

MOTC-IOT-92-HICA01

布袋港漂沙及地層下陷觀測研究計畫(IV)



交通部高雄港務局 主辦

交通部運輸研究所 執行

中華民國九十二年十二月

MOTC-IOT-92-HICA01

布袋港漂沙及地層下陷觀測研究計畫()

著 者：賴聖耀、張富東、邱永芳、陳志芳

交通部高雄港務局 主辦

交通部運輸研究所 執行

中華民國九十二年十二月

表 目 錄

表 4-1 布袋港填土 3.666m 引致地層各層次之沉陷分析表.....	4-4
表 5-1 監測井座標高程一覽表.....	5-3
表 5-2 沉陷計感應環安裝深度一覽表.....	5-4
表 5-3 地下水壓觀測站水壓計埋設資料表(200m).....	5-5
表 5-4 嘉義縣布袋等十鄉鎮市各井深水井數量數量(民國 84 年)	5-32
表 6-1 環線閉合差分析表	6-5
表 7-1 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-21
表 7-2 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-21
表 7-3 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-22
表 7-4 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-22
表 7-5 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-23
表 7-6 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-23
表 7-7 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-24
表 7-8 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-24
表 7-9 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-25
表 7-10 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-25
表 7-11 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-26
表 7-12 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-26
表 7-13 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-27
表 7-14 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-27

表 7-15 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-28
表 7-16 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-28
表 7-17 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-29
表 7-18 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-29
表 7-19 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-30
表 7-20 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-30
表 7-21 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-31
表 7-22 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-32
表 7-23 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值	7-33
表 8-1 液化機率各種迴歸模式之比較	8-10
表 11-1 布袋港區各種地震引致之液化危害度及平均沉陷量	11-9
表 12-1 布袋港區各種地震引致之液化危害度及平均沉陷量	12-3

圖 目 錄

圖 2-1 布袋港地理位置.....	2-2
圖 2-2 台灣西海岸地形圖	2-2
圖 2-3 布袋港區地層柱狀圖(一).....	2-3
圖 2-4 布袋港區地層柱狀圖(二).....	2-4
圖 2-5 布袋港區地層柵狀圖	2-5
圖 2-6 布袋港附近地區地層下陷圖	2-6
圖 3-1 沉陷分析之流程圖	3-2
圖 3-2 自由水位下降引致之有效應力增量分佈	3-4
圖 3-3 受壓水位下降引致之有效應力增量分佈	3-5
圖 3-4 布袋港沉陷模擬分析與分層下陷之觀測資料比較	3-11
圖 4-1 地球物理探測測線位置圖	4-5
圖 4-2 應力影響因素 I 與 m 和 n 之關係圖	4-5
圖 4-3 布袋港海埔地填土 3.666m 之應力增量圖	4-6
圖 4-4 布袋港第二期海埔地土 3.666m 之沉陷分析結果	4-6
圖 4-5 布袋港第二期海埔地填土 3.666m 之沉陷等值區	4-7
圖 4-6 布袋港第二期 海埔地填土 1.666m 之立體沉陷圖	4-7
圖 4-7 布袋港第二期埔地填土 3.666m 之 0-10 年沉陷歷時曲線.....	4-8
圖 4-8 布袋港第二期海埔地填土 3.666 之 5-10 年沉陷歷時曲線....	4-8
圖 5-1 布袋港地層下陷監測井位置圖	5-2
圖 5-2 系統儀器架構流程圖	5-3

圖 5-3 電子式地下水壓計安裝示意圖	5-7
圖 5-4 開口式水壓計安裝示意圖	5-8
圖 5-5 沉陷計安裝示意圖	5-10
圖 5-6 磁感式層別沉陷安裝示意圖	5-11
圖 5-7 布袋港分層沉陷及水壓量測觀測站地層柱狀圖	5-12
圖 5-8 布袋港 300 公尺沉陷及水壓監測站鑿井地層柱狀圖	5-15
圖 5-9 布袋地區月平均降雨日數($>=10\text{mm}/\text{日}$)	5-16
圖 5-10 布袋港深層水位變化(自記式)	4-19
圖 5-11 布袋港深層水位變化(自記式)	5-20
圖 5-12 布袋港分層水位變化(手動量測)	5-21
圖 5-13 布袋港分層水位變化(自記式)	5-22
圖 5-14 布袋港分層水位變化(手動量測)	5-24
圖 5-15 布袋港分層個別下陷量圖	5-25
圖 5-16 布袋港分層累積下陷量圖	5-26
圖 5-17 布袋港分層累積下陷量圖	5-27
圖 5-18 布袋港(300m)分層個別下陷量圖	5-29
圖 5-19 布袋港(300m)分層累積下陷量圖	5-30
圖 5-20 布袋港永久水準站安裝示意圖	5-35
圖 5-21 布袋港永久水準點觀測站	5-36
圖 6-1 嘉義縣沉陷水準測量檢測範圍	6-2
圖 6-2 布袋港區沉陷水準測量檢測範圍	6-2
圖 6-3 嘉義縣沉陷水準測量測線、環線佈置圖	6-3

圖 6-4 布袋港區沉陷水準測量測線、環線佈置圖	6-3
圖 6-5 嘉義縣沈陷測量 89 年至 92 年度累積下陷量圖	6-8
圖 6-6 嘉義縣沈陷測量 91 年至 92 年度累積下陷量圖	6-9
圖 6-7 布袋港區沈陷測量 89 年至 92 年度累積下陷量圖	6-10
圖 6-8 布袋港區沈陷測量 91 年至 92 年度累積下陷量圖	6-11
圖 7-1 地震與動態孔隙水壓監測系統流程圖	7-8
圖 7-2 地震及動態孔隙水壓監測儀器埋設剖面圖	7-9
圖 7-3 電子式水壓計安裝示意圖	7-10
圖 7-4 布袋港 300 公尺地震計安裝示意圖	7-11
圖 7-5 布袋港 10、20、100 公尺地震計安裝示意圖	7-12
圖 7-6 布袋港地震儀及動態孔隙水壓觀測站地層鑿井柱狀圖	7-13
圖 7-7a 布袋港 2002 年 3 月 31 日 14 時 53 分地震(東西向).....	7-14
圖 7-7b 布袋港 2002 年 3 月 31 日 14 時 53 分地震(南北向)	7-15
圖 7-7c 布袋港 2002 年 3 月 31 日 14 時 53 分地震(垂直向).....	7-16
圖 7-8a 布袋港井下地震儀東西向之最大加速度隨深度變化圖	7-17
圖 7-8b 布袋港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖	7-17
圖 7-9a 布袋港井下地震儀東西向正規化之最大加速度 隨深度變化圖	7-18
圖 7-9b 布袋港井下地震儀南北向正規化之最大加速度 隨深度變化圖	7-18
圖 7-10 應力折減因數 r_d 隨深度之變化範圍	7-19
圖 7-11 軟弱地盤震波放大效應之非線性(Idriss,1990).....	7-19
圖 7-12a 布袋港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖	7-20

圖 7-12b 布袋港南北向震波放大倍率與最大加速度之關係圖	7-20
圖 8-1 淨砂、粉土質砂、粉土等三種土壤之 R_f 值繪於 常態或然率圖上	8-16
圖 8-2 台中港 CPT 試驗與土壤分類之邏輯迴歸分析結果	8-16
圖 8-3 CPT 試驗之 $\sqrt{q_{c1N}}$ 值繪於常態或然率圖上	8-17
圖 8-4 反復應力比 CSR7.5 繪於對數常態或然率圖上	8-17
圖 8-5 R_f 0.45% 邏輯模式之液化機率曲線圖	8-18
圖 8-6 0.45% R_f 1.05% 邏輯模式之液化機率曲線圖	8-18
圖 8-7 1.05% R_f 2.8% 邏輯模式之液化機率曲線圖	8-19
圖 8-8 淨砂、粉土質砂、粉土等土壤以 PL=0.5、PL=0.3 為液化 為液化判別式之比較	8-19
圖 8-9 淨砂液化邏輯模式 PL=0.5、PL=0.3 與 Olsen(1997)、 R&W(1997)及修正之 Seed 等方法之比較	8-20
圖 8-10 粉土質砂液化邏輯模式 PL=0.5、PL=0.3 與 Olsen(1997)、 R&W(1997)及修正之 Seed 等方法之比較	8-20
圖 8-11 粉土液化邏輯模式 PL=0.5、PL=0.3 與 Olsen(1997)、 R&W(1997)及修正之 Seed 等方法之比較	8-21
圖 8-12 邏輯模式 PL=0.5、PL=0.3 之抗液化安全係數與液化 機率之關係圖	8-21
圖 8-13 液化案例之 $\sqrt{F_S}$ 、 $\sqrt{F_S^*}$ 值繪於常態或然率圖上	8-22
圖 8-14 非液化案例之 F_S 、 F_S^* 值繪於對數常態或然率圖上	8-22
圖 8-15 貝氏定理 PL=0.5、PL=0.3 之抗液化安全係數與液化 機率之關係圖	8-23
圖 9-1 0% FC 10% 之 SPT 試驗 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 值繪於常態	

	或然率圖上	9-16
圖 9-2	0% FC 10%之 CSR7.5 值繪於對數常態或然率圖上	9-16
圖 9-3	10% FC 20%之 SPT 試驗 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 值繪於常態 或然率圖上	9-17
圖 9-4	10% FC 20%之 CSR7.5 值繪於對數常態或然率圖上 ..	9-17
圖 9-5	20% FC 30%之 SPT 試驗 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 值繪於常態 或然率圖上	9-18
圖 9-6	20% FC 30%之 CSR7.5 值繪於對數常態或然率圖上 ..	9-18
圖 9-7	30% FC 40%之 SPT 試驗 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 值繪於常態 或然率圖上	9-19
圖 9-8	30% FC 40%之 CSR7.5 值繪於對數常態或然率圖上 ..	9-19
圖 9-9	0% FC 10% 液化判別圖(58 組液化及 70 組 非液化案例).....	9-20
圖 9-10	10% FC 20% 液化判別圖(77 組液化及 95 組 非液化案例).....	9-20
圖 9-11	20% FC 30% 液化判別圖(64 組液化及 32 組 非液化案例).....	9-21
圖 9-12	30% FC 40% 液化判別圖(37 組液化及 29 組 非液化案例)	9-21
圖 9-13	FC=5%、FC=15%、FC=25%、FC=35% 等液化 判別式-C(P)=0 之比較	9-22
圖 9-14	FC=5%、FC=15%、FC=25%、FC=35% 等液化 判別式(P=0.15)之比較	9-22
圖 9-15	FC=5%之判別模式與 Seed(NCEER 1997)及 T & Y(1983)Cs=85 比較	9-23

圖 9-16	FC=15%之判別模式與 Seed(NCEER 1997)及 T & Y(1983) $C_s=85$ 比較	9-23
圖 9-17	FC=25%之判別模式與 Seed(NCEER 1997)及 T & Y(1983) $C_s=85$ 比較	9-24
圖 9-18	FC=35%之判別模式與 Seed(NCEER 1997)及 T & Y(1983) $C_s=85$ 比較	9-24
圖 9-19	液化案例之 $\sqrt{F_s}$ 值繪於常態或然率圖上	9-25
圖 9-20	非液化案例之 F_s 值繪於對數常態或然率圖上	9-25
圖 9-21	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	9-26
圖 9-22	判別模式之液化分析流程	9-27
圖 10-1	台灣地區造成百人以上死亡之重大災害地震震央分佈圖	10-6
圖 10-2	布袋港區 39 孔鑽探資料位置圖	10-7
圖 10-3	布袋港區地震引致土壤液化之危害度($M_w=6.5$, $A_{max}=0.10g$) 賴(2002)安全係數法+Iwasaki(1982)深度加權法	10-7
圖 10-4	布袋港區地震引致土壤液化之危害度($M_w=7.0$, $A_{max}=0.15g$) 賴(2002)安全係數法+Iwasaki(1982)深度加權法	10-8
圖 10-5	布袋港區地震引致土壤液化之危害度, 賴(2002)安全係數法 +Iwasaki(1982)深度加權法($M_w=7.5$, $A_{max}=0.23g$; 新訂耐震 設計規範乙區)	10-8
圖 10-6	布袋港區地震引致土壤液化之危害度, 賴(2002)安全係數法 +Iwasaki(1982)深度加權法($M_w=7.5$, $A_{max}=0.33g$; 新訂耐震 設計規範甲區).....	10-9
圖 10-7	布袋港區土壤液化之機率危害度 ($M_w=6.5$, $A_{max}=0.10g$) 賴(2002)液化機率法+賴、謝(1996)深度加權法	10-9

- 圖 10-8 布袋港區土壤液化之機率危害度 ($M_w=7.0$, $A_{max}=0.15g$)
 賴(2002)液化機率法+賴、謝(1996)深度加權法10-10
- 圖 10-9 布袋港區地震引致土壤液化之機率危害度, 賴(2002)液化機率法
 +賴、謝(1996)深度加權法($M_w=7.5$, $A_{max}=0.23g$; 新訂耐
 震設計規範乙區).....10-10
- 圖 10-10 布袋港區地震引致土壤液化之機率危害度, 賴(2002)液化機率法
 +賴、謝(1996)深度加權法($M_w=7.5$, $A_{max}=0.33g$; 新訂耐震
 設計規範甲區).....10-10
- 圖 11-1 體積應變與反復剪應力比及 N 值之相關經驗圖11-2
- 圖 11-2 N 值、 q_c 值、抗液化安全係數及體積應變之經驗關係11-3
- 圖 11-3 布袋港區地震引致沉陷之等值色階圖 ($M_w=6.5$, $A_{max}=0.10g$)
 賴(2002)安全係數法+Ishihara et al.(1991,1996)法.....11-10
- 圖 11-4 布袋港區地震引致沉陷之等值色階圖 ($M_w=7.0$, $A_{max}=0.15g$)
 賴(2002)安全係數法+Ishihara et al.(1991,1996)法.....11-10
- 圖 11-5 布袋港區地震引致沉陷之等值色階圖 ($M_w=7.5$, $A_{max}=0.23g$)
 賴(2002)安全係數法+Ishihara et al.(1991,1996)法.....11-11
- 圖 11-6 布袋港區地震引致沉陷之等值色階圖 ($M_w=7.5$, $A_{max}=0.33g$)
 賴(2002)安全係數法+Ishihara et al.(1991,1996)法.....11-11

第一章 前 言

1.1 計畫緣起

布袋港位於本省西南部嘉義縣境內，布袋鎮以西濱海地區，面臨台灣海峽，北及西北側海域有統仙洲、箔子寮汕及外傘頂洲所構成之峽長沙洲，形成天然屏障，目前已完成五座碼頭，其他相關營運設施正陸續施工中。唯布袋港介於朴子溪和八掌溪中間濱海地區，其地層大都屬現代沖積層，土層疏鬆軟弱壓密固結尚未全部完成，極可能因附近地區地下水抽取、大規模海埔新生地回填、地震等原因造成地層下陷，而影響港區工程及各樣設施之安全。

近年來由於地下水大量之開發引致之地層下陷問題，在台灣各地區，已是一種普遍現象。而在沿海地區，亦由於養殖業大量開發抽取超額之地下水，導致愈演愈烈之地層下陷。其中嘉義地區累積最大下陷量約 1.0~1.5 公尺，由於超抽地下水易造成區域性之地下水位下降，台灣地區雖無超抽地下水，但受到附近沿海地區超抽地下水之影響，其地下水位大多已降到海平面以下，有引發海水入侵之疑，若水位繼續下降，恐會導致地層下陷。因此為維護港區工程及各樣設施之安全，有必要設立沉陷監測井，以瞭解垂直方向各土層之下陷行為，並以地層下陷水準測量，每年定期施測全區域性之水準，以瞭解水平方向全區域性之沉陷變化，以對布袋港之地層下陷更深入瞭解。

台灣恰處於世界最大且最活躍之太平洋地震帶西環，每年大小地震相當頻繁。在強烈地震作用下，沖積砂土層與海埔新生地極有可能發生液化或沉陷現象，造成海岸與港灣設施、房屋、地下管線等發生破壞之災害。1906、1941、1964 年之嘉義烈震其地震規模 7.1，87 年 7 月 17 日嘉義瑞里發生地震規模 6.2 之地震，88 年 10 月 22 日嘉義梅山發生地震規模 6.4 之地震，亦造成嚴重災害，因此我們相信嘉義地區發生大地震之可能性很大，而布袋港正處於地震災害最頻繁之嘉義烈震區，加上港區之地質多屬疏鬆軟弱之沖積土層、港灣碼頭設施大都由

抽砂填土而成，在強震作用下，極易造成基礎土壤液化或沉陷，致使碼頭破壞，尤其貨櫃碼頭之貨櫃裝卸及堆置漸朝自動化設計，碼頭地面少許之差異沉陷，皆易使碼頭自動化之機械設備損壞或喪失使用功能。

因此本計劃針對布袋港，進行港灣地質、地層速度構造調查，並進行井下地震、地下水壓、地層下陷之長期監測及定期施測水準測量，以探討布袋港區動靜態之地層下陷行為，提供港灣工程規劃設計之參考，並成為工程安全監測之一環且達海岸之保育。

1.2 研究方法

1.地層下陷水準檢測

- (1)於布袋商港區適當位置設置 10 個水準基點，以為檢較港區碼頭線、防波堤線等地層下陷情形之依據。
- (2)為確保高程檢測之準確性，宜自地層下陷區外引測一等水準點至已埋設之水準基點測得各點高程。
- (3)每年定時施測水準乙次，施測 5 年，以瞭解水平方向全區域性之沉陷變化。

2.地層分層沉陷及水壓之監測

- (1)於布袋商港區內，第一年設立 1 組深度 300 公尺之分層沉陷監測井，第二年再設立 1 組深度 300 公尺之分層水壓監測井，進行長期監測，以瞭解垂直方向各土層之下陷行為。
- (2)每月定期以無線電波層別沉陷儀量測分層地層下陷，由各沉陷感應磁環之相對移動，可分析各土層之沉陷量；而分層水壓計可由水壓自動量測系統，設定量測時間暫存 IC 卡內，再定期至現地取回 IC 卡，於室內進行分析。

3.地質及地層速度構造調查

- (1)第一年以電子式水壓錐貫入試驗(CPTU)進行孔區域性之地質調查。由CPTU試驗所量得之錐端阻抗 q_c 值,摩擦阻抗 f_s 值及動態孔隙水壓 u 值等量測參數,可進行土壤分類判別,以瞭解港區地質分佈情形。
- (2)第二年以折射震波探測、反射震波探測、表面波譜法(SASW)及懸浮式速度井測(P-S Logging)等四種地球物理探測方法,以瞭解港區地層速度構造情形。

4.地震及液化監測系統

灣區地層大都為疏鬆軟弱之沖積土層及浚砂回填土所構成,在強烈地震作用下,極有可能發生液化或沉陷現象,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鉅,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,埋入井下地震計,以監測地震之放大效應。

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。

本計畫第三年在布袋商港區設置完成一組 300m、100m、20m、10m、0m 之井下地震監測井之地震監測系統及一組 3M、6M、10M、15M、20M、30M 之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,作為港灣設施耐震設計之參考。

5. 400m 永久水準點監測站之設置

第四年於布袋港區設置 1 孔 400m 永久水準點監測站，藉由安裝於深層堅硬土層並以套管與周圍土壤隔離之不動點，作為港區碼頭線、防波堤線等水準測量之依據。

第二章 布袋港地質概況及相關資料分析

2.1 布袋港之位置與地形

布袋港位於本省西南部嘉義縣境內，布袋鎮以西濱海地區，面臨台灣海峽，北及西北側海域有統仙洲、箔子寮汕及外傘頂洲所構成之峽長沙洲，形成天然屏障，在兩沙洲軸線以東之內灘地，除環繞周邊之潮溝兩側低窪地被用於牡蠣養殖外，中央部較高灘地已開發完成海埔新生地約 126 公頃(如附圖 2-1)。

本區海岸線向陸地凹入形成灣澳灘地，由於海岸分別有北港溪、朴子溪、八掌溪及急水溪等四溪在附近海入海裡以及外傘頂洲所帶下之沙量，將會間接對布袋港海岸地形發生影響(如附圖 2-2)。

2.2 布袋港區地質

布袋港開發計劃包括南北向之海堤、防波堤及散貨、雜貨、客貨、砂石貨等各項用途碼頭 20 席外，尚有新生地、防風林、堆貨場等港埠設施。而整個區域地層屬海岸沖積土層，根據本中心搜集布袋港 10 餘孔海上鑽探資料顯示，在深度-30 公尺範圍內，綜合其剖面土層(如圖 2-3、2-4、2-5)簡述如下：

2.2.1 EL.0M ~ EL.-6M：土層分佈以沉泥質細砂(SM)為主，標準貫入試驗 N 值為 6~14 間之疏鬆土層，而深度-0.6M~-3M 之間偶夾有 N 值為 2-9 之軟弱沉泥層(ML)，以內港之第一期海埔新生地較明顯。

2.2.2 EL.-6M ~ EL.-27M：為一層 10~20 米厚軟弱至堅硬之粘土質沉泥層(ML)，N 值約在 4~20 之間，但於-13.0M~-21.0M 處有一層約 3~5 米厚之中等緊密沉泥質細砂(SM)，N 值在 10~30 之間，分佈以南海堤較厚並逐漸向外海之航道口尖滅消失。



圖 2-1 布袋港地理位置

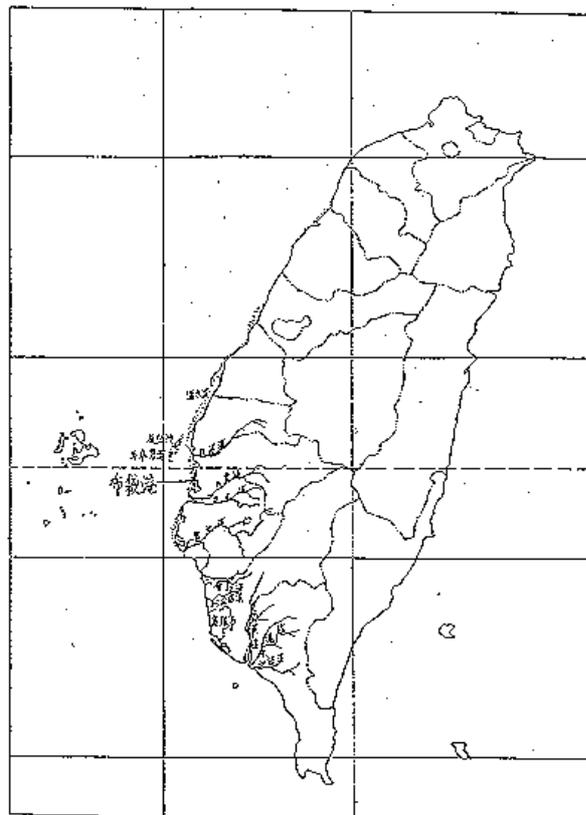


圖 2-2 台灣西海岸地形圖

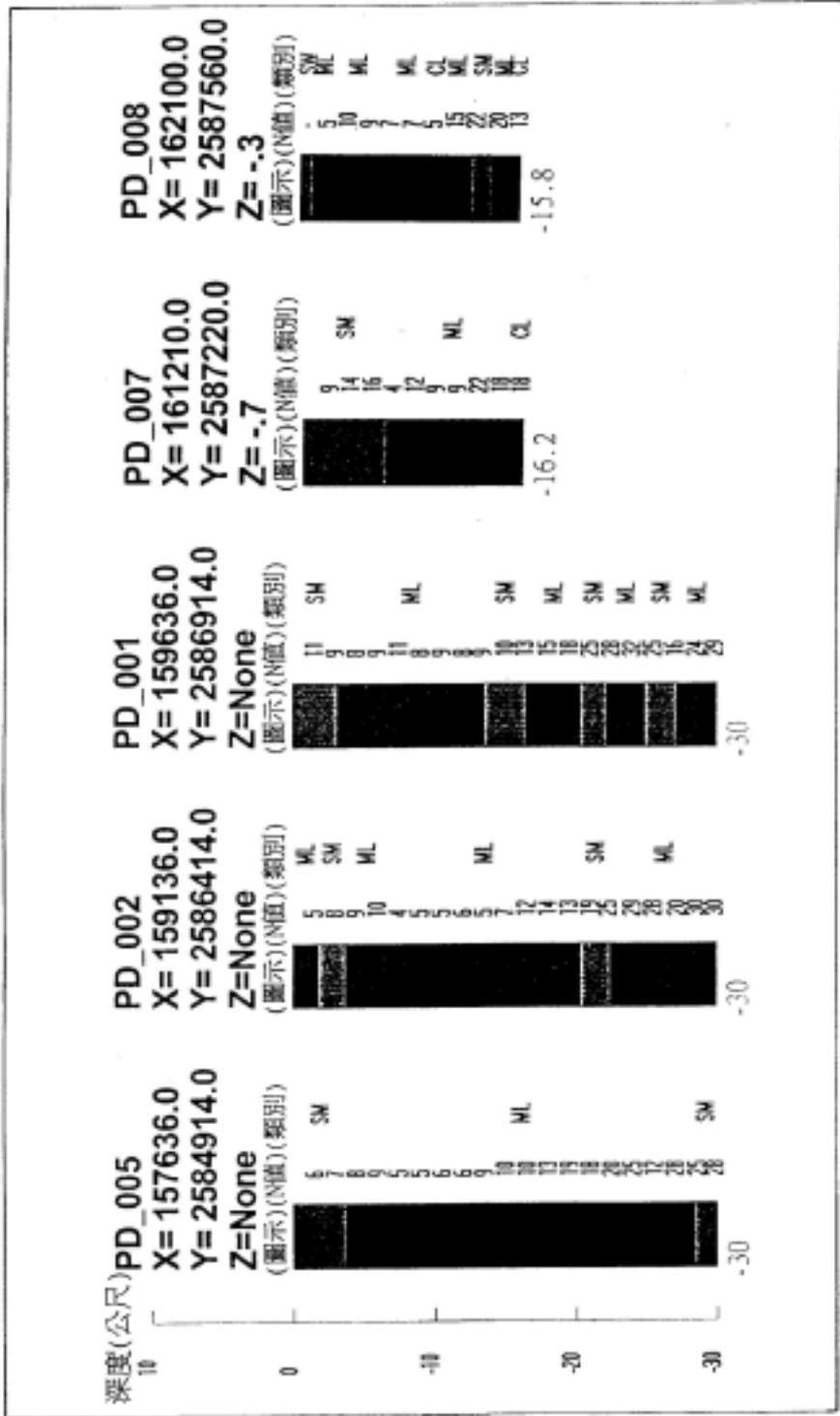


圖 2-3 布袋港區地層柱狀圖(一)

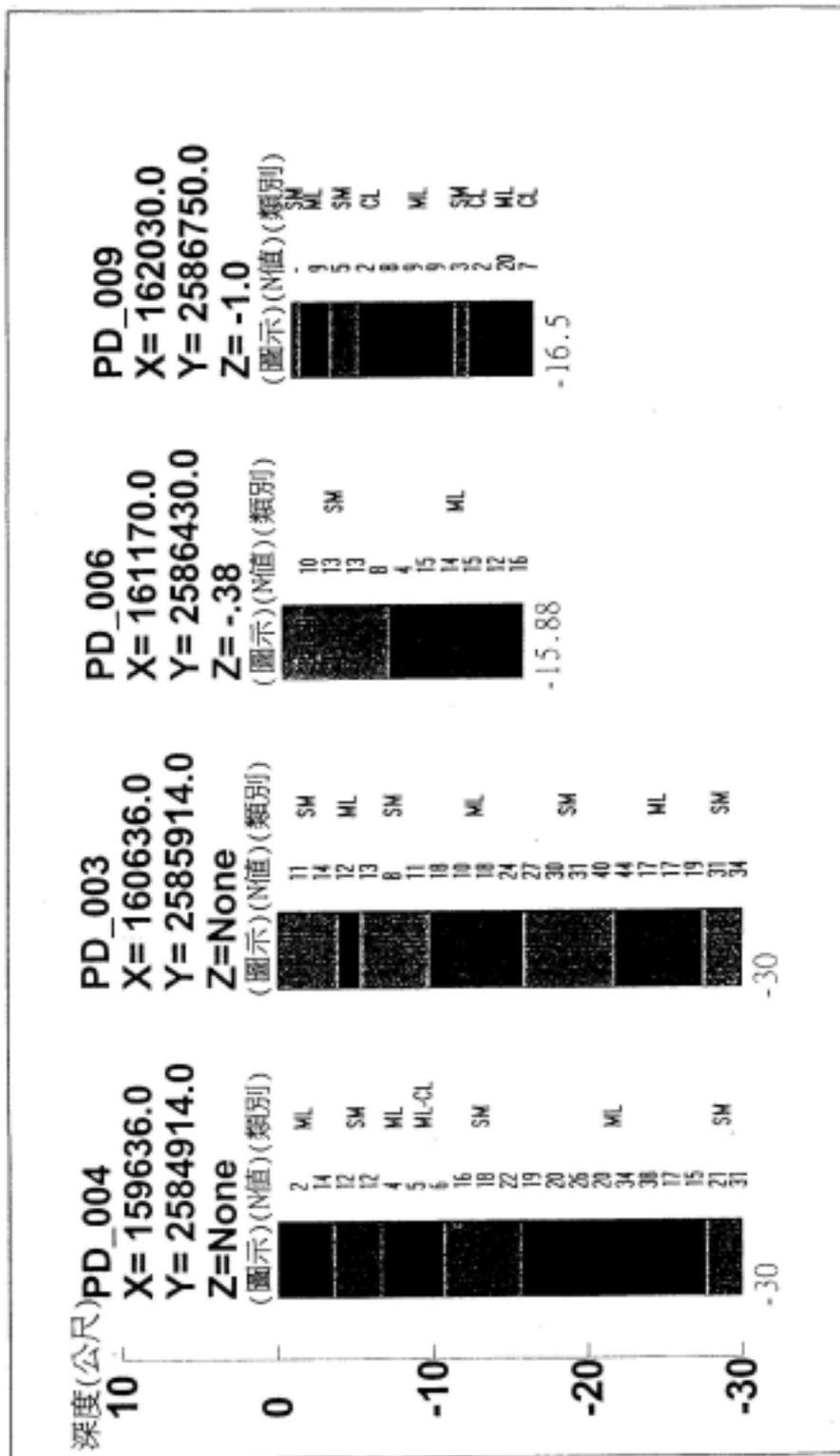


圖 2-4 布袋港區地層柱狀圖(二)

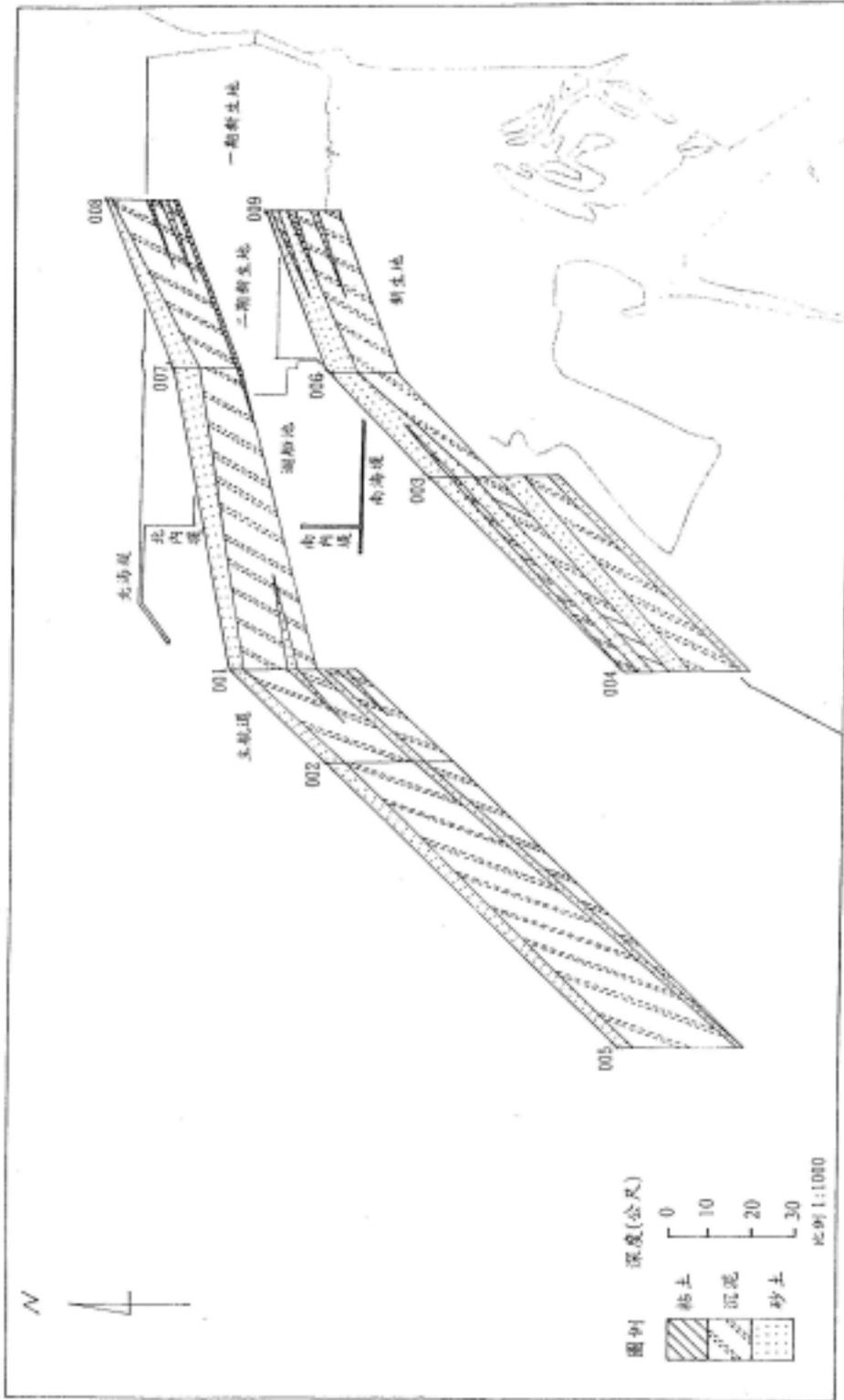


圖 2-5 布袋港區地層柵狀圖

2.2.3 EL.-27.0M ~ EL.-30.0M：由地層柱狀圖得知深度-27.0M 至 -30.0M 處為中等緊密到緊密之沉泥質細砂(SM)土層，N 值約在 20~35 間，土層大致分佈在南海堤及外海處。

2.3 布袋港附近地區之沉陷

根據省水利處於嘉義沿海地區地盤下陷水準檢測報告(如附圖 2-6)，自民國 77 年至 83 年布袋地區總下陷量約 45~70 公分，平均每年沉陷量約在 7~10 公分，而 83~85 年之累計下陷量約 25 公分，其中最嚴重地區為東石鄉，平均每年沉陷約 10 公分。另根據經濟部水資局(2000)之地層下陷檢測報告，嘉義沿海地區之下陷中心位於網寮一帶，民國 77~88 年之最大累積下陷量約 1.21 公尺，且 78~85 年為該區下陷速率最嚴重時段；民國 85 年以後下陷速率趨緩，至民國 88 年底為止，年平均下陷速率約 3.8 公分，而最近(88~89)二年之累積下陷量以網寮國小測站之 10.3 公分最多。

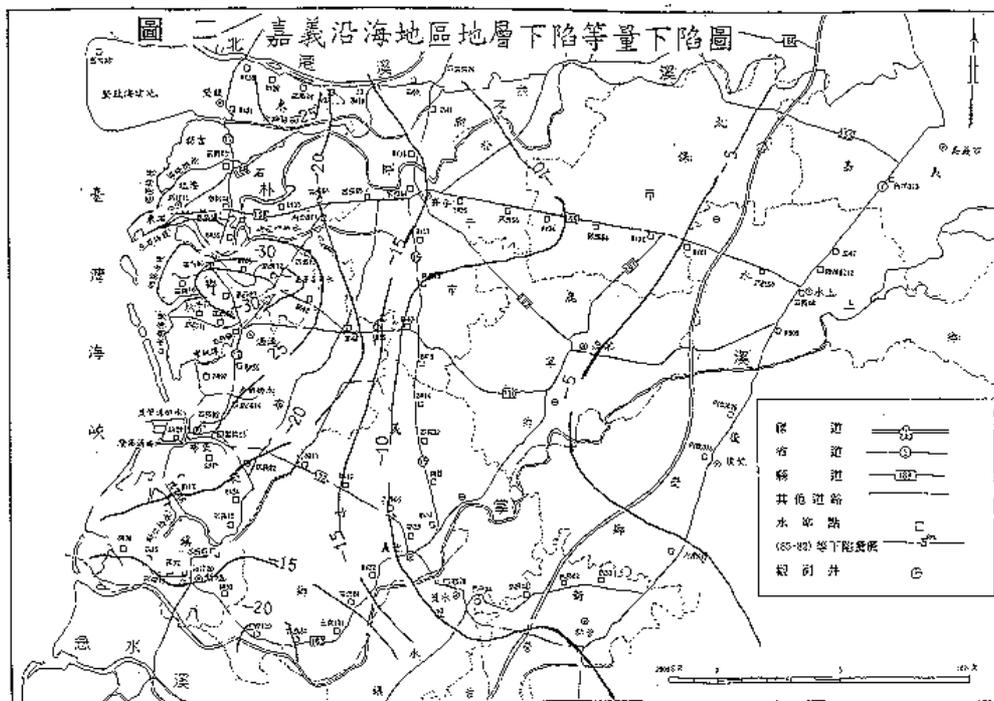


圖 2-6 布袋港附近地區地層下陷圖

第三章 港灣地區地層下陷行為與分析方法

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

一般而言，無論是港灣構造物荷重或超抽地下水造成之地層下陷，大都因土層受到外力而產生壓縮所致，所以欲對地層下陷進行分析之前，首需對整體土層所受有效應力增量之分佈情形，及整體土層之下陷行為與各分層土壤壓縮特性進行瞭解，然後再應用壓密理論進行沉陷分析，如圖 3-1 所示。

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

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

3.1 有效應力增量分佈

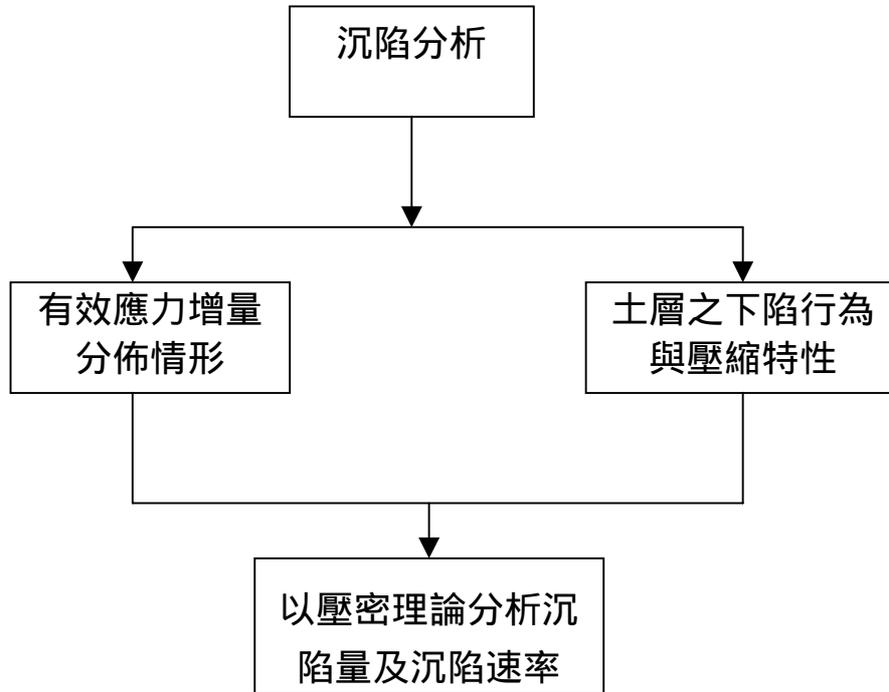


圖 3-1 沉陷分析之流程圖

超抽地下水引致地層下陷，一般可分為二類(7)，一為自由水位下降引致之淺層沉陷，另一為受壓水位下降引致之深層沉陷。若由於自由水層受到過量抽水，引致自由水位下降，其有效應力增量僅分佈於最淺層自由水層及其下之難透水層(Aquitard)或粘土層，而其他之受壓水層(Aquifer)及粘土層則無有效應力增量產生，其分佈情形如圖 3 - 2 所示，由於在有效應力增量存在之土層，才有土壤之壓密或壓縮現象，因此超抽自由水層產生之沉陷屬於淺層沉陷。若由於受壓水層受到過量抽水，而致受壓水位下降，其有效應力增量如圖 3 - 3 所示，除分佈於該超抽受壓水層外，並分佈於其上下之難透水層或粘土層，而最淺層之自由水層及其他之受壓水層與粘土層則無有效應力增量產生，由於超抽受壓水層引致之有效應力增量產生於土層深處，土壤之壓密或壓縮亦發生於深處，因此此種沉陷屬於深層沉陷。

3.2 超抽地下水之下陷行為

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

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

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

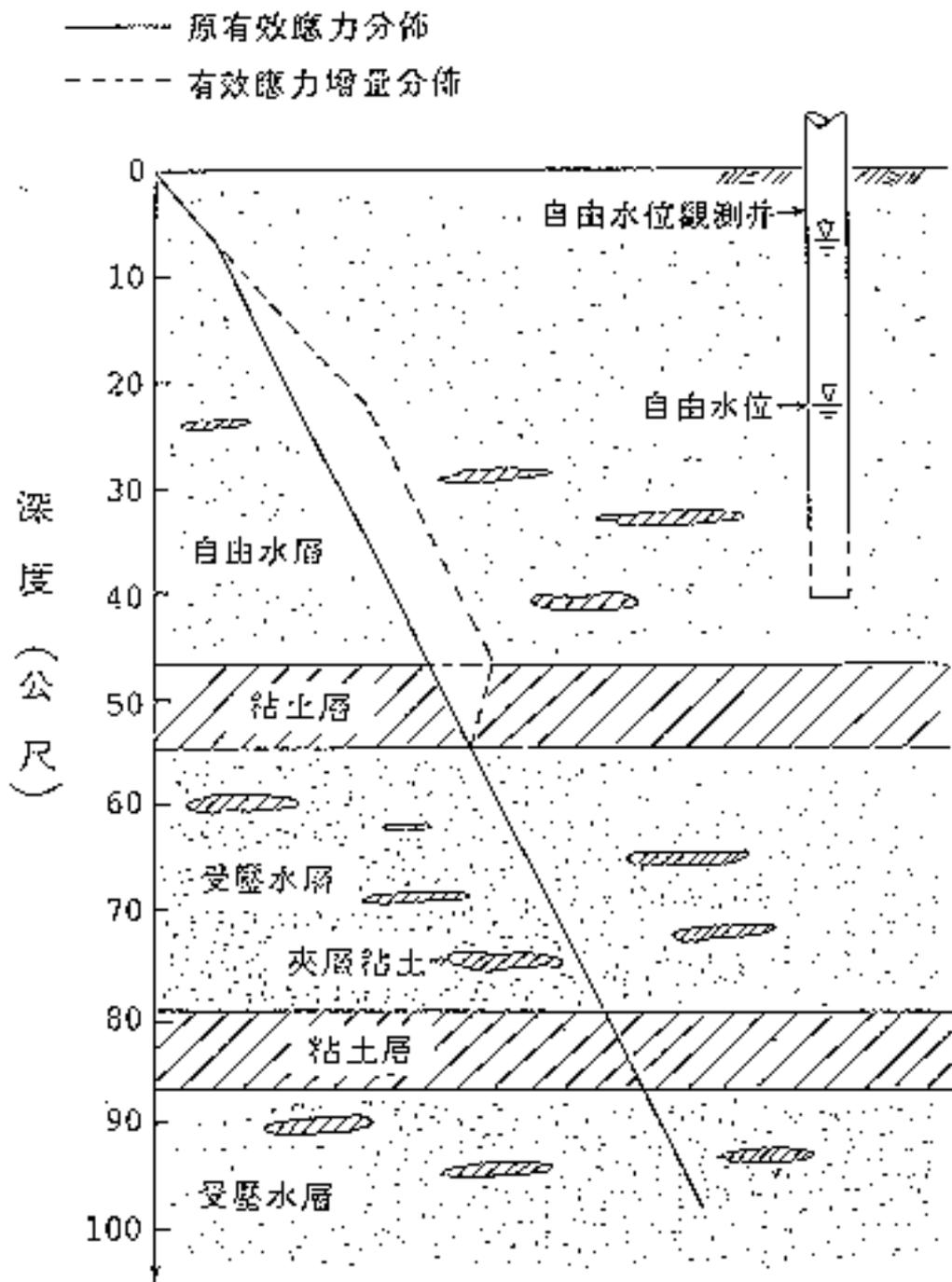


圖 3-2 自由水位下降引致之有效應力增量分佈

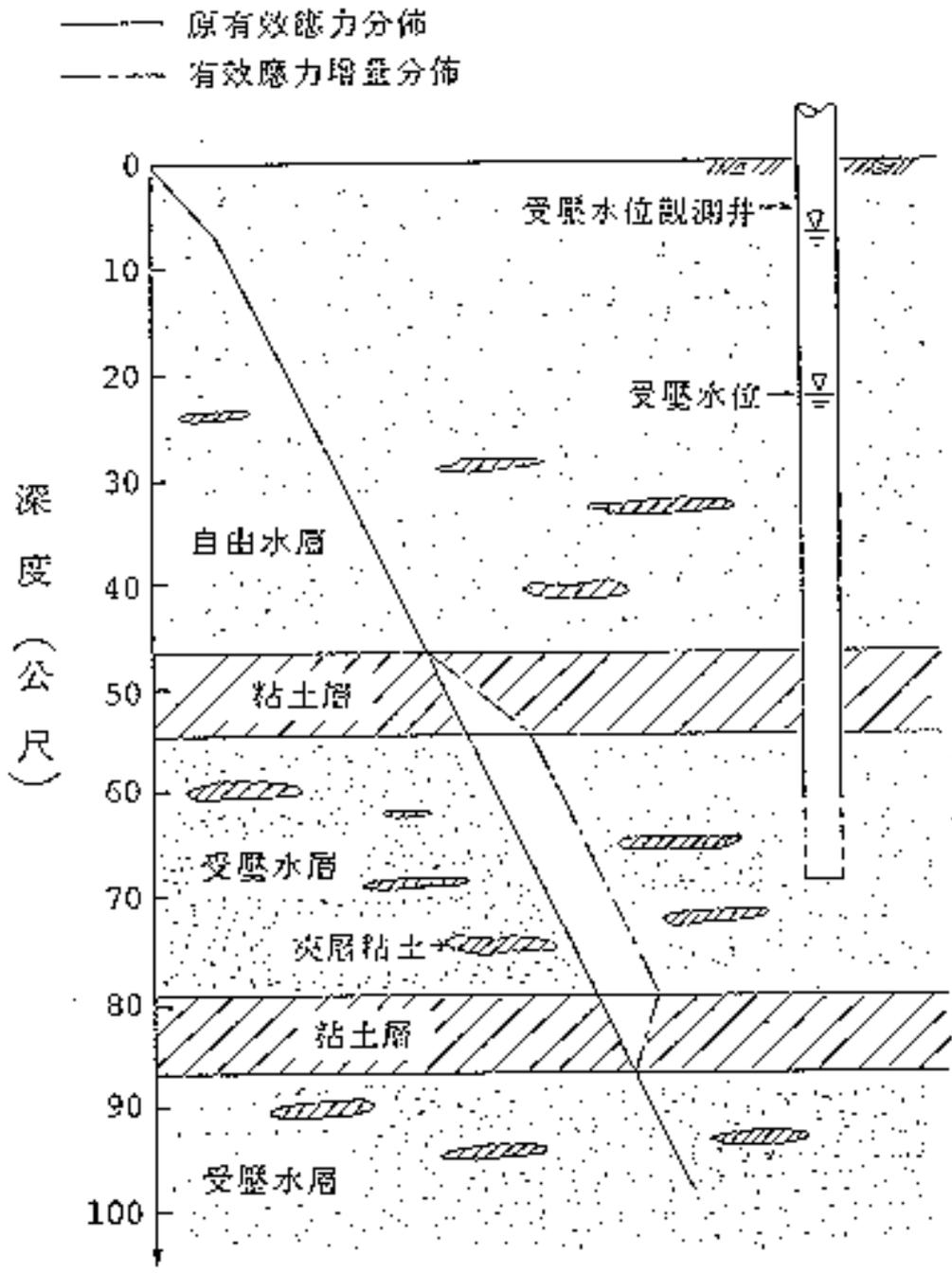


圖 3-3 受壓水位下降引致之有效應力增量分佈

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

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

3.3 地層下陷分析方法

因地下水位下降造成之地層下陷，其下陷量大小與土壤種類有關。砂質土層的沈陷速度較快但沈陷量較小；而粘性土層之壓縮則較具延滯性且沈陷量也較大。

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

1. Terzaghi 壓密理論

本文以 Terzaghi(1943)之單向壓密理論分析地層下陷問題。該理論係利用飽和土壤內孔隙水在穩定層流情況下之連續條件，及有效應力原理和土壤本身之應力 - 應變關係推得計算式。其基本之假設為(1)土壤是飽和狀態，(2)土壤顆粒與水有不同壓縮度，(3)孔隙水流符合達西定律(Darcy law)，(4)土壤之壓縮性與滲透性在受壓過程中保持不變。

依據 Terzaghi 建議，正常壓密土壤之極限沉陷量之計算，如下所示。

$$S_u = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log\left(\frac{P'_0 + \Delta\sigma'_{vo}}{P'_0}\right) \dots\dots\dots (3-1)$$

式中， S_u ：極限沉陷量 C_c ：壓縮指數
 e_0 ：初始孔隙比 P'_0 ：初始壓密應力
 H ：土層厚度 $\Delta\sigma'_{vo}$ ：有效應力增加量

若土壤之壓密性質或孔隙比隨深度有很大的變化，或截然為不同土層，則總沉陷量 S 為各土層沉陷量之總和。

極限沉陷量求得之後，利用以下壓密方程式，則可計算歷時性之沉陷量 $S(t)$ 。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (3-2)$$

式中， u ：孔隙水壓 C_v ：壓密係數
 t ：時間 z ：深度

Taylor(1948)對上式壓密方程式，提出一個以 Fourier 級數展開的方式來表示的數學精確解，如下所示：

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

式中， $U(t)$ ：平均壓密度，定義如式(3-4)

T_v ：時間因數

$$U(t) = 1 - \frac{\int \Delta u dz}{\int \Delta u_0 dz} \dots\dots\dots (3-4)$$

而式(3-3)中之時間因數 T_v 與時間 t 之關係如下所示：

$$T_v = \frac{C_v \times t}{H^2_{dr}} \dots\dots\dots (3-5)$$

式中， H_{dr} ：最長之排水路徑長

因此各土層在各壓密應力之歷時性沉陷量 $s(t)$ 如下所示：

$$S(t) = S_u \times U(t) \dots\dots\dots (3-6)$$

2. Biot 耦合壓密理論

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

$$\left. \begin{aligned} G\nabla^2 S_x + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - \frac{\partial \rho}{\partial x} &= 0 \\ G\nabla^2 S_y + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \frac{\partial \rho}{\partial y} &= 0 \\ G\nabla^2 S_z + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - \frac{\partial \rho}{\partial z} &= 0 \\ k\nabla^2 \rho &= \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + n\beta \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-7)$$

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

由於地下水位觀測井所測得之水位變化，可代表鄰近區域亦有相同之水位變化，而且地下水位變化引致之地層下陷屬於區域沉陷，因

此若考慮為單向度之壓密過程，即 $S_x = S_y = 0$ ， $\varepsilon = \frac{\partial s_z}{\partial z}$ ， $\frac{\partial s_x}{\partial x} = \frac{\partial s_y}{\partial y} = 0$ ，可將基本方程式(3-7)簡化如下：

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

$$-k \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 S_z}{\partial z \partial t} + n\beta \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-8)$$

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

若考慮一土壤厚度為 H ，受到瞬間荷重 P_0 ，則其壓密沉陷，經式(3-8)解析得如下所示：

$$S_z = \frac{4P_0 H}{\pi^2 \eta G} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \times \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{(2n+1)\pi}{2H_d} \right)^2 C_v t \right] \right\} \dots\dots\dots (3-9)$$

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

$H_d = H$ ，若為雙向排水 $H_d = H/2$

3.4 地層下陷模擬預測

地層下陷模擬預測，是根據分層之水位資料及地層之土壤分類，來求地層之沉陷歷線，並與定期量測之沉陷資料比較，以了解地層下陷之力學行為。賴聖耀、謝明志（1995）以 Biot（1941）壓密理論為基礎，發展階段性荷重模式(Step-loading model)之地層下陷預測模式，唯該文僅考慮水位下降過程，土壤有效應力增加之加壓變形，而忽略了水位上升及再下降過程中之解壓及再壓所產生之微量變形。賴聖耀（1998）以大地工程界所熟悉之 Terzaghi（1943）壓密理論為基礎，且考慮水位下降、上升、再下降之加壓、解壓、再壓等變形特性，發展

另一個階段性荷重模式。茲將賴聖耀（1998）之階段性荷重模式，簡述如下：

$$s(t) = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{8H_i}{\pi^2} \sum_{j=1}^k \left\{ C_{\varepsilon ij} \times \log \frac{P'_{ij} \pm \gamma_w h_{ij}}{P'_{ij}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \times \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{(2n+1)\pi}{2H_{di}} \right)^2 \times C_{vi} \times (t - t_{ij}) \right] \right] u(t - t_{ij}) \right\} \right\}$$

..... (3-10)

式中， $s(t)$ ：第 t 時間之地層下陷量。

m ：土層數。

H_i ：第 i 層土壤厚度。

k ：水位變化階段數。

$C_{\varepsilon ij}$ ：第 i 層土壤在第 j 個水位變化階段之土壤壓縮、回彈或再壓縮係數。

水位下降時： $C_{\varepsilon} = C_{c\varepsilon} = C_c / (1 + e_0)$ ， $C_{c\varepsilon}$ 為壓縮係數、 C_c 為壓縮指數、 e_0 為初始孔隙比。

水位上升或水位再下降時： $C_{\varepsilon} = C_{r\varepsilon} = C_r / (1 + e_0)$ ， $C_{r\varepsilon}$ 為回彈係數， C_r 為回彈指數。

P'_{ij} ：第 i 層土壤在第 j 個水位變化階段之有效應力。

γ_w ：水之單位重。

h_{ij} ：第 i 層土壤在第 j 個水位變化階段之水位變化量。水位下降為正，水位上升為負。

H_{di} ：第 i 層土壤之排水路徑長度，單向排水， $H_{di} = H_i$ ，雙向排水
 $H_{di} = H_i / 2$

C_{vi} ：第 i 層土壤之壓密係數。

t_{ij} ：第 i 層土壤在第 j 個水位變化階段之起始時間。

$u(t - t_{ij})$ ：為 Heaviside Step 函數，當 $t < t_{ij}$ 時， $u(t - t_{ij}) = 0$ ，當 $t \geq t_{ij}$ 時，

$$u(t - t_{ij}) = 1。$$

賴聖耀 (1998) 之階段性荷重模式，經由布袋港沉陷模擬分析結果，如圖 3-4 所示，並與分層地層下陷之觀測資料比較，比較結果極為相近。

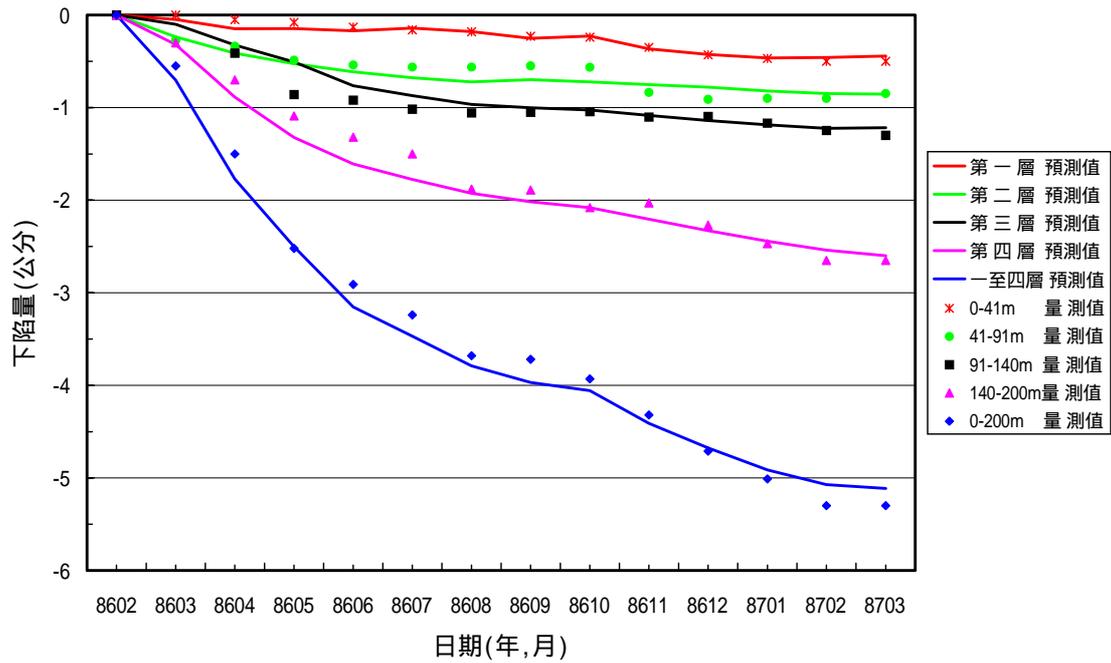


圖 3-4 布袋港沉陷模擬分析與分層下陷之觀測資料比較

第四章 布袋港海埔地填土之沉陷分析

布袋港除商港區之港灣設施由抽砂填土而成外，在商港區與魚港區之間有兩期之海埔地，第一期海埔地有 66 公頃，第二期海埔有 60 公頃，如圖 4-1 所示。第二期海埔地為最近幾年才填造完成，由於靠近商港區，成為商港區之附屬用地，因此其填土荷重所造成之沉陷行為亦有必要瞭解。

由圖 4-1 可知，第二期海埔地成梯字形，其回填寬度約為 660m，長邊為 1020m，短邊為 790m，目前高程約為 3.166m，而未填土前高程約為-0.5m，因此其填土高度約為 3.666m。

本文分別就填土荷重之應力分析，沉陷量分析以及沉陷之速率分析，來探討海埔地填土之沉陷行為。

4.1 應力分析

Boussineq 1885 年發展一套數學式來決定因表面上之點荷重下任何一點之應力，使用其公式之積分技巧，可得位於撓性矩形載重面積角隅下已知點之垂直應力，如式(4-1)：

$$\Delta P = \int_{y=0}^L \int_{x=0}^B \frac{3q_0(dx dy)Z^3}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} = q_0 I \dots\dots\dots (4-1)$$

式中， P 為應力增量，

I 為影響因素，如圖 4-2 所示，圖中 $m = B/Z$ ， $n = L/Z$

茲計算布袋港海埔地第二期填土區中點 O，土層第 8 層次，目前深度為 48.7~75.3m 之沉泥至粘土層(CL-ML)應力增量，以說明應力增量之計算方法。茲將梯形之填土區分為矩形及三角形兩填土區分別計算。

(1) 矩形填土區

$$Z = (48.7+75.3)/2-3.666n = 58.334\text{m}$$

$$B = 660/2 = 330\text{m}$$

$$L = 790/2 = 395\text{m}$$

$$q_0 = 0.2 \times 3.166 + (0.2-0.1) \times 0.5 = 0.6832 \text{ kg/cm}^2$$

$$m = B/Z = 330/58.334 = 5.657$$

$$n = L/Z = 395/58.334 = 6.771$$

查圖 5-2 得 $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 0.244$

$$P_1 = q_0 \times (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) = 0.6668 \text{ kg/cm}^2$$

(2) 三角形填土區對 O 點粘土層之應力增量

以積分公式得 $\Delta P_2 = 0.0144 \text{ kg/cm}^2$

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = 0.6812 \text{ kg/cm}^2$$

依照(1)(2)步驟可計算填土區其他點各個層次土層之應力增量，茲將矩形填土區 AB 剖面 200m 深之應力增量繪成應力增量等值線色階圖，如圖 4-3 所示。由圖 4-3 可知，同一深度之應力增量，在填土區中點最大，然後漸遞減至填土邊緣。

4.2 沉陷量分析

茲以填土區中點 O，土層第 8 層次，深度 48.7~75.3m(CL-ML)之沉陷量分析，說明沉陷量之計算方式

$$S = H \times \frac{C_c}{1 + e_0} \times \log \frac{\sigma'_0 + \Delta P}{\sigma'_0}$$

$$S = H \times C_c \varepsilon \times \log \frac{\sigma'_0 + \Delta P}{\sigma'_0}$$

$H = 26.65\text{m}$, $C_{c\varepsilon}$ 值參考表 4-1 第 5 列 , $C_{c\varepsilon} = 0.1$

$$\sigma'_0 = r' \times Z = (0.2-0.1) \times 58.334 = 5.8334 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Rightarrow S = 26.65 \times 0.1 \times \log \frac{5.8334 + 0.6812}{5.8334}$$

$$= 0.1278\text{m}$$

$$= 12.78\text{cm}$$

其他層次之土層應力增量及沉陷量計算方法同上，層次之沉陷量如表 4-1 所示。其總沉陷量為 70.41 公分。

依據上述方法亦可計算填土區各點之總沉陷量，而非填土區受附近填土荷重而引致之沉陷，亦可計算而得，圖 4-4 為填土區及附近三角形非填土區各點之總沉陷量，將其繪成沉陷等值線色階圖及立體沉陷圖，其分別如圖 4-5、4-6 所示，由圖 4-4、4-5、4-6 顯示：填土區之沉陷量較非填土區沉陷量為大；由填土區之沉陷分析顯示：填土區之中點沉陷量最大，然後沉陷量漸遞減至填土邊緣；由非填土區之沉陷分析顯示，距離填土區愈近，沉陷量愈大，距離填土區愈遠，其沉陷量愈小。

4.3 沉陷速率

由於海埔地之利用，須視沉陷較穩定後才可使用，以免產生過大之差異沉陷，致使上部之構造物及相關設施損壞或喪失功能，因此海埔地填土產生沉陷之沉陷速率分析亦很重要。

圖 4-7 為布袋港第二期海埔地填土 3.666m 之沉陷歷時曲線，由圖 4-7 顯示：於填土完成後之初期，其沉陷速率較大，然後漸緩，而由於布袋港之地質土壤含粘土、沉泥量相當高，而粘土之沉陷速率較慢，由圖 4-7 顯示，雖然歷時 10 年，其沉陷仍未完成，其沉陷量為 60 公分，為總沉陷量(70.41cm)之 85%，因此布袋港海埔地填土產生之沉陷，若

欲完全穩定，可能須 30~40 年。另此海埔地填土至今約有 8 年，沉陷量為 58 公分，約為總沉陷之 82%，由圖 4-8 沉陷速率顯示，目前每年沉陷約 0.7 公分，提供此海埔地往後開發利用時之參考。

表 4-1 布袋港填土 3.666m 引致地層各層次之沉陷分析表

層次	土層分類	土層深度 (m)	厚度 (m)	壓縮係數 $C_c = C_c/(1+e_0)$	有效應力 (kg/cm^2)	應力增量 (kg/cm^2)	沉陷量 (cm)
1	SP	0-9.5	9.5	0.025	0.2667	0.6832	-8.0459
2	ML	9.5-11.6	2.1	0.075	0.6884	0.6832	-4.7153
3	SP	11.6-14.1	2.5	0.025	0.9184	0.6832	-1.5095
4	SM+CL	14.1-32.8	18.7	0.05	1.9784	0.6831	-12.0443
5	SM	32.8-36.5	3.7	0.028	3.0984	0.6829	-0.8962
6	CL-ML	36.5-41.1	4.6	0.1	3.5134	0.6828	-3.5477
7	SM	41.1-48.7	7.6	0.028	4.1234	0.6825	-1.4155
8	CL-ML	48.7-75.3	26.65	0.1	5.8334	0.6812	-12.7829
9	SM+CL	75.3-82.4	7.1	0.055	7.5184	0.679	-1.4664
10	CL	82.4-84.75	2.35	0.2	7.9909	0.6782	-1.6628
11	ML	84.75-87.2	2.45	0.075	8.2309	0.6778	-0.6315
12	SM	87.2-91.15	3.95	0.028	8.5509	0.6771	-0.3661
13	CL	91.15-95.8	4.65	0.2	8.9809	0.6762	-2.9321
14	SM	95.8-108.2	12.4	0.028	9.8334	0.6742	-0.9999
15	CL+SM	108.2-115.2	7	0.075	10.8034	0.6715	-1.3748
16	SM	115.2-132.2	17	0.028	11.3034	0.6699	-1.1902
17	CL+SM	132.2-139.3	7.1	0.1	13.2084	0.6629	-1.5099
18	CL+SM	139.3-147.35	8.05	0.129	13.9659	0.6596	-2.0814
19	CL	147.35-157	9.65	0.2	14.8509	0.6555	-3.6204
20	ML	157-164.35	7.35	0.075	15.7009	0.6512	-0.9729
21	SM+CL	164.35-170.15	5.8	0.035	16.3584	0.6477	-0.3423
22	CL	170.15-172.5	2.35	0.2	16.7659	0.6454	-0.771
23	SM	172.5-175.8	3.3	0.028	17.0484	0.6438	-0.1859
24	CL	175.8-200	24.2	0.15	18.4234	0.6354	-5.3457
總沉陷量				70.41cm			

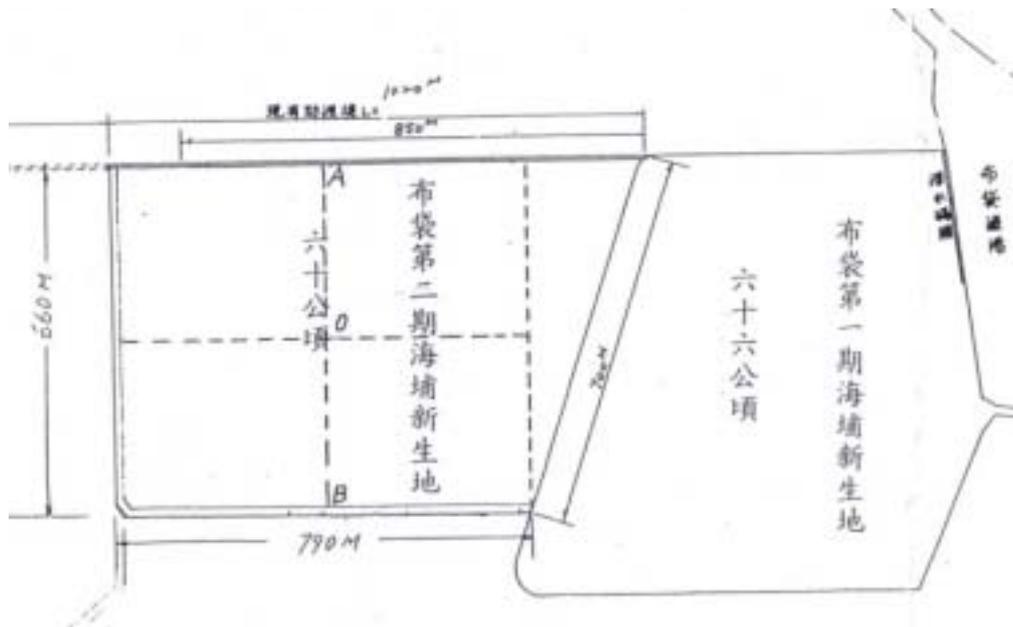


圖 4-1 布袋港第二期海埔新生地平面圖

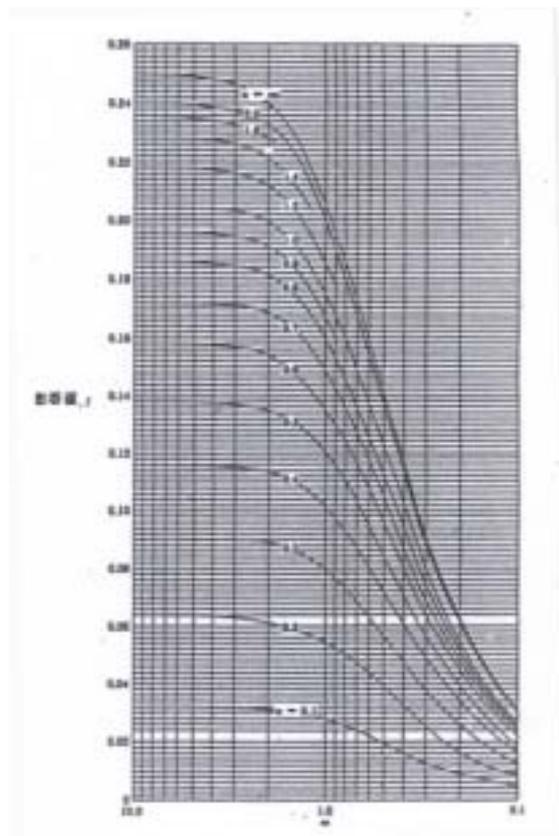


圖 4-2 應力影響因素 I 與 m 和 n 之關係圖

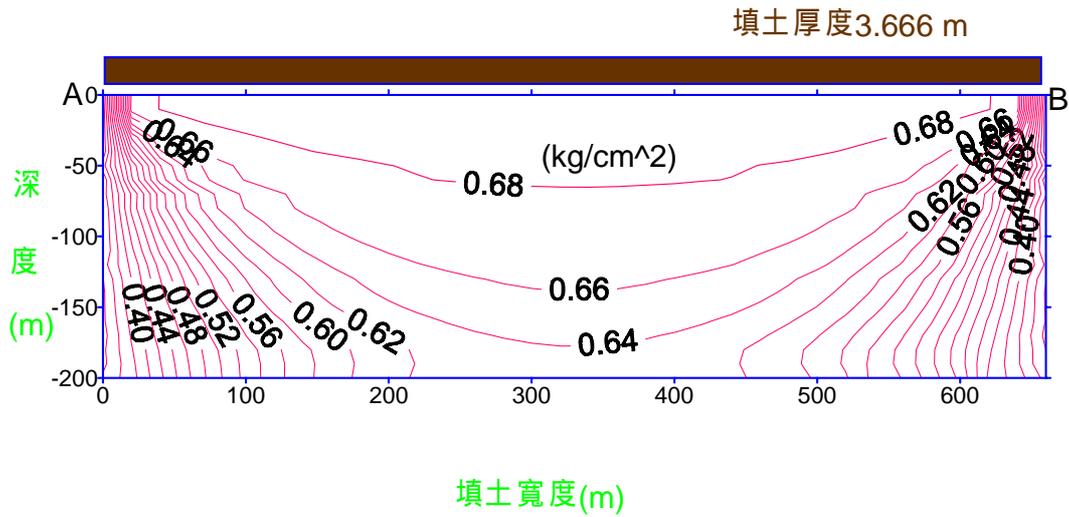


圖 4-3 布袋港海埔地填土 3.666m 之應力增量圖

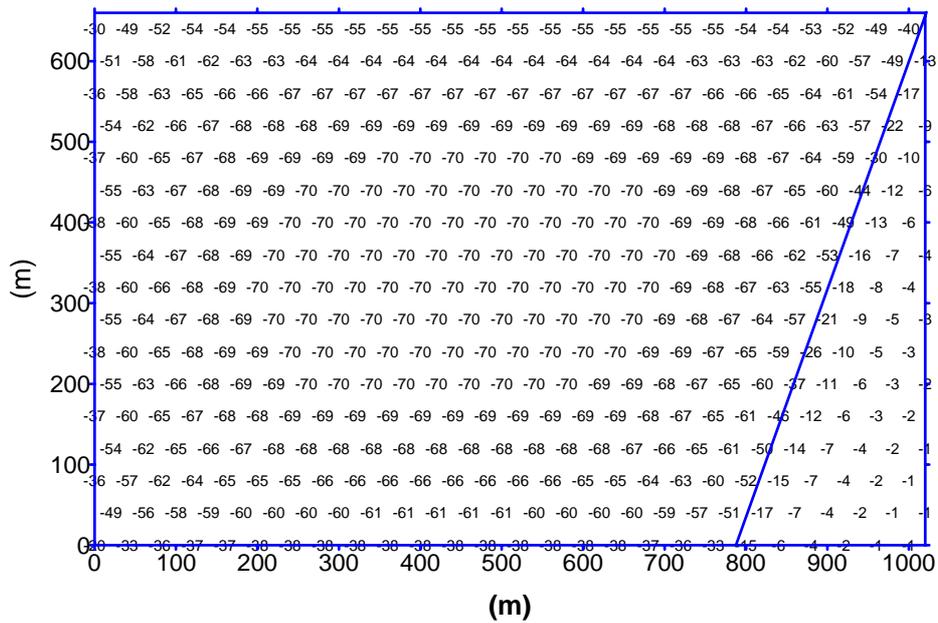


圖 4-4 布袋港第二期海埔地土 3.666m 之沉陷分析結果(cm)

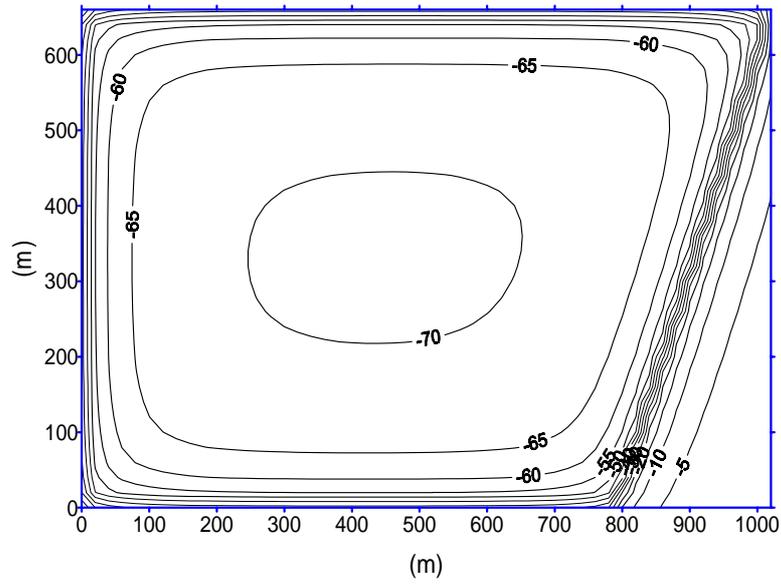


圖 4-5 布袋港第二期海埔地填土 3.666m 之沉陷等值區(cm)

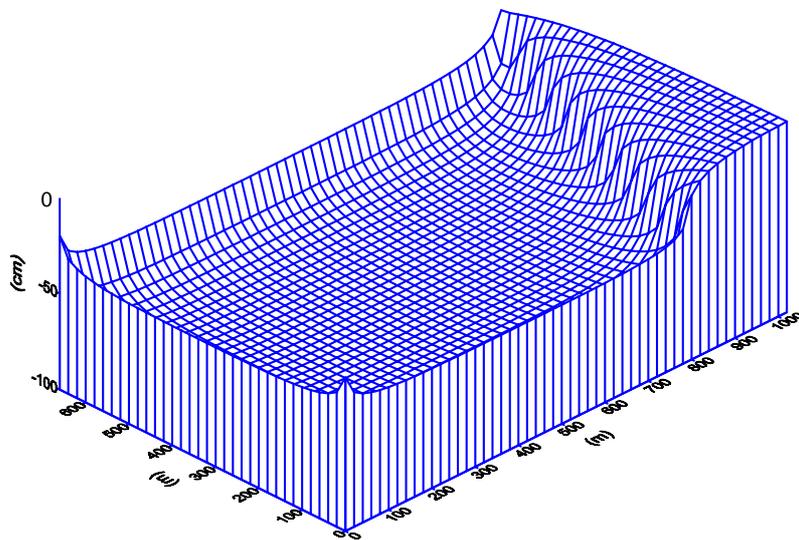


圖 4-6 布袋港第二期 海埔地填土 1.666m 之立體沉陷圖

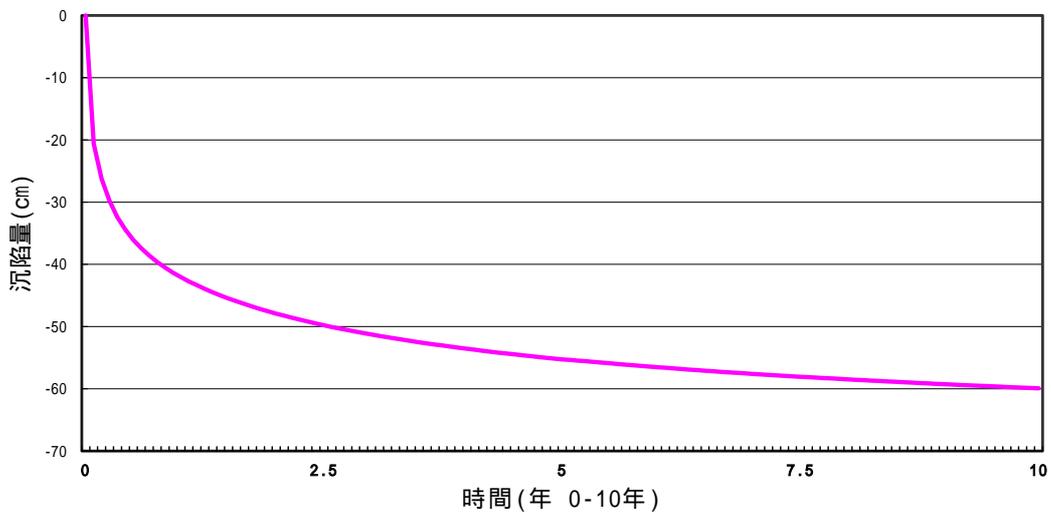


圖 4-7 布袋港第二期埔地填土 3.666m 之 0-10 年沉陷歷時曲線

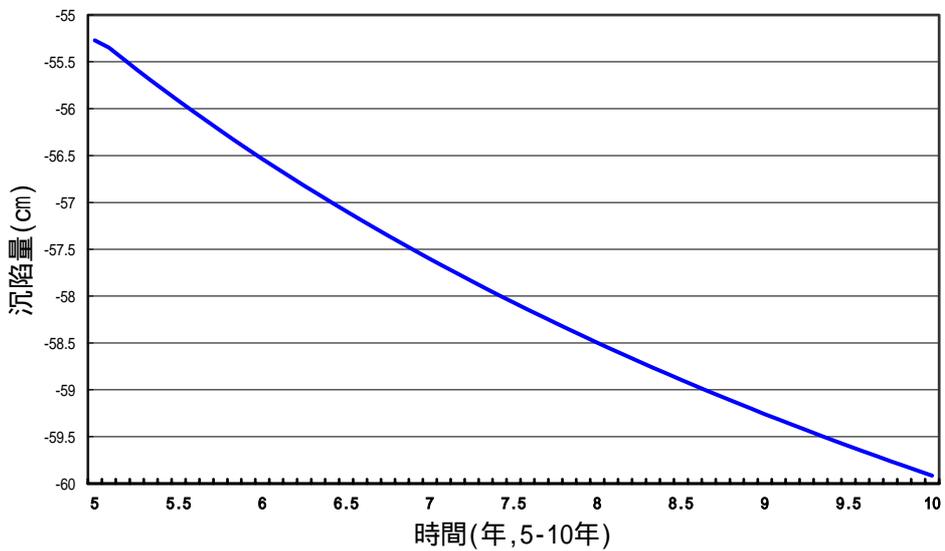


圖 4-8 布袋港第二期海埔地填土 3.666 之 5-10 年沉陷歷時曲線

第五章 地層下陷監測結果分析

本中心曾於布袋港區第二期海埔地之西北角隅設置一組 200M 之下陷與水壓監測井，本計劃另選擇於布袋商港近南堤之砂石碼頭區，亦設置一組 300M 之下陷與水壓監測井，其位置如圖 5-1 所示。

5.1 監測系統規劃與安裝

5.1.1 位置與深度

地下水壓的大小、水位之深度及變化皆對地層下陷有極大影響，且水壓計必須埋設在透水性良好之受壓水層裡，並在其上下不透水層以皂土進行封層，才能量得正確水壓；本中心曾於布袋港區第二期海埔地之西北角隅設置一組 200M 之監測井，其位置如圖 5-1 所示，監測井之座標如表 5-1，300m 監測井位置亦如圖 5-1。

200M 監測井共計三孔，分別為分層沉陷觀測井深度 200M，安裝磁感式磁環 18 只，水壓計鑽探孔 200M，安裝電子式水壓計 3 只，開口式水壓計孔 180M，安裝開放式水壓計 4 只並於管口內放置電子式水壓計，並採用自動記錄方式其儀器架構流程如圖 5-2 所示，300M 監測井共計三孔，分層沉陷觀測井一孔，深度 300M，安裝磁感式磁環 30 只，水壓計二孔，分別為 100M 及 300M，每孔安裝電子式水壓計 4 只，共計 8 支，現就其內容概述如下：

1. 電磁場式分層沉陷觀測井 2 孔，其深度為 200M 及 300M，於主要土層層次變化之處裝設沉陷環，使量測結果可以顯示個別層次之土層沉陷變化量，沉陷觀測井裝設後將以無線電波層別沉陷儀測量沉陷環之深度變化，以求得各深度土層沉陷之變化情形，200M 沉陷計感應環安裝深度如表 5-2，300M 安裝深度如圖 5-8 所示。

2. 電子式水壓計觀測井

200M 水壓監測井共有 7 組電子式水壓計，3 組安裝於鑽探試驗孔內，4 組安裝於開放式水壓計管口內，前 3 組其安裝深度為 131、68、

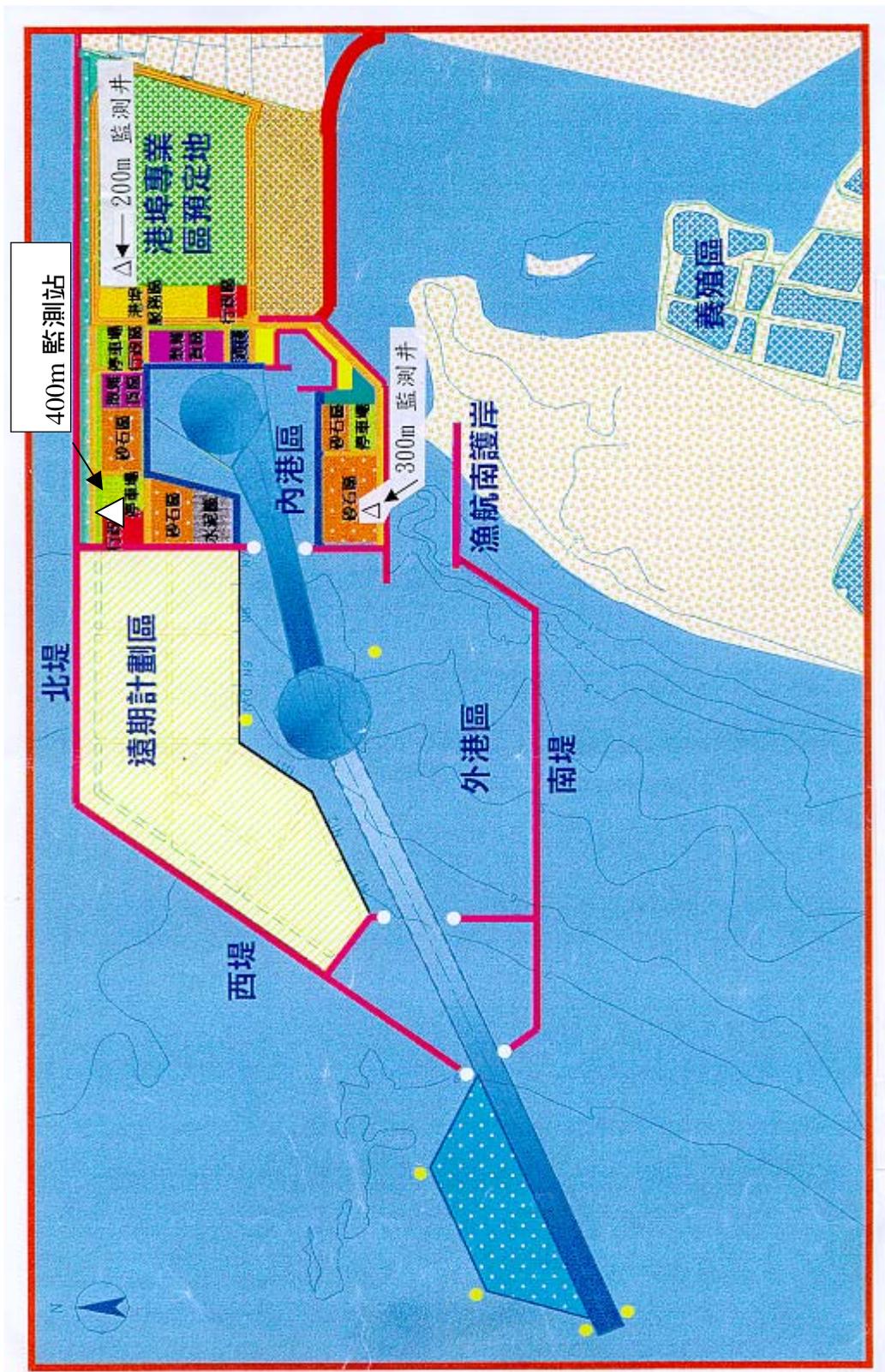


圖 5-1 布袋港地層下陷監測井位置圖

表 5-1 監測井座標高程一覽表

監測井編號	高程	縱座標 N(m)	橫座標 E(m)
水壓井 OW-1	3.166	2587280.959	161254.669
水壓井 OW-2	3.498	2587281.740	161268.649
沉陷井 S-B	3.416	2587281.574	161264.043

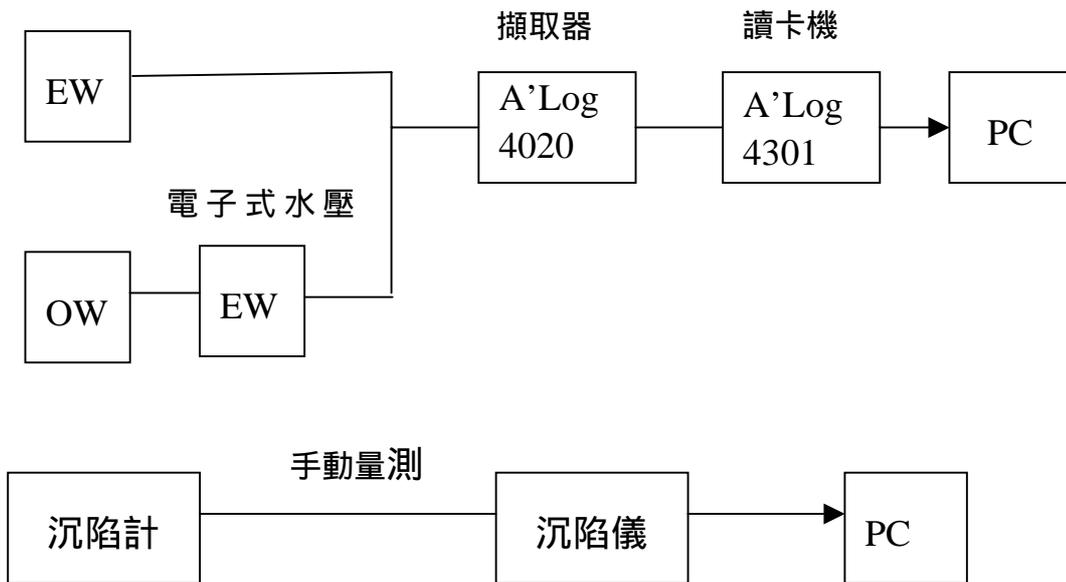


圖 5-2 系統儀器架構流程圖

表 5-2 沉陷計感應環安裝深度一覽表

序 號	埋設深度(m)
S1	8.2620
S2	15.7775
S3	29.6330
S4	40.5855
S5	55.5480
S6	65.5630
S7	75.5140
S8	85.4690
S9	100.4705
S10	110.4515
S11	120.4515
S12	130.7385
S13	140.4410
S14	157.4565
S15	170.4380
S16	180.6975
S17	190.4455
S18	200.4735

44M，開放式水壓計安裝深度為 178、143.5、105、34M，而電子式水壓計則安裝於壓力水頭下 10M 處，所有電子式水壓計經由配管接至同一個自動記錄器，本觀測井採用 IC 卡自動記錄器地下水位資料每 6 小時自動記錄於 IC 卡上，取回 IC 卡後以讀卡機讀出記憶之資料。300M 水壓監測井共有二孔，每孔安裝 4 組電子式水壓計共計 8 組，安裝深度分為 305、250、200、150、103、85、50、35M。

水壓計安裝深度如表 5-3 所示。

表 5-3 地下水壓觀測站水壓計埋設資料表(200m)

儀器編號	原廠編號	埋設深度	記錄器編號	初值(飽和)	較正係數	水頭高(管口)	備 考
OW-1	35549	44M	CH2	27	0.00339		電子式水壓計
	35550	68M	CH3	125	0.00331		電子式水壓計
	39332	131M	CH5	-134	0.00680		電子式水壓計
OW-2		34M				4.07M	開放式水壓計
		105M				24.46M	開放式水壓計
		143.5M				24.81M	開放式水壓計
		178M				25.26M	開放式水壓計
	25986	14.07M	CH1	115	0.000673		電子式水壓計
	25985	34.46M	CH4	296	0.000673		電子式水壓計
	25987	34.81M	CH6	147	0.000672		電子式水壓計
	25983	35.26M	CH7	-315	0.000672		電子式水壓計

水壓計埋設資料表(300m)

水位井安裝深度	封層深度	水壓計編號	較正係數 kg/cm ²	安 裝 深 度 (m)	水位量測(m)
35M	30M	4290024	0.001166	12.42	2.42
50M	42M	4290029	0.001170	12.92	2.92
85M	72M	4290034	0.001121	25.33	15.33
101M	95M	4290035	0.001166	25.92	17.51
150M	140M	5820031	0.001195	30.19	20.19
200M	192M	5820034	0.001184	30.55	20.55
250M	225M	5820040	0.001104	31.91	21.91
305M	295M	5820042	0.001089	32.39	22.39

5.1.2 儀器裝設

1. 電子式水壓計

本水壓計採用日本 DOBOKU 生產, 型式為電阻式 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 及 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 耐水壓型水壓計。

- (1) 因本地區位於海濱附近及鑽孔深度為 200M 及 300M, 因此施鑽時先採用皂土保護孔壁以防崩孔, 待鑽探至預定深度後再以清水置換, 直到迴水無皂土成份, 再開始安裝儀器。
- (2) 水壓計於地面上先行接線, 並於電纜線上註明安裝深度位置, 並於接線位置確實做好防水措施, 並先行飽和量測初值。
- (3) 待鑽探完成後將預先準備好水壓計, 放入孔內, 並量測其水壓值是否合理再開始回填水洗石, 並用 6 分 PVC 管搗實工作及量測其回填深度, 待回填至欲灌漿(封層)位置, 利用 PVC 管將水泥及皂土混合液以灌漿機打入預定位置, 然後再回填七厘石。
- (4) 第二組及第三組水壓計皆重覆 (2)、(3) 步驟, 直到回填至表面為止, 再將電纜線連線至觀測箱內, 其安裝示意圖如圖 5-3 所示。

2. 開放式水壓計

- (1) 安裝方式與電子式水壓計安裝步驟相同。
- (2) 當開放式水壓計完成保護措施後, 先用水位指示器量測其自然水頭高, 然後再將電子式水壓計安裝於水頭水位下 10M 處, 再將電纜線連線至觀測箱內便完成, 其安裝示意圖如圖 5-4 所示。

3. 地盤分層沉陷觀測井

本沉陷井採用日本 DOBOKU 生產之磁感式沉陷環, 磁環及安卡皆為防腐蝕不銹鋼材質, 井管為南亞 2.5 英吋井管, 為耐腐蝕及酸鹼材質。

- (1) 鑿井到達預定深度 210M 或 310M 時, 儘量清除孔內沉泥, 靜置 1 小時後檢查孔深以作為安裝深度及沉砂管長度之依據。

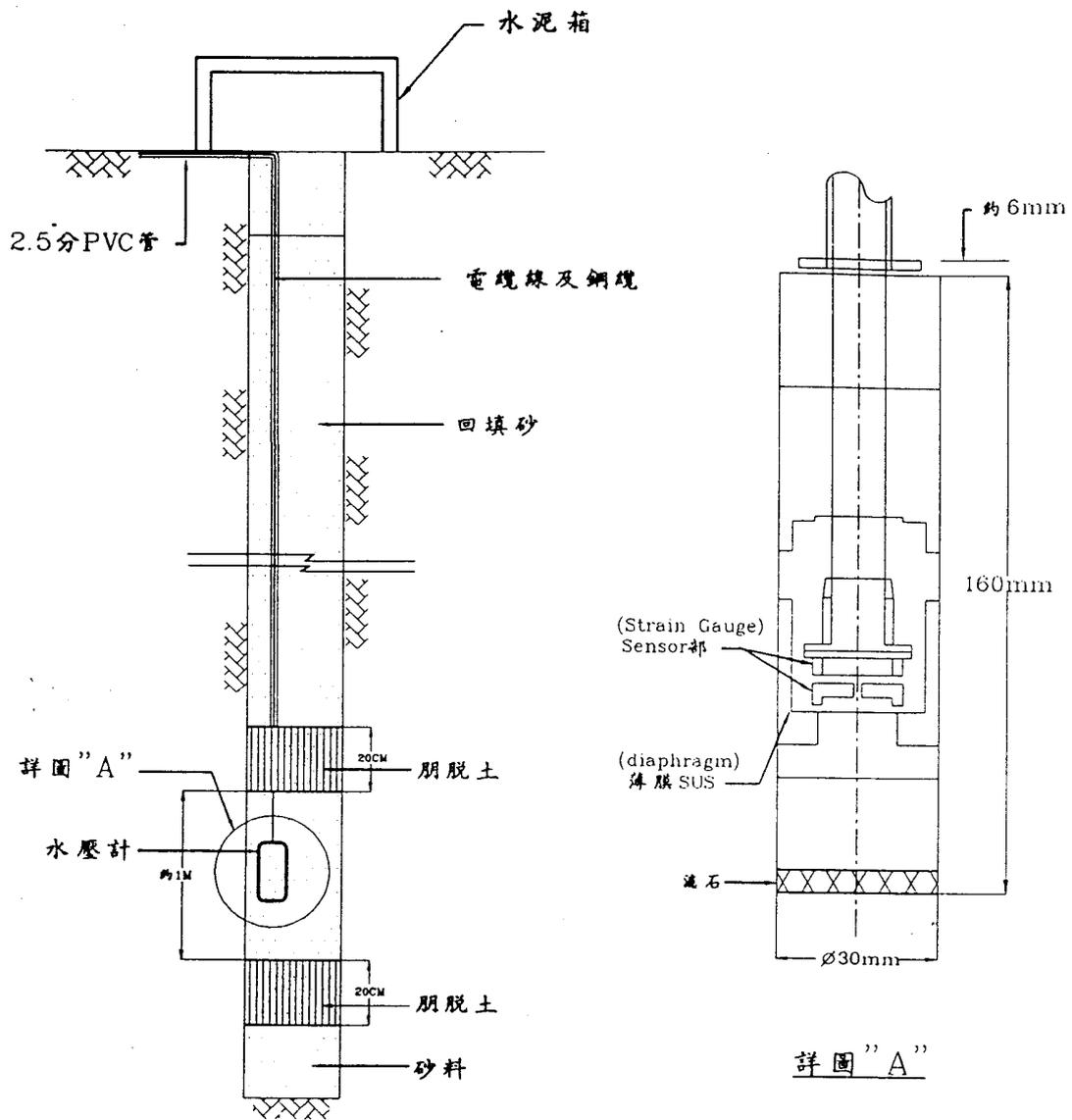


圖 5-3 電子式地下水壓計安裝示意

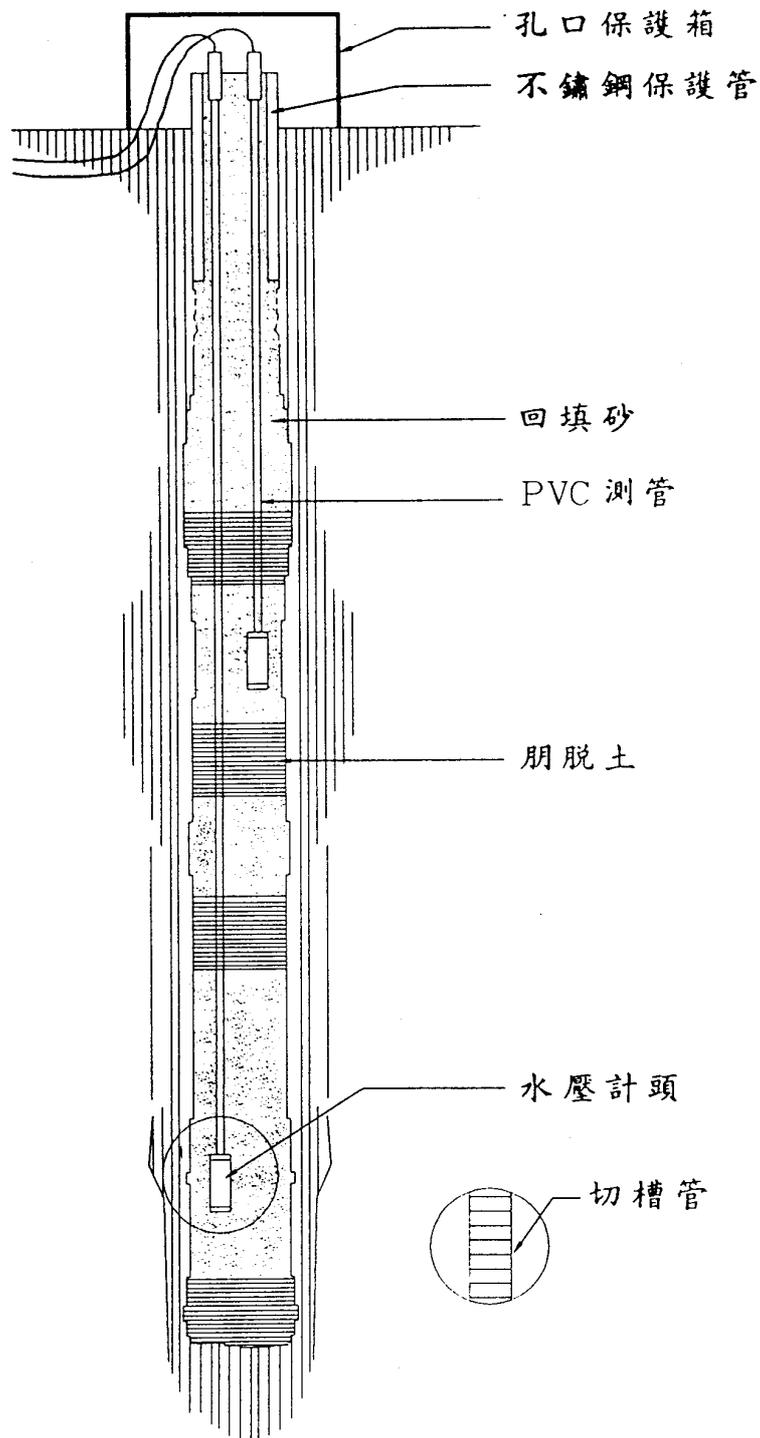


圖 5-4 開口式水壓計安裝示意圖

- (2)依據土層資料決定沉下磁環安裝位置，並將量測管安裝摩擦切管排列於地面，並依序編號及記錄長度再固定沉陷磁環於預定安裝深度，並連接燃燒樹脂導線。
- (3)於量測井管底部安裝沉砂管及止水活閥以便量測導管順利及垂直下井，並於止水活閥處以鋼纜牽引避免導管下放時因過重產生失敗。
- (4)待量測井依秩序完成後，再利用燃燒樹脂機打開磁環，使安卡可順利固定於土壤上，便可進行回填工作，回填原料以河砂，慢慢回填以防崩孔造成量測管損害，所有作業完成後便可進行孔口保護台及洗孔作業，並待測孔穩定後可做初值設定。
- (5)安裝示意圖如圖 5-5、5-6 所示。

5.2 監測井地質分析

1.200M

布袋港監測站在深度 200 公尺之土層，根據現場鑽探資料如圖 5-7 所示，約可分為 24 個次層，分別簡述如下：

- (1)棕黃色細砂(SP)：分佈在地表下深 0~9.5m 且含有貝屑，SPT-N 值為 8~17 間，表土層有 0.45m 之回填礫石夾棕黃色細砂。
- (2)灰色砂質沉泥(ML)：分佈於地表下 9.5~11.6m 深，其 N 值為 3，屬軟弱土層。
- (3)灰色細砂(SP)：分佈於地表下 11.6~14.1m，N 值為 13 屬中等緊密土層。
- (4)灰色細砂夾薄粘土層(SM+ML)：約分佈於地表下深度 14.1~32.8m，其 N 值自 7~24 之間，屬軟弱粘土及中等緊密砂土層。
- (5)灰色細砂(SM)：分佈於地表下 32.8~36.5m，N 值平均為 25 之中等緊密土層。

