

99-61-7470  
MOTC-IOT-98-H1DB007

# 全光纖式邊坡穩定監測系統整合 與現地應用測試(3/4)



交通部運輸研究所

中華民國 99 年 5 月

99-61-7470  
MOTC-IOT-98-H1DB007

# 全光纖式邊坡穩定監測系統整合 與現地應用測試(3/4)

著 者：李豐博、黃安斌、饒正  
蔡東霖、李瑞庭

交通部運輸研究所

中華民國 99 年 5 月

國家圖書館初版品預行編目資料

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地測試.

(3/4) / 李豐博等著. – 初版. – 臺北市

: 交通部運研所, 民 99. 05

面; 公分

參考書目: 面

ISBN 978-986-02-3696-5 (平面)

1. 防災工程 2. 山坡地 3. 光纖感測

445.5

99009873

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(3/4)

著 者: 李豐博、黃安斌、饒正、蔡東霖、李瑞庭

出版機關: 交通部運輸研究所

地 址: 10548 台北市敦化北路 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 99 年 5 月

印 刷 者:

版(刷)次冊數: 初版一刷 110 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站

定 價: 200 元

展 售 處:

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話: (02) 23496880

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

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

GPN: 1009901602

ISBN: 978-986-02-3696-5 (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。

99  
全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試  
(3/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1009901602

定價 200 元

## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(3/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-02-3696-5（平裝）	政府出版品統一編號 1009901602	運輸研究所出版品編號 99-61-7470	計畫編號 98-H1DB007
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：李豐博 研究人員：饒正 聯絡電話：04-26587192 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：國立交通大學防災與水環境研究中心 計畫主持人：黃安斌 研究人員：黃安斌、蔡東霖、李瑞庭 地址：新竹市大學路 1001 號 聯絡電話：03-5712121	研究期間 自 98 年 3 月  至 98 年 10 月	
關鍵詞：光纖感測器、光纖水壓計、地下水文數值模型分析、邊坡穩定監測			
摘要：  傳統邊坡安全監測大多採用傾斜管配合手動式傾斜儀監測地層內滑動面之所在位置及移動量，地下水位監測則多使用開口式水位計。這些監測儀器幾乎全部使用手工在現場紀錄讀數。此一安排不但費時，在雨季或邊坡發生滑動時，現場紀錄讀數可能無法進行或非常危險，而這些情況下也可能是最需要監測儀器讀數的時候。近年來雖有可做自動化監測之電子式監測儀器之研發，但電子式自動化監測系統具有價格昂貴、易受電磁波干擾、雷擊破壞、且儀器設備若長期處於潮濕環境容易短路故障等缺點。本計畫所研發之被動式光纖感測器相較於電子式儀器的優點在於地層內沒有任何電子裝置，訊號傳輸距離遠可達數十公里及在光纖傳輸線上可連接多點或分佈式之優點。本計畫以阿里山台 18 線公路五彎仔路段作為試驗場址，使用本研究研發之光纖感測地層移動監測系統與分佈式光纖水壓計來監測該地區之地層滑動及水壓變化，以評估使用全光纖感測系統在邊坡穩定監測之實用性，並配合地下水文數值模型分析，以作為該地滑區日後穩定評估方法之依據。其中所安裝之光纖感測地層移動與分佈式光纖水壓監測系統已在 2008 之辛樂克颱風與 2009 年之莫拉克颱風期間發揮其功能，在颱風期間持續提供並紀錄重要之地層移動與水壓分佈之數據，其成果效益包含透過地下水流模型，可得知此區域地下水流分佈與流向，以作為日後該區域整治方向，以及提供現場邊坡即時安全警示系統，作為公路單位決策參考依據。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
99 年 5 月	116	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 （解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <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） <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

<b>TITLE: Integration and Field Testing of an All Fiber Optic Slope Stability Monitoring System (3/4)</b>			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-02-3696-5 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009901602	IOT SERIAL NUMBER 99-61-7470	PROJECT NUMBER 98-H1DB007
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lee Feng-bor PROJECT STAFF: Jao Cheng PHONE: (04) 26587192 FAX: (04) 26564418			PROJECT PERIOD FROM March 2009 TO October 2009
RESEARCH AGENCY: National Chiao Tung University, Disaster Prevention and Water Environment Research Center PRINCIPAL INVESTIGATOR: Huang An-bin PROJECT STAFF: Huang An-bin, Tsai Tong-lin, Lee Jui-ting ADDRESS: #1001, Ta Hsueh Rd. , Hsinchu, 300, Taiwan, R.O.C PHONE: (03) 5712121			
KEY WORDS: Fiber Optic Sensor, Fiber Optic Piezometer, Ground Water Flow Numerical Model Analysis, Slope Stability Monitoring			
ABSTRACT:  <p>Conventional slope stability monitoring often involves the use of inclinometer casings and open-end piezometers. A plastic or aluminum casing is installed in the ground and an electronic carriage referred to as the inclinometer probe (IP) is lowered into the pre-installed casing to measure the inclinations. The displacement profile of the casing is determined by accumulating relative movements from IP readings. Open-end piezometers are used to monitor the ground water levels. Both sensors are read manually in the field. The procedure is time consuming and can be dangerous when conducted in rainy season or when the slope is unstable. The safety hazards may prevent the critical instrument readings from being taken when they are needed the most. Many automated electronic devices have been developed recently. These devices can be costly and subject to electromagnetic interference and lightning damage when deployed in the field. In comparison with electronic devices, the optic fiber sensors, which are passive systems with no electronic circuitry installed underground can easily, transmit signals by tens of kilometers through light. Multiple sensors can be connected to a single optic fiber. A test site has been set up at the Five Turn Point of Highway 18 near Alishan. The fiber optic ground displacement and ground water monitoring sensors developed by the research team have deployed at the test site. The main purpose of this research is to verify the feasibility of using an all fiber optic sensor system in slope stability monitoring. Coupled with field measurements, a ground water numerical model will be established as a basis to evaluate the slope failure mechanisms. The fiber optic ground displacement and pore water profile monitoring systems have demonstrated their effectiveness by continuously transmitting and recording valuable data during Typhoon Synlaku in 2008 and Morakot in 2009. The achievement and benefit of the water numerical model included that the regional underground water flow distribution and flow directions can be known through the underground water flow model to be used as the road unit decision-making reference for regional improvement direction and the side slope real-time security warning system.</p>			
DATE OF PUBLICATION May 2010	NUMBER OF PAGES 116	PRICE 200	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(3/4)

## 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
圖目錄 .....	V
表目錄 .....	IX
第一章 緒論 .....	1-1
1.1 計畫背景 .....	1-1
1.2 計畫工作項目與執行進度說明 .....	1-3
第二章 光纖監測系統更新與目前概況 .....	2-1
2.1 光纖監測系統之孔位位置配置與選定要素說明 .....	2-1
2.2 光纖監測系統目前運作狀況說明 .....	2-4
2.3 光纖自動化監測系統與光纖光柵水壓計改進說明 .....	2-11
第三章 重力式光纖傾斜計與加速度感測器研發 .....	3-1
3.1 光纖光柵原理簡述 .....	3-1
3.2 光纖光柵傾斜/加速度感測 .....	3-5
3.3 FBG-I/A 加速度感測原理 .....	3-6
3.4 FBG-I/A 傾斜感測原理 .....	3-9
3.5 重力式光纖傾斜計之改良與測試 .....	3-12
第四章 辛樂克與莫拉克颱風之監測數據比較說明 .....	4-1
第五章 研究場址地下水流模擬 .....	5-1

5.1 地下水流數值模式簡介 .....	5-1
5.1.1 理論基礎與離散方程式 .....	5-1
5.1.2 模式之驗證 .....	5-3
5.1.3 模式之穩態與非穩態測試 .....	5-5
5.1.4 模式之降雨入滲測試 .....	5-8
5.2 五彎仔地區地下水流模擬 .....	5-12
第六章 結論與建議 .....	6-1
6.1 結論 .....	6-1
6.2 建議 .....	6-2
6.3 後續工作項目 .....	6-2
參考文獻 .....	參-1
附錄一 期中審查委員意見及辦理概況 .....	附錄 1-1
附錄二 期末審查委員意見及辦理概況 .....	附錄 2-1
附錄三 期末報告簡報資料 .....	附錄 3-1



## 圖 目 錄

圖 2.1 傳統水壓計與光纖光柵水壓計現地安裝比較圖.....	2-2
圖 2.2 全光纖式監測儀器配置圖.....	2-3
圖 2.3 NCTU-03 光纖光柵水壓監測孔位歷時水壓變化圖.....	2-5
圖 2.4 IHMT-01 監測孔位旁之 GPS 監測站.....	2-6
圖 2.5 自動化光纖光柵解讀系統監測畫面.....	2-7
圖 2.6 光纖感測器自動化擷取系統地層位移畫面.....	2-8
圖 2.7 光纖感測器自動化擷取系統水壓分布及歷時畫面.....	2-9
圖 2.8 自動化光纖解讀系統警訊發送畫面.....	2-10
圖 2.9 高供電量(4800W)不斷電系統.....	2-12
圖 2.10 低耗電量自動化光纖光柵解讀儀器系統.....	2-13
圖 2.11 改良後光纖光柵水壓計實體圖.....	2-14
圖 2.12 改良後光纖光柵水壓計率定圖.....	2-15
圖 2.13 溫度效應對於光纖光柵水壓計率定圖.....	2-16
圖 2.14 修正溫度對於光纖光柵水壓計結果圖.....	2-17
圖 3.1 光纖光柵反射原理示意圖.....	3-3
圖 3.2 光纖光柵感測機制示意圖.....	3-4
圖 3.3 FBG accelerometer 側面剖示圖.....	3-5
圖 3.4 FBG inclinometer 剖示圖.....	3-6
圖 3.5 FBG-I/A 加速度感測示意圖.....	3-8
圖 3.6 FBG-I/A 傾斜感測示意圖.....	3-10
圖 3.7 FBG-I/A 實體圖.....	3-11

圖 3.8	FBG-I/A 傾斜標定結果 .....	3-11
圖 3.9	第一次修正後 FBG-I/A 傾斜感測示意圖 .....	3-12
圖 3.10	(a)FBG-I/A 實體圖側視圖；(b)FBG-I/A 實體圖斜角視圖 .....	3-13
圖 3.11	第一次修正 FBG-I/A 傾斜標定結果 .....	3-14
圖 3.12	第二次修正 FBG-I/A 傾斜感測示意圖 .....	3-15
圖 3.13	FBG-I/A 光纖光柵黏貼過程圖 .....	3-16
圖 3.14	FBG-I/A 傾斜感測加熱固化黏貼膠 .....	3-16
圖 3.15	FBG-I/A 傾斜感測計標定 .....	3-17
圖 4.1	辛樂克與莫拉克颱風期間累積降雨量 .....	4-2
圖 4.2	NCTU-03 -14m~-24m 水壓與辛樂克颱風之累計降雨量變化趨勢圖 .....	4-3
圖 4.3	NCTU-03 -29m~-39m 水壓與辛樂克颱風之累計降雨量變化趨勢圖 .....	4-4
圖 4.4	NCTU-03 -44m~-54m 水壓與辛樂克颱風之累計降雨量變化趨勢圖 .....	4-5
圖 4.5	NCTU-03 水壓歷時變化於辛樂克颱風 .....	4-6
圖 4.6	NCTU-03 3D 水壓歷時變化於辛樂克颱風量變化趨勢圖 ...	4-7
圖 4.7	NCTU-03 -14m~-24m 水壓與莫拉克颱風之累計降雨量變化趨勢圖 .....	4-8
圖 4.8	NCTU-03 -29m~-39m 水壓與莫拉克颱風之累計降雨量變化趨勢圖 .....	4-9
圖 4.9	NCTU-03 -44m~-54m 水壓與莫拉克颱風之累計降雨量變化趨勢圖 .....	4-10
圖 4.10	NCTU-03 水壓歷時變化於莫拉克颱風 .....	4-11
圖 4.11	NCTU-03 3D 水壓歷時變化於莫拉克颱風圖 .....	4-12

圖 5.1 驗證案例區域示意圖.....	5-3
圖 5.2 驗證案例模擬結果.....	5-4
圖 5.3 測試案例示意圖 5.1.3 模式之穩態與非穩態測試.....	5-5
圖 5.4 水位 20m 之穩態地下水壓力水頭與水位模擬結果 .....	5-6
圖 5.5 水位 25m 之穩態地下水壓力水頭與水位模擬結果 .....	5-6
圖 5.6 非穩態地下水壓力水頭模擬結果.....	5-7
圖 5.7 降雨入滲地下水壓力水頭模擬結果.....	5-9
圖 5.8 降雨入滲地下水壓力水頭隨時間模擬結果.....	5-10
圖 5.9 五彎仔地區地下水流模擬區域圖.....	5-11
圖 5.10 五彎仔地區地下水流率定與驗證結果.....	5-12
圖 5.11 辛樂克颱風降雨資料.....	5-13
圖 5.12 地下水水位面隨時間模擬結果.....	5-13

## 表 目 錄

表 2.1	NCTU-04 光纖光柵水壓計配置表 .....	2-18
-------	--------------------------	------

# 第一章 緒 論

## 1.1 計畫背景

針對潛在或持續滑動之邊坡的監測，國內外大多採用傳統傾斜管配合手動式傾斜儀 (inclinometer probe, IP)，視情況之需要配合開口式水位管(open ended piezometer)做地下水位之監測。IP是以手動的方法放入傾斜管中紀錄讀數，開口式水位管則是以皮尺放入管中決定水位之深度。國內有許多公路或鐵路（包括高速鐵路）邊坡，由於其位置偏遠或不易到達，難以使用傳統傾斜管與手動式傾斜儀做邊坡穩定監測，此類監測系統自動化與遠距離訊號傳輸確實有其必要性。傾斜管之監測可以用管內傾斜儀 (in place inclinometer, IPI) 以長期置入的方法做自動化監測。開口式水位管內可置入電子式水壓計以水壓感測水位。配合自動資料擷取系統，可自動紀錄IPI與電子式水壓計讀數。但電子式自動化監測系統具有價格昂貴、易受電磁波干擾、雷擊破壞、且儀器設備若長期處於潮濕環境容易短路故障等缺點。同時傳統開口式水位管受其尺寸限制，在同一鑽孔內通常最多安裝兩管，對於地下水位/水壓之判讀多所限制。

光纖感測技術具有許多傳統電子感應技術沒有的優點，包括(1)體積小—光纖直徑一般為250  $\mu\text{m}$ 左右體積甚小；(2)耐久性高—光纖之主要成份是矽(silica)為非金屬，可以長期埋在地下而不易腐蝕或改變其性質；(3)光纖訊號可長（數十公里）距離傳輸而不受電磁波干擾；(4)可以在同一光纖上做多點分佈式的監測。

近來國內已研發成功光纖光柵 (fiber Bragg grating, FBG) 節理式偏斜儀 (FBG segmented deflectometer, FBG-SD)，其設計是與傳統傾斜管匹配，將 FBG-SD 插入固定於地層內之傾斜管，以 FBG-SD 節理間偏斜角度之改變來估算傾斜管之變形分佈。FBG-SD 已成功的應用於公路邊坡或地層開挖支撐變形之監測，唯 FBG-SD 感應範圍有限，一般 FBG-SD 感測範圍為正負 2 度角，光纖光柵拉伸應變量約為正負

3,000 至 4,000  $\mu \varepsilon$  (但可視感測器靈敏度做調整)，若每一感測器間距為 1 公尺長，則單一 FBG-SD 最大可感應位移量為正負 3.14 公分(總位移量為 6.28 公分)，當邊坡滑動量大於 FBG-SD 允許感測範圍量時，將使得部分 FBG-SD 可能無法繼續發揮功能(其餘未超過允許量測範圍時，可繼續感測傾斜觀測管變形量之改變)，此時，若能在傾斜觀測管外側增加一額外 (redundancy)，如光纖拉伸計，一般單模光纖可承受之應變量為 15,000 至 20,000  $\mu \varepsilon$ ，相對於 FBG-SD 其感測靈敏度較低，感測靈敏度約 30  $\mu \varepsilon$ ，對於低靈敏度之光纖光柵拉伸計較能承受大變形且低成本之配置則更能增加此變形監測系統之有效性與可靠性。也就是說小變形範圍內由 FBG-SD 所控制；大變形範圍則由光纖拉伸計所控制，而邊坡破壞經常也涉及地下水壓變化，因此若能同時監測水壓則更能有效反應地層之破壞潛能。

使用光纖感應系統做邊坡穩定監測需要實用而能夠維持長期穩定之訊號解讀裝置。市場上現有光纖訊號解讀系統並不一定能夠滿足現場監測在經濟與穩定性之需求，而必須在軟硬體方面做必要之檢測與改良。國內外在 FBG 水壓感測技術方面也有初步之發展，但其實用性仍然有限。

數值分析顯示，原深層地下水位之邊坡在不同降雨程度下其地下水位會會有不同程度之上升，受地下水位上方土層為非飽和及滲流的影響，降雨前後地層內水壓分佈常是非線性的。如果使用傳統在鑽孔內只量測一至兩個深度然後以線性內差的方法來估算水壓分佈的方法會有明顯的誤差。此一現象也顯示做地層內分佈式水壓監測之重要性。

本計畫之目的是進一步改良光纖地層位移與水壓監測技術之穩定性與經濟性、將光纖感應水壓計與地層移動監測系統加以整合，如此可以更充分的發揮邊坡穩定監測之功能。另一方面，本計畫將光纖感應器之解讀系統、光纖轉換器以及數值訊號傳輸系統做一整合，如此可以全時間以自動化之方式將數據傳輸至管理單位並與預警機制配合使用。

本計畫所希望達到之總目標有以下四項：

1. 光纖地層位移與水壓監測系統之整合與必要之改良。
2. 可與 FBG-SD 匹配，低解析度能承受大變形，低成本之光纖地層感應系統之研發。
3. 光纖感應訊號解析與資料擷取/傳輸系統之整合。
4. 以四年的時間設定測試場所做系統之現場應用測試。

測試地點在第一年選定，每年視研究之需要增加鑽孔及安裝新監測儀器，在此期間並連續紀錄數據，累積長期之使用經驗。

## 1.2 計畫工作項目與執行進度說明

本年度計畫之主要工作與進度內容為：

1. 以提高自動化光纖光柵解讀系統，如更換低耗電量工業型電腦及增加不斷電系統之供電時數。
2. 考量非飽和狀態下之現場地下水數值模擬，且完成模式之穩態與非穩態測試。
3. 現場地下水水位監測資料與數值模擬比較。
4. 完成重力式光纖傾斜儀改良與室內標定。
5. 現場光纖感測器資料擷取與系統維護。

## 第二章 光纖監測系統更新與目前概況

本年度計畫中於光纖光柵解讀系統部分，更換低耗電量之工業型電腦，及增加不斷電系統之供電量，以提供緊急情況下，光纖光柵解讀系統能夠正常運作，即時發送重要監測資料與訊息。另外，今年度現場會增加一光纖水壓監測孔位，其監測孔內會裝設10組光纖光柵水壓計，而孔位暫定安置IHMT-01傾斜觀測管附近(圖2.2所示)，因此，可藉由兩孔水壓監測管(NCTU-03及NCTU-04)，來判斷在B-B斷面上地層內之水流流向，以下為說明光纖監測系統更新後配置說明，及各監測孔位所安裝監測感測器成果。

### 2.1 光纖監測系統之孔位位置配置與選定要素說明

自95年5月5日本研究於至臺18線阿里山公路五彎仔路段現地勘查，依據現有監測資料(青山工程顧問報告)，現地傾斜觀測管編號C-11仍持續量測中，以及水位觀測井B2，據監測資料結果可知在暴雨期間，現地水位及水壓監測管內水位或水壓變化遽增，約可達數十公尺。由於B2與C-11兩鑽孔都位於N3滑動區之上緣(青山工程顧問報告)，此處對於現地地下水流數值分析為重要之邊界條件。所以本研究基於數值模擬分析考量選擇於傾斜觀測管C-11附近新增一傾斜觀測管，深度為40m並裝設研發之FBG-SD偏斜儀監測管內變形(詳細量測方法可見本計畫第一年度報告)。而現地水壓觀測部分，為了考量現有封層技術，將原先規劃設置在B-2旁100公尺水壓觀測井分成兩部分，首先在C-11旁設置深度40公尺的水壓觀測井，並以間隔5公尺之距離，安裝5組光纖光柵水壓計，其目的可先測試現場封層技術是否可到達預期目標，另一方面日後可與NCTU-01傾斜觀測管中裝設之20組FBG-SD所量測的資料及以傳統IP量測C-11傾斜觀測管變形資料相互比較。而在B-2孔位設置深度為60公尺水位觀測井，孔位編號為NCTU-03，該孔位同樣以間隔5公尺的距離，裝設10組光纖光柵水壓計，以監測NCTU-02與



NCTU-03兩水壓觀測管中之水壓隨深度的變化，圖2.1為傳統水壓計與光纖光柵水壓計現地安裝比較圖。

IHMT-01 200公尺傾斜觀測管之配置為考量上述之光纖監測孔位大多分布於B-B剖面上(見圖2.2)，加上預定裝設位置距離邊坡坡面僅有1~2公尺，較容易監測傾斜管之變形量。

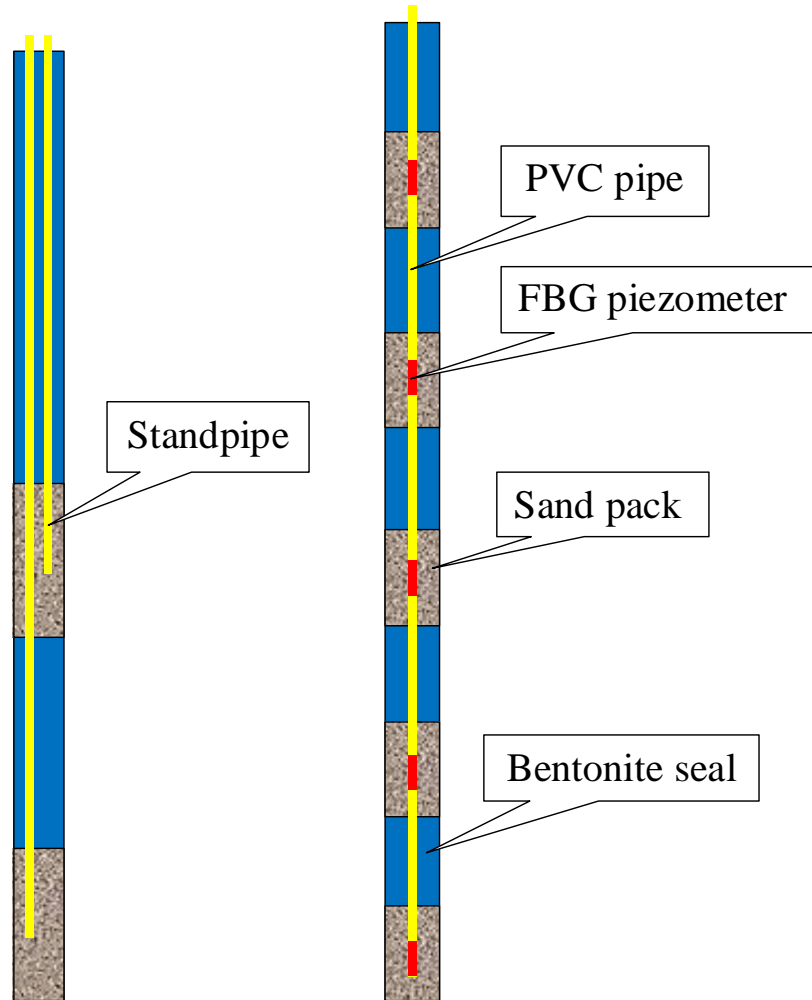


圖 2.1 傳統水壓計與光纖光柵水壓計現地安裝比較圖

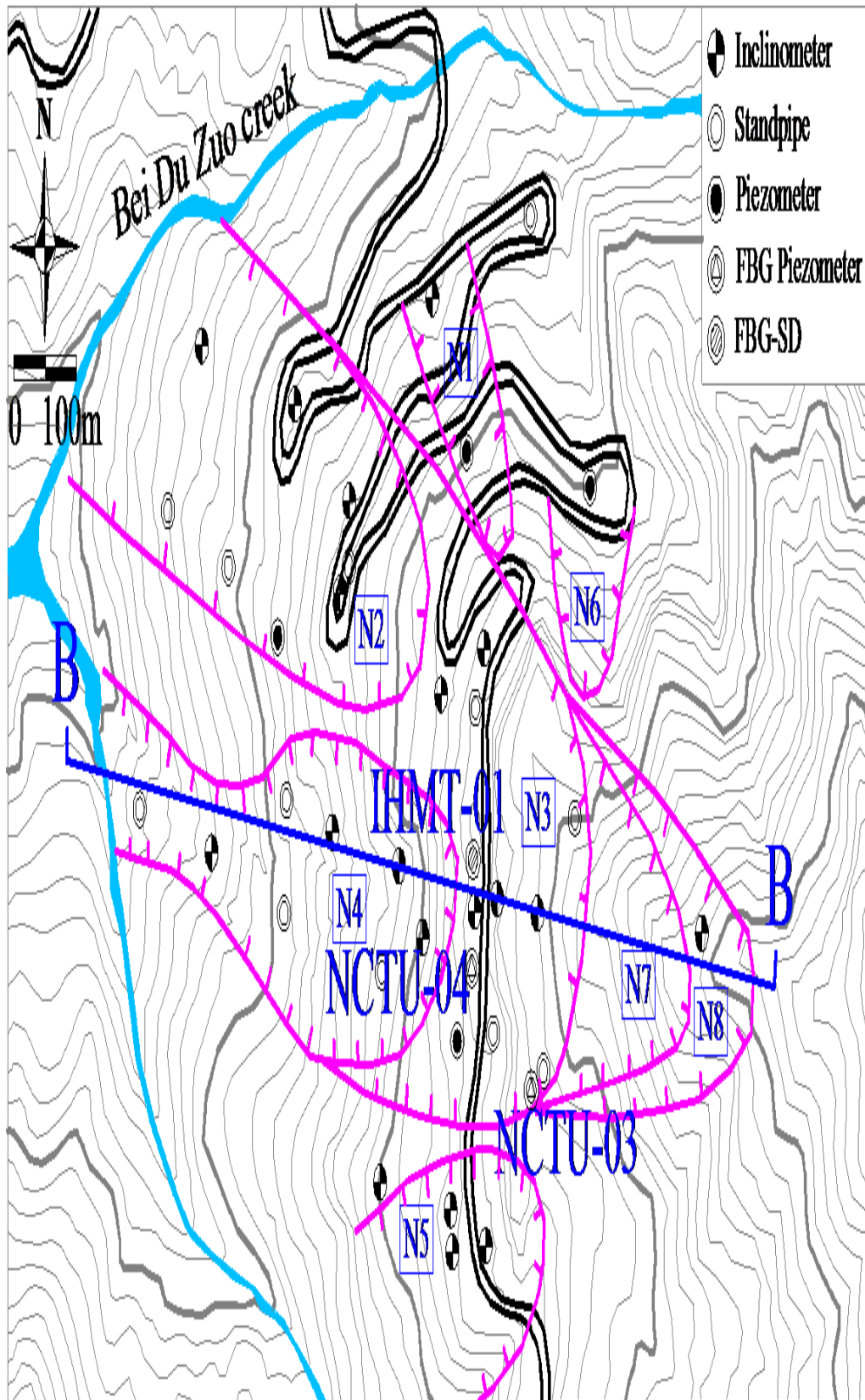


圖 2.2 全光纖式監測儀器配置圖 (青山工程顧問公司, 2007)

## 2.2 光纖監測系統目前運作狀況說明

圖2.3為目前NCTU-03光纖柵水壓觀測井歷時曲線圖，由圖可知該水壓觀測井自95年10月安裝完成後，初始所量得的數據為隨深度變化之淨水壓力，其代表性非常合理，經過一個月後(071026~071119)，水壓觀測井內部水壓慢慢消散，深度從-50公尺至-5公尺，各點深度位置所呈現之水壓力均在100kPa以下(10公尺水頭高度)，且該期間也無下雨跡象，所以各感測點運作正常。而071026至080523這七個月期間中，並非為南部地區雨季季節，故各深度點之水壓力並無太大變化之處且量測數據非常重疊。08523至080611期間，受季節性氣候之影響，南部地區之梅雨季節正逢開始，且該段期間降雨量非常多，所以深度-35公尺以下之水壓力有明顯增加之趨勢。另外，上年度辛樂克颱風期間，成功地完整擷取監測資料，而當日降雨量為600公厘，由數據結果顯示NCTU-03孔內水壓力在短時刻中，增加有10至20公尺之水頭高度(詳細說明可參閱本計畫第二年度報告)。目前NCTU-03孔位內水壓計個感測點均感應正常，如圖2.3。

