104-35-7810
MOTC-IOT-103- H1DA004c

港區地震與地層下陷監測之研究
(2/2)

交 通 部 運 輸 研 究 所

中 華 民 國 104 年 5 月

104-35-7810
MOTC-IOT-103-H1DA004c

港區地震與地層下陷監測之研究
(2/2)

著 者：陳志芳、謝明志、羅建明、胡啟文

交 通 部 運 輸 研 究 所

中 華 民 國 104 年 5 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

港區地震與地層下陷監測之研究. (2/2) / 陳志芳等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民104.05
面 ; 公分
ISBN 978-986-04-4544-2(平裝)

1.港埠工程 2.地震 3.地層下陷

443.2 104004808

港區地震與地層下陷監測之研究(2/2)

著　　者：陳志芳、謝明志、羅建明、胡啟文
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 (中文版＞中心出版品)
電　　話：(04)26587176
出版年月：中華民國 104 年 5 月
印 刷 者：群彩印刷科技股份有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站
定　　價： 200 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：1010400390　　ISBN：978-986-04-4544-2 (平裝)

104

港區地震與地層下陷監測之研究 (2/2)

交通部運輸研究所

GPN: 1010400390
定價 200 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：港區地震與地層下陷監測之研究(2/2)

國際標準書號	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號	計畫編號
978-986-04-4544-2 (平裝)	1010400390	104-35-7810	103-H1DA004c

主辦單位：港灣技術研究中心
主管：邱永芳
計畫主持人：陳志芳
研究人員：謝明志、羅建明、胡啟文
參與人員：陳毓清、陳義松、李春榮、李昭明、何木火
聯絡電話：04-26587113
傳真號碼：04-26564418

研究期間
自 103 年 01 月
至 103 年 12 月

關鍵詞：地震、地層下陷、監測

摘要：

近年來世界各國地震頻傳，也造成許多傷亡與財產損失，各國為減少地震引致之災害與損失，無不投入相當的經費與人力於地震之相關研究。

本所於臺北港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港及蘇澳港等 6 個港區設置了監測站，期望藉由長期監測、分析的成果，能提供各港務分公司未來地震防救災決策之依據，及本所設計相關研究之重要參考。

因此，本計畫於 103 年度完成港區地震及地層下陷分層監測研究工作，期望相關研究成果可供各港務分公司等相關單位之碼頭維護管理及設計人員參考。

研究成果效益：

1.港區地震災況速報系統，能提供震後碼頭液化安全評估相關資訊，可作為防災人員救災決策之參考。

2.各港井下地震監測資料，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. 港區地震及地層下陷監測資料，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
104 年 5 月	232	200	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：
□密□機密 □極機密 □絕對機密
（解密條件：□　年　月　日解密，□公布後解密，□附件抽存後解密，
□工作完成或會議終了時解密，□另行檢討後辦理解密）
■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 Ground Subsidence at Harbor Areas. (2/2)

ISBN 978-986-04-4544-2 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010400390	IOT SERIAL NUMBER 104-35-7810	PROJECT NUMBER 103-H1DA004c

DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER
DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chen Jyh-fang
PROJECT STAFF: M.J. Hsieh, C.M. Lo, C.W. Hu
PROJECT TECHNICIAN: Y.Q. Chen, Y.S. Chen, C.R. Lee, Z.M. Lee, M.H. He
PHONE:04-26587113
FAX: 04-26564418

PROJECT PERIOD
FROM January 2014
TO December 2014

KEY WORDS: earthquake, subsidence, monitoring

ABSTRACT:

In recent years, earthquakes caused many casualties and property damage around the world. Countries in the world invested many funds and manpower in earthquake research to reduce the disaster and loss by the earthquake.

In the part of port terminal situ monitoring, we set up the monitoring stations in each port area (including Taipei, Taichung, Kaohsiung, Anping, Budai and Suao Harbor). We expect the long-term monitoring and analysis of the results could provide each port branch decisions on earthquake disaster prevention.

Therefore, this project carried out in 2014, is port monitoring earthquakes and subsidence of stratification. With expectation the research results will provide reference for terminal design and maintenance in the future.

Benefit of Research Results：

1. A rapid damage assessment system based on liquefaction analysis model and the in situ monitoring data in harbor area provides information for disaster management of associated authorities.
2. The 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.

Current situations in application:

1. The settlement profile and variations of ground water pressures in harbor area can benefit the design and maintenance of harbor structures.
2. The published research report can be potentially useful for industry, government, and academic research.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
May 2015	232	200	☐RESTRICTED ☐CONFIDENTIAL ☐SECRET ☐TOP SECRET ■UNCLASSIFIED

港區地震與地層下陷監測之研究(2/2)

目 錄

圖 目 錄

表 目 錄

第一章　前 言

1.1 研究緣起

碼頭構造物是港灣設施中重要之工程，而臺灣之港灣碼頭，無論在平時或地震時，多曾因疏鬆軟弱之地質因素，發生一些工程災害，其中災害規模較大者計有：(1)民國 75 年花蓮地震，蘇澳港 3-5 號碼頭，長度約有 750 公尺，沉箱側移 20~50cm，碼頭後線下陷龜裂。花蓮港東堤 A-7 型萬代福消波室，長度約有 500 公尺，沉陷 25-40cm，新建 25 號碼頭後線背填土沉陷約 20-40cm。(2)民國 80 年安平港 3-4 號碼頭鋼板樁於施工中嚴重側傾 30-40 公分，嚴重影響碼頭安全。(3)民國 83 年凱特琳颱風豪雨後，高雄港 19 號碼頭突然坍陷損壞，長度約 100 公尺，岸壁本體全部沒入水下。(4)民國 88 年集集大地震，臺中港 1-4A 號碼頭，長度約 1,135 公尺，沉箱側移 50-170 公分，碼頭後線背填土壤發生嚴重液化、噴砂、下陷、坑洞、鐵軌彎曲變形，9-11 號及 13 號碼頭後線亦有噴砂、龜裂、下陷。 (5)民國 96 年臺北港東 14 碼頭，岸肩及卸煤機軌道基礎差異沉陷達 15 公分，恐影響未來卸煤機裝置及碼頭結構安全。因此為維護港區設施之安全，直接於碼頭結構進行監測亦有其必要。

另外，臺灣西南沿海之港灣地區，其地層大都屬現代沖積層，土層疏鬆軟弱壓密固結尚未全部完成，極可能因附近地區地下水抽取、大規模海埔新生地回填、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。其中布袋港近 10 年已沉陷 50 餘公分，其他各港亦有可能沉陷，加上碼頭之貨櫃裝卸及堆置漸朝自動化設計，少許之差異沉陷，皆易使碼頭自動化之機械設備損壞或喪失使用功能。因此為維護港區工程及各樣設施之安全，有必要於各港灣地區之地下水壓及地層下陷進行長期之監測。藉由長期監測的成果，將所得之紀錄進行震波特性、地層放大效應、動態孔隙水壓變化、港區之場址效應及地層下陷等進行相關性分析及彙整建置成資料庫，以提供各港未來港區地震防救災及碼頭耐震設計與評估相關研究之參考依據。

1.2 研究範圍

在地震及動態水壓監測部份，第一年(102 年)主要以彙整安平港地震站歷年來實測資料並進行反應譜分析、震波放大效應、動態孔隙水壓變化與高雄港場址效應等資料分析，並設置臺中港、安平港及高雄港網路型地震災況速報系統。第二年(103)年增加彙整臺中港地震站歷年實測資料進行反應譜分析，並增加設置蘇澳港地震災況速報系統。地層下陷監測部份，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，並進行布袋港區地層下陷平面水準測量工作。

1.3 研究方法與內容

102 年彙整安平港地震監測站 2006 至 2012 年地震資料採實測與經驗式方法進行比較地震力、場址效應、動態孔隙水壓等分析，並以現行之建築物耐震設計規範檢核高雄港區之結構物是否介於安全範圍為工作。103 年增加彙整臺中港地震監測站 2006 至 2013 年地表地震資料依建築物耐震設計規範進行設計地震水平譜加速度分析。

於港灣地區進行地震、地層下陷監測之研究，在本文第二章分別介紹不同港灣地區所設置的監測站。第三章敘述港區井下地震站所監測的資料與各項分析成結果，包含安平港區的地震力分析、港區附近活動斷層的影響、臺中港地震站監測資料分析與高雄港區土層場址效應等。第四章介紹碼頭現地動態監測站之現況。第五章為各港區地層分層下陷監測資料分析及進行布袋港區平面水準測量等項目。第六章為結論與建議。

第二章 監測系統規畫與安裝

為確保位於港區軟弱沖積土層結構物之安全，需針對地震或地層下陷所產生之效應進行監測，以作為設計結構物與維護工程之參考，因此於港區自由場適當地點設置監測系統，本系統依功能與目的，分為地震動態孔隙水壓監測與地層下陷監測等兩大系統，分述如下：

2.1 地震監測系統

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。本研究分層設計深度規劃大致為 GL-0m、GL-15m、GL-30m、GL-100m、GL-300m，唯實際埋設深度乃依現地土層變化狀況而調整。

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，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：

2.1.1 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、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。

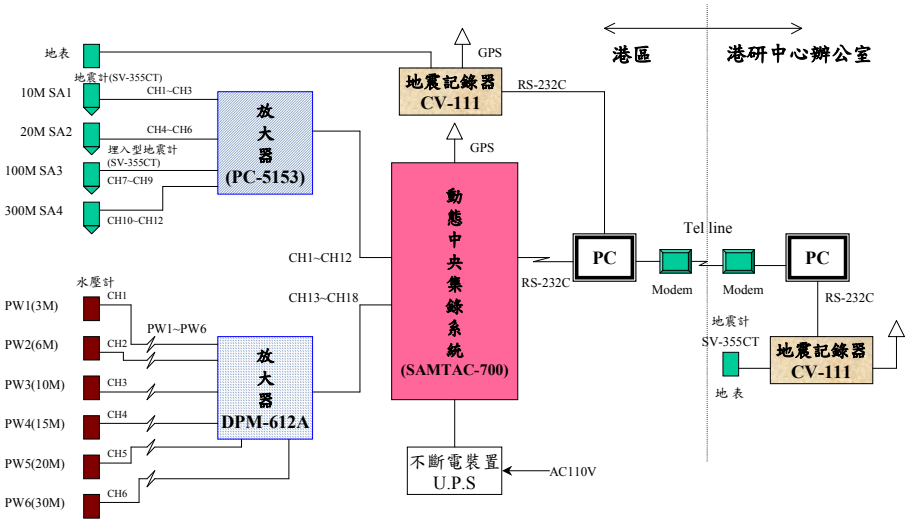


圖 2.1 港區地震監測系統規劃與流程圖

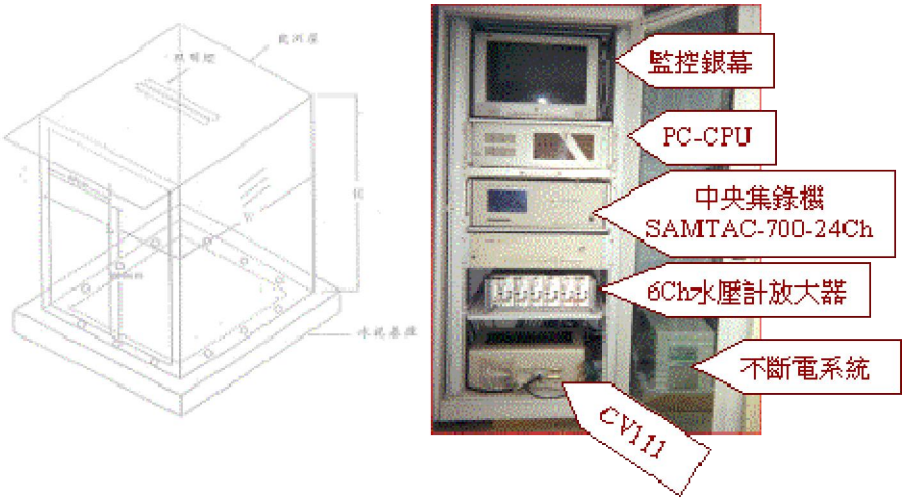


圖 2.2 機房及設備外觀示意圖

2.1.2 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 Moden 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。

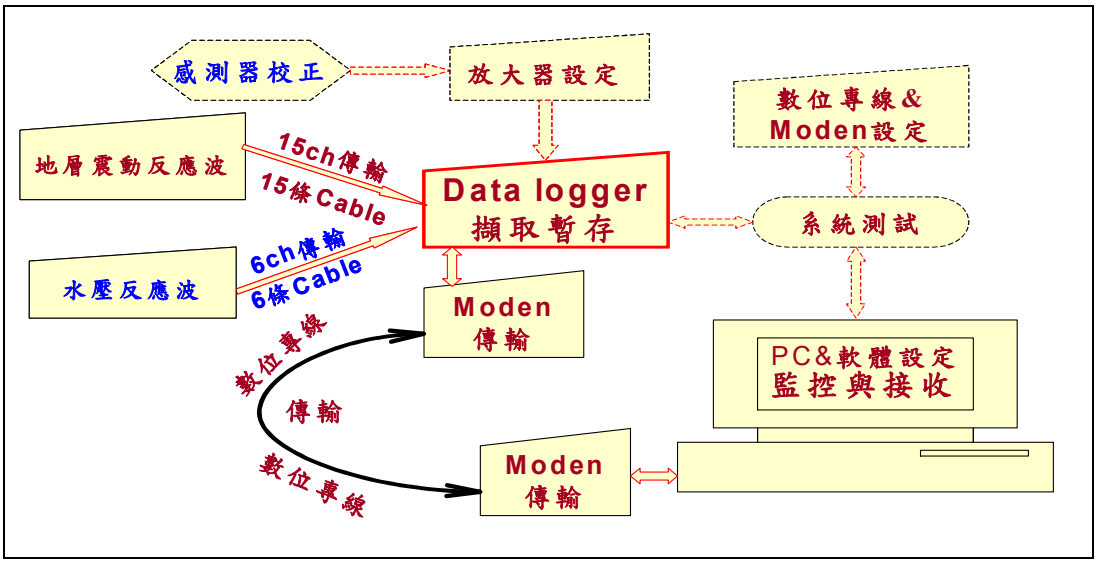


圖 2.3 整體擷取、傳輸與監測控制流程

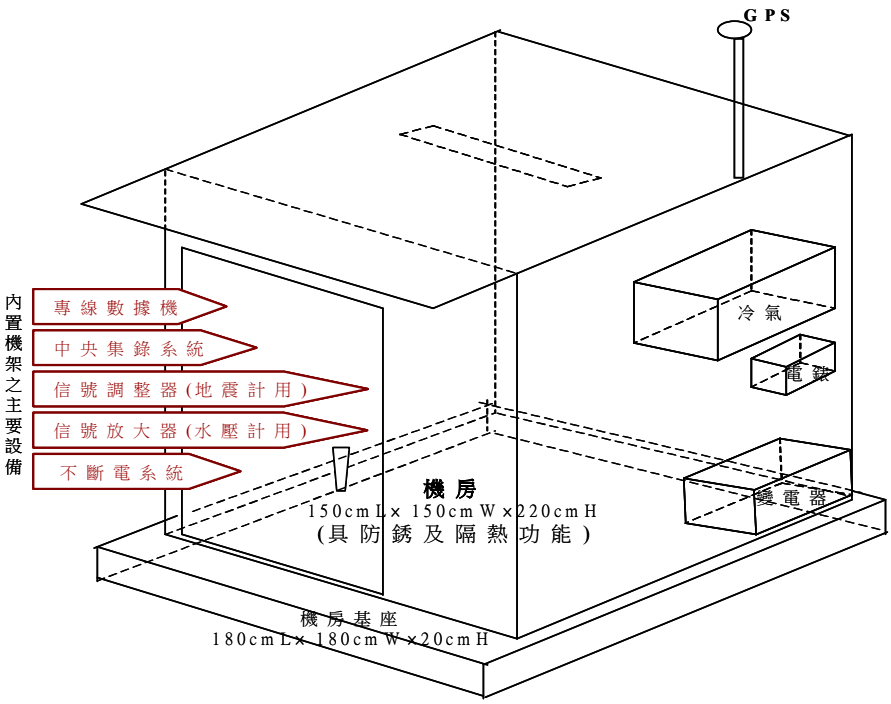


圖 2.4 機房構造與配置示意圖

2.1.3 各港地震監測站

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、高雄港及蘇澳港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(如表 2-1)，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 與圖 2.6 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 2.7。
3. 布袋港地震監測站於 91 年元月建置完成，監測站如圖 2.8 與圖 2.9。
4. 臺北港地震監測站於 91 年建置完成，監測站如圖 2.10 與圖 2.11。
5. 高雄港地震監測站於 92 年建置完成，監測站如圖 2.12 與圖 2.13。
6. 蘇澳港地震監測站於 93 年建置完成，監測站如圖 2.14。
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儀資料表

測　站	設置位置	經緯度(度)	儀器深度	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 24.27358 緯度 120.5201	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	大樓前花圃	經度 25.151 緯度 121.393	297m	91 年
高雄港	船舶管理中心花圃	緯度 22.5985 緯度 120.2829	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

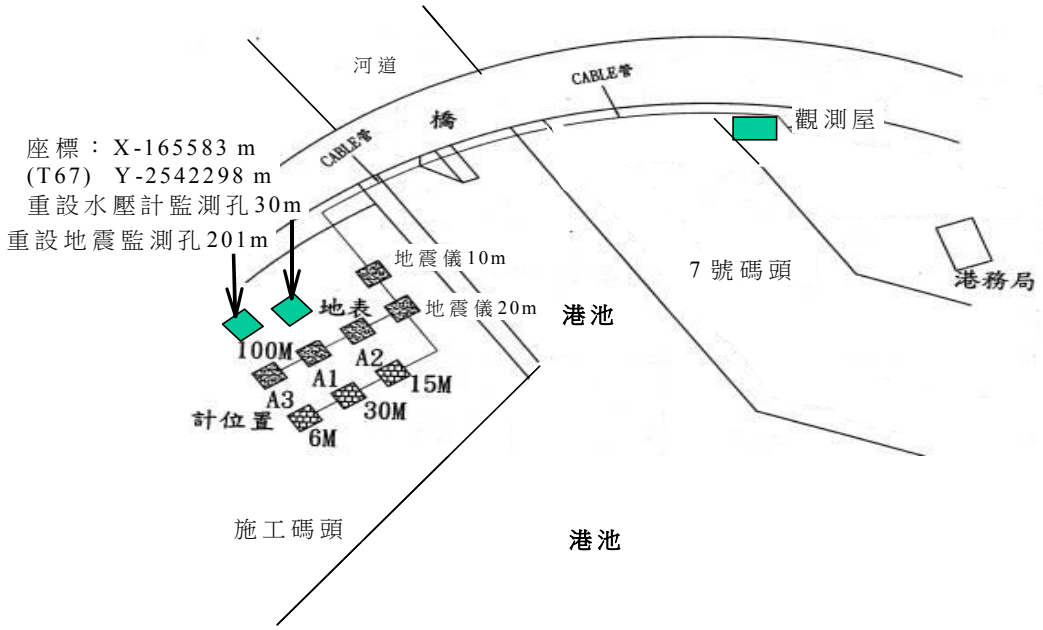


圖 2.5 安平港區井下地震監測站平面示意圖

圖 2.6 安平港區井下地震監測站示意圖

圖 2.7 臺中港區井下地震監測站示意圖

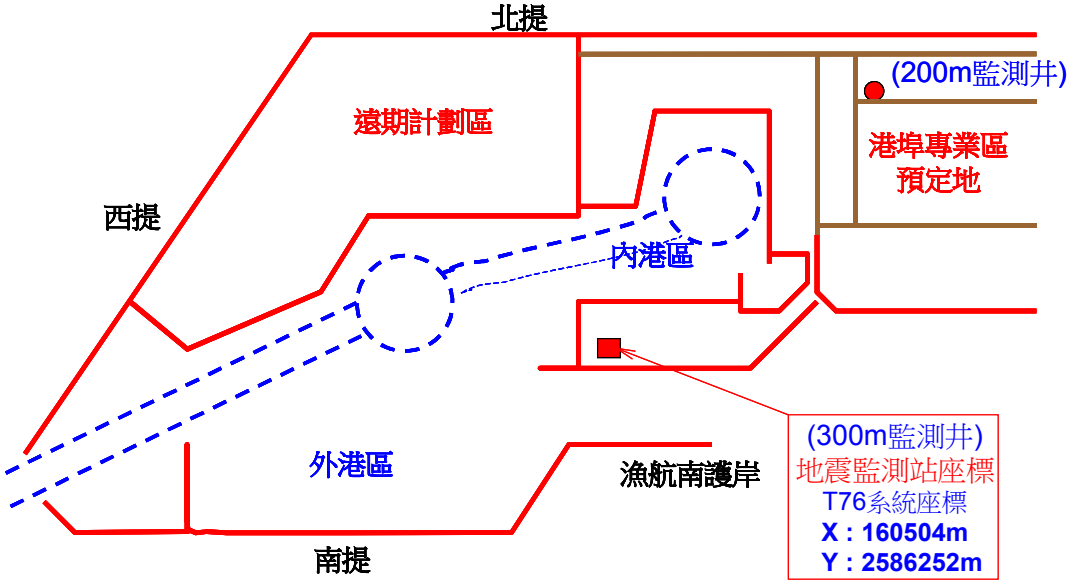


圖 2.8 布袋港區井下地震監測站平面示意圖

圖 2.9 布袋港區井下地震監測站示意圖

圖 2.10 臺北港區井下地震監測站平面示意圖

圖 2.11 臺北港區井下地震監測站示意圖

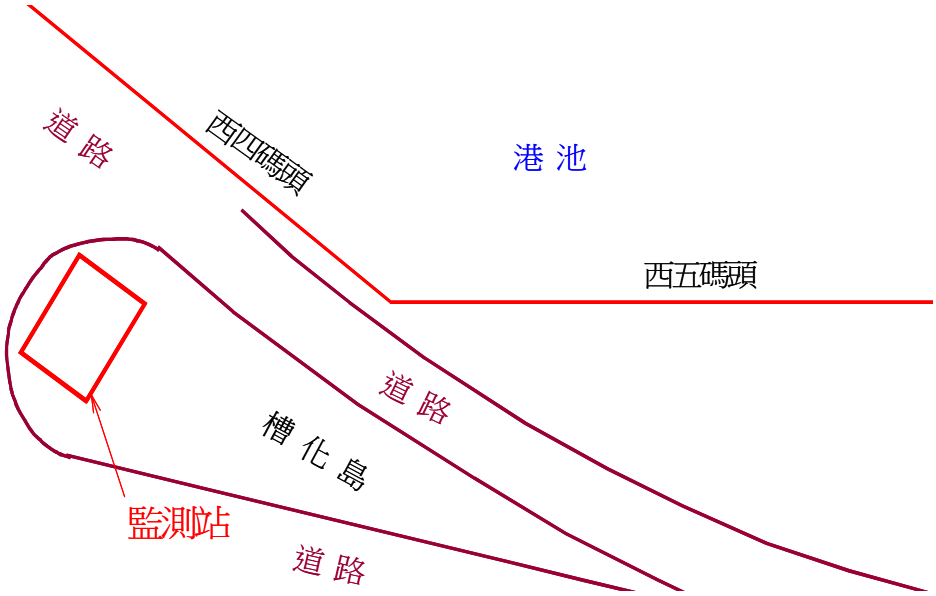


圖 2.12 高雄港區井下地震監測站平面示意圖

圖 2.13 高雄港區井下地震監測站示意圖

圖 2.14 蘇澳港區井下地震監測站示意圖

2.2 地層下陷監測系統

港灣地區地層下陷之原因，非常複雜，如大地應力作用所引致地殼之升降，地震作用引致港灣地區沖積砂土層與海埔新生地發生液化而產生嚴重之下陷，防波堤為港灣之重要構造物，大都由大型沉箱連接而成，有極大的荷重，亦會產生嚴重之下陷；另港灣碼頭設施大都由抽砂填土而成，大規模之填土易造成區域性之不均勻沉陷，及港灣附近地區超抽地下水易造成區域性之地下水位下降，導致港區地層下陷等，依據世界各地研究觀察結果，大部分之地層下陷，皆因過量開發地下水資源而產生，台灣西南海岸港灣地區之地層下陷亦然，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：

2.2.1 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。砂質土層的沈陷速度較快但沈陷量較小；而粘性土層之壓縮則較具延滯性且沈陷量也較大。

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

1. Terzaghi 壓密理論

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。

$$S_u = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log\left(\frac{P'_0 + \Delta\sigma_{vo}}{P'_0}\right) \quad \text{.....(2-1)}$$

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$S(t)$。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial Z^2} \quad \text{.....(2-2)}$$

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：

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

式中，$U(t)$：平均壓密度，定義如式(3-4)

T_v：時間因數

$$U(t) = 1 - \frac{\int \Delta u_t dz}{\int \Delta u_0 dz} \quad \text{.....(2-4)}$$

而式(2-3)中之時間因數T_v與時間t之關係如下所示：

$$T_v = \frac{C_v \times t}{H^2_{dr}} \quad \text{.....(2-5)}$$

式中，H_{dr}：最長之排水路徑長

因此各土層在各壓密應力之歷時性沉陷量$S(t)$如下所示：

$$S(t) = S_u \times U(t) \quad \text{.....(2-6)}$$

2. Biot 耦合壓密理論

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

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

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

由於地下水位觀測井所測得之水位變化，可代表鄰近區域亦有相同之水位變化，而且地下水位變化引致之地層下陷屬於區域沉陷，因此若考慮為單向度之壓密過程，即 $S_x = S_y = 0$ ，$\varepsilon = \frac{\partial S_z}{\partial z}$ ，$\frac{\partial S_x}{\partial x} = \frac{\partial S_y}{\partial y} = 0$ ，可將基本方程式(2-7)簡化如下：

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

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

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

若考慮一土壤厚度為 H，受到瞬間荷重 P0，則其壓密沉陷，經式(2-8)解析得如下所示：

$$S_z = \frac{4P_0 H}{\pi^2 \eta G} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \times \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{(2n+1)\pi}{2H_d} \right)^2 C_v t \right] \right\} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}9)$$

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

2.2.2 儀器裝設

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 2.16 所示。

1. 電子式水壓計

本水壓計採用日本 DOBOKU 生產，型式為電阻式 20kg/cm^2 、10kg/cm^2 及 2kg/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 2.15 所示。

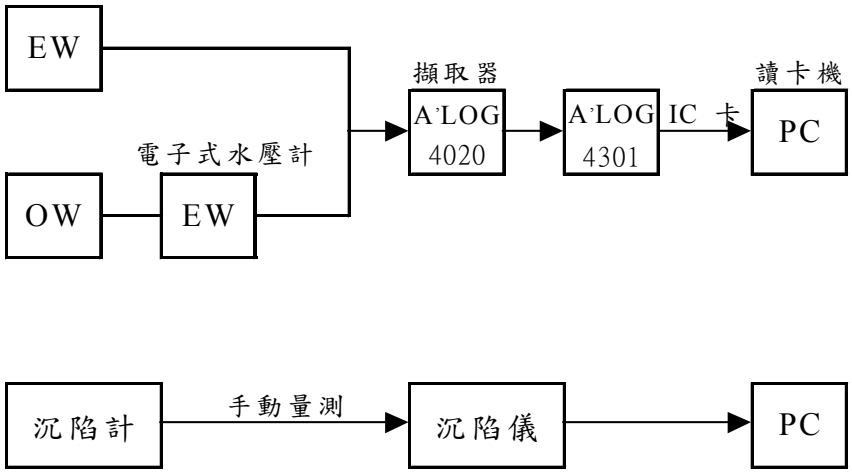


圖 2.15 系統儀器架構流程圖

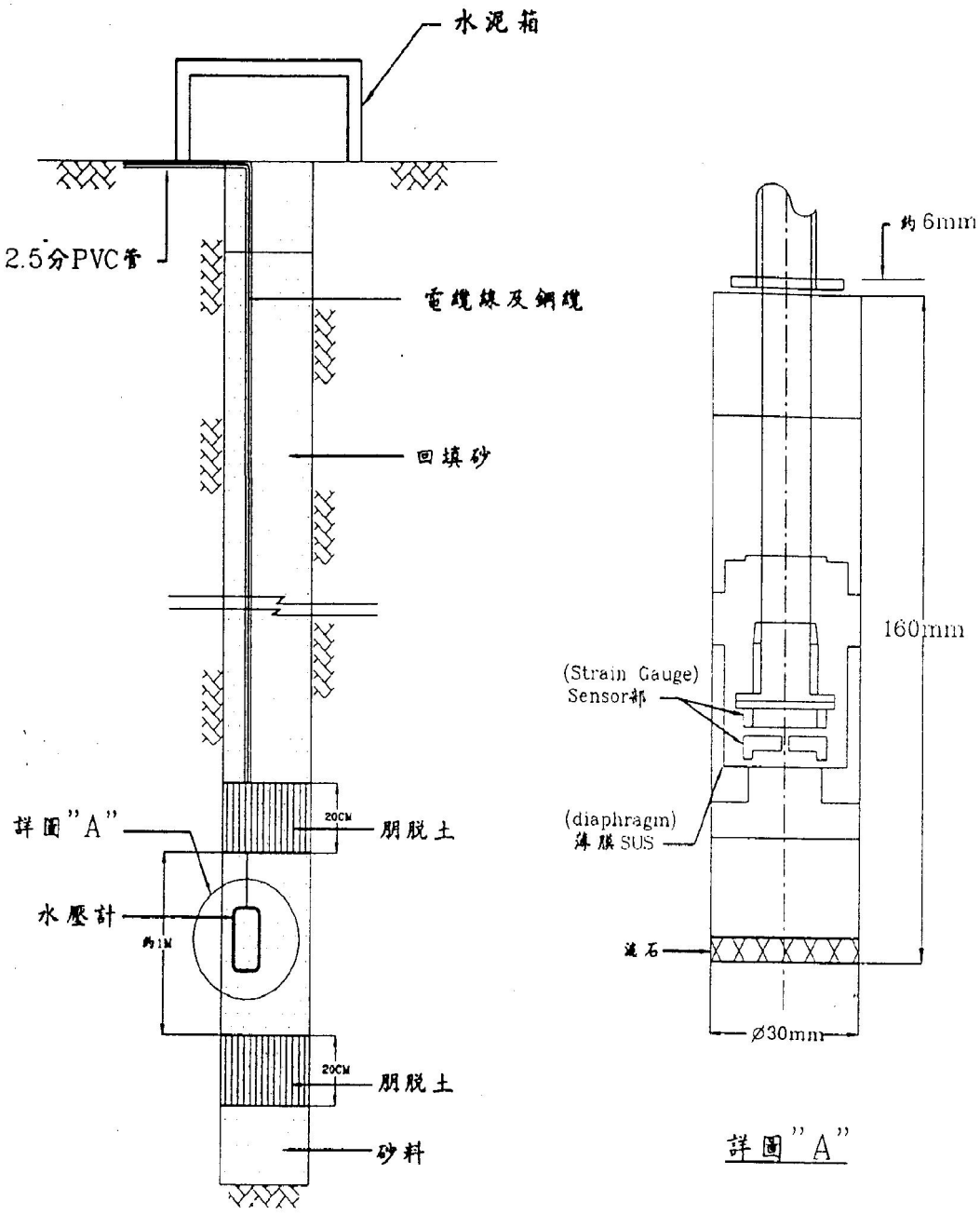


圖 2.16 電子式地下水壓計安裝示意圖

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 2.17 所示。

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 英吋井管，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 2.18、2.19 所示。

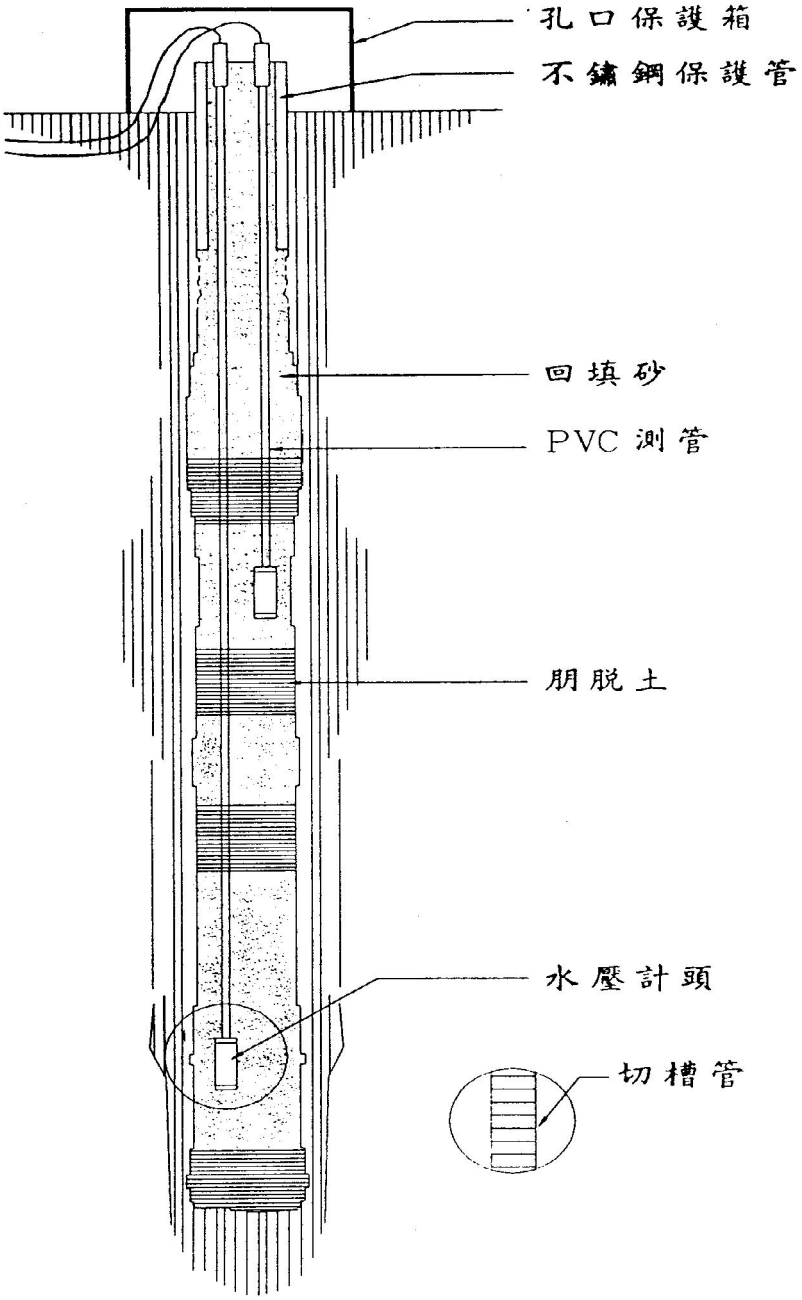


圖 2.17 開放式水壓計安裝示意圖

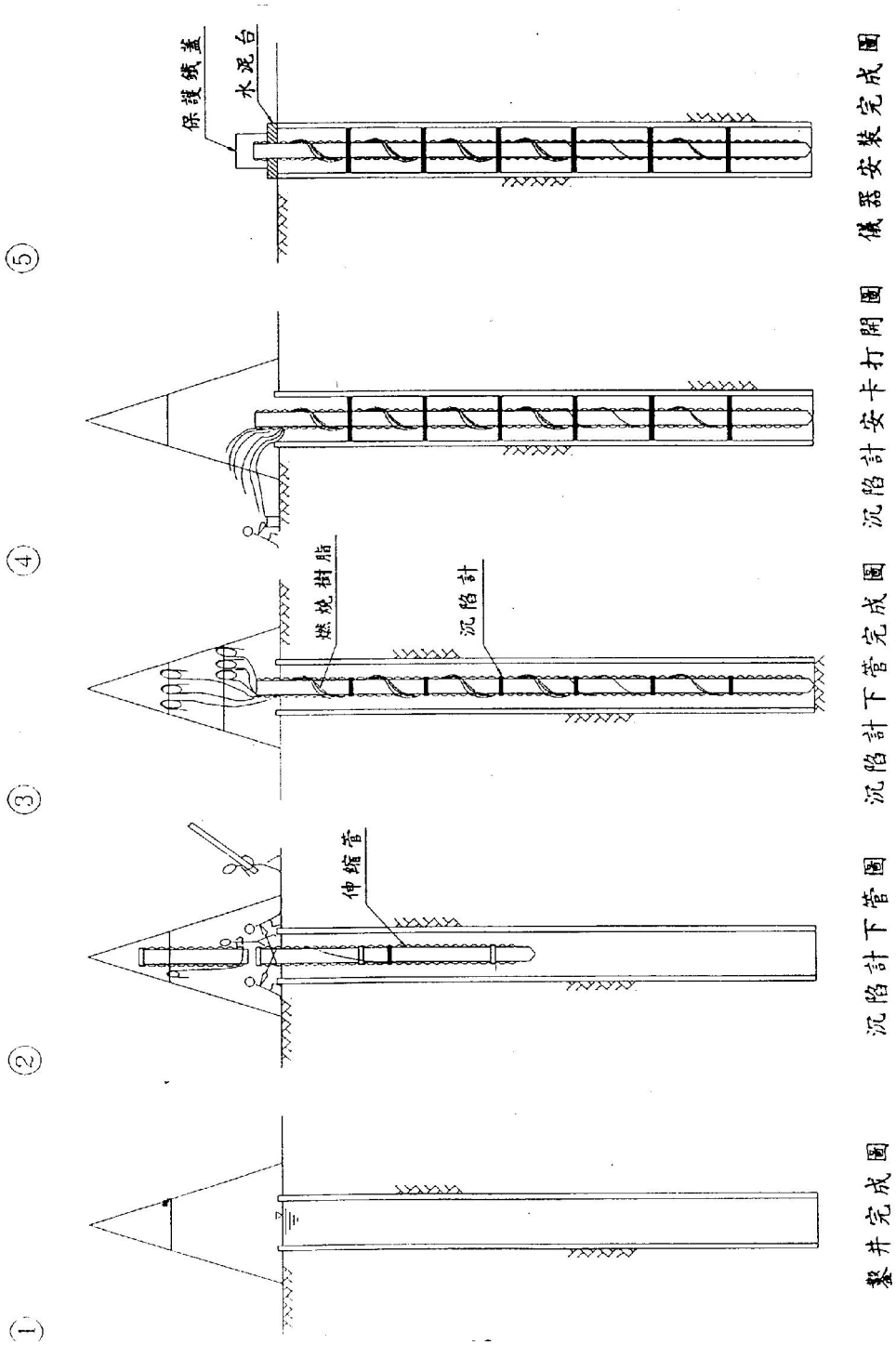


圖 2.18 沉陷計安裝示意圖

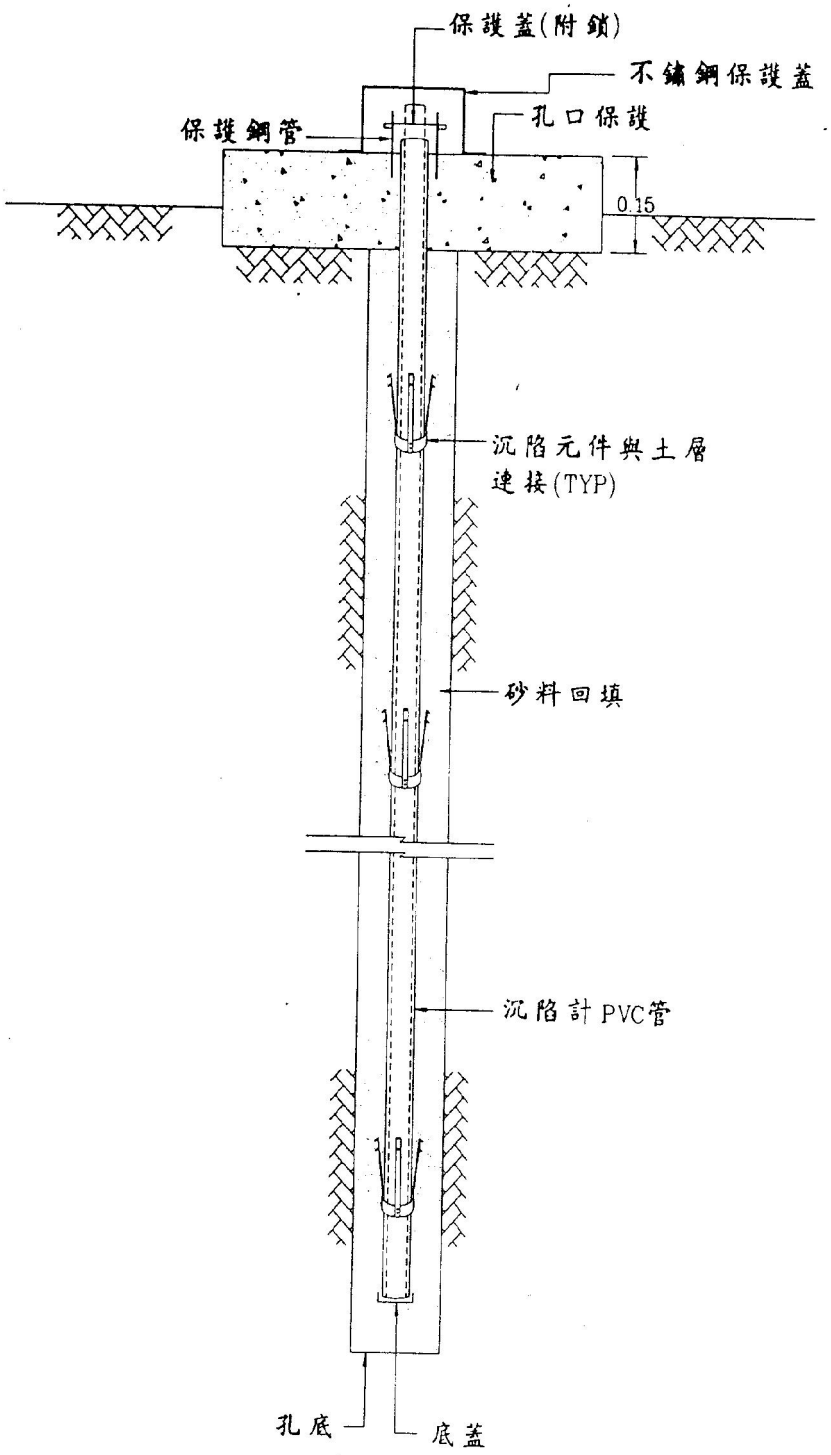


圖 2.19 磁感式層別沉陷計安裝示意圖

2.2.3 各港地層下陷監測站

各港下陷監測站設置概述如下：

1. 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 2.20），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 2-2 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 2-3 所示。

表 2-2　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		

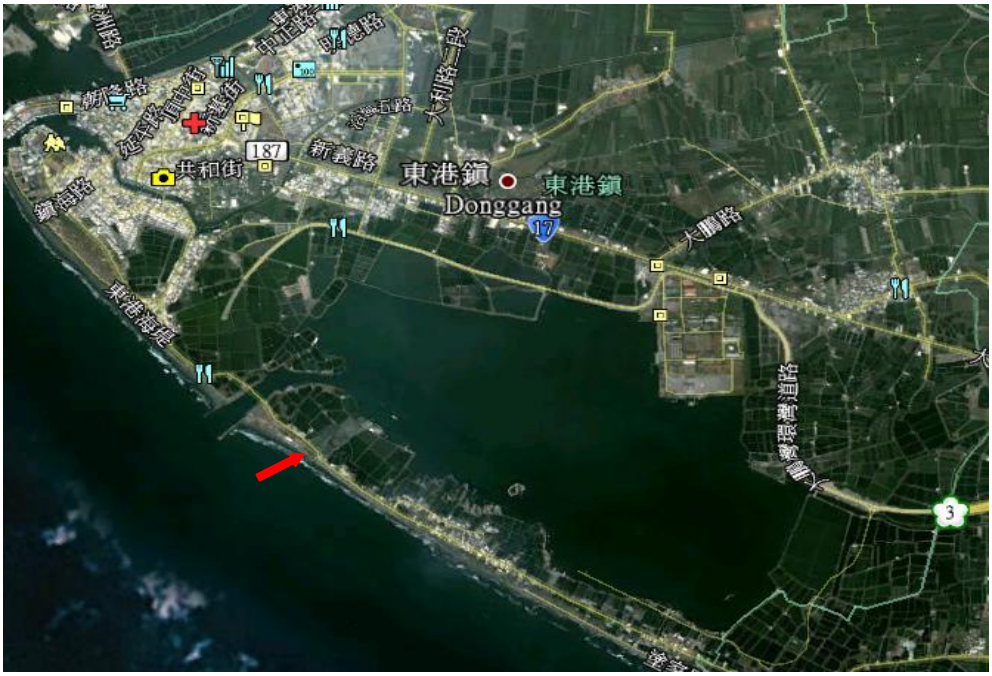


圖 2.20 大鵬灣監測站位置圖

表 2-3　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

2. 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 2.21 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 2-4 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。

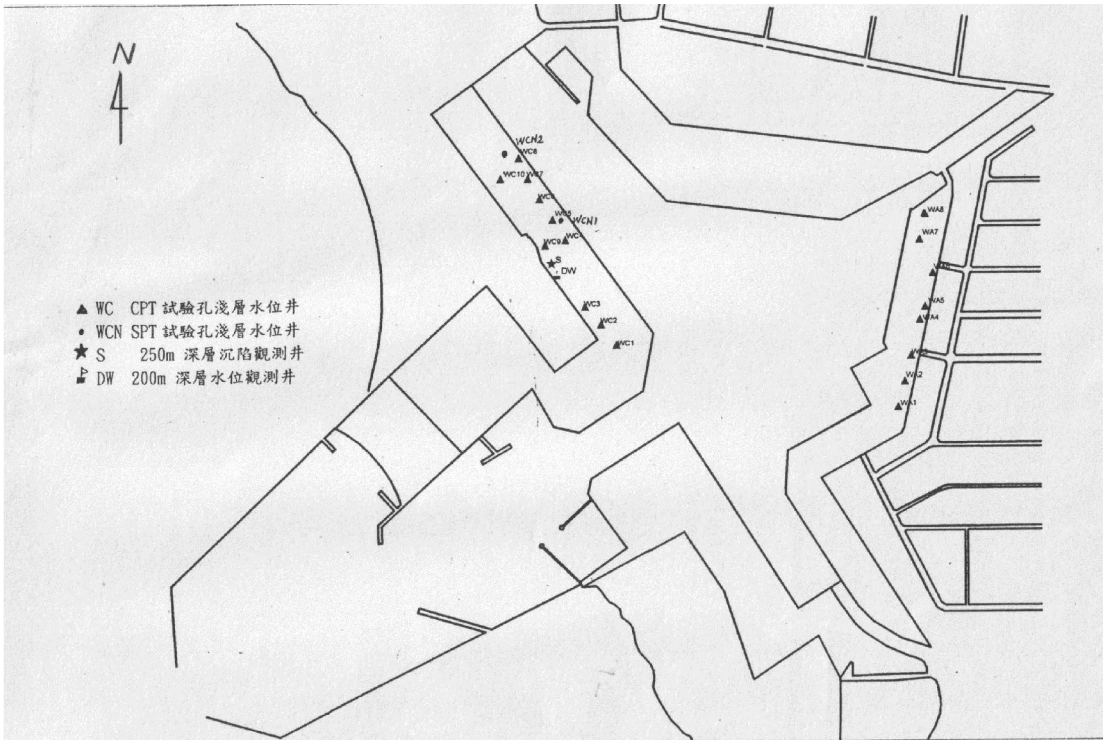


圖2.21 安平港監測站位置圖

表 2-4　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

3. 布袋港監測站

布袋港監測站選擇位於布袋港區第二期海埔地之西北角隅之適當位置(如圖 2.22)，各監測井之座標如表 2-5。

本監測井共計三孔，分別為分層沉陷觀測井 1 孔，水壓計觀測井 2 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 2-6 所示。

(2)電子式水壓計觀測井 2 孔。

(3)水壓監測井共有 7 組電子式水壓計，3 組安裝於鑽探試驗孔內，4 組安裝於開放式水壓計管口內，前 3 組其安裝深度為 131、68、

44 m，開放式水壓計安裝深度為 178、143.5、105、34 m，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 2-7 所示。

表 2-5　布袋港監測井座標高程一覽表

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

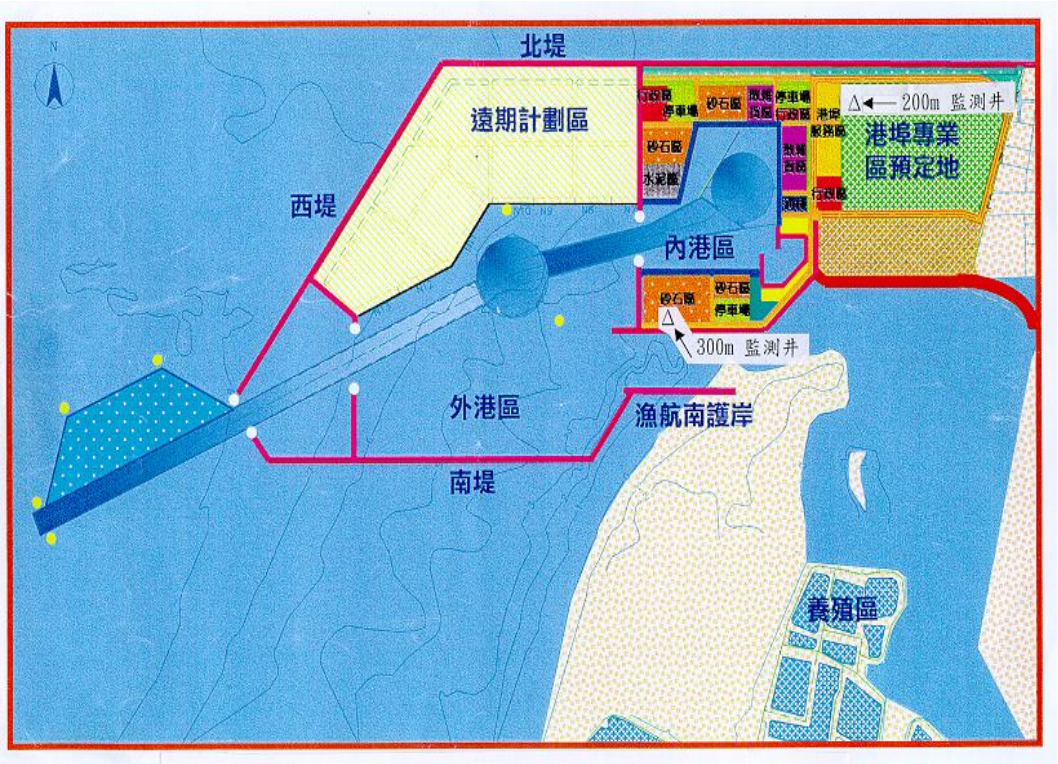


圖 2.22 布袋港監測站位置圖

表 2-6　布袋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	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 2-7　布袋港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
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				~~4.07 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
	~~25986~~ 120023	14.07 m	CH1	~~115~~ -70	~~0.000673~~ 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

4. 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 2.23)。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 2-8 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 2-8　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 2.23 臺中港監測站示意圖

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。本章初步以安平港區地震站資料為例，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；並進行地層放大效應、動態孔隙水壓變化、港區之場址效應等之相關性分析，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地震工程研究之參考。

3.1 安平港之地理位置與地形

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

3.1.1 安平港地層

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

曾文溪挾帶沉積物，部份沿著安平港附近沿岸形成砂嘴與濱海沉砂洲。而鹽水溪則挾帶較細粒粉土質土壤堆積於砂洲東側較低窪潟形成了新潟湖沉積。安平港及其鄰近地區地質分布情況如圖 3.1 所示，茲將說明如下：

1. 砂嘴與濱海沉積

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

2. 新潟湖沉積

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

3. 三角洲沉積

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

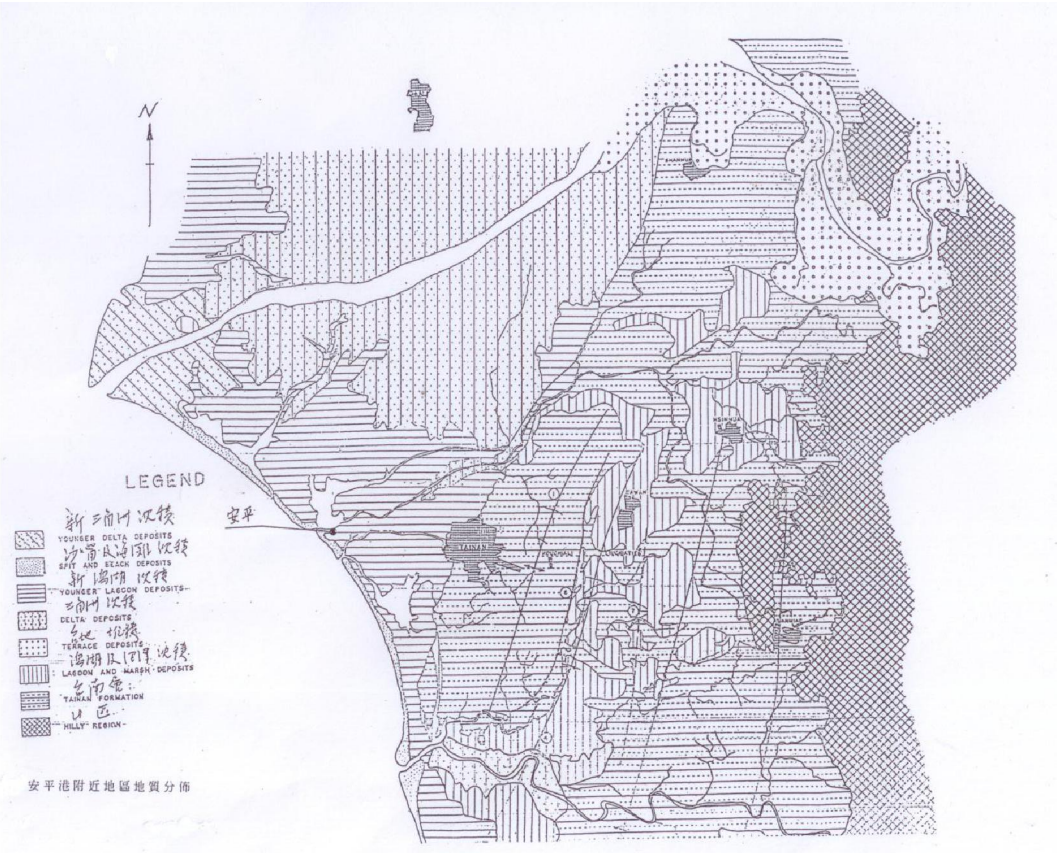


圖 3.1 安平港及其鄰近地區地質分布

3.1.2 安平港區地質

規劃之安平港除了主航道之南、北、內、外防波堤外，尚有客貨、散雜貨、水泥及化學品等 31 席，各類用途碼頭如圖 3.2 所示，其中＃1～＃4 為散雜貨及客貨碼頭，＃5A～＃7 皆是散雜貨碼頭，＃8～＃14 為環保中心、貨櫃及散雜貨碼頭，＃15～＃20 為水泥專用碼頭，＃21～＃31 大都是散雜貨碼頭，僅＃21、＃22 是化學品及油類使用碼頭。

地質大部分屬於漁塭區之地層，表層含有貝殼之細砂或鬆軟之砂質壤土，下層為泥質壤土之沖積層，砂礫則來自曾文溪、鹿耳門溪、鹽水溪及二仁溪。而根據已搜集之安平港鑽探資料[23]，可將港區分為 6 個區域來分析，各個區域之鑽探深度約在 25 公尺～55 公尺左右，而土層大致以 6～8 個層次來研判，茲依各不同區域土層自上而下概述如下：

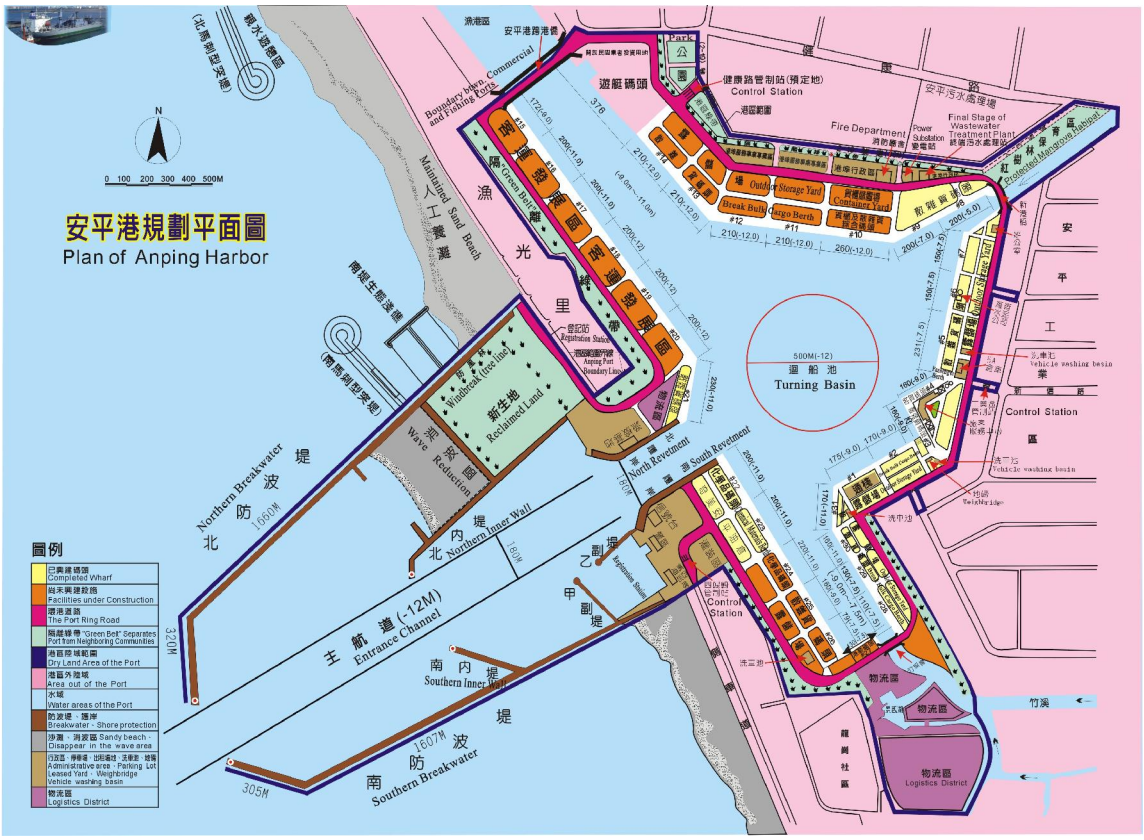


圖 3.2 安平港規劃平面圖

1. 安平港的 1、2、3、4 號碼頭：

＃1～＃4 碼頭共收集 15 個間距在 25m～50m 之海上鑽孔，如圖 3.3 所示，各鑽孔深度為 30m～57m，海床至海平面平均約 6m。土層大略以粉土質細砂(SM)、砂質粉土(ML)或夾粉土質粘土(CL)薄層等三種土層沖積而成。靠近海床面，為 2m 至 4m 厚之砂質粉土或夾粘土薄層，其標準貫入 N 值在 2 至 5 屬極軟弱稠度。

海床表土層下至 EL.-25m 以中等緊密之灰色粉土質砂土層為主，但於-16m 及-23m 處各有平均約 2m 厚之灰色粉土或黏土層。

EL.-25m 至 EL.-53m 深皆以粉土與砂土層分佈，其中 EL.-28m～EL.-33m 及 EL.-36m～EL.-48m 是較厚之灰色黏土質粉土層，且有由＃4 碼頭逐漸向＃2、＃1 碼頭尖滅消失之趨勢。

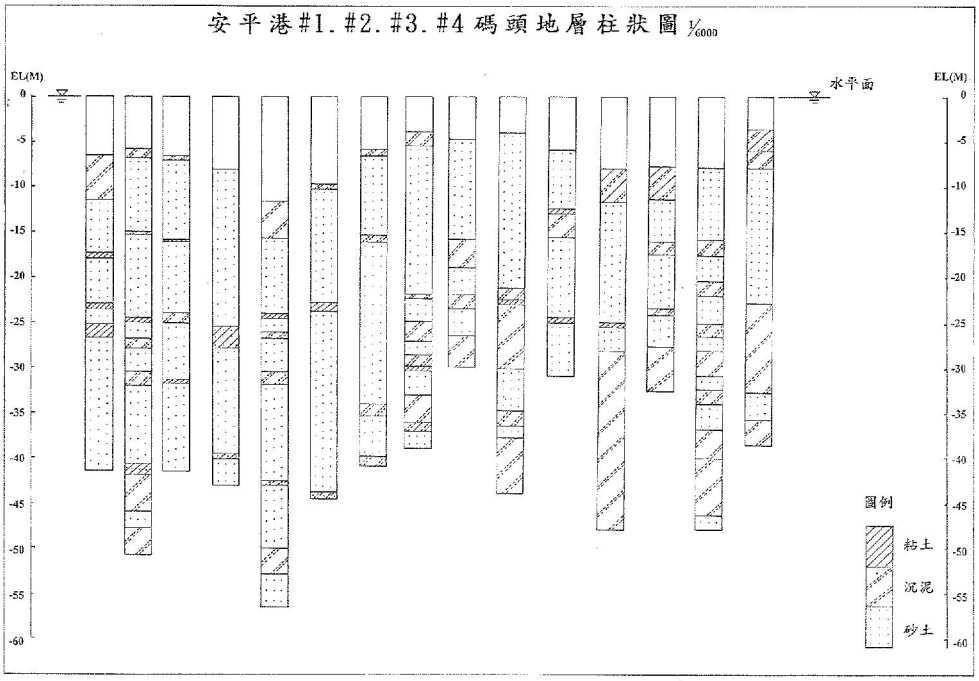


圖 3.3 安平港 1、2、3、4 號碼頭地層柱狀圖

2. 5A、5、6、7 號碼頭：

本區地質鑽探，沿著碼頭線共有 25 個孔距皆為 25m 之鑽孔，平均深度在海水面下 27m，鑽探位置較靠近內陸，故水深為 0.5m 至 3m

左右，如圖 3.4 所示。

海床面以下約有平均 2.5m 厚之極軟弱粘土層，標準貫入 N 值在 0～1，EL.-5m 至 EL.-10m 為灰色粉土層，N 值在 2～10 間。

在 EL.-10m 以下至 EL.-27m 處，則以粉土質細砂(SM)土層較為明顯，分別是 EL.-10m～EL.-17m 及 EL.-20m～EL.-24m，而 EL.-17m 至 EL.-20m 及 EL.-24m 至 EL.-27m 則為粉土層，且靠近＃7 碼頭區為中塑性黏土層。

