

96-32-7251

MOTC-IOT-95-H1DA002-02

# 港灣地區地震及液化之常態 監測研究(2/4)



交通部運輸研究所  
中華民國 96 年 4 月

96-32-7251

MOTC-IOT-95-H1DA002-02

# 港灣地區地震及液化之常態 監測研究(2/4)

著 者：賴聖耀、陳志芳、賴瑞應

交通部運輸研究所  
中華民國 96 年 4 月

台灣地區地震及液化之常態監測研究. (2/4) /

賴聖耀, 陳志芳, 賴瑞應著. -- 初版. -- 臺

北市: 交通部運研所, 民96

面: 公分

參考書目:面

ISBN 978-986-00-9259-2 (平裝)

1. 港埠 - 管理 - 自動化 2. 地震 - 防制

443. 2029

96006181

台灣地區地震及液化之常態監測研究(2/4)

著者: 賴聖耀、陳志芳、賴瑞應

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](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版>中心出版品)

電話: (04) 26587176

出版年月: 中華民國96年4月

印刷者: 福島實業有限公司

版(刷)次冊數: 初版一刷130冊

本書同時登載於交通部運輸研究所台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: 1009600793

ISBN: 978-986-00-9259-2 (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 港灣地區地震及液化之常態監測研究 (2/4)

交通部運輸研究所

GPN: 1009600793

定價 200 元

## 交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                         |                          |                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 出版品名稱：港灣地區地震及液化之常態監測研究(2/4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                          |                                                              |
| 國際標準書號（或叢刊號）<br>978-986-00-9259-2 （平裝）                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 政府出版品統一編號<br>1009600793 | 運輸研究所出版品編號<br>96-32-7251 | 計畫編號<br>95-H1DA002-2                                         |
| 主辦單位：港灣技術研究中心<br>主管：邱永芳<br>計劃主持人：賴聖耀<br>參與研究人員：陳志芳、賴瑞應<br>聯絡電話：04-26587186<br>傳真號碼：04-26564418                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                         |                          | 研究期間<br>自 95 年 01 月<br>至 95 年 12 月                           |
| 關鍵詞：地震監測、震波放大、液化                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                         |                          |                                                              |
| 摘要： <p>港灣地區地質多屬疏鬆軟弱之沖積土層及海埔新生地，地震來襲時，震波從震源深處向上經過軟弱的覆土層，振幅通常有放大作用；另在強烈地震作用下，此沖積土層與海埔新生地，可能發生液化現象，造成港灣設施、房屋建築等發生毀損破壞。因此，本計畫在港區建立地震及液化監測系統，以探討地震在港灣地區之放大效應及液化行為，作為港區碼頭、防波堤等港灣設施耐震設計之參考。</p> <p>本計畫已完成臺中港、臺北港及高雄港等港區之地震及動態孔隙水壓監測站，由監測資料之迴歸分析顯示，臺中港震波放大倍率約為 3 倍，臺北港震波放大倍率約為 4 倍，高雄港震波放大倍率約為 4.5 倍。本計畫亦以本土化液化分析模式，分析港區液化危害度，分析結果顯示，臺中港液化之臨界地表加速度為 0.13g，臺北港液化之臨界地表加速度為 0.15g，高雄港液化之臨界地表加速度為 <math>A_{max}=0.1g</math>。</p> |                         |                          |                                                              |
| 出版日期                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 頁數                      | 定價                       | 本 出 版 品 取 得 方 式                                              |
| 96 年 4 月                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 132                     | 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><input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密<br>（解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密，<br><input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密）<br><input checked="" type="checkbox"/> 普通   |                         |                          |                                                              |
| 備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                         |                          |                                                              |

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

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                              |                                 |                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>TITLE: Earthquake and Liquefaction Monitoring at Harbor Areas (2/4)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                              |                                 |                                                                                                                                                                                                                        |
| ISBN (OR ISSN)<br>978-986-00-9259-2<br>(pbk)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER<br>1009600793 | IOT SERIAL NUMBER<br>96-32-7251 | PROJECT NUMBER<br>95-H1DA002-02                                                                                                                                                                                        |
| DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER<br>DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu<br>PRINCIPAL INVESTIGATOR: S. Y. Lai<br>PROJECT STAFF: J. F. Chen, R. I. Lai<br>PHONE: 04-26587186<br>FAX: 04-26564418                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                              |                                 | PROJECT PERIOD<br>FROM January 2006<br>TO December 2006                                                                                                                                                                |
| <b>KEY WORDS: Earthquake Monitoring, Seismic Magnification, Liquefaction</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |                                 |                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>ABSTRACT</b><br><p>\</p> <p>Because Taiwan is located in the western branch of the Cum-Pacific Seismic Belt, earthquakes occur frequently. Under the circumstances of strong earthquake shaking, the liquefaction of sandy soils of alluvium and reclaimed lands in the western coastal area of Taiwan may occur. It may then cause damages to coastal and harbor facilities in this area..</p> <p>In this project, the ground surfaced and embedded seismographs and piezometers are installed in Taichung, Taipei and Kaohsiung harbor areas. The monitoring data reveal that the seismic magnification at Taichung Harbor is three times, that at Taipei Harbor is four times, and that at Kaohsiung Harbor is 4.5 times. Some local models for evaluating liquefaction potential using SPT data as well as applicable local models to evaluate liquefaction potential for local soil conditions at harbor areas are established in this study. The seismic intensity induce liquefaction at Taichung Harbor is needed 0.13g, that at Taipei Harbor is 0.15g, and that at Kaohsiung Harbor is 0.1g.</p> |                                              |                                 |                                                                                                                                                                                                                        |
| DATE OF PUBLICATION<br>April 2007                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | NUMBER OF PAGES<br>132                       | PRICE<br>200                    | CLASSIFICATION<br><input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL<br><input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET<br><input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED |
| The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                              |                                 |                                                                                                                                                                                                                        |

# 港灣地區地震及液化之常態監測研究(2/4)

## 目 錄

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 中文摘要 .....                    | I    |
| 英文摘要 .....                    | II   |
| 圖目錄 .....                     | V    |
| 表目錄 .....                     | X    |
| 第一章 前 言 .....                 | 1-1  |
| 第二章 港灣地區之地震監測系統 .....         | 2-1  |
| 2.1 港灣地區地震監測系統之種類 .....       | 2-1  |
| 2.2 港灣地區地震及動態孔隙水壓監測規劃 .....   | 2-3  |
| 2.3 港灣地區地震及動態孔隙水壓監測 .....     | 2-6  |
| 第三章 港區地震及土壤液化監測之分析 .....      | 3-1  |
| 3.1 沖積土層對地震之影響 .....          | 3-1  |
| 3.2 港區地震及土壤液化監測規劃 .....       | 3-4  |
| 3.3 臺中港地震監測結果分析 .....         | 3-5  |
| 3.4 臺北港地震監測結果分析 .....         | 3-7  |
| 3.5 高雄港地震監測結果分析 .....         | 3-10 |
| 3.6 蘇澳港地震監測結果分析 .....         | 3-13 |
| 3.7 港區地震 PGA 值分佈之模擬 .....     | 3-13 |
| 3.8 動態孔隙水壓之監測結果分析 .....       | 3-15 |
| 3.9 小 結 .....                 | 3-16 |
| 第四章 本土化液化分析模式與港區液化危害度分析 ..... | 4-1  |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 4.1 前言 .....                | 4-1        |
| 4.2 修正之極限狀態分析法 .....        | 4-2        |
| 4.3 SPT 評估液化潛能之極限狀態模式 ..... | 4-7        |
| 4.4 極限狀態模式之驗證與比較 .....      | 4-11       |
| 4.5 液化機率模式 .....            | 4-16       |
| 4.6 液化危害度分析 .....           | 4-18       |
| 4.7 港區液化危害度分析結果 .....       | 4-20       |
| 4.8 小結 .....                | 4-22       |
| <b>第五章 結論與建議 .....</b>      | <b>5-1</b> |
| <b>參考文獻 .....</b>           | <b>6-1</b> |



## 圖 目 錄

|                                                        |      |
|--------------------------------------------------------|------|
| 圖 3-1 港區地震監測系統規劃與流程圖 .....                             | 3-4  |
| 圖 3-2 機房及設備外觀示意圖 .....                                 | 3-5  |
| 圖 3-3 臺中港測站平面配置示意圖 .....                               | 3-6  |
| 圖 3-4 臺中港地震監測站照片 .....                                 | 3-6  |
| 圖 3-5 臺北港測站平面配置示意圖 .....                               | 3-7  |
| 圖 3-6 臺北港地震監測站照片 .....                                 | 3-7  |
| 圖 3-7 高雄港地震監測站位置示意圖 .....                              | 3-8  |
| 圖 3-8 高雄港地震監測站照片 .....                                 | 3-8  |
| 圖 3-9 蘇澳港地震監測站位置示意圖 .....                              | 3-9  |
| 圖 3-10 蘇澳港地震監測站照片 .....                                | 3-9  |
| 圖 3-11 臺灣地區較可能影響港區之斷層分佈圖 .....                         | 3-10 |
| 圖 3-12 臺中港 26 號碼頭地震監測站 30m 地質調查概況 .....                | 3-12 |
| 圖 3-13 臺中港 26 號碼頭地震監測站 300m 地層構造圖與特性 .....             | 3-13 |
| 圖 3-14a 臺中港地震監測站液化潛能評估結果-1 ( $M=7.3, A_{max}=0.163g$ ) | 3-14 |
| 圖 3-14b 臺中港地震監測站液化潛能評估結果-2 ( $M=7.3, A_{max}=0.163g$ ) | 3-14 |
| 圖 3-15 臺中港地震監測站地層構造與地震及水壓監測深度圖 .....                   | 3-15 |
| 圖 3-16 臺中港火力電廠地震監測站地層構造與地震及水壓監測深度圖                     | 3-16 |
| 圖 3-1 臺中港地震及動態水壓監測站示意圖 .....                           | 3-18 |
| 圖 3-2 臺中港 2002 年 3 月 31 日 14 點 53 分地震波(南北向).....       | 3-18 |
| 圖 3-3 臺中港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖 .....                    | 3-19 |
| 圖 3-4 臺中港井下地震儀南北向正規化之最大加速度隨深度變化圖 .....                 | 3-19 |

|                                                         |      |
|---------------------------------------------------------|------|
| 圖 3-5 應力折減因數 $r_d$ 隨深度之變化範圍 (Seed & Idriss, 1971) ..... | 3-20 |
| 圖 3-6 臺中港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖 .....                      | 3-20 |
| 圖 3-7 臺灣西海岸港區沉泥質砂性土壤 $G/G_{max}$ 與剪應變之關係 .....          | 3-21 |
| 圖 3-8 臺灣西海岸港區沉泥質砂性土壤阻尼比與剪應變之關係 .....                    | 3-21 |
| 圖 3-9 臺中港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖 .....                        | 3-22 |
| 圖 3-10 臺中港 2002 年 3 月 31 日-SHAKE 模擬地震(南北向) .....        | 3-23 |
| 圖 3-11 臺北港地震及動態水壓監測站示意圖 .....                           | 3-24 |
| 圖 3-12 臺北港 2003 年 6 月 10 日 16 時 41 分地震(南北向) .....       | 3-24 |
| 圖 3-13 臺北港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖 .....                    | 3-25 |
| 圖 3-14 臺北港井下地震儀南北向正規化之最大加速度隨深度變化圖 ....                  | 3-25 |
| 圖 3-15a 臺北港南北向震波放大倍率與最大加速度之關係圖 .....                    | 3-26 |
| 圖 3-15b 臺北港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖 .....                    | 3-26 |
| 圖 3-16 臺北港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖 .....                       | 3-27 |
| 圖 3-17 臺北港 2003 年 6 月 10 日-SHAKE 模擬地震(南北向) .....        | 3-28 |
| 圖 3-18a 臺北港 2003 年 6 月 10 日模擬與觀測加速度在 R 方向比較圖 .          | 3-29 |
| 圖 3-18b 臺北港 2003 年 6 月 10 日模擬與觀測加速度在 T 方向比較圖 .          | 3-30 |
| 圖 3-19 高雄港地震及動態水壓監測站示意圖 .....                           | 3-31 |
| 圖 3-20 高雄港 2003 年 12 月 10 日 12 時 39 分地震(南北向) .....      | 3-31 |
| 圖 3-21 高雄港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖 .....                    | 3-32 |
| 圖 3-22 高雄港井下地震儀南北向正規化之最大加速度隨深度變化圖 ....                  | 3-32 |
| 圖 3-23a 高雄港南北向震波放大倍率與最大加速度之關係圖 .....                    | 3-33 |
| 圖 3-23b 高雄港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖 .....                    | 3-33 |
| 圖 3-24 高雄港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖 .....                       | 3-34 |

|                                                           |      |
|-----------------------------------------------------------|------|
| 圖 3-25a 高雄港 2003 年 12 月 10 日模擬(下)與觀測(上)加速度在 R 方向比較圖 ..... | 3-35 |
| 圖 3-25b 高雄港 2003 年 12 月 10 日模擬(下)與觀測(上)加速度在 T 方向比較 .....  | 3-36 |
| 圖 3-26 蘇澳港地震及動態水壓監測站示意圖 .....                             | 3-37 |
| 圖 3-27 蘇澳港 2005 年 3 月 6 日 3 時 6 分地震(南北向).....             | 3-37 |
| 圖 3-28 蘇澳港地震監測井與微地動試驗分佈圖 .....                            | 3-38 |
| 圖 3-29 蘇澳港地表與深度 15 米之頻譜比與微地動分析比較圖 .....                   | 3-38 |
| 圖 3-30 蘇澳港地表與深度 35 米之頻譜比與微地動分析比較圖 .....                   | 3-39 |
| 圖 3-31 蘇澳港特性週期 3 秒港區放大倍率等值圖 .....                         | 3-39 |
| 圖 3-32 蘇澳港特性週期 0.5 秒港區放大倍率等值圖 .....                       | 3-40 |
| 圖 3-33 蘇澳港 2005 年 3 月 6 日地震 PGA 模擬之分佈圖(東西向).....          | 3-40 |
| 圖 3-34 台中港 921 地震 PGA 模擬之分佈圖(東西向) .....                   | 3-41 |
| 圖 3-35 台中港淺層共振主頻之分佈圖.....                                 | 3-41 |
| 圖 3-36a 蘇澳港 2005 年 3 月 6 日地震之動態水壓變化 .....                 | 3-42 |
| 圖 3-36b 蘇澳港 2005 年 3 月 6 日地震之動態水壓變化(大於 0.25Hz) ...        | 3-43 |
| 圖 3-36c 蘇澳港 2005 年 3 月 6 日地震之動態水壓變化(小於 0.25Hz) ...        | 3-44 |
| 圖 3-37a 高雄港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化 .....               | 3-45 |
| 圖 3-37b 高雄港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化(大於 0.1Hz). 3-46     |      |
| 圖 3-37c 高雄港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化(小於 0.1Hz). 3-47     |      |
| 圖 3-38a 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化.....                | 3-48 |
| 圖 3-38b 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化(大於 0.08Hz)3-49      |      |
| 圖 3-38c 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化(小於 0.08Hz)3-50      |      |
| 圖 4-1 NCEER(1997)建議細粒料含量 $FC \leq 5\%$ 曲線之修正值 .....       | 4-25 |

|                                                                                                            |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 圖 4-2 液化之極限狀態分析示意圖 .....                                                                                   | 4-25 |
| 圖 4-3 X 與 Y 均為隨機函數之示意圖(楊，1899).....                                                                        | 4-26 |
| 圖 4-4 SPT 試驗 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 值繪於常態或然率圖上 .....                                                          | 4-27 |
| 圖 4-5 $CSR_{7.5}$ 值繪於對數常態或然率圖上 .....                                                                       | 4-27 |
| 圖 4-6 尋找液化極限狀態值之流程圖 .....                                                                                  | 4-28 |
| 圖 4-7 液化極限狀態資料點及迴歸曲線.....                                                                                  | 4-28 |
| 圖 4-8 $0\% \leq FC \leq 10\%$ 液化極限狀態曲線圖 .....                                                              | 4-29 |
| 圖 4-9 $10\% \leq FC \leq 20\%$ 液化極限狀態曲線圖 .....                                                             | 4-29 |
| 圖 4-10 $20\% \leq FC \leq 30\%$ 液化極限狀態曲線圖 .....                                                            | 4-30 |
| 圖 4-11 $30\% \leq FC \leq 40\%$ 液化極限狀態曲線圖.....                                                             | 4-30 |
| 圖 4-12 經機率檢定之 $FC=5\%$ 、 $15\%$ 、 $25\%$ 、 $35\%$ 等極限狀態曲線之比較<br>( $(N_1)_{60}$ ， $\ln(CSR_{7.5})$ ) .....  | 4-31 |
| 圖 4-13 未經機率檢定之 $FC=5\%$ 、 $15\%$ 、 $25\%$ 、 $35\%$ 等極限狀態曲線之比較<br>( $(N_1)_{60}$ ， $\ln(CSR_{7.5})$ ) ..... | 4-31 |
| 圖 4-14 未經機率檢定之 $FC=5\%$ 、 $15\%$ 、 $25\%$ 、 $35\%$ 等極限狀態曲線之比較<br>( $(N_1)_{60}$ ， $CSR_{7.5}$ ).....       | 4-32 |
| 圖 4-15 T&Y(1983) $C_s=85$ 之 $FC \leq 5\%$ 、 $FC=15\%$ 、 $FC=25\%$ 、 $FC=35\%$ 等之<br>經驗曲線比較圖 .....          | 4-32 |
| 圖 4-16 $FC=5\%$ 之極限狀態模式與 Seed(NCEER 1997)、Seed(1985)及<br>T&Y(1983) $C_s=85$ 比較.....                        | 4-33 |
| 圖 4-17 $FC=15\%$ 之極限狀態模式與 Seed(NCEER 1997)、Seed(1985)及<br>T&Y(1983) $C_s=85$ 比較.....                       | 4-33 |
| 圖 4-18 $FC=25\%$ 之極限狀態模式與 Seed(NCEER 1997)、Seed(1985)及<br>T&Y(1983) $C_s=85$ 比較.....                       | 4-34 |
| 圖 4-19 $FC=35\%$ 之極限狀態模式與 Seed(NCEER 1997)、Seed(1985)及                                                     |      |

|                                                                                                   |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| T&Y(1983) $C_s=85$ 比較.....                                                                        | 4-34 |
| 圖 4-20 本文極限狀態模式繪於水平座標為 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 及垂直座標為 $\ln(CSR_{7.5})$<br>或 $\ln(CRR_{7.5})$ 之圖上..... | 4-35 |
| 圖 4-21 細粒料含量 FC 與 $\Delta(N_1)_{60}$ 之關係 .....                                                    | 4-35 |
| 圖 4-22 本文極限狀態模式分析臺中港區 921 地震之液化潛勢圖 .....                                                          | 4-36 |
| 圖 4-23 Seed(NCEER 1997)法分析臺中港區 921 地震之液化潛勢圖 .....                                                 | 4-37 |
| 圖 4-24 T&Y(1983)法分析臺中港區 921 地震之液化潛勢圖.....                                                         | 4-38 |
| 圖 4-25 液化案例之 $\sqrt{F_s}$ 值繪於常態或然率圖上.....                                                         | 4-39 |
| 圖 4-26 非液化案例之 $F_s$ 值繪於對數常態或然率圖上.....                                                             | 4-39 |
| 圖 4-27 極限狀態模式經貝氏定理推求之抗液化安全係數與液化機率之關係<br>圖 .....                                                   | 4-40 |
| 圖 4-28 台灣地區造成百人以上死亡之重大災害地震震央分佈圖 .....                                                             | 4-40 |
| 圖 4-29 影響台中港之活動斷層分佈與斷層剖面圖 .....                                                                   | 4-41 |
| 圖 4-30 台中港區模擬 1935 年新竹—台中地震之液化危害程度分佈圖 ..                                                          | 4-41 |
| 圖 4-31 台中港區模擬 1848 年彰化地震之液化程度分佈圖 .....                                                            | 4-42 |
| 圖 4-32 台中港區模擬彰化斷層可能發生之最大地震之液化程度分佈圖<br>.....                                                       | 4-42 |
| 圖 4-33 臺北港區液化之臨界地表加速度 .....                                                                       | 4-43 |
| 圖 4-34 臺中港區液化之臨界地表加速度 .....                                                                       | 4-44 |
| 圖 4-35 高雄港區液化之臨界地表加速度 .....                                                                       | 4-45 |

## 表 目 錄

|                                                                         |      |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| 表 4-1 經機率檢定之各種極限狀態函數之比較( $\sqrt{(N_1)_{60}}$ , $\ln(CSR_{7.5})$ ) ..... | 4-24 |
| 表 4-2a 未經機率檢定之各種極限狀態函數之比較( $(N_1)_{60}$ , $\ln(CSR_{7.5})$ ).....       | 4-24 |
| 表 4-2b 未經機率檢定之各種極限狀態函數之比較( $(N_1)_{60}$ , $CSR_{7.5}$ ).....            | 4-24 |

# 第一章 前 言

臺灣西海岸各港區地質多屬疏鬆軟弱之沖積土層及海埔新生地，地震來襲時，震波從震源深處向上經過軟弱的覆土層，振幅通常有放大作用。另在強烈地震之反復作用下，土壤之孔隙水壓會逐漸上升，土壤之承載力會逐漸減低，當土壤之超額孔隙水壓之上升累積至與土壤之垂直壓力相等時即所謂之土壤液化，當此種現象發生的時候，土壤的承載力會瞬間驟降甚至到零的地步，築在其上的結構物也因基礎失去支撐而傾斜或倒塌，而側向之構造物如碼頭、護岸、海堤亦會因土壤液化增加之側向力，而產生向海側位移或傾斜等破壞，因此地震時動態水壓之監測，對港灣構造物之安全極為重要。

1995 年日本發生阪神大地震，港區新生地發生嚴重液化造成神戶港之碼頭、岸壁等港灣設施嚴重毀損，港灣機能全面癱瘓。921 大地震除造成車籠埔斷層沿線重大災害外，遠在斷層數十公里外的臺中港區亦發生土壤液化，造成港灣結構物的損毀。分析港區內之地層可初步瞭解，靠近地表之地層屬於震波傳遞較慢的鬆軟沖積層或回填層，這些地層均易造成特定頻率震波之放大。因此徹底瞭解地震在港區沖積土層之放大效應及動態孔隙水壓變化行為，作為各港區後續工程設計時的依據為本研究主要目標。

本計畫於民國 90 年底完成臺中港監測站，民國 91 年完成臺北港監測站，民國 92 年底完成高雄港監測站，於民國 93 年底完成蘇澳港監測站。臺中港監測站設置已五年多，臺北港監測站設置已四年多，高雄港監測站設置已三年多，蘇澳港監測站設置已二年多，監測期間曾發生強震 PGA 值大於 65 gal 以上者有，94 年 3 月 6 日蘇澳雙震源地震，芮氏地震規模  $M_L=5.9$ ，蘇澳港區監測站之  $PGA=155gal$ 。95 年 12 月 26 日屏東恆春地震，震央於恆春外海，芮氏地震規模  $M_L=6.7$ ，高雄港區監測站之  $PGA=67gal$ ，但同一日之最大餘震，震央位於屏東枋寮，芮氏地震規模  $M_L=6.4$ ，高雄港區監測站之  $PGA=97gal$ ，安平港區監測站之

PGA=101gal。因此本計畫除了以臺中港、臺北港及高雄港之地震監測資料進行分析，以探討地震在臺中港、臺北港及高雄港之放大效應；並以港區地震 PGA 值分佈之模擬，探討民國 75 年花蓮地震造成蘇澳港 3-5 號碼頭側移及 921 地震造成臺中港 1-4 號碼頭土壤液化災害之原因；亦以 94 年 3 月 6 日蘇澳雙震源地震及 95 年 12 月 26 日屏東恆春地震，探討強烈地震在蘇澳港、高雄港及安平港之動態孔隙水壓之變化，作為港區碼頭、防波堤等港灣設施耐震設計之參考。



## 第二章 港灣地區之地震監測系統

### 2.1 港灣地區地震監測系統之種類

為確保地震發生時位於軟弱沖積土層結構物之安全，須針對地震所產生之效應進行監測，以作為設計結構物之參考，於港灣地區設置地震反應監測系統，本研究依功能與目的將其歸納為：地震監測、動態孔隙水壓監測、地層下陷監測、碼頭及地層之傾斜變位監測等四種，分述於下列各小節。

#### 2.1.1 地震監測

本研究將其分為：地表自由場地震力監測、地震在軟弱土層之放大效應監測、重要構造物之地震反應監測等三方面探討。

1. 地表自由場地震力監測：自由場之地震監測為港灣地區最基本之地震監測，其是以三向式之地表地震儀，設置於寬度空曠地區之地表，再以電纜線連接至室內之監測記錄器。本研究在臺中港、臺北港、布袋港、安平港、花蓮港及高雄港等地區均已完成設置之工作。
2. 地震在軟弱土層之放大效應監測：港灣地區地層大都為疏鬆軟弱之沖積土層及浚砂回填土所構成，因此地震在鬆軟地層之放大效應，悠關港灣構造物之安全甚巨，為了瞭解地震時，地層中震波之傳遞特性，鑽數口井至各個地層，分別於最深之堅硬地盤及不同深度之軟弱土層，分層安置埋入型地震計，分層監測(本研究分層設計深度規劃為 GL-15m、GL-30m、GL-100m、GL -300m，得依現地土層變化狀況而調整。)，以瞭解當地地層之地震放大效應。目前本研究已先後於安平港、臺中港、臺北港與高雄港各完成一組地震監測系統。
3. 重要構造物之地震反應監測：港灣地區有棧橋式、板樁式、沉箱式等各種不同型式之基礎及碼頭、防波堤、海堤、過港隧道等各種不

同構造物，其對地震之反應皆各有不同，為了瞭解地震時，重要構造物之地震反應，亦需安裝地震儀加以監測。

### 2.1.2 動態孔隙水壓監測

在強烈地震之反復作用下，土壤之孔隙水壓會逐漸上升，土壤之承載力會逐漸減低，當土壤之超額孔隙水壓之上升累積至與土壤之垂直壓力相等時即所謂之土壤液化。當此種現象發生的時候，土壤的承載力會瞬間驟降甚至到零的地步，築在其上的結構物也因基礎失去支撐而傾斜或倒塌，而側向之構造物如碼頭、護岸、河海堤亦會因土壤液化增加之側向力，而產生向海側（河側）位移或傾斜等破壞。因此地震時動態水壓之監測，對港灣構造物之安全極為重要。目前本中心在安平港、臺中港、臺北港與高雄港均已個別完成設置一組動態水壓即時監測系統(本研究分層設計深度規劃為 GL-4m、GL-8m、GL-10m、GL-15m、GL-30m，得依現地土層變化狀況而調整)。以監測地震時淺層動態水壓之即時變化。此外，在臺中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港區亦分別設置 1 組 200M 分層地下水壓監測系統，除了可以監測港區平時之水壓變化外，亦可監測地震前後深層地下水壓之變化。

### 2.1.3 地層下陷監測

在強烈地震作用下，港灣地區之沖積層及抽砂浚填土層易產生液化及下陷現象，而可能影響結構物安全。1906 年之舊金山及 1964 年之阿拉斯加大地震，發生 5 公分至 30 公分之沉陷者十分普遍，而 1995 年 1 月 17 日之阪神大地震，造成神戶港區新生地（Port Island）液化後之沉陷，在無基礎構造物之廣闊地區平均液化後之沉陷為 50 公分，最大者為 90 公分；但在港區沉箱式碼頭背填土液化後回填砂外漏被掏空及沉箱位移後砂土填補位移空間造成之沉陷卻高達 2-4 公尺。921 集集大地震，造成臺中港區 1-4 號沉箱式碼頭背填土液化後之沉陷及沉箱位移後砂土填補位移空間造成之沉陷高達 60-100 公分。本中心在臺中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港區已分別完成 1 至 2 組 200M

深之分層沉陷監測井，平時可監測港區附近抽水、填土等造成之沉陷，地震時，亦可監測地震之下陷量，921 地震臺中港監測井即發揮了其沉陷監測功能。

#### 2.1.4 碼頭及地層之傾斜變位監測

地震不但會造成地層下陷，亦會產生側向力使港灣構造物造成位移、傾斜，日本阪神地震造成港灣碼頭位移 1-5m，臺灣 1999 年 921 地震造成臺中港 1-4A 碼頭外移 0.5~1.7m，傾斜 2~4%，因此對碼頭及地層之傾斜變位之監測亦為地震反應安全監測之一環。

### 2.2 港區地震及動態孔隙水壓監測規劃

本研究依年度預算及工作進度，依序分別於各港區選擇適當位置安置地震及動態孔隙水壓監測系統，且各港監測系統自成一個監測站，其各站監測系統規劃與流程設計如圖 2-1 所示，每個監測系統規劃設計原則說明如下：

1. 每個系統設計監測儀器設井各 7 孔，分別為水壓計監測井 3 孔及地震監測井 4 孔。水壓計安裝設計深度為 4M、8M、12M、15M、20M、30M 等 6 支分置於 3 孔，地震計安裝設計深度為 15M、30M、100M、300M 等 4 組分置於 4 孔，另於地表安裝地震儀 1 組後，藉由電纜線組合一起延長到觀測房以自動記錄方式將資料記錄保存在電腦。
2. 電子式水壓計監測井 3 孔，主要是量測地下水的壓力，並與地震計配合可以測得地震來時的地下水位變化，以求得地震時土壤液化的變化情形。所有電子式水壓計經由配管接到觀測房的集錄器上。
3. 地震監測井，主要在監測地震波在不同土層的震波變化，故地震儀設計成分層安置，但監測時係同時啟動同步監測，並以 Cable 串聯傳到觀測房，用自動記錄的方式將資料收集，再由電腦讀取提供研

究者作分析。採用集錄系統，為一先進數位化自動記錄器，可記錄於 IC 卡上再取回分析，也可經電腦連線再自動傳輸或強迫傳輸，亦可直接到集錄器的螢幕上觀看波形。

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

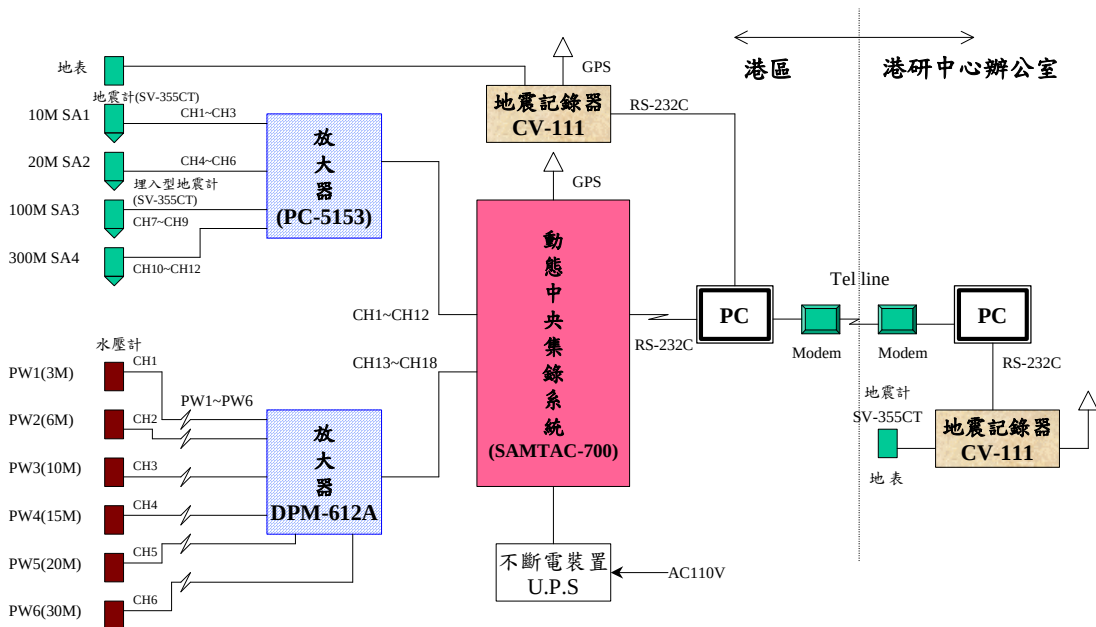


圖 2-1 港區地震監測系統規劃與流程圖

5. 各系統地震儀係以分層分孔方式，分置於 GL±0m(地表)、GL-15m、GL-30m、GL-100m、GL-300m 等 5 點觀測深度，每點均記錄 X、Y、V 等三方向之振波，水壓計亦分 3 孔，每孔 2 點觀測深度，故共須記錄 21ch 之訊號。各系統觀測記錄原則可分:(a)定時激發記錄與(b)即時感測記錄。分述如下：

### (a)定時激發記錄—

係於每日整點(即一天記錄 24 次)，不分振動原因或大小，與地下水壓一併同時記錄。

### (b)即時感測記錄—

係於系統預設一基本激發起動值，不分振動原因，只要振波大於基本激發起動值，系統即予自動啟動記錄。

## 6. 機房之設計原則：

各測站機房之設計原則為：機房為不鏽鋼材外表噴漆，有隔熱裝置，附門、門栓、門鎖。整體堅固不易破壞。水泥機座大小約 180cmL×180cmW×20cmH。機房預定大小 150cmL× 150cmW×220cmH，機房內基本配備：監測儀 1 套、PC 1 部、不斷電系統 1 組、冷氣 1 部(室溫大於攝氏 23 度冷氣方自動開起)、電話 1 部、機架一組。機房外配系統管路（內配 Cable）、電話線路、電力線路及電錶。機房外並噴寫標示。監測站另立不鏽鋼材標示牌。機房及設備外觀參考示意圖如圖 2-2。

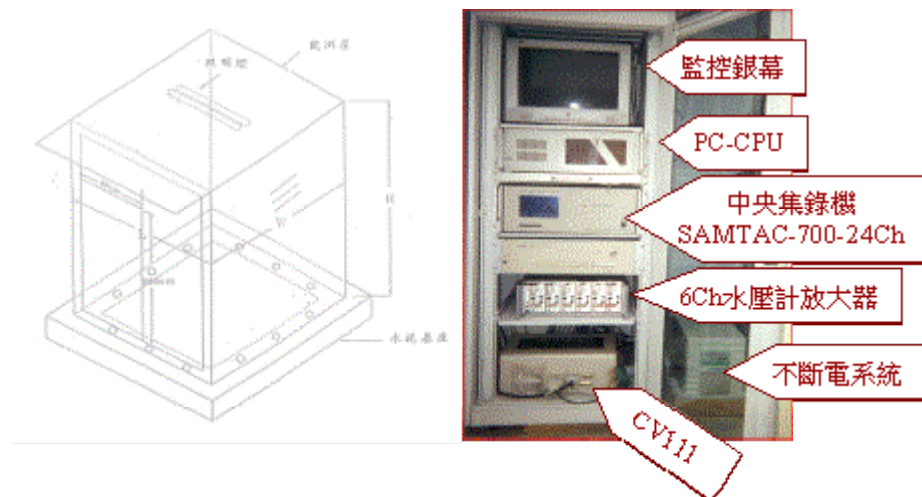


圖 2-2 機房及設備外觀示意圖





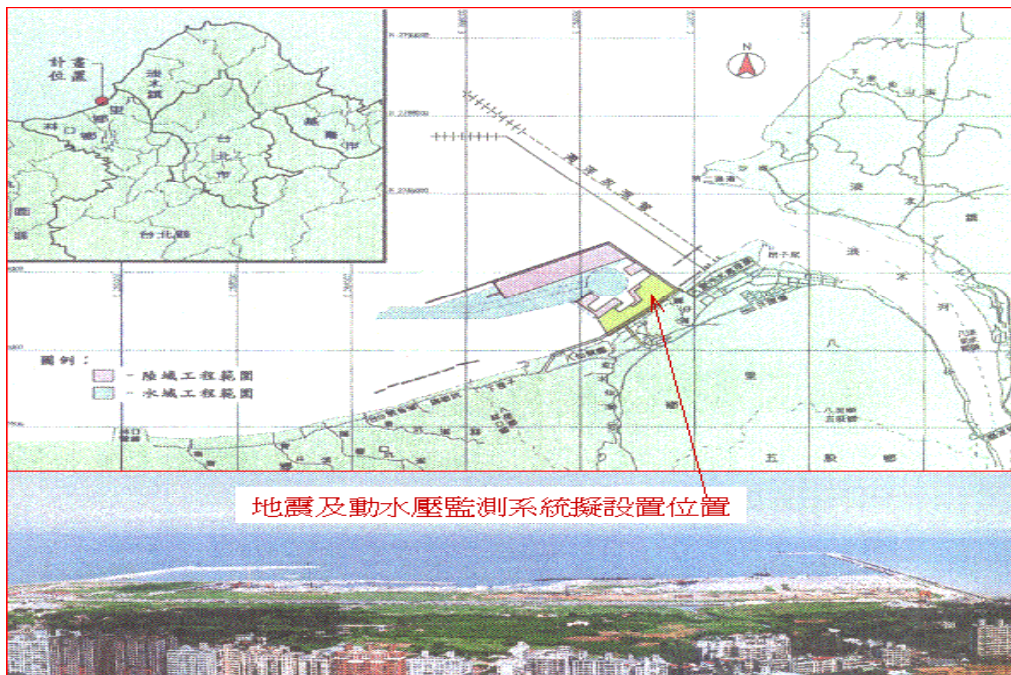


圖 2-5 臺北港監測站平面配置示意圖



圖 2-6 臺北港地震監測站照片

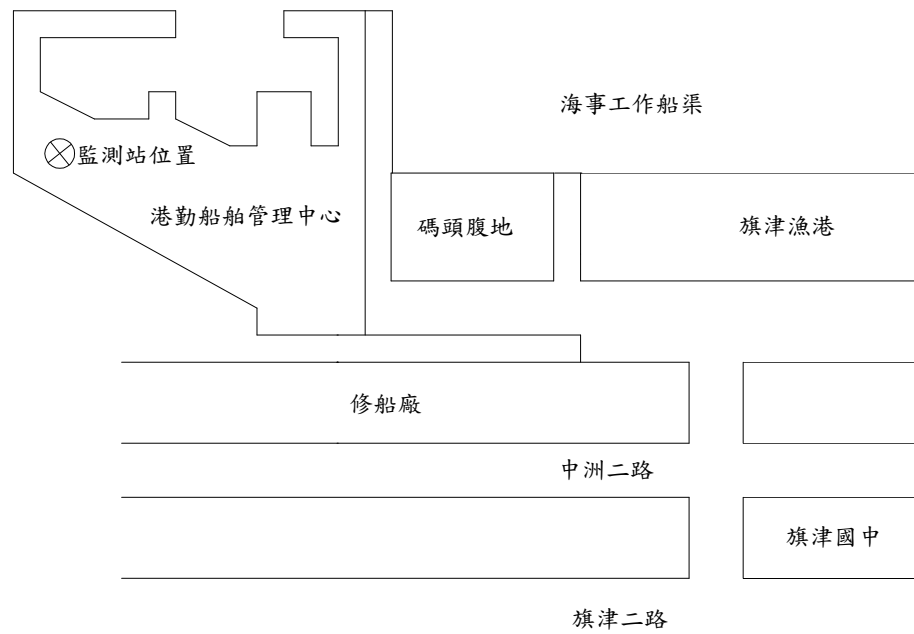


圖 2-7 高雄港地震監測站位置示意圖



圖 2-8 高雄港地震監測站照片





圖 2-9 蘇澳港地震監測站位置示意圖



圖 2-10 蘇澳港地震監測站照片

### 2.3.2 臺灣地區斷層分布狀況

為便於日後分析臺灣地區斷層可能影響各港地震之狀況，特將臺灣地區主要斷層分佈資料予以收集整理如圖 2-11：

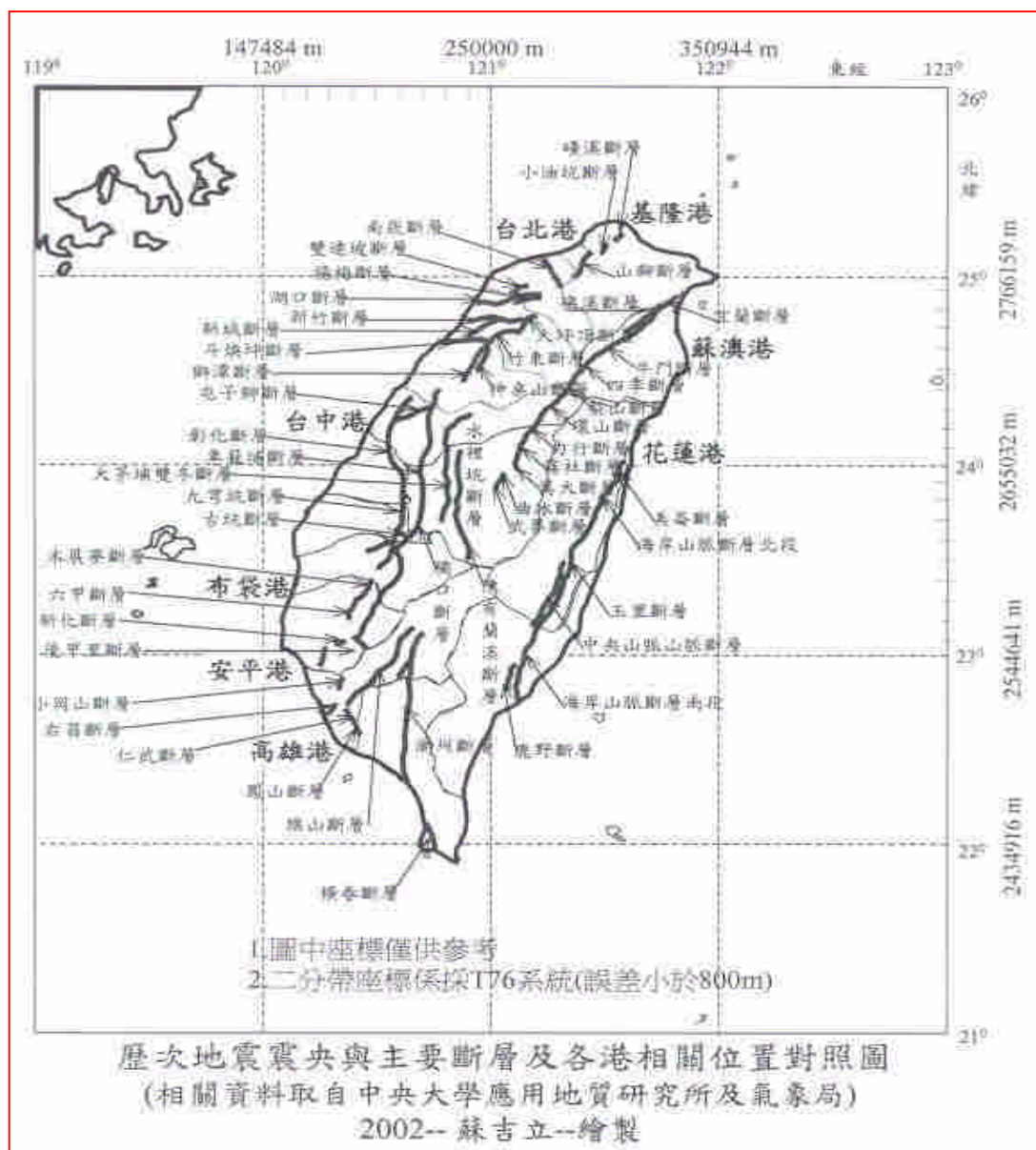


圖 2-11 臺灣地區較可能影響港區之斷層分佈圖

### 2.3.3 各港監測站地層狀況

#### 1. 臺中港區監測站地質構造與特性

##### (1) 臺中港 26 號碼頭地震監測站：

港區地震監測站設於原沉陷監測站，即 26 號碼頭後線三角綠地，其 30m 地質調查概況如圖 2-12，其 300m 地質構造與特性如圖 2-13 及圖 2-14 所示，監測站與港區全區雷同，地表鋪 AC 約 10cm 厚，約 GL -0.5~2.0m 為黃土質卵粒石級配、灰色砂質碎石級配或河川料砂石級配。GL -2.0 至 -12.5m 主要為 SM、ML 與 SP。其 SPT-N 值幾乎小於等於 10。GL -12.5m 至 -30m 間主要亦為 SM、ML 與 SP，但地質分佈則較零亂，偶夾礫石或薄層 CL。其 SPT-N 值分佈於 5 至 30 間，上層最軟弱帶出現於 GL 約 -4.50m 至 -7.50m 間。全區土壤平均含水量介於 23% 至 30% 間。若以 921 地震，地震規模 7.3，臺中港最大加速度 163gal，以 CPT 試驗分析本監測站之液化潛能，分析結果亦如圖 2-15 所示。

