

96-33-7252

MOTC-IOT-95-H1DB008

# 現地模擬地震之液化試驗與碼頭 動態監測研究(1/4)



交通部運輸研究所

中華民國 96 年 4 月

96-33-7252

MOTC-IOT-95-H1DB008

# 現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究(1/4)

著者：賴聖耀、陳志芳、林炳森、張文忠  
張啟文、魏銘忠、鄭光廷

交通部運輸研究所

中華民國 96 年 4 月

現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究。

(1/4) / 賴聖耀等著. -- 初版. -- 臺北市：

交通部運研所， 民96

面： 公分

參考書目：面

ISBN 978-986-00-9260-8 (平裝)

1. 土壤力學 2. 港埠工程 - 管理

441.12

96006244

現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究(1/4)

著 者：賴聖耀、陳志芳、林炳森、張文忠、張啟文、魏銘忠、鄭光廷

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：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96年4月

印 刷 者：福島實業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷120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

國家書坊臺視總店：臺北市八德路3段10號B1·電話：(02) 25781515

五南文化廣場：臺中市中山路6號·電話：(04) 22260330

GPN：1009600794

ISBN：978-986-00-9260-8 (平裝)

著作財產權人：中華民國 (代表機關：交通部運輸研究所)

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

96

現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究  
(1/4)

交通部運輸研究所

GPN: 1009600794

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：現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究(1/4)  |  |                          |  |
| 國際標準書號 (或叢刊號)<br>978-986-00-9260-8 (平裝)  | 政府出版品統一編號<br>1009600794  | 運輸研究所出版品編號<br>96-33-7252 | 計畫編號<br>95-H1DB008   |
| 主辦單位：港研中心<br>主管：邱永芳<br>計劃主持人：賴聖耀<br>協同主持人：陳志芳<br><br>聯絡電話：04-26587186<br>傳真號碼：04-26564418  | 合作研究單位：國立中興大學<br>計劃主持人：林炳森<br>協同主持人：張文忠<br>研究人員：張啟文、魏銘忠、鄭光廷<br>地址：臺中市南區國光路 250 號<br>聯絡電話：04-22855074 |                          | 研究期間<br>自 95 年 01 月<br>至 95 年 12 月                           |
| 關鍵詞：動態土壤結構互制、土壤液化、樁基礎、棧橋式碼頭、現地土壤液化試驗，反覆單剪  |  |                          |  |
| 摘要：<br><br><p style="text-align: justify;">           港灣及海岸地區之結構物常採用樁基礎設計，進行考慮土壤 - 樁基礎 - 上部結構系統於液化前後之動態互制分析為進行結構設計、安全評估及研擬防制對策之要件。本計畫執行之長期目標為建構考慮液化之土壤-樁基礎-結構互制行為之現地觀測站，本年度完成之項目包括收集並整理現有土壤-樁基礎-結構互制行為相關之文獻與分析方法，並以有效應力動態分析(effective stress-based dynamic analysis)程式，進行考慮土壤非線性與孔隙水壓激發行為且可模擬基樁與上部結構之動態數值分析。數值分析時所需之動態參數以現地鑽探取樣之試體，由反覆單剪儀進行土壤動態與液化試驗，並以非破壞性現地剪力波速量測結果建立簡化之地質模型並推估現地土壤在不同剪應變震幅下之動態特性。本年度已完成試驗場址之自由場液化分析，同時進行地表簡諧震源現地土壤震動試驗，由量測之地盤震動與孔隙水壓力耦合反應，驗證數值分析結果，並發展可定期檢測現有地震永久測站之程序。同時利用經驗正後之數值程序，應用於分析棧橋式碼頭考慮土壤液化之動態反應，推估棧橋式碼頭之耐震能力。         </p> |  |                          |  |
| 出版日期   | 頁數   | 定價                       | 本出版品取得方式   |
| 96 年 4 月   | 162  | 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：<br>密 機密 極機密 絕對機密<br>(解密條件： 年 月 日解密， 公布後解密， 附件抽存後解密，<br>工作完成或會議終了時解密， 另行檢討後辦理解密)<br>普通  |  |                          |  |
| 備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。   |  |                          |  |

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

|   |  |                                 |  |
|---|--|---------------------------------|--|
| <b>TITLE: In-situ Liquefaction Testing in Port Area and Its Implementations in Monitoring the Dynamic Behaviors of Port Structures (1/4)</b>  |  |                                 |  |
| ISBN (OR ISSN)<br>978-986-00-9260-8<br>(pbk)  | GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER<br>1009600794 | IOT SERIAL NUMBER<br>96-33-7252 | PROJECT NUMBER<br>95-H1DB008   |
| DIVISION: Harbor & Marine Technology Center<br>DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu<br>PRINCIPAL INVESTIGATOR: S. Y. Lai<br>PROJECT STAFF: J. F. Chen<br>PHONE: 04-26587186<br>FAX: 04-26564418  |  |                                 | PROJECT PERIOD<br>FROM January 2006<br>TO December 2006                                  |
| RESEARCH AGENCY: National Chung Hsing University<br>PRINCIPAL INVESTIGATOR: P. S. Lin<br>PROJECT STAFF: W. J. Chang, C. W. Chang, M. C. Wei, K. T. Zheng<br>ADDRESS: 250, Kuo kuang Rd., Taichung 402, Taiwan R.O.C<br>PHONE: 886-4-22873181  |  |                                 |  |
| <b>KEY WORDS: Dynamic soil-structure interaction, Liquefaction, Pile foundation, Wharf structure, In-situ dynamic liquefaction testing, Cyclic simple shear</b>   |  |                                 |  |
| <b>ABSTRACT:</b><br><br>For piles in liquefiable soils, analyzing the soil-pile-superstructure dynamic behaviors prior and after liquefaction is an essential issue for properly structural configurations, seismic safety assessments, and countermeasure designs. The long-term goal of this project is to set up an in-situ instrumentation station to monitor dynamic response of soil-pile-superstructure system. In the past years, an extensive literature on dynamic soil-pile-structure interactions and state-of-the-art technologies in this field is reviewed. Effective stress-based dynamic simulations are performed, using parameters from detailed site characterization and laboratory testing. Various seismic testing techniques are implemented to characterize the testing site. The dynamic properties of the subsurface layers are determined by cyclic simple shear testing with bender element inside. Free-field simulations of the testing site under the upward propagating seismic waves and sinusoidal loading on ground surface are both conducted. In-situ dynamic tests using horizontally sinusoidal vibrator are performed. The measured coupled responses of subsurface are used to verify the adequacies of the simulation procedure. In addition, an in-site checking procedure for long-waiting liquefaction station is proposed and tested. Furthermore, the verified free-field simulation is integrated with structure and interface elements to analyze the seismic response of wharf structure in liquefied soils. The results are beneficial to achieve the long-term goal. |  |                                 |  |
| DATE OF PUBLICATION<br>April 2007   | NUMBER OF PAGES<br>162                       | PRICE<br>200                    | CLASSIFICATION<br>RESTRICTED    CONFIDENTIAL<br>SECRET        TOP SECRET<br>UNCLASSIFIED |
| The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.   |  |                                 |  |

# 現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究(1/4)

## 目 錄

|   |      |
|---|------|
| 中文摘要 .....  | I    |
| 英文摘要 .....  | II   |
| 目錄 .....  |      |
| 圖目錄 .....   |      |
| 表目錄 .....   |      |
| 第一章 前言 .....  | 1-1  |
| 1.1 計畫目的 .....                                      | 1-1  |
| 1.2 本年度研究內容與項目 .....                                | 1-3  |
| 1.3 研究流程與時程 .....                                   | 1-6  |
| 第二章 棧橋式碼頭破壞案例與動態分析文獻回顧.....                         | 2-1  |
| 2.1 棧橋式碼頭液化破壞案例 .....                               | 2-1  |
| 2.2 碼頭基樁動態分析程序 .....                                | 2-3  |
| 2.3 現地土壤液化試驗 .....                                  | 2-6  |
| 第三章 研究場址與地質探勘.....                                  | 3-1  |
| 3.1 試驗場址概況 .....                                    | 3-1  |
| 3.2 現地震測試驗 .....                                    | 3-1  |
| 3.3 現地鑽探計畫與結果 .....                                 | 3-6  |
| 第四章 室內土壤動態試驗 .....                                  | 4-1  |
| 4.1 土壤反覆單剪試驗(Cyclic Direct Simple Shear Test) ..... | 4-1  |
| 4.2 土壤動態特性試驗結果 .....                                | 4-6  |
| 4.3 土壤液化試驗結果 .....                                  | 4-14 |

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| 第五章 有效應力動態數值分析.....      | 5-1    |
| 5.1 分析原理與程序 .....        | 5-1    |
| 5.2 自由場有效應力動態數值分析 .....  | 5-9    |
| 5.3 分析結果與討論 .....        | 5-13   |
| 第六章 棧橋式碼頭有效應力動態數值分析..... | 6-1    |
| 6.1 分析原理與程序 .....        | 6-1    |
| 6.2 數值分析案例模型 .....       | 6-2    |
| 6.3 分析結果與討論 .....        | 6-7    |
| 第七章 現地地表震源震動試驗.....      | 7-1    |
| 7.1 試驗目的與原理 .....        | 7-1    |
| 7.2 試驗系統與配置 .....        | 7-1    |
| 7.3 試驗結果 .....           | 7-15   |
| 第八章 結論與建議.....           | 8-1    |
| 參考文獻.....                | 9-1    |
| 附錄 A 期中報告審查意見處理情形表.....  | 附錄 A-1 |
| 附錄 B 期末報告審查意見處理情形表.....  | 附錄 B-1 |

## 圖 目 錄

|  |      |
|--|------|
| 圖 1-1 以地表簡諧力為震源之現地土壤液化試驗示意圖<br>(Rathje Etal.2005) .....                              | 1-5  |
| 圖 1-2 95 年度研究流程圖 .....   | 1-7  |
| 圖 2-1 Kobe 港在土壤液化時未損壞之棧橋基樁圖<br>(Finn and Fujita 2002).....                           | 2-2  |
| 圖 2-2 棧橋式碼頭破壞模式圖 .....   | 2-3  |
| 圖 2-3 擬靜態 Bean on Winkler Foundation 模型示意圖<br>(Liyanapathirana and Poulos 2005)..... | 2-4  |
| 圖 2-4 動態 Bean on Winkler Footing 模型示意圖(Finn and Fujita 2002)<br>.....                | 2-5  |
| 圖 2-5 可移動震源產生器圖 .....  | 2-9  |
| 圖 2-6 垂直向震動試驗配置圖(張文忠與許晉銘 2005).....  | 2-10 |
| 圖 2-7 重模越南砂試坑孔隙水壓激發曲線(張文忠與許晉銘 2005)....  | 2-10 |
| 圖 3-1 IHMT 測站配置圖 .....   | 3-2  |
| 圖 3-2 港研中心現地液化測站周遭環境圖 .....  | 3-3  |
| 圖 3-3 液化觀測站與表面震測測線配置圖 .....  | 3-3  |
| 圖 3-4 測線 MASW1 與 SAAW1 之簡剪力波速剖面與分層圖 .....  | 3-5  |
| 圖 3-5 跨孔法設備與原理圖(Juh 2003) .....  | 3-6  |
| 圖 3-6 跨孔法試驗與表面波量測結果比較 .....  | 3-7  |
| 圖 3-7 鑽孔位置配置圖 .....  | 3-8  |
| 圖 4-1 地層中土壤受反覆剪力狀態示意圖(Seed 1979).....  | 4-2  |

|        |   |      |
|--------|---|------|
| 圖 4-2  | CTS 反覆單剪儀設備圖 .....                              | 4-3  |
| 圖 4-3  | 反覆單剪動態特性試驗結果圖(土樣編號：BH1-T1-100).....             | 4-7  |
| 圖 4-4  | BH1-T1 波速與平均有效應力關係圖 .....                       | 4-8  |
| 圖 4-5  | 回填土壤 BH1-T1 動態特性圖 .....                         | 4-9  |
| 圖 4-6  | BH2-T2 波速與平均有效應力關係圖 .....                       | 4-10 |
| 圖 4-7  | 試驗土層 BH2-T2 動態特性圖 .....                         | 4-11 |
| 圖 4-8  | BH3-T8 波速與平均有效應力關係圖 .....                       | 4-12 |
| 圖 4-9  | 下方土層 BH2-T2 動態特性圖 .....                         | 4-13 |
| 圖 4-10 | 回填單剪液化試驗結果圖(土樣編號：BH1-T1-L1) .....               | 4-15 |
| 圖 4-11 | 回填土層抗液化強度圖(土樣編號：BH1-T1) .....                   | 4-16 |
| 圖 4-12 | 試驗土層單剪液化試驗結果圖(土樣編號：BH2-T2-L3) ....              | 4-17 |
| 圖 4-13 | 試驗土層抗液化強度圖(土樣編號：BH2-T2) .....                   | 4-18 |
| 圖 4-14 | 下方土層單剪液化試驗結果圖(土樣編號：BH3-T8-L1) ....              | 4-19 |
| 圖 4-15 | 下方土層抗液化強度圖(BH3-T8) .....                        | 4-20 |
| 圖 5-1  | 考慮動態荷重之自由場物理模型圖 .....                           | 5-5  |
| 圖 5-2  | 自由場分析數值模型圖(含震動基礎).....                          | 5-11 |
| 圖 5-3  | 案例編號 FF-E Case 之底部與表面加速度歷時圖 .....               | 5-14 |
| 圖 5-4  | 阻尼參數影響(ref=0.03)圖 (a)底部與地表加速度歷時(b)底部元素遲滯圈 ..... | 5-15 |
| 圖 5-5  | 輸入之 TCU059 濾除 8Hz 以上之速度歷時圖(0-25 秒) .....        | 5-16 |
| 圖 5-6  | 試驗場現場配置圖(a)現場配置上視圖(b) 現場配置剖面圖 .....             | 5-17 |
| 圖 5-7  | 主要震動期間(15-28 秒)之底部與表面加速度歷時圖 .....               | 5-18 |

|   |      |
|---|------|
| 圖 5-8 6m(6,25)與 8m(6,23)所激發之超額孔隙水壓力歷時圖.....                               | 5-18 |
| 圖 5-9 最大超額孔隙水壓力比分佈圖 .....   | 5-19 |
| 圖 5-10 Sensor-6m、Sensor-8m 與距基礎 6.5m 深度 8.5m 處超額孔隙水<br>壓力歷時圖(單位 Pa) ..... | 5-21 |
| 圖 5-11 Sensor-6m Sensor-8m 與距基礎下方深度 6.5m 處超額孔隙水壓<br>力歷時( $r_u$ )圖.....    | 5-21 |
| 圖 5-12 水平震動基礎在量測區之最大超額孔隙水壓比包絡線圖 ..  | 5-22 |
| 圖 5-13 Sensor-8m 與 IHMT 地表加速度計所在位置水平加速度歷時圖<br>.....                       | 5-22 |
| 圖 6-1 臺中港 9-11 號碼頭配置圖(基樁間距 2.5m) .....                                    | 6-3  |
| 圖 6-2 棧橋式碼頭斜坡網格與土壤分區圖 .....   | 6-5  |
| 圖 6-3 恆樑與基樁元素位置與結點編號圖 .....   | 6-6  |
| 圖 6-4 TCU059 速度與加速度歷時圖 .....  | 6-7  |
| 圖 6-5 不同區域地盤加速度歷時圖 .....  | 6-8  |
| 圖 6-6 最大孔隙水壓比分佈圖 .....  | 6-9  |
| 圖 6-7 邊坡前方坡址(20,9)與坡址 15m 處 $r_u$ 變化圖 .....                               | 6-9  |
| 圖 6-8 邊坡後方回填砂區與底部土壤介面(36,11)與地表(36,18) $r_u$ 變化<br>圖.....                 | 6-10 |
| 圖 6-9 土壤結構互制反應圖 .....   | 6-11 |
| 圖 6-10 碼頭前端位移歷時圖 .....  | 6-11 |
| 圖 7-1 偏心式動態震源(Eccentric Mass Vibrator)圖 .....                             | 7-3  |
| 圖 7-2 偏心式動態震源原理圖(郭景琳 2004).....   | 7-3  |
| 圖 7-3 震動基礎圖.....  | 7-4  |

|  |      |
|--|------|
| 圖 7-4 震動基礎內鋼筋及保麗隆設置情形圖 .....   | 7-4  |
| 圖 7-5 耦合感測子圖.....  | 7-6  |
| 圖 7-6 感測子安裝推桿圖 .....   | 7-7  |
| 圖 7-7 基礎加速度頻率圖 .....   | 7-8  |
| 圖 7-8 基礎加速度 X 方向圖(a)整體時間域(b)0~75 秒(c)75~150 秒<br>(d)150~225 秒(e)225~300 秒 .....  | 7-9  |
| 圖 7-9 基礎加速度 Y 方向圖(a)整體時間域(b)0~75 秒(c)75~150 秒<br>(d)150~225 秒(e)225~300 秒 .....  | 7-10 |
| 圖 7-10 基礎加速度 Z 方向圖(a)整體時間域(b)0~75 秒(c)75~150 秒<br>(d)150~225 秒(e)225~300 秒 ..... | 7-11 |
| 圖 7-11 高速自動資料擷取系統(NI-PXI+SCXI 系統)架構圖 .....                                       | 7-13 |
| 圖 7-12 訊號整合箱圖.....   | 7-14 |
| 圖 7-13 臺中港火力發電廠現地監測配置圖 .....   | 7-14 |
| 圖 7-14 臺中港火力發電廠現地監測外觀圖 .....   | 7-15 |
| 圖 7-15 平面剪力波傳法圖 .....  | 7-18 |
| 圖 7-16 剪力樑法圖.....  | 7-19 |
| 圖 7-17 數值積分所產生的偏移量圖 .....  | 7-22 |
| 圖 7-18 數位濾波器圖.....   | 7-24 |
| 圖 7-19 同步化後時間歷時圖(a)臺中港現地監測站地表加速度(b)基礎<br>加速度 .....                               | 7-25 |
| 圖 7-20 8m 加速度頻率域圖 .....  | 7-26 |
| 圖 7-21 基礎加速度 X 方向圖(a)整體時間域(b)0~75 秒(c)75~150 秒<br>(d)150~225 秒(e)225~300 秒 ..... | 7-27 |

|  |      |
|--|------|
| 圖 7-22 基礎加速度 Y 方向圖(a)整體時間域(b)0~75 秒(c)75~150 秒<br>(d)150~225 秒(e)225~300 秒 ..... | 7-28 |
| 圖 7-23 基礎加速度 Z 方向圖(a)整體時間域(b)0~75 秒(c)75~150 秒<br>(d)150~225 秒(e)225~300 秒 ..... | 7-29 |
| 圖 7-24 小震動下孔隙水壓力圖 .....  | 7-31 |
| 圖 7-25 動態孔隙水壓力與殘餘孔隙水壓力圖(a)東西向震動(b)南北向<br>震動.....                                 | 7-32 |
| 圖 7-26 超額孔隙水壓比圖(a)Case-20 (b)Case-19 (c)Case-17 .....                            | 7-33 |
| 圖 7-27 波傳法剪應變圖 .....   | 7-34 |
| 圖 7-28 位移法剪應變圖 .....   | 7-35 |
| 圖 7-29 超額孔隙水壓力與加速度耦合關係圖(a)孔內加速度與超額孔<br>隙水壓力(b)地表加速度與超額孔隙水壓力 .....                | 7-36 |
| 圖 7-30 現地監測地表加速度圖(a)X 方向(b)Y 方向(c)Z 方向 .....                                     | 7-38 |
| 圖 7-31 港研中心孔下 15m 不同深度加速度計比較圖 .....  | 7-39 |
| 圖 7-32 港研中心地表下 8m 孔隙水壓力歷時圖 .....   | 7-40 |

## 表 目 錄

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| 表 1-1 預定進度甘特圖(Gantt Chart) .....     | 1-9  |
| 表 3-1 港研中心液化測站鑽探紀錄表 .....            | 3-2  |
| 表 3-2 現地鑽探深度、取樣深度與試驗項目表 .....        | 3-7  |
| 表 3-3 室內試驗規劃表 .....                  | 3-9  |
| 表 3-4 鑽探結果表.....                     | 3-10 |
| 表 4-1 各土層之動態特性試驗總表 .....             | 4-8  |
| 表 5-1 自由場分析土層分佈表 .....               | 5-11 |
| 表 5-2 自由場分析土層參數 .....                | 5-12 |
| 表 5-3 自由場分析總表 .....                  | 5-13 |
| 表 6-1 棧橋式碼頭分析土層參數表 .....             | 6-5  |
| 表 6-2 結構元素參數表 .....                  | 6-6  |
| 表 6-3 基樁元素 Mohr-Columb 介面彈簧參數表 ..... | 6-6  |
| 表 7-1 試驗使用之感測子一覽表 .....              | 7-6  |
| 表 7-2 試驗流程表.....                     | 7-16 |

# 第一章 前言

## 1.1 計畫目的

臺灣西部因多屬砂岸地形，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，此類地質及施工方式形成之土層為最易發生土壤液化(liquefaction)及因液化引發之承載力破壞 (bearing capacity failure)、地表沈陷(subsurface settlement)、側潰 (lateral spreading)及沈箱式基礎位移等災害，相關案例如 1995 Kobe 地震後港區液化(JGS 1996 & 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。港灣及海岸地區之結構物為得到符合基礎承載力與動力需求，多採用深基礎設計，其中樁基礎為最常見之選項之一，因此進行考慮土壤 - 樁基礎 - 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。

現有考慮液化土壤-樁基礎-上部結構互制(soil-pile-superstructure 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 modelling)等，其中擬靜態分析法之結果常隨所使用之參數與假設條件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基樁尺寸。動態數值模擬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，若分析時能佐以可靠之動態量測資料，可進一步增進其準確性與可靠度。而實體室內模型試驗因受限於試體尺寸與試體擾動，使其代表性與實際基礎行為仍有相當差異，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。為克服上述在液化土層中土壤-樁基礎-上部結構互制分析之限制，解決之道為設立永久之現地監測站或進行現地基樁液化試驗。

為增進對現地基樁受震反應之瞭解及提供更可靠之數值模擬驗證資料，設立永久之現地監測站與進行全尺寸現地基樁動態試驗有其必要性，現地監測站為於現地土層或現有設施上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，監測系統之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 - 基樁系統之動態試驗，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基樁動態試驗均為全尺寸現地紀錄，所得結果將可驗證現有分析方法，並作為修復與改善之參考，其重要性與價值遠比現有縮小尺寸之模型試驗為高。

本計畫執行之長期目標之一為建構考慮液化之土壤-樁基礎-結構互制行為之現地觀測站，計畫初期將收集並整理現有土壤-樁基礎-結構互制行為相關之文獻與分析方法，以有效應力動態分析(effective stress-based dynamic analysis)程式如 FLAC、Opensees 等，進行考慮土壤非線性與孔隙水壓激發行為且可模擬基樁與上部結構之動態數值分析，確認相關參數之量化影響及進行現地土壤 - 基樁系統動態試驗時反應預測，以決定進行現地基樁動態試驗時之荷重頻率、延時、震源、試驗基樁配置及量測系統配置等。數值分析時所需之動態參數將以現地鑽探取樣之試體搭配模擬現地土壤形成過程之重模試體，以動態單剪儀進行土壤動態與液化試驗，並以非破壞性現地剪力波速量測結果推估現地土壤在不同剪應變震幅下之動態特性。動態數值分析結果除作為現地土壤 - 基樁系統之動態試驗監測系統規劃之依據外，將以所建立之動態數值分析程序進行棧橋式碼頭之動態分析及回饋擬靜態簡化法參數率定，作為後續類似案例分析之參考，同時歸納現地土壤液化機制及碼頭動態受損型式，進而研訂出港灣及海岸地區液化防治及樁基礎相關設計手冊。

本年度計畫將進行以大簡諧力之產生設備(sinusoidal vibration generator)如圖 1-1(a) 所示，作為地表大型人工震源，於地表產生可控制頻率、震幅及延時之應力波並向預先埋設可同時量測地盤震動及水

壓力變化量測系統之土層傳遞，使土層產生大於門檻應變值之剪應變並激發超額孔隙水壓力，試驗配置如圖 1-1(b)所示，藉由高速資料擷取系統量測地盤反應與孔隙水壓力激發之耦合反應(coupled response)，由地盤反應之質點震動計算剪應變歷時，使所發展之量測系統可進行剪應變 - 超額孔隙水壓力激發耦合反應量測系統，計畫中亦將發展與觀測系統搭配之資料處理程序與軟體，使量測資料可立即分析。此外試驗時將考慮與港研中心現有港區液化監測站搭配，評估以表面人工震源震動，發展可定期檢測現有現地監測站功能之方法。所發展之系統於將來可擴充為進行現地土壤 - 基樁系統動態試驗之基礎，並可與現有現地監測站整合，作為備份系統或作為局部剪應變 - 孔隙水壓力耦合反應量測系統。

## 1.2 本年度研究內容與項目

計畫原規劃雖為 4 年期，但因相關研究國內外並無太多可參考之文獻，為保持計畫執行之彈性利於分年期修訂，整體目標僅綱要說明如下：

第一年(95 年)

- 1.彙整分析現有國內外港區液化案例及動態試驗相關分析。
- 2.利用非破壞檢測方法選定試驗場址，並進行詳細之鑽探、SPT、CPT 與剪力波量測等現地試驗。
- 3.進行室內重模土樣動態單剪(cyclic simple shear)動力與液化試驗。
- 4.以動態分析程式 FLAC 進行液化側潰對樁基礎影響與棧橋式碼頭之群樁基礎影響之數值分析。
- 5.進行自由場動態數值分析，初步擬定所需監測系統規格與配置。
- 6.以大型震盪震源車模擬強烈之地震作用，進行初期現地土壤液

化試驗與現有液化監測站功能檢測。

第二年(96年)

- 1.蒐集彙整土壤-樁基礎-結構互制行為文獻
- 2.設計並組裝可進行動態試驗之量測基樁與自動監測系統。
- 3.進行現地模擬動態互制反應之單樁液化試驗。

第三年(97年)

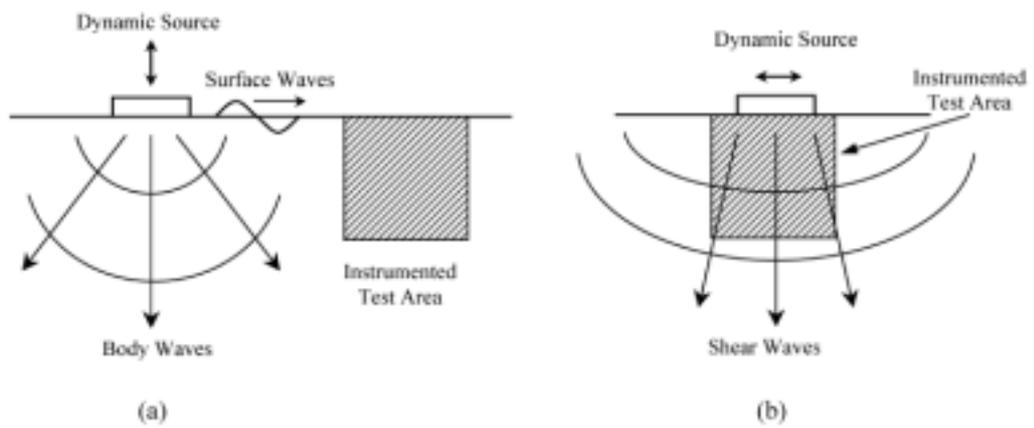
- 1.以數值分析成果配置與安裝棧橋式碼頭動態監測系統。
- 2.監測系統整合與建立資料處理程序。
- 3.建立可定期檢測現有現地液化監測站之方法與程序。
- 4.以監測資料系統識別檢測棧橋式碼頭安全臨界。

第四年(98年)

- 1.土壤液化機制與防制方法文獻收集與分析研究。
- 2.國內外港區地盤改良案例蒐集整理與分析。
- 3.碼頭土壤液化潛能區地盤改良範圍研究。
- 4.以現地動態試驗與室內試驗量化評估地盤改良成效。
- 5.國內港灣及海岸地區土壤液化防治與地盤改良方法及其設計與施工準則(草案)研擬。



(a) 偏心質量震源產生器 (ANCO)



(b) 試驗配置構想圖

圖 1-1 以地表簡諧力為震源之現地土壤液化試驗示意圖  
(Rathje et al. 2005)

### 1.3 研究流程與時程

本研究計畫採用之方法主要包括實體模型模擬(physical modelling)與數值模擬(numerical simulation)，現地土壤液化試驗為全尺寸實體模型模擬，數值模擬包括自由場與考慮土壤 - 結構互制(soil-structure interaction, SSI)反應之動態有效應力分析，實體模型模擬與數值模擬二種方法彼此間可作為規劃與驗證之用，其初步應用則包括棧橋式碼頭液化分析、現地全尺寸基樁動態試驗規劃與建立現有監測站定期檢測程序，研究流程如圖 1-2 所示，各重點項目說明如下：

1. 彙整分析現有國內外港區液化案例及動態試驗相關分析：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。
2. 利用非破壞檢測方法選定試驗場址，並進行詳細之鑽探取樣與 SPT 等現地試驗：於鑽探前利用表面波譜法(Spectrum Analysis of Surface Waves, SASW)與跨孔法於試驗場址進行非侵入性非破壞震測試驗，探測地表下 20m 內之土層地質剖面、地下水位及土層剪力波速分佈，建立雷利波頻散曲線(dispersion curve)，經由頻散曲線反算推估現地剪力波速，以剪力波速進行初步場址液化潛能分析，具以擬定鑽探計畫中相關之鑽探孔位、深度、薄管取樣深度、SPT 施做深度及一般物理試驗數量等，同時規劃進行跨孔試驗(Crosshole testing)，驗證 SASW 之成果。由鑽探及震測試驗成果，作為數值分析之士層模型建立之依據，並選取液化潛能高之士層深度作為安置現地土壤液化試驗之感測器位置。
3. 進行室內重模土樣動態單剪動力與液化試驗：以鑽探所得之薄管取樣及重模試體，進行含波速量測之動態單剪試驗，建立土壤之正規剪力模數折減曲線(normalized shear modulus reduction curve)、阻尼比曲線(damping ratio curve)及阻滯圈等非線性動態性質，配合現地震測

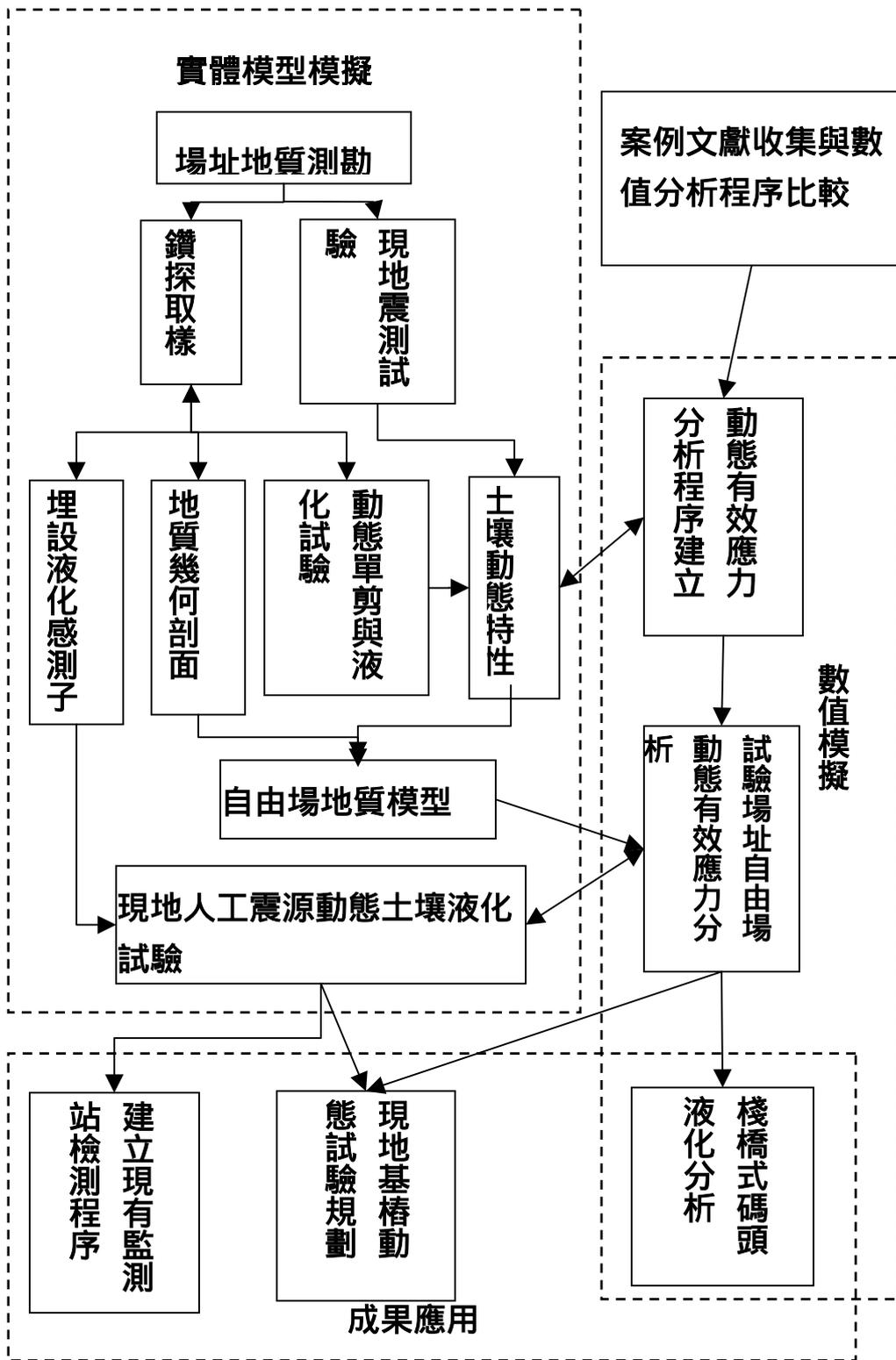


圖 1-2 95 年度研究流程圖

求得之最大剪力模數可修正得到現地土壤動態特性，作為數值分析之土壤力學參數，另由土壤一般物理試驗得到如塑性指數 (PI)、砂石含量 (SC)、相對密度 (Dr) 等，進行土壤分類與作為後續發展之土壤組構模式之驗證比較。另以單剪試驗儀進行一組土壤液化試驗，求取土層之抗液化強度及作為有效應力動態數值分析之參數，並以之作為動態數值分析所需參數反算之用。

4. 進行自由場動態數值分析，擬定自由場現地液化試驗所需監測系統規格與配置：利用鑽探、現地震測試驗及室內試驗成果建立試驗場址之地質模型，進行自由場有效應力動態分析，包括模擬真實地震時由下方土層向上傳播之剪力波之效應及由地表簡諧震源震動對下方土層所造成地盤反應及孔隙水壓力激發等，分析所得之土層反應及孔隙水壓力激發分佈將作為現地自由場液化試驗配置及量測規劃之依據。
5. 以大型表面震源模擬強烈之地震作用，進行初期現地土壤液化試驗與現有液化監測站功能檢測：利用數值分析成果所規劃之試驗配置，於試驗場址以大型地表簡諧震源，對土層產生可激發超額孔隙水壓力甚至液化之反覆剪動，量測震動過程中地盤耦合反應，同時於試驗時啟動原有現地土壤液化測站，由新裝設之監測系統與現有測站量測成果，檢測現有測站不同深度之加速度計與水壓計之反應，且現地液化試驗試驗之成果將作為驗證自由場有效應力動態分析之用。
6. 以動態分析程式 FLAC 進行液化對棧橋式碼頭之群樁基礎影響之數值分析：利用研究內容 4 所建立之自由場動態數值分析程序與參數，加入群樁及棧橋式碼頭等結構元素，進行考慮液化土壤 - 基樁 - 上部結構系統之有效應力動態分析，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。

依前述研究方法及工作內容，計畫執行之步驟、項目與時程如表 1-1 所示，本計畫自簽約起為期約 11 個月，每月執行進度工作比重表示，每月百分比配置約略相同。每季之檢核點項目均為主要完成工作

項目，第一季重點為完成動態單剪試驗並建立數值分析地質模型，第二季為完成自由場動態有效應力分析，第三季為完成地表人工震源動態土壤液化試驗，最後為進行棧橋式碼頭液化分析，相關計畫已執行完成，各項成果將分章說明。

表 1-1 預定進度甘特圖(Gantt Chart)

| 工作項目               | 3月                        | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 |
|--------------------|---------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 案例文獻收集、數值分析程序比較    | ■                         |    |    |    |    |    |    |     |     |     |
| 現地震測試驗             | ■                         |    |    |    |    |    |    |     |     |     |
| 場址選定與鑽探取樣          |                           | ■  |    |    |    |    |    |     |     |     |
| 室內動態單剪與液化試驗        |                           |    | ■  |    |    |    |    |     |     |     |
| 建立動態有效應力分析程序       |                           | ■  |    |    |    |    |    |     |     |     |
| 場址自由場動態有效應力分析      |                           |    |    | ■  |    |    |    |     |     |     |
| 期中報告與簡報            |                           |    |    |    | ■  |    |    |     |     |     |
| 地表人工震源動態土壤液化試驗     |                           |    |    |    |    | ■  |    |     |     |     |
| 現有監測站定期檢測程序建立      |                           |    |    |    |    |    | ■  |     |     |     |
| 場址 SSI 動態有效應力分析與驗證 |                           |    |    |    |    |    | ■  |     |     |     |
| 進行棧橋式碼頭液化分析        |                           |    |    |    |    |    |    | ■   |     |     |
| 期末報告書初稿及簡報         |                           |    |    |    |    |    |    |     |     | ■   |
| 工作進度估計百分比(累積數)     | 10                        | 20 | 30 | 40 | 55 | 65 | 75 | 85  | 90  | 100 |
| 各季查核點              | 第 1 季:完成動態單剪試驗並建立數值分析地質模型 |    |    |    |    |    |    |     |     |     |
|                    | 第 2 季:完成自由場動態有效應力分析       |    |    |    |    |    |    |     |     |     |
|                    | 第 3 季:完成地表人工震源動態土壤液化試驗    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |
|                    | 第 4 季:進行棧橋式碼頭液化分析         |    |    |    |    |    |    |     |     |     |

## 第二章 棧橋式碼頭破壞案例與動態分析文獻回顧

碼頭為船舶繫靠設施中最主要之設備，係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，一般來說，碼頭結構物可概分為重力式碼頭、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不同而不同，包括回填土之沉陷，防波堤之沉陷及崩潰，棧橋之側潰，護岸之滑動及崩潰，整個或部份碼頭及倉棚崩潰等，本研究以棧橋式碼頭做分析主軸，主要原因為台灣之商港除花蓮港外，均有棧橋式碼頭，且臺中港有 67% 屬於棧橋式碼頭。棧橋式碼頭屬於非剛性結構物，其具有幾何形狀、質量分佈與勁度變化不規則之特性，因此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，且其碼頭棧橋由基樁支撐，地震時需考慮土壤與結構之互制行為，其行為複雜且相關研究國內較為少見。

### 2.1 棧橋式碼頭液化破壞案例

棧橋式碼頭的地震災損案例較少，茲將日本三個災損案例說明如下：

#### 1. 四日市港案例

四日市港一個 9m 長的棧橋係建築在新生地上，新生地建築在含有細砂的沖積土上。結構包括鋼筋混凝土樑建築在鋼筋混凝土樁上，此結構遭受 1944 年東南海地震、1945 年三河地震和 1946 年南海地震等三次大地震，北邊四跨向北移動了 50 至 70cm，西邊一跨移動約 50cm，背後 L 型擋土牆向外傾斜，背填土最大沉陷量 70cm，其破壞原因為發生滑動破壞。

#### 2. 新潟港案例

1964 年新潟地震在新潟港造成棧橋式碼頭的嚴重破壞，整個碼

頭結構沉入水面下，其破壞型式為典型的結構大量沉陷，原因為該地區是由很鬆的砂質沖積層組成，地震時引發土層液化，造成大量體積變化與永久沈陷。

### 3. 神戶港案例

1995 Kobe 地震使神戶港區因土壤液化導致地表大量位移，但作為起重機軌道之棧橋式碼頭其下方基樁其抗剪與抗彎強度超過其因液化側潰之影響，使得在土壤地表位移超過 1.0 m 時仍能維持碼頭完整，液化後之棧橋基樁如圖 2-1 所示。



圖 2-1 Kobe 港在土壤液化時未損壞之棧橋基樁(Finn and Fujita 2002)

由棧橋式碼頭震害案例，簡單的歸納出棧橋式碼頭受地震力作用下可能的破壞模式如圖 2-2 所示，可能的破壞模式及原因說明如下：

- (1)基樁結構：此部份指的是基樁結構本體，其可能的破壞模式為基樁因地震所產生的額外橫向力及水壓力，超過結構原有之設計強度，造成基樁產生破損、斷裂及挫曲，或因基礎土壤滑動使基樁產生位移或側傾。

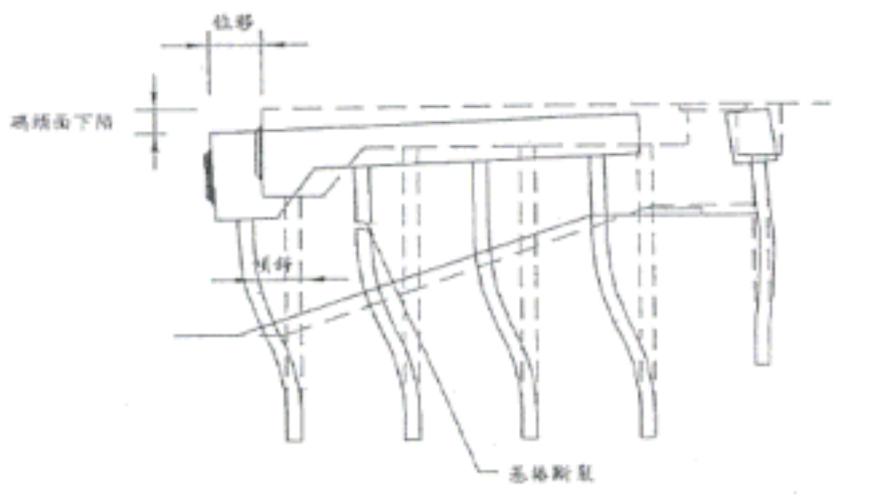


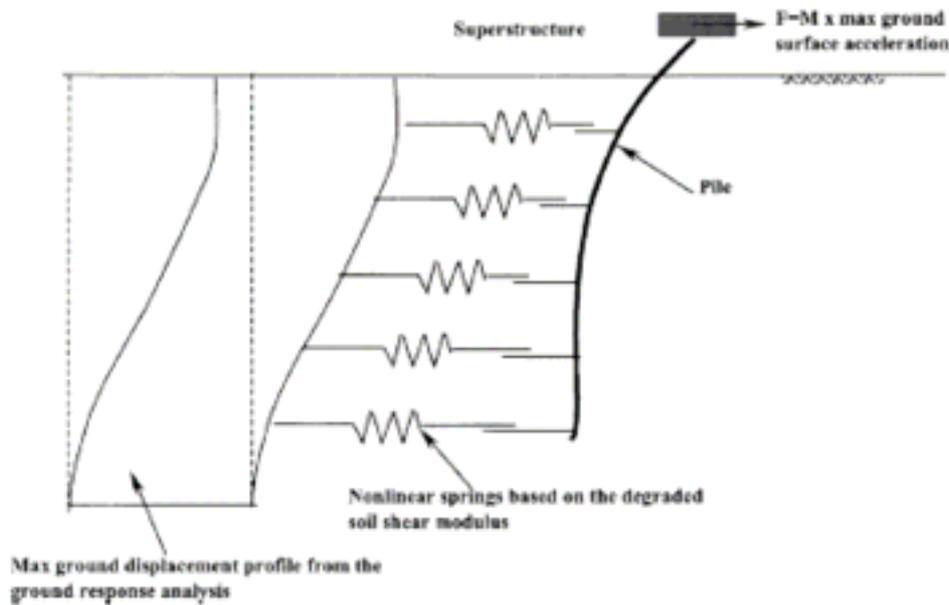
圖 2-2 棧橋式碼頭破壞模式

- (2)上部結構：上部結構指的是碼頭面，其可能的破壞模式為結構因地震力產生破壞或變位造成碼頭面破裂、拱起，或因波浪作用將碼頭面掀起。
- (3)附屬設施：因地震力或土壤液化發生裝卸機械挫曲、輸送帶扭曲、損壞，倉庫產生裂縫或損毀，儲槽凹陷、損毀等。

臺中港在 921 地震時，在部分棧橋式碼頭發現後方回填土區產生液化噴砂現象，導致碼頭產生 10 20 公分之水平與垂直位移，但整體結構並無破壞且碼頭仍可正常運作。

## 2.2 碼頭基樁動態分析程序

現有考慮液化土壤-樁基礎-上部結構互制 (soil-pile- superstructure 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。擬靜態分析為延伸 Matlock (1970)用於分析靜態側向變形分析之 p-y 法，將基樁視為埋置土中之樑，周圍土壤以 Winkler 彈簧模擬土壤勁度，上部結構則以集中質量(lumped mass)代表，其物理模型如圖 2-3 所示，此類模型稱為 Beam on Winkler Foundation，其中 Winker 彈簧可以最簡單之線彈性至複雜之非線性彈塑性彈簧表示。



**圖 2-3 擬靜態 Beam on Winkler Foundation 模型示意圖  
(Liyanapathirana and Poulos 2005)**

分析液化土層基樁側向阻抗(lateral resistance), 實務上較常用之方法為 Wang and Reese (1998)所建議之分析程序, 其主旨為採用砂土之殘餘不排水強度於傳統之 p-y 曲線進行基樁側向分析, 但 p-y 曲線僅代表土壤 - 基樁互制行為, 其並不考慮液化土壤之力學特性與孔隙水壓之影響; Rollins et al. (2005)以考慮液化後土層殘餘強度及以 p-multiplier (Liu and Dobry 1995) 折減後之二種 p-y 曲線分析現地液化土層基樁反應, 並以迴歸法提出適用於不同樁徑之經驗 p-y 曲線; Ashour and Norris (2003)提出考慮距離基樁不同距離之水壓力分佈之不排水 strain wedge model 進行單樁分析, 其結果可較準確預測現地試驗結果; Liyanapathirana and Poulos (2005)利用 Winkler 形式之介面模型及一維度地盤有效應力反應分析結果, 提出修正之擬靜態液化土層之基樁分析程序, 其中以地表最大加速度乘以上部結構質量作為施加在樁頂之集中側向力, 假設樁身周圍土壤最大位移量與自由場相同, 土壤之非線性勁度以折減之剪力模數代表。整體而言, 擬靜態分析法其參數決定有賴工程師判斷, 且僅能提供基樁最大彎距與變位, 對土

壤與基樁之互制反應、液化前後動態反應、基樁勁度影響、樁帽效應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 - 基樁 - 上部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基樁與上部結構震動，上部結構之震動亦會影響下方土壤之動態行為，而分析液化土層之基樁系統時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，但其物理模式與相關機制複雜，為簡化分析，實務上多採將土壤動態反應與基樁 - 上部結構分開分析之非耦合分析 (decoupled analysis)，並以動態 Winkler 系統模擬土壤 - 基樁之互制行為，其物理模型如圖 2-4 所示，將基樁視為埋置土中之樑，周圍土壤以 Winkler 彈簧模擬土壤勁度並將彈簧以並聯或串聯之 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，近場區則考慮土壤 - 基樁互制效應之土層反應，近場區之 Winkler 彈簧可採用非線性彈塑性質之彈簧以模擬其非線性行為。

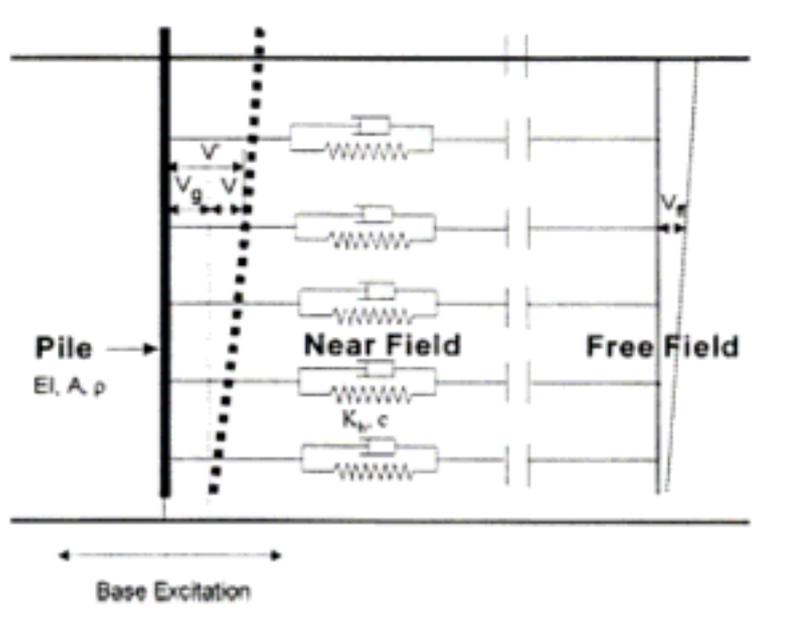


圖 2-4 動態 Beam on Winkler Footing 模型示意圖(Finn and Fujita 2002)

Boulanger et al. (1999)引入近似於 p-y 曲線之概念，以非線性動態 p-y 元素模擬土壤 - 基樁互制行為，稱為 BNWF(Beam on Nonlinear Winkler Foundation)模式，並整合於於時間域(time domain)二維動態有限元素分析中用於預測離心機基樁動態試驗結果，Curras et al. (2001)利用相同程式進行群樁分析，但其程式均無法考慮孔隙水壓力激發之影響；Maheshwari et al. (2004)以彈塑性土壤模型進行三向度動態有限元素分析探討土壤塑性對群樁側向反應分析，但因缺乏孔隙水壓力激發參數，無法適用於液化土層分析；Klar and Frydman (2002, 2004)以有限差分程式 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 - 基樁動態分析，儘管其土壤勁度與孔隙水壓分別考慮，其結果相當接近於考慮耦合反應之有效應力分析。

本計畫以 Klar and Frydman 所建議之時間域動態有效應力分析程序，以 FLAC 之 Dynamic 架構，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 Martin et al. (1975)相同，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)與沈箱式碼頭液化分析(李佳翰 2001)。初期將進行自由場有效應力動態分析，進行動態有效應力分析時所需土層及土壤相關參數將由現地地震測及動態單剪試驗求得，其結果將用於預測現地動態液化試驗之成果，而現地液化試驗之成果亦可驗證數值分析程序，率定後之分析程序將用於棧橋式碼頭動態分析。後續將嘗試以 Zienkiewicz et al. (1990)所提出之 u-p formulation 程序，以求解 Biot (1955)方程式並配合非線性應力相依(nonlinear stress depend)之土壤組構模式，進行考慮固體 - 流體耦合反應(solid-fluid coupled response) 之有效應力動態分析。

## 2.3 現地土壤液化試驗

### 2.3.1 自由場現地土壤液化試驗

隨著大地地震工程領域之進展，現有在液化潛能評估法（如 Seed

and Idriss 1971, Dobry et al. 1982, Kayen and Mitchell 1997), 液化土層地盤動態反應(如 Seed and Idriss 1967, Finn et al, 1977 及 Zienkiewicz et al., 1990) 與液化土層地盤改良(如 Seed and Brooker 1977, Mitchell et al. 1995)等領域已有相當之進展, 然而因土壤液化本身之複雜性與現有液化潛能評估法之不確定性, 土壤液化及其相關災害一直是大地地震工程中具高度挑戰性之課題之一。

現有土壤液化實驗設備, 如動力三軸、反覆單剪、反覆扭剪、震動台及離心機試驗等因受限於試體尺寸、土壤擾動, 受力狀態等影響, 使得試驗結果的應用價值不大, 因此多用於探討影響液化阻抗之因子研究。實務上利用現地試驗參數(如標準貫入試驗 N 值(SPT-N value)、電子錐貫入試驗錐尖阻抗(CPT-qc)及剪力波速( $V_s$ )量測)與半經驗公式評估液化潛能之方法(如 Youd et al. 2001), 因現地試驗之誤差、半經驗公式之準確性及土層之變異性等, 其結果具有相當之不確定性, 尤其是在鄰近液化邊界之預測其不準確性更為明顯。解決之道為直接於現地監測土壤液化行為與發展現地土壤液化試驗, 以現地直接量測地盤動態反應與超額孔隙水壓力歷時, 可避免現有試驗與評估方法之限制與誤差, 其成果除可用於修正現有液化潛能評估法, 並可由量測地震中地盤反應與超額孔隙水壓力之耦合反應(Coupled response), 作為發展與驗證土壤液化數值分析之依據, 其重要性早為地震工程學者所強調(Ishihara et al. 1981, NRC 1985)。

目前全世界僅有數個現地土壤液化量測紀錄, 其震源產生方式可分成天然地震與人工震源如爆炸、震盪震源車等。以天然地震為震源之土壤液化監測站中, 其原理為預先將地震儀(量測加速度)與孔隙水壓力計安置於可能液化之土層, 當地震發生時, 自動啟動量測系統以紀錄地盤反應與孔隙水壓力變化。此類土壤液化監測站僅有美國加州 USGS 設置於 Wildlife site 之測站曾有液化現象發生, 其他測站僅量測到激發之超額孔隙水壓力與地盤加速度反應。國內在 921 之後, 亦有學者於嘉南地區(倪勝火 2001)及台中港區(賴聖耀等 2003)安裝強震儀及孔隙水壓監測系統, 長期監測地表與下方土層之加速度

以及孔隙水壓之反應等。由於地震之不可預測，量測系統需安置於現地相當時日，其可靠度、精確度及耐久性均需特別加以考量，而發展可定期檢測測站功能之程序亦迫在眉睫。

以人工震源進行土壤液化試驗(Ashford et al. 2002, Chang 2002, Gohl et al. 2001)，因土壤液化需相當大之震幅，因此需可產生高能量應力波之震源，現有進行土壤液化試驗之人工震源主要分成打樁(Onoue et al., 1987)、爆炸(Gohl et al. 2001, Ashford et al. 2002)與可移動震源產生器(mobile shaker)(Rathje et al. 2005, 張文忠與許晉銘 2005)三類。其中打樁及爆炸因其產生之頻寬、延時等震動特性與天然地震之震動特性有所差異，且瞬間產生之高壓使監測相當困難，使以爆炸為震源進行現地土壤液化試驗有其侷限。

常見之可移動震源產生器包括震盪震源車(Vibroiseis, 如圖 2-5(a)所示)及偏心質量起震器(Eccentric mass vibrator, 如圖 2-5(b)所示)，震盪震源車為地質探勘常用之高能量震源，其力量來源為油壓設備，可施加特定頻率、震幅之反覆荷重，其可施加之反覆荷重可達到 20 噸以上，其操作頻率可低至數赫茲(Hz)，且具有高度機動性；偏心質量起震器其原理為利用二旋轉之偏心質量塊產生簡諧力，多用於結構強迫震動試驗。Chang (2002)以震盪震源車為震源並配合內置式耦合感應子及量測系統，發展一新型之現地液化試驗，其試驗原理如圖 1-1(a)所示，圖 1-1(a)為利用垂直向震動之表面震源，通過側向近地表量測區域(instrumented test area)之應力波場包括體波(body waves)及表面波，圖 1-1(b)為利用水平向震動之表面震源，通過下方量測區域之波場主要為剪力波，藉由不同剪應變計算方式，可由土層震動歷時計算剪應變歷時，配合相同位置量測之孔隙水壓力歷時，可同時量測震動時土壤結構震動與孔隙水壓力激發之耦合(coupled)行為 震後孔隙水壓力消散及土壤之門檻應變(Threshold shear strain)等土層液化特性 (Rathje et al. 2005)。張文忠與許晉銘(2005)利用圖 2-6 之試驗配置，以重模越南砂試坑進行位移法(displacement-based method, DBM)、平面剪力波速法(plane shear waves method, PSW)及視波法(apparent waves method, AW)

計算不同剪應變震幅之差異，及量測現地剪應變震幅、作用次數及超額孔隙水壓比關係之孔隙水壓力激發曲線（如圖 2-7），決定現地門檻剪應變(threshold shear strain)及孔隙水壓激發行為。



(a) 中油 HEMI 50/IVI 震盪震源車



(b) 偏心質量起震器 (ANCO)

圖 2-5 可移動震源產生器

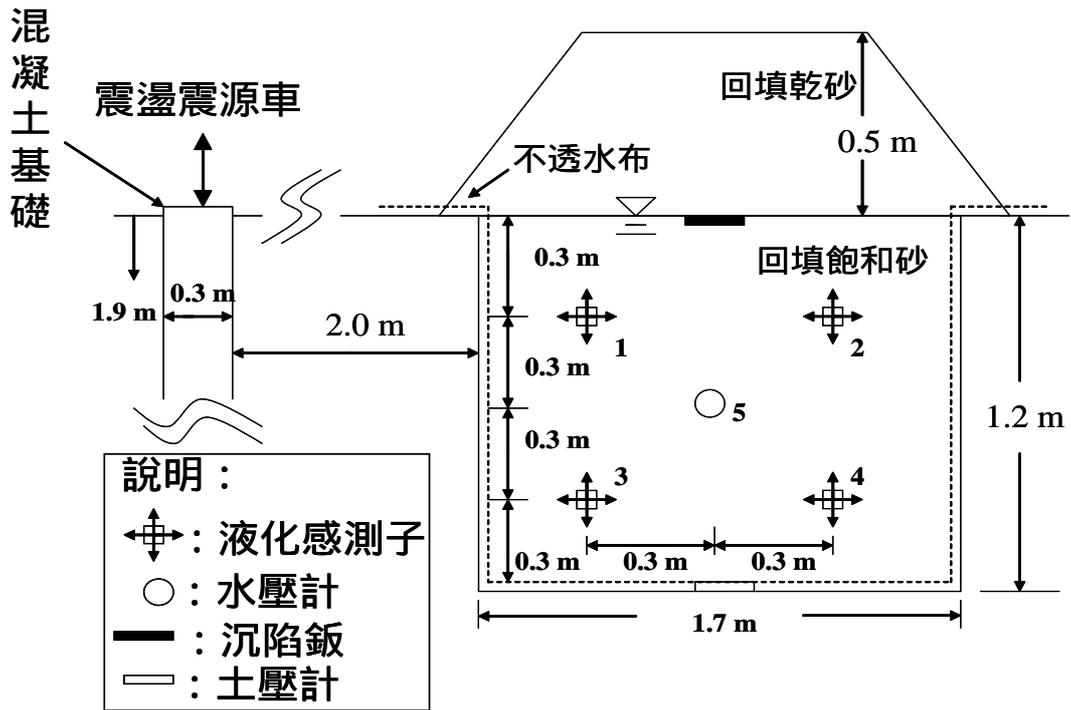


圖 2-6 垂直向震動試驗配置(張文忠與許晉銘 2005)

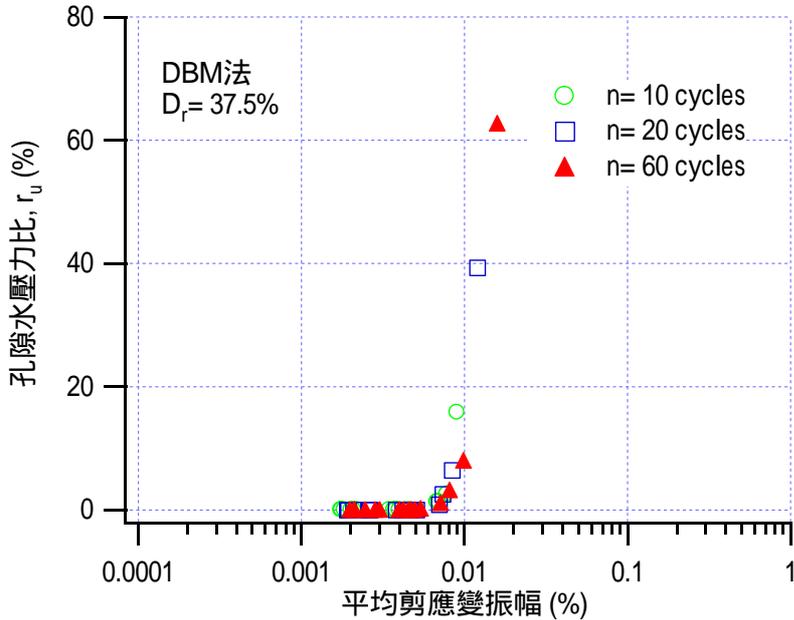


圖 2-7 重模越南砂試坑孔隙水壓激發曲線(張文忠與許晉銘 2005)

### 2.3.2 液化土層基樁動態試驗

由於現地液化土層基樁動態反應其反應機制複雜，因此相關現地案例除 Kobe 地震有部分觀測資料外(Ishihara et al. 1998)，並無位於液化土層基樁之於地震之現地動態量測資料。現有液化土層基樁動態試驗結果可分成三種類型：(1)人工震源配合全尺寸基樁動態試驗，(2)大型震動台模型樁試驗及(3)離心機動態模型樁試驗。各試驗研究重點包括：位於液化土層基樁動態側向抵抗(seismic lateral resistance)分析、液化土層土壤 - 基樁 - 上部結構動態互制反應(Kinematics interaction response)、樁頂束制(pile head constrained)條件與樁群反應(pile group response)及土壤側潰對基樁影響(pile response to lateral spreads)等。

Rollins et al. (2004) 於加州 Treasure Island 以爆破方式使土層液化後再以側向油壓設備對現地全尺寸鋼管樁之單樁及群樁側向抵抗力進行側向反覆加載試驗，其結果顯示液化與非液化土層其  $p-y$  曲線不同且群樁效應並不明顯，但 Kamijo et al. (2004)同樣利用爆破方式使重模土壤液化並觀測以樁帽連結四個鋼管樁組成之群樁效應，其結果顯示最大彎距發生於樁頂與樁帽連接處。Yao et al. (2004)利用大型震動台及 1.75 m 長之模型鋁樁進行動態土壤 - 基樁 - 上部結構互制試驗，其結果顯示基樁 - 上部結構之卓越週期(predominant period)受下方土壤孔隙水壓激發與地表震動影響，基樁行為與土層位移密切相關且基樁最大彎距發生於土壤液化前之狀態。Wilson et al. (2000)利用裝置於離心機上之震動台及分層剪力盒(laminar shear box)觀測單樁與群樁於液化土層之行為並發展考慮土層非線性動態反應下之  $p-y$  法，Brandenberg et al. (2005)利用相同設備探討液化後土壤側潰對基樁造成之影響，其結果發現利用 Matlock (1970)靜態  $p-y$  曲線可預測非液化土層之反應，且樁帽正下方非液化土層與樁帽摩擦力會影響其受力，而液化土層之樁身位移則與樁身與周圍土壤之相對勁度相關。

## 第三章 研究場址與地質探勘

### 3.1 試驗場址概況

臺中港係從民國六十二年開始抽砂水力回填而成，921 地震時發生土壤液化地點在北碼頭區之 1-4A 號碼頭與北突堤區之貨櫃場，北碼頭區沉箱往海側最大外移了 1.68m，碼頭後線區之地表有嚴重之陷落，詳細之液化調查研究可參考交通部運輸研究所港灣技術研究中心(IHMT)之專刊(1999)。本計畫原候選試驗廠址有兩處，分別位於臺中港 26 號碼頭與臺中港火力發電廠旁，二處皆有港研中心之現地液化監測站，但因 26 號碼頭測站其腹地較小，且為營運中碼頭，因此進出不便且重型貨櫃車出入頻繁，因此選擇以台中港火力發電廠旁之測站周圍為試驗場址，港研中心之現地液化監測站前期鑽探記錄如表 3-1 所示，相關儀器配置如圖 3-1 所示，試驗場址周遭環境如圖 3.2 所示，試驗場址現有空地至少有 50m ×25 m，長邊兩側為 40m 寬之環港路與堤防，距台中火力發電廠最短距離至少有 50m，因此人工震源產生之震動對周圍環境影響應在可控制範圍，基於前述說明，本研究案以台中港火力發電廠旁之測站附近為試驗場址。

### 3.2 現地地震測試驗

為瞭解試驗場址之士層分佈，以便於後續鑽探計畫擬定與試驗配置，本研究利用表面波震測法於選定之試驗場址施測四組表面波震測試驗，每組測線長度 20m，施測之方法包括表面波譜法(SASW)與多通道表面震測法(MASW)，佈設之測線位置如圖 3-3 所示，利用二垂直向震測試驗探測現地土層分佈；另外於鑽探完成後，利用鑽孔進行表層土壤跨孔震測，以與表面波震測結果比較。

表 3-1 港研中心液化測站前期鑽探紀錄

| 深度 (m)      | SPT-N 值 | 土壤分類  |
|-------------|---------|-------|
| 0.55-1.00   | 38      | SL    |
| 3.55-4.00   | 2       | CL    |
| 6.55-7.00   | 12      | SW-SM |
| 8.05-8.50   | 21      | SM    |
| 11.05-11.50 | 20      | ML    |
| 12.55-13.00 | 25      | SM    |
| 14.55-15.00 | 36      | SM    |

