

98-23-7380

MOTC-IOT-97-H1DB007

# 全光纖式邊坡穩定監測系統整合 與現地應用測試(2/4)



交通部運輸研究所

中華民國 98 年 4 月

98-23-7380

MOTC-IOT-97-H1DB007

# 全光纖式邊坡穩定監測系統整合 與現地應用測試(2/4)

著者：李豐博、饒正、黃安斌  
蔡東霖、李瑞庭

交通部運輸研究所

中華民國 98 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目資料

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試

. (2/4) / 李豐博等著. -- 初版. -- 臺北市

: 交通部運研所, 民 98. 04

面 ; 公分

參考書目:面

ISBN 978-986-01-8231-6(平裝)

1. 防災工程 2. 山坡地 3. 光纖感測

445. 5

98006758

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(2/4)

著 者：李豐博、饒正、黃安斌、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 98 年 4 月

印 刷 者：承亞興企業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 130 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

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 台北市中山區松山路 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：1009800886

ISBN：978-986-01-8231-6 (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分內容者，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(2/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-01-8231-6(平裝)	政府出版品統一編號 1009800886	運輸研究所出版品編號 98-23-7380	計畫編號 97-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：國立交通大學防災工程研究中心 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 97 年 3 月 至 97 年 10 月	
關鍵詞：光纖、光纖感測、光纖水壓計、地下水文數值模型、邊坡穩定			
<p>摘要：</p> <p>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。</p> <p>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，使用本研究團隊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。</p> <p>本系統研發完成後，可供交通部公路總局第五區養護工程處建立光纖式地滑與水壓監測系統，提供阿里山公路五彎仔段安全性指標與建立阿里山公路五彎仔段地下水數值模型，提供該區域之地下水流向與分佈，管理值之研擬之具體目標。本系統亦可加入本所研發之「公路防救災決策支援系統」，供公路管理單位完成災害預防、災害緊急應變及緊急復原各階段所應執行之災前評估、調查及應採取之緊急措施，以達成防災及減災之功效。</p>			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
98 年 4 月	104	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。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>密 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>（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， <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）</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>普通</p>			
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 (2/4)</b>			
ISBN(OR ISSN) ISBN978-986-01-8231-6 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009800886	IOT SERIAL NUMBER 98-23-7380	PROJECT NUMBER 97-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 2008 TO October 2008
RESEARCH AGENCY: National Chiao Tung University, Natural Hazard Mitigation Engineering Research Center PRINCIPAL INVESTIGATOR: Huang An-bin PROJECT STAFF: Huang An-bin, Tsai Tong-lin, Lee Jui-ting ADDRESS: #1001, Ta Hsueh Rd. , Hsinchu City 300, Taiwan, R.O.C PHONE: (03) 5712121			
KEY WORDS: Fiber optic, Fiber optic sensor, Fiber optic piezometer, Ground water flow numerical model, Slope stability			
<p>ABSTRACT:</p> <p>Conventional slope stability monitoring often involves the use of inclinometer casings and open-ended piezometers. A plastic or aluminum casing is installed in the ground. 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-ended 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 the 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 fiber optic sensors that 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 fiber optic.</p> <p>A test site has been set up at the Five-turn-point of Highway 18 near Mt. Alishan. The fiber optic ground displacement and ground water monitoring sensors developed by the research team have been 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.</p> <p>The research can provide new slope stability monitoring technologies to the Fifth Maintenance Office, Directorate General of Highways, MOTC. These new technologies include the use of fiber optic sensors for ground displacement and porewater pressure monitoring. Results from field measurements can be used to facilitate groundwater numerical modeling for the Five-turn-point section of the Mt. Alishan highway. The goal of numerical modeling is to determine the characteristics and distribution of groundwater flow and to setup critical index values for highway safety management.</p> <p>The completed monitoring system can be integrated into the "highway disaster prevention decision support system" and offer an effective tool to highway administrators for evaluation and implementation of disaster prevention schemes.</p>			
DATE OF PUBLICATION April 2009	NUMBER OF PAGES 104	PRICE 100	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(2/4)

## 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
表目錄 .....	V
圖目錄 .....	VII
第一章 緒 論 .....	1-1
1.1 計畫背景 .....	1-1
1.2 計畫工作項目說明 .....	1-3
1.3 計畫執行進度說明 .....	1-4
第二章 光纖監測系統研發概況 .....	2-1
2.1 光纖監測系統之鑽位置配置與選定要素 .....	2-1
2.2 研究場址光纖監測系統運作狀況 .....	2-3
2.3 光纖感測系統自動化設備架設與光纜佈放 .....	2-10
第三章 低解析可承受大變形之光纖感測器研發 .....	3-1
3.1 布里淵 (Brillouin) 散射原理 .....	3-1
3.1.1 激發性 Brillouin 散射原理 .....	3-4
3.1.2 自發性 Brillouin 散射原理 .....	3-6
3.2 低解析可承受大變形之光纖感測器之研發構想 .....	3-7
3.3 低解析可承受大變形之光纖感測器之室內標定 .....	3-12
3.4 低解析可承受大變形之光纖感測器之室內九米傾斜觀測管測	

試.....	3-15
第四章 光纖拉伸計現場安裝與監測資料分析.....	4-1
4.1 光纖拉伸計之現場安裝與量測結果.....	4-1
4.2 辛樂克颱風期間現場光纖感測器資料分析.....	4-2
4.3 BOTDR 光纖拉伸計改良與現場安裝.....	4-8
第五章 研究場址地下水流數值模式之驗證與擴充.....	5-1
5.1 研究場址地下水流數值模式簡介.....	5-1
5.2 研究場址地下水流數值模式之驗證.....	5-3
5.3 研究場址地下水流數值模式之擴充.....	5-5
5.4 五彎仔地區地下水流初步率定與驗證模擬.....	5-8
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	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 期末簡報資料.....	附錄 3-1

## 表 目 錄

表 3.1 A-A 剖面監測項目狀態說明(青山工程顧問公司, 2006).....3-10

表 3.2 B-B 剖面監測項目狀態說明(青山工程顧問公司, 2006).....3-10



## 圖 目 錄

圖 2.1	全光纖式監測儀器配置圖（青山工程顧問公司, 2006）	2-2
圖 2.2	NCTU-03 光纖光柵水壓監測孔位歷時水壓變化圖	2-4
圖 2.3	IHMT-01 200m 傾斜觀測管深度檢測	2-5
圖 2.4	孔位方向紀錄儀	2-5
圖 2.5	指北針影像	2-6
圖 2.6	IHMT-01 200m 傾斜觀測管內導溝方位量測	2-6
圖 2.7	IHMT-01 30 組 FBG-SD 安裝	2-7
圖 2.8	IHMT-01 200m 傾斜觀測管歷時變形圖	2-7
圖 2.9	IHMT-01 200m 傾斜觀測管後方邊坡坡面植生工程	2-8
圖 2.10	NCTU-01 20 組 FBG-SD 重新裝置	2-8
圖 2.11	IHMT-01 孔位光纜佈放工程	2-9
圖 2.12	監測小屋光纜配線盒裝設工程	2-9
圖 2.13	光纜佈放路線	2-11
圖 2.14	五彎仔監測小屋	2-11
圖 2.15	IHMT-01 孔位光纜架設	2-12
圖 2.16	NCTU-01 及 NCTU-02 光纜架設	2-12
圖 2.17	NCTU-03 光纜架設	2-13
圖 2.18	光纖感測器自動化擷取系統	2-13
圖 2.19	光纖感測器自動化擷取系統畫面	2-14
圖 2.20	光纖感測器自動化擷取系統參數設定畫面	2-14

圖 2.21 光纖感測器自動化擷取系統地層位移畫面.....	2-15
圖 2.22 光纖感測器自動化擷取系統水壓分布及歷時畫面.....	2-15
圖 2.23 光纖感測器自動化擷取系統警戒值與簡訊發送畫面 .....	2-16
圖 3.1 Brillouin 散射在纖核(core)中的示意圖 (陳進福, 2001) .....	3-2
圖 3.2 光纖內的 Rayleigh、Brillouin、Raman 散射的頻譜圖 (陳進福, 2001) .....	3-3
圖 3.3 Brillouin 散射功率對入射光功率的關係圖(陳進福, 2001).....	3-4
圖 3.4 (a) SMF 中的背向激發性布里淵散射頻譜.....	3-7
(b) SMF 中的背向自發性布里淵散射頻譜(陳進福, 2001).....	3-7
圖 3.5 阿里山公路五彎仔路段-監測儀器配置圖 (青山工程顧問公司, 2006) .....	3-9
圖 3.6 光纖拉伸計實體圖.....	3-11
圖 3.7 光纖拉伸計初始與受力後狀態圖.....	3-11
圖 3.8 光纖拉伸計固定於 PVC 管 .....	3-12
圖 3.9 光纖拉伸計拉伸測試結果圖.....	3-13
圖 3.10 光纖拉伸計固定於 PVC 管彎曲標定示意圖.....	3-14
圖 3.11 光纖拉伸計固定於 PVC 管之彎曲標定圖.....	3-15
圖 3.12 光纖拉伸計架設於室內九米傾斜觀測管.....	3-16
圖 3.13 對照組傾斜管大肚形變形.....	3-17
圖 3.14 光纖拉伸計(定性)大肚形變形測試結果圖.....	3-17
圖 3.15 對照組傾斜管喇叭形變形圖.....	3-18
圖 3.16 光纖拉伸計(定性)喇叭形變形測試結果圖.....	3-18

圖 4.1	30 組 BOTDR 光纖拉伸計 .....	4-2
圖 4.2	C-04-4 100m 傾斜觀測管安裝 15 組 BOTDR 光纖拉伸計 .....	4-3
圖 4.3	C-3 30m 傾斜觀測管安裝 6 組 BOTDR 光纖拉伸計 .....	4-3
圖 4.4	C-12A 40m 傾斜觀測管安裝 7 組 BOTDR 光纖拉伸計 .....	4-4
圖 4.5	C-04-4 BOTDR 光纖拉伸計變化圖 .....	4-4
圖 4.6	C-3 BOTDR 光纖拉伸計變化圖 .....	4-5
圖 4.7	C-12A BOTDR 光纖拉伸計變化圖 .....	4-5
圖 4.8	辛樂克颱風期間 NCTU-03 水壓分佈圖 .....	4-6
圖 4.9	辛樂克颱風期間 IHMT-01 傾斜觀測管變形圖 .....	4-6
圖 4.10	9 月份日累積雨量分佈圖 .....	4-7
圖 4.11	NCTU-03 地下水位歷時變化圖 .....	4-7
圖 4.12	NCTU-03 地下水位上升歷時變化圖(辛樂克颱風期間) .....	4-8
圖 4.13	改良式 BOTDR 拉伸計實體圖 .....	4-9
圖 4.14	改良式 BOTDR 拉伸計現場安裝 .....	4-9
圖 4.15	改良後 BOTDR 拉伸計於 C-04-4 孔位初始變化圖 .....	4-10
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	五彎仔地區地下水流模擬區域圖(青山顧問, 2006) .....	5-5
圖 5.4	簡易地下水流模式示意圖 .....	5-6
圖 5.5	簡易地下水流模式模擬結果 .....	5-8
圖 5.6	A-A 斷面高水位時之地下水位率定與驗證結果 .....	5-9

圖 5.7 A-A 斷面低水位時之地下水位率定與驗證結果 .....	5-10
圖 5.8 B-B 斷面高水位時之地下水位率定與驗證結果.....	5-10
圖 5.9 B-B 斷面低水位時之地下水位率定與驗證結果.....	5-11

# 第一章 緒 論

## 1.1 計畫背景

邊坡滑動的監測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，在單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。

本研究團隊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  $\mu \varepsilon$  (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 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，在不同降雨程度下地下水位會會有不同程度之上升，受表層土壤為非飽和及滲流的影響，在暴雨情況下地層內水壓隨深度之分佈常是非線性的(Ng et al., 2001)。如果使用傳統在鑽孔內只量測一至兩個深度可能無法正確反應水壓分佈。此一現象也顯示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 計畫工作項目說明

本年度計畫之主要工作內容為：

1. 研發可與 FBG-SD 匹配，低解析度能承受大變形，低成本光纖地層感應系統之研發與功能測試。
2. 前項系統在試驗室內標定與測試。
3. 於現場 30m 深鑽孔做新系統初步安裝測試。
4. 於現場監測小屋中，裝設光纖自動化解讀系統，以利在颱風與梅雨季節中，擷取第一年所裝光纖監測儀器之量測數據。
5. 於現場目前無法繼續量測之傾斜觀測管，裝置新研發之低解析度可承受大變形之光纖感測器。
6. 繼續地下水數值計算模式之驗證與測試。
7. 根據水文資料、地質資料及暴雨期間光纖感應監測數據，進行試驗場地地下水流模擬初步率定。

### 1.3 計畫執行進度說明

本研究團隊對於計畫工作內容執行進度如下：

1. 港灣研究中心所屬 200m 傾斜觀測管之 30 組 FBG-SD 安裝完成。
2. 已完成 200m 傾斜觀測管之光纜佈放至監測小屋，以提供自動化之用途。
3. NCTU-01 40m 傾斜觀測管內 20 組 FBG-SD 維修與重新安裝。
4. 現場光纖監測儀器之測讀與擷取。
5. 已完成低解析度可承受大變形之光纖拉伸計之研發。
6. 低解析度光纖拉伸計室內標定與室內 9m 傾斜管測試與驗證以及現場 30m 鑽孔內之安裝。
7. 研究試驗場址地下水模型之驗證。
8. 研究試驗場址地下水數值模型之擴充。



## 第二章 光纖監測系統研發概況

本章節主要敘述研究團隊於上一年度計劃中所裝設之光纖監測系統與今年度新增之光纖監測儀器至目前研發狀況，以及簡介監測孔位配置位置之選擇。

### 2.1 光纖監測系統之鑽位置配置與選定要素

本團隊於95年5月5日至阿里山五彎仔現地勘查，依據現有監測資料，目前傾斜觀測管C-11有持續量測中，以及水位觀測井B2，在暴雨期間，內水位變化遽增，可達數十公尺。B2與C-11兩鑽孔都位於N3滑動區之上緣，此處之數據在數值分析中可提供重要之邊界條件。所以本團隊選擇於傾斜觀測管C-11附近新增一傾斜觀測管，深度為40m並裝設本團隊所研發之FBG-SD偏斜儀監測管內變形，如此新鑽孔中FBG-SD之讀數可以與C-11中傳統IP讀數相比較。而關於水壓觀測部分，本團隊為了考量現場封層技術，將原計畫設置在B-2旁100公尺水位觀測井分成兩部分，一先在C-11旁設置深度40公尺的水壓觀測井，並以間隔五公尺之距離，安裝五組光纖光柵水壓計，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，該孔位同樣以間隔五公尺的距離，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。

而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2.1)且距離邊坡坡面僅有1~2公尺，較容易監測到傾斜管之變形量。

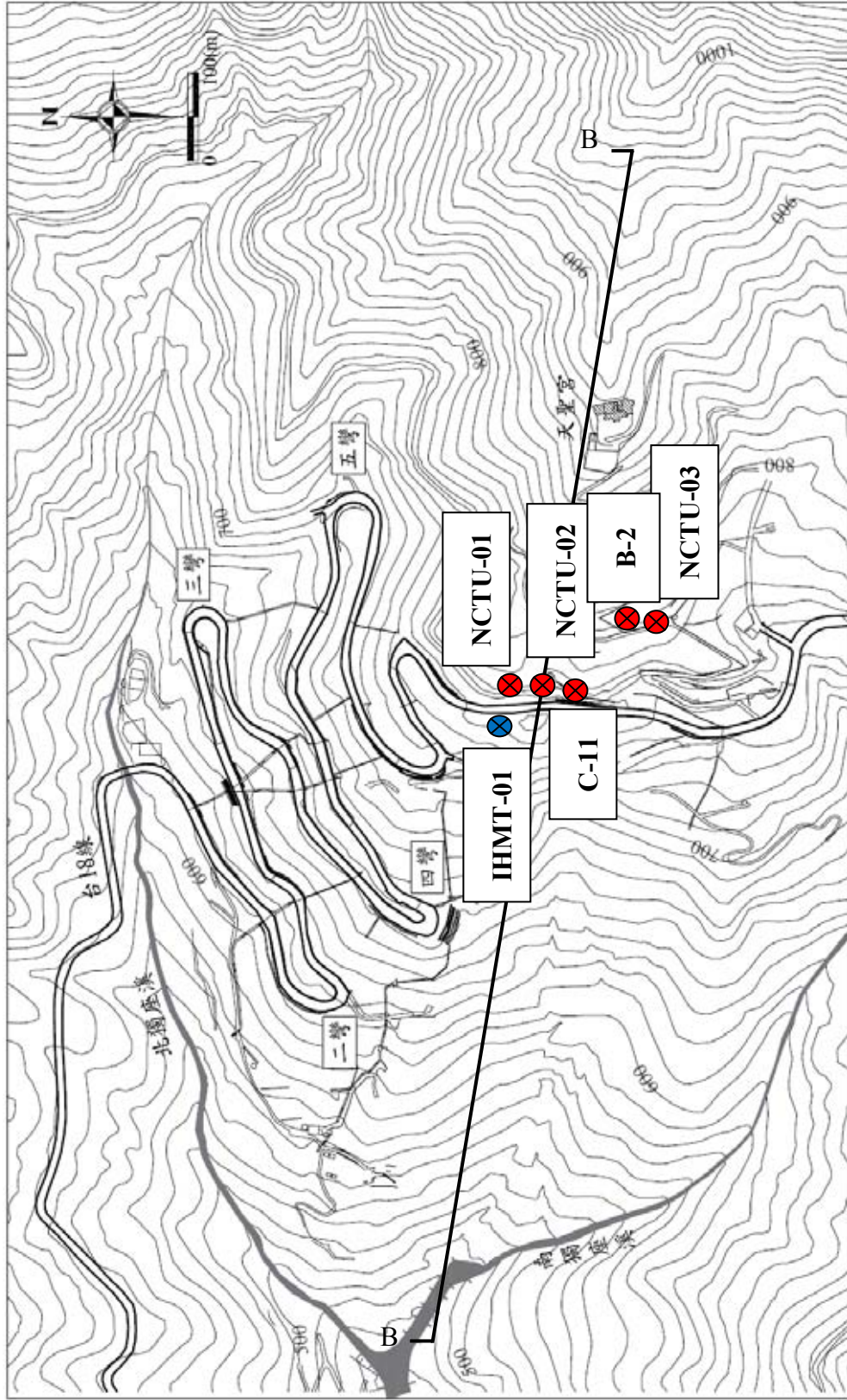


圖 2.1 全光纖式監測儀器配置圖 (青山工程顧問公司, 2006)

## 2.2 研究場址光纖監測系統運作狀況

圖2.2為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(96/10/26~96/11/19)，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96/10/26至97/5/23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。97/5/23至97/8/31期間，加上全球氣候受暖化之影響，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。

為本年度3月14日至現場安裝200公尺傾斜觀測管內30組FBG-SD時做傾斜觀測管深度測試之狀況，因該監測孔位於95年底期間所裝設之監測孔，且該地區處於活潑之滑動塊體上，為確保傾斜管內是否因這段期間邊坡滑動而造成孔內過大變形，因此，本研究團隊先將假的測傾儀放入孔內，並順著孔內導溝向下滑動，該假的測傾儀可順利滑至200公尺之深度，代表本傾斜管並無過大之變形存在。因200m之傾斜觀測管長度非常長，是否在裝設傾斜管時產生旋轉，使得導溝之方向由上至下造成扭曲，以致量測之變形方向會因導溝方位而有所差異，故本研究團隊將一小型攝影機裝設於一長約15公分，外徑約為45公釐之密封探管內如圖2.4所示，而在探管內部安裝照明、供電、針孔攝影、影像傳輸裝置及一個指北針，在將探管從地表放置孔底過程中觀察並紀錄指北針讀數隨深度之變化。此系統之靈敏度約為5度。圖2.5為傾斜觀測管孔內方位檢測之狀況以及典型指北針影像紀錄。結果顯示在200m鑽孔內無明顯扭曲現象。此一結果符合產業界使用ABS材料所製作傾斜觀測管使用之經驗。在使用ABS傾斜觀測管多年後，國內外所累積經驗都指出受ABS高勁度之影響以少有斜觀測管扭曲現象之發生，近來在產業界已很少使用儀器確認斜觀測管扭曲。圖2.7為30組節理式偏斜儀(FBG-SD)安裝狀況。本次FBG-SD裝設深度最深只達到-70

公尺而無法在繼續往下推入，研判該傾斜觀測管在-70公尺以下之地方可能有曲率較大之處，因此，對於單一測傾儀可能可以繼續通過，但相較於30公尺的FBG-SD可能會因曲率過大而無法繼續往下推入。圖2.8為30組FBG-SD量測傾斜管內變形結果圖，可發現深度-40至-50公尺範圍有兩處明顯的折點，且最大位移量為10公分，其造成最大位移之原因，可能是其該五彎仔路段目前正進行改道工程，加上該處後方為一約60度以上的大陡坡及坡面處於裸露狀態並無植生，以及地形效應之影響，可由圖2.9看出。

圖2.9為IHMT-01 孔位後方邊坡正進行邊坡植生工程，以嚴防豪大雨時，造成坡面侵蝕而發生滑動。圖2.10為NCTU-01 20組FBG-SD於97年5月30日重新裝入40m之傾斜管內，因之前裝設時發現有部分FBG-SD感測器訊號異常，故重新拆回取出至實驗室整修。圖2.11及圖2.12為將IHMT-01 30組FBG-SD訊號透過光纜遷至於監測小屋中，以作為七、八月份颱風季節時，即時監測孔內之變形情況。

