

100-46-7531  
MOTC-IOT-99-H1DB007

# 全光纖式邊坡穩定監測系統整合 與現地應用測試 (4/4)



交通部運輸研究所

中華民國 100 年 4 月

100-46-7531  
MOTC-IOT-99-H1DB007

# 全光纖式邊坡穩定監測系統整合 與現地應用測試 (4/4)

著者：邱永芳、黃安斌、饒正、李瑞庭  
陳志芳、何彥德

交通部運輸研究所

中華民國 100 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(4/4)  
/邱永芳等著.--初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，  
民 100.04  
面 ； 公分  
ISBN 978-986-02-7408-0 (平裝)

1. 防災工程 2. 山坡地 3. 光纖感測

445.5

100004828

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(4/4)

著 者：邱永芳、黃安斌、饒 正、李瑞庭、陳志芳、何彥德  
出版機關：交通部運輸研究所  
地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號  
網 址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版>中心出版品)  
電 話：(04) 26587176  
出版年月：中華民國 100 年 4 月  
印 刷 者：  
版(刷)次冊數：初版一刷 100 冊  
本書同時登載於交通部運輸研究所臺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 臺北市中山區松江路 290 號 F1•電話：(02)2510207  
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010000558

ISBN：978-986-02-7408-0 (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。

100

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試  
(4/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1010000558

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(4/4)			
國際標準書號 (或叢刊號) ISBN978-986-02-7408-0(平裝)	政府出版品統一編號 1010000558	運輸研究所出版品編號 100-46-7531	計畫編號 99-H1DB007
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：饒正 研究人員：陳志芳 聯絡電話：04-26587113 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、李瑞庭、何彥德 地址：300 新竹市大學路 1001 號 聯絡電話：03-5712121	研究期間 自 99 年 3 月 至 99 年 10 月	
關鍵詞：光纖光柵、地下水流模型、邊坡穩定分析、有效應力、地下水			
<p><b>摘要：</b></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，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。然而，現場邊坡崩塌機制往往受到地表入滲或側向水流影響，使得土壤有效應力降低而發生破壞。根據相關研究數值分析顯示，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。如使用傳統方法在鑽孔內量測一至兩個深度水壓，再以線性內差的方法來估算水壓分佈會有明顯的誤差，此現象也顯示設置土層內分佈式水壓監測系統之重要性。</p> <p>本研究是研發及整合光纖式感測器與自動化解讀/數據傳輸設備，藉由光纖感測器分佈感測之優點，量測地層水壓及位移分佈，並應用於臺 18 線阿里山公路五彎仔路段。計畫期間，經歷辛樂克、莫拉克與凡那比颱風，都能夠有效發揮監測功能，完整紀錄颱風期間監測點地層內各深度水壓及位移變化。透水壓監測資料，結合數值分析，建立現場地下水流模型，分析現場邊坡穩定性並建立預警基準，提供相關單位做決策參考依據。</p> <p><b>成果與效益：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 完成光纖式地滑與水壓監測系統，可供交通部公路總局第五區養護工程處建立該區域地下水分佈與流向，併作為管理單位研擬安全管理之具體指標。</li> <li>2. 監測系統完成後可加入「公路防救災決策支援系統」供公路管理單位作為防災及減災之功效。</li> </ol>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
100 年 4 月	182	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。
<p><b>機密等級：</b></p> <p><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</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:</b> Integration and Field Testing of an All Fiber Optic slope stability monitoring system (4/4)			
<b>ISBN (OR ISSN)</b> ISBN978-986-02-7408-0 (pbk)	<b>GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER</b> 1010000558	<b>IOT SERIAL NUMBER</b> 100-46-7531	<b>PROJECT NUMBER</b> 99-H1DB007
<b>DIVISION:</b> Harbor & Marine Technology Center <b>DIVISION DIRECTOR:</b> Chiu Yung-fang <b>PRINCIPAL INVESTIGATOR:</b> Jao Cheng <b>PROJECT STAFF:</b> Chen Jyh-fang <b>PHONE:</b> (04) 26587113 <b>FAX:</b> (04) 26564418			<b>PROJECT PERIOD</b> FROM March 2010 TO October 2010
<b>RESEARCH AGENCY:</b> National Chiao Tung University, Disaster Prevention and Water Environment Research Center <b>PRINCIPAL INVESTIGATOR:</b> Huang An-bin <b>PROJECT STAFF:</b> Huang An-bin, Lee Jui-ting, Ho Yen-te <b>ADDRESS:</b> #1001, Ta Hsueh Rd., Hsin Chu 300, Taiwan, R.O.C <b>PHONE:</b> (03) 5712121			
<b>KEY WORDS:</b> Fiber Bragg grating, ground water flow numerical model analysis, Slope stability, Effective stress, Groundwater			
<b>ABSTRACT:</b> <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. 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 safety hazards may prevent the critical instrument readings be taken when they are needed the most. Many automated electronic devices have been developed recently. These devices can be costly and subject to electromagnetic interferences and lightning damage when deployed in the field. In comparison with electronic devices, the optic fiber sensors are passive in nature with no electronic circuitry. The optic signals can be easily transmitted by tens of kilometers through light. Multiple sensors can be connected to a single optic fiber for distributive sensing. The objective of this research is to develop and integrate the optical fiber sensors and the automated interrogation system. The system was deployed at a test site at the Five Turn Point of Highway 18 near Alishan. A series of optic fiber sensors were installed in boreholes to monitor the pore water pressure and ground displacement distribution. The system has survived typhoons Sinlaku, Molake and Fanapi and demonstrated their effectiveness. The overall slope stability can be analyzed by integrating the pore pressure readings and stress analysis. The proximity of failure can be ascertained by comparing the state of effective stress according to the pore pressure measurements and stress analysis and its relationship with the failure envelope. Following this concept, a framework for slope stability warning system has been proposed and experimented.</p>			
<b>ACHIEVEMENT AND BENEFIT :</b> <p>The monitoring system can provide references and applications of the disaster prevention of the roadside slope collapses for the Highway Bureau and parties that may be concerned with promoting disaster prevention technique for the maintenance management of mountain areas in Taiwan.</p>			
<b>DATE OF PUBLICATION</b> April 2011	<b>NUMBER OF PAGES</b> 182	<b>PRICE</b> 200	<b>CLASSIFICATION</b> <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(4/4)

## 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
圖目錄 .....	VII
表目錄 .....	XIII
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
第二章 重要文獻回顧 .....	2-1
2.1 光纖光柵原理簡述 .....	2-1
2.2 光纖光柵節理式偏斜儀 .....	2-4
2.3 光纖光柵節理式偏斜儀之改良 .....	2-6
2.4 光纖光柵水壓計 .....	2-7
2.5 光纖光柵水壓計之改良 .....	2-11
2.6 光纖光柵傾斜/加速度感測器 .....	2-14
2.6.1 FBG-I/A 加速度感測原理 .....	2-15
2.6.2 FBG-I/A 傾斜感測原理 .....	2-18
2.7 布里淵 (Brillouin) 散射原理 .....	2-21
2.7.1 激發性 Brillouin 散射原理 .....	2-23
2.7.2 自發性 Brillouin 散射原理 .....	2-25

2.7.3	低解析可承受大變形之光纖感測器 .....	2-26
2.7.4	低解析可承受大變形之光纖感測器之室內標定 .....	2-29
2.7.5	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 .....	2-31
2.8	地下水流數值模擬 .....	2-35
第三章	光纖監測系統優化與維護 .....	3-1
3.1	光纖監測系統之孔位位置配置與選定要素說明 .....	3-1
3.2	光纖監測系統目前運作狀況說明 .....	3-2
3.2.1	光纖監測儀器監測數據說明 .....	3-2
3.2.2	光纖自動化監測系統優化與維護說明 .....	3-6
第四章	歷年現場監測儀器數據與成果比較 .....	4-1
4.1	辛樂克與莫拉克颱風期間現場監測儀器資料 .....	4-1
4.2	光纖傳感器與傳統監測儀器效能評估 .....	4-13
第五章	研究場址地下水流模擬 .....	5-1
5.1	現場地下水流數值模式簡介 .....	5-1
5.1.1	SEEP/W 程式理論說明 .....	5-1
5.1.2	MODFLOW 程式理論說明 .....	5-5
5.2	阿里山公路五彎仔路段全區域地下水流模擬結果說明 .....	5-6
5.3	B-B 剖面地下水流模擬結果說明 .....	5-10
5.3.1	辛樂克颱風現場地下水流模擬測試結果 .....	5-11
5.3.2	莫拉克颱風現場地下水流模擬測試結果 .....	5-15
第六章	邊坡穩定分析與破壞潛勢定義說明 .....	6-1
6.1	邊坡破壞模式說明 .....	6-1

6.2	邊坡穩定分析方法與室內環剪模擬實驗介紹.....	6-1
6.2.1	邊坡穩定分析方法介紹.....	6-1
6.2.2	室內環剪模擬實驗介紹.....	6-3
6.3	現場邊坡初始應力狀態之建立.....	6-7
6.4	邊坡破壞潛勢定義說明.....	6-11
6.5	阿里山公路五彎仔路段邊坡破壞分析.....	6-14
第七章	光纖式與電子式感測器成本與效益分析.....	7-1
7.1	光纖式與電子式感測器成本比較.....	7-1
7.2	光纖式與電子式感測器效益分析.....	7-1
第八章	結論與建議.....	8-1
8.1	結論.....	8-1
8.2	建議.....	8-2
	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	期中報告簡報資料.....	附錄 3-1
附錄四	期末報告簡報資料.....	附錄 4-1

## 圖 目 錄

圖 2.1 光纖光柵反射原理示意圖 (Kersey, 1992) .....	2-3
圖 2.2 光纖光柵感測機制示意圖 (簡旭君, 2003) .....	2-3
圖 2.3 FBG 偏斜儀設計示意圖 .....	2-5
圖 2.4 節理式設計之訊號放大效應 .....	2-5
圖 2.5 鋁擠型偏斜儀支架設計概念圖 .....	2-6
圖 2.6 製作完成之鋁擠型偏斜儀支架 .....	2-6
圖 2.7 光纖光柵內連續遞增之漸變應變 .....	2-7
圖 2.8 連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改變 .....	2-8
圖 2.9 FBG 波長飄移分析示意圖 .....	2-8
圖 2.10 漸變週期式 FBG 水壓計構造示意圖 .....	2-10
圖 2.11 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖 .....	2-10
圖 2.12 等週期波長式 FBG 水壓計標定結果 .....	2-11
圖 2.13 FBG 水壓計改良斷面示意圖 .....	2-12
圖 2.14 改良式 FBG 水壓計 .....	2-12
圖 2.15 大量串接 FBG 水壓計與傳統水位管之比較 .....	2-13
圖 2.16 FBG 水壓計現場安裝構想圖 .....	2-14
圖 2.17 FBG-I/A 側面剖示圖 .....	2-16
圖 2.18 FFBG-I/A 平面剖示圖 .....	2-16
圖 2.19 FFBG-I/A 傾斜感測示意圖 .....	2-19
圖 2.20 FFBG-I/A 實體 .....	2-20
圖 2.21 FBG-I/A 傾斜標定 .....	2-20
圖 2.22 Brillouin 散射在纖核(core)中的示意圖(陳進福, 2001) .....	2-21

圖 2.23 光纖內的 Rayleigh、Brillouin、Raman 散射的頻譜圖 (陳進福, 2001).....	2-22
圖 2.24 Brillouin 散射功率對入射光功率的關係圖.....	2-23
圖 2.25 (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).....	2-26
圖 2.26 光纖拉伸計實體圖 .....	2-27
圖 2.27 光纖拉伸計初始與受力後狀態圖 .....	2-28
圖 2.28 光纖拉伸計固定於 PVC 管 .....	2-28
圖 2.29 光纖拉伸計拉伸測試結果圖 .....	2-29
圖 2.30 光纖拉伸計固定於 PVC 管彎曲標定示意圖 .....	2-30
圖 2.31 光纖拉伸計固定於 PVC 管之彎曲標定圖 .....	2-31
圖 2.32 光纖拉伸計架設於室內九米傾斜觀測管 .....	2-32
圖 2.33 對照組傾斜管大肚形變形 .....	2-33
圖 2.34 光纖拉伸計(定性)大肚形變形測試結果圖 .....	2-33
圖 2.35 對照組傾斜管喇叭形變形圖 .....	2-34
圖 2.36 光纖拉伸計(定性)喇叭形變形測試結果圖 .....	2-34
圖 2.37 都布假設之非拘限地下水流模型示意圖 .....	2-35
圖 2.38 多水層地下水流模型示意圖 .....	2-36
圖 2.39 坡地非飽和地下水流模型示意圖 .....	2-37
圖 3.1 全光纖式監測儀器配置圖 (青山工程顧問公司, 2007) .....	3-2
圖 3.2 NCTU-03 60m 光纖光柵水壓監測孔水壓變化圖.....	3-3
圖 3.3 IHMT-01 200m 光纖光柵傾斜觀測觀變化圖 .....	3-4
圖 3.4 NCTU-04 50m 光纖光柵水壓監測孔水壓變化圖.....	3-4
圖 3.5 NCTU-01 20m 光纖光柵傾斜觀測觀變化圖.....	3-5

圖 3.6	IHMT-01 200m 光纖光柵傾斜觀測觀變化圖 .....	3-5
圖 3.7	自動化光纖光柵解讀系統監測畫面 .....	3-7
圖 3.8	光纖感測器自動化擷取系統地層位移畫面 .....	3-7
圖 3.9	光纖感測器自動化擷取系統水壓分布及歷時畫面 .....	3-8
圖 3.10	自動化光纖解讀系統警訊發送畫面 .....	3-8
圖 3.11	低耗電量工業型電腦 .....	3-9
圖 3.12	工業級網路路由器 .....	3-9
圖 3.13	高供電量(4800W)不斷電系統.....	3-10
圖 3.14	現場光纖監測儀器擷取系統圖 .....	3-11
圖 3.15	台科大網路即時監測畫面圖 .....	3-12
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...4-6	
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	辛樂克颱風前期現場地下水位高程變化圖	5-8
圖 5.2	辛樂克颱風後期現場地下水位高程變化圖	5-8
圖 5.3	莫拉克颱風前期現場地下水位高程變化圖	5-9
圖 5.4	莫拉克颱風後期現場地下水位高程變化圖	5-9
圖 5.5	現場地下水流模型圖	5-10
圖 5.6	辛樂克颱風現場降雨量	5-12
圖 5.7	NCTU-03 水壓觀測井於辛樂克颱風 3D 歷時變化圖	5-13
圖 5.8	考量入滲邊界之 SEEP/W 現場地下水流模型圖	5-13
圖 5.9	低水位穩態狀態於辛樂克颱風之模擬值與實際監測值比較圖	5-14
圖 5.10	高水位穩態狀態於辛樂克颱風之模擬值與實際監測值比較圖	5-14
圖 5.11	暫態狀態下於辛樂克颱風之模擬值與實際監測值比較圖	5-15
圖 5.12	莫拉克颱風現場降雨量	5-16
圖 5.13	NCTU-03 水壓觀測井於莫拉克颱風 3D 歷時變化圖	5-17
圖 5.14	低水位穩態狀態於莫拉克颱風之模擬值與實際監測值比較圖	5-17
圖 5.15	高水位穩態狀態於莫拉克颱風之模擬值與實際監測值比較圖	5-18
圖 5.16	暫態狀態下於莫拉克颱風之模擬值與實際監測值比較圖	5-18
圖 6.1	邊坡坡地崩塌類型圖	6-1
圖 6.2	破壞面切片作用力示意圖	6-3
圖 6.3	利用環剪試驗模擬邊坡滑動面之應力元素	6-4