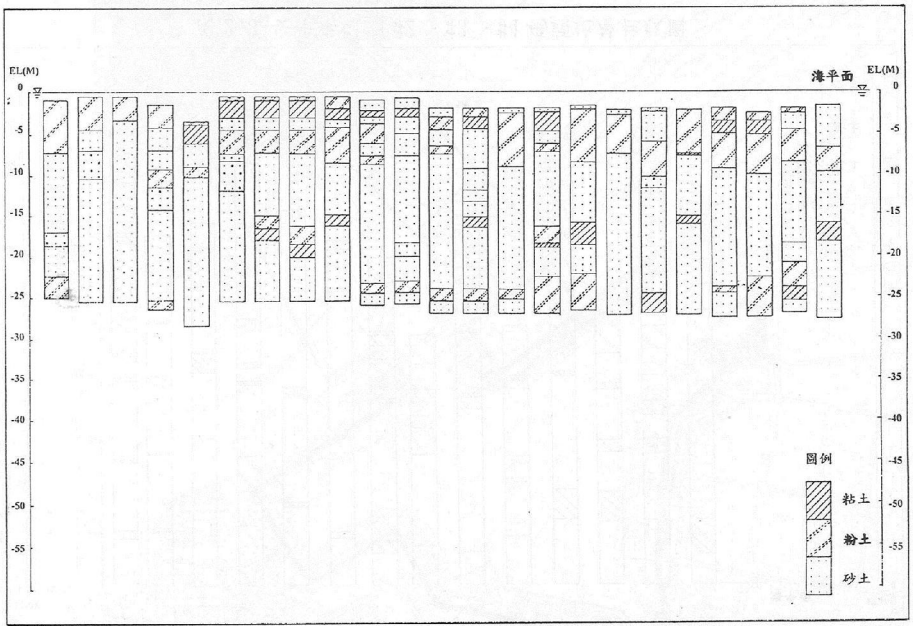


圖 3.4 安平港 5、6、7 號碼頭地層柱狀圖

3. 8、9、10 號碼頭：

本所於＃8、＃9、＃10 碼頭等區共進行 17 孔 30 公尺深之荷式錐貫入試驗(CPT)，根據試驗得知整個地區之土層剖面變化不大，依錐頭阻力研判本區土層，如圖 3.5 所示，可細分為 6 個次層：

表土層厚度約為 2m，屬於砂質粉土，因表土層水份受到蒸發，含水量低，錐頭阻力約為 80～140Kg/cm^2，屬較緊密粉土層。

第二次層為厚約 2m 之粉土質細砂，錐頭阻力小於 20Kg/cm^2，為極疏鬆之砂土層。

地表下-4m 至-5m 有約 1m 厚之軟弱黏土層，在地表下.-5.0m～-8m 間為厚約 2～3m 之粉土質細砂或砂質粉土層，且由＃8 碼頭向西邊之＃10 碼頭漸變為含有細黏土顆粒較多之砂質粉土。

地表下-8m～-13m 為厚 5m 之軟弱黏性土層，偶夾 1 米厚之疏鬆砂土層，錐頭阻力在 35～50Kg/cm^2。

深度自地表下 13m 至 25m 為較緊密之粉土質砂土層(SM)，且有些試孔在深度約 20m 處夾有 1m 厚之黏土層。

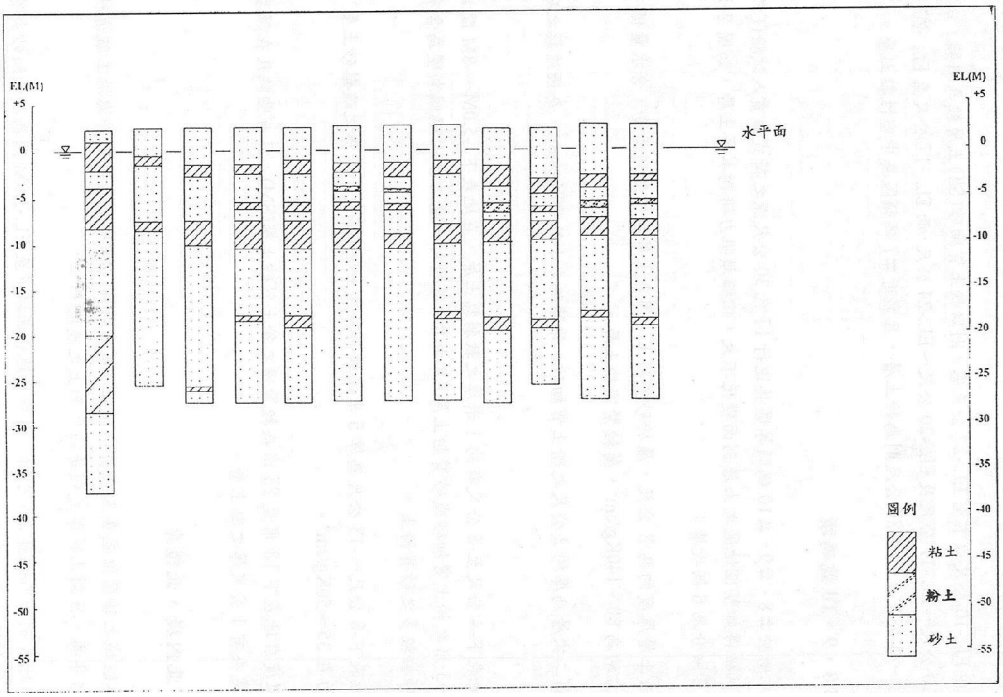


圖 3.5 安平港 8、9、10 號碼頭地層柱狀圖

4. 北內堤、北護岸：

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

由地層剖面，如圖 3.6 可知，護岸自地表面以下至 EL.-3.0m 間為灰色細砂夾礫石層，而整個區域自海床面以下至 EL.-43m 間皆以灰色細砂或粉土質細砂層為主，其中於 EL.-17m～-22.0m 及 EL.-30m～-33m 則為粉土質細砂夾薄黏土層，並向西側外海逐漸尖滅消失。

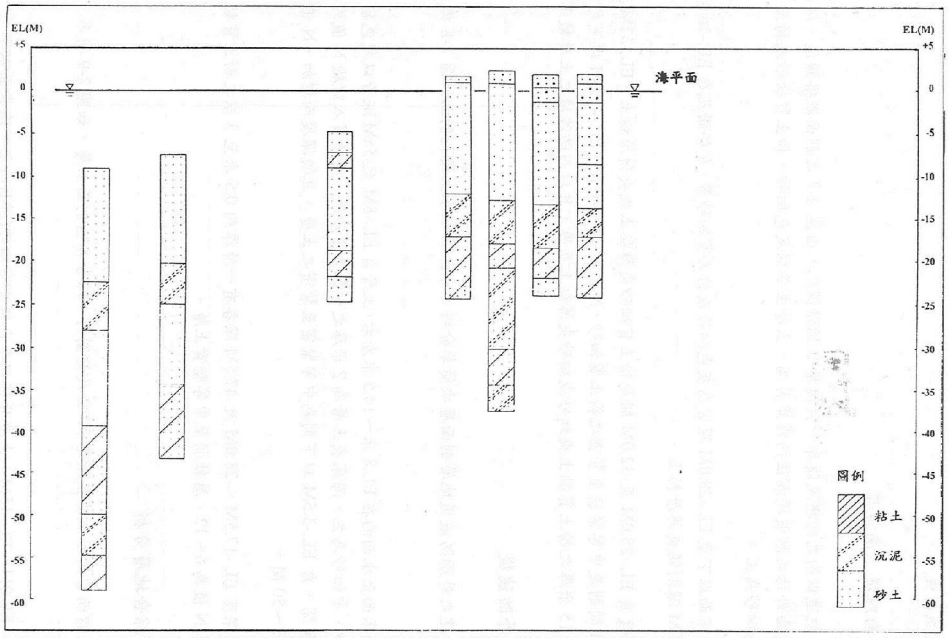


圖 3.6 安平港北內堤、北護岸碼頭地層柱狀圖

5. 南內堤、南護岸：

主航道以南之內堤及護岸，共搜集 9 個鑽探孔，由圖 3.7 之剖面概略顯示，海床面亦是由外海之防波堤漸往內護岸昇高，土層主要以灰色細砂、粉土質細砂或粉土質黏土夾細砂為主。

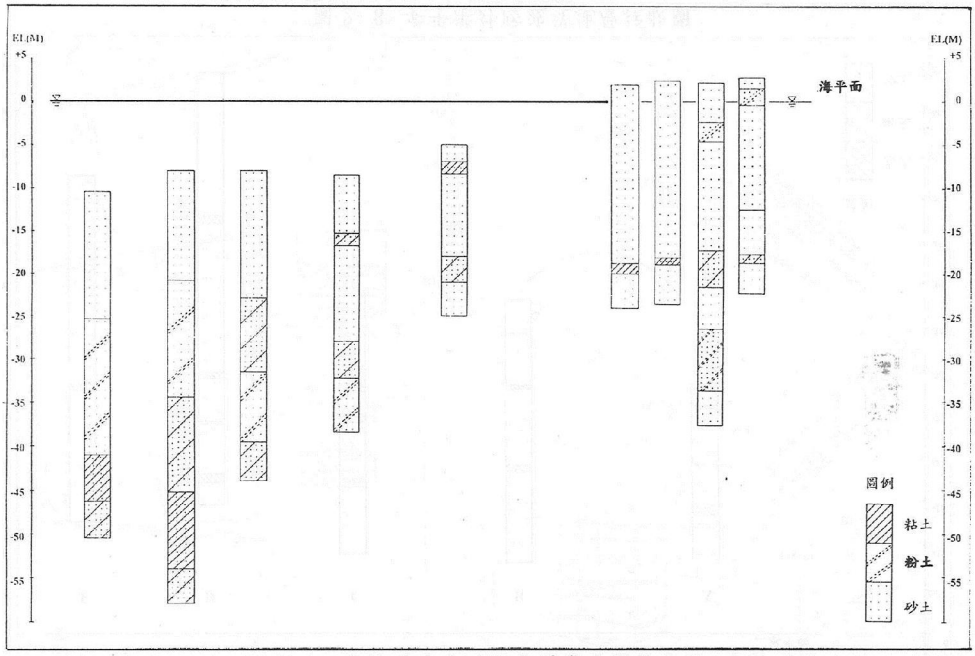


圖 3.7 安平港南內堤、南護岸碼頭地層柱狀圖

海床面以下至 EL.-28.0m 深皆為灰色細砂或粉土質細砂層，有些鑽孔在 EL.-16.0m～-19.0m 深則偶夾薄層粘土。

深度自 EL.-28.0m 至-32.0m 間是粉土質細砂夾薄黏土或夾薄層粉土。EL.-32m 至-45.0m 間則是中等緊密至緊密之粉土質細砂，N 值在 22～40 間。EL.-45.0m 以下約有 5m 至 15m 厚之粉土質黏土夾細砂或細砂夾薄黏土互層，且以內防波堤之土層較厚。

6. 外防波堤：

新建之外廓防波堤地層剖面層次簡單分明，可由 5 個水上鑽孔剖面如圖 3.8 概示如下：

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

在深度 EL.-17.5m、-28.0m 及-47.5m 深各有一層厚約 0.5m 至 3m 之粉土質黏土層，其 N 值為 6～12，屬軟弱至中等堅實土層。

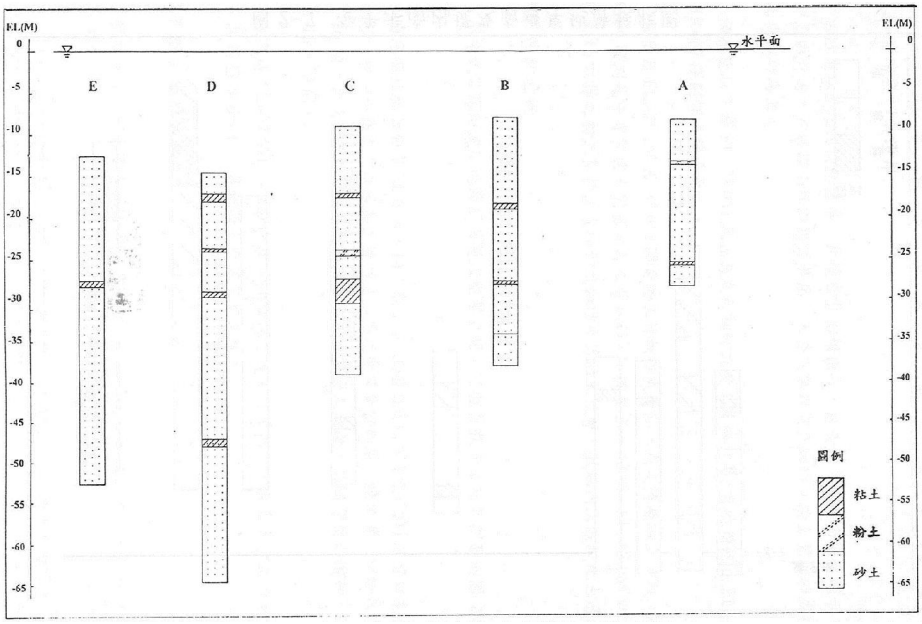


圖 3.8 安平港外防波堤碼頭地層柱狀圖

3.1.3 綜合地層分析

整體而言，安平港在深度-50m 範圍內，綜合各區剖面土層，如圖 3.9 所示，簡述如下：

1. EL.0m～EL.-15m：土層分佈以灰色粉土質細砂(SM)為主，海床面以下 2～4m 為軟弱之粉土層(ML)，深度-5m 及-10m 間偶夾有 N 值為 2～10 之軟弱粉土或黏土薄層。

2. EL.-15m～EL.-20m：具有一層平均為 2～3m 厚之灰色黏土(CL)或粉土層(ML)，N 值在 6～30 間，屬中等堅實至極堅實稠度土層，其中以外防波堤土層較軟弱。

3. EL.-20m～EL.-35m：大致以緊密之粉土質砂(SM)居多，但於-28m～-33m 間有一層厚約 2～5m 之粉土質細砂夾黏土或粉土層，N 值為 22～60 間之極堅實至堅硬土壤。

4. EL.-35m～EL.-50m：大部分為灰色粉土質砂土層，但於-45m～-50m 間為一層厚約 2～8m 之灰色粉土質粘土夾細砂土層，N 值約在 22～45 間，此土層分佈以航道之內防波堤較厚。

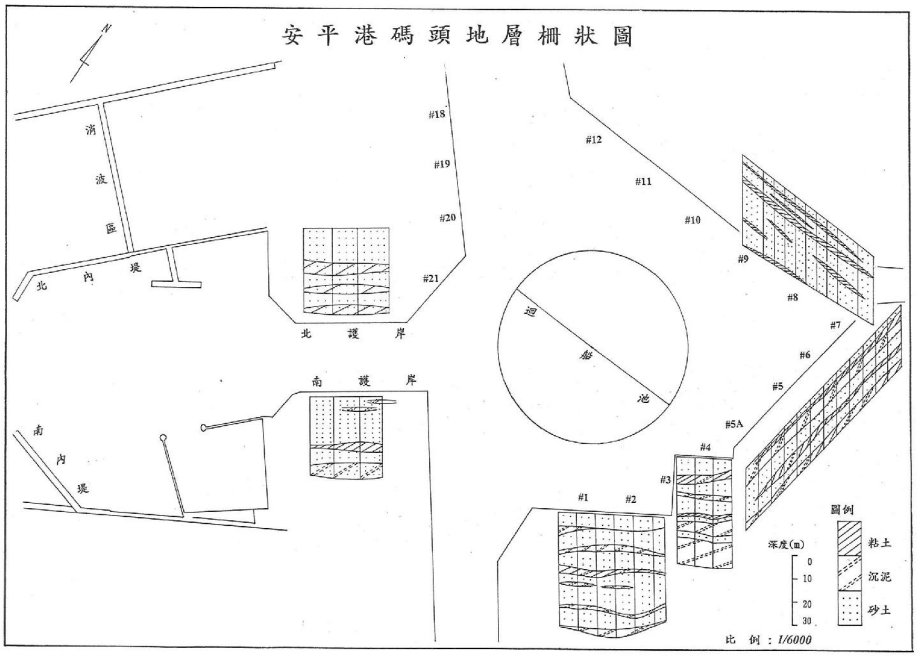


圖 3.9 安平港碼頭地層柵狀圖

3.2 安平港區之地震力分析

安平新商港亦稱安平商港，商港的興建，是因民國 63 年安平舊港封淤後，另擇安平舊港南方 2 公里的「鯤鯓湖」興建新港，建造客、貨、遊艇碼頭與防波堤共計 30 餘座碼頭工程，於民國 68 年竣工並開始營運，民國 86 年由交通部公告成為高雄港之輔助港，故安平港自國內商港提升為國際商港，102 年經建會通過安平港成為國內第 7 個自由貿易港區，103 年 8 月台灣港務股份公司完成安平港自由貿易港區營運許可，故其地位更是非常重要。因此對於安平港碼頭工程維護附近由於斷層地震造成港區碼頭港灣工程的影響，更是不可加以重視。本節就港區附近之活動斷層、斷層長度與地震規模及港區土層放大效應分別敘述如下。

3.2.1 安平港區附近的活動斷層

斷層通常是地震釋放能量的地方，其主因是地層受到大地應力作用後產生，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稱為斷層。

臺灣西南部地區的活動斷層，依據經濟部中央地質調查所的調查報告，地表長度大於 5 公里的活動斷層，包括九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、木屐寮斷層、六甲斷層、觸口斷層、新化斷層、後甲里斷層與左鎮斷層等共 9 條斷層[27]，而其中離安平港區最近且具影響港區構造物的活動斷層為新化與後甲里斷層，以下分別就新化與後甲里斷層之地形、地質與活動特性簡述如下：

1. 新化斷層

新化斷層，為右移斷層，約呈東北東走向，由臺南縣新化鎮那拔里向西延伸至北勢里，長度約 6 公里，如圖 3.10。1946 年 12 月 5 日芮氏規模 6.3 的地震，為新化斷層的再活動所造成。新化斷層有多次古地震事件，故列為第一類活動斷層[27]。

新化斷層位於新化丘陵西緣，新化畜產試驗所以西沒有明顯的斷層地形特徵，而那菝林至深坑橋則有明顯線形。

斷層出露的地層包括六雙層、階地堆積層與沖積層。六雙層下段為棕黃色砂岩和厚層泥岩，上段以棕黃色砂岩為主。階地堆積層與沖積層，皆以礫石、砂與泥為主。

新化斷層於 1946 年 12 月 5 日早上 6 時 47 分曾發生芮氏規模 6.3 之破壞性地震，震央在北緯 23.1 度，東經 120.4 度，約在臺南市東北方之新化與那拔林附近，震源深度經判斷約在 5km 處，走向為東北東 ENE-WSW，約從新化至永康附近。震央附近之新化鎮、新市鄉與永康鄉一帶災情嚴重，震度達 5 級，其次為安定鄉、歸仁鄉、仁德鄉及臺南市安南區。震央附近發生顯著地殼變動，如斷層、地裂、噴砂、噴泥、噴水與井水變異等現象，對農業與交通上之影響甚鉅。根據調查，本次地震最大水平位移為 200 公分，最大垂直變位 76 公分，約在現今深坑橋北側公路上，新化斷層與安平港之距離約 25km。

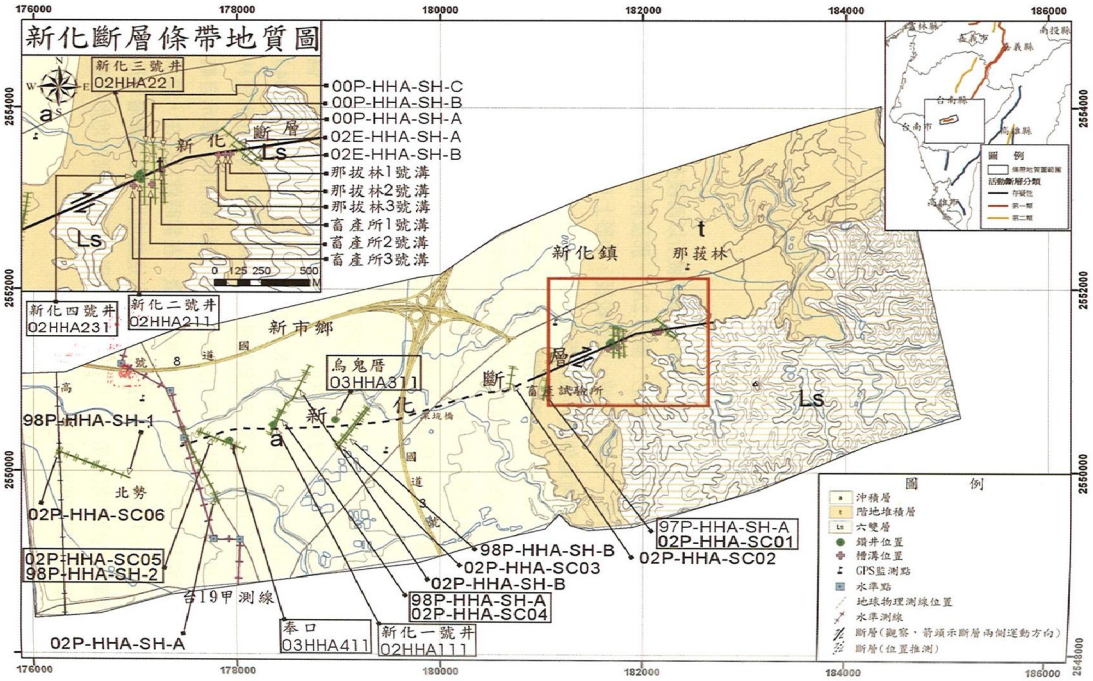


圖 3.10 新化斷層地質圖

2. 後甲里斷層

後甲里斷層，為逆移斷層，約呈南北走向，由臺南市永康向南延伸至虎山，如圖 3.11，長約 12 公里[27]。

臺南台地為一橢圓外形，長軸為南北向。台地東緣有一直線狀崖，崖線西側岩層向東傾斜 15~30 度，推測存在一條高角度傾斜的正移斷層。由航照判釋發現台地東緣有明顯的斷層崖，崖的中段高約 30 公尺，並被一約 15 公尺高的侵駛平台所隔，因此推測後甲里斷層為一向西傾斜的逆移斷層，且在臺南層沉積之後歷經 2 次的抬生作用。本區出露的地層包括臺南層與沖積層，臺南層以膠結疏鬆的厚層細至中粒砂岩為主，偶夾薄層頁岩。沖積層則以未膠結的砂、礫石與泥為主。後甲里斷層藉由槽溝開挖與鑽井資料顯示可確定確實存在，年輕地層雖有受劇烈構造擾動，造成地層傾斜、龜裂、錯動及液化等現象，但因未發現有斷層截穿至地表，故屬於盲斷層，為第二類活動斷層。

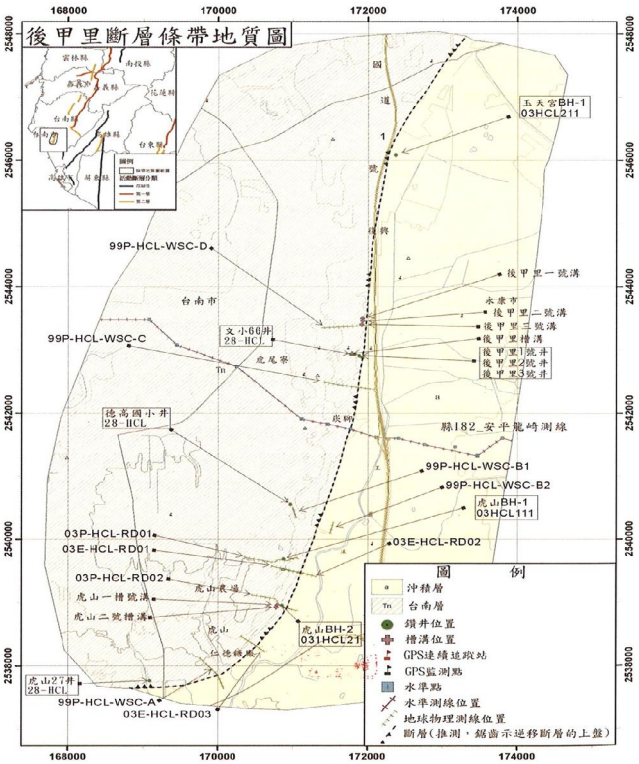


圖 3.11 後甲里斷層地質圖

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。日本學者蒐集 1891 年至 1948 年日本地震相關的斷層資料彙整分析[19]及 Tsai et al.,(1987)[34]、Wells and Coppersmith (1994)[5]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、3-4 式所示：

$log_{10}L$=1.32M-7.99 ..... (3-1)

上式中，M=地震規模(為芮氏規模)。L：斷層長度 (km)。

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〕 ..... (3-2)

上式中，L：斷層破裂長度 (km)，M_L =芮氏地震規模。

Wells and Coppersmith (1994)[5]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 3-3a 式、3-4b 式所示：

Mw=5.16+1.12*$log(SRL)$ .....(3-3a)

SD=0.28

Mw=5.00+1.22*$log(SRL)$ ..... (3-3b)

SD=0.28

上式中，Mw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) [34] 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±0.14 ..... (3-4)

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[34]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。

新化斷層與後甲里斷層根據中央地調所調查之斷層長度分別為右移 6 公里與逆移 12 公里，由以上 3 種不同學者之經驗式分別來估算出地震規模。當斷層滑移長度 L=6 公里時：地震規模分別為 M=6.64、M_L=5.0 與 M_W=6.03±0.28，M_W 轉換成芮氏規模為 M_L=6.05±0.14。當斷層長度 L=12 公里時：地震規模分別為 M=6.87、M_L=5.7 與 Mw=6.31±0.28，M_W 轉換成芮氏規模為 M_L=6.26±0.14。

3.2.3 安平港區土層放大效應

依據以往之震紀錄考慮，考慮震源之線性模式與衰減率，推測安平港工址之可能發生最大地震(maximun credible eathquake MCE)。根據下列最大地表加速度衰減率公式，可以推估安平港地區可能遭受新化斷層之最大地表加速度 a_{max} 。

Kanai 公式：

$$a_{max} = 1.192e^{0.735M}(R+34)^{-1.743} \quad \text{.....(3-5)}$$

Joyner & Boore 公式

$$\log_{10}(a_{max}) = -1.352 + 0.2875M - \log_{10}\sqrt{R^2+14^2} \quad \text{.....(3-6)}$$

Campbell 公式：

$$a_{max} = 0.009e^{1.024M}(R+0.04e^{0.94M})^{-1.074} \quad \text{.....(3-7)}$$

Japan Rock Site 公式：

$$\log_{10}(0.981a_{max}) = (\frac{R+75}{100})(-4.92+1.018M-0.06M^2) \quad \text{.....(3-8)}$$

茅聲燾公式：

$$a_{max} = 0.3725e^{0.876M}(R^2+400)^{-0.918} \quad \text{.....(3-9)}$$

上式中，a_{max}=最大地表加速度，單位為 g。

M=地震規模。R=震源至當地距離，單位為公里。

上述衰減公式(3-5)~(3-9)，係羅俊雄(1990)[36]根據 Kanai、Joyner & Boore、Campbell、Japan Rock Site 所建議之基本型式，再根據 1973 年後臺灣地震網(TTSN)已建立，且震源位置測定較精密，所收集之地震資料，求得較合適之係數，而式(3-9)為茅聲燾以 1935 年臺中、新竹等五次臺灣大地震資料所建立之加速度衰減公式。

根據安平港地震站與 921 集集大地震之地表加速度 a_{max} 記錄資料顯示，沖積土層之地震力皆有放大效應，其加速度 a_{max} 值大部份皆較衰減公式所推估者為高[25]。將實測值與衰減公式之推估值相比，可得各公式之修正係數如表 3-1 所示。

表 3-1 安平港測站實測地震各衰減公式之計算值及修正係數

記錄 \ 模式		衰減公式					平均值
		Kanai	**Joyner & Boore**	**Campbell**	**Japan Rock Site**	**茅聲燾**	
M=7.0 2006/12/26 20:26:51	計算值(g)	0.025	0.0321	0.047	0.026	0.019	0.0298
	實測值(g)	0.050					
	修正係數	1.987	1.547	1.062	1.909	2.628	**1.827**
M=7.0 2006/12/26 20:34:36	計算值(g)	0.033	0.039	0.056	0.041	0.027	0.039
	實測值(g)	0.101					
	修正係數	3.054	2.575	1.808	2.475	3.712	**2.734**
M=6.9 2009/12/19	計算值(g)	0.017	0.024	0.035	0.0135	0.012	0.0203
	實測值(g)	0.036					
	修正係數	2.084	1.468	1.013	2.665	3.023	**2.051**
M=6.4 2010/03/04	計算值(g)	0.049	0.052	0.062	0.0728	0.053	0.0577
	實測值(g)	0.081					
	修正係數	1.634	1.576	1.317	1.1123	1.534	**1.435**
M=6.1 2012/02/26	計算值(g)	0.033	0.036	0.042	0.046	0.031	0.0376
	實測值(g)	0.052					
	修正係數	1.562	1.432	1.245	1.138	1.667	**1.408**

3.3 安平港區之設計地震力

3.3.1 安平港測站的地震類型

本章彙整安平港井下地震監測站歷年監測所得，依地震規模大小與測站震度、距離，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 10 公里，芮氏規模介於 4.5~6.4、測站震度為 5 級以下之地震紀錄。B 類型地震為震央離測站亦超過 10 公里，芮氏規模 6.4 以上、測站震度為 5 級以上之強震紀錄。C 類型地震為震央距測站少於 10 公里、芮氏規模小於 4.6，測站震度 2 級以上，屬於近距離之地震紀錄，安平港 2006~2013 年井下地震監測資料如表 3-2，三種地震之加速度歷時、加速度富氏譜分別如圖 3.12 及 3.13 所示。將 A、B、C 三種地震記錄之水平方向加速度歷時資料分別進行 5%阻尼比之反應譜分析，如圖 3.14 所示。

表 3-2 安平港 2006~2013 年井下地震監測資料表

編號	監測時間(臺北時間)	震央位置		深度 (km)	規模 (M_L)
		北緯(度)	東經(度)		
1	2006-03-09; 12:07:54.00	23.64	120.56	9.9	5.1
2	2006-04-01; 18:02:42.00	22.88	121.08	7.2	6.2
3	2006-04-16; 06:41:23.00	22.86	121.30	17.9	6.0
4	2006-04-18; 09:26:23.00	23.42	120.34	10.6	4.6
5	2006-06-17; 10:04:57.00	23.1	120.19	15.9	4.3
6	2006-10-09; 18:02:53.00	20.77	119.93	28.0	6.1
7	2006-12-26; 20:26:51.00	21.69	120.56	44.1	7.0
8	2006-12-26; 20:34:36.00	21.97	120.42	50.2	7.0
9	2006-12-26; 23:42:14.00	22.07	120.30	41.23	5.5
10	2006-12-27; 10:30:58.00	22.05	120.39	49.5	5.8
11	2007-01-25; 18:59:48.00	22.63	122.03	25.8	6.2
12	2007-07-23; 21:40:52.00	23.69	121.70	31	5.9
13	2007-08-09; 08:56:20.00	22.65	121.08	5.5	5.7
14	2007-09-07; 01:52:13.00	24.28	122.25	54	6.6
15	2007-10-17; 22:40:50.00	23.50	121.61	42.1	5.4
16	2007-12-05; 09:42:19.00	23.07	121.19	11.3	5.1
17	2007-12-23; 19:50:50.00	23.10	120.67	7.6	4.2

編號	監測時間(臺北時間)	震央位置		深度 (km)	規模 (M_L)
		北緯(度)	東經(度)		
18	2008-02-18; 04:33:33.00	23.31	121.46	28.3	5.4
19	2008-03-05; 01:32:04.00	23.21	120.70	11.3	5.2
20	2008-04-24; 02:29:20.00	22.87	121.68	11.1	5.6
21	2008-06-15; 07:29:39.00	22.90	120.59	16.9	4.8
22	2008-09-24;02:57:27.70	23.06	120.22	15.4	3.6
23	2008-09-25; 15:25:38.00	23.06	120.21	16.0	3.5
24	2008-09-25; 23:48:18.00	23.06	120.22	15.8	3.6
25	2008-10-31; 06:25:30.00	23.07	120.23	16.0	4.0
26	2008-10-31;07:36:30.00	23.05	120.22	14.7	3.5
27	2008-10-31; 16:38:20.00	23.07	120.22	15.4	4.6
28	2008-12-02; 11:16:53.30	23.34	121.49	31.7	5.7
29	2008-12-08; 05:19:39.00	23.85	122.2	35.1	5.9
30	2009-05-12; 02:07:38.50	23.01	120.19	14.7	2.8
31	2009-06-18; 01:18:12.00	23.44	120.65	12.7	4.4
32	2009-07-14; 02:06:10.00	24.02	122.22	18.1	6.0
33	2009-07-17; 19:01:23.00	23.04	120.29	16.3	3.7
34	2009-07-30; 00:53:36.00	22.05	120.48	41.3	5.8
35	2009-08-17; 08:06:42.00	23.37	123.88	43.3	6.8
36	2009-08-22; 04:58:09.00	22.27	120.34	50.5	5.6
37	2009-10-22; 11:37:11.00	23.36	120.38	10.9	4.6
38	2009-11-05; 17:33:17.00	23.79	120.72	24.1	6.2
39	2009-11-05; 17:38:42.00	23.79	120.71	24.5	4.6
40	2009-11-05; 19:34:21.30	23.77	120.76	24	5.7
41	2009-12-19; 21:02:45.00	23.79	121.66	43.8	6.9
42	2010-01-09; 07:40:24.60	22.61	120.58	34.2	4.4
43	2010-02-07; 14:10:00.30	23.33	123.77	88	6.6
44	2010-02-12; 10:42:38.00	23.89	121.09	14	5.3
45	2010-03-04; 08:18:52.10	22.97	120.71	22.6	6.4
46	2010-03-04; 16:16:16.30	22.96	120.63	19	5.7
47	2010-03-08; 17:26:22.90	23.4	120.55	15.3	4.9

編號	監測時間(臺北時間)	震央位置		深度 (km)	規模 (M_L)
		北緯(度)	東經(度)		
48	2010-07-03; 03:11:32.40	22.86	120.68	17.8	5.1
49	2010-07-25; 11:52:10.20	22.84	120.69	19.6	5.7
50	2010-09-12; 22:02:51.90	23.00	120.21	14.3	3.2
51	2010-09-12; 22:03:12.2	22.99	120.19	12.7	3.1
52	2010-11-08; 21:01:21.00	23.22	120.41	19.9	5.2
53	2010-11-12; 23:39:00.60	22.19	120.61	38	5.3
54	2010-11-21; 20:31:45.60	23.85	121.69	46.9	6.1
55	2011-03-16; 21:12:16.60	22.56	120.68	34.9	4.7
56	2011-03-20; 16:00:51.20	22.44	121.38	27.5	5.8
57	2011-04-29; 21:12:48.30	21.35	122.07	178.1	5.9
58	2011-09-09; 11:26:59.10	22.31	120.99	10.4	5.0
59	2011-11-06; 17:36:35.40	23.25	120.33	9.9	4.0
60	2012-02-14; 13:08:33.50	23.05	120.23	15.6	3.1
61	2012-02-26; 10:35:00.90	22.74	120.78	20.4	6.1
62	2012-03-09; 08:04:48.50	22.72	120.74	23.4	4.1
63	2012-04-28; 05:08:18.00	22.73	120.73	24	4.4
64	2012-05-09; 08:21:03.10	23.05	120.04	15.9	4.1
65	2012-06-02; 06:25:57.30	23.22	120.47	19.9	3.8
66	2012-06-06; 09:08:34.00	22.39	121.43	16.6	5.9
67	2012-06-08; 06:22:44.50	22.92	120.6	15.5	4.5
68	2012-06-09; 12:41:21.20	22.92	120.57	15.1	4.9
69	2012-06-10; 05:00:17.90	24.47	122.39	61.9	6.5
70	2012-10-25; 18:31:19.20	22.44	120.4	33.0	5.5
71	2012-11-21; 01:09:01.70	22.47	121.4	26.9	5.4
72	2012-11-29; 11:12:52.80	22.69	121.3	88.2	5
73	2012-12-31; 00:03:25.80	23.46	120.93	5.70	5.4
74	2013-02-19; 10:12:45.60	23.35	120.6	15.1	4.6
75	2013-02-19; 14:52:39.40	22.91	120.6	15.6	4.7
76	2013-03-27; 10:03:19.60	23.9	121.1	19.4	6.2
77	2013-06-02; 13:43:03.20	23.86	121	14.5	6.5
78	2013-06-08; 00:38:01.00	23.88	122.7	58.6	6.2
79	2013-07-16; 18:11:34.70	24.28	121.5	10	5.3
80	2013-10-31; 20:02:09.00	23.55	121.4	19.5	6.3

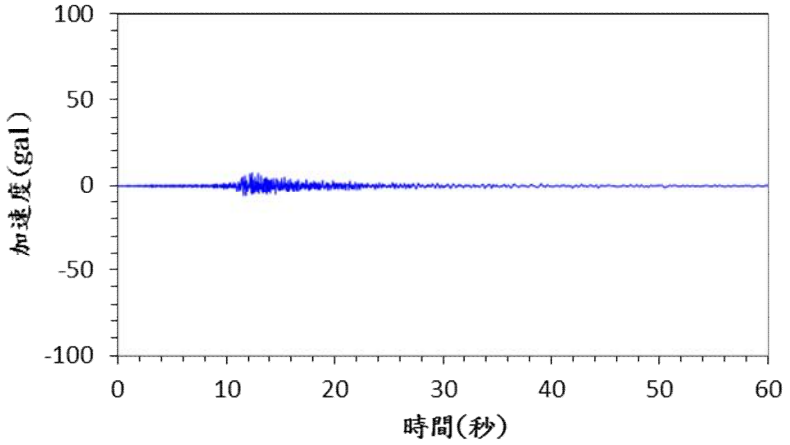


圖 3.12a 安平港 A 類型地震歷時圖

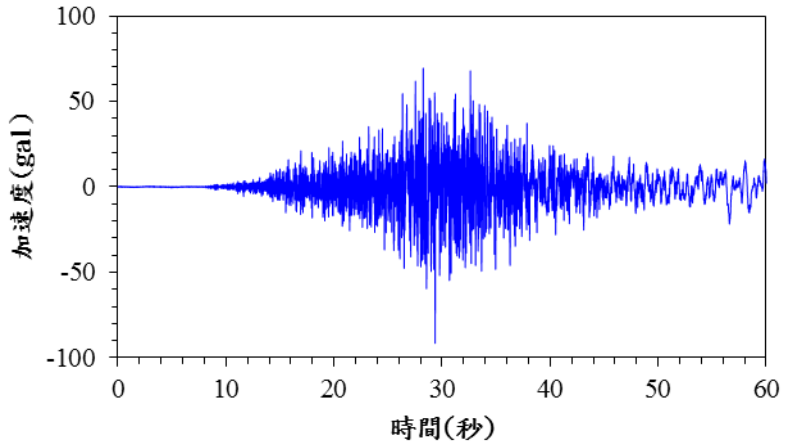


圖 3.12b 安平港 B 類型地震歷時圖

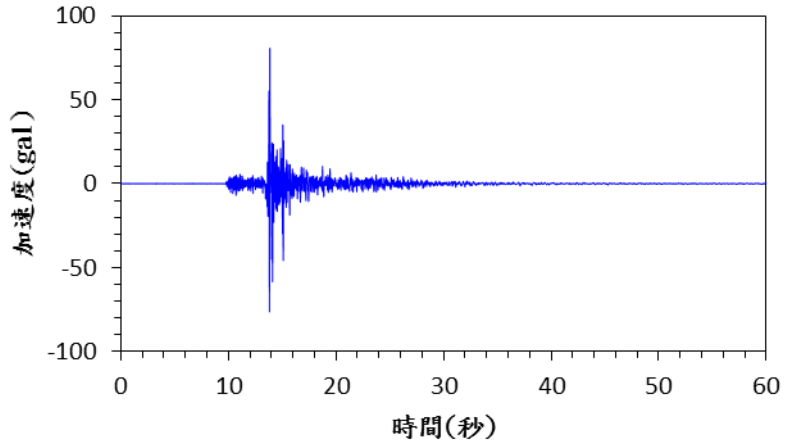


圖 3.12c 安平港 C 類型地震歷時圖

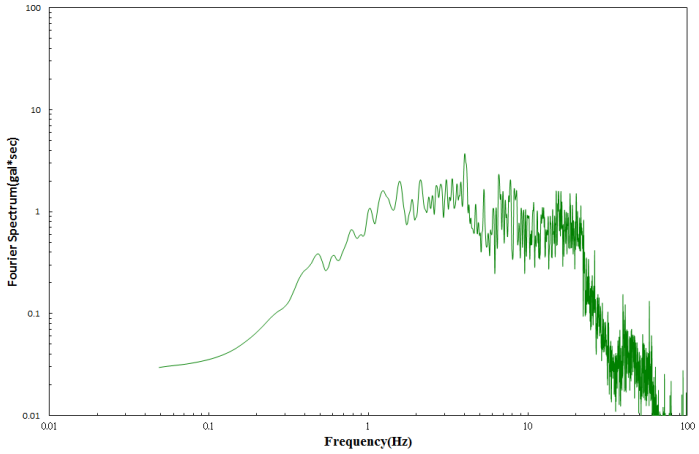


圖 3.13a 安平港 A 類型地震加速度富氏譜圖

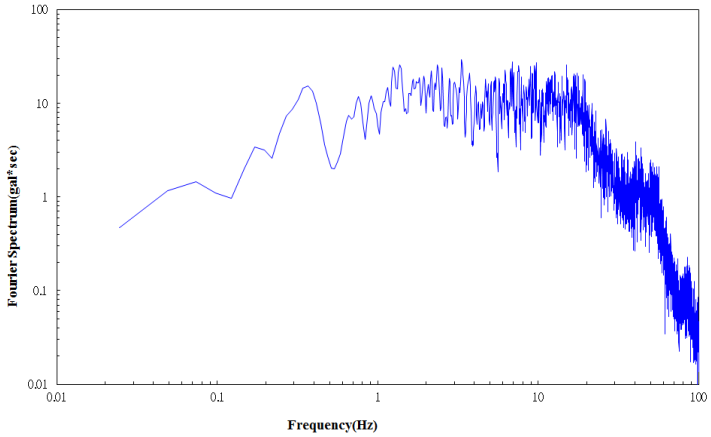


圖 3.13b 安平港 B 類型地震加速度富氏譜圖

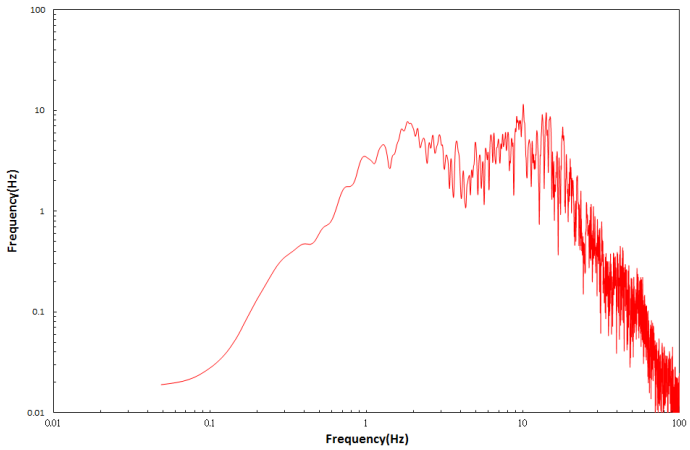


圖 3.13c 安平港 C 類型地震加速度富氏譜圖

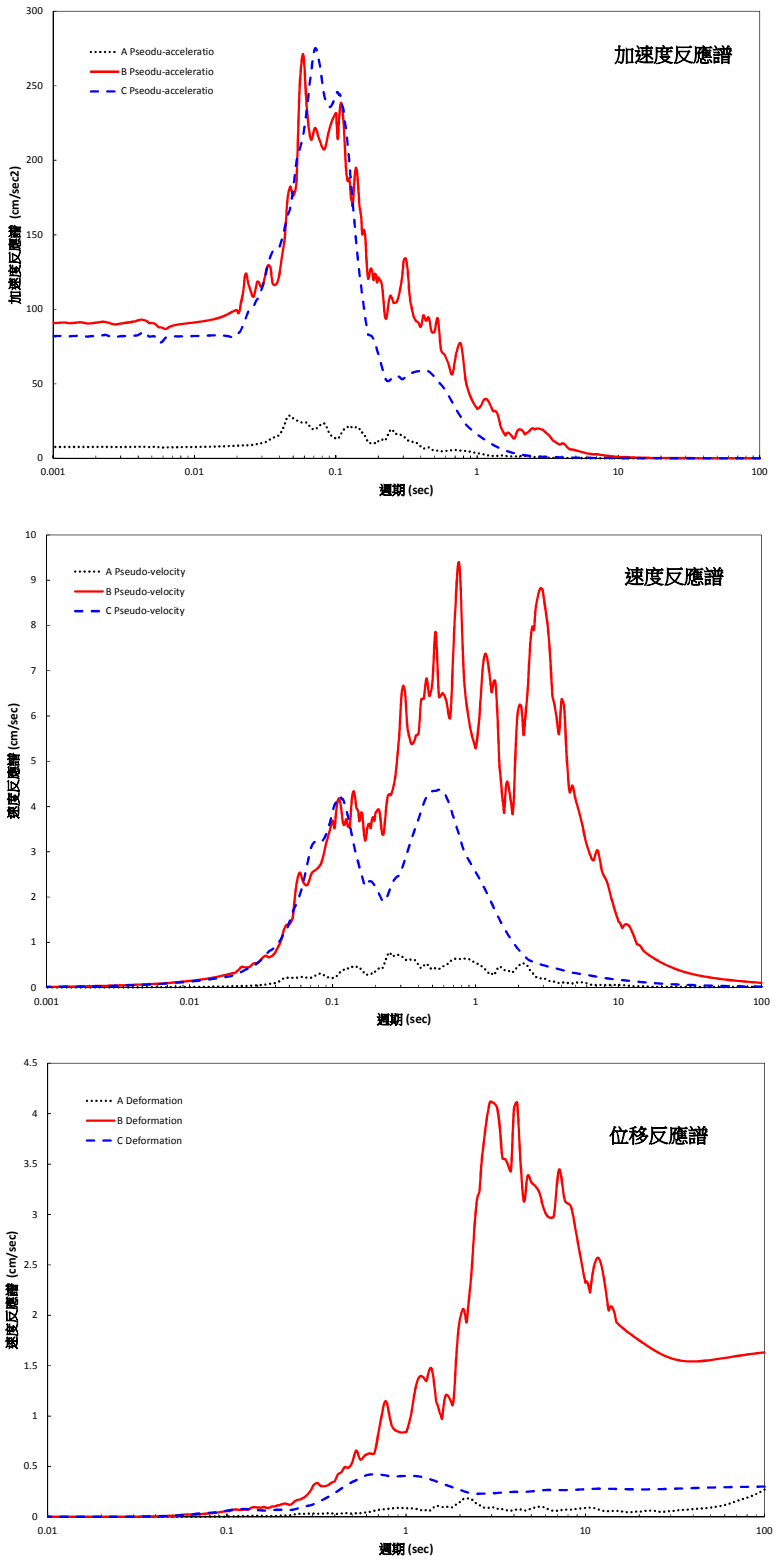


圖 3.14　安平港 A、B 及 C 類型地震之加速度、速度及位移反應譜圖

3.3.2 港區建築物耐震設計

建築物耐震設計規範的設計地震力[15]，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，彙整安平港自 2006 年至 2013 年止共 70 餘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共計 140 餘筆，其中震央距測站超過 10 公里之 A、B 類型地震共有 130 餘筆，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。

3.3.3 安平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_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，安平港行政區劃分為南區，其短週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數分別為 0.7 及 0.4，港區土層由地表至地下 30 公尺深的土層平均剪力波速為 167m/sec，為第三類地盤，屬軟弱地盤，工址短週期設計水平譜加速度係數，$S_{DS} = S_S^D F_a$，所以，

$PGA = 0.4 \times S_{DS} = 0.4 S_S^D F_a = 0.4 \times 0.7 \times 1.1 = 0.308$。

上式中，Fa：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 Ss(S_S^D)而改變。

因此，將安平港 A、B 類型各組地震調整至 0.308g 後進行反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 3.15a 所示，反應譜曲線平台約介於 0.07~0.7 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，安平港區位於臺南市屬地震甲區，其加速度係數為 0.33，因此，將安平港 A、B 類型各組地表水平向地震調整至 0.33g 後進行反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 3.15b 所示。

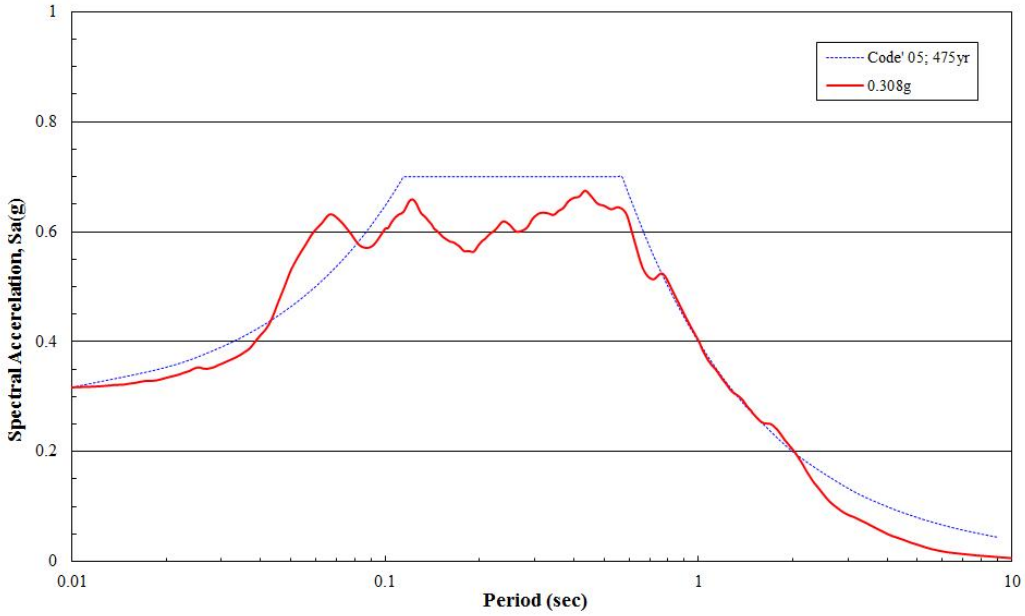


圖 3.15a 安平港 A、B 類型地表地震水平加速度反應譜曲線圖(0.308g)

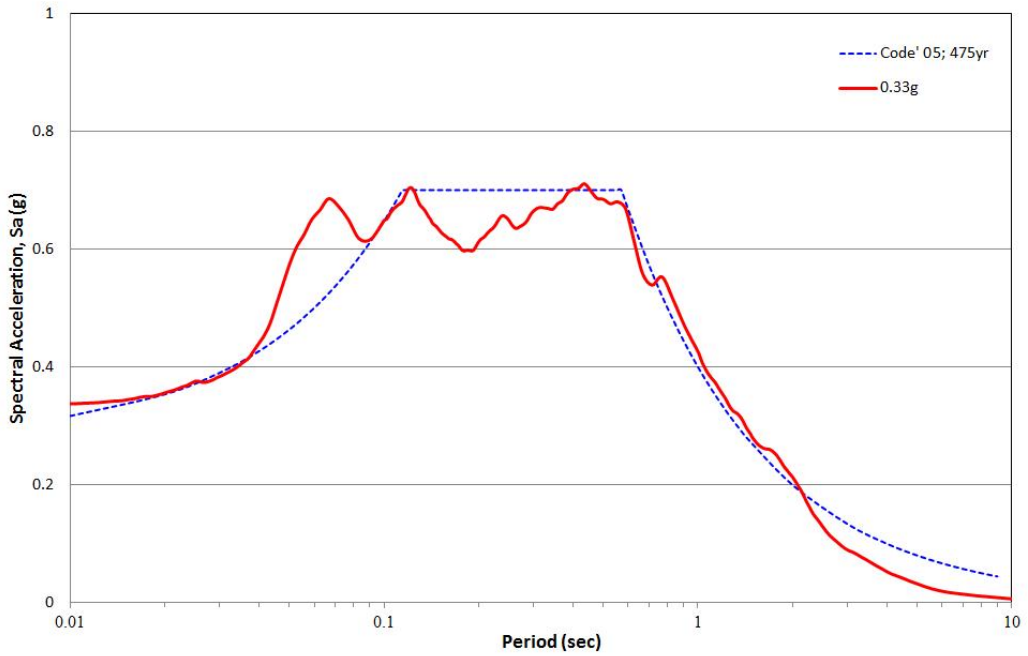


圖 3.15b 安平港 A、B 類型地表地震水平加速度反應譜曲線圖(0.33g)

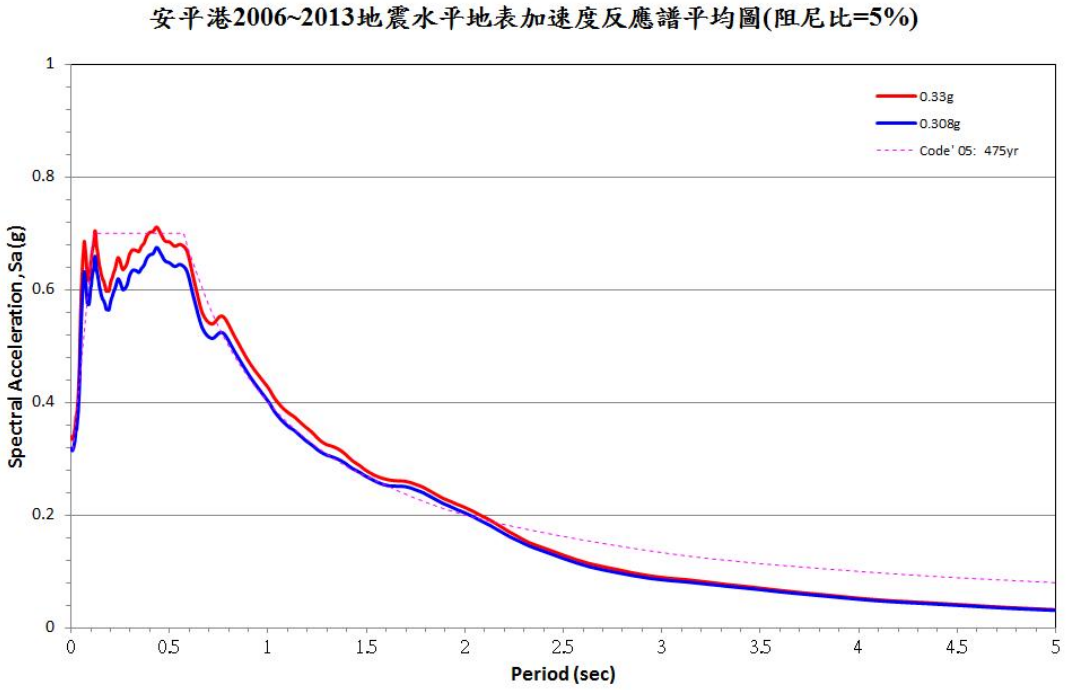


圖 3.15c 安平港 A、B 類型地震水平加速度反應譜曲線圖(0.308g、0.33g)

3.4 臺中港區之斷層與設計地震力

3.4.1 臺中港附近的活動斷層與地震規模

臺灣中部地區的活動斷層，依據經濟部中央地質調查所的調查報告，地表長度大於 5 公里的活動斷層，包括大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層等共 6 條斷層[28]，而其中距離臺中港區最近且具影響港區構造物的活動斷層為屯子腳與大甲斷層，因斷層長度亦是造成地震規模之主因，以下分別就屯子腳斷層與大甲斷層之地形、地質、活動特性及斷層長度與地震規模之關係等簡述如下：

1. 屯子腳斷層

屯子腳斷層，為右移斷層，呈東北東走向，斷層北由后里台地東北隅的泰安車站附近開始，向西南西方向延伸，經下后里、內埔（屯子腳），越過大甲溪至大肚台地北段之清泉崗附近結束，長約 14 公里[28]（大塚彌之助，1936），與獅潭、神卓山等斷層可能為同一系列斷層，延伸長度可能稱超過 50 公里。

屯子腳為一舊地名，位於現臺中市神崗區以北舊社附近，於 1935 年 4 月 21 日曾發生芮氏規模 7.1 之地震，震央位於臺中市北北東三十公里的大安溪中游（120°49'E, 24°21'N），地震伴隨斷層兩側作相對水平位移，最大水平位移 200 公分，強烈地震後形成三條較具規模的斷層，分別為獅潭斷層、神卓山斷層及屯子腳斷層，其中經后里台地的一條，日人大塚彌之助將其命名屯子腳地震斷層。

屯子腳斷層，僅在后里台地東北仍殘留一地形崖，因 1935 年地震地表破裂並未保存，由地球物理探勘結果，淺部斷層帶約數百公尺寬，呈現花狀構造；在后里台地最上部的階地堆積層沉積之後，除了 1935 年地震所造成的地震斷層截切紅土臺地堆積外，並未觀察到岩層傾動或撓曲等現象，因此在紅土臺地堆積後斷層可能僅有 1 次活動的紀錄。由近期的大地測量精密水準測量結果也顯示，跨屯子腳斷層無明顯的

高程變化量，故列為第一類活動斷層(如圖 3.16)。

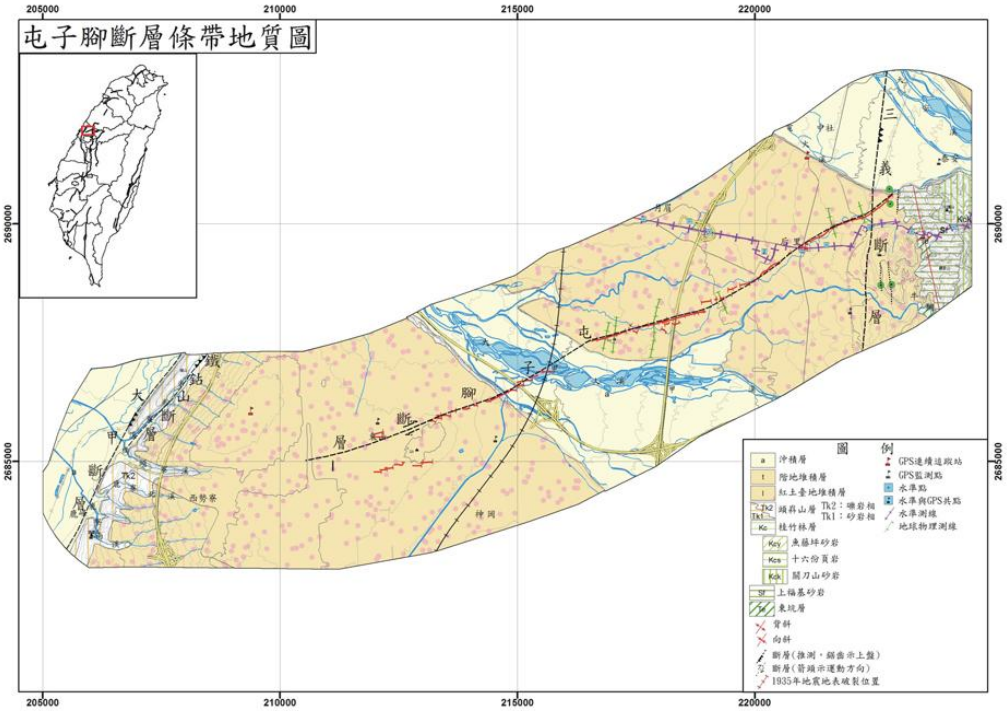


圖 3.16 屯子腳斷層條帶地質圖

2. 大甲斷層

大甲斷層，為北至北北東走向的逆移斷層，由苗栗縣通霄附近經大甲、甲南、清水、沙鹿至臺中縣大肚，長約 30 公里。斷層南段由甲南至大肚的部分，以往稱為清水斷層，長約 22 公里[28] (張徽正等，1998；林啟文等，2000b）。

大甲斷層有明顯的線狀崖，但是野外尚未發現斷層露頭。由野外調查與鑽探岩芯中的岩層比對結果，地表淺處大甲斷層的垂直移距約 50~70 公尺，斷層前緣已截切穿出地表，但斷層跡可能為崩積層或沖積層所覆蓋，因此在地表未發現露頭。大甲斷層南段，野外也未發現斷層露頭，而由鑽探結果顯示斷層的前緣已接近地表，並造成階地崖前緣局部剪切帶。大甲斷層截切更新世晚期的地層，可能在全新世活動過，故暫列為第一類活動斷層(如圖 3.17)。

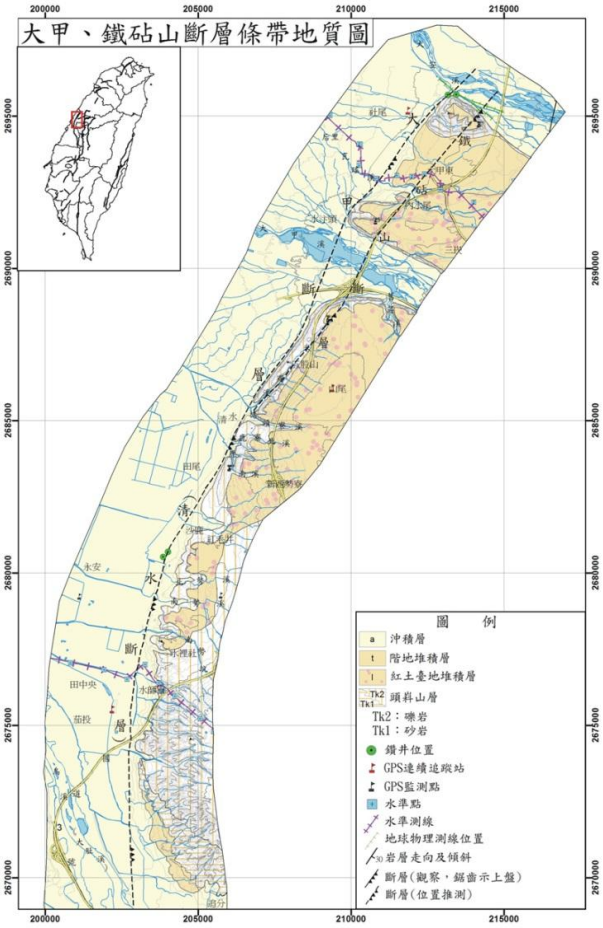


圖 3.17 大甲斷層與鐵砧山斷層條帶地質圖

3. 斷層長度與地震規模

臺中港區附近由於屯子腳斷層或大甲斷層錯動引起的地震，其可能發生之地震規模，可依前節諸位學者彙整出來的斷層長度與地震規模之經驗式簡述如下。

屯子腳斷層系列與大甲斷層根據中央地調所調查之斷層長度分別為右移 50 公里與逆移 30 公里，由以上 3 種不同學者之經驗式分別來估算出地震規模。當長度 L=50 公里時：地震規模分別為 M=7.34、M_L=7.1 與 M_W=7.07±0.28，M_W 轉換成芮氏規模為 M_L=6.77±0.14。當長度 L=30 公里時：地震規模分別為 M=7.17、M_L=6.29 與 Mw=6.50±0.28，M_W 轉換成芮氏規模為 M_L=6.39±0.14。

3.4.2 臺中港測站的地震類型

本節彙整臺中港井下地震監測站歷年監測所得，依地震規模大小與測站震度、距離，將地表地震資料分為 A、B 兩種不同類型。A 類型地震為震央距測站超過 10 公里，芮氏規模介於 4.4~6.4、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亦超過 10 公里，芮氏規模 6.4 以上、測站震度為 4 級以上之強震紀錄。臺中港 2006~2013 年井下地震監測資料如表 3-3，兩種地震類型之加速度歷時、加速度富氏譜分別如圖 3.18 及 3.19 所示。

