

100-85-7554

MOTC-IOT-99-H1DA002-1

# 港灣地層下陷監測之研究(2/2)



交通部運輸研究所

中華民國 100 年 5 月

100-85-7554

MOTC-IOT-99-H1DA002-1

# 港灣地層下陷監測之研究(2/2)

著 者：陳志芳、謝明志、羅建明

交通部運輸研究所

中華民國 100 年 5 月

100

港灣地層下陷監測之研究  
(2/4)

交通部運輸研究所

GPN: 1010000954

定價 100 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

港灣地層下陷監測之研究 (2/2) / 陳志芳、謝明志、  
羅建明著. --初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，

民 100.05

面 ； 公分

ISBN 978-986-02-7770-8 (平裝)

1. 港埠 2. 地震 3. 地層下陷 4. 環境監測 5. 監視系統

443.2029

100007673

港灣地層下陷監測之研究 (2/2)

著 者：陳志芳、謝明志、羅建明

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

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

電 話：(04)26587176

出版年月：中華民國 100 年 5 月

印 刷 者：良機事務機器有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 90 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站

定 價：100 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010000954

ISBN：978-986-02-7770-8 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

## 交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                         |                           |                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 出版品名稱：港灣地層下陷監測之研究(2/2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                         |                           |                                                              |
| 國際標準書號（或叢刊號）<br>ISBN978-986-02-7770-8(平裝)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 政府出版品統一編號<br>1010000954 | 運輸研究所出版品編號<br>100-85-7554 | 計畫編號<br>99-H1DA002-1                                         |
| 主辦單位：港灣技術研究中心<br>主 管：邱永芳<br>計畫主持人：陳志芳<br>協同主持人：<br>研究人員：謝明志、羅建明<br>技術人員：陳義松、李春榮、李昭明、何木火、陳毓清、魏瓊蓉、林隆貞<br>聯絡電話：04-26587113<br>傳真號碼：04-26564418                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                         |                           | 研究期間<br>自 99 年 01 月<br>至 99 年 12 月                           |
| 關鍵詞：地震監測、地層下陷監測                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                         |                           |                                                              |
| <p>摘要：</p> <p>臺灣西南沿海之臺中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港灣地區，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。本研究計畫於臺中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港區，各設置 1 組 200m 深之沉陷監測井及水位觀測井，以無線電波感應式層別沉陷儀進行港區地層分層沉陷之長期監測，並量測地下水位，以瞭解地下水位及水壓變化對港區地層下陷之影響。另臺灣位處於環太平洋地震帶上，每年大小地震不斷，且臺灣港埠所曾遭受的天然災害，仍以 1999 年 921 地震臺中港所受的災損最為嚴重。綜上所述，為維護港區工程及各樣設施之安全，有必要對各港灣地區之地層下陷以及地震水壓進行長期之監測，並將量測所得資料經彙整分析後，建檔儲存建置成資料庫，以提供相關單位設計港灣結構物之參考。</p> <p>本計畫為延續性常態監測研究，本年度執行的工作內容包括：1. 各港區地層下陷及地下水壓之量測，2. 港灣地區地層下陷監測資料彙整分析，3. 港灣地區地震水壓監測站資料收集及分析。這些成果可作為災害預防、災時應變及災後重建計畫之參考。</p> <p>研究成果效益：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>學術效益，發表研討會論文 1 篇：2009 臺灣地理資訊系統年會暨學術研討會，發表論文「GIS 在臺北港區土壤液化分析及震災速報系統之開發應用」。</li> <li>資料庫建置效益：港灣地區井下地震及水壓監測站量測所得資料，已陸續彙整成資料表單，納入港灣工程基本資料庫中，可建立港區防救災體系之相關資料庫，作為港灣地區之地震災前預防、災時應變計畫與決策之參考依據。</li> </ol> <p>提供應用情形：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>利用本研究所安裝之港區井下地震水壓監測系統，配合港區工程基本資料查詢展示系統之液化分析模組，開發地震速報系統，可於震後發佈港區可能致災地點之警訊，提供港務局防救災及緊急修復使用。</li> <li>所建港區地震速報系統，已於 98 年 12 月 19 花蓮地區規模 6.8 之強震後，各港測站皆成功擷取震動反應資料，並發送通報簡訊予各港務局相關人員。</li> </ol> |                         |                           |                                                              |
| 出版日期                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 頁數                      | 定價                        | 本出版品取得方式                                                     |
| 99 年 5 月                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 86                      | 100                       | 凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。 |
| 機密等級：<br><input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密<br>（解密條件： <input type="checkbox"/> 年 月 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密，<br><input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密）<br><input checked="" type="checkbox"/> 普通                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                         |                           |                                                              |
| 備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                         |                           |                                                              |

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

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                              |                                  |                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TITLE: Monitoring of Ground Subsidence and Water Pressure in Taiwan Harbor Areas (2/2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                              |                                  |                                                                                                                                                                                                                        |
| ISBN(OR ISSN)<br>ISBN978-986-02-7770-8<br>(pbk)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER<br>1010000954 | IOT SERIAL NUMBER<br>100-85-7554 | PROJECT NUMBER<br>99-H1DA002-1                                                                                                                                                                                         |
| DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER<br>DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu<br>PROJECT ADVISOR: J. F. Chen<br>PRINCIPAL INVESTIGATOR:<br>PROJECT STAFF: M. J. Hsieh, J. M. Loe<br>PROJECT TECHNICIAN: Y. S. Chen, C. R. Lee, Z. M. Lee, M. H. He, Y. Q. Chen, Q. R. Wei, L. Z. Lin.<br>PHONE: 04-26587172<br>FAX: 04-26564418                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                              |                                  | PROJECT PERIOD<br>FROM January 2010<br>TO December 2010                                                                                                                                                                |
| KEY WORDS: Seismic monitoring, Ground subsidence monitoring.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                              |                                  |                                                                                                                                                                                                                        |
| <p><b>ABSTRACT :</b></p> <p>Ports of Taichung, Pudai, Anping, and Tapeng Bay are located on the southwestern coast of Taiwan. The soil deposit at these areas is of recent alluvium, in which soils are generally loose, soft and under consolidated. It is concerned that the ground subsidence occurred due to the local overdraw of ground water and the massive land reclamation, which would affect the safety of harbor engineering and her facilities.</p> <p>The project is a continuous study of in-situ monitoring and analysis. The working contents of this year include: 1. Subsidence and ground water pressure measuring at southwest port and marine areas, 2. Analysis of subsidence and ground water pressure measuring data, 3. Collection and analysis of seismic monitoring data, Those are beneficial to both the design of the monitoring system for port facilities and development of remediation and response plans for a specific harbor.</p> <p>Benefits of research results:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Academic benefits, publication of 2 papers in seminars: “The application of GIS in soil liquefaction and earthquake damage instant report system in Taipei Harbor”, 2009 Taiwan Geographic Information System Annual Conference and Academic Seminar.</li> <li>2. The benefit of database building: It provides valuable information to facilitate the decision-making during and after disaster.</li> </ol> <p>Current situation in application:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. “The Instant Earthquake Report system” developed by this project has been put into use in warning possible damage spots during earthquake.</li> <li>2. “The Instant Earthquake Report system” was successful in accumulating dynamic responsive data during the 6.8 scale of earthquake in Hualien area, and instantly sent newsletter to those who are responsible for the disaster prevention and rescue.</li> </ol> |                                              |                                  |                                                                                                                                                                                                                        |
| DATE OF PUBLICATION<br>May 2011                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | NUMBER OF PAGES<br>86                        | PRICE<br>100                     | CLASSIFICATION<br><input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL<br><input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET<br><input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED |
| The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                              |                                  |                                                                                                                                                                                                                        |

# 港灣地層下陷監測之研究(2/2)

## 目 錄

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 中文摘要 .....                | I   |
| 英文摘要 .....                | II  |
| 目 錄 .....                 | III |
| 圖目錄 .....                 | V   |
| 表目錄 .....                 | VII |
| 第一章 前言 .....              | 1-1 |
| 第二章 港灣地區地層下陷行為與分析方法 ..... | 2-1 |
| 2.1 有效應力增量分佈 .....        | 2-2 |
| 2.2 超抽地下水之下陷行為 .....      | 2-3 |
| 2.3 地層下陷分析方法 .....        | 2-6 |
| 2.4 矩形雙曲線法計算壓密係數 .....    | 2-9 |
| 第三章 監測系統規劃與安裝 .....       | 3-1 |
| 3.1 位置與深度 .....           | 3-1 |
| 3.2 儀器裝設 .....            | 3-1 |
| 3.3 各港監測站 .....           | 3-8 |
| 第四章 監測結果與試驗分析 .....       | 4-1 |
| 4.1 布袋港 .....             | 4-1 |

|               |      |
|---------------|------|
| 4.2 大鵬灣 ..... | 4-20 |
| 4.3 安平港 ..... | 4-29 |
| 4.4 臺中港 ..... | 4-35 |
| 第五章 結論 .....  | 5-1  |
| 參考文獻 .....    | 6-1  |

## 圖目錄

|        |                              |      |
|--------|------------------------------|------|
| 圖 2.1  | 沉陷分析之流程圖 .....               | 2-2  |
| 圖 2.2  | 自由水位下降引致之有效應力增量分佈 .....      | 2-4  |
| 圖 2.3  | 受壓水位下降引致之有效應力增量分佈 .....      | 2-5  |
| 圖 3.1  | 系統儀器架構流程圖 .....              | 3-2  |
| 圖 3.2  | 電子式地下水壓計安裝示意圖 .....          | 3-3  |
| 圖 3.3  | 開放式水壓計安裝示意圖 .....            | 3-5  |
| 圖 3.4  | 沉陷計安裝示意圖 .....               | 3-6  |
| 圖 3.5  | 磁感式層別沉陷計安裝示意圖 .....          | 3-7  |
| 圖 3.6  | 布袋港監測站位置圖 .....              | 3-9  |
| 圖 3.7  | 大鵬灣監測站位置圖 .....              | 3-11 |
| 圖 3.8  | 安平港監測站位置圖 .....              | 3-13 |
| 圖 3.9  | 臺中港監測站示意圖 .....              | 3-15 |
| 圖 4.1  | 布袋港分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖 .....     | 4-4  |
| 圖 4.2a | 布袋港分層水位變化圖(自記式) .....        | 4-8  |
| 圖 4.2b | 布袋港分層水位變化圖(自記式) .....        | 4-9  |
| 圖 4.2c | 布袋港 200m 分層水位變化圖(手動量測) ..... | 4-10 |
| 圖 4.3  | 布袋港 300m 分層水位變化圖(手動量測) ..... | 4-11 |
| 圖 4-4  | 布袋港分層個別下陷量圖(200m) .....      | 4-12 |
| 圖 4.5  | 布袋港分層累積下陷量圖(200m) .....      | 4-13 |
| 圖 4.6  | 布袋港分層個別下陷量圖(300m) .....      | 4-14 |

|                                                    |      |
|----------------------------------------------------|------|
| 圖 4.7 布袋港分層累積下陷量圖(300m) .....                      | 4-15 |
| 圖 4.8a 布袋港(400m)水準基站累積沉陷量(92/09~95/09) .....       | 4-16 |
| 圖 4.8b 布袋港(400m)水準基站累積沉陷量(98/07/03~99/07/06) ..... | 4-17 |
| 圖 4.9 矩形雙曲線壓密曲線圖 .....                             | 4-18 |
| 圖 4.10 大鵬灣分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖 .....                    | 4-22 |
| 圖 4.11 大鵬灣分層水位變化圖(手動量測) .....                      | 4-23 |
| 圖 4.12 大鵬灣分層個別下陷量圖 .....                           | 4-26 |
| 圖 4.13 大鵬灣地層下陷與地下水位變化圖 .....                       | 4-27 |
| 圖 4.14 大鵬灣地層分層下陷觀測圖 .....                          | 4-28 |
| 圖 4.15 安平港分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖 .....                    | 4-32 |
| 圖 4.16 安平港分層水位變化圖(手動量測) .....                      | 4-33 |
| 圖 4.17 安平港分層累積下陷量圖 .....                           | 4-34 |
| 圖 4.18 臺中港分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖 .....                    | 4-37 |
| 圖 4.19 臺中港分層水位變化圖(自記式) .....                       | 4-38 |
| 圖 4.20 臺中港分層水位變化圖(手動量測) .....                      | 4-39 |
| 圖 4.21 臺中港分層累積下陷量圖(200m) .....                     | 4-40 |

## 表目錄

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| 表 3-1 布袋港監測井座標高程一覽表 .....          | 3-9  |
| 表 3-2 布袋港沉陷計感應環安裝深度一覽表 .....       | 3-10 |
| 表 3-3 布袋港地下水壓觀測站水壓計埋設資料表 .....     | 3-10 |
| 表 3-4 大鵬灣沉陷計感應環安裝深度一覽表 .....       | 3-12 |
| 表 3-5 大鵬灣地下水壓觀測站水壓計埋設資料表 .....     | 3-12 |
| 表 3-6 安平港 18~19 號碼頭沉陷磁環安裝深度表 ..... | 3-14 |
| 表 3-7 臺中港沉陷計感應環安裝深度一覽表 .....       | 3-15 |
| 表 4-1 布袋港土層單向度壓密係數一覽表 .....        | 4-19 |

# 第一章 前 言

臺灣西南沿海之臺中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港灣地區，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，在臺灣各地區，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，其中以屏東地區累積最大下陷量達 3.00 公尺為最嚴重，雲林、嘉義地區累積最大下陷量約 1.5~2.0 公尺，而彰化濱海地區亦有 2.3 公尺之下陷量，整個西南沿海地區幾乎均有地層下陷現象。由於超抽地下水易造成區域性之地下水位下降，港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。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。因此為維護港區工程及各樣設施之安全，有必要對各港灣地區之地下水壓及地層下陷進行長期之監測。

本所港研中心於臺中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港區，各設置 1 至 2 組 200 m、300 m 深沉陷井，以無線電波感應式層別沉陷儀進行港區地層分層沉陷之長期監測，並埋設水壓計，水位觀測井，以瞭解地下水位及水壓變化對港區地層下陷之影響，其目的不但可成為維護港區現有工程及各樣設施安全監測之一環，並可做為港區碼頭、堤防等擴建工程規劃設計之參考。

本研究計畫之目標，主要是維護各港區沉陷及水位觀測井之正常監

測，平時定期量測各港區之沉陷及水位變化，以探討地下水位及水壓變化對各港區地層下陷之影響。地震後，以無線電波層別沉陷儀量測分層地層下陷，分析各土層地震時之沉陷量。

在本研究報告第二章及第三章中，分別介紹港灣地區地層下陷行為與分析方法與各港監測站的設置，第四章為監測地下水壓及分層地層下陷的結果與土壤試驗等相關性分析，第五章將相關成果做成結論，所得資料可供應各項研究討論及災害防治策略規劃之用。

## 第二章 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，臺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 2.1 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：

## 2.1 有效應力增量分佈

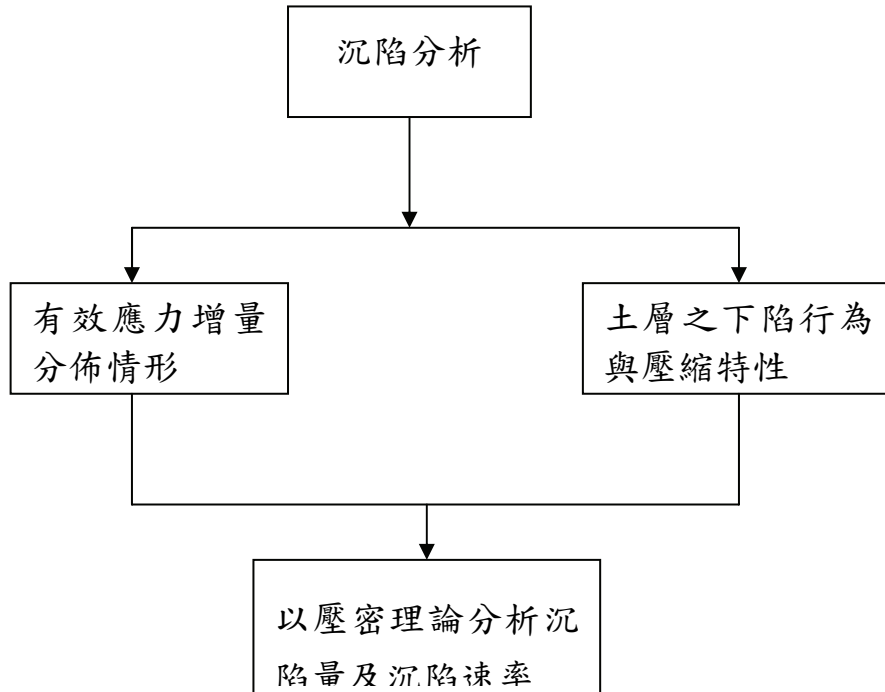


圖 2.1 沉陷分析之流程圖

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 2.2 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 2.3 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。

## 2.2 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。

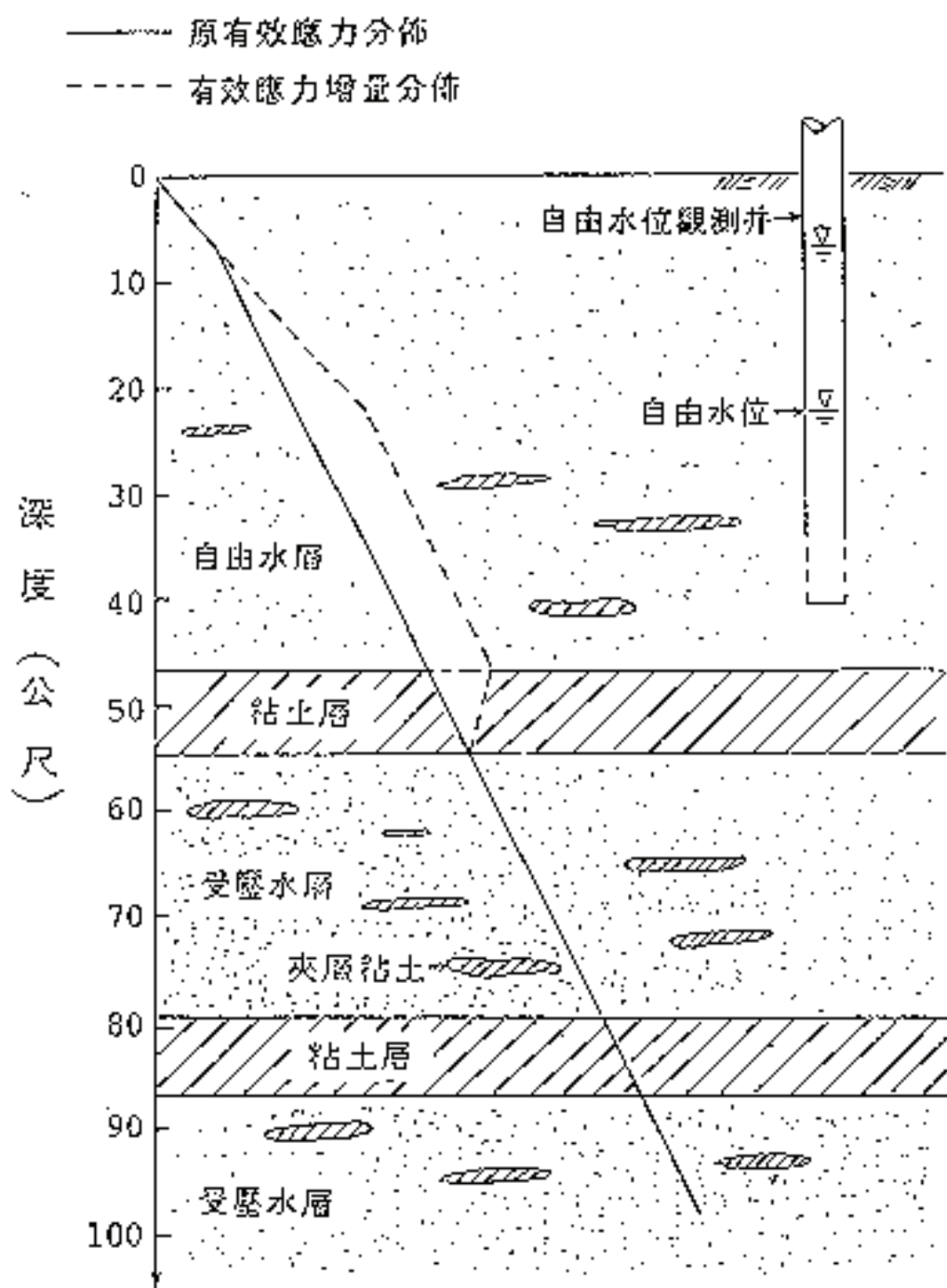


圖 2.2 自由水位下降引致之有效應力增量分佈

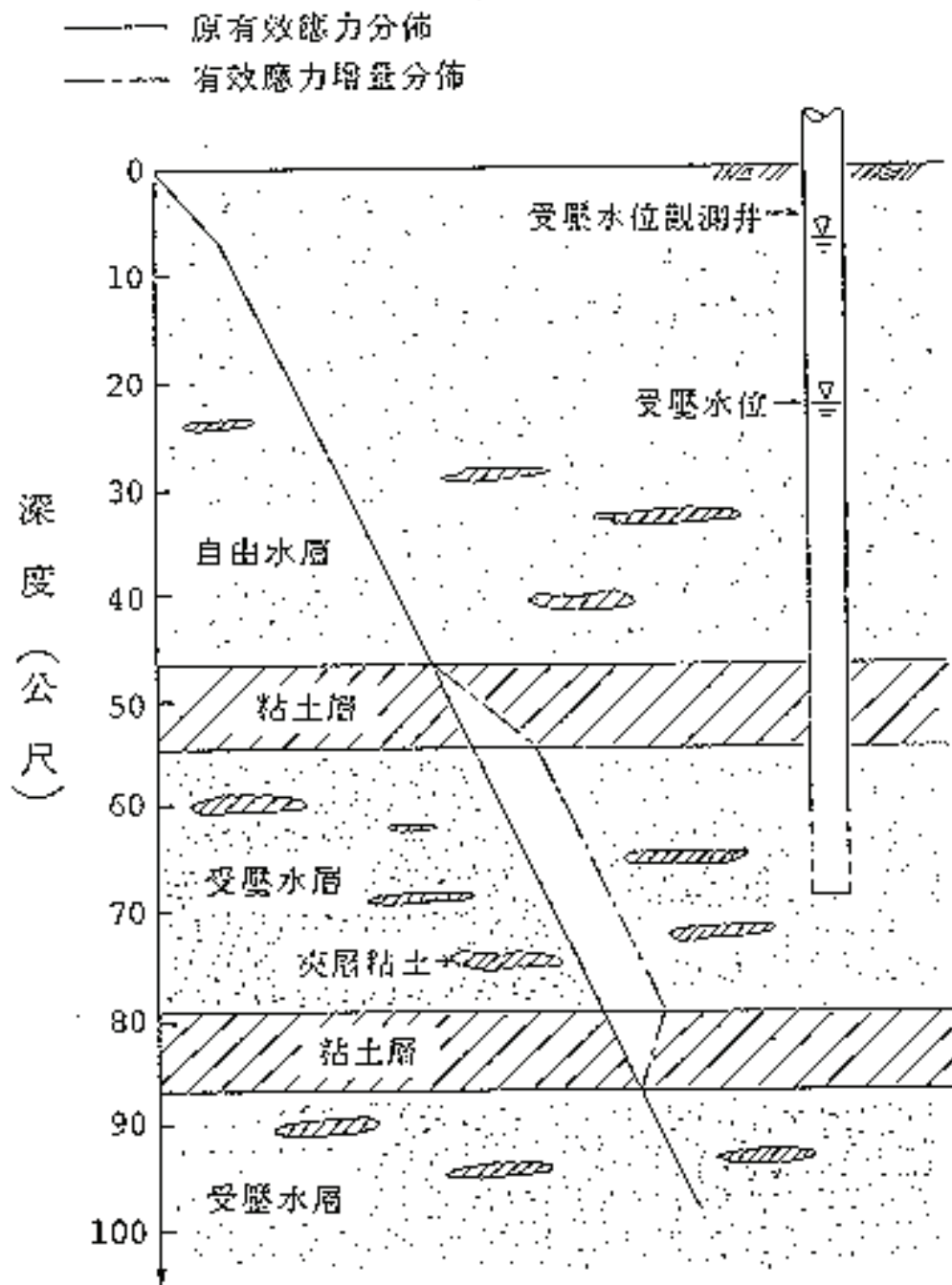


圖 2.3 受壓水位下降引致之有效應力增量分佈

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。

## 2.3 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的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

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)土壤顆粒及水為完全不可壓縮，(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。

$$S_u = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log\left(\frac{P'_0 + \Delta\sigma'_{vo}}{P'_0}\right) \dots\dots\dots (2-1)$$

