

99-65-7474

MOTC-IOT-98-H1DB002

# 港灣現地碼頭結構與土壤動態 互制監測之研究(1/2)



交通部運輸研究所

中華民國 99 年 5 月

99-65-7474

MOTC-IOT-98-H1DB002

# 港灣現地碼頭結構與土壤動態 互制監測之研究(1/2)

著者：謝明志、陳志芳、張文忠、林炳森、黃安斌

交通部運輸研究所

中華民國 99 年 5 月

國家圖書館出版品預行編目資料

港灣現地碼頭結構與土壤動態互制監測之研究.

(1/2) / 謝明志等著. -- 初版. -- 臺北市 :

交通部運研所, 民 99. 05

面 ; 公分

參考書目 : 面

ISBN 978-986-02-3663-7 (平裝)

1. 土壤力學 2. 港埠工程 3. 港埠管理

441.12

99009773

港灣現地碼頭結構與土壤動態互制監測之研究(1/2)

著者：謝明志、陳志芳、張文忠、林炳森、黃安斌

出版機關：交通部運輸研究所

地址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版 > 中心出版品)

電話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 99 年 5 月

印刷者：

版(刷)次冊數：初版一刷 100 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：1009901651

ISBN：978-986-02-3663-7 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

99

港灣現地碼頭結構與土壤動態互制監測之研究  
(1/2)

交通部運輸研究所

GPN: 1009901651

定價 200 元

## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：港灣現地碼頭結構與土壤動態互制監測之研究(1/2)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-02-3663-7（平裝）	政府出版品統一編號 1009901651	運輸研究所出版品編號 99-65-7474	計畫編號 98-H1DB002
主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：謝明志 協同主持人：陳志芳 參與人員：陳毓清 聯絡電話：04-26587186 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：國立暨南國際大學 計畫主持人：張文忠 協同主持人：林炳森、黃安斌 研究人員：闕慎佑、李瑞庭、洪傑人 地址：南投縣埔里鎮大學路1號 聯絡電話：049-2910960~4966	研究期間 自 98 年 03 月 至 98 年 10 月	
關鍵詞：動態土壤結構互制、現地碼頭動態監測、錨定版樁碼頭			
<p>摘要：</p> <p>碼頭受震反應與破壞型態隨土壤狀況、施工方式、基礎類型與結構配置不同而表現不一，而現有港區碼頭設計方法，多以靜力或擬靜態方法設計，由於碼頭結構屬於非剛性結構物，其具有幾何形狀、質量分佈與勁度變化不規則之特性，以靜力分析方法難以反映結構物地震時的動態反應，需以動力分析方法分析設計，本研究規劃為二年期計畫，以現有之錨定板樁碼頭之結構與土壤動態互制動態監測為主軸，選擇於台北港東 9 號碼頭，進行動態監測系統安裝與資料分析，由動態監測系統結合微地動試驗得到港區之共振主頻分佈成果，應用在震後土層液化分佈之快速評估與災害速報系統，並作為港區災害應變管理之依據。</p> <p>成果與效益：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.分析即時監測結果及港區共振主頻分佈，作為各港區後續災害管理及地震災害速報系統之參據。相關成果可進一步用於後續不同形式碼頭動態功能性設計之基準。</li> <li>2.研究成果提供各港務局及相關單位，作為港灣碼頭工程規劃設計之參據，以提升碼頭耐震能力，減低震害。</li> </ol>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
99 年 5 月	122	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。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>密 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密          （解密條件：<input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密，  <input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密）</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>普通</p>			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

<b>TITLE: In-situ Monitoring of Seismic Soil-Structure Interactions in Active Wharves (1/2)</b>			
<b>ISBN (OR ISSN)</b> ISBN978-986-02-3663-7 (pbk)	<b>GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER</b> 1009901651	<b>IOT SERIAL NUMBER</b> 99-65-7474	<b>PROJECT NUMBER</b> 98-H1DB002
<b>DIVISION:</b> Harbor & Marine Technology Center <b>DIVISION DIRECTOR:</b> Yung-Fang Chiu <b>PRINCIPAL INVESTIGATOR:</b> M. J. Hsieh <b>PROJECT STAFF:</b> J. F. Chen <b>PHONE:</b> 04-26587172 <b>FAX:</b> 04-26564418			<b>PROJECT PERIOD</b> FROM March 2009 TO October 2009
<b>RESEARCH AGENCY:</b> National Chi Nan University <b>PRINCIPAL INVESTIGATOR:</b> W. J. Chang <b>PROJECT STAFF:</b> P. S. Lin, A.B. Huang <b>ADDRESS:</b> #1, University Road, Puli Township, Nantou County, Taiwan <b>PHONE:</b> 886-49-2910960~4966			
<b>KEY WORDS:</b> Dynamic soil-structure interaction, In-situ dynamic monitoring of active port, Anchored sheet pile wall.			
<b>ABSTRACT:</b> <p>Seismic responses of waterfront components in the port areas vary with site soil conditions, construction methods, foundation types, and structure layouts. Current designs of waterfront components mostly adopt a static or pseudo-static approach. Due to the flexibility of retaining structures, irregularity in geometry and mass distribution, and nonlinear soil properties, dynamic analysis is preferred and more appropriate. This proposed 2-year project aims to set-up an in-situ dynamic monitoring station for soil-structure interaction of an anchored sheet pile system and to develop associated data reduction procedures. Combining the contour of the fundamental frequency of soil stratum and numerical simulation results, the collected data can be the basis for developing a rapid damage evaluation system in the port areas, which will be beneficial for seismic damage management.</p>			
<b>ACHIEVEMENT AND BENEFITS :</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.The results of dynamic effective stress analyses on pile-supported wharves can be implemented to quick evaluations of spatial liquefaction distribution and development of real-time seismic assessment systems.</li> <li>2.The results of seismic scenic simulations provide background information for the development of disaster management and response systems in the harbor areas for associated administrations.</li> </ol>			
<b>DATE OF PUBLICATION</b> May 2010	<b>NUMBER OF PAGES</b> 122	<b>PRICE</b> 200	<b>CLASSIFICATION</b> <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 港灣現地碼頭結構與土壤動態互制監測之研究(1/2)

## 目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
圖目錄.....	V
表目錄.....	VII
第一章、緒論.....	1-1
1.1 研究計畫之背景、目的及重要性.....	1-1
1.2 研究範圍與對象.....	1-4
1.3 研究內容、項目與成果要求.....	1-4
1.4 研究方法與規劃進度.....	1-7
1.5 預期成果、效益及其應用.....	1-10
第二章、文獻回顧與分析.....	2-1
2.1 液化土層碼頭破壞機制.....	2-1
2.2 土壤-錨定鉸樁互制行為文獻.....	2-3
2.3 液化土壤—擋土結構系統互制數值分析.....	2-5
第三章、場址選定與現地調查.....	3-1
3.1 場址選定.....	3-1
3.2 監測港區現地調查.....	3-6
3.3 港區微地動試驗與共振主頻分析.....	3-12
3.3.1 臺北港區微地動試驗與共振主頻分析.....	3-13
第四章、錨定版樁動態數值模擬.....	4-1
4.1 分析原理.....	4-1
4.1.1 FLAC Dynamic 介紹.....	4-2

4.1.2 分析程序 .....	4-7
4.2 錨定版樁式碼頭有效應力動態數值分析 .....	4-10
4.2.1 分析原理與程序 .....	4-10
4.2.2 數值分析案例模型 .....	4-11
4.3 數值分析成果 .....	4-19
4.3.1 加速度與位移歷時變化 .....	4-19
4.3.2 土壤結構互制 .....	4-20
第五章、錨定板樁碼頭動態監測站 .....	5-1
5.1 現地監測系統規劃 .....	5-1
5.2 監測站配置與施工 .....	5-4
5.3 自動監測程式 .....	5-8
5.3.1 自動監測程式組成 .....	5-8
5.3.2 港區碼頭動態監測程式 .....	5-11
第六章 結論與建議 .....	6-1
6.1 本年度計畫執行結論 .....	6-1
6.2 建議 .....	6-2
參考文獻 .....	參-1
附錄一 期中審查會議記錄回覆辦理 .....	附錄 1-1
附錄二 期末審查會議紀錄回覆辦理 .....	附錄 2-1
附錄三 期末簡報資料 .....	附錄 3-1

## 圖目錄

圖 1.1 研究流程圖 .....	1-9
圖 2.1 RC-5 Rokko Island 沈箱式碼頭於 1998 Kobe EQ 震後剖面....	2-2
圖 2.2 臺中港#1~4 沈箱式碼頭於 921 震後碼頭岸肩與後現高成差 側視圖 .....	2-2
圖 2.3 典型錨定鈹樁式碼頭側視圖 .....	2-3
圖 2.4 日本阪神地震神戶港鈹樁式碼頭岸肩沈箱受損情形.....	2-4
圖 2.5 Ohama NO.2 錨定鈹樁碼頭於 1993Nihonkai-Chubu 震後變形 剖面 .....	2-4
圖 2.6 Ohama NO.2 錨定鈹樁碼頭於 1993Nihonkai-Chubu 中土壓力與 彎距分布圖 .....	2-5
圖 2.7 動態 Bean on Winkler Footing 模型示意圖 .....	2-7
圖 3.1 TPE09 碼頭位置圖 .....	3-2
圖 3.2 TPE09 碼頭剖面圖 .....	3-3
圖 3.3 TPE09 碼頭周圍鑽探紀錄 .....	3-3
圖 3.4 TPE09 驗潮站外部周圍現況.....	3-4
圖 3.5 TPE09 驗潮站內部與潮位計主機.....	3-5
圖 3.6 臺北港既有監測站周圍現況.....	3-7
圖 3.7 既有監測站與多頻道表面波震測測線配置圖.....	3-7
圖 3.8 筆記型電腦與多頻道可攜帶式數位震測儀.....	3-8
圖 3.9 震測電纜.....	3-8
圖 3.10 高感度電磁式速度受波器(4.5Hz) .....	3-8
圖 3.11 長柄手持式鐵槌及橡皮軟墊.....	3-9
圖 3.12 Geometrics 公司製造型號為 23464-01 之觸發器 .....	3-9

圖 3.13 施測方法與配置方式.....	3-9
圖 3.14 MASW 之剪力波速剖面.....	3-10
圖 3.15 臺北港區 300M 地震監測井地質剖面概況(IHMT) .....	3-11
圖 3.16 微地動儀野外量測示意圖.....	3-13
圖 3.17 臺北港區圖.....	3-15
圖 3.18 臺北港微地動測站位置圖.....	3-15
圖 3.19 臺北港港區各微地動測站分析反應頻譜比(H/V)圖.....	3-16
圖 3.20 臺北港區共震主頻等值分布圖.....	3-17
圖 4.1 考慮動態荷重之自由場物理模型圖.....	4-4
圖 4.2 TPE09 錨定式鈹樁數值模型.....	4-16
圖 4.3 TPE09 錨定式鈹樁靜力平衡垂直有效應力與結構彎距 .....	4-16
圖 4.4 網格底部(-29M)輸入地震波形.....	4-17
圖 4.5 監測點位與動態邊界.....	4-18
圖 4.6 加速度歷時變化.....	4-19
圖 4.7 鈹樁上方土壤位移歷時變化.....	4-20
圖 4.8 土壤變形與結構位移.....	4-20
圖 4.9 土壤變形與結構彎距分佈.....	4-21
圖 4.10 結構彎距歷時.....	4-22
圖 4.11 鋼索拉力歷時.....	4-22
圖 5.1 Measurand Shape Array 構造示意圖.....	5-3
圖 5.2 TPE09 錨定鈹樁碼頭動態監測站配置.....	5-5
圖 5.3 動態剖面位移計水下安裝完成圖.....	5-6
圖 5.4 水下訊號線固定.....	5-6
圖 5.5 陸上訊號線固定.....	5-7
圖 5.6 陸上地震儀安裝圖.....	5-7

圖 5.7 戶外指向型天線安裝圖.....	5-8
圖 5.8 自動監測程式原始碼.....	5-11
圖 5.9 自動監測主畫面.....	5-12
圖 5.10 量測參數設定畫面.....	5-12
圖 5.11 動態剖面儀紀錄畫面.....	5-13
圖 5.12 動態剖面儀初始值.....	5-13
圖 5.13 地表地震儀背景訊號值.....	5-14
圖 5.14 地表地震儀背景訊號頻譜.....	5-14

## 表 目 錄

表 1.1 預定進度甘特圖.....	1-8
表 3.1 臺北港區測站資料.....	3-14
表 4.1 動態分析土層參數表.....	4-13
表 4.2 結構元素參數表.....	4-14
表 4.3 基樁元素中之 Mohr-Columb 介面彈簧參數表.....	4-14
表 5.1 監測系統表.....	5-2

# 第一章 緒論

## 1.1 研究計畫之背景、目的及重要性

港口為臨海國家之重要物資進出通道，對臺灣這類天然資源有限且以出口導向之經濟體而言，為國家之命脈，而在災害地震發生後，為大宗救援物資進出之重要口岸，因此港口震災評估與耐震補強為國家抗災體系中不可或缺之一環。港口之設施中，碼頭為船舶繫靠設施中最主要之設備，為提供船舶安全離靠岸、順利裝卸貨物及乘客上下船之設施，其種類繁多，一般將碼頭結構物概分為重力式碼頭、板樁式碼頭、棧橋式碼頭及其他型式碼頭四大類，其受震破壞型態因碼頭類別與現地土層不同而有所差異，常見破壞型態包括回填土之沉陷、防波堤之沉陷及崩潰、碼頭之側潰、護岸之滑動及崩潰、碼頭及倉棚破壞及管線破壞等。

臺灣西部因多屬砂岸地形，各港區地質多屬疏鬆軟弱之沖積土層及海埔新生地，且興建時多以水利抽砂回填施工，由於疏鬆軟弱之沖積土層與水利抽砂回填之海埔新生地為最易發生土壤液化( Soil liquefaction)之土層，建於此類地質之港灣及臨海結構物因液化引發之破壞型態包括承载力破壞(bearing capacity failure)、地表沈陷(subsurface settlement)、側潰(lateral spreading)及沈箱式基礎位移(deformation of caisson quay wall)等災害，相關案例如 1995 Kobe 地震後港區液化(JGS 1996 and 1998)、1999 年土耳其 Kocaeli 地震後臨海區液化(Bray et al. 2004)與 921 地震後臺中港區 1 至 4A 號碼頭液化沈陷(港灣研究中心, 1999)等。

美日等國家對於土壤液化問題研究已發展多年，而國內也有諸多相關研究及試驗，但其主要重點與發展為土壤液化潛能評估方法及現地試驗等方面，對於液化過程與液化後結構物與液化土層間之互制反應研究相對缺乏，針對液化土層上港灣設施之相關研究其基礎學理與整合應用更是欠缺，使得相關設計規範與營運中防救災策略擬定等無法

更新或修正，因此對於土壤液化於碼頭設施影響之問題有需要作進一步深入之研究。

碼頭受震反應與破壞型態隨土壤狀況、施工方式、基礎類型與結構配置不同而表現不一，而現有港區碼頭結構設計方法，多以靜力或擬靜態方法設計，由於碼頭結構屬於非剛性結構物，其具有幾何形狀、質量分佈與勁度變化不規則之特性，且土壤為高度非線性材料，其動態特性受剪應變震幅與有效應力而改變，以靜力分析方法難以反映結構物地震時的動態反應，需以動力分析方法分析設計，且常見碼頭多以沈箱、錨定版樁或基樁等型式支撐，地震時需考慮土壤-支撐基礎-上部結構之互制行為，其行為複雜且相關研究國內外較為少見。

本系列研究計畫之目標為建立現有不同形式碼頭之動態監測系統，以監測現有碼頭結構與土壤動態互制為主軸，良好的監測系統除可回饋設計與分析方法外，結合良好之預測模式可提供營運單位快速災損評估之用。碼頭型式種類眾多，由於前期三年計畫主軸為基樁式棧橋式碼頭數值分析與現地動態監測站設置，對於棧橋式碼頭動態分析與監測系統已有相當基礎，本期以錨定版樁(anchored sheet pile quay wall) 碼頭，進行動態監測系統安裝與數值分析，選定臺北港東9號碼頭，進行地質與碼頭結構之資料收集並配合現地調查，以微地動及表面震測量測結果，協助建立數值分析之幾何與土壤組構模型，另由場址動態反應分析與現地自由場監測結果，選定輸入地震進行動態土壤-結構互制分析，所得之土壤動態震動與土中結構反應將用以規劃現地監測系統。

現有考慮液化土壤-結構互制(Soil-structure interaction)分析方法包括擬靜態分析(pseudo-static analysis)、動力數值模擬(dynamic numerical analysis)及模型試驗(physical modeling)等，其中擬靜態法其分析時雖相對較為簡單，但其結果常隨所使用參數及假設不同而使結果具相當之不準確性且多僅適用於特定簡化之場址及結構型態。動態數值模擬因可模擬不同邊界條件、地震狀況、土層變異及結構模型等，其可靠度隨著數值分析所採用之網格模型及材料組構參數(constitutive

parameters)之複雜化而提高，但因其理論繁複、計算量大、所需參數不易由常用之試驗求取及缺乏實測資料驗證等限制，實用上有其侷限，但其結果對動態土壤-結構互制反應定性趨勢之瞭解及影響因子之量化分析具有相當助益，若分析時能佐以可靠之動態量測資料，可進一步增進其可靠度。而模型試驗因受限於試體尺寸，使其代表性與實際工程系統之行為仍有差異，因此多用於動態影響因子之基礎研究及提供動態數值模擬之驗證，雖然近年來已有相關研究者利用離心機(centrifuge)與大型振動台(shaking table)進行動態土壤-結構系統受震試驗，但受限於試體擾動與儀器限制，與實際工程應用仍有差距，解決之道為設立長期現地監測站或進行現地液化試驗。

為增進對現地不同形式碼頭受震反應之瞭解及提供更可靠之數值模擬驗證資料，設立現地碼頭土壤與結構互制監測站與進行大尺寸現地動態試驗有其必要性，現地監測站為於現地土層與碼頭結構安裝相關之監測儀器，等待下一次地震時紀錄相關反應之動態歷時；此為瞭解特定場址動態反應最佳之資料，但因地震之不可預測，其長期可靠度有賴於定期檢測與維護，改進方法為利用人造震源進行現地土壤-結構系統之動態試驗，對選定之測站與場址進行可產生大應變震幅之震動，由於現地監測站與現地動態土壤結構互制試驗均為全尺寸紀錄，所得結果將可驗證現有分析方法，並可作為修復與改善之依據，其重要性與價值將遠比現有縮小尺寸之模型試驗為高。

由於建置現地碼頭土壤與結構互制監測系統與後續維護之成本昂貴，如何建構一可反應碼頭液化動態反應量測系統需對其複雜之反應機制進行深入探討，並以現有分析方法對受震反應進行預測與模擬，前期計畫針對棧橋式碼頭已進行包括試驗場址探勘、現地大型震動試驗、二維數值分析、大型重模試坑配合全尺寸量測基樁進行現地人工震源液化基樁試驗之成果以及三維土壤-基樁動態互制反應分析，本階段將以臺北港東 9 號錨定版樁碼頭，進行包括碼頭地質資料收集、場址探勘與動態有效應力數值模擬等項目，由相關文獻資料與數值模擬成果規劃並建構現地碼頭土壤-結構互制反應監測系統，於選定碼頭安

裝相關量測設備，以試驗不同量測設備之可靠度與適用性，同時發展相關分析程序與程式，以建構動態錨定版樁碼頭土壤-結構互制反應監測站之雛形。

## 1.2 研究範圍與對象

為延續前期研究成果並探討不同類型碼頭之反應，本年度計畫之研究範圍以臺北港東9號錨定版樁碼頭進行研究，選定地點之地點為營運管理之基隆港務局、港研中心及本研究團隊商議決定，選定之碼頭將進行考慮孔隙水壓力激發之動態反應分析程序與動態監測系統研發，相關場址探勘、動態有效應力數值分析，營運中碼頭監測站亦以選定之碼頭為對象，配合之微地動試驗共振主頻分析其量測範圍為包含選定碼頭之臺北港港區。

## 1.3 研究內容、項目與成果要求

本計畫預計分二年執行，各年度預計完成之工作項目條列如下：

### 第一年(98年) (本年度)

1. 選定港區碼頭形式與場址並進行相關文獻收集與現地調查。
2. 以動態數值分析進行考慮錨定版樁碼頭之動態有效應力數值分析。
3. 規畫與分年設置營運中錨定版樁碼頭現地土壤-結構動態互制監測系統，作為數值驗證與震後災損預測。
4. 於監測站所在港區進行微地動量測與共振主頻分析(由本所港研中心配合調查)。

### 第二年(99年) (規劃項目)

1. 以動態分析程式 FLAC 3D 進行考慮碼頭液化時對碼頭結構影響之三維動態有效應力數值分析。
2. 增加安裝碼頭結構物與土壤動態反應監測設備，並進行初步驗證。

- 3.建立監測資料分析架構與碼頭結構受震災損速報系統。
- 4.利用港區微地動試驗與共振主頻分析成果，建立結合監測站紀錄之港區自由場地盤振動與液化災損速報預測。

**針對本年度研究之內容與項目說明如下：**

1. 選定港區碼頭形式與場址進行相關文獻收集與現地調查：收集國內外港區液化案例及港區結構物動態分析技術進行系統性整理，歸納港區結構物因液化導致之破壞類型及因素，檢討現有動態分析方法與相關輸入參數取得方式等，訂定研究之方法、標的、可能遭遇之困難與問題可採用之對策，並配合港研中心選定碼頭形式與監測碼頭場址，並在選定之碼頭進行詳細現地調查，以求取數值分析所需相關參數及後續監測系統規劃依據。
2. 以動態數值分析進行考慮碼頭結構形式之動態有效應力數值分析：利用現地調查及港區地質與施工資料，建立監測碼頭之數值模型，進行考慮液化土壤—擋土結構系統之有效應力動態分析，並由港研中心已建立之設計地震參數及現地自由場液化監測站資料選取輸入地震，模擬地震時由岩盤向上傳播之剪力波與面海側動態水壓力對土壤所造成地盤反應及孔隙水壓力激發等，並加入擋土及上部結構碼頭等結構元素，以有限差分程式 FLAC 進行考慮液化土壤-擋土-上部結構系統之有效應力動態分析，成果除可作為監測系統規劃細部規劃依據外，並可作為日後制訂液化門檻加速度決定、液化前後受力狀態及修復補強之參考。
3. 規畫與分年設置碼頭現地結構與土壤動態互制監測系統，作為數值驗證與震後災損預測：本年度將設計並規劃動態現地碼頭結構與土壤動態互制監測站，主要量測標的包括擋土結構動態反應、孔隙水壓力變化、地盤振動及碼頭面版反應，並發展搭配之自動監測系統，使其具有目前水平地盤液化監測站之即時監測、遠端遙控及傳輸功能。規劃安裝期程並於今年度於選定之中碼頭進行部分安裝，測試

其成效與穩定性。同時建立配合之分析程序，成果可作為數值驗證與震後災損預測。

4. 選擇適當港區進行微地動量測與共振主頻分析：利用前期所發展之微地動分析程序，配合港研中心，於選定之監測站及港區進行微地動量測與主頻分析，除可協助監測站之選定，並可配合液化與地表震動預測模式，建立結合現地監測站紀錄之震後災損速報系統。

**依據研究之內容與項目，本年度主要部分包括：**

1. 進行考慮碼頭結構與土壤互制之動態有效應力數值分析。
2. 於選定港區建構碼頭動態反應監測系統。
3. 監測系統資料分析程序與撰寫相關程式。

**依據研究之內容與項目，本年度之成果要求說明如下：**

1. 進行考慮碼頭結構與土壤互制之動態有效應力數值分析：以 FLAC 及搭配之 Dynamic option 進行選定碼頭之動態有效應力分析，作為相關現地監測規劃之依據。
2. 於選定港區建構碼頭即時動態反應監測系統：設計並規劃動態現地碼頭結構與土壤動態互制監測站，規劃安裝期程並於今年度於選定之營運中碼頭進行部分安裝，測試其成效與穩定性。
3. 監測系統資料分析程序與撰寫相關程式：建立配合之分析程序，使其成果除可作為數值驗證外並可整合現有港區動態監測站，發展震後災損速報系統，並協調港研中心完成資料擷取操作與分析程序相關程式。
4. 完成研究報告書：將本年度成果，依據港研中心格式要求撰寫研究報告書。

## 1.4 研究方法與規劃進度

本研究計畫採用之方法主要包括考慮土壤-結構互制(soil- structure interaction, SSI) 反應之動態有效應力數值模擬(numerical simulation)與現地碼頭動態監測，數值模擬為延續前期之成果，修正土壤與介面之組構模式，以現場配置與邊界條件進行二維動態有效應力分析，其結果除可作為現地碼頭監測站規劃分析並可作為後續應用之基礎。為選取適合之監測站場址，將收集港區興建與後續調查之相關文獻，進行初步篩選，並提供給港研中心作為碼頭選取之建議，以進行後續港研中心向港區營運管理單位商借之程序，由港研中心選取之碼頭再進行場址之地表與水下調查，同時進行場址周圍微地動調查，以求取相關動力分析參數，並將現地調查所得結果提供數值分析用。利用數值分析與現地調查成果，據以規劃碼頭動態監測系統，相關自動監測設備亦將一併規劃，由於目前並無相關於現地營運中碼頭設置監測系統之完整文獻，且長期碼頭監測所需儀器與系統之耐候與穩定性均需特別考量，因此本計畫將採用不同量測技術，並發展可於現有碼頭安裝之程序，檢測這些設備之穩定性，降低後續維護之成本，完整全期研究流程如圖 1.1 所示，本年度預計完成動態數值模擬、監測場址選定及部分監測站安裝。

依據研究流程與進行步驟所規劃之執行進度如表 1.1 所示，本計畫執行之目標之一為建構可監測動態土壤-擋土結構互制行為之現地碼頭監測站，本年度將收集並整理土壤-擋土結構互制行為相關之文獻與分析方法，進行有效應力動態分析之土壤組構模式與模擬土壤結構間之介面元素，整合至可進行二維動態有限差分之 FLAC 程式中，進行考慮土壤非線性與孔隙水壓激發行為且可模擬擋土系統與上部結構之動態有效應力數值分析，相關土壤參數將由相關設計資料或重模試體進行動態性質與液化試驗結果進行參數反算，土壤與結構元素介面參數將收集相關文獻並進行參數靈敏度分析，求得可適切代表介面行為之參數，建構之模式將用以規劃現地監測站配置，由模擬結果及與相關文獻比對，可預測碼頭土壤-擋土系統互制行為，以建構碼頭震後速報系統及回饋設計與分析。

表 1-1 預定進度甘特圖(Gantt Chart)

工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	備註
互制行為與文獻彙整	■								
場址選定與現地調查		■ ※							
港區震測、微地動試驗與共振主頻分析		■							
初期土壤-結構互制數值分析		■							
現地監測系統規劃書			■						
期中報告				■ ※					
自動監測系統研發				■					
碼頭監測系統整合測試					■				
現地監測系統裝設與測試						■ ※			
修正土壤-結構互制數值分析					■				
期末報告								■ ※	
工作進度估計百分比(累積數)	10	20	30	40	50	75	85	100	
預定查核點	第1季:監測站場址選定與現地調查								
	第2季:期中報告								
	第3季:現地監測系統裝設與測試								
	第4季:期末報告								
<p>說明:(1)工作項目請視計畫性質及需要或依研究計畫綱要說明訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。</p> <p>(2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定:①工作天數②經費之分配③工作量之比重④擬達成目標之具體數字。</p> <p>(3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。</p>									

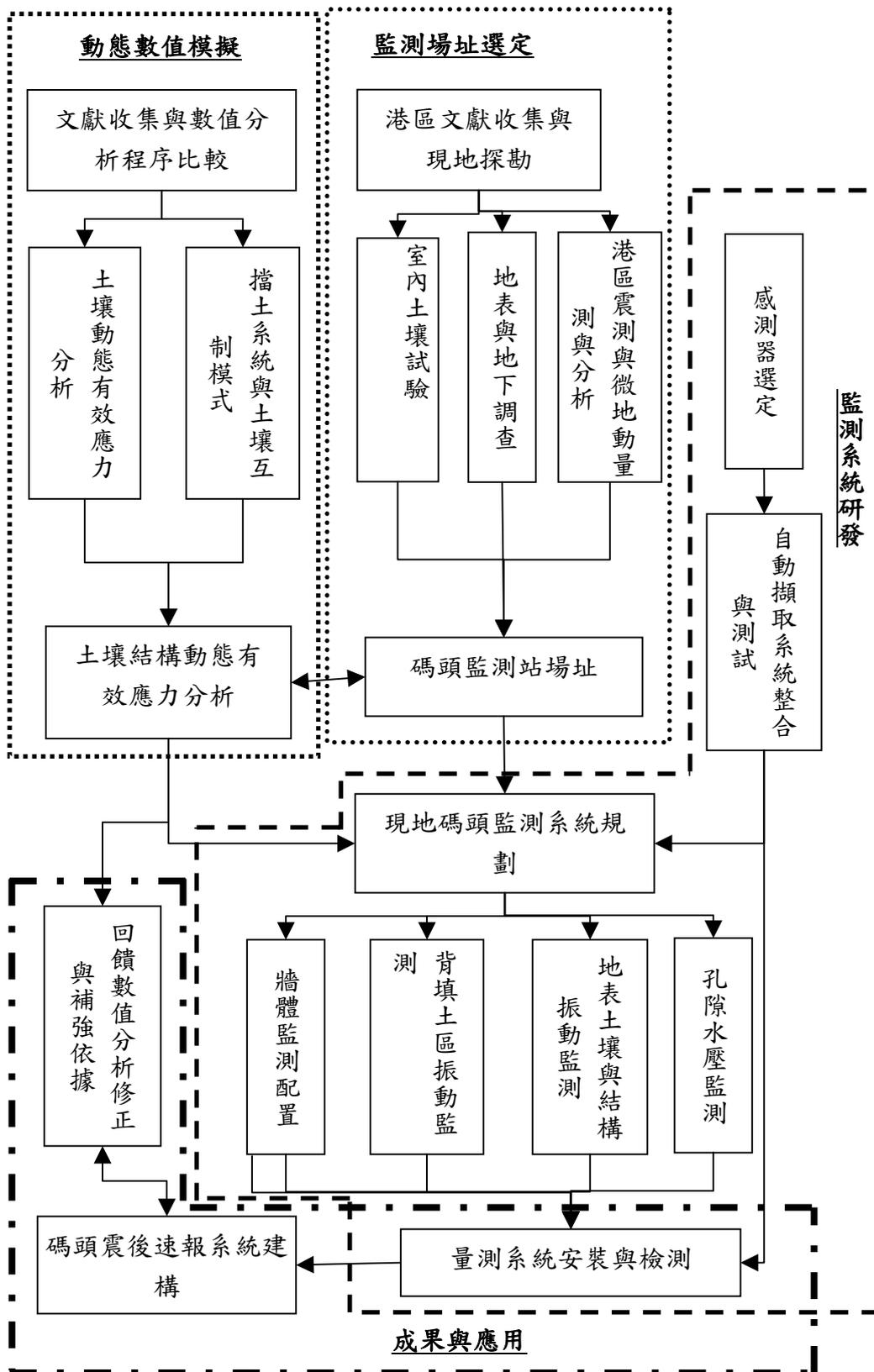


圖 1-1 研究流程圖

## 1.5 預期成果、效益及其應用

本計畫之預期成果如下：

1. 完成影響碼頭位移之動態水壓激發或液化之加速度門檻值。
2. 探討動力狀態下土壤-碼頭結構互制之行為，作為未來修正相關設計方法與現有系統補強之參考。
3. 提供現有動態土壤-結構互制行為分析方法驗證資料。
4. 提供不同形式碼頭受震動態數值分析程序作為功能性設計之基礎。

預期計畫執行效益及其潛在應用包括：

1. 經試驗或現地監測站資料驗證之數值分析程序，依數值模擬之成果，提出港區碼頭結構安全臨界值，包括臨界液化加速度、震後碼頭位移與變形、液化後碼頭穩定性等，作為港區災害應變管理之依據及提供目前耐震補強之策略及震後修復之參考。
2. 相關成果可進一步用於後續不同形式碼頭動態功能性設計之基準。
3. 分析即時監測結果及港區共振主頻分佈，作為各港區後續災害管理及地震災害速報系統之依據。
4. 研究成果提供各港務局及相關單位，作為港灣碼頭工程規劃設計之參考，以提升碼頭耐震能力減低震害。