表 3-3 臺中港 2006~2013 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 (M_L)
		北緯(度)	東經(度)		
1	2006-12-26; 20:26 21.00	21.69	120.6	44.1	7.0
2	2006-12-26; 23:41:44.70	22.07	120.3	41.2	5.5
3	2006-12-27; 10:30 39.80	22.05	120.4	49.5	5.8
4	2007-09-15; 12:42 13.00	23.87	120.75	22.4	4.4
5	2007-10-17; 22:40 43.00	23.47	121.71	42.2	5.7
6	2007-12-05; 09:42 30.00	23.07	121.19	11.3	5.1
7	2007-12-06; 22:15 57.00	24.09	121.35	72.5	5.1
8	2007-12-25; 02:48 50.00	24.02	120.72	22.9	5.1
9	2008-02-18; 04:33:47.00	23.31	121.46	28.3	5.4
10	2008-03-05; 01:32: 26.00	23.21	120.70	11.3	5.2
11	2008-04-24; 02:29:39.00	22.87	121.68	11.1	5.6
12	2008-04-28; 07:31:59.00	23.94	121.43	17.9	4.6
13	2008-05-11; 03:43:02.00	23.95	122.53	25.0	5.6
14	2008-10-31; 16:38:52.00	23.07	120.22	15.4	4.6
15	2008-12-08; 05:19:26.00	23.84	122.17	12.5	6.0
16	2009-01-04; 06:05:17.00	21.14	121.73	7.5	5.1
17	2009-02-02; 18:38:52.00	24.01	121.01	16.0	4.3
18	2009-03-02; 21:00:17.00	24.26	121.02	40.5	4.2
19	2009-07-14; 02:06:14.00	24.02	122.22	9.4	6.3
20	2009-12-19; 21:02:40.00	23.79	121.66	43.8	6.9

編號	發震時間(臺北時間)	震央位置		深度 (km)	規模 (M_L)
		北緯(度)	東經(度)		
21	2010-01-02; 01:34:45.10	23.78	121.6	33.7	4.9
22	2010-01-19; 14:09:26.80	23.82	121.68	41	5.6
23	2010-02-07; 14:10:00.30	23.33	123.77	88.0	6.6
24	2010-02-12; 10:42:38.00	23.89	121.08	18.4	5.2
25	2010-03-04; 08:18:52.10	22.97	120.7	22.6	6.4
26	2010-03-04; 16:16:16.30	22.96	120.63	19	5.7
27	2010-03-08; 17:26:22.90	23.4	120.6	15.3	4.9
28	2010-04-26; 10:59:51.00	22.15	123.74	73.4	6.8
29	2010-06-15; 08:31:18.00	24.04	121.62	16.7	5.5
30	2010-07-03; 03:11:32.40	22.86	120.68	17.8	5.1
31	2010-07-17; 17:04:17.20	23.45	121.74	40.0	5.2
32	2010-07-25; 11:52:10.20	22.84	120.69	19.6	5.7
33	2010-08-22; 00:38:00.00	23.58	121.59	40.2	5.3
34	2012-02-26; 10:35:00.90	22.74	120.8	20.4	6.1
35	2012-06-06; 09:08:34.70	22.44	121.4	18.4	5.9
36	2012-06-10; 05:00:17.90	24.47	122.4	61.9	6.5
37	2012-06-15; 00:15:13.40	23.71	121.5	6.5	5.3
38	2012-08-31; 20:11:39.60	24.72	120.9	10	5.0
39	2012-11-05; 21:40:29.70	23.78	121.4	14.1	4.9
40	2012-12-31; 00:03:25.80	23.46	120.9	5.7	5.4
41	2013-02-02; 11:39:51.40	23.74	122	16.9	5.5
42	2013-03-07; 11:36:45.70	24.3	121.5	5.6	5.9
43	2013-03-17; 21:53:19.90	23.68	120.9	12.3	4.4
44	2013-03-27; 10:03:19.60	23.9	121.1	19.4	6.2
45	2013-06-02; 13:43:03.20	23.86	121	14.5	6.5
46	2013-06-08; 00:38:01.10	23.88	122.7	58.6	6.2
47	2013-06-29; 07:51:50.30	24.03	122.2	19.8	5.7
48	2013-10-28; 08:24:08.20	24.31	119.6	35.6	4.7
49	2013-10-31; 20:02:09.50	23.57	121.4	15.0	6.4
50	2013-10-31; 23:47:28.50	23.63	121.4	10.1	5.1
51	2013-11-04; 06:56:14.20	23.95	121.5	26	4.9

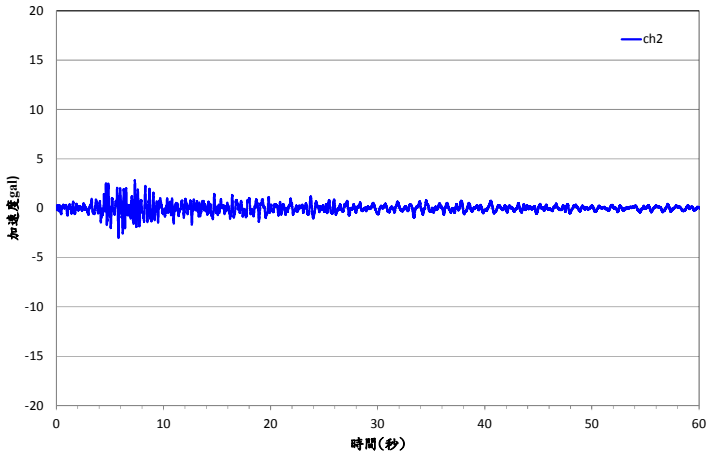


圖 3.18a 臺中港 A 類型地震歷時圖

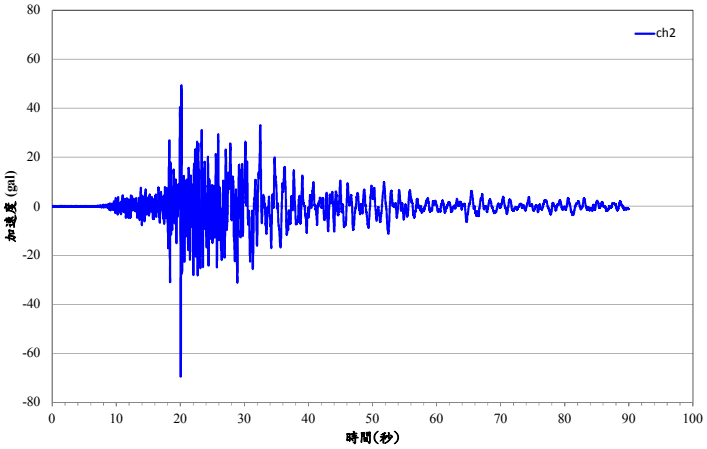


圖 3.18b 臺中港 B 類型地震歷時

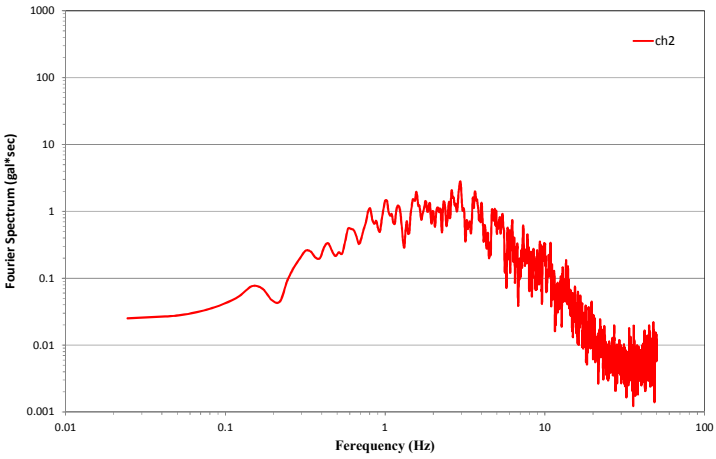


圖 3.19a 臺中港 A 類型地震加速度富氏譜圖

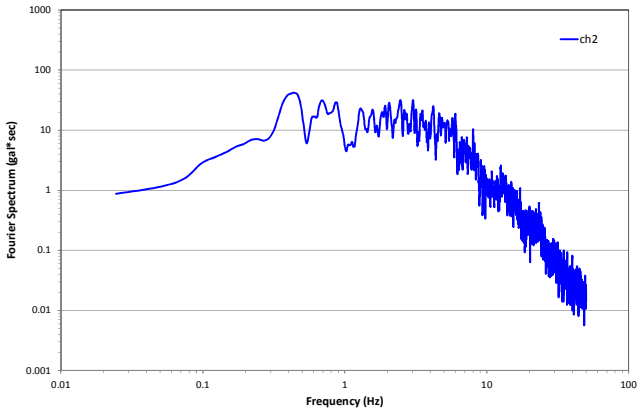


圖 3.19b 臺中港 B 類型地震加速度富氏譜圖

3.4.3 臺中港之水平加速度反應譜

依內政部頒建築物耐震設計規範係數表中，臺中港行政區劃分為梧棲區，其短週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數分別為 0.7 及 0.4，港區土層由地表至地下 30 公尺深的土層平均剪力波速為 $V_S = 256m/\sec$，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，

$$PGA = 0.4 \times S_{DS} = 0.4 S_S^D F_a = 0.4 \times 0.7 \times 1.0 = 0.28 \text{ 。}$$

上式中，Fa：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 Ss(S_S^D)而改變。

因此，將臺中港測站各組地表水平向之地震資料調整至 0.28g 後，分別進行 5%阻尼比之反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 3.20 所示，反應譜曲線平台約介於 0.12~0.42 秒。

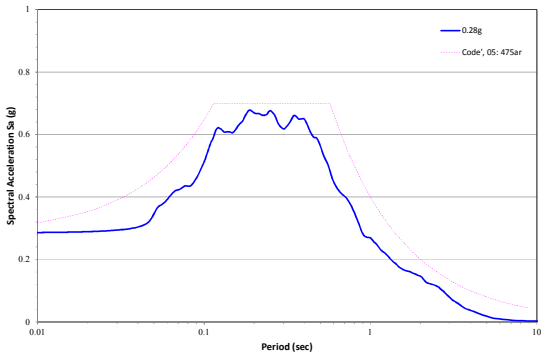


圖 3.20 臺中港地表地震水平加速度反應譜曲線圖(0.28g)

3.5 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 3.21。

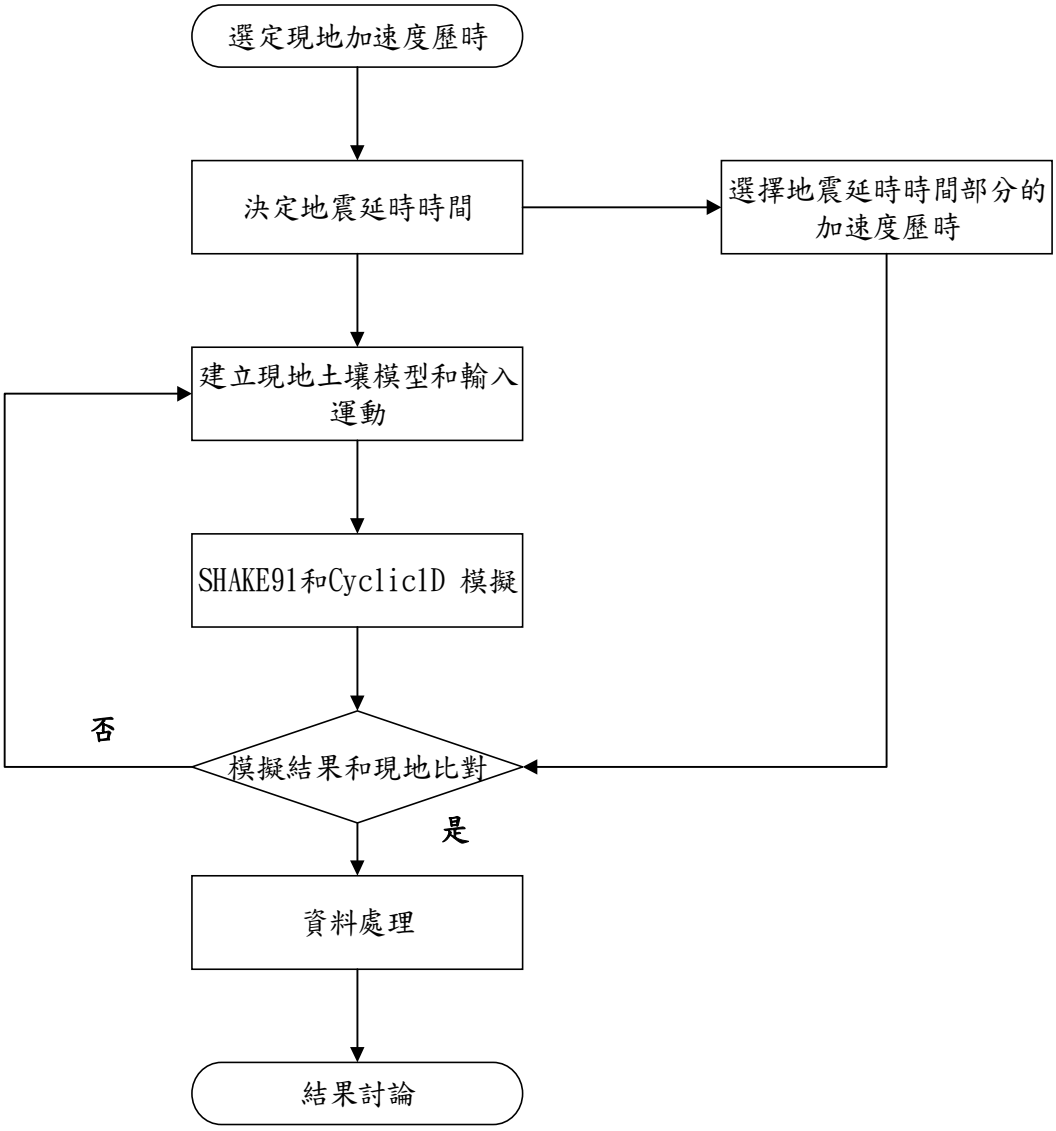


圖 3.21 分析流程圖

3.5.1 一維地盤反應分析假設與理論

Schanabel et al.(1972)[13]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 3.22 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。

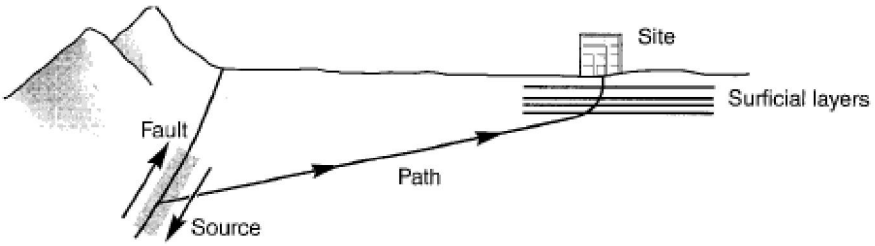


圖 3.22 地震波傳遞示意圖

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) [13]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) [6]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

Schanabel 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 3.23 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 3-10 所示。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial x^2 \partial t} \quad \text{.....} (3\text{-}10)$$

上式中，η: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^2)，ρ:土壤單位密度(kg/m3)。

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 3-11 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：

$$R(\omega) = G(\omega) \cdot H(\omega) \quad \text{(3-11)}$$

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。

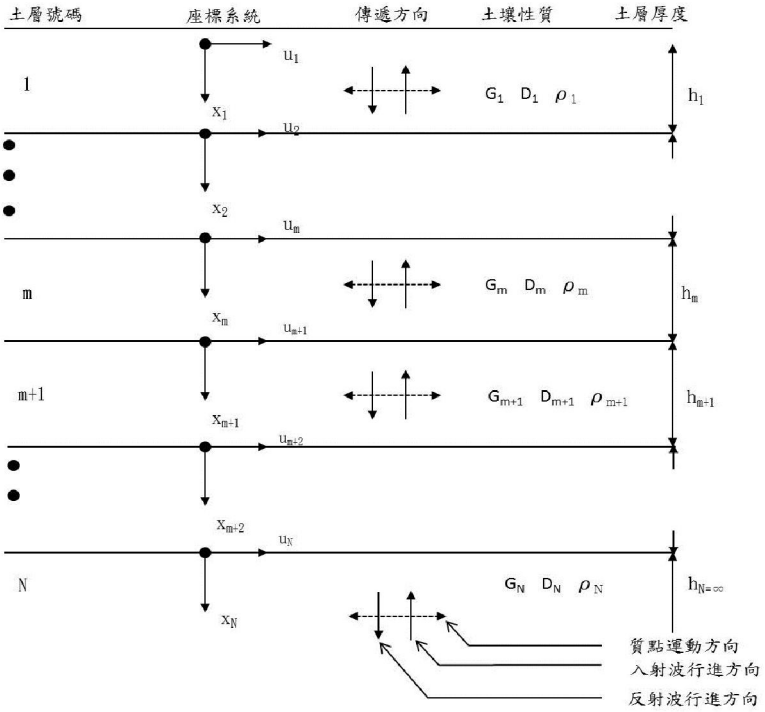


圖 3.23 一維土層系統剖面(Schnabel et al.,1972)

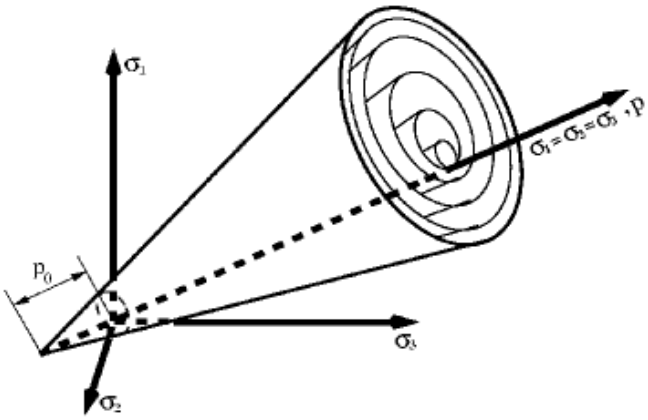
3. Cyclic 1D 理論模式

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 3.24 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 3-12。

$$C = A_{MC}M + A_{KC}K \quad (3\text{-}12)$$

式中 A_{MC} = 質量阻尼係數 ，A_{KC} = 勁度阻尼係數



Principal effective stress space

圖 3.24 多重塑性降伏表面空間(Cylic1D,2004)

3.5.2 土壤模型

高雄港監測站位置如圖 3.25 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 3.26 所示。

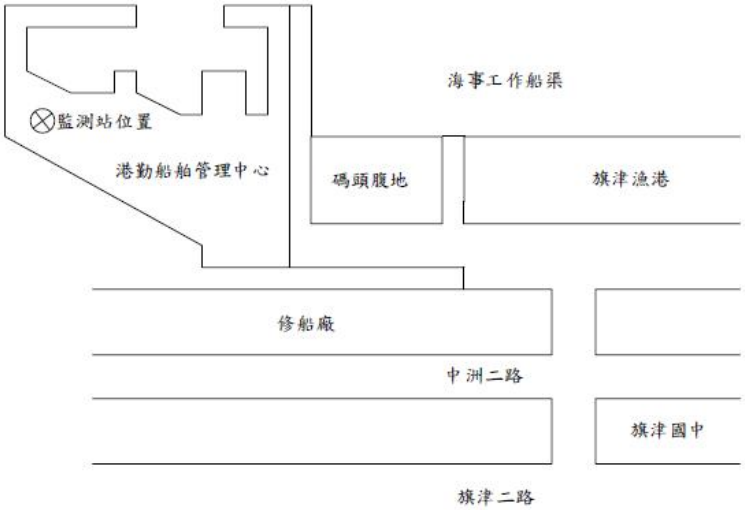


圖 3.25 高雄港地震監測站位置示意圖

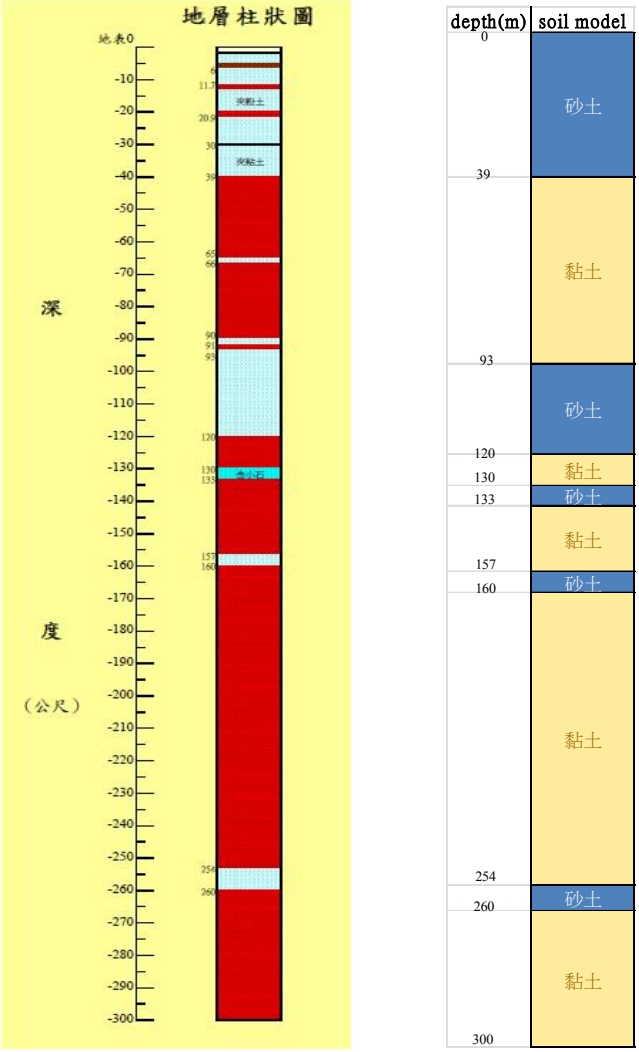


圖 3.26 現地土層柱狀圖與土壤模型對照

3.5.3 輸入參數

Shake91 中剪力波速 Vs 參考現地利用懸浮式井測量測的結果，如圖 3.27 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 3.28 所示。土壤密度(Mass Density)黏土假設為 2,000kg/m^3、砂土假設為 1,900kg/m^3。

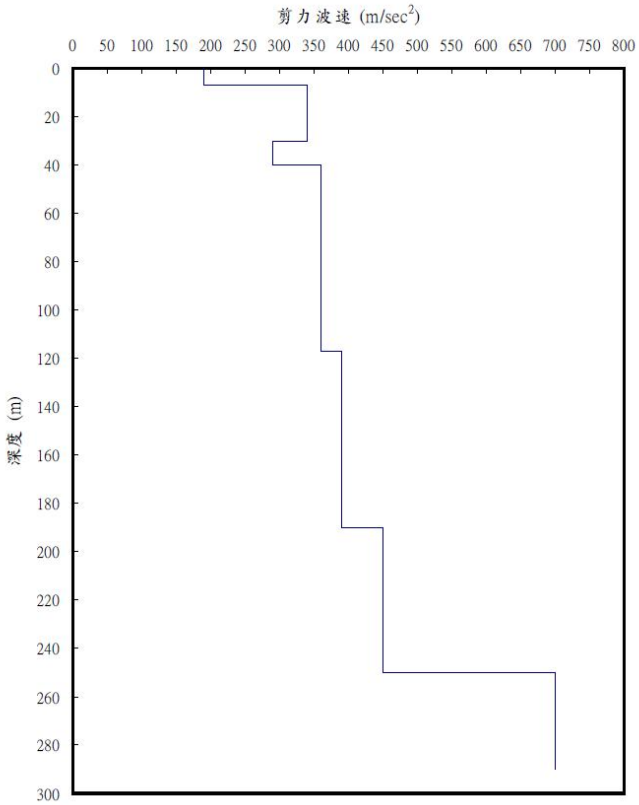


圖 3.27 高雄港地震監測站剪力波速隨深度變化圖

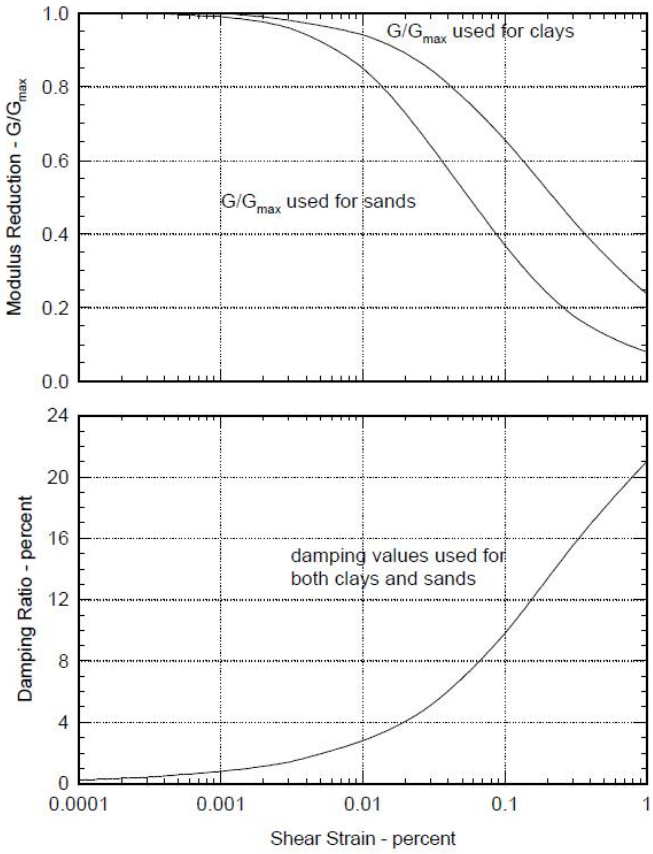


圖 3.28 輸入之剪力模數和阻尼比(SHAKE91)

3.5.4 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 3-4 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 3.29 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 3.30 所示。

表 3-4 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	

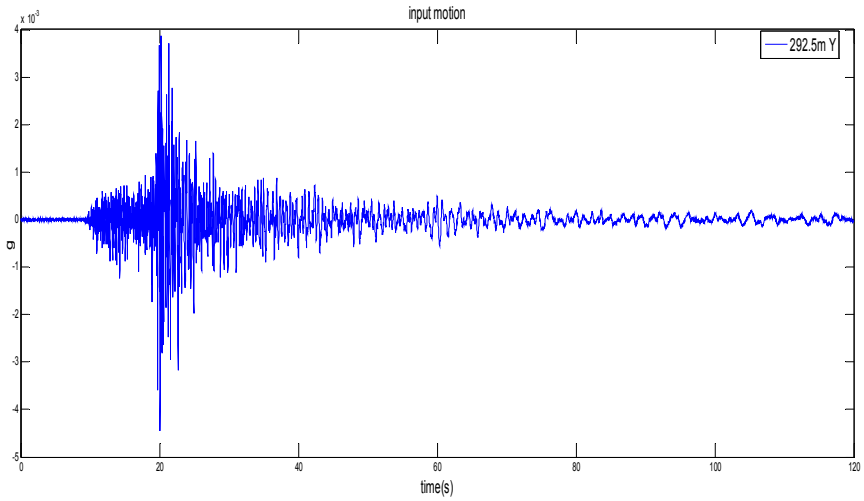


圖 3.29 地震輸入運動(292.5 公尺 Y 向)

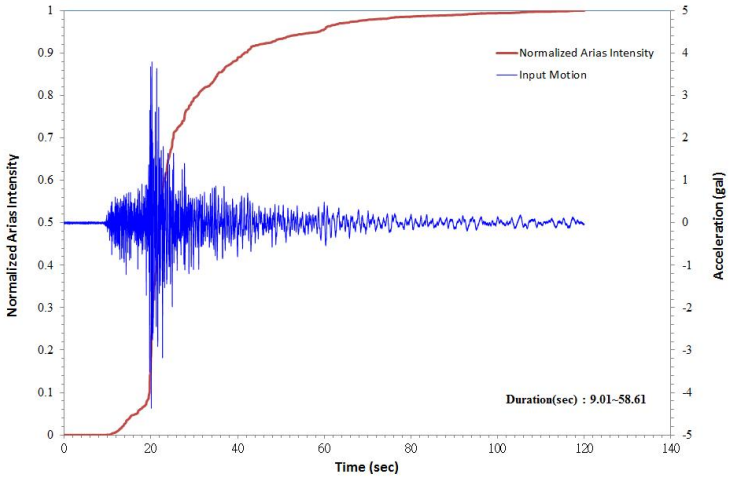


圖 3.30 輸入地震延時

3.5.5 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，其中以剪力波的所傳遞的震幅最大，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 3.31 所示。

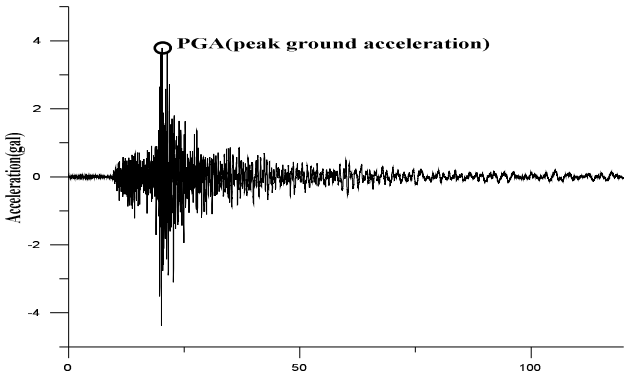


圖 3.31 地震 PGA 示意圖

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 3-13 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。

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad \text{.....(3-13)}$$

上式中，C_n:振幅，ω_n:頻率，ϕ_n:相位角

2. 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 3.32 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 3-14 所示，使用杜式積分(Duhamel integral)可從式 3-14 得到位移解，如式 3-15 所示，再以求得的位移解取最大絕對值為位移反應譜，如式 3-16 所示：

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = Q(t) \quad \text{.....(3-14)}$$

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_d}\int_0^t Q(\tau)e^{-\omega\xi(t-\tau)}\sin\omega_d(t-\tau)d\tau \quad \text{.....(3-15)}$$

$$S_d(\omega,\xi) = |u(t)|_{\max} = \left|\frac{1}{m\omega_d}\int_0^t Q(\tau)e^{-\omega\xi(t-\tau)}\sin\omega_d(t-\tau)d\tau\right|_{\max} \quad \text{.....(3-16)}$$

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；ξ為阻尼比(設定 5%)；ω_d 為阻尼作用下

的頻率；ω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 3-17 式及 3-18 式。

$$S_v(\omega,\xi) = \omega S_d \quad \text{(3-17)}$$

$$S_a(\omega,\xi) = \omega^2 S_d \quad \text{(3-18)}$$

上式中，S_v為速度反應譜；S_a 為加速度反應譜。

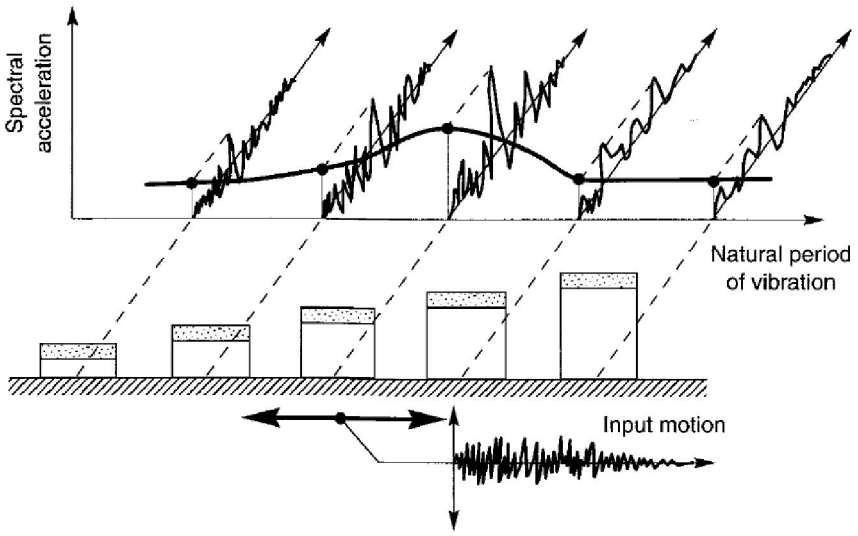


圖 3.32 單自由度系統之加速度反應示意圖(Kramer,1996)[9]

3. 艾氏震度(Arias Intensity)

Arias (1970)提出一地震強度指數，稱為艾氏強度[1]，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 3-19 所示：

$$I_a = \frac{\pi}{2g}\int_0^t [a(t)]^2\,dt \quad \text{(3-19)}$$

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。

4. 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 3-12 推估：

$$f_n = \frac{\overline{V_s}}{4H}(2n-1) \quad \text{(3-20)}$$

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

3.5.6 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 3.33 所示，Shake91 分析結果與現地加速度歷時依深度如圖 3.34 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 3.34 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 3.35 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 3.36 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。

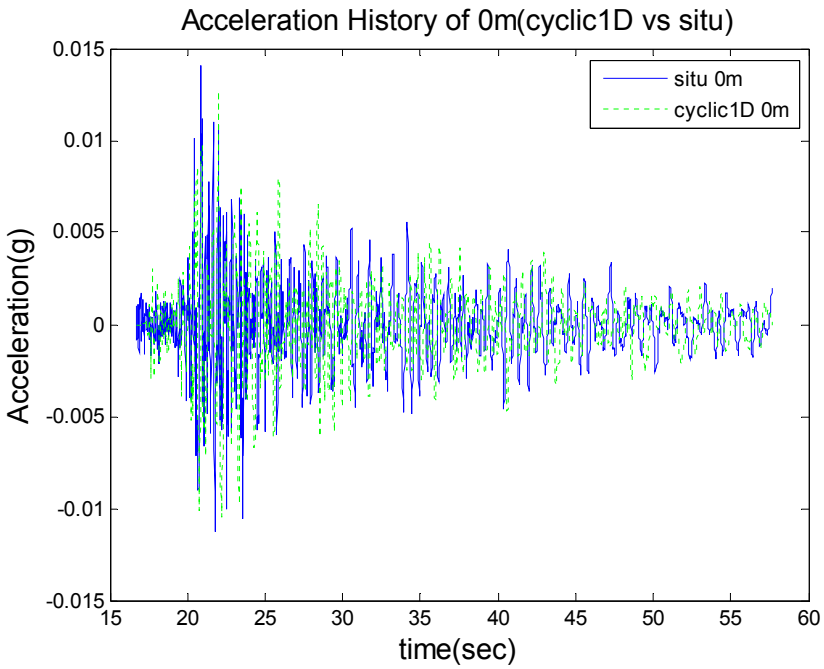


圖 3.33a 現地與 Cyclic1D 加速度歷時比較圖(地表)

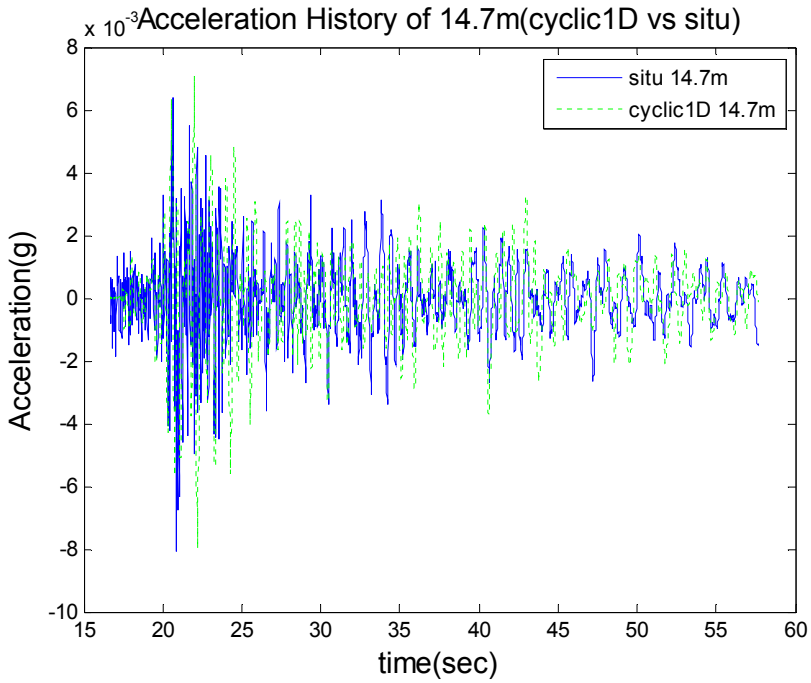


圖 3.33b 現地與 Cyclic1D 加速度歷時比較圖(-14.7m)

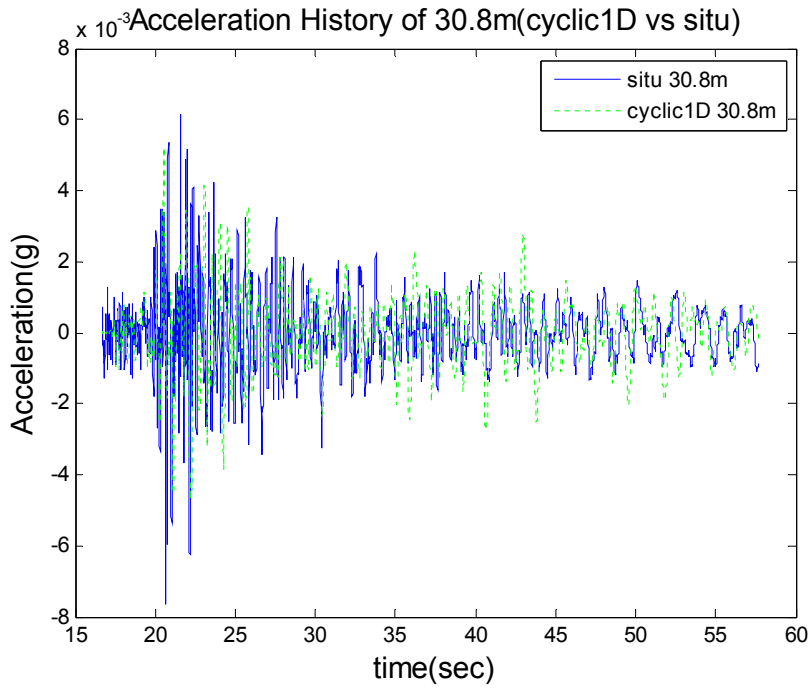


圖 3.33c 現地與 Cyclic1D 加速度歷時比較圖(-30.8m)

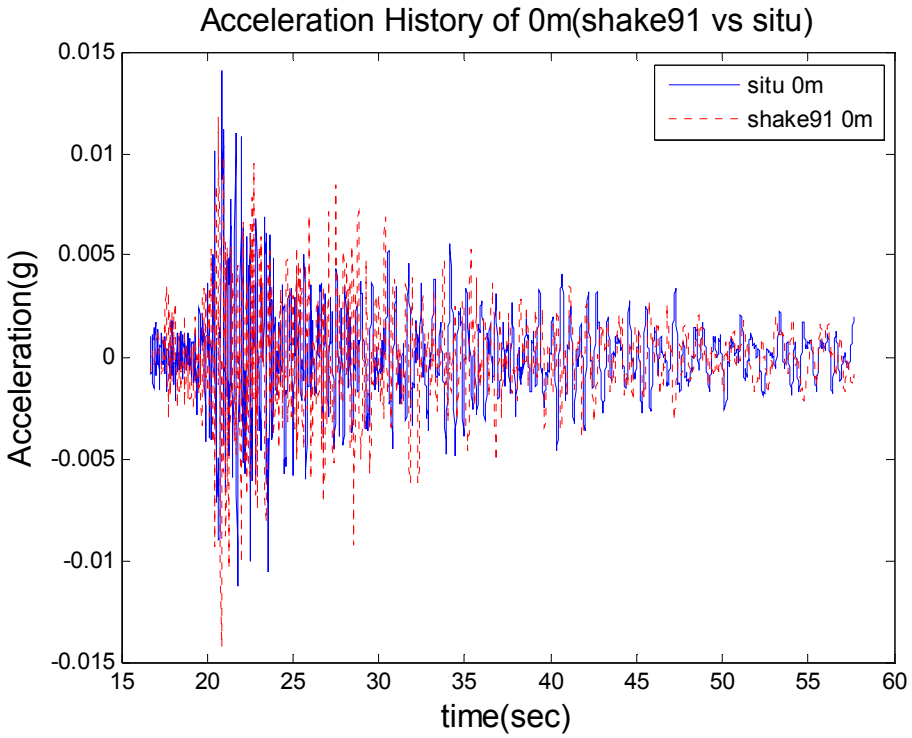


圖 3.34a 現地與 Shake91 加速度歷時比較圖(地表)

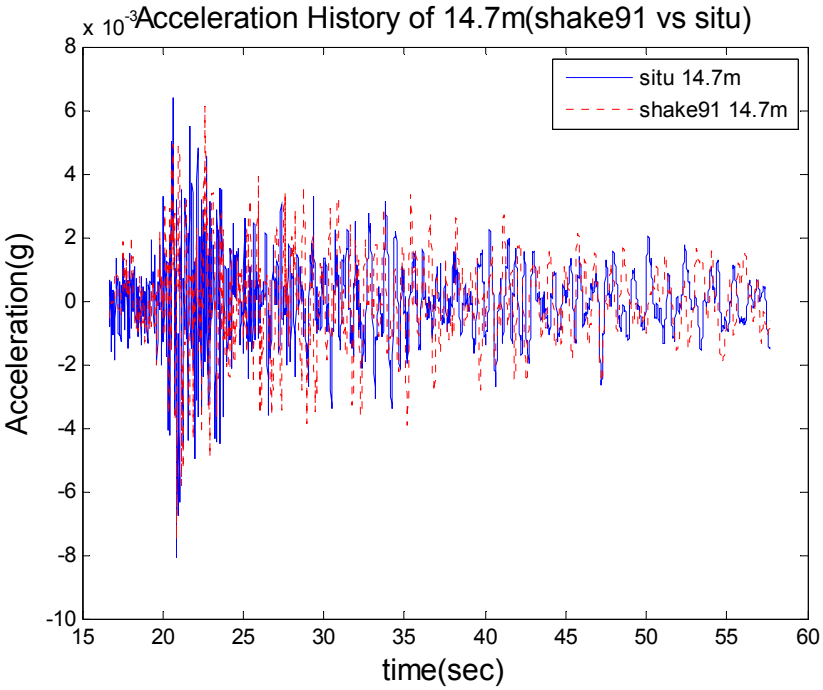


圖 3.34b 現地與 Shake91 加速度歷時比較圖(-14.7m)

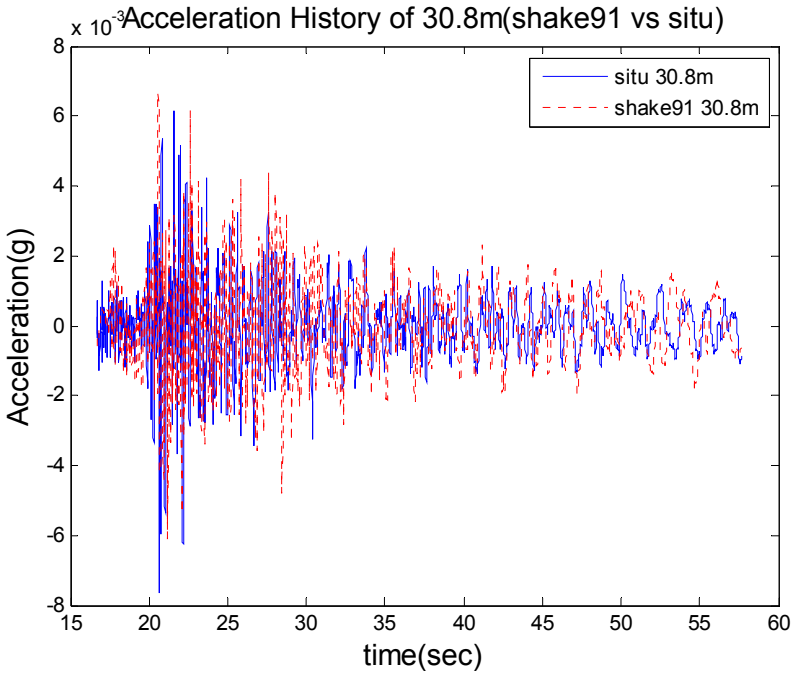


圖 3.34c 現地與 Shake91 加速度歷時比較圖(-30.8m)

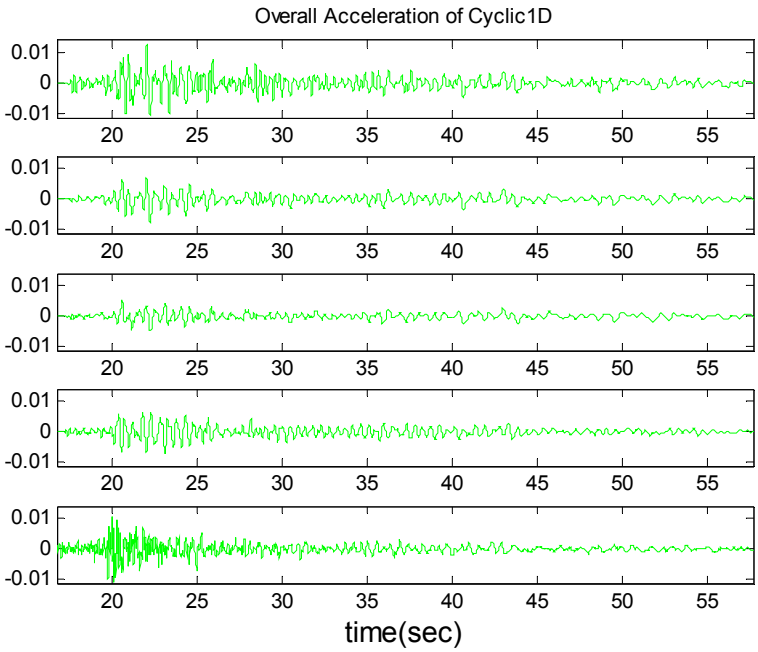


圖 3.35a 各深度加速度歷時比較圖(Cyclic1D)

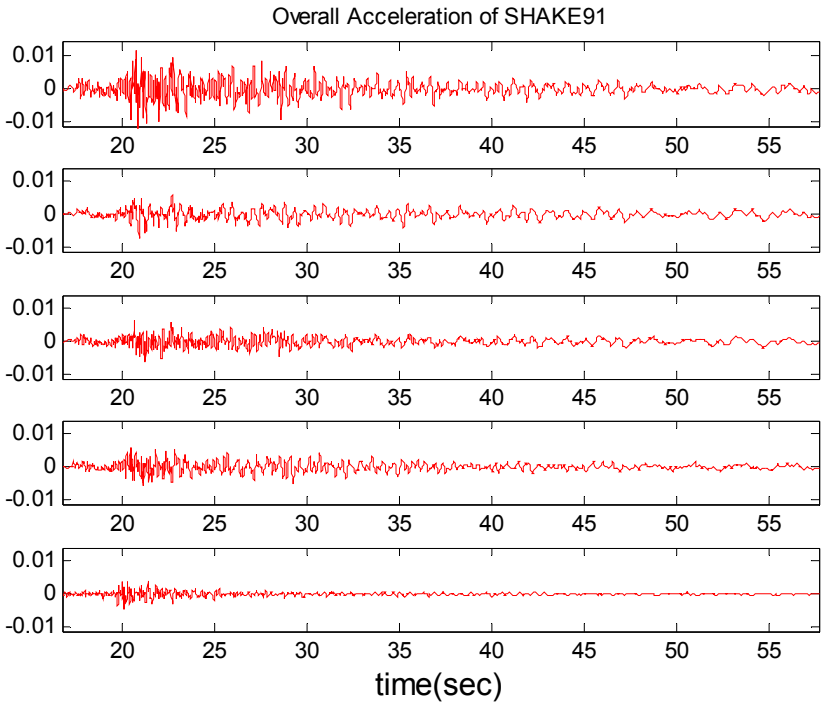


圖 3.35b 各深度加速度歷時比較圖(Shake91)

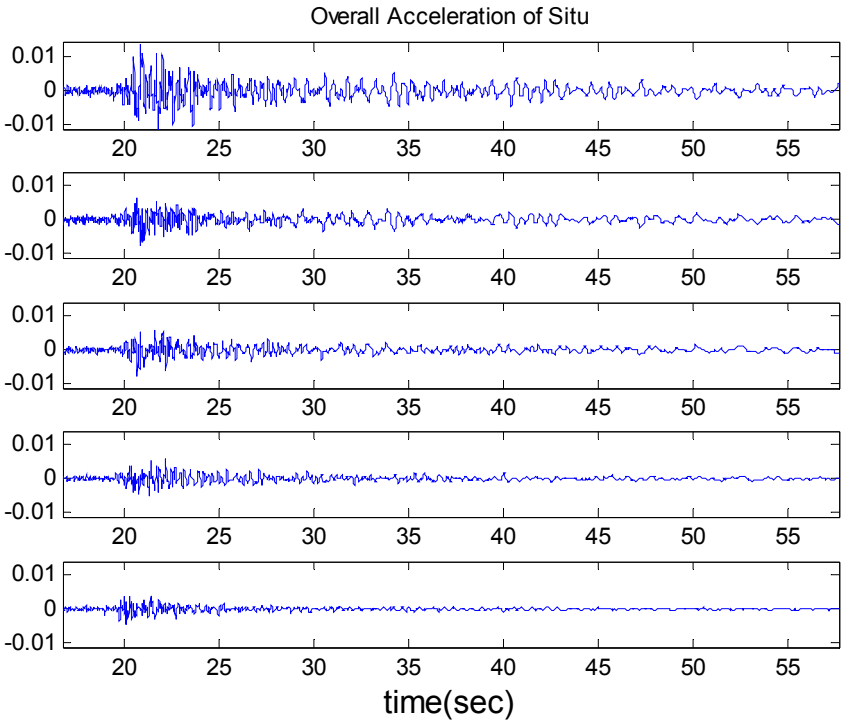


圖 3.35c 各深度加速度歷時比較圖(現地)

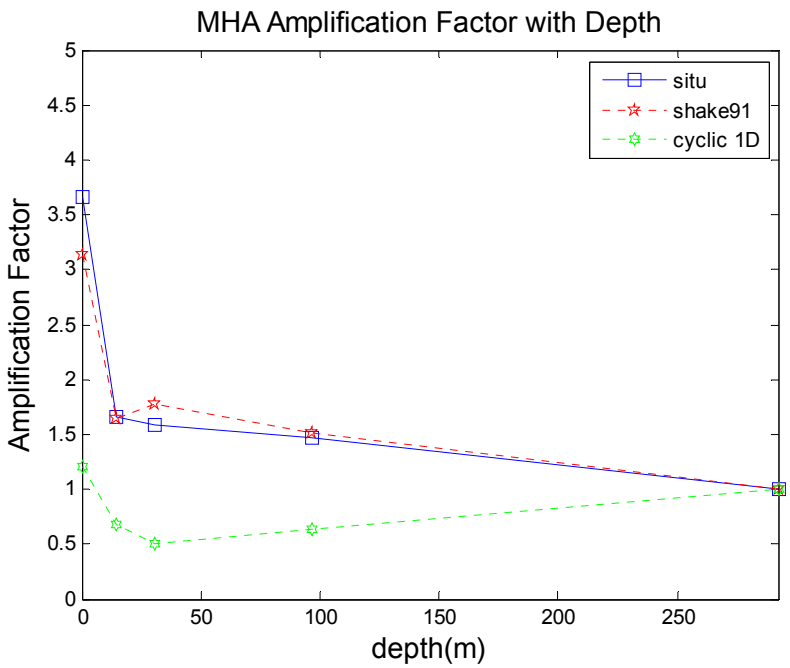


圖 3.36 最大加速度放大係數隨深度變化圖

3.6 港區震災速報系統

本所港研中心逐年分別於臺中港、安平港、高雄港及蘇澳港井下地震監測站之儀器機房內安裝三向度網路型地表地震監測速報系統，當地表感震器接收到地震訊號後，先傳至儀器主機經運算後，再同時儲存到工地工業級無風扇小型電腦，可藉著中華電信 ADSL 網路將港區災況以簡訊方式依不同震度需求發送至各手機持用人，本系統可提供本中心或港區各港務管理單位及碼頭設施維修等相關人員作為災後檢修之參考，縮短救災時間並減少災損。監測儀器配置如圖 3.37，即時畫面顯示如圖 3.38、3.39、3.40 及 3.41 所示。地震即時監測系統採用日製儀器，為三軸向網路型小型加速度計(CV-374 型)，地震訊號取樣頻率 100 Hz~1KHz，量測範圍自 0gal~±2000gal。

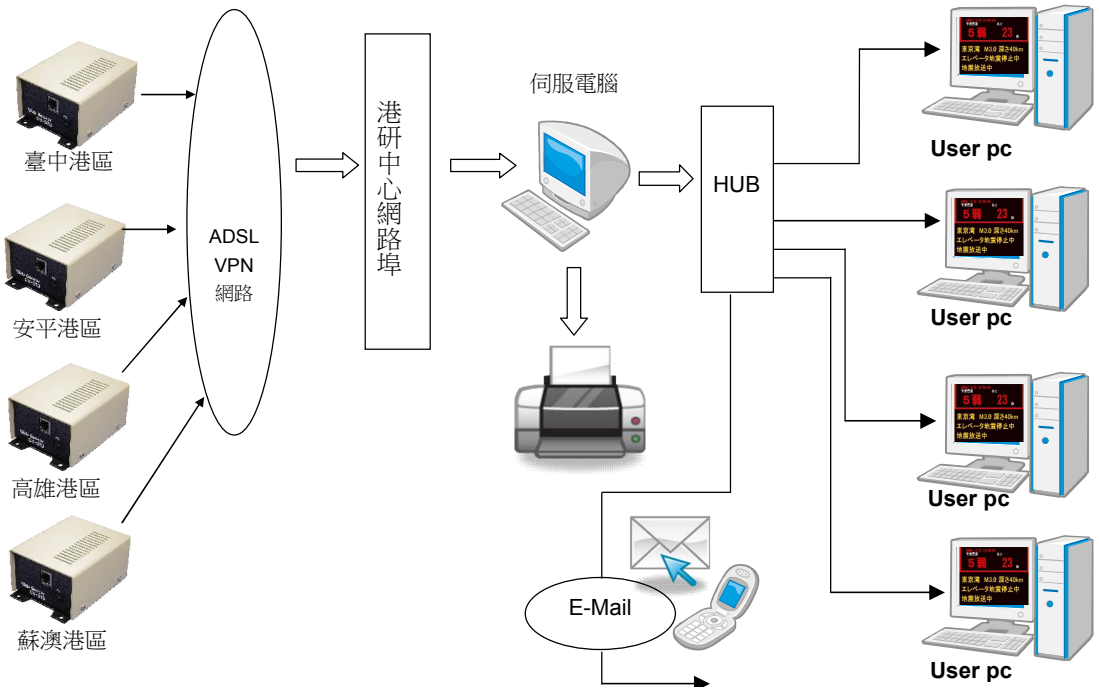


圖 3.37 港區地震災況速報系統儀器配置示意圖

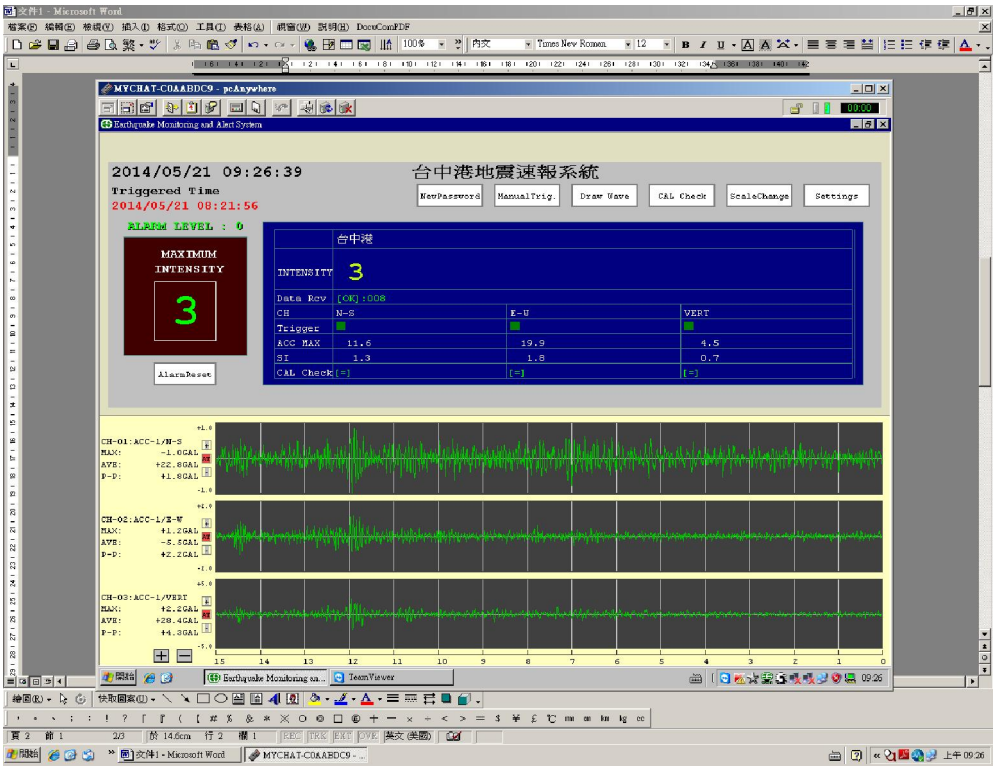


圖 3.38a 臺中港區地震即時監測畫面示意圖

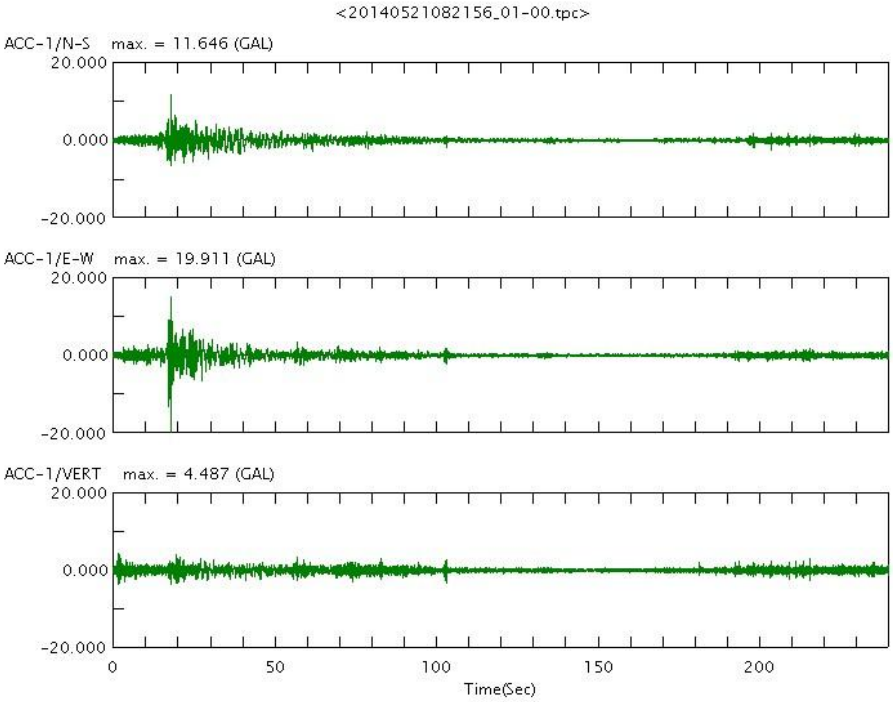


圖 3.38b 臺中港區地震即時監測加速度歷時圖

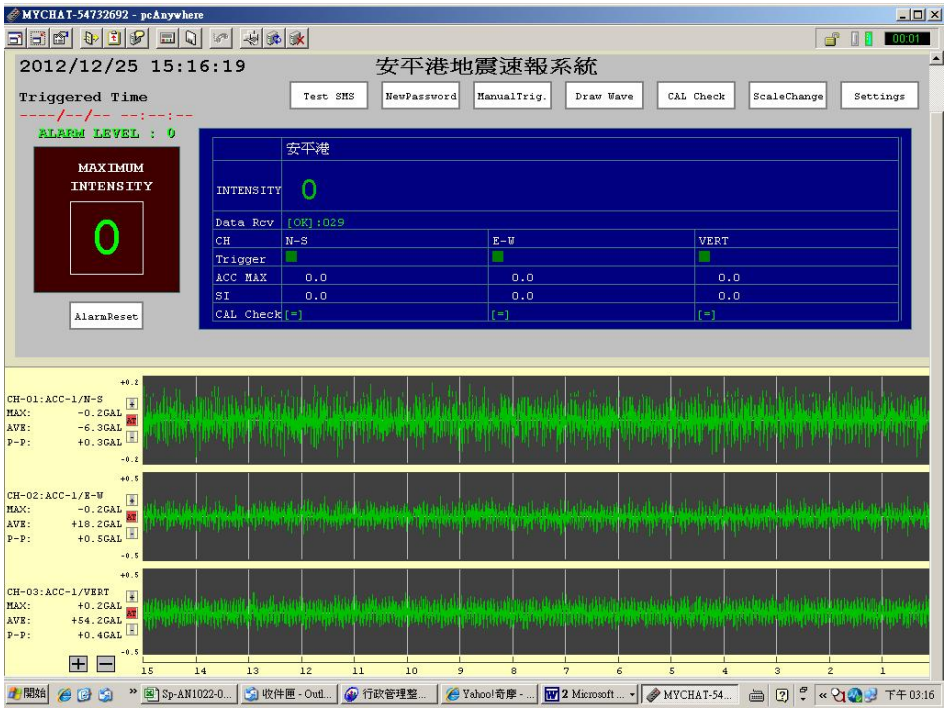


圖 3.39 安平港區地震即時監測畫面示意圖

圖 3.40 高雄港區地震即時監測畫面示意圖

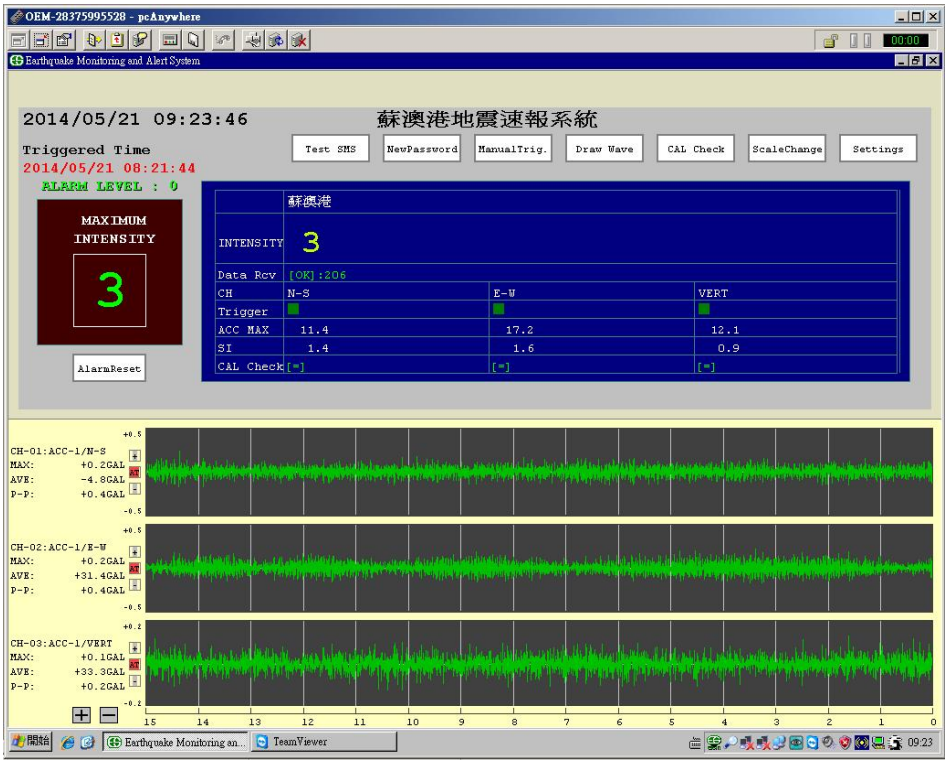


圖 3.41a 蘇澳港區地震即時監測畫面示意圖

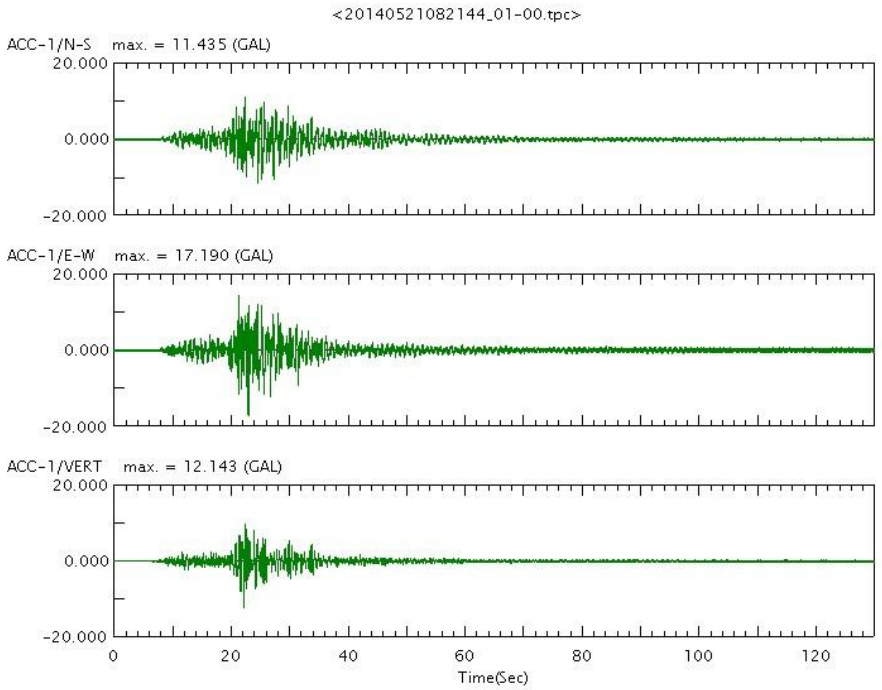


圖 3.41b 蘇澳港區地震即時監測加速度歷時圖

3.7 實測地震反應譜分析

本節依內政部 2005 年修訂建築物耐震設計規範之靜力分析法，進行 2006 年恆春地震對數個震度較大測站之實測地震反應譜分析，藉以評估設計規範對該鄉鎮建築結構物是否在安全範圍內。各圖中紅色虛線代表當地 475 年回歸期之設計地震反應譜，依耐震設計規範之規定繪製，各地鄉鎮之工址短週期與一秒週期之設計水平譜加速度係數皆不同，各站之S_S^D、S_1^D值、反應譜等加速度段工址放大係數 Fa 與反應譜等速度段工址放大係數 Fv，如表 3-5 所示[15]。安平港地震站位於臺南市南區，經以懸浮式速度井測探測結果，地表至地下 30 公尺之平均剪力波速約為 166(m/sec)，依耐震設計規範規定屬第三類地盤(軟弱地盤)。