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 $S(t)$ 。

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

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 Fourler 級數展開的方式來表示的數學精確解，如下所示：

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

式中， $U(t)$ ：平均壓密度，定義如式(3-4)

$T_v$ ：時間因數

$$U(t) = 1 - \frac{\int \Delta u dz}{\int \Delta u_0 dz} \dots\dots\dots (2-4)$$

而式(2-3)中之時間因數 $T_v$ 與時間 $t$ 之關係如下所示：

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

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：

$$S(t) = S_u \times U(t) \dots\dots\dots(2-6)$$

## 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：

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

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)， $E$ 、 $\nu$ 、 $G$  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  $G=E/2(1+\nu)$ 。 $k$ ， $n$ ， $\beta$  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(2-7)簡化如下：

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

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

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(2-8)解析得如下所示：

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

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  $H_d = H/2$

## 2.4 矩形雙曲線法計算壓密係數

欲了解現地土層在受到上部荷重及地下水位變化產生的沉陷有多快時，需由整體土層之平均壓密度來決定，而要決定平均壓密度之前，有一個很重要的參數必需被求得，那就是由 Terzaghi 單向度壓密理論之壓密方程式所發展之壓密係數  $C_v$  值，而常用來估算壓密係數之方法有 Casagrande(1936)之對數時間調整法及 Taylor(1948)平方根時間調整法，雖然這兩種方法已被廣泛採納並也使用了一段時間，但在決定壓密係數  $C_v$  值之程序中卻有一些經驗上的困難，故另有一種值得推廣的

方法稱為 Sridharan(1981)矩形雙曲線法，它是可以很迅速和較準確來決定壓密係數的第三種方法。

一般在室內求得壓密係數的方法，是在進行單向度壓密試驗並繪製  $\log t \sim \delta$  及  $\sqrt{t} \sim \delta$  曲線圖後，利用 Casagrande 之對數時間法及 Taylor 平方根時間法之步驟求得，但是有一些曲線圖如果不是標準或理想的型態時，較難去決定它的  $t_{50}$  或  $t_{90}$ ，為克服上述的困難，本法從 Terzaghi's 單向度壓密理論  $T \sim U$  或試驗室  $t \sim \delta$  曲線之矩形雙曲線關係的理想化來達到決定  $C_v$  值，它的可靠性和準確性顯示出比現有的 Taylor's 和 Casagrande's 標準方法好，且由雙曲線法所求得之  $C_v$  值約介於 Taylor's 法及 Casagrande's 法兩者之間。以下就矩形雙曲線法決定壓密係數  $C_v$  值之步驟簡述如下：

- (a)進行室內之標準單向度壓密試驗，可得到時間( $t$ )和沉陷( $\delta$ )值。
- (b)繪製  $\sqrt{t} \sim \delta$  圖、 $\log t \sim \delta$  圖及  $t \sim t/\delta$  圖。
- (c)在  $t \sim t/\delta$  圖中，決定初始之直線段，並找出直線段之斜率  $m$  及直線段交於  $t/\delta$  軸上之截距  $c$ 。
- (d)將  $m$ 、 $c$  代入  $C_v = \frac{0.24mH^2}{c}$  式中計算之，即可得到  $C_v$  值。

## 第三章 監測系統規劃與安裝

### 3.1 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，且用來量測水壓大小之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。

埋設土層分層沉陷計之深度需依各監測站地質狀況而定，即於主要土層層次變化之位置安裝沉陷磁環，設置完成後，定期再以無線電波層別沉陷儀測量沉陷環之深度變化，此量測結果可以顯示個別層次之土層沉陷變化量，進而求得各深度土層沉陷之變化情形。

電子式、開放式水壓量測及土層分層沉陷量測可採用手動及自動記錄，其系統儀器架構流程如圖 3.1 所示。

### 3.2 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 200 m，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 3.2 所示。

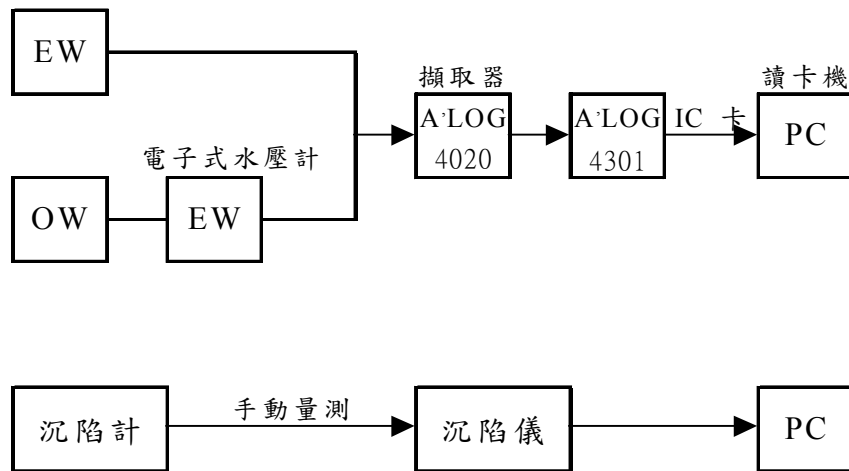


圖 3.1 系統儀器架構流程圖

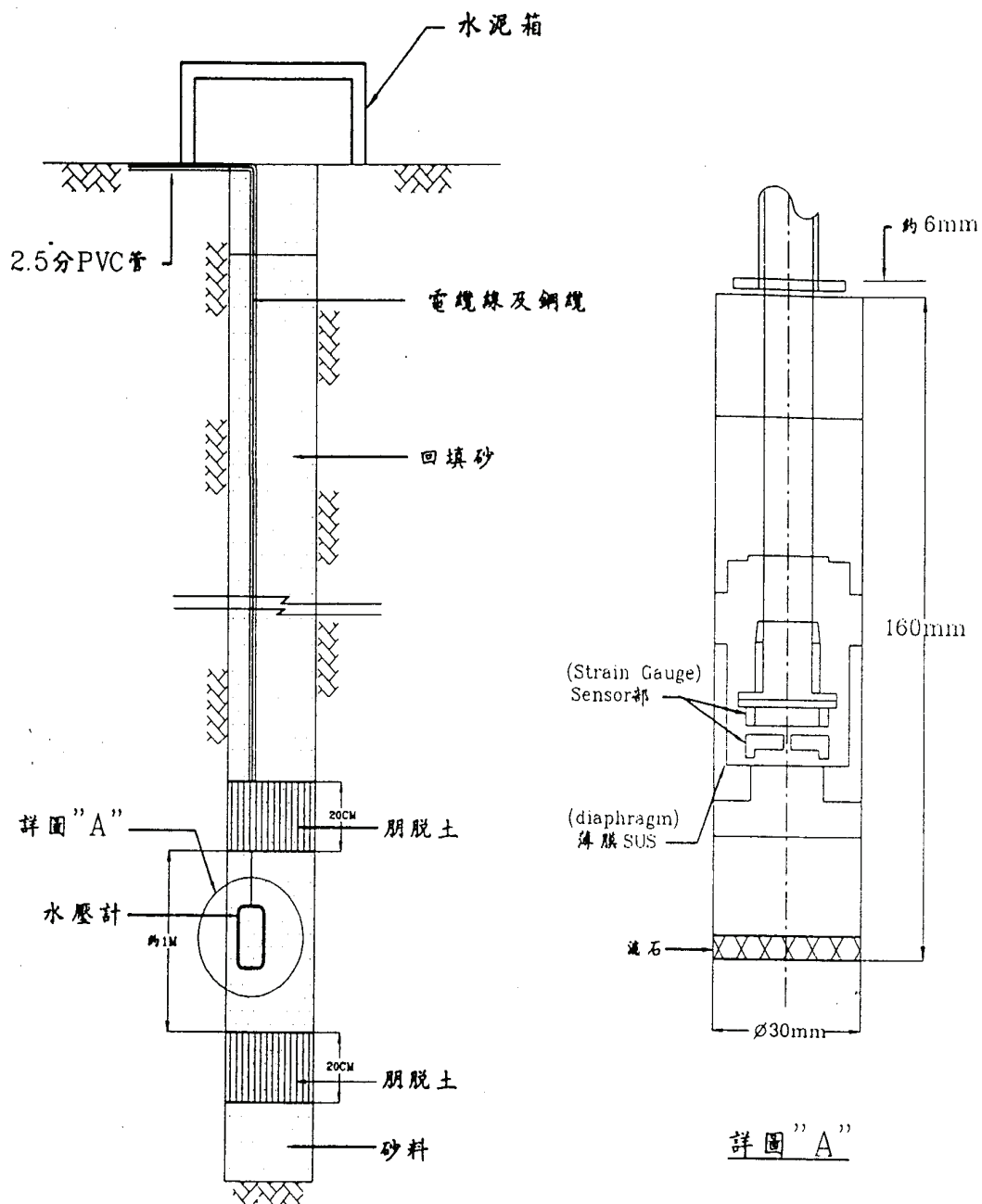


圖 3.2 電子式地下水壓計安裝示意圖

## 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 10 m 處，再將電纜線連線至觀測箱內便完成，其安裝示意圖如圖 3.3 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 210 m 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。
- (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 3.4、3.5 所示。

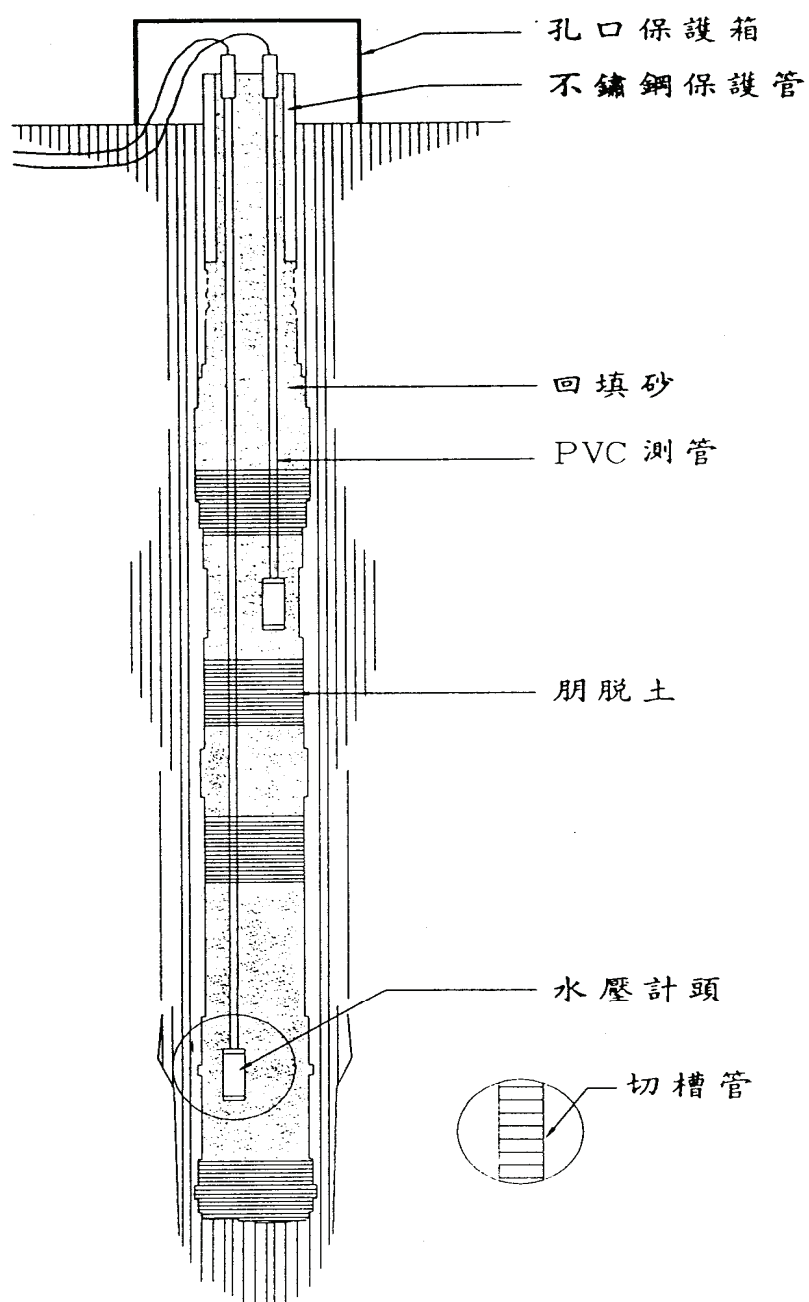


圖 3.3 開放式水壓計安裝示意圖

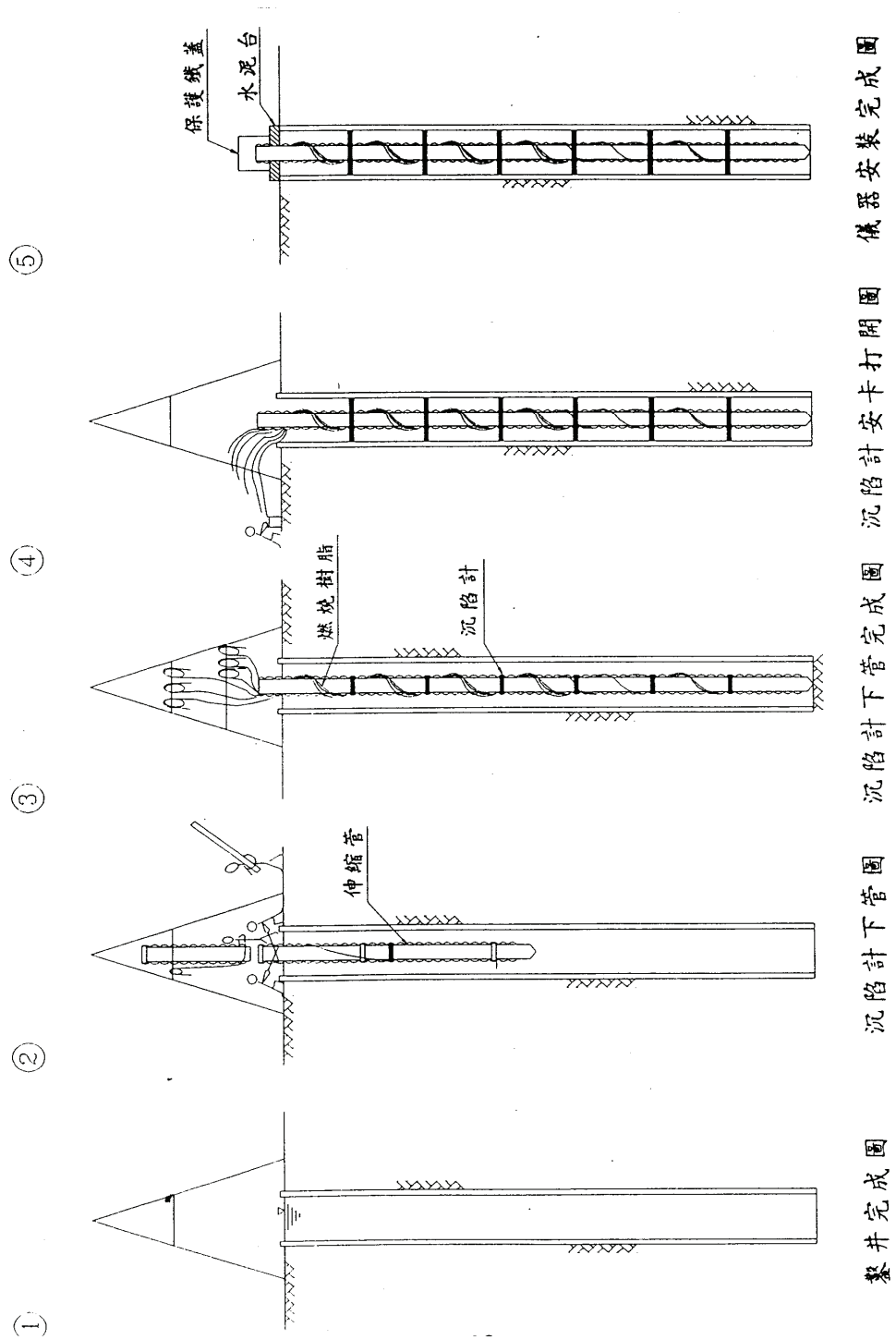


圖 3.4 沉陷計安裝示意圖

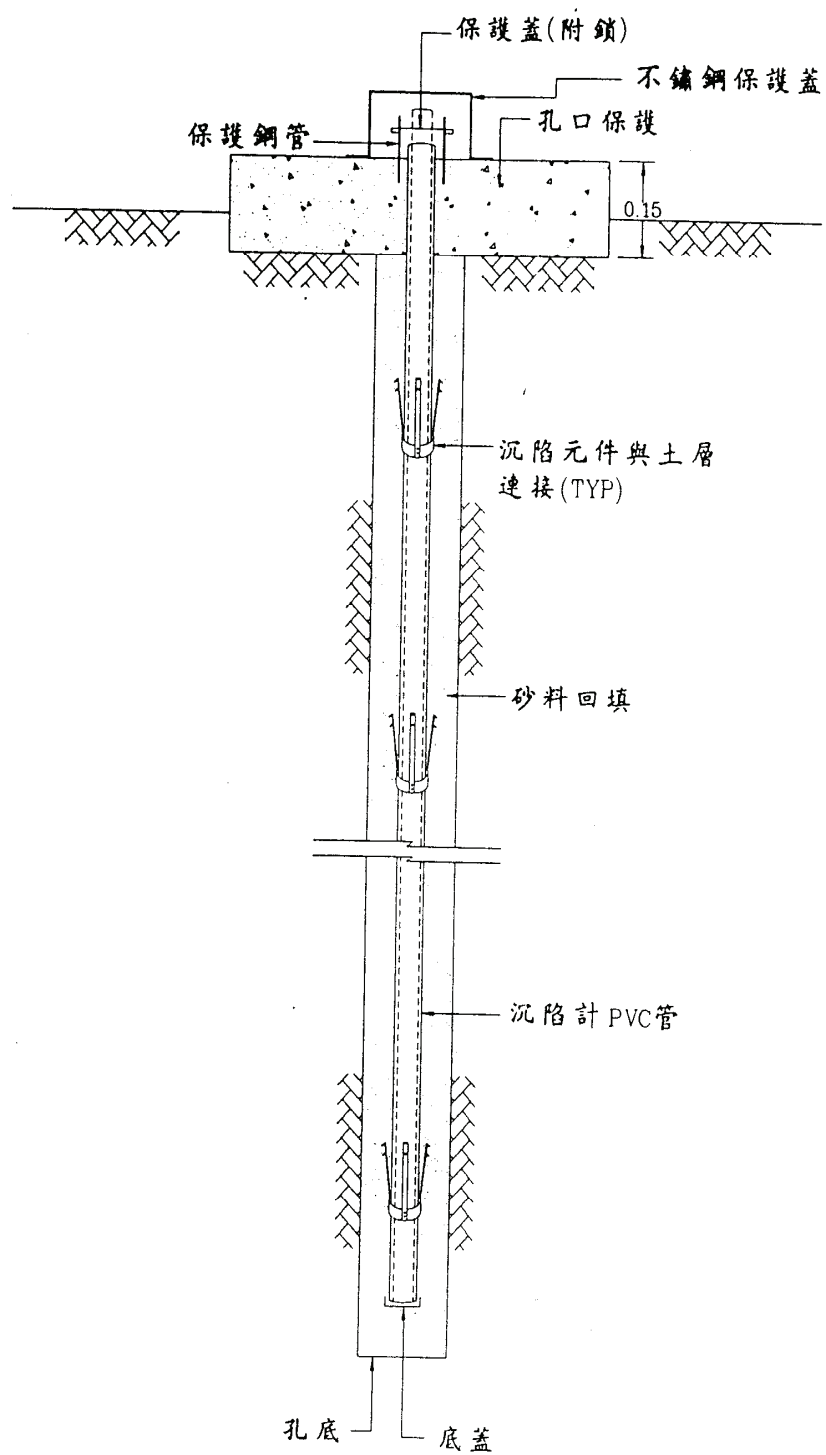


圖 3.5 磁感式層別沉陷計安裝示意圖

### 3.3 各港監測站

各港監測站設置概述如下：

#### 3.3.1 布袋港監測站

布袋港監測站選擇位於布袋港區之適當位置(如圖 3.6)，各監測井之座標如表 3-1。

於第二期海埔地之西北角隅設置 200m 沉陷監測站，分別為分層沉陷觀測井 1 孔，水壓計觀測井 2 孔(含電子式水壓計及開口式水壓計)，並採用手動及自動記錄方式，其內容如下：

1. 電磁場式分層沉陷觀測井 1 孔，其深度為 200 m，安裝沉陷計感應環 18 個，安裝深度如表 3-2 所示。

2. 電子式水壓計觀測井 2 孔

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、44 m，開放式水壓計安裝深度為 178、143.5、105、34 m，電子式水壓計則安裝於壓力水頭下 10 m 處，所有電子式水壓計經由配管接至同一個自動記錄器，水壓計安裝深度如表 3-3 所示。

於商港近南堤之砂石碼頭區亦設置 300 公尺深之地層下陷監測井，分別為分層沉陷觀測井 1 孔，水壓計觀測井 2 孔(含電子式水壓計及開口式水壓計)，採用手動記錄，其內容如下：