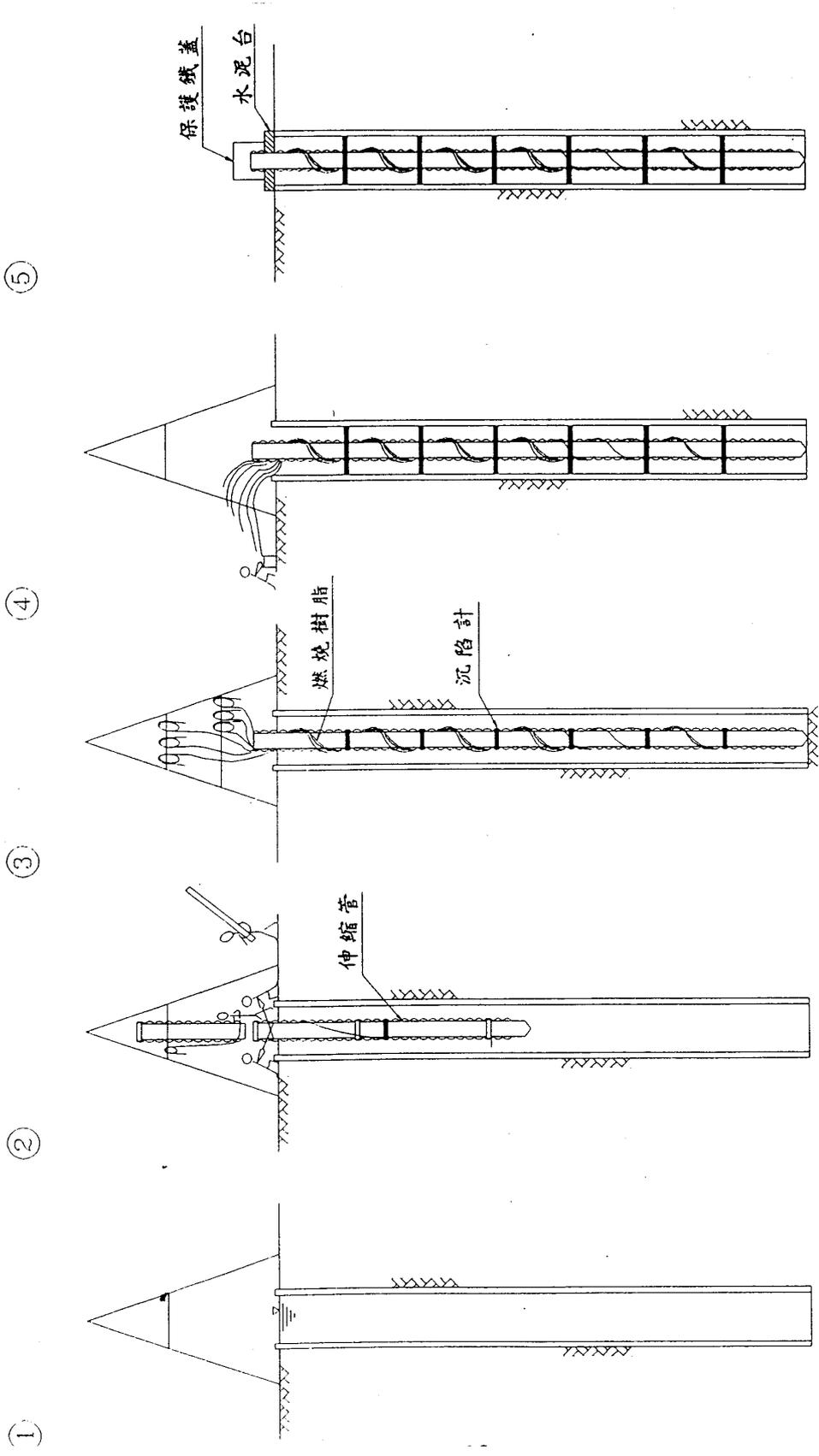


圖 5-5 沉陷計安裝示意圖

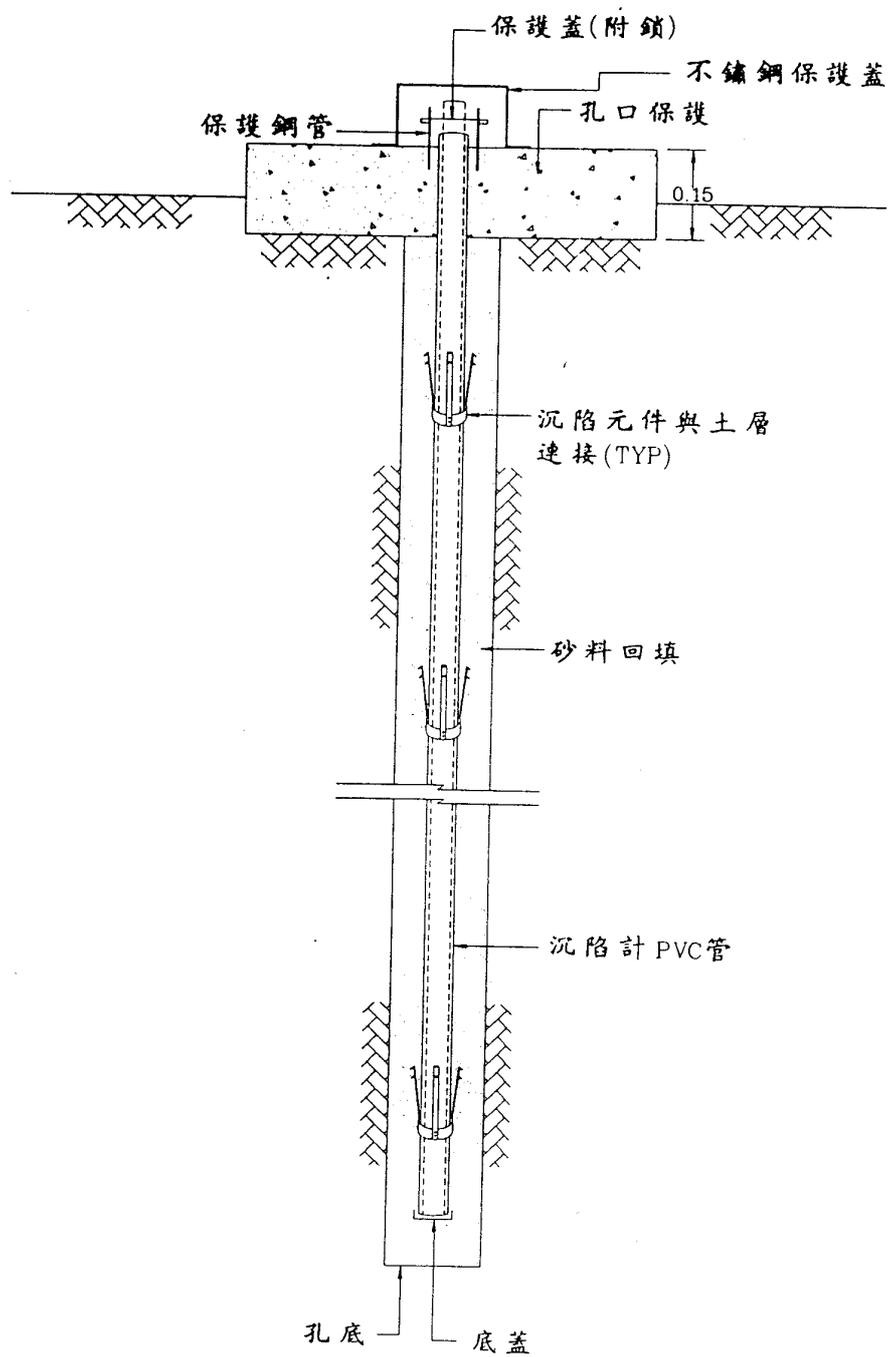


圖 5-6 磁感式層別沉陷安裝示意圖

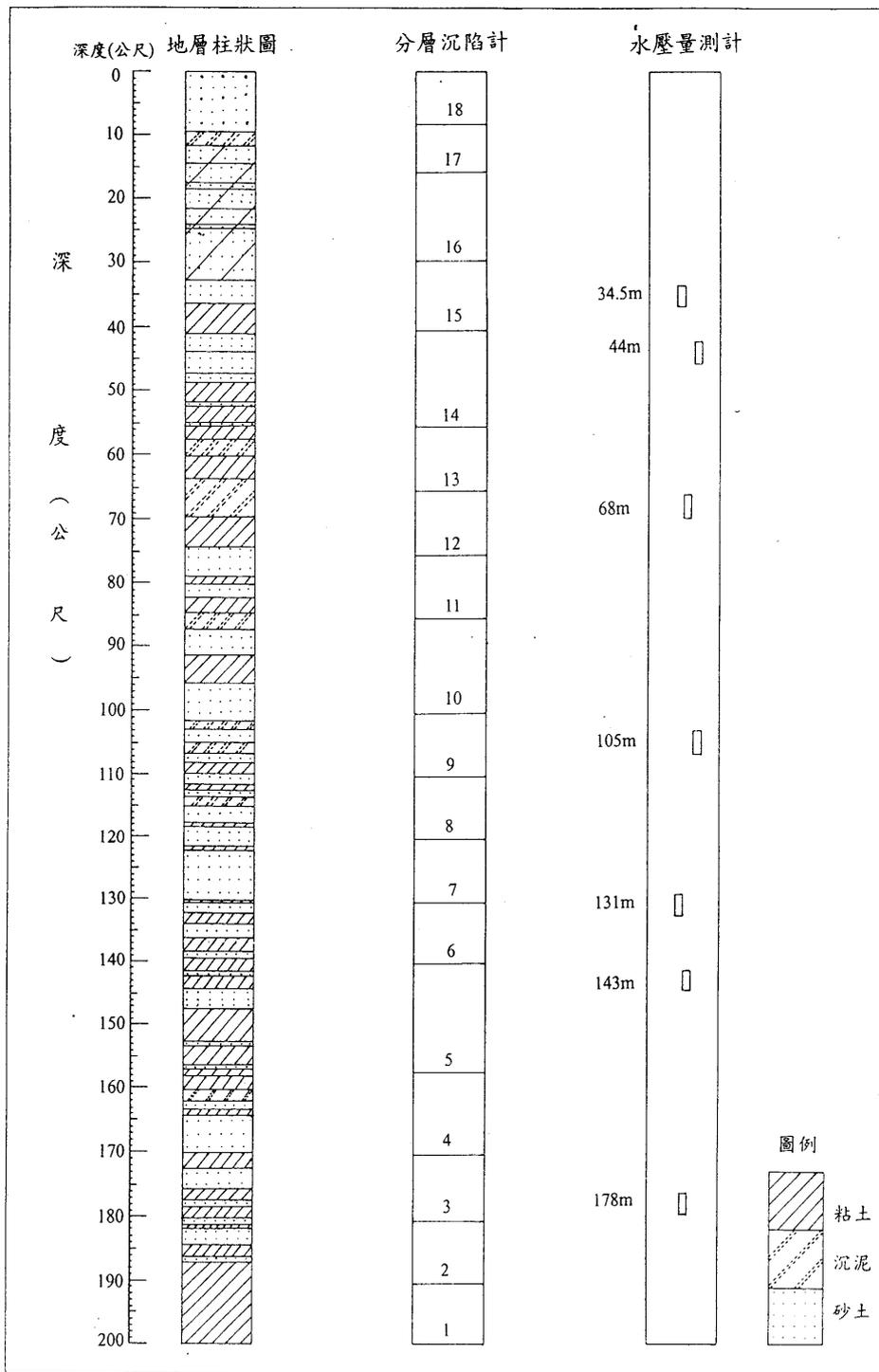


圖 5-7 布袋港分層沉陷及水壓量測觀測站地層柱狀圖

- (6)灰色粘土或砂質沉泥層(CL~ML)：分佈於地表下 36.5~41.1m，N 值在 12~16 間，屬中等堅硬土層。
- (7)灰沉泥質細砂(SM)：分佈於地表下 41.1~48.7m，N 值為 41 之中等緊密土層。
- (8)灰色泥質粘土至砂質沉泥(CL~ML)：分佈於地表下 48.7~75.3m，N 值為 15~34 間，屬中等堅硬土層，其中於深度 52~52.5m，58~60m，64~66m 為沉泥質細砂(SM)土層，N 值為 34~40 間之中等緊密土層。
- (9)灰色泥質細砂含泥質粘土(SM+CL)：分佈於地表下 75.3~82.4m，N 值於 28~74 之間。
- (10)灰色沉泥質粘土(CL)：分佈於地表下 82.4~84.75m，N 值約為 40。
- (11)灰色砂質沉泥(ML)：分佈於地表下 84.75~87.2m，N 值約為 41。
- (12)灰色沉泥質細砂(SM)：分佈於地表下 87.2~91.15m，SPT-N 值為 45。
- (13)青灰色沉泥質粘土(CL)：分佈於地表下 91.15m~95.8m，N 值介於 28~36 之間。
- (14)青灰色沉泥質細砂(SM)：分佈於地表下 95.8~108.2m，SPT-N 值在 50~77 時貫入土層為 4~9cm。
- (15)灰色泥質細砂含砂質粘土(CL+SM)：分佈於地表下 108.2~115.2m，N 值為 31 及 50 時貫入土層約 4cm。
- (16)灰色沉泥質細砂(SM)：分佈於地表下 115.2~132.2m，其 SPT-N 值為 60 時貫入土層約 7cm。
- (17)灰色粘土含泥質細砂(CL+SM)：分佈於地表下 132.2~139.3m，N 值為 100 時貫入土層約 13cm。
- (18)褐色或灰色粘土含沉泥質細砂(CL+SM)：分佈於地表下 139.3~147.35m，N 值為 30 時貫入土層約 3cm。
- (19)灰色粘土(CL)：分佈於地表下 147.35~157m，N 值為 50~60 時貫入土層約 38~40cm。

- (20)灰色沉泥(ML)：分佈於地表下 157~164.35m，N 值為 60 時貫入土層約 4cm。
- (21)灰色細砂含灰色粘土(SM+CL)：分佈於地表下 164.35~170.15m，SPT-N 值在 60 時貫入土層約 4cm。
- (22)灰色粘土(CL)：分佈於地表下 170.15~172.5m，SPT-N 值在 100 時貫入土層約 7cm。
- (23)灰色細砂(SM)：分佈於地表下 172.5~175.8m，N 值在 100 時貫入深度約 7cm。
- (24)灰色粘土(CL)：分佈於地表下 175.8~200m，N 值為在 100 時貫入土層約 5~13cm。

2.300M

監測井在深度 300 公尺之土層，根據現場鑿井資料如圖 5-8 所示，約可分為 21 個次層，分別簡述如下：

- (1)棕黃色細砂(SP)：分佈在地表下深 0~11m 且含有貝屑。
- (2)灰色砂質粉土(ML)：分佈於地表下 11.0~29.4m 深，屬軟弱土層。
- (3)灰色細砂(SP)：分佈於地表下 29.4~33.0m。
- (4)灰色泥質粘土至砂質粉土(CL~ML)：約分佈於地表下深度 33.0~81.2m。
- (5)灰色細砂(SM)：分佈於地表下 81.2~92.0m。
- (6)青灰色粘土至砂質粉土層(CL~ML)：分佈於地表下 92.0~101.0m。
- (7)青灰色粉土質細砂(SM)：分佈於地表下 101.0~107.0m。
- (8)灰色泥質粘土至砂質粉土(CL~ML)：分佈於地表下 107.0~111.0m 間。
- (9)灰色沉泥質細砂(SM)：分佈於地表下 111.0~133.0m。
- (10)灰色沉泥質粘土至砂質粉土(CL~ML)：分佈於地表下 133.0~141.6m。

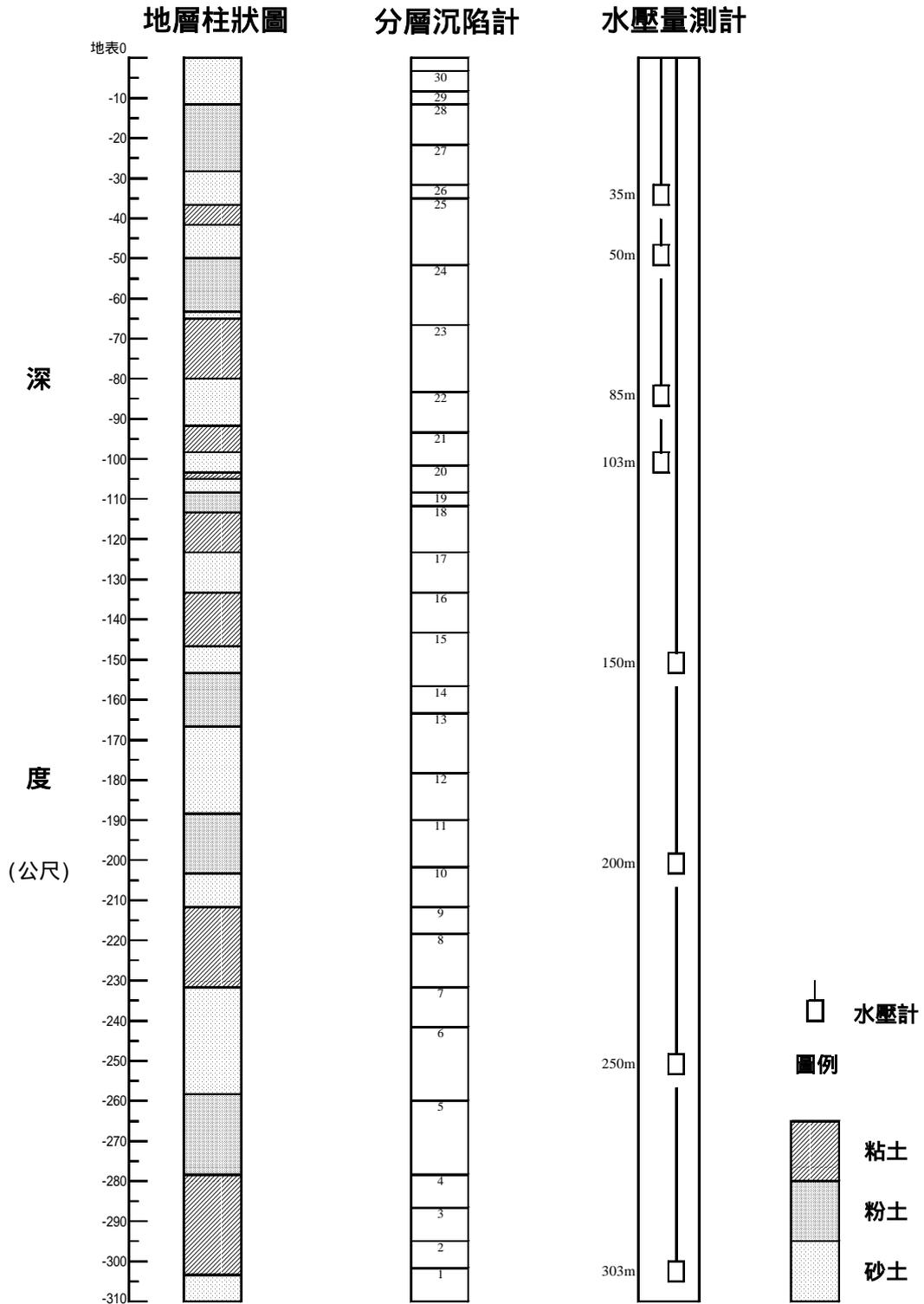


圖 5-8 布袋港 300 公尺沉陷及水壓監測站鑿井地層柱

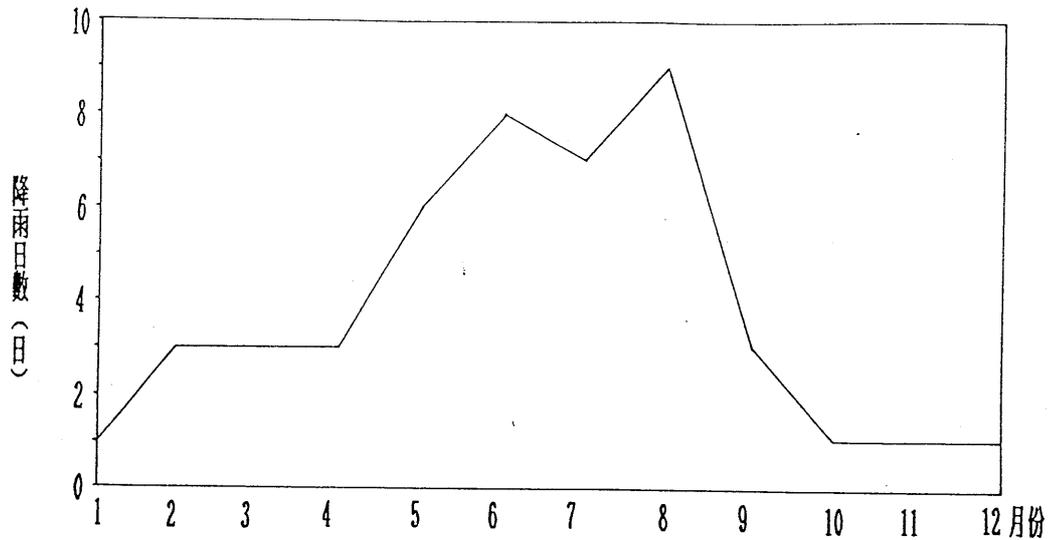


圖 5-9 布袋地區月平均降雨日數($\geq 10\text{mm}/\text{日}$)

- (11)灰色粉土質細砂(SM)：分佈於地表下 141.6~162.0m。
- (12)灰色粉土質粘土至砂質粉土(CL~ML)：分佈於地表下 162.0~176.5m。
- (13)灰色粉土質細砂(SM)：分佈於地表下 176.5m~189.0m。
- (14)灰色粉土質粘土至砂質粉土(CL~ML)：分佈於地表下 189.0~201.0m。
- (15)灰色泥質細砂(SM)：分佈於地表下 201.0~210.0m。
- (16)灰色粘土(CL)：分佈於地表下 210.0~216.0m。
- (17)灰色泥質細砂夾粘土(SM+CL)：分佈於地表下 216.0~239.0m。
- (18)灰色粉土質細砂(SM)：分佈於地表下 239.0~259.0m。
- (19)灰色粘土至砂質粉土(CL~ML)：分佈於地表下 259.0~277.0m。
- (20)灰色粉土質細砂(SM)：分佈於地表下 277.0~284.4m。
- (21)灰色粘土至砂質粉土(CL~ML)：分佈於地表下 286.0~300.0m。

5.3 監測結果分析

地下水位變化會引起地層之變化，而雨量及地下水抽取量會引起地下水位及地下水壓之變化，因此雨量、地下水位、地層下陷三者存在著某種相關性，茲分別說明其量測結果及其相關性。

5.3.1 雨量

布袋港位於嘉義沿海地區，其雨量分析乃依據台鹽總廠布袋氣象站記錄，如圖 5-9 所示，每年降雨量皆集中在 6、7、8 月，其餘月份雨量不大。

5.3.2 地下水位分析

1. 200m

本所於布袋港區第二期海埔地西北角隅，埋設 200 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 7 支水壓計，其深度分別為 34m、44m、68m、105m、131m、143m、178m，自 86 年 7 月 22 日開始以自動量測系統量測，其中 86 年 8 月 15 日至 9 月 22 日、87 年 6 月 17 日至 8 月 18 日、87 年 12 月 25 日至 88 年 1 月 20 日、89 年 10 月 18 日至 90 年 2 月 14 日及 92 年 8 月 15 日迄今，因水壓自動量測儀故障，而缺乏資料，茲將分層地下水壓 (t/m^2) 正規化為分層地下水位 (m)，以利比較，分別如圖 5-10 至圖 5-11 所示。由於其中 34m、105m、143m、178m 之水壓計為開放式，亦可以手動定期量測，手動量測自 86 年 4 月開始量測，每月量測一次。其量測結果如圖 5-12 所示。

由圖 5-10 及圖 5-12 顯示：34m 處之水位變化介於-3.3 ~ -3.7m 之間反復性之震盪，並無多大變化；44m 處之水位大約介於-5.5 ~ -7.0m，自 92 年 5 月起則向下降至-8.3m；68m 之水位介於-6.5 ~ -12m 之間，其中 87 年聖嬰年雨量較豐，全年水位較高，而 88 年 3 ~ 6 月、89 年 4 ~ 6 月、90 年 3 ~ 5 月、91 年 6~7 月及 92 年 4~5 月雨量少時，呈現較低水位，88 年 7 ~ 9 月及 89 年 6~8 月雨量較豐時，水位又漸上升。

由圖 5-11 及圖 5-12 顯示：105m 處之水位變化極大，最高水位

-16.6m，最低水位-26.5m，在 87 年聖嬰年雨量較豐時，水位較高，88 年 3 6 月、89 年 6 月、90 年 5 月、91 年 5 月及 92 年 3~5 月雨量較少時，水位明顯降低，88 年 7 9 月、89 年 6~8 月及 90 年 6~9 月雨量較豐時，水位漸漸上升；131m 處之水位變化亦極大，最高水位-17m，最低水位可能為-24m，其水位大小及變化與 105m 處水位相當，應是屬於同一含水層，目前因水壓計故障而無資料。143m 及 178m 水位大小及變化亦很相當，亦屬同一含水層，其最高水位為-17.8m，最低水位為-29.0m，其水位變化與 105m、131m 處相似。

綜合各地層之地下水位資料，如圖 5-13 所示，該圖顯示布袋港水層約可分為 5 個層次，34m 水位為第 1 含水層之水位，44m 水位為第 2 含水層之水位，68m 水位為第 3 含水層之水位，105m、131m 水位為第 4 含水層之水位，143m、178m 水位為第 5 含水層之水位。由水位變化現象顯示：第 1、2 層水位變化較小，較無超抽地下水現象，第 3、4、5 層地下水位低且變化極大，超抽地下水現象明顯，而且在 87 年聖嬰年雨量較豐時，水位較高，88 年 3 6 月、88 年 10 月 89 年 5 月、89 年 10 月 90 年 5 月、90 年 10 月~91 年 5 月及 92 年 2 月~5 月雨量較少時，水位漸漸降低，表示旱季時，超抽地下水較為嚴重。

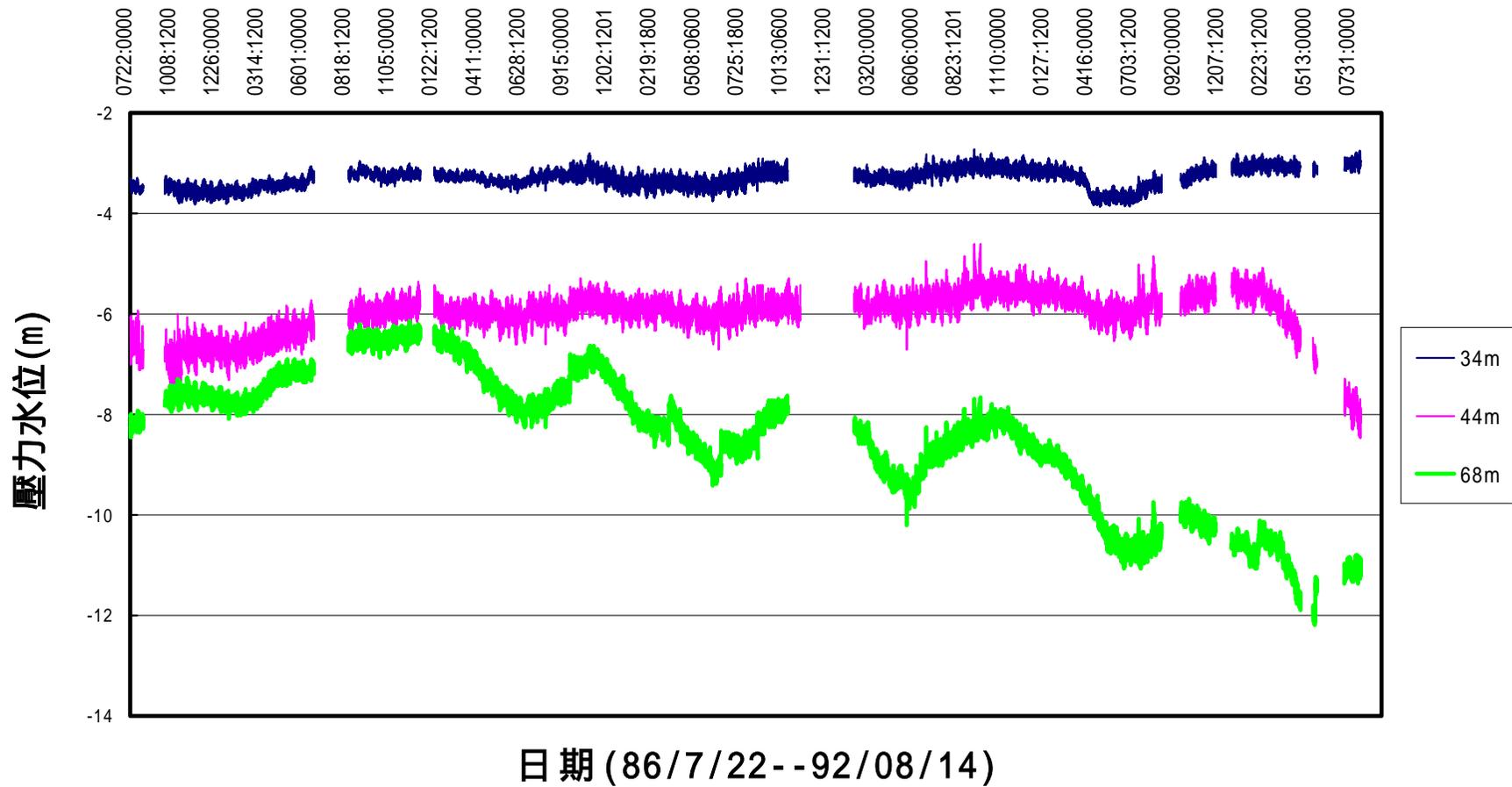


圖 5-10 布袋港深層水位變化(自記式)

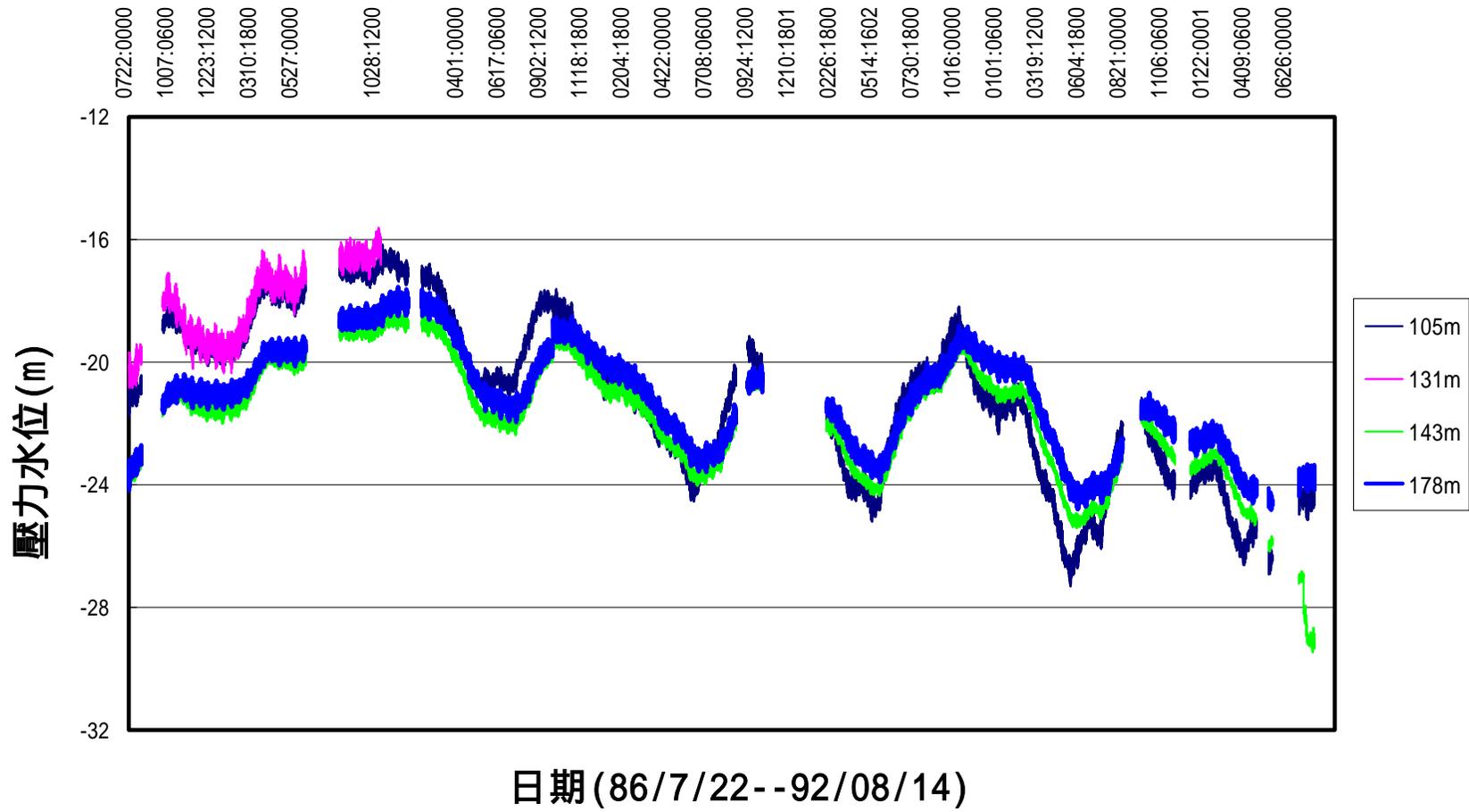


圖 5-11 布袋港深層水位變化(自記式)

布袋港(200m)分層水位變化(手動量測)

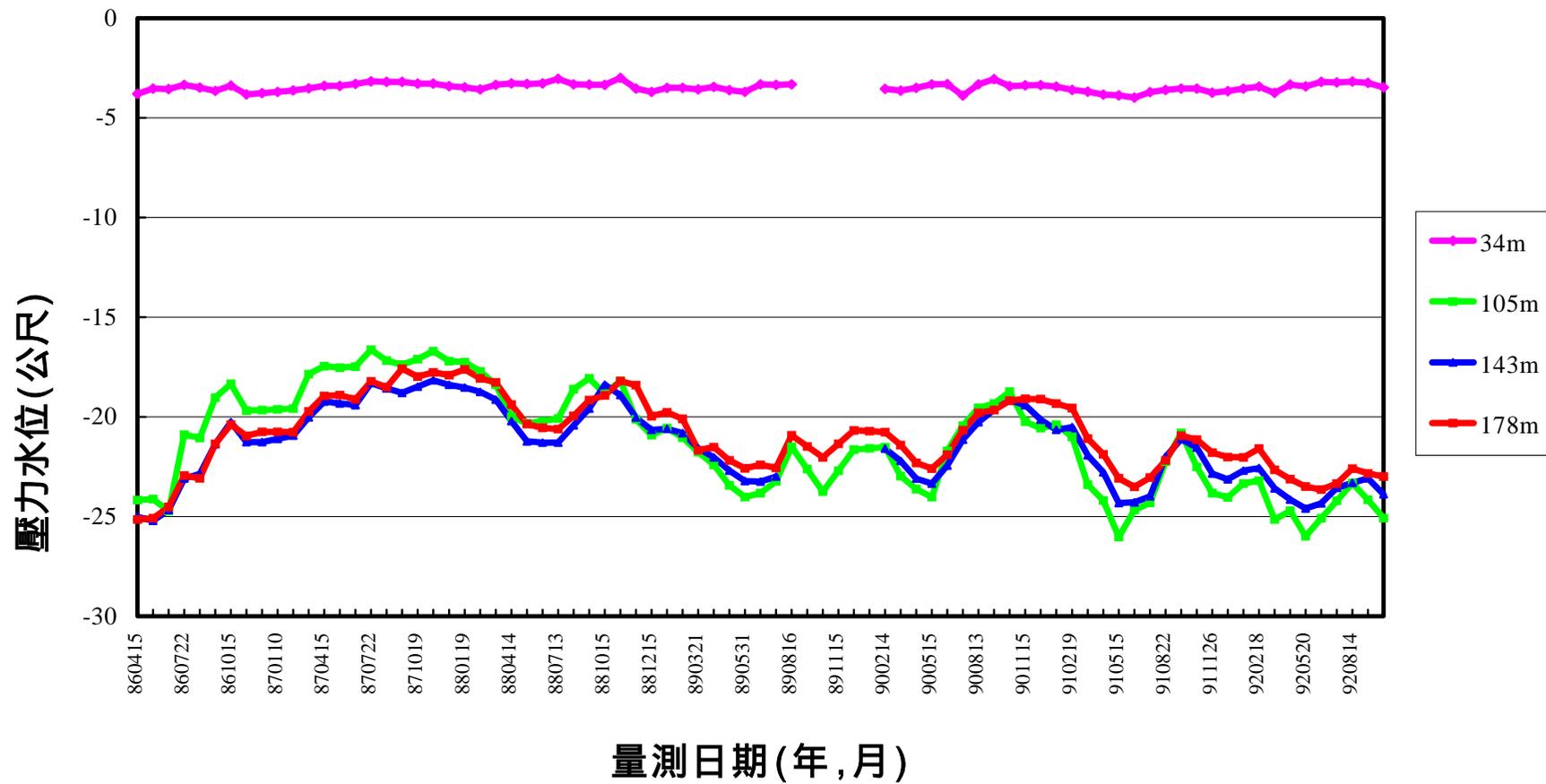


圖 5-12 布袋港分層水位變化(手動量測)

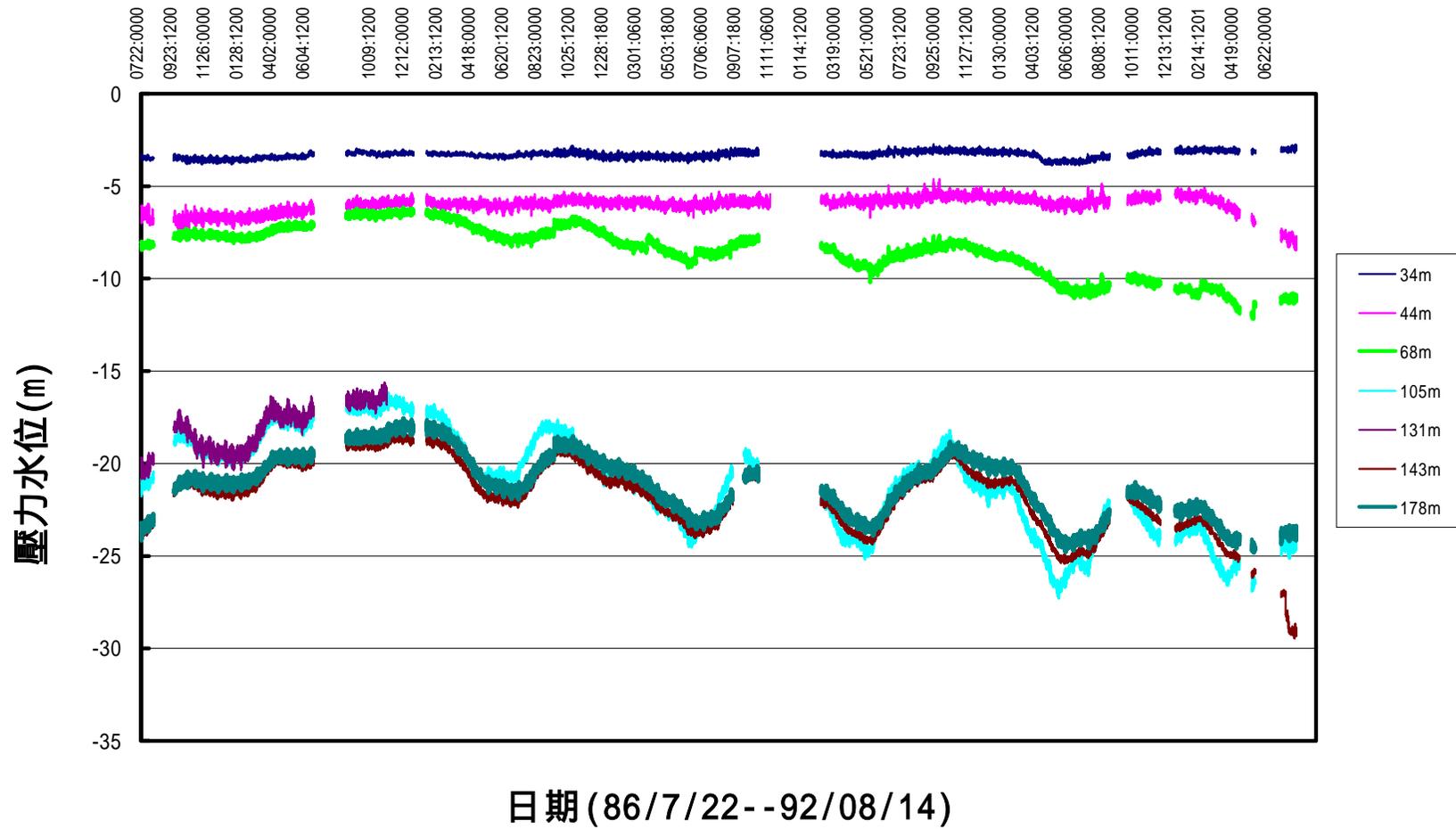


圖 5-13 布袋港分層水位變化(自記式)

2. 300m

於 90 年度選擇位於沉陷監測井旁之適當位置安裝兩孔深層水壓監測井，分別為 100 公尺及 300 公尺，每孔埋設四支水壓計，其深度為 35m、50m、85m、103m、150m、200m、250m、303m 共八支(如圖 5-8)，並自 90 年 9 月起進行定期量測，如圖 5-14 顯示，35 及 50m 之水位介於 -2.4 -3.5m 之間，屬淺層水位，85 及 103m 為較深層之水位介於-15.0 -22.2m 之間且屬同一含水層，其中以 91 年 5 月之水位降至-20m 及 -22.2m 較明顯變化，150m 及 200m 之水位介於-19.2 -23.3m 之間亦屬同一含水層，250m 深層之水位介於-21.3~24.9m 之間，而 303m 之水位又屬另一含水層，其水位介於-21.6~-25m 之間變化。

5.3.3 分層地層下陷分析

1. 200m

為了探討布袋港不同深度之壓縮行為，於港區第二期海埔地西北角隅之位置，設立 200m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 8、16、30、41、56、66、76、85、100、110、120、131、140、157、170、181、190、200m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 18 個磁環，每個月之中旬定期以無線電波監測儀量測各沉陷磁環之相對移動變化量，以分析不同深度地層之壓縮量，資料值由鋼鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 5-15 為至民國 91 年 11 月止，不同深度地層之壓縮量，以柱狀圖形表示，負值表壓縮，正值表回脹，圖中所有的量測數值均以地表為參考點所計算之相對壓縮量，由圖 5-15 可發現較淺之地層壓縮量較小，壓縮量較大之地層為 140、157m 及 170、181m 之深度，而此地層屬粘土層，且深層超抽地下水較嚴重，因此壓縮量較大。

圖 5-16 為不同時期不同深度之感應磁環相對於地表感應磁環之累積曲線比較圖，由圖 5-16 顯示，從 86 年 2 月至 92 年 10 月之 6 年 8 個月期間，布袋港地表至 200 公尺間之沉陷總量為 320 公厘，而其中 140、200m 之沉陷量 164mm，約佔總沉陷量之 51%，由此資料顯示，布袋港第二期海埔地區之沉陷屬於深層沉陷。

布袋港(300m)分層水位變化(手動量測)

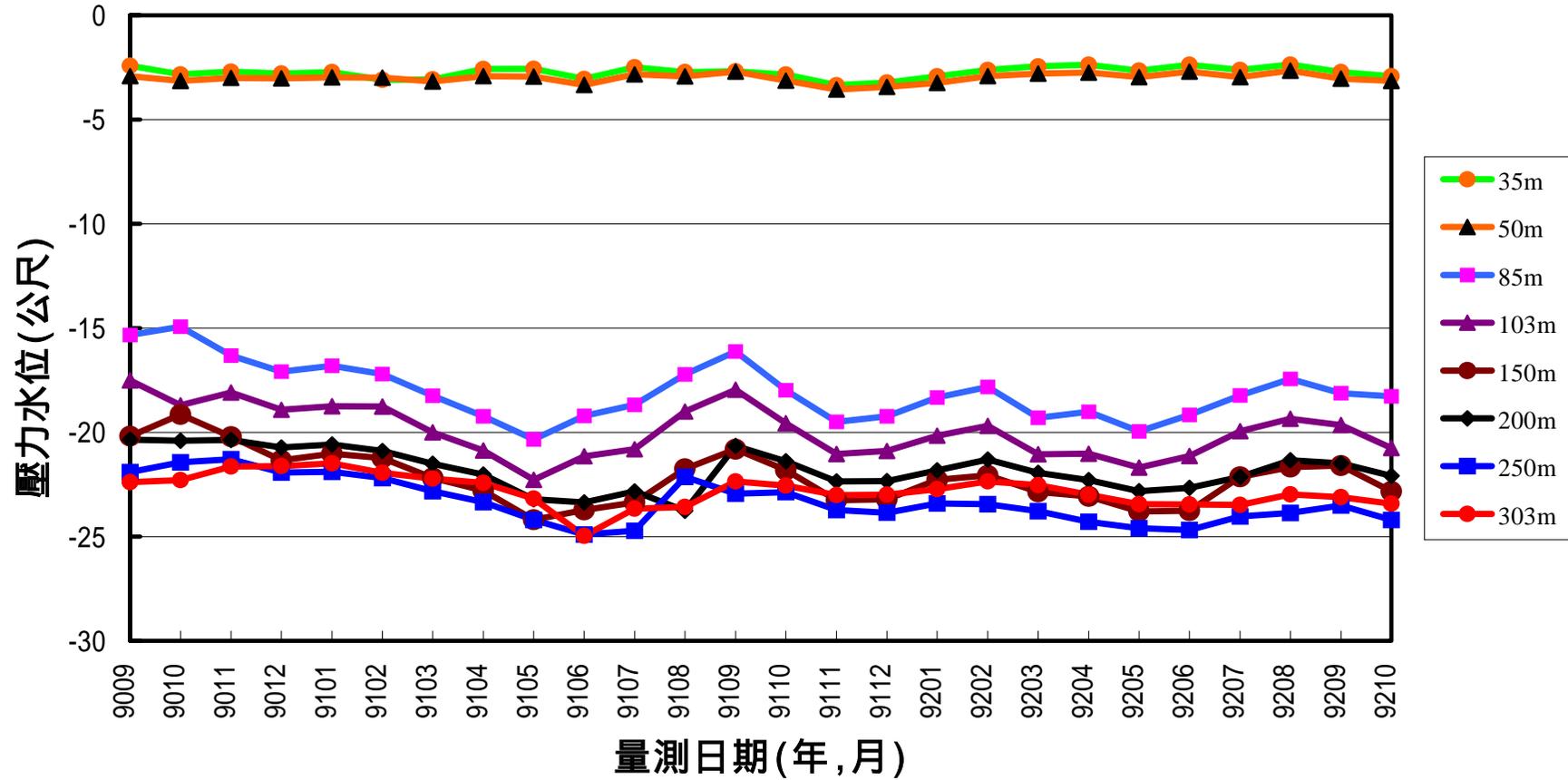


圖 5-14 布袋港分層水位變化(手動量測)

布袋港(200m)分層個別下陷量圖

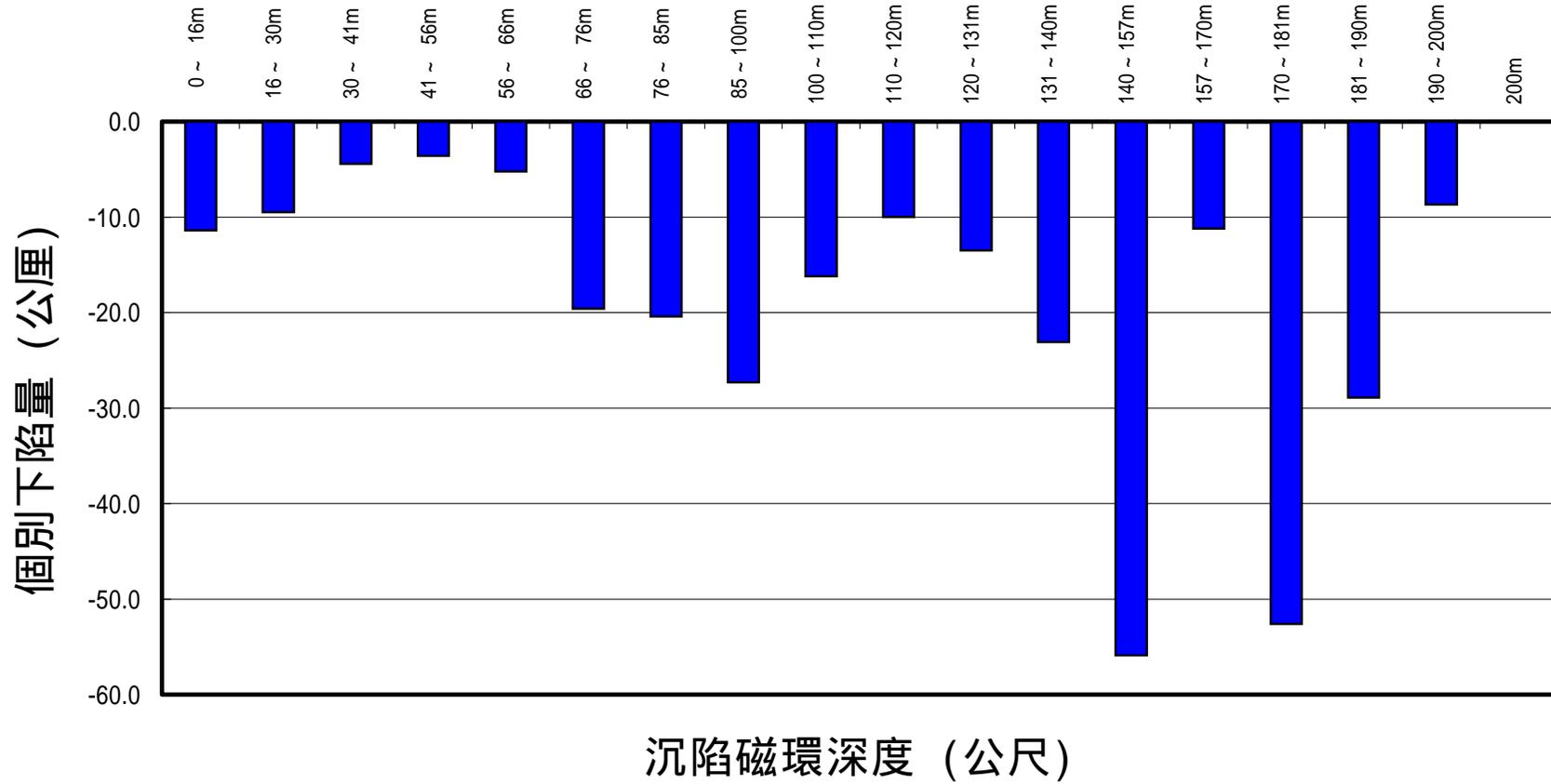
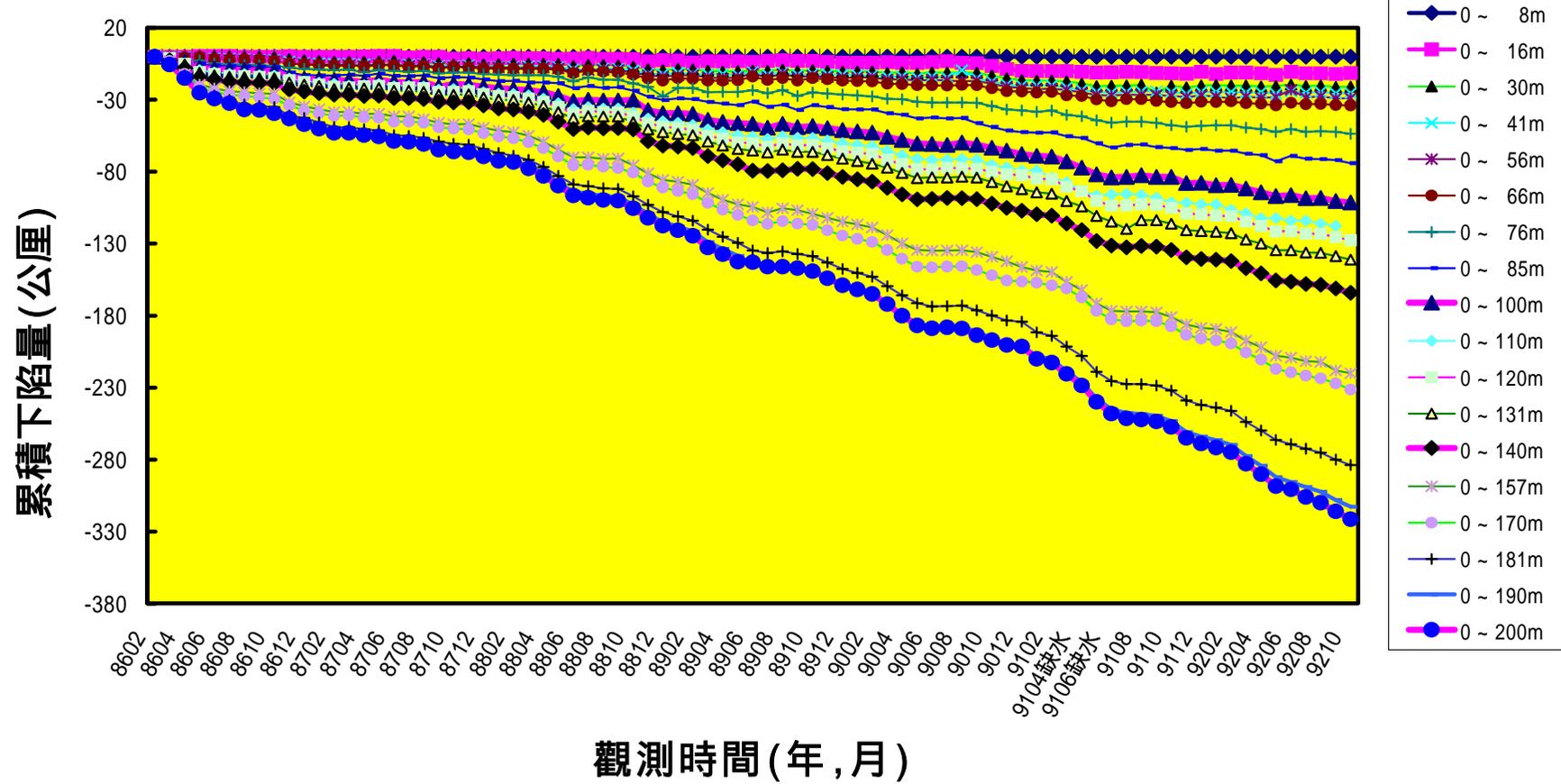


圖 5-15 布袋港分層個別下陷量圖

布袋港(200m)地層分層下陷觀測圖



5-26

圖 5-16 布袋港分層累積下陷量圖

布袋港(200m)地層分層下陷觀測圖

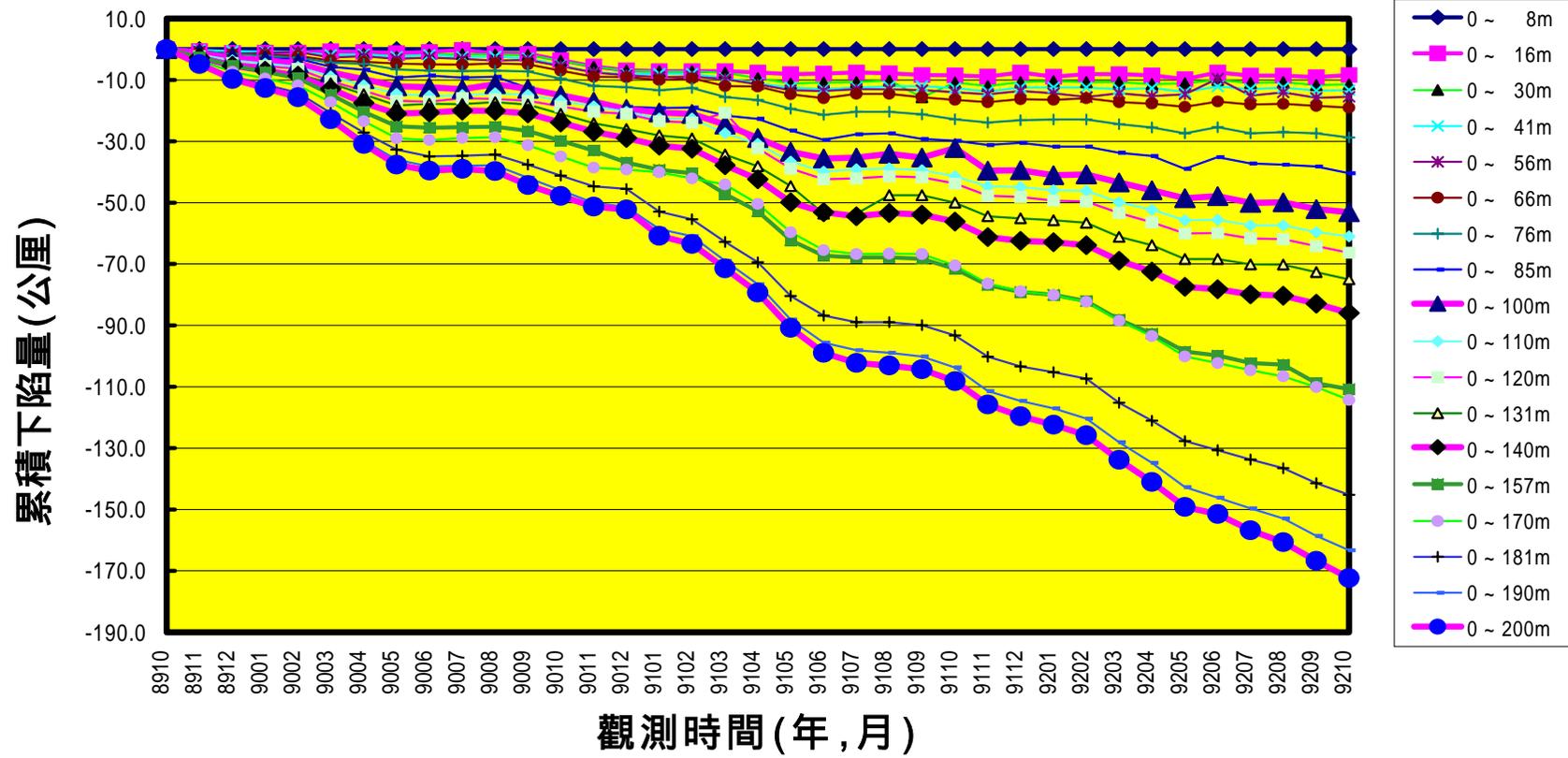


圖 5-17 布袋港分層累積下陷量圖

圖 5-17 為 89 年 10 月至 92 年 10 月止期間之累積沉陷總量 172 公厘

2. 300m

另於商港近南堤之砂石碼頭區，亦完成設置 300 公尺深之地層下陷監測井，分別於深度 3、7、11、21、31、35、51、66、83、94、102、109、112、123、134、142、156、163、178、190、202、212、218、231、241、261、278、285、294、300m 之位置各安裝一個沉陷磁環，共計 30 個(如圖 5-8)。圖 5-18 為至民國 92 年 10 月止，不同深度地層之個別壓縮量，可發現較深之地層壓縮量較小，壓縮量較大之地層為 66 83m 及 94 102m 之深度，而此地層屬粘土層，因此壓縮量較大。

由圖 5-19 分層觀測圖顯示，自 89 年 10 月 92 年 10 月止，3 年之沉陷總量約 26.12 公分，分別為 90 年沉陷量約 7.40 公分、91 年沉陷量約 7.07 公分、92 年沉陷量約 11.55 公分，監測期間 90 年 8 月時該區進行鑿井，導致 90 年較 91 年沉陷大，92 年 2 月時該區再進行新填土約 2m，導致 92 年沉陷增大許多。各分層沉陷量大約可區分為 7~66m、66 83m、83 102m、102 190m、190 300m 等 5 個層次來分析，其中以 66 83m 之累積沉陷量 4.9 公分，所佔比例最大，約佔總沉陷量之 19%，83 102m 之沉陷量為 5.4 公分約佔總沉陷量之 21%，102 190m 之沉陷量為 8.8 公分約佔總沉陷量之 34%，190 300m 之沉陷量較少為 1.3 公分，約佔總沉陷量之 5%，綜合以上得知，66 102m 深度之累積沉陷量為 10.3 公分約佔總沉陷量之 40%，與 200m 監測井監測結果比較，總沉陷量較大一些，而且主要沉陷之深度不同，因此需要進行較長期之監測，再進一步探討原因。

5.3.4 相關性分析

1. 200m

綜合上述地質、雨量、分層地下水位及分層地層下陷之分析，本節簡要之探討其間之相關性。淺層地下水位屬於局部性，其受港區抽

布袋港(300m-新)分層個別下陷量圖

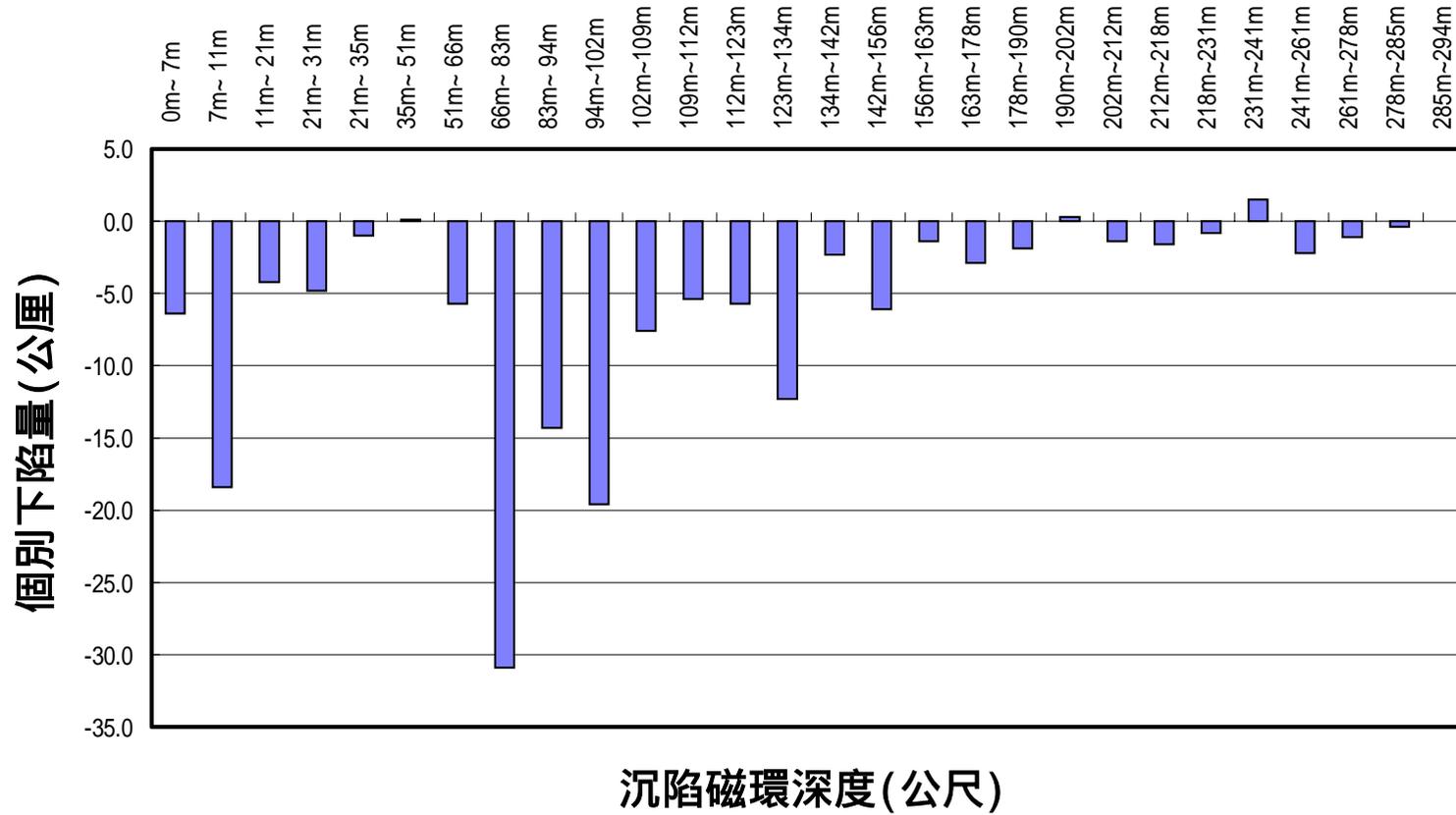


圖 5-18 布袋港(300m)分層個別下陷量圖

布袋港(300m-新)地層分層下陷觀測圖

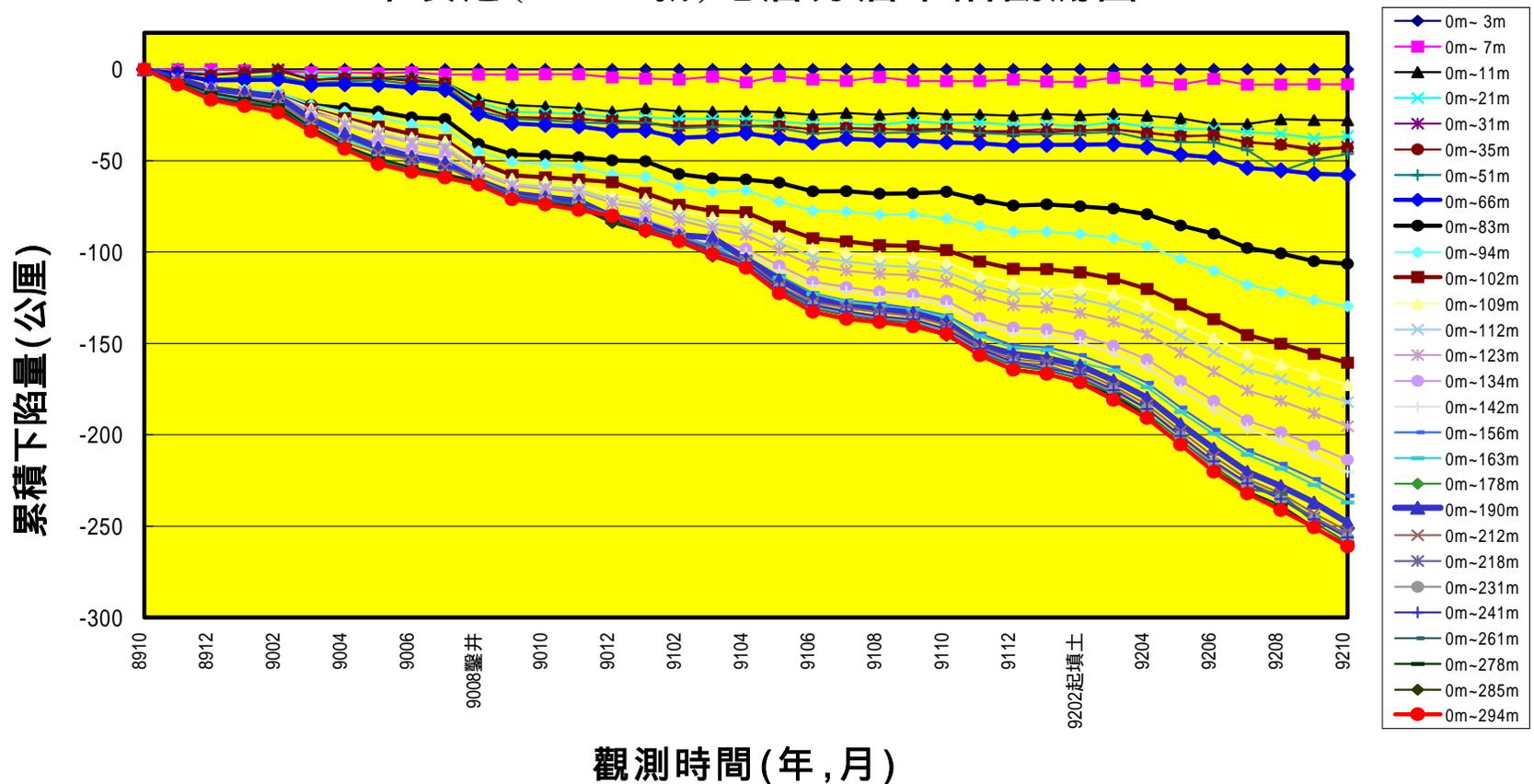


圖 5-19 布袋港(300m)分層累積下陷量圖

水之影響，若是鄰近區域之抽水，則較不影響，而深層之地下水位屬於區域性，港區及附近區域之抽水皆會對其影響，由於港區並無抽水現象發生，淺層水位應無多大變化，但淺層水位除了受漲退潮之潮位影響外，受到雨量之影響最大，7、8月雨季時，水位上升，11、12月旱季時，水位下降，因此淺層土層若無抽水引致壓密水位下降之影響，僅受季節性雨量之影響，則淺層土層僅會因水位上升受解壓而微小之膨脹，水位下降時受再壓而微小之壓縮，整體而言不太會有沉陷發生，此可由圖 5-15 及圖 5-16 得知，8m 16m 之土層僅少量壓縮得到說明，而 34m 之地下水位，雖屬淺層水位，但由於 9.5 11.6m 有沉泥層，14.1 32.8m 有細砂夾多層之薄粘土，因此 34m 之水位已非純自由水位而是半受壓水位，因此附近區域之抽水亦會影響其水位變化，而由表 5-4，水井之調查，布袋鎮 10 30m 之水井有 909 口，是淺層抽水之主要深度，故 34m 之水位於 11、12 月旱季時因抽水較多，而水位較低，致使淺層土壤 0 41m 亦有些壓縮量。而深層之地下水位理應較不受到雨量變化之影響，而受到深層抽水之影響較大，其中 44m 之水位無多大變化，雖然 41 66m 土層大多為粘土層或沉泥層，其土層壓縮量亦極小。而 68m 之水位變化較 44m 水位為大，又 66 85m 之土層大多為粘土層或沉泥層其土層之壓縮量較大；105m、131m、143m、178m 處之水位變化極為明顯，因此 85 200m 之土層沉陷亦很明顯，100 200m 之水位屬於較深層之水位，理應不太受雨量分佈之影響，若有受雨量補注之影響亦應有一段延遲現象，但此處深層水位，卻於 7、8 月雨季時水位逐漸上升，11、12 月旱季時水位逐漸下降，其原因何在？依本研究之見解，乃因雨季時地面水源充足，附近工業區或漁塭區減少使用地下水，而較少抽水，故深層水位上升，而旱季時，地面水源缺乏，引起附近工業區或漁塭區，大量抽取地下水，致使深層水位急速下降，亦引發深層之地層下陷。而由圖 5-16 分層沉陷顯示：壓縮量較大之位置，大多發生在抽水層鄰近深度之粘土層，即發生在砂土層厚度較大之鄰近的粘土層，如 131 157m，170 180m 即是抽水層鄰近之粘土層，其壓縮量最大。另由表 5-4 水井之

調查，可發現 150m 深以上之水井有 319 口，佔抽水井之比例極高，因此 143m、178m 之水位最低且變化大，因此沉陷量亦大，由分層沉陷資料圖 5-16 顯示，140~200m 之沉陷量約佔總沉陷量 51%。

2. 300m

因 300m 監測井相關性資料有限，由水位變化及分層沉陷等量測資料圖 5-14、5-18 及圖 5-19 顯示分析，總沉陷量自 89 年 10 月 92 年 10 月止約 261 公厘，其中以 66~102m 之土層沉陷量 102mm 為最大，0~11m 之沉陷量 28mm 次之，依據柱狀圖 5-8 所示，65~80m 及 92~101m 土層皆為粘土層，其土層之壓縮量較大，因適逢旱季且 80~92m 及 101~107m 水層又受到超抽地下水之影響，水位明顯降低，所以沉陷量亦最大。而 0~11m 之沉陷則為鑿井及填土荷重引起之沉陷，較詳細之分析待監測資料充足後再進一步探討。

表 5-4 嘉義縣布袋等十鄉鎮市各井深水井數量數量(民國 84 年)

單位:口

井深(m) 鄉鎮市別	10 以下	10-30	30-50	50-80	80-100	100-150	150 以上	合 計
東石鄉	454	811	114	169	271	343	283	2,445
布袋鎮	312	909	84	21	53	178	319	1,876
朴子市	58	1,498	1,099	271	81	141	108	3,256
義竹鄉	109	918	401	115	17	29	311	1,900
六腳鄉	10	2,280	500	151	53	21	13	3,028
太保市	143	1,155	641	88	27	72	32	2,158
新港鄉	215	3,895	410	26	16	224	52	4,838
民雄鄉	536	2,039	327	402	40	245	157	3,746
溪口鄉	254	1,970	212	66	48	86	42	2,678
鹿草鄉	776	549	189	489	167	28	6	2,204
合計	2,867	16,024	3,977	1,798	773	1,367	1,323	28,129
比例%	10.2	57.0	14.1	6.4	2.7	4.9	4.7	100

資料來源:民國 84 年嘉義農專調查結果

5.4 永久水準點觀測站

布袋港選擇第二期海埔地之綠地位置，設置一 400 公尺深之永久水準點觀測站，並於孔口處設置自動量測系統(如圖 5-20、5-21 所示)，可定期量測港區之沈陷量，亦可作為該地區實施水準測量時之引測點，現就設置方式簡述如下：

1. 外管安裝工作

- (1) 於指定位置以鑿井機作業，進行直徑約 8 英吋，鑽孔深度為 408 公尺。
- (2) 以適當的穩定液保護液面，不致使孔徑擴大崩孔。
- (3) 備妥一套 372 公尺長有縫黑鋼管及 20 公尺長不銹鋼管(每根鋼管長 6M、外徑 141mm、厚度 4.5mm、CNS 2056)作為外套管，下管前每支鋼管標示連接編號及長度，並依標示之順序，逐一併排於地面上，再於外表塗擦二層以上之乳性瀝青，作防銹措施。
- (4) 待鑿井深度到達地下 408 公尺後，取出鑿桿，再將前(第三)項之黑鋼管依編號逐一吊放至孔底，當作外套管以保護孔壁(鋼管間之聯接，以全滿焊接方式連結)。
- (5) 回填已篩洗之中細砂至鑿井孔壁與外套管間之孔隙，使外套管牢固於孔壁。
- (6) 鑿井過程並詳細記錄各土層變化資料，並製表參考。

2. 內管安裝作業

- (1) 備妥一套 354 公尺長之有縫黑鋼管及 54 公尺長不銹鋼管(每根鋼管長 6M、外徑 89mm、厚度 4mm、CNS 2056)之作為內套管，下管前每支鋼管標示連接編號及長度，並依標示之順序，逐一併排於地面上，並進行內管(4")NX 套管外部黃油塗裝作防銹措施。
- (2) 將側向噴射灌漿鑽頭與 89mm(厚度 4mm)之內管底部連接，然後將各內管以全滿焊接或鎖螺牙方式逐一連接、並每隔 18M 放置

一間隔器,逐漸吊放至鑽孔內,待內管前端(最底部)確定達到 408M 後,則施作高壓灌漿作業。

(3)施作側向高壓灌漿時,需配合漿液流量將內管慢慢旋轉並提升到 407M,待灌漿完畢,即可立刻將內管壓入水泥柱內至 408M,即可固定內桿。

(4)安裝完成內管後,於管內灌入 1:1 水泥砂漿至管頂。

(5)最後以乳性瀝青填充內外管間之空隙,管口則以螺帽作保護,螺帽頂焊接不銹鋼珠作水準測量之參考點,則完成安裝工作。

5.5 小結

1.由布袋港 200m 之地下水位監測結果顯示:淺一層(34m) 水位約在 -3.3m~3.7m 間反復振盪,淺二層(44m) 水位由-7m 漸升至-5.5m 自 92 年 3 月開始下降由-5.5 漸降至-8m,而淺三層(68m)水位自 87 年開始下降由-6.3 漸降至-12m;深層之 105m、143m 及 178m 處之地下水位已分別降至-26m、-26m 及-24.7m,由此可知,布袋港區內雖無超抽地下水之現象,而布袋港附近地區超抽深層之地下水,致使港區之深層水位受影響而且有逐年下降之趨勢。

2.由布袋港舊填土區之 200m 地層下陷監測井監測結果顯示:自 86 年 2 月 92 年 10 月止,近 6.5 年之沉陷總量約 32.15 公分,分別為 86 年沉陷量約 5 公分、87 年聖嬰年沉陷量約 3 公分、88 年沉陷量約 4 公分、89 年沉陷量約 5 公分,90 年沉陷量約 5 公分,91 年沉陷量約 5.5 公分,92 年沉陷量約 6.5 公分,其中百分之五十之沉陷在深度 140~200 公尺處發生,百分之二十五之沉陷在深度 66~110 公尺處發生,因此在監測深度 200m 之外,即較 200m 以上更深之處亦可能有沉陷發生。

3.由布袋港 300m 之地下水位監測結果顯示:35 及 50m 之水位介於-2.4 -3.0m 之間,屬淺層水位,85 及 103m 為較深層之水位介於-15.0

-22.2m 之間且屬同一含水層，其中以 91 年 5 月之水位降至-20m 及-22.2m 較明顯變化，150m 及 200m 之水位介於-19.2 -23.3m 之間亦屬同一含水層，250m 深層之水位介於-21.3~24.9m 之間，而 303m 之水位又屬另一含水層，其水位介於-21.6~-25m 之間變化較小。

4.由布袋港新填土區，約於 87 年填土 4-5m，92 年再填土約 2m，其 300m 地層下陷監測井監測結果顯示：自 89 年 10 月 92 年 10 月止，3 年之沉陷總量約 26.12 公分，分別為 90 年沉陷量約 7.40 公分、91 年沉陷量約 7.07 公分、92 年沉陷量約 11.55 公分，監測期間 90 年 8 月時該區進行鑿井，導致 90 年較 91 年沉陷大，92 年 2 月時該區再進行新填土約 2m，導致 92 年沉陷增大許多。各分層沉陷量大約可區分為 7~66m、66 83m、83 102m、102 190m、190 300m 等 5 個層次來分析，其中以 66 83m 之累積沉陷量 4.9 公分，所佔比例最大，約佔總沉陷量之 19%，83 102m 之沉陷量為 5.4 公分約佔總沉陷量之 21%，102 190m 之沉陷量為 8.8 公分約佔總沉陷量之 34%，190 300m 之沉陷量較少為 1.3 公分，約佔總沉陷量之 5%，綜合以上得知，66 102m 深度之累積沉陷量為 10.3 公分約佔總沉陷量之 40%，與 200m 監測井監測結果比較，總沉陷量較大一些，而且主要沉陷之深度不同，因此需要進行較長期之監測，再進一步探討原因。

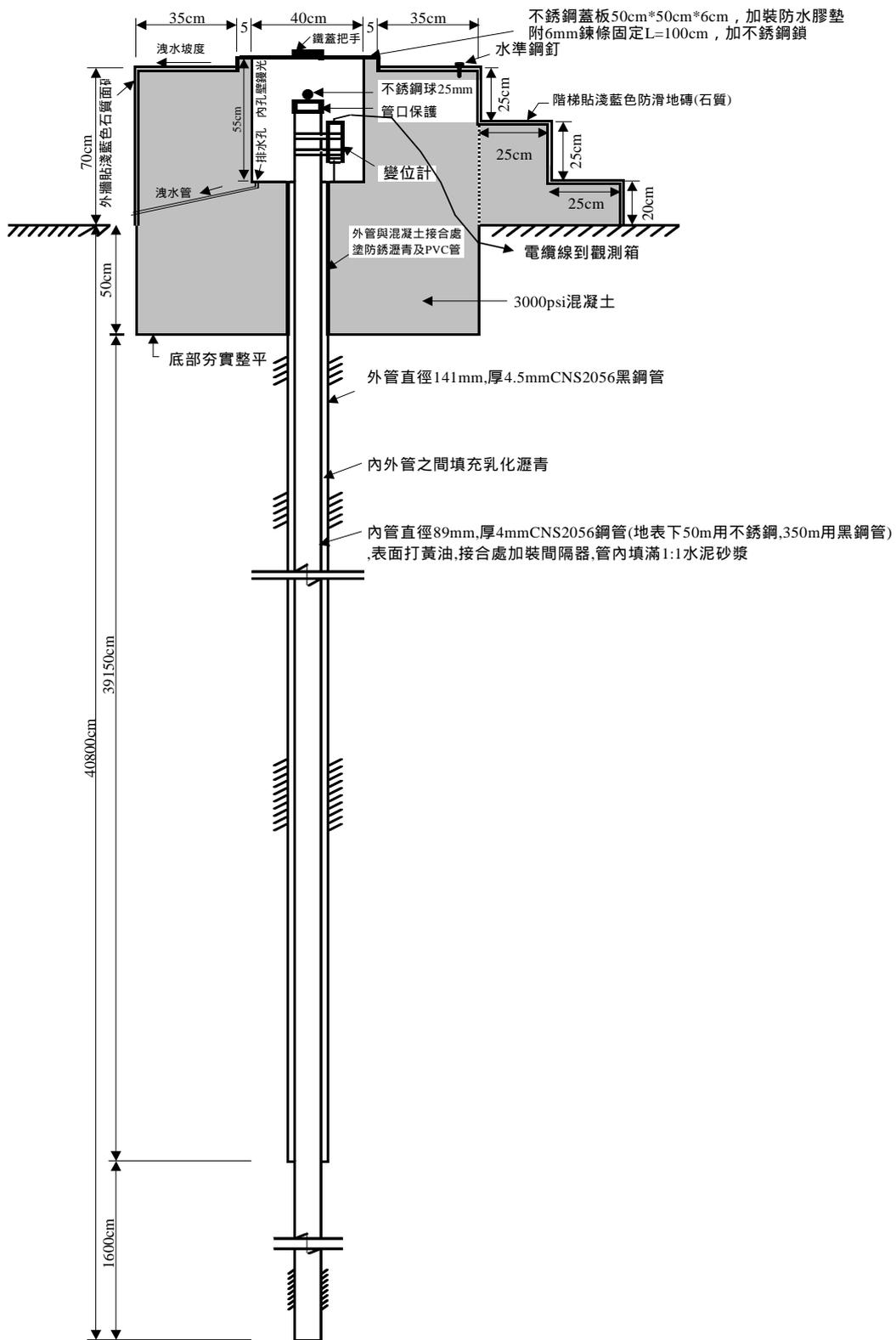


圖 5-20 布袋港永久水準站安裝示意圖



圖 5-21 布袋港永久水準點觀測站

第六章 地表沉陷水準測量

6.1 水準測量檢測範圍及測量環線

布袋地區水準測量路線分為兩個部分，一為檢測台一線嘉義至新營段一等水準點並引測大迴路基線，進行基線檢核及水準沉陷檢測，一等水準測量路線為沿台一線自嘉義縣水上鄉水準點「G1135」至台南縣新營市一等水準點「內部 078」；大迴路基線測量路線為自台一線一等水準點「內部 078」往西沿南 76 線、南 74 線、台 172 線、轉北沿台 17 線、往東轉 170 線閉合至台一線一等水準點「BM9803」，里程共約 65 公里。另沿台 19 線自嘉義縣朴子市監測點「水資嘉 12」至義竹鄉水準點「嘉 23」進行檢核線之水準測量，里程約 10 公里；一為進行布袋鎮及布袋港區監測點水準測量，里程共約 13 公里，本次測量工作範圍如圖 6-1、圖 6-2 所示，測量環線，如圖 6-3、圖 6-4 所示。

6.2 水準測量作業方法與規範

水準測量作業的重點是藉由測量程序與步驟的安排來消弱誤差的影響。野外作業相關之方法與規範參考交通部運輸研究所港灣技術研究中心委辦測量規範、內政部規範及聯勤總部測量隊之作業手冊而釐定作業準則手冊，有關於規範部分簡述重點如下：

- (1) 水準點之間各測段均作往返測量，且按先往測再返測順序進行。
- (2) 控制系統檢測，各測段的往測與返測的差值，其允許誤差為 $7\text{mm} \sqrt{k}$ (k 為公里數)。
- (3) 主水準路線，各測段的往測與返測的差值以及環線的閉合差，其允許誤差為 $7\text{mm} \sqrt{k}$ (k 為公里數)。
- (4) 兩水準點高程觀測應由同一台儀器自一水準點出發，閉合於另一水準點，不可用不同水準儀施測於臨時節點的高程值相加組合。

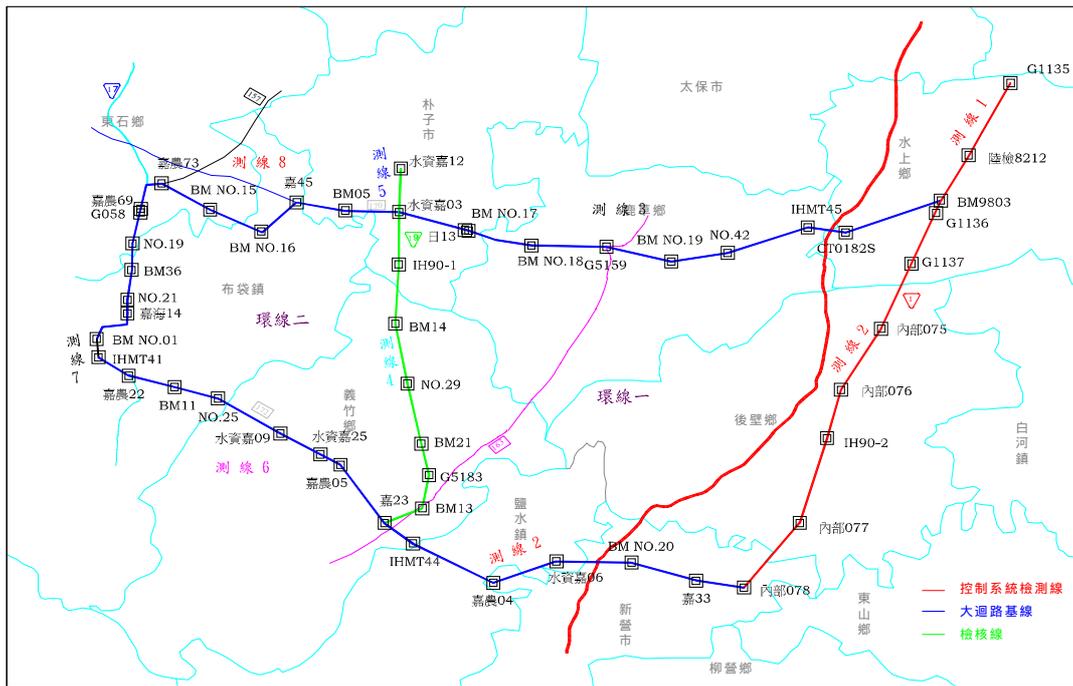


圖 6-1 嘉義縣沉陷水準測量檢測範圍

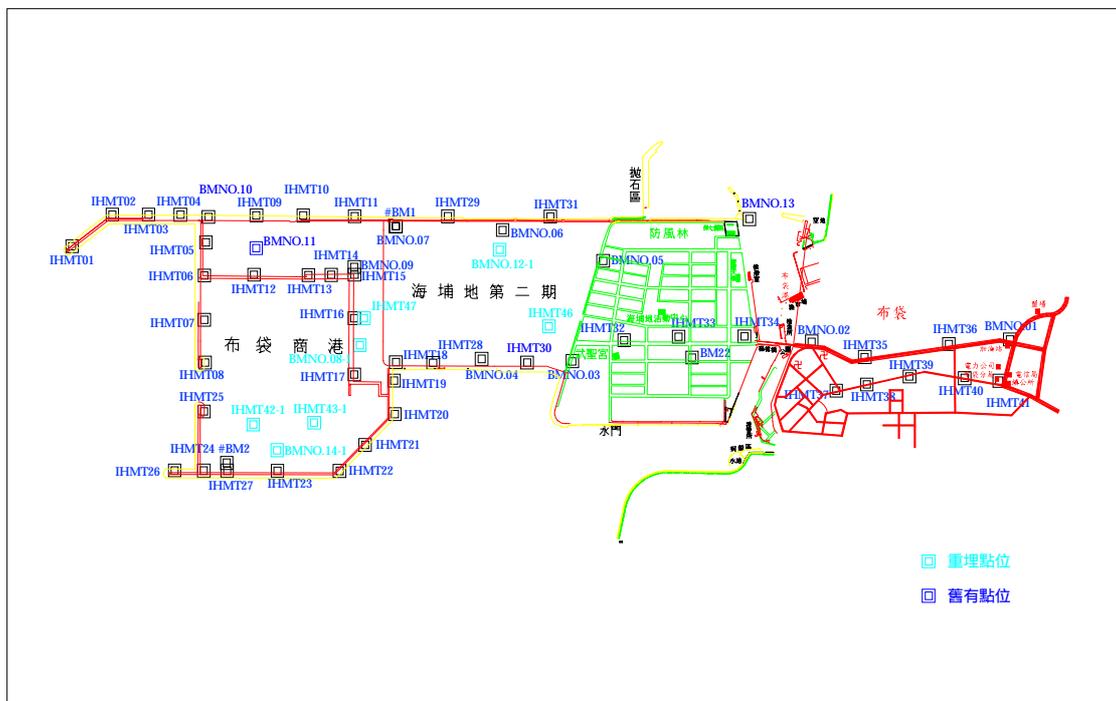


圖 6-2 布袋港區沉陷水準測量檢測範圍

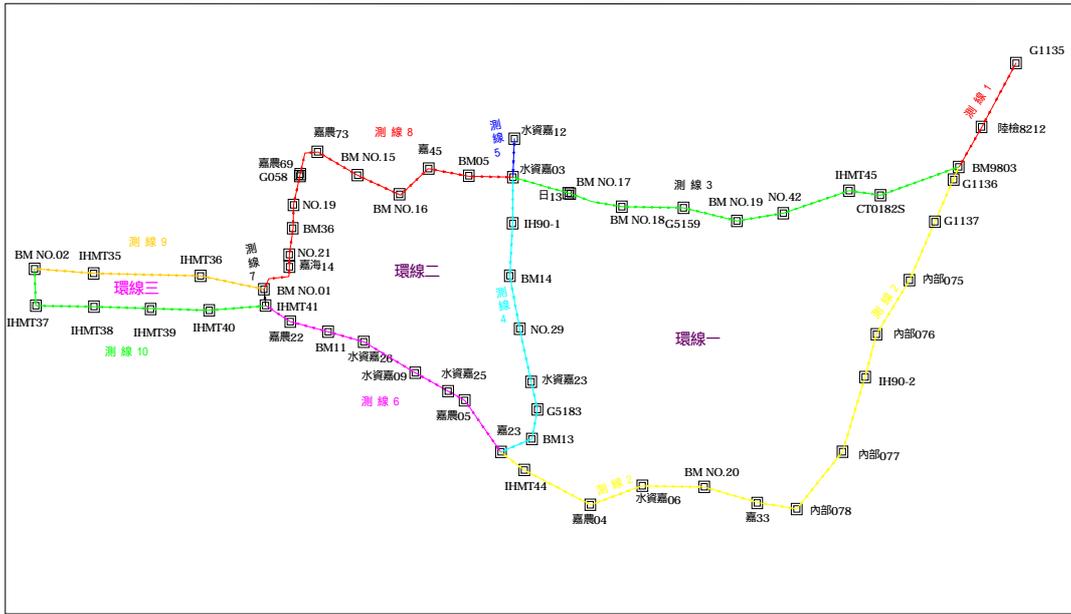


圖 6-3 嘉義縣沉陷水準測量測線、環線佈置圖

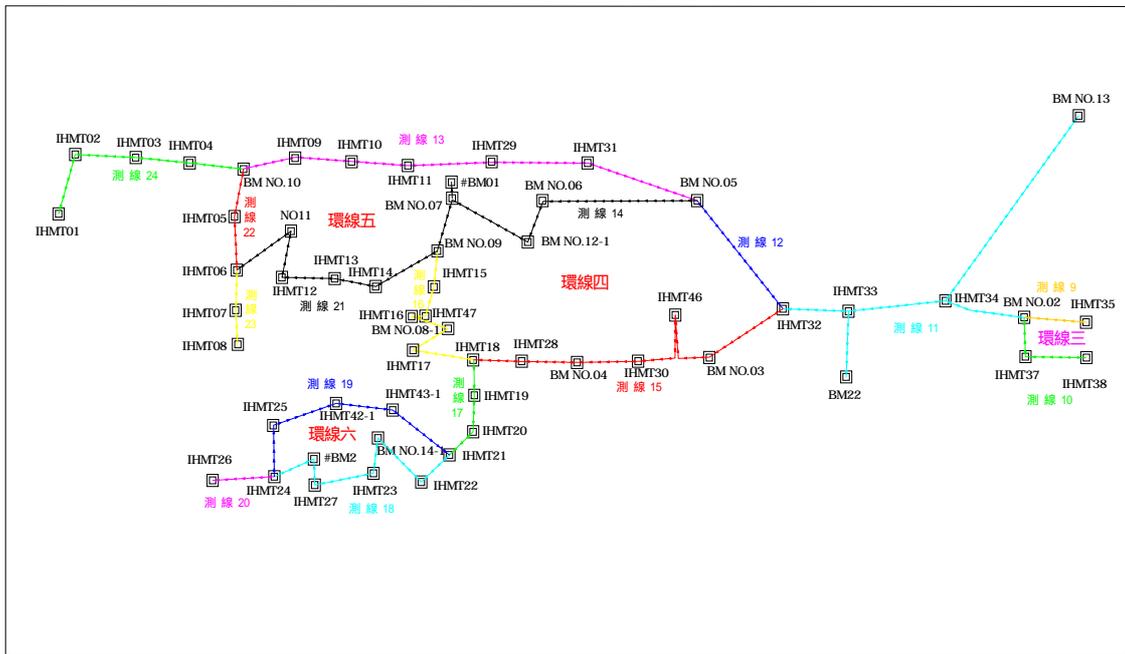


圖 6-4 布袋港區沉陷水準測量測線、環線佈置圖

- (5) 水準測量使用的儀器是 Zeiss Dini-11 一等精密電子自動水準儀，配合精密鈷鋼條碼尺作業，精密水準標尺皆附有圓形水準器及扶尺，減少標尺的晃動。
- (6) 觀測時標尺與儀器距離約六十公尺，前後視距約相等，以減除視準軸誤差及折光誤差。作業時觀測手配備雷射槍，達到快速量距及精準調整前後視距相等。
- (7) 各測段以直接水準測量進行往返觀測，各節點為同一標尺放置(即測站的次數為偶數)。
- (8) 往返兩次觀測整置儀器及標尺位置不得為同一地點。亦不可用反號之結果作為返測或往測。
- (9) 高程所有計算及提送成果均至公尺後小數點第五位。

水準測量內業成果計算的檢核分為三個階段，首先檢討每一測段往返高程差的差值是否小於規範允許誤差的限定值，如超過則必須重測。第二階段依幾何條件檢核閉合誤差，判定環線閉合網的閉合差是否小於規範允許誤差的限定值。經過前二個階段的品管處理，可挑選出觀測誤差較大的觀測值，並進一步判定是否重測以提高精度。第三階段依據最小二乘法理論整體平差，以高程差為觀測量，距離的倒數為權，組成間接觀測方程式，整體平差並加入觀測值的可靠度分析。

6.3 水準測量分析

水準測量成果分析分為控制系統分析、環線分析、水準網平差分析三個步驟，控制系統分析目的為確認高程起算基點屬穩定不具顯著的高程變化，以確保測區兩個時期具有相當的高程基準。環線分析目的乃應用幾何閉合條件，確認測量成果的內在精度。水準網整體平差階段提供高程平差成果、高程的精度指標、可靠度指標與數據偵錯。

6.3.1 控制系統分析

嘉義地區水準測量控制系統，由台一線嘉義縣劉厝附近一等水準

點「內部 073」起，沿台一線公路至台南縣新營市一等水準點「內部 078」止，因劉厝「內部 073」已毀失，改以次點「BM9803」為起點，控制系統全長約 12.367 公里，觀測期間為民國九十二年六月。

嘉義地區地層下陷分析工作，往年經濟部水資源局及八十九年港灣技術研究中心主幹線係以嘉義縣水上鄉一等水準點「BM9803」為高程基準起算點。控制系統分析目的即為檢測主幹線測量高程差是否在測量允許誤差內，以判定計算固定點水準高程沒有顯著變化可資引用，以此點高程為固定值目的在和本港區去年的計算方法有一致性，確保下陷分析架構在相同基礎。

主幹線「BM9803」至「內部 078」本年度測量觀測高程差往返平均值為 7.93080 公尺。九十一年度測量觀測高程差往返平均值為 7.91475 公尺。本次測量成果與去年原高差相差 16.05mm，小於允許誤差 17.58mm，顯示主幹線路段地層穩定，檢測成果無誤，故仍採用「BM9803」為計算基準。

6.3.2 水準環線分析

嘉義縣布袋地區及布袋港區水準網各閉合環線的觀測精度分析如表 6-1，每個閉合環線的閉合差觀測精度皆在允許誤差內。

表 6-1 環線閉合差分析表

水準閉合 環線編號	測線關係	閉合環線 總長度(km)	環線閉合差 (mm)	允許誤差 (mm)
一	(02)-(04)+(03)	50.432	-18.15	49.71
二	(04)+(06)+(07)+(08)	33.031	-11.27	40.23
三	(07)+(09)-(10)	2.158	4.85	10.28
四	(15)+(16)-(14)+(12)	4.317	-0.01	14.23
五	(21)+(22)+(13)+(14)	4.635	0.95	15.07
六	(18)+(19)	2.164	1.91	10.29

6.3.3 水準網平差分析

水準測量平差一般常用的方法有水準幹線分級平差與最小二乘法整體平差。分級平差的步驟首先將主幹線依據已知高程值為閉合條件(或附合條件)，平差改正數依距離配賦平差，支線高程則再依所完成平差之主幹線高程為已知固定值條件，再去平差支線上的高程。此法簡易明瞭，缺點是誤差逐級傳播，若組成水準網形，偵錯與精度估計的分析都很困難。本作業採最小二乘法嚴密整體平差方式，平差原理係將所有水準點與節點以觀測距離之倒數為其權值，進行整體誤差配賦。

6.4 水準測量結果

由嘉義縣地區及布袋港區地表沉陷水準測量之分析，嘉義縣地區 89 年至 92 年之累積下陷如圖 6-5 所示，其中 91 年至 92 年之累積下陷如圖 6-6 所示；布袋港區 89 年至 92 年之累積下陷如圖 6-7 所示，其中 91 年至 92 年之累積下陷如圖 6-8 所示。

由圖 6-5 及圖 6-6 顯示，嘉義縣地區之下陷量，由東向西逐漸增加，至沿海之東石鄉及布袋鎮下陷量最大。布袋鎮 89 年至 92 年之三年累積下陷為 14-15 公分，其中 91 年至 92 年之一年累積下陷為 6-7 公分。

由圖 6-7 及圖 6-8 顯示，布袋港新填土區(商港區) 之下陷量，較布袋港舊填土區(第二期海埔地) 之下陷量大。布袋港新填土區(商港區)89 年至 92 年之三年累積下陷為 20-25 公分，其中 91 年至 92 年之一年累積下陷為 9-14 公分。布袋港舊填土區(第二期海埔地)89 年至 92 年之三年累積下陷為 17-18 公分，其中 91 年至 92 年之一年累積下陷為 7-8 公分。

由布袋鎮、布袋港舊填土區、布袋港新填土區近三年下陷量之比較分析顯示：布袋港新填土區下陷量最大，每年以 7 至 8 公分之速率沉陷中；布袋港舊填土區下陷量次之，每年以 5 至 6 公分之速率沉陷中；布袋鎮下陷量較小，每年以 4 至 5 公分之速率沉陷中。

由海埔地填土沉陷量與地層下陷觀測井之記錄，及水準測量近二年下陷量之比較分析顯示：(1)200m 沉陷井：水準測量為 13.78 cm、觀測井之記錄為 11.19 cm、填土沉陷分析為 0.6 cm。(2)300m 沉陷井：水準測量為 22.95 cm、觀測井之記錄為 16.41 cm、填土沉陷分析為 8 cm。由此可見布袋港之沉陷，大部份為附近地區超抽之地下水所造成之沉陷，而且水準測量之沉陷皆較與觀測井之記錄為大，因此有必要進一步監測比較。