以 2006 年恆春地震引起各測站之實測水平加速度反應譜與耐震設計規範進行比較，經初步比較結果如圖 3.42~圖 3.49 所示，各測站中以滿州國小、墾丁國小及恆春氣象站等地區將會有建築結構物於此次地震中損壞，而高雄港、安平港區、高雄氣象站與七股氣象站等地結構物則在安全範圍內，高雄港地區如將 PGA 放大到 0.15g 時介於設計規範內。

表 3-5 工址短週期與一秒週期之設計水平譜加速度係數

鄉鎮市區	S_S^D	S_1^D	F_a 地盤係數	F_v 地盤係數
屏東縣恆春鎮	0.5	0.3	1.0	1.0
屏東縣滿州鄉	0.5	0.3	1.0	1.0
高雄市鼓山區	0.7	0.35	1.0	1.4
高雄市旗津區	0.6	0.35	1.1	1.4
臺南市南　區	0.7	0.4	1.1	1.6
臺南市安南區	0.7	0.4	1.0	1.3
臺南市七股鄉	0.7	0.4	1.0	1.3

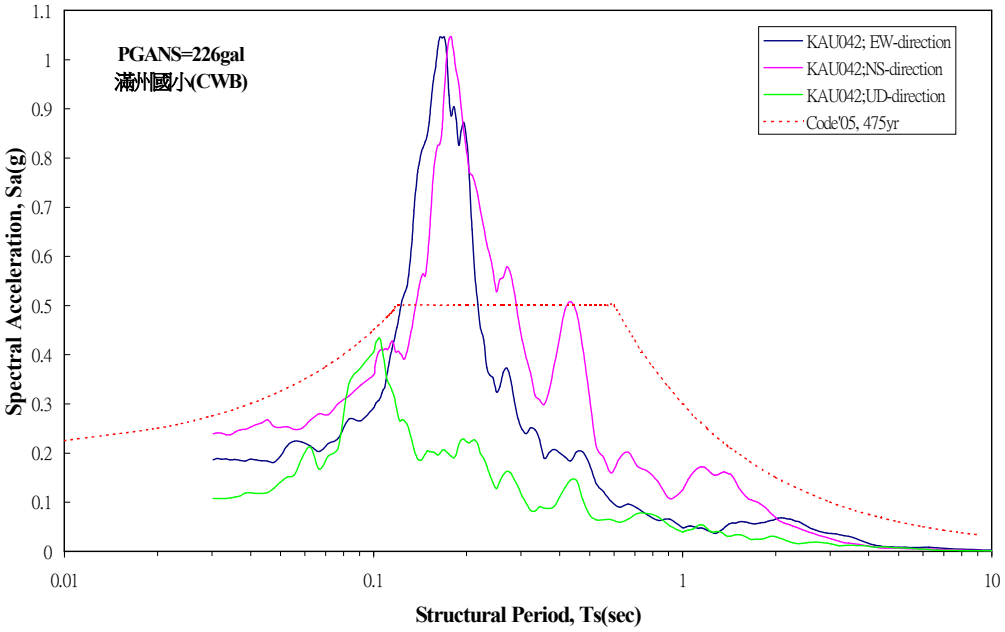


圖 3.42 滿州國小(KAU042)地震站實測反應譜圖(中央氣象局)

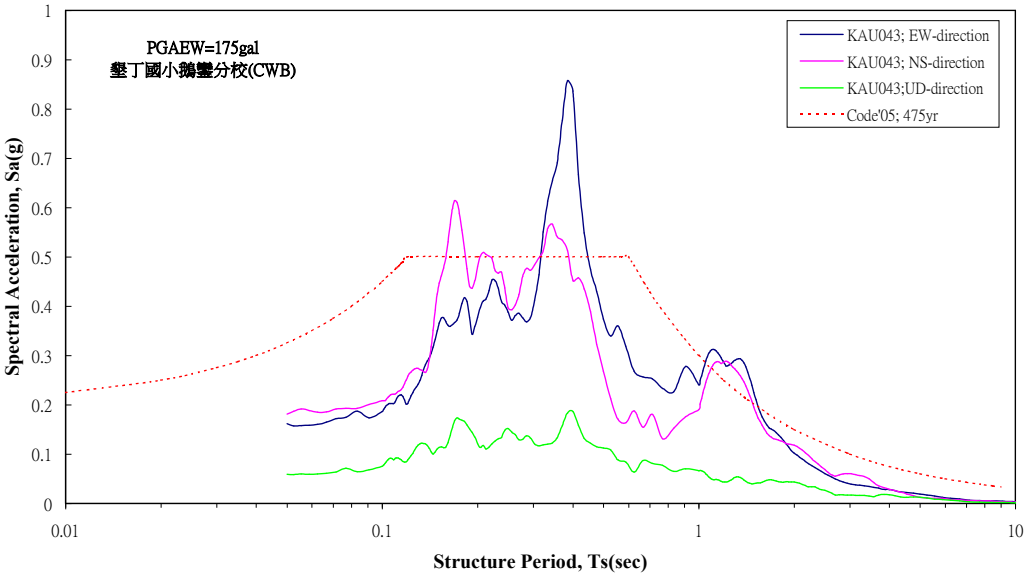


圖 3.43 墾丁國小(KAU043)地震站實測反應譜圖(中央氣象局)

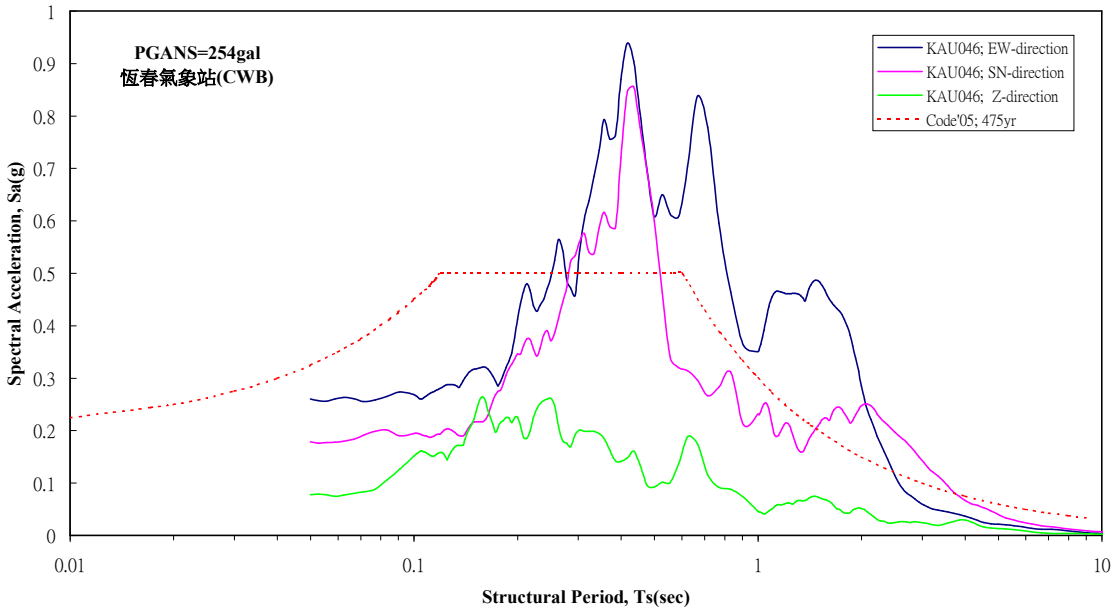


圖 3.44 恆春氣象地震站實測反應譜圖(中央氣象局)

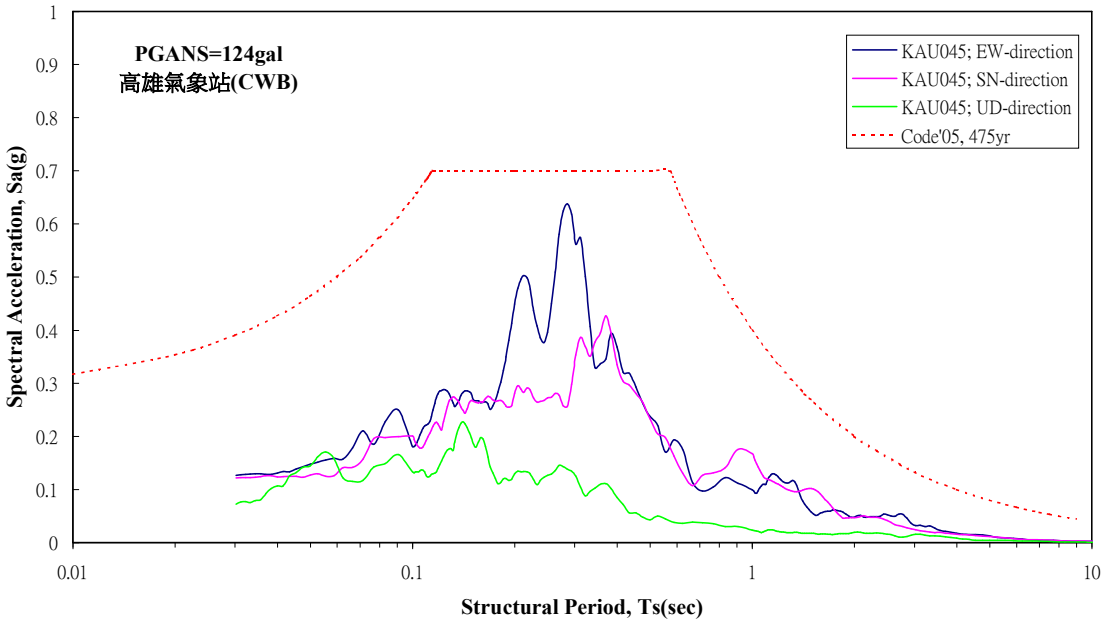


圖 3.45 高雄氣象地震站實測反應譜圖(中央氣象局)

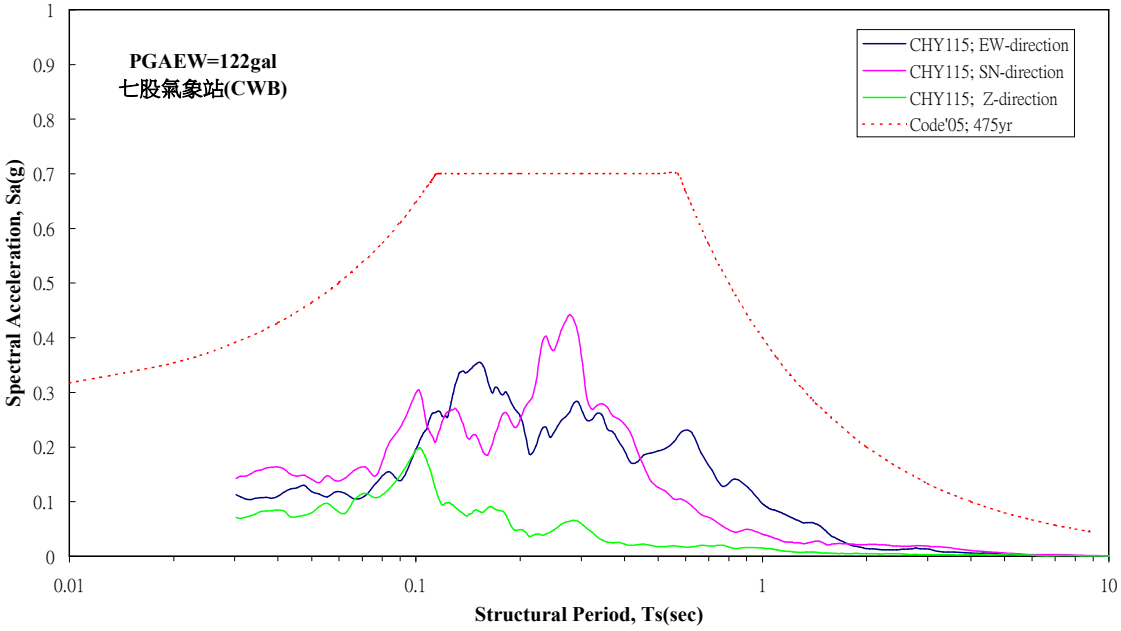


圖 3.46 七股氣象地震站實測反應譜圖(中央氣象局)

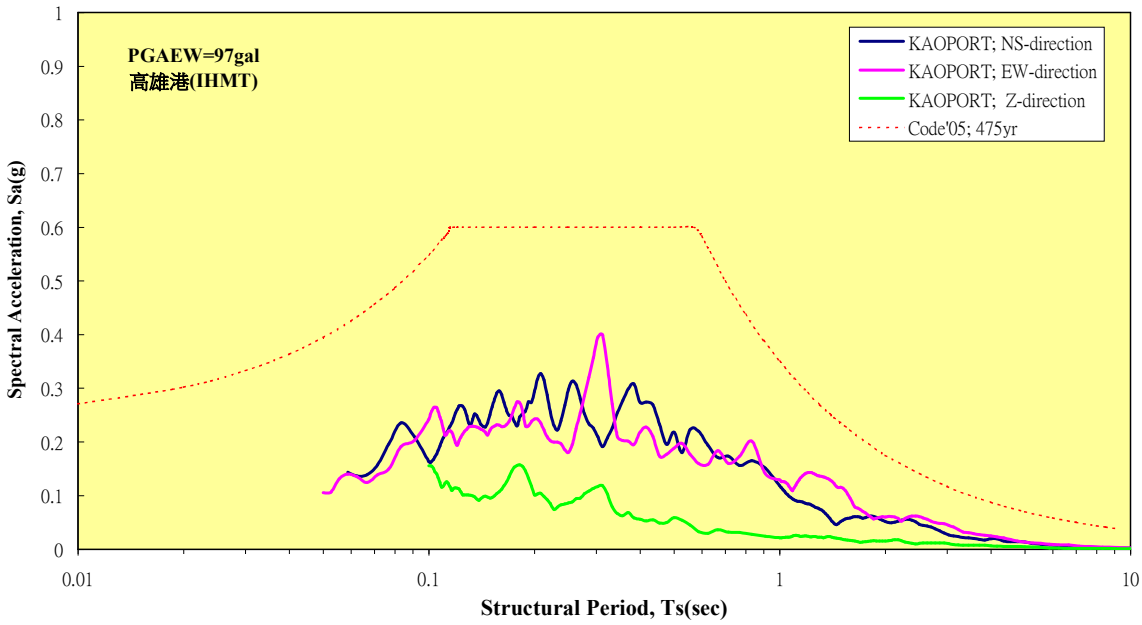


圖 3.47 高雄港地震站實測加速度反應譜圖(ζ=5%) (港研中心)

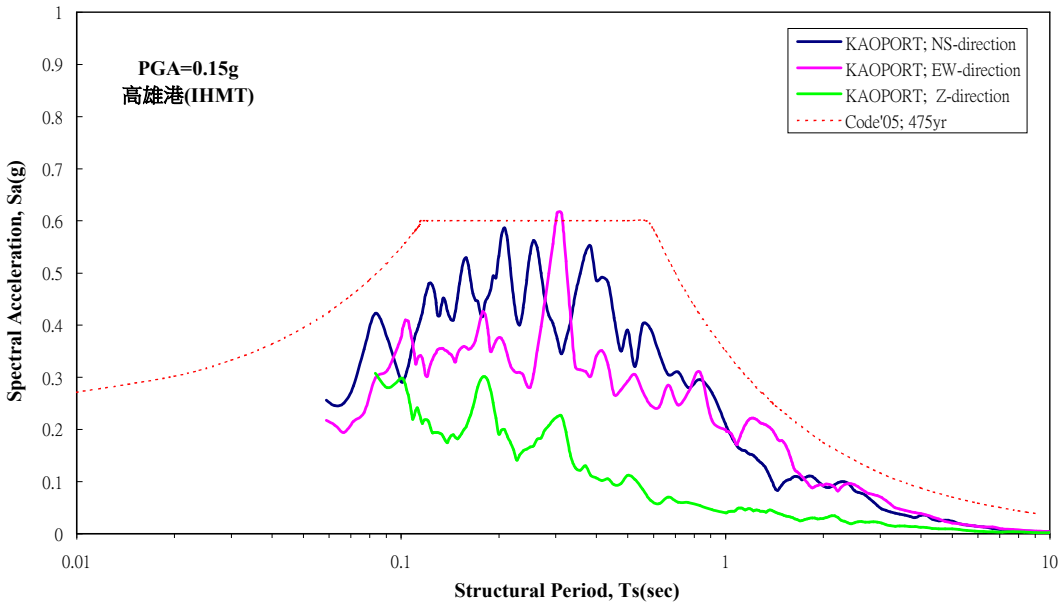


圖 3.48 高雄港地震站加速度反應譜圖(0.15g) (港研中心)

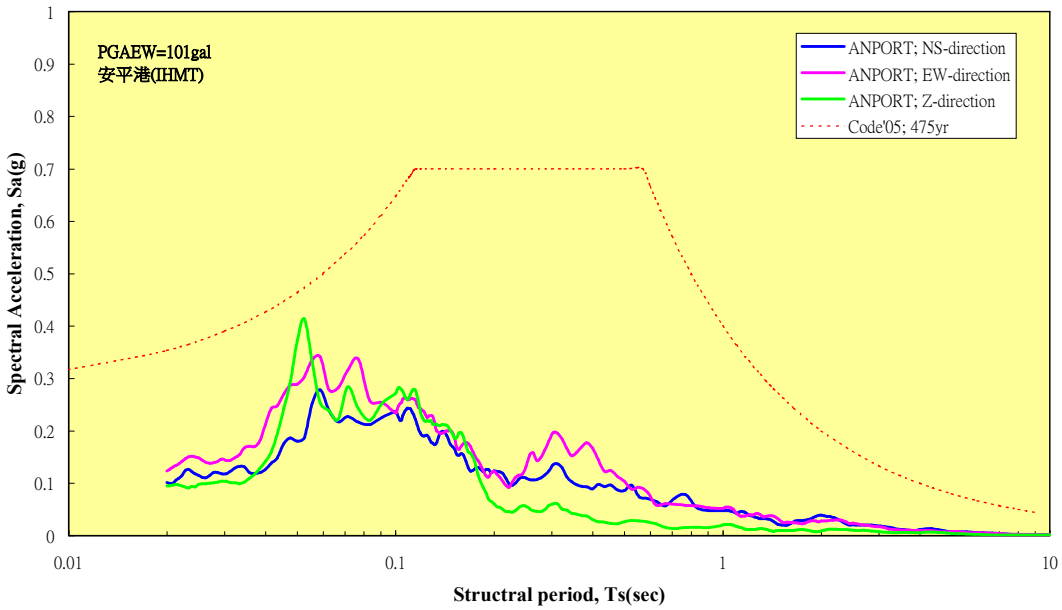


圖 3.49 安平港地震站實測加速度反應譜圖(港研中心) (ζ=5%)

3.8 動態孔隙水壓分析

各港區井下地震及動態孔隙水壓監測站，自民國 90 年陸續設置完成開始監測以來，安平、蘇澳與高雄等測站曾擷取到動態孔隙水壓紀錄，安平港測站於 90 年完成，井下地震儀陣列設置於地表，-10m、-20m、 -100m 及-200m 共 5 部地震儀，測站於 2006 年 12 月 26 日之恆春地震、2010 年 3 月 4 日之甲仙地震與 2012 年 2 月 26 日震央位於屏東縣霧台鄉附近芮氏規模 6.1 之地震，皆分別監測到動態孔隙水壓資料，各地區震度分布如圖 3.50、圖 3.51 及圖 3.52 所示。超額動態孔隙水壓有超額之孔隙水壓及震盪之動態水壓，以適當之震盪頻率將其分離結果，動態孔隙水壓圖分別如圖 3.53 至圖 3.55，超額之孔隙水壓為低頻反應，震盪之孔隙水壓為高頻，分離之震盪頻率為 0.08Hz。安平港監測站於 2006 年、2010 年及 2012 年皆監測到超額動態孔隙水壓，震盪頻率分離之頻率皆為 0.08Hz，初步評估應是該區之土層特性。

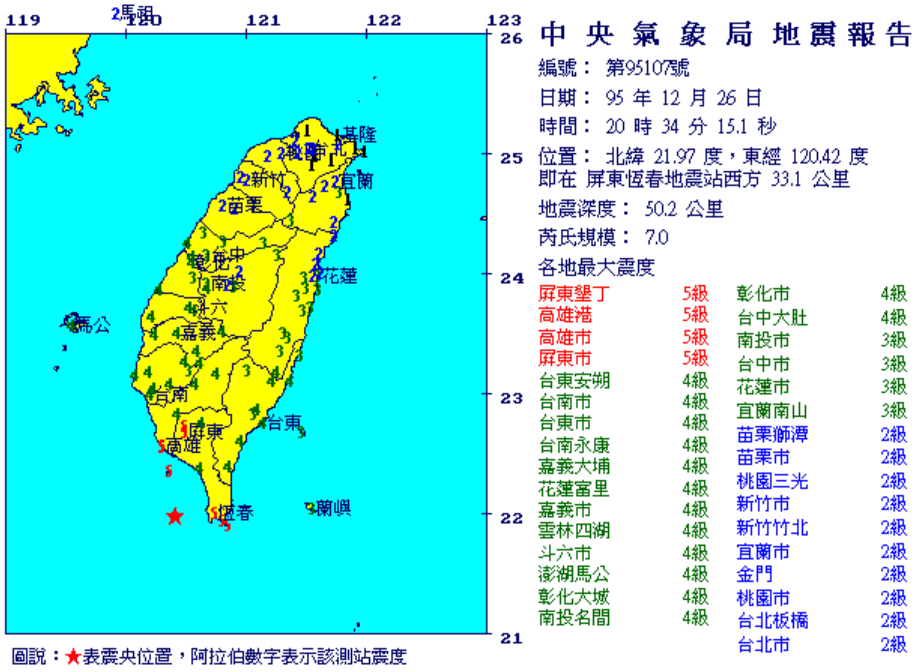
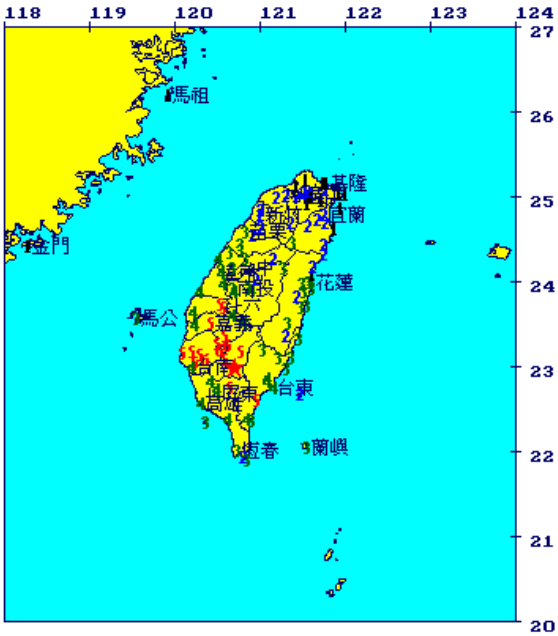


圖 3.50　2006 年 12 月 26 日恆春地震震度分布(中央氣象局)



中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第99015號

日期： 99 年 3 月 4 日

時間： 8 時 18 分 52.1 秒

位置： 北緯 22.97 度，東經 120.71 度
即在 高雄甲仙地震站東南方 17.1 公里

地震深度： 22.6 公里

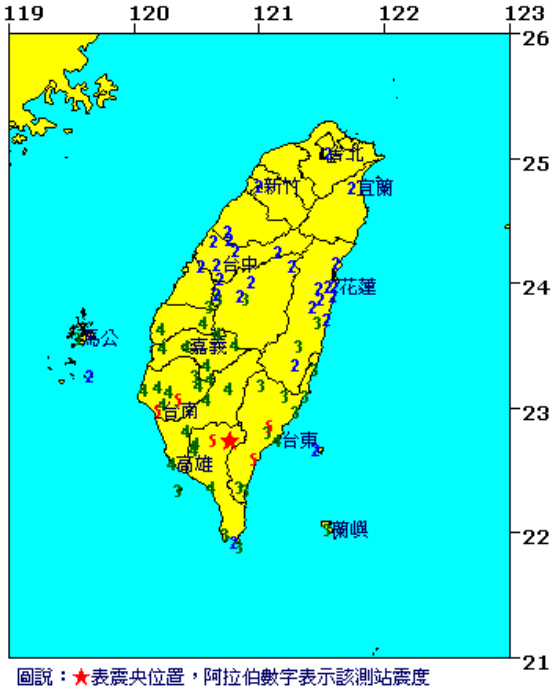
芮氏規模： 6.4

各地最大震度

台南楠西	6級	花蓮紅葉	3級
嘉義大埔	6級	南投市	3級
高雄甲仙	5級	台中市	3級
屏東三地門	5級	澎湖馬公	3級
台東太麻里	5級	花蓮市	3級
嘉義市	5級	苗栗鯉魚潭	3級
雲林古坑	5級	宜蘭南山	3級
斗六市	5級	苗栗市	3級
屏東市	4級	桃園三光	2級
台南市	4級	新竹市	2級
台東市	4級	新竹竹北	2級
高雄市	4級	宜蘭市	2級
南投名間	4級	桃園市	2級
彰化大城	4級	台北板橋	2級
彰化市	4級	台北市	2級
台中港	4級	基隆市	1級

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

圖 3.51　2010 年 03 月 04 日甲仙地震震度分布(中央氣象局)



中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第101037號

日期： 101 年 2 月 26 日

時間： 10 時 35 分 0.9 秒

位置： 北緯 22.74 度，東經 120.78 度
即在 屏東縣政府東偏北方 30.4 公里
位於 屏東縣霧台鄉

地震深度： 20.4 公里

芮氏規模： 6.1

各地最大震度

台東縣初鹿	5級	台中市霧峰	2級
屏東縣三地門	5級	台中市	2級
台南市新化	5級	花蓮縣花蓮市	2級
台南市	5級	苗栗縣鯉魚潭	2級
高雄市旗山	4級	宜蘭縣宜蘭市	2級
台東縣台東市	4級	新竹市	2級
高雄市	4級	台北市信義區	2級
嘉義縣大埔	4級	台北市	1級
嘉義市	4級		
雲林縣草嶺	4級		
屏東縣屏東市	4級		
花蓮縣紅葉	3級		
彰化縣二水	3級		
南投縣名間	3級		
澎湖縣馬公市	3級		
南投縣南投市	2級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

本報告係中央氣象局地震觀測網即時地震資料
地震運報之結果。

圖 3.52　2012 年 02 月 26 日地震震度分布(中央氣象局)

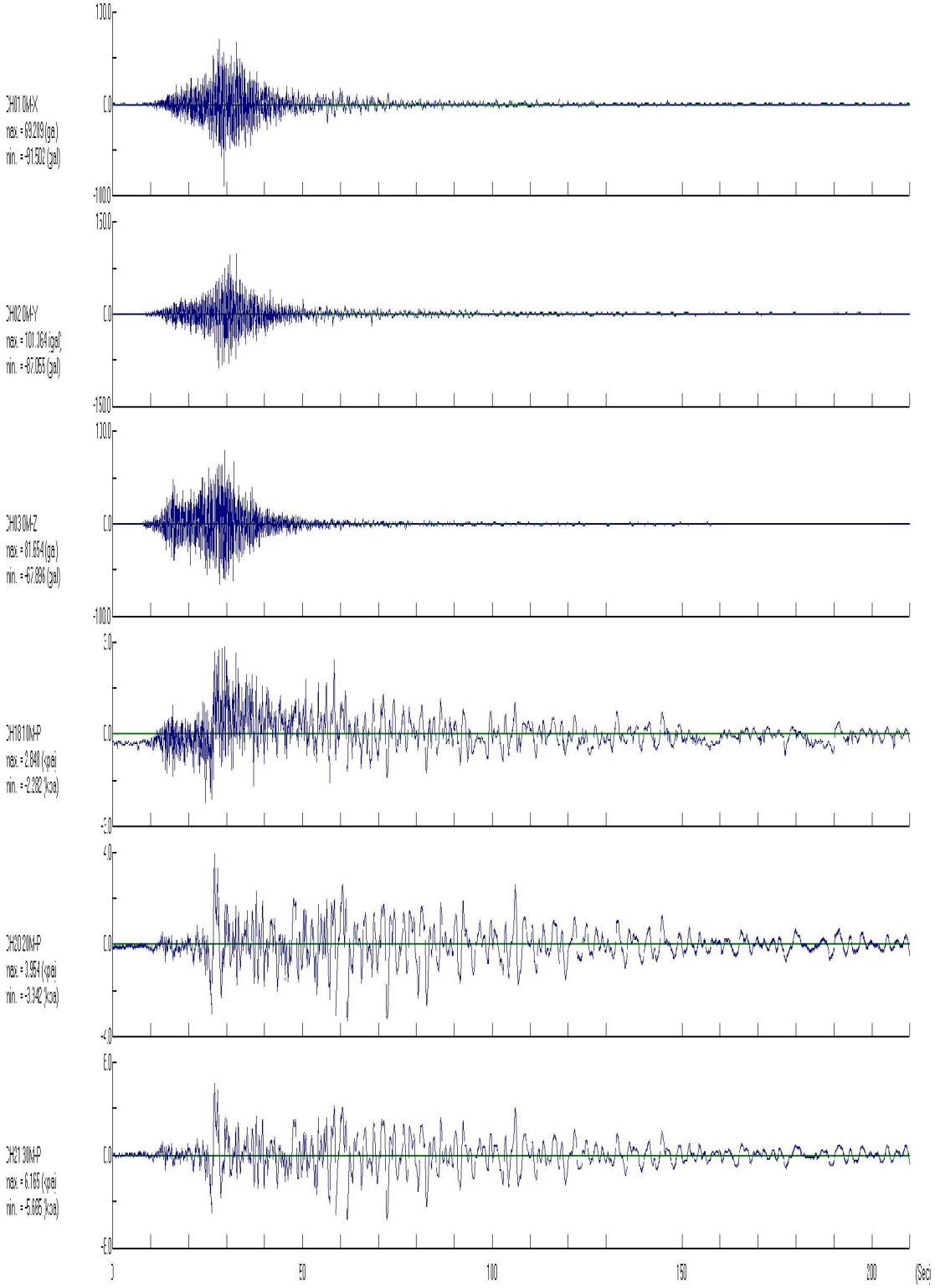


圖 3.53a 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態孔隙水壓變化

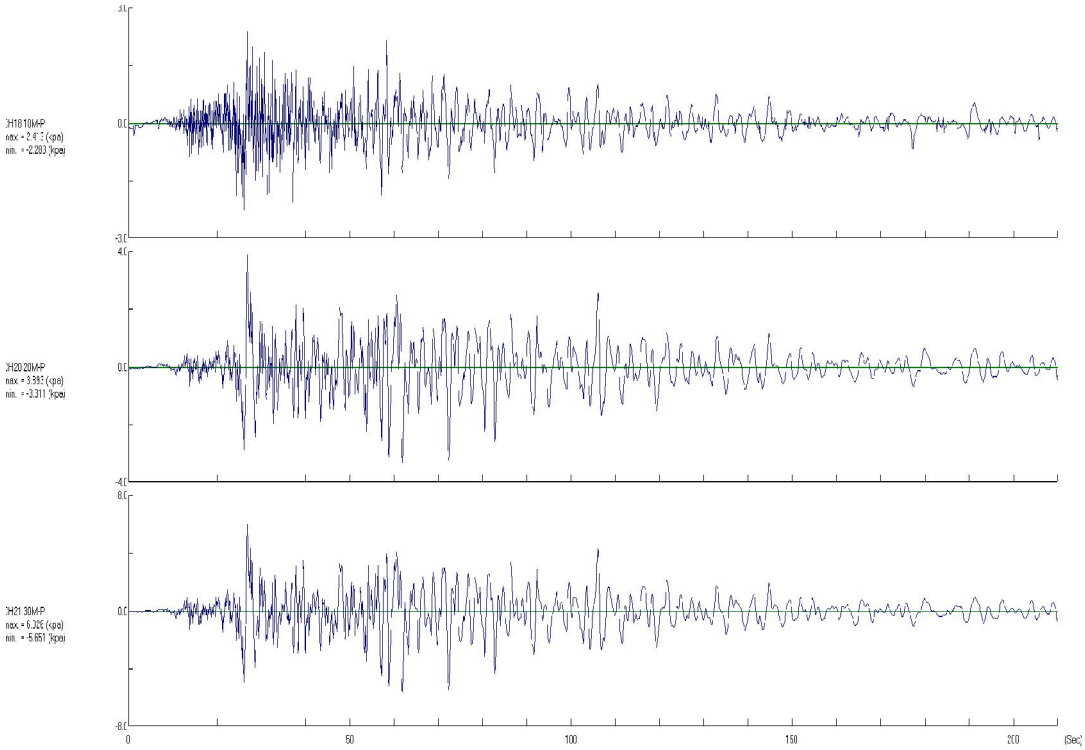


圖 3.53b 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態孔隙水壓變化 (大於 0.08Hz)

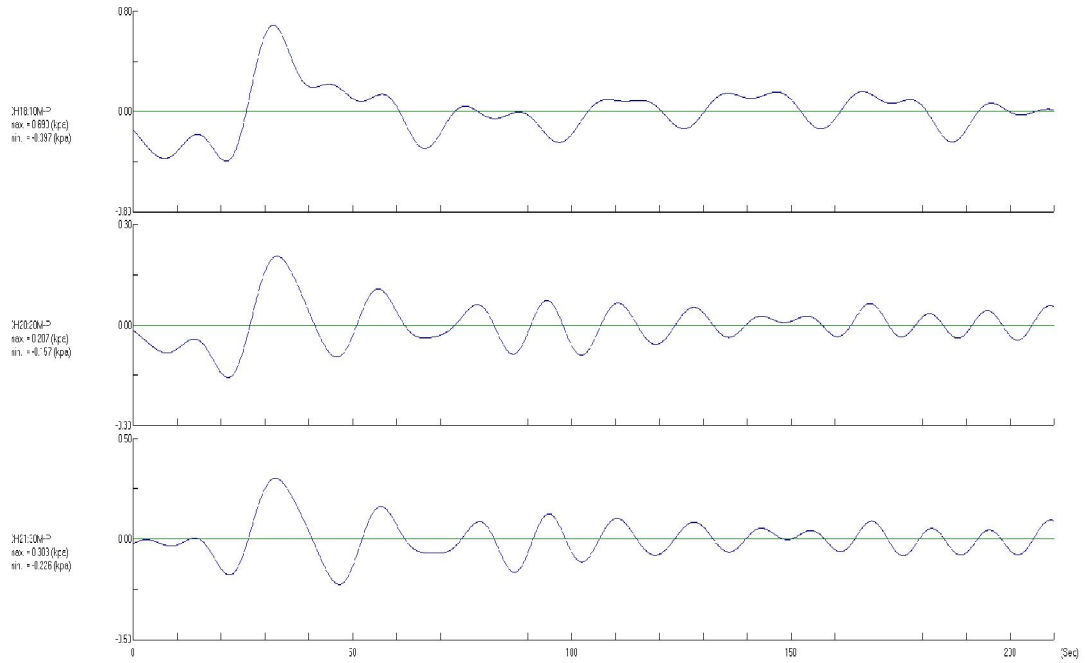


圖 3.53c 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態孔隙水壓變化 (小於 0.08Hz)

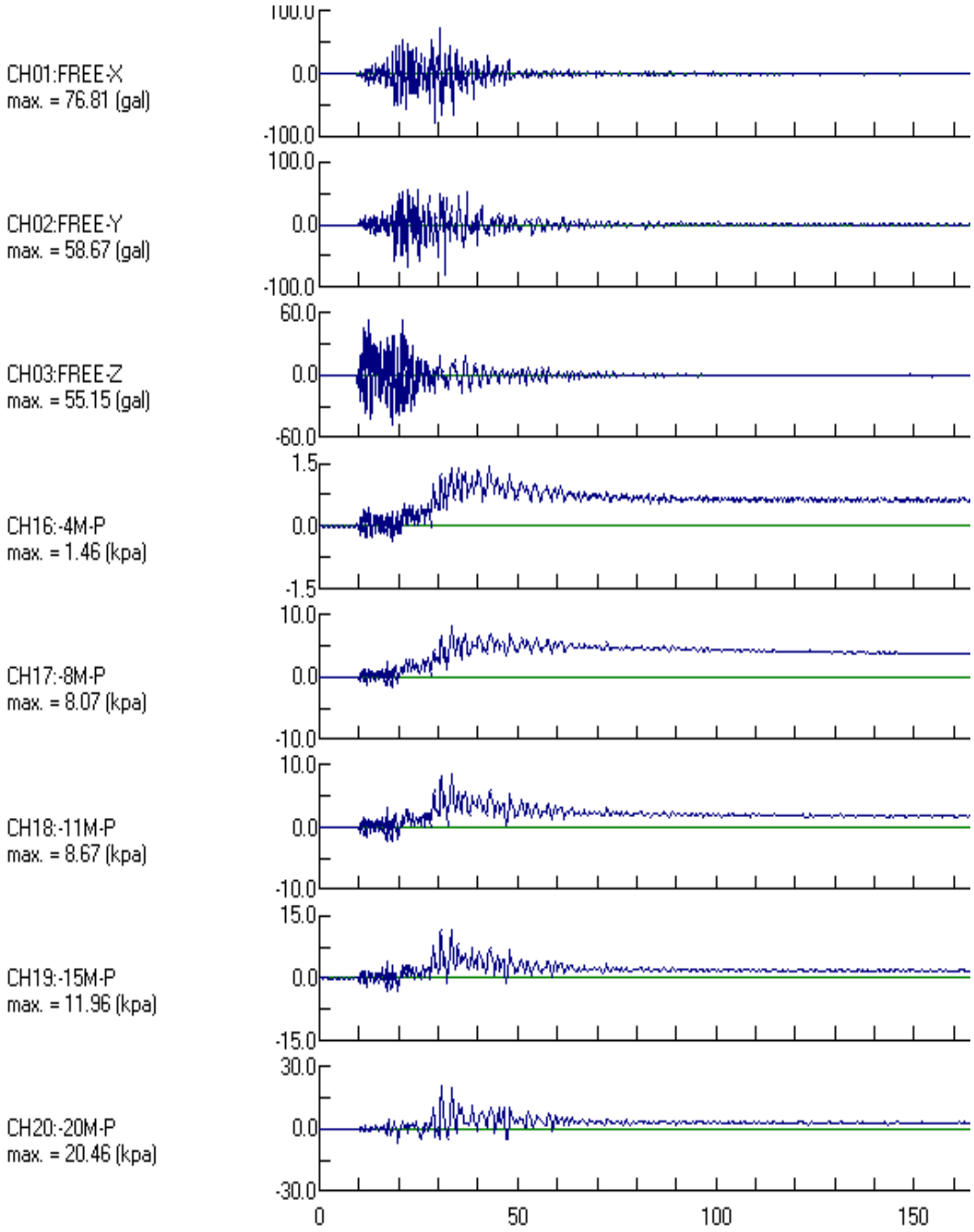


圖 3.54a 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化

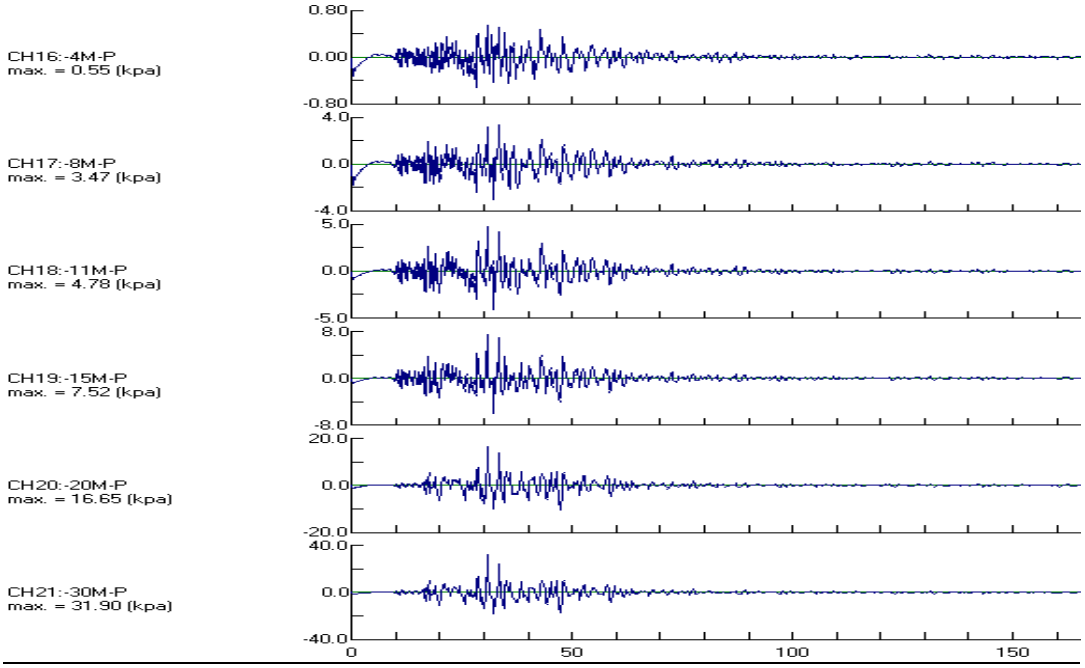


圖 3.54b 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化 (大於 0.08Hz)

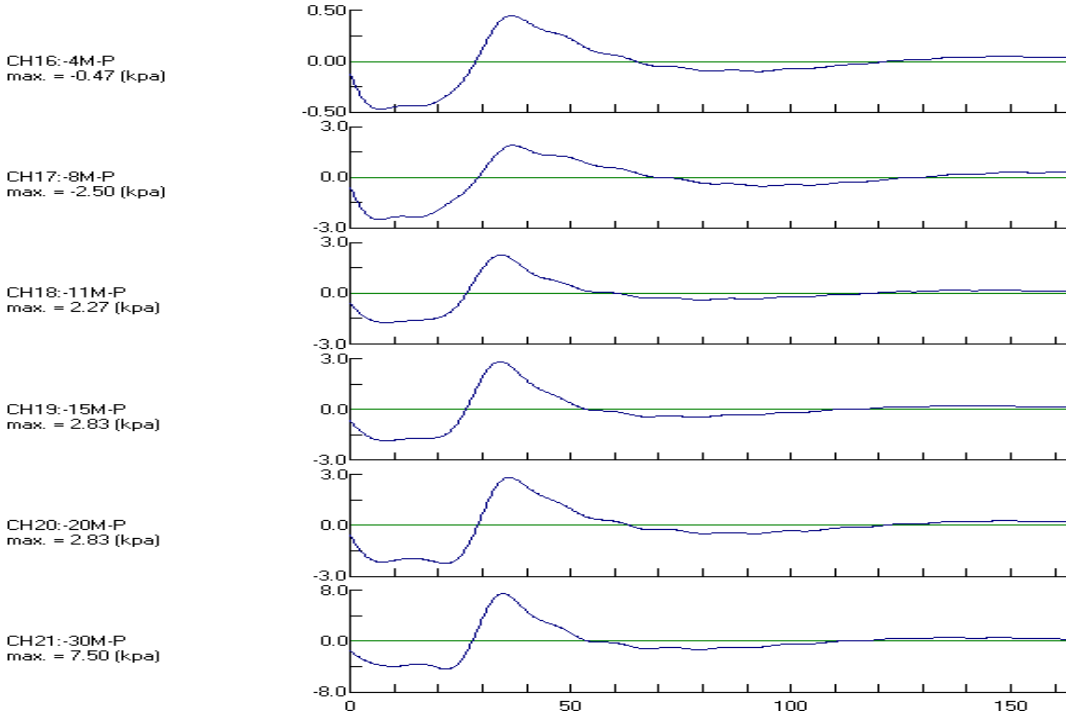


圖 3.54c 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化 (小於 0.08Hz)

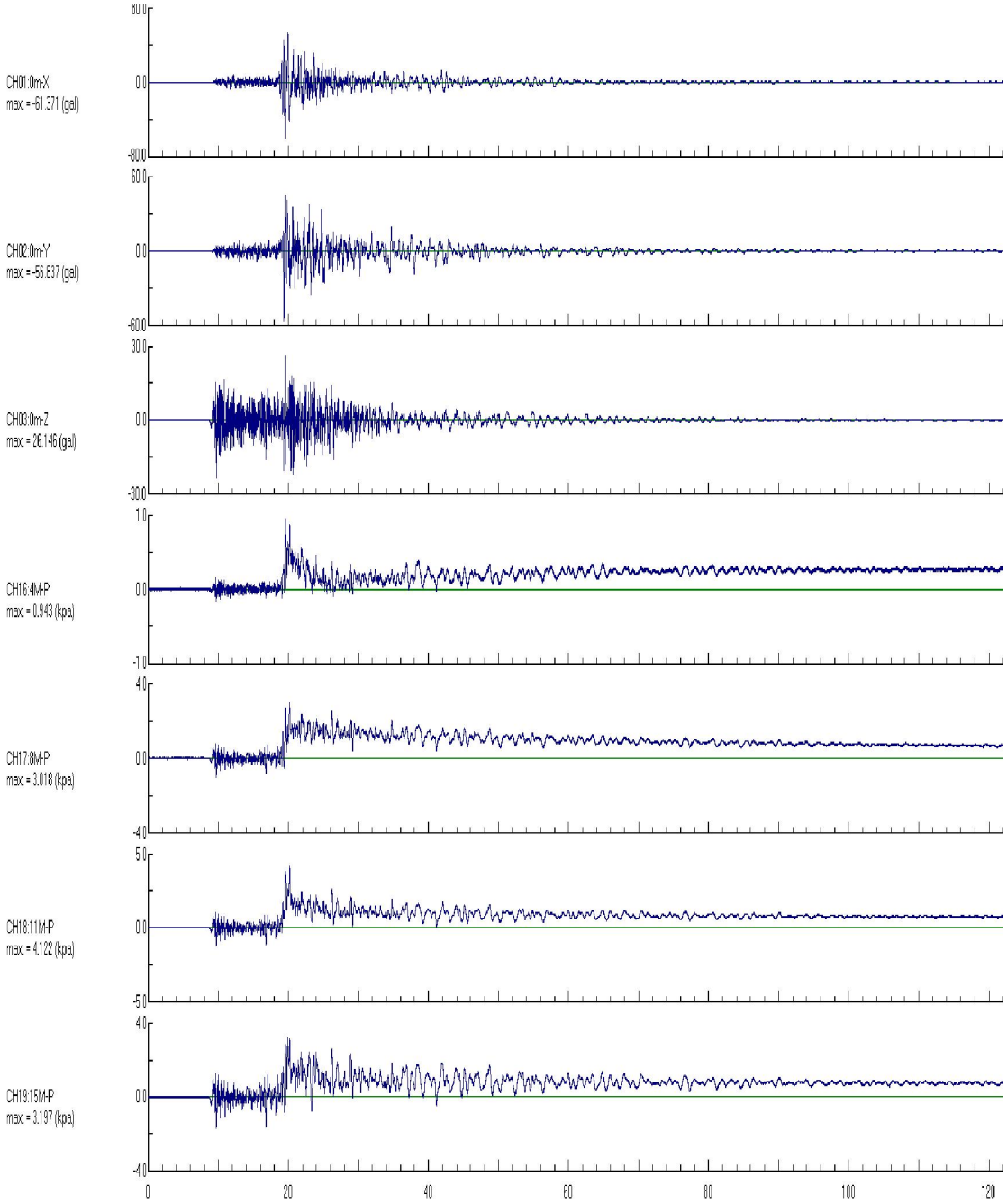


圖 3.55a 安平港 2012 年 2 月 26 日地震之動態水壓變化

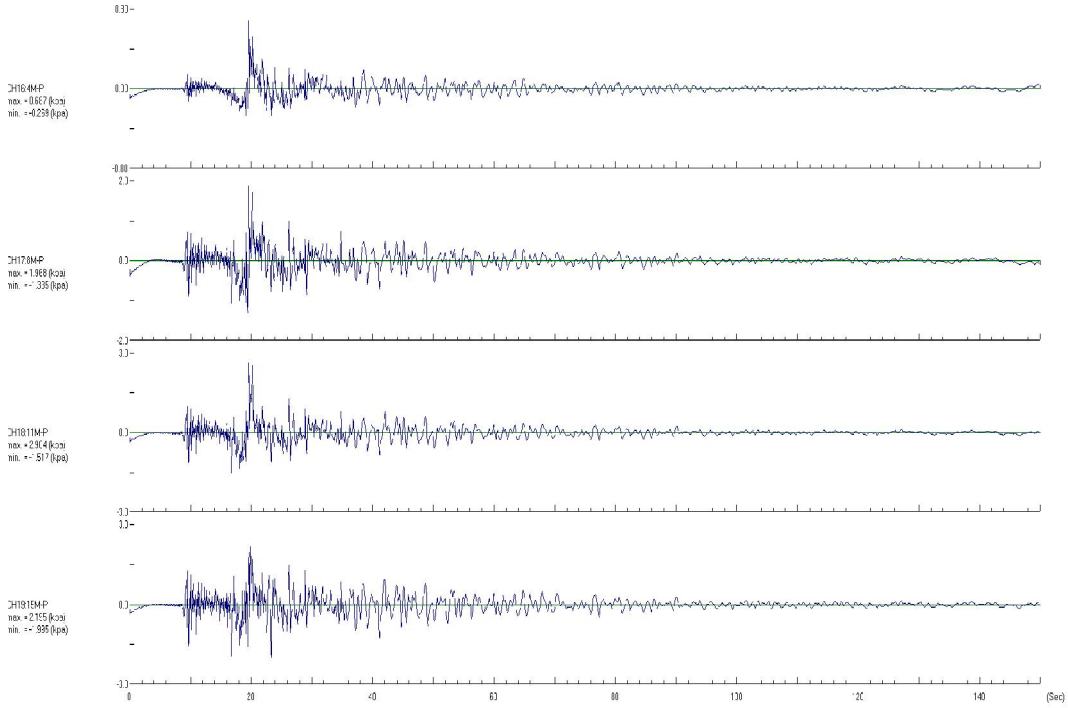


圖 3.55b 安平港 2012 年 2 月 26 日地震之動態孔隙水壓變化 (大於 0.08Hz)

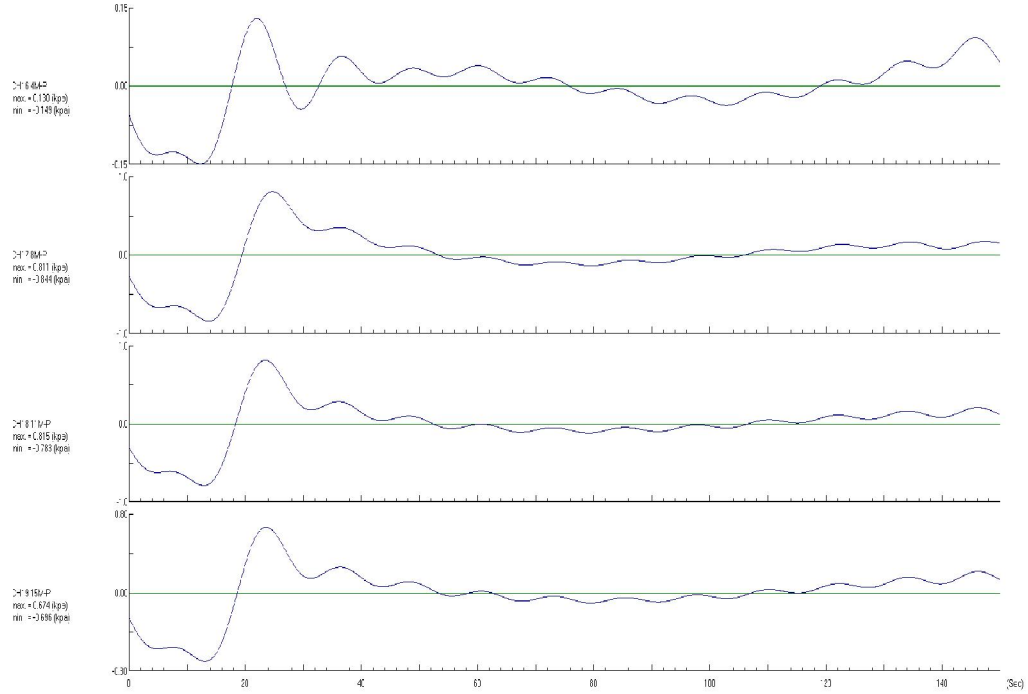


圖 3.55c 安平港 2012 年 2 月 26 日地震之動態孔隙水壓變化 (小於 0.08Hz)

3.9 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[29]，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，本節嘗試以該公司提供的試用版軟體，進行分析 2006 年恆春地震於高雄港地震站監測的資料，如圖 3.56 所示，即應用 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及能譜圖，如圖 3.57 至圖 3.59 所示，由圖 3.59 可知地震波振盪主頻為 0.4Hz 之低頻。

一般在研究土壤場址效應時，是將地表與井下測站之地震紀錄波訊號，進行傅立葉轉換自時間訊號轉換至頻率域，再利用雙站頻譜比法，將地表與井下水平向的頻譜相除，其比值即代表各個頻率的土壤放大因子，而其頻譜比之第一峰值所在的頻率，即為兩測站間土層之共振主頻。

由於土壤受到較大之地震作用將會改變其共振主頻，如果採用一般之傅氏頻譜分析僅能得知地震共振主頻的不同，卻無法得知主頻發生變化與時間的關係。因此本節亦利用 Visual Signal 軟體之短時傅氏轉換法(Short-Term Fourier Transform)分析高雄港測站之 2006 年恆春地震訊號，再加上利用雙站頻譜比法，將地表與井下-14.7m 之頻譜比相除，其比值最大值所在之頻率，即是共振主頻。利用上述方法進行 2006 年 10 月 9 日微震及 2006 年 12 月 26 日強震 2 筆地震資料後，如圖 3.60~圖 3.61，強震時其主頻約為 2.4Hz，弱震時之主頻約為 4.4Hz，由圖可知共振主頻隨 PGA 值增大而往低頻移動，圖中橫軸為訊號的時間軸，縱軸為頻率，圖的顏色代表強度。高雄港及布袋港地震站 2010 年 3 月 4 日地震 STFT 法頻譜比圖如圖 3.62 及 3.63 所示。

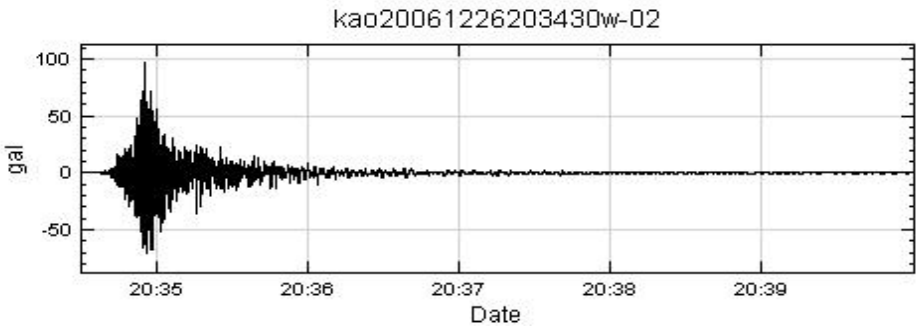


圖 3.56 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震 PGA 圖

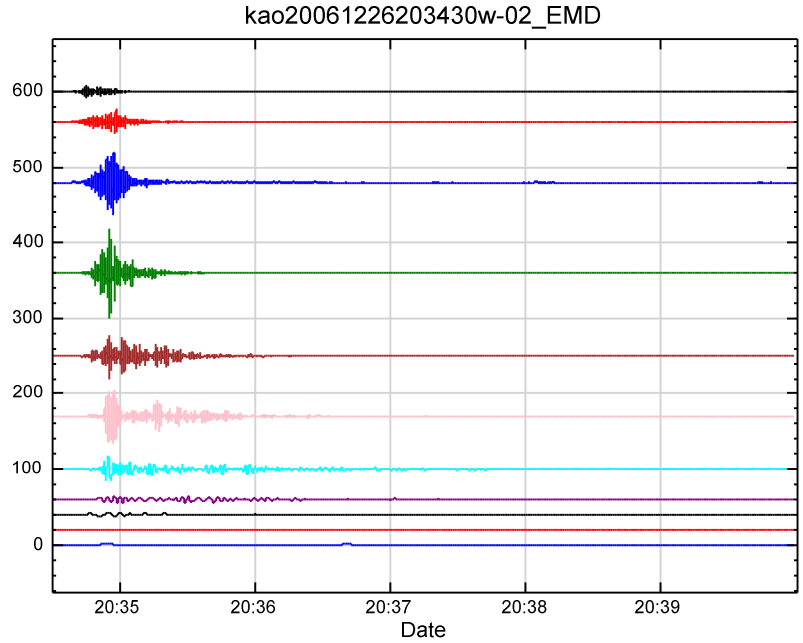


圖 3.57 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震隱模態函數組圖 (IMFs_Intrinsic Mode Functions)