## 第二章 文獻回顧與分析

### 2.1 液化土層碼頭破壞機制

地震導致碼頭擋土結構破壞之原因包括：(1)側向土壓力的增加，(2)水側水壓的減少，(3)背填土壤的強度喪失或導致液化。關於港區碼頭擋土結構容易引致嚴重的地震災害，文獻上記載的破壞案例很多 (Amano et al., 1955; Hayash et al., 1966 and 1970; Seed and Whitman, 1970; Nazaeian and Hajian, 1979; Noda and Hayasji, 1980; Hung and Werner, 1982; Pitilakis and Moutsakis, 1989; Ishibashi and Madi, 1990; PHRI, 1992; Inagaki and Iai, 1996; 港灣技術研究中心, 1999,) 其中位移量有達到 5 公尺，而沉陷量也有高達 2 公尺者，而且通常是沿著碼頭全線同時發生(長達數十或是數百公尺)，因此造成港區功能完全癱瘓，而其損失與復原工作所需費用與時間則難以估計。根據黃國祥(2002)相關地震災害文獻資料的收集，從 1923 至 1995 年期間文獻記載至少有 20 個破壞案例，且地震規模皆大於 6；災情比較嚴重者，皆有液化現象之報導。其中 1995 年的日本阪神地震為例，重力式沉箱碼頭的滑動位移平均達 3 公尺之多，而外傾角約 4 度，震後 RC-5 Rokko Island 沈箱式碼頭變形剖面如圖 2.1 所示。而臺中港於 921 後於#1~4 號碼頭，亦因後方土壤液化導致向海側滑移 0.5~1.7m，並使碼頭岸肩與後線產生高程差(如圖 2.2 所示)。而 Matsuo and O'Hara (1960)對於 23 個重力式港灣碼頭破壞案例之觀察，其中有 16 個是屬於牆底之滑動破壞，而另外 7 個則是兼具滑動與傾斜之破壞，因此建議主要的破壞模式是滑動破壞。

由過去地震災損案例得知，背填土壤發生液化與否對重力式碼頭及板樁式碼頭之穩定性破壞最為嚴重(Werner et al. 1998)，Ishibashi and Madi (1990)對於1983年發生於日本之Nihonkai-Chubu地震的港區受損碼頭案例進行探討，其中考慮若是背填砂土已達液化，則港灣擋土結構之安全係數遠低於未液化之狀況，與現地之破壞情形相符。所以在分析港灣構造物的穩定性時，背填土壤液化所產生的影響不容忽視。

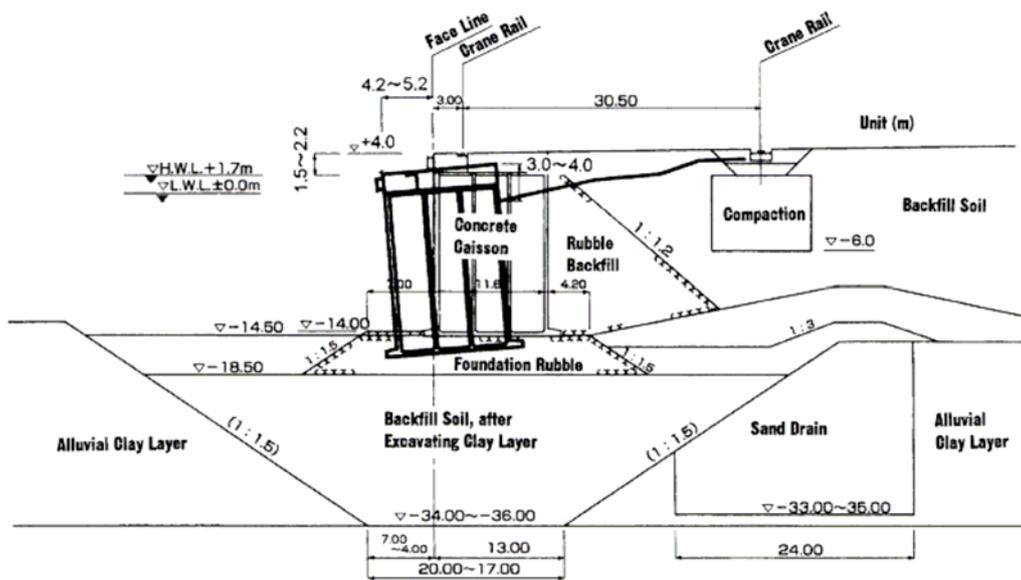


圖 2.1 RC-5 Rokko Island 沈箱式碼頭於 1998 Kobe EQ 震後變形剖面 (Iai et al. 1998)



圖 2.2 臺中港#1~4 沈箱碼頭於 921 震後碼頭岸肩與後線高程差側視圖

## 2.2 土壤-錨定版樁互制行為文獻

典型錨定版樁碼頭之配置如圖 2.3 所示，其基本組成包括面海版樁、錨定版樁、回填土壤及路面，本期計畫選擇錨定版樁碼頭為研究碼頭類型之原因有三：(1) 錨定版樁碼頭由於具有施工容易、設備簡單，水中工事較少及工期短之優點，為碼頭整建常用之碼頭形式，進行錨定版樁碼頭於動態分析時需考慮土壤-版樁-錨定-結構之互制行為，其行為複雜且相關研究國內較為少見，且現有錨定版樁碼頭抗液化強度分析均有待補正；(2) 錨定版樁碼頭屬於柔性結構物，其具有幾何形狀、質量分佈與勁度變化不規則之特性，考慮土壤非線性動態性質，以靜力分析方法難以反映結構物地震時的動態反應，需以動力分析方法分析設計；(3) 錨定版樁碼頭破壞常由碼頭位移量控制，以極限平衡法無法計算位移量。而發展考慮土壤-版樁系統-上部結構系統於液化前後之動態互制分析為進行相關結構設計、安全性評估及研擬防制對策之要件。

錨定版樁碼頭破壞之形式主要可分成版樁降服破壞、錨定破壞及後方回填土下陷，一般定義版樁破壞多以側向位移為指標，在日本一般以版樁頂端側向位移達 1.2m 為嚴重損害，圖 2.4 為日本阪神地震神戶港版樁式碼頭岸肩沈陷受損情形。

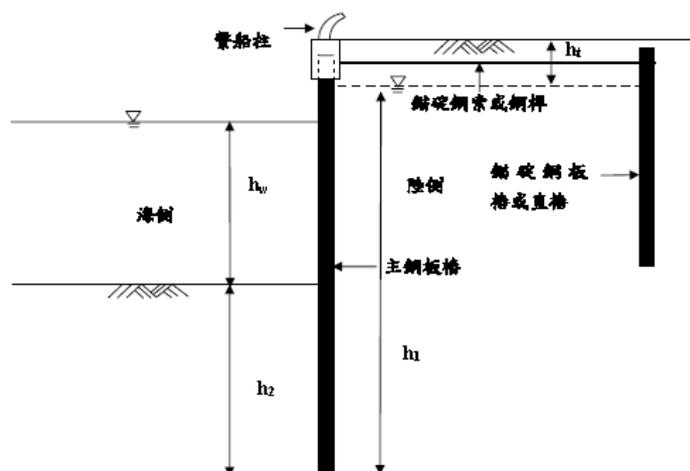


圖 2.3 典型錨定版樁式碼頭斷面圖(資料來源：「港灣工程專有名詞」)



圖 2.4 日本阪神地震神戶港鈹樁式碼頭岸肩沈陷受損情形

Iai et al. (1993)分析 O'hamma No. 2 Wharf 於 1983 Nihonkai-Chubu 地震破壞，其震前與震後碼頭斷面變化如圖 2.5 所示，以有效應力動力分析程式 FLIP 分析所得該錨定版樁之後方土壓力與彎距分佈如圖 2.6 所示，其中板樁之最大側向變位並非發生於版樁頂端，且其破壞機制主要為後方因土壤強度降低而使土壓力增加，最大變形發生於鄰近版樁兩側，且變形為累積增加而非突然破壞，亦即後側土壤以有限變形之 cyclic mobility 形式變化。

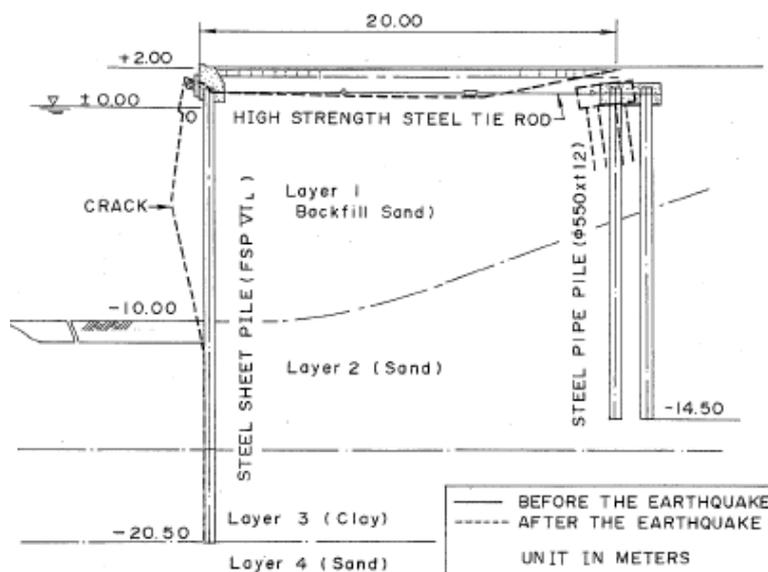
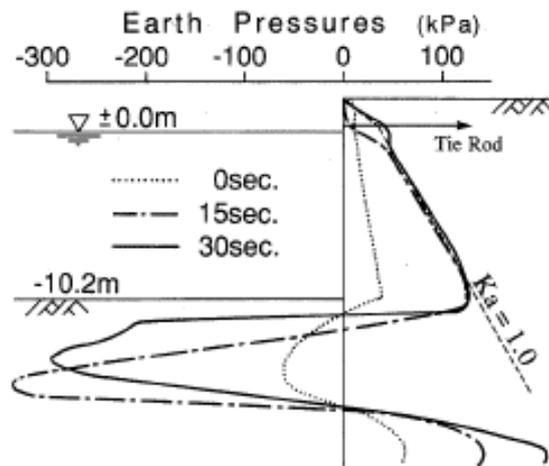
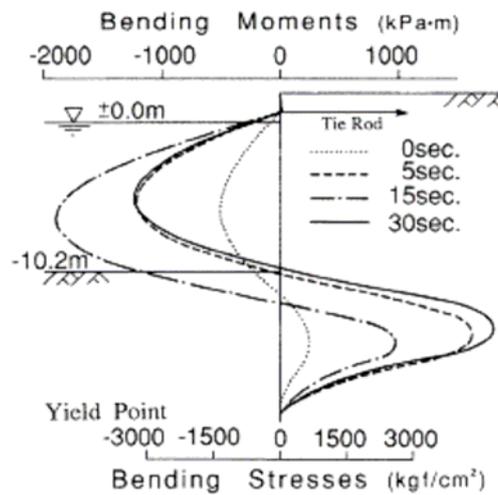


圖 2.5 Ohama No. 2 錨定鈹樁碼頭於 1993 Nihonkai-Chubu 震後變形剖面 (Iai and Kameoka 1993)



(a) Earth Pressure



(b) Bending Stress

圖 2.6 Ohama No. 2 錨定鉸樁碼頭於 1993 Nihonkai-Chubu 中土壓力與彎距分佈圖 (Iai and Kameoka 1993)

### 2.3 液化土壤—擋土結構系統互制數值分析

針對土壤液化後對港灣擋土結構所造成之影響分析，由於液化前後土壤性質、力學機制與作用方式等明顯不同，一般多將其分成二個階段：(1)自受地震力作用至土壤開始產生液化以及其後過程之歷時互制行為與(2)液化土壤產生側潰後考慮地盤側向位移對擋土結構所造成之影響。

現有考慮液化土壤-擋土結構互制(Soil-retaining structure interaction)數值分析方法包括擬靜態分析(pseudo-static analysis)及動力數值模擬(dynamic numerical analysis)二種。擬靜態分析為利用 Mononobe-Okabe (M-O)法，將地震力轉換成等值側向土壓力，引用極限平衡法側向土壓力理論進行穩定性分析，Iai et al. (1998)以數值分析結果與 M-O 法進行比較，結論為土壤液化前所受之土壓力小於 M-O 之等值土壓力。而液化後壓力則將後方土壤以等重流體計算作用於擋土牆之側向壓力。牆體位移則可以降服加速度(yielding acceleration)及 Newmark 法加以評估。整體而言，擬靜態分析法其參數決定有賴工程師判斷，且僅能提供牆體極限平衡安全係數，對土壤與牆體之互制反應、液化前後動態反應、土壤勁度影響及孔隙水壓力激發對互制反應之影響等均無法提供相關資訊。

液化土壤—擋土結構系統之動態行為實際上應為耦合反應(coupled response)，即經由土壤傳播之地震波會造成擋土牆與上部結構震動，且上部結構之震動亦會影響下方土壤之動態行為，分析液化土層之擋土結構系統時更需將因孔隙水壓激發造成之地震波傳遞影響及液化土層側向位移一併考量，因其物理模式複雜，為簡化分析，實務上多採將土壤動態反應與擋土結構個別分析之非耦合分析(decoupled analysis)，並以動態 Winkler 系統模擬土壤—擋土結構之互制行為，Winkler spring 之功用為連結土壤與土中結構元素之介面，其物理意義為使其力學反應可彼此連結，於數值模擬中則為連結土壤固體元素與結構樑元素之介面元素(interface element)，以形成完整勁度矩陣。其物理模型如圖 2.7 所示，將牆體視為埋置土中之樑，周圍土壤以 Winkler 彈簧模擬土壤勁度並以並聯或串聯之 dashpot 模型模擬土壤阻尼(damping)效應，其中土壤動態反應分成二區：近場區(near field)及自由場(free field)，自由場為單純考慮向上傳播之剪力波造成之地盤反應，其反應與土中結構元素互不影響，近場區則考慮土壤—基樁互制效應之土層反應，近場區之土壤元素反應除受地震波影響外，亦受結構反應影響，結構元素亦受地震波與近場土壤元素影響，近場區連結結構與土壤元

素之 Winker 彈簧多採用可模擬非線性彈塑性質之彈簧，考慮背填土液化時尚須將孔隙水壓力激發對土壤勁度與彈簧勁度改變加以考慮。

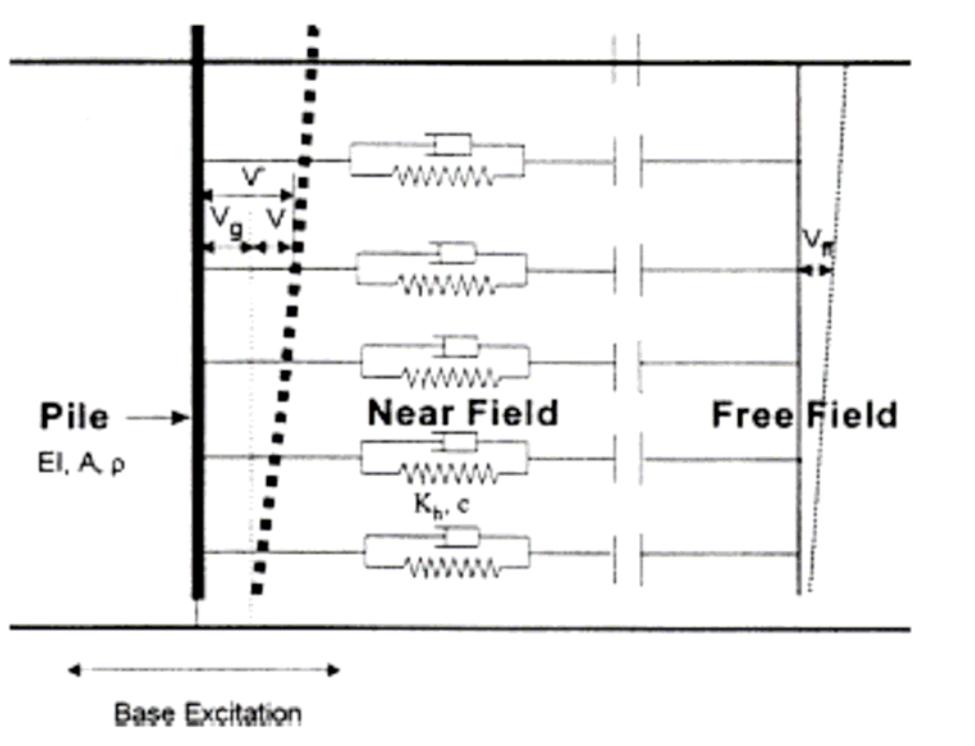


圖 2.7 動態 Beam on Winkler Footing 模型示意圖  
(Modified from Finn and Fujita 2002)

本計畫以 FLAC 程式進行動態有效應力分析，FLAC 為有限差分數值分析程式，其內建之 Finn Model 與 Marin et al. (1975)相同，可進行與 Klar and Frydman (2002, 2004)所建議之程序相同之時間域動態有效應力分析，國內亦曾利用 FLAC 進行大壩動態有效應力分析(交通大學防災中心, 2000)，本計畫前期亦以 FLAC 及其 Dynamic option 進行考慮滲流之自由場與棧橋式碼頭動態有效應力分析，其程序類似於 Klar and Frydman (2002, 2004)之建議，雖然相關參數仍須進一步率定，但其定性行為與文獻及現地震後觀測結果類似。

## 第三章 場址選定與現地調查

### 3.1 場址選定

本年度規劃裝設棧橋式碼頭動態監測系統之候選場址為臺北港東 9 號碼頭(TPE09)，其主要考量為該碼頭為典型錨定式版樁碼頭、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完善遮蔽物，其於港區之相關位置如圖 3.1 所示，TPE09 號碼頭為工作碼頭，總長度為 200 m，深度為 4.5~6.5 m，其典型剖面如圖 3.2 所示，其擋土結構以錨定式鈹樁組成，內部回填砂土與礫石，地表以混凝土版連結，TPE09 碼頭周圍之鑽探剖面如圖 3.3 所示，其 40m 深度之土層由上而下為平均 N 值為 10 左右之軟弱粉土質砂土(SM)、平均 N 值為 25 左右之堅硬粉土質砂土(SM)、平均 N 值為 7 之軟弱黏土(CL)。

經與管理單位基隆港務局臺北港分局協調，在不破壞版樁結構與不影響碼頭營運之原則下，取得於 TPE09 前端轉角之現有驗潮站附近裝設監測站，其外部周圍環境如圖 3.4 所示，內部現況如圖 3.5 所示，該驗潮站為 RC 結構物，內部有自計式潮位計監測主機，可提供監測主機所需之遮蔽與電源，地板距碼頭棧版有 1m 之高差，可避免淹水，且監測站緊鄰碼頭，可免除管線佈設所需之開挖，為理想之監測場址，但因其位於碼頭轉角，因此其反應需考慮三維效應，此將於後續計畫進行相關探討。

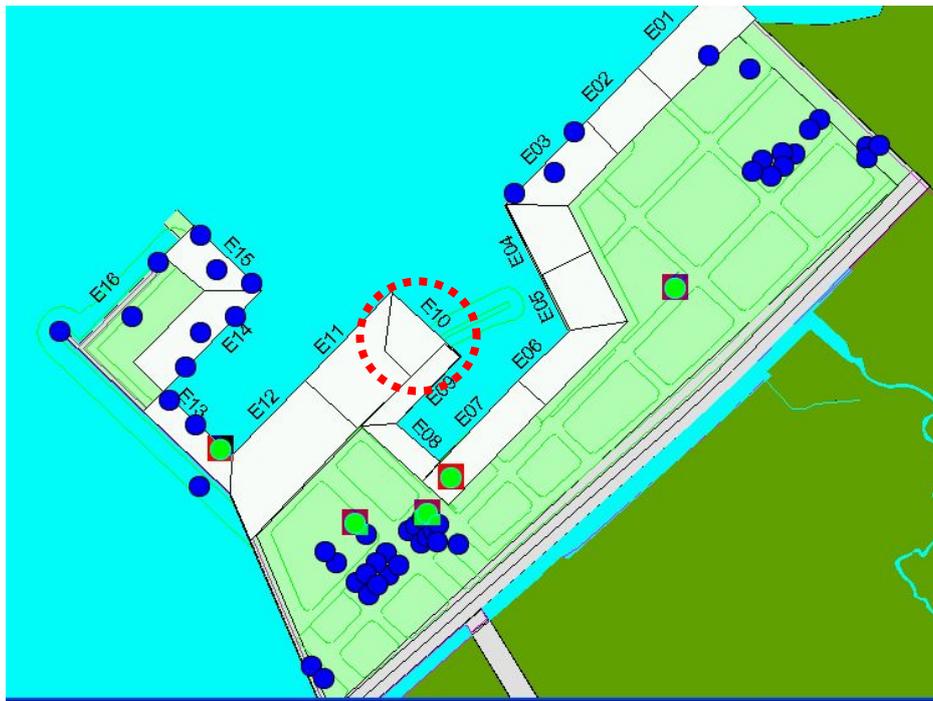


圖 3.1 TPE09 碼頭位置圖(Google earth、IHMT)

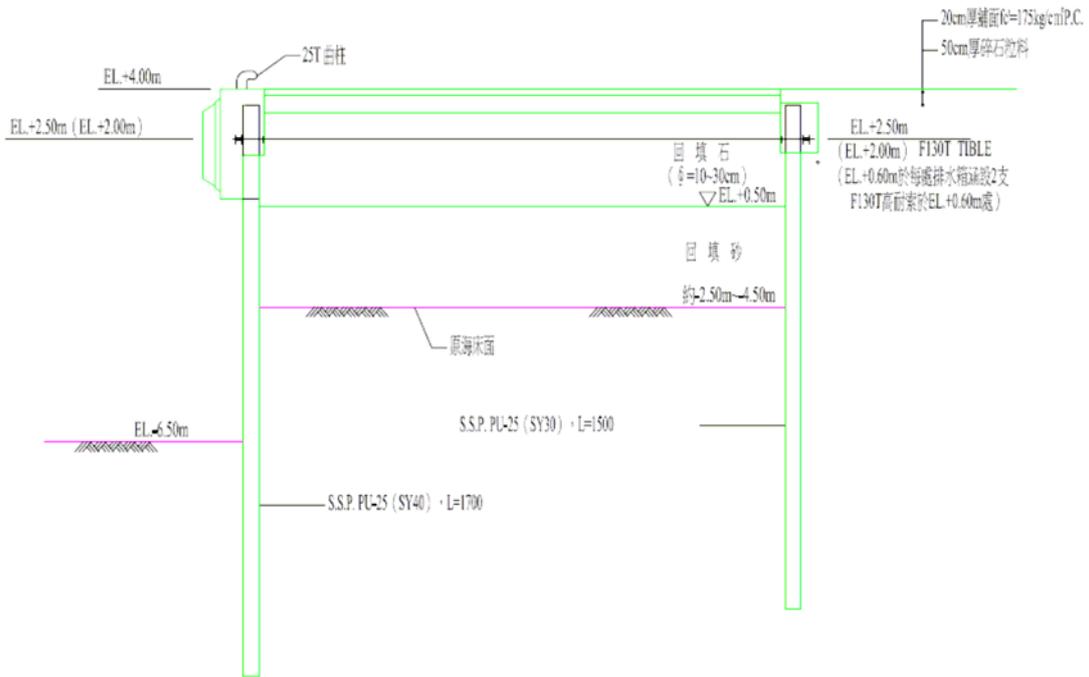


圖 3.2 TPE09 碼頭剖面圖(IHMT)

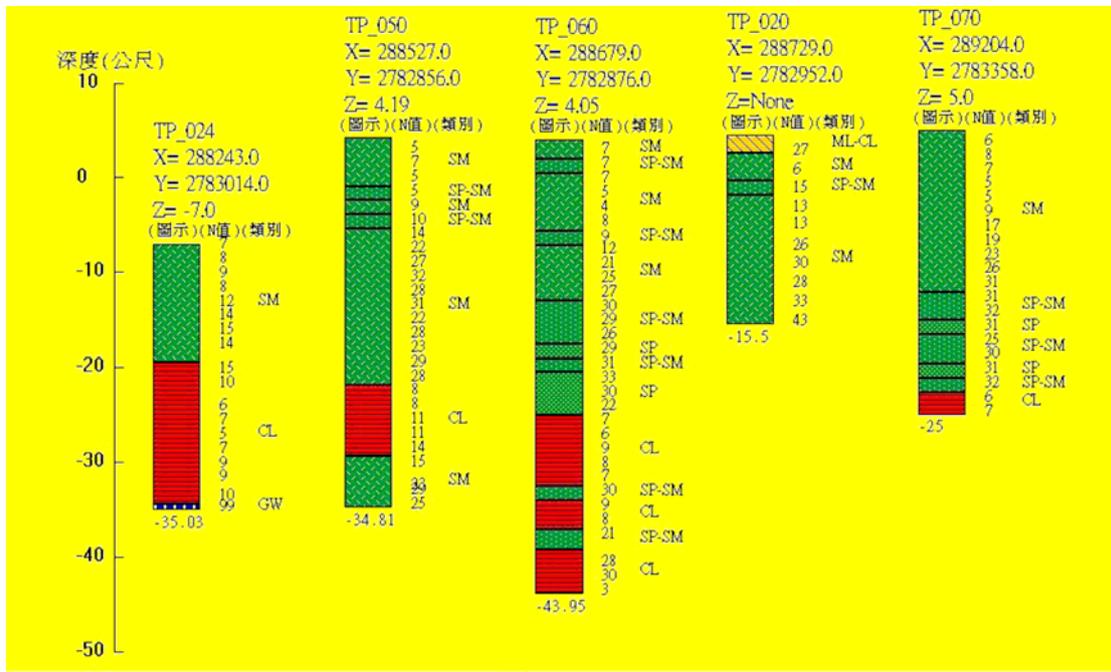


圖 3.3 TPE09 碼頭周圍鑽探紀錄(IHMT)



圖 3.4 TPE09 驗潮站外部周圍現況



圖 3.5 TPE09 驗潮站內部與潮位計主機

### 3.2 監測港區現地調查

為瞭解試驗場址之土層分佈，以便於後續計畫分析模型建立與監測配置，本研究利用多頻道表面波譜法(MASW)於選定之試驗場址進行震測試驗。因碼頭區上方為混凝土版且與版樁連結，下方為回填之礫石，混凝土版與礫石並非完全密接，因此無法以表面震測進行探測，且因碼頭所在無法進行鑽探與開挖，僅能參考施工時之相關資料，進行相關參數推估，由施工資料得知現地為一沖積土層，進行地表高程修正後研判於鄰近區域之原有土層分佈差異不大，因此於港研中心於臺北港現有自由場監測站旁進行表面波量測，作為前期資料驗證與求取分析所需彈性參數。

施測地點為臺北港現有自由場監測站旁，其周遭環境如圖 3.6 所示。施測之測線長度為 12 公尺，佈設之測線位置如圖 3.7 所示。本計畫使用之多頻道表面波震測試驗(MASW)，所使用之量測儀器，包括：Geometrics Geode 數位震測儀、震測電纜、OYO Geospace 公司製造型號 GS0-11D 4.5HZ 受波器 12 顆、震源為 14 磅長柄鐵槌及 Geometrics 公司製造型號為 23464-01 之觸發器，如圖 3.8~ 3.12 所示。利用 KGS 之 Surfesis 軟體，以泛音分析(overtone)求得現地頻散曲線後反推之剪力波波速剖面。本次施測採用 12 顆受波器，各受波器間距為 1 公尺，近站支距分別為 6 公尺、7 公尺做正向及反向施測如圖 3.13 所示，分析後剔除不良之資料，最後結果為 MASW\_1 與 MASW\_2 兩筆資料，其剪力波波速剖面如圖 3.14 所示。在地表 4.5 公尺內土壤之剪力波波速約為 180 m/s 左右，為一相對均勻土層，而 4.5~5.5 公尺其剪力波波速約為 220m/s，推測距地表 4.5 公尺處剪力波波速變化之原因為地下水位造成。經與臺北港 A2 區 300m 地震監測井地直剖面結果比較(如圖 3.15 所示)，距地表 6 公尺內為回填土層，施測與之前鑽探之結果大致吻合。



圖 3.6 臺北港既有監測站周遭環境現況

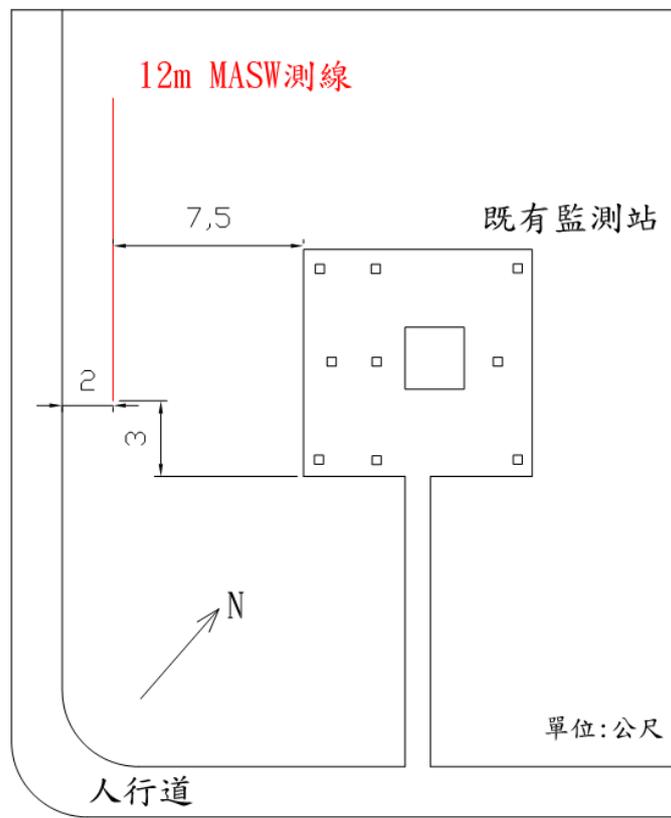


圖 3.7 既有監測站與多頻道表面波震測測線配置圖



圖 3.8 筆記型電腦與多頻道可攜帶式數位震測儀



圖 3.9 震測電纜



圖 3.10 高感度電磁式速度受波器(4.5Hz)



