95-46-7188 MOTC-IOT-94-H1DA002-1

港灣地區地震及液化之常態 監測研究(1/4)



交通部運輸研究所

中華民國 95 年 3 月

95-46-7188 MOTC-IOT-94-H1DA002-1

港灣地區地震及液化之常態 監測研究(1/4)

著 者:賴聖耀、陳志芳、賴瑞應

交通部運輸研究所

中華民國 95 年 3 月

港灣地區地震及液化之常態監測研究. (1/4) / 賴聖耀,陳志芳,賴瑞應著 初版 臺 北市:交通部運研所,民95 面; 公分 參考書目:面 ISBN 986-00-4832-0(平裝)	
 賴聖耀,陳志芳,賴瑞應著 初版 臺 北市:交通部運研所,民95 面; 公分 參考書目:面 ISBN 986-00-4832-0(平裝) 	港灣地區地震及液化之常態監測研究.(1/4)/
 北市:交通部運研所,民95 面; 公分 参考書目:面 ISBN 986-00-4832-0(平装) 	賴聖耀,陳志芳,賴瑞應著, 初版。 臺
	北市:交通部運研所,民95
参考書目:面 ISBN 986-00-4832-0(平裝)	面; 公分
ISBN 986-00-4832-0(平裝)	參考書目:面
	ISBN 986-00-4832-0(平裝)
	•

•

.

.

· · · · · ·

.

٦

• ·

.



港灣地區地震及液化之常態監測研究 (1/4)
茎をおり網、雨芋芋、福瑞庵
山山以後間 ・ 文理市理判明明7月1月 山山 - 山山 - 第三日デオレル (1.02 0.00 0.0
地 址·量北巾叙化北路 240 號
網 址:www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)
電 話:(04) 26587176
出版年月:中華民國 95 年 3 月
印刷者:
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港灣技術研究中心網站
定 價:200 元
·展 售 處:
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話:(02)23496880
國家書坊臺視總店:臺北市八德路 3 段 10 號 B1•電話:(02)2578151:
五南大化鹿坦・高山市山殿 9 蛯 B1,電話・(04)22260220

五国人间殿物,重于山于田町と加口工电田、(\+/2220033)

GPN:1009500804 ISBN:986-00-4832-0(平装)

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。

· ·

•

.

.

1.5.8

95 港灣地區地震及液化之常態監測研究 (14)

交通部運輸研究所

GPN: 1009500804 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(1/4)						
國際標準書號(或叢刊號)	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號	計畫編號			
ISBN 986-00-4832-0 (平裝)	1009500804	95-46-7188	94-H1DA002-1			
主辦單位:港灣技術研究中心						
主管:邱永芳						
計劃主持人:賴聖耀	至 94 年 12 月					
參與研究人員:陳志芳、賴瑞應						
聯絡電話:04-26587186						
傳真號碼:04-26564418						

關鍵詞:地震監測、震波放大、液化

摘要:

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。

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0.12g,高雄港液化之臨界地表加速度為Amax=0.07g。

出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
95年3月	130	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品,公營、 公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱;私人及私營機 關團體可按定價價購。

機密等級:

密 機密 極機密 絕對機密

(解密條件:	年	月	日解密,	, 公布後解密 ,	附件抽存後解密,
工作完成或會	諸終	了時	解密,	另行檢討後辦理解	密)
普通					

備註:本研究之結論與建議不代表交通部之意見。

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

TITLE: Earthquake a	nd Liquefaction Monitoring at Harbor Area	s (1/4)	
ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
ISBN 986-00-4832-0	1009500804	95-46-7188	94-H1DA002-1
(pbk)			
DIVISION: HARBOR &	k MARINE TECHNOLOGY CENTER		PROJECT PERIOD
DIVISION DIRECTOR: PRINCIPAL INVESTIG PROJECT STAFF: J. F. (PHONE: 04-26587186 FAX: 04-26564418	: Yung-Fang Chiu ATOR: S. Y. Lai Chen, R. I. Lai		FROM January 2005 TO December 2005

KEY WORDS: Earthquake monitoring, Seismic magnification, Liquefaction

ABSTRACT:

Taiwan is located in the western branch of the Cum-Pacific Seismic Belt, therefore earthquakes have occurred frequently. Under strong shaking, the liquefaction of sandy soils of alluvium and reclaimed lands in the western coastal area of Taiwan might happen, which cause damages to coastal and harbor's facilities in this area.

Hence, in this project, the ground surfaced and embedded seismographers and piezometers were installed in Taichung, Taipei, and Kaohsiung Harbor areas. The results from monitoring data reveal that the seismic wave magnification at Taichung Harbor is three times, and Taipei Harbor is four times, while Kaohsiung Harbor is 4.5 times. Some local models for evaluating liquefaction potential using SPT data were also established in this study. Moreover, applicable local models to evaluate liquefaction potential for local soil conditions at harbors' areas were developed. The seismic intensity induce liquefaction at Taichung Harbor is 0.13g, and Taipei Harbor is 0.12g, while Kaohsiung Harbor is 0.07g.

DATE OF PUBLICATION March 2006	NUMBER OF PAGES 130	PRICE 200	CLASSIF RESTRICTED SECRET UNCLASSIFIED	TCATION CONFIDENTIAL TOP SECRET	
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(1/4)

目 錄

中文摘要
英文摘要
圖目錄 V
表目錄
第一章 前言 1-1
第二章 地震放大效應之相關文獻分析2-1
2.1 沖積土層對地震之影響2-1
2.2 軟弱土層之相關耐震規範2-4
2.3 震波放大效應之相關研究2-5
第三章 港灣地區地震及動態孔隙水壓監測
3.1 港灣地區地震監測系統之種類
3.2 港灣地區地震及動態孔隙水壓監測規劃3-3
3.3 港灣地區地震及動態孔隙水壓監測3-6
第四章 臺中港地震監測結果分析 4-1
4.1 地震監測結果分析4-1
4.2 SHAKE 地震模擬分析4-2
4.3 動態孔隙水壓之監測結果分析4-3
第五章 臺北港地震監測結果分析
5.1 地震監測結果分析5-1
5.2 SHAKE 地震模擬分析5-4

5.3	HASKALL 地震模擬分析	5-5
第六章	高雄港地震監測結果分析	5-1
6.1	地震監測結果分析	5-1
6.2	HASKALL 地震模擬分析	5-3
第七章	本土化液化分析模式與港區液化危害度之研究	7-1
7.1	判別模式	7-1
7.2	液化機率模式	7-4
7.3	液化危害度分析	7-5
7.4	臺中港液化之臨界地表加速度	7-7
7.5	臺北港液化之臨界地表加速度	7-7
7.6	高雄港液化之臨界地表加速度	7-8
第八章	結論與建議	3-1
參考文	款	€-1

圖目錄

圖 2-1 美國不同地盤條件之地表 PGAs 與岩盤露頭 PGAR 關係圖2-9
圖 2-2 軟弱地盤地表 PGAs 與岩盤露頭 PGAR 之關係圖
圖 2-3 各種地盤相對於硬岩盤之短週期及中周期反應譜放大函數量2-10
圖 2-4 日本東京灣附近三處工址之地盤最大加速度比值
隨深度變化之剖面圖2-11
圖 2-5 日本 Kobe 市附近四處工址之剪力波速剖面
圖 2-6 日本 Kobe 市附近四處工址之地盤最大加速度隨深度變化剖面2-12
圖 2-7 日本 Kobe 市附近四處工址之地盤最大加速度隨深度與量測
最深處之地盤最大加速度關係圖2-12
圖 2-8 日本 Kobe 市附近四處工址之土層放大係數2-13
圖 2-9 臺北盆地五股測區最大加速度隨深度變化之關係圖
圖 2-10 臺北盆地板橋水利處測區最大加速度隨深度變化之關係圖2-15
圖 2-11 臺北盆地板橋退輔會測區最大加速度隨深度變化之關係圖2-16
圖 2-12 臺北盆地 SHAKE 程式之土層放大係數分析結果2-17
圖 2-13 蘭陽平原 SMART-1 地震資料之土層放大係數2-17
圖 2-14 蘭陽平原 SMA、SMART-1 地震資料之土層放大係數2-17
圖 3-1 港區地震監測系統規劃與流程圖
圖 3-2 機房及設備外觀示意圖
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
圖 3-6 臺北港地震監測站照片

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	9
圖 3-10 蘇澳港地震監測站照片	9
圖 3-11 臺灣地區較可能影響港區之斷層分佈圖3-10	0
圖 3-12 臺中港 26 號碼頭地震監測站 30m 地質調查概況	2
圖 3-13 臺中港 26 號碼頭地震監測站 300m 地層構造圖與特性3-1	3
圖 3-14a 臺中港地震監測站液化潛能評估結果-1 (M=7.3,Amax=0.163g).3-14	4
圖 3-14b 臺中港地震監測站液化潛能評估結果-2 (M=7.3, Amax=0.163g).3-14	4
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3-1	5
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 3-10	6
圖 3-17 臺北港地震監測站地層構造與地震及水壓監測深度圖3-1	7
圖 3-18 高雄港地震監測站地層構造與地震及水壓監測深度圖3-1	8
圖 3-19 蘇澳港地震監測站地層構造與地震及水壓監測深度圖3-1	9
圖 4-1a 臺中港 2002 年 3 月 31 日 14 點 53 分地震波(南北向)4-	5
圖 4-1b 臺中港 2002 年 3 月 31 日 14 點 53 分地震波(東西向)4-	6
圖 4-1c 臺中港 2002 年 3 月 31 日 14 點 53 分地震波(垂直向)4-	7
圖 4-2a 臺中港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖4-	8
圖 4-2b 臺中港井下地震儀東西向之最大加速度隨深度變化圖4-	8
圖 4-2c 臺中港井下地震儀垂直向之最大加速度隨深度變化圖4-	9
圖 4-3a 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4-	9
圖 4-3b 臺中港井下地震儀東西向正規化之最大加速度隨深度變化圖4-10	0
圖 4-3c 臺中港井下地震儀垂直向正規化之最大加速度隨深度變化圖4-10	0

圖 4-4 應力折減因數 r_a 隨深度之變化範圍 (Seed & Idriss, 1971)4-	-11
圖 4-5a 臺中港南北向震波放大倍率與最大加速度之關係圖4-	-11
圖 4-5b 臺中港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖4-	·12
圖 4-5c 臺中港垂直向震波放大倍率與最大加速度之關係圖4-	·12
圖 4-6 臺灣西海岸港區沉泥質砂性土壤 G/Gmax 與剪應變之關係4-	-13
圖 4-7 臺灣西海岸港區沉泥質砂性土壤阻尼比與剪應變之關係4-	-13
圖 4-8 臺中港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖4-	-14
圖 4-9 臺中港 2002 年 3 月 31 日-SHAKE 模擬地震(南北向)4-	-15
圖 4-10 臺中港 26 號碼頭地下水壓隨潮汐之單日連續變化關係圖4-	-16
圖 5-1a 臺北港 2003 年 6 月 10 日 16 時 41 分地震(南北向)	5-6
圖 5-1b 臺北港 2003 年 6 月 10 日 16 時 41 分地震(東西向)	5-7
圖 5-1c 臺北港 2003 年 6 月 10 日 16 時 41 分地震(垂直向)5	5-8
圖 5-2a 臺北港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖5	5-9
圖 5-2b 臺北港井下地震儀東西向之最大加速度隨深度變化圖5	5-9
圖 5-2c 臺北港井下地震儀垂直向之最大加速度隨深度變化圖5-	-10
圖 5-3a 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5-	-10
圖 5-3b 臺北港井下地震儀東西向正規化之最大加速度隨深度變化圖5-	·11
圖 5-3c 臺北港井下地震儀垂直向正規化之最大加速度隨深度變化圖5-	·11
圖 5-4 臺北港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖5-	-12
圖 5-5a 臺北港南北向震波放大倍率與最大加速度之關係圖5-	-13
圖 5-5b 臺北港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖5-	-13
圖 5-5c 臺北港垂直向震波放大倍率與最大加速度之關係圖5-	-14
圖 5-6 臺北港 2003 年 6 月 10 日-SHAKE 模擬地震(南北向)5-	-15