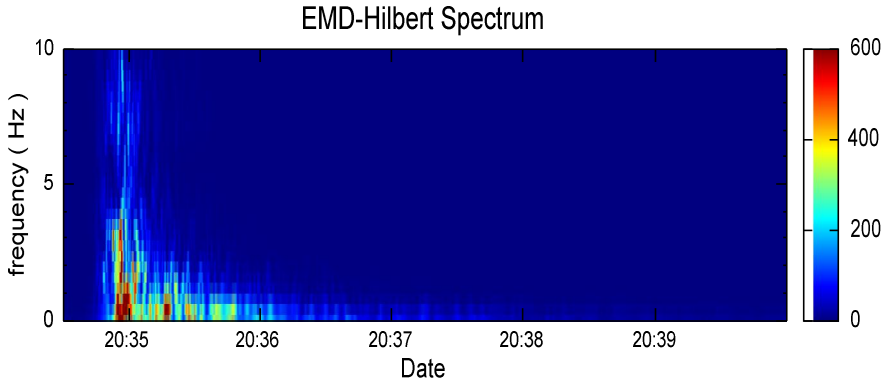


圖 3.58 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震(HHT)時頻分析圖

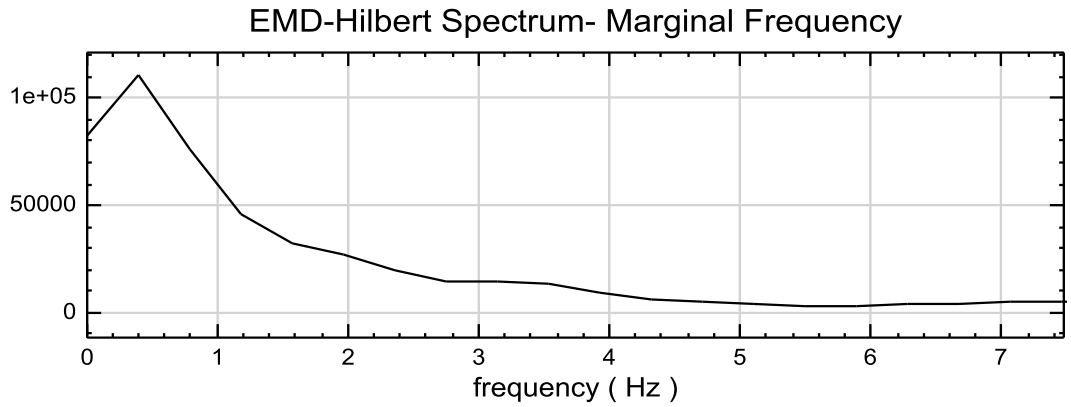


圖 3.59 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震能譜圖

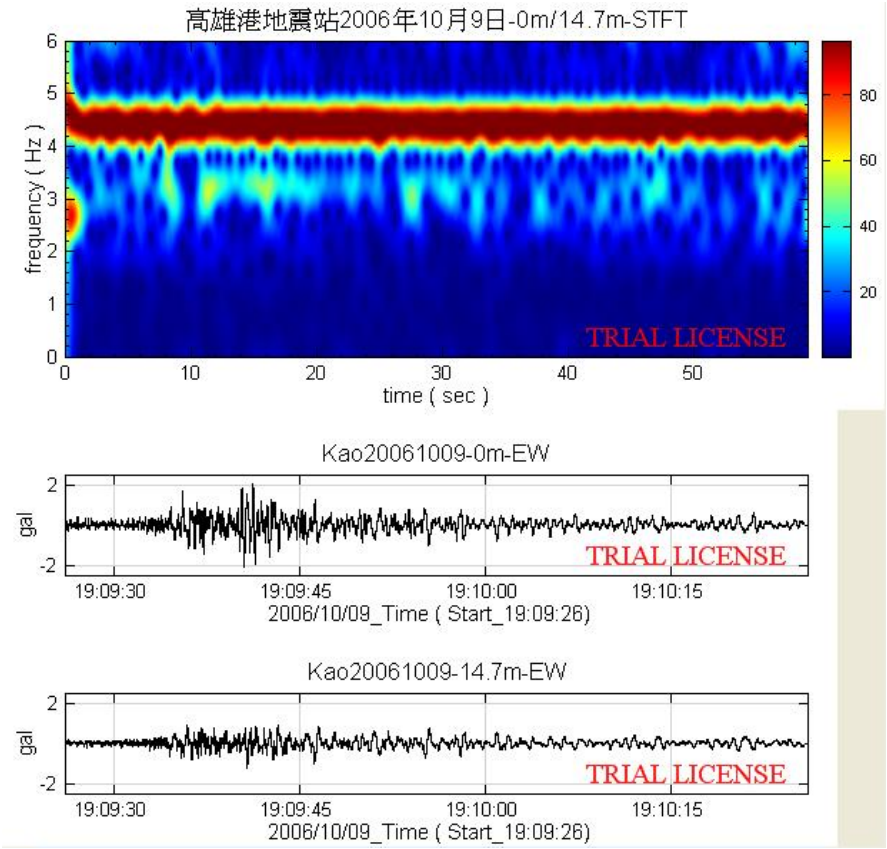


圖 3.60 高雄港地震站 2006 年 10 月 9 日地震 STFT 法頻譜比圖

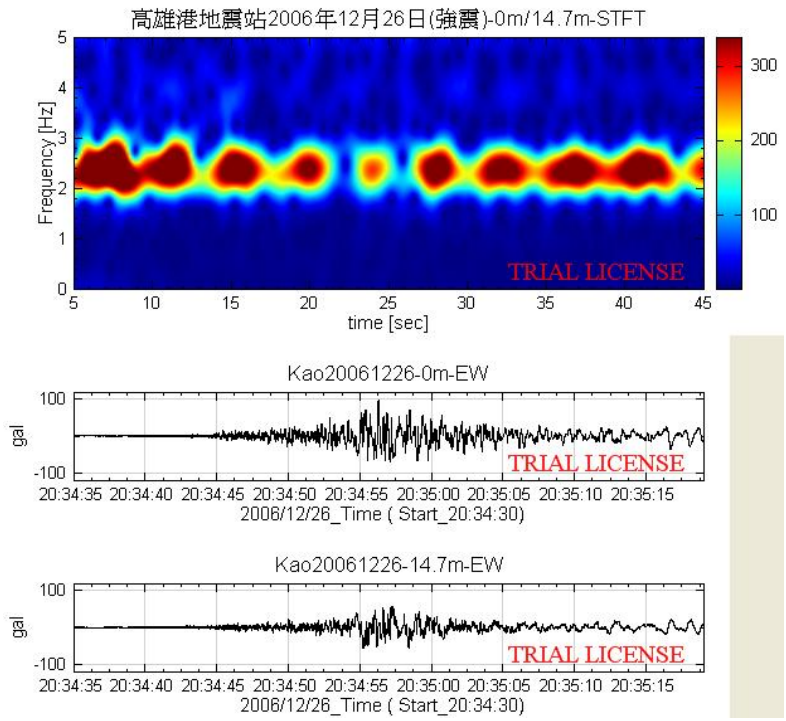


圖 3.61 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日地震 STFT 法頻譜比圖

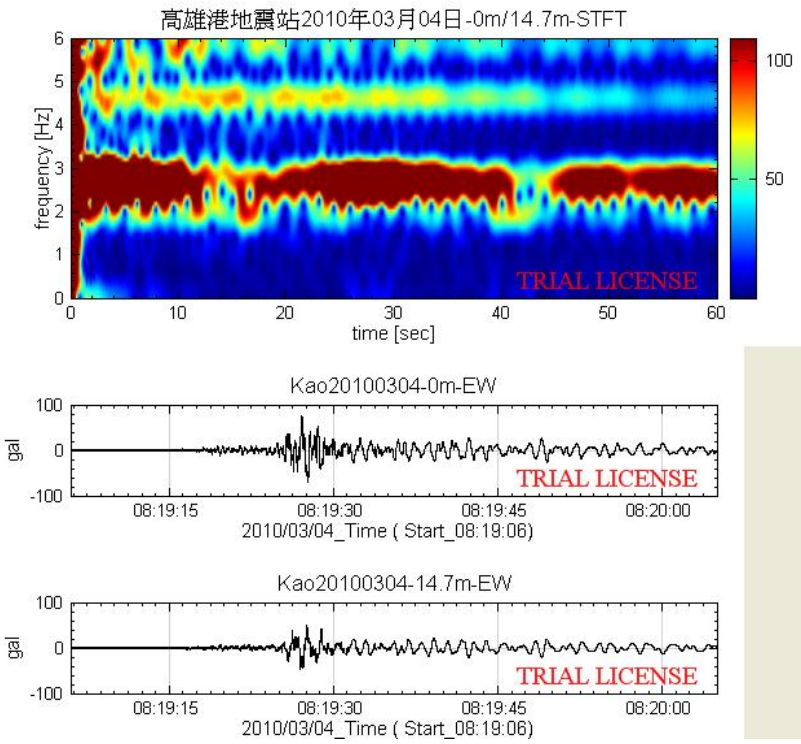


圖 3.62 高雄港地震站 2010 年 3 月 4 日地震 STFT 法頻譜比圖

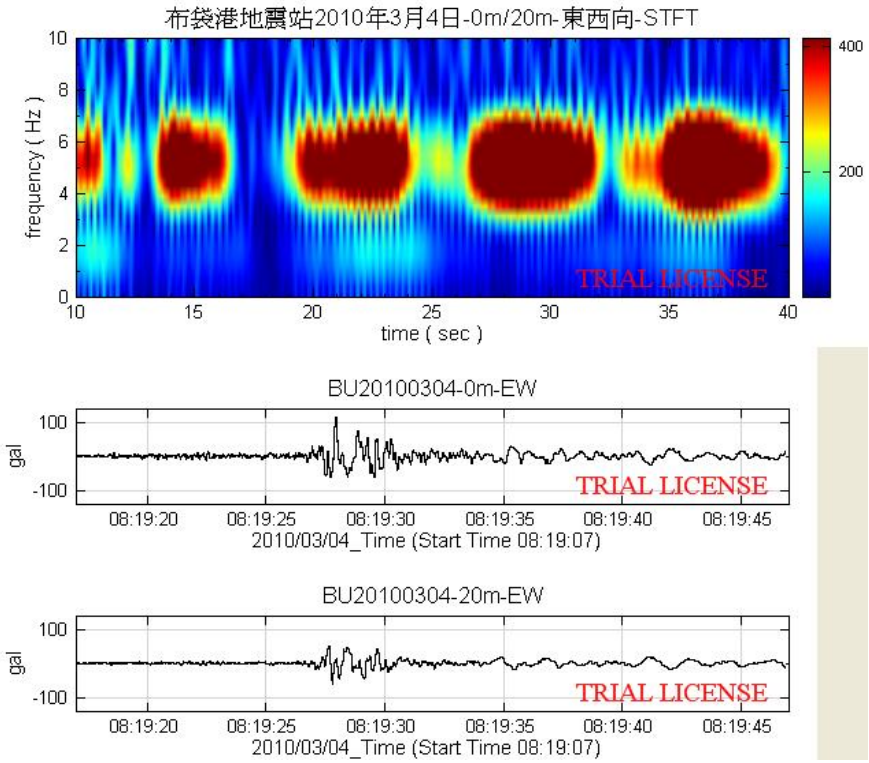


圖 3.63 布袋港地震站 2010 年 3 月 4 日地震 STFT 法頻譜比

第四章　現地碼頭動態監測站

4.1 棧橋式碼頭現地監測站

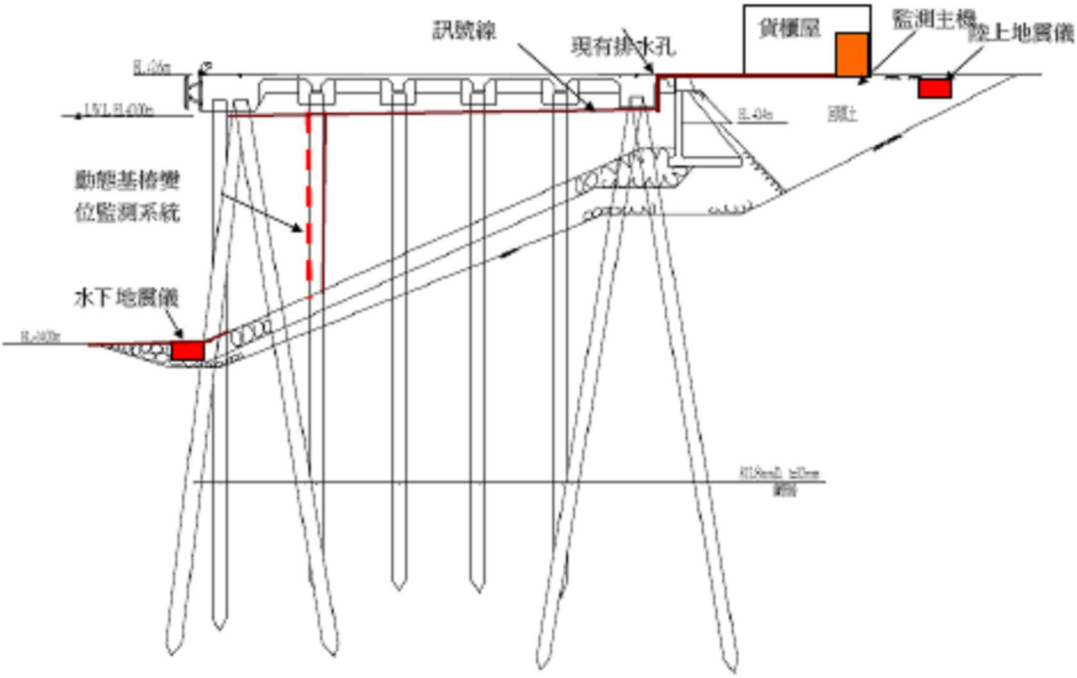
4.1.1 現地配置

高雄港 120 號碼頭為典型鋼管樁支撐之碼頭、現地地質狀況單純且有相關資料、鄰近具電力供應設施且有一簡易遮蔽物，監測站原有配置如圖 4.1 所示，包括一海床地震儀、一陸上地震儀，水下動態基樁變位監測系統及一動態監測主機，相關監測系統與管線將以地下化、隱蔽與不妨礙碼頭動線為原則。

動態基樁變位監測系統則裝置於由岸邊向內陸之第二根直樁上，將於基樁每隔 50cm 間距，以鋼製套環鎖於基樁表面，水下設備之管線將以浮管方式固定於棧橋版下方，並由近岸起重機軌道後方之排水通氣孔穿出至地表，並開挖淺溝埋於地下，施工完並回復原狀。陸上施工包括陸上地震儀與監測主機，陸上地震儀裝置於地表，裝置於現地配線箱機座上，以避免影響動線與人為碰撞，相關管線以淺溝埋設於淺層地表下。監測主機安裝於起重機軌道後方之貨櫃屋中，該貨櫃屋目前僅堆置雜物，且上方有港區監視系統，商借一約 1m*2.5m 之面積放置監測系統主機櫃，並將裝置一空調與警報系統，所需電源向現有租用單位借用，另向中華電信申請固定 IP 之 ADSL 與電話。

4.1.2 棧橋式碼頭地震紀錄與分析

高雄港 120 號(KH120)碼頭監測站於完裝完成後，於 2010/03/04 16:16:16.3 記錄 99022 甲仙地震，其震央位置在北緯 22.96 度東經 120.63 度 (位於高雄甲仙地震站南偏東方 14.3 公里)，震源深度為 19 公里，芮氏地震規模為 5.7，其震度分佈如圖 4.2 所示，與高雄港較接近之高雄港監測站其震度為 2 級，高雄港監測站距離震源 55.45 km，其加速度歷時如圖 4.3 所示，其水平向最大加速於 EW 向為 7.12 gal，NS 向為 7.48 gal。



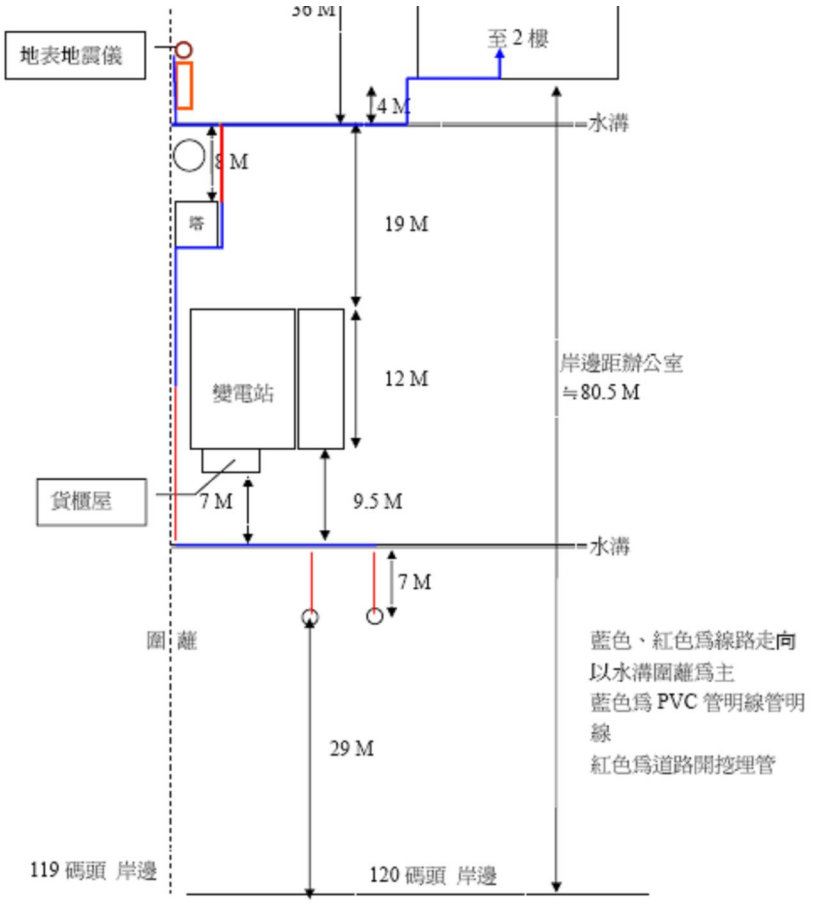


圖 4.1 高雄港 120 號碼頭動態監測站配置

KH120 水下地震儀記錄如圖 4.4 所示，最大水平加速度發生於碼頭法線向，大小為 9 gal，而碼頭之水平向其最大水平加速度為 7.4 gal，垂直向最大加速度為 3.5 gal，與氣象局高雄港監測站比較，除了碼頭法線向水平最大加速度稍大 30%外，其餘皆相當吻合，其原因包括土層分佈、土壤性質及地形差異等，但波型相近，顯示地震儀結果具一定可信度。

動態剖面儀之記錄如圖 4.5~4.7 所示，圖 4.5 為裝置於 KH120 之動態剖面儀頂端加速度記錄，其深度約距地表 4 公尺，最大加速度震幅發生於 X 向，其值為 9 gal，圖 4.6 為頂端相對與底部之位移量，最大水平相對位移發生於 Y 向，最大位移為 145 mm (0.145 公尺)，圖 4.7 為動態剖面儀於最大震動(t=20 sec)時之三維變形，初步結果顯示監測系統已達到原先設定目標。

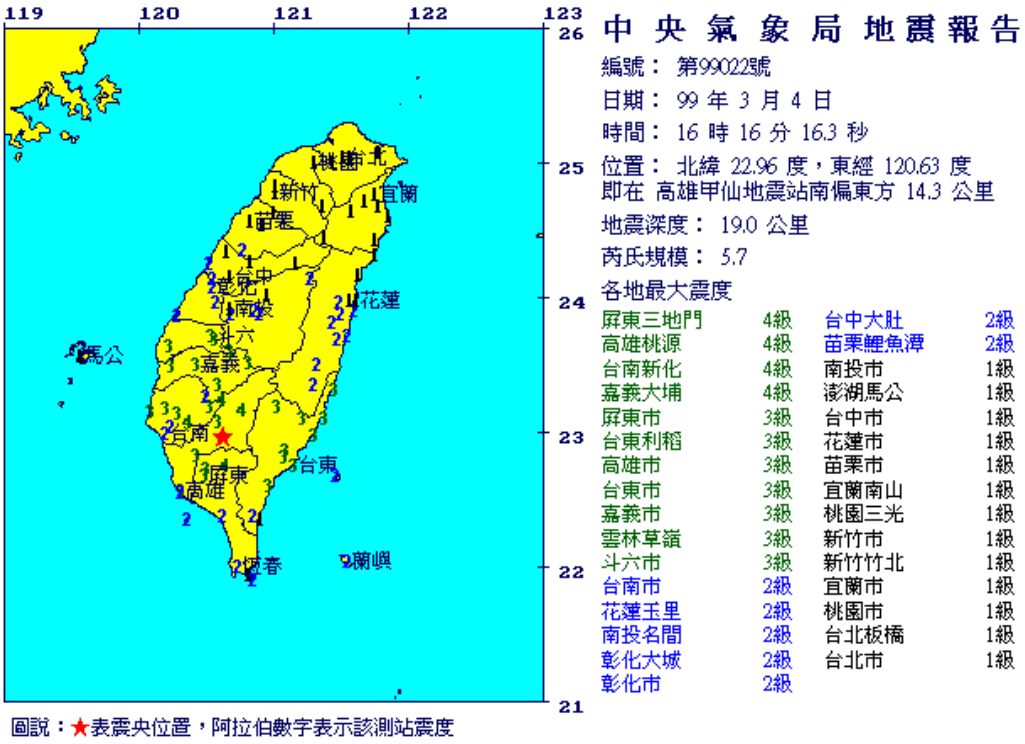


圖 4.2　2010/03/04 甲仙地震震度分佈(氣象局)

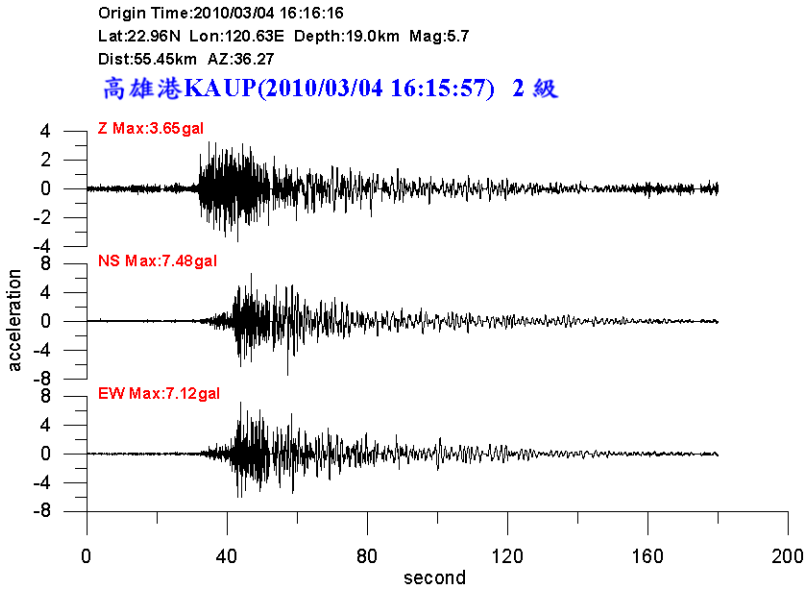


圖 4.3 高雄港監測站加速度歷時(氣象局)

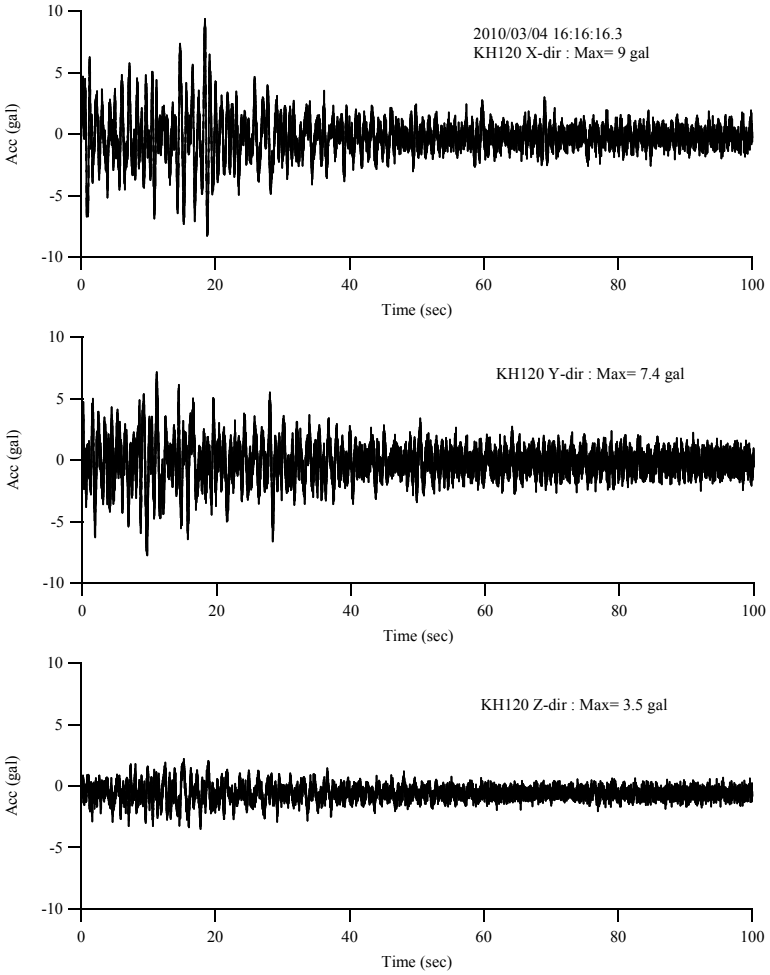


圖 4.4 KH120 水下地震儀記錄

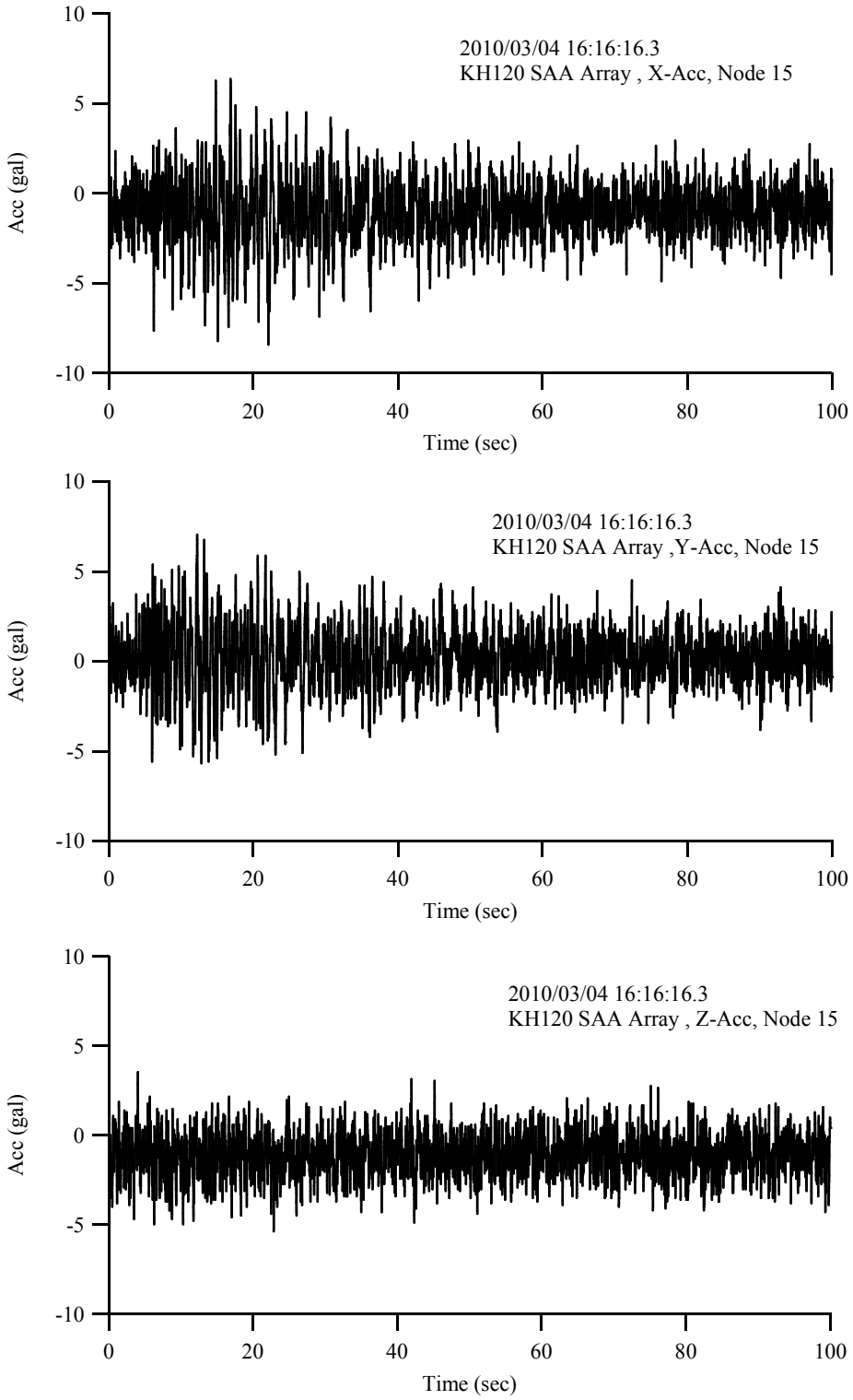
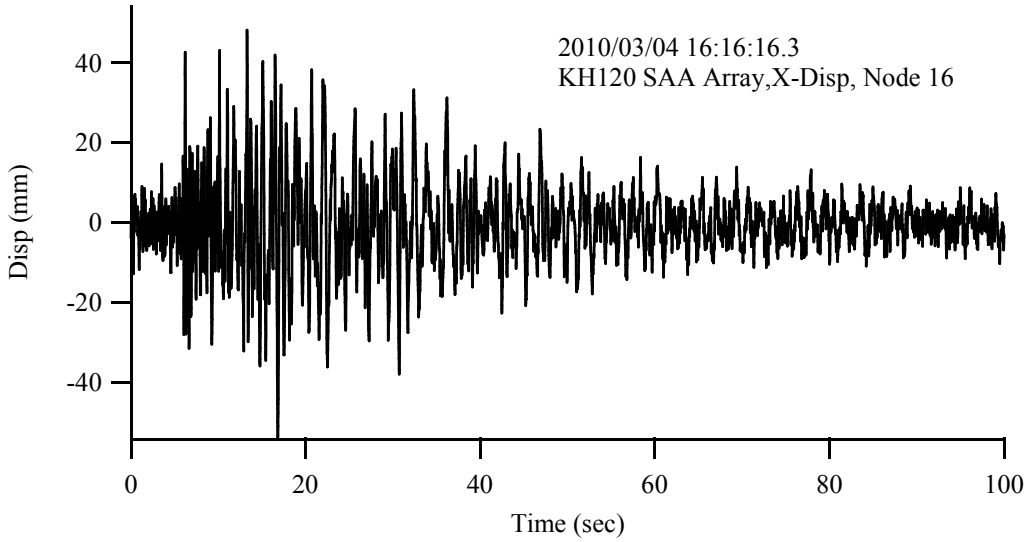


圖 4.5　KH120 之 SAA 頂端加速度歷時



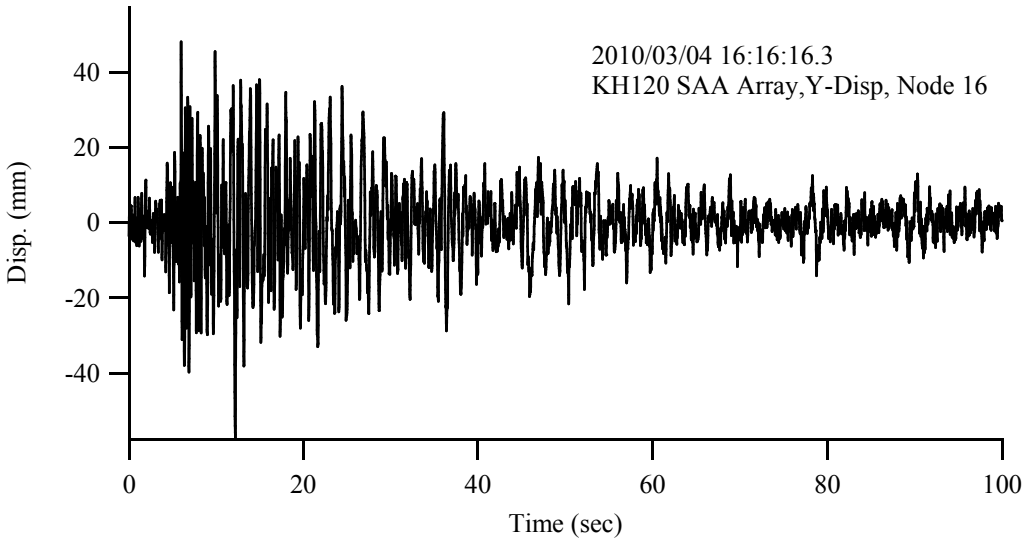


圖 4.6　KH120 SAA 頂端位移歷時

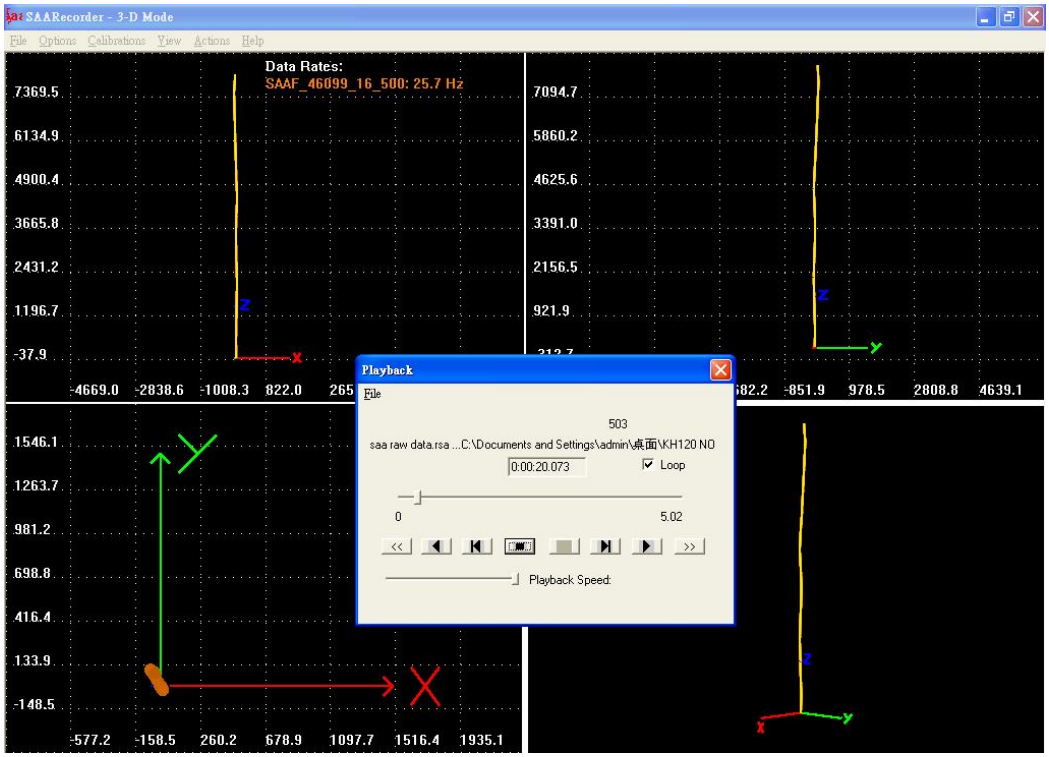


圖 4.7　KH120 SAA 位移剖面記錄 (t=20 sec)

4.1.3　KH120 棧橋式碼頭監測站現況

本測站原裝設之水下動態基樁變位監測系統因年久腐蝕，導致失去功能，且原有監測主機亦因近海之故，主機板腐蝕嚴重，2012 年更換主機板後，於 4 月中旬重新恢復水下及陸上地震儀監測，2012/10/25 成功紀錄一筆有感地震，其震央位置在北緯 22.44 度東經 120.40 度，震源深度為 33 公里，芮氏地震規模為 4.5，與高雄港較接近之高雄港監測站其震度為 5 級，氣象局測站之加速度歷時如圖 4.8 所示，其水平向最大加速於 EW 向為 74.29 gal，NS 向為 81.47 gal。

KH120 測站所量得之水下與陸上地震儀如圖 4.9 及 4.10 所示，陸上地震儀資料與氣象局監測記錄波形相同但加速度震幅較小，此結果顯示 KH120 監測站仍具維護價值。

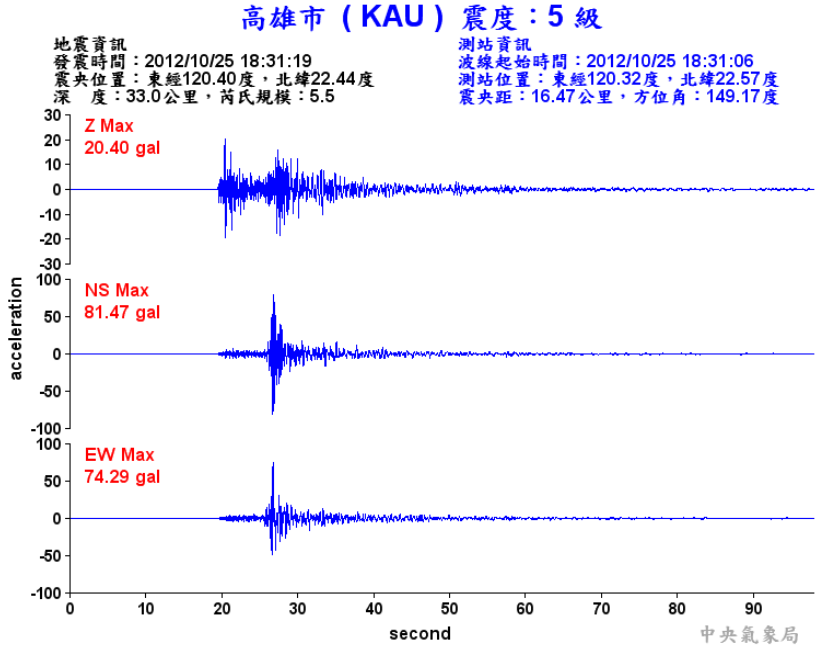


圖 4.8　2012/10/25 高雄港監測站加速度歷時(氣象局)

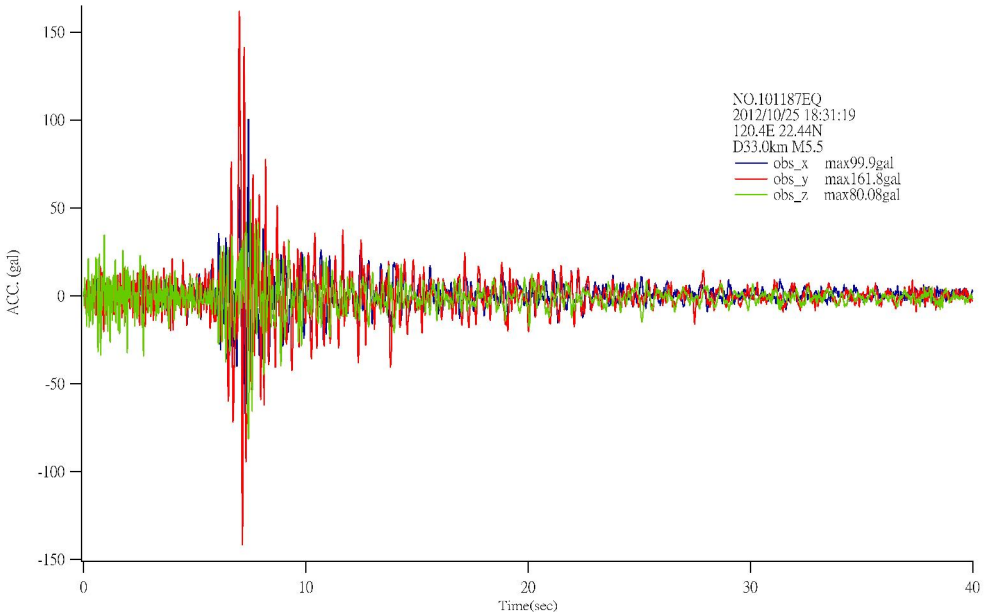


圖 4.9　2012/10/25 KH120 水下地震儀記錄

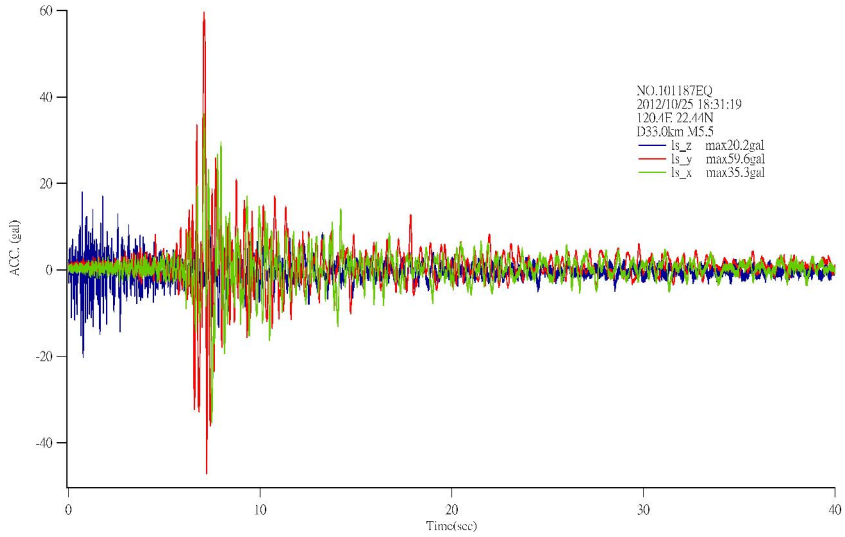


圖 4.10　2012/12/15 KH120 陸上地震儀記錄

棧橋式碼頭監測站(KH120)2014 年仍維持正常運作，2015 年起因該碼頭外租而撤站。2014 年 10 月 13 日測得氣象局編號 125 之地震紀錄，震央位置在北緯 22.26 度，東經 120.45 度，震源深度為 42.4 公里，芮氏規模 4.7，與高雄港較接近之氣象局高雄市監測站之加速度歷時如圖 4.11 所示，其水平最大加速度為 2.45 gal，NS 向為 3.23 gal，KH120 測站所量得之水下與陸上地震儀如圖 4.12 及 4.13 所示，陸上地震儀資料與氣象局監測記錄波形相同，但加速度震幅較小，水下地震儀則記錄到較陸上地震儀大之震幅，監測站機房狀況如圖 4.14 所示。

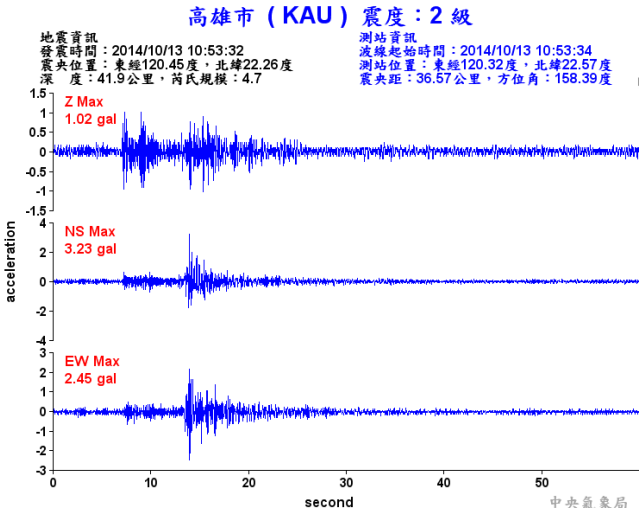


圖 4.11　2014/10/13 高雄市監測站加速度歷時(氣象局)

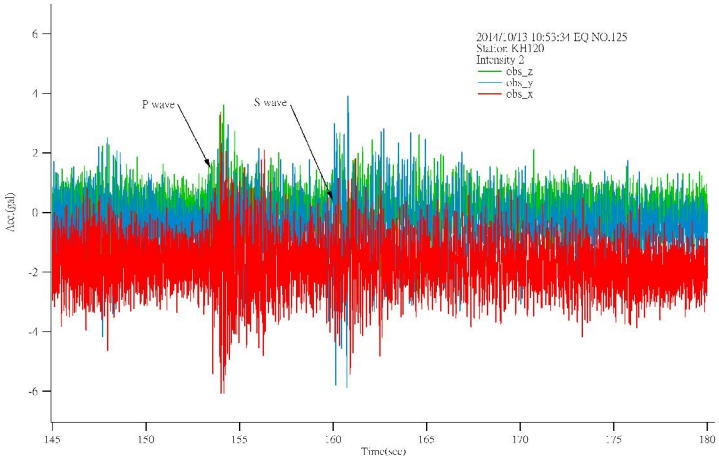


圖 4.12　2014/10/13 KH120 水下地震儀記錄

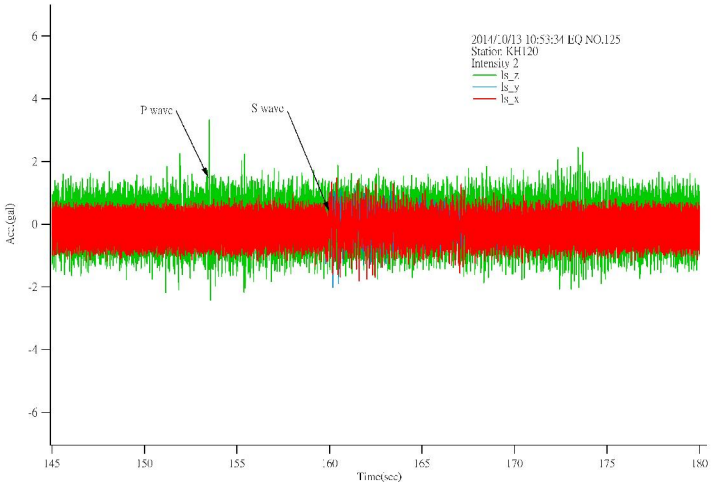


圖 4.13　2014/10/13 KH120 陸上地震儀記錄

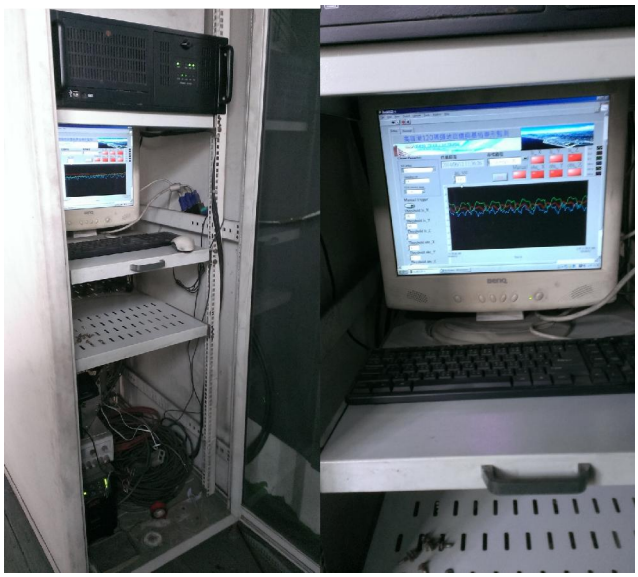


圖 4.14 高雄港 120 號碼頭動態監測站機房(2014/10/25 照)

4.2 錨碇板樁碼頭現地監測站

4.2.1 錨碇板樁現地監測站配置

現有錨碇板樁動態監測站位於臺北港外海貨櫃碼頭交界之北 2 碼頭(TPN02)，測站所在位於北 2 碼頭與北 3 碼頭交接處，交角約為 120 度，北 2 碼頭屬於錨碇鋼板樁碼頭，規劃屬散裝碼頭，北 3~6 碼頭為鋼管支撐棧橋式碼頭，規劃為貨櫃碼頭，監測主機所在工寮如圖 4.15 所示，監測機箱如圖 4.16 所示。

測站所在距北 3 碼頭最近距離為 3 公尺，水下鋼板樁變位監測配置如圖 4.17 所示，裝設二組間距為 0.3 m 總長度為 4.8 m 之垂直向動態剖面儀(SAA-1 與 SAA-2)，並於二垂直剖面儀頂部加裝水平向動態剖面儀(SAA-3)，另於監測主機旁裝設陸上地震儀。

圖 4.15 臺北港北 2 碼頭工寮現況

圖 4.16 TPN02 監測主機機箱

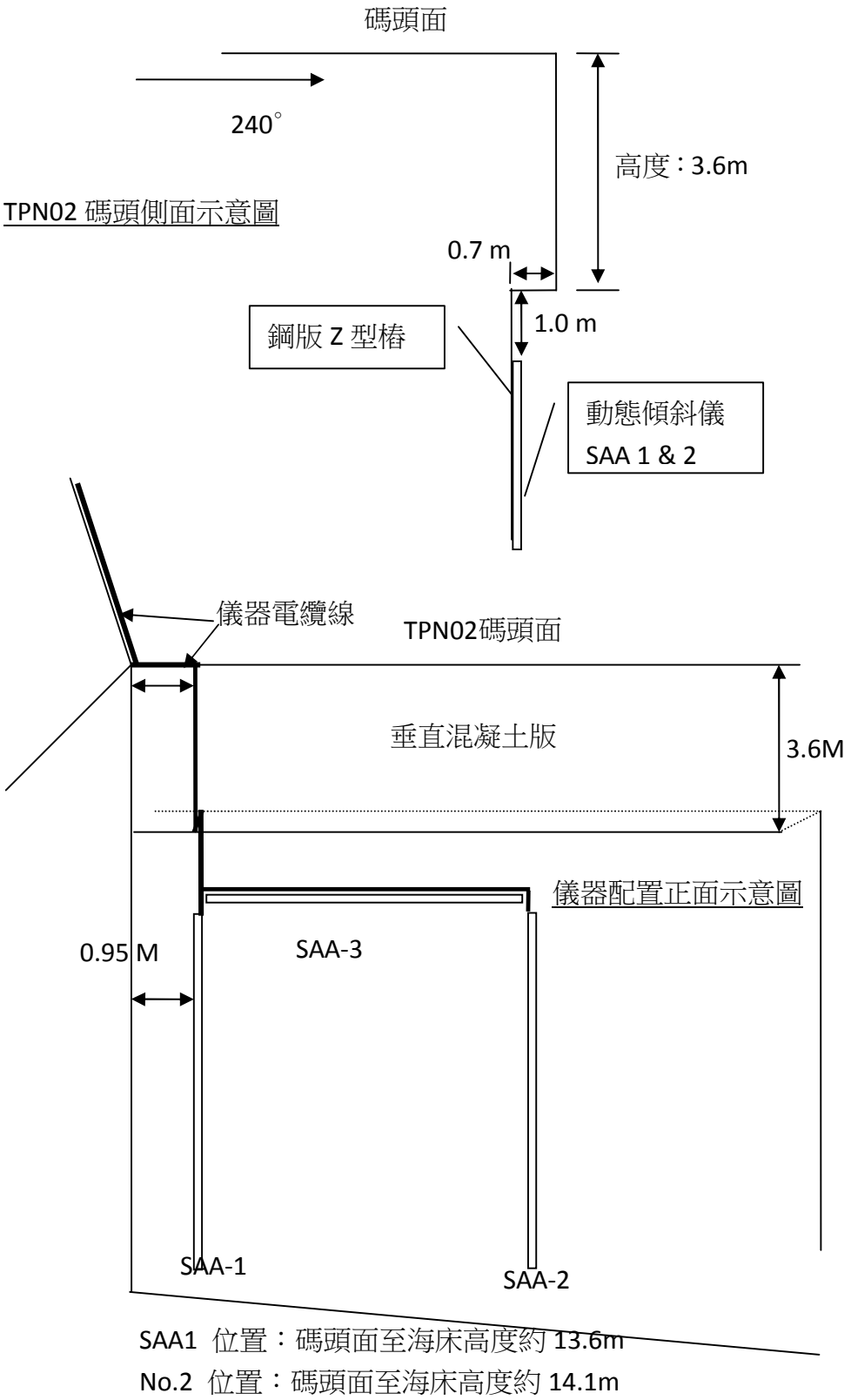


圖 4.17　TPN02 板樁變位監測配置圖

4.2.2 TPE09 板樁式碼頭監測站

板樁式碼頭動態監測站，於民國 98 年於臺北港東 9 號碼頭前端轉角之現有驗潮站附近之適當位置，在不破壞版樁結構與不影響碼頭營運原則下設置監測站，其主要考量為該碼頭為典型錨定式版樁碼頭，監測系統含有陸上地震儀、動態剖面儀、監測主機、通訊網路與電力設施等。

民國 99 年因臺北港務工程需要，原設置於東 9 碼頭(TPE09)之監測站需進行遷移，經考慮碼頭類型、監測主機放置處所、現場管線裝設及通訊網路佈設等因素，後選擇靠近臺北港外海貨櫃碼頭交界之北 2 錨定鋼版樁碼頭設置測站(TPN02)，北 2 碼規劃屬散裝碼頭。

4.2.3 TPN02 板樁式碼頭監測站現況

監測站於 101 年度更換 UPS 及監測主機之主機板，系統於 2012 年 4 月下旬重新上線，但由於 SAA 已裝置一定期間，因此訊號並不穩定，目前僅剩水平裝設之 SAA-3 及陸上地震儀仍持續監測，且成功紀錄 2013/03/07 地震，與臺北港較接近之臺北市監測站其震度為 2 級，其加速度歷時如圖 4.18 所示。TPN02 陸上地震儀記錄如圖 4.19，最大水平加速度發生於碼頭平行向，大小為 8.42 gal，而碼頭之法線向其最大水平加速度為 7.33 gal，垂直向最大加速度為 3.6 gal，與板橋監測站比較其震幅增加約 200 %，其原因包括土層分佈、土壤性質及地形差異等，但波型相近，顯示地震儀結果具一定可信度。

另於 2013/10/31 紀錄一芮氏規模 6.3 之地震，臺北市監測站其震度為 3 級，其水平向最大加速於 NS 向為 20.16gal，EW 向為 10.59 gal。其加速度歷時如圖 4.20 所示，陸上地震儀記錄如圖 4.21，臺北港地震站記錄如圖 4.22 所示，傅式譜比較圖如圖 4.23。

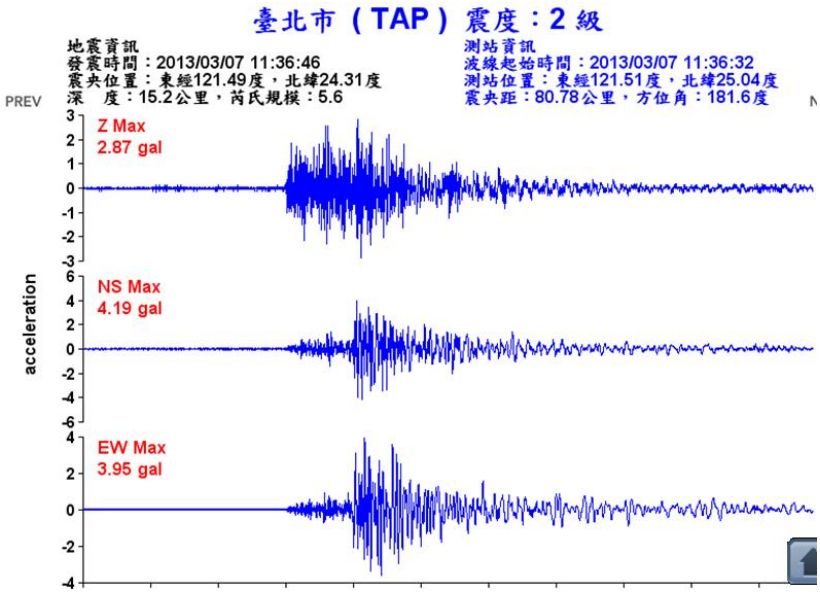


圖 4.18　2013/03/07 臺北市站加速度歷時(氣象局)

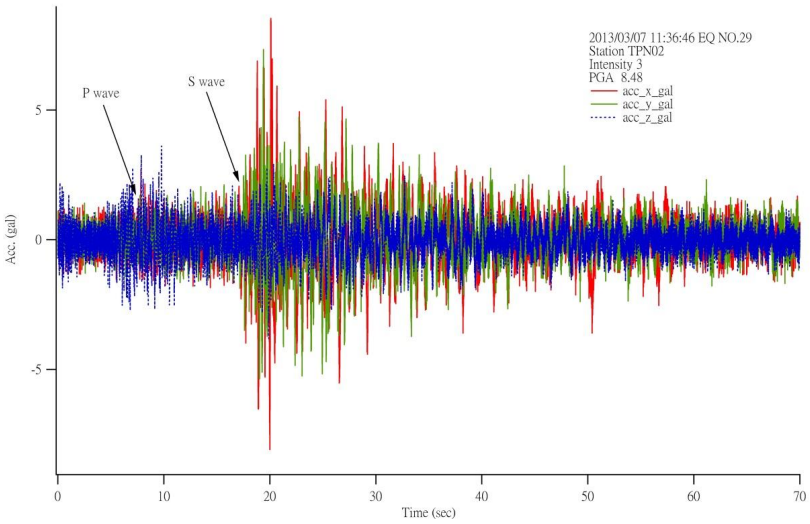


圖 4.19　2013/03/07 TPN02 監測站地表加速度計歷時

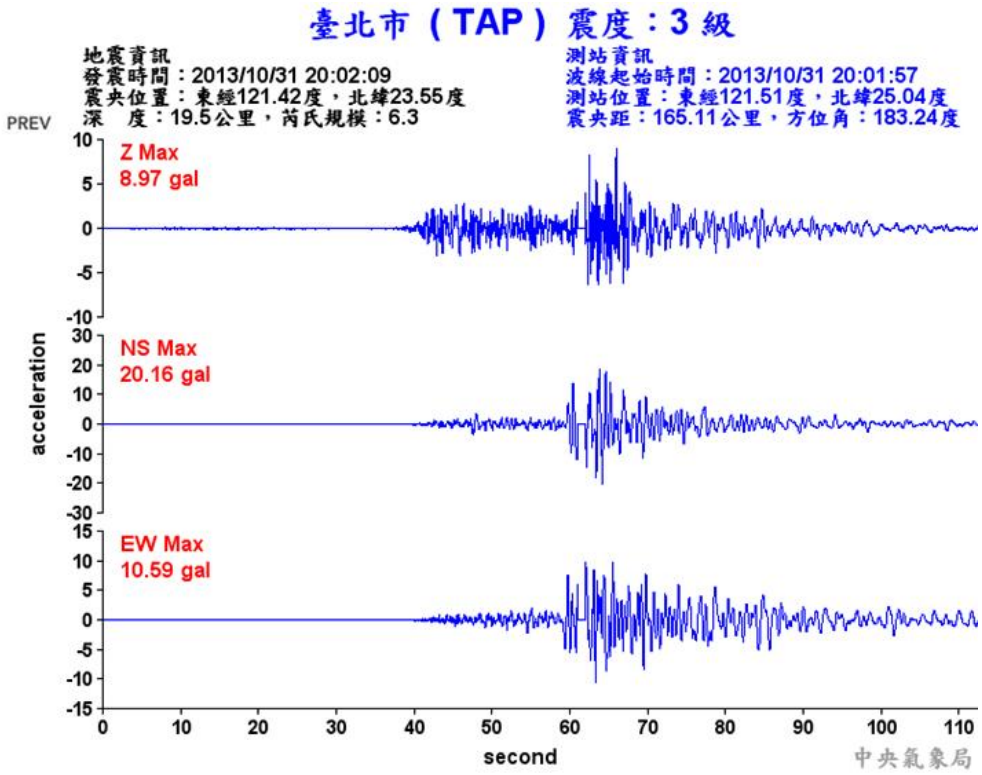


圖 4.20　2013/10/31 臺北市站加速度歷時(氣象局)

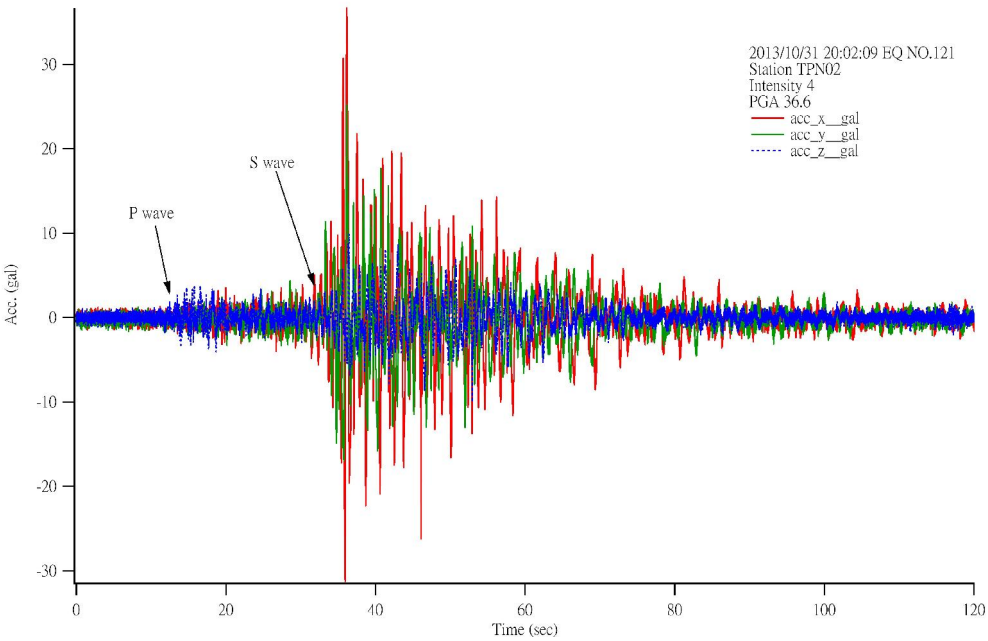


圖 4.21　2013/10/31 TPN02 監測站地表加速度計歷時

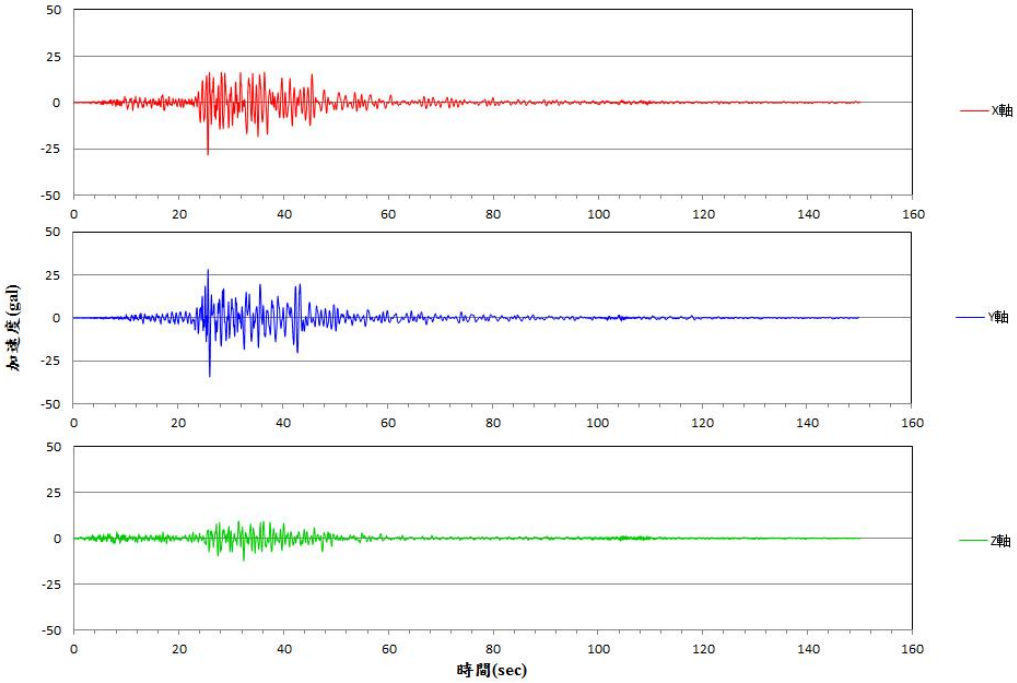


圖 4.22　2013/10/31 臺北港地震站地表加速度計歷時圖

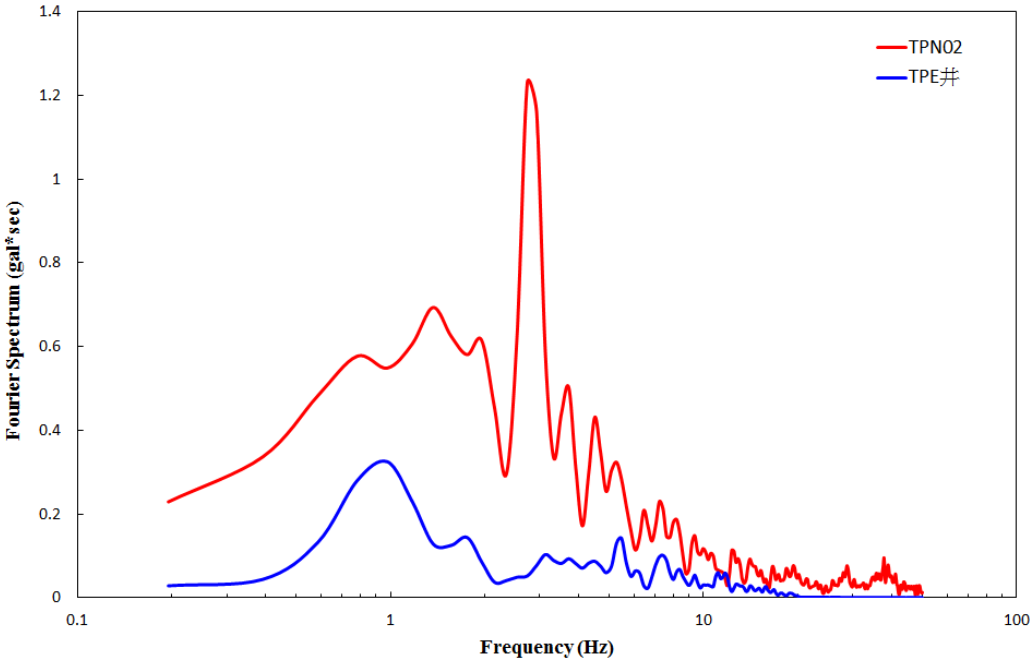


圖 4.23　臺北港北 2 碼頭與井下地震站地表加速度傅式譜比較圖

第五章 港灣地區地層下陷監測分析

臺灣地區由於地下水大量開發引致之地層下陷問題，已是一種普遍現象，而在沿海地區，亦由於大量開發抽取超額之地下水，導致愈演愈烈之地層下陷，依據水利署地層下陷資料截至民國 99 年止，臺灣西南沿海以屏東地區最大累積下陷量達 3.28 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 2.4 公尺，而嘉義地區累積最大下陷量亦有 1.5 公尺，且下陷中心主要是分布於鰲鼓、東石及布袋一帶，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。尤其貨櫃碼頭之貨櫃裝卸及堆置漸朝自動化設計，碼頭地面少許之差異沉陷，皆易使碼頭自動化之機械設備損壞或喪失使用功能。因此，為維護港區工程及各樣設施之安全，設置地層下陷及地下水壓監測站，進行長期之下陷監測。

本計畫連續於布袋港、大鵬灣、臺中港、安平港等港區，各設置 1 組 200 m 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，定期進行港區地層分層沉陷之長期監測，主要是維護各港區沉陷及水位觀測井之正常監測，平時定期量測各港區之沉陷及水位變化，以探討地下水壓變化對各港區地層下陷之影響。地震後，亦可量測分層地層下陷，分析各土層地震時之沉陷量。

本章就港灣地區之地層下陷行為、量測方法與各港區地層下陷監測站經過長期量測地磐下陷及地下水位結果分節敘述於後。

5.1 港灣地區地層下陷行為

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。

一般而言，無論是港灣構造物荷重或超抽地下水造成之地層下陷，大都因土層受到外力而產生壓縮所致，所以欲對地層下陷進行分析之前，首需對整體土層所受有效應力增量之分佈情形，及整體土層之下陷行為與各分層土壤壓縮特性進行瞭解，然後再應用壓密理論進行沉陷分析，如圖 5.1 所示。