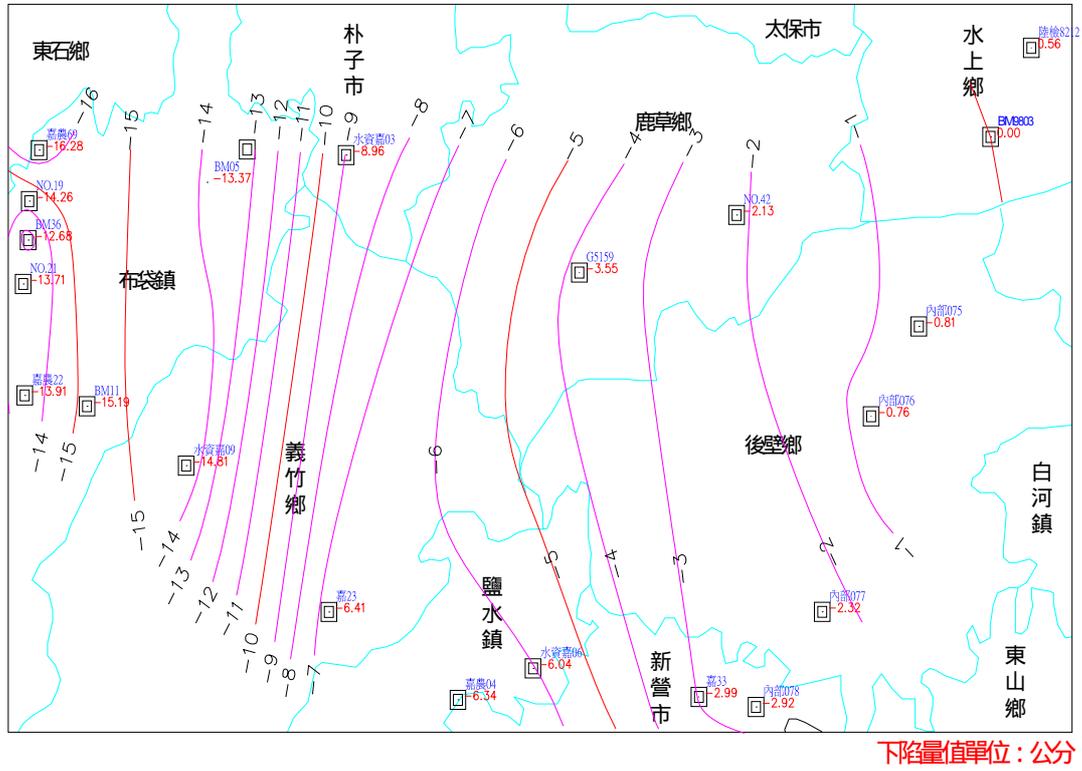


圖 6-5 嘉義縣沈陷測量 89 年至 92 年度累積下陷量圖

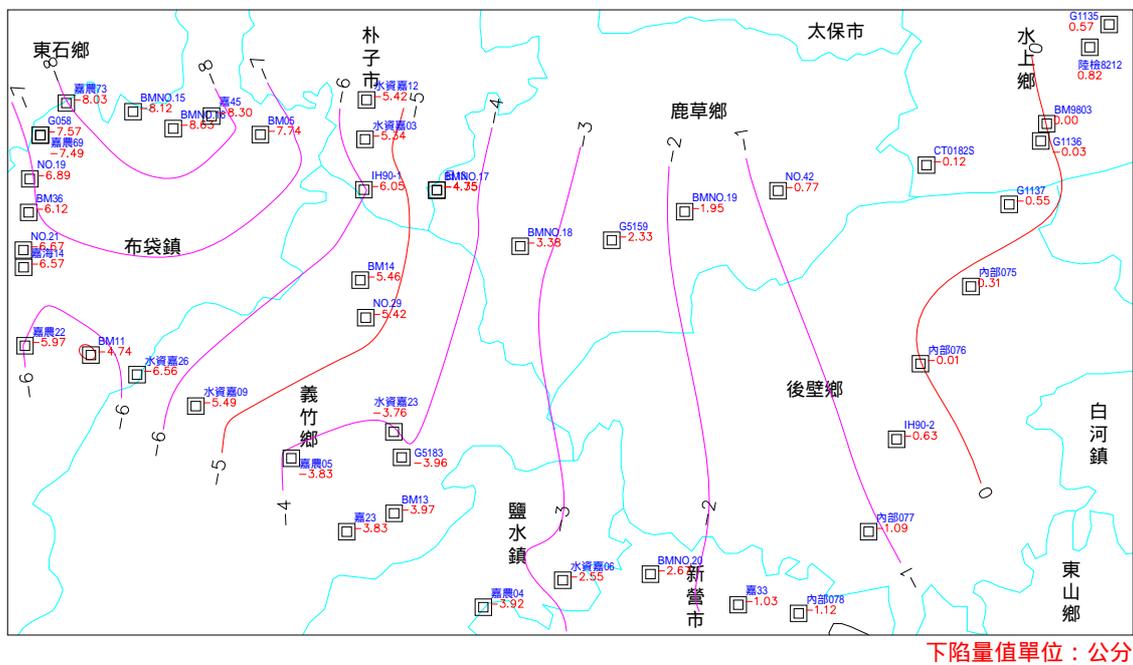
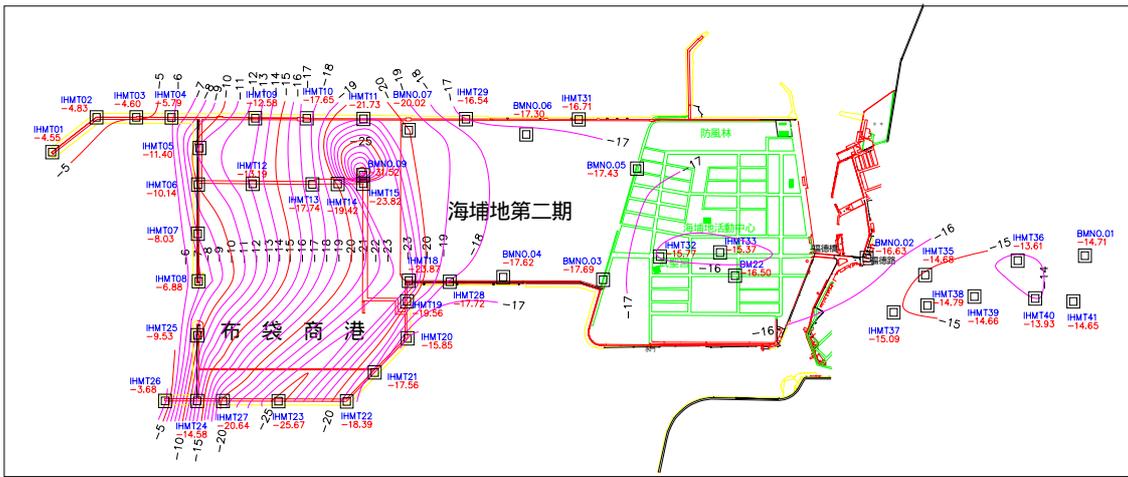
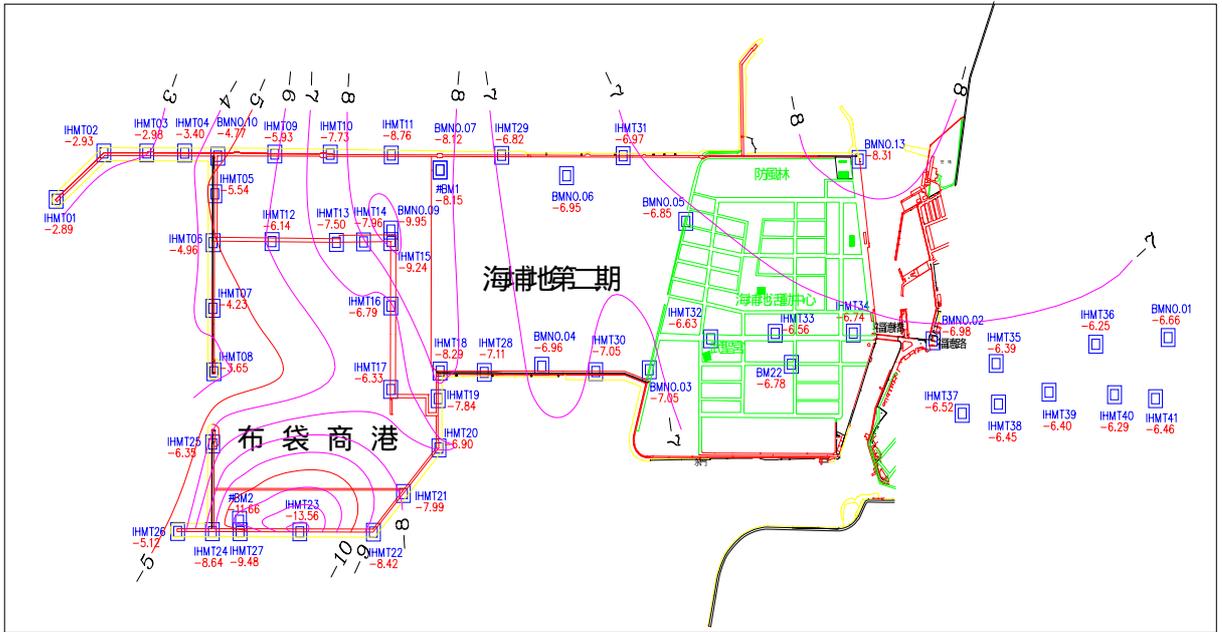


圖 6-6 嘉義縣沈陷測量 91 年至 92 年度累積下陷量圖



下陷量值單位：公分

圖 6-7 布袋港區沈陷測量 89 年至 92 年度累積下陷量圖



下降量值單位：公分

圖 6-8 布袋港區沈陷測量 91 年至 92 年度累積下陷量圖

第七章 地震與動態孔隙水壓監測

7.1 港灣地震反應監測系統

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，綜合港灣地區設置地震反應監測系統約可歸納下列四種：

1. 地震監測

(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。

(2) 地震在軟弱土層之放大效應監測：港灣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鉅，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，埋入埋入型地震計，以監測地震之放大效應。

(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. 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、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，本計畫在布袋港已完成設置一組 3M、6M、10M、15M、20M、30M 之動態

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，亦設置 1 組 35M、50M、85M、100M、150M、200M、250M、300M 之深層分層地下水壓監測系統，以監測港區平時之水壓變化，亦可監測地震前後深層地下水壓之變化。

- 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，而發生 5 公分至 30 公分之沉陷者則十分普遍，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高達 3-4 公尺。921 集集大地震，造成台中港區 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。本計畫在布袋港已分別完成 1 組 200M 及 1 組 300M 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 地震台中港監測井即發揮了其沉陷監測功能。
- 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，阪神地震造成港灣碼頭位移 1-5m，921 地震造成台中港 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。

7.2 地震監測井設立概述

1. 監測規劃

本監測計劃選擇位於布袋港近南堤之砂石碼頭區(如圖 5-1)適當位置安裝地震及動態孔隙水壓監測儀器，布袋港監測站現況示意圖，如照片 7-1 所示，本系統共計有 8 孔，分別為水壓計 3 孔，其安裝水壓計深度為 3M、6M、10M、15M、20M、30M 等 6 支，地震計埋入孔深度為 10M、20M、100M、300M 及地表等 5 孔共安裝 4 組

埋入式地震計及一部地表型地震儀後，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，其儀器架構流程及儀器埋設剖面如圖 7-1、7-2 所示，現就其內容概述如下：

- (1) 電子式水壓計觀測井 3 孔，其深度為 6M、15M、30M，並在每一孔內裝 2 只水壓計分別為 3M、6M、10M、15M、20M、30M 共 6 支，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。
- (2) 埋入式地震計孔，本工程共有 4 孔埋入式地震計，分別為 10M、20M、100M、300M 埋入式地震計主要是監測地震波在不同層的化以 Cable 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。本工程採用 Akashi AJE-8200 集錄系統，為一先進數位化自動記錄器，可記錄於 IC 卡上，可取回分析，也可經連線傳輸至電腦的螢幕上觀看波形。
- (3) 獨立式地震計及記錄器，本工程在布袋港砂石碼頭區安裝一套獨立式地震計，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。



照片 7-1 布袋港地震及動態孔隙水壓監測站

2.儀器裝設

(1)電子式水壓計

本工程採用日本 Tokyo Sokki 生產，型式為電阻式 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 及 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 耐水壓型水壓計。

- (a)本地區位於海濱附近，每孔鑽孔深度分別為 30M、15M、6M，每孔內安裝 2 支水壓計。
- (b)水壓計於地面上先行接線，並於電纜線上註明安裝深度位置，並於接線位置確實做好防水措施，並先行飽和量測初值。
- (c)待鑽探完成後將預先準備好水壓計，放入孔內，並量測其水壓值是否合理再開始回填水洗石，並用 6 分 PVC 管搗實工作及量測其回填深度，待回填至欲封層位置後，放入皂土至預定位置後再回填七厘石。
- (d)第二組水壓計皆重覆(b)、(c)步驟，直到回填至表面為止，再將電纜線連接至觀測箱內，其安裝如圖 7-3 所示。

(2)埋入型地震計(JTS-003,JEP-4B3)

(a)定位及鑽孔

位置選定後，鑽井機與地面成水平放置，使用鑽頭 100mm 孔徑以衝擊方式鑽孔，待鑽至預定深度位置後，再進行埋設地震計。

(b)地震計埋設步驟

- a.地震計在埋設前要先做安裝的測試檢查，以便確認地震計是否正常。
- b.鑽孔至埋設地震計的深度，分別為 10M、20M、100M、300M 等 4 孔。

- c.地震計接上不銹鋼索。
- d.地震計依所定的深度連接延長電纜線。
- e.地震計上方插入連桿(Rod)，連桿 1 支 2 米或 3 米。
- f.將地震計放入套管內，藉著纏繞在鑽機滑輪上之不銹鋼索慢慢的放下，連桿 1 支接著 1 支，直到深度通過不銹鋼索的固定夾具後，接上電子式方位計然後再續接連桿，直到安裝深度。
- g.以電子式方位計調整深層地震計(300 米)的方向，如果是淺層地震計(100 米、20 米、10 米)則在連桿的上方裝上一個方位計調整，x 軸向為正北。
- h.調整地震計的垂直度。
- i.在最下端 1 公尺以下，以小石頭及細砂慢慢的放入，使地震計固定。
- j.地震計固定後，再次檢查及測試。
- k.把 Rod 1 支 1 支拔出，至全部 Rod 拔出為止。
- l.再將細砂全部填入孔內直至地面。
- m.地震計埋設完成後，電纜線穿入 PVC 管埋入地下，延長接到控制室。
- n.地面上設一不銹鋼保護蓋及水泥台保護措施。
- o.若要考慮將來地震計的維修保養，孔內可加設預埋塑膠管，其安裝示意圖如圖 7-4、7-5 所示。

(3)表面型地震計(JEP-4A3)

- (a)表面型地震計主要是裝設在結構物及地表面上的感應器。
- (b)地震計設置的方向：x 軸向正北方，y 軸和 x 軸成 90° 直角，z 軸垂直向上。

- (c)在選定的位置打一水泥台(中間要放鋼筋拱鞏固水泥台)，待水泥台乾後，先確定方向後鑽孔。
- (d)感應器固定後連接電纜線，電纜線依已設之管路接線一直到觀測室。
- (e)地震計固定後，上方以不銹鋼保護蓋加以保護。

7.3 監測井之地質分析

根據地震監測站 300M 鑿井資料,其地層柱狀圖如圖 7-6 所示。

7.4 地震監測資料分析

布袋港地震儀及動態孔隙水壓監測系統之安裝工作，於元月剛完成，今年度雖未有強震之觀測資料,唯小地震非常頻繁,0.3gal 以上之地震觀測資料已有 40 多組，其各深度之最大加速度如表 7-1 至 7-23 所示。本文即以 40 多組初步探討布袋港震波放大特性。圖 7-7 為振幅較大之 331 之地震歷時圖。圖 7-8 為數組最大加速度隨深度變化圖。為探討布袋港震波放大特性，本文將 40 多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 7-9 所示，迴歸函數，如下列所示。其中由於地表之垂直向最大加速度記錄器仍在維修中,資料不正確,因此今年度未進行統計迴歸分析。

$$\text{東西向: } \text{PGA}=\exp(-0.29*(\text{深度})^{0.27}) \quad R^2=0.94$$

$$\text{南北向: } \text{PGA}=\exp(-0.34*(\text{深度})^{0.24}) \quad R^2=0.93$$

由圖 7-9 迴歸分析結果可發現: 自 300m 至 20m,其厚度達 280m 之地層，正規化之最大加速度由 0.26 放大至 0.52，約放大 2 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 0.52 放大至 1，放大亦達 2 倍；由此可知地震震波放大，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。圖 7-10 為 Seed & Idriss (1971)有關應力折減因數隨深度變化範圍之研究, 由圖 7-9 布袋港震波放大特性初步探討結果亦可發現,布袋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 7-11 所示, 由圖 7-11 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。因此為進一步探討布袋港震波放大效應之非線性, 本文亦分析布袋港震波放大倍率與最大加速度之關係, 如圖 7-12 所示。由圖 7-12 可發現: 布袋港震波放大倍率約於 2.5-5.5 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。

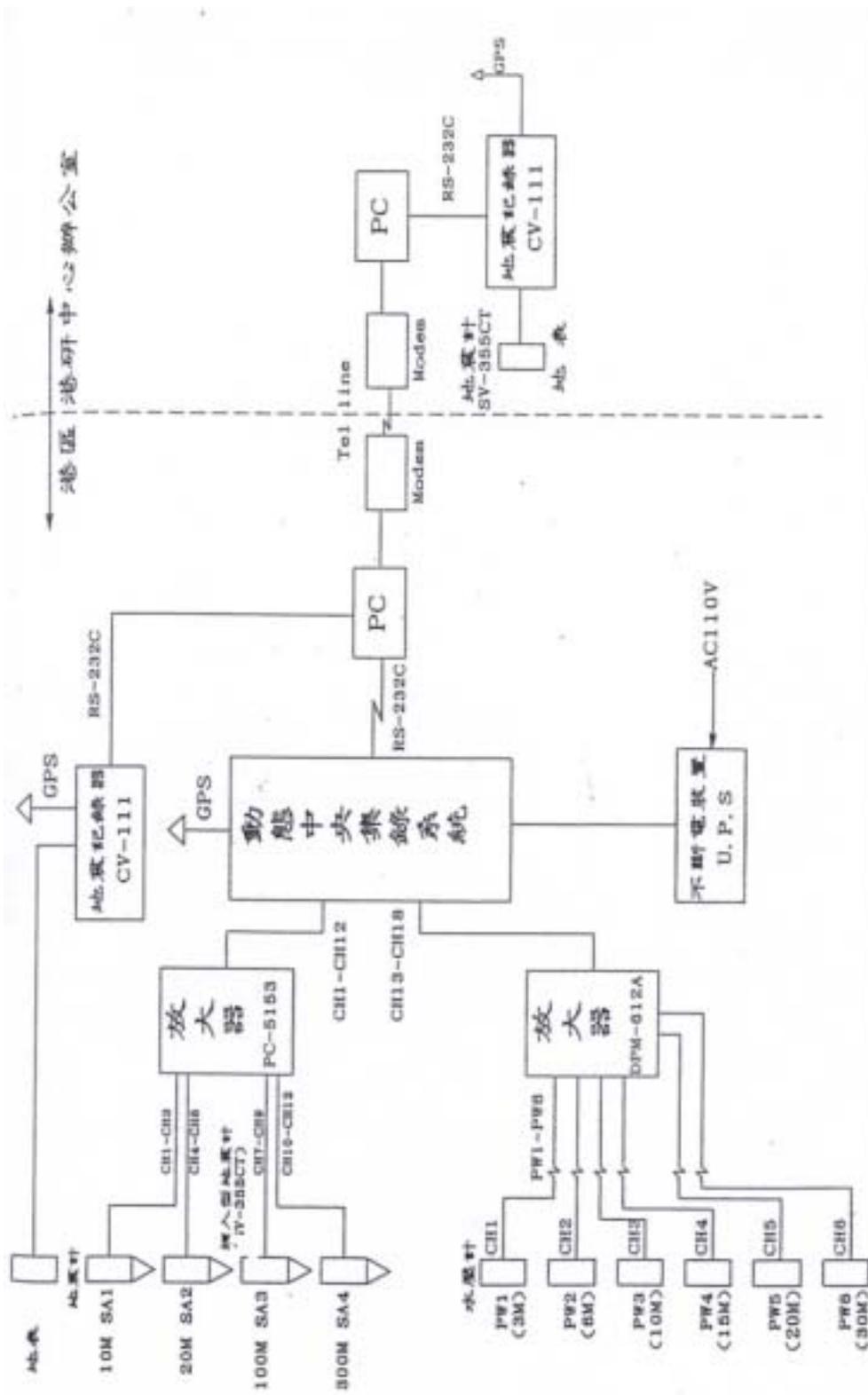


圖 7-1 地震與動態孔隙水壓監測系統流程圖

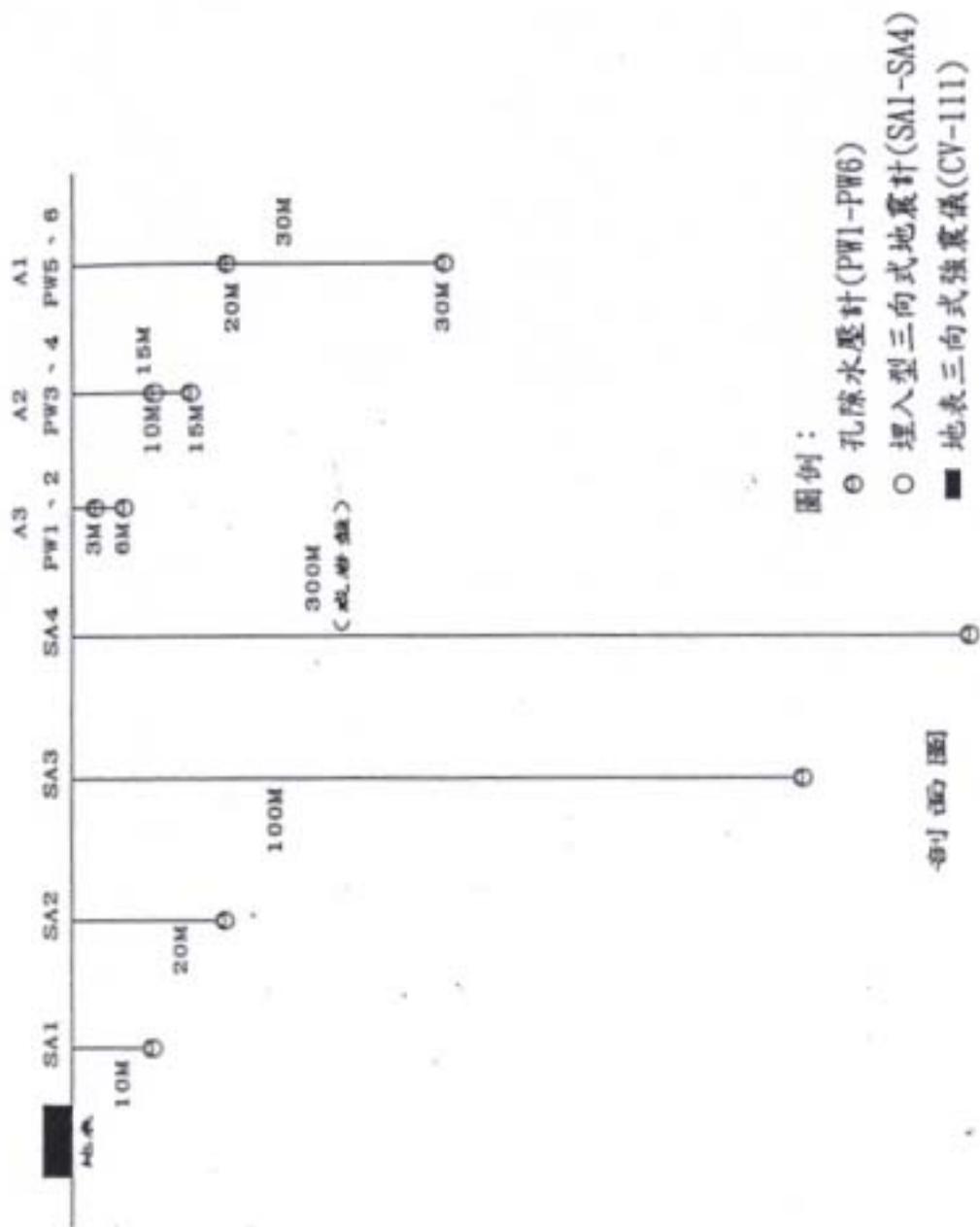


圖 7-2 地震及動態孔隙水壓監測儀器埋設剖面圖

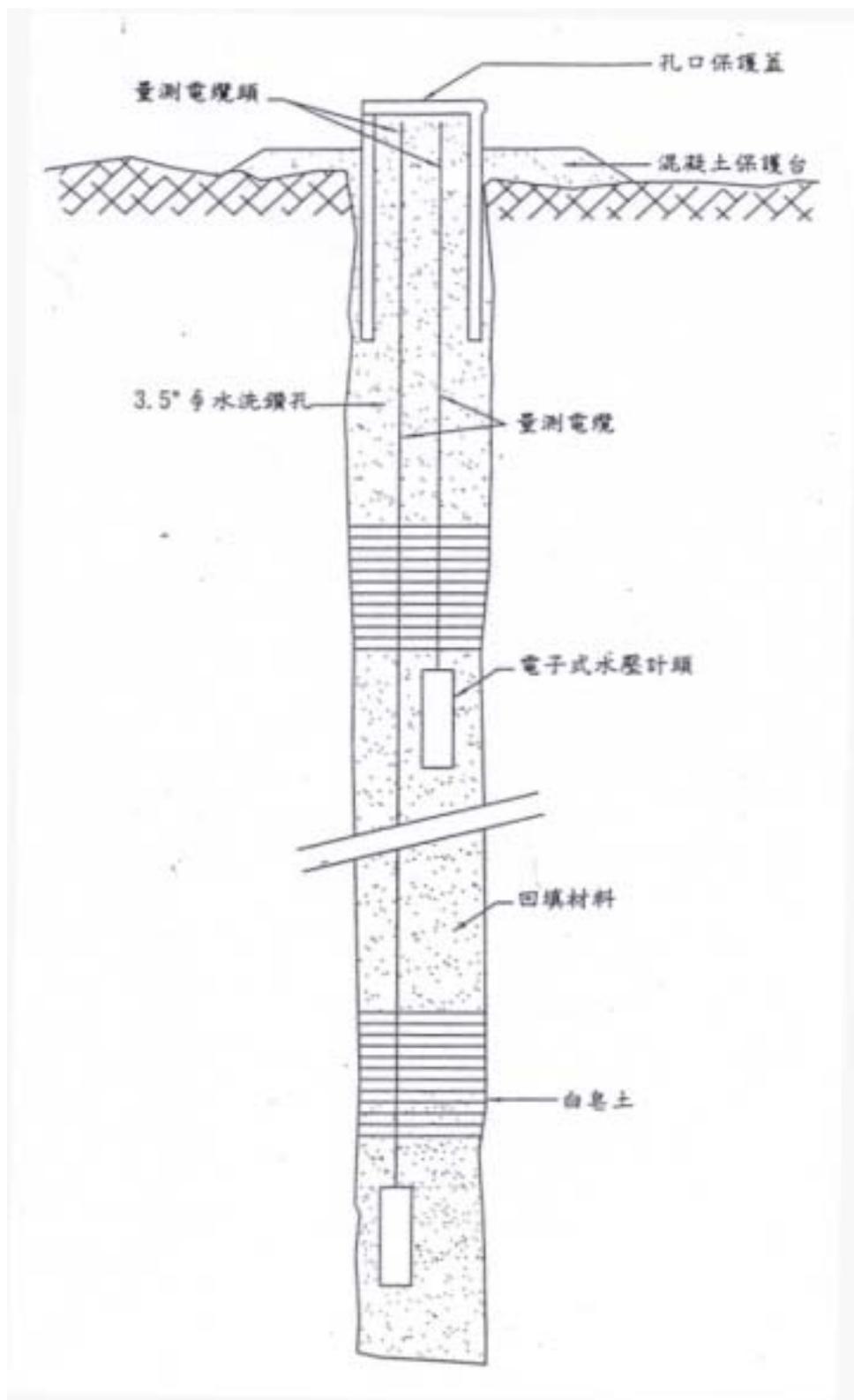


圖 7-3 電子式水壓計安裝示意圖

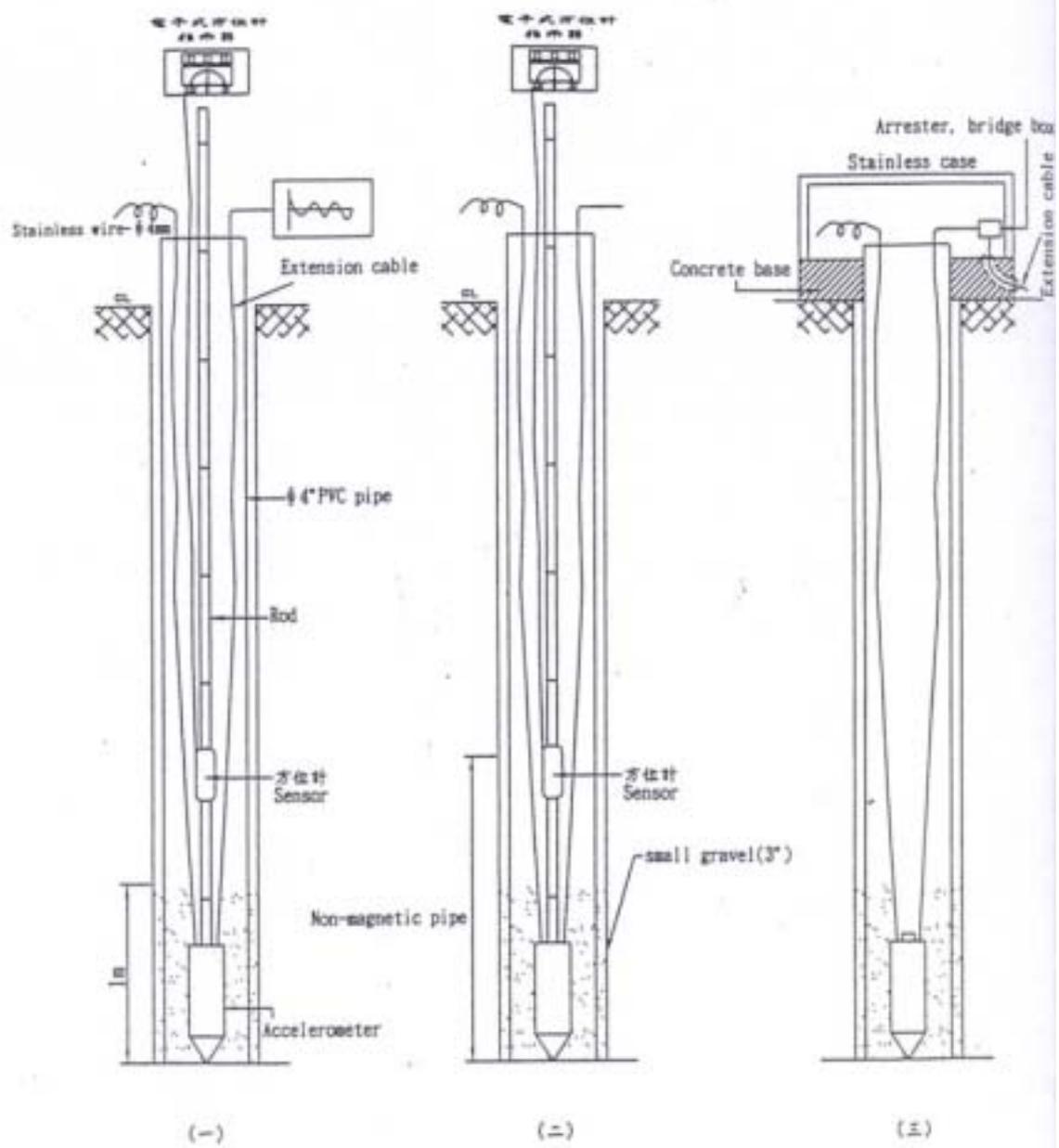


圖 7-4 布袋港 300 公尺地震計安裝示意圖

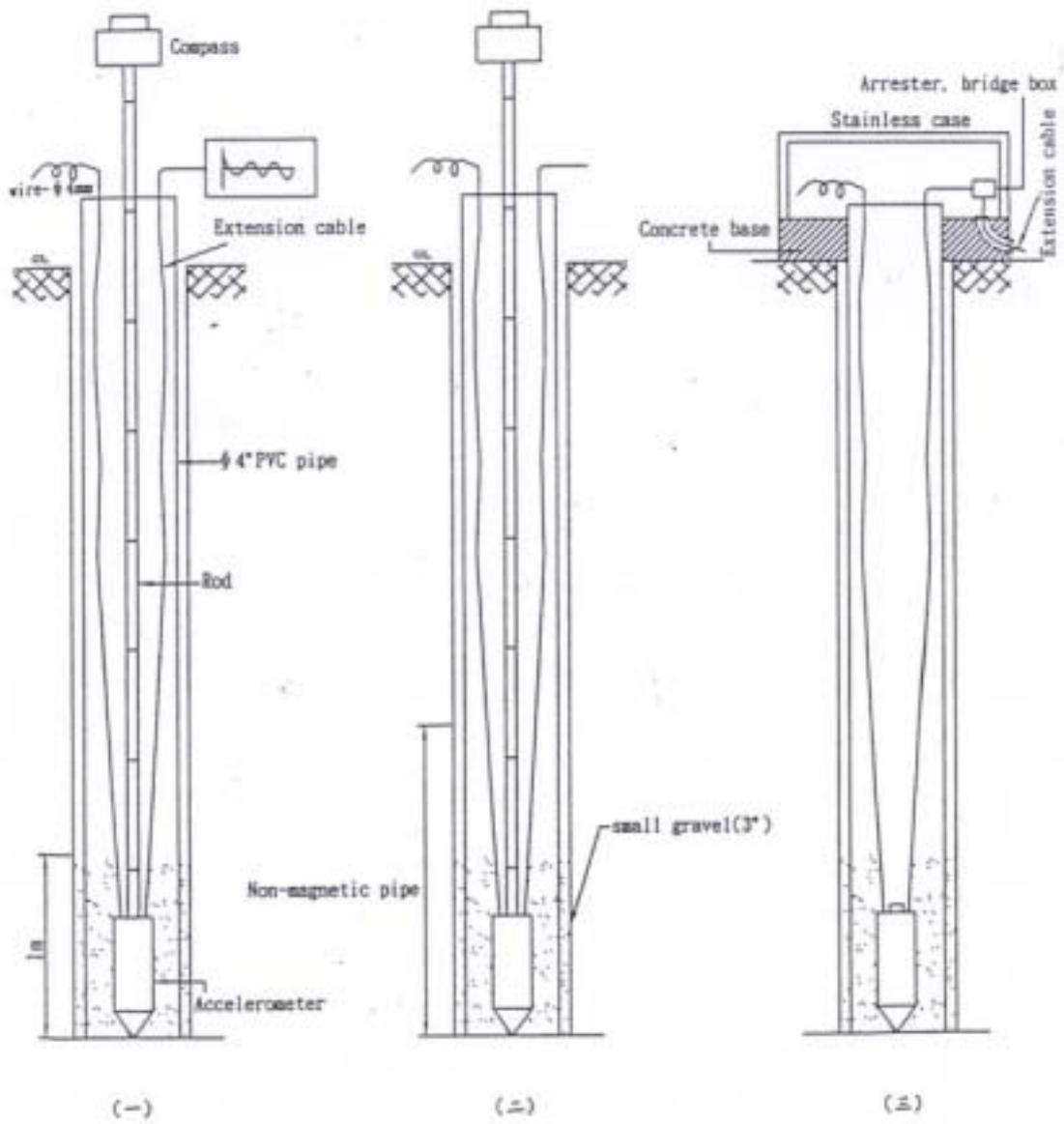


圖 7-5 布袋港 10、20、100 公尺地震計安裝示意圖

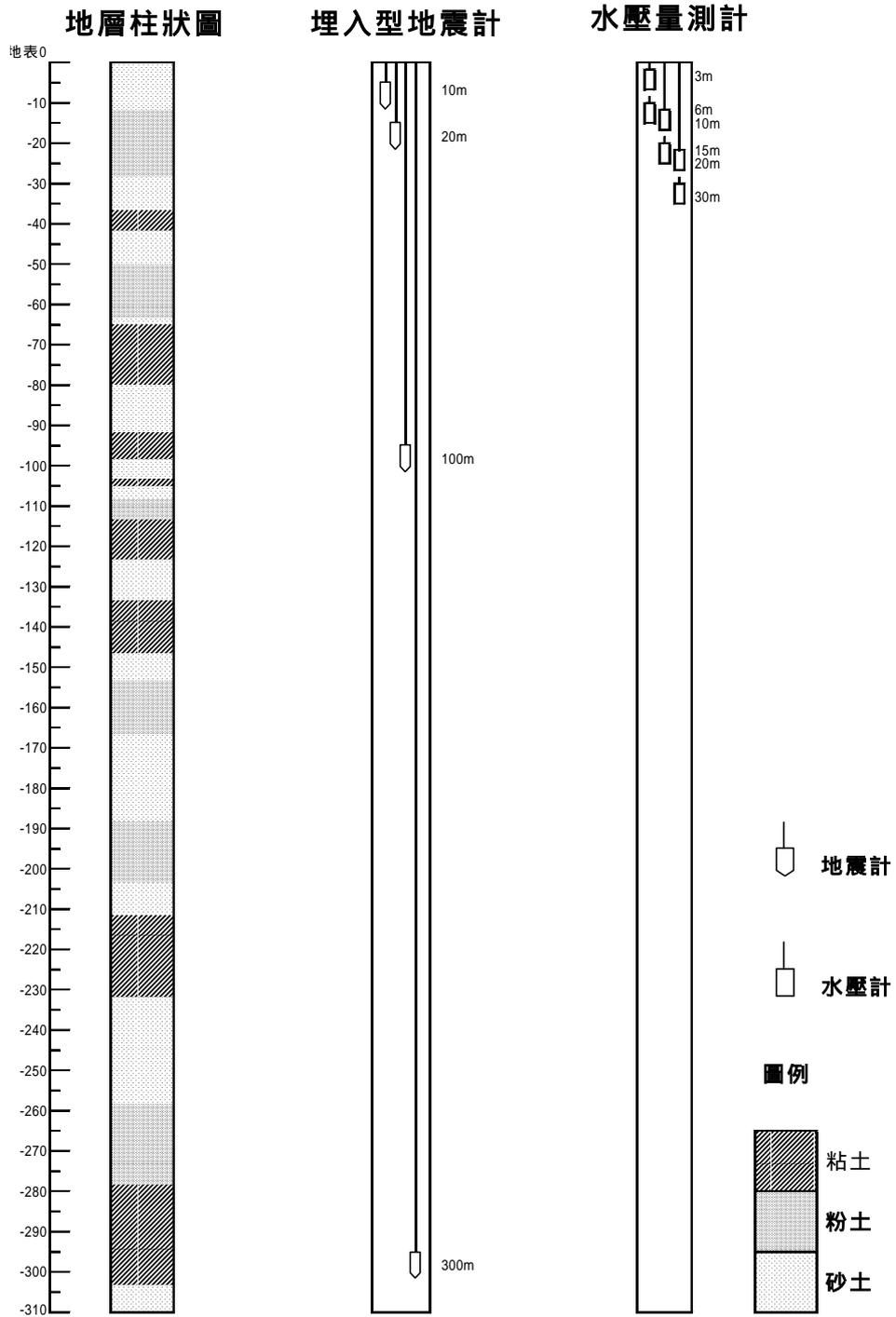


圖 7-6 布袋港地震儀及動態孔隙水壓觀測站地層鑿井柱狀圖 (300 公尺)

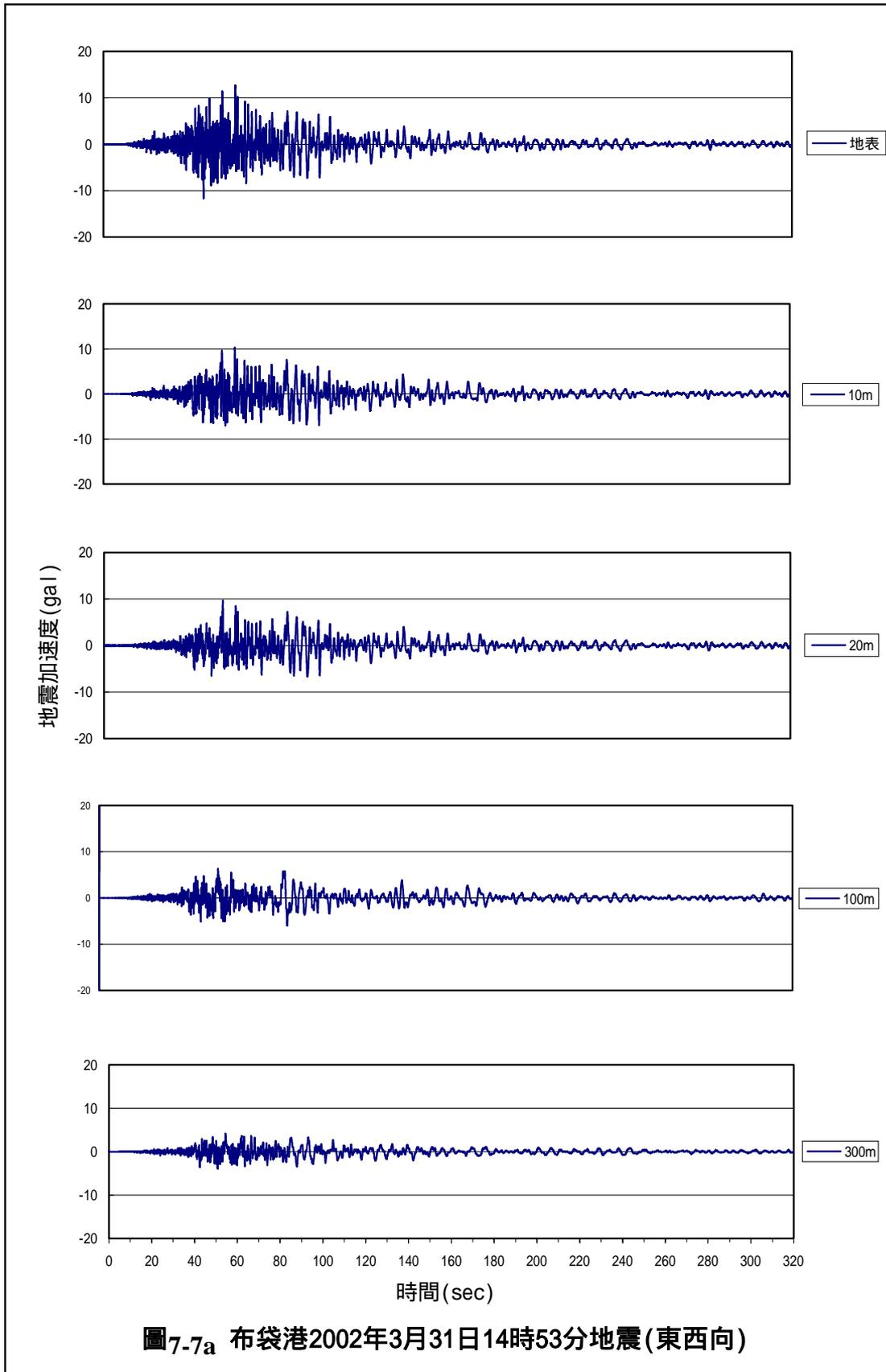
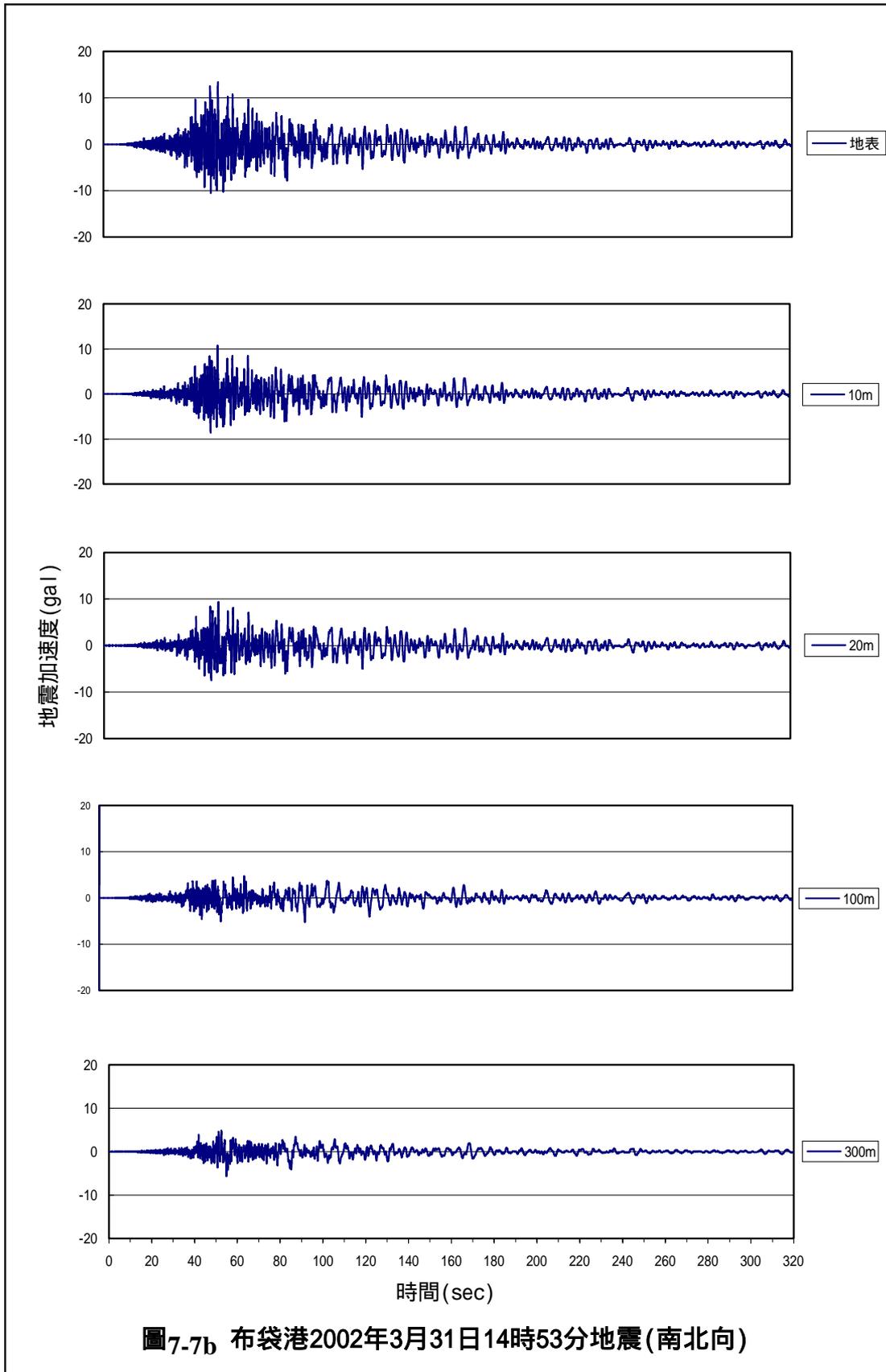


圖7-7a 布袋港2002年3月31日14時53分地震(東西向)



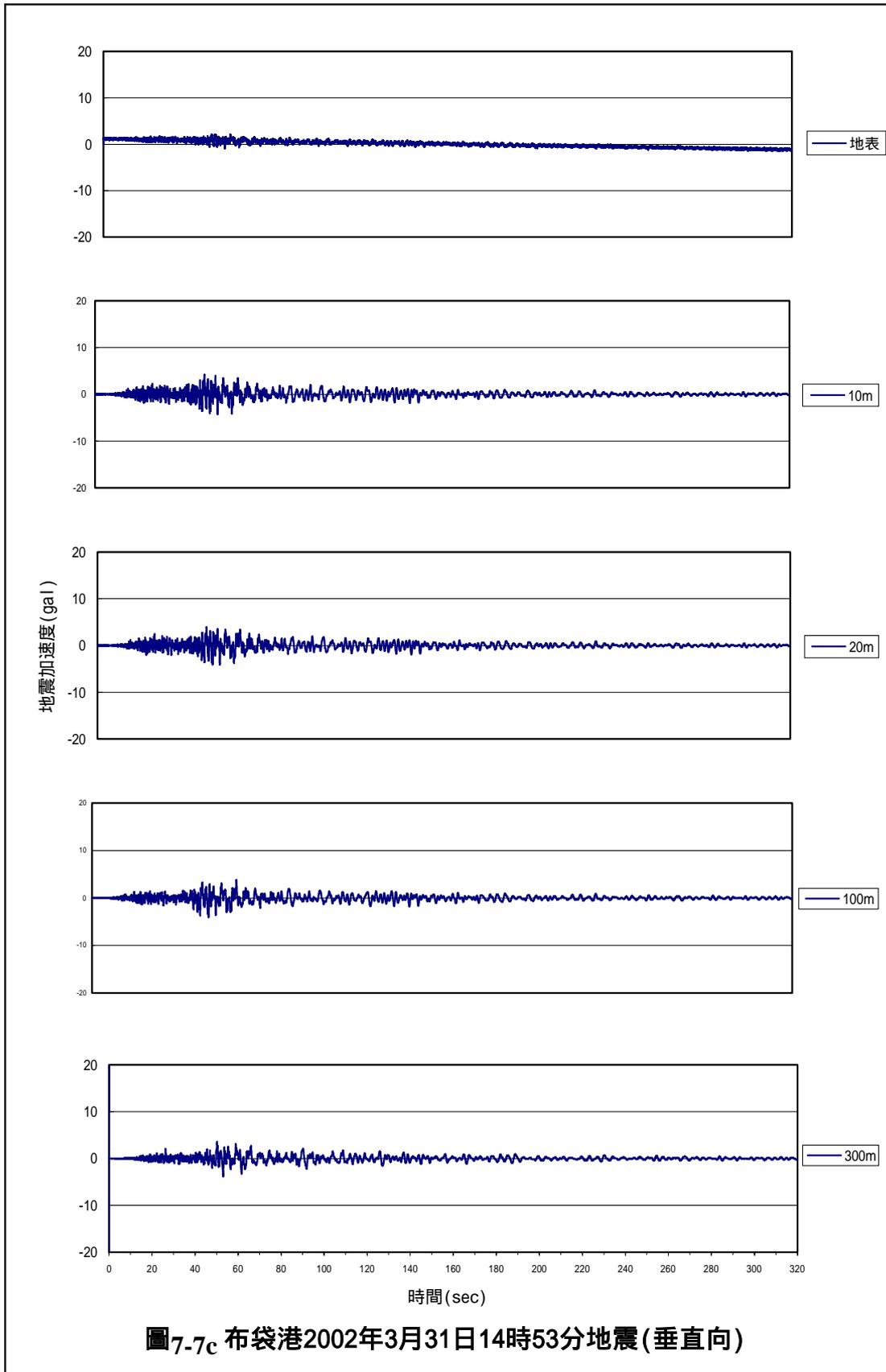


圖7-7c 布袋港2002年3月31日14時53分地震(垂直向)

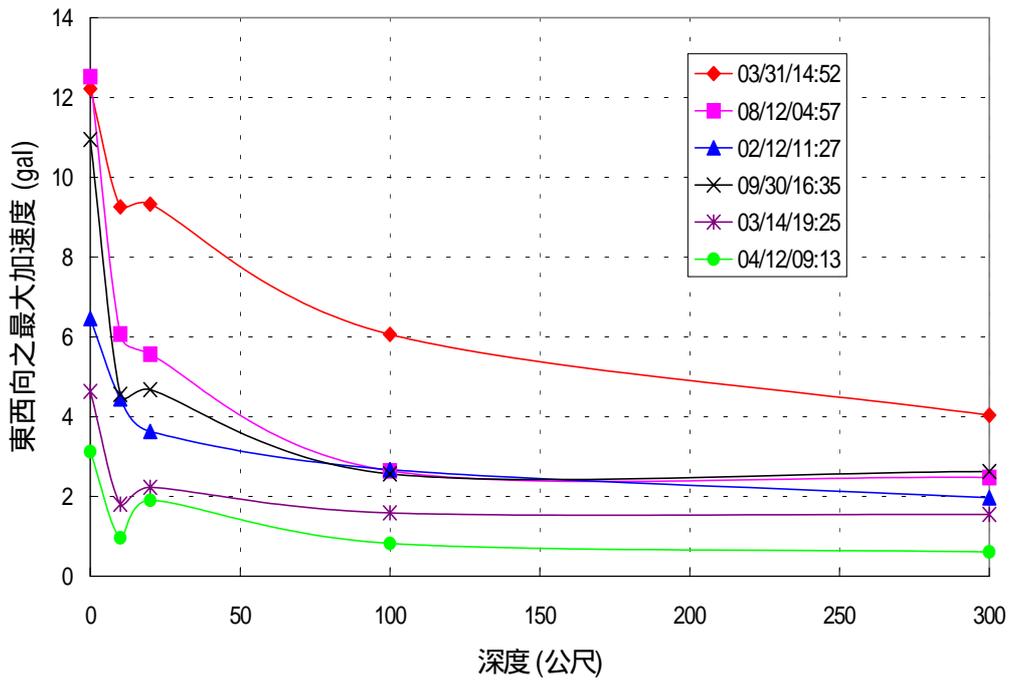


圖 7-8a 布袋港井下地震儀東西向之最大加速度隨深度變化圖

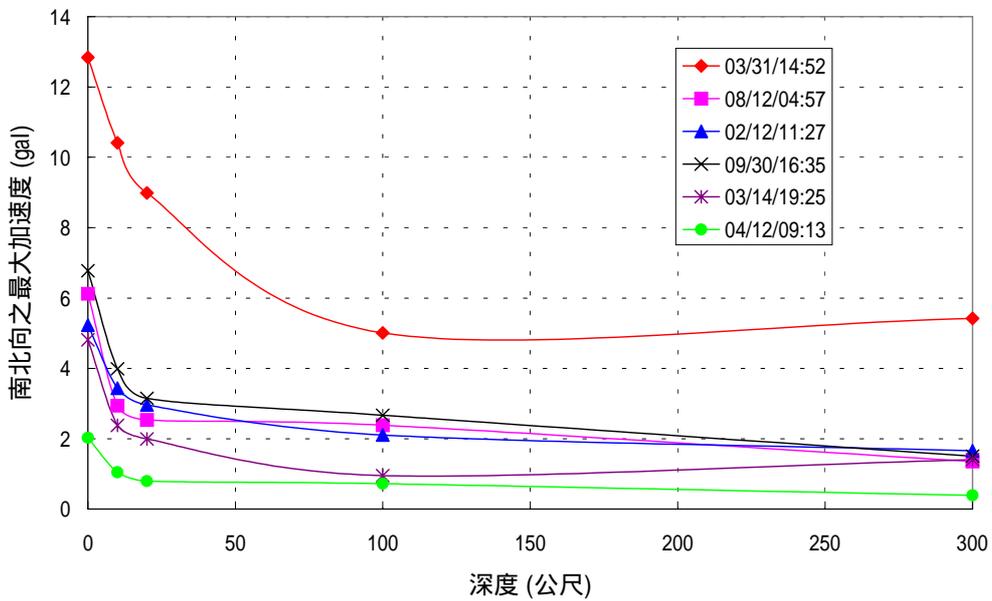


圖 7-8b 布袋港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖

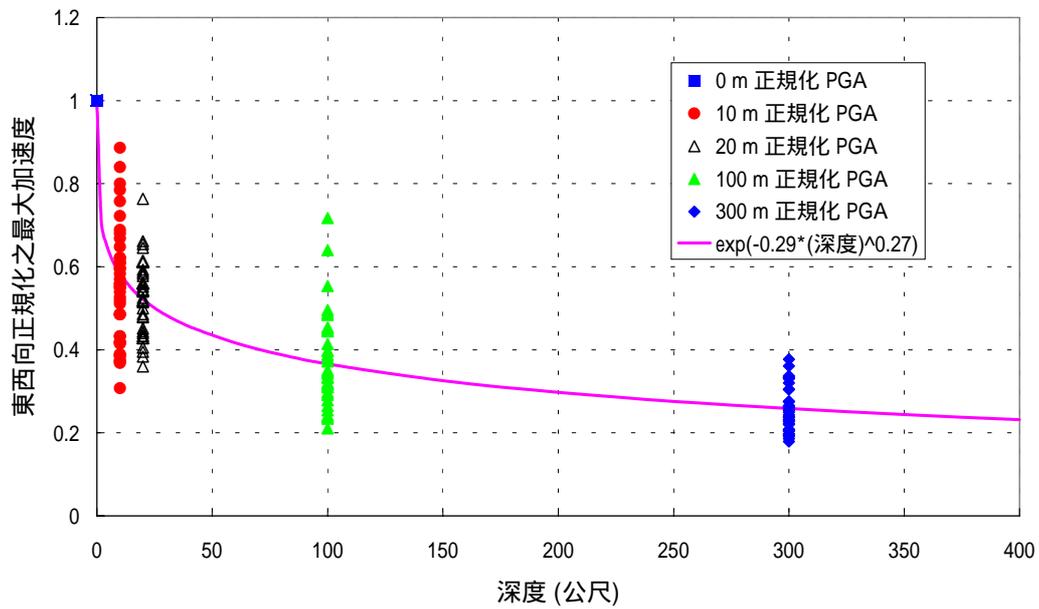


圖 7-9a 布袋港井下地震儀東西向正規化之最大加速度隨深度變化圖

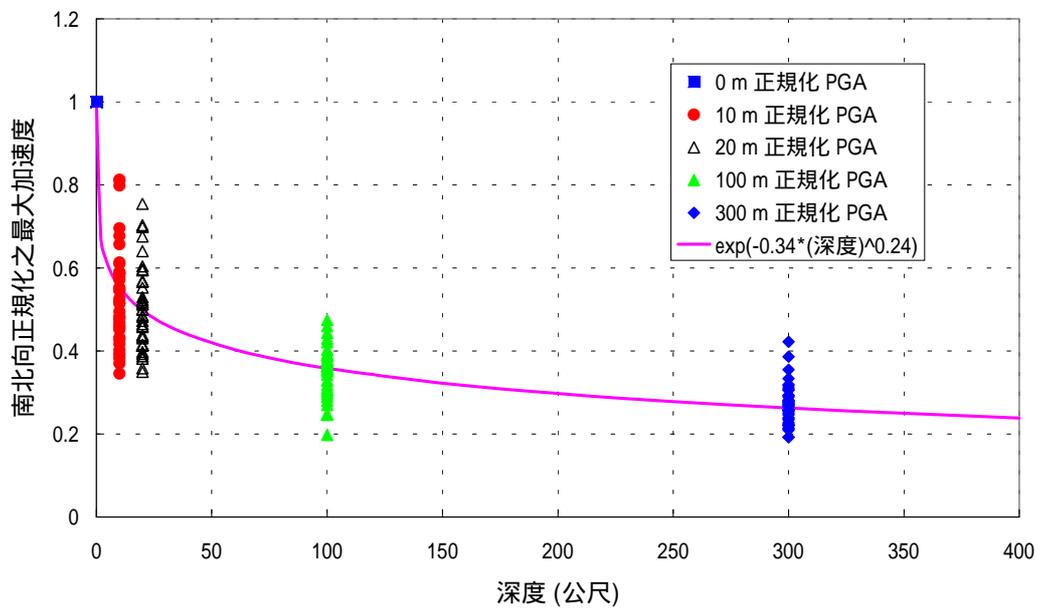


圖 7-9b 布袋港井下地震儀南北向正規化之最大加速度隨深度變化圖

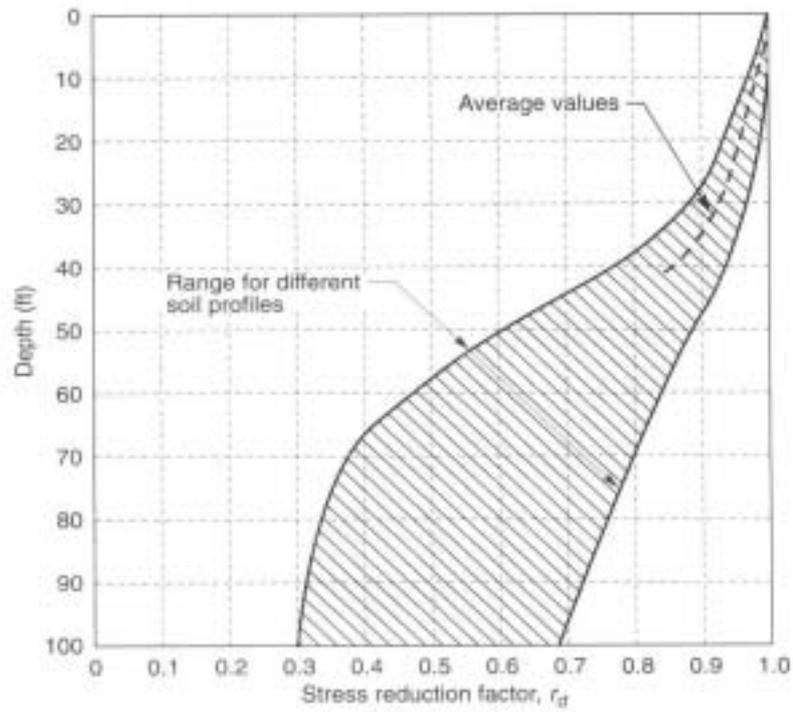


圖 7-10 應力折減因數 r_d 隨深度之變化範圍 (Seed & Idriss, 1971)

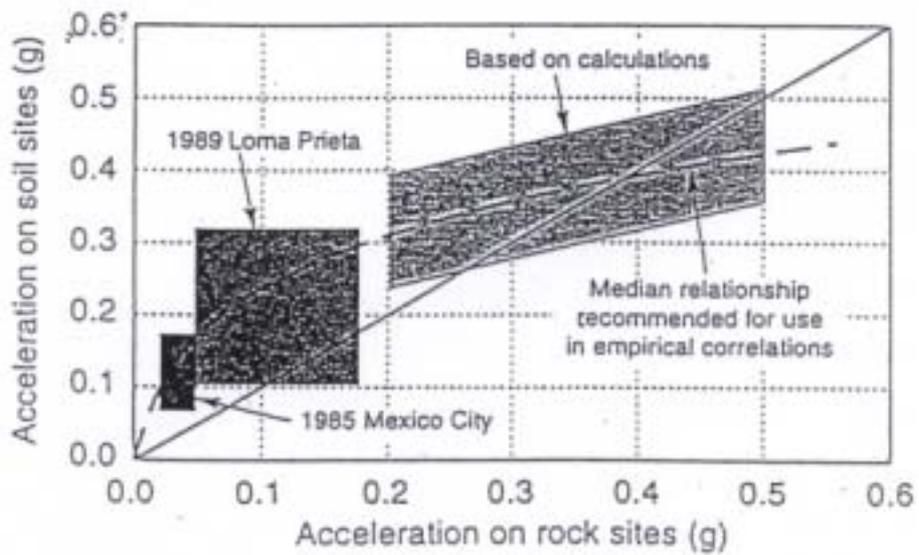


圖 7-11 軟弱地盤震波放大效應之非線性 (Idriss, 1990)

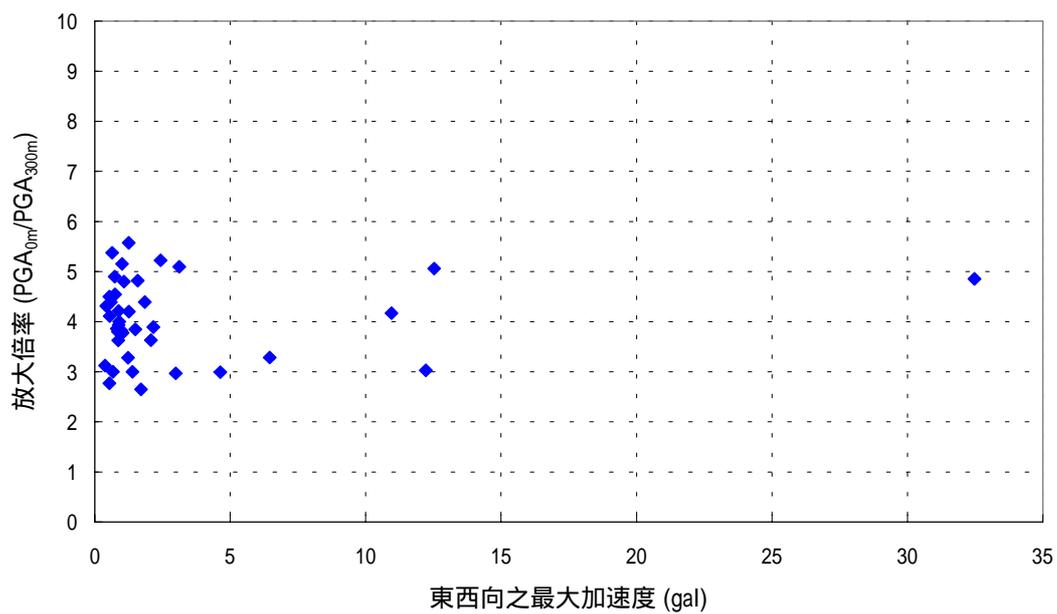


圖 12-a 布袋港東西向震波放大倍率與最大加速度之關係圖

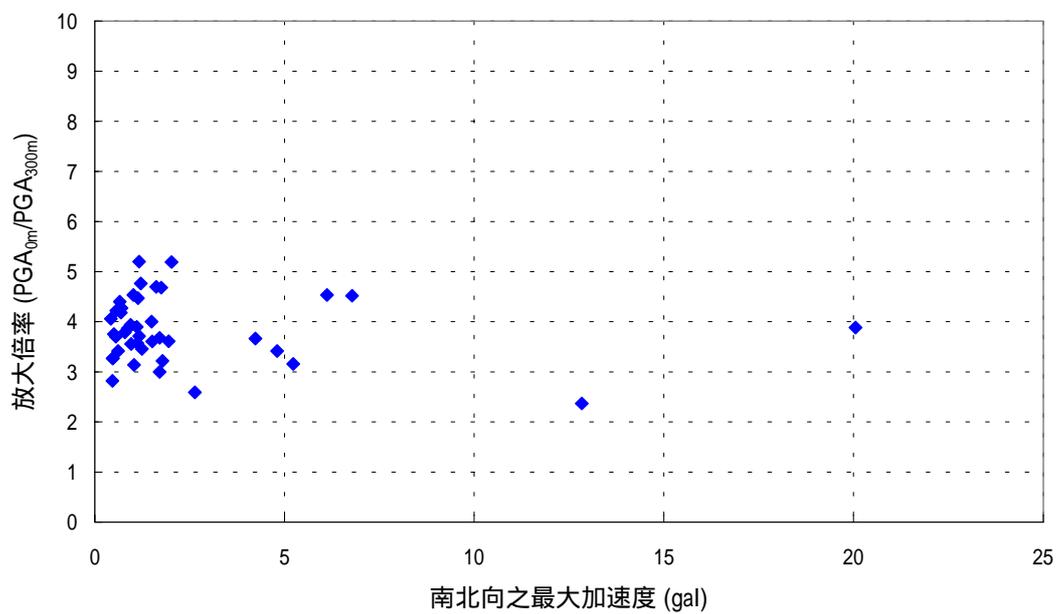


圖 12-b 布袋港南北向震波放大倍率與最大加速度之關係圖

表 7-1 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002 年 2 月份共 3 筆)

編 號：1/3 規模：6.2 深度：25.1km			編 號：2/3 規模：5.2 深度：24.2km		
震央位置： 北緯： 東經：			震央位置： 北緯： 東經：		
地震時間： 02/02/12/112726.3			地震時間： 02/02/12/120038		
記錄時間： 02/02/12/112756			記錄時間： 02/02/12/120125		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	-1.768	1(南北)	300m	-0.155
2(東西)	300m	-2.096	2(東西)	300m	-0.107
3(垂直)	300m	0.877	3(垂直)	300m	-0.008
4(南北)	100m	2.248	4(南北)	100m	-0.154
5(東西)	100m	2.850	5(東西)	100m	-0.210
6(垂直)	100m	-1.118	6(垂直)	100m	-0.413
7(南北)	20m	-3.157	7(南北)	20m	0.288
8(東西)	20m	-3.870	8(東西)	20m	0.240
9(垂直)	20m	-1.765	9(垂直)	20m	-0.109
10(南北)	10m	3.664	10(南北)	10m	0.218
11(東西)	10m	4.746	11(東西)	10m	0.254
12(垂直)	10m	1.774	12(垂直)	10m	-0.130
13(南北)	地表	5.579	13(南北)	地表	-0.507
14(東西)	地表	-6.888	14(東西)	地表	0.462
15(垂直)	地表	-1.469	15(垂直)	地表	0.400

表7-2 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年2月份-共3筆)

編 號：3/3 規模：4.3 深度：9.4km			編 號： 規模： 深度：		
震央位置： 北緯： 東經：			震央位置： 北緯： 東經：		
地震時間： 02/02/19/225254			地震時間：		
記錄時間： 02/02/19/225316			記錄時間：		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	-0.176	1(南北)	300m	
2(東西)	300m	-0.192	2(東西)	300m	
3(垂直)	300m	0.128	3(垂直)	300m	
4(南北)	100m	0.208	4(南北)	100m	
5(東西)	100m	-0.304	5(東西)	100m	
6(垂直)	100m	0.112	6(垂直)	100m	
7(南北)	20m	-0.352	7(南北)	20m	
8(東西)	20m	-0.288	8(東西)	20m	
9(垂直)	20m	-0.144	9(垂直)	20m	
10(南北)	10m	-0.320	10(南北)	10m	
11(東西)	10m	-0.320	11(東西)	10m	
12(垂直)	10m	-0.144	12(垂直)	10m	
13(南北)	地表	-0.608	13(南北)	地表	
14(東西)	地表	-0.672	14(東西)	地表	
15(垂直)	地表	-	15(垂直)	地表	

表 7-3 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002 年 2 月份共 3 筆)

編號：1/4 規模：4.8 深度：9.5km			編號：2/4 規模：3.9 深度：0.7km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/03/14/192554.5			地震時間：02/03/17/020925.8		
記錄時間：02/03/14/192607			記錄時間：02/03/17/020954		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.912	1(南北)	300m	0.144
2(東西)	300m	-0.912	2(東西)	300m	0.144
3(垂直)	300m	-0.587	3(垂直)	300m	0.064
4(南北)	100m	-1.787	4(南北)	100m	-0.186
5(東西)	100m	1.422	5(東西)	100m	0.176
6(垂直)	100m	0.597	6(垂直)	100m	0.064
7(南北)	20m	-2.576	7(南北)	20m	-0.280
8(東西)	20m	-2.576	8(東西)	20m	0.256
9(垂直)	20m	-0.832	9(垂直)	20m	0.106
10(南北)	10m	2.000	10(南北)	10m	0.211
11(東西)	10m	2.336	11(東西)	10m	0.341
12(垂直)	10m	-0.944	12(垂直)	10m	0.106
13(南北)	地表	4.005	13(南北)	地表	0.541
14(東西)	地表	-4.418	14(東西)	地表	0.632
15(垂直)	地表	-1.165	15(垂直)	地表	0.224

表7-4 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年3月份-共4筆)

編號：3/4 規模：4.0 深度：7.8km			編號：4/4 規模：6.8 深度：9.6km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/03/27/224516			地震時間：02/03/31/145254		
記錄時間：02/03/27/224553			記錄時間：02/03/31/145335		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	-0.112	1(南北)	300m	-5.782
2(東西)	300m	0.144	2(東西)	300m	-4.304
3(垂直)	300m	0.064	3(垂直)	300m	-4.000
4(南北)	100m	-0.112	4(南北)	100m	-5.344
5(東西)	100m	-0.176	5(東西)	100m	-6.464
6(垂直)	100m	0.064	6(垂直)	100m	-4.224
7(南北)	20m	0.208	7(南北)	20m	9.584
8(東西)	20m	0.256	8(東西)	20m	9.952
9(垂直)	20m	0.080	9(垂直)	20m	-4.224
10(南北)	10m	0.208	10(南北)	10m	11.107
11(東西)	10m	0.368	11(東西)	10m	9.874
12(垂直)	10m	0.080	12(垂直)	10m	-4.437
13(南北)	地表	0.454	13(南北)	地表	13.694
14(東西)	地表	0.592	14(東西)	地表	13.037
15(垂直)	地表	0.384	15(垂直)	地表	2.211

表7-5 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年4月份-共4筆)

編號：1/4 規模：5.4 深度：10.3km			編號：2/4 規模：4.0 深度：11.9km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/04/04/020610			地震時間：02/04/04/162747		
記錄時間：02/04/04/020714			記錄時間：02/04/04/162811		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	-0.176	1(南北)	300m	0.240
2(東西)	300m	0.208	2(東西)	300m	0.240
3(垂直)	300m	0.128	3(垂直)	300m	-0.160
4(南北)	100m	-0.272	4(南北)	100m	-0.288
5(東西)	100m	-0.256	5(東西)	100m	0.320
6(垂直)	100m	0.176	6(垂直)	100m	0.125
7(南北)	20m	0.368	7(南北)	20m	0.403
8(東西)	20m	-0.352	8(東西)	20m	-0.688
9(垂直)	20m	0.192	9(垂直)	20m	-0.133
10(南北)	10m	-0.512	10(南北)	10m	0.448
11(東西)	10m	-0.416	11(東西)	10m	0.704
12(垂直)	10m	0.192	12(垂直)	10m	-0.160
13(南北)	地表	-0.736	13(南北)	地表	0.928
14(東西)	地表	0.576	14(東西)	地表	1.338
15(垂直)	地表	0.800	15(垂直)	地表	0.688

表7-6 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年4月份-共4筆)

編號：3/4 規模：4.4 深度：9.7km			編號：4/4 規模：5.6 深度：7.0km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/04/12/091343.7			地震時間：02/04/20/164757.1		
記錄時間：02/04/12/091407			記錄時間：02/04/20/164848		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.416	1(南北)	300m	0.592
2(東西)	300m	0.653	2(東西)	300m	0.496
3(垂直)	300m	-0.208	3(垂直)	300m	0.240
4(南北)	100m	-0.768	4(南北)	100m	-0.688
5(東西)	100m	0.880	5(東西)	100m	-0.864
6(垂直)	100m	0.240	6(垂直)	100m	0.256
7(南北)	20m	-0.848	7(南北)	20m	1.008
8(東西)	20m	2.032	8(東西)	20m	1.360
9(垂直)	20m	0.400	9(垂直)	20m	0.352
10(南北)	10m	1.120	10(南北)	10m	-1.040
11(東西)	10m	1.024	11(東西)	10m	-1.120
12(垂直)	10m	0.464	12(垂直)	10m	-0.416
13(南北)	地表	-2.160	13(南北)	地表	1.904
14(東西)	地表	3.328	14(東西)	地表	-2.592
15(垂直)	地表	-0.080	15(垂直)	地表	0.048

表7-7 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年5月份-共4筆)

編號：1/4 規模：6.2 深度：5km			編號：2/4 規模：6.2 深度：5.7km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/05/15/114605.6			地震時間：02/05/29/004516.7		
記錄時間：02/05/15/114650			記錄時間：02/05/29/004619		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	-1.088	1(南北)	300m	0.496
2(東西)	300m	-1.072	2(東西)	300m	-0.496
3(垂直)	300m	-0.848	3(垂直)	300m	-0.336
4(南北)	100m	1.248	4(南北)	100m	-0.784
5(東西)	100m	1.762	5(東西)	100m	-0.720
6(垂直)	100m	0.800	6(垂直)	100m	-0.368
7(南北)	20m	1.968	7(南北)	20m	1.168
8(東西)	20m	-1.952	8(東西)	20m	0.960
9(垂直)	20m	1.136	9(垂直)	20m	-0.480
10(南北)	10m	2.288	10(南北)	10m	1.456
11(東西)	10m	-2.128	11(東西)	10m	1.168
12(垂直)	10m	1.184	12(垂直)	10m	-0.496
13(南北)	地表	-2.816	13(南北)	地表	1.824
14(東西)	地表	3.184	14(東西)	地表	1.488
15(垂直)	地表	0.032	15(垂直)	地表	-0.032

表7-8 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年5月份-共4筆)

編號：3/4 規模：5.9 深度：91.1km			編號：4/4 規模：4.9 深度：10.7km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/05/30/145339.2			地震時間：02/05/31/012726.6		
記錄時間：02/05/30/145444			記錄時間：02/05/31/012810		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.256	1(南北)	300m	-0.160
2(東西)	300m	0.208	2(東西)	300m	0.128
3(垂直)	300m	-0.144	3(垂直)	300m	-0.080
4(南北)	100m	-0.272	4(南北)	100m	0.256
5(東西)	100m	0.416	5(東西)	100m	0.256
6(垂直)	100m	-0.176	6(垂直)	100m	-0.096
7(南北)	20m	0.416	7(南北)	20m	0.368
8(東西)	20m	0.592	8(東西)	20m	-0.224
9(垂直)	20m	-0.288	9(垂直)	20m	0.112
10(南北)	10m	0.576	10(南北)	10m	0.336
11(東西)	10m	0.464	11(東西)	10m	0.336
12(垂直)	10m	0.256	12(垂直)	10m	0.144
13(南北)	地表	-1.008	13(南北)	地表	-0.704
14(東西)	地表	1.072	14(東西)	地表	-0.400
15(垂直)	地表	-0.032	15(垂直)	地表	-0.032

表7-9 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年6月份-共4筆)

編號：1/4 規模：5.5 深度：24.9km			編號：2/4 規模：5.0 深度：16.1km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/06/14/152208.9			地震時間：02/06/23/171956.6		
記錄時間：02/06/14/152306			記錄時間：02/06/23/172029		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.448	1(南北)	300m	-0.336
2(東西)	300m	-0.416	2(東西)	300m	-0.288
3(垂直)	300m	-0.272	3(垂直)	300m	0.144
4(南北)	100m	0.608	4(南北)	100m	0.464
5(東西)	100m	-0.608	5(東西)	100m	0.432
6(垂直)	100m	0.304	6(垂直)	100m	0.176
7(南北)	20m	-1.136	7(南北)	20m	-0.496
8(東西)	20m	-0.704	8(東西)	20m	0.608
9(垂直)	20m	-0.400	9(垂直)	20m	0.176
10(南北)	10m	0.736	10(南北)	10m	0.736
11(東西)	10m	1.088	11(東西)	10m	0.528
12(垂直)	10m	-0.512	12(垂直)	10m	-0.208
13(南北)	地表	1.616	13(南北)	地表	1.200
14(東西)	地表	-1.600	14(東西)	地表	-1.088
15(垂直)	地表	0.000	15(垂直)	地表	0.000

表7-10 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年6月份-共4筆)

編號：3/4 規模：5.1 深度：17.1km			編號：4/4 規模：3.7 深度：14.9km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/06/24/091220.4			地震時間：02/06/30/214242.8		
記錄時間：02/06/24/091310			記錄時間：02/06/30/214307		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	-0.336	1(南北)	300m	-0.272
2(東西)	300m	-0.288	2(東西)	300m	-0.240
3(垂直)	300m	0.144	3(垂直)	300m	0.112
4(南北)	100m	0.464	4(南北)	100m	0.320
5(東西)	100m	0.432	5(東西)	100m	0.336
6(垂直)	100m	0.176	6(垂直)	100m	0.160
7(南北)	20m	-0.496	7(南北)	20m	-0.464
8(東西)	20m	0.608	8(東西)	20m	-0.368
9(垂直)	20m	0.176	9(垂直)	20m	0.128
10(南北)	10m	0.736	10(南北)	10m	-0.448
11(東西)	10m	0.528	11(東西)	10m	-0.368
12(垂直)	10m	-0.208	12(垂直)	10m	0.176
13(南北)	地表	-1.248	13(南北)	地表	-1.296
14(東西)	地表	-1.088	14(東西)	地表	0.960
15(垂直)	地表	-	15(垂直)	地表	-0.032

表7-11 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年7月份-共3筆)

編號：1/3 規模：5.0 深度：66.5km			編號：2/3 規模：5.9 深度：3.2km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/07/07/180103.4			地震時間：02/07/11/153620.4		
記錄時間：02/07/07/180151			記錄時間：02/07/11/153728		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	-0.144	1(南北)	300m	0.608
2(東西)	300m	0.128	2(東西)	300m	-0.448
3(垂直)	300m	0.080	3(垂直)	300m	-0.288
4(南北)	100m	-0.256	4(南北)	100m	0.640
5(東西)	100m	0.192	5(東西)	100m	-0.688
6(垂直)	100m	0.096	6(垂直)	100m	-0.288
7(南北)	20m	-0.304	7(南北)	20m	-1.376
8(東西)	20m	-0.336	8(東西)	20m	1.072
9(垂直)	20m	0.128	9(垂直)	20m	-0.480
10(南北)	10m	-0.336	10(南北)	10m	1.072
11(東西)	10m	-0.336	11(東西)	10m	-0.736
12(垂直)	10m	-0.176	12(垂直)	10m	-0.528
13(南北)	地表	-0.608	13(南北)	地表	1.824
14(東西)	地表	-0.576	14(東西)	地表	-1.968
15(垂直)	地表	-0.272	15(垂直)	地表	-0.496

表7-12 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年7月份-共3筆)

編號：3/3 規模：5.4 深度：82.1km			編號：規模：深度：		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/07/18/125230.5			地震時間：		
記錄時間：02/07/18/125314			記錄時間：		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	-0.160	1(南北)	300m	
2(東西)	300m	0.240	2(東西)	300m	
3(垂直)	300m	0.080	3(垂直)	300m	
4(南北)	100m	0.272	4(南北)	100m	
5(東西)	100m	0.224	5(東西)	100m	
6(垂直)	100m	-0.096	6(垂直)	100m	
7(南北)	20m	-0.400	7(南北)	20m	
8(東西)	20m	0.512	8(東西)	20m	
9(垂直)	20m	-0.160	9(垂直)	20m	
10(南北)	10m	0.256	10(南北)	10m	
11(東西)	10m	0.352	11(東西)	10m	
12(垂直)	10m	-0.144	12(垂直)	10m	
13(南北)	地表	-0.592	13(南北)	地表	
14(東西)	地表	0.944	14(東西)	地表	
15(垂直)	地表	-0.352	15(垂直)	地表	

表7-13 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年8月份.共5筆)

編號：1/5 規模：4.1 深度：11.4km			編號：2/5 規模：4.3 深度：15.1km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/08/06/152040.1			地震時間：02/08/12/045726.7		
記錄時間：02/08/06/152102			記錄時間：02/08/12/045737		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.272	1(南北)	300m	1.440
2(東西)	300m	0.320	2(東西)	300m	2.640
3(垂直)	300m	-0.160	3(垂直)	300m	-1.024
4(南北)	100m	-0.400	4(南北)	100m	-2.544
5(東西)	100m	-0.416	5(東西)	100m	2.816
6(垂直)	100m	-0.176	6(垂直)	100m	-1.184
7(南北)	20m	-0.672	7(南北)	20m	-2.704
8(東西)	20m	0.880	8(東西)	20m	5.936
9(垂直)	20m	-0.208	9(垂直)	20m	-1.488
10(南北)	10m	0.640	10(南北)	10m	-3.136
11(東西)	10m	-0.800	11(東西)	10m	6.480
12(垂直)	10m	0.240	12(垂直)	10m	-1.664
13(南北)	地表	-1.216	13(南北)	地表	-6.528
14(東西)	地表	1.344	14(東西)	地表	13.360
15(垂直)	地表	-0.832	15(垂直)	地表	-0.930

表7-14 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年8月份-共5筆)

編號：3/5 規模：4.3 深度：15km			編號：4/5 規模：6.0 深度：13.2km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/08/20/180144.6			地震時間：02/08/29/010530.8		
記錄時間：02/08/20/180208			記錄時間：02/08/29/010610		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.400	1(南北)	300m	-0.576
2(東西)	300m	0.240	2(東西)	300m	-0.688
3(垂直)	300m	-0.272	3(垂直)	300m	0.368
4(南北)	100m	0.464	4(南北)	100m	0.736
5(東西)	100m	-0.288	5(東西)	100m	-0.816
6(垂直)	100m	0.224	6(垂直)	100m	0.384
7(南北)	20m	0.816	7(南北)	20m	-0.912
8(東西)	20m	0.560	8(東西)	20m	-1.072
9(垂直)	20m	-0.384	9(垂直)	20m	0.480
10(南北)	10m	0.752	10(南北)	10m	1.136
11(東西)	10m	0.544	11(東西)	10m	-1.616
12(垂直)	10m	-0.480	12(垂直)	10m	0.544
13(南北)	地表	1.872	13(南北)	地表	-2.080
14(東西)	地表	0.912	14(東西)	地表	-1.824
15(垂直)	地表	0.608	15(垂直)	地表	0.640

表7-15 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年8月份.共5筆)

編號：5/5 規模：4.8 深度：24.2km			編號： 規模： 深度：		
震央位置： 北緯： 東經：			震央位置： 北緯： 東經：		
地震時間： 02/08/29/213619.8			地震時間：		
記錄時間： 02/08/29/213708			記錄時間：		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.224	1(南北)	300m	
2(東西)	300m	0.224	2(東西)	300m	
3(垂直)	300m	0.176	3(垂直)	300m	
4(南北)	100m	-0.320	4(南北)	100m	
5(東西)	100m	-0.288	5(東西)	100m	
6(垂直)	100m	0.160	6(垂直)	100m	
7(南北)	20m	0.512	7(南北)	20m	
8(東西)	20m	-0.512	8(東西)	20m	
9(垂直)	20m	0.192	9(垂直)	20m	
10(南北)	10m	-0.496	10(南北)	10m	
11(東西)	10m	0.560	11(東西)	10m	
12(垂直)	10m	-0.224	12(垂直)	10m	
13(南北)	地表	0.848	13(南北)	地表	
14(東西)	地表	0.864	14(東西)	地表	
15(垂直)	地表	0.384	15(垂直)	地表	

表7-16 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年8月份)

編號： 規模： 深度：			編號： 規模： 深度：		
震央位置： 北緯： 東經：			震央位置： 北緯： 東經：		
地震時間：			地震時間：		
記錄時間：			記錄時間：		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m		1(南北)	300m	
2(東西)	300m		2(東西)	300m	
3(垂直)	300m		3(垂直)	300m	
4(南北)	100m		4(南北)	100m	
5(東西)	100m		5(東西)	100m	
6(垂直)	100m		6(垂直)	100m	
7(南北)	20m		7(南北)	20m	
8(東西)	20m		8(東西)	20m	
9(垂直)	20m		9(垂直)	20m	
10(南北)	10m		10(南北)	10m	
11(東西)	10m		11(東西)	10m	
12(垂直)	10m		12(垂直)	10m	
13(南北)	地表		13(南北)	地表	
14(東西)	地表		14(東西)	地表	
15(垂直)	地表		15(垂直)	地表	

表7-17 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年9月份-共10筆)

編號：1/10 規模：5.6 深度：2.5km			編號：2/10 規模：6.0 深度：35.5km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/09/01/135622.7			地震時間：02/09/01/150733.9		
記錄時間：02/09/01/135734			記錄時間：02/09/01/150841		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.192	1(南北)	300m	-0.18
2(東西)	300m	0.160	2(東西)	300m	-0.11
3(垂直)	300m	-0.096	3(垂直)	300m	-0.13
4(南北)	100m	-0.240	4(南北)	100m	0.21
5(東西)	100m	0.272	5(東西)	100m	-0.19
6(垂直)	100m	0.112	6(垂直)	100m	0.07
7(南北)	20m	0.336	7(南北)	20m	0.33
8(東西)	20m	0.336	8(東西)	20m	0.27
9(垂直)	20m	0.208	9(垂直)	20m	-0.16
10(南北)	10m	0.400	10(南北)	10m	-0.33
11(東西)	10m	0.304	11(東西)	10m	-0.21
12(垂直)	10m	0.224	12(垂直)	10m	-0.15
13(南北)	地表	-0.656	13(南北)	地表	-0.64
14(東西)	地表	0.784	14(東西)	地表	0.50
15(垂直)	地表	-0.288	15(垂直)	地表	0.17

表7-18 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年9月份-共10筆)

編號：3/10 規模：5.5 深度：26km			編號：4/10 規模：5.5 深度：40km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/09/06/190201.8			地震時間：02/09/08/065933.1		
記錄時間：02/09/06/190220			記錄時間：02/09/08/070027		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	5.504	1(南北)	300m	0.304
2(東西)	300m	-7.456	2(東西)	300m	-0.400
3(垂直)	300m	2.080	3(垂直)	300m	0.192
4(南北)	100m	-6.800	4(南北)	100m	0.448
5(東西)	100m	8.384	5(東西)	100m	-0.416
6(垂直)	100m	2.752	6(垂直)	100m	0.160
7(南北)	20m	-8.160	7(南北)	20m	-0.544
8(東西)	20m	12.464	8(東西)	20m	0.656
9(垂直)	20m	-2.880	9(垂直)	20m	-0.320
10(南北)	10m	11.008	10(南北)	10m	-0.464
11(東西)	10m	19.728	11(東西)	10m	-0.544
12(垂直)	10m	-3.696	12(垂直)	10m	0.384
13(南北)	地表	21.392	13(南北)	地表	1.184
14(東西)	地表	34.640	14(東西)	地表	-1.312
15(垂直)	地表	3.152	15(垂直)	地表	-1.136

表7-19 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年9月份-共10筆)

編號：5/10 規模：5.5 深度：102.4km			編號：6/10 規模：6.8 深度：173.6km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/09/10/163814.8			地震時間：02/09/16/080331.2		
記錄時間：02/09/10/160001			記錄時間：02/09/16/080451		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	-0.368	1(南北)	300m	-1.232
2(東西)	300m	-0.240	2(東西)	300m	0.608
3(垂直)	300m	0.160	3(垂直)	300m	-0.400
4(南北)	100m	0.512	4(南北)	100m	-1.264
5(東西)	100m	-0.368	5(東西)	100m	1.584
6(垂直)	100m	0.128	6(垂直)	100m	-0.752
7(南北)	20m	-0.816	7(南北)	20m	2.176
8(東西)	20m	0.560	8(東西)	20m	-1.056
9(垂直)	20m	0.272	9(垂直)	20m	0.768
10(南北)	10m	-0.720	10(南北)	10m	-3.056
11(東西)	10m	0.704	11(東西)	10m	1.344
12(垂直)	10m	0.304	12(垂直)	10m	0.752
13(南北)	地表	1.728	13(南北)	地表	-4.512
14(東西)	地表	1.152	14(東西)	地表	2.208
15(垂直)	地表	0.880	15(垂直)	地表	-

表7-20 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年9月份-共10筆)

編號：7/10 規模：4.5 深度：11.5km			編號：8/10 規模：5.0 深度：10.7km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/09/19/122154.5			地震時間：02/09/25/064319.8		
記錄時間：02/09/19/122216			記錄時間：02/09/25/064404		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.400	1(南北)	300m	0.384
2(東西)	300m	0.352	2(東西)	300m	0.272
3(垂直)	300m	0.304	3(垂直)	300m	-0.160
4(南北)	100m	0.464	4(南北)	100m	0.496
5(東西)	100m	0.544	5(東西)	100m	-0.464
6(垂直)	100m	0.288	6(垂直)	100m	-0.160
7(南北)	20m	0.688	7(南北)	20m	-0.464
8(東西)	20m	0.736	8(東西)	20m	0.688
9(垂直)	20m	0.352	9(垂直)	20m	0.240
10(南北)	10m	0.592	10(南北)	10m	0.768
11(東西)	10m	-0.880	11(東西)	10m	0.832
12(垂直)	10m	0.480	12(垂直)	10m	0.240
13(南北)	地表	1.600	13(南北)	地表	1.328
14(東西)	地表	1.696	14(東西)	地表	1.040
15(垂直)	地表	0.624	15(垂直)	地表	0.480

表7-21 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年9月份-共10筆)

編號：9/10 規模：5.3 深度：5.5km			編號：10/10 規模：5.3 深度：5.2km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/09/27/130746.7			地震時間：02/09/30/163503.2		
記錄時間：02/09/27/130827			記錄時間：02/09/30/163526		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.240	1(南北)	300m	1.600
2(東西)	300m	-0.592	2(東西)	300m	2.800
3(垂直)	300m	0.192	3(垂直)	300m	1.360
4(南北)	100m	0.592	4(南北)	100m	2.848
5(東西)	100m	-0.672	5(東西)	100m	-2.736
6(垂直)	100m	-0.208	6(垂直)	100m	1.328
7(南北)	20m	0.640	7(南北)	20m	3.360
8(東西)	20m	-1.040	8(東西)	20m	4.992
9(垂直)	20m	-0.288	9(垂直)	20m	2.128
10(南北)	10m	-0.576	10(南北)	10m	4.256
11(東西)	10m	-0.848	11(東西)	10m	4.864
12(垂直)	10m	-0.352	12(垂直)	10m	2.480
13(南北)	地表	1.248	13(南北)	地表	-7.232
14(東西)	地表	2.304	14(東西)	地表	11.680
15(垂直)	地表	-0.352	15(垂直)	地表	-3.584

布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年9月份)

編號： / 規模： 深度：			編號： / 規模： 深度：		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：			地震時間：		
記錄時間：			記錄時間：		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m		1(南北)	300m	
2(東西)	300m		2(東西)	300m	
3(垂直)	300m		3(垂直)	300m	
4(南北)	100m		4(南北)	100m	
5(東西)	100m		5(東西)	100m	
6(垂直)	100m		6(垂直)	100m	
7(南北)	20m		7(南北)	20m	
8(東西)	20m		8(東西)	20m	
9(垂直)	20m		9(垂直)	20m	
10(南北)	10m		10(南北)	10m	
11(東西)	10m		11(東西)	10m	
12(垂直)	10m		12(垂直)	10m	
13(南北)	地表		13(南北)	地表	
14(東西)	地表		14(東西)	地表	
15(垂直)	地表		15(垂直)	地表	

表7-22 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年10月份-共2筆)

編號：1/2 規模：4.4 深度：7.8km			編號：2/2 規模：4.2 深度：146km		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：02/10/07/085548.4			地震時間：02/10/15/134004.3		
記錄時間：02/10/07/085622			記錄時間：02/10/15/134028		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.176	1(南北)	300m	0.240
2(東西)	300m	0.256	2(東西)	300m	0.224
3(垂直)	300m	0.112	3(垂直)	300m	0.224
4(南北)	100m	-0.272	4(南北)	100m	-0.336
5(東西)	100m	0.288	5(東西)	100m	-0.240
6(垂直)	100m	-0.112	6(垂直)	100m	-0.224
7(南北)	20m	0.448	7(南北)	20m	0.528
8(東西)	20m	-0.480	8(東西)	20m	-0.512
9(垂直)	20m	0.160	9(垂直)	20m	-0.192
10(南北)	10m	0.352	10(南北)	10m	-0.416
11(東西)	10m	0.576	11(東西)	10m	-0.528
12(垂直)	10m	-0.208	12(垂直)	10m	0.288
13(南北)	地表	0.752	13(南北)	地表	1.088
14(東西)	地表	-0.928	14(東西)	地表	0.944
15(垂直)	地表	-	15(垂直)	地表	-0.480

布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年10月份-共2筆)

編號：3/ 規模： 深度：			編號：4/ 規模： 深度：		
震央位置：北緯：東經：			震央位置：北緯：東經：		
地震時間：			地震時間：		
記錄時間：			記錄時間：		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m		1(南北)	300m	
2(東西)	300m		2(東西)	300m	
3(垂直)	300m		3(垂直)	300m	
4(南北)	100m		4(南北)	100m	
5(東西)	100m		5(東西)	100m	
6(垂直)	100m		6(垂直)	100m	
7(南北)	20m		7(南北)	20m	
8(東西)	20m		8(東西)	20m	
9(垂直)	20m		9(垂直)	20m	
10(南北)	10m		10(南北)	10m	
11(東西)	10m		11(東西)	10m	
12(垂直)	10m		12(垂直)	10m	
13(南北)	地表		13(南北)	地表	
14(東西)	地表		14(東西)	地表	
15(垂直)	地表		15(垂直)	地表	

表7-23 布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年11月份-共 筆)

編號：1/ 規模：4.1 深度：11.2km			編號：2/ 規模：5.7 深度：109.2km		
震央位置：北緯： 東經：			震央位置：北緯： 東經：		
地震時間： 02/11/08/114143.8			地震時間： 02/11/10/080703.7		
記錄時間： 02/11/08/114201			記錄時間： 02/11/10/0807		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m	0.176	1(南北)	300m	0.352
2(東西)	300m	0.128	2(東西)	300m	-0.240
3(垂直)	300m	0.096	3(垂直)	300m	0.144
4(南北)	100m	-0.176	4(南北)	100m	0.272
5(東西)	100m	-0.256	5(東西)	100m	0.352
6(垂直)	100m	-0.112	6(垂直)	100m	0.064
7(南北)	20m	-0.192	7(南北)	20m	-0.656
8(東西)	20m	-0.272	8(東西)	20m	-0.416
9(垂直)	20m	-0.144	9(垂直)	20m	-0.224
10(南北)	10m	0.224	10(南北)	10m	0.608
11(東西)	10m	-0.384	11(東西)	10m	0.368
12(垂直)	10m	-0.192	12(垂直)	10m	-0.256
13(南北)	地表	0.496	13(南北)	地表	1.104
14(東西)	地表	-0.688	14(東西)	地表	-0.720
15(垂直)	地表	-	15(垂直)	地表	-

布袋港地震監測站各頻道最大加速度值(2002年11月份-共 筆)

編號：3/ 規模： 深度：			編號：4/ 規模： 深度：		
震央位置：北緯： 東經：			震央位置：北緯： 東經：		
地震時間：			地震時間：		
記錄時間：			記錄時間：		
頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)	頻道(方向)	儀器深度	PGA(gal)
1(南北)	300m		1(南北)	300m	
2(東西)	300m		2(東西)	300m	
3(垂直)	300m		3(垂直)	300m	
4(南北)	100m		4(南北)	100m	
5(東西)	100m		5(東西)	100m	
6(垂直)	100m		6(垂直)	100m	
7(南北)	20m		7(南北)	20m	
8(東西)	20m		8(東西)	20m	
9(垂直)	20m		9(垂直)	20m	
10(南北)	10m		10(南北)	10m	
11(東西)	10m		11(東西)	10m	
12(垂直)	10m		12(垂直)	10m	
13(南北)	地表		13(南北)	地表	
14(東西)	地表		14(東西)	地表	
15(垂直)	地表		15(垂直)	地表	

第八章 CPT 試驗之本土化液化分析模式

本章搜集布袋港、台中港、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，利用統計分類法中之邏輯迴歸法，以純 CPT 現場試驗數據之錐端阻抗 q_c 值與摩擦比 R_f 為分析參數，建立 CPT 試驗評估液化機率之模式，並以液化機率 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 為判別式，分別建立理論上及工程實用上兩種抗液化安全係數 F_s 之公式，再以邏輯迴歸法及貝氏定理，分別建立抗液化安全係數 F_s 與液化機率 P_L 之關係式。

8.1 前言

921 集集地震雖然造成中部多處土壤液化災害，但亦提供許多液化案例，可建立本土化之液化分析模式。當今世界上工程界著名之土壤液化評估方法，大多是累積許多地震液化案例及大量現場或室內試驗研究成果，並針對工程實務應用發展而成。早期由於標準貫入試驗 SPT-N 值之地震液化案例現場觀測數據資料較多，CPT 液化潛能評估法乃將 CPT- q_c 與 SPT-N 值之間轉換，唯近年來累積地震災區發生液化與非液化之現地 CPT 試驗資料亦相當豐富，本文搜集布袋港、台中港、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，如表 1 所示。因此可直接以 CPT 試驗之地震液化案例資料，建立 CPT 液化潛能評估之本土化模式。

以地震液化與非液化案例現場觀測數據資料，建立現場試驗之液化潛能評估模式，主要是建立土壤抗液化強度 CRR 與現場試驗值之關係式或關係圖，欲求得其關係，有傳統經驗判斷法及統計分類法。傳統方法所推導之相關經驗式或相關經驗圖(Shibata & Teparaksa, 1988; Seed, Idriss & Arango, 1983; Seed & De Alba, 1986; Robertson & Campanella, 1985; Stark & Olson, 1995; Olson, 1997; Robertson & Wride, 1997)，雖經嚴謹之經驗判斷分析，但仍缺乏統計上的根據。

本文利用統計分類法中之邏輯迴歸法，先建立以 CPT 試驗之摩擦比 R_f 判別土壤分類，再根據 921 地震現場液化與非液化案例 CPT 試驗共 174 組數據，亦利用邏輯迴歸法，以純 CPT 現場試驗數據之無因次化之錐端阻抗 q_{cIN} 值與摩擦比 R_f 為分析參數，建立以 CPT 試驗評估液化機率之本土化模式。並以液化機率 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 為判別式，分別建立理論上及工程實用上兩種抗液化安全係數 F_s 之公式，再以邏輯迴歸法及貝氏定理，分別建立抗液化安全係數 F_s 與液化機率 P_L 之關係式。

8.2 土壤分類之邏輯迴歸分析

8.2.1 土壤分類之邏輯迴歸方法

土壤分類之邏輯迴歸分析，係以 A 類土壤之調查資料及 B 類土壤之調查資料，建立以 m 個解釋參數表示 A 類土壤之可能機率(P_A)函數。因此 A 類土壤之可能機率 $P_A(X)$ 為被給定之已知 m 個解釋參數之函數，可表示如下式所示：

$$P_A(X) = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m)]} \dots\dots\dots (8-1)$$

上式之 $P_A(X)$ 介於 0 與 1 之間，藉著邏輯轉換(Logit Transformation)，將 $P_A(X)$ 轉換為 $-\infty$ 至 ∞ 之單調變化函數 $Q_A(X)$ (Cox, 1970)，如下式所示：

$$Q_A(X) = \log \text{it}[P_A(X)] = \ln \left[\frac{P_A(X)}{1 - P_A(X)} \right] \dots\dots\dots (8-2a)$$

$$= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots\dots + \beta_m x_m \dots\dots\dots (8-2b)$$

式(8-1)、(8-2)中， x_1, x_2, \dots, x_m 為解釋參數，依據 Cox(1970)之意見，以上之解釋參數須符合常態分佈，其為土壤分類特性參數之函數。而 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ 為迴歸係數，必須由可資利用之 A 類土壤之調查資料及 B 類土壤之調查資料，進行邏輯迴歸分析推定之。

本文以 CPT 試驗之摩擦比 R_f 值表示土壤分類之解釋參數。如下式所示:

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} * 100\% \dots\dots\dots(8-3)$$

其中，

R_f : CPT 試驗之摩擦比(Friction ratio),%。

f_s : CPT 試驗之摩擦阻抗(Friction resistance)值，kg/cm²。

q_c : CPT 試驗之錐端阻抗(Tip resistance)值，kg/cm²。

式(8-3) R_f 值經下一節之或然率圖檢定分析，其符合常態分佈。根據式(8-1)

A 類土壤之可能機率 P_A 可表示成式(8-4) 所示。

$$P_A = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_1 \cdot R_f)]} \dots\dots\dots(8-4)$$

以 Y 為指示參數，即 A 類土壤時 Y=1，非 A 類土壤時，即 B 類土壤時 Y=0。根據最大似然性法(Maximum Likelihood)加以推定其似然性函數(Likelihood Function)如下式所示：

$$L(X; \beta) = \prod [P_A(X_i)]^{Y_i} [1 - P_A(X_i)]^{(1-Y_i)} \dots\dots\dots(8-5)$$

其似然性函數之對數可推導得

$$\ln[L(X; \beta)] = \sum_{i=1}^n -\ln[1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_1 \cdot (R_f)_i)]] + \sum_{i=1}^{n_1} -[(\beta_0 + \beta_1 \cdot (R_f)_i)] \dots\dots\dots(8-6)$$

式中，n：為 A 類土壤與 B 類土壤之調查資料數。

n_1 ：為 B 類土壤之調查資料數。

吾人可將 $L(X; \beta)$ 對 β 微分並置為零，求出 $\hat{\beta}_i$ ，此時似然性函數往往為極大，然而傳統上往往先將似然性函數取對數，再求其極大值，即

$$\frac{\partial \ln[L(X; \beta)]}{\partial \beta_i} = 0 \dots\dots\dots (8-7)$$

因此迴歸係數 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 之最大似然性推定值，可由下列聯立方程式組來解得：

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\exp[-(\beta_0 + \beta_1 \cdot (R_f)_i)]}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_1 \cdot (R_f)_i)]} - \sum_{i=1}^{n_1} 1 = 0 \dots\dots\dots (8-8a)$$

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_1} = \sum_{i=1}^n \frac{(R_f)_i \cdot \exp[-(\beta_0 + \beta_1 \cdot (R_f)_i)]}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_1 \cdot (R_f)_i)]} - \sum_{i=1}^{n_1} (R_f)_i = 0 \dots\dots\dots (8-8b)$$