1. 電磁場式分層沉陷觀測井 1 孔，其深度為 300 m，安裝沉陷計感應環 18 個。

2. 電子式水壓計觀測井 2 孔

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。

表 3-1 布袋港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 |

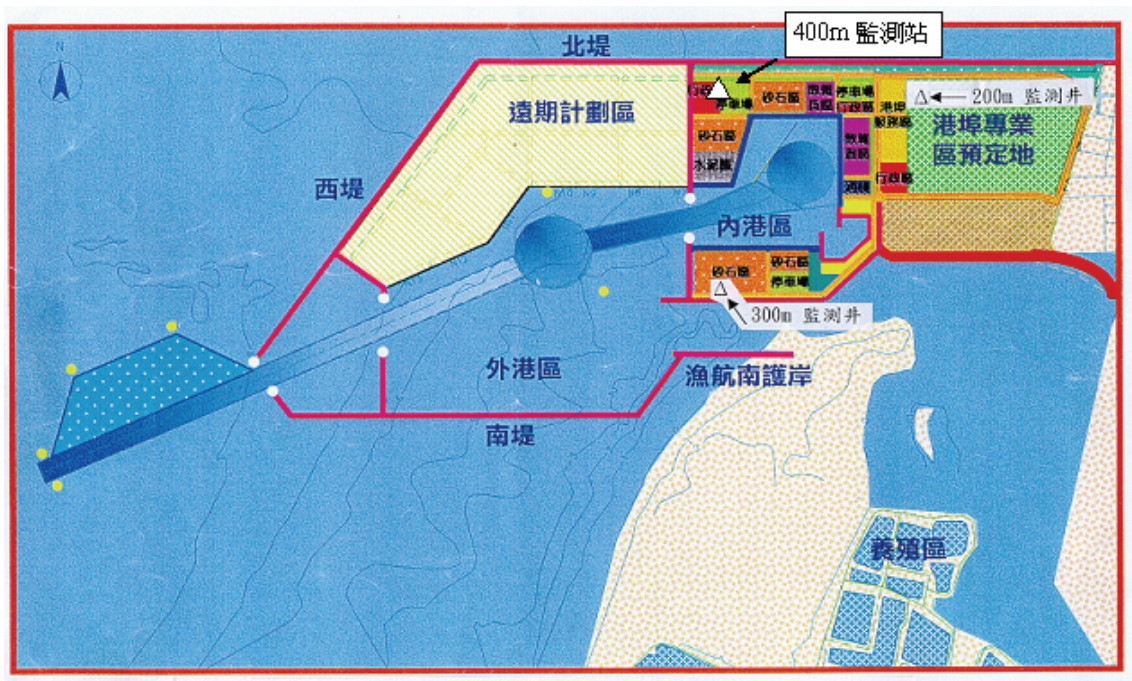


圖 3.6 布袋港監測站位置圖

表 3-2 布袋港沉陷計感應環安裝深度一覽表

| 序 號 | 埋設深度 (m) | 序 號 | 埋設深度 (m) |
|-----|----------|-----|----------|
| S1  | 8.262    | S10 | 110.4515 |
| S2  | 15.7775  | S11 | 120.4515 |
| S3  | 29.633   | S12 | 130.7385 |
| S4  | 40.5855  | S13 | 140.441  |
| S5  | 55.548   | S14 | 157.4565 |
| S6  | 65.563   | S15 | 170.4380 |
| S7  | 75.514   | S16 | 180.6975 |
| S8  | 85.469   | S17 | 190.4455 |
| S9  | 100.4705 | S18 | 200.4735 |

表 3-3 布袋港地下水壓觀測站水壓計埋設資料表

| 儀器編號 | 原廠編號  | 埋設深度    | 記錄器編號 | 初值<br>(飽和) | 較正係數     | 水頭高<br>(管口) | 備 考    |
|------|-------|---------|-------|------------|----------|-------------|--------|
| OW-1 | 35549 | 44 m    | CH2   | 27         | 0.00339  |             | 電子式水壓計 |
|      | 35550 | 68 m    | CH3   | 125        | 0.00331  |             | 電子式水壓計 |
|      | 39332 | 131 m   | CH5   | -134       | 0.00680  |             | 電子式水壓計 |
| OW-2 |       | 34 m    |       |            |          | 4.07 m      | 開放式水壓計 |
|      |       | 105 m   |       |            |          | 24.46 m     | 開放式水壓計 |
|      |       | 143 m   |       |            |          | 24.81 m     | 開放式水壓計 |
|      |       | 178 m   |       |            |          | 25.26 m     | 開放式水壓計 |
|      | 25986 | 14.07 m | CH1   | 115        | 0.000673 |             | 電子式水壓計 |
|      | 25985 | 34.46 m | CH4   | 296        | 0.000673 |             | 電子式水壓計 |
|      | 25987 | 34.81 m | CH6   | 147        | 0.000672 |             | 電子式水壓計 |
|      | 25983 | 35.26 m | CH7   | -315       | 0.000672 |             | 電子式水壓計 |

### 3.3.1 大鵬灣監測站

選擇位於大鵬灣原青洲濱海遊憩區內，靠近南平海堤前端處之適當位置（如圖 3.7），埋設監測儀器。

本監測井共計二孔，分別為分層沉陷觀測井 1 孔，水壓計觀測井 1 孔，可採用手動及自動方式記錄，其內容如下：

- (1) 電磁場式分層沉陷觀測井 1 孔，其深度為 193 m，安裝沉陷計感應環 23 個，深度如表 3-3 所示。
- (2) 電子式水壓計觀測井 1 孔，共有 5 組電子式水壓計，安裝於開放式水壓計管口內，開放式水壓計安裝深度為 202 m、142 m、105 m、58 m、35 m，而電子式水壓計則安裝於壓力水頭下 10 m 處，所有電子式水壓計經由配管接至同一個自動記錄器，水壓計安裝深度如表 3-4 所示。

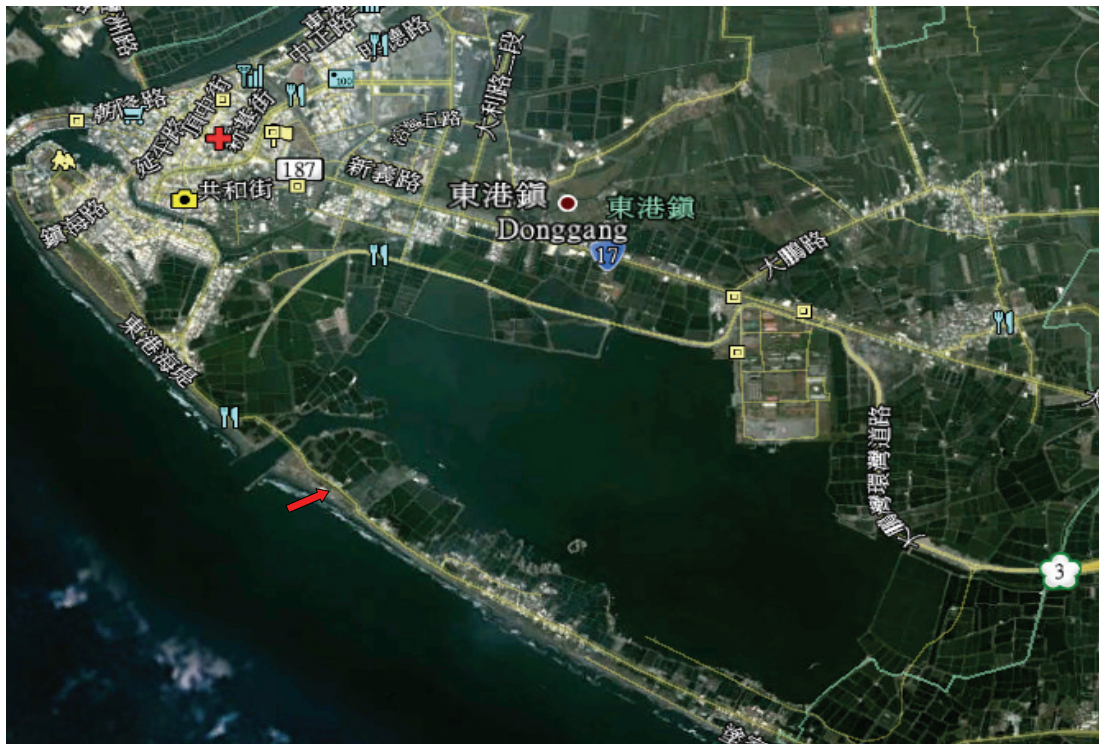


圖 3.7 大鵬灣監測站位置圖

表 3-4 大鵬灣沉陷計感應環安裝深度一覽表

| 序 號 | 埋設深度 (m) | 序 號 | 埋設深度 (m) |
|-----|----------|-----|----------|
| S1  | 189.2    | S13 | 109.1    |
| S2  | 188.2    | S14 | 104.1    |
| S3  | 177.2    | S15 | 101.2    |
| S4  | 173.2    | S16 | 90.1     |
| S5  | 161.0    | S17 | 62.2     |
| S6  | 155.2    | S18 | 55.2     |
| S7  | 146.1    | S19 | 51.3     |
| S8  | 138.2    | S20 | 31.3     |
| S9  | 129.1    | S21 | 26.4     |
| S10 | 125.0    | S22 | 3.7      |
| S11 | 120.0    | S23 | 0.6      |
| S12 | 116.0    |     |          |

表 3-5 大鵬灣地下水壓觀測站水壓計埋設資料表

| 儀器編號 | 原廠編號  | 埋設深度    | 記錄器編號 | 初值<br>(飽和) | 校正係數     | 水頭高<br>(管口) | 備 考    |
|------|-------|---------|-------|------------|----------|-------------|--------|
| EW   | 41894 | 13.73 m | CH1   | 242        | 0.000682 |             | 電子式水壓計 |
|      | 41895 | 13.73 m | CH2   | 276        | 0.000667 |             | 電子式水壓計 |
|      | 41897 | 15.26 m | CH3   | 225        | 0.000670 |             | 電子式水壓計 |
|      | 41898 | 14.58 m | CH4   | 105        | 0.000671 |             | 電子式水壓計 |
|      | 41896 | 17.85 m | CH5   | 245        | 0.000672 |             | 電子式水壓計 |
|      |       | 35 m    |       |            |          | 3.73 m      | 開放式水壓計 |
|      |       | 58 m    |       |            |          | 3.73 m      | 開放式水壓計 |
|      |       | 105 m   |       |            |          | 5.26 m      | 開放式水壓計 |
|      |       | 142 m   |       |            |          | 4.58 m      | 開放式水壓計 |
|      |       | 202 m   |       |            |          | 7.85 m      | 開放式水壓計 |

### 3.3.3 安平港監測站

安平港監測井之設置地點位於安平港區第 18、19 號碼頭後線綠帶區之位置，其地點如圖 3.8 所示。

監測井共計二孔，電磁場式分層沉陷觀測井及電子式水壓計觀測井各 1 孔，水壓計觀測井可採用手動及自動方式記錄，其內容如下：

1. 電磁場式分層沉陷觀測井 1 孔，其深度為 200 m，安裝沉陷計感應環 22 個，安裝深度如表 3-5 所示。
2. 電子式水壓計觀測井 1 孔，本水壓監測井共有 5 組電子式水壓計，安裝於開放式水壓計管口內，開放式水壓計安裝深度為 187、145、105、75、40.5 m，而電子式水壓計則安裝於壓力水頭下 10 m 處，所有電子式水壓計經由配管接至同一個自動記錄器。

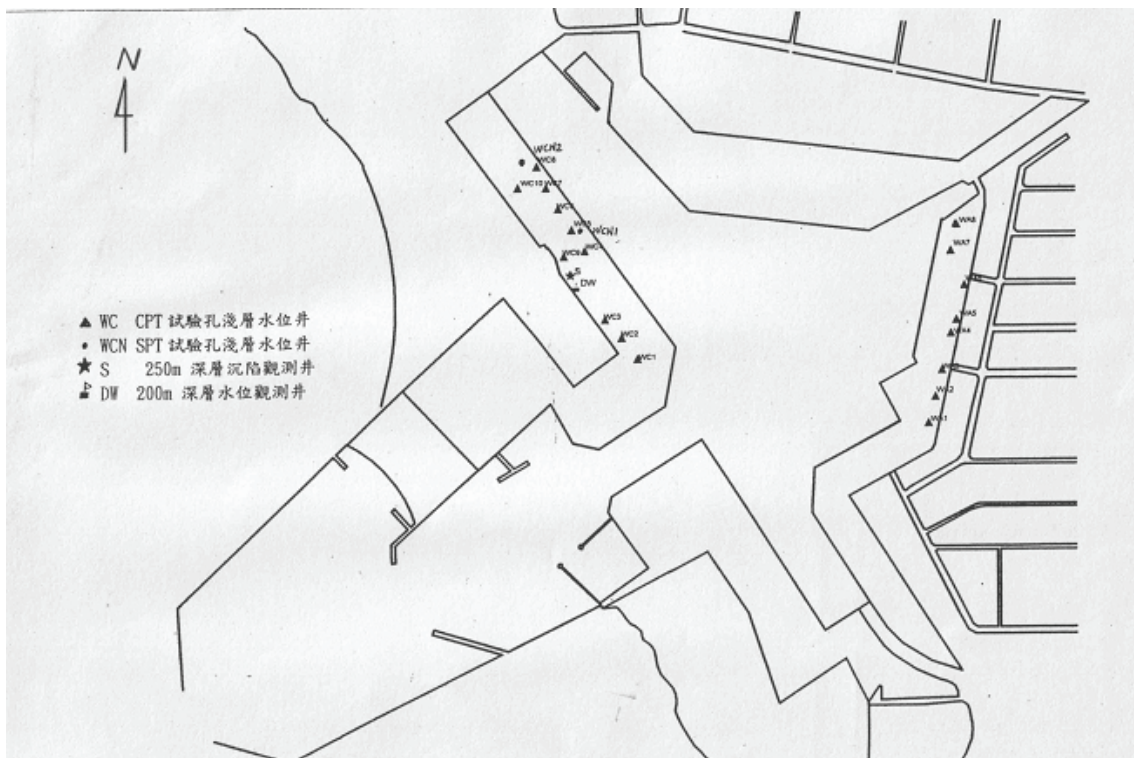


圖3.8 安平港監測站位置圖

表 3-6 安平港 18~19 號碼頭沉陷磁環安裝深度表

| 序 號 | 埋設深度 (m) | 序 號 | 埋設深度 (m) |
|-----|----------|-----|----------|
| S1  | 249.5    | S12 | 110.6    |
| S2  | 248.8    | S13 | 94.3     |
| S3  | 239.8    | S14 | 79.9     |
| S4  | 231.4    | S15 | 56.0     |
| S5  | 221.2    | S16 | 52.6     |
| S6  | 211.2    | S17 | 40.2     |
| S7  | 200.5    | S18 | 30.8     |
| S8  | 181.0    | S19 | 20.8     |
| S9  | 175.0    | S20 | 10.9     |
| S10 | 150.0    | S21 | 3.8      |
| S11 | 134.0    | S22 | 0.6      |

### 3.3.4 臺中港監測站

臺中港監測站選擇位於臺中港區 26 號碼頭區綠地之適當位置 (如圖 3-9)。本監測井共計二孔，分別為分層沉陷觀測井 1 孔，水壓計觀測井 1 孔(含電子式水壓計及開口式水壓計)，並採用手動及自動記錄方式，其內容如下：

1. 電磁場式分層沉陷觀測井 1 孔，其深度為 200 m，安裝沉陷計感應環 18 個，安裝深度如表 3-6 所示。
2. 電子式水壓計觀測井 1 孔，鑽探孔 173 m，監測井共有 5 組電子式水壓計，安裝於開放式水壓計管口內，安裝深度為 29、63、100、145、173 m，電子式水壓計則安裝於壓力水頭下 10 m 處，所有水壓計經由配管接至同一個自動記錄器。



圖 3.9 臺中港監測站示意圖

表 3-7 臺中港沉陷計感應環安裝深度一覽表

| 序 號 | 埋設深度 (m) | 序 號 | 埋設深度 (m) |
|-----|----------|-----|----------|
| S1  | 0.7      | S11 | 139.1    |
| S2  | 3.6      | S12 | 157.2    |
| S3  | 10.5     | S13 | 164.3    |
| S4  | 18.8     | S14 | 179.8    |
| S5  | 27.5     | S15 | 182.5    |
| S6  | 31.6     | S16 | 189.8    |
| S7  | 55.0     | S17 | 199.7    |
| S8  | 73.2     | S18 | 200.7    |
| S9  | 90.9     |     |          |
| S10 | 110.4    |     |          |

## 第四章 監測結果與試驗分析

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，因此地質、雨量、地下水位、地層下陷存在著某種相關性，茲就各港分別說明其量測結果及其相關性。

由於開發中之港灣地區，有關土層沉陷問題往往因相關資料不足，而無法估算港區土層之沉陷速率及沉陷量，本計畫並於布袋港採取港區 30~150 公尺深之粘性土樣進行室內單向度壓密試驗，並以不同方法計算壓密係數，探討其差異，進而得到較準確的數據，以供相關單位參考。

### 4.1 布袋港

#### 4.1.1 監測井地質分析

布袋港監測站在深度 200 公尺之土層，根據現場鑽探資料所示(如圖 4.1)，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 0~9.5 m 且含有貝屑，SPT-N 值為 8~17 間，表土層有 0.45 m 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 9.5~11.6 m 深，其 N 值為 3，屬軟弱土層。
3. 灰色細砂(SP)：分佈於地表下 11.6~14.1 m，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 14.1~32.8 m，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 32.8~36.5 m，N 值平均為 25 之中等緊密土層。

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

土層約 38~40 cm。

20.灰色沉泥(ML)：分佈於地表下 157~164.35 m，N 值為 60 時貫入土層約 4 cm。

21.灰色細砂含灰色粘土(SM+CL)：分佈於地表下 164.35~170.15 m，SPT-N 值在 60 時貫入土層約 4 cm。

22.灰色粘土(CL)：分佈於地表下 170.15~172.5 m，SPT-N 值在 100 時貫入土層約 7 cm。

23.灰色細砂(SM)：分佈於地表下 172.5~175.8 m，N 值在 100 時貫入深度約 7 cm。

24.灰色粘土(CL)：分佈於地表下 175.8~200 m，N 值為在 100 時貫入土層約 5~13 cm。

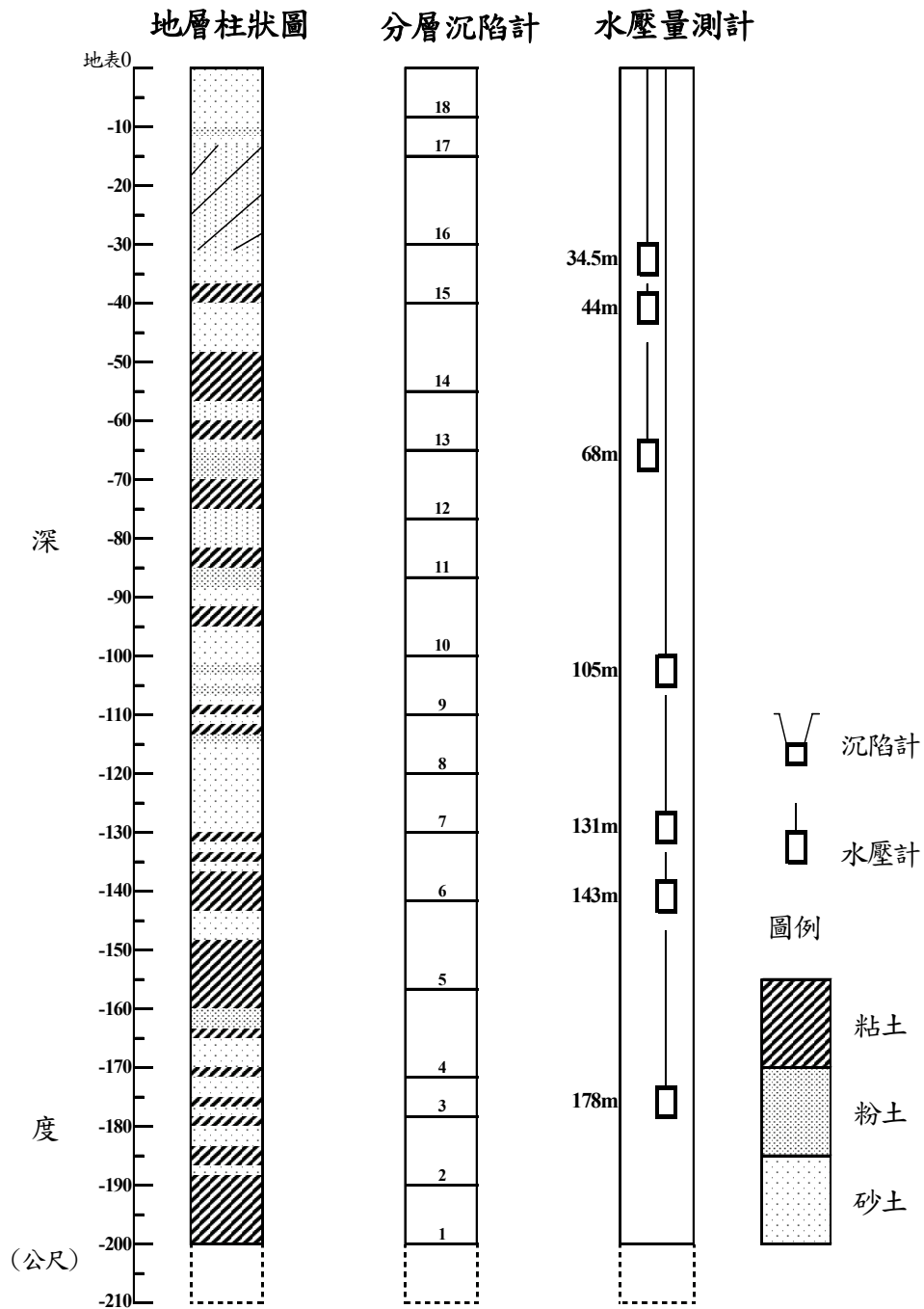
#### 4.1.2 地下水位分析

##### 1. 200m 分層水壓觀測站

設於布袋港區第二期海埔地西北角隅，共 7 支水壓計，其深度分別為 34 m、44 m、68 m、105 m、131 m、143 m、178 m，自 86 年 7 月 22 日開始以自動量測系統量測，量測中因水壓自動量測儀曾故障，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 4.2a 及圖 4.2b 所示。由於其中 34 m、105 m、143 m、178 m 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 月至 95 年 12 月每月量測一次，自 94 年 1 月起由於人力有限，故每 2 個月量測一次，其量測結果如圖 4.2c 所示。

##### 2. 300m 分層水壓觀測站

設於商港近南堤之砂石碼頭區，共 8 支水壓計，其深度分別為 35m、50m、85m、103m、150m、200m、250m、303m，自 90 年 9 月開始量測，如圖 4.3 所示。



**圖 4.1 布袋港分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖**

由圖 4.2a 顯示：34 m 處之水位變化介於-3.1~-3.9 m 之間反復性之震盪，並無多大變化，僅在 88 年 8~10 月及 90 年 9 月雨量較多時，

水位稍微上升。44 m 處之水位，除了 86 年 10 月旱季時，水位較低為 -7.4 m 外，其餘時期水位皆在 -6~-7 m 之間反復震盪，而至 87 年 5~8 月雨量較多，水位稍為上升，至 90 年 9 月上升到 -5 m。68 m 之水位介於 -6.4~-10.9 m 之間，其中因 87 年降雨量豐富，故該年之 11~12 月水位最高為 -6.4 m，而 91 年因降雨量太少，故該年 6 月之水位降到最低為 -10.9 m，且有逐年下降趨勢。

由圖 4.2a 顯示：105 m 處之水位變化極大，最高水位 -16.6 m，最低水位 -27.6 m，91 年及 93 年降雨量較少時，水位明顯降低。131 m 處之水位變化亦很大，最高水位 -17 m，最低水位可能為 -24 m，其水壓大小及變化與 105 m 處屬同一含水層，但自 87 年 4 月以後因水壓計損壞而缺少資料。143 m 及 178 m 水位大小及變化亦很相當，亦屬同一含水層，其最高水位為 -17.8 m，最低水位為 -26 m，其變化與 105 m、131 m 處相似。