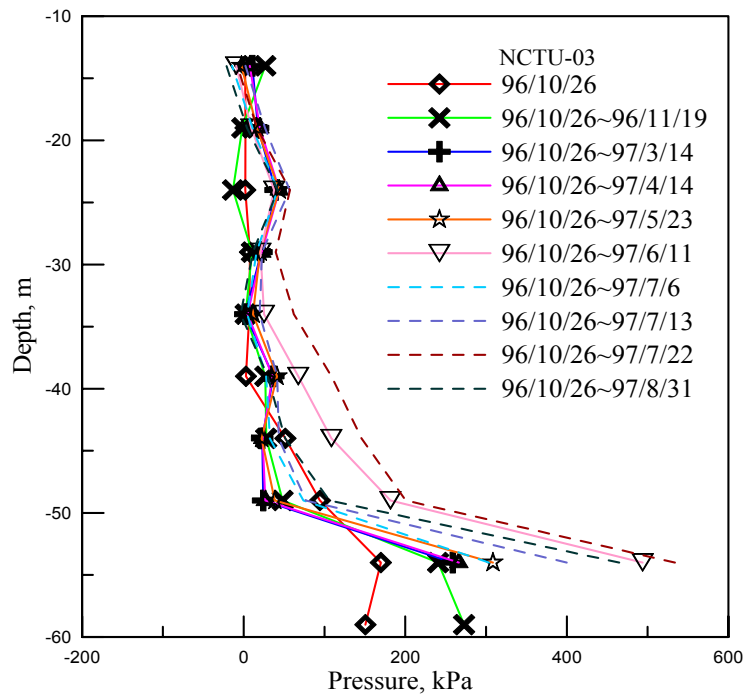


圖 2.2 NCTU-03 光纖光柵水壓監測孔位歷時水壓變化圖



圖 2.3 IHMT-01 200m 傾斜觀測管深度檢測



圖 2.4 孔位方向紀錄儀

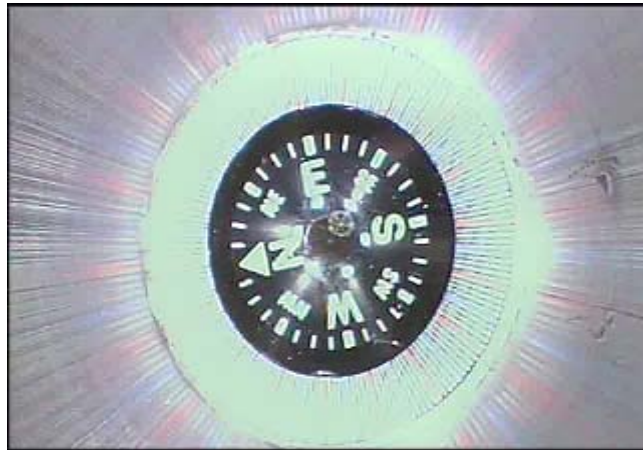


圖 2.5 指北針影像



探管置入傾斜管

圖 2.6 IHMT-01 200m 傾斜觀測管內導溝方位量測



圖 2.7 IHMT-01 30 組 FBG-SD 安裝

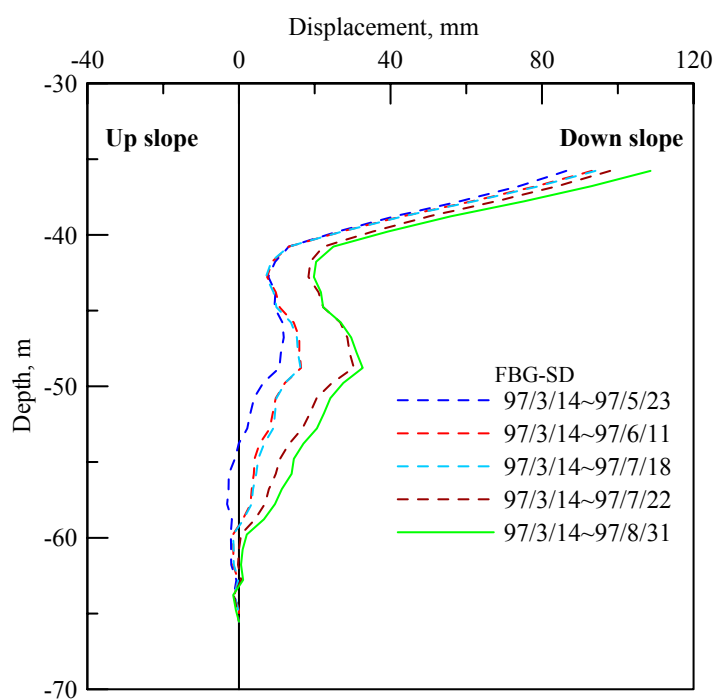


圖 2.8 IHMT-01 200m 傾斜觀測管歷時變形圖



圖 2.9 IHMT-01 200m 傾斜觀測管後方邊坡坡面植生工程



圖 2.10 NCTU-01 20 組 FBG-SD 重新裝置





圖 2.11 IHMT-01 孔位光纜佈放工程



圖 2.12 監測小屋光纜配線盒裝設工程

## 2.3 光纖感測系統自動化設備架設與光纜佈放

本研究單位已於期中報告前完成光纖感測系統自動化架設與光纖監測孔位光纜佈放，圖2.13所示為NCTU-01、NCTU-02、NCTU-03及IHMT-01光纖監測孔位之光纜佈放示意圖，以利於颱風與梅雨季節中，可擷取各光纖監測孔位之歷時資料，並作為後續現場地下水流模型參數率定來源之依據。圖2.14為五彎仔監測小屋示意圖，該監測小屋設有衛星通訊傳輸設備，作為監測資料之傳輸，以達到即時監測之效果。圖2.15至圖2.17為各光纖監測孔位之光纜架設示意圖，而圖2.18為光纖感測器自動化擷取設備，其包含光纖光柵解讀設備、光纖切換器（optical switch）與工業電腦及3.5G無線網路傳輸，其中光纖光柵解讀設備為光纖光柵訊號解析；因光纖光柵解讀儀器設備之頻道數量有限（4個頻道），而現場共有24條光纖訊號線，故需額外配置光纖切換器，以利光纖光柵解讀儀器擷取其他之訊號，而光纖光柵解讀設備解析後數據經由數學方程式運算後，可得到傾斜觀測管之變形與地層內水壓之大小，並將計算後之資料及原始數據儲存至工業電腦，再透過3.5G無線網路傳輸設備，將數據傳至交通大學伺服器。

圖2.19為光纖感測器自動化擷取畫面示意圖，該頁面為檢測各頻道光纖光柵之訊號強度與參數設定來源依據，如圖2.20。圖2.21為顯示NCTU-01與IHMT-01傾斜觀測管變形，圖2.22為顯示地層內部水壓變化與歷時監測資料，圖2.23為警戒值與簡訊內容設定，其警戒值大小可依據相關資料與決策者來設定，當NCTU-01及IHMT-01之位移量超過警戒值時，則會發送簡訊或e-mail至相關人員。

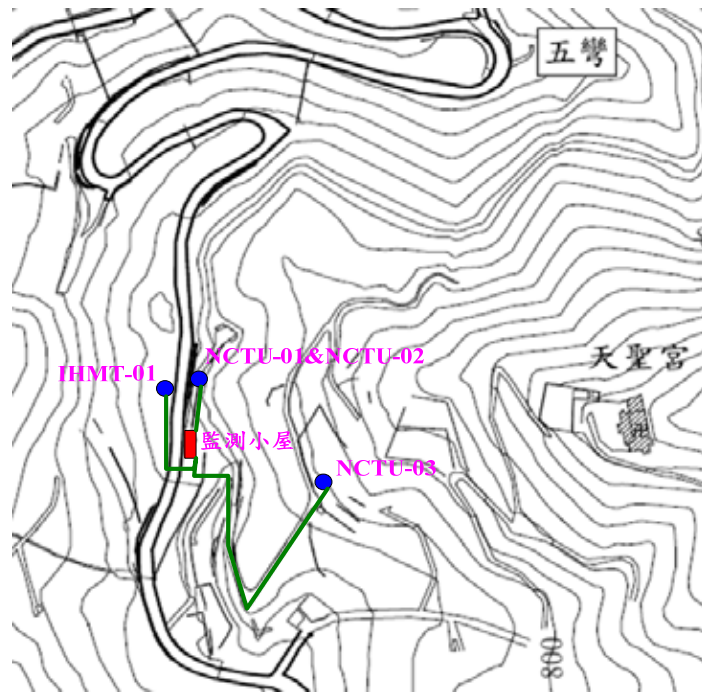


圖 2.13 光纜佈放路線



圖 2.14 五彎仔監測小屋



圖 2.15 IHMT-01 孔位光纜架設



圖 2.16 NCTU-01 及 NCTU-02 光纜架設



圖 2.17 NCTU-03 光纜架設



圖 2.18 光纖感測器自動化擷取系統

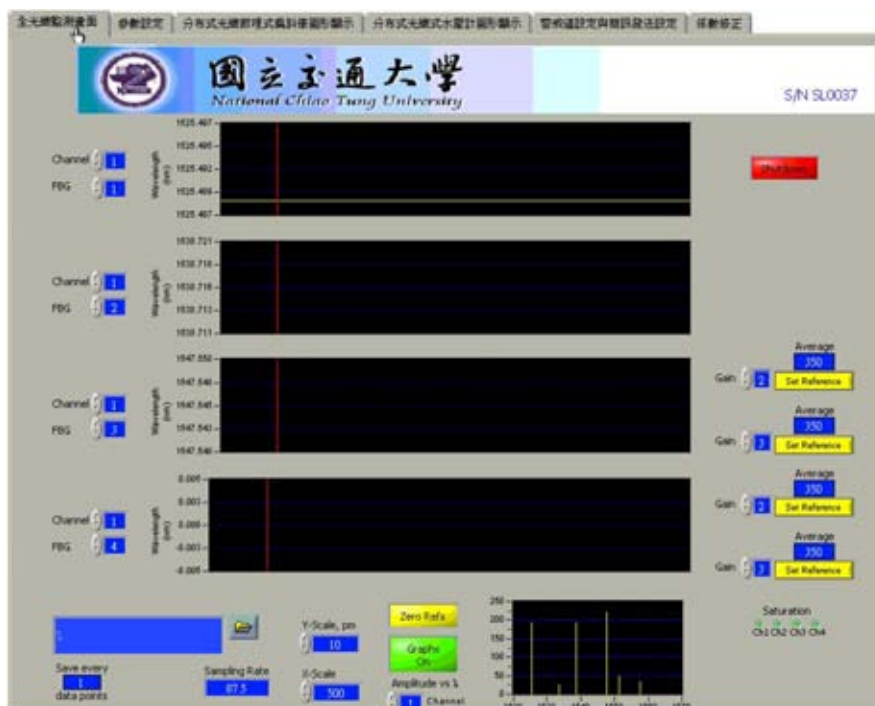


圖 2.19 光纖感測器自動化擷取系統畫面

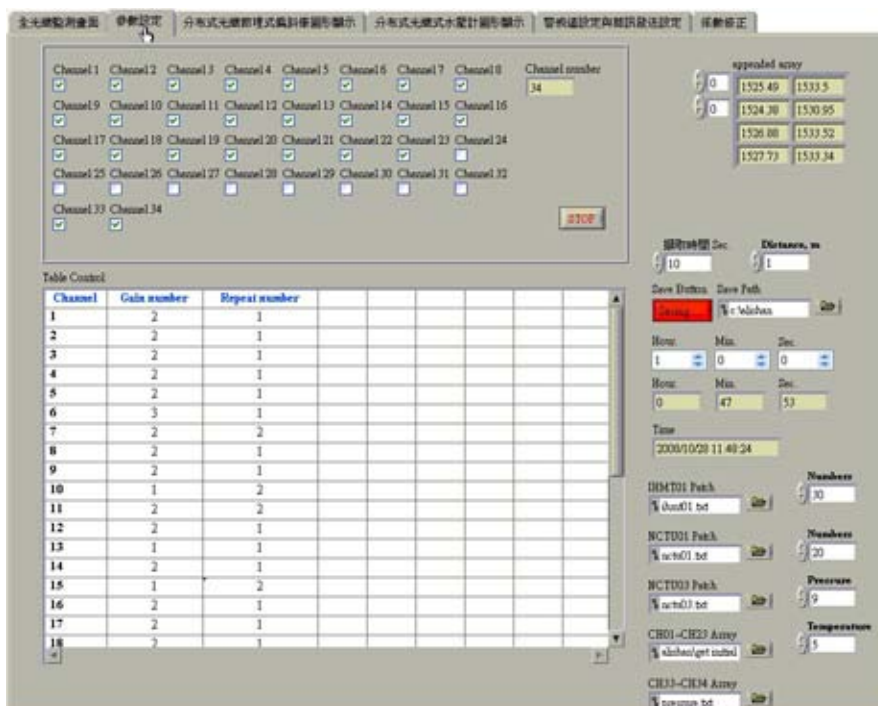


圖 2.20 光纖感測器自動化擷取系統參數設定畫面

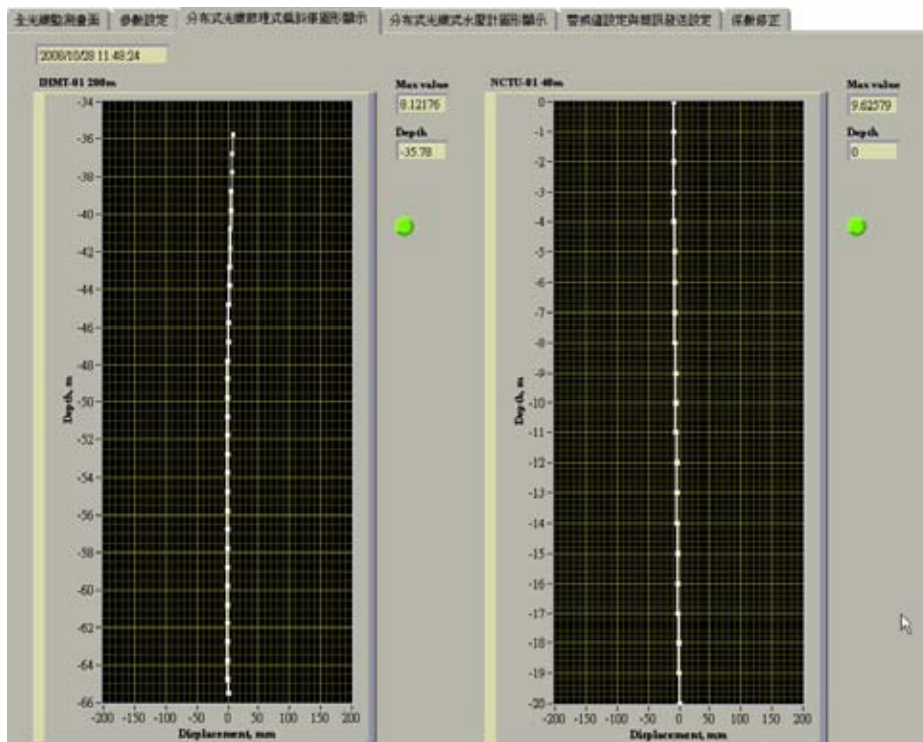


圖 2.21 光纖感測器自動化擷取系統地層位移畫面

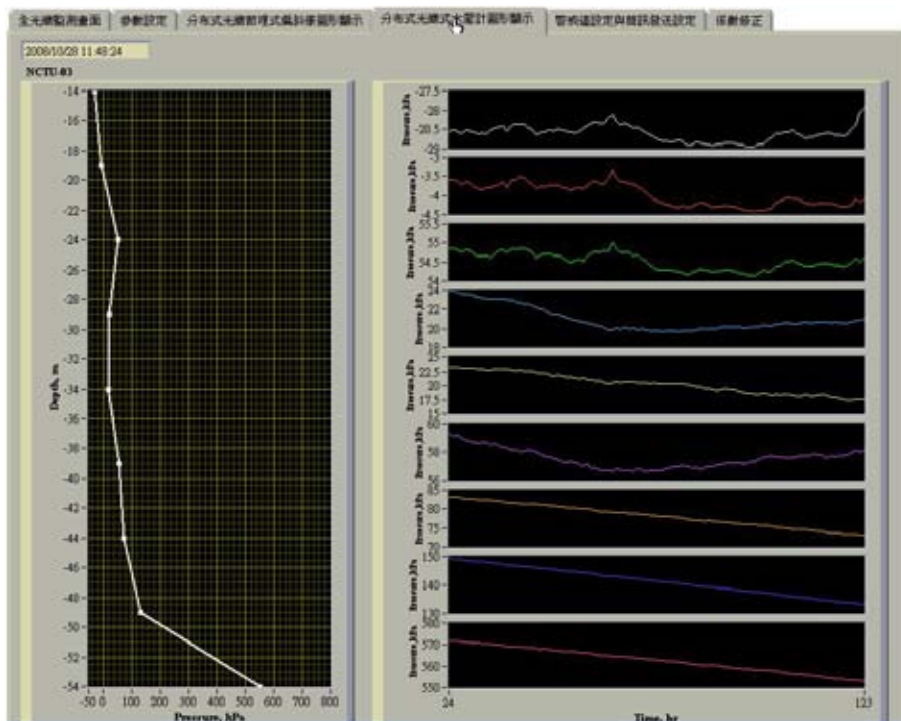


圖 2.22 光纖感測器自動化擷取系統水壓分布及歷時畫面

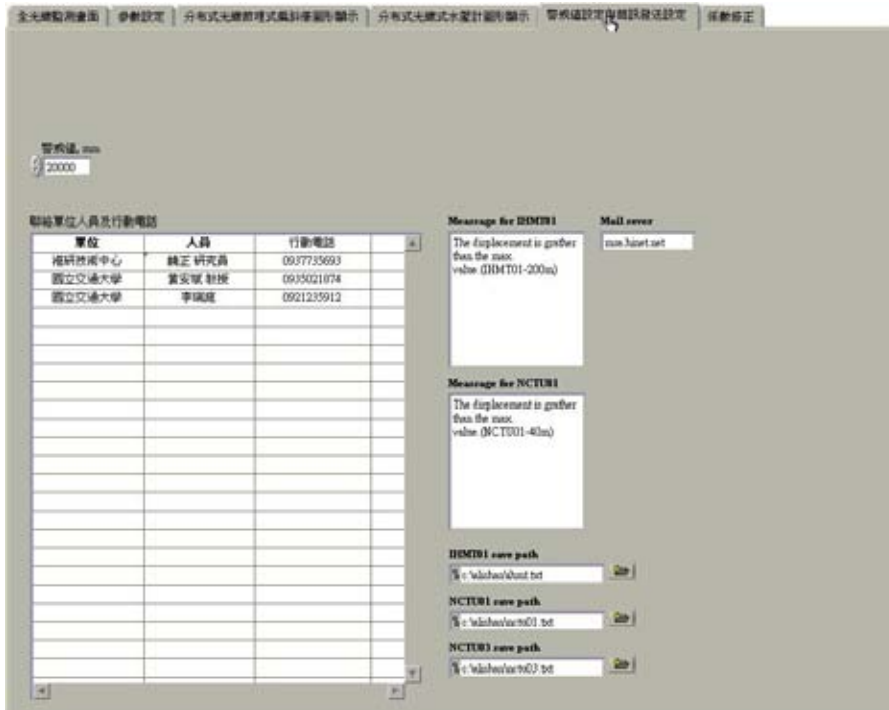


圖 2.23 光纖感測器自動化擷取系統警戒值與簡訊發送畫面



## 第三章 低解析可承受大變形之光纖感測器研發

本章節主要敘述低解析可承受大變形之光纖感測器之感測原理，以及其研發構想與應用範圍，並透過室內標定與室內九米傾斜觀測管之初步驗證。

### 3.1 布里淵 (Brillouin) 散射原理

Brillouin 效應，首先是由法國物理學家Leon Brillouin( 1889~1969 )於西元1920 年所發現。在他的發現當中，最主要是說明散射光的頻率受到改變，所以這個效應就以他為名，稱為Brillouin 散射。而且當時就僅在學術及研究領域上討論，直到1970年之後，雷射和光纖應用在光纖通信系統之後，這個效應才逐漸受到重視。

Brillouin 散射效應，主要是因為入射光打到原子與原子的鍵結，造成原子與原子的振動，而在光纖纖核中激發出音波而造成折射率的變動，因此會有散射的現象產生。而此音波在纖核當中，類似一個往前移動性的布拉格光柵，當入射光與音波互相作用時，會有一部份的光被往後散射（180度的散射），並且因為都卜勒效應（Doppler effect）的緣故，使得散射光會比入射光低一個頻率值，這樣的散射現象，我們就稱為布里淵散射（Brillouin Scattering），此時所降低的頻率值稱為Brillouin 頻率 $\nu_B$ 如圖3.1所示。

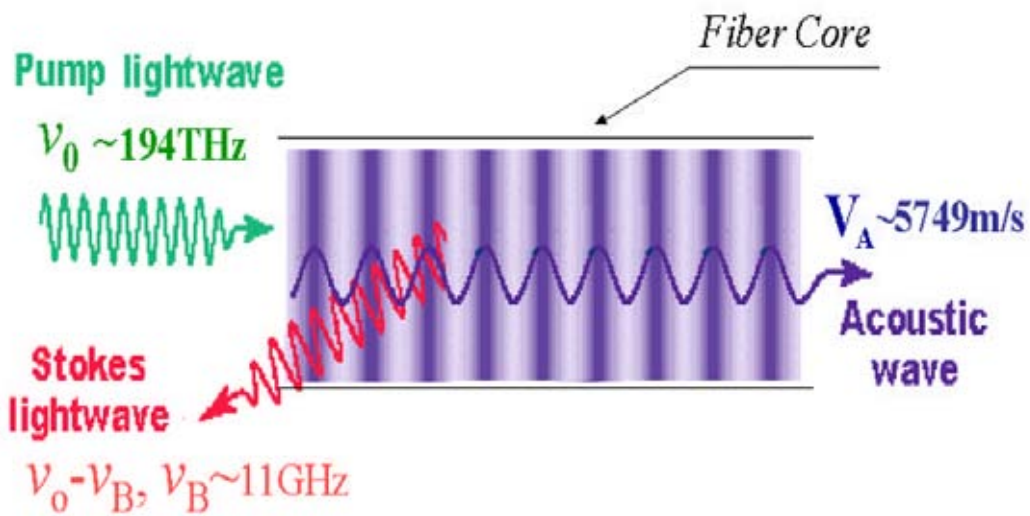


圖 3.1 Brillouin 散射在纖核(core)中的示意圖（陳進福, 2001）

如果就量子振動的觀點來看，散射現象可視為光子與聲子之間的互相作用。在兩者互相作用過程中，光子可能會產生聲子，也可能會吸收聲子，而造成光子能量的改變。如果是產生聲子的話，則光子的能量會減少，其頻率也會減少，在這種情況下，我們稱為史多克漂移（Stokes shift）；如果是吸收聲子，則光子的能量和頻率都會增加，在這種情況下，我們稱為反史多克漂移（Anti-Stokes shift）。若是由光聲子造成的散射現象，我們稱為拉曼散射（Raman Scattering）；而若是由音聲子造成的散射現象，我們稱為布里淵散射（Brillouin Scattering）。可由下圖3.2所示，為光纖內的Rayleigh、Brillouin、Raman 散射的頻譜圖。

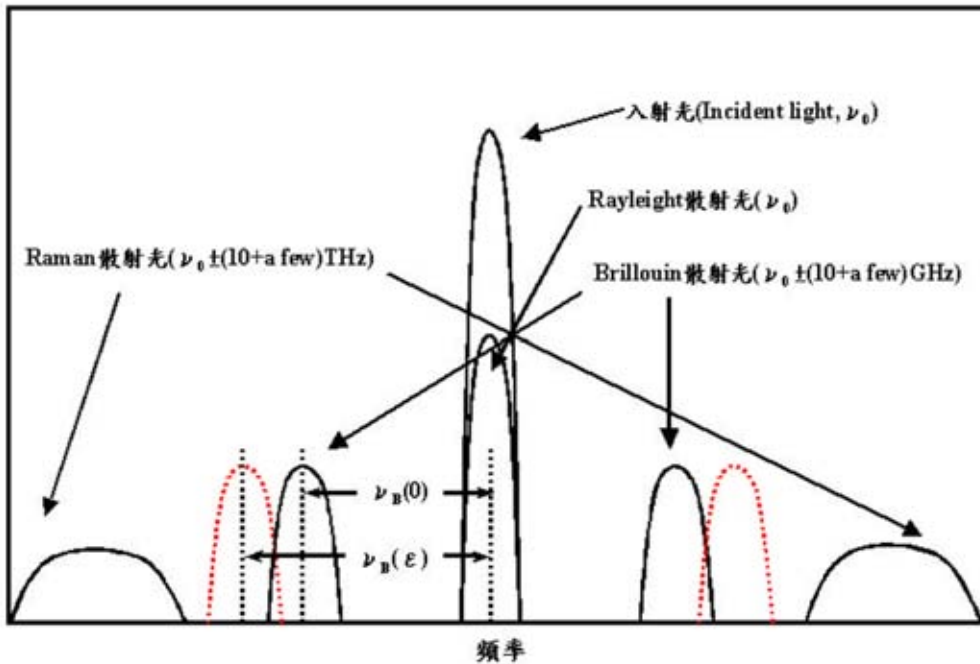


圖 3.2 光纖內的 Rayleigh、Brillouin、Raman 散射的頻譜圖  
(陳進福, 2001)

而就散射頻譜來說，Brillouin 散射與光載波約有 11GHz 的最大頻率漂移量及約有 40MHz 的頻寬；而 Raman 散射頻譜，則與光載波約有 13.2THz (440cm<sup>-1</sup>) 的最大頻率漂移量。兩者除了散射頻譜的差異之外，Brillouin 散射與光子的散射角度也有關；在向後散射時，其頻率漂移量為最大，此時的最高頻率漂移值稱為 Brillouin 頻率，在向後散射時則降為零。而且 Brillouin 散射之光強度又比 Raman 散射光為大，所以 Brillouin 散射效應應用於分佈型光纖感測領域就比較有其發展性。