圖 6.4 應力狀態於實際邊坡與環剪儀器 (Sassa et al.,2004).....	6-5
圖 6.5 模擬飽和砂土層於不排水條件下受剪行為 (Sassa et al.,2004).....	6-5
圖 6.6 Minamata 邊坡斷面圖 (Sassa et al.,2004) .....	6-6
圖 6.7 模擬 Minamata 邊坡受剪應力路徑結果 (Sassa et al.,2004) .....	6-7
圖 6.8 現場邊坡模型網格示意圖 .....	6-8
圖 6.9 模擬邊坡各元素 $\sigma_{xx}$ 應力大小示意圖 .....	6-8
圖 6.10 模擬邊坡各元素 $\sigma_{yy}$ 應力大小示意圖 .....	6-9
圖 6.11 模擬邊坡各元素 $\sigma_{zz}$ 應力大小示意圖 .....	6-9
圖 6.12 模擬邊坡各元素 $\sigma_{xy}$ 應力大小示意圖 .....	6-10
圖 6.13 模擬邊坡各元素 $p$ 應力大小示意圖 .....	6-10
圖 6.14 模擬邊坡各元素 $q$ 應力大小示意圖 .....	6-11
圖 6.15 不同摩擦角所對應 p-q 圖之斜率說明 .....	6-12
圖 6.16 邊坡安全預警機制流程圖 .....	6-13
圖 6.17 低水位時期 B-B 剖面安全係數等高線(莫拉克颱風).....	6-14
圖 6.18 T=14.4hr 時 B-B 剖面安全係數等高線(莫拉克颱風).....	6-15
圖 6.19 T=28.8hr 時 B-B 剖面安全係數等高線(莫拉克颱風).....	6-15
圖 6.20 T=43.2hr 時 B-B 剖面安全係數等高線(莫拉克颱風).....	6-16
圖 6.21 高水位時 B-B 剖面安全係數等高線(莫拉克颱風).....	6-16
圖 6.22 SLOPE/W 模擬 B-B 剖面邊坡圖 .....	6-17
圖 6.23 NCTU-03 孔位於莫拉克颱風時各深度安全係數變化軌跡圖 .....	6-17

## 表 目 錄

表 2-1 光纖式水壓感測器規格說明 .....	2-12
表 4-1 光纖傳感器與傳統監測儀器效能評估表 .....	4-13
表 5-1 水力傳導係數與體積含水量之預測方法 .....	5-3
表 5-2 水力傳導係數與體積含水量之預測方法 .....	5-5
表 5-3 Modflow 程式參數設定說明 .....	5-6
表 5-4 現場觀測井於辛樂克颱風期間地下水位變化表 (青山顧問報告, 2009).....	5-7
表 5-5 現場觀測井於莫拉克颱風期間地下水位變化表 (青山顧問報告, 2009).....	5-7
表 5-6 地下水流模型參數說明表 .....	5-11
表 6-1 現場邊坡模型參數設定說明 .....	6-7
表 6-2 邊坡破壞潛勢範圍大小 .....	6-12
表 7-1 光纖感測器與傳統電子感應器成本差異比較 .....	7-1
表 7-2 光纖感測器與傳統電子感應器效益比較表 .....	7-2

# 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項目為：

1. 現場光纖監測感測器與自動化光纖解讀系統量測設備維護與優化。
2. 完成現場數值模擬，包含現場水壓變化與雨量關係等。
3. 光纖監測資料擷取與現場數值分析結果網頁呈現。(利用現場監測資料輸入至現場數值模擬分析(邊坡穩定分析)，求得雨量與安全係數之關係，以提供警戒值、行動值與管理值與相關單位(公路局等)，且該監測資料會與台科大網路系統整合，以網頁方式呈現。
4. 光纖與傳統感應系統結果之比較以及效益評估。

## 第二章 重要文獻回顧

研究團隊在使用光纖感測技術於大地工程監測，以及地下水流數值模擬方面已有多數之研發經驗。本章針對計畫中將使用之光纖感測技術原理以及地下水流數值模擬理論做一敘述。

### 2.1 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(李瑞庭, 2005)。

其布拉格反射波長 $\lambda_B$  為

$$\lambda_B = 2n\Lambda \dots\dots\dots (2-1)$$

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 2.1 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 2.2 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(2-1)式可以得到

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

根據應變的定義

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \dots\dots\dots (2-3)$$

得到

$$\Delta l = \left(\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}\right)l = \left(\frac{\frac{\Delta\lambda_B}{2n}}{\frac{\lambda_B}{2n}}\right)l \dots\dots\dots (2-4)$$

因此

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \dots\dots\dots (2-5)$$

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

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K \frac{\Delta l}{l} = K\varepsilon \dots\dots\dots (2-6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{K\lambda_B} \dots\dots\dots (2-7)$$

當光纖光柵受到溫度變化時，波長飄移量可由下式表示

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\xi + \alpha)\Delta T = K_T \times \Delta T \dots\dots\dots (2-8)$$

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

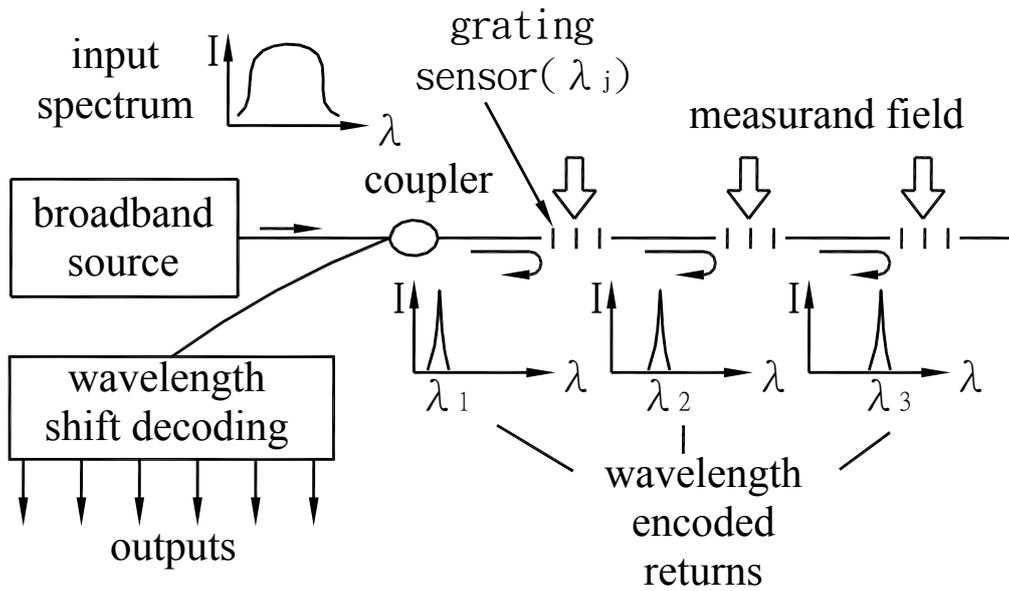


圖 2.1 光纖光柵反射原理示意圖 (Kersey, 1992)

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  $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{nm}$ 。

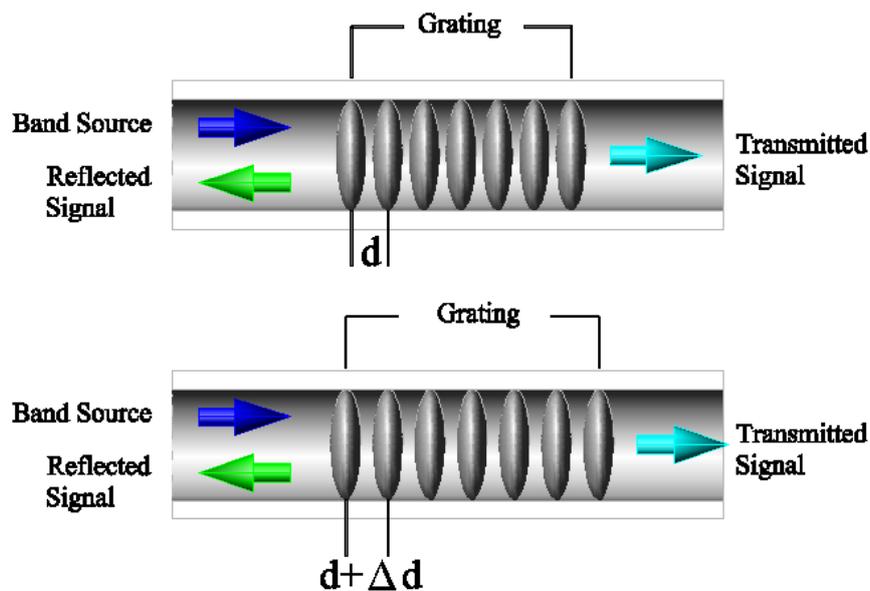


圖 2.2 光纖光柵感測機制示意圖 (簡旭君, 2003)

## 2.2 光纖光柵節理式偏斜儀

本團隊目前所發展出之 FBG 地層監測技術稱之為光纖光柵節理式偏斜儀(FBG segmented deflectometer, FBG-SD)，能夠與傳統測傾管配合使用。FBG-SD 是將一長約 215mm，直徑約 10mm，使用塑鋼製成之柔性軟管(Flexible tube)外，相隔 180 度黏貼成對的光纖光柵。在此應變感測元件兩端加裝鋁片剛性材料如圖 2.3 所示，將兩端剛性材料所受到的應力傳到中間柔性材料上，此時對柔性材料會有應變集中的現象，也就會有將應變放大的效果。在應變感測元件兩端加裝鋁片剛性材料構成節理 (Segment) 之部分。節理又分量測節理 (Measurement segment) 與延伸節理 (Extension segment) 兩部分。量測節理上裝有支架 (Stud)，其大小與形狀與傳統測傾管 (Inclinometer casing) 及其內部之凹槽相匹配，藉由彈簧 (Spring) 之拉力來保持支架與傾斜觀測管凹槽之密合。延伸節理為一硬體，沒有任何自由度，其唯一目的為根據量測需要來改變或延長量測節理間之距離。量測節理內安裝兩個軸承，其中一個軸承與監測管方向同軸 (軸向軸承，Longitudinal bearing)，其目的在於解除感測器受監測管軸向力 (包括重力與摩擦力) 與扭力對感測器之影響，另一個軸承與監測管方向垂直 (橫向軸承，Lateral bearing)，安裝在量測節理之中心點，其目的在於限制量測節理只能以橫向軸承為中心旋轉而增加結果分析之可靠度。柔性軟管之一端以雙螺絲固定於量測節理內，另一端插入軸向軸承中，可以延軸向滑動或轉動，柔性軟管之中心與橫向軸承在同一位置。偏斜儀在現場組裝，以量測節理與延伸節理交互連接而形成，連結完成之偏斜儀隨即放入測傾管中 (圖 2.4)。傾斜管因為地層滑動或被監測結構體變形而發生扭曲的時候，變形監測管經由光纖或其他應變感應器量測柔性軟管彎曲變化量，計算並累積變形監測管因地層移動而造成之彎曲角度，再根據此角度之變化來計算地層移動量。

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，根據標定結果計算，光柵波長改變 1 pm (解析儀所能讀取之最小 FBG 波長改變量) 所對應之，剛性段間之夾角改變量在 0.0012 與 0.0018 度之間。在監