由式(8-8)求出 $\hat{\beta}_i$ 之解，此邏輯迴歸模式是否適當，可利用 Horowitz(1982)提議之修正似然性比之指數(Modified Likelihood Ratio Index, MLRI) ρ^2 ，加以判定，其定義如式(8-9)：

$$\rho^2 = 1 - \frac{\ln[(\hat{\beta})] - \frac{(m+1)}{2}}{\ln[L(0)]} \dots\dots\dots (8-9)$$

式中， $\ln[L(\hat{\beta})]$ ：最大似然性函數。

$\ln[L(0)]$ ： $\beta = 0$ 之似然性函數。

m ：解釋參數之數目。

理論上 ρ^2 是介於 0 與 1 之間，若 ρ^2 高於 0.4 以上，即表示該邏輯迴歸模式良好。

8.2.2 土壤分類之邏輯迴歸模式

欲建立土壤分類之邏輯迴歸模式，首需檢視土壤分類之解釋參數是否符合常態分佈。本文以台中港 CPT 試驗之土壤分類數據共 111 組，分別以淨砂(SP, SP-SM)、粉土質砂(SM)、粉土(ML)等三種土壤 R_f 資料進行或然率分析，這些資料經或然率圖檢定，其結果如圖 8-1 所示，由圖 8-1 顯示：淨砂、粉土質砂、粉土等三種土壤之 R_f 值於常態或然率圖上皆接近直線，因此 CPT 試驗之 R_f 值符合常態分佈。

本文以 R_f 為土壤分類之解釋參數，分別以淨砂(SP, SP-SM)、粉土質砂(SM)與粉土質砂(SM)、粉土(ML)等二組土壤分類，建立土壤分類之邏輯迴歸模式，其分析結果如下所示：

模式一：淨砂、粉土質砂之土壤分類邏輯迴歸模式

經台中港 CPT 試驗之土壤分類分析得淨砂之資料 24 組、粉土質砂之資料 61 組，進行推定分析，得土壤分類邏輯迴歸模式如圖 8-2 及式 (8-10)：

$$P_{SP} = \frac{1}{1 + \exp[-(7.54 - 16.89 \cdot R_f)]} \dots\dots\dots(8-10)$$

其修正之似然性指數 $\rho_1^2 = 0.6783$

以上述 $P_{SP} = 0.5$ 為判別式，分析得 $R_f = 0.45\%$ ，因此淨砂與粉土質砂之判別分界為 $R_f = 0.45\%$ 。

模式二：粉土質砂、粉土之土壤分類邏輯迴歸模式

經台中港 CPT 試驗之土壤分類分析得粉土質砂之資料 61 組、粉土之資料 26 組，進行推定分析，得土壤分類邏輯迴歸模式如圖 8-2 及式 (8-11)：

$$P_{SM} = \frac{1}{1 + \exp[-(13.49 - 12.85 \cdot R_f)]} \dots\dots\dots(8-11)$$

其修正之似然性指數 $\rho_1^2 = 0.6061$

以上述 $P_{SM} = 0.5$ 為判別式，分析得 $R_f = 1.05\%$ ，因此粉土質砂與粉土之判別分界為 $R_f = 1.05\%$ 。

由於未搜集到粉土質粘土之 CPT 土壤分類資料，因此無法針對粉土與粉土質粘土之土壤分類進行邏輯迴歸分析，本文僅以接近粉土之臨界下限值 $R_f = 2.8\%$ 為粉土與粉土質粘土之判別分界。

由以上土壤分類之綜合分析得知， $0\% < R_f < 1.05\%$ 為淨砂， $0.45\% < R_f < 1.05\%$ 為粉土質砂， $1.05\% < R_f < 2.8\%$ 為粉土。

8.3 液化機率之邏輯迴歸分析

8.3.1 液化機率之邏輯迴歸方法

液化機率之邏輯迴歸分析，係以液化之調查資料及非液化之調查資料，建立以 m 個解釋參數表示液化機率(P_L)之函數。本文以 Robertson & Wride (1998)建議之式(8-12)無因次化之錐端阻抗 q_{c1N} 值表示土層特性之參數，以式(8-13)反復應力比($CSR_{7.5}$)表示地震強度之參數。

$$q_{c1N} = C_N \cdot \frac{q_c}{P_a} = \sqrt{P_a / \sigma'_o} \cdot \frac{q_c}{P_a} \dots\dots\dots(8-12)$$

其中，

q_{c1N} ：修正至有效覆土壓力為 1 atm 之無因次化之錐端阻抗值。

C_N ：有效覆土壓力之修正係數。

q_c ：CPT 試驗之錐端阻抗(Tip resistance)值。

P_a : 1 大氣壓力(1 atm)

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_o} = 0.65 \cdot \gamma_d \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_o}{\sigma'_o} \dots\dots\dots (8-13a)$$

$$CSR_{7.5} = CSR / MSF \dots\dots\dots (8-13b)$$

其中，

CSR：地震強度參數,無因次化之反復應力比。

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

τ_{av} ：地震引致土層之平均剪應力， kg/cm^2 。

a_{max} ：地表最大水平加速度 m/sec^2 。

g ：重力加速度， m/sec^2 。

σ_o ：最初垂直覆土壓力， kg/cm^2 。

σ'_o ：有效覆土壓力， kg/cm^2 。

γ_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 γ_d 之關係式如下：

$$\begin{aligned} \gamma_d &= 1.0 - 0.00765Z, & Z &\leq 9.15 \text{ m} \\ &= 1.174 - 0.0267Z, & 9.15 \text{ m} < Z < 23 \text{ m} \dots\dots\dots (8-14) \end{aligned}$$

根據 Idriss (1999)所建議之地震規模 M_w 與 MSF 之關係式如下：

$$\begin{aligned} MSF &= 37.9(M_w) - 1.81 && \text{for } M_w \geq 5.75 \\ &= 1.625 && \text{for } M_w < 5.75 \dots\dots\dots (8-15) \end{aligned}$$

由於式(8-12)之 q_{c1N} 值及式(8-13)之 $CSR_{7.5}$ 值皆不符合常態分佈，不能成為邏輯迴歸分析之解釋參數，經下一節之或然率圖檢定分析結果， $\sqrt{q_{c1N}}$ 值及 $\ln(CSR_{7.5})$ 值符合常態分佈。因此以 $\sqrt{q_{c1N}}$ 值及 $\ln(CSR_{7.5})$ 值為液化特性之解釋參數。其液化機率 P_L 可表示成式(8-16) 所示。

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_o + \beta_1 \ln(CSR_{7.5}) + \beta_2 \sqrt{q_{c1N}})]} \dots\dots\dots(8-16)$$

式(8-16)迴歸係數 $\beta_o, \beta_1, \beta_2$ 之推定值，可由下列聯立方程式組來解得：

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_o} = \sum_{i=1}^n \frac{\exp[-(\beta_o + \beta_1 \ln(CSR_{7.5})_i + \beta_2 (\sqrt{q_{c1N}})_i)]}{1 + \exp[-(\beta_o + \beta_1 \ln(CSR_{7.5})_i + \beta_2 (\sqrt{q_{c1N}})_i)]} - \sum_{i=1}^{n_1} 1 = 0 \dots\dots(8-17a)$$

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_1} = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(CSR_{7.5})_i \cdot \exp[-(\beta_o + \beta_1 \ln(CSR_{7.5})_i + \beta_2 (\sqrt{q_{c1N}})_i)]}{1 + \exp[-(\beta_o + \beta_1 \ln(CSR_{7.5})_i + \beta_2 (\sqrt{q_{c1N}})_i)]} - \sum_{i=1}^{n_1} \ln(CSR_{7.5})_i = 0 \dots\dots(8-17b)$$

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_2} = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{q_{c1N}})_i \cdot \exp[-(\beta_o + \beta_1 \ln(CSR_{7.5})_i + \beta_2 (\sqrt{q_{c1N}})_i)]}{1 + \exp[-(\beta_o + \beta_1 \ln(CSR_{7.5})_i + \beta_2 (\sqrt{q_{c1N}})_i)]} - \sum_{i=1}^{n_1} (\sqrt{q_{c1N}})_i = 0 \dots\dots(8-17c)$$

由式(8-17)求出 $\hat{\beta}_i$ 之解，此邏輯迴歸模式是否適當，仍以式(8-9)之修正似然性比之指數 ρ^2 ，加以判定。

8.3.2 液化機率之邏輯迴歸模式

欲建立 CPT 評估液化機率邏輯迴歸模式，首需檢視 CPT 資料是否符合常態分佈。本文以 921 地震共 174 組數據，依據第二章土壤分類之邏輯迴歸分析結果分組進行或然率檢定，即分別以淨砂(R_f 0.45%)、粉土質砂(0.45% R_f 1.05%)、粉土(1.05% R_f 2.8%)等三組資料進行或然率分析，這些資料經或然率圖檢定，其結果如圖 8-3 至圖 8-4 所示，由圖 8-3 顯示，CPT 試驗之 $\sqrt{q_{c1N}}$ 值符合常態分佈，由圖

8-4 顯示，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。

因此本文以 $\sqrt{q_{cIN}}$ 及 $\ln(CSR_{7.5})$ 為液化特性之解釋參數，分別以 R_f 0.45%、0.45% R_f 1.05%、1.05% R_f 2.8% 等三種土壤，建立 CPT 評估液化機率之邏輯迴歸模式，其分析結果如下所示：

模式一：淨砂(R_f 0.45%)之液化機率邏輯迴歸模式

經 921 地震現地資料分析得淨砂之液化資料 17 組、非液化資料 20 組，進行推定分析，得液化機率邏輯迴歸模式如圖 8-5 及式(8-18)：

$$P_{L1} = \frac{1}{1 + \exp[-(21.8 + 6.8 \ln(CSR_{7.5}) - 1.36 \sqrt{q_{cIN}})]} \dots\dots\dots(8-18)$$

其修正之似然性指數 $\rho_1^2 = 0.4709$

模式二：粉土質砂(0.45% R_f 1.05%)之液化機率邏輯迴歸模式

經 921 地震現地資料分析得粉土質砂液化資料 30 組、非液化資料 51 組，進行推定分析，得液化機率邏輯迴歸模式如圖 8-6 及式(8-19)：

$$P_{L2} = \frac{1}{1 + \exp[-(19.6 + 6.4 \ln(CSR_{7.5}) - 1.26 \sqrt{q_{cIN}})]} \dots\dots\dots(8-19)$$

其修正之似然指數 $\rho_2^2 = 0.4817$

模式三：粉土(1.05% R_f 2.8%)之液化機率邏輯迴歸模式

經 921 地震現地資料分析得粉土之液化資料 41 組、非液化資料 13 組，進行推定分析，得液化機率邏輯迴歸模式如圖 8-7 及式(8-20)：

$$P_{L3} = \frac{1}{1 + \exp[-(19.6 + 5.9 \ln(CSR_{7.5}) - 1.48 \sqrt{q_{cIN}})]} \dots\dots\dots(8-20)$$

其修正之似然性指數 $\rho_3^2 = 0.5752$

將模式一至三之比較如表 8-1。

表 8-1 液化機率各種迴歸模式之比較

土壤分類	資料數目	邏輯之迴歸式	ρ^2
R_f 0.45%	37	$Q_L = 21.8 + 6.8 \ln(CSR_{7.5}) - 1.36 \sqrt{q_{cIN}}$	0.4709
0.45% R_f 1.05%	81	$Q_L = 19.6 + 6.4 \ln(CSR_{7.5}) - 1.26 \sqrt{q_{cIN}}$	0.4817
1.05% R_f 2.8%	54	$Q_L = 19.6 + 5.9 \ln(CSR_{7.5}) - 1.48 \sqrt{q_{cIN}}$	0.5702

以上之邏輯迴歸模式，不但可直接以 CPT 試驗定量評估土壤液化機率，亦可以液化機率 $P_L=0.5$ 為判別式定性評估土壤液化潛能。因此本文分別將 R_f 0.45%、0.45% R_f 1.05% 與 1.05% R_f 2.8% 之液化邏輯迴歸模式，以液化機率 $P_L=0.5$ 為判別式，對於圖 8-8 互相比較，並進行統計迴歸，以 $CRR_{7.5} = CSR_{7.5}$ ，則抗液化強度 $CRR_{7.5}$ 與 q_{cIN} 之關係如式(8-21)：

$$CRR_{7.5} = \exp[(0.2169 - 0.0760R_f + 0.0658R_f^2) \sqrt{q_{cIN}} - (3.426 - 0.9002R_f + 0.5539R_f^2)] \dots\dots\dots(8-21)$$

理論上，以液化機率 $P_L=0.5$ 為判別式較合理，但工程實務上常以較保守之液化機率為判別式，因此本文亦將將液化機率 $P_L=0.3$ 之判別式，亦對於圖 8-8 互相比較，並進行統計迴歸，則抗液化強度 $CRR_{7.5}^*$ 與 q_{cIN} 之關係如式(8-22)：

$$CRR_{7.5}^* = \exp[(0.2169 - 0.0760R_f + 0.0658R_f^2) \sqrt{q_{cIN}} - (3.5451 - 0.8809R_f + 0.5519R_f^2)] \dots\dots\dots(8-22)$$

上述之式(8-21)、(8-22)僅適用 $0 < R_f < 2.8\%$ ，即淨砂、粉土質砂及

粉土等土壤 由圖 8-8 $P_L=0.5$ $P_L=0.3$ 之判別式皆可發現：在相同之 q_{cIN} ，抗液化強度反復應力比 $CRR_{7.5}$ 之大小分別為： $R_f = 0.45\%$ 最小、 0.45% $R_f = 1.05\%$ 次之、 1.05% $R_f = 2.8\%$ 最大，與實際之土壤情況極為吻合。

以上述 $P_L=0.5$ 為判別式分析液化潛能，其土壤之抗液化強度， $CRR_{7.5}$ ，以式(8-21)計算，地震引致土層之作用強度， $CSR_{7.5}$ ，以式(8-13)計算，其抗液化之安全係數， F_s ，如下所示：

$$F_s = CRR_{7.5} / CSR_{7.5} \dots\dots\dots(8-23)$$

以較保守之 $P_L=0.3$ 為判別式分析液化潛能，其土壤之抗液化強度， $CRR_{7.5}^*$ ，以式(8-22)計算，地震引致土層之作用強度， $CSR_{7.5}$ ，以式(8-13)計算，其抗液化之安全係數， F_s^* ，如下所示：

$$F_s^* = CRR_{7.5}^* / CSR_{7.5} \dots\dots\dots(8-24)$$

8.4 邏輯迴歸模式與傳統相關經驗法之比較

本文之邏輯迴歸模式，不但可直接以 CPT 試驗定量評估土壤液化機率，亦可以液化機率 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 為判別式定性評估土壤液化潛能。因此本文以液化機率 $P_L=0.5$ $P_L=0.3$ 為判別式，分別與 Olson(1997)、Robertson & Wride(1997) 簡稱 R & W(1997)及修正之 Seed 法相互比較，以探討其差異性。比較結果如圖 8-9 至圖 8-11 所示。其中修正之 Seed 法，由 Youd & Idriss(1997) 以邏輯迴歸模式修正 Seed et al.(1985)之 SPT-N 法，本文再以港研所(1984) q_c 與 N 相關性之研究成果，即淨砂以 $(q_c/N)=4$ 、粉土質砂以 $(q_c/N)=3.7$ 、粉土質砂以 $(q_c/N)=3$ ，轉換為修正之 Seed CPT- q_c 法。

由圖 8-9 至圖 8-11 之比較可發現：於淨砂、粉土質砂及粉土等三種土壤之情況，於 $q_{cIN} \leq 70$ 附近時，本文 $P_L=0.3$ 模式之抗液化強度，皆相當接近於修正之 Seed CPT- q_c 法之相關經驗曲線；於淨砂及粉土質砂土壤時，本文 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 模式之抗液化強度大於 Olson(1997)、R & W

(1997) 之相關經驗曲線許多；於粉土土壤時，本文之 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 模式，與 Olson(1997)、R & W (1998) 之相關經驗曲線則相差甚多。

整體而言：本文 $P_L=0.5$ 之邏輯判別式，為理論上液化與非液化之分界線；本文 $P_L=0.3$ 之邏輯判別式及修正之 Seed CPT- q_c 法，介於為理論分界線與液化臨界下限；而 Olson(1997)、R & W (1997) 法，為液化臨界下限之經驗判斷分析法，因此 Olson(1997)、R & W (1997) 法最為保守。由賴、謝(1999)、亞新工程顧問公司(2000)、Chu et al.(2000)、Lin et al.(2000) 等，針對 921 地震之台中港、員林、霧峰、南投等地區之液化危險度分析可發現，Olson(1997)、R & W (1997) 等 CPT- q_c 法較保守，而 Youd & Idriss al.(1997)修正 Seed et al.(1985)之 SPT-N 法較適中。

8.5 抗液化安全係數與液化機率之相關性

本文分別以邏輯迴歸模式及貝氏定理，建立抗液化安全係數 F_s 與液化機率 P_L 之相關性。

邏輯迴歸模式不但可分析土壤液化機率，亦可以液化機率 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 為判別式，計算土壤抗液化之安全係數， F_s 、 F_s^* 。本文以式(8-18)至式(8-20)之邏輯迴歸模式，計算液化及非液化案例，獲得 174 組(P_L, F_s)及 (P_L^*, 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(8-25)-式(8-26)及圖 8-12 ($R^2=0.82, R^{*2}=0.84$)所示：

$$P_L = \frac{1}{1 + 0.3(F_s)^3 + 0.7(F_s)^7} \dots\dots\dots(8-25)$$

$$P_L^* = \frac{1}{1 + 0.5(F_s^*)^3 + 1.8(F_s^*)^7} \dots\dots\dots(8-26)$$

本文亦以貝氏定理(Juang et al., 1999) 分析土壤液化機率，其分析方法如式(27)所示：

$$P_{LB} = \frac{f_L(F_S)}{f_L(F_S) + f_{NL}(F_S)} \dots\dots\dots(8-27)$$

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。

由圖 8-13 液化案例安全係數 F_S 、 F_S^* 之或然率圖檢定顯示，液化案例之 $\sqrt{F_S}$ 、 $\sqrt{F_S^*}$ 值符合常態分佈，由圖 8-14 非液化案例安全係數 F_S 、 F_S^* 之或然率圖檢定顯示，非液化案例之 F_S 、 F_S^* 值符合對數常態分佈，因此液化案例安全係數之機率密度函數， $f_L(F_S)$ 、 $f_L(F_S^*)$ ，可表示如下式：

$$f_L(F_S) = \frac{1}{0.214 * \sqrt{8\pi * F_S}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{F_S} - 0.793}{0.214} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(8-28)$$

$$f_L(F_S^*) = \frac{1}{0.201 * \sqrt{8\pi * F_S^*}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{F_S^*} - 0.741}{0.201} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(8-29)$$

非液化案例安全係數之機率密度函數， $f_{NL}(F_S)$ 、 $f_{NL}(F_S^*)$ ，可表示如下式:

$$f_{NL}(F_S) = \frac{1}{0.322 * F_S * \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(F_S) - 0.353}{0.322} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(8-30)$$

$$f_{NL}(F_S^*) = \frac{1}{0.322 * F_S^* * \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(F_S^*) - 0.221}{0.322} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(8-31)$$

將式(8-28)-式(8-31)代入式(8-27) 之貝氏定理，分析液化及非液化

案例，獲得 174 組 (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(8-32)-式(8-33)及圖 8-15($R^2=0.98$, $R^{*2}=0.99$)所示：

$$P_{LB} = \frac{1}{1 + (F_S / 0.98)^{5.2}} \dots\dots\dots(8-32)$$

$$P_{LB}^* = \frac{1}{1 + (F_S^* / 0.86)^{5.3}} \dots\dots\dots(8-33)$$

由圖 8-12 及圖 8-15 顯示，以 $P_L=0.5$ 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， $P_L=0.5$ 、 $P_{LB}=0.47$ 。以 $P_L=0.3$ 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， $P_L^*=0.3$ 、 $P_{LB}^*=0.31$ 。

8.6 小結

- 1.由土壤分類之邏輯迴歸分析得知：0% R_f 0.45%為淨砂、0.45% R_f 1.05%為粉土質砂、1.05% R_f 2.8%為粉土。
- 2.本文以 921 地震現場液化與非液化案例 CPT 試驗共 174 組數據，建立以 CPT 評估液化機率之邏輯迴歸模式，不但可定性評估土壤液化潛能，亦可定量評估土壤液化機率，提供工程設計更多之資訊。
- 3.本文所建立之邏輯迴歸模式，是以 CPT 現場試驗數據之錐端阻抗 q_{c1N} 值與摩擦比 R_f 為分析參數，不需其他非 CPT 試驗之數據，並以簡易之相關式表示，在液化分析上甚為方便。
- 4.本文不但以液化機率 $PL=0.5$ 為判別式，建立理論上之抗液化強度 $CRR_{7.5}$ 與 q_{c1N} 之關係式，即式(8-21)；亦以較保守之液化機率 $PL=0.3$ 為判別式，建立適用於工程上之抗液化強度 $CRR_{7.5}$ 與 q_{c1N} 之關係式，即式(8-22)。提供液化分析上更多之資訊。

5. 本文邏輯迴歸模式與傳統相關經驗法之比較可發現：於淨砂、粉土質砂及粉土等三種土壤之情況，於 $q_{c1N} \leq 70$ 附近時，本文 PL=0.3 模式之抗液化強度，皆相當接近於修正之 Seed CPT- qc 法之相關經驗曲線；於淨砂及粉土質砂土壤時，本文 PL=0.5、PL=0.3 模式之抗液化強度大於 Olson(1997)、R & W (1998) 之相關經驗曲線許多；於粉土土壤時，本文之 PL=0.5、PL=0.3 模式，與 Olson(1997)、R & W (1998) 之相關經驗曲線則相差甚多。
6. 本文分別以邏輯迴歸模式及貝氏定理，建立抗液化安全係數與液化機率之關係式，即式(8-25)-式(8-26)及式(8-32)-式(8-33)，其相關性皆甚良好。

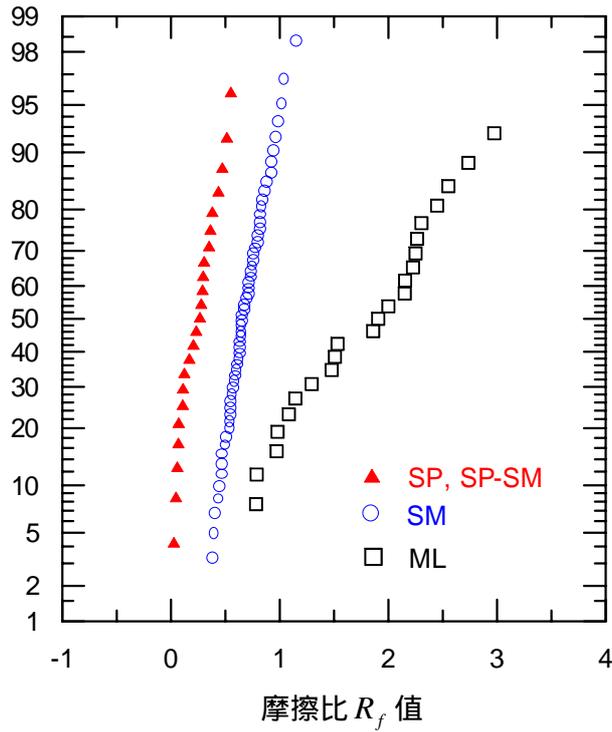


圖 8-1 淨砂、粉土質砂、粉土等三種土壤之 R_f 值繪於常態或然率圖上

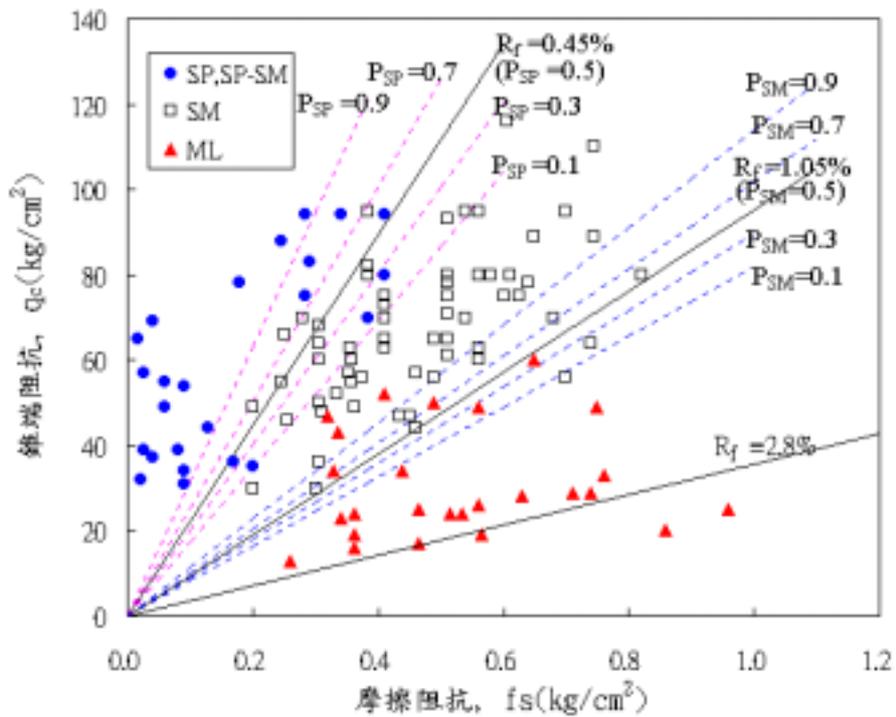


圖 8-2 台中港 CPT 試驗與土壤分類之邏輯迴歸分析結果

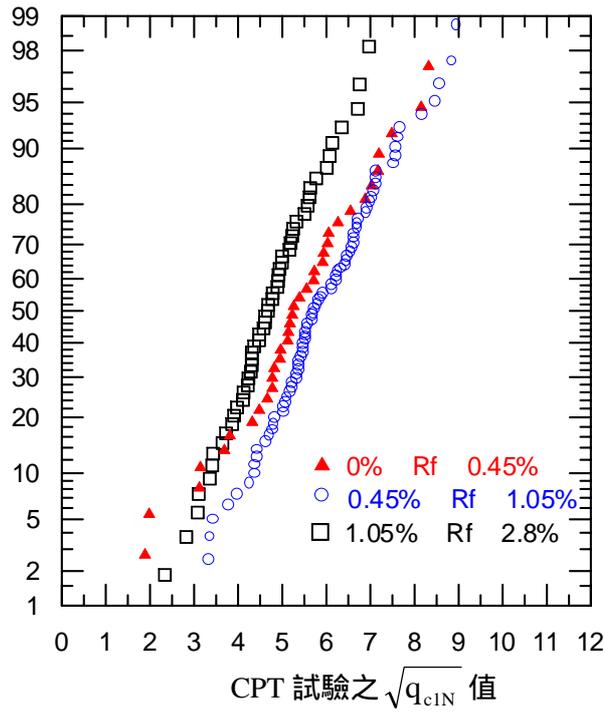


圖 8-3 CPT 試驗之 $\sqrt{q_{c1N}}$ 值繪於常態或然率圖上

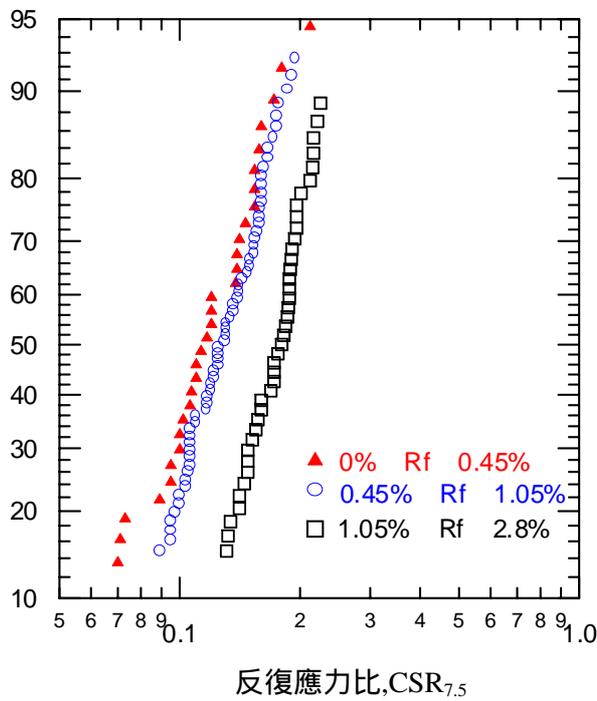


圖 8-4 反復應力比 $CSR_{7.5}$ 繪於對數常態或然率圖上

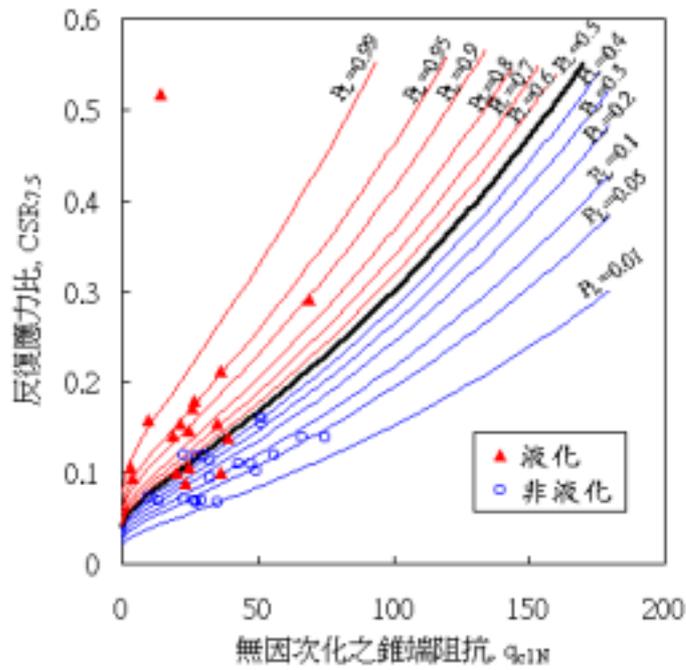


圖 8-5 R_f 0.45% 邏輯模式之液化機率曲線圖

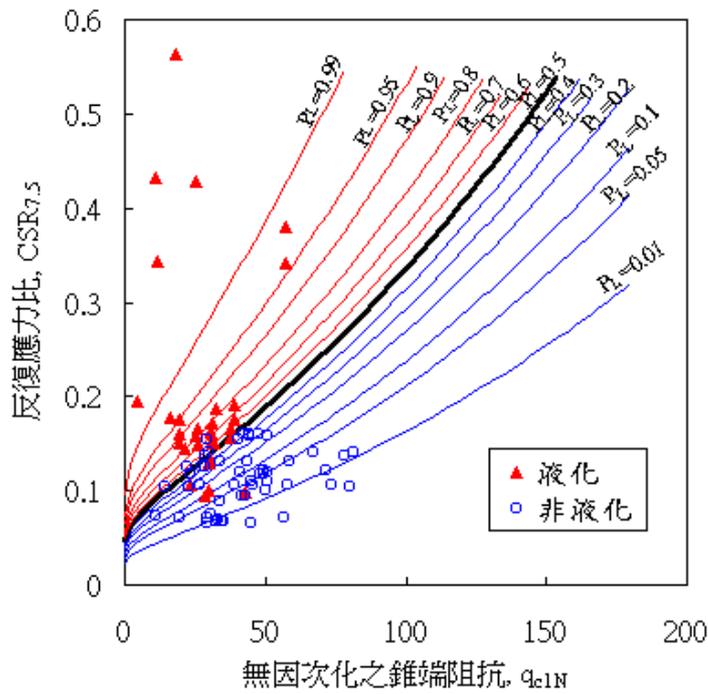


圖 8-6 0.45% R_f 1.05% 邏輯模式之液化機率曲線圖

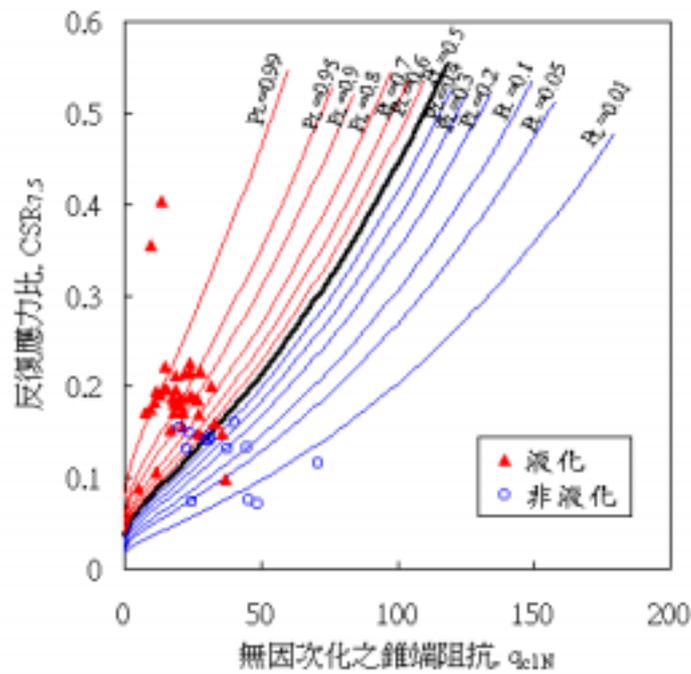


圖 8-7 1.05% R_f 2.8% 邏輯模式之液化機率曲線圖

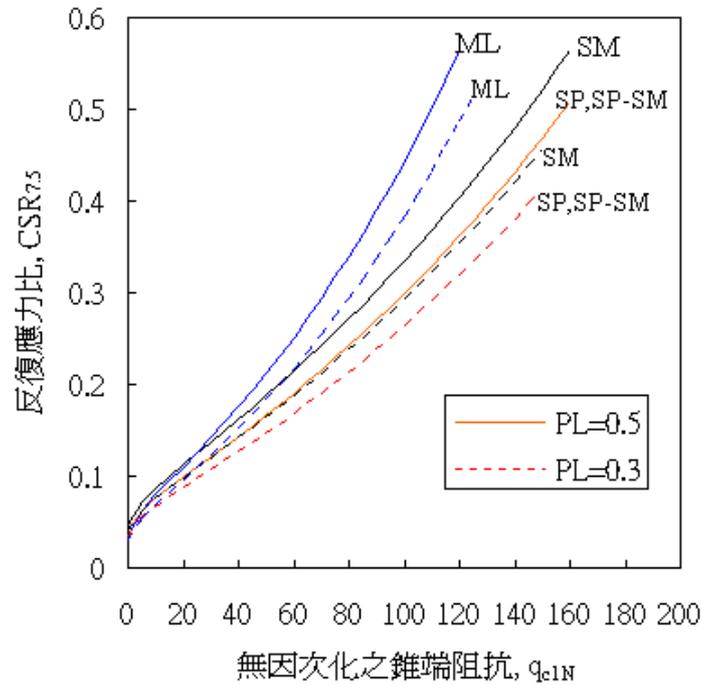


圖 8-8 淨砂、粉土質砂、粉土等土壤以 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 為液化判別式之比較

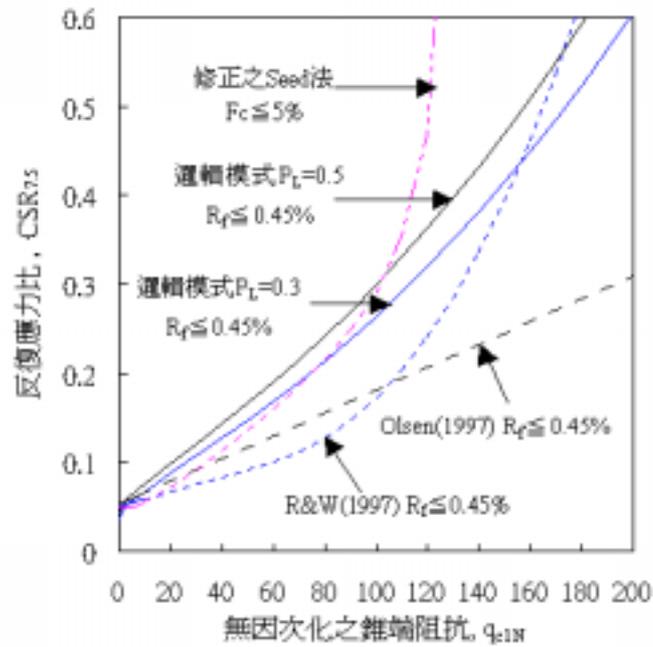


圖 8-9 淨砂液化邏輯模式 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 與 Olsen(1997)、R&W(1997)及修正之 Seed 等方法之比較

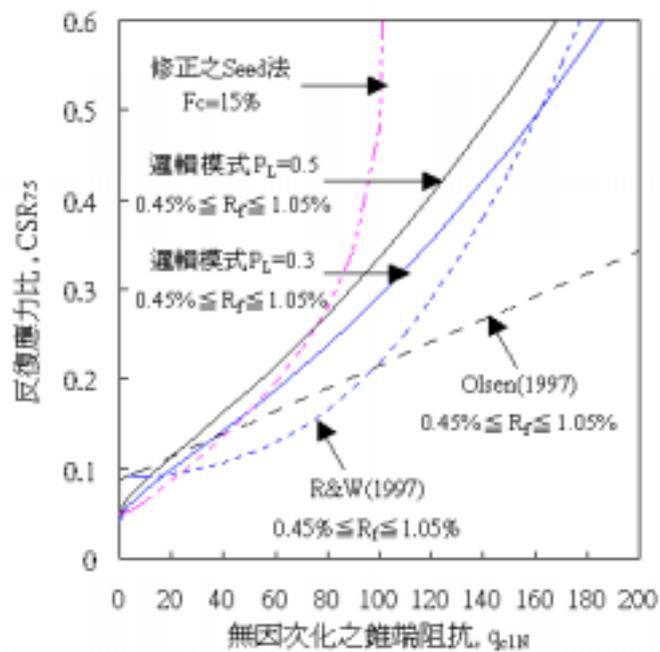


圖 8-10 粉土質砂液化邏輯模式 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 與 Olsen(1997)、R&W(1997)及修正之 Seed 等方法之比較

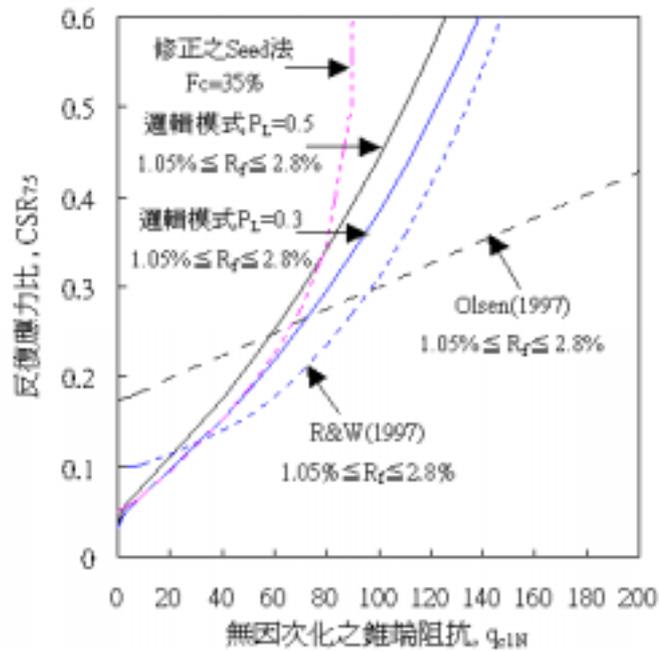


圖 8-11 粉土液化邏輯模式 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 與 Olsen(1997)、R&W(1997)及修正之 Seed 等方法之比較

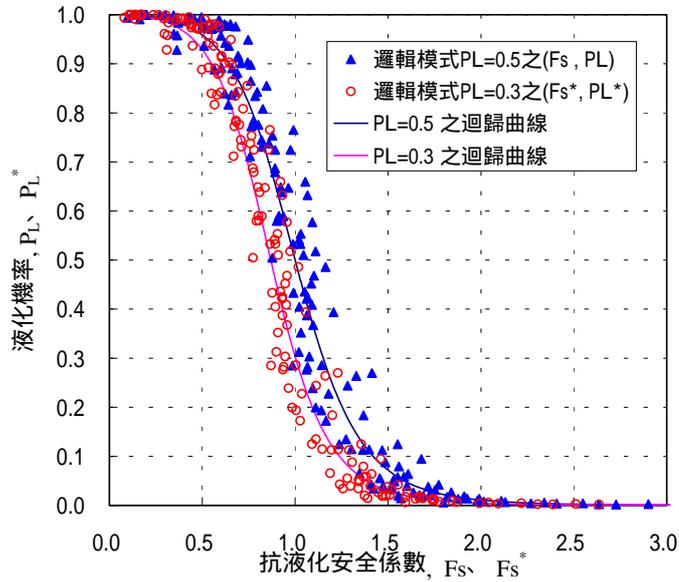
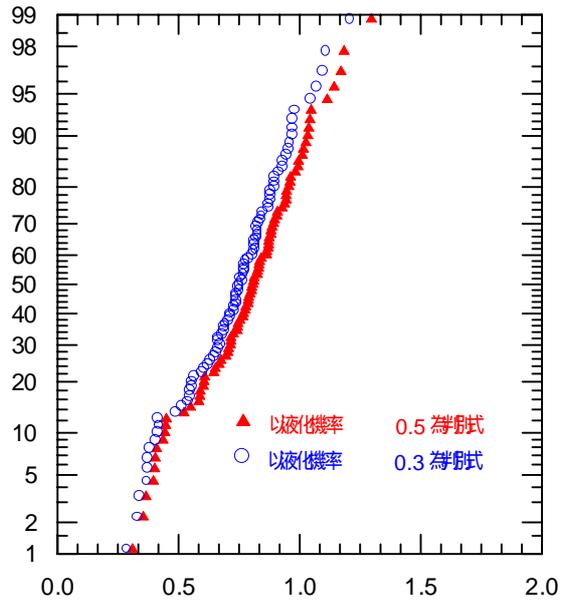
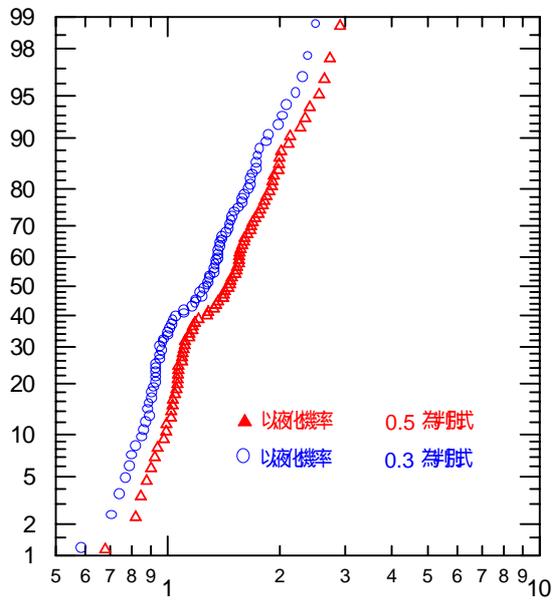


圖 8-12 邏輯模式 $P_L=0.5$ 、 $P_L=0.3$ 之抗液化安全係數與液化機率之關係圖



液化案例之 $\sqrt{F_S}$ 、 $\sqrt{F_S^*}$ 值

圖 8-13 液化案例之 $\sqrt{F_S}$ 、 $\sqrt{F_S^*}$ 值繪於常態或然率圖上



非液化案例之 F_S 、 F_S^* 值

圖 8-14 非液化案例之 F_S 、 F_S^* 值繪於對數常態或然率圖上

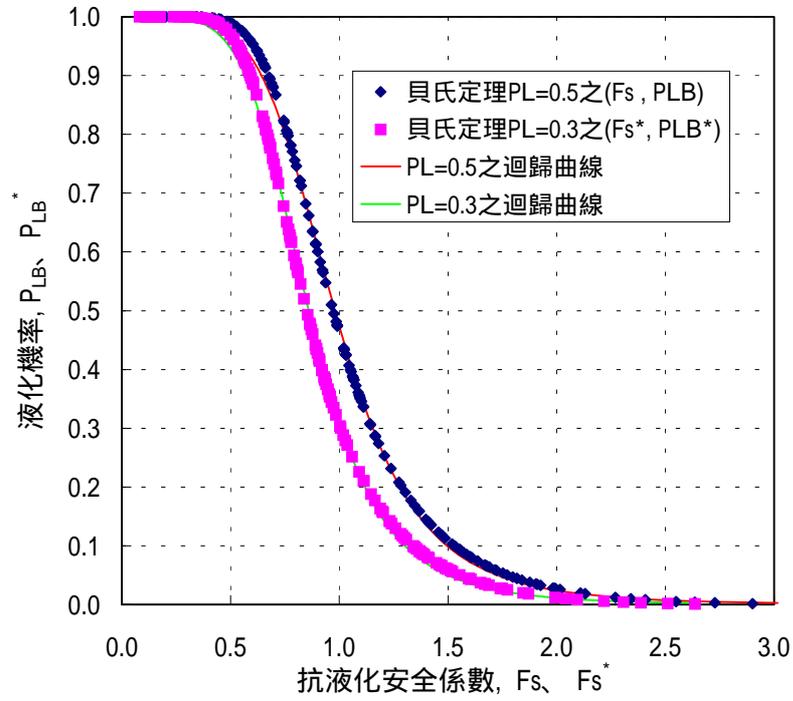


圖 8-15 貝氏定理 $PL=0.5$ 、 $PL=0.3$ 之抗液化安全係數與液化機率之關係圖

第九章 SPT 試驗之本土化液化分析模式

9.1 前言

在地震活動頻繁的區域，以土壤為材料之工程構造物或工址，均須考慮土層液化之可能性，當今世界上工程界著名之土壤液化評估方法，大多是累積許多地震液化案例及大量現場或室內試驗研究成果，並針對工程實務應用發展而成。而現場試驗被發展用來評估液化潛能者：有標準貫入試驗 (SPT)、荷式錐貫入試驗 (CPT)或震測剪力波試驗 V_s 等。其中以標準貫入試驗，為全世界最廣泛使用之現場試驗，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，為目前世界上最充足之 SPT 現場液化與非液化案例數據，以較合理之統計方法，發展出一個以 SPT 評估土壤液化潛能之本土化及全球化分析模式。

以 SPT 評估土壤液化潛能之分析方法，須先建立土壤抗液化強度 X_R 與 SPT-N 值之關係式或關係圖，欲求得 X_R 與 SPT-N 值之關係，有傳統經驗判斷法及統計分類法。由於傳統方法所推導之相關經驗式或相關經驗圖，如 Seed 簡易經驗法 (1971, 1985, 1997 NCEER)、Tokimatsu & Yoshimi 簡易經驗法 (1983)、日本道路橋協會簡易經驗法 (1990, 1996) 等方法，在數據上常顯得較不足，而且推導之方法，亦偏重於經驗判斷，較缺乏統計上的根據。因此，其推導之經驗式或經驗圖較易產生偏差。

欲求得 X_R 與 SPT-N 值之關係，目前之統計方法約有三種：(1) 判別分析法，(2) 邏輯迴歸法，(3) 最小錯誤分類法，由於各種方法皆各具特色及適用性，本文乃根據以上共 592 組，為目前世界上最充足之 SPT

現場液化與非液化案例數據，利用多變數統計之判別分析方法，建立以標準貫入試驗值評估土壤液化潛能之判別模式，及其可能導致誤差判斷之機率。並分別與 Seed et al.(1997 NCEER)、Tokimatsu & Yoshimi (1983)簡易經驗法(簡稱 T&Y 法)等方法所提出之相關經驗曲線相互比較。以利工程師進行工程規劃、設計之參考。

9.2 判別分析

判別分析(discriminant analysis)是多變數統計分析之一個步驟，即將一群現地調查資料區分為兩個種類；就本文來講，是將地震區液化與非液化之 SPT 資料，加以統計分析求得適當之判別式區分液化與非液化兩個種類，以便能由工址之現地調查資料，評估工址之液化潛能，及其可能導致誤差判斷之機率。

依據 Christian & Swiger(1975)及賴聖耀(1990)之建議，進行判別分析之現地調查資料須符合三項假設，即：

- 1.全部現地調查資料皆為隨機調查所得。
- 2.判別分析之參數須符合常態分佈。
- 3.現地調查資料兩種個別種類之變異性(variances)及相關性(correlation)須與全部調查資料之變異性、相關性相同。

若地震區液化與非液化之現地貫入試驗資料，符合上述三項假設，則其液化潛能之判別式，依 Christian & Swiger(1975)之意見，可表示如下式：

$$V = \left[X - \frac{1}{2}(\bar{X}_\ell + \bar{X}_{n\ell}) \right]^T S^{-1}(\bar{X}_\ell - \bar{X}_{n\ell}) \dots\dots\dots(9-1)$$

式中

V ：判別參數； $V \geq 0$ 表示非液化， $V < 0$ 表示液化。

X ：液化解釋參數之向量

\bar{X}_ℓ ：現地調查資料中，液化部分解釋參數平均值之向量，其中下標 ℓ 符號表示液化。

$\bar{X}_{n\ell}$ ：現地調查資料中，非液化部分解釋參數平均值之向量，其中下標 $n\ell$ 符號表示非液化。

S^{-1} ：全部調查資料變異性矩陣 S 之反矩陣。

由式(9-1)之判別分析，僅能尋找一條液化與非液化之理論分界曲線，本文以應用更廣泛之新的判別式(賴, 1990)進行判別分析，新的判別式為式(9-1)結合誤差機率函數(function of probability of misclassification) $C(P)$ ，如式(9-2)所示，依此新的判別式可尋找數條液化與非液化之分界曲線，再依工程之重要程度，選擇較合理誤差機率函數之理想分界曲線。

$$V_p = \left[X - \frac{1}{2}(\bar{X}_\ell + \bar{X}_{n\ell}) \right]^T S^{-1} (\bar{X}_\ell - \bar{X}_{n\ell}) - C(P) \dots\dots\dots(9-2)$$

式中

V_p ：判別參數； $V_p \geq 0$ 表示非液化， $V_p < 0$ 表示液化，其中下標 P 符號表示誤差機率。

P ：誤差機率(probability of misclassification)

$C(P)$ ：誤差機率函數

式(9-1)及式(9-2)之液化解釋參數，包括地震強度解釋參數 SR ，及土壤抗液化強度之解釋參數 XR ，因此液化解釋參數之向量 X 可以下式表示：

$$X = \begin{Bmatrix} SR \\ XR \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(9-3)$$

現地調查資料中，液化部分解釋參數平均值 \bar{X}_ℓ 之向量可表示成下

式：

$$\bar{X}_l = \left\{ \begin{array}{l} \overline{SR}_l \\ \overline{XR}_l \end{array} \right\} \dots\dots\dots(9-4)$$

式中

\overline{SR}_l ：液化部分地震強度解釋參數 SR_l 之平均值。

\overline{XR}_l ：液化部分土壤抗液化強度解釋參數 XR_l 之平均值。

而現地調查資料中，非液化部分解釋參數平均值 X_{nl} 之向量亦可表示成下式：

$$\bar{X}_{nl} = \left\{ \begin{array}{l} \overline{SR}_{nl} \\ \overline{XR}_{nl} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (9-5)$$

式中

\overline{SR}_{nl} ：非液化部分地震強度解釋參數 SR_{nl} 之平均值

\overline{XR}_{nl} ：非液化部分土壤抗液化強度解釋參數 XR_{nl} 之平均值

全部調查資料變異性矩陣 S 如下式所示：

$$S = \begin{bmatrix} \text{Var}(SR) & \text{Cov}(SR, XR) \\ \text{Cov}(SR, XR) & \text{Var}(XR) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9-6)$$

式中

$\text{Var}(SR)$ ：地震強度解釋參數 SR 之變異數

$\text{Var}(XR)$ ：土壤抗液化強度解釋參數 XR 之變異數

$\text{Cov}(SR, XR)$ ： SR 與 XR 之協方差(covariance)

判別分析之判別式，除受液化解釋參數之影響，亦受誤差機率函數 $C(P)$ 之影響，而誤差機率 P ，並不是工址之液化機率，而是表示預測工址為非液化，事實上工址發生了液化之機率，亦即以該判別式區

分液化與非液化有或然率 P 之可能誤差，其誤差機率之參數 α 如下式所示：

$$\alpha = (\bar{X}_\ell - \bar{X}_{nl})^T S^{-1} (\bar{X}_\ell - \bar{X}_{nl}) \dots\dots\dots (9-7)$$

而誤差機率函數 $C(P)$ 為誤差機率 P 及誤差機率參數 α 之函數，如下式所示：

$$C(P) = \sqrt{2\alpha} \operatorname{erf}^{-1}(1 - 2P) - \frac{\alpha}{2} \dots\dots\dots (9-8)$$

式中

erf^{-1} ：為誤差函數 erf 之反函數

erf ：為誤差函數，其定義為：

$$\operatorname{erf}(Y) = \int_0^Y \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-X^2) dX \dots\dots\dots (9-9)$$

由以上之判別分析，可將現地之調查資料，加以統計分析，獲得適當之判別式 V_p ，其為地震強度解釋參數 SR 、土壤液化強度解釋參數 XR 及誤差機率函數 $C(P)$ 之函數，可表示成 $V_p = f[SR, XR, C(P)]$ ，以預測工址屬於液化或非液化，並說明該判別式可能導致誤差判斷之機率。

9.3 SPT 評估土壤液化潛能之參數

震災地區之 SPT 現場數據包括土壤抗液化之強度及地震引致土層之作用強度。地震引致土層的作用強度參數，以無因次之反復應力比 τ_{av}/σ'_o 表示，根據 Seed et al. (1985) 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 τ_{av} ，與砂土之有效覆土壓力 σ'_o 之比值，並修正至地震規模 $M_w=7.5$ 以 $CSR_{7.5}$ 表示，其計算式如下所示：

$$CSR_{7.5} = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_o} = 0.65 \cdot \frac{\gamma d}{MSF} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_o}{\sigma'_o} \dots\dots\dots (9-10)$$

其中，

CSR_{7.5}: 修正至地震規模 Mw=7.5 之反復應力比。

τ_{av} : 地震引致土層之平均剪應力，kg/cm²。

a_{max} : 地表最大水平加速度 m/sec²。

g : 重力加速度，m/sec²。

σ_o : 最初垂直覆土壓力，kg/cm²。

σ'_o : 有效覆土壓力，kg/cm²。

γ_d : 應力折減因數。

γ_m : 地震規模影響因素。

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 γ_d 之關係式如下：

$$\begin{aligned} \gamma_d &= 1.0 - 0.00765Z, & Z &\leq 9.15 \text{ m} \\ &= 1.174 - 0.0267Z, & 9.15 \text{ m} < Z < 23 \text{ m} \dots\dots\dots (9-11) \end{aligned}$$

根據 Idriss (1999)所建議之地震規模 Mw 與 MSF 之關係式如下：

$$\begin{aligned} \text{MSF} &= 37.9(\text{Mw})^{-1.81} & \text{for Mw} &\geq 5.75 \\ &= 1.625 & \text{for Mw} < 5.75 \dots\dots\dots (9-12) \end{aligned}$$

而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(N₁)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,(N₁)₆₀ 值應為：

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_n \cdot N \dots\dots\dots (9-13)$$

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，
 $C_n = \sqrt{1/\sigma'_o}$ ， σ'_o 為有效覆土壓力,kg/cm²。

N ：標準貫入試驗值。

本文之 921 地震液化與非液化案例 288 組資料之落錘能量比 (Energy Ratio)，乃參考亞新工程顧問公司(2000)於員林地區施作落錘能量檢測之結果，其經驗公式如下所示：

$$ER=30*(Z/11)+50 \quad \text{for } Z \leq 11\text{m} \quad \dots\dots\dots (9-14)$$

$$ER=80 \quad \text{for } Z > 11\text{m} \quad \dots\dots\dots (9-15)$$

3.4 SPT 評估液化潛能之判別模式

欲建立 SPT 評估液化潛能之判別式，首需檢視 SPT 資料是否符合判別分析之三項假設，本文以世界各震災區共 592 組資料進行檢定分析，由於本文所蒐集之 SPT 資料為世界各地震區之調查結果，因此假設其屬於隨機資料，而液化參數之變異性、相關性及機率分佈之檢定，說明如下：

本文分別以 $0\% \leq FC \leq 10\%$ 、 $10\% \leq FC \leq 20\%$ 、 $20\% \leq FC \leq 30\%$ 與、 $30\% \leq FC \leq 40\%$ 等四組資料進行或然率圖檢定及統計分析，這些資料經或然率圖檢定，其結果如圖 3-1 至圖 3-8 所示，由圖 3-1 至圖 3-8 顯示：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，根據第二節之判別分析，可得液化潛能之判別式，如式(9-16)所示：

$$V_p = \left[\begin{array}{c} \left\{ \begin{array}{c} \sqrt{(N_1)_{60}} \\ \ln(CSR_{7.5}) \end{array} \right\} - \frac{1}{2} \left\{ \begin{array}{c} \sqrt{(N_1)_{60}} \\ \ln(CSR_{7.5}) \end{array} \right\}_{liq} + \left\{ \begin{array}{c} \sqrt{(N_1)_{60}} \\ \ln(CSR_{7.5}) \end{array} \right\}_{non-liq} \end{array} \right]^T \cdot \left[\begin{array}{cc} \text{Var}(\sqrt{(N_1)_{60}}) & \text{Cov}[\sqrt{(N_1)_{60}}, \ln(CSR_{7.5})] \\ \text{Cov}[\sqrt{(N_1)_{60}}, \ln(CSR_{7.5})] & \text{Var}[\ln(CSR_{7.5})] \end{array} \right]_{liq. \text{ and } non-liq}^{-1} \cdot \left[\begin{array}{c} \left\{ \begin{array}{c} \sqrt{(N_1)_{60}} \\ \ln(CSR_{7.5}) \end{array} \right\}_{liq} - \left\{ \begin{array}{c} \sqrt{(N_1)_{60}} \\ \ln(CSR_{7.5}) \end{array} \right\}_{non-liq} \end{array} \right] - C(P) \quad (9-16)$$

誤差機率參數 α ，如式(3-17)

$$\alpha = \left[\begin{array}{c} \left\{ \begin{array}{c} \sqrt{(N_1)_{60}} \\ \ln(CSR_{7.5}) \end{array} \right\}_{liq} - \left\{ \begin{array}{c} \sqrt{(N_1)_{60}} \\ \ln(CSR_{7.5}) \end{array} \right\}_{non-liq} \end{array} \right]^T \cdot \left[\begin{array}{cc} \text{Var}(\sqrt{(N_1)_{60}}) & \text{Cov}[\sqrt{(N_1)_{60}}, \ln(CSR_{7.5})] \\ \text{Cov}[\sqrt{(N_1)_{60}}, \ln(CSR_{7.5})] & \text{Var}[\ln(CSR_{7.5})] \end{array} \right]_{liq. \text{ and } non-liq}^{-1} \cdot \left[\begin{array}{c} \left\{ \begin{array}{c} \sqrt{(N_1)_{60}} \\ \ln(CSR_{7.5}) \end{array} \right\}_{liq} - \left\{ \begin{array}{c} \sqrt{(N_1)_{60}} \\ \ln(CSR_{7.5}) \end{array} \right\}_{non-liq} \end{array} \right] \quad (9-17)$$

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： $0\% \leq FC \leq 10\%$ 之液化判別模式

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，進行判別分析得判別模式，如下式所示：

$$V_p = 0.9450876\sqrt{(N_1)_{60}} - 2.406358 \ln(CSR_{7.5}) - 7.80260 - C(p) \dots \dots \dots (9-18)$$

其誤差機率參數 $\alpha = 1.917175$

其誤差機率函數 $C(P)$ ，如下式所示：

$$C(P) = 1.95815 \operatorname{erf}^{-1}(1-2P) - 0.958587 \dots \dots \dots (9-19)$$

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：

$$V_p = 1.107534\sqrt{(N_1)_{60}} - 2.245728 \ln(CSR_{7.5}) - 8.116554 - C(p) \dots \dots \dots (9-20)$$

其誤差機率參數 $\alpha = 2.354608$

其誤差機率函數 $C(P)$ ，如下式所示：

$$C(P) = 2.170073 \operatorname{erf}^{-1}(1-2P) - 1.177304 \dots \dots \dots (9-21)$$

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：

$$V_p = 0.8621721\sqrt{(N_1)_{60}} - 1.503677 \ln(CSR_{7.5}) - 5.65012 - C(p) \dots \dots \dots (9-22)$$

其誤差機率參數 $\alpha = 2.171423$

其誤差機率函數 $C(P)$ ，如下式所示：

$$C(P) = 2.08395 \operatorname{erf}^{-1}(1-2P) - 1.08571 \dots \dots \dots (9-23)$$

模式四：30% ≤ FC ≤ 40% 之液化判別模式

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：

$$V_p = 0.8938813 \sqrt{(N_1)_{60}} - 1.403875 \ln(CSR_{7.5}) - 5.443882 - C(p) \dots\dots\dots (9-24)$$

其誤差機率參數 $\alpha = 2.078286$

其誤差機率函數 $C(P)$ ，如下式所示：

$$C(P) = 2.038767 \operatorname{erf}^{-1}(1-2P) - 1.039143 \dots\dots\dots (9-25)$$

為了使工程界瞭解判別模式之應用，分別將 $0\% \leq FC \leq 10\%$ 、 $10\% \leq FC \leq 20\%$ 、 $20\% \leq FC \leq 30\%$ 與、 $30\% \leq FC \leq 40\%$ 等四組判別模式，繪製於圖 3-9~圖 3-12，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，劃於圖 3-13 互相比較，並進行統計迴歸，以 $CRR_{7.5} = CSR_{7.5}$ ，則抗液化強度 $CRR_{7.5}$ 與 $(N_1)_{60}$ 之關係如下式：

$$CRR_{7.5} = \exp[(0.3865548 + 0.0072398 FC) \sqrt{(N_1)_{60}} - (3.3597395 + 0.0186297 FC - 0.0001093 FC^2)] \dots\dots\dots (9-26)$$

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，亦劃於圖 3-14 互相比較，並進行統計迴歸，則抗液化強度 $CRR_{7.5}^*$ 與 $(N_1)_{60}$ 之關係如式(22)：

$$CRR_{7.5}^* = \exp[(0.3865548 + 0.0072398 FC) \sqrt{(N_1)_{60}} - (3.6762598 - 0.0150227 FC + 0.0020571 FC^2 - 0.0000343 FC^3)] \dots\dots\dots (9-27)$$

由圖 3-13 及圖 3-14 $C(P)=0$ 、 $p=0.15$ 之判別式皆可發現：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： $30\% \leq FC \leq 40\%$ 最大、 $20\% \leq FC \leq 30\%$ 次之、 $10\% \leq FC \leq 20\%$ 再次之、 $0\% \leq FC \leq 10\%$ 最小，與實際之土壤情況極為吻合；但於 $(N_1)_{60} \leq 5$ (以 $C(P)=0$ 為判別式) 及於 $(N_1)_{60} \leq 8$ 時(以 $p=0.15$ 為判別式)，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 $C(P)=0$ 為判別式分析液化潛能，其土壤之抗液化強度， $CRR_{7.5}$ ，以式(9-26)計算，地震引致土層之作用強度 $CSR_{7.5}$ ，以式(9-10)計算，其抗液化之安全係數 F_s ，如下所示：

$$F_s = CRR_{7.5} / CSR_{7.5} \dots\dots\dots (9-28)$$

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 $CRR_{7.5}^*$ ，以式(3-27)計算，地震引致土層之作用強度 $CSR_{7.5}$ ，以式(9-10)計算，其抗液化之安全係數 F_s^* ，如下所示：

$$F_s^* = CRR_{7.5}^* / CSR_{7.5} \dots\dots\dots (9-29)$$

9.5 判別模式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.(1997 NCEER)、T&Y(1983)簡易經驗法等方法較為工程界所接受及使用，由於其相關曲線包括細料含量 FC 之影響，本文以 $FC = 5\%$ 、 $FC = 15\%$ 、 $FC = 25\%$ 、 $FC = 35\%$ 等 Seed et al.(1997 NCEER)、T&Y(1983) 之相關經驗曲線，分別與本文建立之 $C(P)=0$ 、 $p=0.15$ 之判別模式相互比較，比較結果如圖 9-15~圖 9-18 所示。

由圖 9-15 $FC = 5\%$ 淨砂模式之比較可發現：於 $(N_1)_{60} \leq 10$ 時，本文之 $C(P)=0$ 模式與 T&Y(1983)之曲線相當接近，本文之 $p=0.15$ 模式與 Seed et al.(1997 NCEER)之曲線相當接近；於 $10 \leq (N_1)_{60} \leq 20$ 時，本文之 $C(P)=0$ 模式與 Seed et al.(1997 NCEER)之曲線相當接近，於 $20 \leq (N_1)_{60} \leq 30$ 時，本文之 $C(P)=0$ 、 $p=0.15$ 模式，介於 Seed et al.(1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線之間；於 $(N_1)_{60} > 30$ 時，本文模式小於 Seed et al.(1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線甚多。

由圖 9-16 $FC = 15\%$ 粉土質砂模式之比較可發現：於 $(N_1)_{60} \leq 20$ 時，本文之 $C(P)=0$ 模式與 Seed et al.(1997 NCEER)之曲線接近；於 $20 \leq (N_1)_{60} \leq 30$ 時，本文之 $p=0.15$ 模式與 T&Y(1983)之曲線接近；於 $(N_1)_{60} > 30$ 時，本文模式小於 Seed et al.(1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線甚多。

由圖 9-17 $FC = 25\%$ 粉土質砂模式之比較可發現:於 $(N_1)_{60} \leq 11$ 時, 本文之 $C(P)=0$ 、 $p=0.15$ 模式小於 Seed et al.(1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)之曲線; 於 $15 \leq (N_1)_{60} \leq 23$ 時, 本文之 $C(P)=0$ 模式與與 Seed et al.(1997 NCEER)之曲線接近; 於 $16 \leq (N_1)_{60} \leq 30$ 時, 本文之 $p=0.15$ 模式與 T&Y(1983)之曲線接近; 於 $(N_1)_{60} > 30$ 時, 本文模式小於 Seed et al.(1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線甚多。

由圖 9-18 $FC = 35\%$ 粉土質砂模式之比較可發現:除了於 $14 \leq (N_1)_{60} \leq 19$ 時, 本文之 $C(P)=0$ 模式與 Seed et al.(1997 NCEER)曲線相當接近外;其餘 $(N_1)_{60}$ 時, 本文之模式與 Seed et al.(1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線相當甚多。

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)曲線與 T&Y(1983)曲線。於 $10 \leq (N_1)_{60} \leq 30$ 時, 本文之 $C(P)=0$ 模式與 Seed et al.(1997 NCEER)之曲線接近, 本文之 $p=0.15$ 模式與 T&Y(1983)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.(1997 NCEER)曲線與 T&Y(1983)曲線甚多。

9.6 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:

$$P_{LB} = \frac{f_L(F_s)}{f_L(F_s) + f_{NL}(F_s)} \dots\dots\dots (9-30)$$

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(9-26)至式(9-29)之判別模式，計算液化及非液化案例，獲得 F_S 及 F_S^* ，這些資料經或然率圖檢定，其結果如圖 9-19 至圖 9-20 所示，由圖 9-19 液化案例安全係數 F_S 、 F_S^* 之或然率圖檢定顯示，液化案例之 $\sqrt{F_S}$ 、 $\sqrt{F_S^*}$ 值符合常態分佈，由圖 9-20 非液化案例安全係數 F_S 、 F_S^* 之或然率圖檢定顯示，非液化案例之 F_S 、 F_S^* 值符合對數常態分佈，因此液化案例安全係數之機率密度函數， $f_L(F_S)$ 、 $f_L(F_S^*)$ ，可表示如下式：

$$f_L(F_S) = \frac{1}{0.188 * \sqrt{8\pi * F_S}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{F_S} - 0.763}{0.188} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (9-31)$$

$$f_L(F_S^*) = \frac{1}{0.171 * \sqrt{8\pi * F_S^*}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{F_S^*} - 0.678}{0.171} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (9-32)$$

非液化案例安全係數之機率密度函數， $f_{NL}(F_S)$ 、 $f_{NL}(F_S^*)$ ，可表示如下式：

$$f_{NL}(F_S) = \frac{1}{0.511 * F_S * \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(F_S) - 0.485}{0.511} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (9-33)$$

$$f_{NL}(F_S^*) = \frac{1}{0.513 * F_S^* * \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(F_S^*) - 0.260}{0.513} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (9-34)$$

將式(9-31)-式(9-34)代入式(9-30) 之貝氏定理，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(9-35)-式(9-36)及圖 9-21($R^2=0.99$, $R^{*2}=0.99$)所示：

$$P_{LB} = \frac{1}{1 + 0.6(F_S)^3 + 0.4(F_S)^8} \dots\dots\dots (9-35)$$

$$P_{LB}^* = \frac{1}{1 + 1.5(F_S^*)^3 + 1.9(F_S^*)^8} \dots\dots\dots (9-36)$$

由圖 9-21 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， $P_{LB}^* = 0.23$ 。

9.7 判別模式之液化分析流程

根據第 9-4 節抗液化安全係數及 9-6 節液化機率之研究成果，可以將 SPT 試驗評估液化潛能之分析步驟以簡化之數學式表示，其分析之流程圖如圖 9-22 所示。

9.8 小結

1. 本文對於以現地貫入試驗評估液化潛能之研究，提供了進一步之分析方法，本文發展之判別模式，不但有傳統上評估土壤是否可能液化之功能，更進一步指出該判別式可能導致誤差判斷之機率，提供工程設計更多之資訊。
2. 本文不但以誤差機率函數 $C(P)=0$ 為判別式，建立理論上之抗液化強度 $CRR_{7.5}$ 與 $(N_1)_{60}$ 之關係式，即式(9-26)；亦以較保守之誤差機率 $p=0.15$ 為判別式，建立適用於工程上之抗液化強度 $CRR_{7.5}$ 與 $(N_1)_{60}$ 之關係式，即式(9-27)。提供液化分析上更多之資訊。
3. 由本文建立之判別模式可發現：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% 最小，與實際之土壤情況極為吻合；但於 $(N_1)_{60} \leq 5$ (以 $C(P)=0$ 為判別式)、及於 $(N_1)_{60} \leq 8$ 時 (以 $p=0.15$ 為判別式)，其各種土壤之抗液化強度反復應力比 $CRR_{7.5}$ 皆相當接近。
4. 本文所建立之判別模式，與 Seed(1997 NCEER)簡易經驗法、T&Y(1983)簡易經驗法比較，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 $10 \leq (N_1)_{60} \leq 30$ 時，本文之 $C(P) = 0$ 模式與 Seed et al.(1997 NCEER) 之曲線接近，本文之 $p = 0.15$ 模式與 T&Y(1983) 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.(1997 NCEER) 曲線與 T&Y(1983) 曲線甚多。

5. 本文以貝氏定理，分別建立以 $C(P) = 0$ 及 $p = 0.15$ 為判別式之抗液化安全係數與液化機率的關係式，即式(3-35)及式(3-36)，其相關性皆甚良好。

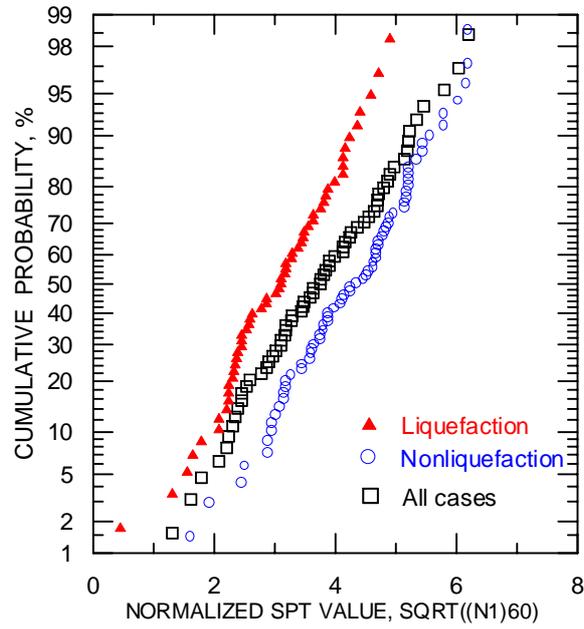


圖 9-1 0% FC 10%之 SPT 試驗 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 值繪於常態或然率圖上

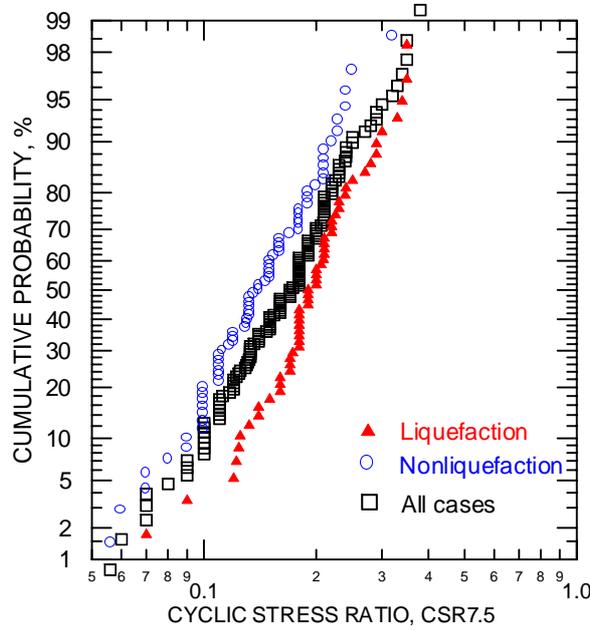


圖 9-2 0% FC 10%之 $CSR_{7.5}$ 值繪於對數常態或然率圖上

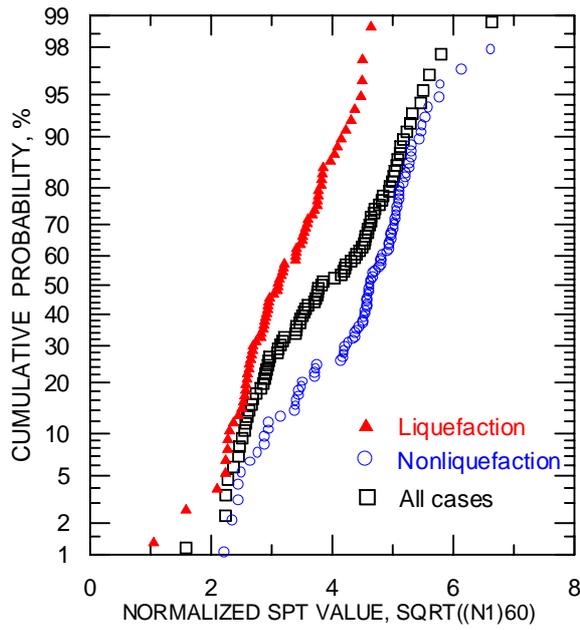


圖 9-3 10% FC 20%之 SPT 試驗 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 值繪於常態或然率圖上

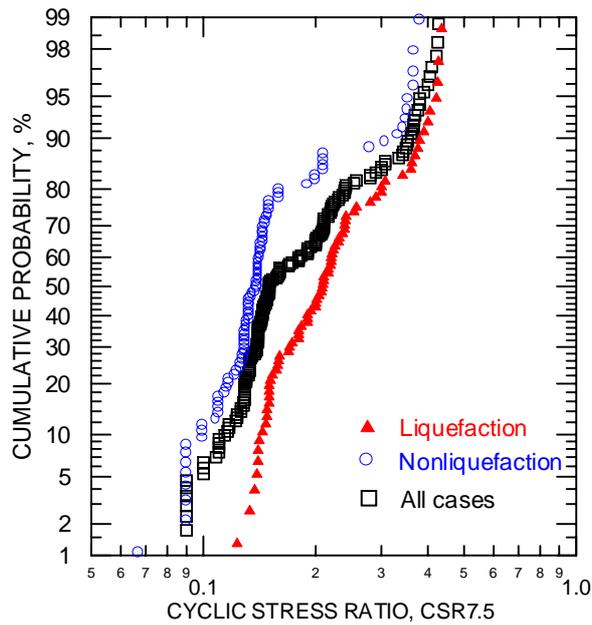


圖 9-4 10% FC 20%之 CSR_{7.5} 值繪於對數常態或然率圖上

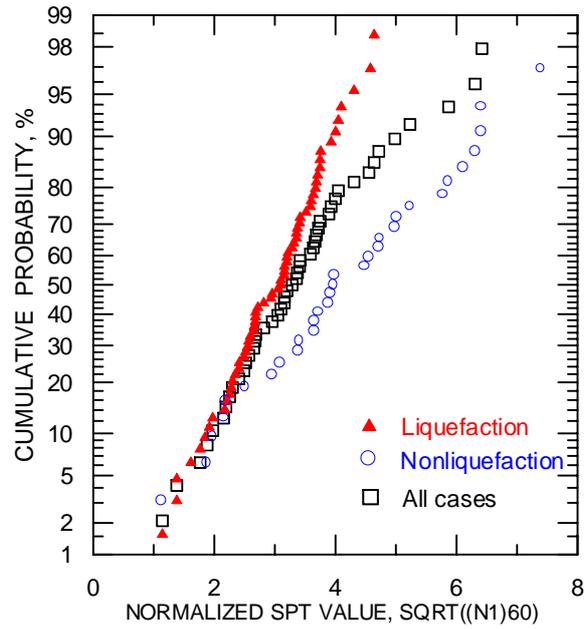


圖 9-5 20% FC 30%之 SPT 試驗 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 值繪於常態或然率圖上

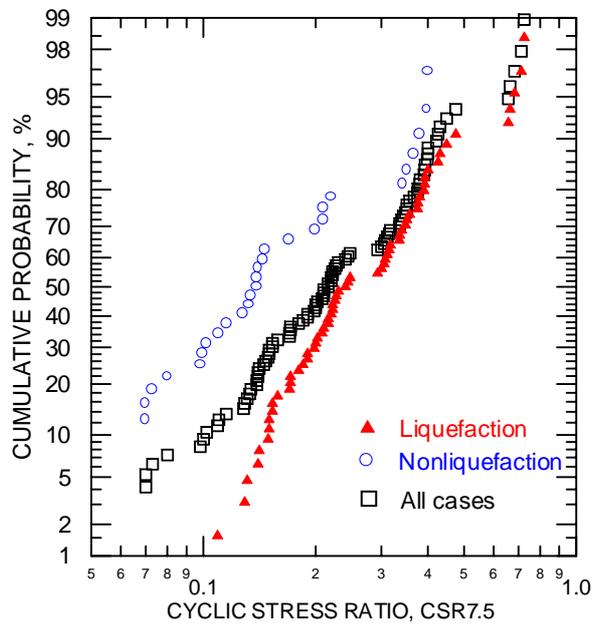


圖 9-6 20% FC 30%之 CSR_{7.5} 值繪於對數常態或然率圖上

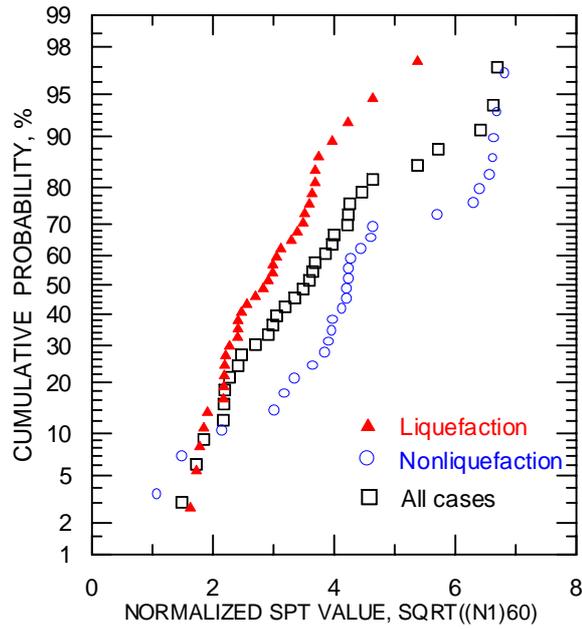


圖 9-7 30% FC 40%之 SPT 試驗 $\sqrt{(N_1)_{60}}$ 值繪於常態或然率圖上

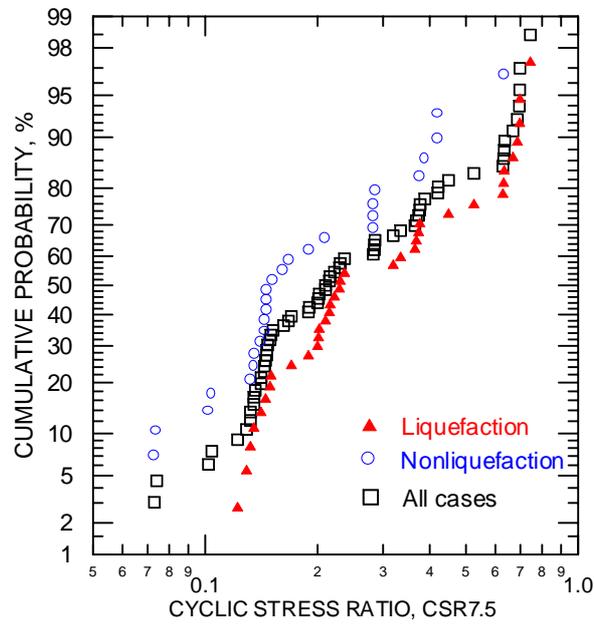


圖 9-8 30% FC 40%之 $CSR_{7.5}$ 值繪於對數常態或然率圖上

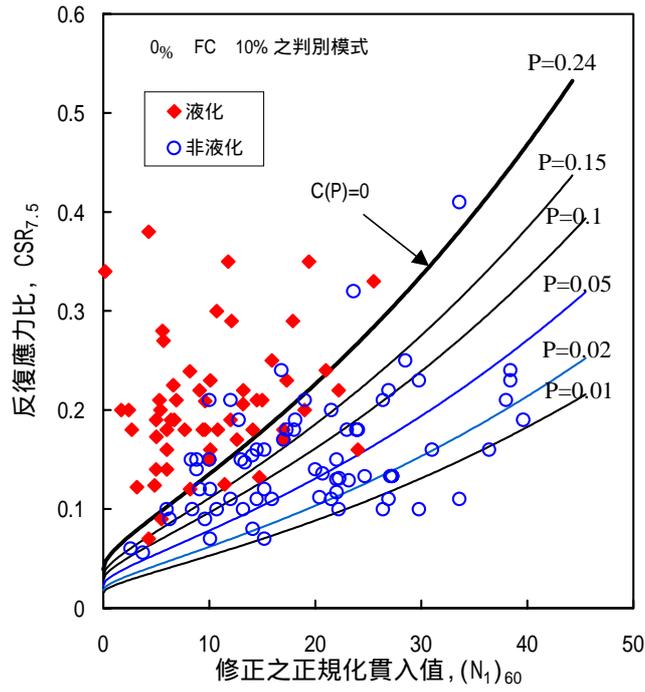


圖 9-9 0% FC 10% 液化判別圖
(58 組液化及 70 組非液化案例)

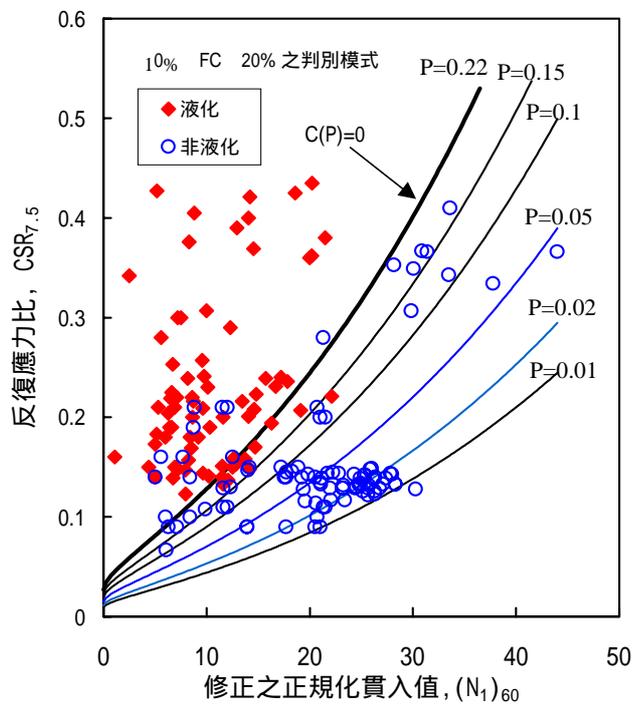


圖 9-10 10% FC 20% 液化判別圖
(77 組液化及 95 組非液化案例)

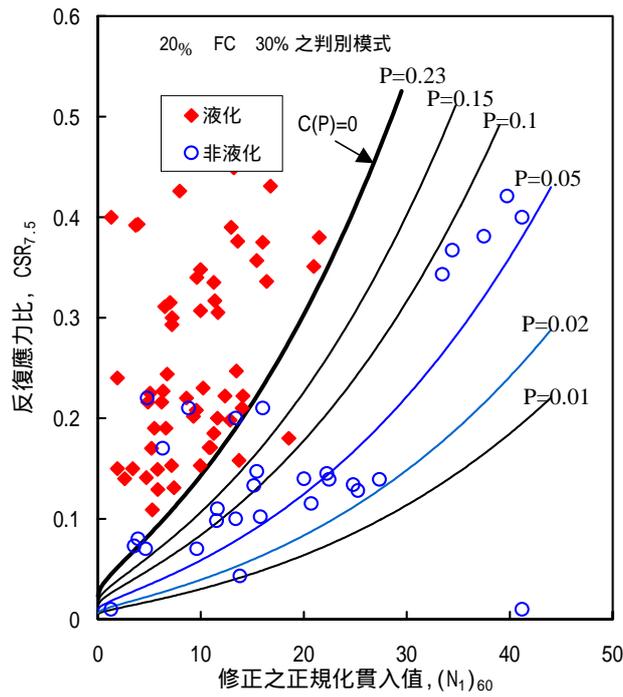


圖 9-11 20% FC 30% 液化判別圖
(64 組液化及 32 組非液化案例)

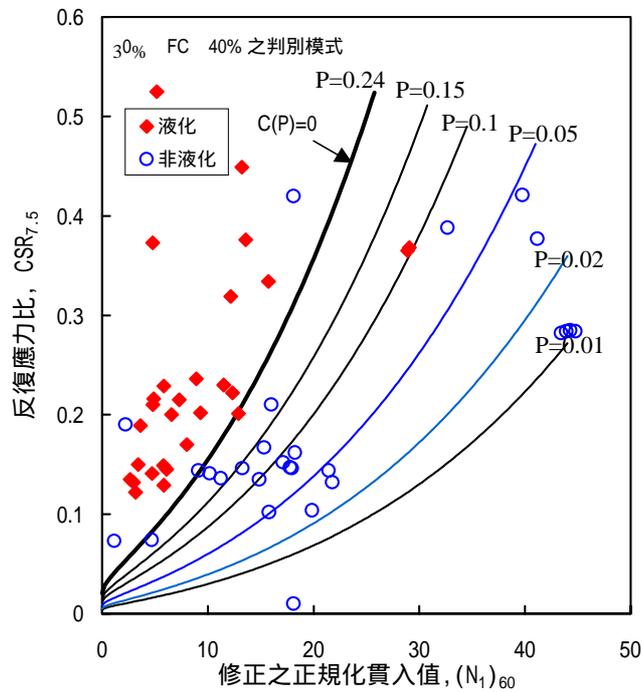


圖 9-12 30% FC 40% 液化判別圖
(37 組液化及 29 組非液化案例)

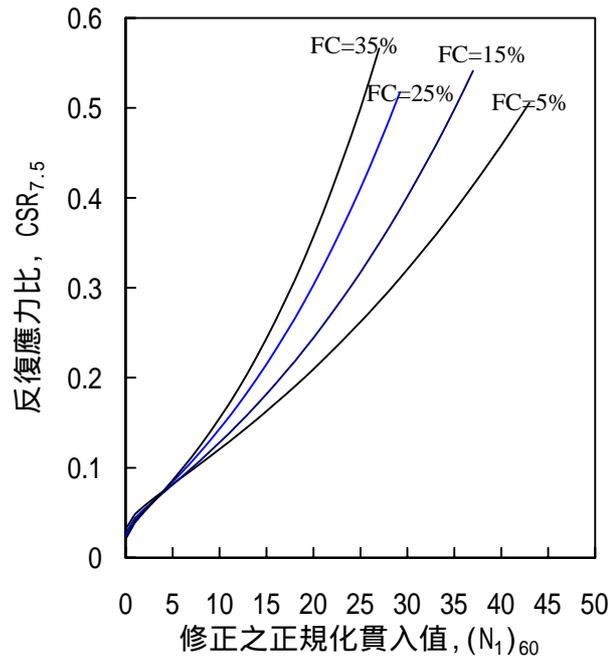


圖 9-13 FC=5%、FC=15%、FC=25%、FC=35%等
液化判別式-C(P)=0 之比較

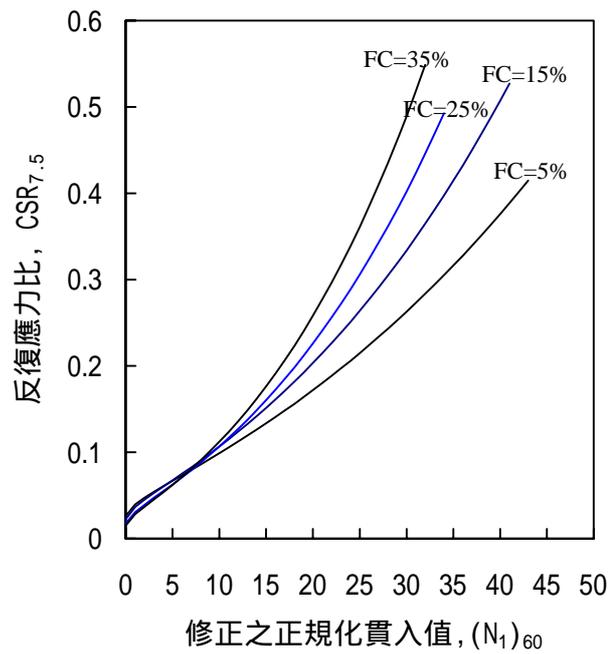


圖 9-14 FC=5%、FC=15%、FC=25%、FC=35%等
液化判別式(P=0.15)之比較

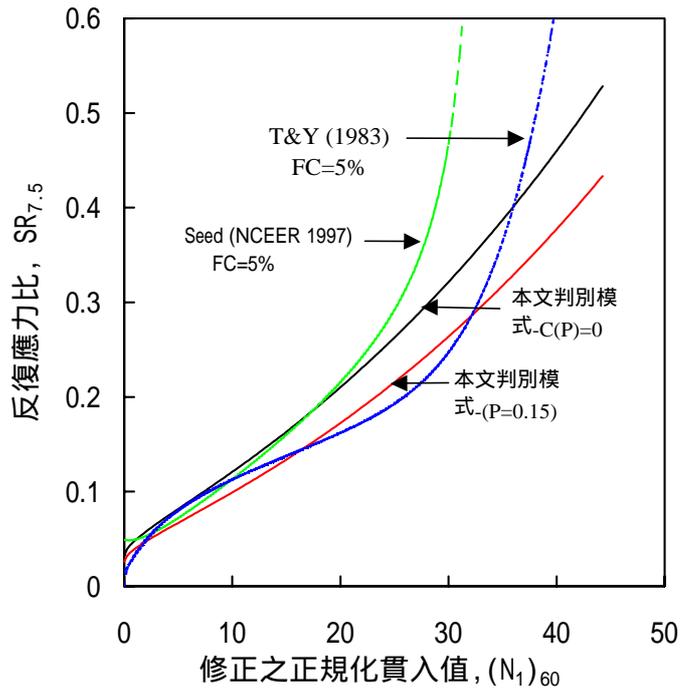


圖 9-15 FC=5%之判别模式與 Seed(NCEER 1997) 及 T&Y(1983) $C_s=85$ 比較

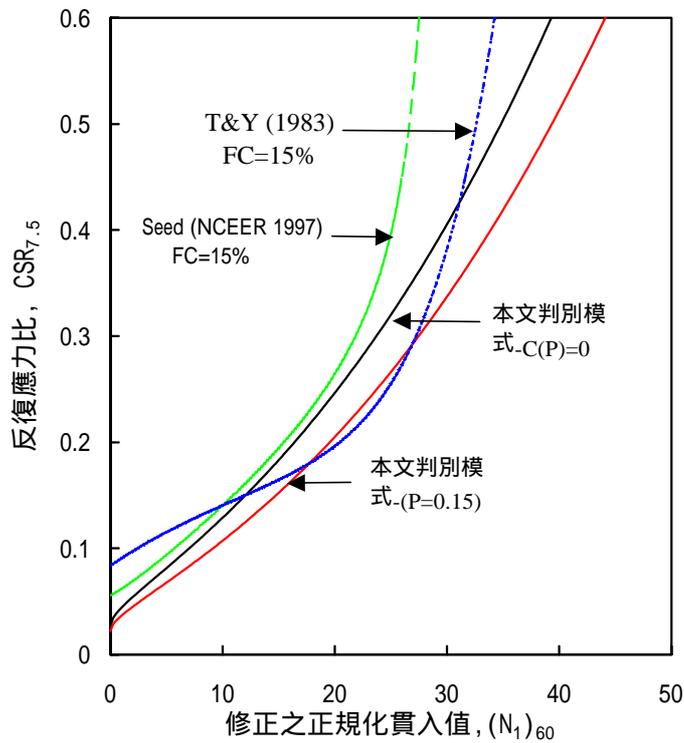


圖 9-16 FC=15%之判别模式與 Seed(NCEER 1997) 及 T&Y(1983) $C_s=85$ 比較

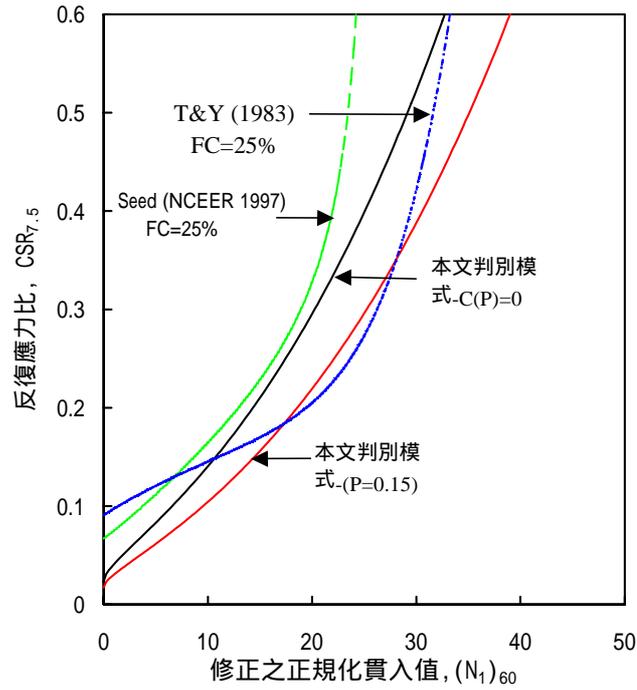


圖 9-17 FC=25%之判別模式與 Seed(NCEER 1997) 及 T&Y(1983) $C_s=85$ 比較

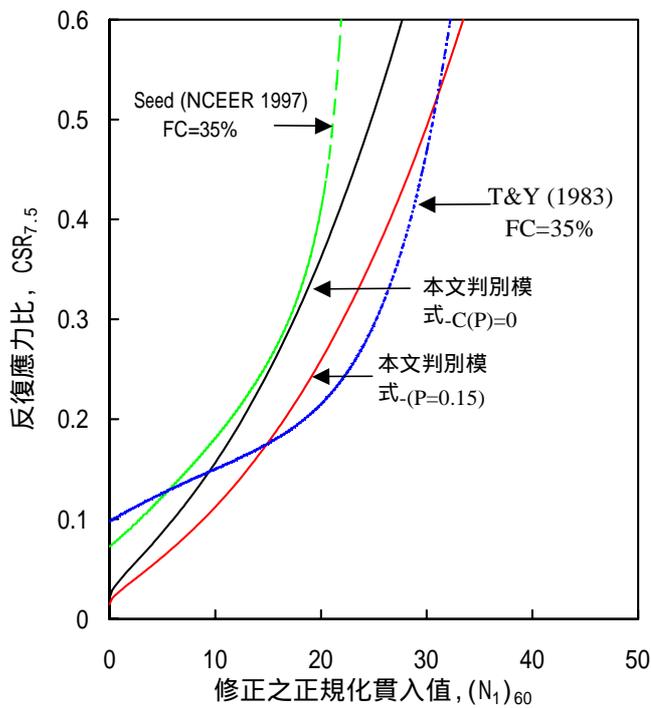


圖 9-18 FC=35%之判別模式與 Seed(NCEER 1997) 及 T&Y(1983) $C_s=85$ 比較

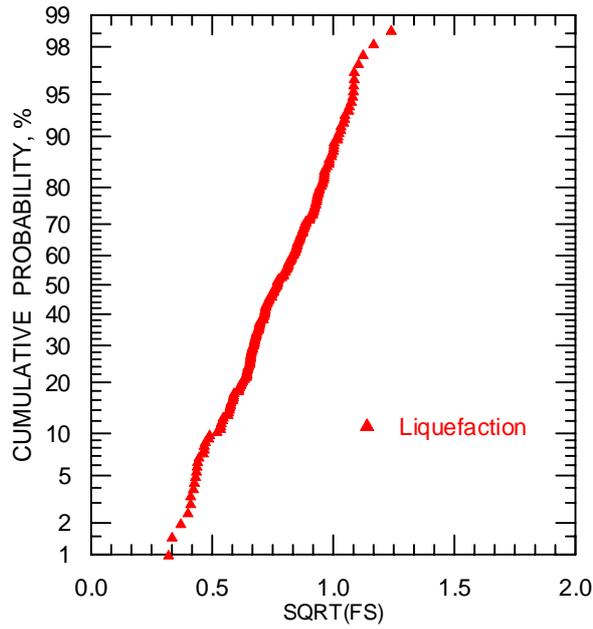


圖 9-19 液化案例之 $\sqrt{F_s}$ 值繪於常態或然率圖上

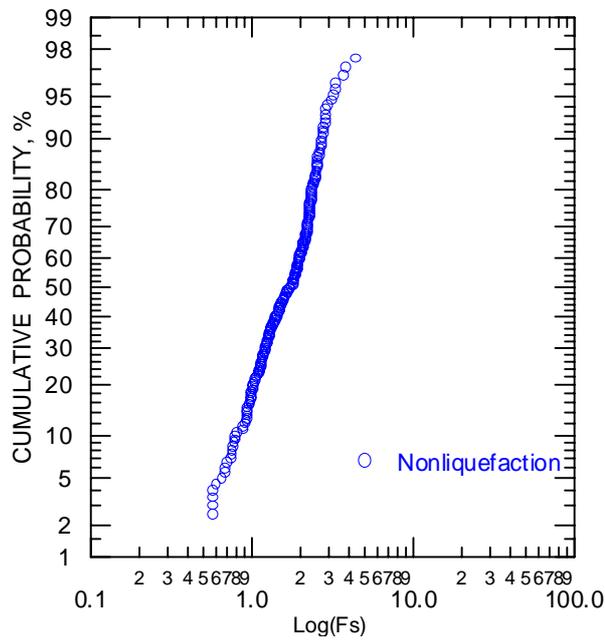


圖 9-20 非液化案例之 F_s 值繪於對數常態或然率圖上

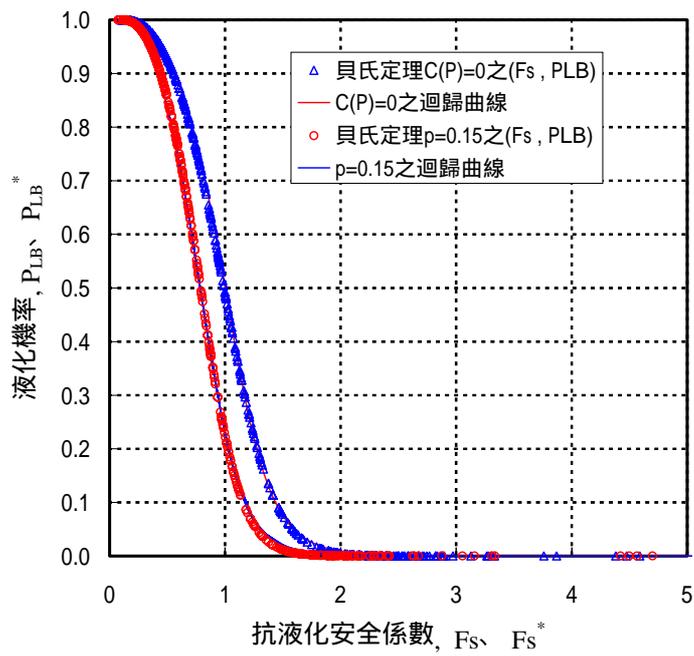


圖 9-21 貝氏定理 $C(P)=0$ 、 $p=0.15$ 之抗液化安全係數與液化機率之關係圖

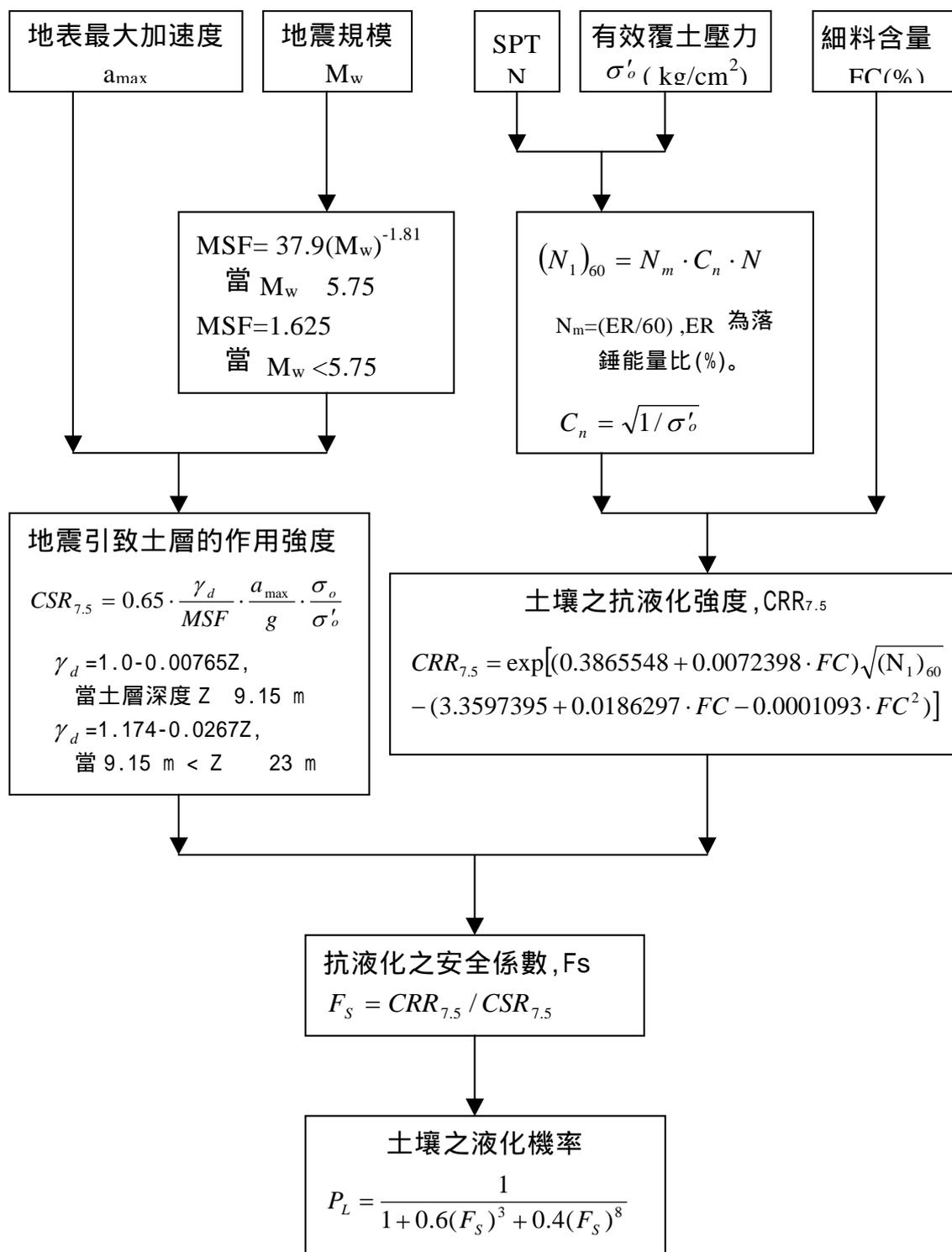


圖 9-22 判別模式之液化分析流程

第十章 布袋港區液化危害度分析

10.1 液化危害度分析方法

本文分別以第九章新建立之本土化液化分析模式，進行布袋港區液化潛能評估。

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、及賴聖耀、謝明志 (1996) 液化機率深度加權法，分別分析布袋港區各種模擬地震之液化危害度。茲將此兩種深度加權法略述如下。