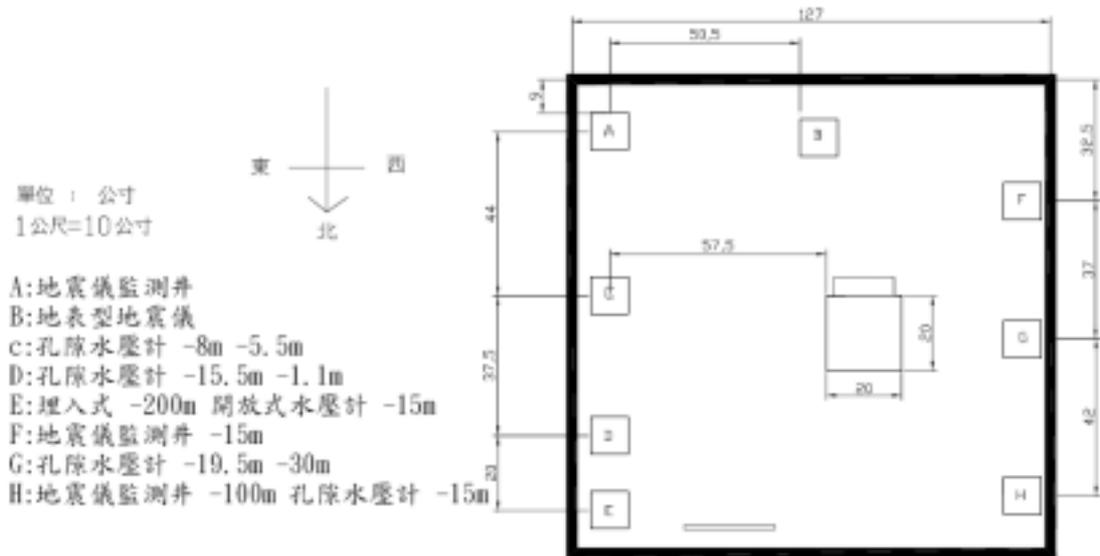


圖 3-1 港研中心現地液化觀測站平面配置圖



圖 3-2 港研中心現地液化觀測站周遭環境現況

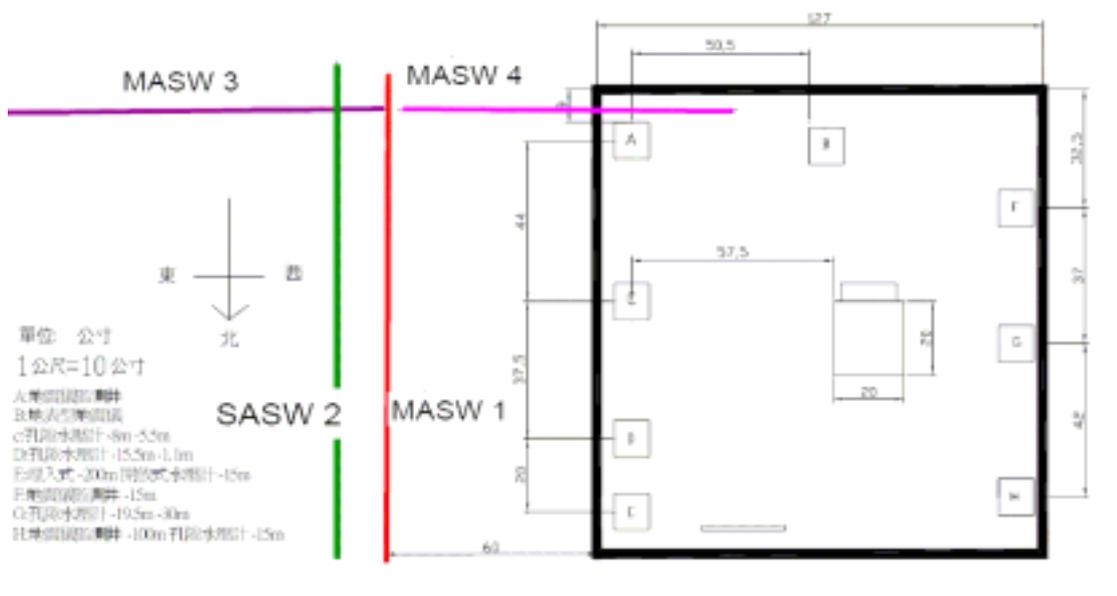


圖 3-3 液化觀測站與表面波震測測線配置圖

### 3.2.1 表面波震測

本計畫之表面波震測試驗，所採用之方法主要以多通道表面震測法(MASW, Multichannel Analysis for Surface Waves)為主，輔以表面波譜法(SASW, Spectrum Analysis for Surface Waves)結果，MASW 共進行 3 組 20m 測線(MASW1、3 & 4)，其中 MASW1 因垂直於道路且位在現地液化試驗場址上，因此於其平行側施測一條 SASW1 測線。

MASW1 與 SASW1 所測得之剪力波速剖面與分層如圖 3-4 所示，其中 SASW-FFT 為利用 FFT 分析現地頻散曲線反推(inversion)求得之剪力波速剖面，SASW-Wavelet 為利用小波分析(wavelet analysis)處理現地量測訊號並反推後求得之波速剖面，MASW 為利用 KGS 之 Surfesis 軟體，以泛音分析(overtone)求得現地頻散曲線後反推之波速剖面，在地表 10m 內土壤其剪力波速約在 200m/s 左右，且在 5~11m 深度為一相對均勻土層，依其剪力波波速分佈可將 20m 深度內土層分為表土層、細砂層與中等堅硬細砂層三個主要土層，地下水位在施測當時約在 2.8 m 深度，但其深度會隨潮汐變化而改變，經與港研中心液化觀測站之鑽探結果比較(如表 3-1 所示)，其結果大致吻合。考慮地下水位深度與具較低液化阻抗土層，以便於產生較高孔隙水壓力，因此選擇第二層之細砂層為試驗土層，並依此震測結果規劃現地鑽探計畫，同時預留利用鑽孔 2 與 3 進行跨孔震測試驗，以對震測結果進行驗證並增加剪力波速剖面之解析度。

### 3.2.2 跨孔震測

為增進淺層土壤波速量測解析度，本計畫以孔內跨孔震源與受波器，利用鑽探後以 PVC 管保護之二鑽孔進行跨孔剪力波量測，其原理與設備如圖 3-5 所示，二孔間距約為 1.5 m，鑽孔 BH-2 深度為 8.0m，BH-3 為 16.0m，受限於 BH-2 孔深，跨孔實驗最深為 8.0m，跨孔法所得波速剖面與表面波量測結果對照如圖 3-6 所示，以跨孔法所得之波速均較 MASW 之數據為低，其原因可能為鑽探時擾動與土層變異性較大，但所得波速與室內薄管取樣之試體剪力波速相近，另由鑽探結果

與另兩條 MASW 之結果比較，發現現地土層其變異性相當大，考慮表面波震測所得為整體平均之性質，因此後續分析將以 MASW 之結果作為彈性與微小應變下之土壤參數。

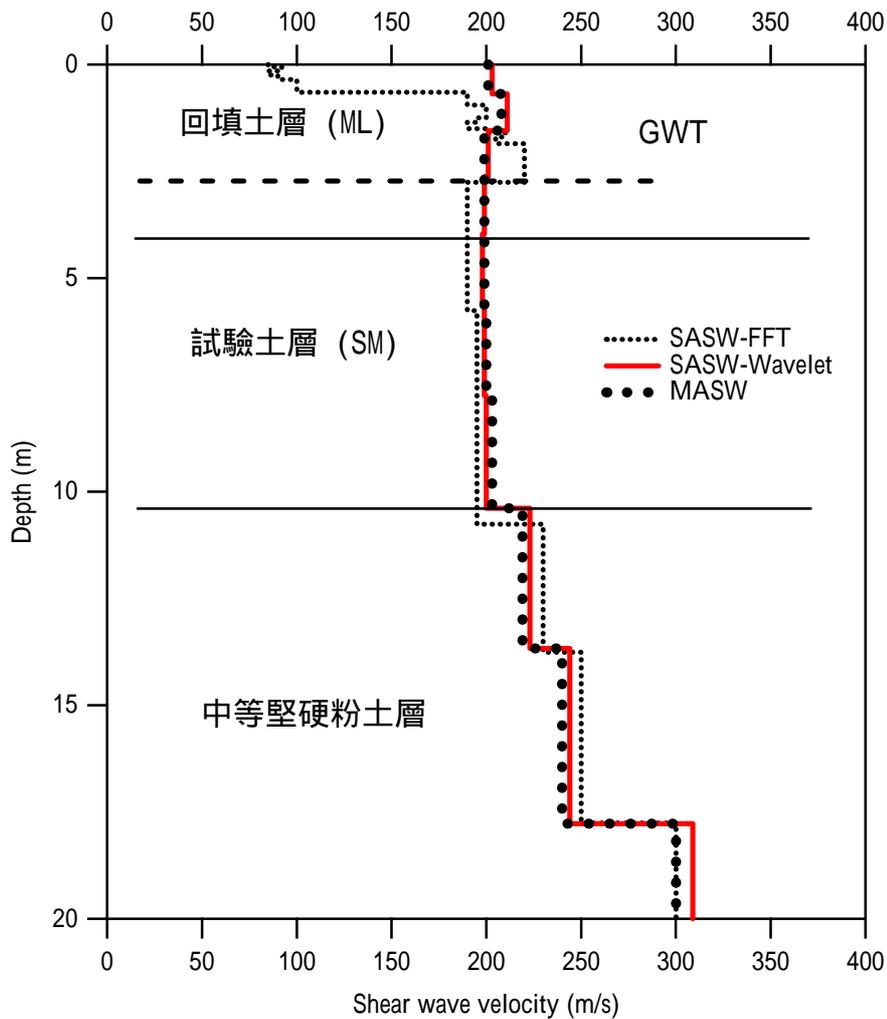


圖 3-4 測線 MASW1 與 SASW1 之剪力波速剖面與分層

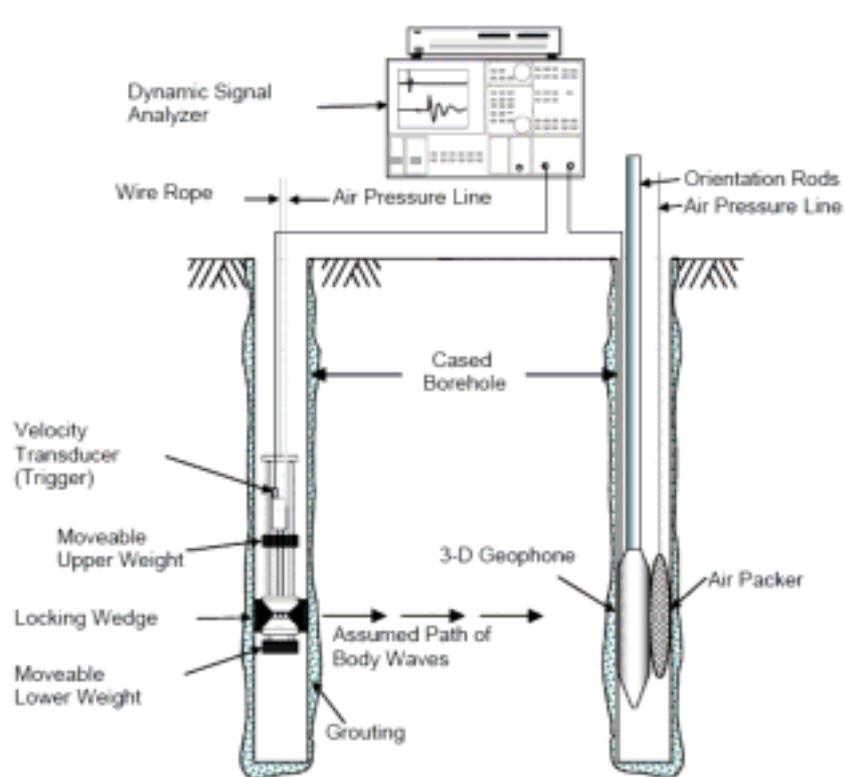


圖 3-5 跨孔法設備與原理(Juh 2003)

### 3.3 現地鑽探計畫與結果

#### 3.3.1 現地鑽探計畫

依震測結果、現地人工震源液化試驗配置規劃與所需分析參數所擬定之現地鑽探計畫其鑽孔深度、取樣深度與試驗項目如表 3-2 所示，鑽孔位置與監測站相對位置如圖 3-7 所示，鑽孔計有三孔，總鑽探深度為 30m，其中鑽孔 1 與 2 其底部位於規劃之試驗土層，將用於裝置感測子，孔號 3 則為取得下方土層土樣，以求取相關物理性質與動態參數，另孔號 2 與 3 其間距僅 1.5m，其目的為便於進行跨孔震測試驗，以求取現地最大剪力模數，鑽孔後採全孔套 2.8” 之 PVC 管至地表並凸出地表 30 cm 保護，以利於後續試驗與感測子安裝。

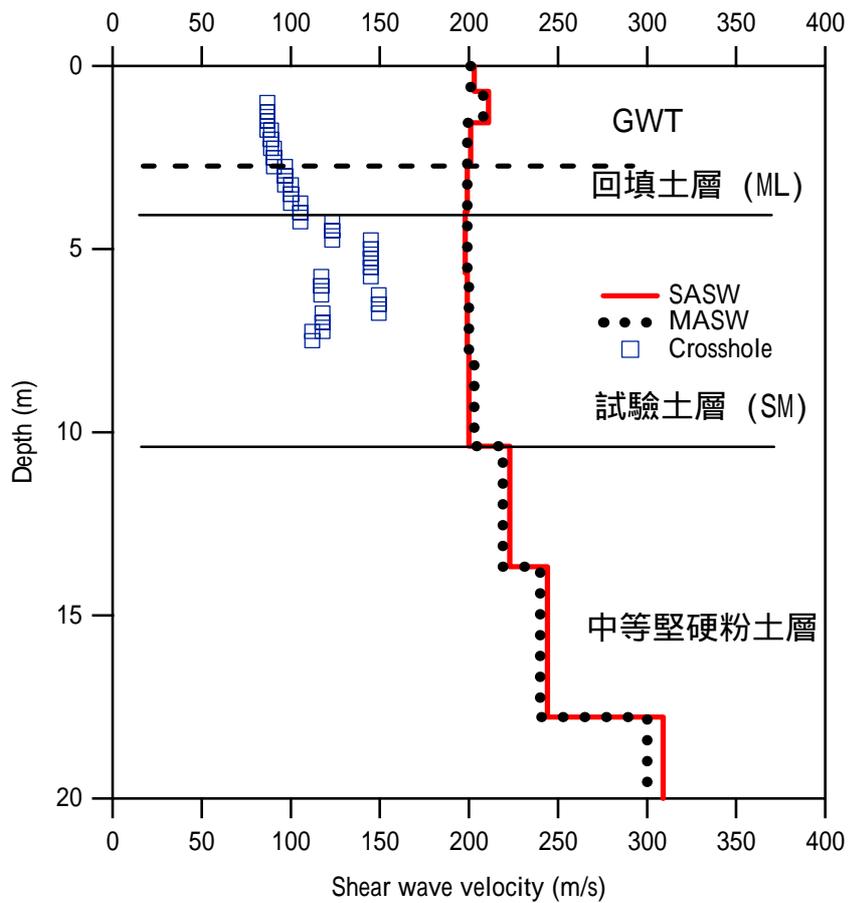


圖 3-6 跨孔法試驗與表面波量測結果比較

表 3-2 現地鑽探深度、取樣深度與試驗項目

| 孔號 | 深度 (m) | 薄管取樣深度 (m) | 薄管取樣數量 | 備註   |
|----|--------|------------|--------|--|
| 1  | 6      | 0.5~6.0    | 3      | 表土層, SPT+Denis 薄管                              |
| 2  | 8      | 5.0~8.0    | 3      | 粉土層, Denis 薄管連續取樣                              |
| 3  | 16     | 0.5~16.0   | 8      | 0.5~4 每 1m 進行一組 SPT 不取樣<br>4~16 m SPT+Denis 薄管 |

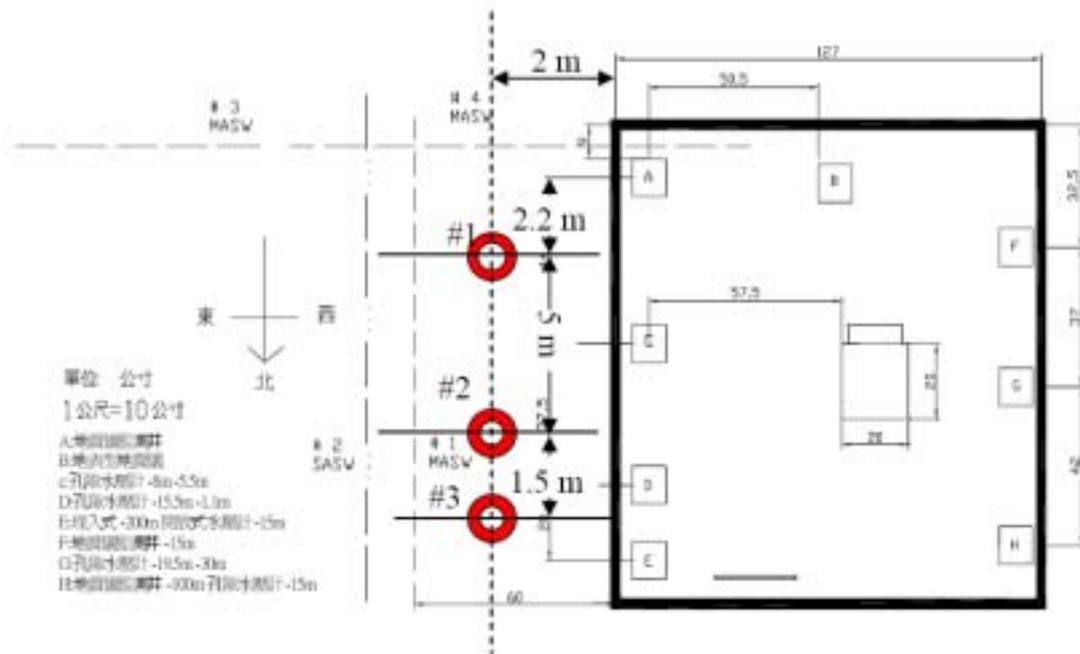


圖 3-7 鑽孔位置配置圖

### 3.3.2 鑽探與一般物理試驗結果

現地鑽探作業於 95 年 5 月 6、8 日施做，相關室內試驗規劃如表 3-3 所示，鑽探結果如表 3-4 所示，位於深度 5 至 10m 之試驗土層大致為細粒料含量小於 10% 之不均勻級配細砂，土壤分類為 SP，且 SPT-N 值小於 20，但鑽探結果亦顯示現地土層差異頗大，此對後續分析有些許影響。取得之所有薄管以冰凍儲存，進行單剪試驗時，於冰凍狀態下進行試體準備，試體安裝好後再以室溫水解凍，所有試驗完後將試體烘乾後以塑膠袋密封編號保存，便於日後製作重模試體。

表 3-3 室內試驗規劃

| 深度(m)     | 土層描述     | 進行之試驗                                   | 求得參數  |
|-----------|----------|---|---|
| 0~5.0     | 表土層      | 一般物理試驗<br>現地與室內波速量測<br>動態單剪試驗           | Gs, w, GSD, unit weight<br>Vs<br>(G/Gmax) ~ $\gamma$ , D ~ $\gamma$               |
| 5.0~10.0  | 軟弱細砂夾粉土層 | 一般物理試驗<br>現地與室內波速量測<br>動態單剪試驗<br>單剪液化試驗 | Gs, w, GSD, unit weight<br>Vs<br>(G/Gmax) ~ $\gamma$ , D ~ $\gamma$<br>CSR~N, CRR |
| 10.0~16.0 | 中等軟弱粉土層  | 一般物理試驗<br>現地與室內波速量測<br>動態單剪試驗           | Gs, w, GSD, unit weight<br>Vs<br>(G/Gmax) ~ $\gamma$ , D ~ $\gamma$               |

表 3-4 鑽探結果

鑽探及試驗報告表

名稱：\_\_\_\_\_ 孔號：BH-1 鑽探時間 95.05.06-05.08  
 Project \_\_\_\_\_ 地面標高：\_\_\_\_\_ Hole No. \_\_\_\_\_ Date of Borng  
 地點：環港路 Elevation \_\_\_\_\_ 地下水位 GL.-3.03 m 試驗時間 \_\_\_\_\_  
 Location \_\_\_\_\_ Gound Water Table \_\_\_\_\_ Date of Testing \_\_\_\_\_

| 深度<br>Depth M | 柱狀圖<br>Log | 擊數<br>Blows<br>N | 樣號<br>Sample No | 地層說明<br>Description      | 顆粒分析      |            |            | 分類<br>Classi-<br>cation | 自然<br>含水量<br>w% | 液性<br>限度<br>w% | 塑性<br>限度<br>w% | 比重<br>Gs | 當地密<br>度 $\gamma_m$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 孔隙比<br>e |
|---------------|------------|------------------|-----------------|--------------------------|-----------|------------|------------|-------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------|---|----------|
|               |            |                  |                 |                          | 砂<br>Sand | 沈泥<br>Silt | 黏土<br>Clay |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 1             |            | 22               | S-1-2           | 回填棕灰色細砂紅棕色粉土<br>夾卵石 0.7m | 97.4      |            |            | SP                      | 8.2             | --             | NP             | 2.66     | 1.67  | 0.72     |
| 2             |            | 75/68cm          | T-1             |                          |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 3             |            | 9                | S-2-2           | 棕灰色粉土質細砂夾細砂層<br>3.2m     | 72.1      | 27.7       | 0.2        | SM                      | 28              | --             | NP             | 2.61     | 1.78  | 0.88     |
| 4             |            |                  |                 | 灰色粉土質黏土 3.65m            |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 5             |            | 6                | S-4-2           | 卵石層夾粗砂 4.25m             | 95.6      |            |            | SP                      | 22.9            | --             | NP             | 2.67     | 1.87  | 0.75     |
| 6             |            | 70/50cm          | T-2             | 灰色粗中砂 4.70m              |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 7             |            | 80/65cm          | T-3             | 灰色中細砂夾砂質粉土               |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 8             |            | 6                | S-5-2           | 6.85m                    | 97.4      |            |            | SP                      | 24.5            | --             | NP             | 2.64     | 1.82  | 0.81     |
| 9             | 孔底         |                  |                 |                          |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |

表 3-4 鑽探結果 (續)

鑽探及試驗報告表

名稱: \_\_\_\_\_ 孔號: BH-2 鑽探時間: 95.05.06-05.08  
 Project: \_\_\_\_\_ 地面標高: \_\_\_\_\_ Hole No.: \_\_\_\_\_ Date of Boring: \_\_\_\_\_  
 地點: 環港路 Elevation: \_\_\_\_\_ 地下水位: GL.-3.23 m 試驗時間: \_\_\_\_\_  
 Location: \_\_\_\_\_ Gound Water Table: \_\_\_\_\_ Date of Testing: \_\_\_\_\_

| 深度<br>Depth M | 柱狀圖<br>Log | 擊數<br>Blows<br>N | 樣號<br>Sample No | 地層說明<br>Description      | 顆粒分析      |            |            | 分類<br>Classi-<br>cation | 自然<br>含水量<br>w% | 液性<br>限度<br>w% | 塑性<br>限度<br>w% | 比重<br>Gs | 當地密<br>度 $\gamma_m$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 孔隙比<br>e |
|---------------|------------|------------------|-----------------|--------------------------|-----------|------------|------------|-------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------|---|----------|
|               |            |                  |                 |                          | 砂<br>Sand | 淤泥<br>Silt | 黏土<br>Clay |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 1             |            | 29               | S-1-2           | 圓礫棕灰色細砂紅棕色粉土<br>夾卵石 0.7m | 83        | 16.5       | 0.5        | SM                      | 11.8            | --             | NP             | 2.66     | 1.72  | 0.73     |
| 2             |            | 5                | S-2-2           | 棕灰色粉土質細砂夾細砂層<br>3.4m     | 51.3      | 47.2       | 1.5        | SM                      | 27.9            | --             | NP             | 2.68     | 1.69  | 1.03     |
| 3             |            | 14               | S-3-2           | 灰色粉土質細砂<br>4.3m          | 88.5      | 11.2       | 0.3        | SP-SM                   | 28.9            | --             | NP             | 2.63     | 1.85  | 0.83     |
| 4             |            |                  |                 | 灰色中砂<br>5.20m            |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 5             |            | 85/50cm          | T-1             | 灰色粉土質細砂                  |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 6             |            | 85/60cm          | T-2             | 夾砂質粉土<br>7.10m           |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 7             |            | 85/60cm          | T-3             | 灰色中細砂<br>8.0m            |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 8             |            |                  |                 | 灰色砂質粉土夾細砂層<br>8.0m       |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 9             | 孔底         |                  |                 |                          |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 10            |            |                  |                 |                          |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 11            |            |                  |                 |                          |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 12            |            |                  |                 |                          |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 13            |            |                  |                 |                          |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |

表 3.4 鑽探結果 (續)

鑽探及試驗報告表

名稱: \_\_\_\_\_ 孔號: BH-3 鑽探時間: 95.05.06-05.08  
 Project: \_\_\_\_\_ 地面標高: \_\_\_\_\_ Hole No.: \_\_\_\_\_ Date of Boring: \_\_\_\_\_  
 地點: 環港路 Elevation: \_\_\_\_\_ 地下水位: GL.-2.93 m 試驗時間: \_\_\_\_\_  
 Location: \_\_\_\_\_ Gound Water Table: \_\_\_\_\_ Date of Testing: \_\_\_\_\_

| 深度<br>Depth M | 柱狀圖<br>Log | 擊數<br>Blows<br>N | 樣號<br>Sample No | 地層說明<br>Description       | 顆粒分析      |            |            | 分類<br>Classification | 自然<br>含水量<br>w% | 液性<br>限度<br>w% | 塑性<br>限度<br>w% | 比重<br>Gs | 當地密<br>度 $\gamma_m$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 孔隙比<br>e |
|---------------|------------|------------------|-----------------|---------------------------|-----------|------------|------------|----------------------|-----------------|----------------|----------------|----------|---|----------|
|               |            |                  |                 |                           | 砂<br>Sand | 淤泥<br>Silt | 黏土<br>Clay |                      |                 |                |                |          |   |          |
| 1             |            | 50/12cm          | S-1-0           | 回填棕灰色細砂紅棕色粉土<br>及卵石 1.55m |           |            |            |                      |                 |                |                |          |   |          |
| 2             |            | 9                | S-2-2           | 棕灰色粉土質夾細砂層<br>2.80m       | 67.8      | 31.2       | 1          | SM                   | 26.9            | --             | NP             | 2.63     | 1.74  | 0.92     |
| 3             |            | 2                | S-3-2           | 灰色粉土質黏土<br>4.10m          | 24.4      | 73.3       | 2.3        | ML                   | 35              | --             | NP             | 2.68     | 1.72  | 1.10     |
| 4             |            | 2                | S-4-2           | 灰色粉土質黏土<br>4.10m          | 38.1      | 33.9       | 28         | CL-ML                | 35.5            | 36.63          | 30.5           | 2.61     | 1.78  | 0.99     |
| 5             |            | 85/55cm          | T-1             | 灰色粗中砂夾中細砂<br>5.25m        | 86        | 13.6       | 0.4        | SM                   | 20.2            | --             | NP             | 2.63     | 1.92  | 0.65     |
| 6             |            | 85/60cm          | T-2             | 灰色粉土質細砂夾砂質粉土<br>6.50m     | 71.1      | 28         | 0.9        | SM                   | 23.2            | --             | NP             | 2.68     | 1.92  | 0.72     |
| 7             |            | 85/70cm          | T-3             | 灰色中細砂<br>10.70m           | 98.4      |            |            | SP                   | 26.3            | --             | NP             | 2.64     | 1.88  | 0.77     |
| 8             |            | 17               | S-7-2           |                           |           |            |            |                      |                 |                |                |          |   |          |
| 9             |            | 85/65cm          | T-4             |                           |           |            |            |                      |                 |                |                |          |   |          |
| 10            |            | 19               | S-8-2           |                           |           |            |            |                      |                 |                |                |          |   |          |
| 11            |            | 85/60cm          | T-5             |                           |           |            |            |                      |                 |                |                |          |   |          |
| 12            |            | 19               | S-9-2           | 94                        |           |            | SP         | 16.2                 | --              | NP             | 2.64           | 1.93     | 0.59  |          |
| 13            |            | 85/65cm          | T-6             | 10.70m                    |           |            |            |                      |                 |                |                |          |   |          |
| 11            |            | 11               | S-10-2          | 灰色細砂質粉土夾粉土質<br>黏土 11.50m  | 96.1      |            |            | SP                   | 20.3            | --             | NP             | 2.69     | 1.89  | 0.71     |
| 12            |            | 85/65cm          | T-7             | 灰色中細砂<br>12.50m           |           |            |            |                      |                 |                |                |          |   |          |
| 13            |            | 15               | S-11-2          | 灰色細砂夾薄層(6.80m(下頁))        |           |            |            |                      | 27.8            |                |                | 2.69     | 1.75  | 0.96     |

表 3.4 鑽探結果 (續)

名稱: \_\_\_\_\_ 孔號: BH-3 鑽探時間: 95.05.06-05.08  
 Project \_\_\_\_\_ Hole No. \_\_\_\_\_ Date of Boring \_\_\_\_\_  
 地點: 環港路 地面標高: \_\_\_\_\_ 地下水位: GL.-2.93 m 試驗時間: \_\_\_\_\_  
 Location \_\_\_\_\_ Gound Water Table \_\_\_\_\_ Date of Testing \_\_\_\_\_

| 深度<br>Depth M | 柱狀圖<br>Log | 擊數<br>Blows<br>N | 樣號<br>Sample No | 地層說明<br>Description | 顆粒分析      |            |            | 分類<br>Classi-<br>cation | 自然<br>含水量<br>w% | 液性<br>限度<br>w% | 塑性<br>限度<br>w% | 比重<br>Gs | 當地密<br>度 $\gamma_m$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 孔隙比<br>e |
|---------------|------------|------------------|-----------------|---------------------|-----------|------------|------------|-------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------|---|----------|
|               |            |                  |                 |                     | 砂<br>Sand | 沈泥<br>Silt | 黏土<br>Clay |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 14            |            | 85/60cm          | T-8             | 灰色細砂夾薄層砂質粉土         | 93.1      |            |            | 27.9                    | --              | NP             | 2.67           | 1.89     | 0.81  |          |
| 15            |            | 21               | S-12-2          | 15.10m              |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 16            |            | 31               | S-13-2          | 灰色中細砂<br>16.00m     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 17            | 孔底         |                  |                 |                     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 18            |            |                  |                 |                     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 19            |            |                  |                 |                     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 20            |            |                  |                 |                     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 21            |            |                  |                 |                     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 22            |            |                  |                 |                     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 23            |            |                  |                 |                     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 24            |            |                  |                 |                     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 25            |            |                  |                 |                     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |
| 26            |            |                  |                 |                     |           |            |            |                         |                 |                |                |          |   |          |

## 第四章 室內土壤動態試驗

為求取現地土層於不同應變下之動態特性及液化強度，以鑽探取得土樣進行一系列室內動態試驗，包括在小應變下以剪力波速量測結果求取土壤最大剪力模數，在大應變下則以反覆單剪試驗(cyclic direct simple shear, CDSS) 求取不同應變下其剪力模數與阻尼比關係，由小應變與大應變結果建立正規化剪力模數折減曲線(normalized shear modulus reduction curves)，結合現地量測之剪力波速結果可推估現地分層土壤之動態特性。

因本計畫之主要目的為分析液化狀態下港區地底結構物反應，因此土壤在受震中其液化過程特徵為必要參數，包括液化強度、孔隙水壓力激發、模數折減及變形特徵等，因此在所有土層以反覆單剪儀進行薄管取樣土壤之液化試驗。

### 4.1 土壤反覆單剪試驗 (Cyclic Direct Simple Shear Test)

反覆單剪試驗為模擬向上傳播之於水平向震動之剪力波通過土壤元素時土壤受反覆動力作用情形(如圖 3-1 所示)，其原理為施加反覆剪力或剪應變震幅於試體的水平面上，以適切模擬實際土壤於受震下之動態行為，由於現地土壤受震前為  $K_0$  壓密狀態，剪動過程為  $K_0$  不排水狀態，因此試驗進行中以鋼絲加勁橡皮膜限制側向位移，達到  $K_0$  壓密不排水狀態。

本試驗包含(一)動態強度試驗及(二)動態特性試驗，動態強度試驗目的為提供結構物受震時之動態反應所需之土層抗液化強度與變形能力，而動態特性則提供計算結構物受震時之動態反應所需之土層動態剪力模數及阻尼比等之動力分析參數。動態強度試驗係參照美國材料試驗學會標準 ASTM D5311-92 動態三軸試驗與 ASTM D6528-00 壓密不排水單剪試驗規範之方法實施，動態特性試驗係參照美國材料試驗學會標準 ASTM D3999-91 之方法，但以單剪取代動態三軸實施。

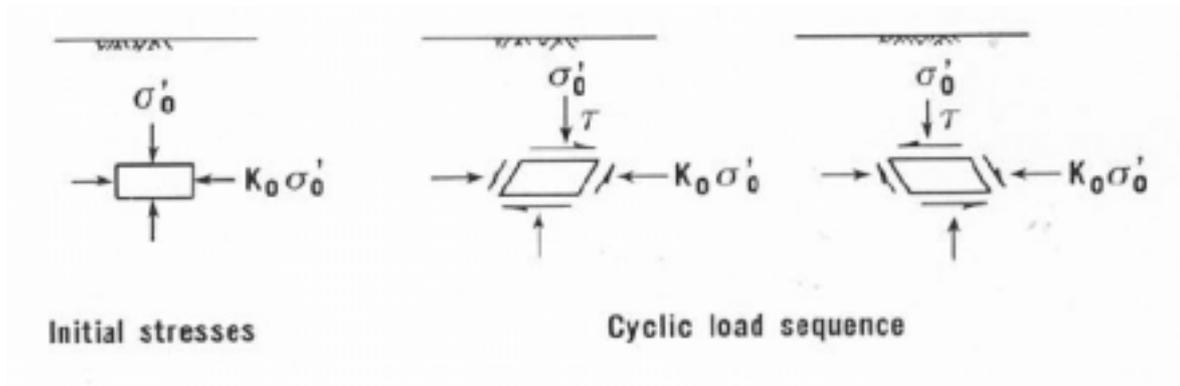


圖 4-1 地層中土壤受反覆剪力狀態示意圖 (Seed 1979)

#### 4.1.1 動態伺服單剪試驗系統

試驗之儀器是由美國 GCTS(Geotechnical Consulting and Testing Systems)所設計的動態伺服單剪試驗系統，設備如圖 4-2 所示，主要包括下列部分：

1. 壓力供應系統：包括提供正向與剪力方向電子油壓系統所需應力之油壓機與氣壓機，油壓機所能提供之最大壓力 14 MPa，而氣壓機提供圍壓與反水壓力所需壓力，最大供壓為 500 kPa。
2. 雙向荷重機構與量測系統：本設備包括二組伺服控制之油壓荷重機構，可分別用於施加垂直向(正向)及水平向(剪向)作用力，並以 CATS 軟體伺服控制施力大小或位移，搭配之量測系統包括量測施加荷重之電子荷重計(load cell)與量測荷重桿變位之線性變化位移計 LVDT，系統最大作用頻率為 20 Hz，正向之電子荷重計最大量測荷重為 9 kN (2000 LB)，搭配之 LVDT 最大衝程為 50 mm，水平向電子荷重計最大可達 9 kN (2500 LB)荷重，搭配之 LVDT 最大衝程為 $\pm 25$  mm，並可替換 1 kN (250 LB)荷重計與 $\pm 2.5$  mm LVDT。

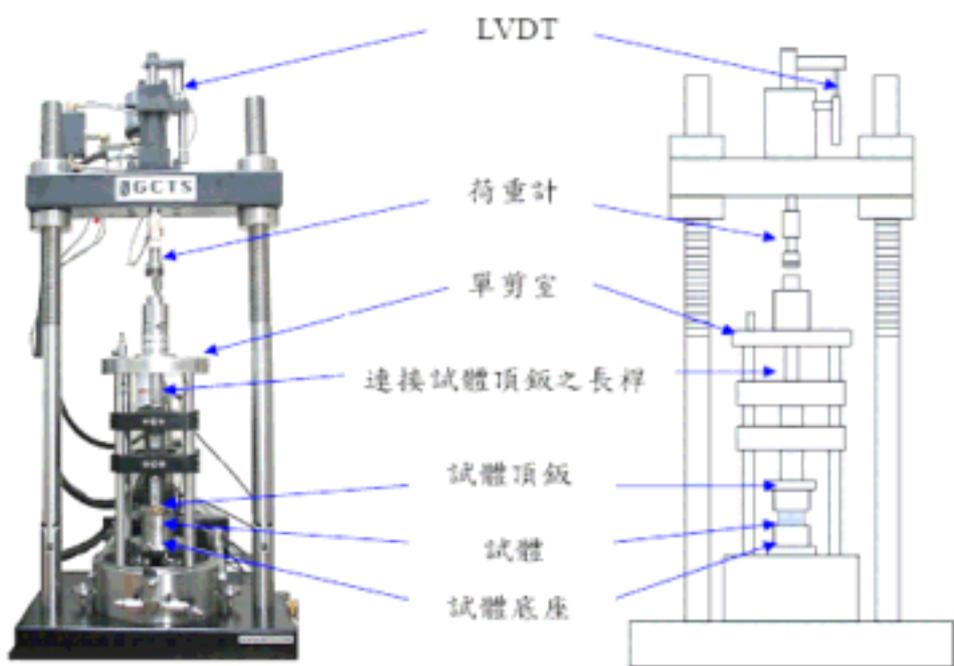


圖 4-2 GCTS 反覆單剪儀設備圖

3. 反覆單剪壓力室：以透明壓克力外罩密封成一密閉系統，內部注水或空氣以作為壓力傳遞介質，壓克力外罩所能承受最大壓力約為 1000 kPa，可進行直徑為 7.0 cm (2.8")或 10 cm (4")之試體，試體的頂鈹與底座之直徑略大於加勁橡皮膜直徑，頂鈹由內部側向支撐固定，以避免實驗時試體頂部產生旋轉或側向的移動。試體頂鈹可以上下移動調整高度，底座則是置於一個可單向水平滑動之剪動平台上，為減少正向荷重產生的滑軌摩擦力，剪動平台底部連接預力施加的滑軌。
4. 電腦控制自動壓力系統：可控制試驗所需之圍壓、反水壓與真空壓力，而圍壓、反水壓與孔隙水壓皆可經由電腦伺服控制與量測，並配置電子體積變化儀，最大容許體積為 100 cc，解析度為 0.05 c，及真空壓力調節系統與去氣水儲存筒。
5. 數位伺服控制與資料擷取系統：由 GCTS 所設計的 SCOM-2000 主電腦所控制，並且利用 RS232 傳輸線與個人電腦相連接作為輸出界面，可同時伺服控制垂直向與水平向荷重以及圍壓與反水壓之施加，解析度為 16-bit，最多可控制 8 個控制通道，擷取 24 個通道，經由程式將試驗程序自動化、自動資料擷取，並且可以即時顯示試驗數據圖形與基本訊號處理。可同步控制 8 個伺服頻道。
6. 試體準備配件：包含與試體接觸之頂鈹與底座，NGI 形式之鋼絲加勁的橡皮膜、透水石、頂土機、電子秤烘箱、裁土、修土及頂土工具等。

進行試驗前，所有系統量測系統組件均與 CNLA 認證機構率定之標準感測器率定完成，並定期檢測，使試驗結果具代表性。

#### 4.1.2 試驗步驟

試驗步驟說明如下：

1. 試體準備：本試驗使用薄管取樣之試體，將自薄管取得之土樣，修

裁成直徑 68 mm 與高度 25 mm 之試體 ( $H/D < 0.4$ )，試體修裁完成後，即秤重並量測試體之直徑與高度，另取部分土樣放入皿中求取含水量。將試體置於剪動平台底座之底鈹，上下置以濾紙及飽和之透水石，試體外面再套以加勁橡皮膜，並以橡皮圈於試體上下予以束縛。使用抽氣機後，套上壓力室並連接加壓管路。

2. 試體飽和: 欲使試體飽和需先執行飽和程序，以 -5 kPa 真空壓力抽氣 5 min 後再導入去氣水後並加上適當之反水壓。待足夠飽和時間後執行飽和度測試，以量測 B 值方式測試飽和度。
3. 壓密: 當飽和度 B 值高於 0.95 後，執行壓密程序，配合現場覆土深之有效應力，進行  $K_0$  不等向壓密，以模擬現地土壤在地震前之應力狀態。
4. 動態試驗：依動動態強度試驗或動態特性試驗進行剪動程序，程序如下：

(1) 動態強度試驗:

試體壓密完成後，執行動態強度試驗程序。將試體在不排水狀況下，以應力控制方式施加固定震幅且頻率為 0.1~1.0 Hz 之正弦波水平反覆剪應力，直至試體發生液化或其剪應變震幅超過 3%，每組試體數以能定義土壤抗震之剪應力比與加力循環次數為原則。試驗過程中，試體所受之反覆剪力、正向荷重、正向與水平向變位、孔隙水壓及圍壓以電子感應器量測並予連續紀錄，以求得土壤抗液化及變形之能力。

(2) 動態特性試驗:

試體壓密完成後，執行動態特性試驗程序。將試體在不排水狀況下，以應變控制方式施加固定震幅且頻率為 0.1~1.0 Hz 之正弦波水平反覆剪應變，剪應變震幅由小到大漸增，以能定義土壤剪力模數、阻尼比與剪應變之關係為原則。於試驗過程中，試體所受之反覆剪力、正向荷重、正向與水平向變位、孔隙水壓及圍

壓以電子感應器量測並予連續紀錄，以求得土壤上述定義之動態特性。

#### 4.1.3 資料處理

試驗結果之計算如下所述：

1. 動態強度：繪製不同剪應力時間歷時、剪應變時間歷時及孔隙水壓力時間歷時等曲線，由圖求得不同剪應力下，其超額孔隙水壓比比達液化或試體變形量達到一定程度所需之週期數，建立反覆剪力比與液化週期數關係。
2. 動態特性：繪製不同應變震幅下之應力-應變阻滯圈圖，由圖求得下列參數：

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

$$\gamma = \frac{X}{H} \quad (4.2)$$

$$G = \tau / \gamma \quad (4.3)$$

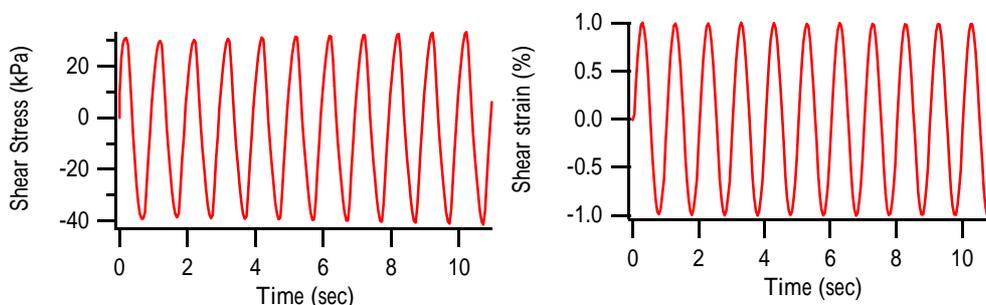
$$D = A_i / \pi A_t \quad (4.4)$$

式中， $\tau$ =剪應力， $F$ =為施加之剪力， $A$ =為試體截面積， $\gamma$ =阻滯圈之剪應變幅度， $X$ =土壤水平方向之變位， $H$ =試體壓密後之高度， $G$ =土壤正割剪力模數(secant modulus)， $D$ =阻尼比， $A_i$ =阻滯圈面積， $A_t$ =阻滯圈頂點投影三角面積。

## 4.2 土壤動態特性試驗結果

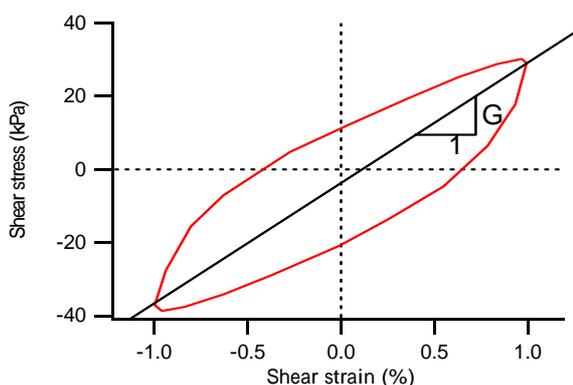
為量測單剪試體之最大剪力模數以建立正規化剪力模數折減曲線，因此於原 GCTS 單剪儀內加裝 bender element，用以量測試體之剪力波速，進一步推估其最大剪力模數，同時以分階段壓密方式進行剪

力波速量測，可建立試體其剪力波速與有效應力關係。進行動態特性試驗時，其典型試驗結果如圖 4-3 所示，三個主要土層之動態特性總和列表如表 4-1 所示。

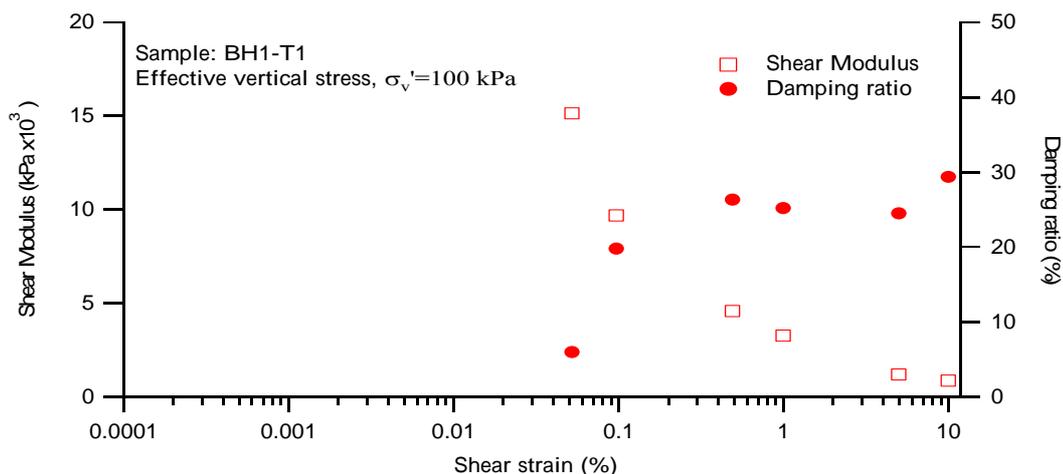


(a) 剪應力歷時

(b) 剪應變歷時



(c) 阻滯圈



(d) 剪應變與剪力模數折減及阻尼比關係

圖 4-3 反覆單剪動態特性試驗結果(土樣編號: BH1-T1-100)

表 4-1 各土層之動態特性試驗總表

| 土層名稱 | 深度 (m) | Vs (m/s)                 | $\gamma_{ef}$ |
|------|--------|--------------------------|---------------|
| 回填土層 | 0-5    | $35(\sigma'_m)^{0.23}$   | 0.08          |
| 試驗土層 | 5-10   | $33(\sigma'_m)^{0.36}$   | 0.03          |
| 下方土層 | >10    | $61.6(\sigma'_m)^{0.33}$ | 0.01          |

#### 4.2.1 回填土層

此土層為自地表以下至深度約 5.0 m，主要為回填壓實土層，以薄管編號 BH1-T1 之土樣進行試驗，計進行三個試體，其垂直有效應力分別為 100、150 及 200 kPa，其波速與平均有效應力關係如圖 4-4 所示，並可以所列之公式迴歸，其整合之動態特性如圖 4-5 所示，且可以  $\gamma_{ef}=0.08$  近似於 Hardin and Drenvich (1973) 所提出之模數折減公式。

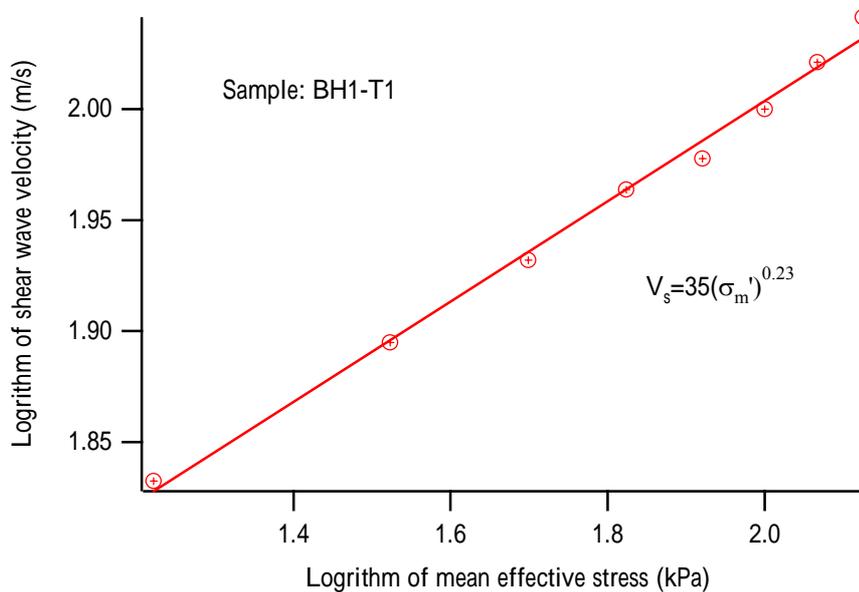


圖 4-4 BH1-T1 波速與平均有效應力關係

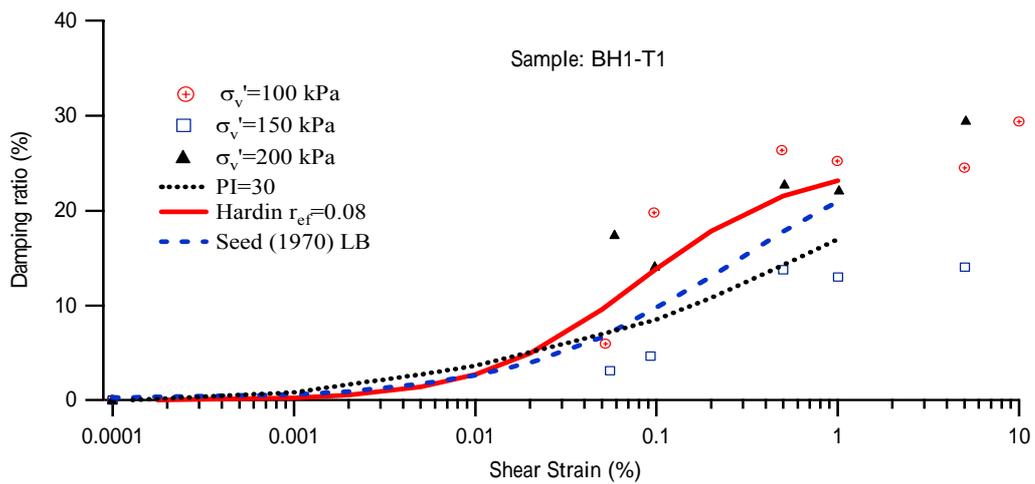
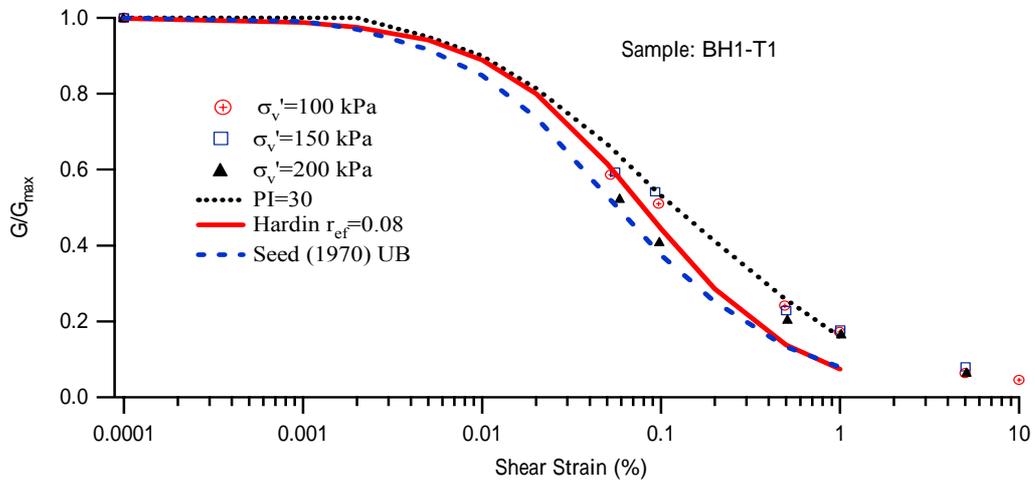
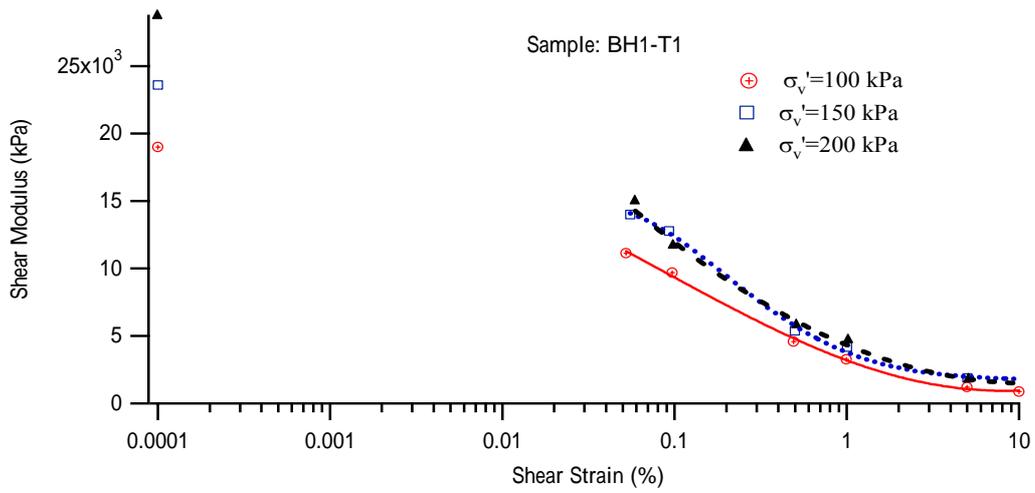


圖 4-5 回填土層 BH1-T1 動態特性

#### 4.2.2 試驗土層

試驗土層約位於地表下 5~10 m，以薄管編號 BH2-T2 之土樣進行試驗，計進行三個試體，垂直有效應力分別為 100、150 及 200 kPa，其波速與平均有效應力關係如圖 4-6 所示，其完整之動態特性如圖 4-7 所示，以  $\gamma_{ef}=0.03$  可近似 Hardin and Drenvich (1973) 所提出之模數折減公式。

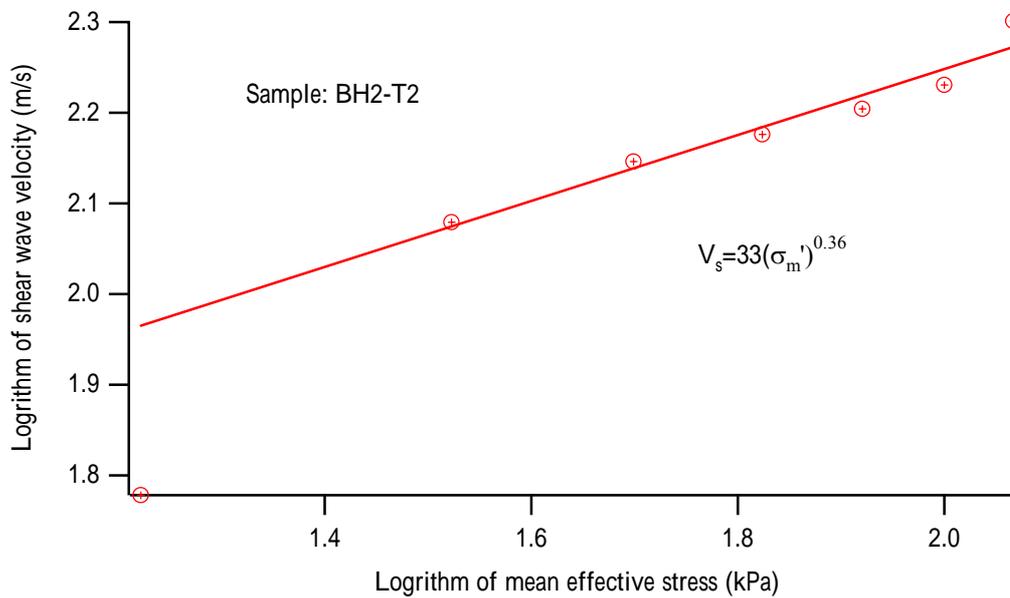


圖 4-6 BH2-T2 波速與平均有效應力關係

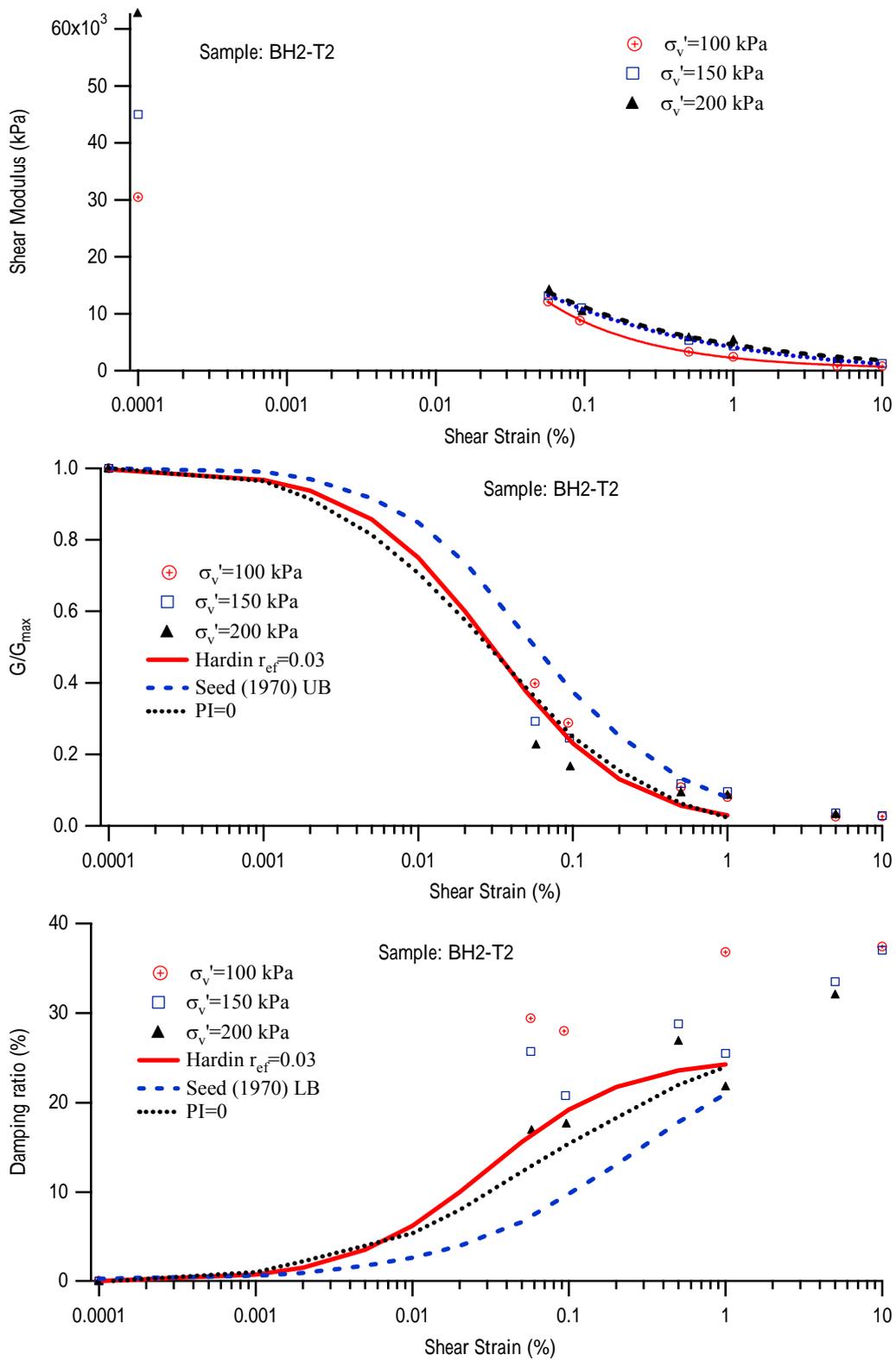


圖 4-7 試驗土層 BH2-T2 動態特性

### 4.2.3 下方土層

試驗土層約位於地表 10m 以下，以薄管編號 BH2-T2 之土樣進行試驗，計進行三個試體，垂直有效應力分別為 100、150 及 200 kPa，其波速與平均有效應力關係如圖 4-8 所示，其完整之動態特性如圖 4-9 所示，以  $\gamma_{ef}=0.01$  可近似 Hardin and Drenvich (1973) 所提出之模數折減公式。

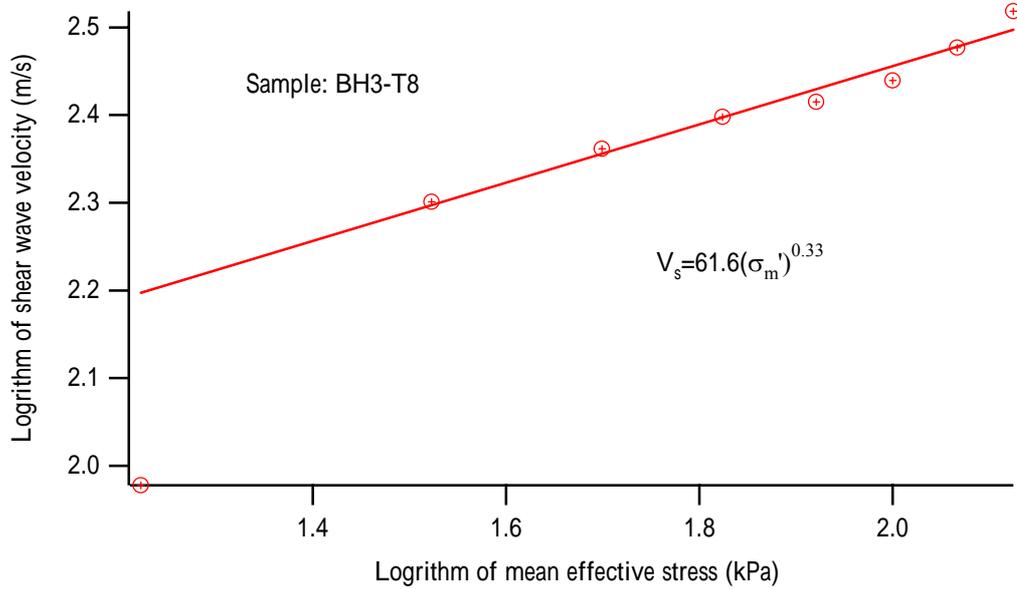


圖 4-8 BH3-T8 波速與平均有效應力關係

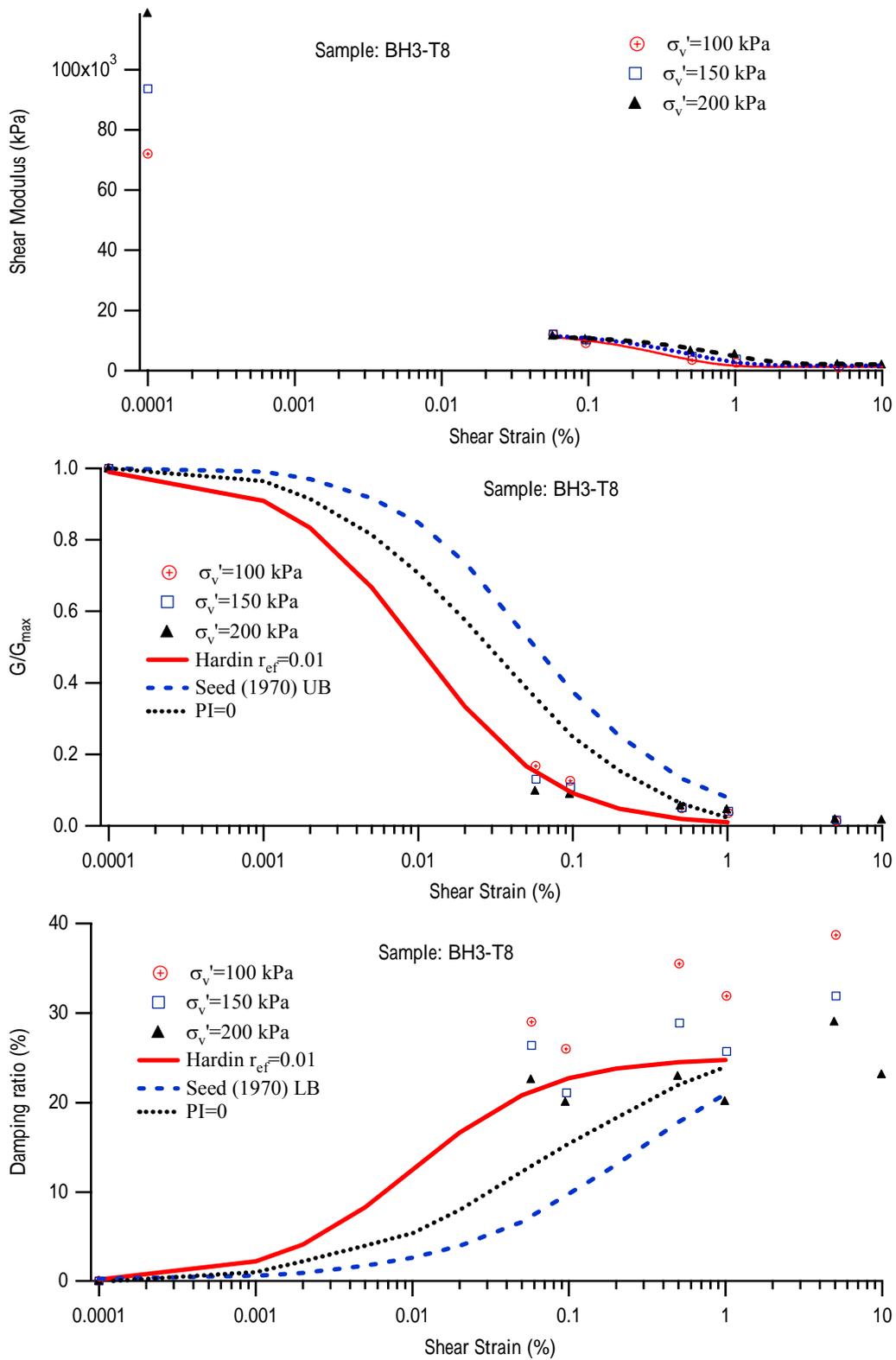


圖 4-9 下方土層 BH2-T2 動態特性

### 4.3 土壤液化試驗結果

進行單剪液化試驗時，將完成飽和之試體以垂直有效應力 150 kPa 進行  $K_0$  壓密，再以應力控制方式施加固定應力震幅之反覆剪應力，試驗時剪動頻率為 1 Hz，剪動至超額孔隙水壓比達到 0.9 或剪應變震幅達到 3%，典型土壤液化試驗結果以試體編號 BH1-T1-L3 說明，如圖 4-10 所示，該試體之反覆剪力比為 0.4，試體於第 9 個週期時達到超額孔隙水壓比 0.9，進行三個以上不同剪應力震幅試驗，結果如圖 4-11 所示，以  $N=15$  定義其抵抗地震規模  $M_w=7.5$  之液化應力比( $CRR_{7.5}$ )為 0.375。