另外，在 Brillouin 散射過程中，依其入射光強度的大小可分為兩大類：(1) 激發性 Brillouin 散射 (Stimulated Brillouin Scattering) 效應，表示入射光強度超過某個臨限值 (Threshold value) 時，則幾乎所有的入射光都會被反射回輸入端；(2) 自發性 Brillouin 散射 (Spontaneous Brillouin Scattering) 效應，表示入射光低於此臨界值時，其本身自己就會存在的輻射能量返回於反射端，並造成的光頻率漂移量，我們可由圖 3.3 可看出，Brillouin 散射功率對入射光功率的關係圖。

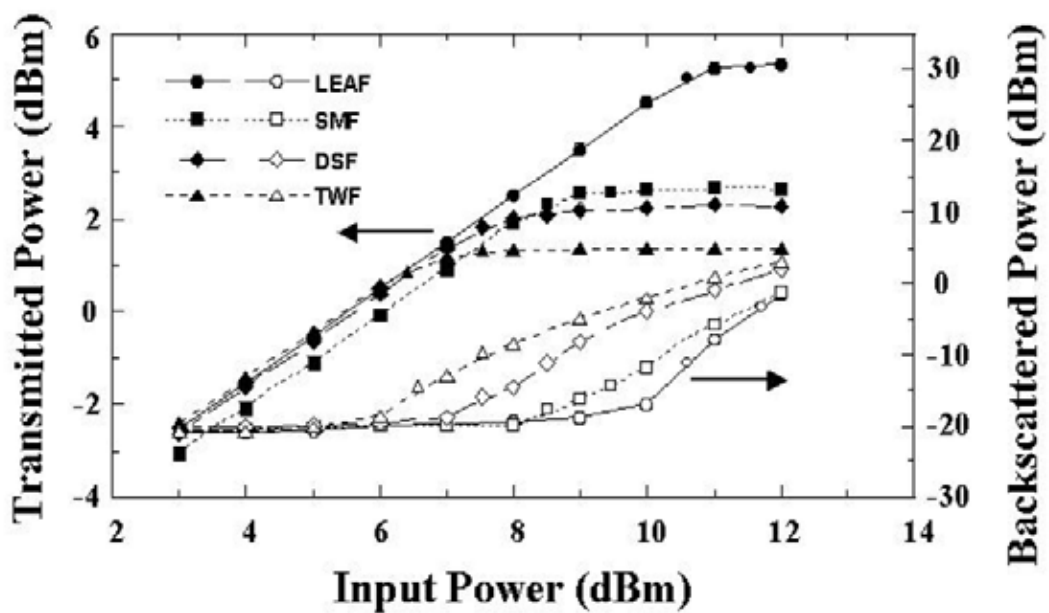


圖 3.3 Brillouin 散射功率對入射光功率的關係圖 (陳進福, 2001)

### 3.1.1 激發性 Brillouin 散射原理

激發性 Brillouin 散射主要是由泵激光波 (Pump wave)，探測光波 (Probewave) 及音波 (Acoustic wave) 三者互相作用產生的結果。Pumpwave 和 Probe wave 在光纖當中，是互為相反方向傳輸，再透過電致伸縮 (Electrostriction) 效應激發出音波，使得光纖折射率受到週期性調變而散射入射的泵激光，此時光的能量由泵激光波轉移到探測光波，被散射光會因為都卜勒效應以及音速 (Acoustic velocity)  $V_A$  移動的光柵兩者的關係，而向下漂移某個頻率值  $\nu_B$ ，在整個聲光作用的過程期間，都必須保持能量守恆及動量守恆，而其能量守恆關係式如下：

$$\omega_A = \omega_P - \omega_S \dots\dots\dots (3.1)$$

而其動量守恆關係式如下：

$$k_A = k_P - k_S \dots\dots\dots (3.2)$$

其中

$\omega_A$  : the frequency of the Pump wave

$\omega_P$  : the frequency of the Stokes wave

$\omega_S$  : the frequency of the Acoustic wave

$k_A$  : the wave vector of the Pump wave

$k_P$  : the wave vector of the Stokes wave

$k_S$  : the wave vector of the Acoustic wave

另外，在 Brillouin 增益頻譜中，其頻率的漂移量  $\nu_B$ ，可用下式表示：

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda_p} \dots\dots\dots (3.3)$$

其中可以觀察到一點是  $n_B$  與  $\lambda_p$  成反比，及與材料的有效折射率  $n$ ，及音波音速  $V_A$  成正比，而  $\lambda_p$  為入射光脈波。由於光纖材料的電致伸縮 (electrostriction) 效應的作用，就會影響 Brillouin 散射增益值  $g_B$ ，而 Brillouin 散射增益值  $g_B$  與材料的特性及電致伸縮係數  $\gamma_e$  有關，而光纖的 Brillouin 增益係數  $g_B(\nu)$  可用羅倫茲 (Lorentzian) 方程式來描述：

$$g_B(\nu) = \frac{2\pi\gamma_e^2}{c_0\varepsilon_0^2\lambda_p^2\rho_0nV_A\Delta\nu_B} \dots\dots\dots (3.4)$$

其中  $\gamma_e$  為電致伸縮係數 ( $\gamma_e = \rho\partial\varepsilon/\partial\rho$ )， $\rho_0$  為材料密度， $\lambda_p$  為泵激光波長， $\Delta\nu_B$  為頻譜寬度 (FWHM linewidth)， $\varepsilon_0$  為真空的介電常數， $n$  為有效的折射係數， $V_A$  為音波的速度，其一般  $g_B \doteq 5 \times 10^{-11}$  m/W。而且電致伸縮對介質的影響會增加材料密度，所以介電常數需要下列的修正：

$$\Delta\chi = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{2} \frac{C\gamma_e^2}{\varepsilon_0} \frac{|E|^2}{2} \dots\dots\dots (3.5)$$

其中  $C$  為介質壓縮係數 ( $C = \rho\partial P/\partial\rho$ )， $P$  為光彈係數，而電致伸縮也會對折射係數造成影響，其關係如下：

其中I為光強度  $I = (n\varepsilon_0 c_0 / 2)E^2$ ，E為電場， $c_0$ 為光傳輸速度。

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial \chi} = \Delta \chi = \frac{1}{4} \frac{C \gamma_e^2}{n^2 \varepsilon_0^2 c_0} I \dots\dots\dots (3.6)$$

在Brillouin增益頻譜來看，其頻譜寬度 $\Delta\nu_B$ 很小，約40MHz左右，而線寬與音波的阻尼時間 (damping time) 和聲子的生命週期 (lifetime)  $\tau_B$ 有關，其表示式為 $\Delta\nu_B = (\pi\tau_B)^{-1}$ 。

### 3.1.2 自發性 Brillouin 散射原理

自發性Brillouin 散射主要是由泵激光波 (Pump wave)，史多克波 (Stokes wave) 及音波 (Acoustic wave) 三者互相作用產生的結果。此現象一般只需要很低的功率就會產生，所以對於光纖通信在長途的傳輸及高密度分波多工 (DWDM) 的系統上會造成嚴重的影響。而自發性Brillouin 散射效應的作用原理與激發性Brillouin 散射效應相同，只是光強度大小有所差別，這也是自發性布里淵散射現象應用在感測系統會比較廣泛的原因，分析原因主要是激發性Brillouin 散射效應會在整個聲光作用的過程產生放大作用，使得感測的物理量變得不準確。圖3.4為單模光纖的背向布里淵散射頻譜，圖3.4 (a)所示為激發性布里淵散射 (Stimulated Brillouin Scattering) 頻譜，及圖3.4 (b)所示為自發性布里淵散射 (Spontaneous Brillouin Scattering) 頻譜。

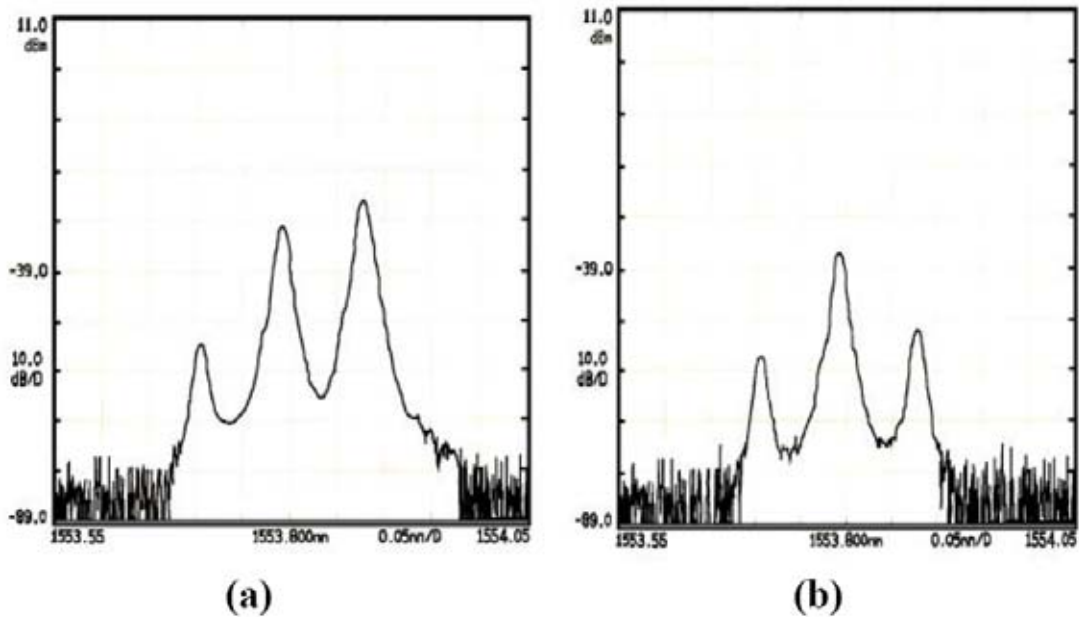


圖 3.4 (a) SMF 中的背向激發性布里淵散射頻譜  
(b) SMF 中的背向自發性布里淵散射頻譜 (陳進福, 2001)

### 3.2 低解析可承受大變形之光纖感測器之研發構想

根據青山顧問公司(2006)針對台18線五彎仔路段研究報告指出，該地區共可分為八個滑動塊體，且這些滑動塊體在雨季期間中，滑動量可達到每月1.5公分以上之滑動量，另外，地下水位變化可達數十公尺。因此，分布在該區域之監測孔位與儀器，大部分都無法再繼續使用，尤其為傾斜觀測管大多因過大變形，使得測傾儀(Inclinometer Probe, IP)無法通過較大之彎曲曲率，而無法持續監測該區域滑動塊體之滑動量大小。圖3.5為該區域分布之監測孔位示意圖，表3.1、表3.2為說明A-A剖面與B-B剖面監測孔位之狀況。所以，本研究團隊為了使得該區域傾斜觀測管繼續發揮其功能，並利用光纖本身之特性，如體積小、不受電磁波影響及耐久度高等，加上光纖每一公里單價非常便宜（5,000m單模光纖售價新台幣3,000元），並以布理淵散射原理來做為低解析度可承受大變形之光纖感測器，而光纖感測器主要感測機制為將一長為1.2m的單模光纖先固定於長5cm，直徑為4cm的螺桿上，再將其套入一

長為1.3公尺，內徑為4cm、外徑為6cm的尼龍套管，以保護光纖不受到外在環境所破壞，稱此低解析度可承受大變形之光纖感測器為光纖拉伸計，如圖3.6所示，圖3.7為當光纖拉伸計受一張力時，所產生之變化。而藉由上述光纖拉伸計之特性，將其固定於28mm直徑PVC管上並兩邊對稱，每一PVC管長約為1.9m長，相鄰兩PVC管則利用具有導輪，長20公分的PVC管相接一起，當PVC管受到外力彎曲時，則一邊會產生拉力，另一邊則產生壓力，故即可判斷傾斜觀測管再次發生變形之位址。圖3.8為將光纖拉伸計固定於PVC管上之示意圖。



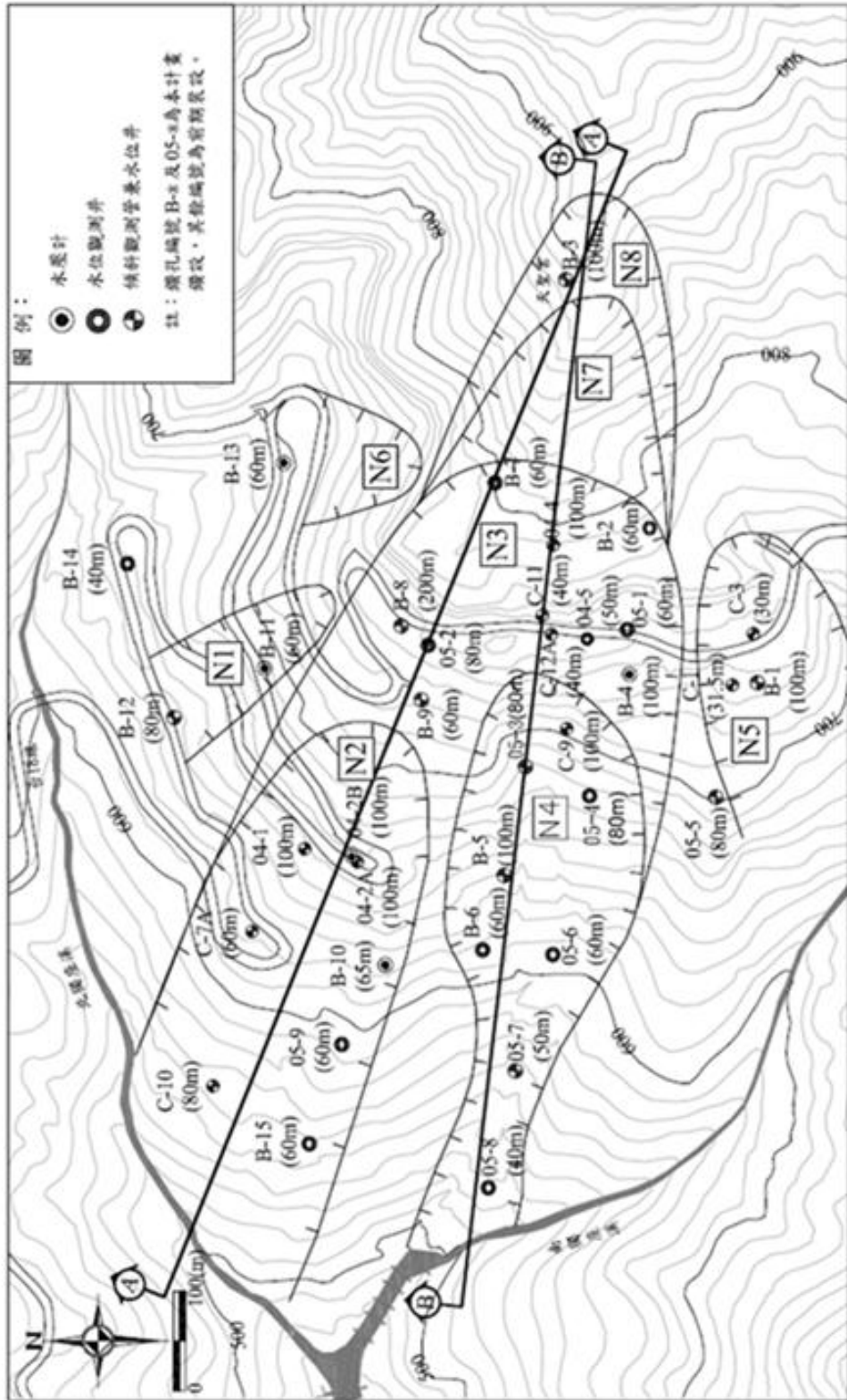


圖 3.5 阿里山公路五彎仔路段-監測儀器配置圖 (青山工程顧問公司, 2006)

表 3.1 A-A 剖面監測項目狀態說明 (青山工程顧問公司, 2006)

剖面	儀器名稱	儀器編號	深度 (m)	裝設時間 (初值)	量測終止時間	備註
A	觀傾測管斜	C-7A	60	93.06.17	93.07.08	1.於深度 52.5m 處產生大角度彎曲變形或折斷。 2.目前暫停監測工作。
		C-10	79	93.06.17	94.03.29	目前暫停監測工作。
		04-2A	100	93.06.17	93.06.29	1.於深度 28.5m 處產生大角度彎曲變形或折斷。 2.目前暫停監測工作。
		B-3	100	93.09.13	95.04.03	
		B-8	200	93.09.13	95.04.20	量測深度為 120m。
	水壓計 豎管式	04-2B	100	93.06.28	93.10.01	1.二支，分別於 25~30m 及 40~50m。 2.目前暫停監測工作。
		B-9	60	93.06.02	95.04.20	二支，分別於 28~32m 及 52~60m。
	觀測井 水位	B7	60	93.06.02	95.04.20	
05-2		80	94.12.04	95.04.20		

表 3.2 B-B 剖面監測項目狀態說明 (青山工程顧問公司, 2006)

剖面	儀器名稱	儀器編號	深度 (m)	裝設時間 (初值)	量測終止時間	備註
B	觀傾測管斜	C-12A	40	93.06.17	93.09.01	目前暫停監測工作。
		04-4	100	93.06.17	94.12.20	1.於深度 41.5m 處產生大角度彎曲變形或折斷。 2.目前暫停監測工作。
		B-3	100	93.09.13	95.04.03	
		B5	100	93.09.13	94.04.11	1.於深度 10m 處產生大角度彎曲變形或折斷。 2.目前暫停監測工作。
		05-3	80	94.11.15	95.04.19	
	觀測井 水位	B6	60	93.12.03	94.04.25	目前暫停監測工作。



圖 3.6 光纖拉伸計實體圖

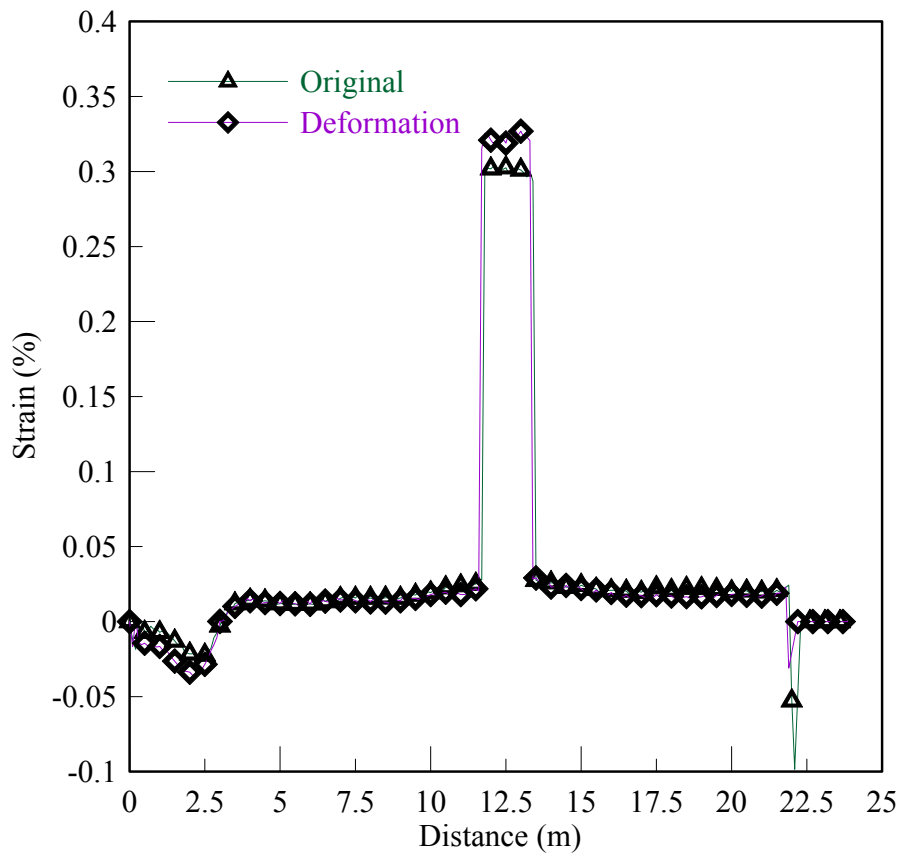


圖 3.7 光纖拉伸計初始與受力後狀態圖



圖 3.8 光纖拉伸計固定於 PVC 管

### 3.3 低解析可承受大變形之光纖感測器之室內標定

本年度研究計劃中，主要將低解析度可承受大變形之光纖感測器之研發分為兩方向，一為定性化，另一則為定量化。在定性化方面，目前本研究團隊已完成初步成果，可由圖3.7所示。而定量化方面，目前以拉伸與彎曲兩種方法進行測試，在光纖拉伸計之拉伸測試中，先將光纖拉伸計一端固定於光學卓板上，而另一端固定於光學桌面上之螺旋測微計上，以每5mm之拉伸量做為測試，圖3.9為光纖拉伸計拉伸測試結果，由結果顯示光纖拉伸計變形沿軸向方向有良好之重覆性，其R-square為0.9972，每一微應變可感應0.01mm。

圖3.10為光纖拉伸計固定於PVC管彎曲標定示意圖，而標定前先將兩組光纖拉伸計固定於PVC管上並相互對稱，偶後將PVC管之一端固定於光學桌面上，使其為一懸臂量狀態，另一自由端則以間隔為25mm