##### (2) 臺中港火力電廠地震監測站：

臺中港火力電廠地震監測站地質構造如圖 2-16。

#### 2. 臺北港、高雄港、蘇澳港等港區監測站之地質構造與特性於第三章再說明。

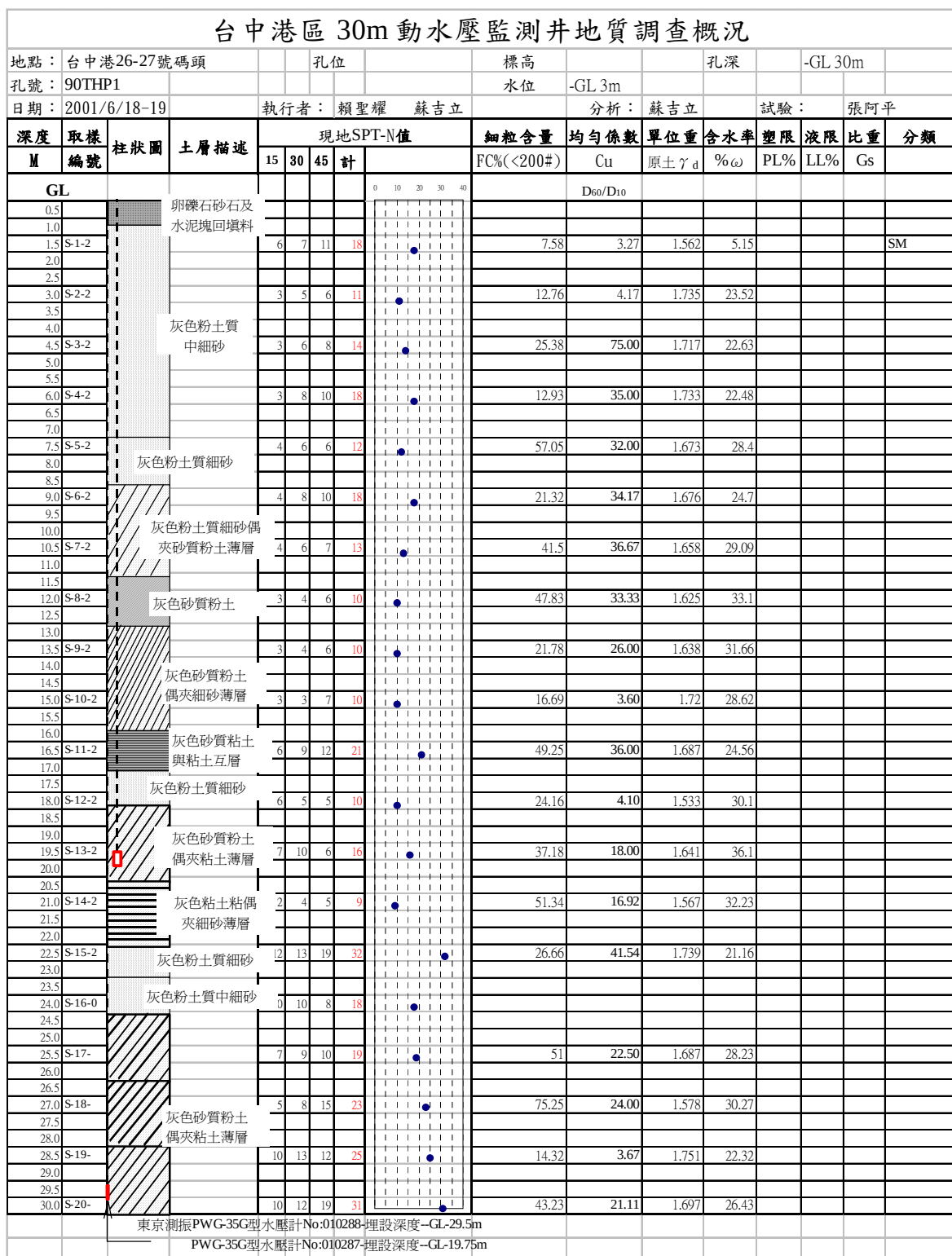


圖 2-12 臺中港 26 號碼頭地震監測站 30m 地質調查概況

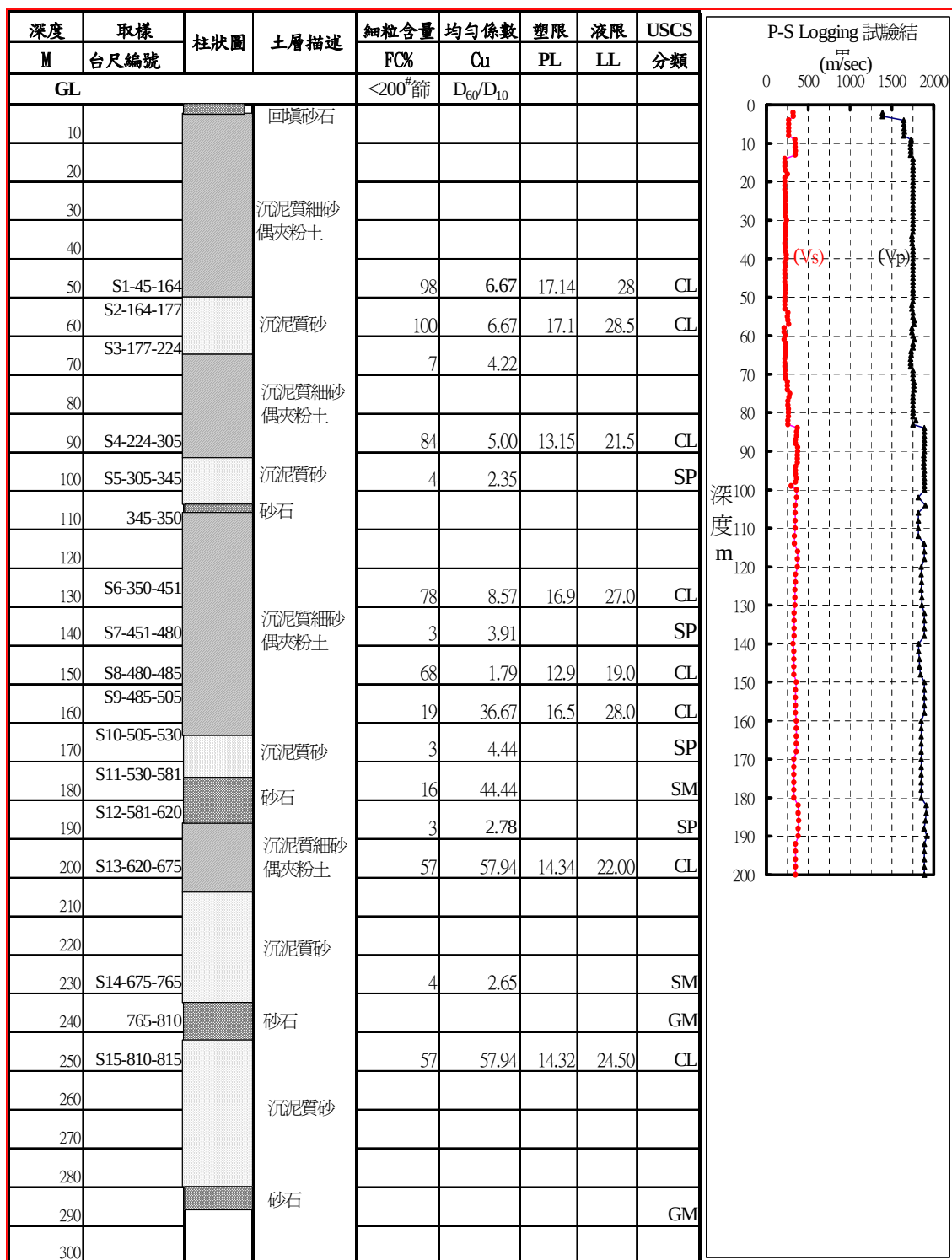


圖 2-13 臺中港 26 號碼頭地震監測站 300m 地層構造圖與特性

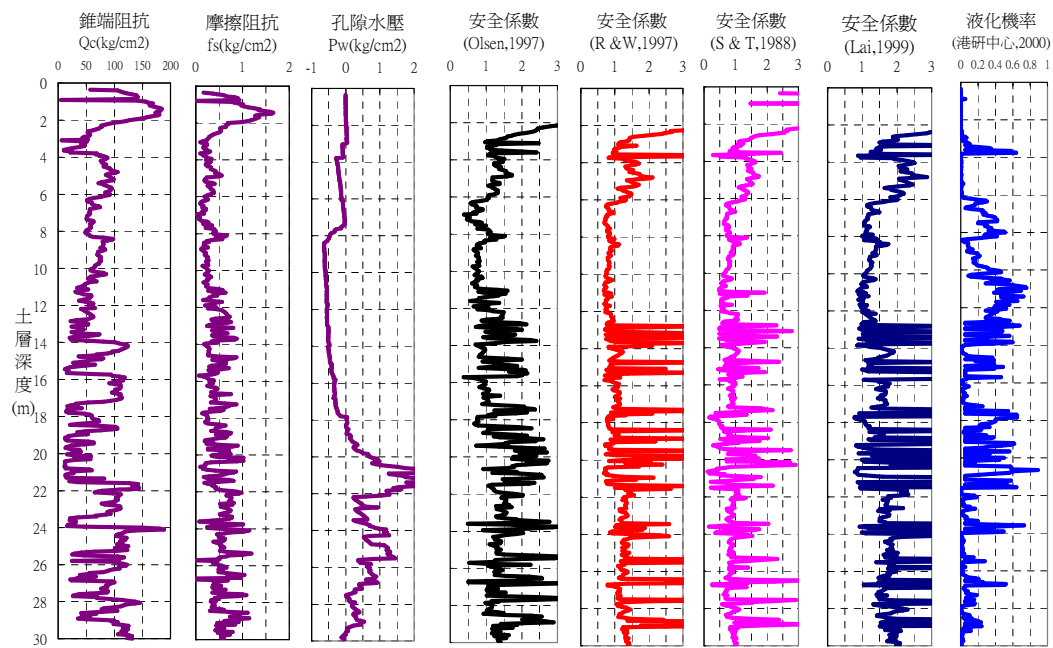


圖 2-14a 臺中港地震監測站液化潛能評估結果-1  
( $M=7.3$ ,  $A_{max}=0.163g$ )

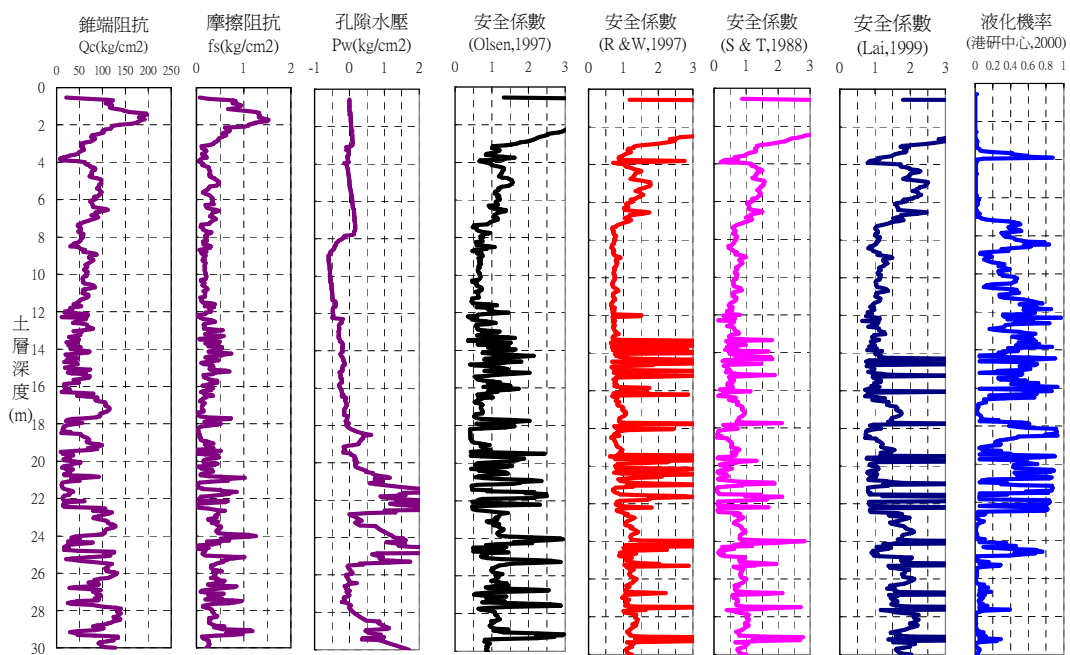


圖 2-14b 臺中港地震監測站液化潛能評估結果-2  
( $M=7.3$ ,  $A_{max}=0.163g$ )

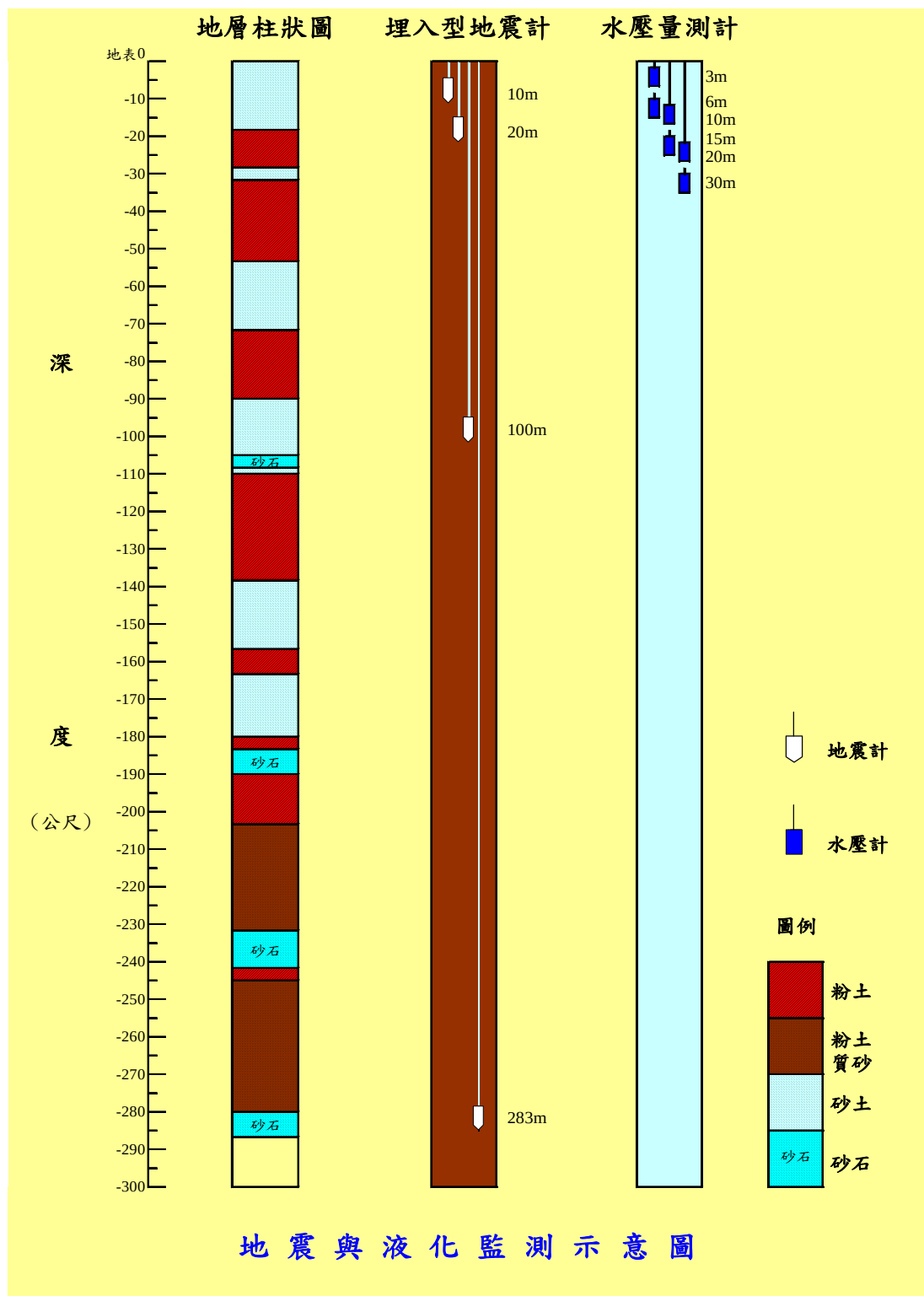


圖 2-15 臺中港地震監測站地層構造與地震及水壓監測深度圖

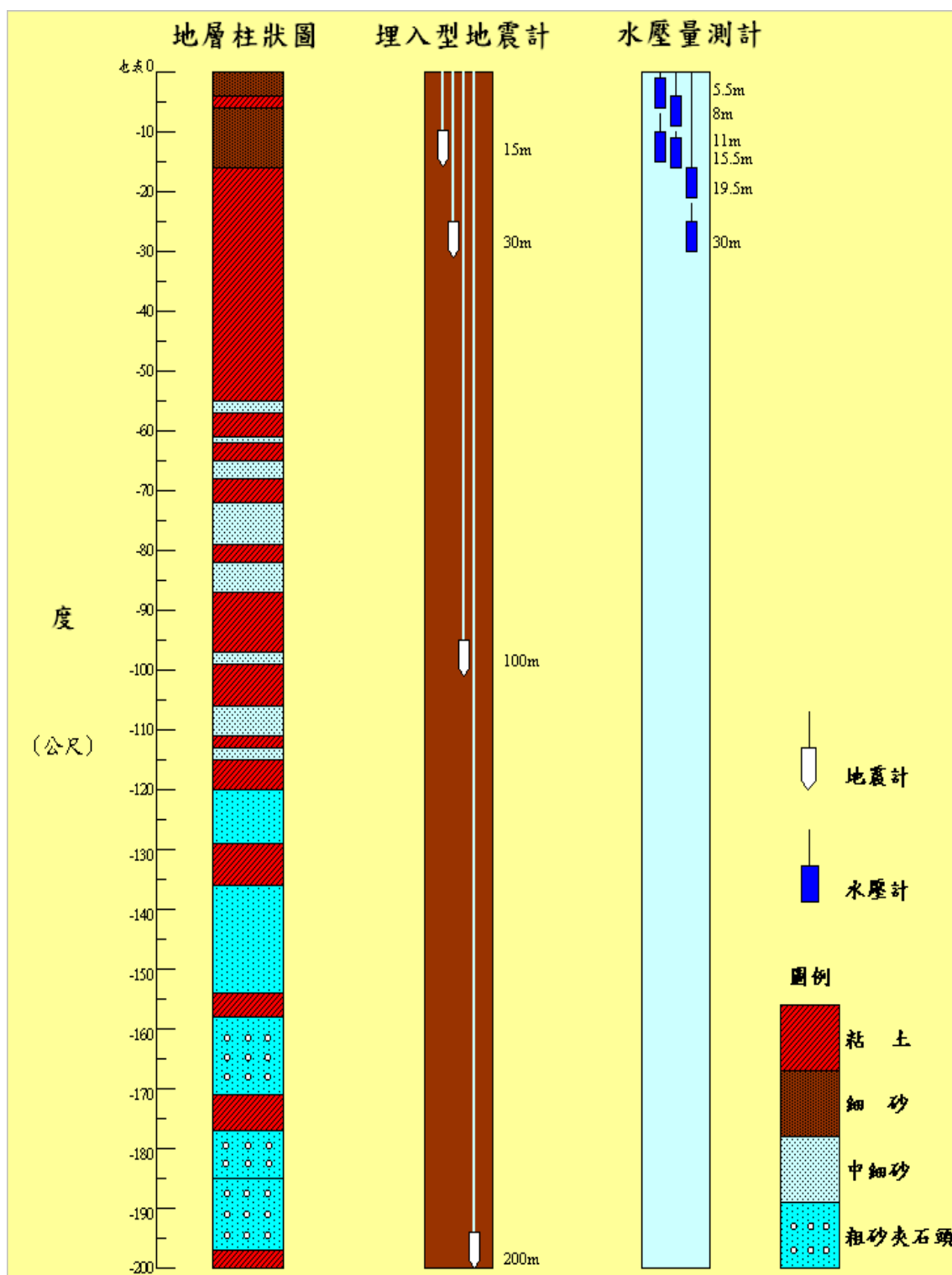


圖 2-16 臺中港火力電廠地震監測站地層構造與地震及水壓監測深度圖



### 第三章 港區地震及土壤液化監測之分析

港灣地區地層大都為疏鬆軟弱之沖積土層及浚砂回填土所構成，地震來襲時，震波從震源深處向上經過軟弱的覆土層，振幅通常有放大作用。另在強烈地震之反復作用下，土壤之孔隙水壓會逐漸上升，土壤之承载力會逐漸減低，當土壤之超額孔隙水壓之上升累積至與土壤之垂直壓力相等時即所謂之土壤液化，當此種現象發生的時候，土壤的承载力會瞬間驟降甚至到零的地步，築在其上的結構物也因基礎失去支撐而傾斜或倒塌，而側向之構造物如碼頭、護岸、海堤亦會因土壤液化增加之側向力，而產生向海側位移或傾斜等破壞，因此港區地震及土壤液化監測，對港灣構造物之安全極為重要。

在 1985 年墨西哥(Mexico)地震，1988 年亞美尼亞(Armenia)地震以及 1989 年美國洛馬普利塔(Loma Prieta)地震中，均有非常重大之災害發生，綜合各災報告及研究，可發現其主要震災均係震波放大效應所引起，由於軟弱土層對地震波之放大作用造成局部地區非常嚴重之損害，因此震波放大效應的問題普遍引起大家之注意。1995 年日本發生阪神大地震，港區新生地發生嚴重液化造成神戶港之碼頭、岸壁等港灣設施嚴重毀損，港灣機能全面癱瘓。921 大地震除造成車籠埔斷層沿線重大災害外，遠在斷層數十公里外的臺中港區亦發生土壤液化，造成港灣結構物的損毀。分析港區內之地層可初步瞭解，靠近地表之地層屬於震波傳遞較慢的鬆軟沖積層或回填層，這些地層均易造成特定頻率震波之放大。因此徹底瞭解地震在港區沖積土層之放大效應及動態孔隙水壓變化行為，作為各港區後續工程設計時的依據為本研究主要目標。

#### 3.1 沖積土層對地震之影響

一般於同一地震中各地所感受之震度與災害其隨距震央之距離而

減弱，但因各地區地盤之差異效應，使得與震度等距之各區感受震度與災害之程度，往往大不相同，甚至有時距震央較遠者反比較近者感受較大之震度與災害，可從歷史地震觀測記錄得知。此與沖積地層之地震振動特性有關。觀測區域地震記錄，可幫助瞭解區域沖積地層之地震振動特性：

- 1.區域地盤對地震之振動波型與強度之影響。
- 2.區域地盤對結構物之振動阻尼之影響。
- 3.地震振動對地盤強度之影響。
- 4.瞭解地盤差異之影響性。

由於埋入型地震儀之發展，地震已可做地盤之分層觀測，對瞭解不同地層之振動與其相互關係極有幫助。一般地震之相關振動特性值，地面大於地下，但於地震主震動之初期，地下與地面之振動記錄除時間上之差異外確大致相似。欲探討沖積土層對地震之影響，主要應可分兩方面探討：

### 3.1.1 沖積土層對地震振動頻率之影響

#### 1.卓越週期之計算

- (1)於沖積性地盤近表面地盤的卓越週期。其長短因表面層之細部組織而定。依多從反射理論計算法，若表面層為一性質均勻之單層，其卓越週期可由下式計算：

$$T = \frac{4H}{C}$$

，T 為地盤的卓越週期，H 為表面地層的厚度，C 為

橫波之速度。依此公式表面層越厚主週期越長。

- (2)若表面層為多層堆積而成，且各層物理性質相差不大時，最長之卓越週期可用一換算波速 C 計算： $T = \frac{4H}{C} = 4 \sum \frac{H_i}{C_i}$ 。H 為表面層總

厚度， $H_i$  為分層之厚度， $C_i$  為分層之橫波速。計算值之可靠否依分層波速之正確值而定。

## 2. 卓越週期之測定

- (1) 地震之卓越週期對建物於地震之震動有極大之影響，其值必須預先測知。一般可透過微震量測及搜集現址觀察地震波動記錄之頻率曲線(頻率與振動週期之關係圖)得之。於現地地震儀之長期觀測記錄中可獲得有價值之地層特性資料。
- (2) Kanai(1962)金井博士之研究結果：1.地震規模大於 6 時，各地之卓越週期因地而異，其值與微震之值相同。2.某一地區震波如有兩個以上之卓越週期，其值常因各地震而異，但其中之一常與微震頻率曲線上所示多數高峰之一重合。
- (3) 由歷史觀測資料顯示，大地震時地盤之卓越週期與計算之第一振動週期近似，但小地震時地盤之卓越週期近於計算之第二或次高之振動週期，而與第一振動週期無關。一般常重視大地震之觀測，實際上中地震與大地震所引起地盤振動之卓越週期可能不同，於結構安全設計必須兼顧兩種地震之卓越週期。

### 3.1.2 沖積土層對地震強度之影響

沖積土層之震動阻抗較岩盤及洪積地盤為小，同時沖積地盤又有卓越週期，使其在地震時可能因共振而生較強之振動。故必須瞭解每一地震之震波最大加速度、速度與位移等重要特性質，因表面層之沖積地盤而擴大了多少。其值之一般差異性如下：

- (1) 因區域地質之差異，其值有區域性之差異。
- (2) 沖積地層越厚位移越大，加速度亦相對增加。
- (3) 地震振動波之週期長者產生最大位移，週期短者產生最大加速度。

(4)沖積地層因多重反射，使其在地震時可能因共振使表面震動振幅增大而生較強之振動。其增幅之計算依 Kanai(1962)金井博士之研究結果：

$$G(T) = 1 + \frac{1}{\sqrt{\left[ \frac{1+\kappa}{1-\kappa} \left\{ 1 - \left( \frac{T}{T_G} \right)^2 \right\} \right]^2 + \left( \frac{0.3}{\sqrt{T_G}} \frac{T}{T_G} \right)^2}}$$

其中  $\kappa = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}$ ， $G(T)$ =增幅比率， $T$ =地震波振動成分之週期， $T_G$ =表面層之卓越週期， $\rho_1$ =表面層之質量， $\rho_2$ =基盤之質量， $c_1$ =表面層之地震波速， $c_2$ =基盤之地震波速。

### 3.2 港區地震及土壤液化監測規劃

由於地震在鬆軟地層之放大效應，悠關港灣構造物之安全甚巨，為了瞭解地震時，地層中震波之傳遞特性，鑽數口井至各個地層，分別於最深之堅硬地盤及不同深度之軟弱土層，分層安置埋入型地震計分層監測，以瞭解港區地層之地震放大效應。本研究分層設計深度規劃大致為 GL-0m、GL-15m、GL-30m、GL-100m、GL-300m，唯實際埋設深度得依現地土層變化狀況而調整。目前本研究已先後於臺中港、臺北港、高雄港與蘇澳港各完成一組地震監測系統。

另在強烈地震之反復作用下，土壤之孔隙水壓之逐漸上升，是土壤發生液化之主要因素，因此地震時動態水壓之監測，對港灣構造物之安全極為重要。目前本研究亦已先後在臺中港、臺北港、高雄港與蘇澳港個別完成設置一組動態水壓即時監測系統，以監測地震時淺層動態水壓之即時變化，本研究分層設計深度規劃為 GL-3m、GL-6m、GL-10m、GL -15m、GL -30m，唯實際埋設深度得依現地土層變化狀況而調整。此外，在臺中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港區亦分別

設置 1 組 200M 分層地下水壓監測系統，除了可以監測港區平時之水壓變化外，亦可監測地震前後深層地下水壓之變化。

### 3.3 臺中港地震監測結果分析

#### 3.3.1 地震監測結果分析

臺中港井下地震儀監測站於民國 90 年底完成，監測站之地層構造及地震計、水壓計埋設深度示意圖，如圖 3-1 所示。此井下地震儀陣列於地表、10 米、20 米、100 米及 283 米共設置 5 部地震儀，監測站設置已四年多，監測期間雖未有強震之觀測資料，唯小地震非常頻繁，目前擷取之地震觀測資料已有 36 組，唯其中有多組觀測資料受港區貨櫃車輛經過時之振動干擾，資料分析時予以篩除，本文僅篩選 28 組較完整之監測資料進行分析研究。

為瞭解地震波於臺中港區之放大特性，茲以振幅較大之 91 年 3 月 31 日地震南北向(NS)歷時為示意圖，如圖 3-2 所示。圖 3-3 為數組南北向(NS)最大加速度隨深度變化圖。由圖 3-2 及圖 3-3 顯示:南北向(NS)之尖峰加速度，由 283m 上傳至地表時，其振幅均有明顯放大。

為探討臺中港震波放大特性，本文將 28 組地震之各深度之最大加速度正規化，即將各深度之最大加速度除以地表之最大加速度。並加以統計迴歸分析，正規化之最大加速度隨深度變化之迴歸分析結果，如圖 3-4 所示，迴歸函數如下列所示：

$$\text{南北向：PGA}=\exp(-0.20*(\text{深度})^{0.30})\dots\dots\dots (3-1)$$

$$\text{東西向：PGA}=\exp(-0.24*(\text{深度})^{0.25})\dots\dots\dots (3-2)$$

$$\text{垂直向：PGA}=\exp(-0.10*(\text{深度})^{0.45})\dots\dots\dots (3-3)$$

由圖 3-4 迴歸分析結果可發現：南北向之地震波自 283m 至地表，地震震波放大 2.86 倍；其中自 283m 至 20m，其厚度達 263m 之地層，

正規化之最大加速度由 0.351 放大至 0.589，約放大 1.678 倍；但自 20m 至地表，其厚度僅 20m 之地層，正規化之最大加速度由 0.589 放大至 1，放大亦達 1.698 倍；由此可知南北向之地震震波放大，主要來自淺層地層，但深層地層之震波放大效應仍不能忽略。東西向之地震波自 283m 至地表，地震震波放大 2.80 倍；其中自 283m 至 20m，其厚度達 263m 之地層，正規化之最大加速度由 0.356 放大至 0.593，約放大 1.666 倍；但自 20m 至地表，其厚度僅 20m 之地層，正規化之最大加速度由 0.593 放大至 1，放大達 1.686 倍；由此可知東西向之地震震波放大，主要亦來自淺層地層。垂直向之地震波自 283m 至地表，地震震波放大 2.83 倍；其中自 283m 至 20m，其厚度達 263m 之地層，正規化之最大加速度由 0.353 放大至 0.621，約放大 1.75 倍；但自 20m 至地表，其厚度僅 20m 之地層，正規化之最大加速度由 0.621 放大至 1，放大亦達 1.61 倍；由此可知垂直向之地震震波放大，主要亦來自淺層地層。

圖 3-5 為 Seed & Idriss (1971) 有關應力折減因數隨深度變化範圍之研究，由圖 3-4 臺中港震波放大特性初步探討結果亦可發現，臺中港淺層地層之震波放大稍大於 Seed & Idriss (1971) 之平均值。

Idriss(1990) 對軟弱地盤震波放大效應之研究發現，震波放大有非線性效應，即各地震之震波放大效應不同。因此為進一步探討臺中港震波放大效應之非線性，本文亦分析臺中港震波放大倍率與最大加速度之關係，如圖 3-6 所示。由圖 3-6 可發現：臺中港震波放大倍率約於 2-5 倍之間，平均約為 3 倍，由於皆為小地震，並未發現有非線性效應，俟有一些大地震時再進一步分析。

### 3.3.2 SHAKE 地震模擬分析

本文進一步以大地工程界常用之 SHAKE 程式，進行地震之模擬分析，SHAKE 程式係以加速度記錄的型態輸入產生地震，並考慮該地土壤與地質情況因素，以進行地盤反應分析。SHAKE 為一總應力地盤反應分析程式，用以估計地震來臨時地盤所承受的反覆應力比及

作用週期數等相關之地盤反應。分析過程所需參數包含現地土層之剪力模數、阻尼比、以及具代表性的地震入射波基盤資料等，分析結果一般可求得地表及各層交接面之最大加速度歷時曲線、土層基本振動週期、任意土層間運動之放大倍率、地表加速度之富氏震幅譜(Fourier Spectrum)及各土層之反應譜等，除了可以作為設計震譜之重要依據外，並藉此計算地震時地盤所承受的應力應變，評估砂性土壤受震時之反覆應力比。

本研究以 SHAKE 程式模擬加速度歷時曲線，並與井下地震記錄比較，以探討臺中港區地震之放大倍率。由於目前無法獲得地震入射波，所以將井下 283 公尺所收到的地震記錄視為入射波，以進行模擬地表、井下 10 公尺、20 公尺、100 公尺之加速度歷時曲線，計算長度擷取剪力波開始後 60 秒之記錄，模擬過程中亦將地表自由端反射波列入計算。本研究相關之動態參數與剪應變之關係，是以臺灣西海岸港區沉泥質砂性土壤之動態試驗結果為程式分析時之輸入曲線，如圖 3-7 及圖 3-8 所示，各層土壤之剪力波速，則以臺中港地震監測站之懸浮式速度井測(P-S Logging)結果為輸入資料，如圖 3-9 所示。

圖 3-10 是利用 SHAKE 程式模擬 91 年 3 月 31 日南北向加速度歷時曲線之模擬結果，與圖 3-2 之實際的觀測值互相比較，比較結果可發現地表、20 公尺及 100 公尺之 PGA 值相當接近，10 公尺之模擬結果與觀測值相差甚多，有待進一步研究。本研究以 283 公尺記錄當作入射波，而實際上這記錄除了包含入射波之外，尚有來自其它地層反射回來的反射波，如果能減低這些反射波後，再作為入射波，則可進一步改善模擬結果。

### 3.4 臺北港地震監測結果分析

#### 3.4.1 地震監測結果分析

臺北港井下地震儀監測站於民國 91 年底完成，監測站之地層構造

及地震計、水壓計埋設深度示意圖，如圖 3-11 所示。此井下地震儀陣列於地表、14 米、30 米、99 米及 297 米共設置 5 部地震儀，監測站設置已三年多，監測期間雖未有強震之觀測資料，唯小地震非常頻繁，目前擷取之地震觀測資料已有 19 組，唯其中有多組觀測資料受港區貨櫃車輛經過時之振動干擾，資料分析時予以篩除，本文僅篩選 17 組較完整之監測資料進行分析研究。

為瞭解地震波於臺北港區之放大特性，茲以振幅較大之 92 年 6 月 10 日地震南北向(NS)歷時為示意圖，如圖 3-12 所示。圖 3-13 為數組南北向(NS)最大加速度隨深度變化圖。由圖 3-12 及圖 3-13 顯示:南北向(NS)之尖峰加速度，由 297m 上傳至地表時，其振幅均有明顯放大。

為探討臺北港震波放大特性，本文將 17 組地震之各深度之最大加速度正規化，即將各深度之最大加速度除以地表之最大加速度。並加以統計迴歸分析，正規化之最大加速度隨深度變化之迴歸分析結果，如圖 3-14 所示，迴歸函數如下列所示：

$$\text{南北向： } PGA = \exp(-0.16 * (\text{深度})^{0.38}) \dots\dots\dots (3-4)$$

$$\text{東西向： } PGA = \exp(-0.21 * (\text{深度})^{0.32}) \dots\dots\dots (3-5)$$

$$\text{垂直向： } PGA = \exp(-0.22 * (\text{深度})^{0.28}) \dots\dots\dots (3-6)$$

由圖 3-14 迴歸分析結果可發現:南北向之地震波自 297m 至地表，地震震波放大 3.87 倍；其中自 297m 至 30m,其厚度達 267m 之地層，正規化之最大加速度由 0.258 放大至 0.567，約放大 2.2 倍；但自 30m 至地表，其厚度僅 30m 之地層，正規化之最大加速度由 0.567 放大至 1，放大亦達 1.764 倍；由此可知南北向之地震震波放大，主要來自淺層地層，但深層地層之震波放大效應仍不能忽略。東西向之地震波自 297m 至地表，地震震波放大 3.71 倍；其中自 297m 至 30m，其厚度達 267m 之地層，正規化之最大加速度由 0.269 放大至 0.536，約放大



1.99 倍；但自 30m 至地表，其厚度僅 30m 之地層，正規化之最大加速度由 0.536 放大至 1，放大達 1.86 倍；由此可知東西向之地震震波放大，主要亦來自淺層地層。垂直向之地震波自 297m 至地表，地震震波放大 3.12 倍；其中自 297m 至 30m，其厚度達 267m 之地層，正規化之最大加速度由 0.321 放大至 0.555，約放大 1.73 倍；但自 30m 至地表，其厚度僅 30m 之地層，正規化之最大加速度由 0.555 放大至 1，放大亦達 1.8 倍；由此可知垂直向之地震震波放大，主要亦來自淺層地層。

Seed & Idriss (1971) 有關應力折減因數隨深度變化範圍之研究，如圖 3-5 所示，由圖 3-14 臺北港震波放大特性初步探討結果亦可發現，臺北港淺層地層之震波放大稍大於 Seed & Idriss (1971) 之平均值。為進一步探討臺北港震波放大效應之非線性，本文亦分析臺北港震波放大倍率與最大加速度之關係，如圖 3-15 所示。由圖 3-15 可發現：臺北港震波放大倍率約於 3-5 倍之間，平均約為 4 倍，由於皆為小地震，並未發現有非線性效應，俟有一些大地震時再進一步分析。

#### 3.4.2. SHAKE 地震模擬分析

本研究以 SHAKE 程式模擬加速度歷時曲線，並與井下地震記錄比較，以探討臺北港區地震之放大倍率。由於目前無法獲得地震入射波，所以將井下 297 公尺所收到的地震記錄視為入射波，以進行模擬地表、井下 14 公尺、30 公尺、100 公尺之加速度歷時曲線，計算長度擷取剪力波開始後 40 秒之記錄，模擬過程中亦將地表自由端反射波列入計算。本研究相關之動態參數與剪應變之關係，是以臺灣西海岸港區沉泥質砂性土壤之動態試驗結果為程式分析時之輸入曲線，如圖 3-7 及圖 3-8 所示，各層土壤之剪力波速，則以臺北港地震監測站之懸浮式速度井測(P-S Logging)結果為輸入資料，如圖 3-16 所示。

圖 3-17 是利用 SHAKE 程式模擬 92 年 6 月 10 日南北向加速度歷時曲線之模擬結果，與圖 3-12 之實際的觀測值互相比較，比較結果可

發現地表、10 公尺及 100 公尺之 PGA 值相當接近，30 公尺之模擬結果與觀測值相差甚多，有待進一步研究。本研究以 297 公尺記錄當作入射波，而實際上這記錄除了包含入射波之外，尚有來自其它地層反射回來的反射波，如果能減低這些反射波後，再作為入射波，則可進一步改善模擬結果。

### 3.4.3 Haskall 地震模擬分析

為了進一步模擬加速度歷時曲線，本研究利用 Haskall (1953, 1960) 數值模擬方式，並以陳圭璋、賴聖耀(2003)所計算之轉換函數及衰減因子 Q 值，進行不同深度時間歷時之模擬，再與井下地震記錄比較，以探討臺北港區地震之放大倍率。用來進行模擬之地震為 92 年 6 月 10 日之地震記錄，模擬之項目包括原始之加速度記錄。Haskall 模擬方式與 SHAKE 模擬方式不同，是以地表記錄當作輸入歷時，以進行地下 14、30、100、297 公尺深之歷時計算，同時計算前先將地表歷時旋轉至徑向 (R) 以及切向 (T)，計算長度擷取剪力波開始後 40 秒之記錄，模擬過程中亦將地表自由端反射波列入計算，圖 3-18 為加速度在 R 與 T 方向之模擬與觀測比較圖。由圖 3-18 可發現，在淺層的 14 以及 30 公尺部份，模擬與觀測結果不論是振幅或波相均相當一致；至於較深層之 100 公尺及 297 公尺之部分，則發現加速度模擬結果之振幅較觀測值稍高，但波相與整體趨勢仍十分接近，推測在深層部分有變化較劇烈之薄層夾雜其中，使得較能反映薄層之高頻加速度訊號產生變化所致，此外震波在深層部分並非完全如計算時所假設是以接近垂直之入射角入射，也造成一定程度之影響，但就整體而言，模擬與觀測仍屬接近。

## 3.5 高雄港地震監測結果分析

### 3.5.1 地震監測結果分析

高雄港井下地震儀監測站於民國 92 年底完成，監測站之地層構造

及地震計、水壓計埋設深度示意圖，如圖 3-19 所示。此井下地震儀陣列於地表、15 米、30 米、97 米及 293 米共設置 5 部地震儀，監測站設置已二年多，監測期間雖未有強震之觀測資料，唯小地震非常頻繁，目前擷取之地震觀測資料已有 22 組，唯其中有多組觀測資料受港區貨櫃車輛經過時之振動干擾，資料分析時予以篩除，本文僅篩選 17 組較完整之監測資料進行分析研究。

為瞭解地震波於高雄港區之放大特性，茲以 92 年 12 月 10 日地震南北向(NS)歷時為示意圖，如圖 3-20 所示。圖 3-21 為數組南北向(NS)最大加速度隨深度變化圖。由圖 3-20 及圖 3-21 顯示:南北向(NS)之尖峰加速度，由 297m 上傳至地表時，其振幅均有明顯放大。

為探討高雄港震波放大特性，本文將 17 組地震之各深度之最大加速度正規化，即將各深度之最大加速度除以地表之最大加速度。並加以統計迴歸分析，正規化之最大加速度隨深度變化之迴歸分析結果，如圖 3-22 所示，迴歸函數如下列所示：

$$\text{南北向：PGA}=\exp(-0.146*(\text{深度})^{0.404}) \dots\dots\dots (3-7)$$

$$\text{東西向：PGA}=\exp(-0.147*(\text{深度})^{0.401}) \dots\dots\dots (3-8)$$

$$\text{垂直向：PGA}=\exp(-0.230*(\text{深度})^{0.276}) \dots\dots\dots (3-9)$$

由圖 3-22 迴歸分析結果可發現：南北向之地震波自 293m 至地表，地震震波放大 4.26 倍；其中自 293m 至 30m，其厚度達 263m 之地層，正規化之最大加速度由 0.235 放大至 0.562，約放大 2.39 倍；但自 30m 至地表，其厚度僅 30m 之地層，正規化之最大加速度由 0.562 放大至 1，放大亦達 1.78 倍；由此可知南北向之地震震波放大，主要來自淺層地層，但深層地層之震波放大效應仍不能忽略。東西向之地震波自 293m 至地表，地震震波放大 4.20 倍；其中自 293m 至 30m，其厚度達 263m 之地層，正規化之最大加速度由 0.238 放大至 0.563，約放大 2.36 倍；但自 30m 至地表，其厚度僅 30m 之地層，正規化之

最大加速度由 0.563 放大至 1，放大達 1.77 倍；由此可知東西向之地震震波放大，主要亦來自淺層地層。垂直向之地震波自 293m 至地表，地震震波放大 3.01 倍；其中自 293m 至 30m，其厚度達 263m 之地層，正規化之最大加速度由 0.332 放大至 0.555，約放大 1.67 倍；但自 30m 至地表，其厚度僅 30m 之地層，正規化之最大加速度由 0.555 放大至 1，放大亦達 1.8 倍；由此可知垂直向之地震震波放大，主要亦來自淺層地層。

由圖 3-22 高雄港震波放大特性初步探討結果亦可發現，高雄港淺層地層之震波放大稍大於 Seed & Idriss (1971) 之平均值。為進一步探討高雄港震波放大效應之非線性，本文亦分析高雄港震波放大倍率與最大加速度之關係，如圖 3-23 所示。由圖 3-23 可發現：高雄港震波放大倍率約於 3-7 倍之間，平均約為 4.5 倍，由於皆為小地震，並未發現有非線性效應，俟有一些大地震時再進一步分析。

### 3.5.2 Haskall 地震模擬分析

為了進一步模擬加速度歷時曲線，本研究利用 Haskall (1953, 1960) 數值模擬方式，各層土壤之剪力波速，則以高雄港地震監測站之懸浮式速度井測(P-S Logging)結果為輸入資料，如圖 3-24 所示。並以陳圭璋、賴聖耀(2003)所計算之轉換函數及衰減因子 Q 值，進行不同深度時間歷時之模擬，再與井下地震記錄比較，以探討高雄港區地震之放大倍率。用來進行模擬之地震為 92 年 12 月 10 日之地震記錄，模擬之項目包括原始之加速度記錄。Haskall 模擬方式與 SHAKE 模擬方式不同，是以地表記錄當作輸入歷時，以進行地下 15、30、97、293 公尺深之歷時計算，同時計算前先將地表歷時旋轉至徑向 (R) 以及切向 (T)，計算長度擷取剪力波開始後 40 秒之記錄，模擬過程中亦將地表自由端反射波列入計算，圖 3-25 為加速度在 R 與 T 方向之模擬與觀測比較圖。由圖 3-25 可發現，在淺層的 15 以及 30 公尺部份，模擬與觀測結果不論是振幅或波相均相當一致；至於較深層之 97 公尺及