測地層滑動時我們可以將多個 FBG 偏斜儀串接在一起，並將量測到的角度換算成側向位移量，偏斜儀能夠容許的彎曲角度可達 3.0 度上下。

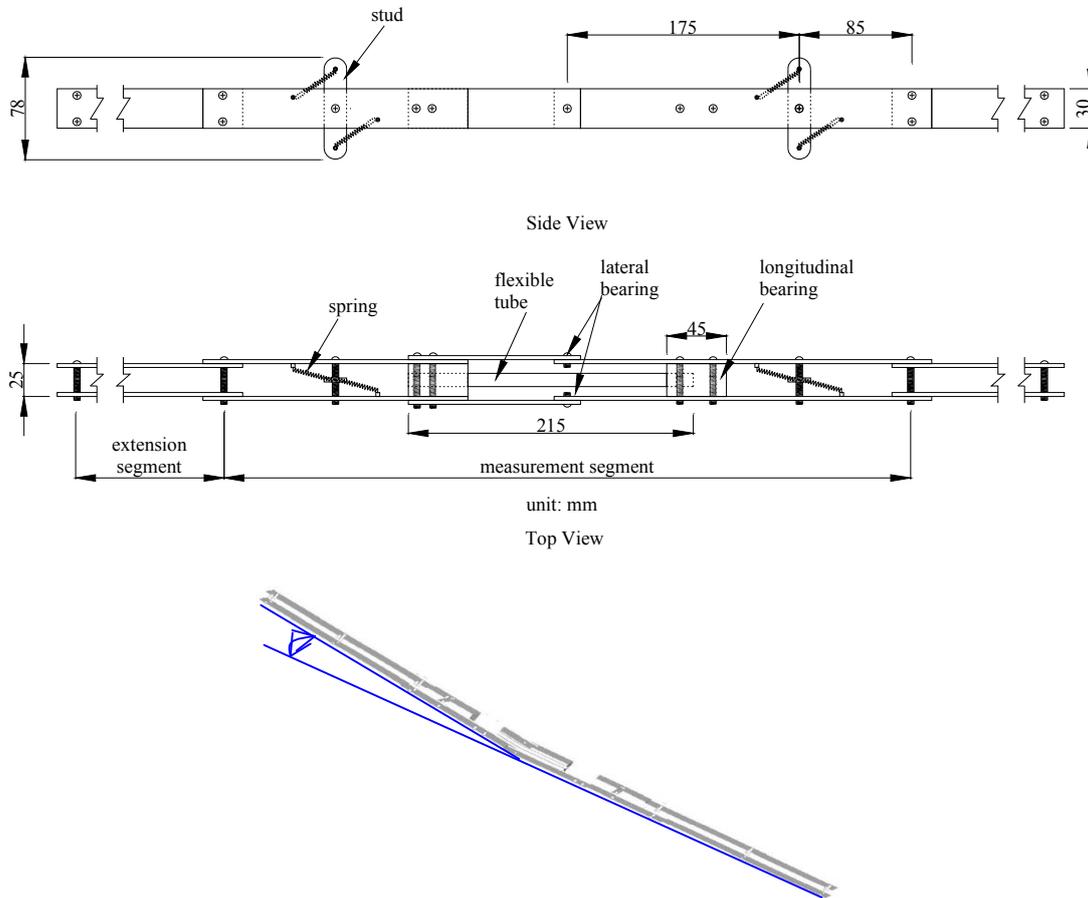


圖 2.3 FBG 偏斜儀設計示意圖

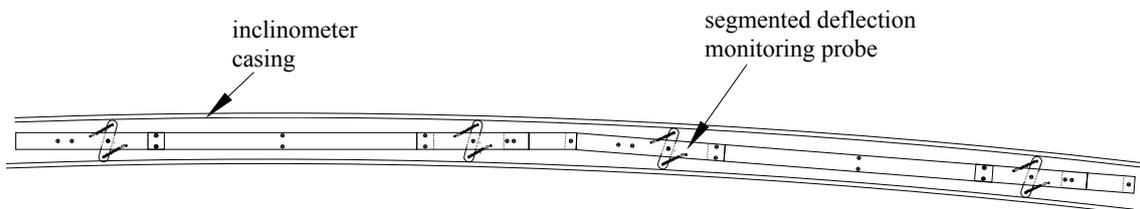


圖 2.4 節理式設計之訊號放大效應

### 2.3 光纖光柵節理式偏斜儀之改良

為便於將來大量安裝，本團隊已將原設計加以改良。偏斜儀支架改用鋁擠型，支架間之連接使用鋁粉壓鑄成型。改良設計之概念圖如圖 2.5 所示。

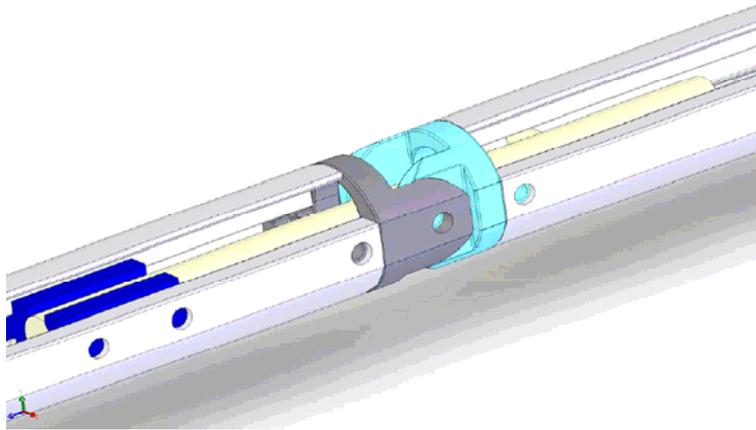


圖 2.5 鋁擠型偏斜儀支架設計概念圖

圖 2.6 展示製作完成之鋁擠型偏斜儀支架，新型設計之偏斜儀支架表面經過陽極硬化處理，耐用性更高，同時便於現場安裝。

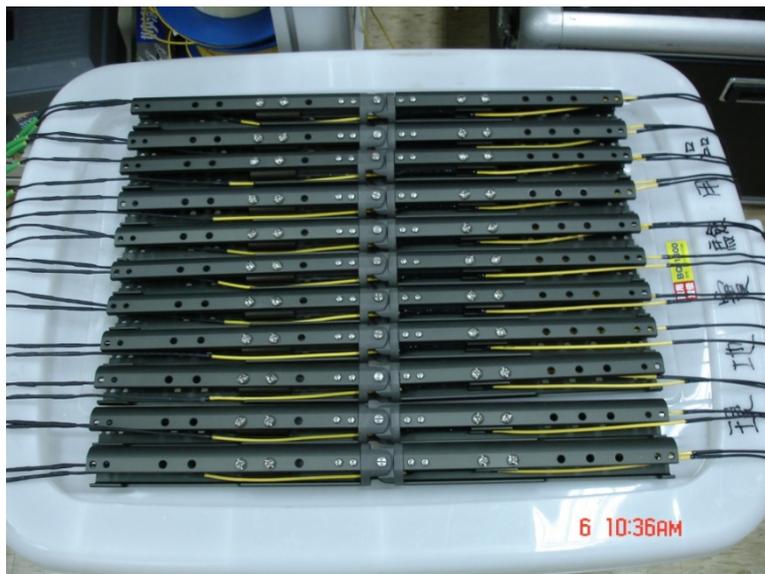


圖 2.6 製作完成之鋁擠型偏斜儀支架

本計畫所安裝之光纖光柵節理式偏斜儀既將使用改良型之鋁擠型偏斜儀。

## 2.4 光纖光柵水壓計

本團隊所研發之水壓計使用光纖光柵 (FBG) 做水壓計之解析方法使用 FBG 波峰漂移以及波峰寬度改變兩種方法來調解 (Modulate)，這兩種方法分別敘述如下：

漸變週期式 FBG 波峰寬度分析：漸變週期式 FBG 是指 FBG 內的光柵應變之分部是漸變的 (如圖 2.7)，假設一原週期均勻分佈之 FBG 當受到外力而產生漸變式應變時其 FBG 波峰寬度會變寬如圖 2.8 所示。

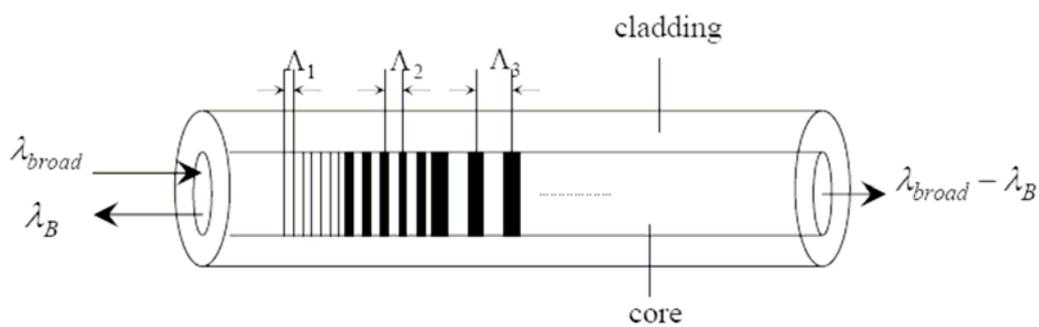


圖 2.7 光纖光柵內連續遞增之漸變應變

FBG 波峰飄移分析：FBG 受應變或溫度影響，易產生波長飄移 (圖 2.9)，假設一個 FBG 初始波長為  $\lambda_1$ ，當 FBG 受到外力或溫度之影響時，會使得 FBG 波峰往長波長飄移為  $\lambda_2$ ，而此波峰變寬量會正比於 FBG 應變量。

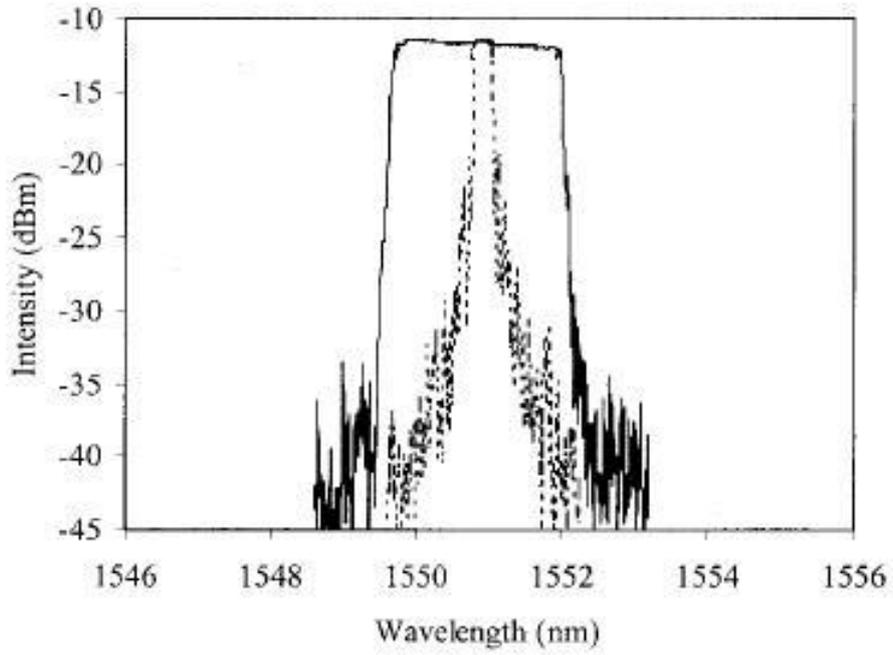


圖 2.8 連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改變

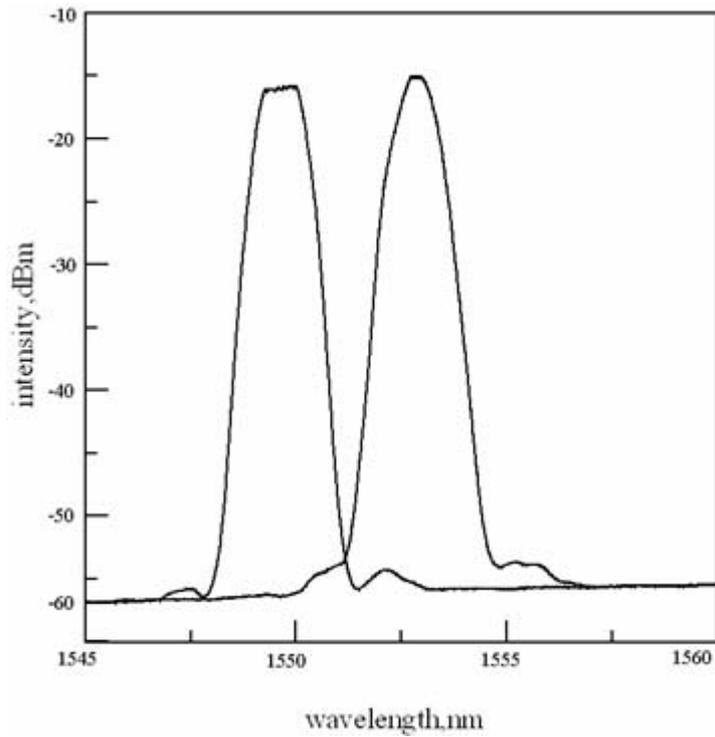


圖 2.9 FBG 波長飄移分析示意圖

採用漸變週期式 FBG 來製作水壓計如圖 2.10 所示。將 FBG 貼於圓形薄片上，可隨著所需要量測的範圍調整薄片的厚度，根據彈性力學分析，當此圓形薄片受到垂直於平面的壓力時，從圓心到邊界的應變會呈現先受伸張再受壓縮分布，因此貼於圓板上的 FBG 會發生漸變的型式，光柵所反射的頻譜會以較寬的形勢顯示，其波形反應會產生如圖 2.8 之現象，而其波峰寬度與壓力成正比。此設計之優點是 FBG 反應不受溫度變化之影響而結構簡單。

圖 2.11 展示使用等週期式使用 FBG 波峰飄移與壓力間之關係來設計。將 FBG 光纖之一端固定於水壓計底部使其不產生位移，另一端則黏著於於一彈性金屬薄膜上，當水壓計內部受壓力作用改變時金屬膜隨之變形，因此 FBG 所感受之應變也隨之變化。當金屬膜仍在彈性限度內，FBG 即呈現等週期式之變化，FBG 波峰值與壓力有一線性關係。但此一設計無法隔離溫度改變對 FBG 波峰值之影響，因此必須加入另一呆 (Dummy) FBG 做為感應溫度變化之用。

圖 2.12 展示等週期式 FBG 水壓計之標定結果。結果顯示，在 0 至 500kPa 範圍內讀數與壓力間有高度之線性關係，其相關係數 ( $R^2$ ) 在 0.998 以上，效果非常良好。等週期式 FBG 水壓計體積小直徑小於 1.5mm，適合於現階段安裝於現有之開孔式水位計內。

表 2-1 為說明光纖式水壓計量測範圍、感測器靈敏度及精度。

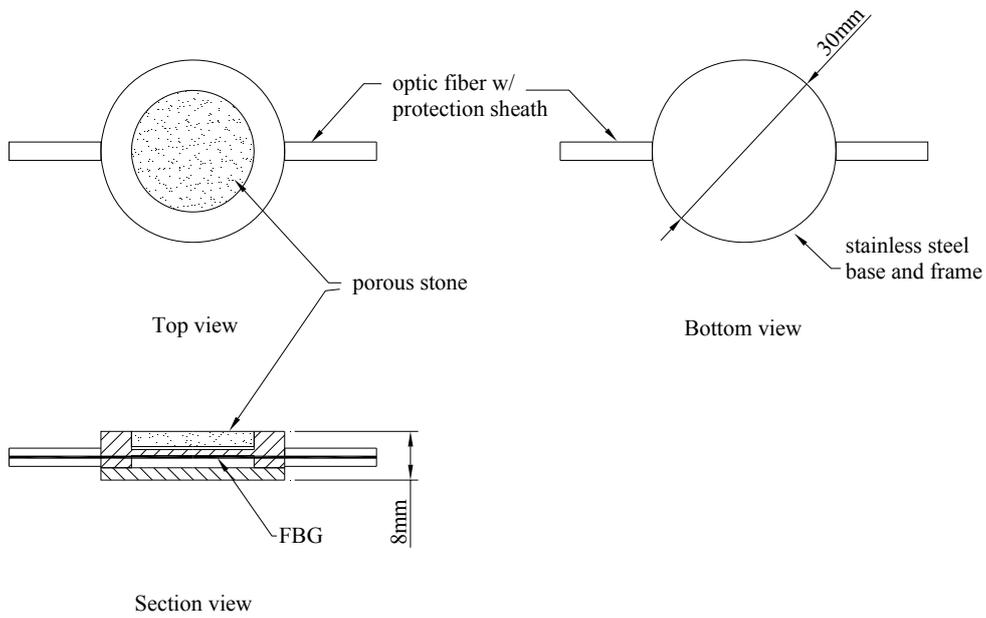


圖 2.10 漸變週期式 FBG 水壓計構造示意圖

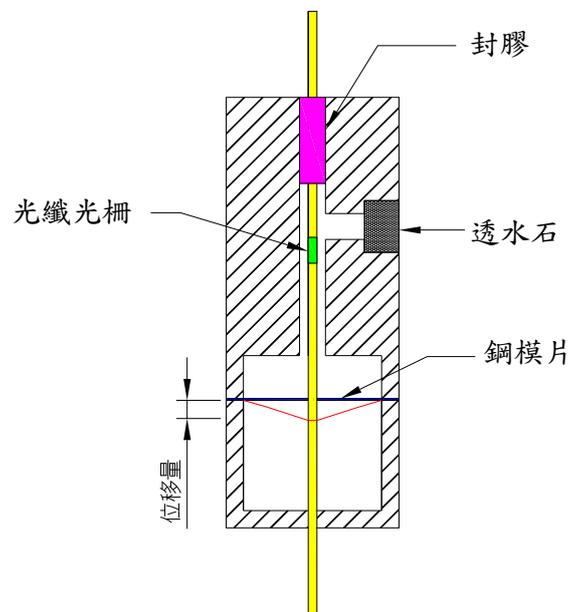


圖 2.11 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖

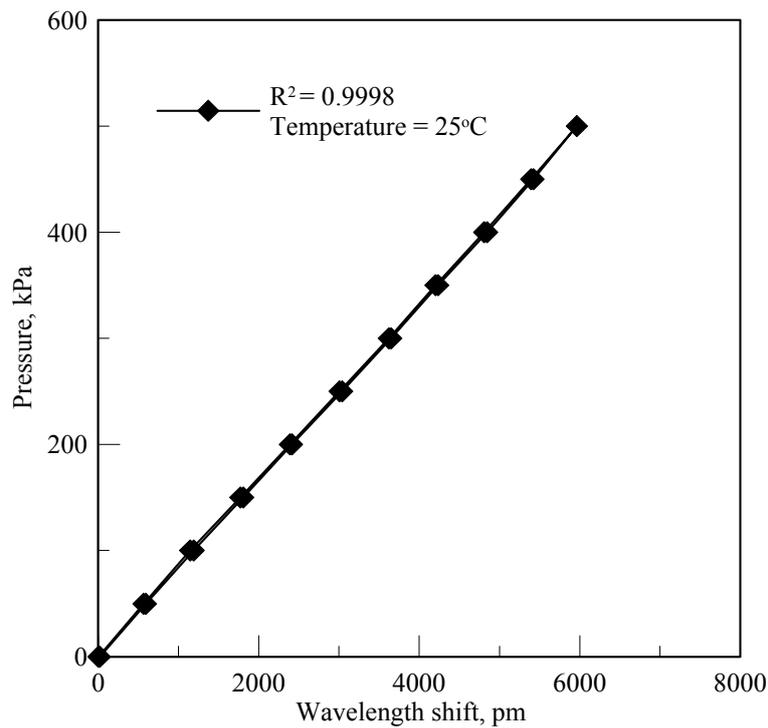


圖 2.12 等週期波長式 FBG 水壓計標定結果

表 2-1 光纖式水壓感測器規格說明

項 目	光纖式水壓感測器
量測範圍	0~1 MPa
感測器靈敏度	0.1 kPa
感測器精度	±0.434% 量測範圍

## 2.5 光纖光柵水壓計之改良

本計畫使用如圖 2.11 所示之等週期波長式 FBG 水壓計。根據圖 2.12 所示 FBG 水壓計標定結果，其靈敏度為 0.285 kPa/pm，也就是說，當 FBG 水壓計能感測外側 28.5 mm 以上水頭變化。