之位移量來回前後施加，圖3.為自由端前後位移量與應變之關係圖，其R-square為0.9958，每一微應變可感應0.39mm。

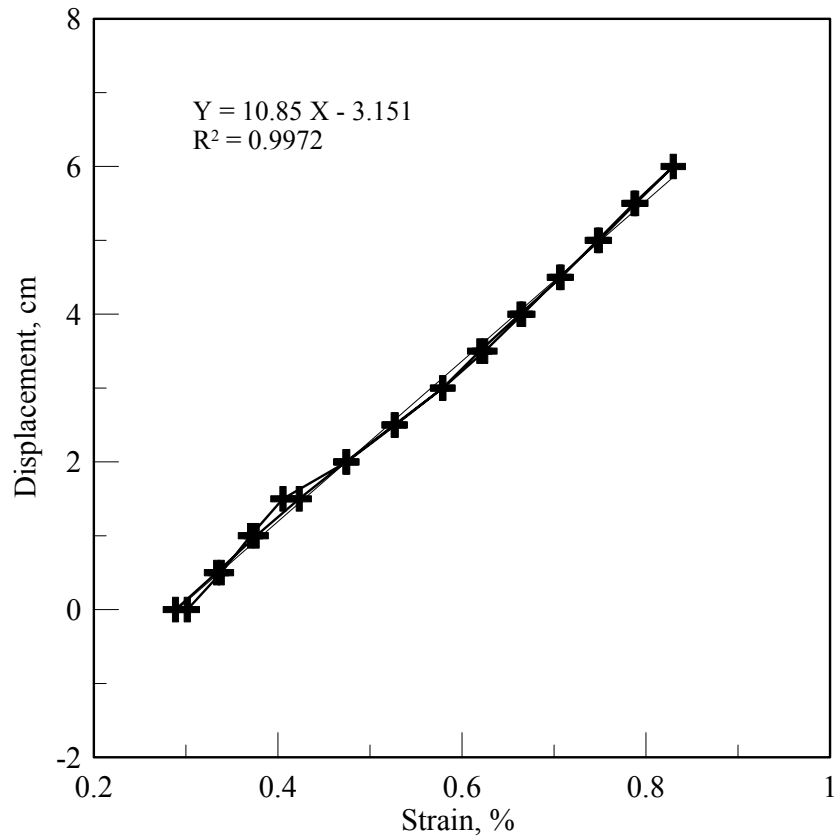
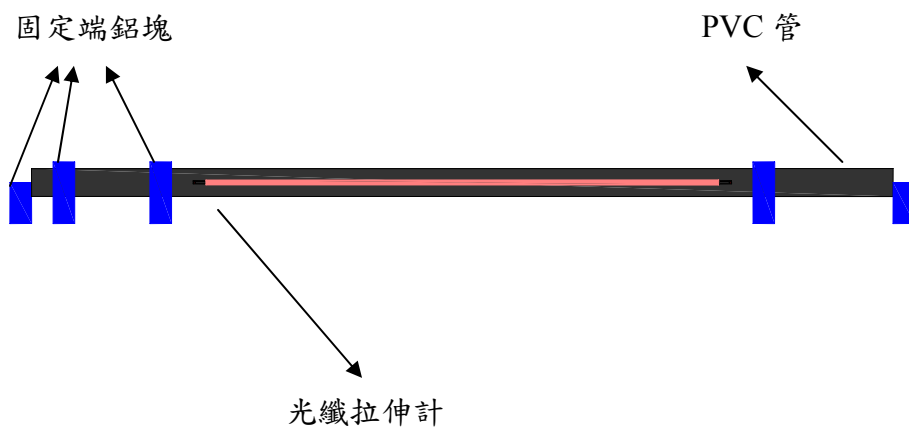
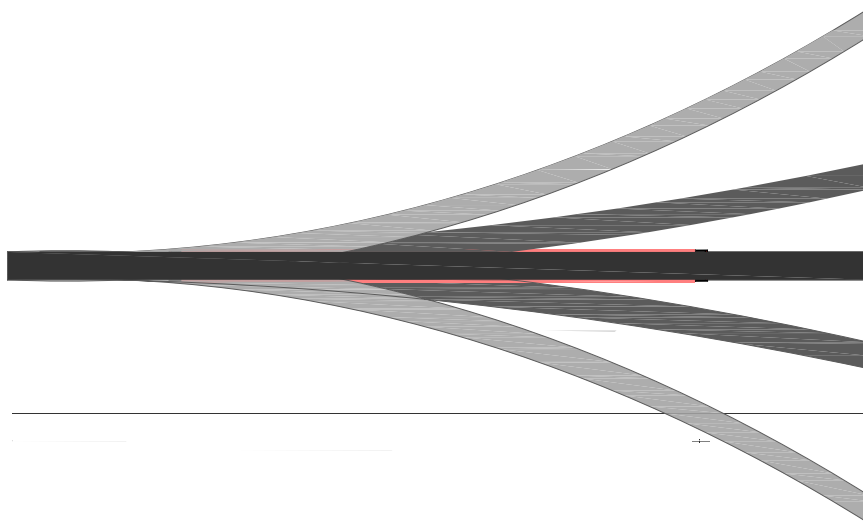


圖 3.9 光纖拉伸計拉伸測試結果圖



### 側視平面圖



### 上視平面圖

圖 3.10 光纖拉伸計固定於 PVC 管彎曲標定示意

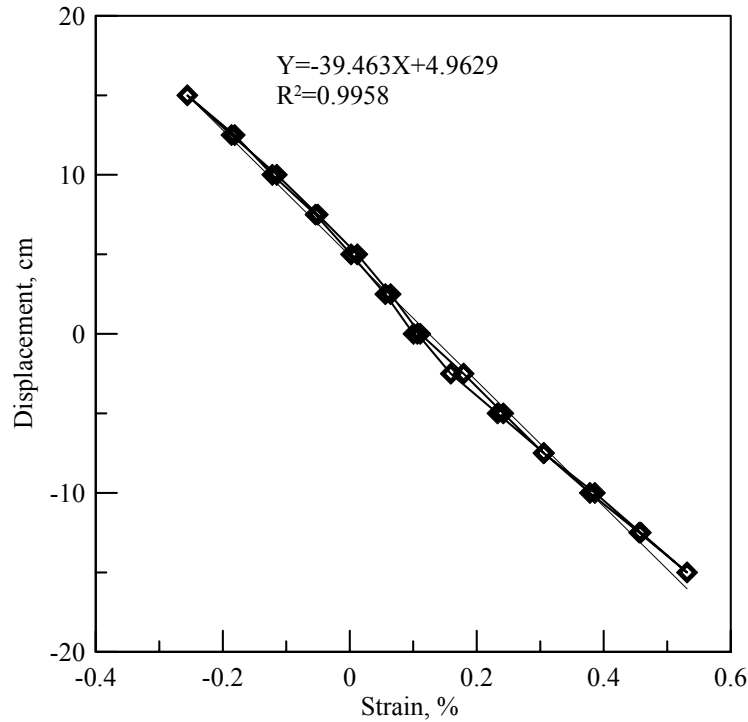


圖 3.11 光纖拉伸計固定於 PVC 管之彎曲標定圖

### 3.4 低解析可承受大變形之光纖感測器之室內九米傾斜觀測管測試

本次光纖拉伸計室內九米傾斜管測試，測試項目分為喇叭形之變形及大肚形之變形，而光纖拉伸感測器部分，一共裝設4組於9m傾斜管，其各光纖拉伸計感測範圍分別為1.32~2.52m、3.32~4.52m、5.32~6.32m及7.32~8.52m。各拉伸計之間有一段不受力光纖，其應變讀數為零，此零讀數光纖段是用來確認BOTDR讀數與位置關係之用。在大肚形變形部分，為在9m傾斜管深度3m處分別向外推出約3.5m、4.3m及5.5m，圖3.為內側9m傾斜管藉由測傾儀量測出傾斜管變形示意圖，在傾斜管變形圖中，可觀察到深度在1.32~2.52m處，傾斜管有趨於為向外側彎曲，換句話說，傾斜管外側承受壓狀態；內測呈現受拉狀態，圖3.顯示出深度在1.32~2.52m位置處，外側之光纖拉伸計應變量有明顯變小趨勢，內側光纖拉伸計感應之應變量則有變大趨勢，而在傾斜管之反曲點處，3.32~4.52m處之外側光纖拉伸計有呈現受拉裝況；內側部分則為受壓狀態，同樣在深度5.32~6.32m中，光纖拉伸計之應變變化量也與傾斜管變形趨勢一致，由於深度在7.32~8.52m傾斜管並未變形，故

該處之光纖拉伸計也未受變形而影響。大肚形變形情況下，受拉（tension）與受壓（compression）之應變大小關係會隨深度而反轉，如圖3.所示。

在喇叭形的變形狀態下，其傾斜管主要變形位於深度0至3m處，其向外推出位移量分別為3.8cm、8.1cm及10.2cm(見圖3.)，可由圖3.看出，位於1.32至2.52m之光纖拉伸計外側部分之應變量有明顯降低；內側之應變量則有升高趨勢。相對於大肚形變形，在喇叭形的變形狀態下，受拉（tension）與受壓（compression）之應變大小關係不會會隨深度而反轉，如圖3.所示。

根據以上經驗，地層變形之特性可以用BOTDR應變分佈之特性來判讀，但在所施加之變形範圍內還無法根據BOTDR應變讀數做定量之分析。



圖 3.12 光纖拉伸計架設於室內九米傾斜觀測管



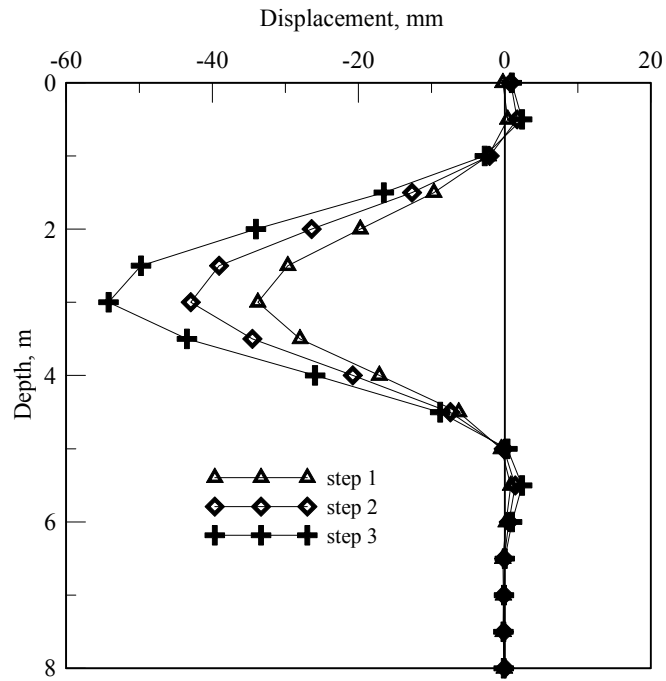


圖 3.13 對照組傾斜管大肚形變形

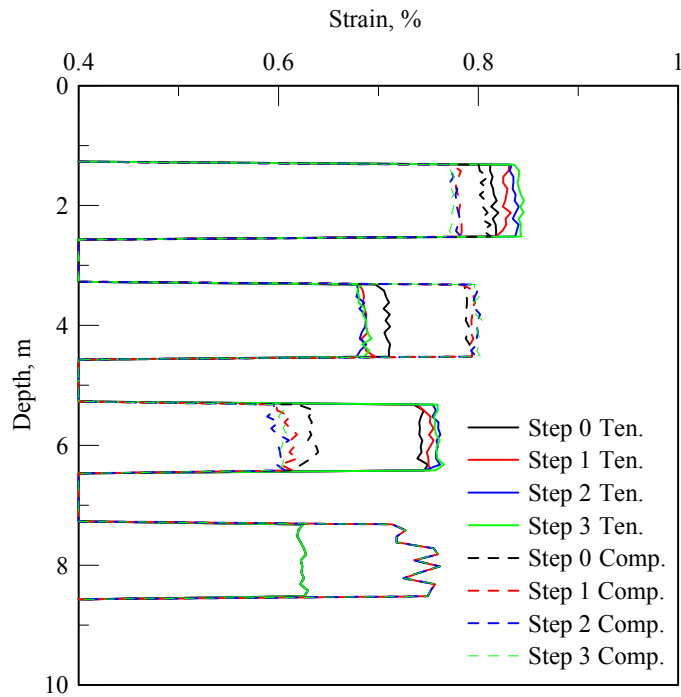


圖 3.14 光纖拉伸計(定性)大肚形變形測試結果圖

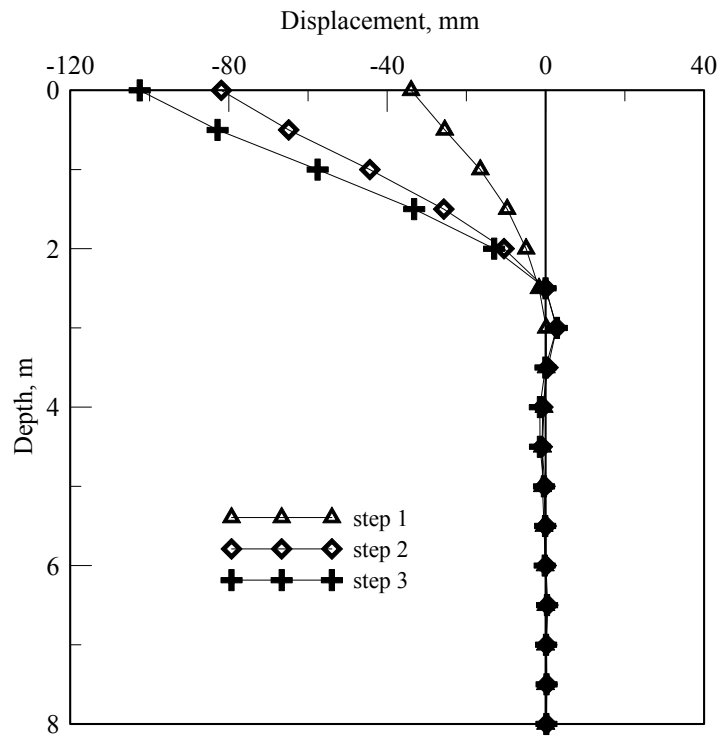


圖 3.15 對照組傾斜管喇叭形變形圖

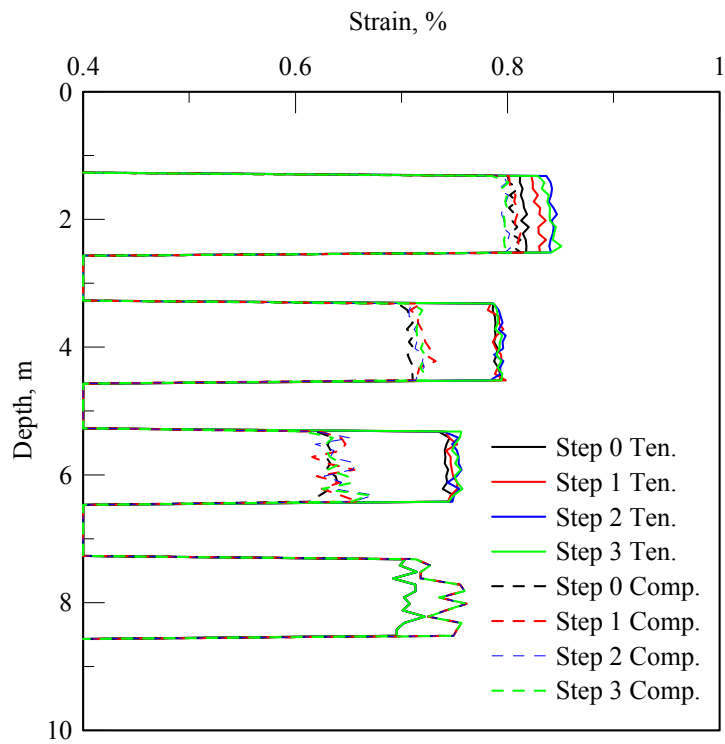


圖 3.16 光纖拉伸計(定性)喇叭形變形測試結果圖

## 第四章 光纖拉伸計現場安裝與監測資料分析

本章節主要敘述光纖拉伸計現場安裝概況與實測結果，以及在 9 月份新樂克颱風期間 NCTU-03 及 IHMT-01 所量測之數據分析。

### 4.1 光纖拉伸計之現場安裝與量測結果

本研究團隊已於 97 年 7 月期間，將完成 30 組 BOTDR 光纖拉伸計安裝於現場，圖 4.1 為 30 組 BOTDR 光纖拉伸計實體圖，本次研究將分三孔安裝 BOTDR 光纖拉伸計，其孔位分別為 C-04-4、C-3 及 C-12A，而在 C-04-4 100m 傾斜觀測管內共安裝 15 組 BOTDR 光纖拉伸計，如圖 4.2 所示，因安裝過程中，於光纖接頭接續點未安裝良好，故損失兩組 BOTDR 光纖拉伸計，圖 4.5 為顯示 C-04-4 孔位量測結果，由此圖可看出 07/07 至 07/22 期間內，從地表至 25m 範圍內有明顯之變化，有往下邊坡滑動之趨勢，圖 4.3 及圖 4.6 分別為 C-3 之 6 組 BOTDR 光纖拉伸計安裝示意圖及量測結果，而在此量測結果圖顯示，0 至 2m 範圍有向下邊坡滑動之趨勢，而 2 至 12m 則顯示共同拉伸情況，並無滑動發生；另外，圖 4.4 及圖 4.7 為 C-12A 之 7 組 BOTDR 光纖拉伸計安裝示意圖與監測成果，由圖 4.7 中，可看出在 0 至 2m 內有向下邊坡滑動之趨勢，但在 2 至 15m 範圍內則與 C-3 孔 2 至 12m 有共同拉伸的情況，無滑動跡象。而在 07/07 至 07/22 期間內正好有卡玫基颱風經過，研判此期間所發生之滑動為卡玫基所夾帶之豪雨，造成有滑動跡象。

### 4.2 辛樂克颱風期間現場光纖感測器資料分析

圖 4.10 為臺 18 線五彎仔監測小屋附近所架設之雨量站測得的 9 月份日累積雨量圖，而在 9/13 至 9/14 期間為辛樂克颱風侵襲臺灣，可看出這幾天之降雨量達到 1000mm 以上的雨量，圖 4.8 及圖 4.9 為該期間 NCTU-03 光纖光柵水壓觀測管及 IHMT-01 200m 傾斜觀測管之變形圖；從 NCTU-03 水壓監測管所測得水壓變化圖來看，在這兩天時間，

水壓變化可達到 200kPa 以上，換算其壓力水頭約為 20m 高，可見該區域的側向補注源相當大且岩層內的流通性也相當高，才會使得在短暫時間內，使得水壓變化非常快速。而相同期間內，IHMT-01 200m 傾斜觀測管也測得變化，約在地表下 0 至 65m 處有明顯之滑動，而圖 4.9 顯示之變形趨勢為先往下邊坡傾斜，其最大位移量達到 18mm，接著在往上邊坡傾斜，其滑動量約為 120mm，研判此發生的原因可能為先由淺層滑動面滑動再從深層滑動面滑動，才導致有向上邊坡傾斜之趨勢。圖 4.11、圖 4.12 為 NCTU-03 於辛樂克颱風期間，該孔位各深度之水壓變化趨勢圖，由此圖可得知，在豪雨發生前，其地下水位面之變化與深度約呈現線性分佈，而在豪雨時間範圍，地下水位面變化非常快速，而地下水位面約與深度呈現直線關係，另外，圖 4.11、圖 4.12 可看該區域內有兩個不同之地下水位面，其區分位置為地表下 30m 處，在 30m 以下其地下水位變化較大，約為 20m 之變化；30m 以上範圍，其地下水位變化約為 10m，研判該區域內應為兩種不同之滲透係數之地層。