293 公尺之部分，則發現加速度模擬結果之振幅較觀測值稍高，但波相與整體趨勢仍十分接近，推測在深層部分有變化較劇烈之薄層夾雜其中，使得較能反映薄層之高頻加速度訊號產生變化所致，此外震波在深層部分並非完全如計算時所假設是以接近垂直之入射角入射，也造成一定程度之影響，但就整體而言，模擬與觀測仍屬接近。

### 3.6 蘇澳港地震監測結果分析

蘇澳港井下地震儀監測站於民國 93 年底完成，監測站之地層構造及地震計、水壓計埋設深度示意圖，如圖 3-26 所示。此井下地震儀陣列於地表、8 米、15 米、22 米及 35 米共設置 5 部地震儀，監測站設置已一年多，為瞭解地震波於蘇澳港區之放大特性，茲以 94 年 3 月 6 日地震南北向(NS)歷時為示意圖，如圖 3-27 所示。由圖 3-27 顯示:南北向(NS)之尖峰加速度，由 35m 上傳至地表時，其振幅並未有明顯放大，可見 35m 並非真正之堅硬地盤，35m 至地表可能為同一地層。有關蘇澳港區之震波放大特性及地震模擬分析等，於第 3.7 節將更詳細之探討。

### 3.7 港區地震 PGA 值分佈之模擬

為了進一步模擬港區地震 PGA 值之分布，本研究於各港區內多處進行微地動量測，其中蘇澳港區總計量測 40 個測點，其測點位置分佈如圖 3-28 所示，然後將每個測點所有制窗之頻譜做單站頻譜比(Nakamura, 1989)；為了驗證蘇澳港區單站頻譜比可做為場址效應分析之用，將井下地震站微地動量測之單站頻譜比結果與井下地震儀不同深度雙站頻譜比結果比對，比對結果如圖 3-29 至圖 3-30 所示。由圖 3-29 至圖 3-30 發現，地表與不同深度紀錄之頻譜比，隨著深度增加其第一階共振主頻往低頻移動，在地表與 15 米深之頻譜比中，第一階共振主頻約在 5Hz；在地表與 35 米深之頻譜比中，第一階共振主

頻約在 2.5Hz。可發現不同深度之頻譜比主頻，均可對應微地動結果中之主頻，顯示不同深度均有地層之速度對比，在速度對比下也均有共振發生，推測即使沖積層下方亦有產生共振與放大之速度構造存在。

特別值得注意的是，微地動之結果不僅反映淺層部分，在速度對比明顯之情形下，微地動可反應深部之地層共振，而由地表/35m 與微地動單站頻譜比之比對來看，地表/35m 之第一階共振主頻位於 2.5Hz，明顯高於微地動單站頻譜比之 1Hz，顯見 35 公尺下方應還存在速度對比交界面。由以上論述可知，蘇澳港區單站頻譜比可做為場址效應分析之用，因此將港區每個測點所有制窗之頻譜做單站頻譜比（Nakamura, 1989），獲得港區各地之場址效應，結果圖 3-31 至圖 3-32 所示。由圖 3-31 至圖 3-32 發現，低頻(高週期)時蘇澳港區放大倍率南邊較高，往北、往西則較低；高頻(低週期)時蘇澳港區放大倍率往北、往西以及蘇澳港碼頭區較高，往南邊則明顯降低許多。

由港區各地之場址效應，加上井下地震站之地震資料，即可模擬港區地震 PGA 值之分佈，本文以 94 年 3 月 16 日地震，該地震為雙主震，蘇澳港地震站東西向 PGA 為 133gal，模擬蘇澳港地震 PGA 之分佈，如圖 3-33 所示。由圖 3-33 模擬結果顯示，蘇澳港 4 號碼頭 PGA=175 gal，較蘇澳港區其他碼頭地震 PGA 稍大，這或許是民國 75 年花蓮地震造成蘇澳港 4 號碼頭側移及後線龜裂之重要原因之一。

本文亦以同方法模擬 921 地震台中港地震 PGA 之分佈，該地震清水地震站東西向 PGA 為 155gal，假設清水站地震歷時與台中港地震站相當，模擬台中港地震 PGA 之分佈，如圖 3-34 所示。由圖 3-34 模擬結果顯示，台中港 1-4A 號碼頭後線、及 9-11 號碼頭後線、及西碼頭區，其 PGA 值皆較其他碼頭區稍大，這與 921 地震造成台中港 1-4 號碼頭側移及 9-11 號碼頭後線土壤液化等災害亦有些吻合。另由台中港區淺層共振主頻分析結果如圖 3-35 所示。由圖 3-35 亦顯示，921 地震液化災區之淺層共振主頻小於 3Hz，非液化災區之淺層共振主頻大於 3.9Hz。

### 3.8 動態孔隙水壓之監測結果分析

由 Ishihara et al. (1981,1987)之研究顯示，地震之最大加速度須大於 65 gal 以上，才會有動態孔隙水壓之激發，監測期間曾發生強震 PGA 值大於 65 gal 以上者有，94 年 3 月 6 日蘇澳雙震源地震，芮氏地震規模  $M_L=5.9$ ，蘇澳港區監測站之  $PGA=155gal$ ，如圖 3-36a 所示。95 年 12 月 26 日屏東恆春地震，震央於恆春外海，芮氏地震規模  $M_L=3.7$ ，高雄港區監測站之  $PGA=67gal$ ，但同一日之最大餘震，震央位於屏東枋寮，芮氏地震規模  $M_L=3.4$ ，高雄港區監測站之  $PGA=97gal$ ，安平港區監測站之  $PGA=101gal$ ，分別如圖 3-37a 及圖 3-38a 所示。

由圖 3-36a 顯示，蘇澳港區之  $PGA=155gal$ ，土層深度 5m-20m 之超額動態孔隙水壓為 10kpa，即有 1m 高之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比約有 10%，土層深度 30m 之超額動態孔隙水壓為 30kpa，即有 3m 高之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比亦約有 10%；由圖 3-37a 顯示，高雄港區之  $PGA=97gal$ ，土層深度 4m 之超額動態孔隙水壓為  $0.04\text{ kg/cm}^2$ ，即有 40cm 高之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比約有 10%，8-20m 之超額動態孔隙水壓約為  $0.1\text{ kg/cm}^2$ ，即有 1m 高之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比亦約有 10%；由圖 3-38a 顯示，安平港區之  $PGA=101gal$ ，土層深度 10m 之超額動態孔隙水壓為 3 kpa，即有 30cm 高之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比僅有 3 %，20m 之超額動態孔隙水壓約為 4 kpa，即有 40m 高之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比約僅有 2 %，30m 之超額動態孔隙水壓約為 6 kpa，即有 60m 高之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比亦僅有 2 %。

由圖 3-36a 至圖 3-38a 可發現，超額動態孔隙水壓有超額之孔隙水壓及震盪之動態水壓兩部份，以適當之震盪頻率將其分離，分離結果震盪之動態水壓如圖 3-36b 至圖 3-38b 所示，超額之孔隙水壓如圖 3-36c 至圖 3-38c 所示。由分離結果可發現，超額之孔隙水壓為低頻反應，震盪之動態水壓為高頻反應，唯各港分離之震盪頻率不同，其

分別為蘇澳港 0.25Hz、高雄港 0.10Hz、安平港 0.08Hz，以上分離之震盪頻率不同，是地震波動特性不同引致？或土壤特性不同所引致？或兩者特性聯合所引致？俟有更多動態孔隙水壓之監測資料時再進行分析。

### 3.9 小結

1. 由地震波放大倍率與最大加速度之研究可發現：臺中港震波放大倍率約於 2-5 倍之間，平均約為 3 倍；臺北港震波放大倍率約於 3-5 倍之間，平均約為 4 倍；高雄港震波放大倍率約於 3-7 倍之間，平均約為 4.5 倍；蘇澳港井下地震儀僅有 35m 深，其震波放大倍率仍不確定，需進一步研究。由此可見高雄港區淺層地層最為疏鬆軟弱，且與深層地層之軟硬比最大，臺北港次之，臺中港最小。另由地震波放大倍率隨深度變化之初步探討結果亦可發現：臺中港、臺北港及高雄港淺層地層之震波放大皆稍大於 Seed & Idriss (1971) 之平均值。
2. 由港區地震 PGA 值分佈之模擬結果顯示：蘇澳港 4 號碼頭 PGA 較港區其他碼頭地震 PGA 稍大，這或許是民國 75 年花蓮地震造成蘇澳港 4 號碼頭側移及後線龜裂之重要原因之一。台中港 1-4A 號碼頭後線、及 9-11 號碼頭後線、及西碼頭區，其 PGA 值皆較其他碼頭區稍大，這與 921 地震造成台中港 1-4 號碼頭側移及 9-11 號碼頭後線土壤液化等災害亦有些吻合。
3. 由臺中港區共振主頻分析結果顯示：921 地震液化災區之淺層共振主頻小於 3Hz，非液化災區之淺層共振主頻大於 3.9Hz。
4. 由 94 年 3 月 6 日蘇澳雙震源地震之超額動態孔隙水壓分析結果顯示：蘇澳港區之  $PGA=155gal$ ，土層深度 5m-20m 之超額動態孔隙水壓為 10kpa，即有 1m 高之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比約有 10%，土層深度 30m 之超額動態孔隙水壓為 30kpa，即有 3m 高



之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比亦約有 10%；其中超額孔隙水壓為 0.25Hz 以下之低頻反應，震盪動態水壓為 0.25Hz 以上之高頻反應。

5. 由 95 年 12 月 26 日屏東枋寮地震引致之超額動態孔隙水壓分析結果顯示：高雄港區之  $PGA=97gal$ ，土層深度 8-20m 之超額動態孔隙水壓約為  $0.1\text{ kg/cm}^2$ ，即有 1m 高之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比約有 10%，其中超額孔隙水壓為 0.10Hz 以下之低頻反應，震盪動態水壓為 0.10Hz 以上之高頻反應。安平港區之  $PGA=101gal$ ，土層深度 10m 之超額動態孔隙水壓為 3 kpa，即有 30cm 高之超額動態水位，其超額動態孔隙水壓比僅有 3%，其中超額孔隙水壓為 0.08Hz 以下之低頻反應，震盪動態水壓為 0.08Hz 以上之高頻反應。



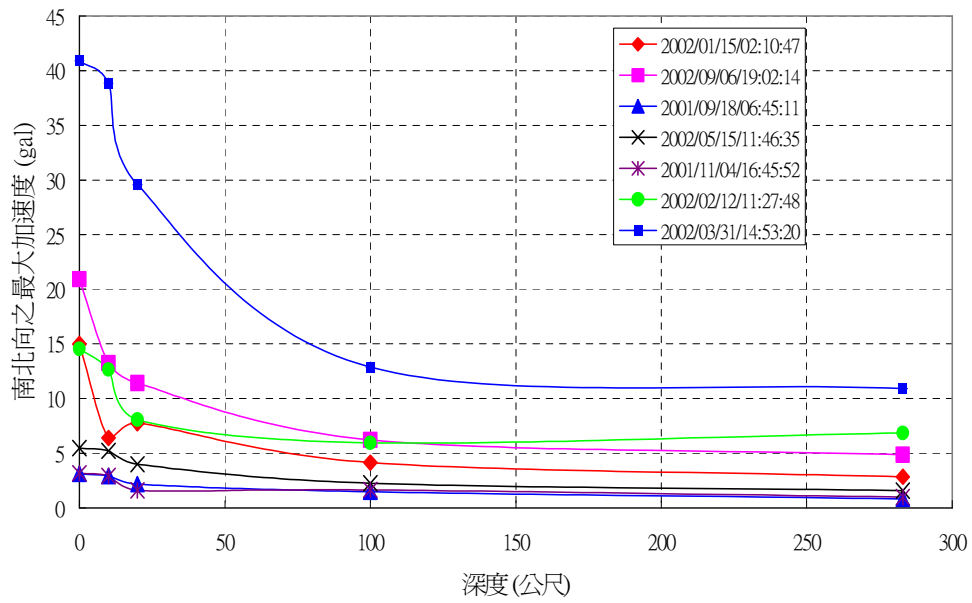


圖 3-3 臺中港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖

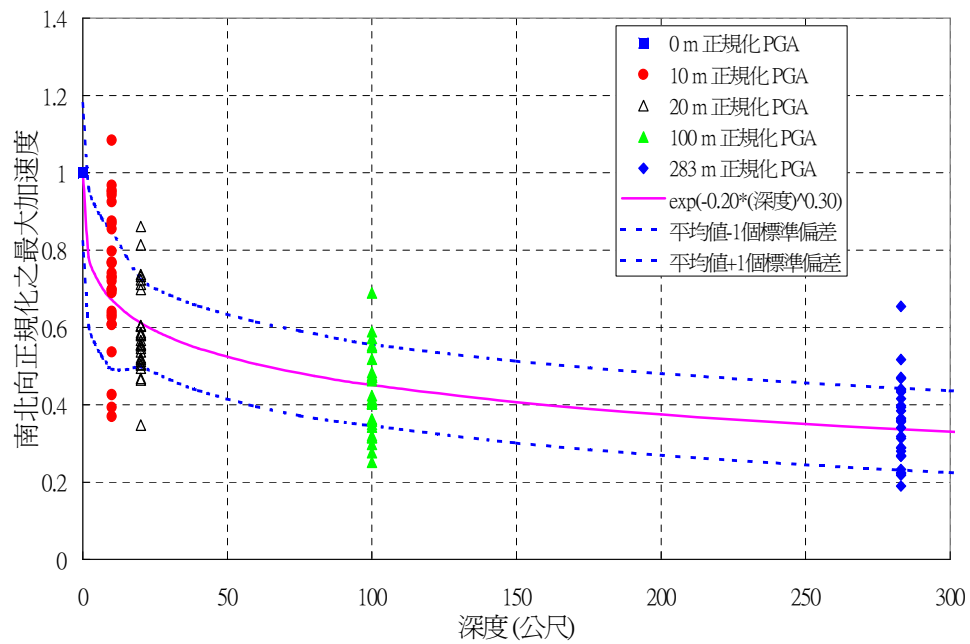


圖 3-4 臺中港井下地震儀南北向正規化之最大加速度隨深度變化圖

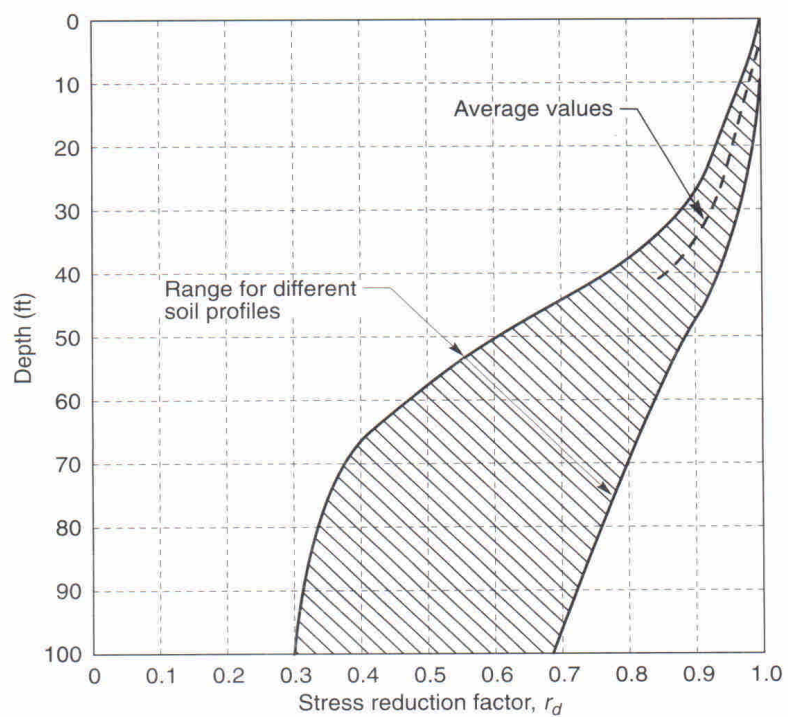


圖 3-5 應力折減因數  $r_d$  隨深度之變化範圍 (Seed & Idriss, 1971)

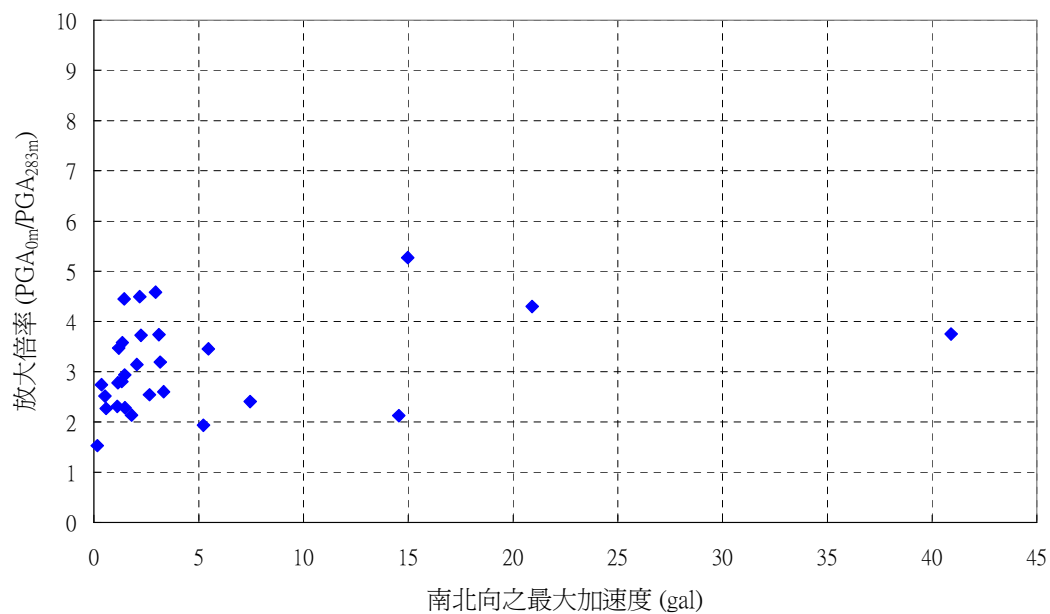


圖 3-6 臺中港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖

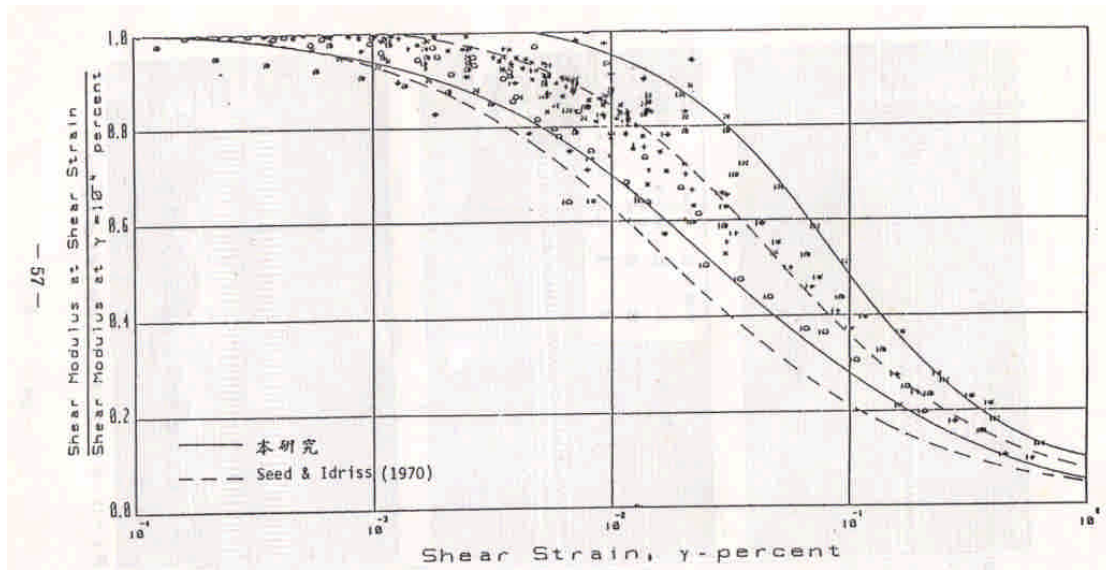


圖 3-7 臺灣西海岸港區沉泥質砂性土壤  $G/G_{max}$  與剪應變之關係

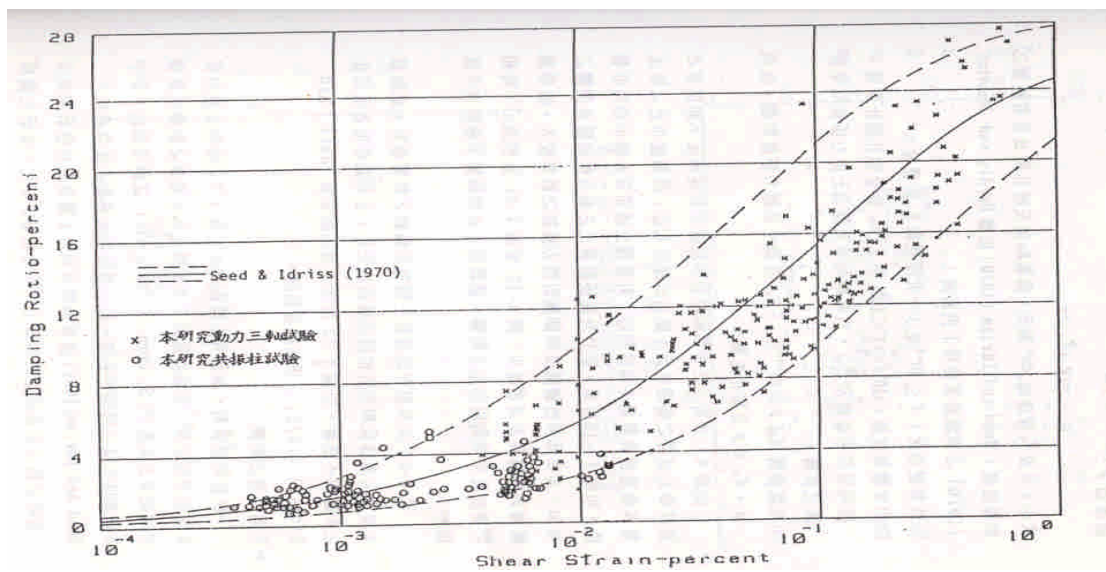


圖 3-8 臺灣西海岸港區沉泥質砂性土壤阻尼比與剪應變之關係

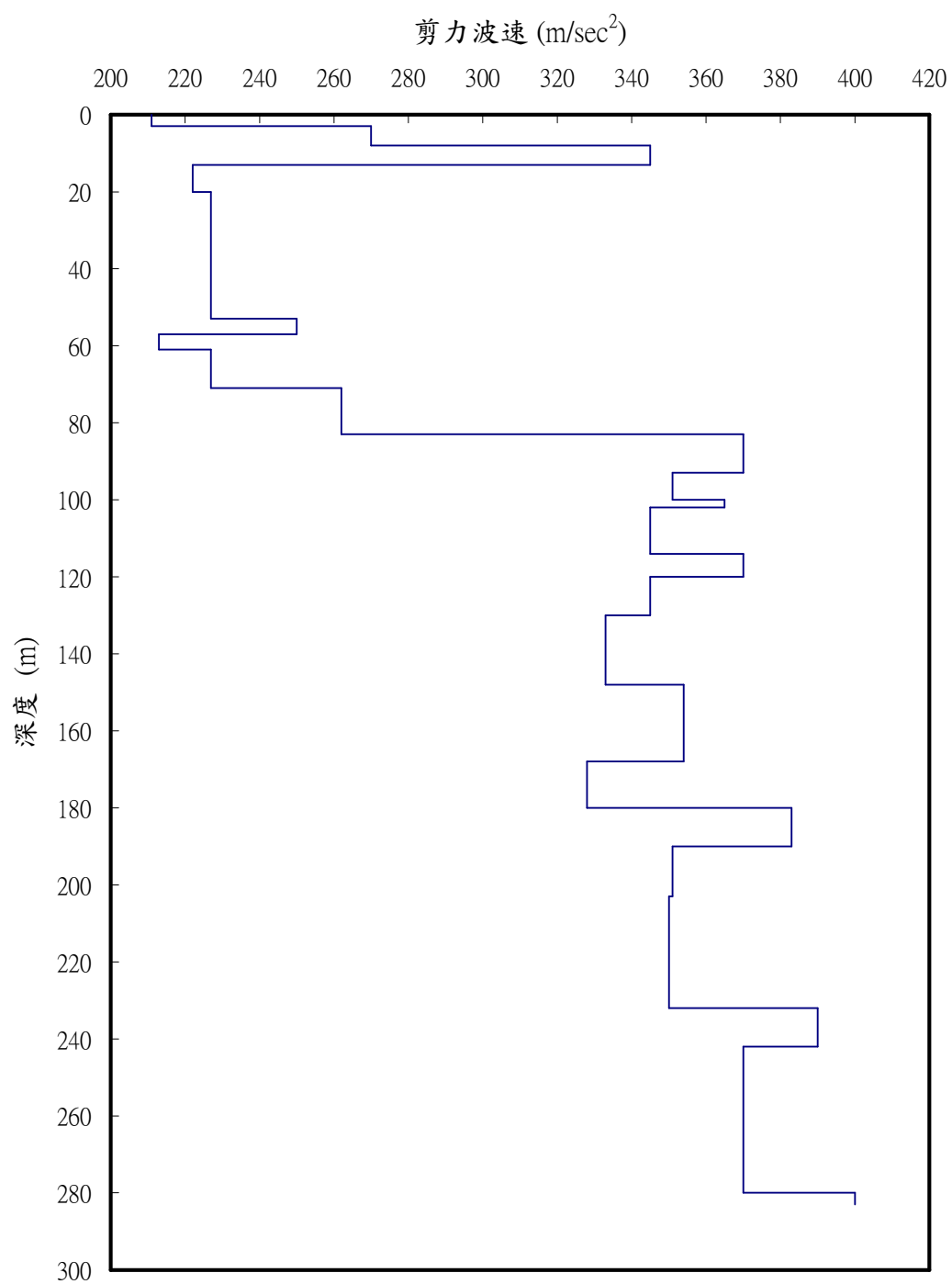


圖 3-9 臺中港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖

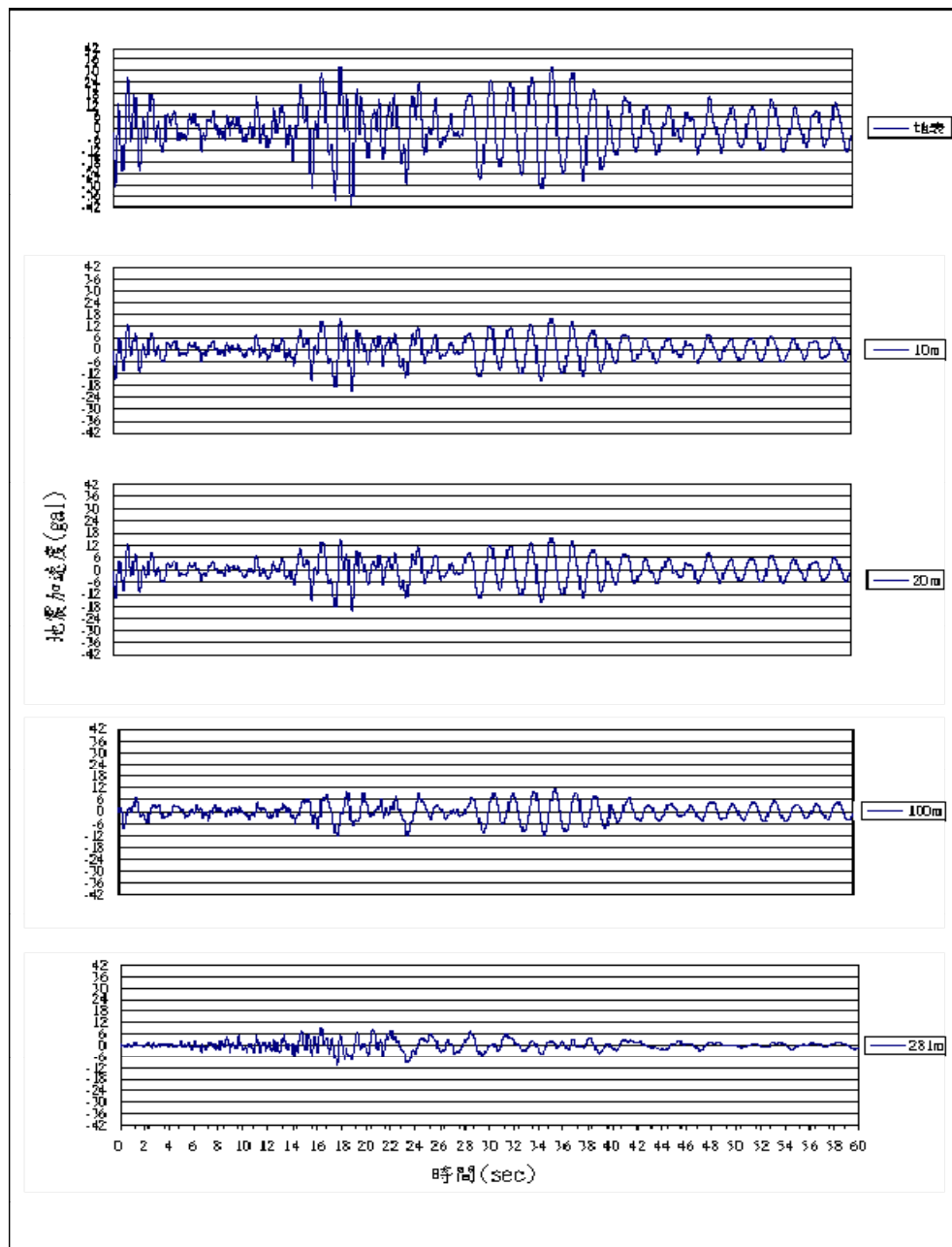


圖 3-10 臺中港 2002 年 3 月 31 日-SHAKE 模擬地震(南北向)

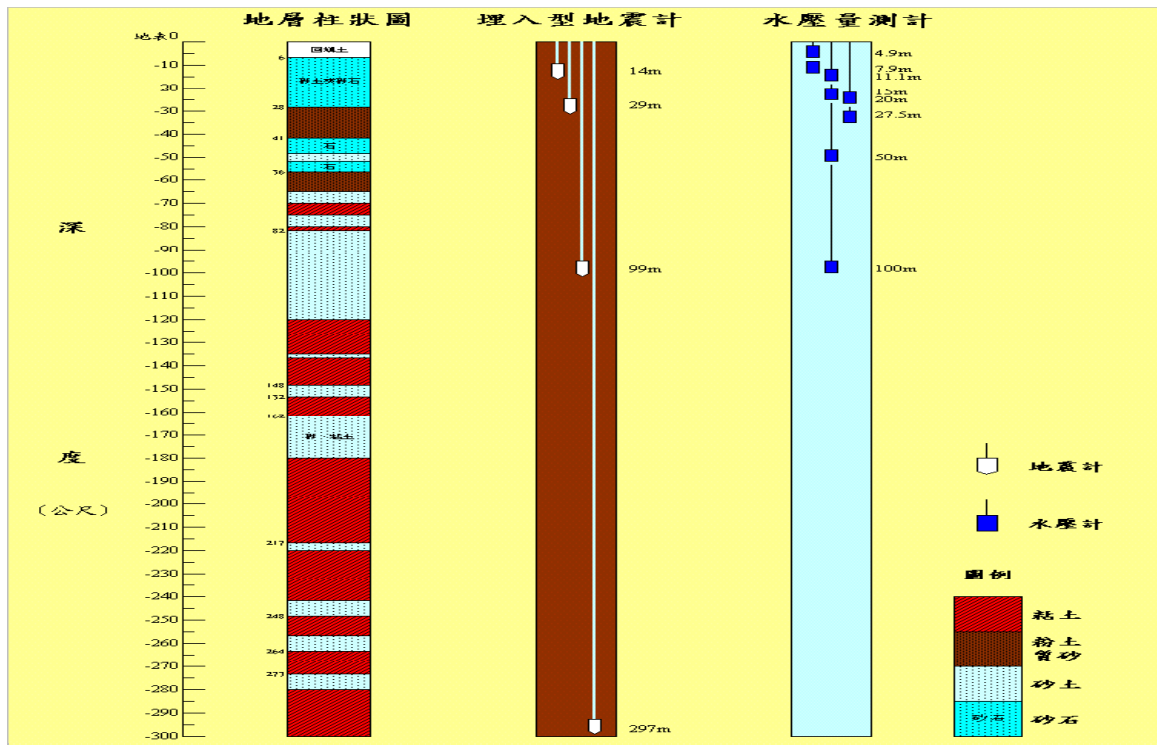


圖 3-11 臺北港地震及動態水壓監測站示意圖

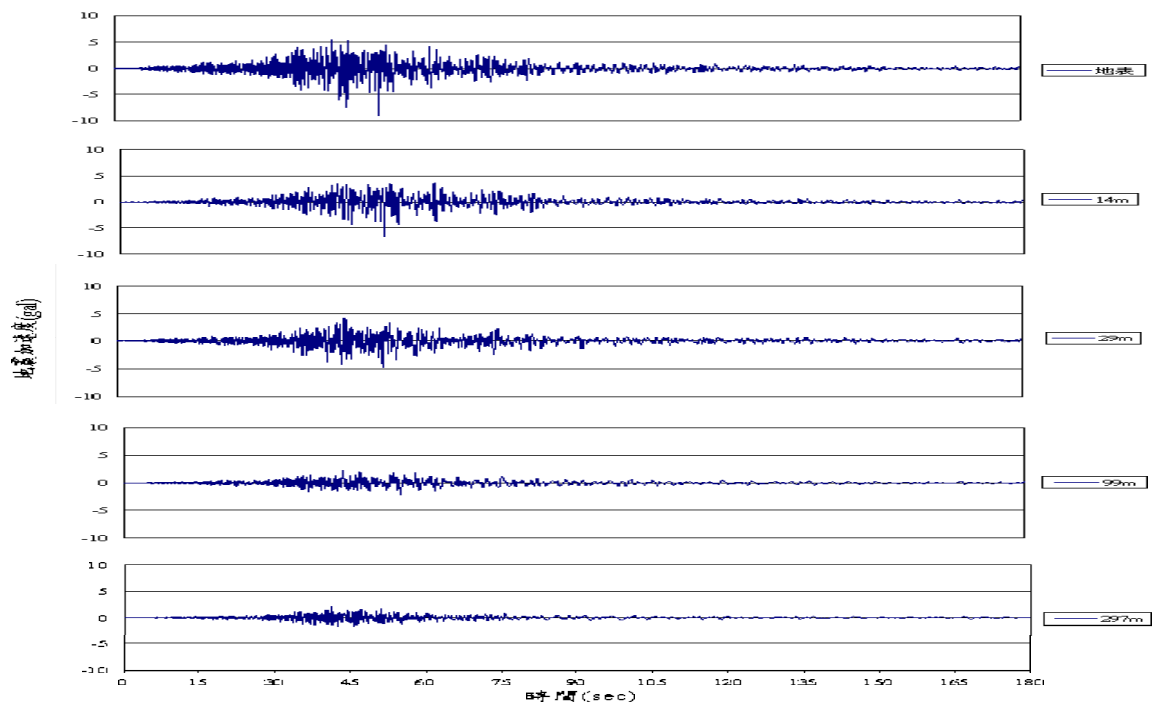


圖 3-12 臺北港 2003 年 6 月 10 日 16 時 41 分地震(南北向)