圖 3.11 長柄手持式鐵錘及橡皮軟墊



圖 3.12 Geometrics 公司製造型號為 23464-01 之觸發器

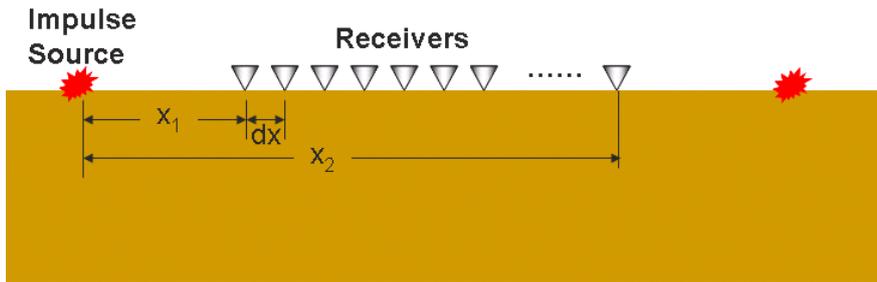


圖 3.13 施測分法之配置方式

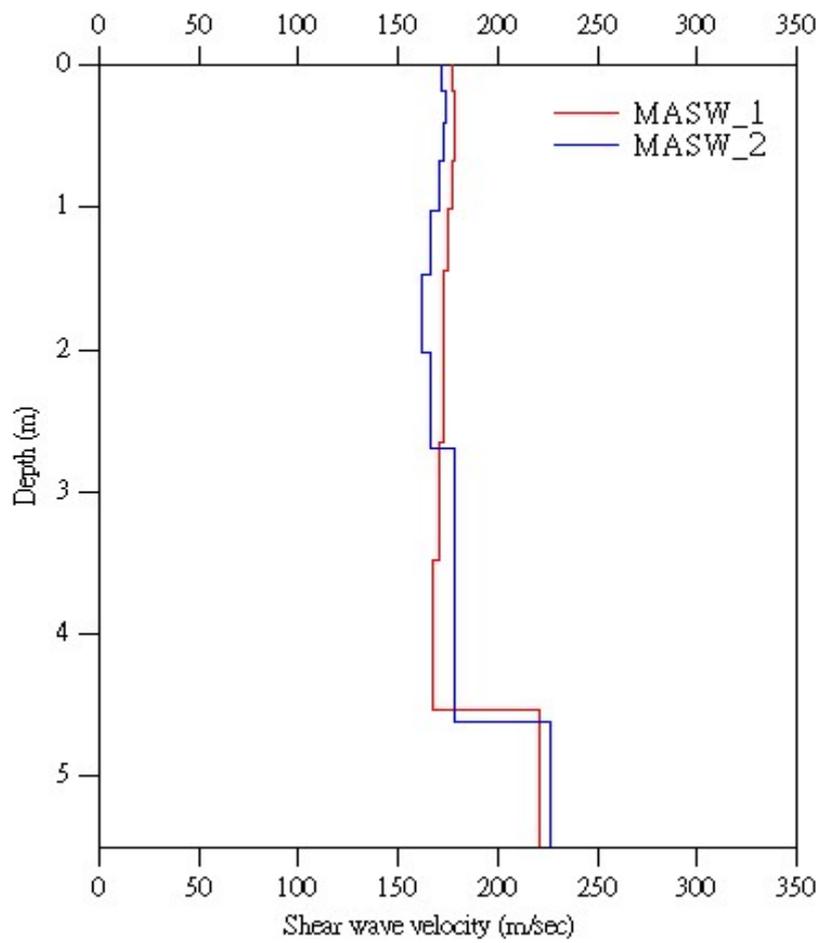


圖 3.14 MASW 之剪力波速剖面

地點：台北港A2區

日期：91/5/30~90/6/17

地下水位：GL-5.00M

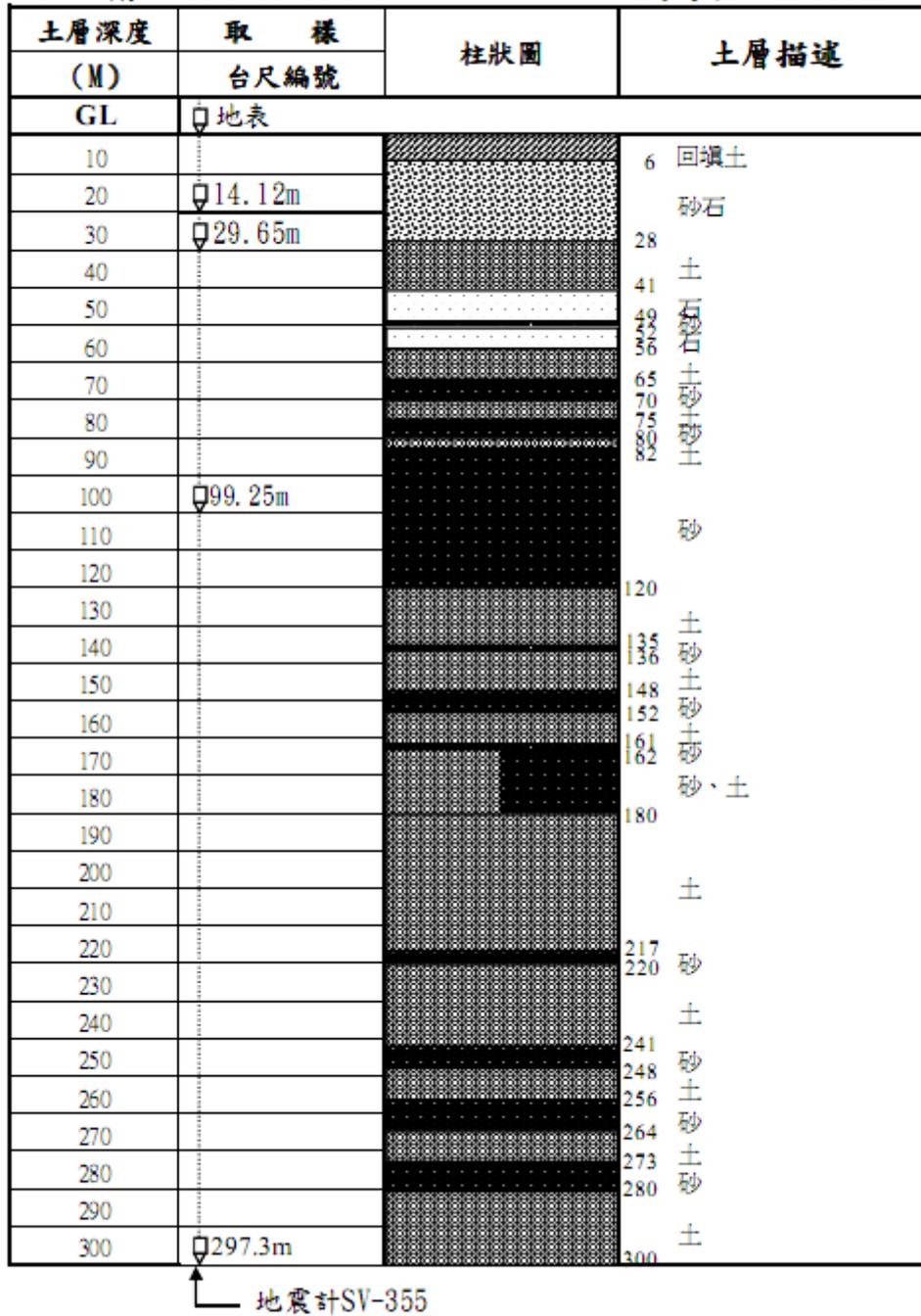


圖 3.15 臺北港區 300m 地震監測井地質剖面概況 (IHMT)

### 3.3 港區微地動試驗與共振主頻分析

由於營運中碼頭取樣不易，為規劃營運中碼頭動態監測系統裝設與求取數值分析所需參數，本年度於選定場址地質概況調查作業中，除進行表面震測外，並以微地動(micro-tremor)量測，配合 Nakamura (1996, 2000)之單站法，以水平與垂直向震幅放大頻譜比(H/V amplification spectrum ratio)，探討場址之共振主頻與平均波速，本部分試驗由港研中心主導，本研究團隊提供支援之人力，並協助發展訊號處理與分析程序。

本計畫所採用之微地動量測技術為 Nakamura (1996, 2000)之單站頻譜比法，其原理為假設地表下方為均質等向之半無限空間，由岩盤產生之體波(body waves)微震分成垂直向( $V_b$ )與水平向( $H_b$ )分量向地表傳播，地表量測之微地動(tremor)可分成垂直向( $V_f$ )與水平向( $H_f$ )分量，另外岩盤露頭(outcrop)於地表造成之表面波(surface waves)其垂直與水平分量分別為  $V_s$  與  $H_s$ ，定義向方岩盤體波於上方地層傳播時其垂直與水平向放大因子分別為  $A_v$  及  $A_h$ ，考慮垂直與水平向之體波震幅相同，或將量測之微地動分別對體波正規化後，因表面波震幅相對於體波之比值遠小於 1，因此可以忽略不計，另垂直向之放大係數( $A_v$ )小於水平向放大係數( $A_h$ )，定義其水平向與垂直向震幅之比值為 Quasi Transfer Spectrum (QTS)，QTS 與水平向放大係數近似，此一方法與基本振態之反應類似，因此可由 QTS 得到水平向放大係數頻譜，由頻譜可得之地層之主頻，水平地盤之主頻( $f_0$ )與厚度(H)與平均剪力波速( $V_{sh}$ )關係為：

$$f_0 = \frac{V_{sh}}{4H} \dots\dots\dots(3.1)$$

水平地盤之主頻( $f_0$ )及水平放大頻譜可用於地盤反應與液化分析及與震波衰減 Q 值評估。

訊號處理程序以擷取頻率為 200 Hz，量測一垂直與兩個互為垂直之水平向微地動資料為例，資料處理程序說明如下：

1. 檢視所有量得之原始紀錄，將每筆紀錄中受到人為雜訊干擾之區段剔除。將每筆品質良好量測紀錄以約 4096 個資料點(20.48

秒)為一個區段，將時間域之資料做快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform) 以獲得頻譜 (Amplitude Spectrum) 資料，所得之頻寬為 0.05-100 Hz。

2. 以每次將時間軸平移視窗之一半(2048 個資料點)擷取下一個時間軸視窗，進行頻譜分析，如此程序重複直至量測結束，將所有時間軸視窗之頻譜進行統計分析，將偏移超過一個標準差之資料剔除後所得之平均頻譜。

在頻率域取二個水平向頻譜之均方根 (Root Mean Square)，將所得之水平向頻譜均方根除以垂直向頻譜則可得到水平向對垂直向震幅比頻譜(HV ratio spectrum)，以此代表 QTS，由 QTS 可求得主頻與放大頻譜。

### 3.3.1 臺北港區微地動試驗與共振主頻分析

本計畫所用之微地動儀為港研中心現有 Guralp CMG-6TD 數位寬頻地震儀(圖 3.16)，選定實驗區域後，規劃測線使各測點散佈圍繞全區，利用晚間無重型機械運作時施作以避免人為震動之影響，每一測點施測 15 分鐘。測線圍繞臺北港全區周邊，以 200 公尺設一個測站，總計量測 22 站，測站資料如表 3.1 所示，臺北港區如圖 3.17，各站位置如圖 3.18 所示，典型測站分析反應頻譜比圖如圖 3.19。



(a) 三軸微地動儀介紹



(b) 野外量測情形

圖 3.16 微地動儀野外量測示意圖

表 3.1 臺北港區測站資料

點號	經度	緯度	高程	誤差	第一主頻	放大倍率	第二主頻	放大倍率
TP01	289184	2782666	5	9	2.42	1.66		
TP02	289283	2782772	4	10	1.71	3.37	15.04	1.42
TP03	289305	2782501	4	8	1.42	0.05		
TP04	289747	2782942	6	7	1.42	0.04		
TP05	289382	2782855	5	8	1.46	3.1	11.13	1.46
TP06	289516	2782746	5	7	1.51	1.91		
TP07	289406	2782747	7	9	1.76	2.71		
TP08	289653	2782882	5	8	1.51	2.77		
TP09	289433	2782632	5	9	1.17	2.79		
TP10	289796	2783185	6	7	1.07	2.93		
TP11	289964	2783314	7	8	1.12	1.82		
TP12	289565	2782675	7	8	1.17	3	3.42	0.71
TP13	289901	2783058	7	9	0.98	1.97		
TP14	289313	2782388	6	7	1.73	2.99		
TP15	289397	2782476	5	8	2.69	3.51		
TP16	289470	2782546	5	8	1.56	3.58		
TP17	289433	2782354	4	10	1.81	2.85		
TP18	289532	2782456	6	8	1.61	3.03		
TP19	289477	2782938	4	8	1.42	5.71		
TP20	289974	2783606	7	8	1.07	2.28		
TP21	290092	2783735	7	8	1.46	2.72		
TP22	290369	2783227	3	10	1.42	2.42		



圖 3.17 臺北港區圖

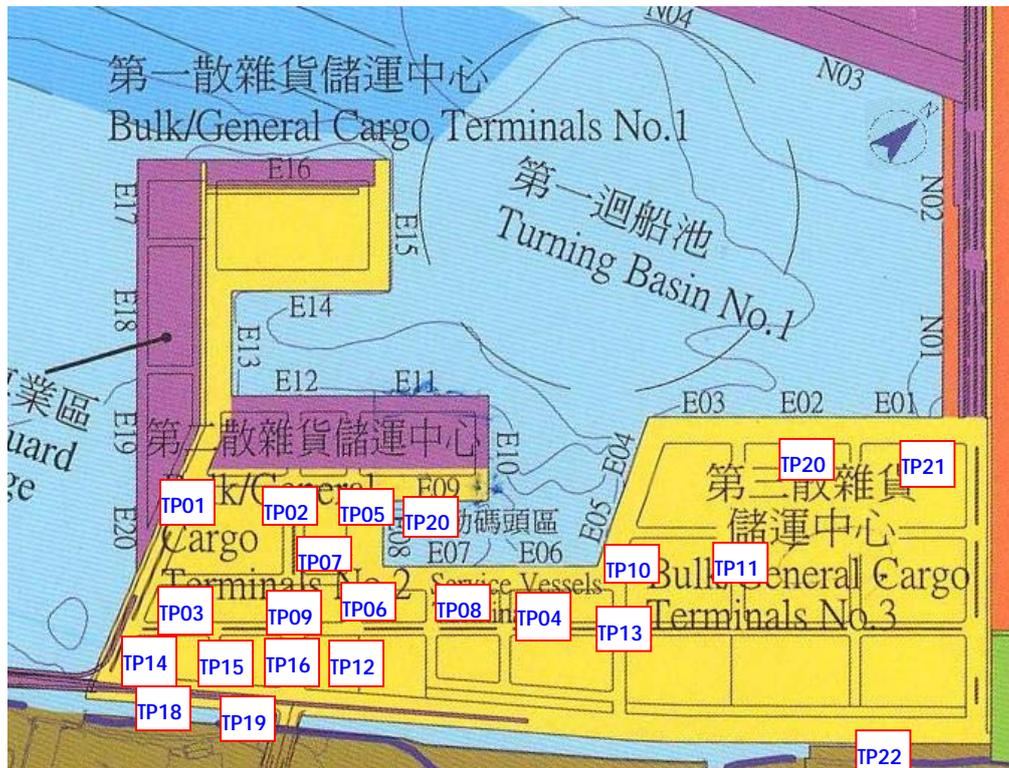


圖 3.18 臺北港微地動測站位置圖

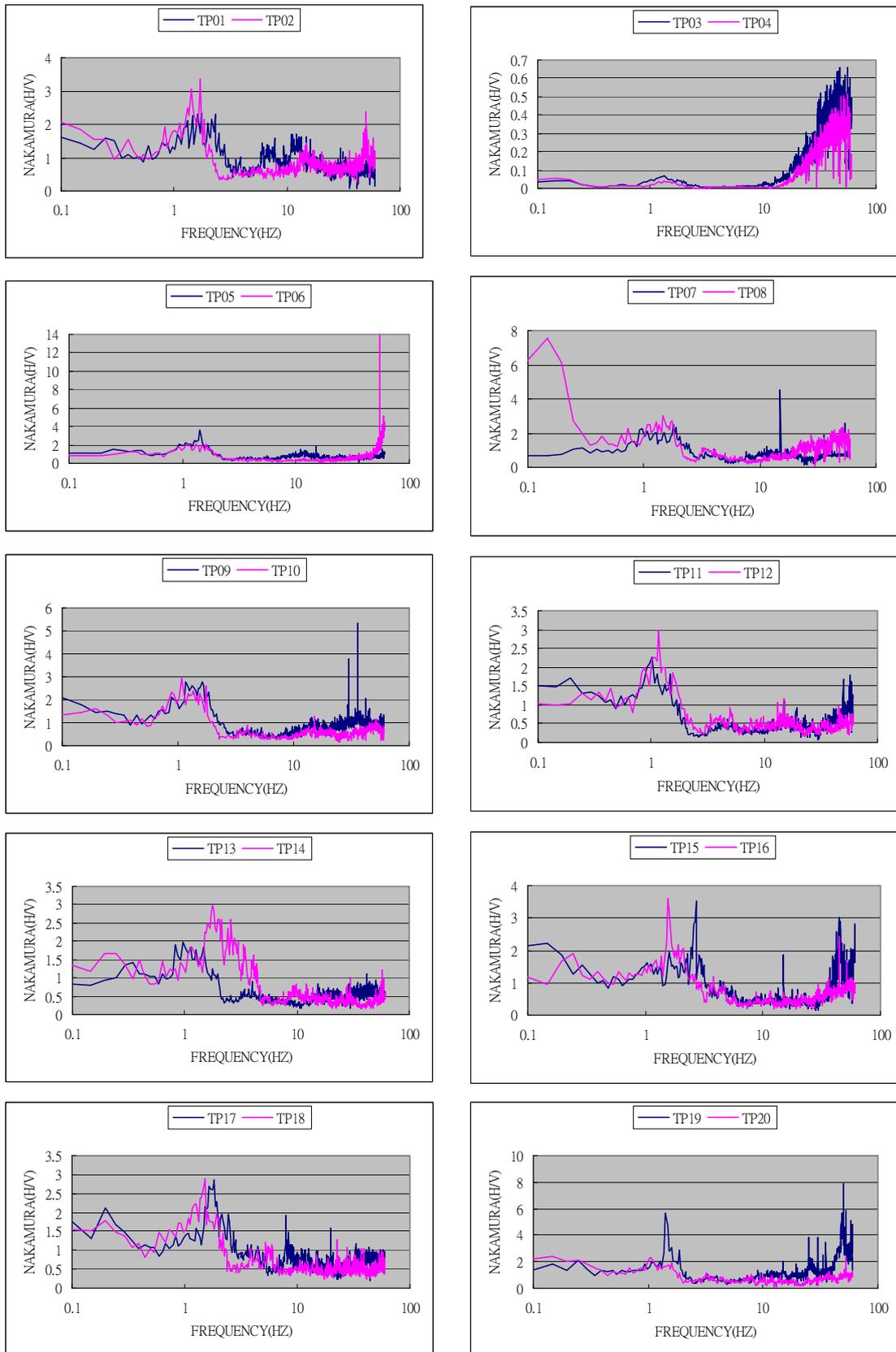


圖 3.19 臺北港區各微地動測站分析反應頻譜比【H/V】圖

量測結果，臺北港區主頻除了一測站為 2.69 外，其於大約介於 0.98~1.81Hz，若平均剪力波速( $V_{sh}$ ) 400 m/s，利用經驗公式  $f_0 = V_{sh}/4H$ ，可推得岩盤深度約 102~55 公尺，臺北港區共振主頻等值分佈圖，如圖 3.20。另由陸上與 TPE09 碼頭之反應與分析結果顯示其頻譜結果相當接近，且港區之共振主頻差異不大，配合鑽探紀錄分佈顯示港區內地質分佈具有一定之一致性，基於此結果，後續數值分析將利用岸上鑽探資料推估 TPE09 碼頭之地質模型。

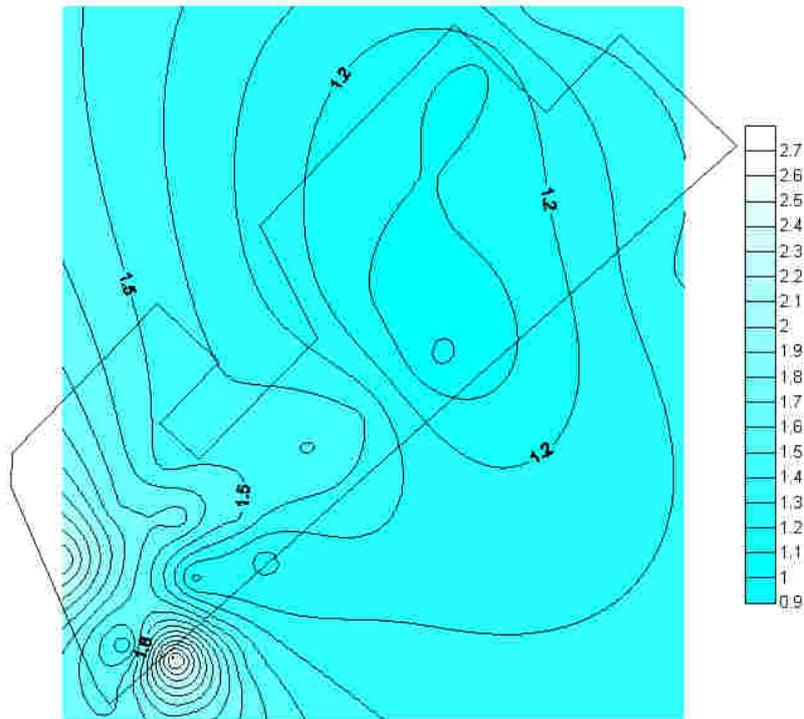


圖 3.20 臺北港區共振主頻等值分佈圖

## 第四章 錨定版樁動態數值模擬

本年度進行之數值分析主要為配合現地監測站配置與評估引致破壞之門檻加速度，以數值方法進行選定場址之動態有效應力分析。承續前期以 FLAC 所完成 2 維棧橋式碼頭分析程序，進行 TPE09 錨定式版樁碼頭之動態分析，所用之分析原理、程序、相關參數及成果說明如下。

### 4.1 分析原理

本計畫應用 FLAC 及其動態模組進行錨定版樁碼頭有效應力分析，FLAC 為二維外顯(explicit)有限差分程式，其運算過程中是以「時階的形態」(time-stepping fashion) 來求解每一個節點(node)的運動方程式，利用切的很小的時階，達到節點或元素(zone)間之訊息或變化不會傳給鄰近之節點或元素之假設，因此可對將連續空間離散化之節點進行個別運算，不需如內顯(implicit)有限元素般求解聯立方程組，而在每一個時階中，利用系統原本的不平衡狀態決定每一節點的不平衡力，然後求解其運動方程式，以求得該時階下各節點的速度，節點速度決定後，將速度積分求得節點的位移及並以位移-應變矩陣計算該時階之應變增量。應變增量決定後再利用材料的組合律求得對應之應力增量，將應力增量加上原來的應力狀態，即成為新得應力狀態，並可得另一不平衡力，再進行下一時階的運算，如此反覆運算直至不平衡力趨近於零，達到平衡為止。

由於 FLAC 均採取時階運算，雖然在解一些穩態問題時因採小時階而需較長運算，但有限元素在求解非線性材料與大應變模擬時，常需進行疊代且需採用特殊解法，外顯有限差分運算因不需求解聯立方程組，所以相較而言較為簡單，另外由於外顯有限差分運算不需建立完整勁度矩陣，因此對於加入介面元素(interface element)與不同偏微分控制方程式相對簡單，因此近年已陸續加入邊界元素、結構元素及地

下水滲流求解等，且其本身解的是完整的運動方程式，因此適於求解動力問題。由於進行土壤有效應力動態分析時，常需面對非線性與大應變行為，因此近年廣為應用於模擬地工材料之動態非線性行為，若結合介面元素與結構元素，可進一步模擬土壤結構互制，而導入孔隙水壓力激發模式於土壤之組構模式，可進一步進行土壤有效應力動力數值分析。

為進行動力分析，需在 FLAC 在原來靜力分析架構下增加包含阻尼效應、吸能邊界、動態邊界及孔隙水壓力激發模式之 FLAC Dynamic 額外選項，其相關功能說明如下。

#### 4.1.1 FLAC Dynamic 介紹

進行動態分析時需考慮波傳行為在有限尺寸網格之影響，因此對應力波於網格邊界之折射與反射行為需加以考慮，且在進行模擬時需考慮到應力波傳遞時其能量消散行為，而 FLAC 的 Dynamic Option 提供了阻尼與吸能邊界，此外內含 Finn model 可模擬孔隙水壓力激發，配合其地下水模式與有效應力計算，可適切模擬土壤液化現象。Klar and Frydman (2002, 2004)以 FLAC 結合 Martin et al. (1975)之孔隙水壓力激發模式並考慮水壓消散行為進行時間域三向度液化土層一基樁動態分析，雖然分析時其土壤勁度與孔隙水壓分別考慮，但其結果顯示接近於考慮耦合反應之有效應力分析。

#### 1. 力學阻尼

應力波於固體材料傳遞時，其震幅會隨傳遞路徑長度增加而逐漸降低，亦即其單位體積攜帶之能量會隨傳遞距離增加而減少，一般稱材料之吸能效應為阻尼(damping)，阻尼之來源包括應力波傳遞時因應力波擾動範圍增加而使單位體積之能量降低之幾何阻尼(geometric damping)與材料受擾動時應變吸收之能量，稱為材料阻尼(Material damping)。幾何阻尼一般較小且於一般動態模擬可自然滿足，材料阻尼(Material damping)傳統多以不具物理意義之數值阻尼

模擬，彈性系統間常見以和質量或勁度相關之 Rayleigh damping 模擬，其缺點為物理意義不明顯且當材料進入非線性應力應變行為時，不易模擬。

FLAC Dynamic 提供數種可模擬材料阻尼效應之方式，除傳統 Rayleigh damping 外，增加了用於模擬壓力波傳遞之人工阻尼 (artificial damping) 與考慮非線性應變關係之阻滯阻尼 (Hysteretic damping)，阻滯阻尼考慮類比於等值線性 (linear-equivalent) 之效應，考慮非線性剪應力與剪應變關係，引入 backbone curve 與 Masing rule 形成阻滯圈，由阻滯圈可計算不同剪應變下之割線剪力模數 (secant shear modulus) 與阻尼比 (damping ratio)，因其較符合土壤之非線性動態特性，因此適合模擬土壤或岩石等高度非線性地工材料，本計畫採用 Hardin and Drenvich (1972) 所提出之剪力模數與應變震幅關係，以試誤法求取最符合室內試驗結果之參考應變 (reference shear strain)。阻滯阻尼之缺點為阻尼計算時與非線性塑性應變組構模式分別獨立，因此無法完全模擬塑性應變之影響。

## 2. 吸能邊界

為在有限網格下模擬半無限空間下波傳行為，網格之側向邊界需能滿足實際波傳行為，亦即需降低因邊界束制條件而產生之反射應力波並允許能量逸散，理論上採用較大的邊界距離時，其幾何阻尼與材料阻尼可以吸收大部份的波，使傳達至邊界之應力波震幅很小，使反射能量誤差較小。但實際進行數值模擬時，因網格區域有限，在靜態分析時，網格延伸範圍可依模擬精度配合數值測試決定其主要影響範圍，但進行動態分析時，應力波傳遞之範圍遠較靜力分析為大，雖然幾何阻尼效應會造成應力波震幅衰減，但其影響仍較靜力分析為大，當應力波接觸數值模型邊界時，會造成反射現象，此與現地大範圍有所不同，而使分析造成誤差。

為使數值模型可符合動力行為，需於人為之數值邊界施加可消除應力波反射效應之邊界，一般多以黏滯邊界模擬，FLAC 中採用

Lysmer and Kuhlemeyer 所提出的黏滯性邊界條件，在邊界的正向與切向上加上阻尼盤(dashpot)，吸收傳至邊界之能量而不產生反射，稱為安靜邊界(quiet boundary)，此外分析土壤與結構互制行為問題時，所模擬區域平面與平面向外方向(即 Z 方向)均會產生消能效應。平面上能量散射可由黏滯邊界條件吸收，FLAC 程式在平面向外方向採用 Lysmer(1975)所建議之 3-D 阻尼，其物理模型為可吸收平面向外方向能量之黏滯阻尼盤(viscous dashpot)。

整合動態荷重與無限空間波傳邊界，可進行自由場動態分析，其數值模型如圖 4.1 所示，側向以黏滯邊界模擬，底部依其與網格土壤之相對勁度差異分為柔性基底(flexible base)或剛性基底(rigid base)，當網格底部之材料與下方勁度差異不大時，需以柔性基底模擬，亦即需允許應力波傳遞至下方而非反射回網格，因此需於底部增加黏滯邊界，而剛性基底則以固定邊界模擬即可，FLAC Dynamic 中另提供可模擬垂直側向邊界之邊界條件稱為自由場邊界(free-field boundaries)，其主要為自動施加黏滯邊界於兩側邊界節點。

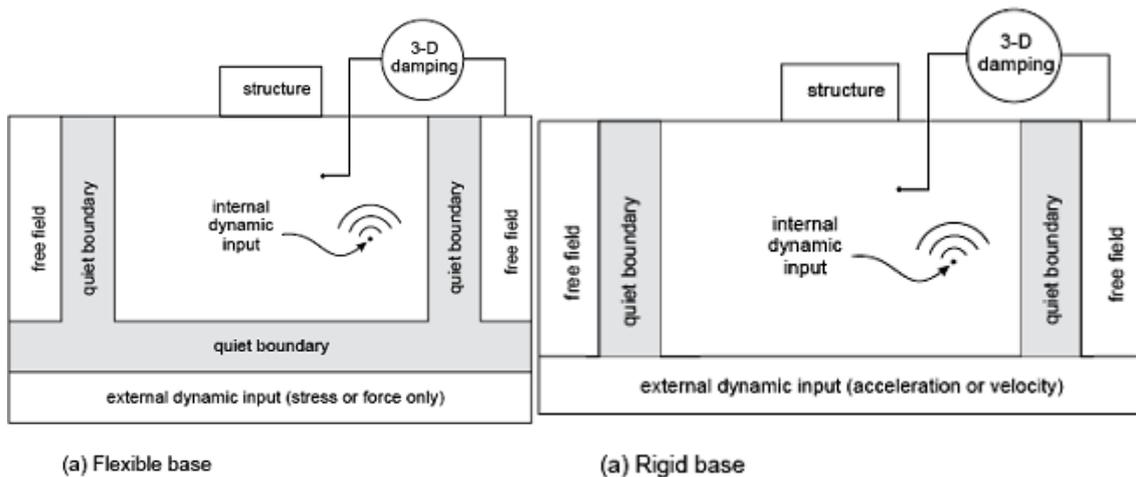


圖 4.1 考慮動態荷重之自由場物理模型圖

### 3. 動態邊界條件

進行動態分析時需輸入適當之動態邊界條件，主要為施加可隨時間改變之荷重或格點運動量，FLAC Dynamic 所提供之動態輸入邊界包括作用於網格表面之應力或壓力歷時及作用於節點之荷重、

速度或加速度歷時等，速度或加速度歷時一般多用於模擬自底部岩盤向上傳遞之地震波，對於底部為黏滯邊界之柔性基底，因速度或加速度邊界會使黏滯邊界無法運算，因此需轉換為應力邊界，其轉換公式為：

$$\sigma = 2(\rho V) \dot{u} \dots\dots\dots (4.1)$$

式中： $\sigma$ =作用於底部之應力， $\rho$ =底部元素之總體密度， $V$ =底部元素之體波波速， $\dot{u}$ =垂直或平行於波傳方向之質點速度，以剪力波為例，此公式推導為作用於土壤之應力為：

$$\tau = G\gamma = (\rho V_s^2) \left(\frac{\dot{u}}{V_s}\right) = (\rho V_s) \dot{u} \dots\dots\dots (4.2)$$

式中  $V_s$  為底部土壤之剪力波速，但底部黏滯邊界之原理為施加一與入射波反向之剪力以抵銷入射波之效應，其大小以為以質點速度與式(4.2)計算，為使應力波可向上傳遞，因此需將黏滯邊界應力加在原有動態應力，因此向上傳遞之剪力波可以下式施加：

$$\tau = 2(\rho V_s) \dot{u} \dots\dots\dots (4.3)$$

計算前需將加速度歷時以數值積分求得速度歷時，且為確保計算結束時速度為零，需進行基線修正，將數值積分之最後偏移速度消除。

由於臨海擋土結構一側受土壤側向土壓力另一側受水壓，地震時需將兩側之側向壓力差列入考慮。考慮水下結構物 (submerged structure) 之動態水壓之影響實務上均假設流體為不可壓縮且無黏滯與旋轉運動，忽略波浪效應並假設結構物不動下以增加部分流體之質量(virtual mass)於結構物上之方式，使其產生等值之動態效應方式，所增加之 virtual mass 約等於以面水側高度為直徑之圓柱體積之液體，其結果為產生隨深度變化之非線性水壓力分佈 (Newmark and Rosenblueth (1971))。但其準確度受結構物勁度與幾何形狀影響，且需將增加之 virtual mass 動態效應於時間域計算中施

加於受影響元素範圍並不確定，此一方式於類似基樁之四面為海水所包覆之結構較為適合，因其不同方向震動之效應相同，但以版樁此類結構兩面介質不同之系統，其包圍介質之土壓力與水壓力效應並不相同，以相同之 added mass 概念並不適合。

另一種方式為以簡化之 Westergaard(1931) 動態水壓力形式 ( $\Delta U_i$ ) 施加於面海側之邊界，動態水壓力其大小為：

$$\Delta U_i = \frac{7}{12} h^2 \gamma_w k_h \dots\dots\dots (4.4)$$

式中  $h$  為水深， $\gamma_w$  為水單位重， $k_h$  為水平地震係數，依 Matsuo and O'hara (1960) 之研究得出牆後之動態水壓力為純水之 70%，因此作用於牆面之淨動態水壓為：

$$\Delta U_i = \frac{7}{40} h^2 \gamma_w k_h \dots\dots\dots (4.5)$$

由於 FLAC 本身並不提供此一功能，本計畫嘗試以海床加速度為水平地震係數，以輸入正弦波之方式進行時域(time domain)數值分析，探討面海側動態水壓力之影響，其於版樁彎距大小之差異小於 10%，且其效應為增加版樁之穩定，但由於過於簡化其準確度仍有待驗證，為保守起見，本次分析忽略面海側動態水壓之影響，相關影響建議於下年度進行詳細分析。