圖2.4為逢甲大學測量資訊研究中心於IHMT-01傾斜觀測管附近裝設一GPS監測點位，後續IHMT-01所計算出之地表位移可與該GPS監測點位監測結果比較。圖2.5至圖2.8為目前自動化光纖光柵解讀系統監測畫面圖。

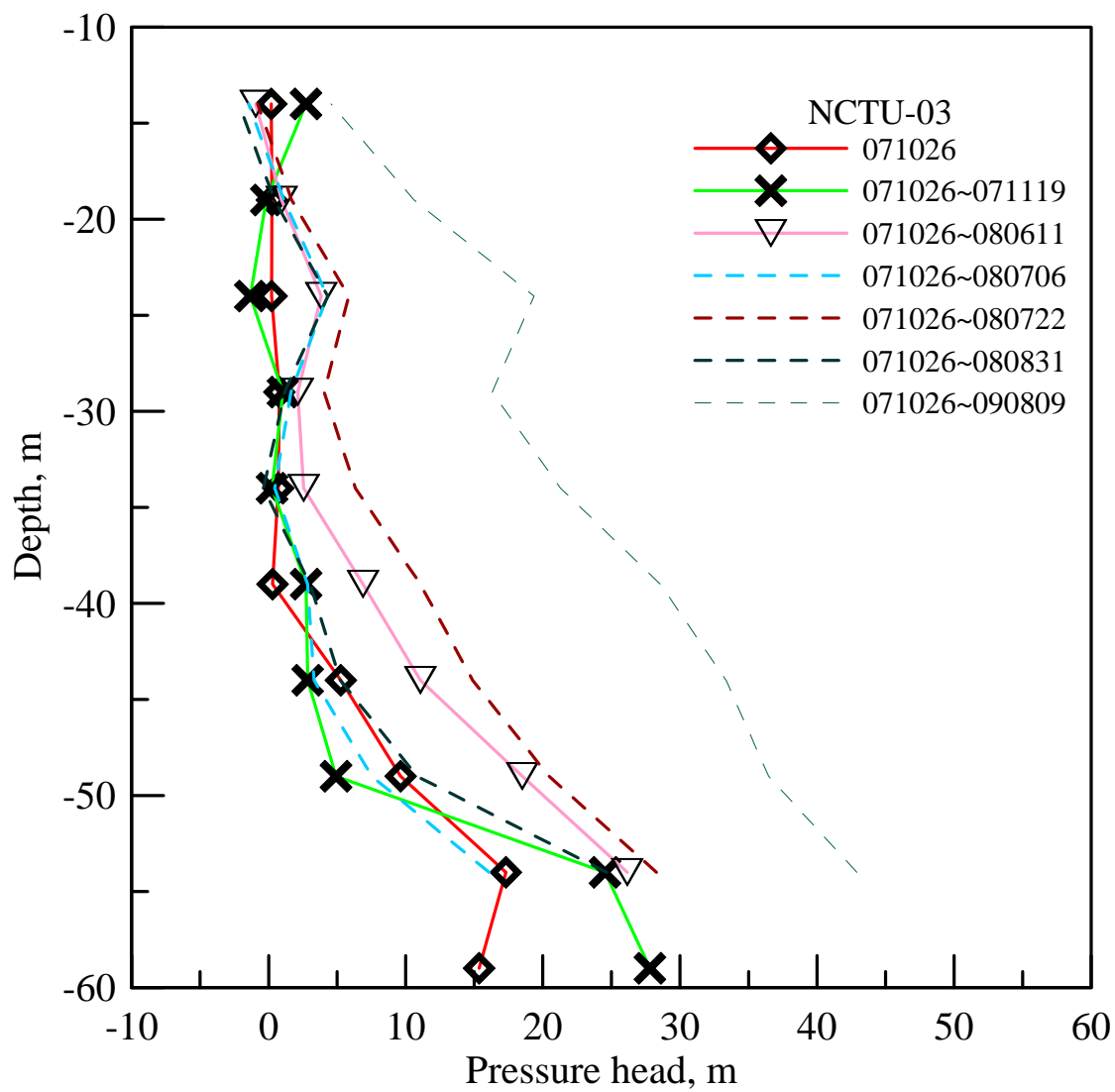


圖 2.3 NCTU-03 光纖光柵水壓監測孔位歷時水壓變化圖



圖 2.4 IHMT-01 監測孔位旁之 GPS 監測站

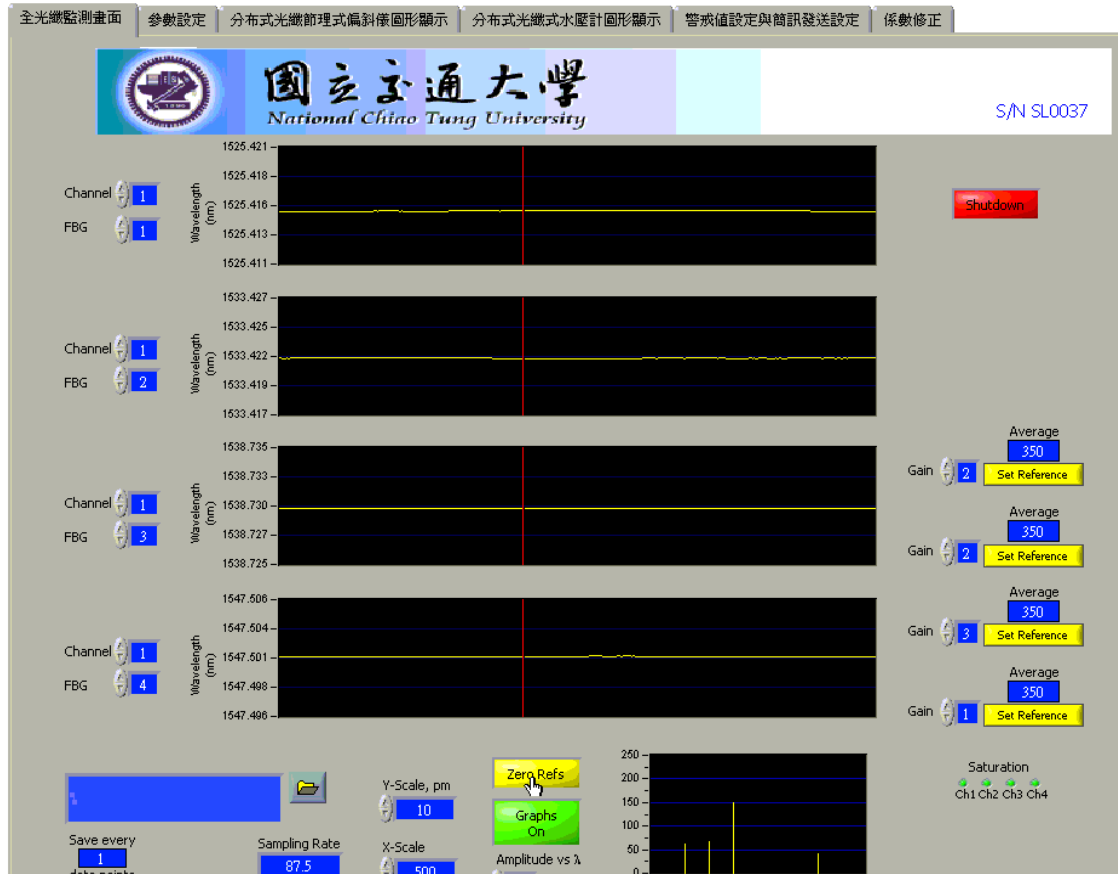


圖 2.5 自動化光纖光柵解讀系統監測畫面

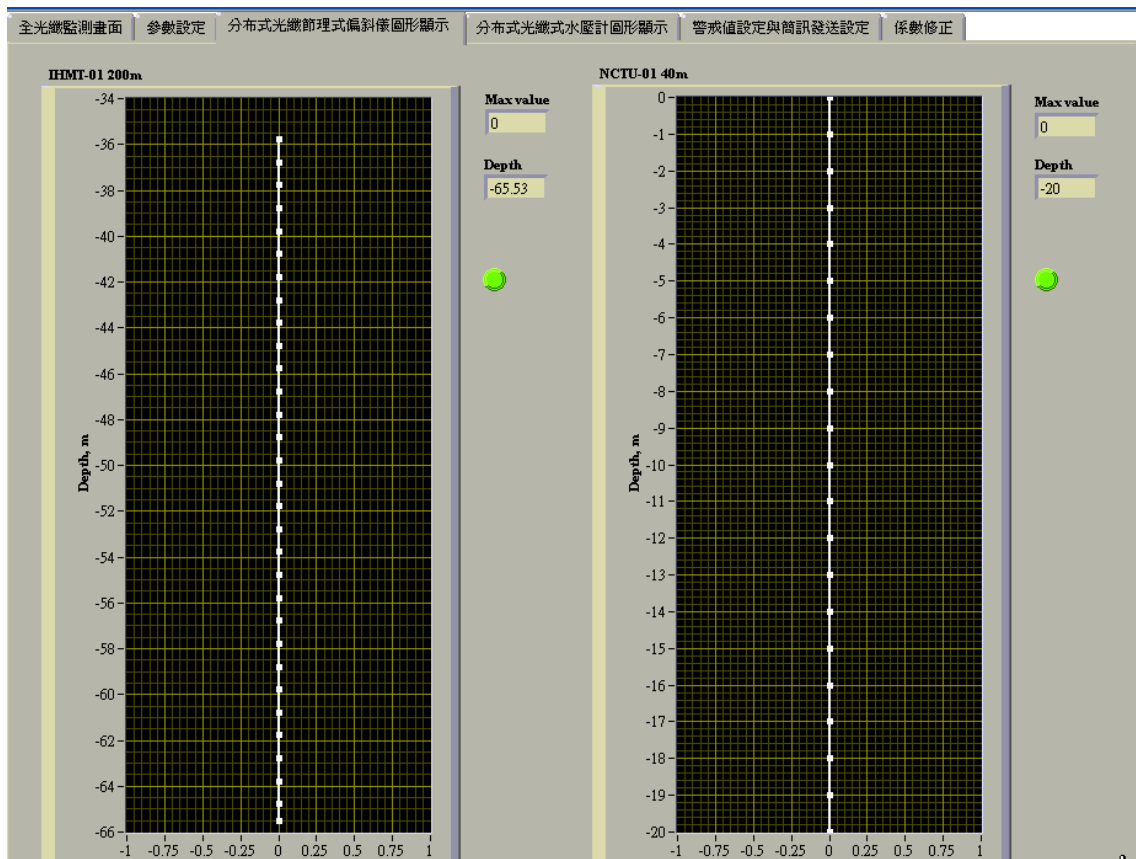


圖 2.6 光纖感測器自動化擷取系統地層位移畫面

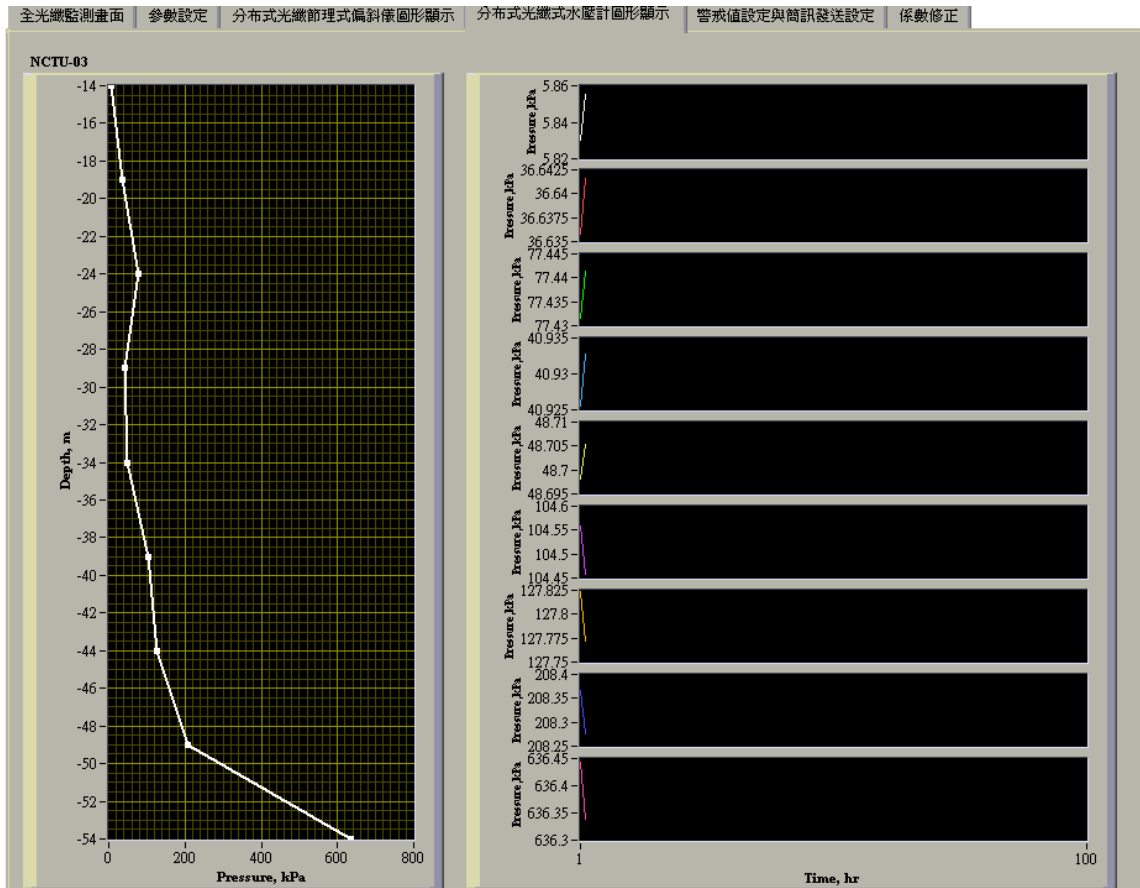


圖 2.7 光纖感測器自動化擷取系統水壓分布及歷時畫面





## 2.3 光纖自動化監測系統與光纖光柵水壓計改進說明

圖2.9為本計畫新增設高供電量不斷電系統，可提供電功率達4800W，該不斷電系統可因應不同需求增加電瓶數量，以增加其電功率之大小，但礙於監測小屋的空間使用大小，本次只裝設2組12伏特200安培容量之電池；另外，由於不斷電系統供電量有限，為了使得自動化光纖光柵解讀系統，能夠在緊急狀況下運作正常，所以將自動化光纖光柵解讀系統之控制電腦更換成低耗電量之工業型電腦，其優點每小時耗電功率為15W，不需風扇散熱，以減少電量，圖2.10為自動化光纖光柵解讀儀器圖。

圖2.11為改良後之光纖光柵水壓計實體圖，其改良為將溫度光柵直接黏貼於光纖光柵水壓計本體上，直接量測水壓計本體受溫度之影響，主要目的為修正感測器會因外在溫度變化，使得感測器之讀數會受溫度產生變化，故光纖光柵水壓計所測得之光纖光柵改變量，須扣除溫度影響部分，才可計算實際之壓力值，而圖2.12為室內標定結果圖(於25°C之室溫)，其靈敏度約為0.1 KPa，圖2.13為將改良後之光纖光柵水壓計放置於一恆濕恆溫箱進行溫度測試，由測試結果圖可看出，水壓計上之溫度光柵對於溫度反應比水壓計還高，因此當水壓計受到外在溫度影響時，可藉由溫度光柵來修正溫度對光纖光柵水壓力計之影響，方程式(2.1)為說明，光纖光柵水壓計之光柵波長變化量含有， $\Delta\lambda_{Bm}$  受壓力狀況下，所產生之光柵波長改變量； $\Delta\lambda_{BT}$  受溫度影響下之光柵波長改變量； $\Delta\lambda_{Bc}$  為將水壓計修正在室溫25°C下之實際受壓力所造成之改變量。

$$\Delta\lambda_{Bc} = \Delta\lambda_{Bm} \pm \Delta\lambda_{BT} \dots\dots\dots (2.1)$$

圖2.14為將光纖光柵水壓計受其溫度反應量修正至室溫25°C的結果圖。

表2.1為目前製作完成10組光纖光柵水壓計，其預計裝設於IHMT-01傾斜觀測管孔位旁，其目的為當暴雨來時，可藉由在B-B斷面

上下處兩孔之水壓監測孔(NCTU-03及NCTU-04)，見圖2.2。進而判斷出該斷面之地下水流之可能流動方向，並與現場數值模擬分析相互比較。



圖 2.9 高供電量(4800W)不斷電系統



圖 2.10 低耗電量自動化光纖光柵解讀儀器系統

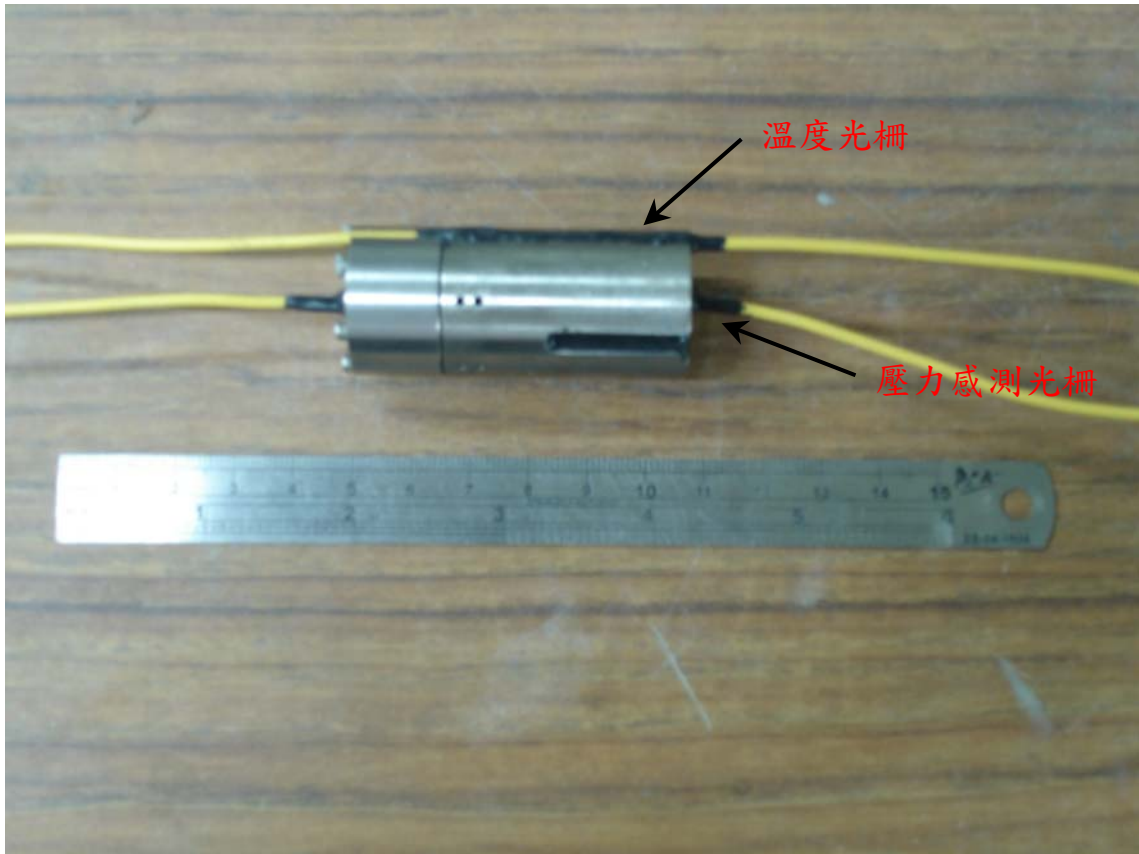


圖 2.11 改良後光纖光柵水壓計實體圖

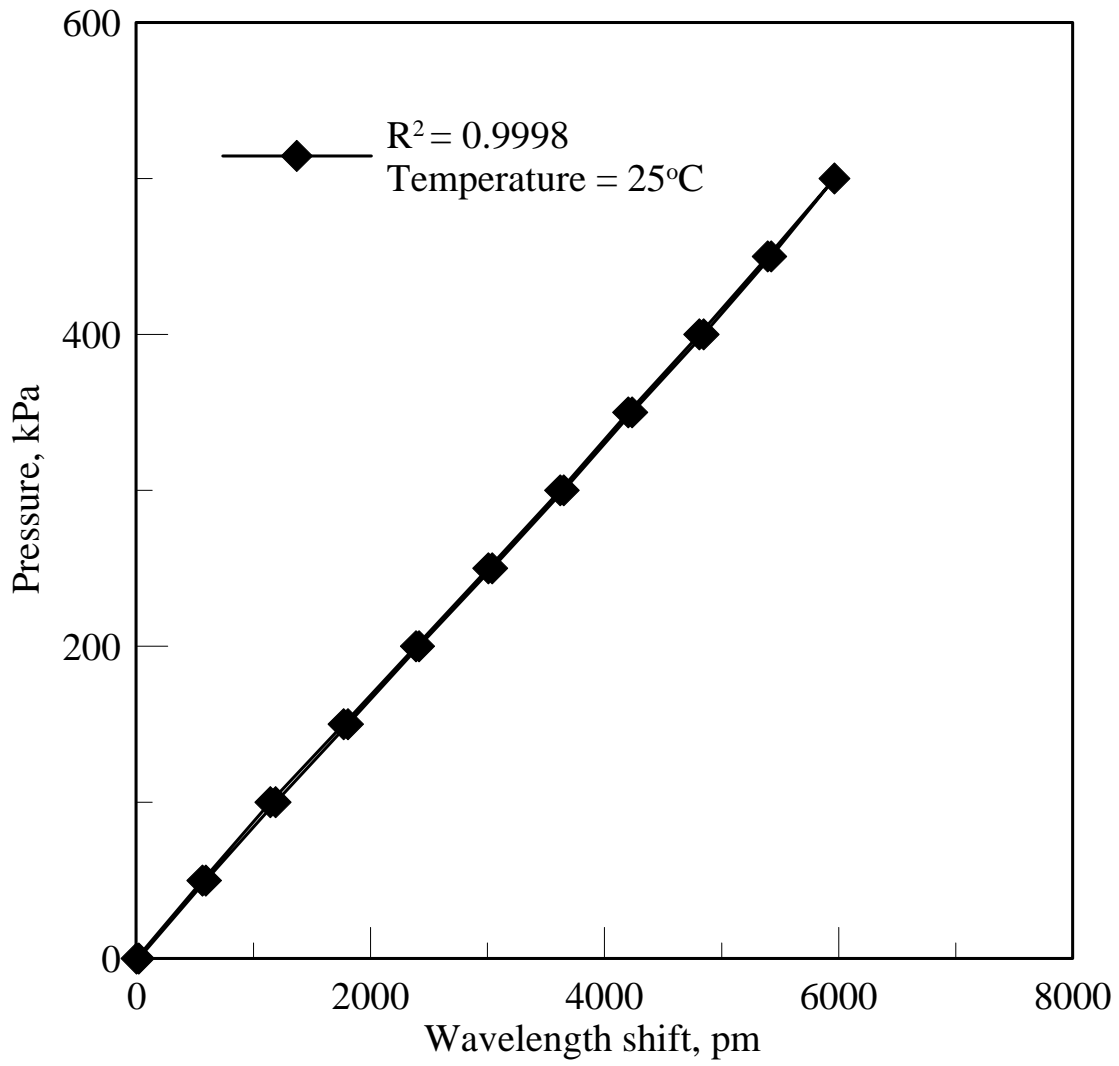


圖 2.12 改良後光纖光柵水壓計率定圖

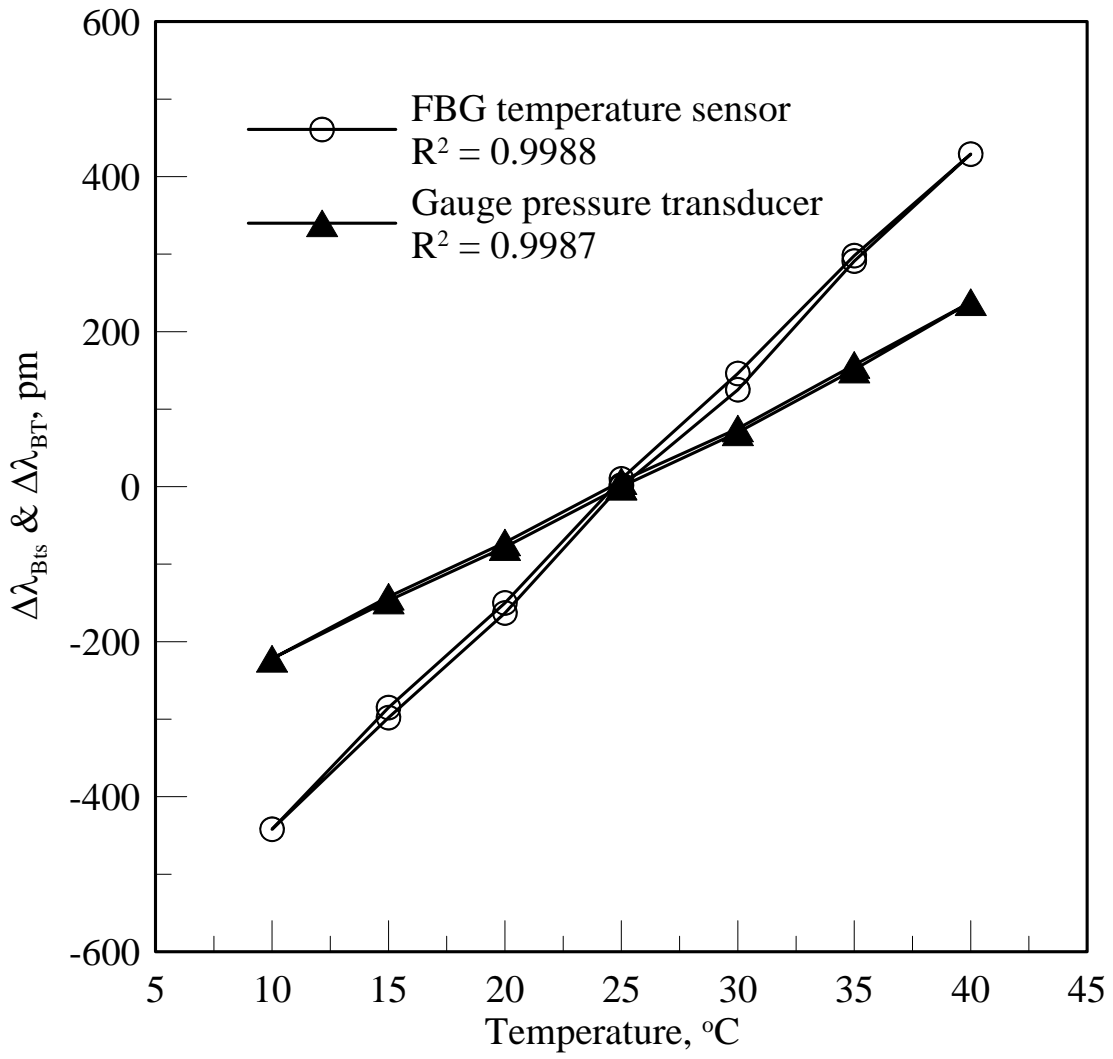


圖 2.13 溫度效應對於光纖光柵水壓計率定圖

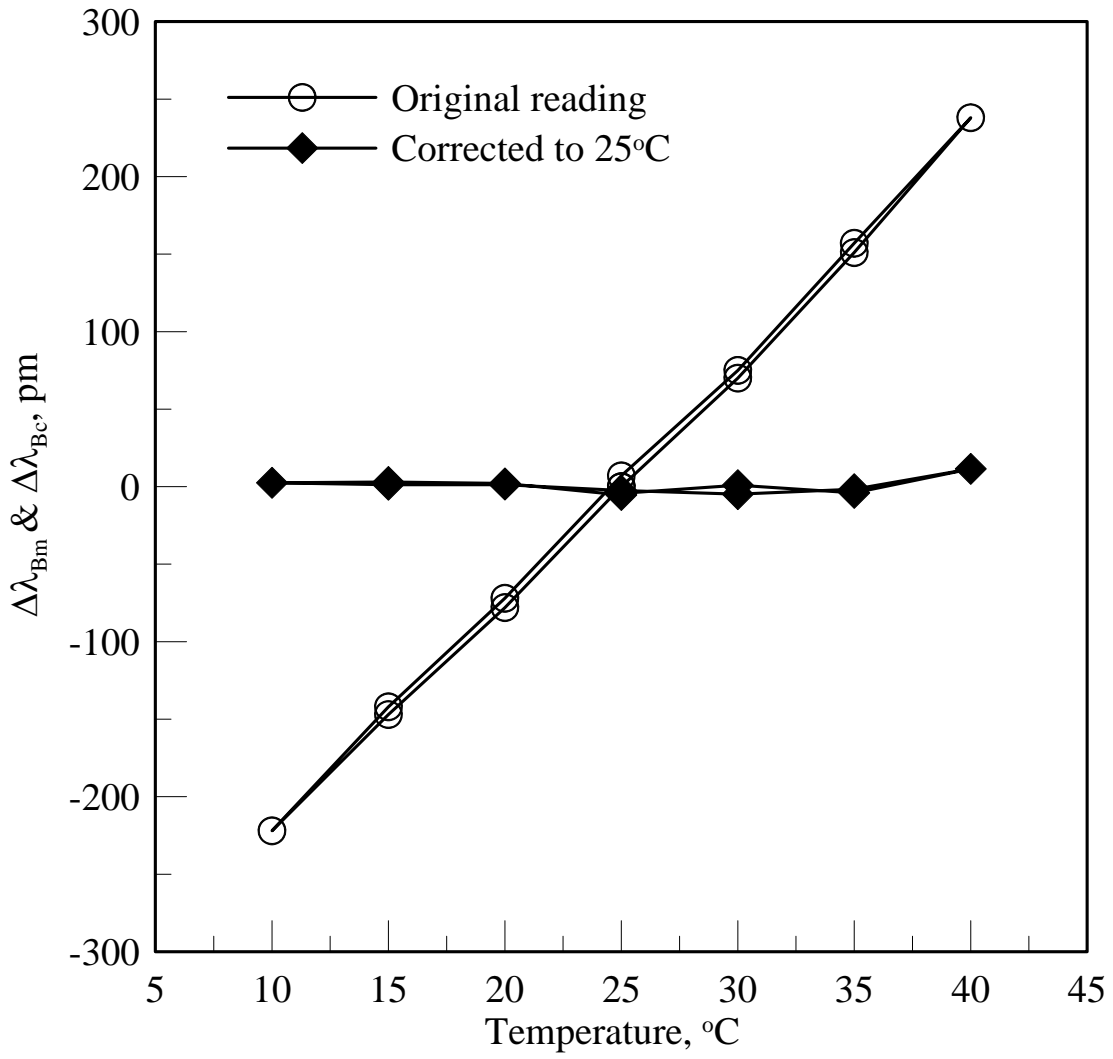


圖 2.14 修正溫度對於光纖光柵水壓計結果圖



表 2.1 NCTU-04 光纖光柵水壓計配置表

水壓計編號	壓力感測波長, nm	溫度感測波長, nm	率定係數, kPa/pm
AL-A-1	1524	1524	0.1266
AL-A-2	1530	1530	0.1034
AL-A-3	1536	1536	0.1004
AL-A-4	1542	1542	0.1067
AL-A-5	1548	1548	0.1274
AL-B-1	1524	1524	0.1137
AL-B-2	1530	1530	0.1008
AL-B-3	1536	1536	0.1039
AL-B-4	1542	1542	0.1187
AL-B-5	1548	1548	0.1084

