度 (m)
S1	189.2	S13	109.1
S2	188.2	S14	104.1
S3	177.2	S15	101.2
S4	173.2	S16	90.1
S5	161.0	S17	62.2
S6	155.2	S18	55.2
S7	146.1	S19	51.3
S8	138.2	S20	31.3
S9	129.1	S21	26.4
S10	125.0	S22	3.7
S11	120.0	S23	0.6
S12	116.0		

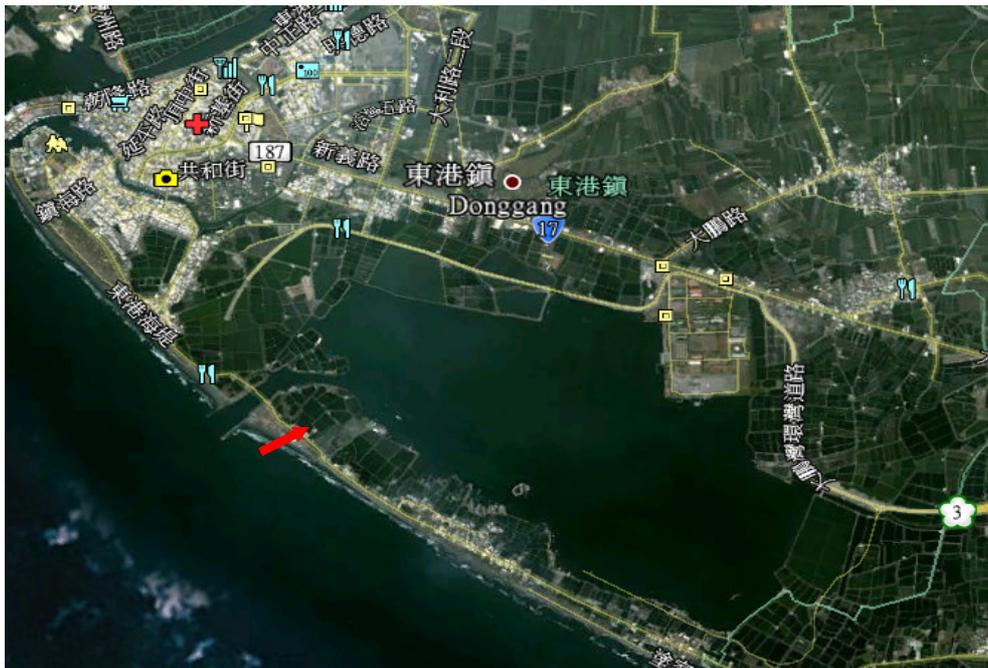


圖 4.25 大鵬灣監測站位置圖

表 4-6 大鵬灣地下水壓觀測站水壓計埋設資料表

儀器編號	原廠編號	埋設深度	記錄器編號	初值 (飽和)	較正係數	水頭高 (管口)	備考
EW	41894	13.73 m	CH1	242	0.000682		電子式水壓計
	41895	13.73 m	CH2	276	0.000667		電子式水壓計
	41897	15.26 m	CH3	225	0.000670		電子式水壓計
	41898	14.58 m	CH4	105	0.000671		電子式水壓計
	41896	17.85 m	CH5	245	0.000672		電子式水壓計
-	-	35 m	-	-	-	3.73 m	開放式水壓計
	-	58 m	-	-	-	3.73 m	開放式水壓計
	-	105 m	-	-	-	5.26 m	開放式水壓計
	-	142 m	-	-	-	4.58 m	開放式水壓計
	-	202 m	-	-	-	7.85 m	開放式水壓計

### 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 106 年 7 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 4.26 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 4.27 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 4.27 顯示，從 87 年 3 月至 107 年 7 月止，共 20 年 4 個月期間，大鵬灣地表下 4 m 至 189 m 間之沉陷總量約 14.5 公分，而其中地表~51.3 m 之沉陷量為 10.4 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。

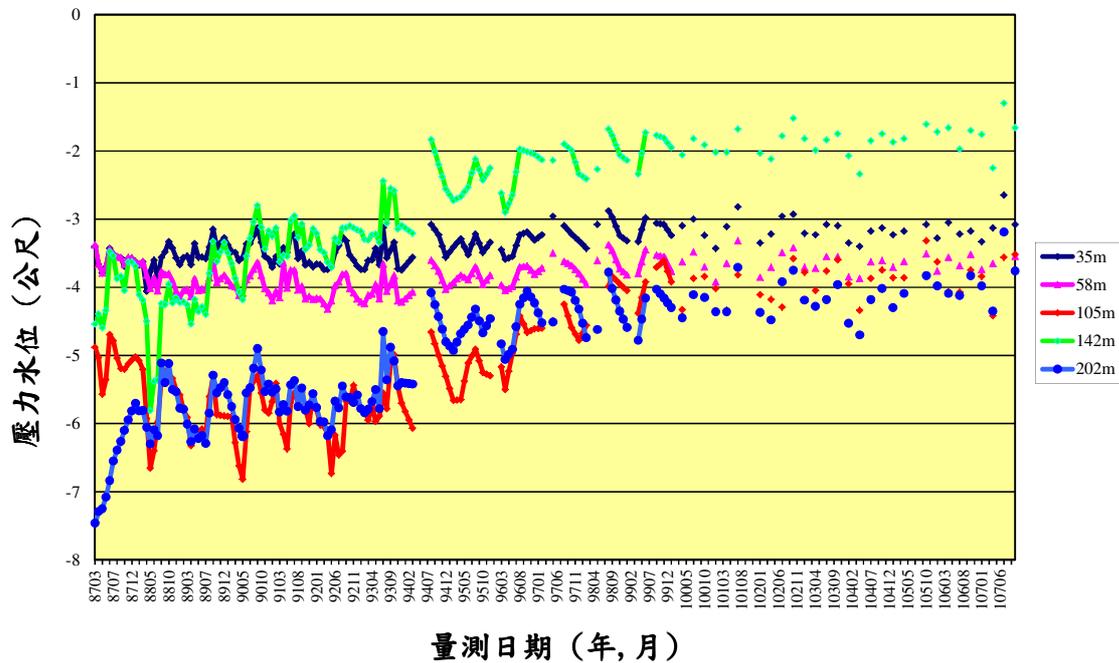


圖 4.26 大鵬灣分層水位變化圖(手動量測)

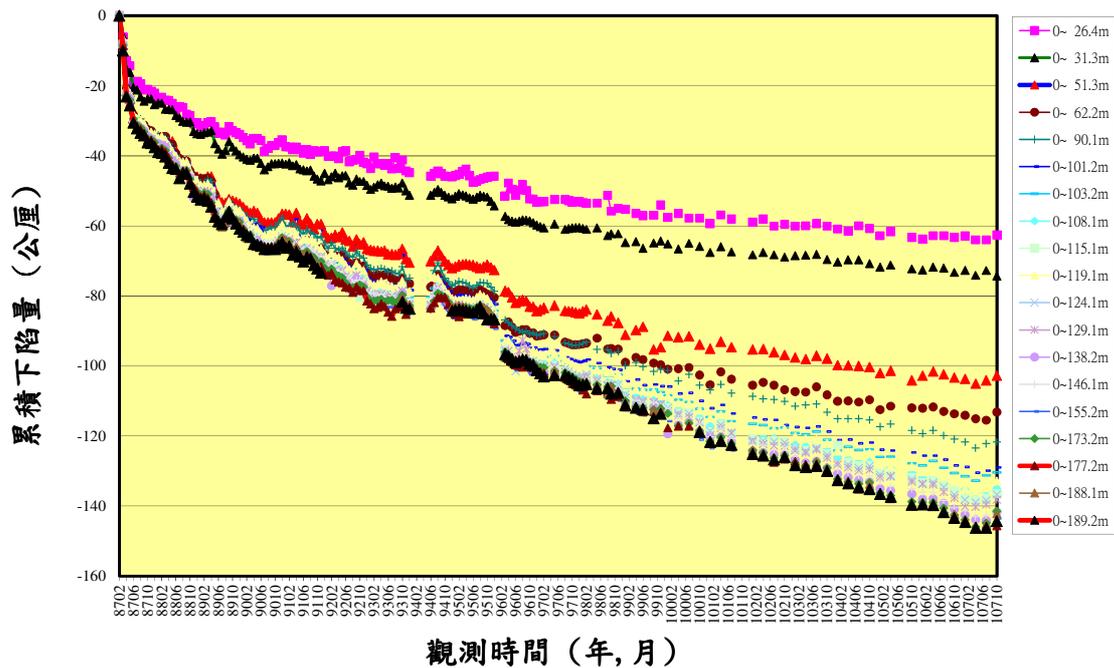


圖 4.27 大鵬灣地層分層下陷觀測圖

#### 4.6.3 臺中港監測站

臺中港監測站選擇位於臺中港區 26 號碼頭區綠地之適當位置 (如圖 4.28)。本監測井共計二孔，分別為分層沉陷觀測井 1 孔，水壓計觀測井 1 孔(含電子式水壓計及開口式水壓計)，並採用手動及自動記錄方式，其內容如下：

- (1) 電磁場式分層沉陷觀測井 1 孔，其深度為 200 m，安裝沉陷計感應環 18 個，安裝深度如表 4-7 所示。
- (2) 電子式水壓計觀測井 1 孔，鑽探孔 173 m，監測井共有 5 組電子式水壓計，安裝於開放式水壓計管口內，安裝深度為 29、63、100、145、173 m，電子式水壓計則安裝於壓力水頭下 10 m 處，所有水壓計經由配管接至同一個自動記錄器。

表 4-7 臺中港沉陷計感應環安裝深度一覽表

序 號	埋設深度 (m)	序 號	埋設深度 (m)
S1	0.7	S11	139.1
S2	3.6	S12	157.2
S3	10.5	S13	164.3
S4	18.8	S14	179.8
S5	27.5	S15	182.5
S6	31.6	S16	189.8
S7	55.0	S17	199.7
S8	73.2	S18	200.7
S9	90.9	-	-
S10	110.4	-	-



圖 4.28 臺中港監測站圖

## 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 106 年 7 月止，其結果如圖 4.29 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 106 年 7 月止約為 58 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 4.30 所示。

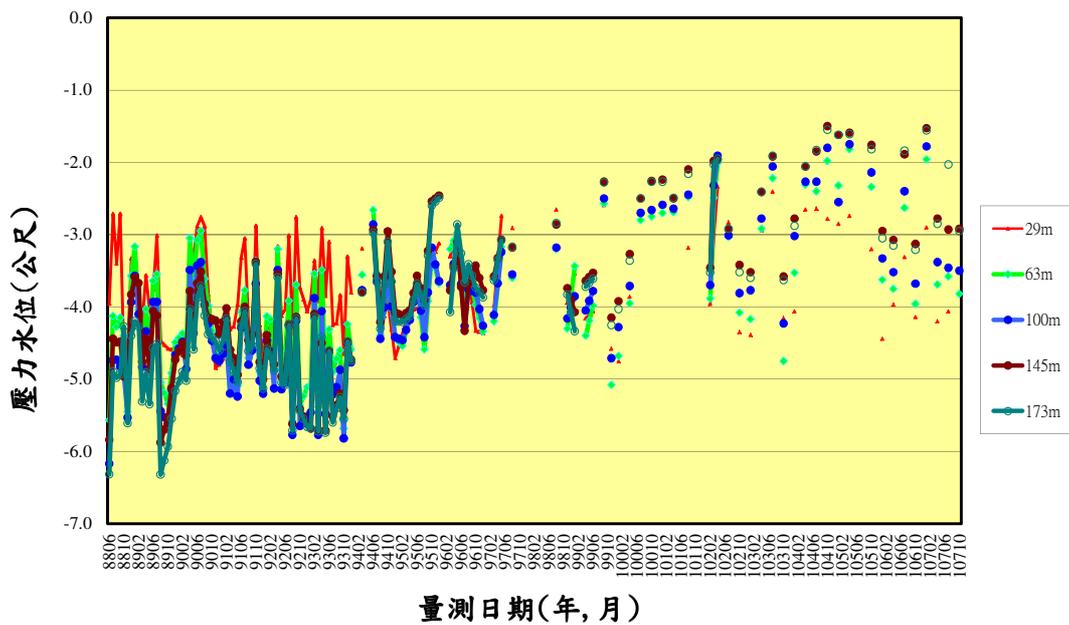


圖 4.29 臺中港分層水位變化圖(手動量測)

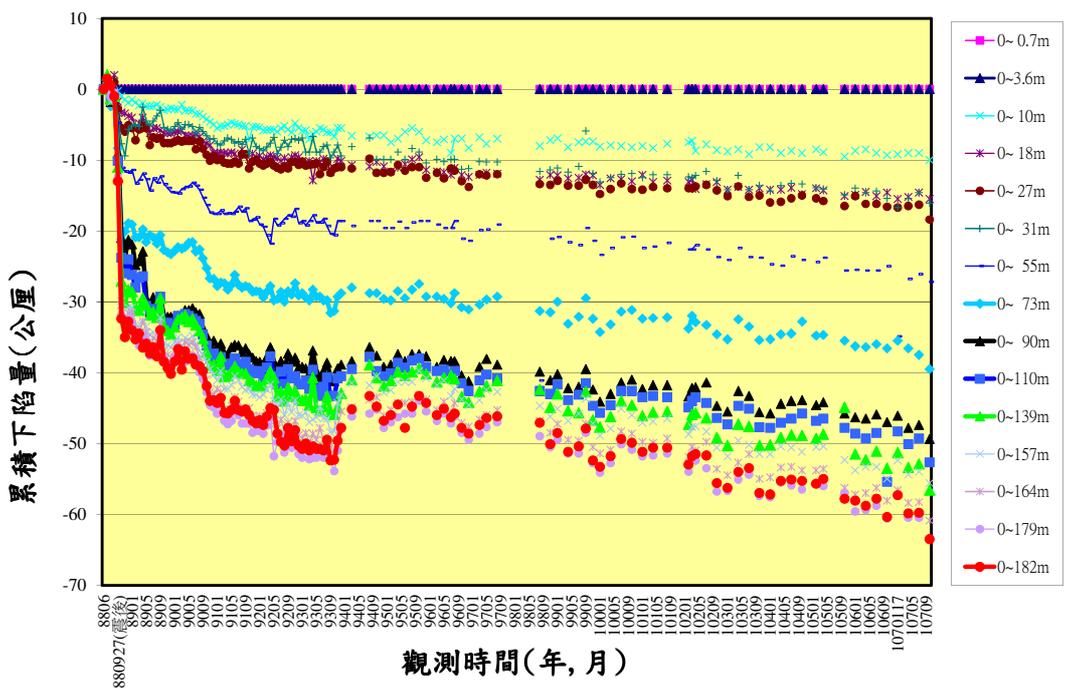


圖 4.30 臺中港分層累積下陷量圖(200m)

#### 4.6.4 安平港監測站

安平港監測井之設置地點位於安平港區第 18、19 號碼頭後線綠帶區之位置，其地點如圖 4.31 所示。

監測井共計二孔，電磁場式分層沉陷觀測井及電子式水壓計觀測井各 1 孔，水壓計觀測井可採用手動及自動方式記錄，其內容如下：

- (1)電磁場式分層沉陷觀測井 1 孔，其深度為 250 m，安裝沉陷計感應環 22 個，安裝深度如表 4-8 所示。
- (2)電子式水壓計觀測井 1 孔，本水壓監測井共有 5 組電子式水壓計，安裝於開放式水壓計管口內，開放式水壓計安裝深度為 187、145、105、75、40.5 m，而電子式水壓計則安裝於壓力水頭下 10 m 處，所有電子式水壓計經由配管接至同一個自動記錄器。

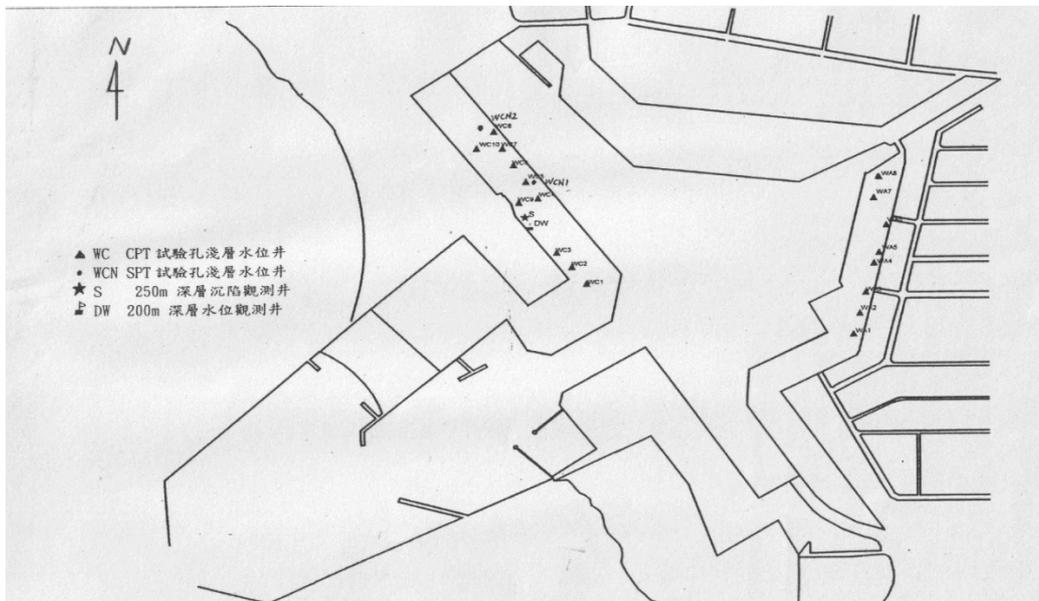


圖4.31 安平港監測站位置圖

表 4-8 安平港 18~19 號碼頭沉陷磁環安裝深度表

序 號	埋設深度 (m)	序 號	埋設深度 (m)
S1	249.5	S12	110.6
S2	248.8	S13	94.3
S3	239.8	S14	79.9
S4	231.4	S15	56.0

S5	221.2	S16	52.6
S6	211.2	S17	40.2
S7	200.5	S18	30.8
S8	181.0	S19	20.8
S9	175.0	S20	10.9
S10	150.0	S21	3.8
S11	134.0	S22	0.6

## 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 4.32 所示。

由圖 4.32 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 105 年) 應沒有受到超抽地下水影響，故地下水位呈現上下變動現象。

## 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。

安平港於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，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 4.33)。

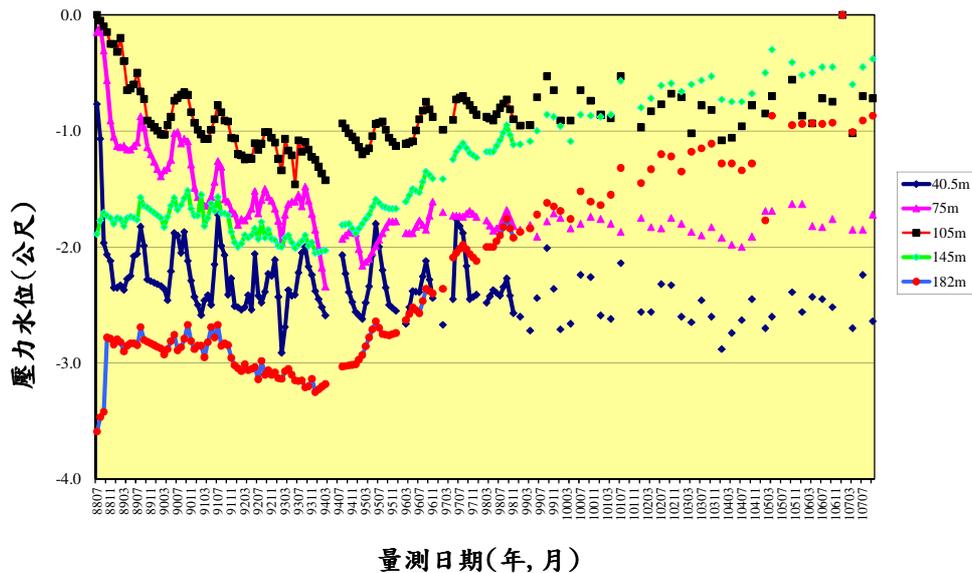


圖 4.32 安平港分層水位變化圖(手動量測)