#### 4. 孔隙水壓力激發模式

進行動態荷重下土壤液化行為之有效應力分析時，除考慮土壤之非線性應力-應變行為外，亦需將因應變造成之超額孔隙水壓力列入考量，目前僅有少數超額孔隙水壓力激發模式提出，其中以 Finn et al. (1977) 所提出之模式模擬較為常見，Finn et al. (1977) 將非線性勁度變化與孔隙水壓力分開考量，利用 Martin et al (1975) 所建立之飽和砂土受排水反覆荷重之體積減小量，和不排水試驗之孔隙水壓上升的關係，建立剪力模數、剪力強度、累積體積應變和有效應力變化的關係，常稱為 Finn-Martin model，引用 Finn-Martin model 時

需四個參數，Byrne (1991) 提出簡化之 Martin 公式，其累積體積應變與剪應變之關係可以下式表示：

$$\frac{\Delta\varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp(-C_2(\frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma})) \dots\dots\dots (4.6)$$

其他計算與 Finn-Martin model 相同，稱為 Finn and Byrne Model，此公式僅需 2 個參數，且  $C_1$  可由相對密度或修正之 SPT-N 值求得：

$$C_1 = 8.7(N_1)_{60}^{-1.25} \dots\dots\dots (4.7)$$

而  $C_2$  則可以下式計算：

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \dots\dots\dots (4.8)$$

FLAC 內建 Finn and Byrne Model，所需之孔隙水壓力激發模式參數將以現地 SPT 試驗結果估算，非線性應力與應變關係則以 Mohr-Coulomb 模式模擬並加入滲流影響，可進行近似於有效應力分析之模擬。

#### 4.1.2 分析程序

進行動態有效應力數值模擬程序包括：1) 建立網格；2) 設定材料彈性與塑性強度參數；3) 設定靜態邊界條件並進行重力力學平衡計算；4) 施加靜水壓力或滲流應力於於網格內部與邊界；5) 靜態系統力學平衡；6) 將液化土層以 Finn 模式模擬；7) 給予阻尼參數和吸能邊界條件；8) 施加動態邊界條件。

分析時之其主要考量可整合為包括：(1) 地層幾何模型建立、(2) 分層土壤組構行為模擬以及(3)動態荷重與邊界條件三部分，各部分說明如下：

## 1. 地層幾何模型建立

進行動態分析時其網格除需考慮靜態分析時之特性外，其網格大小(空間切割)與時間切割之單位需額外考慮波傳行為之影響，且其側向與下方延伸範圍與邊界條件亦需考慮應力波在固定邊界之反射現象，以模擬應力波於半無限空間傳遞之行為。網格之尺寸需滿足波傳方向(垂直向)之最大網格長度小於應力波最小波長之 1/10 為原則，若輸入之動態邊界其含有較高頻率(短波長)之成分，在不影響分析精度下需先進行濾波處理，將高於網格限制之頻寬部分移除，網格尺寸可模擬之最高頻率( $f_u$ )可以下式計算：

$$f_u = \frac{V}{10 \times L} \dots\dots\dots (4.9)$$

式中  $V$  = 應力波波速， $L$  = 平行波傳方向之最大網格長度。

進行動態分析前之數值模型需符合靜態穩定條件，靜態穩定包含力學平衡與地下水穩定，為滿足力學平衡與計算震動前初始狀態，需於網格邊界施加適當邊界條件，而地下水之影響亦需施加水壓力邊界條件，進行動態自由場分析時，假設底部邊界節點於水平與垂直向固定，二邊側向則假設側向邊界節點水平向固定，水壓力可依現地水位狀況模擬，並於 FLAC 中啟動滲流分析計算網格內部穩態水壓力分佈。

為配合自由場邊界應用，網格兩側節點需滿足垂直配置，側向延伸範圍需滿足靜態分析時之尺寸要求，垂直向需儘量涵蓋影響土層，模擬層狀地盤時需依現地鑽探之地質剖面進行適度簡化分層，此外網格劃分時，儘可能於現地監測系統位置附近有節點或元素，以便後續比較驗證。

## 2. 分層土壤力學組構行為模擬

網格中每一元素均需指定其材料參數，進行有效應力動態分析之參數包括彈性參數、塑性參數、滲流參數及孔隙水壓力激發模式

參數，彈性參數可由震測試驗之波速求得，需有二個彈性力學參數，FLAC 中可以體積模數配合剪力模數或者楊氏模數加柏松比輸入；塑性材料參數依選用模數不同而不同，因 FLAC 中之 Finn model 僅能用於 Mohr-Coulomb 模式，因此需要 Mohr-Coulomb 塑性參數，包括摩擦角、膨脹角、凝聚力、張力強度等；為進行滲流分析，需輸入土壤之滲透係數(permeability)與水之體積模數，此外為進行重力計算，需輸入土壤密度。

進行動態載重下液化行為有效應力分析時，除考慮應力應變行為外，亦需將因應變造成之孔隙水壓力列入考量，以 FLAC 內建之 Finn and Byrne Model 分析，將非線性勁度變化與孔隙水壓力分開考量，所需之孔隙水壓力激發模式參數初期以 SPT 之 N 值估算，非線性應力與應變關係則以 Mohr-Coulomb 模式模擬並加入滲流影響。

為考慮動態分析時之幾何阻尼效應與數值穩定，需以人為方式施加阻尼，常以 Rayleigh damping 形式施加。然而，在以彈-塑性行為做為組成率的分析模式中，例如莫耳-庫倫塑性模式 (Mohr-Coulomb Plasticity Model)，多數之能量消散會在呈現塑性流 (Plastic Flow) 期間發生，並且會隨著剪應力或剪應變震幅的增加而增加，因此本計畫以考慮非線性應力應變關係中之切線勁度(tangent stiffness)，Masing rule 模擬應力大小改變之阻滯阻尼(Hysteretic damping)，並以 Hardin 公式中之 reference strain 定義阻滯，模擬阻尼效應，另結構物其阻尼則以 5% 之勁度阻尼模擬。

### 3. 動態荷重與邊界條件

為模擬半無限空間波傳行為，分析時需於側向施加自由場邊界，底部則以可消除垂直與水平向震動之消能邊界模擬。動態荷重包括地震波與地表載重，地表荷重可以荷重形式施加於節點或以應力形式施加於邊界元素表面，但動態運動邊界(如位移、速度或加速度)之施加需將其轉換為作用於格點之邊界條件，本研究中因網格底部為柔性底層，為配合底部消能邊界使用，將加速度歷時積分後成

為速度歷時，再以  $\tau_{xy} = 2(\rho V_s) \dot{u}$ ，( $\rho$  = 底部土壤總體密度， $V_s$  為土壤剪力波速， $\dot{u}$  為底部土壤質點水平速度)，將加速度歷時轉換為剪應力歷時施加於網格底部元素，進行自由場地震模擬；對地表動態載重則另外增加埋置於地表之剛性基礎並將荷重施加於剛性基礎元素之節點。

## 4.2 錨定版樁碼頭有效應力動態數值分析

為進行臺北港東 9 號錨定版樁碼頭有效應力動態數值分析，在原有土層網格中加入樑與基樁二種結構元素，模擬考慮液化之錨定版樁式碼頭動態有效應力分析，因缺乏實際取樣與試驗結果，因此所用參數依港研中心之臺北港施工資料並佐以表面震測與鄰近監測站資料推估，結果將可作為錨定版樁碼頭監測系統規劃之參考。

### 4.2.1 分析原理與程序

#### 1. 分析原理

液化土壤－版樁結構系統之動態行為實際上為耦合反應 (coupled response)，即經由土壤傳播之地震波會造成版樁與上部結構震動，且上部結構之震動亦會影響下方土壤之動態行為，分析液化土層之版樁系統時更需將因孔隙水壓激發造成之地震波傳遞影響及液化土層側向位移一併考量，但其物理模式複雜，為簡化分析，實務上多採將土壤動態反應與版樁－上部結構個別分析之非耦合分析 (decoupled analysis)，並以動態 Winkler 系統模擬土壤－版樁之互制行為。

非耦合分析物理模型為將版樁視為埋置土中之樑，周圍土壤以 Winkler 彈簧模擬土壤勁度並以並聯或串聯之 dashpot 模型模擬土壤阻尼 (damping) 效應，本研究以 FLAC 中之基樁元素 (pile element) 模擬土中版樁，加上以鋼索元素 (cable element) 模擬錨定鋼纜，結合成錨定式版樁碼頭系統，結合 Martin et al. (1975) 之孔隙水壓力激

發模式並考慮水壓消散行為進行時間域三向度錨定式版樁動態分析，模擬臺北港東 9 號碼頭之動態反應。

## 2. 結構元素

本研究之版樁碼頭主要由基樁元素及鋼索元素組成，基樁元素為 2 維元素，可傳遞正向力、剪力及彎距至接觸之土壤，基樁本身限制其軸向降服行為，但可指定其節點形成塑性鉸，模擬彎距破壞，其與周圍土壤之互動以介面元素傳遞，介面元素本身具備正向與剪向彈簧，並可指定其彈簧行為，此介面特性可用以模擬土壤結構互制行為，而周圍土壤則以自由場中之土壤元素模擬。

鋼索元素為單一自由度元素，僅可承受軸向應力，與周圍土壤不產生互制反應，但可與結構元素於節點連結。

### 4.2.2 數值分析案例模型

#### 1. 臺北港東 9 號工作碼頭配置

臺北港東 9 號碼頭為典型錨定版樁碼頭，其斷面如圖 3.2 所示，碼頭面海側為型號 PU-25 之鋼版樁，長度為 17 m，陸側之錨定版樁為相同型號版樁但長度為 15 m，錨定鋼纜最大張力為 130 ton，裝設於地表下方 1 m 深度之版樁且間距為 1.6m，碼頭上方為厚度 20 cm 之 RC 版，為簡化分析以等值 2 ton/m 之載重施加於地表。

土壤分層由施工階段之鑽探資料配合港研中心之自由場地震測站資料佐證，模擬由高程 1m 至 -29m 之土層，海水假設位於高程 0 m 處，底部有一 9m 厚之堅硬粉土細砂(SM)，其上覆蓋一 5m 厚之黏土(CL)，此兩層與回填礫石不考慮孔隙水壓力激發，黏土層上方覆蓋一 6m 厚之粉土質砂，其平均 N 值為 12，N=12 之粉土質砂上方為 N=7 之疏鬆粉土質砂，其厚度為 4m，此土層以下屬現地土層，其上為回填砂，假設土層 N 值為 5，另在錨定鋼索區間有一 3m 厚之回填礫石，依據原始設計，假設地表荷重為 2000 kg/m。側向則以面海版樁為中心，向海側延伸 30 m，向陸側延伸 36 m，為便於底部

施加剪應力歷時，於網格底部下方額外增加一厚度為 5 m 之線彈性土層，其剪力模數與 29m 深度土壤之小應變模數相同，每一網格大小為 0.5m×0.5m。

## 2. 數值分析模型

本案例分析主要包括二個階段，分別為現有系統靜態穩定分析及動態有效應力分析，依此二階段規劃之之數值模擬共分七個步驟：1) 土壤網格及結構元素建立；2) 靜態分析材料強度參數指定並重力平衡；3) 設定靜態與水壓邊界條件；4) 使用 Finn 模式於可能液化土壤；5) 給定阻尼參數、動態邊界條件及動態水壓力；6) 規劃監測點並施加地震力。分別敘述如下：

本案例所建立之網格乃依照 TPE09 碼頭的設計斷面圖，建立一寬度 66 公尺，高 35 公尺之範圍，海水位於高程為零，且不考慮潮差影響，將海床可分成四層，底部海床(OB)為高程-29 公尺至-20 公尺，為 SM 土壤，其 $(N_1)_{60}$ 約為 25，因其細粒料含量高於 50%，且深度較深，因此不考慮液化；中間海床(OM)為高程-20 公尺至-15 公尺，其 $(N_1)_{60}$ 約為 10，屬於 CL 土壤，因此不考慮液化；頂部海床(OT1)為高程-15 公尺至-9 公尺，其主要分類為 SM，其 $(N_1)_{60}$ 約為 12，考慮其可能液化，碼頭開挖面位於高程-9 公尺深度，高程-9 公尺至-5 公尺為原有海床(OT2)，屬 SM 類土壤，其 $(N_1)_{60}$ 約為 7 並可能液化；版樁內高程-5 公尺至-2 公尺為回填砂層(BFS)，屬 SM 類土壤，其 $(N_1)_{60}$ 約為 5 並可能液化；自高程-2 公尺至+1 公尺為回填礫石(BFG)，屬 GP 類土壤不考慮液化。

以指定上下結構元素節點方式並配合自動分割方式產生版樁元素，版樁以基樁元素模擬，並將間距設為零，以模擬連續之版樁，鋼索元素則將其兩端點固定於相同高程(ELE=0 m)之面海側版樁與錨定版樁之節點，所有結構元素之長度均為 0.5m 以與土壤元素節點連結，版樁上下兩端點均與土壤連結，使基樁位移與周圍土壤相同，且自動形成鉸接(hinge)端點。各結構元素之參數如表 4-2 所列，

基樁元素中與土壤連結之介面元素以符合 Mohr-Columb 行為之介面彈簧參數模擬，介面彈簧參數如表 4-3 所列，結構元素建立後之網格如圖 4.2 所示。

表 4-1 動態分析土層參數表

土層	OB	OM	OT1	OT2	BFS	BFG
Depth from SL(m)	-29~-20	-20~-15	-15~-9	-9~-5	-5~2	-2~+1
USCS	SM	CL	SM	SM	SM	GP
$N_{1,60}$	25	10	12	7	5	>50
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1850	1850	1800	1800	1750	2100
Shear Modulus (MPa)	98	72	74	40	27	189
Bulk Modulus (MPa)	163	96	123	54	36	207
Cohesion (Pa)	2000	2000	2000	0	0	0
Friction angle (deg)	33	33	33	33	33	45
Dilation angle (deg)	0	0	0	0	0	0
Hardin $r_{ef}$	0.06	0.023	0.08	0.09	0.10	0.01
Finn Parameter C1	--	--	0.39	0.764	0.927	--
Finn Parameter C2	--	--	1.03	0.524	0.432	--

OB:底部海床

OM:中間海床

OT1:頂部海床

OT2:原有海床

BFS:回填砂層

BFG:礫石回填區

表 4-2 結構元素參數表

	Elastic Modulus (GPa)	Moment of Inertia (m <sup>4</sup> )	Cross Sect. Area (m <sup>2</sup> )	Mass Density (kg/ m <sup>2</sup> )	Pile Perimeter (m)
Sheet Pile	21	5.65×10 <sup>-4</sup>	0.02	157	0.54
Cable	21	--	1.27×10 <sup>-2</sup>	7850	--

表 4-3 基樁元素中之 Mohr-Columb 介面彈簧參數表

	Normal Stiffness (MN/m)	Shear Stiffness (MN/m)	Normal Coh. (N/m)	Shear Coh. (N/m)	Normal Friction (deg)	Shear Friction (deg)
ST Backfill	10	5	1000	1000	30	30

為進行考慮水壓之靜力平衡，所設之邊界條件為左右兩側為水平向固定之 roller，底部為垂直向固定之 roller，靜態時考慮靜水壓力分佈，土中孔隙水壓力以線性分佈隨深度增加而線性增加，面海側另考慮相對於碼頭深度之水壓施加於碼頭底部，版樁上則施加線性增加之水壓，另為考慮碼頭常時荷重，以 20 kN/m 之壓力施加於 RC 版與陸上土壤，另用所建網格及邊界條件得到之靜力平衡下垂直有效應力分佈與結構元素彎距分佈如圖 4.3 所示，最大彎距於面海版樁發生於水面下 6m 深度，大小為 3.26×10<sup>4</sup> N-m，錨定版樁最大彎距為 3.52×10<sup>4</sup> N-m，位置為錨定位置下方 3 m，錨定鋼索受力為 1.5×10<sup>3</sup> Newton。

進行動態分析時，可液化土層其 Finn 模式之參數如表 4-1 所列，結構元素以 Rayleigh 阻尼設為質量之 2%，土壤則以 Hardin 型態之遲滯阻尼，參數如表 4-1 所列，以 free field 邊界指定作用於左右兩側，底部由於為非岩盤，為消除自自由面反射波之於底部造成反射現象，底部以雙均啟動之安定邊界(Quiet Boundary) 設定。另地震力以式(4.1)

施加於底部，輸入地震以附近 IHMT 測站於深度 29m 量到之南北向水平地震紀錄為波形，原始紀錄如圖 4.4 所示，其於地表之最大水平加速度為 15 gal，利用不同設計最大地表加速度，將高程-29m 之波形等比例放大，並將 5 Hz 以上震波濾除，加於網格底部，進行時間域動態分析，此外，動態水壓力則以海床加速度及式 2.2 施加於版樁表面。

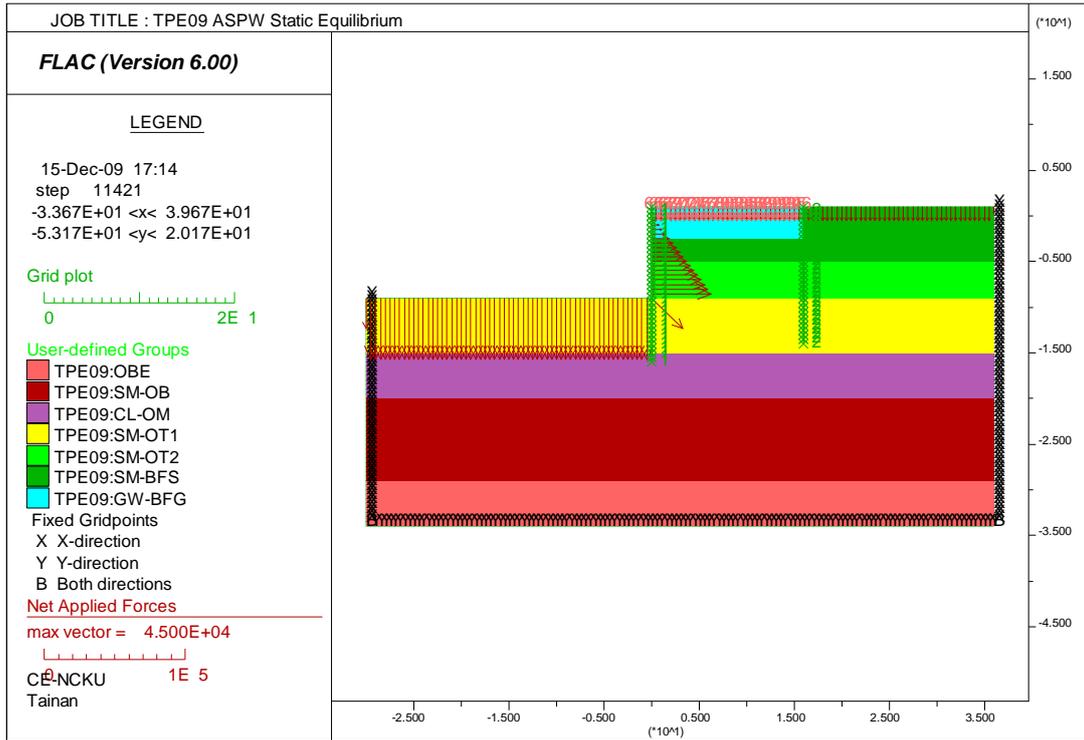


圖 4.2 TPE09 錨定式鉸樁數值模型

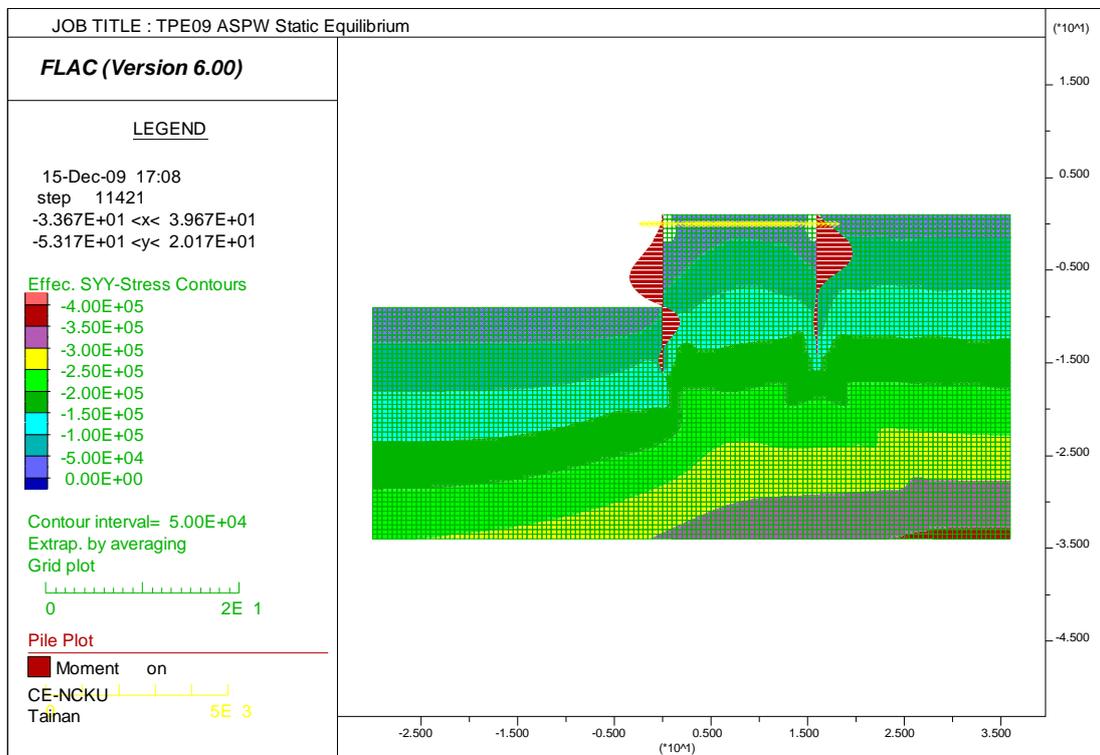


圖 4.3 TPE09 錨定式鉸樁靜力平衡垂直有效應力、結構彎距與錨定力

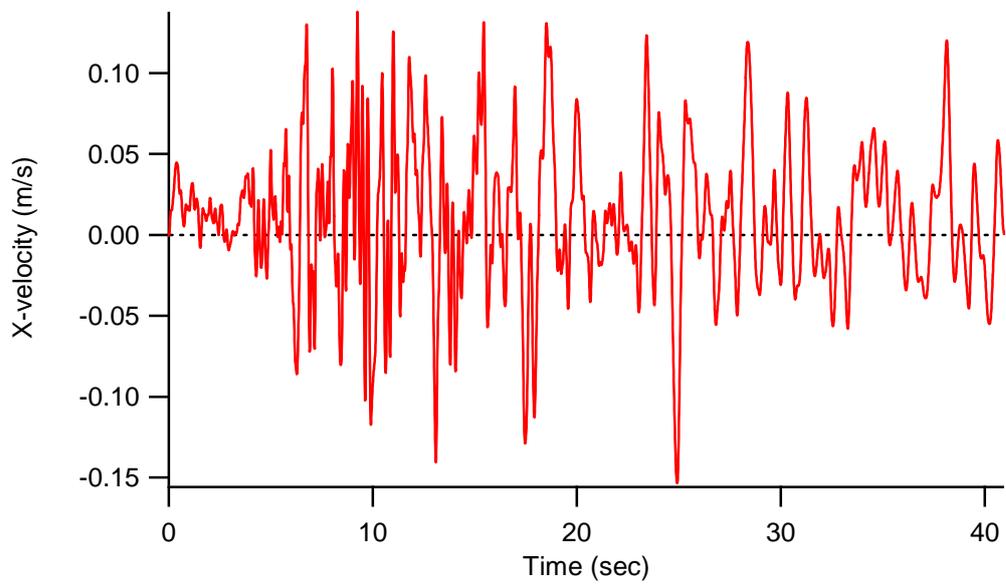
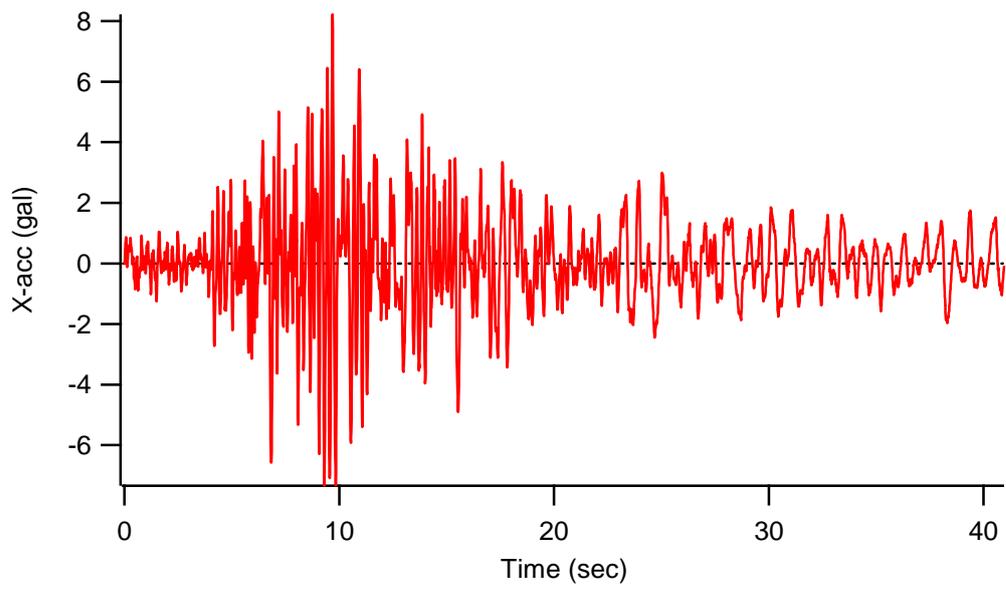


圖 4.4 網格底部(-29m)輸入地震波形

本研究以超額孔隙水壓力、超額孔隙水壓比、基樁彎距與號碼頭前端位移量、土壤加速度等，將地震紀錄轉換為速度歷時，以剪應力歷時作用於底部安定邊界之格點，依分析目的規劃監測點位，紀錄其時間變化量，監測點位與進行動態分析前之網格與邊界如圖 4.5 所示。

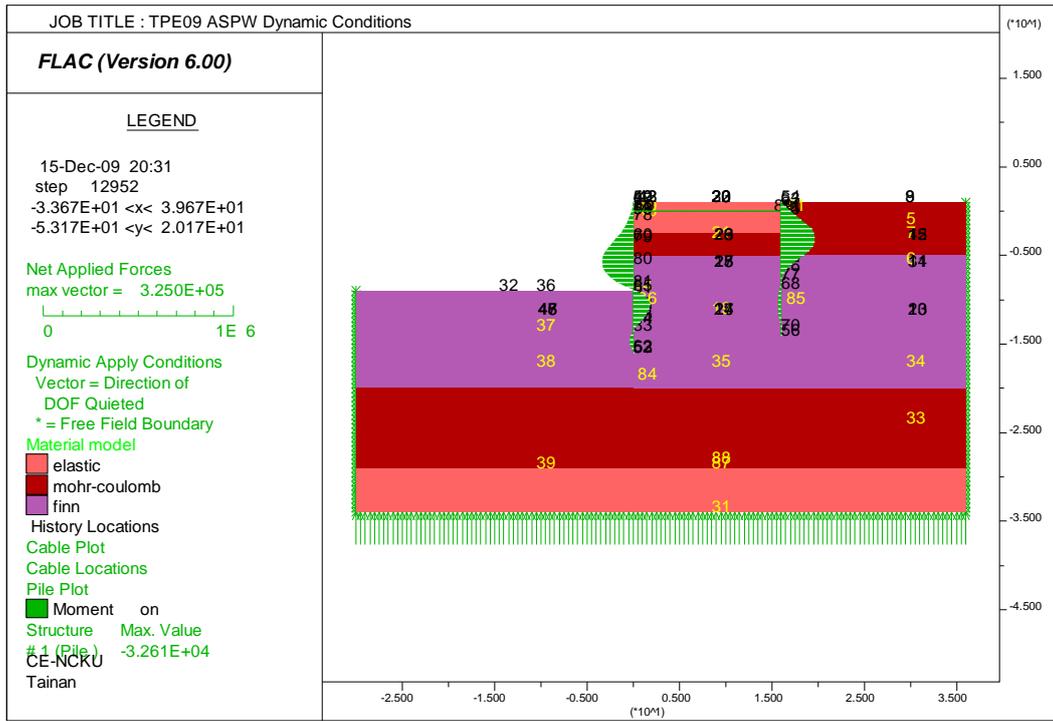


圖 4.5 監測點位與動態邊界

## 4.3 數值分析成果

### 4.3.1 加速度與位移歷時變化

考慮在版樁後方自由場高程 29 m 與地表高程 1m 之加速度變化如圖 4.6 所示，除少數突出點外，地表最大水平加速度約為 0.23 g，且底部之加速度較地表為大，顯示其地表加速度因中間土層勁度減小而產生較大阻抗，使地震波無法有效傳播至地表；由於版樁其破壞常由碼頭位移量控制，考慮面海版樁頂部(nd1)之水平與垂直向位移、海床(nd21)與樁底(nd35)之水平位移，及錨定基樁樁頂(nd36)與樁底(nd66)之水平位移歷時如圖 4.7 所示，水平向位移較垂直向為大，雖然水平向位移最大值約為向海側 2.0 m，垂直向位移最大值為向下約為 0.45 m，但此數值包含土層之總變位，考慮基樁頂底部之相對位移僅有 0.24 m，因此破壞屬輕微等級。

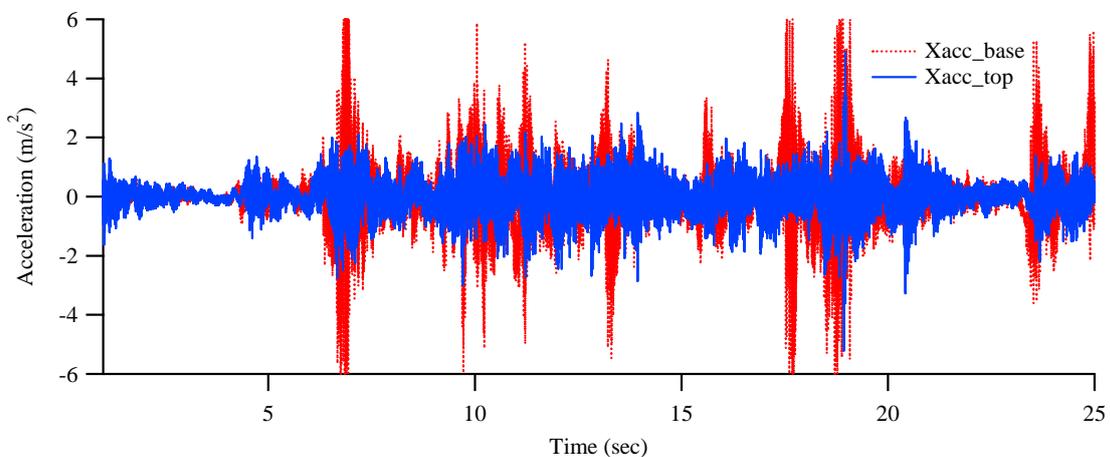


圖 4.6 加速度歷時變化

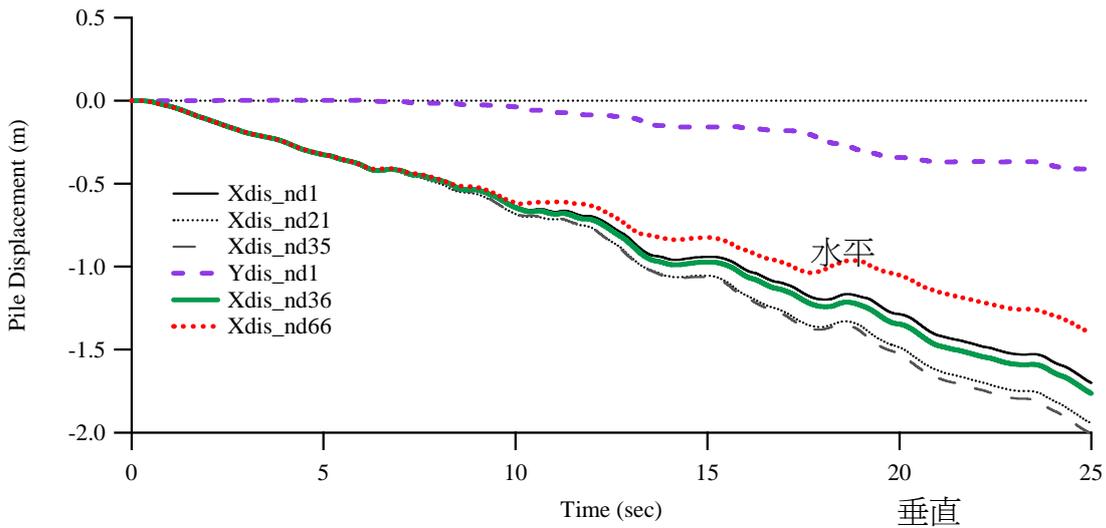


圖 4.7 鉸樁上方土壤位移歷時變化

### 4.3.2 土壤結構互制

土壤結構互制反應可由其有效應力變化與結構反應觀察，圖 4.8 為在 25 sec 時土壤位移量分佈與結構元素之水平位移量分佈，面海版樁之最大位移發生於樁底，錨定基樁則發生於樁頂，不考慮底部彈性層，較大之位移發生於兩版樁間之土壤，最大土壤垂直位移發生於錨定版樁與表層土壤交界處，顯示板樁變位之主因為受周圍土壤變位影響。