啚	5-7a	2003年6月10日模擬與觀測加速度在R方向比較圖5-16
啚	5-7b	2003年6月10日模擬與觀測加速度在T方向比較圖5-17
圕	6-1a	高雄港 2003 年 12 月 10 日 12 時 38 分地震(南北向)
圕	6-1b	高雄港 2003 年 12 月 10 日 12 時 38 分地震(東西向)6-6
圕	6-1c	高雄港 2003 年 12 月 10 日 12 時 38 分地震(垂直向)
圕	6-2a	高雄港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖6-8
圕	6-2b	高雄港井下地震儀東西向之最大加速度隨深度變化圖6-8
圕	6-2c	高雄港井下地震儀垂直向之最大加速度隨深度變化圖6-9
圕	6-3a	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6-9
圕	6-3b	高雄港井下地震儀東西向正規化之最大加速度隨深度變化圖6-10
圕	6-3c	高雄港井下地震儀垂直向正規化之最大加速度隨深度變化圖6-10
圕	6-4a	高雄港南北向震波放大倍率與最大加速度之關係圖6-11
圕	6-4b	高雄港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖6-11
圕	6-4c	高雄港垂直向震波放大倍率與最大加速度之關係圖6-12
啚	6-5	高雄港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖6-13
啚	6-6a	2003 年 12 月 10 日模擬(下)與觀測(上)加速度在 R 方向比較圖6-14
啚	6-6b	2003 年 12 月 10 日模擬(下)與觀測(上)加速度在 T 方向比較圖6-15
圕	7-10)%≤FC≤10%液化判別圖(58 組液化及 70 組非液化案例)7-9
啚	7-2 1	.0%≤FC≤20%液化判別圖(77 組液化及 95 組非液化案例)
圕	7-32	20%≤FC≤30%液化判別圖(64 組液化及 32 組非液化案例)7-10
圕	7-4 3	30%≤FC≤40%液化判別圖(37 組液化及 29 組非液化案例)7-10
圕	7-5	貝氏定理 C(P)=0、p=0.15 之抗液化安全係數與液化機率之關係圖 7-11
啚	7-6	判別模式之液化分析流程7-12

VIII

圖 7-7 臺中港區液化之臨界地表加速度(Mw=7.0, Amax=0.13g)......7-13 圖 7-8 臺北港區液化之臨界地表加速度(Mw=7.0, Amax=0.12g)........7-13 圖 7-9 高雄港區液化之臨界地表加速度(Mw=6.0, Amax=0.07g)...........7-14

表目錄

表 4-1 臺中港區實測地震波篩選資料-1	4-13
表 4-2 臺中港區實測地震波篩選資料-2	4-14
表 4-3 臺中港區實測地震波篩選資料-3	4-15
表 4-4 臺中港區實測地震波篩選資料-4	4-16
表 5-1 臺北港井下地震觀測資料之規模、震央與震源深度	5-1
表 5-2 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 5 月)	5-18
表 5-3 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 6 月)	5-18
表 5-4 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 6 月)	5-19
表 5-5 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 6 月)	5-19
表 5-6 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 7 月)	5-20
表 5-7 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 7 月)	5-20
表 5-8 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 8 月)	5-21
表 5-9 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 9 月)	5-21
表 5-10 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 11 月)	5-22
表 5-11 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 11 月)	5-22
表 5-12 臺北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003 年 12 月)	5-23
表 6-1 高雄港井下地震觀測資料之規模、震央與震源深度	6-1
表 7-1 液化損害程度定義(Iwasaki 等人,1982)	7-6
表 7-2 液化損害程度定義(港研中心,2005)	7-7

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四年多,臺北港監測站設置已三年多,高雄港 監測站設置已二年多,蘇澳港監測站設置已一年多,監測期間雖未有強 震之觀測資料,唯小地震非常頻繁,目前擷取之臺中港地震觀測資料已 有 36 組,臺北港地震觀測資料已有 17 組,高雄港地震觀測資料已有 17 組,本計畫即以臺中港、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,作為港區碼頭、防波 堤等港灣設施耐震設計之參考。

1-1

第二章 地震放大效應之相關文獻分析

地震發生時土壤之放大作用,係指地震波自地層深處傳至地表面時,震波振幅(位移、速度或加速度)因受土層動力反應之影響而逐漸 變大之現象,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,綜合各戡災報告及研究,可發現其主要震災均係場址效 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,因此場址效應的問題普遍引起大家之注意。

而土壤液化大都發生於地表附近之較軟弱沖積土層中,因此,軟 弱地盤受震時之振動行為亦為研究土壤液化之重要課題,此即所謂場 址效應(site effect)問題。一般而言,影響場址效應之因素甚多,若針 對局部場址效應而言,主要因素包括地盤特性及地震動強度,後者係 指地盤中土壤材料於不同震度時之非線性效應。因場址效應造成地盤 反應之變異性很大,且軟弱地盤上之強震紀錄有限,所以目前工程設 計上所使用之設計地震力係數,皆係由硬地盤上之地震紀錄經由地震 危害度分析求得,因此這些參數僅適用於硬地盤地區,對於軟弱地盤 條件,則須針對場址效應作適當之修正,方能使用,但目前國內各規 範對軟弱地盤之設計地震尚無完整、具體的規定。本章將分別就沖積 土層對地震之影響、軟弱土層之相關耐震規範及震波放大效應之相關 研究(黃富國,1996)等探討如下:

2.1 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:

2.1.1 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: $T = \frac{4H}{C} = 4\Sigma \frac{H_i}{C_i}$ 。H 為表面層總 厚度,Hi 為分層之厚度,Ci 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)K.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.某一地區振波如 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。

2.1.2 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 K.Kanai(1962)金井博士之 研究結果:

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

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, TG=表 面層之卓越週期, 1=表面層之質量, 2=基盤之質量, c1=表面 層之地震波速, c2=基盤之地震波速。

2.2 軟弱土層之相關耐震規範

2.2.1 日本規範

現行日本之耐震設計規範中,直接考慮不同地盤條件對地表最大 加速度之影響者甚少,大都只針對不同地盤條件上結構物之設計地震 力有所規定,雖然各規範之設計準則並無一致之標準,但其主要原則 不外乎將地盤依其土壤種類、厚度、剪力波速或地盤週期不同予以分 類,分別給予適當之地盤係數值,對設計地震力作修正;這些針對結 構物設計地震力所訂定之地盤係數,雖然無法直接代表地盤條件對地 表最大加速度之放大係數,但仍可由其間接瞭解各規範對場址效應之 考慮方向。

檢視日本土木研究所新耐震設計法(案)(日本土木研究所,1977)、 日本國鐵構造物耐震設計標準(日本國有鐵道,1979)及日本道路橋示 方書耐震設計篇(日本道路協會,1990),三規範對所謂之軟弱地盤雖 有其各自的定義,但相對於岩盤或硬地盤而言,均給予1.25~1.5 倍之 地盤係數值供結構設計時使用,以考慮軟弱地盤之效應。

2.2.2 美國規範

美國 AASHTO 橋梁耐震設計說明書(AASHTO, 1983)與 ATC3-06 完全一樣, 係參考 Seed et al.(1974)之研究成果將地盤分為三類, 對不

同地盤類別之地盤, 各有其正規化之 lg 反應譜, 所須之律常數(scaling factor)可由危害度分布圖查得, 但對於第三類地盤而言,當 PGA 等於 或大於 0.4g 時, 可將其乘以 0.8 之係數以考慮軟弱地盤效應, 事實上, 根據統計資料顯示, 此修正係數並非常數, 而是隨地盤運動之增大而 減少的, 通常小於此處所建議之 0.8。

此外,美國加州運輸局之橋梁耐震說明書(CALTRANS,1990)採用 ARS 反應譜設計法,其中之 S 代表土壤放大係數,係由 SHAKE 程 式作案例分析歸納所得,當土層厚度逐漸增厚時,或岩盤輸入運動之 PGA 變大時,在短週期範圍內,其 S 值均逐漸減小,此乃由土壤受震 之非線性反應所引致。

2.3 震波放大效應之相關研究

有關軟弱地盤地表最大加速度(PGA_s)放大(或折減)效應之案例研 究非常多,在此僅就國外重要文獻及本土資料之研究成果作一概述, 以了解已有之成果及將來發展之趨勢。

2.3.1 國外案例

1.美國

Seed et al.(1975)統計美國西部 23 次地震共 104 個地震紀錄之地 表 PGA_s與岩盤露頭最大加速度 PGA_R的關係,結果如圖 2-1 所示。 當岩盤露頭之 PGA_R值較小時,在較深厚或較軟弱土層地表之 PGA_S 值明顯較岩盤露頭為大,顯示土層具有放大之作用,但當岩盤露頭 之 PGA_R值較大時,在厚層軟弱土層上紀錄所得之 PGA_S 值反而較 岩盤露頭為小,上述兩種情形分界點之 PGA_R 值約介於 0.10~0.15g 之間。Idriss(1990)之研究(圖 2-2)也得到類似之趨勢,惟其分界點之 PGA_R值較高,約為 0.4g 左右,其樣本空間是 1985 年 9 月墨西哥地 震、1989 年 10 月美國 Loma Prieta 地震之資料,以及數值模式之計 算結果。 Borcherdt(1994)亦利用 1989 年 10 月美國 Loma Prieta 地震之地 震紀錄及豐富的地盤資料作土壤放大係數(反應譜放大係數)之研 究,並提出新的地盤分類法,根據近地表地層之材料性質、30m 深 度範圍內之平均剪力波速及使土層發生共振放大效應之最小厚度 (土層週期大於 0.1 秒),將地盤分為四類,並根據各類地盤之地震反 應資料歸納出短週期(0.1~0.5 秒)及中週期(0.4~2.0 秒)之反應譜放大 係數,如圖 2-3 所示;當土層愈軟(波速愈小)、輸入震波愈高頻(周 期愈低),地盤反應之非線性效應愈明顯,圖中顯示,第三類(SC-III) 及第四類(SC-IV)地盤之短週期反應譜在岩盤輸入運動之加速度值 較小時,有明顯放大作用,但當岩盤輸入之加速度值逐漸增大時, 其短周期反應譜之放大係數則逐漸減小,圖中亦顯示,當 I_a=0.4g 時,此兩類地盤之反應譜放大係數均為 0.9,反而有折減之效應。

2.日本

Kazuhiko & Keiichi(1991)統計日本東京灣附近 Ukishima 公園、 Futtsu 岬及 Kannonzaki 三處之下孔最大加速度紀錄與地表最大加速 度之比值(RD_{PGA}),所用之地震資料筆數依序為 28,54 及 124,所得 結果如圖 2-4 所示。該三工址之地質剖面如圖上所示,Ukishima 公 園近地表為一相當軟弱之沖積土層,剪力波速只有 120~170m/sec, 而 Futtsu 岬近地表為砂與粉質砂互層,其剪力波速為 240~300m/sec,另外 Kannonzaki 則為近地表產生風化之堅硬岩石地 盤,其剪力波速估計約為 600~1000m/sec。圖示結果顯示 PGA 放大 效應主要發生於近地表處,尤其土層較軟弱之 Ukishima 公園工址最 明顯,且該工址 RD_{PGA} 值之變異帶寬也較小。

於 1995 年元月時, 關西地區則發生規模 7.2 的 Hyogoken-Nanbu 大地震,其中四個工址(簡稱 PI, SGK, TKS 及 KNK 工址)有量測到 下孔加速度紀錄,其中 PI 工址近地表處發生嚴重之液化破壞,而 TKS 工址則於地震後發生噴砂現象。該四處工址之剪力波速剖面如 圖 2-5 所示, 各工址近地表 60m 之剪力波速約 100~400m/sec 左右,