試驗土層其單剪液化試驗結果如圖 4-12 所示，進行三個以上不同剪應力震幅試驗，結果如圖 4-13 所示，以  $N=15$  定義其抵抗地震規模  $M_w=7.5$  之液化應力比( $CRR_{7.5}$ )為 0.276。下方土層單剪液化試驗結果如圖 4-14 所示，進行三個以上不同剪應力震幅試驗，結果如圖 4-15 所示，以  $N=15$  定義其抵抗地震規模  $M_w=7.5$  之液化應力比( $CRR_{7.5}$ )為 0.290，三種土層試體因含相當細粒料，因此與鬆砂之受剪行為有所差異。

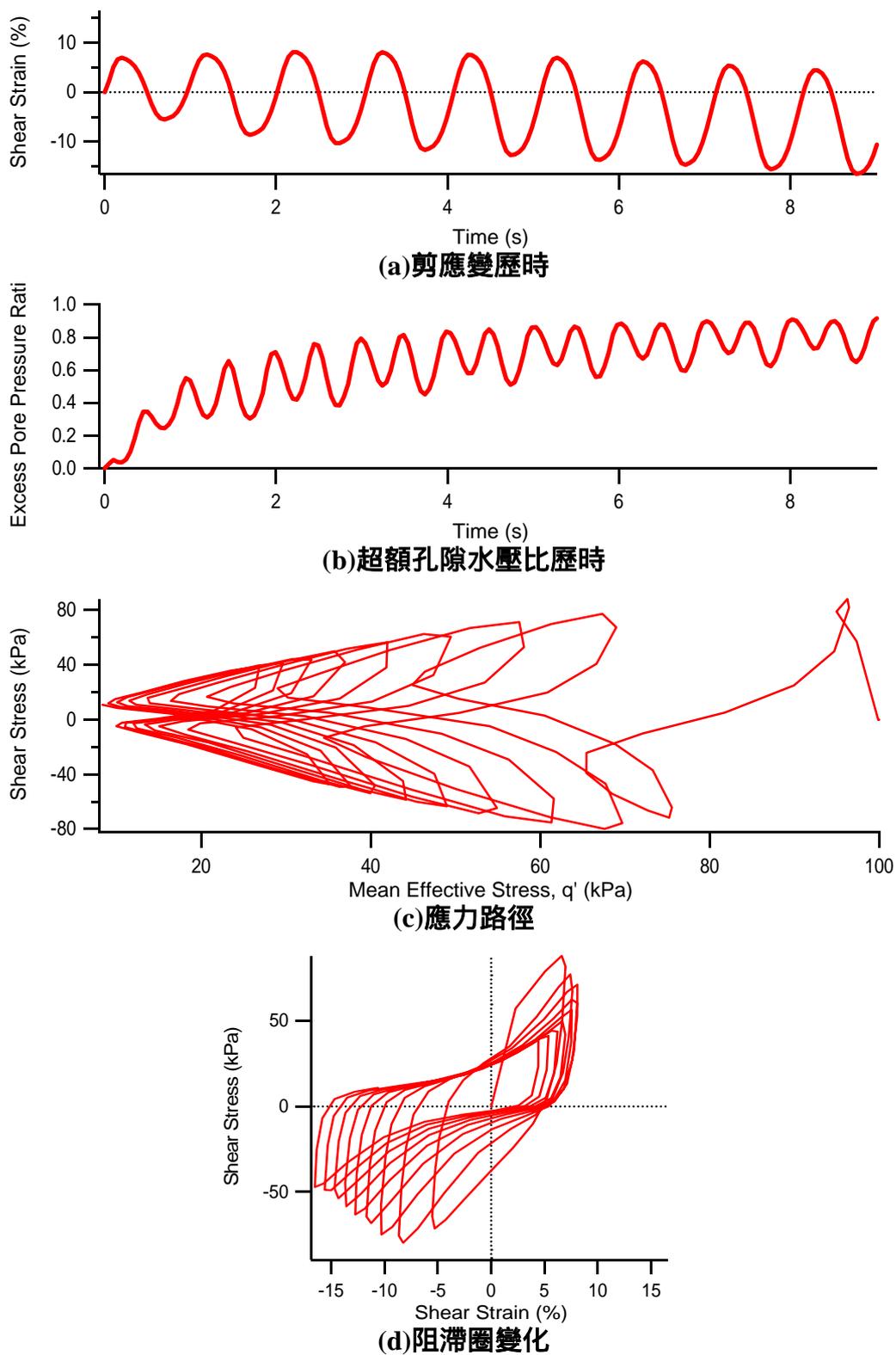


圖 4-10 回填單剪液化試驗結果(土樣編號: BH1-T1-L1)

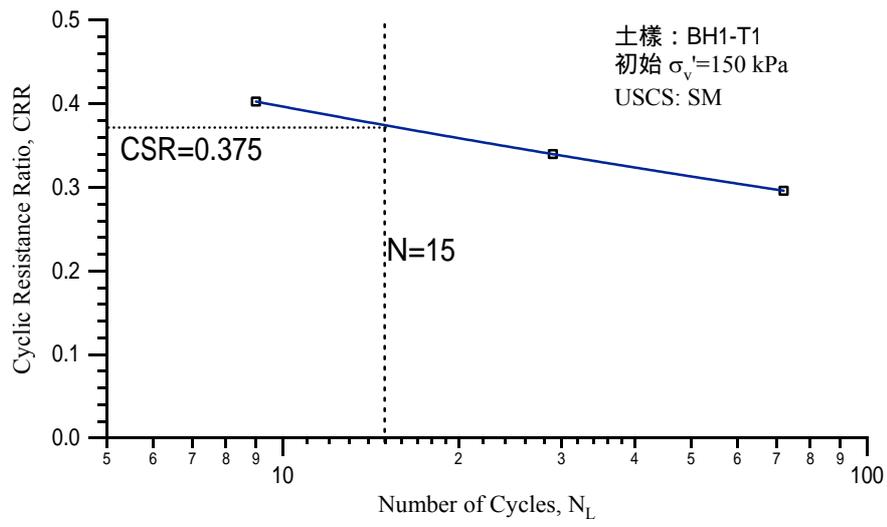
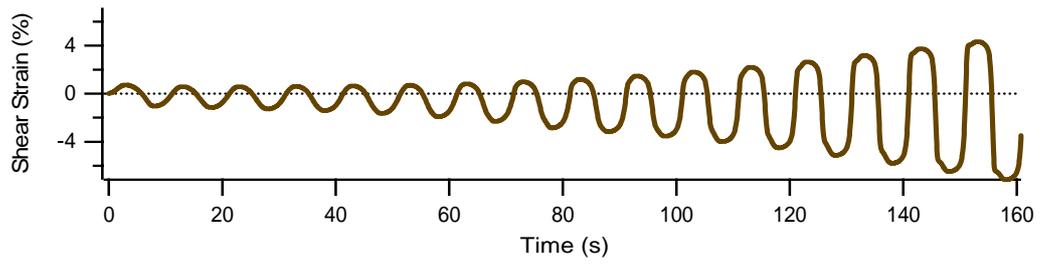
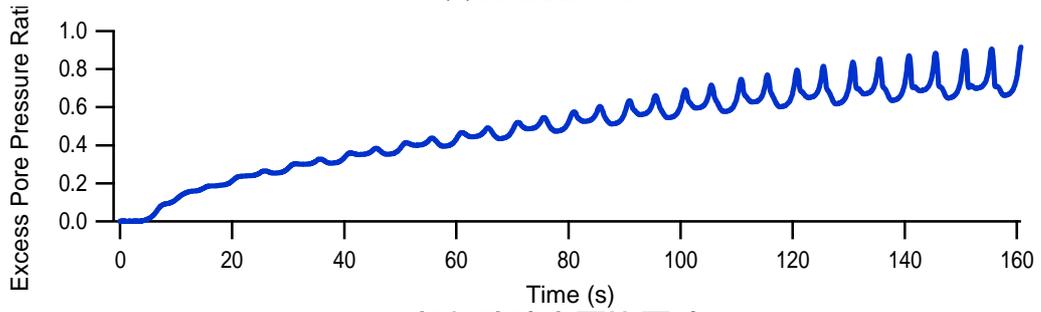


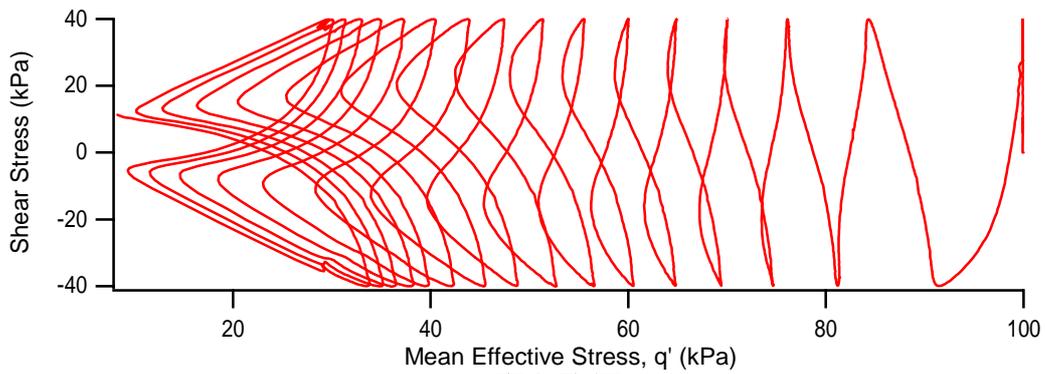
圖 4-11 回填土層抗液化強度(BH1-T1)



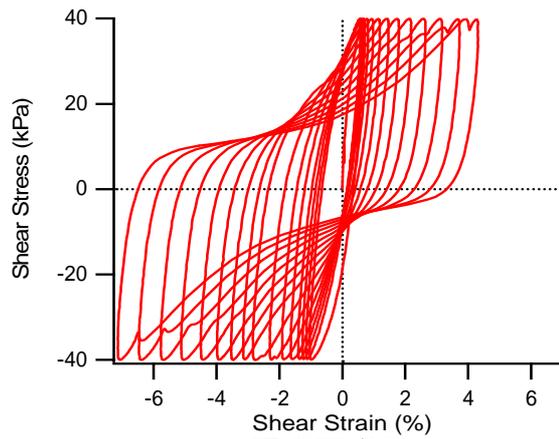
(a)剪應變歷時



(b)超額孔隙水壓比歷時



(c)應力路徑



(d)阻滯圈變化

圖 4-12 試驗土層單剪液化試驗結果(土樣編號: BH2-T2-L3)

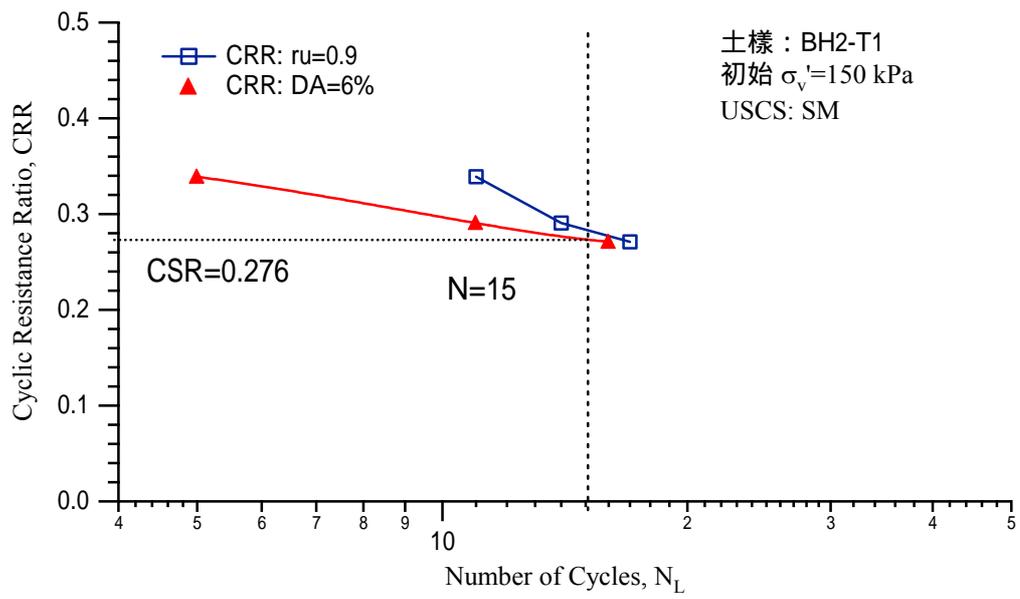


圖 4-13 試驗土層抗液化強度(BH2-T2)

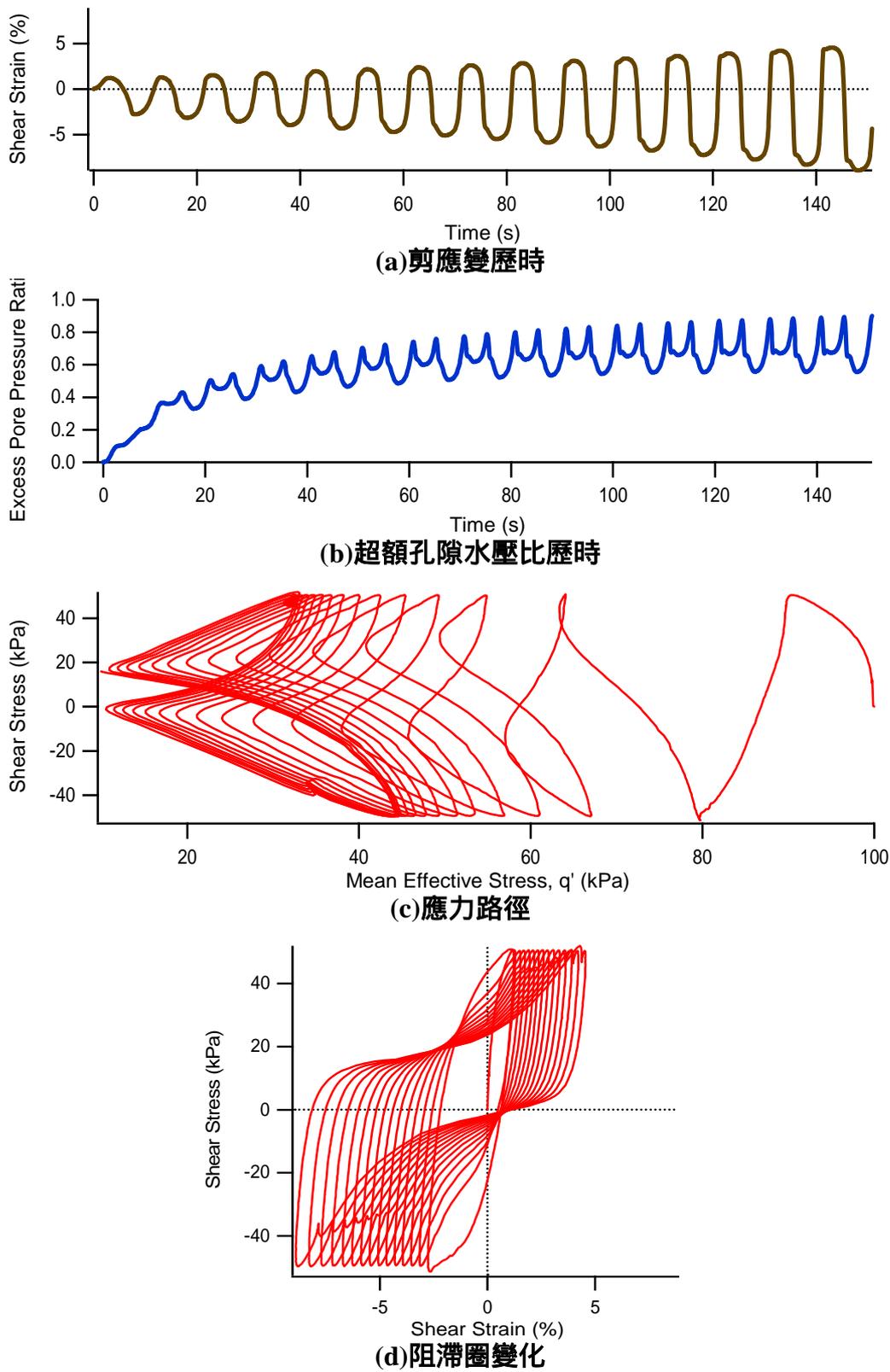


圖 4-14 下方土層單剪液化試驗結果(土樣編號: BH3-T8-L1)

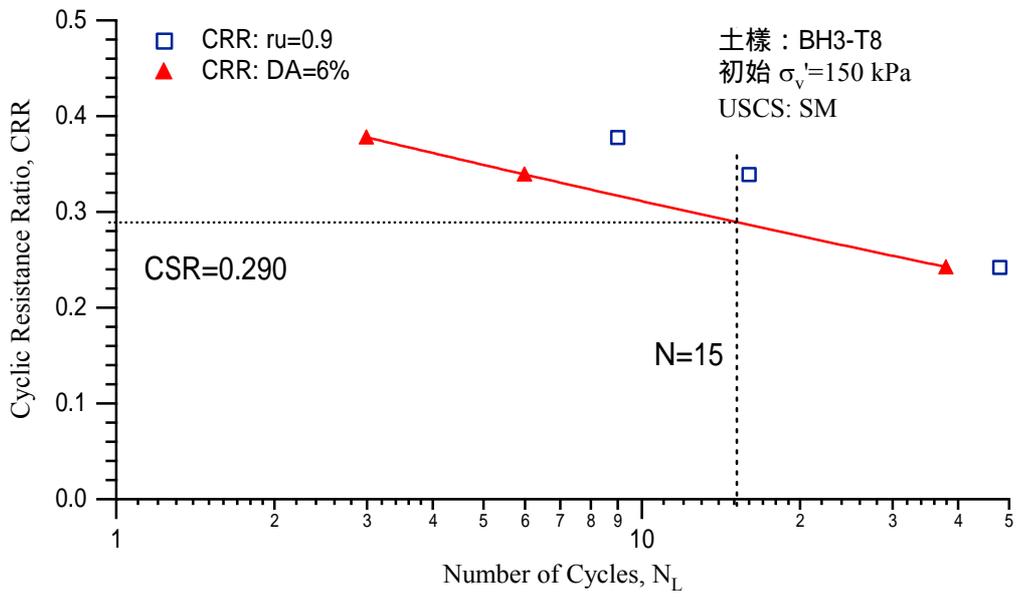


圖 4-15 下方土層抗液化強度(BH3-T8)

## 第五章 有效應力動態數值分析

### 5.1 分析原理與程序

#### 5.1.1 分析目的

本研究計畫採用之方法主要包括實體模型模擬(physical modeling)與數值模擬(numerical simulation)，現地土壤液化試驗為全尺寸實體模型模擬，數值模擬包括自由場與考慮土壤 - 結構互制(soil-structure interaction, SSI)反應之動態有效應力分析，實體模型模擬與數值模擬二種方法彼此間可作為規劃與驗證之用，其初步應用則包括棧橋式碼頭液化分析、現地全尺寸基樁動態試驗規劃與建立現有監測站定期檢測程序。

#### 5.1.2 分析原理

本計畫應用 FLAC 程式及其動態模組進行自由場分析及後續基樁與棧橋式碼頭液化分析，FLAC 為外顯(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，以求得該時接下各節點的速度，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 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。

### 5.1.3 FLAC Dynamic 介紹

進行動態分析時需考慮波傳行為在有限網格之影響，因此對應力波於邊界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 - 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，但其結果相當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增加而逐漸降低，亦即其攜帶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)，如表 4-1 所列及圖 4-5、4-7 及 4-9 所示。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，理論上較為廣大的邊界距離，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)。

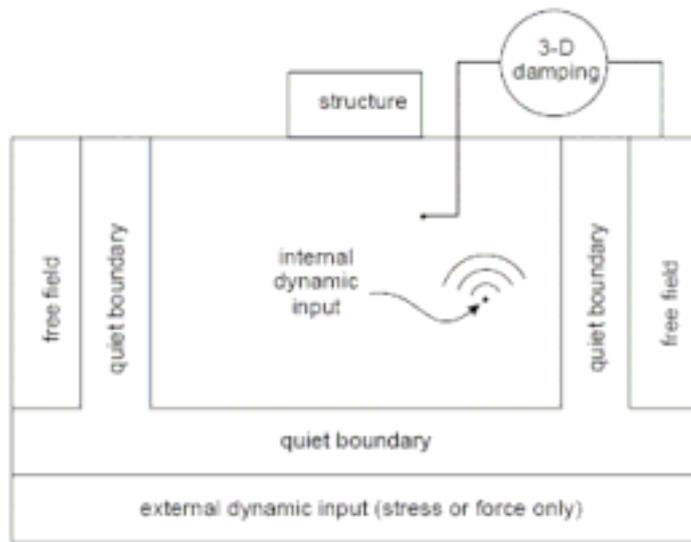
整合動態荷重與無限空間波傳邊界，可進行自由場動態分析，其數值模型如圖 5-1 所示，側向以黏滯邊界模擬，底部依其與網格土壤之相對勁度差異分為柔性基底(flexible base)或剛性基底(rigid base)，當網格底部之材料與下方勁度差異不大時，需以柔性基底模擬，亦即需允許應力波傳遞至下方而非反射回網格，因此需於底部增加黏滯邊界，而剛性基底則以固定邊界模擬即可，FLAC Dynamic 中另提供可模擬垂直側向邊界之邊界條件稱為自由場邊界(free-field boundaries)，其主要為自動施加黏滯邊界於兩側邊界節點。

### 3. 動態邊界條件

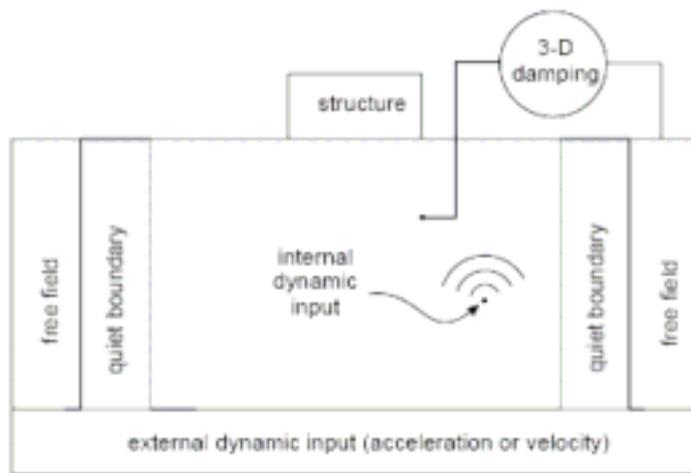
進行動態分析時需輸入適當之動態邊界條件，可以隨時間改變之荷重或格點運動量施加，FLAC Dynamic 所提供之動態輸入邊界包括作用於網格表面之應力或壓力歷時及作用於節點之荷重、速度或加速度歷時等，速度或加速度歷時一般多用於模擬自底部岩盤向上傳遞之地震波，對於底部為黏滯邊界之柔性基底，因速度或加速度邊界會使黏滯邊界無法運算，因此需轉換為應力邊界，其轉換公式為：

$$\sigma = 2(\rho V) \dot{u} \quad (5.1)$$

式中： $\sigma$  = 作用於底部之應力， $\rho$  = 底部材料總體密度， $V$  = 底部材料之體波波速， $\dot{u}$  = 垂直或平行於波傳方向之質點速度。



(a) Flexible base



(a) Rigid base

圖 5-1 考慮動態荷重之自由場物理模型圖

#### 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：

$$\frac{\Delta\varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp(-C_2(\frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma})) \quad (5.2)$$

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：

$$C_1 = 8.7(N_1)_{60}^{-1.25} \quad (5.3)$$

而  $C_2$  則可以下式計算：

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (5.4)$$

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。

#### 5.1.4 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：

$$f_u = \frac{V}{10 \times L} \quad (5.5)$$

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，為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，常以雷利阻尼形式施加。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)，以 Masing 模擬應力大小改變之阻滯阻尼(Hysteretic damping)，並以單剪試驗求得之 Hardin 公式中之 reference strain，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，分析時側向需施加自由場邊界，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。

## 5.2 自由場有效應力動態數值分析

利用鑽探、現地震測試驗及室內試驗成果建立試驗場址之幾何與材料條件，建立數值模型並以 FLAC Dynamic 進行自由場有效應力動態分析，模擬包括實際地震時由底部向上傳播之剪力波之效應及由地表簡諧震源產生動態荷重對下方土層所造成地盤反應及孔隙水壓力激發等，分析所得之土層反應及孔隙水壓力激發分佈可作為後續現地自由場液化試驗試驗配置及相關量測規劃之依據。

### 5.2.1 自由場地質模型

建立自由場分析數值模型所需相關條件與參數說明如下：

#### 1. 地質模型

臺中港區原為大甲溪與大肚溪沖積形成之西部海岸平原，主要為沉泥質砂、砂質沉泥、黏土質沉泥及沉泥質黏土等互相交雜而成，沈積土層之厚度，臺中港務局之鑽探資料顯示，鑽探深度至 60m 時仍為沈積砂土，依賴聖耀等(2003)於港區鑽探資料，港區土壤厚度大於 300 公尺以上，歷年來各單位在台中港區進行之地質鑽探資料顯示臺中港區自地表至高程-10m 之間以灰色細中砂為主，尤其靠近地表處大多屬不良級配中細砂，疏鬆至中等緊密程度。高程-10m 以下

土層以沉泥質細砂層為主，但細砂層間夾黏土質沉泥或沉泥質黏土薄層或厚層，且常不延續而間斷出現，黏土質沉泥或沉泥質黏土薄層厚度不等，在幾公分至 2m 以上，且隨深度及地點不同變化極大，導致 SPT-N 值在同一深度中分佈甚為散亂，地層頗為複雜，而在高程-25m 以下 N 值大都高於 30，屬中等緊密以上程度，而高程-80m 以下土層 N 值大都高於 100，屬極緊密堅硬之層次，可提供比較可靠的承載力(簡連貴等 2000)。

考慮液化土壤多發生於地表以下 20 公尺內顆粒性土壤，參考簡連貴等(2000)之結論，在高程-25m 以下 N 值大都高於 30，而本計畫之鑽探與震測深度小於 30 公尺，綜合上述考量，分析將僅考慮地表下 30m 深度之土層。依據現地鑽探結果，在 16 m 內之土壤其差異性頗大，以 BH-1、BH-2 與 BH-3 三孔進行比較，在地表至 6 m 間土壤差異性頗大，而表面波震測與跨孔亦有相當差異，因 MASW 所測為測線之平均值，因此以 MASW 之結果，由鑽探資料、地下水位與當地地層資料，將 30m 深度內之土壤分成 5 層，分層幾何資料如表 5-1 所列，其中 soil3 與 soil4 為同一土層，但將深度 20m 內土層另外分成一層以套用 Finn Model 進行孔隙水壓力激發模擬，分析時將地下水位假設為地表下 3m。

網格側向延伸範圍則考慮後續現地震動試驗之配置與現有現地監測站之配置，將現地監測站置於網格中間，且考慮網格之長寬比，使模擬區域為一寬度 40m 深度 30 m 之 40×30 之網格，每一網格均為 1m 之正方形，如圖 5-2 所示，各材料之相關參數整理如表 5-2 所示，土層彈性參數依震測所得剪力波速剖面計算，並假設 Poisson's ratio 為 0.3，土層模型中最低剪力波速為 125 m/s，網格寬度 1.0 m 時，可解析之最高頻率為 12.5 Hz，現地試驗時最高頻率為 8 Hz，分析時將輸入震波高於 8 Hz 之部分濾除。

考慮試驗土層上方與下方土層會產生液化，由於試驗土層  $(N_1)_{60} = 17$ ，上方與下方土層  $(N_1)_{60} = 21$ ，各土層之阻滯阻尼參數，採用 Hardin 形式之阻滯圈，依據第四章單剪試驗結果，其最接近之

參考應變值如表 5-2 所示，因缺乏滲透係數資料，因此採用港研中心在台中港區之試驗資料，均設為 $1 \times 10^{-7}$  m/s (蘇吉立及李延恭 2000)，有關於滲透係數之影響與實際之數值將於下一年度計畫中進行檢討。

表 5-1 自由場分析土層分佈

| 土層編號   | 深度(m)   | 土壤分類 | 液化條件 | 描述     |
|--------|---------|------|------|--------|
| Top    | 0 - 3   | SM   | 無    | 未飽和表土層 |
| Soil 1 | 3 - 6   | SM   | 可    | 回填土層   |
| Soil 2 | 6 - 11  | SP   | 可    | 試驗土層   |
| Soil 3 | 11 - 20 | SM   | 可    | 下方土層   |
| Soil 4 | 20 - 30 | SM   | 無    | 底部土壤   |

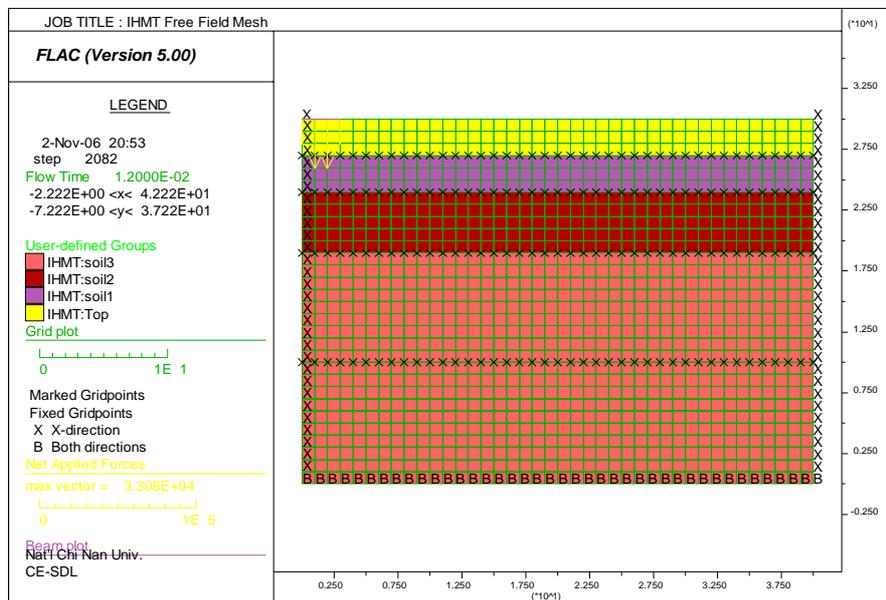


圖 5-2 自由場分析數值模型圖(含震動基礎)

表 5-2 自由場分析土層參數

|                             | 下方土層<br>Soil 4 | 下方土層<br>Soil 3 | 試驗土層<br>Soil 2 | 回填土層<br>Soil 1 | 表層<br>Top |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| Density(kg/m <sup>3</sup> ) | 2010           | 2010           | 1950           | 1900           | 1900      |
| Young's Modulus (MPa)       | 313.5          | 313.5          | 117            | 49             | 49        |
| Poisson's ratio             | 0.3            | 0.3            | 0.3            | 0.3            | 0.3       |
| Cohesion(Pa)                | 2000           | 2000           | 0              | 2000           | 2000      |
| Friction angle(degrees)     | 38             | 38             | 32             | 35             | 35        |
| Dilation angle(degrees)     | 0              | 0              | 0              | 0              | 0         |
| Dilation angle(degrees)     | 0              | 0              | 0              | 0              | 0         |
| Reference strain            | 0.01           | 0.01           | 0.03           | 0.08           | 0.08      |
| Finn Parameter C1           | --             | 0.194          | 0.25           | 0.194          | --        |
| Finn Parameter C2           | --             | 2.07           | 1.59           | 2.07           | --        |

進行動態分析前需先達成重力平衡、地下水穩定及考慮邊界荷重之靜力平衡，由於現地已澆製一震動源基礎，模擬時以混凝土單位重乘以厚度 1.25 m 以壓力型態加於左側上方三個元素，其他邊界條件包括左右兩側格點於水平向固定，下方格點垂直與水平向均固定，地下水位設於地表下 3 m，且兩側均加上與地下水位同高之水壓力。

## 2. 動態荷重與邊界

進行動態分析時，將兩側邊界設為自由場邊界，底部設為水平與垂直雙向黏滯邊界，以使自地表反射之地震波於底部邊界不會造成反射。由於此自由場網格尚須用於模擬地表震動基礎震動產生由上向下傳遞之應力波，因此動態荷重施加形式包括於震動基礎所在網格分別施加水平與垂直向之簡諧荷重，以模擬現地震動試驗，另外為模擬由下往上传播之剪力波，因此將地震加速度紀錄積分為速度紀錄，並經濾除 8 Hz 以上部分後，在底部以剪應力歷時施加。

為觀測模擬結果，將設定需紀錄之網格位置與現地配置相同，此外紀錄反應之底部加速度以與輸入值比較，另亦撰寫相關 Fish 以紀錄超額孔隙水壓力、剪應變歷時、超額孔隙水壓比、各元素最大超額孔隙水壓比及最大剪應變等小程式。

### 5.3 分析結果與討論

本計畫於自由場有效應力動態分析計進行三組分析，各分析案例整理如表 5-3 所示，其中案例編號 FF-E 為彈性均勻土層，用來驗證網格與程式之準確性，案例編號 FF-EQ 為考慮現地土層與震源基礎模型，但輸入集集地震紀錄 TCU059 於底部，案例編號 FF-HS 為依表 5-1 及 5-2 所建構之模型，但考慮基礎單位重之荷重並模擬現地震源試驗之試驗情形，各案例結果說明如下。

表 5-3 自由場分析總表

| 案例編號  | 材料      | 靜態荷重 | 動態荷重                  |
|-------|---------|------|-----------------------|
| FF-E  | Elastic | 無    | 底部 sin 波              |
| FF-EQ | MC+Finn | 基礎荷重 | 底部地震波                 |
| FF-HS | MC+Finn | 基礎荷重 | 基礎水平正弦波震幅 15 噸頻率 7 Hz |

#### 5.3.1 彈性均勻土層

此案例之目的為驗證模型與程式其彈性波傳行為與阻尼之效應，將網格設為均勻之彈性材料，其剪力波速為 180 m/s，其他條件不變，自底部輸入一固定頻率 5 Hz 之正弦波，紀錄不同深度之加速度歷時與應力應變行為，圖 5-3 為底部與地表自由面加速度歷時，其結果顯示地表(自由面)震幅為底部之 2 倍，自底部上傳至地表之波速為 180 m/s，且底部無反射波折回，顯示相關邊界條件符合所要求。

利用此一模型可探討阻尼參數波傳行為之影響，圖 5-4 為設定為

Hysteric Hardin  $\text{ref}=0.03$  時之影響，其結果顯示加速度歷時產生高頻訊號且震幅降低，而最底部之元素其阻滯圈(圖 5-4(b))滿足 Masing rule 與阻尼比，且塑性應變造成之平移亦可有效模擬。

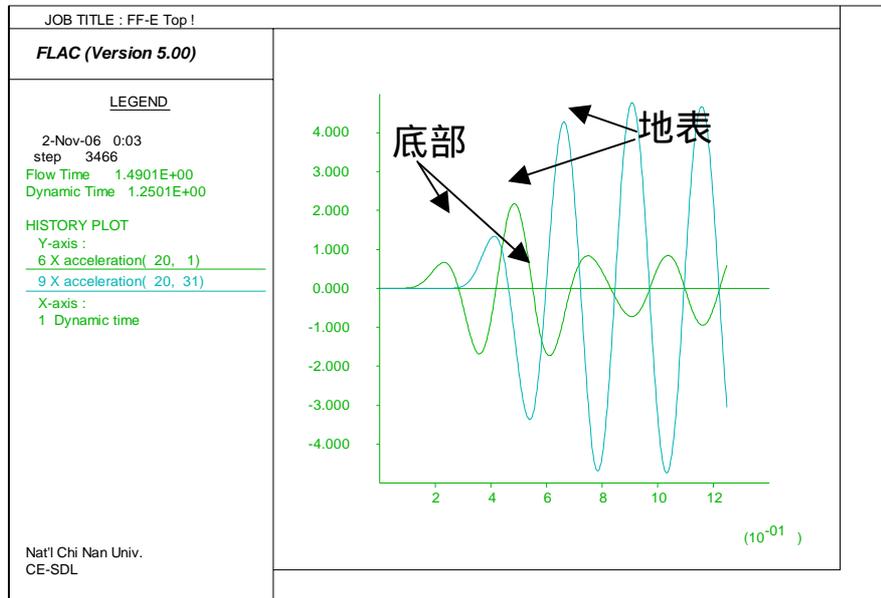
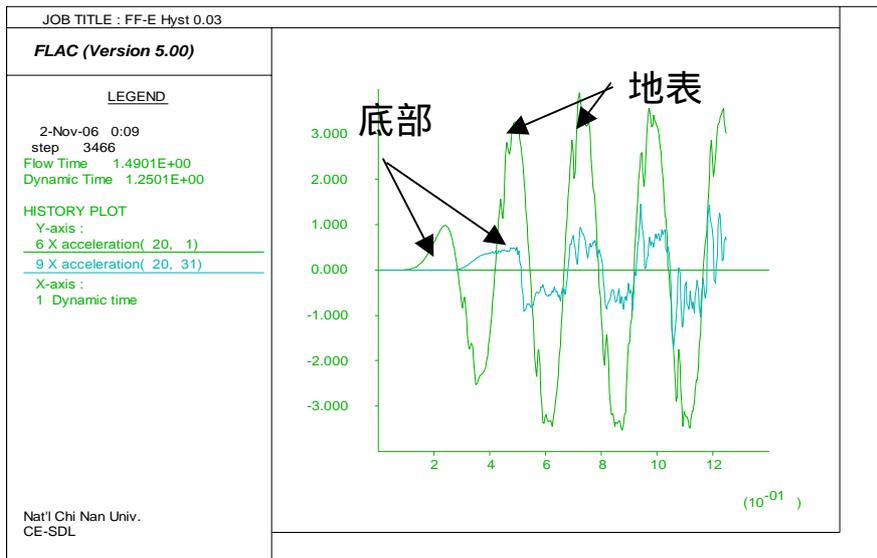


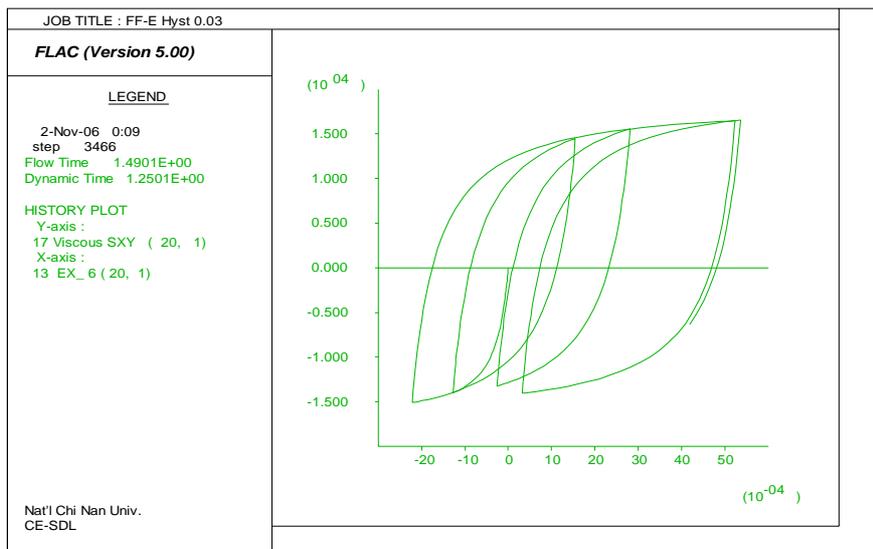
圖 5-3 案例編號 FF-E 之底部與表面加速度歷時圖

### 5.3.2 地震波傳遞模擬

本案例以圖 5-2 與表 5-3 所建構之地質模型，以集集地震中清水國小之紀錄 TCU050 轉換為低於 8 Hz 之速度歷時(如圖 5-5 所示)，由於造成底部節點 1 m/s 速度所需之剪應力為 980880 Pa，引此將速度歷時乘上 980880 轉換成施加於模型底部元素之剪應力歷時，模擬地震波自下往上傳遞之行為，考慮液化發生於 20 m 深度內之飽和土層，並將回填土層與下方土層其 Finn 參數設為相同。觀測之記錄點與現地液化觀測站與地表震源震動試驗量測配置相同(如圖 5-6 所示)，主要震動期間為 15 至 28 秒，其底部與地表加速度歷時如圖 5-7 所示，在圖 5-6 中 Sensor 6 m 與 8 m 對應網格之超額孔隙水壓力歷時如圖 5-8 所示，在 8 m 激發 8.6 kPa 之超額孔隙水壓力，在 6 m 深度激發 7.5 kPa 之超額孔隙水壓力。



(a)



(b)

圖 5-4 阻尼參數影響(ref= 0.03)

(a)底部與地表加速度歷時 (b)底部元素阻滯圈

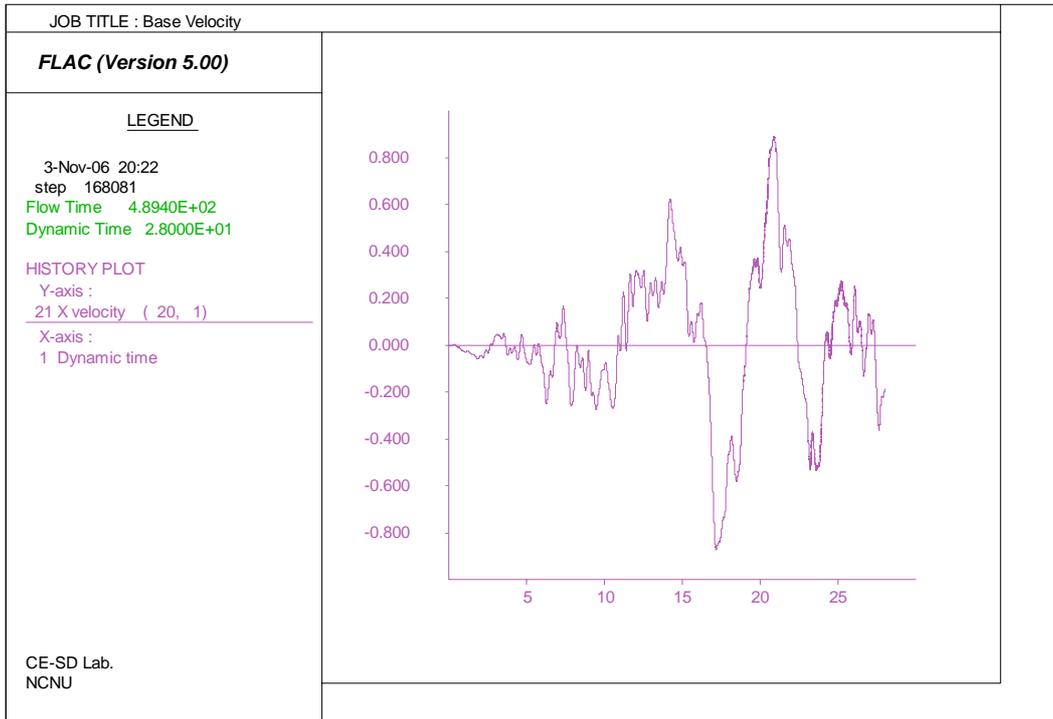
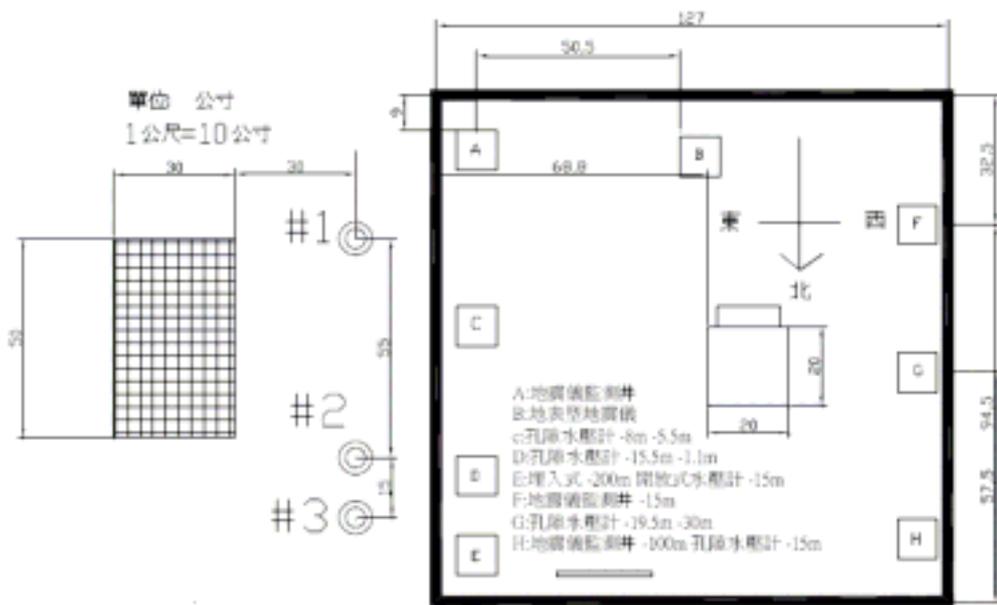
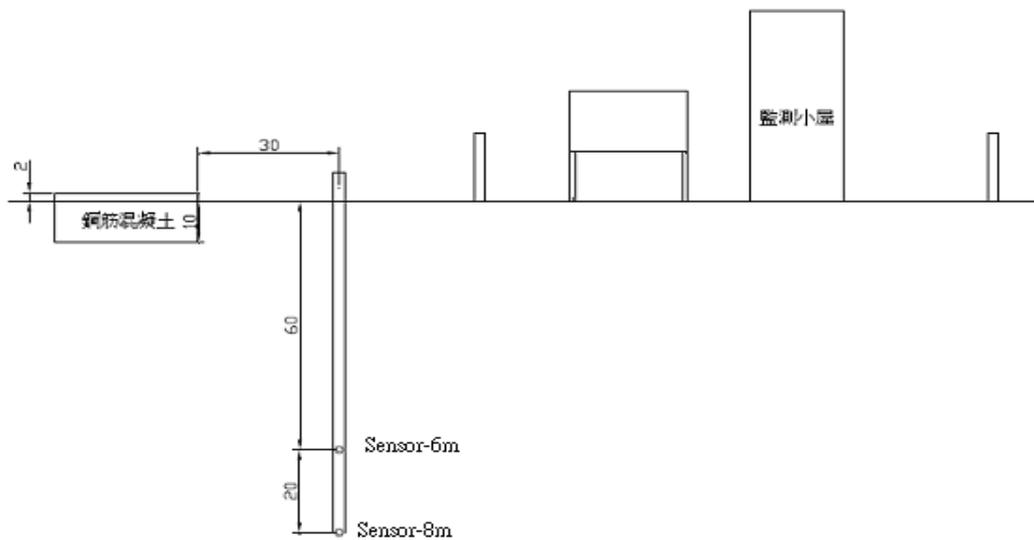


圖 5-5 輸入之 TCU059 濾除 8 Hz 以上之速度歷時(0-25 sec)



(a)



(b)

圖 5-6 試驗場現場配置圖 (a)現場配置上視圖 (b)現場配置剖面圖

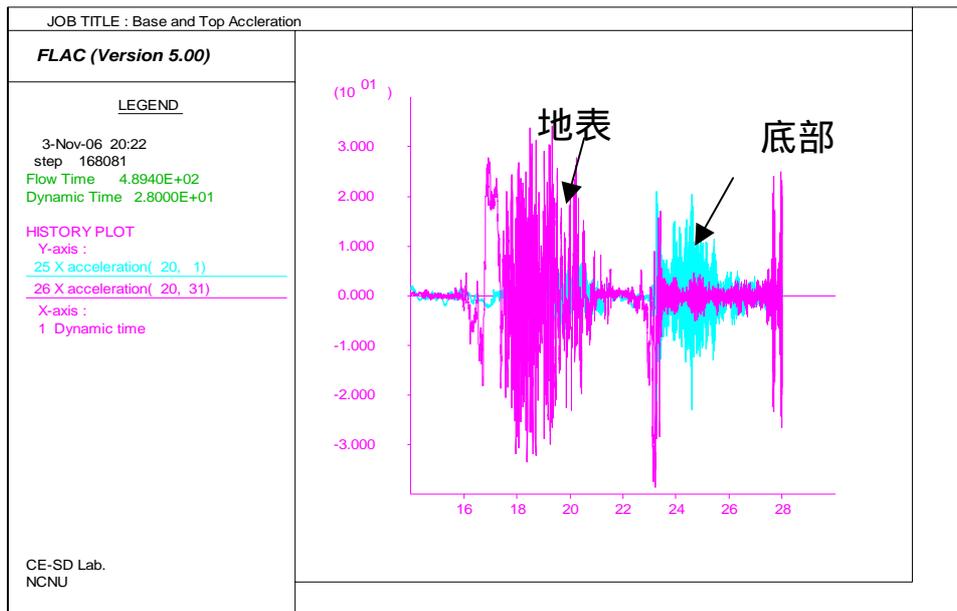


圖 5-7 主要震動期間(15-28 sec)之底部與地表加速度歷時

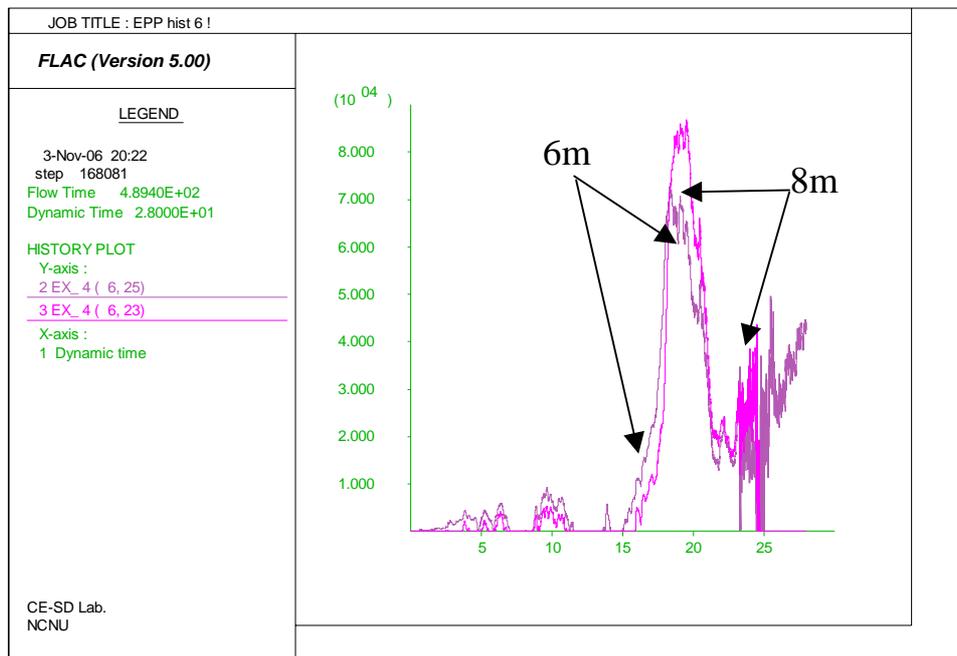


圖 5-8 6m (6,25)與 8m (6,23)所激發之超額孔隙水壓力歷時圖

定義超額孔隙水壓比( $r_u$ )為超額孔隙水壓力( $\Delta u$ )與初始平均有效應力( $\sigma'_m = \frac{1}{3}(\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z)$ )之比值,震動過程中各元素最大超額孔隙水壓比分佈如圖 5-9 所示,此圖顯示在試驗土層上下 3m 之土層發生或接近液化狀態,且試驗土層上方之飽和回填土層因向上之滲流而產生超過 1 之超額孔隙水壓比,模擬結果基本上吻合原先設定之液化條件。模擬過程雖在 29.9 秒因在 soil 2 與 soil 3 交界(20 m 深)之右側網格變形過大而使導致程式模擬終止,但相關結果已顯示所建立之模型可模擬現地之液化現象。

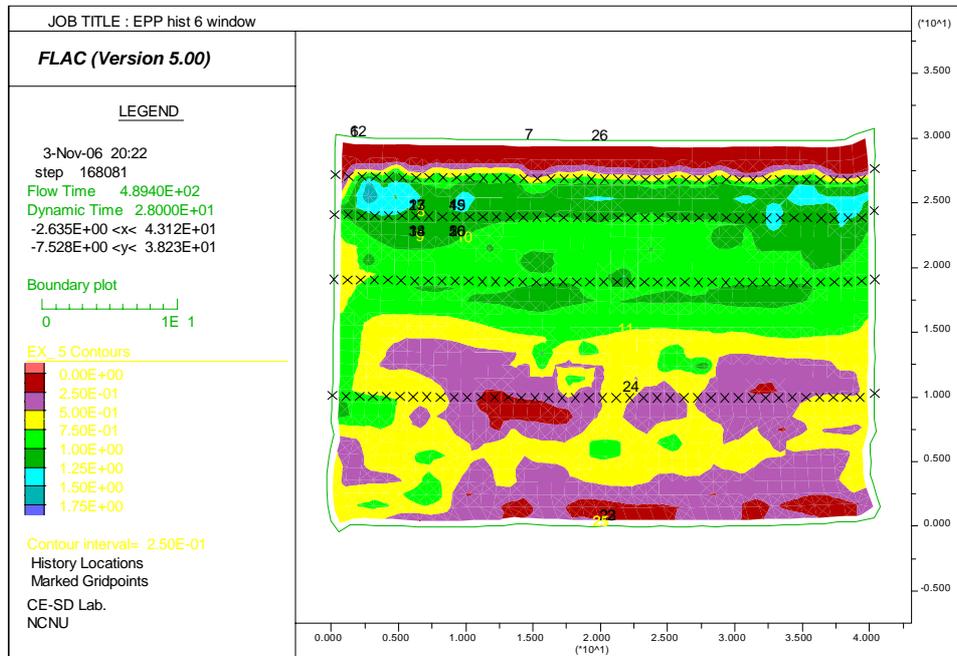


圖 5-9 最大超額孔隙水壓比分佈圖

### 5.3.3 地表水平向震源試驗模擬

利用與 5.3.2 節相同之網格與材料參數，於左上方加上基礎面積為 15 平方公尺，厚度為 1.25m 之混凝土基礎之自重，基礎尺寸為 3 公尺，在左上方三個元素表面施加垂直向下之應力，待靜力平衡後在相同元素表面施加水平向應力(剪應力)等於震源最大輸出震幅為 15 噸，動態荷重為頻率為 7 Hz 之正弦波，以模擬現地水平震源試驗時之反應，模擬時以作用 120 週期為延時，相關歷時監測點與物理量與現地配置相仿。

圖 5-6 中距基礎邊緣 3.5 m 之深度 6.5 m (sensor-6m)與 8.5 m (sensor-8m) 及距基礎邊緣 5.5 m 深度 7.5 m 三處之超額孔隙水壓力歷時紀錄如圖 5-10 所示，相同深度下距基礎越遠之處其激發之超額孔隙水壓力較小，而相同水平距離下，深度越深其激發之超額孔隙水壓力較大，Sensor-6m 處激發之殘餘孔隙水壓力約 23 kPa，現地觀測結果為 10 kPa，且孔隙水壓激發曲線近似，其結果與模擬時之基礎面積為實際面積之 2 倍，即輸入之能量為實際試驗之 2 倍有關。

基礎正下方 6.5m Sensor-6m 與 Sensor-8m 之超額孔隙水壓比歷時如圖 5-11 所示，相同水平距離下，試驗土層中不同深度之地點其  $r_u$  相近，但基礎下方之  $r_u$  值除了較其他地點大以外，在 30 個週期後殘餘孔隙水壓值趨於定值 ( $r_u \approx 0.3$ )，顯示其孔隙水壓力激發與消散速率達到平衡，而在試驗區域，各元素之中點紀錄之最大超額孔隙水壓比包絡線如圖 5-12 所示，結果顯示量測區域激發之最大超額孔隙水壓比約在 0.3 與 0.4 間，現地量測值約在 0.15 至 0.2 間。

Sensor-6m 與港研中心地表加速度計所在之水平向加速度歷時如圖 5-13 所示，孔下加速度震幅固定，而地表加速度則有較大變異，Sensor-8m 之加速度震幅為 50 gal，地表為 150 gal，現地量值則分別為 10 gal 與 50 gal，此誤差與其模擬能量相關。

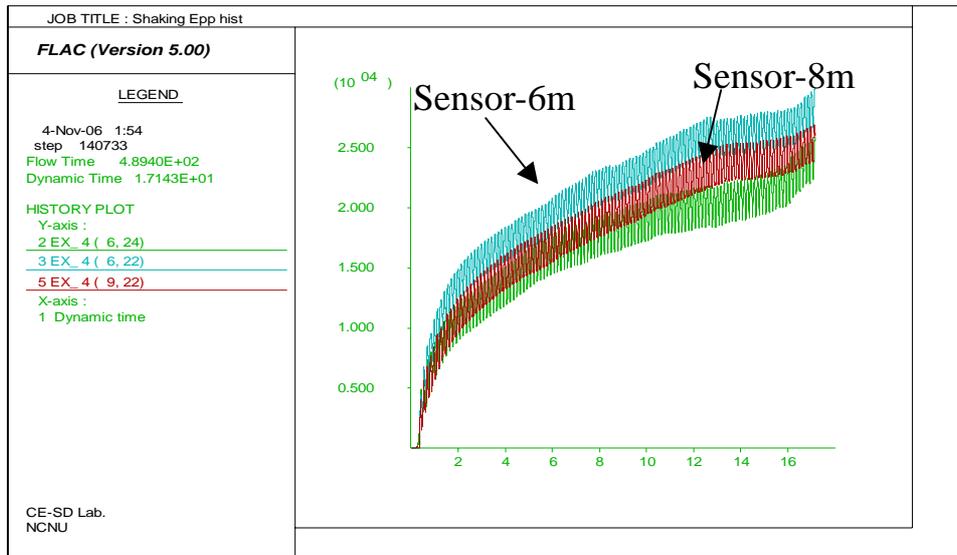


圖 5-10 Sensor-6 m、Sensor-8 m 與距基礎 6.5m 深度 8.5 m 處超額孔隙水壓力 (單位 Pa) 歷時圖

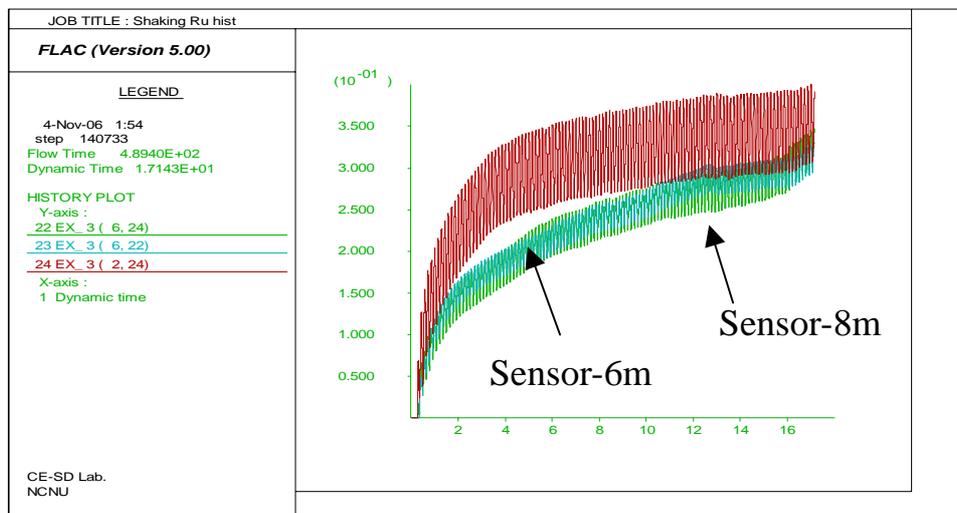


圖 5-11 Sensor-6 m、Sensor-8 m 與距基礎正下方深度 6.5 m 處超額孔隙水壓比(ru)歷時圖

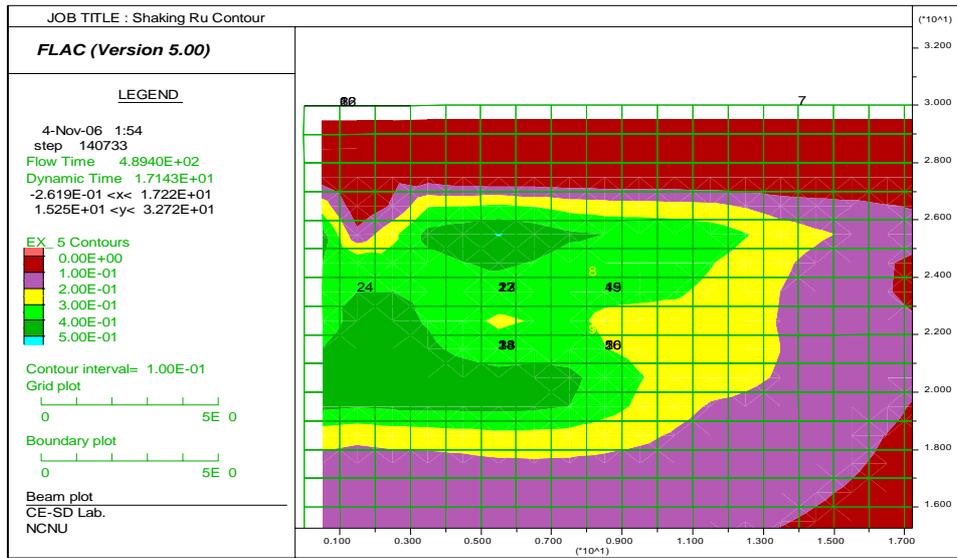


圖 5-12 水平震動基礎在量測區之最大超額孔隙水壓比包絡線

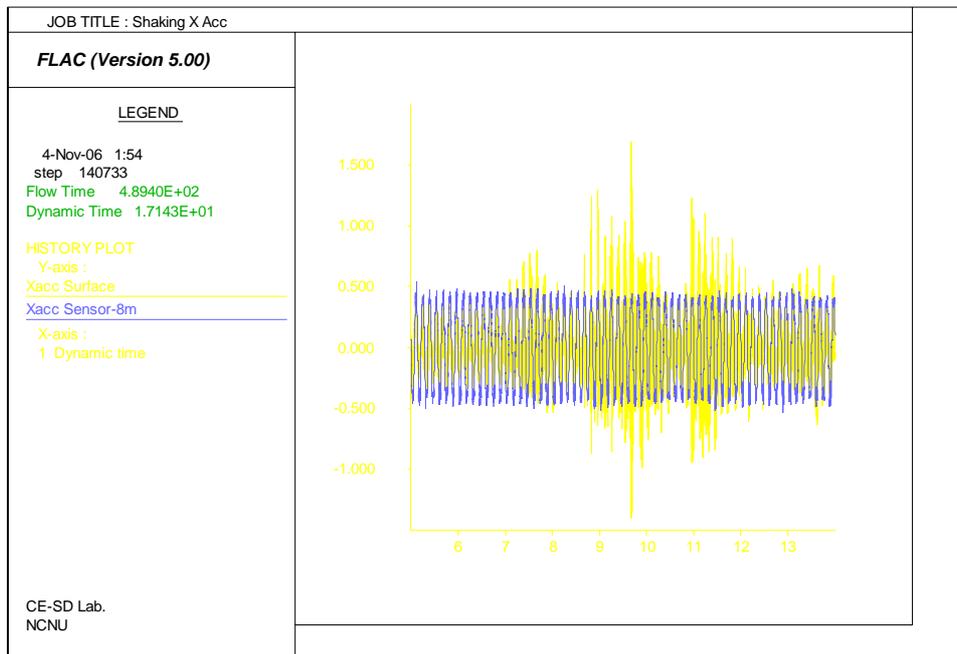


圖 5-13 Sensor-8m 與港研中心地表加速度計所在位置水平加速度歷時

觀察震動反應與孔隙水壓力變化結果顯示以此試驗配置僅能於靠近震源基礎附近區域激發部分超額孔隙水壓力，其原因與現地土層結構有關，現地大型簡諧震源試驗結果與模擬結果大略吻合，因此需考慮其他震源與試驗系統配置。