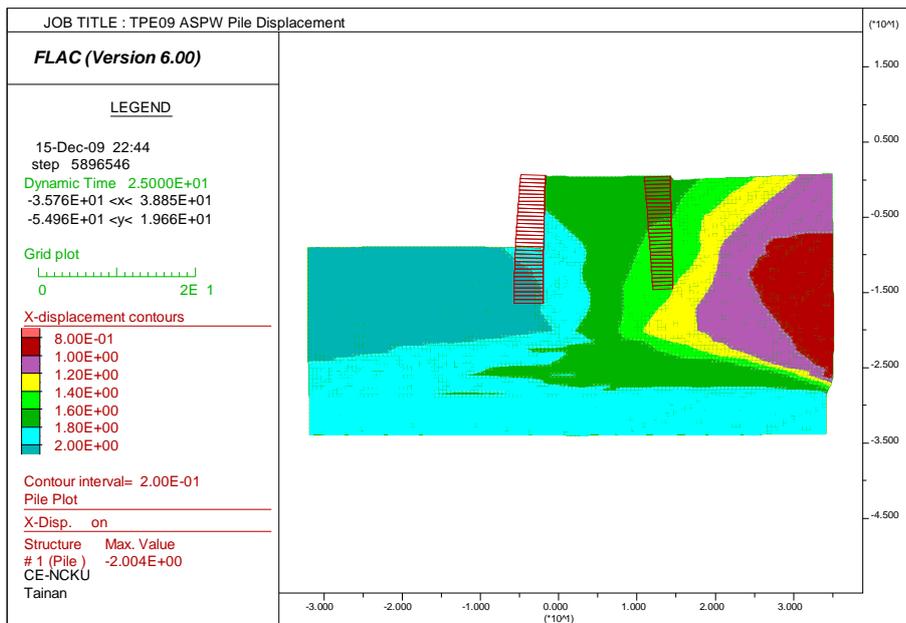


圖 4.8 土壤位移與結構位移

圖 4.9 顯示於 25 sec 時結構元素之彎距分佈與垂直有效應力分佈，在經過主要震動後(10 sec)，表層回填砂之垂直有效應力大幅減少，其原因為孔隙水壓力激發之故，面海版樁最大彎距發生於海床深度，錨定基樁其彎距均遠小於面海版樁之彎距值，圖 4.10 為面海版樁在不同高程之彎距歷時，最大彎距產生於海床深度，至 25 sec 時其最大彎距為  $2.5 \times 10^5$  N-m，除顯示其相對關係外，圖中亦顯示版樁頂彎距較靜態時( $3.52 \times 10^4$  N-m) 增加超過 7 倍。圖 4.11 為鋼索拉力歷時，其亦增加超過 50 倍，其最大拉力為 115 kN (11.7 tons)，初步分析顯示考慮孔隙水壓力激發與動力反應下，其結構荷重將大幅增加，但仍小於其極限拉力。

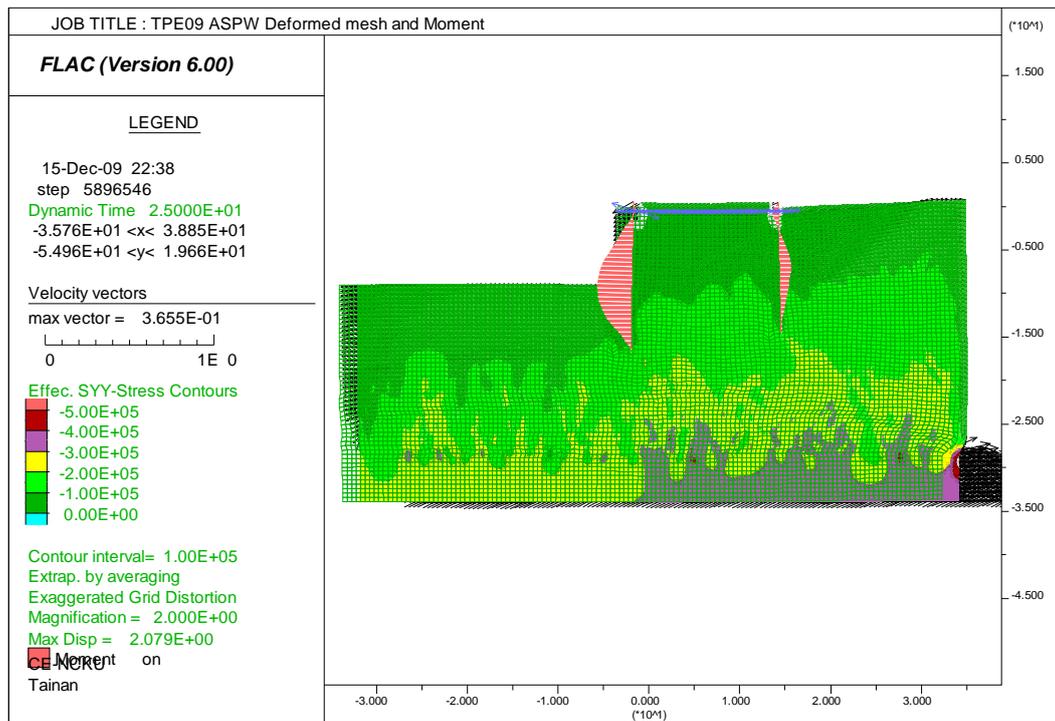


圖 4.9 土壤變形與結構彎距分佈

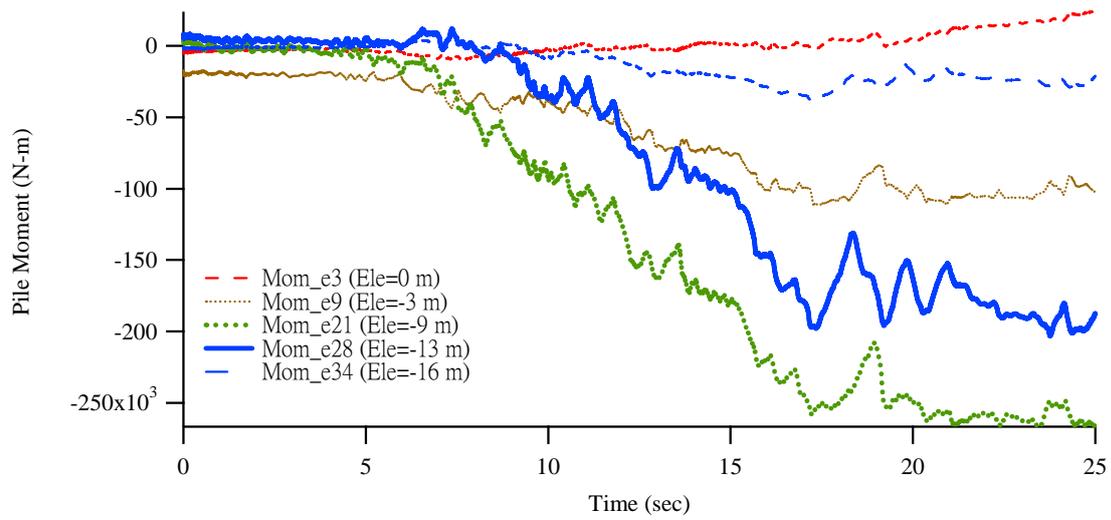


圖 4.10 結構彎矩歷時

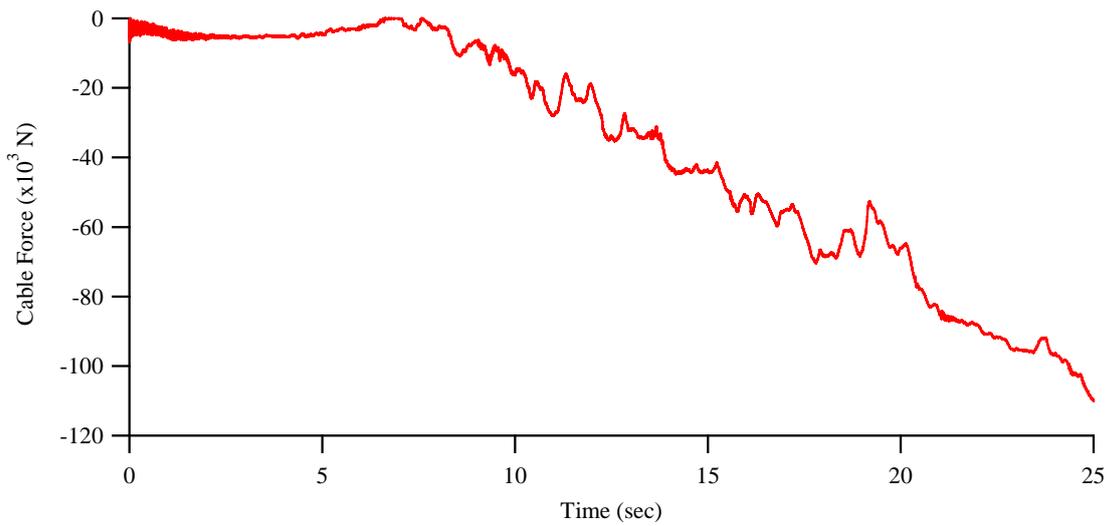


圖 4.11 鋼索拉力歷時

## 第五章 錨定板樁碼頭動態監測站

本階段計畫以錨定板樁碼頭長期動態監測系統建置為主軸，於營運中之板樁碼頭安裝板樁動態變位監測系統，等待下一次地震時紀錄相關動態歷時。板樁式碼頭監測系統之規劃配置，所量測之資料包括板樁變形與地表加速度歷時，所需之儀器包括陸上三向度地震儀、動態位移剖面具自動啟動(triggering)之動態資料擷取系統。目前全世界仍無完整板樁式碼頭監測資料，其相關之成果可用於檢驗與修正數值分析之程序，且增進對液化土層板樁動態反應機制之認知，為後續修正與規劃相關設計參數與規範之擬定之樞紐，並可作為後續港區地震災害管理之基礎。

### 5.1 現地監測系統規劃

由文獻對碼頭擋土設施動態研究相關研究得知，碼頭土壤結構互制動態監測需量測物理量包括：(1)鄰近擋土結構近域(near field)與距擋土結構一定距離之遠域(far field)土壤振動與孔隙水壓力變化，(2)牆體本身變形、剪力與彎距分佈，及(3)周圍自由場土壤震動與孔隙水壓反應。考慮不同形式碼頭之結構特性與地質狀況，碼頭動態反應量測主要為牆體結構動態變位、岸肩結構反應、近岸土壤振動反應及孔隙水壓分變化等，針對不同觀測目的需採用不同感測器與量測技術，此外動態監測站需具備高速擷取、定值觸發(level triggering)、定時啟動(time triggering)、人工啟動、遠端遙控、網路通訊、警報警示、資料顯示等功能，本計畫將以 National Instrument 之軟硬體為架構，延用前期棧橋式碼頭現地監測站之擷取系統架構，發展一穩定、具擴充性且低廉之動態監測系統，同時開發可與觀測系統搭配之資料處理程序與軟體，使量測資料可快速分析。

本年度規劃之監測元件系統如表 5.1 所列，包含監測主機、動態擷取系統、陣列式位移計量測系統、陸上地震儀、通訊系統及機箱，各

元件功用如表 5.1 所列，系統將以 LabView 程式加以整合。

為監測牆體動態反應，本計畫使用以微機電系統(Micro Electronic Mechanical System, MEMS)為加速度計架構之動態剖面位移計 (high-bandwidth Shape Accelerometer Array)，製造廠商為 Measurand，其構造如圖 5.1 所示，其原理為利用加速度計量測桿件傾角，經由傾角與桿件長度可計算個別桿件兩端接點位移量，並可由固定點計算各接點之累積位移量，進而求得剖面之側向相對位移變化。另為監測碼頭 RC 版之反應，於地表裝設三向地震儀，此地震儀同時可作為系統啟動並用以推估動態剖面位移計底部之變位。

表 5.1 監測系統列表

設備	規格	用途
工業電腦	耐高溫至 45 °C	監測主機
多頻道動態資料擷取系統	NI PCI-6284 A/D cards	多通道動態資料擷取硬體
陣列式位移計量測系統	Measurand shap array with 16 sensors in 30 cm spacing	版樁動態側向變位量測
陸上地震感應器	三軸向、解析度 0.001 gal, DC~250 Hz	碼頭地表振動監測
網路通信模組	ADSL 寬頻+長距離戶外 Wi-Fi	遠端監控
機箱與不斷電系統	可用高度:1558mm, 深度:900mm, 3000KVA UPS	主機保護與電源供應

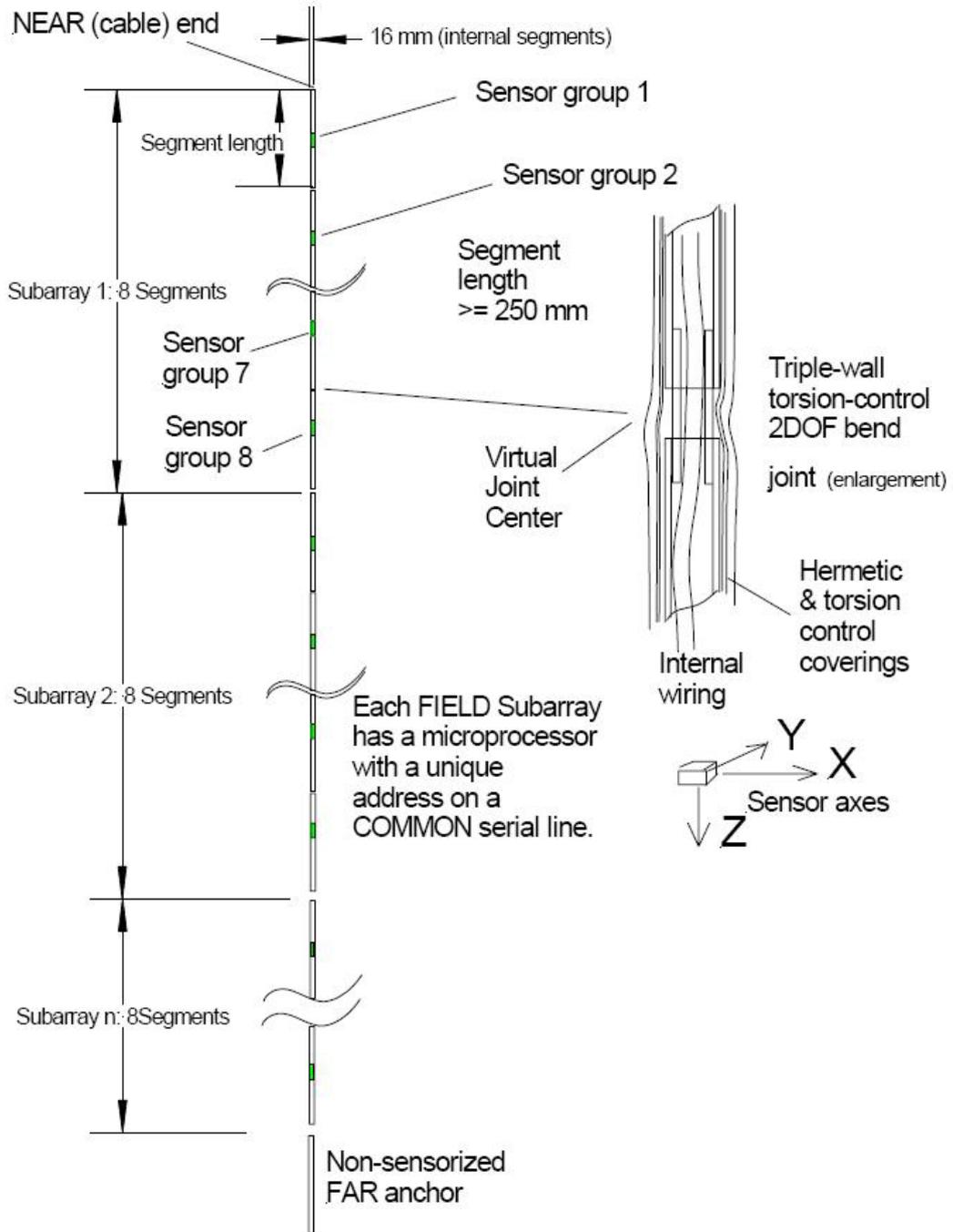


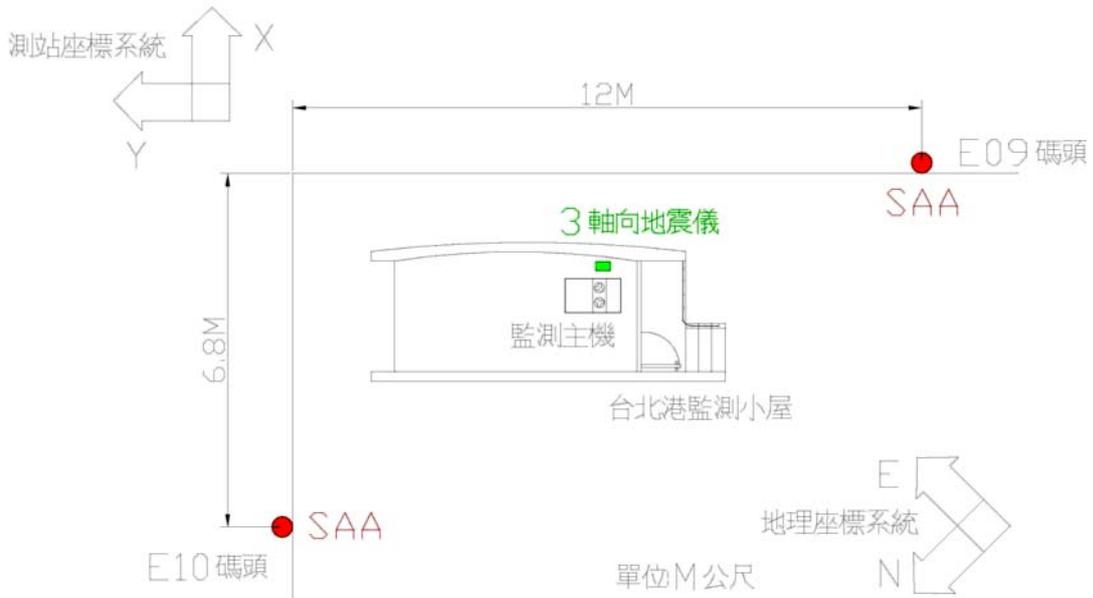
圖 5.1 Measurand Shape Array 構造示意圖

## 5.2 監測站配置與施工

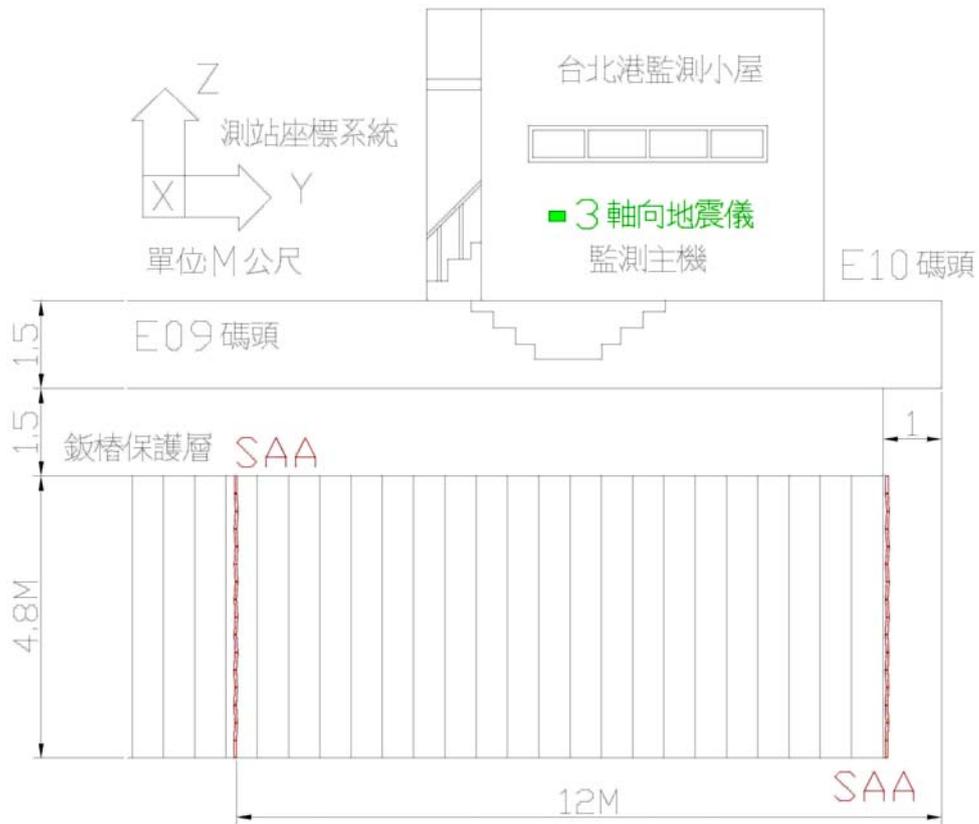
本計畫於臺北港東 9 號碼頭設置監測系統，其主要考量為該碼頭為典型錨定版樁碼頭、現地地質狀況單純且有相關資料、鄰近具電力供應設施且有一完善遮蔽物，本測站規劃之配置如圖 5.2 所示，包括一陸上地震儀、水下動態基樁變位監測系統及動態監測主機，後續將依計畫經費核定額度分年增設動態攝影機等，相關監測系統與管線將以地下化、隱蔽與不妨礙碼頭動線為原則。

儀器安裝分成水下與陸上兩部分，水下安裝包含動態版樁變位監測系統，施工前進行水下調查與版樁表面清理，動態版樁變位監測系統則裝置於靠近現有潮差監測主機所在之監測小屋周圍 12m 與 6.5 m 距離之面海兩側版樁，其二水平方向與碼頭面平行，施工時先將固定套件以水下電銲貼附於版樁表面，不進行鑽孔與破壞版樁之作為，在將固定好方位之動態剖面儀自下方開始以束帶固定，其完成圖如圖 5.3 所示，訊號線則以 PVC 管保護，固定於 RC 版下方版樁保護層，如圖 5.4 所示，陸上訊號線則以明管方式攀附於現有潮差儀之管線附近，並以現有之 PVC 開孔導入監測小屋，完成圖如圖 5.5 所示。

陸上施工包括陸上地震儀、監測主機與網路裝設，陸上地震儀裝置於監測小屋內，以鋼製之平台固定於地面，其方位為與碼頭平行，調整水平後固定，其完成如圖 5.6 所示；監測主機安裝於監測屋，並以機箱遮蔽保護，所需電源將使用現有監測屋內電源，另因現地無電信管線及 3G 訊號，因此本計畫申請之固定 IP ADSL 裝置於臺北港港務大樓 11 樓，並於港務大樓與監測屋間以戶外指向型天線及 Wi-Fi 中繼連結，指向天線安裝如圖 5.7 所示，其傳輸頻寬幾無損失。



(a) Top View



(b) Side view (x-direction)

圖 5.2 TPE09 錨定鈹樁碼頭動態監測站配置



圖 5.3 動態剖面位移計水下安裝完成圖

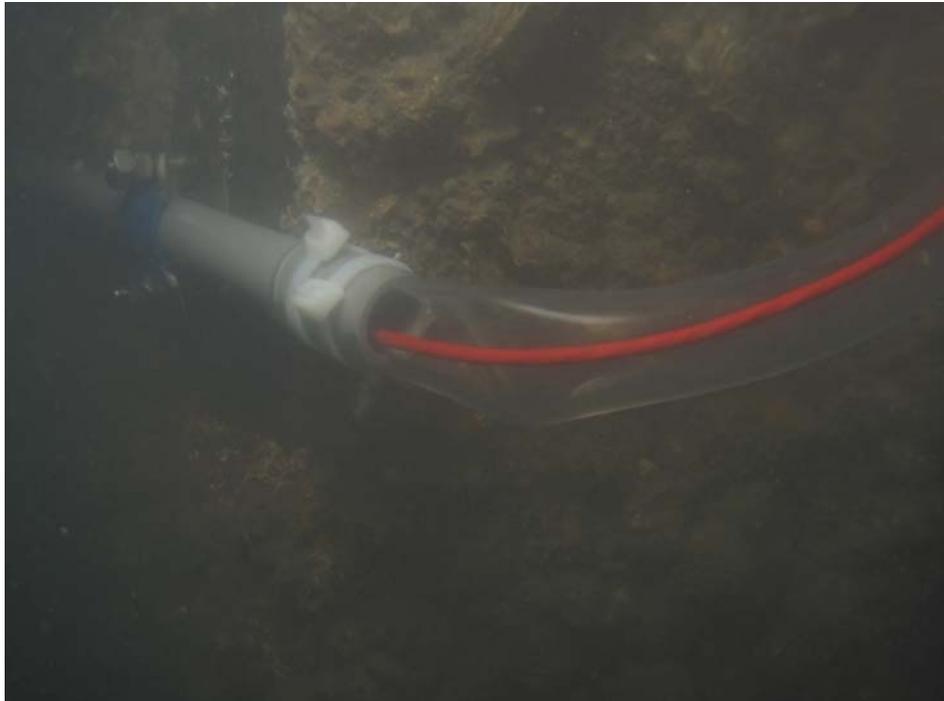


圖 5.4 水下訊號線固定



圖 5.5 陸上訊號線固定

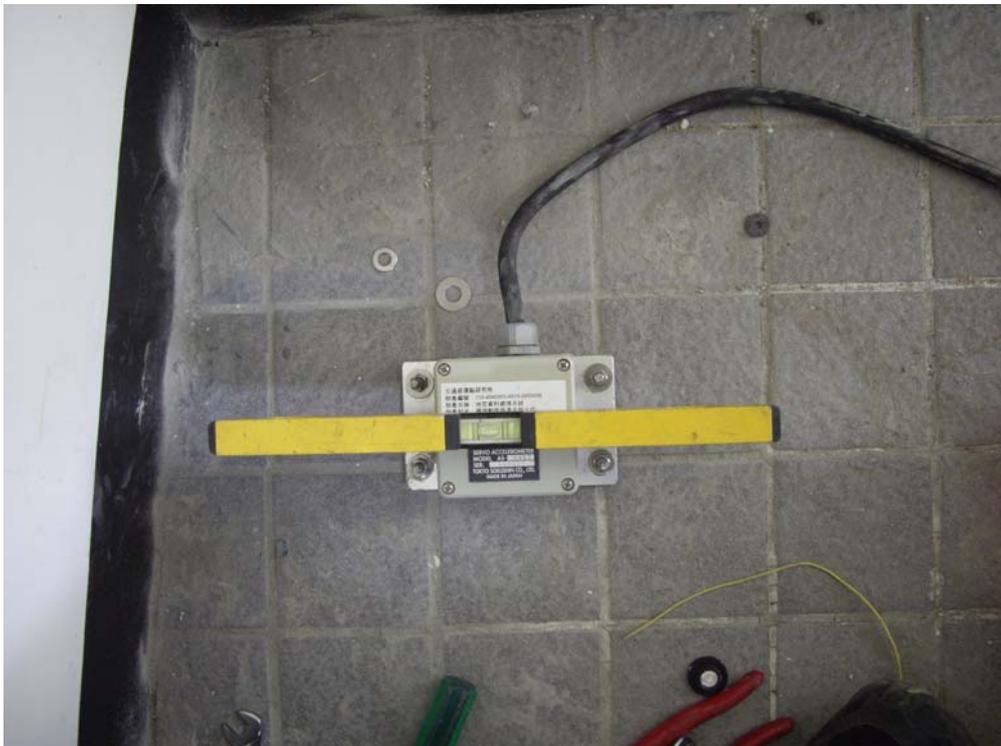


圖 5.6 陸上地震儀安裝



圖 5.7 戶外指向型天線安裝

## 5.3 自動監測程式

### 5.3.1 自動監測程式組成

由於監測站需具有長期自動監測之功能，且所用系統中包含不同設備與訊號模式，因此本計畫使用 National Instruments 所開發之 PCI 介面，以 LabView 所建構之動態自動資料擷取系統，加上以網路連結之遠端監測系統，所用之系統為參考交通大學光纖感測試驗室所研發之光纖光柵感測系統，做為土木工程系統現地，長期自動化監測。而自動化擷取系統主要分為三大技術，其說明如下。

#### 1. 網路傳輸技術

為達到自動化監測、分析的功能，而感測器所得資訊將透過 LabVIEW 程式語言所撰寫並與網路技術做連結，使得分析運算後的結果可以即時的呈現達到預警的功效，更可以透過網路的傳輸將運算簡化後的資訊傳回使用者端儲存。

目前系統所使用的是 LabVIEW 最新的網路技術 Share Variable，它提供廣域變數的技術，可以在 LabVIEW 環境下，透過此一技術在所有的分布式應用中存取任何類型的資料，使用 Share Variable 可以藉由網路的技術分享資料在單一程式的迴圈之中或是介於不同的程式之間，甚至是在不同網路位置的儀器上。相對於在 LabVIEW 中現存的許多技術例如：TCP (Transmission Communication Protocol)、UDP(Universal Data gram Protocol)、Data Socket 與 VI Server 等技術，Share Variable 是一種典型的簡化技術，而且其底層仍舊是使用 TCP/IP 的架構，不但傳輸速度快，而且訊號最為準確可靠。它可以直接透過屬性的設定，建構出所需要的特定功能，達到分享資料的工作，而略過令人覺得煩雜的 TCP/IP 等低階的網路設定，與基本的程式碼撰寫工作。

使用 Share Variable 有下列三種的基本變數型態(Variable Type)：single-process、network-published、time-triggered。一般較常使用的部分是 single-process、network-published 這兩種方式，Single-process 大多是使用在單一程式之間的資料分享，例如在許多平行迴圈當中，我們無法直接將某參數拉到另一個迴圈做運算，就可以利用 single-process 的 Share Variable。另一種情況則是在同一個設備儀器中的兩個不同程式，也是需要透過這樣的功能屬性設定，才能將資料做傳遞或是同步運算。這樣的特性相當便利於執行具有決定性影響的即時應用，也可以更進一步藉由 Real-Time FIFO 的技術將這些資料給不同使用者運用，並且確保這些資料不會失真。

Network-published 則是使用在不同儀器設備之間的不同程式之間，也可以簡易的透過網際網路將資料作傳遞或是分享的動作。而在使用 Share Variable 除了上述的類型是需要被適當的選擇：資料型態(Data Type)也是需要事先被定義，否則可能因為在不同儀器中的程式所產出的資料型態差異，將導致在不同程式之間資料的傳輸發生錯誤。

完成之系統中的使用者端並不一定都安裝有 LabVIEW 程式，但是我們仍然可以透過 LabVIEW 的環境之下，進行網路權限分享設定，利用超文件傳輸協定（Hyper Text Transmission Protocol；HTTP）的網頁瀏覽格式，讓一般使用者使用網際網路瀏覽器（Internet Explorer；IE）就可以觀看系統的監測資訊，完全不需要任何特殊介面，或是安裝任何其他軟體，達到簡易分享資訊的功能。

## 2. 資料存取模式：

即時的監測資訊除了可以馬上讓使用者了解現地的情形外，如果可以將監測資訊儲存至遠端使用者的電腦中，這是利用網路技術將資料儲存在使用者的電腦，避免一般長期監測在現地的儀器可能發生的記憶空間不足的缺點。