圖 4.1 30 組 BOTDR 光纖拉伸計



圖 4.2 C-04-4 100m 傾斜觀測管安裝 15 組 BOTDR 光纖拉伸計



圖 4.3 C-3 30m 傾斜觀測管安裝 6 組 BOTDR 光纖拉伸計



圖 4.4 C-12A 40m 傾斜觀測管安裝 7 組 BOTDR 光纖拉伸計

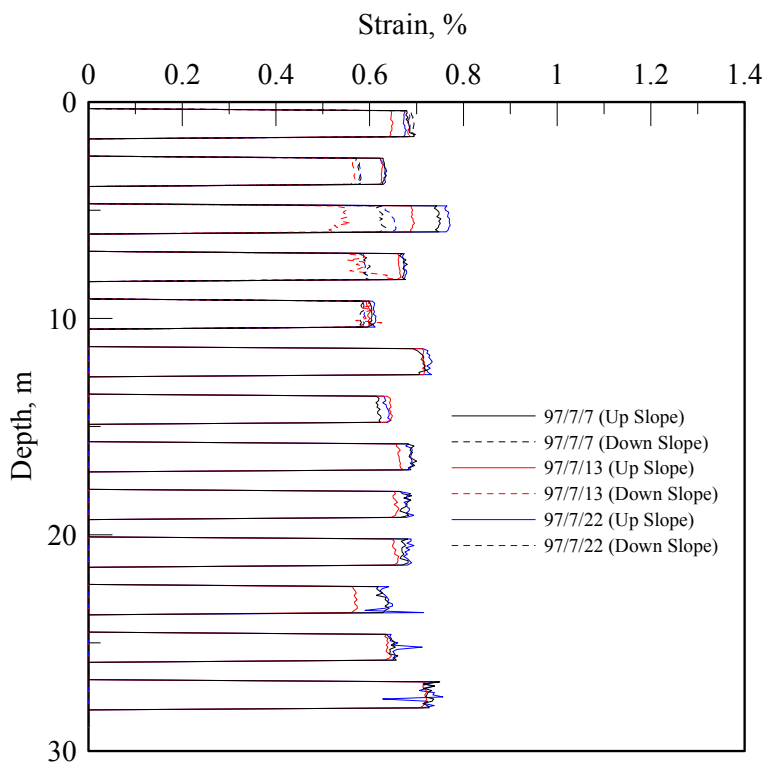


圖 4.5 C-04-4 BOTDR 光纖拉伸計變化圖

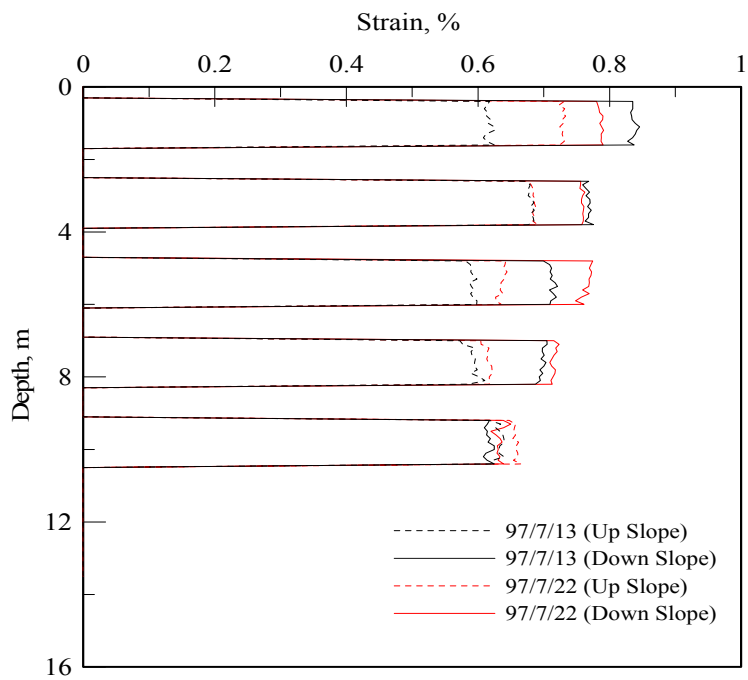


圖 4.6 C-3 BOTDR 光纖拉伸計變化圖

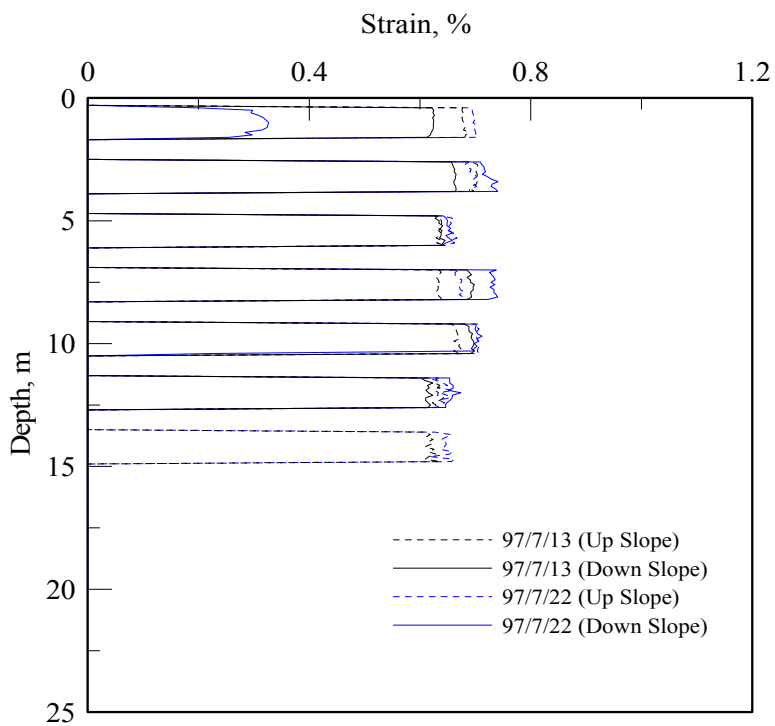


圖 4.7 C-12A BOTDR 光纖拉伸計變化圖

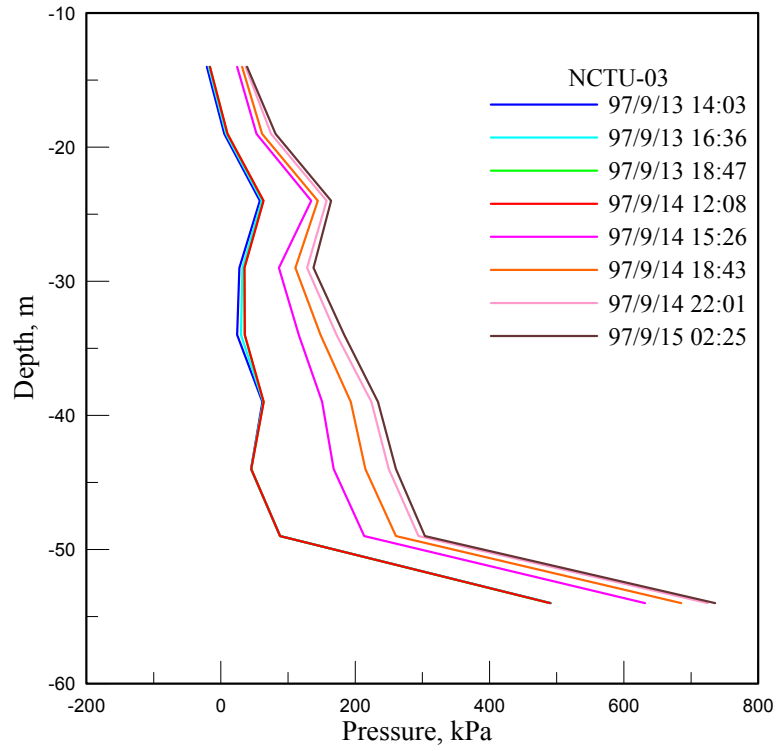


圖 4.8 辛樂克颱風期間 NCTU-03 水壓分佈圖

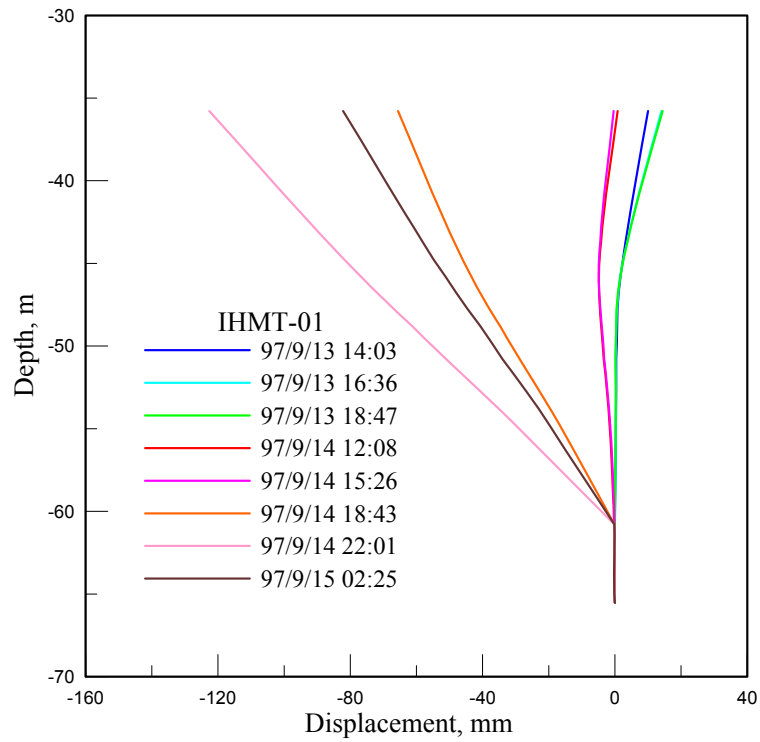


圖 4.9 辛樂克颱風期間 IHMT-01 傾斜觀測管變形圖



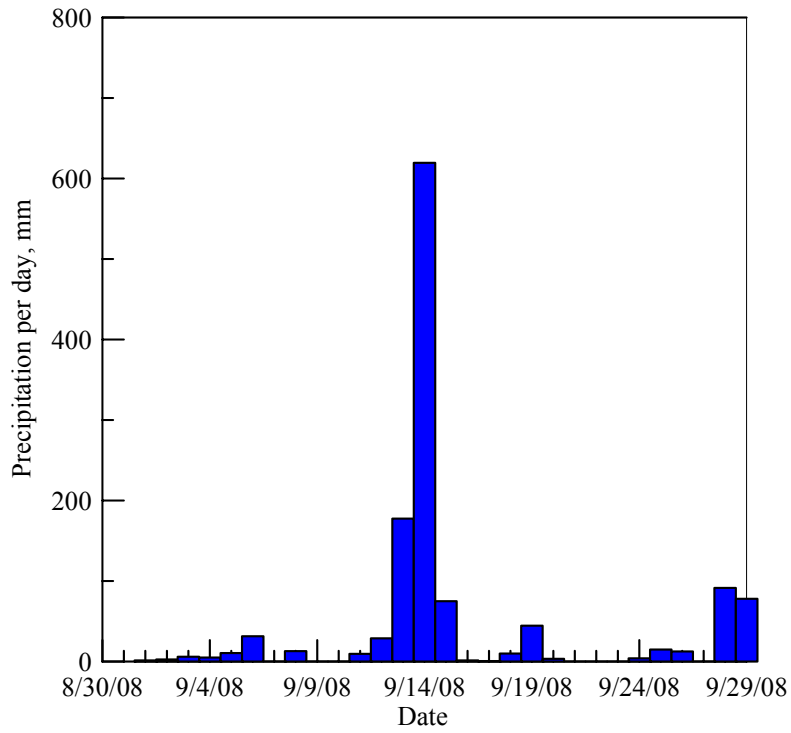


圖 4.10 9 月份日累積雨量分佈圖

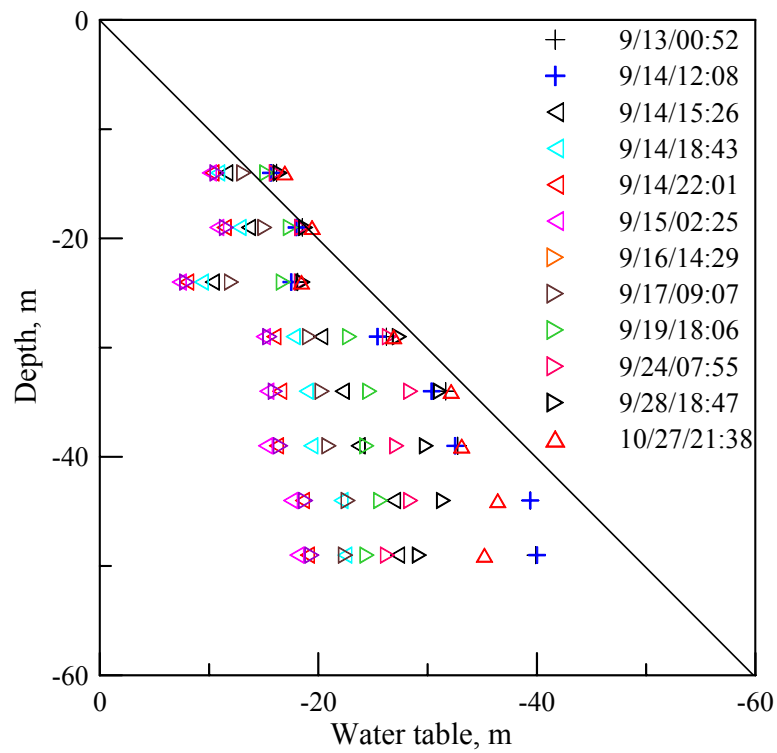


圖 4.11 NCTU-03 地下水位歷時變化圖

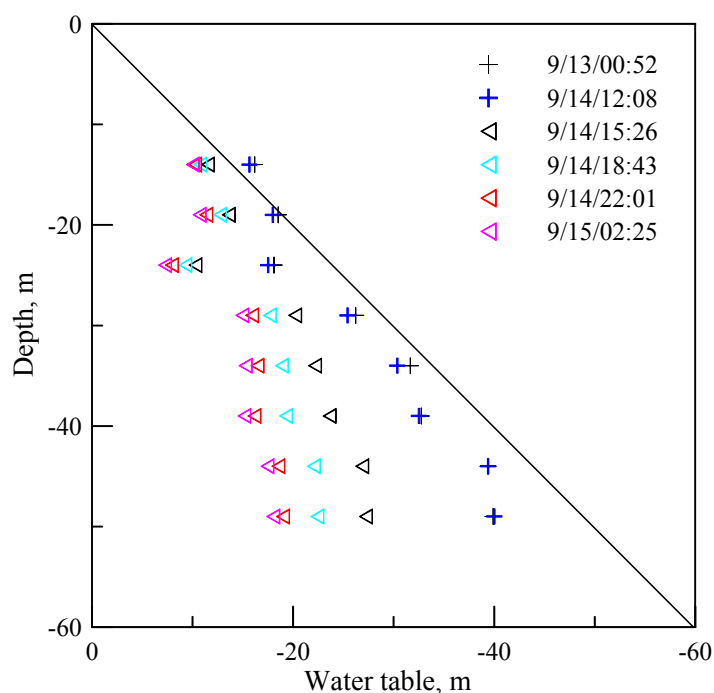


圖 4.12 NCTU-03 地下水位上升歷時變化圖（辛樂克颱風期間）

### 4.3 BOTDR光纖拉伸計改良與現場安裝

本團隊於期中報告之前已完成 30m 之 BOTDR 拉伸計安裝，由於前一代設計有部分問題，其問題為該感測器在安裝時，必須承受下一組感測器之重量，故靠近地表之感測器所承受重量為最大，也就是 BOTDR 拉伸計除了受彎曲力，也承受軸向力量，因此，過了一段時間之後，因材料受潛變效應影響，而造成斷裂。

所以，本團隊於 9 月期間進行 BOTDR 拉伸計之改良，其在 BOTDR 拉伸計之 PVC 管內安裝一直徑為 9.3mm，長為 2m 之螺桿，而螺桿內部安裝 4 個 1/2 吋之 PVC 管帽，間隔為 50cm，外圍 PVC 管長為 1.5m，其中一端固定於第一個 PVC 管帽，其於不固定，當 BOTDR 拉伸計對接時，則軸向力量由螺桿承受，圖 4.13 為改良式 BOTDR 拉伸計實體圖；而圖 4.14 及圖 4.15 為期末報告前，將 30m 改良式 BOTDR 拉伸計安裝於 C-04-4 之孔位，並記錄其初始讀數。



圖 4.13 改良式 BOTDR 拉伸計實體圖



圖 4.14 改良式 BOTDR 拉伸計現場安裝

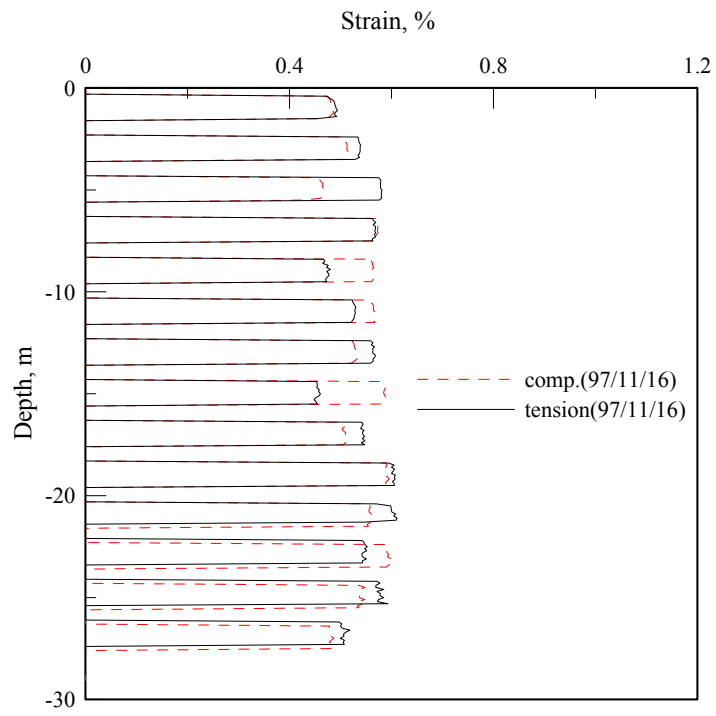


圖 4.15 改良後 BOTDR 拉伸計於 C-04-4 孔位初始變化圖

## 第五章 研究場址地下水流數值模式之驗證與擴充

### 5.1 研究場址地下水流數值模式簡介

上年度(第一年度)研究中，吾人選定採用坡地非飽和地下水流模型來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，可為時間之函數， $\Omega$  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  $\bullet$  表示內積(inner product)。

利用兩步驟有限差分 Crank-Nicolson 法(Hills et al.1989; Hsu et al.,

2002) 可將式(5.1)離散化(discretization)。其步驟一可表示為

$$\begin{aligned}
 C_{i,j}^n \frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} &= \frac{K_{i+1/2,j}^n}{2\Delta x} \left( \frac{\psi_{i+1,j}^* - \psi_{i,j}^*}{\Delta x} + \frac{\psi_{i+1,j}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta x} \right) - \frac{K_{i-1/2,j}^n}{2\Delta x} \left( \frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i-1,j}^*}{\Delta x} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) \\
 &+ \frac{K_{i,j+1/2}^n}{2\Delta z} \left( \frac{\psi_{i,j+1}^* - \psi_{i,j}^*}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j+1}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta z} \right) - \frac{K_{i,j-1/2}^n}{2\Delta z} \left( \frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i,j-1}^*}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i,j-1}^n}{\Delta z} \right) + \frac{K_{i,j}^n - K_{i,j-1}^n}{\Delta z}
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

式中， $K_{i+1/2,j}^n = (K_{i,j}^n + K_{i+1,j}^n)/2$ ， $K_{i-1/2,j}^n = (K_{i,j}^n + K_{i-1,j}^n)/2$ ， $K_{i,j+1/2}^n = (K_{i,j}^n + K_{i,j+1}^n)/2$ ， $K_{i,j-1/2}^n = (K_{i,j}^n + K_{i,j-1}^n)/2$ 。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，下標 i 與 j 分別為 x 與 z 方向之格網點位置。步驟二可表示為

$$\begin{aligned}
 C_{i,j}^{n+1/2} \frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} &= \frac{K_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{2\Delta x} \left( \frac{\psi_{i+1,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\psi_{i+1,j}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta x} \right) - \frac{K_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{2\Delta x} \left( \frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) \\
 &+ \frac{K_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{2\Delta z} \left( \frac{\psi_{i,j+1}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j+1}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta z} \right) - \frac{K_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{2\Delta z} \left( \frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i,j-1}^n}{\Delta z} \right) + \frac{K_{i,j}^{n+1/2} - K_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta z}
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

式中， $C_{i,j}^{n+1/2} = (C_{i,j}^n + C_{i,j}^*)/2$ ， $K_{i+1/2,j}^{n+1/2} = (K_{i,j}^n + K_{i+1,j}^n + K_{i,j}^* + K_{i+1,j}^*)/4$ ， $K_{i-1/2,j}^{n+1/2} = (K_{i,j}^n + K_{i-1,j}^n + K_{i,j}^* + K_{i-1,j}^*)/4$ ， $K_{i,j+1/2}^{n+1/2} = (K_{i,j}^n + K_{i,j+1}^n + K_{i,j}^* + K_{i,j+1}^*)/4$ ， $K_{i,j-1/2}^{n+1/2} = (K_{i,j}^n + K_{i,j-1}^n + K_{i,j}^* + K_{i,j-1}^*)/4$ ， $K_{i,j}^{n+1/2} = (K_{i,j}^n + K_{i,j}^*)/2$ ， $K_{i,j-1}^{n+1/2} = (K_{i,j-1}^n + K_{i,j-1}^*)/2$ 。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) (詳見第一年報告)。

## 5.2 研究場址地下水流數值模式之驗證

上年度研究中，吾人已完成研究場址地下水流數值模式之建置與初步測試。本年度進一步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

$$K(\psi) = K_0 \exp(\alpha\psi) \dots\dots\dots(5.7)$$

$$\theta(\psi) = (K_0 / A_0) \exp(\alpha\psi) \dots\dots\dots(5.8)$$

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。

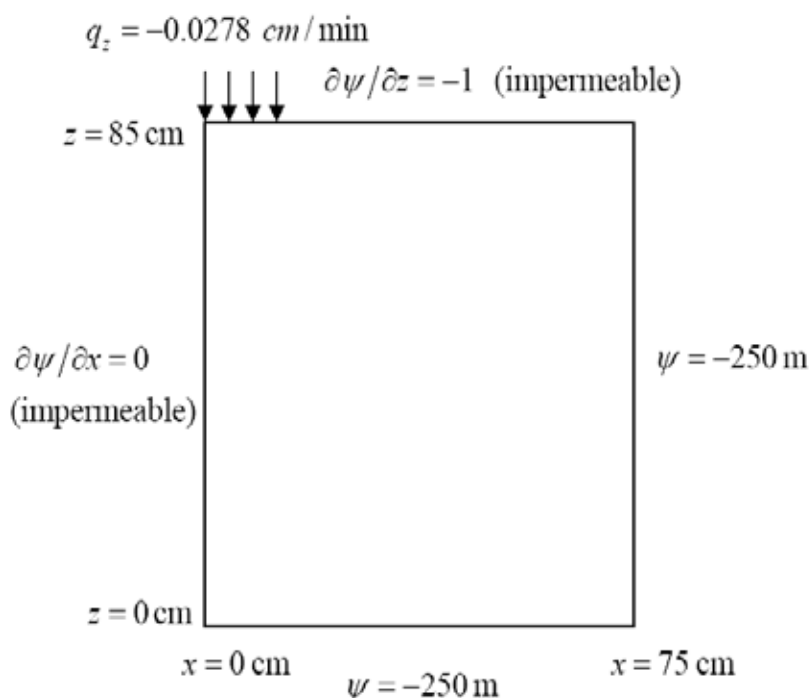


圖 5.1 驗證案例區域示意圖

當時間間距  $\Delta t = 0.25$  s、空間間距  $\Delta x = 1$  cm、 $\alpha = 0.04$ 、 $K_0 = 0.0694$  cm/min、與  $A_0 = 0.1388$  cm/min，所建立地下水流數值模式之壓力水頭模擬結果，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。

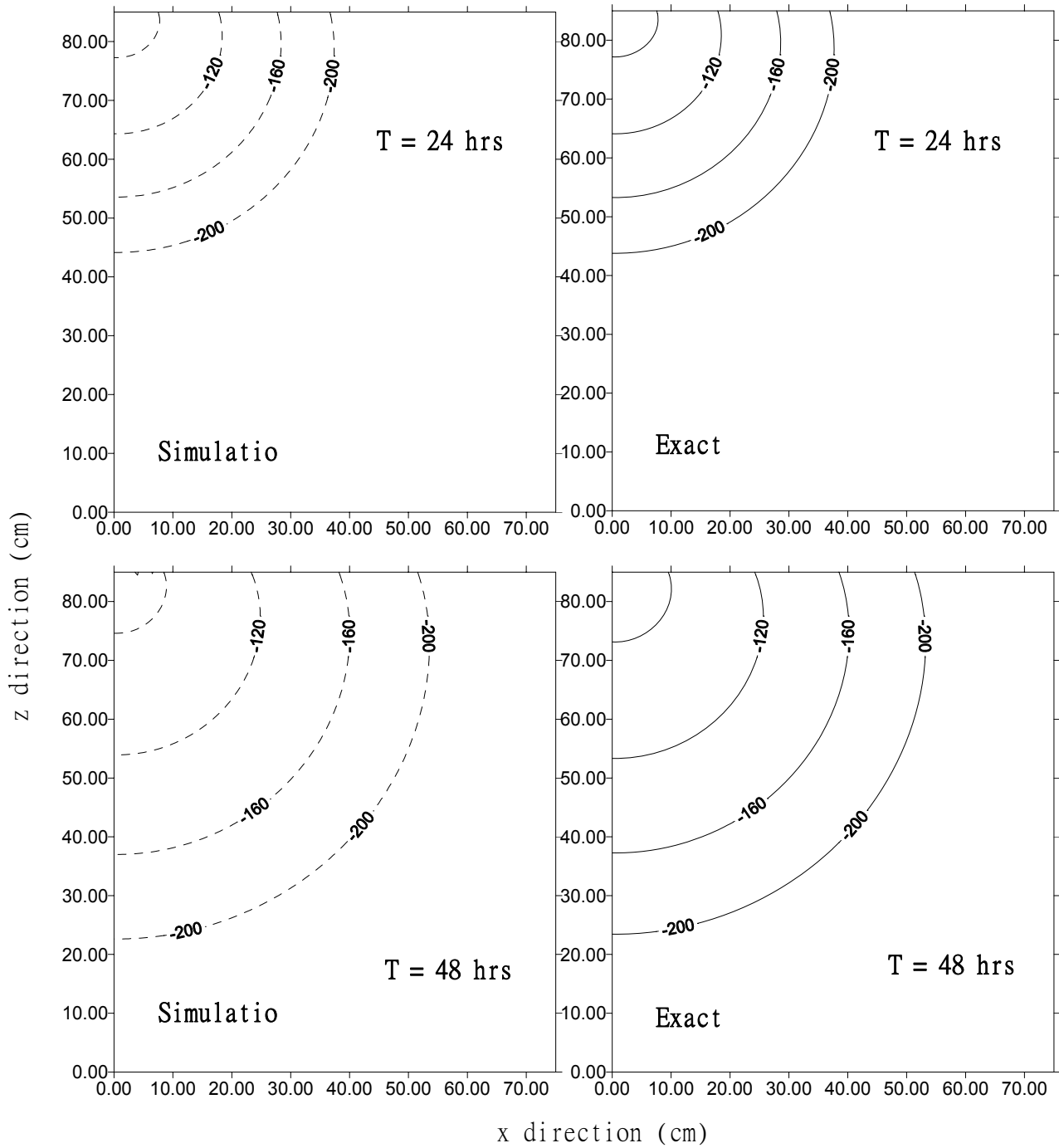


圖 5.2 驗證案例模擬結果





參考圖 5.4，簡易地下水流模式之控制方程式可表示為

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left( Kh' \cos \alpha \frac{\partial h'}{\partial x'} + Kh' \sin \alpha \right) = S_y \frac{\partial h'}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(5.9)$$

式中， $S_y$  為比出水量(specific yield)。另外，水位  $h$  可表示為

$$h = h' \cos \alpha + x' \sin \alpha \quad \dots\dots\dots(5.10)$$

若土壤為均質(homogeneous)，則式(4.10)可簡化為

$$K \cos \alpha \frac{\partial}{\partial x'} \left( h' \frac{\partial h'}{\partial x'} \right) + K \sin \alpha \frac{\partial h'}{\partial x'} = S_y \frac{\partial h'}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(5.11)$$