## 第六章 棧橋式碼頭有效應力動態數值分析

本章延伸第五章自由場分析之成果，加入樑與基樁二種結構元素，模擬考慮液化之棧橋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與臺中港相關文獻選用，碼頭剖面則以臺中港 9-11 號碼頭為案例，結果將可作為碼頭監測系統規劃之參考。

### 6.1 分析原理與程序

#### 6.1.1 分析原理

液化土壤 - 基樁 - 上部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基樁與上部結構震動，且上部結構之震動亦會影響下方土壤之動態行為，分析液化土層之基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基樁 - 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 - 基樁之互制行為。

非耦合分析物理模型如圖 2.4 所示，將基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，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，近場區則考慮土壤 - 基樁互制效應之土層反應，近場區之 Winkler 彈簧多採用可模擬非線性彈塑性質之彈簧。

本研究將以第五章之自由場分析成果，加入 FLAC 中之基樁元素 (pile element)，並以樑元素 (beam element) 與基樁結合，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 - 基樁動態分析，模擬棧橋式碼頭之動態反應。

### 6.1.2 樑元素與基樁元素

本研究之棧橋式碼頭主要由樑元素與基樁元素組成，棧橋之樓版以樑元素模擬，樑元素為 2 維 3 自由度元素，可傳遞軸向力與彎距，在 FLAC 中其幾何特性以節點(node)描述，其與接觸之土壤可以連結接觸之土壤格點或以介面元素連結。

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圖 2-4 之近場區(near field)行為，而周圍土壤則以自由場中之土壤元素模擬。

## 6.2 數值分析案例模型

### 6.2.1 臺中港 9-11 棧橋式碼頭配置

棧橋式碼頭之結構為基樁上連接橫樑再鋪以床版組成，使在穩定之斜坡維持穩定，基樁包含直立基樁與斜樁，直立基樁用以支撐結構自重與工作載重，斜樁可支撐海浪與地震時之橫向水平力。

臺中港 9-11 號碼頭其配置剖面如圖 6-1 所示，基樁為外徑 0.6 m 內徑 0.3 m 之預力混凝土空心樁，長度為 30 m，基樁間距為 2.5 m，拋石區其內摩擦角為 40 度以上。

### 6.2.2 台中港棧橋式碼頭液化災害

921 地震後臺中港區 4000 多公頃內有多處地區發現液化現象，包括 1 至 4A 號碼頭後線作業區、9 至 11 號碼頭貨櫃堆置場、12 號碼頭倉庫後線之陸側場地等，其中 1 至 4A 號碼頭為沈箱式碼頭，19 至 11 號碼頭屬棧橋式碼頭，震後調查發現 9 至 11 號碼頭後線作業區及道路發生噴砂、崩裂，後線作業區平均差異沉陷約 10~15cm，棧橋式碼頭在面海向有 10~20cm 之垂直與水平向位移，但造成之災害及損失均不大。

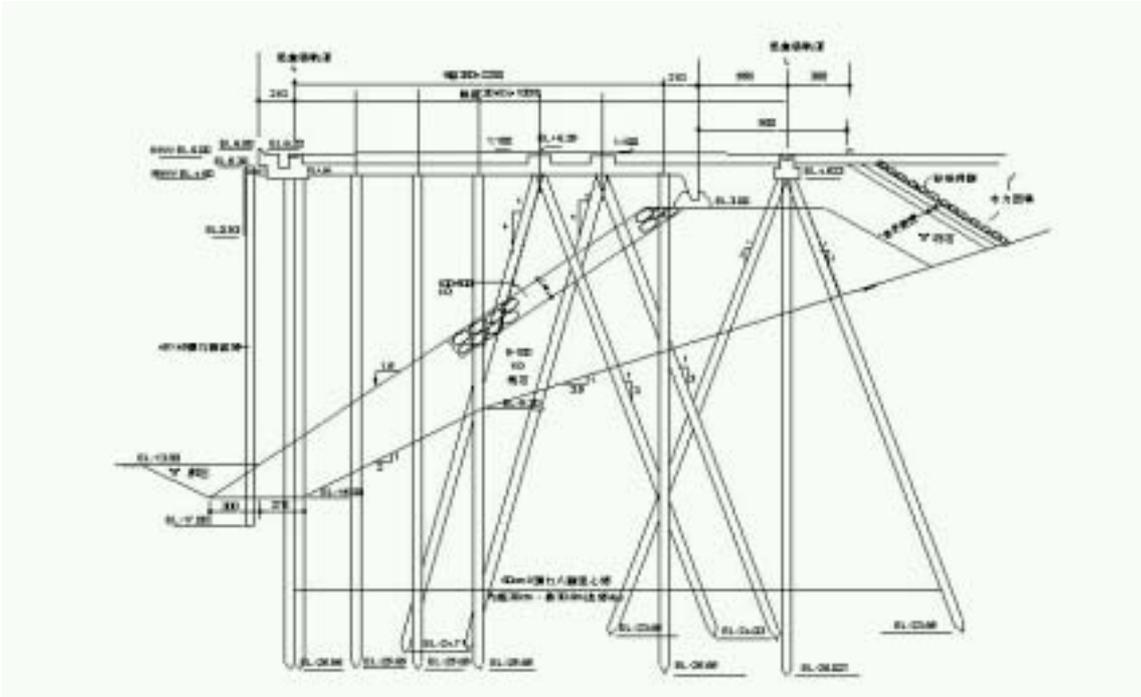


圖 6-1 臺中港 9-11 號碼頭配置圖(基樁間距 2.5 m)

### 6.2.3 數值分析模型

本案例分析主要包括三個階段，分別為回填與構築斜坡之穩定分析、棧橋結構施工後穩定性分析及動態有效應力分析，依此三階段規劃之之數值模擬共分七個步驟：1) 斜坡網格建立；2) 材料強度參數指定並重力平衡；3) 設定靜態運動與海水邊界條件；4) 加入橫樑與基樁元素完成力學平衡；5) 使用 Finn 模式於可能液化土壤；6) 給定阻尼參數和動態邊界條件；7) 規劃監測點並施加地震力。分別敘述如下：

#### 1. 斜坡網格建立

本案例所建立之網格乃依照台中港 9 至 11 號棧橋式碼頭的設計斷面圖（圖 6-1），建立一 45×19 之網格數，模擬長 131 公尺高 48 公尺之範圍，礫石回填區後之回填砂涵蓋 30m，以 gen line 指令將網格分為四區，海床土壤假設不可液化土層。

## 2. 材料強度參數指定並重力平衡

材料強度參數則參考賴聖耀及謝明志(2000)、蘇吉立及李延恭(2000) 和黃俊鴻等 (2000) 等人之現地試驗和室內試驗結果，以及自由場分析之成果做適度折減，海床土壤假設其 $(N_1)_{60}=22$ ，回填砂其 $(N_1)_{60}=10$ ，各分區土壤資料如表 6-1 所列，建立之網格如圖 6-2 所示，以此網格執行重力平衡。

## 3. 設定靜態運動與水位邊界條件

靜態邊界條件為左右兩邊土層固定 x 軸，只允許縱向變位；底部 x 與 y 方向均固定，水位設於碼頭下方 2m，左右邊界水位均相同，並在左側水下邊坡施加水壓力。

## 4. 加入橫樑與基樁元素並完成力學平衡

以指定左右端點方式並配和自動分割方式產生樑與基樁，每 6m 一個樑元素，並將樑之二端點與土壤連結，30m 基樁分成 10 個元素，各結構元素之參數如表 6-2 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 6-3 所列，結構元素建立後之網格如圖 6-3 所示，以此網格進行力學平衡。

## 5. 使用 Finn 模式土壤

由於臺中港底部為原沖積土層，具有凝聚力 0.03~0.05MPa，假設其不會發生土壤液化現象，因此本案例只於背填砂區域使用 Finn 模式將 soil 2 改為 Finn 土壤，參數如表 6.1 所示，假設土壤之 $(N_1)_{60}=10$ 、土壤滲透係數為 $10^{-7}$  m/s，土壤參數均為假設，其影響將於下一年度以參數分析進行探討並考慮進行原樣或重模試體進行試驗。

## 6. 給予阻尼參數和動態邊界條件

結構元素以 Rayleigh 阻尼設為勁度之 2%，土壤則以 Hardin 型態之阻滯阻尼，所需之參數如表 6-1 所列，與自由場分析類似，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 x 與 y 均啟動之安定邊界(Quiet Boundary) 設定。

表 6.1 棧橋式碼頭分析土層參數表

|                             | 底部土壤<br>Soil 1 | 回填砂層<br>Soil 2 | 礫石回填區<br>Gravel |
|-----------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| density(kg/m <sup>3</sup> ) | 1800           | 1800           | 1900            |
| Shear Modulus (MPa)         | 80             | 30             | 140             |
| Bulk Modulus (MPa)          | 133            | 68             | 310             |
| Cohesion(Pa)                | 50000          | 0              | 0               |
| Friction angle(degrees)     | 33             | 30             | 40              |
| Dilation angle(degrees)     | 0              | 0              | 0               |
| Dilation angle(degrees)     | 0              | 0              | 0               |
| Hardin $r_{ef}$             | 0.01           | 0.08           | --              |
| Finn Parameter C1           | --             | 0.49           | --              |
| Finn Parameter C2           | --             | 0.82           | --              |

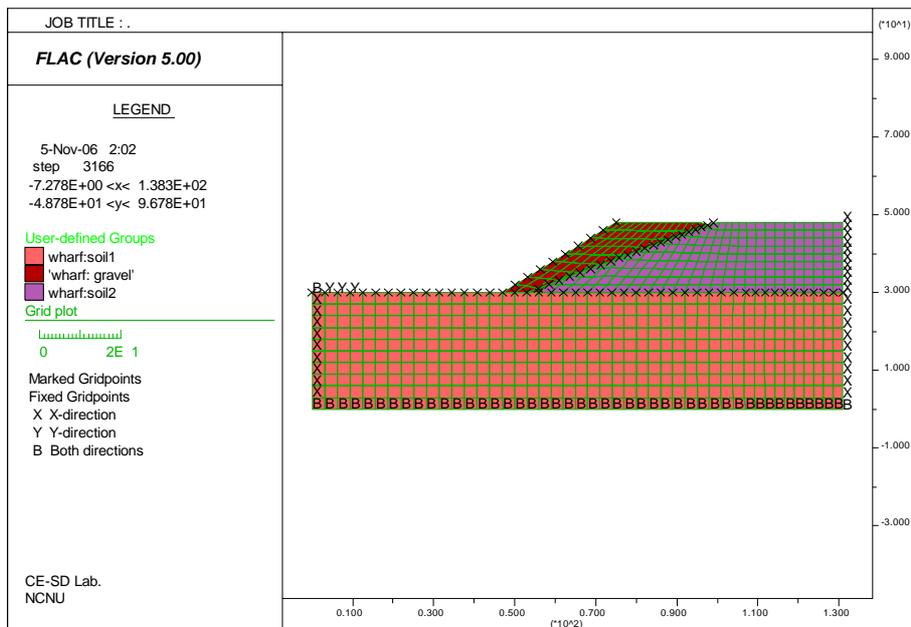


圖 6-2 棧橋式碼頭斜坡網格與土壤分區圖

表 6-2 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) |
|-------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| Beams | 2.0                   | 2.364×10 <sup>-3</sup>              | 0.305                              | 2000                               | —                  |
| Piles | 2.0                   | 6×10 <sup>-3</sup>                  | 0.212                              | 2000                               | 1.88               |

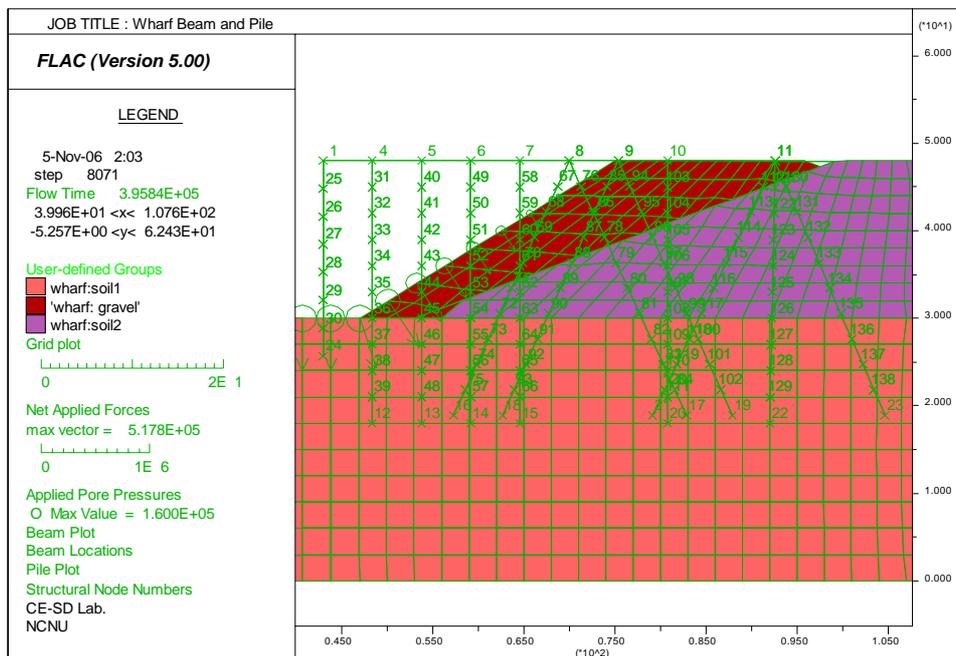


圖 6-3 橫樑與基樁元素位置與節點編號圖

表 6-3 基樁元素中之 Mohr-Columb 介面彈簧參數表

|               | Normal Stiffness (GN/m/m) | Shear Stiffness (GN/m/m) | Normal Cohesion (N/m) | Shear Cohesion (N/m) | Normal Friction (degrees) | Shear Friction (degrees) |
|---------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|
| Soil 1 & Grav | 1.0                       | 1.0                      | 1000                  | 1000                 | 30                        | 30                       |
| Soil 2        | 1.0                       | 1.0                      | 1000                  | 1000                 | 30                        | 30                       |

## 7. 規劃監測點並施加地震力

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，本案例所使用之地震記錄為位於台中港東南方 4.7km 處之清水國小測站 (TCU059) 於 921 地震之地震記錄，取最大震動方向 (NS) 的主要作用時間 35 秒作為動態輸入，其速度(單位 m/s)與加速度(單位(g))歷時如圖 6-4 所示。

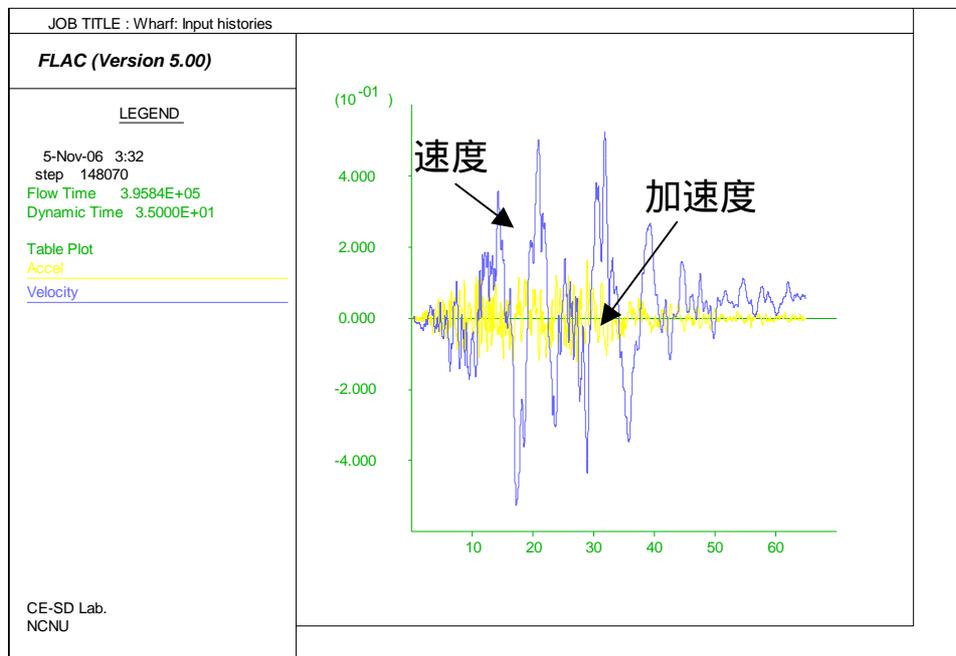


圖 6-4 TCU059 速度與加速度歷時圖

## 6.3 分析結果與討論

依據前述數值模型與分析程序，結果說明與討論如下：

### 6.3.1 地盤震動反應

網格底部格點、坡面下方基樁施做區與碼頭右側與土壤相交處之

水平加速度歷時如圖 6-5 所示，結果顯示頂部土壤加速度因受樑影響使其震幅較底部為低，而邊坡內土壤因受力石與基樁束制其震動亦較小，初期最大加速度發生於回填砂層後方頂部，但當填砂層液化後其震幅減小且僅餘低頻震動。

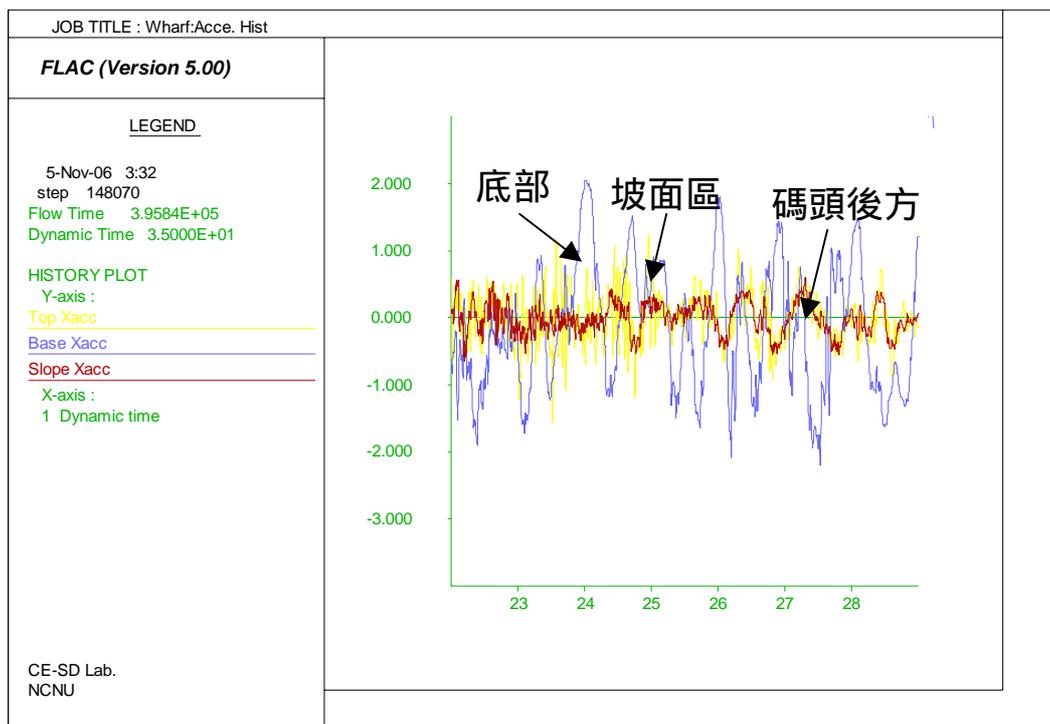


圖 6-5 不同區域地盤加速度歷時圖

### 6.3.2 超額孔隙水壓變化

網格中各元素之最大超額孔隙水壓比分佈如圖 6-6 所示，液化區發生在邊坡前方與背後回填土區，基樁打設區域與坡面前方土層雖並未設定孔隙水壓力激發，但有液化發生，且其原因推估應為滲流所造成，由前方距坡趾不同距離之超額孔隙水壓比歷時(圖 6-7)，距坡趾越遠處其除了  $r_u$  較小外並有波形延遲現象。背後回填土區之液化則與孔隙水壓力激發有關，圖 6-8 為回填土區在與底部土壤交界及近地表處之  $r_u$  變化，海床與回填區交界面並無液化發生，但其波型類似且無延遲，比較速度歷時發現其與孔隙水壓力激發幾乎同步，因此其應由反覆剪動產生。

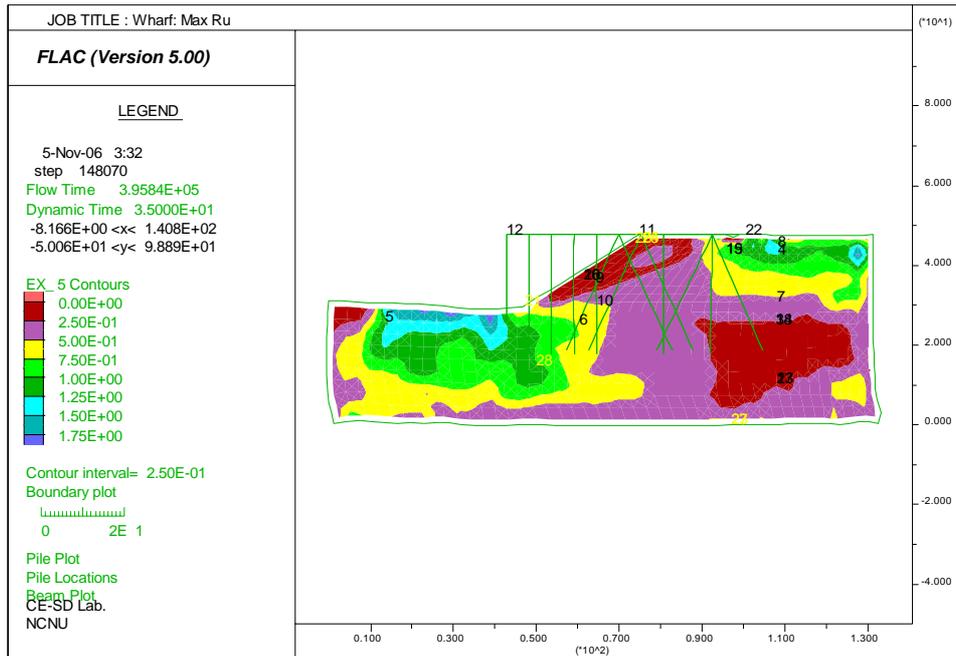


圖 6-6 最大孔隙水壓比分佈圖

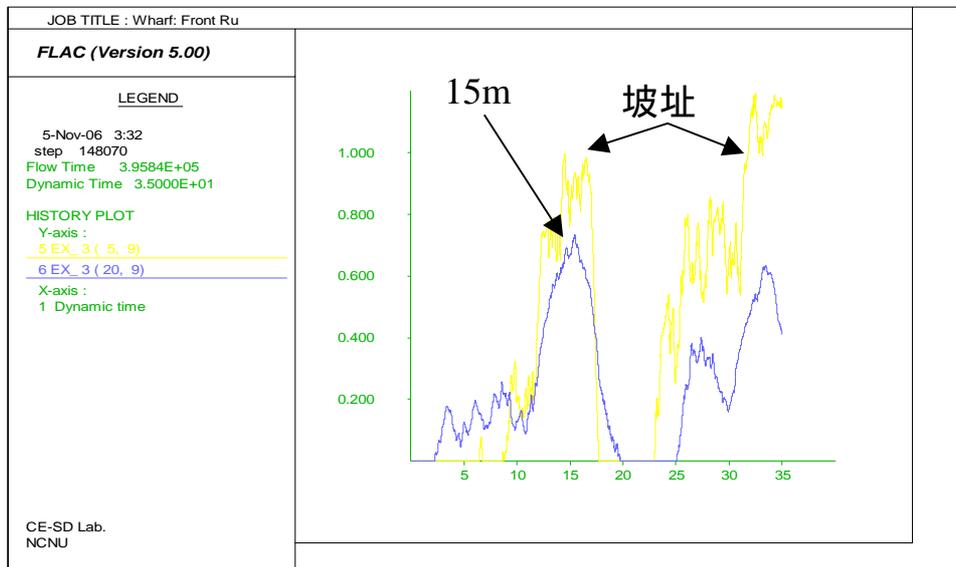


圖 6-7 邊坡前方坡趾(20,9)與距坡趾 15m 處  $r_u$  變化圖

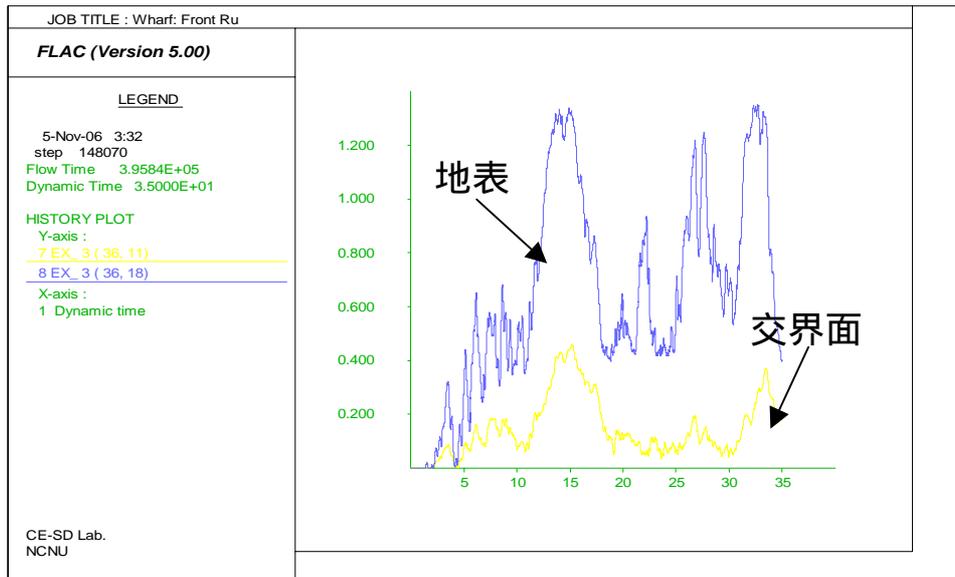


圖 6-8 邊坡後方回填砂區與底部土壤介面(36,11)與地表(36,18) $r_u$  變化

### 6.3.3 土壤結構互制反應

土壤結構互制反應可由土壤液化範圍(以最大孔隙水壓比做指標)、土壤位移向量、及基樁與樑彎距分佈說明，在液化區其土壤位移量最大，但在基樁周圍其位移量很小，表示基樁對周圍土壤具束制作用，且因其彼此影響，在此區之基樁其彎矩相對較小，而液化區之土壤其彎矩有增加之情形，樑元素最大之彎距發生在與液化回填砂土接觸之部分，另外斜樁之彎矩並不比直樁大，其有效性仍待探討。碼頭前端位移歷時如圖 6-10 所示，其最大水平位移震幅雖有 0.7 m，但最終永久位移量僅有 0.1m，但垂直位移量有 0.3m，其原因可能與前端直樁位移量較大有關。

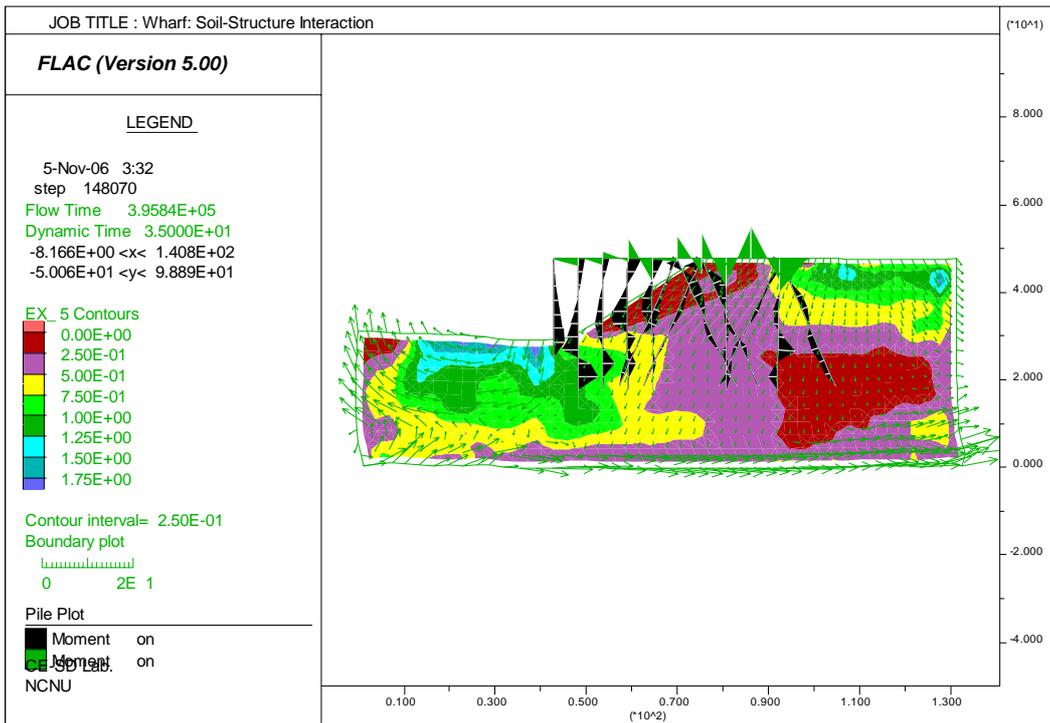


圖 6-9 土壤結構互制反應圖

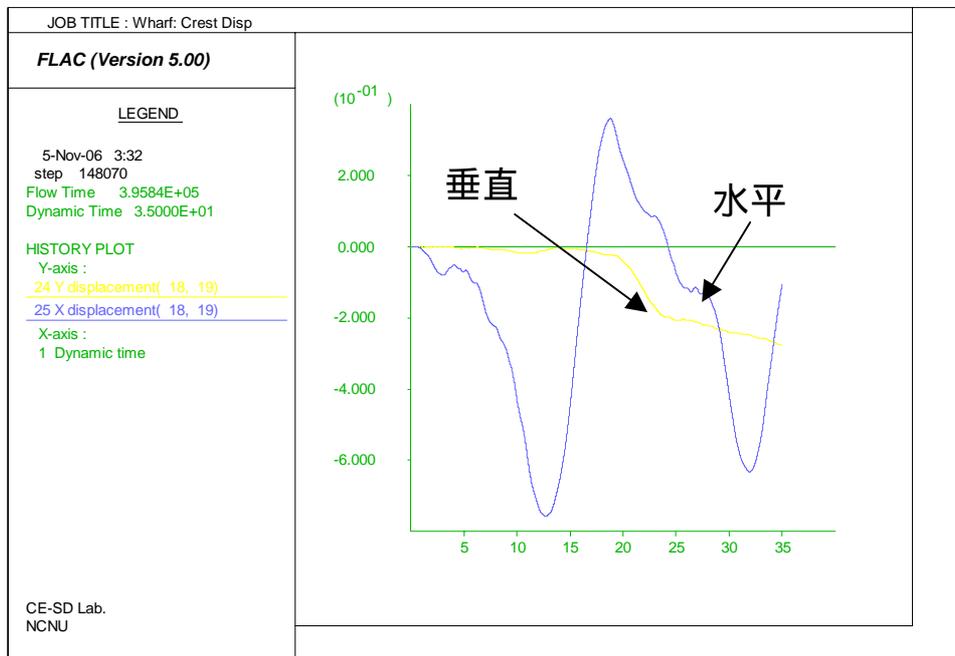


圖 6-10 碼頭前端位移歷時圖

## 第七章 現地地表震源震動試驗

### 7.1 試驗目的與原理

#### 7.1.1 試驗目的

以大型表面震源模擬強烈之地震作用，其目的有三：(1)進行初期現地土壤液化試驗，(2)現有液化監測站功能檢測及(3)提供數值模擬之驗證資料；本計畫利用數值分析成果所規劃試驗配置，於試驗場址以大型表面水平簡諧力震源，對土層產生可激發超額孔隙水壓力之反覆剪動，量測震動過程中地盤耦合反應，同時於試驗時啟動原有現地土壤液化測站，由新裝設之監測系統與現有測站量測成果，檢測現有測站不同深度之加速度計與水壓計之反應，現地液化試驗試驗之成果將作為驗證自由場有效應力動態分析之用。

#### 7.1.2 試驗原理

本計畫現地地表震源震動試驗其試驗原理如圖 1-2(b)所示，利用水平向震動之表面震源，通過下方量測區域之波型主要為平面剪力波，藉由不同剪應變計算方式，可由土壤震動歷時計算剪應變歷時，配合相同位置量測之孔隙水壓力歷時，可同時量測震動時土壤結構震動與孔隙水壓力激發之耦合(coupled)行為及震後孔隙水壓力消散等土層液化特性。

### 7.2 試驗系統與配置

#### 7.2.1 試驗系統配置

現地液化試驗場址為港灣研究中心於臺中火力發電廠架設的現地監測液化站旁，現場配置如圖 5-6 所示，為了讓偏心式簡諧震源可將水平向作用力施加於土壤，現地設計一場鑄長方形基礎，基礎大小至少為 3m\*5m\*1.2m(長邊平行於南北垂直於東西)，且距離鑽孔位置需遠離

3m 左右,以防止因埋設感測子與試驗時破壞到鑽孔,而於 BH-1 與 BH-2 鑽孔安裝整合震動與孔隙水壓力量測之感測子,試驗開始後將自行研發之高速擷取系統放置於測站機房內進行資料擷取,電源由機房內所提供且接地。

## 7.2.2 大型動態水平力震源系統

### 1. 偏心式動態震源

本次試驗採用之震源為美國 ANCO Engineers 公司所製造,型號為 MK-155U 之偏心式動態震源(Eccentric Mass Vibrator),利用伺服馬達驅動對稱之偏心質塊反向旋轉,產生一單向簡諧外力作用於震動基礎上,出力方向可分為水平向及垂直向,如圖 7-1 所示。其原理如下,首先考慮圖 7-2 所示之對稱旋轉偏心質量,兩旋轉偏心質量皆為  $m$ ,繞著圓心  $o$ 、 $o'$  點以大小相等但方向相反之角速度旋轉,半徑為  $r$ 。此時由動力學原理可知, $x$  方向上之力互相抵銷,而在  $y$  方向上之慣性力則相加,則慣性力  $P(t)$  總和則為:

$$P(t) = 2F \sin\omega t = 2m r \omega^2 \sin\omega t \quad (7-1)$$

因此,在任一時刻  $P(t)$  皆僅沿著  $y$  方向作用,且作用力大小隨時間呈現正弦函數之變化,此稱之為單向正弦力(unidirectional sinusoidal force)。操作時以不同質量與轉速搭配可產生穩定之簡諧水平力,本震源之最大出力約為 15 噸,頻率在 1 ~ 8 Hz 間。

### 2. 震動基礎

本次試驗於現地設置一鋼筋混凝土基礎,供架設震源之用,基礎尺寸為 5m × 3m,埋入土內深度為 1m,突出地表約 20cm,如圖 7-3 所示,基礎內鋼筋間距為 50cm × 40cm,埋入土內約 50cm,均利用電焊接合,且於基礎周圍包覆保麗龍,避免與周圍土壤直接接觸,使基礎震動時有足夠之位移空間並降低側向抵抗力,如圖 7-4 所示。



圖 7-1 偏心式動態震源圖(Eccentric Mass Vibrator)

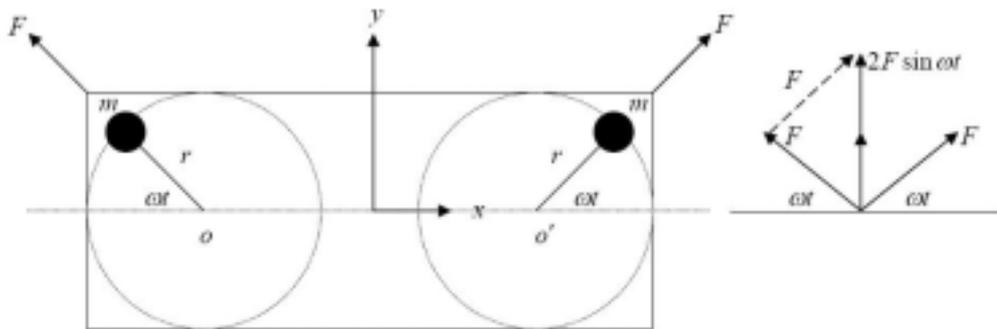


圖 7-2 偏心式動態震源原理圖(郭景琳 2004)



圖 7-3 震動基礎圖



圖 7-4 震動基礎內鋼筋及保麗龍設置情形圖

### 7.2.3 量測系統

#### 1. 耦合感測子設計與安裝

本計畫將修改原用於現地土壤液化試驗之內置式液化監測系統(張文忠與許晉銘 2005、楊志偉 2006)，自行設計整合微型三向度低頻加速度計(miniature DC triaxial accelerometer)與微型動態孔隙水壓計(miniature pore pressure transducer)為一體之耦合感測子(coupled sensor)，以加速度計量測土壤顆粒震動反應，配合以孔隙水壓計量測孔隙水壓變化，進行時間域(time domain)土壤受震時土壤結構與孔隙水壓力激發之耦合(coupled)行為觀測，且其體積相對於試體尺寸比較小，可以說達到近乎點量測之目標(point measurement)，因此可進行現地局部動態反應量測。

試驗中為量測土壤質點震動，將利用三軸向加速度計量測質點加速度，因試驗震動頻率約為 1~8 Hz，因此以低頻高精度之電容式加速度計(capacitive accelerometer)進行三向質點震動量測，所用之加速度計為 PCB 3703 系列，其特點為有效頻寬為 0.01 至 100 Hz、可量測傾斜角度且感測器體積較小可縮小耦合感測子之尺寸。所用之孔隙水壓感測子為常用於離心機試驗之 Drcuk PDCR 81 微型孔隙水壓計，其特點為體積小且精度高。加速度計與微型孔隙水壓計以密閉之壓克力外殼整合稱之為耦合感測子，其整體單位重可調整與飽和土壤試體相近，避免液化後產生下沉或上浮。

耦合感測子結構如圖 7-5 所示，其外型長度約 12 cm 直徑 5.5 cm 之圓錐，外殼以壓克力加工製作，使用 AB 膠(epoxy)將加速度計固定於壓克力內部空間並提供防水。微型孔隙水壓計本體以 AB 膠固定密封，並使其透水銅露出於壓克力外殼表面，以量測土壤動態孔隙水壓力之變化情形，相關感測器規格如表 7-1 所列。

表 7-1 試驗使用之感測子一覽表

| 感測子種類    | 廠牌     | 型號                    |
|----------|--------|-----------------------|
| Sensor-1 | SYSCOM | Cable S2002+ Triaxial |
| Sensor-2 | SYSCOM | Cable S2002+ Triaxial |
| Sensor-3 | PCB    | 3703D1FD3G            |
|          | Druck  | Druck PDCR 81         |
| Sensor-4 | PCB    | 3703D1FD3G            |
|          | Druck  | Druck PDCR 81         |

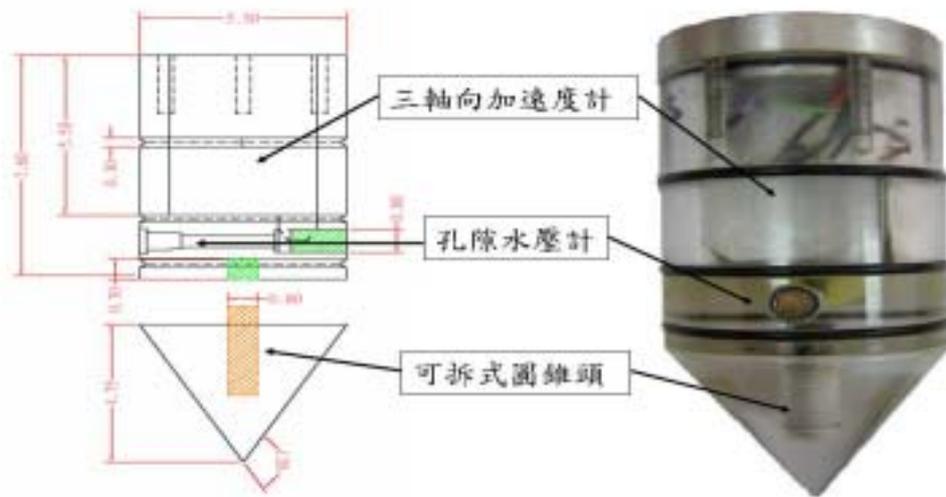


圖 7-5 耦合感測子圖

儀器安裝時將感測子埋入鑽探後之孔洞內，深度分別為 6m、8m 的鑽孔，而埋設感測子時因鑽孔深度較深且感測子需要平行於北方(方向固定)，所以需利用一組可拆式推桿(如圖 7-6)，將感測子分別推入 6m、8m 深度內之鑽孔內，此推桿為 1.5m\*7 根的鐵桿所組成，使用方式是將壓克力感測子裝置於鐵製外套管內，接下來與外推桿組合在一起並且把內推桿裝置於外管內，將內外推桿一根接一根組合起來直到預埋入的深度為止，開始旋轉外推桿上的 T 型桿件，但須注意方向性(平行於北方)與深度(6m、8m)需維持在預設值。

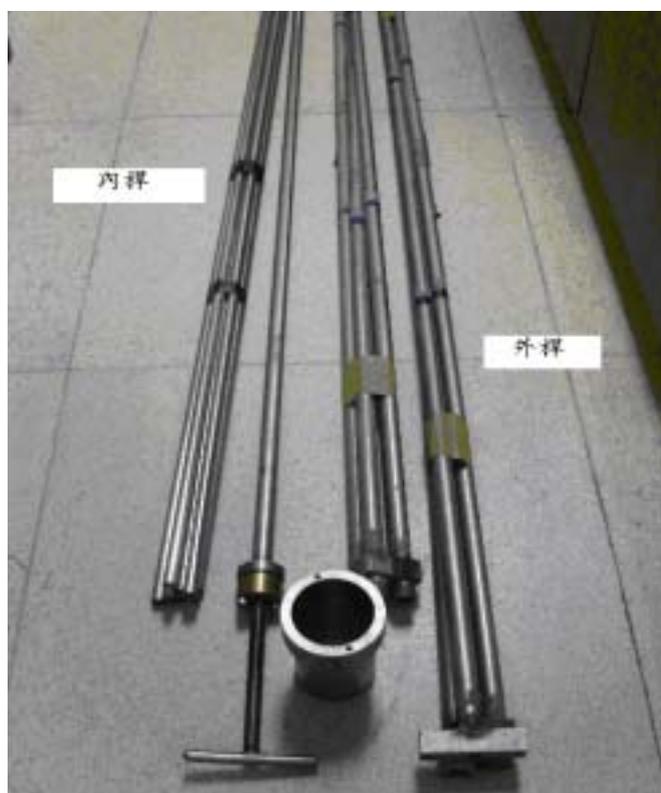


圖 7-6 感測子安裝推桿圖

## 2. 基礎震動量測

本次試驗於混凝土基礎上安裝一個加速度計用於量測偏心式震源所產生的頻率與加速度，亦即震源的加速度大小，如圖 7-7 所示，此案例震源震動方向為 y 方向震動且頻率為 7Hz，由圖可看出 AY1 的震幅最大且在 7Hz 左右，圖 7-8 至圖 7-10 為同一案例三個方向之加速度歷時，因資料點數龐大所已分成三段來顯示，結果顯示出 Y 方向加速度最大，圖 7-11(c)顯示偏心式震源逐漸加速中後來呈現穩定狀態，而圖 7-11(d)顯示偏心式震源從穩定狀態逐漸趨緩下來直到停止。

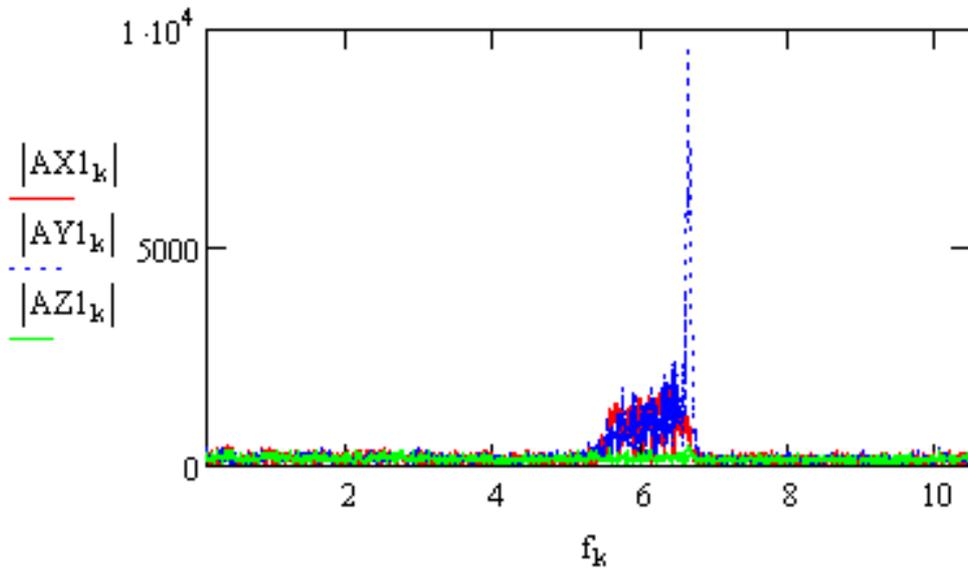


圖 7-7 基礎加速度頻率域圖

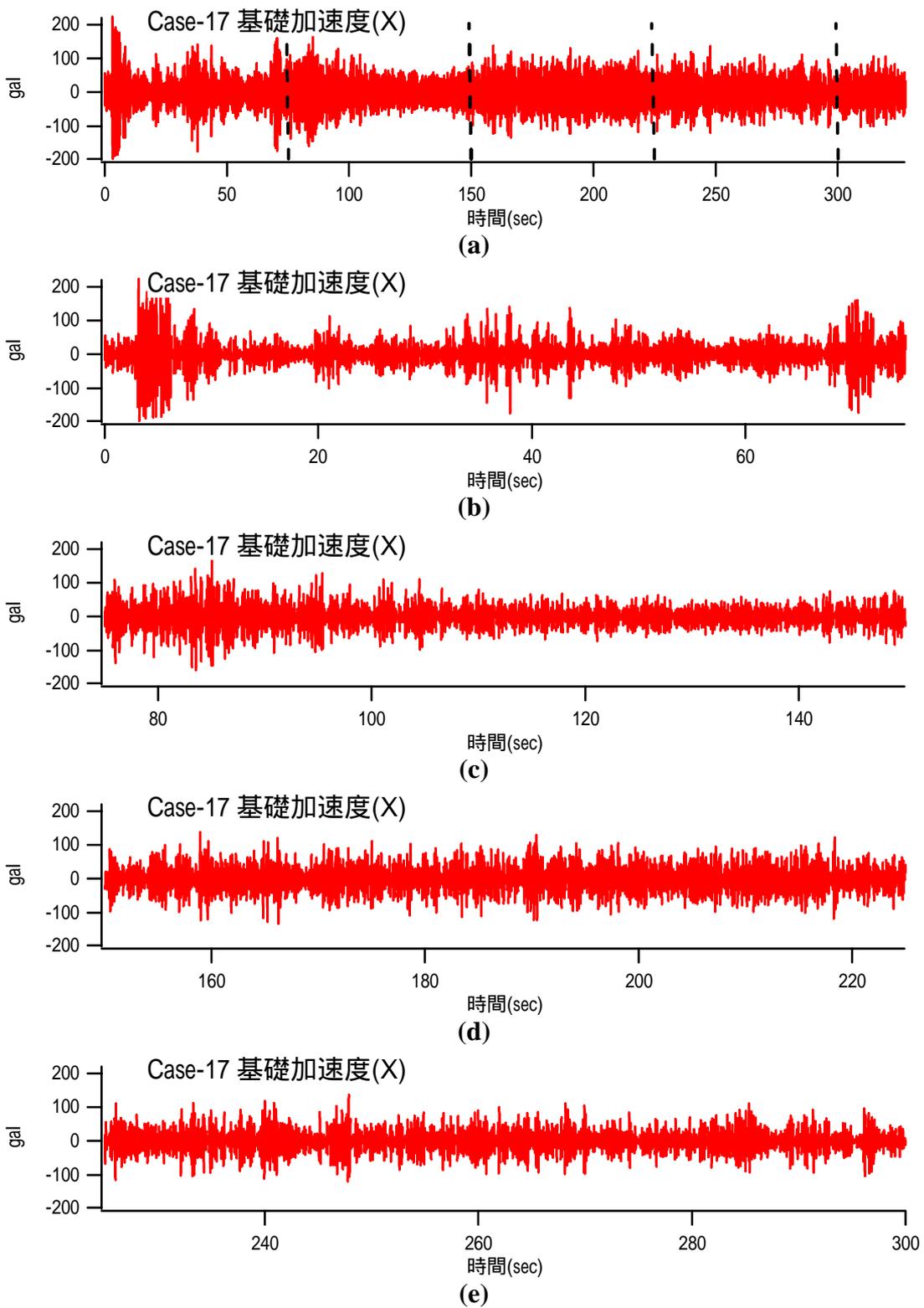


圖 7-8 基礎加速度 X 方向圖 (a)整體時間域 (b)0~75 秒 (c)75~150 秒  
(d)150~225 秒 (e)225~300 秒

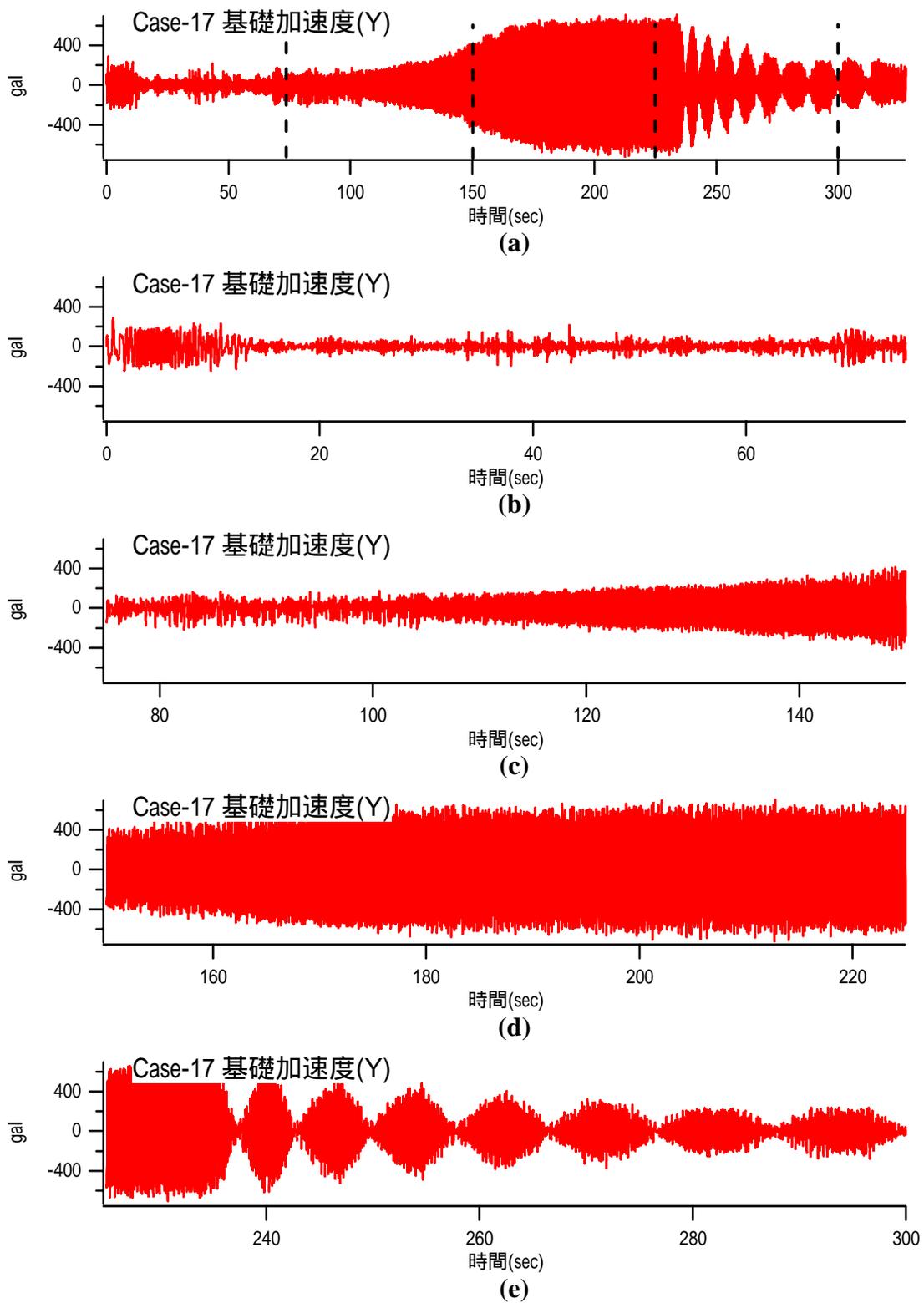


圖 7-9 基礎加速度 Y 方向圖 (a)整體時間域 (b)0~75 秒 (c)75~150 秒  
(d)150~225 秒 (e)225~300 秒

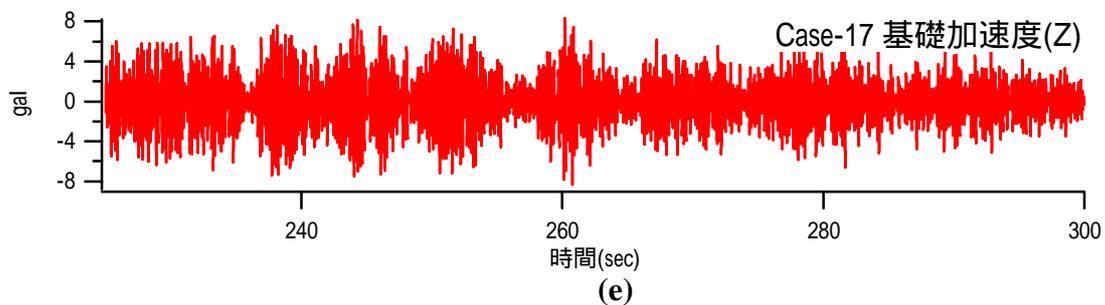
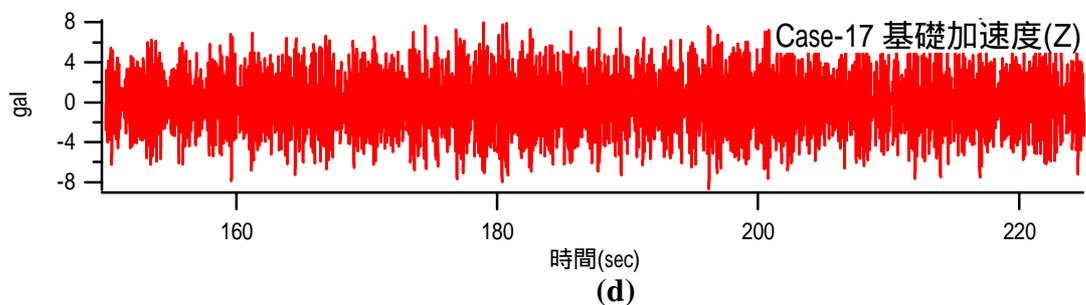
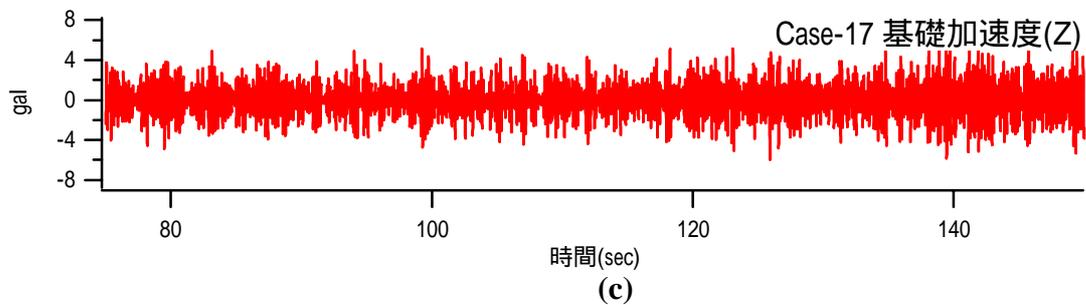
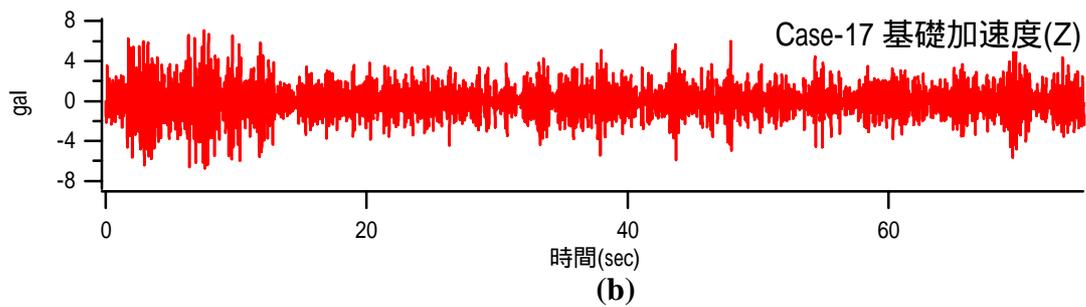
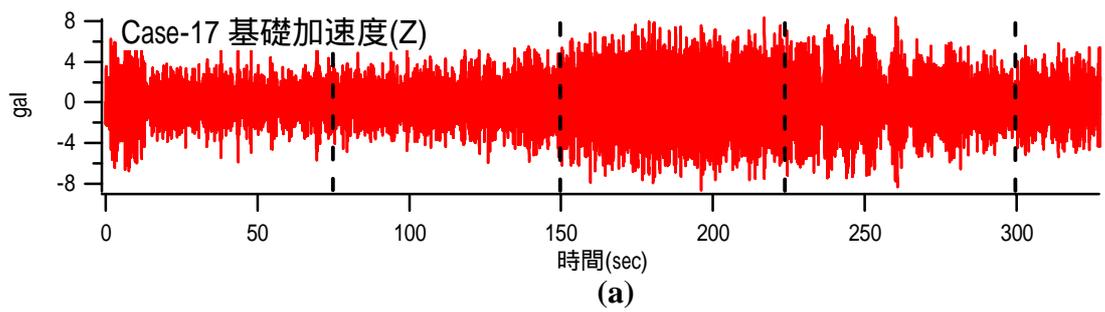


圖 7-10 基礎加速度 Z 方向圖 (a)整體時間域 (b)0~75 秒 (c)75~150 秒  
(d)150~225 秒 (e)225~300 秒

### 3. 高速動態擷取系統

本計畫使用自行研發之高速動態資料擷取系統，因一般購置之套裝擷取系統其功能常侷限於出廠之設定或程式，程式設計撰寫不易及價格昂貴等因素，且無法自行擴增系統功能。動態量測需搭配之穩定之高速自動資料擷取系統，為預留日後擴充性與日常維護，本次計畫採用 National Instrument 所生產軟硬體為基礎，採用 NI-SCXI 架構之信號制約器搭配高速資料擷取卡，控制軟體為 NI 之 LabVIEW 平台，可在有限預算下，快速建立具彈性及擴充性的監測系統。

所使用之擷取軟體為 NI 之 LabVIEW，LabVIEW 是功能完整的圖形化程式語言(Graphic Language)，兼具傳統文字式程式語言的彈性，可藉由互動式程式撰寫方式控制軟硬體，利用類似於類比擷取系統資料傳輸之資料流(Dataflow)的觀念控制執行程序，使系統程式撰寫簡易，且硬體為模組化設計可擴充且價格、規格適當且容易操作。擷取系統架構如圖 7-11 所示，試驗開始後將埋設於孔內的感測子的訊號線，包含地表加速度計(SYSCOM)、三軸加速度計、水壓計總計 14 個頻道，依感測子順序收集到訊號整合箱內(圖 7-12)，此外因訊號整合箱無電源供應器，需另外供給，訊號收集與整合後隨即將水壓計資料與加速度計資料分別傳送到 PXI 系統內進行資料擷取。

#### 7.2.4 現地液化監測站

##### 1. 測站配置

港研中心現地液化監測站位於臺中火力發電廠旁空地，測站外觀及測站內儀器配置如圖 7-13 及圖 7-14 所示，監測系統包括位於 200m、100m、30m、15m 之井下地震儀及一組地表地震儀，以監測地震時震波之放大效應。另分別於 5.5m、8m、11m、15.5m、19.5m、30m 之埋置孔隙水壓計，以監測土壤液化時之動態水壓變化。其測站機房主體為不鏽鋼材，有隔熱裝置，監測機房內基本配備包括監測儀、電腦、不斷電系統、冷氣及機架等。