在 LabVIEW 的環境下可以將資料儲存成文件檔的格式或是動態資料檔的型態。文件檔的優點是檔案位元小不佔記憶體空間，而動態檔案的優點則是可以立即將現地的動態資料馬上還原成波形，方便使用者觀看。

監測系統除了可以在使用者介面即時觀察現地情況，並將資訊透過網路儲存外，當使用者無法長時間觀看監測畫面時，仍然有辦法可以獲得重大變化的訊息，因此預警功能就是在這樣的環境下所產生的需求，可以透過撰寫程式完成警戒功能，在現地的量測物理量超過安全範圍，並透過 E-Mail 通知寄送到指定的信箱，將系統所設定的訊息傳達給使用者端，而使用者並不限定為一位，甚至可以一次傳送給多人，但是必須配合各家網路公司郵件伺服器是否允許未經驗證的使用者進行轉信，當系統如果轉信失敗會顯示出哪些收件者被拒絕，可以此檢視哪些使用者並沒有收到警訊的電子郵件。

### 5.3.2 港區碼頭動態監測程式

本年度用於整合臺北港東 9 號碼頭監測系統程式其主要架構為隨時擷取地震儀訊號，當水平向震動大於設定啟動值(約為 5 gal)時開始啟動資料擷取系統，同時啟動 shape array 記錄系統，程式中並設計當水平震動大於某一設定值時會傳送簡訊通知相關管理人員，此外相關參數均可遠端設定，並具每日定時啟動與人工啟動功能。所紀錄地震儀頻率為 250 Hz，shape array 之頻率約為 15 Hz，記錄延時為 5 分鐘，程式之原始碼如圖 5.8 所示，操作與設定介面如圖 5.9~5.11 所示。圖 5.12~5.14 為利用監測程式所得之動態剖面儀與地表加速度背景訊號值，其變動很小，顯示整體系統相當穩定。

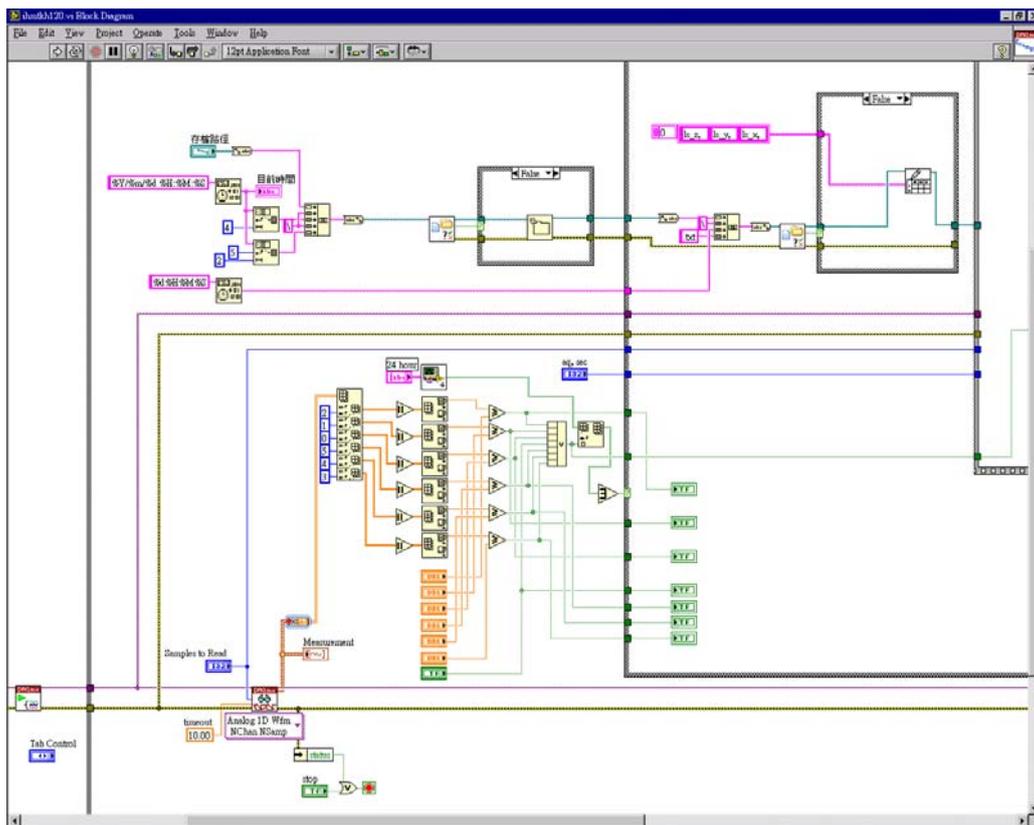


圖 5.8 自動監測程式原始碼

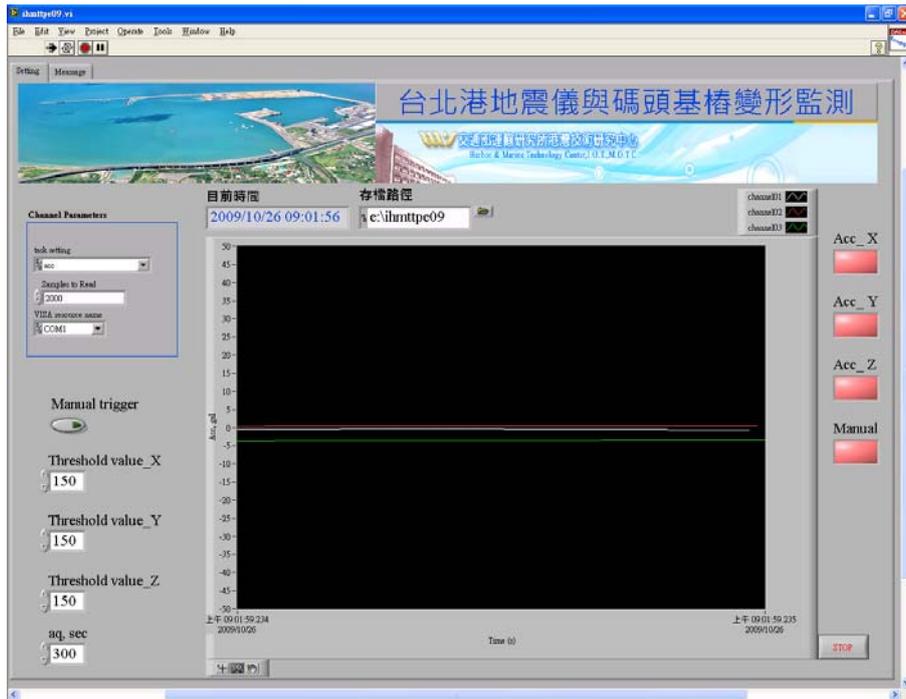


圖 5.9 自動監測主畫面

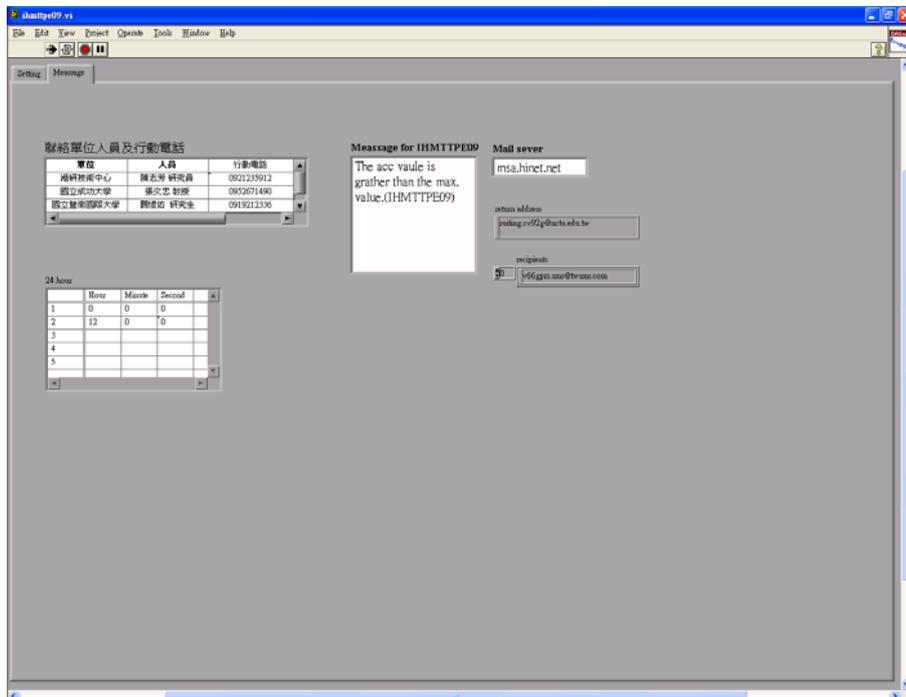


圖 5.10 量測參數設定畫面

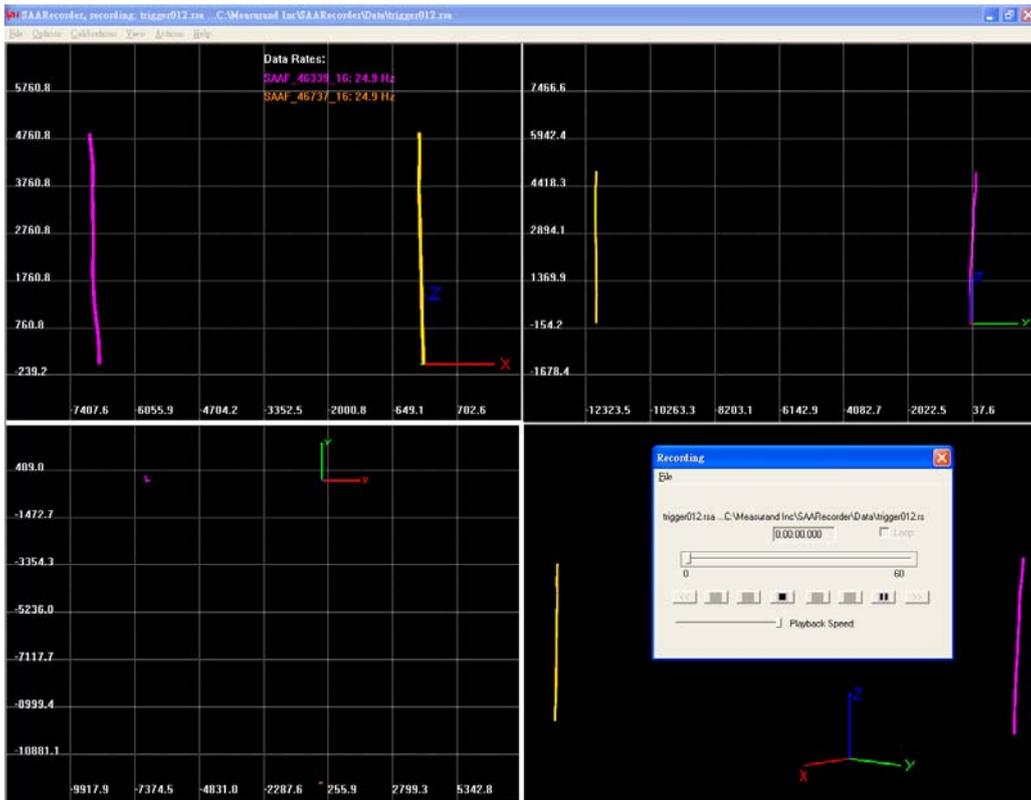


圖 5.11 動態剖面儀紀錄畫面

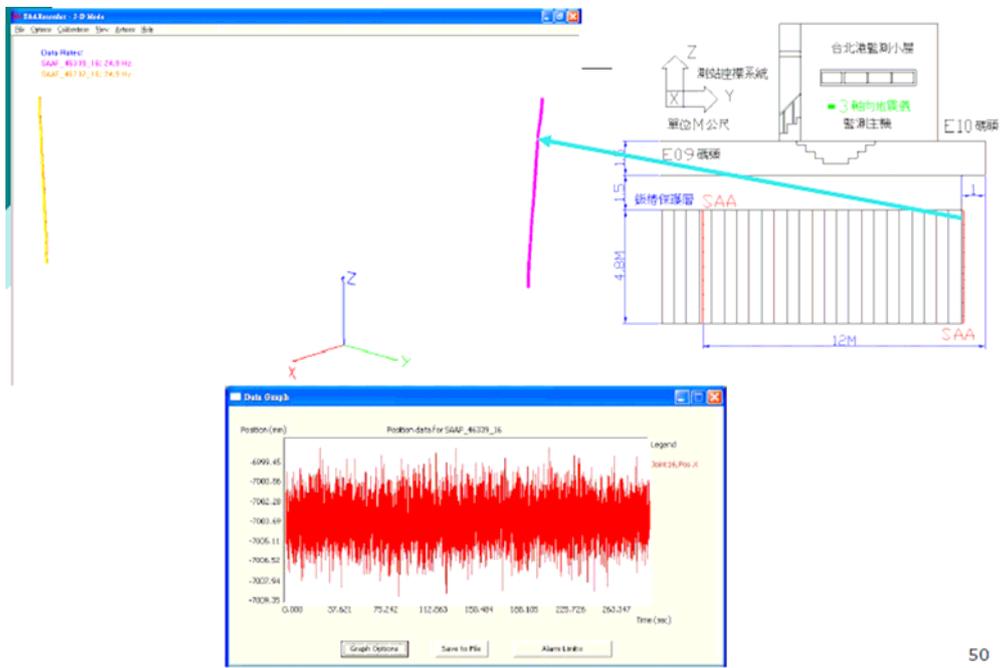


圖 5.12 動態剖面儀初始值

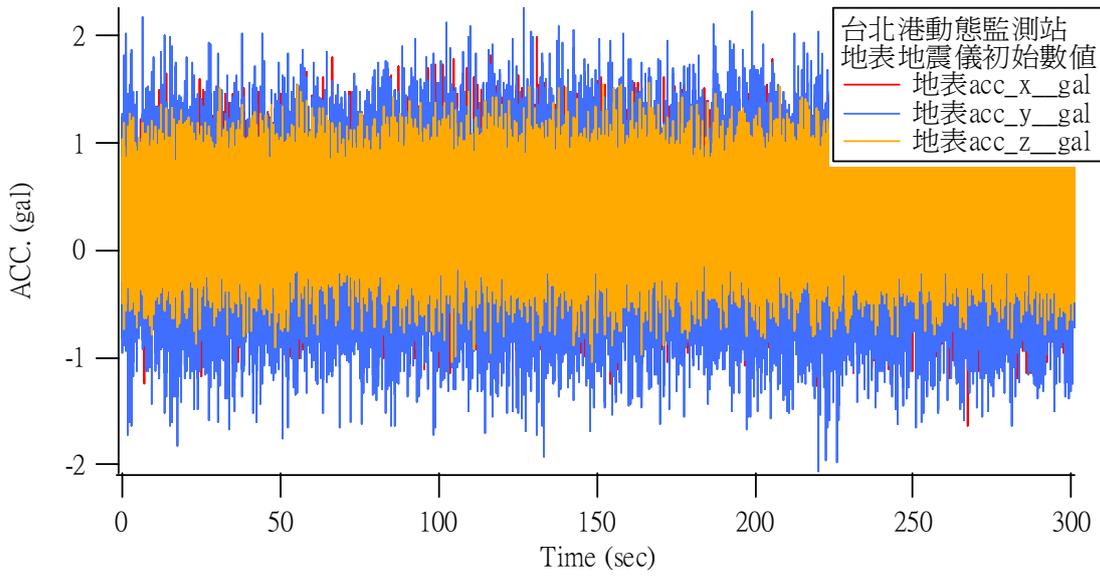


圖 5.13 地表地震儀背景訊號值

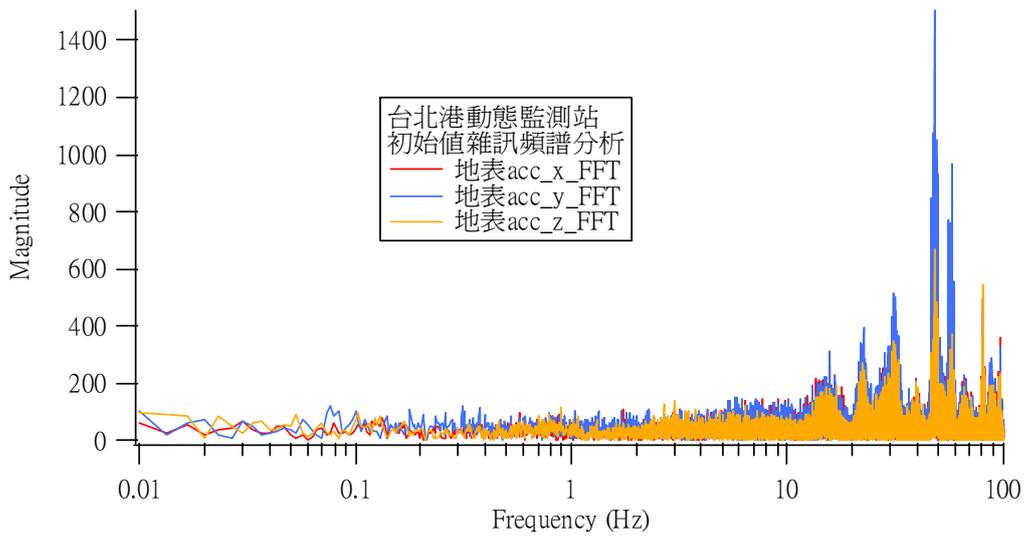


圖 5.14 地表地震儀背景訊號頻譜

## 第六章 結論與建議

### 6.1 本年度計畫執行結論

本階段計畫以版樁式碼頭長期動態監測系統建置為主軸，於營運中之碼頭版樁安裝版樁動態變位監測系統，等待下一次地震時紀錄相關動態歷時。本計畫預計分二年執行，本年度完成之主要工作項目總結如下：

1. 選定適當之港區碼頭形式與場址進行相關文獻收集與現地調查：本年度選定於台北港東 9 號碼頭設置監測系統，其主要考量為該碼頭為典型錨定式版樁碼頭、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完善遮蔽物，同時收集碼頭與港區之土層與結構配置資料，並進行淺層表面震測與微地動量測，此外並收集國內外錨定版樁動態反應文獻，錨定版樁式碼頭破壞常由碼頭位移量控制，因此進行震災管理時需能推估碼頭永久變位。
2. 進行考慮錨定版樁碼頭之動態有效應力數值分析：本年度已初步完成錨定版樁碼頭之動態有效應力數值分析，由於表層為軟弱土層，因此其震波放大效應不顯著，版樁彎距隨後方土壤變形量增加而增加，最大彎距發生於頂部與 RC 面版連結處，此結果與 Iai and Kameoka (1993)之結果不同，其原因為考慮樓版之連續樑效應，當地表加速度達到 0.4g 左右，表層即有液化現象，且鋼索荷重超過其設計拉力，初步結果亦顯示考慮孔隙水壓力激發與動力反應下，其結構彎距將大幅增加。
3. 規畫與分年設置營運中碼頭現地結構與土壤動態互制監測系統：本年度已完成裝設包括陸上三向度地震儀、動態位移剖面具自動啟動 (triggering)之動態資料擷取系統，且系統具備遠端控制之功能，目前測試相關功能尚屬正常。
4. 選擇適當港區進行微地動量測與共振主頻分析：本年度完成以港研

中心所有 Guralp CMG-6TD 數位寬頻地震儀於台北港區進行微地動儀量測，量測結果顯示台北港區主頻除了一個測站為 2.69 外，其於大約介於 0.98~1.81Hz，另由陸上與 TPE09 碼頭之反應與分析結果顯示其頻譜結果相當接近，顯示港區之共振主頻差異不大。

## 6.2 建議

針對本年度計畫執行提出下列建議：

1. 本年度數值分析時之土壤參數均以文獻建議數值，建議往後增加現地取樣試體之室內動態試驗。
2. 由於 Finn model 將塑性應變與孔隙水壓分開考慮，無法與室內液化試驗結果結合，將於後續可發展參數決定程序並在 FLAC 架構下撰寫適合之組構模式及 BNWF 程序，並進行參數驗證程序，以便更真實模擬監測站行為。
3. 由於現地營運中碼頭之監測設備安裝受限於場地與水下作業之故，且國內外並無相關文獻，所用設備須經耐久與適用性測試，本年度僅完成初期裝設與整合，後續成果檢核、校正與微調仍需進一步測試，希望後續計畫可編列相關經費擴增與維護。
4. 有關海水動壓力對版樁之影響，本年度僅進行初步簡化分析，基於分析之不確定性與其效應有限且為增加版樁穩定性，因此本年度於數值分析時暫不考慮，其詳細分析與探討建議於後續計畫加強。

## 參考文獻

1. 賴聖耀、李豐博、蘇吉立、陳志芳(2002)，”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，中華民國九十一年二月。
2. 港灣技術研究中心(1999)，”臺中港 1 至 4A 碼頭 921 地震液化災損出步調查研究”，專刊 172。
3. 張文忠、許晉銘 (2005) “現地土壤液化試驗之發展與應用” 第十一屆大地工程研討會。
4. 黃俊鴻、楊志文、譚志豪、陳正興 (1990) “集集地震土壤液化之調查與分析” 土工技術 NO.77 p.51-64
5. 褚炳麟、張益銘、陳冠閔、徐松析、張錦銘 (1990) “921 地震霧峰、太平地區液化及下陷調查分析” 土工技術 NO.77 p.19-28
6. 翁作新、褚炳麟、林炳森 (1990) “員林、霧峰及南投地區土壤液化特性” 土工技術 NO.81 p.17-23
7. 黃俊鴻、陳正興 (1998) “土壤液化評估規範之回顧與前瞻” 土工技術 NO.70 p.23-44
8. 陳正興等 (2004) “土壤液化對交通結構物之影響及液化潛能評估方法與災害分析模式之研究 (1/2)”，交通部運輸研究所，中華民國九十三年十二月。
9. 簡連貴、林敏清，1998，回填造地土壤剪力波速之評估-雲林麥寮案例之探討，土工技術(Sino-Geotechnics)，(67): 69-82.
10. 簡連貴、賴聖耀、林敏清，1999，921 集集大地震對臺中港區港灣設施災損調查與評估，土木水利會刊(Civil and Hydraulic Engineering)，26(3): 82-95。

- 11.陳景文、林宏翰 (2000) 高雄都會區土壤液化潛能微分區。地工技術，第 82 期，第 35-42 頁。
- 12.許崑山(2007)，FPGA/Real-Time 架構下現地光纖光柵解讀儀系統之研發，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所。
- 13.陳道生(2005)，軟弱岩石內模型基樁之物理與數值模擬試驗，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所。
- 14.Ashford, S.A., Weaver, T.J., and Rollins, K.M. (2002) "Pore Pressure Response of Liquefied Sand in Full-Scale Lateral Pile Load Tests." Transportation Research Record 1808, Transportation Research Board, p. 21-29.
- 15.Brandenberg, S.J., Boulanger, R.W., Kutter, B.L., Chang, D. (2005), "Behavior of Pile Foundations in Laterally Spreading Ground during Centrifuge Tests", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 11. pp.1378-1391.
- 16.Boulanger, R.W., Curras, C. J., Kutter, B.L., Wilson, D.W., and Abghari, A. (1999), "Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 9. pp.750-759.
- 17.Chang, W.-J. (2002) Development of an In Situ Dynamic Liquefaction Test, Ph.D. Dissertation, University of Texas, Austin, TX, USA.
- 18.Chang, W. J., Rathje, E. M., Stokoe, K. H. II, Cox, B. R. (2004), "Direct Evaluation of Effectiveness of Prefabricated Vertical Drains in Liquefiable Sand," Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 24/9-10, pp 723-731.
- 19.Dafalias, Y.F. and Manzari, M.T.M. (2004), "Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 6. pp.622-634.
- 20.Finn. W.D.L. and Fujita, N. (2002), "Piles in liquefiable soils: seismic

- analysis and design issues,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 22/9, pp 731-742.
21. Klar, A. and Frydman, S. (2002), “Three-Dimensional Analysis of Lateral Pile Response using Two-Dimensional Explicit Numerical Scheme,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 9. pp.775-784.
  22. Lin, S.-S. and Liao, J.-C. (2006) “Lateral Response Evaluation of Single Piles Using Inclinator Data”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 12. pp.1566-1573.
  23. Liyanapathirana, D.S. and Poulos, H. G. (2005), “Pseudostatic Approach for Seismic Analysis of Piles in Liquefying Soil,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 12. pp.1480-1487.
  24. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L. (1969), “Finite dynamic model for infinite media,” *J. Eng. Mech. Div.*, 95(EM4), pp. 859–877.
  25. Rathje, E. M., Chang, W. J. and Stokoe, K. H. II (2005), “Development of an In Situ Dynamic Liquefaction,” *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 28, No. 1, pp.65-76.
  26. Rollins, K. M., Gerber, T. M., Lane, J. D., and Asford, S.A. (2005). “Lateral Resistance of a Full-Scale Pile Group in Liquefied Sand,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 1. pp.115-125.
  27. Tokimatsu, K. (2003), “Behavior and Design of Pile Foundations Subjected to Earthquakes” Tokyo Institute of Technology.(in Japanese).
  28. Tokimatsu K. (1999) “Performance of pile foundations in laterally spreading soils,” In: *Proceedings of the Second International Conference Earthquake Geotechnical Engineering*, vol. 3. p. 957–64.
  29. Tokimatsu K, Asaka Y. (1998), “Effects of liquefaction-induced ground displacements on pile performance in the 1995. Hyogoken–Nambu earthquake,” *Special issue of Soils and Foundations*. pp.163–77.

30. Tokimatsu, K., Suzuki, H., and Suzuki, Y. (2001). "Back-calculated p-y relation of liquefied soils from large shaking table tests." Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, S. Prakash, ed, University of Missouri – Rolla, paper 6.24.
31. Wilson, D. W., Boulanger, R. W., and Kutter, B. L. (2000). "Seismic lateral resistance of liquefying sand." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126, No.10, pp. 898-906.
32. Yang, Z., Elgamal, A., and Parra, E., (2003). "A Computational Model for Liquefaction and Associated Shear Deformation," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 12.
33. Zienkiewicz, O. C., Chan, A. H. C., Pastor M., Paul, D. K., and Shiomi T. (1990), "Static and dynamic behaviour of geomaterials – a rational approach to quantitative solutions, part-1 fully saturated problems," Proc. Royal Society of London, A429, pp. 285-309.

## 附錄一

### 期中審查會議紀錄回覆辦理

## 交通部運輸研究所合作研究計畫第 2 類

### 期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：港灣現地碼頭結構與土壤動態互制監測之研究(1/2)

執行單位：國立暨南國際大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
國立臺灣大學土木系 陳教授 正興		
1. 報告書初稿中，動態有效應力分析模型之 Winkler Spring 代表什麼？如何以界面元素模擬？	Winkler spring 表示連結基樁或版樁結構元素與周圍土壤之機制，數值模擬中以包含兩向彈簧與 dashpot 之界面元素模擬。	同意
2. 表面波震測之施測地點與監測地點不一致，理由為何？又震測所得波速剖面僅 5m 深度，可能無法滿足分析所需。	由於碼頭表面存在混凝土版且下方回填礫石與混凝土版間可能有部分空隙，以致無法施做有意義之表面震測，因此以具較完整資料之現有自由場資料，以表面震測驗證現有資料，結合微地動港區共振主頻分佈之瞭解土層變異性，以推估碼頭之土層性質。目前施測深度僅有 5m，將嘗試使用低頻震源增加探測深度，但表面震測探測深度仍僅約 15m，因此碼頭地質資料仍以推估為主。	同意
3. 現地監測系統所採用之 Shape Array 僅 4.8m 長，僅能監測版樁之局部變形，因無固定點，並無法量得版樁之整體變形或絕對位移。	受限於可施做空間與不破壞現有結構，因此僅能做表面量測，結果僅為版樁局部相對變形，解決方法為利用表面加速度計，並以接近表面上端為固定點，可近似量得版樁之絕對位移。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
4.量測位置應避免角隅效應之影響。	謹遵委員建議，在訊號線可延伸範圍，將設置 Shape Array 地點儘量遠離角隅。	同意
國立中山大學河工系 李教授 賢華		
1.數值分析 model 中使用 winkle spring 模擬 Near field，對於 Structure 與 Soil 之互制行為是否適當，如何 justify?	所示為 Finn 等之建議模型，本研究僅以包含兩向彈簧與 dashpot 之界面元素模擬，以連結土壤與結構元素，並無法完整模擬 near field 之概念，但結合鄰近結構周圍之土壤與界面元素之反應可近似代表 near field 之概念。	同意
2.碼頭的分析中水為最重要的元素之一，如何分別在靜力及動力分析中考慮，應在報告中顯示。	原擬以近似之 Westegard 等值水壓力模擬，但考慮結構本身亦為震源之效應，將以委員建議之 added mass 方法將水之影響加入動態分析，靜態分析則僅考慮水位造成之靜態孔隙水壓力。	同意
3.利用現地實測的數據來驗證分析方法之可靠性有其重要性唯選擇之方法是否適當，宜具體先行評估。	本計畫目的之一為發展營運中碼頭動態監測系統，以驗證分析方法可靠度，但受限於現地設施，無法如實驗室般進行詳細量測，因此將佐以數值分析評估各主要參數與影響區域，以增進相關分析方法之可靠性。	同意
基隆港務局工務組 李組長 雲萬		
1.報告書初稿中，P9、P22、P54：本案所選為臺北港 E09 碼頭，此碼頭為錨定式版樁碼頭，本報告中多處文字均以基樁或棧橋式碼頭	相關文字將於期末報告中更正。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
稱之，請將誤繕處更正。另 P54 之光纖感測裝設方式與本地點碼頭結構不符，請修正。		
2.報告書 P18：本年度預期成果中表示可提供不同型式碼頭受震後之資料，本案僅 E09 碼頭，其他碼頭結構不同時，如何提供？同樣其下之預期效應可提供之資訊，仍值存疑。	不同碼頭形式與地質概況將導致不同反應，報告內容為包含前期與未來計畫成果，目前應可對已完成之棧橋式與進行中之錨碇版樁得到初步成果。	同意
3.報告書 P60：港區微地動量測需進入碼頭區，如無法進入取資料，請知會本局人員協助。另“其中尤其……確認”意指為何？	後續量測將請基隆港務局協助，另所書文字為針對量測之邊界效應之影響對量測方法之適用性所提出需進一步確認之意。	同意
4.本研究所建構之模式，是以圖 1.3 Bean on Winkler Footing 模型所修，成為圖 2.26 之 TPE 09 模型，兩者模型考量背景及參數不同。E09 背填與圖 1.3 適用重力碼頭之假設相異，E09 是否可完整或具代表性表現碼頭行為，值得觀察。	圖 1.3 為相關物理模型概念代表，E09 碼頭模擬會以現地情況加以修正。	同意
前港研中心研究員 賴聖耀 先生		
1.本計畫雖然是一個新的計畫，但它亦有延續性，研究團隊去年為港研中心於高雄港完成棧橋式碼頭的監測系統，盼望將其監測結果亦放於本報告書中，讓各審查委員得知該監測系統運轉狀況。	前期監測站因屬測試性質，目前仍有部分元件進行修改，將於期末報告中加入現有成果。	同意
2.有關碼頭的微地動試驗，請研究團隊利用港研中心之低頻微震儀試驗，分析選定碼頭之共振主頻。	所用之設備為港研中心之低頻微震儀試驗，但碼頭區施測之困難如審查意見(2)說明，且其適用性仍待進一步探討。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
3. 謝謝研究團隊願意幫港研中心承接這種現地野外的監測研究，並由主持人採用最新版之數值模擬 (FLAC) 程式來進行分析，對於問題掌控亦相當清礎。	謝謝委員鼓勵。	同意
本所港研中心 朱科長 金元		
研究計畫中，選擇臺北港東 9 號碼頭安裝監測系統的主要目的，是要將監測相關之成果，應用在檢驗及修正數值模擬分析上，請研究團隊儘速完成相關工作計畫項目，並於期末報告時能有預期成果展現。	研究團隊將謹遵委員指示，並儘早完成相關工作，於期末報告時展現預期成果。	同意