綜合 200 m 水位監測站之地下水位資料，可分為 4 個層次，34 m 水位為第 1 含水層之水位，44 m、68 m 水位為第 2 含水層，105 m 及 131 m 水位為第 3 含水層，143 m、178 m 水位為第 4 含水層。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 層地下水位低且變化極大，超抽地下水現象明顯，而且以旱季時，水位相對較低，表降雨量減少時，超抽地下水更為嚴重。

### 4.1.3 分層地層下陷分析

#### 1. 200 m

於布袋港區第二期海埔地西北角隅之位置，設立 200 m 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、200 m 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，資料值由鈰鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 4.4 為分層個別下陷量圖，圖 4.5 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖顯示，從 86 年 2 月至 99 年 11 月之 13 年 8 個月期間，布袋港地表下 8 m 至 200 m 間之沉陷總量為 563 公厘，而其中 140~200 m 之沉陷量 274 公厘，佔總沉陷量之 48% 以上，由此資料顯示，布袋港之沉陷屬於深層沉陷，且較 200 m 更深之處仍可能有沉陷發生，因此布袋港之總沉陷量應比監測所量測之壓縮總量還大。

## 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 4.6 所示，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 4.7 分層觀測圖顯示，自 89 年 10 月~99 年 11 月止，10 年之沉陷總量約 65.2 公分，分別為 90 年沉陷量約 7.4 公分、91 年沉陷量約 7.1 公分、92 年沉陷量約 11.6 公分、93 年沉陷量約 13.6 公分，近 6 年(94 至 99)總沉陷量約 23.3 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 年及 93 年沉陷增大許多。各分層沉陷量大約可區分為 7~66m、66~102m、102~190m、190~300m 等 4 個層次來分析，其中以 66~102m 之累積沉陷量 23.0 公分，所佔比例最大，約佔總沉陷量之 37%，102~190m 之沉陷量為 27 公分約佔總沉陷量之 44%，190~300m 之沉陷量較少為 1.2 公分，約佔總沉陷量之 2%，綜合以上得知，66~190m 深度之累積沉陷量為 50 公分約佔總沉陷量之 80%，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，因此需要長期監測，再進一步探討原因。

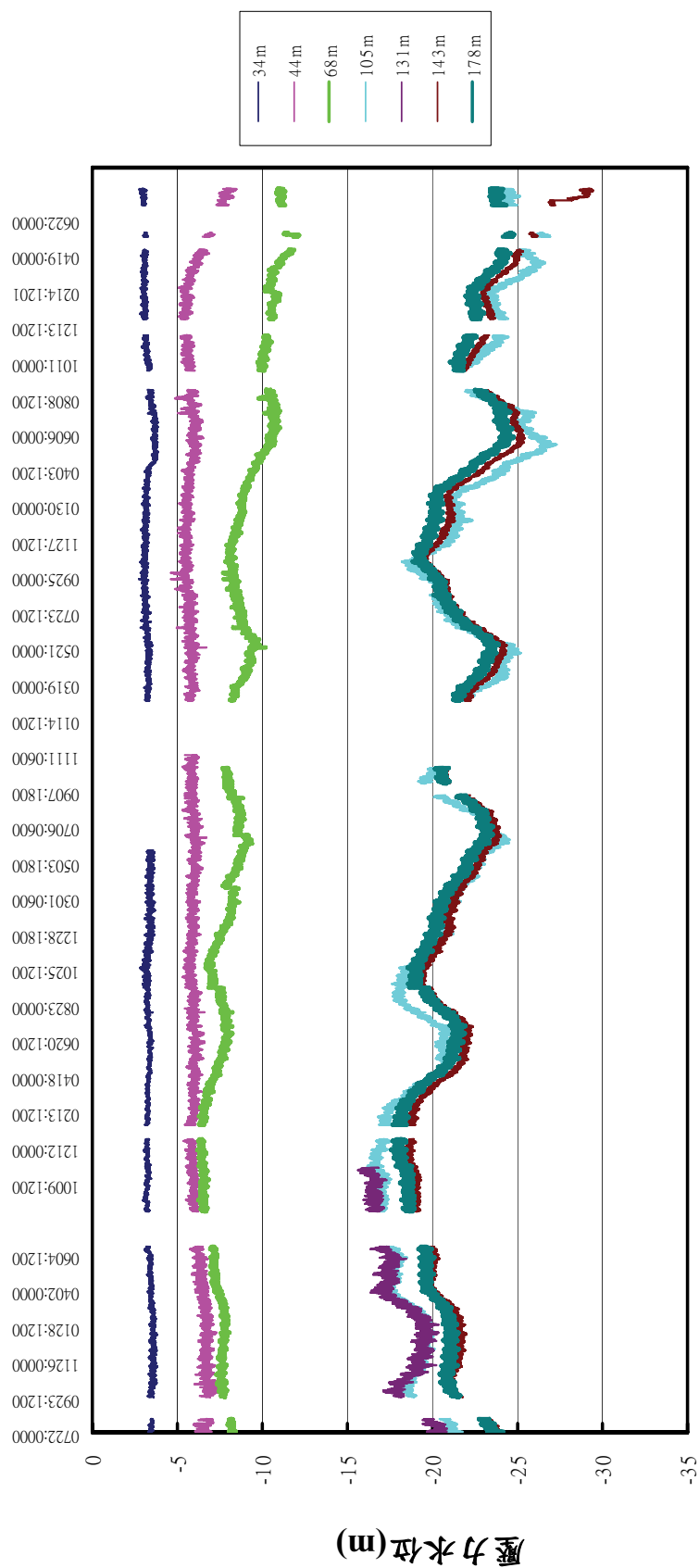
### 3. 400m

布袋港 400m 深之水準基站，自民國 92 年設置於商港區的西北角隅，為一個長期之地層下陷自動監測站，設定時間為每 6 小時自動記錄一筆，自 92 年 9 月至 97 年 4 月止，總累積下陷量約為 16.5 公分，如圖 4.8a 所示。98 年 7 月至 99 年 7 月之累積下陷量如圖 4.8b。

#### 4.1.4 相關性分析

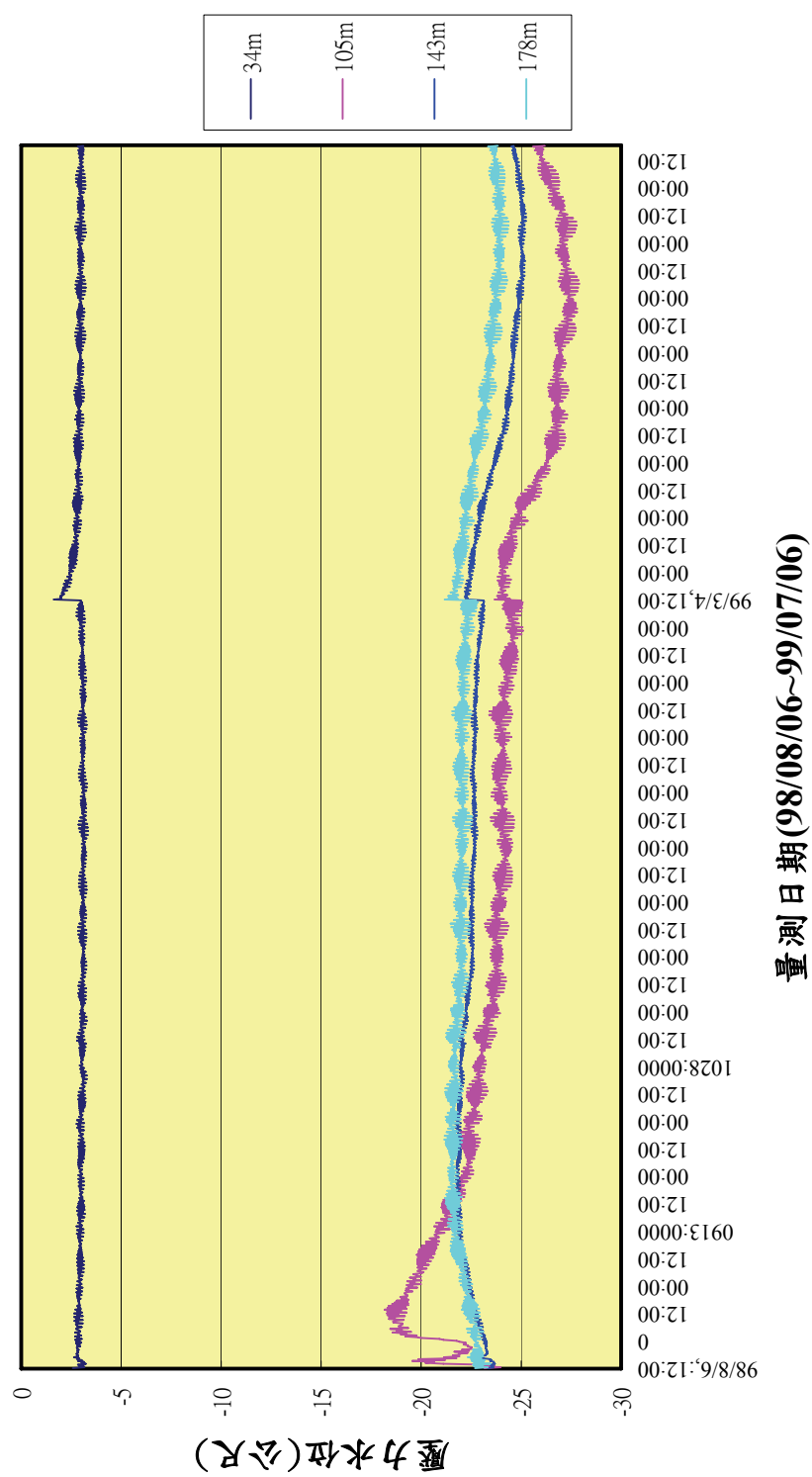
綜合上述地質、雨量、分層地下水位及分層地層下陷之分析，本節簡要之探討其間之相關性。布袋港位於嘉義沿海地區，其雨量依據中央氣象局記錄，86~91 年之降雨量大多集中在 6、7、8 月，其餘月份雨量較少，唯 87 年降雨量從 2 月份開始便增多，但 89 年之年降雨量僅有 1350 毫米，而 90 年 9 月份之降雨量則高達 1,320 毫米，自 94 年 5 月起嘉義地區之降雨量即有明顯增加趨勢。

淺層地下水位屬於局部性，其受港區抽水之影響，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。



日期 (86/7/22--92/08/14)

圖 4.2a 布袋港分層水位變化圖(自記式)



布袋港分層水位變化200m(手動量測)

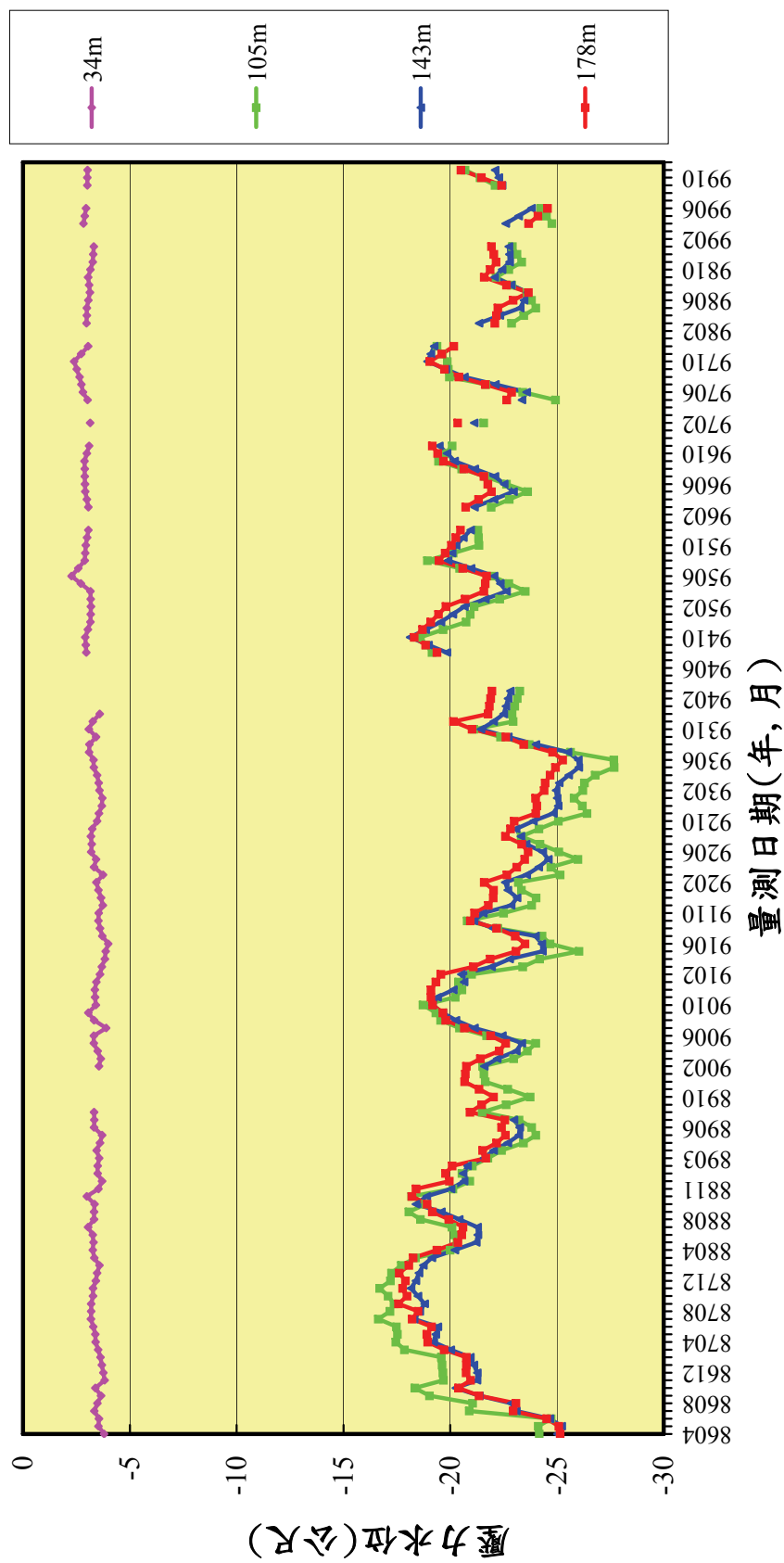


圖 4.2c 布袋港 200m 分層水位變化圖(手動量測)

# 布袋港(300m)分層水位變化(手動量測)

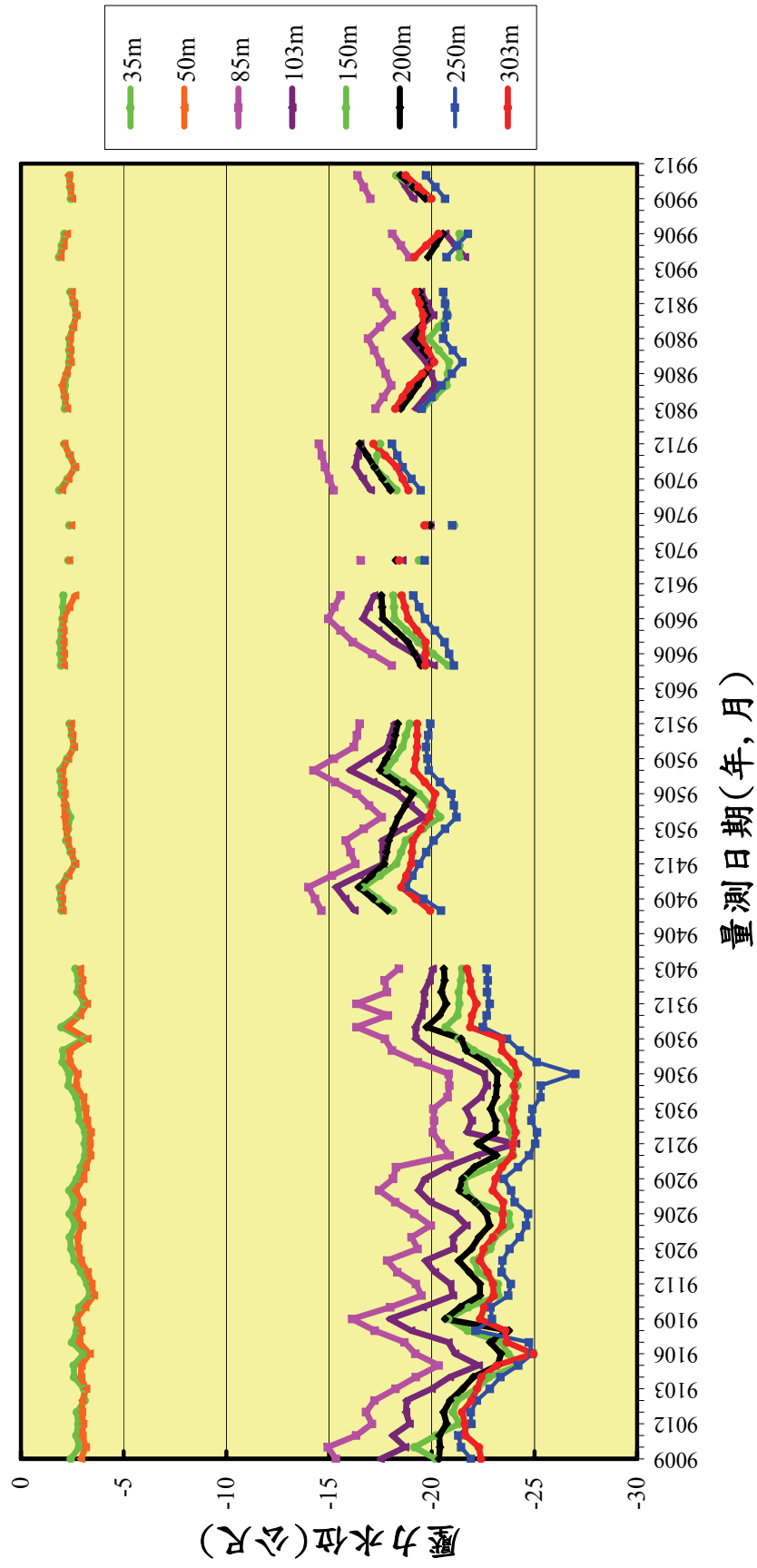


圖 4.3 布袋港 300m 分層水位變化(手動量測)

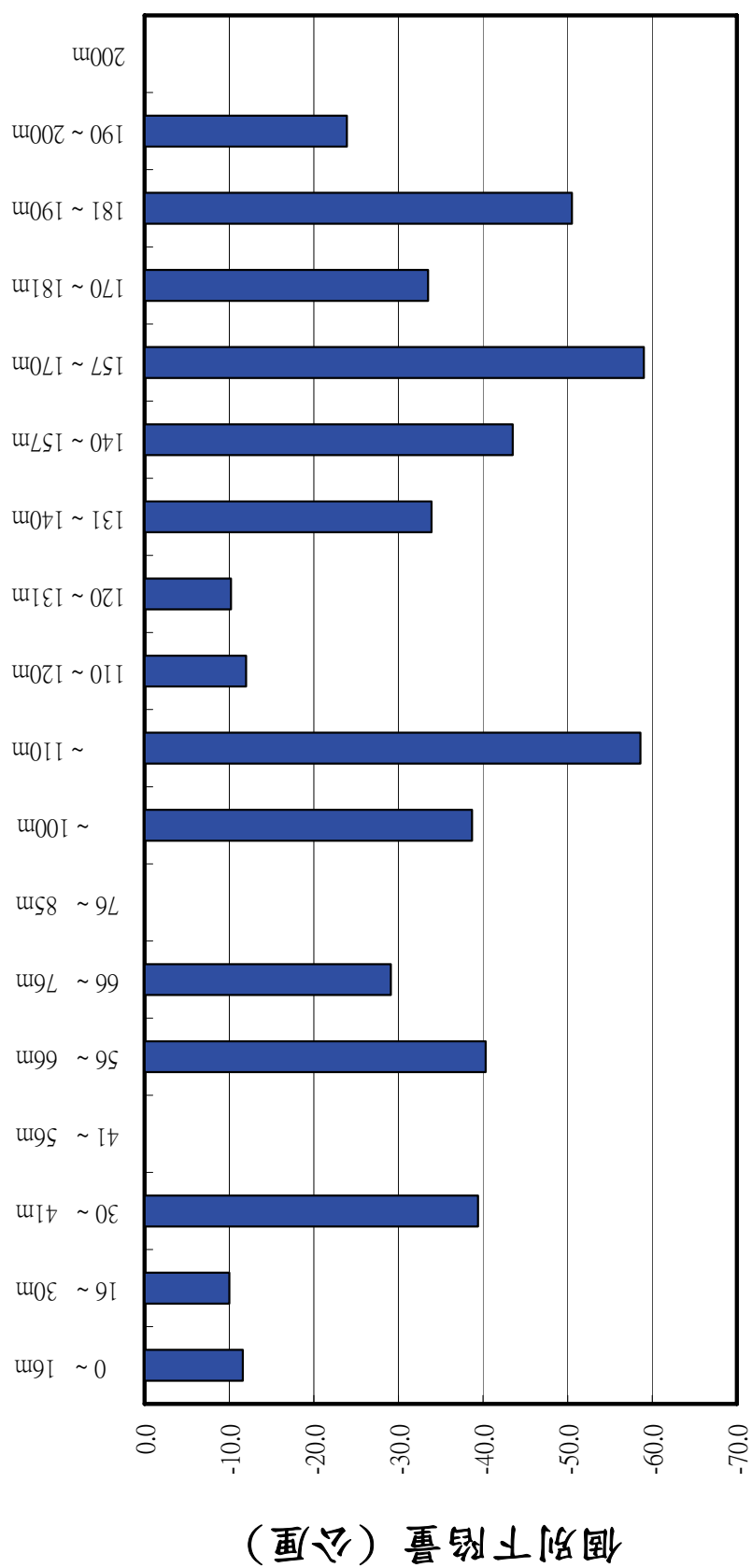


圖 4.4 布袋港分層個別下陷量圖(200m)