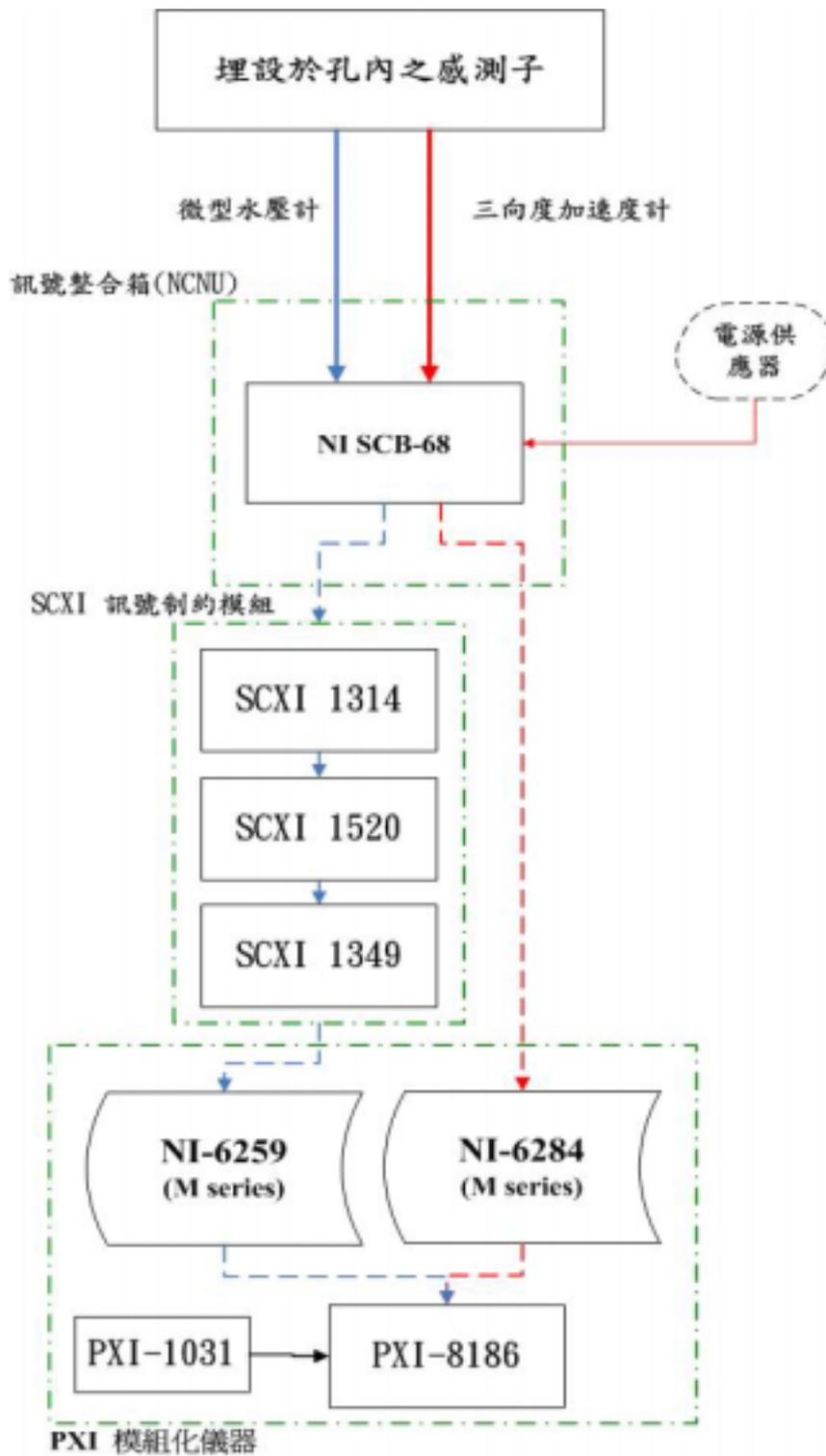


圖 7-11 高速自動資料擷取系統(NI-PXI+SCXI 系統)架構圖



圖 7-12 訊號整合箱圖

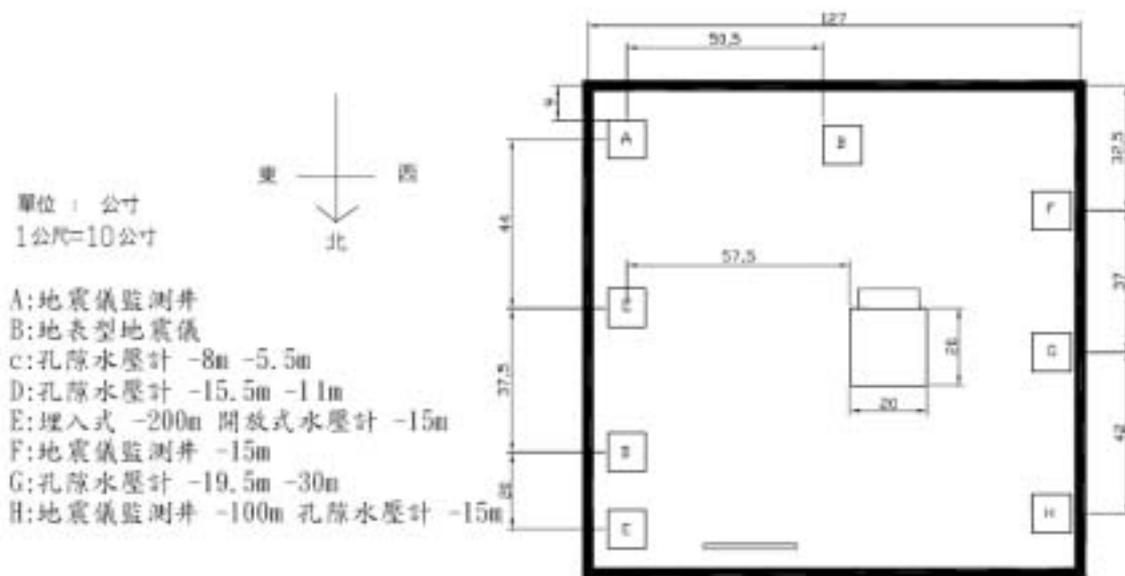


圖 7-13 臺中港火力發電廠現地監測配置圖



圖 7-14 臺中港火力發電廠現地監測外觀圖

## 2. 監測系統

資料記錄方式均藉由電纜線組合延長至監測機房，將資料保存於電腦中，並可以網路進行遠端遙控與資料傳輸。各系統觀測記錄原則可分為：(a)定時激發記錄與(b)即時感測記錄，定時激發記錄係於每日整點(即一天記錄 24 次)，不分震動原因或大小。即時感測記錄係於系統預設依基本激發啟動值，只要震波大於基本激發啟動值系統即予自動啟動記錄。

## 7.3 試驗結果

### 7.3.1 試驗流程與試驗計畫

本次試驗時原規劃以不同出力與頻率之震動進行試驗，順序為自小出力低頻率開始，漸次增加出力，待出力達 100%後再增加頻率，但由於低頻震動無法有效傳遞剪力至土層，因此修改為皆以最大出力但

改變出力方向為長軸與短軸各一，完整試驗計畫如表 7-2 所示，每次震動間至少間隔 30 分鐘，以使前次激發之超額孔隙水壓力得以消散。

表 7-2 試驗流程表

| CASE   | HZ         | 控制面<br>板HZ | N,S-LINE | E,W-LINE | MASS<br>PLATE | OUTPUT<br>FORCE TON | STAR TIME |
|--------|------------|------------|----------|----------|---------------|---------------------|-----------|
| Case1  | 2.0        | 12.0       | ●        |          | 1L20          | 3.4                 | 11:31     |
| Case2  | 2.0        | 12.0       | ●        |          | 1L30+4S30     | 6.5                 | 12:00     |
| Case3  | 2.0        | 12.0       | ●        |          | 2L30+1S20     | 8.93                | 13:35     |
| Case4  | 2.0        | 12.0       | ●        |          | 3L30          | 12.66               | 14:00     |
| Case5  | 2.0        | 12.0       | ●        |          | 4L30          | 16.63               | 14:35     |
| Case6  | 2.0        | 12.0       |          | ●        | 4L30          | 16.63               | 15:00     |
| Case7  | 2.0        | 12.0       |          | ●        | 4L30          | 16.63               | 15:00     |
| Case8  | 2.6        | 15.6       |          | ●        |               | 3.01                | 15:57     |
| Case9  | 2.6        | 15.6       |          | ●        | 2S30+1S12     | 6.43                | 16:10     |
| Case10 | 2.6        | 15.6       |          | ●        | 4S30+1S12     | 9.27                | 16:25     |
| Case11 | 4.0        | 24.0       |          | ●        | 1L20+1S30     | 15.02               | 16:50     |
| Case12 | 4.0        | 24.0       | ●        |          | 1L20+1S30     | 15.02               | 17:30     |
| Case13 | 5.0        | 30.0       | ●        |          | 5S30+1S12     | 16.72               | 17:51     |
| Case14 | 5.0        | 30.0       |          | ●        | 5S30+1S12     | 16.72               | 18:10     |
| Case15 | 6.0        | 36.0       |          | ●        | 3S30+1S12     | 17.66               | 19:02     |
| Case16 | 6.0        | 36.0       | ●        |          | 3S30+1S12     | 17.66               | 19:35     |
| Case17 | 7.0        | 42.0       | ●        |          | 1S30+1S20     | 16.48               | 19:46     |
| Case18 | 7.0        | 40.0       |          | ●        | 1S30+1S20     | 16.48               | 20:13     |
| Case19 | 7.0        |            |          | ●        |               | 16.48               | 20:30     |
| Case20 | 8.0        |            | ●        |          |               | 17.73               | 20:53     |
| Case21 | 7.0        |            | ●        |          |               | 17.73               | 21:24     |
| Case22 | 6.9        |            | ●        |          |               | 16.48               | 21:55     |
|        |            |            |          |          |               |                     |           |
|        |            |            |          |          |               |                     |           |
|        | <b>L30</b> |            | 大塊30MM   |          |               |                     |           |
|        | <b>L20</b> |            | 大塊20MM   |          |               |                     |           |
|        |            |            |          |          |               |                     |           |
|        | <b>S30</b> |            | 小塊30MM   |          |               |                     |           |
|        | <b>S20</b> |            | 小塊20MM   |          |               |                     |           |
|        | <b>S12</b> |            | 小塊12MM   |          |               |                     |           |
|        |            |            |          |          |               |                     |           |

## 7.3.2 資料處理程序

### 1. 剪應變計算原理

本試驗使用二種剪應變評估方法推估震動過程之剪應變時間歷時，方法一種是以質點震動速度與波傳速度推估的方法，另一個方法是假設土層為一維度之剪力樑(shear beam)之一維剪力樑法。由發電廠旁空地埋設感測子並且進行資料擷取，試驗所擷取之資料包含土壤顆粒運動之加速度與動態下孔隙水壓力變化之情況，這些資料經由程式運算後，將可轉換成二種剪應變評估所需的物理量。

#### (1)平面剪力波傳法

平面剪力波傳法為利用平面剪力波傳遞時其質點震動速度與波速關係，假設由底部向上傳遞之平面彈性剪力波，其任一深度之於水平方向之剪應變為(White 1965)：

$$\gamma = \frac{-\dot{A}_y}{V_s} \quad (7-2)$$

式中  $V_s$  = 由上向下傳遞的剪力波速(m/s)， $-\dot{A}_y$  = 為顆粒之垂直於波傳方向之質點震動速度，可由加速度積分一次求得。

利用平面剪力波傳法求取剪應變量時需進行質點速度與波傳速度之量測。本計畫之震源為偏心式動態震源，圖 7-15 為一個混凝土基礎受震時示意圖，試體受到 y 方向的震動時，從混凝土底部往下傳遞剪力波速為  $V_s$ ，而從三向度加速度計擷取到垂直於波傳方向之質點震動加速度，經由數值積分一次後可得到質點速度，剪力波波速則利用不同高程之初達波計算，再帶入公式計算出剪應變。利用波傳理論之剪應變推估方法，因其可計算測點所在之剪應變量，若整合孔隙水壓力量測，則可進行局部剪應變-孔隙水壓力耦合(coupled)行為量測。波傳法優點是所需物理量較少，但剪力波速為影響波傳法精確度之重要關鍵，本試驗以採

用初始剪力波速，但剪力波速會隨應力狀態改變，因此波傳法為在大應變下或有孔隙水壓力激發時有相當之誤差。

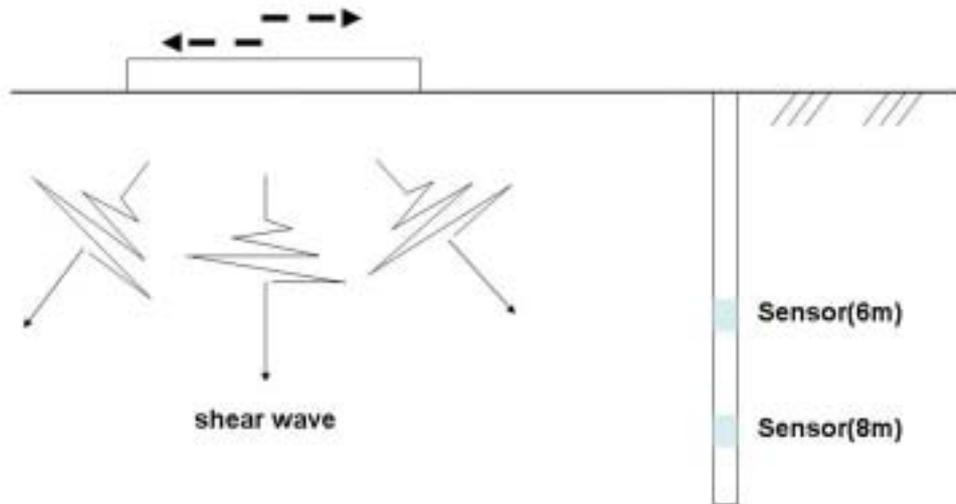


圖 7-15 平面剪力波傳法圖

## (2) 剪力樑法

Zeghal and Elgamal (1994)為分析現地孔下地震觀測陣列(in situ seismic downhole- array)數據提出剪力樑法，假設土層為 1-D 之剪力樑(shear beam)，利用二個不同深度之加速度歷時，計算中間深度土壤所受之剪應力( $\tau_z$ )與剪應變( $\gamma$ )為：

$$\tau_z = \frac{1}{2} \rho Z (a_1 + a_z) \quad (7-3)$$

$$\gamma = \frac{d_1 - d_2}{h} \quad (7-4)$$

其中  $a_z = a_1 + (a_2 - a_1) \frac{z}{h}$ ， $Z$ =所求剪應變之深度(m)， $h$ =感測子之間的垂直距離(m)； $\rho$ =土壤的密度( $kg/m^3$ )； $a_1$ =靠近砂試體表面感測子加速度計資料； $d_1$ 、 $d_2$ =水平位移。圖 7-16 所示為一個假設土層為 1-D

剪力樑之土壤模型，當地表基礎震動時，可由 6m 及 8m 量測到土壤質點加速度，再經由數值雙重積分後得到位移，帶入式 7-4 即可求得剪應變。

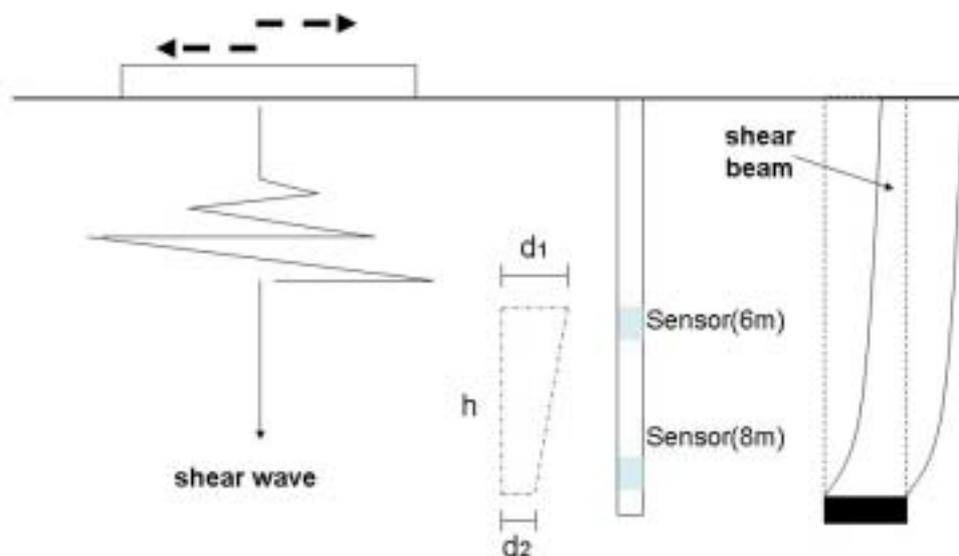


圖 7-16 剪力樑法圖

## 2. 訊號前處理

### (1) 資料結構

本試驗所擷取之訊號，包含三軸向加速度計、水壓計及基礎與地表加速度計等總計 14 個頻道，依感測子順序輸入到各資料擷取卡上，由於擷取速率較高(1 kHz)使擷取資料量廣大，為使擷取系統於高速下正常運作，將儲存之檔案型態由一般佔記憶體容量較大之 ASCII 檔改成較小二進位(binary)檔案，如此可使擷取系統於高速量測下仍能穩定運作。擷取系統量測所儲存之檔案類型為二進位(binary)，其優點為檔案所佔空間較小，可進行高速且大量之資料處理，缺點為無法由一般檢視文字檔案軟體觀察其資料內容，因此需進行檔案格式轉換或於可處理二進位之程式中進行。

## (2)降頻與延時選取

由試驗後所擷取之資料量大，所以本研究藉由資料處理程式讀取速度計量測數據並進行資料識別，計算其資料點數，接著將量測數據乘以率定係數，將電壓值轉換為物理量，再進行資料判讀與分析，並觀測孔隙水壓力消散、土壤質點震動等行為。在實驗中加速度與水壓計的擷取頻率為 1000Hz，且擷取時間長達 7~10 分鐘左右，即時為檔案較小之二進位(binary)檔案，試驗擷取後的檔案高達 35~50Mb 為一般家用電腦記憶體無法負擔此龐大運算量，所以將利用 Fortran 自行撰寫降頻的程式，此程式可將加速度與水壓計從 1000Hz 降為任一頻率(建議不可低於取樣原理亦即最小取樣速率必須為原始訊號所含最大頻率之兩倍，如式 7-5)，其原理是每隔 N 點取一個數據來達到降低取樣頻率的目的。

除上述的降頻可以減少電腦的運算負擔外，自行撰寫的 Fortran 程式還可自行選取延時時間，如震動後孔隙水壓力激發所產生的超額孔隙水壓於震動停止後開始消散，但資料擷取無法準確掌握何時消散結束，所以為了擷取到完整資料通常擷取時間較長檔案也較大，此時可利用延時選取來輸出某段有興趣的時刻來分析數據，使檔案相對也較小。

$$f = \frac{1}{\Delta t} > f_{ny} = \frac{2}{T} \quad (7-5)$$

## 3. 訊號後處理

### (1)初始值與物理量轉換

以電腦為基礎之訊號擷取系統，其基本原理為將自然界中的物理現象轉換為電腦可讀取的訊號，像是電壓及電流等，量測之訊號經由前端感測器回傳至電腦中，由類比轉數位資料擷取卡 (Analog to Digital (A/D) converter)轉換訊號，最後將擷取之資料存於硬碟中，所有動作皆由儀控程式進行設定與控制。本計畫所

建立之高速量測系統，所擷取的資料是電壓值，需再以乘上率定常數將其轉換電壓值轉換成物理量。舉例來說在靜止狀態下利用微型孔隙水壓計所擷取到的資料為靜止狀態下的水壓力此量測數據為一個電壓值，在本研究中俗稱初始電壓值(靜水壓)，而為計算出超額孔隙水壓力，全部感測子還必須扣除靜水壓，以求取超額孔隙水壓力。

## (2) 頻譜分析與濾波

進行訊號處理時，為增加運算速率與取得更多訊息，常需將原為時間函數的訊號，轉換為不同變數之函數，常見之轉換為將訊號與時間關係轉換為訊號與頻率之關係，一般以時間表示之訊號稱之為時間域訊號(time domain signal)，而以頻率表示之訊號稱之為頻率域訊號(frequency domain signal)，訊號處理分析時，依其運算變數不同亦可分成時間域分析與頻率域分析，本計畫所使用的數值積分(numerical integration)與基線修正(baseline correction)為時間域分析，訊號之濾波程序與頻譜分析屬於頻率域分析。

由於雜訊的存在以及記錄之波形訊號並非完全之正弦曲線，由加速度數值積分二次後，所得位移歷時會有一明顯之偏移(drift)，如圖 7-17 所示。為消除所求得每一個位移歷時的偏移量，在將位移轉換為應變之前，必須進行基線修正(baseline correction)。基線修正法使用最小平方迴歸(least square regression)找出位移偏移量之最佳符合曲線(best fit curve)，可利用六次多項式計算出的最佳符合曲線，然後由原始數據扣掉從最佳符合曲線到 y 軸的每一個垂直距離來消除偏移量，相關分析均於時間域完成。

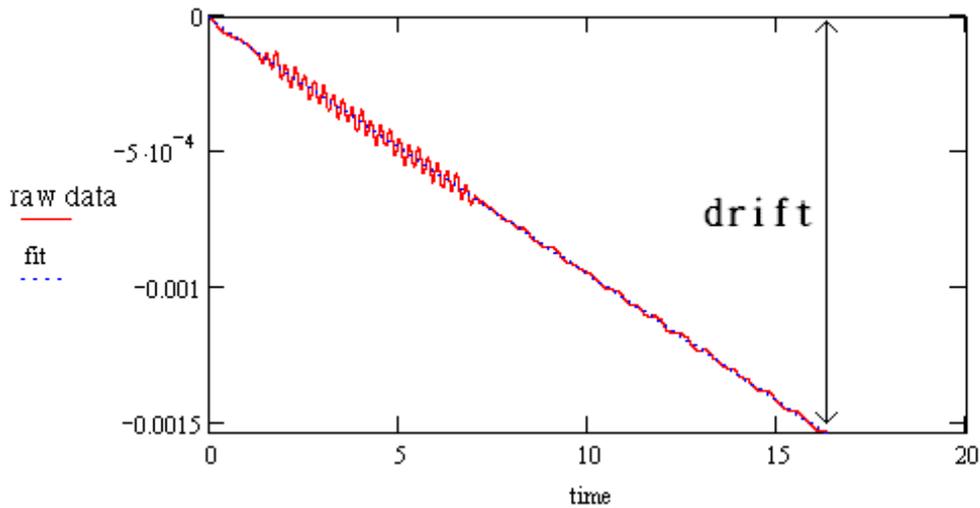


圖 7-17 數值積分所產生的偏移量圖

頻率域分析時其原理為將動態訊號分解為不同頻率、震幅與相位之正弦函數(Sheriff and Geldart 1995)。本計畫所處理之資料為離散型態，進行傅立葉轉換運算時以離散形式來進行，稱為離散傅立葉轉換(Discrete Fourier transform, DFT)。對上述頻譜一週期內取  $N$  點，即取樣間隔為  $2\pi/N$  之離散訊號而言，由時間域轉成頻率域可由式(7-6)計算之：

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X[n] \cdot e^{-j2\pi nk/N} \quad (7-6)$$

其中  $\omega_k = k \frac{2\pi}{N \cdot \Delta t}$ ， $\omega_k$  為循環頻率(circular frequency)， $N$ =資料點數， $X[k]$ =頻率  $\omega_k$  傅立葉係數， $k=0,1,2,\dots,N-1$ 。式(7-6)中，可將傅立葉係數  $X_k$  經離散傅立葉轉換之逆運算(Inverse Discrete Fourier transform, IDFT)之運算，建構時間域中之離散訊號  $x_j$ 。此轉換可由下式(7-7)表示之：

$$X[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot e^{j(2\pi nk/N)} \quad (7-7)$$

由式(7-7)與(7-6)之轉換運算，訊號可於時間域及頻率域中互相轉

換。由於離散傅立葉轉換(DFT)需要較大之運算量，以(7-7)為例子，直接演算，要計算一點 $X[n]$ 需要  $N$  個複數乘法  $N-1$  個複數加法，總共有  $N$  個點要計算，因此共需要  $N^2$  個乘法  $N(N-1)$ 個加法。對於一般電腦，乘法所需要的運算時間是加法的數拾倍，運算的複雜度和  $N^2$  成比率的關係，為增進運算速率，Cooley 與 Turkey(1965)發展出將原本之 DFT 計算分解為連續性且較小的 DFT 計算。此快速演算法的使用限制為資料點數( $N$ )需為 2 的倍數，亦即所謂的快速傅立葉轉換(Fast Fourier transform, FFT)。目前在所有訊號處理軟體中，已廣泛地應用 FFT 與其逆運算(Inverse FFT, IFFT)並作為標準的內建函數。

本計畫中對 FFT 之使用，主要與數位濾波器(filter)結合。數位濾波器對擷取系統量測之原始訊號作訊號處理，可將其背景雜訊(background noise)或不想要的訊號濾除，並可使某感興趣的頻率範圍之訊號特別清晰。頻率濾波器通常可分為三種型態：低通(low-pass)、高通(high-pass) 與帶通 (band-pass)濾波器。圖 7-18 為三種數位濾波器的示意圖，原始訊號經由 FFT 後轉成頻率域，由圖可以看出震幅最大地方為 2Hz，即為此訊號的共振頻率，而圖 7-18(a)使用低通濾波器(low-pass filter)，並設定為切斷頻率(cut-off frequency)為 10 Hz，亦即將高於 10 Hz 之訊號移除並保留低於 10 Hz 之訊號，低通濾波器可以用來阻絕高頻之雜訊，像是 AC 電源(60Hz)、汽車引擎、發電機等引起之高頻雜訊，本研究中，低通濾波器用來去除速度計與孔隙水壓計資料之高頻背景雜訊；圖 7-18(b)為高通濾波器(high-pass filter)示意圖，其功能為使低於切斷頻率(cut-off frequency)之訊號通過，而高於切斷頻率之訊號則設定其傅立葉係數為零而將之濾除；圖 7-18(c)為帶通濾波器(band-pass filter)，其為低通與高通濾波器之結合，為一帶狀頻寬之濾波器，可將某段頻率範圍內之訊號留存，本計畫中使用帶通濾波器觀察動態之超額孔隙水壓力變化情形。應用濾波器處理訊號，除了其去除雜訊之效果良好外，更由於原理簡單及使用方便，為一優良之訊號分離技術。

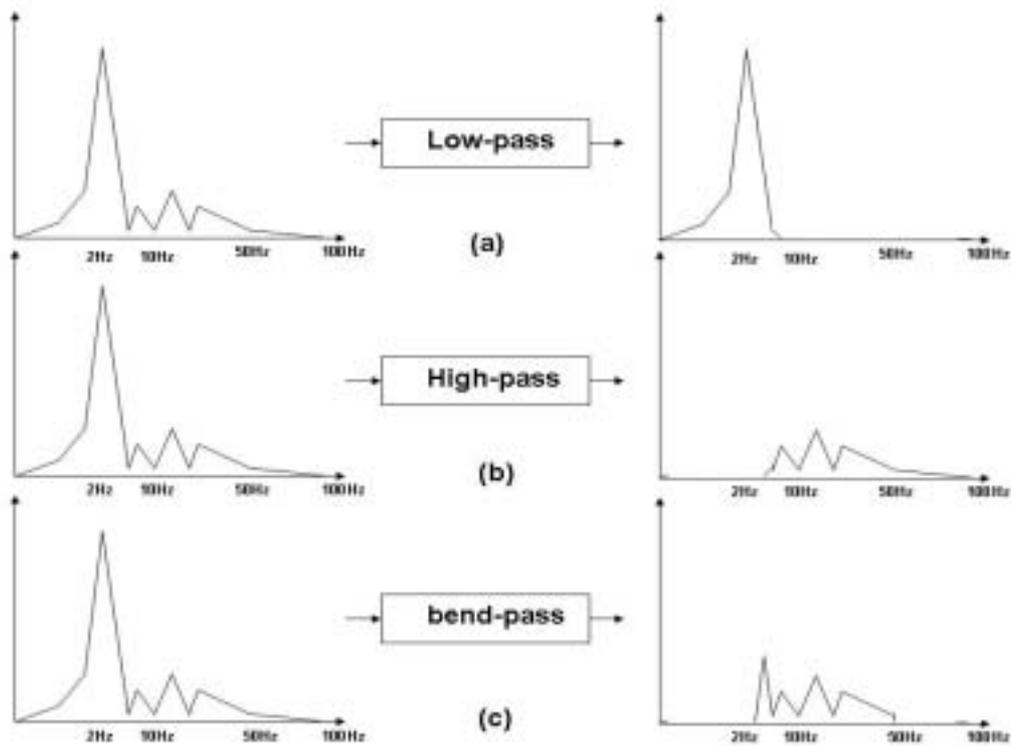


圖 7-18 數位濾波器圖

#### 4. 與港研中心系統同步程序

本實驗採用自行研發之 NI-DAQ 資料擷取系統，與港灣技術研究中心(IHMT)之資料擷取系統不同，而且資料擷取開始的時間也不同，為解決不同系統與時間域之不同，因此需進行系統同步(synchronization)。本研究採用的策略是擷取港灣技術研究中心的地表加速度為基準訊號，稱之為參考頻道(reference channel)，於試驗完後比較二個系統擷取之時間差，將 NI-DAQ 之訊號於時間軸平移至與港灣技術研究中心之資料擷取系統相同起始時間。

利用兩不同系統抓取尖峰值並且得知港灣技術研究中心參考點時間( $rt_1$ )與 NI-DAQ 系統之時間( $rt_2$ )，然後將( $rt_2 - rt_1$ )可以計算出所延遲(delay)的秒數，由 NI-DAQ 之延遲與擷取頻率，可計算 NI-DAQ 所需平移點數，達到同步之目的，由點數=秒數(s)\*擷取頻率(Pts/s)之關係，計算出相差之總點數後，再扣掉或補上點數之方式加強同步化的精確度，最後同步化後如圖 7-19 所示，波形完全符合在一起。

### 7.3.3 地盤震動資料

#### 1. 地下土層震動模式

圖 7-20 所示為地表下 8m 深度之加速度經過 FFT 轉變成頻率域後之頻譜，其 Y 方向有一個約 7Hz 的震動，三方向之加速度歷時如圖 7-21 至圖 7-23 所示，其圖 7-22(c) 為埋於深度 8m 的加速度受到地表震動後加速度逐漸有上升趨勢，而圖 7-22(d) 因震源逐漸停止震動而加速度緩慢變小。

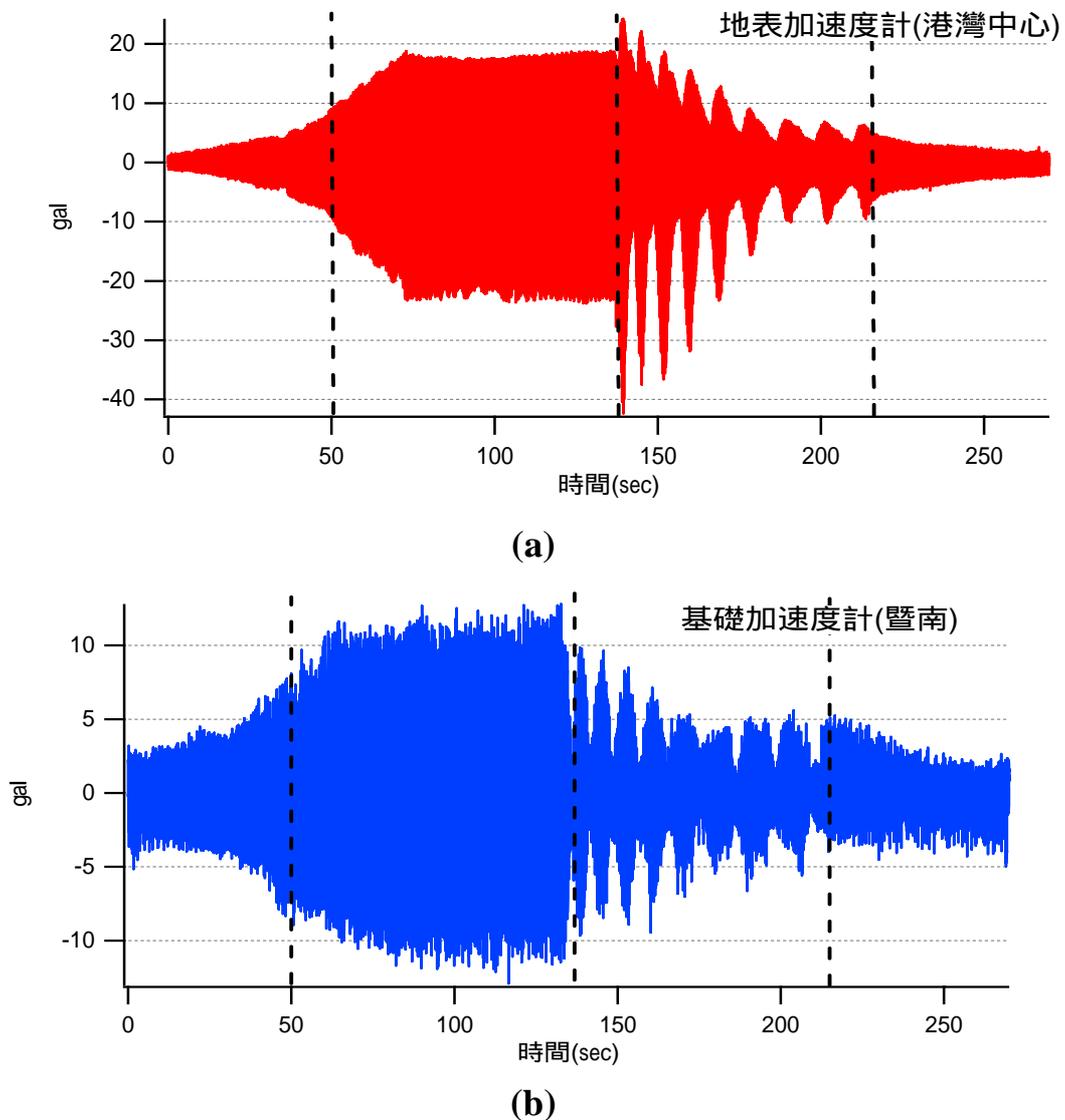


圖 7.19 同步化後時間歷時圖 (a)台中港現地監測站地表加速度  
(b)基礎加速度

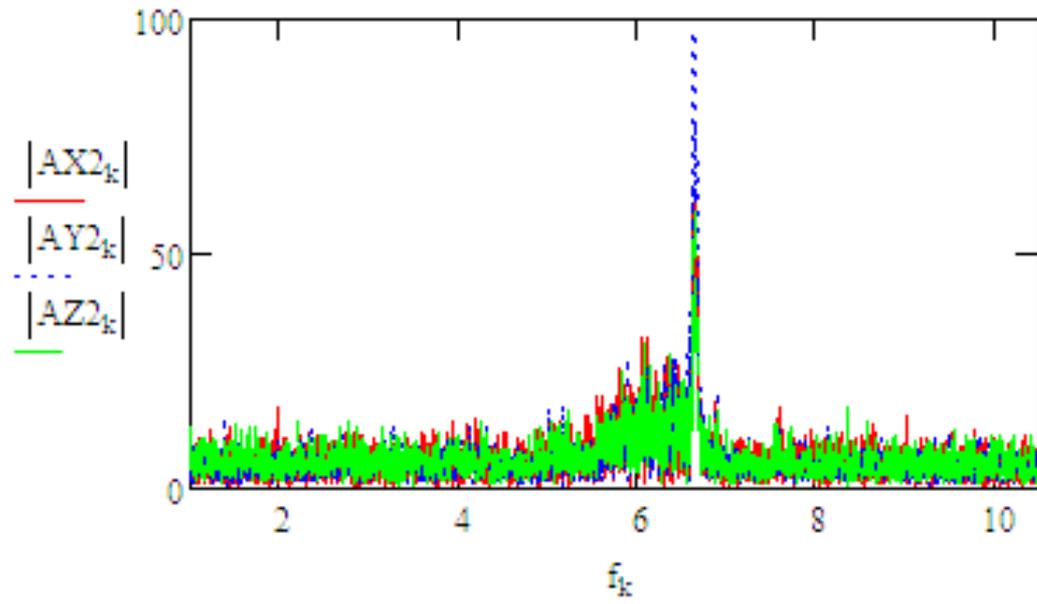


圖 7-20 8m 深度土層加速度頻譜圖

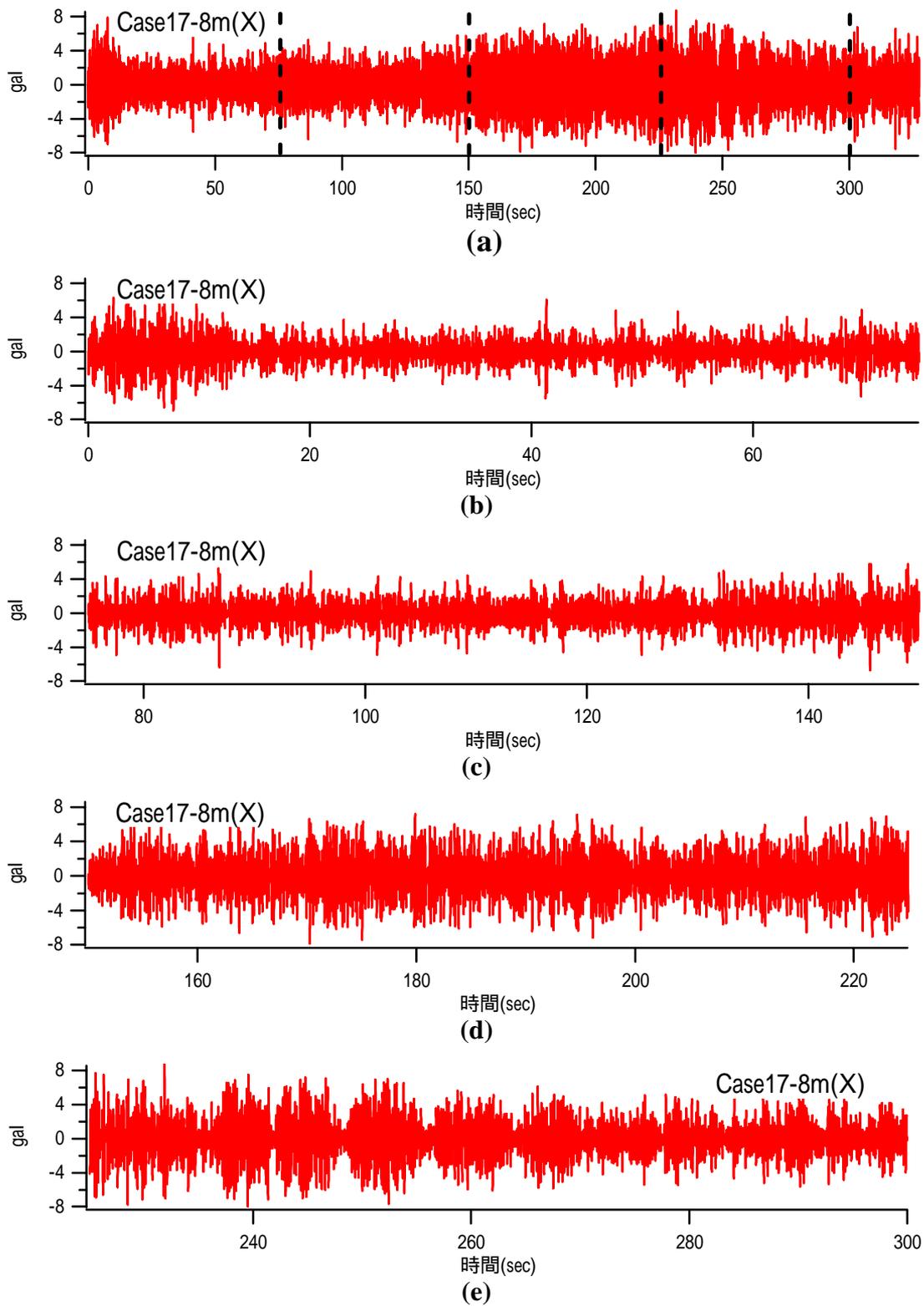


圖 7-21 基礎加速度 X 方向圖 (a)整體時間域 (b)0~75 秒 (c)75~150 秒  
(d)150~225 秒 (e)225~300 秒

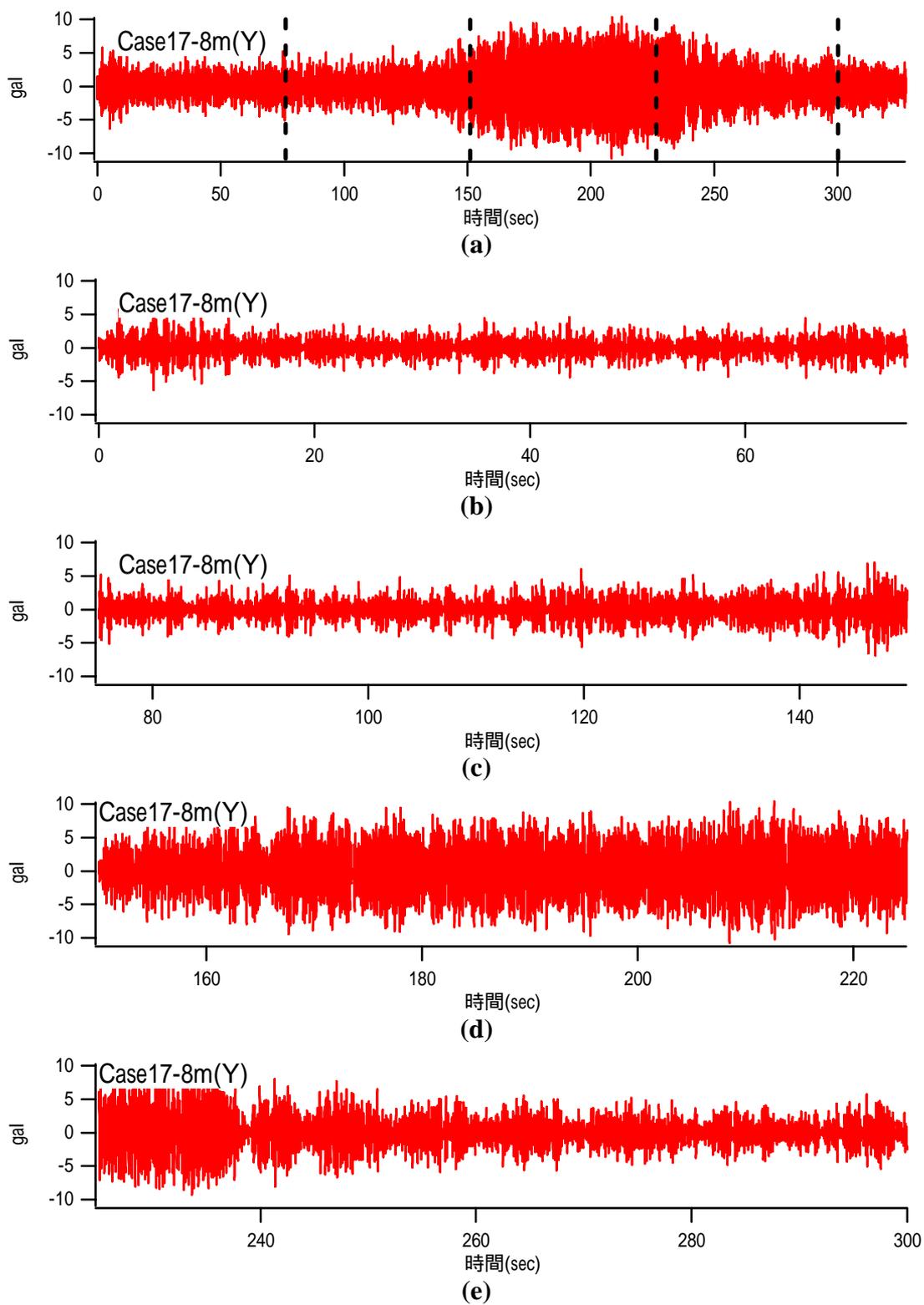


圖 7.22 基礎加速度 Y 方向圖 (a)整體時間域 (b)0~75 秒 (c)75~150 秒 (d)150~225 秒 (e)225~300 秒

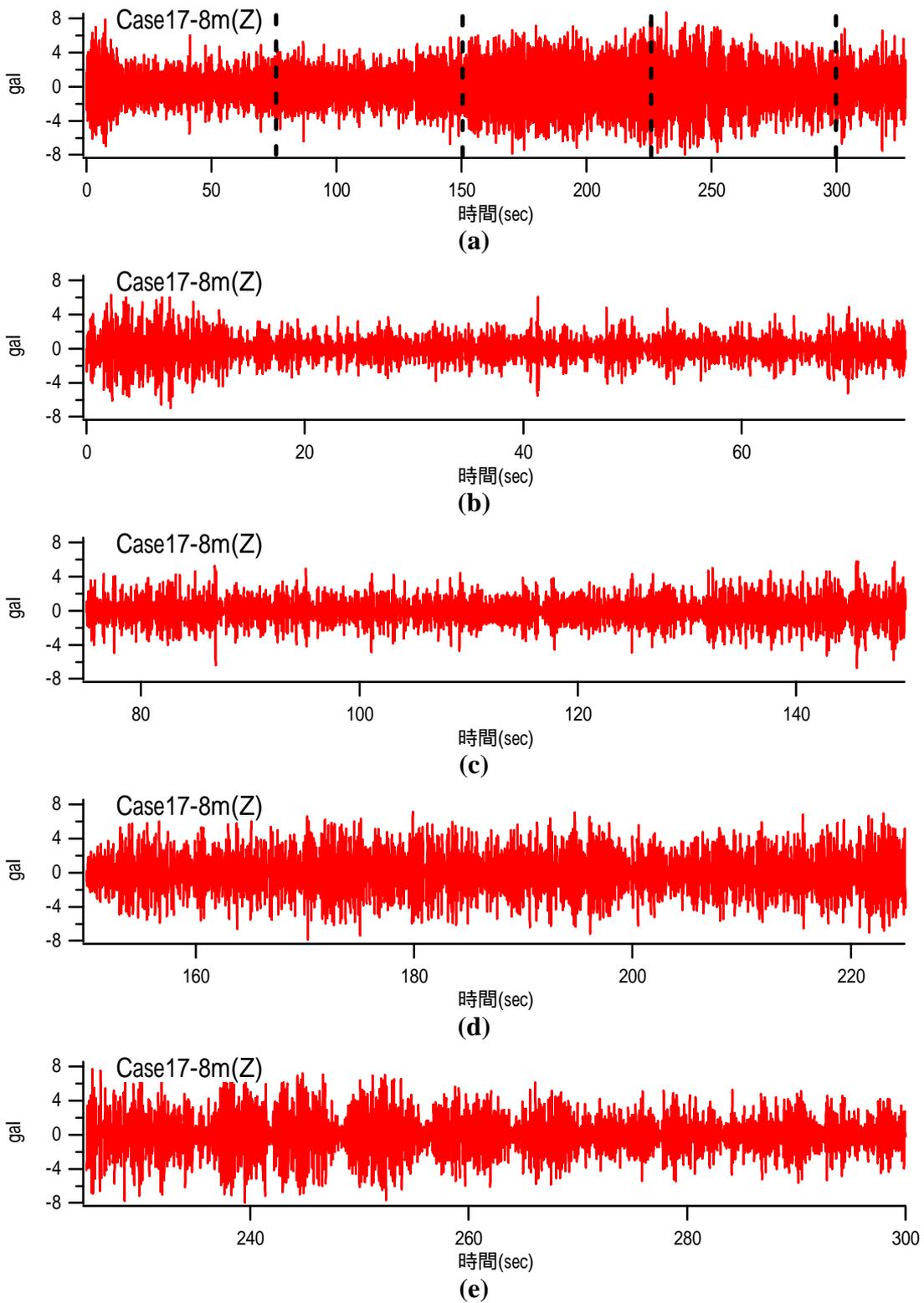


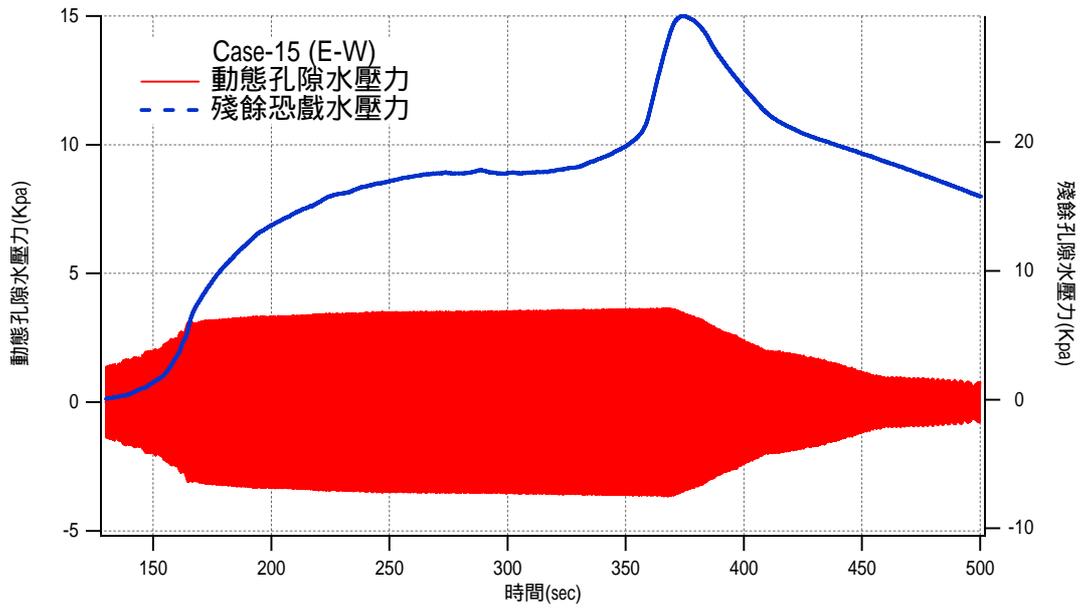
圖 7-23 基礎加速度 Z 方向圖 (a)整體時間域 (b)0~75 秒 (c)75~150 秒  
(d)150~225 秒 (e)225~300 秒

### 7.3.4 孔隙水壓力資料

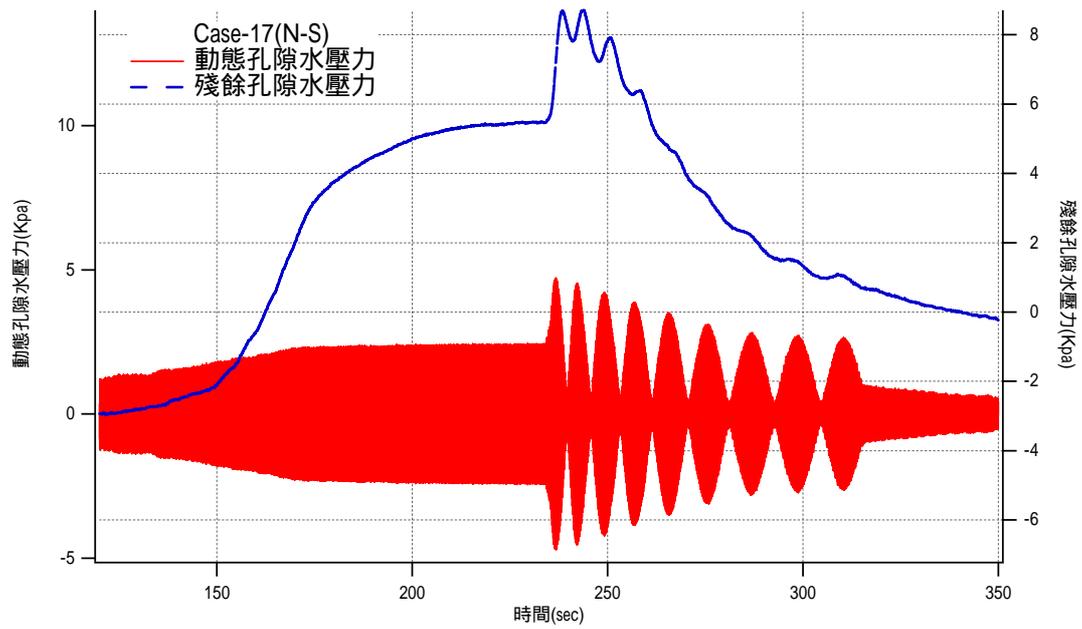
#### 1. 超額孔隙水壓資料

##### (1) 動態與殘餘孔隙水壓力

孔隙水壓力為本試驗之重要量測資料，試驗中孔隙水壓力之變化情形可直接由孔隙水壓計之紀錄觀測。由於擷取系統為以電腦為基礎之作業環境，孔隙水壓計是以電壓變化值來代表孔隙水壓力變化情形，因此由擷取系統擷取之電壓需再以乘上率定常數，將其轉換為水壓力。孔隙水壓力可依特性分為動態(Hydrodynamic)與殘餘(Residual)孔隙水壓力來探討，動態孔隙水壓力為波前通過過土壤傳遞使平均應力改變及可回復剪應變量(recoverable strain)所造成，因此動態孔隙水壓力僅存在於動態加載期間；殘餘孔隙水壓力則於動態加載期間慢慢累積，並在加載結束後漸漸消散至零，其為造成土壤有效應力變化之超額孔隙水壓力。動態孔隙水壓力其變化與加載頻率相同，而殘餘孔隙水壓力則緩慢上升，可視為長週期(低頻率)之訊號，基於此一特性，可利用訊號處理中頻率域低通(low-pass)與帶通(band-pass)濾波加以分離。濾波器之切斷頻率，依訊號特性選用並由濾波後之結果來決定，如圖 7-24(a) Case-15(震源頻率 5 Hz) 使用 4.5~6.5 Hz 帶通濾波分離出動態孔隙水壓，殘餘水壓則由 2 Hz 低通濾波器得到此震源為東西向的震動，圖 7-24(b) Case-17(震源頻率 7 Hz) 使用 5~12 Hz 帶通濾波分離出動態孔隙水壓，殘餘水壓則由 2 Hz 低通濾波器得到而此震源為南北向的震動。



(a)



(b)

圖 7-24 動態孔隙水壓力與殘餘孔隙水壓力圖 (a)東西向震動  
(b)南北向震動

## (2)小震動下孔隙水壓力

圖 7-25 為受震動頻率 5Hz 的小震動下之孔隙水壓力激發情況，由圖可以知所激發的超額孔隙水壓力約 1.5kpa，穩態震動期間為 100 秒到 400 秒之間，隨即開始消散。

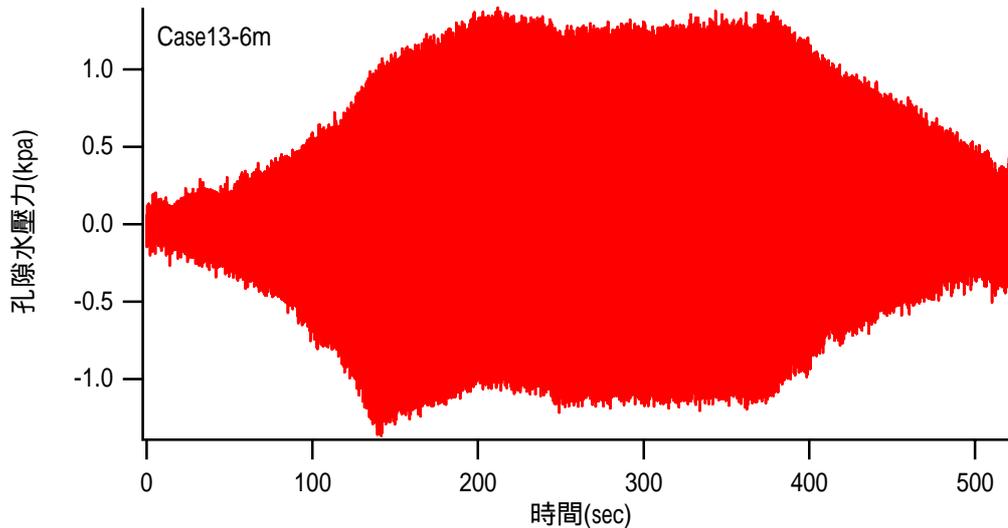
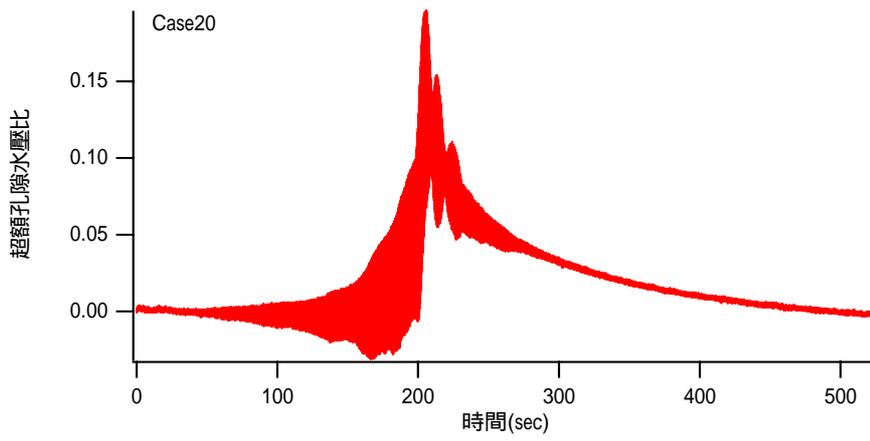


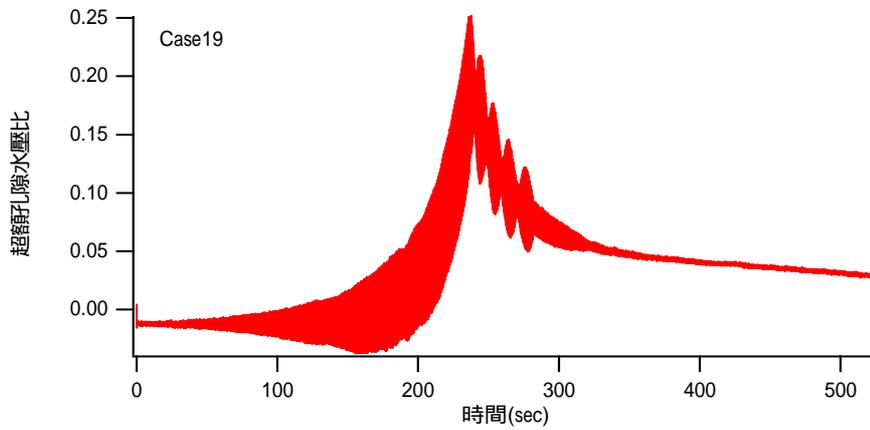
圖 7-25 小震動下孔隙水壓力

## (3)超額孔隙水壓比

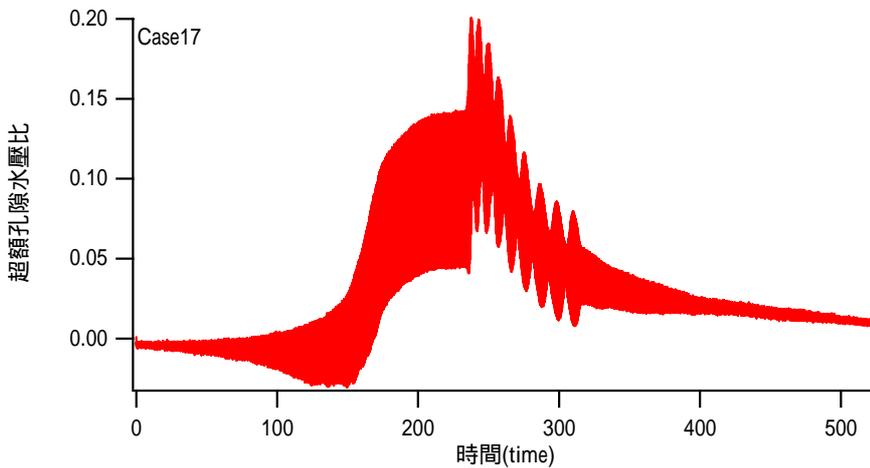
圖 7-26 為在大應變下之孔隙水壓比變化其量測深度為 6m，圖 7-26(a) 為 Case-20 在深度 6m 的感測子超額孔隙水壓力，經過公式計算後其最大超額孔隙水壓比為 0.19，而圖 7-26(b) 為 Case-19 在深度 6m 的最大超額孔隙水壓比為 0.25，但圖 7-26(c) 為同一深度在 Case-19 之額孔隙水壓比歷時，結果顯示在 200~300 秒中超額孔隙水壓比由 0.13 快速升至為 0.2，其原因為基礎下方土層孔隙水壓力之壓力差所產升的滲流作用。



(a)



(b)



(c)

圖 7-26 超額孔隙水壓比圖 (a) Case-20 (b)Case-19 (c)Case-17

### 7.3.5 剪應變與孔隙水壓力耦合反應

## 1. 剪應變歷時

由圖 7-27 為以平面剪力波傳法計算在 6m 深度與 8m 深度的局部剪應變，之後將其平均，代表兩感測子中間深度的平均剪應變，結果顯示平均剪應變為 $6 \times 10^{-3}\%$ 左右，圖 7-28 為利用 6m 深度與 8m 深度的感測子所擷取出的加速度經過二次積分轉變成位移後以剪力樑法，所求出的平均剪應變，代表 6m 至 8m 深度之平均剪應變，其平均振幅約為 $6 \times 10^{-3}\%$ ，二者所得到之結果相近，此因所產生之剪應變振幅相當小 之故。

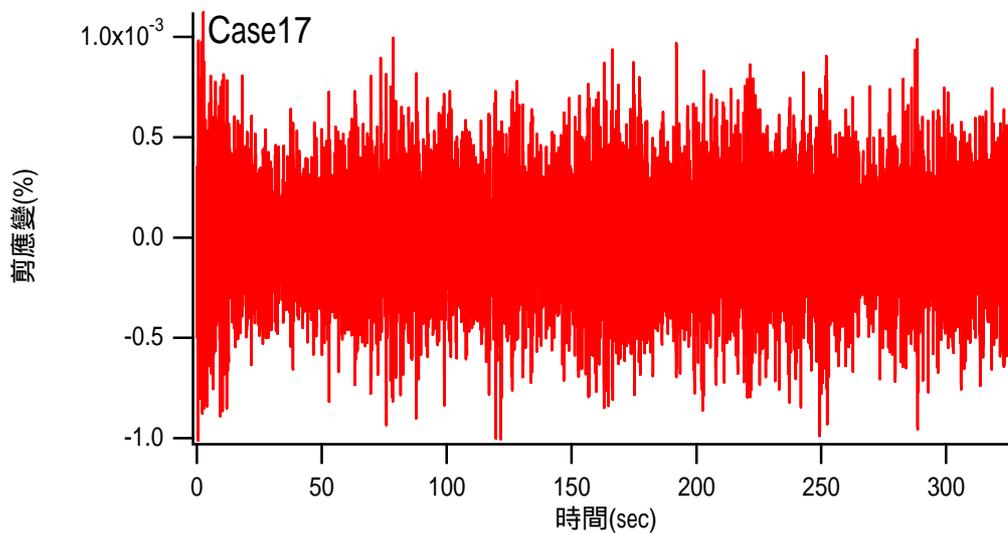


圖 7-27 波傳法平均剪應變圖

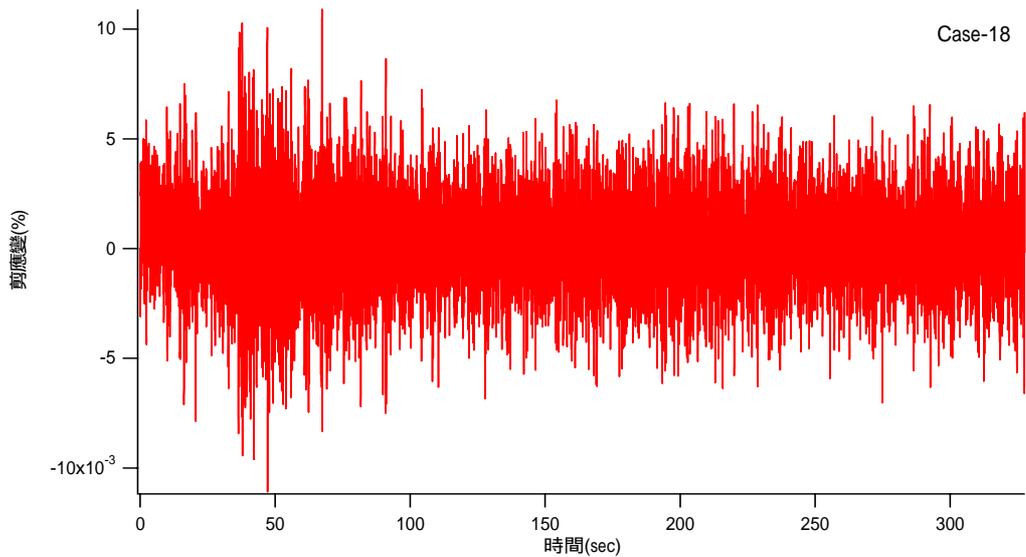
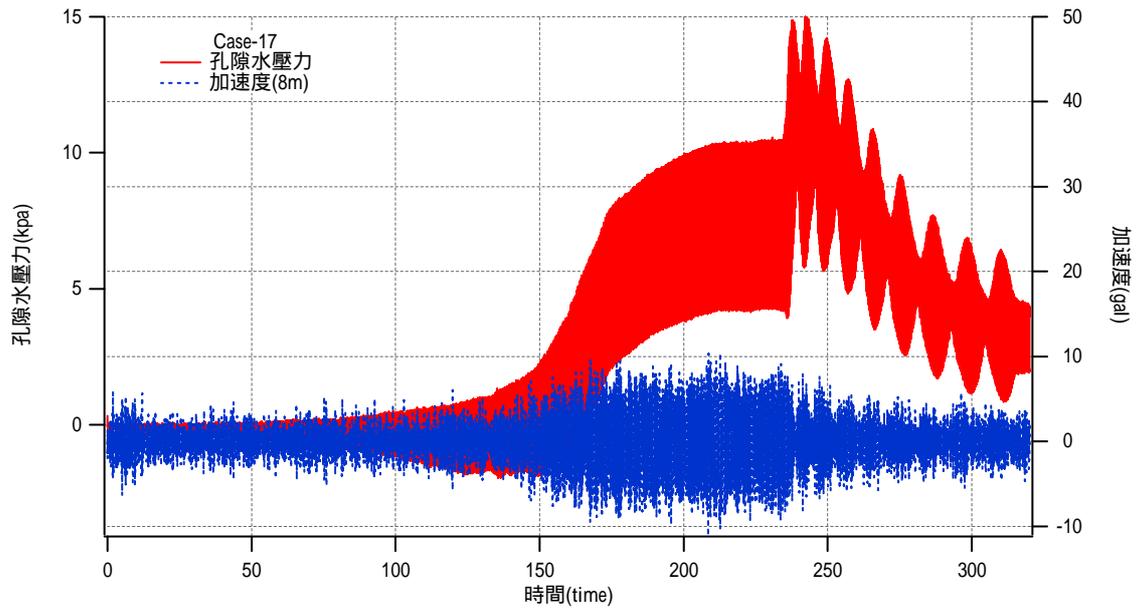