10.1.1 安全係數危害度分析

若鑽孔液化分析結果是以安全係數來表示，本研究採用Iwasaki之深度加權法加以評估液化危害度，Iwasaki等人(1982)考慮深度的影響，提出一評估液化潛能之深度加權法，建議以液化潛能指數 (Liquefaction Potential Index) IL表示任一鑽孔之液化危險程度。

$$IL = \int_0^H F(z) \cdot W(z) dz \dots\dots\dots (10-1)$$

其中

IL 為液化潛能指數，介於 0~100 之間

$$F(Z)=1-F_L(Z) \quad \text{for } F_L(Z)<1.0$$

$$F(Z)=0 \quad \text{for } F_L(Z)>1.0$$

$$W(Z)=10-0.5Z$$

Z：距地表之深度，單位 m

H：鑽孔深度

Iwasaki等人(1982) 依此分析過去6次地震中，64個液化區域和23個非液化區域的資料，綜合整理後，提出下列指標：

- (1) IL 15 高度液化災害風險，地表發生明顯液化表徵機會較高，如噴砂或顯著沈陷等現象
- (2) 5 IL<15 中度液化災害風險，地表發生明顯液化表徵機會低，但深層可能液化，地表沈陷量不明顯。
- (3) 0<IL<5 輕微液化災害風險，液化之可能性很低
- (4) IL =0 非液化潛能區

10.1.2 液化機率危害度分析

若鑽孔液化分析結果是以機率值來表示,依上述液化機率評估法分析，進行液化機率評估時，所獲得的結果僅為各鑽孔地表下某一深度之砂土層液化機率，對於整個鑽孔而言，液化危害程度如何仍無定論。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危害程度分佈圖，則採用賴聖耀 謝明志(1996)之深度加權法加以評估。賴聖耀 謝明志 (1996)考慮深度的影響，提出一評估液化危險度之深度加權法，建議以液化危險度 P_{LW} 表示任一鑽孔之液化危險程度。

$$P_{LW} = \frac{\int_0^{20} P_L(z) \cdot W(z) \cdot dz}{\int_0^{20} W(z) \cdot dz} \dots\dots\dots (10-2)$$

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)。 $W(z)=1-0.05z$

吾人可以仔細觀察式10-1、10-2所代表的意義，式10-1之 F_L 為安全係數，依照液化的觀點， $F_L < 1.0$ 的液化機率為 $P_L > 0.5$ 。而式10-1對 $F_L > 1.0$ 的土層並不計算其液化危害度，因此其所計算的液化危害度範圍若對應到機率的觀點來看，約是計算液化機率 P_L 在0.5~1.0的範圍，至於0.0~0.5之間的範圍則不加以計算，而式10-2之 P_{LW} 所計算之液化危害度，其所使用液化機率 P_L 的範圍在0.0~1.0之間，約為式10-1之 IL 所計算液化危害度範圍的兩倍多。由於液化潛能指數，介於0~100之間，故當式10-1液化危害度指數為15時，其為液化潛能總指數之15%，其所對應到式10-2之液化危險度機率約為0.4。因此本文參考Iwasaki等人(1982)安全係數法之液化潛能分級，建議液化危害度機率法之分級，如下所示：

- (1) $P_{LW} \geq 0.4$ 高度液化災害風險，地表發生明顯液化表徵機會較高，如噴砂或顯著沈陷等現象
- (2) $0.2 \leq P_{LW} < 0.4$ 中度液化災害風險，地表發生明顯液化表徵機會低，但深層可能液化，地表沈陷量不明顯。
- (3) $0 < P_{LW} < 0.2$ 輕微液化災害風險，液化之可能性很低
- (4) $P_{LW} = 0$ 非液化潛能區

10.2 布袋港區附近之斷層與地震

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10-1所示，其中嘉義地區地震規模 M_L 超過7.0有3次：分別是1792年嘉義地震(713人死亡)、1906年梅山地震(1,258人死亡)與1941年中埔地震(358人死亡)。嘉義地區之重要活動斷層有梅山斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層及觸口斷層，而此四個斷層亦為影響布袋港之重要活動斷層。

10.3 布袋港區液化危害度分析結果

本文搜集布袋港區現有鑽探資料39孔，共約700筆N值資料，其相關位置如圖10-2所示，分別以①地震規模 $M_w=6.5$ ，布袋港之地表最大加速度 $A_{max}=0.1g$ ；②地震規模 $M_w=7.0$ ，布袋港區之地表最大加速度 $A_{max}=0.15g$ ；③新訂耐震設計規範乙區地震強度 $A_{max}=0.23g$ ；④新訂耐震設計規範甲區地震強度 $A_{max}=0.33g$ 等四種地震條件，並利用標準貫入試驗(SPT)之土層調查資料來評估布袋港區土層液化危害度。

本文分析各種地震強度引致布袋港區之液化危害度，是以平均地下水水位為-1.0m為分析依據，本文新模式賴(2002)安全係數法+Iwasaki(1982)深度加權法之分析結果，如圖10-3至圖10-6所示；本文新模式賴(2002)液化機率法+賴、謝(1996)深度加權法之分析結果，如圖10-7至圖10-10所示。

由圖10-3及圖10-7二種模式分析結果均顯示：地震規模 $M_w=6.5$ ，布袋港之地表最大加速度 $A_{max}=0.1g$ 時，布袋港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 $A_{max}=0.1g$ 可視為布袋港區液化之臨界地表加速度。

由圖10-4及圖10-8二種模式分析結果顯示：地震規模 $M_w=7.0$ ，布袋港之地表最大加速度 $A_{max}=0.15g$ 時，布袋港大部份地區屬於中度液化災害風險，地表發生明顯液化表徵機會低，但深層可能液化，地表沈陷量不明顯；僅小部份地區屬於輕度液化。

由圖10-5及圖10-9二種模式分析結果顯示：地震規模 $M_w = 7.5$ ，布袋港之地表最大加速度 $A_{max} = 0.23g$ 時，即布袋港發生新訂耐震設計規範乙區地震強度 $A_{max} = 0.23g$ ，布袋港大部份地區屬於高度液化災害風險，地表發生明顯液化表徵機會較高，如噴砂或顯著沈陷等現象；僅小部份地區屬於中度液化。

由圖10-6及圖10-10二種模式分析結果顯示：地震規模 $M_w = 7.5$ ，布袋港之地表最大加速度 $A_{max} = 0.33g$ 時，即布袋港發生新訂耐震設計規範甲區地震強度 $A_{max} = 0.33g$ ，布袋港全部份地區屬於高度液化災害風險，地表發生明顯液化表徵機會較高，如噴砂或顯著沈陷等現象。

由圖10-3至圖10-6及圖10-7至圖10-10二種模式分析結果比較顯示：賴(2002)本土化安全係數法與賴(2002)本土化液化機率法之液化危險程度極為相似。由圖10-3至圖10-10分析結果亦顯示：港區液化危險程度，由圖中心附近位置往兩側漸大。

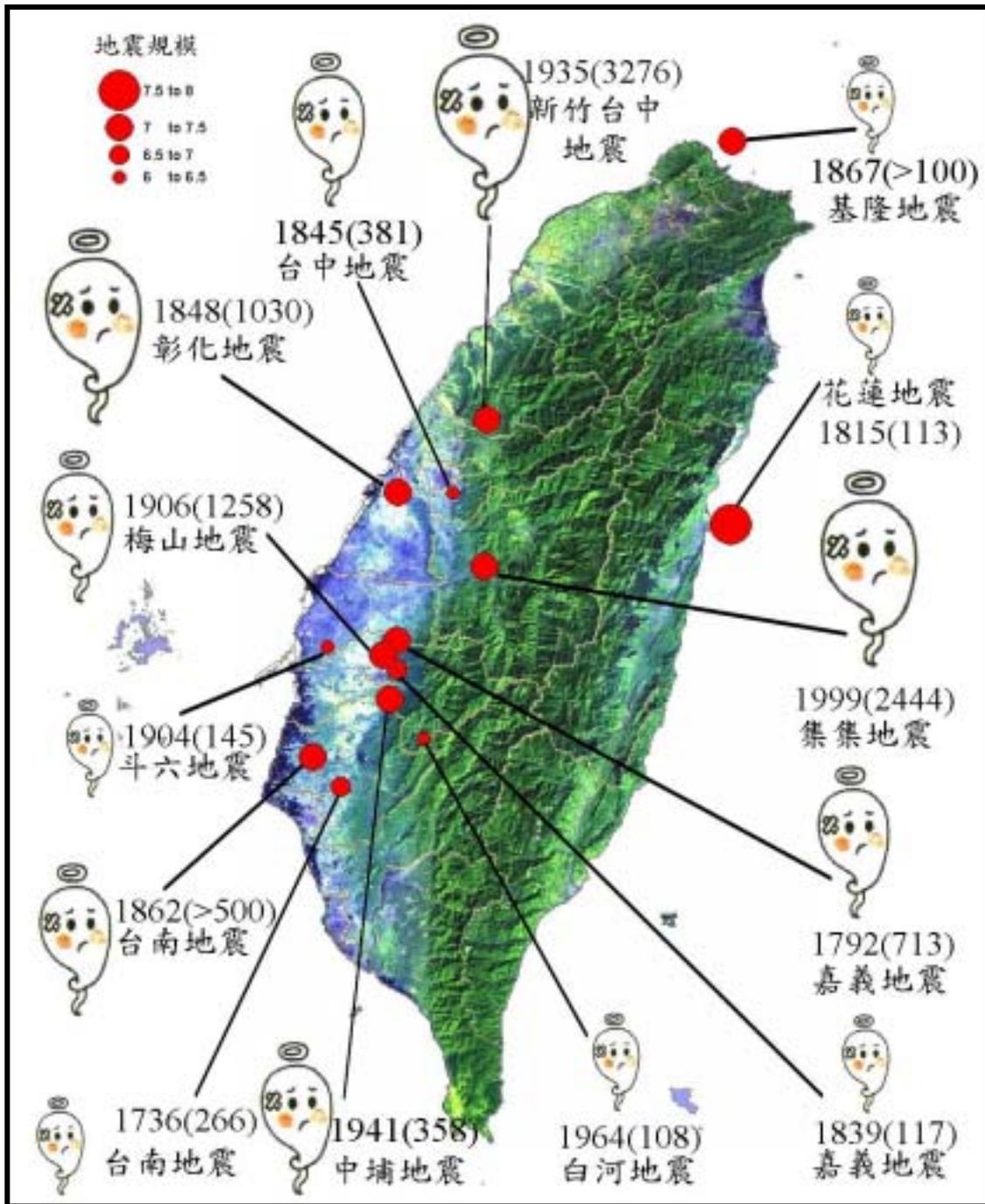


圖 10-1 台灣地區造成百人以上死亡之重大災害地震震央分佈圖
(鄭世楠、葉永田, 2001)

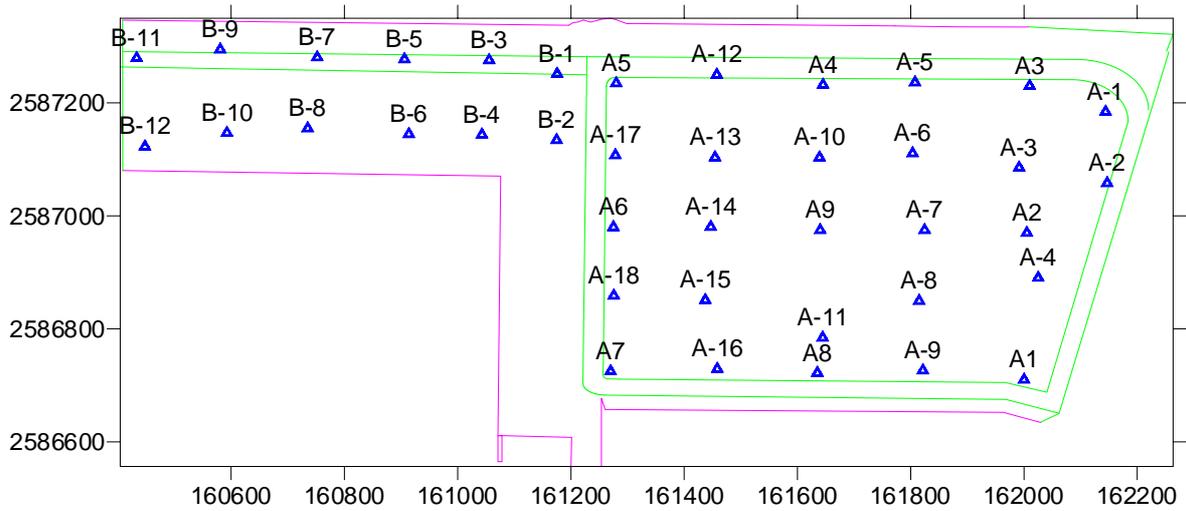


圖 10-2 布袋港區 39 孔鑽探資料位置圖

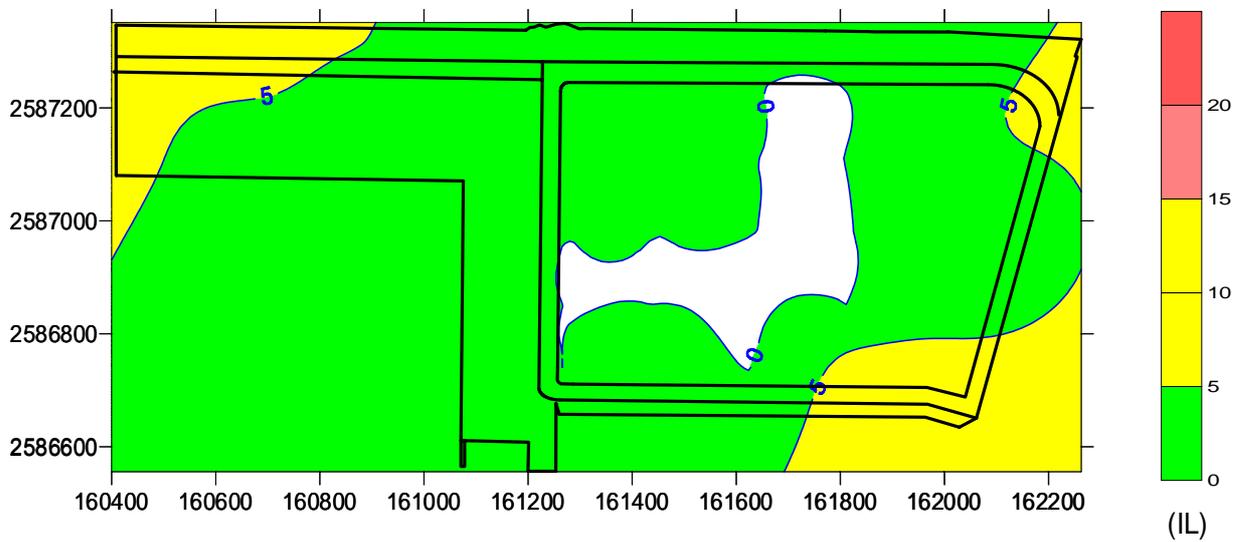


圖 10-3 布袋港區地震引致土壤液化之危害度 ($M_w=6.5$, $A_{max}=0.10g$)
 賴(2002)安全係數法+Iwasaki(1982)深度加權法

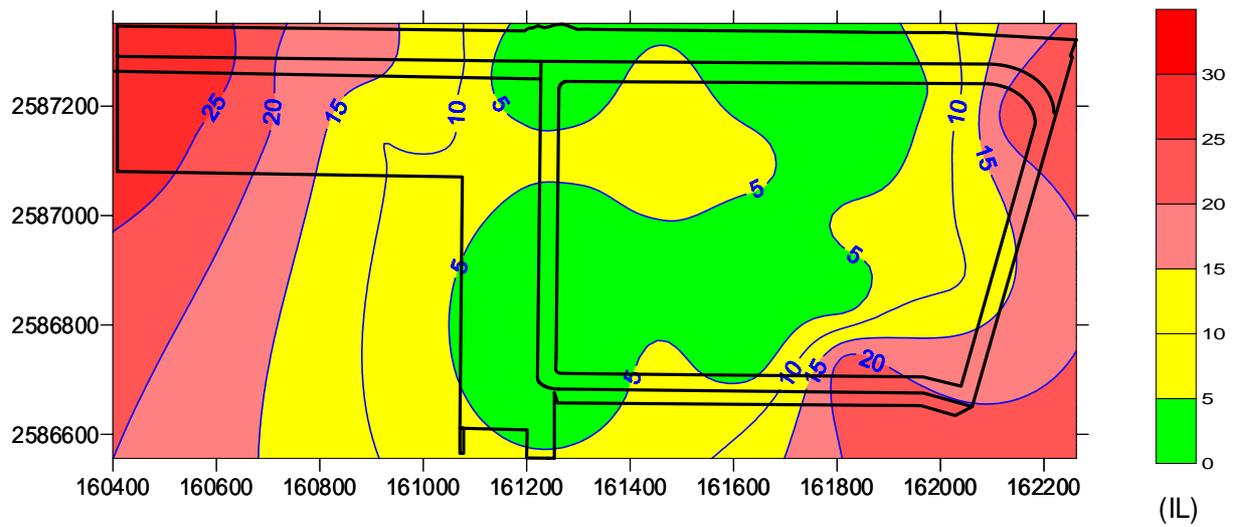


圖 10-4 布袋港區地震引致土壤液化之危害度 ($M_w=7.0$, $A_{max}=0.15g$)
 賴(2002)安全係數法+Iwasaki(1982)深度加權法

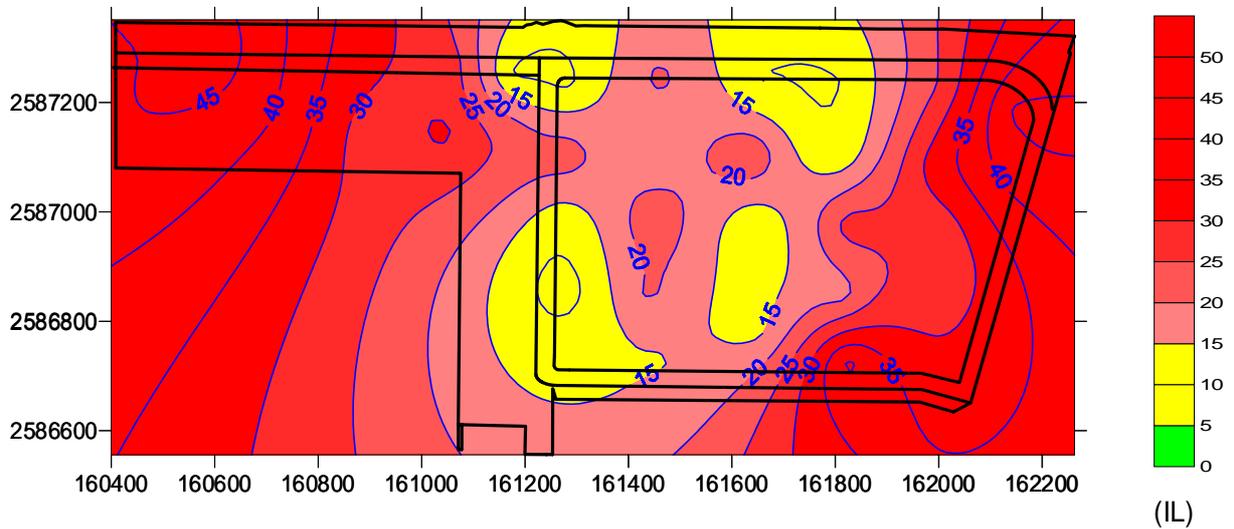


圖 10-5 布袋港區地震引致土壤液化之危害度
 賴(2002)安全係數法+Iwasaki(1982)深度加權法
 ($M_w=7.5$, $A_{max}=0.23g$; 新訂耐震設計規範乙區)

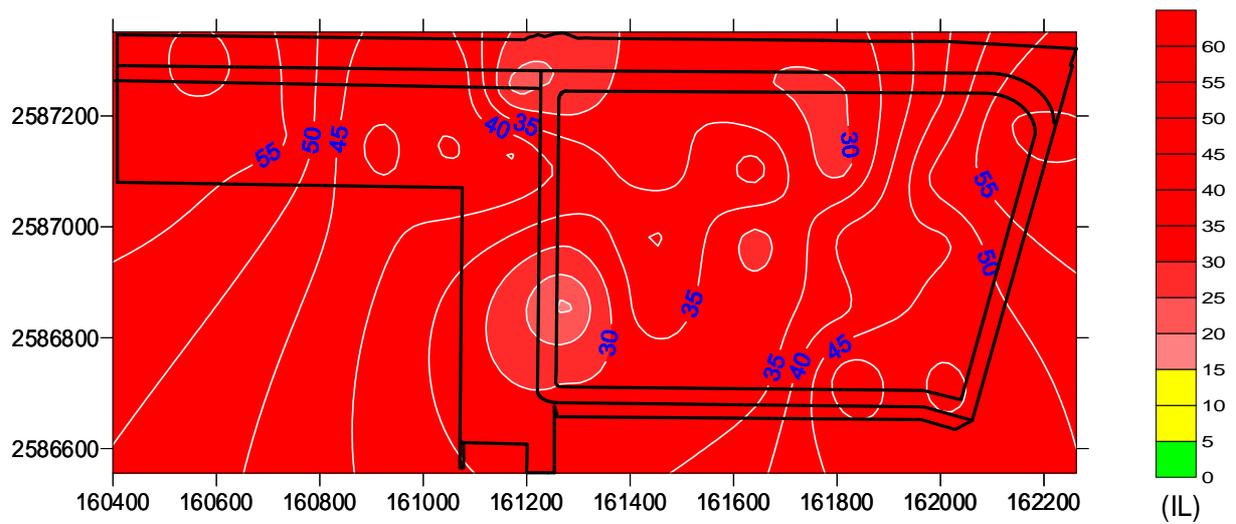


圖 10-6 布袋港區地震引致土壤液化之危害度
 賴(2002)安全係數法+Iwasaki(1982)深度加權法
 ($M_w=7.5$, $A_{max}=0.33g$; 新訂耐震設計規範甲區)

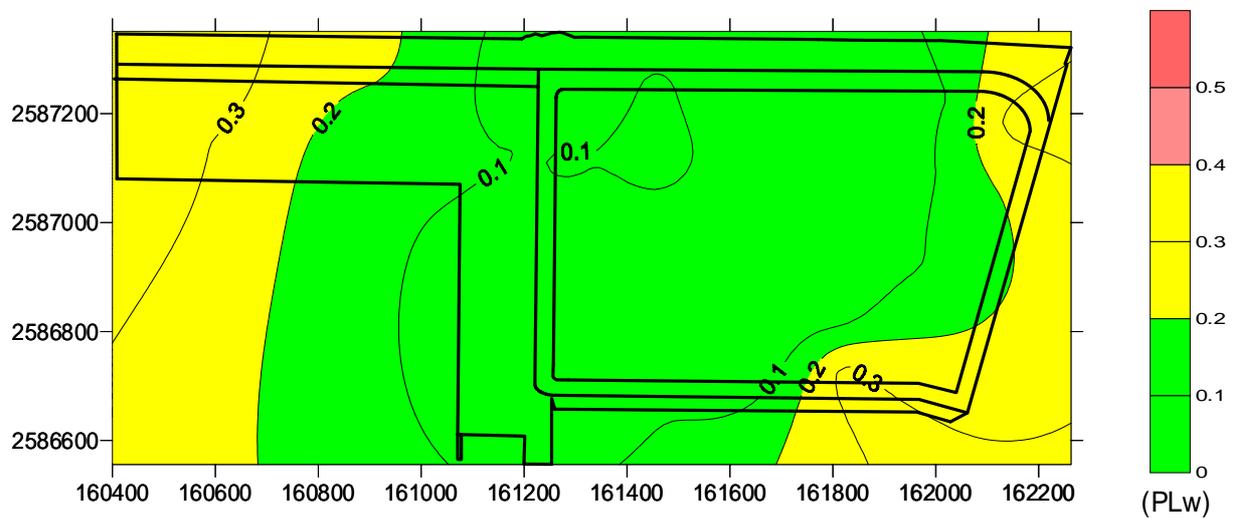


圖 10-7 布袋港區土壤液化之機率危害度 ($M_w=6.5$, $A_{max}=0.10g$)
 賴(2002)液化機率法+賴、謝(1996)深度加權法

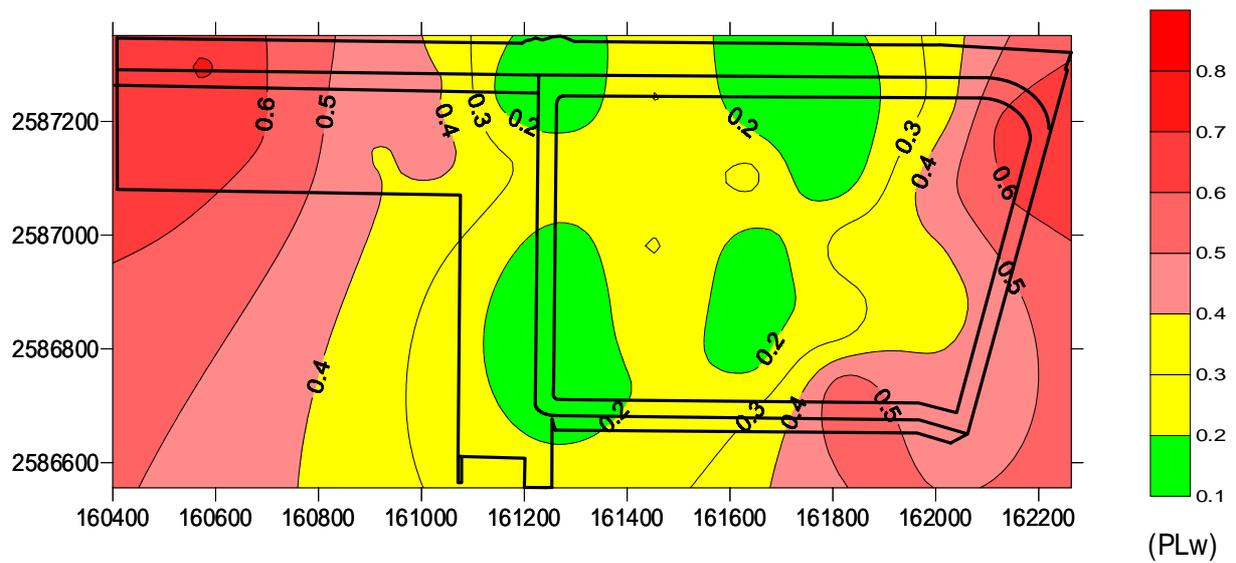


圖 10-8 布袋港區土壤液化之機率危害度 ($M_w=7.0, A_{max}=0.15g$)
 賴(2002)液化機率法+賴、謝(1996)深度加權法

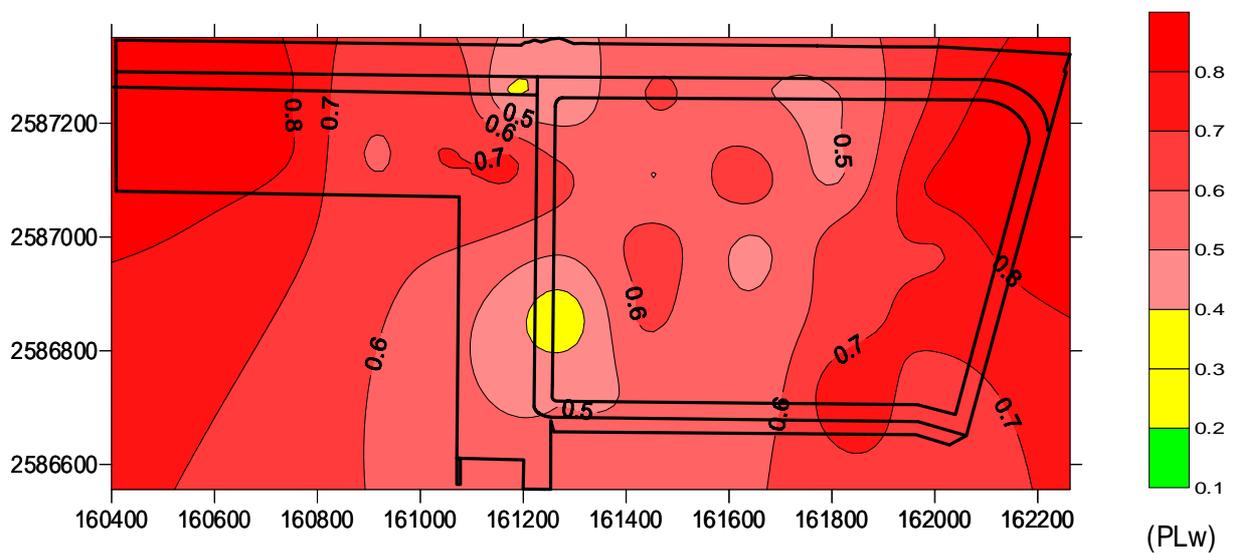


圖 10-9 布袋港區地震引致土壤液化之機率危害度
 賴(2002)液化機率法+賴、謝(1996)深度加權法
 ($M_w=7.5, A_{max}=0.23g$; 新訂耐震設計規範乙區)

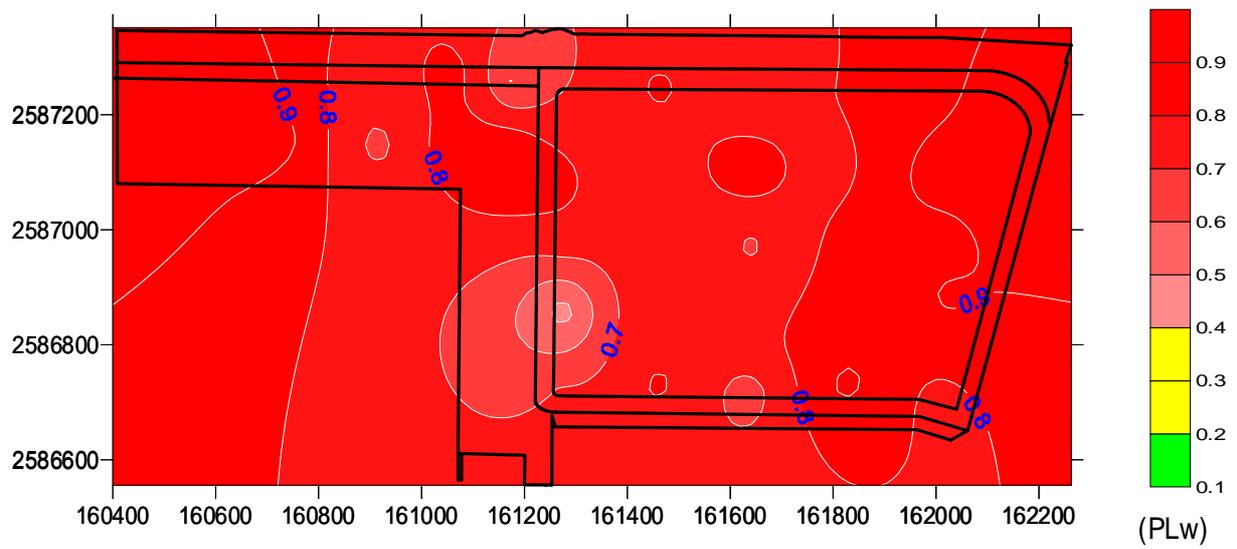


圖 10-10 布袋港區地震引致土壤液化之機率危害度
 賴(2002)液化機率法+賴、謝(1996)深度加權法
 ($M_w=7.5, A_{max}=0.33g$; 新訂耐震設計規範甲區)

第十一章 布袋港區地震引致沉陷之分析

地震力引致之沉陷對於較為深厚且疏鬆之沖積土層，尤其是抗液化安全係數小於 1.6 之土層(Tokimatsu & Seed, 1987)，應對此項沉陷之影響作審慎之考慮。對於此項沉陷之研究，一般均如同液化潛能分析一樣，將其邊界條件簡化為水平地盤且無結構物荷重影響之情況，而於此情況下，土體將呈現單向度壓縮行為，亦即其垂直應變量等於其體應變量。

目前以現地試驗評估土層沉陷方法有兩種：一為 Tokimatsu & Seed (1987)曾綜合許多飽和砂土之試驗結果，建議一反覆剪應力比(σ'_{av} / σ'_o)，N 值及體積應變之關係，如圖 11-1 所示；另一為 Ishihara et al.(1991, 1996)建議之 N 值、 q_c 值、抗液化安全係數及體積應變之經驗關係，如圖 11-2 所示，以上均可作為沉陷推估之參考。

本文以 Ishihara et al.(1991, 1996)建議之 N 值、 q_c 值、抗液化安全係數及體積應變之經驗關係圖為沉陷分析依據，其中抗液化安全係數之分析，以第九章新建立之 SPT-N 值評估液化潛能之本土化分析模式為依據。茲分別對地震所引致之土壤液化與沈陷之相關性、地震引致土層之下陷行為、SPT-N 值評估地震引致沉陷之方法、及布袋港區震陷潛能分析之結果等，分述如下：

11.1 液化與沈陷相關性之探討

現地土壤承受反覆荷重作用所產生的壓密和液化問題，對大地工程師而言是一項重要而值得研究的問題。

土壤液化後，在其孔隙水壓消散過程將使得土壤產生壓密現象，而使基礎構造產生超額之差異沈陷，致使結構物發生破壞或傾斜現象。一般設計者可能會較為注意淺層土壤之液化問題，其實較深層土

壤液化時，雖不致直接影響基礎之支承力，但因超額孔隙水壓消散引致之沉陷，則可能影響結構物之安全，對於沉陷較為敏感及重要之結構物於設計時應作適度之考慮。

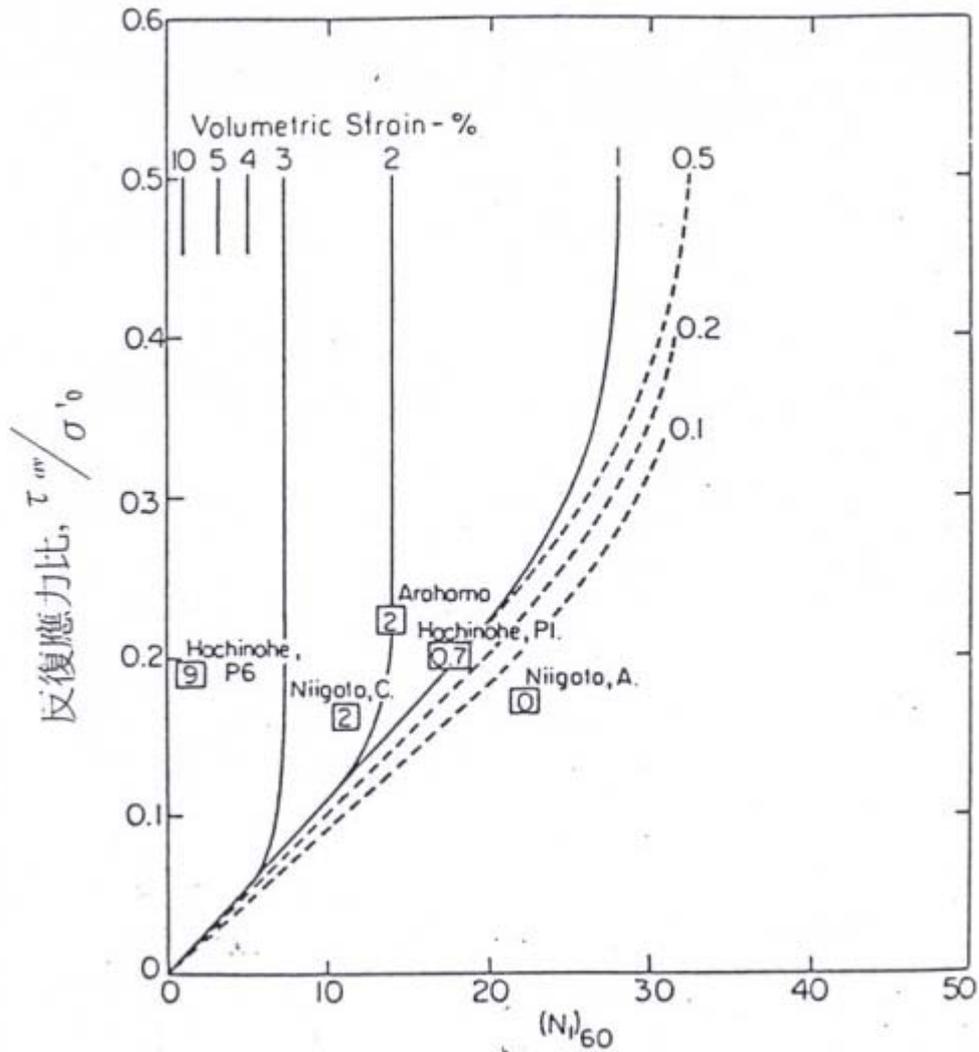


圖 11-1 體積應變與反復剪應力比及 N 值之相關經驗圖
(Tokimatsu & Seed,1987)

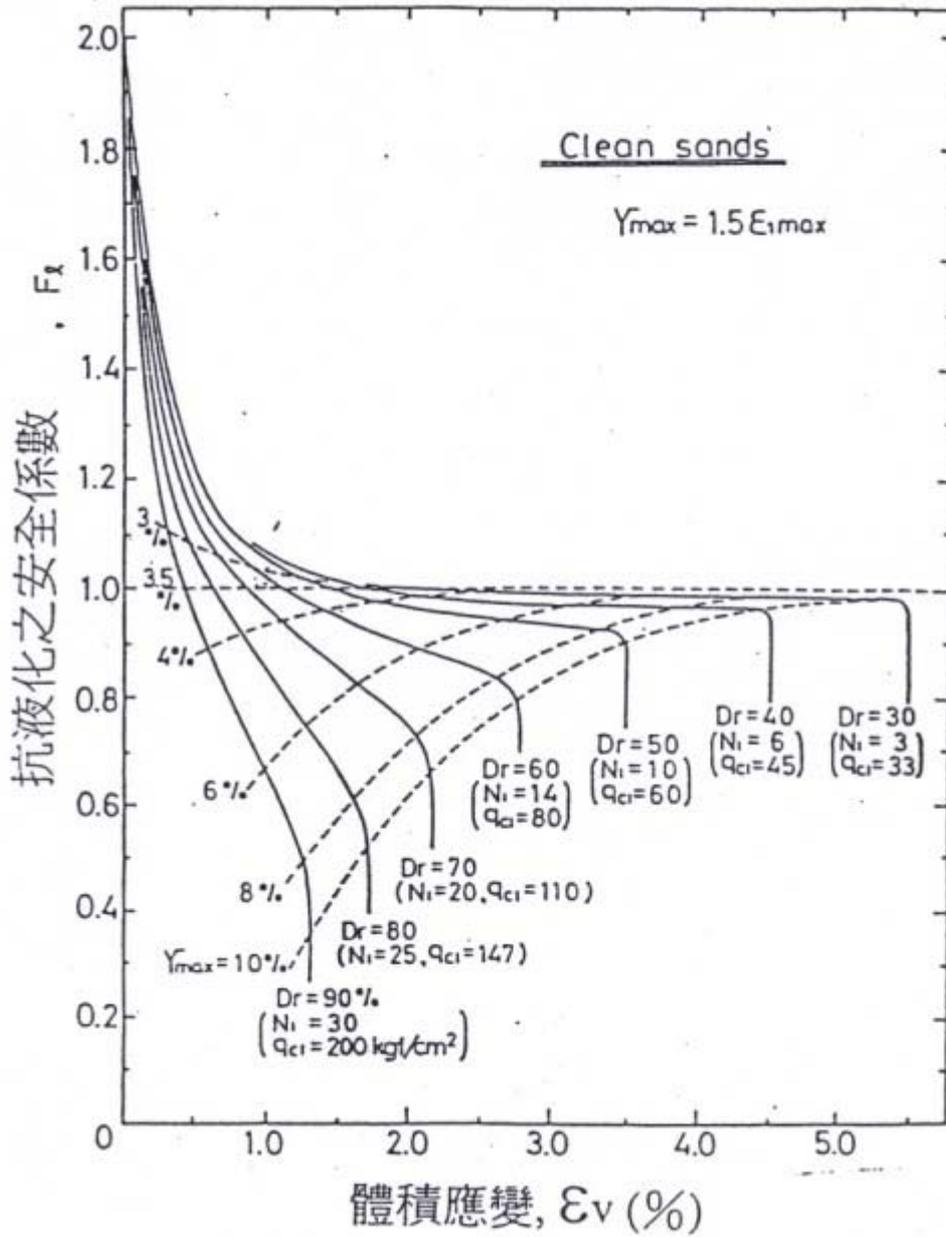


圖 11-2 N 值、 q_c 值、抗液化安全係數及體積應變之經驗關係 (Ishihara et al.,1991,1996)

根據 Lee & Albaisa(1974)整理多位學者之研究及實地觀測資料，發現不論飽和或不飽和之砂土層在強震或人造反覆前應力作用時，均會產生沉陷現象；對於未發生液化之砂土層沉陷應變量均小於 1%，而發生液化後產生之沉陷應變量將可達 2%至 5%，Ishihara et al.(1991, 1996)亦提出抗液化安全係數與沉陷應變量之相關經驗圖如圖 11-2 所示。如圖 11-2 可明白液化程度與沉陷應變量之關係，或未液化情況 ($FL > 1.0$) 之沉陷應變量。EERI(1986)提到在一些大地震中曾觀測得沉陷量達一公尺以上者，如 1906 年之舊金山及 1964 年之阿拉斯加大地震，而發生 5 公分至 30 公分之沈陷者則十分普遍。

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高達 3-4 公尺，Port Island 碼頭岸壁後 150 公尺以內，其土壤液化造成地表之沉陷量由岸壁向碼頭後線遞減。921 集集大地震，造成台中港區 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，台中港區 1-4 號沉箱式碼頭後線 100 公尺以內，其土壤液化造成地表之沉陷量亦由岸壁向碼頭後線遞減。在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十幾個大坑洞深度高達 4-5 公尺。

11.2 地震引致之下陷行為

現地土壤受到地震之振動作用，產生沉陷的來源有四方面：(1) 乾燥或飽和但能充分排水的砂土，因振動作用而有壓實的產生；(2) 若砂土為飽和而且未能排水，則在振動作用期間所產生的殘留變形；(3) 在振動停止後，超額孔隙水壓消散使砂土再壓密造成沉陷。(4) 飽和粘土在承受反復剪力載重後，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象，而發生長期沉陷。

11.2.1 壓實作用所造成的沉陷

Silver & Seed (1971)以反覆單剪儀器對乾燥砂土施以 0.01% 至 0.5% 之反覆剪應變，藉以探討乾砂因壓實作用而導致的體積應變。其結論認為體積改變量受垂直應力的影響並不顯著，而主要是與試體所受的剪應變振幅有關。尤其是在剪應變大於 0.05% 之後。反覆剪應變可使土壤顆粒移動至較緊密狀態，因而可將之當作決定體積應變的基本參數。同時亦發現當垂直應力增加，則達到某一壓實程度所需的反覆剪應力亦增加。

由 Silver & Seed(1971)的結論乃是以單一方向受剪為依據，而在實際的地震力作用情況，土壤乃是受到多方向剪力的作用，因此 Pyke et al. (1975)以振動桌對乾砂施加多方向振動研究其沉陷行為。其結果發現，多方向水平聯合振動所造成的沉陷，大約等於單方向振動所造成沉陷之和。同時亦指出，若是垂直方向單獨作用的加速度小於 1g，則並不會引起沉陷。但是若垂直方向與水平方向同時作用，則將引起明顯增加的沉陷量。

Youd(1972)對飽和渥太華砂以單應儀器施以反覆剪應變，並使試體能充分排水。其結論亦認為剪應變是砂性土壤引起壓實作用的主要因素，同時反覆剪應變頻率範圍在 10 cycles/min 與 150 cycles/min 之間，對試體的壓實行為沒有明顯的影響。乾砂與飽和而完全排水砂的試體，亦沒有明顯的行為差異。Bhatia et al.(14)用相同的材料與試驗設備，但施加不同的反覆剪應力及靜態剪應力，藉以探討靜態剪應力對反覆體積變化行為的影響。其試驗結果顯示：(A)累積剪應變和體積應變均會隨著反覆應力比和靜剪應力的增加而加大；(B)主要的體積應變發生於最先的 10 個振動週期內，超過 30 個振動週期後，由於緊密化或硬化的現象，產生的體積應變很小；(C)在第一個振動週期過後，體積應變的大小與所施加的靜剪應力大小無關；(D)在任一靜剪應力比下，累積體積應變和剪應變間存在有線性關係。

11.2.2 殘留壓縮應變所造成的沉陷

非均向壓密的試體在受到反覆振動作用期間所產生的不排水殘留變形，亦是造成沉陷的原因之一。Chang 認為殘留變形量的大小受初始應力狀態、反覆荷重所產生的超額孔隙水壓及土壤性質所影響。並且從“殘留變形量主要是在反覆軸差應力作用下有效圍壓之降低所引起”的假設中，提出一含有五個參數的半經驗模式加以預測：

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{\Delta u} = \frac{R_f \left[\frac{\sigma'_d}{\sigma'_{ult} - \sigma'_d} \right]^2 \left[\frac{2 \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right]}{K p_a \left[\frac{\sigma'_3}{p_a} \right]^n} + \frac{n \left[\frac{\sigma'_d}{\sigma'_{ult} - \sigma'_d} \right] \left[\frac{\sigma'_{ult}}{\sigma'_a} \right]}{K p_a \left[\frac{\sigma'_3}{p_a} \right]^n} \dots\dots\dots (11-1)$$

上式中 K, n, Rf 為土壤參數， ϕ' 為內摩擦角， p_a 為大氣壓力。

11.2.3 砂土再壓密作用所造成的沉陷

Lee 和 Albaisa (1974)以均向壓密動力三軸試驗研究水平地表下砂土受到反覆荷重後由於超額孔隙水壓消散所導致的沉陷。其結論指出，在尚未液化的情況，再壓密之體積應變量將隨著下列各項因素而增加：土壤顆粒尺寸的增加、相對密度的減小、和超額孔隙水壓力的增加。體積應變幾乎是與孔隙水壓的產生方式無關，且通常小於 1%。

Yoshimi 和 Tokimatsu(1975)將實際的結構模型置於飽和砂土上，以振動桌試驗研究結構物附近的砂土，其孔隙水壓發展情形及影響沉陷的因素。其結論指出：(1)在模型結構物正中心下方所產生的超額孔隙水壓較其他地方為小；(2)當結構物的重量增加，則其正下方的超額孔隙水壓比將降低；(3)當結構物底下的孔隙水壓達到一臨界值，其沉陷量將較顯著增加；和(4)結構物的寬度增加，則會降低沈陷量。

11.2.4 粘土層再壓密所造成的沉陷

Ohara & Matsuda(1988)亦發現，飽和粘土在承受反復剪力載重

後，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象，產生可觀之長期沉陷。Ohara & Matsuda (1988)提出一個計算粘土層受震後之壓密沉陷量：

$$\varepsilon_v = \frac{C_{dyn}}{1 + e_0} \times \log\left(\frac{1}{1 - U_{dyn}/\sigma'_{v0}}\right) \dots\dots\dots (11-2)$$

式中， ε_v 為粘土沉陷應變量， e_0 為粘土初始孔隙比， C_{dyn} 為反復荷重引致壓縮之指數，其介於壓縮指數 C_c 與回脹指數 C_s 之間，即 $C_s < C_{dyn} < C_c$ ，由 Ohara & Matsuda(1988)之個案研究 $C_{dyn} = 1/3C_c$ ； U_{dyn}/σ'_{v0} 為正規化之動態孔隙水壓比，其與地震作用力及土壤性質相關。

地震力引致之沉陷對於較為深厚且疏鬆之沖積土層，尤其是抗液化安全係數小於 1.6 之土層(Tokimatsu & Seed, 1987)，應對此項沉陷之影響作審慎之考慮。對於此項沉陷之研究，一般均如同液化潛能分析一樣，將其邊界條件簡化為水平地盤且無結構物荷重影響之情況，而於此情況下，土體將呈現單向度壓縮行為，亦即其垂直應變量等於其體應變量。

11.3 賴聖耀(2002)結合 Ishihara et al.(1991, 1996)之震陷潛能分析步驟：

本文以以 Ishihara et al.(1991,1996)建議 N 值、抗液化安全係數及體積應變之經驗關係圖，如圖 11-2 所示，為沉陷分析依據，其中抗液化安全係數之分析，以第九章賴聖耀(2002)新建立之 SPT-N 值評估液化潛能之本土化分析模式為依據。其分析步驟如下：

其分析步驟如下：

1.計算土層抗液化之安全係數 F_L ：

以第九章圖 9-22 本土化分析模式之液化分析流程，計算土層抗液化之安全係數 F_L 。

2. 計算體積應變量 ε_v

計算 N1 值及 FL，再利用圖 11-2 即 Ishihara et al.(1991,1996)建議之 N1 值、抗液化安全係數 FL 及體積應變之相關經驗圖，計算某一點之體積應變 ε_v 值。

3. 重覆步驟(1) (2)計算每一點 i 之 $\varepsilon_{v,i}$ 值，再以下列公式將每一點 i 的沉陷量加以累計計算總沉陷量 S_d

$$S_d = \sum_{i=1}^N \varepsilon_{v,i} \cdot \Delta h_i \dots\dots\dots (11-3)$$

11.4 布袋港區震陷潛能分析結果

本文搜集布袋港區現有鑽探資料 39 孔，共約 700 筆 N 值資料，其相關位置如圖 10-2 所示，分別以①地震規模 $M_w=6.5$ ，布袋港之地表最大加速度 $A_{max}=0.1g$ ，約為布袋港區液化之臨界震度；②地震規模 $M_w=7.0$ ，布袋港區之地表最大加速度 $A_{max}=0.15g$ ，約為 1906 年梅山地震之布袋港區震度；③新訂耐震設計規範乙區地震強度 $A_{max}=0.23g$ ；④新訂耐震設計規範甲區地震強度 $A_{max}=0.33g$ 等四種地震條件，並利用標準貫入試驗(SPT)之土層調查資料，評估各種地震強度引致布袋港區之震陷潛能。

本文分析各種地震強度引致布袋港區之震陷潛能，是以平均地下水位為-1.0m 為分析依據，本文新模式賴(2002)安全係數法+ Ishihara et al.(1991,1996)之分析結果，如圖 11-3 至圖 11-6 所示。其中圖 11-3，是以地震規模 $M_w=6.5$ ，布袋港之地表最大加速度 $A_{max} = 0.1g$ ，其所引致之沉陷等值圖，其引致港區之最大沉陷量為 50 公分，平均沉陷量為 12.53 公分。圖 11-4，是以 1906 年梅山地震之布袋港區震度，地震規模 $M_w=7.0$ ，布袋港區之地表最大加速度 $A_{max}=0.15g$ ，其所引致之沉陷等值圖，其引致港區之最大沉陷量為 70 公分，平均沉陷量為 31.20 公分。圖 11-5，是假設布袋港不幸遭受耐震設計規範乙區地震強度

$A_{max}=0.23g$ ，其所引致之沉陷等值圖，其引致港區之最大沉陷量為 90 公分，平均沉陷量為 53.17 公分。圖 11-6，是假設布袋港不幸遭受耐震設計規範甲區地震強度 $A_{max}=0.33g$ ，則其可能引致港區之沉陷等值圖，最大沉陷量為 110 公分，平均之沉陷量為 64.19 公分。圖 11-3 至 11-6 之分析結果，皆以港區為廣闊無碼頭岸壁等港灣構造為分析依據，據 1995 年神戶港災害調查，及 1999 年 921 大地震台中港 1-4A 碼頭震害調查，於碼頭岸壁附近，在強烈地震下，沉箱式碼頭背填土液化沉陷及碼頭岸壁之側傾及位移後砂土填補位移空間，將造成更大之沉陷。

茲將以上分析各種地震強度引致布袋港區之液化機率危害度及震陷潛能整理如表 11-1 所示。

表 11-1 布袋港區各種地震引致之液化危害度及平均沉陷量

地震條件	地震規模 (M_w)	地表最大加 速度 (A_{max})	液化危 害度 IL	液化機率 危害度 P_{LW}	平均 沉陷 (cm)	危害度等 級
布袋港區液化之 臨界震度	6.5	0.10	2.30	0.13	12.53	輕度
1906 年梅山地震 之港區震度	7.0	0.15	9.67	0.35	31.20	中度
新訂耐震設計規 範乙區	7.5	0.23	25.14	0.64	53.17	嚴重
新訂耐震設計規 範甲區	7.5	0.33	41.35	0.81	64.19	極 嚴重

綜合圖 10-3 至圖 10-10 及圖 11-3 至圖 11-6 之液化機率危害度及沉陷等值圖整體觀之，布袋港區有三處土質較為鬆軟，極易因地震而造成較嚴重之液化及沉陷災害，其分別位於(1)第二期海埔地之東北角隅，(2) 第二期海埔地之東南角隅，(3)商港區之西北角隅。

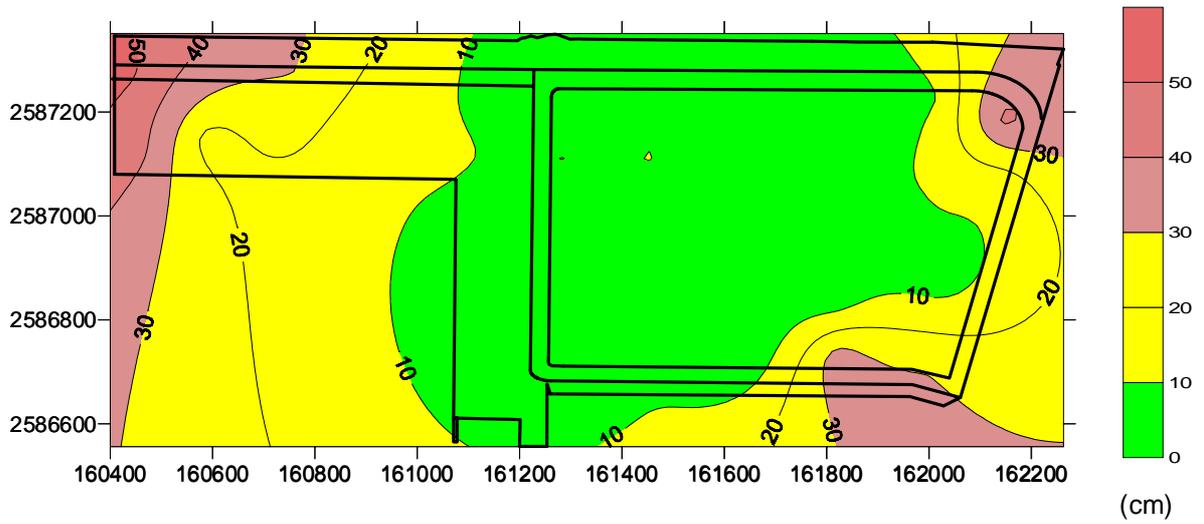


圖 11-3 布袋港區地震引致沉陷之等值色階圖 ($M_w=6.5$, $A_{max}=0.10g$)
 賴(2002)安全係數法+Ishihara et al.(1991,1996)法

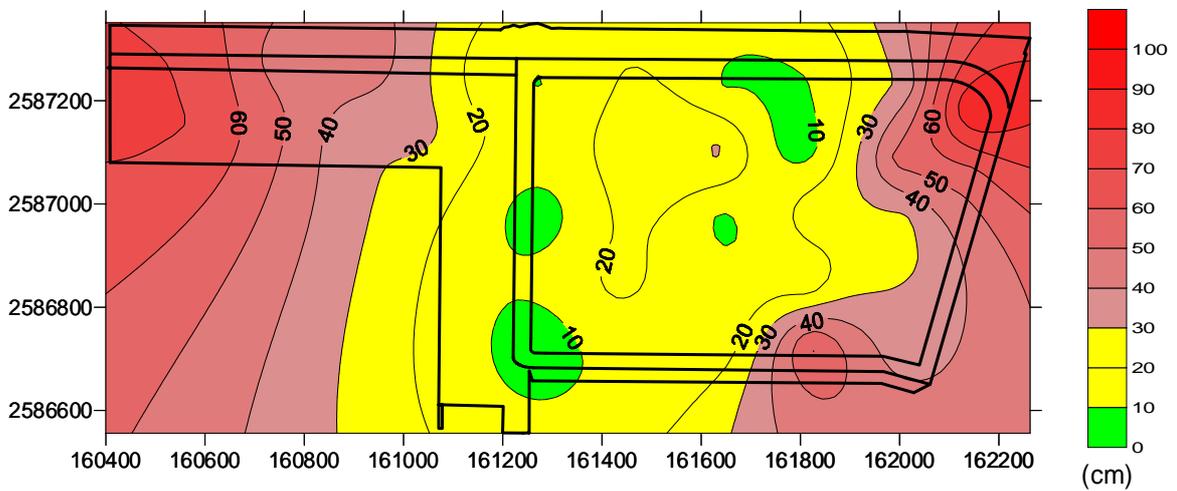


圖 11-4 布袋港區地震引致沉陷之等值色階圖 ($M_w=7.0$, $A_{max}=0.15g$)
 賴(2002)安全係數法+Ishihara et al.(1991,1996)法

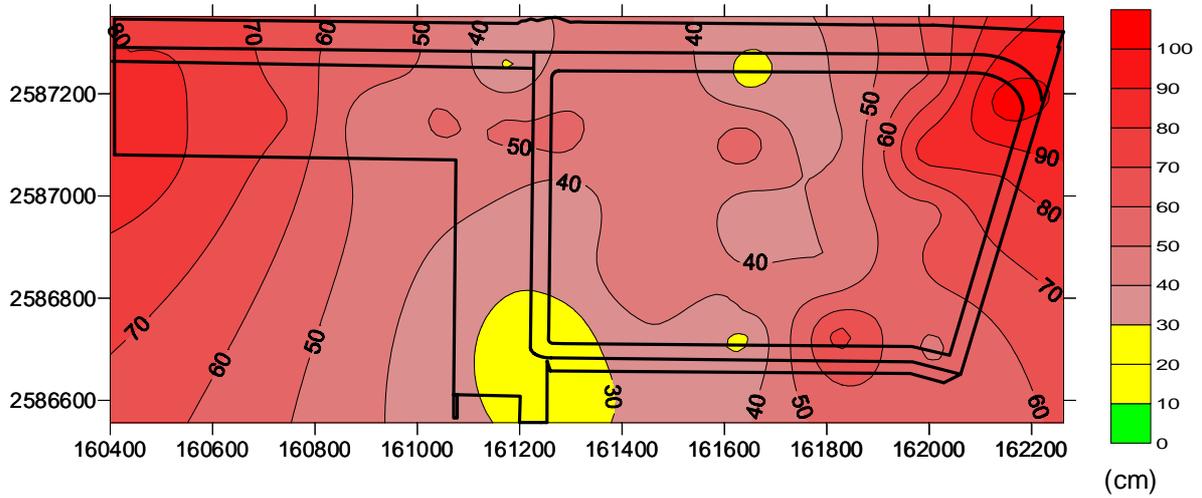


圖 11-5 布袋港區地震引致沉陷之等值色階圖 ($M_w=7.5$, $A_{max}=0.23g$)
 賴(2002)安全係數法+Ishihara et al.(1991,1996)法

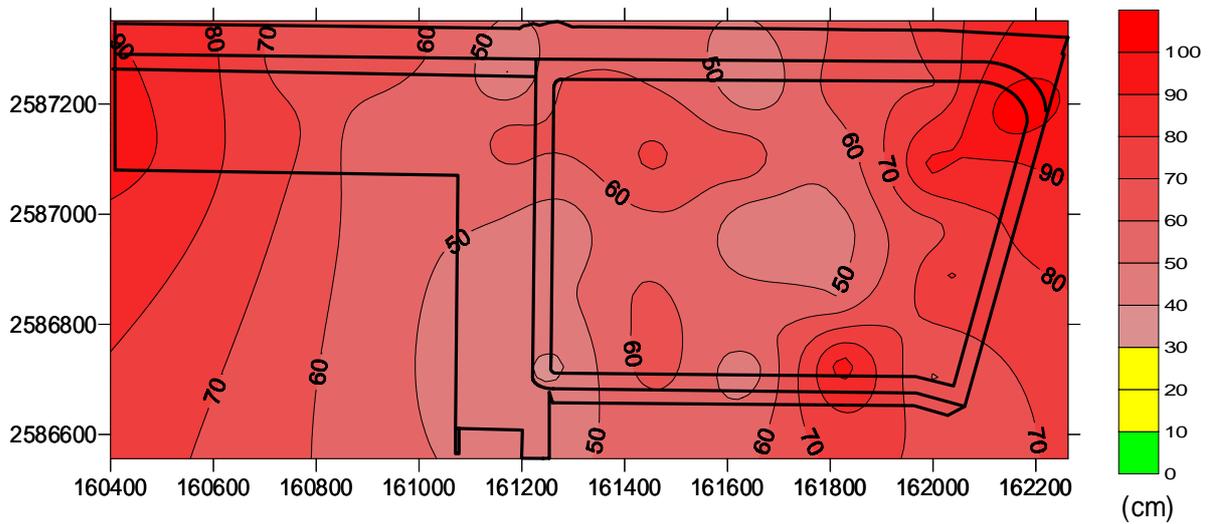


圖 11-6 布袋港區地震引致沉陷之等值色階圖 ($M_w=7.5$, $A_{max}=0.33g$)
 賴(2002)安全係數法+Ishihara et al.(1991,1996)法

第十二章 結論與建議

- 1.由布袋鎮、布袋港舊填土區、布袋港新填土區近四年沉陷水準測量結果與港區地層下陷監測井之綜合分析顯示：
 - (1)布袋鎮下陷量較小，每年以 4 至 5 公分之速率沉陷中，主要為養殖業大量開發超抽地下水所造成。
 - (2)布袋港舊填土區(第二期海埔地)下陷量次之，每年以 5 至 6 公分之速率沉陷中，主要為深層下陷，是港區附近地區超抽地下水所造成。由於填土已有 9 年，填土荷重造成之下陷已趨緩和，每年影響之沉陷約僅有 0.5-1 公分。
 - (3)布袋港新填土區(商港區)下陷量最大，每年以 7 至 8 公分之速率沉陷中，淺層至深層均有沉陷，主要是新填土荷重及港區附近地區超抽地下水兩種因素所造成。
- 2.由布袋港布袋港第二期海埔地約60公頃之抽砂填土區可能引致區域性之差異沉陷進行分析，由分析結果顯示：抽砂填土3.666m高可能引致之最大沉陷量約為70.41公分。填土區之中點沉陷量最大，然後沉陷量漸遞減至填土邊緣。由沉陷歷時曲線顯示：於填土完成後之初期，其沉陷速率較大，然後漸緩，海埔地填土至今約有9年，沉陷量為59公分，約為總沉陷之84%，目前其沉陷速率約為每年0.7公分。
- 3.由布袋港舊填土區之200m地層下陷監測井監測結果顯示：自86年2月 92年10月止，近6.5年之沉陷總量約32.15公分，分別為86年沉陷量約5公分、87年聖嬰年沉陷量約3公分、88年沉陷量約4公分、89年沉陷量約5公分，90年沉陷量約5公分，91年沉陷量約5.5公分，92年沉陷量約6.5公分。
- 4.布袋港新填土區，約於87年填土4-5m，92年再填土約2m，其300m地層下陷監測井監測結果顯示：自89年10月 92年10月止，3年之沉陷總量約26.12公分，分別為90年沉陷量約7.40公分、91年沉陷量約7.07公分、92年沉陷量約11.55公分，監測期間90年8月時該區進行鑿井，

導致90年較91年沉陷大，92年2月時該區再進行新填土約2m，導致92年沉陷增大許多。

- 5.由海埔地填土沉陷量與地層下陷觀測井之記錄，及水準測量近二年下陷量之比較分析顯示：(1)200m沉陷井：水準測量為13.78 cm、觀測井之記錄為11.19 cm、填土沉陷分析為0.6 cm。(2)300m沉陷井：水準測量為22.95 cm、觀測井之記錄為16.41 cm、填土沉陷分析為8 cm。由此可見布袋港之沉陷，大部份為附近地區超抽之地下水所造成之沉陷，而且水準測量之沉陷皆較與觀測井之記錄為大，因此有必要進一步監測比較。
- 6.由布袋港區40多組地震觀測資料迴歸分析結果顯示：地表最大加速度約為井下300m最大加速度之4倍；其中自300m至20m，其厚度達280m之地層，震波放大約2倍；但自20m至地表，其厚度僅20m之地層，震波放大亦達2倍；由此可知地震震波放大，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。與Seed & Idriss (1971)研究比較，布袋港淺層地層之震波放大稍大於Seed & Idriss (1971)之平均值。
- 7.布袋港區各種地震引致之液化危害度及平均沉陷量之分析結果如下表所示：

表12-1 布袋港區各種地震引致之液化危害度及平均沉陷量

地震條件	地震規模 (M _w)	地表最大加速度(A _{max})	液化危害度 IL	液化機率危害度 P _{LW}	平均沉陷(cm)	危害度等級
布袋港區液化之臨界震度	6.5	0.10	2.30	0.13	12.53	輕度
1906年梅山地震之港區震度	7.0	0.15	9.67	0.35	31.20	中度
新訂耐震設計規範乙區	7.5	0.23	25.14	0.64	53.17	嚴重
新訂耐震設計規範甲區	7.5	0.33	41.35	0.81	64.19	極嚴重

- 8.由布袋港液化機率危害度及地震引致沉陷之綜合分析，布袋港區有三處土質較為鬆軟，極易因地震而造成較嚴重之液化及沉陷災害，其分

別位於(1)第二期海埔地之東北角隅，(2)第二期海埔地之東南角隅，(3)商港區之西北角隅。

9.布袋港區內填土造成之下陷，會因長時間(約15年)而緩和；但附近地區超抽地下水造成之下陷，則須視超抽程度而定；地震造成之下陷，可以地盤改良因應。其中以港區附近地區超抽地下水造成之深層下陷最為嚴重，而且影響深遠長久，因此有關港區相關工程或建築物之設計高程，須考慮工程使用年限及沉陷速率，預先提高工程之高程。

10.防治地震造成之液化及下陷之地質改良方法有夯實法、排水法、固化法及置換法等四類，夯實法是應用最廣泛之有效方法，其中之壓實砂樁法適合於碼頭區域之地質改良，動力壓密法適合大區域之地質改良，是國內在海岸地區新生地之地質改良主要採用之方法。唯各種地質改良方法分別具有不同特性、限制與優劣條件，其優劣之評估與選擇需綜合考量改良區域之環境與土質狀況、改良條件與效果、工期配合與經費等許多因素，以較低之經費，在合理之工期內達到較佳之改良效果。

參 考 文 獻

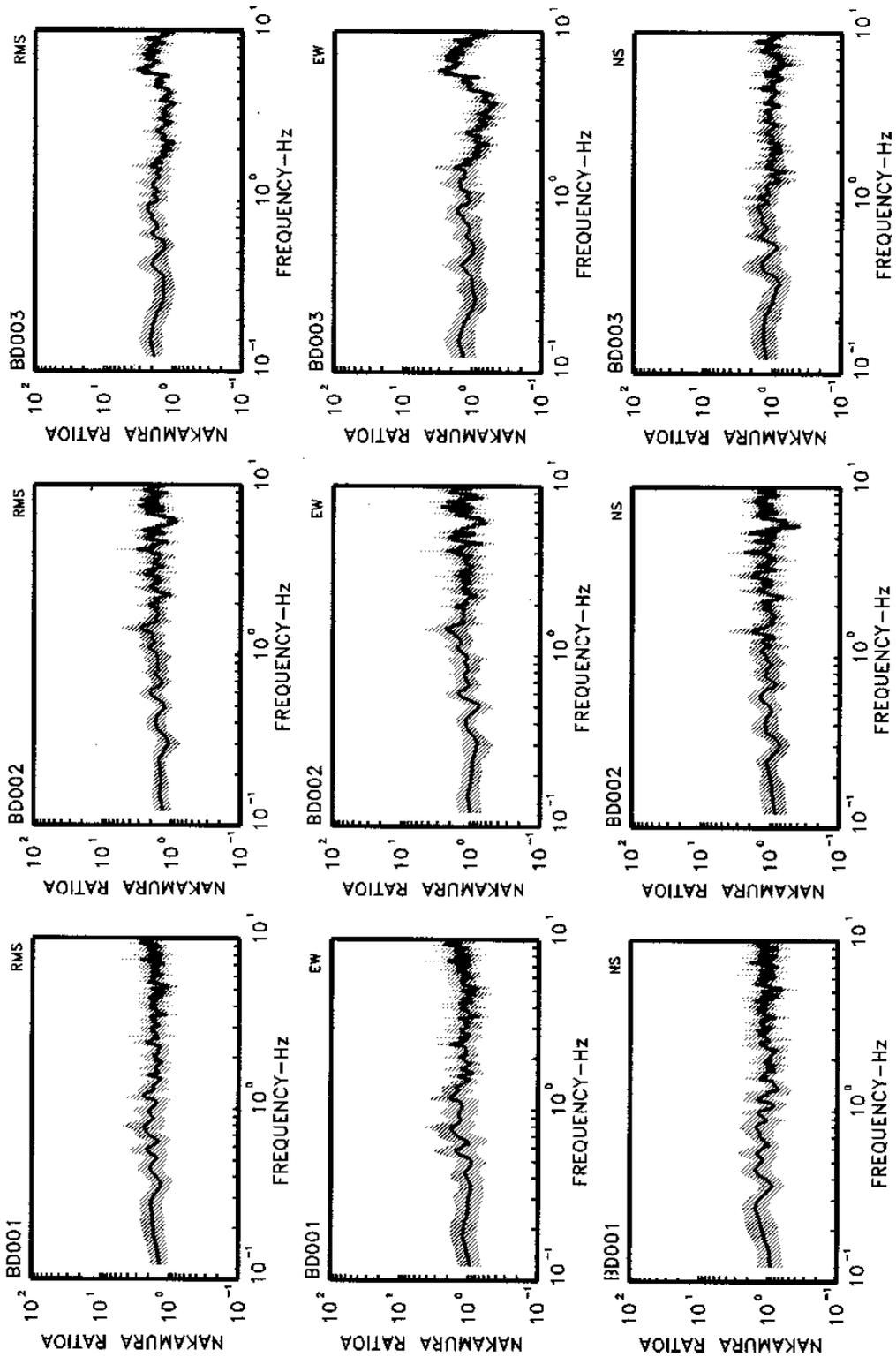
1. 水利局(1996)「嘉義沿海地區地盤下陷檢測報告」。
2. 亞新工程顧問公司(2000)「評估土壤液化評估與處理對策研擬第一期計畫(彰化縣員林鎮大村鄉與社頭鄉)總報告」行政院國家科學委員會。
3. 成功大學(1999)「彰濱工業區新生地動態地層下陷研究」期末報告。
4. 嘉義縣政府(1995)「布袋海埔新生地第二期地質鑽探工程」。
5. 嘉義縣政府(1993)「嘉義縣布袋港擴建客貨碼頭整體規劃報告」。
6. 歐陽正宅、侯和雄(1982)「台灣地區環島航運系統發展計畫(二)港址的調查與設計」, 港灣技術研究所。
7. 港灣技術研究所, (1984)「荷式錐貫入試驗於基礎工程之應用研究」73-研(六)。
8. 港灣研究中心(1999)「港灣地區地層下陷監測研究(II)-- 安平港」, 交通部科技顧問室委託研究。
9. 港灣研究中心(1999)「台中港 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。
10. 賴聖耀 (1990)「以標準貫入試驗值建立土壤液化潛能判別模式」中國土木水利工程學刊, 第二卷, 第四期, PP.301-311。
11. 賴聖耀 (2002)「以 921 地震液化案例之 SPT - N 值建立土壤液化潛能判別模式」, 液化潛能評估方法及潛能圖之製作研討會。
12. 賴聖耀、謝明志(2002),「以邏輯迴歸法建立 CPT 試驗評估液化機率之本土化模式」, 24 屆海洋工程研討會, PP.653-657。
13. 賴聖耀, 謝明志, 李豐博, 陳志芳 (1998)「布袋港地層下陷監測

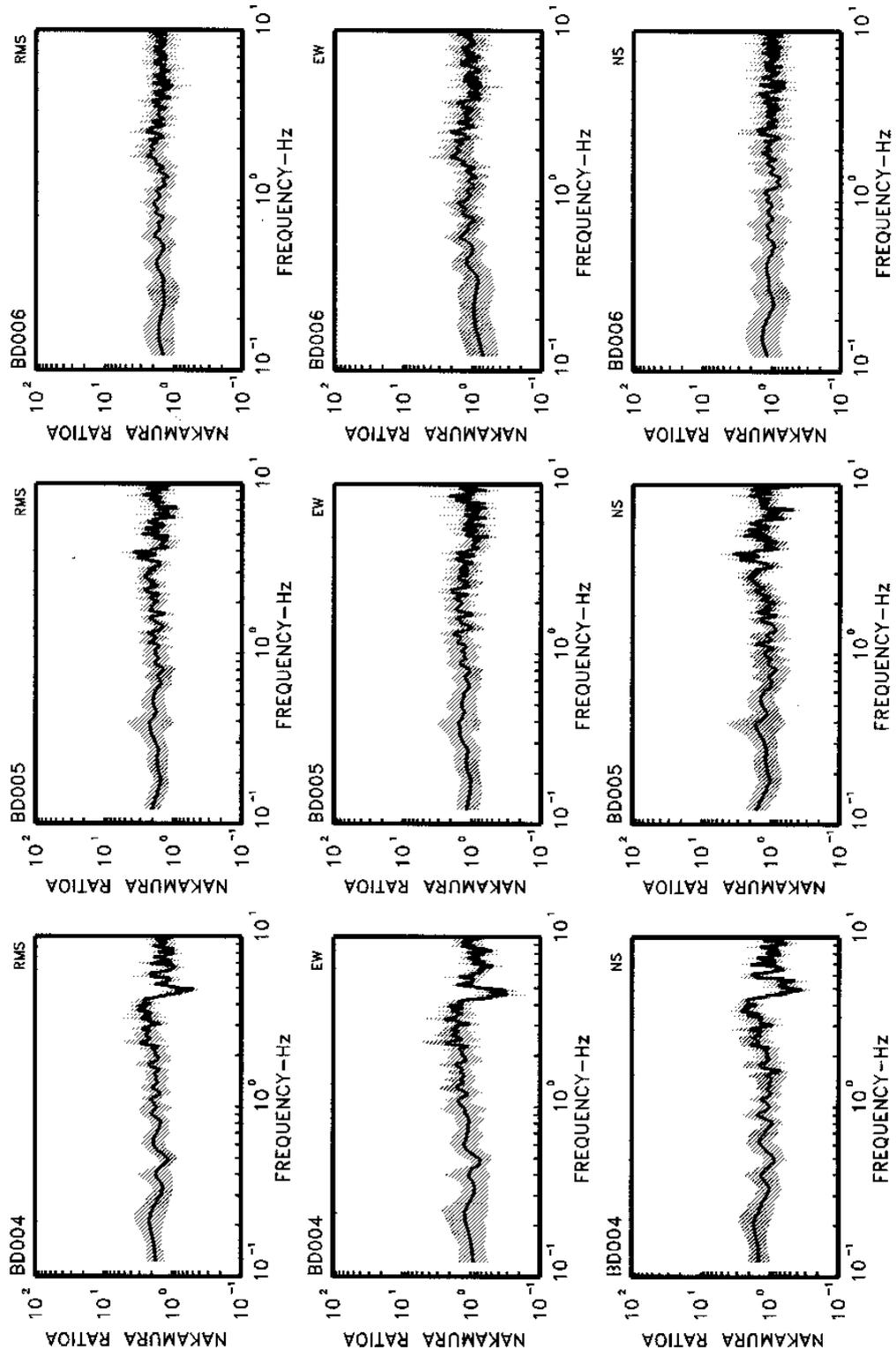
- 研究」第二十屆海洋工程研討會。
14. 賴聖耀、謝明志 (1996), 「台中港區土壤液化危險度分析與應用」八十五年度港灣大地工程研討會 PP.7-1 7-18。
 15. 賴聖耀、李豐博、謝明志 ,(1993)「地下水位歷時性變化與地層歷時性下陷之關係研究」,第十七屆全國力學會議。
 16. 賴聖耀、李豐博、蘇吉立、陳志芳 (1995)「以 Rowe cell 壓密試驗探討海岸土層之沉陷特性」第六屆大地工程學術研究討論會。
 17. 顏宗瓊 (1992)「反覆荷重下飽和砂土之累積應變比之探討」成功大學土木系碩士論文。
 18. 鄭世楠等人(1999)「台灣十大災害地震圖集」,交通部中央氣象局,CWB-9-1999-002-9。
 19. 鄭世楠和葉永田 ,(2002)「1848年彰化地震與彰化斷層關係的初步研究」港灣報導季刊,61期。
 20. Boulanger, R.W., Mejia, L.H., Idriss, I.M. (1997) "Liquefaction at Moss Landing during Loma Prieta earthquake " J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.123, No.5, pp.453-467.
 21. Biot, M.A. (1941), "General theory of three-dimensional consolidation ", J. of applied physics 12(2).
 22. Christian, J. T., and Swiger, W. F. (1975), "Statistics of Liquefaction and SPT Results," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASEC, Vol. 101, No. GT11, pp. 1135-1150.
 23. Chu, B. L., Hsu, S. C., Lai, S. Y., and Chang, Y. M. (2000) ,"Failures associated with liquefaction at Wufeng during Chi-Chi earthquake. " Proceedings of International Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi Earthquake September 18-20, Taipei. Vol. ,46-57.
 24. Cox, D. R. (1970), The analysis of binary data . Methuen and Co. Ltd., London, U.K. (Reprinted by Chapman and Hall, London, U.K., 1983).

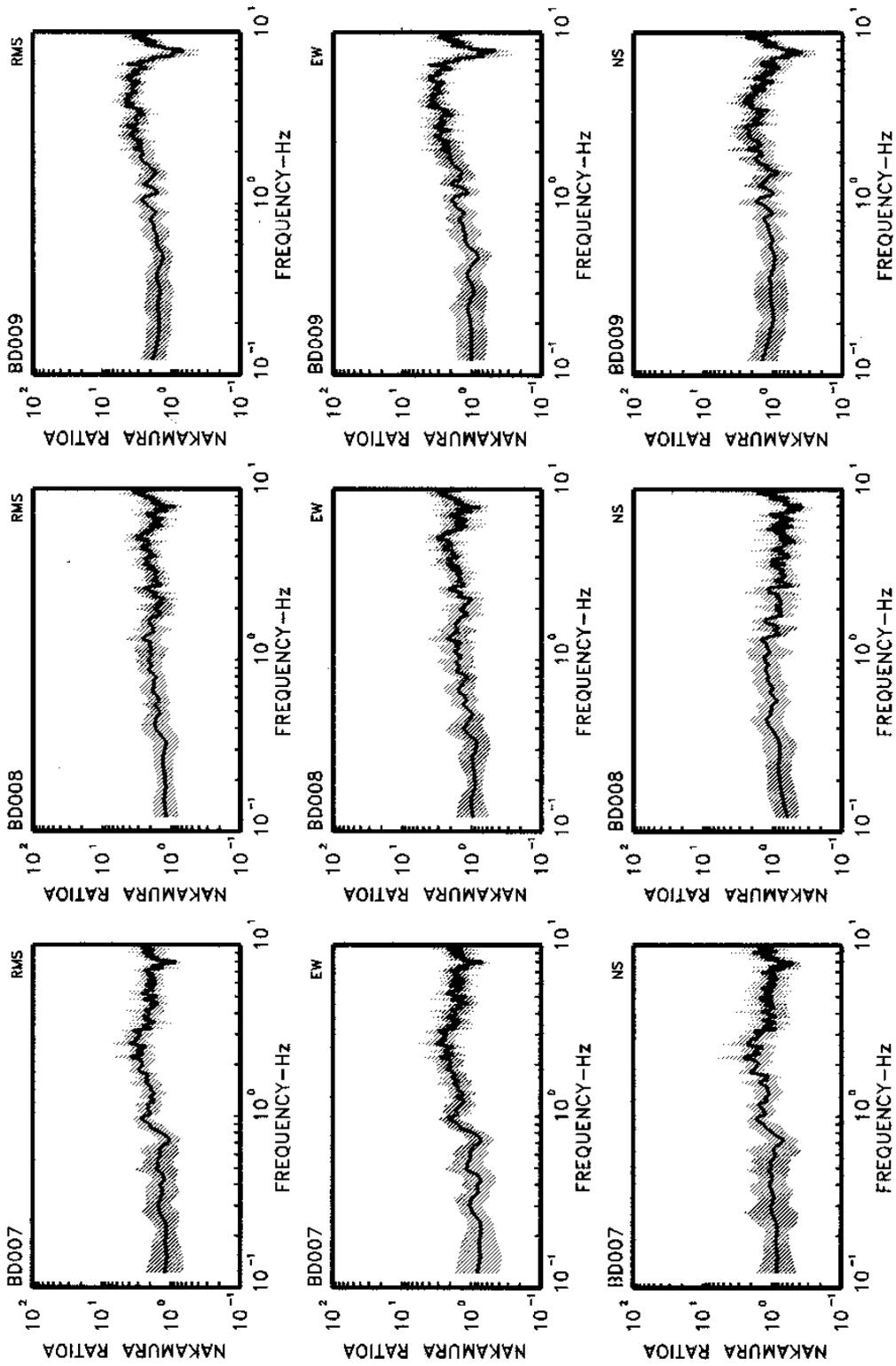
- 25.Helm, D.C. (1975),“One-Dimensional Simulation of Aquifer -System Compaction Near Pixley, California, 1,Constant Parameters”,Water Resources Research, Vol.11, No.3, PP.465~478.
- 26.Horowitz, J.L. (1982), “Evaluation of usefulness of two standard goodness-of-fit indicators for comparing non-nested random utility model . ” Advances in Trip Generration, Transportation Research Record 874, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 19-25.
- 27.Hwang, J.H., Yang, C.W. (2001), "Verification of critical cyclic strength curve by Taiwan Chi-Chi earthquake data " Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.21, pp.237-257.
- 28.Idriss, I. M. (1999), “An update of the Seed-Idress simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential . ”Proceedings, TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction Analysis, FHWA-RD-99-165. Washington, DC:Federal Highway Administration.
- 29.Iwasaki, T., Arakawa, T. and Tokida, K. (1982) , “Simplified Procedures for Assessing Soil Liquefaction During Earthquakes”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering Conference Southampton, pp.925-939.
- 30.Ishihara, K., Yasuda, S., and Nagase,H., (1996), "Soil characteristics and ground damage", Special Issue of Soils and Foundations, pp.109-118.
- 31.Juang, C. H., Rosowsky, D.V., and Tang, W.H. (1999), “A reliability-based method for assessing liquefaction potential of sandy soils.” Journal Geotech. and Geoenvir. Engineering, ASCE, 125(8), 684~689.
- 32.Lai, S.Y. & Hsieh,M.J.(1995)“The step-loading model of subsidence induced by groundwater level changes with time.”Proceedings of the Fifth International Symposiam on Land Subsidence The Hagne.
- 33.Lin, P. S., Lai, S. Y., Lin, S. Y., and Hseih, C. C. (2000) , “Liquefaction potential assessment on Chi-Chi earthquake in Nantou, Taiwan. ” Proceedings of International Workshop on Annual

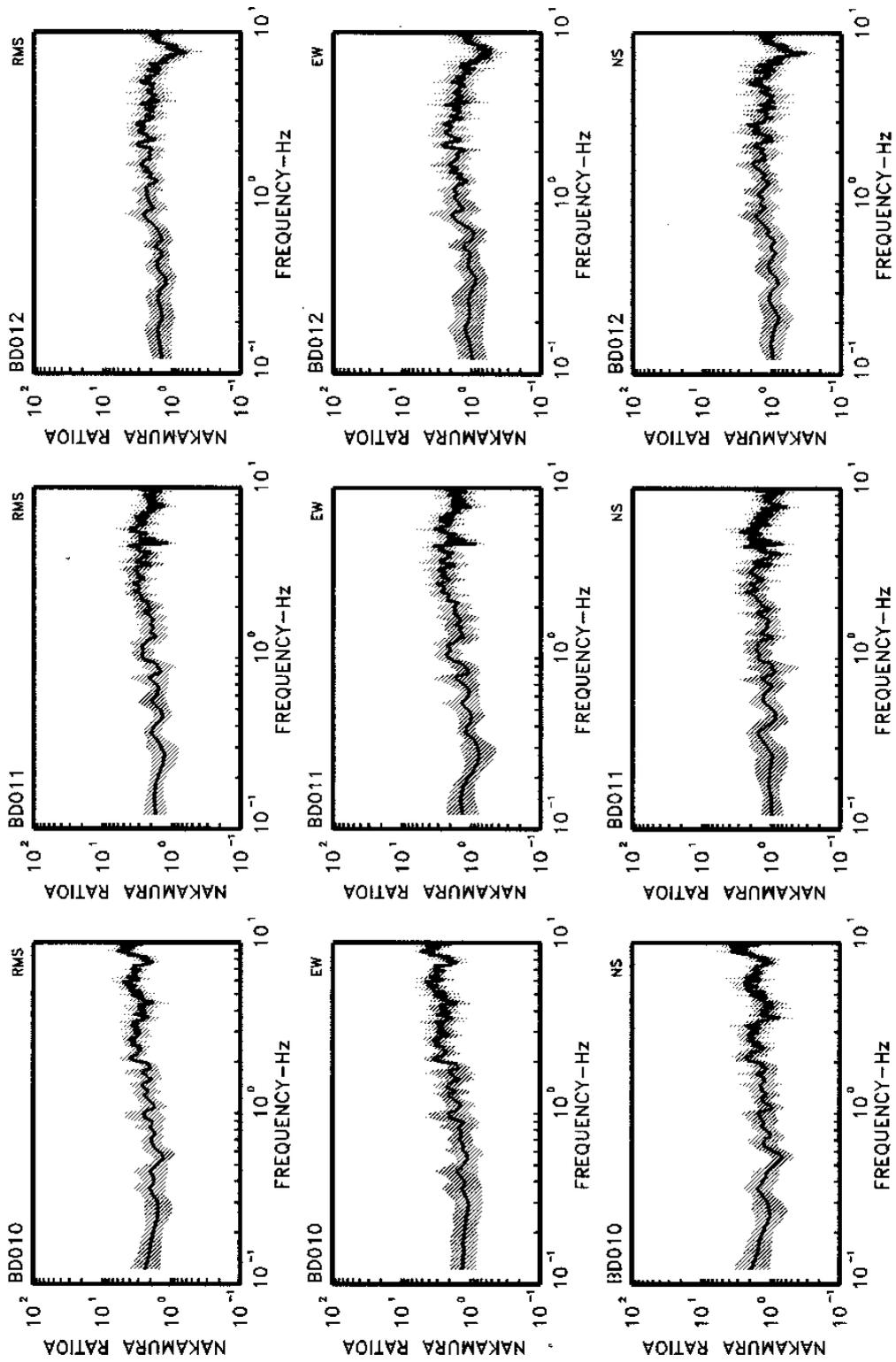
- Commemoration of Chi-Chi Earthquake September 18-20, Taipei. Vol. ,83-94.
- 34.Liao, S. S.,and Whitman, R.V. (1986), “ Overburden correction factors for SPT in sand.” J. Geotech. Eng., ASCE, 112(3), 373-377.
 - 35.Liao,S.S.C., Veneziano, D., and Whitman, R.V. (1988), “Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability.” J. Geotech. Eng., ASCE, 114(4), 389~411.
 - 36.Olsen, R. S. (1997), “Cyclic Liquefaction Based on the Cone Penetrometer test.” Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soil. Edited by T.L. Youd and I.M. Idriss. NCEER-97-0022.
 - 37.Robertson, P. K. and Campanella, R. G. (1985), "Liquefaction Potential of Sands Using the CPT" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 384-403.
 - 38.Robertson, P. K. and Wride C.E. (1997), “Cyclic Liquefaction and its Evaluation Based on SPT and CPT”, Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soil, Edited by T. L. Youd and I. M. Idriss. NCEER-97-0022.
 - 39.Robertson, P. K. and Wride C.E. (1998), “Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test,” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, pp.442-459.
 - 40.Seed,H.B., Idriss, I. M., and Arango, I. (1983), “ Evaluation of liquefaction potential using field performance data.” J. Geotech. Eng., ASCE, 109(3), 458-482.
 - 41.Seed,H.B., K.Yokimatsu, L.F.Harder ,and R.M. Chung (1985) ”Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation”, J._of Geot. Engr., ASCE, Vol.111, No.12, pp. 1425~1445.

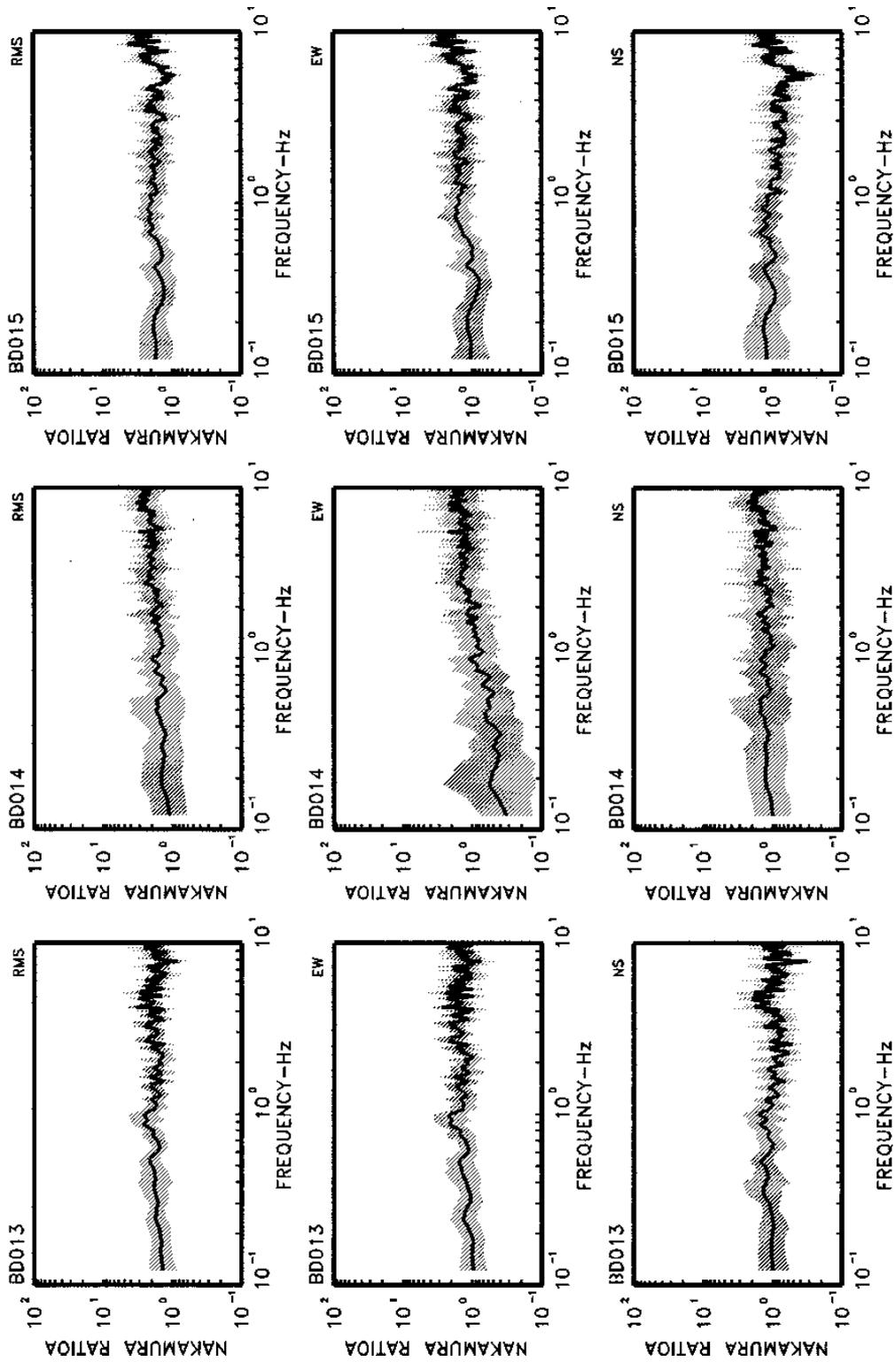
42. Seed, H.B., and De Alba, P.M. (1986), "Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands." *Proc. of In-Situ Test*, ASCE, 281-302.
43. Shibata, T. and Teparaksa, W. (1988), "Evaluation of liquefaction Potentials of Soil Using Cone Penetration Tests." *Soils and found.*, Tokyo, Japan, 28(2), 49-60.
44. Stark, T.D. and Olson, S.M. (1995), "Liquefaction Resistance using CPT and Field Case Histories." *J. Geotech. Eng.*, ASCE, 121(12), 856~869.
45. Seed, H.B., K. Yokimatsu, L.F. Harder, and R.M. Chung (1985) "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation", *J. of Geot. Engr.*, ASCE, Vol.111, No.12, pp. 1425~1445.
46. Shibata, T. and Teparaksa, W., (1988), "Evaluation of liquefaction Potentials of Soil Using Cone Penetration Tests", *Soils and foundations*, Vol.28, No.2, pp.49-60.
47. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
48. Youd, T. L. and Idriss, I. M. (1997), "Proceeding of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils." State University of New York at Buffalo.