布袋港(200m)地層分層下陷觀測圖

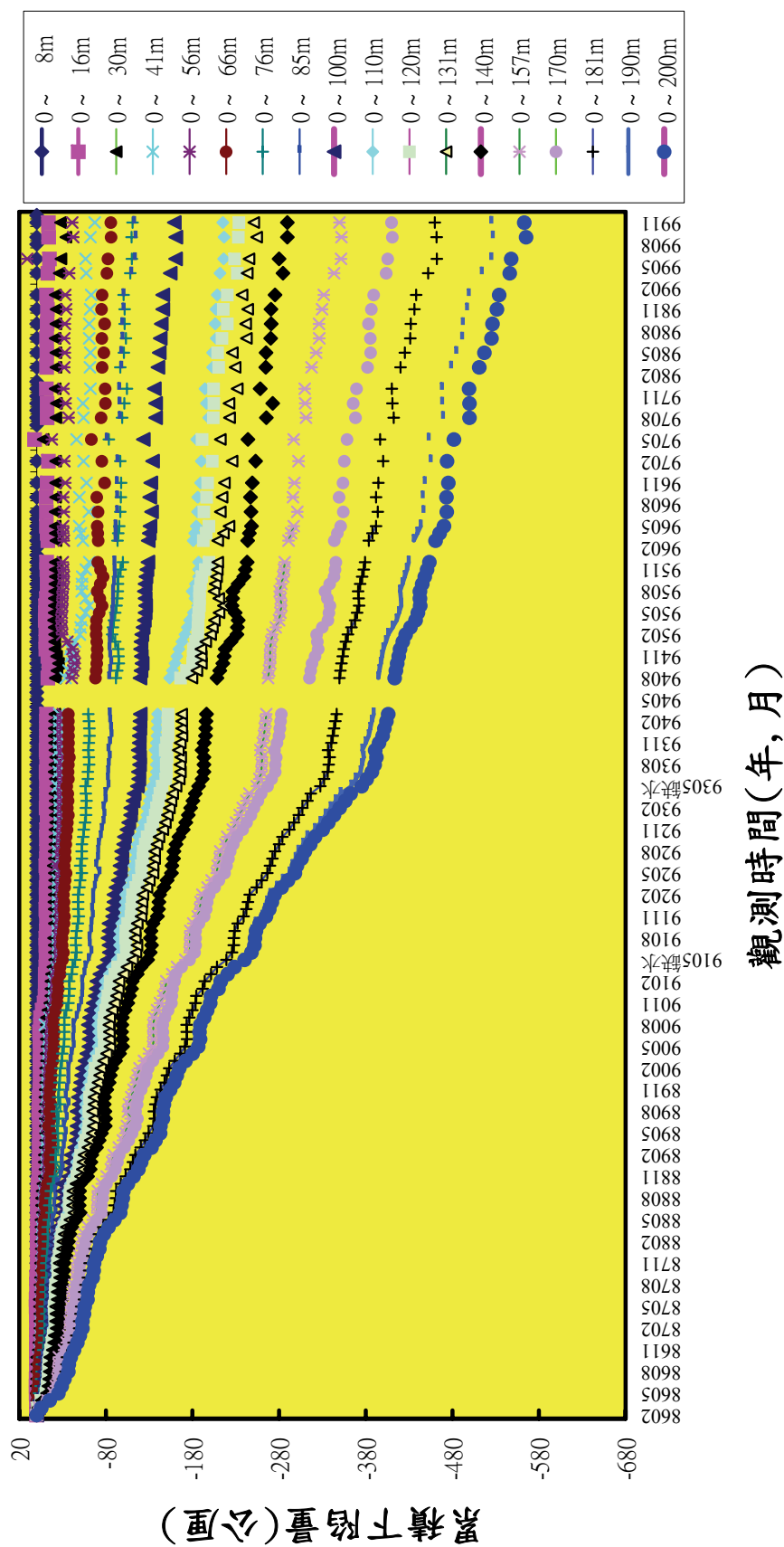
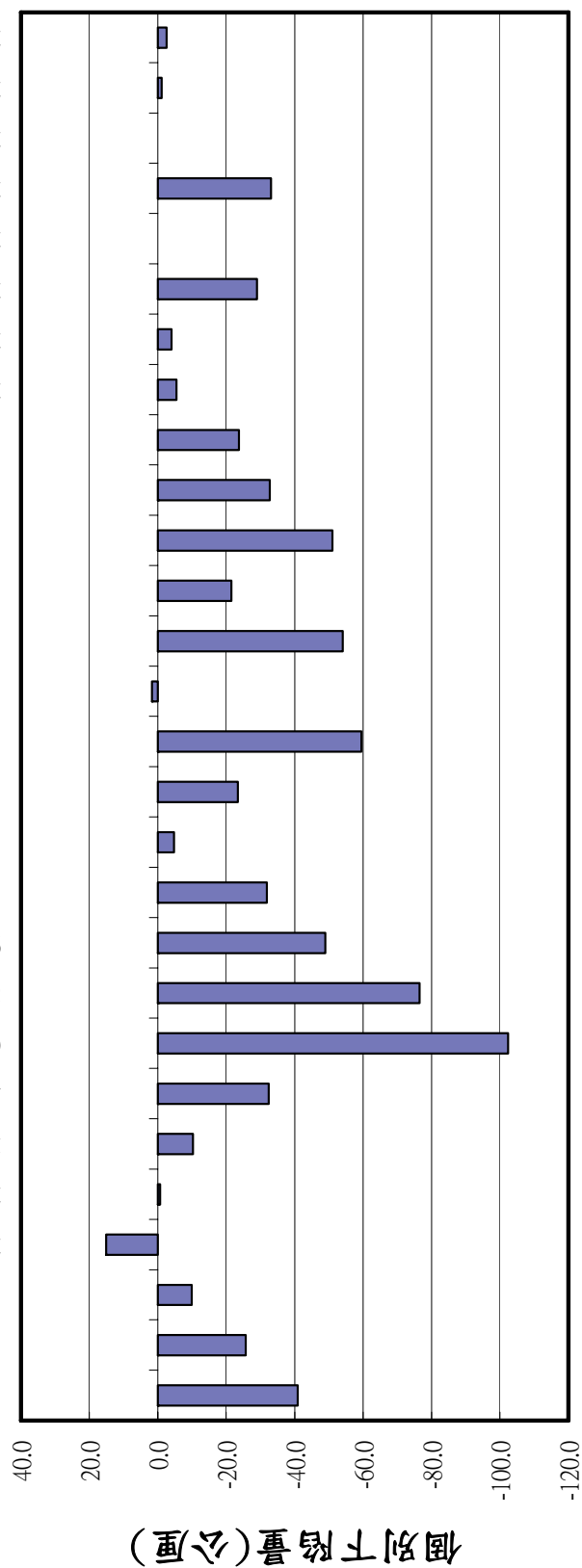


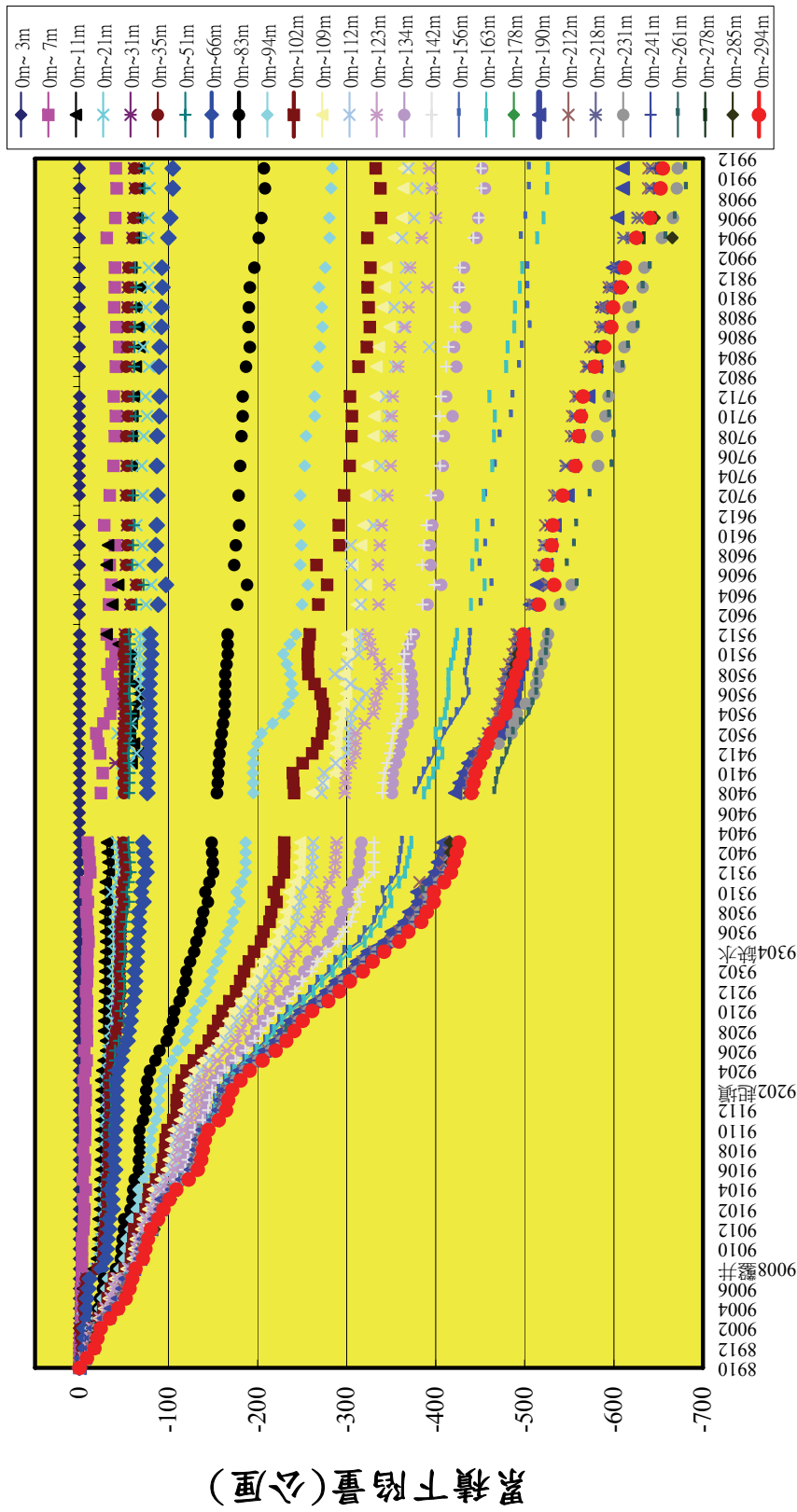
圖 4.5 布袋港分層累積下陷量圖(200m)

布袋港(300m-新)分層個別下陷量圖



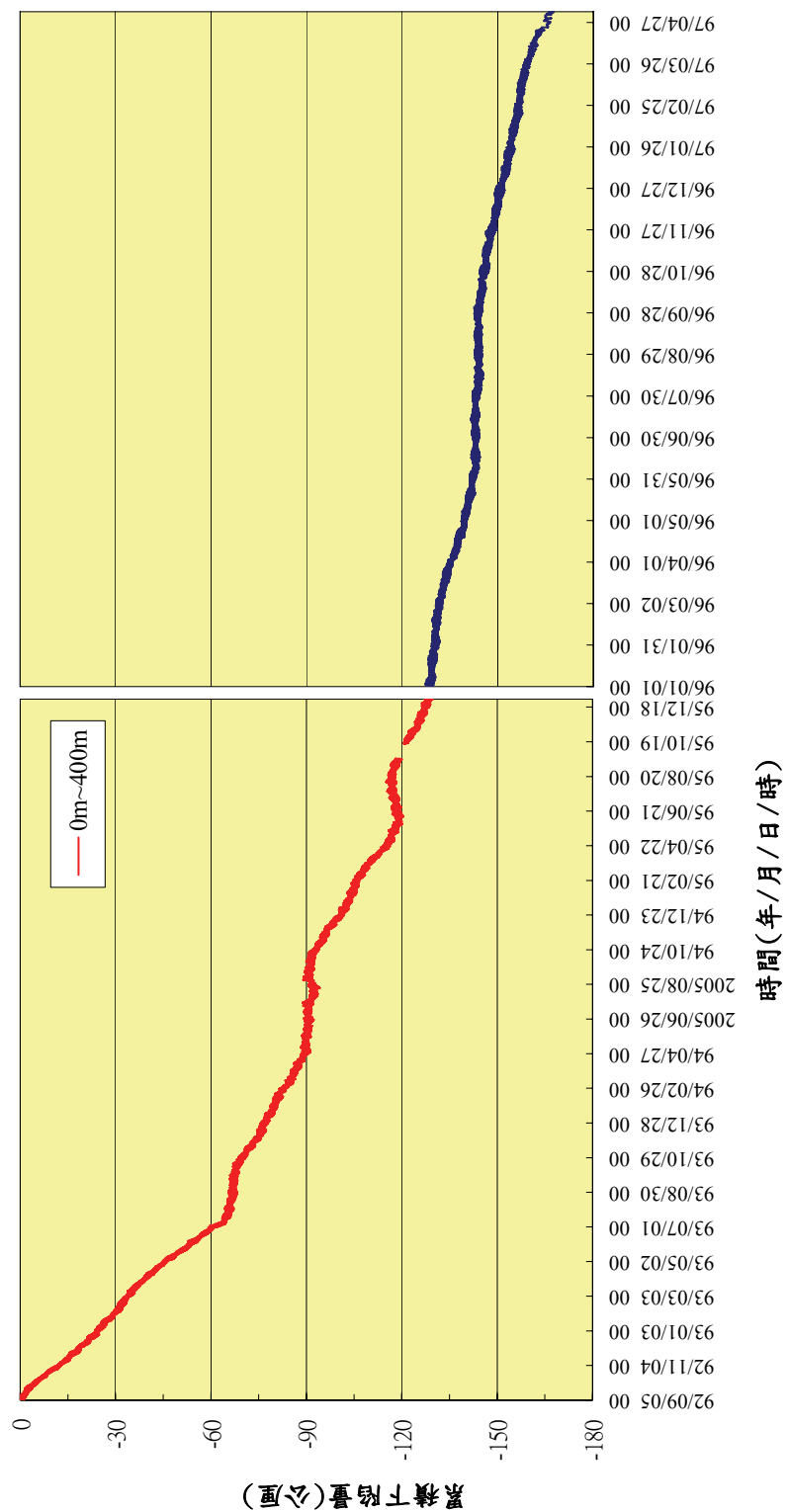
沉陷磁環深度(公尺)

圖 4.6 布袋港分層個別下陷量圖(300m)



觀測時間(年, 月)

圖 4.7 布袋港分層累積下陷量圖(300m)



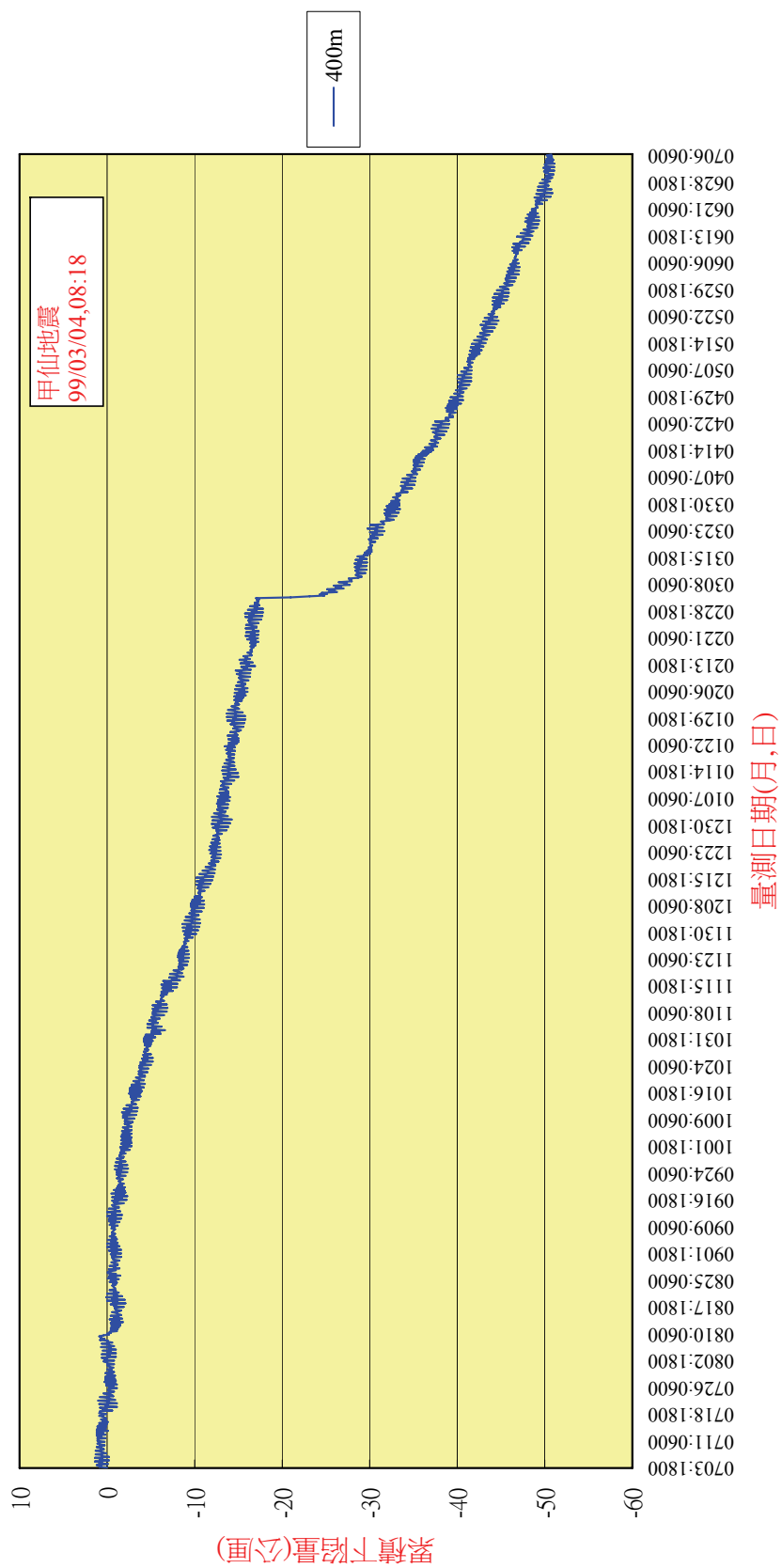


圖 4.8b 布袋港(400m)水準基準站累積下陷量圖(98/07/03~99/07/06)

#### 4.1.5 布袋港之壓密係數

經採取布袋港區粘性土樣進行室內單向度壓密試驗結果，本節以壓密試驗試體編號 T-6，深度 112.26m 之土樣為例(如表 4-1)，並依第二章之 Sridharan 矩形雙曲線方法來計算壓密係數  $C_v$  值(如圖 4.9)。

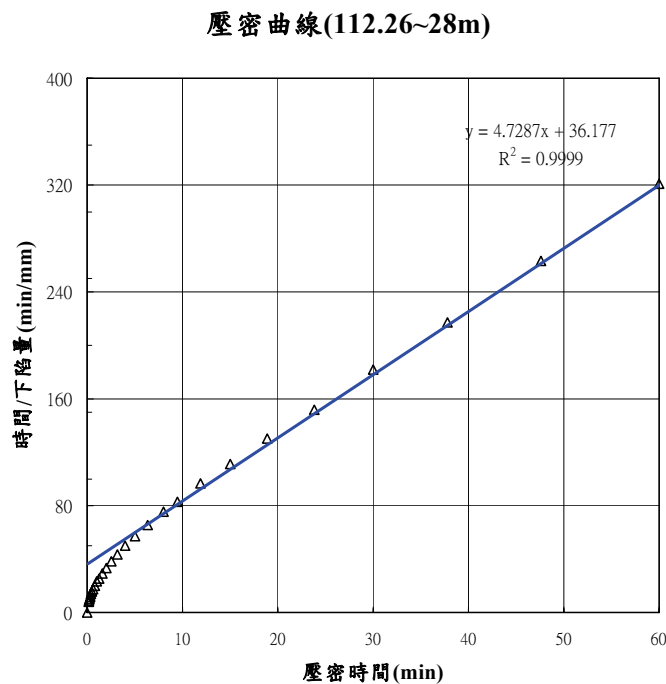


圖 4.9 矩形雙曲線壓密曲線圖

由 Sridharan 之雙曲線求得斜率  $m=4.7287$ ，截距  $c=36.17$ ，代入前述之計算式， $C_v = \frac{0.24mH^2}{C} = 3.137 \frac{mm^2}{min} = 1.649 \frac{m^2}{yr}$ ，得到  $C_v = 1.649 \frac{m^2}{yr}$ 。

布袋港採取土層進行壓密試驗所得結果如表 4-1 所示，使用不同方法計算之壓密係數亦有所差別， $C_{v,C}$  值是以 Casagrande 法求得， $C_{v,T}$  值是以 Taylor 法求得，由表 4-1 顯示，採用 Sridharan 法求得之  $C_v$  值介於 Casagrande 法及 Taylor 法之間，且以 Taylor 法之  $C_v$  值最大。

表 4-1 布袋港土層單向度壓密係數一覽表

單位：m<sup>2</sup>/yr

| 樣號            | 荷重  | C <sub>V,C</sub> | C <sub>V,T</sub> | C <sub>V,R</sub> | 樣號             | 荷重  | C <sub>V,C</sub> | C <sub>V,T</sub> | C <sub>V,R</sub> |
|---------------|-----|------------------|------------------|------------------|----------------|-----|------------------|------------------|------------------|
| T-1<br>33.03  | 0.5 | 6.09             | 11.14            | 7.15             | T-5<br>112.02m | 0.5 | 4.3              | 4.95             | 4.44             |
|               | 1   | 6.47             | 13.75            | 6.6              |                | 1   | 6.02             | 12.34            | 9.04             |
|               | 2   | -                | 12.09            | 7.93             |                | 2   | 6.1              | 11.14            | 9.77             |
|               | 4   | -                | 10.61            | 7.6              |                | 4   | 6.27             | -                | 5.56             |
|               | 8   | 5.18             | 10.1             | 8.8              |                | 8   | 7.67             | -                | 9.14             |
|               | 16  | 7.14             | 11.14            | 8.62             |                | 16  | 7.4              | 7.74             | 7.29             |
|               | 32  | 6.9              | 12.35            | 11.12            |                | 32  | 8.02             | 9.2              | 8.46             |
|               | 48  | -                | -                | -                |                | 48  | -                | 10.1             | 6.45             |
| T-2<br>57.03m | 0.5 | 7.96             |                  | 13.33            | T-6<br>112.26m | 0.5 | 1.04             | 1.78             | 1.61             |
|               | 0.5 | 6.47             |                  | 7.64             |                | 1   | 1.06             | 1.86             | 1.54             |
|               | 1   | 6.9              | 11.72            | 8.84             |                | 2   | 1.52             | 1.78             | 1.65             |
|               | 2   | 6.68             | 11.14            | 9.15             |                | 4   | 2.07             | 3.17             | 3.13             |
|               | 4   | 7.67             | 11.72            | 9.36             |                | 8   | 3.23             | 3.85             | 3.65             |
|               | 8   | 7.96             | 13.75            | 13.07            |                | 16  | 4.14             | 4.22             | 4.18             |
|               | 16  | 8.15             | 14.55            | 11.07            |                | 32  | 3.98             | 4.14             | 4.09             |
|               | 32  | 7.66             | 11.7             | 10.6             |                | 48  | 3.57             | 4.09             | 3.73             |
| T-3<br>57.55m | 0.5 | 9.4              | 13.75            | 11.23            | T-7<br>148.0m  | 0.5 | -                | -                | -                |
|               | 0.5 | 6.47             | 7.13             | 6.97             |                | 1   | 6.09             | 11.14            | 6.03             |
|               | 1   | 7.4              | 11.14            | 9.46             |                | 2   | 5.75             | 10.11            | 7.56             |
|               | 2   | 7.97             | 9.21             | 8.72             |                | 4   | 5.45             | 11.72            | 6.53             |
|               | 4   | 9.8              | 13.75            | 12.58            |                | 8   | 4.14             | 12.35            | 7.3              |
|               | 8   | 10.9             | 19.81            | 16.23            |                | 16  | 5.54             | 15.4             | 7.24             |
|               | 16  | 8.63             | 18.55            | 13.04            |                | 32  | 7.96             | 13.78            | 8.21             |
|               | 32  | 9.4              | 19.8             | 13.45            |                | 48  | -                | -                | 8.91             |
| T-4<br>72m    | 0.5 | -                | -                | -                |                |     |                  |                  |                  |
|               | 1   | 4.31             | -                | 5.56             |                |     |                  |                  |                  |
|               | 2   | 4.14             | 3.64             | 4.24             |                |     |                  |                  |                  |
|               | 4   | 3.83             | 4.95             | 4.75             |                |     |                  |                  |                  |
|               | 8   | 4.93             | 7.13             | 5.2              |                |     |                  |                  |                  |
|               | 16  | 5.05             | 7.74             | 6.46             |                |     |                  |                  |                  |
|               | 32  | 6.68             | 10.1             | 8.22             |                |     |                  |                  |                  |
|               | 48  | 6.9              | 11.72            | 7.15             |                |     |                  |                  |                  |