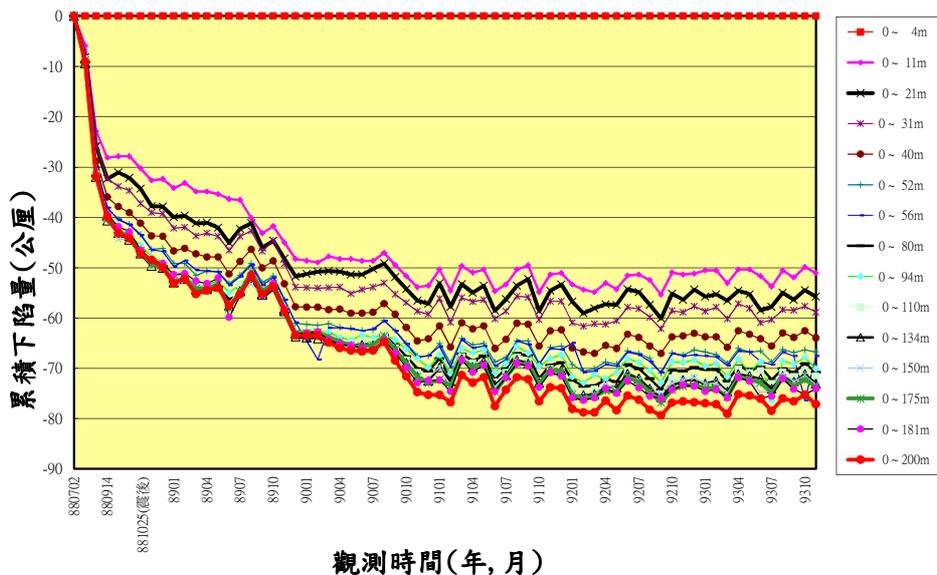


圖 4.33 安平港 18~19 號碼頭地層分層下陷觀測圖(88 年~93 年)

## 第五章 資料庫在地理資訊系統上之應用

由於西南沿海地區地質資料與長期的地震及動態水壓監測資料非常龐大，需以資料庫方式建置，故全部資料分別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，本章就資料庫系統操作程序分別簡述如下。

### 5.1 縣市分區土層及下陷資料庫系統

港研中心自104年來逐年陸續完成「縣市分區土層及下陷基本資料庫」，104年度完成雲林縣地區土層及下陷資料庫建置，105年完成彰化縣地區資料庫，106年完成嘉義縣地區資料庫，其它縣市資料庫由於107年度人力不足，故以彙整雲林、彰化、嘉義等縣市地區資料庫為主，茲簡述如下。由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：

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 雲林與嘉義地區土層及下陷基本資料查詢

縣市分區土層及下陷基本資料庫，分為「鑽探資料」與「水準檢測資料」兩大主功能項目查詢展示，本節以雲林縣之土層及下陷量測資料查詢系統之「鑽探資料」展示為例，「水準檢測資料」則以嘉義縣之「鑽探資料」為例，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「單孔或多孔非排序顯示」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、嘉義、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。

- 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。
- 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」。