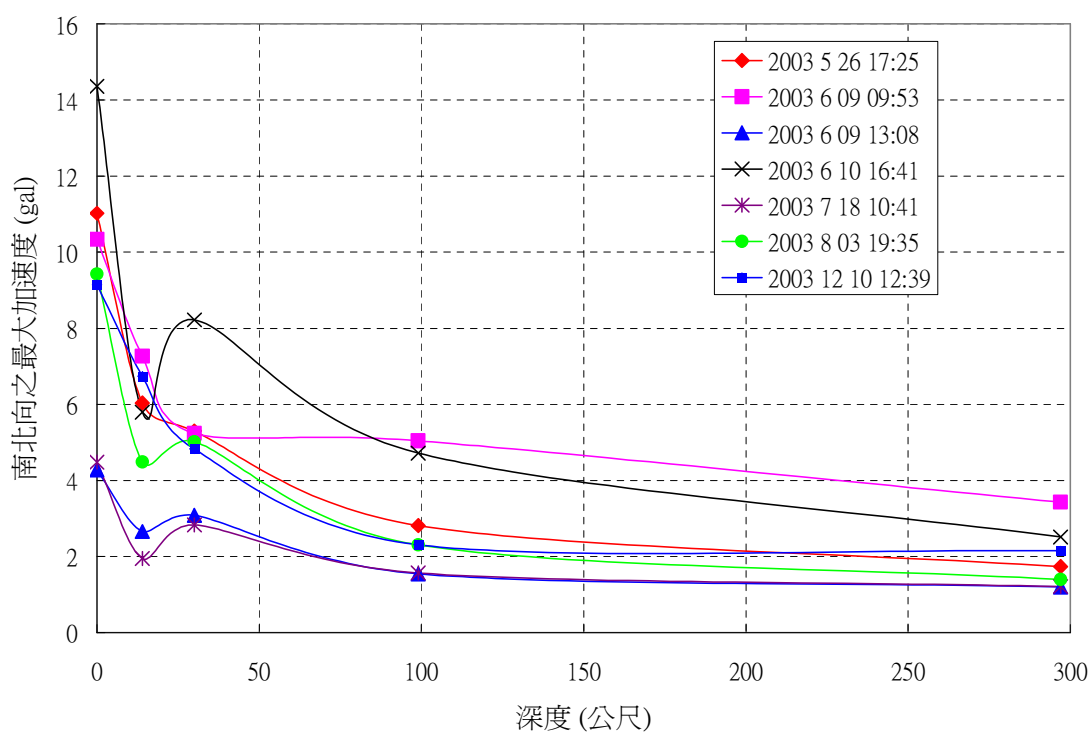


圖 3-13 臺北港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖

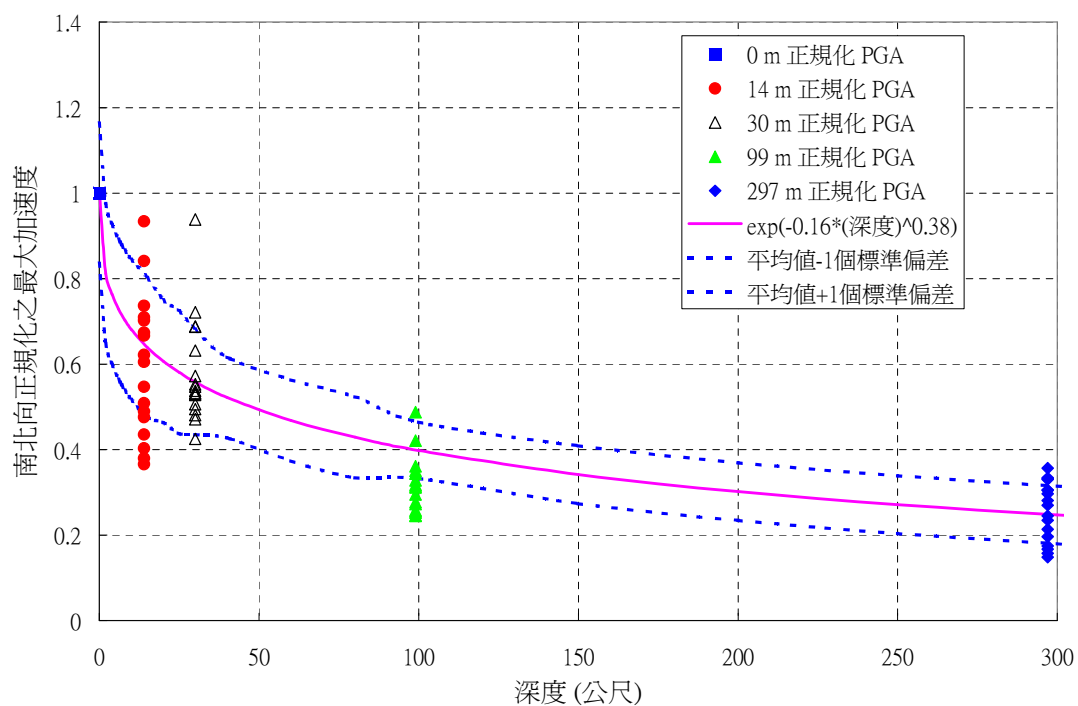


圖 3-14 臺北港井下地震儀南北向正規化之最大加速度隨深度變化圖

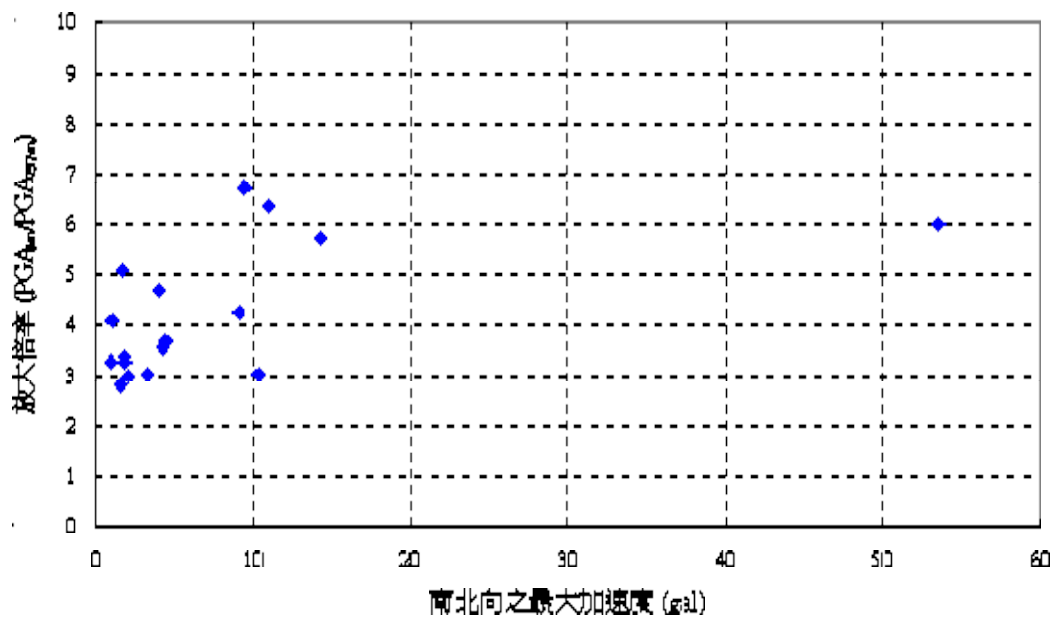


圖 3-15a 臺北港南北向震波放大倍率與最大加速度之關係圖

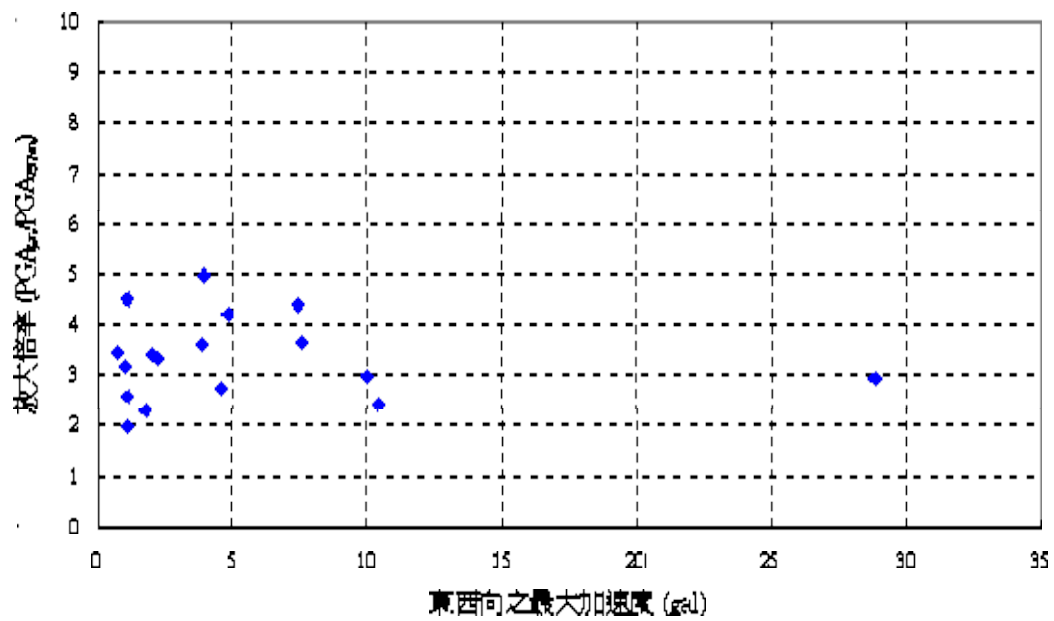


圖 3-15b 臺北港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖

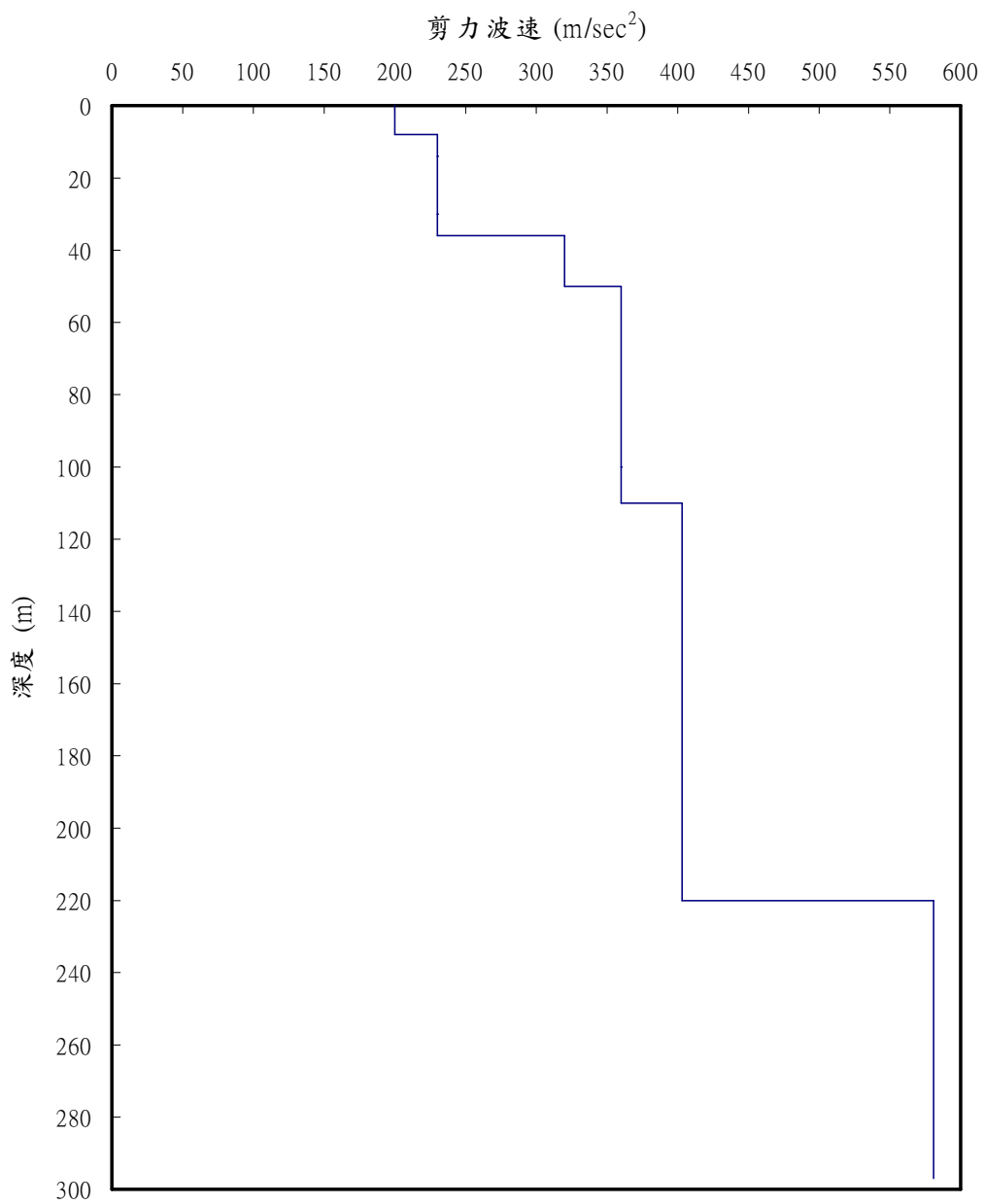


圖 3-16 臺北港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖

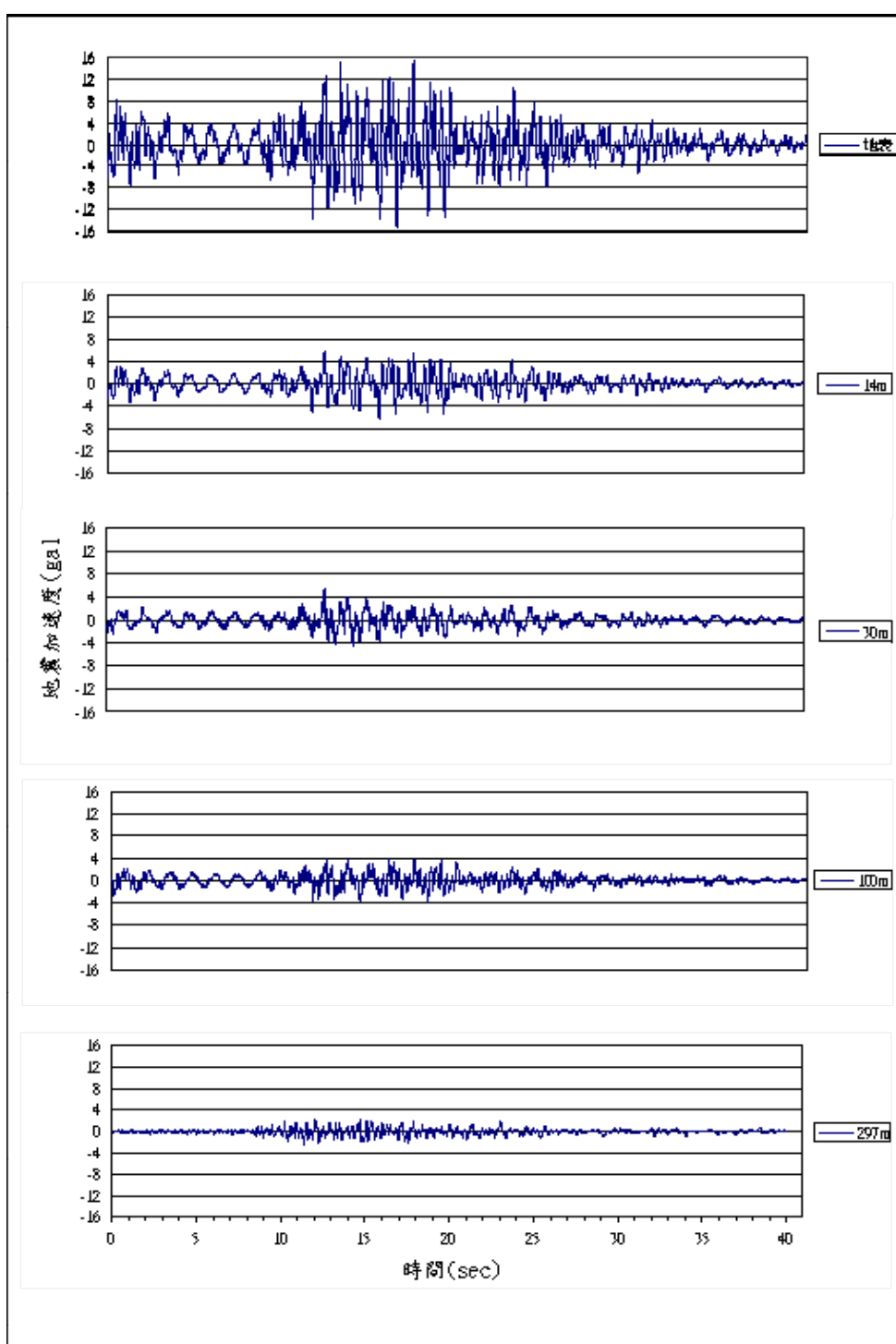


圖 3-17 臺北港 2003 年 6 月 10 日-SHAKE 模擬地震(南北向)

2002 6 10 16:41

R component

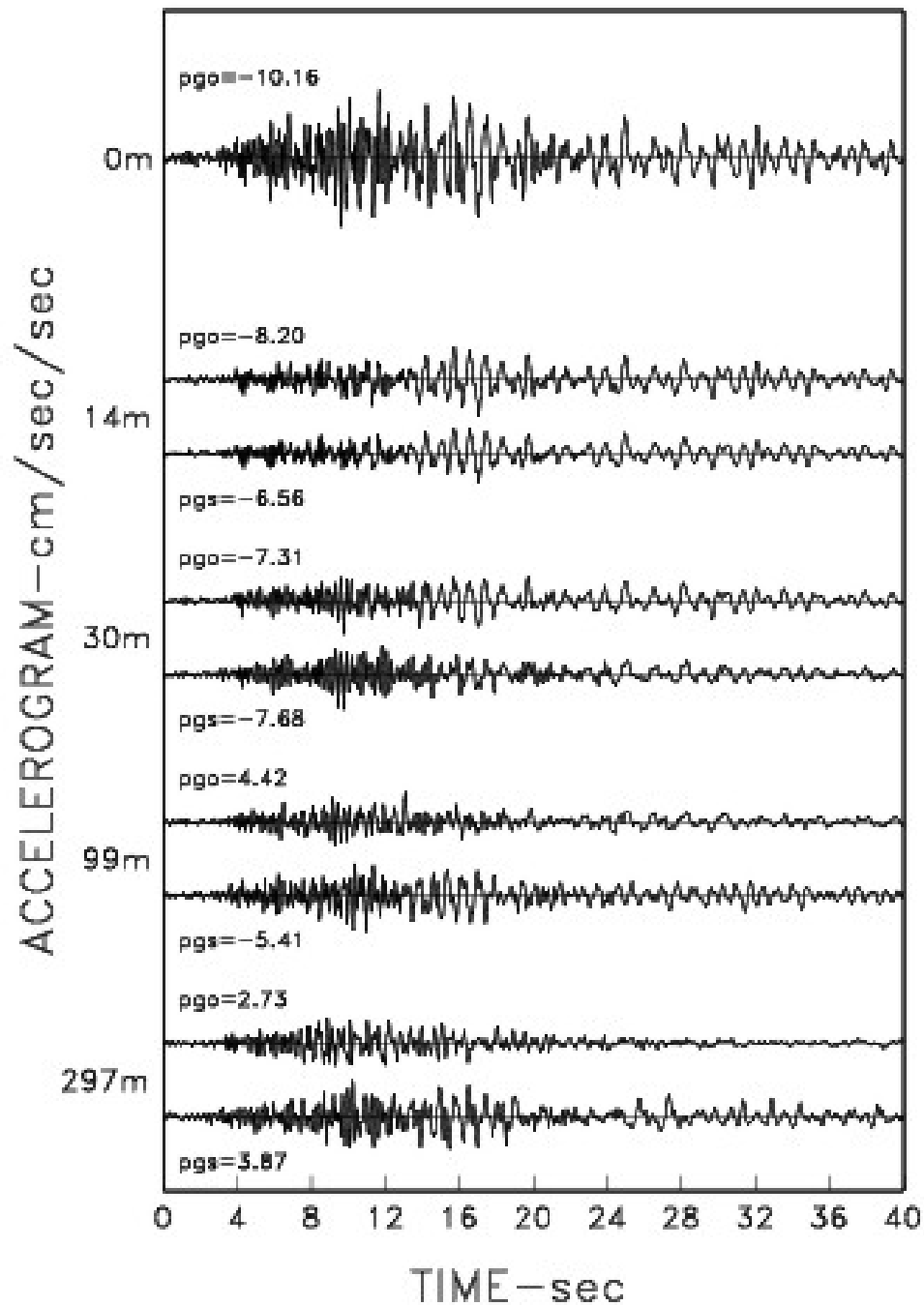


圖 3-18a 臺北港 2003 年 6 月 10 日模擬與觀測加速度在 R 方向比較圖

2002 6 10 16:41

T component

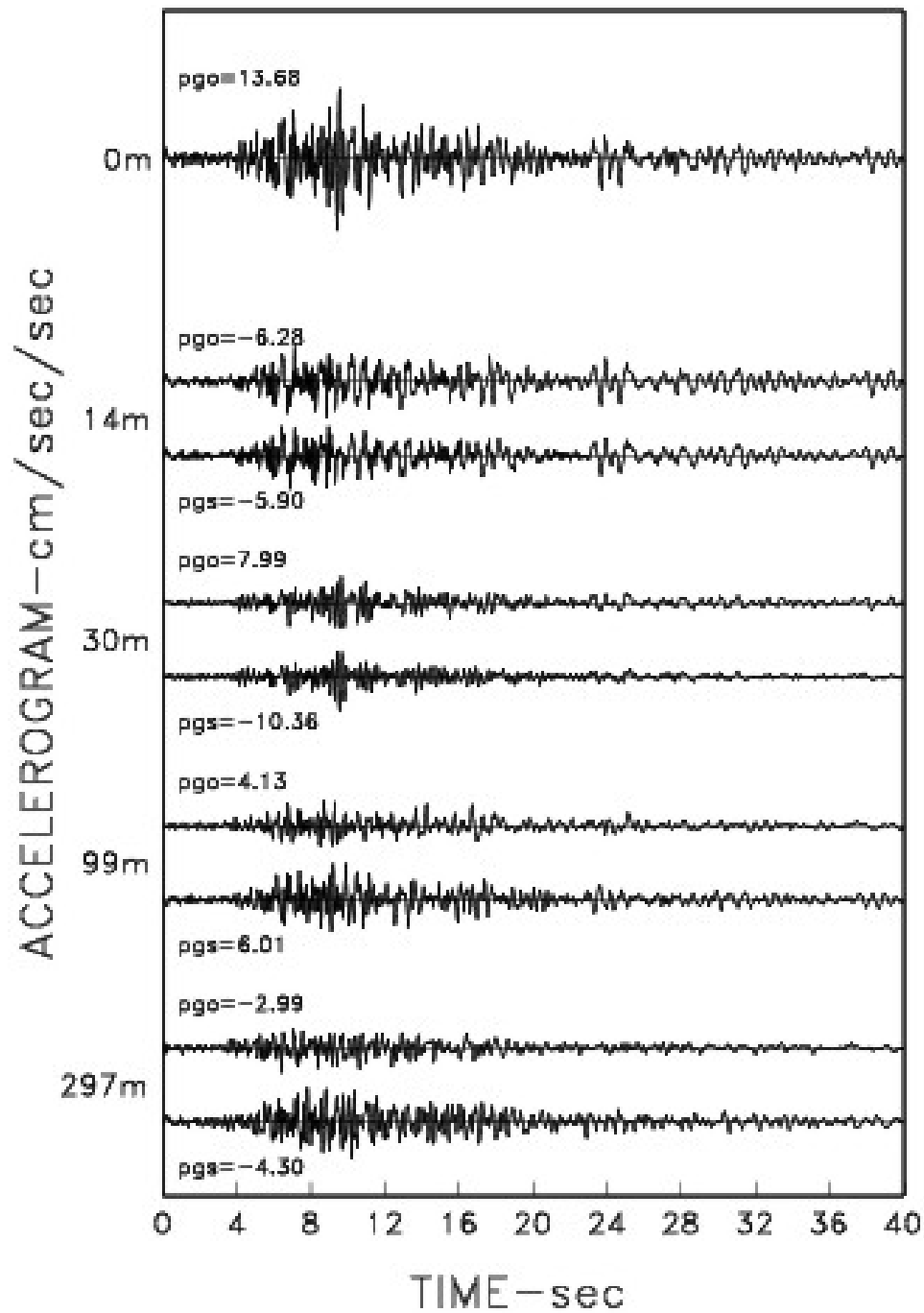


圖 3-18b 臺北港 2003 年 6 月 10 日模擬與觀測加速度在 T 方向比較圖

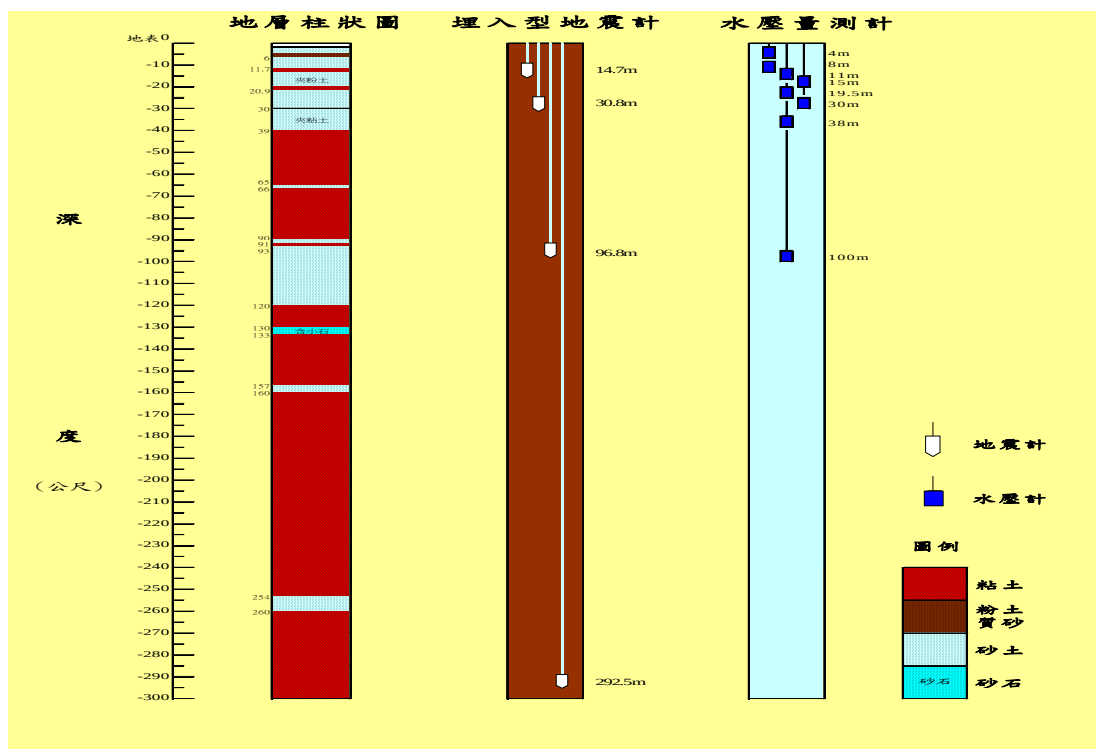


圖 3-19 高雄港地震及動態水壓監測站示意圖

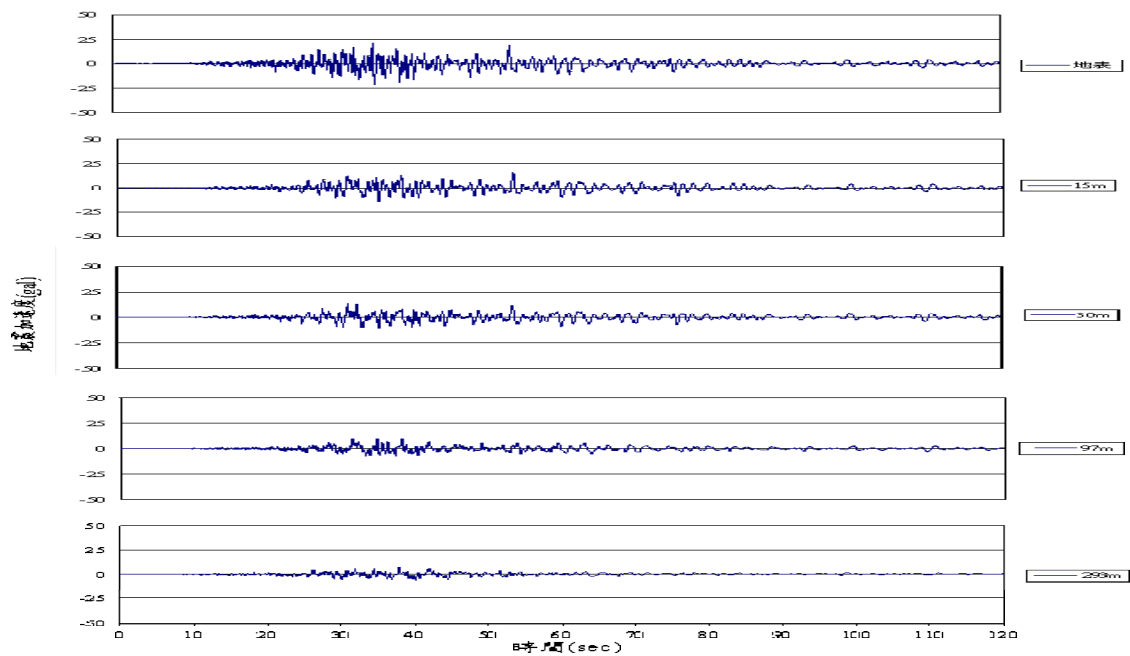


圖 3-20 高雄港 2003 年 12 月 10 日 12 時 39 分地震(南北向)

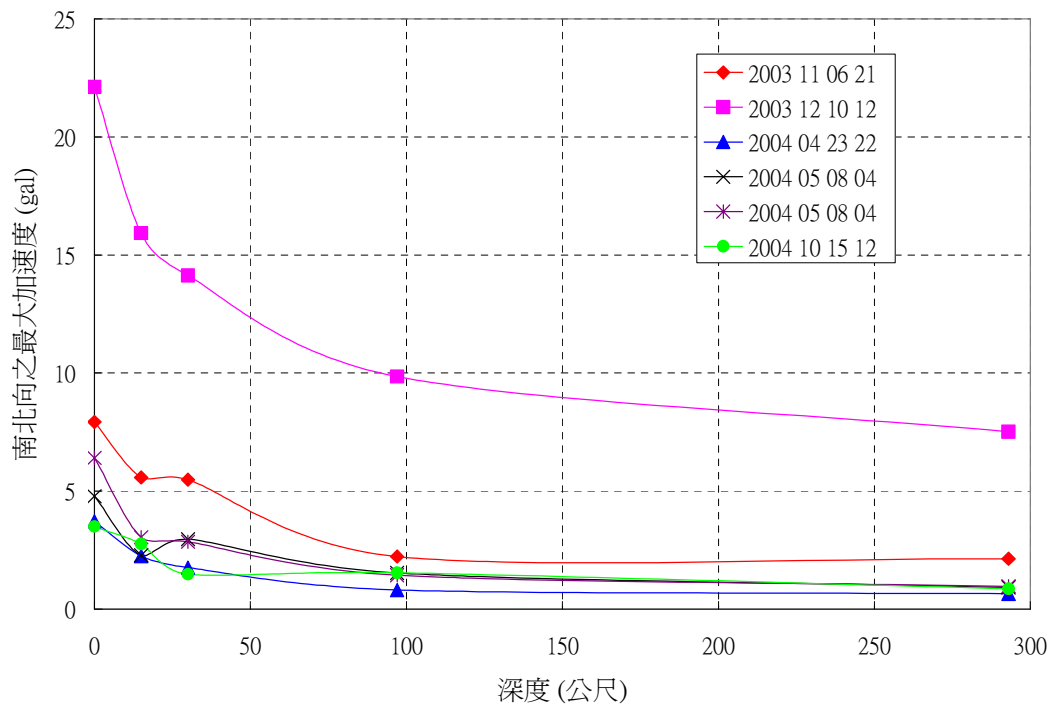


圖 3-21 高雄港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖

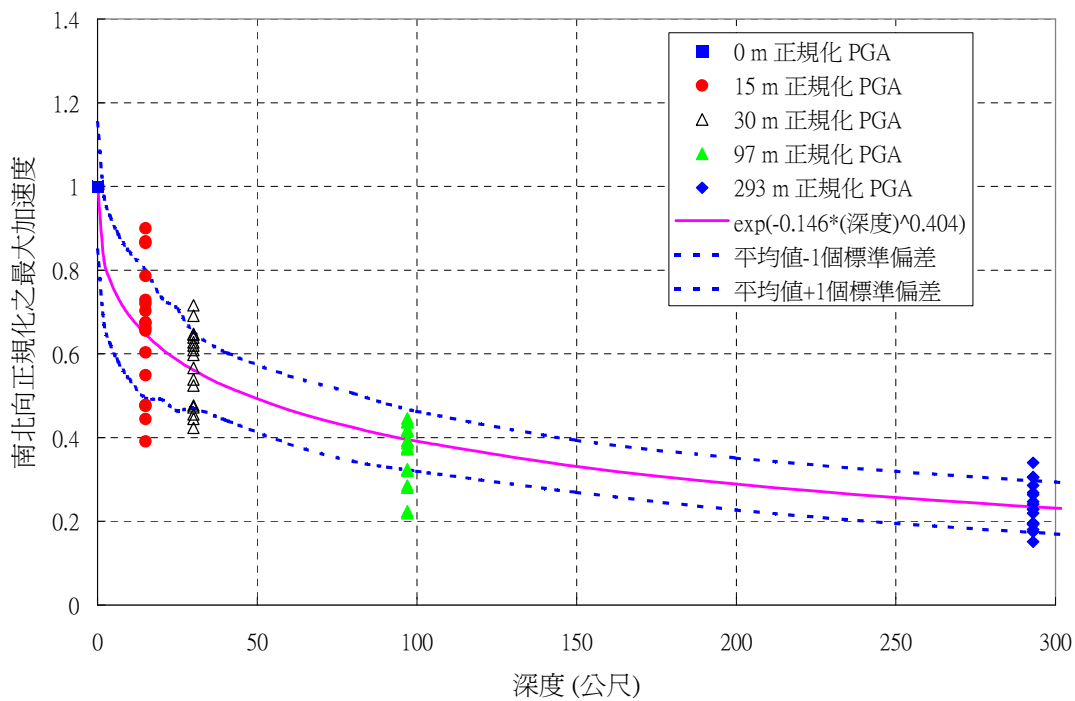


圖 3-22 高雄港井下地震儀南北向正規化之最大加速度隨深度變化圖



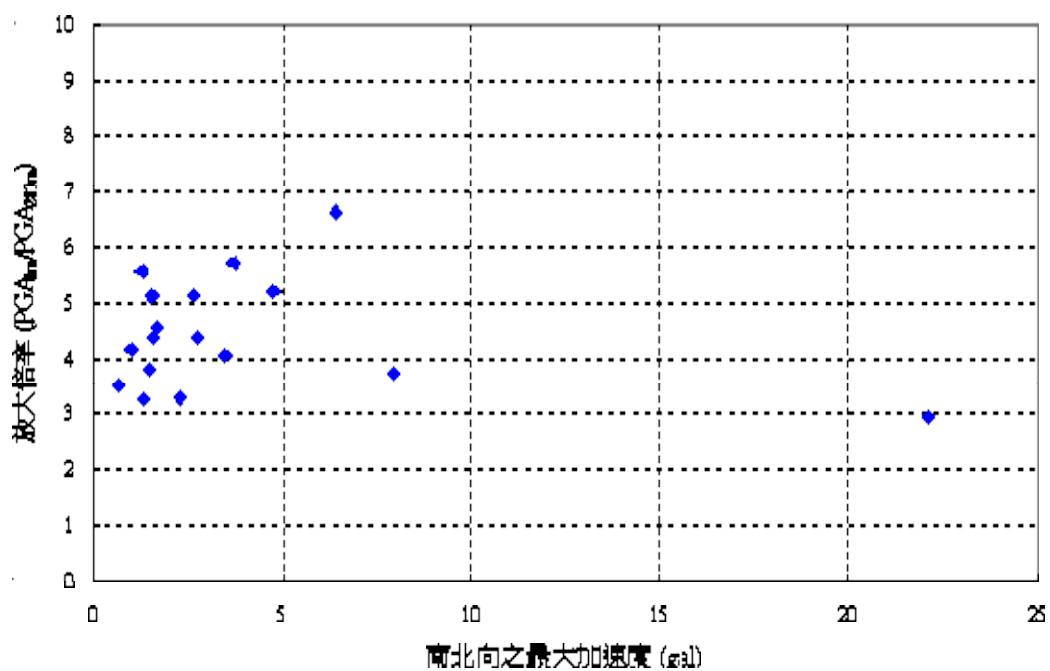


圖 3-23a 高雄港南北向震波放大倍率與最大加速度之關係圖

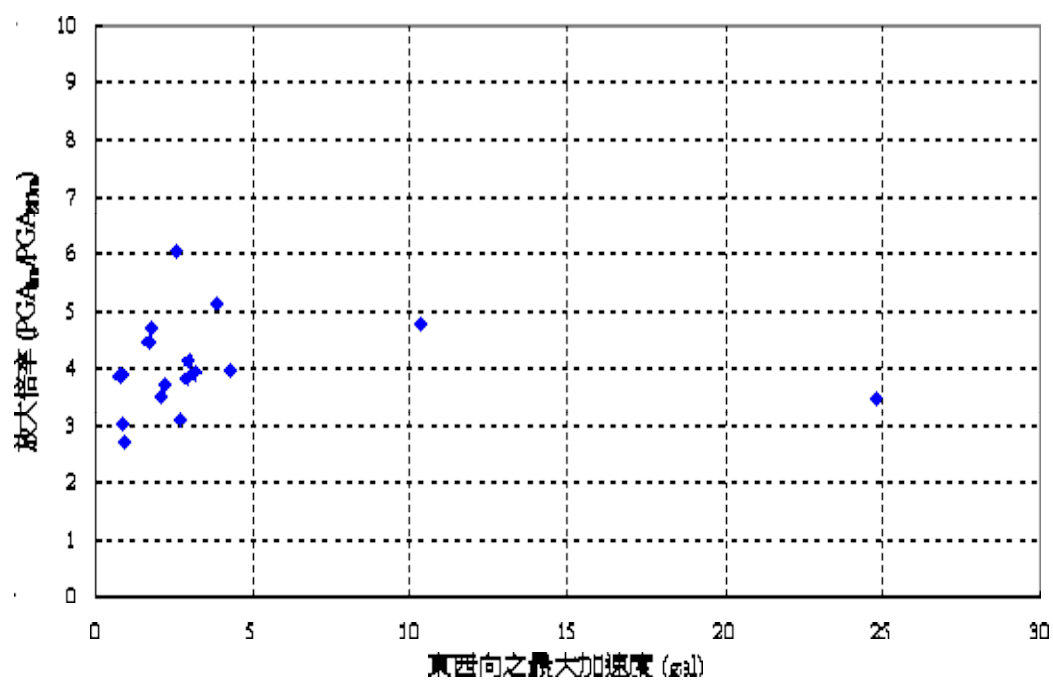


圖 3-23b 高雄港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖

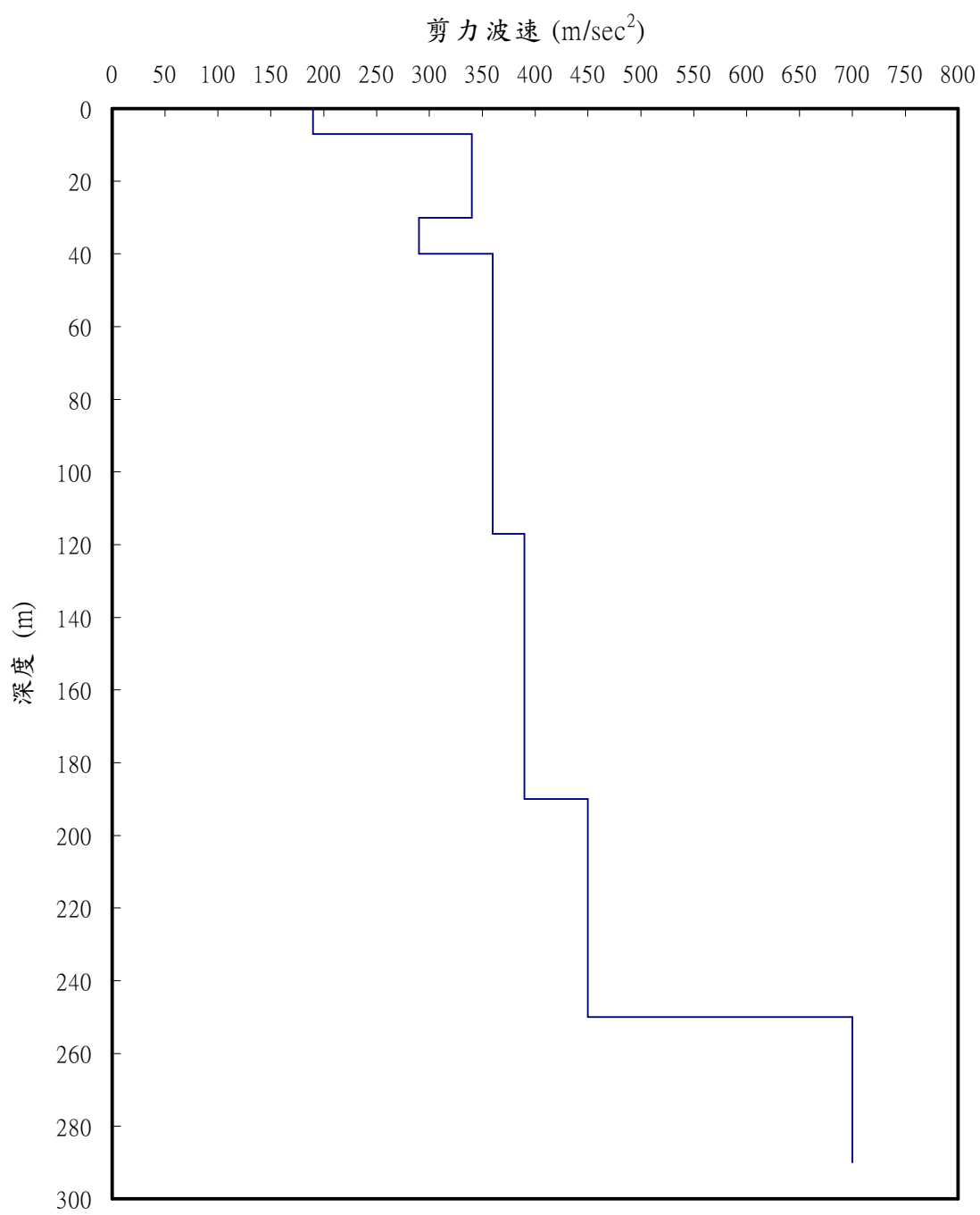


圖 3-24 高雄港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖

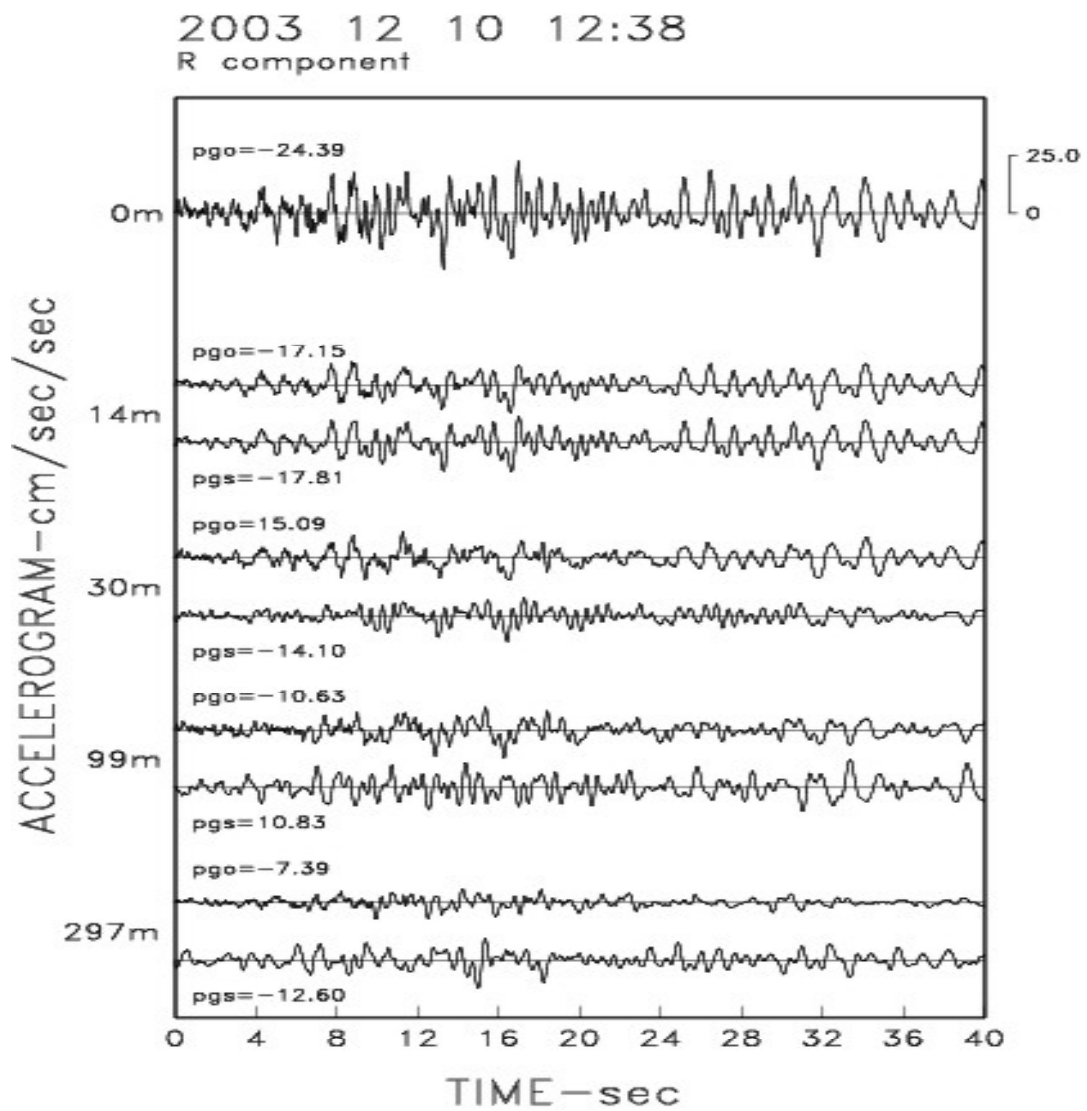


圖 3-25a 高雄港 2003 年 12 月 10 日模擬(下)與觀測(上)加速度在 R 方向比較圖

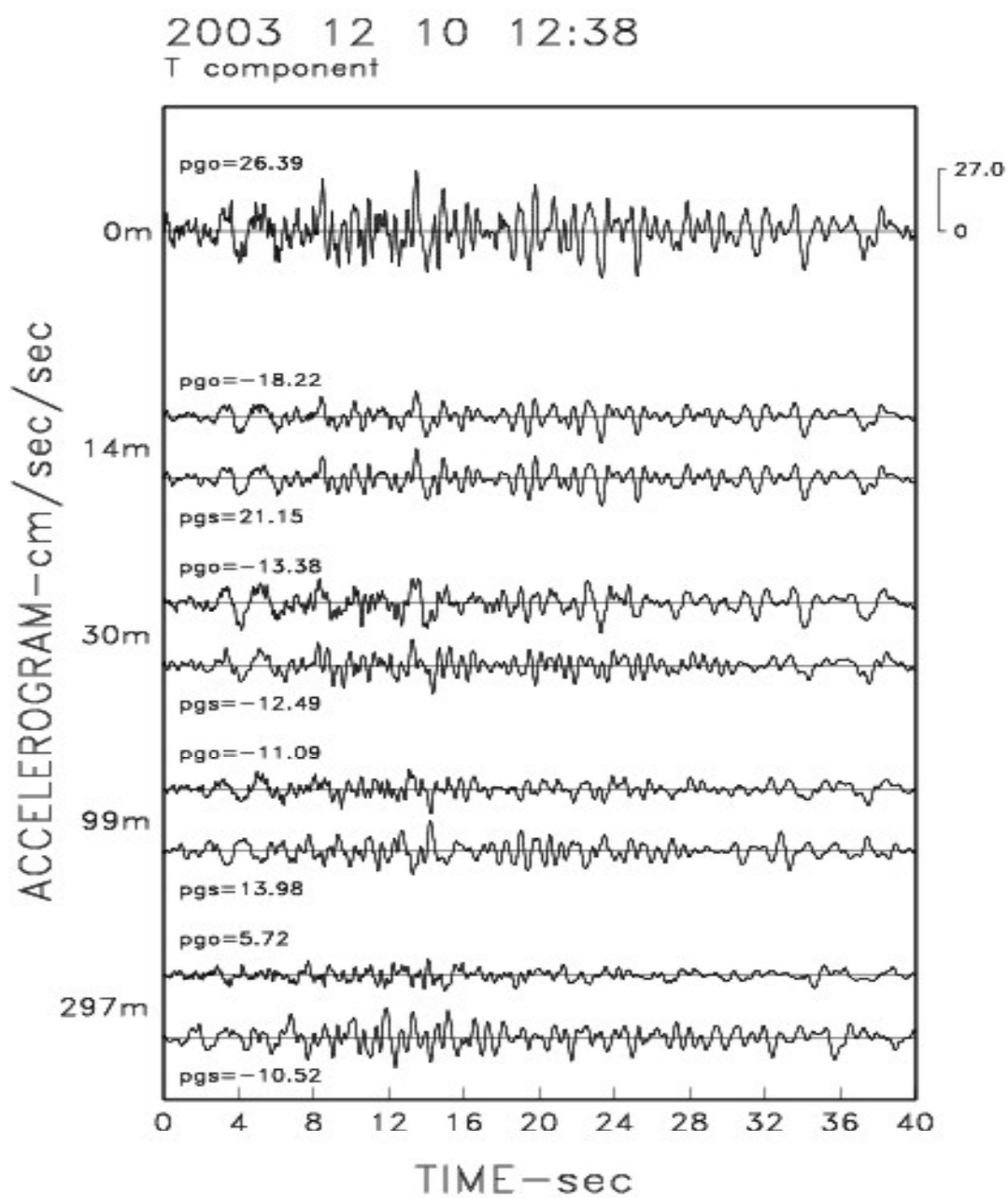


圖 3-25b 高雄港 2003 年 12 月 10 日模擬(下)與觀測(上)  
加速度在 T 方向比較

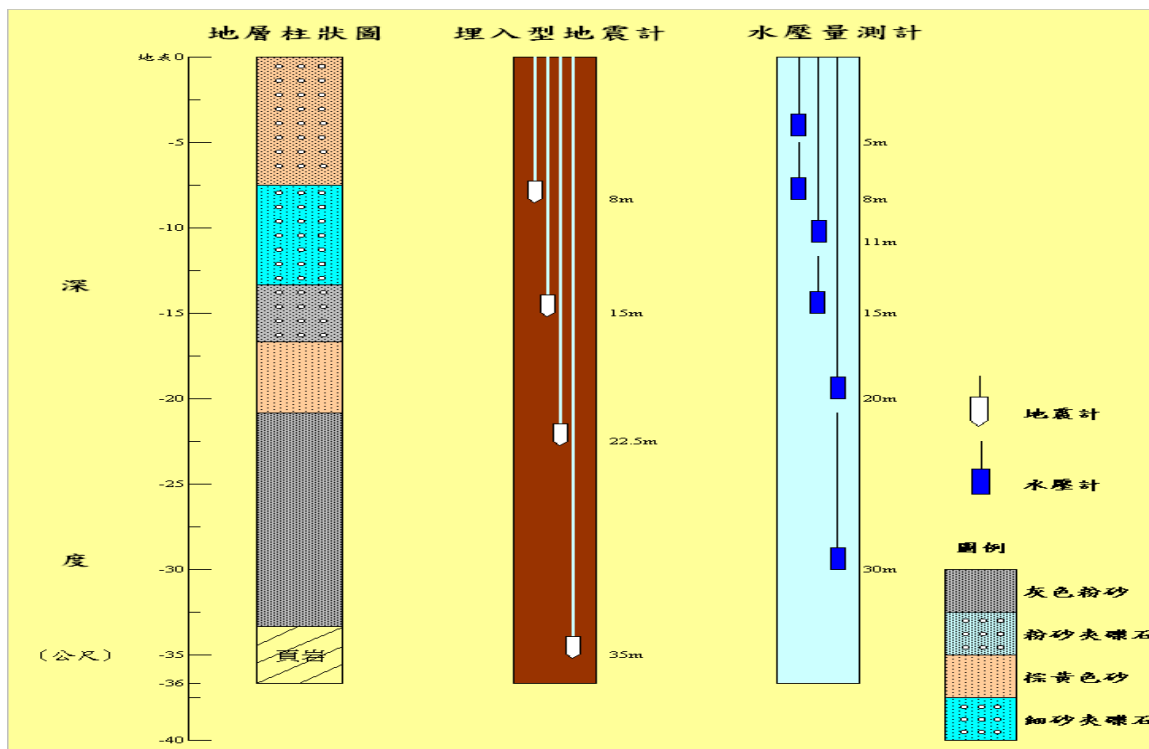


圖 3-26 蘇澳港地震及動態水壓監測站示意圖

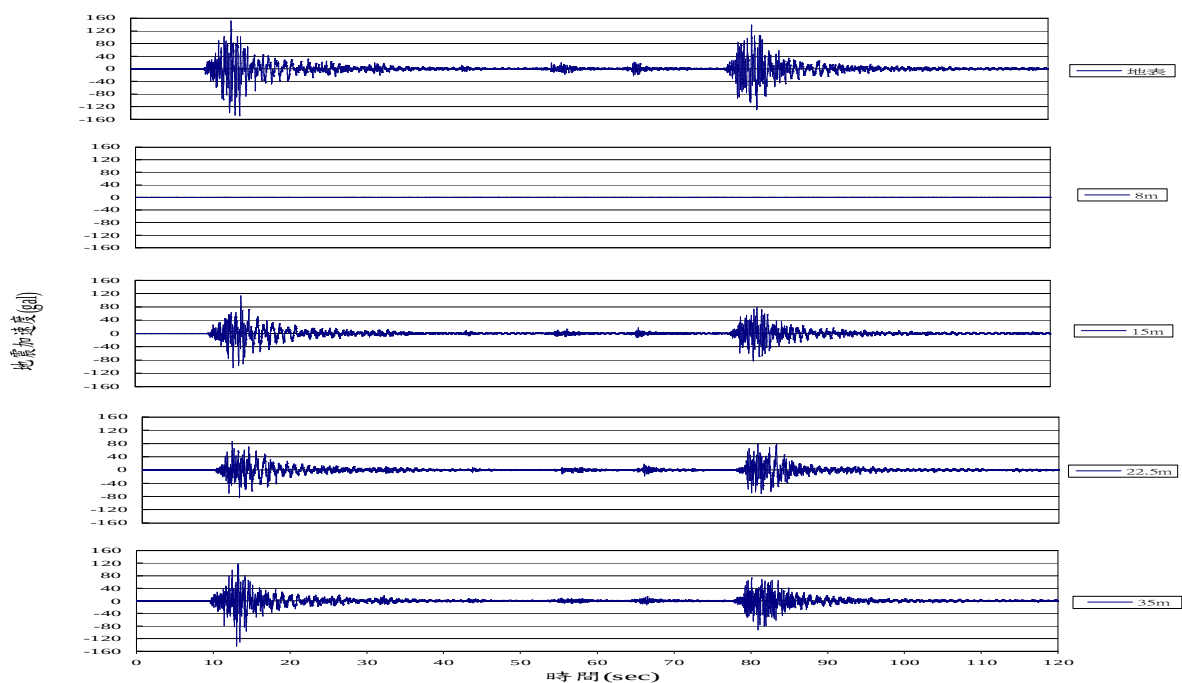


圖 3-27 蘇澳港 2005 年 3 月 6 日 3 時 6 分地震(南北向)