## 4.2 大鵬灣

### 4.2.1 監測井地質分析

大鵬灣監測站在深度 207 公尺之土層，根據現場鑿井取樣如圖 4.10，約可概分為 12 個次層，分別簡述如下：

1. 砂土層(SW~SM)：分佈在地表下 0~-60 m，皆大部分為灰色砂土層，其中-24 m~-29 m，及-49 m~-53 m 深處含有一層厚達約 5 公尺之灰色粘土層(CL)。
2. 粘土層(CL)：分佈於地表下-60 m~-101 m 處，而-88 m~-90 m 深度位置夾有一層約 2 公尺厚之砂土層(SW~SM)。
3. 砂土層(SW~SM)：分佈於地表下-101 m~-106 m 處，厚約 5 公尺之灰色砂土層。
4. 粘土層(CL)：分佈於地表下-106 m~-113 m 深度，厚達 7 公尺之灰色粘土層。
5. 砂土層(SW~SP)：分佈於地表下-113 m~-117 m 深，厚約 4 公尺之灰色砂土層。
6. 粘土層(CL)：分佈於地表下-117 m~-128 m 深處，為一層低塑性灰色粘土層，其中-122 m~-125 m 深處夾有一層厚約 3 公尺之沉泥質砂土層(SM)。
7. 砂土層(SW~SP)：分佈於地表下-128 m~-144 m 深為一層灰色砂土層，其中-134 m~-136 m 深夾有厚約 2 公尺之低塑性粘土層(CL)。
8. 粘土層(CL)：分佈於地表下-144 m~-153 m 深處，比重為 2.72，厚約 9 公尺之灰色低塑性粘土。
9. 砂土層(SW~SP)：分佈於地表下-153 m~-159 m 深，厚為 6 公尺之灰色砂土層。
10. 粘土層(CL)：分佈於地表下-159 m~-171 m 深，為一層厚達 12 公尺

之灰色粘土層。

11. 砂土層(SW~SP)：分佈於地表下-171 m~-188 m 深，厚約 17 公尺之砂土層，而自-175 m 深以下之砂土層，其顆粒分佈隨著深度之增加有較粗之趨勢。
12. 卵礫石層(GP)：分佈於地表下-188 m 至-207 m 深度為止，皆是卵礫石層。

#### 4.2.2 地下水位分析

於大鵬灣風景區西南角隅，埋設 202 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 5 支水壓計，其深度分別為 35 m、58 m、105 m、142 m、202 m，以手動及自動兩種方式進行量測，時間自 87 年 3 月起至 99 年 11 月止。其中 87 年 9 月 14 日至 10 月 30 日、88 年 7 月 13 日至 9 月 14 日及 89 年 10 月 17 日至 12 月 30 日止，因自動量測儀故障，而缺乏資料。由於水位井為開放式，亦可以手動量測水位，手動量測自 87 年 3 月開始，每月量測一次，自 94 年 1 月起因人力有限，每 2 月量測一次，其結果如圖 4.11 所示：

綜合各地層之地下水位資料，如圖 4.11 所示，大鵬灣水層約可分為 4 個層次，35 m、58 m 水位為第 1 含水層之水位，105 m 水位為第 2 含水層之水位，142 m 水位為第 3 含水層之水位，202 m 水位為第 4 含水層之水位。由水位變化現象顯示：第 1 層水位變化較小，較無超抽地下水現象，第 2、3、4 層地下水位較低且變化較大，超抽地下水現象明顯，尤其 88 年 3~5 月、90 年 5 月、91 年 5 月及 92 年 5 月時，水位忽然下降，表示旱季時，超抽地下水更為嚴重。

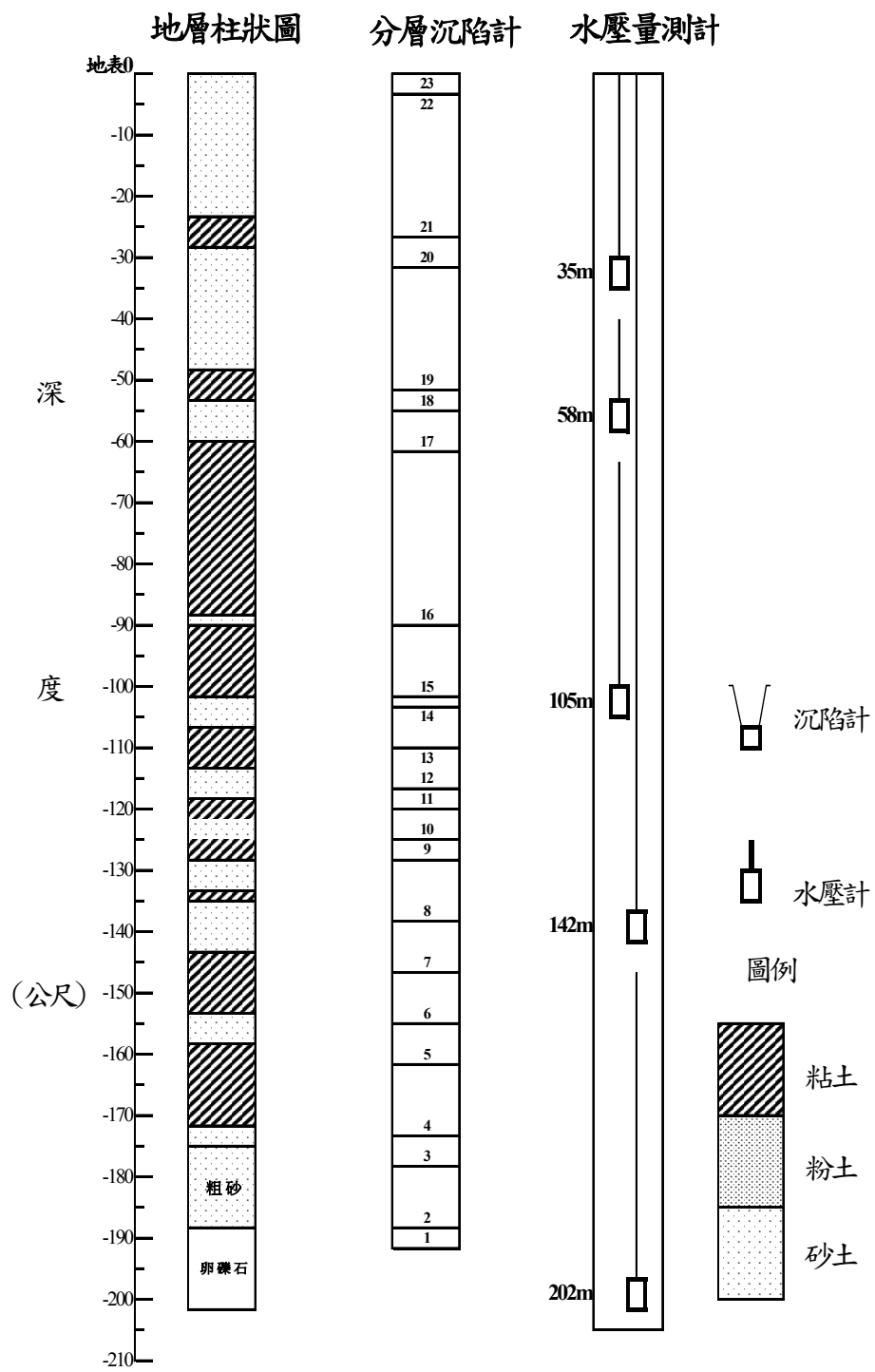


圖 4.10 大鵬灣分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖

大鵬灣分層水位變化(手動量測)

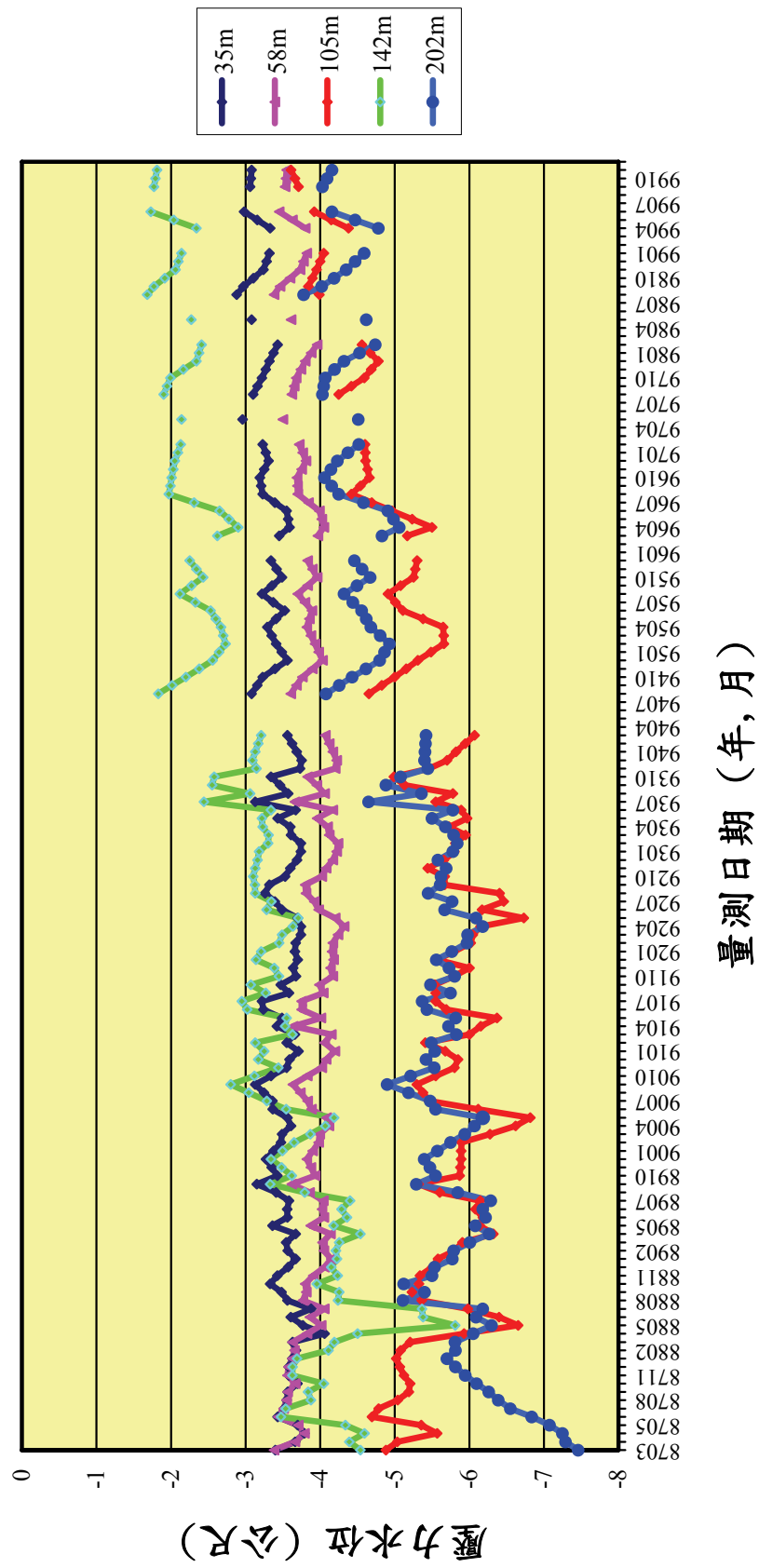


圖 4.11 大鵬灣分層水位變化圖(手動量測)

#### 4.2.3 分層地層下陷分析

為了探討大鵬灣不同深度之壓縮行為，於水壓觀測站旁之位置，設立 200 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 4、26、31、51、55、62、90、101、103、108、115、119、124、129、138、146、155、161、173、177、188、189 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 22 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，資料值由鈰鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 4.12 為至民國 99 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，因為感應磁環之最大深度為 189 公尺，所以圖中所有的量測數值均以此為參考點所計算之相對壓縮量，由圖 4-12 可發現較深之地層壓縮量較小，壓縮量較大之地層為 26m、31 m 及 51 m 之深度。

圖 4.13 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 190 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖 4.13 顯示，從 87 年 3 月至 99 年 11 月止，共 12 年 7 個月期間，大鵬灣地表下 4 m 至 189 m 間之沉陷總量為 114 公厘，而其中地表～51.3 m 之沉陷量為 94.7 公厘，佔總沉陷量之 80%以上，由此資料顯示，大鵬灣之沉陷屬於淺層沉陷。

#### 4.2.4 相關性分析

綜合上述地質、雨量、分層地下水位及地層下陷之分析，本節簡要敘述其間之相關性。大鵬灣地區之沉陷由分層地層監測得知，82% 以上沉陷發生於地表至 51.3 m 深位置，而壓縮量較大之位置，大多發生在砂土層厚度較大之鄰近粘土層，又由 202 公尺之土層柱狀圖得知，淺層土層 0 m～-60 m 之間，皆大部分為含水量豐富之砂土層，僅於-24 m～-29 m 及-49 m～-53 m 深夾有厚約 4～5 公尺之粘土層，而此土層壓縮量較大，亦是本地區地層下陷主要之土層。

而-60 m~-128 m 深之土層，大都是不透水之粘土或透水性較低之沉泥土層，僅於-101 m~-106 m，-113 m~-117 m 及-122 m~-125 m 深夾有 2 公尺~4 公尺厚之砂土或沉泥質砂土層，因砂土層厚度小，壓縮量亦小，且此土層水位也較易受到超抽地下水之影響。而自-171 m 以下為顆粒愈來愈粗之砂土及卵礫石層，此深層土層含水量高，壓縮量小，故沉陷量亦很少。

由地層分層下陷與地下水位變化圖(如圖 4.14)可知，於 2、3、4、5 月旱季雨量少時，地面水缺乏，附近之農漁養殖業大量抽取地下水，致水位下降，故地層下陷速率較大，而 7、8、9 月雨量多時，地面水源充足，減少使用地下水，故水位上升，而下陷速率較緩。

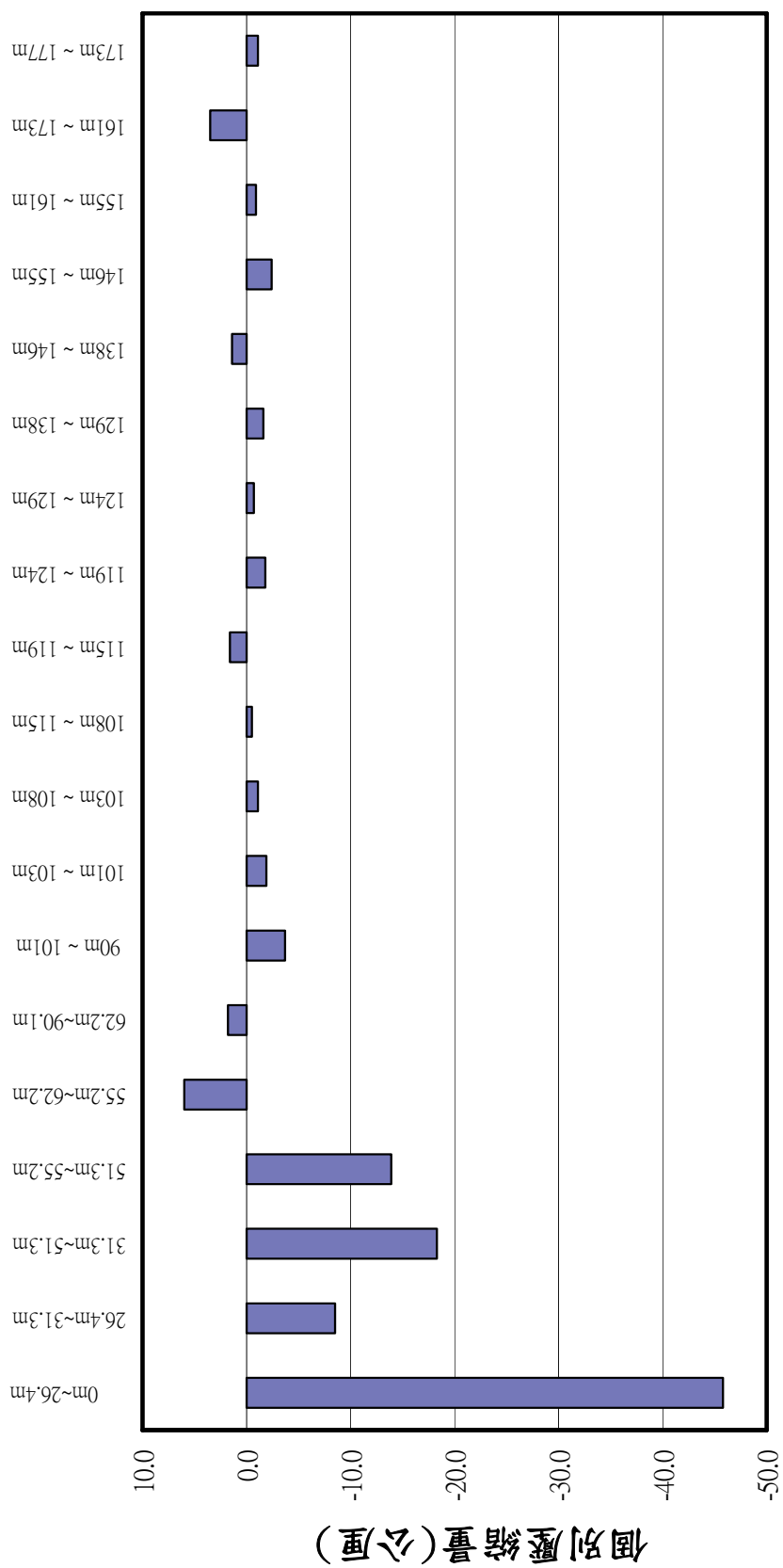
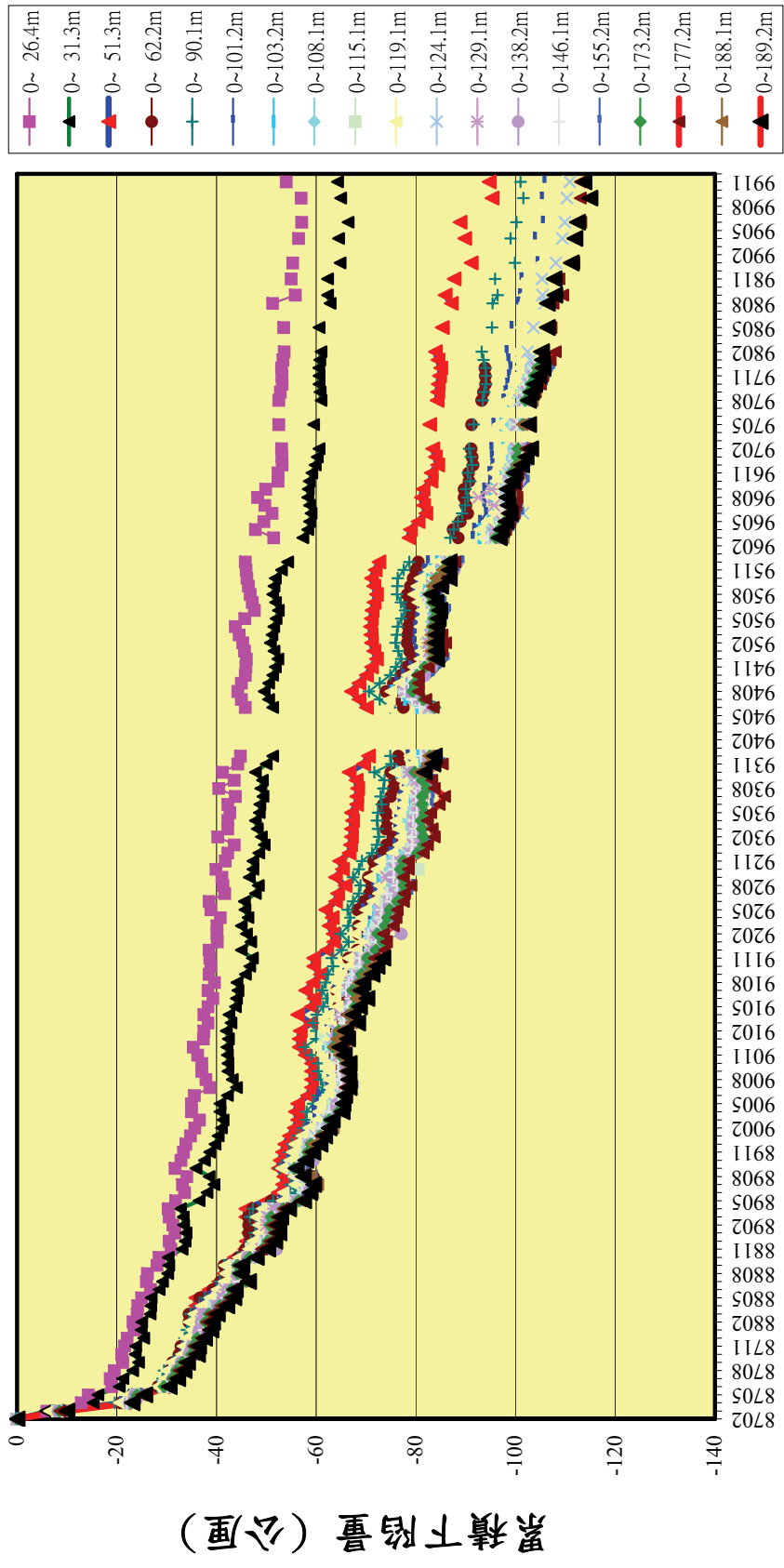