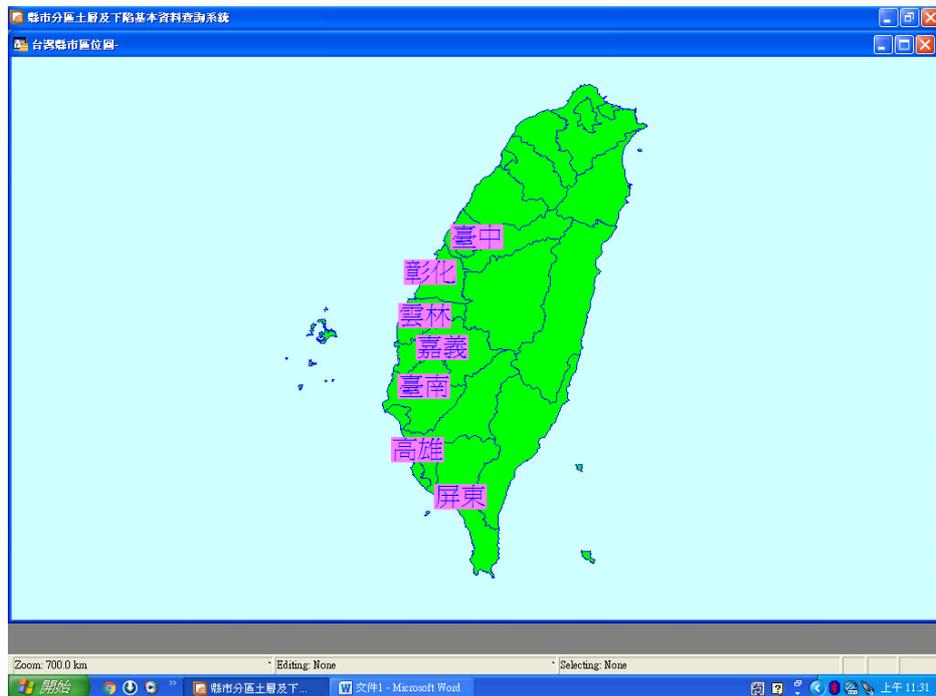


圖 5.1 查詢主畫面

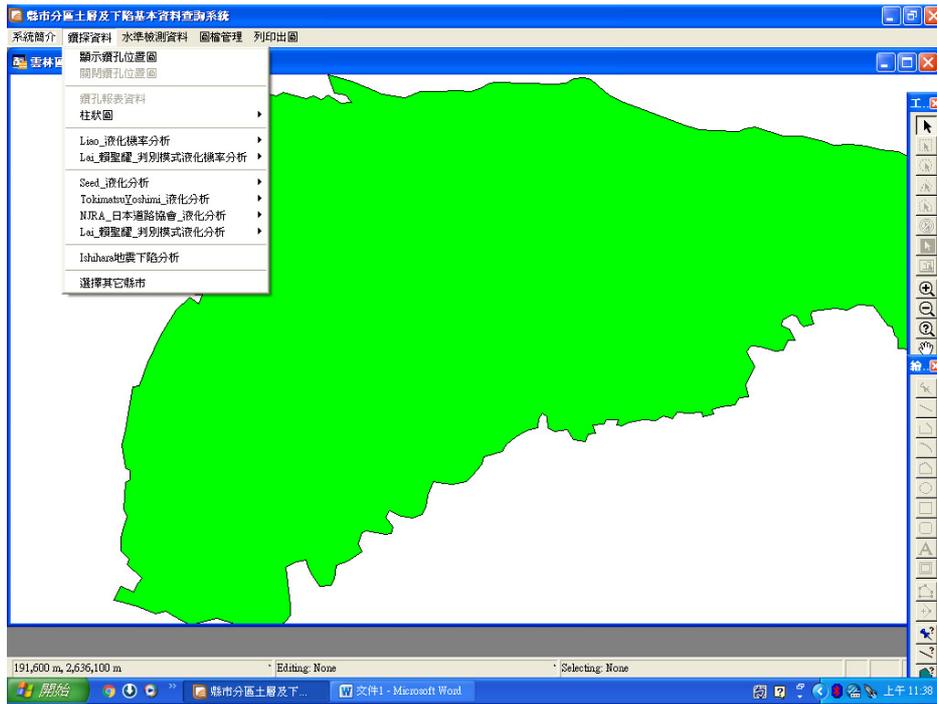


圖 5.2 雲林縣土層鑽探與水準檢測資料查詢表單下拉展示圖

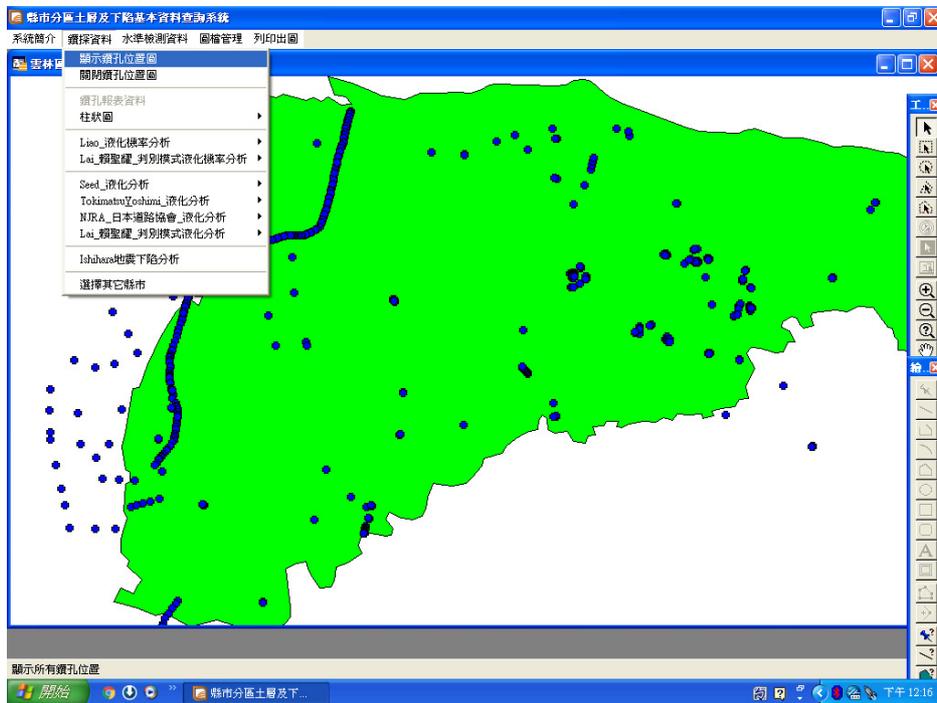


圖 5.3 雲林地區土層鑽探資料查詢表單下拉展示圖

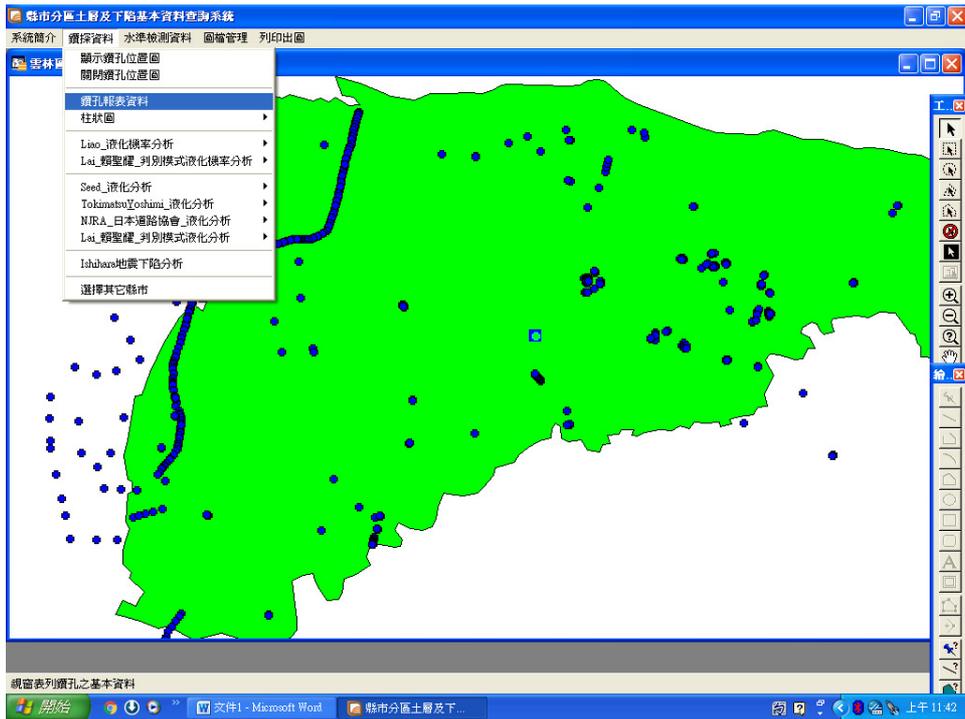


圖 5.4 雲林地區土層鑽孔資料報表查詢展示圖

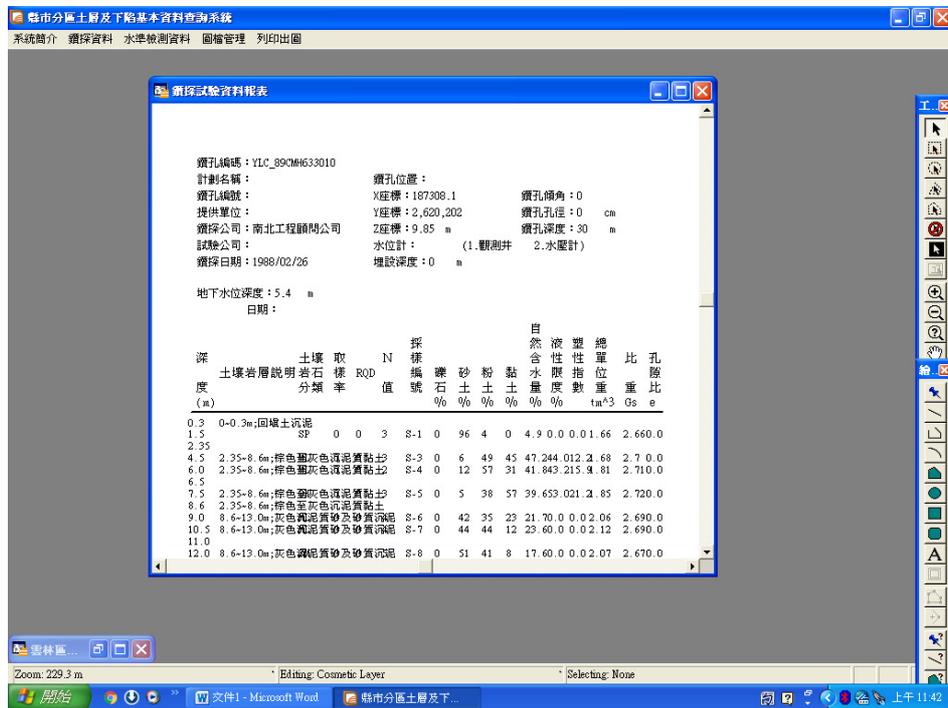


圖 5.5 雲林地區土層鑽孔資料報表展示圖

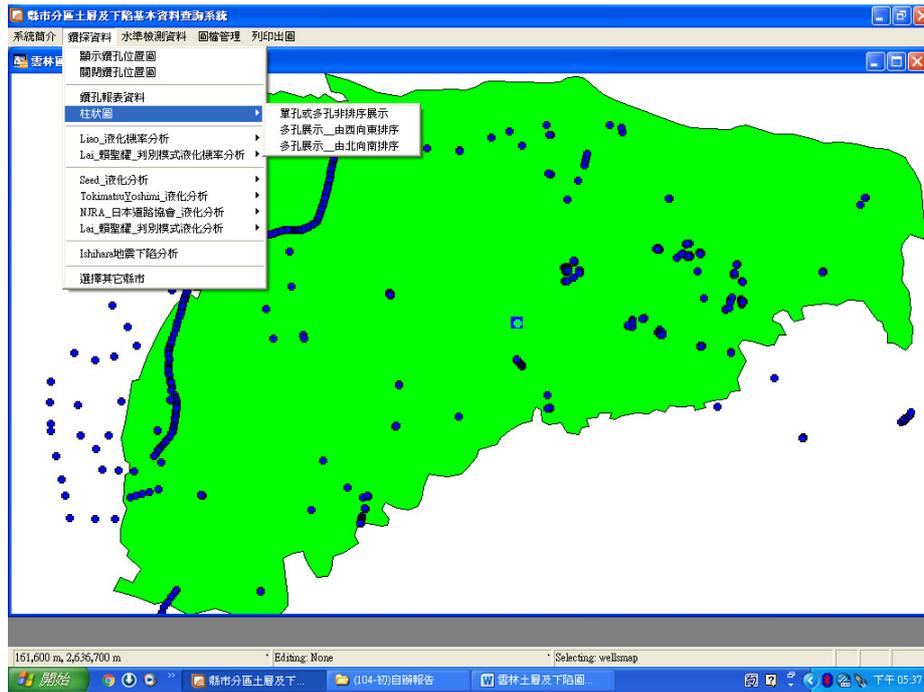


圖 5.6 雲林地區土層鑽探資料柱狀圖查詢展示圖

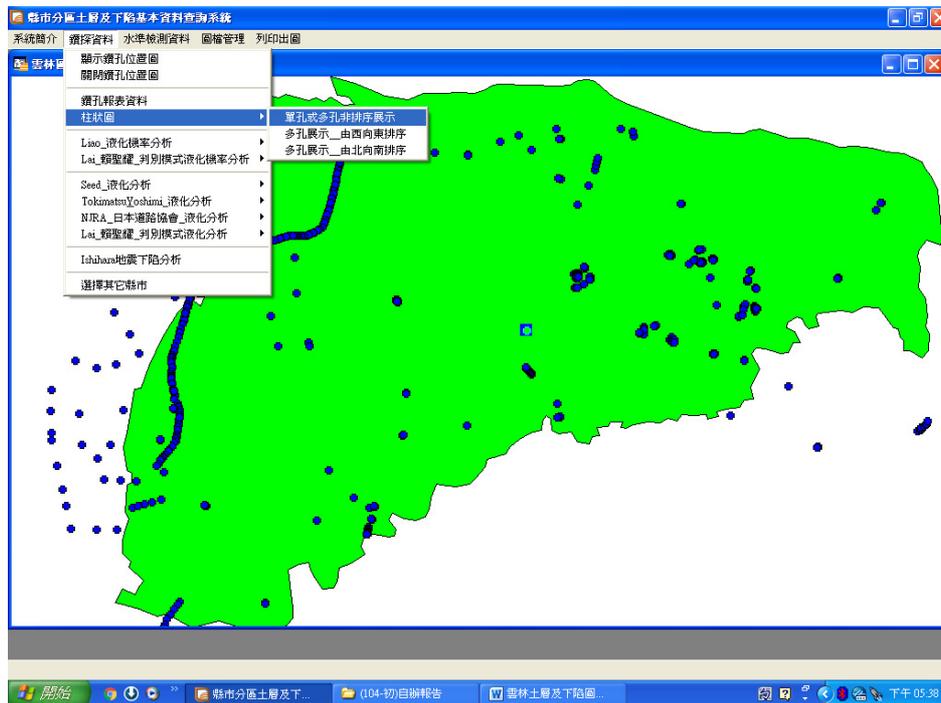


圖 5.7 雲林地區土層鑽探單孔或多孔非排序查詢展示圖

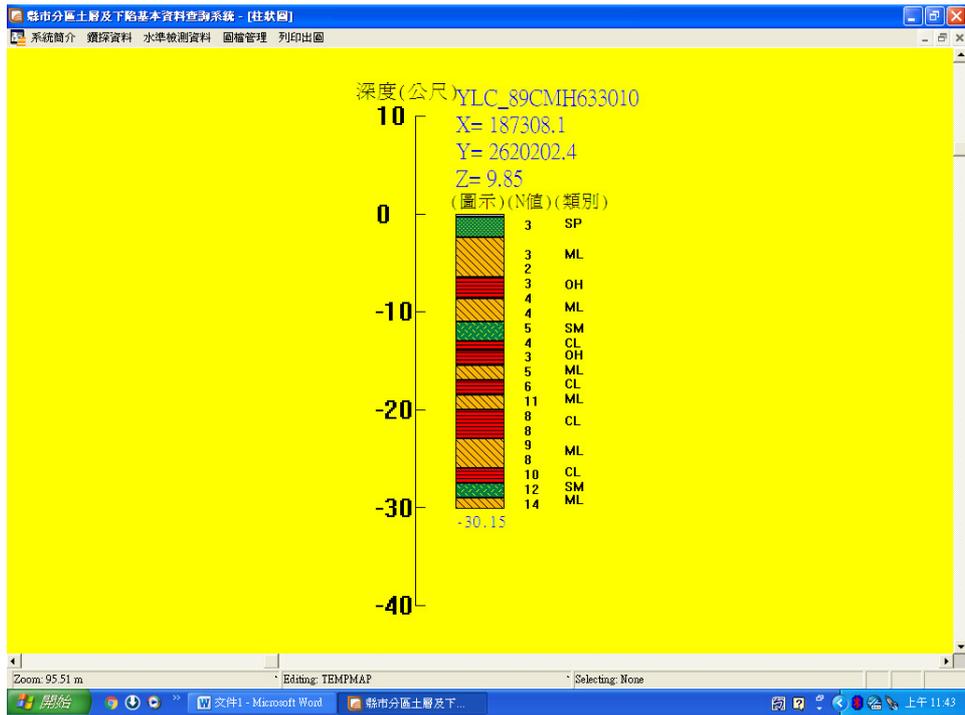


圖 5.8 雲林地區土層鑽探單孔非排序柱狀圖展示圖

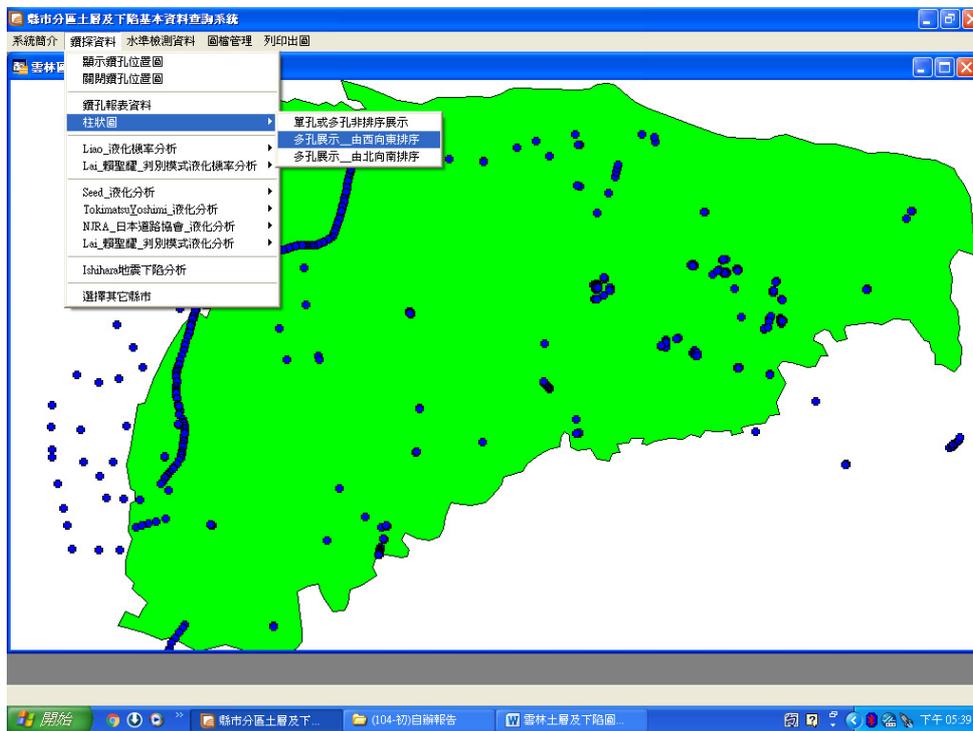


圖 5.9 雲林地區土層鑽探多孔展示排序查詢展示圖

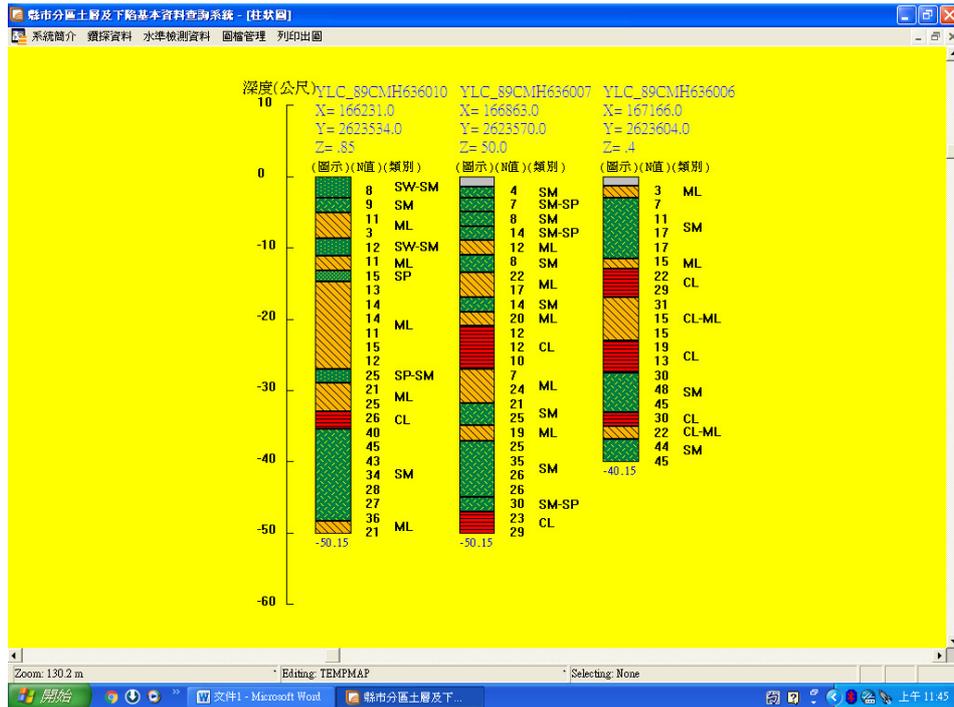


圖 5.10 雲林地區土層鑽探多孔展示\_由西向東柱狀展示圖

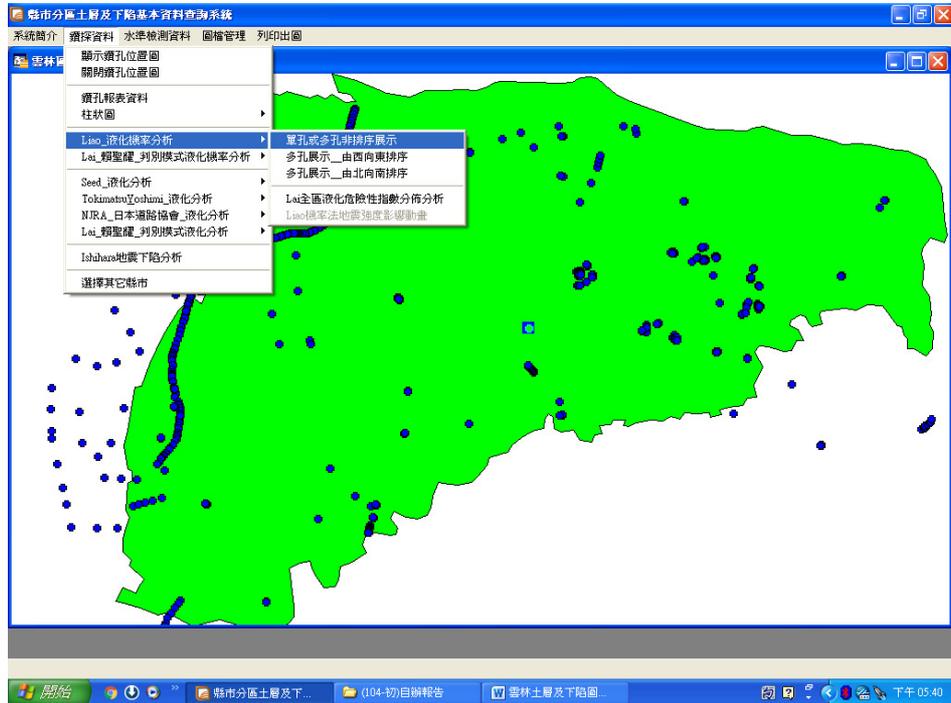


圖 5.11 雲林地區土層鑽孔液化機率分析查詢展示圖

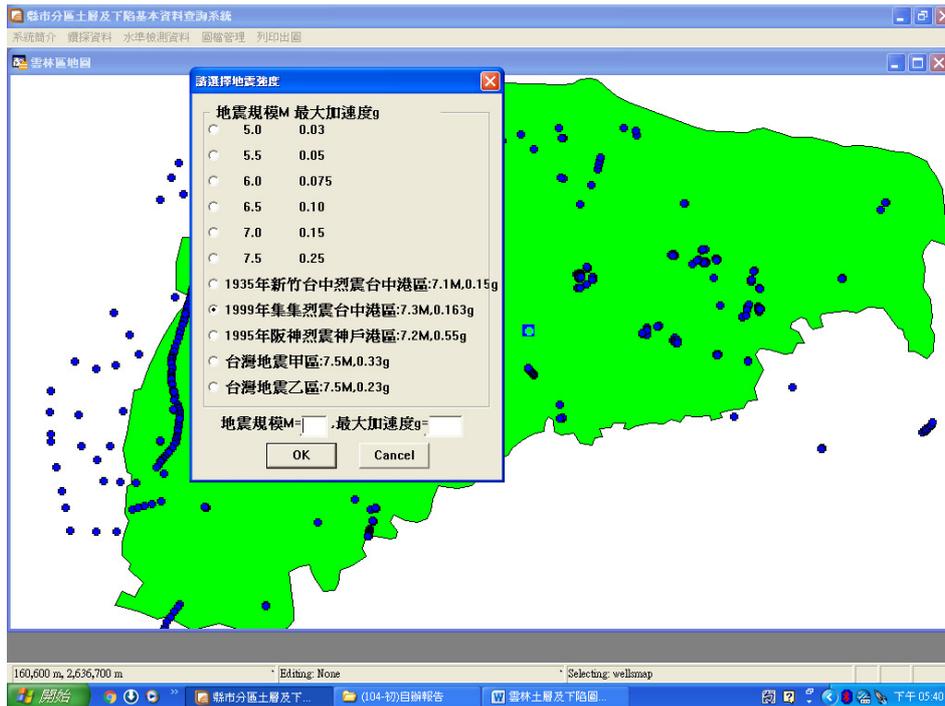


圖 5.12 雲林地區土層液化機率地震強度查詢展示圖

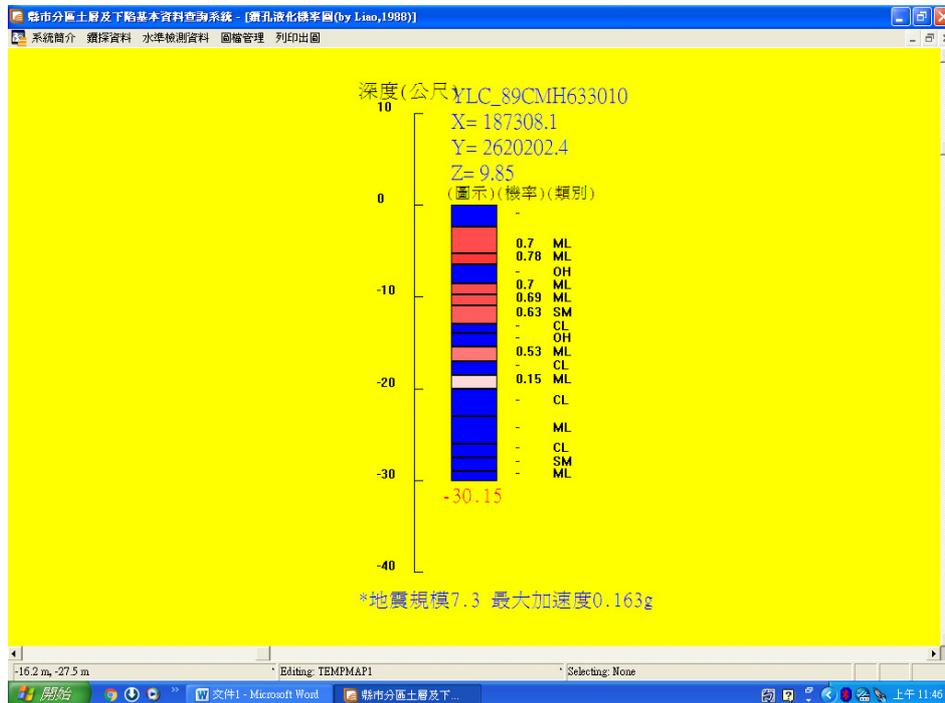


圖 5.13 雲林地區土層液化機率分析展示圖(Liao\_液化機率)

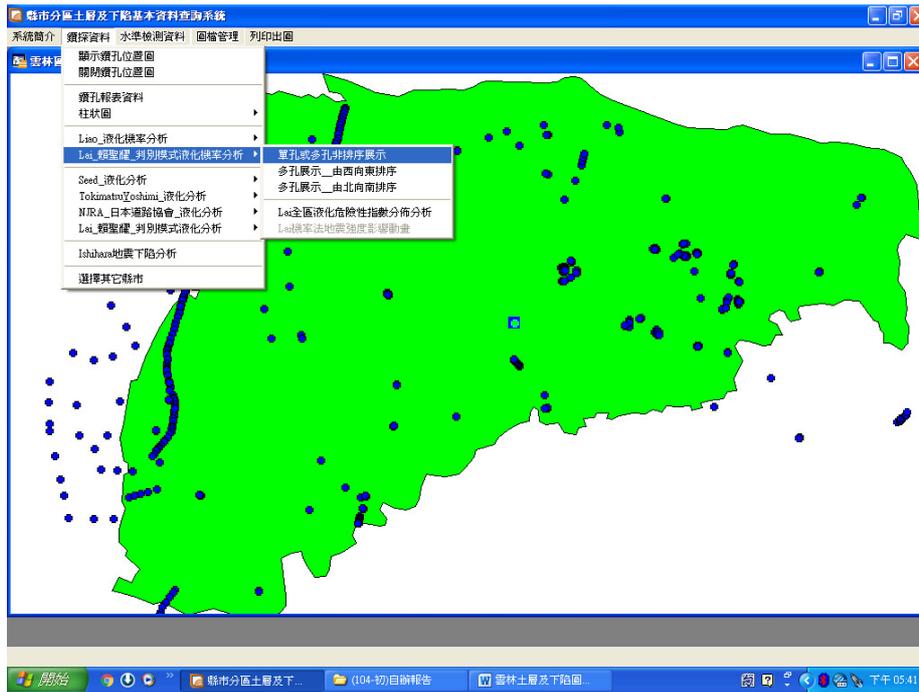


圖 5.14 雲林地區土層液化機率分析展示圖(Lai\_賴聖耀\_判別模式)