初始條件可表示為

$$h'(x', t = 0) = h^*(x') \quad \dots\dots\dots(5.12)$$

式中， $h^*(x')$  表示初始之  $h'$  分佈。

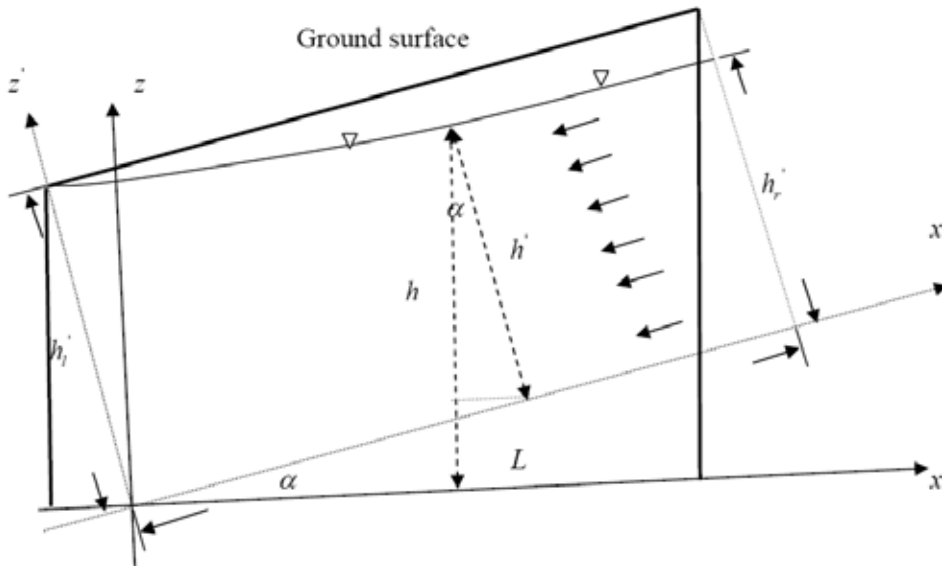


圖 5.4 簡易地下水流模式示意圖

另外，邊界條件可表示為

$$h'(x' = 0, t) = h'_l \dots\dots\dots(5.13)$$

與

$$h'(x' = L, t) = h'_r(t) \dots\dots\dots(5.14)$$

利用有限差分法可將式(5.11)離散化為

$$\frac{K \cos \alpha}{\Delta x'} \left[ h'^{n+1}_{i+1/2} \frac{\partial h'}{\partial x'} \Big|_{i+1/2}^{n+1} - h'^{n+1}_{i-1/2} \frac{\partial h'}{\partial x'} \Big|_{i-1/2}^{n+1} \right] + K \sin \alpha \frac{h'^{n+1}_{i+1} - h'^{n+1}_i}{\Delta x'} = S_y \frac{h'^{n+1}_i - h'^n_i}{\Delta t} \dots\dots\dots(5.15)$$

式(5.15)可進一步表示為

$$\frac{K \cos \alpha}{\Delta x'} \left[ \frac{h'^{n+1}_{i+1} + h'^{n+1}_i}{2} \left( \frac{h'^{n+1}_{i+1} + h'^{n+1}_i}{\Delta x'} \right) - \frac{h'^{n+1}_i + h'^{n+1}_{i-1}}{2} \left( \frac{h'^{n+1}_i + h'^{n+1}_{i-1}}{\Delta x'} \right) \right] + K \sin \alpha \frac{h'^{n+1}_{i+1} + h'^{n+1}_i}{\Delta x'} = S_y \frac{h'^{n+1}_i + h'^n_i}{\Delta t} \dots\dots\dots(5.16)$$

式(5.16)為一非線性方程式(nonlinear equation)，可利用疊代法(iterative method)求解之，如下所示

$$\begin{aligned} & - \left\{ \frac{K \cos \alpha}{2(\Delta x')^2} \left[ (h'^{n+1}_{i+1})^m + (h'^{n+1}_i)^m \right] + \frac{K \sin \alpha}{\Delta x'} \right\} (h'^{n+1}_{i+1})^{m+1} \\ & + \left\{ \frac{K \cos \alpha}{2(\Delta x')^2} \left[ (h'^{n+1}_{i+1})^m + 2(h'^{n+1}_i)^m + (h'^{n+1}_{i-1})^m \right] + \frac{K \sin \alpha}{\Delta x'} + \frac{S_y}{\Delta t} \right\} (h'^{n+1}_i)^{m+1} \\ & - \left\{ \frac{K \cos \alpha}{2(\Delta x')^2} \left[ (h'^{n+1}_i)^m + (h'^{n+1}_{i-1})^m \right] \right\} (h'^{n+1}_{i-1})^{m+1} = \frac{S_y}{\Delta t} h'^n_i \end{aligned} \dots\dots\dots(5.17)$$

式中，上標  $m$  表示疊代次數。

若  $\alpha = 20^\circ$ 、 $L = 1,000\text{m}$ 、 $h'_i = 300\text{m}$  且右側之地下水位  $h'_r(t)$  隨時間變化，在 48 小時內由初始 220m 線性增加至 250m，簡易地下水流模式之地下水位模擬結果如圖 5.5 所示。由圖 5.5 可發現，簡易地下水流模式之地下水位模擬結果與實測地下水位之趨勢相似(如圖 5.3 所示)。

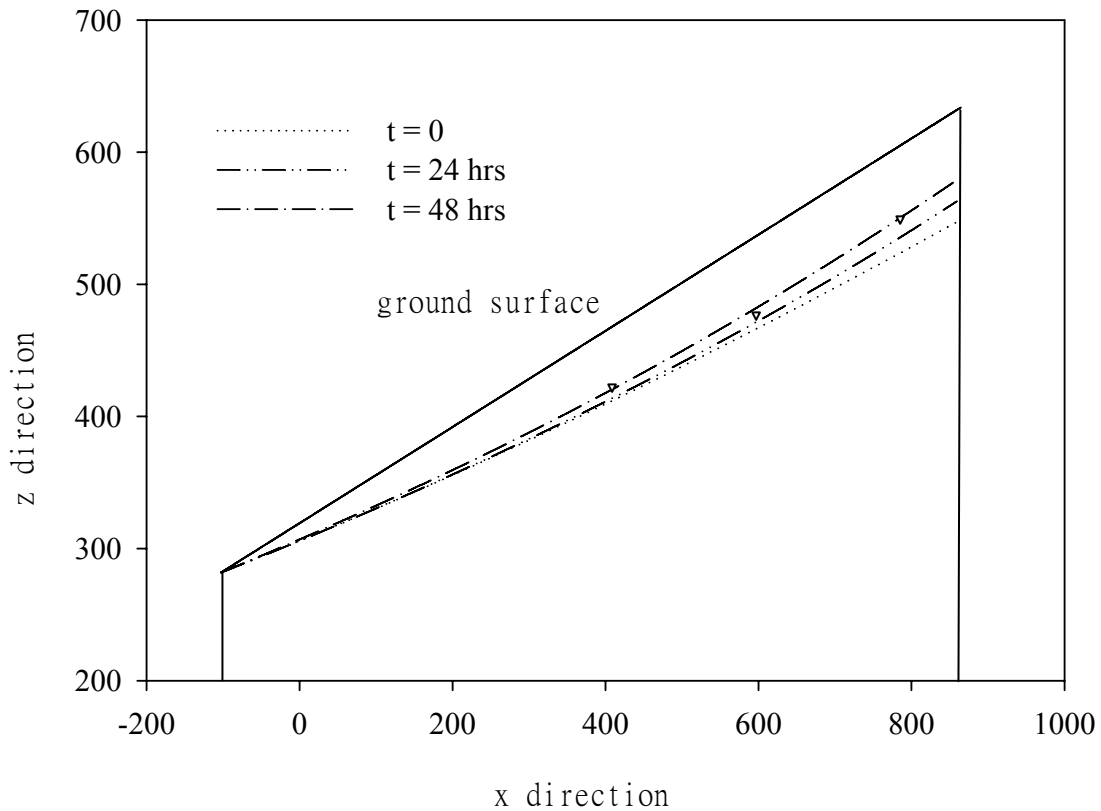


圖 5.5 簡易地下水流模式模擬結果

#### 5.4 五彎仔地區地下水流初步率定與驗證模擬

本研究利用上述發展之簡易地下水流模式，初步率定與驗證五彎仔地區之地下水流。利用民國 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 95 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。模擬時，以 B-3 觀測之水位為右端邊界條件，左端則以溪流(南獨座溪與北獨座溪)為邊界，且設定地下

水位高程與地表同高。模擬格點間距大小為 50m，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 B-3 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。初步率定與驗證結果顯示，土壤水力傳導係數介於  $10^{-2}$  至  $10^{-4}$  cm/s 間，且 A-A 斷面與 B-B 斷面之地下水位模擬結果與實測結果如圖 5.6 至圖 5.9 所示。由圖 5.6 與圖 5.9 可知，本研究發展之簡易地下水流模式應可模擬五彎仔地區之地下水位分佈情況。

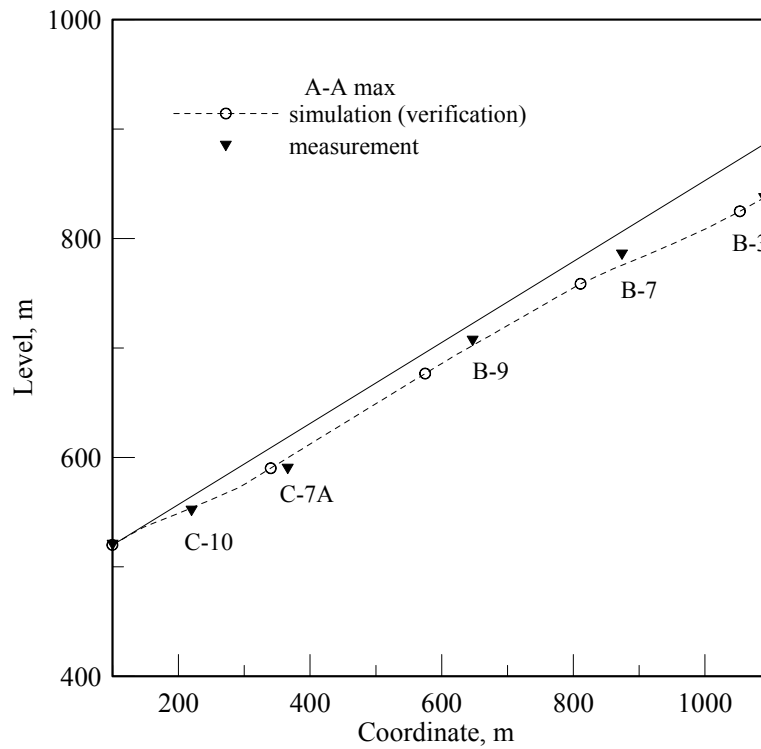


圖 5.6 A-A 斷面高水位時之地下水位率定與驗證結果

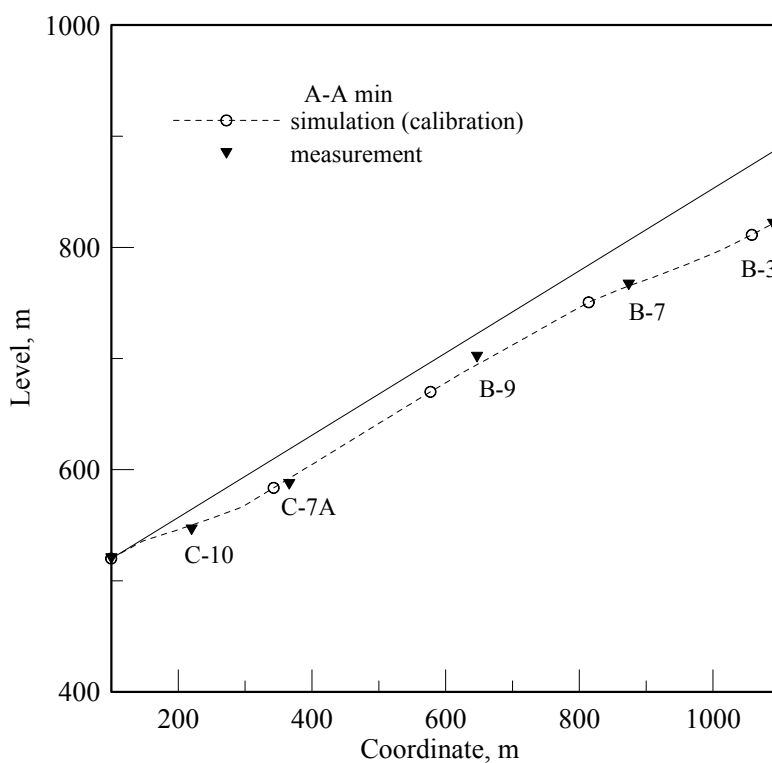


圖 5.7 A-A 斷面低水位時之地下水位率定與驗證結果

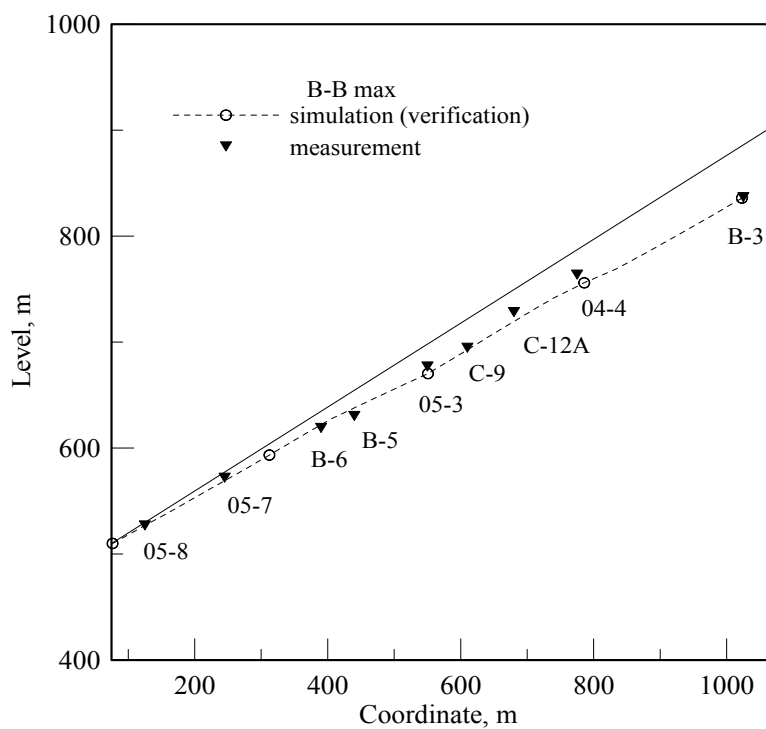


圖 5.8 B-B 斷面高水位時之地下水位率定與驗證結果

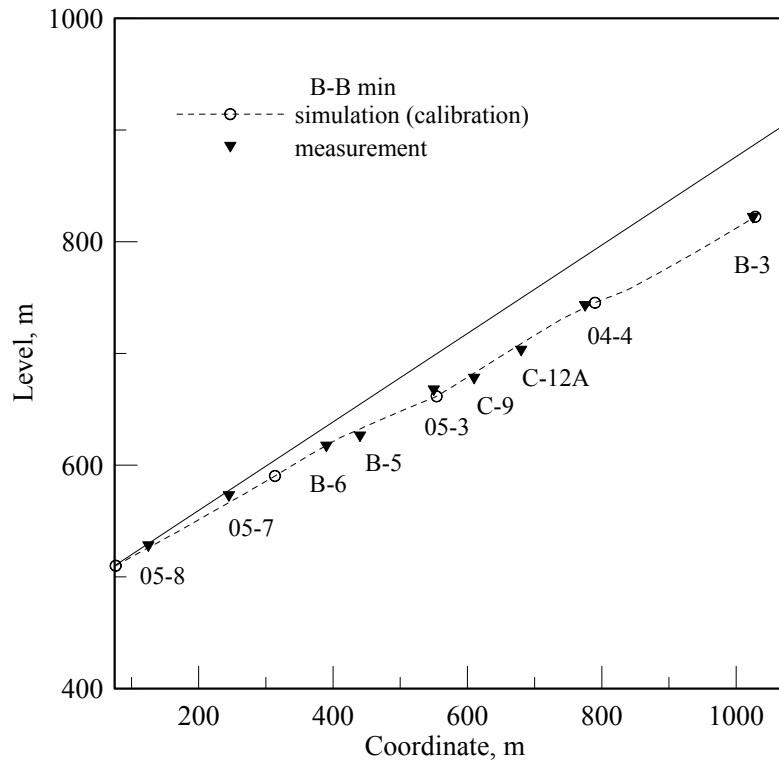


圖 5.9 B-B 斷面低水位時之地下水位率定與驗證結果

## 第六章 結論與建議

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，使用本研究團隊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，另外，今年度計畫中，所發展之BOTDR拉伸計，經過實驗室與現場安裝驗證，可有效應用在廢棄傾斜管內（無法再次以傾斜儀量測之傾斜管），量測現場傾斜觀測管之變形趨勢，而今年度辛樂克颱風期間，成功利用分佈式光纖光柵水壓計量測到現場地層內部各點水壓隨降雨量的變化，由結果數據可看出，暴雨期間內，地層內部水壓並分呈靜態水壓分佈，而是會受地層內水平及垂直滲流影響，產生上部水頭壓力大，下部水頭壓力小，也說明傳統現場監測水壓以單一點或單一深度之量測為不足夠的，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. 上年度研究中，已完成研究場址未飽和地下水流數值模式之建置與初步測試。本年度進一步利用具有解析解之案例，完成研究場址未飽和地下水流數值模式之驗證。
2. 本研究為簡單且有效率地模擬研究場址之地下水位變化，配合已發展完成之未飽和地下水流模式，在進一步假設地下水流平行於坡面且引用都布假設，並忽略未飽和效應下，同時發展一套簡易地下水數值模式。



3. 完成簡易地下水數值模式之測試，並利用民國 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 95 年報告)，A-A 與 B-B 斷面觀測所得之最低水位作為參數率定之用，最高水位作為參數驗證之用。在穩態假設下，初步率定與驗證之結果顯示，土壤水力傳導係數介於  $10^{-2}$  至  $10^{-4}$  cm/s 間。
4. IHMT-01 200m 傾斜觀測管，在 080314 至 080831 期間所測得知最大變形量約為 9cm，其變形量之造成可能為該路段近期間正進行道路改道工程且該孔位後方為裸露之大陡坡，坡度約為 60 度以上。
5. 光纖拉伸計室內標定結果中，於拉伸測試中，其光纖拉伸計每一微應變可感應 0.01mm，而彎曲測試，其光纖拉伸計每一微應變可感應自由端前後 0.39mm 之位移量；室內九米傾斜管光纖拉伸計定性測試結果，在大肚形變形中，其內外側光纖拉伸計應變變化量與傾斜管變形趨勢一致；同樣在喇叭型變形測試中，內外側之光纖拉伸計應變變化量也有與傾斜管變形一致趨勢。
6. 於 C-04-4、C-3 及 C-12A 所安裝之 BOTDR 光纖拉伸計的監測結果，可看出在淺層區域內有明顯之滑動趨勢，且該期間內有正逢卡玫基颱風侵襲。
7. 於辛樂克颱風事件中，由圖 4.11 可知該區域的地下水位面可在短時間內提高約 20m，且在地表下 30m 處可區分成兩個不同之地下水位面，研判該區域可能有兩種不同滲透係數的岩層；另外，當豪雨過後時，該區域之地下水位面下降非常迅速，可得知其區域水流流通性相當高，其表示岩層相當破碎。

## 6.2 建議

1. 目前光纖感測器自動化擷取設備已安裝於五灣仔監測小屋，但每逢豪及颱風季節中，該監測小屋之電力常發生斷電情況，使得在關鍵時刻光纖感測自動化之設備無法繼續運作，希望港研技術中心能提

供額外經費，增設常時間之不斷電系統，使得監測儀器能正常運作。

2. 對於廢棄之傾斜管 C-04-4、C-3 及 C-12A 孔位所安裝之 BOTDR 光纖拉伸計結果來看，明顯看出淺層內有滑動趨勢，使得廢棄的傾斜觀測管再次提供監測功能，故可建議港灣技術中心可在其他廢棄之傾斜觀測管安裝光纖拉伸計，以持續該區域之滑動趨勢。

## 參考文獻

1. Hill, R.G., Porro, I. and Hudson, D.B. (1989) “Modeling one-dimensional infiltration into very dry soils. 1. model development and evaluation.” Water Resources Research, Vol. 25, 1259-1269.
2. Hsu S.H., Ni, C.F., and Hung P.F. (2002) “Assessment of three infiltration formulas based on model fitting on Richards’ equation.” Journal of Hydrological Engineering, Vol. 7, 373-379.
3. Ng, C.W.W., Wang, B., and Tung, Y.K., 2001, “Three-Dimensional Numerical Investigations of Groundwater Responses in Unsaturated Slope Subjected to Various Rainfall Patterns,” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 38, pp.1049-1062.
4. Warrick, A.W., and Lomen, D.O. (1976) “Time-dependent linearized infiltration: III. strip and disc sources.” Soil Sci. Soc. Am. J., 40, 639-643.
5. 陳進福，” 利用自發性布里淵散射量測不同光纖的超音波傳輸特性”，國立交通大學光電研究所碩士論文，新竹，台灣，民國90年。
6. 青山顧問有限公司（民國96年），台18線28.9K~31.5K（五彎仔）地滑區調查、整治規劃及安全評估地滑地區補充監測執行總報告，交通部公路總局第五區養護工程處。
7. 青山顧問有限公司（民國96年），台18線28.9K~31.5K（五彎仔）地滑區調查、整治規劃及安全評估地三次總結報告，交通部公路總局第五區養護工程處。

## 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(2/4)

執行單位：交通大學防災工程研究中心

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)吳組長鎮封 (公路總局養護組)：</p> <p>1. 台 18 線五彎仔路段監測小屋，若自動化儀器需作長期監測，電力方面如何考量？</p> <p>2. 本計畫中已裝設光纖式監測儀器，日後是否可達到預警功能？例如，當傾斜觀測管達到某一位移量，可提供相關單位警訊。</p>	<p>1. 安裝一不斷電系統，該系統只能提供 2~3 小時之電力，若要達到長期監測，因考量研究經費有限，故需請港研技術中心，支援電力設備經費，以防止颱風季節時，監測小屋電力斷電，而無法擷取監測儀器之數據。</p> <p>2. 目前光纖式監測系統已架設自動化，並提供預警功能，當傾斜觀測管達到某一變位量，則會發送簡訊至有關單位聯絡人。</p>	<p>同意</p> <p>同意</p>
<p>(二)許技正書王 (交通部科技顧問室)：</p> <p>1. 請研究單位說明全光纖邊坡穩定監測系統在實務應用上，例如氣候異常下能否運作，其極限為何？</p>	<p>1. 本研究所使用的節理式光纖光柵偏斜儀及光纖光柵水壓計，已在研發階段施作反複循環加溫測試，其測試溫度範圍為-10~70 度，經測試後，其感測器靈敏度並無降低。</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
2.在坡體滑動多少情況下，光纖會損壞，此是否會影響監測系統的功能，有否對策。	2.因光纖光柵節理式偏斜儀屬於小變形量測範圍，其最大量測位移約 6.28 公分(單一感測器)，若當邊坡滑動量過大時，則可採用 BOTDR 光纖拉伸計來持續監測滑動趨勢，但只能作為定性使用。	同意
3.期中報告書中未見國內、外相關文獻，是否本研究單位為原創。	3.關於光纖光柵節理式偏斜儀為原創，並已取得台灣及美國專利。而相關文獻可參考本計畫之第一年度報告書。	同意
4.請說明監測值將如何應用以及系統耐久性之規劃，指實施方式。	4.關於光纖光柵水壓監測井所量得的數據，可做為該區域地下水滲流模型參數率定之依據，而所安裝之節理式光纖光柵偏斜儀的傾斜觀測管測得之變形資料，可做為日後訂定警戒值之依據及可找出水壓(降雨量)與位移之關係，至於系統的耐久性已參照中華民國國家標準局所訂定之相關規範，施做試驗。	同意
5.本研究為利爾後應用，若有涉及現行規範須配合修正者，請研究單位適時提出建議，以利成果推動。	5.感謝評審委員建議，若規範有需求修正時，將適當提供建議供大家參考。	同意