### 第三章 重力式光纖傾斜計與加速度感測器研發

本章節主要敘述重力式光纖傾斜與加速度感測器之感測原理，以及其研發構想與應用範圍，並透過室內標定之進行初步驗證。

#### 3.1 光纖光柵原理簡述

光纖光柵的製造係利用高能量同調雷射在光纖曝光造成折射率永久改變，成為一系列週期為 $\Lambda$ 的明暗條紋，此稱之為光纖光柵（Fiber Bragg Grating, FBG）。當一寬頻光耦合進入此一光纖時，除了滿足布拉格條件（Bragg condition）的特定波長，其餘波長都會因為相位差而相消(Hill, 2005；Kersey, 1992；Meltz, 1989；Measures, 2001；Othons, 1999；Rao, 1998、李瑞庭, 2005)。

其布拉格反射波長 $\lambda_B$ 為

$$\lambda_B = 2n\Lambda \dots\dots\dots(3.1)$$

其中：

$n$  = 光纖纖心的有效折射率

$\Lambda$  = 折射率週期性改變的間距

圖3.1為光纖光柵反射原理示意圖，光柵中的週期明暗條紋類似在光纖中製造一系列透鏡組合，當寬頻光束通過這些透鏡組合時，造成某特定頻率光波被反射，而其他頻率光波則繼續向前傳導，而這些透鏡的間距不同，則被反射光波頻率亦不相同。

應變與波長飄移關係如圖3.2所展示，當光柵受到外力產生應變時，則造成光纖光柵原本間距 $\Lambda$ 的改變增加量為 $\Delta\Lambda$ ，帶入(3.1)式可以得到

$$\Delta\lambda_B = 2n\Delta\Lambda \dots\dots\dots(3.2)$$

根據應變的定義

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \dots\dots\dots(3.3)$$

得到

$$\Delta l = \left(\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}\right)l = \left(\frac{\frac{\Delta\lambda_B}{2n}}{\frac{\lambda_B}{2n}}\right)l \dots\dots\dots(3.4)$$

因此

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \dots\dots\dots(3.5)$$

當外力施加產生應變後，不只是反射回來的 $\lambda_B$ 會改變，光纖的有效折射率 $n$ 也會同時改變。因此上式應該被修正為

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K \frac{\Delta l}{l} = K\varepsilon \dots\dots\dots(3.6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{K\lambda_B} \dots\dots\dots(3.7)$$

當光纖光柵受到溫度變化時，波長飄移量可由下式表示

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\xi + \alpha)\Delta T = K_T \times \Delta T \dots\dots\dots(3.8)$$

其中

$\xi$  = 光纖的熱光係數 (Thermal Optical Coefficient)

$\alpha$  = 光纖的熱膨脹係數 (Thermal Expansion Coefficient)

$K_T$  = 溫度敏感係數

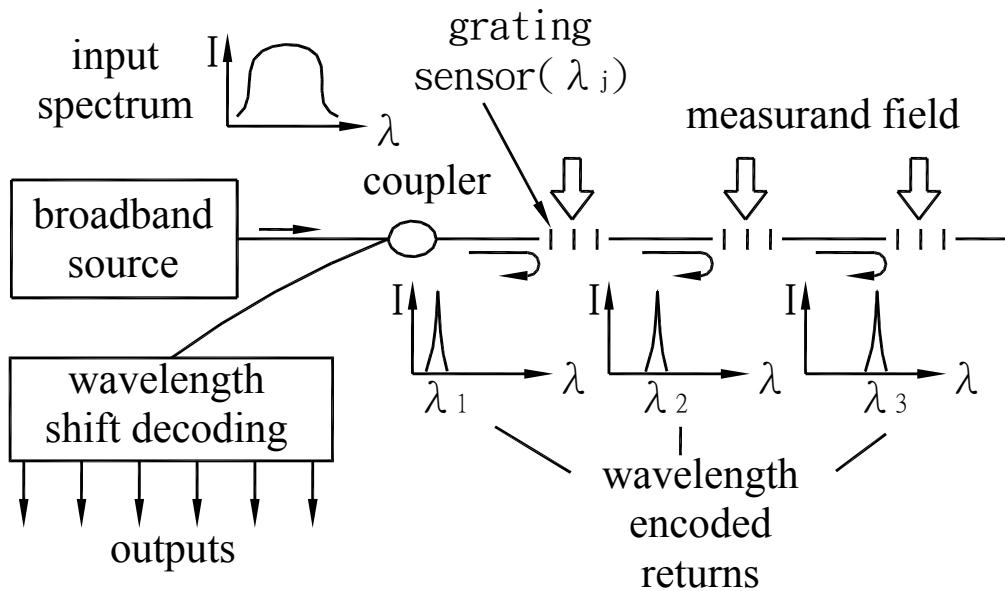


圖 3.1 光纖光柵反射原理示意圖 (Ho et al., 2005)

布拉格波長飄移並非完全線性，在高溫時溫度變化會使波長飄移較為顯著，因為在 $\xi$ 在 $150^{\circ}\text{C}$ 約為 $6.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ， $450^{\circ}\text{C}$ 時則變為約 $9.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，而熱膨脹係數 $\alpha=0.55 \sim 1.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。然而在室溫條件下， $1^{\circ}\text{C}$ 的溫度變化約使得布拉格飄移約 $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-2}\text{nm}$ 。

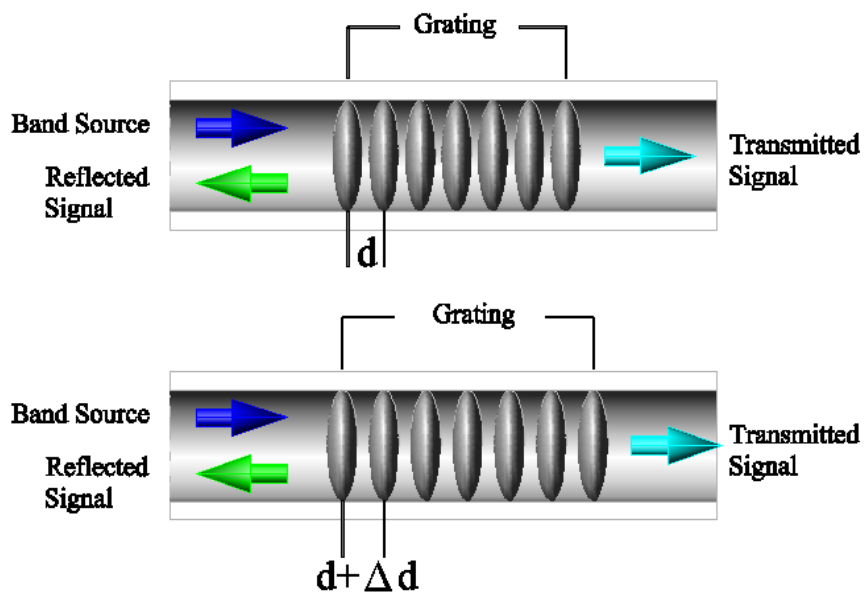


圖 3.2 光纖光柵感測機制示意圖 (簡旭君, 2003)

### 3.2 光纖光柵傾斜/加速度感測

本研究所研發雙質量光纖光柵加速度傾斜感測裝置 (FBG inclinometer/accelerometer, FBG-I/A) 之整體構件如圖3.3與圖3.4所示 (黃安斌、何彥德, 2008)。其加速度量測單元是由質量重塊與軸承桿件連接而形成。質量重塊將分別黏著於左右之兩個光纖光柵(FBG1與FBG2)拉緊，兩個FBG訊號透過光纖傳遞。感測元件固定於上蓋。透過軸承左右偏移。重塊與光纖光柵所形成之組合體以軸承為軸心旋轉並產生側向位移量。

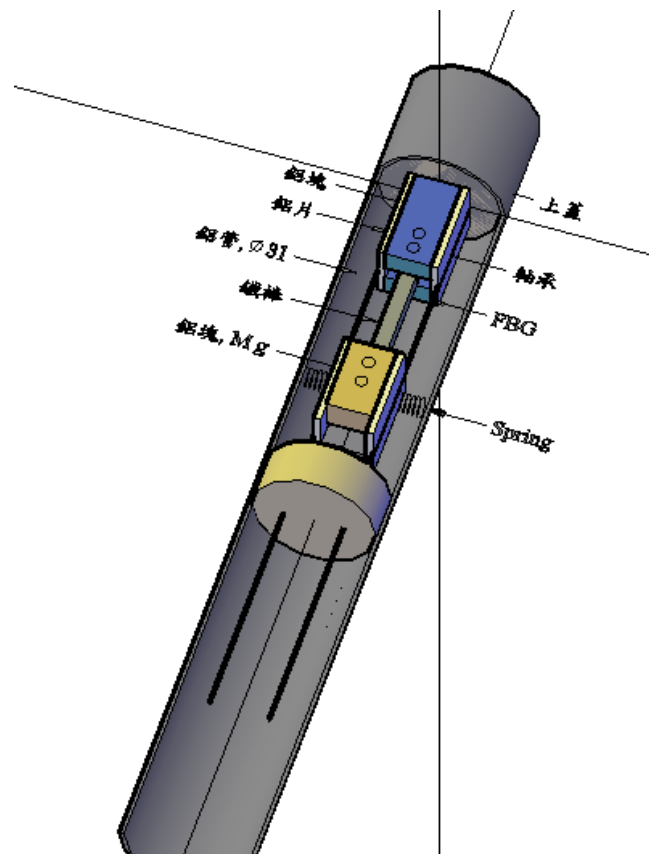


圖 3.3 FBG accelerometer 側面剖示圖

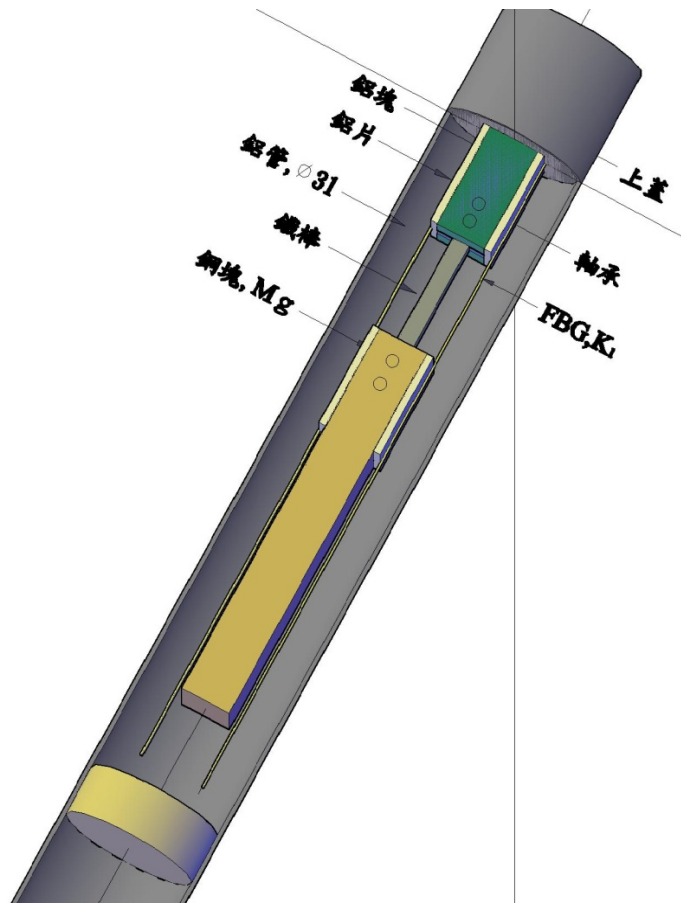


圖 3.4 FBG inclinometer 剖示圖

### 3.3 FBG-I/A 加速度感測原理

圖3.5為FBG-I/A加速度感測示意圖，當感測裝置相對於支架垂直方向(x方向)產生加速度 $a_x$ 時，感測器之系統運動公式如下：

$$M \ddot{x} + ((a/b)^2 K_1)x = -Ma_x \dots\dots\dots(3.9)$$

其中

M = 重塊質量

$\ddot{x}$  = x方向位移對時間之二次微分

$K_1$  = 光纖光柵張力方向之勁度

$a$  = 光纖光柵對應軸心之力臂

$b$  = 重力塊對應軸心之力臂

將公式兩邊除以 $2M$ ，得到：

$$\ddot{x} + \omega_o^2 x = -a_x \dots\dots\dots(3.10)$$

其中

$$\omega_o = \sqrt{((a/b)^2 K_1)/M} \dots\dots\dots(3.11)$$

代表此加速度儀之天然頻率。當加速度儀受一x向週期性振波，其迴旋角度頻率為 $\omega$ 時

$$a_x = A_x e^{i\omega t} \dots\dots\dots(3.12)$$

其中

$A_x$  = 振幅

重塊質量所對應之週期性振波為

$$x = X e^{i\omega t} \dots\dots\dots(3.13)$$

將公式(3.11)與(3.13)重塊振幅代入公式(3.9)即可得到重塊質量振幅X

$$X = \frac{-1}{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 \omega_o^2} A_x \dots\dots\dots(3.14)$$

光纖光柵所受應變 $\epsilon_{FBG}$ 與X關係為：

$$\epsilon_{FBG} \approx -\kappa X \dots\dots\dots(3.15)$$



因此透過高頻  $\varepsilon_{FBG}$  之擷取，即可計算振幅  $X$  隨時間之變化，而得到量測之目的。

$$\kappa = \frac{a/b}{L} \frac{1}{\omega_0^2} (\mu\text{strain/G})$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

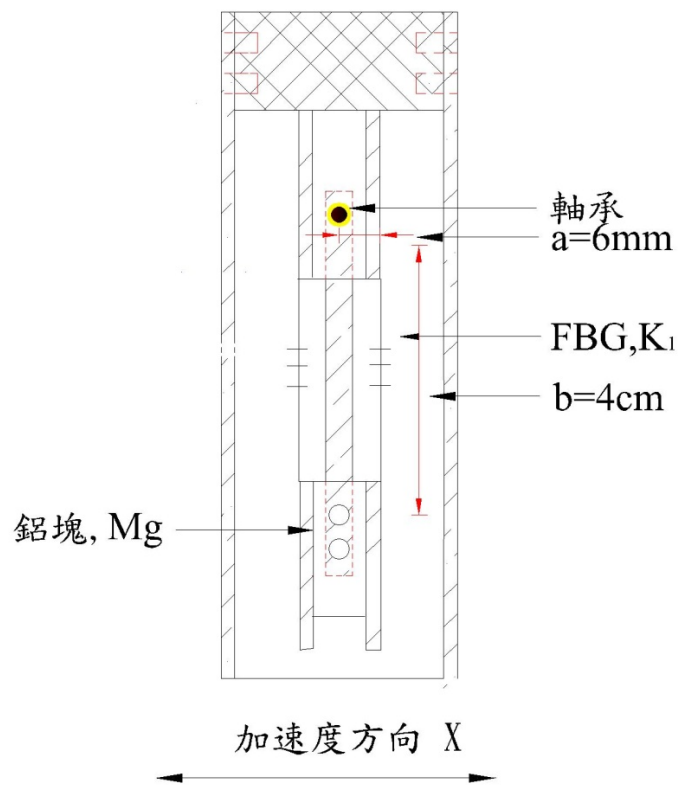


圖 3.5 FBG-I/A 加速度感測示意圖

### 3.4 FBG-I/A傾斜感測原理

在無傾斜時光纖光柵左右平衡，當傾斜時重塊重心軸向至軸承間之距離  $d_{FBG}$ 。光纖光柵透過重力塊受制於光纖光柵產生反作用拉力與順時針方向之力矩 (Mcw) 為

$$M_{cw} = (F_{FBG}) \times d_{FBG} \dots\dots\dots(3.16)$$

其中

$F_{FBG}$  = 光纖光柵所受拉力之改變

$d_{FBG}$  = 光纖光柵相對於軸承之力臂

當傾斜時重塊受重力影響使得此組合體受逆時針方力矩 (moment)，此一逆時針方力矩 (Mccw) 為：

$$M_{ccw} = (Mg) \times L_M \sin \theta \dots\dots\dots(3.17)$$

其中

$g$  = 重力加速度

$L_M$  = 重塊相對於軸承之力臂

Mccw與Mcw大小相同方向相反，因此當感測裝置相對於重力方向產生傾斜角度  $\theta$  時 (如圖3.6所示)，此時  $\theta$  與FBG有以下之關係式：

$$F_{FBG} = \frac{MgL_M \sin \theta}{d_{FBG}} \dots\dots\dots(3.18)$$

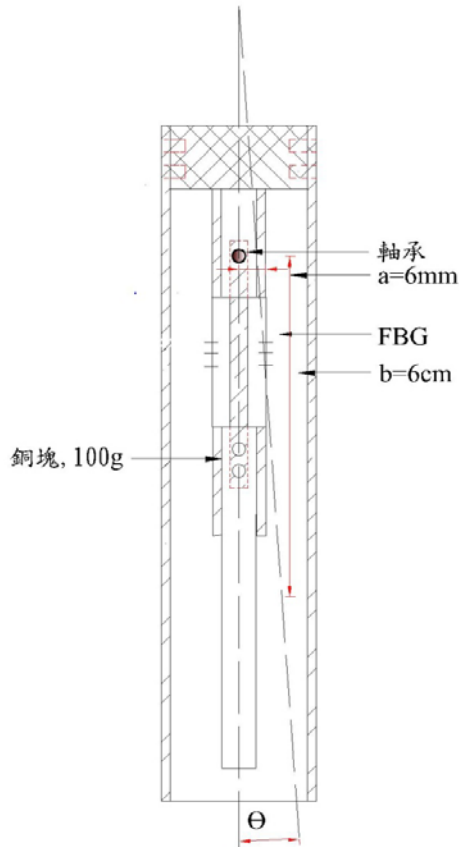


圖 3.6 FBG-I/A 傾斜感測示意圖

在重力塊上左右之光纖光柵所受拉力改變FBG大小相同正負相反。利用此一特性可以抵銷溫度效應，因為溫度對重力塊左右方之光纖光柵所產生拉力改變FBG大小與正負都相同。將重力塊左右方光纖光柵所量得拉力改變FBG數值相減即可將溫度效應消除。

如圖3.7所示每一FBG-I/A單元上下配有滾輪，可以配合放入傳統傾斜管中，當地層滑動時FBG-I/A可經由傾斜角度變化量來計算單組FBG測傾儀側向移動量，最後累積計算出變形監測管因地層移動而造成之側向位移。在實驗室中可標定出光柵波長改變量與角度變化量的關係(圖3.8)，根據標定結果計算，FBG波長改變1pm (解析儀所能讀取之最小FBG波長改變量) 所對應之角度變化量，傾斜角度精度在0.002與0.004度之間。在監測地層滑動時我們可以將多個FBG-I/A串接在一起，並將量測到的角度換算成側向位移量，單組FBG測傾儀能夠容許的傾斜角度在-5度至+5度之間。



圖 3.7 FBG-I/A 實體圖

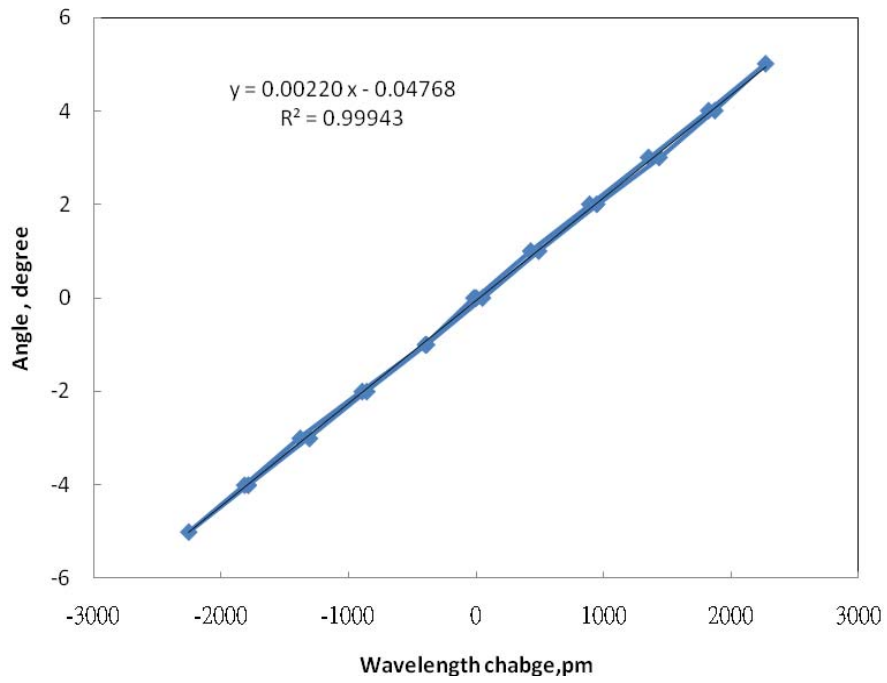


圖 3.8 FBG-I/A 傾斜標定結果

### 3.5 重力式光纖傾斜計之改良與測試

為了考量重力式光纖傾斜計量測角度增加及感應最小角度之變化量，故將原先設計之重力式光纖傾斜計進行改良。依據力學平衡條件下，將原有重力式光纖傾斜計的重力塊尺寸改為16mm \*16mm\* 60mm，其總重量為180g，而重力塊之重心距離軸承中心長度(力臂距離)為55mm，另外，為了提高系統支撐重量塊之穩定度，將軸承端改用2顆3mm有帽之軸承。圖3.9及圖3.10為此重力式光纖傾斜計之設計圖與實體圖。

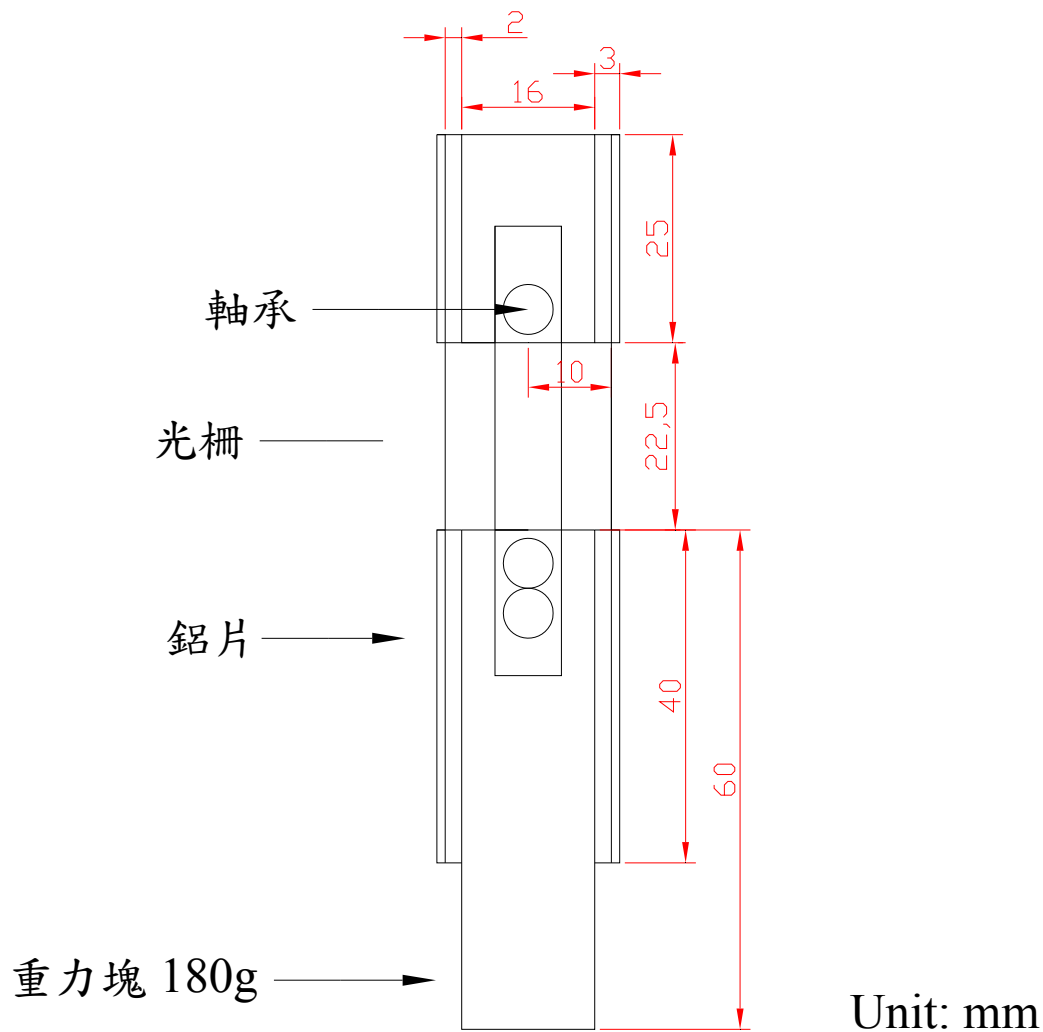


圖 3.9 第一次修正後 FBG-I/A 傾斜感測示意圖

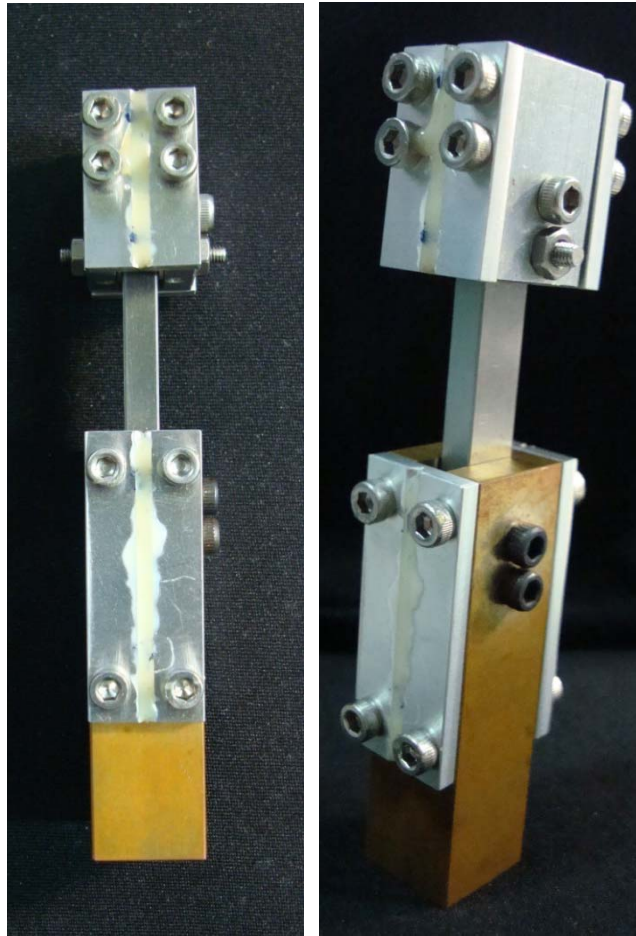


圖 3.10 (a)FBG-I/A 實體圖側視圖；(b) FBG-I/A 實體圖斜角視圖

由重力式光纖傾斜計標定試驗結果，當光纖光柵(FBG)波長改變 1pm (解析儀所能讀取之最小FBG波長改變量)所對應之角度變化量為 0.005與0.007度之間。其可感測角度範圍為-3度至+12度之間，其標定結果之相關係數( $R^2$ )為0.9974，圖3.10為此重力式光纖傾斜之標定結果值。