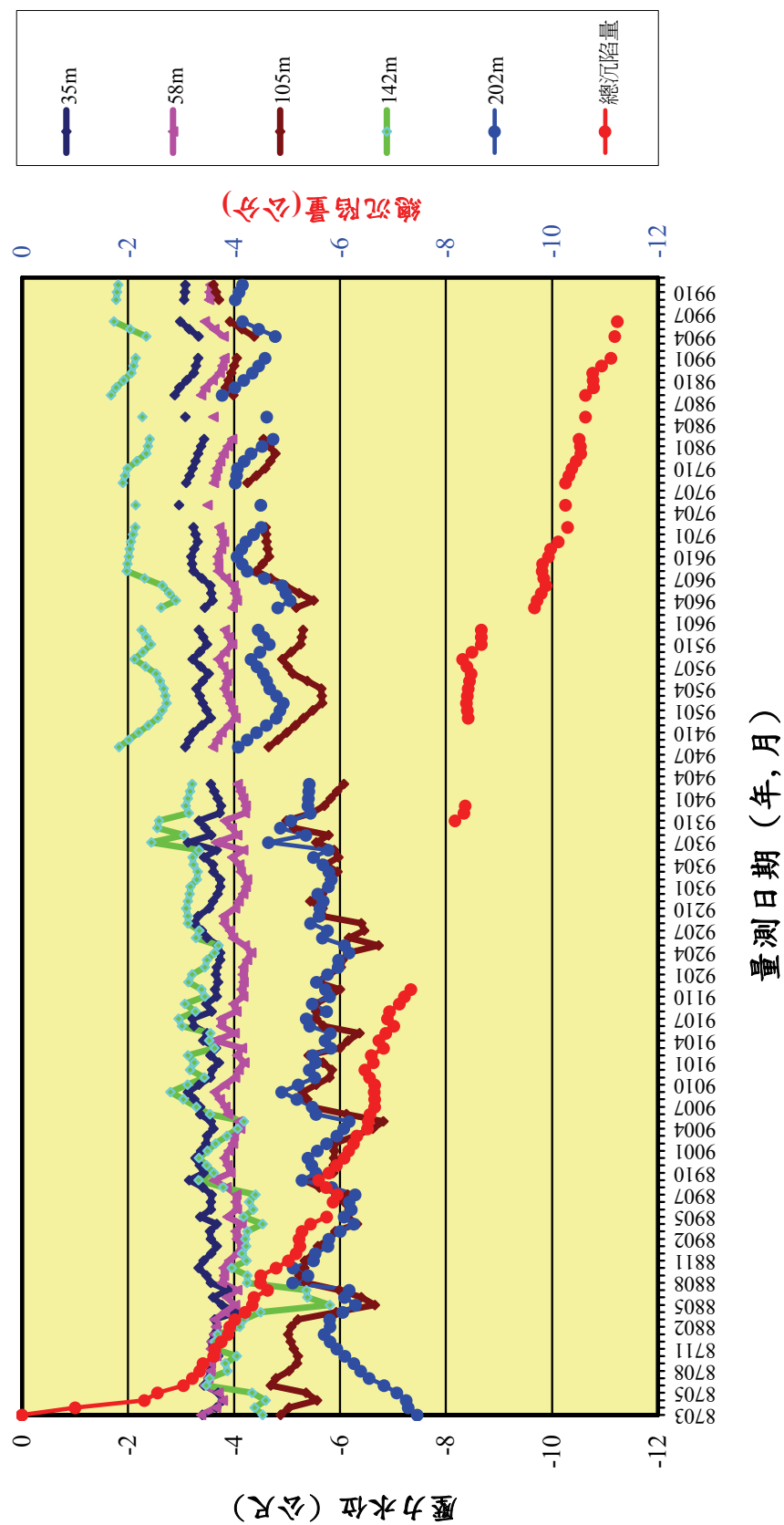
圖 4.12 大鵬灣分層個別下陷量圖



觀測時間 (年, 月)

圖 4.13 大鵬灣地層分層下陷觀測圖

## 大鵬灣地層下陷與地下水位變化圖



4.14 大鵬灣地層下陷與地下水位變化觀測圖

## 4.3 安平港

### 4.3.1 監測井地質

根據安平港監測站(18-19 號碼頭)200 m 鑽探資料及 258 m 鑽井資料如圖 4.15 所示，在深度 258 公尺之土層狀況約可分為 27 個次層，分別簡述如下：

1. 灰色粉土質細砂 (SM)：約分佈於地表下深度 0~20.3 m。
2. 黏土薄層 (CL)：分佈於地表下深度 20.3 m~22.2 m。
3. 灰色粉土質細砂 (SM)：分佈於地表下 22.2~30.4 m。
4. 黏土與粉土質細砂互層 (CL+SM)：分佈於地表下 30.4 m~34.3 m。
5. 灰色粉土質細砂 (SM)：分佈於地表下 34.3 m~37.4 m。
6. 黏土薄層 (CL)：分佈於地表下 37.4 m~39.5 m。
7. 灰色粉土質細砂 (SM)：分佈於地表下 39.5 m~50.4 m。
8. 灰色粉土質黏土夾薄層粉土質細砂 (CL+SM)：分佈於地表下 50.4 m~55.6 m。
9. 灰色細砂質粉土夾黏土薄層 (ML+CL)：分佈於地表下 55.63 m~88.4m。
10. 黏土偶夾薄層細砂 (CL、SM)：分佈於地表下 88.4 m~93.7 m。
11. 灰色粉土質黏土夾細砂或粉土薄層 (ML-CL、SM)：分佈於地表下 93.7 m~134.3 m。
12. 灰色粉土質細砂 (SM)：分佈於地表下 133.4 m~137.3 m。
13. 灰色粉土質黏土層 (CL)：分佈於地表下 137.3 m~141.2 m。
14. 灰色粉土質砂夾細砂質粉土薄層 (SM、ML)：分佈於地表下 141.2m~155 m。
15. 灰色粉土質砂夾黏土薄層 (SM、CL)：分佈於地表下 155 m~

174.6m。

16. 灰色粉土質黏土 (CL)：分佈於地表下 174.6 m~180.4 m。
17. 灰色粉土質細砂 (SM)：分佈於地表下 180.4 m~184.2 m。
18. 灰色粉土質黏土夾薄層細砂 (CL、SM)：分佈於地表下 184.2 m~194.4 m。
19. 灰色粉土質細砂 (SM)：分佈於地表下 194.4 m~196.3 m。
20. 灰色粉土質黏土夾薄層細砂 (CL、SM)：分佈於地表下 196.3 m~210.7 m。
21. 灰色粉土質砂夾黏土薄層 (SM、CL)：分佈於地表下 210.7 m~220.7m。
22. 灰色粉土質黏土層 (CL)：分佈於地表下 220.7 m~223.1 m。
23. 灰色粉土質細砂 (SM)：分佈於地表下 223.1 m~229.7 m。
24. 灰色粉土質黏土層 (CL)：分佈於地表下 229.7 m~235.36 m。
25. 灰色粉土質細砂 (SM)：分佈於地表下 235.36 m~244.45 m。
26. 灰色粉土質黏土層 (CL)：分佈於地表下 244.45 m~255 m。
27. 灰色粉土質細砂 (SM)：分佈於地表下 255 m~258.3 m。

#### 4.3.2 地下水位分析

於安平港之 18-19 號碼頭綠地區，埋設 200 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 5 支開放式水壓計，其深度分別為 40 m、75 m、105 m、145m、182 m，自 88 年 7 月開始量測，每月量測一次，其結果如圖 4.16 所示。

由圖 4.16 顯示，各地層之地下水位，40 m 及 75 m 為第 1 含水層之水位，105 m 為第 2 含水層，145m 為第 3 含水層，182 m 為第 4 含水層，其中 75 m、105 m 為粉土層及粘土層之水位。由水位變化顯示，第 1 含水層之 40 m 及 75 m 粉土層之水位下降較大，超抽地下水現象

明顯，第 2 及 3 含水層 105 m、145m 土層之水位變化較小，但亦有逐漸下降趨勢，第 4 層之 182 m 之水位變化亦很大，唯水位不降反升，顯示此層 88 年 7 月~11 月有減抽現象。由上可知，安平港附近地區 88 年 7 月至 95 年 12 月有超抽第 1、2 含水層之地下水，而第 4 水層之受壓水層則有減抽現象。

#### 4.3.3 分層地層沉陷分析

於安平港之 18-19 號碼頭綠帶地區，設立 250 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 0.6、4、10、20、30、40、52、55、79、94、110、133、149、174、180、200、210、220、230、239、248、249 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 22 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，資料值由鈰鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 4.17 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖顯示，從 88 年 7 月至 94 年 3 月之 5 年 8 個月期間(3 月以後因儀器故障)，安平 18-19 號碼頭區地表下 0 m~200 m 間之沉陷總量為 73mm，而其中 0~56 m 之沉陷量為 67mm，佔總沉陷量之 88%以上，由此資料顯示，安平港 18-19 號碼頭區之沉陷屬於淺層沉陷。由圖 4-17 可發現較深之地層壓縮量較小，壓縮量較大地層為 4~11 m、11~21m、31~52 m、56~80 m 及 181~200 m 之深度，而此地層為地下水位變化較大之處，即超抽地下水較嚴重，因此壓縮量較大。

#### 4.3.4 相關性分析

綜合上述地質、分層地下水位及分層地層下陷之分析，因淺層之 40m 水位下降 1.6 m 最大，故淺層之 0~52 m 沉陷亦最多，累計沉陷量約 67 mm。而 75 m 粉土層之水位下降 1.5 m 次之，故 52~80 m 土層之沉陷亦較大。另 105 m 及 145 m 處之水位變化不大，故 94~110 m 及 134

~150 m 沉陷量亦少。深層 182 m 之水位變化較大，唯水位急上升 0.8 m 後，再緩和下降，故 181~200 m 沉陷量 3 mm，顯示此層亦是超抽之地下水層，只是有減抽現象，因此亦有些深層沉陷。唯安平 18-19 號碼頭區之沉陷雖有超抽地下水引致之沉陷，但由水位變化可知超抽並不嚴重，因此超抽地下水引致之沉陷量，應不會如上述沉陷監測結果那樣大，故上述監測之總沉陷量，亦有可能大半為填土所引致之沉陷。

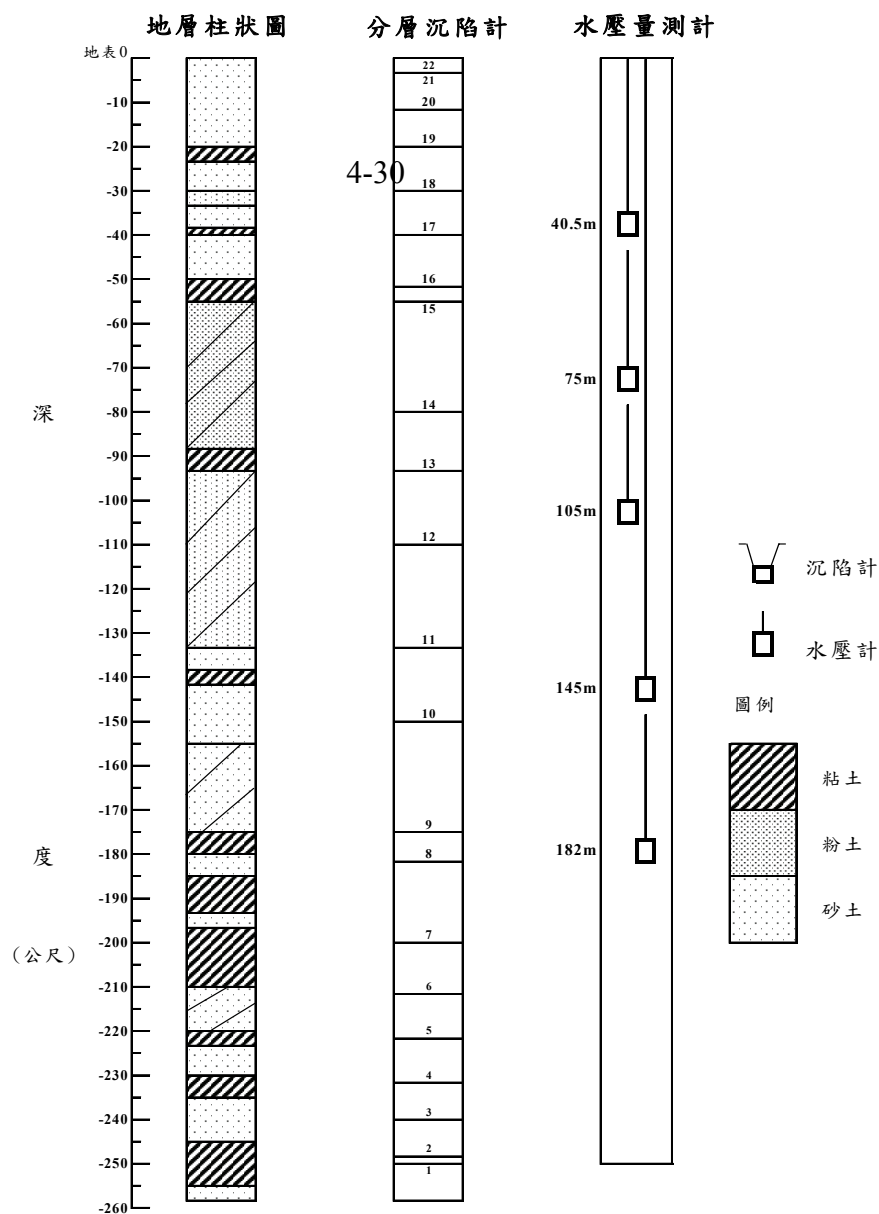


圖 4.15 安平港分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖

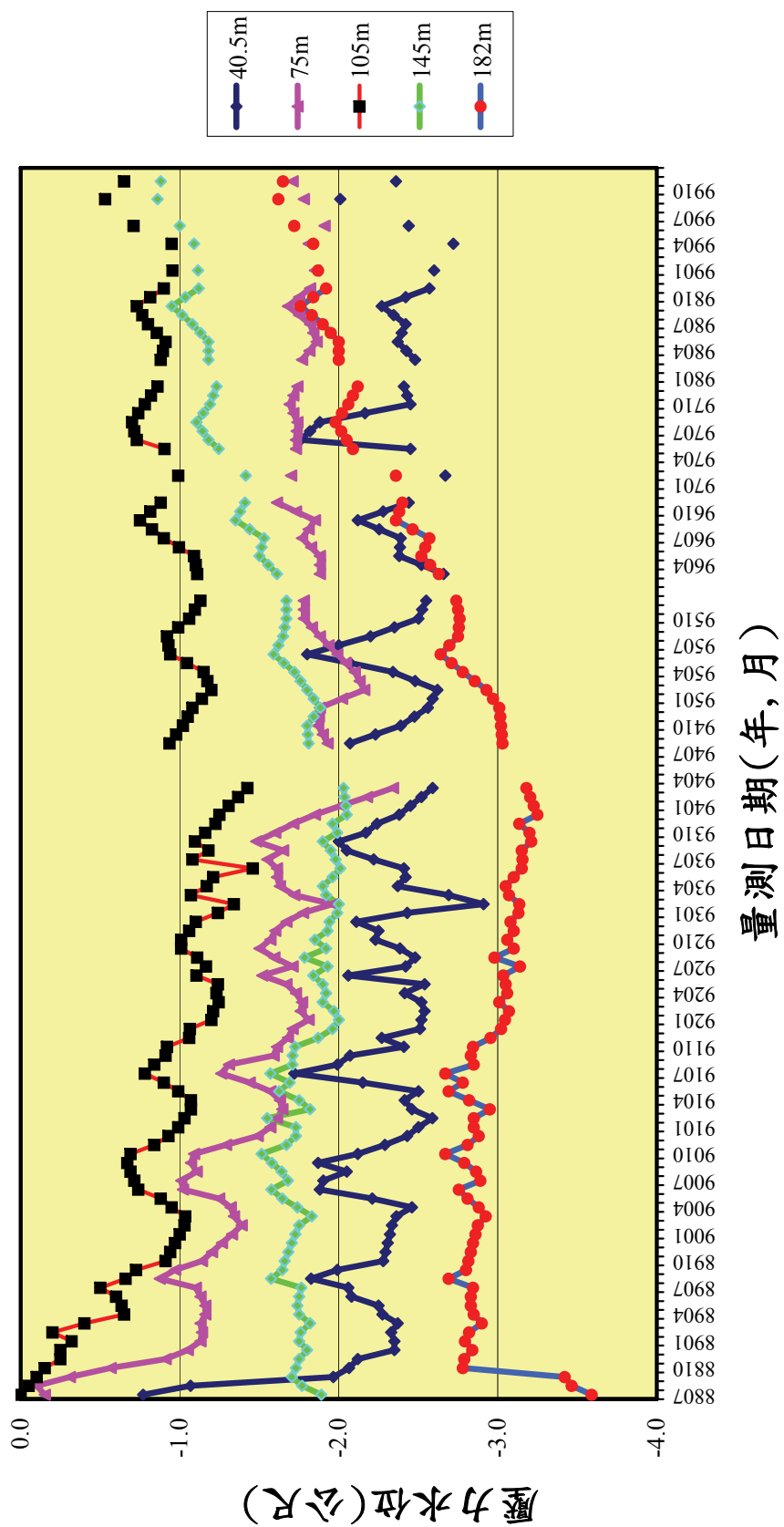
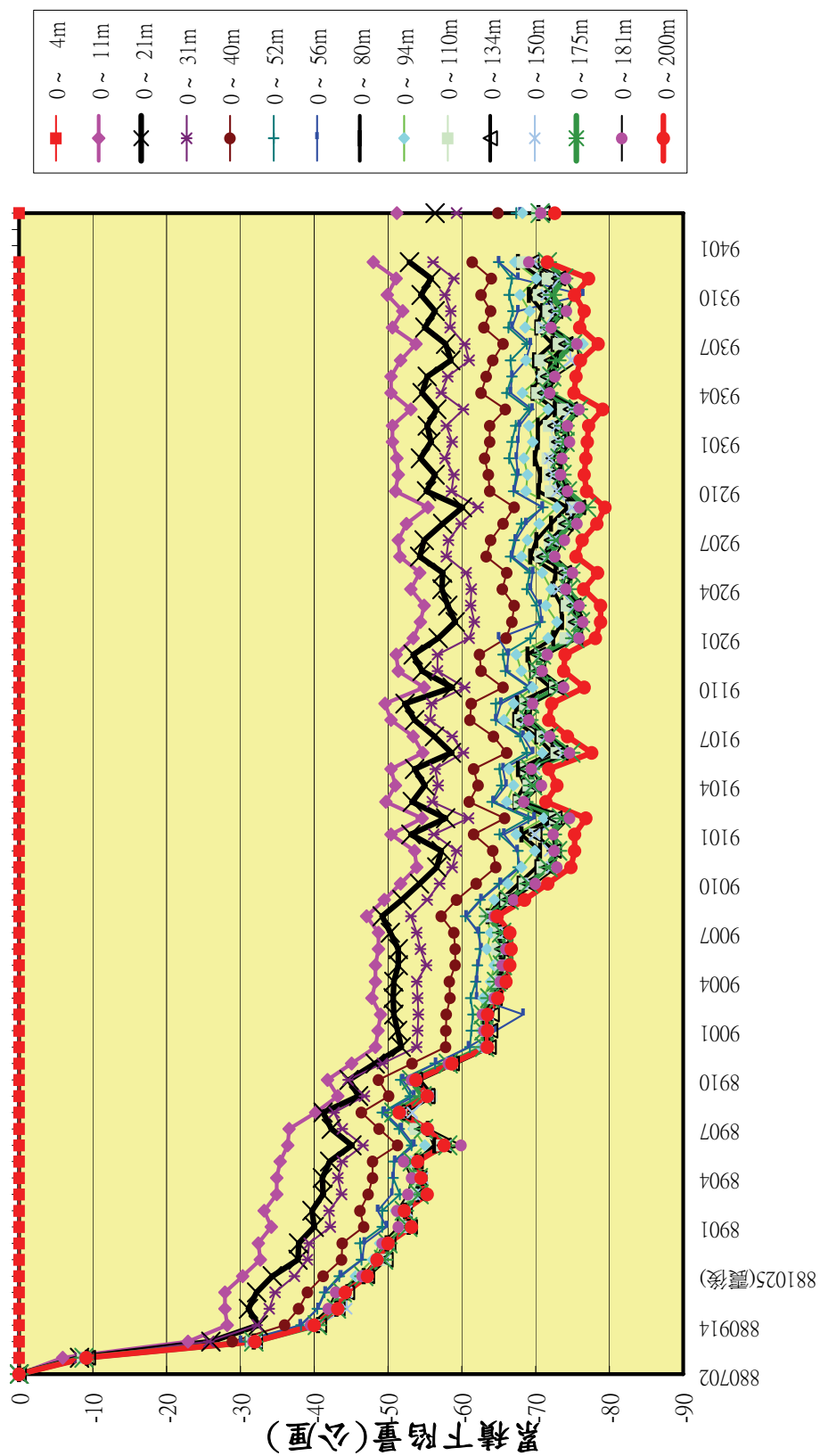


圖 4.16 安平港分層水位變化圖(手動量測)



觀測時間(年, 月)

圖 4.17 安平港分層累積下陷量圖

## 4.4 臺中港

### 4.4.1 監測井地質分析

臺中港監測站在深度 199 公尺之土層，根據現場鑿井取樣如圖 4.18，約可概分為 14 個次層，分別簡述如下：

1. 砂土層(SW~SM)：分佈在地表下 0~-18.18 m，皆大部分為灰色砂土層。
2. 粘土層(CL)：分佈於地表下-18.18 m~-27.27 m 處，厚約 9 公尺之灰色砂土層。
3. 砂土層(SM)：分佈於地表下-27.27 m~-30.91 m 處，厚約 3.6 公尺之灰色砂土層。
4. 粘土層(CL)：分佈於地表下-30.91 m~-54.55 m 深度，厚達 14 公尺之灰色粘土層。
5. 砂含石子層(SW~SP)：分佈於地表下-54.55 m~-72.73 m 深，為含砂石之灰色砂土層。
6. 粘土層(CL)：分佈於地表下-72.73 m~-90.3 m 深處，為一層厚約 17 公尺之灰色粘土層。
7. 砂含石子層(SW~SP)：分佈於地表下-90.3 m~-110 m 深處，為含砂石之灰色砂土層。
8. 粘土層(CL)：分佈於地表下-110 m~-138.48 m 深處，厚約 28 公尺之灰色粘土層。
9. 砂土層(SM)：分佈於地表下-138.48 m~-156.67 m 深，厚為 18.2 公尺之灰色砂土層。
10. 粘土層(CL)：分佈於地表下-156.67 m~-163.64 m 深，為一層厚 7 公尺之灰色粘土層。
11. 砂土層(SM)：分佈於地表下-163.64 m~-179.4 m 深，厚約 16 公尺

之砂土層。

12.粘土層(CL)：分佈於地表下-179.4 m 至-181.8 m 深，為一層厚 2 公尺之粘土層。

13.砂石層(SW~SP)：分佈於地表下-181.8 m~-189.4 m 深處，為灰色之砂石土層。

14.粘土層(CL)：分佈於地表下-189.4 m 至-199 m 深，為一層厚 10 公尺之粘土層。

#### 4.4.2 地下水位分析

於臺中港之 26 號碼頭綠地區，設置 200 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 5 支開放式水壓計，其深度分別為 29 m、63 m、100 m、145 m、173 m，自 88 年 6 月 29 日開始以自動量測系統量測(如圖 4.19)，目前因量測系統故障，資料記錄至 91 年 6 月 7 日止。手動量測自 88 年 7 月開始，每月量測一次，94 年起，改以每兩個月量測一次，97 年 8 月至 98 年 8 月因水位井卡管而缺記錄，資料記錄至 99 年 11 月止，其結果如圖 4.20 所示。

由圖 4.19 顯示，地下水位可分為 5 個層次，由水位變化得知，第 1 層含水層 29 m 之水位介於-3~-4.8 m，第 2 層含水層之 63 m 之水位介於-3~-5.6 m，其中以 93 年 10 月之水位(-5.6 m)最低，第 3 層含水層之 100 m 水位為-3.4~-5.8 m，第 4 層含水層之 145 m 水位為-3.6~-5.8 m，第 5 層含水層之 173 m 水位於-3.7~-6.3 m 之間，故變化較大。圖 4.19 為自記式分層水位變化圖，資料擷取為設定每 6 小時記錄一次，由於台中港受到 921 大地震影響，導致部份碼頭有液化現象，而本水壓監測站之水位亦取得記錄，88 年 9 月 21 日 00 時 00 分之各分層水位約-3~-5 m，地震後 9 月 21 日 06 時 00 分之各分層水位約為-0.2 m，因地震時間為 9 月 21 日 01 時 47 分，由此印證各層水位是於地震後才上升。