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>6. 監測之資料擷取，若有時 間差，請問如何處理？</p> <p>(三) 陳研究員志芳 (港灣技術研究中心)</p> <p>1. 研究報告書指出節理式 偏斜儀 FBG-SD 感測範圍 為正負 2 度角，單一感測 器可感測總位移量為 6.28 公分，對於邊坡量測是否 足夠？</p> <p>2. 五灣仔為大規模滑動，是 否可藉由 FBG-SD 與光纖 光柵水壓計之監測資 料，找出關係？且監測點位 配置是否足夠？</p>	<p>6. 目前監測頻率為 1 小時紀 錄一筆資料，對於現今監測 頻率已相當高，但可適其需 求，縮短監測時間。</p> <p>1. 對於單一節理式偏斜儀 FBG-SD 所量測偏移量需 與其他節理式偏斜儀 FBG-SD 做累加計算，才可 得到傾斜觀測管實際變形 量，若假設邊坡為向一方向 滑動，且安裝 10 組節理式 偏斜儀 FBG-SD，每一感測 器假設均量到 2mm，則累 加計算後，可得到最大變形 量為 20mm。</p> <p>2. 本計畫其中項目為建立五 灣仔地區地下水數值模 型，另外，於第一年計畫中 已安裝分佈式光纖光柵水 壓計與節理式 FBG-SD 偏 斜儀，依據此量測資料可做 為現場地下水數值模擬參 數修正，而模擬結果，將 可作為日後其他監測孔 位點位之依據。</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>3.根據逢甲大學GPS全球定位系統，監測五灣仔四灣，20天可達到位移變化量9公分。</p>	<p>3.與 IHMT-01 所監測之位移量有些差異，但由此些數據顯示，目前五灣仔區域還持續滑動中。</p>	<p>同意</p>
<p>(四)蘇科長文崎 (公路總局養護組)</p>		
<p>1.公路局是否提供經費，一般大部分傾斜觀測管安裝後多已損壞，若傾斜管為呈現剪斷行為，光纖拉伸計是否會損壞，設置是否考慮改良。</p>	<p>1.光纖拉伸計相對於節理式光纖光柵偏斜儀可承受較大之變形量，根據室內九米傾斜管測試結果，其量測位移量可達到20cm且並未損壞，應可讓已損壞之傾斜管繼續發揮功能，但若發生過大變形時，任何監測感測器都會損壞，且邊坡有可能已發生滑動。</p>	<p>同意</p>
<p>2.量測訊號是否有雜訊干擾？</p>	<p>2.無雜訊干擾。因本研究以光作為傳輸訊號，故不易受電磁波干擾。</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(2/4)

執行單位：交通大學防災工程研究中心

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)吳組長進興 (公路總局養路組):</p> <p>1. 請問貴單位以阿里山台 18 線五彎仔路段作為試驗場址之監測成果是否有和其他研究單位（如：青山顧問有限公司等）之監測成果作比對？若有，其異同性如何？監測成果之精確性如何？</p> <p>2. 根據附錄 1--3 提及光纖光柵節理式偏斜儀其最大量測位移約 6.28 公分，若當邊坡滑動量過大時則可採用 BOTDR 光纖拉伸計，請教 BOTDR 光纖拉伸計可測得之邊坡最大位移量約為多少公分？另光纖光柵節理式偏斜儀和 BOTDR 光纖拉伸計是否同時佈設？或當邊坡滑動量過大光纖光柵節理式偏斜儀無法量測時，再予佈設 BOTDR 光纖拉伸計？</p>	<p>1. 目前本研究團隊所測得之監測資料，尚未與青山顧問公司之資料作比較，日後將與承辦單位透過相關程序取得資料後，並進行比較。</p> <p>2. 感謝委員之指導，一般邊坡大多屬漸進式破壞，除非很明顯之剪動破壞，才會使得局部發生較大變形，使得該點處範圍之感測器受到影響，但其餘感測器還能繼續發揮其監測功能；BOTDR 光纖式目前為定性監測，無法測得其真實位移量。</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>3. 建議將日期格式統一採用民國格式，若採用西元格式於年份請寫出 4 位數表示，以利報告之閱讀。例如：P2-3、P2-6、P2-11、P5-7~14 等。</p>	<p>5. 感謝委員之建議與指導，將修正於期末報告定稿中。</p>	<p>同意</p>
<p>4. P3-18，3.4 節第 6 行「3.5m 及 4.3m 及 3.5m」之單位請確認，另 P-5-2，4.2 節第 10 行，位移量「18mm」同。</p>	<p>4. 感謝委員對於報告之修正，本團隊將根據委員所提之項目進行確認與修正。</p>	<p>同意</p>
<p>(二)高組長邦基 (公路總局新工組)：</p> <p>1. 研究成果符合實務需求，建議可與自動監測預警通報系統結合。</p> <p>2. 拉伸計放置於廢棄之傾斜管內，則於其他道路設置時，拉伸計置放有無地質或其他考量？</p>	<p>1. 感謝委員給予本團隊之建議。</p> <p>2. BOTDR 光纖拉伸計並無地質與其他之考量，也可在新設之傾斜觀測管安裝及量測。</p>	<p>同意</p> <p>同意</p>
<p>(三)許技正書王 (交通部科技顧問室)</p> <p>1. 本研究所提電力常發生斷電情況，建議請公路總局等支援及安全管理。</p>	<p>1. 感謝委員支持本團隊所給予之建議。</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
2. 結論中有描述地下水在短時間內提高20m，是否可描述一下，當提高20m影響範圍有多大，同樣的提高到多少是需預警作為。	2. 目前已測得在辛樂克颱風期間，其地下水位有劇烈變化，而影響範圍目前並無法得知，但可於明年度計劃中根據現場地下水流數值模擬結果，予以增加水壓觀測井孔位，並與模擬相互比較，應可找出其影響範圍；而其預警值之制定，目前還無法定論，將於日後與其他單位監測所得資料統整之後，並與各專家學者研討後，應可得知其預警值範圍。	同意
3. 本案與山區道路坡地災害防治技術整合研究案，之間是否有互利互惠的交流，以利研究成果的應用。	3. 本案與山區道路邊坡災害防治技術整合研究案，均屬於承辦單位之計劃，故相關研究之資料，可透過承辦單位所取得。	同意
4. 請說明在今年颱風過程，本研究之設備妥善率如何。	4. 除監測系統受電力影響範圍外，唯獨辛樂克颱風無電力影響下，均有測得颱風期間之資料。	同意
5. 儀器小屋已興建多年為小屋內儀器設備安全由請港研中心研討對策如修繕等或可請公路總局協助。	5. 感謝策員建議其承辦單位與其他單位給予本團隊之協助。	同意

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
6. 有測到水位，卻沒有滑動資料等，甚為可惜，可能本來就沒動。	6. 於期末報告中，有展示辛樂克颱風期，水壓與位移之變化。	同意
7. 未來器材、讀數之所有權問題。	7. 計劃期間所購買之設備及監測所得資料，其所有權均為承辦單位所有。	同意
(四)李博士維峰		
(臺灣科技大學)		
1. 研究成果具創新價值。	1. 感謝委員給予研究團隊之肯定。	同意
2. 可補充說明現有研究成果應用於實務之程序與應注意事項。	2. 目前所安裝之系統與光纖感測器至今機能正常，但還需時間來加以驗證本系統之機能可靠度，故將於全程計劃結束後，應可提出應用於實務之程序及注意事項。	同意
3. FBG-SD 偏斜儀是否能克服管底位移的問題。	3. 本年度本團隊已進行發展光纖式重力式感測器，其參可值為相對於重力方向，若於管底安裝此感測器，可避免管位移之問題。	同意
4. 地下水流分布分析，建議可與一般常用程式(eg. SEEP)比對。	4. 本研究所發展之模式皆已利用具有解析解之案例驗證其正確	同意

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>5. 未來研究可加強系統 capacity, durability, calibration 之說明。</p>	<p>性，未來現地模擬時若有需要可考慮與其他模式比較。</p> <p>5. 感謝委員之建議，因系統及光纖感測器持續朝向新科技改良與研發，故目前未給予系統詳細說明，但於未來技術成熟後，將針對委員所提建議，給予系統詳細說明。</p>	<p>同意</p>
<p>(五)陳研究員志芳 (港灣技術研究中心)</p> <p>1. 整體的研究報告內容符合預定進度，值得肯定。現地安裝監測儀器是相當辛苦的工作，也感謝研究團隊的努力。</p> <p>2. 本年度監測系統中設置了光纖節理式偏斜儀及光纖感應水壓計，很成功的量測到在辛樂克颱風豪雨來襲前後的傾斜管變形及地下水位變化資料，建議黃老師在本自動化擷取系統較穩定成熟時，可以提供港研中心密碼，讓承辦人員除了可收到簡</p>	<p>1. 感謝委員對於本團隊之支持與鼓勵。</p> <p>2. 感謝委員給予本團隊研究之肯定，對於自動化儀器監測系統畫面，若承辦單位有需要，可提供承辦單位相關驗證碼。</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>訊以外，也可進入系統中觀測歷時警戒畫面。</p> <p>3. 本年度 9 月份共有 3 個颱風來襲，其中有一個蕃蜜颱風，監測系統是否有擷取到資料。</p> <p>4. 報告中有編排需要更正的地方，如目錄中第五章及內文中第四章的頁碼，以及 3-12 頁的圖 3.7 光纖拉伸計<u>初使圖</u>，請改為初始圖。</p>	<p>3. 因蕃蜜颱風期間，監測小屋電力設備斷電，故無測得監測數據。</p> <p>4. 感謝委員之指導，將修正於期末報告定稿中。</p>	<p>同意</p> <p>同意</p>
<p>(六)林研究員雅雯 (港灣技術研究中心)</p> <p>1. 中英文摘要及報告格式請參照本所出版品要點規定。</p> <p>2. 請在報告內加入光纖拉伸計及光纖光柵節理式偏斜儀量測位移量範圍、靈敏度、定性定量及適用情形之比較表。</p>	<p>1. 感謝委員之指導，將修正於期末報告定稿中。</p> <p>2. 感謝委員之建議，因系統及光纖感測器持續朝向新科技改良與研發，故目前未給予系統詳細說明，但於未來技術成熟後，將針對委員所提建議，給予系統詳細說明。</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
3. IHMT-01 傾斜觀測由 -70~-35M，是否有必要延伸到地表呢？	3. 目前並無將其監測範圍延伸至地表。	同意
4. 改良後的光纖拉伸計及試驗結果請撰寫於報告中。	4. 感謝委員指導，將於期末報告定稿中撰寫。	同意
5. 報告 P.2-1 提及 C-11、B2 等孔位，但在圖 2.1 沒有標示出來。	5. 感謝委員之指導，將修正於期末報告定稿中。	同意
6. 圖 2.1~2.23 應置於文章中，而非統一放於文章後。	6. 感謝委員之指導，將修正於期末報告定稿中。	同意
7. 圖 2-18 光纖感測器自動化擷取設備，照片看不清楚，並應加註指出包含的四項設備。	7. 感謝委員之指導，將修正於期末報告定稿中。	同意
8. P.2-26 圖 2-23 警戒值是 20000mm 是否修改一下。	8. 感謝委員之指導，目前警戒值為測試值，將會予以修正於程式中。	同意
9. P.3-9 圖 3.5 模糊看不清楚。	9. 感謝委員之指導，將修正於期末報告定稿中。	同意
10.P.5-11 圖 4-9 應為彩色或用不同符號的線，否則看不出日期。	10. 感謝委員之指導，以彩色印刷附於期末報告定稿中。	同意



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>(七)蔡先生漢卿 (交通部公路總局)</p> <p>1. 研究團隊所佈設監測點位位於N8滑動塊，報告中並未指出水流方向？</p> <p>2. 可否與相關研究單位之監測資料比對？</p>	<p>1. 本年度研究中利用簡易地下水流模式進行現地模擬時，假設地下水流流向平行坡面。此假設與實際水流可能會有所差異，於未來研究中進行未飽和二維地下水流模擬，再加以探討。</p> <p>2. 感謝委員之建議，日後將與其他單位監測資料比對。</p>	<p>同意</p> <p>同意</p>
<p>(八)羅先生山程 (交通部公路總局)</p> <p>1. 水壓計量測讀數到達多少，會造成邊坡滑動？</p> <p>~~~~~以下空白~~~~~</p>	<p>1. 目前無法定論出水壓數值達到多少，才會造成邊坡滑動，但日後將佈設其他監測孔位與配合地下水流模擬及實際破壞案例，應可找出預警數值。</p> <p>~~~~~以下空白~~~~~</p>	<p>同意</p>

## 附錄三

### 期末簡報資料

# 全光纖式邊坡穩定監測系統 整合與現地應用測試 (2/4) 2008-期末報告

黃安斌、蔡東霖、李瑞庭



## 2008-工作內容

2

- 光纖自動化解讀系統之裝設。
- 研發可與FBG-SD匹配，低解析度能承受大變形，低成本光纖地層感應系統之研發與功能測試。
- 前項系統之試驗室內標定與測試。
- 30公尺地層感應系統初步安裝測試。
- 於現場目前無法繼續量測之傾斜觀測管，裝置新研發之低解析度可承受大變形之光纖感測器。
- 繼續地下水數值計算模式之驗證與測試。
- 利用水文資料、地質資料及暴雨期間光纖感應監測數據，進行試驗場地地下水流模擬初步率定。

## 研究方法及進行步驟

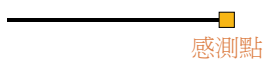
3

- 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
- 可與FBG-SD匹配，可承受大變形之光纖拉伸計感測器之研發
- 室內九米傾斜管測試
- 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

## 光纖感測類型

4

- 非分布式- Fabry-Perot 感測方法



- 部分分布式- FBG Sensor 感測方法



- 全分布式- Brillouin 感測方法

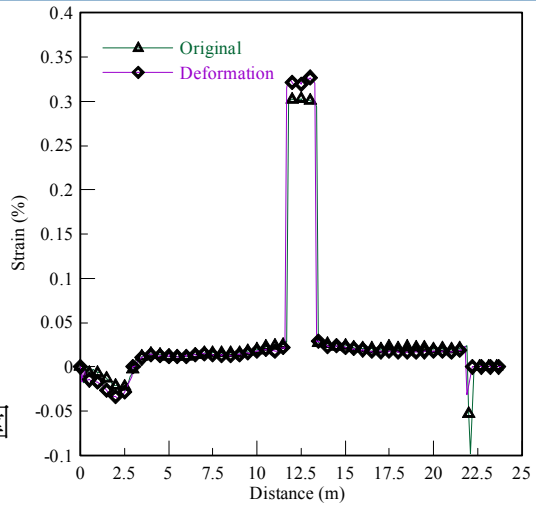


# 光纖拉伸計

5

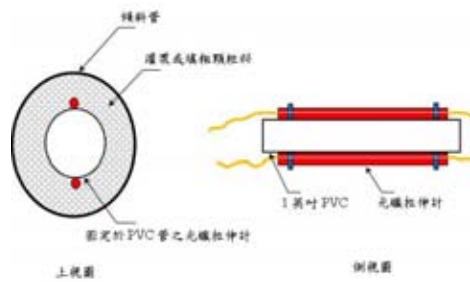
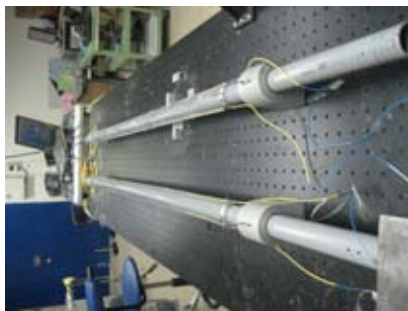


低靈敏度高量測範圍



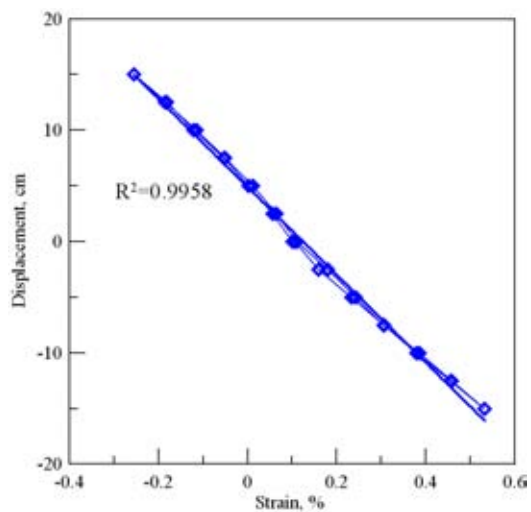
# 固定於傾斜管外側與內側之光纖拉伸計

6



## 光纖拉伸計之標定

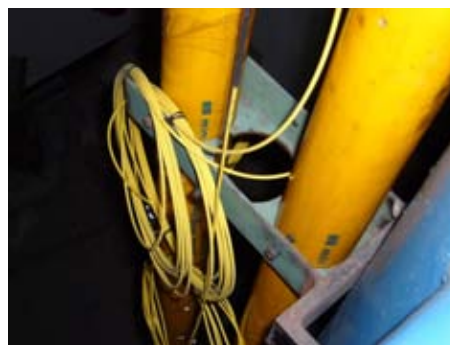
7



低靈敏度高量測範圍

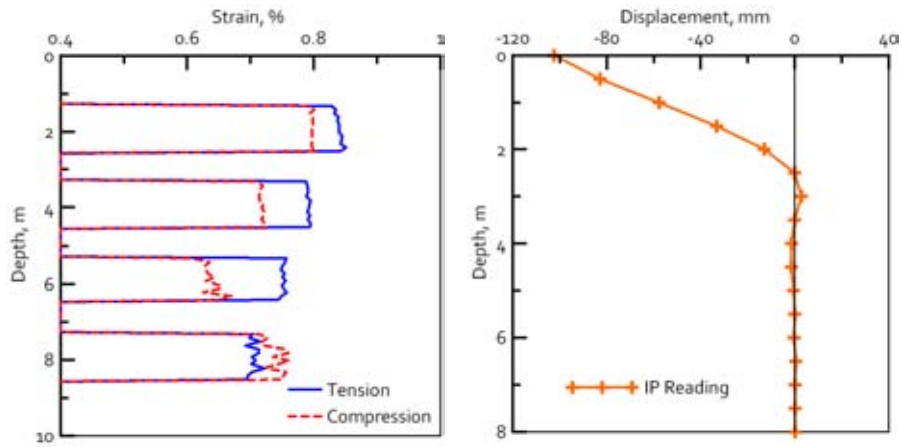
## 室內九米傾斜觀測管

8



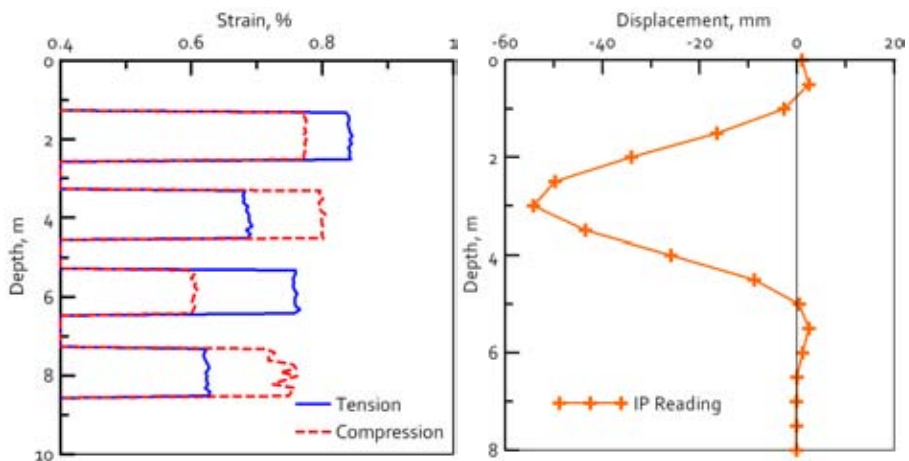
# BOTDR定性標定

9



# BOTDR定性標定

10



# BOTDR光纖拉伸計現場安裝

11

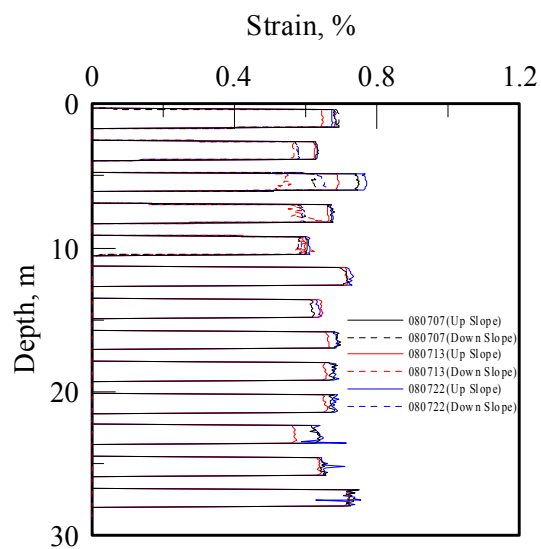


C-3 6組  
C-04-4 15組  
C-12A 9組



## C-04-4

12





## 光纖拉伸計改良

13



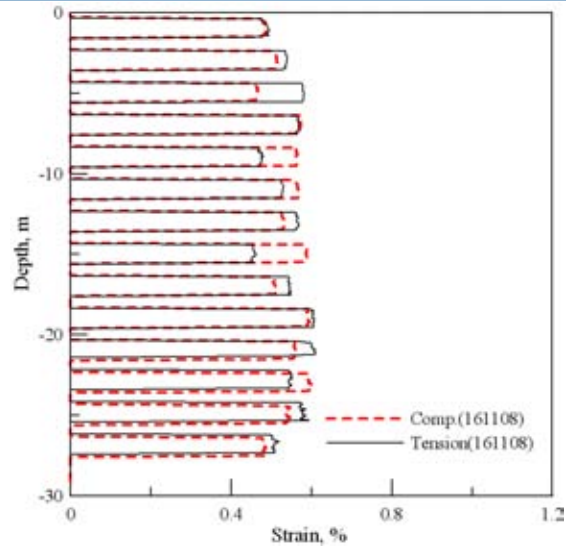
## C-04-4 11月16日重裝

14



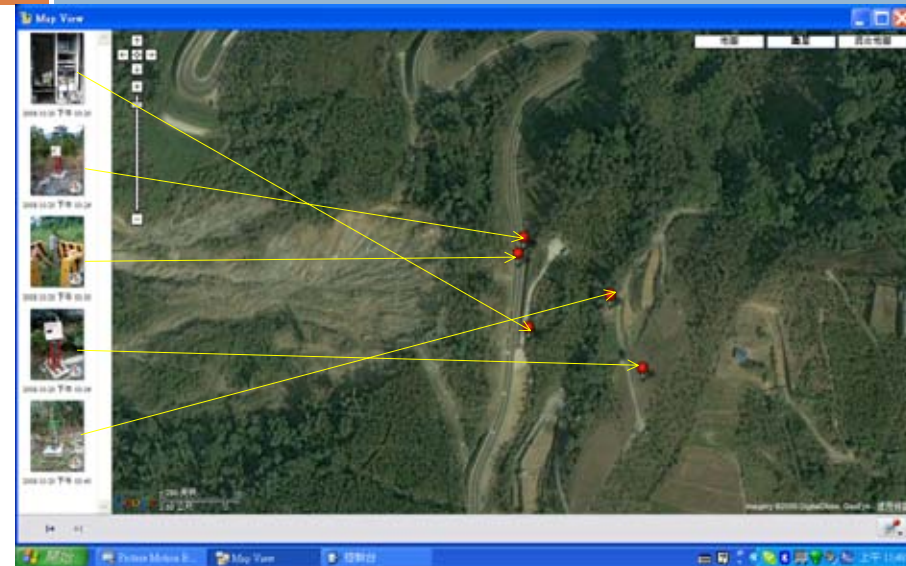
# 初始讀數

15



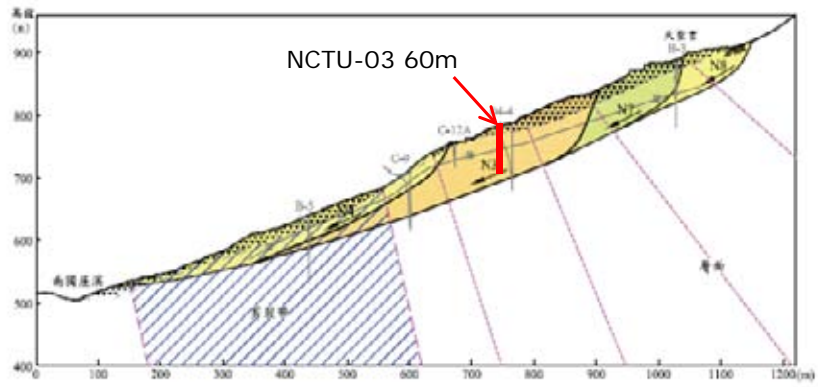
# 現場光纖監測儀器安裝

16



# 深層滑動B-B剖面

17



(青山工程顧問公司, 2006)