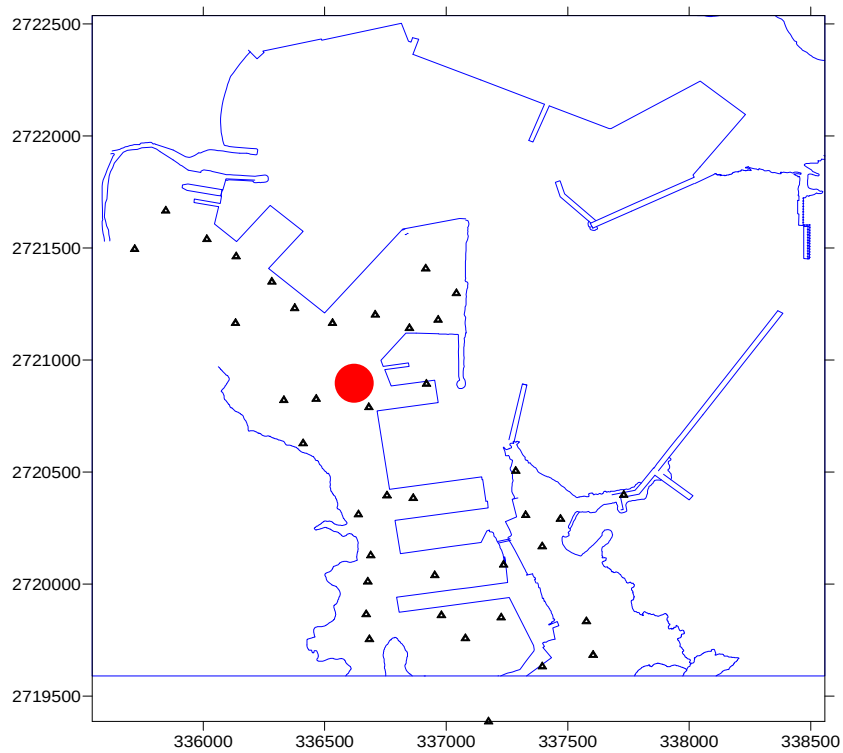


圖 3-28 蘇澳港地震監測井與與微地動試驗分佈圖

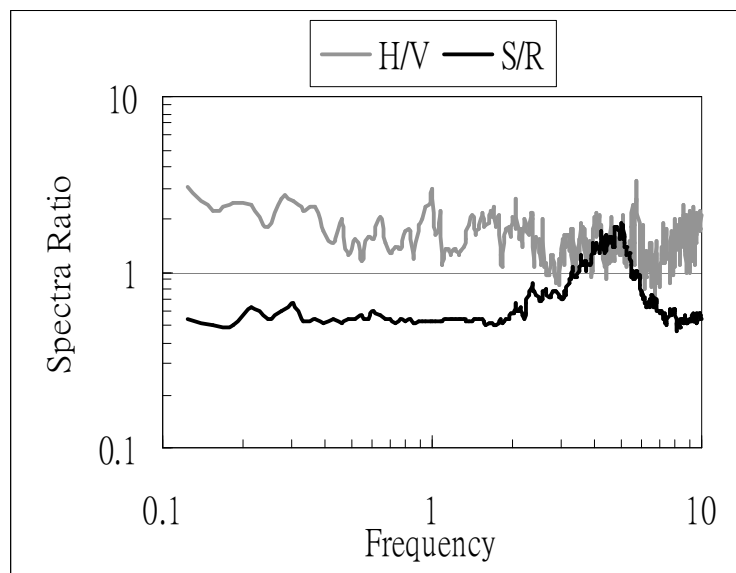


圖 3-29 蘇澳港地表與深度 15 米之頻譜比與微地動分析比較圖

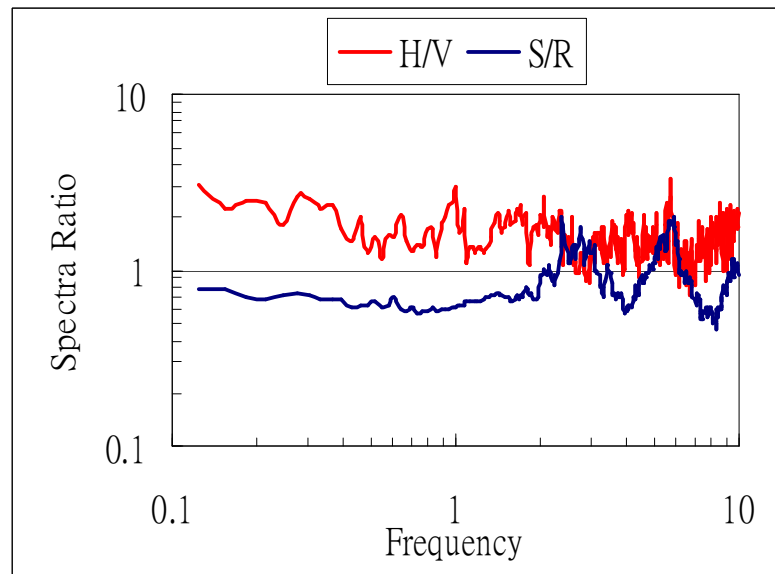


圖 3-30 蘇澳港地表與深度 35 米之頻譜比與微地動分析比較圖

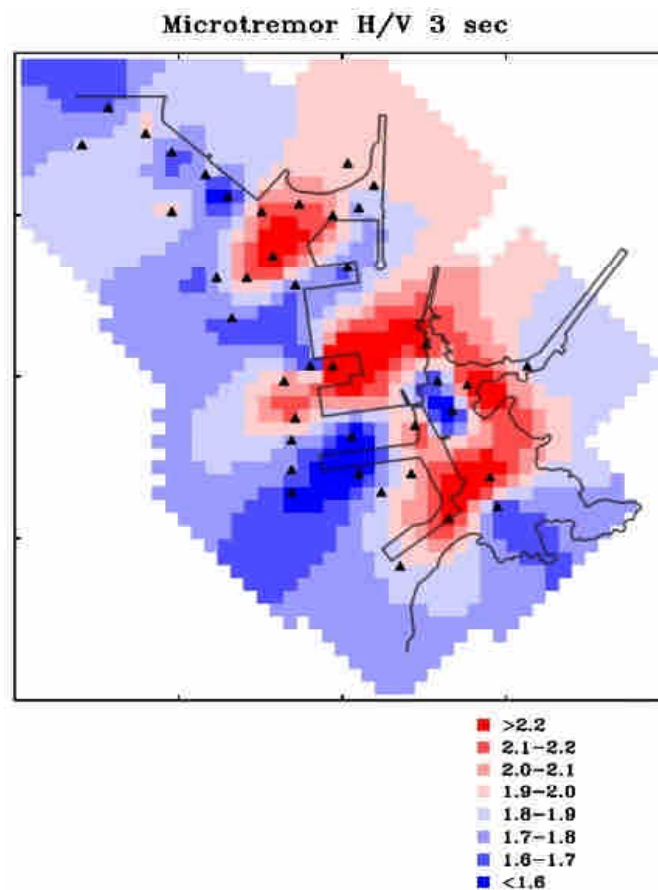


圖 3-31 蘇澳港特性週期 3 秒港區放大倍率等值圖

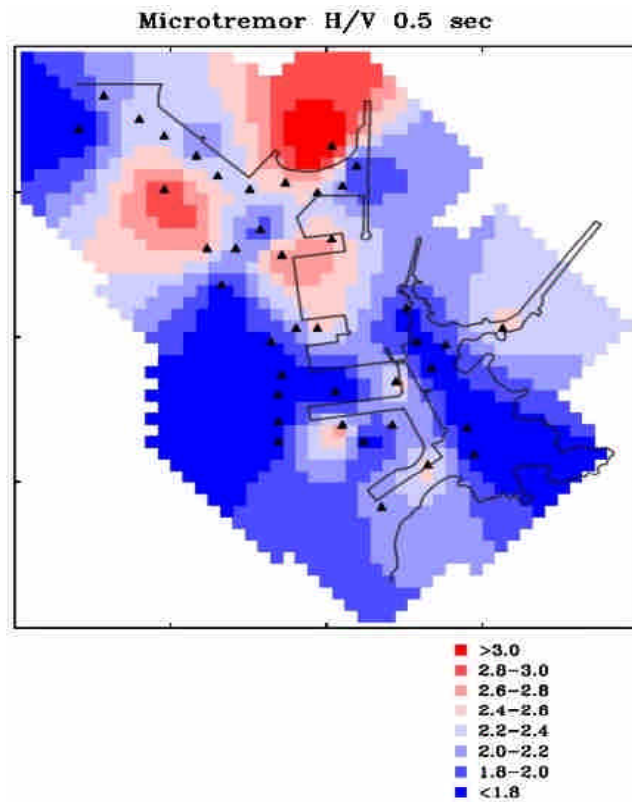


圖 3-32 蘇澳港特性週期 0.5 秒港區放大倍率等值圖

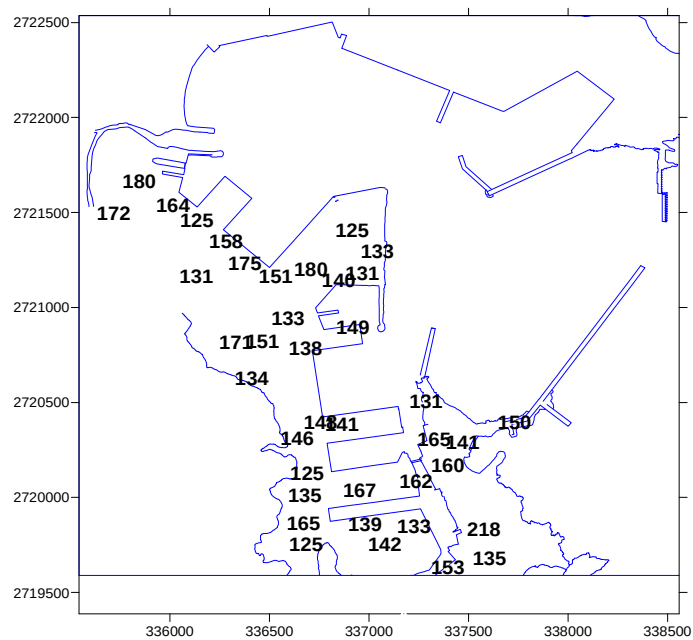


圖 3-33 蘇澳港 2005 年 3 月 6 日地震 PGA 模擬之分佈圖(東西向)



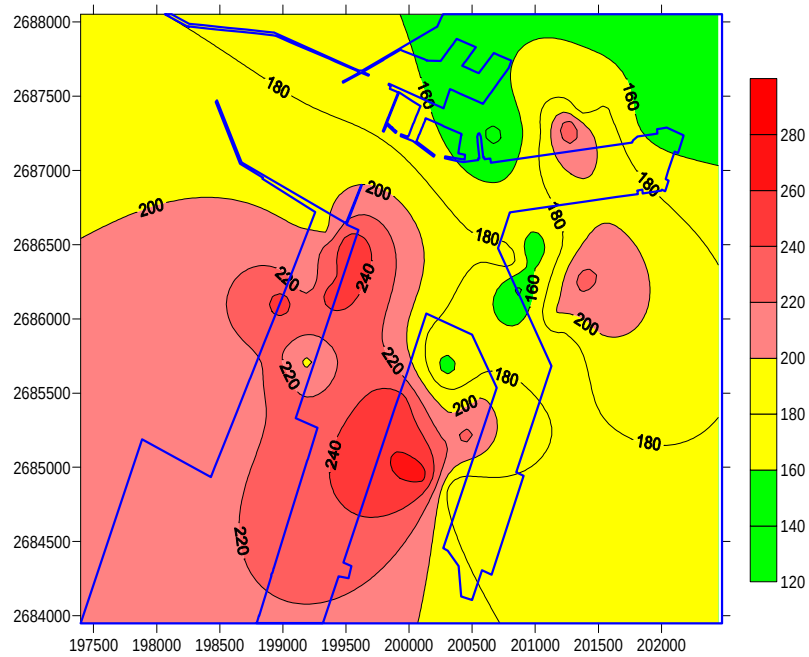


圖 3-34 台中港 921 地震 PGA 模擬之分佈圖(東西向)

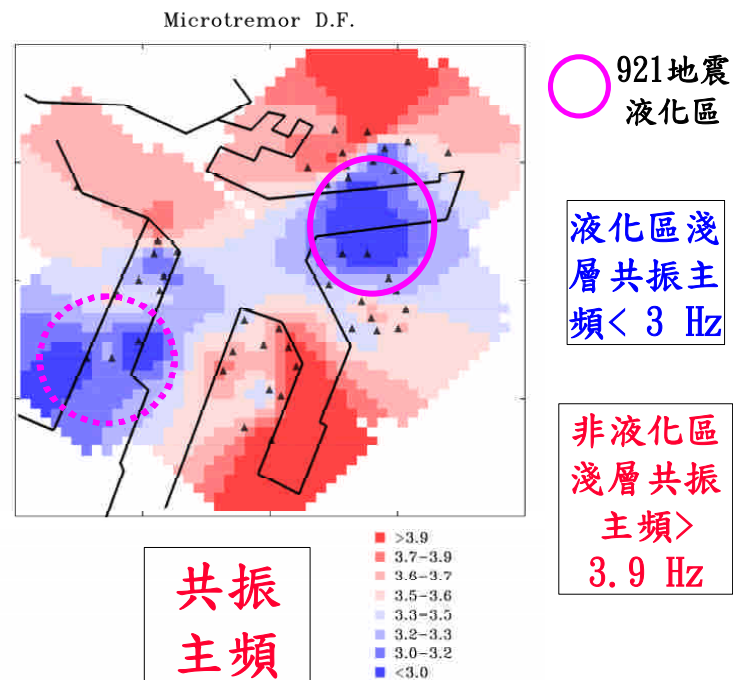


圖 3-35 台中港淺層共振主頻之分佈圖

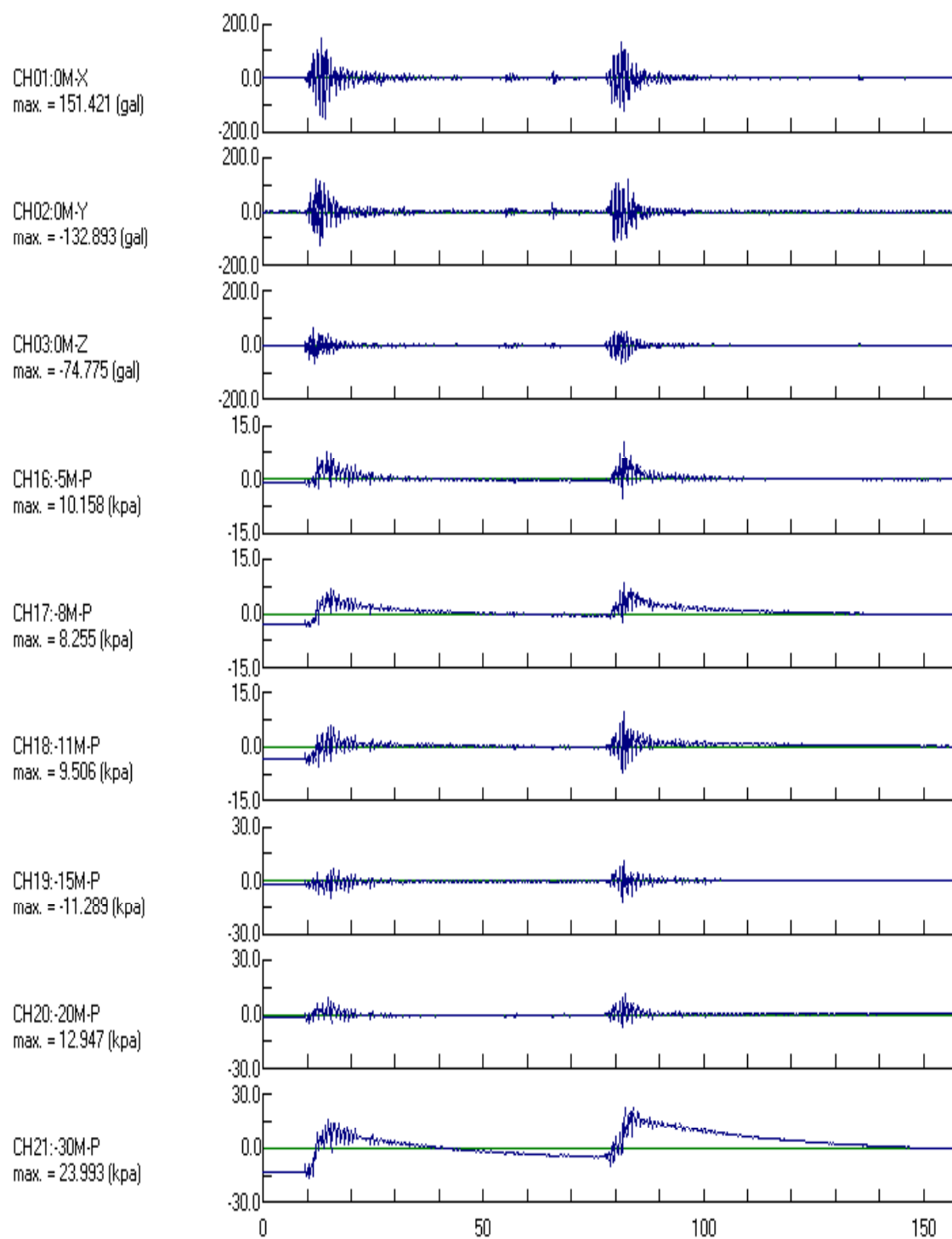


圖 3-36a 蘇澳港 2005 年 3 月 6 日地震之動態水壓變化

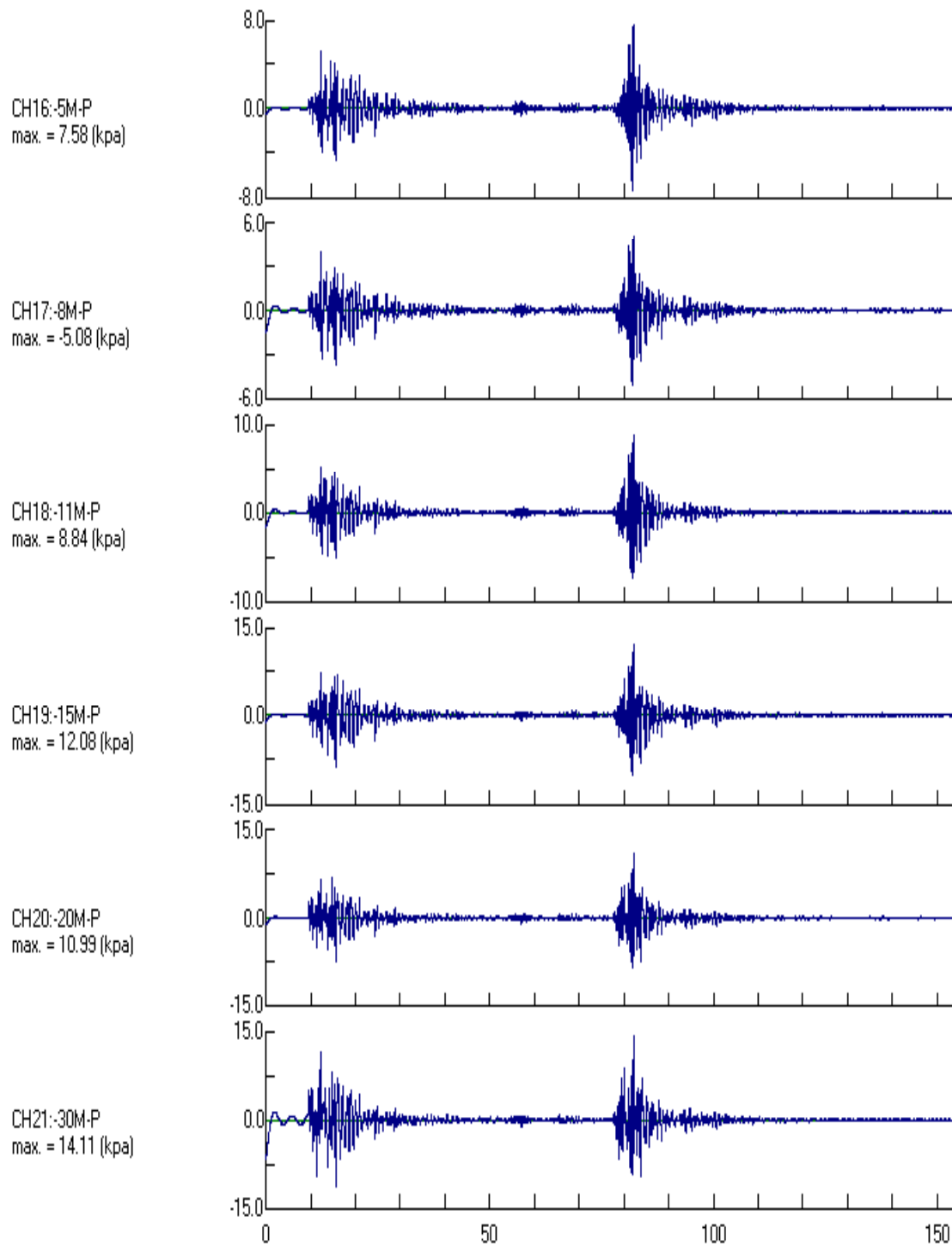


圖 3-36b 蘇澳港 2005 年 3 月 6 日地震之動態水壓變化(大於 0.25Hz)

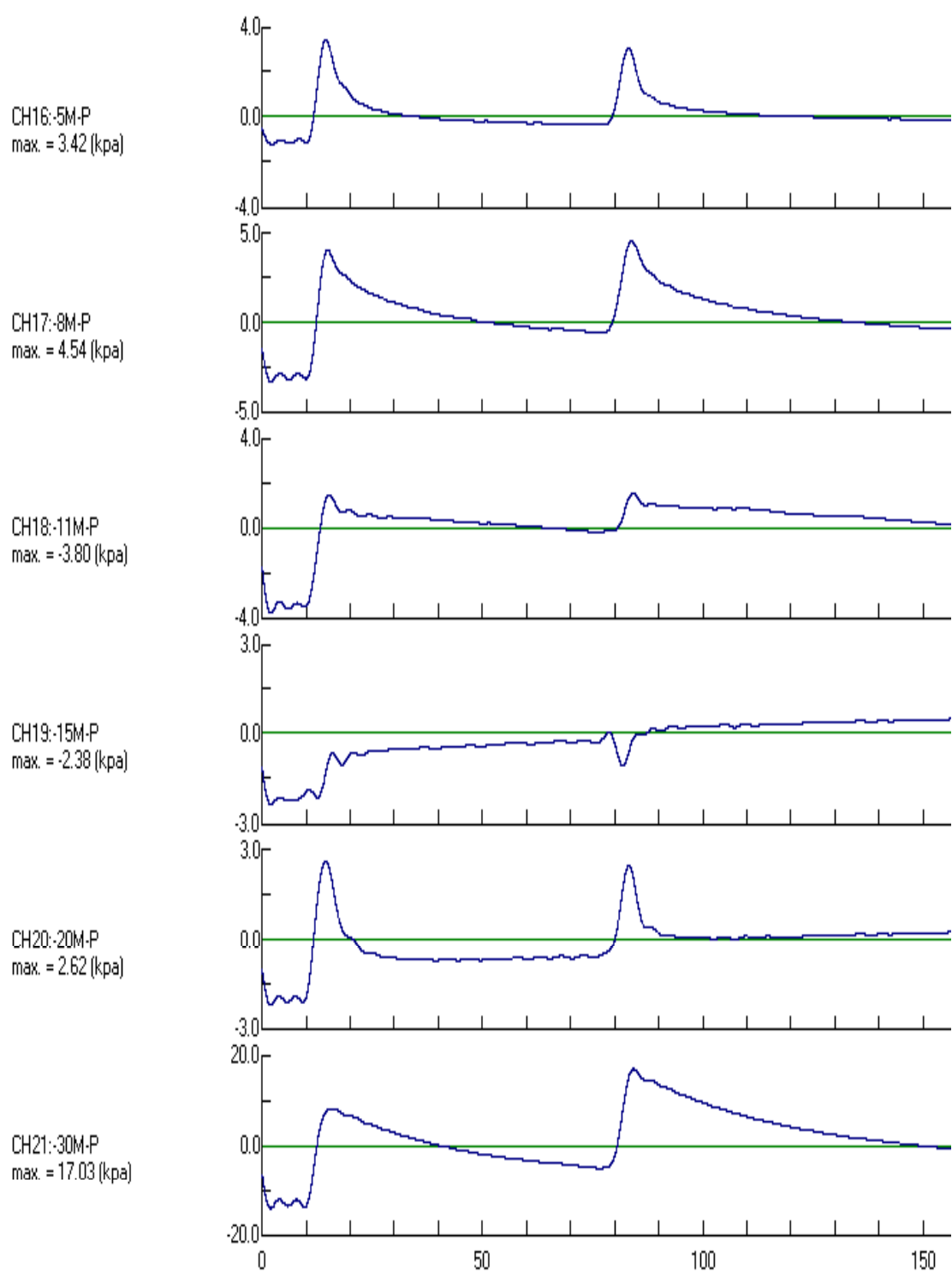


圖 3-36c 蘇澳港 2005 年 3 月 6 日地震之動態水壓變化(小於 0.25Hz)

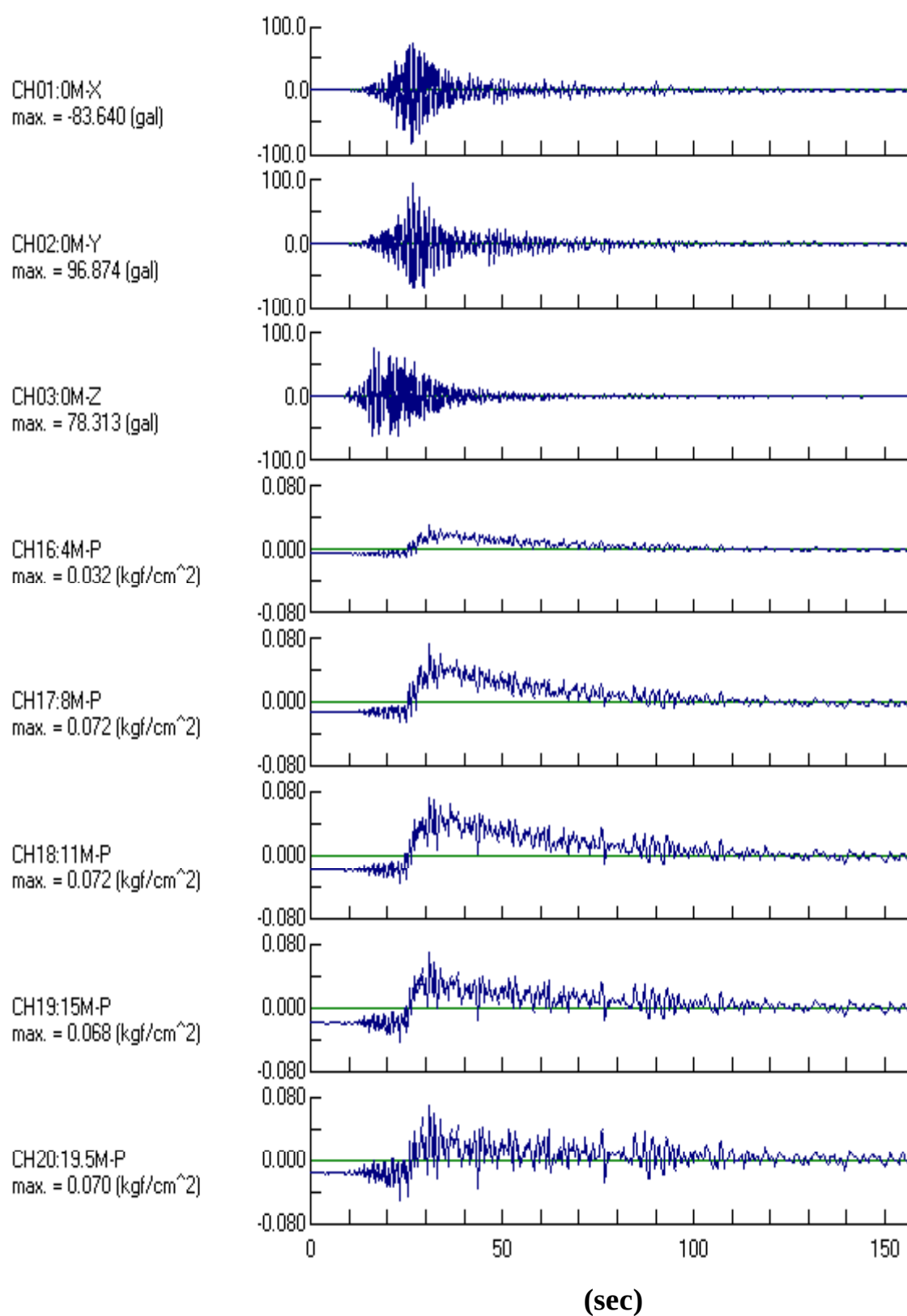


圖 3-37a 高雄港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化

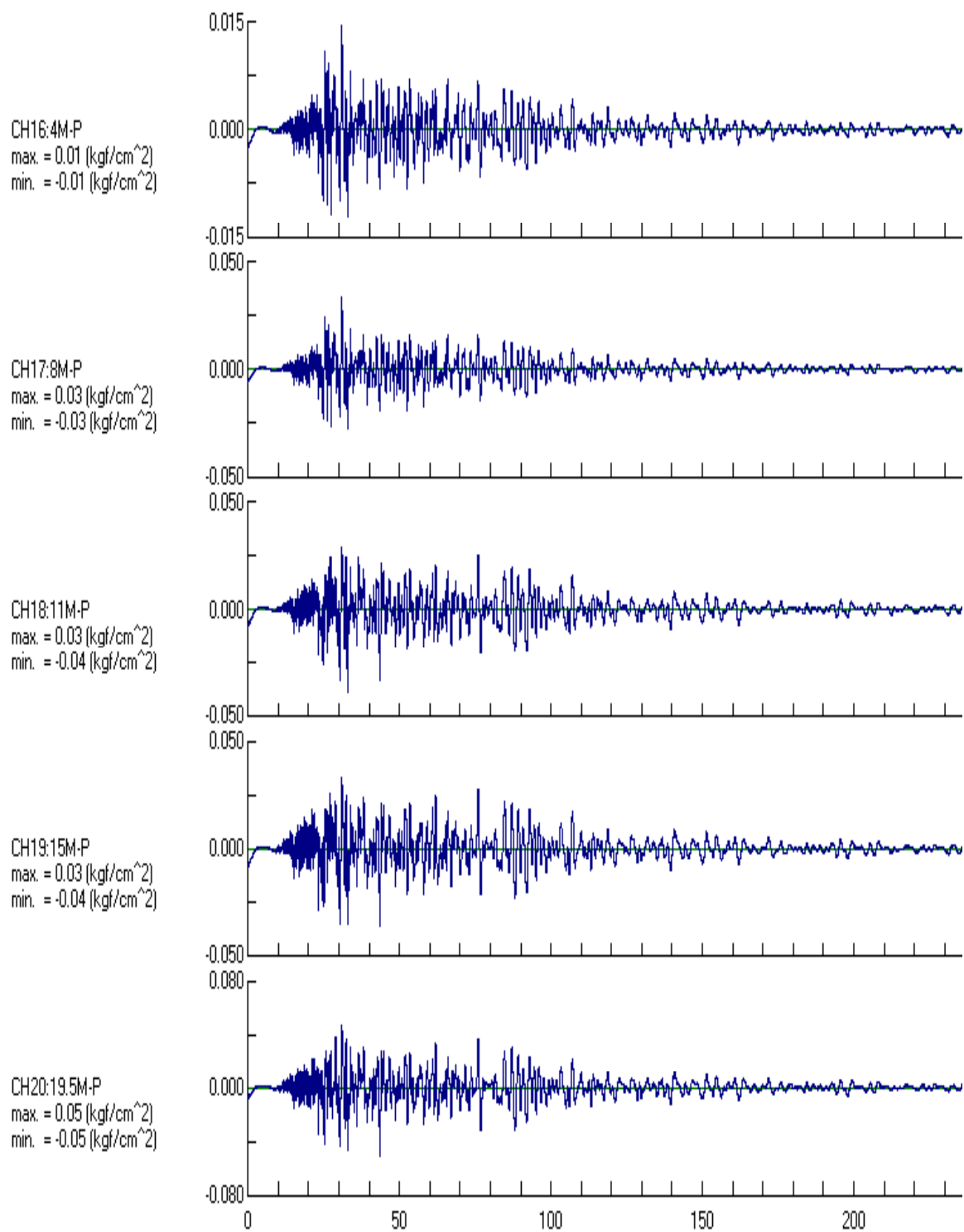


圖 3-37b 高雄港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化(大於 0.1Hz)

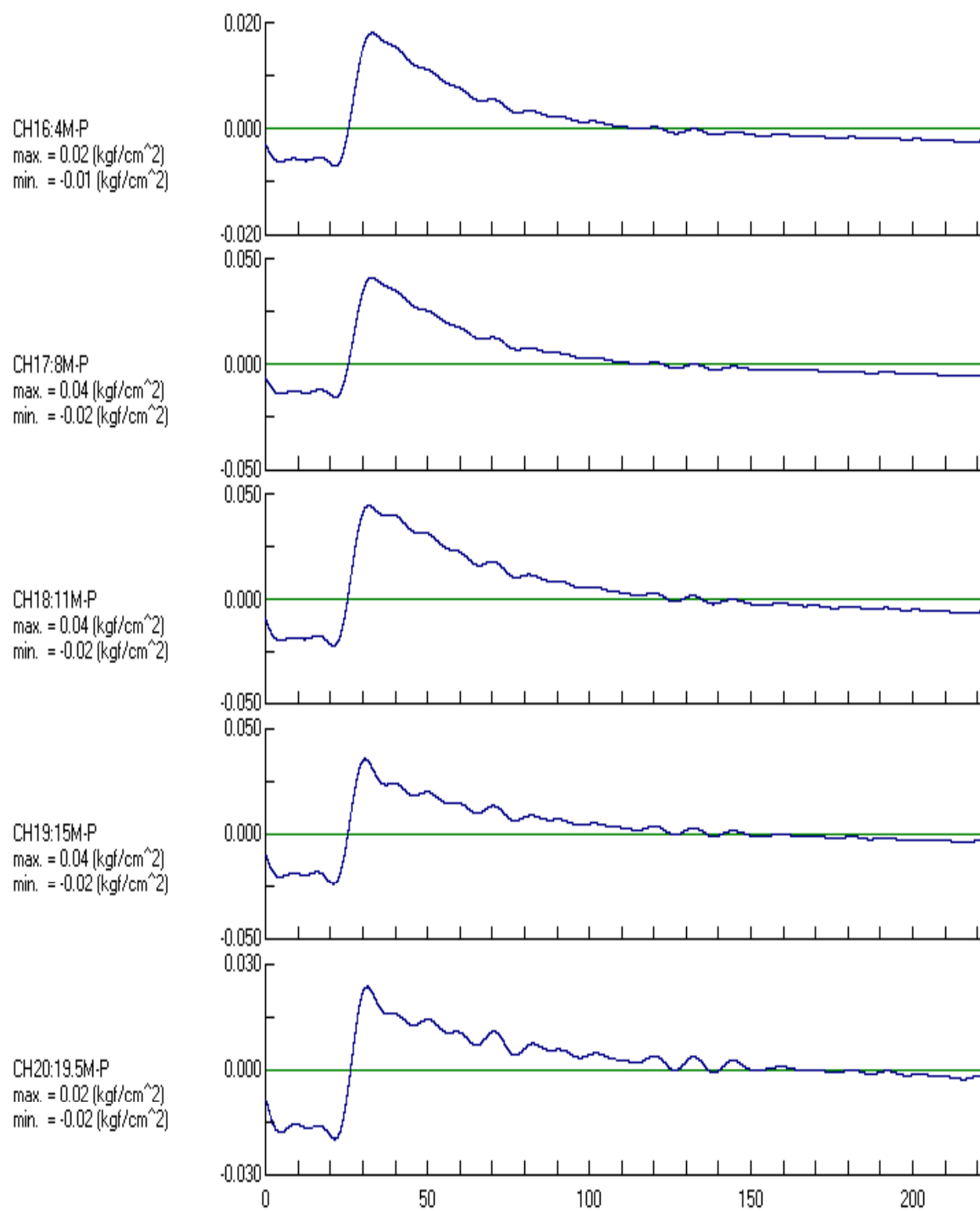


圖 3-37c 高雄港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化(小於 0.1Hz)

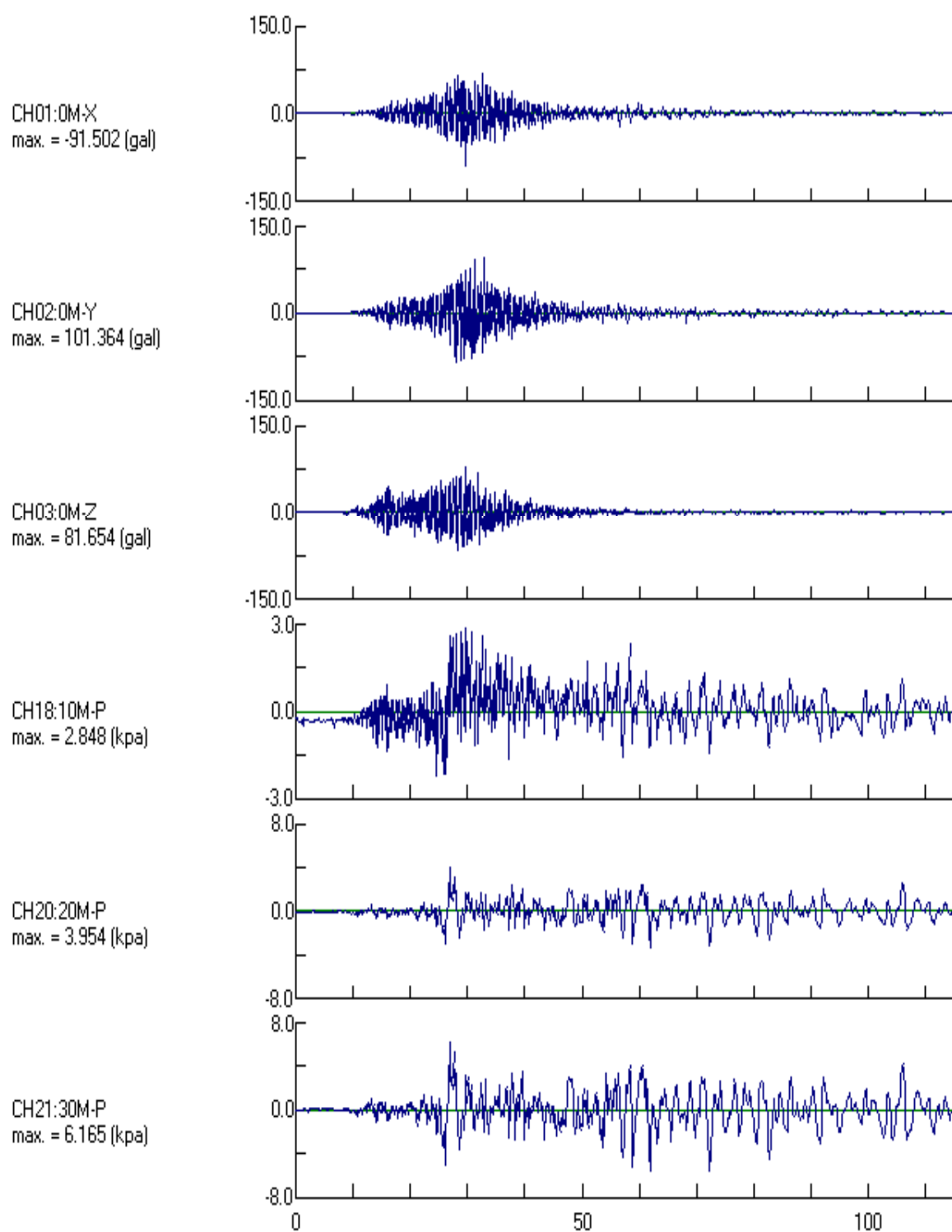


圖 3-38a 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化



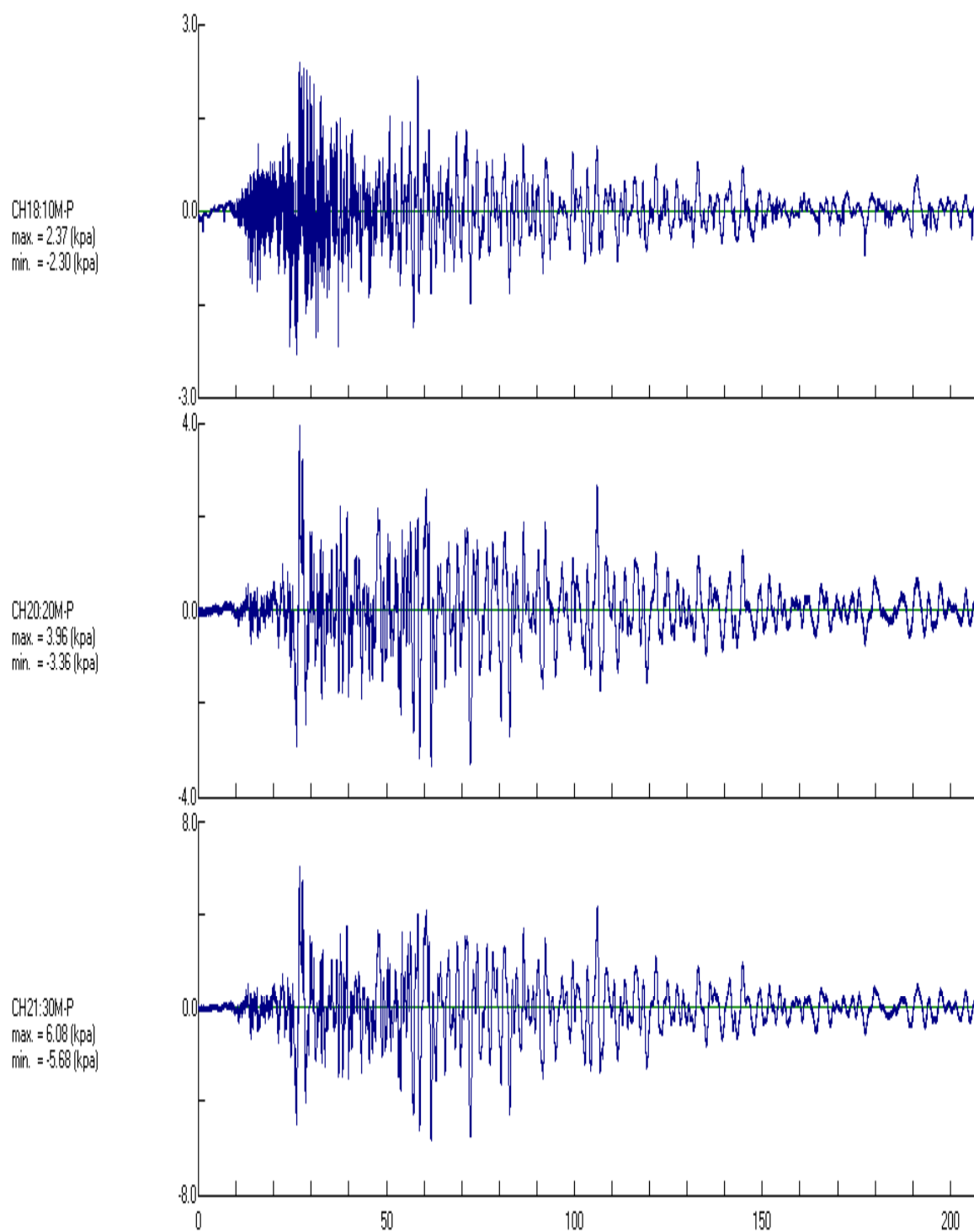


圖 3-38b 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化(大於 0.08Hz)