2-6

其中 KNK 工址最底部為堅硬岩盤,其餘工址埋設地震儀之最深處 (約地下 100m)則為更新世(Pleistocene)之礫石土層,此次地震該四工 址實測最大加速度隨深度變化之關係如圖 2-6 所示,圖中顯示,除 液化工址 PI 外,其餘三工址在地表下 25m 處之 PGA 值與地盤深處 之最大加速度 PGA_B大小差異極微,顯示放大效應主要仍發生於近 地表處。至於地表 PGA_S及 PGA 放大係數 M_{A,S}(=PGA_S/PGA_B)與地 盤深處 PGA_B之關係分別如圖 2-7 及圖 2-8 所示,由圖中可知,當 PGA_B較小時,M_{A,S}很大,但當 PGA_B漸大時,由於土壤的非線性效 應,因此 M_{A,S}漸小,至於液化工址 PI,因其地表土層之剪力強度幾 已完全喪失,因此地表 PGA_S遠小於地盤深處之 PGA_B。

此外, Ishihara(1985)曾收集日本地區曾發生土壤液化之地震案例,發現液化工址表面附近約5公里以內的地表最大加速度約僅為 岩盤露頭紀錄之 0.65~0.9 倍,因此, Ishihara 建議在作土壤液化分 析時,土層地表之最大加速度值約可取附近岩盤露頭最大加速度值 之 0.8 倍。

2.3.2 國內案例

1.臺北盆地

溫國樑、葉永田(1996)以井下地震儀陣列資料,經由統計迴歸分 析,得臺北盆地之五股、板橋等測區最大加速度隨深度變化之關係圖, 如圖 2-9 至圖 2-11 所示,張吉佐等(1992)曾將臺北盆地之表土層及松 山層簡化為 60m 厚之地層,利用 SHAKE 程式以人造地震進行地盤 受震反應分析,其結果如圖 2-12 所示。圖中亦顯示 PGA 放大係數 $M_{A,S}$ (該圖以 表示)有隨基盤 PGA_B 增大而減小之趨勢,當 PGA_B < 0.2g 時, $M_{A,S}$ > 1.0;而當 PGA_B > 0.2g 時, $M_{A,S}$ < 1.0。

2.羅東工址

Wen(1994)曾分析蘭陽沖積平原上 SMART-1 強震陣列資料,比較沖積層地表 PGA 與岩盤露頭 PGA 之關係,發現其比值隨岩盤露

頭 PGA 之增加而減小,如圖 3-13 所示,其關係符合 Sugito & Kameda(1990)之理論轉換曲線(S_n=0.45,d_p=60),比值減小之現象係由 土壤之非線性行為所引起。上述統計分析之樣本資料大都為岩盤露 頭 PGA 小於 0.2g 者,對於更大之地震動,土壤之非線性行為將更 顯著,推測其 PGA 比值將更為減小。

張吉佐等(1992)亦利用 SMART-1 地震資料, 再補充全省性強震 觀測網 SMA 資料, 分析芮氏規模約 5、6、7 地震之軟地盤 PGA 放 大係數與硬地盤震動強度 PGA 之變化關係, 如圖 2-14 所示, 圖中 顯示 M_{A,S}(該圖以 表示)隨硬地盤 PGA 增大而減小, 且地震規模愈 大, M_{A,S}愈小。



圖 2-1 美國不同地盤條件之地表 PGA_S與岩盤露頭 PGA_R關係圖 (Seed et al., 1975)



圖 2-2 軟弱地盤地表 PGA_s與岩盤露頭 PGA_R之關係圖 (Idriss, 1990)



(a) Short-period F_a and (b) mid-period F_v amplification factors with respect to Firm to Hard rock, SC-lb, plotted as a continuous function of mean shear-wave velocity, using the indicated equations for specified levels of input ground motion (equations 2 or 4, see text) Amplification factors with respect to SC-lb for the simplified site classes also are shown.

圖 2-3 各種地盤相對於堅硬岩盤之短周期及中周期反應譜放大函數量 (Borcherde, 1994)





圖 2-4 日本東京灣附近三處工址之地盤最大加速度比值隨深度變化之 剖面圖(Kazuhiko & Keiichi, 1991)



2-12



圖 2-7 日本 Kobe 市附近四處工址之地盤最大加速度與量測最深處之 地盤最大加速度關係圖(取自 Sato et al, 1996)



圖 2-8 日本 Kobe 市附近四處工址之土層放大係數 (取自 Sato et al, 1996)



2-14







2-16



圖 2-12 臺北盆地 SHAKE 程式之土層放大係數分析結果 (張吉佐等,1992)



圖 2-13 蘭陽平原 SMART-1 地震資料之土層放大係數 (溫國樑,1994)



圖 2-14 蘭陽平原 SMA、SMART-1 地震資料之土層放大係數 (張吉佐等,1992)

第三章 港灣地區地震及動態孔隙水壓監測

3.1 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。

3.1.1 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。

- 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。

3.1.2 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。

3.1.3 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3-4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。

3.1.4 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,臺彎 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。

3.2 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 3-1 所示,每個監測系統規 劃設計原則說明如下:

- 每個系統設計監測儀霾設井各 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。
- 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。

 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 3-1 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、PC1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 3-2。



圖 3-2 機房及設備外觀示意圖

3.3 港區地震及動態水壓監測

3.3.1 港區地震及動態水壓監測站設置狀況

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。各港監測站之設置環境現況如圖 3-3 至 3-10。



圖 3-3 臺中港測站平面配置示意圖



圖 3-4 臺中港地震監測站照片



圖 3-5 臺北港監測站平面配置示意圖



圖 3-6 臺北港地震監測站照片



圖 3-7 高雄港地震監測站位置示意圖



圖 3-8 高雄港地震監測站照片



圖 3-9 蘇澳港地震監測站位置示意圖



圖 3-10 蘇澳港地震監測站照片

3.3.2 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 3-11:



圖 3-11 臺灣地區較可能影響港區之斷層分佈圖

3.3.3 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 3-12,其 300m 地質構造與特性如 圖 3-13 及圖 3-14 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-13.5m 主要為 SM ML 與 SP。 其 SPT-N 值幾乎小於等於 10, GL -13.5m 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 3-15 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 3-16。

2.臺北港區監測站地質構造與特性

臺北港區監測站地質構造如圖 3-17。

3.高雄港區監測站地質構造與特性

高雄港區監測站地質構造如圖 3-18。

4.蘇澳港區監測站地質構造與特性

蘇澳港區監測站地質構造如圖 3-19。

台中港區 30m 動水壓監測井地質調查概況																
地點:	台中港	豊26-27號	碼頭			孔	位		標高			孔深		-GL 3	0m	
孔號:	90THI	21							水位	-GL 3m						
日期:	2001/	6/18-19		執征	亍者	i:	賴聖	≧耀 蘇吉立		分析:	蘇吉立		試驗	:	張阿	Ŧ
深度	取樣	مريد المريد	上 🖻 🕂 🌾			現	地SI	PT-N 值	細粒含量	均勻係數	單位重	含水率	塑限	液限	比重	分類
М	编號	性沉圖	工層描述	15	30	45	計		FC%(<200#)	Cu	原土 d	%	PL%	LL%	Gs	
C	T							0 10 20 30 40		D/D	u					
0.5			卵礫石砂石及	·				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		D60/D10						
1.0			水泥塊回填料													
1.5	S-1-2	1		6	7	11	18		7.58	3.27	1.562	5.15				SM
2.0																
3.0	S-2-2			3	5	6	11		12.76	4.17	1.735	23.52				
3.5		1	- 布布粉十齊 -													
4.0	S-3-2		次已初工員 由細砂	3	6	8	14	+	25.38	75.00	1.717	22.63				
5.0		Ì														
5.5	642					40	40		10.02	25.00	1 700	22.49				
6.5	3-4-2			3	0	10	10		12.95	55.00	1.733	22.40				
7.0																
7.5	S-5-2		以十哲如孙	4	6	6	12	•	57.05	32.00	1.673	28.4				
8.5																
9.0	S-6-2	1///		4	8	10	18		21.32	34.17	1.676	24.7				
9.5			」 五粉十皙细砂偶													
10.0	S-7-2	// ["]	NUT 2000 00000000000000000000000000000000	4	6	7	13		41.5	36.67	1.658	29.09				
11.0		////														
11.5	587				4	6	10		47.02	22.22	1 625	22.1				
12.0	5-6-2	灰	色砂質粉土 1		4	0	10	••••	47.03	5.55	1.025	33.1				
13.0		N ////////////////////////////////////														
13.5	S-9-2			3	4	6	10		21.78	26.00	1.638	31.66				
14.0		(),///////	灰色砂質粉土													
15.0	S-10-2	///////	禺夾細砂薄層 」	3	3	7	10		16.69	3.60	1.72	28.62				
15.5		///////////////////////////////////////														
16.5	S-11-2		灰色砂質粘土	6	9	12	21		49.25	36.00	1.687	24.56				
17.0		-	與粘土彑僧													
17.5	S-12-2	1 灰色	色粉土質細砂	- 6	5	5	10		24.16	4 10	1 533	30.1				
18.5	0122	(////			Ŭ	Ŭ		• • • • • • • •	24.10		1.000	50.1				
19.0	0.10.0	////	灰色砂質粉土							10.00						
19.5 20 0	5-13-2	Ø //, .	偶夾粘土薄層		10	6	16		37.18	18.00	1.641	36.1				
20.5		/////		<u> </u>												
21.0	S-14-2		灰色粘土粘偶	2	4	5	9	•	51.34	16.92	1.567	32.23				
21.5			夾細砂薄層		\vdash	-		+ • • • • • • • • • • • • • • • • • • •								
22.5	S-15-2	ta	】 (色粉十皙细孙)	12	13	19	32		26.66	41.54	1.739	21.16				
23.0																
23.5	S-16-0	灰色	色粉土質中細砂	0	10	8	18									
24.5																
25.0	\$ 17	/////				40	\$		EA	22.50	1 607	00.00		<u> </u>		
25.5	3-1/-			<u> </u>	9	10	19	$\left \left \cdot \cdot \cdot \right \right $	51	22.50	1.067	20.23				
26.5		1111														
27.0	S-18-		∎ 灰色砂質粉士	5	8	15	23		75.25	24.00	1.578	30.27				
27.5			禺夾粘土薄層			-				<u> </u>						
28.5	S-19-	/////		10	13	12	25		14.32	3.67	1.751	22.32				
29.0		/////			\square											
29.5	S-20-	////		10	12	19	31	<u>.</u>	43.23	21.11	1.697	26.43		<u> </u>		
	[/	東京	則振PWG-35G型	小昼	₹計N	lo:01	0288-	埋設深度GL-29.:	ōm	1						
			PWG-35G <u>理</u>	小屋	計N	o:01	0287-	埋設深度GL-19.2	/5m							

圖 3-12 臺中港 26 號碼頭地震監測站 30m 地質調查概況

深度	取樣	杜宇國	十國描述	細粒含量	均勻係數	塑限	液限	USCS		P-S Logging 試驗結
М	台尺編號			FC%	Cu	PL	LL	分類		(m/sec)
GL		000.000000000.0		<200 [#] 篩	D ₆₀ /D ₁₀				0	500 1000 1500 2000
10			回填砂石						10	
20									10	
20			沉泥香细心						20	
30			偶夾粉土						30	• • • • • • • • • • • • • • • •
40	S1 45 164			08	6.67	17 1/	28	CT	40	(-Vs)' (-Vp)-
50	S1-43-164 S2-164-177		沉泥ケル	90	6.67	17.14	20	C	50	
00	S3-177-224		加化良砂	7	4.22	17.1	20.0		60	
70			沉泥質細砂	1	4.22				70	
			偶夾粉土					~~	80	
90	S4-224-305			84	5.00	13.15	21.5	CL	90	
100	S5-305-345		沉泥買砂	4	2.35			SP	深 ¹⁰⁰	
110	345-350		砂石						度110	· ₽ E E E E E E E E
120									m120	
130	S6-350-451		灾况每知小	78	8.57	16.9	27.0	CL	130	
140	S7-451-480		偶夾粉土	3	3.91			SP	140	
150	S8-480-485			68	1.79	12.9	19.0	CL	150	
160	S9-485-505			19	36.67	16.5	28.0	CL	160	
170	S10-505-530		沉泥質砂	3	4.44			SP	170	
180	S11-530-581		砂石	16	44.44			SM	180	
190	S12-581-620			3	2.78			SP	190	
200	S13-620-675		沉泥貿細砂 偶夾粉土	57	57.94	14.34	22.00	CL	200	
210									200	
220			沉泥質砂							
230	S14-675-765			4	2.65			SM		
240	765-810		砂石					GM		
250	S15-810-815			57	57.94	14.32	24.50	CL		
260			沉泥質砂							
270										
280										
290			砂石					GM		
300										