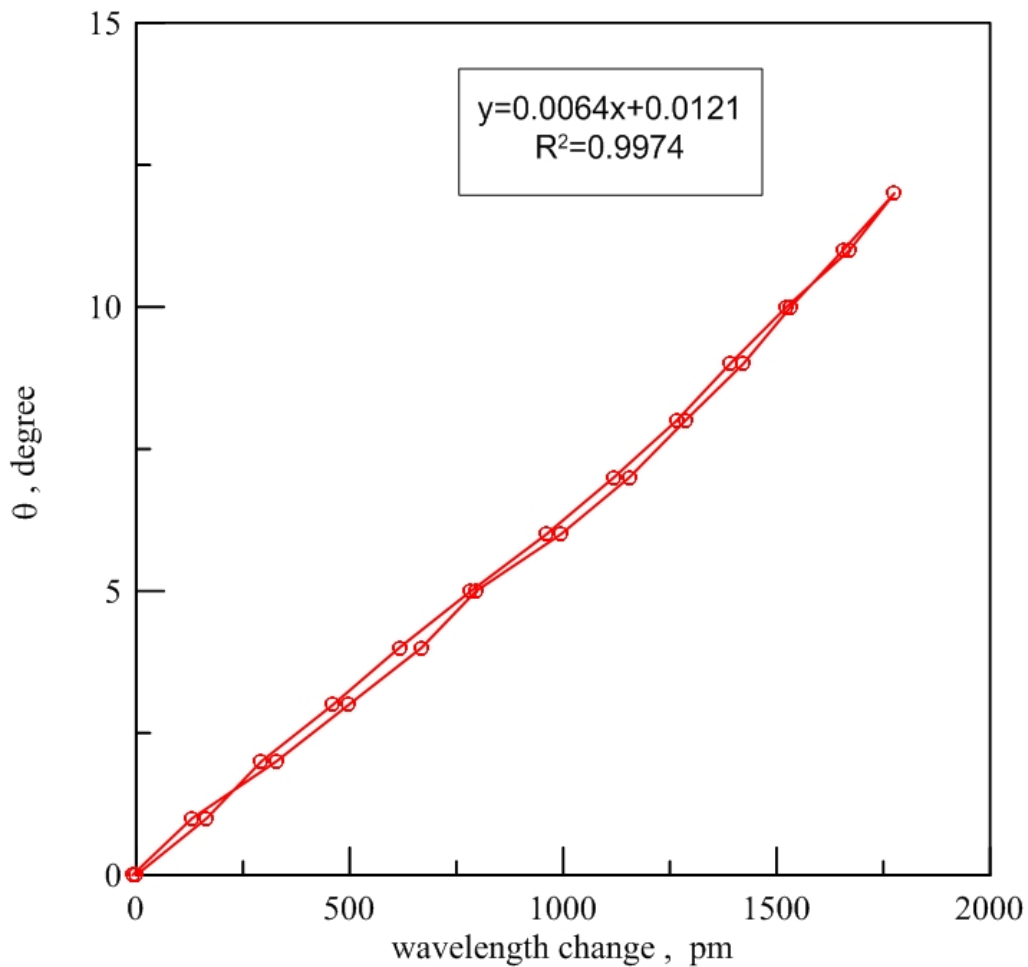


圖 3.11 第一次修正 FBG-I/A 傾斜標定結果

由前一次重力式光纖傾斜計改良結果，如圖3.11，其感測效果未達預期的感應範圍，且感應靈敏度偏低，其感測範圍0度至12度之間，可感應最小角度變化量為0.0064度，因此，重新考量力平衡方程式，其方程式如下所示：

$$F \times D = W \times L \times \sin \theta \dots\dots\dots(3.19)$$

其中，F為光纖光柵因系統旋轉時，所產生之拉力；D為光纖光柵與軸承中心之距離；W為系統之重力塊之重量；L為重力塊之重心距離軸承中心長度(力臂距離)； $\theta$ 為系統之旋轉角度。

由方程式(3.19)可觀察出，當兩光柵之間距越小(D)，其系統靈敏度相對會提高；若重力塊重量越重(W)，其靈敏度相對會提高；軸承與重力塊距離越長(L)，其靈敏度相對提高。

依據上述說明，則將重力式光纖傾斜計進行第二次修正，其中重力塊尺寸改為16mm \* 6mm \* 100mm，其重力塊重量為100g，重塊相對於軸承之力臂為5mm，而黏貼光柵之鋁片厚度改為2mm，圖3.12為第二次修正之重力式光纖傾斜計(FBG-I/A)設計圖，圖3.13與圖3.14為重力式光纖傾斜計製作過程圖，圖3.15為重力式光纖傾斜計標定過程圖。

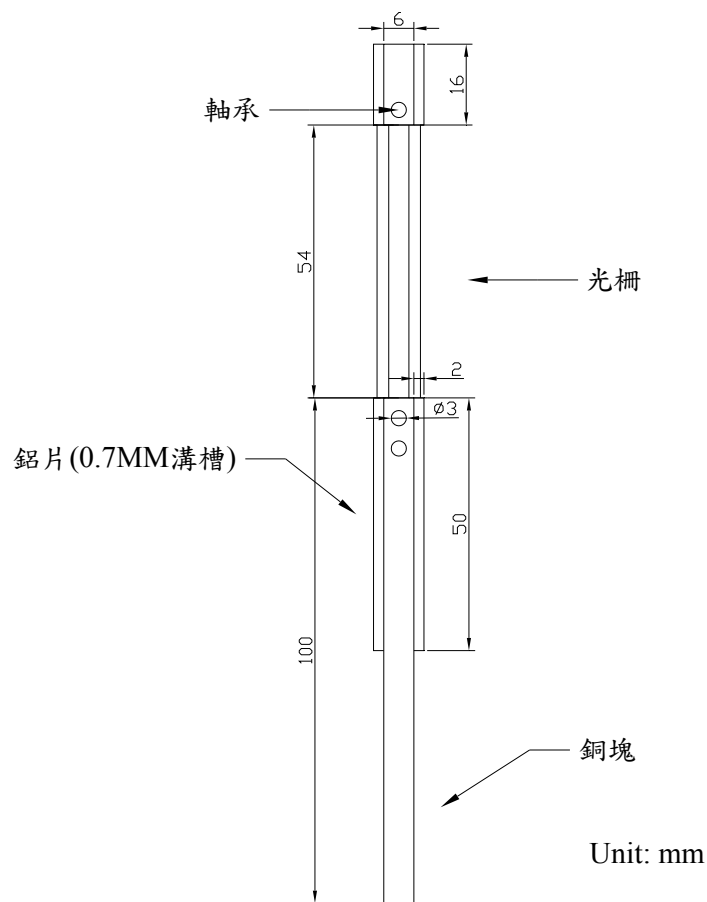


圖 3.12 第二次修正 FBG-I/A 傾斜感測示意圖





圖 3.13 FBG-I/A 光纖光柵黏貼過程圖

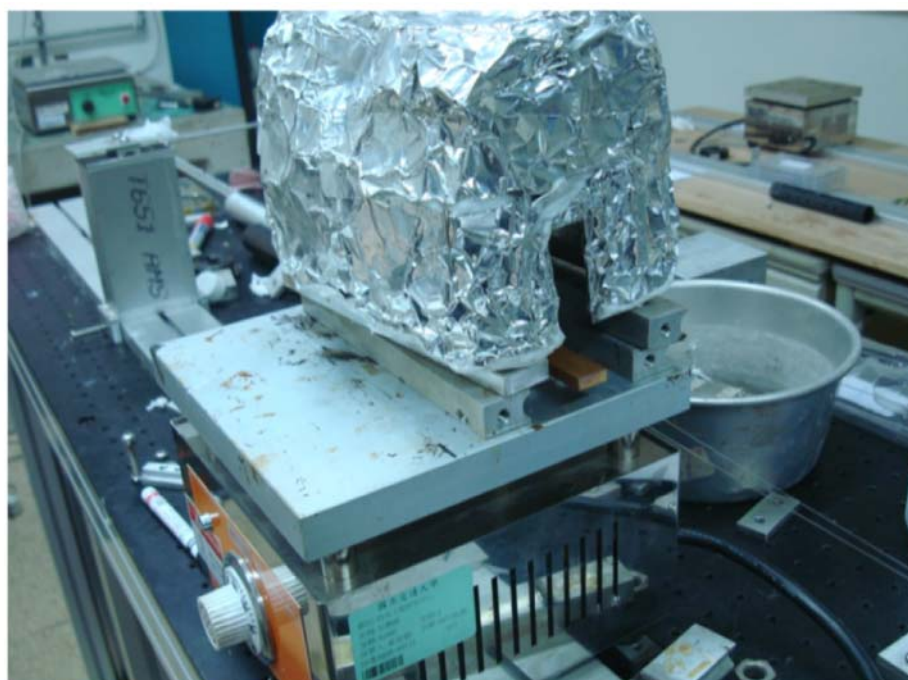


圖 3.14 FBG-I/A 傾斜感測加熱固化黏貼膠

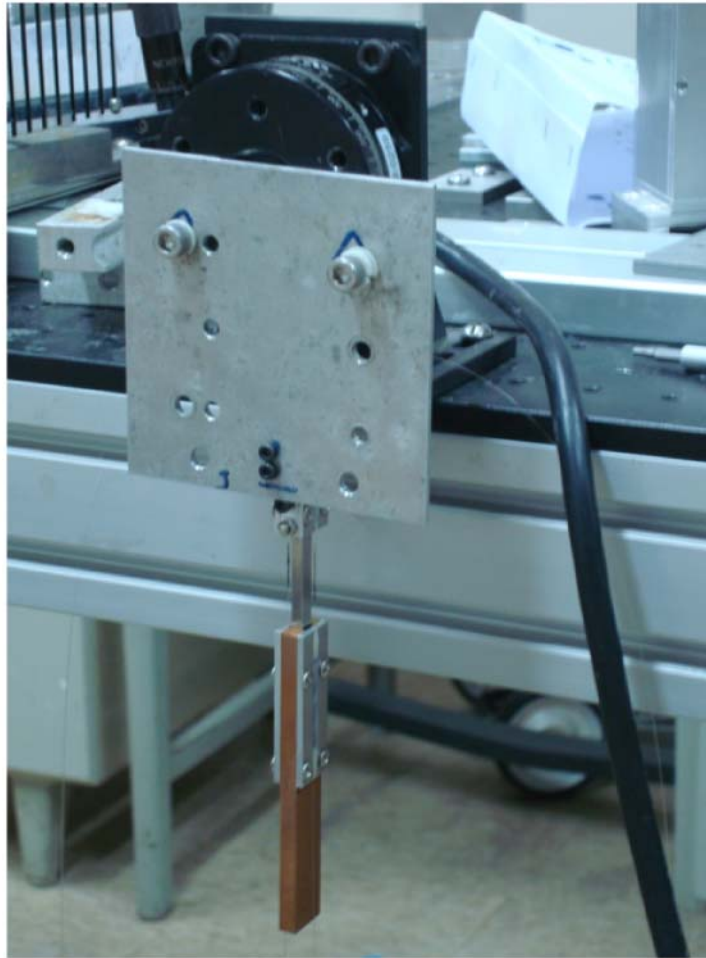


圖 3.15 FBG-I/A 傾斜感測計標定

圖3.16為標定結果可看出，修改後之重力式光纖傾斜計之靈敏度為0.0039；其感測範圍角度為-12度到+12度之間，其相關係數( $R^2$ )為0.9991。

## 第四章 辛樂克與莫拉克颱風之監測數據比較說明

圖4.1為辛樂克與莫拉克颱風期間之降雨量圖，可看出在這兩個颱風期間內，當日累積降雨量可達到700~1000mm，圖4.2~圖4.4為辛樂克颱風期間各深度之水壓力與累積降雨量之歷時變化曲線圖，由圖4.2中，9/14晚間8點時刻前，位於-14m~-24m之FBG水壓計開始有水壓上升的趨勢，爾後，-24m以下之水壓力有快速上升情形。圖4.5為將各深度之FBG水壓力變化與時間關係圖，而各深度的水壓力變化為相對於前一時刻的變化，可看出在9/13下午4點時刻時，-40m以上的FBG水壓計有明顯的水壓變化，此後由於現場地層內可能開始有水平向滲流發生，造成深層部分的FBG水壓計開始有發生水壓力變化，最大水壓力變化可到達100kPa，在9/15上午4點時刻時，各深度的FBG水壓計無水壓力變化，達到一穩定值，隨著時間增加，各深度的FBG水壓計之水壓力呈現負值狀態，則表示水壓力開始慢慢消散。同樣地，圖4.7~圖4.9為莫拉克期間各深度之水壓力與累積降雨量之歷時變化曲線圖，可看出在8/8上午6點時刻前，-14m~-24m之FBG水壓計開始有較大的壓力變化趨勢，圖4.10為將各深度之FBG水壓力變化與時間關係圖，而各深度的水壓力變化為相對於前一時刻的變化，可看出在8/7上午9點時刻時，-40m以上的FBG水壓計有明顯的水壓變化，此後由於現場地層內可能開始有水平向滲流發生，造成深層部分的FBG水壓計開始有發生水壓力變化，最大水壓力變化可到達80kPa，在8/9約上午9點時刻時，各深度的FBG水壓計無水壓力變化，達到一穩定值，隨著時間增加，各深度的FBG水壓計之水壓力呈現負值狀態，則表示水壓力開始慢慢消散。

由上述辛樂克與莫拉克颱風事件來看，該區域的地層內之水壓力變化，淺層部分水壓力會開始先增加，之後深層部分，因受其側向水流入滲，則水壓力開始有變化趨勢，可觀察出，當地層內部受到水平向滲流影響時，則水壓並非呈淨態水力梯度增加。

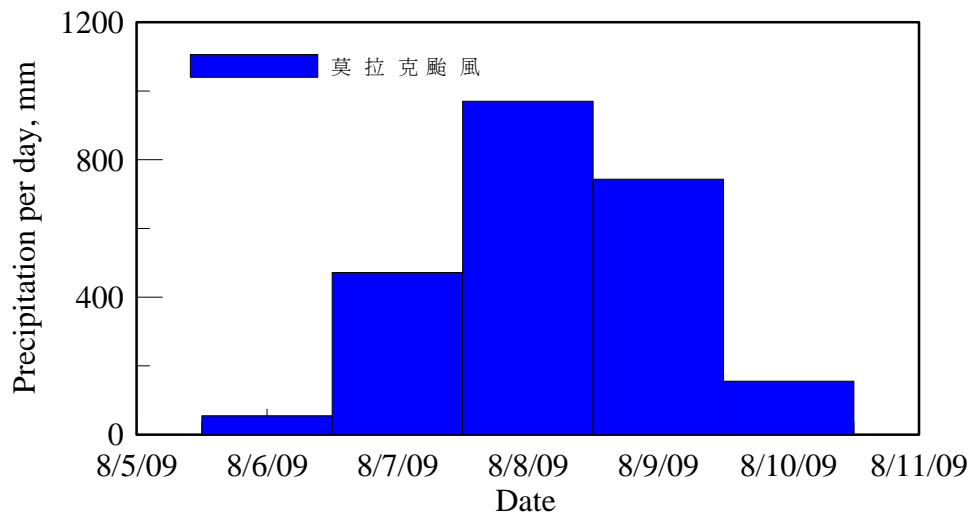
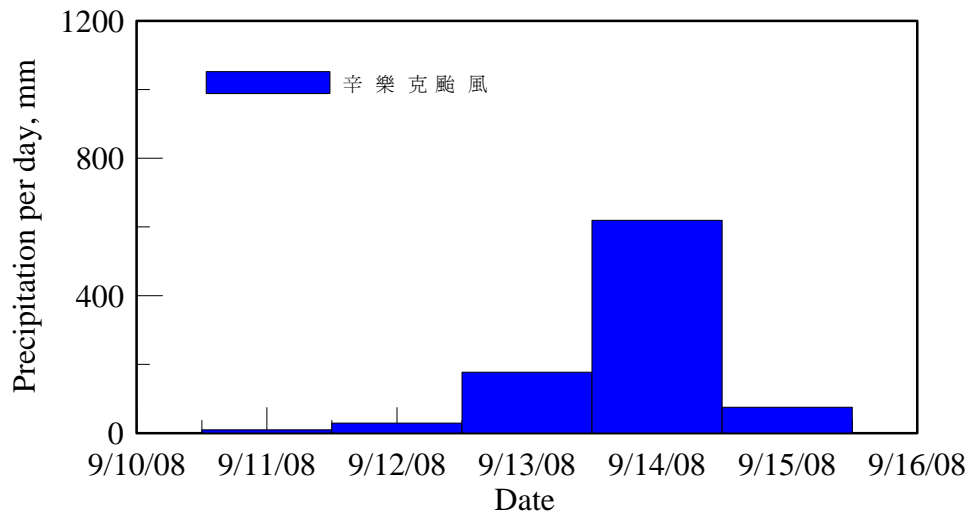