由於 FBG 水壓計之量測訊號是藉由光纖傳輸線來傳輸，當於現場裝設時，可能因人為因素而造成損壞，所以本團隊將 FBG 水壓計裝置

於長 50 cm，直徑為 27 mm 之 PVC 管內，如圖 2.13、圖 2.14 所示。而 FBG 水壓計本體位於兩側阻絕層之內並固定於 PVC 管之中心處，於該 PVC 管外圍施作間距 5 mm 寬 2 mm 的篩孔及包裹不織布，使得 FBG 水壓計能感測外圍水壓或水位的變化。

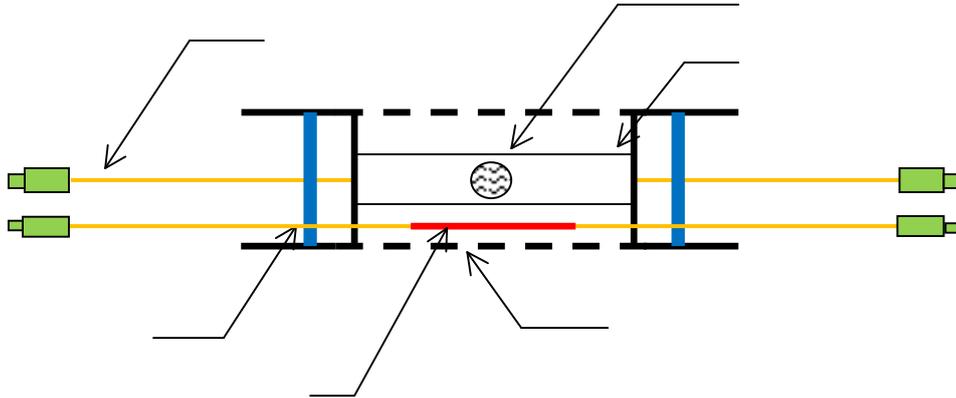


圖 2.13 FBG 水壓計改良斷面示意圖

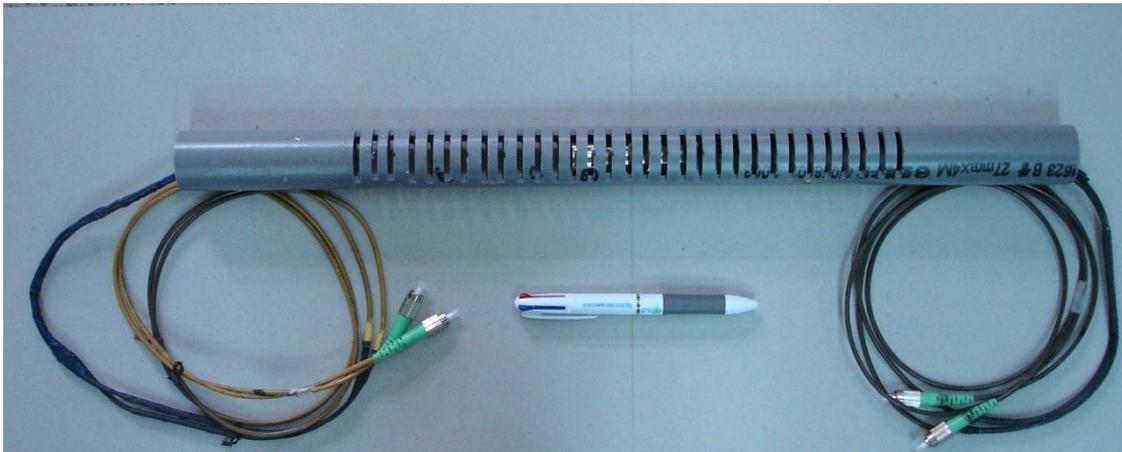


圖 2.14 改良式 FBG 水壓計

使用 PVC 管包覆的另一原因是本次安裝最多使用 10 個水壓計串連在一起，在監測技術上將是一創新。此一安裝與傳統鑽孔（直徑約 100mm）中最多只安裝兩個水位管間之比較展示於圖 2.15。為確保封層（使用白皂土顆粒）施工順利，PVC 管外圍必須保持平直而無凸出接頭，這是將 FBG 水壓計置入 PVC 管之另一原因。

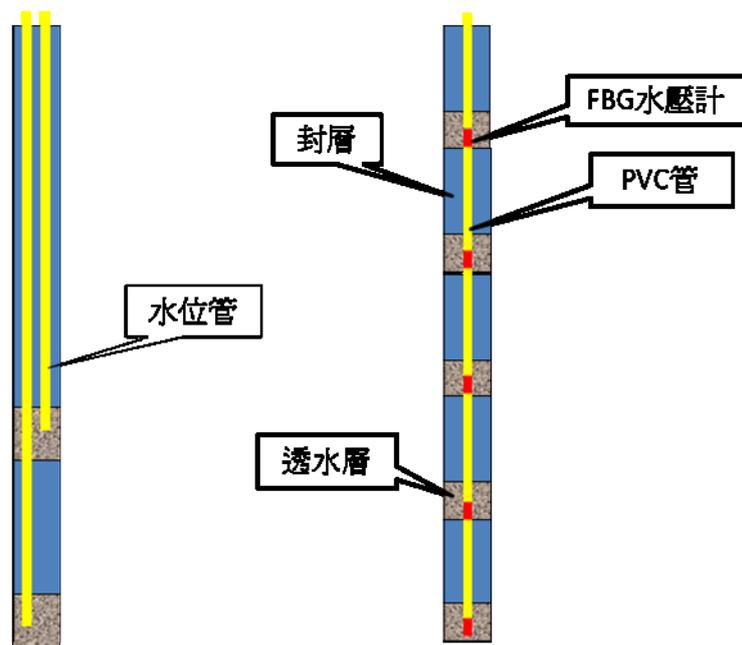


圖 2.15 大量串接 FBG 水壓計與傳統水位管之比較

本計畫採取的方式是首先將 FBG 水壓計固定於長 0.5 m、直徑為 27 mm (約 1 英吋) 的 PVC 管內，而 PVC 管外將予以打孔且外圍包裹不織布如圖 2.14 所示，使得該範圍透水，而該部分稱為感測單元。至於連接部份，以相同直徑大小之 PVC 管作銜接以保護光纖傳輸線，其在鑽孔內之裝設示意圖如圖 2.16 所示。感測單元周圍之鑽孔以透水材料 (例如礫石) 回填，連接部份周圍則以不透水材料 (白皂土) 回填，如圖 2.16 所示。

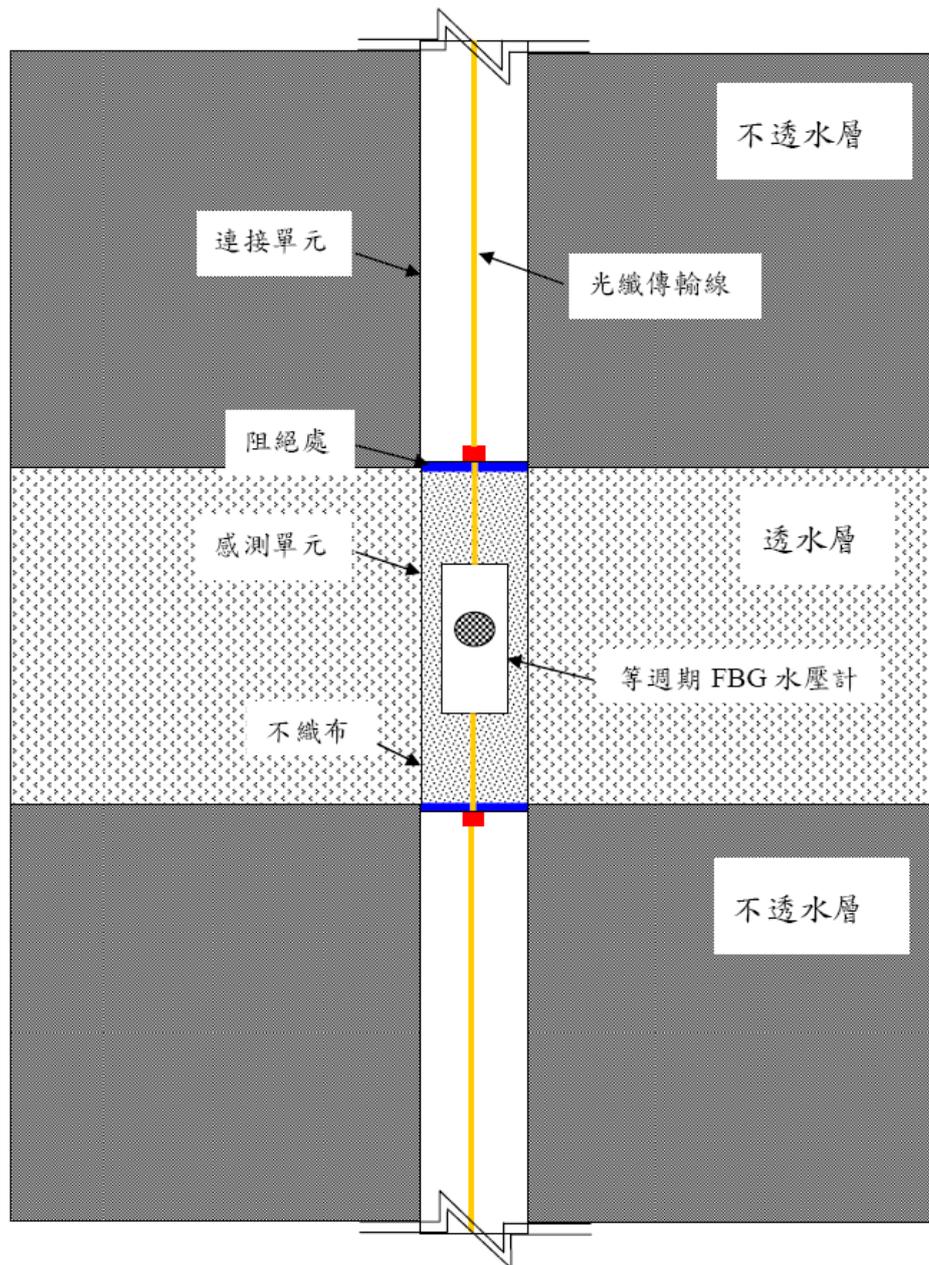


圖 2.16 FBG 水壓計現場安裝構想圖

## 2.6 光纖光柵傾斜/加速度感測器

本團隊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 2.17 與圖 2.18 所示(黃安斌、何彥德, 2008)。加速度量測單元是由兩質量相同幾何形狀

對稱之重塊以彈簧片連接而形成。彈簧片之彈力將分別黏著於固定夾塊上下之兩個光纖光柵 (FBG1 與 FBG2) 拉緊，固定夾塊以螺絲固定於支架上。彈簧片透過軸承套與軸承支撐於支架上。重塊、彈簧片與光纖光柵所形成之組合體可以軸承為軸心旋轉但無法做線性位移。

### 2.6.1 FBG-I/A 加速度感測原理

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 (如圖 2.17 所示)，感測器之系統運動公式如下：

$$2M\ddot{x} + (r_s K_s + r_F K_F)x = -2Ma_x \quad (2-9)$$

其中：

$M$  = 重塊質量

$\ddot{x}$  = x 方向位移對時間之二次微分

$K_s$  = 彈簧片扭轉方向之勁度

$K_F$  = 光纖光柵張力方向之勁度

$r_s$  = 彈簧片扭轉與 x 向位移之轉換係數

$r_F$  = 光纖光柵張力方向 x 向位移之轉換係數

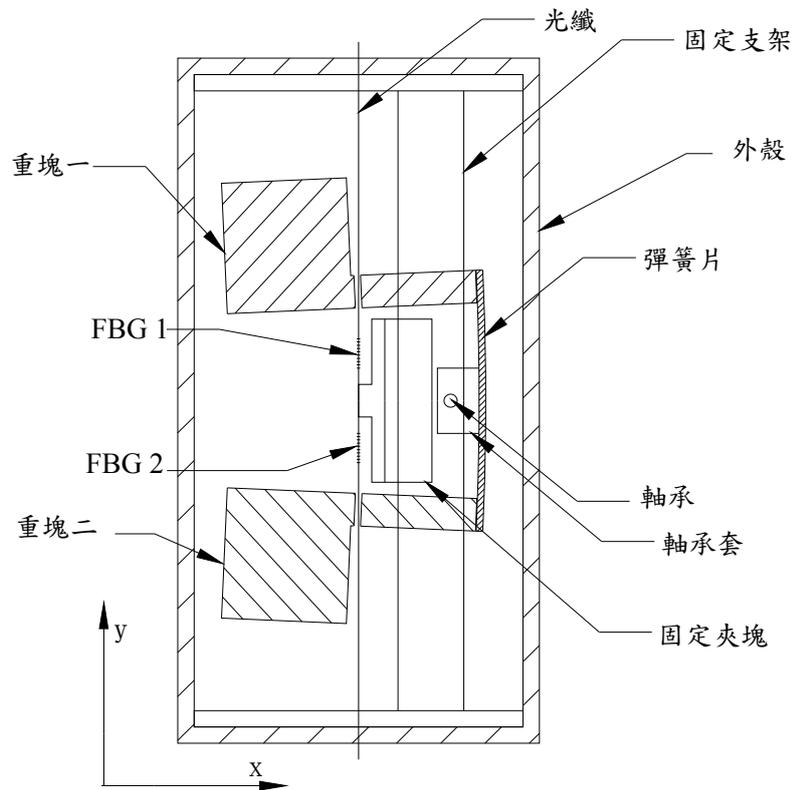


圖 2.17 FBG-I/A 側面剖示圖

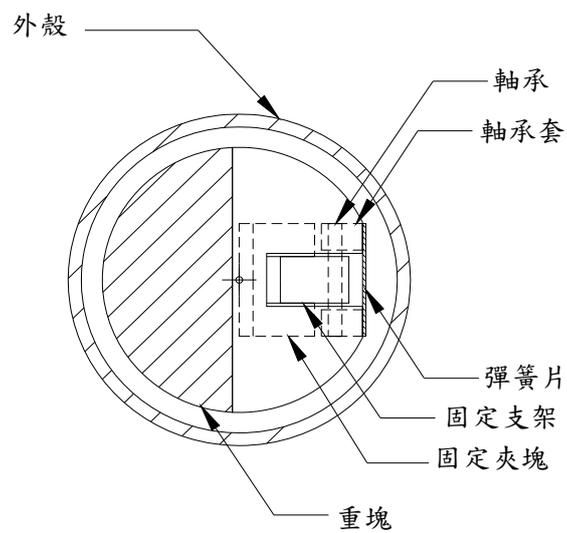


圖 2.18 FBG-I/A 平面剖示圖

將公式兩邊除以  $2M$ ，得到：

$$\ddot{x} + \omega_o^2 x = -a_x \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