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

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

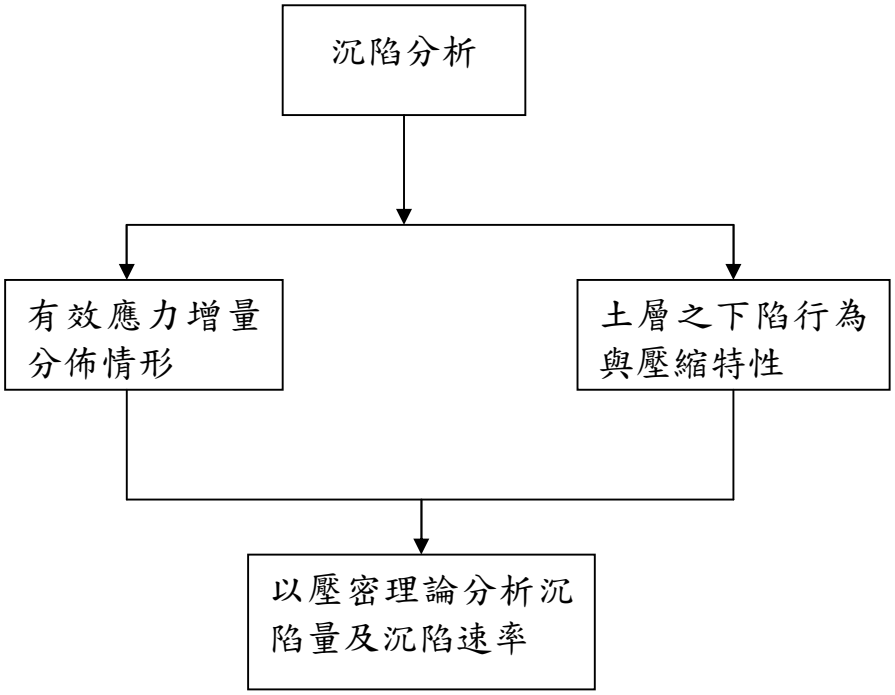


圖 5.1 沉陷分析之流程圖

5.1.1 有效應力增量分布

超抽地下水引致地層下陷，一般可分為二類(7)，一為自由水位下降引致之淺層沉陷，另一為受壓水位下降引致之深層沉陷。若由於自由水層受到過量抽水，引致自由水位下降，其有效應力增量僅分布於最淺層自由水層及其下之難透水層(Aquitard)或粘土層，而其他之受壓水層(Aquifer)及粘土層則無有效應力增量產生，其分布情形如圖 5.2 所示，由於在有效應力增量存在之土層，才有土壤之壓密或壓縮現象，因此超抽自由水層產生之沉陷屬於淺層沉陷。若由於受壓水層受到過量抽水，而致受壓水位下降，其有效應力增量如圖 5.3 所示，除分佈於該超抽受壓水層外，並分佈於其上下之難透水層或粘土層，而最淺層之自由水層及其他之受壓水層與粘土層則無有效應力增量產生，由於超抽受壓水層引致之有效應力增量產生於土層深處，土壤之壓密或壓縮亦發生於深處，因此此種沉陷屬於深層沉陷。

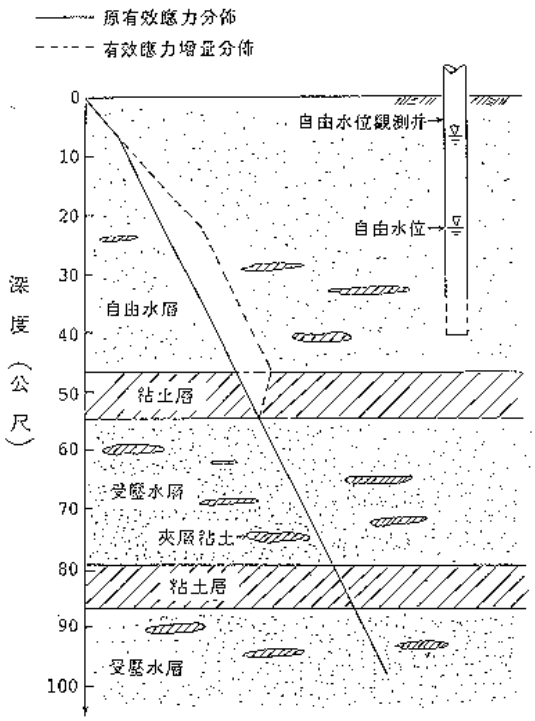


圖 5.2 自由水位下降引致之有效應力增量分布

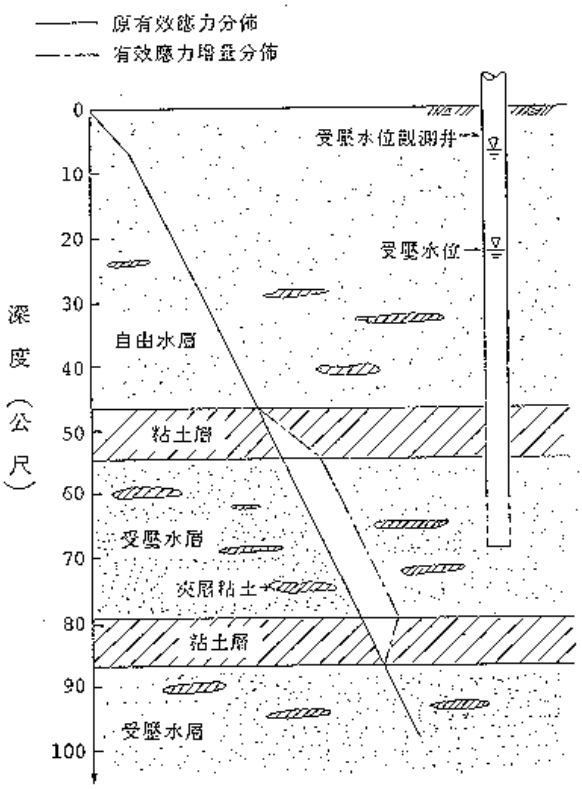


圖 5.3 受壓水位下降引致之有效應力增量分布

5.1.2 超抽地下水之下陷行為

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

大部分海岸地層下陷皆因過量抽取受壓含水層中地下水而產生之沉陷，此種沉陷不但其影響達於土層深處，更由於其沉陷主因，是土層深處之受壓含水層及其上下之難透水層或粘土層，受壓縮而產生地層下陷，故稱為深層沉陷(Deep subsidence)，此種沉陷行為，相當於一水力起重機(Hydrulic jack)將荷重舉高後突然水壓力減少時之情形，此時荷重即漸漸下降。在發生區域沉陷時，主要因受壓含水層中水壓因過度抽取地下水而下降，受壓含水層及其上下之粘土層受到壓縮，此稱為受壓縮土層，而此受壓土層至地表面間之土層並未受到壓縮，只是整體隨受壓縮土層之壓縮而向下移動產生地層下陷，故地面之沉陷與受壓含水層中水壓之減少量成正比。當地下水繼續超抽時所發生之沉陷，在地下水文學裡稱為活性沉陷(Active subsidence)。當過量抽水已遏止，地下水壓已趨穩定後，地面之沉陷並不立即停止，而仍將持續一段時間，惟其沉陷速率隨時間而漸趨緩和，最後始停止，此期間所發生之沉陷，在地下水文學裡稱為「稽延沉陷」(Lag subsidence)或「殘餘沉陷」(Residual subsidence)(2)，通常在活性沉陷後，殘餘沉陷仍將繼續數十年，而後沉陷方可認為全部停止。

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

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

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

5.2 分層沉陷觀測井設置與量測

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

分層沉陷觀測井採用日本 DOBOKU 生產之磁感式沉陷環，磁環及安卡皆為防腐蝕不銹鋼材質，井管為南亞 2.5 英吋井管，為耐腐蝕及酸鹼材質，安裝步驟敘述如下：

1. 鑿井到達預定深度時，儘量清除孔內沉泥，靜置 1 小時後檢查孔深以作為安裝深度及沉砂管長度之依據。
2. 依據土層資料決定沉下磁環安裝位置，並將量測管安裝摩擦切管排列於地面，並依序編號及記錄長度再固定沉陷磁環於預定安裝深度，並連接燃燒樹脂導線。
3. 於量測井管底部安裝沉砂管及止水活閥以便量測導管順利及垂直下井，並於止水活閥處以鋼纜牽引避免導管下放時因過重產生失敗。
4. 待量測井依秩序完成後，再利用燃燒樹脂機打開磁環，使安卡可順利固定於土壤上，便可進行回填工作，回填原料以河砂，慢慢

回填以防崩孔造成量測管損害，所有作業完成後便可進行孔口保護台及洗孔作業，並待測孔穩定後可做初值設定。

5. 安裝示意圖如圖 5.4、圖 5.5 所示。

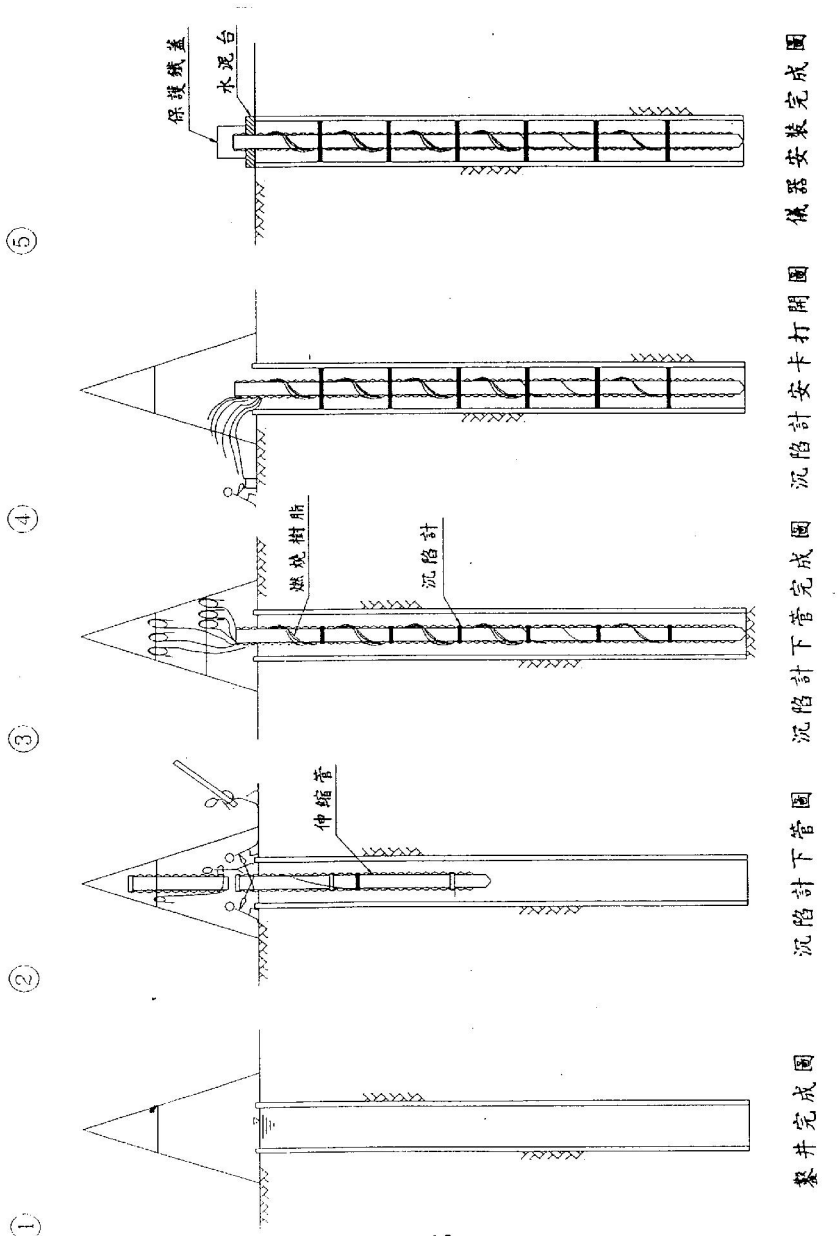


圖 5.4 沉陷計安裝示意圖

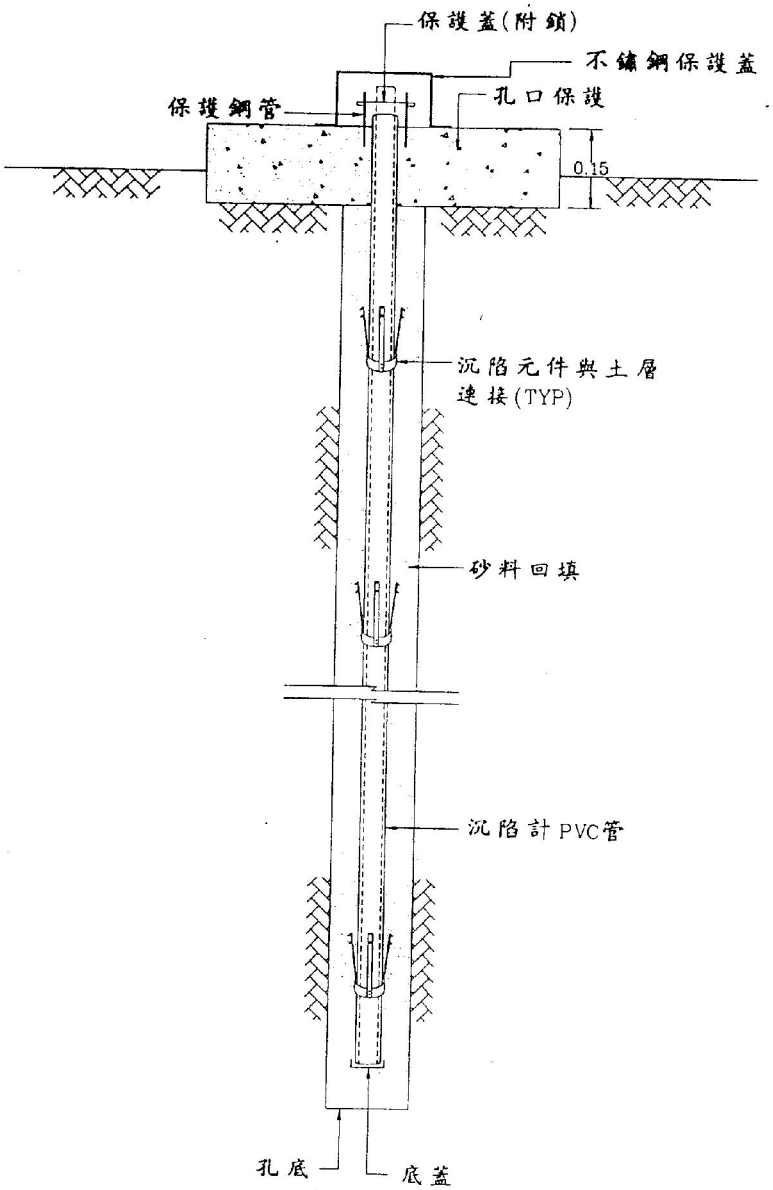


圖 5.5 磁感式層別沉陷計安裝示意圖

5.3 布袋港監測站

5.3.1 布袋港地下水位分析

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[24]，另選擇於布袋商港近南堤之砂石碼頭區，亦設置一組 300m 深之下陷與水壓監測井，其位置如圖 5.6 所示。

1. 200m

200 公尺監測井共埋設 7 支水壓計，其深度分別為 34 m、44 m、68 m、105 m、131 m、143 m、178 m，自 86 年 7 月 22 日起至 103 年 11 月為自動量測系統資料，量測期間曾因儀器故障而資料中斷，茲將分層地下水壓（t/m^2）正規化為分層地下水位（m），以利比較，如圖 5.7 所示，發生於民國 99 年 3 月 4 日 8 時 18 分的甲仙強烈地震，布袋港 200m 水壓自動監測站於 3 月 4 日中午 12 時亦成功的記錄到超額之孔隙水壓資料。由於其中 34 m、105 m、143 m、178 m 之水壓計為開放式，故採手動量測，手動量測自 86 年 4 月至 102 年 7 月止，每月定期量測一次，自 94 年 1 月起因人力有限，故每 2 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 5.8 所示。

由圖 5.8 顯示，105 m 處之水位變化極大，最高水位-16.6 m，最低水位-27.6m，91 年及 93 年降雨量較少時，水位明顯降低。131 m 處之水位變化亦很大，最高水位-17 m，最低水位可能為-24 m，其水壓大小及變化與 105 m 處屬同一含水層，143 m 及 178 m 水位大小及變化亦很相當，亦屬同一含水層，其最高水位為-17.8 m，最低水位為-26 m，其變化與 105m、131 m 處相似。

綜合各地層之地下水位資料，如圖 5.7 及圖 5.8 示，布袋港水層約可分為 4 個層次，34 m 水位為第 1 含水層之水位，44 m、68 m 水位為第 2 含水位，105 m 及 131 m 水位為第 3 含水位，143 m、178 m 水位為第 4 含水位。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 5.9 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。

5.3.2 布袋港分層地層下陷分析

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，資料值由鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 5.10 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 103 年 10 月之 17 年 8 個月期間，布袋港地表下 8 m 至 200 m 間之沉陷總量為 63 公分，而其中 140～200 m 之沉陷量 31.5 公分，佔總沉陷量之 51%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 5.11 為至民國 103 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 5.12a 分層觀測圖顯示，自 89 年 10 月～103 年 10 月止，14 年之累積總沉陷量約 75.8 公分，分別為 90 年沉陷約 7.4 公分、91 年沉陷 7.1 公分、92 年沉陷量 11.6 公分、93 年沉陷量 13.6 公分，近 5 年(98 至 103)總沉陷量約 19 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，導致 92 年及 93 年沉陷增大許多。各分層沉陷量大約可區分為 7~66m、66～102m、102～190m、190～300m 等 4 個層次來分析，66～102m 之累積沉陷量 25.5 公分，約佔總沉陷量之 35%。其中以 102～190m 之沉陷量為 31.7 公分所佔比例最大，約佔總沉陷量之 45%，190～300m 之沉陷量較少為 1.2 公分，約佔總沉陷量之 2%，綜合以上得知，66～190m 深度之累積沉陷量為 58 公分約佔總沉陷量之 80%，與 200m 監測井監測結果比較，總沉陷量較大一些，而且主要沉陷之深度不同，因此需要進行長期之監測以探討原因。

3. 400m

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 103 年 11 月為止共 11 年之總累積下陷量約為 32.1 公分，如圖 5.12b 及 5.12c 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 103 年 11 月之累積下陷量約 15.1 公分，97 年 5 月至 98 年 7 月因儀器故障缺少資料。

圖 5.6 布袋港地層下陷監測井位置圖

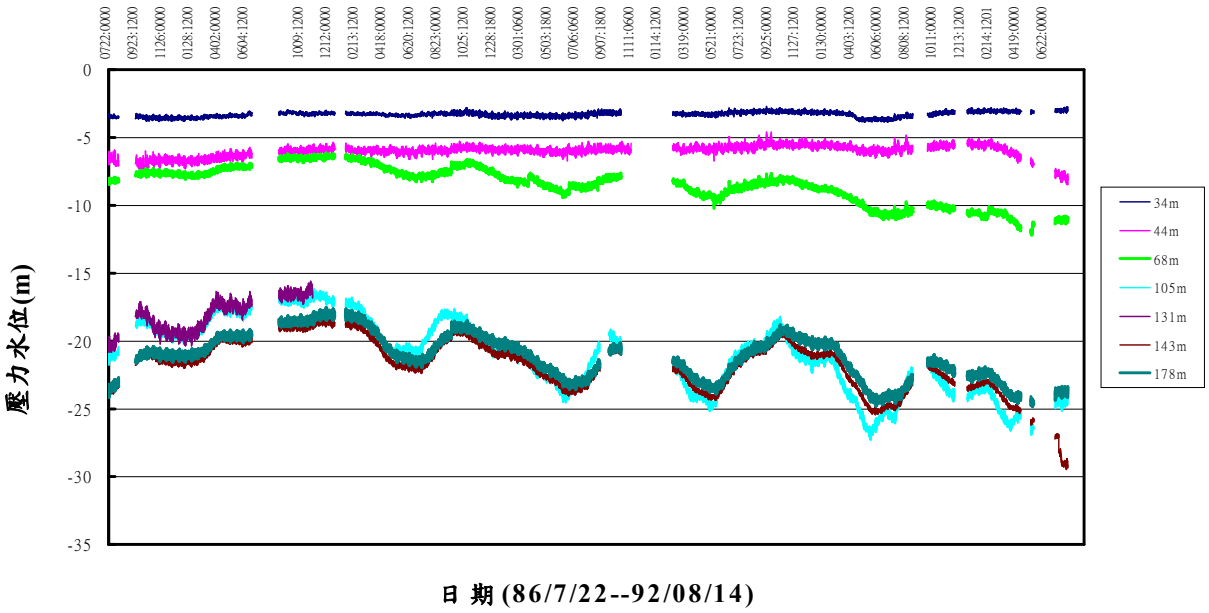


圖 5.7a 布袋港分層水位變化圖(自記式)

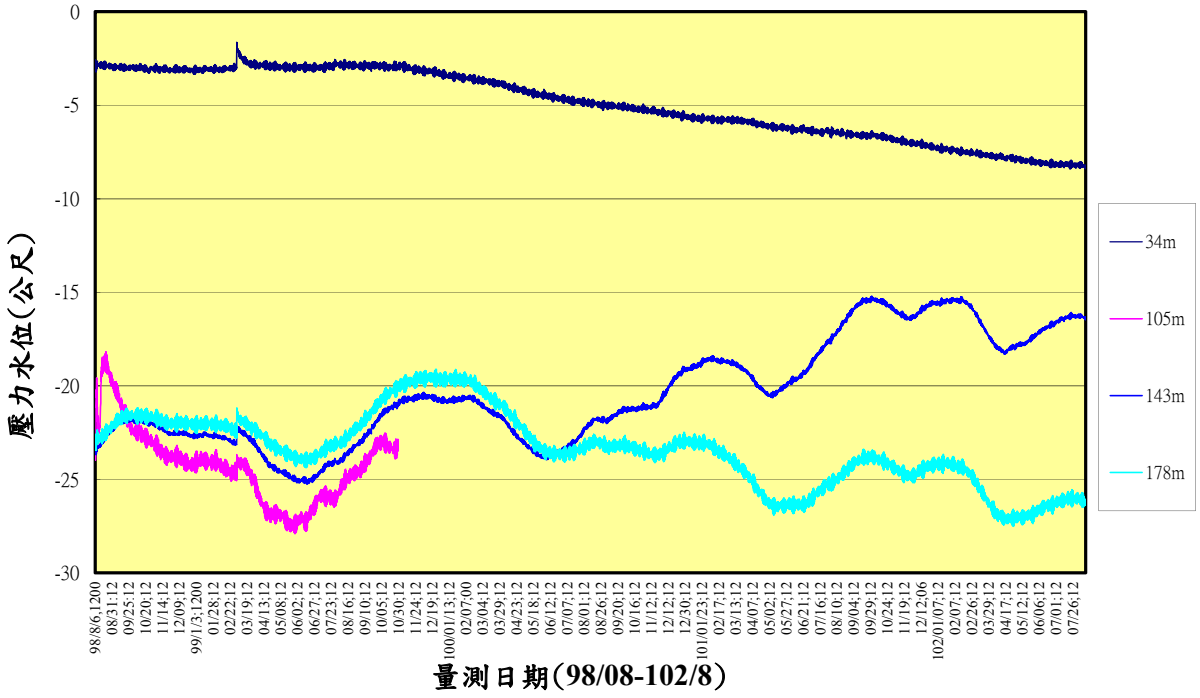
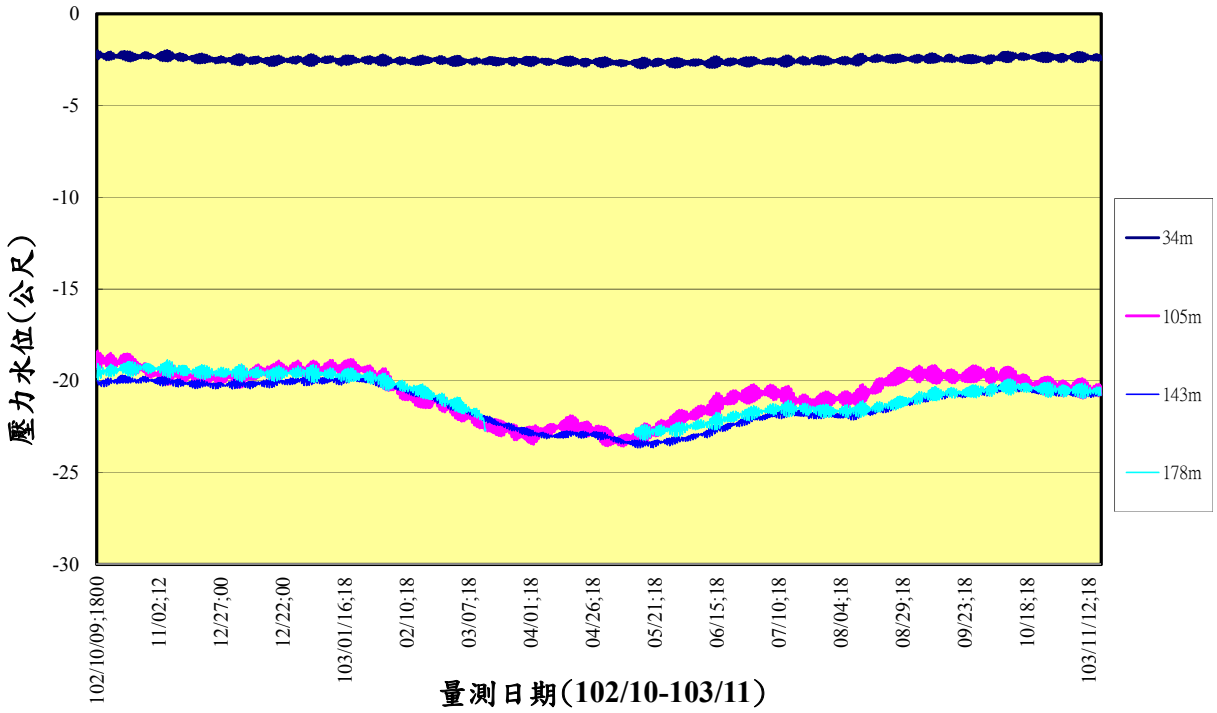


圖 5.7b 布袋港分層水位變化圖(自記式)



5.7c 布袋港分層水位變化圖(自記式)

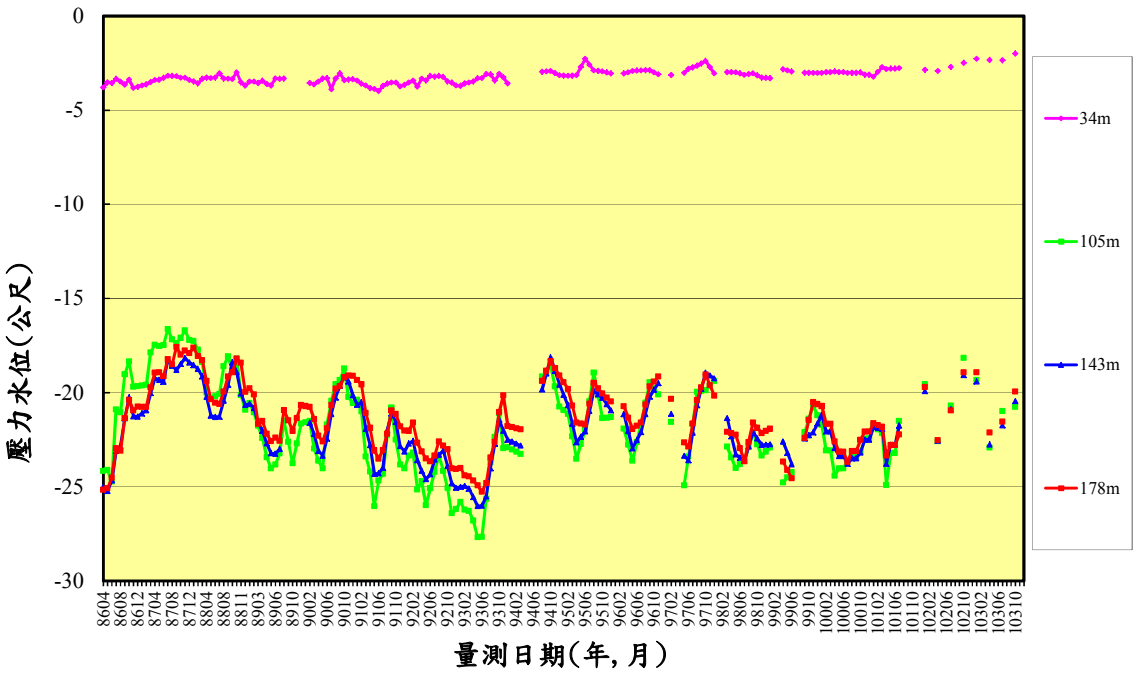


圖 5.8 布袋港(200m)分層水位變化圖(手動量測)

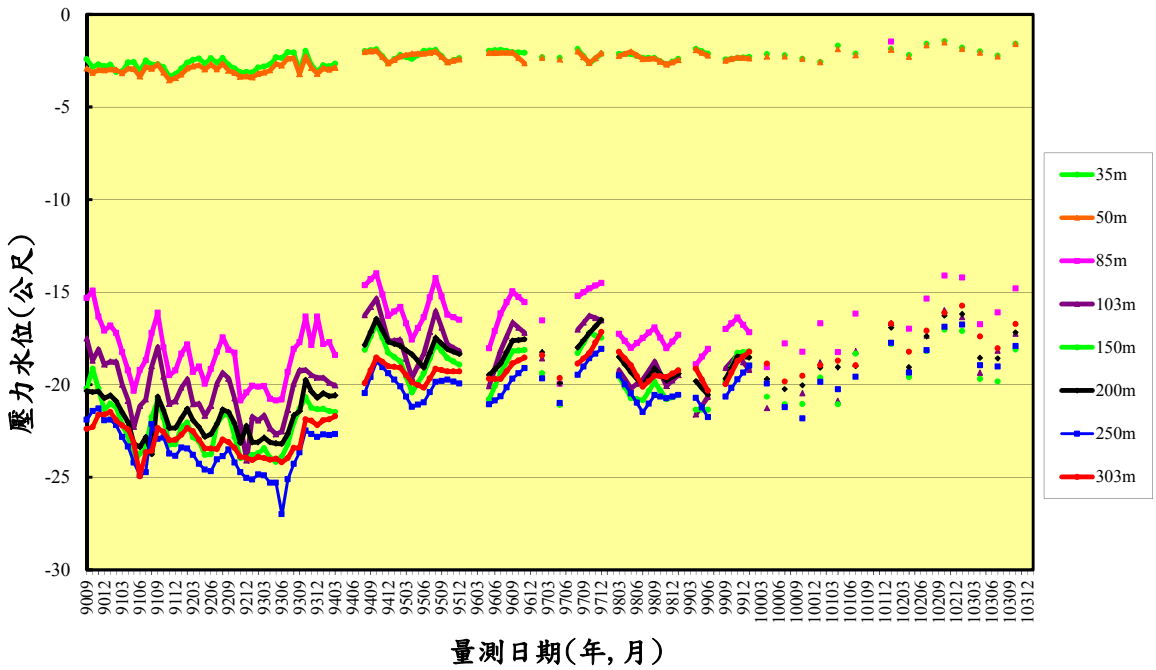


圖 5.9 布袋港(300m)分層水位變化圖(手動量測)

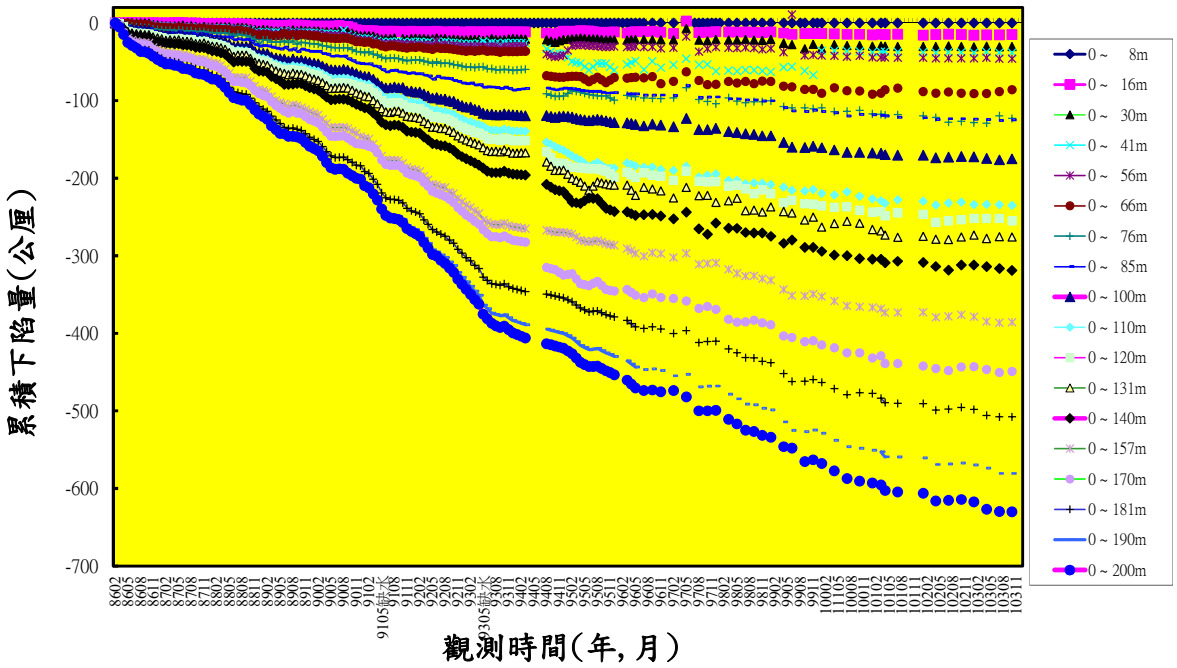


圖 5.10 布袋港(200m)分層累積下陷圖(手動量測)

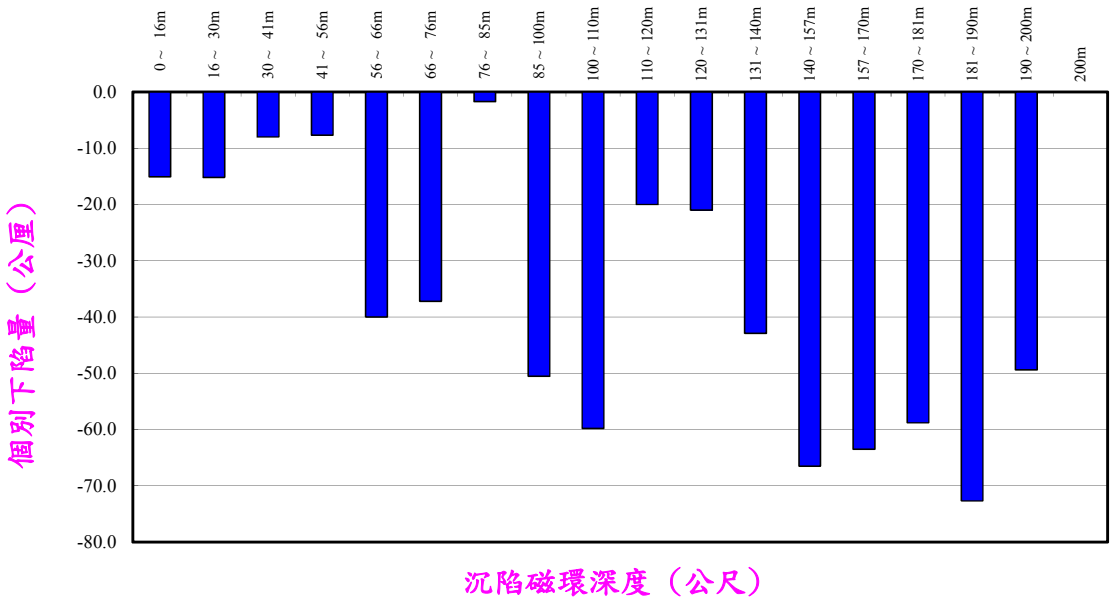


圖 5.11 布袋港(300m)分層個別下陷量圖

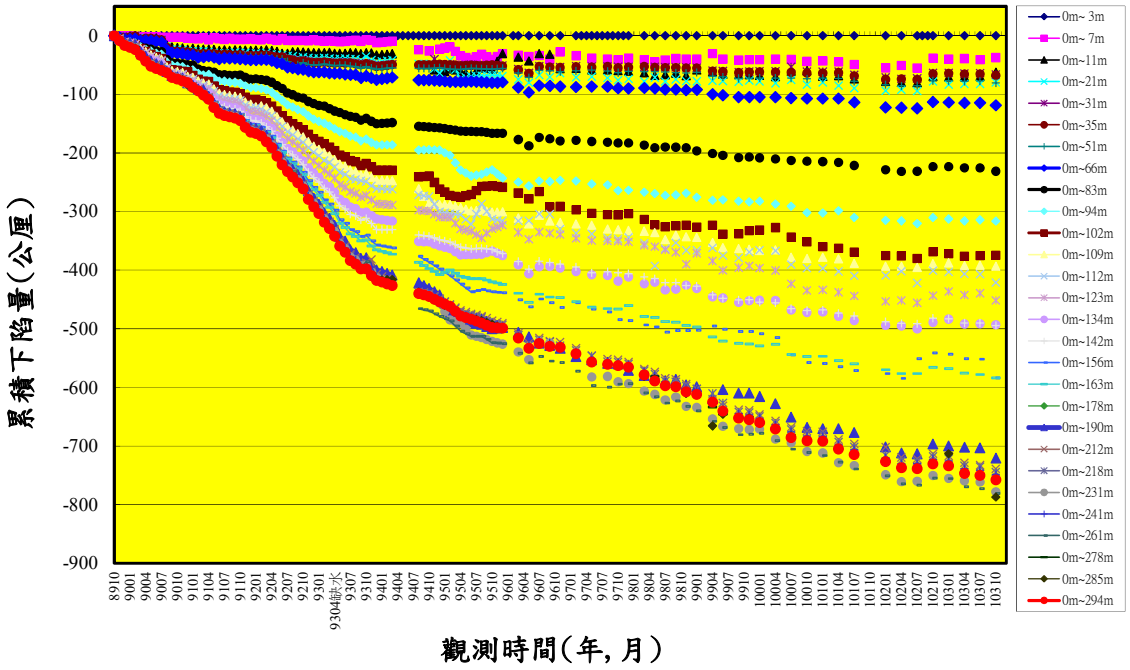


圖 5.12a 布袋港(300m)分層累積下陷量圖

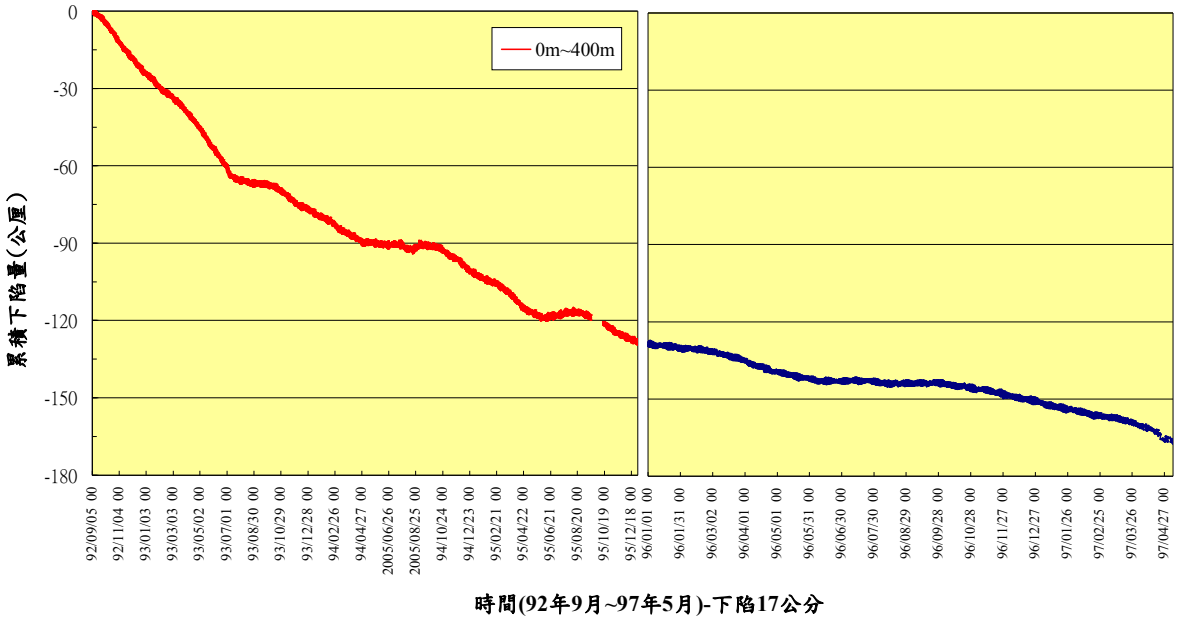


圖 5.12b 布袋港(400m)水準基站累積下陷量圖(92/09/04~97/05/30)

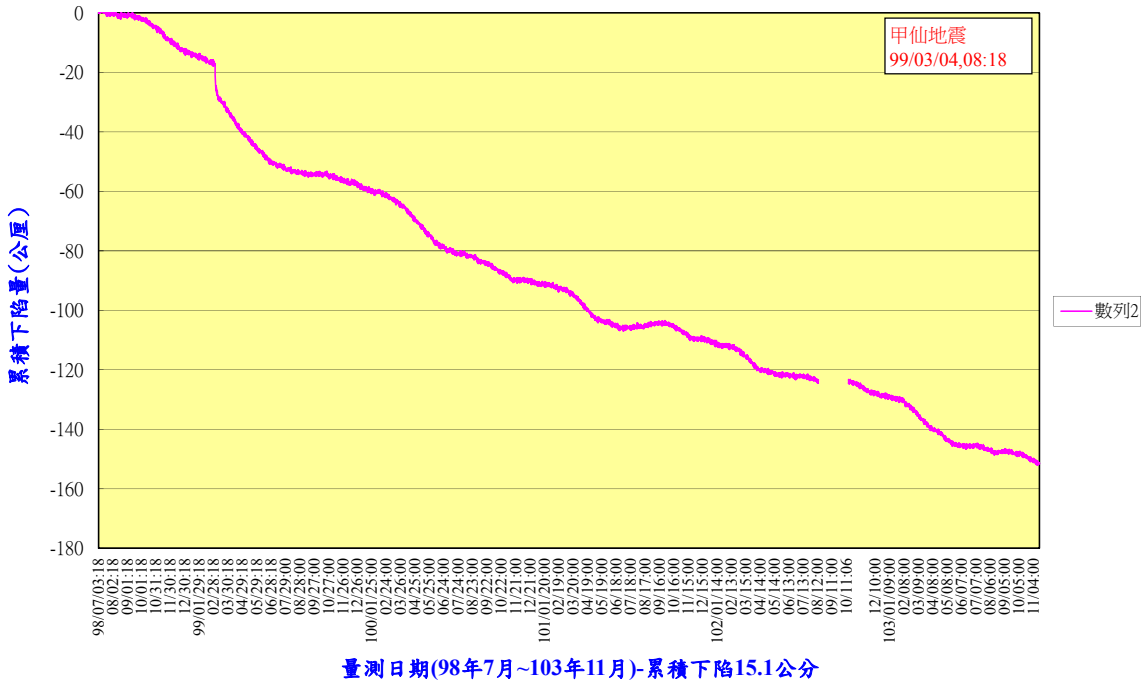


圖 5.12c 布袋港(400m)水準基站累積下陷量圖(98/07/03~103/11/17)

5.3.3 布袋港區平面水準測量

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

1. 水準測量檢測範圍

水準測量檢測範圍，本年度檢測布袋港地層下陷平面水準測量區域如圖 5.13 所示，首先檢測布袋港區內深層水準樁「井 BM3」，校對高程無誤後，作為監測點水準測量之依據，並引測至布袋鎮及布袋港區內。

2. 水準測量網形規劃

水準網形規劃主要任務是擬定水準網的施測方案，包括測量路線的進行方式與水準測網的構成。水準路線的行進方式及水準網形

的設計，是為能考慮提高觀測值的精度與可靠度，藉由施測前的規劃與網形設計，可探討出觀測值對於沉陷資訊的檢測能力。水準網形說明如下：

本次布袋港地層下陷平面水準測量，進行布袋鎮及布袋港區監測點水準測量，佈置四個環線閉合網，各測線及環線佈置如圖 5.14。

3. 水準測量作業方法與規範

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

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

(2)控制系統檢測，各測段的往測與返測的差值，其允許誤差為 3mm $\sqrt{k}$（k 為公里數）。

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

(4)兩水準點高程觀測應由同一台儀器自一水準點出發，閉合於另一水準點，不可用不同水準儀施測於臨時節點的高程值相加組合。

(5)水準測量使用的儀器是 Zeiss Dini-12 一等精密電子自動水準儀，配合精密銦鋼尺作業，精密銦鋼尺皆附有圓形水準器及扶尺，減少標尺的晃動。

(6)觀測時標尺與儀器距離約五十公尺，前後視距約相等，以減除視準軸誤差及折光誤差。作業時觀測手配備雷射槍，達到快速量距及精準調整前後視距相等；最大前後視距差：每一測站前後視距差為 0.5 公尺至 1 公尺。

(7)各測段以直接水準測量進行往返觀測，各節點為同一標尺放置(即

測站的次數為偶數)。

(8)往返兩次觀測整置儀器及標尺位置不得為同一地點。亦不可用反號之結果作為返測或往測。

(9)高程所有計算及提送成果均至公尺後小數點第五位。

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

4. 水準環線分析

嘉義縣布袋鎮及布袋港區監測點水準網各閉合環線及觀測高差明細列印於附錄三，環線內各測線觀測高程差明細列印於附錄四。閉合環線的觀測精度分析如表 5-1，每個閉合環線的閉合差觀測精度皆在允許誤差內。

5. 平面水準測量結果

布袋港區於 101 年 7 月中旬進行港區平面水準測量，經檢測量結果，自 93 年至 101 年止布袋港區之累積下陷量如圖 5.15 所示，累積最大下陷樁位是#BM2(300m 沉陷井)，下陷量為 34.23 公分。#BM1(200m 沉陷井)下陷量為 26.28 公分。最小下陷樁位為 IHMT01 的 4.95 公分。101 年度檢測，年平均最大下陷速率是#BM2 樁位的 4.2 公分，最小下陷樁位為 IHMT01，年平均下陷速率為 0.6 公分。

布袋港區 102 年 6 月中旬進行水準測量結果，自 93 年至 102 年止港區之累積下陷量如圖 5.16 所示，累積最大下陷樁是#BM2(300m 沉陷井)，下陷量 36.23 公分。#BM1(200m 沉陷井)下陷量 27.57 公分。最小下陷樁位為 IHMT01 的 4.8 公分，年平均最大下陷速率是#BM2 樁位的 4 公分。101 年至 102 年累積下陷量，如圖 5.17。

布袋港區 103 年 6 月中旬進行平面水準測量，經檢測結果，自 93 年至 103 年止布袋港區之累積下陷量如圖 5.18 所示，累積最大下陷樁是#BM2(300m 沉陷井)，下陷量 38.17 公分。#BM1(200m 沉陷井)下陷量為 29.34 公分，102 年至 103 年累積下陷量，如圖 5.19。

檢核 400m 水準基站之下陷量，係參考歷年水利署地層下陷及本所布袋港地層下陷平面水準測量報告文獻，即以嘉義縣水上鄉台 1 線之水準樁(BM9803)為起始點，引測至#BM3 (400m 沉陷井)為終點，兩點間之距離為 41.8 公里，自 92 年度測量高程差值為-20.75756 公尺至 102 年度測量高程差值為-20.79151 公尺，故其高程差變化量年平均值為 3.395mm，皆在允許誤差 19.39mm 之範圍內(允許誤差 3mm$\sqrt{k}$，k 為公里數)，詳如表 5-2 所示，由此可證明水準樁「#BM3」也相對穩定。

表 5-1 環線閉合差分析表

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

表 5-2 BM9803~#BM3 高程變化量

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

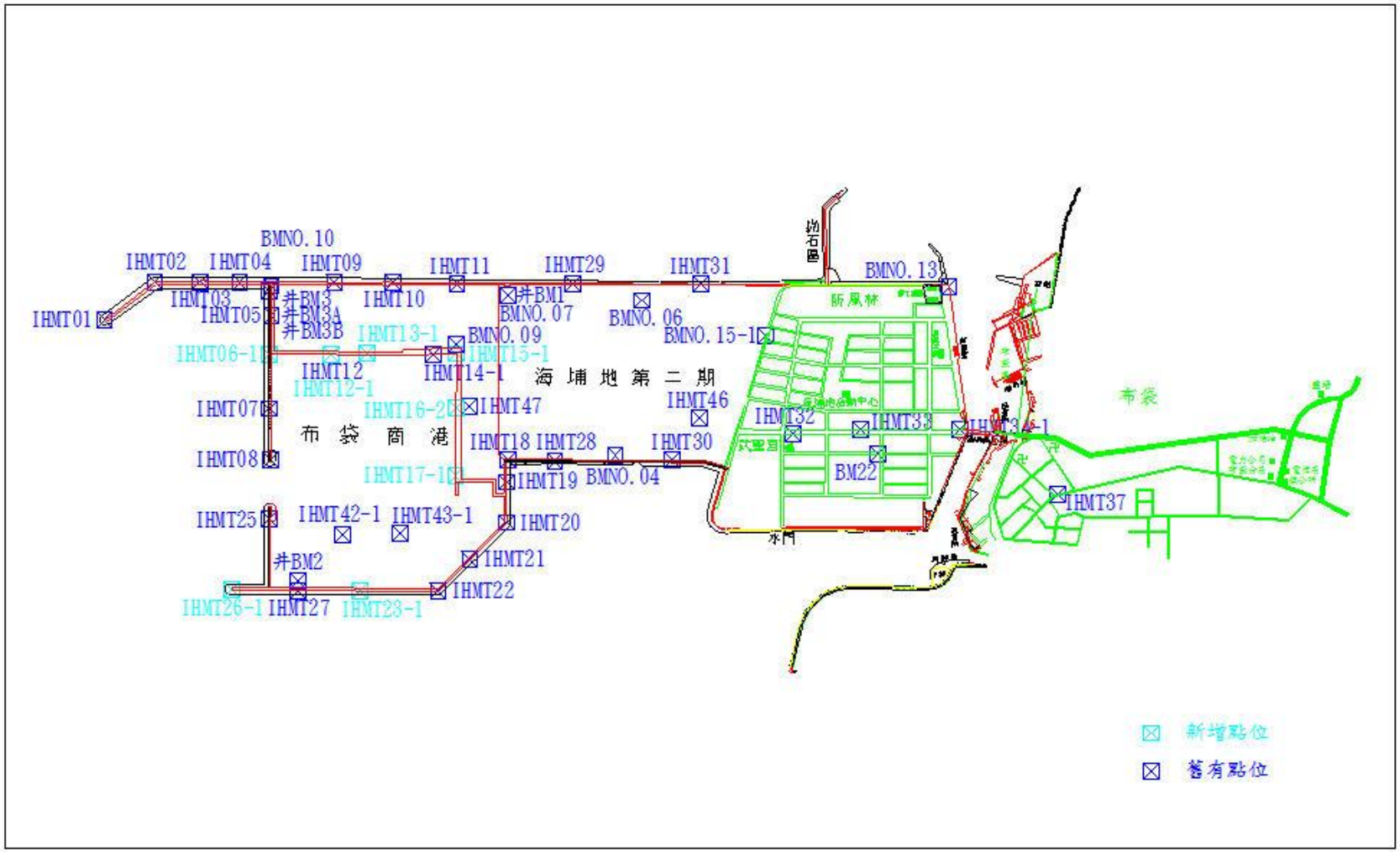


圖 5.13　101 年嘉義縣布袋鎮及布袋港區監測點水準測量工作範圍圖

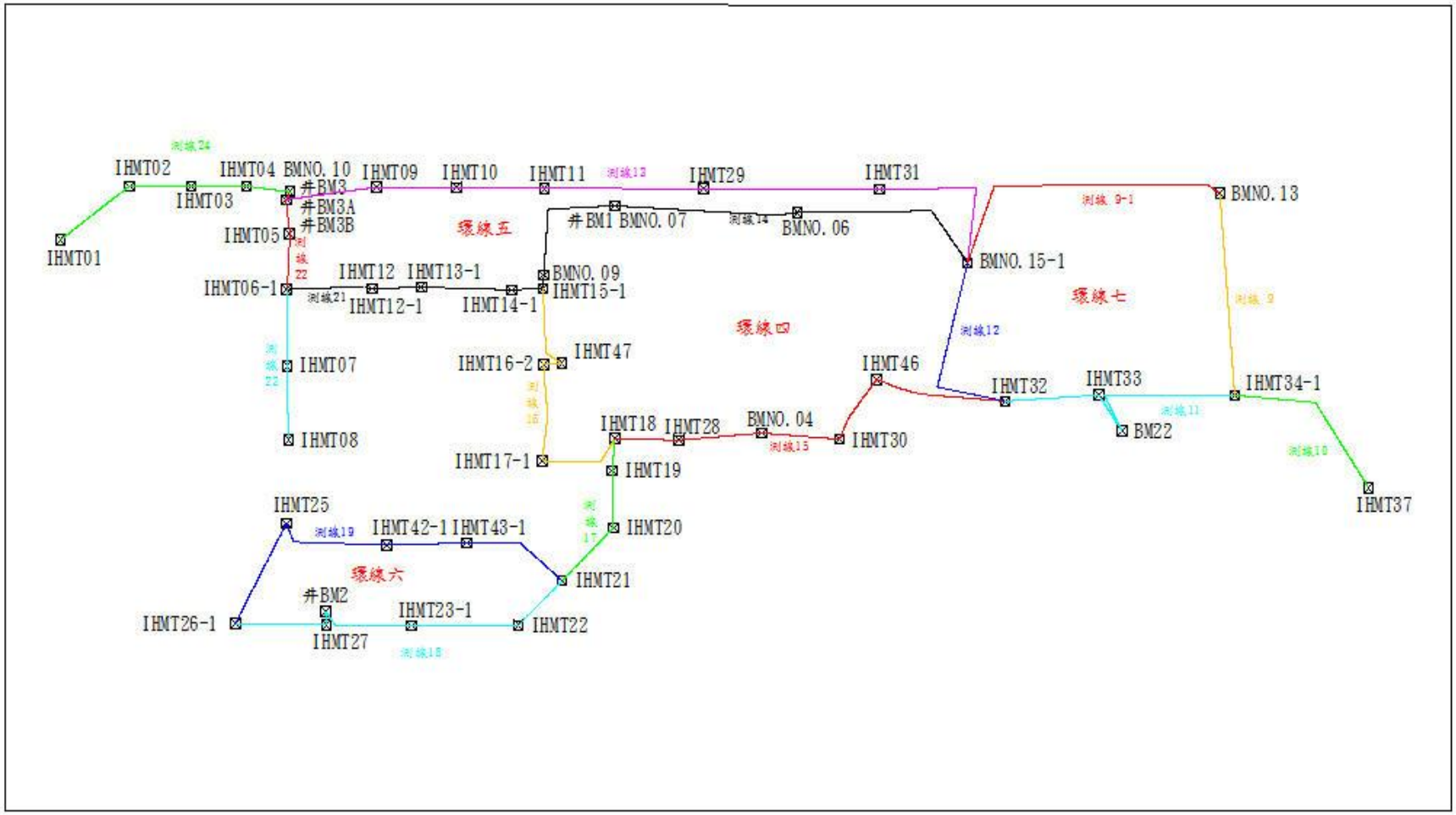


圖 5.14　101 年嘉義縣布袋鎮及布袋港區監測點水準測量水準測線、環線佈置圖

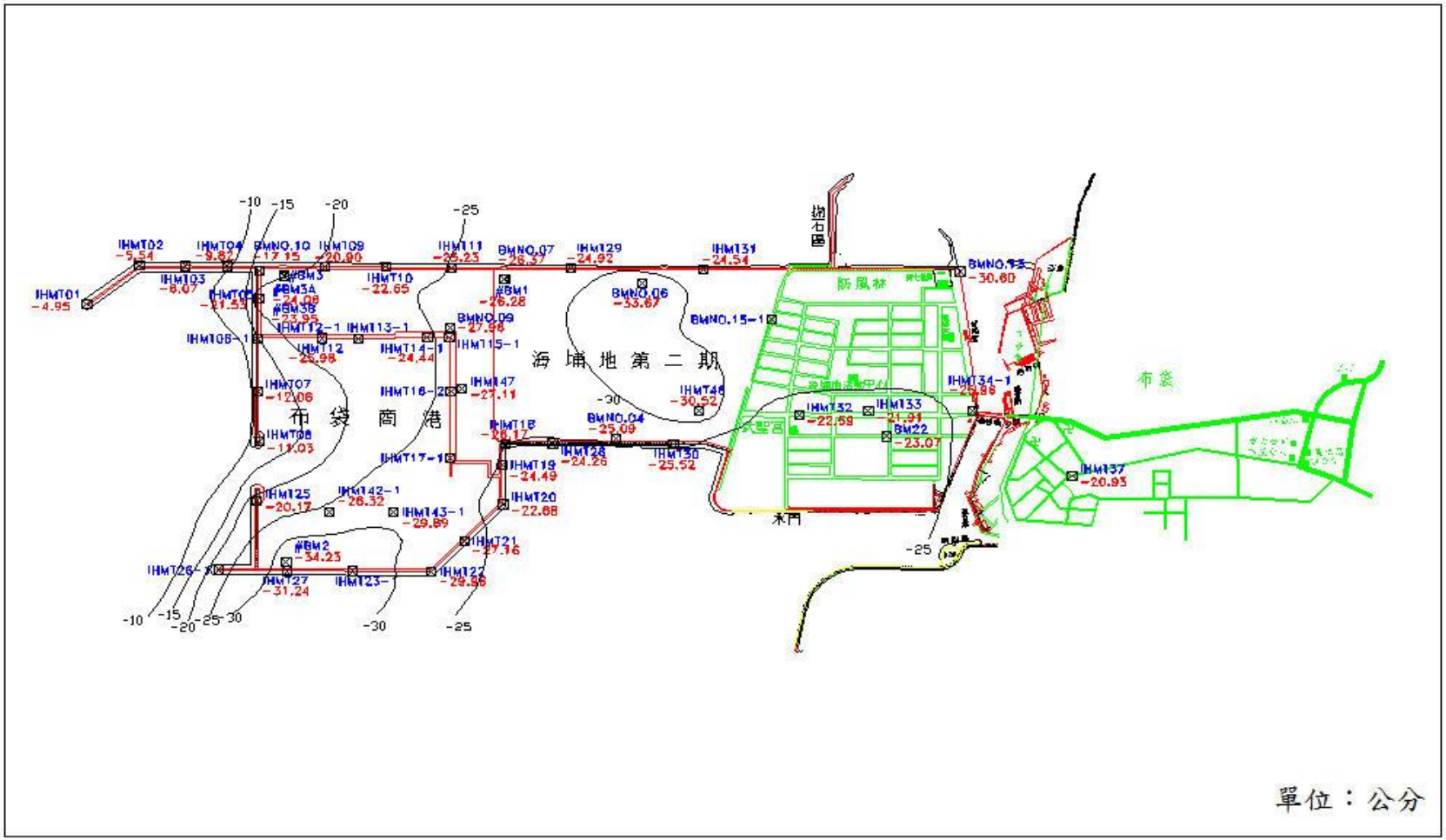


圖 5.15 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(93~101 年)

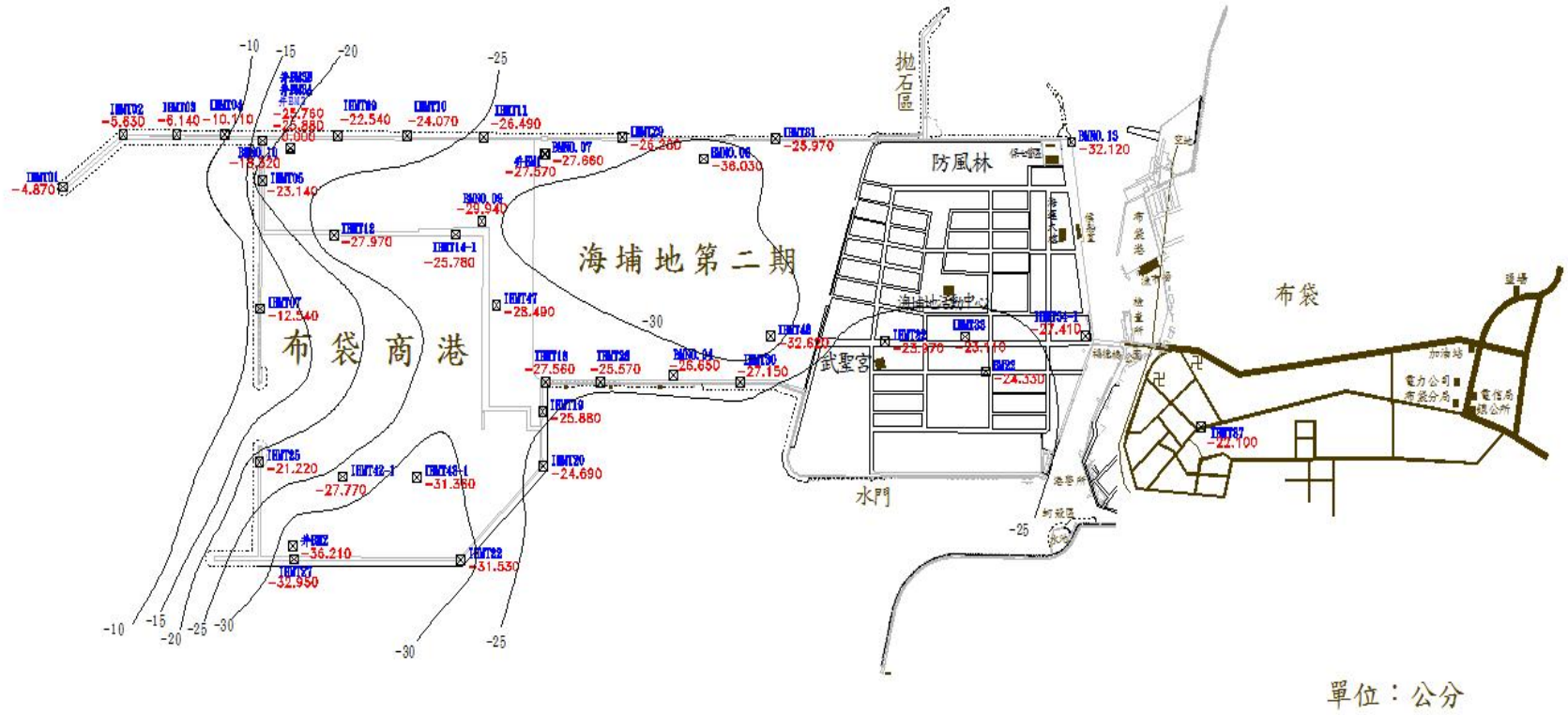


圖 5.16 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(93~102 年)