圖 3-13 臺中港 26 號碼頭地震監測站 300m 地層構造圖與特性



圖 3-14a 臺中港地震監測站液化潛能評估結果-1 (M=7.3,Amax=0.163g)



圖 3-14b 臺中港地震監測站液化潛能評估結果-2 (M=7.3, Amax=0.163g)



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



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



圖 3-17 臺北港地震監測站地層構造與地震及水壓監測深度圖



圖 3-18 高雄港地震監測站地層構造與地震及水壓監測深度圖



圖 3-19 蘇澳港地震監測站地層構造與地震及水壓監測深度圖

第四章 臺中港地震監測結果分析

4.1 地震監測結果分析

本研究於民國 90 年底完成臺中港監測站,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地層之放大特性,統計臺中港測站(26 號碼頭)實測地震波資料,分別以正規化及未正規化,比較東西向 (EW)、南北向(SN)及垂直向(V)之尖峰加速度隨深度之變化,其結 果如表 4-1 至 4-4。

圖 4-1 為振幅較大之 91 年 3 月 31 日之地震歷時圖,圖 4-2 為數組 最大加速度隨深度變化圖。由圖 4-1 及圖 4-2 顯示:東西向(EW)、南 北向(SN) 及垂直向(V)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4-3所示,迴歸函數如下列所示。

南北向: PGA=exp(-0.20*(深度)^{0.30}).....(4-1)

東西向:PGA=exp(-0.24*(深度)^{0.25}).....(4-2)

垂直向: PGA=exp(-0.10*(深度)^{0.45}).....(4-3)

由圖 4-3a 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。

由圖 4-3b 迴歸分析結果可發現: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。

由圖 4-3c 迴歸分析結果可發現: 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 4-4 為 Seed & Idriss (1971)有關應力折減因數隨深度變化範圍 之研究,由圖 4-3 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結果,如圖 2-2 所示, 由圖 2-2 可發現:震波放大有非線性效應,即各最大加速度值之震波 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 4-5 所示。 由圖 4-5 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。

4.2 SHAKE 地震模擬分析

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 4-6 及圖 4-7 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 4-8 所示。

圖 4-9 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 4-1a 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。

4.3 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

4-3

於 65 gal 以上,才會有動態孔隙水壓之激發,由於監測期間於港區附 近未有強震發生,因此亦未有地震引致土壤孔隙水壓逐漸上升之監測 資料,俟有動態孔隙水壓之監測資料時再進行分析。

地下水壓除受強震之影響外,亦受潮汐之影響,瞭解地下水壓變 化受潮汐及地震波動之影響,有助於更進一步瞭解港區地層之液化行 為。故本研究除擷取地震時之動水壓資料外,亦同時量測當時之潮位 與臨孔之地下水,以為日後比較研析之用。圖 4-6 即為 2001 年 8 月 6 日當日之動水壓與潮位量測資料之比較圖。



圖 4-1a 臺中港 2002 年 3 月 31 日 14 點 53 分地震波(南北向)



圖 4-1b 臺中港 2002 年 3 月 31 日 14 點 53 分地震波(東西向)



圖 4-1c 臺中港 2002 年 3 月 31 日 14 點 53 分地震波(垂直向)



圖 4-2a 臺中港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖



圖 4-2b 臺中港井下地震儀東西向之最大加速度隨深度變化圖



圖 4-2c 臺中港井下地震儀垂直向之最大加速度隨深度變化圖



圖 4-3a 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 4-3b 臺中港井下地震儀東西向正規化之最大加速度隨深度變化圖



圖 4-3c 臺中港井下地震儀重直向正規化之最大加速度隨深度變化圖



圖 4-4 應力折減因數 r_a 隨深度之變化範圍 (Seed & Idriss, 1971)



圖 4-5a 臺中港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖



圖 4-5b 臺中港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖



圖 4-5c 臺中港垂直向震波放大倍率與最大加速度之關係圖



圖 4-6 臺灣西海岸港區沉泥質砂性土壤 G/Gmax 與剪應變之關係



圖 4-7 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 4-8 臺中港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖



圖 4-9 臺中港 2002 年 3 月 31 日-SHAKE 模擬地震(南北向)



圖 4-10 臺中港地震監測站地下水壓隨潮汐之單日連續變化關係圖

表 4-1 臺中港區實測地震波篩選資料-1

台中港26號	 飞碼頭地	震波放大效應	憲統計分析資料-1

地震編號	地震 規模	震源 深度	監測 深度		尖峰加速度							
西元年月時分秒	М	Km		SN	正規化 SN	EW	正規化 EW	Ⅴ垂直	正規化 V			
			0	3.103	3.739	2.842	2.612	1.067	3.253			
			10	2.923	3.522	1.799	1.653	0.938	2.860			
20010918064511	5.4	3.2	20	2.168	2.612	1.407	1.293	0.641	1.954			
			100	1.461	1.760	0.916	0.842	0.335	1.021			
			283	0.830	1.000	1.088	1.000	0.328	1.000			
			0	0.528	2.514	0.763	3.704	0.333	3.083			
			10	0.391	1.862	0.335	1.626	0.463	4.287			
20011014040743	4.5	10.6	20	0.306	1.457	0.337	1.636	0.187	1.731			
			100	0.255	1.214	0.288	1.398	0.088	0.815			
			283	0.210	1.000	0.206	1.000	0.108	1.000			
			0	1.356	3.578	1.606	3.155	0.984	4.514			
			10	0.935	2.467	0.729	1.432	0.848	3.890			
20011014040743 20011026184330 20011104164552 20011216090548	5.2	9.3	20	0.635	1.675	0.792	1.556	0.413	1.894			
			100	0.639	1.686	0.511	1.004	0.332	1.523			
			283	0.379	1.000	0.509	1.000	0.218	1.000			
			0	3.167	3.193	3.551	3.014	1.987	2.632			
20011104164552	5.1	5.9	10	2.929	2.953	3.345	2.840	1.846	2.445			
			20	1.598	1.611	2.663	2.261	1.300	1.722			
			100	1.640	1.653	1.444	1.226	0.916	1.213			
			283	0.992	1.000	1.178	1.000	0.755	1.000			
		Km 3.2 10.6 9.3 5.9 71.7 32.2 5 2.5	0	1.190	3.469	1.135	3.368	0.513	4.311			
			10	0.723	2.108	0.749	2.223	0.459	3.857			
20011104164552 20011216090548	5.3		20	0.552	1.609	0.706	2.095	0.277	2.328			
			100	0.381	1.111	0.502	1.490	0.148	1.244			
			283	0.343	1.000	0.337	1.000	0.119	1.000			
			0	5.232	1.934	5.453	2.349	3.065	2.175			
			10	5.063	1.872	4.216	1.816	2.291	1.626			
20011218120347	6.7	32.2	20	4.256	1.573	4.423	1.906	2.417	1.715			
			100	2.870	1.061	3.632	1.565	1.664	1.181			
			283	2.705	1.000	2.321	1.000	1.409	1.000			
			0	7.459	2.407	8.096	3.082	3.777	2.681			
			10	5.450	1.759	3.883	1.478	3.180	2.257			
20020109010050	5.3	5	20	4.225	1.363	3.976	1.514	2.222	1.577			
			100	3.011	0.972	4.985	1.898	1.639	1.163			
			283	3.099	1.000	2.627	1.000	1.409	1.000			
			0	14.986	5.271	7.435	2.122	2.692	2.454			
西元年月時分秒 20010918064511 20011014040743 20011026184330 20011104164552 20011216090548 20011218120347 20020109010050 20020109010050			10	6.380	2.244	4.207	1.201	3.135	2.858			
20020115021047	4.8	2.5	20	7.750	2.726	4.586	1.309	2.412	2.199			
西元年月時分秒 20010918064511 20011014040743 20011026184330 20011104164552 20011216090548 20011218120347 20020109010050 20020109010050		.0 2.0	100	4.146	1.458	3.569	1.019	1.545	1.408			
					283	2.843	1.000	3.503	1.000	1.097	1.000	

表 4-2 臺中港區實測地震波篩選資料-2

地震編號	地震 規模	震源 深度	監測 深度		尖峰加速度							
西元年月時分秒	М	Km		SN	正規化 SN	EW	正規化 EW	V垂直	正規化 V			
			0	2.939	4.585	1.638	2.402	1.511	6.167			
			10	1.087	1.696	0.994	1.457	0.847	3.457			
20020115045540	4.4	5.3	20	1.477	2.304	1.000	1.466	0.507	2.069			
			100	0.739	1.153	0.726	1.065	0.360	1.469			
			283	0.641	1.000	0.682	1.000	0.245	1.000			
			0	14.553	2.125	28.163	5.855	6.949	2.015			
			10	12.646	1.846	20.564	4.275	5.713	1.657			
20020212112748	6.2	25.1	20	8.075	1.179	9.982	2.075	4.991	1.448			
			100	5.955	0.869	6.890	1.432	2.674	0.776			
			283	6.850	1.000	4.810	1.000	3.448	1.000			
			0	2.188	4.493	1.843	2.567	0.843	3.255			
			10	1.574	3.232	1.204	1.677	0.622	2.402			
20020212114336	5.2	21.7	20	1.120	2.300	0.986	1.373	0.541	2.089			
			100	0.749	1.538	0.778	1.084	0.305	1.178			
			283	0.487	1.000	0.718	1.000	0.259	1.000			
			0	2.248	3.722	1.769	3.087	1.268	2.481			
20020212120019		24.2	10	0.884	1.464	1.134	1.979	0.732	1.432			
	5.2		20	0.782	1.295	1.066	1.860	0.690	1.350			
			100	0.708	1.172	0.922	1.609	0.651	1.274			
			283	0.604	1.000	0.573	1.000	0.511	1.000			
			0	1.486	2.283	1.769 1.134 1.066 0.922 0.573 2.718 1.265 1.143 0.972	3.765	1.292	3.054			
			10	1.038	1.594	1.265	1.752	0.706	1.669			
20020304170448	4.9	13.3	13.3	20	0.896	1.376	1.143	1.583	0.624	1.475		
			100	0.702	1.078	0.872	1.208	0.645	1.525			
			283	0.651	1.000	0.722	1.000	0.423	1.000			
			0	1.802	2.138	2.654	4.476	0.989	2.322			
			10	1.156	1.371	1.200	2.024	0.734	1.723			
20020314192611	4.8	9.5	20	1.049	1.244	1.478	2.492	0.595	1.397			
			100	0.645	0.765	0.719	1.212	0.310	0.728			
			283	0.843	1.000	0.593	1.000	0.426	1.000			
			0	40.908	3.751	23.371	1.803	11.441	1.913			
20020314192611			10	38.850	3.562	23.981	1.851	11.577	1.936			
20020331145320	6.8	9.6	20	29.579	2.712	22.431	1.731	10.240	1.712			
20020304170448 20020314192611 20020331145320			100	12.894	1.182	11.894	0.918	8.233	1.377			
			283	10.906	1.000	12.959	1.000	5.981	1.000			
			0	0.359	2.740	0.345	1.938	0.206	2.901			
西元年月時分秒 20020115045540 20020212112748 20020212114336 20020212120019 20020304170448 20020304170448 20020314192611 20020314192611			10	0.276	2.107	0.253	1.421	0.195	2.746			
20020401011024	4.8	11.1	20	0.187	1.427	0.191	1.073	0.143	2.014			
			100	0.152	1.160	0.121	0.680	0.068	0.958			
	JUNK 規模 M 4.4 6.2 5.2 5.2 5.2 4.9 4.8 6.8 4.8		1			283	0.131	1.000	0.178	1.000	0.071	1.000