其中：

$$\omega_o = \sqrt{(r_s K_s + r_F K_F) / 2M} \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

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：

$$a_x = A_x e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

其中：

$A_x$  = 振幅

重塊質量所對應之週期性振波為：

$$x = X e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (2-13)$$

將公式(2-12)與(2-13)重塊振幅代入公式(2-9)即可得到重塊質量振幅  $X$ ：

$$X = \frac{-1}{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 \omega_o^2} A_x \quad \dots\dots\dots (2-14)$$

光纖光柵所受應變  $\varepsilon_{FBG}$  與  $X$  關係為：

$$\varepsilon_{FBG} \approx -r_F X \quad \dots\dots\dots (2-15)$$

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。當重塊受重力影響使得此組合體受逆時針方力矩

(Moment) 而有旋轉之傾向，此一逆時針力矩 (M<sub>ccw</sub>) 為：

$$M_{ccw} = (2Mg) \times d_w \dots\dots\dots (2-16)$$

其中：

g = 重力加速度

d<sub>w</sub> = 重塊相對於軸承之力臂

### 2.6.2 FBG-I/A 傾斜感測原理

在無傾斜時 d<sub>w</sub> 與重塊重塊重塊重心軸向至軸承間延垂直於支架方向之距離 d<sub>M</sub> 相等。光纖光柵透過固定夾塊受制於支架產生反作用拉力與順時針方向之力矩 (M<sub>cw</sub>) 為：

$$M_{cw} = (2F_{FBG}) \times d_{FBG} \dots\dots\dots (2-17)$$

其中：

FFBG = 光纖光柵所受拉力之改變

d<sub>FBG</sub> = 光纖光柵相對於軸承之力臂

M<sub>ccw</sub> 與 M<sub>cw</sub> 大小相同方向相反，因此組合體無法旋轉。當感測裝置相對於重力方向產生傾斜角度 θ 時 (如圖 2.19 所示)，d<sub>w</sub> 隨傾斜角度改變，但 d<sub>FBG</sub> 及 d<sub>M</sub> 維持不變。此時 θ 與 F<sub>FBG</sub> 有以下之關係式：

$$F_{FBG} = \frac{Mgd_M \cos \theta}{d_{FBG}} \dots\dots\dots (2-18)$$

在固定夾塊上下方之光纖光柵所受拉力改變 FFBG 大小相同正負相反。利用此一特性可以抵銷溫度效應，因為溫度對固定夾塊上下方之光纖光柵所產生拉力改變 FFBG 大小與正負都相同。將固定夾塊上下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 2.20 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 2.21），根據標定結果計算，FBG 波長改變 1 pm（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  $-5^{\circ}$  至  $+5^{\circ}$  之間。

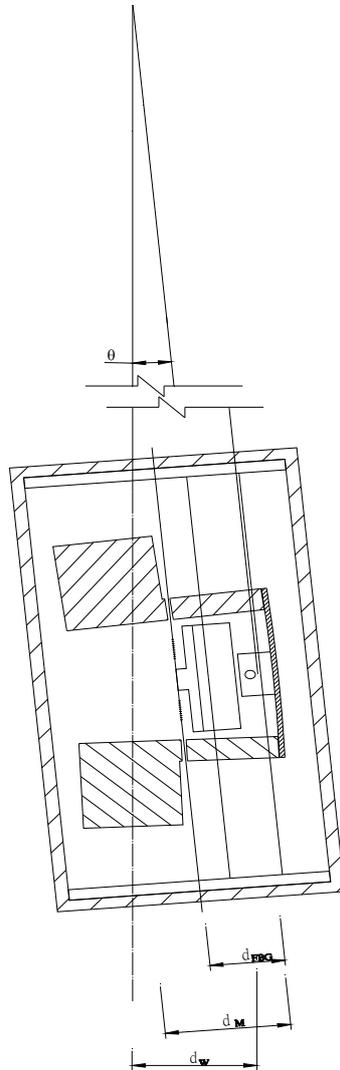


圖 2.19 FBG-I/A 傾斜感測示意圖



圖 2.20 FFBG-I/A 實體

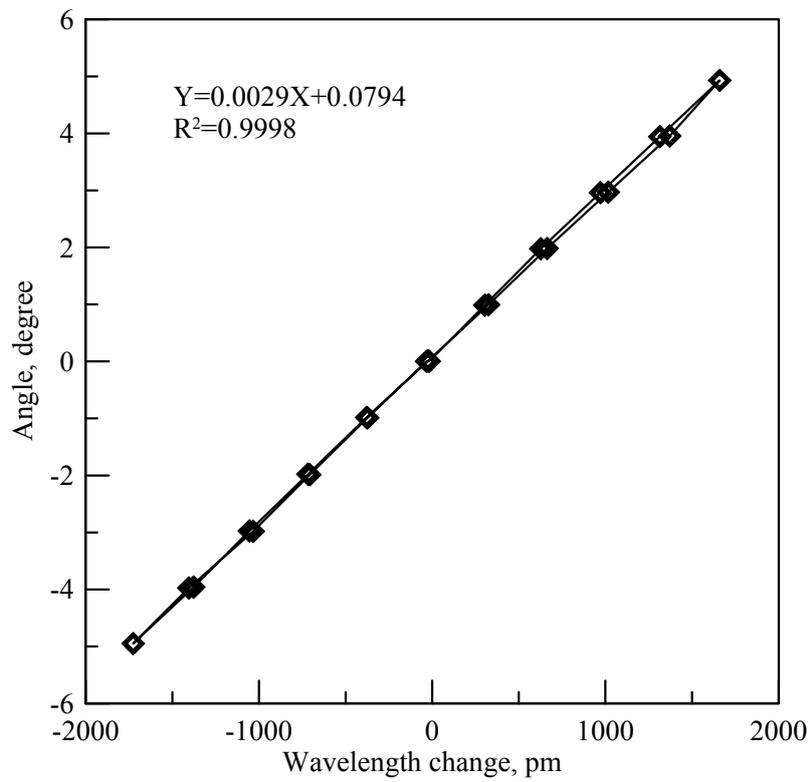


圖 2.21 FBGI/A 傾斜標定

## 2.7 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 2.22 所示。

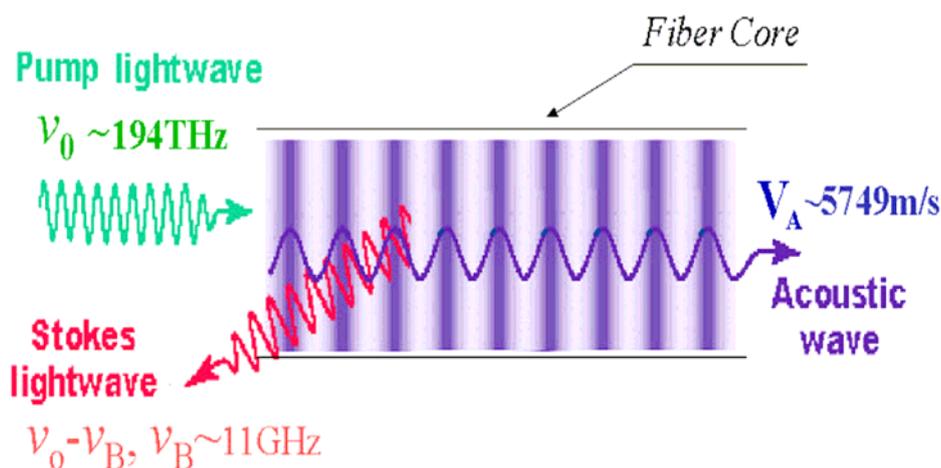


圖 2.22 Brillouin 散射在纖核(core)中的示意圖 (陳進福, 2001)

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相互作用。在兩者相互作用過程中，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 2.23 所示，為光纖內的 Rayleigh、Brillouin、Raman 散射的頻譜圖。

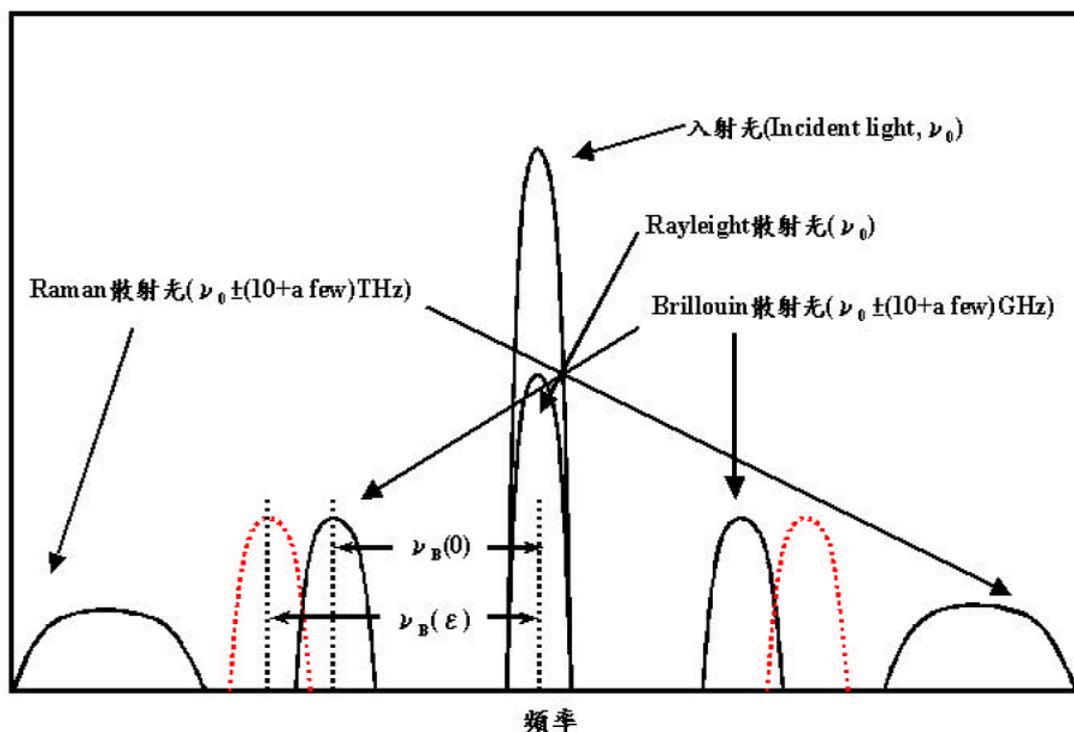


圖 2.23 光纖內的 Rayleigh、Brillouin、Raman 散射的頻譜圖  
(陳進福, 2001)

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，此時的最大頻率漂移值稱為 Brillouin 頻率，在向前散射時則降為零。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 2.24 可看出，Brillouin 散射功率對入射光功率的關係圖。

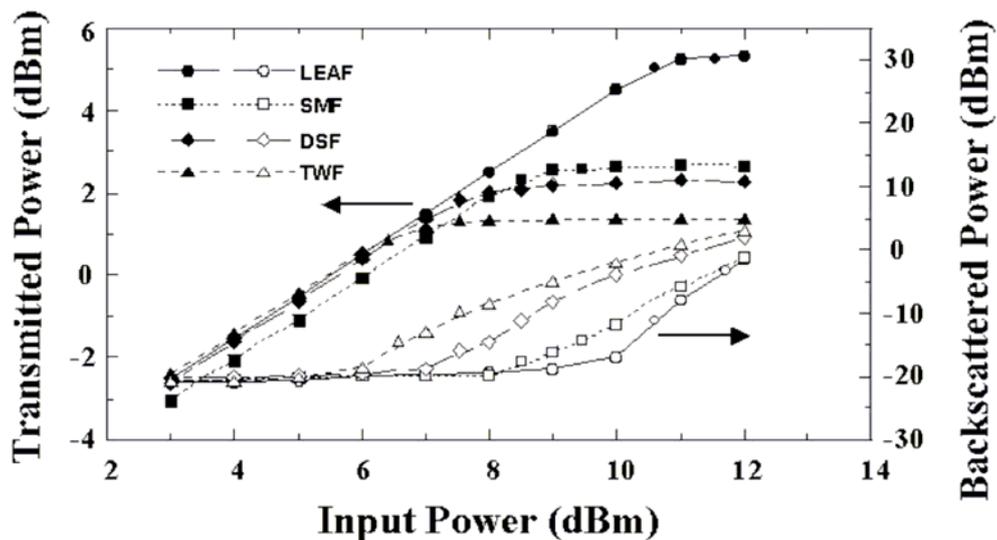


圖 2.24 Brillouin 散射功率對入射光功率的關係圖（陳進福, 2001）

### 2.7.1 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：

$$\omega_A = \omega_P - \omega_S \dots\dots\dots (2-19)$$

而其動量守恆關係式如下：

$$k_A = k_P - k_S \dots\dots\dots (2-20)$$

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：

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda_P} \dots\dots\dots (2-21)$$

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：

$$g_B(\nu) = \frac{2\pi\gamma_e^2}{c_0\epsilon_0^2\lambda_P^2\rho_0nV_A\Delta\nu_B} \dots\dots\dots (2-22)$$

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 $g_B \doteq 5 \times 10^{-11} \text{ m/W}$ 。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：

$$\Delta\chi = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{2} \frac{C\gamma_e^2}{\varepsilon_0} \frac{|E|^2}{2} \dots\dots\dots (2-23)$$

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。

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial \chi} = \Delta\chi = \frac{1}{4} \frac{C\gamma_e^2}{n^2 \varepsilon_0^2 c_0} I \dots\dots\dots (2-24)$$

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 $\Delta\nu_B = (\pi\tau_B)^{-1}$ 。