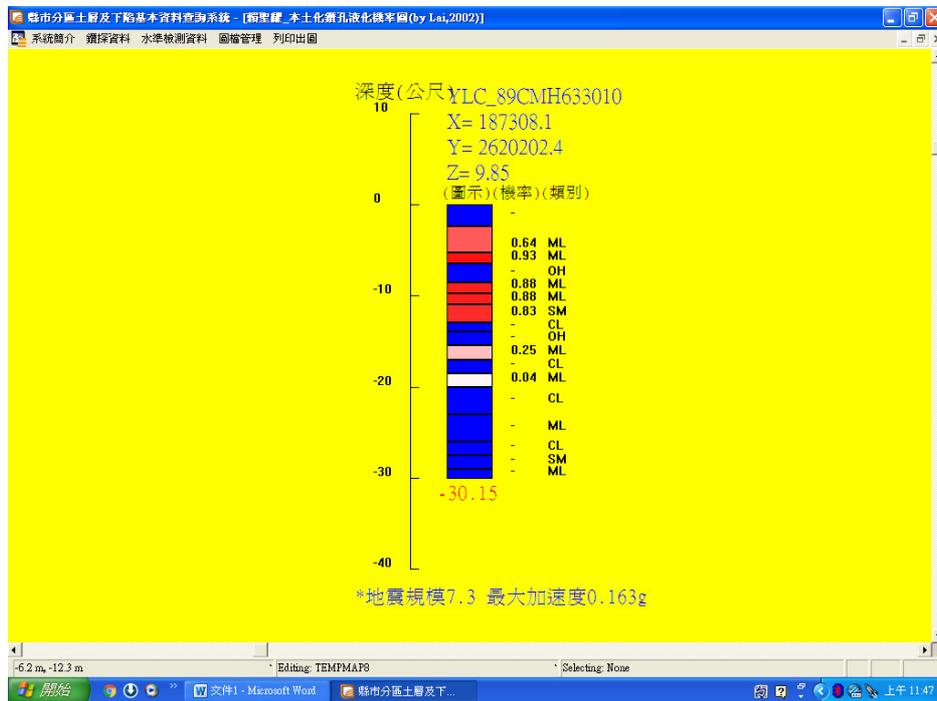


圖 5.15 雲林地區土層 Liao\_液化機率分析展示圖

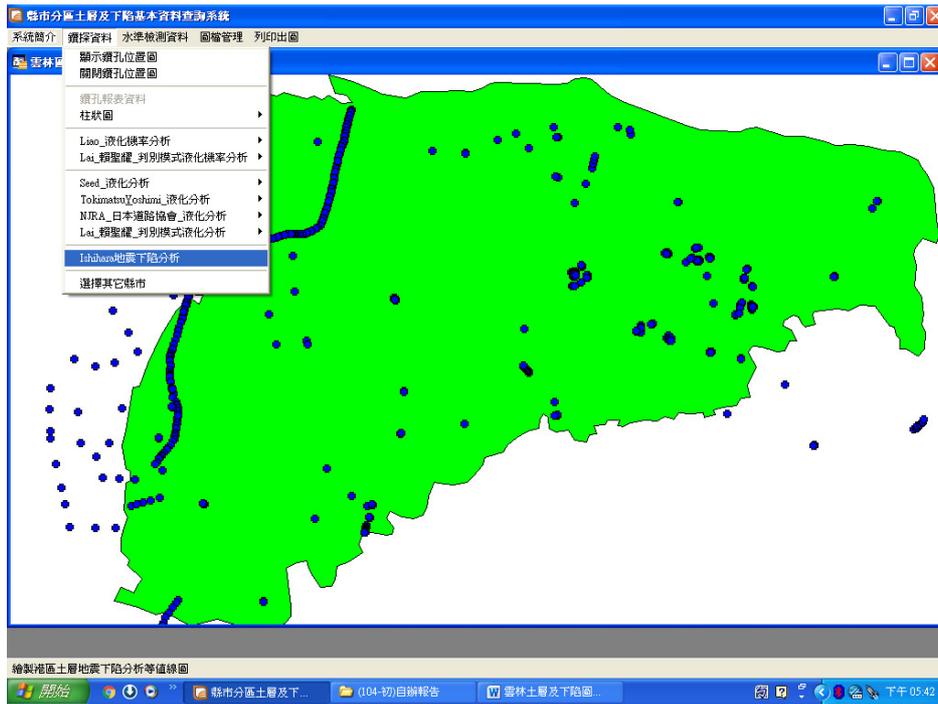


圖 5.16 雲林地區土層 Ishihara 地震下陷分析查詢展示圖

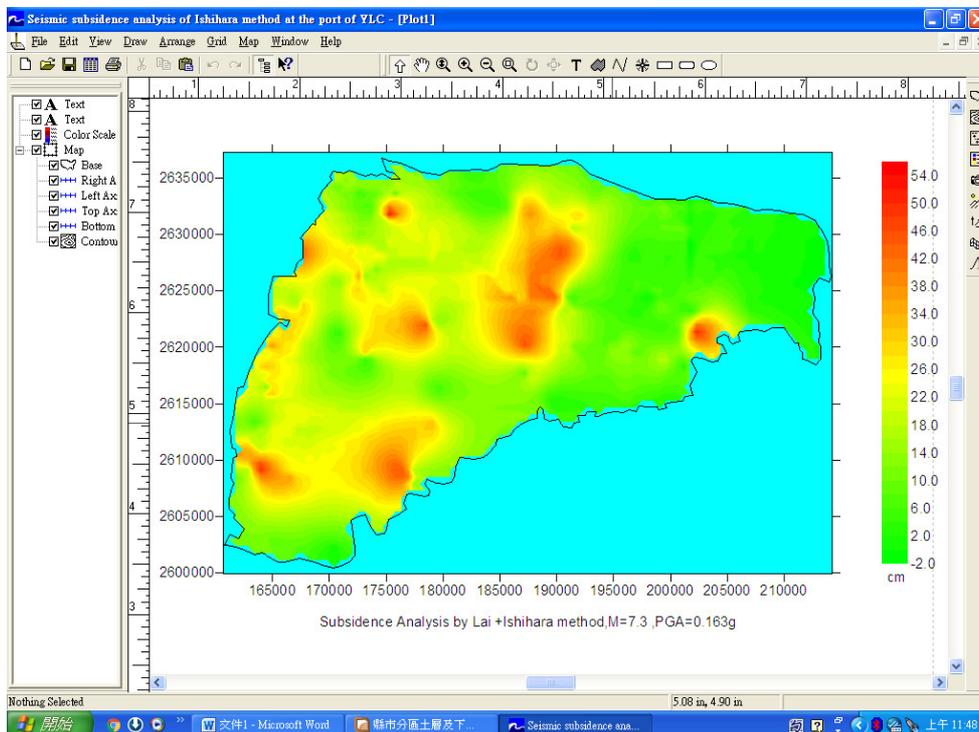


圖 5.17 雲林地區土層 Ishihara 地震下陷分析展示圖

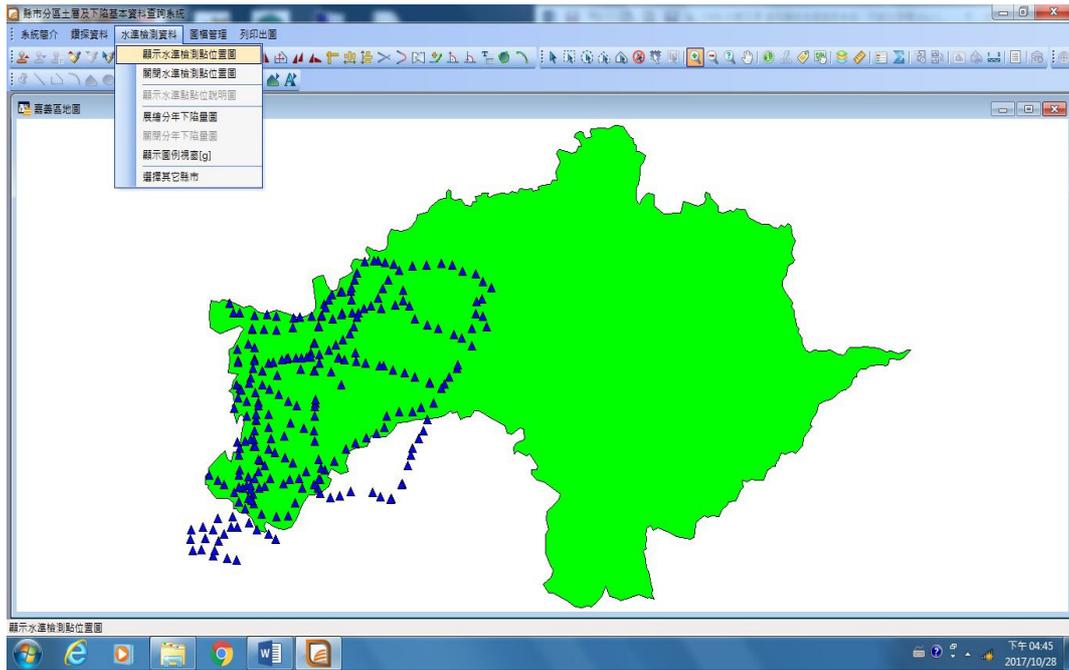


圖 5.18 嘉義地區水準檢測點位置圖展示圖

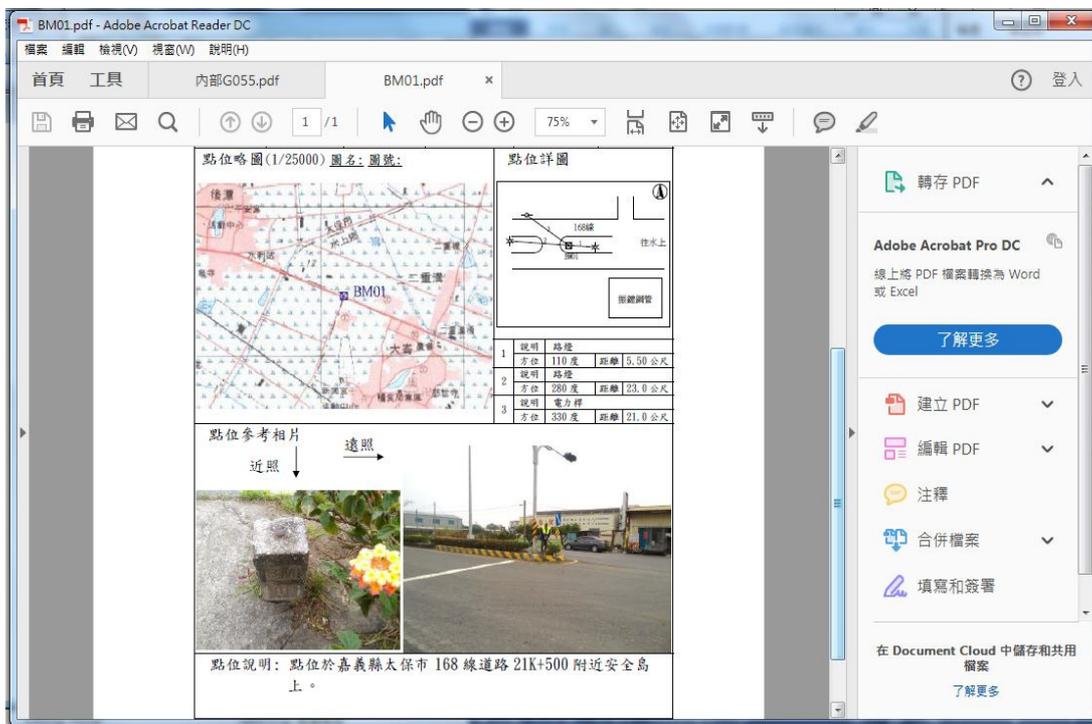


圖 5.19 嘉義地區水準檢測點位說明展示圖

BM01.pdf - Adobe Acrobat Reader DC

檔案 編輯 檢視(V) 視窗(W) 說明(H)

首頁 工具 內部G055.pdf BM01.pdf x 登入

1 /1 125%

### 水準點點位說明圖

點名	潭崙 11 桿	標石號碼	BM01	標石種類	水泥椿
TWD97 坐標		縱坐標: 2594187.000		橫坐標: 183994.000	
埋設日期	民國 85 年 05 月		埋設單位	水利局第五工程處	
檢測日期	檢測高程	檢測單位	引用基點	基點高程	備註
98 年 01 月	19.70762	水利局	BM9803S	24.86876	
99 年 06 月	19.70073	水利局	BM9803S	24.86876	
100 年 08 月	19.70372	水利局	BM9803S	24.86876	
101 年 08 月	19.69746	水利局	BM9803S	24.86876	
102 年 08 月	19.70471	水利局	BM9803S	24.86876	
103 年 08 月	19.70535	水利局	BM9803S	24.86876	
104 年 08 月	19.70113	水利局	BM9803S	24.86876	
105 年 06 月	19.71013	水利局	BM9803S	24.86876	

210 x 297 公厘

圖 5.20 嘉義地區水準檢測點位說明(高程資訊)展示圖

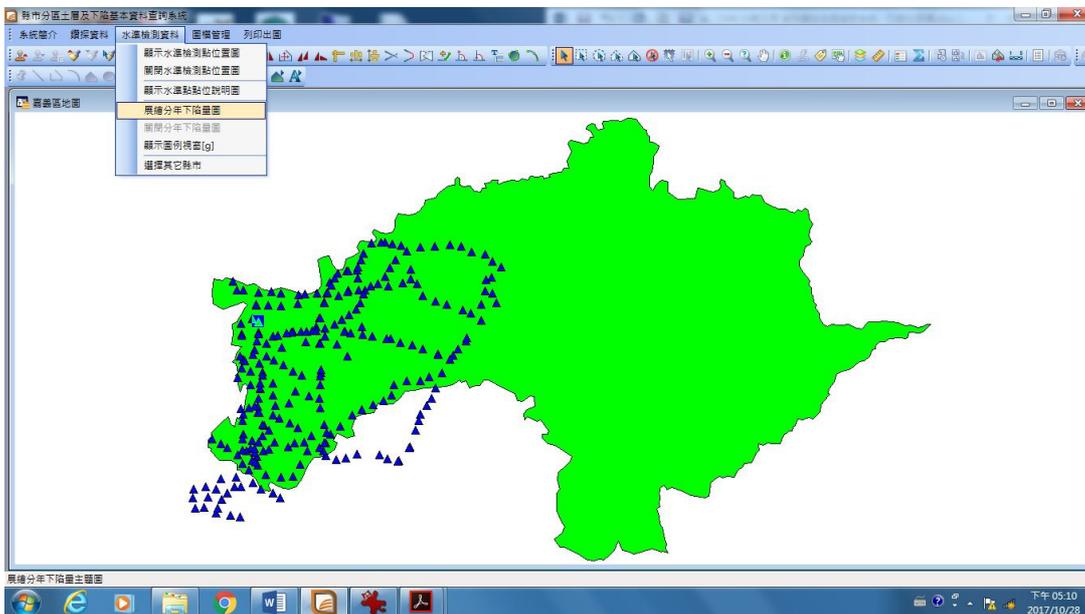


圖 5.21 嘉義地區水準檢測資料展繪分年下陷量圖查詢選單

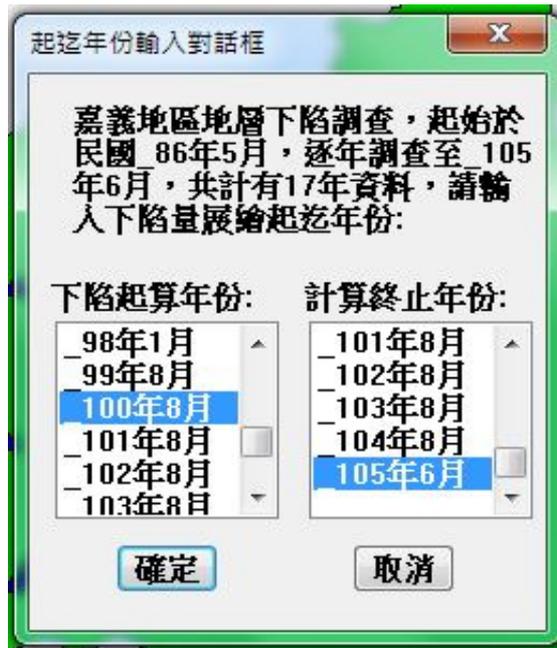


圖 5.22 嘉義地區地層下陷分年下陷量圖年份選取對話框

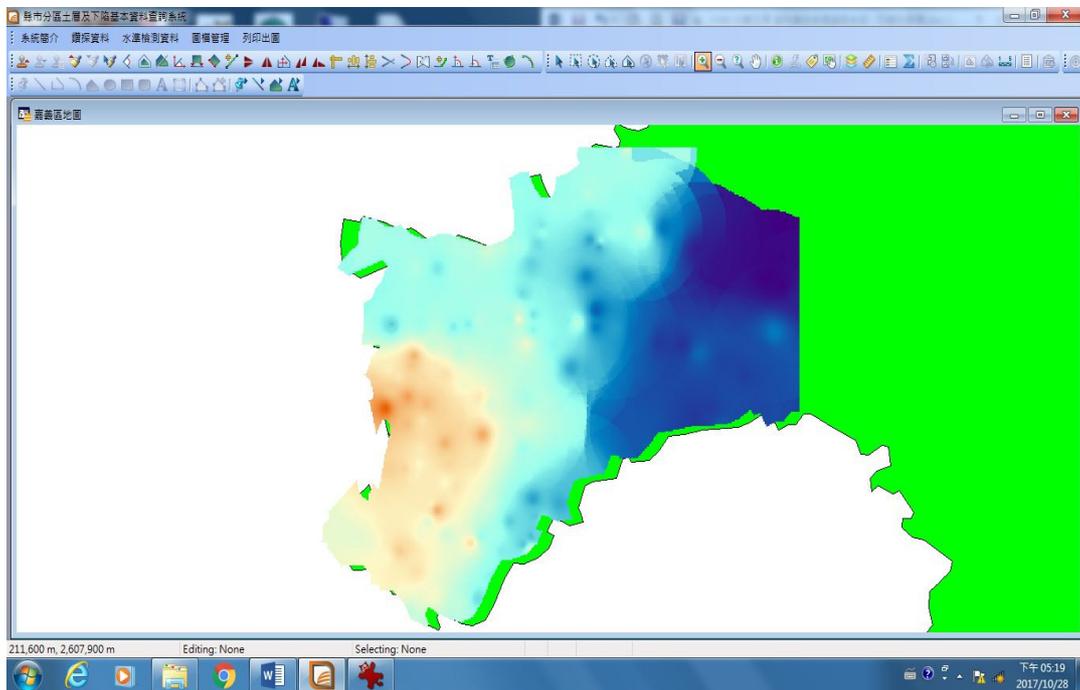


圖 5.23 嘉義地區水準檢測地層下陷量展示圖



## 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，高鐵路線於彰雲地區軟弱土層路段也因為地下水超抽而造成地層下陷，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、安平港、高雄港與大鵬灣等港區逐年設置地層分層下陷、地震監測站與地震速報系統，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。

本計畫主要工作重點是港區地震速報系統建置與精進、蒐集西南沿海地質資料建檔與港區地層下陷監測，本(107)年執行的內容是 1.彙整雲林、彰化、嘉義縣市地區之地質資料庫查詢系統，2.港區地震速報系統規劃設置與地震監測資料分析，3.各港區地層下陷及地下水壓之量測與資料彙整分析，4.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

本計畫進行港區地震監測與地層下陷監測調查之研究，綜合結果如下：

1. 彙整高雄港自 2005 年至 2017 年止共 103 起經中央氣象局定位之地震紀錄，選擇地表水平方向加速度歷時地震資料，其中震央距離測站超過 30 公里之 A、B 類型地震共有 88 起，水平兩方向地表加速度有 176 筆，將地震強度調整到 475 年設計地震大小，進行反應譜分析、彙整、平均化等步驟後得到水平譜加速度曲線圖，反應譜曲線平台約介於 0.14~0.7 秒。

2. 根據中央地調所調查資料，距高雄港最近的活動斷層，為旗山斷層與潮州斷層，旗山斷層長度為 30 公里，由以上 2 種不同學者之經驗式分別來估算出地震規模：地震規模分別為  $M_L=6.6$  與  $M_w=6.80\pm 0.28$ ，地震矩規模  $M_w$  轉換成芮氏規模為  $M_L=6.59\pm 0.14$ 。
3. 潮州斷層可分為南段與北段，斷層長度分別為北段 28 公里與南段 61 公里，共計 89 公里，由不同學者之經驗式分別來估算出地震規模。當斷層長度  $L=28$  公里時：分別為  $M_L=6.53$  與  $M_w=6.76\pm 0.28$ ， $M_w$  轉換成芮氏規模為  $M_L=6.57\pm 0.14$ 。當斷層長度  $L=61$  公里時：地震規模分別為  $M_L=7.3$  與  $M_w=7.17\pm 0.28$ ， $M_w$  轉換成芮氏規模為  $M_L=6.83\pm 0.14$ 。當潮州斷層南北段相加長度  $L=89$  公里時：地震規模分別為  $M_L=7.58$  與  $M_w=7.37\pm 0.28$ ，地震矩規模  $M_w$  轉換成芮氏規模為  $M_L=6.96\pm 0.14$ 。
4. 民國 107 年 2 月 6 日 23 時 50 分花蓮地區發生芮氏規模 6.2，地震深度 6.3 公里，震央在花蓮東北方海上。港研中心的花蓮地震站距離震央約 16.3 公里，地表最大加速度為 230gal，以實測所得 0.23g 進行反應譜分析，繪製水平譜加速度曲線圖，再與規範中 475 年設計地震水平譜加速度曲線圖比較，水平方向反應譜曲線在 1.3 秒及 1.7 秒以後明顯超出規範曲線，顯示該區域結構物有損害發生。
5. 計算花蓮港實測地震土壤剪應變量，垂直向質點速度以測站實測地表加速度經積分後的速度歷時值代入，再與測站之土壤剪力波速演算後得到土壤剪應變量，最大剪應變量已超出激發動態孔隙水壓之門檻值 ( $10^{-2}\%$ ) 許多，評估會有動態孔隙水壓激發產生。
6. 依水利署資料顯示，臺南地區自 99 至 100 年與 100 至 103 年近 5 年期間的平均下陷速率，主要下陷區域為北門與學甲，最大下陷速率皆小於 3 公分/年，顯示臺南地區的下陷速率已有趨緩。嘉義地區自民國 80 年至 103 年來總下陷量在 60 公分以上之下陷區，集中在東石鄉、布袋鎮、朴子市、義竹鄉等鄉鎮。
8. 在港灣地層下陷監測部份，布袋港水位監測站之 -05 m、-143m 及