# 光纜配置圖

18



## 光纜佈設與自動化系統安裝

19



3.5G wireless transmission  
Readings updated every hour



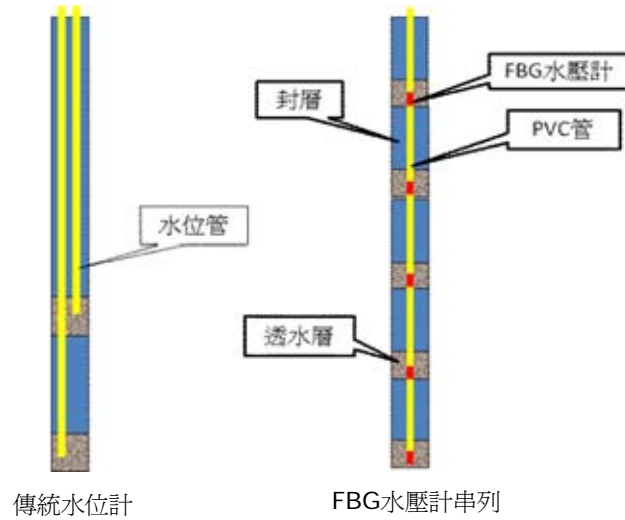
## 邊坡地層特性

20

- 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

# FBG水壓計串列

21

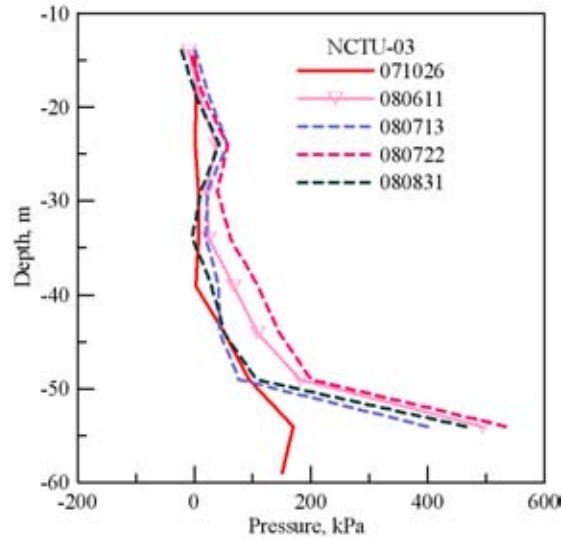


# NCTU03 60m鑽孔? 以5m間隔安裝FBG水壓計

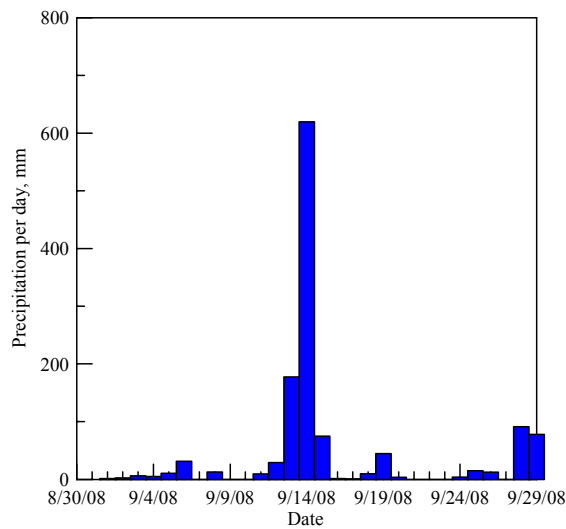
22



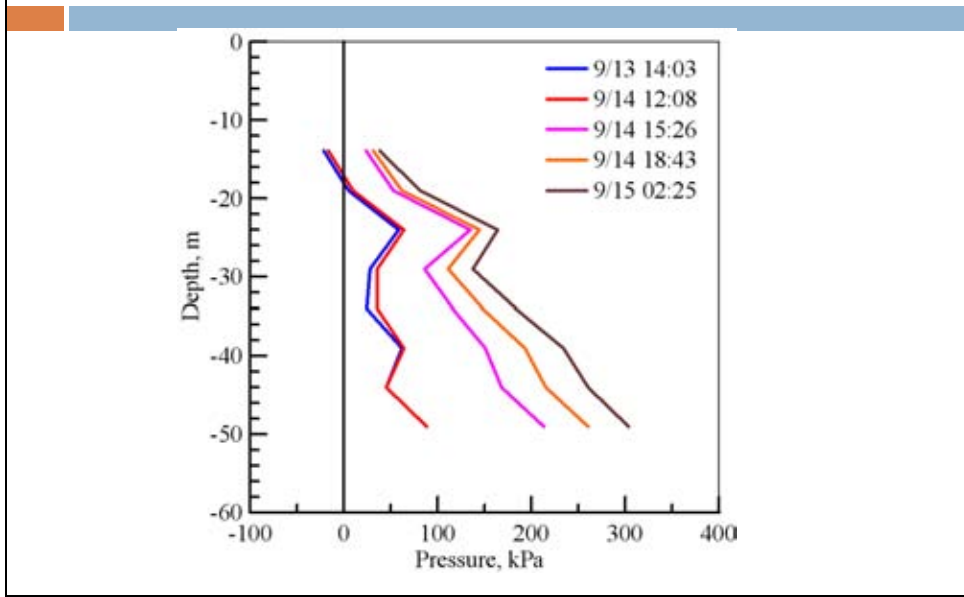
## NCTU03 辛樂克颱風前水壓讀數



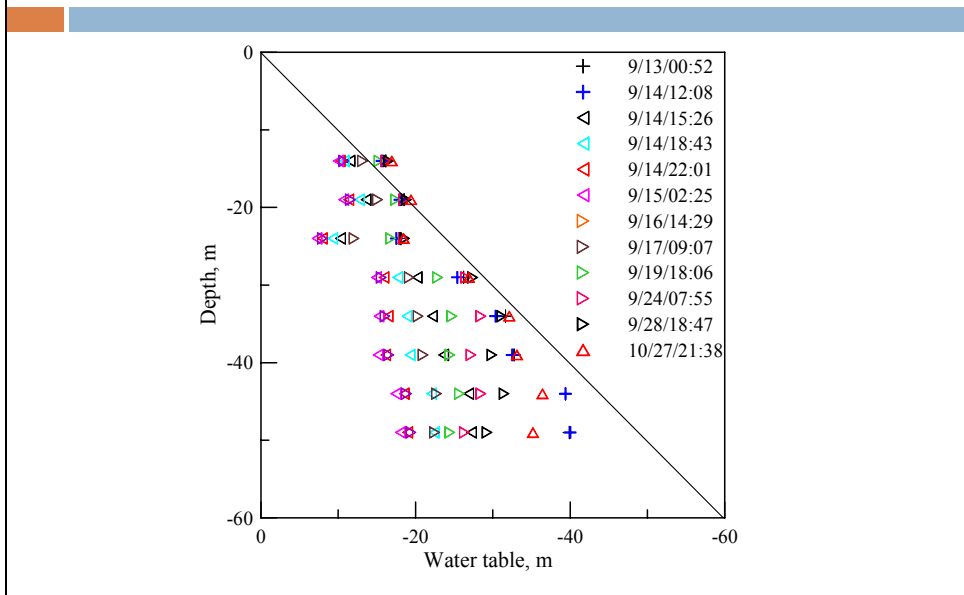
## 辛樂克颱風期間降雨紀錄

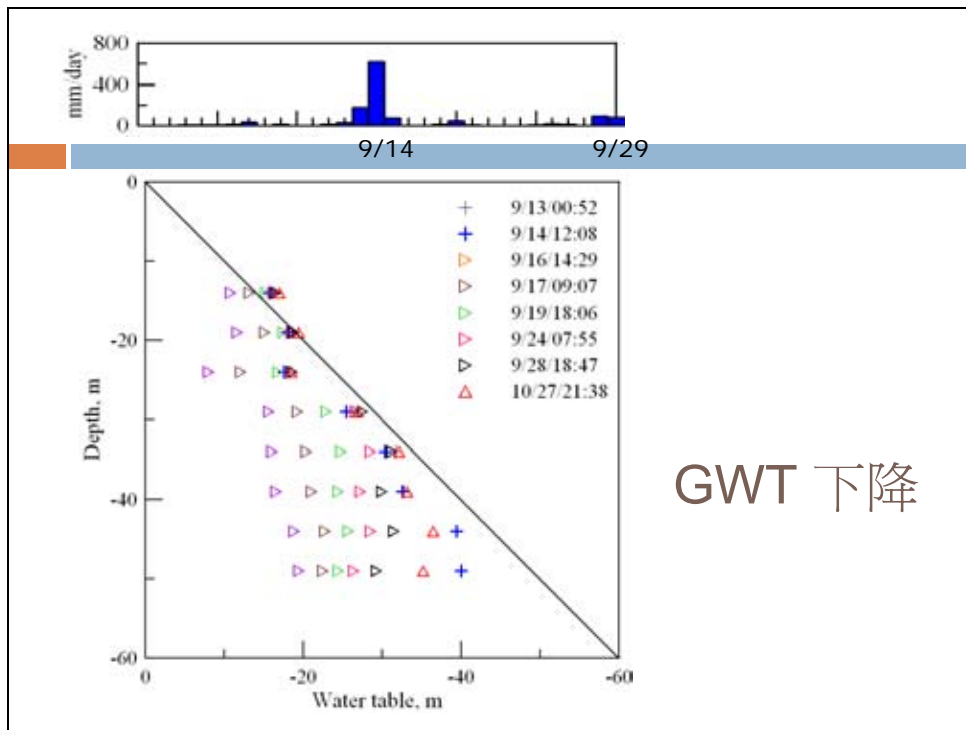
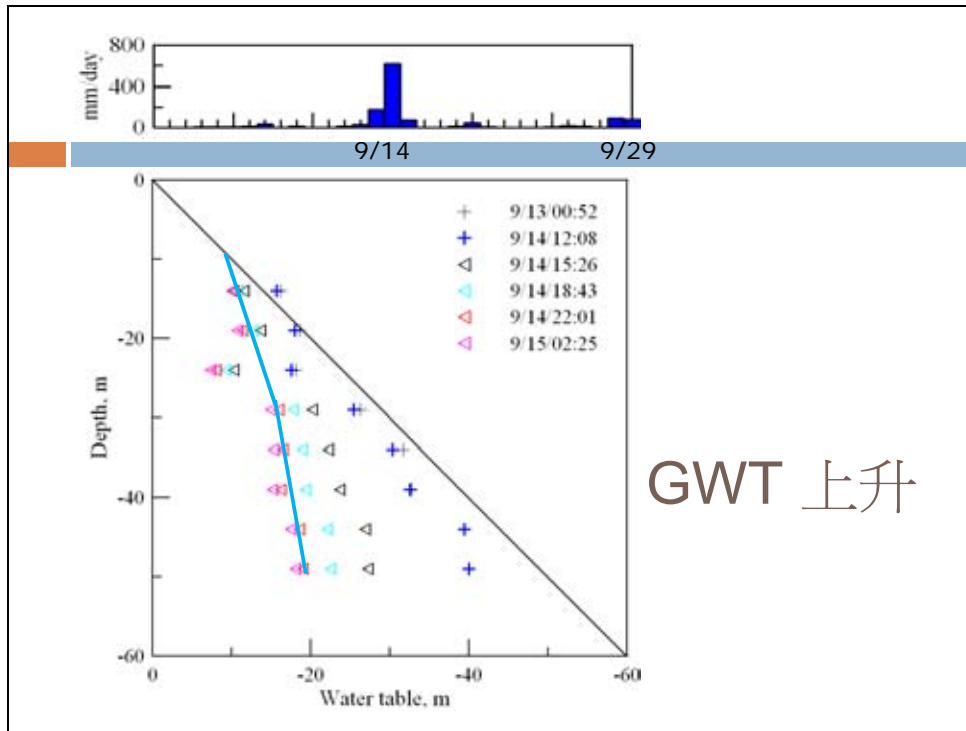


## 辛樂克颱風期間水壓讀數



## 辛樂克颱風期間水頭分佈

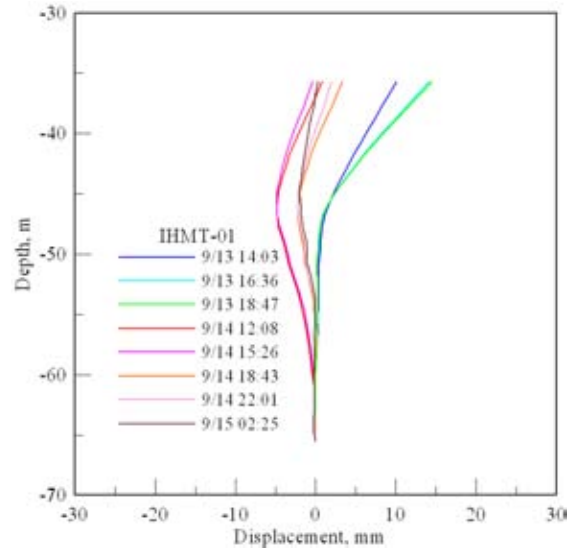






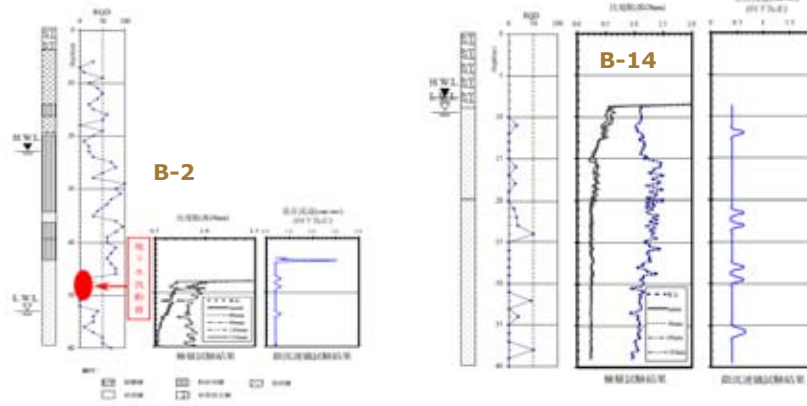
# IHMT-01 傾斜觀測管變形

29



# 垂直流不可忽略

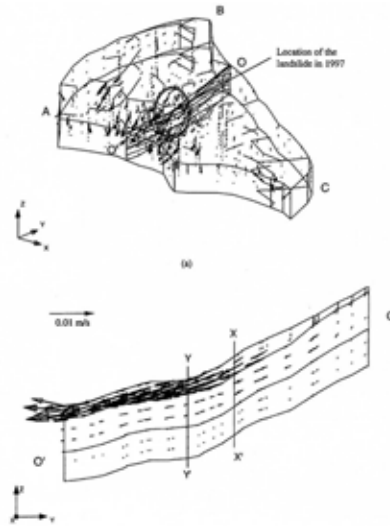
30



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

31



(取自Ng et al., 2001)

# 相關地下水流模型簡介

32

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：

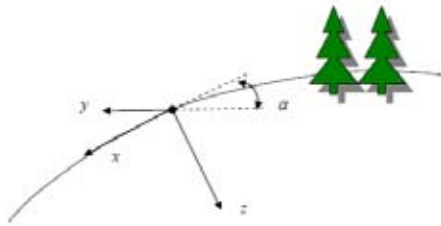
- 同時考慮垂直流與水平流。
- 地質不需要有類似阻水層與含水層規則互層之分布。
- 可較嚴謹地考慮降雨入滲至土壤之機制。

# 非飽和地下水流模型

33

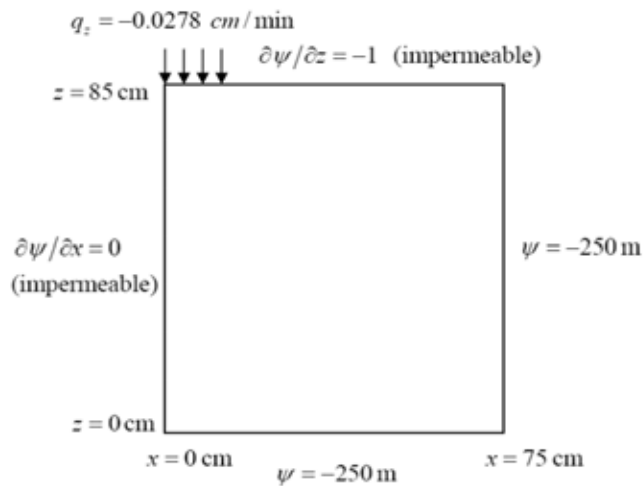
$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_1(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_2(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial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

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) ·



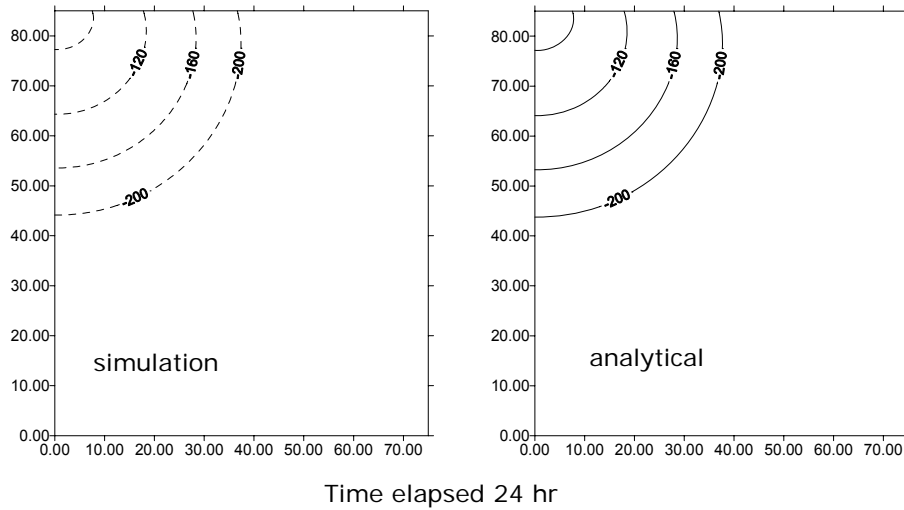
# 驗證案例區域示意圖

34



# 數值模擬與解析解之比較

35



# 都布非拘限地下水流模型

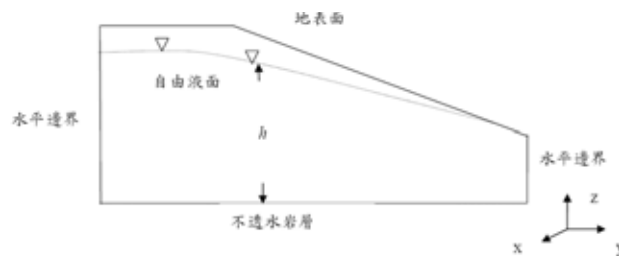
36

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

$h$  為水頭或水位(hydraulic head)。

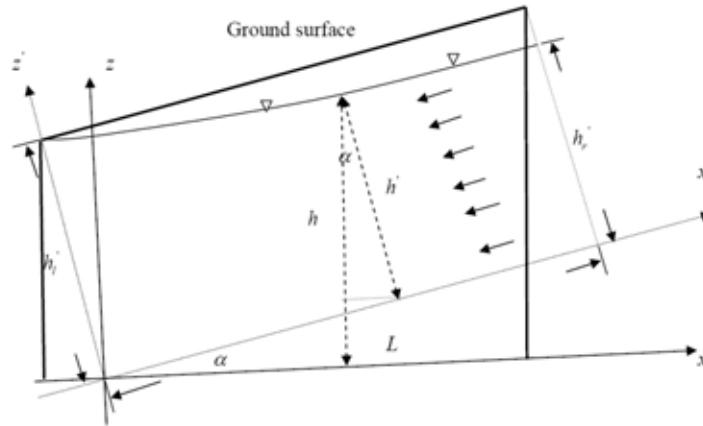
$K_x$  與  $K_y$  分別表示  $x$  與  $y$  方向之水力傳導係數(hydraulic conductivity)。

$S_y$  為 比出水係數(specific yield)。



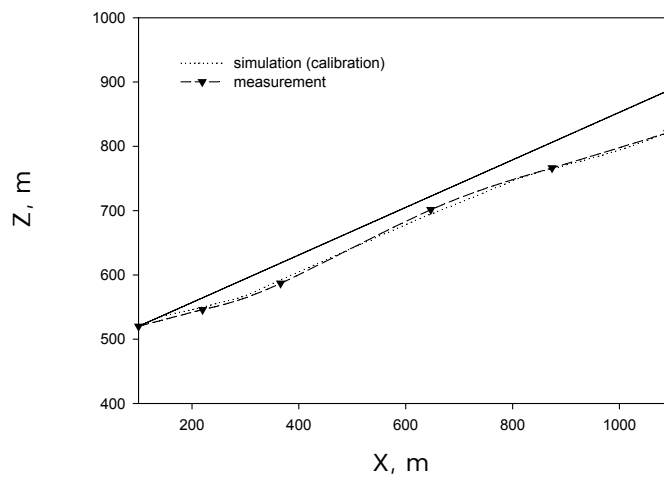
# 簡易地下水流模式

37



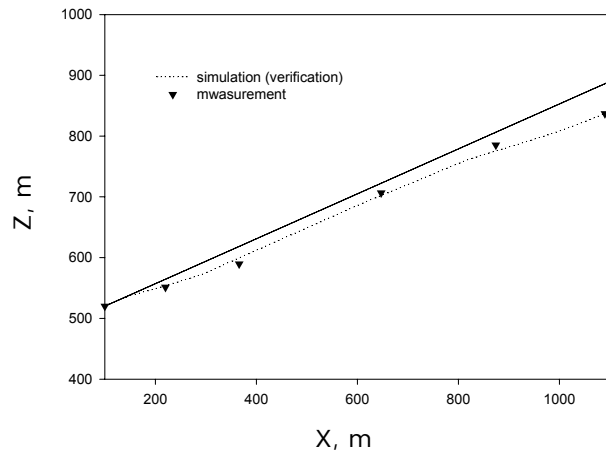
# 簡易地下水流模式標定 - 低水位

38



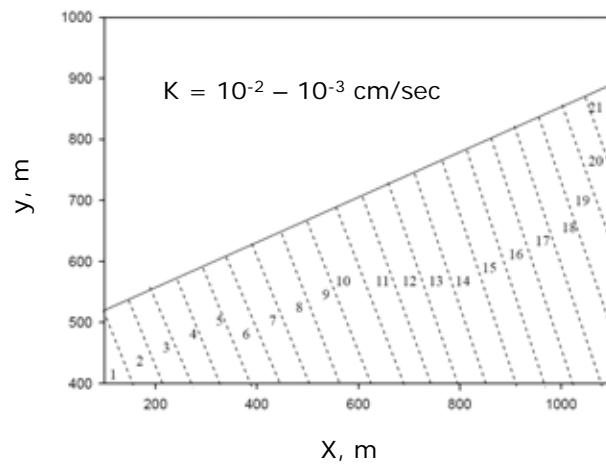
# 簡易地下水流模式標定 - 高水位

39



# 滲透係數分佈

40



## 結論

41

- 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
- 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
- 耐用性、使用成本與系統維修

## 後續工作

42

- 收集颱風季節之水壓與地層移動分佈與時間、雨量之關係
- 數值分析之繼續研發驗證 – 水頭分佈對滲流特性之影響
- 數值分析與係地監測數據之整合 – 根據水頭分佈做預警之可能
- 低成本地層位移監測