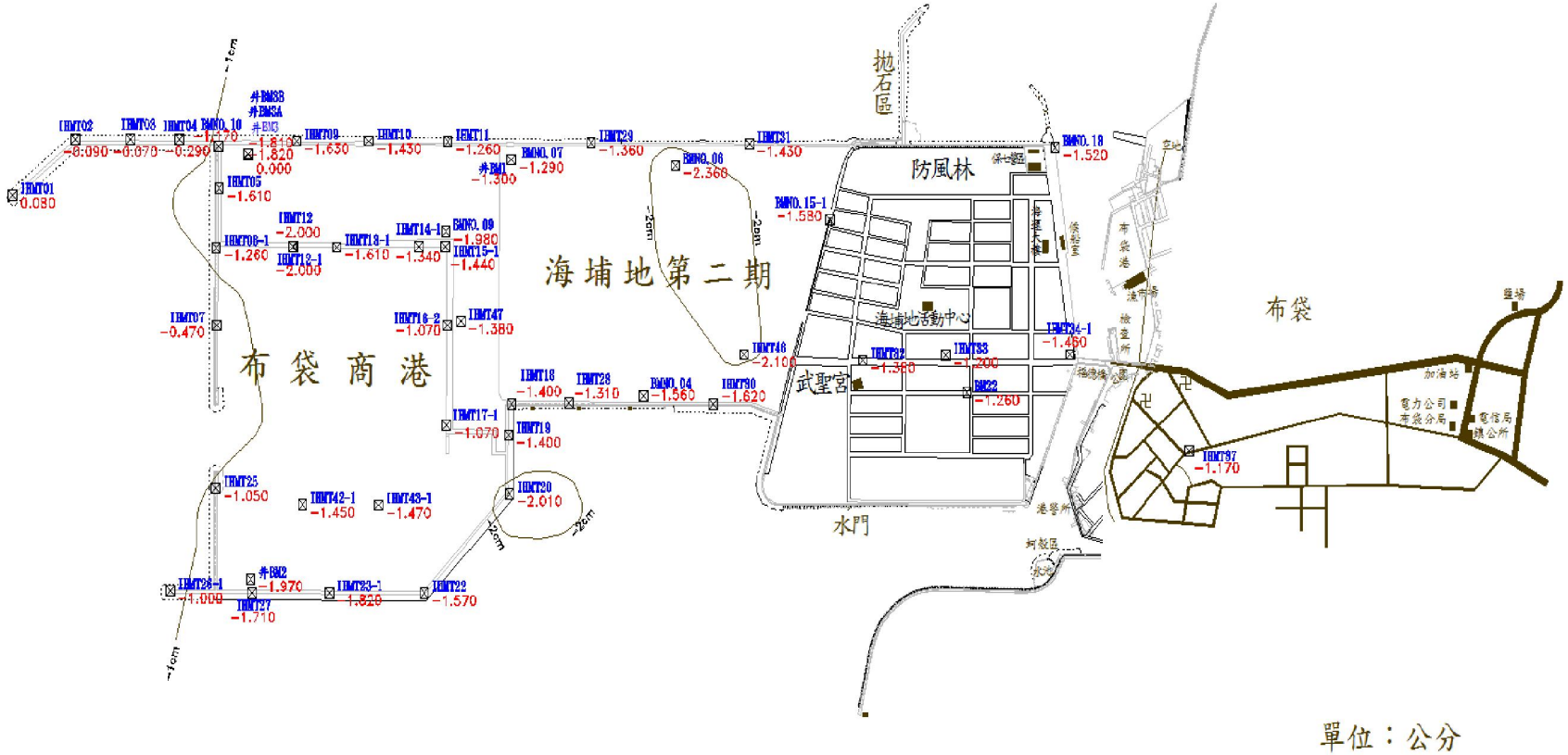


圖 5.17 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(101~102 年)

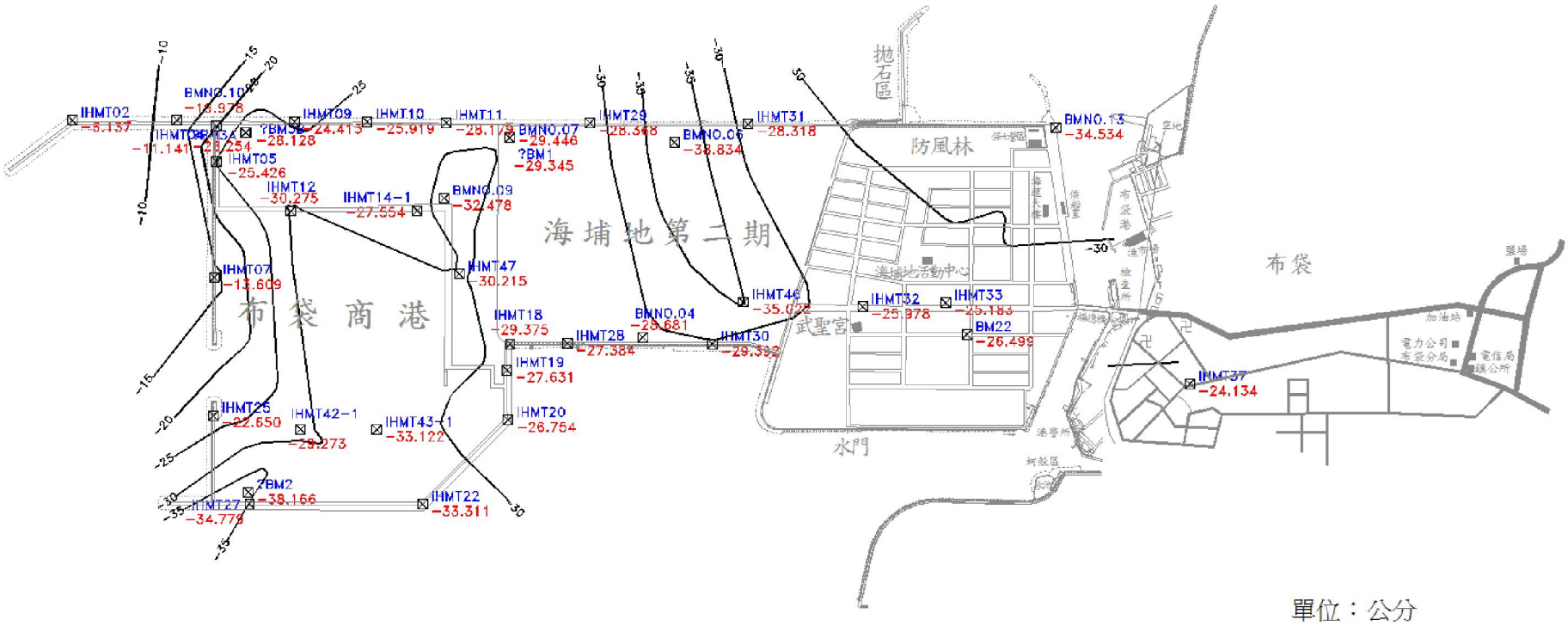


圖 5.18 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(93~103 年)

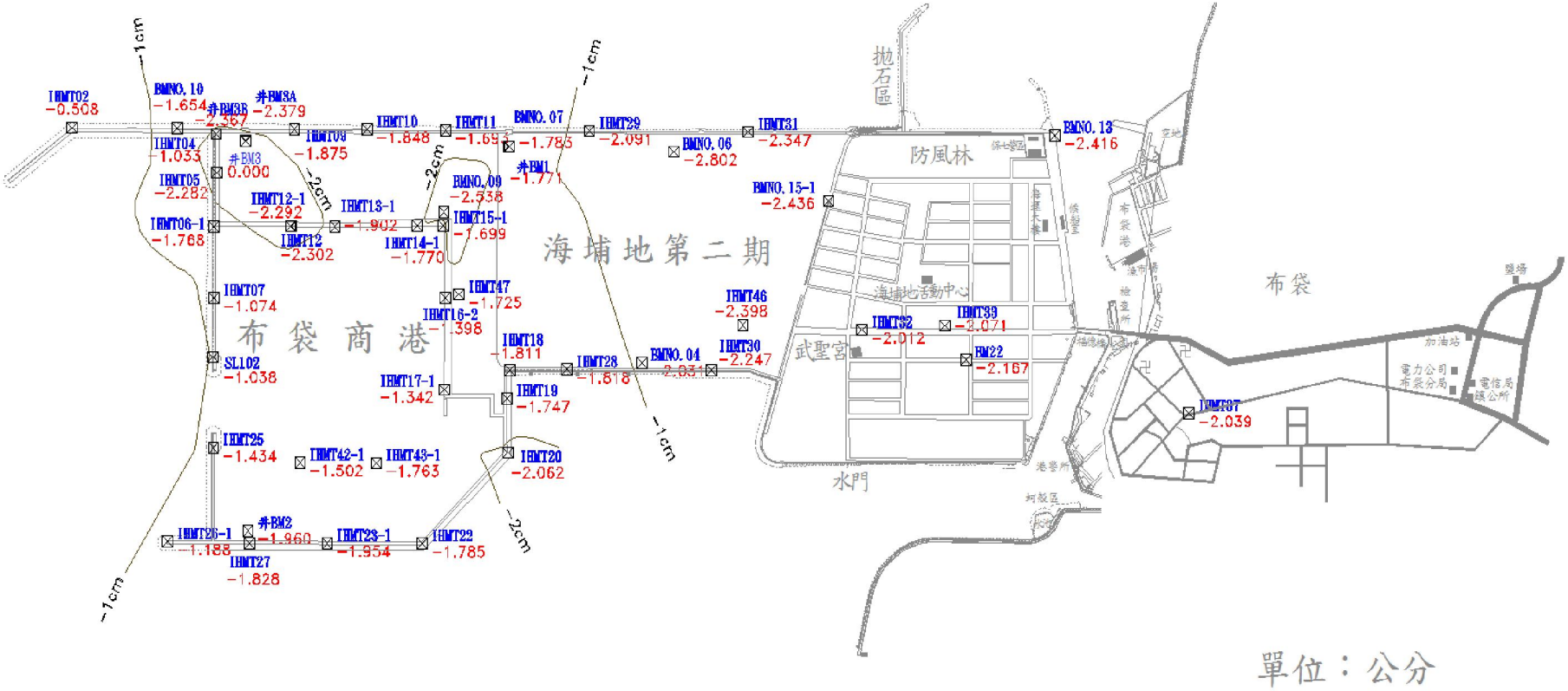


圖 5.19 嘉義縣布袋鎮及布袋港區下陷圖(102~103 年)

5.4 大鵬灣監測站

5.4.1 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 103 年 10 月止。其中 87 年 9 月 14 日至 10 月 30 日、88 年 7 月 13 日至 9 月 14 日及 89 年 10 月 17 日至 12 月 30 日止，因自動量測儀故障，而缺乏資料。由於水位井為開放式，亦可以手動量測水位，手動量測自 87 年 3 月開始，每月量測一次，99 年 1 月開始，每 3 個月量測一次，其結果如圖 5.20 所示：

5.4.2 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，資料值由鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 5.21 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 5.21 顯示，從 87 年 3 月至 103 年 10 月止，共 16 年 6 個月期間，大鵬灣地表下 4 m 至 189 m 間之沉陷總量為 13 公分，而其中地表～51.3 m 之沉陷量為 10 公分，佔總沉陷量之 80%以上，由此資料顯示，大鵬灣之沉陷屬於淺層沉陷。

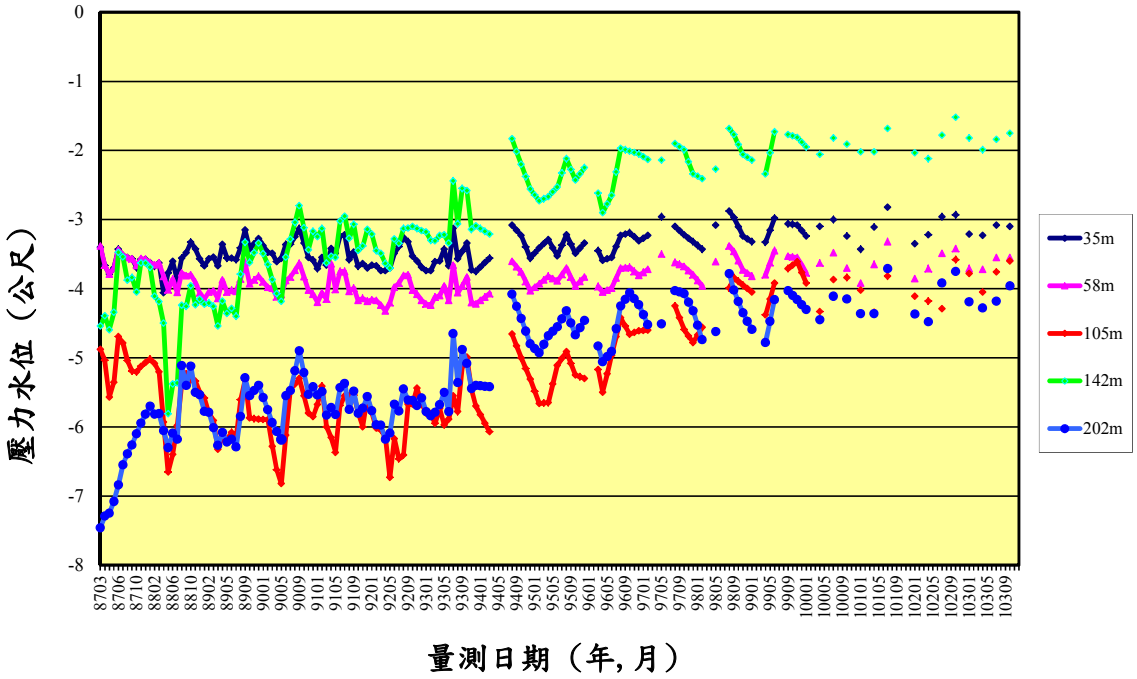


圖 5.20 大鵬灣分層水位變化圖(手動量測)

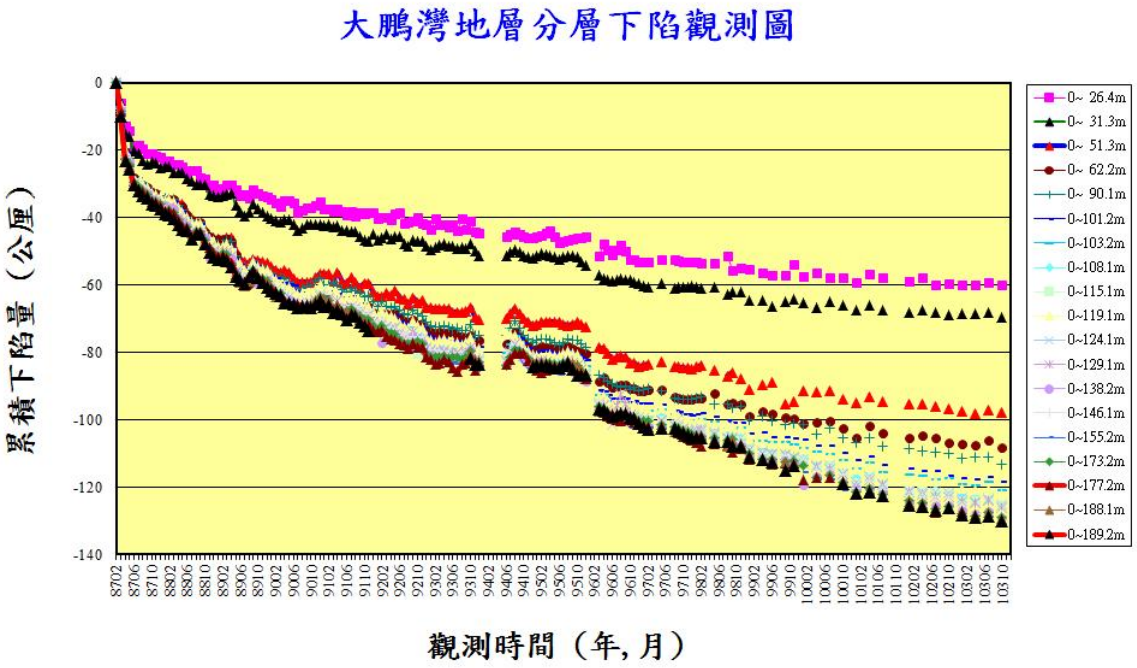


圖 5.21 大鵬灣地層分層下陷觀測圖

5.5 臺中港監測站

5.5.1 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 103 年 10 月止，其結果如圖 5.22 所示。

因臺中港受到 921 大地震影響，導致部份碼頭有液化現象，本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。

5.5.2 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 103 年 10 月止約為 57 公厘，其中自 0m~90 m 深之沉陷量約 46 公厘，佔總沉陷量 80% 以上，其間以 88 年 9 月至 10 月，因地震產生之總沉陷量 32 公厘最多，而 88 年 10 月至 98 年 11 月止，總沉陷量為 18 公厘，如圖 5.23 所示。

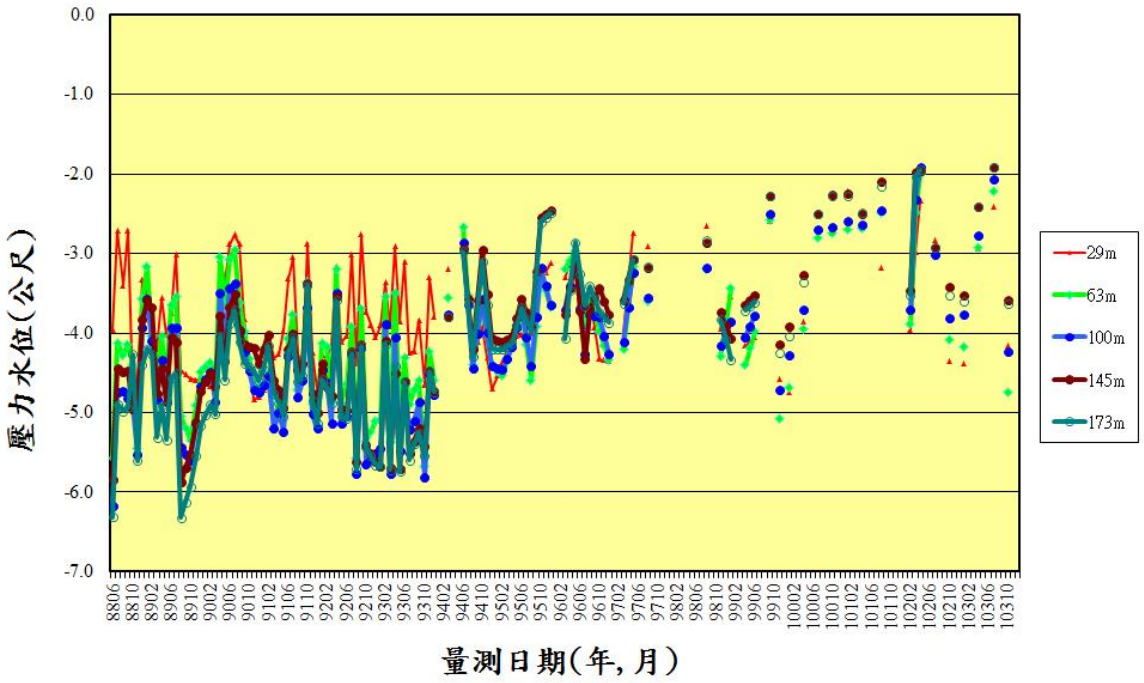


圖 5.22 臺中港分層水位變化圖(手動量測)

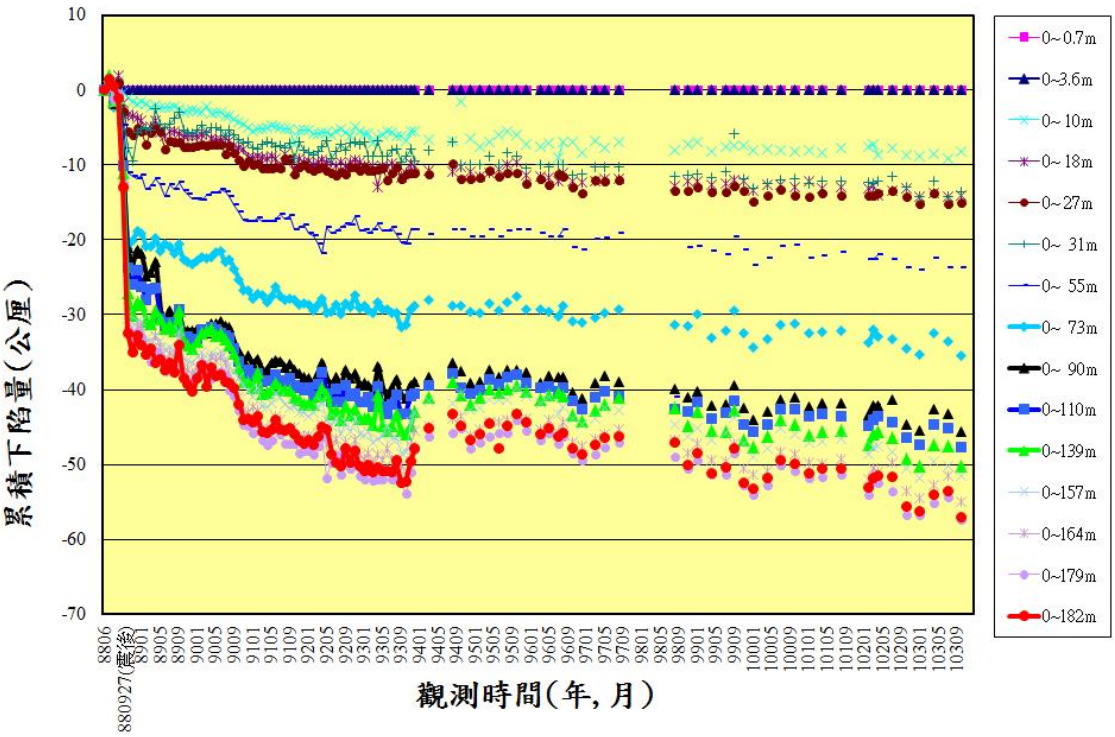


圖 5.23 臺中港分層累積下陷量圖(200m)

5.6 安平港監測站

5.6.1 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 5.24 所示。

由圖 5.24 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 103 年) 應沒有受到超抽地下水影響，故地下水位呈現上升現象。

5.6.2 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，鋼尺讀數之最小刻度為公厘。

圖 5.25 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖顯示，從 88 年 7 月至 94 年 3 月之 5 年 8 個月期間，安平 18-19 號碼頭區地表下 0 m～200 m 間之沉陷總量為 73 公厘，而其中 0～56 m 之沉陷量為 67 公厘，佔總沉陷量之 88%以上，由資料顯示，安平港 18-19 號碼頭區之沉陷屬於淺層沉陷，自 94 年 3 月起因儀器故障故量測資料中斷。

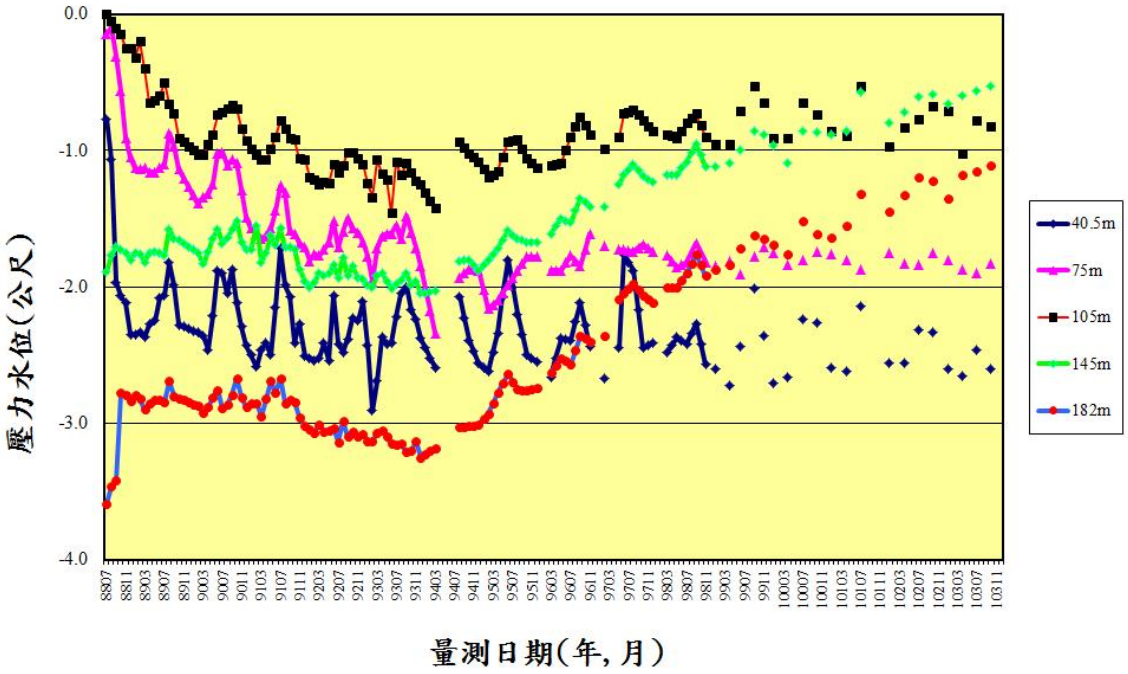


圖 5.24 安平港分層水位變化圖(手動量測)

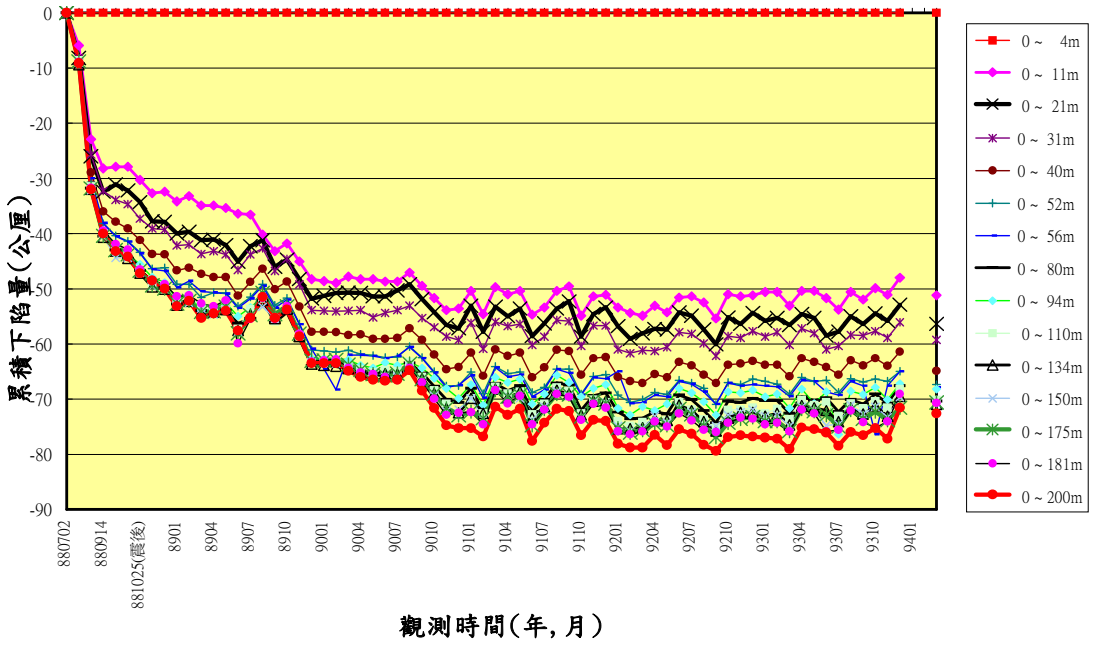


圖 5.25 安平港分層累積下陷量圖

第六章 結論與建議

近年來世界各國地震頻傳，也造成許多傷亡與財產損失，各國為減少地震引致之災害與損失，無不投入相當的經費與人力於地震之相關研究。由過去歷史紀錄，我國港埠的地震災害包括民國 75 年的花蓮地震，造成蘇澳港＃3~＃5 碼頭發生滑動傾斜的情形，以及民國 88 年發生的 921 集集地震，造成臺中港＃1~＃4 沉箱式碼頭發生位移受損，由於當初蘇澳港及臺中港並無設置相關之地震及動態水壓監測站，故無法提供相關單位即時防救災決策之相關參考資訊。有鑑於此，本所於民國 89 年開始，陸續於安平港、布袋港、臺中港、臺北港、高雄港及蘇澳港等港區逐年分別設置了地震及動態水壓監測站與地層分層下陷監測站。期望藉由長期監測及分析的成果，能提供各港務分公司未來地震防救災決策之依據。

6.1 結論

1. 彙整安平港與臺中港地震站自 2006 年至 2013 年止，選擇經中央氣象局定位且震央距測站超過 10 公里之地表水平向地震紀錄，依建築物耐震設計規範將地震強度調整到 475 年設計地震大小；同時安平港地震資料也依交通部港灣設計準則之規定將地震強度調整到地震甲區之 0.33g 加速度係數，分別進行反應譜分析、彙整、平均化後得到水平譜加速度曲線，經比較後曲線皆介於耐震設計規範之 475 年設計地震水平譜加速度曲線範圍內。

2. 安平港區之地震力經實測資料與經驗式方法推估後，港區沖積土層之最大地表加速度呈有放大效應，經蒐集數筆測站震度 4 級以上之資料估算後，其放大倍數約為 1.4~2.7 倍之間。

3. 安平港區附近活動斷層對港區之影響，斷層長度與地震規模的關係，依不同學者之經驗式分別初步估算後，經比較結果以 Wells and

Coppersmith 的經驗式推估新化斷層之地震規模較接近 1946 年所發生之芮氏規模 6.3 地震。臺中港區屯子腳活動斷層對港區之影響，如斷層長度為 50 公里，經估算後地震規模達 M_L7.1，如用於液化分析時可換算成地震矩規模 M_W 約為 7.6。

4. 以高雄港井下陣列觀測之小振幅地震資料為研究對象，使用非線性分析程式 Cyclic1D 與擬線性分析程式 Shake91 模擬地震加速度歷時曲線，比較不同分析方法的模擬結果。現地與 Shake91 和 Cyclic1D 的加速度歷時曲線，Shake91 和現地皆在 21 秒左右出現在最大加速度值，並隨時間的增加逐漸變小，Shake91 在 27 到 30 秒的值較大，而 Cyclic1D 則是較現地略小，兩種方法模擬結果均產生土層放大效應，在淺層土壤(30.8 公尺)放大係數開始明顯增加，在放大係數方面 Shake91 模擬結果較 Cyclic1D 更接近現地結果。

5. 安平港井下地震監測站於 2006 年 12 月 26 日之恆春地震、2010 年 3 月 4 日之甲仙地震與 2012 年 2 月 26 日芮氏規模 6.1 之地震，皆分別監測到動態孔隙水壓資料，其超額動態孔隙水壓經過分離結果，其超額孔隙水壓為 0.08Hz 以下之低頻反應，震盪動態水壓為 0.08Hz 以上之高頻，顯示該港區之土層特性。

6. 在港灣地層下陷監測研究中，布袋港因水位監測站之-105 m、-143 m 及-178 m 深度地下水位已降到地表下約 20 餘公尺，故布袋港附近地區有超抽深層之地下水，致使港區之深層水位下降而引起地層下陷的情形。200m 地層下陷站經量測結果，自 86 年 2 月至 103 年 10 月止，總累積沉陷量約為 63cm，其中百分之 48 以上之沉陷在深度-140~-200m 地層發生，屬深層沉陷，近 3 年來年平均沉陷量約為 2.7cm。300m 地層下陷站經量測結果，自 89 年 10 月至 103 年 10 月止，共 14 年總累積沉陷量約為 75.8cm，103 年度總沉陷量為 2.7 分，整體而言，布袋港區近年來地層下陷有趨緩現象。

7. 布袋港區自 93 年 6 月至 103 年 7 月止，平面水準測量下陷量及地層下陷觀測井之記錄比較分析顯示： 200m 沉陷井，水準測量為 29.34

cm，觀測井之記錄為 24.9cm。300m 沉陷井，水準測量為 38.17cm，觀測井之記錄為 38.1 cm，由兩種量測方法所得數據比較結果，水準測量之沉陷量比觀測井之記錄為大，且 300m 沉陷井與水準測量之數據極為接近，顯示布袋港區之地層下陷深度大約介於地表至 300m 深土層之範圍。

6.2 建議

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

6.3 研究成果之效益

1. 高雄港區地震即時災況速報系統,能提供震後高雄港碼頭液化安全評估相關資訊，可作為防災人員救災決策之參考。
2. 各港井下地震監測站之監測資料，可供未來港灣結構物設計及地震工程相關研究之用。
3. 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. 設置高雄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高雄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. Boulanger, R.W., Mejia, L H., Idriss,I.M. "Liquefaction at Moss Landing during Loma Prieta earthquake " J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.123, No.5, pp.453-467 (1997).

3. Chopra, A. K., "Dynamic of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering, " Prentice-Hall, pp.197-250 (2001).

4. Ch.A. Maniatakis, I.M. Taflampas and C.C.Spyrakos, "IDENFICATION OF NEAR-FAULT EARTHQUAKE RECORD CHARACTERISTICS", The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.

5. 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.

6. 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.

7. Ishihara, K., and Yoshimine, M., (1991), Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188.

8. Ishihara, K., Yasuda, S., and Nagase,H., (1996), Soil characteristics and ground damage, Special Issue of Soils and Foundations, pp.109-118

9. Kramer, S. L. (1996).Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

10.Nakamura, Y., (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micro tremor on the ground surface, *QR of RTRI* 30, no.1, February, 25-33.

11. Nagase, H., and Ishihara, K., (1988), "Liquefaction-induced compation and settlement of sand during earthquakes, "Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.66-76.

12. Newmark, N. M. (1965), “Effects of earthquakes on dams and embankments.”, Geotechnique, 15(2), pp.139-159.

13. Schnabel, P. B, Lysmer, J., Seed, H. B. (1972). “SHAKE:A computer program for response analysis of horizontally layered sites,” Report No. EERC 72-12. Univ. of California at Berkeley.

14. Westergaard, H.M., “Water Pressure on Dams during Earthquakes”, Transactions, ASCE, Vol.98, pp.418-433, 1933.

15. 內政部，「建築物耐震設計規範及解說」，民國 95 年 1 月。

16. 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。

17. 交通部，港灣構造物設計基準—碼頭設計基準及說明，2000。

18. 交通部運輸研究所，港灣構造物設計基準修訂，2005 年 2 月。

19. 岡本舜三，「地震工程學」，地震工程研究中心編譯，1987,11。

20. 何幸娟、張文忠、陳志芳、林炳森，「現地棧橋式碼頭動態液化模型試驗之發展」，第 13 屆大地工程研討會，2009。

21. 徐鐵良，「地質與工程」，科技圖書，民國 75 年。

22. 翁駿民，「耐震設計講意」，國立中興大學土木工程系，民國 101 年。

23. 高雄港務局，(1970-1998)，安平港商港區地質鑽探工程報告書。

24. 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。

25. 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。

26. 彭瀚毅，1998。「臺北盆地場址效應之研究，中央大學博士論文。

27. 經濟部中央地質調查所特刊，「臺灣西南部的活動斷層」，民國 96 年 3 月。

28. 經濟部中央地質調查所特刊，「臺灣中部的活動斷層」，民國 97 年 12 月。

29. 逸奇科技股份有限公司，AnCAD (2011)「Visual Signal 參考指南」，第 1.4 試用版。

30. 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。

31. 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。

32. 賴聖耀、謝明志，「港灣地區土壤液化與震陷潛能評估」，港灣工程耐震安全評估與災害防治研討會，2002。

33. 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。

34. 賴聖耀，「臺灣近岸地震潛勢及海嘯影響範圍分析(1/4)」2008。

35. 謝明志、陳志芳、張文忠、林炳森，港區碼頭構造物模型試驗與數值模擬之研究(2/4)，交通部運輸研究所，2013。

36. 羅俊雄，1990，地下結構物耐震設計之研究，中央大學土木工程研究所研究報告。

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
1.港研中心前組長賴聖耀委員	1.本研究所建立港區震災速報系統，配合港區的液化分析，可迅速的提供港務管理單位作為災後搶救的參考，去年度建置台中港、安平港及高雄港等 3 港，本年度建蘇澳港，宜將此震災速報系統繼續推廣至各港區。	1.感謝委員肯定。
	2.本研究除了提供港區地震地防救災之用，監測資料對港灣碼頭的耐震設計，亦提供極為寶貴可分析與研究之用，就如設計地震力之製作、反應譜分析及場址的效應分析。	2.感謝委員肯定。
	3.P.5-17 布袋港的平面水準測量，文中提到有檢核 400m 地永久水準點,但卻無檢核結果，請補充。	3.感謝委員指教與建議，已補充 於 5-20 頁。
	4. P.4-13 頁台北港 TPE09 板樁式碼頭的監測記錄與分析之圖，皆未再報告中出現；另外，TPN02 板樁式碼頭監測站現況的圖	4.感謝委員指教與建議，已修正。

審查委員	審查意見	處理情形
	4.18-圖 4.23，在 p.4-13，p.4-14 文中，卻誤寫成圖 4.18-圖 4.23，請修正。	
2.成功大學土木系 陳景文教授	1.臺中港設計地震力採 PGA=0.33g，而另一計畫港區碼頭耐震功能性評估，則採 PGA=0.24g，請說明。	1.感謝委員指教，臺中港區設計地震力依交通部頒設計基準，屬地震甲區以 PGA=0.33g 設計。
	2.於各港區評估出各類地震規模，宜補充說明各類地震規模之適用性。	2.感謝委員指教與建議，已補充說明。
3.港研中心前副主任 李豐博委員	1.本研究長期監測各港區之本研究內容包括各港區地下水位，地層沉陷及地震之長期性監測與分析，內容豐富，極具實務應用價值。	1.感謝委員肯定。
	2.第六章結論(1)及(2)敘述主題與內容相近，宜整併簡化。	2.感謝委員指教與建議，已修正。
	3.報告中，地震規模有 M、M_L、M_W 及芮氏規模之分，是否有相互關係，如何使用？宜作說明，以免混淆。	3.感謝委員指教與建議，已補充說明。

審查委員	審查意見	處理情形
4.中興大學土木系 林炳森教授	4.結論(8)僅表示平面水準測量下陷量與地層下陷觀測井紀錄之比較，其顯示之現象與意義宜有進一步說明。	4.感謝委員指教與建議，已修 正。
	1.港區地震與地層下陷監測資料相當寶貴，具工程實用價值。	1.感謝委員肯定。
	2.速報系統可再量化。	2.遵照辦理，將於未來計畫經費中酌予修正。
	3. P.3-43 為何採用艾氏震度，應說明。	3.感謝委員指教與建議，已補充說明。
	4.可將監測儀器種類與數量列表，目前可用的還有多少，可作為後續編列維修經費之參考。	4.感謝委員指教與建議，將於未來計畫中修正。

附錄二

期末報告簡報資料

港區地震與地層下陷監測之研究(2/2)

- 報告人：陳志芳

執行單位：港灣技術研究中心
計畫時程：103.1.1~103.12.31

計畫緣起

- 臺灣西海沿岸等港灣地區，其地層大都屬疏鬆軟弱的沖積土層或海埔新生地。由於強烈地震作用後震波經過軟弱覆土層的振幅放大，產生之土壤液化或沉陷，造成碼頭結構物因基礎失去承載力而破壞。
- 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。
- 基於上述原因，港研中心自86年起於設置地震與地層下陷監測站，並進行長期監測及碼頭耐震評估，以維護港區各項工程設施安全。
- 設置港區地震站進行彙整監測資料作為檢核與設計結構物參據，亦使用於港區震災後速報系統。

1

地震與地層下陷監測

- 一、地震監測

  設計地震、斷層與規模、動態水壓、災後速報....

- 二、現地碼頭監測

  棧橋碼頭、錨錠板樁碼頭

- 三、地層下陷監測

  布袋港、大鵬灣、臺中港、安平港

- 四、結論

2

三、地震監測

港區地震監測系統設置

3

港區地震監測資料

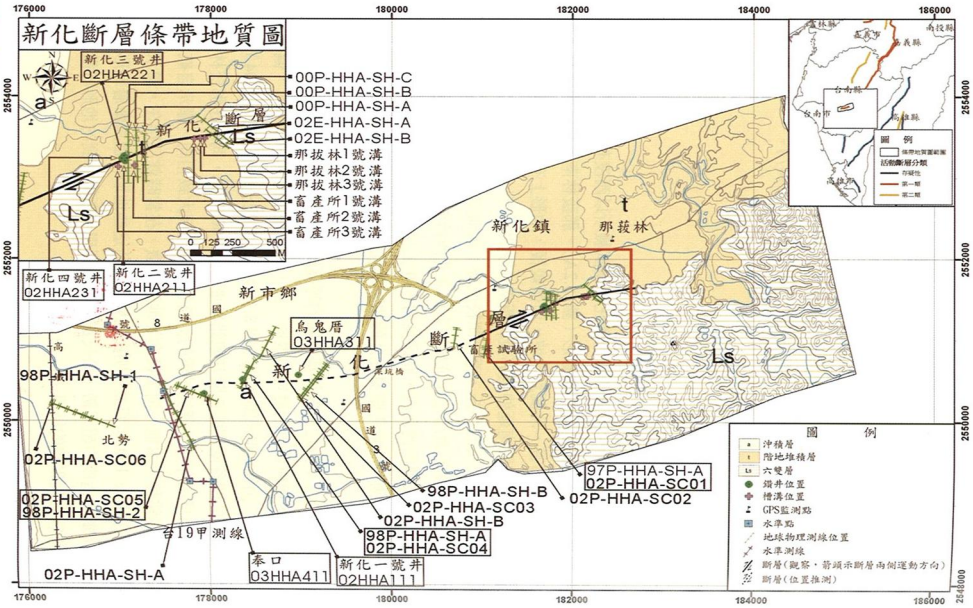
- 監測所得資料經彙整分析後，進行檢核現有結構物承受地震力影響後之安全性評估。
- 港區地震**簡訊**供各港務分公司之碼頭管理人員作為地震災後修復速報訊息參考。
- 以**安平港、臺中港區地震站**資料為例，蒐集港區地層、地質、歷史地震資料與附近活動斷層進行探討地震對該區結構物的影響與地層放大效應，與製作港區設計地震力反應譜。

安平港區地震力分析–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。
- 臺灣西南部地區的活動斷層，依據經濟部中央地質調查所調查，地表長度大於5公里的活動斷層，包括九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、木屐寮斷層、六甲斷層、觸口斷層、新化斷層、後甲里斷層與左鎮斷層等共9條斷層。
- 安平港區附近的活動斷層：距離安平港區最近且具影響港區構造物的活動斷層為**新化斷層**與**後甲里斷層**。

三、地震監測

新化斷層－右移斷層(6公里)

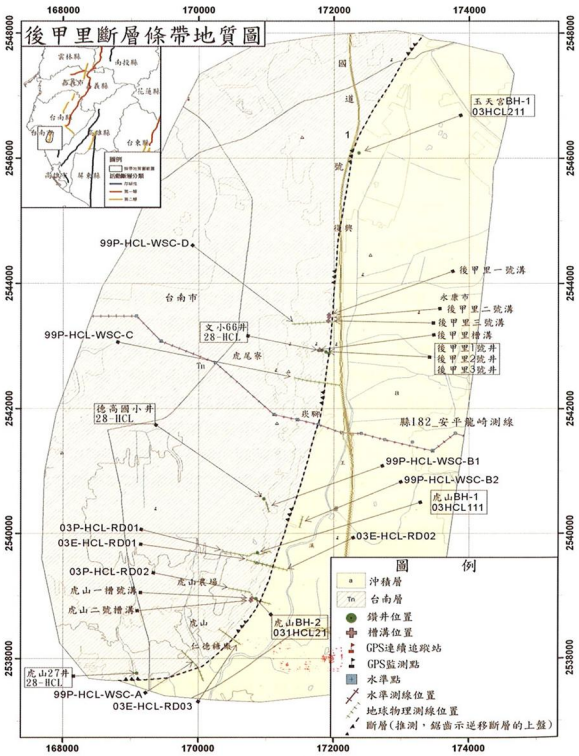


6

三、地震監測

後甲里斷層

－逆移斷層(12公里)



7

斷層長度與地震規模

- 日本學者蒐集日本自1891年至1948年大地震相關的大斷層資料，經過彙整分析後彙整出來的斷層長度和變位的幅度與地震規模之間的關係
- $log_{10}L=1.32M-7.99$ (3-1)
- 上式中，M=地震規模。L：斷層長度 (km)。

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：
- $L=\exp〔1.006M_L-3.232〕$ (3-2)
- 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3-3a、3-3b
- $Mw=5.16+1.12*log(SRL)$ (3-3a)
- $Mw=5.00+1.22*log(SRL)$ (3-3b)
- SD=0.28
- 式中*Mw*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。
- $M_L=4.533Ln(M_W)-2.091\pm0.14$ (3-4)

斷層長度與地震規模

- 根據中央地調所調查之新化斷層與後甲里斷層長度為6公里與12公里，並分別依上列經驗式來估算地震規模得到：
- 當斷層長度L=6公里時，地震規模為M=6.64、M_L=5.0與M_W=6.03±0.28。
- 當斷層長度L=12公里時，地震規模為M=6.87、M_L=5.7與Mw=6.31±0.28。

港區土層放大效應

- 依據以往之地震紀錄，考慮震源之線性模式與衰減率，可推測安平港工址之可能發生最大地震(maximun credible eathquake MCE)。由最大地表加速度衰減率公式，可以推估港區可能遭受斷層之最大地表加速度。
- 根據安平港地震站與921集集大地震之地表加速度記錄資料顯示，沖積土層之地震力皆有放大效應，其加速度 值大部份皆較衰減公式所推估者為高。

最大地表加速度衰減率經驗公式

- Kanai公式：

$$a_{max} = 1.192\, e^{0.735\,M} (R + 34)^{-1.743} \qquad (3\text{-}5)$$

- Joyner & Boore公式

$$\log_{10}(a_{max}) = -1.352 + 0.2875M - \log_{10}\sqrt{R^2 + 14^2} \qquad (3\text{-}6)$$

- Campbell公式：

$$a_{max} = 0.009e^{1.024M}(R + 0.04e^{0.94M})^{-1.074} \qquad (3\text{-}7)$$

- Japan Rock Site公式：

$$\log_{10}(0.98\,la_{max}) = (\frac{R+75}{100})(-4.92 + 1.018M - 0.06M^2) \qquad (3\text{-}8)$$

- 芋聲燾公式：

$$a_{max} = 0.3725e^{0.876M}(R^2 + 400)^{-0.918} \qquad (3\text{-}9)$$

- 式中：M=地震規模， R=震源至當地距離(km)

安平港測站實測地震各衰減公式之計算值及修正係數

記錄 \ 模式		衰減公式					平均值
		Kanai	Joyner & Boore	Campbell	Japan Rock Site	芋聲燾	
M=7.0 2006/12/26 20:26:51	計算值(g)	0.025	0.0321	0.047	0.026	0.019	0.0298
	實測值(g)	0.050					
	修正係數	1.987	1.547	1.062	1.909	2.628	1.827
M=7.0 2006/12/26 20:34:36	計算值(g)	0.033	0.039	0.056	0.0408	0.027	0.039
	實測值(g)	0.101					
	修正係數	3.061	2.589	1.803	2.475	3.741	**2.734**
M=6.9 2009/12/19	計算值(g)	0.017	0.024	0.035	0.0135	0.012	0.0203
	實測值(g)	0.036					
	修正係數	2.084	1.468	1.013	2.665	3.023	2.051
M=6.4 2010/03/04	計算值(g)	0.049	0.052	0.062	0.0728	0.053	0.0577
	實測值(g)	0.081					
	修正係數	1.634	1.576	1.317	1.1123	1.534	1.435
M=6.1 2012/02/26	計算值(g)	0.033	0.036	0.042	0.046	0.031	0.0376
	實測值(g)	0.052					
	修正係數	1.562	1.432	1.245	1.138	1.667	1.408

安平港區設計地震力-測站的地震類型

- 彙整安平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10公里，芮氏規模介於4.5~6.4、測站震度為5級以下之地震紀錄。
- B類型地震為震央離測站超過10公里，芮氏規模6.4以上、測站震度為5級以上之強震紀錄。
- C類型地震為震央距測站少於10公里、芮氏規模小於4.6，測站震度2級以上，屬於近距離之地震紀錄。
- 安平港自2006~2013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、加速度富氏頻譜圖與進行5%阻尼比之反應譜分析。

安平港2006~2013年地震監測資料

編號	監測時間(臺北時間)	規模	震度	編號	監測時間(臺北時間)	規模	震度
1	2006-03-09; 12:07:54.00	5.1	3	11	2007-01-25; 18:59:48.00	6.2	2
2	2006-04-01; 18:02:42.00	6.2	3	12	2007-07-23; 21:40:52.00	5.9	1
3	2006-04-16; 06:41:23.00	6.0	2	13	2007-08-09; 08:56:20.00	5.7	2
4	2006-04-18; 09:26:23.00	4.6	2	14	2007-09-07; 01:52:13.00	6.6	2
5	2006-06-17; 10:04:57.00	4.3	4	15	2007-10-17; 22:40:50.00	5.4	1
6	2006-10-09; 18:02:53.00	6.1	2	16	2007-12-05; 09:42:19.00	5.1	2
7	2006-12-26; 20:26:51.00	7.0	4	17	2007-12-23; 19:50:50.00	4.2	1
8	2006-12-26; 20:34:36.00	7.0	5	18	2008-02-18; 04:33:33.00	5.4	2
9	2006-12-26; 23:42:14.00	5.5	3	19	2008-03-05; 01:32:04.00	5.2	3
10	2006-12-27; 10:30:58.00	5.8	3	20	2008-04-24; 02:29:20.00	5.6	2

三、地震監測

安平港2006~2013年地震監測資料

編號	監測時間(臺北時間)	規模	震度	編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度
21	2008-06-15; 07:29:39.00	4.8	2	31	2009-06-18; 01:17:45.60	4.4	2
22	2008-09-24;02:57:27.70	3.6	3	32	2009-07-14; 02:05:02.60	6.0	1
23	2008-09-25; 15:25:38.00	3.5	2	33	2009-07-17; 19:01:14.00	3.7	2
24	2008-09-25; 23:48:18.00	3.6	3	34	2009-07-30; 00:53:06.10	5.8	2
25	2008-10-31; 06:25:30.00	4.0	4	35	2009-08-17; 08:05:45.90	6.8	2
26	2008-10-31;07:36:30.00	3.5	2	36	2009-08-22; 04:57:44.20	5.6	3
27	2008-10-31; 16:38:20.00	4.6	4	37	2009-10-22; 11:36:52.50	4.6	2
28	2008-12-02; 11:16:53.30	5.7	1	38	2009-11-05; 17:32:57.70	6.2	3
29	2008-12-08; 05:19:39.00	5.9	1	39	2009-11-05; 17:38:07.30	4.6	2
30	2009-05-12; 02:07:38.50	2.8	3	40	2009-11-05; 19:34:21.30	5.7	3

18

三、地震監測

安平港2006~2012年地震監測資料

編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度	編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度
41	2009-12-19; 21:02:16.30	6.9	4	51	2010-09-12; 22:03:12.20	3.1	3
42	2010-01-09; 07:40:24.60	4.4	2	52	2010-11-08; 21:01:21.00	5.2	2
43	2010-02-07; 14:10:00.30	6.6	2	53	2010-11-12; 23:39:00.60	5.3	2
44	2010-02-12; 10:42:38.00	5.3	1	54	2010-11-21; 20:31:45.60	6.1	2
45	2010-03-04; 08:18:52.10	6.4	4	55	2011-03-16; 21:12:16.60	4.7	2
46	2010-03-04; 16:16:16.30	5.7	3	56	2011-03-20; 16:00:51.20	5.8	2
47	2010-03-08; 17:26:22.90	4.9	2	57	2011-04-29; 21:12:48.30	5.9	2
48	2010-07-03; 03:11:32.40	5.1	2	58	2011-09-09; 11:26:59.10	5.0	1
49	2010-07-25; 11:52:10.20	5.7	3	59	2011-11-06; 17:36:35.40	4.0	2
50	2010-09-12; 22:02:51.90	3.2	3	60	2012-02-14; 13:08:33.50	3.1	2

19

安平港2006~2013年地震監測資料

編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度	編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度
61	2012-02-26; 10:35:00.90	6.1	4	71	2012-11-21; 01:09:01.70	5.4	2
62	2012-03-09; 08:04:48.50	4.1	1	72	2012-11-29; 11:12:52.80	5	2
63	2012-04-28; 05:08:18.00	4.4	2	73	2012-12-31; 00:03:25.80	5.4	2
64	2012-05-09; 08:21:03.10	4.1	3	74	2013-02-19; 10:12:45.60	4.6	2
65	2012-06-02; 06:25:57.30	3.8	2	75	2013-02-19; 14:52:39.40	4.7	2
66	2012-06-06; 09:08:34.00	5.9	2	76	2013-03-27; 10:03:19.60	6.2	3
67	2012-06-08; 06:22:44.50	4.5	1	77	2013-06-02; 13:43:03.20	6.5	3
68	2012-06-09; 12:41:21.20	4.9	2	78	2013-06-08; 00:38:01.00	6.2	1
69	2012-06-10; 05:00:17.90	6.5	2	79	2013-07-16; 18:11:34.70	5.3	1
70	2012-10-25; 18:31:19.20	5.5	3	80	2013-10-31; 20:02:09.00	6.3	3

安平港測站A、B、C類型地表地震歷時圖

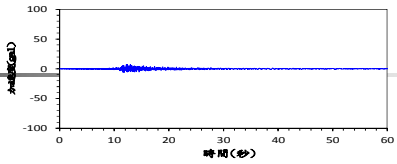


圖 3.12a 安平港 A 類型地震歷時圖

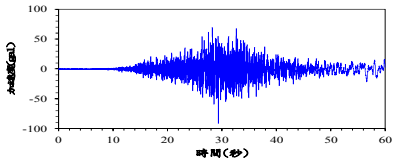


圖 3.12b 安平港 B 類型地震歷時圖

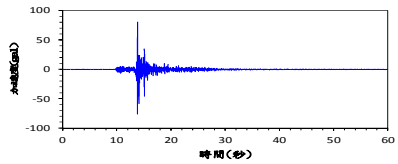


圖 3.12c 安平港 C 類型地震歷時圖

三、地震監測

安平港A、B、C類型地震水平地表加速度富氏頻譜圖

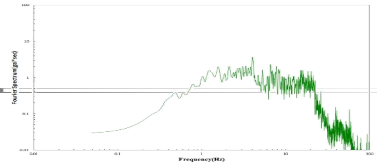


圖 3.13a 安平港 A 類型地震加速度富氏譜圖

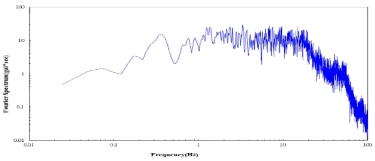


圖 3.13b 安平港 B 類型地震加速度富氏譜圖

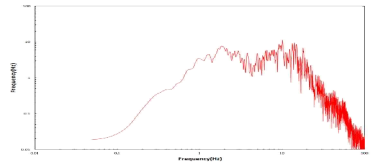
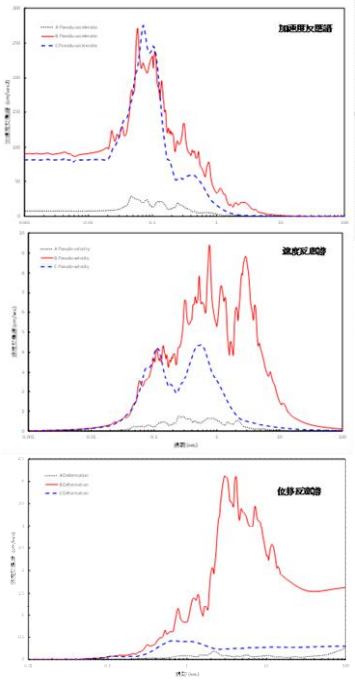


圖 3.13c 安平港 C 類型地震加速度富氏譜圖

22

三、地震監測

安平港A、B、C類型地震水平加速度、速度及位移反應譜圖

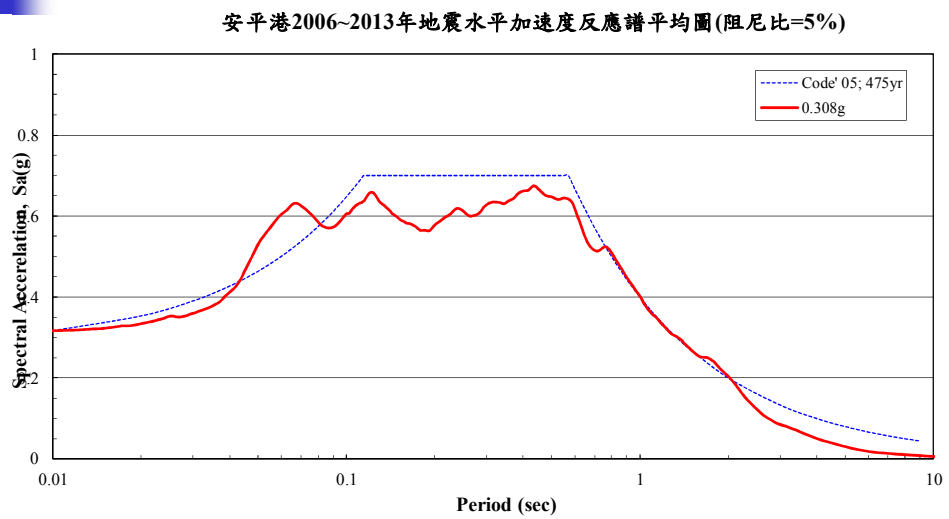


23

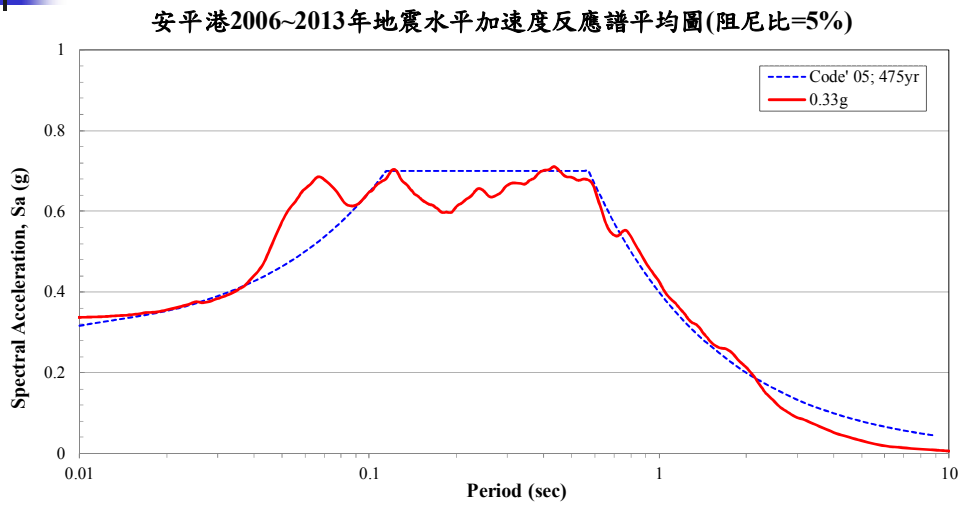
安平港區水平地表加速度反應譜

- 選擇其中震央距測站超過10公里之A、B類型地震共有130餘筆加速度，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： $PGA = 0.4 \times S_{DS} = 0.4 S_S^D F_a = 0.4 \times 0.7 \times 1.1 = 0.308$
- 式中，Fa：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Ss(S_S^D)而改變。

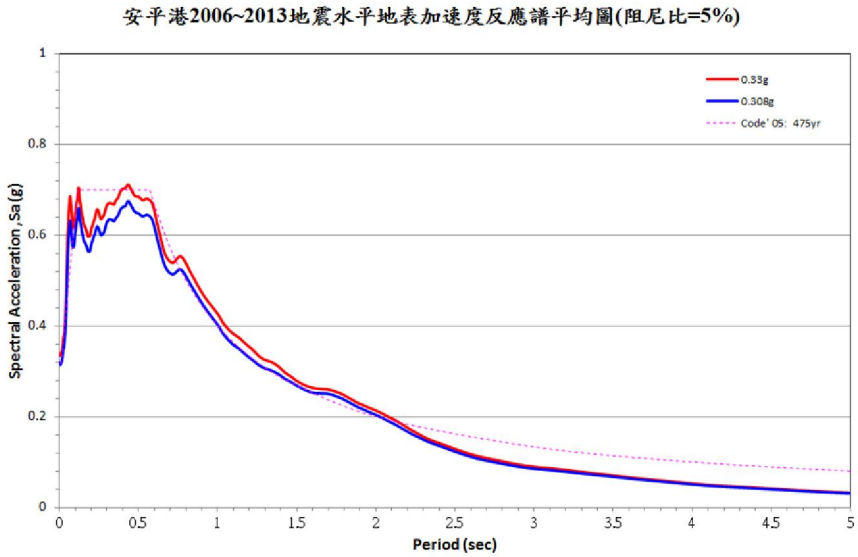
安平港A、B類型地震水平加速度反應譜曲線圖



安平港A、B類型地震水平加速度反應譜曲線圖



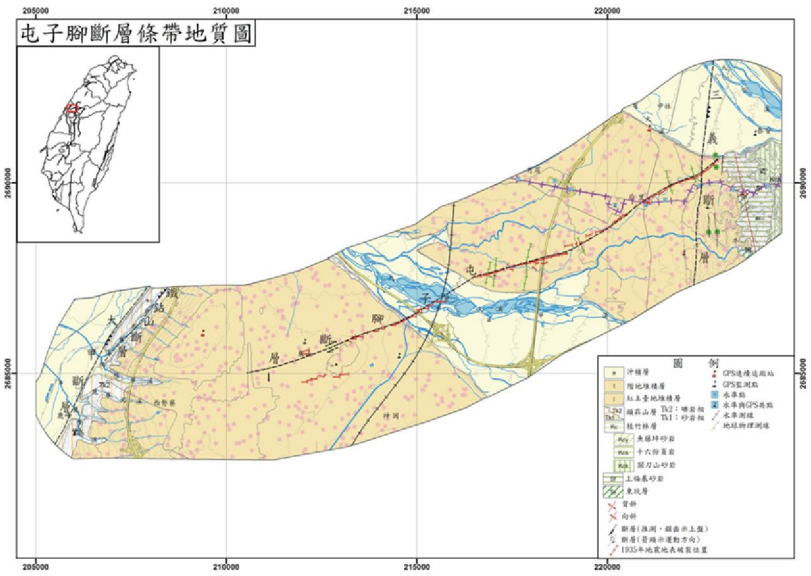
安平港A、B類型地震水平加速度反應譜曲線比較圖



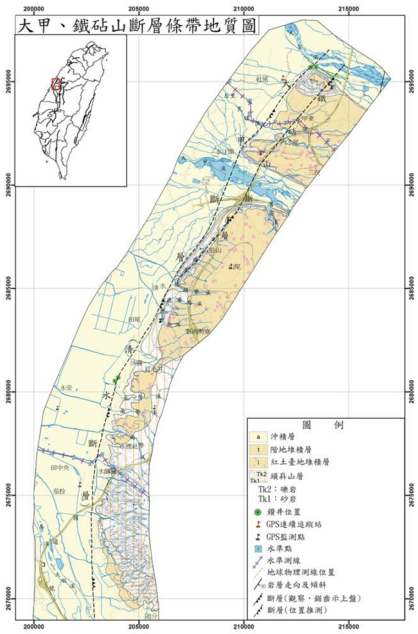
臺中港區的斷層與設計地震力

- **臺中港附近的活動斷層與地震規模**
- 臺灣中部地區的活動斷層，依中央地質調查所的調查報告，地表長度大於5公里的活動斷層，包括大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層等共6條斷層。
- 臺中港區附近的活動斷層：距離臺中港區最近且具影響港區構造物的活動斷層為**屯子腳斷層**與**大甲斷層**。

屯子腳斷層-右移斷層(14公里)