-178m 深度地下水位，自地表下之 25~27 公尺逐漸回升到-16~-18 公尺，然後又下降到地表下 22~24 公尺，故布袋港附近地區有超抽深層之地下水，使港區之深層水位變化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 107 年 10 月止，總累積沉陷量約為 70cm，106 年沉陷量約為 1.5cm，107 年沉陷量約為 1.5cm，其中百分之 49 以上之沉陷在深度-140~-200m 地層發生，屬深層沉陷。

9. 布袋港 300m 地層下陷站經量測結果，自 89 年 10 月至 107 年 10 月止，共 18 年總累積沉陷量約為 92cm，107 年下陷 5.3 公分、近 3 年來累積沉陷量為 12.2 公分，104 年因測站又填土自 2.5 公尺至 6 公尺高，故沉陷量略增到 4 公分，105 年沉陷量 2.6 公分，106 年因缺水現象故沉陷量為 4.3 公分，平均 1 年約 5 公分，大致而言，布袋港區近 3 年來由於填土原因地層下陷有增加現象。
10. 布袋港 400m 深之地層下陷水準基站，民國 92 年設置於商港區的西北角隅，經自動監測結果，自 92 年 9 月至 107 年 5 月為止共 14 年之總累積下陷量約為 43.2 公分。
11. 由港研中心發展之「縣市分區土層及下陷資料庫」逐年已完成建置雲林、彰化、嘉義等縣，分別於 104 年完成雲林地區之地質調查資料 526 孔，蒐集建置水利署自民國 96 年至 102 年之水準點高程下陷資料，水準點數量 425 處，水準實測里程 520 公里。105 年完成彰化地區之地質調查資料 649 孔，蒐集水利署自民國 96 年至 102 年之準點高程下陷資料，水準點數量 273 處，水準實測里程 391 公里。106 年完成嘉義地區之地質調查資料 485 孔，建置水利署自民國 96 年至 105 年之水準點高程下陷監測資料，水準點數量 310 處，水準實測里程 433 公里，建置於「縣市分區土層及下陷基本資料庫」系統供查詢。
12. 本年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

1. 布袋港 300 公尺地層下陷監測站是 3 合 1 的測站，將地層下陷、地下水位與井下地震監測等系統整合在同一場址，因布袋港地層下陷嚴重已成窪地，再加上港區進行航道抽砂工程，將上岸的砂填於測站周圍，導致場址淹水不退，造成儀器損壞也增加維修困難，需考慮遷移。
2. 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：蒐集彙整嘉義、雲彰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. Arias, A. (1970). "A measure of earthquake intensity," in R. J. Hansen, ed. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 438-483.
2. Das. Braja M. (1983) " *Advanced Soil Mechanics*. " McGraw-Hill, NewYork.
3. Dobry, R., Ladd, R. S., Yokel, F. Y., Chung, R. M., and Powell, D. (1982), "Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquake by the cyclic strain method," *NBS Building Science Series 138, National Bureau of Standards*, Gaithersburg, Maryland, 150 pp.
4. Donald L. Wells and Kevin J. Coppersmith, 1994, *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*. *Bull.Ssism.Soc.Am*, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002, August 1994.
5. Elgamal, A., Yang, Z., Lu, J. (2006). "Cyclic1D: A Computer Program for Seismic Ground Response," Report No. SSRP-06/05, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego.
6. Holtz, R.D., and Kovacs, W.D. (1981), " *An introduction to geotechnical engineering*. " ,Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.
7. Ishihara, K., Yasuda, S., and Nagase,H., (1996), *Soil characteristics and ground damage*, Special Issue of *Soils and Foundations*, pp.109-118
8. Kramer, S. L. (1996).*Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
9. 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.
10. Newmark, N. M. (1965), "Effects of earthquakes on dams and

embankments. ", *Geotechnique*, 15(2), pp.139-159.

11. Rathje, E. M., Chang, W. J. and Stokoe, K. H. II (2003), "Development of an In Situ Dynamic Liquefaction," submitted to the *ASTM Geotechnical Testing Journal*.
12. Richart, F. E., Hall, J. R., and Woods, R. D. (1970), *Vibration of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
13. Schnabel PB, Lysmer J, Seed HB. SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center; 1972. UCB/EERC-72/12, p.102.
14. 水利處，「臺南地區地盤下陷檢測成果報告」，1995。
15. 水利處，「嘉義沿海地區地盤下陷檢測報告」，1996。
16. 水利處，「屏東縣沿海地區地盤下陷檢測報告」，1997。
17. 內政部，「建築物耐震設計規範及解說」，民國 95 年 1 月。
18. 交通部，「港灣構造物設計基準—碼頭設計基準及說明」，民國 86 年 7 月。
19. 交通部，「港灣構造物設計基準—碼頭設計基準及說明」，2000。
20. 交通部運輸研究所，「港灣構造物設計基準修訂」，2005 年 2 月。
21. 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。
22. 交通部公路總局(2014)，「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」。
23. 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。
24. 徐鐵良，「地質與工程」，科技圖書，民國 75 年。

25. 翁駿民，「耐震設計講意」，國立中興大學土木工程系，民國 101 年。
26. 屏東縣政府，「大鵬灣風景特定區整體發展規劃設計」，1997。
27. 高雄港務局，「安平港商港區地質鑽探工程報告書」，(1970-1998)。
28. 高速鐵路工程局，「高鐵局簡訊 220 期、232 期、242 期」。
29. 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。
30. 陳明山、段紹緯、黃永和、謝添和，「高速鐵路橋樑樁基礎設計考量」 THE 10<sup>TH</sup> CONFERENCE ON RESEARCHES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING IN TAIWAN, OCT.2-4 2003, SANCHIH。
31. 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。
32. 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」。
33. 經濟部水利署(2014)，「103 年度多元化監測及整合技術應用於宜蘭、嘉義、台南及屏東地區地層下陷監測」。
34. 楊萬全，「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，2000。
35. 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。
36. 彭瀚毅，「臺北盆地場址效應之研究」，中央大學博士論文 1998。
37. 經濟部中央地質調查所，「臺灣地質圖」，2000。
38. 經濟部中央地質調查所特刊第 17 號，「臺灣西南部的活動斷層」，民國 96 年 3 月。

39. 經濟部中央地質調查所特刊第 23 號，「臺灣東部與南部的活動斷層」，民國 98 年 12 月。
40. 賴典章、費立沅、江崇榮，「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，2003。
41. 賴聖耀、李延恭、陳志芳，「安平港地震與動態孔隙水壓監測之研究」，交通部運輸研究所報告，2000。
42. 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。
43. 賴聖耀，「港灣地區地震監測與土壤液化潛能評估之研究」，交通部運輸研究所，2001。
44. 賴聖耀，「港灣地區大地災害調查與常態監測之研究(2/4)」，交通部運輸研究所報告，2007。
45. 賴聖耀，「臺灣近岸地震潛勢及海嘯影響範圍分析(1/4)」2008。
46. 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。
47. 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報告，1994。

## 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.國立成功大學 陳景文委員</p>	<p>1.高雄港設計地震力中測站地震類型，A 類與 C 類是否重疊，請說明。</p> <p>2.花蓮港資料僅以震央距離分析，是否應補充以那一斷層分析？</p> <p>3.第四章名稱嘉南與港灣地區中之嘉南，是否應明確化？</p> <p>4.第五章資料大部份包含非港區資料，其應用是否符合本研究之課題範圍？</p>	<p>1.感謝委員指教，已修正。</p> <p>2.感謝委員指教，因資料有限，本年度僅以港研中心測站資料分析。</p> <p>3.感謝委員指教，已修正。</p> <p>4.感謝委員指教，地質資料庫建置範圍包括西南沿海地區。</p>
<p>2.國立中興大學 林炳森委員</p>	<p>1.本研究搜集地震監測資料、地層下陷資料與地震速報系統精進，具有實用價值，且可供各港務公司管理單位維護結構物之參考。</p> <p>2.未來工作建議：</p> <p>(1).持續量測港區地層下陷與維護。</p> <p>(2).精進港區災害速報系統。</p> <p>3.其它需修正部份：</p> <p>(1).報告中 1-1 頁第 9 行「地下水大多已降到」請改為「地下水大多降到」。</p> <p>(2).報告中 3-4 頁，液限「20%~50%」應改為液限「20~50」。</p>	<p>1.感謝委員肯定。</p> <p>2.</p> <p>(1).感謝委員指教。</p> <p>(2).感謝委員指教。</p> <p>3.</p> <p>(1).感謝委員指教，已修正。</p> <p>(2).感謝委員指教，已修正。</p>

審查委員	審查意見	處理情形
	<p>(3).報告中 3-36 頁，圖 3.23 比較現地加速度與 Cyclic1D 之區別應說明。</p> <p>(4).報告中 4-1 頁，砂土沉陷「速度快」，應改為「速率快」，但沉陷量小，應修正。</p> <p>(5).報告中 4-7 頁開放式水壓計(open stand pipe)應說明。</p> <p>(6).參考文獻應列完整，且依規定格式要有出處，如 2.Das 應列出版書局。</p>	<p>(3).感謝委員指教，已補充說明。</p> <p>(4).感謝委員指教，已修正。</p> <p>(5).感謝委員指教，已補充說明。</p> <p>(6).感謝委員指教，已修正。</p>
<p>3.鼎興工程顧問公司 蔡瑤堂委員(書面)</p>	<p>1.本研究為連續性計畫，建議在前言增加一節簡單扼要說明各年度研究成果，讓讀者瞭解整個研究流程及其成果。</p> <p>2. P.2-4 地震計安裝設計深度為 15m、30m、100m、300 等四組分置於四孔。但 P.2-7 表 2-1 各港區只有一個孔，而且只有布袋港儀器深度達到 300m，上述差異原因何在？</p> <p>3.P.3-1 港區地震監測分析建成資料庫是否提供給另案"港區工程基本資料查詢系統"作土壤液化分析？</p>	<p>1.感謝委員指教，已補充修正。</p> <p>2.感謝委員指教，P.2-4 及表 2-1 已修正。</p> <p>3.感謝委員指教，已提供工程基本查詢系統作土壤液化分析。</p>

審查委員	審查意見	處理情形
	<p>4. P.3-1 高雄港位於台灣西南部沿海，腹地廣大，地處台灣海峽...與上一段重複，故宜刪除。</p> <p>5. P.3-1 3.1.1 高雄港整體規劃 建議改為”高雄港概況”</p> <p>6. P.3-63 花蓮 107 年 2 月 6 日大地震，本研究之”港區地震災況速報系統”是否有發揮預期功能？</p>	<p>3. 感謝委員指教，已修正。</p> <p>4. 感謝委員指教，已修正。</p> <p>5. 感謝委員指教，系統有即時起動該速報，惟因設定時間歷時不足，PGA 非最大值。</p>
<p>4. 臺中港務分公司 顏垂慶委員</p>	<p>1. 本報告書摘要效益部分，提及「港區地震災況速報系統」，其通報內容為何員及相關人員定義為何，請加強論述。</p> <p>2. P2-12..即時畫面顯示如圖 2.15 至圖 2.20 所示，圖號是否有誤，應否為圖 2.16 至圖 2.21，請確認。</p> <p>3. P3-1 第三章港區地震監測分析引言部分，請加強論述內容，如本年度以高雄港監測站資料為主，蒐集港區地形、地質、歷史地震資料.....，回顧臺北港的水平加速度反映普，彙整 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分震央發生於花蓮</p>	<p>1. 感謝委員指教，已修正。港區地震災況依碼頭損壞程度通報各港務公司防救災與工程維管人員。</p> <p>2. 感謝委員指教，已修正。</p> <p>3. 感謝委員指教，已修正。</p>

審查委員	審查意見	處理情形
	<p>東部海域，芮氏規模 6.2....，該段文字內容相互間有何關聯性。</p> <p>4. P3-7~P3-9提及高雄縣..部分，請修正為高雄市，或另以文字補充說明，現已改制為高雄市 00 區。</p> <p>5. P3-29 圖 3.17 剪力波速 (m/sec<sup>2</sup>)，是否有誤，請再確認。</p> <p>6. P3-44 2018 年 2 月 6 日花蓮地震報告中央氣象局地表加速度資料與港研中心資料數據相差太大(如 NS 向 442.22gal 與 230gal)，請檢討原因。</p> <p>7. P4-16 敘及台南過去 13 年，主要下陷區發生在台南市北門區、學甲區與安南區，為 P4-18 表 4.1 學甲區下陷不嚴重，請檢討說明。</p> <p>8. O6-1 6.1 結論 1.彙整高雄港自 2005 年至 2017 年.....反應頻譜曲線平台約介於 0.103~0.8 秒。請說明 0.103~0.8 秒如何取得。</p>	<p>4.感謝委員指教，已修正。</p> <p>5.感謝委員指教，已修正。</p> <p>6.氣象局測站設置在縣消防局大樓地下室內量測結構物震度，港研中心測站設於港務公司前花園內，屬於自由場，因地質條件不同，故 PGA 會有差異。</p> <p>7.感謝委員指教，表 4.1 已修正。</p> <p>8.感謝委員指教，已修正。依反應頻曲線平台涵蓋之週期時間來界定。</p>

## 附錄二

### 期末報告簡報資料



# 港區地震監測與地層下陷 調查分析研究

■ 報告人：陳志芳



執行單位：港灣技術研究中心  
計畫時程：107.1.1~107.12.31



## 港區地震監測與地層下陷調查

- 一、前言
- 二、地震速報規劃  
    速報精進
- 三、地震監測  
    高雄測站、設計地震、斷層與規模、花蓮地震
- 四、地層下陷監測
- 五、資料庫建置
- 六、結論

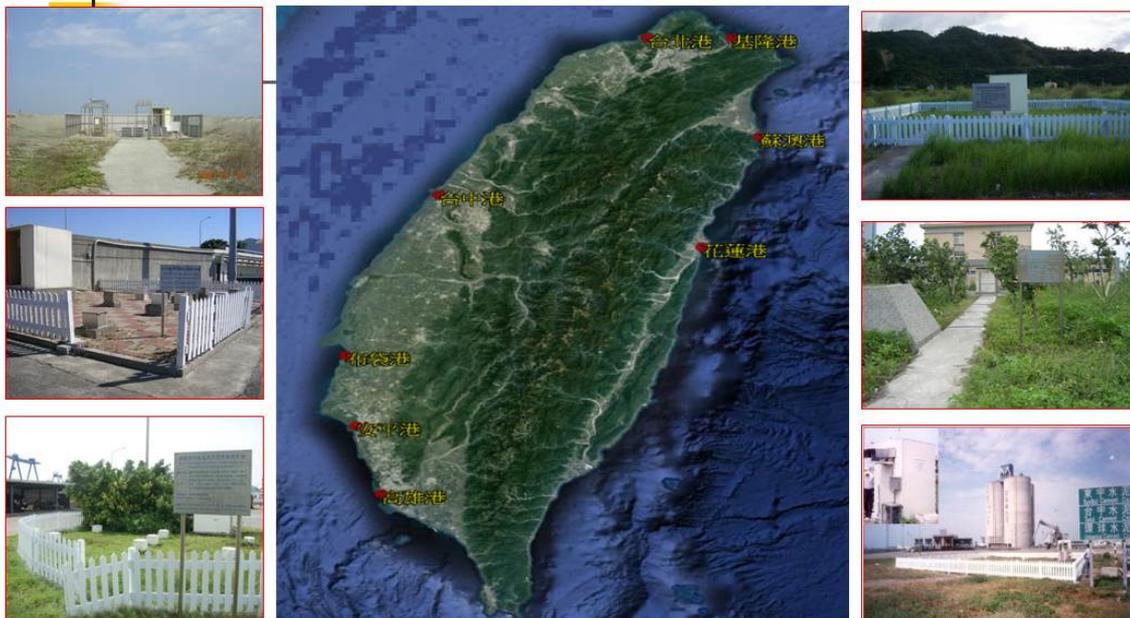
## 計畫緣起

- 臺灣西海沿岸港灣地區，由於強烈地震作用造成碼頭結構物因基礎失去承载力而破壞。
- 由於地下水大量開發，超抽地下水引致之地層下陷問題，是沿海地區普遍現象。
- 爰此，港研中心在港區適當地點設置地震與地層下陷監測站，針對地震或地層下陷所產生之效應，進行長期監測及港區設計地震力分析，作為設計港灣結構物與維護各項工程設施參考。
- 精進港區震災後速報系統。