### 2.7.2 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2.25為單模光纖的背向布里淵散射頻譜，圖2.25 (a)所示為激發性

布里淵散射 ( Stimulated Brillouin Scattering ) 頻譜，及圖2.25 (b)所示為自發性布里淵散射 ( Spontaneous Brillouin Scattering ) 頻譜。

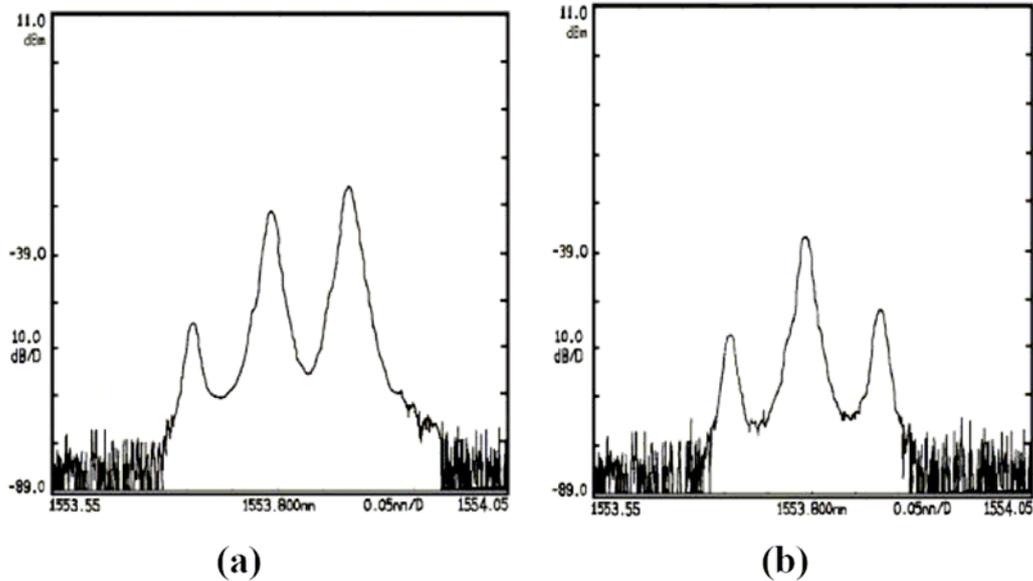


圖 2.25 (a) SMF 中的背向激發性布里淵散射頻譜  
(b)SMF 中的背向自發性布里淵散射頻譜(陳進福, 2001)

### 2.7.3 低解析可承受大變形之光纖感測器

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。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（5000m單模光纖售價新台幣3000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2.26所示，圖2.27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2.28為將光纖拉伸計固定於PVC管上之示意圖。



圖 2.26 光纖拉伸計實體圖

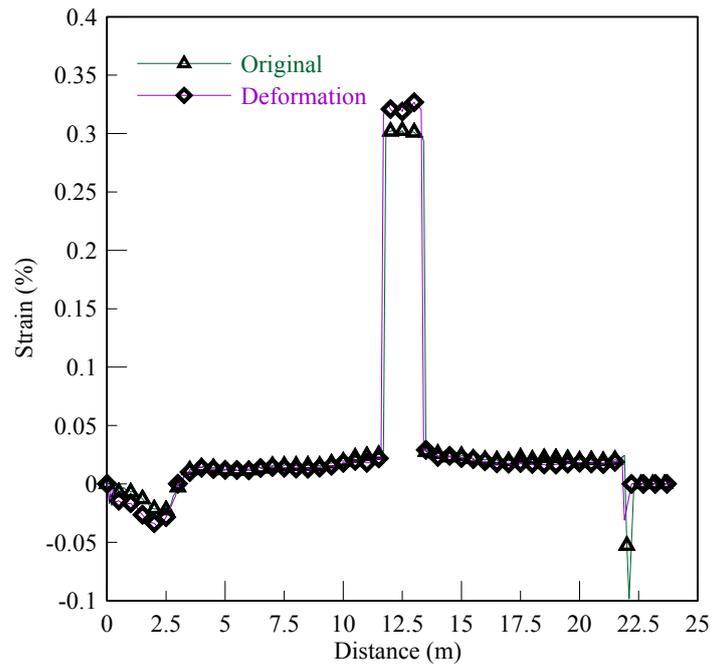


圖 2.27 光纖拉伸計初始與受力後狀態圖

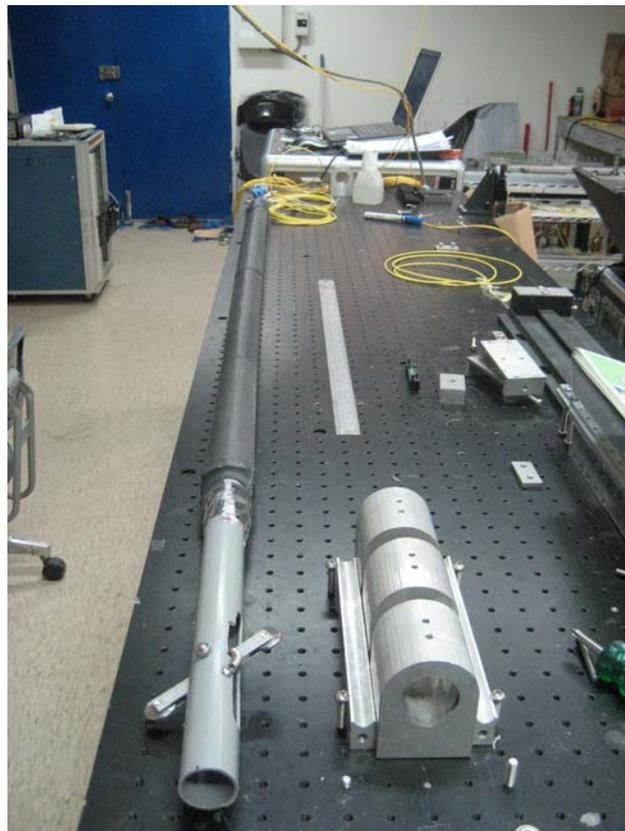


圖 2.28 光纖拉伸計固定於 PVC 管

#### 2.7.4 低解析可承受大變形之光纖感測器之室內標定

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2.27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桌板上，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2.29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2.30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2.31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。

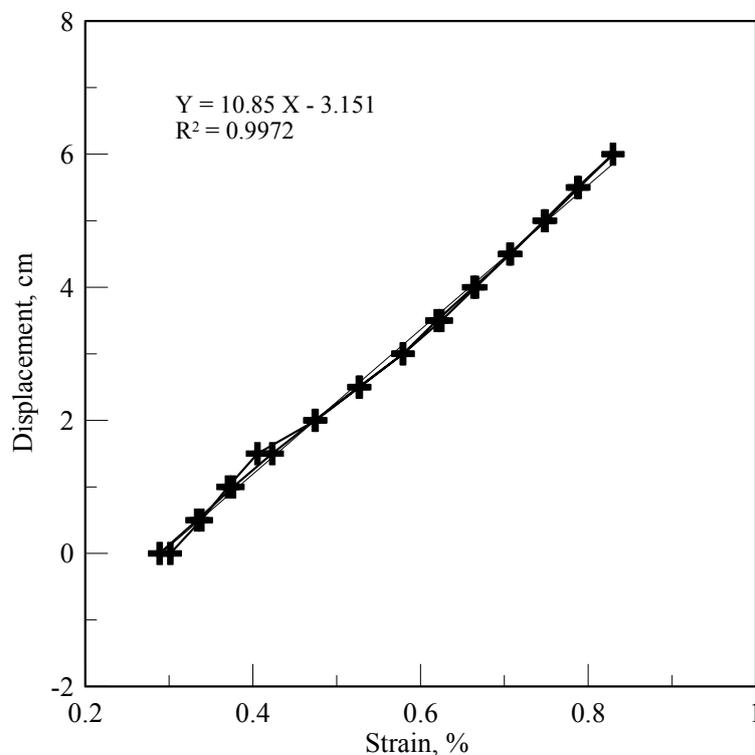
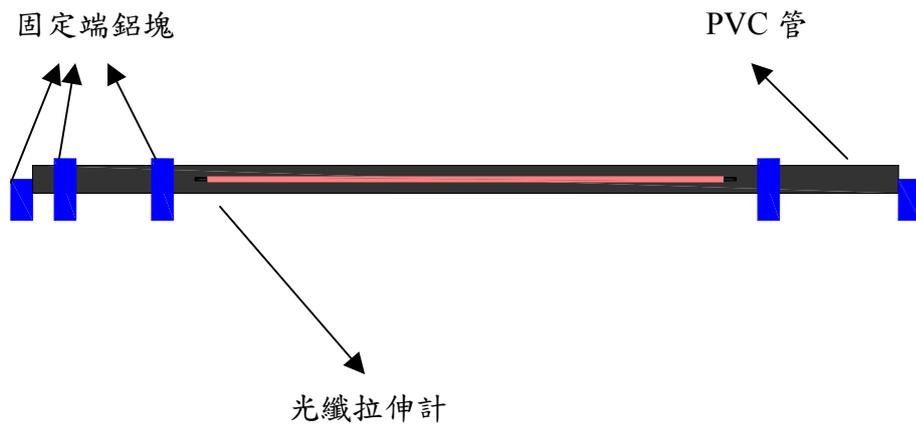
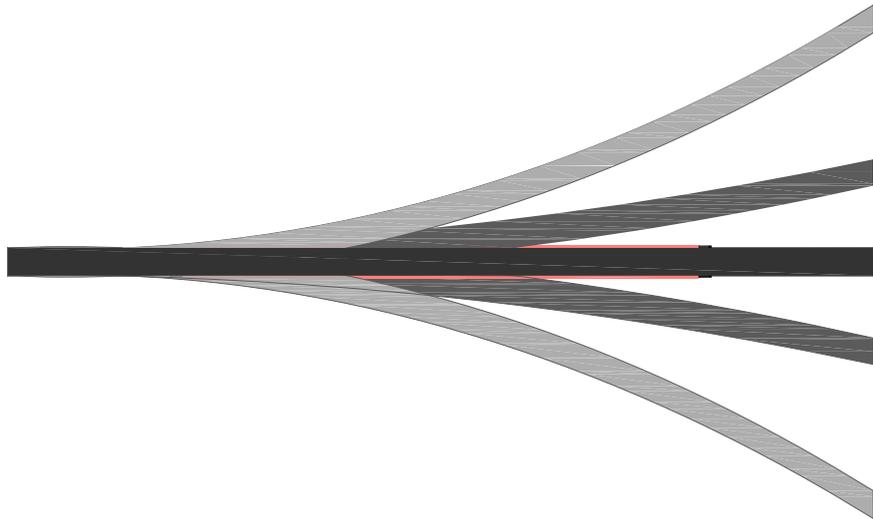


圖 2.29 光纖拉伸計拉伸測試結果圖



### 側視平面圖



### 上視平面圖

圖 2.30 光纖拉伸計固定於 PVC 管彎曲標定示意圖

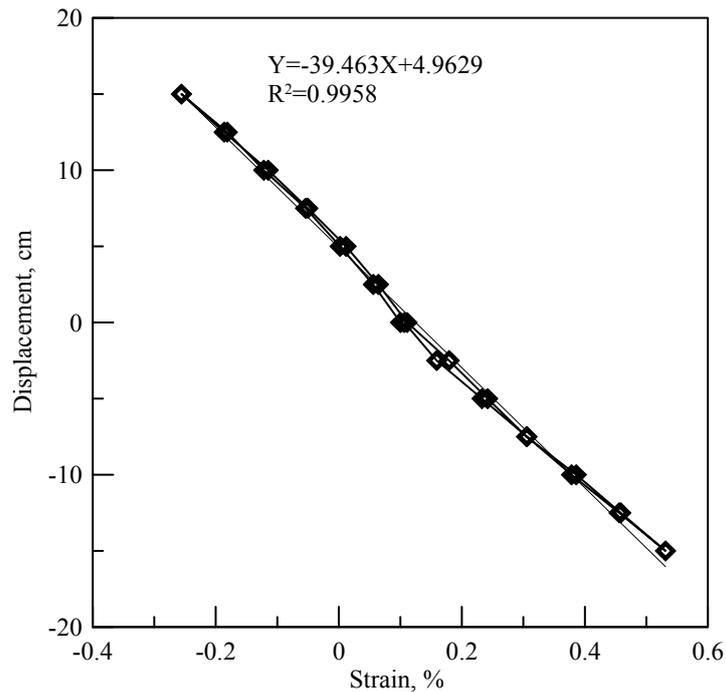


圖 2.31 光纖拉伸計固定於 PVC 管之彎曲標定圖

### 2.7.5 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2.33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2.34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2.34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2.35)，可由圖看出，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2.36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 2.32 光纖拉伸計架設於室內九米傾斜觀測管