#### 4.4.3 分層沉陷分析

於臺中港區第 26 號碼頭綠地之位置，設立 199 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 0、3、10、18、27、31、54、73、90、110、138、157、164、179、181、189、199 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 17 個磁環。自 88 年 6 月開始量測，而 94 年 8 月起因儀器卡管，故累積沉陷量僅能自地表量測至 181m 深，累積總沉陷量至 99 年 11 月止約為 52 公厘，其中自 0m~90m 深之沉陷量約 41 公厘，佔總沉陷量 80% 以上，其間以 88 年 9 月至 10 月，因地震產生之總沉陷量 32 公厘最多，而 88 年 10 月至 98 年 11 月止，總沉陷量為 20 公厘，如圖 4.21。

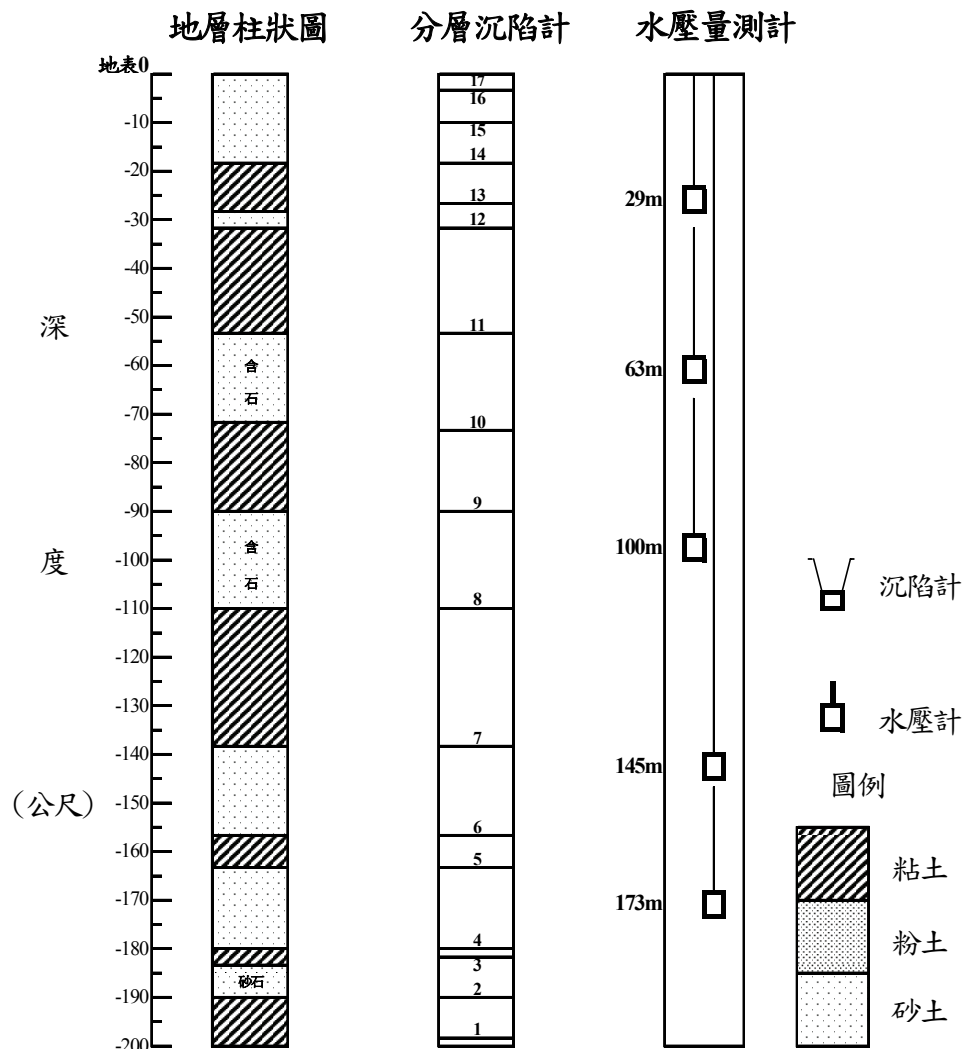
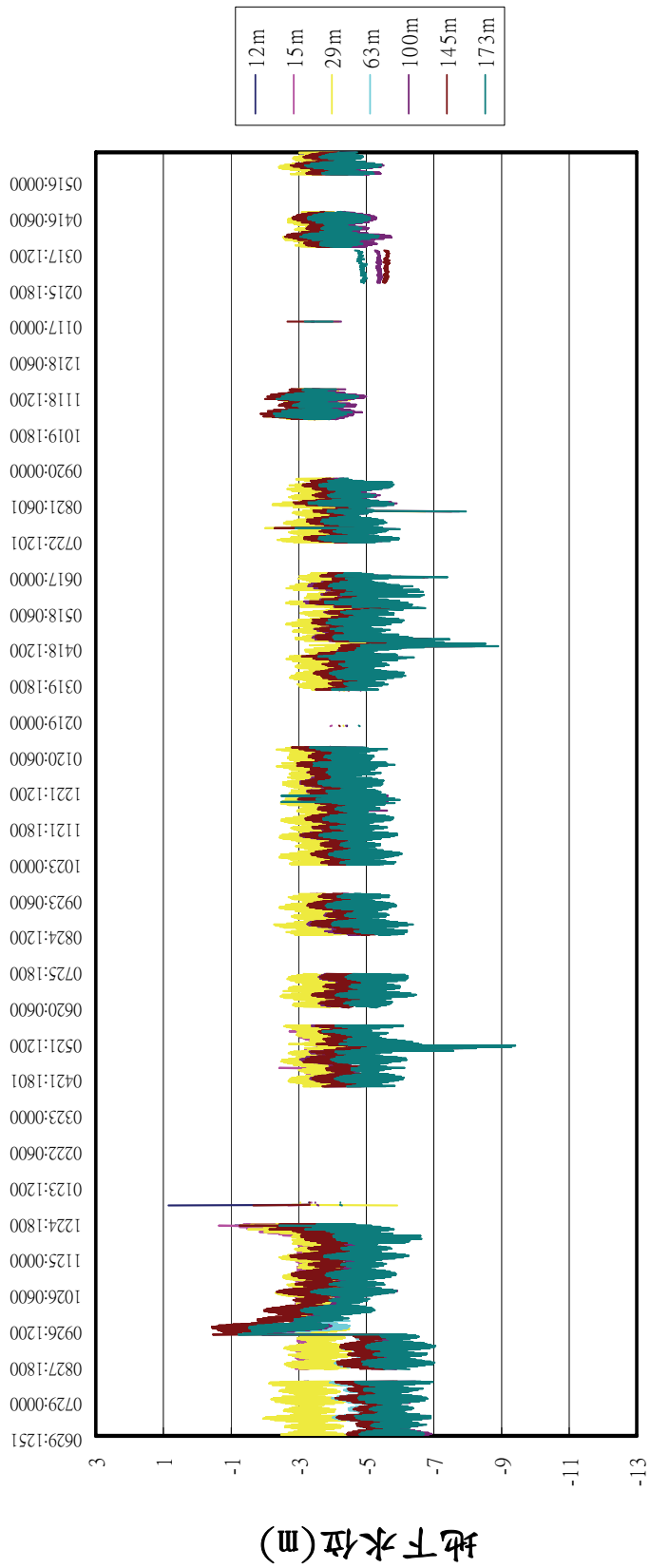


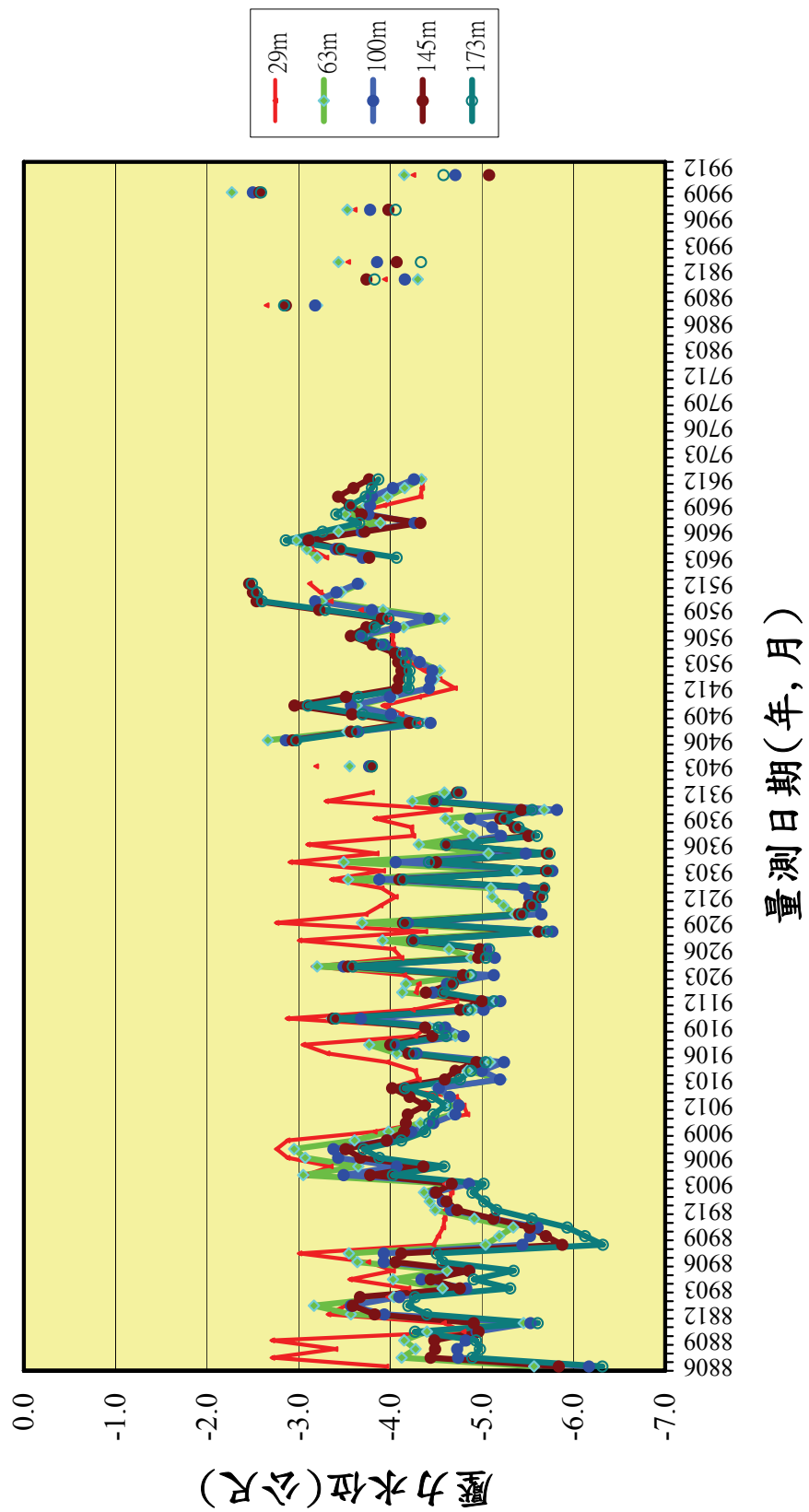
圖 4.18 臺中港分層沉陷及水壓觀測站土層柱狀圖

# 台中港分層水位變化(自記式)



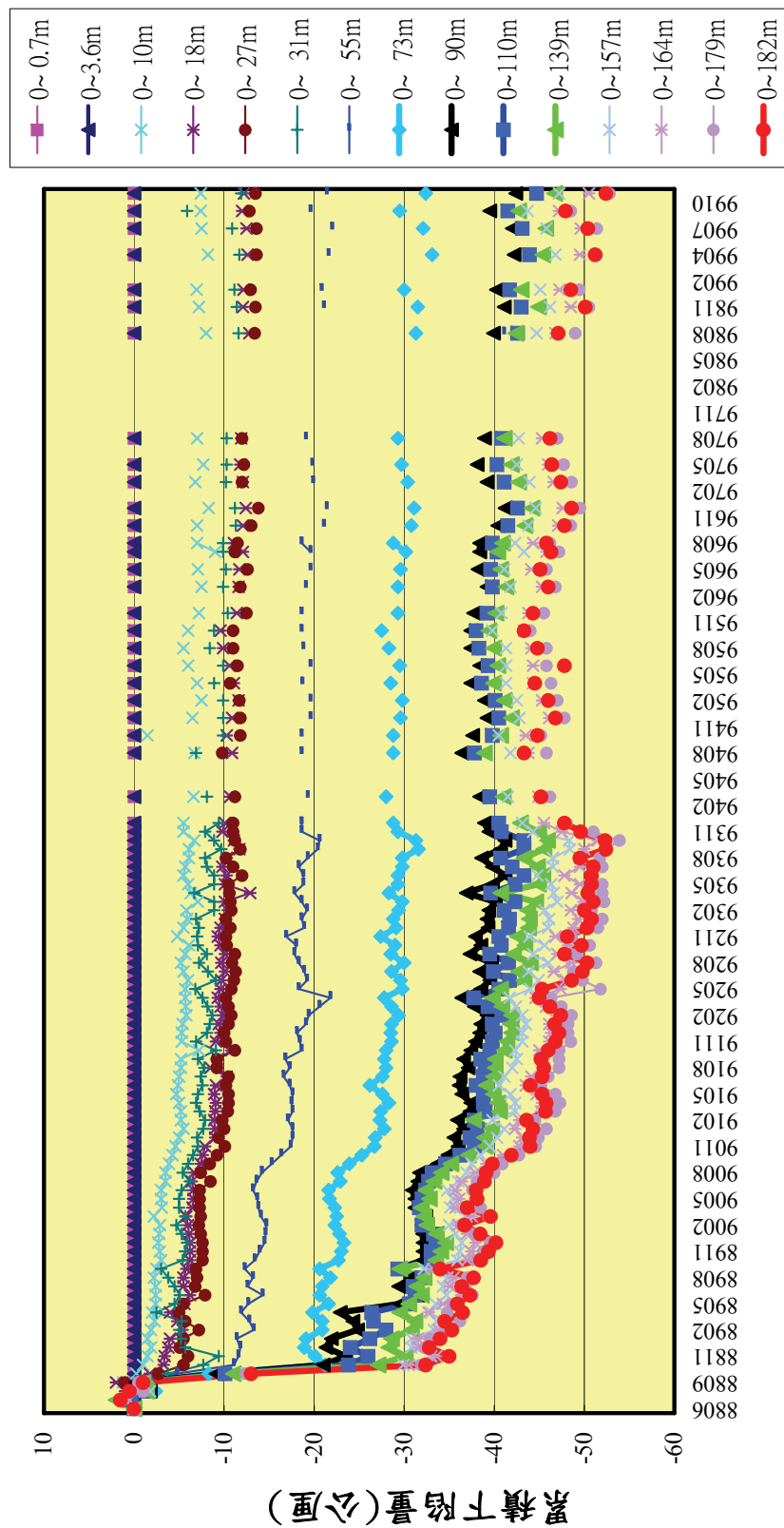
日期(88/06/29--91/06/07)

圖 4.19 臺中港分層水位變化圖(自記式)



量測日期(年,月)

圖 4.20 臺中港分層水位變化圖(手動量測)



觀測時間(年, 月)

圖 4.21 臺中港分層累積下陷量圖(200m)

## 第五章 結論與建議

### 5.1 研究目的與問題

臺灣的重要港埠大都建設在西部海岸，而西部海岸的地層幾乎都屬於現代沖積層，該類土層較為疏鬆軟弱，極可能因附近地區地下水抽取、大規模海埔新生地回填、或強烈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，為維護港區工程及各樣設施之安全，有必要對各港灣地區之地下水壓及地層下陷進行長期之監測。另港灣設施中，以碼頭最為重要，而臺灣之港灣碼頭，無論在平時或地震時，多曾因疏鬆軟弱之地質因素，發生一些工程災害，因此為維護港區設施之安全，進行地震監測亦有其必要。因而，本計畫遂於港灣地區執行港灣地層下陷及地震水壓監測研究。

本計畫本年度執行的工作內容包括：1. 各港區地層下陷及地下水壓之量測，2. 港灣地區地層下陷監測資料彙整分析，3. 地層分層下陷監測站儀器維修與更新，這些成果可作為災害預防、災時應變及災後重建計畫之參考。

### 5.2 結論

本研究計畫進行港灣地區地層下陷之監測，綜合結果如下：

1. 布袋港因地下水位監測站之-105 m、-143 m及-178 m深度地下水位已降到地表下約20餘公尺，故布袋港附近地區有超抽深層之地下水，致使港區之深層水位下降而引起地層下陷的情形。200m地層下陷站經量測結果，自86年2月至99年11月止，總累積沉陷量約為56cm，其中百分之50以上之沉陷在深度-140~-200m地層發生，屬深層沉陷，近3年來年平均沉陷量約為2.7cm。300m地層下陷站量測結果，自90年2月至99年11月止，共9年9個月總累積沉陷量約為65cm，整體而言，布

袋港區近3年來地層下陷有趨緩現象。布袋港400m深之水準基站，為長期之地層下陷自動監測站，採每6小時自動記錄一筆，自92年9月至99年7月止，總累積下陷量約為16.5公分。98年7月至99年7月之累積下陷量約5公分，其中因甲仙地震引起的下陷約1.2公分。

布袋港經採取港區30~150公尺深之粘性土樣進行室內單向度壓密試驗，並以不同方法計算壓密係數，由試驗結果，布袋港粘土層之壓密係數 $C_v$ 值約為 $1\sim 20\text{m}^2/\text{yr}$ 。

2. 大鵬灣-105m及-142m深度之水位變化較大，105 m之水位於-4.7 m~-6.8 m之間上下震盪，142 m深度之水位自-4.2m緩和上升約至-2.5 m，故大鵬灣附近地區應有超抽地下水引起之地層下陷。地層下陷量測自87年3月至99年11月止，累積總沉陷量約為11.4cm，平均一年之沉陷量約為1.5cm，而其中地表至51.3 m之沉陷量為9.7cm，佔總沉陷量之80%，故大鵬灣屬於淺層沉陷。
3. 安平港16~20號碼頭區因地下水位偏高，約於地表下-2 ~ -3m，港區因超抽地下水引致之沉陷並不嚴重，有一部分為填土荷重所引致之沉陷。港區地層下陷自88年7月至94年3月之累積沉陷量約為7.3cm，其中地表至56 m之沉陷量6.7cm，佔總沉陷量之88%，故屬淺層沉陷。
4. 臺中港200m地層下陷站經監測結果，自88年6月開始至99年11月止，累積總沉陷量約5.2cm，量測期間包括88年9月至10月，因921地震所產生之總沉陷量為3.2 cm。

### 5.3 建議

1. 港灣地層下陷監測及港區地震水壓監測等研究，為長期性的監測工作，其設施特點為在地表及不同土層中置放監測儀器，如此不只可長期觀察其總量變化，更可獲知不同土層的反應數據，在港區規劃、防災處置及學術研究上，可提供長期的環境數據，值得持續研究。
2. 監測工作有時受限於現場環境，儀器所需電力能源的供應取得困難，目前使用大型電瓶組配合太陽能板來支應，但其損耗極為快速，需要在能源設施上留意其最新發展，已使監測儀器發揮最佳功能。

## 5.4 研究成果效益：

1. 學術效益，發表研討會論文1 篇：2009臺灣地理資訊系統年會暨學術研討會，發表論文「GIS在臺北港區土壤液化分析及震災速報系統之開發應用」。
2. 資料庫建置效益：港灣地區井下地震及水壓監測站量測所得資料，已陸續彙整成資料表單，納入港灣工程基本資料庫中，可建立港區防救災體系之相關資料庫，作為港灣地區之地震災前預防、災時應變計畫與決策之參考依據。

## 5.5 提供應用情形：

1. 利用本研究所安裝之港區地震水壓監測系統，配合港區工程基本資料查詢展示系統之液化分析模組，開發地震速報系統，可於震後發佈港區可能致災地點之警訊，提供港務局防救災及緊急修復使用。
2. 所建港區地震速報系統，已於98年12月19花蓮地區規模6.8之強震後，各港測站皆成功擷取震動反應資料，並發送通報簡訊予各港務局相關人員。

## 參考文獻

1. 水利處(1995)，臺南地區地盤下陷檢測成果報告。
2. 水利處(1996)，嘉義沿海地區地盤下陷檢測報告。
3. 水利處(1997)，屏東縣沿海地區地盤下陷檢測報告。
4. 屏東縣政府(1997)，大鵬灣風景特定區整體發展規劃設計。
5. 港灣研究中心(1999)，港灣地區地層下陷監測研究(II)，安平港地層下陷監測與資料查詢系統之研究。
6. 港灣研究中心(2000)，大鵬灣地下水位及地層下陷監測研究計畫，大鵬灣國家風景區管理處委託研究。
7. 港灣研究中心(2004)，布袋港漂沙及地層下陷監測研究計畫(V)，交通部高雄港務局委託研究。
8. 歐陽正宅、侯和雄(1982)「臺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。
9. 嘉義縣政府(1995)，布袋海埔新生地第二期地質鑽探工程。
10. 嘉義縣政府(1993)，嘉義縣布袋港擴建客貨碼頭整體規劃報告。
11. 李豐博、賴聖耀、謝明志(1992)「海岸土層下陷行為與預測之研究」，港灣技術研究所研究報告82-研(十)。
12. 陳志芳、賴聖耀(2002)，「布袋港地下水位與地層下陷監測研究」，第二十四屆海洋工程研討會，PP.664~670。
13. 陳志芳(2005)，「布袋港土層壓密特性與地層下陷之研究」，國立中興大學土木工程研究所碩士論文。
14. 賴聖耀、李豐博、陳志芳(1997)「安平港長期性地下水位變化與分層地層下陷監測研究」，港灣技術研究所研究報告86-研(十)。
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(1994)「雲林沿海地區地下水位變化與地層下陷之關係」，

港灣報導，No.27。

- 17.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。
- 18.Becker,D.E.(1981),Settlements under intermittent loading on a clay subsoil,Ph.D.thesis University of Western Ontario,Canada.
- 19.Biot, M.A. (1941), “General theory of three-dimensional consolidation”,J.of applied physics 12(2).
- 20.Lay,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.
- 21.Leake,S.A. & Prudic,D.E. (1988),Documentation of A Computer Program to Simulate Aquifer-System Compaction Using the Modular Finite-Difference Ground-water Flow Model, U.S. Geological Survey, Report No.88-482, Tucson, Arizona.
- 22.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.
- 23.Terzaghi,K.(1943),Theoretical soil mechanics,John Wiley & Sons,New York.
- 24.Liao,S.S.C., D.Veneziano, and R.V.Whitman (1988)”Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability” ,J. of Geot. Engr., ASCE, Vol.114, No.4, pp.389~411.
- 25.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.
- 26.Sridharan, A., Murthy, N. S. and Prakash, K., “Rectangular Hyperbola Method of Consolidation Analysis,” Geotechnique, Vol.37, No. 3, pp. 355-368 (1987).