台中港26號碼頭地震波放大效應統計分析資料-2

表 4-3 臺中港區實測地震波篩選資料-3

地震編號	地震 担措	震源	監測	尖峰加速度							
而一年日時公孙		/不反 Km	床反	SN	正規化	EW	正規化	V垂直	正規化		
四九十万时刀秒	IVI	KIII	0	1 1 1 0	2 207	1 204	E W	0.602	V 0.474		
			10	0.952	2.307	1.304	3.730	0.603	2.471		
20020404020641	5 A	10.2	10	0.002	1.700	1.101	3.129	0.020	2.041		
20020404020041	0.4	10.5	100	0.073	1.390	0.675	2.009	0.440	1.024		
			100	0.030	1.320	0.073	1.019	0.313	1.291		
			203	0.402	1.000	0.371	1.000	0.244	1.000		
			10	0.000	2.200	0.000	2.031	0.329	2.301		
20020404210532	10	15 7	20	0.032	2.409	0.324	2.104	0.300	2.140		
20020404210332	4.9	15.7	100	0.324	0.012	0.379	1.022	0.240	1.734		
			100	0.230	1.000	0.299	1.201	0.193	1.000		
			203	0.207	1.000	0.249	1.000	0.143	1.000		
			10	0.102	1.020	0.177	0.072	0.097	1.940		
20020411025747	15	12.6	20	0.113	0.000	0.100	0.972	0.120	2.020		
20020411023747	4.5	13.0	20	0.095	0.090	0.114	1.040	0.007	0.700		
			100	0.077	0.720	0.062	0.009	0.035	0.700		
			203	0.100	1.000	0.109	1.000	0.000	1.000		
			10	5.400	3.404	0.207	3.333	3.320	2.000		
20020515114625	C F	F	10	0.211	3.290	4.900	2.700	3.075	2.344		
西元年月時分秒 20020404020641 20020404210532 20020411025747 20020515114635 20020529004601 20020530145406 20020718031540	6.5	5	20	3.997	2.320	3.012	2.100	2.179	1.001		
			100	2.200	1.427	2.334	1.450	1.4/0	1.120		
			283	1.081	1.000	1.701	1.000	1.312	1.000		
			10	3.333	2.002	3.707	2.444	1.502	2.400		
20020520004601	<u> </u>	F 7	10	2.910	2.270	3.092	2.038	1.307	2.408		
20020329004001	0.2	Э. <i>1</i>	20	2.400	1.910	2.884	1.901	1.432	2.200		
			100	1.043	1.439	1.993	1.314	1.094	1.723		
			203	1.201	1.000	1.317	1.000	0.030	1.000		
			10	2.000	2.042	4.720	3.971	4.741	2.000		
20020520145404	50	01 1	10	2.110	2.027	2.034	1.709	3.110	1.099		
20020330143400	5.9	91.1	20	2.20/	2.109	2.001	2.100	3.050	1.003		
			100	1.001	1.702	1.422	1.190	1.040	1.000		
			203	1.040	1.000	0.015	1.000	0.616	1.000		
			10	0 770	4.440	0.015	1.031	0.010	4.//5		
20020718021540	51	16.0	20	0.717	2.307	0.001	1.201	0.010	3.992		
20020710031340	5.1	40.9	100	0.717	2.199	0.005	0.010	0.201	1.940		
			200	0.000	1.002	0.409	1 000	0.170	1.000		
			203	0.320	2 4 4 4	0.440	2,000	0.129	0.000		
20020404210532 20020411025747 20020515114635 20020529004601 20020530145406 20020718031540 20020718031540			10	2.004	3.141	2.028	2.330	0.917	2.178		
20020820010641	e	12.0	20	1.498	2.291	1.010	2.3/8	0.000	2.109		
20020629010041	0	13.2	100	0.740	1.090	1.024	1.013	0.707	1.079		
			100	0.740	1.141	0.677	1.020	0.000	1.271		
			203	0.004	1.000	0.077	1.000	U.4Z1	1.000		

台中港26號碼頭地震波放大效應統計分析資料-3

表 4-4 臺中港區實測地震波篩選資料-4

地震編號	地震 規模	震源 深度	監測 深度			尖峰加	口速度		
西元年月時分秒	М	Km		SN	正規化 SN	EW	正規化 EW	V垂直	正規化 V
20020830040635			0	1.332	2.804	1.882	4.287	0.989	4.495
			10	0.810	1.705	1.081	2.462	0.816	3.709
20020830040635	5.6	83	20	0.947	1.994	0.910	2.073	0.496	2.255
			100	0.784	1.651	0.638	1.453	0.311	1.414
			283	0.475	1.000	0.439	1.000	0.220	正規化 V 4.495 3.709 2.255 1.414 1.000 7.203 3.767 2.272 1.267 1.267 1.200 3.004 1.915 1.309 1.309 1.309 2.3.450 3.518 2.073 3.518 2.073 3.1.358 3.1.000
20020901135716	5.6		0	1.152	2.776	1.543	4.447	1.671	7.203
		2.5	10	0.985	2.373	0.958	2.761	0.874	3.767
			20	0.637	1.535	0.850	2.450	0.527	2.272
			100	0.533	1.284	0.650	1.873	0.294	1.267
			283	0.415	1.000	0.347	1.000	0.232	1.000
			0	20.908	4.299	16.112	2.513	7.741	3.004
20020901135716 20020906190214			10	13.250	2.725	11.884	1.853	4.935	1.915
20020906190214	5.5	26	20	11.413	2.347	9.163	1.429	3.404	1.321
西元年月時分秒 20020830040635 20020901135716 20020906190214 20020908070010			100	6.231	1.281	7.343	1.145	3.374	1.309
			283	4.863	1.000	6.412	1.000	2.577	1.000
			0	1.471	2.936	1.632	2.766	0.752	3.450
			10	0.923	1.842	1.117	1.893	0.767	3.518
20020908070010	5.5	40	20	0.790	1.577	0.881	1.493	0.452	2.073
			100	0.593	1.184	0.549	0.931	0.296	1.358
			283	0.501	1.000	0.590	1.000	0.218	1.000

台中港26號碼頭地震波放大效應統計分析資料-4
第五章 臺北港地震監測結果分析

5.1 地震監測結果分析

本研究於民國 91 年底完成臺北港井下地震儀監測站,以期藉由所 收到之地震紀錄進行各方面之研究,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,表 5-1 為 17 組地震之規模、震央與震源深度,其各深度之最大加速度如表 5-2 至 5-12 所示。

	a+ 88		位置		+0.1#	
No	時間	緯度	經度	深度 km	規模	
1	2003 5 15 9:18 04.00	25° 18'	122° 14.8'	4.4	5.4	
2	2003 5 26 17:25 31.00	24° 42'	121° 41.4'	70.3	4.9	
3	2003 6 09 09:53 10.00	24° 24'	121° 59.4'	21.3	6.3	
4	2003 6 09 13:08 24.00	24° 23.4'	121° 51'	9.7	5.3	
5	2003 6 10 16:41 02.00	23° 31.2'	121° 40.2'	27.6	6.5	
6	2003 6 12 21:41 49.00	24° 22.8'	121° 49.8'	12.9	5.0	
7	2003 6 17 02:34 15.00	23° 33.6'	121° 36.6'	18.8	5.9	
8	2003 7 13 23:06 48.00	24° 28.2'	121° 52.8'	16.4	5.0	

表 5-1 臺北港井下地震觀測資料之規模、震央與震源深度

9	2003 7 18 10:41 36.00	24° 35.4'	121° 50.4'	72.6	5.4
10	2003 7 31 02:37 27.00	23° 55.8'	122° 27.6'	46.8	5.3
11	2003 8 03 19:35 42.00	24° 15.0'	121° 42.0'	56.5	5.5
12	2003 8 12 00:30 27 00	24° 38.4'	121° 34.2'	56.0	5.6
13	2003 9 26 07:42 59.70	24° 19.2'	121° 54.0'	20.5	4.9
14	2003 11 09 13:36 06.00	24° 50.4'	121° 55.2'	79.3	5.4
15	2003 11 12 08:02 56.00	24° 27.6'	121° 55.2'	20.7	5.5
16	2003 11 14 23:54 39.00	24° 07.2'	121° 42.0'	27.6	5.1
17	2003 12 10 12:39 01.00	23° 06.0'	121° 20.4'	10.0	6.6

圖 5-1 為其中振幅較大之 92 年 6 月 10 日之地震歷時圖,圖 5-2 為數組最大加速度隨深度變化圖。由圖 5-1 及圖 5-3 顯示:東西向 (EW)、南北向(SN)及垂直向(V)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 5-3 所示,迴歸函數如下列所示。

南北向: PGA=exp(-0.16*(深度)^{0.38})(5-1) 東西向: PGA=exp(-0.21*(深度)^{0.32})(5-2) 垂直向: PGA=exp(-0.22*(深度)^{0.28})(5-3) 由分析觀測與回歸結果有幾點特別值得注意,首先由水平 向觀測結果發現,30 公尺深之 PGA 值大於 14 公尺深之 PGA 值,此點違反一般深度越深 PGA 值越小之情況,推測造成此 一不尋常之原因為此二深度之地震儀位於同一地層,故未發 生振波音穿透低速層所發生之放大現象,相反的由於衰減因 素造成能量降低,使得較深之 PGA 值大於淺部之 PGA 值,對 照地層速度構造調查結果,此二深度之地震儀均為於深度 8~ 36 公尺之地二層內,亦符合上述之推測。令一值得注意的是 PGA 明顯之放大不在淺層與地表之間,而是發生在 30 與 100 公尺之間,同樣對照臺北港地震監測站各層土壤之剪力波速 ,如圖 5-4 所示,港區內地下地層剪力波速度對比最大之介 面位於 36 公尺處,此點也說明 PGA 明顯之放大不在淺層與地 表之間,而是發生在 30 與 100 公尺之間的原因。

由圖 5-3a 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。

由圖 5-3b 迴歸分析結果可發現: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。

由圖 5-3c 迴歸分析結果可發現: 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

5-3

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 4-4 所示,由圖 5-3 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。

Idriss(1990)對軟弱地盤震波放大效應之研究結果,如圖 2-2 所 示,由圖 2-2 可發現:震波放大有非線性效應,即各最大加速度值之 震波放大效應不同。因此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 5-5 所 示,由圖 5-5 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。

5.2 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 4-6 及圖 4-7 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 5-4 所示。

圖 5-6 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 5-1a 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

5-4

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。

5.3 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 SHA KE 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 5-7 為加速度在 R 與 T 方向之模擬與觀測比較圖。 由圖 5-7 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。



圖 5-1a 臺北港 2003 年 6 月 10 日 16 時 41 分地震(南北向)



圖 5-1b 臺北港 2003 年 6 月 10 日 16 時 41 分地震(東西向)



圖 5-1c 臺北港 2003 年 6 月 10 日 16 時 41 分地震(垂直向)



圖 5-2a 臺北港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖



圖 5-2b 臺北港井下地震儀東西向之最大加速度隨深度變化圖



圖 5-2c 臺北港井下地震儀垂直向之最大加速度隨深度變化圖



圖 5-3a 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 5-3b 臺北港井下地震儀東西向正規化之最大加速度隨深度變化圖



圖 5-3c 臺北港井下地震儀垂直向正規化之最大加速度隨深度變化圖



圖 5-4 臺北港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖



圖 5-5a 臺北港南北向震波放大倍率與最大加速度之關係圖



圖 5-5b 臺北港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖



圖 5-5c 臺北港垂直向震波放大倍率與最大加速度之關係圖



圖 5-6 臺北港 2003 年 6 月 10 日-SHAKE 模擬地震(南北向)