大甲、鐵砧山斷層-逆移斷層(22公里)



斷層長度與地震規模

- 根據中央地調所調查之屯子腳斷層與大甲斷層長度為14公里與22公里，分別依上列經驗式來估算地震規模得到：
- 當斷層長度L=14公里時，地震規模為 M=6.92、M_L=5.84與M_W=6.44±0.28 。
- 當斷層長度L=22公里時，地震規模為 M=7.07、M_L=6.29與Mw=6.50±0.28 。

大甲、清水、彰化斷層-向東傾　逆移斷層(65公里)

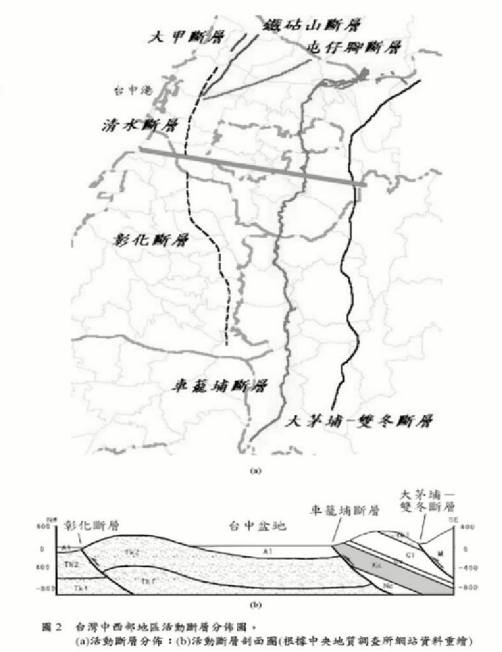


圖 2　台灣中西部地區活動斷層分佈圖。
(a)活動斷層分佈；(b)活動斷層剖面圖(根據中央地質調查所網站資料重繪)

臺中港區設計地震力-測站的地震類型

- 彙整臺中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兩種不同類型。
- A類型地震為震央距測站超過10公里，芮氏規模介於4.4~6.4、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10公里，芮氏規模6.4以上、測站震度為4級以上之強震紀錄。
- 臺中港自2006~2013年地表地震監測資料，依A、B兩種地震歷時資料分別繪製加速度歷時圖、加速度富氏頻譜圖與進行5%阻尼比之反應譜分析。

三、地震監測

臺中港2006~2013年地震監測資料

編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度	編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度
1	2006-12-26; 20:26 21.00	7.0	2	11	2008-04-24; 02:29:39.00	5.6	2
2	2006-12-26; 23:41:44.70	5.5	2	12	2008-04-28; 07:31:59.00	4.6	1
3	2006-12-27; 10:30 39.80	5.8	2	13	2008-05-11; 03:43:02.00	5.6	1
4	2007-09-15; 12:42 13.00	4.4	2	14	2008-10-31; 16:38:52.00	4.6	2
5	2007-10-17; 22:40 43.00	5.7	2	15	2008-12-08; 05:19:26.00	6.0	2
6	2007-12-05; 09:42 30.00	5.1	2	16	2009-01-04; 06:05:17.00	5.1	1
7	2007-12-06; 22:15 57.00	5.1	2	17	2009-02-02; 18:38:52.00	4.3	2
8	2007-12-25; 02:48 50.00	5.1	2	18	2009-03-02; 21:00:17.00	4.2	2
9	2008-02-18; 04:33:47.00	5.4	2	19	2009-07-14; 02:06:14.00	6.3	3
10	2008-03-05; 01:32: 26.00	5.2	2	20	2009-12-19; 21:02:40.00	6.9	4

34

三、地震監測

臺中港2006~2013年地震監測資料

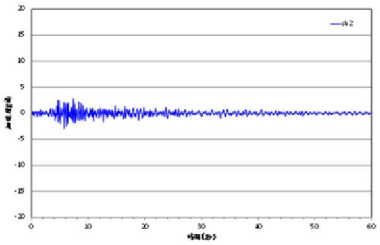
編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度	編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度
21	2010-01-02; 01:34:45.10	4.9	1	31	2010-07-17; 17:04:17.20	5.2	2
22	2010-01-19; 14:09:26.80	5.6	2	32	2010-07-25; 11:52:10.20	5.7	2
23	2010-02-07; 14:10:00.30	6.6	2	33	2010-08-22; 00:38:00.00	5.3	2
24	2010-02-12; 10:42:38.00	5.2	3	34	2012-02-26; 10:35:00.90	6.1	3
25	2010-03-04; 08:18:52.10	6.4	4	35	2012-06-06; 09:08:34.70	5.9	1
26	2010-03-04; 16:16:16.30	5.7	2	36	2012-06-10; 05:00:17.90	6.5	3
27	2010-03-08; 17:26:22.90	4.9	3	37	2012-06-15; 00:15:13.40	5.3	2
28	2010-04-26; 10:59:51.00	6.8	2	38	2012-08-31; 20:11:39.60	5.0	2
29	2010-06-15; 08:31:18.00	5.5	2	39	2012-11-05; 21:40:29.70	4.9	2
30	2010-07-03; 03:11:32.40	5.1	2	40	2012-12-31; 00:03:25.80	5.4	2

35

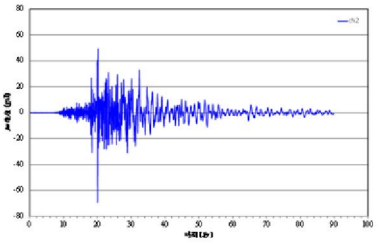
臺中港2006~2013年地震監測資料

編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度	編號	發震時間(臺北時間)	規模	震度
41	2013-02-02; 11:39:51.40	5.5	2	51	2013-11-04; 06:56:14.20	4.9	2
42	2013-03-07; 11:36:45.70	5.9	3				
43	2013-03-17; 21:53:19.90	4.4	2				
44	2013-03-27; 10:03:19.60	6.2	4				
45	2013-06-02; 13:43:03.20	6.5	4				
46	2013-06-08; 00:38:01.10	6.2	1				
47	2013-06-29; 07:51:50.30	5.7	1				
48	2013-10-28; 08:24:08.20	4.7	2				
49	2013-10-31; 20:02:09.50	6.4	3				
50	2013-10-31; 23:47:28.50	5.1	1				

臺中港測站A、B類型地表地震歷時圖

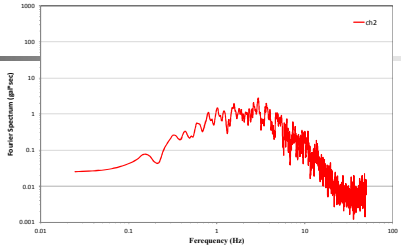


臺中港 A 類型地震歷時圖

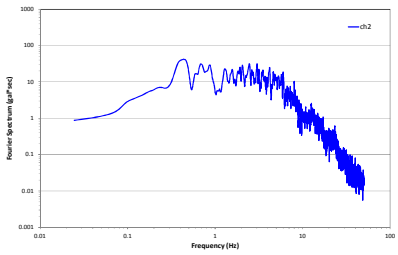


臺中港 B 類型地震歷時

臺中港A、B類型地震水平地表加速度富氏頻譜圖



臺中港A類型地震加速度富氏譜圖



臺中港B類型地震加速度富氏譜圖

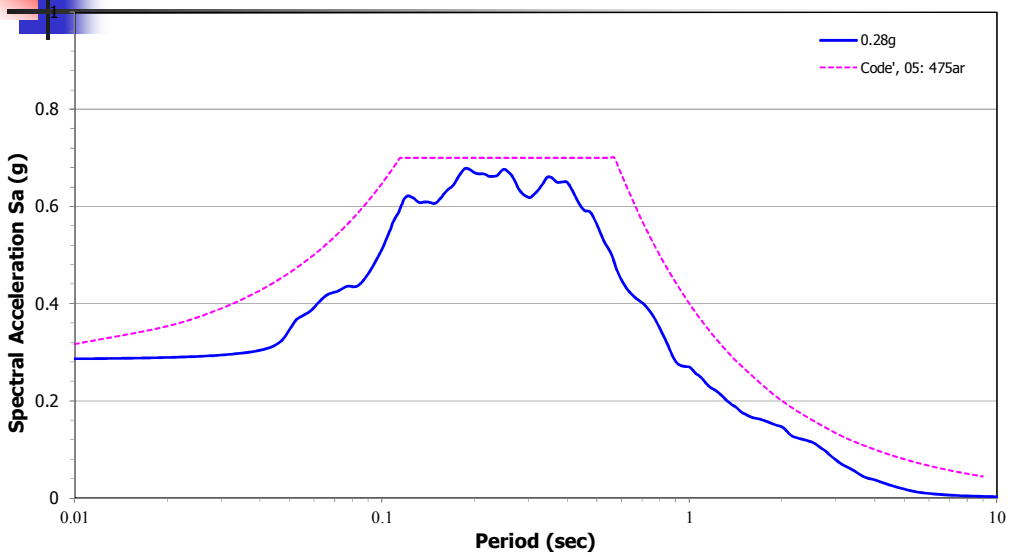
臺中港區水平地表加速度反應譜

- 選擇震央距測站超過10公里之A、B類型地震共有102筆水平加速度資料，將地震強度調整到475年設計地震大小，並進行反應譜分析、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： $PGA = 0.4 \times S_{DS} = 0.4 S_S^D F_a = 0.4 \times 0.7 \times 1.0 = 0.28$
- 式中，Fa：為反應譜等加速度段之工址放大係數(短周期結構)。平均剪力波速 $V_S = 256 m/\sec$

三、地震監測

臺中港A、B類型地表地震水平加速度反應譜曲線圖

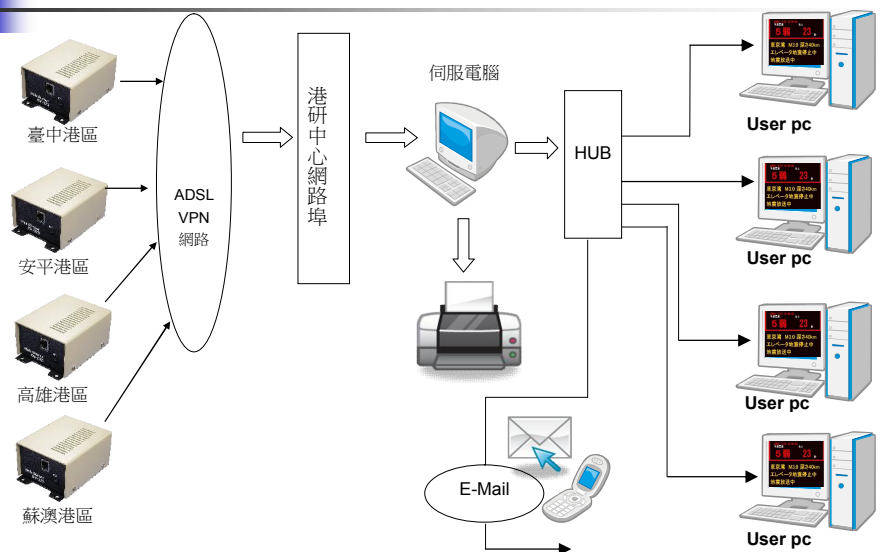
臺中港2006~2013地震水平地表加速度反應譜平均圖(阻尼比=5%)



40

三、地震監測

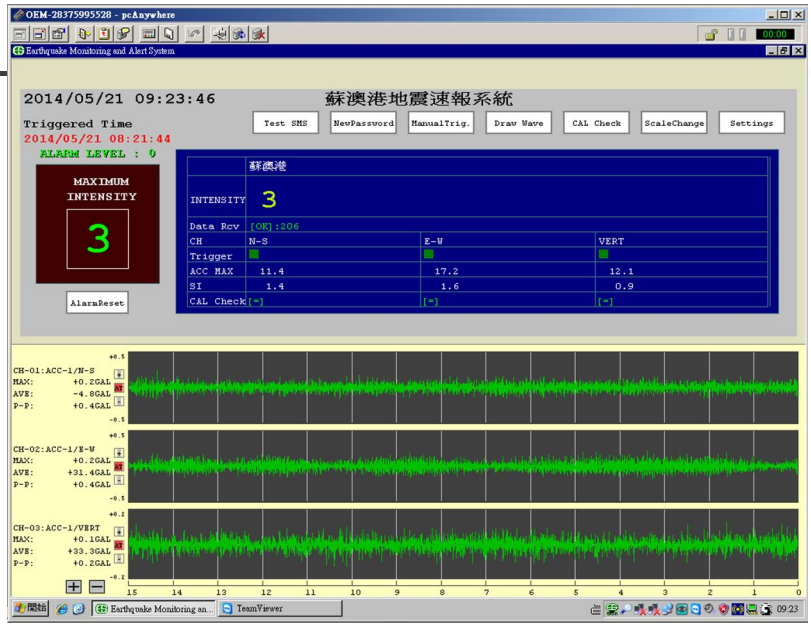
港區地震災況速報系統儀器配置示意圖



43

三、地震監測

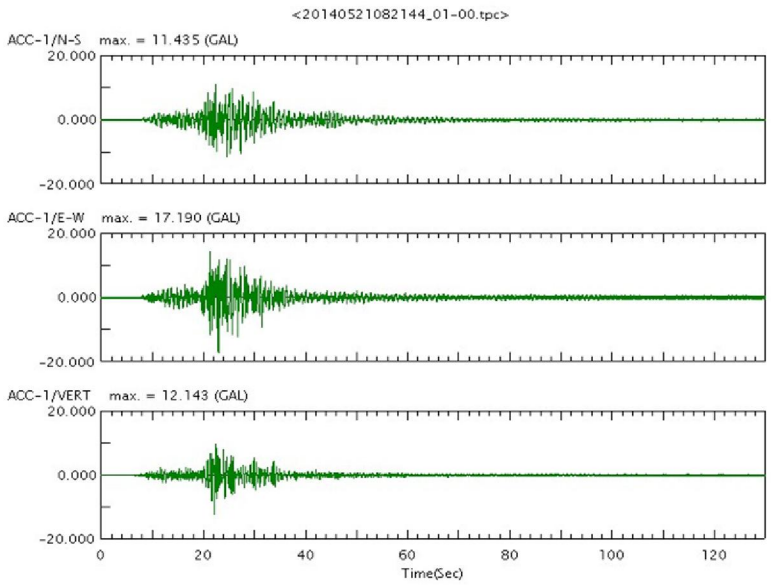
蘇澳港區地震即時監測畫面示意圖



44

三、地震監測

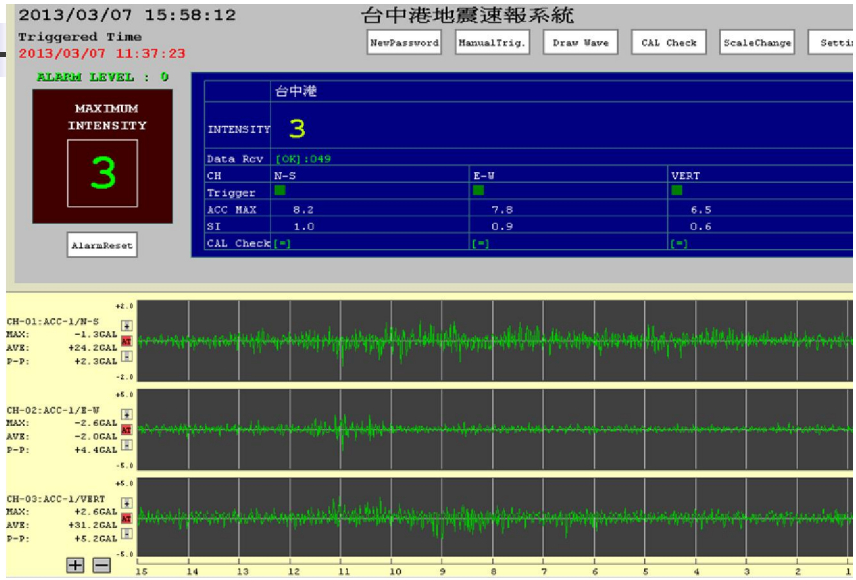
蘇澳港區地震即時監測畫面示意圖



45

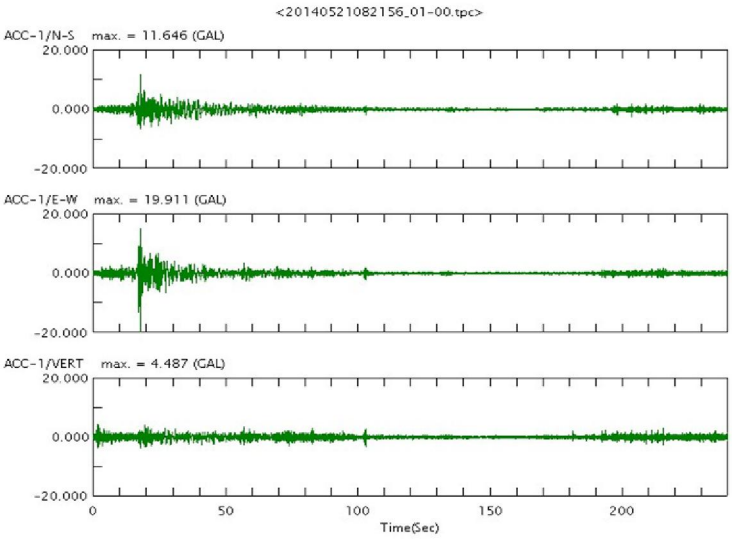
三、地震監測

臺中港區地震即時監測畫面示意圖



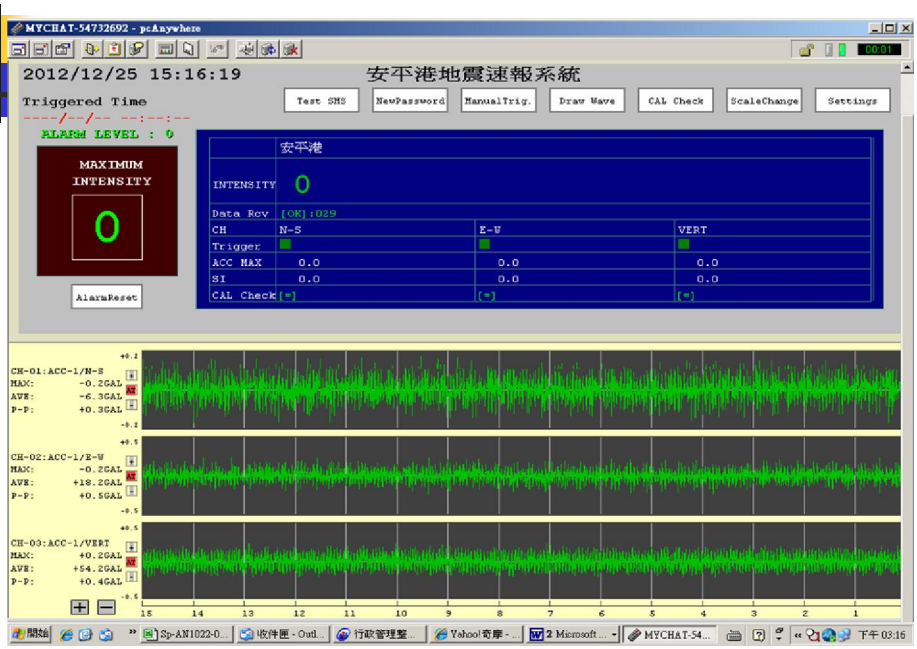
三、地震監測

臺中港區地震即時監測地表加速度示意圖



三、地震監測

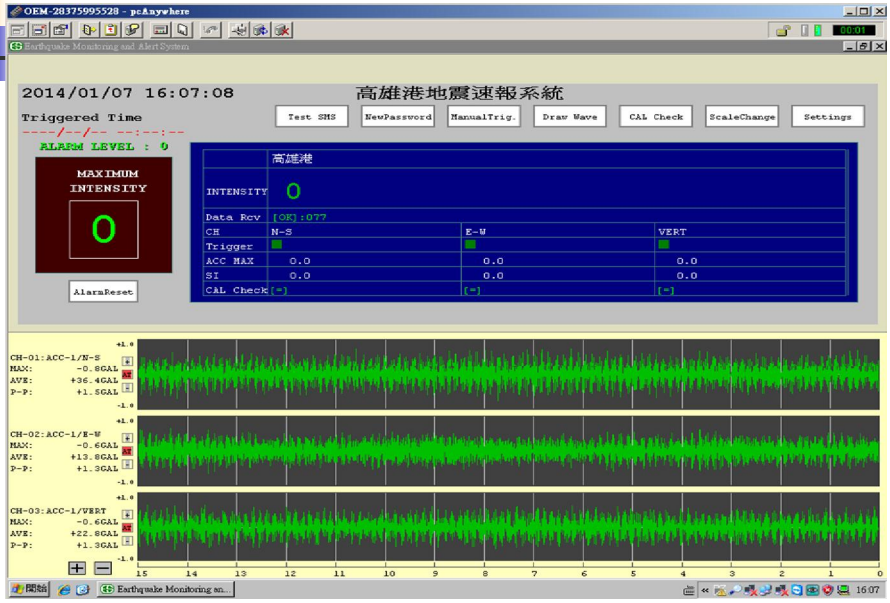
安平港區地震即時監測畫面示意圖



48

三、地震監測

高雄港區地震即時監測畫面示意圖



49

四、現地碼頭

高雄港現地碼頭地震監測站位置示意圖

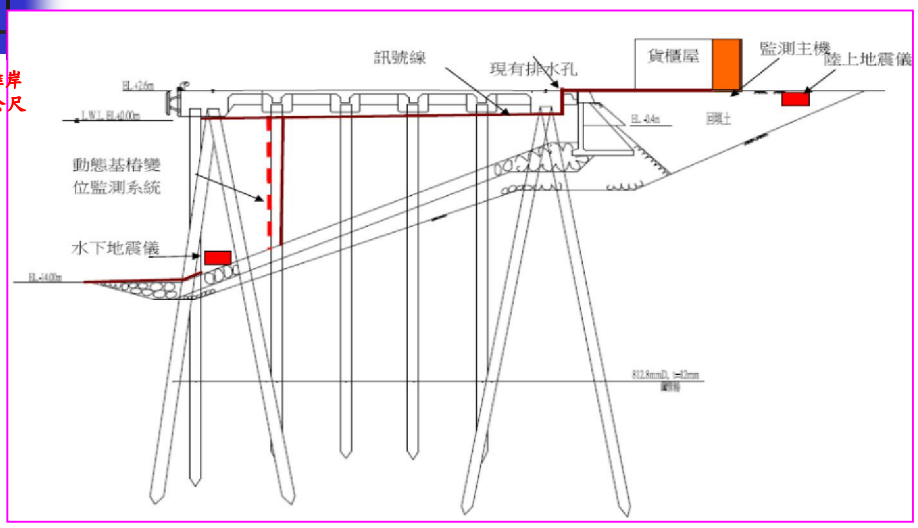
兩站相距約
3.5公里

50

四、現地碼頭

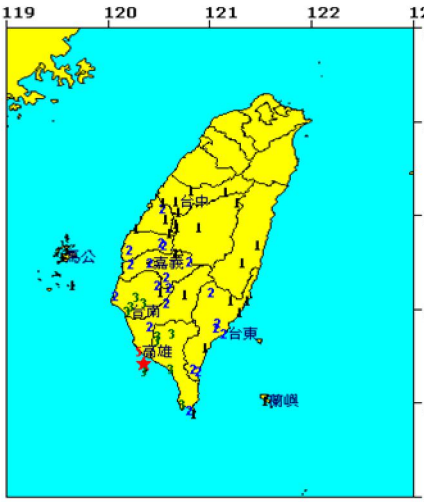
高雄港現地碼頭地震監測站斷面配置圖

地震儀離岸
邊約80公尺



51

2012/10/25, 18時31分地震記錄震度分布(中央氣象局)



圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

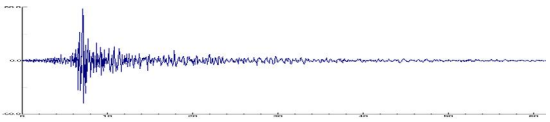
中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第101187號
日期： 101 年 10 月 25 日
時間： 18 時 31 分 17.6 秒
位置： 北緯 22.43 度，東經 120.37 度
即在 高雄市政府南偏東方 22.1 公里
位於 屏東縣近海
地震深度： 40.7 公里
芮氏規模： 5.4
各地最大震度

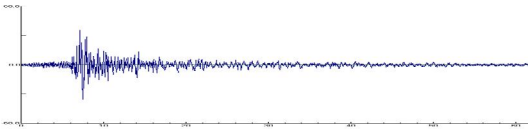
高雄市	5級	台中市霧峰	1級
屏東縣小琉球	3級	台中市	1級
屏東縣屏東市	3級		
台南市	3級		
台東縣安朔	2級		
台東縣台東市	2級		
嘉義縣大埔	2級		
嘉義市	2級		
雲林縣四湖	2級		
雲林縣斗六市	2級		
彰化縣彰化市	2級		
澎湖縣東吉島	1級		
澎湖縣馬公市	1級		
花蓮縣紅葉	1級		
南投縣名間	1級		
南投縣南投市	1級		

高雄港120碼頭地表地震儀地表加速度歷時(2012/10/25)

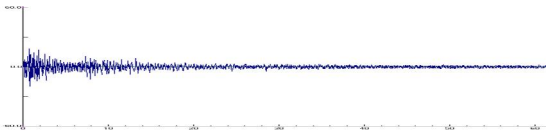
X1=58gal



X1=35gal

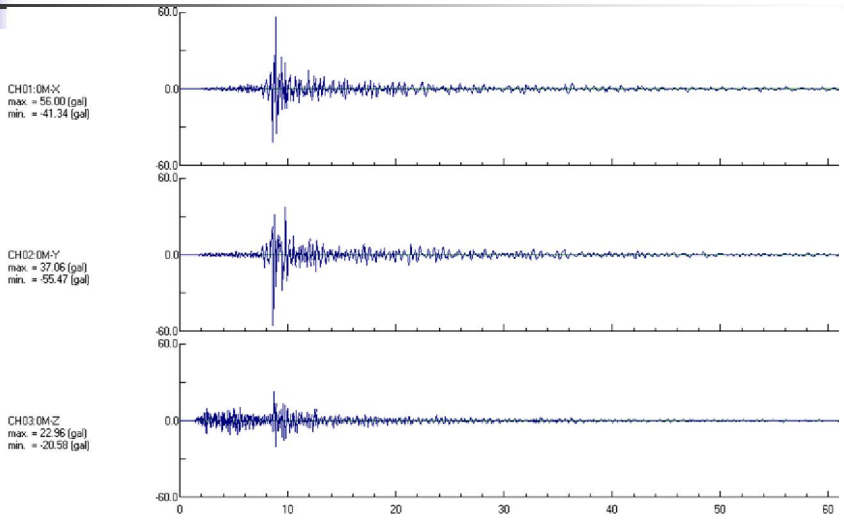


X3=20gal



四、現地碼頭

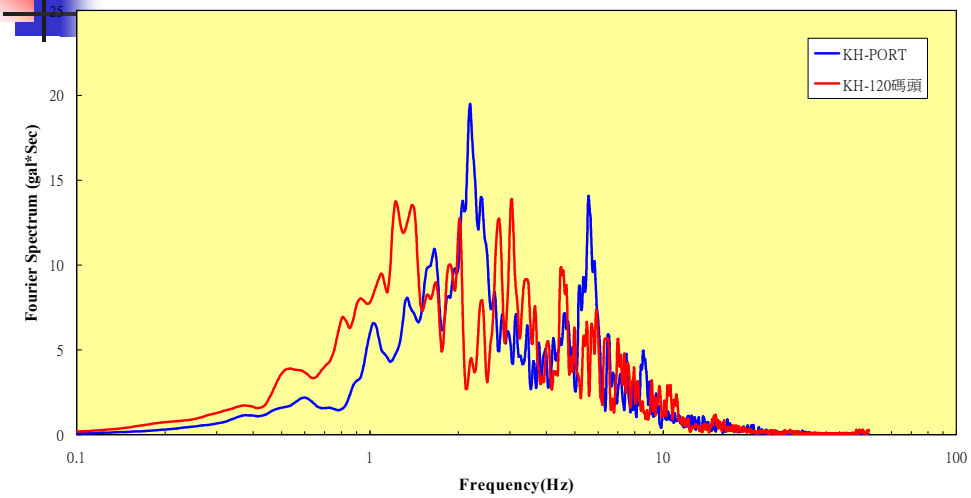
高雄港井下地震站地表加速度歷時(2012/10/25)



54

四、現地碼頭

高雄港地震站地震資料傅氏頻譜比較圖(2012/10/25地震)

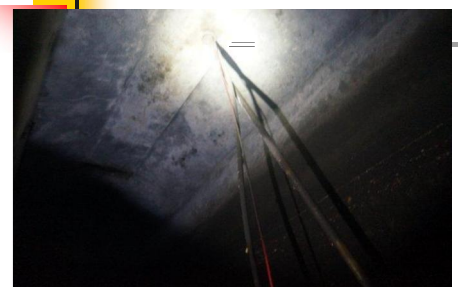


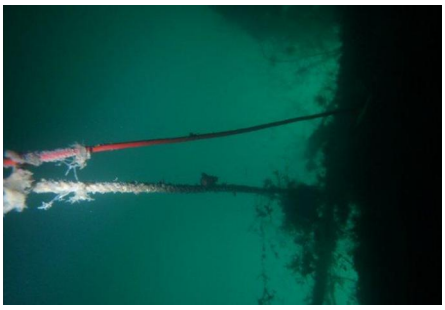
55

四、現地碼頭

高雄港現地碼頭地震監測站圖-103/12/29拆

陣列式動態剖面儀拆除



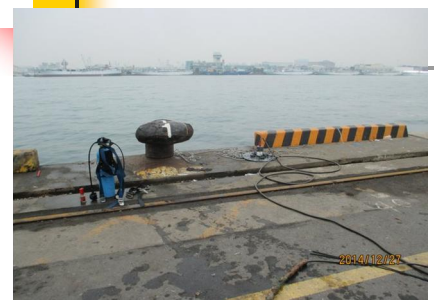


56

四、現地碼頭

高雄港現地碼頭地震監測站圖-103/12/29拆

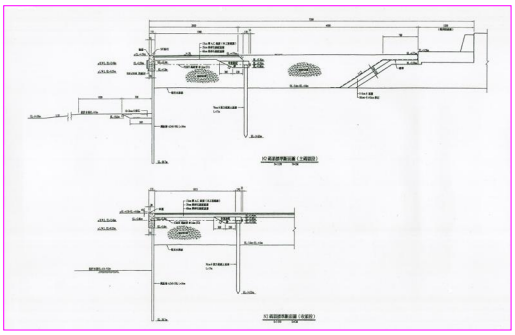
水下地震儀拆除



57

四、現地碼頭

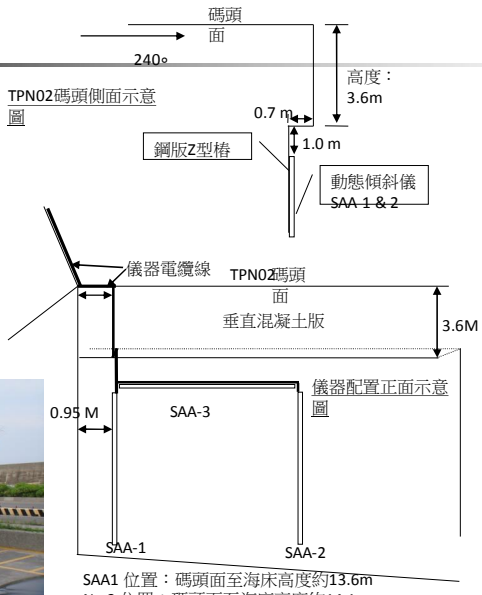
臺北港設置板樁碼頭監測系統示意圖-北2



58

四、現地碼頭

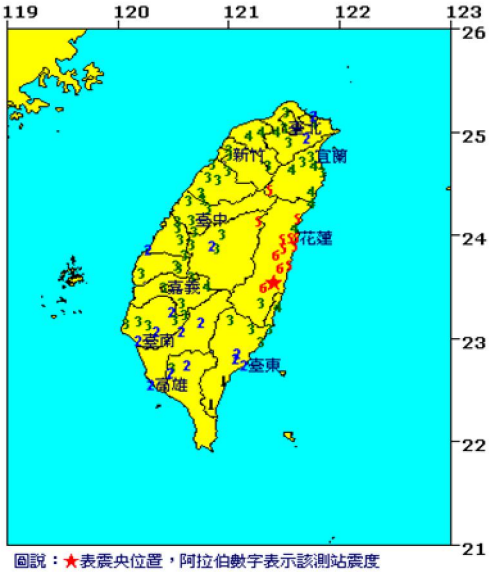
臺北港現地碼頭地震監測站配置圖



58

四、現地碼頭

2013/10/31, 20時02分地震記錄震度分布(中央氣象局)



圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102121號
日期： 102 年 10 月 31 日
時間： 20 時 2 分 9.0 秒
位置： 北緯 23.55 度，東經 121.42 度
即在 花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里
位於 花蓮縣瑞穗鄉
地震深度： 19.5 公里
芮氏規模： 6.3
各地最大震度

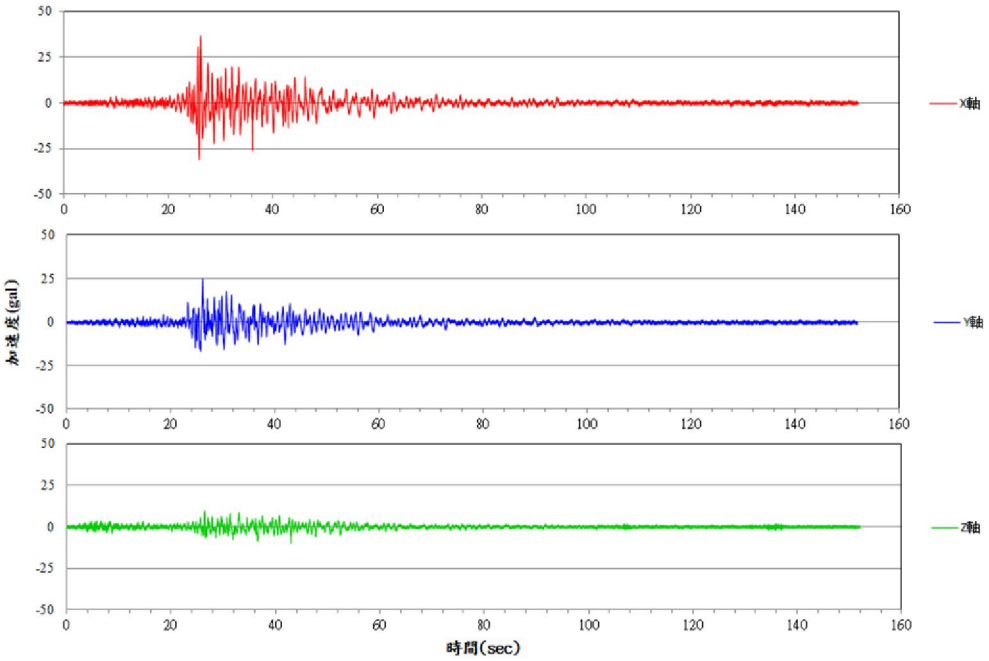
花蓮縣紅葉	6級	苗栗縣鯉魚潭	3級
花蓮縣花蓮市	5級	苗栗縣苗栗市	3級
南投縣合歡山	5級	屏東縣九如	3級
宜蘭縣南山	5級	宜蘭縣宜蘭市	3級
嘉義縣阿里山	4級	新竹縣竹北市	3級
臺東縣長濱	4級	雲林縣斗六市	3級
桃園縣中壢	4級	新竹市	3級
新北市	4級	臺北市	3級
桃園縣桃園市	4級	南投縣南投市	3級
雲林縣草嶺	3級	高雄市桃源	2級
彰化縣二水	3級	臺東縣臺東市	2級
臺中市霧峰	3級	屏東縣屏東市	2級
臺南市楠西	3級	臺南市	2級
臺中市	3級	高雄市	2級
嘉義市	3級	基隆市	2級
彰化縣彰化市	3級		

本報告係中央氣象局地震觀測網即時地震資料地震運報之結果。

59

四、現地碼頭

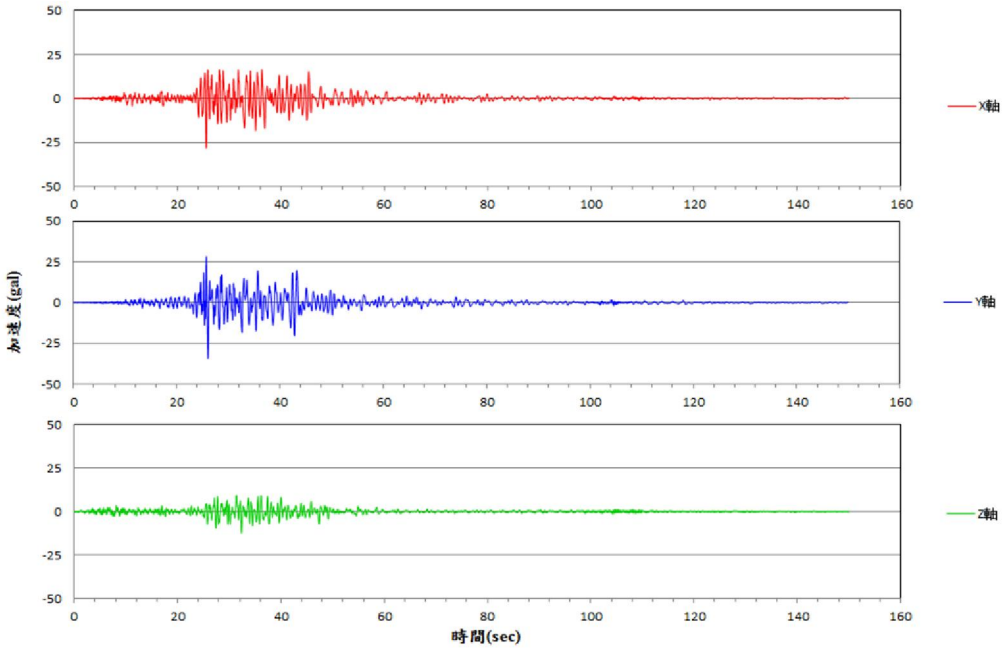
2013年10月31日地表加速度歷時圖-臺北港N2碼頭監測站



60

四、現地碼頭

2013年10月31日地表加速度歷時圖-臺北港地震站

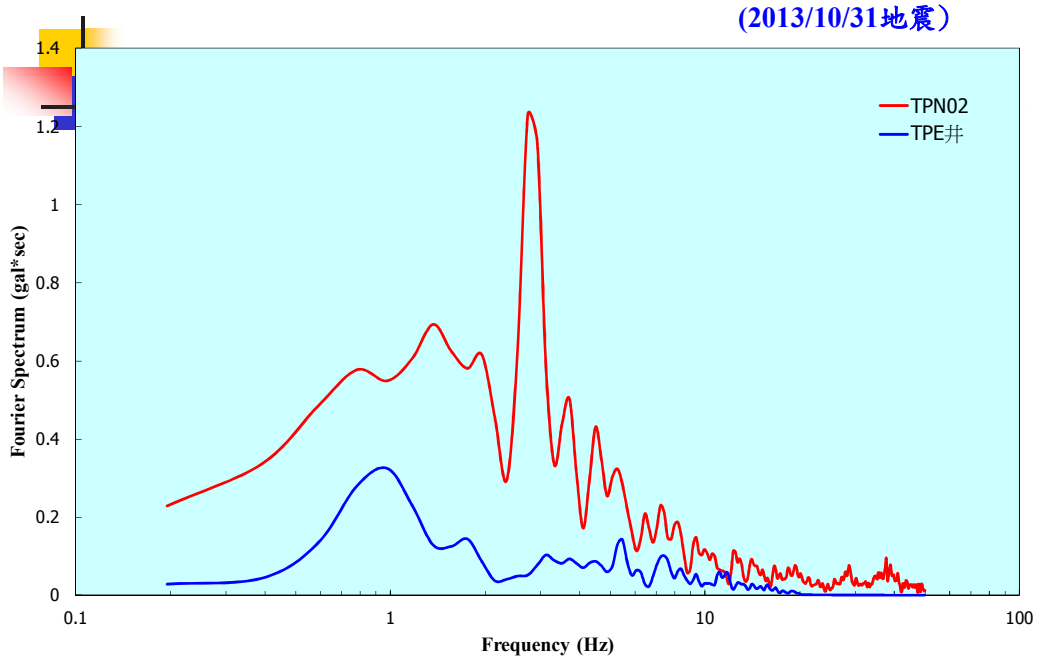


61

四、現地碼頭

臺北港北2碼頭與井下地震站地表加速度傅式譜比較圖

(2013/10/31地震)



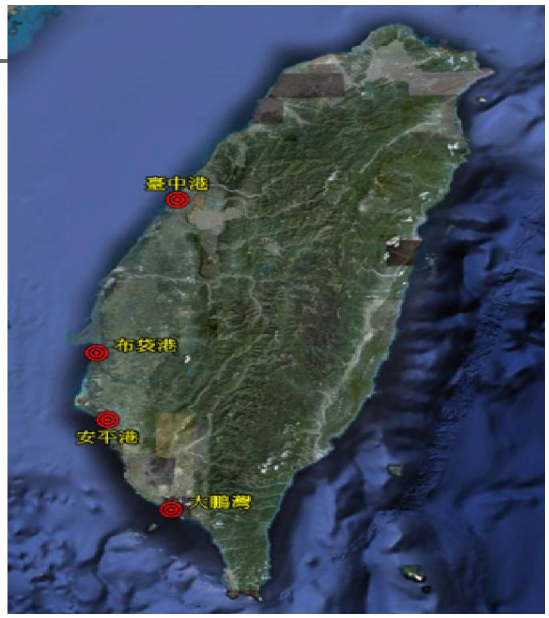
62

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。

63

港區地層下陷監測站

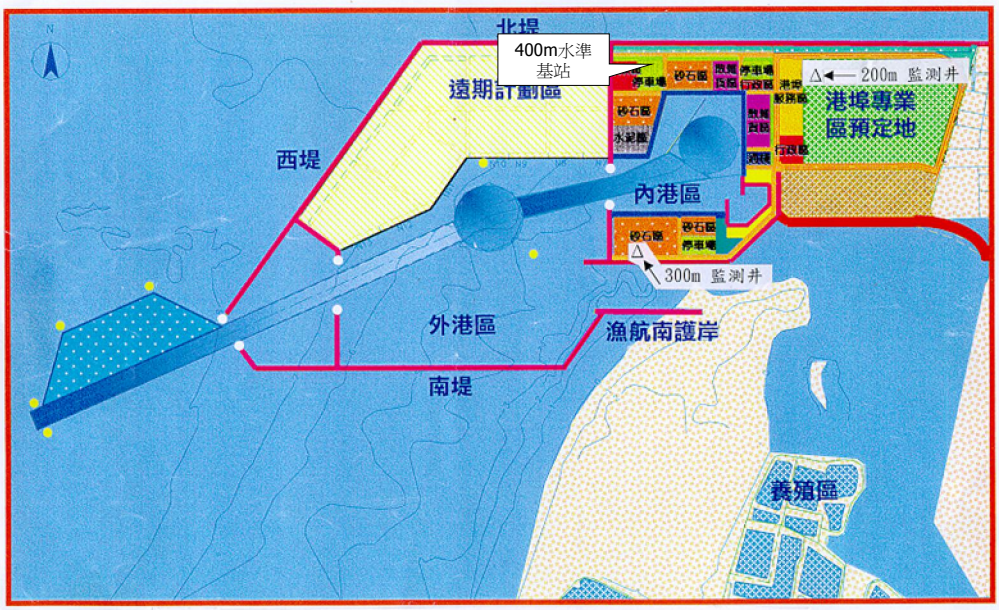


64

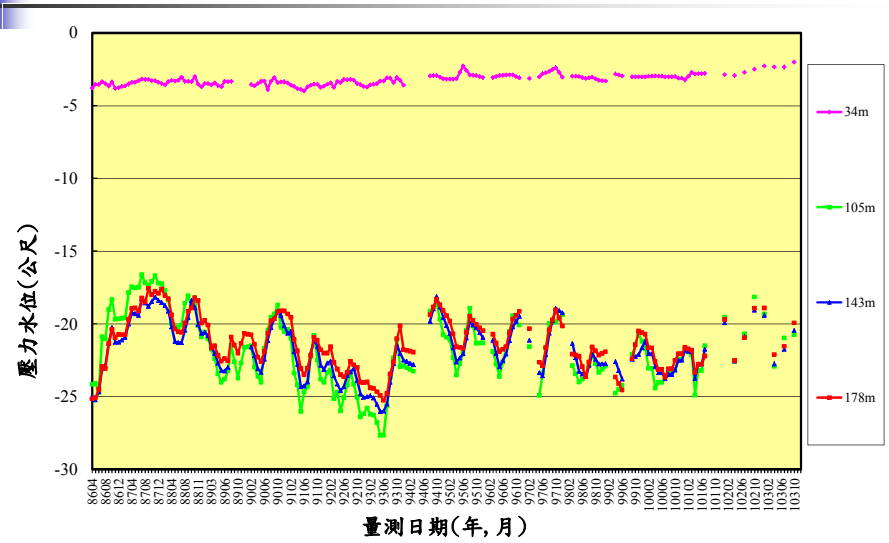
港區地層下陷監測資料

- 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，本章主要以**布袋港區地層下陷監測站**為主介紹。

布袋港地層下陷站(整體規劃)

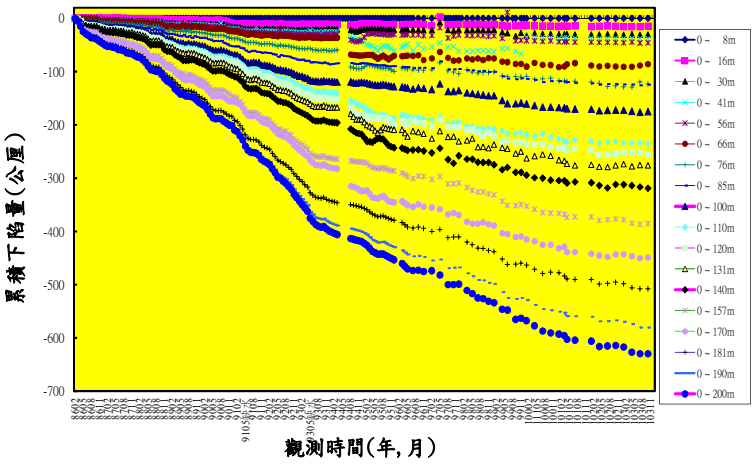


布袋港分層水位變化200m(手動量測86/04起)



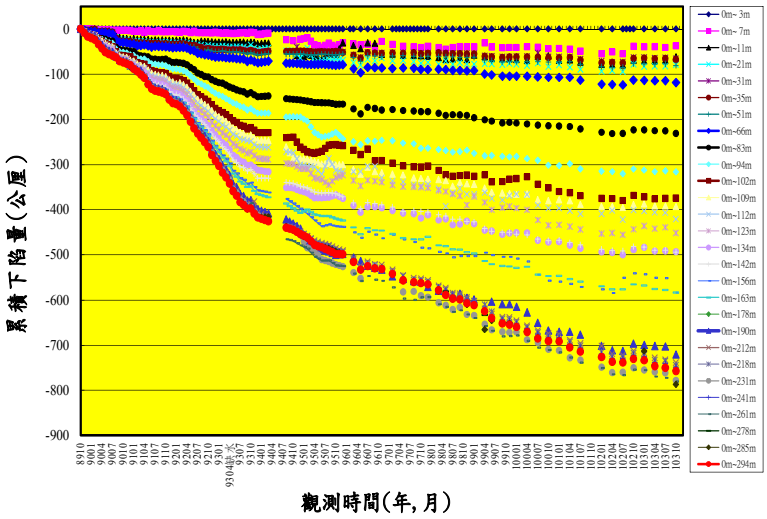
布袋港(200m)地層分層下陷圖

- 86年2月~103年10月止17年8月，總累積沉陷量63公分。
- 其中-140m~-200m之沉陷量31.5公分。



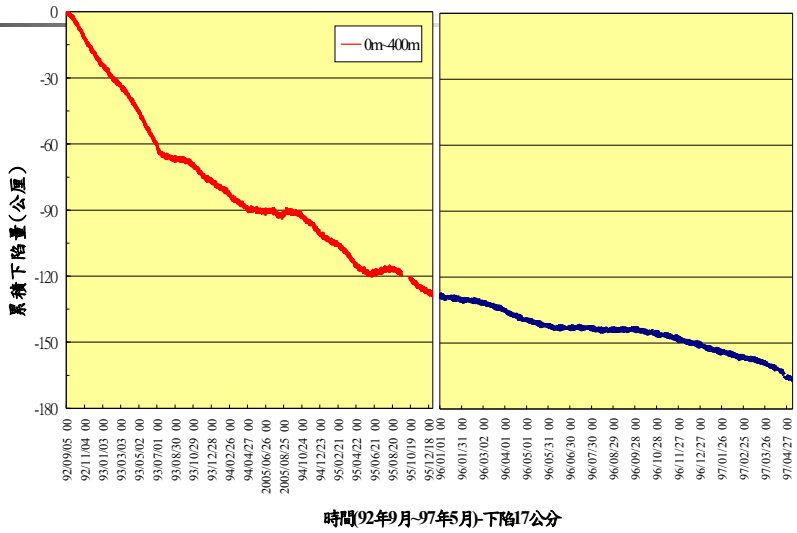
布袋港(300m)地層分層下陷圖

- 89年10月~103年10月止，14年總累積沉陷量75.8cm
- 近5年98~103約19cm



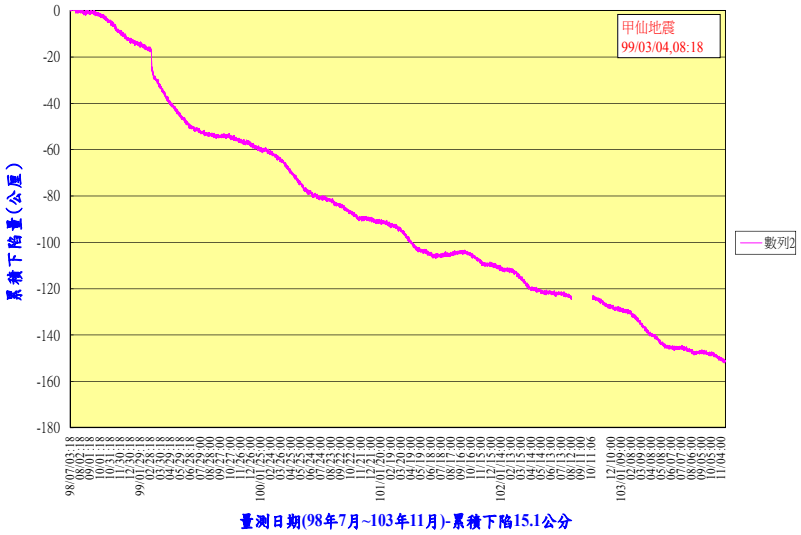
布袋港(400m)水準基站累積下陷圖

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



布袋港(400m)水準基站累積下陷圖

- 98年7月~103年11月累積下陷量15.1cm。
- 97年5月至98年7月缺少資料。
- 因地震產生下陷量約1.2cm。

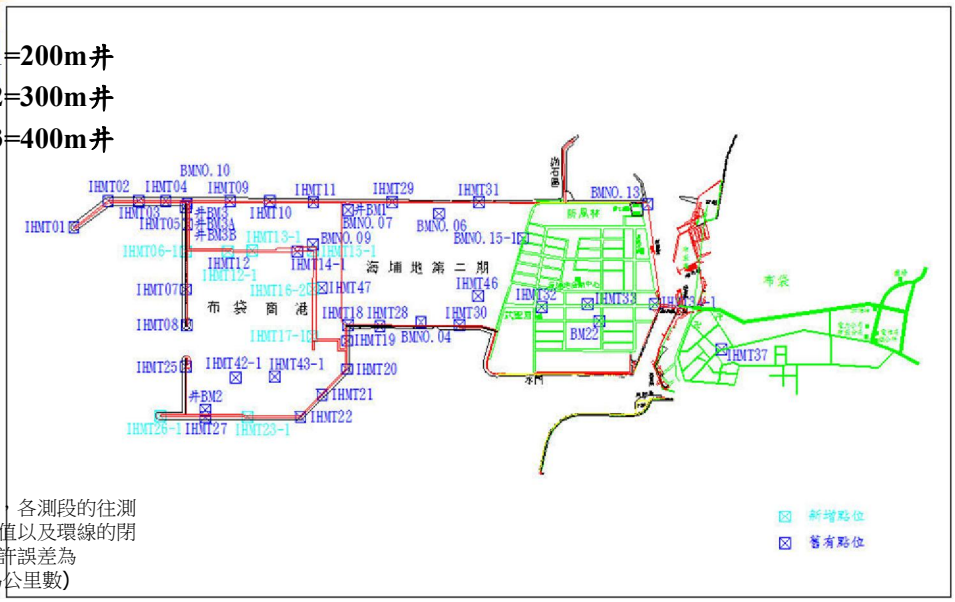


布袋港區平面水準測量

五、地層下陷

布袋港區沉陷水準測量工作範圍圖 (101~103年)

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



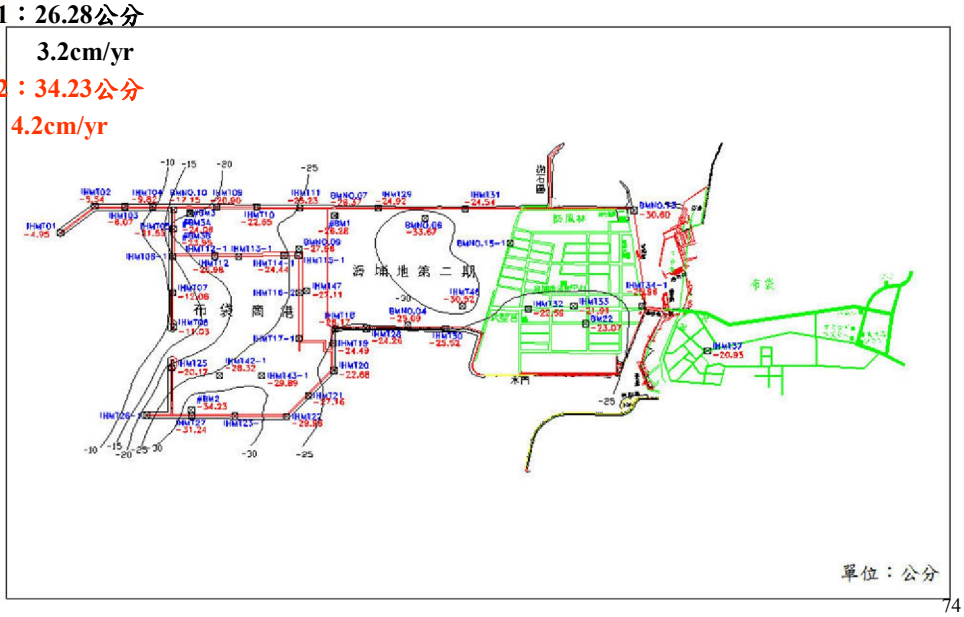
主水準路線，各測段的往測與返測的差值以及環線的閉合差，其允許誤差為3mm√k(k為公里數)

73

五、地層下陷

布袋港區沉陷水準測量總累積下陷圖(93-101)

- #BM1：26.28公分
  3.2cm/yr
- #BM2：34.23公分
  4.2cm/yr

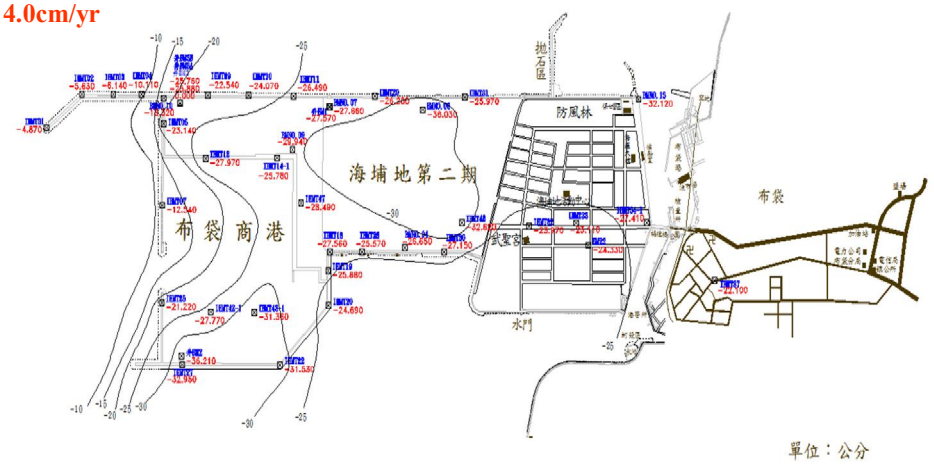


74

五、地層下陷

布袋港區沉陷水準測量總累積下陷圖(93-102)

- #BM1：27.57公分
  3.0 cm/yr
- #BM2：36.21公分
  4.0cm/yr

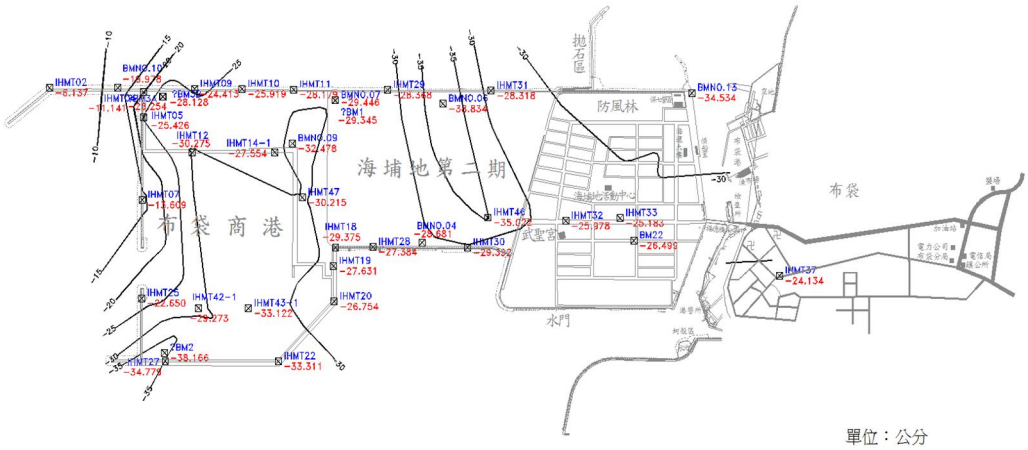


75

五、地層下陷

布袋港區沉陷水準測量總累積下陷圖(93-103)

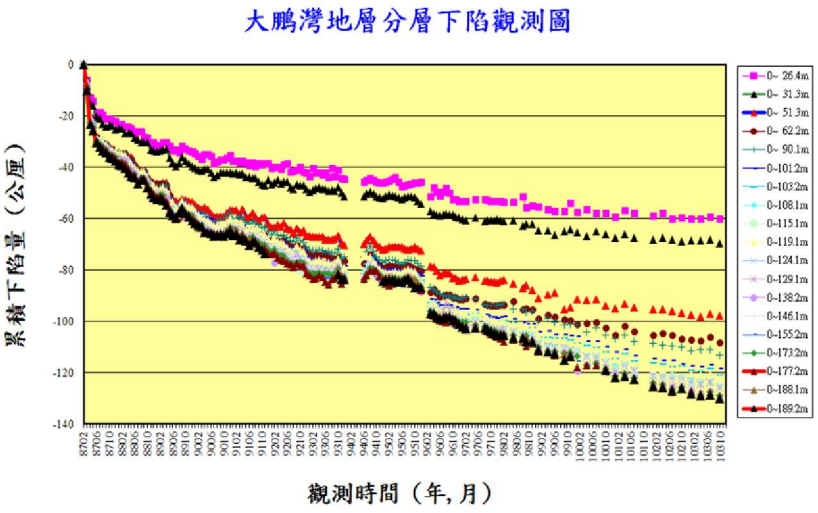
- #BM1：29.34公分
- #BM2：38.17公分



76

大鵬灣地層分層下陷圖

- 87年3月~103年10月止16年6月，總累積沉陷量13公分。
- 其中0m~-50m之沉陷量10公分。



98至103年度地層下陷最大累積下陷量及最大年下陷速率

資料來源-水利署

地區	98年 (97.6~98.7)		99年 (98.7~99.6)		100年 (99.6~100.5)		101年 (100.5~101.5)		102年 (101.5~102.5		103年 (102.5~103.5)	
	最大累積下陷量 (m)	最大年下陷速率 (yr/cm)	最大累積下陷量 (m)	最大年下陷速率 (yr/cm)	最大累積下陷量 (m)	最大年下陷速率 (yr/cm)	最大累積下陷量 (m)	最大年下陷速率 (yr/cm)	最大累積下陷量 (m)	最大年下陷速率 (yr/cm)	最大累積下陷量 (m)	最大年下陷速率 (yr/cm)
彰化	2.51	5.7	2.51	6.4	2.51	**5.3**		5.4		3.8	2.5	**3.4**
雲林內陸	2.43	**7.4**	2.44	**6.4**	2.47	**6.8**	2.49	**7.4**		**4.5**	2.49	**6.1**
嘉義	1.42	**4.6**	1.47	**5.4**	1.50	**4.5**		**4.2**		**2.5**	1.51	**1.8**
台南	0.94	5.5	0.99	4.3	1.02	**2.4**					1.05	**1.4**
屏東	3.28	2.7	3.33	4.3#		**6.8**	3.40	**1.9**		**3.9**	3.45	**4.7**

小結(1/4)-地震監測系統

- **安平港**區之地震力經實測資料與經驗式方法推估後，港區沖積土層之最大地表加速度呈放大效應，經蒐集數筆測站震度4級以上之資料估算後，其放大倍數約為1.4~2.7倍之間。
- **安平港**區附近活動斷層對港區之影響，斷層長度與地震規模的關係，依相關文獻之經驗式初步推估後，以Wells and Coppersmith的經驗式推估新化斷層之地震規模較接近1946年所發生之芮氏規模6.3地震。

80

小結(2/4)-地震監測系統

- **安平港**區水平地表加速度反應譜經平均化後，反應譜曲線平台約介於0.07~0.7秒。
- **臺中港**區附近活動斷層對港區之影響，斷層長度與地震規模的關係，依相關文獻之經驗式初步推估後，如屯子腳斷層長度為50公里，經估算後地震規模達M_L7.1，如用於液化分析時可換算成地震矩規模M_W約為7.6。
- **臺中港**區水平加速度反應譜經平均化後，反應譜曲線平台約介於0.12~0.42秒。

80

小結(3/4)-地震監測系統

- 安平港井下地震監測站於2006年12月26日之恆春地震、2010年3月4日之甲仙地震與2012年2月26日芮氏規模6.1之地震，皆監測到動態孔隙水壓資料，其超額動態孔隙水壓經過分離結果，其超額孔隙水壓為0.08Hz以下之低頻反應，震盪動態水壓為0.08Hz以上之高頻。
- **井下地震監測站：系統正常運作中。**
- **發展與改良港區地震速報系統。**

81

小結(4/4)-地層下陷監測

1.布袋港地層下陷：

200m：86年2月～103年10月止，累積沉陷量63公分，50%在-140~-200m。

300m：89年10月~103年10月止，累積沉陷量75.8公分，平均每年約5.5公分。

400m：92~103年總下陷約32公分，99年震陷量1.2公分。

2.港區下陷量趨緩，宜繼續監測。

3. 水準測量與分層沉陷量比較結果。(93-103)

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

4.大鵬灣地層下陷：

87年3月~103年10月止，累積沉陷量13公分。

82

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。

83

簡報完畢
恭請指正