2

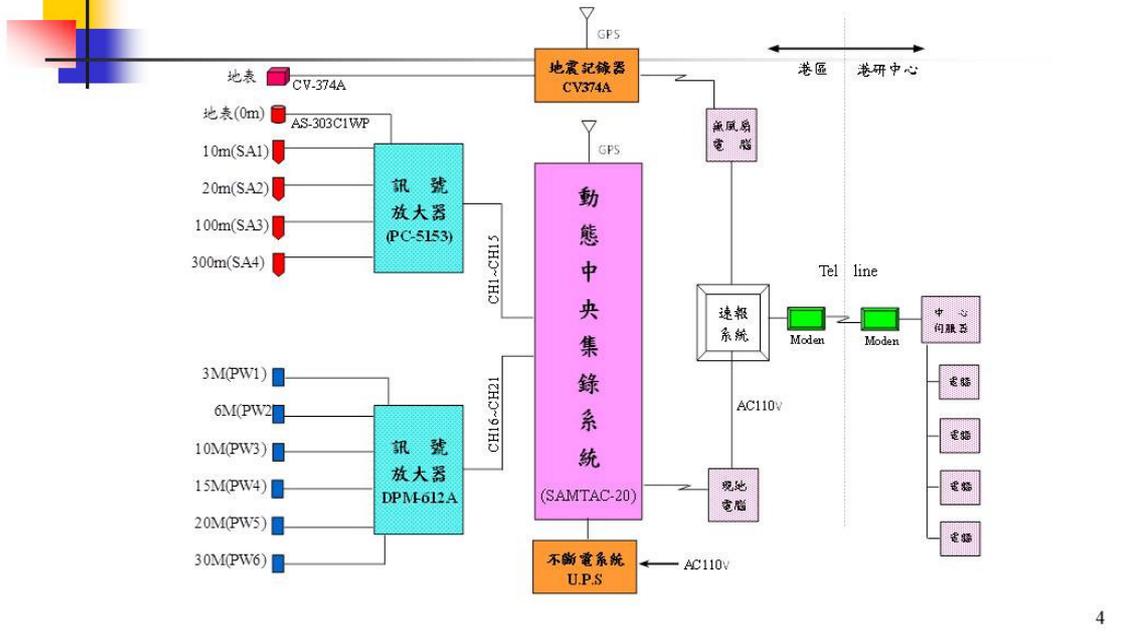
三、地震監測

## 港區地震監測與速報系統設置

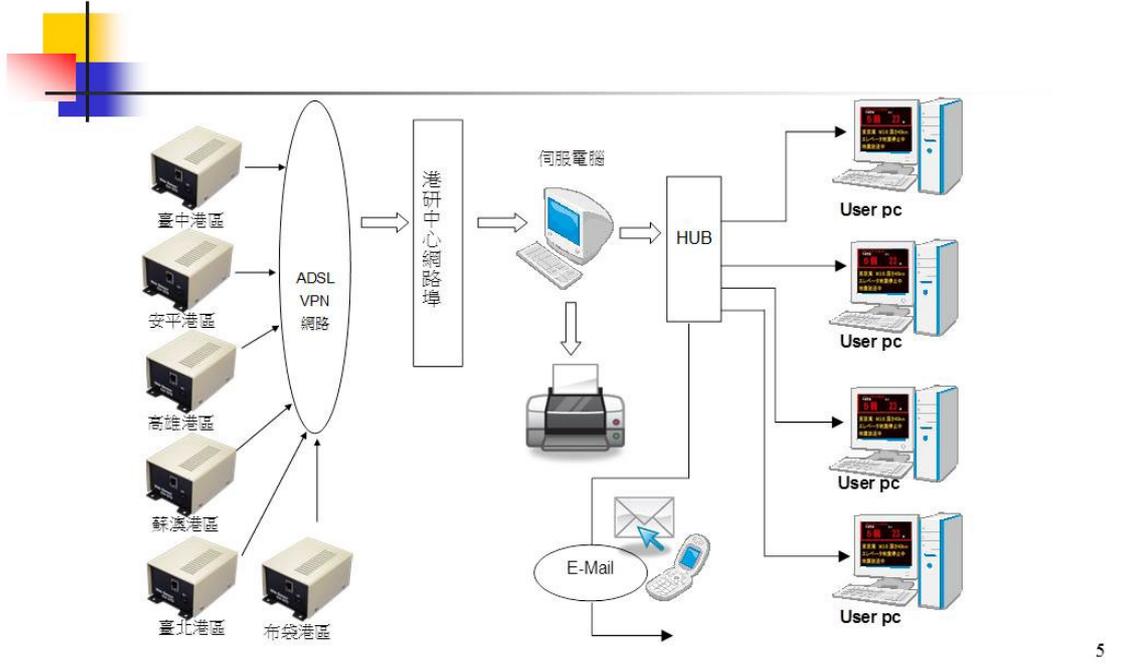


3

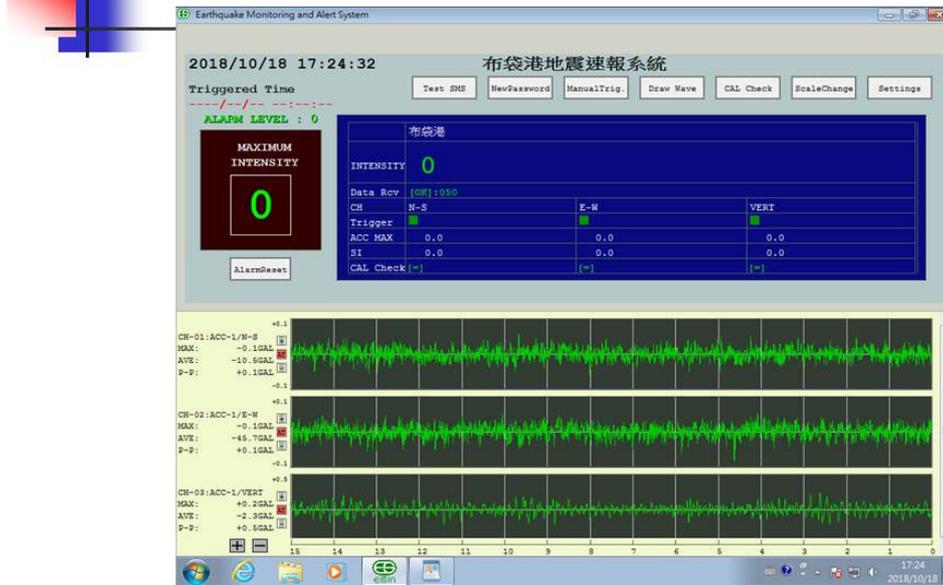
### 港區地震監測與災況速報系統儀器配置圖



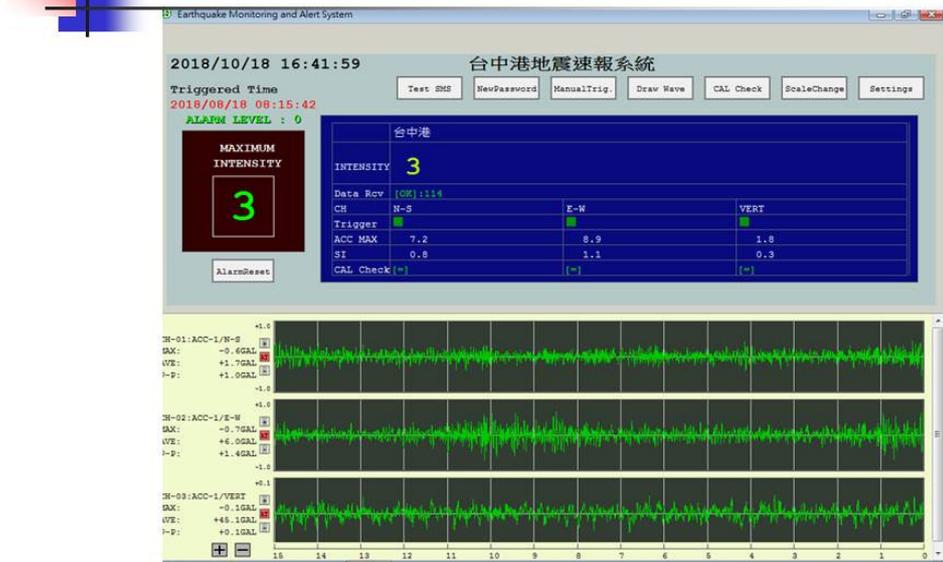
### 港區地震災況速報系統儀器配置示意圖



### 布袋港區地震即時監測畫面示意圖



### 臺中港區地震即時監測畫面示意圖



## 港區地震監測資料

- 以**高雄港地震站**資料為例，蒐集港區地層、地質、歷史地震資料與附近活動斷層探討地震對該地區結構物的影響與製作港區設計地震力反應譜。
- 監測所得資料經彙整分析後，進行檢核現有結構物承受地震力影響後之安全性評估。
- 港區地震簡訊供各港務分公司之碼頭管理人員作為地震災後修復速報訊息參考。

8

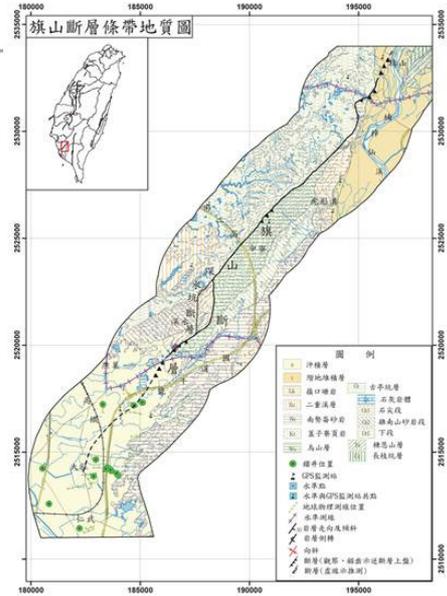
## 高雄港區地震力分析-港區附近的活動斷層

- 斷層通常是地震釋放能量的地方，因此在大地震發生後，常出現地表破裂，而破裂面的兩側岩層發生相對位移之現象。
- 臺灣南部的活動斷層小崗山斷層、旗山斷層、六龜斷層、潮州斷層、鳳山斷層與恆春斷層。
- 高雄港區附近的活動斷層：距高雄港區最近具影響港區構造物的活動斷層**旗山斷層**與**潮州斷層**。
- **旗山斷層**具逆移斷層的特性，**列第一類活動斷層**。  
○ 最近調查，**潮州斷層**在更新世晚期可能有活動，潮州斷層列**第二類活動斷層**。

9

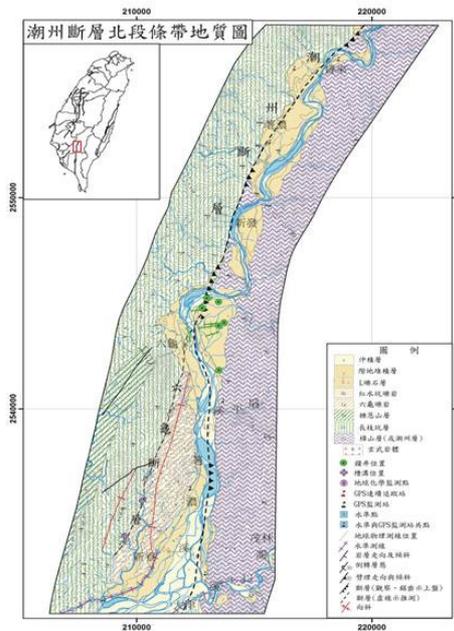
### 旗山斷層-逆移斷層(30公里)

高雄旗山  
南伸  
高雄仁武

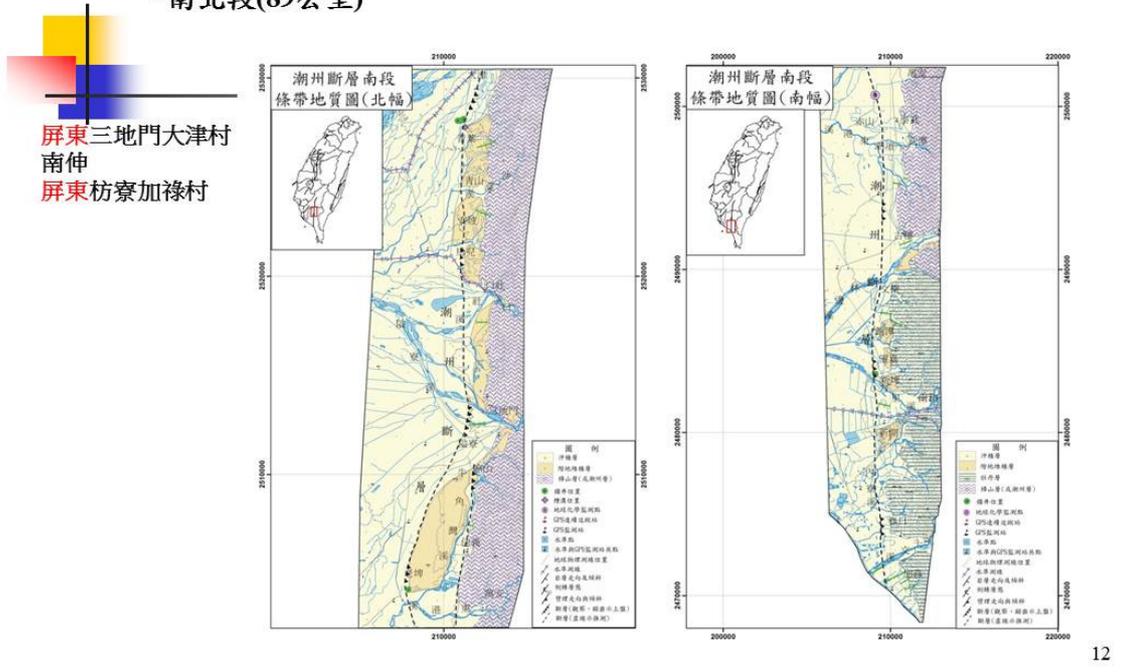


### 潮州斷層 -北段-逆移斷層(28km)

高雄六龜寶來  
南伸  
屏東三地門大津村



### 潮州斷層-南段-逆移斷層(61公里) -南北段(89公里)



### 斷層長度與地震規模

- Tsai et al., (1987) 針對斷層長度與規模關係所發展之經驗式：  
$$L = \exp [ 1.006 M_L - 3.232 ] \quad (3-1)$$
- 上式中， $L$ ：斷層破裂長度 (km)， $M_L$  = 地震規模。

### 斷層長度與地震規模

- Wells and Coppersmith (1994)根據全球244個大地震資料迴歸得到地表地震斷層長度、地震規模的經驗式如3-2a、3-2b
  - $M_w=5.16+1.12*\log(SRL)$  (3-2a)
  - $M_w=5.00+1.22*\log(SRL)$  (3-2b)
- $SD=0.28$
- 式中  $M_w$  表示地震矩規模， $SRL$  為地表破裂長度(公里)； $SD$  表示1個標準偏差值。

### 斷層長度與地震規模

- 地震規模  $M_w$  與  $M_L$  之間的轉換關係，可根據 Wu et al.(2000) 依據臺灣地震紀錄所建立之經驗式換算。
  - $M_L=4.533Ln(M_w)-2.091\pm 0.14$  (3-3)

## 斷層長度與地震規模

- 高雄港地區根據中央地調所調查之旗山斷層與潮州斷層長度為30公里與89公里，分別依上列經驗式來估算地震規模：
- 當斷層長度 $L=30$ 公里時，地震規模為 $M_L=6.6$  與 $M_W=6.80\pm 0.28$ ， $M_W$ 轉換成芮氏規模為 $M_L=6.59\pm 0.14$ 。
- 斷層總長度 $L=89$ 公里時，地震規模為 $M_L=7.58$ 與 $M_W=7.37\pm 0.28$ 。 $M_W$ 轉換成芮氏規模為 $M_L=6.96\pm 0.14$ 。

16

## 高雄港區設計地震力-測站的地震類型

- 彙整高雄港地震監測站歷年監測所得，依地震規模大小與測站震距，將地震資料分為A、B、C三種不同類型。
- A類型地震為震央距測站超過30公里，芮氏規模3.8以上(介於3.8~6.9)、測站震度為4級以下之地震紀錄。
- B類型地震為震央離測站超過30公里，芮氏規模5.6以上(5.6~7.0)、測站震度為4級以上之強震紀錄。
- C類型地震為震央距測站少於30公里、芮氏規模小於5.4，測站震度4級以下，屬於近距離之地震紀錄。
- 高雄港自2005~2017年地表地震監測資料，依A、B、C三種地震歷時資料分別繪製加速度歷時圖、加速度傅氏頻譜圖與進行5%阻尼比之反應譜分析。

17

### 高雄港A、B、C類型地震水平地表加速度歷時圖

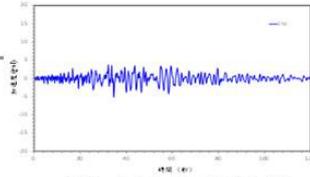
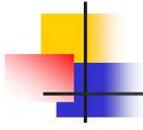


圖 3.8a 高雄港 A 類型地震歷時圖

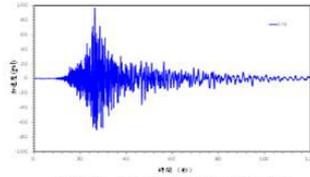


圖 3.8b 高雄港 B 類型地震歷時圖

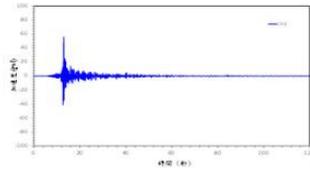


圖 3.8c 高雄港 C 類型地震歷時圖

### 高雄港A、B、C類型地震水平地表加速度傅氏頻譜圖

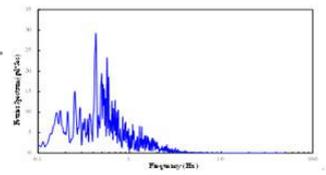
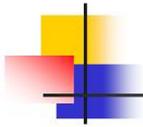


圖 3.9a 高雄港 A 類型地震加速度富氏譜圖

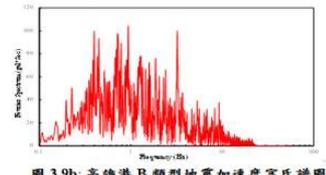


圖 3.9b 高雄港 B 類型地震加速度富氏譜圖

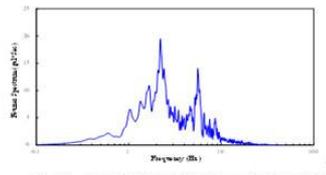


圖 3.9c 高雄港 C 類型地震加速度富氏譜圖

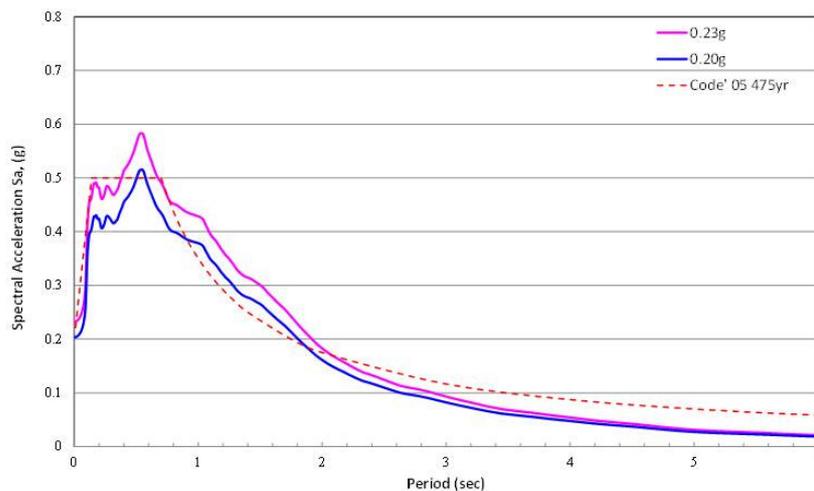
## 高雄港區水平地表加速度反應譜

- 選擇其中震央距測站超過30公里之A、B類型地震水平兩方向地表加速度共有176筆，將地震強度調整到475年設計地震大小，並進行反應譜分析、彙整、平均化等步驟後得到水平譜加速度曲線圖。
- 建築物耐震設計規範：
- 工址短週期設計水平譜加速度係數， $S_{DS} = S_S^D F_a$
- 規範： $PGA=0.4 \times S_{DS} = 0.4 \times S_D^S \times F_a = 0.4 \times 0.5 \times 1.0 = 0.20$
- 式中， $F_a$ ：為反應譜等加速度段之工址放大係數(短周期結構)，隨地盤種類與震區短週期水平譜加速度係數 $S_S(S_S^D)$ 而改變。

20

## 高雄港A、B類型地震水平加速度反應譜曲線圖(0.20g、0.23g)

高雄港測站2005~2017年地震水平加速度反應頻譜圖

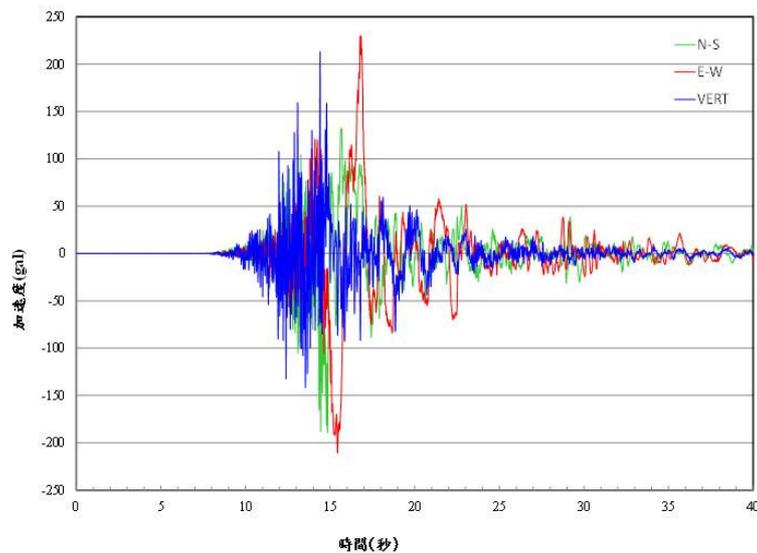


21

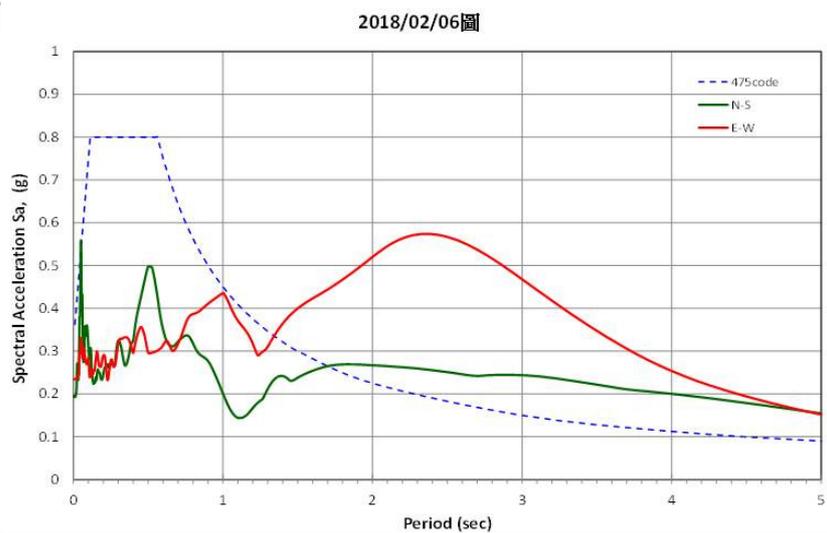
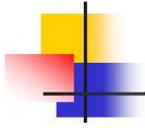
## 花蓮港區水平地表加速度反應譜分析