圖 5.7b 2003 年 6 月 10 日模擬與觀測加速度在 T 方向比較圖

編號: _{1/2}	規模: _{5.4}	深度: _{4.4 km}	編號: 2/2	規模: _{4.9}	深度: _{70.3 km}
地震時間:	03/05/15/9:17'42.	1"	地震時間:	03/05/26/17:25'16	.6"
記錄時間:	03/05/15/9:18'04.	0"	記錄時間:	03/05/26/17:25'31	
震央位置:	北緯:25°18′	東經:122°14.8'	震央位置:	北緯: _{24°42} '	東經:121°41.4'
頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)
₁₍ 南北 ₎	地表	1.84	₁₍ 南北)	地表	11.02
₂₍ 東西)	地表	1.82	₂₍ 東西)	地表	4.64
3(垂直)	地表	1.45	₃₍ 垂直)	地表	2.16
₄₍ 南北)	14m	1.30	₄₍ 南北)	14m	6.03
₅₍ 東西)	14m	1.38	₅₍ 東西)	14m	3.02
₆₍ 垂直)	14m	1.45	₆₍ 垂直)	14m	1.56
₇₍ 南北)	29m	1.02	₇₍ 南北)	29m	5.30
₈₍ 東西)	29m	1.30	₈₍ 東西)	29m	2.84
₉₍ 垂直)	29m	1.23	₉₍ 垂直)	29m	1.20
10(南北)	99m	0.47	10(南北)	99m	2.81
11(東西)	99m	0.80	11(東西)	99m	1.12
₁₂₍ 垂直)	99m	0.78	₁₂₍ 垂直)	99m	0.77
13(南北)	297m	0.56	13(南北)	297m	1.74
14(東西)	297m	0.80	14(東西)	297m	1.70
15(垂直)	297m	0.64	15(垂直)	297m	0.68

表5-2 台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003年5月份-共2筆)

表5-3 台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003年6月份-共5筆)

			1		- /	
編號 : _{1/5}	規模: _{6.3}	深度: _{21.3 km}	編號: 2/5	規模: _{5.3}	深度:9.7 km	
地震時間:	03/06/09/9:52'52.	6"	地震時間:	03/06/09/13:08'4.9"		
記錄時間:	03/06/09/9:53'10.0	D"	記錄時間:	03/06/09/13:08'4.9	9"	
震央位置:	北緯: _{25°18'}	東經:122°14.8'	震央位置:	北緯: _{24°23.4'}	東經: _{121°51} ′	
頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道 ₍ 方向 ₎	儀器深度	PGA(gal)	
₁₍ 南北)	地表	10.34	₁₍ 南北)	地表	4.28	
2(東西)	地表	10.43	2(東西)	地表	3.89	
₃₍ 垂直)	地表	4.75	₃₍ 垂直)	地表	1.81	
₄₍ 南北)	14m	7.26	₄₍ 南北)	14m	2.66	
₅₍ 東西)	14m	7.62	₅₍ 東西)	14m	1.64	
₆₍ 垂直)	14m	5.07	₆₍ 垂直)	14m	1.59	
₇₍ 南北 ₎	29m	5.24	₇₍ 南北 ₎	29m	3.09	
₈₍ 東西)	29m	6.17	₈₍ 東西)	29m	1.87	
9(垂直)	29m	3.55	9(垂直)	29m	1.28	
10(南北)	99m	5.04	10(南北)	99m	1.55	
11(東西)	99m	3.79	₁₁₍ 東西)	99m	1.15	
12(垂直)	99m	2.60	₁₂₍ 垂直)	99m	0.91	
13(南北)	297m	3.43	13(南北)	297m	1.20	
14(東西)	297m	4.33	14(東西)	297m	1.08	
15(垂直)	297m	2.29	15(垂直)	297m	0.66	

				2003 : 0:	••••••
編號: 3/5	規模: _{6.5}	深度: _{27.6 km}	編號: 4/5	規模: _{5.0}	深度: _{12.9 km}
地震時間:	03/06/10/16:40'32	.7"	地震時間:	03/06/12/21:41'14	.2"
記錄時間:	03/06/10/16:41'02		記錄時間:	03/06/12/21:41'49	"
震央位置:	北緯: _{23°31.2'}	東經:121°40.2"	震央位置:	北緯: _{24°22.8′}	東經:121°49.8'
頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)
₁₍ 南北 ₎	地表	14.36	₁₍ 南北)	地表	1.78
₂₍ 東西)	地表	9.96	₂₍ 東西)	地表	1.08
₃₍ 垂直)	地表	5.37	₃₍ 垂直)	地表	0.62
₄₍ 南北)	14m	5.79	₄₍ 南北)	14m	0.68
₅₍ 東西)	14m	7.44	₅₍ 東西)	14m	0.58
₆₍ 垂直)	14m	4.83	₆₍ 垂直)	14m	0.55
₇₍ 南北 ₎	29m	8.22	₇₍ 南北 ₎	29m	1.23
₈₍ 東西)	29m	7.73	₈₍ 東西)	29m	0.68
₉₍ 垂直)	29m	5.11	₉₍ 垂直 ₎	29m	0.34
10(南北)	99m	4.72	10(南北)	99m	0.49
11(東西)	99m	4.32	11(東西)	99m	0.40
12(垂直)	99m	1.84	12(垂直)	99m	0.24
13(南北)	297m	2.51	13(南北)	297m	0.35
14(東西)	297m	3.37	14(東西)	297m	0.34
15(垂直)	297m	2.36	15(垂直)	297m	0.22

表5-4 台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003年6月份-共5筆)

表5-5 台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003年6月份-共5筆)

			, i		-
編號: 5/5	規模: _{5.9}	深度: _{18.8 km}	編號:	規模:	深度:
地震時間:	03/06/17/02:33"39	9.9"	地震時間:		
記錄時間:	03/06/17/02:34'15	;"	記錄時間:		
震央位置:	北緯:23° 33.6'	東經:121°36.6'	震央位置:	北緯:	東經:
頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)
₁₍ 南北)	地表	2.12	₁₍ 南北)	地表	
₂₍ 東西)	地表	2.01	₂₍ 東西)	地表	
₃₍ 垂直)	地表	2.81	₃₍ 垂直)	地表	
₄₍ 南北)	14m	1.78	₄₍ 南北 ₎	14m	
₅₍ 東西)	14m	1.44	₅₍ 東西)	14m	
₆₍ 垂直)	14m	2.26	₆₍ 垂直)	14m	
₇₍ 南北 ₎	29m	1.99	₇₍ 南北 ₎	29m	
₈₍ 東西)	29m	2.71	₈₍ 東西)	29m	
₉₍ 垂直)	29m	4.24	₉₍ 垂直)	29m	
10(南北)	99m	0.67	10(南北)	99m	
11(東西)	99m	0.77	11(東西)	99m	
12(垂直)	99m	0.42	₁₂₍ 垂直)	99m	
13(南北)	297m	0.71	13(南北)	297m	
14(東西)	297m	0.59	14(東西)	297m	
15(垂直)	297m	0.35	15(垂直)	297m	

					- J - J
編號: _{1/3}	規模: _{5.0}	深度: _{16.4 km}	編號: _{2/3}	規模: _{5.4}	深度: _{72.6 km}
地震時間:	03/07/13/23:06'30	0.5"	地震時間:	03/07/18/10:41'20	0.6"
記錄時間:	03/07/13/23:06'48	;"	記錄時間:	03/07/18/10:41'36	;"
震央位置:	北緯: _{24° 28.2'}	東經:121°52.8'	震央位置:	北緯: _{24° 35.4'}	東經:121°50.4'
頻道₍方向₎	儀器深度	PGA(gal)	頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)
₁₍ 南北 ₎	地表	1.57	₁₍ 南北)	地表	4.48
₂₍ 東西)	地表	1.14	₂₍ 東西)	地表	3.93
₃₍ 垂直)	地表	1.43	₃₍ 垂直)	地表	1.88
₄₍ 南北)	14m	0.95	₄₍ 南北)	14m	1.95
₅₍ 東西)	14m	0.89	₅₍ 東西)	14m	2.18
₆₍ 垂直)	14m	1.00	₆₍ 垂直)	14m	1.72
₇₍ 南北 ₎	29m	0.86	₇₍ 南北 ₎	29m	2.83
₈₍ 東西)	29m	0.83	₈₍ 東西)	29m	1.56
₉₍ 垂直)	29m	0.86	₉₍ 垂直)	29m	1.25
10(南北)	99m	0.49	10(南北)	99m	1.57
11(東西)	99m	0.48	11(東西)	99m	1.19
12(垂直)	99m	0.58	12(垂直)	99m	0.76
13(南北)	297m	0.56	13(南北)	297m	1.21
14(東西)	297m	0.58	14(東西)	297m	0.79
15(垂直)	297m	0.69	15(垂直)	297m	0.55

表一个	台北港州	「雪欧川か	と 短道黒	大加速度	首、っへって	,日份了	土っ筆、
1×5-6	ロイレバビー	い辰画別判	口炉归取	八川垈反	旦(2003十)	7/3 //_7	マイ手)

表5-7 台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003年7月份-共3筆)

01			I.		0)
編號: _{3/3}	規模: _{5.3}	深度: _{46.8 km}	編號: _/	規模:	深度: _{km}
地震時間:	03/07/31/02:36'9.7	7"	地震時間:		
記錄時間:	03/07/31/02:37'27		記錄時間:		
震央位置:	北緯: _{23° 55.8′}	東經:122°27.6'	震央位置:	北緯:	東經:
頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道 ₍ 方向)	儀器深度	PGA(gal)
₁₍ 南北)	地表	1.06	₁₍ 南北)	地表	
₂₍ 東西)	地表	0.79	₂₍ 東西)	地表	
3(垂直)	地表	0.53	₃₍ 垂直)	地表	
₄₍ 南北)	14m	0.99	₄₍ 南北)	14m	
₅₍ 東西)	14m	0.62	₅₍ 東西)	14m	
₆₍ 垂直)	14m	0.47	₆₍ 垂直)	14m	
₇₍ 南北)	29m	0.57	₇₍ 南北)	29m	
₈₍ 東西)	29m	0.53	₈₍ 東西)	29m	
9(垂直)	29m	0.37	9(垂直)	29m	
10(南北)	99m	0.26	10(南北)	99m	
11(東西)	99m	0.33	11(東西)	99m	
₁₂₍ 垂直)	99m	0.24	₁₂₍ 垂直)	99m	
13(南北)	297m	0.26	13(南北)	297m	
₁₄₍ 東西)	297m	0.23	14(東西)	297m	
15(垂直)	297m	0.20	15(垂直)	297m	

編號: _{1/2}	規模: _{5.5}	深度:56.5 km	編號: 2/2	規模: _{5.6}	深度: _{56 km}		
地震時間:	03/08/03/19:35'23	.8"	地震時間:	03/08/12/00:30'13	.4"		
記錄時間:	03/08/03/19:35'42		記錄時間:	03/08/12/00:30'27	"		
震央位置:	北緯: _{24°15.0'}	東經:121°42.0'	震央位置:	北緯: _{24° 38.4'}	東經:121°34.2'		
頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)		
₁₍ 南北)	地表	9.43	₁₍ 南北)	地表	53.54		
₂₍ 東西)	地表	7.45	₂₍ 東西)	地表	28.85		
₃₍ 垂直)	地表	4.74	₃₍ 垂直)	地表	10.44		
₄₍ 南北)	14m	4.49	₄₍ 南北)	14m	19.59		
₅₍ 東西)	14m	3.91	₅₍ 東西)	14m	12.88		
₆₍ 垂直)	14m	2.18	₆₍ 垂直)	14m	7.62		
₇₍ 南北 ₎	29m	5.02	₇₍ 南北 ₎	29m	22.77		
₈₍ 東西)	29m	1.95	₈₍ 東西)	29m	10.81		
₉₍ 垂直)	29m	1.82	₉₍ 垂直)	29m	4.58		
10(南北)	99m	2.31	10(南北)	99m	14.61		
11(東西)	99m	2.54	11(東西)	99m	9.04		
12(垂直)	99m	1.68	12(垂直)	99m	2.71		
13(南北)	297m	1.40	13(南北)	297m	8.94		
₁₄₍ 東西)	297m	1.70	14(東西)	297m	9.86		
15(垂直)	297m	1.00	15(垂直)	297m	4.10		

表5-8台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003年8月份-共2筆)

表5-9 台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003年9月份-共1筆)