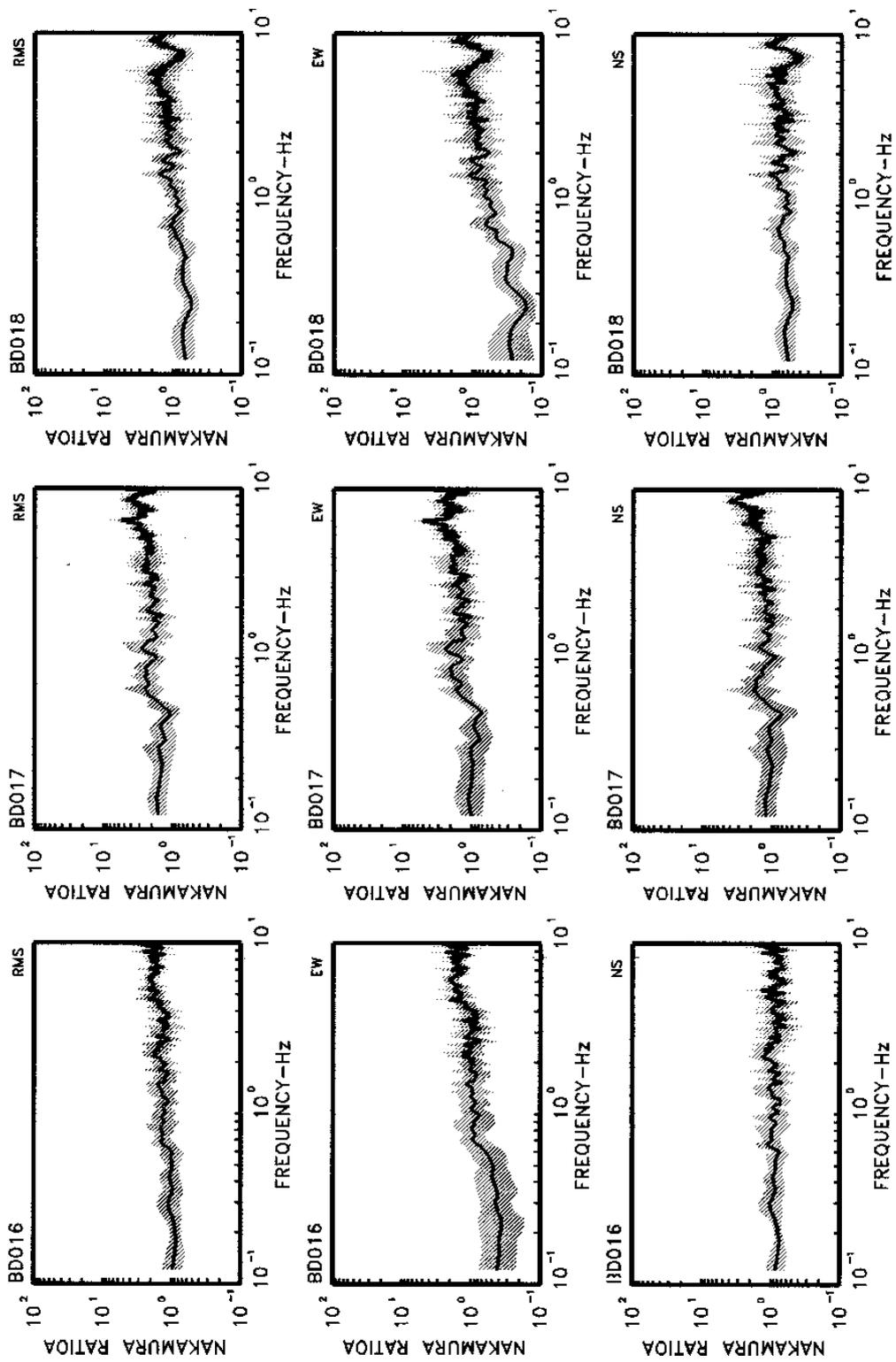


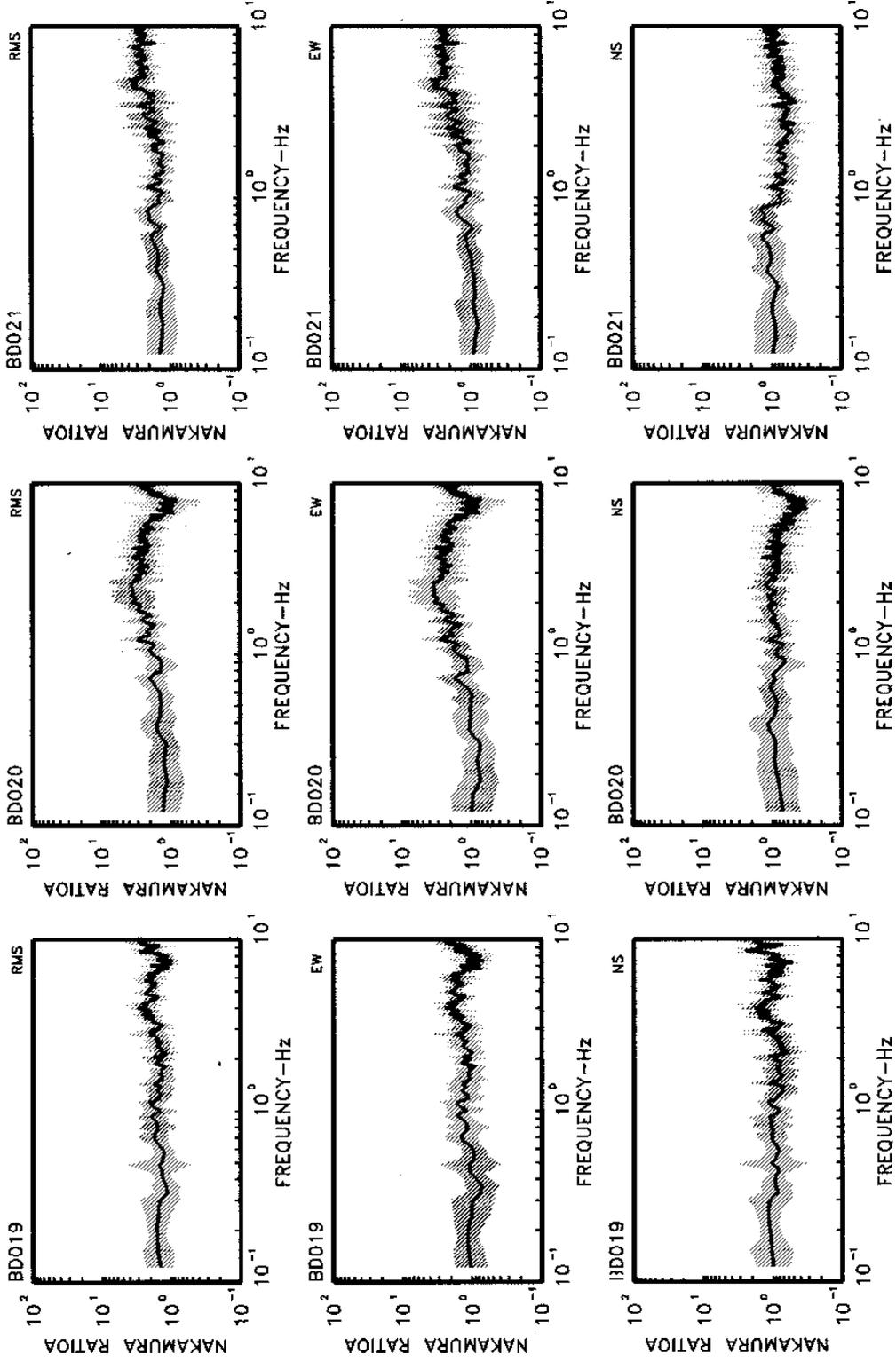


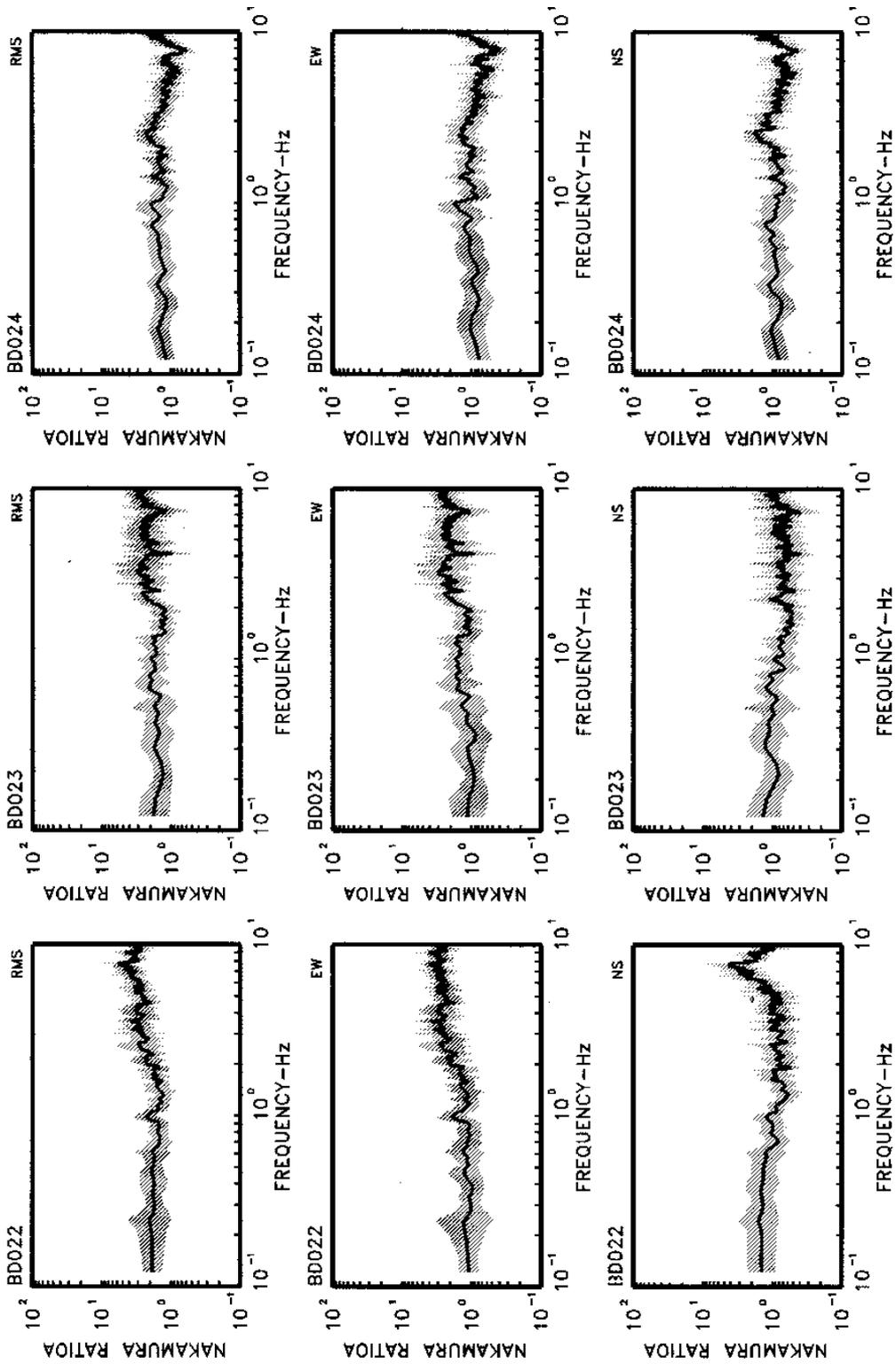


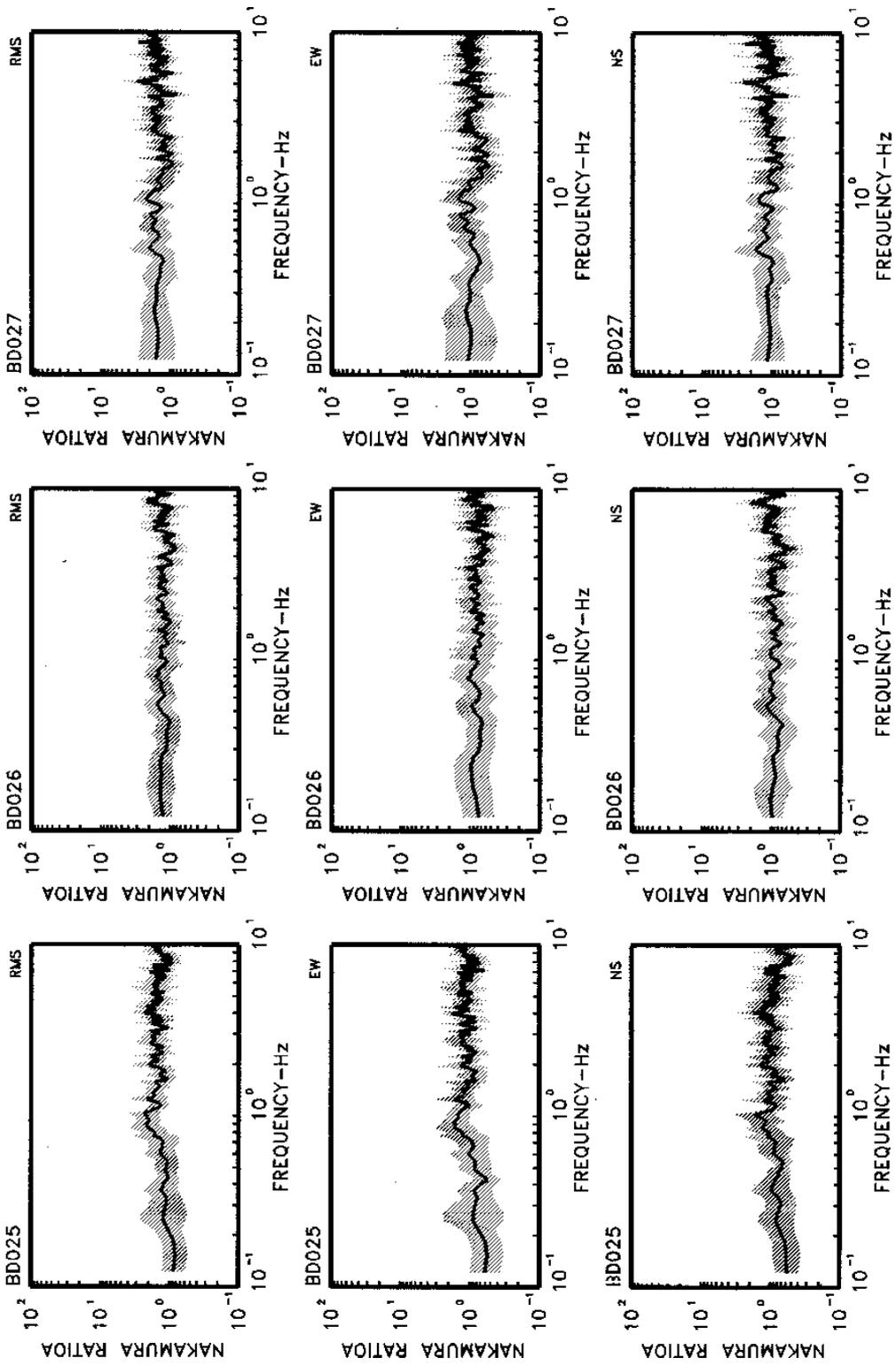


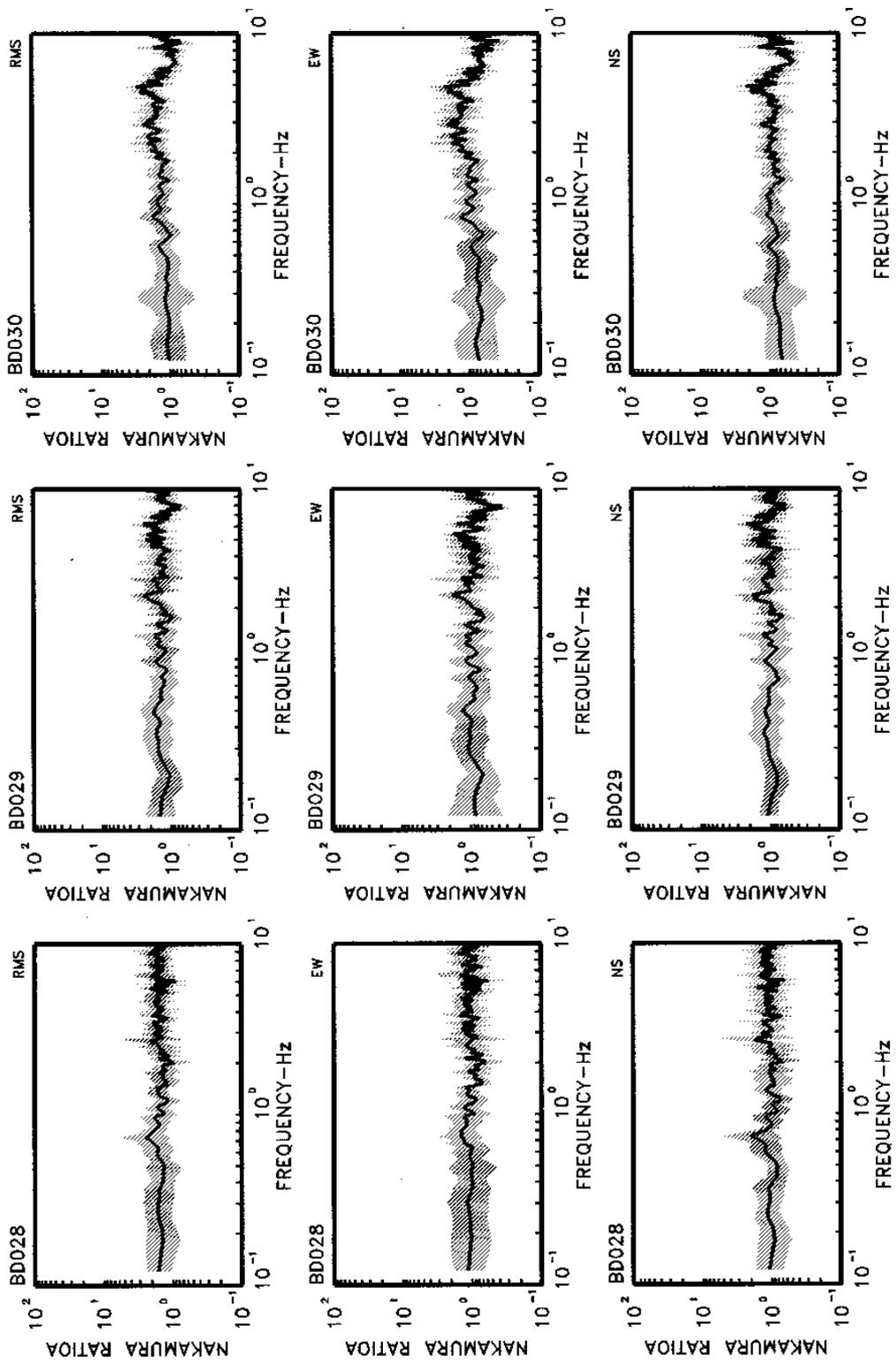


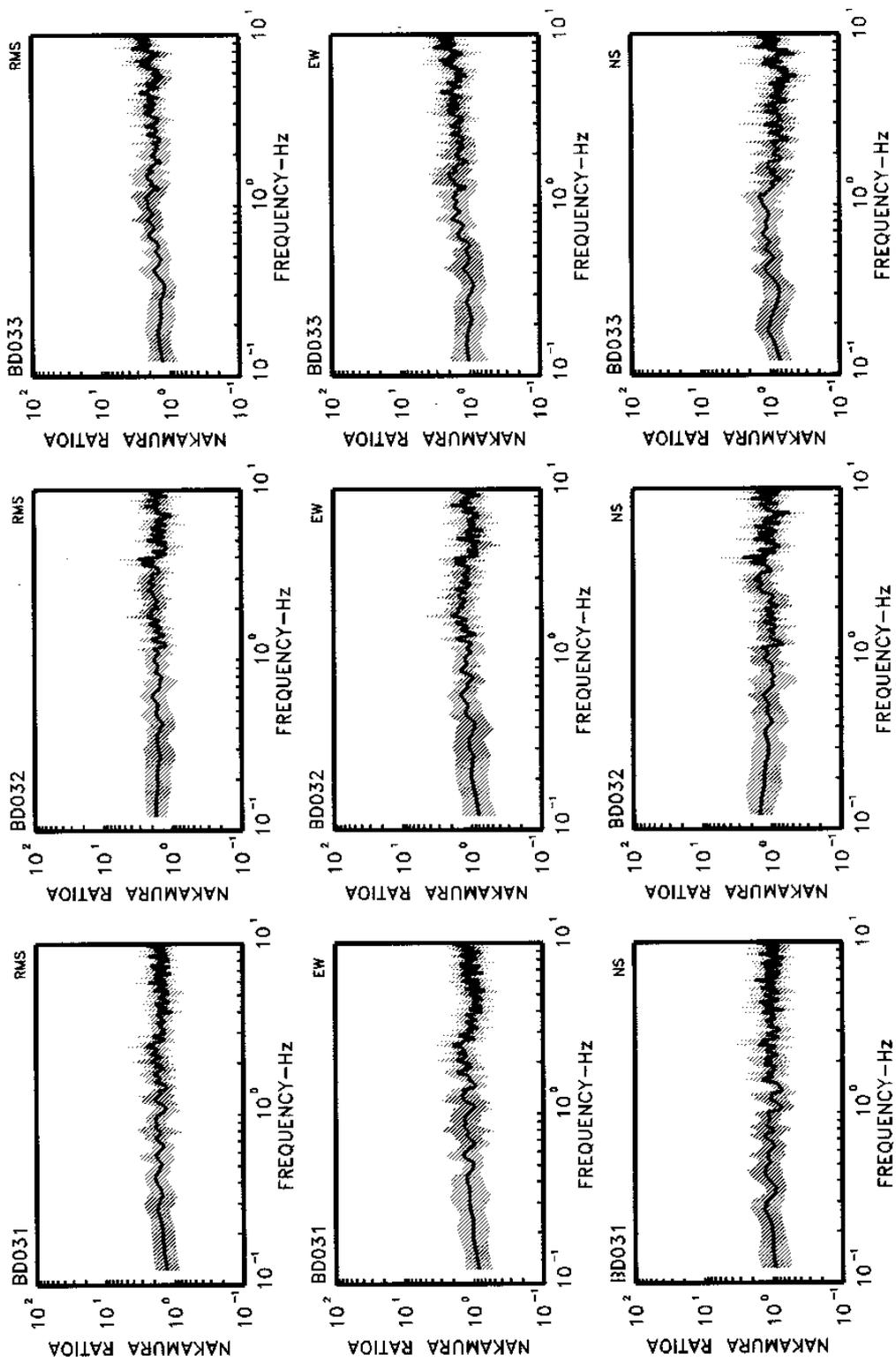


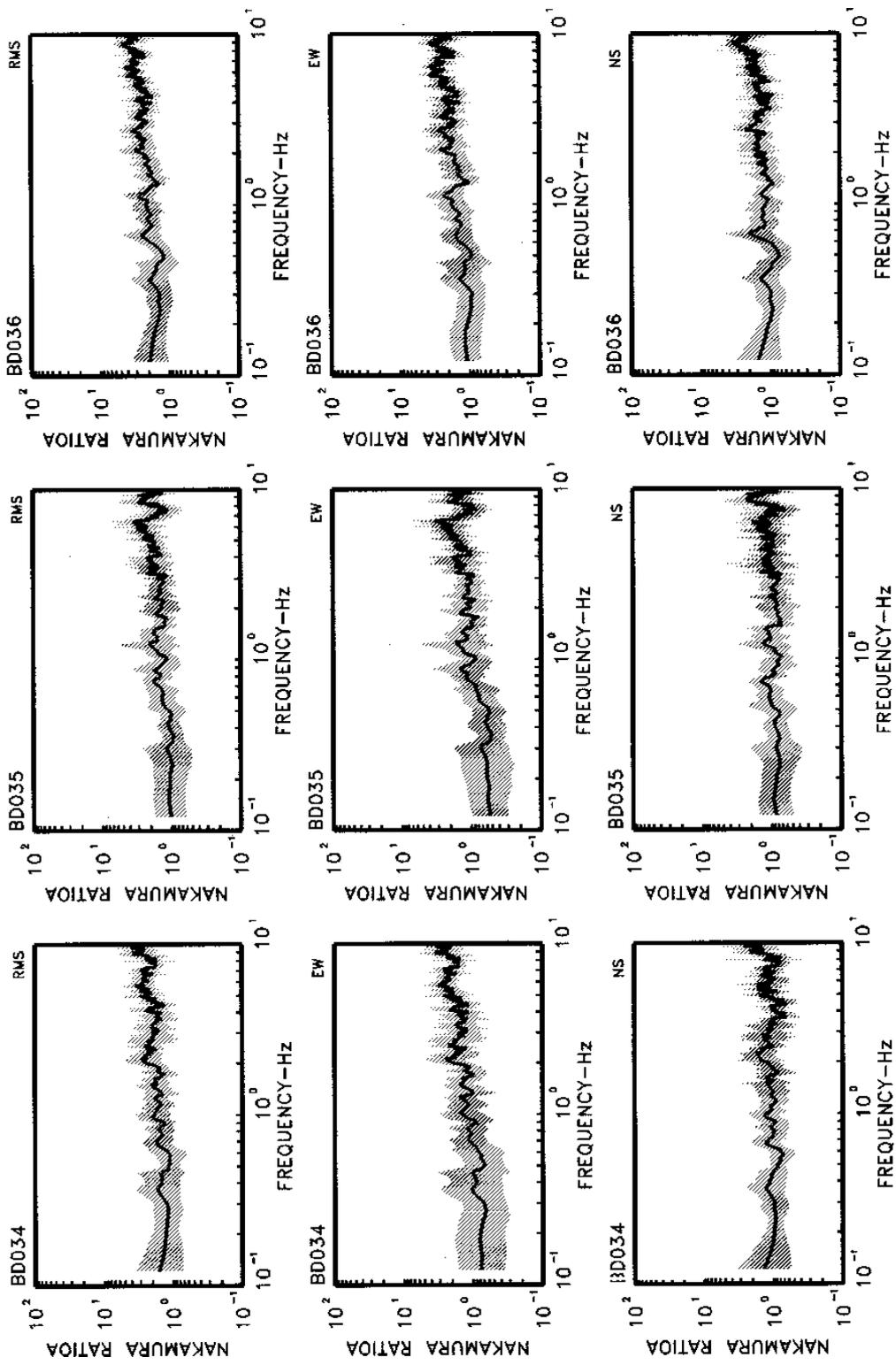


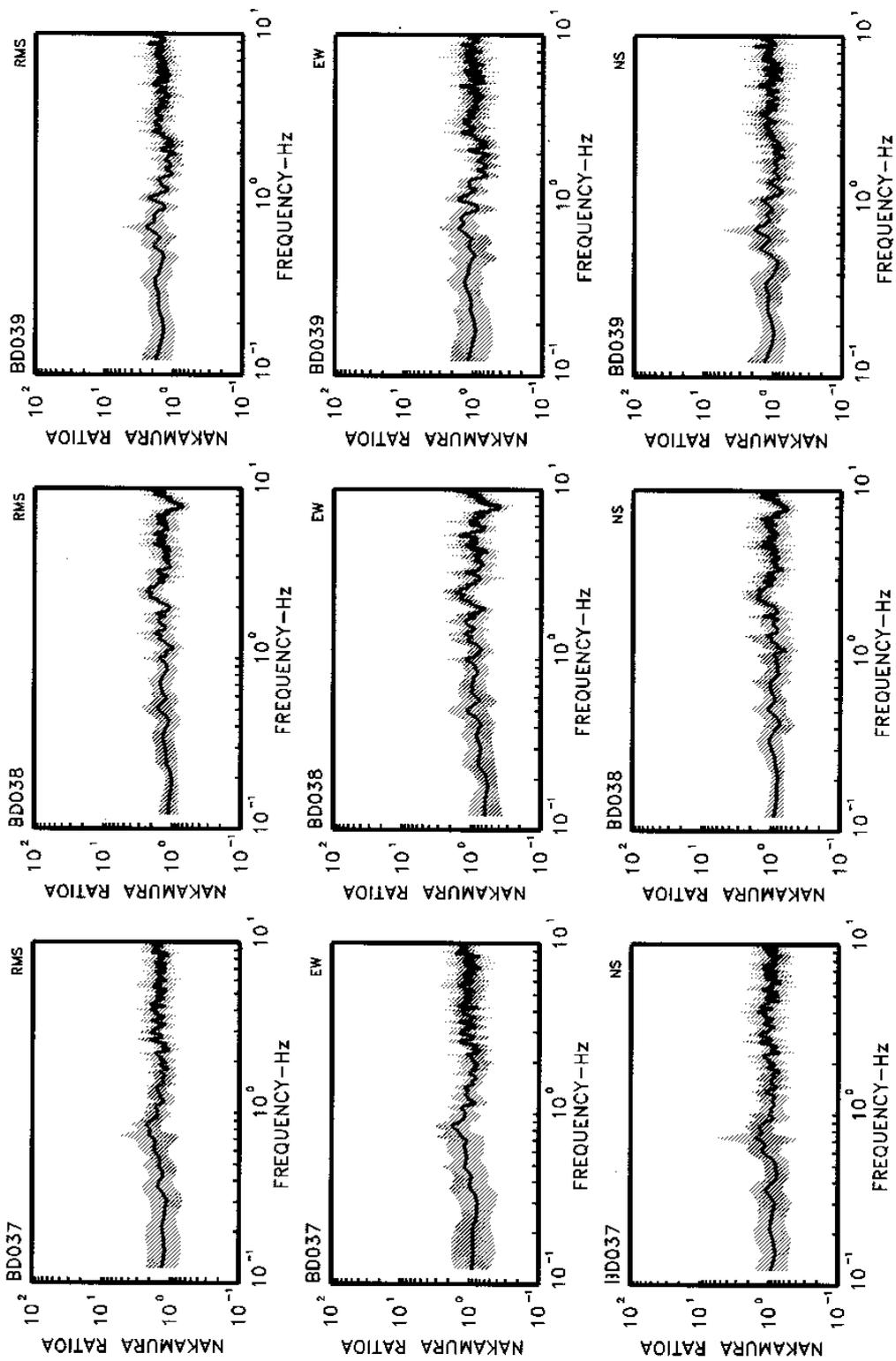


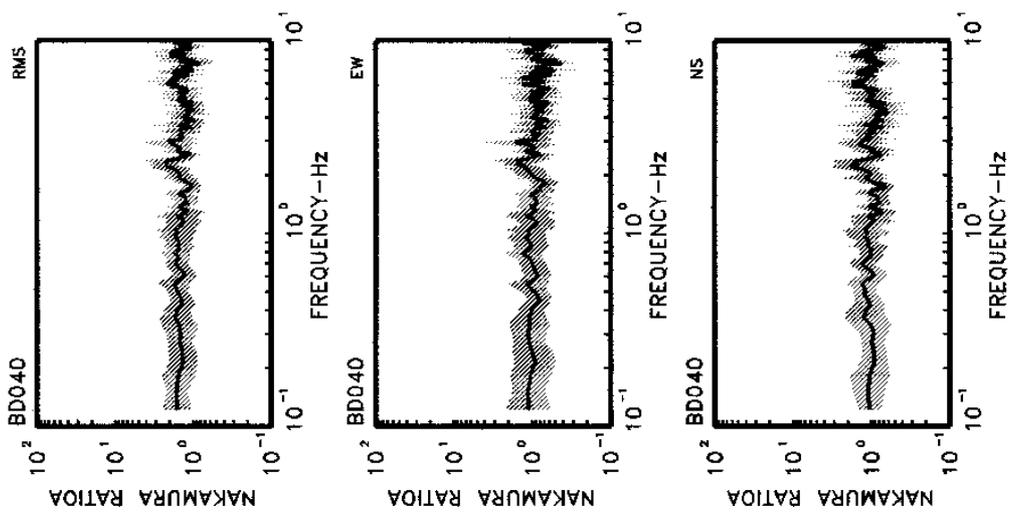












附錄 D

期末報告審查意見及處理情形

期末報告審查意見及處理情形

審查單位	審查意見	處理情形
<p>中興大學土木所 林炳森教授</p>	<p>1. 本計畫為有關布袋港連續性漂沙及地層下陷觀測之成果，頗具實用價值，可供未來規劃之參考。</p> <p>2. P.2-1 說明搜集 10 餘孔鑽探資料，但圖 2-3、2-4、2-5 只有 9 孔。</p> <p>3. P.2-3、2-4 圖 2-3 地層柱狀圖標示不清楚。</p> <p>4. P.3-2 圖 3-1 土層之“下弓”行為意為何？</p> <p>5. P.5-4 開放水壓計安裝深度為 143m，但卻在表 5-3 標為 143.5m</p> <p>6. 圖 5-10~5-14 水位變化曲線為何有中斷現象？</p> <p>7. 圖 5-19 有一條曲線回升，請說明緣由</p> <p>8. P.5-23 深度 8m 處有磁環，但在 P.5-25 圖 5-15 未標示 8m</p> <p>9. P.6-8~6-11 圖應標示北方。</p> <p>10. 表 7-1~表 7-23 PGA(gal) 單位有誤，為何有負號？</p> <p>11. P.9-9 公式(9-18)、(9-19)、(9-20)、(9-22)部份符號不清楚。</p> <p>12. P.11-6 Chang(14)與後面參考文獻不符合。</p> <p>13. 附錄 A CPT 資料圖不完全，例如 P.A-5 之水壓圖</p>	<p>謝謝肯定。</p> <p>另一些孔鑽探資料於外海，未列出。</p> <p>原圖為彩色圖。</p> <p>“下弓”改正為下陷。</p> <p>已經於文中改正。</p> <p>中斷現象為儀器故障。</p> <p>記錄誤差。</p> <p>0-8m 部份已包含於 0-16m。已經於文中改正。</p> <p>東西向:正號表東向,負號表西向。</p> <p>南北向:正號表北向,負號表南向。</p> <p>已經於文中改正。</p> <p>已經於文中改正。</p> <p>水壓已超出圖範圍。</p>
<p>中山大學海洋科學院 陳陽益院長</p>	<p>本報告所提之意見及建議其解決方式與防治已接近完成之任務。</p>	<p>謝謝肯定。</p>

<p>成功大學土木工程系 陳景文 教授</p>	<p>1.報告中多數文獻並未入報告之參考文獻內，例如賴聖耀(1998)、賴&謝(1995)....等。</p> <p>2.圖4.4與圖4.5之沉陷量未標示單位。</p> <p>3.本計畫觀測之時程中，涵蓋921地震發生時間，但報告並未有關921地震對本計畫範圍內影響之描述，請補充說明。</p> <p>4.本計畫觀測所得不少資料，應可歸納出一些預測模式，如沉陷量與地下水位變化之關係，或沉陷量與填土高度之關係等。</p> <p>5.本計畫發展本土化之液化模式應予肯定，其與國外發展出模式之異同處請補充說明。</p> <p>6.部份結論過於量化，其可置於相關章節之小結，建議部份可提出更具體明確之方案，以資參考。</p>	<p>已經於文中改正。</p> <p>已經於文中改正。</p> <p>921地震時布袋港之地表最大加速度僅有0.069g，未達本文分析之液化臨界加速度0.1g，因此未有液化及下陷，由921地震之現地踏勘及監測資料，亦未發現液化及下陷。</p> <p>參見p.3-9之3.4地層下陷模擬預測。</p> <p>參見p.8-11至p.8-12及p.9-11至p.9-12之比較。</p> <p>已經於文中改正。</p>
-----------------------------	---	--

<p>成功大學土木所 倪勝火教授</p>	<p>1. 文章內容豐富，成果卓著，主持人之研究值得肯定。</p> <p>2. 分層沉陷(不同深度)之沉陷之累積變化量，是否有與地表之沉陷量相互檢核其正確性。</p> <p>3. 沉陷可能代表土層之壓密(或密度增加)，其是否會影響土壤之強度？其變化量依主持人之觀點與心得，大概有多少？是否會影響液化之評估結果。</p> <p>4. 主持人之分析成果，若以現在耐震甲區之規範分析，港口區將嚴重液化，就主持人研究之經驗，以此規範分析液化是否合理？主持人是否建議比較合理之地表加速度分析標準。</p> <p>5. 報告中有些筆誤，請更正： (1)表 5-3 之校正係數，請加入完整之單位。 (2)表 5-2 之有效位數建議一致，圖 4.8 之抬頭有筆誤。 (3)表 7-1~7-23 可否說明正負值之意義，及是否可加入震央位置之資料。</p>	<p>謝謝肯定。</p> <p>參見 p. 6-7 之比較。</p> <p>目前布袋港區之地層下陷為附近地區深層(70m-300m)地下水超抽之影響，淺層沉陷非常微小，因此淺層土壤之強度影響有限，對淺層土壤液化之評估結果影響亦有限。</p> <p>耐震甲區規範 0.33g，是以 475 年迴歸期為分析依據，適合港口耐震強化碼頭區之設計，一般碼頭區宜參考日本規範以 75 年迴歸期為分析依據。</p> <p>已經於文中改正。</p> <p>已經於文中改正。</p> <p>東西向：正號表東向，負號表西向。南北向：正號表北向，負號表南向。震央位置可於中央氣象局網站查詢。</p>
<p>中山大學海洋 環境系田文敏教授</p>	<p>1. 本研究分地層下陷與漂砂二個部份，對於布袋港之開發有直接幫助。</p> <p>2. 對於地層下陷量的評估中，相關參數的來源應陳述清楚。</p> <p>3. 下陷之評估量與實測值相當，顯示評估方法或結果具相當的可信度。</p>	<p>謝謝肯定。</p> <p>總期末報告時，再補充相關資料。</p> <p>謝謝肯定。</p>

<p>中山大學海洋物理所 陳冠宇 教授</p>	<p>1.報告內容翔實，分析十分完整，值得肯定。</p> <p>2.報告打字錯誤：</p> <p>(1)Page II PROJECT STAFE:U.F.CHIU PROJECT STAFF, Y.F.CHIU。</p> <p>(2)P.5-31 卻 卻，P.8-2 Logit Logic， P.8-3 Likeihood Likelihood， P.11-9 今年 1999年，P.8-7 反復 反覆。。</p>	<p>謝謝肯定。</p> <p>筆誤，已依建議改進。</p> <p>筆誤，已依建議改進。</p>
<p>高雄港務局 郭總工程司石盾</p>	<p>1.本次期末報告內容充實，值得肯定，因此原則上通過。</p> <p>2.與會專家學者之審查意見，請港研中心於報告書內補充修訂。</p> <p>3.請港研中心將本計畫相關收支憑證於年底前儘速彙整後送交本局，以便核銷。</p> <p>4.其餘有關航道淤積之解決方案會後擇期至現場會勘後再行決議。</p> <p>5.本計畫第五年(最後一年)之期末諮詢審查報告改於交通部運輸研究所舉行，詳細時間及地點另行通知。</p>	<p>謝謝肯定。</p> <p>遵照辦理。</p> <p>遵照辦理。</p> <p>遵照辦理。</p> <p>遵照辦理。</p>

布袋港漂沙及地層下陷觀測研究計畫

全程計畫:自民國 88 年 9 月至 93 年 12 月

本年度計畫:自民國 92 年 1 月至 92 年 12 月

第二子計畫:漂沙現場監測計畫

計畫主持人:張富東 副研究員

共同主持人:邱永芳 主任

交通部高雄港務局主辦
交通部運輸研究所執行

中華民國九十二年十二月

摘要

藉由本研究有計畫之長期監測，布袋港港口附近海域之底質沉積物，其粒徑分佈與礫岩組成，隨季節變動情況，可以因之獲得彰顯；另配合沿岸流之平面流況調查與海岸地形之測量，當可整體性的探討沿岸漂砂的來源、漂砂運動之動力機制、漂砂優勢方向及漂砂量等問題。

本研究計畫預計執行五年，本年度為觀測之第四年，九十一年度受限於預算編列，平面流況調查及底床粒徑採樣分析等兩項調查暫停實施，僅就三大觀測項目中的港口附近水深測量進行調查；另因九十二年冬季時期之調查為求資料具有冬季之代表性，調查時程於九十二年十月底至十一月初剛完成原始資料的整理與檢核，不克於本年度提出具體的成果報告，因此本年度亦僅就夏季調查所得之結果作一論述。

平面流況調查經過四年共五次現場漂浮球軌跡追蹤，其夏季季節風時期，平面流況於退潮時為沿著海岸地形等深線，隨著潮水離岸由東北(NE)向西南(SW)方向或往西(W)退去；而漲潮時段整個平面流之流向，則隨著潮水向岸，並依地形由西南(SW)往東北(NE)方向流向外傘頂洲南側及港池附近；而冬季季節風時期，於退潮時平面流向則為沿海岸地形等深線，隨著潮水向南(S)或西南(SW)方向流去；而漲潮時因東北季風強勁，潮流與強風互逆影響，所以流向較無規律性且流速有偏小驅勢。

港口附近水深測量，歷經四年夏、冬兩種不同季節風時期共七次調查；其結果顯示布袋港港口附近水深變化走向為由北北東(NNE)較淺愈往南南西(SSW)則漸深；而由布袋港岸線海域之各時段水深比對，其八十九年至九十年間港外海域及岸線地形有緩慢往南沖蝕現象，而九十一年起則呈現迴淤現象；另由布袋港港口附近之各時段水深比對觀知，於商港港池碼頭與北堤外廓等區域每遇夏季颱風季節後，皆產生淤積現象。

就本計畫執行七次水深測量之結果，整體布袋港港口附近區域(計算面積為 26687500 平方公尺，水深基面-15 公尺)之土方量分析結果，可得到由 89 年 1 月之土方量 228268226 立方公尺至 92 年 6 月的土方量 220403480 立方公尺，四年期間其監測區域內之土方量共計淤積有 2284209 立方公尺，平均高差淤積了 0.09 公尺之多，究其原因主要是受冬、夏季節性變化不同與長期潮流沿著海岸漲退影響，底泥隨潮水沿著海岸線向、離岸往復作用所致；近年布袋港南面岸線與

建好美里海堤及離岸堤產生養灘作用減緩漂沙變化，91 年 4 月至 92 年 6 月三次調查結果，港外海域及岸線附近皆有迴淤現象；值得注意的是布袋商港港口與外航道附近水深正值颱風波浪之碎波水深處，每當遇到颱風波浪侵襲時，將引起該區域急劇的漂沙活動，使得底床沙粒常達到全面啟動狀態，並急遽的往港池、內航道與碼頭等區域聚集，致使布袋商港港區內常因此淤積大量淤沙。

底床粒徑採樣分析四次調查結果，依 ASTM 分類標準定義，其粒徑分類皆介於細沙至淤泥之間，但因區域不同粒徑特性稍有所差異。由各次採樣調查底床平均粒徑(d_m)與均勻係數(cu)平面分佈特性指標窺知，粗粒徑沉積物皆分佈於海岸之灘線與防波堤附近，而愈往外灘延伸或航道水深較深處則粒徑愈細；究其原因應為波浪之篩分(sorting)作用所致，而越往外灘延伸至水深-10 公尺處其平均粒徑(d_m)、均勻係數(cu)皆較小，蓋因為外灘海域水深較深，沙粒起動條件不足，有足夠時間形成較為安定的粒徑分佈；而由平均粒徑(d_m)平面分佈可知，粒徑分佈大致與海域地形等深線是一致的。

另外礦岩調查之結果顯示，布袋港港口附近海域的礦物組成仍以石英與板岩為主；兩者合計約佔全部底質沉積物 93.15%左右；其他礦物(如長石、方解石、燧石、砂岩、貝類等)皆屬微量(平均小於 1%)；經由五次採樣調查之礦物重量百分比統計圖(圖 5-7-1 至圖 5-7-5)觀知，布袋港港口附近海域因受冬、夏季季節性常年之南、北優勢方向的漲、退潮交替變化影響，其底床礦物成份已混合成為以石英與板岩為主要成分的均勻分佈。

另為了瞭解漂沙的來源及走向，觀察以上游外傘頂洲南岸(樣本 36)與下游八掌溪河口處(樣本 37)兩處採樣取得之礦岩重量百分比分佈值，發現兩處樣本與布袋港港口附近取得之 35 組樣本礦岩組成成份差異性不大，所以判定其漂沙移動方向應屬隨季節性變遷之南、北向波流交替作用，而平行海岸線移動之沿岸漂沙(littoral sand drift)。

由本調查四年度共五次採樣取得之石英及板岩兩大具代表性之礦物重量百分比平面分佈顯示，其平面分佈情況為兩者互有消長；其中石英與同一時段之粗粒徑平面分佈等值線相似；而板岩則與細粒徑平面分佈等值線較為相近；研判原因可能是受波浪篩分(sorting)作用，使得比重較輕之石英(比重 2.65)易被沖往灘線附近滯留，而板岩等礦物(比重大於 2.80)則因比重稍重於石英，較易沉澱於水深較深及波浪作用不到之處；且觀其底床礦物分佈之等值線與地形等深線的走向趨勢相近似，皆為東北往西南方向漸變，故其底床礦物分布應與水深變化有關。而其他礦岩成分則因含量比例皆較為稀少，尚無法

依其重量百分比來判定與漂沙來源間的關係。

綜觀本研究四年所得之調查結果，整個布袋港附近海域之平面流況，是隨著潮水漲、退變化而定；退潮時沿著海岸地形等深線，由東北(NE)向南(S)或西南(W)方向退去，而漲潮時則由西南(W)往東北(NE)方向流入外傘頂洲南側及港池附近。

布袋港附近岸線海域水深變化，其走向為由北北東(NNE)較淺愈往南南西(SSW)則漸深，而布袋港港口附近水深則因恰值颱風波浪之碎波條件水深，每遇颱風侵襲港外漂沙就隨波浪湧入港池與航道內，因此港池及航道、西北碼頭區與港口突堤附近皆有大量漂沙淤積現象；而此一現象恰可證明在布袋港港口附近之底床粒徑與現有水深條件下，只要波浪尖銳度稍大，就足以使得底床沙粒達到全面漂沙起動臨界值，將海域漂沙帶往港內，將嚴重影響布袋港之航船安全。

目錄

第一章	前言.....	1-1
第二章	自然條件資料.....	2-1
	2.1 地理環境及現況.....	2-1
	2.2 風速風向.....	2-1
	2.2.1 冬春季季節風.....	2-2
	2.2.2 夏季季節風.....	2-2
	2.3 颱風.....	2-2
	2.4 波浪.....	2-3
	2.4.1 季風波浪.....	2-3
	2.4.2 颱風波浪.....	2-3
	2.5 海流.....	2-3
	2.6 潮汐.....	2-4
	2.7 海底底質.....	2-4
第三章	平面流況調查.....	3-1
	3.1 調查範圍.....	3-1
	3.2 調查系統架構及方法.....	3-2
	3.2.1 調查系統架構.....	3-2
	3.2.2 調查方法.....	3-4
	3.3 調查結果與分析.....	3-6
	3.3.1 夏季季節風之平面流況.....	3-6
	3.3.2 冬季季節風之平面流況.....	3-12
第四章	港口附近水深測量.....	4-1
	4.1 調查範圍.....	4-1
	4.2 調查儀器與方法.....	4-2
	4.2.1 使用儀器.....	4-2
	4.2.2 調查方法.....	4-3
	4.3 調查結果與分析.....	4-7
第五章	底床粒徑採樣分析.....	5-1
	5.1 調查範圍.....	5-1
	5.2 調查步驟與方法.....	5-1
	5.2.1 主要儀器設備.....	5-3
	5.2.2 作業流程及分析方法.....	5-4
	5.3 樣本分析與結果.....	5-8
第六章	結論與討論.....	6-1
	參考文獻.....	7-1

第一章 前言

布袋港港址位於台灣西南海岸之嘉義縣境內，西臨臺灣海峽，北及西北有統汕洲、箔子寮與外傘頂洲等沙洲形成天然屏障；其地理位置圖如圖 1-1 所示。近年布袋港受外傘頂等沙洲逐漸消失以及鄰近濱海工業區之急速開發影響，其鄰近海域之漂砂活動變化趨於劇烈，而此現象的發生可能使得布袋港之碼頭及航道等區域產生漂沙的淤塞或侵蝕情況，進而影響航船及港埠作業之效率與安全。有鑑於此，為了能進一步瞭解布袋港港區附近之漂砂活動情況及其對布袋港未來之開發與擴建可能造成的影響程度，本計畫乃於布袋港港口附近海域進行長期的漂砂監測，希望藉由長期漂砂監測的實施，取得漂砂活動的基本數據，如此將可藉由此實測數據資料來分析與研判該區海域之地形變化與漂砂特性；而本漂砂監測計畫所得出之結果，將可適時與正確的提供港務局於規劃設計上有力的參考數據。

基於上述，交通部高雄港務局(以下簡稱貴局)遂委託交通部運輸研究所(以下簡稱本所)對布袋港港口附近海域以半年為一期，分年來辦理必要的漂砂活動基本資料調查，本研究預計實施五年，而其主要工作內容共分三個主要項目(一)平面流況調查(二)港口附近水深測量(三)底床粒徑採樣分析。

而本文係本研究計劃執行第四年的成果報告，文中第二章對布袋港附近區域的自然條件與現狀作一必要之蒐集與描述；而第三章、第四章與第五章則分別依本研究之主要工作內容及項目就其調查範圍、使用儀器、執行步驟與分析結果等逐一描述之；第六章則對於本次研究所獲得之調查成果作概要性的總結與討論。

最後，期望在布袋港的開發進程中，能藉由本研究之長期調查成果進一步描繪出布袋港港口附近海域之漂砂活動情況，以作為下一階段港口擴建與規劃設計時之有力依據，更希望這些資料可以作為日後布袋港附近海域從事相關性調查研究時的理想參考數據。

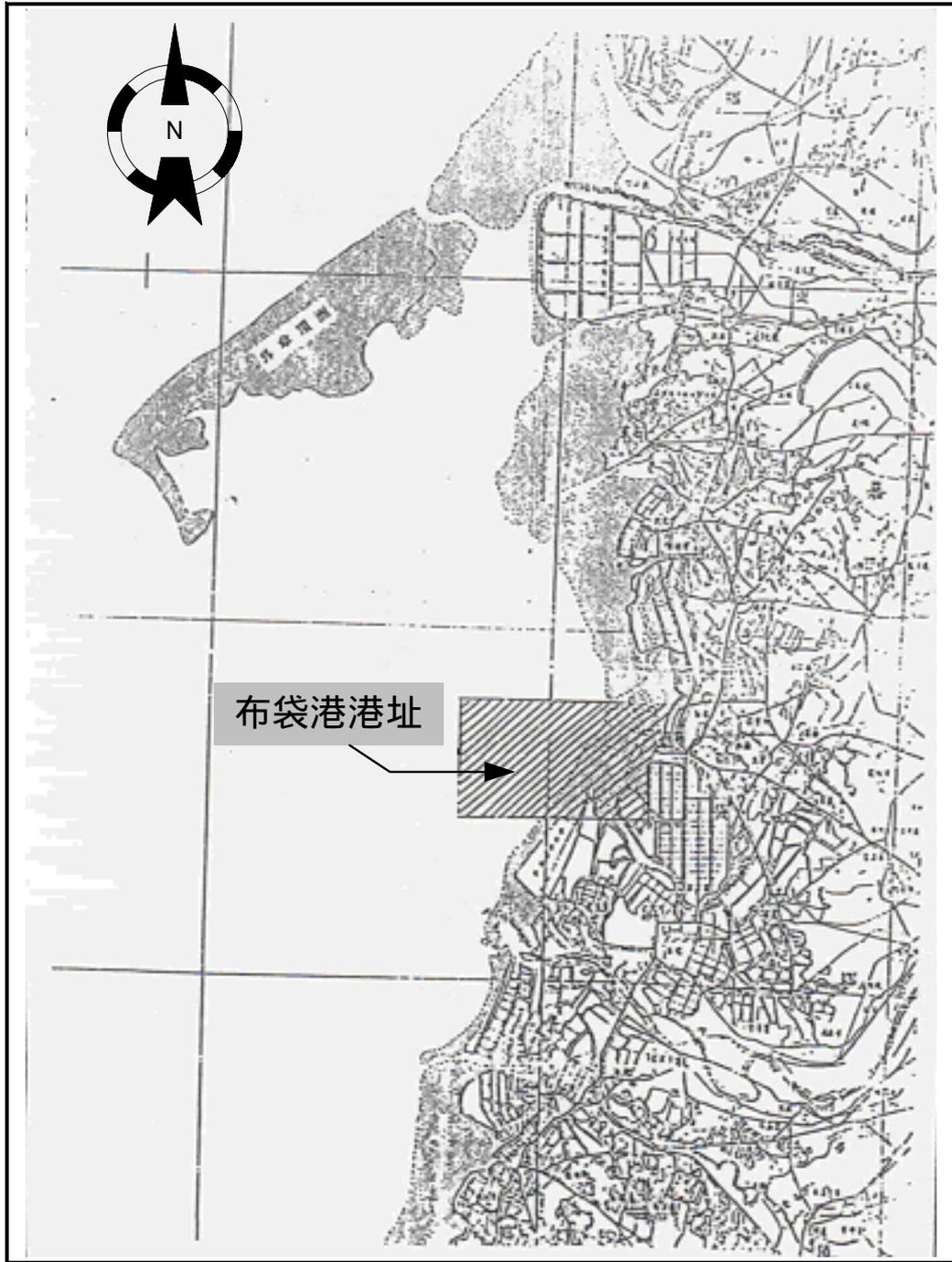


圖 1-1 布袋港地理位置圖

第二章 自然條件資料

布袋港鄰近地區之自然條件資料蒐集與分析可摘要如下：

2.1 地理環境及現況

本地區海岸線向陸地凹入形成灣澳灘地，其外灘淺水區多被用於牡蠣養殖，近年由於養殖技術增進，養殖範圍迅速向深水區擴展，已成為當地居民重要收入之一。本地區內灘地中央部份的較高灘地已開發完成第一期 66 公頃及第二期 60 公頃之海埔新生地，海埔地與市區間保留 100 公尺寬水道，而以過水橋橋寬 15 公尺四線道聯繫兩地交通，港區內則於東堤北側闢有深水碼頭 250 公尺，供與澎湖鎖港通航之定期航線使用。而現有航道水深濬深-6~-9 公尺之間，而接續海埔地北堤亦已延建北防波堤 2253 公尺，以作為港區屏障；其港址現況如圖 2-1 所示。



圖 2-1 布袋港港址現況

2.2 風速風向

本區海岸同於臺灣西海岸一般地區，具多風之氣象特性，冬春兩季季風期強風歷時甚久，夏秋季風期則僅於颱風或熱帶性氣壓形成時發生強風，平時風力較弱。

2.2.1 冬春季季節風

每年 10 月至翌年 3 月為冬季季節風，其風向以 NNE 及 NE 為主，瞬間風速可達 29m/sec，普通風速多介於 11.0~17.5m/sec 之間，以吹風延時而言，五級強風(8.0/sec)以上強風，歷時年平均 486 小時。

2.2.2 夏季季節風

夏季季節風以 NNE 或 SSW 風向為主，期間為每年 4 月至 9 月，其風速在 5.0~10.0m/sec 佔多數，吹風延時平均約 20 小時。

2.3 颱風

根據自 1897~1997 年侵台颱風路徑統計如圖 2-2 所示，對於本區較具威脅之颱風路徑計有第二、第三、第五類等，以通過台灣南部及沿台灣海峽北上者為最。由於本區位中央山脈以西，故多數第二類、第三類颱風到達該區海岸時，風速已較發生時減弱，資料顯示，該三種路徑 100 年統計發生 176 次之多，年平均發生 1.76 次，佔侵台颱風次數之 50.3%。

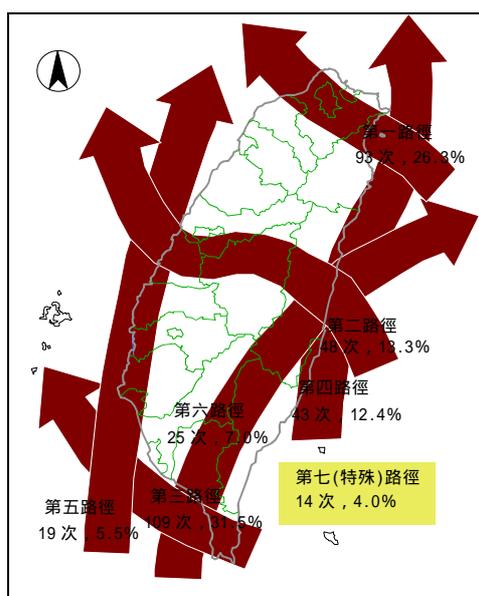


圖 2-2 1897~1997 年侵台颱風路徑統計

2.4 波浪

2.4.1 季風波浪

本區域因受外傘頂洲之遮蔽作用，冬季時波高集中分佈於 0.5 公尺至 1.5 公尺間約佔 74.6%，週期集中佈於 4 秒至 7 秒間佔 88.5%。夏季波高偏小，0.5 公尺以下佔 70.2%，1 公尺以下概率高達 94.7%，週期則分散於 3 秒至 7 秒間，佔 76.5%。

2.4.2 颱風波浪

選定 63 個(1940~1990)對本區影響較大之颱風進行颱風波浪推算。因受澎湖群島及外傘頂洲遮蔽效果，布袋港以西至南向間深海波浪較具威脅，設計 50 年颱風波浪如附表 2-1 所示：

表 2-1 布袋港設計 50 年颱風波浪統計表

波向	H _{1/3} (M)	T _{1/3} (SEC)
W	4.0	8.6
WSW	4.9	9.1
SW	5.4	9.4
SSW	6.1	10.5
S	6.2	12.7

(資料來源：嘉義縣政府)

2.5 海流

交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究報告：

1. 「台灣四周海象、氣象調查研究(四)」，民國 78 年
 - (1)由海流實測資料顯示，冬春季風下，當風速小時，海流主要由長週期海流及潮流組合而成。
 - (2)潮流以下日週期為主，振幅約 40 公分/秒。
 - (3)長週期海流主要流向為北北西，流速約 7.31 公分/秒。
2. 「台灣西部海岸沖淤調查研究」，民國 80 年
 - (1)本海域底部流向，夏季漲潮為 N-NE 向，退潮時為 S-SW 向。冬季漲潮為 NNE-NE 向，退潮時為 WSW-SW 向。
 - (2)水下 2 公尺浮標追蹤調查顯示，夏季時大潮及小潮之最大流速分別為 126.88cm/sec 及 104.75cm/sec，方向大致為 NNE 方向，冬季時發生最大流速之流向均在 NNE-NE 之間，最大流速值約

102.8cm/sec。

2.6 潮汐

本地區海岸潮汐為正規日雙潮，平均週期 12.4 小時，最高潮位發生於春季朔望日左右，潮位為+2.00 公尺；而平均高潮位為+1.07 公尺，最低潮位發生於夏季朔望日，潮位為-1.136 公尺，平均低潮位約-0.42 公尺，最大潮差 2.42 公尺，暴潮位定為+2.9 公尺。

2.7 海底底質

交通部運輸研究所之「台灣海峽外傘頂洲灣內波能量分析與漂砂量之研究」計畫中為了解外傘洲附近漂砂及海床底質特性，曾於外傘頂洲砂嘴及布袋港海域採取砂樣做分析，其中布袋海域之取水樣水深介於-2.3m~-5.2m 之間，分析結果顯示布袋海域之平均中值粒徑為 0.12mm。

2.8 河川輸砂

本區主要的河川為北港溪、朴子溪及八掌溪，各河川之年輸砂量如附表 2-2 所示；其中以八掌溪的年輸砂量最大，其值約為 316 萬噸/年，其次為北港溪的 235 萬噸/年，年輸砂量最小的為朴子溪之 83 萬噸/年。

表 2-2 布袋商港附近各河川年輸砂量統計表

流域名稱	年逕流量 (百萬立方公尺)	年總輸砂量 (百萬公噸)	單位面積輸砂量 (公噸/平方公里)
北港溪	1023.70	2.35	3642
朴子溪	551.49	0.83	1946
八掌溪	744.73	3.16	6656

(資料來源:台灣水文年報(85)，經濟部水資源統一規劃委員會，(87/2))

第三章 平面流況調查

平面流況為漂砂移動的動力影響因素之一，因此由平面流況調查可以用來初步判別特定海域之漂砂走向及其來源，本章即為本計畫對於布袋港港口附近及其鄰近海域所作之平面流況所作的調查研究；以下各節則分別針對本調查之調查範圍、調查系統架構及方法、調查結果與分析等項作一簡介與描述。

3.1 調查範圍

本計畫之平面流況調查主要選擇冬、夏兩季各量測一次，希望藉由本調查觀察出布袋港港口附近海域受季節性變化影響時，其於漲、退潮期間之平面流況變化，進而推估漂沙受季節變化影響可能產生之走向；本計畫平面流況調查四年來共實施五次，合計獲得冬季季節風兩次，夏季季節風三次的量測數據資料；八十九年度第一次調查於89年1月1日至1月2日之間實施，第二次調查工作則於89年6月23日至6月24日之間施測完成；而九十年度第一次平面流況調查於90年6月18日至6月19日之間實施，第二次平面流況調查工作則於90年10月25日至10月26日之間施測完成；而九十二年度第一次平面流況調查於92年6月5日至6月6日實施，另於92年6月25日補測一次完成。而其調查範圍皆以布袋港港口南、北方距離二公里處之海域及布袋港口與港內水域為主要施測區域，其平面流況調查施測範圍如圖3-1所示。

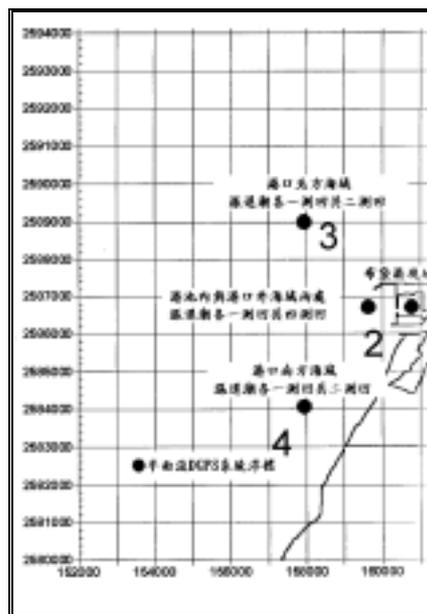


圖 3-1 平面流況調查施測範圍

3.2 調查系統架構及方法

本調查方式係採用漂流物量測法，追蹤整個平面流速及流向，利用球形浮標放流於海域中，浮標內裝置 GPS 定位儀，另配合無線電發射器，每一時間間隔時量測接收其座標位置，再利用 GIS 地理繪圖系統處理，分析出整個流況變化，依此可判定布袋港海域其可能的漂沙走向。

3.2.1 調查系統架構

本調查所使用之平面流況量測系統架構如圖 3-2 所示，共可分為兩大部分：

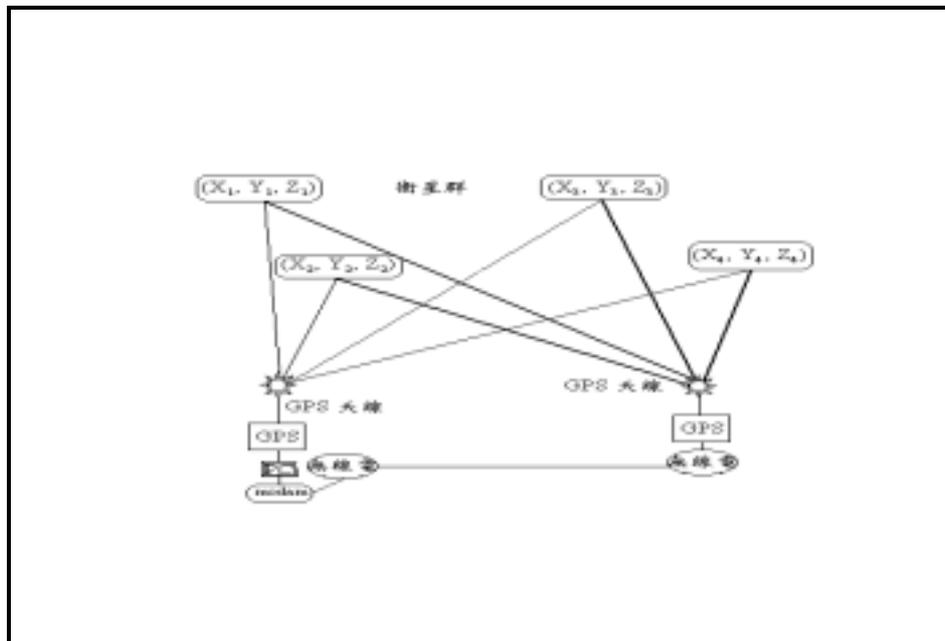


圖 3-2 平面流況量測系統架構

1. 基地站：

設置於觀測海域附近之岸邊；主要由 GPS 接收機、無線電傳輸設備、數據機、個人電腦以及直流電源供應器所組成，其基地站實景如照片 3-1 所示。其主要功能為：將定位指令以無線電傳輸，呼叫移動站回報其位置，並即時經由基地站差分計算座標修正量，改正移動站位置並同時顯示於電腦螢幕上，且將時間、座標等資料記錄於硬碟中，可提

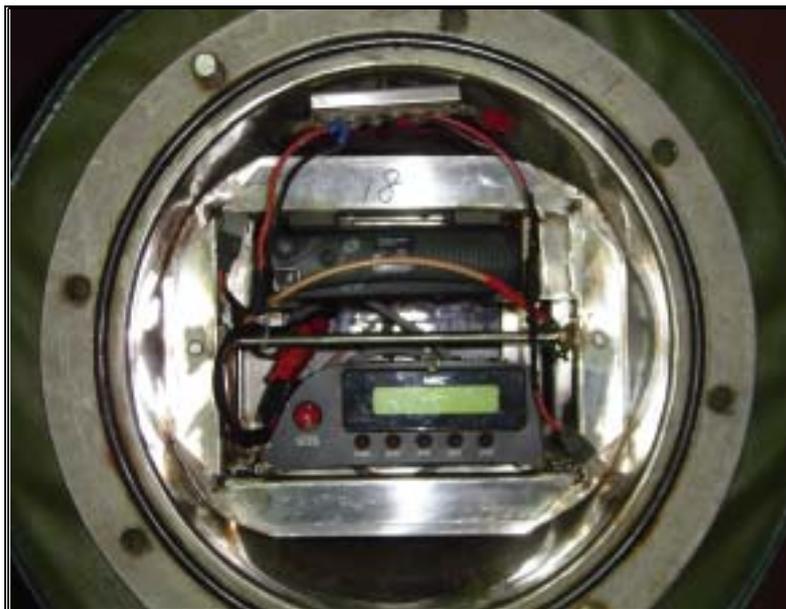
供後期處理及檢核使用。

2. 移動站：

設置於漂浮球上，主要由 GPS 接收機、無線電傳輸設備及電池組成，其移動站內部實景如照片 3-2 所示，其功能為 GPS 座標接收，並回應基地站之呼叫，將座標資料傳送回基地站。



照片 3-1 基地站實景



照片 3-2 移動站內部實景

整個 GPS 系統架構儀器包括：

1. GPS 天線：接收衛星訊號，GPS 天線所在位置即為 GPS 所定位置。
2. GPS 接收機：NEC 公司之 NGPS-M05-01 型接收機，接收 L1 (1575.42MHz) 載波上之 C/A code，可接收的 Channel 數為 6 Channel，接收機亦含 RS232 端為 Data 輸出與輸入端，基地站傳輸速率為 4800(baud rate)，移動站傳輸速率為 1200(baud rate)，輸出資料符合海事無線電委員會 (Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM) 之特別 104 號會議 (Special Committee No.104, SC-104)，簡稱 RTCM-104 之要求，其輸出資料有格林威治時間，經度，緯度，高度，船速(節)，航向，衛星幾何模式。
3. 數據機：TNC-22M Radio Modem，傳輸資料型態 轉換：類比-數位，傳輸速率：300 ~19200 bps。
4. 無線電傳輸機：Motorola 之 GM-300 型，波段範圍：146~174 MHz，輸出功率 10~25W，將修正資料以無線電波發送或接收，產生即時修正的效果。其頻道共有 CH1~CH4 四種頻率，分別如下：151.2625MHz，151.400MHz，151.800MHz，152.100MHz。
5. 電源：基地站為一台 D.C. Power Supply，型號為 DPS-115GI，輸入交流電壓 110V~130V，輸出直流電，電壓 0 ~16V 電流 0~20A，移動站為 SMF700R-9 型可回充式鹽鉛酸電池 (Rechargeable Sealed Lead-Acid Battery)，輸出直流電 12V、50AH。
6. 個人手提電腦：CPU586，24MB 記憶體(RAM)，二個通訊連接埠(COM)，作為資料擷取、儲存、顯示與結果處理。
7. 漂浮球：以不鏽鋼材質製作的漂浮球，浮球本體放置 GPS 接收儀，無線電收發機與電池，上置鋼套管放置 GPS 與無線電天線和警示燈，浮球下焊接阻流板，以產生推力。

3.2.2 調查方法

平面流況量測工作係於前述之量測範圍海域配合潮汐變化時間拋放漂浮球，利用岸邊基地站之 DGPS 定位系統追蹤記錄漂浮球之位置，最後描繪漂浮球之漂移軌跡以研判各海域之流況分佈概況，其平面流況量測實景如照片 3-3 所示。



照片 3-3 平面流況量測實景

量測時首先於岸上架設基地站，基地站設置於控制點 T26，控制點之座標如表 3-1 所示。基地站架設完成後啟動漂浮球追蹤系統，每隔約 2 分鐘呼叫漂浮球回報其位置之衛星座標資料，即時經由基地站差分計算座標修正量，改正漂浮球位置並同時顯示漂浮球位置於手提電腦螢幕上，以確認漂浮球於規劃測區內漂移，且將時間、座標等資料記錄於硬碟中，以為後期處理使用。後期處理工作係將 WGS84 衛星座標轉換 GRS67 座標基準參數如表 3-2 所示，轉換成臺灣地區之大地座標系統。再將漂浮球定位座標套繪於岸線圖中，以繪製漂浮球漂移軌跡圖，提供流況分佈分析。

表 3-1 T26 基地站控制點之座標

控 制 點	WGS84 座標	
	N	E
T26	23° 22.4647	120° 07.8334

附表 3-2 WGS84 衛星座標轉換 GRS67 座標基準參數

DX 平移參數	764.558	M
DY 平移參數	361.229	M
DZ 平移參數	178.374	M
RX 旋轉參數	0.24	SEC
RY 旋轉參數	-0.38	SEC
RZ 旋轉參數	-0.20	SEC
SF 尺度參數	-23.29	PPM

3.3 調查結果與分析

利用前節調查方法，本計畫四年內分別依夏、冬各兩季不同季節共施測五次漂浮球軌跡追蹤調查；經由調查所得資料分析後之結果，可以得出夏季（六月~七月）、冬季（十月~一月）兩種不同季節風時期，布袋港港口附近海域之平面流況變化情況，以下則分別依據此兩種不同季節風作用下，其於漲、退潮時段之流況分別描述之：

3.3.1 夏季季節風之平面流況

3.3.1.1 夏季季節風之退潮平面流況

1. 八十九年度夏季季節風之退潮平面流況

八十九年度夏季現場調查於 89 年 6 月 23 日與 89 年 6 月 24 日之間，時值夏季季節風時期以西南風為主要優勢方向；布袋港港口附近海域之平面流況，於夏季季節風退潮時漂浮球之漂移軌跡如圖 3-3 所示；布袋商港港池內之流向為由西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-3 之 0624-17t1 與 0624-17t3 與 0624-18t2 與 0624-18t2)，於港池內形成環流狀，其平均流速為 0.15m/s。另於商港港口外堤之流向為東(E)向西(W)流(如圖 3-3 之 0624-18t1)，其平均流速為 0.17m/s。而於港外約 1500~2000 公尺北測之流向為由北(N)向南(S)流(如圖 3-3 之 0623-18t1)，其平均流速為 0.13m/s。至於港外約 1500~2000 公尺南測之流向亦為由北(N)向南(S)流(如圖 3-3 之 0623-17t1)，其平均流速為 0.13m/s。0623-18t1 與 0623-17t1 兩條測線之流向趨勢相同，皆為由北(N)往南(S)流向；因此，研判布袋港港口附近夏季季節風時期，於退潮時平面流況，應為沿著海岸地形等深線，隨著潮水離岸向南(S)方向或西南(WS)方向退去。

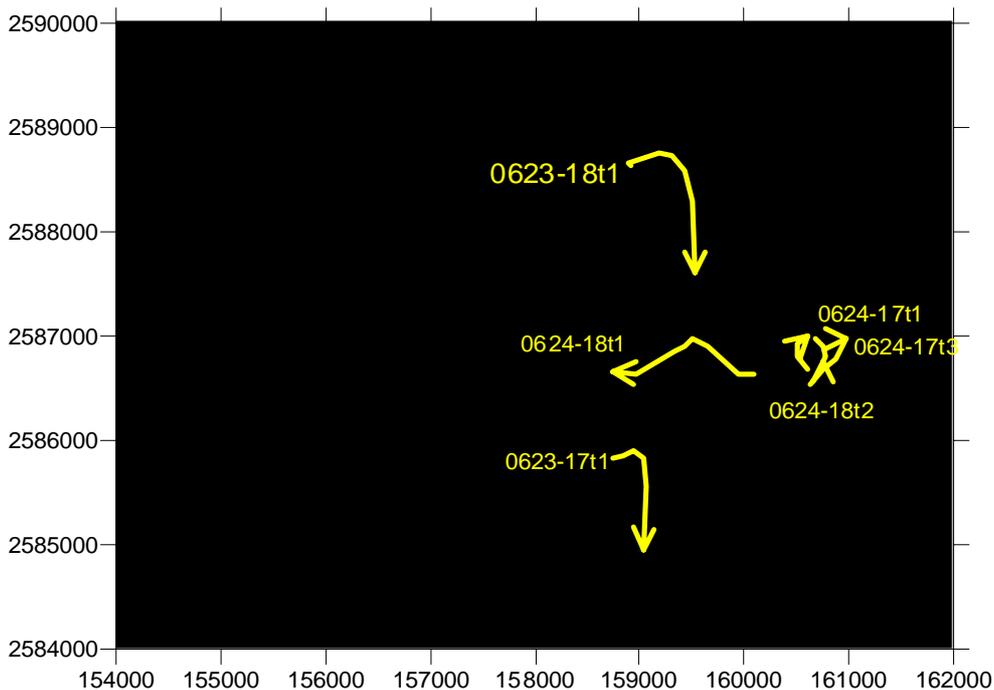


圖 3-3 八十九年度夏季季節風(89/6)退潮時漂浮球之漂移軌跡

2. 九十年度夏季季節風之退潮平面流況

九十年度夏季現場調查於 90 年 6 月 18 日與 90 年 6 月 19 日之間，如第一章自然條件調查夏季季節風向以西南風為主要優勢方向；布袋港港口附近海域之平面流況，於夏季季節風退潮時漂浮球之漂移軌跡如圖 3-4 所示；布袋商港港池內之流向為由西南(W)向東北(E)流(如圖 3-4 之 0919-18t1 與 0919-18t2)，於港池內形成環流狀，其平均流速為 0.06m/s 與 0.08m/s。另於商港港口外堤之流向為東北(E)向西南(W)流(如圖 3-4 之 0618-17t)，其平均流速為 0.38m/s。而於港外約 2300 公尺北測之流向為由北(N)向南(S)流(如圖 3-4 之 0618-18t)，其平均流速為 0.28m/s。至於港外約 3500 公尺南測之流向亦為由東北(E)向西南(W)流(如圖 3-4 之 0619-17t)，其平均流速為 0.20m/s。0618-18t 與 0619-17t 兩條測線之流向趨勢相同，皆為由東北(E)往西南(W)流向；由上述可知，布袋港港口附近之夏季季節風時期退潮時之平面流況，應如八十九年度一樣情況，為沿著海岸地形等深線，隨著潮水離岸向南(S)或西南(W)方向退去。

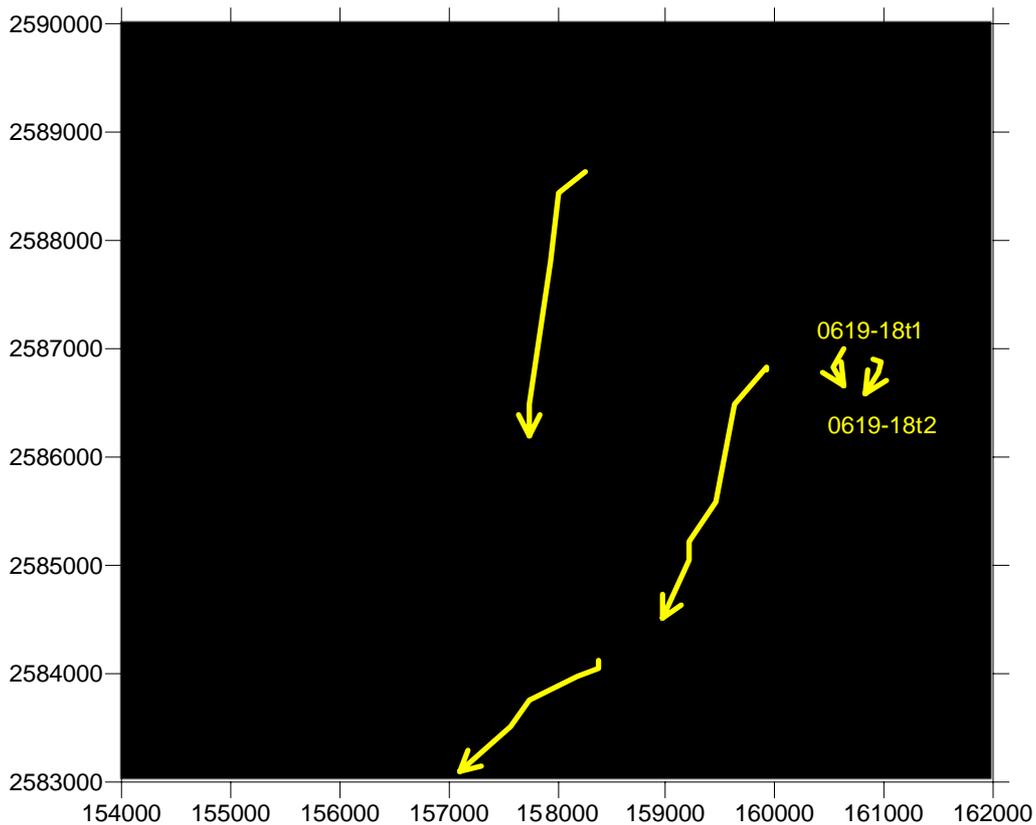


圖 3-4 九十年夏季季節風(90/6)退潮時漂浮球之漂移軌跡

3. 九十二年度夏季季節風之退潮平面流況

九十二年度夏季現場調查於 92 年 6 月 5 日與 92 年 6 月 6 日之間，另於 92 年 6 月 25 補測一次；布袋港港口附近海域之平面流況，於夏季季節風退潮時漂浮球之漂移軌跡如圖 3-5 所示；布袋商港港池內之流向為由西南 (WS) 向東北 (NE) 流 (如圖 3-5 之 0606-18t1 與 00606-18t2)，於港池內形成環流狀，其平均流速為 0.05m/s 與 0.06m/s。另於商港港口外堤之流向為東北 (NE) 向西南 (SW) 流 (如圖 3-4 之 0605-18t)，其平均流速為 0.22m/s。而於港外約 2600 公尺北測之流向為由北 (N) 向南 (S) 流 (如圖 3-5 之 0625-17t)，其平均流速為 0.10m/s。至於港外約 3500 公尺南測之流向亦為由東北 (NE) 向西南 (SW) 流 (如圖 3-5 之 0606-17t)，其平均流速為 0.18m/s。0605-18t 與 0606-17t 兩條測線之流向趨勢相同，皆為由東北 (NE) 往西南 (SW) 流向；由上述可知，九十二年度夏季季節風時期布袋港港口附近之退潮平面流況，應如前兩年度一樣，為沿著海岸地形等深線，隨著潮水離岸向南 (S) 或西南 (SW) 方向退去。

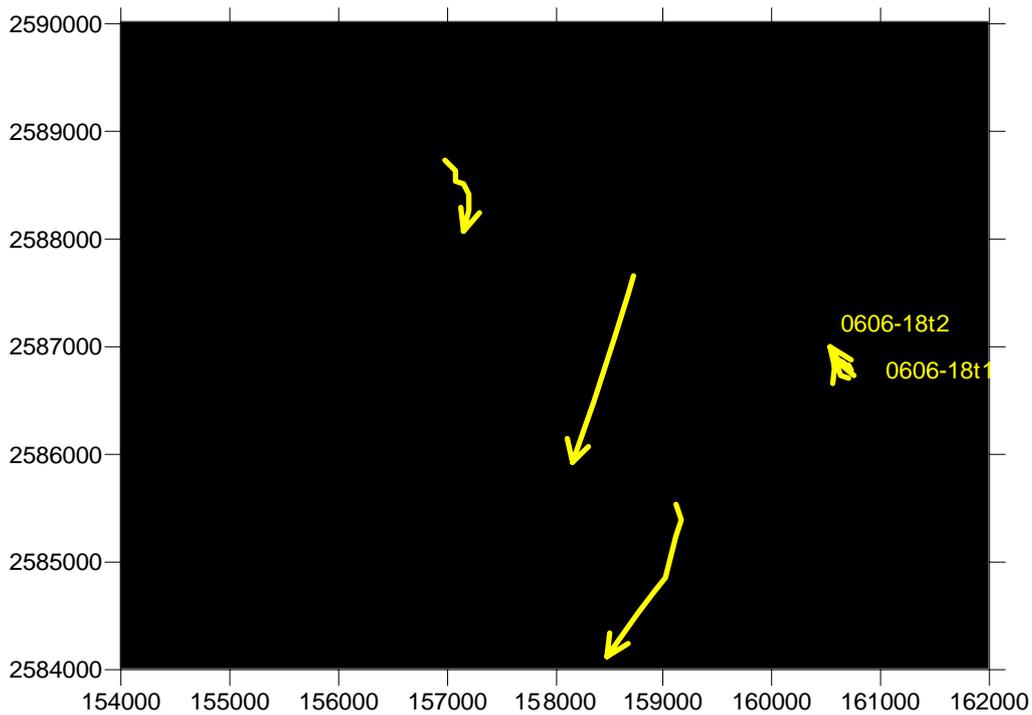


圖 3-5 九十二年度夏季季節風(92/6)退潮時漂浮球之漂移軌跡

3.3.1.2 夏季季節風之漲潮平面流況

1. 八十九年度夏季季節風之漲潮平面流況

布袋港港口附近於夏季季節風漲潮時漂浮球之漂移軌跡如圖 3-6 所示；布袋商港港池內之流向為由西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-6 之 0624-17f1 與 0624-17f2)，其平均流速為 0.13m/s 與 0.11m/s。另於商港港口外堤處之流向為南(S)向北(N)流(如圖 3-6 之 0624-18f1)，其平均流速為 0.28m/s。而於北防波堤堤頭處之流向亦為由西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-6 之 0623-18f2)，其平均流速為 0.28m/s。港外約 1500~2000 公尺北測之流向亦為由西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-6 之 0623-18f1 與 0623-18f2)，其平均流速為 0.28m/s。至於港口外約 1500~2000 公尺南測之流向亦如北側一樣由西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-6 之 0623-17f1)，其平均流速為 0.30m/s。究其布袋港口附近夏季季節風時期，於漲潮時段整個平面流之流向，應是隨著潮水向岸，並依地形往東北(NE)方向流向外傘頂洲南側。

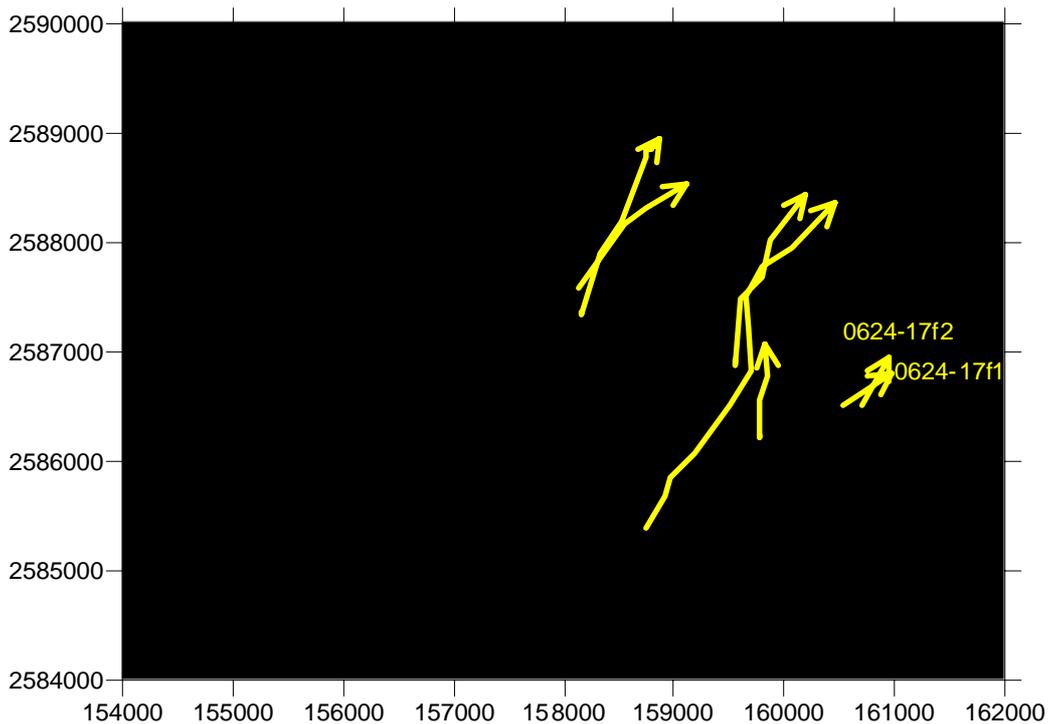


圖 3-6 八十九年度夏季季節風(89/6)漲潮時漂浮球之漂移軌跡

2. 九十年度夏季季節風之漲潮平面流況

布袋港港口附近於夏季季節風漲潮時漂浮球之漂移軌跡如圖 3-7 所示；布袋商港港池內之流向為由西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-7 之 0619-18f1 與 0619-18f2)，其平均流速為 0.13m/s 與 0.11m/s。另於商港港口外堤處之流向為西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-7 之 0618-18f)，其平均流速為 0.14m/s。港外約 2300 公尺北測之流向亦為由西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-7 之 0618-17f)，其平均流速為 0.14m/s。至於港口外約 3500 公尺南測之流向亦如北側一樣由西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-7 之 0619-17f)，其平均流速為 0.28m/s。究其布袋港口附近夏季季節風時期，於漲潮時段整個平面流之流向，應是隨著潮水向岸，並依地形往東北(NE)方向流向外傘頂洲南側。

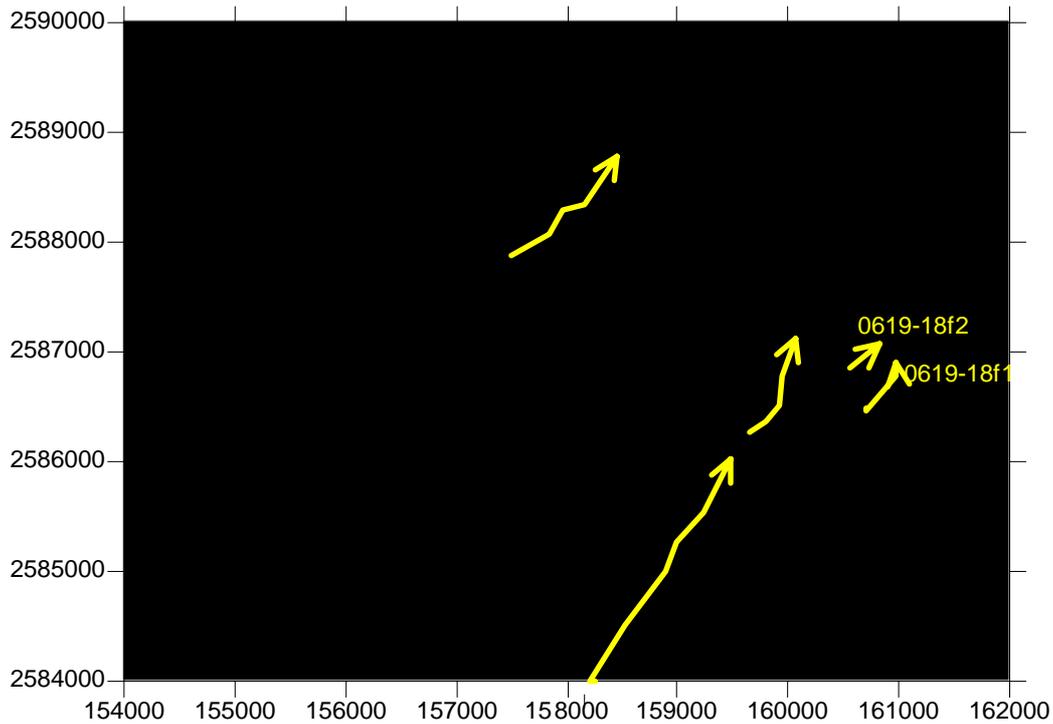


圖 3-7 九十年夏季季節風(90/6)漲潮時漂浮球之漂移軌跡

3. 九十二年度夏季季節風之漲潮平面流況

布袋港港口附近於夏季季節風漲潮時漂浮球之漂移軌跡如圖 3-8 所示；布袋商港港池內之流向為由西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-8 之 0606-18f)，其平均流速為 0.09m/s。另於商港港口外堤處之流向為西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-8 之 0606-18f)，其平均流速為 0.24m/s。港外約 3000 公尺北測之流向亦為由東南(SE)向西北(NW)流(如圖 3-8 之 0625-17f)，其平均流速為 0.45m/s。至於港口外約 3500 公尺南測之流向亦如北側一樣由西南(WS)向東北(NE)流(如圖 3-8 之 0606-17f)，其平均流速為 0.24m/s。究其布袋港口附近夏季季節風時期，於漲潮時段整個平面流之流向，應是隨著潮水向岸，並依地形往東北(NE)方向流向外傘頂洲南側。

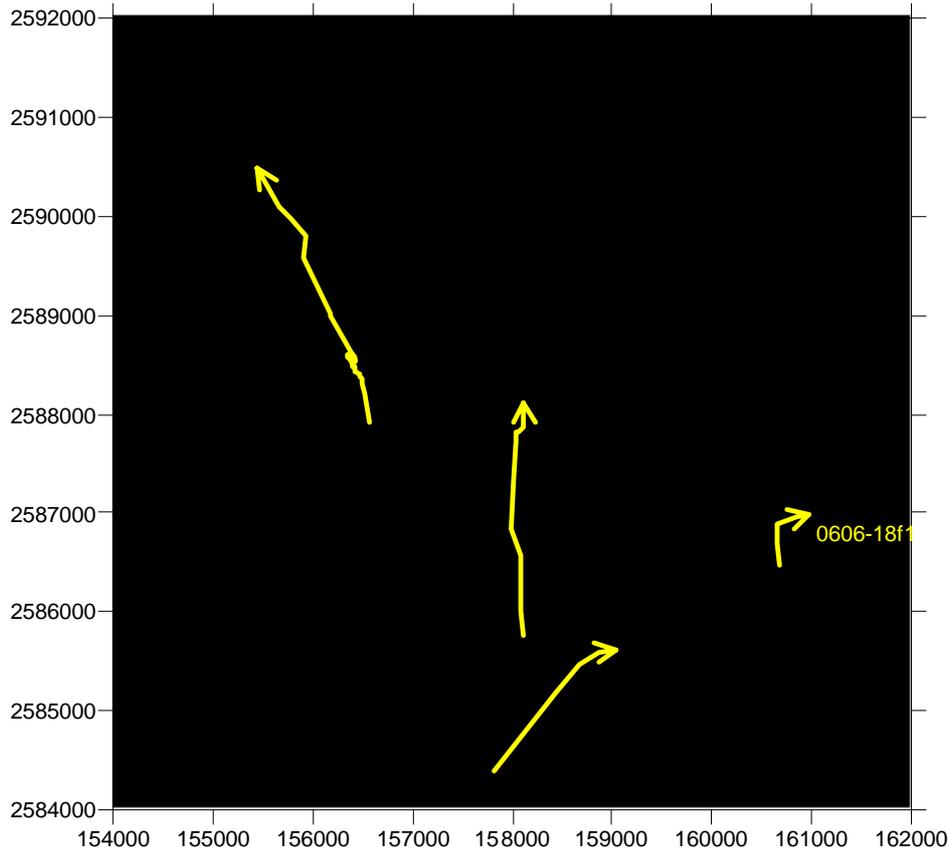


圖 3-8 九十二年度夏季季節風(92/6)漲潮時漂浮球之漂移軌跡

3.3.2 冬季季節風之平面流況

3.3.2.1 冬季季節風之退潮平面流況

1. 八十九年度冬季季節風之退潮平面流況

八十九年冬季現場調查於 89 年 1 月 1 日與 89 年 1 月 2 日間實施，時值冬季季節風時期，因此東北季風強徑，其為主要的優勢風向；布袋港港口附近之平面流況，於冬季季節風退潮時漂浮球之漂移軌跡如圖 3-9 所示。布袋商港港池內之流向為由北(N)向南(S)流(如圖 3-9 之 0102-17t1 與 0102-17t2)，其平均流速為 0.07m/s。港口外側北堤堤頭處之流向為由北(N)向南(S)流(如圖 3-9 之 0102-18t2)，平均流速為 0.17m/s。港口外側離岸 1000 公尺至 3000 公尺之海域，其流向皆為由北(N)斜向南南西(SSW)流(如圖 3-9 之 0102-18t1 等)，其平均流速為 0.31m/s。研判整個布袋港港口附近海域冬季季節風時期，於退潮時之平面流向，應為沿海岸地形等深線，隨著潮水離岸向南(S)或西南(SW)方向流去。

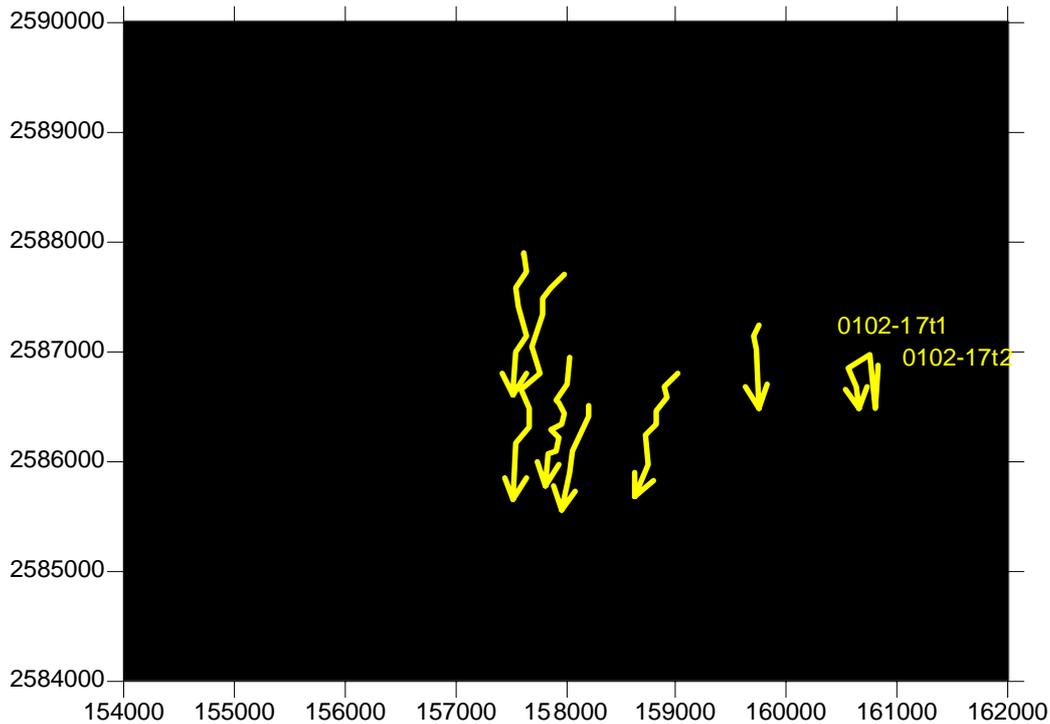


圖 3-9 八十九年度冬季季節風(89/1)退潮時漂浮球之漂移軌跡

2. 九十年度冬季季節風之退潮平面流況

九十年冬季現場調查時間為 90 年 10 月 25 日與 90 年 10 月 26 日期間，正值冬季季節風時期，東北季風強徑，為其主要的優勢風向；布袋港港口附近之平面流況，於冬季季節風退潮時漂浮球之漂移軌跡如圖 3-10 所示。布袋商港港池內之流向為由東北(NE)向西南(SW)流(如圖 3-10 之 1026-18t)，其平均流速為 0.05m/s。港口外側北堤堤頭處之流向則於外堤附近作逆時鐘之環狀旋轉(如圖 3-10 之 1026-17t)，平均流速為 0.06m/s。港口北側離岸 3200 公尺之海域，其流向皆為由東北(NE)斜向西南(SW)流(如圖 3-10 之 1025-18t)，其平均流速為 0.32m/s。港口南側約 2900 公尺處之海域，其流向皆為由東北(NE)斜向西南(SW)流(如圖 3-10 之 1025-18t)，其平均流速為 0.32m/s。研判整個布袋港港口附近海域冬季季節風時期，於退潮時之平面流向，應為沿海岸地形等深線，隨著潮水離岸向西南(SW)方向流去。

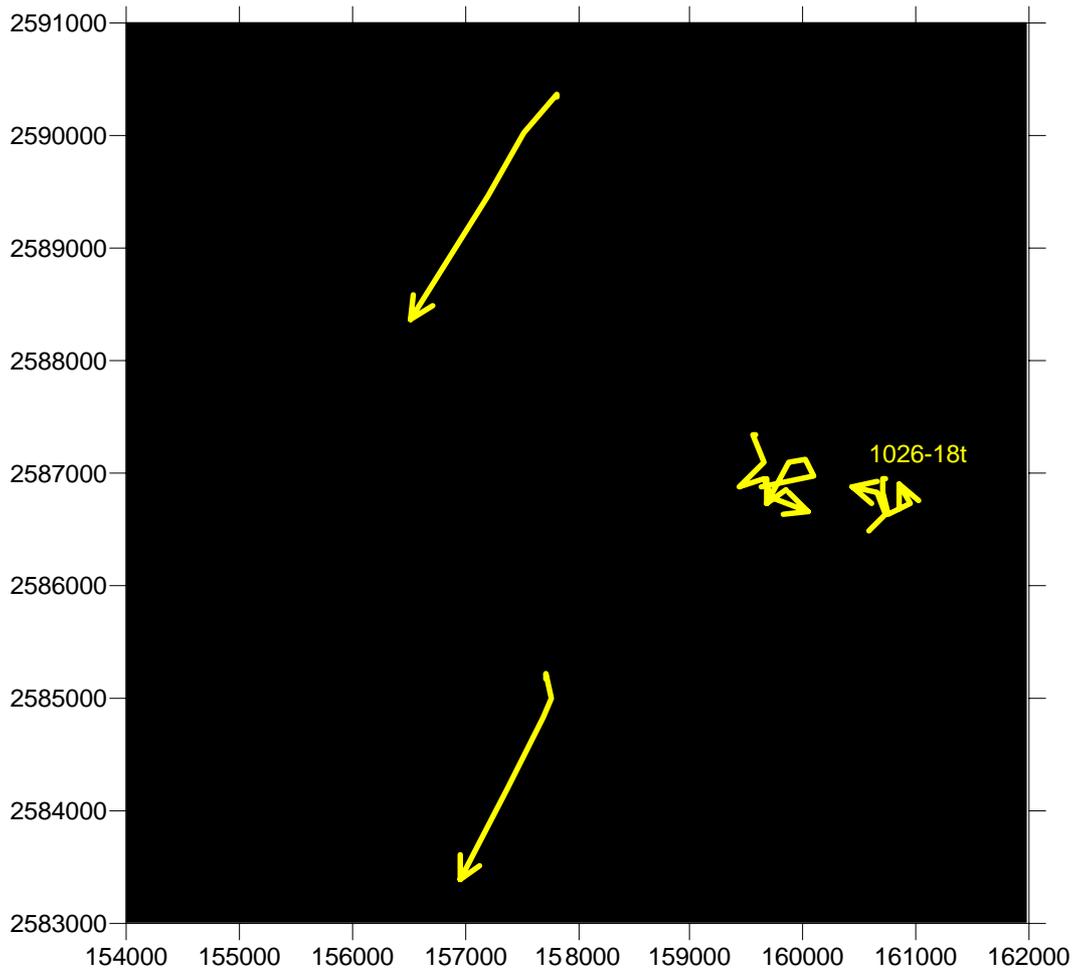


圖 3-10 九十年冬季季節風(90/10)退潮時漂浮球之漂移軌跡

3.3.2.2 冬季季節風之漲潮平面流況

1. 八十九年度冬季季節風之漲潮平面流況

八十九年現場調查於冬季季節風漲潮時漂浮球之漂移軌跡如圖 3-11 所示。布袋商港港池內之流向與退潮時相同，為由北(N)向南(S)流(如圖 3-11 之 0102-17f1 與 0102-17f2)，其平均流速為 0.08m/s。港外堤頭處於 01/02 日 14:05~14:55 時施測，其漂浮球軌跡呈現停滯狀態(如圖 3-11 之 0102-18f2)。港口外側 1000~1500 公尺處海域為由北(N)斜向南南西(SSW)流(如圖 3-11 之 0102-18f1)，其平均流速為 0.27 m/s。商港北堤堤頭以西 1200~1700 公尺處海域，其平均流向為由西(W)向東(E)略微偏北(ENE)(如圖 3-11 之 0101-17f1)，其平均流速為 0.11m/s。商港南堤堤頭以西 2300~2600 公尺處海域，其流向為由北(N)斜向南南東(SSE)流(如圖 3-11 之 0101-18f1)，其平均流速為 0.14 m/s。此次量測結果漲潮時之流況較無規律性且流速偏小，可能與施測期間東北風強勁，漲潮向岸流場受逆向強風吹襲

有關。

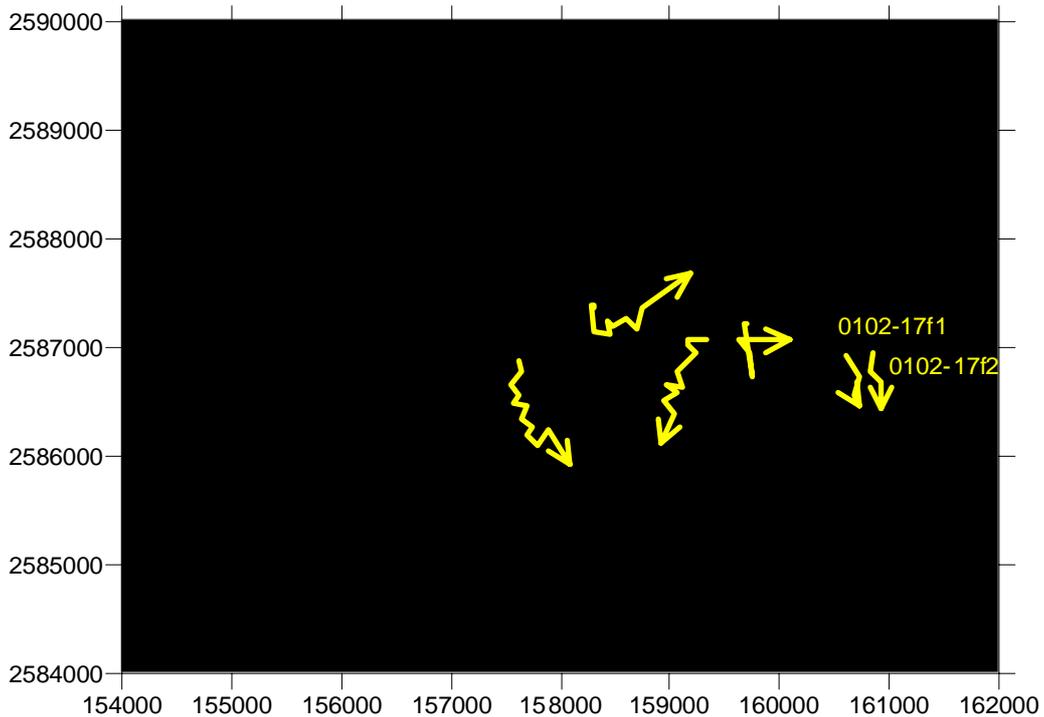


圖 3-11 八十九年度冬季季節風(89/1)漲潮時漂浮球之漂移軌跡

2. 九十年度冬季季節風之漲潮平面流況

九十年度冬季季節風漲潮時漂浮球之漂移軌跡如圖 3-12 所示。布袋商港港池內之流向為由西南(SW)向東北(NE)流(如圖 3-12 之 1025-18f1)，其平均流速為 0.08m/s。港外堤頭處施測時應受東北季風影響，其漂浮球軌由西北(NW)往東南(SE)方向流往南堤堤頭(如圖 3-12 之 1025-17f2)。港口外側西北方約 2300 尺處海域受東北季節風強勁影響，由西北(NW)斜轉向東南(SE)方流又受潮流帶動轉向東北(NE)方向流去，形成類似迴流現象(如圖 3-12 之 1025-17f)，其平均流速為 0.06 m/s。商港南堤西南方 3700 公尺處海域，其流向為先由西南(SW)向東北(NE)再略偏東(E)(如圖 3-12 之 1025-18f)，其平均流速為 0.15m/s。此次量測結果漲潮時之流況較無規律性且流速偏小，可能與施測期間東北風強勁，漲潮向岸流場受逆向強風吹襲有關。

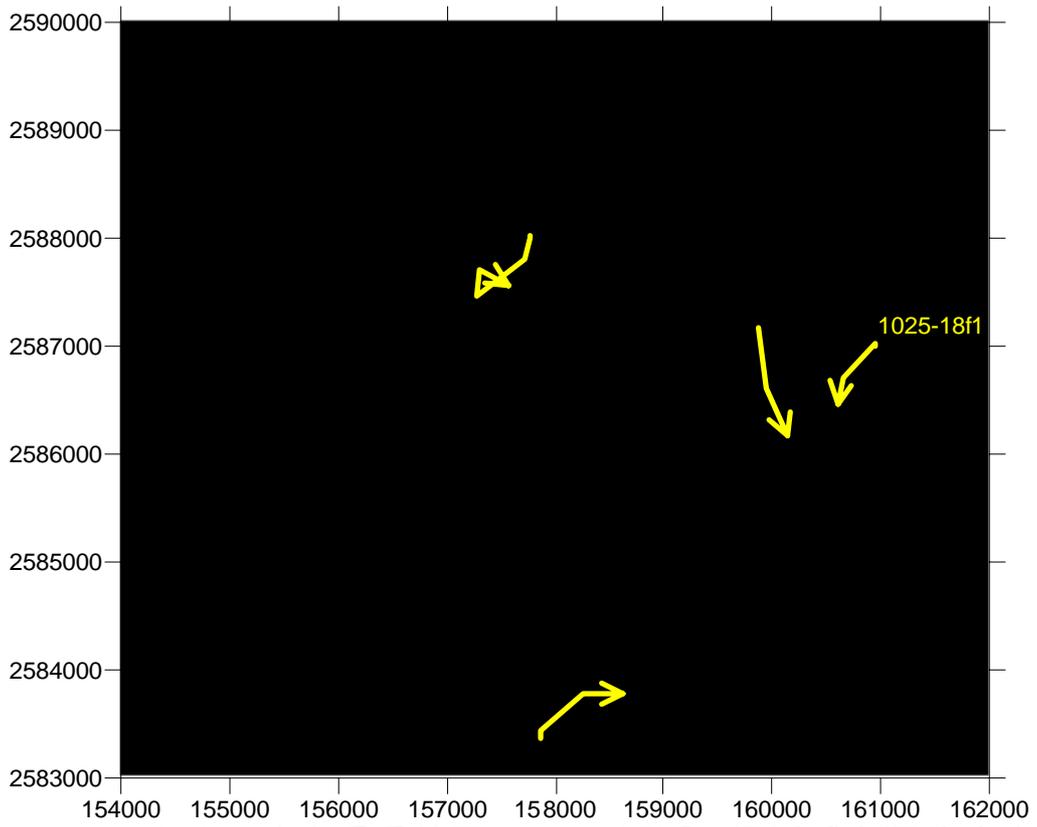


圖 3-12 九十年度冬季季節風(90/10)漲潮時漂浮球之漂移軌跡

第四章 港口附近水深測量

水深測量為漂沙調查的主要追蹤方式之一，藉由水深地形的變化可以以量化數據了解調查海域漂沙的沖淤量，而港口附近水深測量方法是於布袋港港口附近採用 DGPS 自動定位儀配合數位測深儀放置於作業船上，同時擷取座標位置及水深資料，再利用電腦繪圖分析軟體，繪製等深地形變化圖，以分析布袋港海域及港口沖淤變化情況，藉此可研判漂沙活動對港池、航道的影響程度。