## 附錄二

### 期末審查會議紀錄回覆辦理

## 交通部運輸研究所合作研究計畫第 2 類

### 期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：港灣現地碼頭結構與土壤動態互制監測之研究(1/2)

執行單位：國立暨南國際大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<b>臺灣大學陳教授正興：</b>		
1.關於有效應力動態數值分析，以及現地監測系統之建置部份，應將近期之最新研究成果整理併入期末報告書中，以完成預期成果。	已於修正之期末報告中併入數值分析與現地監測結果說明。	同意
2.數值分析模型之邊界宜清楚說明，又分析之時間間距為何？對分析結果亦應有說明。	已於第二章 2.2 及 2.3 節補充說明。	同意
3.對營運中碼頭之基樁裝設監測儀器，只能裝設於地盤之上的自由端部份，無法對入土部份進行監測，故無法得到基樁之完整反應。	由於為現地營運中碼頭，無法進行鑽探與侵入式安裝，但本年度目標為進行相關監測系統整合測試與監測設備耐久與適用性測試，因此裝於出土之基樁部分，但仍可作為相關數值分析之驗證。	同意
<b>中山大學李教授賢華：</b>		
1.本計畫在現地地下水執行困難度較高，能順利完成誠屬不易。	謝謝委員鼓勵。	同意
2.本案中有關水域結構及波浪相關之參數，在分析中宜列入(因報告中未具體呈現)。	由於所用之分析程式於水域結構與波浪相關之參數無法進行細部模擬，目前以 Westgard 等值力形式將波浪應力施加於基樁但其影響有限，水下結構則以水下邊坡方式以浸水單位重取代整體單位重以考慮浮力。	同意
3.本案在土壤相關分析的報告，寫的相當清楚明確。	謝謝委員鼓勵。	同意

國立臺灣大學土木系 陳教授 正興		
1.本研究之目的在發展一有效應力分析模型與建立一現地監測系統，屬第一年之研究計畫，已具初步成果，監測系統可繼續改善與校正使其能正常運作。	將於後續經費許可下將增購監測設備並持續進行耐久與穩定性測試。	同意
2.數值分析模型之分析模式與參數，可繼續修正，並與實測記錄作驗證。	將於後續進行非擾動取樣並進行室內試驗求取相關參數。	同意
國立中山大學河工系 李教授 賢華		
1.動態水壓力以 Added Mass 之分析方法，在簡報中有列入考慮，但報告中之說明，並不夠清楚，請補充。	已增加說明於 4.1 節(p.54) 及建議中	同意
2.版樁式碼頭模擬分析結果中，傳統靜力分析時顯示之結果與動力分析之結果出入甚大，尤其版樁頂端位移較大，動力分析顯示之彎矩力亦為最大，試似乎不合理，請 double check (頂部之 boundary)。	已依施工紀錄修正取消地表 PC slab，改為等值垂直荷重，修正之結果與文獻相近，最大彎距發生於海床深度附近。	同意
3.鋼筋混凝土材料之比重最少可設為 2400kg/m <sup>3</sup> ，原有假設 2300kg/m <sup>3</sup> 太小	已修正。	同意
4.報告中之名詞使用請儘量一致。	已改正如版樁、動態剖面儀等。	同意
前港研中心研究員 賴聖耀 先生		
1.本研究執行艱難的碼頭監測工作又以嚴謹的數值模擬深入分析臺北港版樁碼頭之受震行為由報告中之第 64 頁至 78 頁可看見有很好的分析結果，研究團隊的用心值得肯定，極具參考價值	謝謝委員鼓勵。	同意

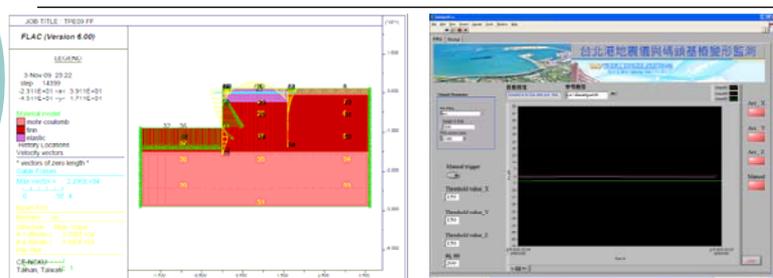
國立臺灣大學土木系 陳教授 正興		
2.有關臺北港版樁碼頭之FLAC數值分析，是以0.45g的地震力進行之分析，分析之結果，土壤有液化現象，版樁水平位移0.7m，鋼索拉力達450噸，已經超過極限拉力130噸許多，有災害可能，但臺北港不太可能發生這麼大的地震力，由於臺北港版樁碼頭之鋼索曾有斷裂災害，請研究團隊再以設計地震力0.23g進行分析，檢核索拉力是否足夠。	原有初稿單位有誤，經修正後地表加速度值約為0.2g，表層土壤產生液化，錨定拉力僅約11.7 tons，應不致破壞。	同意
3.關臺北港版樁碼頭之監測系統，目前已設置完成，最近(98年11月5日)於南投名間發生強震，地震規模達芮氏6.0，撼動全台，不知本監測系統是否有監測到相關資訊？另外去年於高雄港所完成之棧橋式碼頭監測系統，是否有監測到相關資訊？儀器功能是否正常運作。	當時系統仍在測試中，因此無相關紀錄，前期高雄港監測系統亦已上線，但當時因陸上地震儀可能損壞，因此沒有啟動系統。	同意
本所港研中心 朱科長 金元		
1.期末報告初稿中，以數值模擬臺北港版樁碼頭之動態分析，其中假設之邊界條件與實際有一些出入，請依較實際狀況重新再次分析，以得到較合理之結果。	已修正且結果與相關文獻相近。	同意
2.報告定稿中格式，請依港研中心出版品格式編排。	謹遵辦理。	同意

## 附錄三

### 期末報告簡報資料

# 港灣現地碼頭結構與土壤動態互制 監測之研究(1/2)

## 期末簡報



委託單位：交通部運輸研究所  
執行單位：國立暨南國際大學  
研究團隊：張文忠、林炳森、黃安斌

## 簡報大綱

- 計畫目的與流程
- 本年度工作成果報告
  1. 監測碼頭選定、文獻收集及現地調查
  2. 進行版樁碼頭動態有效應力數值分析
  3. 規劃與分年設置營運中碼頭動態監測系統
  4. 試驗港區碼頭微地動試驗與共振主頻分析。
- 結論與建議
  - 本年度成果總結
  - 後續工作建議

## 計畫背景與目的

---

### ○ 背景

- 港區碼頭結構常因受震與液化引起破壞
- 現有安全分析程序與防治對策需修正更新
- 碼頭受震時需考慮土壤-支撐基礎-上部結構之互制行為→ 機制複雜
- 設立永久之現地碼頭結構與土壤動態互制監測站有其必要性

3

### ○ 目的

- 進行土壤－支撐系統－上部結構之動態有效應力分析作為進行現地監測站配置、碼頭安全性評估及防治對策之依據
- 發展現地碼頭土壤與結構動態量測技術
- 設立長期現地碼頭監測站及相關資料處理程序
- 以現地監測成果回饋數值分析結果並發展港區受震快速評估與災害速報系統。

4

## 整體計畫 - 第一年(98年)

---

1. 選定適當之港區碼頭形式與場址進行相關文獻收集與現地調查。
2. 以二維動態數值分析進行考慮碼頭結構形式之動態有效應力數值分析。
3. 規劃與分年設置營運中碼頭現地結構與土壤動態互制監測系統，作為數值驗證與震後災損預測。
4. 配合港研中心進行港區碼頭微地動試驗與共振主頻分析

5

## 整體計畫 - 第二年(99年)

---

1. 以三維動態數值分析進行碼頭結構形式之動態有效應力數值分析。
2. 增補碼頭結構與土壤動態互制監測系統，作為數值驗證與震後災損預測。
3. 建立監測資料分析架構與碼頭結構受震災損速報系統。
4. 利用港區微地動試驗與共振主頻分析成果，建構結合監測站紀錄之港區自由場地盤振動與液化災損速報預測。

6

## 預期成果、效益及其應用

### ○ 碼頭結構與土壤互制之動態有效應力數值分析

- 現地碼頭動態監測站規劃依據。
- 影響碼頭位移之動態水壓激發或液化之加速度門檻值。
- 建立完整碼頭動態數值分析程序。
- 修正相關設計方法與現有系統補強參考

7

### ○ 動態碼頭結構與土壤互制監測系統

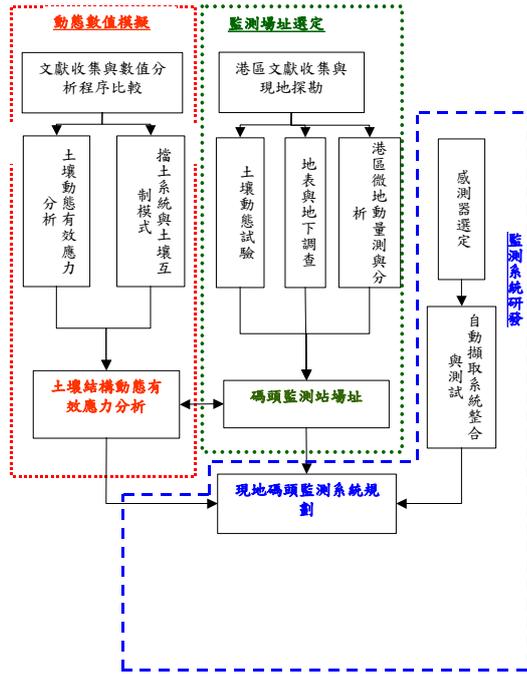
- 量測碼頭結構動態反應、土壤振動反應及孔隙水壓分佈變化
- 瞭解地震作用下土壤-支撐系統-上部結構互制行為，驗證數值分析程序。
- 檢核土壤-支撐系統-結構互制行為分析方法
- 後續建立震後災損速報系統與災害管理之應用

### ○ 微地動試驗與共振主頻分析

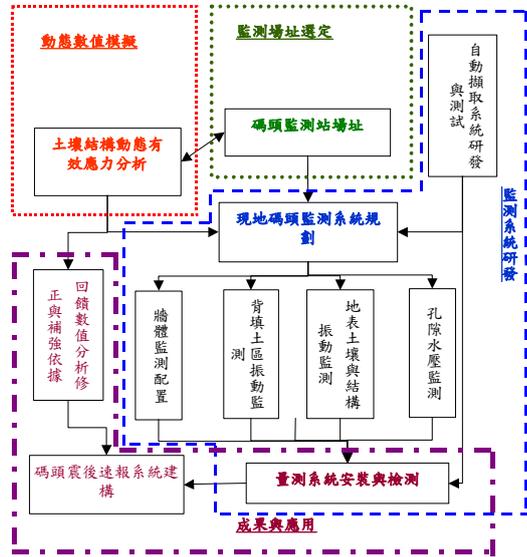
- 港區地表振動與液化危害度微分區，發展震後災損速報系統
- 監測場址地質探測及數值分析參數

8

# 研究流程



# 研究流程 (續)



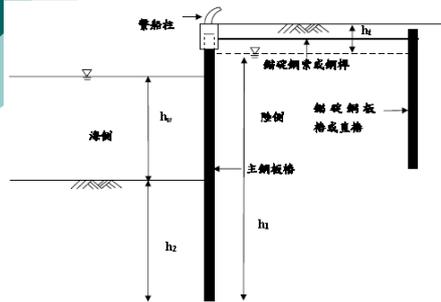
# 規劃執行進度

工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月
互制行為與文獻彙整	█	█							
場址選定與現地調查			※						
港區震測、微地動試驗與共振主頻分析		█	█	█					
初步土壤-結構互制數值分析		█	█	█					
現地監測系統規劃書			█	█	█				
期中報告					※				
自動監測系統研發				█	█	█			
碼頭監測系統整合測試					█	█			
現地監測系統裝設與測試						█	█		
完整土壤-結構互制數值分析					█	█	█	█	
期末報告									※
工作進度估計百分比(累積數)	10	20	30	40	50	70	80	90	100
預定查核點	第1季:場址選定與現地調查 第2季:期中報告 第3季:現地監測系統裝設與測試 第4季:期末報告								

11

## 文獻回顧-錨定鉸樁

錨定版樁式碼頭破壞常由碼頭位移量控制，因此進行震災管理時需能推估碼頭永久變位



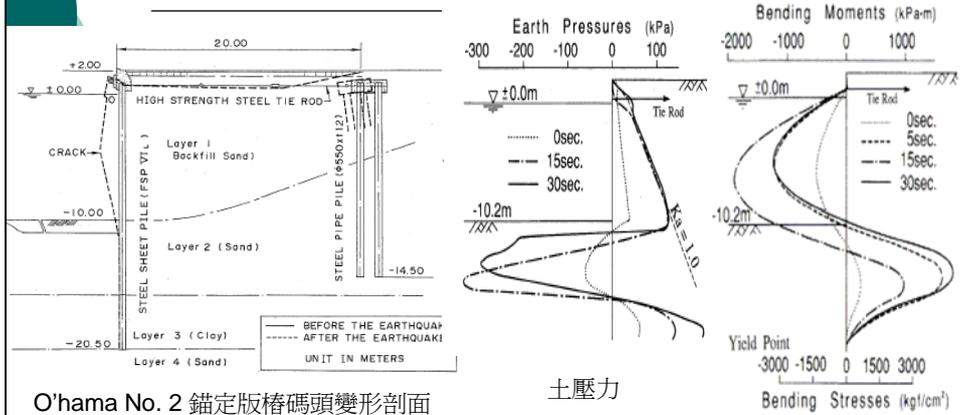
錨定版樁式碼頭斷面



阪神地震神戶港版樁式碼頭岸肩沈陷受損

12

## 土壤-錨定版樁互制行為

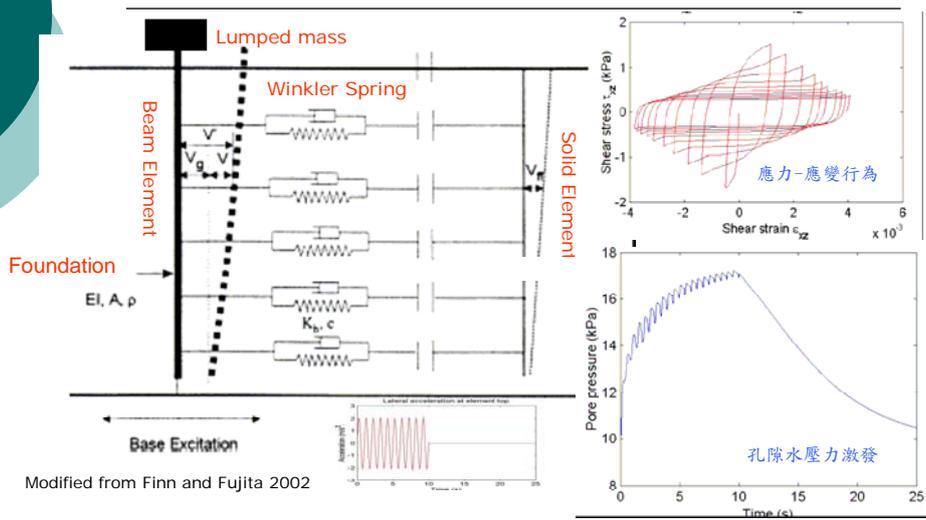


O'hama No. 2 錨定版樁碼頭變形剖面  
(1993 Nihonkai-Chubu EQ)

(Iai and Kameoka 1993)

13

## 動態有效應力分析物理模型

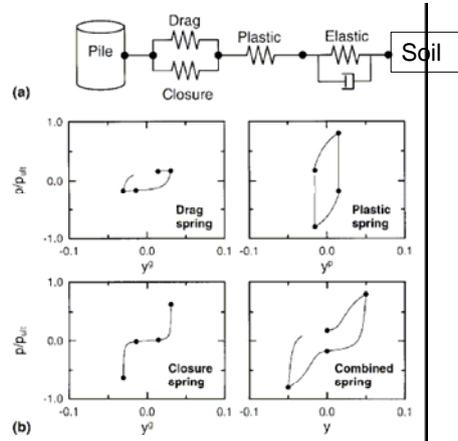


Modified from Finn and Fujita 2002

Yang et al. 2003

14

## 土壤-結構介面



BNWF模式組成元件與各元件反應 (Boulanger et al., 1999)

15

## 動態水壓力

- Added Mass (Newmark and Rosenblueth, 1971)
  - Incompressible fluid, ignore viscosity and rotational motion effects
  - Ignore wave height, fixed structure
  - Added mass on structure element to create equivalent dynamic effects
- Westergaard Hydrodynamic pressure (Matsuo and O'hara, 1960)
 
$$\Delta U_i = \frac{7}{40} h^2 \gamma_w k_h$$

16



## 驗潮站現況



19

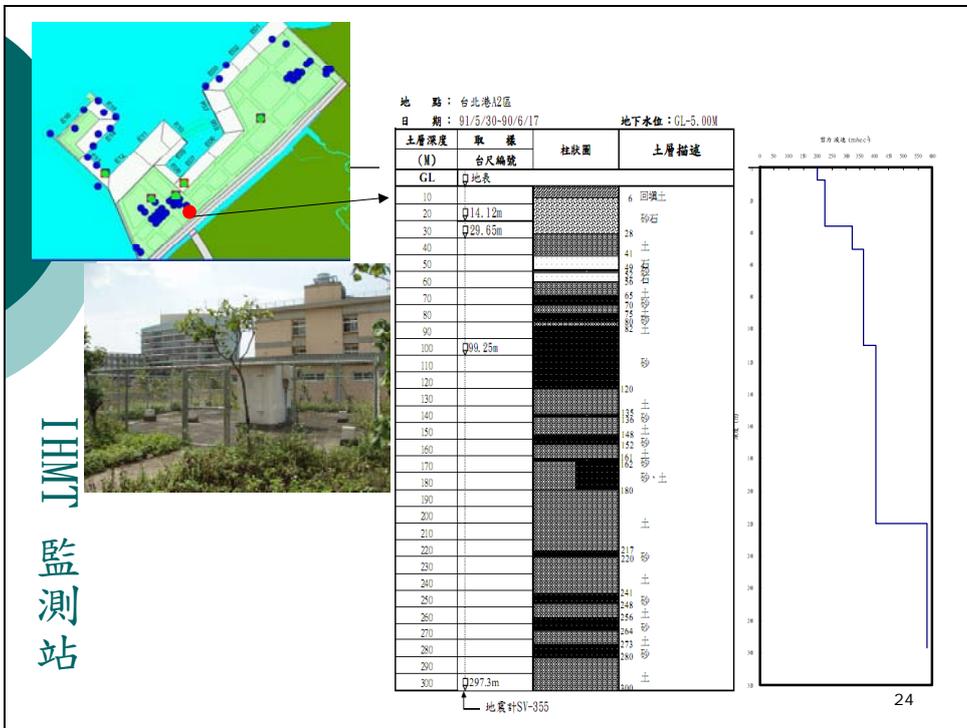
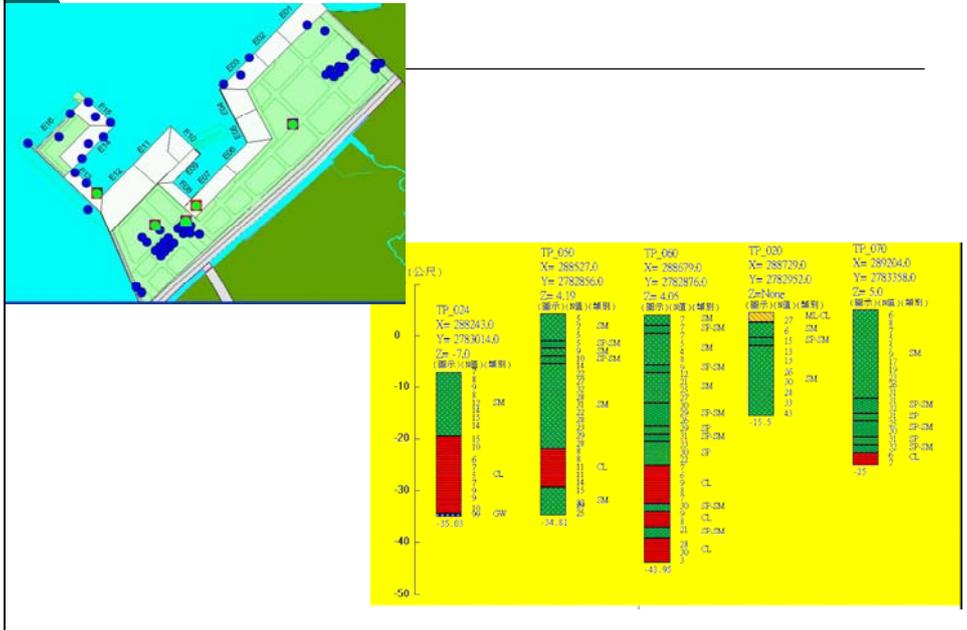
## 監測站附近地質調查

- 施工階段與現地自由場監測站鑽探記錄 (IHMT 提供)
- 港區微地動調查
- 表面波量測

20



# 台北港E04~E10鑽探資料

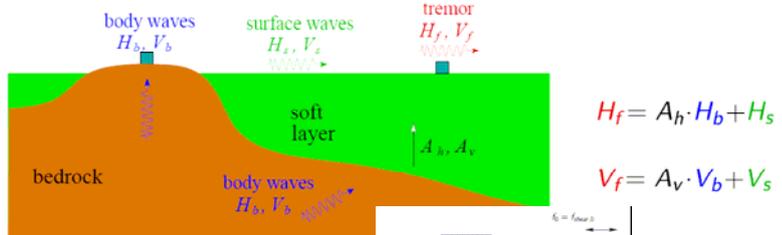


IHM1  
監測站

# 微地動試驗與共振主頻分析

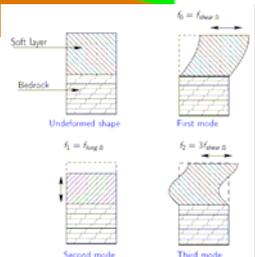
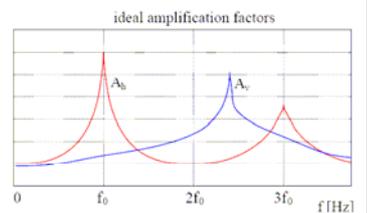
Nakamura's Technique

measured tremor = amplification factor · body wave + surface wave



$$H_f = A_h \cdot H_b + H_s$$

$$V_f = A_v \cdot V_b + V_s$$

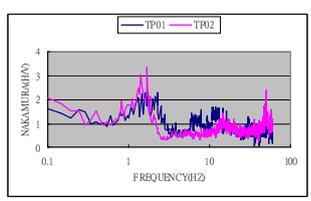
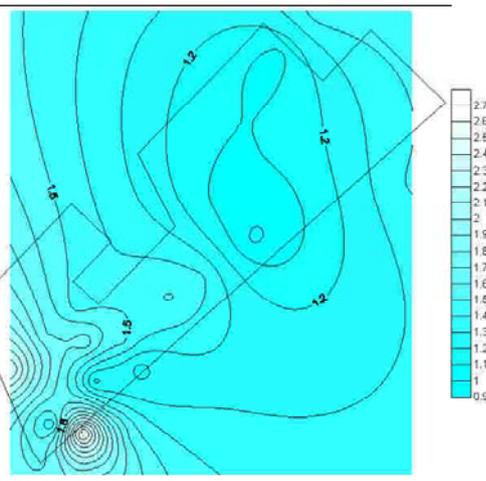
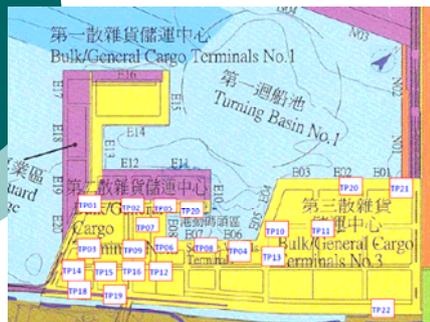


$$A_h = \frac{H_f}{H_b}$$

$$A_v = \frac{V_f}{V_b}$$

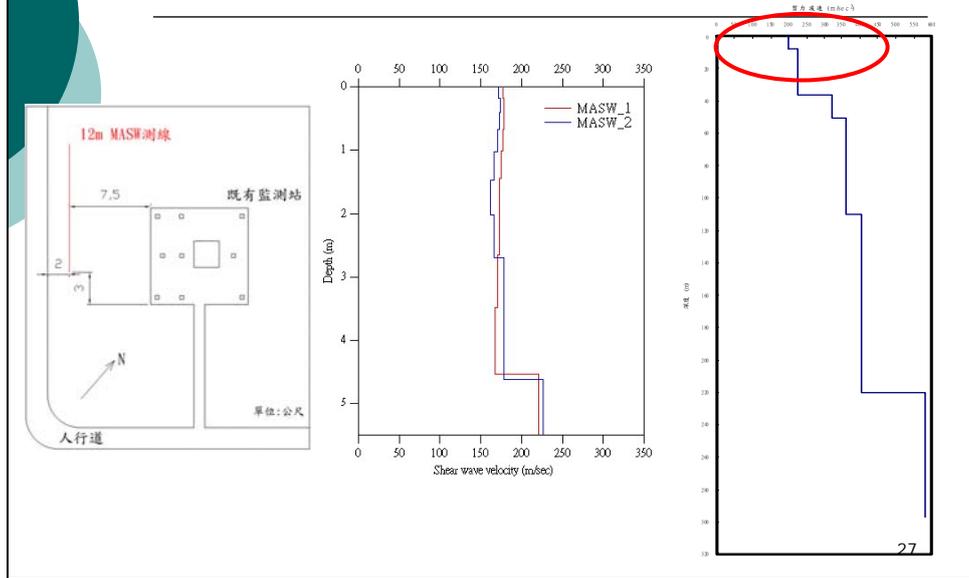
$f_0$  = fundamental frequency

# 港區微地動調查



台北港區共振主頻等值分佈圖

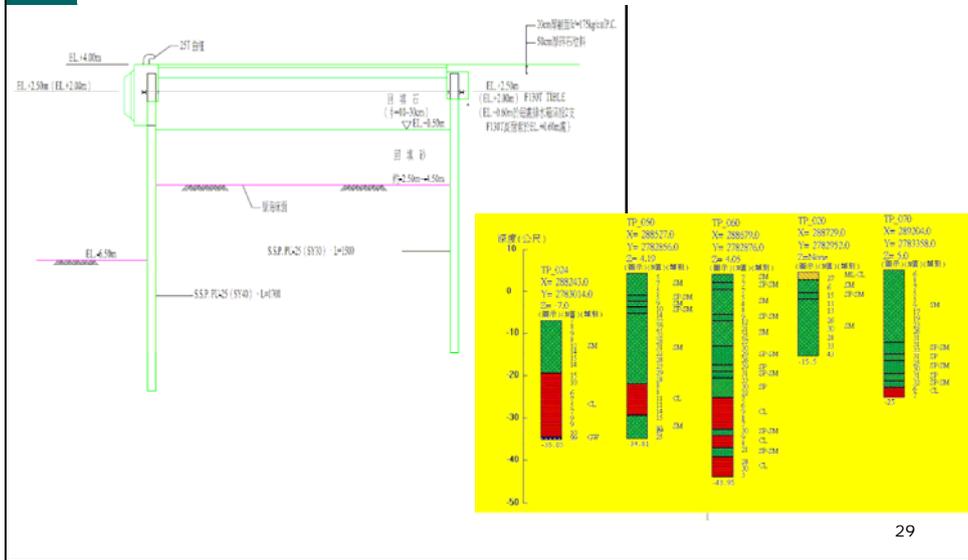
## 現有監測站表面波震測



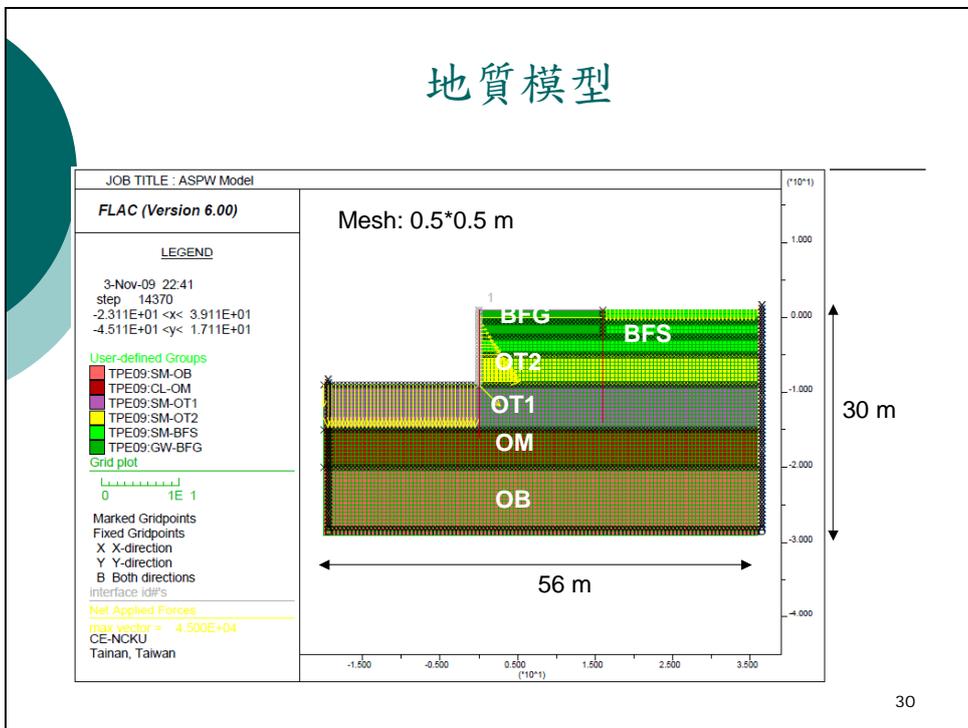
## 錨定版樁動態數值模擬

- 動態有效應力分析目的：
  - 現地監測站配置參考
  - 評估引致破壞之門檻加速度
- 程式架構：
  - FLAC6.0+Dynamic option
  - Soil: Mohr-Coulomb/Finn
  - Sheet pile: Beam element+ interface element
  - Anchor: Cable element

## 碼頭結構幾何與土壤剖面



## 地質模型



### 模型參數：土壤元素

	底部海床 OB	中間海床 OM	頂部海床 OT1	原有海床 OT2	回填砂層 BFS	礫石回填區 BFG
Depth from SL(m)	-29~-20	-20~-15	-15~-9	-9~-5	-5~-2	-2~+1
USCS	SM	CL	SM	SM	SM	GP
N1,60	25	10	12	7	5	>50
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1850	1800	1850	1800	1750	2100
Shear Modulus (MPa)	98	72	74	40	27	189
Bulk Modulus (MPa)	163	96	123	54	36	207
Cohesion (Pa)	2000	3000	2000	2000	1000	0
Friction angle (degrees)	35	28	28	28	28	45
Dilation angle (degrees)	0	0	0	0	0	0
Hardin $r_{ef}$	0.06	0.023	0.08	0.09	0.10	0.01
Finn Parameter C1	--	--	0.39	0.764	0.927	--
Finn Parameter C2	--	--	1.03	0.524	0.432	--

31

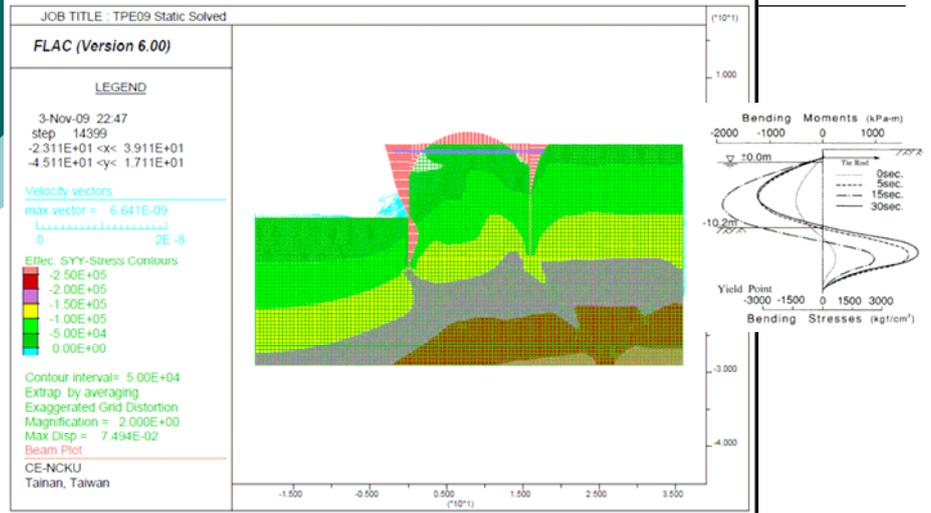
### 模型參數：結構與介面元素

	Elastic Modulus (Gpa)	Moment of Inertia (m <sup>4</sup> )	Cross Sect. Area (m <sup>2</sup> )	Mass Density (kg/ m <sup>2</sup> )	Pile Perimeter (m)
Sheet Pile Beams	21	5.65×10 <sup>-4</sup>	0.02	157	—
Sheet Pile	21	5.65×10 <sup>-4</sup>	0.02	157	0.54
RC Slab Beam	19.4	6.67×10 <sup>-4</sup>	0.2	2300	--