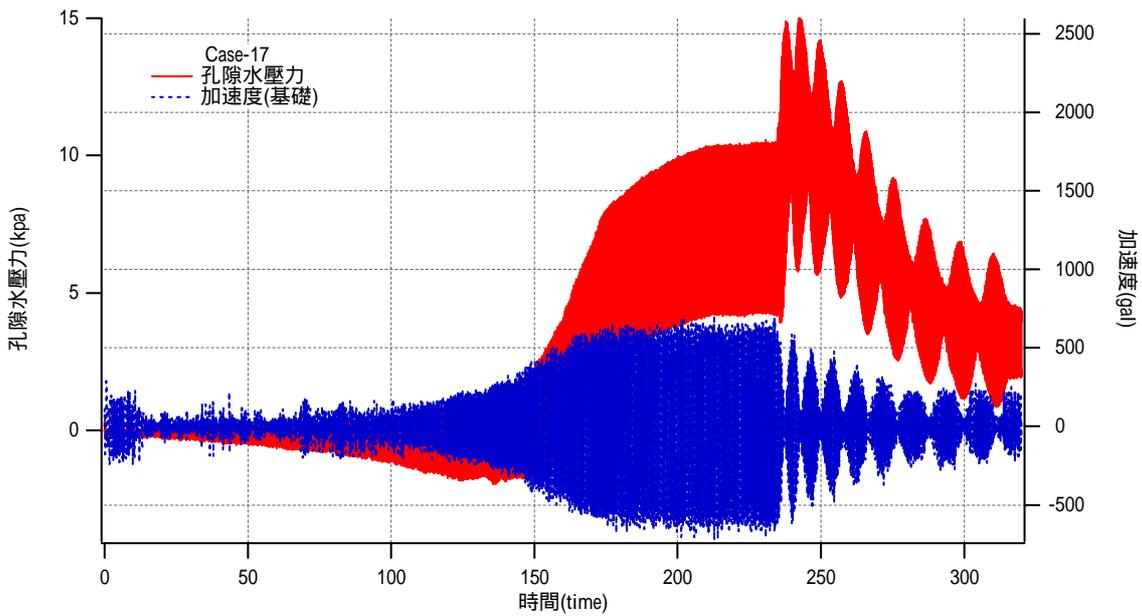
圖 7-28 剪力樑法計算之剪應變圖

## 2. 耦合反應

試驗所研發之耦合感測子，可於現地同時量測土壤受震產生土壤震動與孔隙水壓力激發之耦合行為。圖 7-29(a)為孔內 8m 加速度與孔隙水壓力關係，由所量測之加速度與對應之超額孔隙水壓力激發速率，可將其分為數個階段。其中 0~100 秒為第一階段，此時超額孔隙水壓力比緩慢上升，100~250 秒為第二階段，土壤因持續受到剪應變影響其超額孔隙水壓力迅速上升，第三階段為 250 秒此時受到剪應變影響與受到深層往上滲流之影響使超額孔隙比略微上升一點，第四階段 250 秒後為孔隙水壓力消散階段。



(a)



(b)

圖 7-29 超額孔隙水壓力與加速度耦合關係圖 (a)孔內加速度與超額孔隙水壓力 (b)地表加速度與超額孔隙水壓力

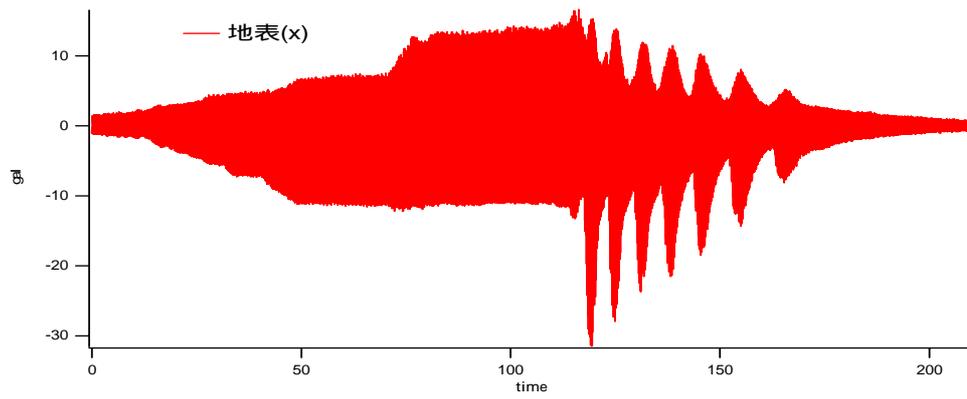
### 7.3.6 現地監測站檢測

#### 1. 加速度計檢測

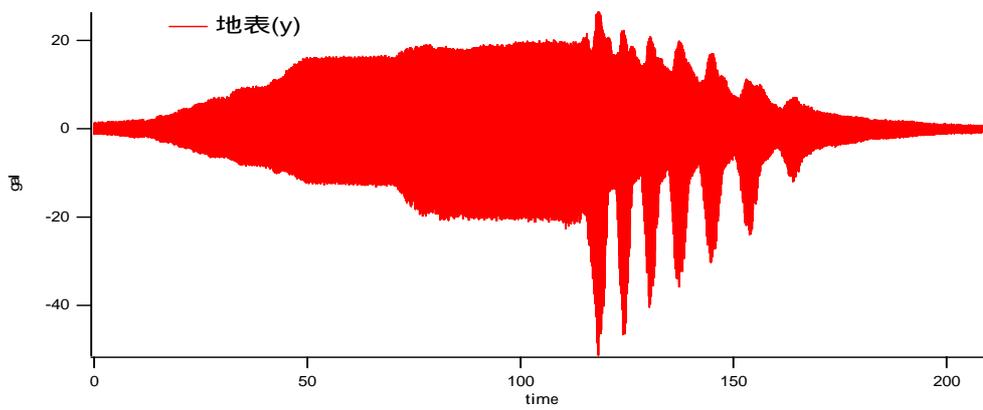
圖 7-30 所示為港研中心之地表加速度歷時，其變化與震動基礎之波形類似，顯示與其狀態正常，且因其位於地表，應有表面波與反射或折射之體波產生，圖 7-30 中顯示其在三個方向均有震動，且最大分量為垂直向，此與理論之波場符合，圖 7-31 所示港研中心孔下 15m 加速度計於 Case-21 之反應，其震動頻率為 7Hz，震動方向為 N-S 向(y 向)，顯示在水向之震動較垂直向為大，兩水平向其振幅約略相等，其原因與波傳路徑有關，由試驗結果顯示，港研中心在 15m 深度內之加速度計運作正常。

#### 2. 孔隙水壓計檢測

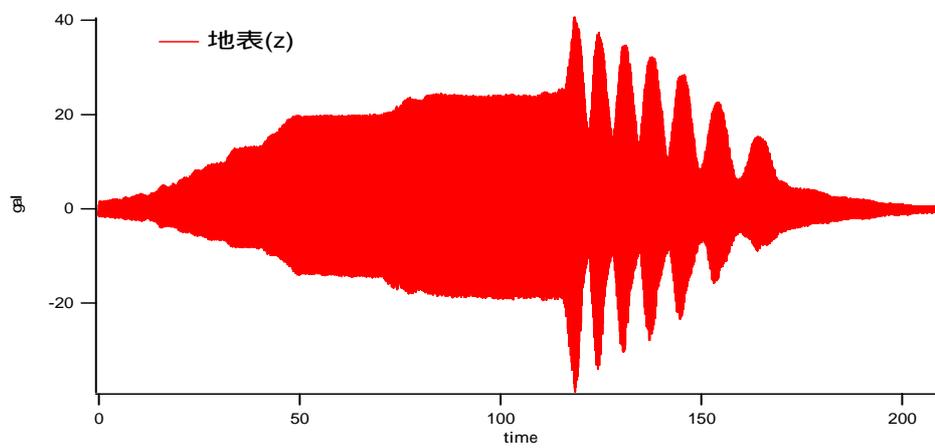
由於所使用之震源能量不足，且震源下方可能因液化使得剪力波無法傳到較深層土壤，因此在港研中心之孔隙水壓計所在位置僅產生動態孔隙水壓力，圖 7-32 為港研中心測站在 8m 深度之孔隙水壓力紀錄，雖然無殘餘孔隙水壓力發生，但由動態孔隙水壓力其波形與周圍加速度計相同，可知其仍正常運作無阻塞與延遲現象。



(a)

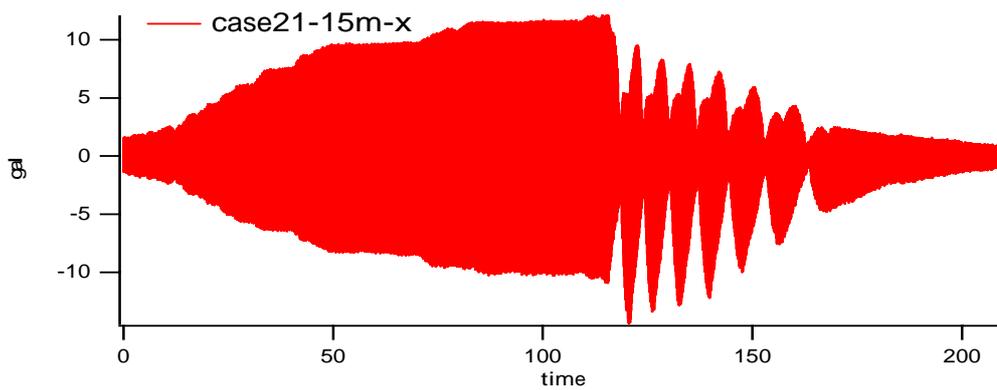


(b)

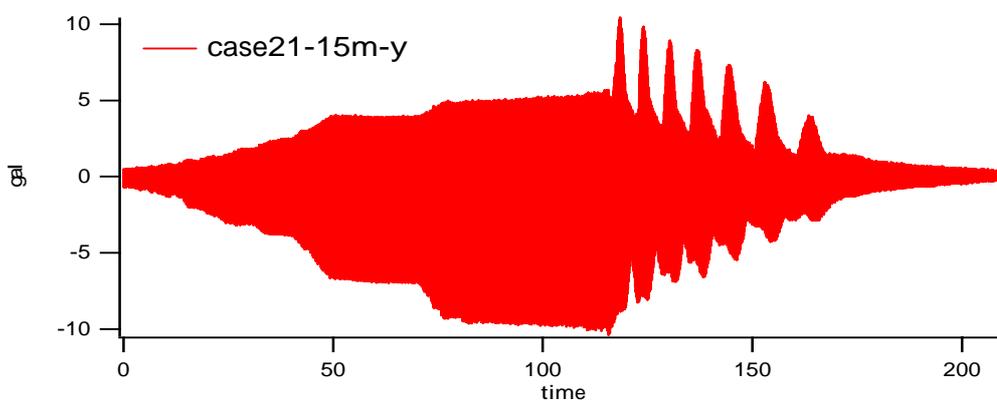


(c)

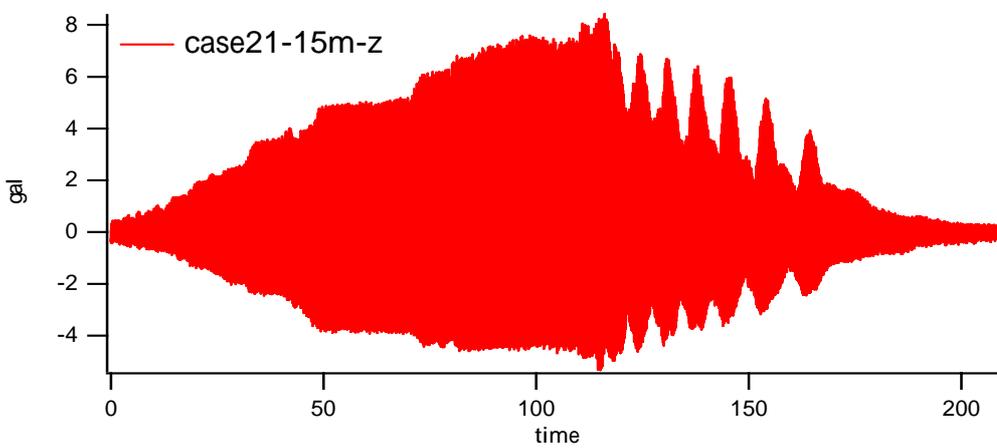
圖 7-30 現地監測地表加速度圖 (a)X 方向 (b)Y 方向 (c)Z 方向



(a)



(b)



(c)

圖 7-31 港研中心孔下 15m 加速度計檢測結果圖

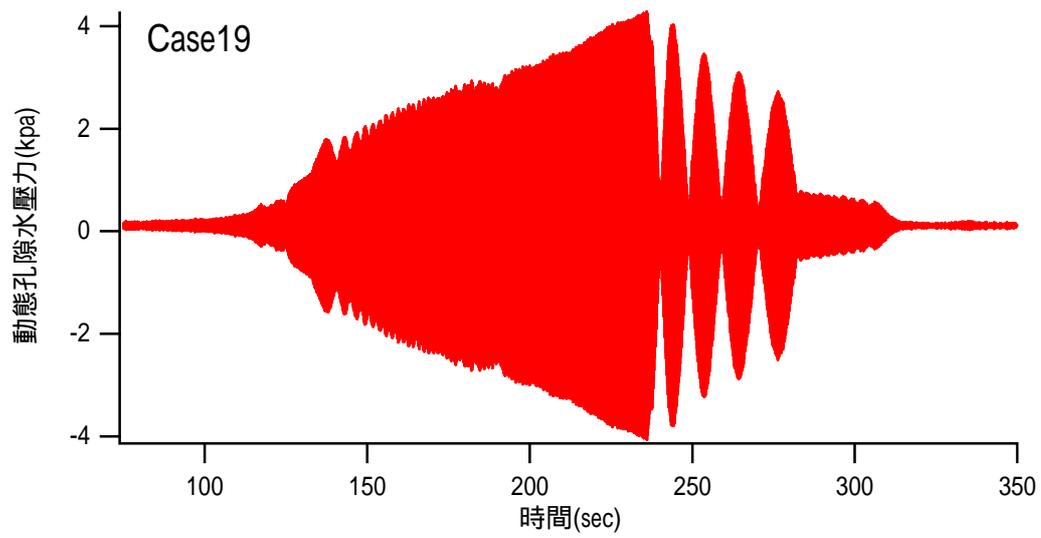


圖 7-32 港研中心地表下 8 m 孔隙水壓力歷時圖

## 第八章 結論與建議

### 8.1 結論

本計畫執行之長期目標之一為建構考慮液化之土壤-樁基礎-結構互制行為之現地觀測站，本年度完成之主要工作項目總結如下：

1. 彙整分析現有國內外港區液化案例及動態試驗相關分析：計收集國內外棧橋式碼頭破壞案例四個，及整理現有基樁動態分析程序，以考慮 BWF 配合自由場有效應力動態分析之土壤-結構-基樁互制模式可提供更多資訊，且為新近之潮流，同時整理大型液化試驗之相關技術，並引入於本年計畫中。
2. 試驗場址地質探勘：計於現地進行 4 條表面震測量測，決定場址之分層與各層之平均波速，並依此結果決定於線地鑽探 3 孔計 30 m，鑽探結果顯示該場址地質概況與相關文獻提及港區土層複雜且變異大之特性吻合，利用鑽孔進行之跨孔震測亦發現其與表面震測結果有相當差異，但其結果與室內薄管試體剪力波速結果相近，顯示該地地質局部差異頗大。
3. 動態特性試驗：本年度計利用整合 Bender element 之動態單剪儀執行三組不同深度土壤動態特性與液化強度試驗，動態特性試驗提供波速與有效應力關係及模數折減曲線及阻尼比曲線，並求得最接近之 Hardin and Drenvich 雙曲線公式之參考應變量(reference strain)，並於三個土層進行液化強度試驗，結果顯示 6 至 10 m 間之試驗土層其  $CRR_{7.5}$  最低，約為 0.28，且因含大量細粒料，使得其行為與一般乾淨之鬆砂不同，近似於緊密砂之特性。
4. 自由場動態有效應力分析：本年度由鑽探與室內試驗結果建立試驗場址土層分佈與材料特性，以 FLAC Dynamic 模組中之 Finn and Byrne 模式及阻滯阻尼，進行考慮孔隙水壓力激發之動態有效應力分析，結果顯示以 FLAC Dynamic 並啟動滲流模式可模擬層狀地盤

震動特性、超額孔隙水壓力激發及滲流影響，結果與現地大型簡諧震源試驗結果接近，因此應可作為後續考慮結構反應分析之基礎。

5. 棧橋式碼頭動態有效應力分析：本年度以台中港 9-11 號碼頭為案例，以集集地震中 TCU059 加速度歷時，利用自由場動態有效應力分析之程序結合橫樑與基樁結構元素，基樁與土壤以 Mohr-Coulomb 型態之正向與剪向彈簧模擬，進行棧橋式碼頭動態分析，結果顯示雖然碼頭後方之回填砂層會產生液化情況，但碼頭本身與下方之土壤並無液化發生，而碼頭前端水下之底部土壤雖不會產生液化但會產生較大變形，導致前方直樁產生較大彎距，基樁最大彎距發生於與樑相接處，但基樁並未破壞，且群樁通過之土壤其最大剪應變與孔隙水壓力激發均較無基樁區域為小，結果顯示分析模式之結果應具相當之價值。
6. 現地大型簡諧震源試驗：本年度於試驗場以可提供震幅達 15 噸之水平簡諧震源於 5m×3m×1.25m(長×寬×高)之場鑄混凝土基礎進行現地震動試驗，結果作為數值分析之驗證與港研中心現地液化監測站系統檢核之用，利用鑽探之鑽孔安裝可於單點量測三向度地盤加速度與孔隙水壓力之感測子，結果顯示現有震源僅能產生超額孔隙比約 0.25 之震動，且其震波侷限於基礎下方鄰近區域，無法檢測較深之區域，但激發之孔隙水壓力與加速度紀錄與自由場分析結果趨勢相同，因此驗證自由場分析有其可靠度，而與現地液化監測站檢核，在地表與 10 m 深度內之加速度計與孔隙水壓力均有激發，量測與數值模擬之加速度之比值在不同點類似，顯示加速度計作用正常，而紀錄之孔隙水壓力其震幅與加速度計同步，顯示其作用正常，無明顯延遲。

## 8.2 建議

針對本年度計畫執行提出下列建議：

1. 由於試驗場址地質剖面變異性大，使得選取合理代表性土壤參數具

相當困難度，且細粒料含量多，因此建議於下一年度增加鑽孔與試驗數量，以進行統計分析。

2. 本年度數值分析時之土壤靜態強度參數與滲透性均以文獻建議數值，建議明年增加此類試驗，另外將參考審查委員建議加入港內潮位之影響。
3. 由於現有場址以水平簡諧震源並無法激發顯著之超額孔隙水壓力，其原因包括震源能量不足與試驗土層不佳，因此下一年度將考慮以震盪震源車進行試驗，並配合重模試坑。由於後續計畫將引入基樁於試驗系統，因此將嘗試以大型重模鬆砂試坑模擬液化土層，將基樁至於重模試坑，並將震源置於基樁頂部之推拉(push over) 試驗。
4. 由於感測器第一次於現地鑽孔安裝，使得 sensor-8m 之孔隙水壓計無法運作，且 sensor-6m 之加速度讀數與孔隙水壓計讀數無法吻合，建議明年度以洗孔方式將其取出重新整修，並整合為現地液化監測站之一。
5. 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，將於下一年度發展參數決定程序或者在 FLAC 架構下撰寫可進行 u-p formulation 計算之組構模式。

## 參考文獻

1. 經濟部水利處中區水資源局(2000), "寶山第二水庫工程計畫壩體動態分析與試驗期末報告", 中華民國八十九年七月。
2. 國家地震工程研究中心 (2000), "921 集集大地震大地工程災害調查報告"
3. 倪勝火 (2001), "液化地區孔隙水壓監測與量測", 國科會專題計畫研究成果期中報告
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 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
8. 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.

9. Chang, W. J. (2002) *Development of an In Situ Dynamic Liquefaction Test*, Ph.D. Dissertation, University of Texas, Austin, TX, USA.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L. (1969), "Finite dynamic model for infinite media," *J. Eng. Mech. Div.*, 95(EM4), pp. 859–877.
15. 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.
16. 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.

17. 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.
  
18. 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.

**交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）  
期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究(1/4)

執行單位：國立中興大學

| 參與審查人員<br>及其所提之意見  | 合作研究單位<br>處理情形  | 本所計畫承辦單位<br>審查意見  |
|--|---|-------------------|
| <b>臺灣大學陳教授正興：</b>  |   |                   |
| 依預定進度表至第二季應完成室內動態單剪與液化試驗以及場址自由場動態有效應力分析，此兩項均未全部完成，應於下半年度內加速研究，以趕上本年度的預期研究目標。       | 謝謝指導，已完成並附於期末報告書中。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| p.32 與 p.33 圖中試驗所得之動態剪力模數及阻尼比所涵蓋之範圍僅限於較大剪應變，缺少應變小於 $1 \times 10^{-2}$ % 之部分是否可做改善？ | 謝謝指導，因限於單剪儀最小位移量之故無法進行應變小於 $1 \times 10^{-2}$ % 之動態特性試驗，但已於單剪儀上增加 bender element 量測剪力波速，作為建立正規化模數折減曲線之用，且與文獻中類似材料之曲線做比較，結果詳見第四章。。 | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| p.34 單剪液化試驗之應力路徑圖與一般常見之試驗結果有所差異，應檢討原因或作改善。   | 謝謝指導，因現地土層變異性大，所試驗之顆粒性土壤其細粒料含量高，因此行為與疏鬆乾淨砂不同，另一原因為試驗時其正向應力採用 Kammer 所建議之應力控制，而非固定體積，其差異性目前正以乾淨砂試體探討中。                             | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| <b>海洋大學簡教授連貴：</b>  |   |                   |
| 本計畫為 4 年期計畫，建議應將整體計畫構想說明清楚，以利評估。   | 本計畫原規劃雖為 4 年期，但因相關研究國內外並無太多可參考之文獻，為保持計畫執行之彈性，以利於分年期修訂，因此僅將當年度構想詳列，但整體目標僅綱要說明。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |

| 參與審查人員<br>及其所提之意見   | 合作研究單位<br>處理情形  | 本所計畫承辦單位<br>審查意見  |
|---|---|-------------------|
| 本研究結合數值、實驗室與現地相關監測，以評估探討土壤液化之動態反應，對大地工程實務之應用有價值；工作內容大致符合要求。   | 謝謝委員之意見。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 資料收集偏重動態相關試驗分析，應強化收集國內外有關港區液化案例（如 921 台中港、1995Kobe 大地震人工島），提供參考。  | 國內外港區液化案例已增補於期末報告中。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 本年度工作項目有規劃 CPT 試驗調查，惟試驗內容並未論述，請澄清說明   | 限於經費與計畫時程，本年度並無進行 CPT 試驗調查，此部份已於計畫執行書更正。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 依鑽探資料顯示，港研中心液化監測站之鑽探結果(如表 2.1)與本研究 3 孔鑽探資料（如圖 2.7）差異頗大，請說明鑽孔孔位間分佈之可能原因。                                     | 現地土層因其形成環境，而具高度變異，此一現象於港研中心前期相關調查計畫中已有多位專家提及，並已引用於 5.2.1 節，且比較第 1、2 孔資料、跨孔量測與 MASW 之結果均顯示此一不均勻土層特性。而鑽探結果其 SPT-N 值基本上與跨孔波速量測吻合，因此其鑽探資料應無誤。 | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 請補充本案 SPT-N 試驗是否進行落錘能量檢測，以作為 SPT-N 值修正及液化評估使用。  | 本計畫並無規劃此一項目，但會於後續年度計畫慎重考慮。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 本研究採用 GCTS 系統進行動態試驗，採用剪動頻率 1Hz 超額孔水壓比達 0.9 或剪應變達 3%，分析評估似與一般動態或液化分析不符，請說明原因或考量。                             | 由於現地土層屬細粒料含量極高之粉土，因此以達到超額孔水壓比 1.0 並不容易，因此參考國外粉土質土壤試驗建議(Kammerer 2002, Hazirbaba 2005)，定義超額孔水壓比達 0.9，而剪應變振幅達 3% 為常用之液化定義。                  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 圖 2.9 所示 $v'_v=150\text{kpa}$ ，與 BH-1，T-1 取樣深度僅 1.5m 左右所對應 $v'_v$ 不符，若評估現地土壤液化特性其考量如何？請說明。另補充土樣相關基本性質，以利評估。 | 進行後續相關分析時所用之動態特性主要由現地剪力波速與正規化模數折減曲線推求，而本計畫於小應變下之特性主要由波速與文獻建議曲線比較，因此其影響應有限。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |

| 參與審查人員<br>及其所提之意見   | 合作研究單位<br>處理情形   | 本所計畫承辦單位<br>審查意見  |
|---|--|-------------------|
| 有關地層幾何模型建立中，土層阻尼比本研究依 Biggs(1964)採用在自然頻率下 5% 即可，與圖 2.8 中阻尼若以 3% 剪應變所對應 Damping Ratio 約為 25% 差距頗大，請說明。                                 | 已改用 Hysteretic 模式，並以 Hardin and Drenvich (1972) 所提出之模式，由試驗資料求取較符合之 reference strain，結果如表 4.1 所示。 | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 棧橋式碼頭液化分析，建議應適度將潮位、水位之變化納入考量，以符實際需求。  | 因本年度為第一年，重點為相關分析架構建立，所以尚未將殘餘水位變化列入分析，但以 FLAC 之地下水分析模式，若能得知殘餘水位與潮位資料，其分析應無困難，會於後續計畫增補。            | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 港研中心過去已累積台中港區相當豐碩液化成果，建議本研究應用。  | 已應用於自由場與棧橋式碼頭分析中。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| <b>港研中心謝研究員明志：</b>  |  |                   |
| 依工作進度甘特圖，期中報告之前應完成各項室內試驗，而表 2.3 也將室內試驗的項目列出。但簡報內容卻有列出 BH1、BH2、BH3 各一薄管的單剪結果，故期中報告不足的部分，請於期末報告中補上。                                     | 已增補於第四章。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 動態特性的結果圖，盼能結合現地及室內試驗，由小應變繪到大應變，以較完整呈現其動態特性分佈範圍。   | 已增加剪力波速量測結果，並引用文獻建議之典型曲線，結果詳見第四章。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 由圖 2.5 顯示，深度 5m ~ 10m 間，Vs 約在 200 m/s 附近，幾無變化，但這一土層在表 2.1 內，其 SPT-N 值由 12 增至 21，BH3 之鑽孔資料，N 值也由 7 增至 19，N 值增加約兩倍，但 Vs 卻沒甚麼變化，請檢核試驗資料。 | 因現地土層變異性大，即使本計畫之鑽探結果亦與港研中心結果有所差異，但因 MASW 所量測為土層之“平均”特性，因此導致相關誤解。                                 | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 圖 2.5 之說明文字，是否 SASW1 與 MASW1 為同一測線，否則，應將 SASW1 改為 SASW2。  | 此為相同測線但同時應用兩種量測方法。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| p.31 倒數第二行取 N = 15 時，代表 M = 7.5，但 Das 一書在介紹單剪儀試驗時，卻取 N = 20 代表 M = 7.5，何者為宜，請查驗。  | 本研究所用 N=15 為以現地試驗資料進行液化潛能評估時之數值，應無誤。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |

| 參與審查人員<br>及其所提之意見  | 合作研究單位<br>處理情形 | 本所計畫承辦單位<br>審查意見  |
|--|----------------|-------------------|
| <b>港研中心賴研究員聖耀：</b>   |                |                   |
| 由簡報內容可知研究團隊很用心的執行本計畫，而且內容相當新穎豐富，但研究報告初稿似乎是來不及將研究內容清楚的表現出來，希望期末報告時能改進。        | 遵照辦理。          | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 研究報告內容可盡量詳細，有很多項目，如地震或人工地震引致孔隙水壓之文獻探討、自由場動態有效應力分析、棧橋式碼頭之液化側潰模擬分析等皆可專章詳細討論分析。 | 遵照辦理。          | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |

**交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）  
期末報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究(1/4)

執行單位：國立中興大學

| 參與審查人員<br>及其所提之意見   | 合作研究單位<br>處理情形  | 本所計畫承辦單位<br>審查意見  |
|---|---|-------------------|
| <b>臺灣大學陳教授正興：</b>   |   |                   |
| 預定工作項目均已按期執行，符合計畫書中之預定進度表。惟預定工作項目第 6 項中，原擬採用大型震盪震源車，而實際採用偏心質量起振器作試驗，應特別說明原因及變更理由。   | 原執行計畫規劃為採用大型震盪震源車或偏心質量起振器，由於試驗配置僅有二組不同深度之感測器，因此以平面剪力波方式可使波傳行為單純化，但大型震盪震源車僅能產生垂直向震動，因此採用偏心質量起振器作為振源。 | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 報告書中很多圖表都為掃描圖表，字體與圖形不清楚，應改善品質，以提高閱讀性。   | 掃描圖形將於報告定稿改善，但由於 FLAC 之後處理無法輸出數值重繪，僅能利用程式輸出圖形，因此將建議港研中心以彩色列印，明年將以 FLAC 之 FISH 撰寫數值輸出程式改善。           | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 報告書中錯別字很多，應更正，例如 P.14“Bean”，“Winker”，P.16“Bean” P.43“阻泥比”，P.79“Winker” P.80“Bean”，P.81“再撲以床版組成” P.84“配和”，P.88“受力石” P.89“於於”，P.138“線地鈷探”以及其他等等。      | 已於定稿中修正。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| FLAC 分析結果圖中之顏色甚淺，無法分辨不同之曲線。   | 已改變顏色對比，並建議以彩色列印輸出。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 下列具疑義，請補充說明。<br>P.86 表 6.3 何謂“基樁元素 Mohr-Columb 介面”？為何對 Grav 與 Soil 兩者所選用之參數均一樣？<br>P.86“結構元素以 Rayleigh 阻尼設為勁度之 2%”之意義為何？<br>P.87“底部底部以 x 與 y 均啟動之安定 | ”基樁元素 Mohr-Columb 介面”應為”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”，將介面彈簧以具有凝聚力及與正向應力成正比之彈簧模擬，其性質應與 | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |

| 參與審查人員<br>及其所提之意見                               | 合作研究單位<br>處理情形  | 本所計畫承辦單位<br>審查意見  |
|---|---|-------------------|
| 邊界(Quiet Boundary)設定”是指何？                       | <p>接觸之土壤相關，但因本年度為初步分析，主要重點為分析程序架構建立，詳細參數將於後續年度進行。</p> <p>“結構元素以 Rayleigh 阻尼設為勁度之 2%”之意義為 Rayleigh damping 中 <math>c = \alpha M + \beta K</math> 中令 <math>\alpha = 0</math> , <math>\beta = 0.02</math></p> <p>“底部底部以 x 與 y 均啟動之安定邊界(Quiet Boundary)設定”為符合圖 5.1 之柔性底部，於底部設定可吸收波傳方向為 x 與 y 向之應力波。</p> |                   |
| 結論應作更明確的闡述，指出具體成果。建議事項 3 應作更具體之說明，並評估其可行性與預期效果。 | <p>已增加說明於結論與建議事項，針對現有場址以水平簡諧震源並無法激發顯著之超額孔隙水壓力，其原因包括震源能量不足與試驗土層不佳，因此下一年度將考慮以震盪震源車進行試驗，並配合重模試坑。由於後續計畫將引入基樁於試驗系統，因此將嘗試以大型重模鬆砂試坑模擬液化土層，將基樁至於重模試坑，並將震源置於基樁頂部之推拉 push over 試驗。</p>  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 成功大學陳教授景文：                                      |   |                   |
| 研究團隊能夠完成此一內容複雜之研究，值得稱賀。                         | 謝謝指導。   |                   |
| 報告中對於”對策”相關之議題著墨不多，尤其是在地層調查分析方面，可以改進。           | <p>本案研究範圍廣，在期中報告審查確認研究範圍後，便針對軟弱分區 災損案例蒐集分析及設計處理對策擬定等工作進行，因此，對於地層僅止於概要性的描述，詳細的調查分</p>  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |

| 參與審查人員<br>及其所提之意見  | 合作研究單位<br>處理情形   | 本所計畫承辦單位<br>審查意見  |
|--|--|-------------------|
|  | 析將在第二年度繼續進行。   |                   |
| 臺灣西南沿海地區有許多高孔隙比之粉土細砂，其壓縮性高而強度低，建議在這些問題加強討論。  | 謝謝指導，如前所述，本案研究範圍廣，因此部分內容將無法深入研究。委員所提的確實是一很好的研究主題對象，可建議港研中心將其列為未來之研究目標。 | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| <b>海大簡教授連貴：</b>  |  |                   |
| 本研究計劃考量架構液化之土壤-樁基礎-結構互制行為之現地觀測站，規納現地土壤液化機制及碼頭動態受損型式，對港灣及海岸之液化防制有其必要性與貢獻，研究團隊努力已有初步成果，且已建置動態試驗系統之整合及現場試驗，實屬不易，值得肯定。 | 謝謝委員肯定。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 本計畫若規劃為四年期延續性計畫，建議應有分年完整計畫(Master Plan)之構想以利評估；另期初或期中相關審查意見應有適當之補充說明。  | 已列於定稿之附錄中。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 本年度工作項目 5.進行自由場動態數值分析，初步擬定所需監測系統規格與配置，請補充說明。   | 已列於定稿中增補。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 報告書寫建議，期能以期末報告方式說明，避免期初計劃書型式說明，如表 1.1 預定進度甘特圖。   | 將於定稿中改善。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 第二章棧橋式碼頭破壞案例與動態分析文獻回顧<br>(1)建議能多收集不同型式碼頭動態破壞案例，供評估參考。<br>(2) PP.11 有部份文章重復請修正，另引用資料圖號標示不符(如圖 5.1.20 及 5.2.21)，請修正。 | 已收集日本與臺中港案例說明，錯誤部分已修改。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 第三章研究場址與地質探勘<br>(1)資料引用應完整避免誤解，如 PP.23“....，此次地震發生土壤液化地點.....”，請補充說明。  | 已於定稿中補充。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |

| 參與審查人員<br>及其所提之意見   | 合作研究單位<br>處理情形   | 本所計畫承辦單位<br>審查意見  |
|---|--|-------------------|
| 第三章研究場址與地質探勘<br>(2)前期鑽探紀錄如表 3.1 所示，與本次鑽探(表 3.4)及剪力波速剖面(圖 3.4，圖 3.6)成果差異頗大應有說明，以利評估。   | 其原因為現地土層變異大，分析時改以代表平均波速之表面震測為主。                              | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 第三章研究場址與地質探勘<br>表 3.3 中 5~10m 深度屬軟弱細砂夾粉土層，主要依據為何，請說明。建議可利用鑽探資料，繪製幾個示範工址土層剖面，供參考。  | 分層依據主要為鑽探與室內試驗結果，由於現地土層變異大，且鑽探數量有限，因此無法繪製詳細之工址土層剖面。          | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 第四章室內土壤動態試驗<br>(1)請說明動態強度試驗及動態特性試驗，請說明所採用試驗頻率為何？以利評估比較。   | 試驗頻率為 1Hz。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 第四章室內土壤動態試驗<br>(2) 4.2.3 下方土層定義，不是很清楚？請再斟酌。   | 其用意為指出在試驗土層以下。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 第四章室內土壤動態試驗<br>(3) 請說明本研究單剪試驗對土壤液化之定義？若採用 CRR， $r_u=0.9$ ，與目前一般定義可能產生差異性？請說明。   | 由於現地土層為具高細粒料之粉土或細砂，因此其液化均為剪應變振幅達到 3%，與一般定義(Ishihara 1996)相近。 | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 第四章室內土壤動態試驗<br>(4)薄管土樣試驗與重模土樣試驗結果之比較分析？   | 本年度因薄管土樣足夠，因此不進行重模土樣試驗。                                      | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 第五章有效應力動態數值分析<br>(1)PP.63 考慮試驗土層上方與下方土層會液化，試驗土層 $(N_1)_{60}=17$ ，上方與下土層 $(N_1)_{60}=21$ ，如何考量請補充說明。(2)表 5.1 自由場分析土層分佈中 Soil1、Soil2、Soil3 液化條件“可”，及表 5.2 自由場分析土層參數與鑽探成果是否符合？請說明。 | 主要為參考本次鑽探紀錄與前期紀錄以及比較其 CRR 值，下方土層之上半部會液化。                     | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 數值分析案例模型中，圖 6.3 是否有考量或反應港內潮位之影響？  | 本年度並無考慮，但已於建議中說明將於後續分析加入港內潮位之影響於穩態分析中。                       | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 第七章現地地表震源震動試驗<br>(1)圖 1.2(b)與圖 7.1，應為圖 1.1(b)請修正。   | 已修正。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |

| 參與審查人員<br>及其所提之意見   | 合作研究單位<br>處理情形  | 本所計畫承辦單位<br>審查意見         |
|---|---|--------------------------|
| <p>第七章現地地表震源震動試驗</p> <p>(2)建議評估大型動態水平力震源系統，是否能達到原先規劃現地土壤液化試驗之目標？以作為下階段試驗之參考依據。</p>  | <p>因本年度目標之一為檢核現有監測站，與測試相關試驗系統，由於後續計畫將引入基樁於試驗系統，因此將嘗試以大型重模鬆砂試坑模擬液化土層，將基樁至於重模試坑，並將震源置於基樁頂部之推拉(push over) 試驗，因此試驗場址可將於現有廠址旁，以重模試坑進行試驗。</p>                         | <p>同意合作研究單位之說明與處理情形。</p> |
| <p>本年度相關動力試驗成果，應可與港研中心過去研究成果作比較評估分析，尤其是不同試驗系統成果之比較評估。</p>   | <p>將於下一年度請港研中心提供資料並進行比較評估。</p>  | <p>同意合作研究單位之說明與處理情形。</p> |
| <p><b>港研中心謝研究員明志；</b></p>   |   |                          |
| <p>本研究報告中所完成之現地或室內試驗，建議將這些結果以附錄方式附加在報告後面。</p>   | <p>本報告已將大部分之結果整理於文中，相關成果可於下一年度整理。</p>   | <p>同意合作研究單位之處理情形。</p>    |
| <p>P.28，圖 3.6 跨孔法與表面波法量測(SASW 或 MASW)結果，其剪力波速有明顯差異，請說明可能影響因素。</p>   | <p>以跨孔法所得之波速均較 MASW 之數據為低，其原因可能為鑽探時擾動與土層變異性較大，但所得波速與室內薄管取樣之試體剪力波速相近，另由鑽探結果與另兩條 MASW 之結果比較，發現現地土層其變異性相當大，考慮表面波震測所得為整體平均之性質，因此後續分析將以 MASW 之結果作為彈性與微小應變下之土壤參數。</p> | <p>同意合作研究單位之說明與處理情形。</p> |
| <p>一般而言，土層愈堅硬，波速傳遞應愈快，在表 3.1 中，深度 4m 之 N=2，7m 之 N=12，8m 之 N=21，據此觀察，跨孔法的波速有依 N 值而增加之趨勢，但表面波量測法的波速在這幾個位置都很接近，感覺跨孔法較符合土質現況，但在自由場程式分析時，卻</p> | <p>以跨孔法所得之波速均較 MASW 之數據為低，其原因可能為鑽探時擾動與土層變異性較大，但所得波速與室內薄管取樣之試體剪力波速相近，另由鑽探結果與另兩條</p>  | <p>同意合作研究單位之說明與處理情形。</p> |

| 參與審查人員<br>及其所提之意見   | 合作研究單位<br>處理情形  | 本所計畫承辦單位<br>審查意見  |
|---|---|-------------------|
| 採用表面波法 MASW 的結果，請說明為何採用 MASW 法的結果。  | MASW 之結果比較，發現現地土層其變異性相當大，考慮表面波震測所得為整體平均之性質，因此後續分析將以 MASW 之結果作為彈性與微小應變下之土壤參數。  |                   |
| 現地液化試驗因儀器的限制無法做到液化現象出現，是否對本計畫有所影響？後續計畫有否其它補救方法？   | 因本年度目標之一為檢核現有監測站，與測試相關試驗系統，由於後續計畫將引入基樁於試驗系統，因此將嘗試以大型重模鬆砂試坑模擬液化土層，將基樁至於重模試坑，並將震源置於基樁頂部之推拉 (push over) 試驗，因此試驗場址可將於現有廠址旁，以重模試坑進行試驗。 | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| <b>港研中心賴研究員聖耀；</b>  |   |                   |
| 本計畫今年完成了現地震測試驗、室內動力試驗、棧橋式數值分析、及現地地表震源震動試驗等多項研究項目，研究項目很多但研究團隊戮力完成在此肯定你們的付出。                                  | 謝謝委員肯定。   | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 因為研究項目很多，時間又非常急迫，報告內容中有很多排版錯誤及打字之錯別字，如 P.10 及 P.11 幾乎重覆列印而且未附圖，正式報告時請幾位研究生多檢查一下。                            | 已於定稿中改善。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |
| 今年度現地地表震源震動試驗採用之現地人工震源為 16T，動力稍嫌不足，僅能激發約 20% 之孔隙水壓，希望明 (96) 年度於進行模擬基樁試驗時，可租用到中油 40T 之震源車，以量測出研究場址液化之加速度臨界值。 | 將於下一年度努力與中油溝通。  | 同意合作研究單位之處理情形。    |
| 本研究地點孔隙水壓激發之震動臨界加速度為何？請補充說明；另以數值分析臺中港 9~11 號棧橋式碼頭之耐震能力是多大？請說明。  | 由於相關參數仍須進一步率定，因此建議於下一年度進行。  | 同意合作研究單位之說明與處理情形。 |

# 現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究(1/4)



期末報告書初稿簡報

主持人：林炳森

協同主持人：張文忠

95.11.16 IHMT

# 簡報大綱

---

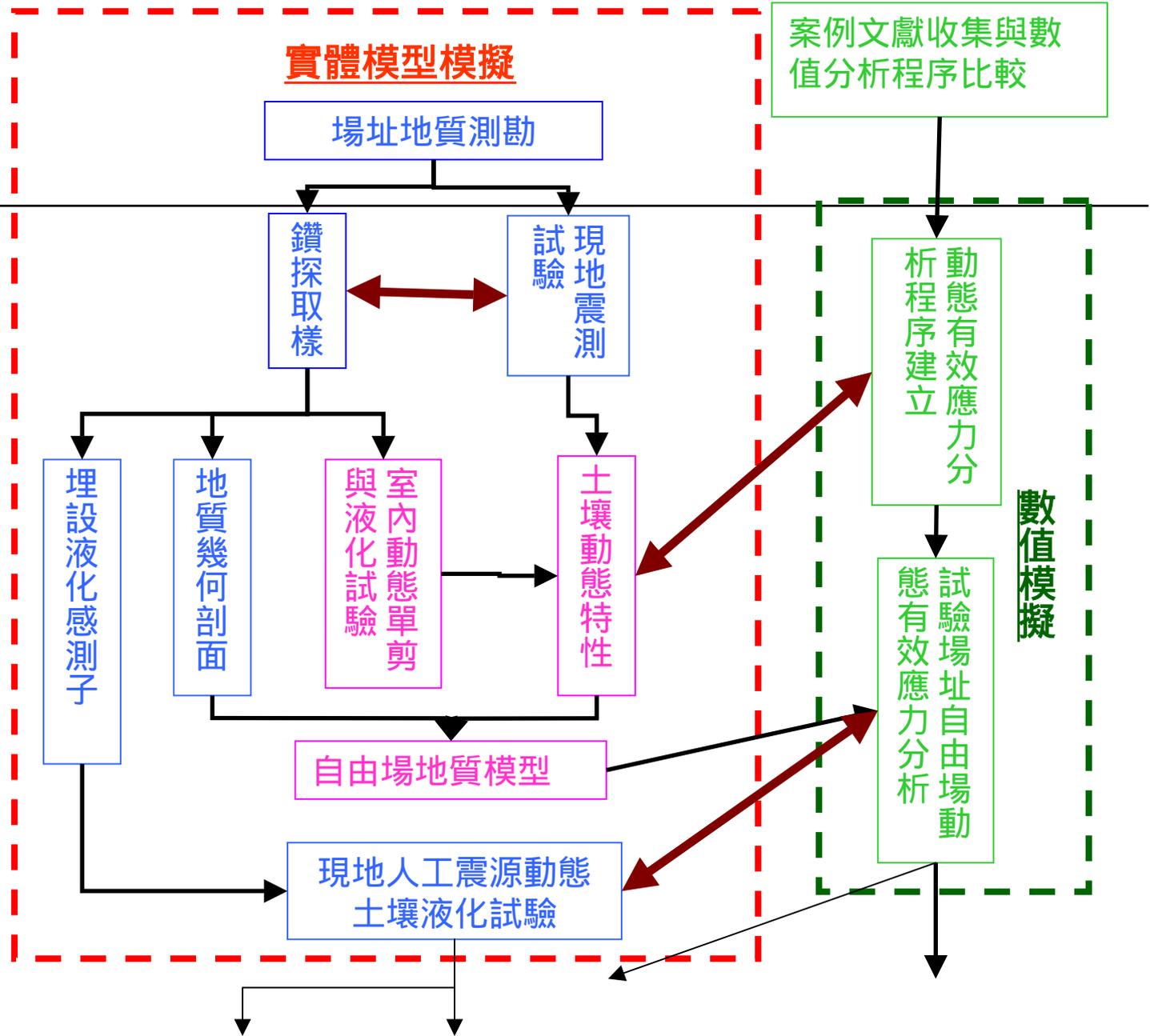
- 計畫目的與流程
- 本年度研究成果
  - 彙整港區液化案例及動態試驗相關分析
  - 試驗場址探勘
  - 室內重模土樣動態單剪動力性質與液化試驗
  - 自由場動態有效應力數值分析
  - 液化側潰對棧橋式碼頭之群樁基礎影響數值分析
  - 現地大型振源震動試驗與現有液化監測站功能檢測
- 總結與建議
  - 本年度成果總結
  - 後續工作建議

# 95年度計畫目的

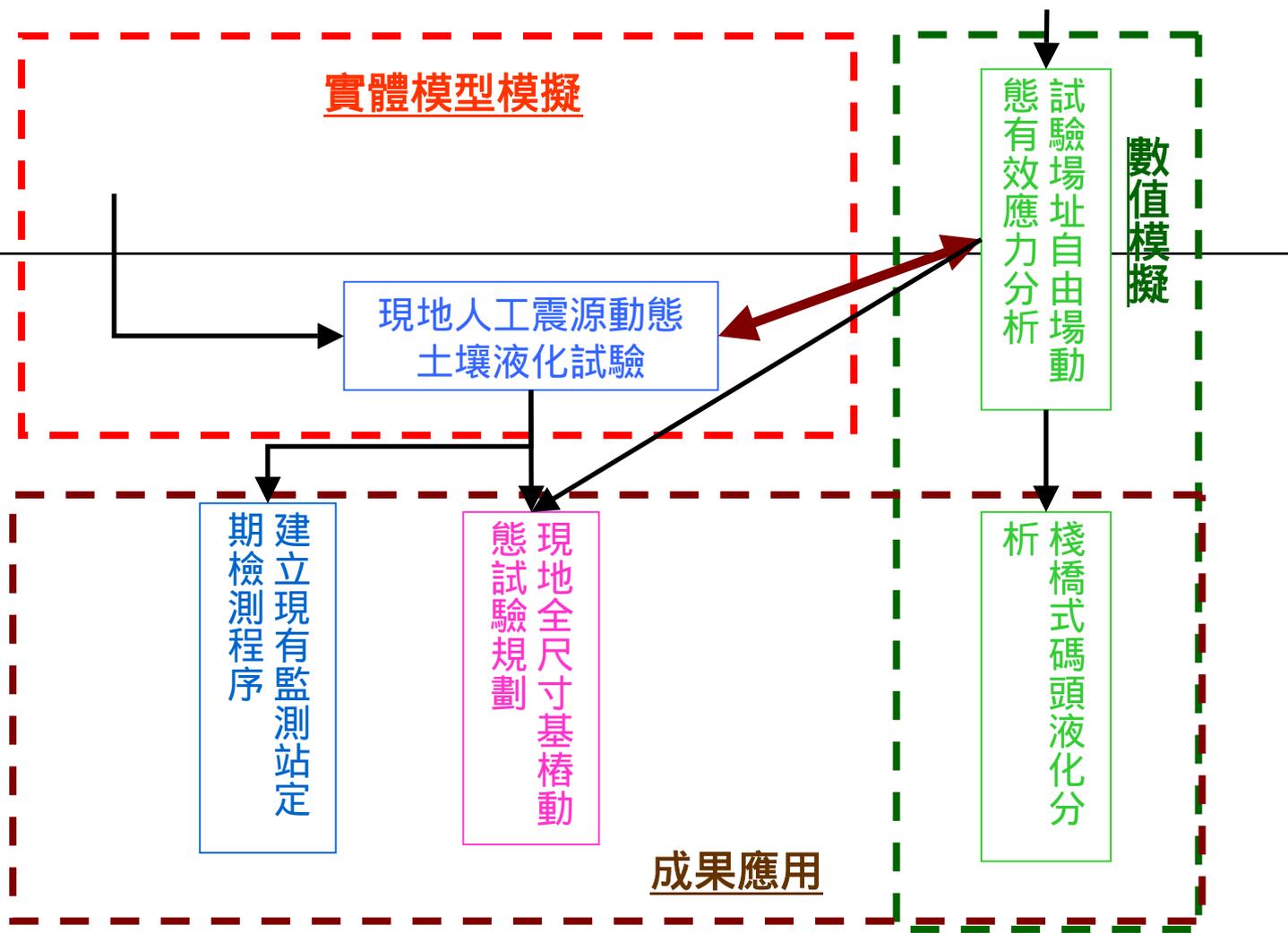
---

- 進行土壤 - 樁基礎 - 上部結構之動態有效應力分析做為進行安全性評估及防制對策之依據
- 設立永久之現地監測站或進行現地基樁液化試驗之基礎之前期準備
- 以現地土壤液化試驗量測現地土層局部耦合反應並定期檢測現有現地監測站功能

# 研究流程



# 研究流程 (續)



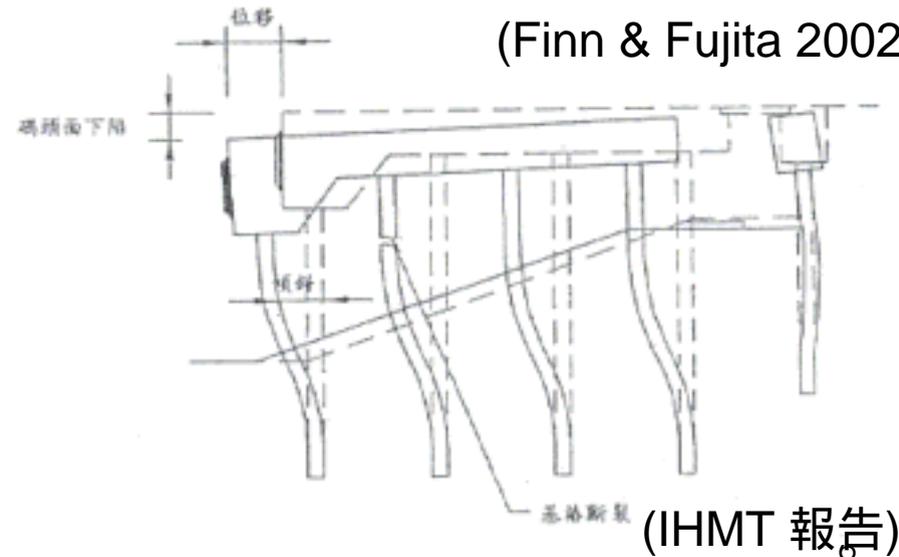
# 研究成果-

## 棧橋式碼頭液化案例

- 棧橋式碼頭地震案例
- 破壞模式：
  - 基樁結構
  - 上部結構
  - 附屬設施



(Finn & Fujita 2002)



# 研究成果 - 動態分析文獻

## 動態土壤 - 基樁互制數值分析

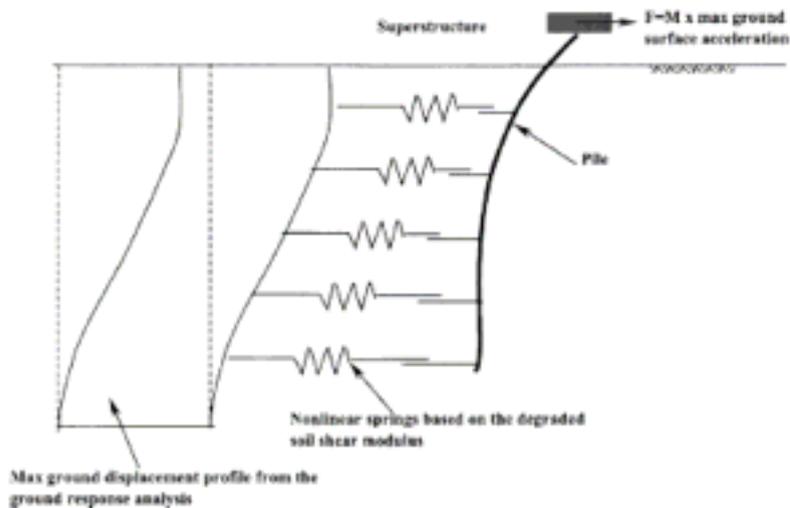
擬靜態分析 → 基樁側向變形  $p$ - $y$  曲線

非耦合動態有效應力分析 → Finn+BNWF 模型

耦合動態有效應力分析 →  $u$ - $p$  form + BNWF

擬靜態分析

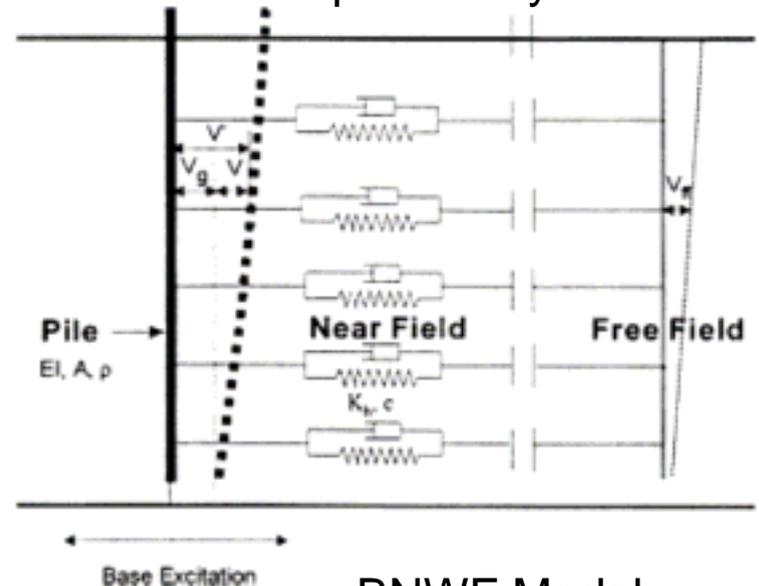
$p$ - $y$  curve



BWF Model

動力數值模擬

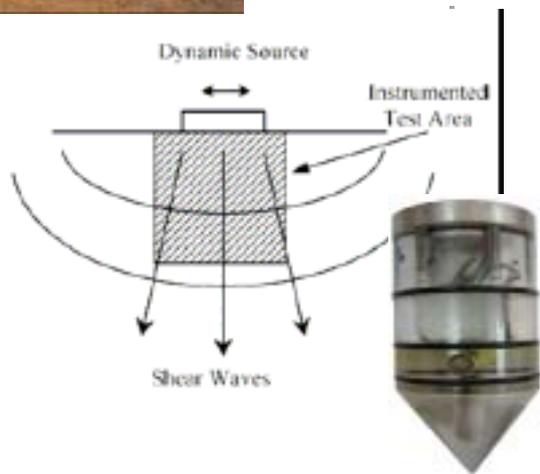
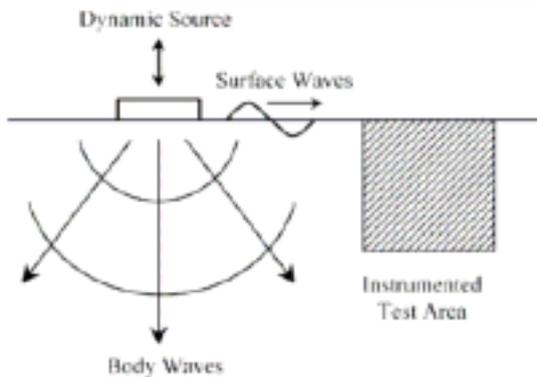
decoupled analysis



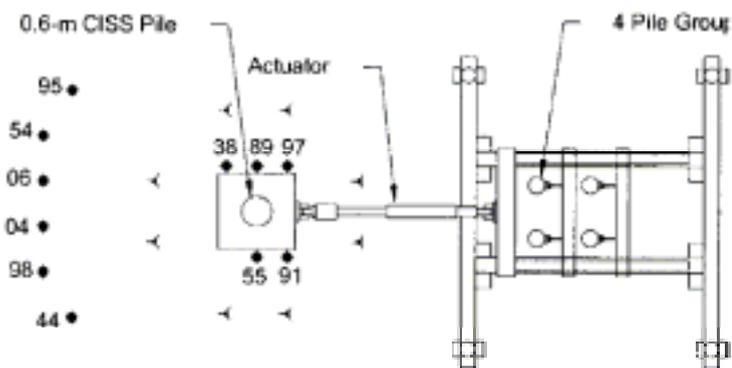
BNWF Model

# 研究成果- 現地大型震動試驗文獻

## ○ 自由場動態試驗



## ○ 基樁動態試驗



(Rollins et al. 2005)

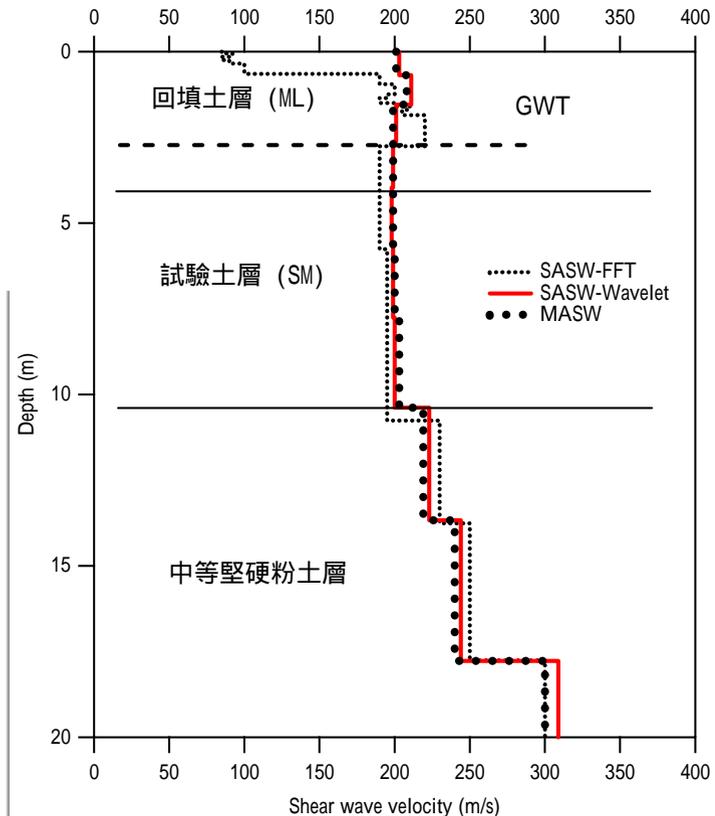
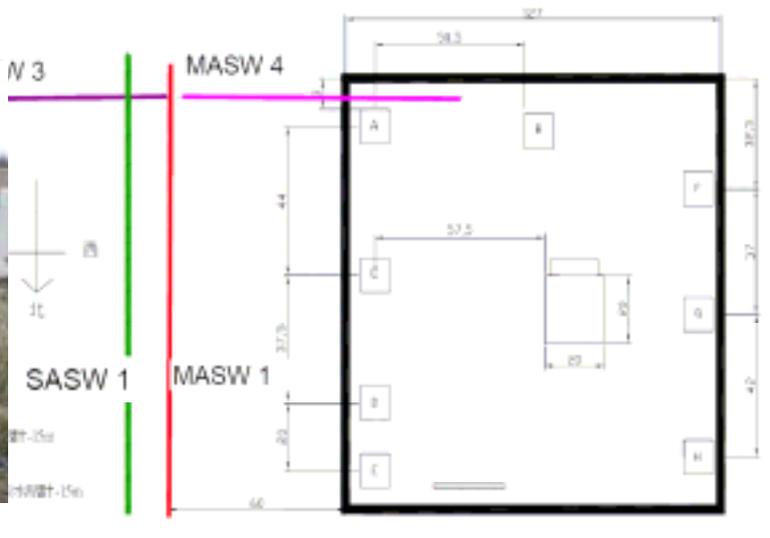
# 研究成果- 試驗場址探勘

---

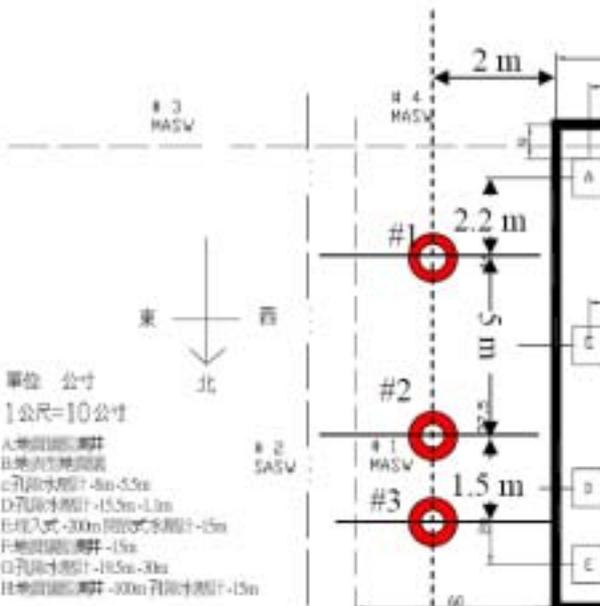
- 現地表面波震測試驗 → MASW & SASW
- 鑽探成果
- 跨孔法震測試驗
- 簡化地質剖面

# 試驗場址探勘 表面波震測

- 目的：
  1. 求取現地土層幾何構造
  2. 剪力波速剖面



# 試驗場址探勘 鑽探成果



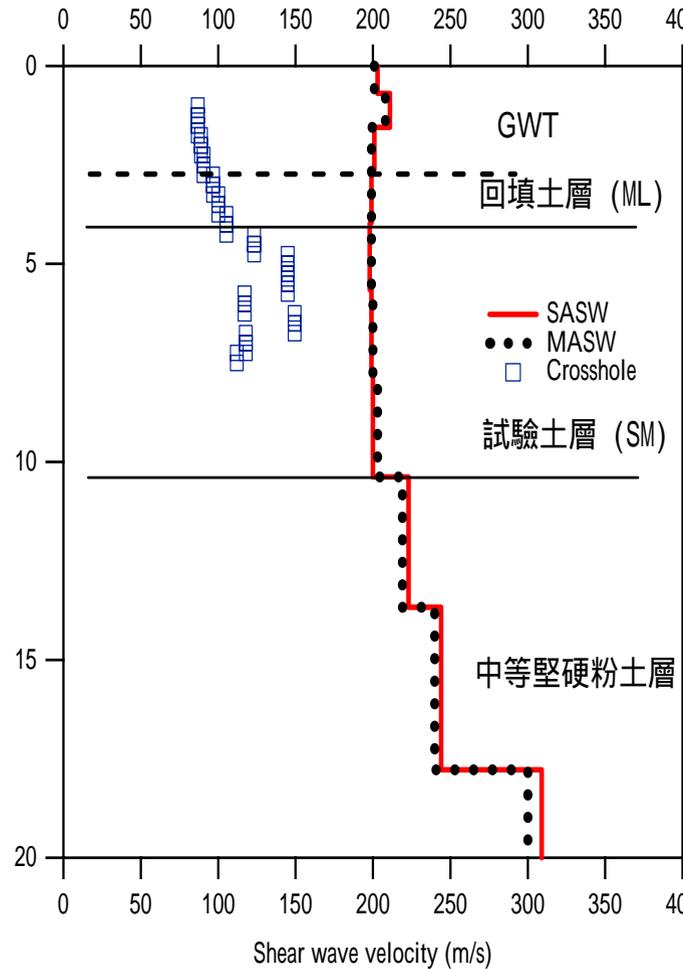
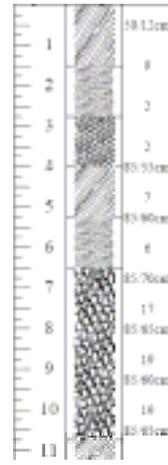
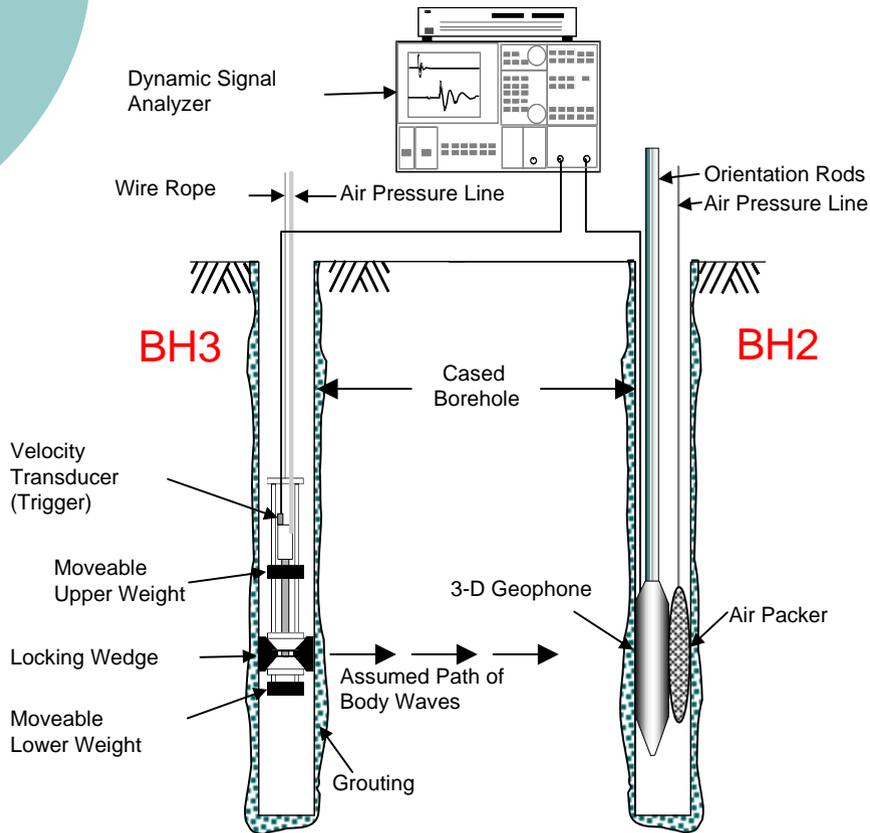
(試驗土層)