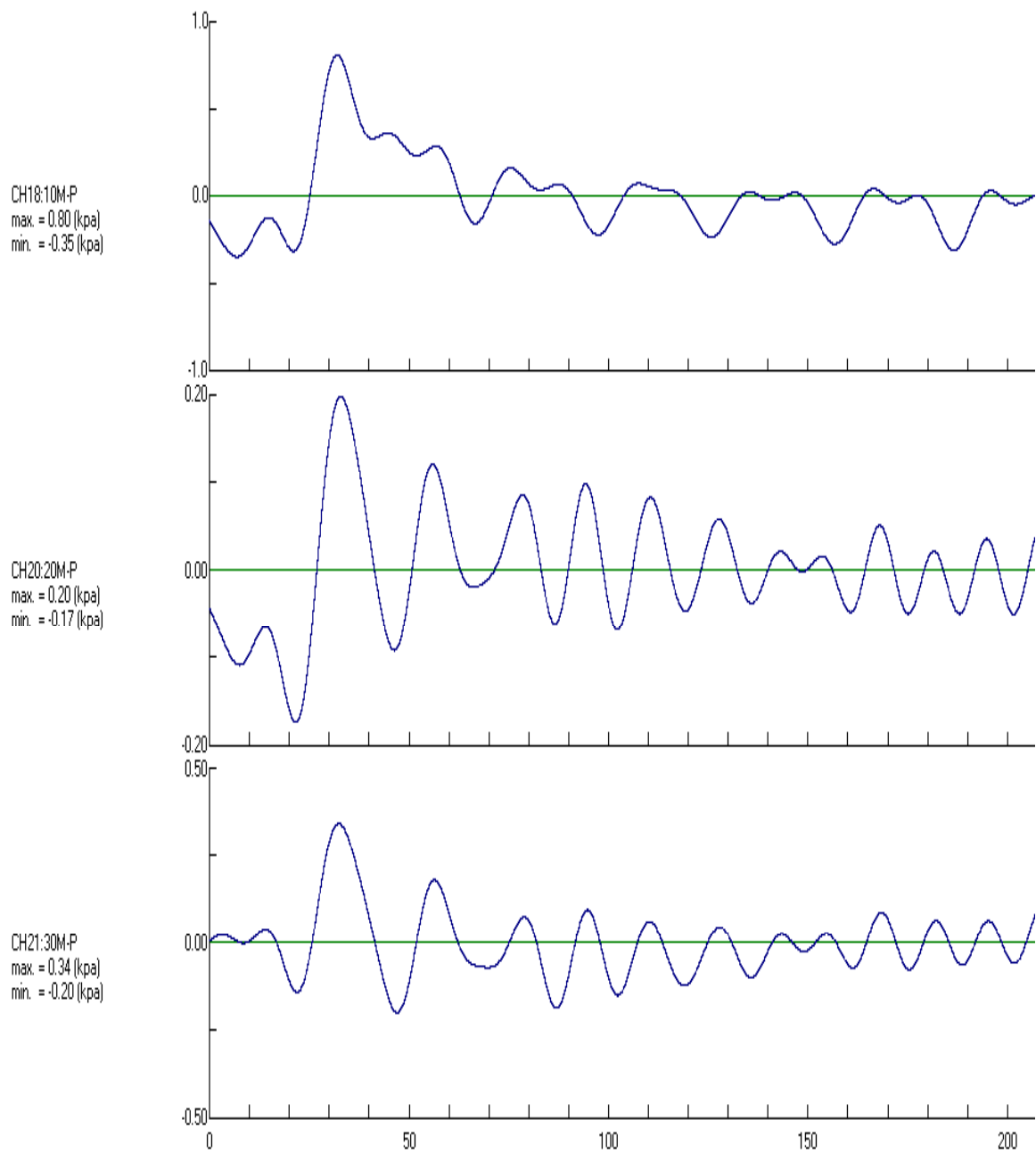


圖 3-38c 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態水壓變化(小於 0.08Hz)

## 第四章 本土化液化分析模式與港區液化危害度分析

921集集大地震造成臺灣中部地區廣泛之土壤液化，震後許多專家學者進行廣泛之調查研究，其中工程界與學術界相當關切之問題，就是如何由廣泛之調查資料，經由回饋分析建立具有本土特色之液化評估方法。賴聖耀等人 (2004, 2005) 以判別分析，分別建立SPT及CPT之本土化液化分析模式，本章以極限狀態分析法，再建立SPT之本土化液化分析模式，並以新建立之本土化液化分析模式，進行港區液化危害度分析。

### 4.1 前言

土壤液化潛能之分析方法中，以簡易經驗法最常被工程界使用，這簡易經驗法最早先由 Seed & Idriss (1971)所提出，Seed et al.(1983, 1985) 加以修正及更新，此簡易經驗法雖經嚴謹之經驗判斷分析，但仍缺乏統計上的根據。因此 1997 年時美國國家地震工程研究中心 NCEER (National Center for Earthquake Engineering Research)，針對 Seed 提出之 $(N_1)_{60}$ -CRR 曲線中細料含量  $FC \leq 5\%$ 之曲線，再進行部分的修正。修正之主要依據為，Liao et al. (1988) 之邏輯迴歸分析及 Youd & Noble (1997)之統計分析，與彙整現場之 CPT 資料所得結果，認為此曲線延伸部分應與縱軸交於 0.05 之截距，修正結果如圖 4-1 所示。因此以較合理之統計方法，建立土壤抗液化強度 CRR 與現地試驗值之關係式或關係圖，是非常重要的。

Hwang et al.(2001)採用賴聖耀(1991)所發展之最小錯誤分類法，建立具有本土特色之土壤臨界液化強度曲線；Juang et al.(2000, 2003) 以極限狀態函數，建立土壤抗液化強度 CRR 與現地試驗值之關係。唯他們所建立之臨界強度曲線或極限狀態函數之參數，並未經適當之統計分析及機率檢定，因此其發展之臨界強度曲線或極限狀態函數，並非唯一解，即在相同之統計資料的情況下，會隨著參數函數之設定不同，

而有不同之臨界強度曲線或極限狀態函數，且其臨界強度曲線或極限狀態曲線相差甚多，因此臨界強度曲線或極限狀態函數須輔以更多之統計理論加以修正，使其成為更完善之統計模式。

根據 Anderson(1958)多變數統計分析、Cox(1983)之二元分析(binary analysis)、楊志良(1989)之統計學新論及賴聖耀等人(2004, 2005)之判別分析等統計理論，隨機函數之解釋參數，須為獨立變數，而且須符合常態分佈，方能建立統計分析模式。因此本文以 Juang et al.(2000)之極限狀態函數為基礎，結合液化解釋參數之機率檢定，使其成為更符合多變數統計分析理論之分析模式。根據修正之極限狀態函數，再統計分析目前蒐集較完備之 592 組液化與非液化案例，其中臺灣集集地震液化與非液化案例 288 組，建立具有本土特色之 SPT 試驗值評估土壤液化潛能之分析模式。並分別與 Seed et al.(1985)、Seed et al.(1997 NCEER)及 Tokimatsu & Yoshimi(1983)(簡稱 T&Y 法)等方法所提出之經驗曲線相互比較。亦建立抗液化安全係數  $F_s$  之公式，再以貝氏定理之映射函數，建立抗液化安全係數  $F_s$  與液化機率  $P_L$  之關係式。

## 4.2 修正之極限狀態分析法

極限狀態分析(Limit State)是將一群現地調查資料區分為兩個種類之分析；就本研究而言，是將地震區液化與非液化之現場試驗資料，加以統計分析求得適當之極限狀態函數或分析曲線，以區分液化與非液化兩個種類。所謂液化的極限狀態，就是當土壤承受地震載重時，其抗液化強度可以用 CRR (Cyclic Resistance Ratio)來表示，而地震載重可以用 CSR (Cyclic Stress Ratio)來表示；當  $CSR=CRR$  時即稱其為液化的極限狀態。

Juang et al.(2000)提出之極限狀態概念，就是將地震區液化與非液化之現場試驗資料，繪於圖 4-2 未知的極限狀態平面中，然後其中的液化資料，藉著減少地震載重(路徑 A)或是增加土壤之抗液化強度(路徑

B)，隨著輸入參數的不斷改變，此地層狀況將會由液化轉成非液化，而在轉換的那一瞬間，此狀態稱之為極限狀態，而此時極限反復應力比(Limit CSR)等於反復阻抗比(CRR)。而非液化資料，藉著增加地震載重(路徑 C)或是減少土壤之抗液化強度(路徑 D)，隨著輸入參數的不斷改變，此地層狀況將會由非液化轉成液化，而在轉換的那一瞬間，此狀態稱之為極限狀態，而此時極限反復應力比(Limit CSR)等於反復阻抗比(CRR)。再將圖中每一點資料的極限狀態點相連接起來，即為極限狀態曲線。此極限狀態曲線中的每一點即代表地震時土層所能承受的極限反復應力比(Limit CSR)，此時極限 CSR 恰等於此層土層所能產生的反復阻抗比(CRR)。

為了求解極限狀態曲線，Juang et al.(2000) 發展出一個液化指示函數 LI(Liquefaction indicator function)來分析液化，利用類神經網路來預測液化和非液化的發生，液化指示函數 LI 如下列函數式：

$$LI = f((N_1)_{60}, FCI, \sigma'_{vo}, a_{max}, M_W) \dots\dots\dots (4-1)$$

即由土層之修正至落錘能量為 60%之正規化貫入值 $((N_1)_{60})$ 、細粒料含量指數(FCI)、有效應力 $(\sigma'_{vo})$ 和地震載重因子 $(a_{max}, M_W)$ 之函數，來獲得液化指示函數 LI，藉以判斷土壤是否會液化，並可以下式類神經網路式表示之：

$$LI = f_T \left\{ B_0 + \sum_{k=1}^n \left[ W_K \cdot f_T \left( B_{HK} + \sum_{i=1}^m W_{iK} P_i \right) \right] \right\} \dots\dots\dots (4-2)$$

其中， $f_T(\theta)$  為轉換函數 $=1/(1+e^{-\theta})$ ， $P_i$  為土層及地震之相關參數； $B_0$ ， $B_{HK}$ ， $W_K$  及  $W_{iK}$  由類神經網路訓練求得， $LI=1$ (發生液化)， $LI=0$ (未發生液化)。

上述 Juang et al.(2000)發展之液化指示函數，雖然能涵蓋很多影響液化之相關參數，使其成為多變數函數。唯其液化指示函數之參數，並未經適當之統計分析及機率檢定，因此其發展之液化指示函數，並非唯一解，即在相同之統計資料的情況下，會隨著參數函數之設定不

同，而有不同之液化指示函數，且其極限狀態曲線相差甚多，因此液化指示函數須輔以更多之統計理論加以修正，使其成為更完善之統計模式。

根據 Anderson(1958)多變數統計分析理論、Cox(1983)之二元分析(binary analysis) 理論、楊志良(1989)之統計學新論及賴聖耀等人(2004, 2005)之判別分析等統計理論；隨機函數之解釋參數，須為獨立變數，而且須符合常態分佈，方能建立統計分析模式。如圖 4-3 所示，X 與 Y 兩隨機函數，為獨立變數，而且均符合常態分佈，方能建立統計分析模式；因此本文以 Juang et al.(2000)之極限狀態概念為基礎，結合液化解釋參數之機率檢定，使其成為更符合多變數統計分析理論之分析模式。

就本研究而言，影響液化之相關參數雖然很多，但很多參數並非獨立變數，例如有效覆土壓力( $\sigma'_{vo}$ )，其為土壤抗液化強度參數 SPT-N 值之影響因素之一，亦為地震作用強度參數 CSR 之影響因素之一，即有效覆土壓力與  $(N_1)_{60}$  及 CSR 為相依之變數，不是互相獨立之變數；而地震規模 Mw，其只是影響地震作用強度參數 CSR 之影響因素之一；因此有效覆土壓力( $\sigma'_{vo}$ )及地震規模 Mw 等參數，並非影響液化之獨立變數；雖然有效覆土壓力與地震規模，分別反應了土層之深度及水位與地震作用強度等具實際物理意義之影響，其為土壤液化之重要影響參數，但於計算  $(N_1)_{60}$  及 CSR 時，已將其影響考慮進去，於統計模型中不需重覆考慮；因此真正之獨立變數可分為兩大部份，即地震作用強度參數 CSR 及土壤抗液化強度參數  $(N_1)_{60}$ ，因而液化指示函數可簡化為下式表示之：

$$LI = f(CSR, (N_1)_{60}) \dots\dots\dots (4-3)$$

地震引致土層的作用強度參數，以無因次之反復應力比  $\tau_{av}/\sigma'_{vo}$  表示。根據 Seed et al.(1971, 1985, 1997 NCEER)方法，反復應力比為飽和砂土層因地震作用引起的平均剪應力  $\tau_{av}$ ，與砂土之有效覆土壓力  $\sigma'_{vo}$  之比值，並修正至地震規模 Mw=4.5 以  $CSR_{7.5}$  表示，其計算式如下所示：

$$CSR_{7.5} = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \cdot \frac{\gamma_d}{MSF} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \dots\dots\dots (4-4)$$

其中，

$CSR_{7.5}$ ：修正至地震規模  $M_w=4.5$  之反復應力比。

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

$a_{max}$ ：地表最大水平加速度  $\text{m/sec}^2$ 。

$g$ ：重力加速度， $\text{m/sec}^2$ 。

$\sigma_{vo}$ ：最初垂直覆土壓力， $\text{kg/cm}^2$ 。

$\sigma'_{vo}$ ：有效覆土壓力， $\text{kg/cm}^2$ 。

$\gamma_d$ ：應力折減因數。

$MSF$ ：地震規模影響因素(Magnitude Scaling Factor)。

根據 Liao et al.(1988)所建議之土層深度  $Z$  與  $\gamma_d$  之關係式如下：

$$\begin{aligned} \gamma_d &= 1.0 - 0.00765Z, & Z \leq 9.15 \text{ m} \\ &= 1.174 - 0.0267Z, & 9.15 \text{ m} < Z \leq 23 \text{ m} \dots\dots\dots (4-5) \end{aligned}$$

而 Idriss (1999)所建議之  $MSF$  可表示為地震規模  $M_w$  之函數，其關係式如下：

$$\begin{aligned} MSF &= 34.9(M_w)^{-1.81} & \text{for } M_w \geq 5.75 \\ &= 1.625 & \text{for } M_w < 5.75 \dots\dots\dots (4-6) \end{aligned}$$

有關上述  $\gamma_d$  與  $Z$  之關係式，有許多學者分別提出各種方法修正，唯其中 Liao et al.(1988)所建議  $\gamma_d$  之公式，最接近平均值，亦為美國國家地震工程研究中心 (NCEER,1997) 及廣泛之工程界所使用，本文因而引用為分析依據。另有關上述  $MSF$  之修正方式，亦有許多學者提出

各種方法修正，但目前最常被使用者為 NCEER(1997)及 Idriss (1999) 所建議之 MSF 之公式，唯該兩者之公式皆為 Idriss 所建議，本文因而引用 Idriss (1999) 較新研究之 MSF 修正公式為分析依據。

土壤抗液化之強度參數以 SPT-N 值表示。不過由於 SPT-N 值，在鑽探時，易受有效應力及落錘能量之影響。因此以現場資料和 SPT-N 值評估土壤液化潛能之前，需將 N 值加以修正，本文以 Seed et al.(1985) 建議使用一個新的標準化參數  $(N_1)_{60}$  值其為進行標準貫入試驗時，施加於鑽桿之能量，為理論自由落錘能量之 60% 所量測的貫入值。根據此提議， $(N_1)_{60}$  值應為：

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_n \cdot N \dots\dots\dots (4-7)$$

其中，

$(N_1)_{60}$ ：修正至落錘能量為 60% 之正規化貫入值。

$N_m$ ：落錘能量之修正係數， $N_m = (ER/60)$ ，ER 為落錘能量比(%)。

$C_n$ ：有效覆土壓力之修正係數，依 Liao & Whitman(1986)之建議， $C_n = \sqrt{1/\sigma'_{vo}}$ ， $\sigma'_{vo}$  為有效覆土壓力， $\text{kg/cm}^2$ 。

N：標準貫入試驗值。

由於式(4-7)之  $(N_1)_{60}$  值及式(4-4)之  $CSR_{7.5}$  值皆不符合常態分佈，不能成為液化指示函數之解釋參數。然而經下一節之或然率圖檢定分析結果， $\sqrt{(N_1)_{60}}$  值及  $\ln(CSR_{7.5})$  值皆符合常態分佈。因此以  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  值及  $\ln(CSR_{7.5})$  值作為液化特性之解釋參數。因而液化指示函數可以下式表示之：

$$LI = f_T(\theta) = 1 / \left\{ 1 + \exp(A_j + B_j \cdot (\sqrt{(N_1)_{60}})_{ik} + C_j \cdot (\ln(CSR_{7.5}))_{ik} \right\} \dots (4-8)$$

其中，

$f_T(\theta)$ ：為轉換函數  $= 1/(1 + e^{-\theta})$ ， $\theta$  為符合常態分佈之獨立變數的線性函數， $\theta > 0$  表示液化， $\theta < 0$  表示未液化， $\theta = 0$  表示液化及未液化之



極限狀態。

$i$ ：為現地調查資料編號 ( $i=1, m$ ;  $m$  為現地調查資料數)。

$k$ ：現地調查資料轉變為極限狀態點之第一迴圈程式測試編號 ( $k=1, n$ ;  $n$  為第一迴圈程式測試數)。

$A_j, B_j, C_j$ ：由極限狀態點迴歸分析求得之係數， $j$  為第二迴圈程式測試編號 ( $j=1, l$ ;  $l$  為第二迴圈程式測試數)。

### 4.3 SPT 評估液化潛能之極限狀態模式

#### 4.3.1 液化與非液化案例資料之處理

921 集集大地震後，國科會、港灣技術研究中心與地震工程研究中心等單位，進行廣泛之液化調查研究，蒐集許多液化與非液化案例之 SPT 試驗資料，目前將以上資料彙整蒐集較完備者為 Hwang et al.(2001) 之 288 組資料，本文即以 Hwang et al.(2001)所彙整集集地震液化與非液化案例 288 組 SPT 試驗資料，加上 Liao et al.(1988)所蒐集世界各國液化與非液化案例 278 組及 Boulanger et al.(1997) 所蒐集美國 Loma Prieta 地震液化與非液化案例 26 組，以上共 592 組，為統計分析依據。

唯 Hwang et al.(2001)所彙整臺灣集集地震液化與非液化案例 288 組資料，其落錘能量比(Energy Ratio)皆假設為 60%，未經落錘能量之檢測，本文乃參考亞新工程顧問公司(2000)於臺灣集集地震液化區域最大之員林地區施作落錘能量檢測之結果，如下式所示，將 Hwang et al.(2001) 之 SPT 試驗值，修正至落錘能量為 60%之正規化貫入值。

$$ER=30 \times (Z/11)+50 \quad \text{當土層深度 } Z \leq 11\text{m} \quad \dots\dots\dots (4-9a)$$

$$ER = 80 \quad \text{當土層深度 } Z > 11\text{m} \quad \dots\dots\dots (4-9b)$$

另 Hwang et al.(2001)亦假設臺灣集集地震  $M_L = 4.3$ ,  $M_W = 4.6$  已非常接近  $M_W = 4.5$ ，而未將地震引致土層的作用強度參數反復應力比加以修正，本文亦根據 Idriss (1999)所建議之地震規模影響因素，將

Hwang et al.(2001)之地震引致土層的作用強度參數反復應力比資料，修正至地震規模  $M_w=4.5$ 。

另 Liao et al.(1988)所蒐集世界各國液化與非液化案例 278 組，其中僅有 159 組有細粒料含量  $FC$  之資料，另外 119 組雖有土壤分類之描述，但未有詳細之細粒料含量  $FC$  資料，本文統計分析時將其割捨。

經過上述處理及篩選之液化與非液化案例資料共 473 組，又由於  $FC \geq 40\%$  之資料僅有 11 組，資料太少不適合進行統計分析，因此本文實際進行統計分析之資料為 462 組。

#### 4.3.2 液化解釋參數之機率檢定

欲建立 SPT 評估液化潛能之統計分析模式，首需檢視液化解釋參數是否符合常態分佈。本文以上述 462 組資料進行檢定分析，分別以  $0\% \leq FC \leq 10\%$ 、 $10\% \leq FC \leq 20\%$ 、 $20\% \leq FC \leq 30\%$  與  $30\% \leq FC \leq 40\%$  等四組資料進行或然率檢定。由於式(4-7)之土壤抗液化強度參數  $(N_1)_{60}$  值及式(4-4)之地震強度之參數  $CSR_{7.5}$  值，經或然率圖檢定皆不符合常態分佈，然而這些資料經適當之函數轉換，再經或然率圖檢定，其結果如圖 4-4 與圖 4-5 所示。由圖 4-4 顯示，四種土壤之  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  值於常態或然率圖上皆接近直線，因此 SPT 試驗之  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  值符合常態分佈。由圖 4-5 顯示，四種土壤之反復應力比  $CSR_{7.5}$  值於對數常態或然率圖上亦接近直線，因此反復應力比  $CSR_{7.5}$  亦符合對數常態分佈。若將反復應力比取對數  $\ln(CSR_{7.5})$  即符合常態分佈。

本文因而以  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  為土壤抗液化強度之解釋參數，以  $\ln(CSR_{7.5})$  為地震強度之解釋參數；其物理意義為土壤之抗液化強度與  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  成正比，地震引致土壤液化之作用強度與  $\ln(CSR_{7.5})$  成正比。

#### 4.3.3 尋找極限狀態值

本文以  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  及  $\ln(CSR_{7.5})$  為液化之解釋參數。亦分別以

$0\% \leq FC \leq 10\%$ 、 $10\% \leq FC \leq 20\%$ 、 $20\% \leq FC \leq 30\%$  與  $30\% \leq FC \leq 40\%$  等四組資料，尋找極限狀態之  $\ln(CSR_{7.5})$  及  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  值。根據第二節修正之極限狀態分析，尋找極限狀態之流程圖，如圖 4-6 所示。由圖 4-6 顯示，液化案例資料之極限狀態，藉著不斷減少地震強度， $\Delta CSR_{7.5}$ ，此地層狀況將會由液化轉成非液化，而在轉換的那一瞬間，此狀態之  $\ln(CSR_{7.5})$  及  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  即為極限狀態值；而非液化案例資料之極限狀態，藉著不斷增加地震強度， $\Delta CSR_{7.5}$ ，此地層狀況將會由非液化轉成液化，而在轉換的那一瞬間，此狀態之  $\ln(CSR_{7.5})$  及  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  即為極限狀態值；而此時極限反復應力比  $CSR_{7.5}$  等於反復阻抗比  $CRR_{7.5}$ 。

#### 4.3.4 建立經機率檢定之極限狀態函數

由修正之極限狀態分析，尋找得極限狀態之  $\ln(CRR_{7.5})$  及  $\sqrt{(N_1)_{60}}$ ，經由迴歸分析，如圖 7 所示，可得各種土壤分類之極限狀態函數如下式所示：

$$CRR_{7.5} = f(\sqrt{(N_1)_{60}}) \dots\dots\dots (4-10)$$

因此本文分別建立  $0\% \leq FC \leq 10\%$ 、 $10\% \leq FC \leq 20\%$ 、 $20\% \leq FC \leq 30\%$  與  $30\% \leq FC \leq 40\%$  等四種土壤分類之極限狀態函數，其分析結果如下所示：

##### 模式一： $0\% \leq FC \leq 10\%$ 之液化極限狀態函數

世界各震災區共 592 組資料，分析得  $0\% \leq FC \leq 10\%$  之液化資料 58 組、非液化資料 70 組，由修正之極限狀態分析，得液化極限狀態函數，如下式所示：

$$CRR_{7.5} = \exp(0.4935 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 3.6323) \dots\dots\dots (4-11)$$

其極限狀態值迴歸分析之相關係數  $R^2=0.99$ ；且其於液化與非液化案例分析之正確率分別為 47/58(或 81%)及 60/70(或 86%)。

## 模式二：10% ≤ FC ≤ 20% 之液化極限狀態函數

世界各震災區共 592 組資料，分析得 10% ≤ FC ≤ 20% 之液化資料 77 組、非液化資料 95 組，由修正之極限狀態分析，得液化極限狀態函數，如下式所示：

$$CRR_{7.5} = \exp(0.5296 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 3.7098) \dots\dots\dots (4-12)$$

其極限狀態值迴歸分析之相關係數  $R^2=0.99$ ，且其於液化與非液化案例分析之正確率分別為 64/77(或 83%)及 86/95(或 91%)。

## 模式三：20% ≤ FC ≤ 30% 之液化極限狀態函數

世界各震災區共 592 組資料，分析得 20% ≤ FC ≤ 30% 之液化資料 64 組、非液化資料 32 組，由修正之極限狀態分析，得液化極限狀態函數，如下式所示：

$$CRR_{7.5} = \exp(0.5838 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 3.8325) \dots\dots\dots (4-13)$$

其極限狀態值迴歸分析之相關係數  $R^2=0.99$ ，且其於液化與非液化案例分析之正確率分別為 62/64(或 97%)及 26/32(或 81%)。

## 模式四：30% ≤ FC ≤ 40% 之液化極限狀態函數

世界各震災區共 592 組資料，分析得 30% ≤ FC ≤ 40% 之液化資料 37 組、非液化資料 29 組，由修正之極限狀態分析，得液化極限狀態函數，如下式所示：

$$CRR_{7.5} = \exp(0.6723 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 4.0488) \dots\dots\dots (4-14)$$

其極限狀態值迴歸分析之相關係數  $R^2=0.99$ ，且其於液化與非液化案例分析之正確率分別為 35/37(或 95%)及 25/29(或 86%)。

為了使讀者瞭解液化極限狀態函數與液化及非液化案例之關係，將 0% ≤ FC ≤ 10%、10% ≤ FC ≤ 20%、20% ≤ FC ≤ 30% 與 30% ≤ FC ≤ 40% 等四組極限狀態函數，分別繪製於圖 4-8~圖 4-11 液化及非液化案例圖

上，並列於表 4-1。亦分別以 FC=5%、15%、25%與 35%代表四組土壤之極限狀態曲線繪製於圖 4-12 比較，將圖 4-12 四組極限狀態曲線，再進行統計迴歸，則抗液化強度  $CRR_{7.5}$  與  $(N_1)_{60}$  及細粒料含量 FC 之關係如下式：

$$CRR_{7.5} = \exp[(0.487705 + 0.000666 \cdot FC + 0.000131 \cdot FC^2) \sqrt{(N_1)_{60}} - (3.626835 - 0.000158 \cdot FC + 0.000347 \cdot FC^2)] \quad \dots (4-15)$$

其迴歸係數  $R^2=0.99$ 。

由圖 4-12 極限狀態曲線互相比較可發現，在相同之  $(N_1)_{60}$ ，抗液化強度反復應力比  $CRR_{7.5}$  之大小分別為：30% ≤ FC ≤ 40% 最大；20% ≤ FC ≤ 30% 次之；10% ≤ FC ≤ 20% 再次之；0% ≤ FC ≤ 10% 則最小；與實際之土壤情況極為吻合。但於  $(N_1)_{60} \leq 5$  時，其各種土壤之抗液化強度反復應力比  $CRR_{7.5}$  皆相當接近。

以上述極限狀態函數分析液化潛能，其土壤之抗液化強度， $CRR_{7.5}$ ，以式(4-15)計算，而地震引致土層之作用強度， $CSR_{7.5}$ ，以式(4-4)計算，則抗液化之安全係數，Fs，如下所示：

$$F_s = CRR_{7.5} / CSR_{7.5} \quad \dots (4-16)$$

## 4.4 極限狀態模式之驗證與比較

為了驗證本文發展之極限狀態模式，本文發展之模式分別與未經機率檢定之極限狀態函數及傳統相關經驗法比較，並以物理意義作說明。為了探討及比較 FC 對抗液化強度之影響，本文以細粒料含量 FC 與  $\Delta(N_1)_{60}$  之關係來表示。另為了進一步驗證本文極限狀態模式之適用性，本文以臺中港區 921 地震液化分析作實際案例說明。

### 4.4.1 與未經機率檢定之極限狀態函數比較

為了探討解釋參數之選擇對極限狀態函數之影響，本文選擇兩組

未經機率檢定之參數 $((N_1)_{60}, \ln(CSR_{7.5}))$ 及 $((N_1)_{60}, CSR_{7.5})$ 為解釋參數，此兩組解釋參數皆不符合常態分佈。其中一組解釋參數 $((N_1)_{60}, \ln(CSR_{7.5}))$ 為 Liao et al.(1988)所提出，另一組解釋參數 $((N_1)_{60}, CSR_{7.5})$ 為一般型式之參數。分別以本文相同之資料庫進行極限狀態分析，其液化極限狀態函數如表 4-2a 及表 4-2b 所示：

由表 4-1、表 4-2a 及表 4-2b 之比較可發現：在相同之統計資料的情況下，會隨著選用參數及函數型式之不同，而有不同之極限狀態函數，且其預測之正確率亦有些差異；雖然不同函數預測之正確率會有些差異，但並非其中某函數於各種土壤預測之正確率皆會最高，而且本文三種函數預測之平均正確率皆相當接近，分別為 84.5%、86.9%、86.9%，因此傳統上以預測正確率之高低，為選用參數及函數型式之根據，並非為最適當之方法，因而以適當之機率檢定選用參數及函數型式，應為較合適之方式。

為了進一步比較未經適當之機率檢定與經適當之機率檢定，其所發展之極限狀態曲線之差異性，將表 4-2a 劃於圖 4-13，表 4-2b 劃於圖 4-14；由圖 4-12 至圖 4-14 可發現：不同液化解釋參數之型式，其有不同之液化判別曲線，其中以 $((N_1)_{60}, \ln(CSR_{7.5}))$ 為解釋參數之判別曲線彎曲度最大，以 $((N_1)_{60}, CSR_{7.5})$ 為解釋參數之判別曲線彎曲度最小，而經適當機率檢定選定之 $(\sqrt{(N_1)_{60}}, \ln(CSR_{7.5}))$ ，其判別曲線彎曲度較適中；由三種解釋參數於各種 $(N_1)_{60}$ 值之影響亦可發現，於極大及極小區間之 $(N_1)_{60}$ 值時，三種解釋參數之抗液化強度 $CRR_{7.5}$ 相差甚多，於中間區間之 $(N_1)_{60}$ 值時，三種解釋參數之抗液化強度 $CRR_{7.5}$ 相當接近，由此可知解釋參數之選擇，對各類低強度及高強度土壤之影響較大，對各類中強度土壤之影響較小。

#### 4.4.2 與傳統相關經驗法之比較

SPT 評估液化潛能之方法，傳統上較偏重於經驗判斷所推導出之相關經驗式或相關經驗曲線，其中以 Seed et al.(1985)、Seed et al.(1997

NCEER)之相關經驗曲線，如圖 4-1 所示，及 T&Y(1983)之相關經驗曲線，如圖 4-15 所示，較為工程界所接受及使用。由於其相關曲線包括細粒料含量  $FC$  之影響，本文以  $FC = 5\%$ 、 $FC = 15\%$ 、 $FC = 25\%$  與  $FC = 35\%$  等 Seed et al.(1985)、Seed et al.(1997 NCEER)及 T&Y(1983)之相關經驗曲線，分別與本文建立之極限狀態模式相互比較，比較結果如圖 4-16~圖 4-19 所示，其中 T&Y(1983)方法中之剪應變振幅係數  $C_s$ ，其值介於 80~90 之間，本文取  $C_s$  之中間值 85 與本文模式相互比較。

由圖 4-1、圖 4-12 與圖 4-15 相互比較可發現，三種模式之細粒料含量對抗液化強度之影響有顯著的不同：本文極限狀態模式約於  $(N_1)_{60} \leq 5$ ，其各種細粒料含量土壤之抗液化強度  $CRR_{7.5}$  皆相當接近，其餘之  $(N_1)_{60}$  值，其細粒料含量愈高之土壤，其抗液化強度  $CRR_{7.5}$  亦愈大，且隨著  $(N_1)_{60}$  值之增大，其細粒料含量之影響亦增大；而 Seed et al.(1985)、Seed et al.(1997 NCEER)及 T&Y(1983)簡易經驗曲線，無論  $(N_1)_{60}$  值之大小，其細粒料含量愈高之土壤，其抗液化強度  $CRR_{7.5}$  亦愈大。

由圖 4-16  $FC = 5\%$  淨砂模式之比較可發現：於  $(N_1)_{60} \leq 10$  時，本文之極限狀態模式與 T&Y(1983)及 Seed et al.(1997 NCEER)之曲線相當接近；於  $10 \leq (N_1)_{60} \leq 28$  時，本文模式稍微大於 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)之曲線；於  $28 \leq (N_1)_{60} \leq 40$  時，本文模式，介於 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線之間；於  $(N_1)_{60} > 40$  時，本文模式小於 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)與 T&Y(1983)曲線甚多。

由圖 4-17  $FC = 15\%$  粉土質砂模式之比較可發現：於  $(N_1)_{60} \leq 5$  時，本文模式介於 Seed et al.(1985)曲線及 Seed et al.(1997 NCEER)曲線之間；於  $5 \leq (N_1)_{60} \leq 22$  時，本文模式與 Seed et al.(1985)及 Seed et al.(1997 NCEER)之曲線接近；於  $22 \leq (N_1)_{60} \leq 32$  時，本文模式介於 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線之間；於  $(N_1)_{60} > 32$  時，本文模式小於 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)與 T&Y(1983)曲線甚多。

由圖 4-18  $FC = 25\%$  粉土質砂模式之比較可發現：於  $(N_1)_{60} \leq 11$  時，本

文模式小於 Seed et al.(1985)、Seed et al.(1997 NCEER)與 T&Y(1983)之曲線;於  $11 \leq (N_1)_{60} \leq 33$  時,本文模式介於 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線之間;於  $(N_1)_{60} > 33$  時,本文模式小於 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)與 T&Y(1983)曲線甚多。

由圖 4-19  $FC = 35\%$  粉土質砂模式之比較可發現:除了於  $14 \leq (N_1)_{60} \leq 20$  時,本文模式與 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)曲線相當接近外;其餘  $(N_1)_{60}$  時,本文之模式與 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)與 T&Y(1983)曲線相差甚多。

整體而言:於  $(N_1)_{60} \leq 10$  時,除了於  $FC = 5\%$  淨砂模式外,本文  $FC = 15\%$ 、 $25\%$ 、 $35\%$  等模式之抗液化強度皆小於 Seed et al.(1997 NCEER)與 T&Y(1983)曲線;於  $10 \leq (N_1)_{60} \leq 30$  時,本文模式與 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)之曲線接近;於  $(N_1)_{60} > 30$  時,由於本文模式之曲線較平直,本文模式小於 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)與 T&Y(1983)曲線甚多。

於高  $(N_1)_{60}$  值時,傳統相關經驗曲線之上升速率大於本文建議之曲線,其主要原因為大部份經驗方法皆沿續 Seed(1983, 1985)之觀念,假設  $(N_1)_{60} > 30$  時土壤不易液化,因此以經驗判斷之抗液化強度曲線,於高  $(N_1)_{60}$  值時上升速率加大。但經 921 地震於近斷層之霧峰、南投等地區(Lin et al.2002)與 1988 年亞美尼亞地震案例中(Yegian et al.2000),發現高  $(N_1)_{60}$  值土壤或礫石土層於極大之地表加速度時,亦有液化現象,因此假設  $(N_1)_{60} > 30$  時土壤不易液化之觀念,可能會漸漸被修正或需進一步研究。另由 Juang et al.(2000)之危險度分析法,及 Liao et al.(1988)之邏輯分析法,皆可發現統計分析結果,高  $(N_1)_{60}$  值之曲線僅緩和上升。由於曲線在某  $(N_1)_{60}$  值以後,立即急速上升,是人為經驗判斷使然,並不符合統計原理,因而本文建議之抗液化強度曲線,是經較嚴謹之統計分析結果,並不刻意加以修正,因此於高  $(N_1)_{60}$  值時,抗液化強度曲線上升速率並未特意加大。



#### 4.4.3 本文模式之物理意義

為了探討本文極限狀態模式之物理意義，將本文發展之極限狀態函數，改繪製於水平座標為 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ ，及垂直座標為 $\ln(CSR_{7.5})$ 或 $\ln(CRR_{7.5})$ 之圖 4-20。由圖 4-20 顯示，FC=5%、15%、25%、35%等極限狀態曲線皆變為直線，亦即 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 與 $\ln(CRR_{7.5})$ 成線性關係；其物理意義為土壤之抗液化強度 $\ln(CRR_{7.5})$ 與 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 成正比，地震引致土壤液化之作用強度與 $\ln(CSR_{7.5})$ 成正比。其中地震引致土壤液化之作用強度與 $\ln(CSR_{7.5})$ 成正比，就如同世界各國對震災之認定，大多以 $\ln(a_{\max})$ 為地震震度級數，亦即地震震度級數與 $\ln(a_{\max})$ 成正比，因此土壤之抗液化強度亦以 $\ln(CRR_{7.5})$ 表示。另根據 Meyerhof(1958)之研究結果，土壤之相對密度 $Dr=21\sqrt{N/(\sigma'_{vo}+0.7)}$ ，Yoshimi et al.(1994)之研究結果為 $Dr=16\sqrt{N_1}$ ，由此顯示土壤之相對密度與 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 成正比；因此土壤之抗液化強度 $\ln(CRR_{7.5})$ 與 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 成正比，就表示土壤之抗液化強度 $\ln(CRR_{7.5})$ 與土壤之相對密度 $Dr$ 成正比。

#### 4.4.4 細粒料含量 FC 與 $\Delta(N_1)_{60}$ 之關係

為了探討及比較 FC 對抗液化強度之影響，本文以細粒料含量 FC 與 $\Delta(N_1)_{60}$ 之關係來表示。由於本文之極限狀態模式，其 FC 對抗液化強度曲線之影響為非線性，如式(4-15)所示，因此本文僅分別以 $(N_1)_{60}$ 為 10 及 20 時之 $\Delta(N_1)_{60}$ 變化與其他方法比較，其細粒料含量 FC 與 $\Delta(N_1)_{60}$ 之關係，如圖 4-21 所示。由圖 4-21 顯示，各方法中，以 T&Y(1983)法之 FC 對抗液化強度之影響最大，Seed et al.(1985，NCEER 1997)法次之，本文之極限狀態模式最小。

#### 4.4.5 臺中港區液化分析比較說明

為了進一步驗證本文極限狀態模式之適用性，本文以臺中港區 921 地震液化分析作比較說明。臺中港區面積約 4000 公頃，921 地震時港區除北碼頭抽砂回填區、北突堤沖積土層造成較嚴重液化，及西碼頭

之北填方區中度液化外，其餘大部份地區液化程度極為輕微。本文搜集臺中港區現有鑽探資料 135 孔，分別以本文極限狀態模式、Seed et al.( NCEER 1997)法及 T&Y(1983)法，以 921 地震時之地震規模  $M_w=4.6$ ，及臺中港區之地表最大加速度  $A_{max}=0.163g$ ，進行液化分析比較，其分析結果分別如圖 4-22 至圖 4-24 所示。由圖 4-22 之本文極限狀態模式分析結果顯示，北碼頭及北突堤為嚴重液化區，即圖中之黑色區域；西碼頭及南碼頭為中度液化區，即圖中之柵狀區域；其餘大部份地區液化程度極為輕微。此分析結果與 921 地震臺中港區液化災害狀況相當吻合。而由圖 4-23 之 Seed et al.( NCEER 1997)法分析結果，僅北突堤為嚴重液化區，北碼頭及西碼頭為皆為中度液化區；由圖 4-24 之 T&Y(1983)法分析結果，北碼頭、北突堤及西碼頭皆為中度液化區。因此 Seed et al.( NCEER 1997)法及 T&Y(1983)法之分析結果，與 921 地震臺中港區液化災害狀況有些不符。探討其原因，主要是 921 地震臺中港區嚴重液化區之噴砂，其細粒料含量  $FC$  高達 30-80%，而 T&Y(1983)法及 Seed et al.( NCEER 1997)法，皆高估了高細粒料含量之沉泥質砂的抗液化強度，致使其分析結果低估了液化災害之程度。而本文之極限狀態模式，除了是以較嚴謹之統計方法建立之模式，亦以包含 921 地震液化案例資料，經回饋分析所建立具有本土特色之液化評估方法，因此其分析結果與 921 地震臺中港區液化災害狀況較為吻合。

## 4.5 液化機率模式

以極限狀態模式分析液化潛能，僅能計算土壤抗液化之安全係數， $F_s$ 。本文進一步以貝氏定理之映射函數 (Juang et al., 2003) 分析土壤液化機率，其分析方法如下式所示：

$$P_{LB} = \frac{f_L(F_s)}{f_L(F_s) + f_{NL}(F_s)} \dots\dots\dots (4-17)$$

式中：

$P_{LB}$  : 貝氏定理分析之土壤液化機率。

$f_L(F_S)$  : 為液化案例安全係數  $F_S$  之機率密度函數。

$f_{NL}(F_S)$  : 為非液化案例安全係數  $F_S$  之機率密度函數。

本文以式(4-15)之極限狀態模式，計算液化及非液化案例之  $F_S$ ，這些資料經或然率圖檢定，其結果如圖 4-25 與圖 4-26 所示。由圖 4-25 液化案例安全係數  $F_S$  之或然率圖檢定顯示，液化案例之  $\sqrt{F_S}$  值於常態或然率圖上接近直線，因此液化案例之  $\sqrt{F_S}$  值符合常態分佈，其安全係數之機率密度函數， $f_L(F_S)$ ，可表示如下式：

$$f_L(F_S) = \frac{1}{0.201 * \sqrt{8\pi * F_S}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\sqrt{F_S} - 0.765}{0.201} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (4-18)$$

另由圖 4-26 非液化案例安全係數  $F_S$  之或然率圖檢定顯示，非液化案例之  $F_S$  值於對數常態或然率圖上亦接近直線，因此非液化案例之  $F_S$  值亦符合對數常態分佈，其安全係數之機率密度函數， $f_{NL}(F_S)$ ，則可表示如下式：

$$f_{NL}(F_S) = \frac{1}{0.537 * F_S * \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(F_S) - 0.549}{0.537} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (4-19)$$

將式(4-18)與式(4-19)代入式(4-17) 貝氏定理之映射函數，分析液化及非液化案例，獲得  $(F_S, P_{LB})$ ，再以迴歸分析建立抗液化安全係數與液化機率之關係，如式(20) ( $R^2=0.99$ )及圖 4-27 所示：

$$P_{LB} = \frac{1}{1 + 0.6(F_S)^3 + 0.4(F_S)^7} \dots\dots\dots (4-20)$$

由圖 4-27 顯示，以極限狀態模式，建立之抗液化安全係數與液化機率關係，當安全係數  $F_S=1$  時，液化機率  $P_{LB}=0.5$ ；當安全係數  $F_S>1$