			1		- /
編號: 1/1	規模: _{4.9}	深度: _{20.5}	編號:	規模:	深度:
地震時間:	03/09/26/07:42'59	9.7"	地震時間:		
記錄時間:	03/09/26/07:43'36	5"	記錄時間:		
震央位置:	北緯: _{24°19.2} ′	東經:121°54.0'	震央位置:	北緯:	東經:
頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)
₁₍ 南北)	地表	0.95	₁₍ 南北)	地表	
₂₍ 東西)	地表	1.17	₂₍ 東西)	地表	
₃₍ 垂直)	地表	1.30	₃₍ 垂直)	地表	
₄₍ 南北)	14m	0.64	₄₍ 南北)	14m	
₅₍ 東西)	14m	0.41	₅₍ 東西)	14m	
₆₍ 垂直)	14m	0.73	₆₍ 垂直)	14m	
₇₍ 南北 ₎	29m	0.47	₇₍ 南北 ₎	29m	
₈₍ 東西)	29m	0.62	₈₍ 東西)	29m	
9(垂直)	29m	0.51	₉₍ 垂直)	29m	
10(南北)	99m	0.40	10(南北)	99m	
11(東西)	99m	0.29	11(東西)	99m	
₁₂₍ 垂直)	99m	0.18	₁₂₍ 垂直)	99m	
13(南北)	297m	0.29	13(南北)	297m	
14(東西)	297m	0.26	14(東西)	297m	
15(垂直)	297m	0.16	15(垂直)	297m	

編號: _{1/3}	規模: _{5.4}	深度: _{79.3 km}	編號: _{2/3}	規模: _{5.5}	深度: _{20.7 km}	
地震時間:	03/11/09/13:35'49	9.8"	地震時間:	03/11/12/08:02'36	5''	
記錄時間:	03/11/09/13:36'06	5"	記錄時間:	03/11/12/08:02'56	5''	
震央位置:	北緯: _{24° 50.4'}	東經:121°55.2'	震央位置:	北緯: _{24° 27.6'}	東經:121°55.2'	
頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	
₁₍ 南北)	地表	4.07	₁₍ 南北)	地表	3.27	
₂₍ 東西)	地表	2.23	₂₍ 東西)	地表	4.88	
₃₍ 垂直)	地表	3.69	₃₍ 垂直)	地表	2.37	
₄₍ 南北)	14m	2.07	₄₍ 南北)	14m	2.18	
₅₍ 東西)	14m	1.46	₅₍ 東西)	14m	3.73	
₆₍ 垂直)	14m	2.08	₆₍ 垂直)	14m	2.03	
₇₍ 南北 ₎	29m	2.16	₇₍ 南北 ₎	29m	1.54	
₈₍ 東西)	29m	1.07	₈₍ 東西)	29m	2.12	
₉₍ 垂直)	29m	1.81	₉₍ 垂直)	29m	1.54	
10(南北)	99m	1.20	10(南北)	99m	1.04	
11(東西)	99m	0.75	11(東西)	99m	2.23	
12(垂直)	99m	1.35	12(垂直)	99m	1.16	
13(南北)	297m	0.87	13(南北)	297m	1.08	
14(東西)	297m	0.67	14(東西)	297m	1.16	
15(垂直)	297m	1.07	15(垂直)	297m	0.54	

表5-10 台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003年11月份-共3筆)

表5-11 台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003年11月份-共3筆)

編號: _{3/3}	規模: _{5.1}	深度: _{27.6 km}	編號: /	規模:	深度:
地震時間:	03/11/14/23:54'4.2	2"	地震時間:		
記錄時間:	03/11/14/23:54'39	"	記錄時間:		
震央位置:	北緯:24° 07.2'	東經:121°42.0'	震央位置:	北緯:	東經:
頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道 ₍ 方向 ₎	儀器深度	PGA(gal)
₁₍ 南北)	地表	1.92	₁₍ 南北)	地表	
₂₍ 東西)	地表	1.16	₂₍ 東西)	地表	
₃₍ 垂直)	地表	1.26	₃₍ 垂直)	地表	
₄₍ 南北)	14m	0.94	₄₍ 南北)	14m	
₅₍ 東西)	14m	0.61	₅₍ 東西)	14m	
₆₍ 垂直)	14m	0.74	₆₍ 垂直)	14m	
₇₍ 南北 ₎	29m	1.32	₇₍ 南北 ₎	29m	
₈₍ 東西)	29m	0.74	₈₍ 東西)	29m	
₉₍ 垂直)	29m	0.53	₉₍ 垂直)	29m	
10(南北)	99m	0.66	10(南北)	99m	
11(東西)	99m	0.42	11(東西)	99m	
12(垂直)	99m	0.28	12(垂直)	99m	
13(南北)	297m	0.57	13(南北)	297m	
14(東西)	297m	0.45	14(東西)	297m	
15(垂直)	297m	0.26	15(垂直)	297m	

			(4		/
編號: 1/1	規模: _{6.6}	深度: _{10.0 km}	編號:	規模:	深度:
地震時間:	03/12/10/12:38'15	.2"	地震時間:		
記錄時間:	03/12/10/12:39'01	"	記錄時間:		
震央位置:	北緯: _{23° 06} '	東經:121°20.4'	震央位置:	北緯:	東經:
頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道 (方向)	儀器深度	PGA(gal)
₁₍ 南北 ₎	地表	9.15	₁₍ 南北)	地表	
₂₍ 東西)	地表	7.57	₂₍ 東西)	地表	
₃₍ 垂直)	地表	3.10	₃₍ 垂直)	地表	
₄₍ 南北)	14m	6.74	₄₍ 南北)	14m	
₅₍ 東西)	14m	5.45	₅₍ 東西)	14m	
₆₍ 垂直)	14m	2.75	₆₍ 垂直)	14m	
₇₍ 南北 ₎	29m	4.83	₇₍ 南北 ₎	29m	
₈₍ 東西)	29m	4.21	₈₍ 東西)	29m	
₉₍ 垂直)	29m	2.35	₉₍ 垂直)	29m	
10(南北)	99m	2.31	10(南北)	99m	
11(東西)	99m	3.40	11(東西)	99m	
12(垂直)	99m	1.46	12(垂直)	99m	
13(南北)	297m	2.15	13(南北)	297m	
14(東西)	297m	2.08	14(東西)	297m	
15(垂直)	297m	1.66	15(垂直)	297m	

表5-12 台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2003年12月份-共1筆)

第六章 高雄港地震監測結果分析

6.1 地震監測結果分析

本研究於民國 92 年底完成高雄港井下地震儀監測站,以期藉由所 收到之地震紀錄進行各方面之研究,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,表 6-1 為 17 組地震之規模、震央與震源深度。

		位置			
No	時間	緯度	經度	深度 km	規模
1	2003 11 6 21:58 38.80	23° 7.8'	120° 27'	14.7	5.2
2	2003 11 14 18:12 46.00	23° 7.2'	120° 27.6'	15.1	4.6
3	2003 11 21 18:59 22.10	22° 4.8'	120° 24'	56.5	5.1
4	2003 12 10 12:38 15.20	23° 6.0'	121° 20.4'	10	6.6
5	2003 12 10 16:46 44.20	22° 55.8'	121° 22.8'	13.6	5.5
6	2003 12 11 8:1 49.80	22° 46.8'	121° 25.2'	12.6	5.7
7	2003 12 16 21:56 59.90	23° 7.2'	121° 19.8'	13.1	5.3
8	2003 12 18 0:27 24.30	22° 36.6'	121° 24'	13.6	5.8
9	2004 4 23 22:4 30.00	22° 54'	120° 36.6'	21.2	5
10	2004 5 8 4:17 58.00	22° 56.4'	120° 35.4'	6.9	5.2

表 6-1 高雄港井下地震觀測資料之規模、震央與震源深度

11	2004 5 8 4:36 14.80	22° 33.6'	120° 0.00'	41.4	4.1
12	2004 5 16 14:4 8.30	23° 5.4'	121° 59.4'	12.5	6
13	2004 5 19 15:4 12.00	22° 42'	121°23.4'	8.7	6.5
14	2004 6 6 8:9 8.20	22° 31.8'	120° 58.8'	3.3	5
15	2004 10 15 12:08 50.20	24° 24.0'	122° 54.6'	58.8	7
16	2004 11 08 23:54 58.80	23° 52.8'	122° 33.0'	10.0	6.7
17	2004 11 11 10:16 44.40	24° 19.8'	122° 11.4'	13.9	6

圖 6-1 為其中振幅較大之 92 年 12 月 10 日之地震歷時圖,圖 6-2 為數組最大加速度隨深度變化圖。由圖 6-1 及圖 6-2 顯示:東西向 (EW)、南北向(NS)及垂直向(V)之尖峰加速度,由 293m 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 6-3 所示,迴歸函數如下列所示。

南北向: PGA=exp(-0.146*(深度)^{0.404})(6-1)

東西向: PGA=exp(-0.147*(深度)^{0.401}).....(6-2)

垂直向: PGA=exp(-0.230*(深度)^{0.276})(6-3)

由圖 6-3a 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。

由圖 6-3b 迴歸分析結果可發現: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。

由圖 6-3c 迴歸分析結果可發現: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

Seed & Idriss (1971)有關應力折減因數隨深度變化範圍之研 究,如圖 4-4 所示,由圖 6-3 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。

Idriss(1990)對軟弱地盤震波放大效應之研究結果,如圖 2-2 所 示,由圖 2-2 可發現:震波放大有非線性效應,即各最大加速度值之 震波放大效應不同。因此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 6-4 所 示。由圖 6-4 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。

6.2 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

6-3

,如圖 6-5 所示。並以陳圭璋、賴聖耀(2003)所計算之轉換函 數及衰減因子 0 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、2 93 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 6-6 為 加速度在 R 與 T 方向之模擬與觀測比較圖。由圖 6-6 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。



圖 6-1a 高雄港 2003 年 12 月 10 日 12 時 38 分地震(南北向)



圖 6-1b 高雄港 2003 年 12 月 10 日 12 時 38 分地震(東西向)



圖 6-1c 高雄港 2003 年 12 月 10 日 12 時 38 分地震(垂直向)



圖 6-2a 高雄港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖



圖 6-2b 高雄港井下地震儀東西向之最大加速度隨深度變化圖





圖 6-2c 高雄港井下地震儀垂直向之最大加速度隨深度變化圖

圖 6-3a 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 6-3b 高雄港井下地震儀東西向正規化之最大加速度隨深度變化圖



圖 6-3c 高雄港井下地震儀垂直向正規化之最大加速度隨深度變化圖



圖 6-4b 高雄港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖



圖 6-4c 高雄港垂直向震波放大倍率與最大加速度之關係圖



圖 6-5 高雄港地震監測站剪力波速隨深度變化關係圖


圖 6-6a 2003 年 12 月 10 日模擬(下)與觀測(上)加速度在 R 方向比較圖



圖 6-6b 2003 年 12 月 10 日模擬(下)與觀測(上)加速度在 T 方向比較圖

第七章 本土化液化分析模式與港區液化危害度之研究

本計畫搜集臺中港、布袋港、彰濱工業區、員林、霧峰、南投等 地之 921 地震現場液化與非液化案例 CPT 試驗共 174 組數據, SPT 試 驗共 288 組數據,以統計分類法中之邏輯迴歸法,建立 CPT 試驗之本 土化液化分析模式,以多變數統計方法中處理現地觀測資料之判別分 析法,建立 SPT 試驗之本土化液化分析模式,再以貝氏定理,分別建 立 CPT、SPT 抗液化安全係數 Fs 與液化機率 PL 之關係式。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。本文僅以 SPT 試驗之本土化液化分析模式做說明:

歷年地震發生時,所進行的 SPT 試驗和現場觀測數據資料甚豐, 目前地震災區發生液化與非液化之現地 SPT 試驗資料,有 Hwang et al. (2001)所蒐集 921 集集地震液化與非液化案例 288 組 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,因此本文乃根據以 上共 592 組現場液化與非液化案例數據,以判別分析法,發展出一個 具有本土特色之 SPT 評估土壤液化潛能分析模式。唯 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。又由於 $FC \ge 40\%$ 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。

7.1 判別模式

本文分別以 $0\% \le FC \le 10\%$ 、 $10\% \le FC \le 20\%$ 、 $20\% \le FC \le 30\%$ 與、 $30\% \le FC \le 40\%$ 等四組資料進行或然率圖檢定及統計分析,這些資料經 或然率圖檢定,其結果:SPT 試驗之 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 值符合常態分佈,而反復應 力比 CSR_{7.5}符合對數常態分佈,因此若將反復應力比取對數 ln(CSR_{7.5}) 即符合常態分佈。經統計分析, $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 、ln(CSR_{7.5})兩解釋參數之液化、 非液化與全部資料之變異係數相當一致,而 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 與 ln(CSR_{7.5})之相關 性,由液化、非液化與全部資料之相關係數,亦大致一致。因此,本 文以 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 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。