圖 4.1 辛樂克與莫拉克颱風期間累積降雨量

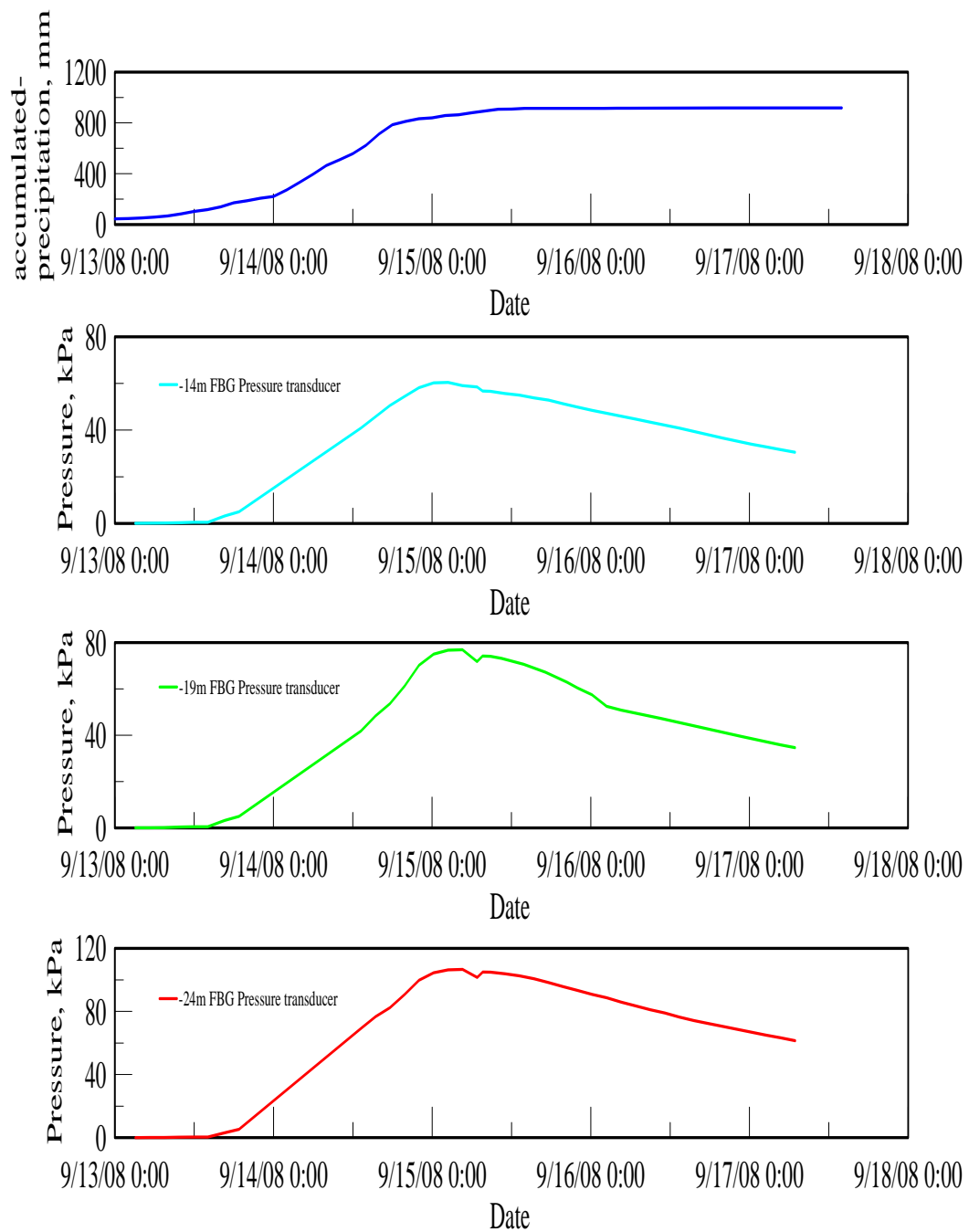


圖 4.2 NCTU-03 -14m~-24m 水壓與辛樂克颱風之累計降雨量變化趨勢圖

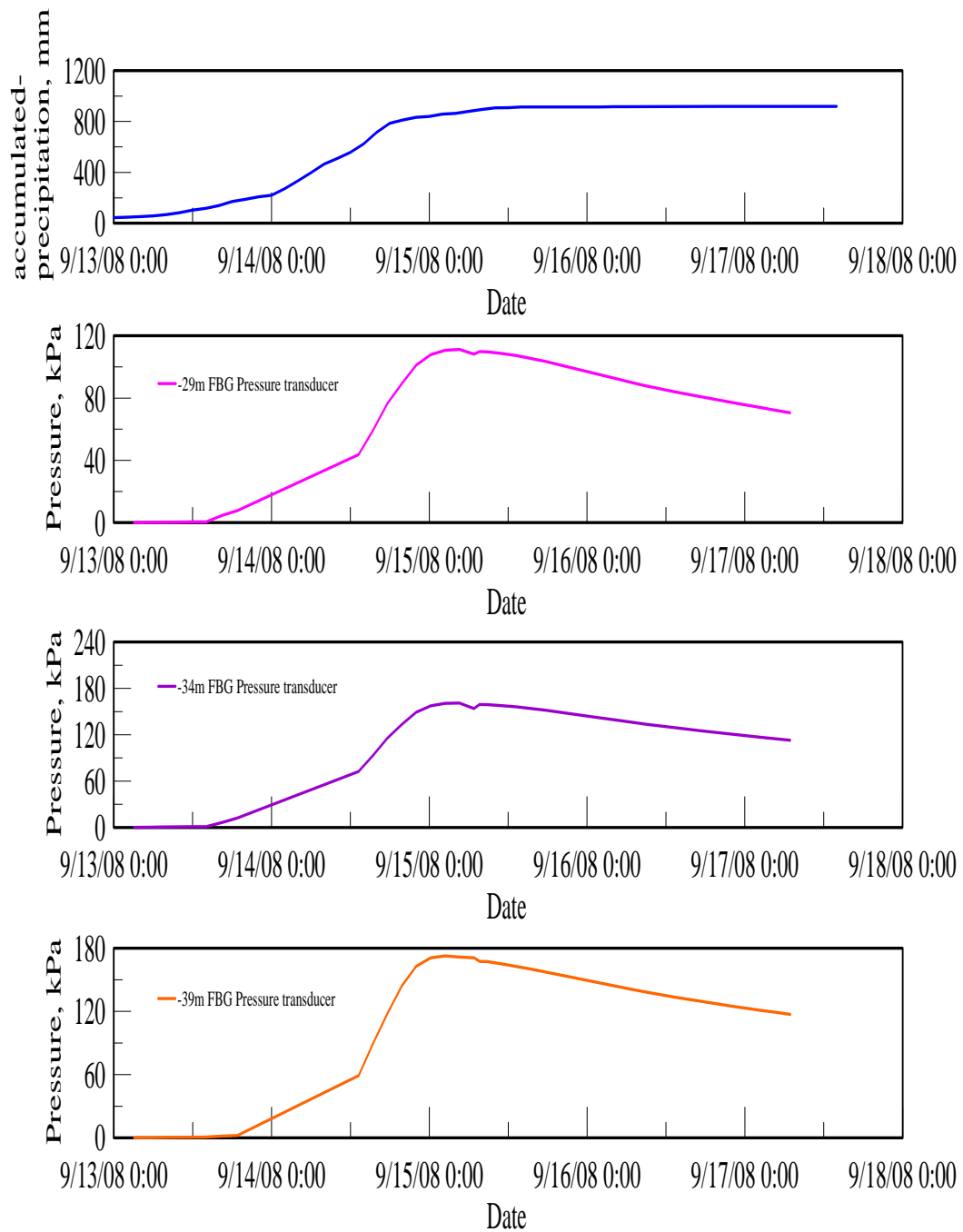


圖 4.3 NCTU-03 -29m~-39m 水壓與辛樂克颱風之累計降雨量變化趨勢圖

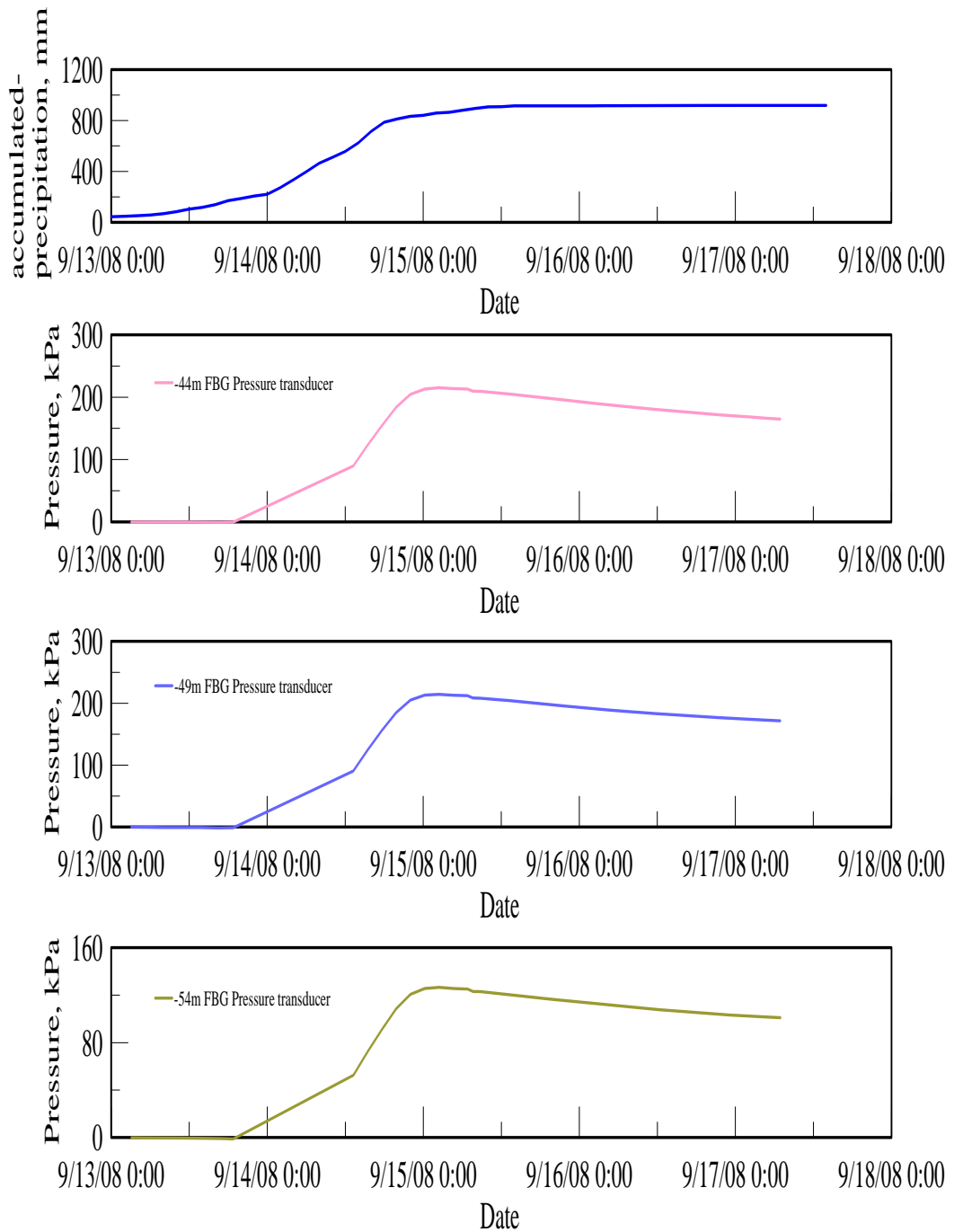


圖 4.4 NCTU-03 -44m~-54m 水壓與辛樂克颱風之累計降雨量變化趨勢圖

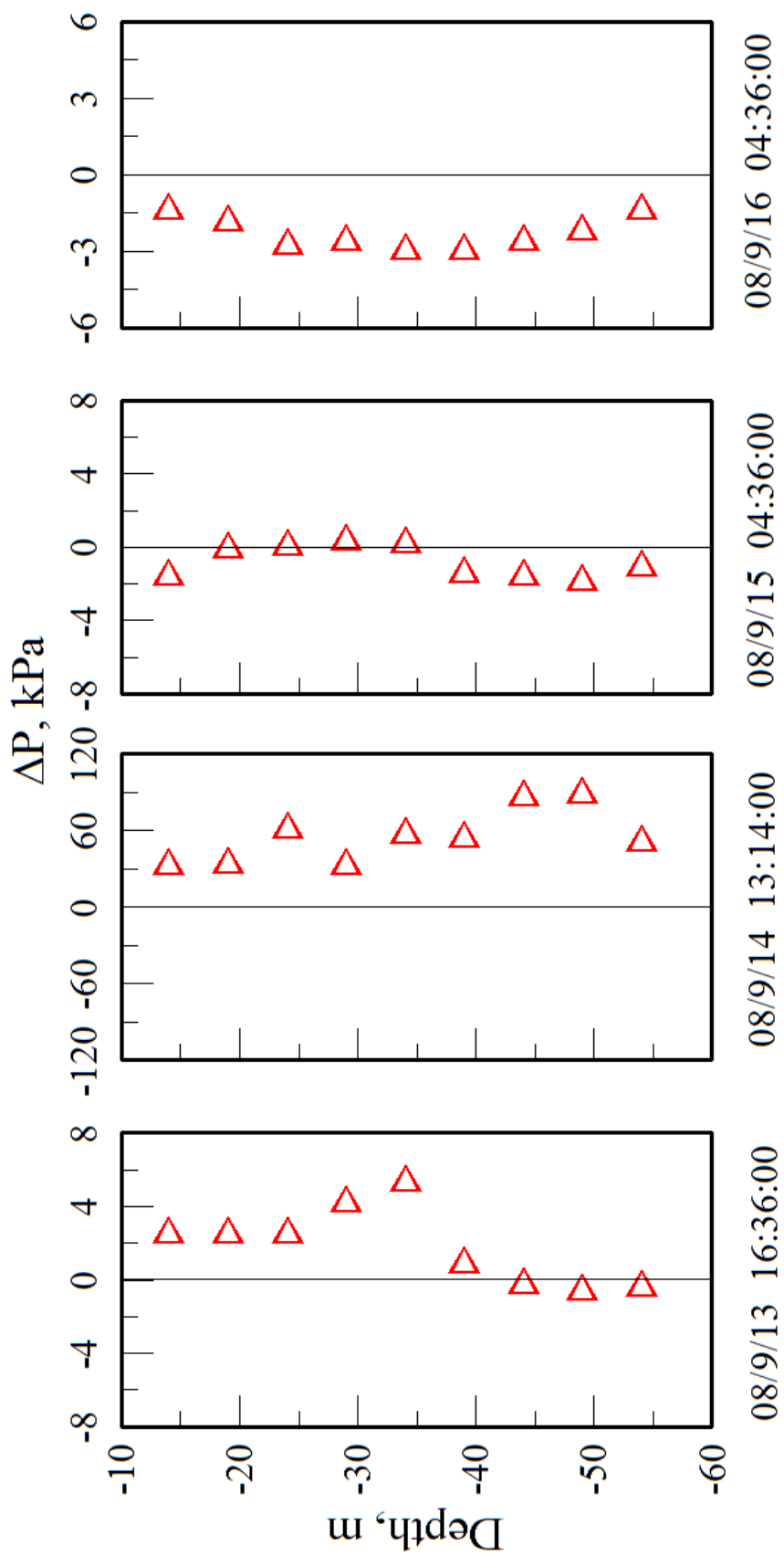


圖 4.5 NCTU-03 水壓歷時變化於辛樂克颱風



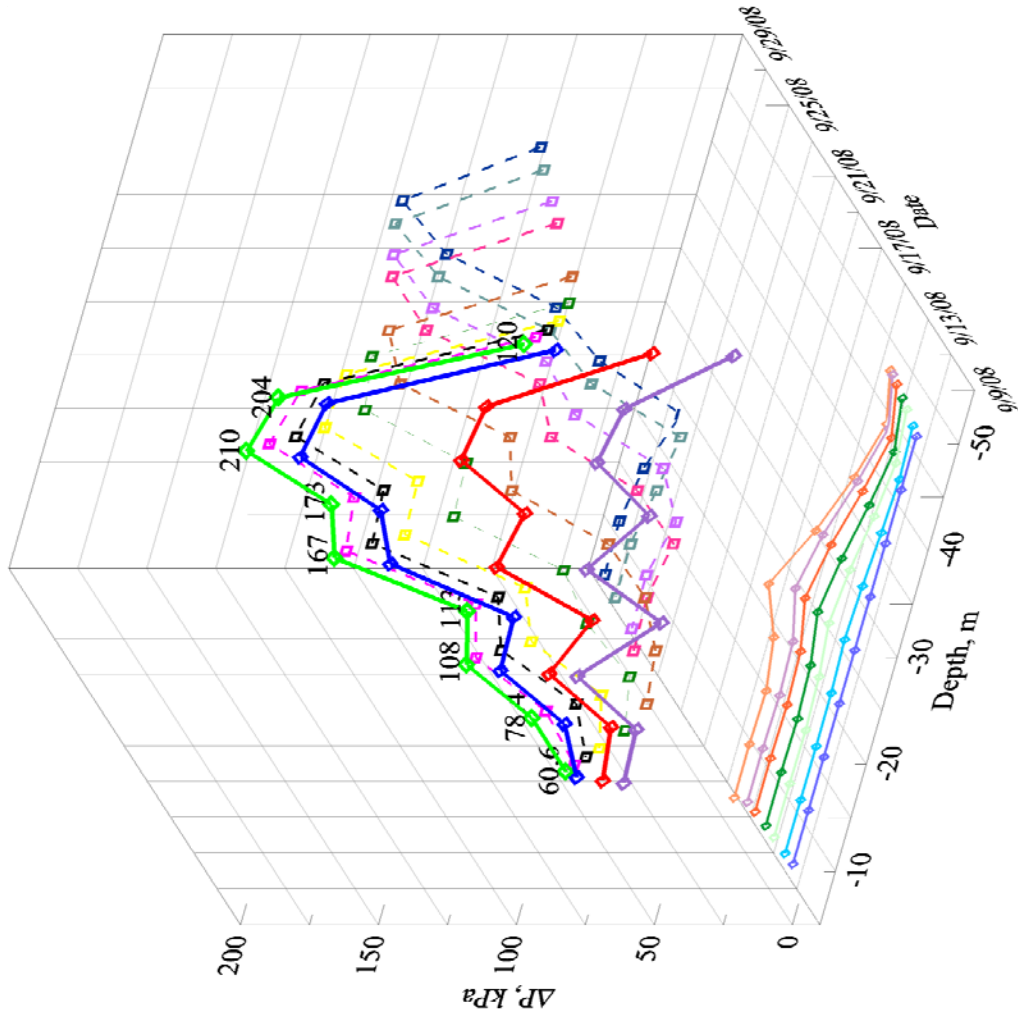


圖 4.6 NCTU-03 3D 水壓歷時變化於辛樂克颱風風量變化趨勢圖

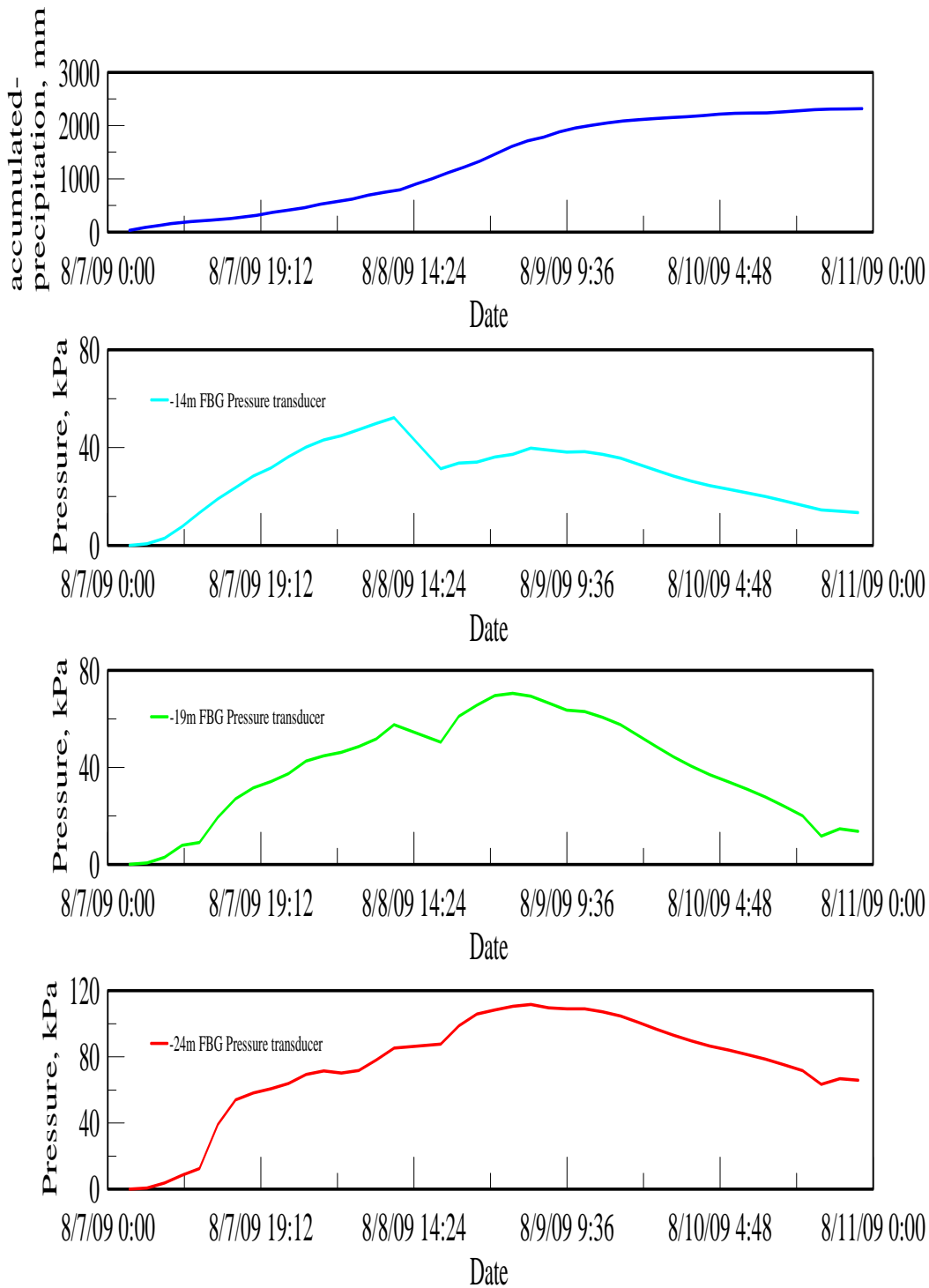


圖 4.7 NCTU-03 -14m~-24m 水壓與莫拉克颱風之累計降雨量變化趨勢圖

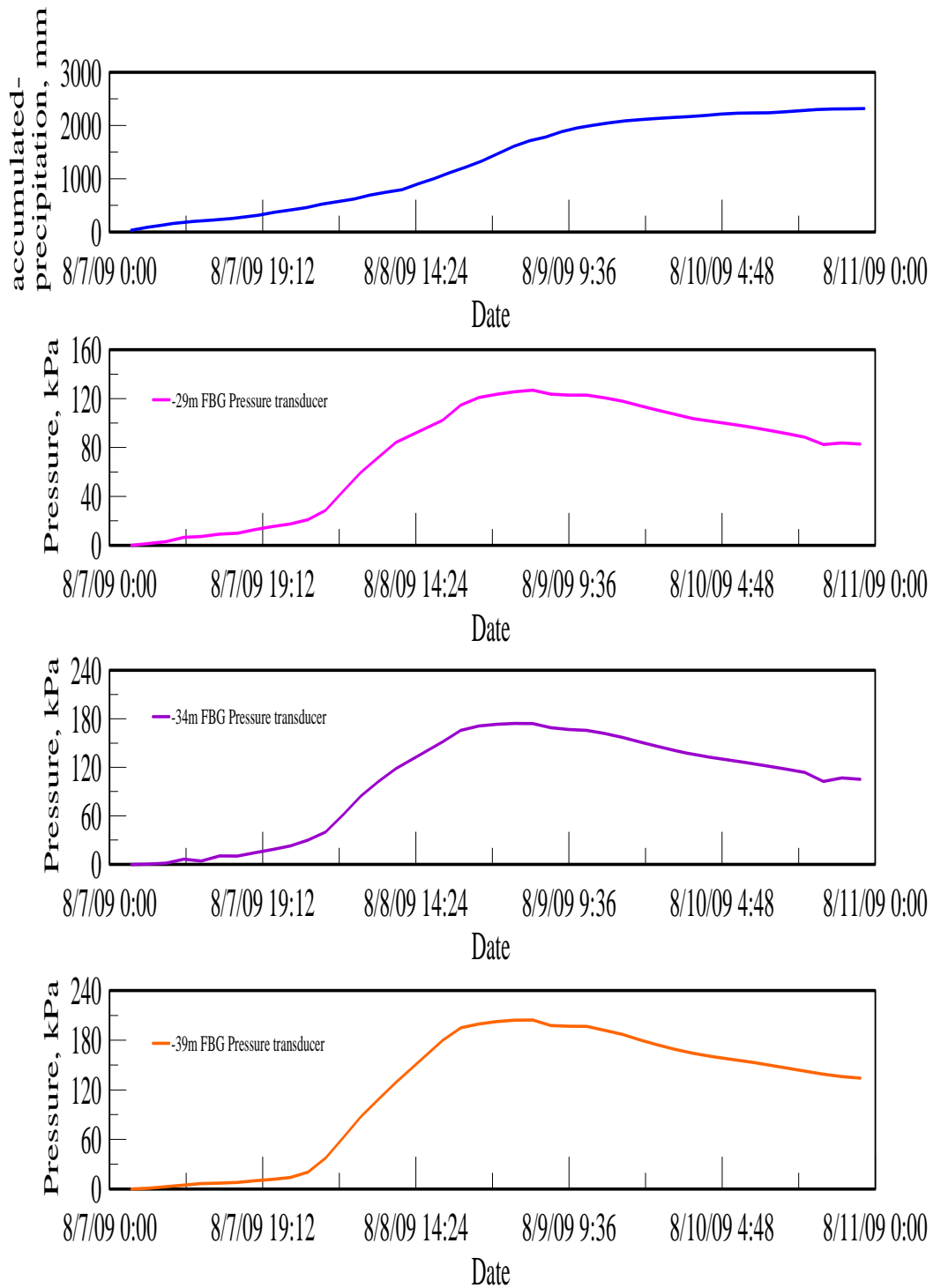


圖 4.8 NCTU-03 -29m~-39m 水壓與莫拉克颱風之累計降雨量變化趨勢圖

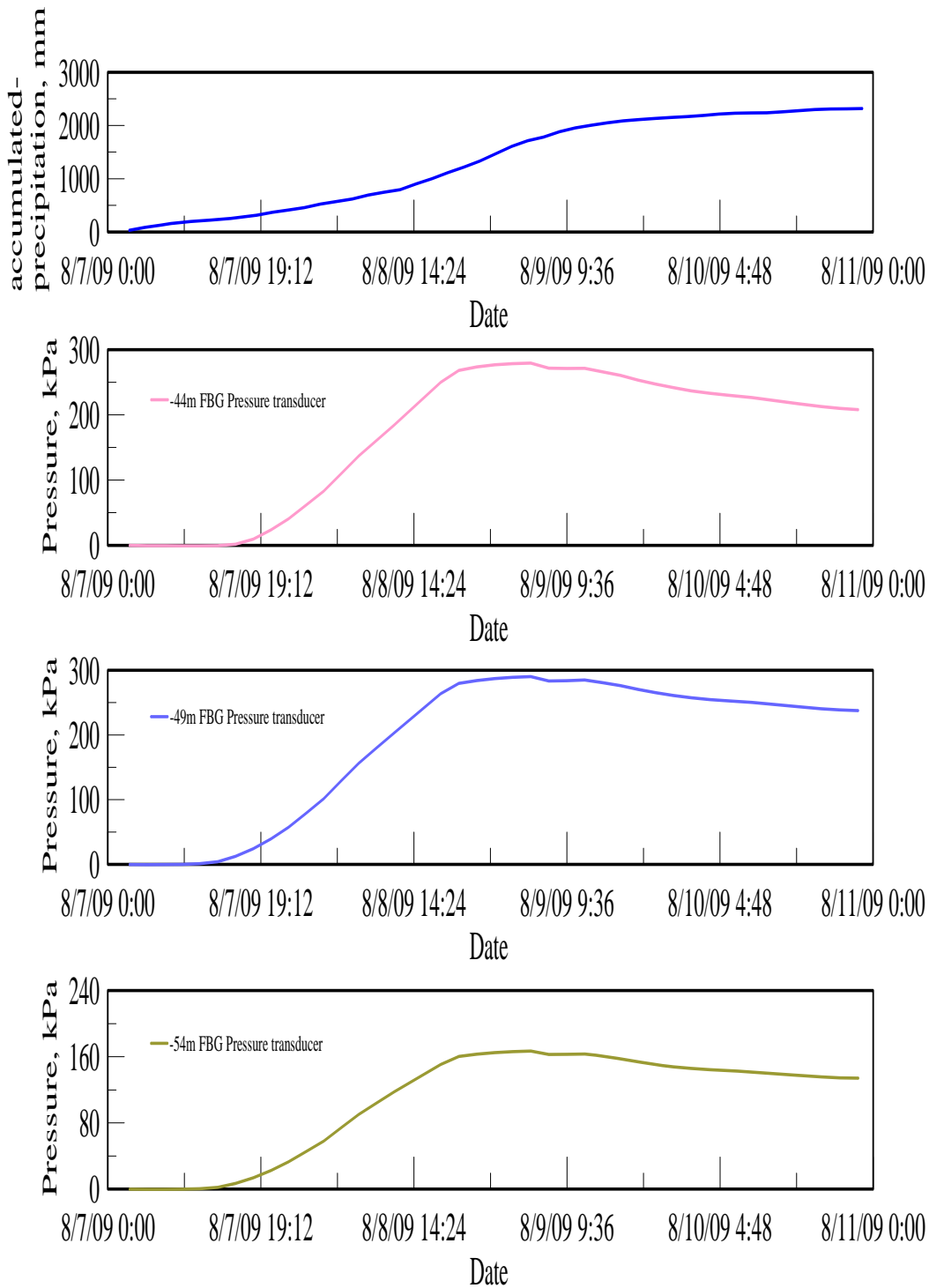


圖 4.9 NCTU-03 -44m~-54m 水壓與莫拉克颱風之累計降雨量變化趨勢圖

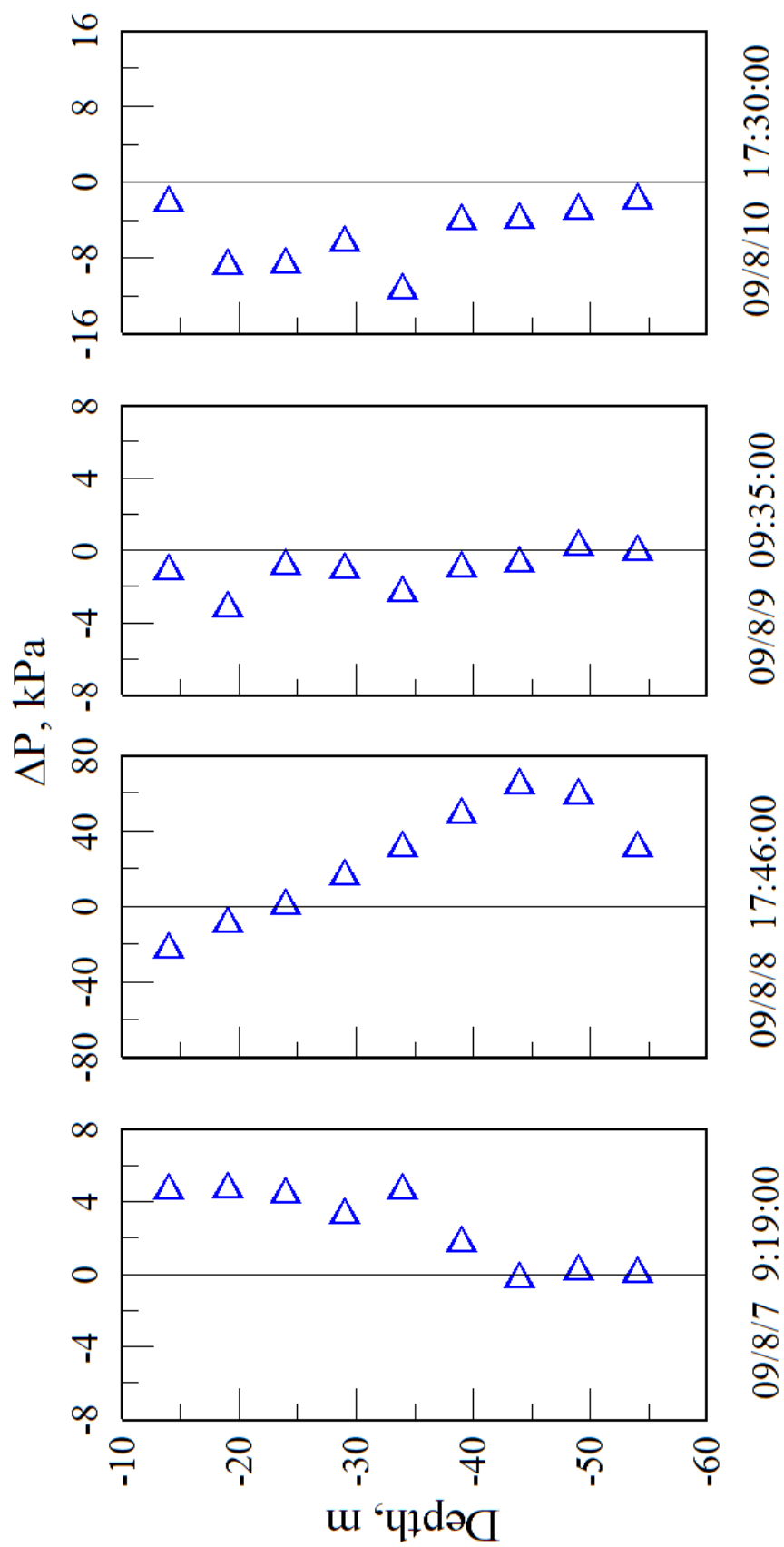


圖 4.10 NCTU-03 水壓歷時變化於莫拉克颱風

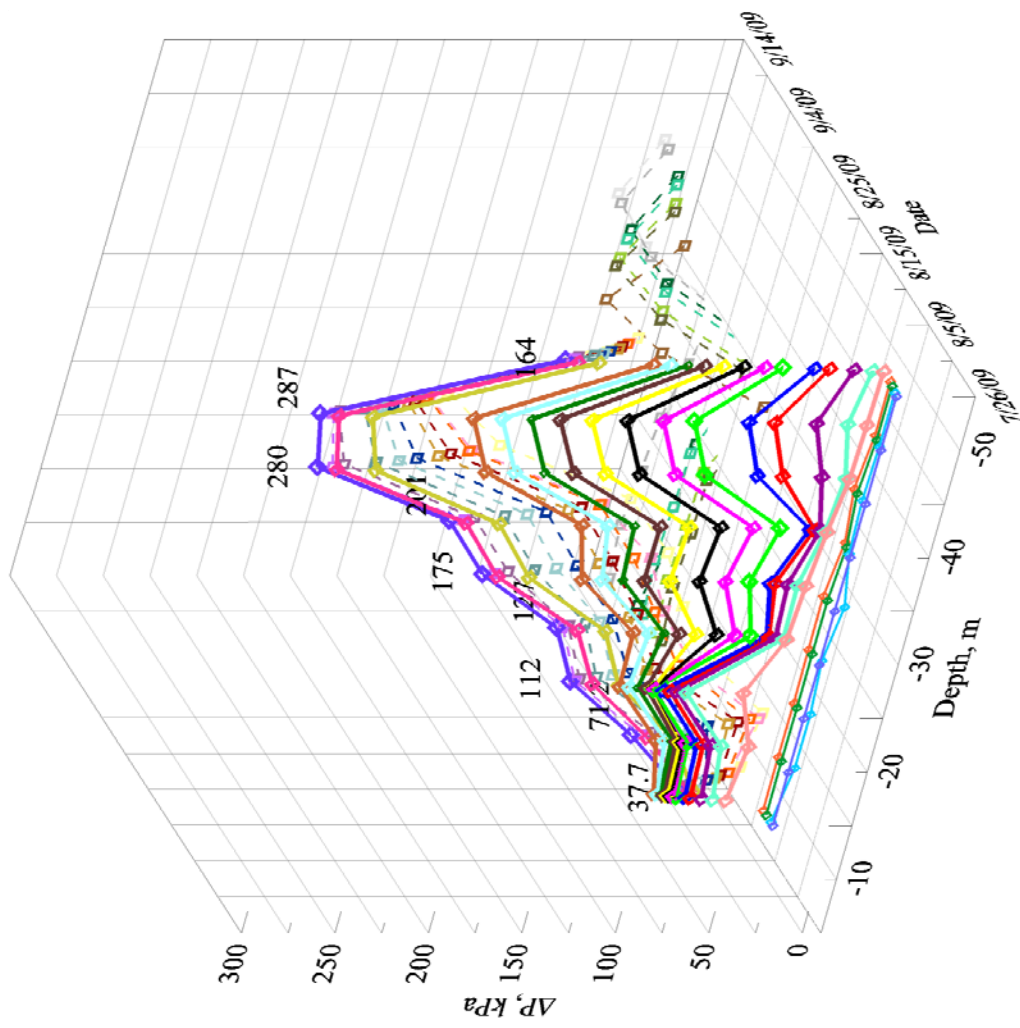


圖 4.11 NCTU-03 3D 水壓歷時變化於莫拉克颱風圖

## 第五章 研究場址地下水流模擬

### 5.1 地下水流數值模式簡介

#### 5.1.1 理論基礎與離散方程式

研究中採用坡地非飽和地下水流模型，模擬五彎仔地區之地下水流況。坡地非飽和地下水流控制方程式表示如下

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

式中， $\psi$  為壓力水頭 (pressure head)， $K$  表示水力傳導係數 (hydraulic conductivity)， $\theta$  為體積含水量 (volumetric water content)， $C(\psi) = \partial\theta/\partial\psi$ ， $x$  與  $z$  分別表示水平與垂直座標， $t$  為時間。

求解式(5.1)需要初始條件與邊界條件，初始條件可表示如下

$$\psi(x, z, t=0) = \psi^0(x, z) \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

式中， $\psi^0(x, z)$  表示初始之壓力水頭分佈函數。另外，邊界條件可分為壓力水頭邊界條件與流量邊界條件兩種。壓力水頭邊界條件可表示為

$$\psi(\Omega, t) = \psi' \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

式中， $\psi'$  表示壓力水頭值，可隨時間變化， $\Omega$  代表邊界之座標。流量邊界條件可表示為

$$-K \left[ \frac{\partial \psi}{\partial x} \bar{i} + \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \bar{k} \right] \cdot \bar{n} = f \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

式中， $\bar{n}$  表示邊界之單位方向向量， $f$  為流出邊界之水流通量。符號  $\cdot$  表示內積 (inner product)。

利用隱式有限差分法可將式(5.1)離散化(discretization)為

$$\begin{aligned}
 C_{i,j}^{n+1,m} \frac{\psi_{i,j}^{n+1,m+1} - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} &= \frac{1}{(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})/2} \left( K_{i+1/2,j}^{n+1,m} \frac{\psi_{i+1,j}^{n+1,m+1} - \psi_{i,j}^{n+1,m+1}}{\Delta x_i} - K_{i-1/2,j}^{n+1,m} \frac{\psi_{i,j}^{n+1,m+1} - \psi_{i-1,j}^{n+1,m+1}}{\Delta x_{i-1}} \right) \\
 &+ \frac{1}{(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})/2} \left( K_{i,j+1/2}^{n+1,m} \frac{\psi_{i,j+1}^{n+1,m+1} - \psi_{i,j}^{n+1,m+1}}{\Delta z_j} - K_{i,j-1/2}^{n+1,m} \frac{\psi_{i,j}^{n+1,m+1} - \psi_{i,j-1}^{n+1,m+1}}{\Delta z_{j-1}} \right) \\
 &+ \frac{1}{(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})/2} \left[ K_{i,j+1/2}^{n+1,m} - K_{i,j-1/2}^{n+1,m} \right] \dots\dots\dots (5.5)
 \end{aligned}$$