鑽探及試驗報告表

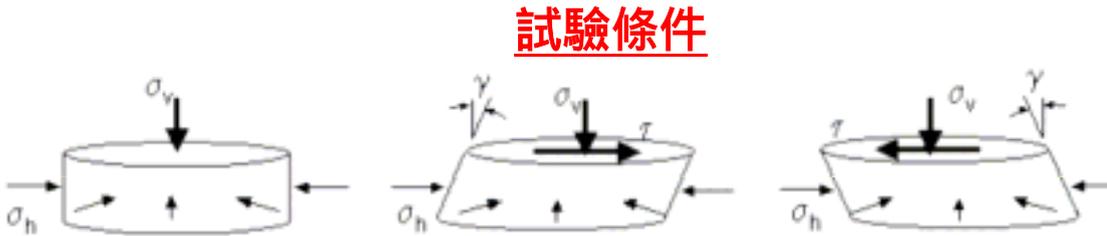
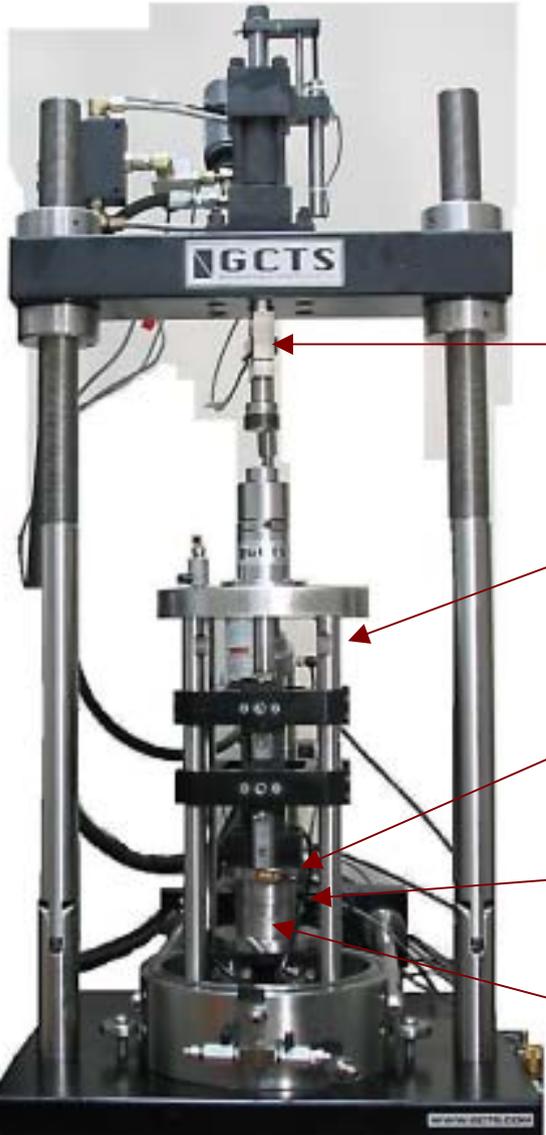
名稱: \_\_\_\_\_ 孔號: BH-3 鑽探時間: 95.05.06-05.08  
 Project: \_\_\_\_\_ 地面標高: \_\_\_\_\_ Hole No.: \_\_\_\_\_ Date of Boring: \_\_\_\_\_  
 地點: 環湖路 Elevation: \_\_\_\_\_ 地下水位: GL.-2.93 m 試驗時間: \_\_\_\_\_  
 Location: \_\_\_\_\_ Ground Water Table: \_\_\_\_\_ Date of Testing: \_\_\_\_\_

| 深度<br>Depth M | 柱狀圖<br>Leg | 擊數<br>Blows<br>N | 樣號<br>Sample No | 地層說明<br>Description   | 顆粒分析      |           |            | 分類<br>Classification | 自然<br>含水量<br>w% | 液性<br>限度<br>w <sub>L</sub> % | 塑性<br>限度<br>w <sub>P</sub> % | 比重<br>Gs | 當地密<br>度 γ <sub>m</sub><br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 孔徑  |
|---------------|------------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------|-----------|------------|----------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|----------|---|-----|
|               |            |                  |                 |                       | 砂<br>Sand | 泥<br>Silt | 粘土<br>Clay |                      |                 |                              |                              |          |   |     |
| 1             |            | 50-12cm          | S-1-0           | 同層棕灰色細砂紅棕色粉土及碎石 1.55m |           |           |            |                      |                 |                              |                              |          |   |     |
| 2             |            | 9                | S-2-2           | 棕灰色粉土質夾細砂層 2.60m      | 67.8      | 31.2      | 1          | SM                   | 26.9            | -                            | NP                           | 2.65     | 1.74  | 0.9 |
| 3             |            | 1                | S-3-2           | 灰色粉土質粉土 4.10m         | 34.4      | 73.3      | 2.3        | ML                   | 35              | -                            | NP                           | 2.68     | 1.72  | 1.1 |
| 4             |            | 2                | S-4-2           | 灰色粉土質粉土 4.10m         | 35.1      | 33.9      | 28         | CL-ML                | 31.5            | 38.63                        | 38.1                         | 2.61     | 1.78  | 0.9 |
| 5             |            | 7                | S-5-2           | 灰色粉土質中砂夾中細砂 5.15m     | 86        | 13.6      | 0.4        | SM                   | 20.2            | -                            | NP                           | 2.63     | 1.92  | 0.8 |
| 6             |            | 6                | S-6-2           | 灰色粉土質細砂夾砂質粉土 6.50m    | 71.3      | 28        | 0.9        | SM                   | 23.2            | -                            | NP                           | 2.68     | 1.92  | 0.7 |
| 7             |            | 51-70cm          | T-3             | 灰色中細砂                 |           |           |            |                      |                 |                              |                              |          |   |     |
| 8             |            | 17               | S-7-2           | 灰色中細砂                 | 98.4      |           |            | SP                   | 26.3            | -                            | NP                           | 2.64     | 1.88  | 0.7 |
| 9             |            | 25-85cm          | T-4             |                       |           |           |            |                      |                 |                              |                              |          |   |     |
| 10            |            | 19               | S-8-2           |                       | 91.5      |           |            | SP                   | 23.2            | -                            | NP                           | 2.68     | 1.94  | 0.7 |
| 11            |            | 25-90cm          | T-5             |                       |           |           |            |                      |                 |                              |                              |          |   |     |
| 12            |            | 19               | S-9-2           |                       | 94        |           |            | SP                   | 16.2            | -                            | NP                           | 2.64     | 1.93  | 0.5 |
| 13            |            | 25-85cm          | T-6             |                       |           |           |            |                      |                 |                              |                              |          |   |     |
| 11            |            | 11               | S-10-2          | 灰色細砂質粉土夾粉土質粘土 11.50m  | 96.1      |           |            | SP                   | 20.3            | -                            | NP                           | 2.69     | 1.89  | 0.7 |
| 12            |            | 25-85cm          | T-7             | 灰色中細砂 12.50m          |           |           |            |                      |                 |                              |                              |          |   |     |
| 13            |            | 15               | S-11-2          | 灰色細砂夾薄層 16.50cm(下頁)   |           |           |            |                      | 27.8            |                              |                              | 2.69     | 1.75  | 0.9 |

# 試驗場址探勘 跨孔震測



# 室內動態試驗



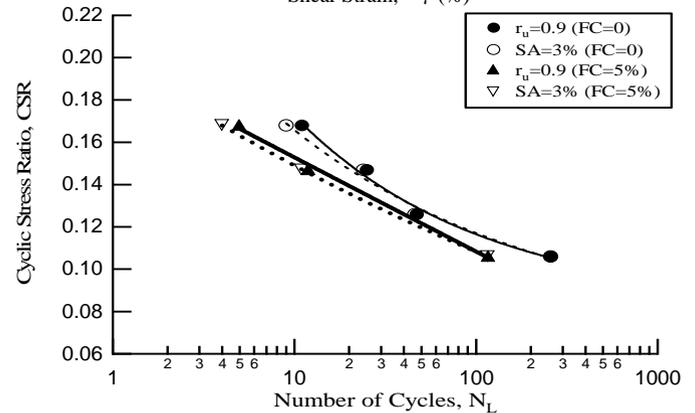
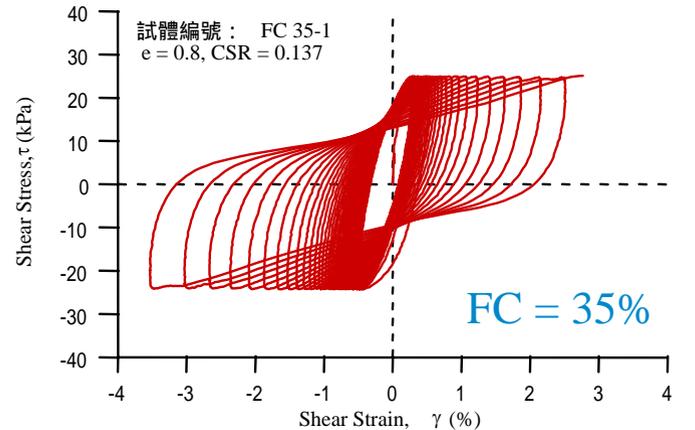
荷重計

單剪室

試體頂板

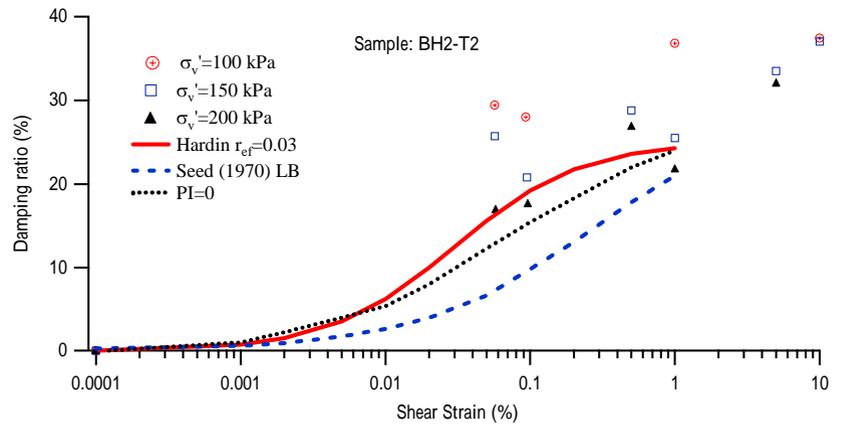
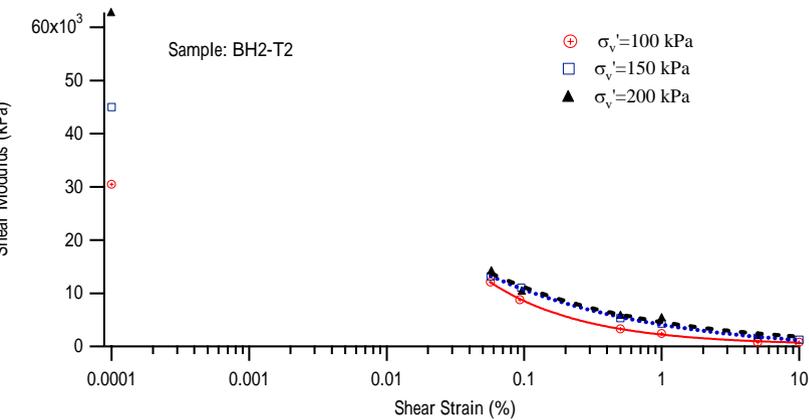
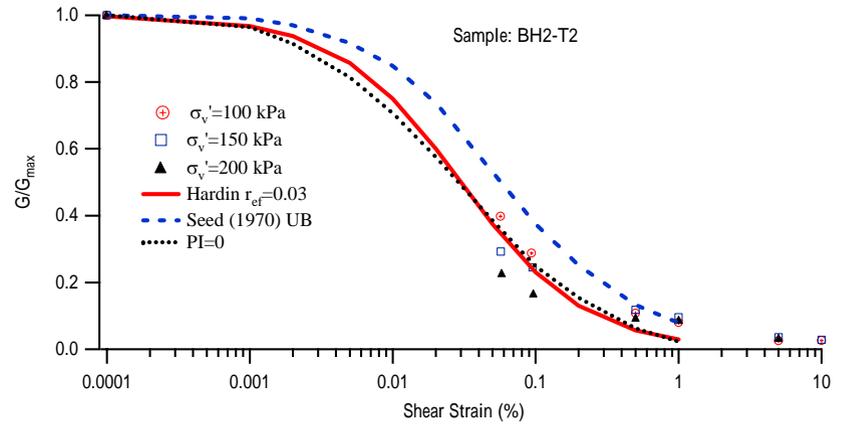
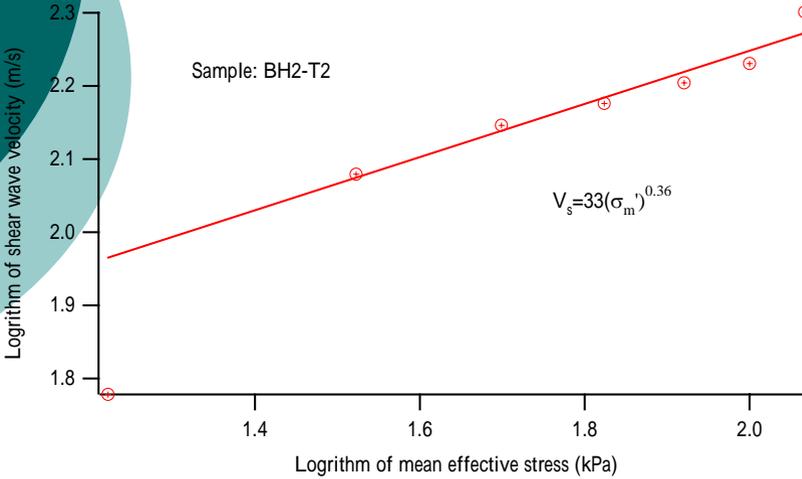
試體位置

試體底座

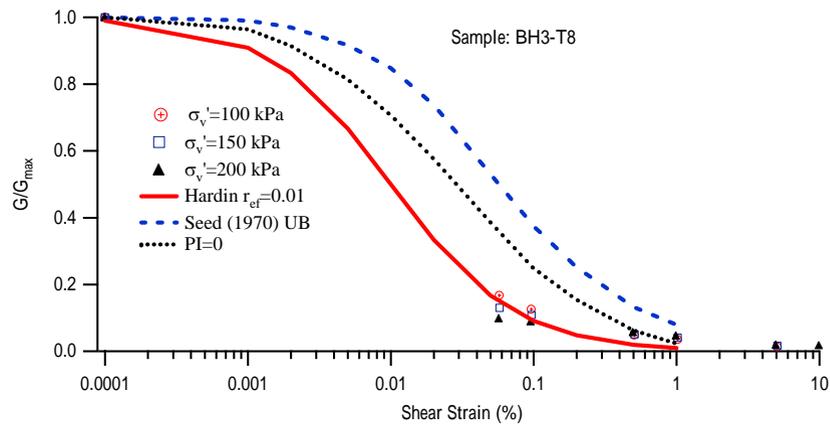
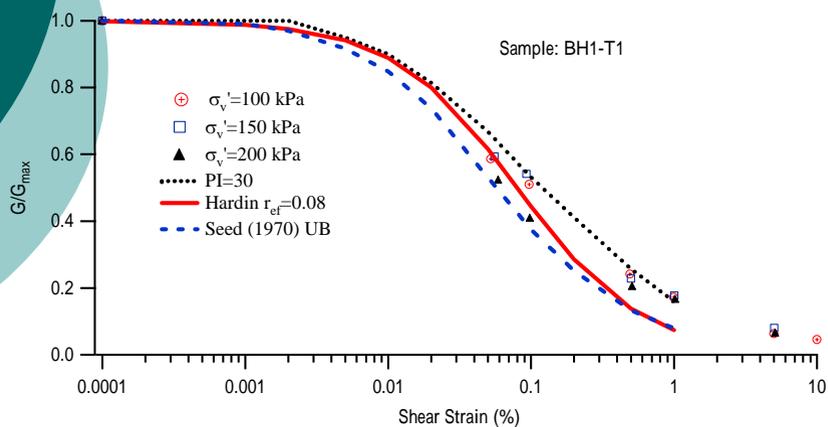


# 反覆單剪試驗 - 土壤動態特性

BH2

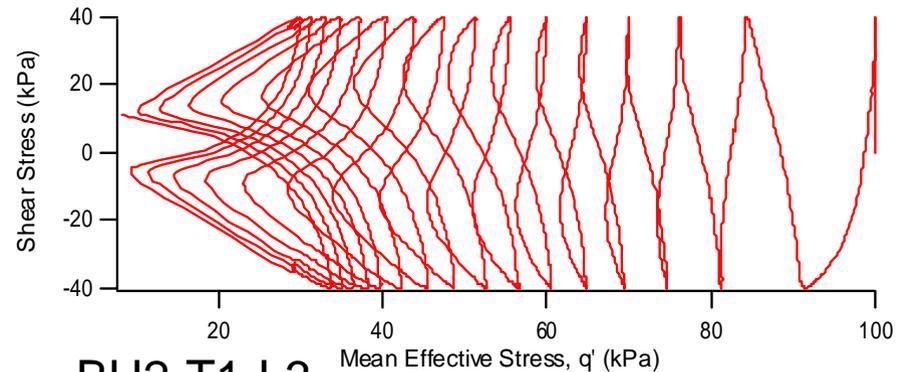
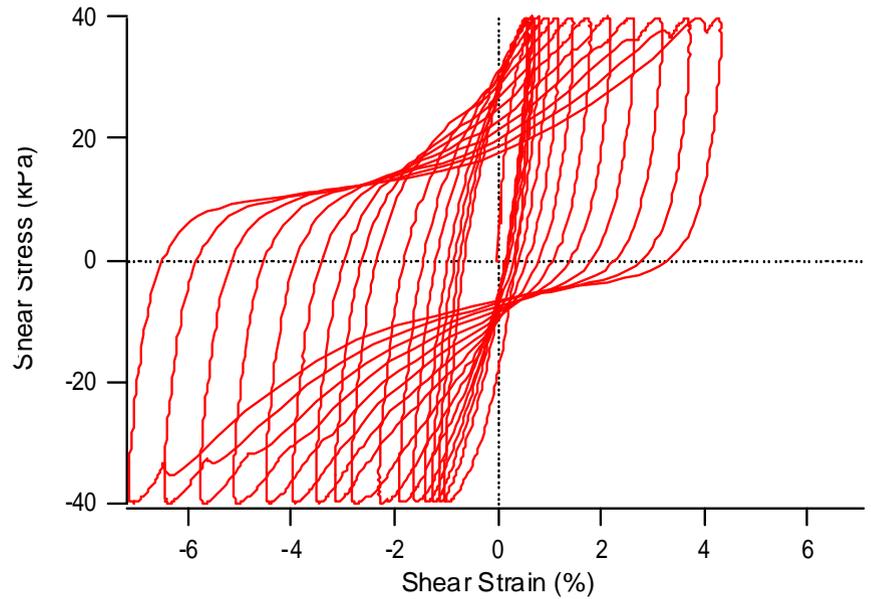
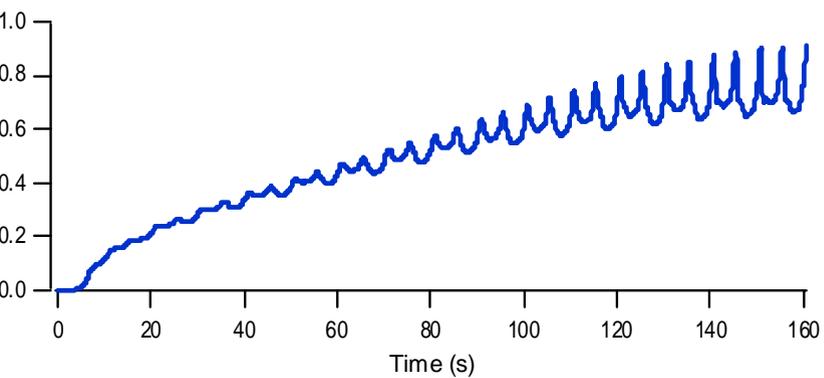
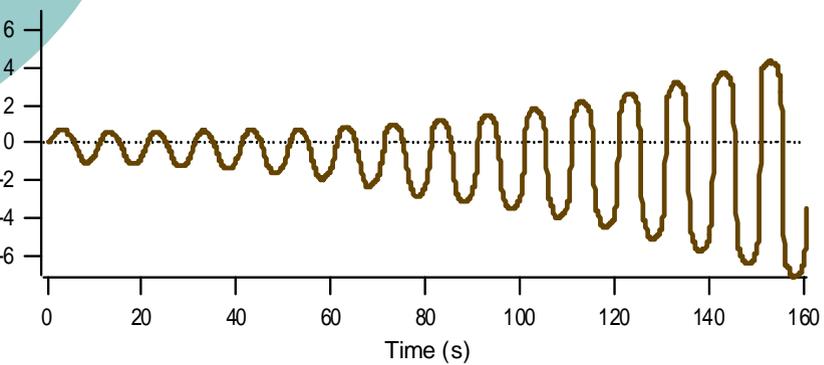
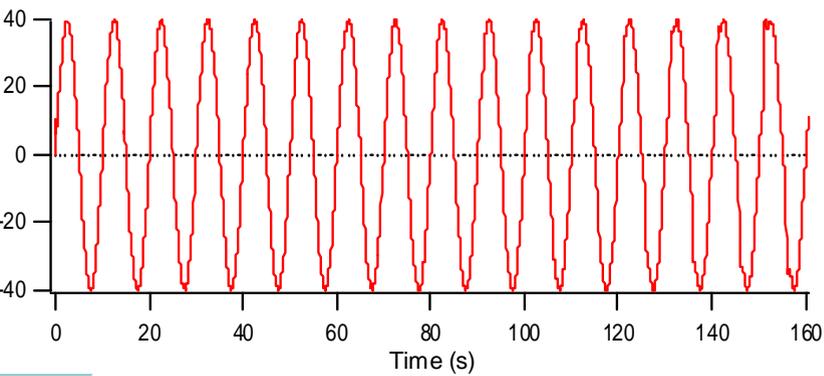


# 土壤動態特性



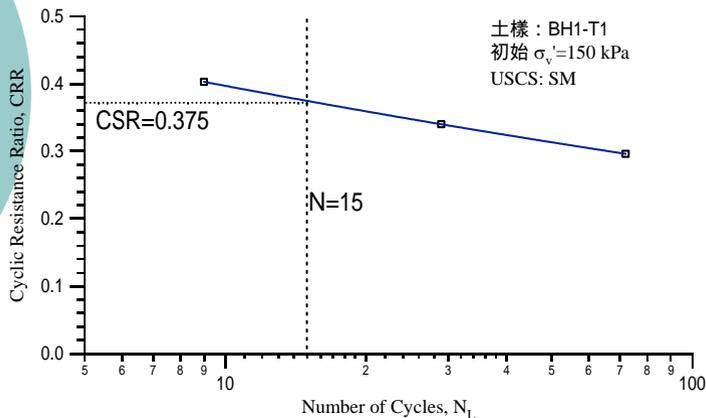
| 土層名稱 | 深度 (m) | $V_s$ (m/s)              | $\gamma_{ef}$ |
|------|--------|--------------------------|---------------|
| 回填土層 | 0-4    | $35(\sigma'_m)^{0.23}$   | 0.08          |
| 試驗土層 | 4-10   | $33(\sigma'_m)^{0.36}$   | 0.03          |
| 下方土層 | 10~    | $61.6(\sigma'_m)^{0.33}$ | 0.01          |

# 反覆單剪試驗-土壤液化強度試驗

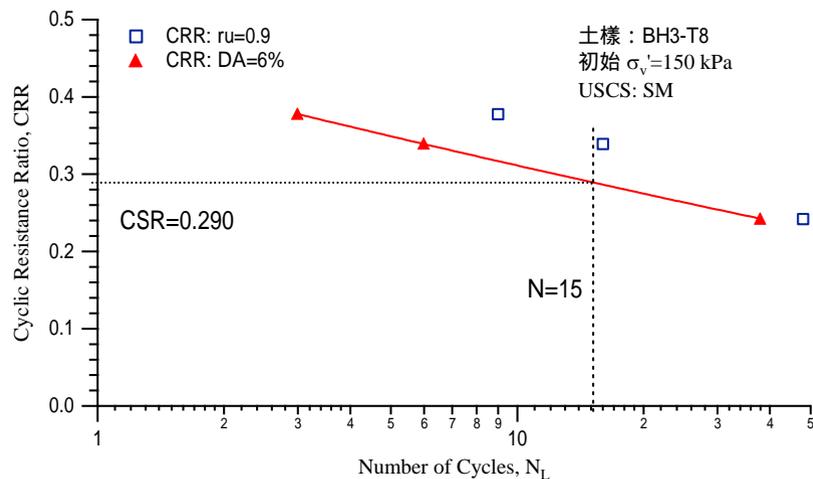
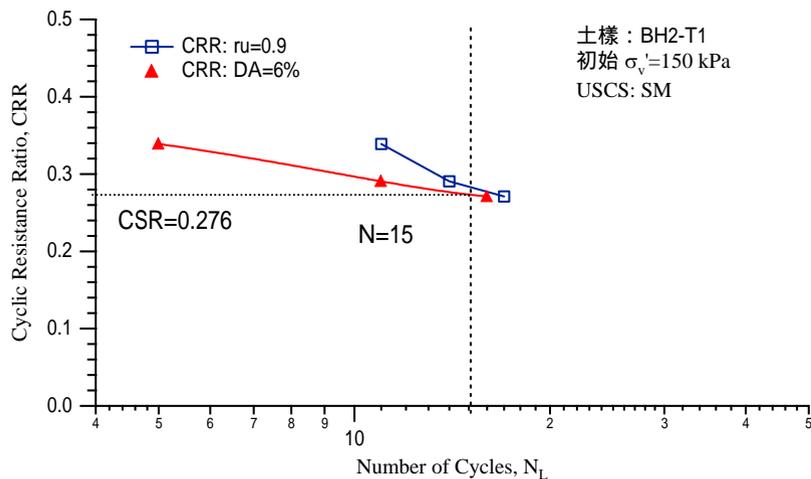


BH2-T1-L3

# 土壤液化強度總表



| 土層   | 深度 (m) | 試體土壤分類 | CSR   |
|------|--------|--------|-------|
| 回填土層 | 2.5    | SM     | 0.375 |
| 試驗土層 | 6.0    | SM     | 0.276 |
| 下方土層 | 13.5   | SM     | 0.290 |



# 自由場動態有效應力分析

---

## ○ 分析重點

- 地層幾何模型建立
- 分層土壤組構行為模擬
- 動態荷重與邊界條件
- 孔隙水壓力激發模式

## ○ 分析案例

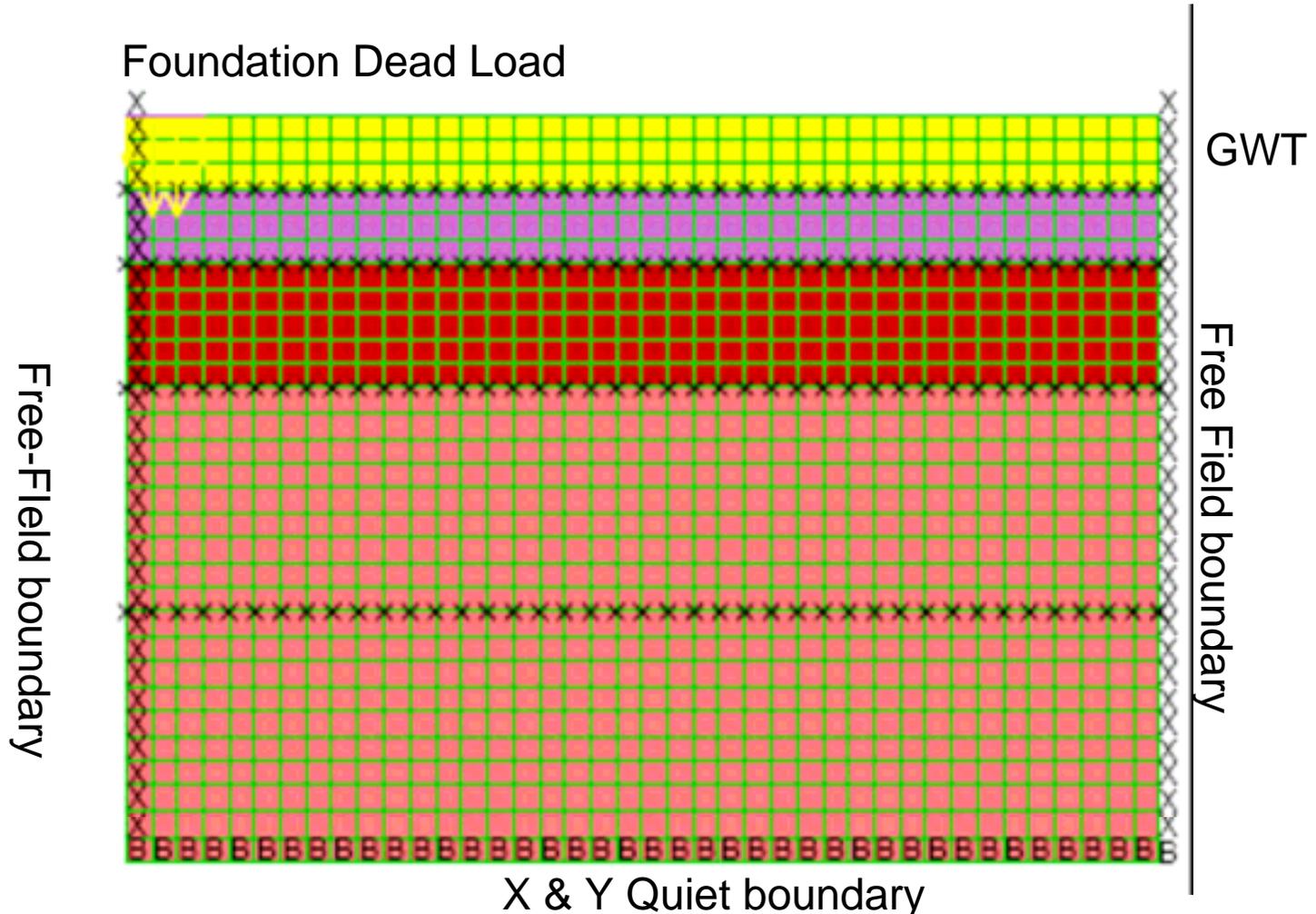
- Elastic + upward Sin waves
- MC + Finn + upward TCU059
- MC+ Finn + Surface vibration source

# 自由場地質模型

Domain: 40 m x 30 m

Element Size: 1 m x 1 m

Foundation Dead Load



# 自由場分析土層參數

|                             | 下方土層<br>Soil 4 | 下方土層<br>Soil 3 | 試驗土層<br>Soil 2 | 回填土層<br>Soil 1 | 表層<br>Top |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| density(kg/m <sup>3</sup> ) | 2010           | 2010           | 1950           | 1900           | 1900      |
| Young's Modulus (MPa)       | 313.5          | 313.5          | 117            | 49             | 49        |
| Poisson's ratio             | 0.3            | 0.3            | 0.3            | 0.3            | 0.3       |
| Cohesion (Pa)               | 2000           | 2000           | 0              | 2000           | 2000      |
| Friction angle (degrees)    | 38             | 38             | 32             | 35             | 35        |
| Dilation angle (degrees)    | 0              | 0              | 0              | 0              | 0         |
| Hardin ref                  | 0.01           | 0.01           | 0.03           | 0.08           | 0.08      |
| Finn Parameter C1           | --             | 0.194          | 0.25           | 0.194          | --        |
| Finn Parameter C2           | --             | 2.07           | 1.59           | 2.07           | --        |

Boring

MSAW

Referred

CDSS

SPT

Note :  $k = 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

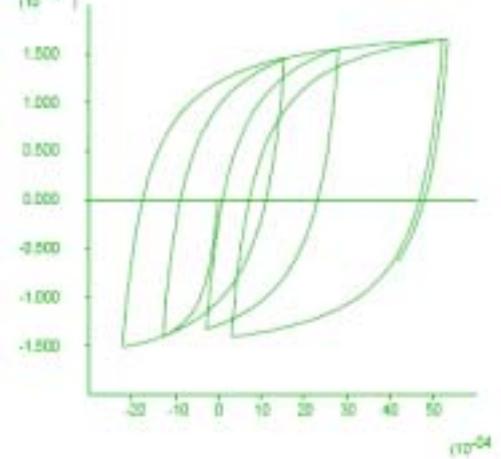
$(N_1)_{60} = 21$

$(N_1)_{60} = 17$

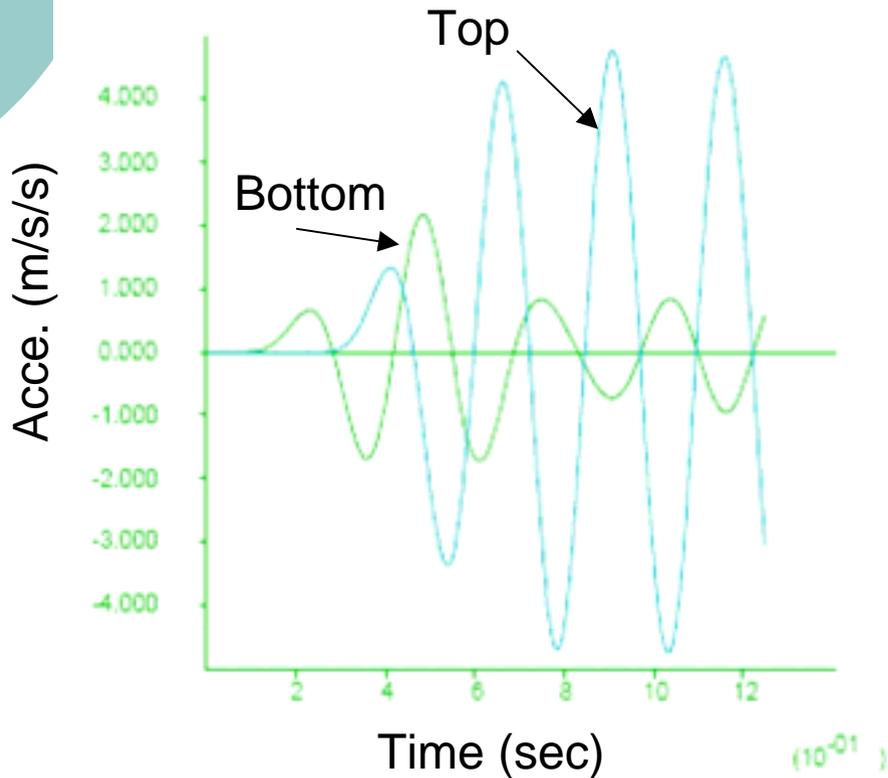
$(N_1)_{60} = 21$

# Case 1: 彈性均勻土層

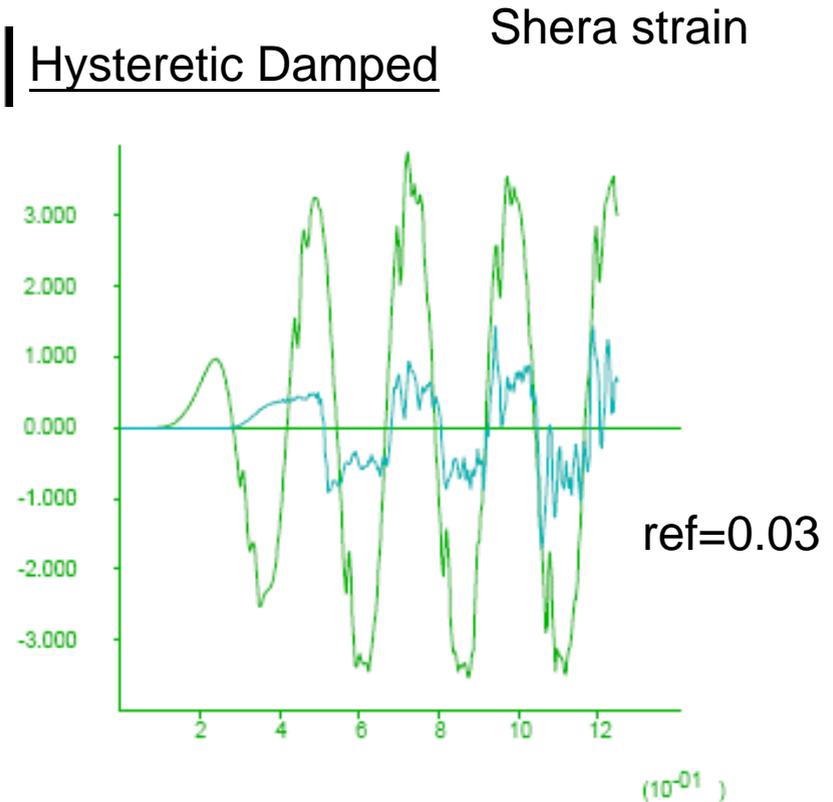
Viscous stress



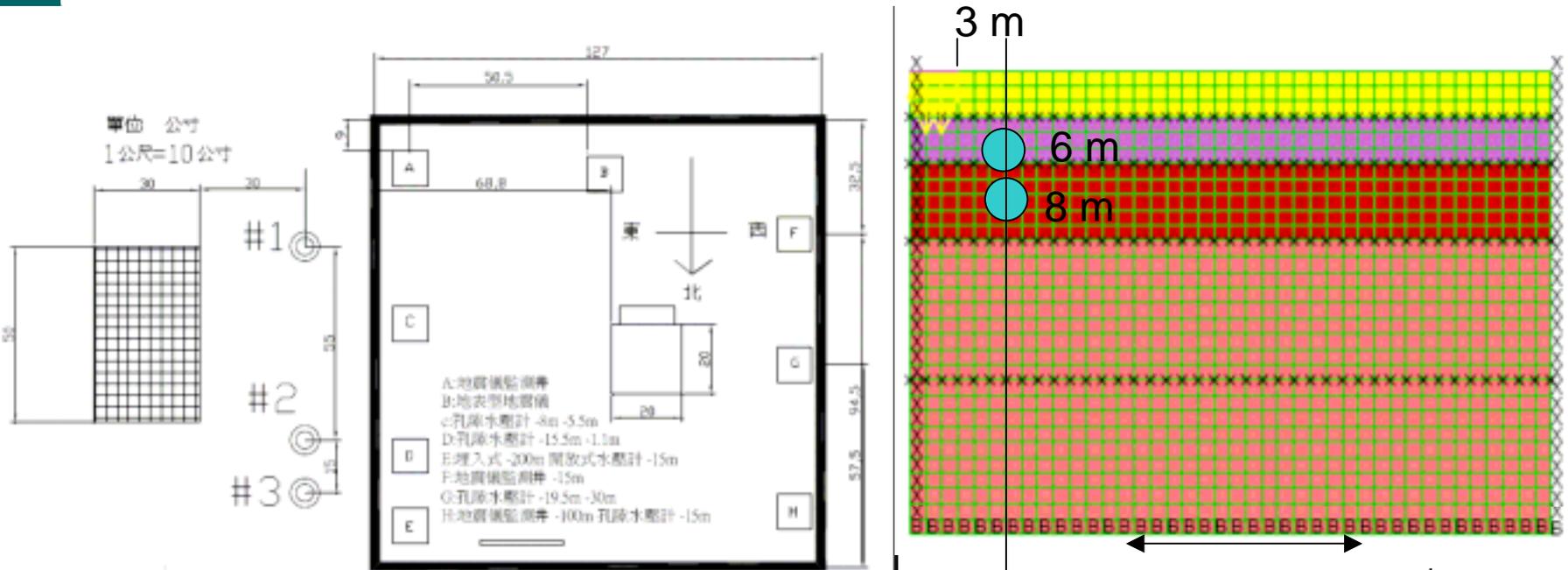
Undamped



Hysteretic Damped



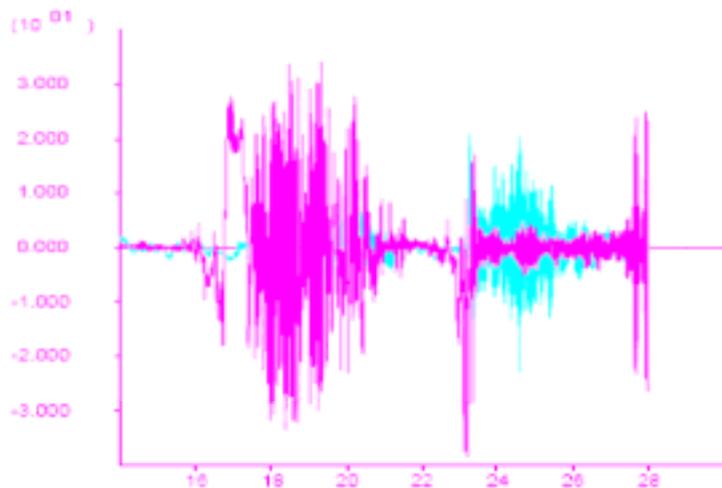
# Case 2:地震波傳遞模擬



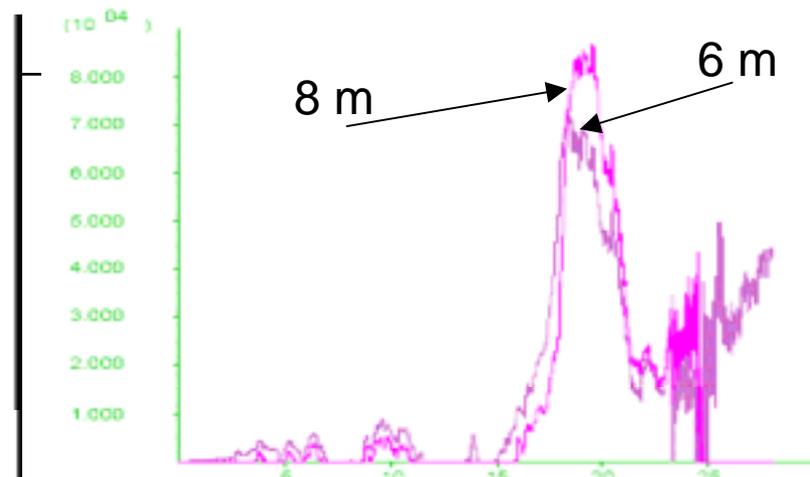
現場配置

TCU059 Velocity Hist.

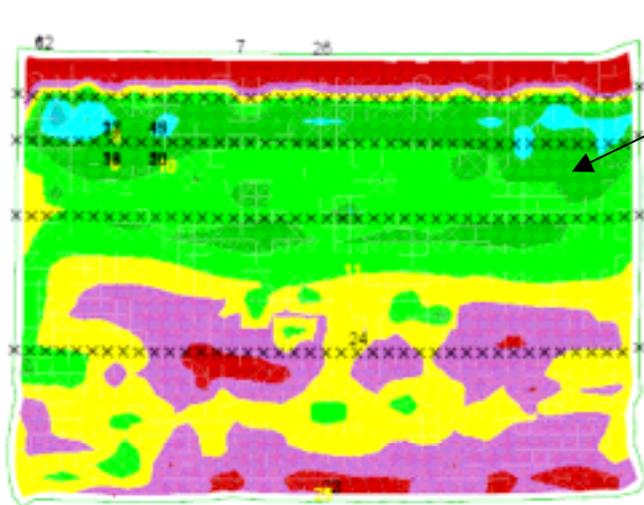
# Case 2:地震波傳遞模擬結果



底部與地表加速度歷時



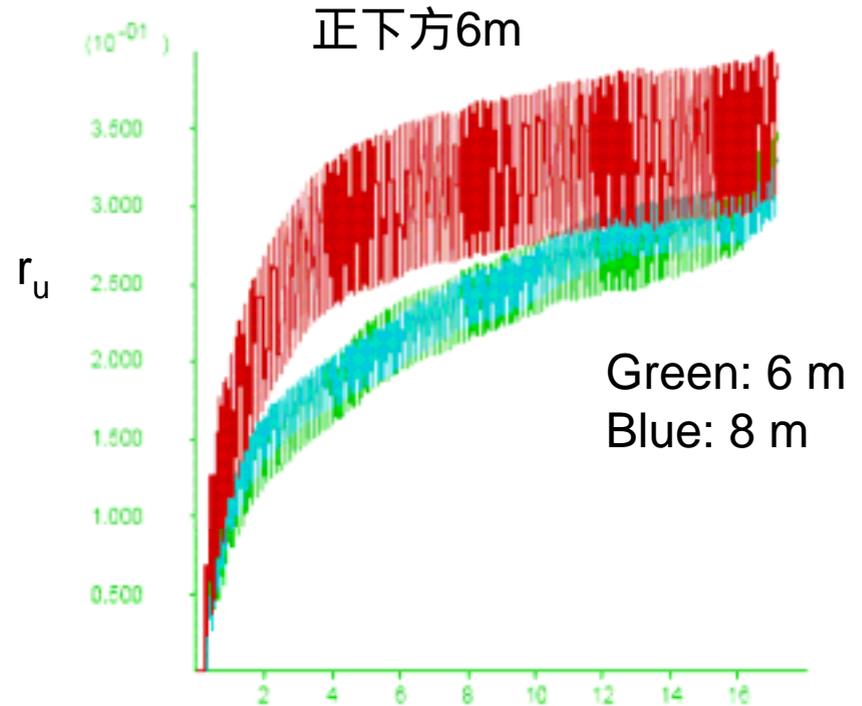
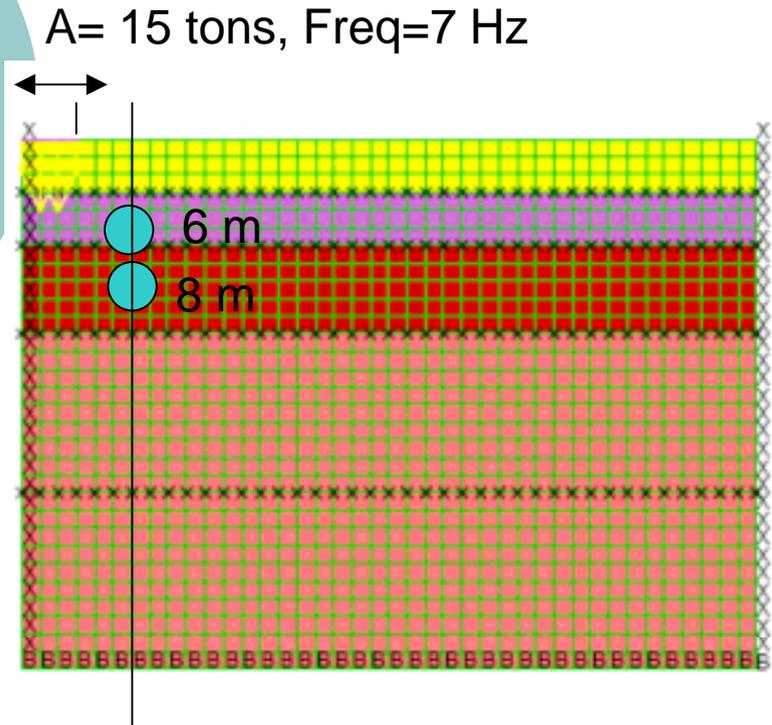
6 m (6,25)與8 m (6,23) 所激發之  
超額孔隙水壓力歷時



液化區域

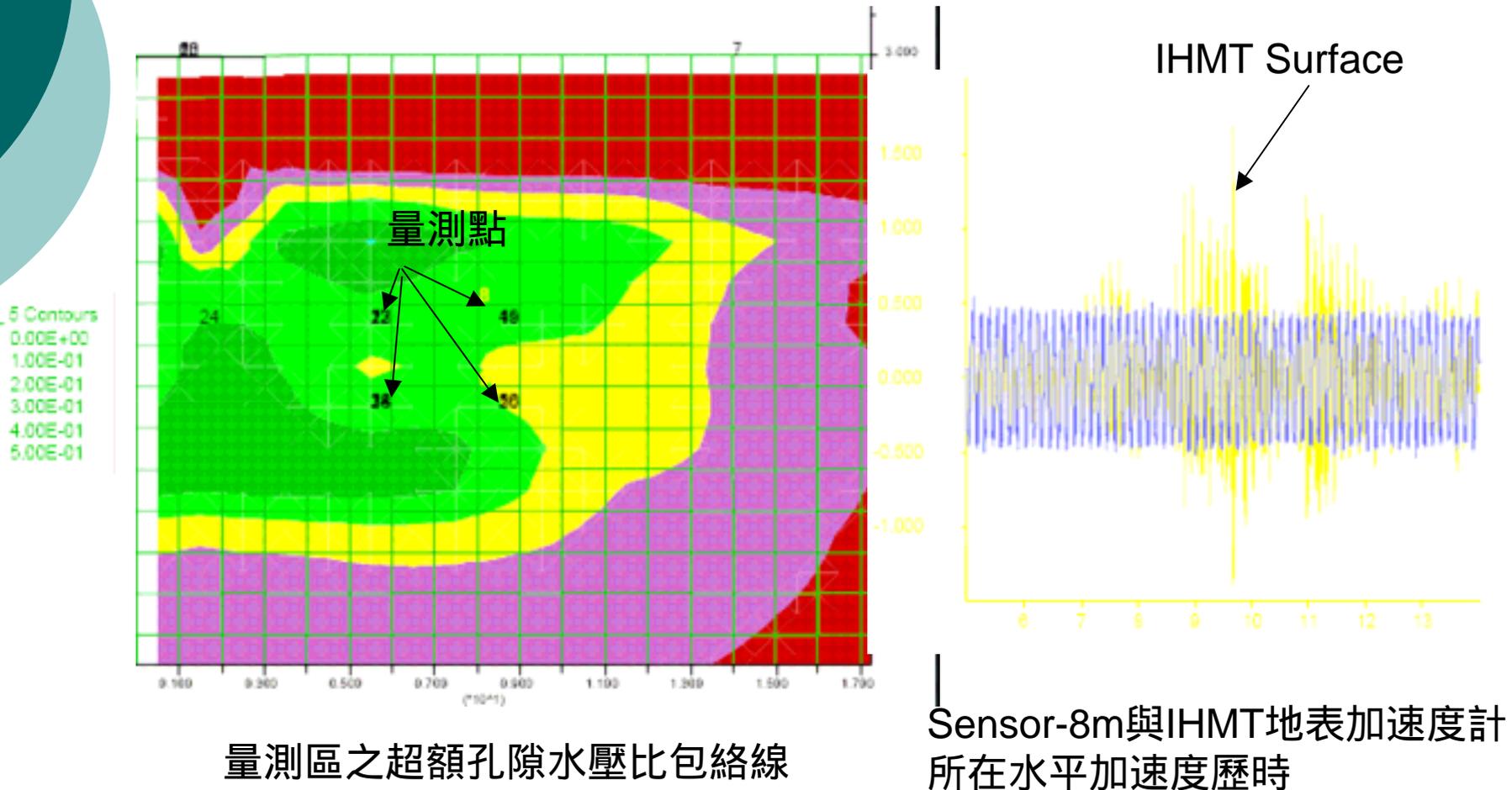
最大超額孔隙水壓力比分布

# Case 3: 地表水平向震動基礎模擬



基礎下方深度超額孔隙水壓比歷時

# Case 3: 地表水平向震動基礎模擬



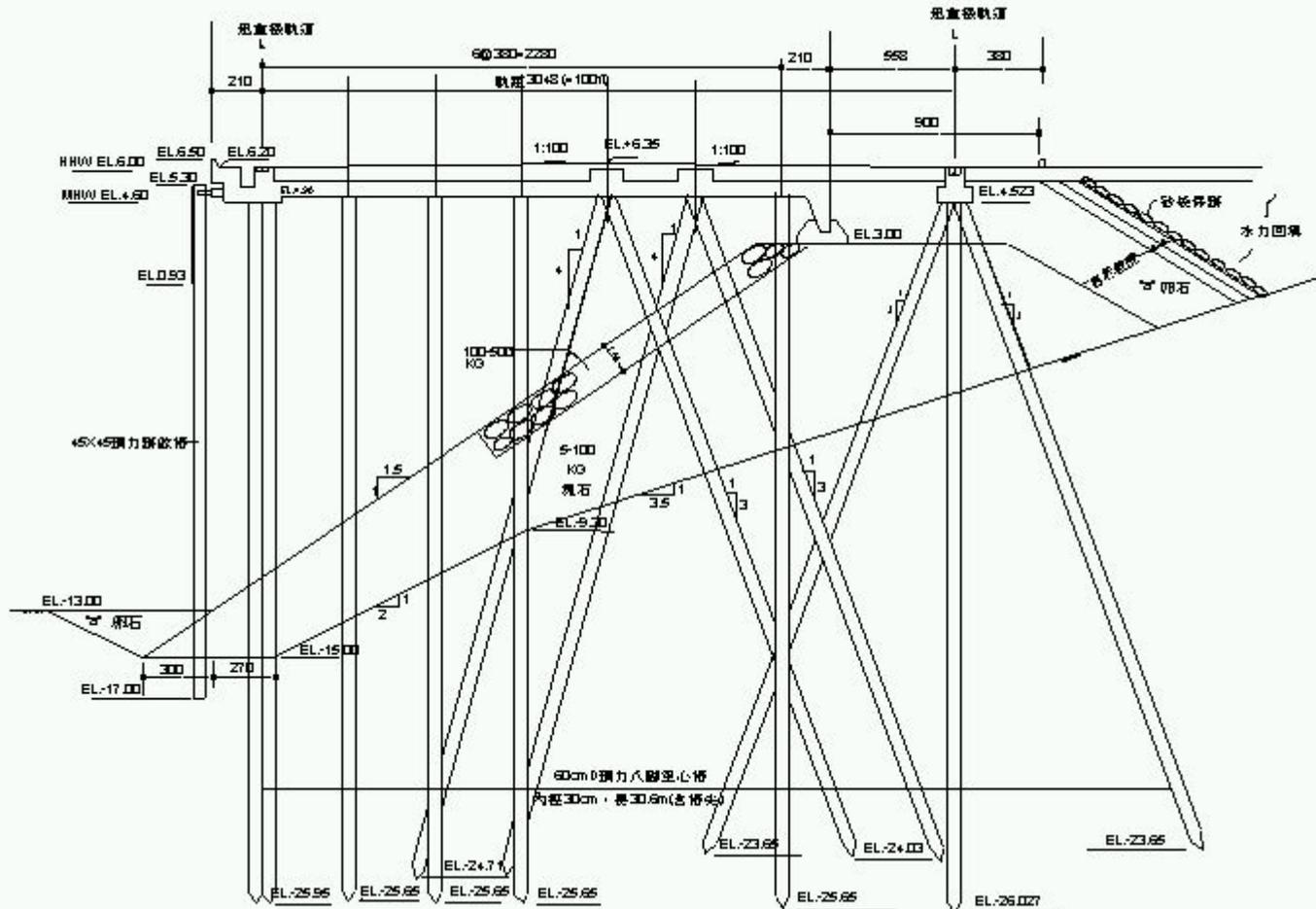
Note: 現地土型篩試震源試驗結果與模擬結果大致吻合

# 棧橋式碼頭有效應力動態數值分析

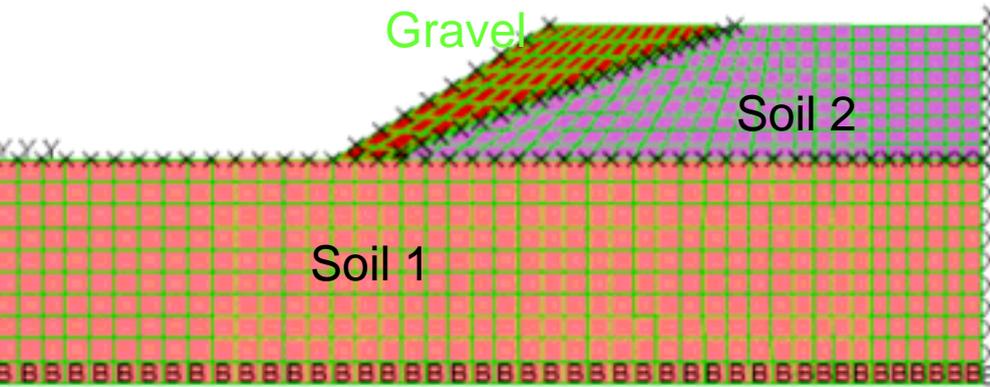
---

- Decoupled analysis
- 棧橋式碼頭結構元素：
  - 樑元素：棧橋樓版
  - 基樁元素：基樁與土壤-基樁介面, 模擬近場區(near field)行為
  - 土壤固體元素：模擬自由場區(free field)行為

# 分析案例：台中港# 9-11碼頭

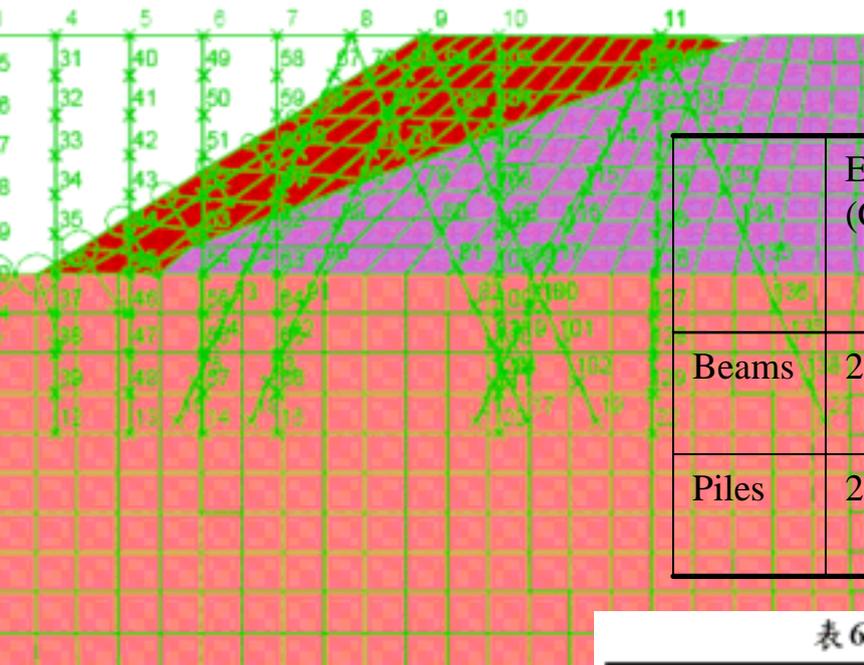


# FLAC 地質模型



|                             | 底部土壤<br>Soil 1 | 回填砂層<br>Soil 2 | 礫石回填區<br>Gravel |
|-----------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| density(kg/m <sup>3</sup> ) | 1800           | 1800           | 1900            |
| Shear Modulus (MPa)         | 80             | 30             | 140             |
| Bulk Modulus (MPa)          | 133            | 68             | 310             |
| Cohesion(Pa)                | 50000          | 0              | 0               |
| Friction angle(degrees)     | 33             | 30             | 40              |
| Dilation angle(degrees)     | 0              | 0              | 0               |
| Hardin $r_{ef}$             | 0.01           | 0.08           | --              |
| Finn Parameter C1           | --             | 0.49           | --              |
| Finn Parameter C2           | --             | 0.82           | --              |

# 結構元素配置



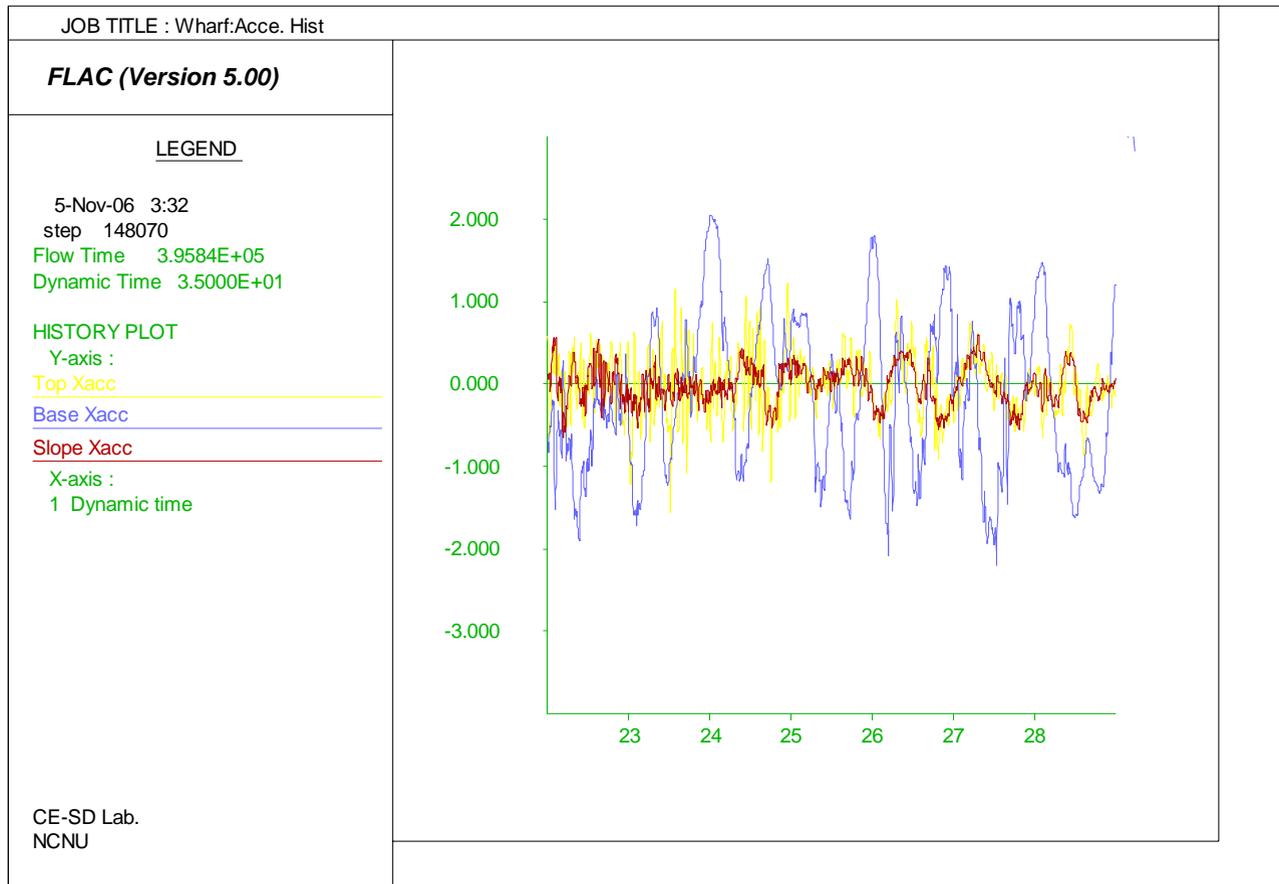
## 結構元素參數

|       | E<br>(Gpa) | I<br>(m <sup>4</sup> ) | Cross Sec.<br>Area<br>(m <sup>2</sup> ) | Mass<br>Density<br>(kg/ m <sup>2</sup> ) | Pile<br>Perimeter<br>(m) |
|-------|------------|------------------------|---|--|--------------------------|
| Beams | 2.0        | $2.364 \times 10^{-3}$ | 0.305                                   | 2000                                     | —                        |
| Piles | 2.0        | $6 \times 10^{-3}$     | 0.212                                   | 2000                                     | 1.88                     |