- 港研中心的花蓮地震站距離震央約16.3公里，地表最大加速度為**230gal**，以實測所得0.23g進行反應譜分析，繪製水平譜加速度曲線圖，再與規範中475年設計地震水平譜加速度曲線圖比較，水平方向反應譜曲線在**1.3秒及1.7秒**以後明顯超出規範曲線，顯示該區域結構物有損害發生。

## 花蓮港地震水平加速度歷時圖(230gal)



## 花蓮港地震水平加速度反應譜曲線圖(230gal)



## 花蓮港地震站-土壤剪應變量



- 採用2018年02月06日花蓮港測站地表加速度歷時。
- 依監測之地表加速度歷時資料經過積分得到速度歷時資料與土壤之剪力波速演算土壤之剪應變量，最後依其剪應變量，進一步判別是否達激發動態孔隙水壓之門檻值。

## 土壤剪應變

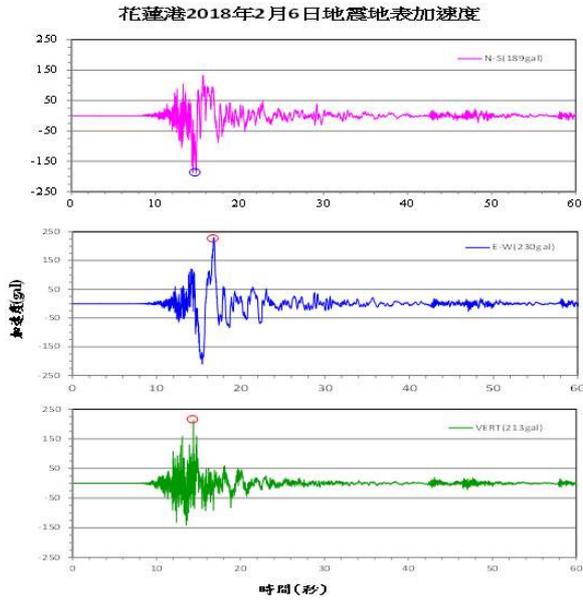
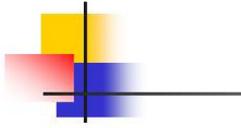
### ■ 土壤剪應變

- 因  $\tau = G\gamma$ ，由2式得  $\dot{v} = \frac{\tau v_s}{G} = \frac{G\gamma v_s}{G} = \gamma v_s$
- 所以， $\gamma = \frac{\dot{v}}{v_s}$
- $\gamma =$  剪應變
- $\dot{v} =$  垂直向質點速度
- $v_s =$  土壤剪力波速

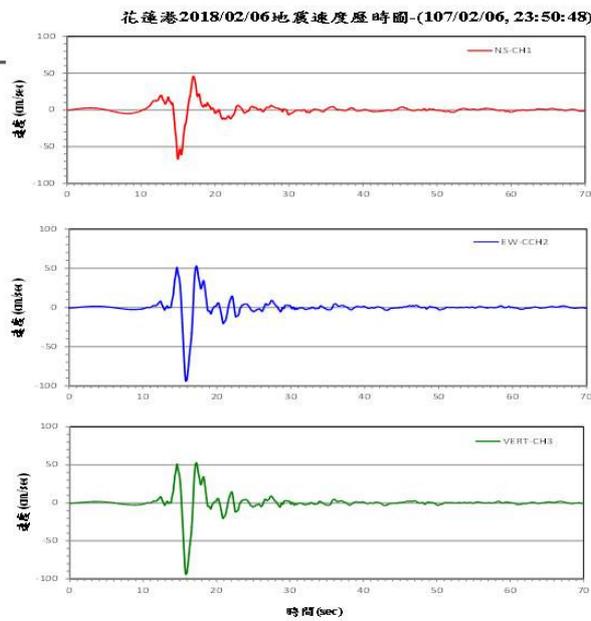
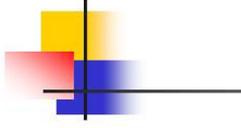
## 花蓮港地震站-剪應變量門檻值

- 基於乾砂反復試驗的結果，Drnevich和Richard於1970及Youd於1972和Pyke於1973得出結論，提出反復剪力的門檻值(threshold cyclic shear  $\gamma_c$ )，約為10<sup>-2</sup>%，低於此值時，不會發生densification(稠密)現象，顯示孔隙水壓力累積開始的門檻值對於預測液化非常重要。
- Dobry和Ladd於1982使用1號砂分階段應變控制反復三軸試驗結果(如圖)，圖中這些小應變測量結果，n = 10個循環後，當  $\frac{\Delta u}{\sigma'_3} = 0$  時，提出了一個反復剪力門檻值，即是10<sup>-2</sup>%。

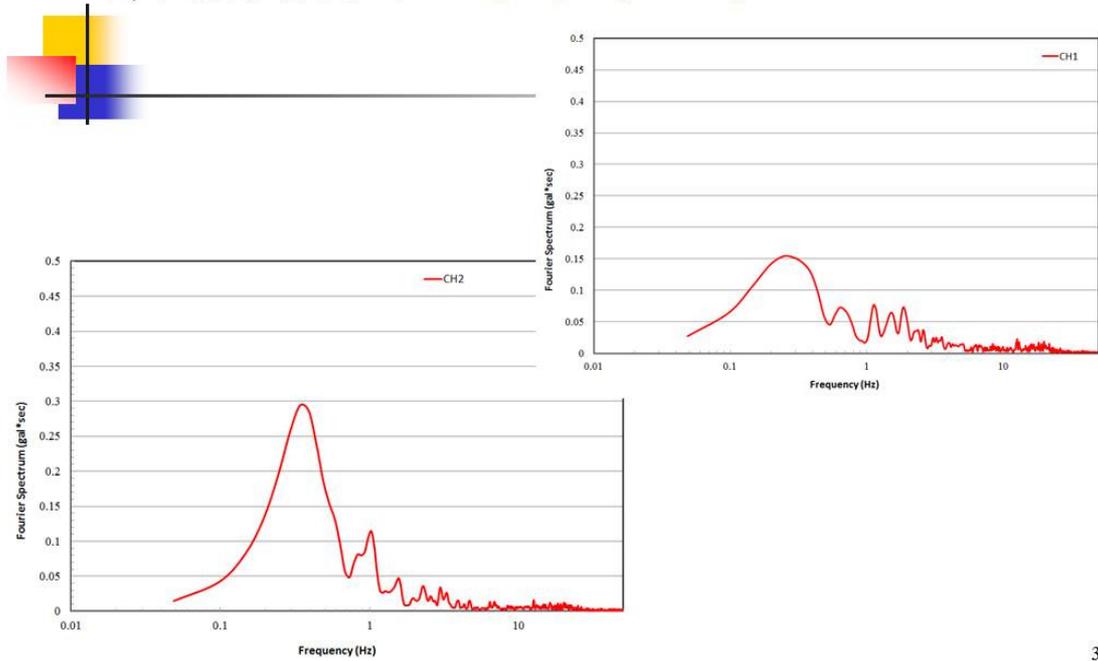
### 花蓮港地震站加速度歷時資料-(2018/02/06,23:50)



### 花蓮港地震站速度歷時資料-(2018/02/06,23:50)



## 傅氏頻譜圖-(2018/02/06,23:50)



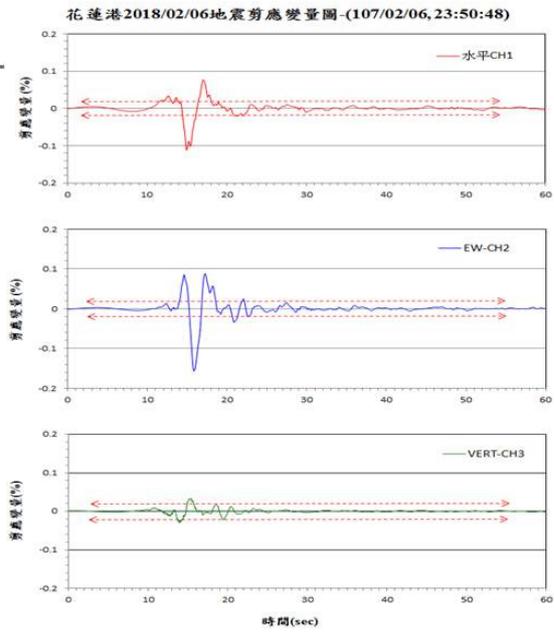
30

## 花蓮港地震站-剪應變量門檻值

- 土壤剪應變量 = 土壤質點速度 / 剪力波速
- 液化門檻值為小於  $10^{-2}\%$ ，不會激發孔隙水壓。
- 液化門檻值為大於  $10^{-2}\%$ ，會激發孔隙水壓。
- 花蓮港地震站地表(EW)最大速度 = **93cm/sec**。
- 土壤剪力波速  $V_{30} = 606\text{m/sec}$
- 剪應變 =  **$0.153\% > 10^{-2}\%$** 。

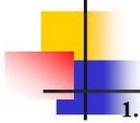
31

## 花蓮港地震站土壤剪應變量-(2018/02/06,23:50)



32

## 花蓮地區地震災況



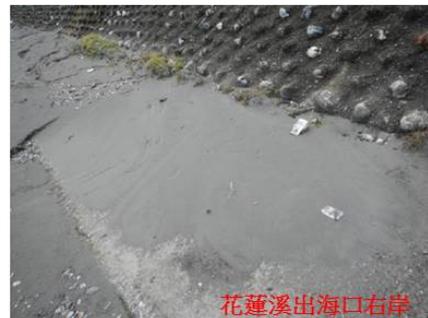
- 1.美崙溪左岸噴砂
- 2.花蓮溪出海口右岸噴砂



美崙溪左岸



美崙溪左岸噴砂(成大柯永彥)



花蓮溪出海口右岸

33

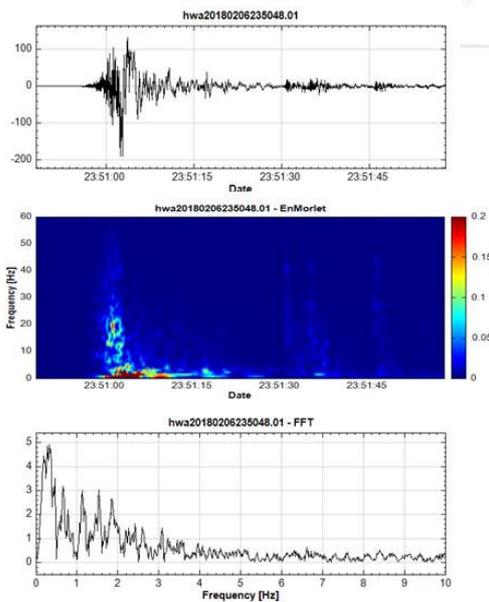
## 花蓮港區地震災況

1. 花蓮港#23與#24碼頭面後線龜裂
2. 花蓮港#24碼頭面龜裂下陷
3. 花蓮港#24碼頭後線鋪面開裂噴砂礫
4. 花蓮港#19碼頭後線鋪面龜裂噴砂



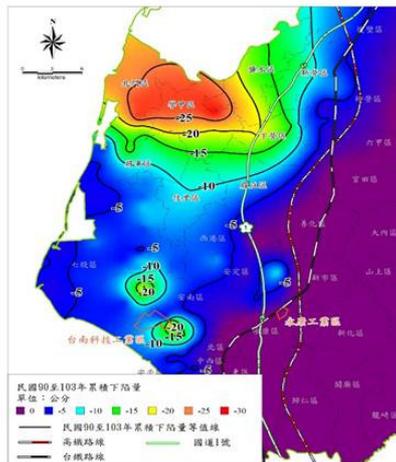
## 花蓮港地震站加速度歷時圖、能譜圖、傅氏譜圖

(2018/02/06, 23:50)



## 西南沿海地區地層下陷-臺南地區(水利署, 2014)

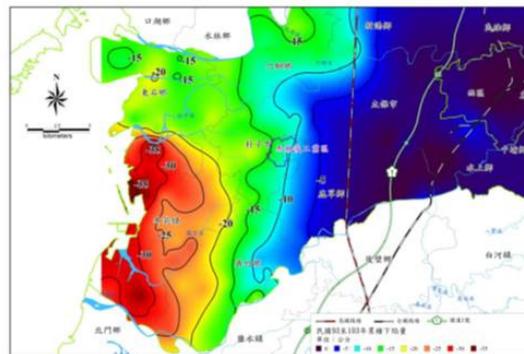
- 臺南地區：自90~103年來，主要下陷地區發生在臺南市北門區、學甲區與安南區。



36

## 西南沿海地區地層下陷-嘉義地區(水利署, 2014)

- 嘉義地區：自93~103年以東石鄉與布袋鎮為下陷中心，下陷區域則以省道台19線以西為主(朴子市以西)。93至103年嘉義地區顯著下陷面積圖，顯示10年中累積下陷超過20公分以上的區域包括布袋鎮、東石鄉與義竹鄉之部分區域。



37

## 港灣地區地層下陷監測

- 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。

38

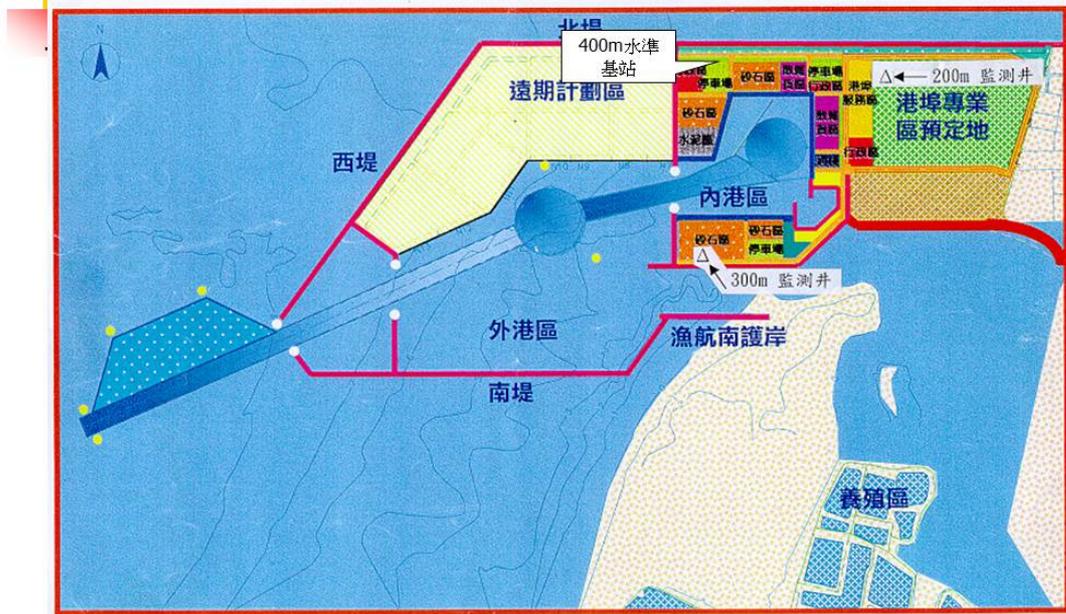
四、地層下陷

## 港區地層下陷監測資料

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

39

### 布袋港地層下陷站(整體規劃)

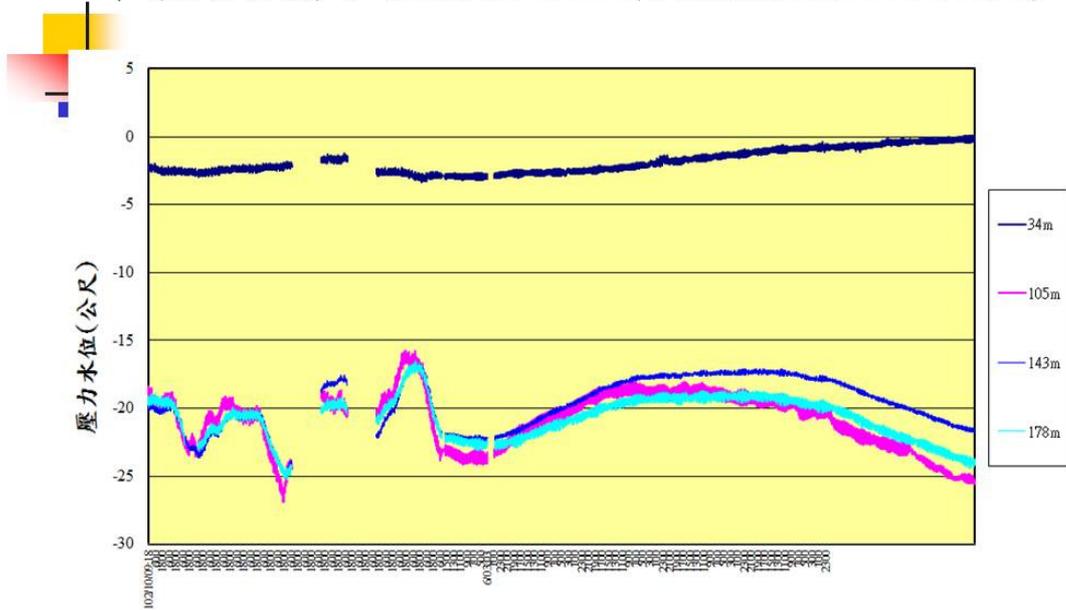


### 布袋港分層水位變化200m(手動量測86/04起)



四、地層下陷

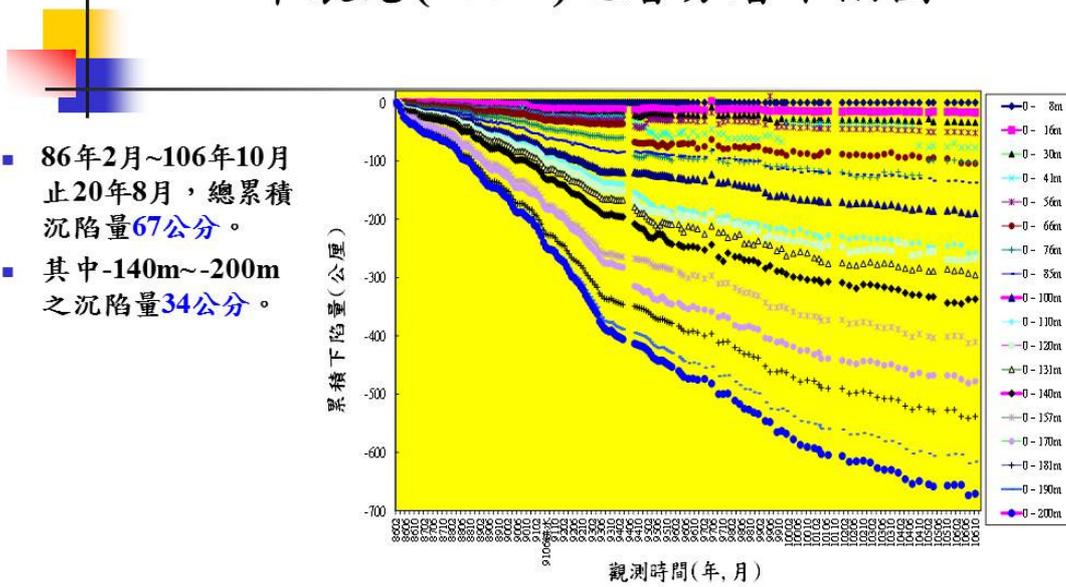
### 布袋港分層水位變化200m(自動量測102/10-107/05/23)