式中， $K_{i+1/2,j}^{n+1,m} = (K_{i,j}^{n+1,m} + K_{i+1,j}^{n+1,m})/2$ ， $K_{i-1/2,j}^{n+1,m} = (K_{i,j}^{n+1,m} + K_{i-1,j}^{n+1,m})/2$ ， $K_{i,j+1/2}^{n+1,m} = (K_{i,j}^{n+1,m} + K_{i,j+1}^{n+1,m})/2$ ， $K_{i,j-1/2}^{n+1,m} = (K_{i,j}^{n+1,m} + K_{i,j-1}^{n+1,m})/2$ 。Δt 為時間間距(time interval)，Δx 與 Δz 分別為 x 與 z 方向之空間間距(space interval)。上標 n 表示模擬時刻，上標 m 為疊代次數(iteration number)，下標 i 與 j 分別為 x 與 z 方向之格網點座標。初始條件及邊界條件亦可利用上述有限差方法將其離散化。此外，求解式(5.5)亦需要土壤之保水曲線(water retention curve or soil-water characteristic curve)。本研究採用 Van Genuchten(1980)提出之關係式

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{1}{1 + (\xi \psi)^N} \right)^M \dots\dots\dots (5.6)$$

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{M}} \right]^M \right\}^2 \dots\dots\dots (5.7)$$

其中， $\theta_s$  為飽和體積含水量(saturated moisture content)， $\theta_r$  為殘餘體積含水量(residual moisture content)， $K_s$  為飽和水力傳導係數(saturated hydraulic conductivity)， $\xi$  為進氣潛能因子(empirical parameter of air entry value)， $N$  為孔徑指數(pore index)， $M$  為曲線密合因子(cure fitting parameter)，且  $M = 1 - 1/N$ 。



### 5.1.2 模式之驗證

利用具有解析解之案例，驗證模式之正確性。如圖 5.1 所示，範圍為 75cm × 85cm 之矩形區域，其左上方有一長為 5cm 之入滲源，入滲強度為  $q_z = -0.0278 \text{ cm/min}$ ；區域之右側與下方邊界保持 -250cm 之定壓力水頭邊界，其餘邊界則為不透水邊界。在初始壓力水頭為 -250cm，且水力傳導係數及體積含水量與壓力水頭之關係呈指數函數分布。

$$K(\psi) = K_0 \exp(\alpha\psi) \dots\dots\dots (5.8)$$

$$\theta(\psi) = (K_0/A_0)\exp(\alpha\psi) \dots\dots\dots (5.9)$$

其中， $\alpha$ 、 $K_0$  與  $A_0$  分別為土壤常數，區域中壓力水頭隨時間之變化如 Warrick and Lomen(1976)所示。

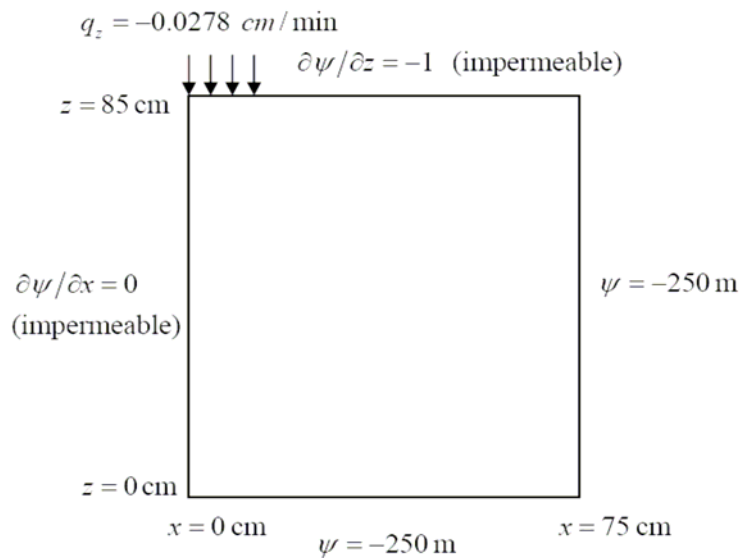


圖 5.1 驗證案例區域示意圖

當時間間距  $\Delta t = 0.25 \text{ s}$ 、空間間距  $\Delta x = \Delta z = 1 \text{ cm}$ 、 $\alpha = 0.04$ 、 $K_0 = 0.0694 \text{ cm/min}$ 、與  $A_0 = 0.1388 \text{ cm/min}$ ，地下水壓力水頭之模擬結果，如圖 5.2 所示。由圖 5.2 可知，模擬結果與解析解極為相近，顯示所建立地下水流數值模式之正確性。

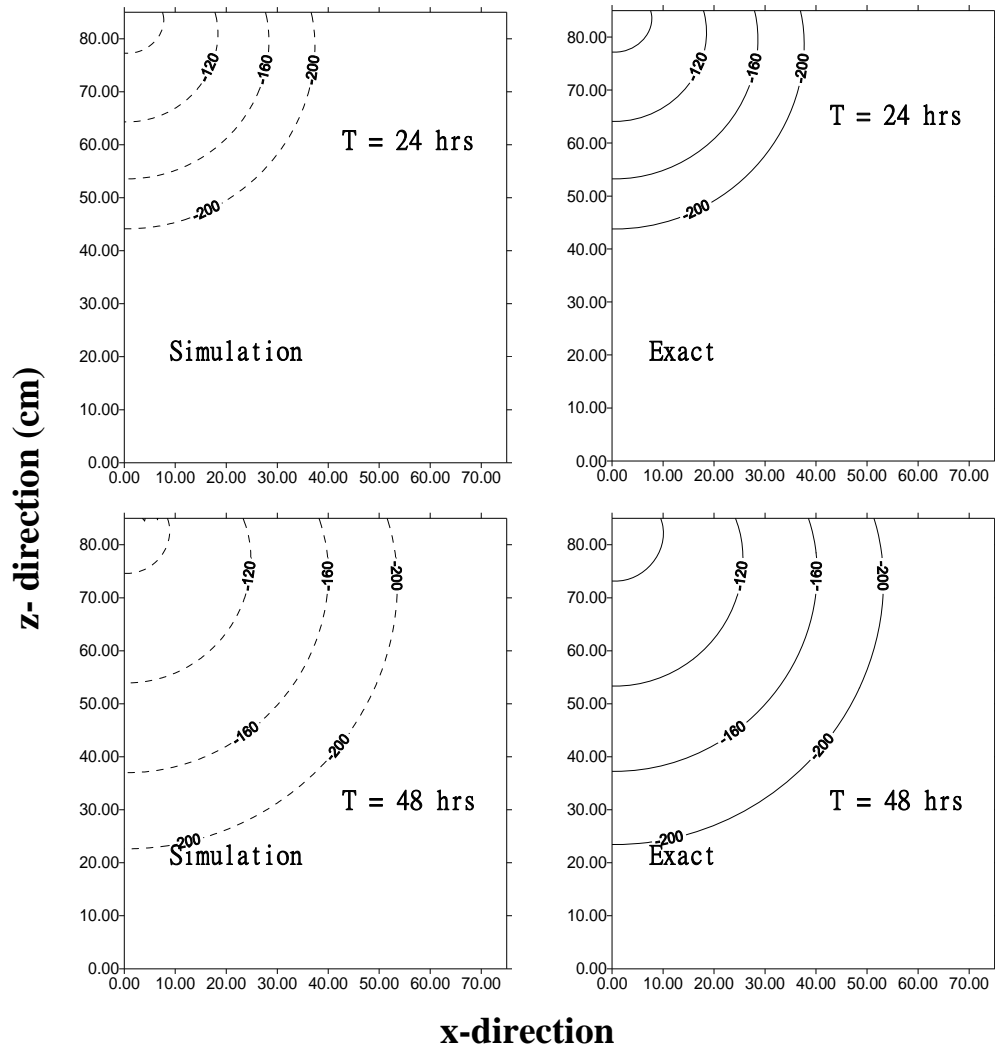


圖 5.2 驗證案例模擬結果

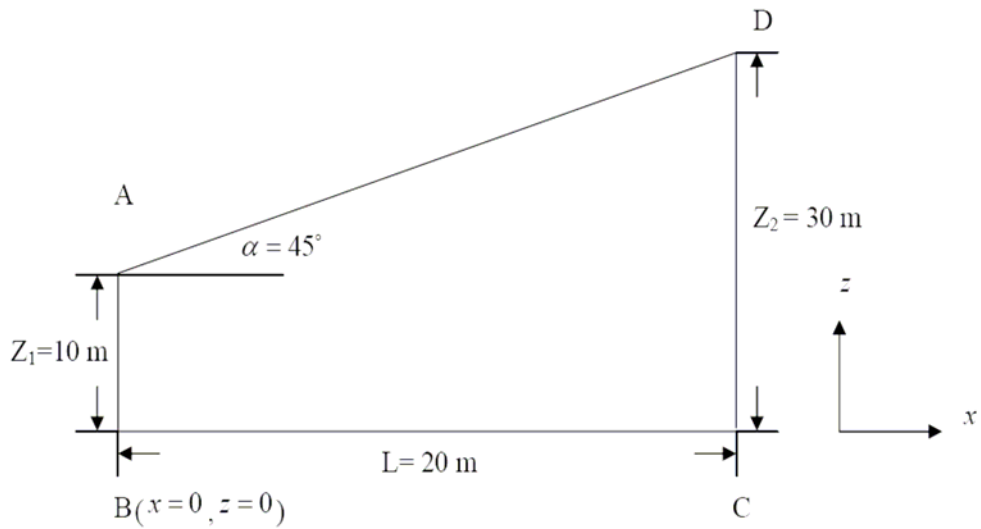


圖 5.3 測試案例示意圖

### 5.1.3 模式之穩態與非穩態測試

利用以下案例進一步測試模式。如圖 5.3 所示，坡地相關參數為坡地坡度  $45^\circ$ 、飽和水力傳導係數  $K_{sat} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ，飽和體積含水量  $\theta_s = 0.41$ ，殘餘體積含水量  $\theta_r = 0.06$ ，進氣潛能因子  $\xi = 0.08$ ，孔徑指數  $N = 1.8$ 。BC 邊界為不透水邊界，AB 與 DC 邊界為定水頭邊界，AD 邊界為滲流邊界(seepage surface)。當 AB 邊界之水位為 10m，CD 邊界之水位為 20m 與 25m 時，坡地之穩態地下水壓力水頭與水位模擬結果，分別如圖 5.4 與圖 5.5 所示。

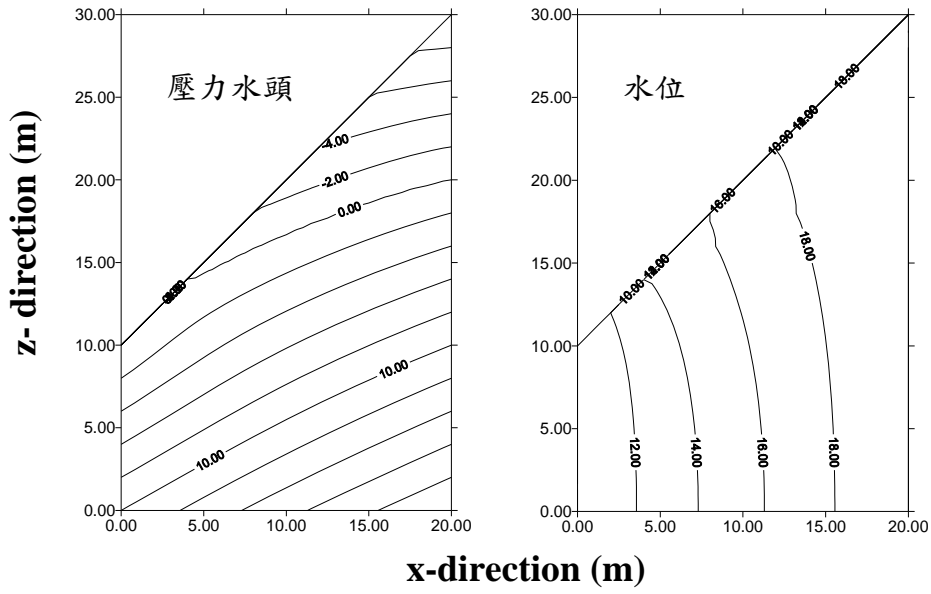


圖 5.4 水位 20m 之穩態地下水壓力水頭與水位模擬結果

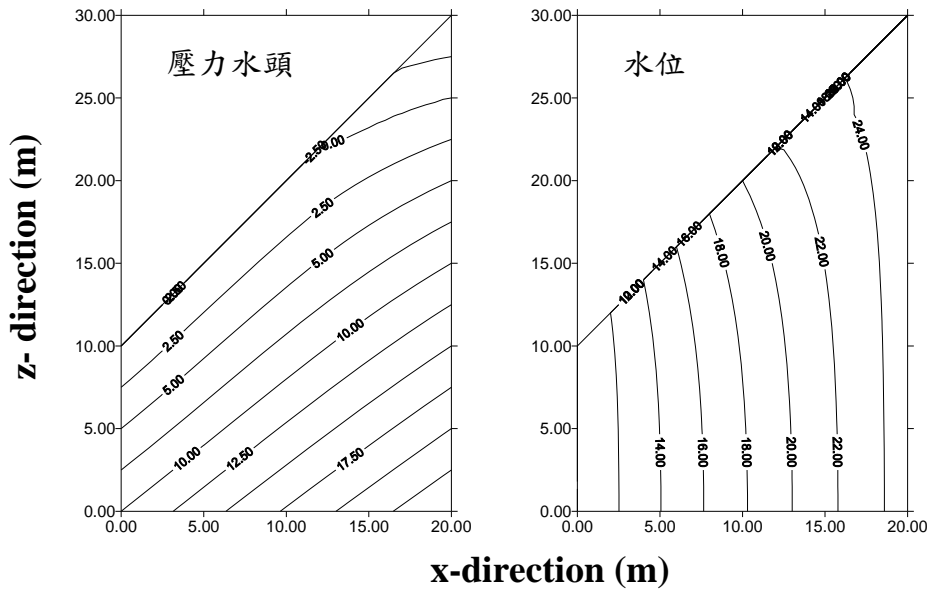


圖 5.5 水位 25m 之穩態地下水壓力水頭與水位模擬結果

另外，當 AB 邊界之水位維持 10m 不變下，CD 邊界之初始水位為 20m，且 CD 邊界之水位在 24 小時內，線性上升至 25m，則坡地之非穩態地下水壓力水頭之模擬結果，如圖 5.6 所示。由圖 5.4 至圖 5.6 可知，發展之模式可合理地模擬穩態與暫態之坡地地下水流。

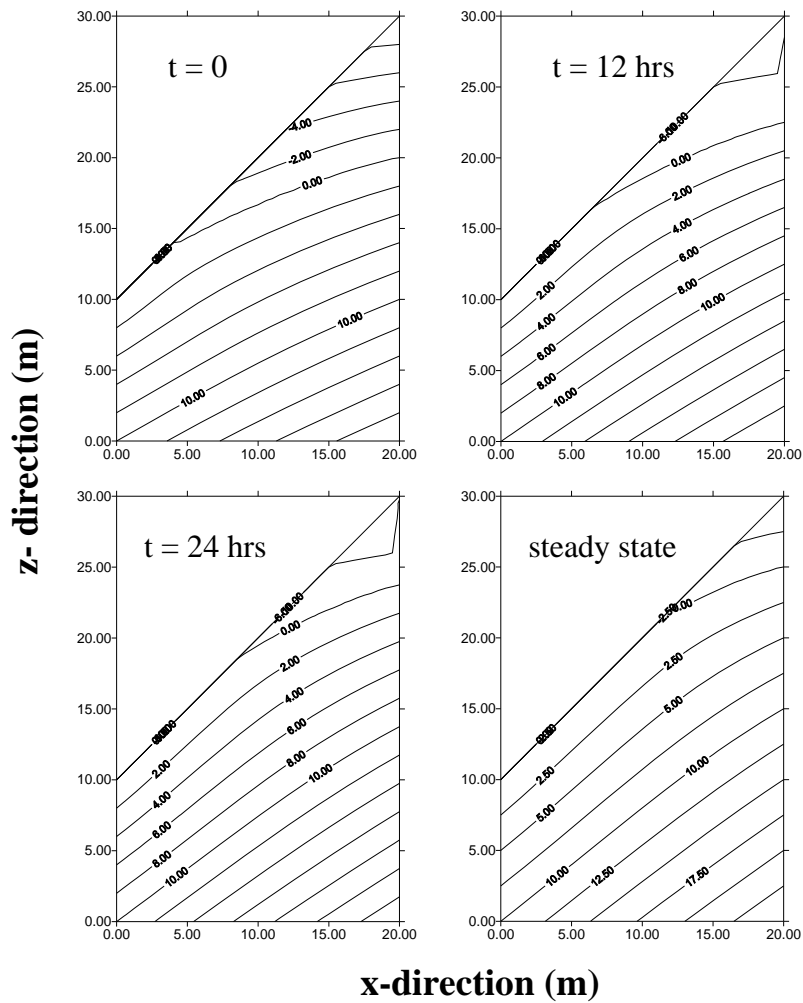


圖 5.6 非穩態地下水壓力水頭模擬結果

#### 5.1.4 模式之降雨入滲測試

最後測試模式模擬坡地降雨入滲之功能，如圖 5.3 所示，坡地相關地質參數與 5.1.3 節相同。BC 邊界為不透水邊界，AB 與 DC 邊界為定水頭邊界，AD 邊界為滲流邊界。當 AB 與 CD 邊界之水位分別保持為 10m 及 15m，且 24 小時降雨量 500mm 之條件下， $x = 12.5\text{m}$  及  $x = 7.5\text{m}$  處地下水壓力水頭在高程方向上隨時間變化之模擬結果如圖 5.7 所示。由圖 5.7 可知，降雨初期時，地下水壓力水頭主要受到垂直方向的入滲影響。然後，坡地上方所入滲之降水，經由側向之流動，漸漸影響地下水壓力水頭。降雨停止後，地下水壓力水頭重新分佈 (redistribution)。另外， $x = 12.5\text{m}$  且高程分別為  $z = 14\text{m}$ 、 $17\text{m}$  與  $20\text{m}$  處之地下水壓力水頭隨時間之模擬結果，如圖 5.8 所示。

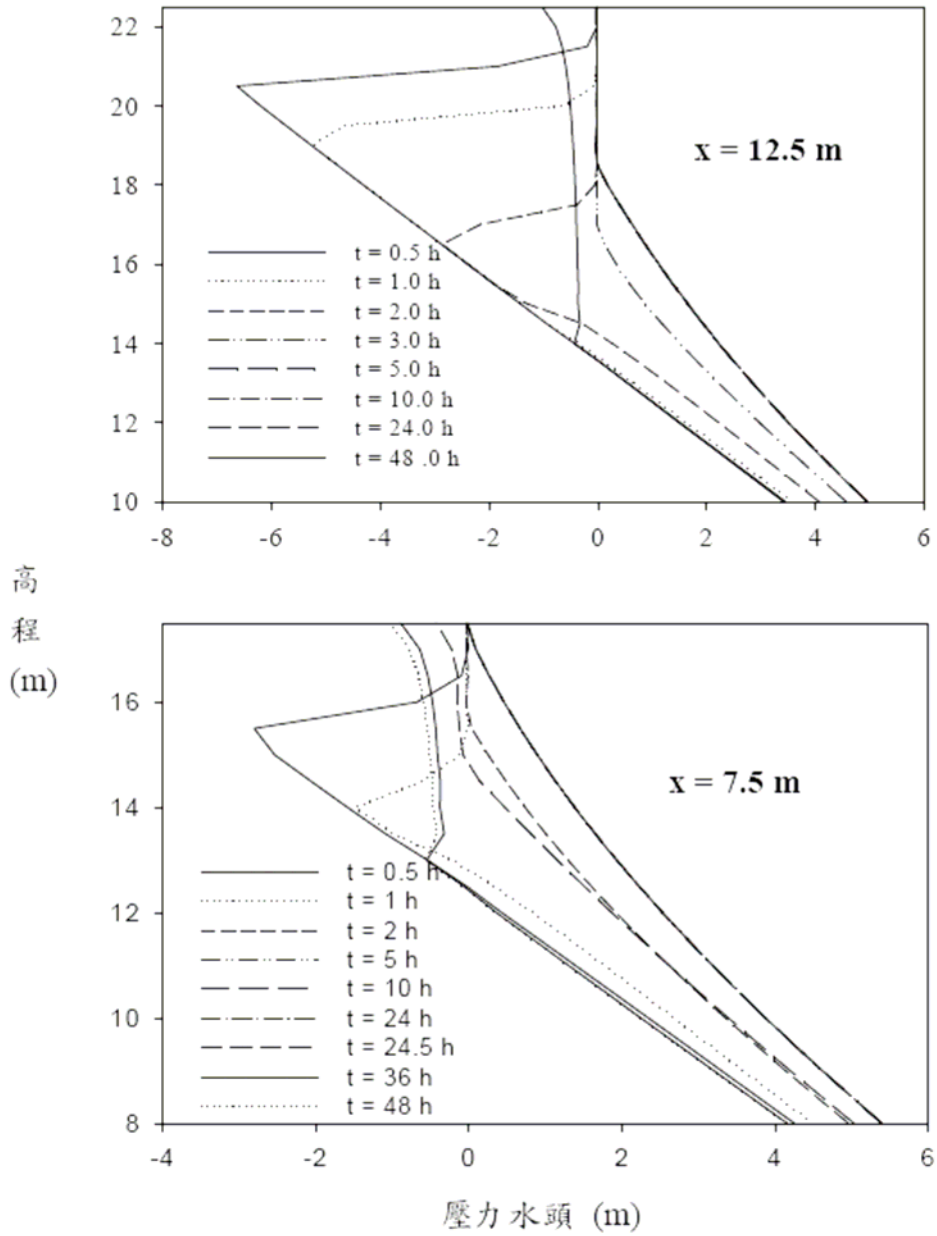


圖 5.7 降雨入滲地下水壓力水頭模擬結果

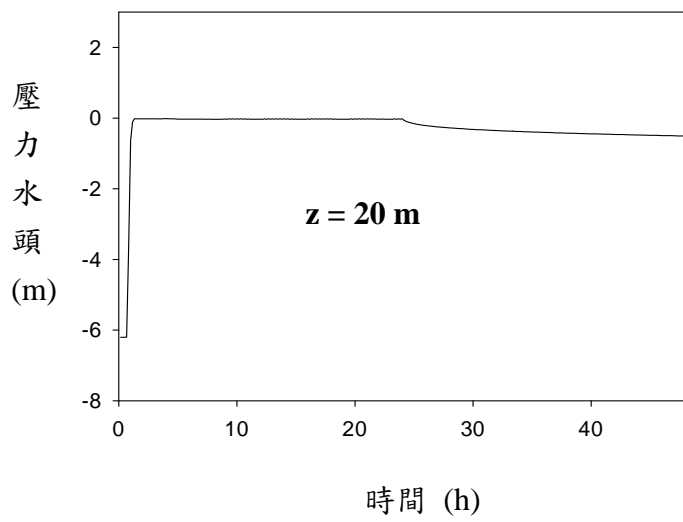
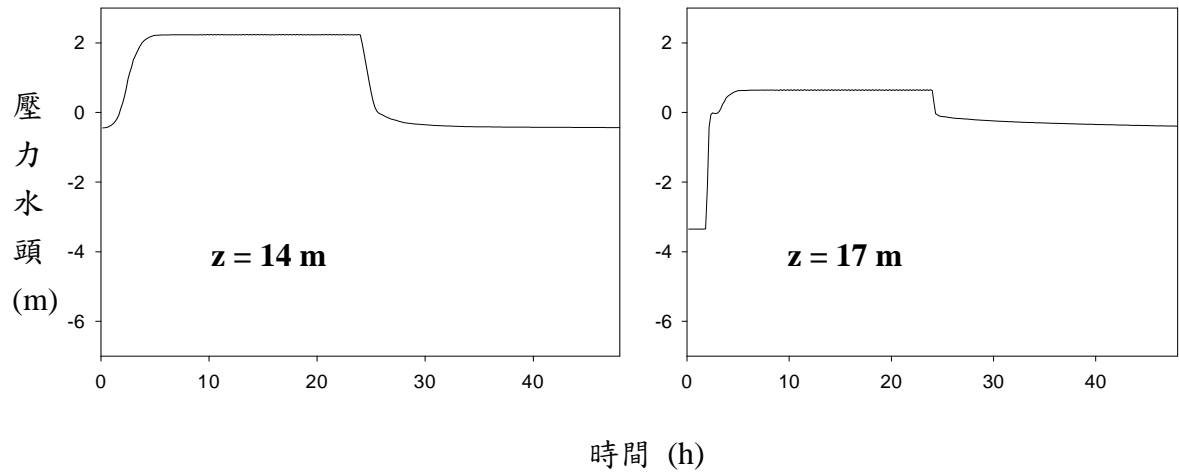


圖 5.8 降雨入滲地下水壓力水頭隨時間模擬結果



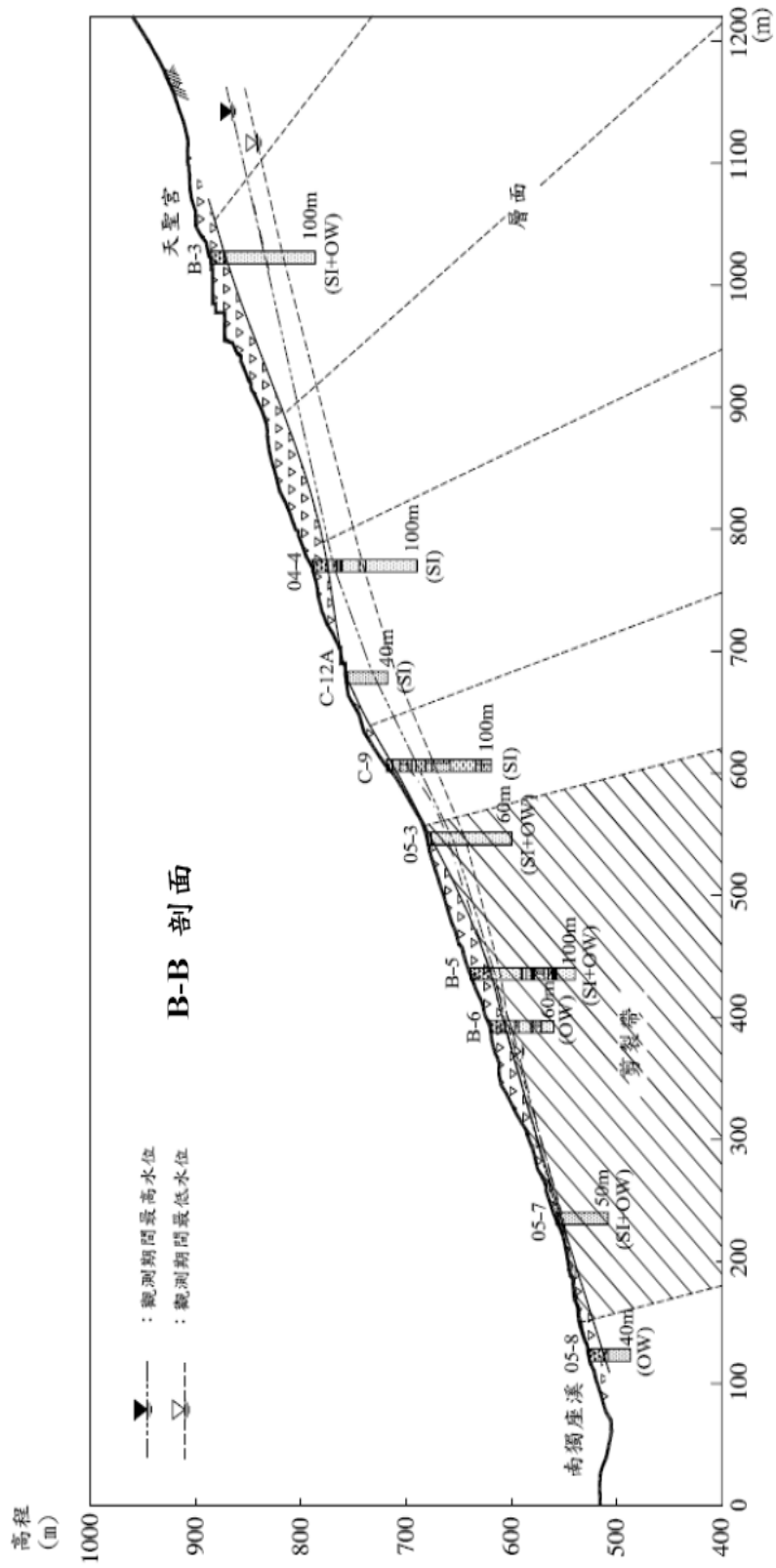


圖 5.9 五彎仔地區地下水模擬區域圖(青山工程顧問公司, 2006)