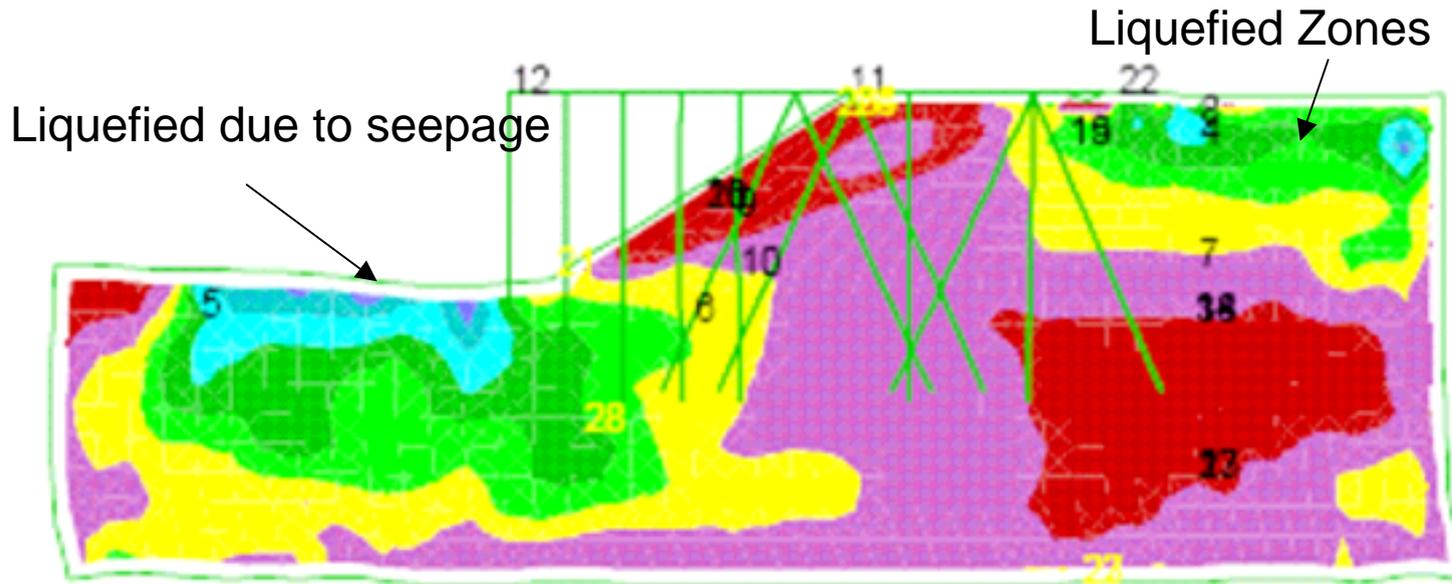
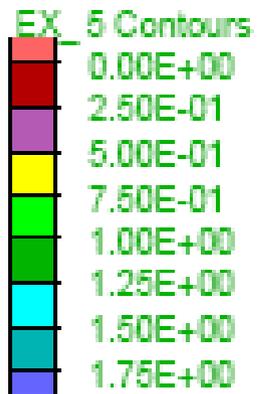
## 表 6.3 基樁元素Mohr-Columb 介面彈簧參數

|                  | Normal<br>Stiffness<br>(GN/m/<br>m) | Shear<br>Stiffness<br>(GN/m/<br>m) | Normal<br>Cohesio<br>n<br>(N/m) | Shear<br>Cohesio<br>n<br>(N/m) | Normal<br>Friction<br>(degrees) | Shear<br>Friction<br>(degrees) |
|------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Soil 1<br>& Grav | 1.0                                 | 1.0                                | 1000                            | 1000                           | 30                              | 30                             |
| Soil 2           | 1.0                                 | 1.0                                | 1000                            | 1000                           | 30                              | 30                             |

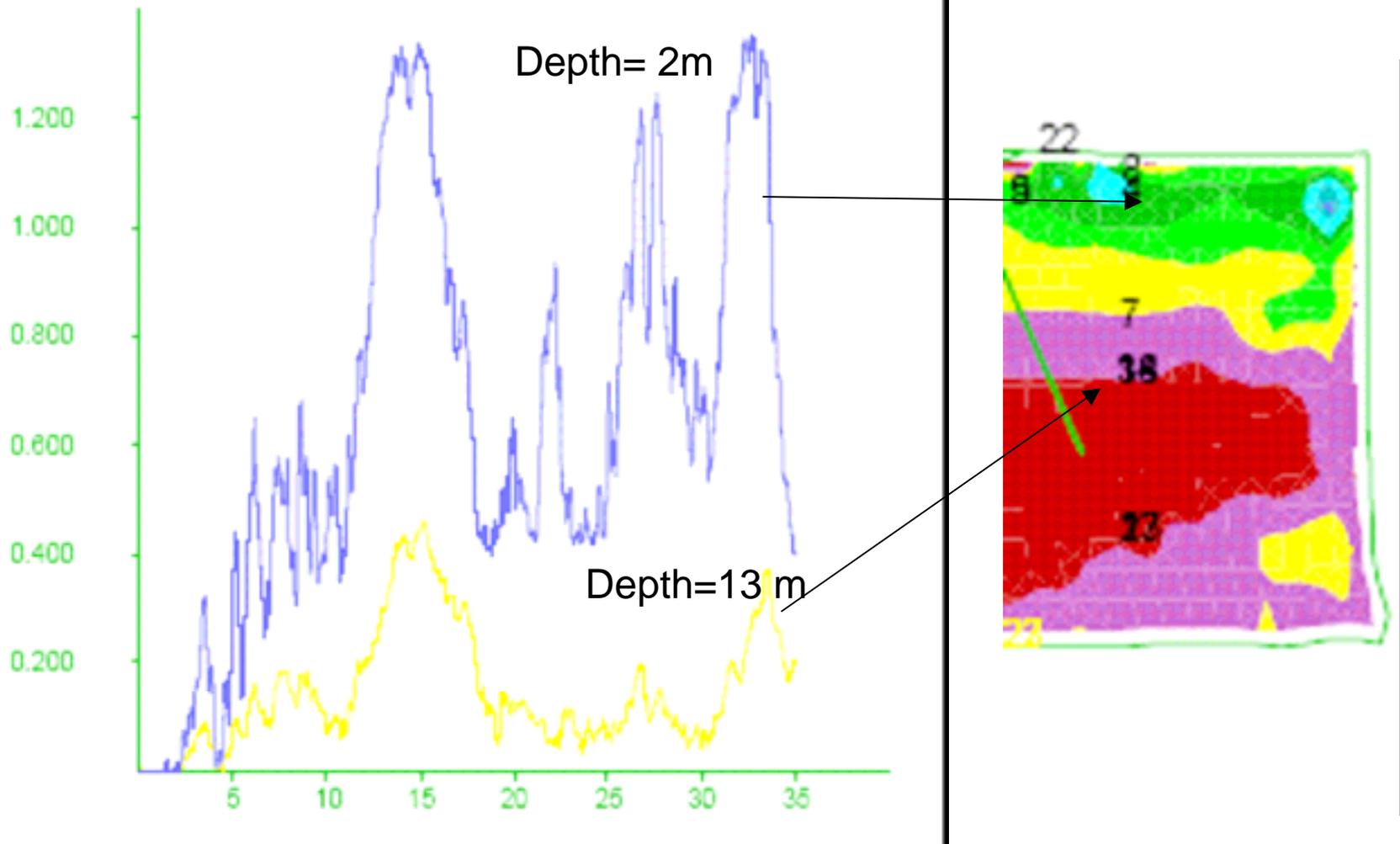
# 不同區域地盤加速度歷時



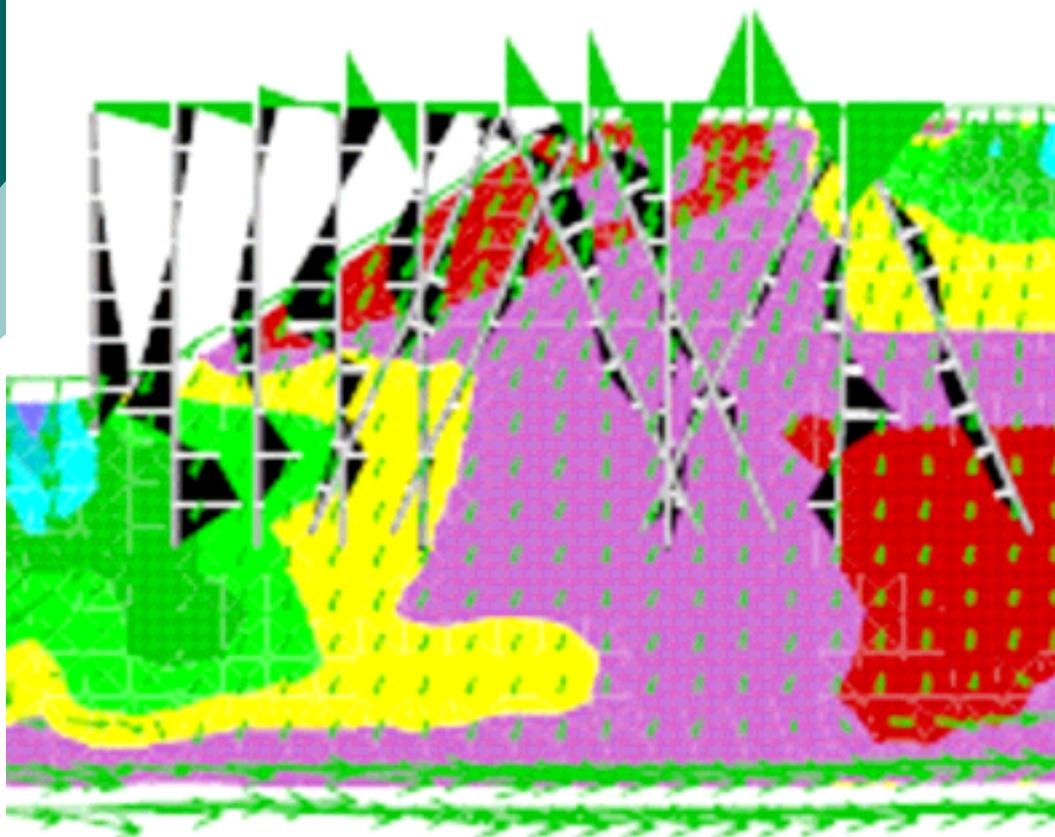
# 最大孔隙水壓比分佈



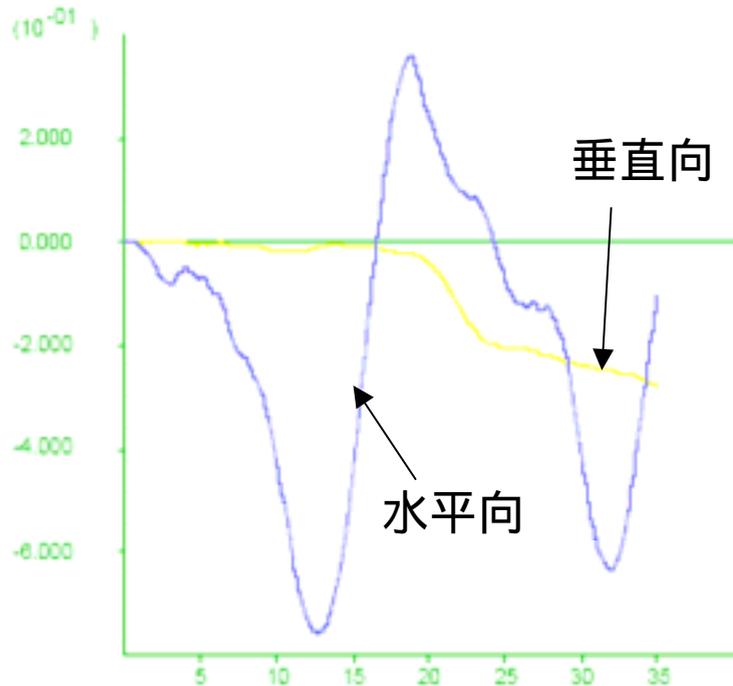
# 回填砂區超額孔隙水壓比變化



# 土壤結構互制反應



結構元素力矩分佈



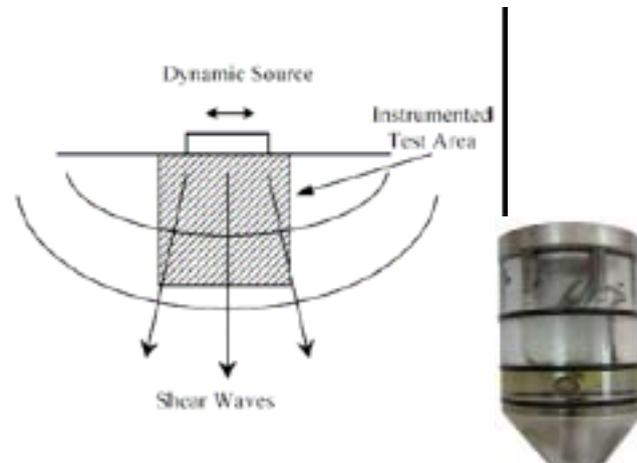
碼頭前端位移歷時

# 現地地表震源震動試驗

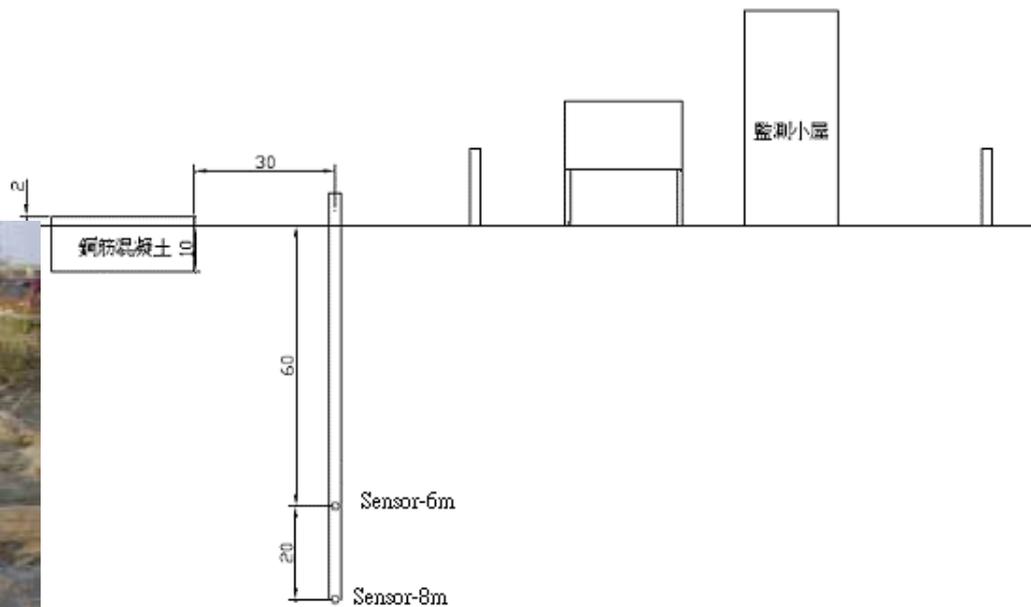
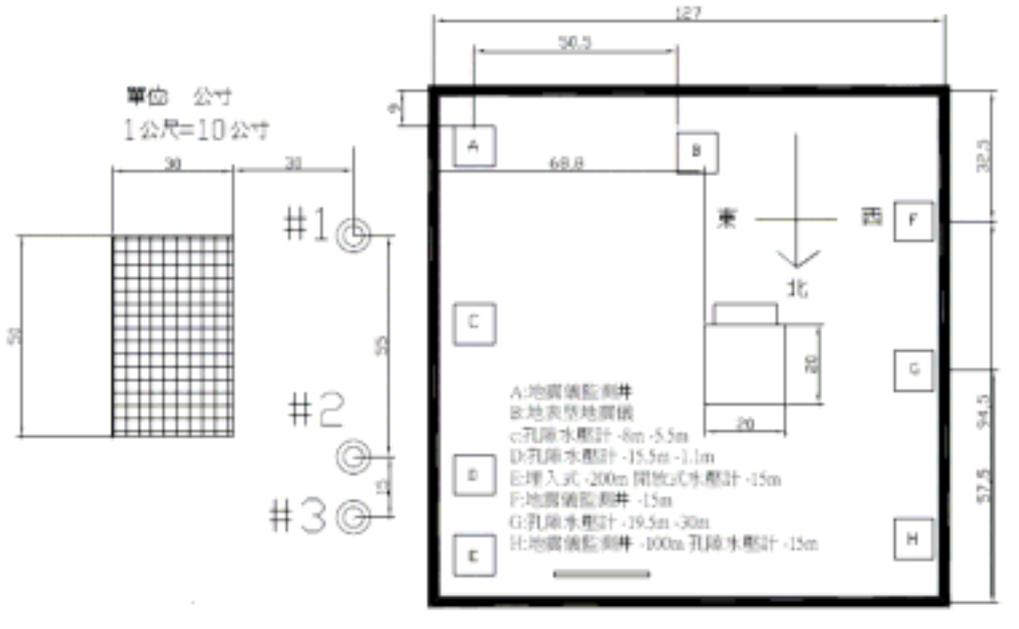
## ○ 試驗目的

1. 初期現地土壤液化試驗
2. 現有液化監測站功能檢測
3. 提供數值模擬之驗證資料

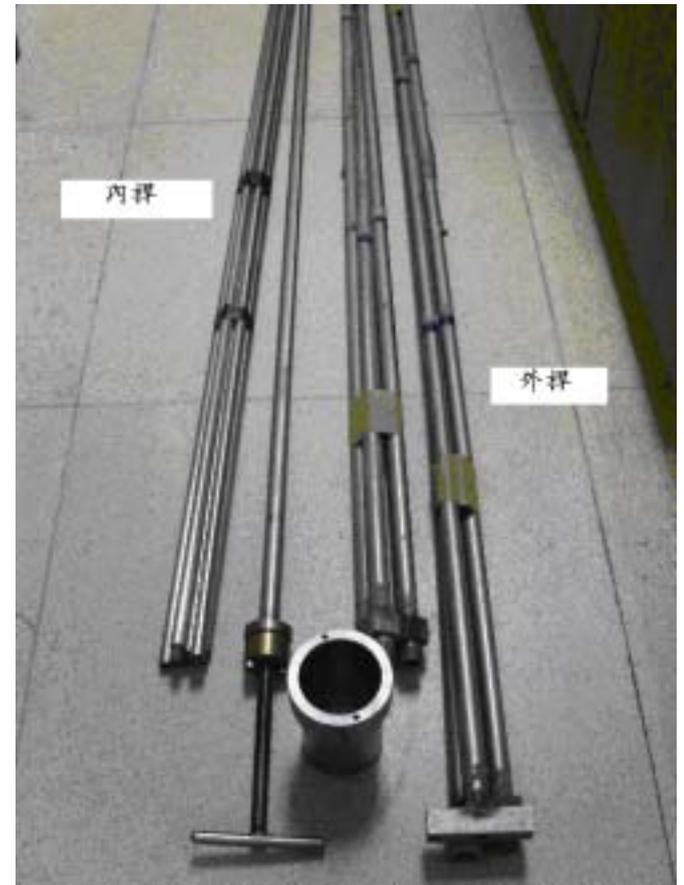
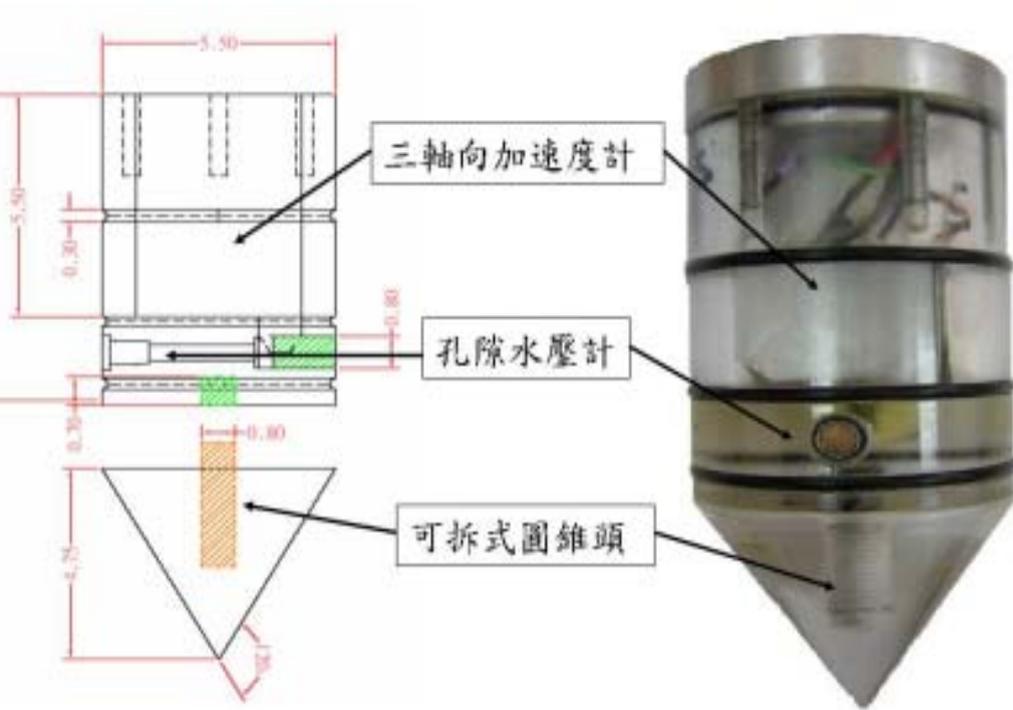
## ○ 試驗原理



# 試驗系統配置

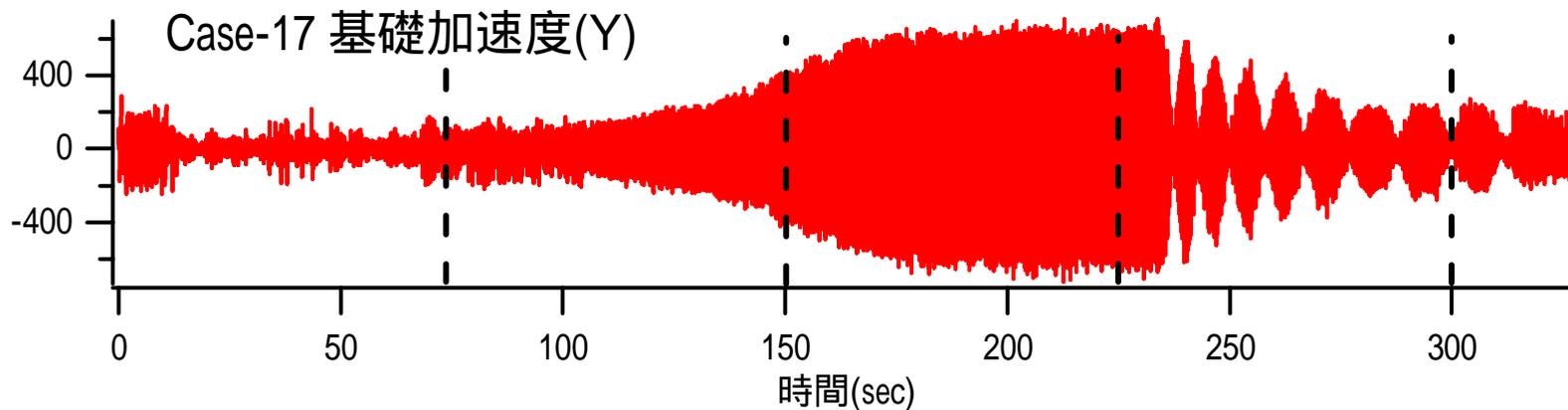
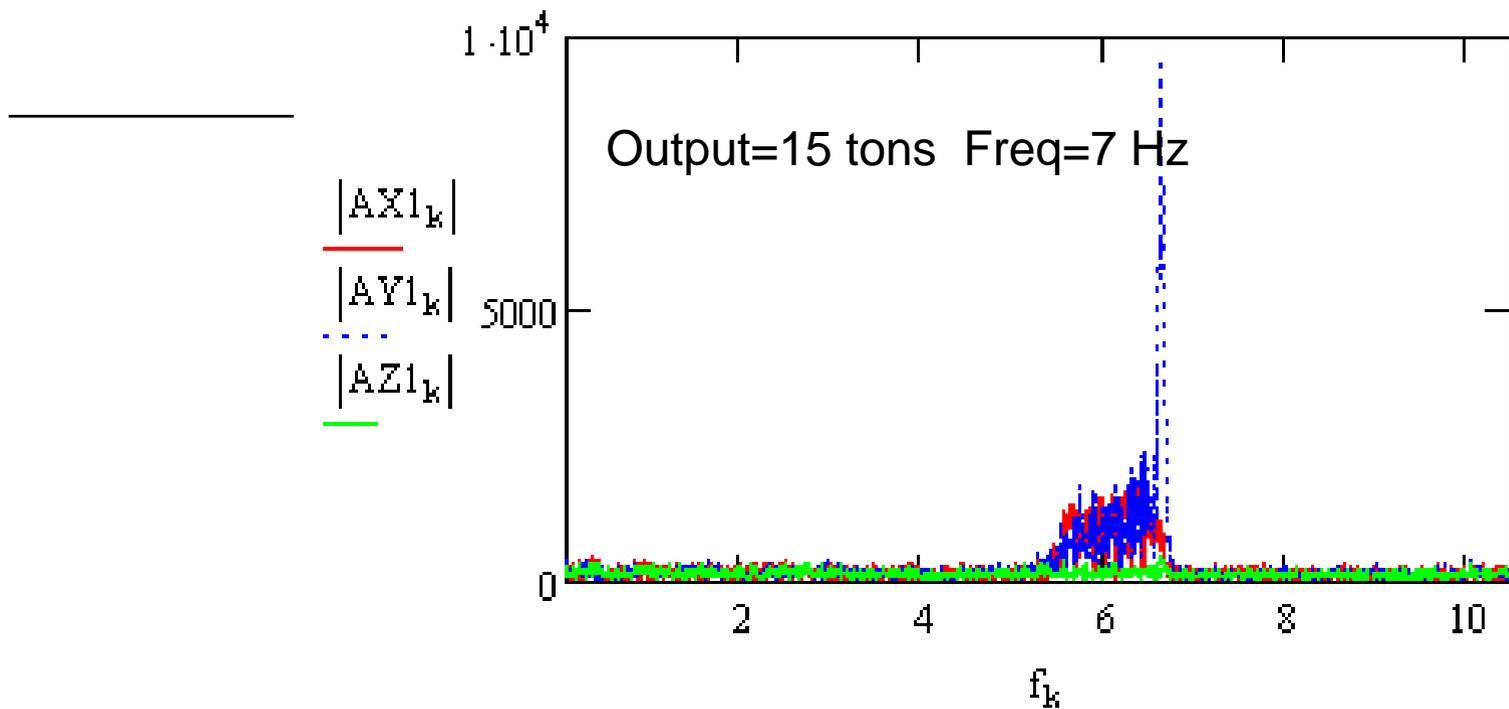


# 耦合感測子與配件



推桿

# 基礎振動模式

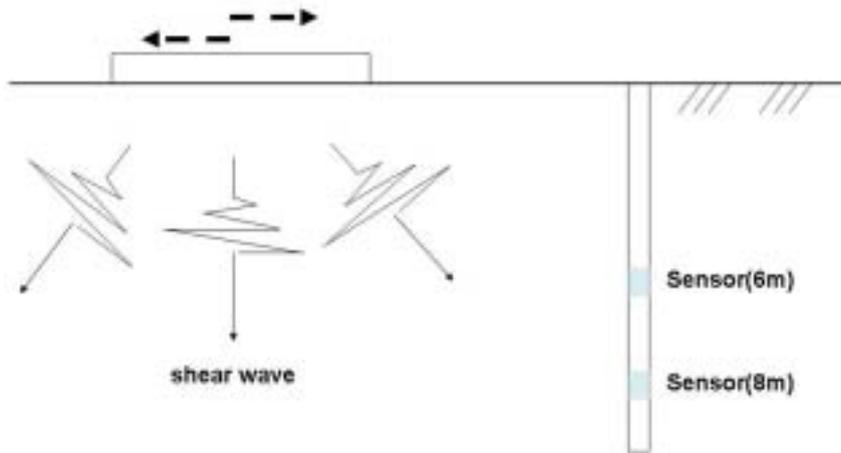


# 試驗流程

| CASE   | HZ         | 控制面<br>板HZ | N,S-LINE      | E,W-LINE | MASS<br>PLATE | OUTPUT<br>FORCE TON | STAR TIME |
|--------|------------|------------|---------------|----------|---------------|---------------------|-----------|
| Case1  | 2.0        | 12.0       | ●             |          | 1L20          | 3.4                 | 11:31     |
| Case2  | 2.0        | 12.0       | ●             |          | 1L30+4S30     | 6.5                 | 12:00     |
| Case3  | 2.0        | 12.0       | ●             |          | 2L30+1S20     | 8.93                | 13:35     |
| Case4  | 2.0        | 12.0       | ●             |          | 3L30          | 12.66               | 14:00     |
| Case5  | 2.0        | 12.0       | ●             |          | 4L30          | 16.63               | 14:35     |
| Case6  | 2.0        | 12.0       |               | ●        | 4L30          | 16.63               | 15:00     |
| Case7  | 2.0        | 12.0       |               | ●        | 4L30          | 16.63               | 15:00     |
| Case8  | 2.6        | 15.6       |               | ●        |               | 3.01                | 15:57     |
| Case9  | 2.6        | 15.6       |               | ●        | 2S30+1S12     | 6.43                | 16:10     |
| Case10 | 2.6        | 15.6       |               | ●        | 4S30+1S12     | 9.27                | 16:25     |
| Case11 | 4.0        | 24.0       |               | ●        | 1L20+1S30     | 15.02               | 16:50     |
| Case12 | 4.0        | 24.0       | ●             |          | 1L20+1S30     | 15.02               | 17:30     |
| Case13 | 5.0        | 30.0       | ●             |          | 5S30+1S12     | 16.72               | 17:51     |
| Case14 | 5.0        | 30.0       |               | ●        | 5S30+1S12     | 16.72               | 18:10     |
| Case15 | 6.0        | 36.0       |               | ●        | 3S30+1S12     | 17.66               | 19:02     |
| Case16 | 6.0        | 36.0       | ●             |          | 3S30+1S12     | 17.66               | 19:35     |
| Case17 | 7.0        | 42.0       | ●             |          | 1S30+1S20     | 16.48               | 19:46     |
| Case18 | 7.0        | 40.0       |               | ●        | 1S30+1S20     | 16.48               | 20:13     |
| Case19 | 7.0        |            |               | ●        |               | 16.48               | 20:30     |
| Case20 | 8.0        |            | ●             |          |               | 17.73               | 20:53     |
| Case21 | 7.0        |            | ●             |          |               | 17.73               | 21:24     |
| Case22 | 6.9        |            | ●             |          |               | 16.48               | 21:55     |
|        |            |            |               |          |               |                     |           |
|        |            |            |               |          |               |                     |           |
|        |            |            |               |          |               |                     |           |
|        | <b>L30</b> |            | <b>大塊30MM</b> |          |               |                     |           |
|        | <b>L20</b> |            | <b>大塊20MM</b> |          |               |                     |           |
|        |            |            |               |          |               |                     |           |
|        |            |            |               |          |               |                     |           |
|        | <b>S30</b> |            | <b>小塊30MM</b> |          |               |                     |           |
|        | <b>S20</b> |            | <b>小塊20MM</b> |          |               |                     |           |
|        | <b>S12</b> |            | <b>小塊12MM</b> |          |               |                     |           |

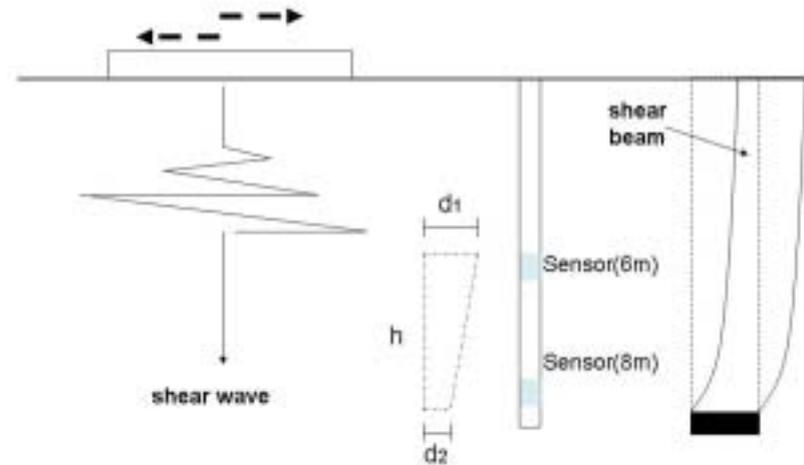
# 資料處理程序：剪應變計算原理

## 平面剪力波法



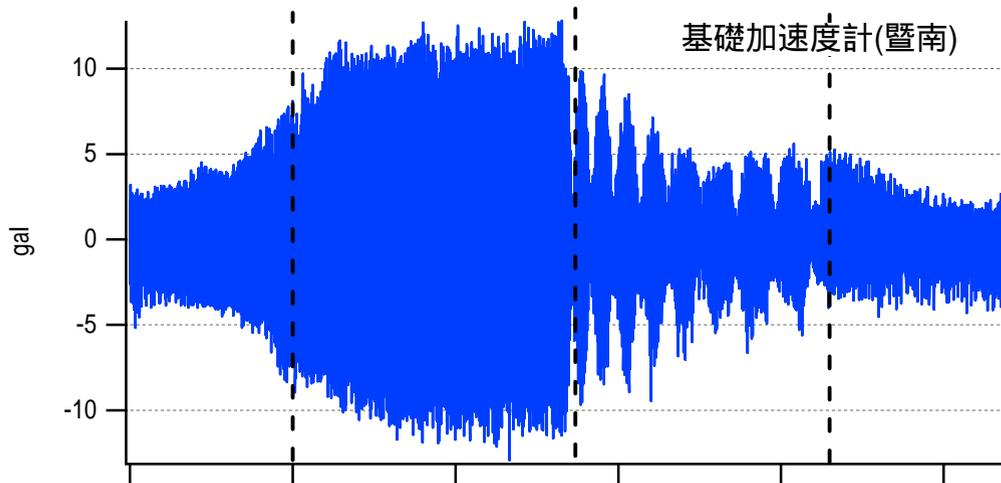
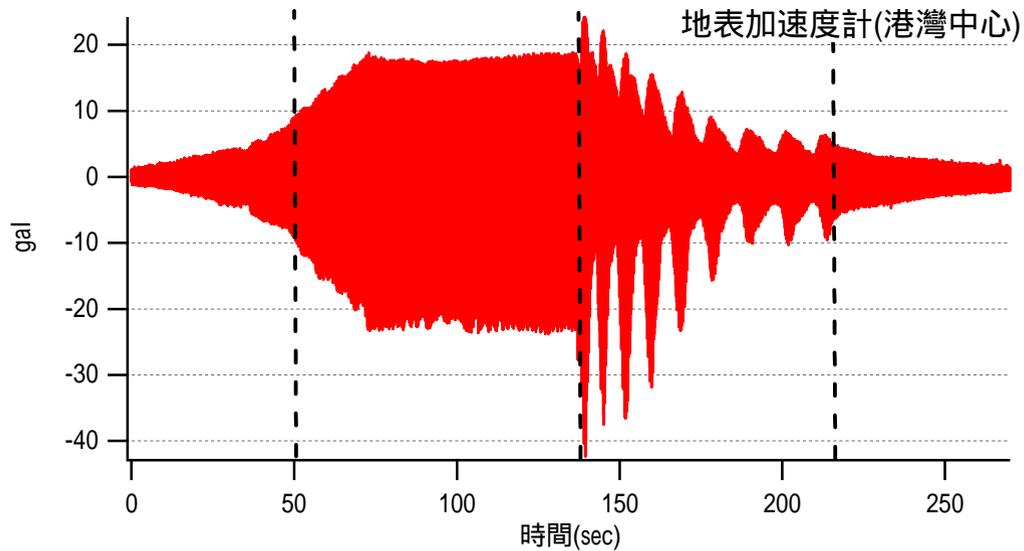
$$\gamma = \frac{-\dot{A}_y}{V_s}$$

## 剪力樑法

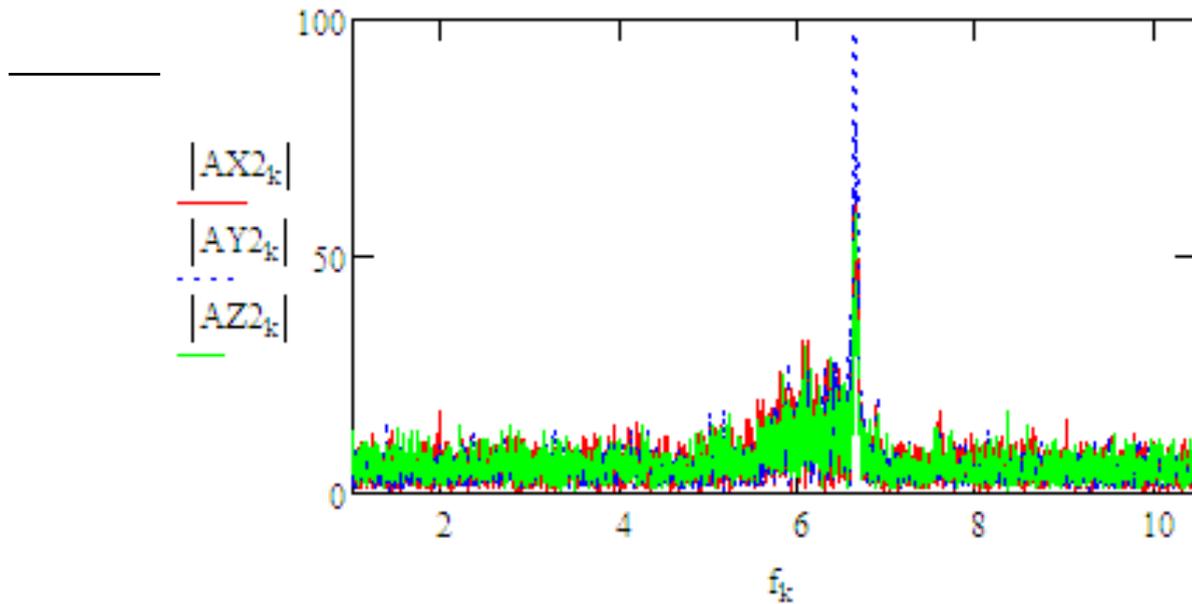


$$\gamma = \frac{d_1 - d_2}{h}$$

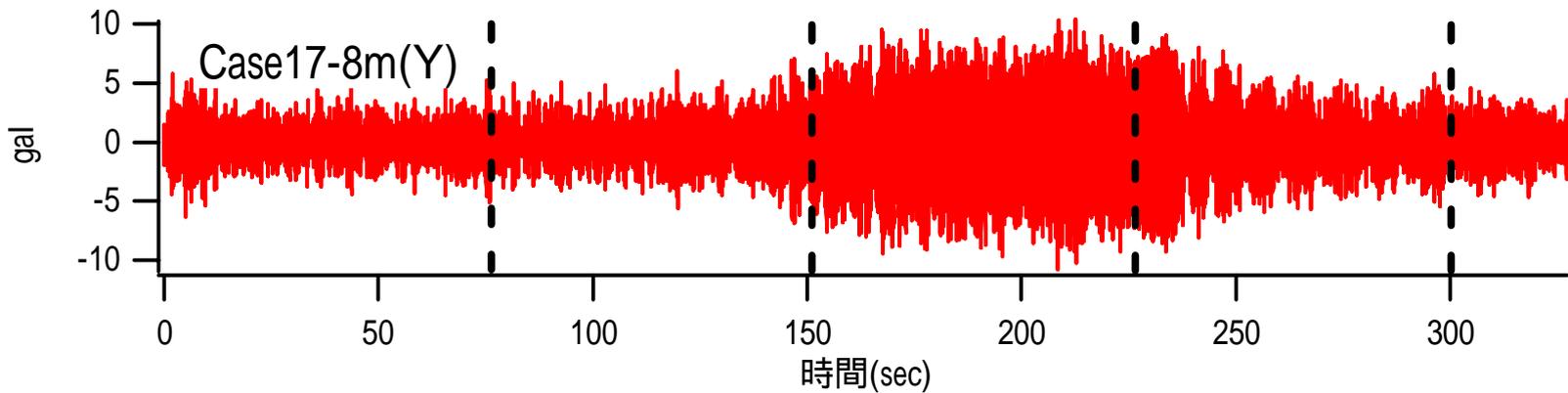
# 同步程序



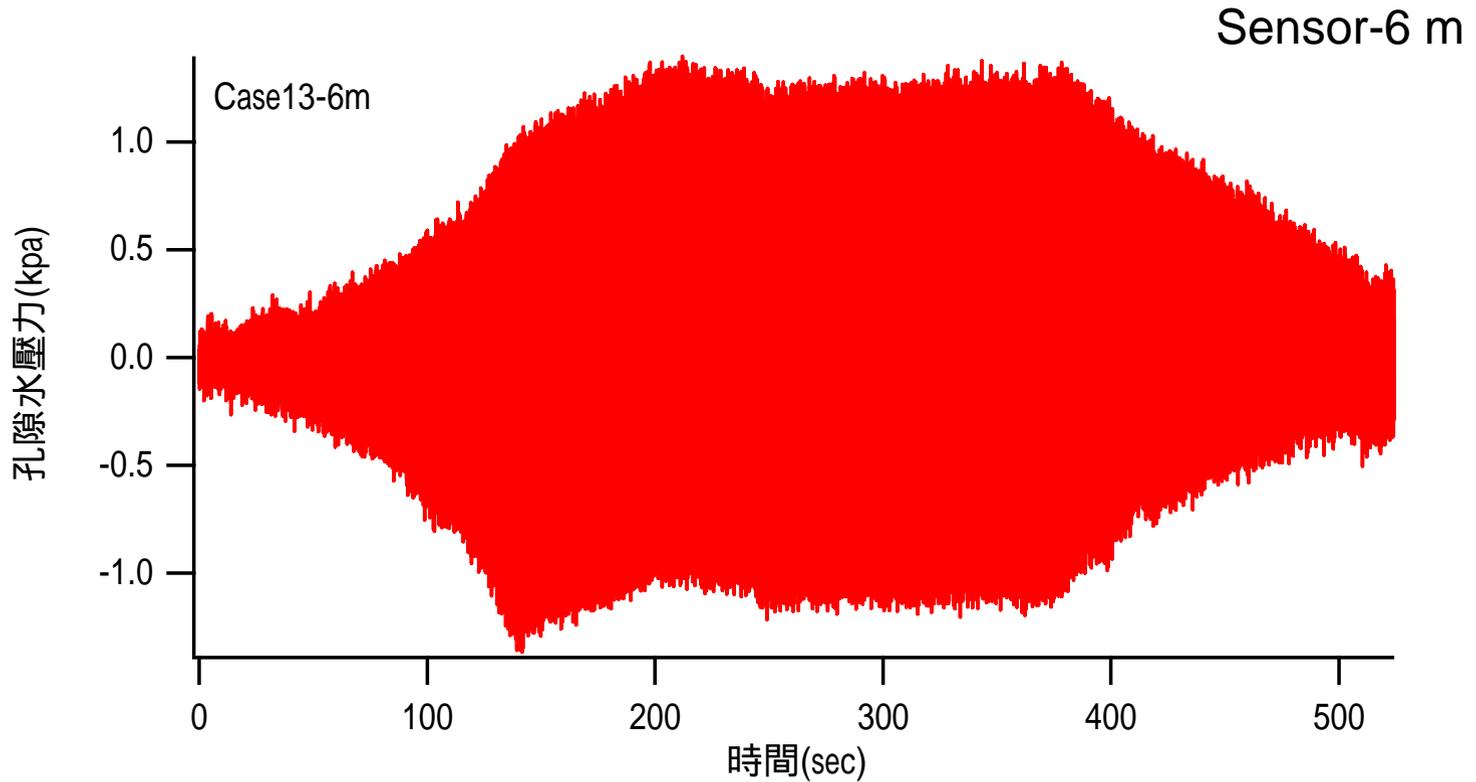
# 地下土層震動模式



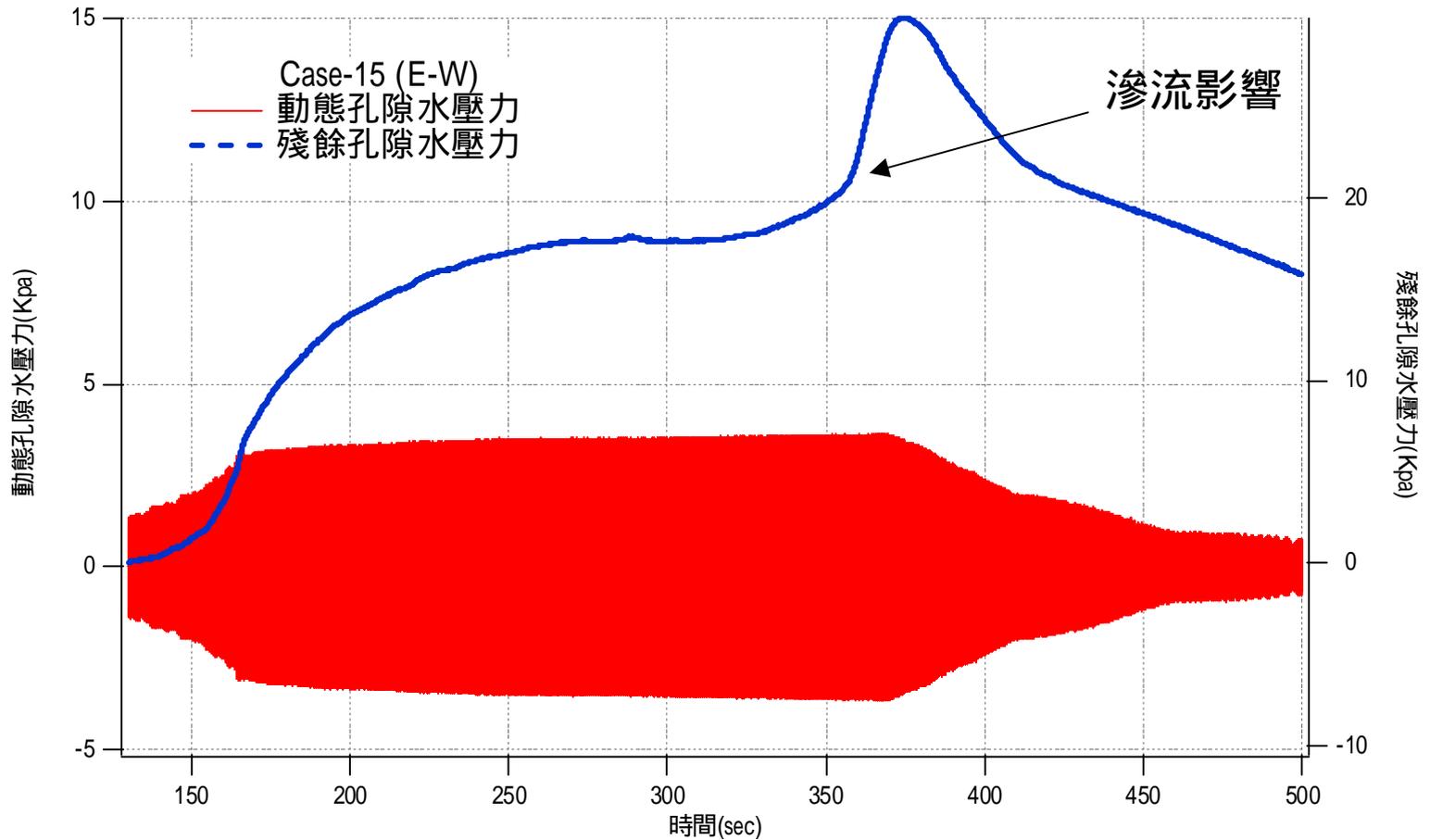
Sensor-8 m



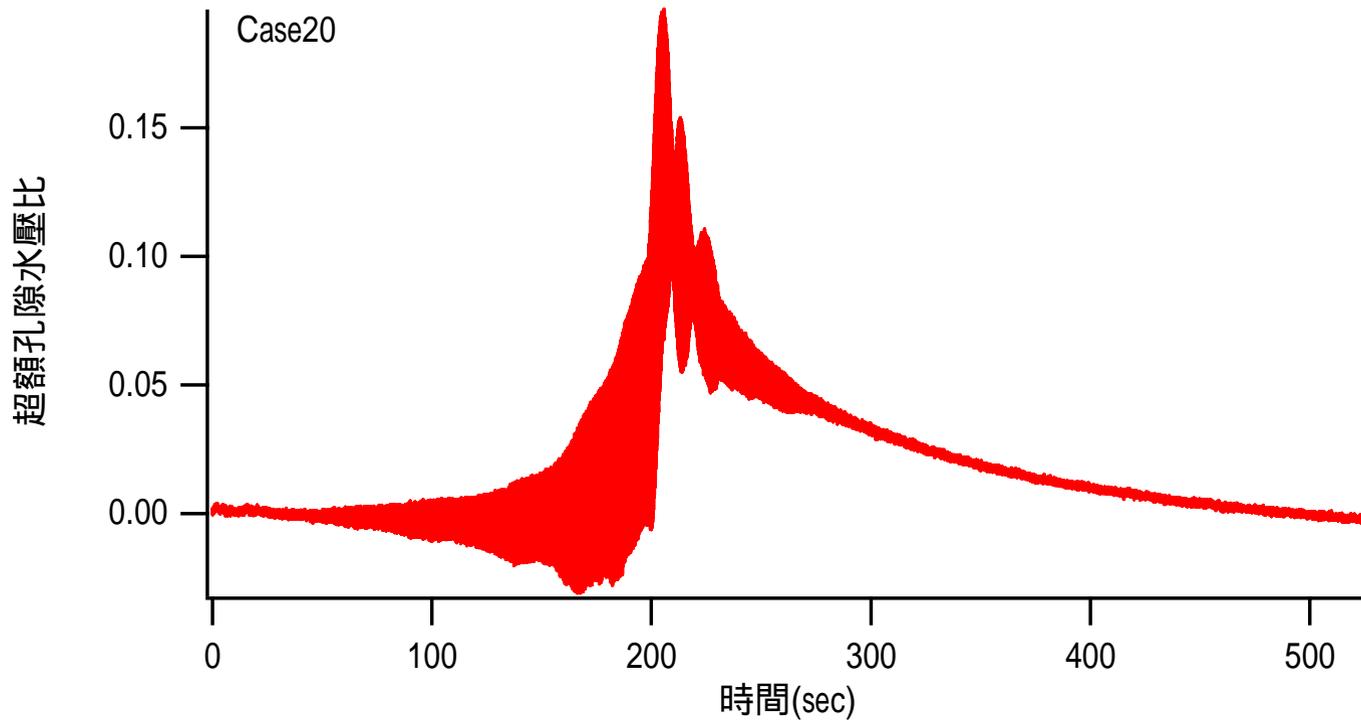
# 超額孔隙水壓資料：小震動



# 動態與殘餘孔隙水壓力

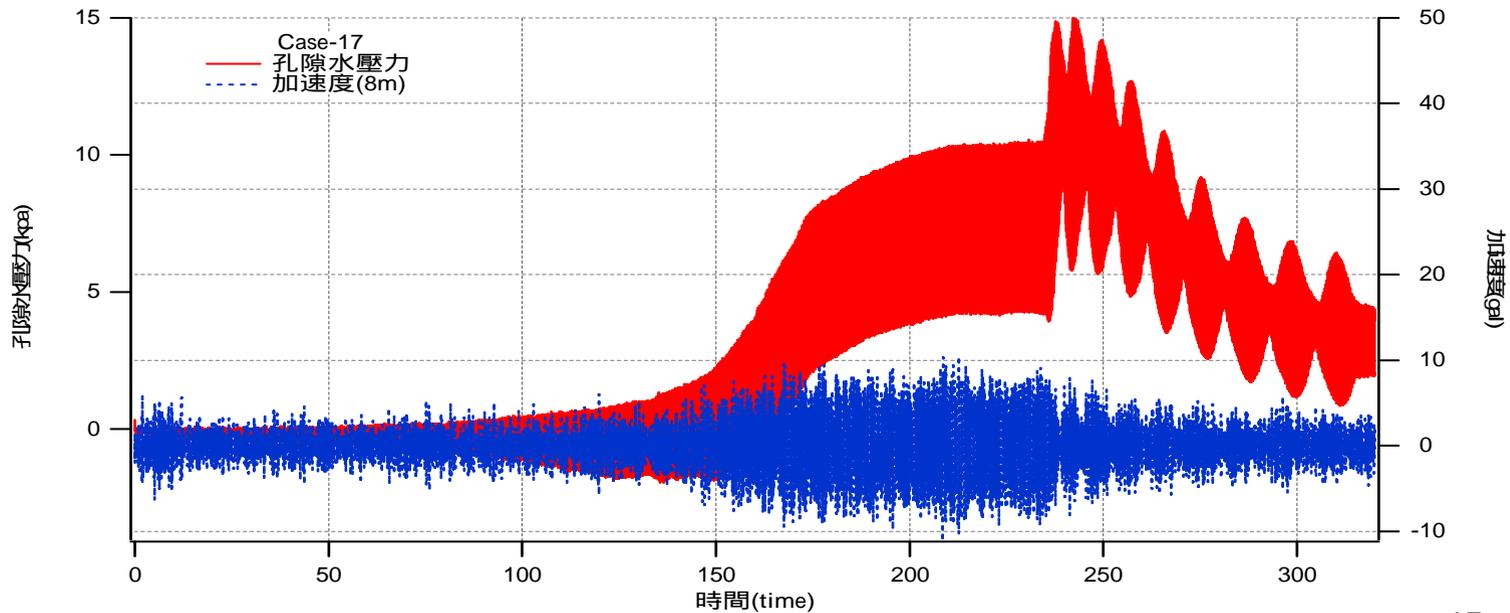
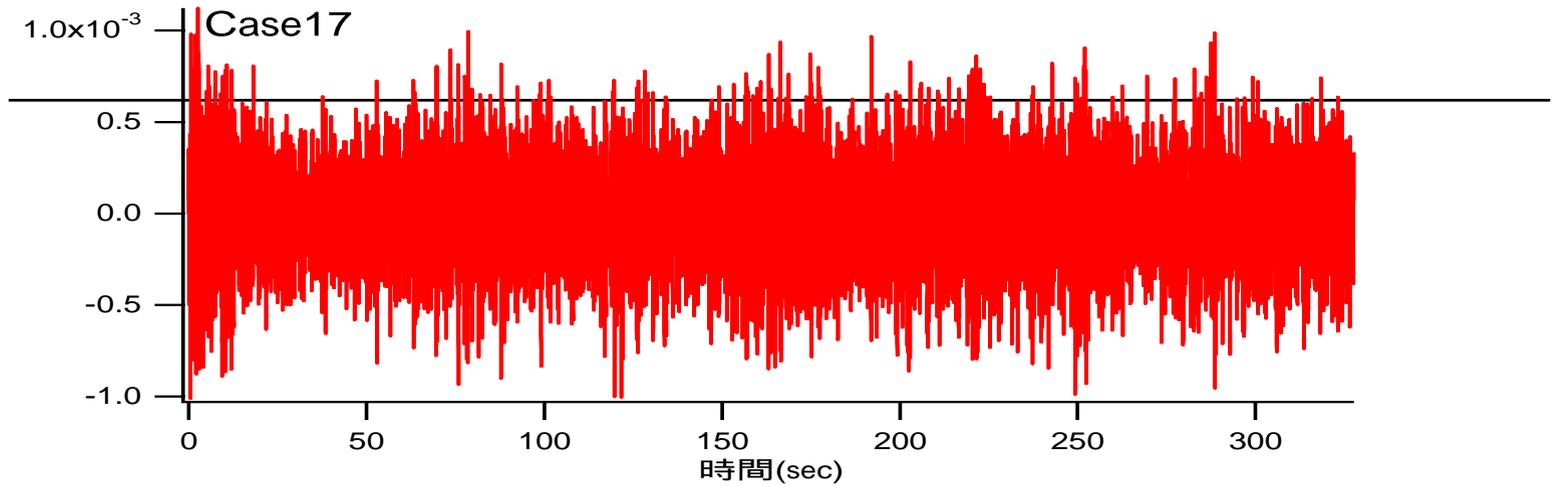


# 超額孔隙水壓比



# 剪應變與孔隙水壓力耦合反應

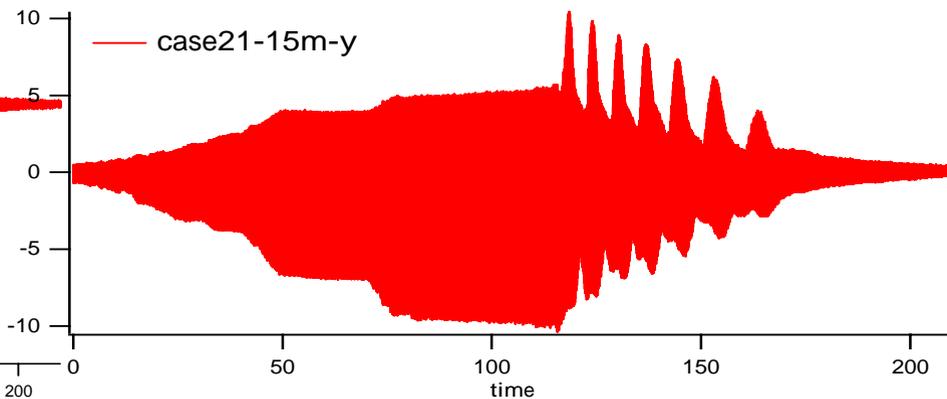
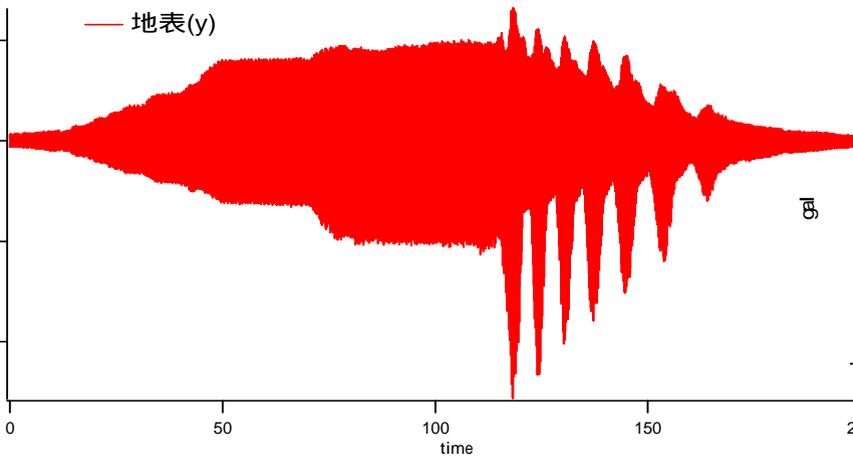
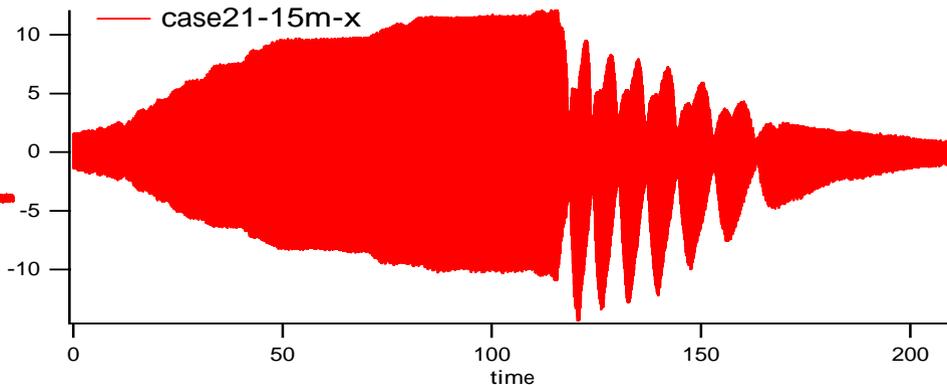
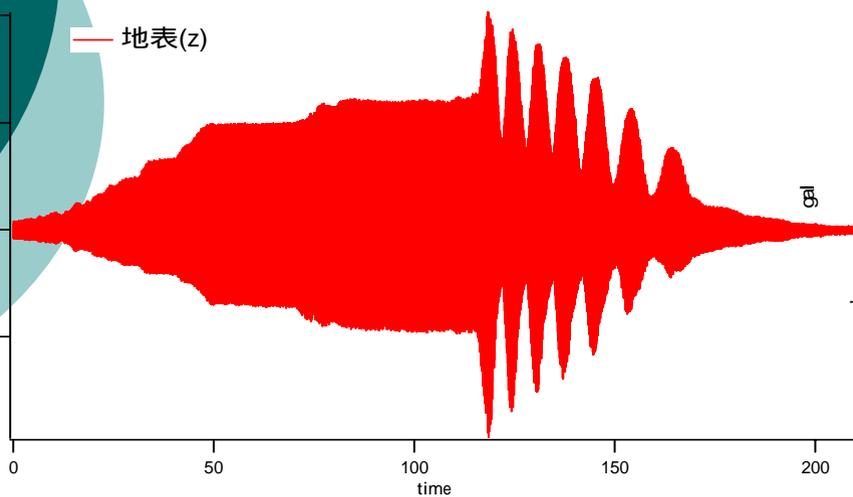
剪應變



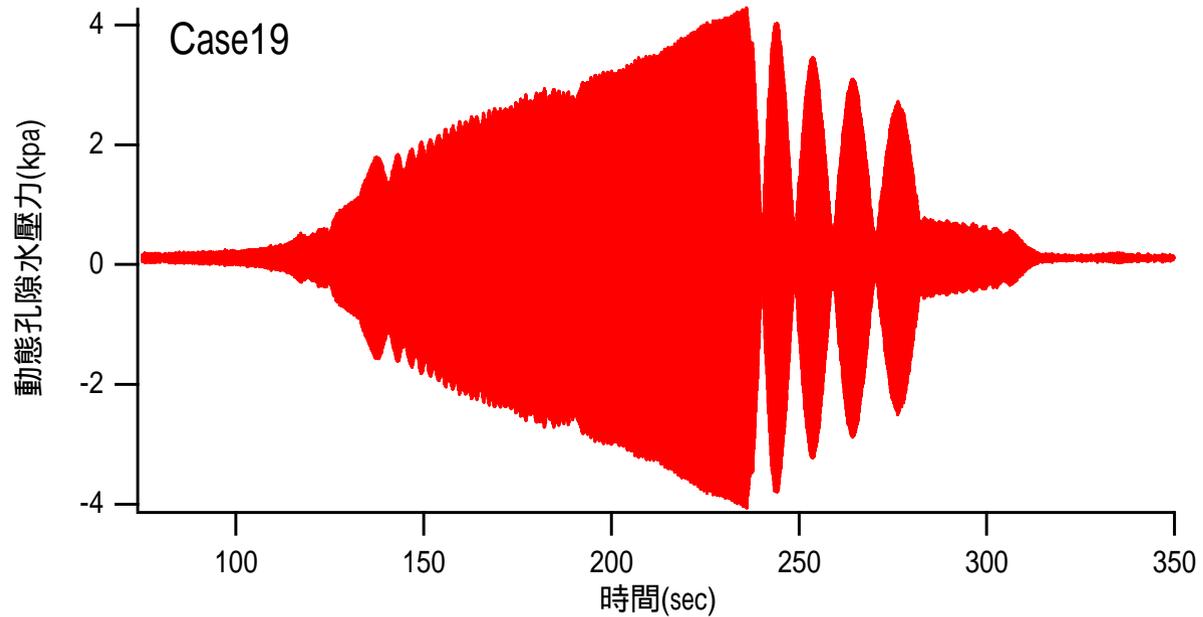
# 現地監測站檢測

## 地表加速度計

## 孔下加速度計



# 孔隙水壓計



IHMT地表下8 m孔隙水壓力歷時

# 結論與建議

---

- 收集國內外棧橋式碼頭破壞案例及整理現有基樁動態分析程序，以BWF配合自由場有效應力動態分析之土壤-結構-基樁互制模式
- 現地進行表面震測量測，決定場址之分層與各層之平均波速，並依此結果決定於線地鑽探3孔計30 m，場址土層局部差異大

# 結論與建議(cont.)

---

- 動態特性試驗顯示在6至10 m間之試驗土層其液化阻抗最低，約為0.28，因含大量細粒料，使得其行為與一般乾淨之鬆砂不同，近似於緊密砂
- 以FLAC Dynamic 並啟動滲流模式可近似模擬層狀地盤振動特性、超額孔隙水壓力激發及滲流影響，結果與現地大型簡諧震源試驗大致符合
- 動態有效應力分析結果顯示碼頭後方之回填砂層會產生液化情況，但碼頭本身與下方之土壤並無液化發生，基樁最大彎距發生於與樑相接處，但基樁並未破壞，群樁通過之土壤其最大剪應變與孔隙水壓力激發均較無基樁區域為小

## 結論與建議(cont.)

---

- 現有震源僅能產生超額孔隙比約0.25之振動，且震波侷限於基礎下方鄰近區域，無法檢測較深之區域，但激發之孔隙水壓力與加速度紀錄與自由場分析結果趨勢相同
- sensor-8m之孔隙水壓計無法運作，且sensor-6m之加速度讀數與孔隙水壓計讀數無法吻合，建議明年度以洗孔方式將其取出重新整修
- 現有數值分析結果需進行參數靈敏度分析，以克服複雜土層影響與介面參數
- 改進數值分析組構模式，以u-p formulation模擬耦合反應



簡報完畢  
敬請指教