4.1 調查範圍

本水深測量調查以布袋港港口海域為中心，每年冬、夏季各施測一次，調查範圍為南北直線距離各施測 6 公里，岸線直線距離長約 12 公里，寬約 10 公里，測線總長約 480 公里（另因八十九年度預算編列因素，調查範圍南北直線距離僅各施測 3.5 公里，岸線岸線直線距離長約 7 公里，寬約 10 公里，測線總長約 300 公里），其整體港口附近水深測量規劃之測量範圍如圖 4-1 所示；量測範圍分為重點施測區域（測線間距 50 公尺）、主要施測區域（測線間距 200 公尺）、次要施測區域（測線間距 500 公尺）與延伸測線（檢核至 -10 公尺水深）等五種不同測線間距區域，其實際作業項目統計如表 4-1 所示。

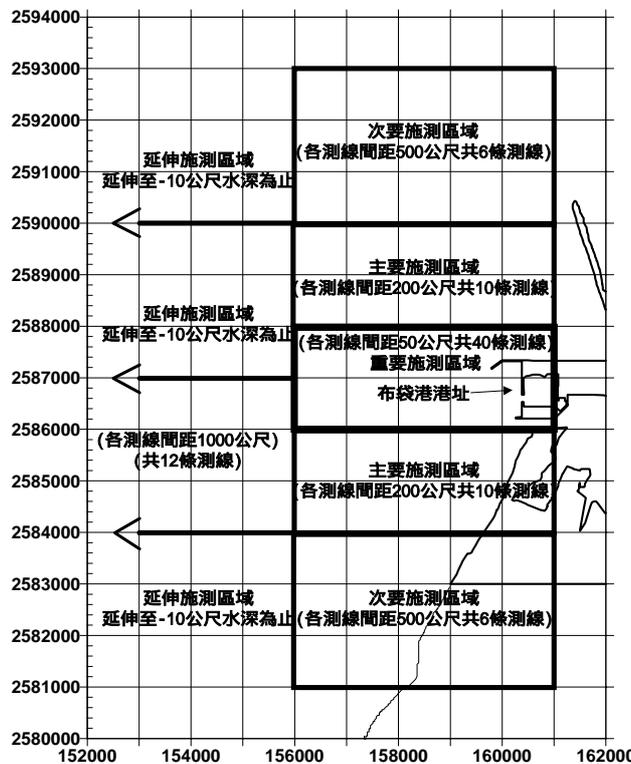


圖 4-1 港口附近水深測量規劃之測量範圍

表 4-1 港口附近水深測量實際作業項目統計表

工 作 項 目	單 位	實 做 數 量
三角點檢測	點	3
水準點檢測	點	2
主水準測量	公里	3.939
導線點埋設及測量	點	26
岸線地形測量	公里	20
水深測量	公里	480
成果報告及水深圖繪製(測算簿)	式	1

4.2 調查儀器與方法

4.2.1 使用儀器

1. 角度及距離測量

用 LEICA TC1610 全測站電子經緯儀測角精度 0.5”，測距精度 2 mm + 2ppm。

2. 水準測量

使用 LEICA NA2002 全自動電子水準儀及條碼尺，直讀至 0.1 mm。

3. 控制測量（衛星定位）

使用 LEICA SYS 3000 及 SR9500 Sersor 衛星定位儀，儀器精度 5 mm + 1ppm。

4. 陸上 DGPS 接收站

使用 SERCEL NDS100 定位精度小於 1 公尺。

5. 海上 DGPS 接收站

使用 SERCEL NR109 定位精度小於 1 公尺。

6. 水深測量

使用 ATLAS DESO 14 高精度數值測深機，音鼓頻率 210KHZ，

儀器精度 1 cm。

7. 運動姿態收集儀

使用 DMS2 Dynamic Motion Sensor 儀器精度 5 公分或 5% (取大者)。

8. 水中聲速

使用 ODOM 聲速儀，讀取至公尺/秒精度小於 1%。

4.2.2 調查方法

1. 控制系統：

- (1). 平面控制測量：採用台灣二度分帶(2°TM)座標系統。
- (2). 高程控制測量：以內政部頒定之台灣省一等水準系統。
- (3). 潮差控制測量：採用布袋水域驗潮站控制。

2. 平面控制測量：

三角點檢測使用 GPS 衛星定位測量，衛星定位各測站須對空通視良好，同時段在仰角 15 度以上天空至少有四顆以上分佈良好之衛星，衛星訊號接收時間至少半小時以上。觀測量之處理皆經過週波脫落偵測與改正；並且點位座標平差計算後轉換至台灣 TM 二度分帶。三角點檢測，各次測量以「前東港」、「Q171」、「Q218」等三點作為平面控制之依據。導線點共計測設 48 點(BT01 至 BT48)作為各次岸線測量控制之依據。

3. 高程控制測量：

- (1). 採直接水準往返觀測。
- (2). 主水準檢測：共檢測布新國小(BM22)、新塭路(嘉農 22)等二點，二點距離長約為 3.9 公里，因布袋地區地層下陷情況嚴重，本調查就主水準測量之主控制點布新國小(BM22)、新塭路(嘉農 22)等二點做必要之檢測，發現本計畫子計畫(一)地層下陷觀測研究所調查的結果，於 89 年 4 月之水準高程布新國小(BM22)為 +1.427 公尺，新塭路(嘉農 22)點為 +1.477；90 年 5

月施測所得之布新國小(BM22)水準高程為+1.373 公尺與新塭路(嘉農 22)點為+1.426 公尺，兩主要控制點高程差各為布新國小(BM22)差-0.054 公尺與新塭路(嘉農 22)差-0.051，經檢核區域地層沉陷量，本調查的參考高程乃依歷次調查所得之布新國小(BM22)控制點相對水準高程為基準。

(3).再由布新國小(BM22)引測至布袋港內驗潮站，得其驗潮站高程。

4. 岸線地形測量：

(1).以電子光波測距儀，於導線點 BT01 BT57 上直接架設儀器以三次元數值方式測繪。

(2).依據地形地物及特徵點(如道路、橋樑、河流、堤防等主幹地物)，依序繪製地形圖(初稿)，經初步編修後再由外業調繪人員進行現地調繪，針對漏畫、不清楚部份進行補測並註記，由內業人員編修並繪出成稿圖。

5. 水域測量：

(1).定位測量：

a. 使用海測專用 SerceI NDS100 及 NDS109 定位儀，以 DGPS(電碼差分定位)方式進行海上定位，配合 ATLAS DES014 數化測深儀作水深測量，輔以湧浪補償器修正浪高，並以自行開發之導航軟體引導船隻於規劃之測線方向行進，其水深測量實測測線軌跡則如圖 4-2 所示；由測線軌跡圖可以看出調查區域內之測點與測點間的距離疏密情況，如此可以用來檢核整體量測過程與先期所訂定測線的一致性；綜觀圖 4-2 所得之各測點分佈距離，應可達到本調查所需之解析要求。

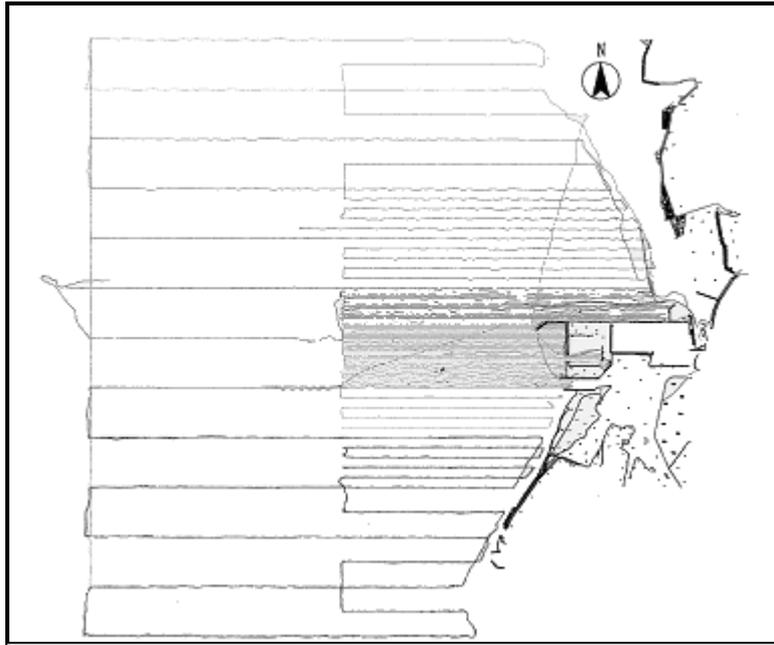


圖 4-2 水深測量實測測線軌跡

- b. 將 DGPS 觀測所得的 WGS84 座標，即時轉換為 TM 二度座標並同步修正測深及湧浪補償器資料，成為一含 X、Y、Z 的資料檔，其座標定位精度可達 ± 1 公尺以內。

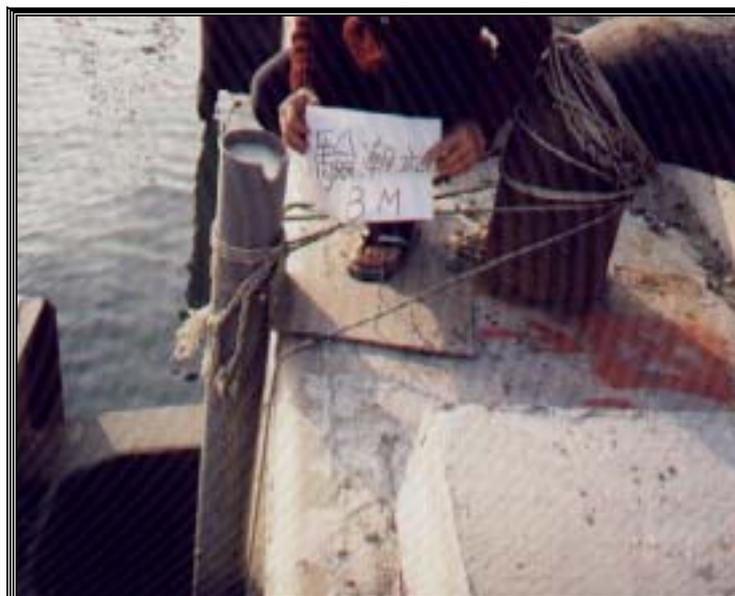
2. 水深測量：

- a. 水深斷面測量依據合約，重點施測區寬度 2 公里，測線間距 50 公尺計 40 條；主要施測區寬度 4 公里，測線間距 200 公尺計 20 條；次要施測區寬度 6 公里測線間距 500 公尺計 12 條；延伸施測區測線間距 1000 公尺計 12 條合計約 480 公里，測深使用測深儀、湧浪補償器，配合 DGPS 定位，同步自動記錄座標與高程，並即時修正浪高，其工作船實景如照片 4-1。
- b. 所有測深資料必須將潮位資料修正後，換算為正確的水深值。水中聲速以聲速儀於測區外緣量測，藉以修正水深儀之量測精度。

- c. 為避免 DGPS 之座標與音鼓有偏移量產生，故將 DGPS 接收儀之天線與音鼓桿固定在一起以避免偏移。
- d. 所有測點經內插成方格點 (DTM) 後，分別繪製 1/5000 及 1/10000 之水深圖。
- e. 驗潮站設置於布袋商港碼頭邊，其驗潮站設置實景如照片 4-2 所示。



照片 4-1 工作船實景



照片 4-2 驗潮站設置實景

4.3 調查結果與分析

利用前節之儀器與方法，對布袋港港口附近之岸線及水深進行測量後，可以得出該區域之水深資料；而藉由水深資料之處理與分析，吾人可瞭解布袋港鄰近海域及港口地形的變化情況；過去本計畫執行的四年中水深測量調查的時程分別如下：

八十九年度冬季水深測量工作於 88 年 12 月 21 日至 89 年 1 月 15 日完成(實際海域測量作業於 12 月 30 日至 1 月 5 日間共七天)，夏季水深測量工作則於 89 年 7 月 1 日至 89 年 7 月 31 日完成(實際水域測量於 7 月 21 日至 7 月 25 日間共五天)；此期間台灣受瑪姬(6/6)颱風過境直接影響布袋港附近海域。

九十年夏季水深測量工作於 90 年 5 月 21 日至 90 年 7 月 1 日間完成(海域測量作業於 6 月 21 日至 6 月 28 日間共八天)，冬季水深測量工作則於 90 年 10 月 23 日至 90 年 11 月 31 日完成(海域測量於 11 月 17 日至 11 月 29 日間共十三天)；而此期間則經歷了桃芝(7/28)、納利(9/6)、利其馬(9/23)等颱風過境直接影響到布袋港附近海域之水深。

九十一年度夏季水深測量工作則於 91 年 4 月 10 日至 91 年 5 月 16 日間完成(海域測量作業於 4 月 15 日至 4 月 24 日間共九天)，冬季水深測量工作則於 91 年 9 月 1 日至 91 年 10 月 15 日完成(海域測量於 9 月 16 日至 9 月 20 日間共五天)；而此期間則經歷了象神(7/28)雷瑪遜(6/6)、娜克莉(7/8)等颱風過境直接影響到布袋港附近海域之水深。

而九十二年夏季水深測量工作則於 92 年 5 月 19 日至 92 年 7 月 2 日間完成(海域測量作業於 5 月 30 日至 6 月 9 日間共七天)。本計畫執行的四年中各時段之水深測量調查結果，經過分析及繪圖後所得出的成果則分別描述於以下各節：

4.3.1 水深測量之結果

1. 八十九年冬季水深測量

八十九年度冬季(89/01)調查結果經由水深測量資料檢核後，再將三維的各測點水深資料經由電腦繪圖作業，繪製成為八十九年度冬季(89/01)布袋港岸線水深測量結果如圖 4-3 所示；而其八十九年度

冬季(89/01)布袋港港口水深測量結果如圖 4-4 所示。

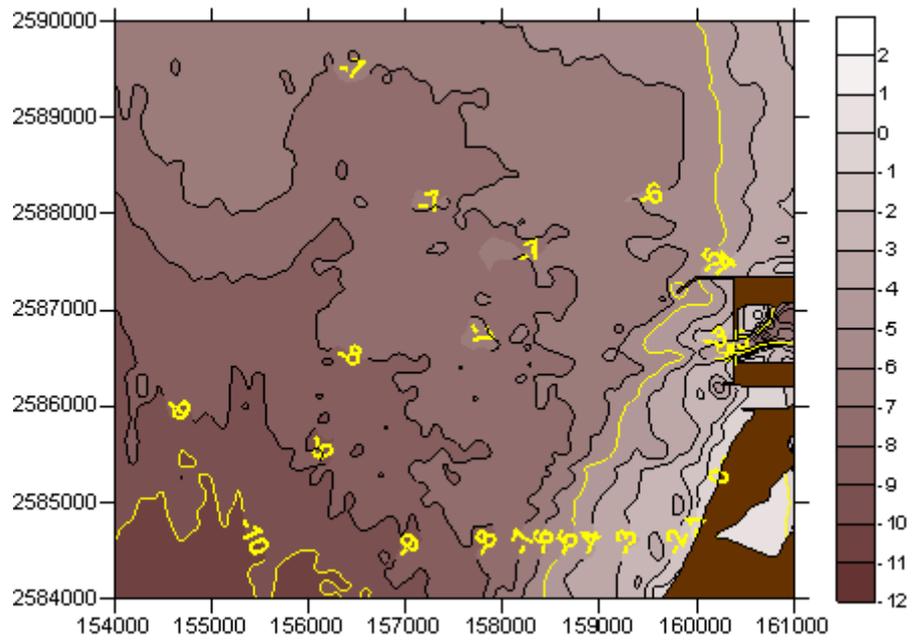


圖 4-3 八十九年度冬季(89/01)布袋港岸線水深測量結果

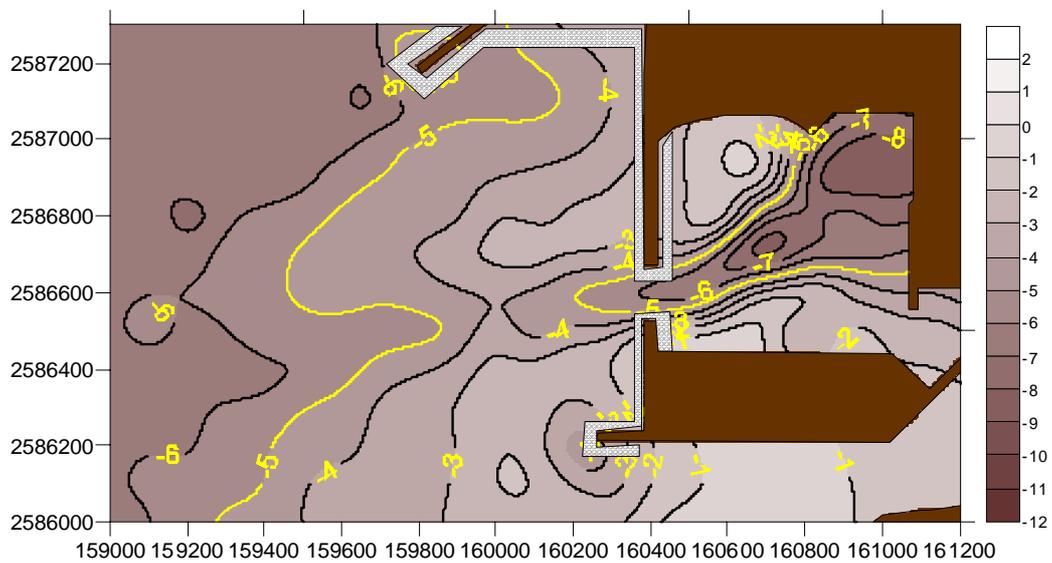


圖 4-4 八十九年度冬季(89/01)布袋港港口水深測量結果

2. 八十九年夏季水深測量

而八十九年度夏季(89/07)布袋港岸線水深測量結果如圖 4-5 所示；其八十九年度夏季(89/07)布袋港港口水深測量結果如圖 4-6 所示。

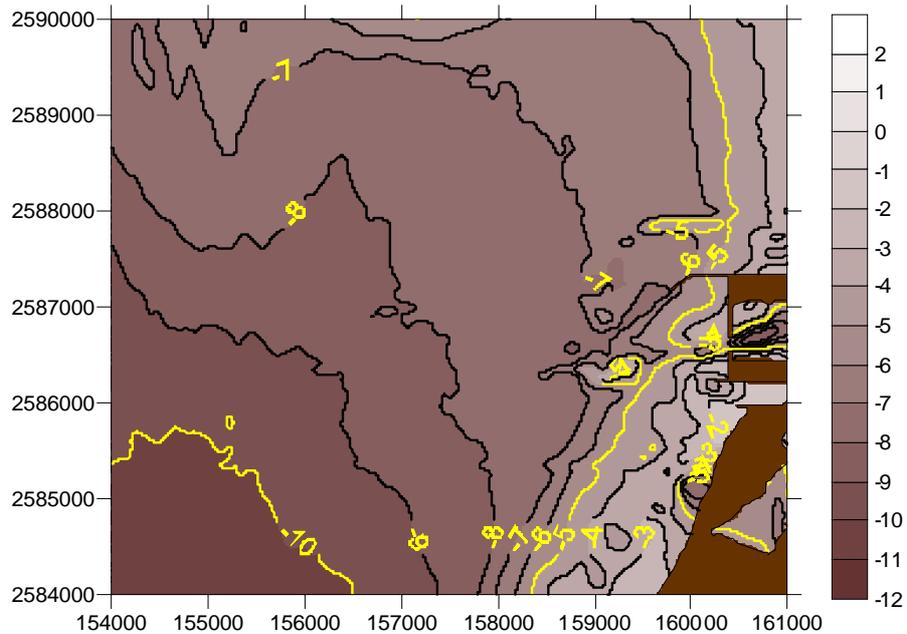


圖 4-5 八十九年度夏季(89/07)布袋港岸線水深測量結果

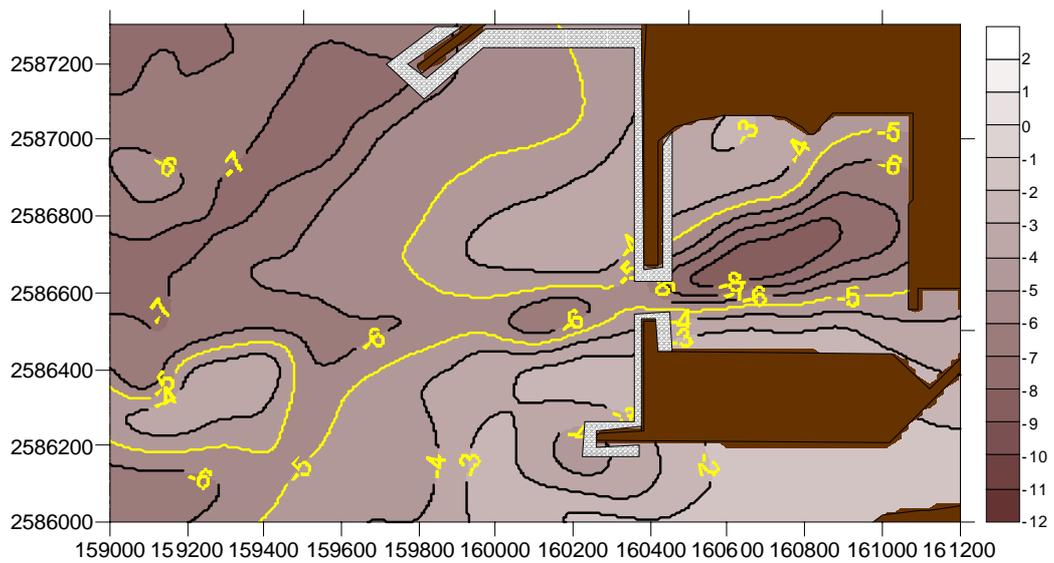


圖 4-6 八十九年度夏季(89/07)布袋港港口水深測量結果

3.九十年夏季水深測量

而九十年度夏季(90/06)布袋港岸線水深測量結果如圖 4-7 所示;其九十年度夏季(90/06)布袋港港口水深測量結果如圖 4-8 所示。

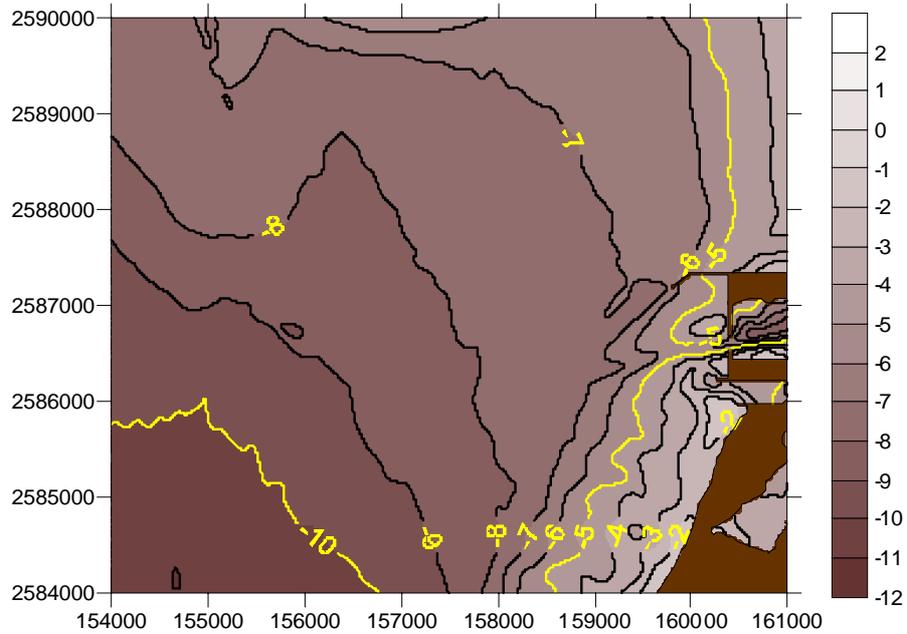


圖 4-7 九十年度夏季(90/06)布袋港岸線水深測量結果

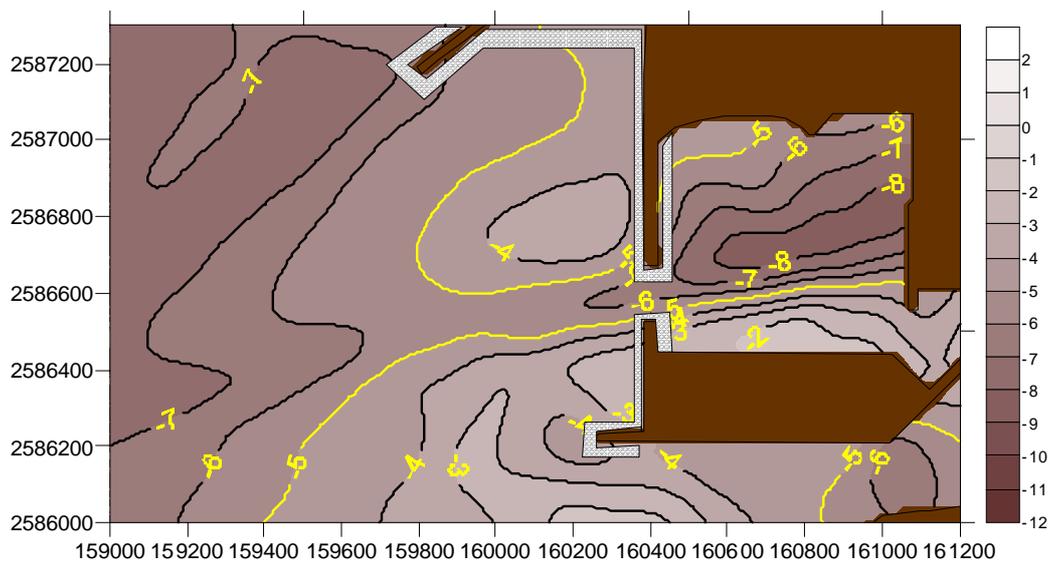


圖 4-8 九十年度夏季(90/06)布袋港港口水深測量結果

4. 九十年冬季水深測量

而九十年度冬季(90/11)布袋港岸線水深測量結果如圖 4-9 所示；其九十年度冬季(90/11)布袋港港口水深測量結果如圖 4-10 所示。

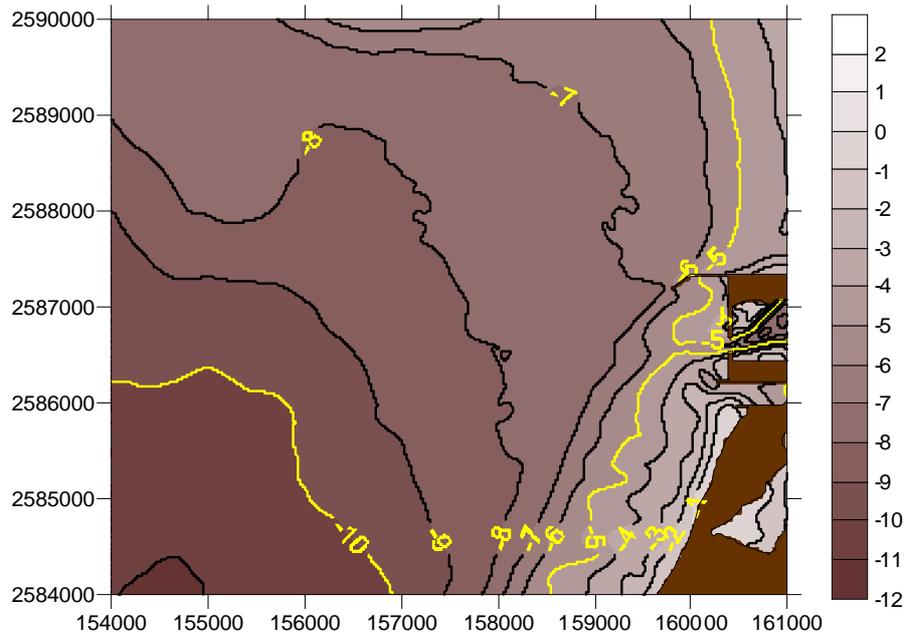


圖 4-9 九十年度冬季(90/11)布袋港岸線水深測量結果

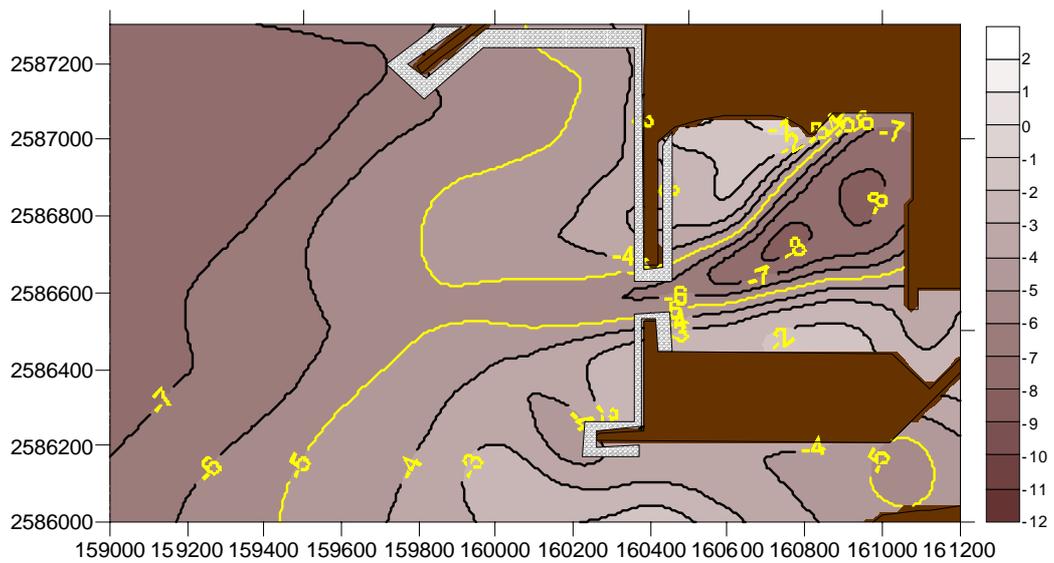


圖 4-10 九十年度冬季(90/11)布袋港港口水深測量結果

5.九十一年夏季水深測量

而九十一年度夏季(91/04)布袋港岸線水深測量結果如圖 4-11 所示；其九十一年度夏季(91/04)布袋港港口水深測量結果如圖 4-12 所示。

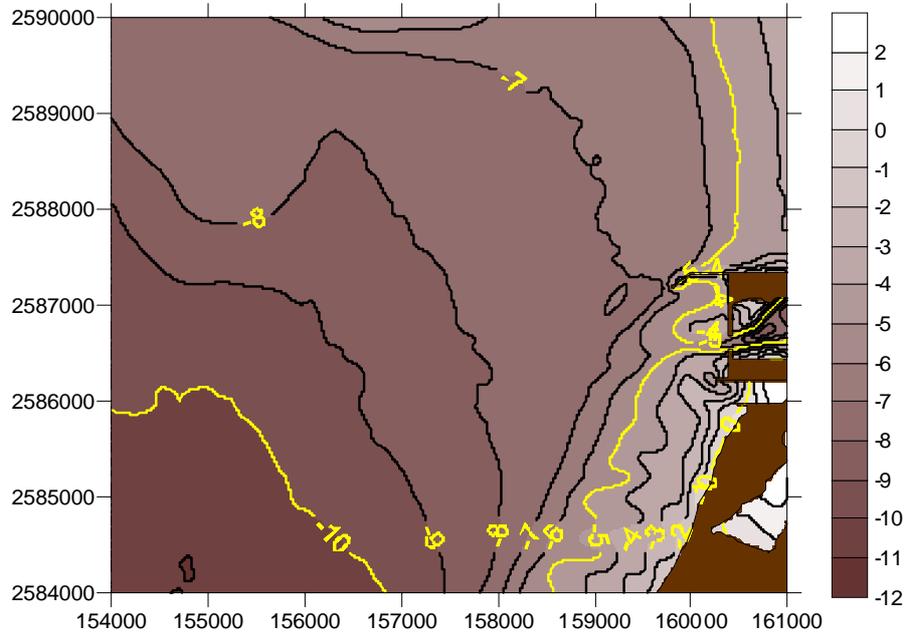


圖 4-11 九十一年度夏季(91/04)布袋港岸線水深測量結果

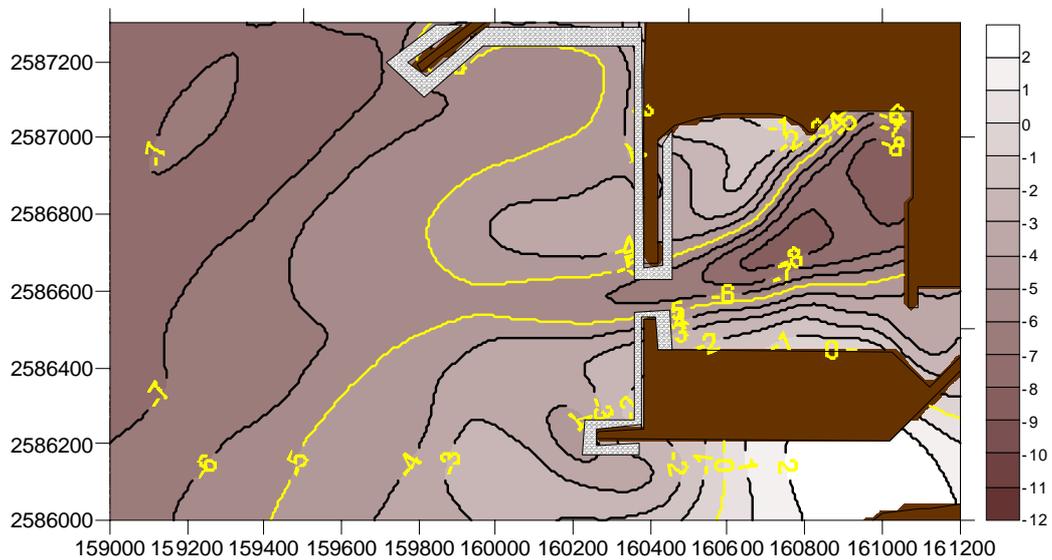


圖 4-12 九十一年度夏季(91/04)布袋港港口水深測量結果

6.九十一年冬季水深測量

而九十一年度冬季(91/09)布袋港岸線水深測量結果如圖 4-13 所示；其九十一年度冬季(91/09)布袋港港口水深測量結果如圖 4-14 所示。

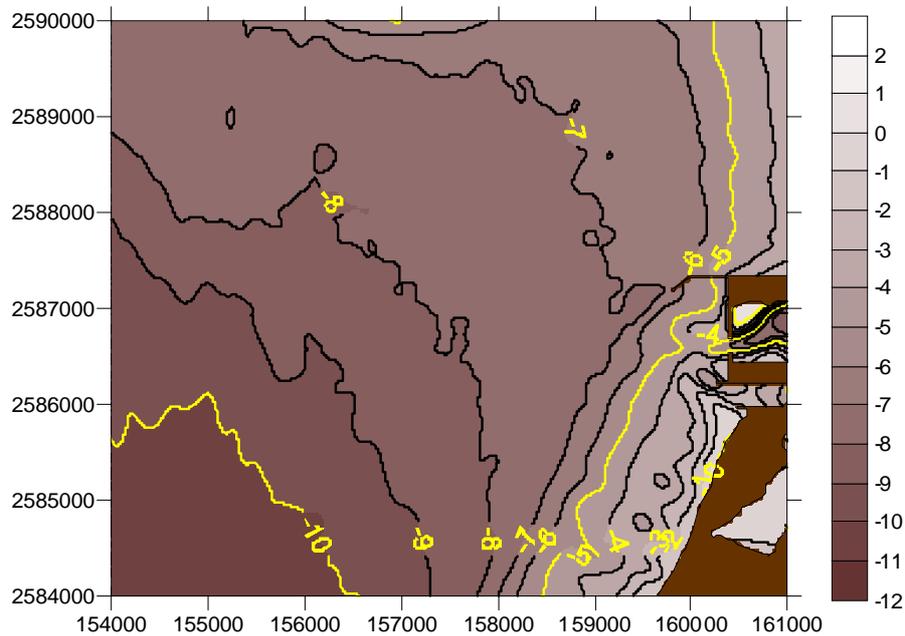


圖 4-13 九十一年度冬季(91/09)布袋港岸線水深測量結果

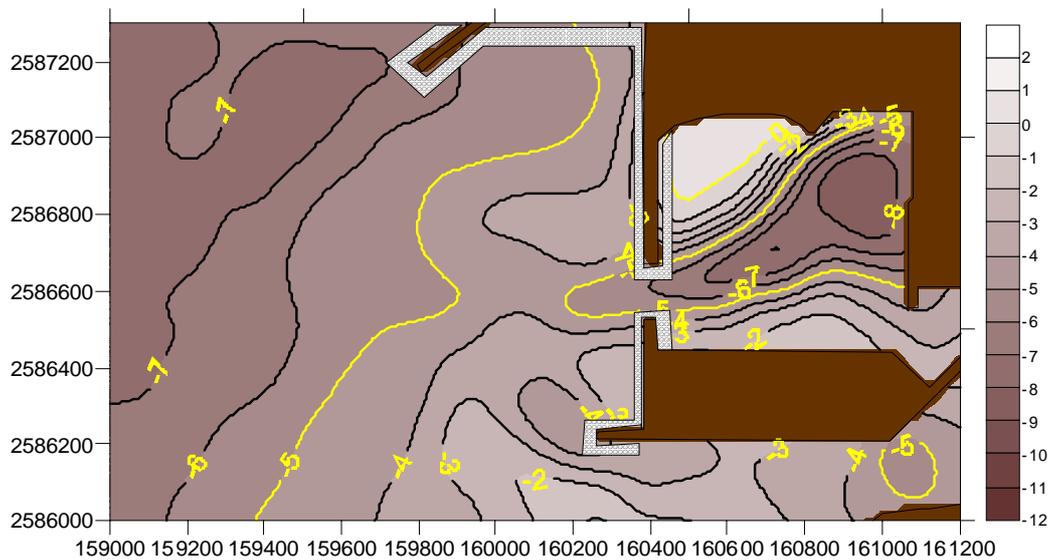


圖 4-14 九十一年度冬季(91/09)布袋港港口水深測量結果

7. 九十二年夏季水深測量

而九十二年度夏季(92/06)布袋港岸線水深測量結果如圖 4-15 所示；其九十二年度夏季(92/06)布袋港港口水深測量結果如圖 4-16 所示。

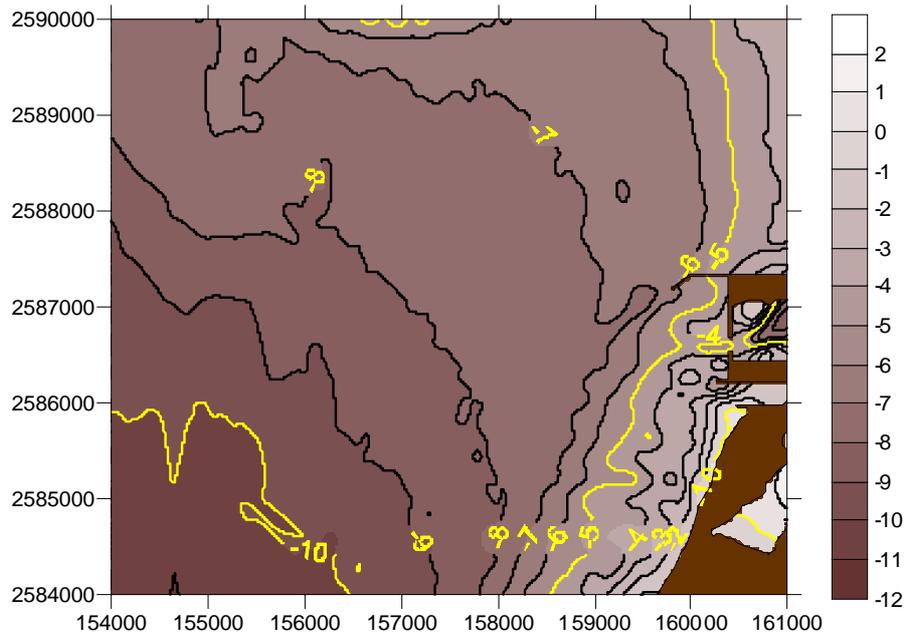


圖 4-15 九十二年度夏季(92/06)布袋港岸線水深測量結果

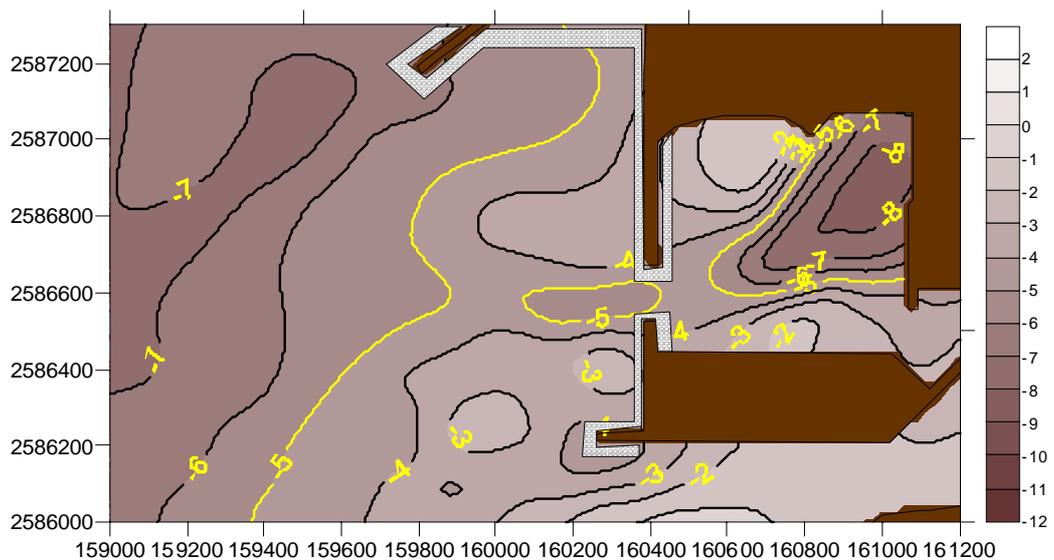


圖 4-16 九十二年度冬季(92/06)布袋港港口水深測量結果

4.3.2 分析與比較

為了便於分析水深變化情況，由前節各次布袋港岸線水深測量之結果，本研究繪製三維水深變化圖來描繪說明之；八十九年度第一次(89/01)布袋港岸線三維水深變化如圖 4-17 所示；八十九年度第二次(89/07)布袋港岸線三維水深變化如圖 4-18 所示；九十年年度第一次(90/07)布袋港岸線三維水深變化如圖 4-19 所示；九十年年度第二次(90/11)布袋港岸線三維水深變化如圖 4-20 所示；九十一年度第一次(91/04)布袋港岸線三維水深變化如圖 4-21 所示；九十一年度第二次(91/09)布袋港岸線三維水深變化如圖 4-22 所示；九十二年度第一次(92/06)布袋港岸線三維水深變化如圖 4-23 所示。

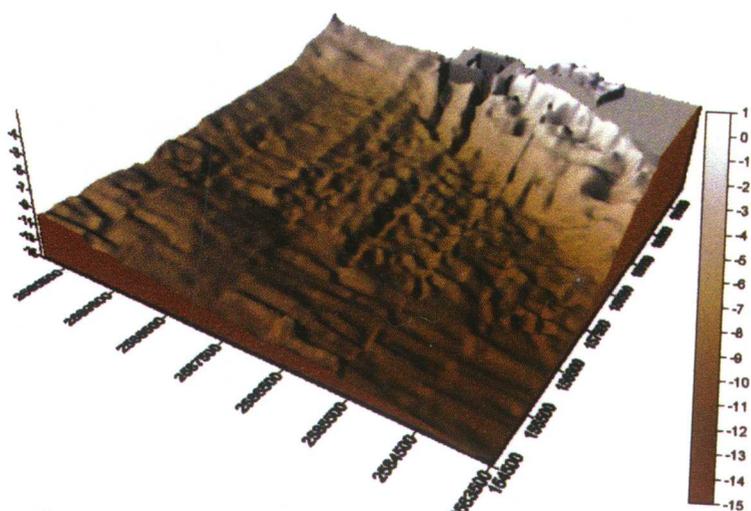


圖 4-17 八十九年度第一次(89/01)布袋港岸線三維水深變化

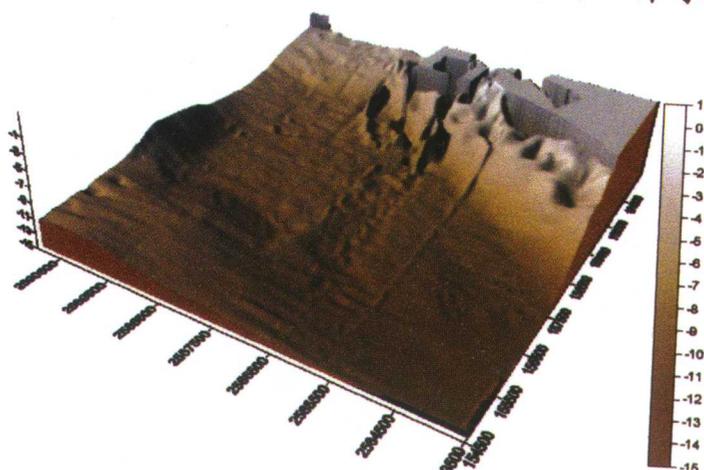


圖 4-18 八十九年度第二次(89/07)布袋港岸線三維水深變化

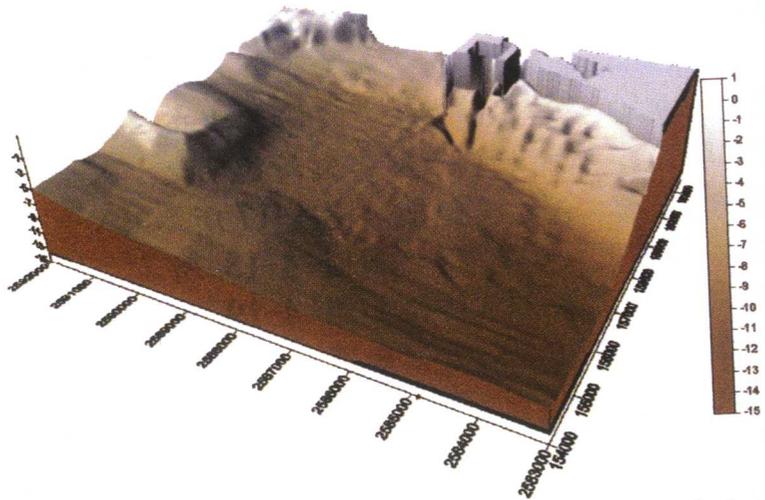


圖 4-19 九十年第一次(90/07)布袋港岸線三維水深變化

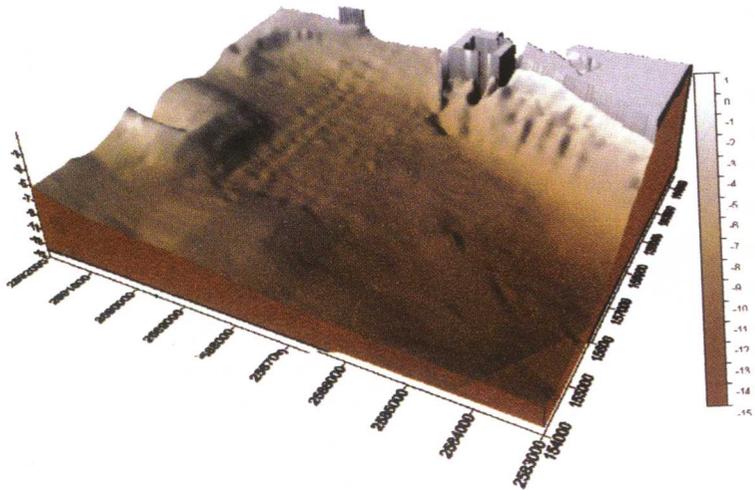


圖 4-20 九十年第二次(90/11)布袋港岸線三維水深變化

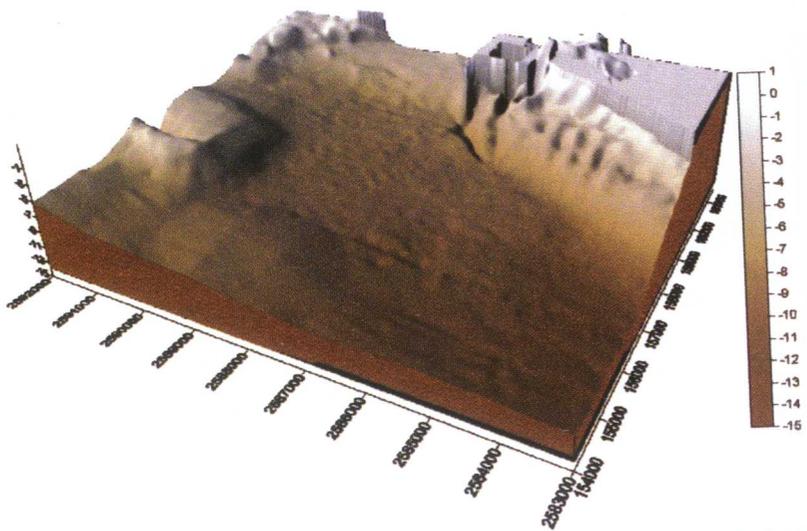


圖 4-21 九十一年第一次(91/04)布袋港岸線三維水深變化

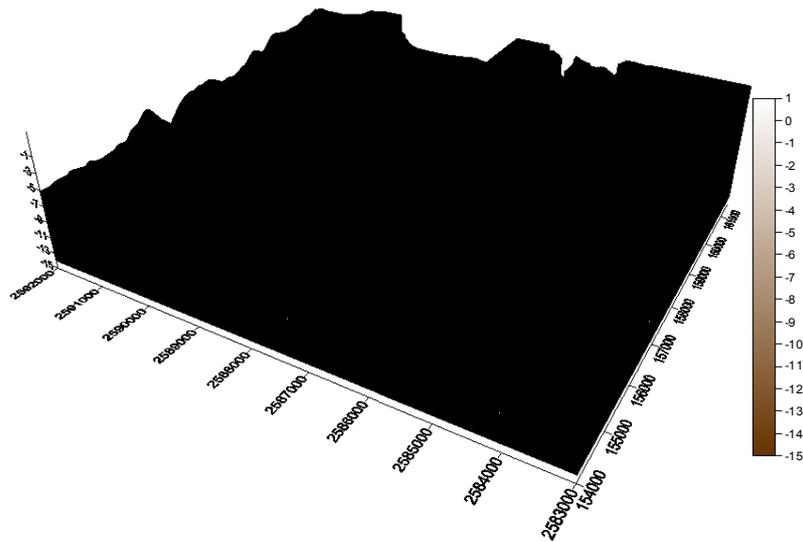


圖 4-22 九十一年度第二次(91/09)布袋港岸線三維水深變化

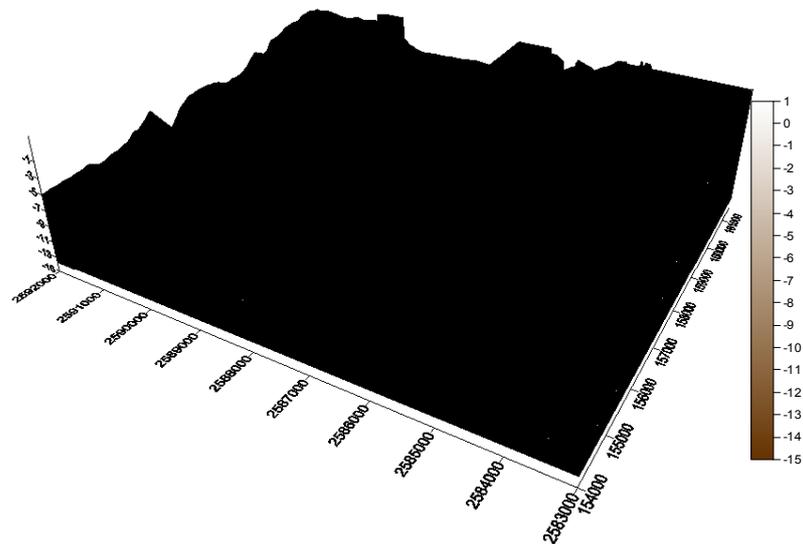


圖 4-23 九十二年度第一次(92/06)布袋港岸線三維水深變化

由上述之布袋港附近海域各時段岸線三維水深變化圖可以得知，布袋港附近海岸線的水深變化走向以北北東(NNE)較淺愈往南南西(SSW)漸深走向，為了便於敘述乃分為四個區域來分別討論：

1. 港池與碼頭區：布袋港港池內與碼頭區水深介於-9~-3 公尺之間，港池西北角與東南角每於夏季颱風期過後皆有淤積現象發生；而港口航道原有水深介於-9~-6 公尺之間，且港務局每年進行航道浚深工程，但每遇颱風過境後皆產生大量淤積現象；甚至港口航道水深僅達-3 公尺左右。
2. 北防波堤以北區：北防波堤以北因有外傘頂洲與壽島等沙洲地形，等深線走向呈弧形內灣變化，由北北西(NNW)較淺往南南東(SSE)方向則漸深；離岸線距離約 2000 公尺，其水深處約在

-5 公尺左右，坡降約為 1/400。

3. 北防波堤與南堤以西：港口以西附近等深線則以由北北東(NNE)方向較淺逐漸往南南西(SSW)方向漸深；離岸線距離約 1000 公尺其水深約在-5 公尺，坡降約為 1/200 左右，而水深-9 至-5 公尺之間為漸變段緩坡，延伸至離岸距離約 6000 公尺處，坡降小於 1/1000，。
4. 南堤以南：港口以南其等深線呈現與海岸線平行走勢，以北北東(NNE)方向較淺逐漸往南南西(SSW)方向漸深；離岸線距離約 950 公尺水深約-5 公尺，坡降為 1/150 至 1/300 之間，而水深-9.5 至-5 公尺之間，亦為漸變段緩坡，延伸至離岸距離約 6000 公尺處，坡降約為 1/1000 左右。

而為了更瞭解布袋港附近海域水深變化情況，特別以本調查研究四年間之歷次岸線水深測量結果(圖 4-3、圖 4-5、圖 4-7、圖 4-9、圖 4-11、圖 4-13、圖 4-15)等資料來作一分析比對；經由比對可以得出布袋港附近海域岸線之各時段水深比對如圖 4-24 所示，由圖 4-24 觀察可以發現布袋港港外海域及岸線地形於八十九年一月與九十年十一月之間為緩慢的侵蝕現象，而由九十年十一月至九十二年六月之間則改變成緩慢淤積的現象，顯示本區於夏季受颱風波浪影響將漂沙向岸堆積後，而於冬季時節則漂沙隨沿岸流緩慢的離岸而去，因此可以判定本區岸線漂沙變化是屬於隨季節變動之動態平衡海域。

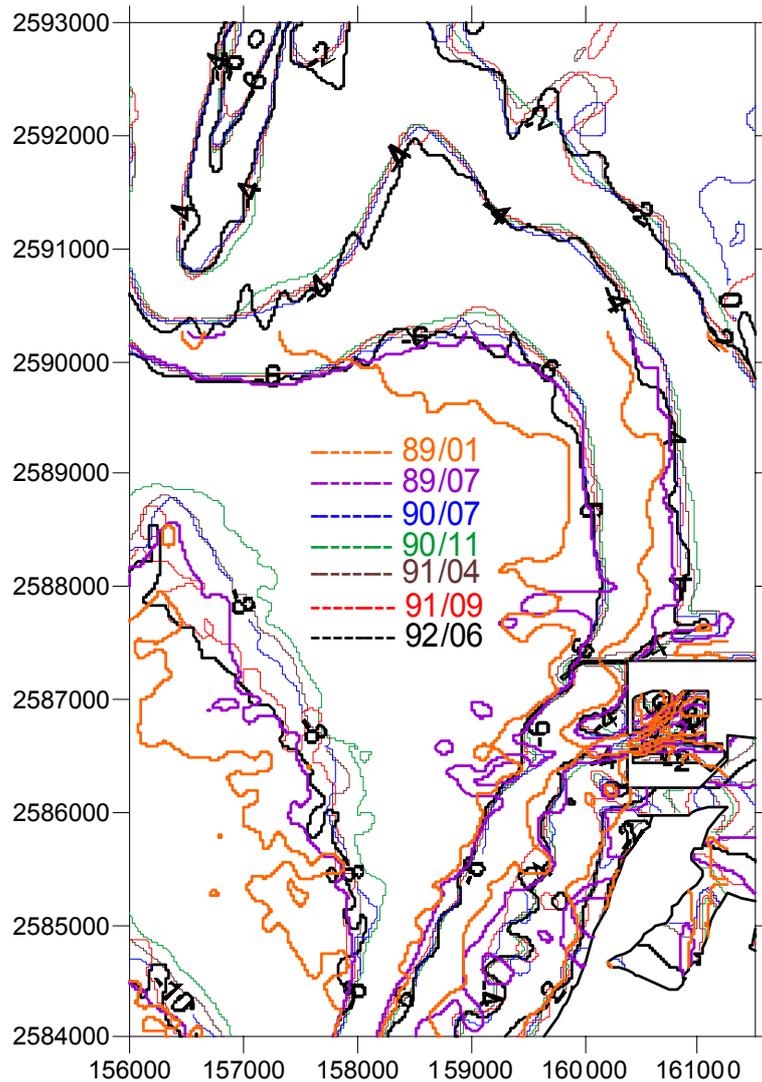


圖 4-24 布袋港附近海域岸線之各時段水深比對

而為了更深入局部觀察布袋港港池及碼頭附近之水深變化情況，則以歷次港口水深測量之結果(圖 4-4、圖 4-6、圖 4-8、圖 4-10、圖 4-12、圖 4-14、圖 4-16)等資料比對，經由比對可以得出布袋港港池及碼頭之各時段之水深比對如圖 4-25 所示；由圖 4-25 顯示布袋港港池及碼頭區的水深變化呈現十分紊亂的現象，其原因主要是因港務局每年皆有浚深工程進行，使得港內淤積情形無法由每次的水深調查中得知其漂沙侵淤程度，但可以確定的是港池及碼頭受季節性影響甚大，每遇颱風時節其港池與航道間皆有大量之淤積現象，而於冬季節風時節卻無法將颱風所帶入之淤沙隨潮流帶出港外，因此漂沙長期滯留於布袋港港池的西北角與東南碼頭附近，此現象是頗值得探討的。

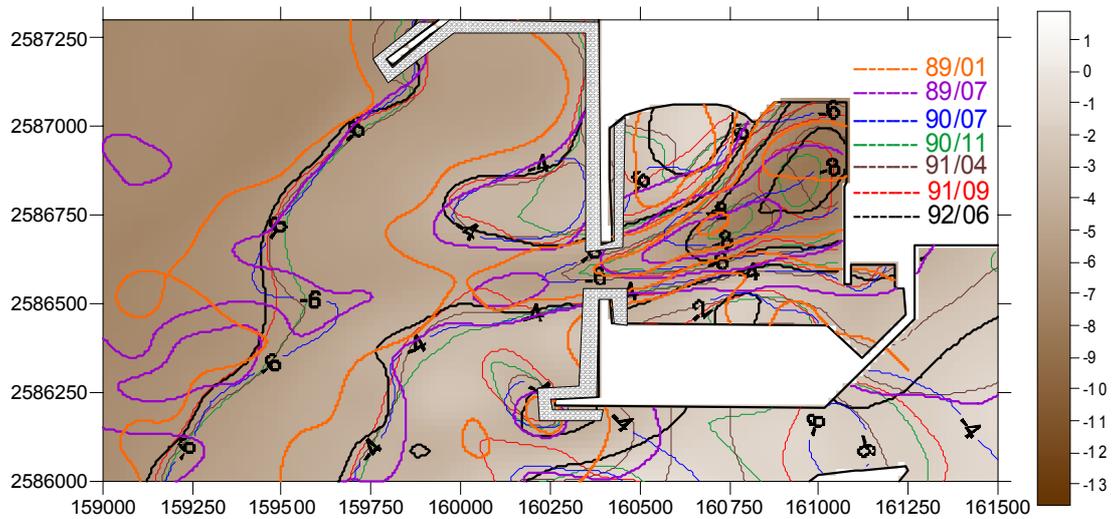


圖4-25 布袋港港池及碼頭之各時段之水深比對

基於上述，為了瞭解布袋港附近海域水深與季節變化之關係，本調查更以歷次岸線水深測量結果(圖 4-3、圖 4-5、圖 4-7、圖 4-9、圖 4-11、圖 4-13、圖 4-15)等資料以季節變化之關聯性來逐一分析比對；經由逐年的季節特性比對，可以得出布袋港附近海域岸線之冬季(89/01)至夏季(89/07)水深比對如圖 4-26 所示；布袋港附近海域岸線之夏季(89/07)至夏季(90/06)水深比對如圖 4-27 所示；布袋港附近海域岸線之夏季(90/06)至冬季(90/11)水深比對如圖 4-28 所示；而布袋港附近海域岸線之冬季(90/11)至夏季(91/04)水深比對如圖 4-29 所示；布袋港附近海域岸線之夏季(91/04)至冬季(91/09)水深比對如圖 4-30 所示；布袋港附近海域岸線之冬季(91/09)至夏季(92/06)水深比對如圖 4-31 所示。

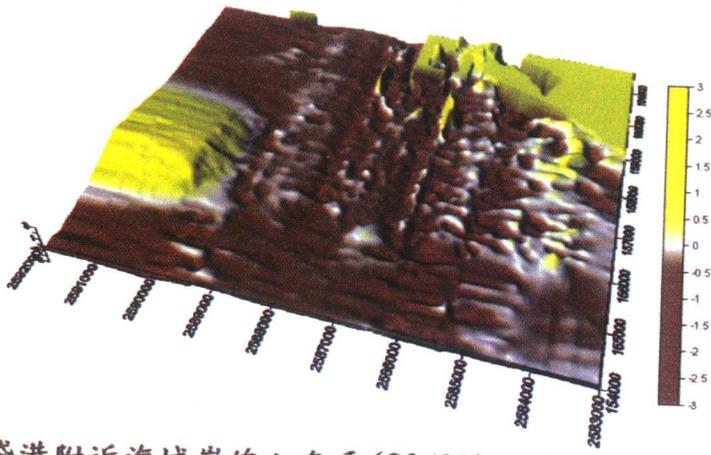


圖4-26 布袋港附近海域岸線之冬季(89/01)至夏季 (89/07)水深比對

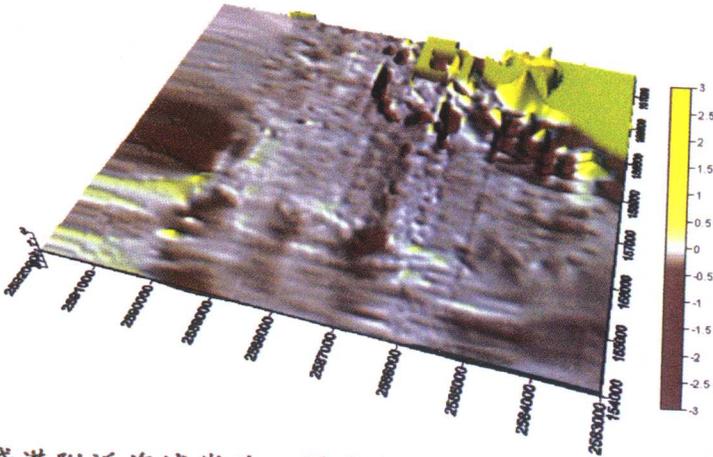


圖4-27 布袋港附近海域岸線之夏季(89/07)至夏季 (90/06)水深比對

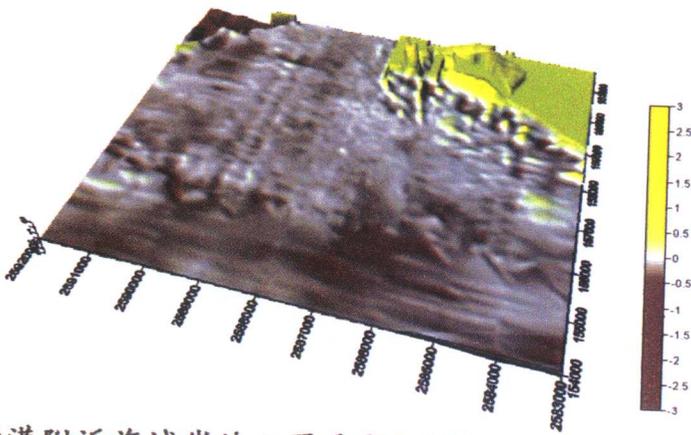


圖4-28 布袋港附近海域岸線之夏季(90/06)至冬季 (90/11)水深比對

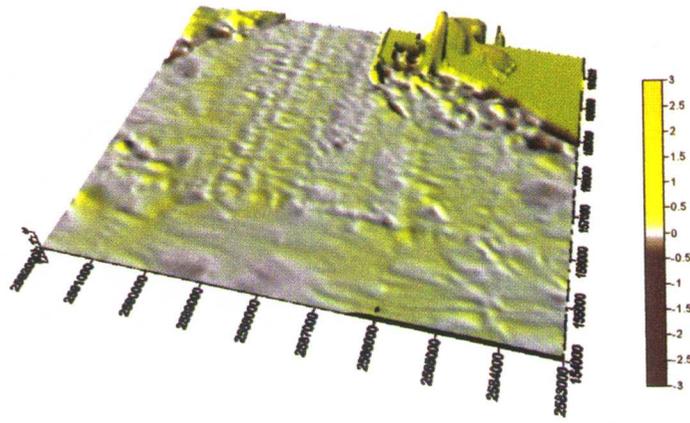


圖4-29 布袋港附近海域岸線之冬季(90/11)至夏季(91/04)水深比對

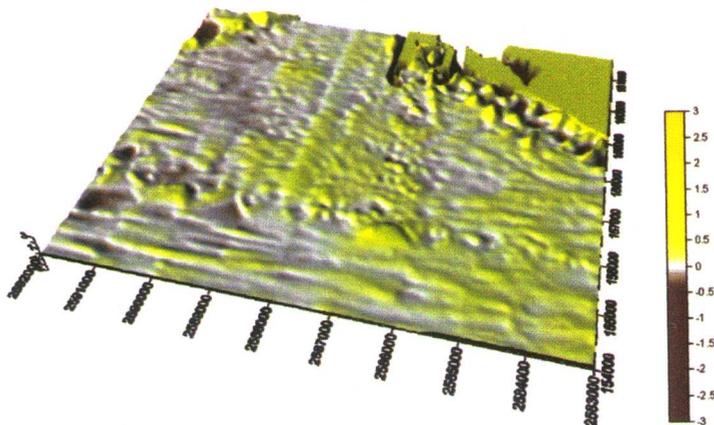


圖4-30 布袋港附近海域岸線之夏季(91/04)至冬季 (91/09)水深比對

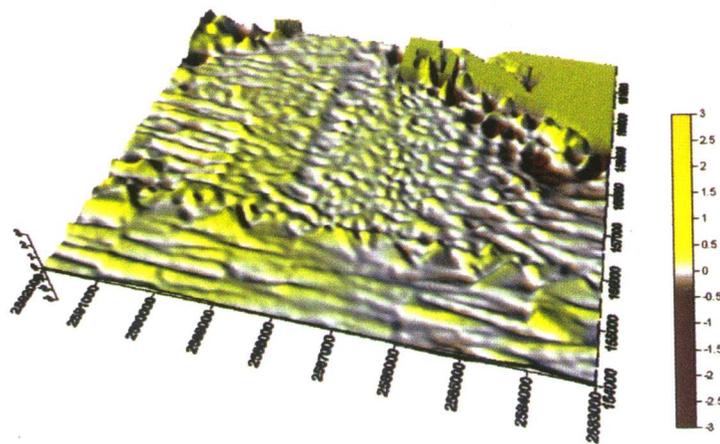


圖4-31 布袋港附近海域岸線之冬季(91/09)至夏季 (92/06)水深比對

由圖 4-26 至圖 4-31 觀察，可以發現布袋港港外海域及岸線地形，其水深變化是以八十九年一月與九十年十一月之間為緩慢沖蝕，而由九十年十一月起至九十二年六月之間則由沖蝕變成為緩慢淤積的現象，究其原因可能是布袋港南面海域的好美里離岸堤興建完工後，使得原本布袋港南面岸線嚴重侵蝕情況獲得控制，進而使得整個布袋港附近海域之漂沙變化達到安定的效果所致。

另布袋港港池及碼頭區其水深與季節變化間之關係，因港內水深常受港務局持續辦理浚深工程之影響，無法依本研究之各次調查結果來進行分析與比對，以免因此誤導對於港內漂沙量之判讀；但是由布袋港港池及碼頭之各時段之水深比對(圖 4-25)顯示，各水深測量時段時差約半年(除八十九年度冬季因預算延誤未施測以外)，於各年夏季轉冬季時節時，布袋海域常會受到颱風過境影響，而其港外漂沙隨颱風波浪湧入港池內，港池內西北角及東南碼頭區與港口突堤內皆呈現漂沙嚴重淤積現象，部份水域淤沙甚至可增達 2 公尺以上之高程；而港外外航道部份與港口以西延伸約 1000 公尺處，也常受颱風波浪影響，從水深-7 公尺淤積為-5 公尺左右，而此現象將嚴重影響布袋商港航船安全。

另外為了瞭解布袋港港口附近漂沙量的減增情況，本研究將本計畫執行四年共七時段之水深測量之結果，依其量測範圍分為港池碼頭區、港口航道區、港外西側區、港口北側區與港口南側區等五個區域以設計高度以下深度-15 水深為基準，來計算出七時段之分區土方量，其土方量計算分區示意如圖 4-32 所示。

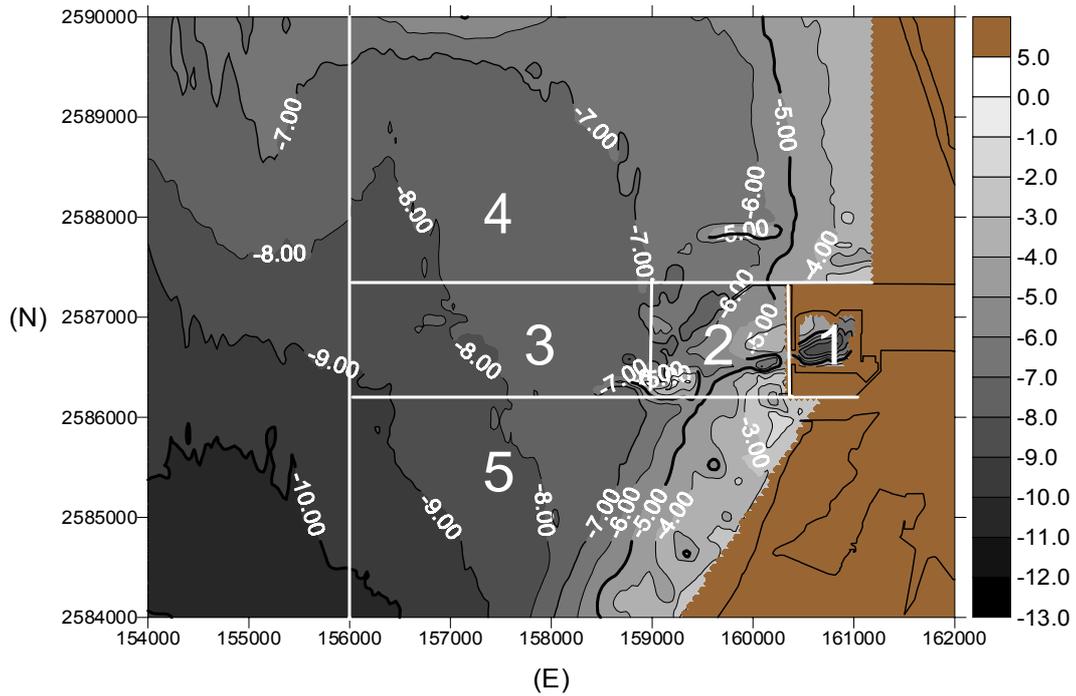


圖 4-32 布袋港港口附近土方量計算分區示意

經由七時段分區土方量計算後，可以得出布袋港港口附近四時段之分區土方量統計如附表 4-2 所示。而將其繪製成布袋港港口附近七時段之分區土方量統計圖，可如附圖 4-33 所示。

表 4-2 布袋港港口附近七時段之分區土方量統計

區域	港池碼頭 (m ³)	港口航道 (m ³)	港外西側 (m ³)	港口北側 (m ³)	港口南側 (m ³)	合計 (m ³)
計算面積(m ²)	146250	1341250	3450000	13780000	8230000	26947500
(1)89年1月(冬季)	1412895	13134012	26117376	120548160	67055783	228268226
(2)89年7月(夏季)	1193170	12637760	24497309	115784233	64141965	218254437
(3)90年6月(夏季)	1231028	12191295	23752729	114018760	62715508	213909320
(4)90年11月(冬季)	1306521	12087656	23254199	114300392	61727514	212676282
(5)91年4月(夏季)	1276517	12162344	23506231	115362900	62388081	214696073
(6)91年9月(冬季)	1336511	12318140	24039833	116793042	63631745	218119271
(7)92年6月(夏季)	1181055	12785714	24379786	118297845	63759080	220403480
沖淤量(2-1) +為淤積-為沖蝕	-219725	-496252	-1620067	-4763927	-2913818	-10013789
平均高差(m)	-1.50	-0.37	-0.47	-0.35	-0.35	-0.38
沖淤量(3-2) +為淤積-為沖蝕	37858	-446465	-744580	-1765473	-1426457	-4345117
平均高差(m)	0.26	-0.33	-0.22	-0.13	-0.17	-0.16
沖淤量(4-3) +為淤積-為沖蝕	75493	-103639	-498530	281632	-987994	-1233038
平均高差(m)	0.52	-0.08	-0.14	0.02	-0.12	-0.05
沖淤量(5-4) +為淤積-為沖蝕	-30004	74688	252032	1062508	660567	2019791
平均高差(m)	-0.21	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07
沖淤量(6-5) +為淤積-為沖蝕	59994	155796	533602	1430142	1243664	3423198
平均高差(m)	0.41	0.12	0.15	0.10	0.15	0.13
沖淤量(7-6) +為淤積-為沖蝕	-155456	467574	339953	1504803	127335	2284209
平均高差(m)	-1.06	0.35	0.1	0.11	0.02	0.09

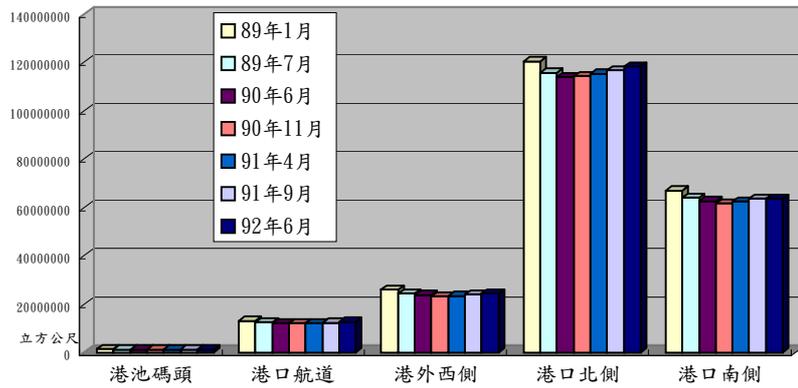


圖 4-33 布袋港港口附近七時段之分區土方量統計圖

由附表 4-2 與圖 4-33 可知，從 89 年 1 月起至 89 年 7 月間，布袋港港池碼頭區其土方量由 1412895 立方公尺減少為 1193170 立方公尺，沖蝕 219725 立方公尺，平均高差沖蝕 1.50 公尺，究其原因應為港務局浚深及冬季東北季節風，港池碼頭區內之底泥隨潮流退去逐漸流出港外之故，而 89 年 7 月至 90 年 6 月之間，則由 1193170 立方公尺增加為 1231028 立方公尺，回淤 37858 立方公尺，平均高差淤積達 0.26 公尺；再因 90 年 6 月至 90 年 11 月期間受桃芝、納利、利其馬等颱風侵襲，使得土方量由 123108 立方公尺增加為 1306521 立方公尺，淤積了 75493 立方公尺，平均高差淤積達 0.52 公尺；90 年 11 月至 91 年 4 月之間則土方量由 1306521 立方公尺減少為 1276517 立方公尺，沖蝕了 30004 立方公尺，平均高差沖蝕 0.21 公尺；而 91 年 4 月至 91 年 9 月期間受雷瑪遜、娜克利等颱風侵襲，使得土方量由 1276517 立方公尺增加為 1336511 立方公尺，淤積了 59994 立方公尺，平均高差淤積達 0.41 公尺；91 年 09 月至 92 年 06 月之間則土方量由 1336511 立方公尺減少為 1181055 立方公尺，沖蝕了 155456 立方公尺，平均高差沖蝕 1.06 公尺；港池碼頭區雖每年因港務局浚深工程持續影響土方變化，但可以概略研判其由夏季轉冬季之調查時段皆呈現淤積現象，究其原因可能是颱風時節受颱風波浪向岸連續作用影響，使得底床沙粒達到起動條件，其漂沙急遽往港池與碼頭區淤積，而於冬季季風時節淤沙卻無法隨著潮水流出港池所致。

而港口外航道區於 89 年 1 月起至 89 年 7 月間，該區域土方量由 13134012 立方公尺減少為 12637760 立方公尺，沖蝕 496252 立方公尺，平均高差沖蝕 0.37 公尺；89 年 7 月至 90 年 6 月之間，則由 12637760 立方公尺再遞減為 12191295 立方公尺，沖蝕 446465 立方公尺，平均

高差沖蝕達 0.33 公尺；而 90 年 6 月至 90 年 11 月之間，則由 12191295 立方公尺再遞減為 12088650 立方公尺，沖蝕 103639 立方公尺，平均高差沖蝕 0.08 公尺；而 90 年 11 月至 91 年 4 月之間，則由 12088650 立方公尺增加為 12162344 立方公尺，回淤 74688 立方公尺，平均高差淤積達 0.06 公尺；91 年 4 月至 91 年 9 月之間，則由 12162344 立方公尺增加為 12318140 立方公尺，回淤 155796 立方公尺，平均高差淤積達 0.12 公尺；91 年 9 月至 92 年 6 月之間，則由 12318140 立方公尺增加為 12785714 立方公尺，回淤 467574 立方公尺，平均高差淤積達 0.35 公尺；本區於 90 年 11 月前皆為沖蝕海岸，90 年 11 月之後調查轉為淤積，究其原因可能受南面好美里岸線興建海堤及離岸堤造成養灘作用，減少漂沙流失有關。

港外西側區則於 89 年 1 月至 89 年 7 月之間，由 26117376 立方公尺減少為 24497309 立方公尺，沖蝕 1620067 立方公尺，平均高差達沖蝕 0.47 公尺；而 89 年 7 月至 90 年 6 月之間，則由 24497309 立方公尺遞減為 23752729 立方公尺，沖蝕 744580 立方公尺，平均高差沖蝕 0.22 公尺；而 90 年 6 月至 90 年 11 月之間，則由 23752729 立方公尺再遞減為 23254199 立方公尺，沖蝕 498530 立方公尺，平均高差沖蝕 0.14 公尺；而 90 年 11 月至 91 年 4 月之間，則由 23254199 立方公尺增加為 23506231 立方公尺，回淤 252032 立方公尺，平均高差淤積達 0.07 公尺；91 年 4 月至 91 年 9 月之間，則由 23506231 立方公尺增加為 24039833 立方公尺，回 533602 立方公尺，平均高差淤積達 0.15 公尺；而 91 年 9 月至 92 年 6 月之間，則由 24039833 立方公尺增加為 24379786 立方公尺，回淤 339953 立方公尺，平均高差淤積達 0.01 公尺；本區土方量雖僅少許變化，但亦與港口航道區一般，於 90 年 11 月前皆為沖蝕海岸，90 年 11 月之後調查轉為淤積，究其原因應受南面興建海堤及離岸堤造成養灘作用，減少漂沙流失有關。

而港口北側與南側則分別由 89 年 1 月至 89 年 7 月間的 120548160 立方公尺與 67055783 立方公尺減少為 115784233 立方公尺與 64141965 立方公尺，沖蝕各有 4763927 立方公尺及 2913818 立方公尺，平均高差沖蝕皆達 0.35 公尺；而 89 年 7 月至 90 年 6 月間則由 115784233 立方公尺與 64141965 立方公尺分別減少為 114018760 立方公尺與 62715508 立方公尺，沖蝕各有 1765473 立方公尺及 1426457 立方公尺，平均高差達沖蝕 0.13 及 0.17 公尺；而 90 年 6 月至 90 年 11 月之間港外南側則由 62715508 立方公尺沖蝕為 61727514 立方公尺，平均高差沖蝕 0.12 公尺；而港外北側則土方量由 114018760 立方公尺增加為 114300392 立方公尺，淤積了 281632 立方公尺，平均高差淤積 0.02 公尺；而 90 年 11 月至 91 年 4 月間港外北側則由

114300392 立方公尺增加為 115362900 立方公尺，淤積了 1062508 立方公尺，平均高差淤積 0.08 公尺；港外南側則由 61727514 立方公尺增加為 62388081 立方公尺，淤積了 660567 立方公尺，平均高差淤積 0.08 公尺；而 91 年 4 月至 91 年 9 月間港外北側則由 115362900 立方公尺增加為 116793042 立方公尺，淤積了 1430142 立方公尺，平均高差淤積 0.10 公尺；港外南側則由 62388081 立方公尺增加為 63631745 立方公尺，淤積了 1243664 立方公尺，平均高差淤積 0.15 公尺；而 91 年 9 月至 92 年 6 月間港外北側則由 116793042 立方公尺增加為 118297845 立方公尺，淤積了 1504803 立方公尺，平均高差淤積 0.11 公尺；港外南側則由 63631745 立方公尺增加為 63759080 立方公尺，淤積了 127335 立方公尺，平均高差淤積 0.09 公尺。

就本計畫執行七次水深測量之結果，整體布袋港港口附近區域(計算面積為 26687500 平方公尺，水深基面-15 公尺)之土方量分析結果，可得到由 89 年 1 月之土方量 228268226 立方公尺至 92 年 6 月的土方量 220403480 立方公尺，四年期間其監測區域內之土方量共計淤積有 2284209 立方公尺，平均高差淤積了 0.09 公尺之多，究其原因主要是受冬、夏季節性變化不同與長期潮流沿著海岸漲退影響，底泥隨潮水沿著海岸線向、離岸往復作用所致；近年布袋港南面岸線興建好美里海堤及離岸堤產生養灘作用減緩漂沙變化，91 年 4 月至 92 年 6 月三次調查結果，港外海域及岸線附近皆有迴淤現象；值得注意的是布袋商港港口與外航道附近水深正值颱風波浪之碎波水深處，每當遇到颱風波浪侵襲時，將引起該區域急劇的漂沙活動，使得底床沙粒常達到全面啟動狀態，並急遽的往港池、內航道與碼頭等區域聚集，致使布袋商港港區內常因此淤積大量淤沙。

第五章 底床粒徑採樣分析

底床粒徑採樣分析常是用來判別漂沙來源的重要指標，藉由底床土壤粒徑之特性分析，可比對臨近海域各漂沙來源間的差異性，藉由此線索可判別布袋港漂沙的主要來源，進一步找出適切的漂沙防治計畫。

5.1 調查範圍

本調查之底床粒徑採樣分析係配合平面流況調查每年夏、冬兩季各實施一次。而本調查於四年間共施測五次(九十一年度未編列調查)；而八十九年度第一次採樣工作於 89 年 1 月 4 日至 89 年 1 月 5 日作業完成，八十九年度第二次採樣工作則於 89 年 7 月 21 日至 89 年 7 月 24 日作業完成；而九十年度第一次採樣工作於 90 年 6 月 21 日至 90 年 6 月 23 日作業完成，九十年度第二次採樣工作於 90 年 10 月 24 日至 90 年 10 月 25 日作業完成，九十二年度第一次採樣工作於 92 年 06 月 04 日至 90 年 06 月 05 日作業完成。其調查範圍則以布袋港港口南、北方各距離 3.5 公里處之整個海域及布袋港口與港內水域為主要採樣區域，整個底床粒徑採樣分析調查範圍與採樣位置如圖 5-1 所示，採樣樣本合計 37 處。

5.2 調查步驟與方法

本研究之調查步驟係由潛水人員於布袋港海域就前節圖 5-1 所選定之採樣點位置以 500cc 容器逐一蒐集底床沉積物，其採樣作業實景如照片 5-1，並包封標示取樣天候、水深與採樣點位置座標等；再於試驗室中利用篩分析儀及光學顯微鏡儀等儀器設備，分析其粒徑與礦岩成份及特性。

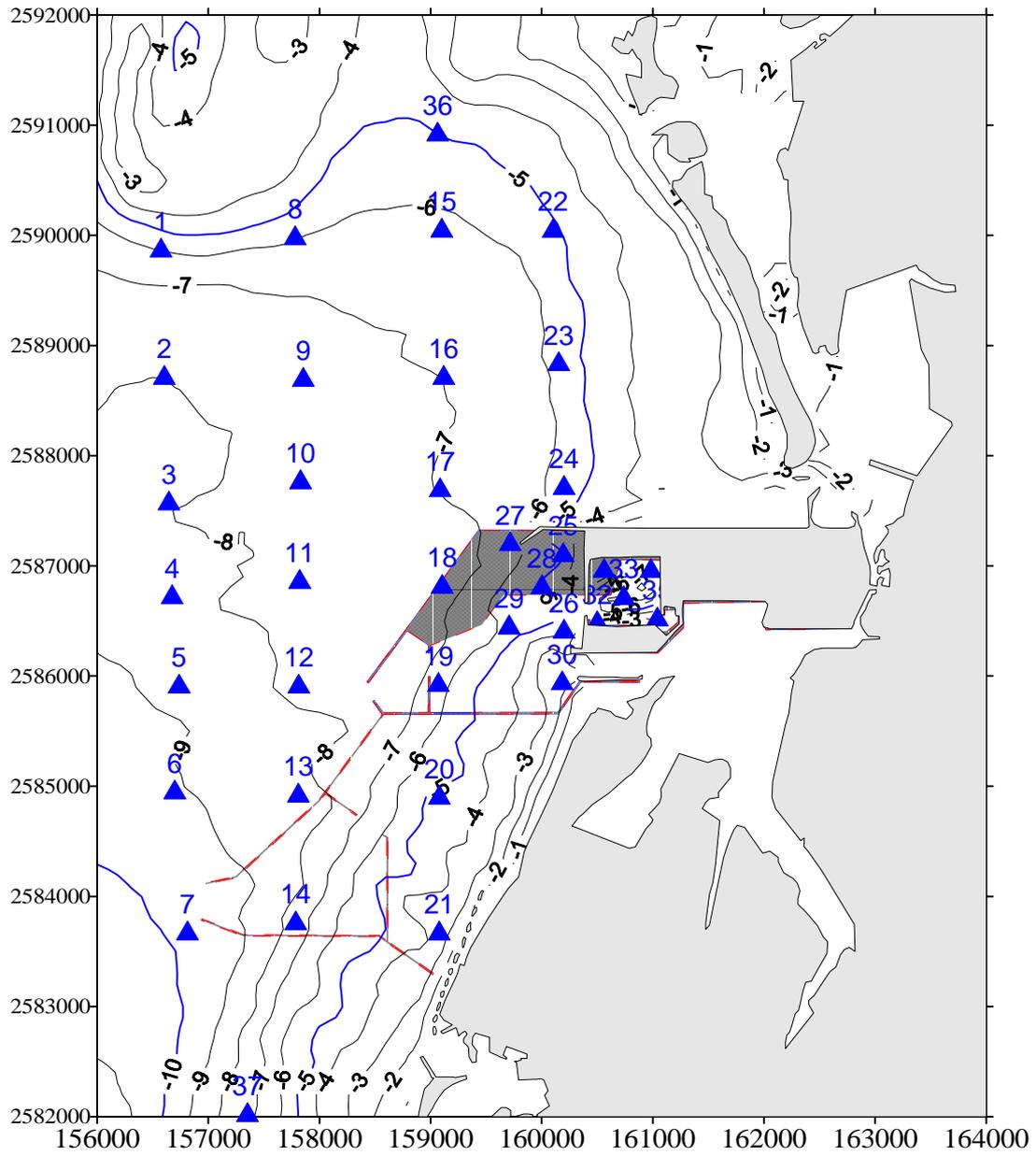


圖 5-1 底床粒徑採樣分析調查範圍與採樣位置



照片 5-1 採樣作業實景

5.2.1 主要儀器設備

本研究使用的主要儀器設備如表 5-1 所示，粒徑分析標準係採用美國土壤局 ASTM 篩號分類標準，其美國土壤局 ASTM 篩號與粒徑之關係如表 5-2 所示，而礦岩分析則以公制重量百分比法分類。

表 5-1 底床粒徑採樣分析主要儀器設備

分析類別	儀器設備
粒徑分析	振動機篩網一套 比重計 量筒
金屬礦物分析	篩網(10,20,40,60,100,200mesh) 偏光顯微鏡

表 5-2 美國土壤局 ASTM 篩號與粒徑之關係

分類	篩號(ASTM)	粒徑 d(mm)	ϕ 值
中礫石	4	8.00	-3.00
	5	4.00	-2.00
	6	3.36	-1.75
	7	2.83	-1.50
	8	2.38	-1.25
細礫石	10	2.00	-1.00
	12	1.68	-0.75
	14	1.41	-0.50
	16	1.19	-0.20
粗沙	18	1.00	0.00
	20	0.84	0.25
	25	0.71	0.50
	30	0.59	1.75
中沙	35	0.50	1.00
	40	0.42	1.25
	45	0.35	1.50
	50	0.299	1.75
細沙	60	0.250	2.00
	70	0.210	2.25
	80	0.177	2.50
	100	0.149	2.75
極細沙	120	0.125	3.00
	140	0.105	3.25
	170	0.088	3.50
	200	0.074	3.75
淤泥	230	0.0625	4.00
	270	0.0530	4.25
	325	0.0440	4.50

5.2.2 作業流程及分析方法

本研究底床粒徑採樣分析流程主要可分為兩大項：

1. 粒徑與比重分析：可以分為篩分析及比重計分析兩部份，其分

析分法是用濕篩將樣本以 ASTM#200 標準篩(篩目 0.074mm)，把樣本分出砂樣和泥樣砂樣，經乾燥後使用一組標準篩其篩號分別為#10、#20、#40、#60、#100、#200 等進行篩分析；泥樣部份則靜置三天後，去掉上層水倒入一公升量筒，並加入水和 20 毫升 1N 的(NaPO₃)₆為分散劑，使其達到一公升後，進行比重計分析，其粒徑與比重分析流程如圖 5-2 所示。

而藉由篩分析流程得出之結果，可以描繪出各個樣本之粒徑分佈曲線如圖 5-3 所示，再利用內差法求得各樣本之中值粒徑 d_{50} (median diameter)、有效粒徑 d_{10} (effective size)以及 d_{25} 、 d_{60} 、 d_{75} 等粒徑，而平均粒徑 d_m (mean diameter)則取幾何平均值計算如下：

$$d_m = \frac{\sum_{p=0}^{100} d_i \cdot p_i}{\sum_{p=0}^{100} p_i}$$

其中 d_i 為兩相鄰篩號之幾何平均值， p_i 為所對應留篩部份全部比重的百分比，所以求得之 d_{25} 、 d_{75} 等各為累計百分率 25% 與 75%之粒徑；一般以漂沙分析皆以平均粒徑 d_m 或中值粒徑 d_{50} 來代表底泥樣本整體性質。

另外可藉由均勻係數的求得，來觀察出採樣所得之樣本其粒徑組成特性：

均勻係數(coefficient of uniform)為判定樣本之粒徑大小分佈是否均勻，其值越接近 1 表示粒徑越均勻，其式為

$$c_u = d_{60} / d_{10}$$

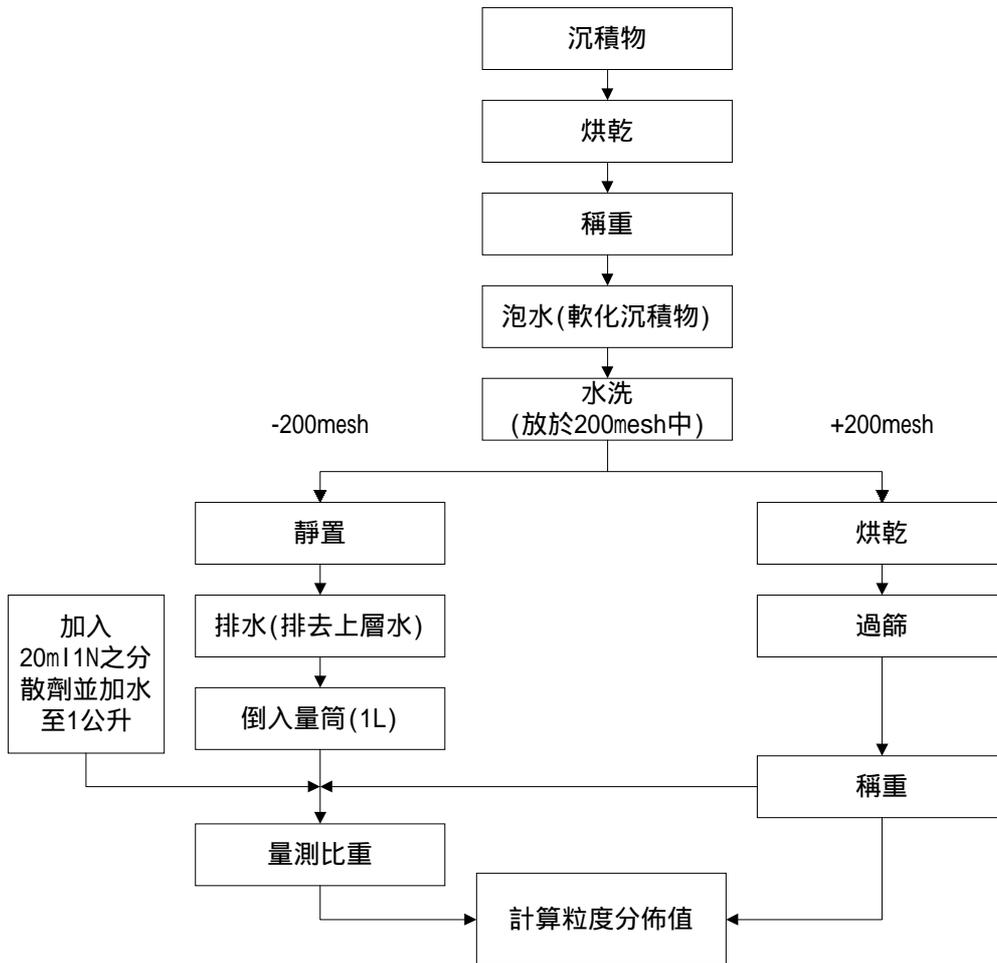


圖 5-2 粒徑與比重分析流程

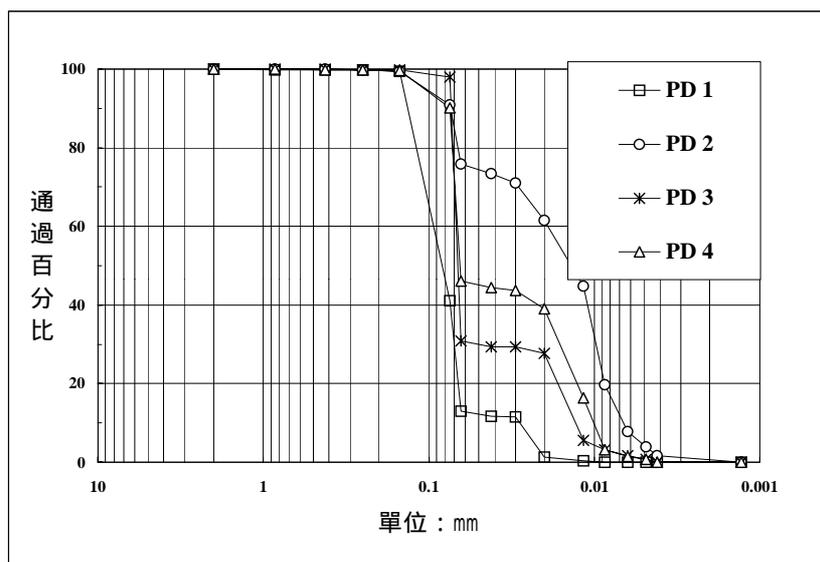


圖 5-3 樣本之粒徑分佈曲線

2. 礦岩分析：沉積物之礦岩分析主要是將樣本做成薄片，再利用光學顯微鏡(OM)來鑑定礦物組成，並分析其個別含量，其礦岩分析流程圖如圖 5-4 所示。

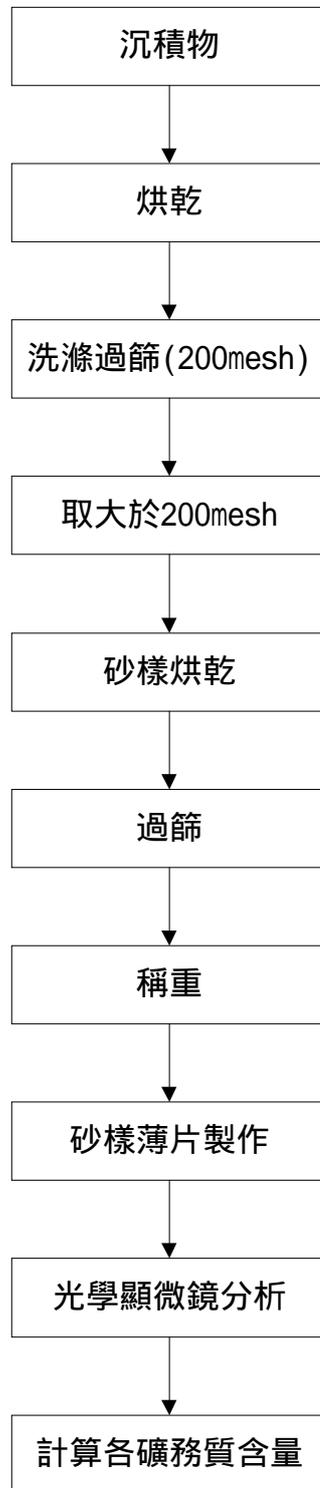


圖 5-4 礦岩分析流程圖

5.3 樣本分析與結果

由現場調查取得之底床沉積物樣本，其同時用 DGPS 定位儀所測得之粒徑分析採樣點位置二度分帶座標與水深如表 5-3 所示；而為了擴大瞭解布袋南北海域之底床粒徑，故除了八十九年度第一次採樣調查之 35 組樣本以外，於八十九年第二次採樣調查開始，於北至外傘頂洲南面與八掌溪河口處各加取一組樣本，合計 37 組：

而經由土壤實驗室分析得出之結果，則可分以下兩項來討論：

1. 粒徑分析：各樣本經實驗室篩分析與比重分析後，得出各樣本之粒徑分佈曲線圖，則可經由前節公式計算出八十九年度第一次採樣調查(89/01)底床粒徑分佈統計如表 5-4 所示；八十九年度第二次採樣調查(89/07)底床粒徑分佈統計表如附表 5-5 所示；而九十年度第一次採樣調查(90/06)底床粒徑分佈統計如表 5-6 所示；九十年度第二次採樣調查(90/10)底床粒徑分佈統計如表 5-7 所示；而九十二年度第一次採樣調查(92/06)底床粒徑分佈統計如表 5-8 所示。

表 5-3 底床粒徑分析採樣點位置二度分帶座標與水深

樣本	橫座標E	縱座標N	水深(m)
1	2589926.557	156591.738	5.8
2	2588725.828	156591.727	8.0
3	2587727.819	156591.966	8.2
4	2586827.779	156590.214	8.5
5	2585926.880	156590.258	8.9
6	2584926.183	156591.628	9.2
7	2583727.717	156591.256	9.2
8	2589928.088	157842.107	6.2
9	2588725.703	157840.742	7.2
10	2587725.948	157842.492	7.4
11	2586827.266	157842.027	7.5
12	2585924.727	157840.286	7.8
13	2584927.064	157840.889	8.2
14	2583728.408	157839.913	7.4
15	2589928.278	159091.092	6.0
16	2588724.560	159089.144	6.8
17	2587724.708	159092.023	6.9
18	2586824.735	159089.187	6.9
19	2585924.750	159089.756	6.2
20	2584927.981	159089.057	4.4
21	2583726.160	159089.297	3.8
22	2589926.525	160217.090	4.9
23	2588726.325	160215.653	5.2
24	2587727.715	160215.236	5.4
25	2587126.005	160214.537	5.0
26	2586427.057	160216.494	2.9
27	2587227.601	159713.730	6.8
28	2586825.021	159966.439	4.3
29	2586426.915	159714.995	5.2
30	2585925.631	160215.366	0.8
31	2586982.720	160537.786	2.1
32	2586544.674	160529.241	1.8
33	2586758.825	160765.653	7.2
34	2586990.459	161001.716	8.6
35	2586545.426	161001.062	3.4
36	2590848.212	159146.720	6.1
37	2582022.408	157377.466	7.1