## 5.2 五彎仔地區地下水流模擬

利用上述發展之地下水流模式，率定與驗證五彎仔地區之地下水流。根據民國 93 年 6 月 2 日至 95 年 6 月 8 日間(見青山工程顧問有限公司 96 年報告)，觀測所得之最低水位作為參數率定之用，最高水位則作為參數驗證之用，如圖 5.9 所示。模擬時，以 04-4 觀測之水位為右端邊界條件，左端則以南獨座溪為邊界，且設定地下水位高程與地表同高，坡面邊界設定為不透水邊界，底部則為流量邊界且流速平行於坡面。模擬格點間距  $\Delta x=14m$  與  $\Delta z=5.7m$ ，土壤之飽和體積含水量  $\theta_s=0.41$ ，殘餘體積含水量  $\theta_r=0.06$ ，進氣潛能因子  $\xi=0.08$ ，孔徑指數  $N=1.8$ 。在穩態假設下，利用試誤法調整水力傳導係數大小，使模擬之水位儘量符合觀測所得之最低水位。再利用率定所得之水力傳導係數，及 04-4 觀測之最高水位為邊界條件，模擬最高水位分佈，以驗證參數之正確性。率定與驗證結果顯示，土壤水力傳導係數介於  $1 \times 10^{-5}$  至  $4 \times 10^{-5}$  m/s 間，且地下水位模擬結果與實測結果如圖 5.10 所示。由圖 5.10 可知，本研究發展之地下水流模式可合理地模擬五彎仔地區之地下水位分佈情況。

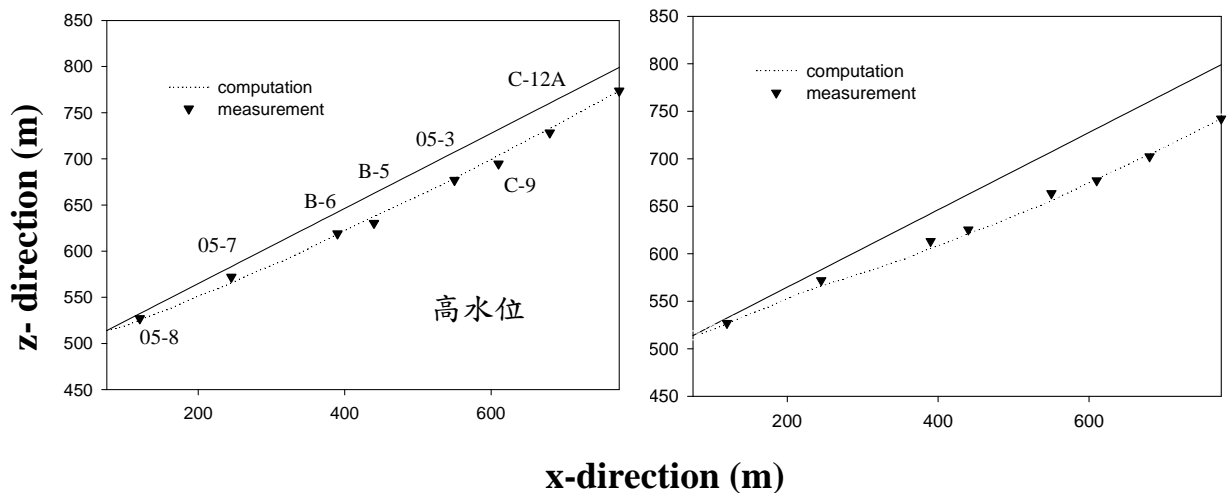


圖 5.10 五彎仔地區地下水流率定與驗證結果

進一步利用率定與驗證之參數，模擬辛樂克颱風期間，地下水位面隨時間之變化過程。辛樂克颱風之降雨資料，如圖 5.11 所示，選擇模擬時間由 9 月 13 日零時至 9 月 14 日 12 時，共 48 小時。模擬時，假設左邊邊界之水位維持不變下，右邊邊界於 48 小時內，初始水位面隨時間上升至高程為 793.7m 處，地下水位面隨時間變化之模擬結果，如圖 5.12 所示。

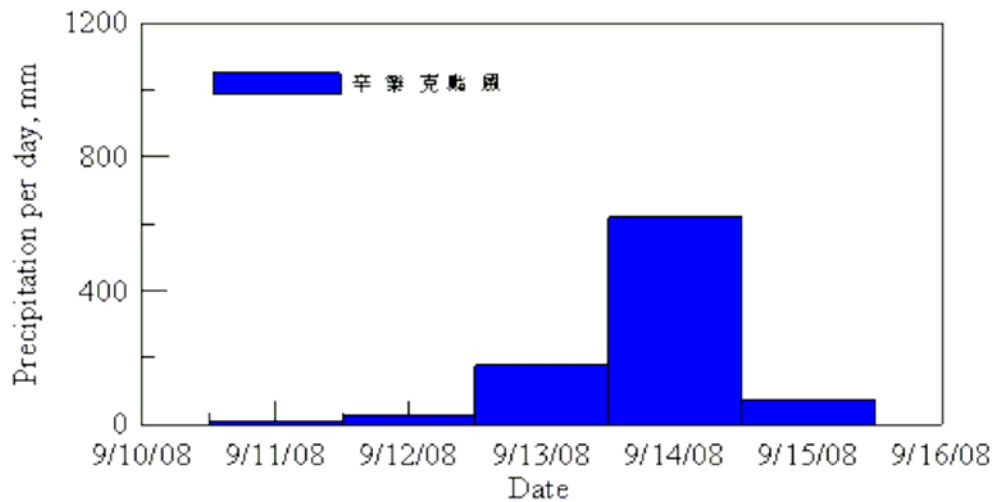


圖 5.11 辛樂克颱風降雨資料

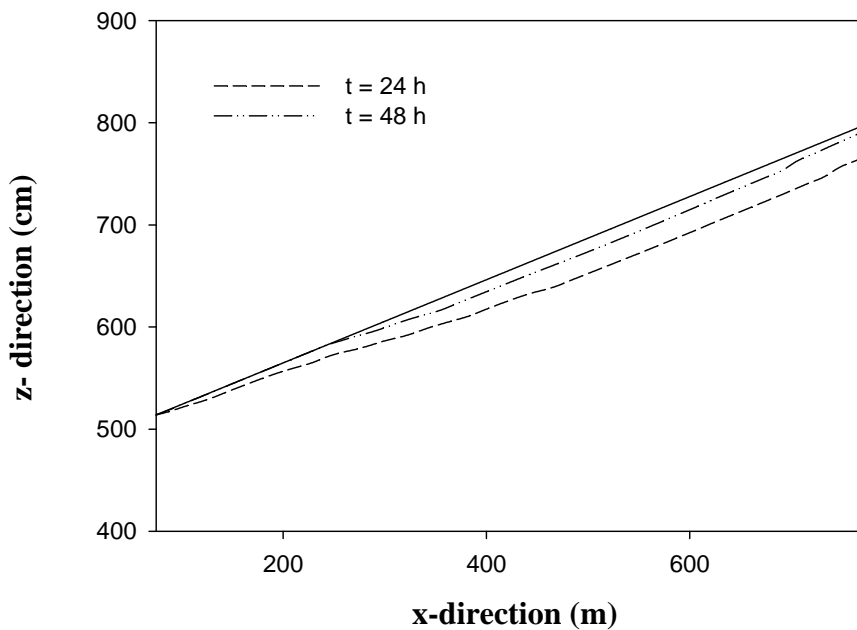


圖 5.12 地下水位面隨時間模擬結果

## 第六章 結論與建議

本計畫為藉由光纖感測技術發展邊坡監測系統，並應用於現場量測與測試，以及配合現場數值模擬來模擬邊坡地下水流分佈，數值模擬中之參數準確性，為透過現場監測系統監測數據作為數值模式參數率定來源，以利後續大範圍模擬分析，並且可由現場降雨資料得知地下水流分佈情況，再配合邊坡數值穩定分析，可即時得知現場邊坡安全因數，以提供相關政府單位決策參考依據。而計畫期間中已發展出分佈式光纖光柵水壓計與安裝封層技術測試、節理式偏斜儀改良及現場安裝、可感應大變形之BOTDR光纖拉伸計，以及重力式傾斜儀等，另外，在光纖感測解讀系統方面，也改良光纖自動化擷取設備，如增加了高容量不斷電系統與低瓦數之工業型電腦及穩定3G網路傳輸系統，並且在辛樂克與莫拉克颱風期間內，成功發揮監測的功效，掌握現場即時監測數據，並證明傳統監測技術的不足，藉由此次研究成果可提供日後相關研究及監測技術一新穎方法，而以下為今年度本研究計畫詳述之結論與建議說明。

### 6.1 結論

1. 光纖光柵水壓與地層移動分佈式自動監測系統整合之可行性與耐用性已得到驗證，可從辛樂克與莫拉克颱風期間內，現場監測數據得知。
2. 因在惡劣環境時，無法靠人為至現場量測，故分佈式自動水壓監測有其價值與必要性。
3. 由辛樂克與莫拉克颱風期間，該地區降雨量可達到當日 600mm 及 1,200mm 高的雨量，現場地下水壓最大變化為 200~300kPa，且由監測數據可知，現場地下水壓呈現非線性分佈。
4. 本計畫所使用的光纖解讀設備為自行研發之系統，成本低而維修容易。

## 6.2 建議

1. 以現場監測結果，若日後需施作排水整治工法時，其最佳之排水廊道約在 50m 以下。
2. 由現場水壓觀測井(NCTU-03)及地下水流分析結果，其降雨入滲對於地層內部水壓為非靜態水壓之分佈，故分佈式水壓監測技術之推廣有行必要性。

## 6.3 計畫成果效益說明

1. 傳統監測儀器較易受電磁波干擾及雷擊的損壞，藉由光纖不受電磁波干擾、體積小、不受雷擊及遠距離分佈式量測特性，可大幅提升監測系統之準確性與耐久性，降低成本。
2. 藉由阿里山五灣仔區域地下水數值模型，得知該區域地下水流分佈與流向，以作為日後該區域整治方向與監測孔位配置及深度之參考依據。
3. 研發國人自製光纖自動化解讀儀器，降低成本。
4. 建立光纖式地滑與水壓監測系統，提供阿里山五灣仔公路段安全性指標。
5. 建立阿里山五灣仔公路段地下水數值模型，提供該區域之地下水流向與分佈。
6. 藉由該場址光纖式監測系統測試成果，可提供各相關研究單位參考，逐漸取代傳統電子式監測儀器。
7. 增進政府與學術研究機構之合作關係，培育相關領域之專業人才。

## 附錄一

### 期中審查委員意見及辦理概況

# 交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）

## 期中 期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(3/4)

執行單位：交通大學防災與水環境研究中心

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>(一)吳副總工程司進興 (公路總局)：</p> <p>1. 據了解五彎仔地區公路總局已委託顧問公司辦理傳統傾斜管監測地滑中，報告中建議能有與研究本案監測資料做比對之敘述。</p> <p>2. 報告 P.3-5，各曲線所代表的時間「一期間如 071026~071119」？請確認，另配合各歷時水壓，建議將該「時」之當地降雨量比對列出。</p>	<p>謝謝委員建議，目前已取得阿里山公路段第五區養護工程處，委託青山顧問公司，所作之延續監測計畫報告，而監測報告資料之數據只到 97 年 10 月，並會以這段期間重大事件(颱風、暴雨)，現場監測儀器所測得之資料，進行本研究後續地下水流之邊界條件之來源，另外，關於傾斜管之資料，因監測點位與深度之不同，只能作滑動趨勢之比對。</p> <p>P.3-5 之圖 2.3 所表示為自 NCTU-03 水壓觀測井於 2007/10/26 裝設完成後，例如 071026~07/11/19 代表這段期間內，NCTU-03 各深度水壓之變化，因本計畫案並無裝設雨量站，必須取得其他研究單位所裝設之雨量站資料，本研究會以主要颱風事件之降雨量來作降雨量與水壓變化之比對。</p>	<p>同意</p> <p>同意</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>(二)高組長邦基 (公路總局養路組):</p> <p>1. 如何決定適當之水壓分佈監測位置，可再予以說明。</p> <p>2. 水壓計內增設溫度計之效用，請再予以補充說明。</p> <p>3. 貴校建置之全光纖邊坡監測系統後續仍應注意於大型深層滑動邊坡監測之存活率及實地驗證。</p> <p>4. 期中報告成果，堪稱完整，建議予以通過。</p>	<p>NCTU-03 水壓觀測井之位置選擇，為根據青山顧問公司所作之監測計畫報告中，該區域地質非常破碎，且報告中將此區域分為兩主要斷面，斷面上有許多監測孔位，另一方面，本研究主要以 B-B 斷面作為地下水流數值模擬驗證斷面，而 NCTU-03 位置為此模擬之邊界條件。(可參考第一年度計畫報告內容所作說明)</p> <p>FBG 水壓計內部設置溫度計主要目的為修正感測器會因外在溫度變化，使得感測器之讀數會受溫度產生變化，故 FBG 水壓計所測得之 FBG 改變量，須扣除溫度影響部分，才可計算實際之壓力值。</p> <p>謝謝委員建議，本研究案為 4 年期研究，將為密切注意可能發生之大型滑動，對於監測儀器之損壞程度。</p> <p>謝謝委員，對於本計畫之研究成果之支持與肯定。</p>	<p>同意</p> <p>同意</p> <p>同意</p> <p>同意</p>



參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>(三)陳處長進發 (公路總局第二區養護工程處)</p> <p>1. 阿里山五彎仔路段治理分 2 期 5 階段，其中第 3 階段係施作集水井降地下水位。本研究案與傳統式水壓監測器應可再具體區分兩者不同處，以本研究案應可分析出地下水流滲流路徑，以利集水井或橫向排水管精準佈設排水，達到邊坡穩定功效，建議可增進此一效益。</p>	<p>目前現場地下水流數值模型，已進行參數率定與驗證，且根據 NCTU-03 水壓監測井數據結果，深層處水壓變化較大，最大變化可達到 200kPa 的變化(20m 水頭高)，可見若現場若需增設排水井或排水廊道時，建議可能深度約在 50m 以下(以 NCTU-03 監測點高程)，所以現場監測資料，將影響現場地下水流模擬結果之可靠度，若模型更加完善時，應可作為後續整治工程之參考依據與邊坡穩定分析之水位及水壓輸入參數來源。</p>	<p>同意</p>
<p>(四)汪副處長海鄂 (公路總局重大橋樑工程處)：</p> <p>1. 在 P.1-3 本年度計畫主要工作內容 2. 傳輸系統之改良，但在 P.1-4 計畫執行進度說明中並無顯示出來，應在 P.1-4 進度 1.2；不斷電源系統，採用低耗電量(約 15W)工業型電腦屬之，應加以說明清楚。</p>	<p>謝謝委員對於報告所提供之建議，對於委員所說之兩點事項，已予以進行修正及說明清楚。</p>	<p>同意</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>2. 在 5-1 初步結果 3.目前已完成 10 組光纖光柵水壓計與封裝與 P.5-2 後續進度說明 2. NCTU-04 水壓觀測孔位裝測及 10 組光纖光柵水壓計安裝應為同一事項，應說明清楚，否則很容易誤會有 20 組光纖光柵水壓計，建議 5-1 初步結果 3. 修正為目前已完成預定裝置在 NCTU-04 水壓觀測孔之 10 組光纖光柵水壓計。</p>	<p>感謝委員之建議，對於後續所增設之 NCTU-04 水壓觀測井部分說明，會從新修改用詞，以避免造成審查委員們之誤解。</p>	<p>同意</p>
<p>3. P.1-4 與 P.5-2 部分用詞應統一。</p>	<p>感謝委員建議，相關報告內容會詳加檢查，並統一用詞。</p>	<p>同意</p>
<p>(五)林教授三賢（國立臺灣海洋大學河海系）：</p>		
<p>1. 計畫執行期限請更正。</p>	<p>計畫執行期限，已予以修正。</p>	<p>同意</p>
<p>2. 3-4 頁，”受全球氣候暖化之影響”字句，是否必要，請考慮。</p>	<p>對於”全球氣候暖化影響用詞”，會考慮其用詞必要性。</p>	<p>同意</p>
<p>3. 3-11 頁之圖 2.15 應為 2.14。</p>	<p>謝謝委員指正，已修正報告中之圖編號。</p>	<p>同意</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>3. 第四章,分析 4-8 頁之剖面,不均質及不等向性效應是否影響很小。</p>	<p>目前所作之地下水流數值模擬,僅考慮均值與等向性,假設其影響性小。</p>	<p>同意</p>
<p>(六)吳先生鎮封：</p>		
<p>1. 傳統式電子式水壓計與光纖光柵水壓計有何不同之處,請說明。</p>	<p>傳統電子式水壓計與光纖光柵水壓計之主要差別於電子式感測器容易受到電磁波干擾問題(當傳輸訊號過長時),電路易受潮而損壞,對於長時間監測效果不高,不易多點量測。</p>	<p>同意</p>
<p>2. 截至目前為止,五灣仔地區之滑動量是多少?</p>	<p>關於這次光纖偏斜儀(FBG-SD)在 IHMT-200m 傾斜觀測管中,在莫拉克颱風時,其變形量約 2mm 左右。</p>	<p>同意</p>
<p>~~~以下空白~~~~</p>	<p>~~~~以下空白~~~~</p>	

## 附錄二

### 期末審查委員意見及辦理概況

交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）

期中 期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(3/4)

執行單位：交通大學防災與水環境研究中心

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>(一)吳副總工程司進興 (公路總局)：</p> <p>1. P.2-3 圖 2.2 各監測儀器有不同類別(如光纖光柵傾斜儀、水壓計、傳統傾斜儀、水壓觀測孔)建議以不同圖示表示。</p> <p>2. P.3-13、P.3-14，圖 3.10 有重複。</p> <p>3. 本年度報告內，對光纖光柵傾斜儀之監測結果似未說明。亦缺乏新監測法與傳統傾斜儀監測結果之比對。(即是滑動趨勢)</p>	<p>謝謝委員建議，於期末報告完稿中，以不同圖式來區別各監測儀器。</p> <p>感謝委員指正，已修正於期末報告完稿。</p> <p>本計畫在莫拉克颱風期間內，均有測得現場水壓觀測井及傾斜觀測管數據，在水壓監測部分，有明顯變化，而傾斜管變形部分，僅只有1~2mm 最大變化量，所以並未呈現至期末報告中。</p>	<p>同意</p> <p>同意</p> <p>同意</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>4. 圖 2.3 各不同深度水壓變化曲線所代表期間很長(如 071026~090809 長達近二年), 其代表意義如何, 請說明。</p> <p>5. P.5-12 圖 5.10 實際量測水位與數值模擬計算所得似有甚大差距(達 30~50m 高差), 將來各不同地區條件在實用上是否仍需依實測數據才能模擬?</p>	<p>圖 2.3 所示水壓變化曲線, 僅代表兩段時間點之各深度點之水壓變化。例如: 071026 為一初始水壓力, 將 090809 所測得的水壓值扣除初始水壓值, 即為這兩時間點之水壓變化。</p> <p>地下水流模擬內之參數需依現場監測資料加以率定修正後, 才可準確模擬現場地下水流情況, 故實用上須針對不同地點重新率定參數, 後續才可模擬實際情況。</p>	<p>同意</p> <p>同意</p>
<p>(二)高組長邦基 (公路總局養路組):</p> <p>1. 希望未來計劃結束後, 能夠由水壓的分佈量測, 達到預警機制。</p> <p>2. 請於第四年建立地層水壓變化與邊坡穩定預警之具體模式以實際應用。</p>	<p>感謝委員對於本計畫之支持, 本研究團隊將盡最大能力, 在第四年計畫時間內, 以水壓監測資料並透過現場地下水流模擬分析, 以求得現場邊坡滑動與水壓之關係, 提供初步建議之預警值。</p> <p>感謝委員建議, 於第四年計畫中提出。</p>	<p>同意</p> <p>同意</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>(三)陳處長進發 (公路總局第二區養護工程處)</p> <p>1. 圖 4.1 應係 24 小時累積雨量值，並宜敘明地區降雨量(資料來源)。</p> <p>2. 雨量與水位上升之統計分析圖，可提供雨量警戒基準值。</p> <p>3. 以集水井內之橫向集水管為例，常因滲流帶動 200mm 粒徑以下之土壤而塞住濾層致失效，本研究是否考量。</p>	<p>本降雨量資料來源為逢甲大學提供，其雨量站架設位置於監測小屋附近，而圖 4.1 為展示 24 小時累積雨量值。</p> <p>感謝委員建議，目前本研究還未由降雨量與現場水壓變化關係，提供一警戒值，但於明年度計畫中，將完成現場地下水流分析，以提供雨量與水壓之關係。</p> <p>感謝委員建議，集水井目的為降低現場地下水位，其流量較大，容易帶走土壤顆粒，而水壓量測功能與其有差異，故濾層不易造阻塞，儘可能內部有細菌孳長。</p>	<p>同意</p> <p>同意</p> <p>同意</p>
<p>(四)汪副處長海鄂 (公路總局重大橋樑工程處)：</p> <p>1. 應可將 1.2 計畫工作項目說明及 1.3 計畫執行進度說明合而為一，兩者似乎尚有不能相互配合之處，合而為一可以說得更清楚。</p>	<p>感謝委員建議，已依照委員建議修正於期末報告完稿中。</p>	<p>同意</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>2. 6-1 結論用語似乎較學術化，不容易懂，這些結論在實務上要如何運用？簡報的結論和期末報告的結論要如何結合？</p>	<p>謝謝委員指正，關於期末報告結論部分，已與簡報結論相結合與修正，並修正至期末報告完稿內文。</p>	<p>同意</p>
<p>3. 本研究是四年計劃中之第三年，應標前2年已做的工作項目及結論作一概略的說明交待，並對於未來的第四年後續預定工作項目陳列出來，才能顯示出整個計劃的完整性。</p>	<p>感謝委員建議，已於期末報告完稿內文中，簡述前兩年之工作項目，並提出第四年計畫之後續工作項目內容。</p>	<p>同意</p>
<p>(五)林教授三賢（國立臺灣海洋大學河海系）：</p>		
<p>1. 數值分析為非飽和狀態，量測是否也可判別非飽和層。</p>	<p>本計畫量測水壓為正水壓部分，尚未考量土壤基質吸力部分，但於後續計畫中，可能加入基質吸力量測部分，以配合數值分析。</p>	<p>同意</p>
<p>2. P.5-11 之圖 5.9 能否增加地調資料提供參考。</p>	<p>感謝委員建議，關於圖 5.9 為取自於青山顧問公司報告中之圖，但報告中未提供地調資料，故無法提供，謝謝。</p>	<p>同意</p>



參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>3. 已埋設之傳統水壓計，若尚能量測，與本計畫可連成 2 維的結果。</p> <p>(六)吳先生鎮封：</p> <p>1. 系統整合改良經三年努力進步情形，已能達到作用程度，未來對邊坡滑動可提供預警，建議在報告書中擬訂預警機制。</p> <p>(七)林助理工務員文欽 (公路總局第五區養護工程處阿里山工務段)：</p> <p>1. 未來監測位置可參考青山顧問公司前期監測偵得的滑動面，將自動化光纖感測器放置重點位置，補足 IP 所不能自動化的缺點，希望藉由本監測設備，找出滑動位置、滑動速率與水位升降的關係。</p> <p>~~~以下空白~~~~</p>	<p>目前傳統水壓計部分，為其他單位所有，且有些已損壞無法量測，但本計畫已於今年增加一水壓觀測井，故可提供 2 維的數值模擬分析。</p> <p>感謝委員建議，因目前現場地下水流分析尚未完成，對於預警值的訂定，在今年度計畫無法提出，本團隊將於後續計畫項目中，完成現場地下地下水流模擬結果，並配合降雨資料，進行邊坡穩定分析，以訂定警戒值及機制方法。</p> <p>感謝委員建議，本團隊所佈設監測點位位置，以參照過去研究報告成果，所佈設的點位，以利後續監測資料比對及數值模擬分析。</p> <p>~~~~以下空白~~~~</p>	<p>同意</p> <p>同意</p> <p>同意</p>

## 附錄三

### 期末報告簡報資料

# 全光纖式邊坡穩定監測系統 整合與現地應用測試 (3/4) 2009-期末報告

黃安斌、蔡東霖、李瑞庭



HAZARD MITIGATION  
Natural  
RESEARCH CENTER  
國立交通大學  
防災工程研究中心  
NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

## 2009-工作內容

2

- 現有高穩定性光纖訊號解讀技術之評估，選擇使用與必要之改良。
- 光纖感應訊號解析與資料擷取/傳輸系統之改良與維護。
- 重力式加速度感測器之研發與室內測試。
- 現有光纖監測儀器之維護。
- 現場數值模擬擴充與驗證。
- 現場監測資料與數值模擬相互驗證。

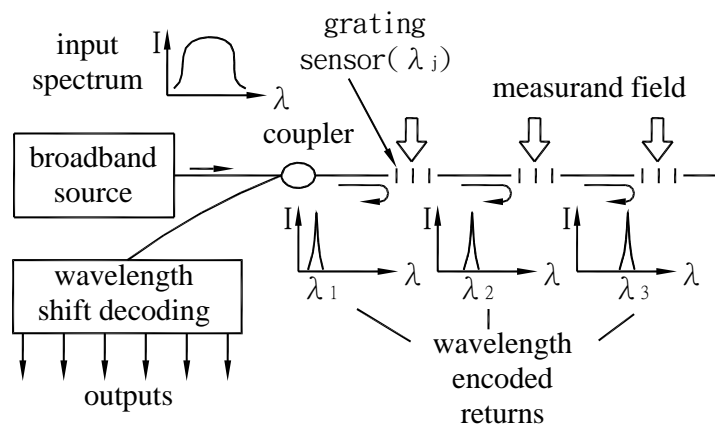
## 研究方法及進行步驟

3

- 以阿里山台18線五灣仔路段為標的
- 現場光纖自動化解讀系統架設與量測數據紀錄
- 重力式加速度與傾斜儀之研發與測試
- 改良現有光纖光柵解讀儀與更換大容量不斷電系統
- 增加一孔NCTU-04 50m光纖光柵水壓觀測井
- 藉由雨季及颱風季節，現場監測儀器量測數據進行現場地下水文分析模型驗證與率定

## 光纖光柵感測原理

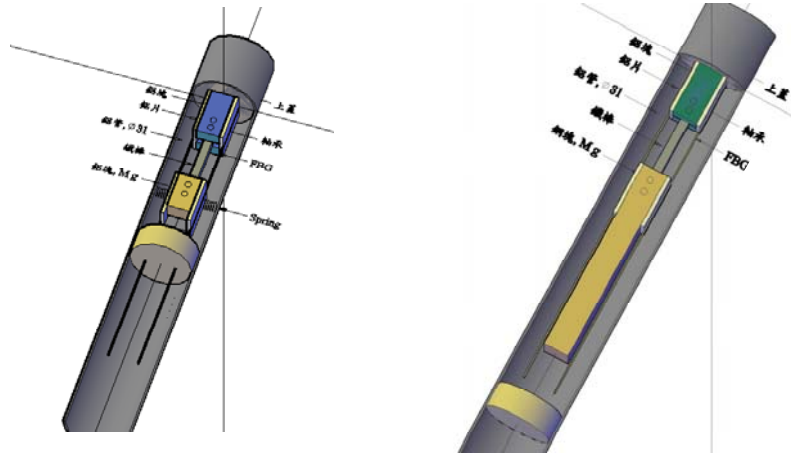
4



光纖光柵反射原理示意圖 (Ho et al., 2005)