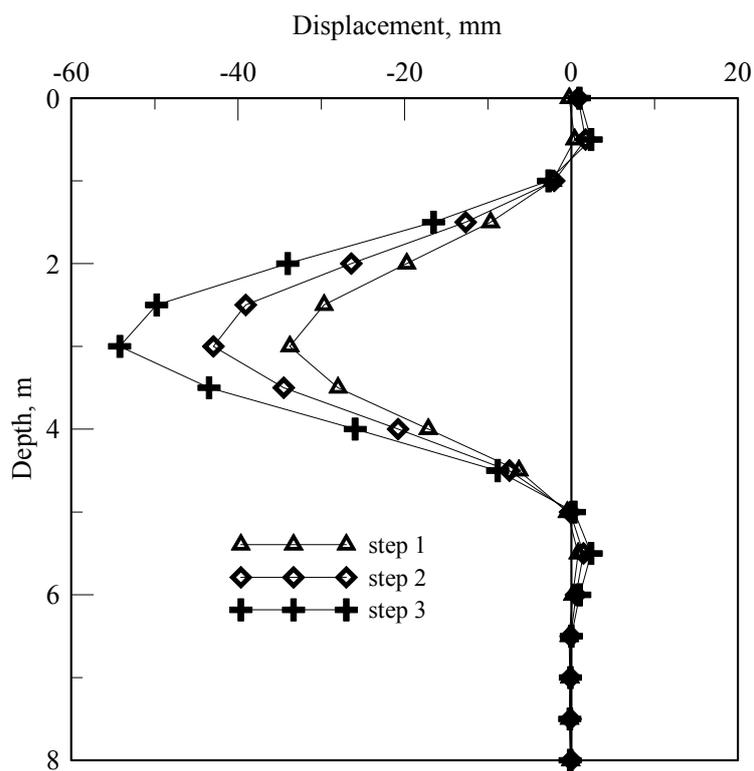


圖 2.33 對照組傾斜管大肚形變形

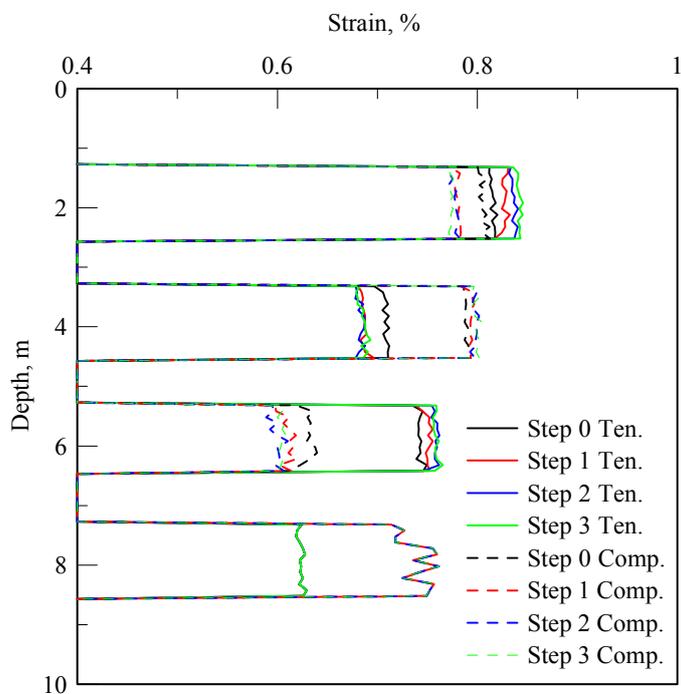


圖 2.34 光纖拉伸計(定性)大肚形變形測試結果圖

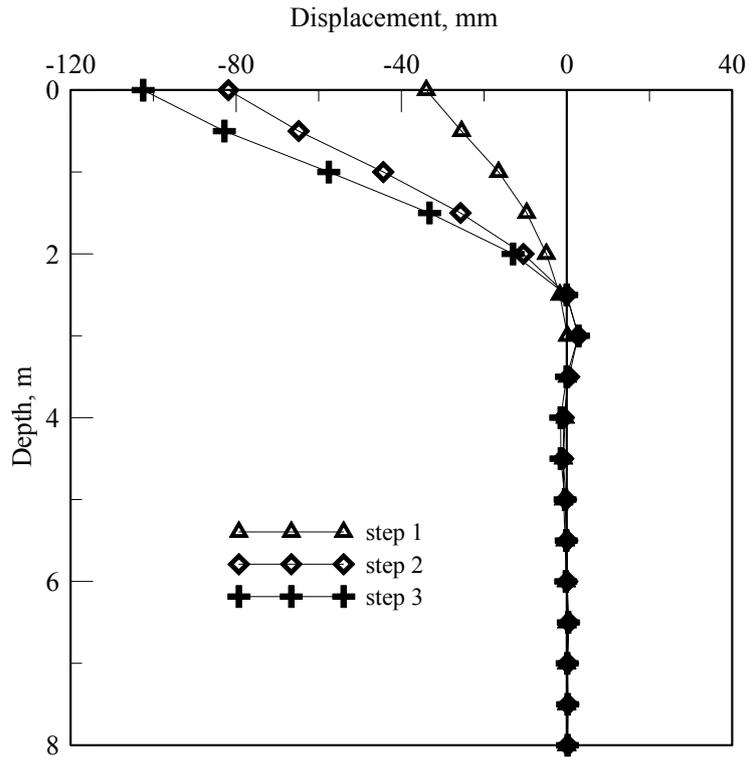


圖 2.35 對照組傾斜管喇叭形變形圖

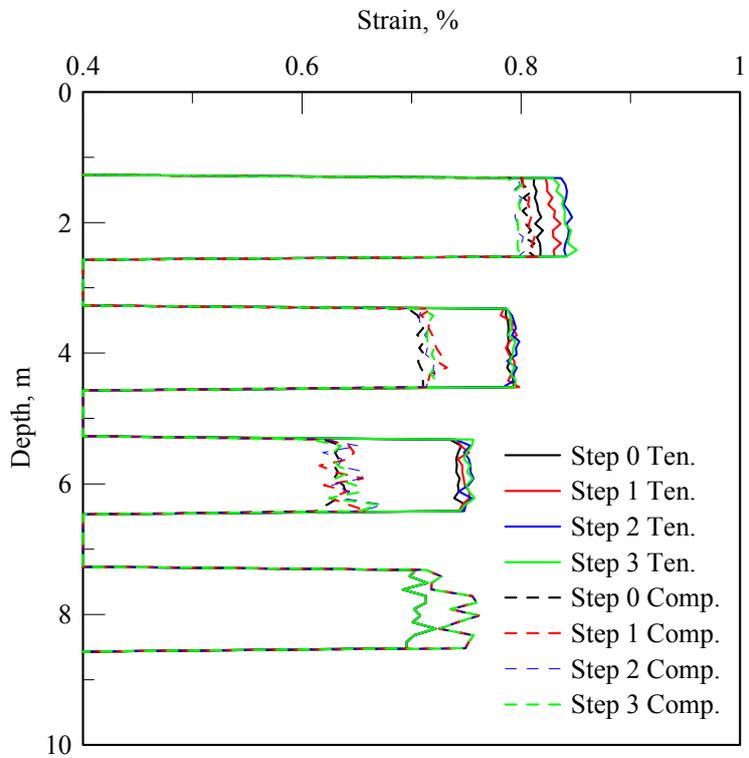


圖 2.36 光纖拉伸計(定性)喇叭形變形測試結果圖

## 2.8 地下水流數值模擬

一般而言，地下水流模型由簡至繁可大略分為三種，首先為考慮都布假設(Dupuit assumption)之非拘限(Unconfined)地下水流模型(Fetter, 1988)，此模型較適合應用於垂向流(Vertical flow)不顯著，也就是地下水流可視為水平流(Horizontal flow)之狀況時。其控制方程式可表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (2-25)$$

式中，h 為水頭或水位(Hydraulic head)，Kx 與 Ky 分別表示 x 與 y 方向之水力傳導係數(Hydraulic conductivity)，Sy 為比出水係數(Specific yield)。都布假設之非拘限地下水流模型，如圖 2.37 所示，常被利用於壩體地下水滲流(Seepage flow)之分析。

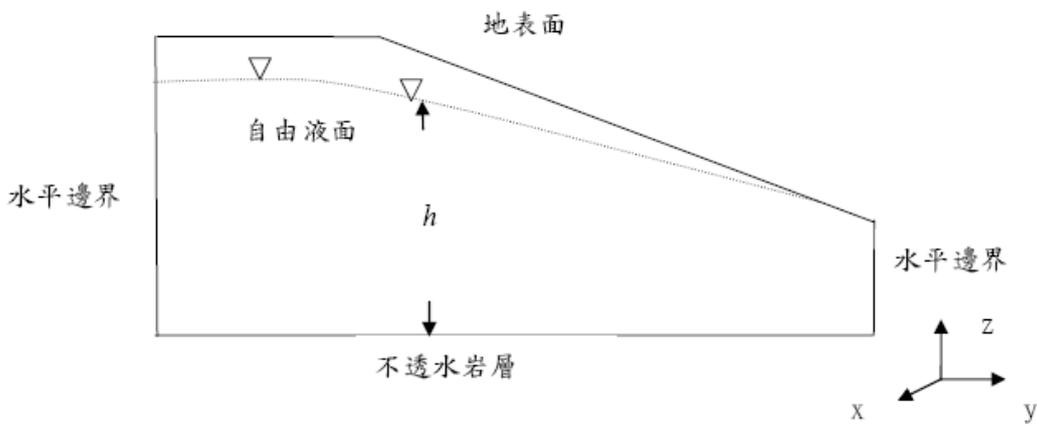


圖 2.37 都布假設之非拘限地下水流模型示意圖

然而，若地下水流中之垂向流不可忽略，且地質有類似層狀分布時，在不考慮土壤非飽和效應下，可利用多水層(Multiaquifer)地下水流模型(McDonald and Harbaugh, 1984；黃良雄, 民國 87 年；楊錦釗與黃良雄, 民國 92 年；蔡東霖, 民國 90 年)。如圖 2.38 所示，拘限含水層(Confined aquifer)、非拘限含水層(Unconfined aquifer)及阻水層(Aquitard)之通用地下水方程式可表示為

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (2-26)$$

式中，h 為水頭或水位， $K_x$ 、 $K_y$  與  $K_z$  分別表示 x、y 與 z 方向之水力傳導係數， $S_s$  為比儲水係數(Specific storage)。

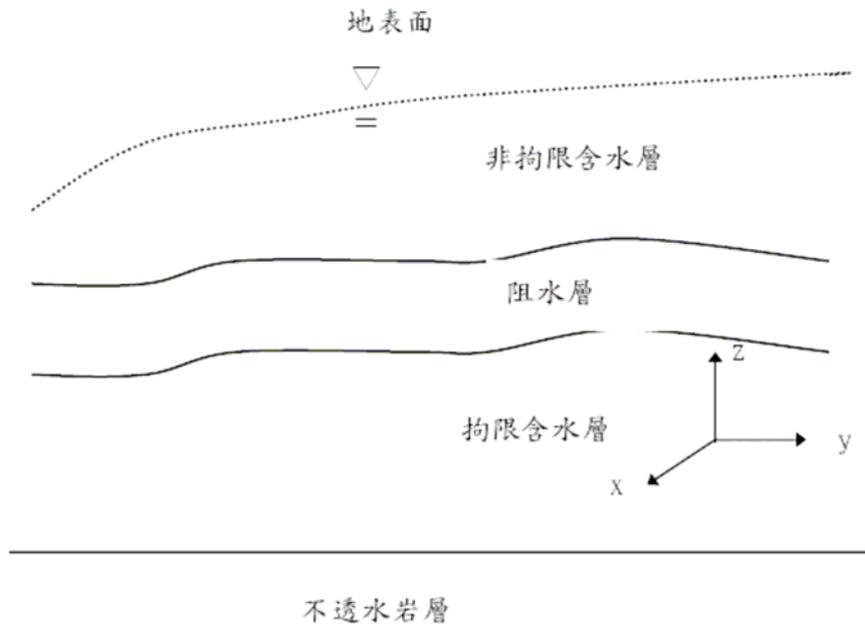


圖 2.38 多水層地下水流模型示意圖

若由地形地質與地下水文分析結果顯示，土壤非飽和性，對地下水及坡地破壞有相當影響時，則需考慮複雜的非飽和地下水流模擬 (Unsaturated groundwater modeling)。如圖 2.39 所示，其控制方程式可表示為(Bear, 1972; Hurley and Pantelis, 1985)

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_L(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_L(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_L(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] \dots\dots\dots (2-27)$$

式中， $\Psi$  為壓力水頭(Pressure head)， $\alpha$  為坡地之角度(Slope angle)， $K_L$  與  $K_z$  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)。

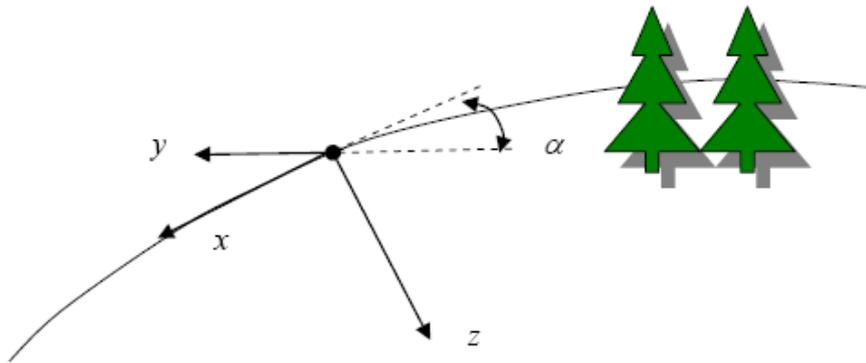


圖 2.39 坡地非飽和地下水流模型示意圖

由式(2-27)可知，非飽和地下水流模擬時，需知道含水量與壓力水頭之關係，及水力傳導係數與壓力水頭之關係，也就是所謂的保水曲線(Water retention curve)。Van Genuchten (1980)提出之飽和度與壓力水頭和水力傳導係數間的關係式，如下所示：

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{1}{1 + (\xi \psi)^N} \right)^M \dots\dots\dots (2-28)$$

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/M} \right]^M \right\}^2 \dots\dots\dots (2-29)$$

其中， $\theta_s$  為飽和含水量(Saturated moisture content)， $\theta_r$  為殘餘含水量(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)。

## 第三章 光纖監測系統優化與維護

光纖光柵解讀系統部分，已於去年度計畫中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，而資料傳輸系統部分，於今年度更換高穩定工業型路由器，可隨時與遠端伺服器保持連線降低網路連線不穩定情況發生，另外，監測資料已透過FTP方式，傳輸至台科大伺服器，以提供即時資訊；現場監測儀器部分，目前所有安裝現場監測儀器運作正常，並且於NCTU-04水壓觀測井孔及IHMT-01傾斜觀測管更換新式光纖連接端，以利後續維修與檢測，以下為光纖監測系統優化與維護說明，及各監孔位目前監測數據成果。

### 3.1 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日本團隊於至臺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。所以本團隊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。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，另外，為了增加地下水流模擬準確性，於98年10月安裝一孔50m水壓測井NCTU-04。

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3.1)，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。

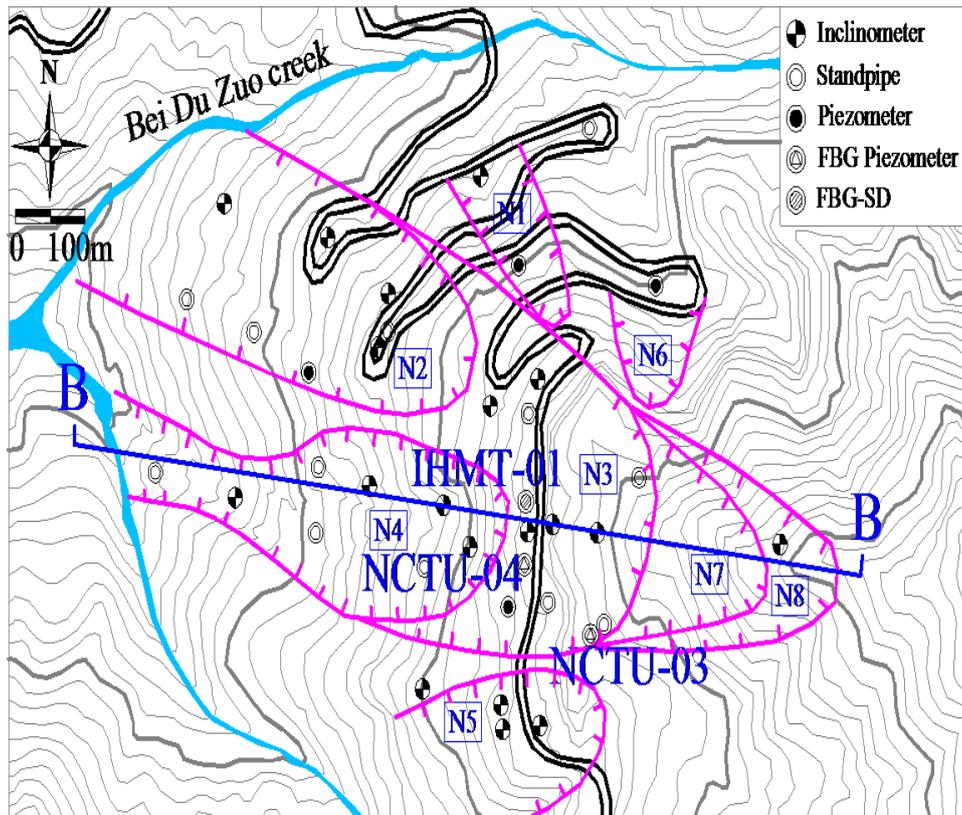


圖3.1 全光纖式監測儀器配置圖 (青山工程顧問公司, 2007)