表 5-4 八十九年度第一次採樣調查(89/01)底床粒徑分佈統計表

樣本編號	有效粒徑 D10(mm)	D25(mm)	中值粒徑 D50(mm)	D65(mm)	D75(mm)	平均粒徑 Dm(mm)	均勻係數 Cu
1	0.0037	0.0202	0.0741	0.0861	0.1105	0.0548	5.470
2	0.0055	0.0246	0.0670	0.0759	0.1078	0.0562	4.382
3	0.0045	0.0192	0.0653	0.0741	0.0975	0.0496	5.078
4	0.0052	0.0246	0.0577	0.0704	0.0882	0.0500	3.585
5	0.0020	0.0095	0.0316	0.0427	0.0670	0.0272	7.053
6	0.0032	0.0128	0.0416	0.0577	0.0704	0.0335	5.500
7	0.0022	0.0095	0.0358	0.0562	0.0759	0.0296	7.989
8	0.0033	0.0157	0.0670	0.0798	0.1078	0.0484	6.866
9	0.0041	0.0138	0.0509	0.0704	0.0928	0.0403	6.725
10	0.0041	0.0178	0.0496	0.0670	0.0839	0.0420	4.713
11	0.0012	0.0067	0.0212	0.0279	0.0496	0.0192	7.403
12	0.0010	0.0035	0.0095	0.0135	0.0223	0.0090	6.371
13	0.0067	0.0272	0.0606	0.0670	0.0741	0.0496	2.724
14	0.0090	0.0460	0.0905	0.1051	0.1253	0.0805	2.724
15	0.0025	0.0125	0.0449	0.0653	0.0839	0.0361	6.712
16	0.0086	0.0316	0.0704	0.0722	0.0951	0.0596	3.009
17	0.0223	0.0606	0.0905	0.1000	0.1162	0.0861	1.917
18	0.0135	0.0591	0.0905	0.1000	0.1191	0.0861	2.015
19	0.0386	0.0759	0.0951	0.1105	0.1222	0.0959	1.610
20	0.0839	0.1105	0.1609	0.1778	0.2015	0.1530	1.824
21	0.0759	0.0905	0.1105	0.1222	0.1420	0.1124	1.569
22	0.0350	0.0779	0.0951	0.1051	0.1222	0.0967	1.569
23	0.0449	0.0779	0.0975	0.1078	0.1222	0.0975	1.569
24	0.0061	0.0386	0.0798	0.0905	0.1105	0.0699	2.863
25	0.0637	0.0905	0.1350	0.1530	0.2119	0.1373	2.341
26	0.0012	0.0050	0.0246	0.0427	0.0670	0.0202	13.400
27	0.0009	0.0043	0.0149	0.0234	0.0484	0.0146	11.256
28	0.1051	0.1569	0.1823	0.1870	0.2119	0.1823	1.351
29	0.0082	0.0427	0.0779	0.0861	0.1105	0.0716	2.588
30	0.0905	0.1420	0.1823	0.1917	0.2228	0.1793	1.569
31	0.0011	0.0065	0.0246	0.0406	0.0704	0.0225	10.831
32	0.0009	0.0062	0.0548	0.0704	0.1051	0.0330	16.952
33	0.0006	0.0017	0.0070	0.0108	0.0246	0.0067	14.471
34	0.0014	0.0076	0.0839	0.1051	0.1492	0.0456	19.632
35	0.0017	0.0105	0.0350	0.0472	0.0704	0.0296	6.705

表 5-5 八十九年度第二次採樣調查(89/07)底床粒徑分佈統計表

樣本編號	有效粒徑 D10(mm)	D25(mm)	中值粒徑 D50(mm)	D65(mm)	D75(mm)	平均粒徑 Dm(mm)	均勻係數 Cu
1	0.0494	0.0795	0.0986	0.1074	0.1222	0.0986	1.5373
2	0.0194	0.0498	0.0806	0.0926	0.1142	0.0771	2.2934
3	0.0071	0.0230	0.0481	0.0637	0.0729	0.0432	3.1742
4	0.0073	0.0261	0.0587	0.0701	0.0922	0.0521	3.5314
5	0.0011	0.0067	0.0212	0.0283	0.0465	0.0187	6.9895
6	0.0022	0.0114	0.0358	0.0485	0.0667	0.0301	5.8631
7	0.0007	0.0038	0.0140	0.0205	0.0356	0.0124	9.3468
8	0.0187	0.0661	0.0908	0.1005	0.1171	0.0889	1.7713
9	0.0051	0.0191	0.0387	0.0600	0.0785	0.0387	4.1181
10	0.0013	0.0103	0.0360	0.0517	0.0742	0.0302	7.2368
11	0.0024	0.0137	0.0477	0.0648	0.0766	0.0369	5.5927
12	0.0014	0.0088	0.0220	0.0348	0.0612	0.0228	6.9278
13	0.0122	0.0411	0.0682	0.0743	0.0963	0.0646	2.3436
14	0.0166	0.0677	0.0935	0.1042	0.1226	0.0919	1.8096
15	0.0039	0.0215	0.0653	0.0727	0.0948	0.0511	4.3996
16	0.0112	0.0459	0.0768	0.0879	0.1075	0.0724	2.3454
17	0.0162	0.0559	0.0844	0.0947	0.1127	0.0810	2.0146
18	0.0491	0.0783	0.0973	0.1062	0.1210	0.0973	1.5454
19	0.0584	0.0816	0.1000	0.1085	0.1226	0.1000	1.5019
20	0.0845	0.1079	0.1574	0.1740	0.2023	0.1509	1.8744
21	0.0813	0.0972	0.1310	0.1474	0.1803	0.1319	1.8551
22	0.0359	0.0677	0.0925	0.1022	0.1187	0.0906	1.7543
23	0.0076	0.0495	0.0849	0.0955	0.1137	0.0782	2.2959
24	0.0548	0.0798	0.0991	0.1080	0.1231	0.0991	1.5430
25	0.0407	0.0787	0.0996	0.1094	0.1261	0.0996	1.6025
26	0.0812	0.0999	0.1411	0.1601	0.1906	0.1390	1.9076
27	0.0414	0.0783	0.0980	0.1072	0.1227	0.0980	1.5671
28	0.0007	0.0028	0.0100	0.0167	0.0506	0.0112	18.1782
29	0.0757	0.0859	0.1061	0.1155	0.1310	0.1061	1.5251
30	0.0802	0.0944	0.1239	0.1330	0.1689	0.1255	1.7890
31	0.0051	0.0445	0.0916	0.1029	0.1225	0.0793	2.7546
32	0.0021	0.0115	0.0287	0.0412	0.0626	0.0274	5.4490
33	0.0020	0.0354	0.1020	0.1172	0.1445	0.0805	4.0861
34	0.0093	0.0754	0.1079	0.1246	0.1571	0.1085	2.0852
35	0.0010	0.0021	0.0077	0.0106	0.0211	0.0070	9.8635
36	0.0019	0.0131	0.0578	0.0690	0.0886	0.0406	6.7626
37	0.0792	0.1017	0.1532	0.1734	0.2087	0.1482	2.0525

表 5-6 九十年度第一次採樣調查(90/06)底床粒徑分佈統計表

樣本編號	有效粒徑 D10(mm)	D25(mm)	中值粒徑 D50(mm)	D65(mm)	D75(mm)	平均粒徑 Dm(mm)	均勻係數 Cu
1	0.0283	0.0683	0.0834	0.0939	0.1122	0.0862	3.3183
2	0.0066	0.0092	0.0137	0.0190	0.0549	0.0191	2.8682
3	0.0129	0.0187	0.0667	0.0684	0.0709	0.0446	5.2951
4	0.0101	0.0142	0.0646	0.0671	0.0709	0.0403	6.6720
5	0.0098	0.0127	0.0171	0.0192	0.0270	0.0180	1.9580
6	0.0100	0.0133	0.0188	0.0239	0.0509	0.0234	2.3892
7	0.0184	0.0282	0.0668	0.0687	0.0724	0.0515	3.7392
8	0.0088	0.0102	0.0155	0.0201	0.0685	0.0221	2.2824
9	0.0179	0.0651	0.0696	0.0714	0.0743	0.0696	3.9992
10	0.0088	0.0104	0.0155	0.0187	0.0645	0.0218	2.1204
11	0.0126	0.0154	0.0224	0.0272	0.0540	0.0265	2.1642
12	0.0111	0.0154	0.0653	0.0675	0.0709	0.0415	6.0577
13	0.0143	0.0260	0.0731	0.0836	0.1043	0.0583	5.8478
14	0.0287	0.0747	0.0969	0.1076	0.1257	0.0969	3.7485
15	0.0094	0.0112	0.0162	0.0188	0.0648	0.0227	2.0092
16	0.0156	0.0646	0.0702	0.0725	0.0845	0.0726	4.6365
17	0.0091	0.0112	0.0226	0.0503	0.0655	0.0255	5.5325
18	0.0107	0.0288	0.0878	0.0979	0.1152	0.0663	9.1369
19	0.0159	0.0665	0.0859	0.0962	0.1139	0.0867	6.0305
20	0.0780	0.0877	0.1066	0.1152	0.1295	0.1066	1.4769
21	0.0759	0.0890	0.1161	0.1292	0.1530	0.1165	1.7029
22	0.0086	0.0166	0.0711	0.0762	0.0984	0.0488	8.8885
23	0.0176	0.0675	0.0882	0.0983	0.1156	0.0883	5.5730
24	0.0066	0.0102	0.0670	0.0707	0.0824	0.0383	10.7170
25	0.0129	0.0494	0.0721	0.0778	0.0999	0.0709	6.0235
26	0.0739	0.0883	0.1173	0.1315	0.1598	0.1183	1.7792
27	0.0156	0.0671	0.0893	0.0996	0.1175	0.0890	6.4007
28	0.0652	0.0730	0.0929	0.1026	0.1191	0.0931	1.5740
29	0.0123	0.0168	0.0667	0.0725	0.0938	0.0472	5.9067
30	0.0648	0.0795	0.0994	0.1087	0.1242	0.0994	1.6756
31	0.0071	0.0102	0.0675	0.0698	0.0733	0.0370	9.8518
32	0.0116	0.0201	0.0710	0.0740	0.0992	0.0521	6.3690
33	0.0065	0.0079	0.0110	0.0150	0.0296	0.0137	2.2938
34	0.0093	0.0118	0.0698	0.0744	0.0995	0.0435	7.9771
35	0.0093	0.0107	0.0323	0.0674	0.0738	0.0295	7.2873
36	0.0091	0.0114	0.0180	0.0260	0.0690	0.0242	2.8481
37	0.0694	0.0883	0.1221	0.1390	0.1745	0.1234	2.0038

表 5-7 九十年度第二次採樣調查(90/10)底床粒徑分佈統計表

樣本編號	有效粒徑 D10(mm)	D25(mm)	中值粒徑 D50(mm)	D65(mm)	D75(mm)	平均粒徑 Dm(mm)	均勻係數 Cu
1	0.0090	0.0110	0.0460	0.0710	0.0970	0.0570	7.7430
2	0.0070	0.0080	0.0100	0.0100	0.0110	0.0130	1.5780
3	0.0060	0.0070	0.0080	0.0090	0.0100	0.0120	1.3590
4	0.0090	0.0110	0.0190	0.0270	0.0420	0.0310	2.9310
5	0.0070	0.0080	0.0110	0.0160	0.0280	0.0290	2.3610
6	0.0090	0.0100	0.0130	0.0160	0.0200	0.0180	1.7500
7	0.0090	0.0110	0.0180	0.0220	0.0320	0.0280	2.3550
8	0.0110	0.0170	0.0440	0.0610	0.0860	0.0560	5.6310
9	0.0070	0.0080	0.0110	0.0110	0.0160	0.0140	1.7550
10	0.0060	0.0080	0.0100	0.0100	0.0110	0.0120	1.5860
11	0.0070	0.0100	0.0160	0.0210	0.0300	0.0230	2.8120
12	0.0090	0.0100	0.0160	0.0200	0.0290	0.0230	2.2180
13	0.0100	0.0120	0.0230	0.0300	0.0470	0.0330	3.1120
14	0.0100	0.0130	0.0220	0.0260	0.0410	0.0300	2.6610
15	0.0060	0.0080	0.0110	0.0110	0.0210	0.0490	1.7590
16	0.0060	0.0070	0.0090	0.0100	0.0110	0.0120	1.5530
17	0.0120	0.0160	0.0370	0.0520	0.0800	0.0510	4.2590
18	0.0200	0.0440	0.0830	0.0980	0.1210	0.0970	4.9740
19	0.0090	0.0110	0.0180	0.0220	0.0290	0.0250	2.4050
20	0.0640	0.0840	0.1070	0.1160	0.1300	0.1070	1.8060
21	0.0770	0.0940	0.1220	0.1340	0.1530	0.1320	1.7440
22	0.0090	0.0110	0.0460	0.0600	0.0750	0.0510	6.6130
23	0.0090	0.0100	0.0180	0.0350	0.0700	0.0500	3.8980
24	0.0090	0.0110	0.0190	0.0440	0.0800	0.0470	4.8420
25	0.0090	0.0110	0.0170	0.0200	0.0290	0.0280	2.0580
26	0.0800	0.1000	0.1340	0.1470	0.1850	0.1440	1.8360
27	0.0090	0.0110	0.0240	0.0440	0.0890	0.0500	5.0580
28	0.0700	0.0910	0.1190	0.1300	0.1470	0.1250	1.8680
29	0.0090	0.0110	0.0520	0.0780	0.1060	0.0650	8.4520
30	0.0960	0.1350	0.1790	0.1940	0.2160	0.1770	2.0070
31	0.0100	0.0180	0.0780	0.0930	0.1170	0.0760	9.3620
32	0.0110	0.0640	0.0680	0.0700	0.0730	0.0650	6.1110
33	0.0040	0.0050	0.0070	0.0080	0.0100	0.0110	1.8220
34	0.0020	0.0040	0.0070	0.0080	0.0110	0.0100	3.5090
35	0.0700	0.0900	0.1210	0.1330	0.1580	0.1410	1.8940
36	0.0080	0.0100	0.0190	0.0400	0.0670	0.0460	5.1740
37	0.0790	0.1070	0.1540	0.1750	0.2080	0.1630	2.2200

表 5-8 九十二年度第一次採樣調查(92/06)底床粒徑分佈統計表

樣本編號	有效粒徑 D10(mm)	D25(mm)	中值粒徑 D50(mm)	D65(mm)	D75(mm)	平均粒徑 Dm(mm)	均勻係數 Cu
1	0.0136	0.0302	0.0732	0.0842	0.0970	0.0757	6.1912
2	0.0089	0.0132	0.0179	0.0258	0.0311	0.0173	2.8989
3	0.0079	0.0107	0.0189	0.0245	0.0300	0.0182	3.1013
4	0.0080	0.0105	0.0059	0.0208	0.0420	0.0053	2.6000
5	0.0089	0.0118	0.0310	0.0411	0.0528	0.0329	4.6180
6	0.0087	0.0103	0.0205	0.0271	0.0320	0.0218	3.1149
7	0.0103	0.0180	0.0402	0.0638	0.0832	0.0428	6.1942
8	0.0394	0.0760	0.0984	0.1088	0.1186	0.0956	2.7614
9	0.0068	0.0082	0.0109	0.0171	0.0216	0.0104	2.5147
10	0.0015	0.0080	0.0157	0.0224	0.0311	0.0152	14.933
11	0.0085	0.0100	0.0179	0.0248	0.0308	0.0172	2.9176
12	0.0112	0.0100	0.0486	0.0657	0.0829	0.0530	5.8618
13	0.0099	0.0232	0.0504	0.0638	0.0747	0.0530	6.4444
14	0.0142	0.0413	0.0969	0.1095	0.1410	0.1030	7.7113
15	0.0086	0.0108	0.0258	0.0468	0.0821	0.0249	5.4419
16	0.0067	0.0075	0.0088	0.0163	0.0311	0.0089	2.4344
17	0.0167	0.0425	0.0787	0.0931	0.1080	0.0751	5.5749
18	0.0165	0.0350	0.0679	0.0763	0.0812	0.0697	4.6242
19	0.0094	0.0410	0.0775	0.0921	0.1290	0.0772	9.7979
20	0.0775	0.0840	0.1234	0.1211	0.1300	0.1207	1.5626
21	0.0750	0.0554	0.1137	0.1234	0.1353	0.1132	1.6453
22	0.0495	0.0710	0.0928	0.1043	0.1750	0.0975	2.1071
23	0.0132	0.0310	0.0685	0.0798	0.0970	0.0685	6.0455
24	0.0102	0.0141	0.0436	0.0646	0.0800	0.0437	6.3333
25	0.0108	0.0183	0.0398	0.0567	0.0729	0.0380	5.2500
26	0.0797	0.0883	0.1183	0.1279	0.1450	0.1144	1.6048
27	0.0140	0.0350	0.0904	0.1032	0.1089	0.0950	7.3714
28	0.0745	0.0839	0.1098	0.1186	0.1370	0.1050	1.5919
29	0.0088	0.0131	0.0408	0.0571	0.0760	0.0465	6.4886
30	0.0752	0.0885	0.1089	0.1173	0.1216	0.1077	1.5598
31	0.0094	0.0168	0.0422	0.0749	0.0917	0.0476	7.9681
32	0.0091	0.0164	0.0363	0.0616	0.0730	0.0365	6.7692
33	0.0079	0.0092	0.0121	0.0140	0.0100	0.0123	1.7722
34	0.0088	0.0124	0.0316	0.0428	0.0110	0.0315	4.8636
35	0.0014	0.0069	0.0093	0.0100	0.1580	0.0095	7.1429
36	0.0087	0.0122	0.0211	0.0303	0.0670	0.0246	3.4828
37	0.0649	0.0671	0.0740	0.0843	0.2080	0.0730	1.2989

底床採樣調查之結果經由公式計算出之八十九年度第一次採樣調查(89/01)底床粒徑分佈統計(表 5-4)顯示，布袋港港口附近海域的底床粒徑分佈概況，其有效粒徑(d_{10})介於 0.0006mm~0.1051mm 之間，中值粒徑(d_{50})則介於 0.007mm~0.1823mm 之間，平均粒徑(d_m)則介於 0.0067mm~ 0.1823mm 之間；而均勻係數(cu)為 1.569~19.632 之間；而於八十九年度第二次採樣調查(89/07)底床粒徑分佈統計(表 5-5)顯示，其有效粒徑(d_{10})介於 0.0007mm~0.0845 mm 之間，中值粒徑(d_{50})則介於 0.0077mm~0.1574mm 之間，平均粒徑(d_m)則介於 0.007mm ~0.1509mm 之間，而均勻係數(cu)為 1.5019~18.1782 之間；九十年度第一次採樣調查(90/06)底床粒徑分佈統計(表 5-6)顯示，布袋港港口附近海域的底床粒徑分佈概況，其有效粒徑(d_{10})介於 0.0065mm~0.0780mm 之間，中值粒徑(d_{50})則介於 0.0110mm~ 0.1173mm 之間，平均粒徑(d_m)則介於 0.0137mm~ 0.1183mm 之間；而均勻係數(cu)為 1.4769~10.717 之間；而九十年度第二次採樣調查(90/10)底床粒徑分佈統計(表 5-7)顯示，其有效粒徑(d_{10})介於 0.0020 mm~0.0110 mm 之間，中值粒徑(d_{50})則介於 0.0070mm~0.1340mm 之間，平均粒徑(d_m)則介於 0.0120mm~0.1509mm 之間，而均勻係數(cu)為 1.3590 ~9.3620 之間；而九十二年度第一次採樣調查(92/06)底床粒徑分佈統計(表 5-8)顯示，其有效粒徑(d_{10})介於 0.0015 mm~0.0797 mm 之間，中值粒徑(d_{50})則介於 0.0059mm~0.1234mm 之間，平均粒徑(d_m)則介於 0.0053mm~0.1127mm 之間，而均勻係數(cu)為 1.2989 ~9.7979 之間；依 ASTM 分類標準定義，五次採樣調查粒徑分類結果，布袋港港口附近海域皆介於細沙至淤泥之間。

為了探討底床粒徑分佈與布袋港港口附近海域之地形兩者之關聯性；本研究依一般漂沙調查統計方法，以求解出之各平均粒徑(d_m)、均勻係數(cu)等粒徑特性，配合二度分帶座標值繪製成各底床粒徑特性平面分佈圖，藉以探討水深變化與粒徑大小之間相互的關係。

其中八十九年度第一次採樣調查(89/01)平均粒徑(d_m)分佈如圖 5-5-1 所示，而八十九年度第二次採樣調查(89/07)平均粒徑(d_m)分佈如圖 5-5-2 所示，九十年度第一次採樣調查(90/06)平均粒徑(d_m)分佈如圖 5-5-3 所示，而九十年度第二次採樣調查(90/10)平均粒徑(d_m)分佈如圖 5-5-4 所示；又可得出八十九年度第一次採樣調查(89/01)均勻係數(cu)分佈如圖 5-6-1 所示，而八十九年度第二次採樣調查(89/07)均勻係數(cu)分佈如圖 5-6-2 所示，九十年度第一次

採樣調查(90/06)均勻係數(cu)分佈如圖 5-6-3 所示，而九十年度第二次採樣調查(90/10)均勻係數(cu)分佈如圖 5-6-4 所示，九十二年度第一次採樣調查(92/06)均勻係數(cu)分佈如圖 5-6-5 所示。

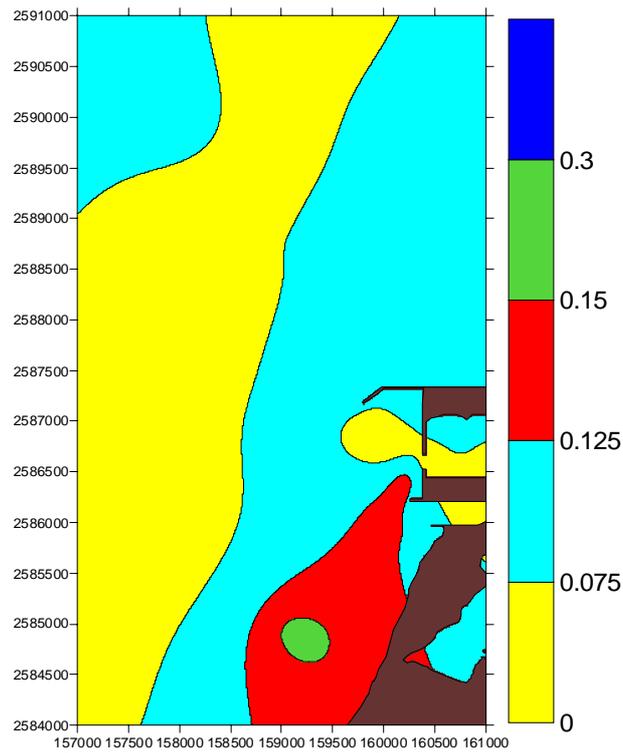


圖 5-5-1 八十九年度第一次採樣調查(89/01)平均粒徑(d_m)分佈

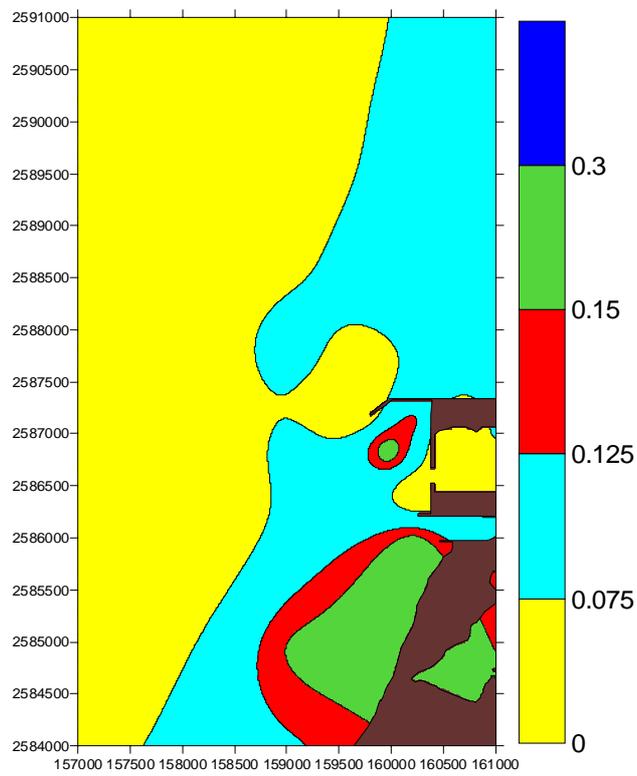


圖 5-5-2 八十九年度第二次採樣調查(89/07)平均粒徑(d_m)分佈

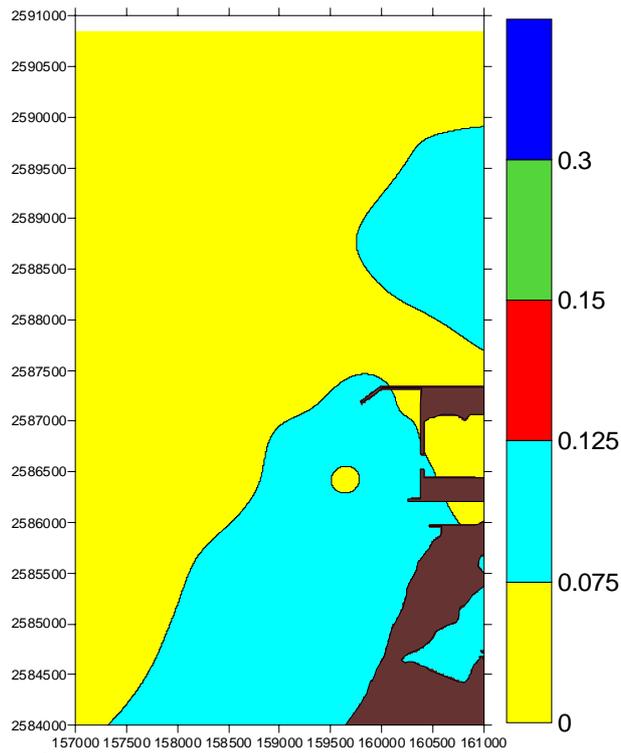


圖 5-5-3 九十年第一次採樣調查(90/06)平均粒徑(d_m)分佈

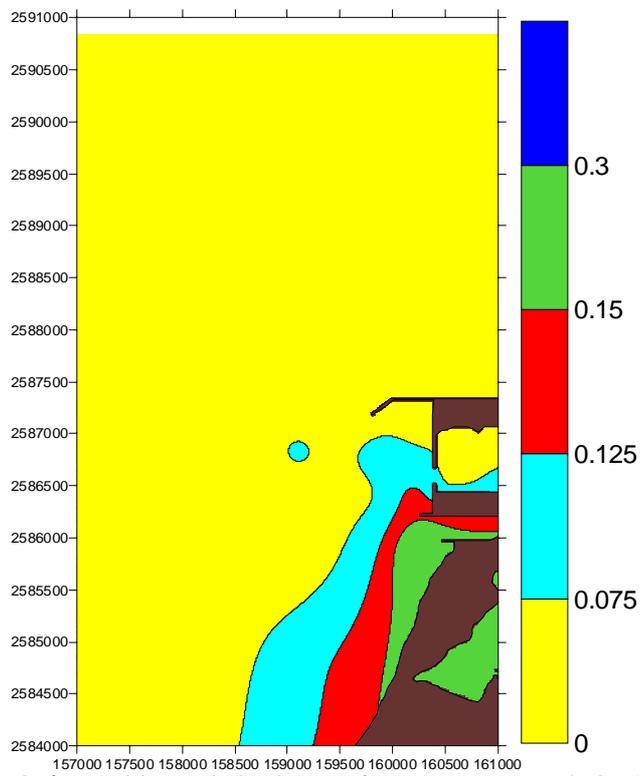


圖 5-5-4 九十年第二次採樣調查(90/10)平均粒徑(d_m)分佈

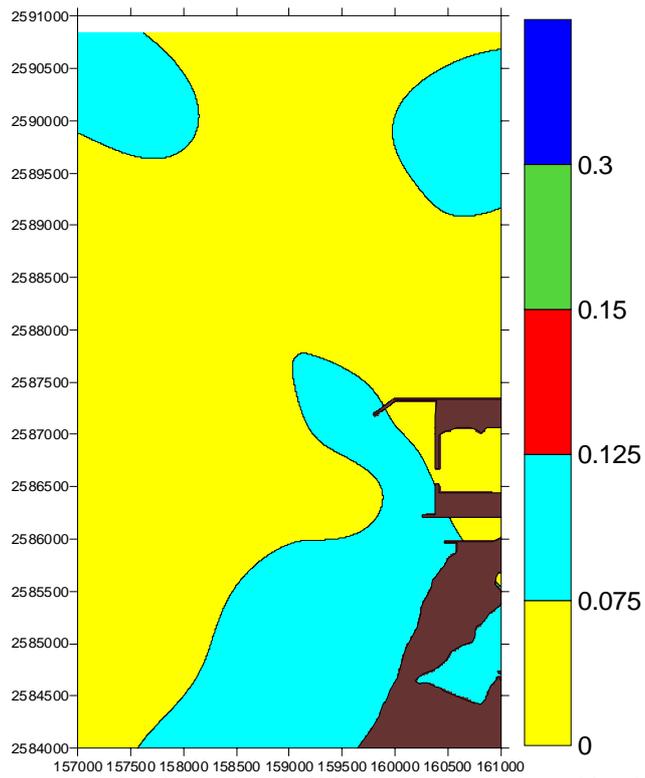


圖 5-5-5 九十二年度第一次採樣調查(92/06)平均粒徑(d_m)分佈

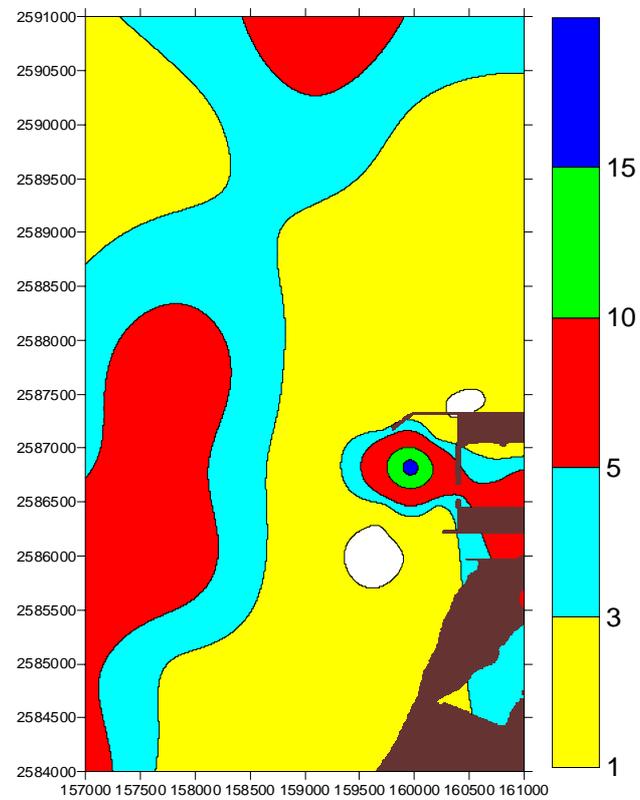


圖 5-6-1 八十九年度第一次採樣調查(89/01)均勻係數(c_u)分佈

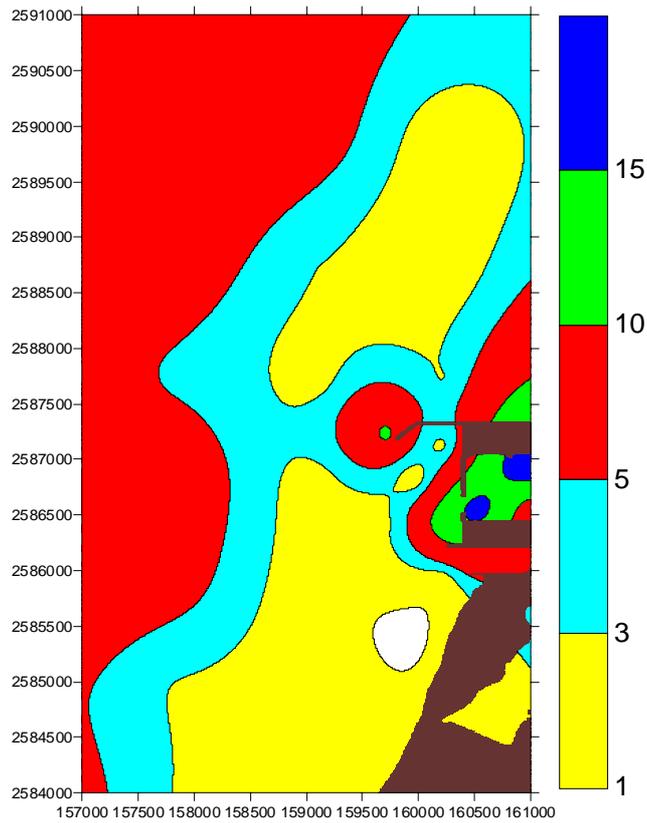


圖 5-6-2 八十九年度第二次採樣調查(89/07)均勻係數(c_u)分佈

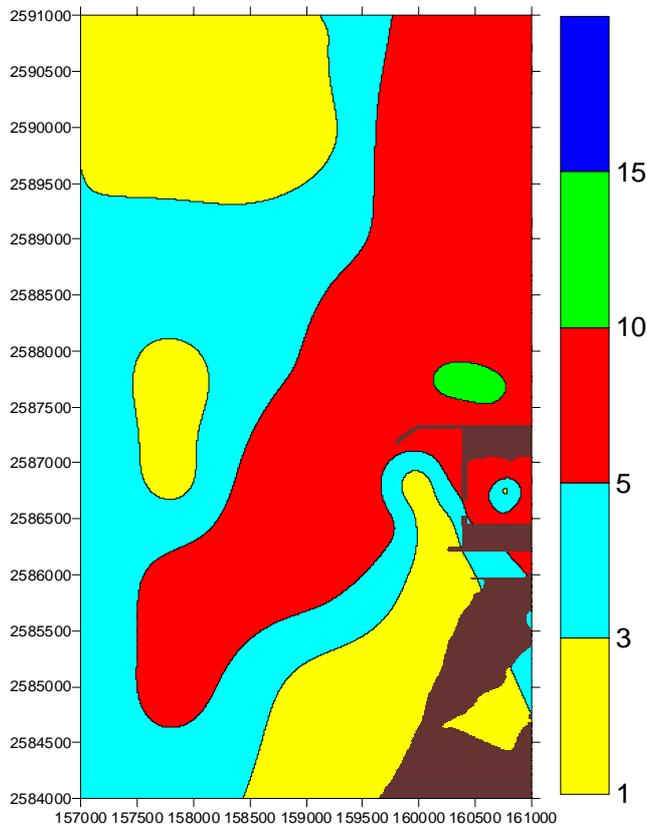


圖 5-6-3 九十年第一次採樣調查(90/06)均勻係數(c_u)分佈

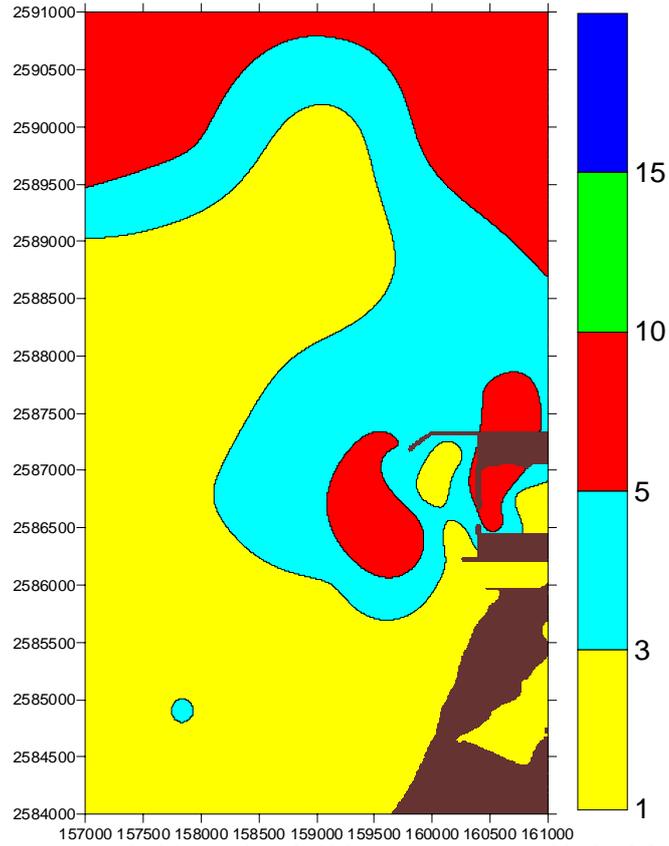


圖 5-6-4 九十年第二次採樣調查(90/10)均勻係數(cu)分佈

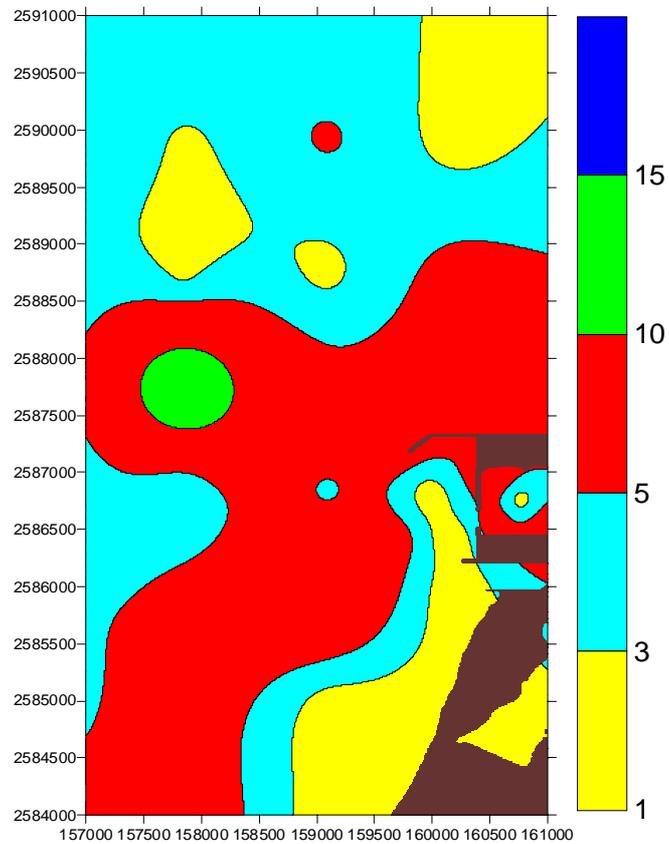


圖 5-6-5 九十二年度第一次採樣調查(92/06)均勻係數(cu)分佈

由本調查歷時四年共五次採樣調查之平均粒徑(d_m)分佈(圖 5-5-1 與圖 5-5-5)粒徑分析特性指標可知,粗粒徑沉積物皆分佈於海岸之灘線與防波堤附近,而愈往外灘延伸或港內航道水深較深處則粒徑愈細;究其原因應為波浪之篩分(sorting)作用所致,因碎波線外之沙粒往碎波點附近移動,故碎波點附近常產生篩分不良而粒徑較粗,故其平均粒徑(d_m)皆較大。而越往外灘延伸至水深-10 公尺處其平均粒徑(d_m)皆較小,蓋因為外灘海域水深較深,沙粒起動條件不足,有足夠時間形成較為安定的粒徑分佈;且由其各次採樣調查的平均粒徑(d_m)分佈圖可知,粒徑分佈情況大致與地形等深線的走向平行,故其粒徑大小應與地形有重大關聯。

而由均勻係數(cu)分佈(圖 5-6-1 與圖 5-6-5)可知,在灘線附近波浪溯升沖上灘面,海水一部份自沙層中成為滲透水流下,因此回流流速減小,大顆粒徑沉積物仍停留於灘面上,僅小粒料隨波流回流至較深海域,所以其平均粒徑(d_m)較大而均勻係數(cu)一般皆較小,而於深水處則因底床受波流作用較不明顯,因此容易形成較小又均勻的沙粒滯留底床,所以其平均粒徑(d_m)較小而均勻係數(cu)則較小;另外受工程浚深或航船擾動的影響區域,底床粒徑較不均勻一般皆有均勻係數(cu)偏大的現象。

2. 礦岩分析:利用前節所述之礦岩分析方法,可以取得各測點礦岩含量之重量百分比值;而藉由礦岩重量百分比值的計算與分析,本研究可分類統計出選定之 37 組(八十九年第一次採樣調查 35 組)樣本,在四年五次的調查中各項礦岩的重量百分比變化情況;其中八十九年度第一次採樣調查(89/01)之礦岩重量百分比分析統計如表 5-8 所示,八十九年度第二次採樣調查(89/07)之礦岩重量百分比分析統計表如附表 5-9 所示;而九十年第一次採樣調查(90/06)之礦岩重量百分比分析統計如表 5-10 所示,九十年第二次採樣調查(90/10)之礦岩重量百分比分析統計如表 5-11 所示,而本年度第一次採樣調查(92/06)之礦岩重量百分比分析統計如表 5-12 所示。

表 5-8 八十九年度第一次採樣調查(89/01)之礦岩重量百分比統計表

樣本	石英	板岩	長石	方解石	燧石	砂岩	多晶石 英	綠泥石	貝殼	不透光 礦物	其他
1	59.43	37.87	0.00	0.66	0.66	0.33	0.00	0.33	0.33	0.33	0.00
2	64.88	33.11	0.00	0.33	1.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	77.37	20.49	0.61	0.31	0.61	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31
4	73.75	24.69	0.00	1.25	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	59.09	38.79	0.30	0.30	0.30	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.61
6	57.48	41.16	0.00	0.68	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.34
7	53.14	45.28	0.00	0.63	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31
8	64.65	33.67	0.00	0.34	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01
9	68.84	30.86	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32
10	69.16	28.57	0.00	0.97	0.32	0.00	0.32	0.00	0.00	0.32	0.32
11	73.00	25.90	0.00	0.55	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28
12	42.65	55.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.37	0.74	0.74
13	63.09	34.90	0.34	0.67	0.67	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00
14	76.11	18.77	0.00	1.37	1.02	2.05	0.00	0.00	0.00	0.68	0.00
15	55.25	41.67	0.93	0.31	0.00	1.23	0.31	0.00	0.31	0.00	0.00
16	63.99	32.80	1.29	0.96	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64
17	70.10	26.46	1.37	0.69	0.34	0.00	0.34	0.34	0.00	0.34	0.00
18	70.85	20.60	2.51	1.01	0.50	4.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	72.20	23.41	0.98	0.49	0.49	0.49	0.49	0.98	0.00	0.49	0.00
20	71.09	24.17	0.47	0.47	1.42	1.90	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00
21	77.46	16.90	0.94	1.41	0.94	1.41	0.00	0.47	0.00	0.00	0.47
22	82.76	14.66	0.00	1.29	1.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	79.65	17.26	0.00	0.88	0.44	0.00	0.00	0.44	0.00	1.33	0.00
24	75.68	23.42	0.00	0.45	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	72.60	22.12	0.48	2.88	1.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	50.72	46.38	0.48	0.48	0.00	0.48	0.48	0.97	0.00	0.00	0.00
27	74.26	23.27	0.99	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00
28	76.00	20.00	0.00	0.50	0.50	2.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
29	75.56	22.67	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.44	0.00	0.00
30	65.31	31.84	0.00	1.22	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	1.22	0.00
31	76.92	18.75	0.96	1.44	0.00	0.48	0.48	0.00	0.48	0.48	0.00
32	68.33	23.98	1.36	3.17	0.00	0.90	0.00	0.45	0.00	1.81	0.00
33	55.80	37.50	0.45	2.23	0.45	3.13	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00
34	79.62	12.32	2.84	1.42	0.00	2.84	0.00	0.00	0.00	0.47	0.47
35	71.96	19.16	2.34	0.93	0.00	4.21	0.47	0.00	0.00	0.93	0.00

表 5-9 八十九年度第二次採樣調查(89/07)之礦岩重量百分比統計表

樣本	石英	板岩	長石	方解石	燧石	砂岩	多晶石 英	綠泥石	貝殼	不透光 礦物	其它
1	64.46	29.52	0.60	3.01	0.00	0.60	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00
2	64.10	34.19	0.00	0.85	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	76.76	19.72	0.70	1.41	0.00	0.00	0.70	0.70	0.00	0.00	0.00
4	69.64	23.21	0.89	3.57	0.00	2.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	44.78	51.49	0.00	1.49	0.00	0.75	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00
6	39.83	58.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.85	0.00	0.00	0.00
7	60.50	36.13	0.00	0.00	0.00	2.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	56.25	38.39	0.00	0.89	0.00	0.89	0.89	0.89	0.00	0.00	0.00
9	52.17	43.48	0.87	3.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	66.36	24.55	0.91	1.82	0.00	2.73	1.82	0.00	0.00	0.00	0.00
11	64.60	26.55	0.88	4.42	0.00	0.00	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00
12	42.16	51.96	0.00	1.96	0.00	0.98	2.94	0.00	0.00	0.00	0.00
13	59.13	36.52	0.87	0.00	0.00	0.00	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00
14	68.87	26.42	0.00	0.00	0.00	0.94	0.94	0.94	0.00	0.00	0.00
15	43.81	49.52	0.00	0.00	0.00	0.00	1.90	0.00	0.00	0.00	0.00
16	52.76	40.94	3.15	0.79	0.79	0.79	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00
17	69.13	24.68	1.27	0.40	0.00	0.87	1.98	0.40	0.00	0.48	0.00
18	76.19	10.48	2.86	1.90	0.00	0.00	5.71	0.00	0.00	1.90	0.00
19	73.83	19.63	1.87	0.00	0.00	1.87	2.80	0.00	0.00	0.00	0.00
20	54.78	26.96	2.61	1.74	2.61	0.87	7.83	0.00	0.00	0.00	0.00
21	74.53	20.75	0.00	0.94	0.00	0.94	0.94	0.00	0.00	0.00	0.94
22	73.21	23.21	0.00	1.79	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00
23	66.02	29.13	0.97	0.97	0.00	0.00	1.94	0.00	0.00	0.00	0.00
24	69.81	21.70	1.89	2.83	0.00	0.94	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00
25	62.84	30.73	0.00	0.92	0.00	2.75	0.92	0.92	0.00	0.00	0.00
26	68.93	19.42	2.91	0.97	1.94	2.91	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00
27	66.99	30.10	0.97	0.97	0.00	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00
28	59.46	34.23	0.00	2.70	0.00	1.80	0.90	0.00	0.90	0.00	0.00
29	67.96	22.33	4.85	0.00	0.00	1.94	1.94	0.97	0.00	0.00	0.00
30	65.42	26.17	0.00	0.93	0.00	5.61	1.87	0.00	0.00	0.00	0.00
31	65.14	27.52	0.92	0.00	0.00	1.83	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00
32	46.90	52.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00
33	70.69	21.55	0.86	0.86	0.00	2.59	2.59	0.00	0.00	0.00	0.00
34	71.32	24.26	1.47	0.74	0.74	1.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	50.86	44.83	0.86	1.72	0.00	0.86	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00
36	66.98	30.19	0.00	1.89	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	71.19	25.42	0.85	0.00	0.00	0.85	1.69	0.00	0.00	0.00	0.00

表 5-10 九十年度第一次採樣調查(90/06)之礦岩重量百分比分析統計表

樣本	石英	多晶石英	長石	方解石	燧石	砂岩	片岩	板岩	綠泥石	貝殼	不透光礦物	其它
1	55.73	0.32	0.00	0.32	0.00	0.96	0.00	41.40	0.64	0.00	0.64	0.00
2	46.19	1.02	0.00	1.02	0.00	0.00	0.00	51.78	0.00	0.00	0.00	0.00
3	67.49	0.00	0.49	0.99	0.00	0.00	0.00	31.03	0.00	0.00	0.00	0.00
4	66.51	0.00	0.96	2.17	0.00	0.00	0.00	26.99	0.48	0.00	1.45	1.45
5	46.73	0.50	1.51	1.51	0.00	0.00	0.00	46.73	1.01	0.50	0.00	1.51
6	53.52	0.00	1.41	0.94	0.47	0.00	0.00	41.31	0.94	0.47	0.00	0.94
7	56.74	0.00	0.47	0.71	0.47	0.47	0.95	40.19	0.00	0.00	0.00	0.00
8	51.72	0.00	0.99	0.49	0.00	0.49	0.99	44.33	0.49	0.49	0.00	0.00
9	51.98	0.00	0.99	0.99	0.00	0.00	0.50	44.55	0.50	0.50	0.00	0.00
10	65.31	0.51	1.02	2.04	0.00	0.00	0.00	29.59	0.51	1.02	0.00	0.00
11	50.62	0.00	2.48	1.24	0.00	0.50	0.00	42.18	1.49	0.50	0.50	0.50
12	58.54	0.63	1.27	2.22	0.63	0.00	0.00	33.54	1.27	0.00	0.63	1.27
13	67.46	0.00	1.18	2.96	0.00	0.59	0.00	26.04	1.18	0.59	0.00	0.00
14	73.60	1.24	0.62	1.55	0.62	0.00	0.00	19.25	1.24	0.62	0.62	0.62
15	61.25	0.63	1.88	1.25	0.00	0.00	0.00	31.25	1.88	0.00	1.25	0.63
16	63.37	1.32	1.98	2.97	0.00	0.00	1.32	24.42	2.64	0.00	0.66	1.32
17	57.62	0.66	0.00	1.99	1.99	0.00	0.66	33.77	1.32	0.66	1.32	0.00
18	59.01	0.00	2.51	1.44	0.00	3.77	0.63	30.76	1.26	0.00	0.63	0.00
19	67.11	1.32	1.32	1.32	0.00	1.97	0.66	24.34	1.32	0.00	0.00	0.66
20	66.08	1.35	0.00	1.21	0.67	2.02	1.35	25.96	0.00	0.00	0.00	1.35
21	72.45	1.96	1.96	0.13	0.00	1.31	0.00	21.54	0.00	0.00	0.00	0.65
22	73.75	0.00	0.00	1.25	0.00	0.63	0.63	22.50	0.00	0.63	0.63	0.00
23	63.76	0.00	1.34	1.34	0.00	0.00	0.00	32.89	0.00	0.00	0.67	0.00
24	69.33	1.33	2.67	2.67	0.00	0.00	0.67	22.67	0.67	0.00	0.00	0.00
25	71.61	0.00	1.29	0.97	0.00	0.00	0.00	26.13	0.00	0.00	0.00	0.00
26	66.00	4.00	1.33	0.67	0.67	0.00	0.67	24.67	0.67	0.00	1.33	0.00
27	61.92	1.24	3.10	0.31	0.62	1.24	1.24	27.24	0.62	0.00	1.24	1.24
28	71.61	0.00	2.58	0.65	0.00	0.00	1.94	22.58	0.65	0.00	0.00	0.00
29	57.79	1.26	1.88	0.75	0.00	0.00	0.00	37.69	0.63	0.00	0.00	0.00
30	73.57	0.64	2.55	0.64	0.00	0.64	0.64	20.70	0.64	0.00	0.00	0.00
31	56.36	0.00	0.00	3.74	0.63	1.27	3.17	32.93	0.63	0.63	0.63	0.00
32	67.63	1.31	0.00	0.20	0.66	0.66	0.66	26.92	0.00	0.66	1.31	0.00
33	49.12	0.65	0.00	1.11	0.00	0.65	0.65	46.50	0.00	0.65	0.00	0.65
34	56.83	1.35	1.35	1.22	0.00	2.71	0.68	34.51	1.35	0.00	0.00	0.00
35	61.99	2.70	0.00	0.27	0.00	4.72	0.00	29.65	0.00	0.67	0.00	0.00
36	54.60	0.63	0.63	0.32	0.00	1.27	1.90	39.37	0.00	1.27	0.00	0.00
37	71.24	1.31	3.27	1.31	0.65	0.65	1.31	20.26	0.00	0.00	0.00	0.00

表 5-11 九十年度第二次採樣調查(90/10)之礦岩重量百分比分析統計表

樣本	石英	多晶石 英	長石	方解石	燧石	砂岩	片岩	板岩	綠泥石	貝殼	不透光 礦物	其它
1	43.53	0.64	1.28	2.69	0.00	12.80	0.00	37.77	0.00	0.64	0.64	0.00
2	29.46	0.00	0.57	1.42	0.00	5.67	0.00	61.76	0.00	0.00	0.57	0.57
3	25.70	0.00	0.58	0.12	0.00	5.26	0.00	68.34	0.00	0.00	0.00	0.00
4	49.06	0.00	0.00	1.26	0.63	7.55	0.00	37.11	0.63	1.26	1.89	0.63
5	54.06	0.00	0.00	1.52	0.00	5.84	0.00	36.82	1.17	0.00	0.00	0.58
6	63.96	0.00	0.67	0.07	1.33	6.00	0.00	27.98	0.00	0.00	0.00	0.00
7	70.30	0.00	2.63	0.13	0.00	6.57	0.00	19.05	1.31	0.00	0.00	0.00
8	57.92	0.00	1.29	2.19	0.00	6.44	0.00	32.18	0.00	0.00	0.00	0.00
9	24.62	0.63	0.00	2.15	0.00	1.26	0.00	68.81	0.63	0.00	0.63	1.26
10	30.51	0.00	0.00	0.19	0.00	8.90	0.00	60.39	0.00	0.00	0.00	0.00
11	52.53	0.00	0.00	1.27	0.00	6.96	0.00	38.61	0.63	0.00	0.00	0.00
12	64.72	0.00	0.65	2.27	0.00	7.77	0.65	20.06	1.94	0.00	1.29	0.00
13	62.75	1.31	0.00	1.96	0.00	8.50	0.00	20.92	1.96	0.00	0.65	1.96
14	58.33	0.00	1.53	1.00	0.00	6.14	0.00	32.23	0.77	0.00	0.00	0.00
15	70.34	0.00	0.69	1.38	0.00	1.38	0.00	23.45	1.38	0.00	0.69	0.69
16	23.87	0.61	0.00	0.24	0.00	7.34	0.00	67.93	0.00	0.00	0.00	0.00
17	77.22	0.00	0.00	1.90	0.00	7.59	0.00	12.66	0.00	0.00	0.63	0.00
18	70.47	0.00	0.00	1.34	0.67	8.05	0.67	18.12	0.00	0.00	0.00	0.00
19	68.59	0.00	0.61	0.18	0.00	8.57	0.00	22.05	0.00	0.00	0.00	0.00
20	76.49	0.00	0.00	2.02	0.63	10.11	0.00	10.11	0.00	0.00	0.63	0.00
21	81.76	0.00	0.00	0.68	0.00	6.76	0.00	10.81	0.00	0.00	0.00	0.00
22	66.06	1.22	0.00	0.92	0.61	8.56	0.00	21.41	0.61	0.00	0.61	0.00
23	72.73	0.00	0.65	0.00	0.00	9.09	0.00	16.23	0.00	0.65	0.65	0.00
24	73.17	0.00	0.00	2.44	0.00	9.15	0.61	13.41	0.00	0.00	0.00	0.61
25	70.30	0.00	0.00	0.13	0.00	7.88	0.66	18.39	1.31	0.00	0.66	0.00
26	72.34	0.00	2.01	2.88	0.00	12.06	0.00	10.05	0.67	0.00	0.00	0.00
27	67.19	0.00	2.08	1.04	0.00	11.46	0.00	17.19	0.52	0.52	0.00	0.00
28	71.15	0.00	0.00	0.64	0.00	12.82	0.00	14.74	0.64	0.00	0.00	0.00
29	72.12	0.00	1.69	1.02	0.34	6.13	0.34	16.99	0.68	0.00	0.34	0.00
30	71.67	0.00	1.37	1.02	0.00	7.51	0.00	17.75	0.00	0.68	0.00	0.00
31	63.06	0.00	2.55	1.27	1.27	7.01	0.00	24.84	0.00	0.00	0.00	0.00
32	70.63	0.00	2.64	0.33	0.00	7.26	0.00	17.82	0.00	0.00	1.32	0.00
33	56.40	0.00	0.00	0.46	0.00	2.65	0.00	40.48	0.00	0.00	0.00	0.00
34	56.21	0.00	0.00	0.00	0.00	4.58	0.00	38.56	0.00	0.00	0.65	0.00
35	62.73	0.00	0.62	0.62	0.00	3.11	0.62	31.06	0.00	0.00	0.62	0.00
36	61.04	0.00	1.95	0.65	0.00	7.79	0.00	28.57	0.00	0.00	0.00	0.00
37	66.01	0.00	0.99	1.93	0.00	10.35	0.00	20.71	0.00	0.00	0.00	0.00

表 5-12 九十二年度第一次採樣調查(92/06)之礦岩重量百分比分析統計表

樣本	石英	多晶石 英	長石	方解石	燧石	砂岩	片岩	板岩	綠泥石	貝殼	不透光 礦物	其它
1	50.00	1.28	1.28	1.28	0.00	0.64	0.00	45.51	0.00	0.00	0.00	0.00
2	42.81	0.00	1.34	2.34	0.67	1.34	0.00	50.84	0.00	0.00	0.67	0.00
3	46.67	2.50	1.67	2.50	0.00	0.00	0.00	45.00	0.00	0.00	0.00	1.67
4	44.90	0.68	2.04	2.72	0.00	0.00	0.00	46.94	0.00	2.04	0.68	0.00
5	58.57	0.00	0.00	1.56	0.00	0.00	0.00	37.38	0.62	0.62	1.25	0.00
6	39.62	0.64	0.64	0.32	0.00	0.00	0.00	57.51	0.00	0.00	1.28	0.00
7	58.54	0.69	0.00	3.58	0.00	1.38	0.00	35.12	0.69	0.00	0.00	0.00
8	58.39	2.01	0.67	1.34	0.00	0.00	0.00	37.58	0.00	0.00	0.00	0.00
9	49.85	0.59	0.59	0.89	0.00	0.59	0.00	45.10	1.78	0.00	0.59	0.00
10	54.97	0.66	0.00	0.66	0.00	0.66	0.00	41.72	0.66	0.00	0.00	0.66
11	58.62	2.07	0.00	3.45	0.00	0.00	0.00	31.72	0.00	0.69	2.07	1.38
12	70.00	0.59	0.59	0.59	0.00	0.00	0.65	27.06	0.59	0.59	0.00	0.00
13	71.47	2.51	0.63	0.94	0.00	5.02	0.00	18.81	0.00	0.00	0.63	0.00
14	76.82	0.69	0.69	1.04	0.69	1.38	0.00	18.69	0.00	0.00	0.00	0.00
15	51.97	0.66	1.32	0.00	0.00	0.66	0.00	44.74	0.00	0.00	0.66	0.00
16	66.67	0.67	0.00	1.68	0.00	6.06	0.00	24.24	0.00	0.67	0.00	0.00
17	73.72	0.64	0.64	0.64	0.00	3.21	0.00	19.23	0.64	0.00	1.28	0.00
18	63.05	2.71	0.00	0.34	0.00	8.81	0.67	24.41	0.00	0.00	0.68	0.00
19	57.53	3.34	0.00	2.34	0.00	2.68	0.00	31.44	0.00	2.68	0.00	0.00
20	76.33	2.12	1.41	0.35	0.71	4.95	0.00	14.13	0.00	0.00	0.00	0.00
21	75.45	0.66	1.32	0.73	0.00	9.27	0.00	12.57	0.00	0.00	0.00	0.00
22	66.00	1.33	0.67	0.67	0.00	0.67	0.00	29.33	0.67	0.00	0.67	0.00
23	64.67	0.00	2.00	0.67	0.67	1.33	0.00	30.67	0.00	0.00	0.00	0.00
24	70.81	0.00	1.24	0.00	1.24	1.24	0.61	25.47	0.00	0.00	0.00	0.00
25	68.63	0.00	0.65	0.65	0.00	0.65	0.66	28.10	1.31	0.00	0.00	0.00
26	66.25	0.00	1.25	0.63	2.50	3.13	0.00	25.63	0.63	0.00	0.00	0.00
27	62.00	0.67	0.67	0.67	0.00	1.33	0.00	34.00	0.67	0.00	0.00	0.00
28	73.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	26.25	0.00	0.00	0.00	0.00
29	67.68	0.00	0.61	0.61	1.22	0.00	0.34	28.66	0.61	0.00	0.00	0.61
30	70.03	0.00	2.02	0.34	1.35	1.35	0.00	24.92	0.00	0.00	0.00	0.00
31	56.52	0.00	1.24	0.62	0.62	0.62	0.00	38.51	0.00	0.62	1.24	0.00
32	69.54	0.00	0.62	0.62	0.00	1.85	0.00	26.46	0.92	0.00	0.00	0.00
33	64.86	0.68	0.00	1.35	0.68	1.35	0.00	31.08	0.00	0.00	0.00	0.00
34	46.92	0.00	0.00	0.29	0.00	1.17	0.00	50.44	0.00	0.00	0.59	0.59
35	68.26	0.00	1.20	0.00	1.20	1.20	0.62	27.54	0.00	0.00	0.60	0.00
36	54.61	0.66	0.66	0.00	0.66	0.00	0.00	43.42	0.00	0.00	0.00	0.00
37	67.96	0.65	0.00	1.62	0.65	1.94	0.00	25.24	1.29	0.00	0.65	0.00

由八十九年度第一次採樣調查(89/01)之礦岩重量百分比分析統計表(表 5-8)顯示,其石英含量介於 42.65%和 82.76%之間(平均 68.25%),板岩含量介於 14.66%和 55.15%之間(平均 30.87%),兩者合計約佔全部底質沉積物 99.1%以上;而八十九年度第二次採樣調查(89/07)之礦岩重量百分比分析統計表(表 5-9)其石英含量介於 39.83%和 82.76%之間(平均 62.66%),板岩含量介於 12.32%和 58.47%之間(平均 31.26%),兩者合計約佔全部底質沉積物 93.92%以上;其他礦物(如長石、方解石、燧石、砂岩、貝類等)均屬微量(平均小於 1%)。

而九十年度第一次採樣調查(90/06)之礦岩重量百分比分析統計表(表 5-10),布袋港港口附近海域的礦物組成仍以石英與板岩為主;其石英含量介於 25.70%和 81.70%之間(平均 53.70%),板岩含量介於 10.10%和 68.80%之間(平均 39.45%),兩者合計約佔全部底質沉積物 93.15%以上;另由九十年度第二次採樣調查(90/10)之礦岩重量百分比分析統計表(表 5-11),知其石英含量介於 23.80%和 81.70%之間(平均 52.75%),板岩含量介於 10.10%和 68.80%之間(平均 39.45%),兩者合計約佔全部底質沉積物 92.20%以上;其他礦物(如長石、方解石、燧石、砂岩、貝類等)均屬微量(平均小於 1%)。

而本年度第一次採樣調查(92/06)之礦岩重量百分比分析統計表(表 5-12),布袋港港口附近海域的礦物組成仍以石英與板岩為主;其石英含量介於 39.62%和 76.33%之間(平均 57.98%),板岩含量介於 12.57%和 57.51%之間(平均 35.04%),兩者合計約佔全部底質沉積物 93.02%以上;其他礦物(如長石、方解石、燧石、砂岩、貝類等)均屬微量(平均小於 1%)。

為了便於描繪五次採樣調查之礦岩重量百分比情況,再利用五次採樣調查之礦岩重量百分比統計表(表 5-8 至表 5-12)繪出五次採樣調查之礦岩重量百分比統計圖;八十九年度第一次採樣調查(89/01)之礦岩重量百分比分析統計如圖 5-7-1 所示,八十九年度第二次採樣調查(89/07)之礦岩重量百分比分析統計如圖 5-7-2 所示;九十年度第一次採樣調查(90/06)之礦岩重量百分比分析統計如圖 5-7-3 所示;九十年度第二次採樣調查(90/10)之礦岩重量百分比分析統計如圖 5-7-4 所示;九十二年度第一次採樣調查(92/06)之礦岩重量百分比分析統計如圖 5-7-5 所示。

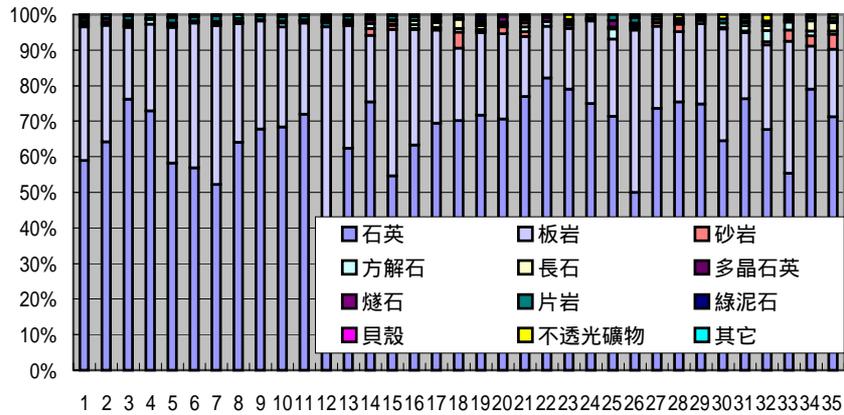


圖 5-7-1 八十九年度第一次採樣調查(89/01) 之礦岩重量百分比分析統計

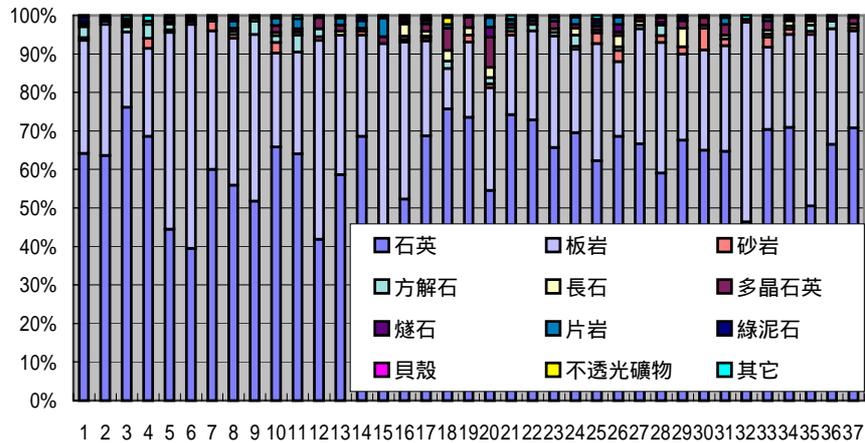


圖 5-7-2 八十九年度第二次採樣調查(89/07) 之礦岩重量百分比分析統計

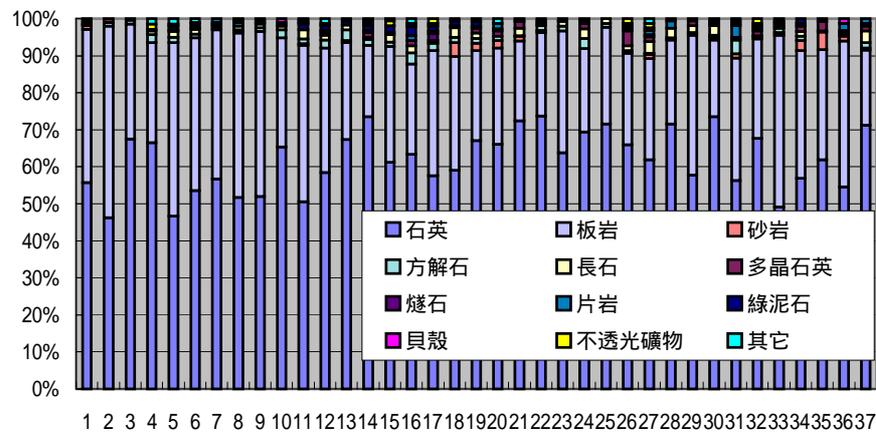


圖 5-7-3 九十年年度第一次採樣調查(90/06) 之礦岩重量百分比分析統計

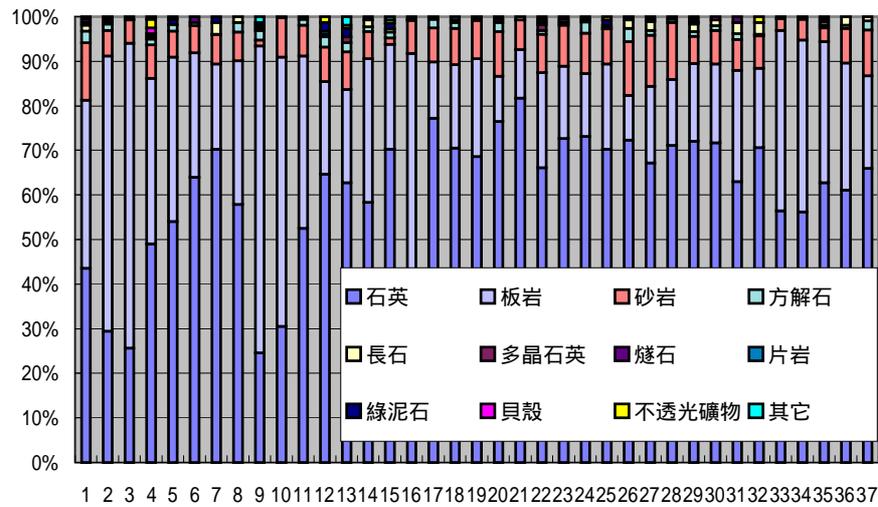


圖 5-7-4 九十年度第二次採樣調查(90/10) 之礦岩重量百分比分析統計

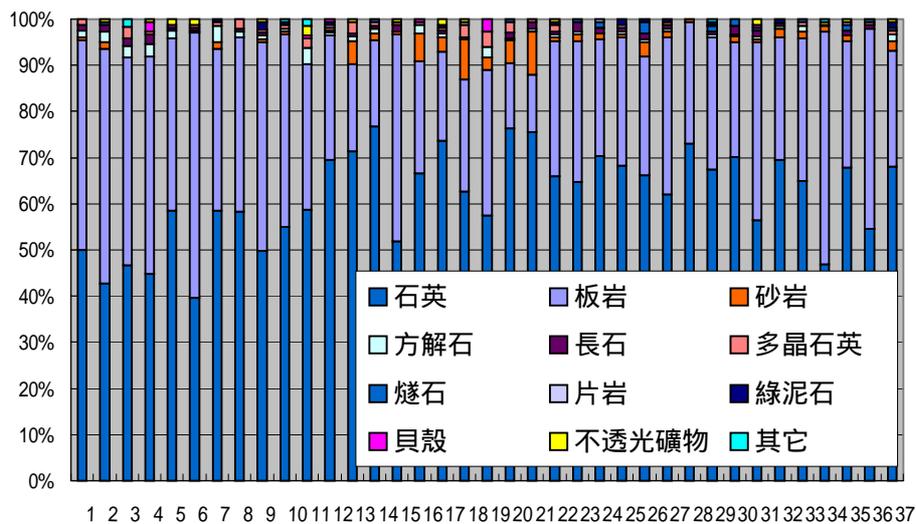


圖 5-7-5 九十二年度第一次採樣調查(92/06) 之礦岩重量百分比分析統計

經由五次採樣調查之礦物重量百分比統計圖(圖 5-7-1 至圖 5-7-5)觀知，布袋港港口附近海域因受冬、夏季季節性常年之南、北優勢方向的漲、退潮交替變化影響，其底床礦物成份已混合成為以石英與板岩為主要成分的均勻分佈。

另為了瞭解漂沙的來源及走向，觀察以上游外傘頂洲南岸(樣本 36)與下游八掌溪河口處(樣本 37)兩處採樣取得之礦岩重量百分比分佈值，發現兩處樣本與布袋港港口附近取得之 35 組樣本礦岩組成成份差異性不大，所以判定其漂沙移動方向應屬隨季節性變遷之南、北向波流交替作用，而平行海岸線移動之沿岸漂沙(littoral sand drift)。

為了瞭解布袋港港口附近海域的礦物組成平面分佈情況，本研究將五次採樣調查所得結果中的主要礦物石英與板岩兩種成份，配合二度分帶座標值與等深線值，繪製成為石英重量百分比平面分佈(如圖 5-8-1 至圖 5-8-5)，板岩重量百分比平面分佈(如圖 5-9-1 與圖 5-9-5)，藉由主要的礦物平面分佈情況，我們可以探討水深變化與主要礦物分佈間之相互關係。

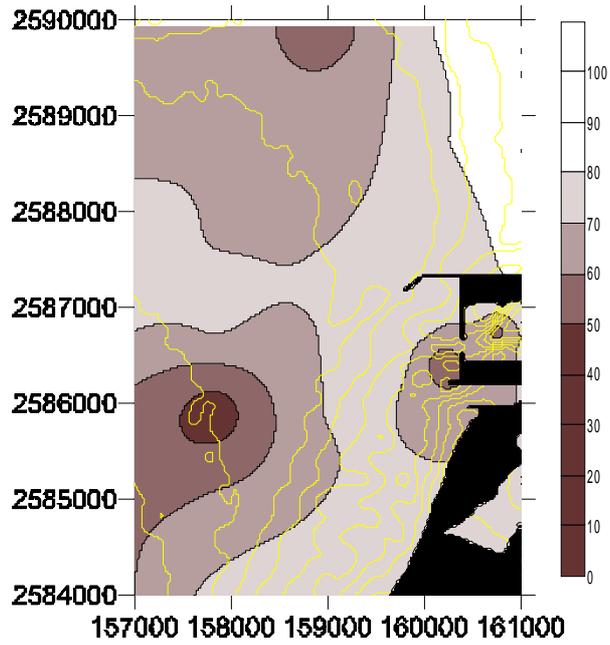


圖 5-8-1 八十九年度第一次採樣調查(89/01)石英重量百分比平面分佈

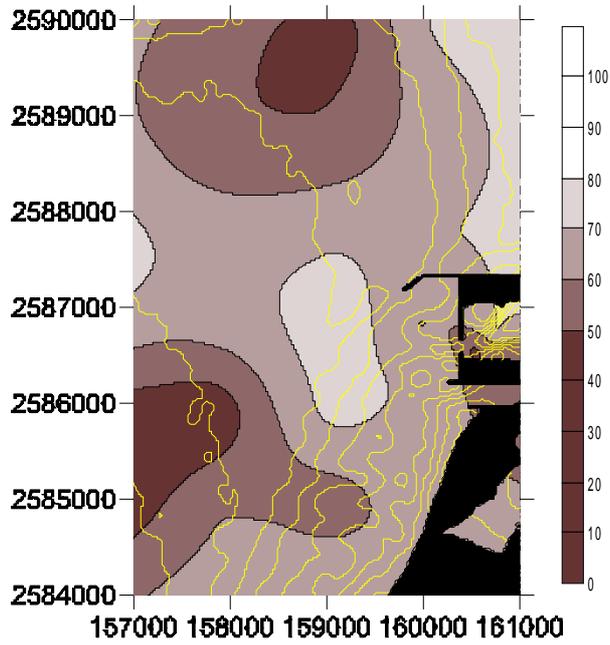


圖 5-8-2 八十九年度第二次採樣調查(89/07)石英重量百分比平面分佈

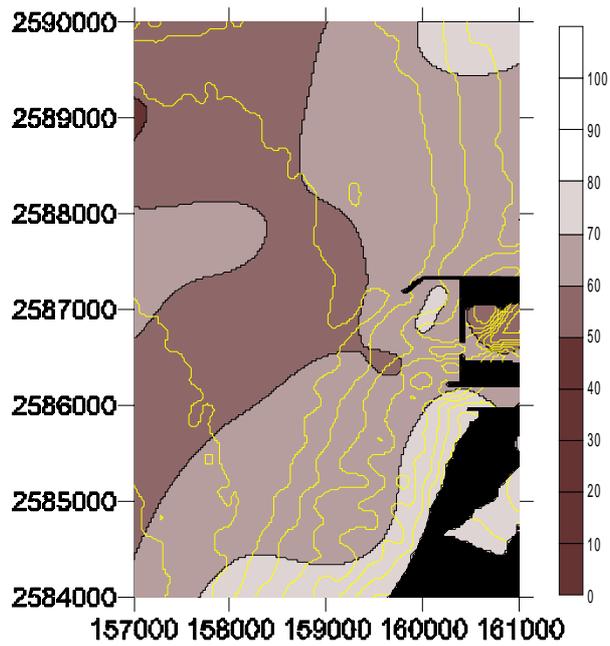


圖 5-8-3 九十年度第一次採樣調查(90/06)石英重量百分比平面分佈

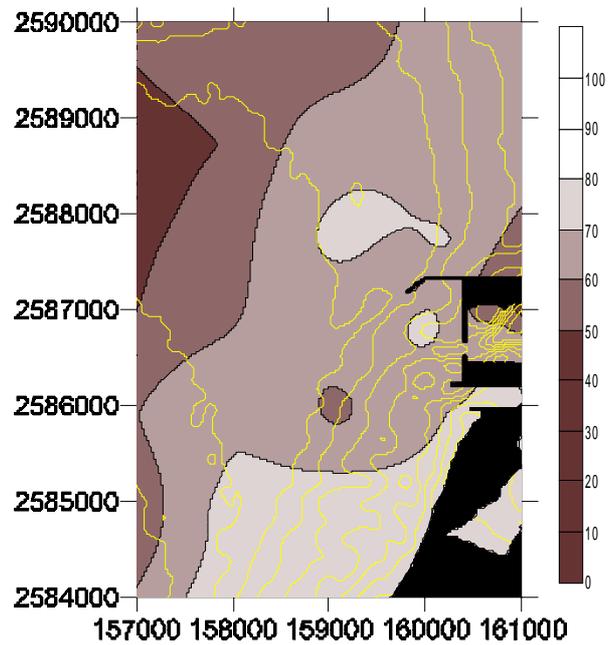


圖 5-8-4 九十年度第二次採樣調查(90/10)石英重量百分比平面分佈

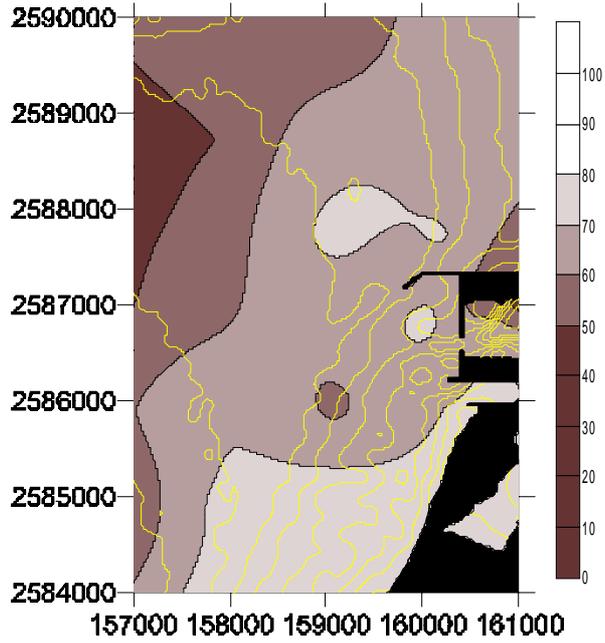


圖 5-8-5 九十二年度第一次採樣調查(92/06)石英重量百分比平面分佈

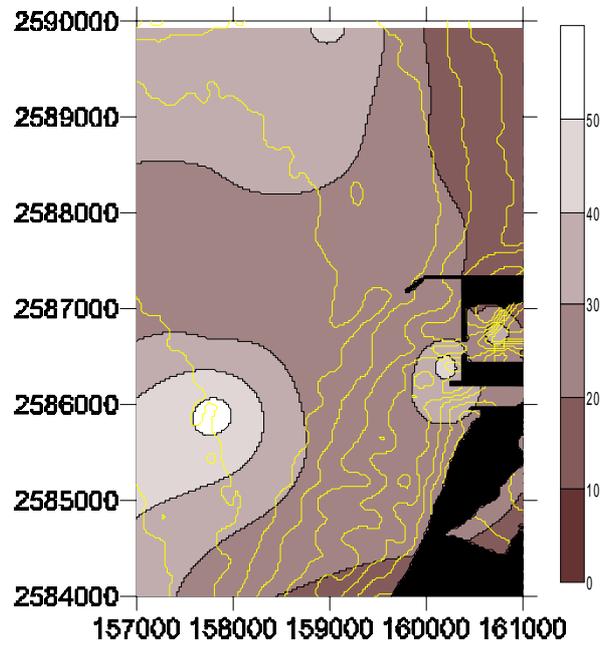


圖 5-9-1 八十九年度第一次採樣調查(89/01)板岩重量百分比平面分佈

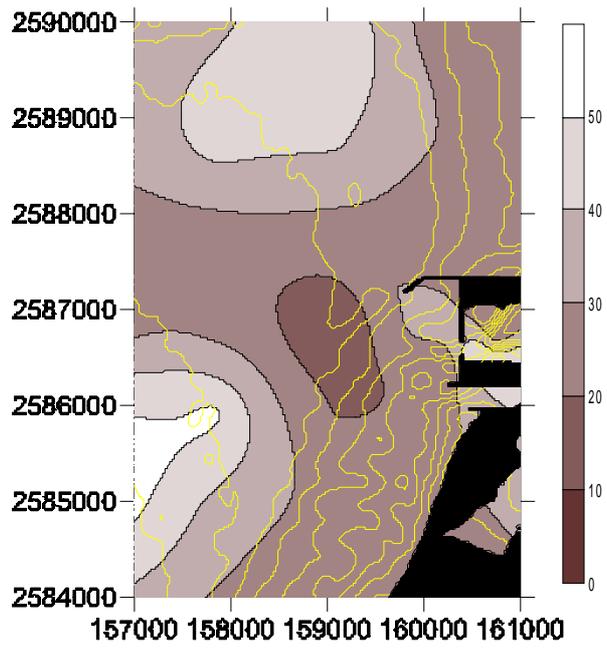


圖 5-9-2 八十九年度第二次採樣調查(89/07) 板岩重量百分比平面分佈

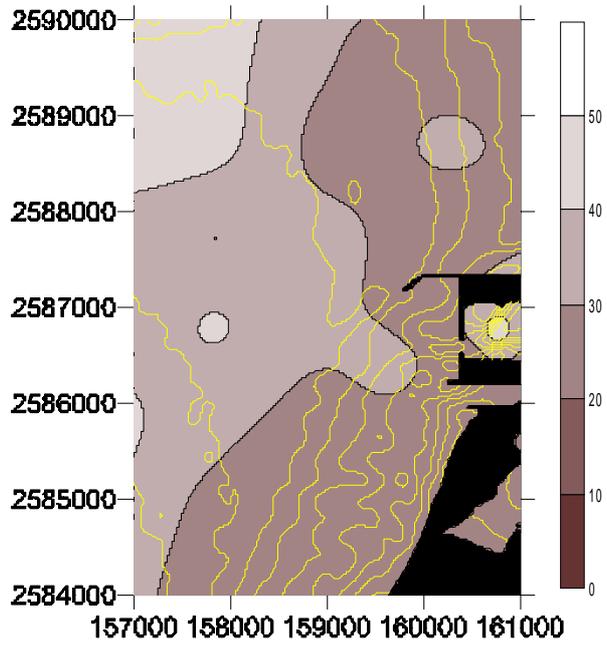


圖 5-9-3 九十年度第一次採樣調查(90/06) 板岩重量百分比平面分佈

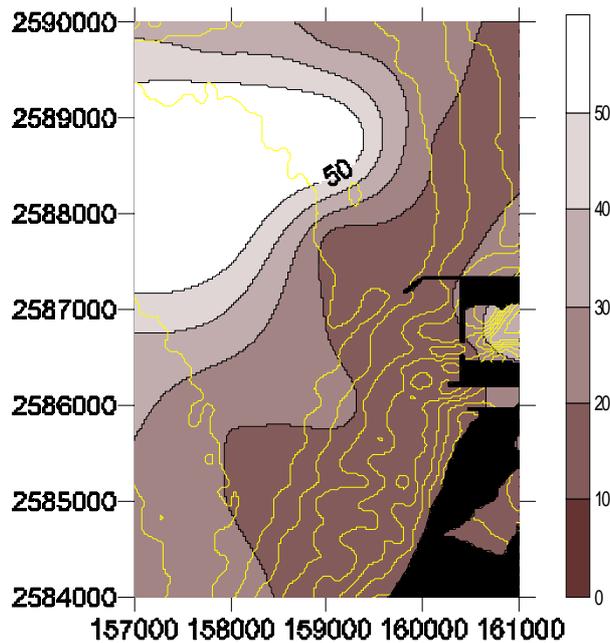


圖 5-9-4 九十年度第二次採樣調查(90/10) 板岩重量百分比平面分佈

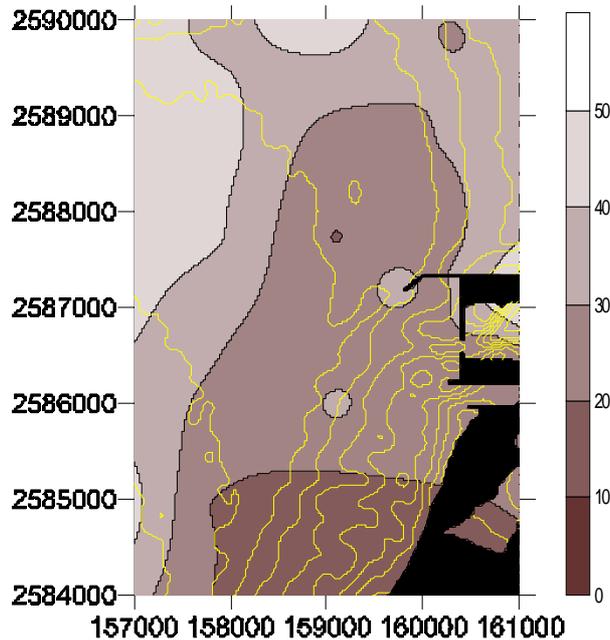


圖 5-9-5 九十二年度第一次採樣調查(92/06) 板岩重量百分比平面分佈

由本調查四年度共五次採樣取得之石英及板岩兩大具代表性之礦物重量百分比平面分佈(圖 5-8-1 至圖 5-8-5 與圖 5-9-1 至圖 5-9-5)顯示，其平面分佈情況為兩者互有消長；其中石英重量百分比平面分佈(圖 5-8-1 至圖 5-8-5)，與同一時段調查得

到的底床平均粒徑(d_m)平面分佈(圖 5-5-1 至圖 5-5-5)之粗粒徑平面分佈等值線相似；而板岩重量百分比平面分佈(圖 5-9-1 至圖 5-9-5)，則與底床平均粒徑(d_m)平面分佈(圖 5-5-1 至圖 5-5-5)之細粒徑平面分佈等值線較為相近；研判原因可能是受波浪篩分(sorting)作用，使得比重較輕之石英(比重 2.65)易被沖往灘線附近滯留，而板岩等礦物(比重大於 2.80)則因比重稍重於石英，較易沉澱於水深較深及波浪作用不到之處；且觀其礦物重量百分比平面分佈之等值線與地形等深線值(圖 4-3 至圖 4-6)的走向趨勢相近似，皆為東北往西南方向漸變，故其礦物重量百分比之平面分佈情況應與水深變化有關。而其他礦岩成分則因含量比例皆較為稀少，尚無法依其重量百分比來判定與漂沙來源間的關係。

第六章 結論與討論

本研究計畫預計執行五年，本年度為觀測之第四年，因本年度冬季時期之調查時程於九十二年十月底至十一月初剛完成原始資料的整理與檢核，不克於本年度提出具體的成果報告，因此本年度僅就夏季季節風之調查結果作一論述，而冬季季節風資料等待分析判定無誤後，再併入正式報告提送成果。

本監測之目的主要在透過長期之調查方式來瞭解布袋商港港口附近海域之底質及沉積物的礦物組成與粒徑分佈，配合沿岸流之平面流況與海岸地形之調查與分析，來探討沿岸漂砂的來源、漂砂運動之動力機制、漂砂優勢方向及漂砂量等問題；藉由有計劃的長期觀測得出的漂砂活動基本資料，吾人可以掌握布袋海域地形變遷之特性與預測未來可能的變化情況。而本計劃之延續對於布袋港港區現有的航道維護與海岸保育，甚至將來之港口擴建可能造成對於鄰近海岸地形的影響，都有很大的參考價值。

文中第二章主要是針對布袋港附近海域之自然條件與現有環境作一般性的資料蒐集與分析，其主要可以幫助監測計劃在執行時對各項氣象與地理環境因子，列入研究分析的重要依據，其對本研究計畫所得出的結果，其正確性與否是極具參考價值的。

第三章平面流況調查則為經過八十九、九十年及九十二年三年度中五次的現場漂浮球軌跡追蹤後，得出於夏、冬兩種不同季節時期之平面流況變化(如圖 3-3 至圖 3-12)顯示，其整個布袋港港口附近海域於夏季季節風時期以西南風為主要優勢方向；其平面流況於退潮時應為沿著海岸地形等深線，隨著潮水離岸由東北(NE)向西南(SW)方向或往西(W)退去；而漲潮時段整個平面流之流向，應是隨著潮水向岸，並依地形由西南(SW)往東北(NE)方向流向外傘頂洲南側及港池附近；而冬季季節風時期，於退潮時之平面流向，應為沿海岸地形等深線，隨著潮水向南(S)或西南(SW)方向流去；而漲潮時因東北季風強勁，潮流與強風互逆影響，所以流向較無規律性且流速有偏小驅勢。

第四章港口附近水深測量，歷經四年夏、冬兩種不同季節風時期所測得之岸線及港口附近水深測量(圖 4-3 至圖 4-16)與布袋港附近海域各時段岸線三維水深變化圖(圖 4-17 至圖 4-23)結果顯示，布袋港港口附近水深變化走向為由北北東(NNE)較淺愈往南南西(SSW)則漸深。

就本計畫執行七次水深測量之結果，整體布袋港港口附近區域

(計算面積為 26687500 平方公尺，水深基面-15 公尺)之土方量分析結果，可得到由 89 年 1 月之土方量 228268226 立方公尺至 92 年 6 月的土方量 220403480 立方公尺，四年期間其監測區域內之土方量共計淤積有 2284209 立方公尺，平均高差淤積了 0.09 公尺之多，究其原因主要是受冬、夏季節性變化不同與長期潮流沿著海岸漲退影響，底泥隨潮水沿著海岸線向、離岸往復作用所致；近年布袋港南面岸線興建好美里海堤及離岸堤產生養灘作用減緩漂沙變化，91 年 4 月至 92 年 6 月三次調查結果，港外海域及岸線附近皆有迴淤現象；值得注意的是布袋商港港口與外航道附近水深正值颱風波浪之碎波水深處，每當遇到颱風波浪侵襲時，將引起該區域急劇的漂沙活動，使得底床沙粒常達到全面啟動狀態，並急遽的往港池、內航道與碼頭等區域聚集，致使布袋商港港區內常因此淤積大量淤沙。

第五章底床粒徑採樣分析，八十九及九十年年度兩年度各上、下半年四次採樣之結果，依 ASTM 分類標準定義，其粒徑分類皆介於細沙至淤泥之間，但因區域不同粒徑特性卻有所差異。由各次採樣調查底床平均粒徑(d_m)平面分佈(圖 5-5-1 與圖 5-5-4)與底床均勻係數(cu)平面分佈(圖 5-6-1 與圖 5-6-4)等不同特性指標值窺知，粗粒徑沉積物皆分佈於海岸之灘線與防波堤附近，而愈往外灘延伸或航道水深較深處則粒徑愈細；究其原因應為波浪之篩分(sorting)作用所致，而越往外灘延伸至水深-10 公尺處其平均粒徑(d_m)、均勻係數(cu)皆較小，蓋因為外灘海域水深較深，沙粒起動條件不足，有足夠時間形成較為安定的粒徑分佈；且由其各次採樣調查的平均粒徑(d_m)平面分佈圖可知，粒徑分佈大致與地形等深線是一致的。

而灘線處波浪溯升沖上灘面，海水一部份自沙層中成為滲透水流下，因此回流流速減小，大顆粒徑沉積物乃停留於灘面，僅小粒料隨波流回流至較深海域，故其平均粒徑(d_m)皆較大，而且其波浪作用時間長且穩定，足以形成穩定之粒徑分佈，所以其均勻係數(cu)皆較小。

由本研究兩年度四次採樣調查取得之 37 組(八十九年度為 35 組)樣本之礦岩重量百分比分析統計(表 5-8 與表 5-11)顯示，布袋港港口附近海域的礦物組成仍以石英與板岩為主；四次採樣調查其石英含量介於 23.80%和 82.76%之間(平均各為 68.25 %、62.66 %、53.70 %、52.75 %)，板岩含量介於 10.10%和 68.80%之間(平均各為 30.87 %、31.26 %、39.45 %、39.45 %)，兩者合計約佔全部底質沉積物 93.15%以上；其他礦物(如長石、方解石、燧石、砂岩、貝類等)均屬微量(平均小於 1%)；而由四次採樣調查樣本的礦岩重量百分比(圖 5-7-1 至圖 5-7-4)可知，布袋港港口附近海域因受冬、夏季季節性長期之南、

北優勢方向的流況作用，且經漲退潮時之潮流南北交替變化影響，其附近海底底床礦物成份已混合成為均勻比例之分佈情況。

另觀察以上游外傘頂洲南岸(樣本 36)與下游八掌溪河口處(樣本 37)兩處採樣取得之礦岩重量百分比分佈值，發現兩處樣本與布袋港港口附近取得之 35 組樣本礦岩組成成份差異性不大，所以判定其漂沙移動方向應屬隨季節性變遷之南、北向波流交替作用，而平行海岸線移動之沿岸漂沙(littoral sand drift)。

另本調查四年度共五次採樣取得之石英及板岩兩大具代表性之礦物重量百分比平面分佈(圖 5-8-1 至圖 5-8-5 與圖 5-9-1 至圖 5-9-5)顯示，其平面分佈情況為兩者互有消長；其中石英重量百分比平面分佈(圖 5-8-1 至圖 5-8-5)，與同一時段調查得到的底床平均粒徑(d_m)平面分佈(圖 5-5-1 至圖 5-5-5)之粗粒徑平面分佈等值線相似；而板岩重量百分比平面分佈(圖 5-9-1 至圖 5-9-5)，則與底床平均粒徑(d_m)平面分佈(圖 5-5-1 至圖 5-5-5)之細粒徑平面分佈等值線較為相近；研判原因可能是受波浪篩分(sorting)作用，使得比重較輕之石英(比重 2.65)易被沖往灘線附近滯留，而板岩等礦物(比重大於 2.80)則因比重稍重於石英，較易沉澱於水深較深及波浪作用不到之處；且觀其礦物重量百分比平面分佈之等值線與地形等深線值(圖 4-3 至圖 4-6)的走向趨勢相近似，皆為東北往西南方向漸變，故其礦物重量百分比之平面分佈情況應與水深變化有關。而其他礦岩成分則因含量比例皆較為稀少，尚無法依其重量百分比來判定與漂沙來源間的關係。

綜觀本研究四年所得之調查結果，整個布袋港附近海域之平面流況，隨著潮水漲、退變化，沿著海岸地形等深線走勢，退潮時由東北(NE)向南(S)或西南(W)方向退去，而漲潮時由西南(W)往東北(NE)方向流入外傘頂洲南側及港池附近；而冬季季節風時期以東北季風強徑為主要優勢方向，夏季季節風時期以西南風為其主要優勢方向。

布袋港附近岸線海域水深變化，其走向為由北北東(NNE)較淺愈往南南西(SSW)則漸深，值得注意的是布袋港港口附近每受颱風侵襲，港外漂沙將隨颱風波浪湧入港池內，港池內西北碼頭區與港口突堤附近皆有大量漂沙淤積現象；而此一現象恰可證明在布袋港現階段規模情況下，港口附近之底床粒徑與水深條件下，只要波浪尖銳度稍大，就足以使得底床沙粒達到全面漂沙起動臨界值，將海域漂沙帶往港口碼頭區與航道之間，嚴重影響布袋港航船安全；因此港區防波堤擴建工程能及早延伸至漂沙起動水深之外，應該是改善港區漂沙的最佳方法。

基於本計畫四年調查所得之成果論述，由於布袋港位居外傘頂洲

南側，東北季風時期該區除優勢向南的沿岸流作用外，外傘頂洲之風沙亦受風吹入海域，為該區海域漂沙的主要沙源之一，因此建議應盡速進行外傘頂洲陸域岸線風沙調查，藉以瞭解風沙南移對布袋港整體漂沙量之影響情況。

另由平面流況調查之結果，我們可以知道布袋港海域之平面流況分布情況，但是對於瞬時或最大之流速及流向變化尚無法真確的掌握，建議港務局仍應於該區海域設置長期性之固定風、浪、流觀測站，藉以即時觀察與蒐集整個海域的海象變化情況，如此更可以正確與即時的來判斷該區海域的漂沙機制，以提供港務單位於規劃設計之時作為參考之用。

參考文獻

1. 湯麟武(1981),”港灣及海域工程”,中華土木水利工程學會專書.
2. 侯和雄(1983),”海岸、港灣規劃與設計”,臺灣省政府交通處港灣技術研究所專刊第九號.
3. 林銘崇(1985),”外傘頂洲地形變化之研究”,土木水利季刊第十二卷第三期.
4. 侯和雄(1985),”布袋港波浪分析與漂沙量研究”,嘉義縣政府.
5. 黃清和 林柏青(1991),”台灣西海岸沖淤調查研究(一)”,臺灣省政府交通處港灣技術研究所基本研究報告(研五).
6. 黃清和 林柏青(1992),”台灣西海岸沖淤調查研究(二)”,臺灣省政府交通處港灣技術研究所基本研究報告(研五).
7. Chien-Kee Chang, Fu-Tung Chang (1994), "Investigation of current and particle velocity near the surf zone", INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDRO-TECHNICAL ENGINEERING FOR PORT AND HARBOR. Pp 180-185.
8. 張金機,張富東,曾相茂(1994), "碎波帶附近流況調查研究",第十六屆海洋工程研討會. Pp d-171-185.
9. 張富東、廖慶堂(1995),”布袋港客貨碼頭擴建水工模型試驗研究”,嘉義縣政府.
10. 賴聖耀,張富東(2000),”布袋港漂沙及地層下陷觀測研究”,高雄港務局
11. 賴聖耀,張富東(2001),”布袋港漂沙及地層下陷觀測研究”,高雄港務局
12. 賴聖耀,張富東(2002),”布袋港漂沙及地層下陷觀測研究”,高雄港務局

附錄 A

布袋港港口附近漂沙現場監測計畫

期末報告審查意見及處理情形

布袋港港口附近漂沙現場監測計畫

期末報告審查意見及處理情形

審查單位	審查意見	處理情形
中山大學海洋科學院 陳陽益院長	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本報告所提之意見及建議其解決方式與防治已接近完成之任務。 2. 有關布袋港航道淤積其沙源多半由外傘頂洲的漂沙所引起，因此預防之道需要再進一步的探討。 	<p>感謝支持與肯定。</p> <p>布袋港航道淤積其沙源多半由外傘頂洲之論述，應設置長期觀測站來進行監測，才能判定漂沙的確實來源及走向。</p>
中山大學海洋環境及工程系 田文敏教授	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究分地層下陷與漂砂二個部份，對於布袋港之開發有直接幫助。 2. 布袋港漂沙的來源與附近河流應有關，請陳述其輸砂量與逕流量，以供評估。 3. 地層下陷在海域部份應與陸域部份相當，對漂砂量的評估有相當程度的影響，評估時應一併考量。 	<p>感謝支持與肯定。</p> <p>遵照辦理於 2.8 節及附表 2-2 說明。</p> <p>漂沙監測之水準高程皆已參考地層下陷調查之結果一併評估考量。</p>
中興大學土木工程研究所 林炳森教授	<ol style="list-style-type: none"> 1. 均勻係數 C_u 應採用下標 C_u。 2. 圖多處不清楚請修正，如圖 1-1、2-1、3-1... 等。 3. P3-7 圖 3-3~圖 3-12 缺 91 年(夏季)91 年(冬季)、92 年(冬季)資料請補足。 2. P4-14 遺漏”8. 九十二年冬季水深量測”。 3. P.4-27 倒數第 8 行，平均高差沖蝕達 0.35 公尺及 0.35 公尺是否有誤？ 4. P4-26 平均高差沖蝕 0.1、0,.6 個小數點。 	<p>已於正式報告書修正。</p> <p>正式報告書以彩色印刷改善修正。</p> <p>本計劃 91 年度未辦理平面流況調查與底泥採樣調查。而 92 年度冬季資料則需 11 月調查分析後補足。</p> <p>92 年度冬季資料則需 11 月調查分析後補足。</p> <p>已於正式報告書修正。</p> <p>已於正式報告書修正。</p>

<p>中山大學海洋物理研究所 陳冠宇教授</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告內容翔實，分析十分完整，值得肯定。 2. 漂沙部份 2.42 之波浪推算來源為何？是否為本計劃之成果，請註明。 3. 流標漂流球量測法所得之資料十分可貴，但只有當時之資料，若經費許可，建議明年起設長期測站。 4. 港務局疏挖後海拋之地點建議在報告中加註。而總積量有否扣除此量？ 5. 本計劃分成兩個子計畫，子計畫間如能互相搭配會更理想。建議明年第一子計畫能另建立模式估算海域、港池的沉陷量；根據此沉陷量第二子計畫可進一步修正其沖淤調查。 6. 報告打字錯誤：2-3 下日半日，6-1 並 併。 	<p>感謝支持與肯定。</p> <p>已於正式報告書註明。</p> <p>建請港務局編列預算設置長期觀測站來進行監測，才能判定漂沙的確實來源及走向。</p> <p>本計劃為現況監測調查，港務單位經常性之疏浚工程土方量可列入參考減增。</p> <p>海域沈陷量由於測深儀之精度影響，其誤差遠大於地層沈陷量，故已陸域之微小地層沈陷量來修正海域沖淤調查之結果有其實際上的困難。</p> <p>已於正式報告書修正。</p>
<p>布袋港蔡處長</p>	<p>由於布袋港航道淤積，東北季風來時其沿岸流向為何，目前是否影響航道的航行，由於每月配合編列預算施行潛堤工作，是否有效，請專家提供正確的資料，以便施工之依據。</p>	<p>布袋港航道淤積，在港池航道為擴建之前，其港口恰於颱風波浪之碎波水深處，將使漂沙往港口附近淤積。而潛堤工程於季節風時節尚有效果，但每遇颱風過境台灣西部則仍有淤積之慮。</p>
<p>高雄港務局工務組楊組長</p>	<p>由於布袋港漂沙量非常大，為了使布袋港航道能維持繼續航行，請港工處繼續編列維護航道之經費。</p>	<p>建請高港局編列預算維護。</p>
<p>布袋港游副處長</p>	<p>由於布袋港航道淤積，日前已進行浚深工作，但仍挖不勝淤，請專家能提供解決方案。</p>	<p>布袋港航道淤積現象，於未擴建防波堤前，難以有效改善漂沙對港池與航道之淤積現象。</p>

布袋港楊主任	這次報告對布袋港頗具參考價值，尤其是三維水深圖對於港工處施工時可作為參考。	感謝支持與肯定。
高港局會計室	目前布袋港仍宥二百多萬尚未報銷，請港研中心儘速將憑證彙整後送交本局，另其餘有關高雄港二港口防波堤維護研究及港池淤沙研究亦請儘速送交本局，以便核銷。	儘速將憑證彙整，送交貴局辦理核銷。