# 重力式加速度與傾斜儀

5

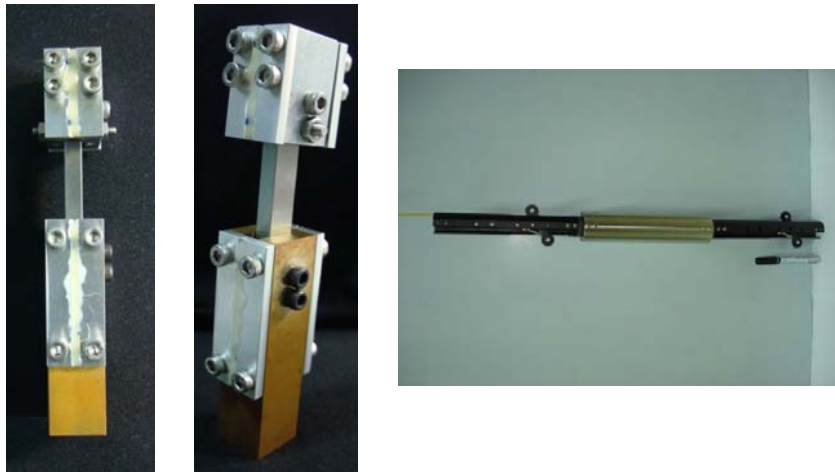


重力式加速度計

重力式傾斜儀

# 重力式傾斜/加速度儀 FBG-I/A

6



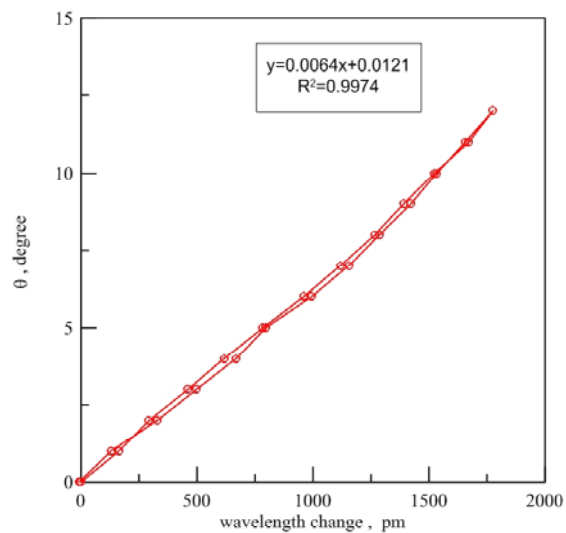
## 重力式傾斜/加速度儀之優點

7

- 感測範圍與靈敏度可用變更重塊質量/簧片勁度來調整
- 非常適合低頻（低於10Hz至靜態）狀況之監測，例如橋墩，塔架式結構穩定/倒塌監測

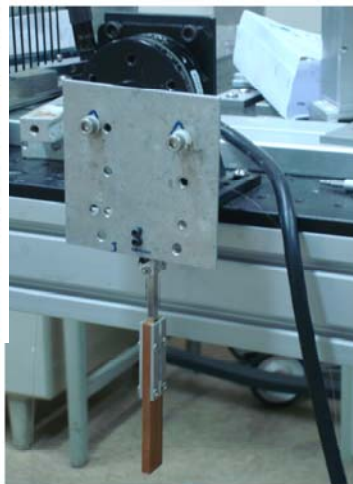
## 標定結果

8



## 重力式傾斜儀(提高靈敏度)

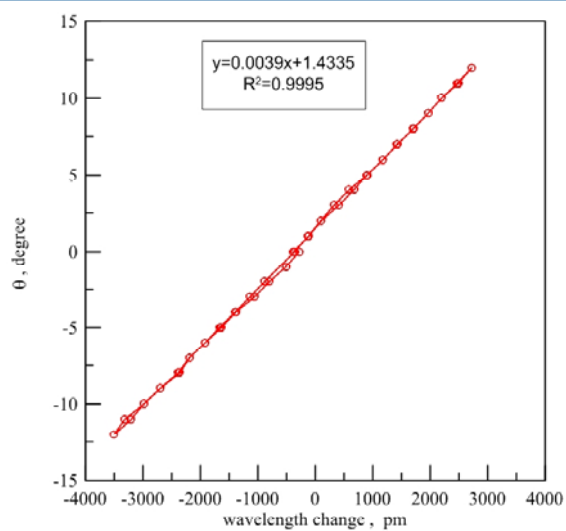
9



軸承、質量分佈與光鮮佈設

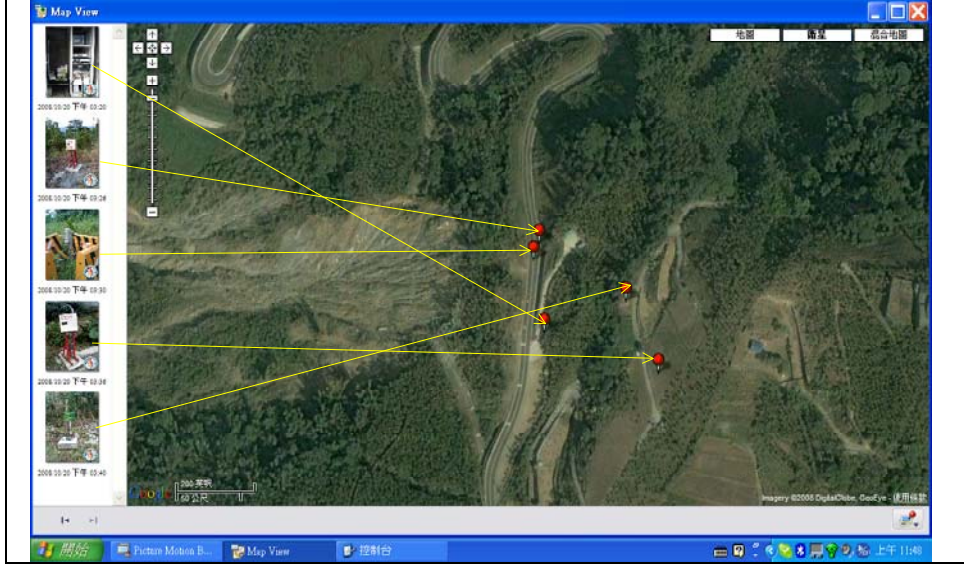
## 標定結果(提高靈敏度)

10



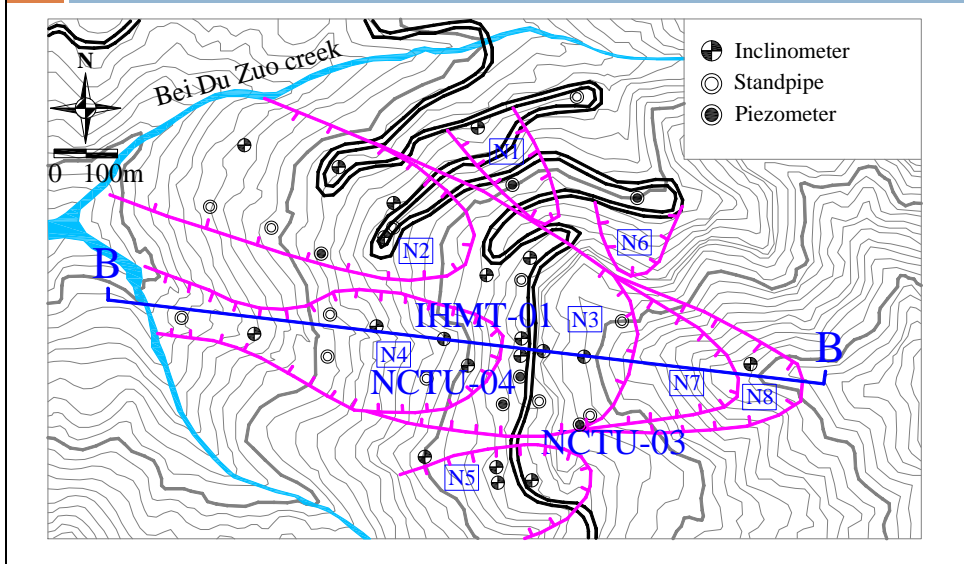
# 現場光纖監測儀器安裝

11



# 現場監測孔位分佈圖

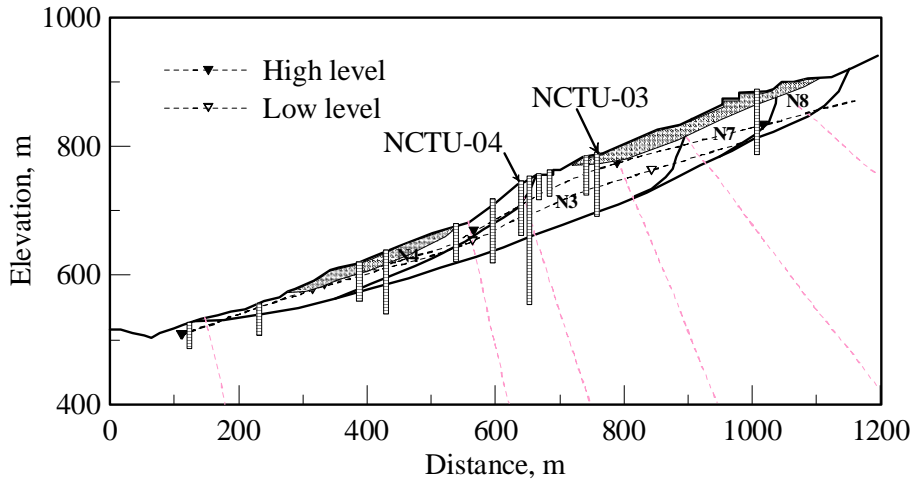
12





## 深層滑動B-B剖面

13



(改繪青山工程顧問公司, 2006)

## 光纖自動化監測系統



3.5G  
4800W battery  
20W Industrial PC



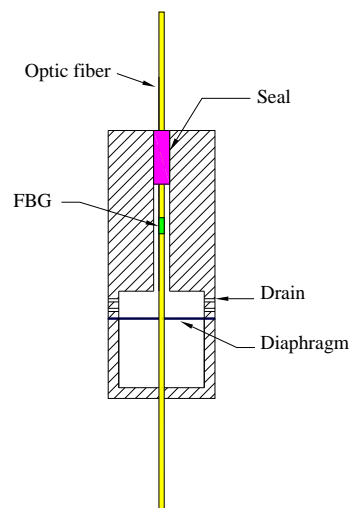
## 邊坡地層特性

15

- 由崩積層與破碎岩石所組成，至最深鑽孔200m深度
- 暴雨期間水位變化均可達數十至二十公尺以上－水壓分佈監測之重要性
- 顯示影響水位變化的可能原因包括側向水流補注，導致地下水位上升快速－滲流分析之重要性

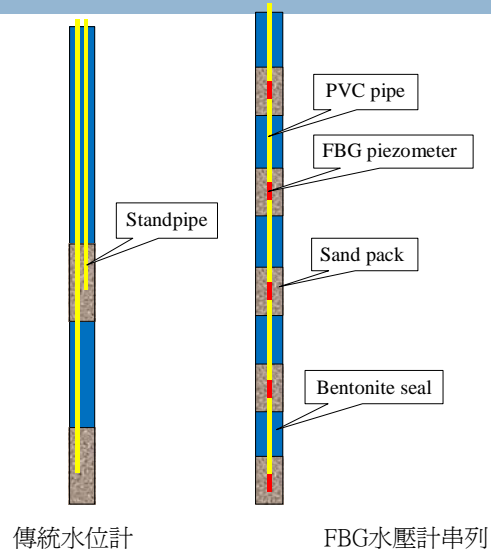
## 光纖光柵水壓計

16



# FBG水壓計串列

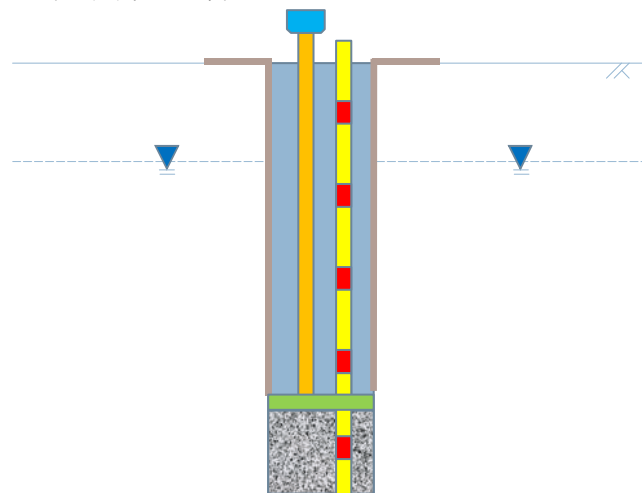
17



# 分佈式水壓計現場安裝封層技術

18

□ 利用特密管施作原理

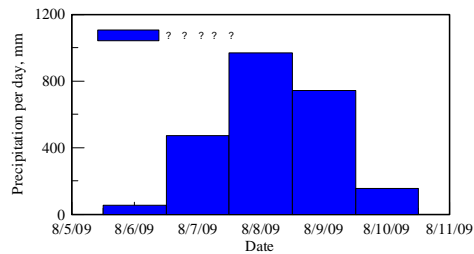
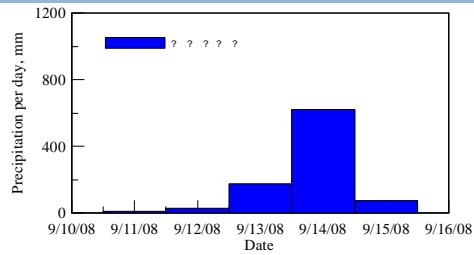


## NCTU-04 50m鑽孔? 以5m間隔安裝FBG水壓計

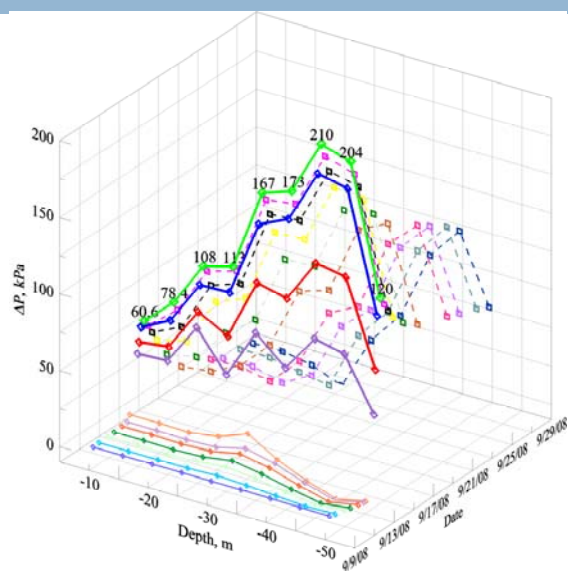
19



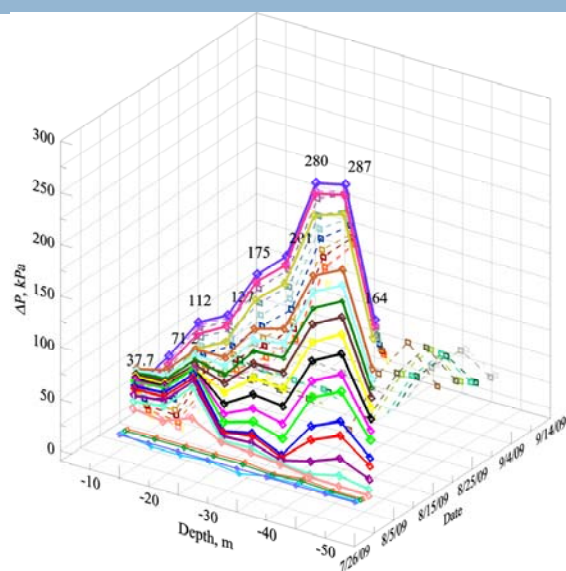
## 辛樂克與莫拉克颱風降雨量



## 辛樂克颱風期間水壓讀數

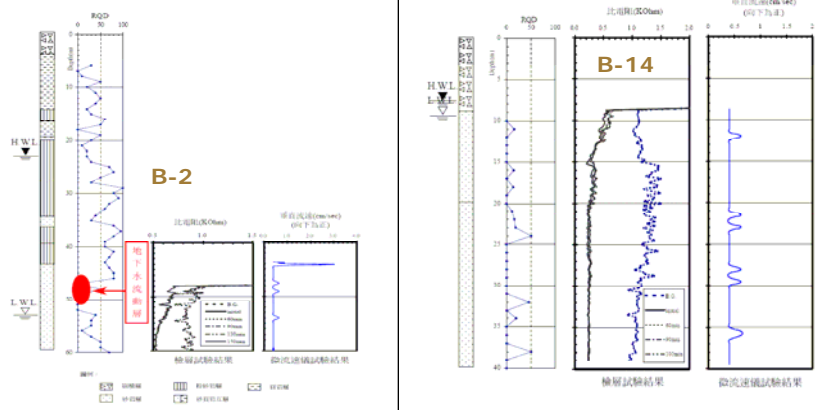


## 莫拉克颱風期間水壓讀數



# 垂直流不可忽略

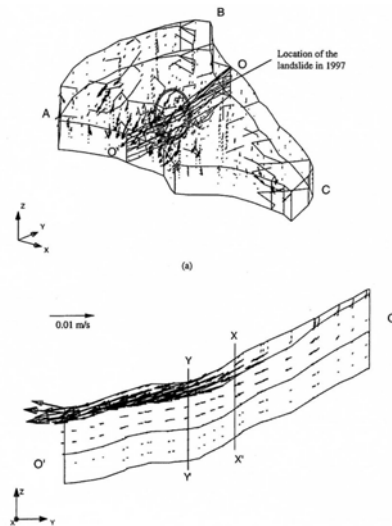
23



根據地下水檢層法與微流速儀量測法之研究成果(青山工程顧問公司, 2006)

# 降雨情況下地層內水流之分佈

24



(取自Ng et al., 2001)

## 相關地下水流模型簡介

25

滿足都布假設(Dupuit assumption)之非拘限(unconfined)地下水流模型：

- 適用於垂直流不顯著之流況(即僅考慮水平流)。
- 忽略非飽和效應
- 常用壩體滲流分析。

多水層(multi-aquifer)地下水流模型：

- 適用垂直流不能忽略之流況。
- 地質有類似阻水層與含水層規則互層之分布。
- 忽略非飽和效應。

非飽和(unsaturated)地下水流模型：

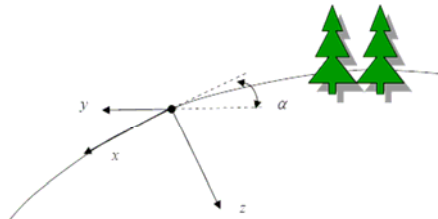
- 同時考慮垂直流與水平流。
- 地質不需要有類似阻水層與含水層規則互層之分布。
- 可較嚴謹地考慮降雨入滲至土壤之機制。

## 非飽和地下水流模型

26

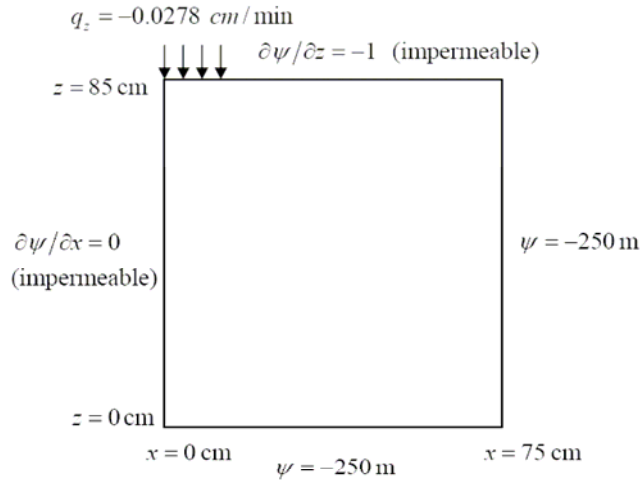
$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_1(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_2(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_3(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right]$$

式中， $\psi$  為壓力水頭(pressure head)， $\alpha$  為坡地之角度(slope angle)， $K_1$  與  $K_2$  分別表示與沿坡面與垂直坡面方之水力傳導係數(hydraulic conductivity)， $\theta$  為含水量(water content)。



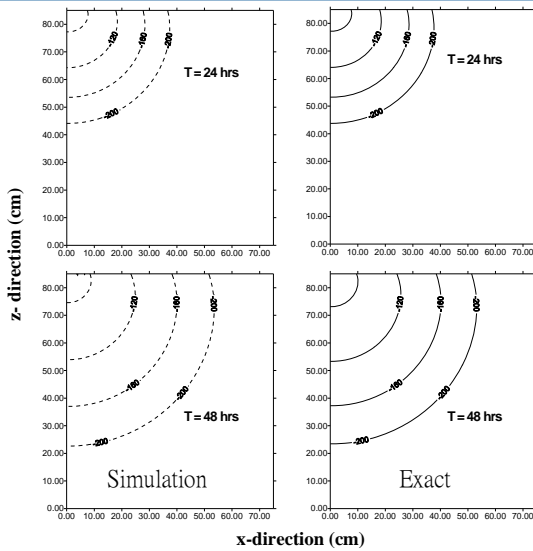
# 驗證案例區域示意圖

27



# 數值模擬與解析解之比較

28





# 都布非拘限地下水流模型

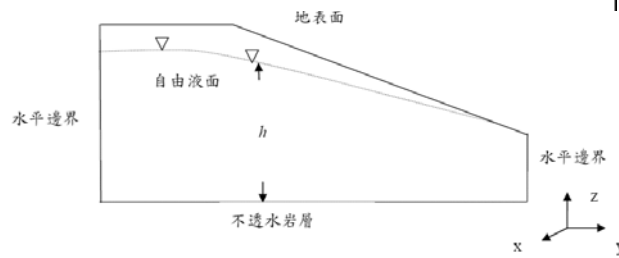
29

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t}$$

$h$  為水頭或水位(hydraulic head)。

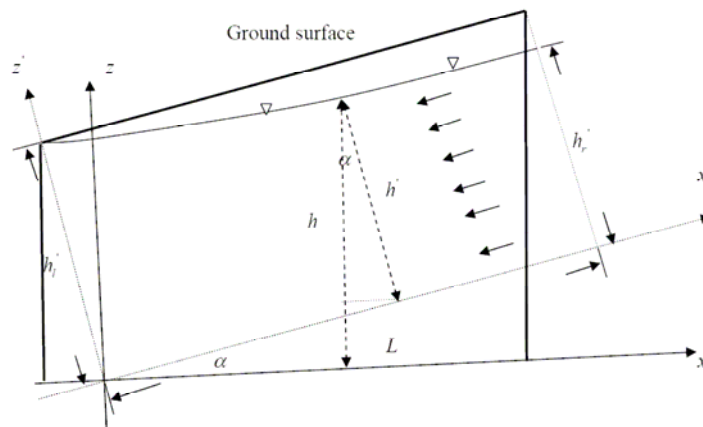
$K_x$  與  $K_y$  分別表示  $x$  與  $y$  方向之水力傳導係數(hydraulic conductivity)。

$S_y$  為 比出水係數(specific yield)。



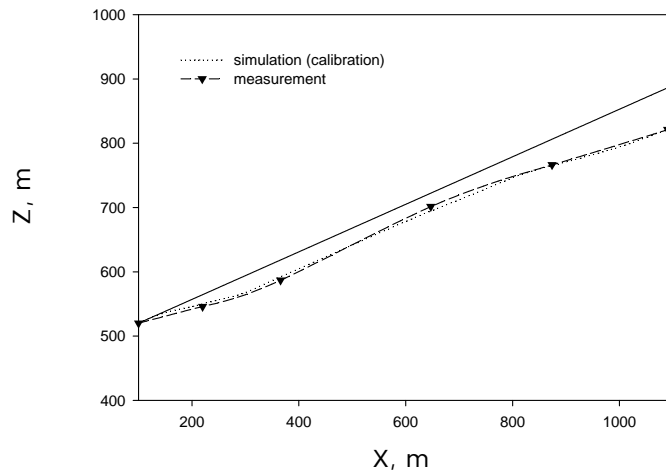
# 簡易地下水流模式

30



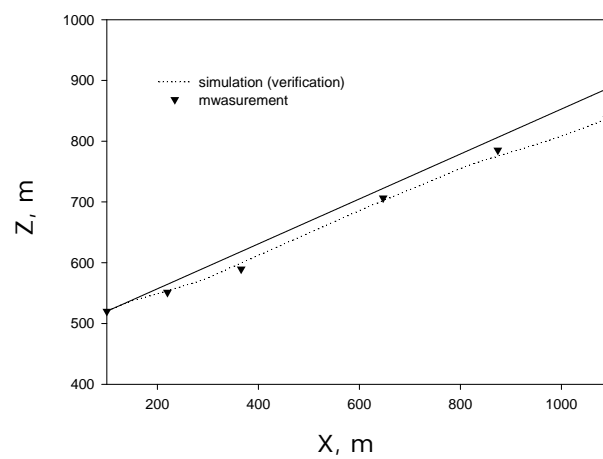
## 簡易地下水流模式標定 - 低水位

31



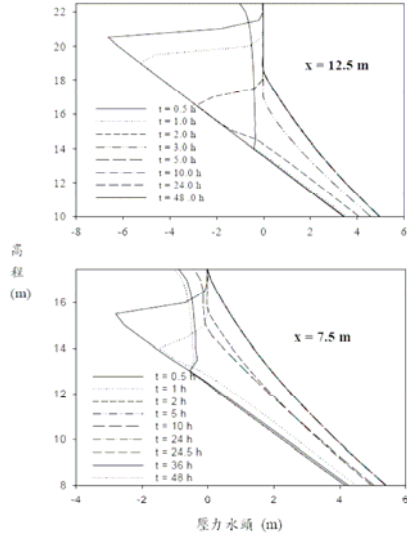
## 簡易地下水流模式標定 - 高水位

32



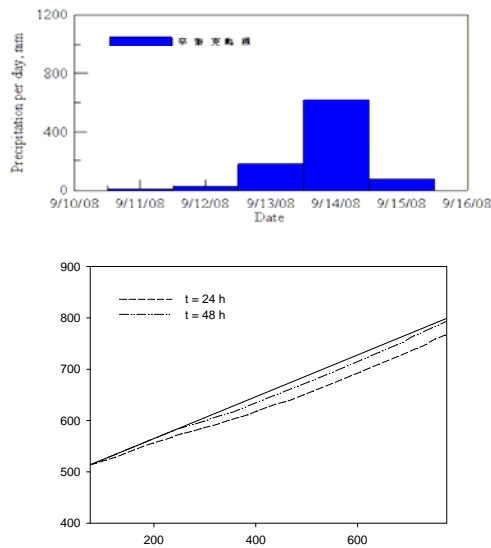
# 模式之降雨入滲測試結果

33



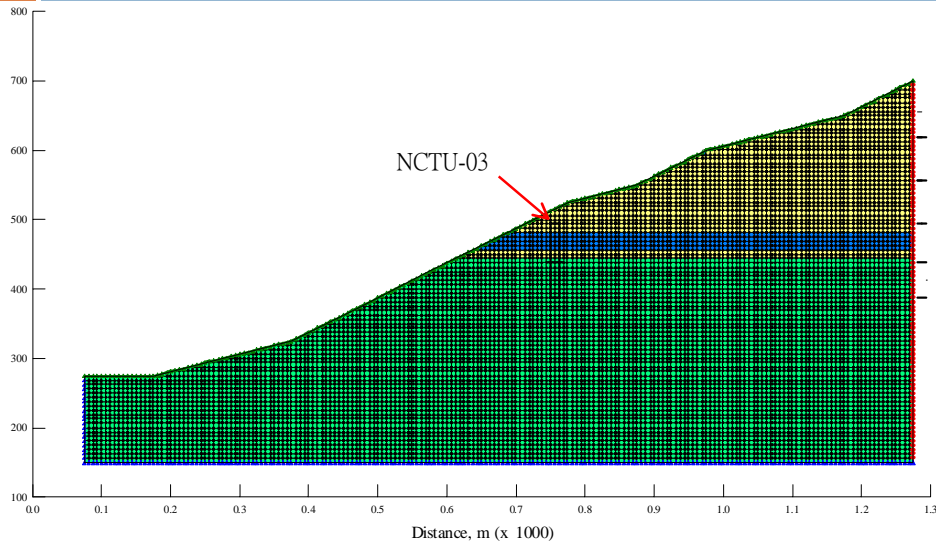
# 辛樂克颱風模擬結果

34



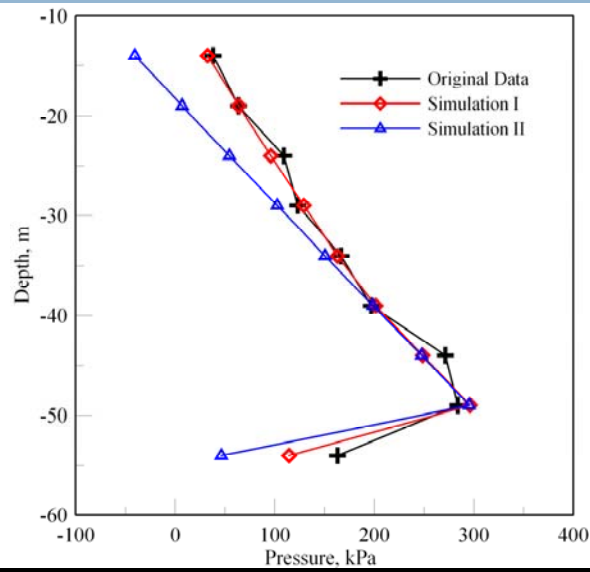
# SEEP/W 模擬網格設定

35



# SEEP/W 模擬結果

36



## 結論

37

- 光纖光柵水壓與地層移動分佈式自動監測系統整合之可行性與耐用性已得到驗證
- 分佈式自動水壓監測之價值與必要性
- 暴雨期間水頭分佈之特性
- 使用自行研發之系統，成本低而維修容易

## 後續工作

38

- 收集暴雨期間地下水壓分佈資訊
- 完成數值模擬分析，建構數值模擬與現場監測整合之預警系統
- 重力式加速度與傾斜儀應用於邊坡與橋墩穩定監測