時，液化機率  $P_{LB} < 0.5$ ；當安全係數  $F_S < 1$  時，液化機率  $P_{LB} > 0.5$ ；而且安全係數  $F_S$  與液化機率  $P_{LB}$  之關係，並非線性之關係，而是 S 型式之關係；即當  $F_S$  於較大(約  $F_S > 1.5$ )及較小(約  $F_S < 0.5$ )時，液化機率  $P_{LB}$  變化速度較慢；當  $F_S$  於 1 附近時(約  $0.5 < F_S < 1.5$ )時，液化機率  $P_{LB}$  變化速度較快。

## 4.6 液化危害度分析

依上述液化評估法分析，進行液化潛能評估時，所獲得的結果僅為各鑽孔地表下某一深度之砂土層是否液化，對於整個鑽孔而言，是否為液化區仍無定論。因此，為了涵蓋土層各深度之液化情形及更深入探討整個地區之液化潛能分佈圖，本文再分別以 Iwasaki 等人(1982)安全係數深度加權法，如式(4-21)及表 4-1 所示；及賴聖耀、謝明志(1996)液化機率深度加權法，如式(4-22)及表 4-2 所示，分別分析港區各種模擬地震之液化危害度。

$$IL = \int_0^{20} [F(Z)] \cdot W(z) \cdot dz \dots\dots\dots(4-21)$$

上式中，

IL 為液化潛能指數，介於 0~100 之間

$F(Z) = 1 - F_L(Z)$                       for  $F_L(Z) < 1.0$

$F(Z) = 0$                                       for  $F_L(Z) > 1.0$

$W(z)$ : 為權重函數， $z$  為深度(公尺)。

$W(z) = 10 - 0.5z$ 。

表 4-3 液化損害程度定義(Iwasaki 等人, 1982)

| 液化損害程度分類 | 液化潛能指數, IL      | 液化損害程度 |
|----------|-----------------|--------|
| I        | $0 < IL < 5$    | 輕微液化   |
| II       | $5 < IL < 15$   | 中度液化   |
| III      | $15 < IL < 100$ | 嚴重液化   |

$$P_{LW} = \frac{\int_0^{20} P_L(z) \cdot W(z) \cdot dz}{\int_0^{20} W(z) \cdot dz} \dots\dots\dots (4-22)$$

上式中,

$P_L(z)$ : 為各孔各個深度之液化機率, 介於 0~1 之間

$P_{LW}$ : 為各孔之液化危險度, 介於 0~1 之間

$W(z)$ : 為權重函數,  $z$  為深度(公尺)。  $W(z)=1-0.05z$

表 4-4 液化損害程度定義(港研中心, 2005)

| 液化損害程度分類 | 液化機率指數, $P_{LW}$     | 液化損害程度 |
|----------|----------------------|--------|
| I        | $0 < P_{LW} < 0.2$   | 輕微液化   |
| II       | $0.2 < P_{LW} < 0.4$ | 中度液化   |
| III      | $0.4 < P_{LW} < 1$   | 嚴重液化   |

## 4.7 港區液化危害度分析結果

### 4.7.1 臺中港區附近之斷層與歷史災害地震

台灣位處於環太平洋地震帶西側，受到歐亞大陸與菲律賓海板塊間的碰撞與擠壓作用，導致台灣地區地震頻繁，自古以來常發生大地震，災情慘重者不少。根據鄭世楠和葉永田(2002)的統計結果顯示，造成百人以上死亡的重大災害地震有 14 次，其分佈圖如圖 4-28 所示，其中超過千人死亡的有 4 次：分別是 1848 年彰化地震(1,030 人死亡)、1906 年梅山地震(1,258 人死亡)、1935 年新竹—台中地震(3,276 人死亡)與 1999 年集集地震(2,444 人死亡)。而超過千人死亡的 4 次地震中，有 3 次地震發生於中部地區，分別由彰化斷層、屯子腳斷層、車籠埔斷層所引發而成，而此三個斷層亦為影響台中港之重要活動斷層，其分佈圖如圖 4-29 所示。

### 4.7.2 臺中港液化危害度分析結果

本文搜集臺中港區現有鑽探資料 135 孔，共約 1800 筆 N 值資料，分別以①1935 年新竹、臺中裂震，地震規模  $M_L=4.1$ ，臺中港區之  $PGA=0.15g$ ；②1999 年集集大地震，地震規模  $M_L=4.3$ 、 $M_w=4.6$ ，臺中港區之  $PGA=0.16g$ ；③1848 年彰化地震，地震規模  $M_L=4.0$ 、 $M_w=4.2$ ，臺中港區之  $PGA=0.23g$ ；相當於新訂耐震設計規範乙區地震強度  $PGA=0.23g$ ；④新訂耐震設計規範甲區地震強度  $A_{max}=0.33g$ ，相當於彰化斷層發生地震規模  $M_L=4.5$  時臺中港區之地表最大加速度；等三種地震條件，並利用標準貫入試驗(SPT)之土層調查資料來評估臺中港區沖積土層液化危害度。

由圖 4-22 及圖 4-30 至圖 4-32 之整體分析結果顯示：臺中港受 1935 年地震地表最大加速度  $0.15g$  作用，港區除 3 號碼頭抽砂回填區造成嚴重液化現象外，其餘大部份地區液化程度極為輕微；臺中港受

921 地震地表最大加速度  $0.16g$  作用，港區除 1 至 4A 碼頭抽砂回填區及 9 至 11 號碼頭沖積土層造成較嚴重液化現象外，其餘大部份地區液化程度極為輕微；此評估結果與 921 地震臺中港液化災損相當符合。如果臺中港遭受 1848 年彰化地震，臺中港區之 PGA 相當於新訂耐震設計規範乙區  $PGA=0.23g$ ，港區約有一半會發生嚴重液化災害。如果臺中港不幸遭受耐震設計規範甲區最大加速度  $0.33g$ ，即相當於彰化斷層發生地震規模  $M_w>4.6$  時臺中港區之震度，如此強烈之地震侵襲時，則大部份港區均會發生嚴重液化災害。

#### 4.7.3 各港區液化之臨界地表加速度

本文搜集現有鑽探資料，台北港區 74 孔，臺中港區 135 孔，高雄港區 129 孔，共約 5000 筆  $N$  值資料，以本土化液化機率法與賴、謝(1996)深度加權法分析，即分別以各種模擬地震反覆試算，推求各港區液化之臨界地表加速度，分析結果，如圖 4-33 至圖 4-35 所示。

由圖 4-33 台北港區分析結果顯示：地震規模  $M_w=4.5$ ，臺北港區之地表最大加速度  $A_{max}=0.15g$  時，臺北港區極大部份地區屬於輕微液化災害風險，液化之可能性很低，僅極小部份地區屬於中度液化，因此  $A_{max}=0.15g$  可視為臺北港區液化之臨界地表加速度。由圖 4-34 臺中港分析結果顯示：地震規模  $M_w=4.0$ ，臺中港區之地表最大加速度  $A_{max}=0.13g$  時，臺中港區極大部份地區屬於輕微液化災害風險，液化之可能性很低，僅極小部份地區屬於中度液化，因此  $A_{max}=0.13g$  可視為臺中港區液化之臨界地表加速度。由圖 4-32 高雄港區分析結果顯示：地震規模  $M_w=6.7$ ，高雄港區之地表最大加速度  $A_{max}=0.10g$  時，高雄港區極大部份地區屬於輕微液化災害風險，液化之可能性很低，僅極小部份地區屬於中度液化，因此  $A_{max}=0.10g$  可視為高雄港區液化之臨界地表加速度。

## 4.8 小結

1. 本文提出液化解釋參數之機率檢定，使液化分析參數之選擇有所依循，亦使極限狀態分析法，成為更符合多變數統計分析理論之分析模式。
2. 本文以修正之極限狀態分析法，建立抗液化強度  $CRR_{7.5}$  與 SPT 試驗值  $(N_1)_{60}$  及細粒料含量  $FC$  之關係式，亦以貝氏定理之映射函數，建立抗液化安全係數  $F_s$  與液化機率  $P_L$  之關係式。所建立之液化分析模式，不但有傳統上評估土壤是否可能液化之功能，更可進一步評估土壤可能發生液化之機率，提供液化分析上更多之資訊。
3. 由細粒料含量與抗液化強度之比較可發現：本文極限狀態模式於  $(N_1)_{60} \leq 5$  時，其各種細粒料含量土壤之抗液化強度  $CRR_{7.5}$  皆相當接近， $(N_1)_{60} > 5$  時，其細粒料含量愈高之土壤，其抗液化強度  $CRR_{7.5}$  亦愈大；而 Seed et al.(1985)、Seed et al.(1997 NCEER)及 T&Y(1983)簡易經驗曲線，無論  $(N_1)_{60}$  值之大小，其細粒料含量愈高之土壤，其抗液化強度  $CRR_{7.5}$  亦愈大。
4. 由本文所建立之極限狀態模式，與 Seed et al.(1985)、Seed et al.(1997 NCEER)及 T&Y(1983)經驗曲線比較可發現：本文模式之曲線較平直，Seed et al.(1985)、Seed et al.(1997 NCEER)與 T&Y(1983)曲線較彎曲。於  $(N_1)_{60} \leq 10$  時，除了於  $FC = 5\%$  淨砂模式外，本文  $FC = 15\%$ 、 $25\%$ 、 $35\%$  等模式之抗液化強度皆小於 Seed et al.(1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線；於  $10 < (N_1)_{60} < 30$  時，本文模式與 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)之曲線接近；於  $(N_1)_{60} > 30$  時，由於本文模式之曲線較平直，本文模式小於 Seed et al.(1985, 1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線甚多。
5. 本文所建立之極限狀態模式，較傳統相關經驗曲線更具有物理意義，即地震引致土壤液化之作用強度與  $\ln(CSR_{7.5})$  成正比，土壤之抗



液化強度  $\ln(CRR_{7.5})$  與  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  成正比，亦表示土壤之抗液化強度  $\ln(CRR_{7.5})$  與土壤之相對密度  $D_r$  成正比。

6. 由本土化液化模式評估各港區液化之臨界地表加速度顯示：台北港之液化之臨界地表加速度為 0.15g，台中港之液化之臨界地表加速度為 0.13g，高雄港之液化之臨界地表加速度為 0.10g。

表 4-1 經機率檢定之各種極限狀態函數之比較( $\sqrt{(N_1)_{60}}$  ,  $\ln(CSR_{7.5})$ )

| 土壤分類                     | 資料<br>數目 | 液化之極限狀態函數                                                   | 液化<br>正確率 | 非液化<br>正確率 |
|--------------------------|----------|-------------------------------------------------------------|-----------|------------|
| $0\% \leq FC \leq 10\%$  | 128      | $CRR_{7.5} = \exp(0.4935 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 3.6323)$ | 81%       | 86%        |
| $10\% \leq FC \leq 20\%$ | 172      | $CRR_{7.5} = \exp(0.5296 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 3.7098)$ | 83%       | 91%        |
| $20\% \leq FC \leq 30\%$ | 96       | $CRR_{7.5} = \exp(0.5838 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 3.8325)$ | 97%       | 81%        |
| $30\% \leq FC \leq 40\%$ | 66       | $CRR_{7.5} = \exp(0.6723 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 4.0488)$ | 95%       | 86%        |

表 4-2a 未經機率檢定之各種極限狀態函數之比較( $(N_1)_{60}$  ,  $\ln(CSR_{7.5})$ )

| 土壤分類                     | 資料<br>數目 | 液化之極限狀態函數                                             | 液化<br>正確率 | 非液化<br>正確率 |
|--------------------------|----------|-------------------------------------------------------|-----------|------------|
| $0\% \leq FC \leq 10\%$  | 128      | $CRR_{7.5} = \exp(0.06686 \cdot (N_1)_{60} - 2.8396)$ | 84%       | 76%        |
| $10\% \leq FC \leq 20\%$ | 172      | $CRR_{7.5} = \exp(0.08020 \cdot (N_1)_{60} - 2.9875)$ | 96%       | 87%        |
| $20\% \leq FC \leq 30\%$ | 96       | $CRR_{7.5} = \exp(0.09177 \cdot (N_1)_{60} - 3.0515)$ | 98%       | 81%        |
| $30\% \leq FC \leq 40\%$ | 66       | $CRR_{7.5} = \exp(0.11230 \cdot (N_1)_{60} - 3.2703)$ | 94%       | 79%        |

表 4-2b 未經機率檢定之各種極限狀態函數之比較( $(N_1)_{60}$  ,  $CSR_{7.5}$ )

| 土壤分類                     | 資料<br>數目 | 液化之極限狀態函數                                        | 液化<br>正確率 | 非液化<br>正確率 |
|--------------------------|----------|--------------------------------------------------|-----------|------------|
| $0\% \leq FC \leq 10\%$  | 128      | $CRR_{7.5} = 0.01031 \cdot (N_1)_{60} + 0.01505$ | 86%       | 77%        |
| $10\% \leq FC \leq 20\%$ | 172      | $CRR_{7.5} = 0.01270 \cdot (N_1)_{60} + 0.00815$ | 83%       | 89%        |
| $20\% \leq FC \leq 30\%$ | 96       | $CRR_{7.5} = 0.01398 \cdot (N_1)_{60} + 0.00435$ | 97%       | 81%        |
| $30\% \leq FC \leq 40\%$ | 66       | $CRR_{7.5} = 0.01525 \cdot (N_1)_{60} + 0.00504$ | 92%       | 90%        |

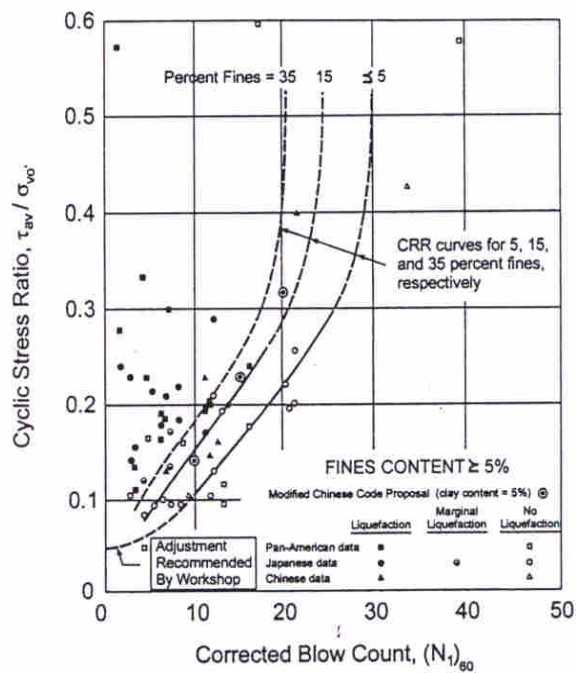


圖 4-1 NCEER(1997)建議細粒料含量  $FC \leq 5\%$  曲線之修正值  
(修正 Seed et al.1985)

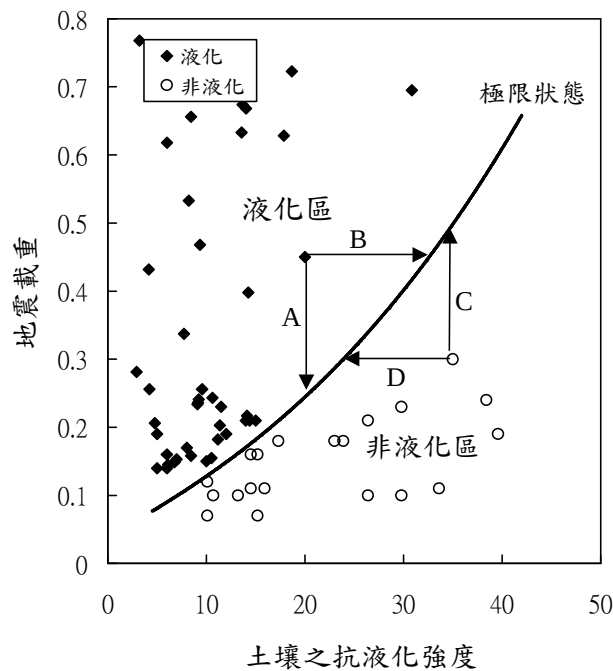


圖 4-2 液化之極限狀態分析示意圖

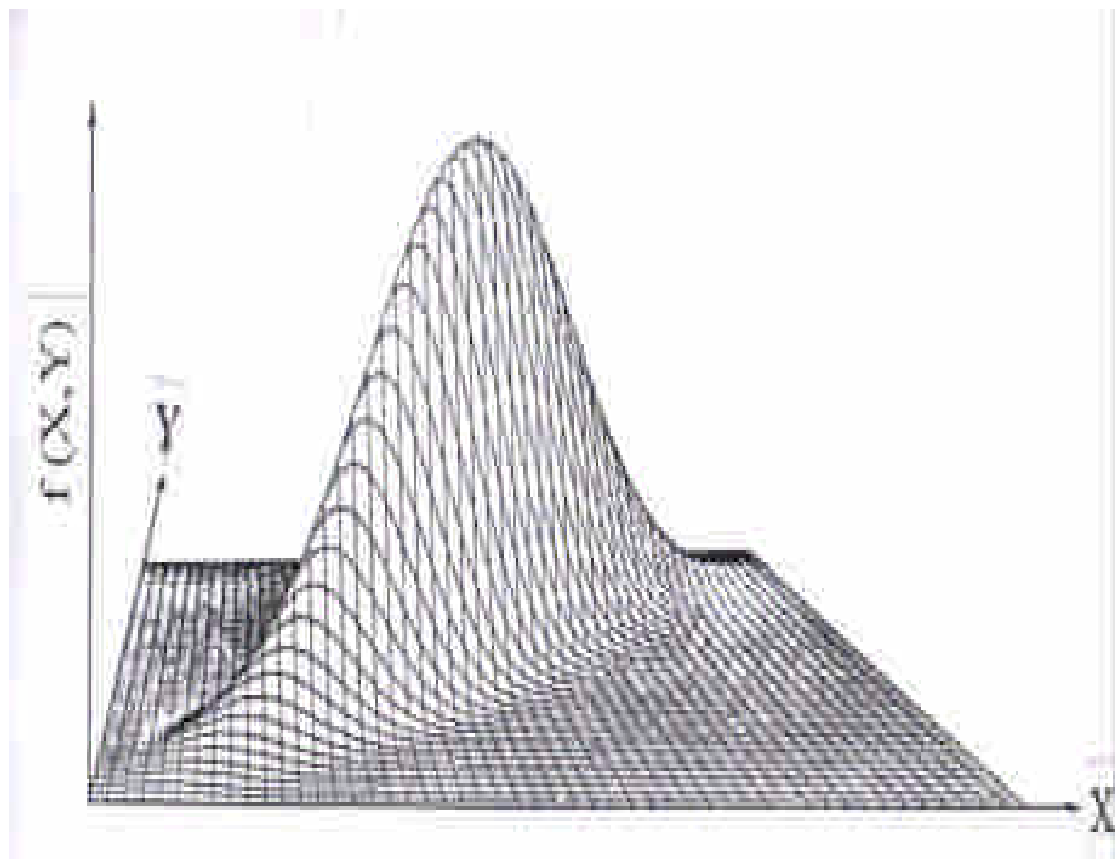


圖 4-3  $X$  與  $Y$  均為隨機函數之示意圖(楊，1899)

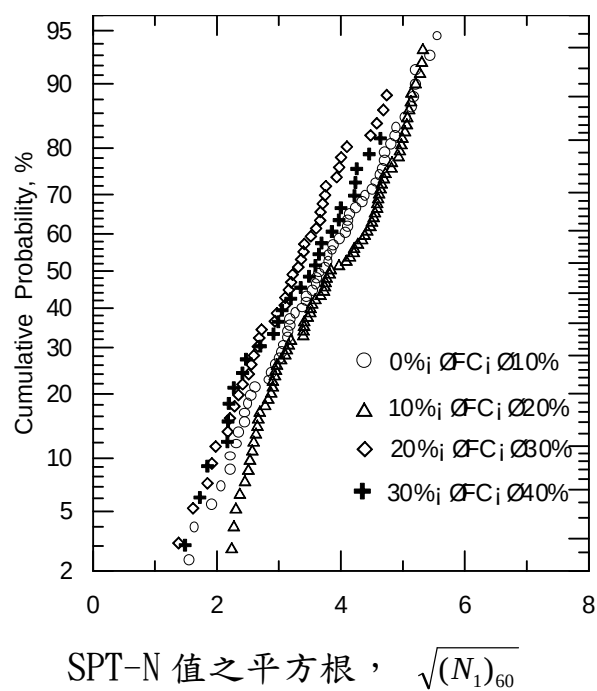


圖 4-4 SPT 試驗  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  值繪於常態或然率圖上

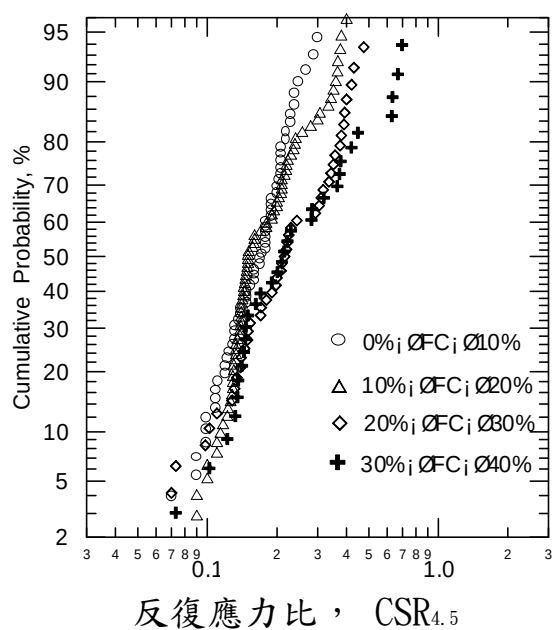


圖 4-5  $CSR_{4.5}$  值繪於對數常態或然率圖上

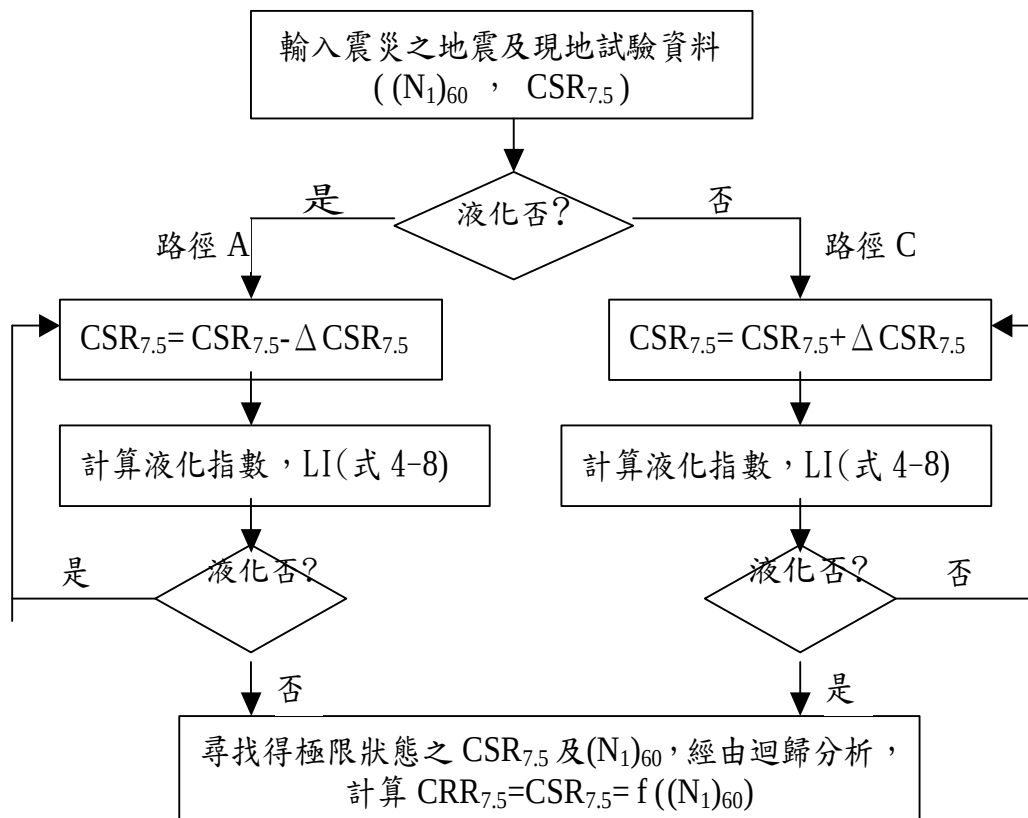


圖 4-6 尋找液化極限狀態值之流程圖

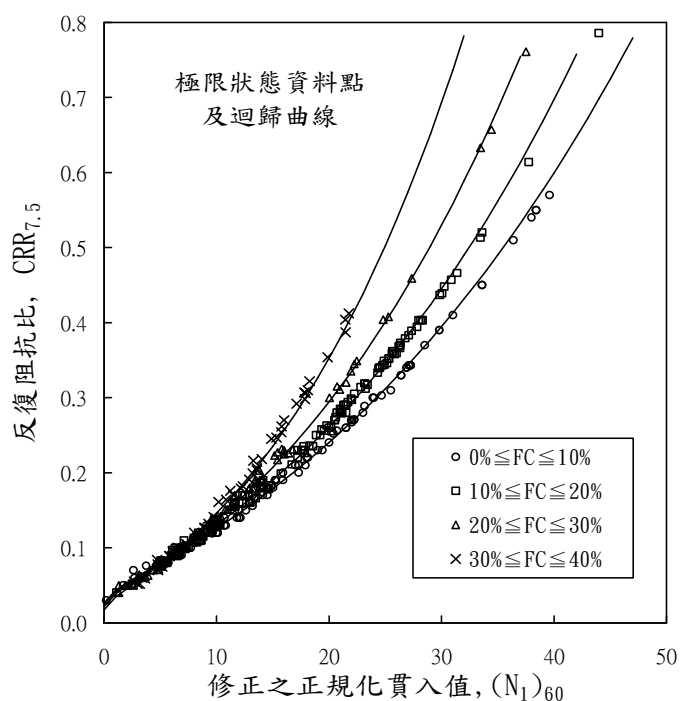


圖 4-7 液化極限狀態資料點及迴歸曲線

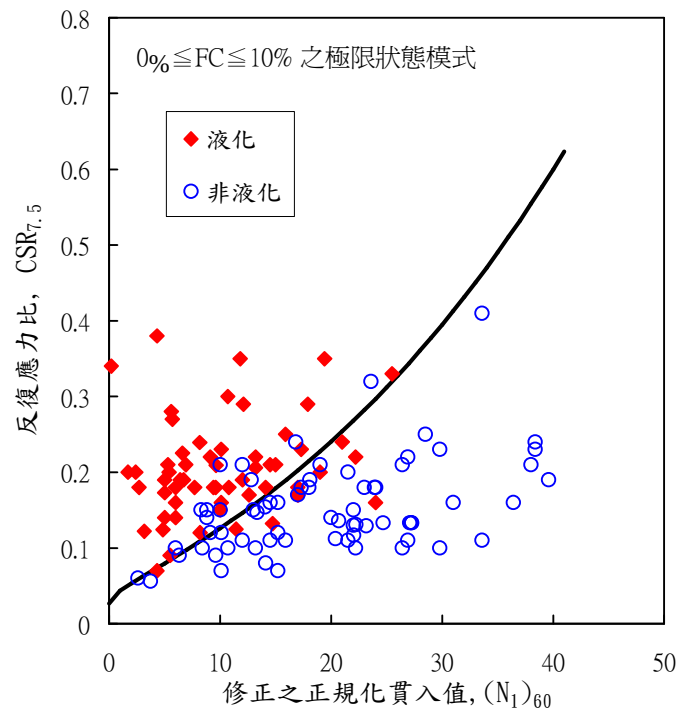


圖 4-8  $0\% \leq FC \leq 10\%$  液化極限狀態曲線圖

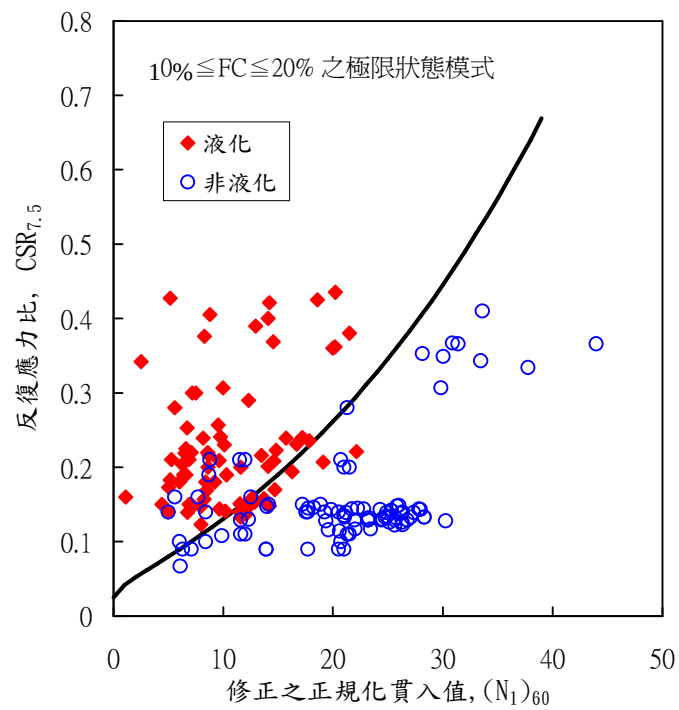


圖 4-9  $10\% \leq FC \leq 20\%$  液化極限狀態曲線圖

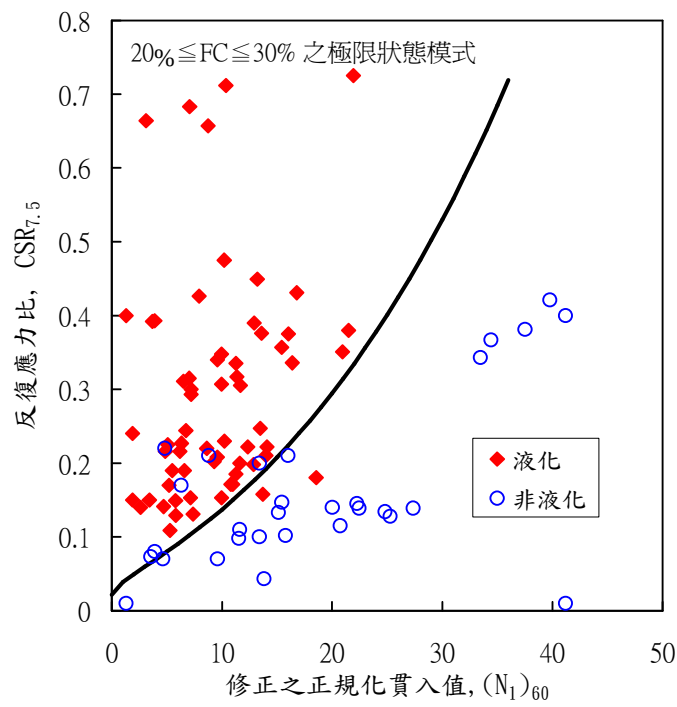


圖 4-10 20% ≤ FC ≤ 30% 液化極限狀態曲線圖

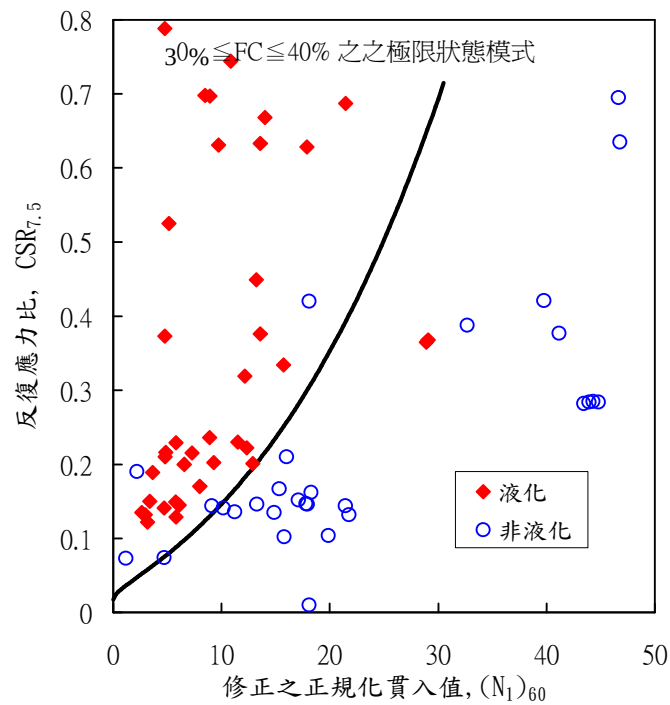


圖 4-11 30% ≤ FC ≤ 40% 液化極限狀態曲線圖



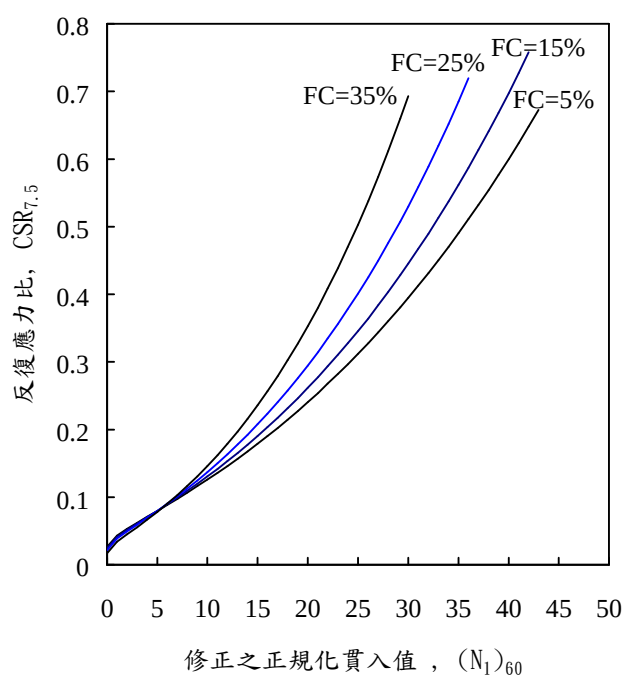


圖 4-12 經機率檢定之 FC=5%、15%、25%、35%等  
極限狀態曲線之比較( $\sqrt{(N_1)_{60}}$ ， $\ln(CSR_{7.5})$ )

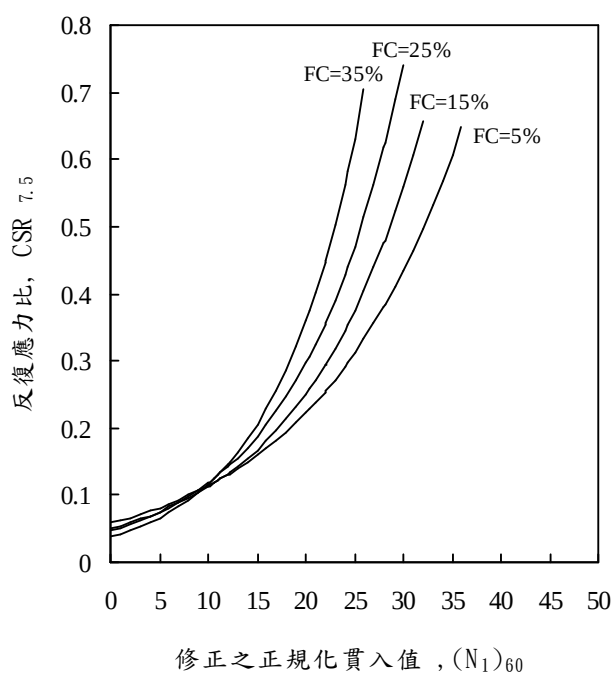


圖 4-13 未經機率檢定之 FC=5%、15%、25%、35%等  
極限狀態曲線之比較( $(N_1)_{60}$ ， $\ln(CSR_{7.5})$ )

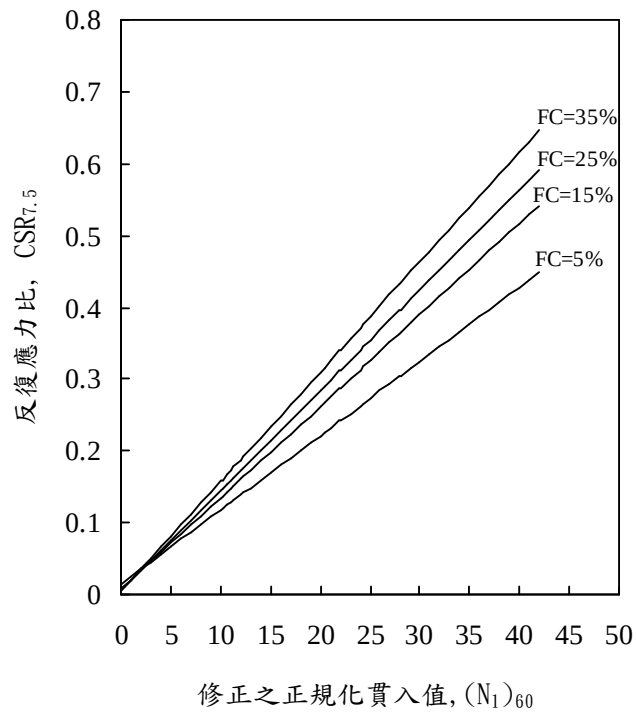


圖 4-14 未經機率檢定之 FC=5%、15%、25%、35%等極限狀態曲線之比較( $(N_1)_{60}$ ， $CSR_{7.5}$ )

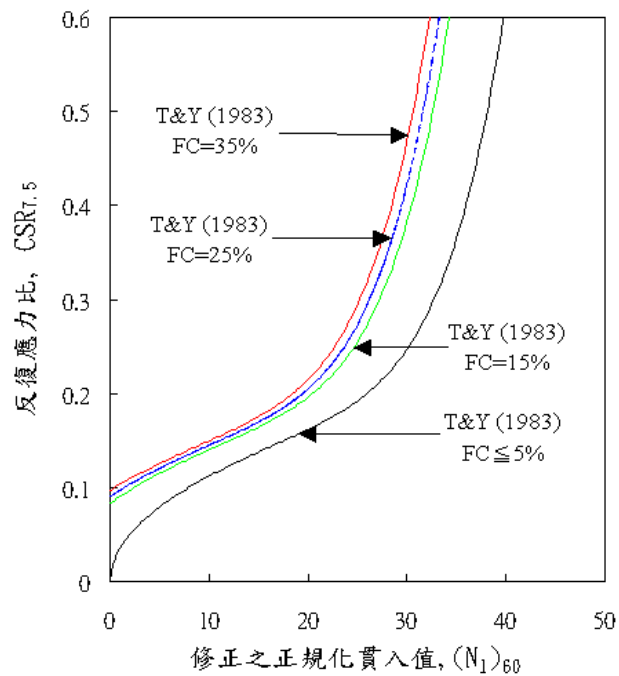


圖 4-15 T&Y(1983) $C_s=85$ 之  $FC \leq 5\%$ 、 $FC=15\%$ 、 $FC=25\%$ 、 $FC=35\%$ 等之經驗曲線比較圖

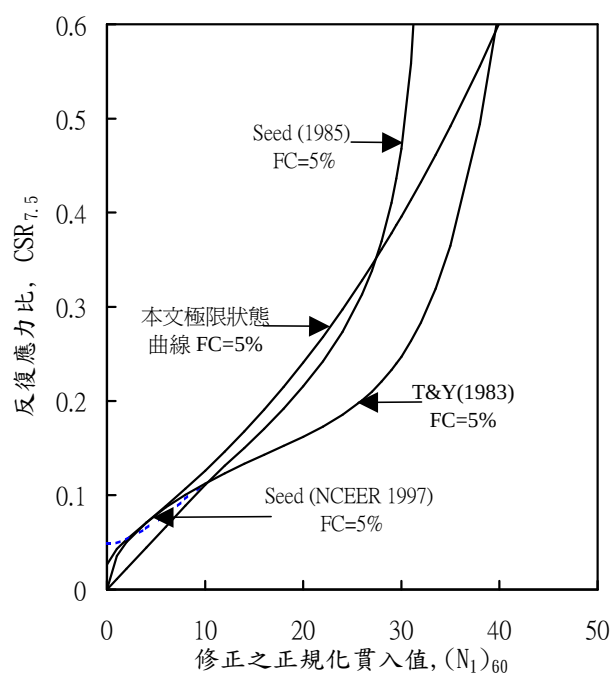


圖 4-16 FC=5%之極限狀態模式與 Seed(NCEER 1997)、Seed(1985)及 T&Y(1983)  $C_s=85$  比較

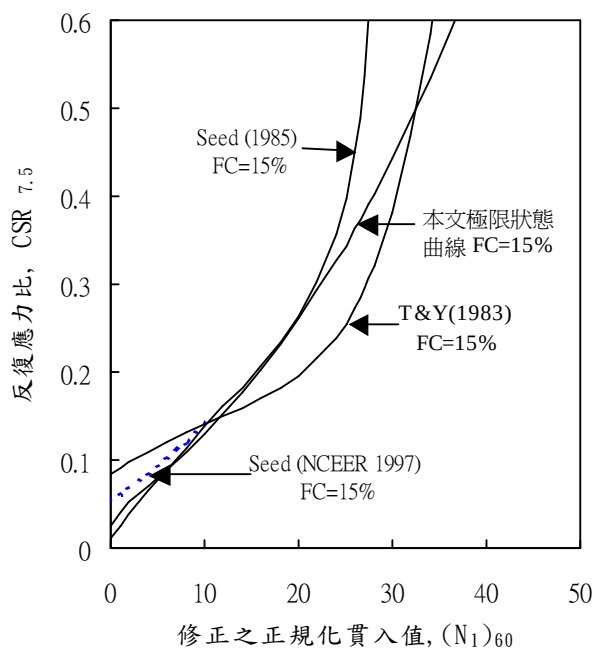


圖 4-17 FC=15%之極限狀態模式與 Seed(NCEER 1997)、Seed(1985)及 T&Y(1983)  $C_s=85$  比較

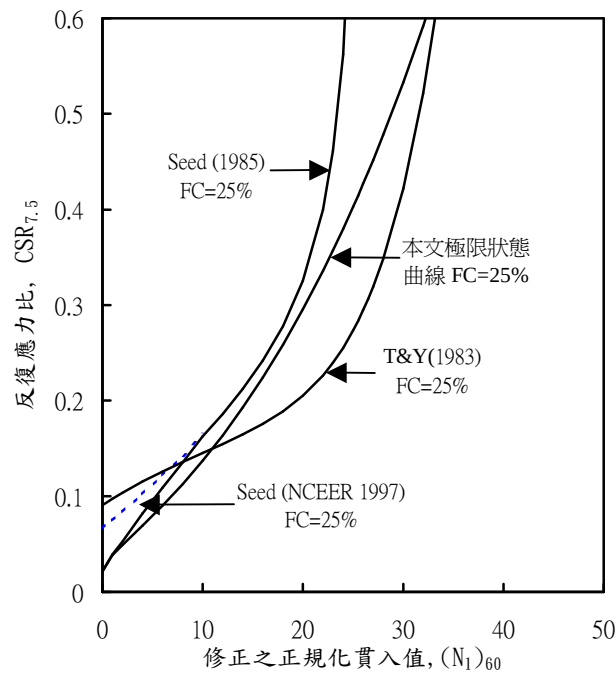


圖 4-18 FC=25%之極限狀態模式與 Seed(NCEER 1997)、Seed(1985)及 T&Y(1983)Cs=85 比較

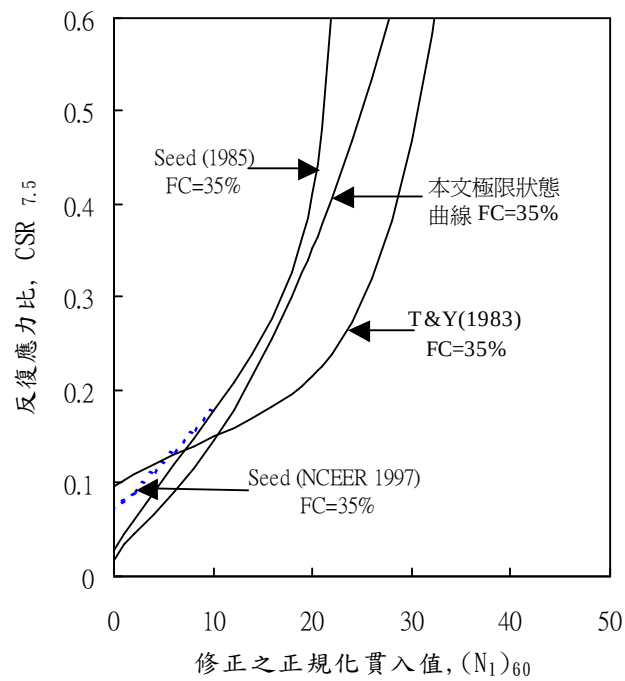


圖 4-19 FC=35%之極限狀態模式與 Seed(NCEER 1997)、Seed(1985)及 T&Y(1983)Cs=85 比較

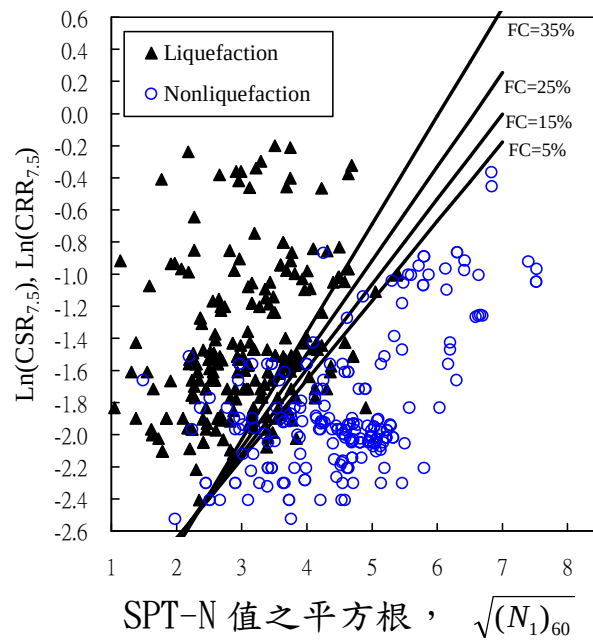


圖 4-20 本文極限狀態模式繪於水平座標為  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  及垂直座標為  $\ln(CSR_{7.5})$  或  $\ln(CRR_{7.5})$  之圖上