本文分別建立^{0%} ≤ *FC* ≤ 10%、10% ≤ *FC* ≤ 20%、20% ≤ *FC* ≤ 30% 與、 30% ≤ *FC* ≤ 40% 等四組 SPT 評估土壤液化潛能之判別模式,其分析結果 如下所示:

模式一: $0\% \leq FC \leq 10\%$ 之判別模式

世界各震災區共 592 組資料,分析得^{0% ≤ FC ≤ 10%} 之液化資料 58 組、非液化資料 70 組,進行判別分析得判別模式,如下式所示:

 $V_p = 0.9450876 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 2.406358 \cdot \ln(CSR_{7.5}) - 7.802606 - C(p) \dots (7-1)$

其誤差機率函數*C(P)*,如下式所示:

 $C(P) = 1.95815 \cdot erf^{-1}(1-2P) - 0.9585875$(7-2) 模式二: 10% ≤ FC ≤ 20% 之判別模式

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,進行判別分析得判別模式,如下式所示:

 $V_{p} = 1.107534 \cdot \sqrt{(N_{1})_{60}} - 2.245728 \cdot \ln(CSR_{7.5}) - 8.116554 - C(p) \dots (7-3)$

其誤差機率函數*C(P)*,如下式所示:

 $C(P) = 2.170073 \cdot erf^{-1}(1-2P) - 1.177304$ (7-4)

模式三: ^{20% ≤ FC ≤ 30%} 之判別模式

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,進行判別分析得判別模式,如下式所示:

 $V_p = 0.8621721 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 1.503677 \cdot \ln(CSR_{7.5}) - 5.65012 - C(p) \dots (7-5)$

其誤差機率函數*C*(*P*),如下式所示:

 $C(P) = 2.08395 \cdot erf^{-1}(1-2P) - 1.085711 \dots (7-6)$

模式四: ^{30% ≤ FC ≤ 40%} 之判別模式

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,進行判別分析得判別模式,如下式所示:

 $V_p = 0.8938813 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} - 1.403875 \cdot \ln(CSR_{7.5}) - 5.443882 - C(p) \dots (7-7)$

其誤差機率函數*C*(*P*),如下式所示:

 $C(P) = 2.038767 \cdot erf^{-1}(1-2P) - 1.039143 \dots (7-8)$

為了使工程界瞭解判別模式之應用,分別將 $^{0\% \le FC \le 10\%}$ 、 $10\% \le FC \le 20\%$ 、 $20\% \le FC \le 30\%$ 與、 $30\% \le FC \le 40\%$ 等四組判別模式, 繪製於圖 7-1~圖 7-4,並以誤差機率函數 $^{C(P)}=0$ 即液化與非液化誤差 機率相等之判別式,進行統計迴歸,則抗液化強度 $^{CRR_{7.5}}$ 與 $^{(N_1)_{60}}$ 之關 係如下式:

 $CRR_{7.5} = \exp\left[(0.3865548 + 0.0072398 \cdot FC)\sqrt{(N_1)_{60}} - (3.3597395 + 0.0186297 \cdot FC - 0.0001093 \cdot FC^2)\right]$ (7-9)

理論上,以誤差機率函數^{*C(P)*}=0為判別式較合理,其誤差機率 p 約為 0.2,但工程實務上常以較保守之誤差機率為判別式,因此本文將 誤差機率 p=0.15 之判別式進行統計迴歸,則抗液化強度^{*CRR*^{*}_{7.5}與^(N1)₆₀ 之關係如下式:}

 $CRR_{7..5}^{*} = \exp\left[(0.3865548 + 0.0072398 \cdot FC)\sqrt{(N_{1})_{60}} - (3.6762598 - 0.0150227 \cdot FC + 0.0020571 \cdot FC^{2} - 0.0000343 \cdot FC^{3})\right]$ (7-10)

以上述^{*C*(*P*)}=0 為判別式分析液化潛能,其土壤之抗液化強度, CRR_{7.5}, 地震引致土層之作用強度, CSR_{7.5}, 其抗液化之安全係數, Fs, 如下所示:

 $F_s = CRR_{7.5} / CSR_{7.5} \dots (7-11)$

以較保守之 p=0.15 為判別式分析液化潛能,其土壤之抗液化強度, $CRR_{7.5}^*$,地震引致土層之作用強度, $CSR_{7.5}$,其抗液化之安全係數, F_s^* ,如下所示:

 $F_s^* = CRR_{7.5}^* / CSR_{7.5}$(7-12)

7.2 液化機率模式

以判別模式分析液化潛能,僅能計算土壤抗液化之安全係數, F_s 、 F_s^* 。本文進一步以貝氏定理(Juang et al., 1999)分析土壤液化機率,其 分析方法如下式所示:

 $P_{LB} = \frac{f_L(F_s)}{f_L(F_s) + f_{NL}(F_s)} \dots (7-13)$

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。

分析液化及非液化案例,獲得(P_{LB} , F_s)及(P_{LB}^* , F_s^*),並以迴歸分析 建立抗液化安全係數與液化機率之關係,如式(7-14)-式(7-15)及圖 7-5(R^2 =0.99, R^{*2} =0.99)所示:

$$P_{LB} = \frac{1}{1 + 0.6(F_s)^3 + 0.4(F_s)^8} \dots (7-14)$$

$$P_{LB}^{*} = \frac{1}{1 + 1.5(F_{S}^{*})^{3} + 1.9(F_{S}^{*})^{8}} \dots (7-15)$$

由圖 7-5 顯示,以 $^{C(P)}=0$ 為判別式,建立之抗液化安全係數與液 化機率關係,當 $^{F_s=1}$ 時, $^{P_{LB}=0.5}$ 。以較保守之誤差機率 p=0.15 為判 別式,建立之抗液化安全係數與液化機率關係,當 $^{F_s^*=1}$ 時, $^{P_{LB}^*=0.23}$ 。

7.3 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(7-16)及表 7-1 所示;及賴聖耀 謝明志(1996) 液化機率深度加權法,如式(7-17)及表 7-2 所示,分別分析港區各種模 擬地震之液化危害度,其分析流程,如圖 7-6 所示。

$$IL = \int_{0}^{20} [1 - Fs(z)] \cdot W(z) \cdot dz \dots (7-16)$$

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)。

 $W(z)=10-0.5z_{o}$

表 7-1 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
	0< IL <5	輕微液化
	5< IL <15	中度液化
	15< IL <100	嚴重液化

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

液化損害程度 分類	液化機率指數, P _{LW}	液化損害程度
	$0 < P_{LW} < 0.2$	輕微液化
	$0.2 < P_{LW} < 0.4$	中度液化
	$0.4 < P_{LW} < 1$	嚴重液化

表 7-2 液化損害程度定義(港研中心,2005)

7.4 臺中港液化之臨界地表加速度

本文搜集臺中港區現有鑽探資料 135 孔, 共約 1800 筆 N 值資料, 分別以各種模擬地震反覆試算, 推求臺中港液化之臨界地表加速度。 由圖 7-7 分析結果顯示: 地震規模 Mw=7.0, 臺中港區之地表最大加速 度 Amax=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 Amax=0.13g 可視為臺中港區液化之臨界地表加速度。

7.5 臺北港液化之臨界地表加速度

本文搜集臺北港區現有鑽探資料 74 孔,共約 1000 筆 N 值資料, 分別以各種模擬地震反覆試算,推求臺北港液化之臨界地表加速度。 由圖 7-8 分析結果顯示:地震規模 Mw=7.0,臺北港區之地表最大加速 度 Amax=0.12g 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 Amax=0.12g 可視為臺北港區液化之臨界地表加速度。

7.6 高雄港液化之臨界地表加速度

本文搜集高雄港區現有鑽探資料 129 孔, 共約 1700 筆 N 值資料, 分別以各種模擬地震反覆試算, 推求高雄港液化之臨界地表加速度。 由圖 7-9 分析結果顯示: 地震規模 Mw=6.0, 高雄港區之地表最大加速 度 Amax=0.07g 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 Amax=0.07g 可視為高雄港區液化之臨界地表加速度。



0 10 20 30 40 50 <u>▲ 下之正規化貫入值</u>(小) **圖 7-1 0% ≤ FC ≤ 10% 液化判別圖(58 組液化没 70 組非液化案例**)



圖 7-2 10%≤FC≤20%液化判別圖(77 組液化及 95 組非液化案例)



圖 7-3 20%≤FC≤30%液化判別圖(64 組液化及 32 組非液化案例)





圖 7-5 貝氏定理 C(P)=0、p=0.15 之抗液化安全係數與液化機率之關係圖







第八章 結論與建議

- 由臺中港地震監測資料之迴歸分析結果顯示:臺中港地表最大加速度 約為井下283m最大加速度之3倍;其中自283m至20m,其厚度達263m 之地層,地震波約放大1.7倍;但自20m至地表,其厚度僅20m之地層, 地震波放大亦達1.7倍;由此可知臺中港之地震震波放大,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。
- 由臺北港地震監測資料之迴歸分析結果顯示:臺北港地表最大加速度 約為井下297m最大加速度之4倍;其中自297m至30m,其厚度達267m 之地層,地震波約放大2.2倍;但自30m至地表,其厚度僅30m之地層, 地震波放大亦達1.8倍;由此可知臺北港之地震震波放大,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。
- 3. 由高雄港地震監測資料之迴歸分析結果顯示:高雄港地表最大加速度 約為井下293m最大加速度之4.3倍;其中自293m至30m,其厚度達 263m之地層,地震波約放大2.4倍;但自30m至地表,其厚度僅30m 之地層,地震波約放大亦達1.8倍;由此可知高雄港之地震震波放大, 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。
- 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。
- 5. 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,由於皆為小地震,並未發現有Idriss (1990)發現之非線性效應,俟有一些大地震監測資料時再進一步分析。
- 6. 本研究以SHAKE程式模擬加速度歷時曲線,並與臺中港及臺北港井 下地震記錄比較,比較結果其之PGA值大多相當接近。由於目前無法 獲得地震入射波,所以臺中港以井下283公尺之地震記錄視為入射

波,臺北港以井下297公尺之地震記錄視為入射波,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。

- 有. 由Haskall數值模擬與臺北港及高雄港井下地震記錄比較發現:在淺層 的15公尺及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。
- 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,由於監測期間於港區附近未 有強震發生,因此亦未有地震引致土壤孔隙水壓逐漸上升之監測資 料,俟有動態孔隙水壓之監測資料時再進行分析。
- 9. 由各港區液化危害度分析結果顯示,臺北港區液化之臨界地表加速度 為Amax=0.12g,臺中港區液化之臨界地表加速度為Amax=0.13g,臺 中港區液化之臨界地表加速度為Amax=0.13g,高雄港區液化之臨界 地表加速度為Amax=0.07g。

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(2001),「臺中港北碼頭區之液化潛能與碼頭穩定性分 析」2001年地震災害情況模擬研討會。
- [18]謝百鍾、柯鎮洋(1989)「基礎耐震設計新擬規範之精義」 地工技術雜誌第 26 期,第 23-38 頁。
- [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 Trans-portation, 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 Accelera- tion Based on Measured Record, Proceedings Fourth International Conference on Seismic Zonation, Stanford University, Stanford California, Vol. ,pp. 237-244.
- [30]Matsuzawa, H., I. Ishibashi and M. Kawamura(1985) " Dynamic soil and water pressure of submerge soils, " J. of Geot. Engr., ASCE, Vol.111, No.10, pp.1161~1176.
- [31]Matsuo,H. and S. O'Hara (1960) " Lateral earth pressures and stability of quay walls during earthquakes," Proc. 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Japan, Vol.1.
- [32]Menard,L. and Broise,Y.,Theoretical and Practial Aspects of Dynamic Consolidation,Geotechnique,Vol.25,No.1,1975.
- [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 compation 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.