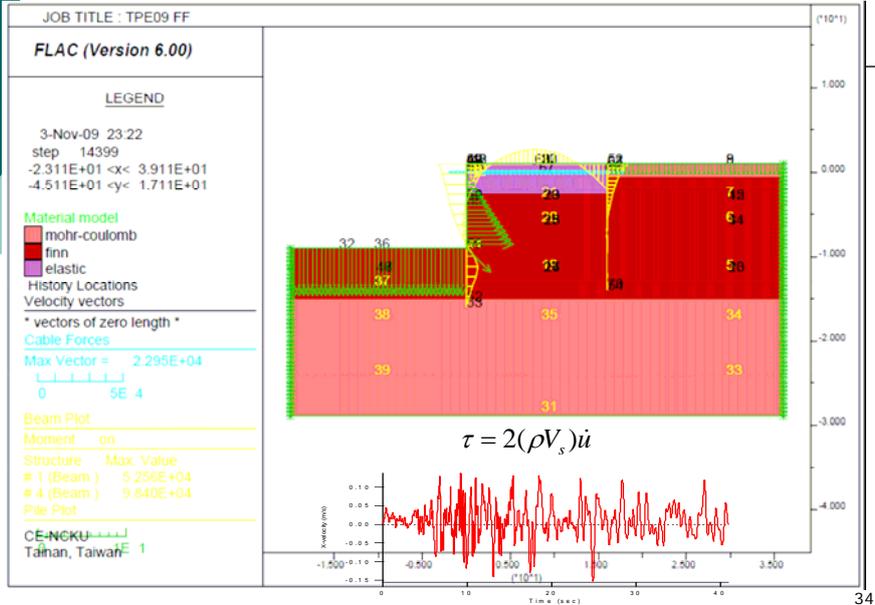
	Normal Stiffness (MN/m/m)	Shear Stiffness (MN/m/m)	Normal Coh. (N/m)	Shear Coh. (N/m)	Normal Friction (deg)	Shear Friction (deg)
ST Backfill	10	5	1000	1000	30	30

32

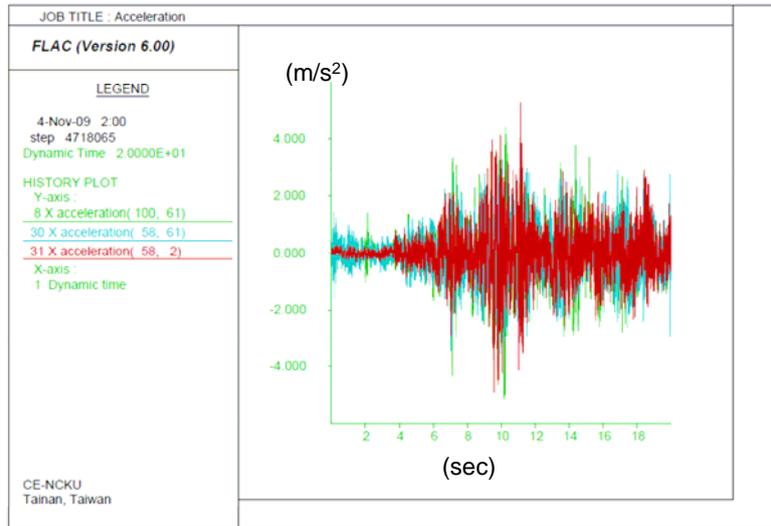
# 靜力平衡: Stress



# 監測點位與動態邊界

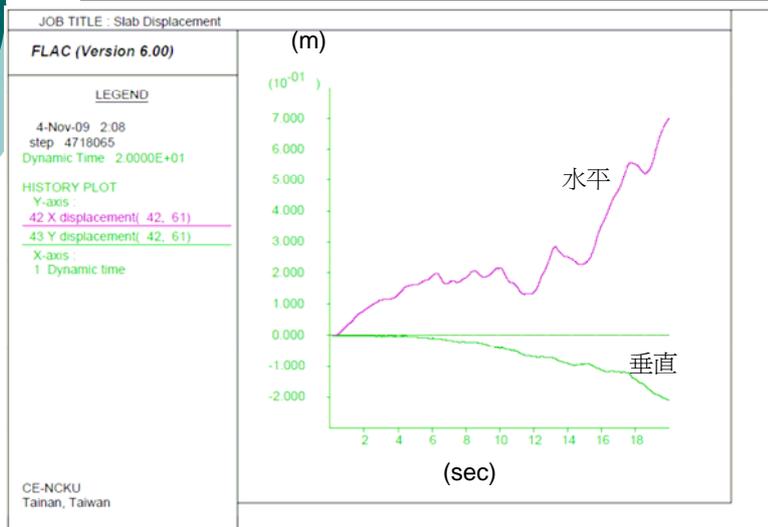


## 加速度與位移歷時變化



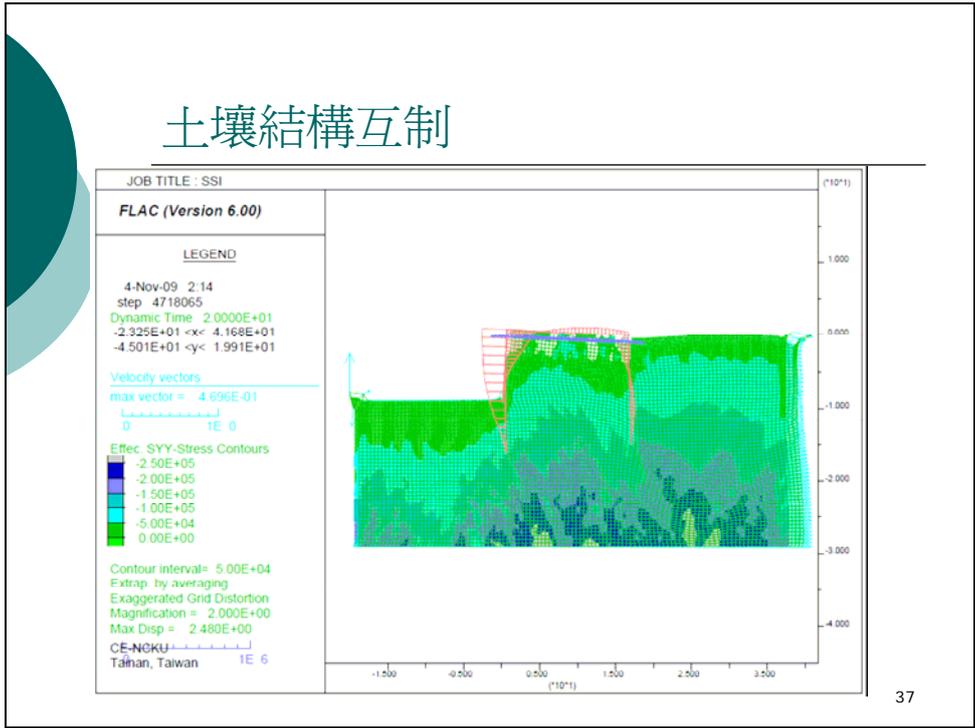
35

## 版樁上方土壤位移歷時變化

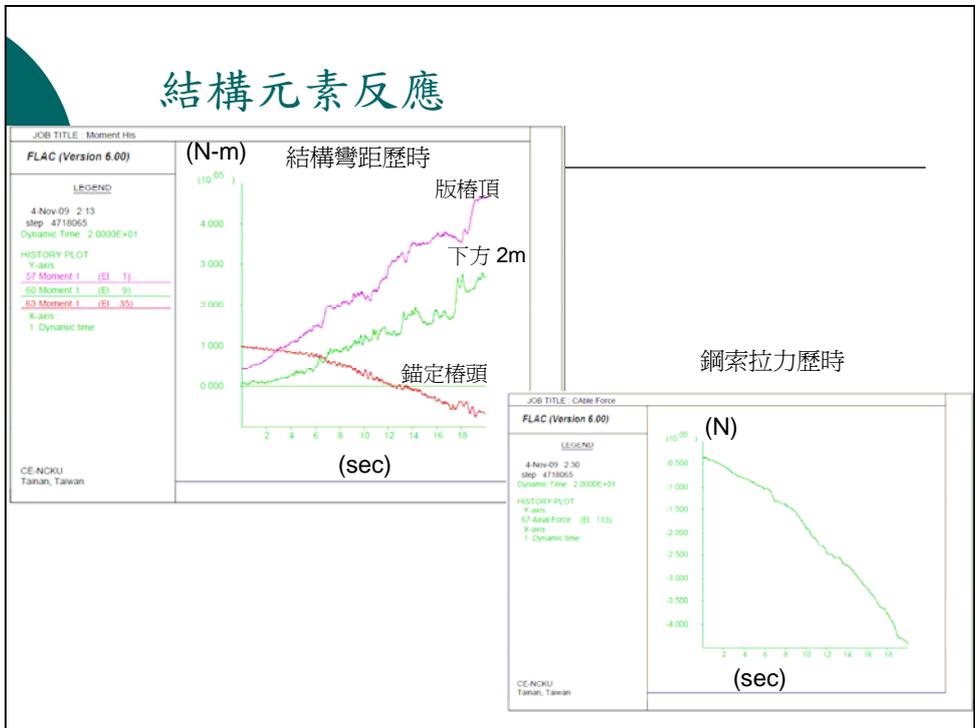


36

# 土壤結構互制



# 結構元素反應

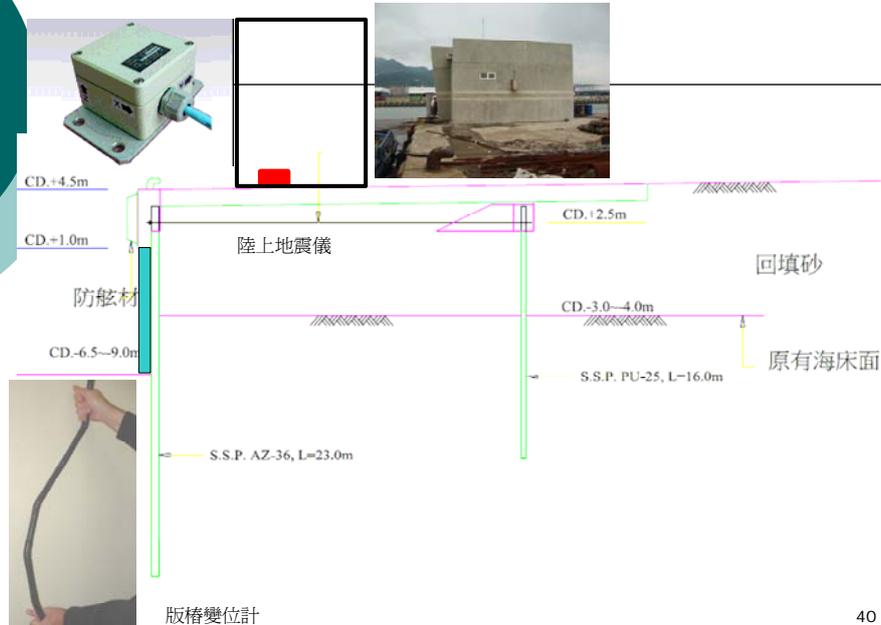


## 錨定版樁碼頭動態監測站規劃

- 分年建構，初期以表面監測為主
- 監測系統組成：
  - 感測器：陸上地震儀、動態版樁變位監測系統
  - 動態監測主機與通訊系統。
- 監測系統裝設原則：
  - 除監測主機外無設施置於地表。
  - 隱密不顯著，不妨礙交通動線。
  - 遠端遙控與無線通訊。

39

## TPE09版樁式碼頭現地配置

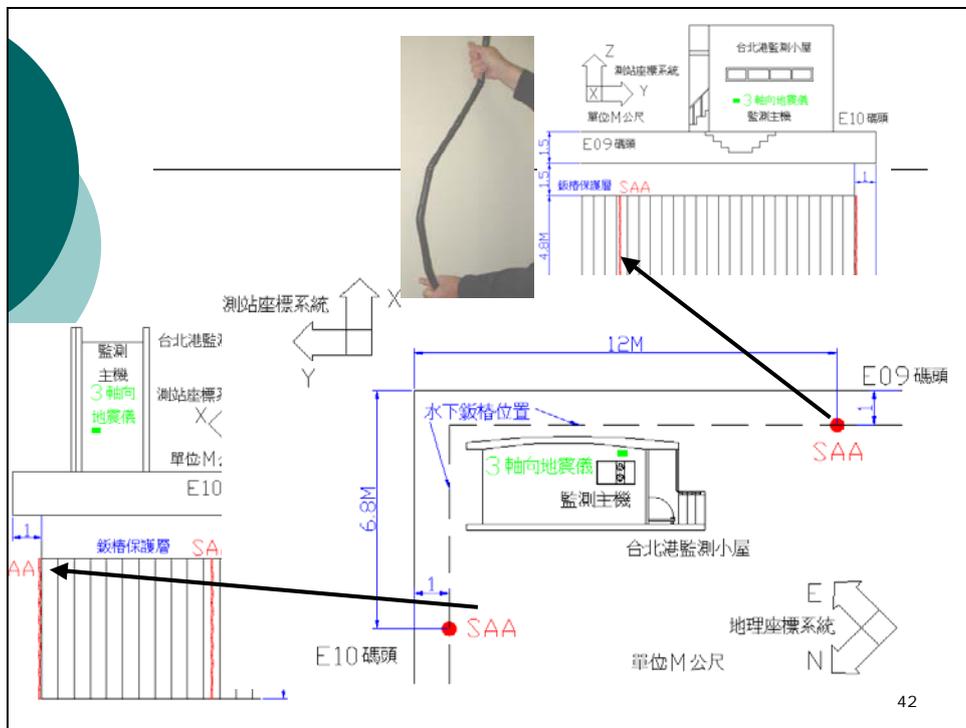


40

## 監測系統列表

設備	規格	用途
工業電腦	耐高溫至45 °C	監測主機
多頻道動態資料擷取系統	NI PCI-6284 A/D cards	多通道動態資料擷取硬體
陣列式位移計量測系統	Measurand shape array with 16 sensors in 30 cm spacing	版樁動態側向變位量測
陸地地震感應器	三軸向、解析度0.001 gal, DC~250 Hz, Max. acc=2 g	碼頭地表振動監測
網路通信模組	ADSL寬頻+長距離戶外 Wi-Fi	遠端監控
機箱與不斷電系統	可用高? :1558mm, 深? :900mm, U ? :35mm, 19" 儀器組合架, 前35U壓克? 門組,	主機保護與電源供應

41



42

## 動態剖面位移計安裝



底部固定



水下安裝完成圖



水下訊號線固定



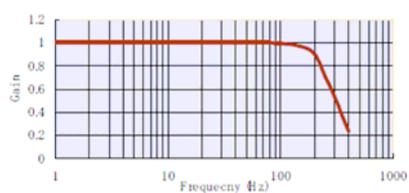
陸上訊號線固定

43

## 陸上地震儀安裝



Tokyo Sokushin AS-3357



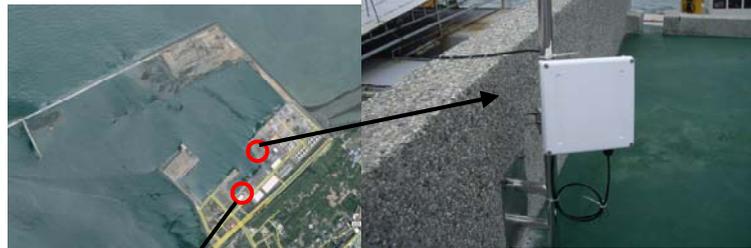
44

## 監測主機



45

## 戶外指向型天線安裝



46

## 自動監測程式

---

- 軟硬體基礎：NI PCI+Labview系統
- 功能：
  - 高速擷取不同訊號類型:數位、類比
  - 定值觸發(level triggering)、定時啟動(time triggering)、人工啟動
  - 遠端遙控及網路通訊: 使用現有網路
  - 警報警示、資料顯示

47

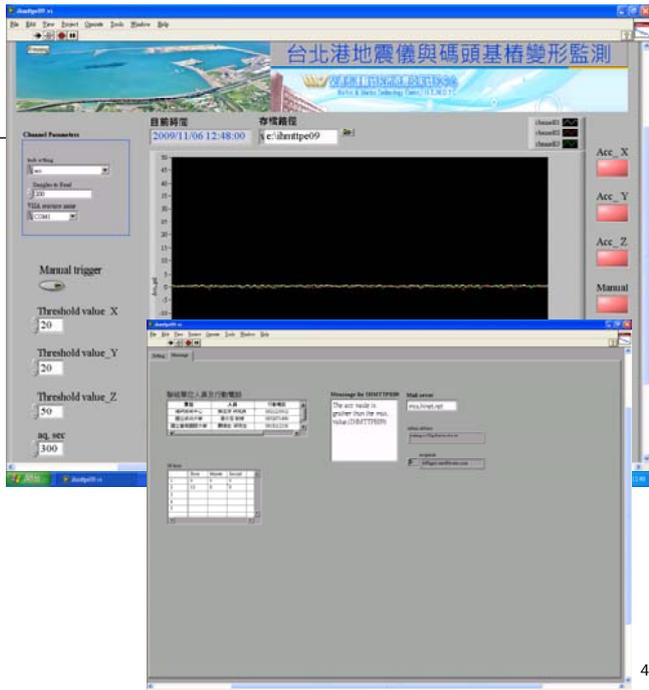
## TPE09碼頭動態監測程式

---

- Trigger 設定：水平向地表震動大於5 gal, 每日定時啟動與人工啟動功能
- 通知功能：傳送簡訊通知相關管理人員
- 遠端設定功能，網路傳輸資料(ADSL)
- 量測參數：地震儀頻率為250 Hz，shape array 之頻率約為15 Hz，記錄延時為5 分鐘

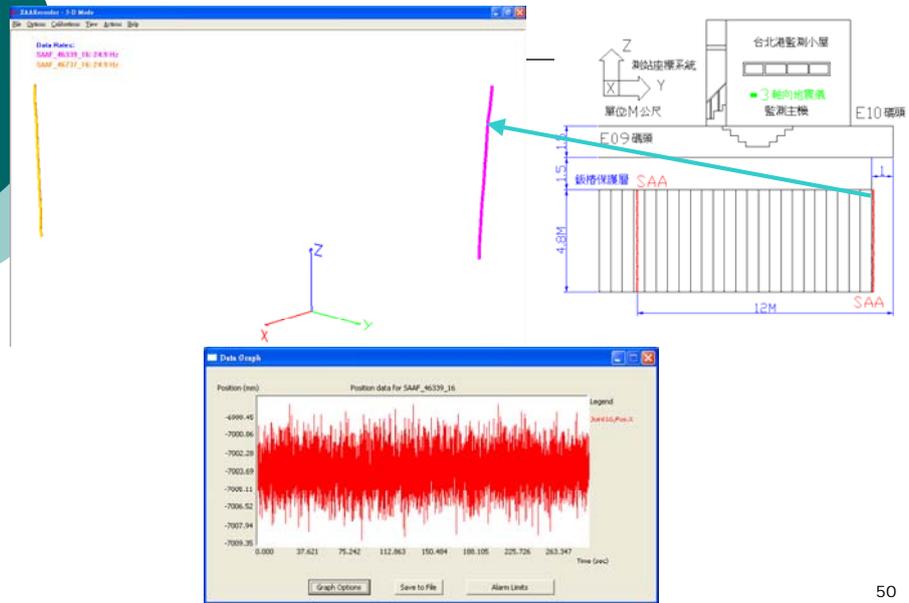
48

# 操作介面



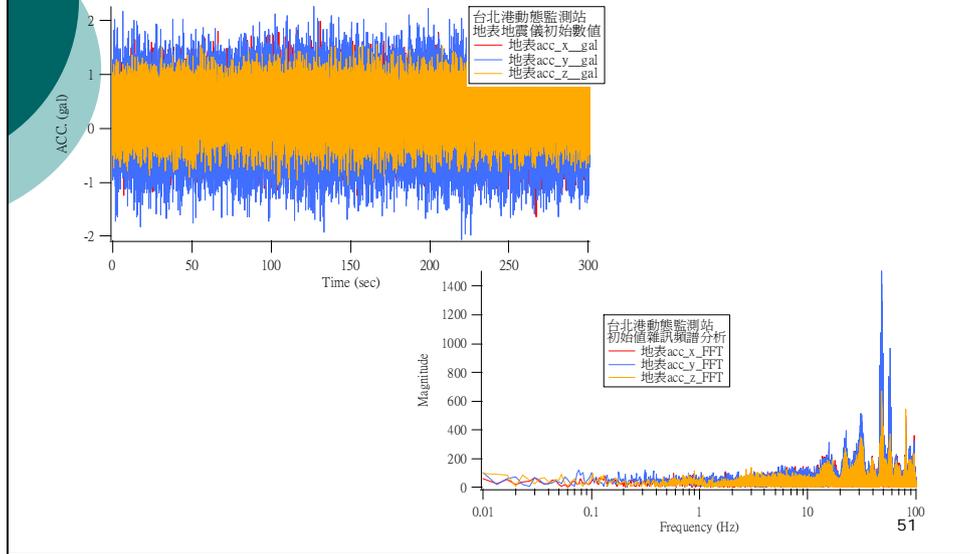
49

# TPE09 動態剖面儀初始值

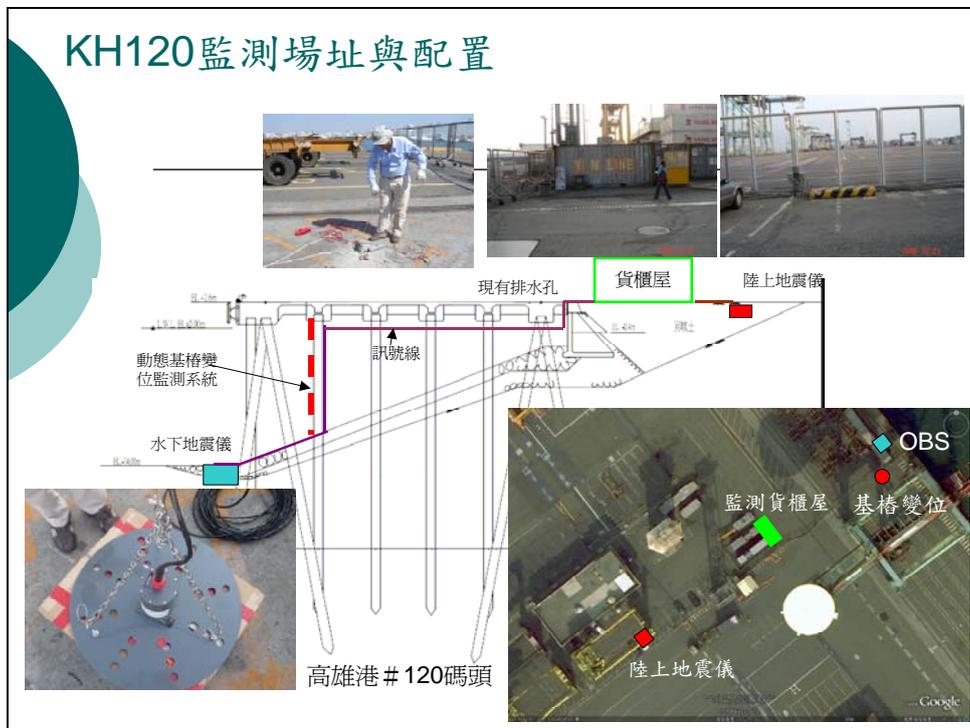


50

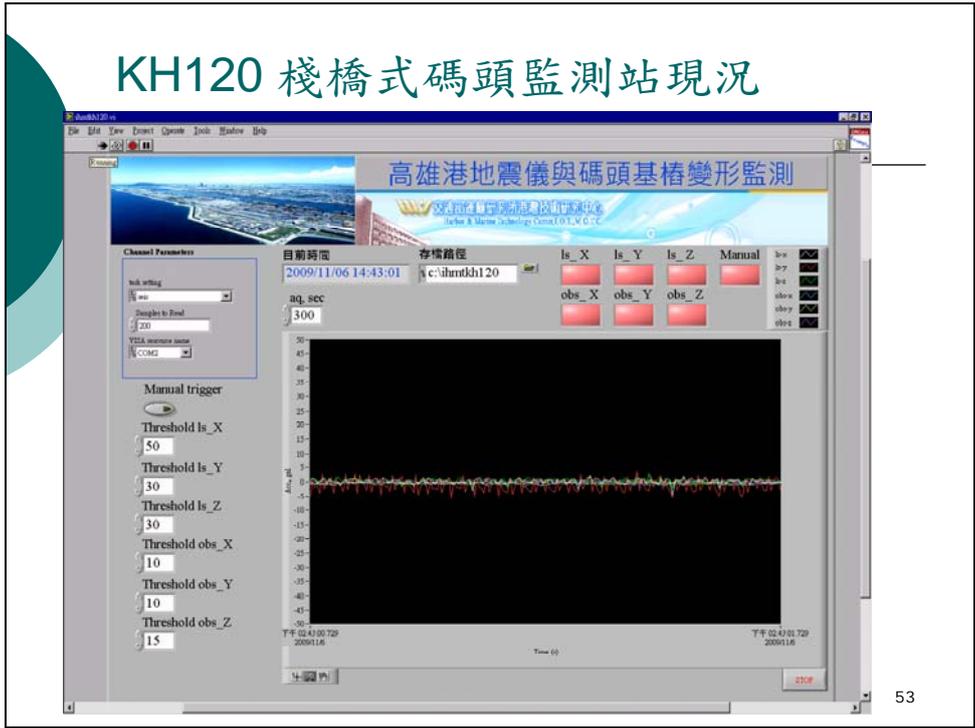
## TPE09 陸上地震儀背景震動



## KH120 監測場址與配置

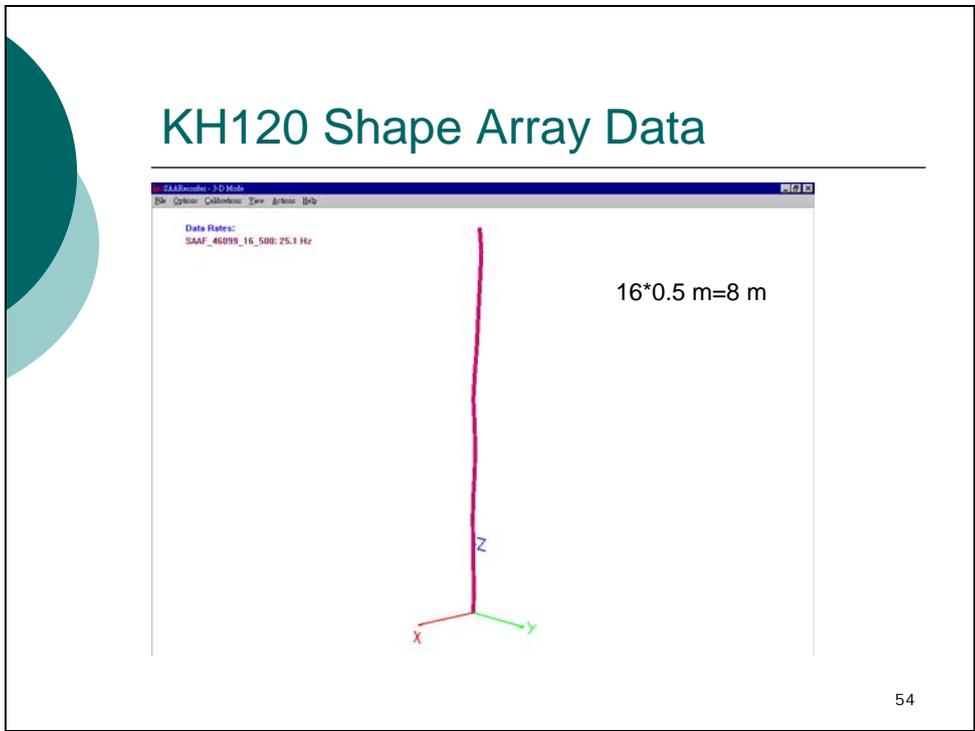


## KH120 棧橋式碼頭監測站現況

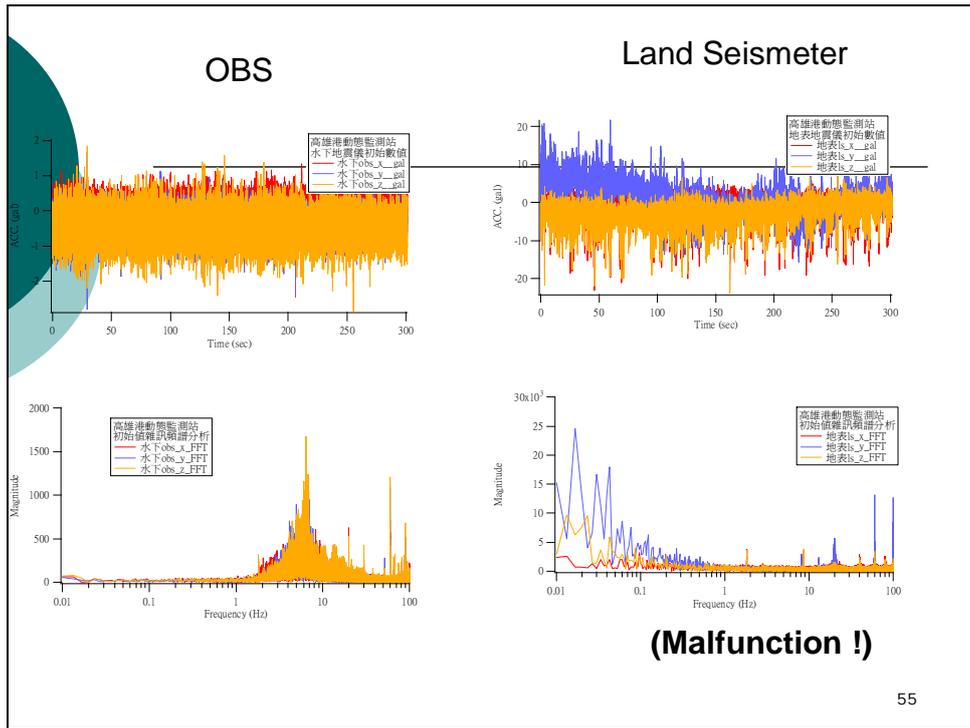


53

## KH120 Shape Array Data



54



55

## 結論與建議

- 本年度選定於台北港E09號碼頭設置監測系統，文獻指出錨定版樁式碼頭破壞常由碼頭位移量控制。
- 完成之錨定版樁碼頭之動態有效應力數值初步分析顯示：
  - 由於表層為軟弱土層，因此其震波放大效應不顯著
  - 版樁彎距隨後方土壤變形量增加而增加，最大彎距發生於頂部與RC面版連結處
  - 當地表加速度達到0.4g左右，表層即有液化現象，且鋼索荷重仍小於設計拉力
  - 考慮孔隙水壓力激發與動力反應下，其結構彎距將大幅增加

56

## 結論與建議 (Cont.)

- TPE09版樁碼頭動態監測站包括陸上三向度地震儀、動態位移剖面及具自動啟動(triggering)之動態資料擷取系統，且系統具備遠端控制之功能，目前測試相關功能正常。
- KH120棧橋式碼頭監測站仍在測試修正，目前已具與台北港相同功能。
- 台北港區微地動儀量測顯示台北港區主頻大約介於0.98~1.81Hz，若平均剪力波速( $V_{sh}$ ) 400 m/s，利用經驗公式，可推得岩盤深度約102~55公尺，另由陸上與TPE09碼頭之反應與分析結果顯示其頻譜結果相當接近，顯示港區之共振主頻差異不大。

57

## 後續建議事項

- 本年度數值分析時之土壤參數均以文獻建議數值，限於時程因素無法進行靈敏度分析，建議後期加以補強以瞭解參數對結果之影響
- 本年度動態水壓對結構影響僅進行正弦波初步分析，希能於FLAC架構下整合進行地震波分析
- 本年度現地營運中碼頭動態監測站僅完成初期裝設與整合，後續成果檢核、校正與微調仍需測試，希望後續計畫編列相關經費擴增與維護。

58

簡報完畢  
敬請指教



59