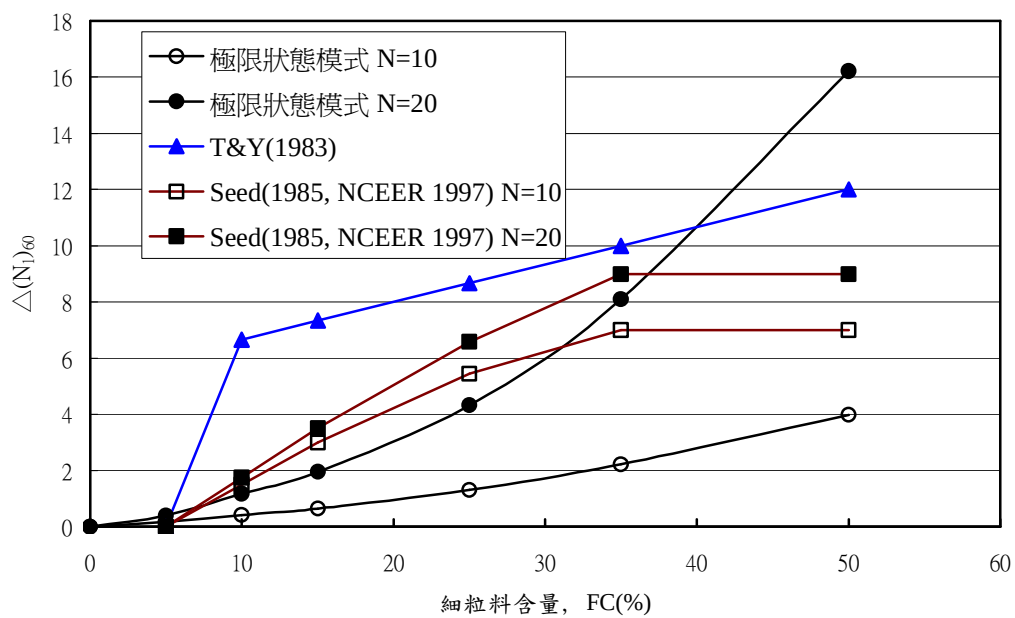


圖 4-21 細粒料含量 FC 與  $\Delta(N_1)_{60}$  之關係

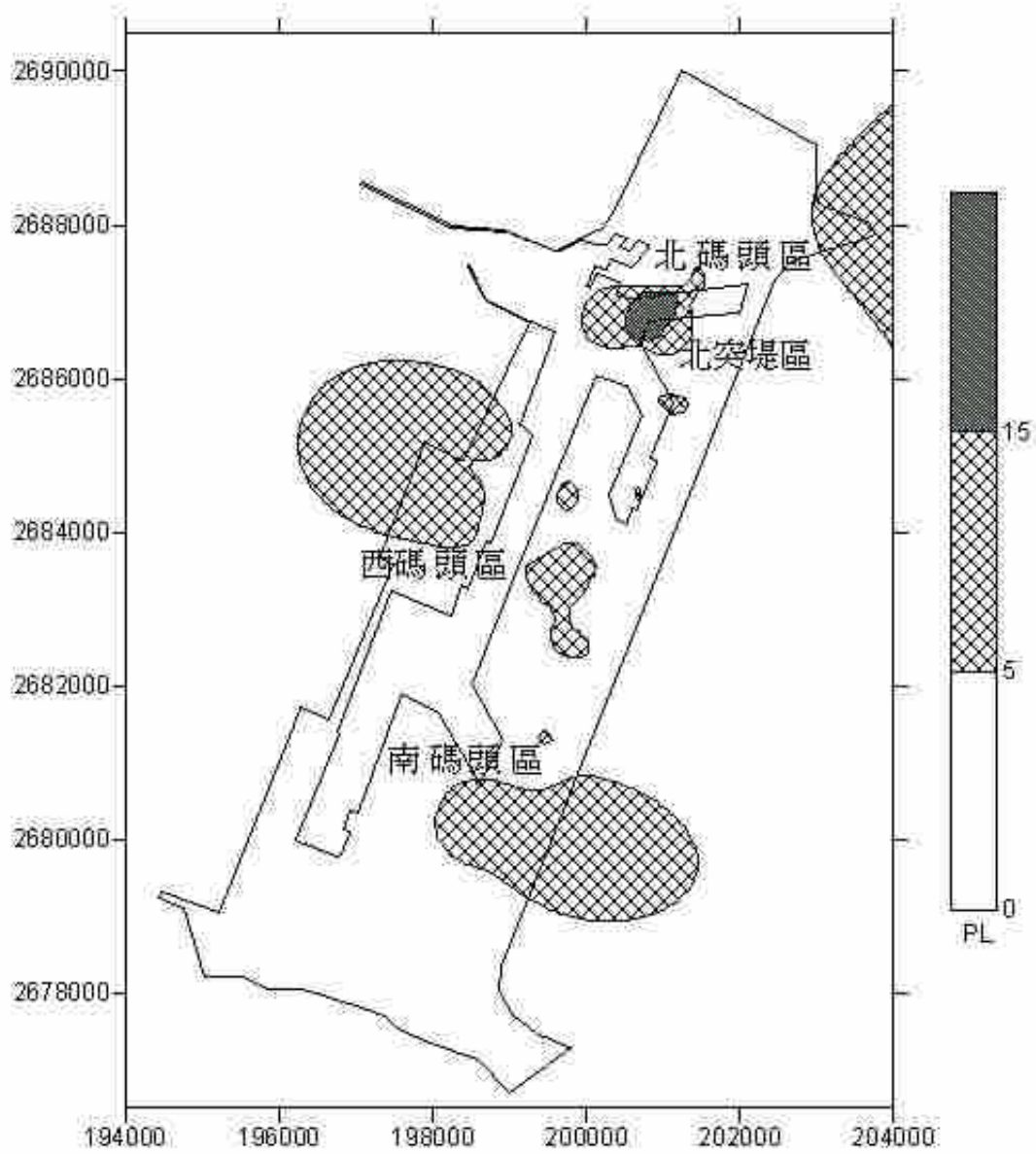


圖 4-22 本文極限狀態模式分析臺中港區 921 地震之液化潛勢圖

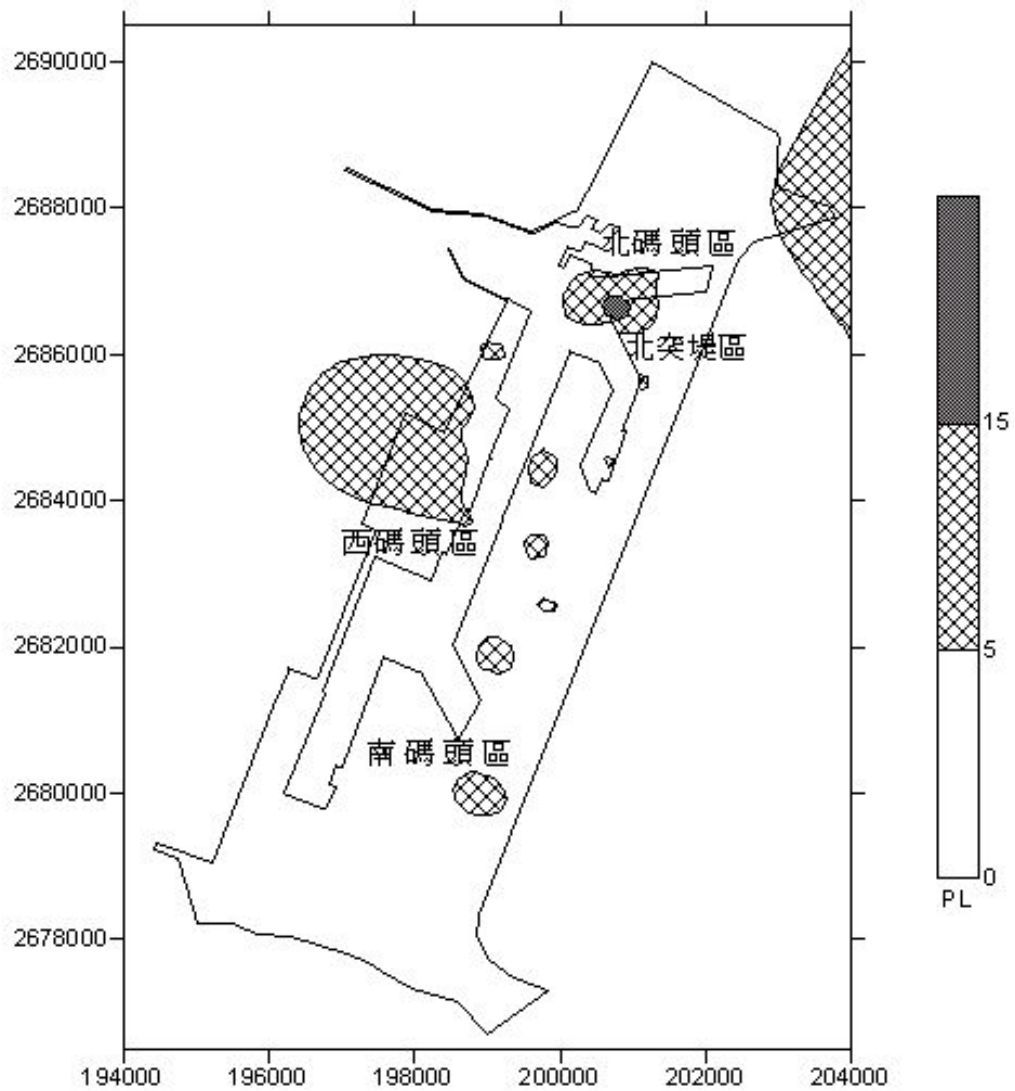


圖 4-23 Seed(NCEER 1997)法分析臺中港區 921 地震之液化潛勢圖

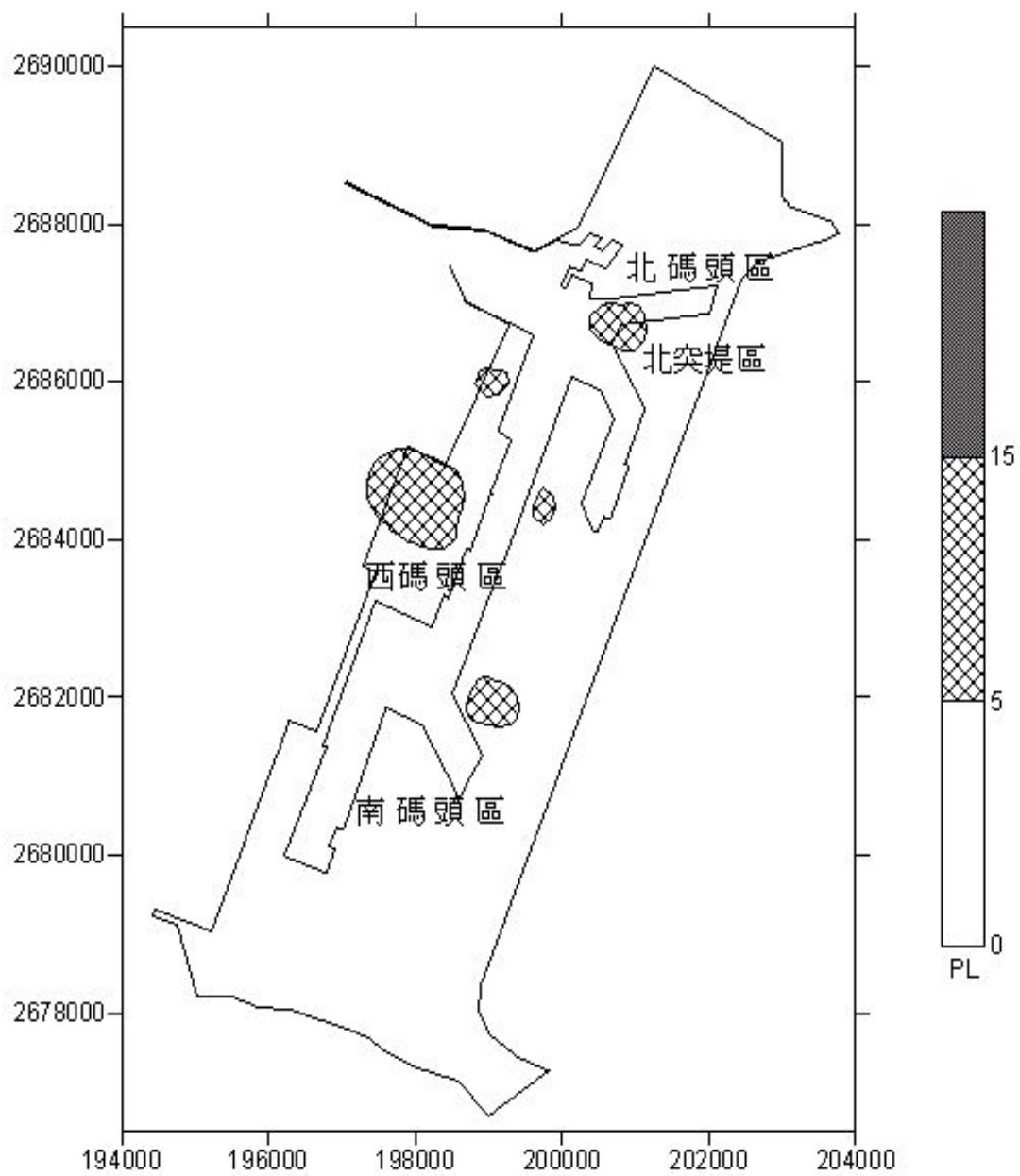
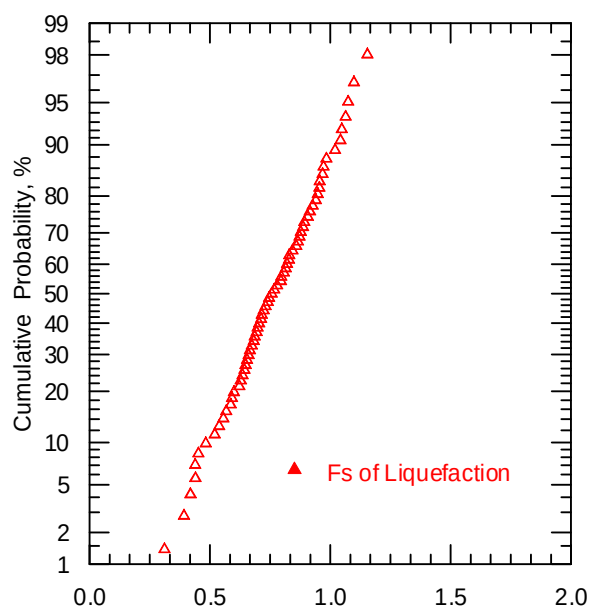


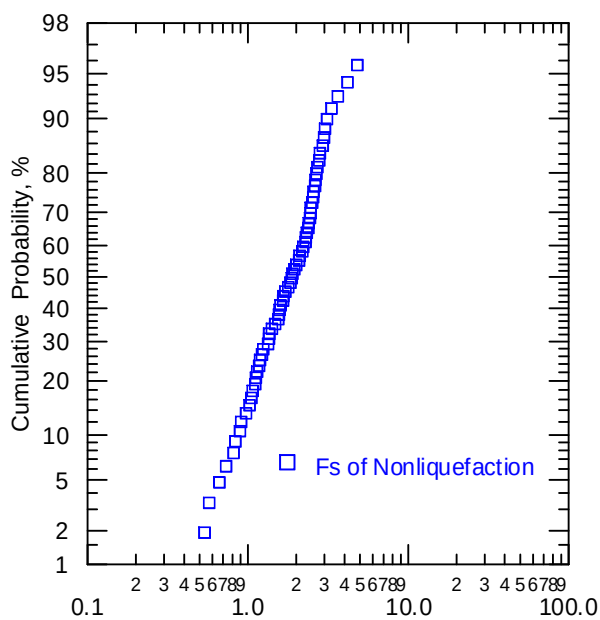
圖 4-24 T&Y(1983)法分析臺中港區 921 地震之液化潛勢圖





液化案例之 $\sqrt{F_s}$

圖 4-25 液化案例之 $\sqrt{F_s}$  值繪於常態或然率圖上



非液化案例之 $F_s$

圖 4-26 非液化案例之 $F_s$  值繪於對數常態或然率圖上

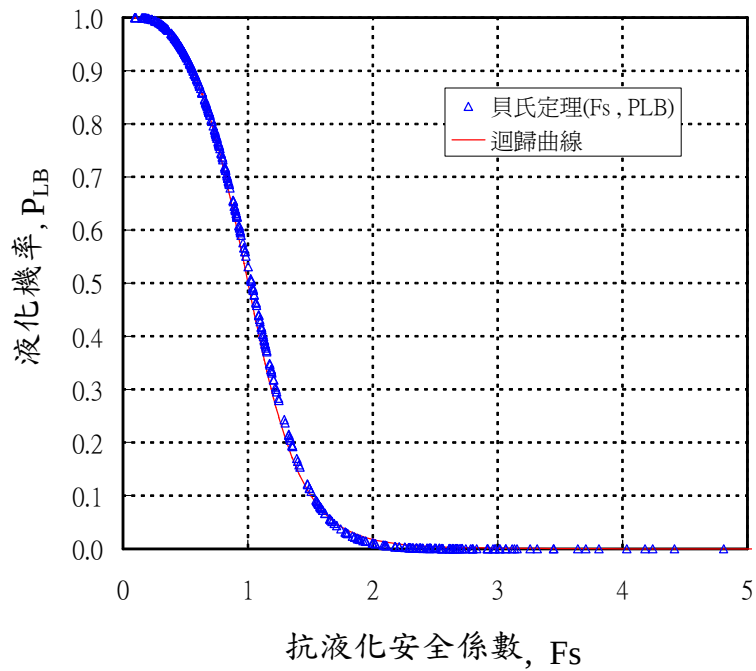


圖 4-27 極限狀態模式經貝氏定理推求之抗液化安全係數與液化機率之關係圖

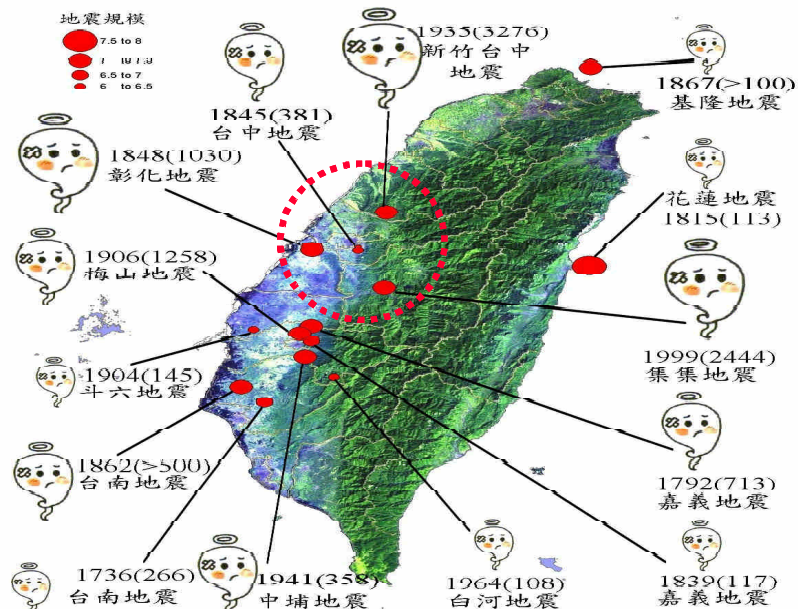


圖 4-28 台灣地區造成百人以上死亡之重大災害地震震央分佈圖 (鄭世楠、葉永田, 2001)

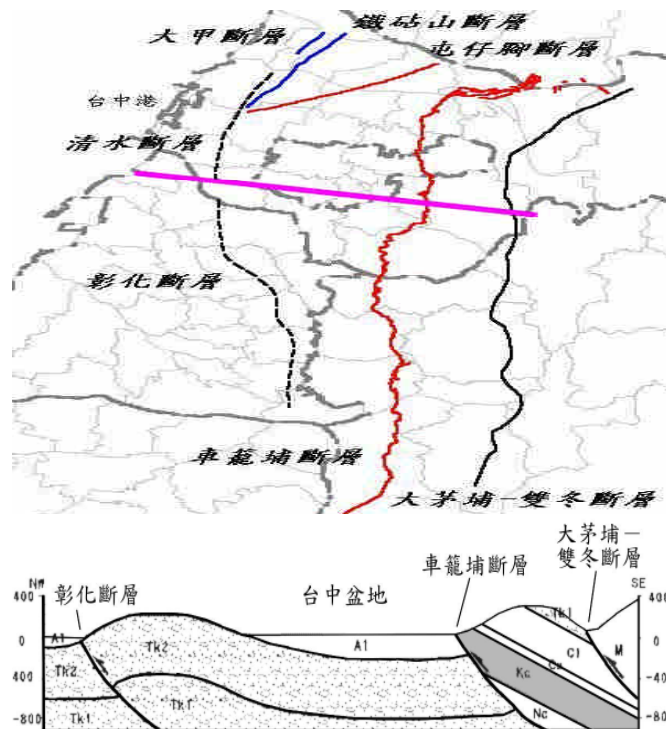


圖 4-29 影響台中港之活動斷層分佈與斷層剖面圖

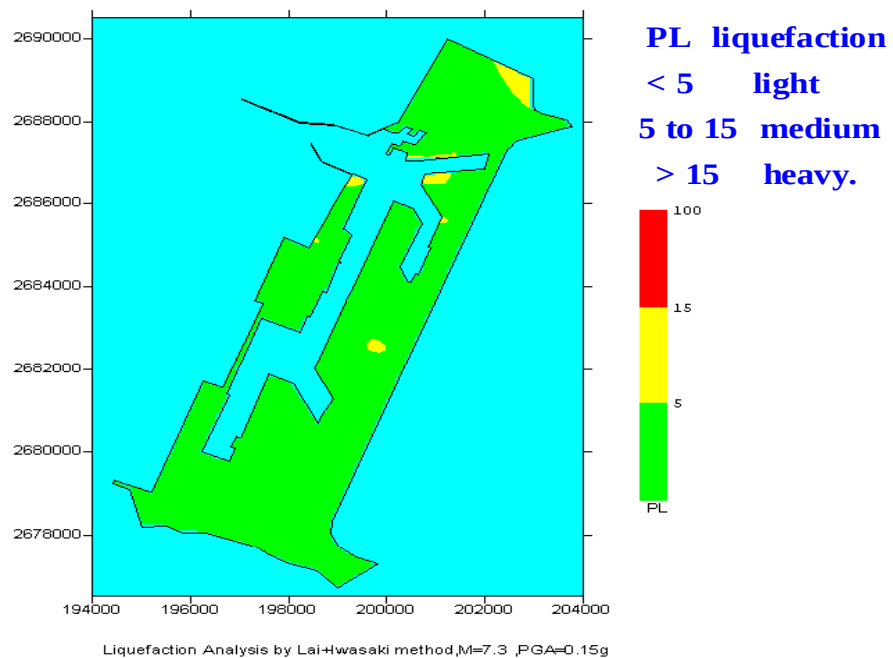


圖 4-30 台中港區模擬 1935 年新竹－台中地震之液化危害程度分佈圖  
( $M_L=4.1$ ,  $M_w$  約為 4.3,  $PGA=0.15g$ )

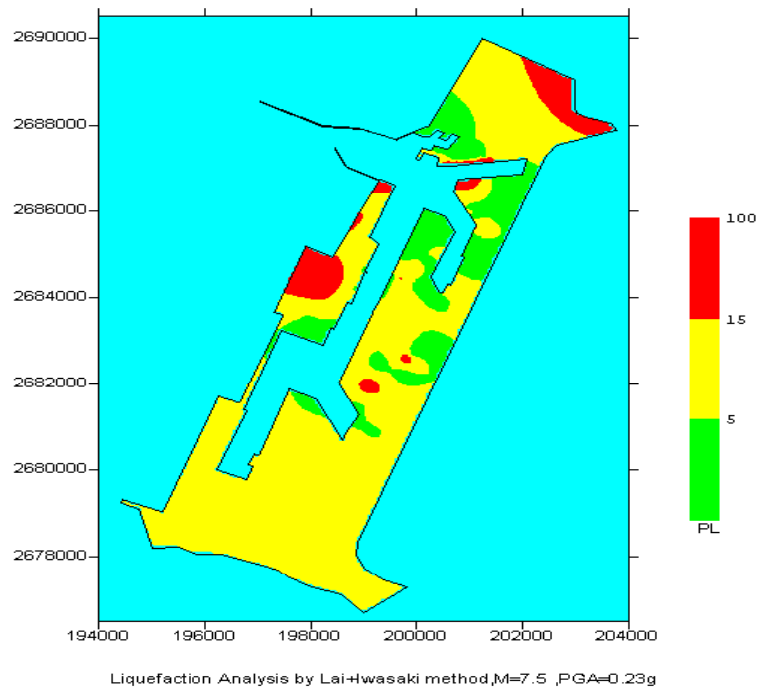


圖 4-31 台中港區模擬 1848 年彰化地震之液化程度分佈圖  
(Mw=4.2, PGA=0.23g ; 新訂耐震設計規範乙區)

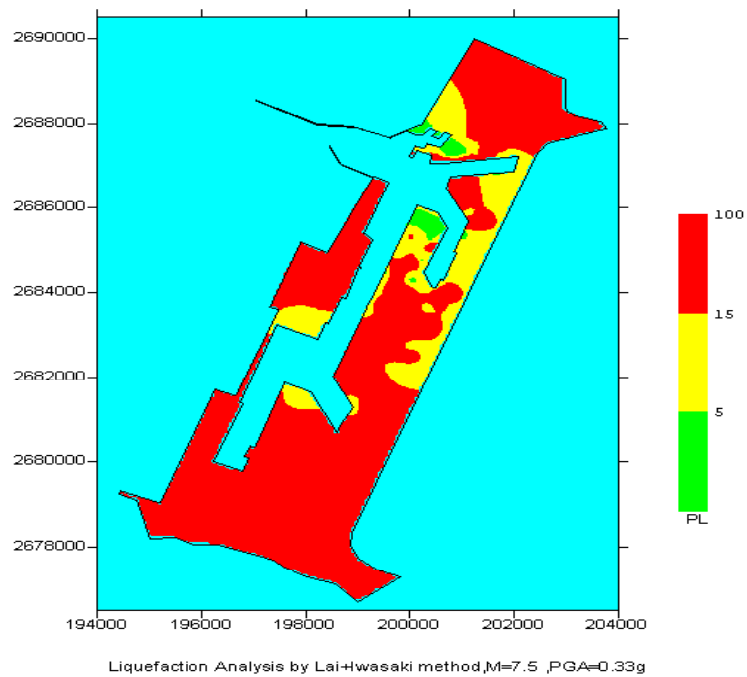


圖 4-32 台中港區模擬彰化斷層可能發生之最大地震之液化程度  
分佈圖(Mw=4.6, PGA=0.33g; 新訂耐震設計規範甲區)

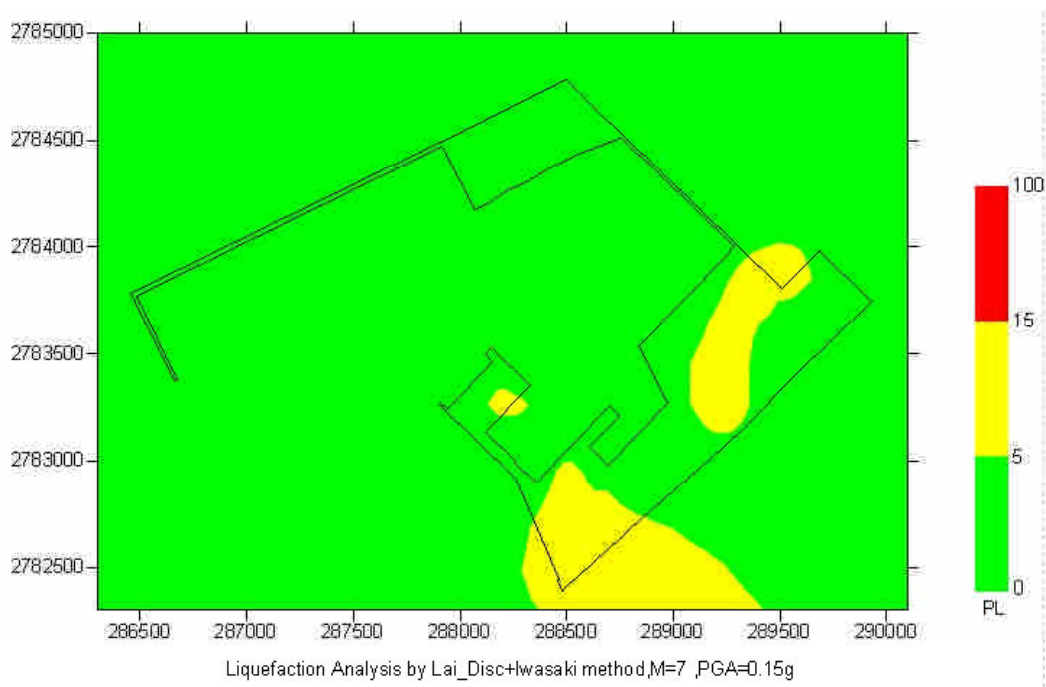


圖 4-33 臺北港區液化之臨界地表加速度 ( $M_w=4.0, PGA=0.15g$ )

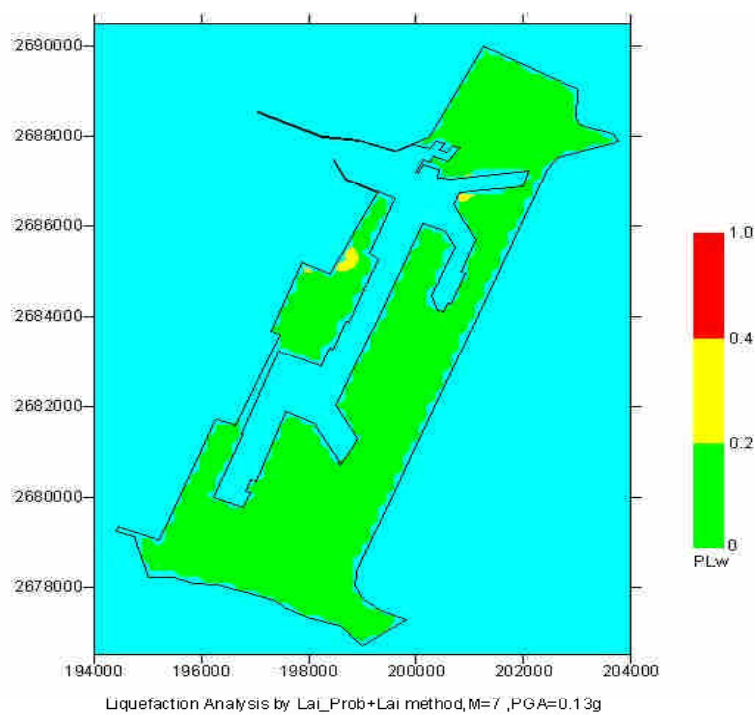


圖 4-34 臺中港區液化之臨界地表加速度 ( $M_w=4.0, PGA=0.13g$ )

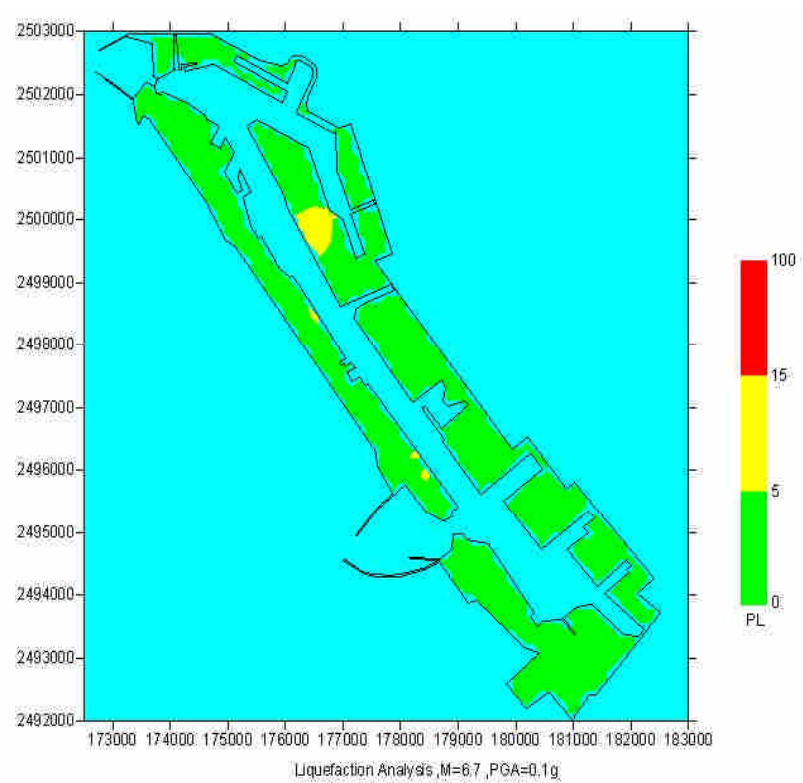


圖 4-35 高雄港區液化之臨界地表加速度 ( $M_w=6.7$ ,  $PGA=0.10g$ )

## 第五章 結論與建議

1. 由地震波放大倍率之研究可發現：臺中港震波放大倍率約為3倍；臺北港震波放大倍率約為4倍；高雄港震波放大倍率約為4.5倍；蘇澳港井下地震儀僅有35m深，其震波放大倍率仍不確定，需進一步研究。由此可見高雄港區淺層地層最為疏鬆軟弱，且與深層地層之軟硬比最大，臺北港次之，臺中港最小。另由地震波放大倍率隨深度變化之初步探討結果亦可發現：臺中港、臺北港及高雄港淺層地層之震波放大皆稍大於Seed & Idriss (1971)之平均值。
2. 由港區地震PGA值分佈之模擬結果顯示：蘇澳港4號碼頭PGA較港區其他碼頭地震PGA稍大，這或許是民國75年花蓮地震造成蘇澳港4號碼頭側移及後線龜裂之重要原因之一。台中港1-4A號碼頭後線、及9-11號碼頭後線、及西碼頭區，其PGA值皆較其他碼頭區稍大，這與921地震造成台中港1-4號碼頭側移及9-11號碼頭後線土壤液化等災害亦有些吻合。另由共振主頻分析結果顯示，921地震液化災區之淺層共振主頻小於3Hz，非液化災區之淺層共振主頻大於3.9Hz。
3. 由94年3月6日蘇澳雙震源地震及95年12月26日屏東枋寮地震引致之超額動態孔隙水壓分析結果顯示：蘇澳港區之超額動態孔隙水壓比約有10%，其中超額孔隙水壓為0.25Hz以下之低頻反應，震盪動態水壓為0.25Hz以上之高頻反應。高雄港區之超額動態孔隙水壓比亦約有10%，其中超額孔隙水壓為0.10Hz以下之低頻反應，震盪動態水壓為0.10Hz以上之高頻反應。安平港區之超額動態孔隙水壓比僅有3%，其中超額孔隙水壓為0.08Hz以下之低頻反應，震盪動態水壓為0.08Hz以上之高頻反應。
4. 本文提出液化解釋參數之機率檢定，使液化分析參數之選擇有所依循，亦使極限狀態分析法，成為更符合多變數統計分析理論之分析模式。另本文建立抗液化強度 $CRR_{7.5}$ 與SPT試驗值 $(N_1)_{60}$ 及細粒料含

量 FC 之關係式，亦建立抗液化安全係數  $F_s$  與液化機率  $P_L$  之關係式。所建立之液化分析模式，不但有傳統上評估土壤是否可能液化之功能，更可進一步評估土壤可能發生液化之機率，提供液化分析上更多之資訊。

5. 由細粒料含量與抗液化強度之比較可發現：本文極限狀態模式於  $(N_1)_{60} \leq 5$  時，其各種細粒料含量土壤之抗液化強度  $CRR_{7.5}$  皆相當接近， $(N_1)_{60} > 5$  時，其細粒料含量愈高之土壤，其抗液化強度  $CRR_{7.5}$  亦愈大；而 Seed et al. (1985)、Seed et al. (1997 NCEER) 及 T&Y (1983) 簡易經驗曲線，無論  $(N_1)_{60}$  值之大小，其細粒料含量愈高之土壤，其抗液化強度  $CRR_{7.5}$  亦愈大。
6. 本文所建立之極限狀態模式，較傳統相關經驗曲線更具有物理意義，即地震引致土壤液化之作用強度與  $\ln(CSR_{7.5})$  成正比，土壤之抗液化強度  $\ln(CRR_{7.5})$  與  $\sqrt{(N_1)_{60}}$  成正比，亦表示土壤之抗液化強度  $\ln(CRR_{7.5})$  與土壤之相對密度  $D_r$  成正比。
7. 由本土化液化模式評估各港區液化之臨界地表加速度顯示：台北港之液化之臨界地表加速度為  $0.15g$ ，台中港之液化之臨界地表加速度為  $0.13g$ ，高雄港之液化之臨界地表加速度為  $0.10g$ 。
8. 本計畫雖已完成各港區之地震及液化監測系統，並建立了各港區小地震時震波放大效應之初步研究，唯影響港灣碼頭構造物較大之中大型地震，其監測資料極少。因此後續計畫中，除了維護及擴充既有地震及液化監測系統外，亦應針對強烈地震作用下之現地土壤液化與碼頭動態行為加以研究，擬以大型震盪震源車於地表產生固定頻率、固定震幅之振動，模擬強烈之地震作用，進行現地土壤液化與碼頭動態反應之量測，歸納出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。



## 參考文獻

- [1]日本土木研究所(1977)，新耐震設計法(案)。
- [2]日本國有鐵道(1979)，日本國鐵構造物耐震設計標準。
- [3]日本道路協會(1990)，道路橋示方書・同解說，V 耐震設計編。
- [4]日本道路協會(1996)，道路橋示方書・同解說，V 耐震設計編。
- [5]臺中港務局(1976) "臺中港第一期工程完工報告"。
- [6]江志俊 (1989)，超額孔隙水壓與地盤運動之相關性研究，臺灣大學土木系碩士論文。
- [7]李景亮 梁英文(1995)：結構耐震設計。
- [8]徐明同(1988 著)：地震工程學，中國土木工程師學會。
- [9]張伯烈(1987 譯)：工程地質與岩石力學(原著 Neil Duncan)。
- [10]張吉佐、黃俊鴻、鄒家琪、王一航(1992) 「不同地盤之地表最大加速度」第一屆結構工程研討會。
- [11]陳圭璋、賴聖耀、彭瀚毅、李俊延、張漢忠(2003)，「臺北港區場址效應研究與土壤液化潛能分析」，第十屆臺灣地區地球物理研討會, PP.97-102。
- [12]黃富國 (1996)「土壤液化之危害度分析」臺灣大學土木系博士論文。
- [13]國立臺灣大學地震工程研究中心(1976 譯)：地震工程學(原著岡本舜三)。
- [14]港灣研究所(1997)"港灣及海岸結構物設計基準"，港灣研究所專刊123號。
- [15]港灣研究中心(1999)「臺中港 1~4A 碼頭 921 地震液化災損初步調查研究」港灣研究中心專刊 172 號。

- [16]溫國樑、葉永田(1996)「盆地對地震波效益之研究」經濟部中央地質調查所報告第 85-006 號。
- [17]賴聖耀(2005)，「以邏輯迴歸法建立 CPT 數據之土壤分類及液化評估模式」中國土木水利工程學刊，第十七卷，第二期，pp.321-333。
- [18]賴聖耀(2006)，「以極限狀態分析法建立標準貫入試驗之液化分析模式」中國土木水利工程學刊，第十八卷，第一期。
- [19]AASHTO (1983). Guide Specifications for Seismic Design of Highway Bridges.
- [20]Borcherdt, R. D. (1994). Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification), Earthquake Spectra Vol.10, No.4, pp. 617-653.
- [21]CALTRANS (1990). Bridge Design Specifications, Department of Transportation, California.
- [22]Idriss, I. M. (1990). Response of Soft Soil Sites during Earthquakes, Proceedings, H Bolton Seed Memorial Symposium, J. Michael Duncan (ed.) Vol.2, pp. 273-289.
- [23]Ishihara, K., Shimizu., and Yamada,Y. (1981), Pore Water Pressure Measured in Sand Deposits During an Earthquake, Soils and Foundations , Vol. 21, No.4 .
- [24]Ishihara, K., Anazawa,Y., and Kuwano, J. (1987), Pore Water Pressure and Ground Motions Monitored During the 1985 Chiba-Ibaragi Earthquake, Soils and Foundations, Vol. 27, No.3 .
- [25]Ishihara, K. (1981), Measurement of Insitu Pore Water Pressure During Earthquake, Proc. Intl. Conf. On Recent Advances in Earthquake Engineering and Soil Dynamics , Missouri, Vol. No.1.
- [26]Ishihara, K., and Yoshimine, M., (1991), Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188.

- [27]Ishihara, K., Yasuda, S., and Nagase,H., (1996), Soil characteristics and ground damage, Special Issue of Soils and Foundations, pp.109-118
- [28]Kanai, K. (1962): On the Predominant Period of Earthquake Motions,Bull.of ERI.,vol.40.
- [29]Kazuhiko, K. and Keiichi, T. (1991). Amplification of Ground Acceleration Based on Measured Record, Proceedings Fourth International Conference on Seismic Zonation, Stanford University, Stanford California, Vol. II ,pp. 237-244.
- [30]Lai, S. Y., Hsu, S. C., and Hsieh, M. J. (2004). "Discriminant model for evaluating soil liquefaction potential using CPT data." *J. Geotech. and Geoenviron. Eng.*, ASCE, 130(12), pp.1271-1282.
- [31]Lai, S. Y., Lin, P. S., Hsieh, M. J., and Jim, H. F. (2005), "Regression Model for Evaluating Liquefaction Potential by Discriminant Analysis of the SPT N value." *Canadian Geotechnical Journal*. Vol.42, No. 3, pp.856-875.
- [32]Lai, S. Y., Chang, W. J., and Lin, P. S (2006)," "Logistic Regression Model for Evaluating Soil Liquefaction Probability Using CPT Data." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.6, pp.694-704.
- [33] Lai, S. Y., Hsu, S. C., and Hsieh, M. J. (2006)," Closure to 'Discriminant model for evaluating soil liquefaction potential using cone penetration test data.' " *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No.5.
- [34]Mononobe, N. and H. Matsuo(1929) "On the determination of earth pressures during earthquakes, " *Proceedings, World Engineering Conference* 9, pp.176-182.
- [35]Nagase,H., (1984), "Strength and deformation characteristics of sand subjected to irregular loading in multiple directions, " PhD dissertation to the University of Tokyo, (in Japanese).

- [36]Nagase, H., and Ishihara, K., (1988), "Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, "Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.66-76.
- [37]Okabe, S.(1926) "General theory of earth pressure," J. of the Japanese Society of Civil Engr., Tokyo, 12,(1).
- [38]Seed, H. B., Murarka, R., Lysmer, J. and Idriss, I. M. (1975). Relationship between Maximum Acceleration, Maximum Velocity, Distance from Source and Local Site Conditions for Moderately Strong Earthquakes, Report No. EERC 75-17, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- [39]The Third Port Construction Bureau of Japan (2000)REBIRTH
- [40]The Japanese Geotechnical Society , Remedial Measures against Soil Liquefaction, A.A.Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1998.
- [41]Westergaard, H.M. (1933) "Water pressure on dams during earthquakes," Transactions, ASCE, Vol.98, pp.418-433.