量測日期(102/10-107/05)

四、地層下陷

### 布袋港(200m)地層分層下陷圖

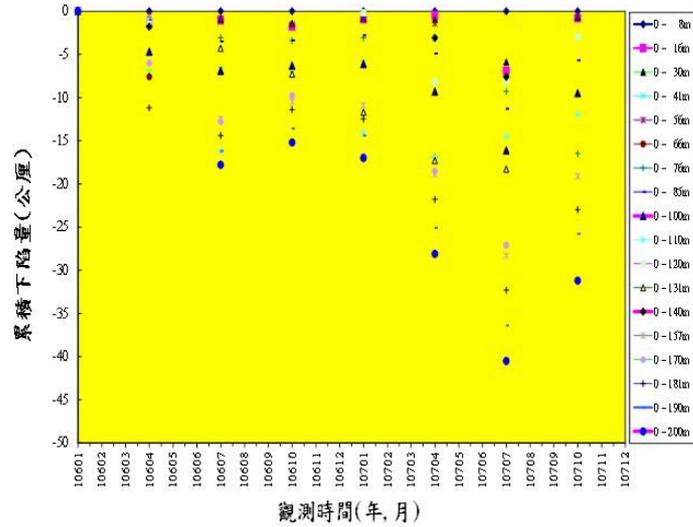


- 86年2月~106年10月止20年8月，總累積沉陷量67公分。
- 其中-140m~-200m之沉陷量34公分。

觀測時間(年,月)

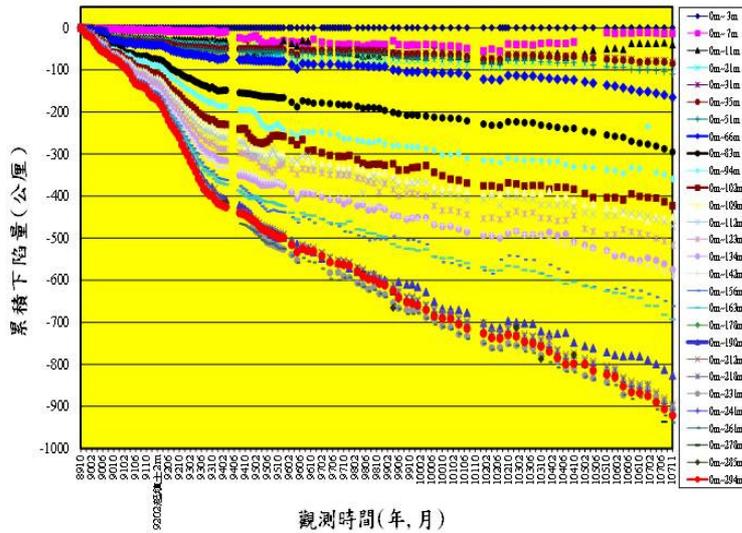
### 布袋港(200m)地層分層下陷圖

- 106年10月~107年10月止，累積沉陷量約3.2公分。



### 布袋港(300m)地層分層下陷圖

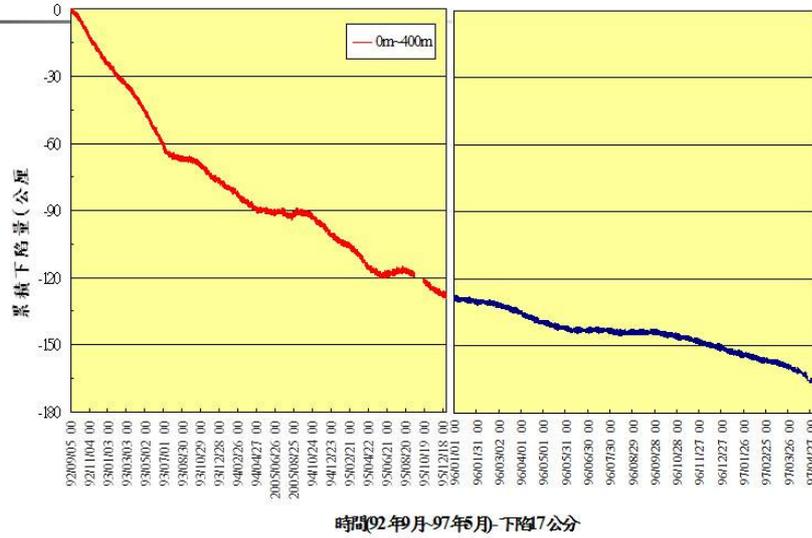
- 89年10月~107年10月止，18年總累積沉陷量92cm
- 106-107約5.3cm
- 近5年102~107約18cm



### 布袋港(400m)水準基站累積下陷圖-1/2



- 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-2/2



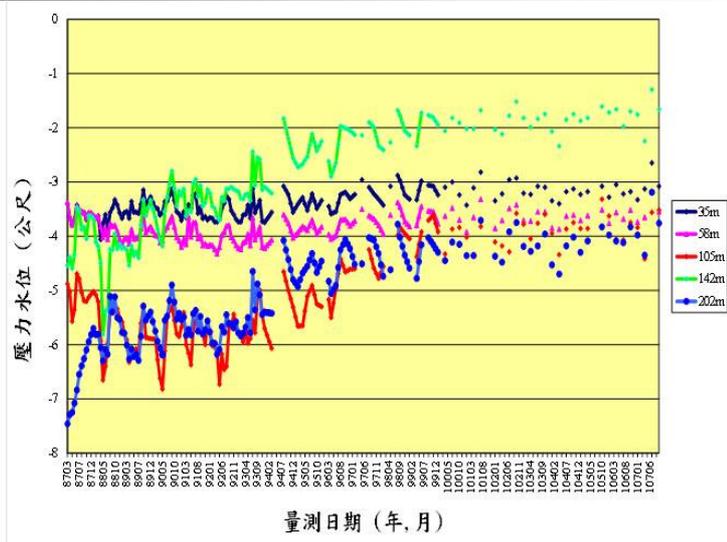
- 92年9月~107年10月累積下陷量**43cm**。
- 98年~106年下陷**26.2cm**。
- 97年5月至98年7月缺少資料。
- 因地震產生下陷量約**1.2cm**。



四、地層下陷

### 大鵬灣地層分層下陷圖

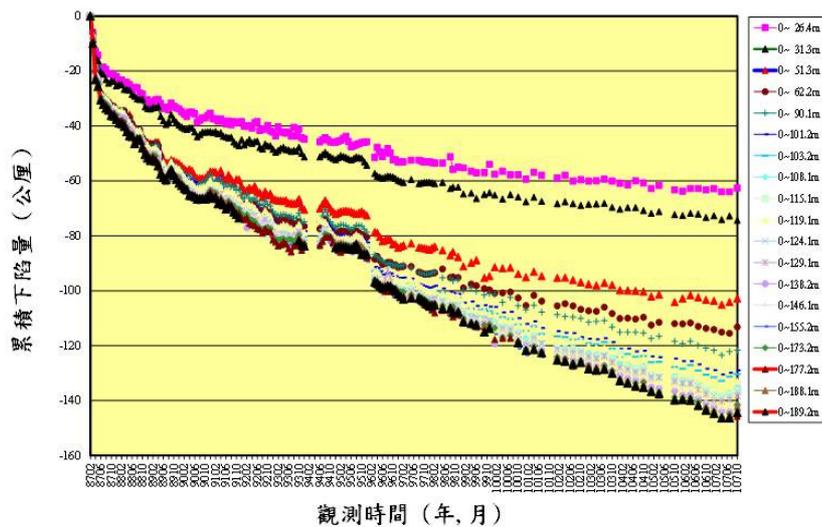
- 自87年~107年起量測。
- 地下水位約介於地表下3m~4m。



四、地層下陷

### 大鵬灣地層分層下陷圖

- 87年3月~107年7月止20年4月，總累積沉陷量14.5公分。
- 其中0m~50m之沉陷量10.4公分。



## 資料庫在地理資訊系統上之應用

### ■ 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：
- 長期的地震及動態水壓監測資料非常龐大，需以資料庫方式建置，由本所港研中心自行開發的「港區工程基本資料庫」建置。

50

五、資料庫

## 資料庫在地理資訊系統上之應用

### ■ 資料庫系統操作程序

- 104年蒐集雲林地區由國內各顧問公司之地質資料共526孔，鑽孔累進深度15,226公尺。蒐集水利署自民國96年至102年之水準點高程下陷資料，水準點數量425處，水準實測里程520公里。
- 105年蒐集彰化地區地質資料649孔，鑽孔累進深度16,400公尺。蒐集水利署民國96年至102年水準點高程下陷資料，水準點數量273處，水準實測里程391公里。
- 106年蒐集嘉義地區地質資料共485孔，鑽孔累進深度10,324公尺。蒐集水利署自民國96年至105年水準點高程下陷資料，水準點數量310處，水準實測里程433公里。

51

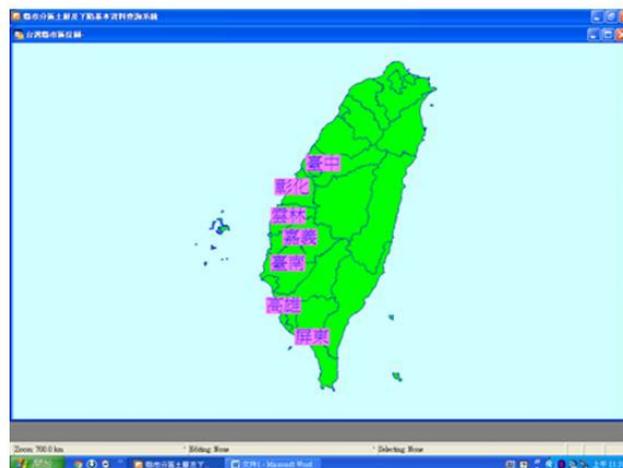
## 資料庫在地理資訊系統上之應用

- 以嘉義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。

52

## 資料庫在地理資訊系統上之應用

- 查詢主畫面



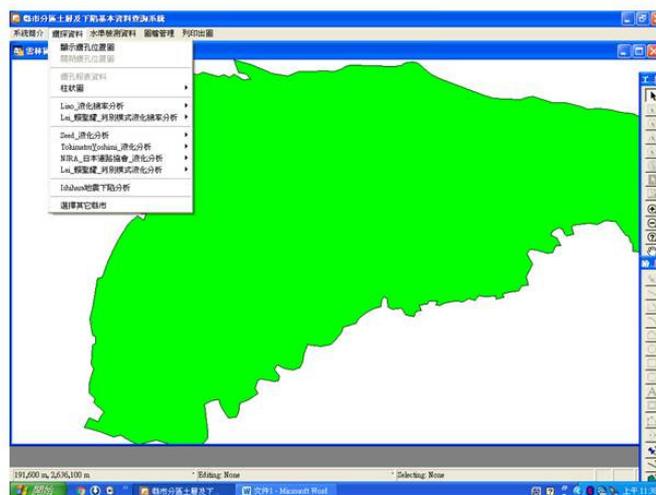
53

## 資料庫在地理資訊系統上之應用

- **嘉義**地區土層及下陷基本資料查詢系統
- **嘉義**縣基本地圖圖層
- 將滑鼠遊標移至**嘉義**標示文字區內，按滑鼠左鍵，可叫出「**嘉義**縣基本地圖圖層」，地圖以綠色標示**嘉義**縣轄區位置。**嘉義**縣土層鑽探與水準檢測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

- **嘉義**縣土層鑽探與水準檢測資料查詢表單下拉展示圖

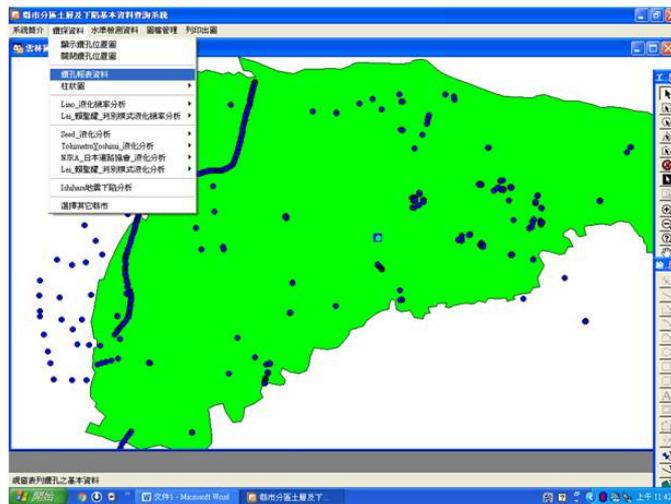


## 資料庫在地理資訊系統上之應用

- **嘉義**地區土層及下陷基本資料查詢系統
- 出現**嘉義**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**嘉義**縣各鄉鎮所建置之土層鑽孔位置圖。**嘉義**縣土層鑽探資料查詢表單下拉展示如圖。

## 資料庫在地理資訊系統上之應用

- **嘉義**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

- **嘉義**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。

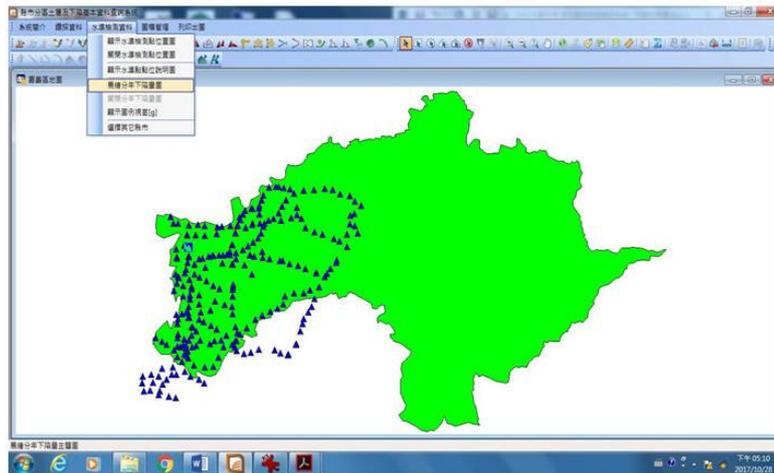
# 資料庫在地理資訊系統上之應用

- **嘉義**地區土層鑽孔資料報表展示圖



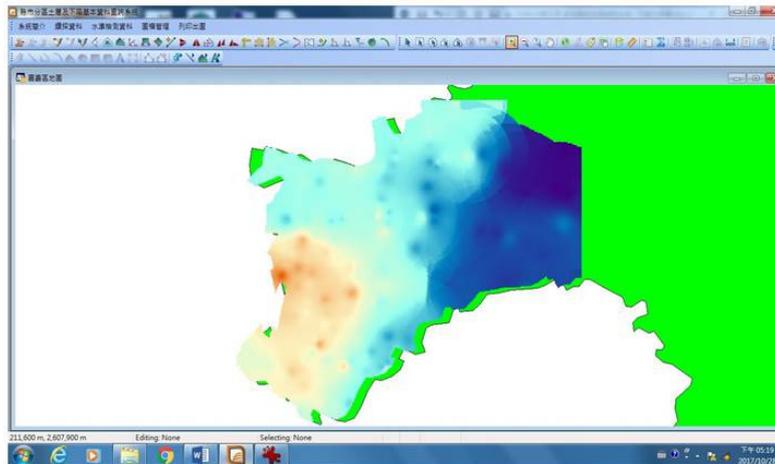
## 資料庫在地理資訊系統上之應用

- 嘉義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

- 嘉義地區水準檢測地層下陷量展示圖



## 小結(1/4)-地震監測系統

- 高雄港自2005年至2017年選擇震央距離測站超過30公里類型地震88起，水平兩方向地表加速度有176筆，調整至0.20g後進行反應譜分析，水平加速度反應譜曲線平台約介於0.103~0.8秒。
- **高雄港區附近活動斷層對港區影響，依經驗式初估：**
- **旗山斷層** 長度 $L=30$ 公里時，地震規模為 $M_L=6.6$  與 $M_W=6.80\pm 0.28$ ， $M_W$ 轉換成芮氏規模為 $M_L=6.59\pm 0.14$ 。
- **潮州斷層** 長89公里，地震規模為 $M_L=7.58$  與 $M_W=7.37\pm 0.28$ 。  $M_W$ 轉換成芮氏規模為 $M_L=6.96\pm 0.14$ 。
- 如用於液化分析時可採用地震矩規模。

62

## 小結(2/4)-地震監測系統

- 花蓮港地震資料分析：
- 花蓮地區107年2月6日發生地震，港研中心地表最大加速度為**230gal**，以實測所得0.23g進行反應譜分析，水平方向反應譜曲線在**1.3秒**及**1.7秒**以後明顯超出規範曲線，顯示該區域結構物有損害發生。
- 花蓮港實測地震計算土壤剪應變量，最大剪應變量已超出激發動態孔隙水壓之門檻值**( $10^{-2}\%$ )**許多，評估會有動態孔隙水壓激發產生。
- 監測與速報系統改良後(有限經費下)，減少雜訊產生。

63

## 小結(3/4)-地層下陷

- 西南沿海地區下陷：水利署資料
- 臺南地區自99至100年與100至103年近5年期間平均下陷速率，主要下陷區域為北門區與學甲區，最大下陷速率皆小於3公分/年，臺南地區的下陷速率已有趨緩。
- 嘉義地區自民國80年至103年來總下陷量在60公分以上之下陷區，集中在東石鄉、布袋鎮、朴子市、義竹鄉等鄉鎮。

64

## 小結(4/4)-地層下陷監測

### ■ 港灣地區地層下陷：

#### 1. 布袋港地層下陷：

200m：86年2月~107年10月止，累積沉陷量70公分，49%在-140~-200m。

300m：89年10月~107年10月止，累積沉陷量92公分，平均每年約5公分。

400m：92~107年5月總下陷約43.2公分。

#### 2. 港區下陷量大致趨緩，近3年由於填土下陷有增加現象，宜繼續監測。

#### 3. 大鵬灣地層下陷：

87年3月~107年7月止，累積沉陷量14.5公分。

65

## 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.臺灣西南沿海地區地層下陷資料。
- 4.建置工程資料庫。
- 5.精進港區災後速報系統。

66

簡報完畢  
恭請指正