## 3.2 光纖監測系統目前運作狀況說明

### 3.2.1 光纖監測儀器監測數據說明

圖3.2為NCTU-03 60m水壓監測孔之水壓變化圖，該孔位自96年10月裝設至今，其各深度水壓計感應正常，該圖為顯示目前水壓變化

圖，圖3.3為NCTU-04 50m水壓監測孔之目前水壓變化圖，該孔位自98年10月裝設完成，經過凡那比颱風期間，其各深度水壓並無明顯變化，研判地層中可能有一透水層存在，目前各深度水壓變化非常小，顯示該點地下水位在地表下50m以下。圖3.4為NCTU-03水壓監測井於凡那比颱風期間所測得各深度水壓變化，圖中顯示其水壓變化最大量約為100 kPa，圖3.5為NCTU-01 40m傾斜觀測管，孔內中為裝設20組光纖光柵節理式偏斜儀，每一感測點間距為1m，其監測範圍為地表下0m至20m之間，圖中目前顯示最大變形量為地表處，其位移量為約20mm，圖3.6為IHMT-01 200m傾斜觀測管，共裝設30組光纖光柵節理式偏斜儀，感測深度範圍為地表下35m至65m之間，其目前孔內最大變形量約為6mm。

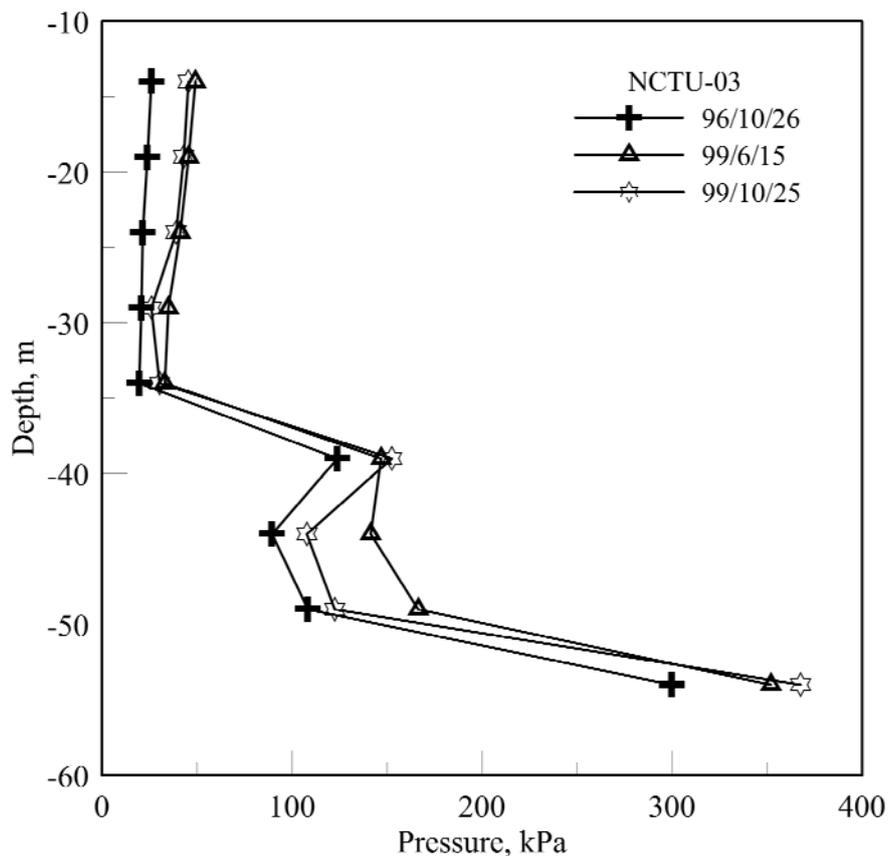


圖 3.2 NCTU-03 60m 光纖光柵水壓監測孔水壓變化圖

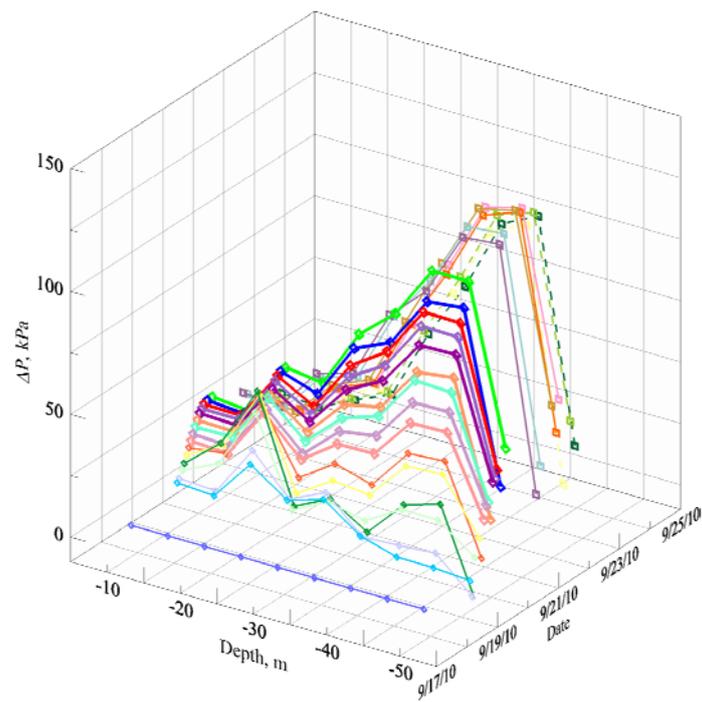


圖 3.3 IHMT-01 200m 光纖光柵傾斜觀測觀變化圖

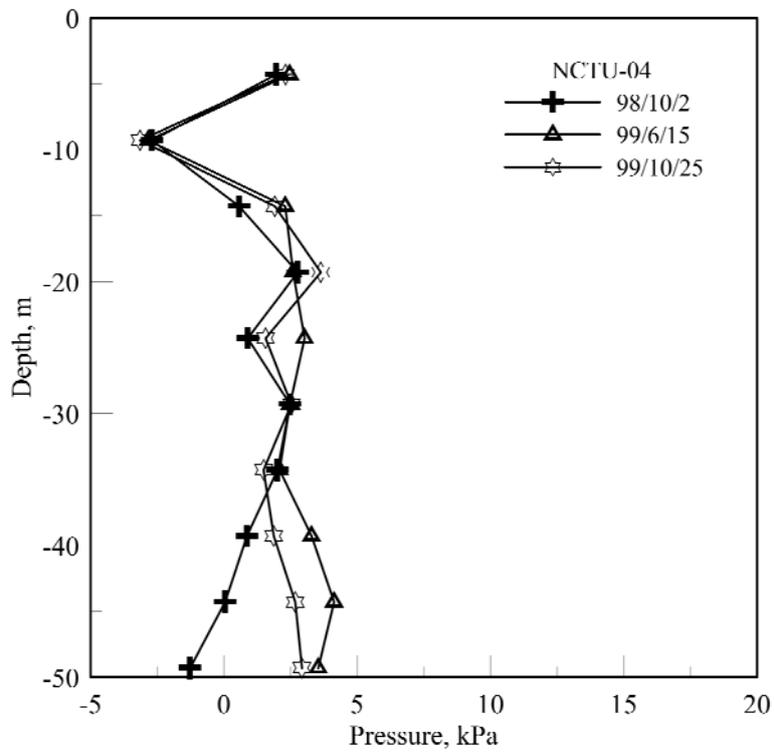


圖 3.4 NCTU-04 50m 光纖光柵水壓監測孔水壓變化圖

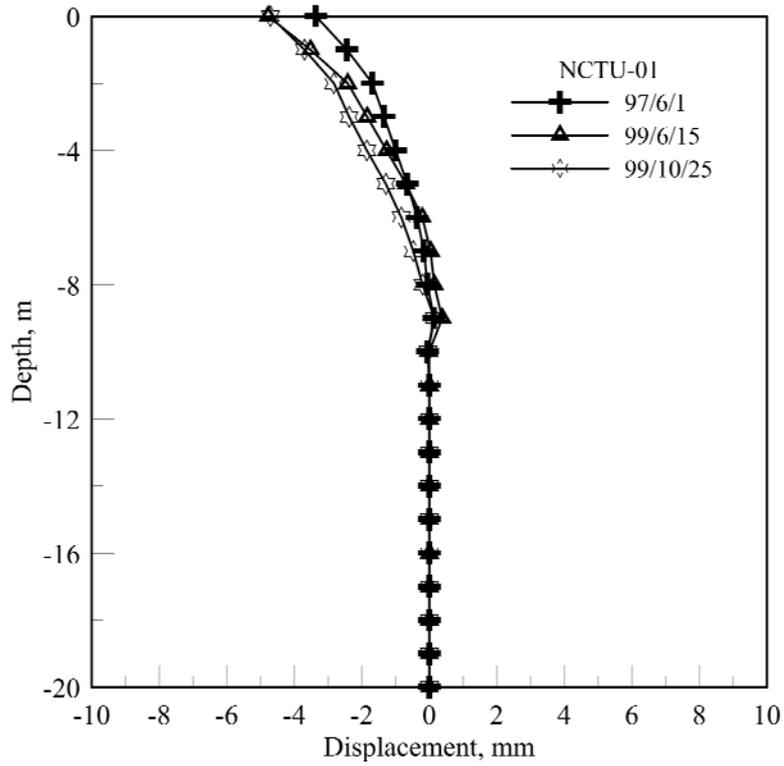


圖 3.5 NCTU-01 20m 光纖光柵傾斜觀測觀變化圖

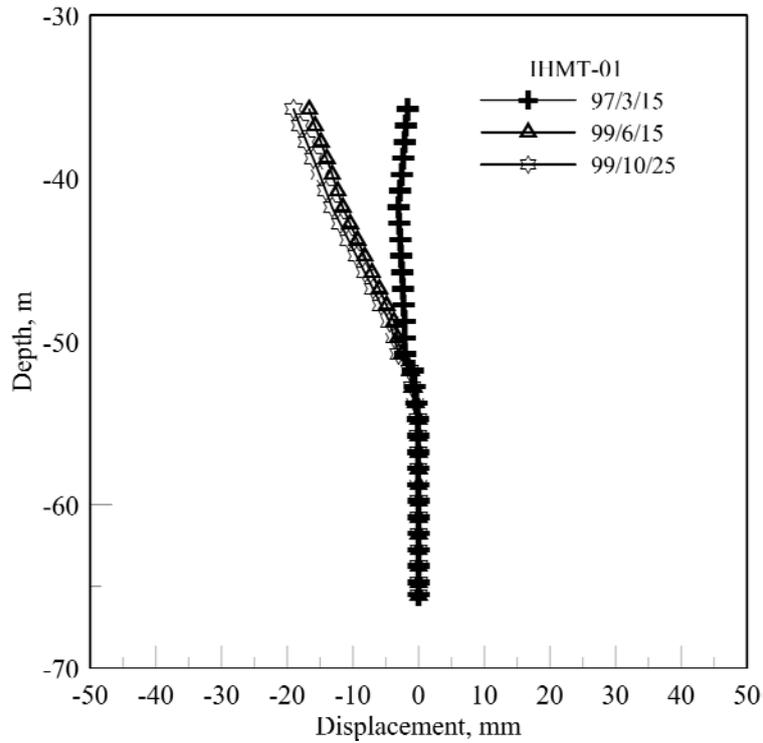


圖 3.6 IHMT-01 200m 光纖光柵傾斜觀測觀變化圖

### 3.2.2 光纖自動化監測系統優化與維護說明

圖3.7至圖3.10為光纖自動化擷取系統監測畫面圖，包含各傾斜觀測管與水壓監測管歷時變化趨勢圖，以及簡訊發送設定畫面，由於台18線阿里山五彎仔監測小屋之電力系統傳輸線為沿公路佈放，當道路中斷時，其電力往往受其影響，因此，於去年度計畫中架設高供電量不斷電系統，可提供電功率達4800W，如圖3.13，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3.11為自動化光纖光柵解讀儀器所採用之工業型電腦。在監測資料傳輸系統方面，為採用中華電信3.5G作為傳輸訊號，因監測站位於山區，所以傳輸能力降為GPRS傳輸速率，由於中華電信機房系統設定，常將用戶端自動剔除連線或將連線能力品質降低，造成網路成線斷網現象，使得軟體端自動撥號能力有時會出現問題，故在今年度計畫中，採用工規等級網路路由器，提高網路連線穩定度，以避免上述情況發生，圖3.12為工業級網路路由器實體圖，圖3.14為現場光纖自動化監測系統設備圖，而圖3.15為整合台科大網頁，可即時提供現場監測儀器監測數據並依據各警戒值、行動值及管理值來發佈訊息至相關單位。

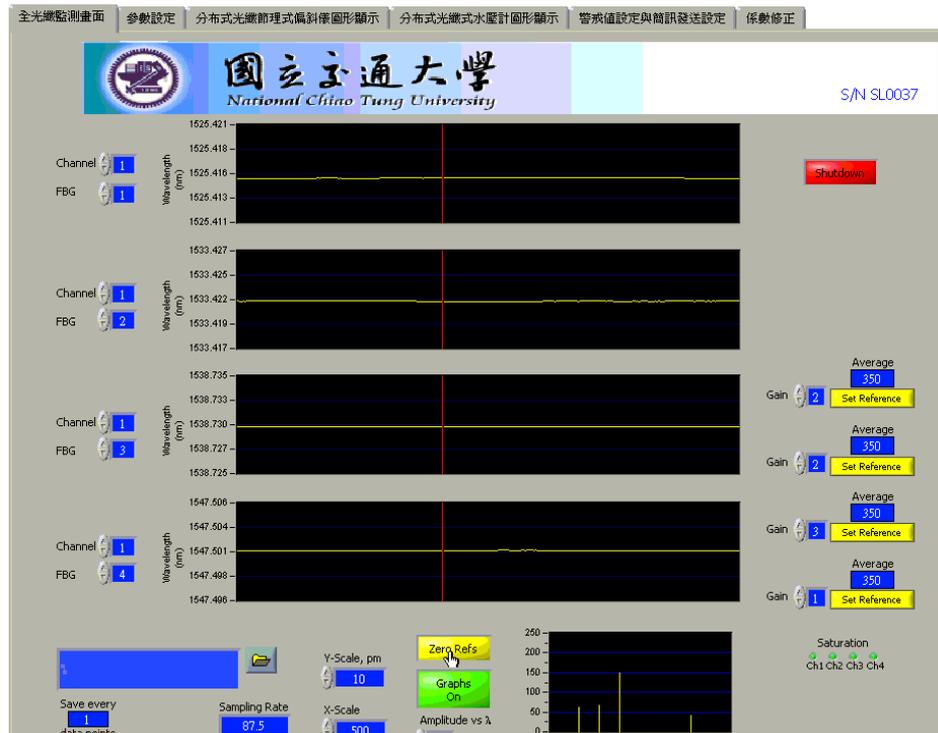


圖 3.7 自動化光纖光柵解讀系統監測畫面

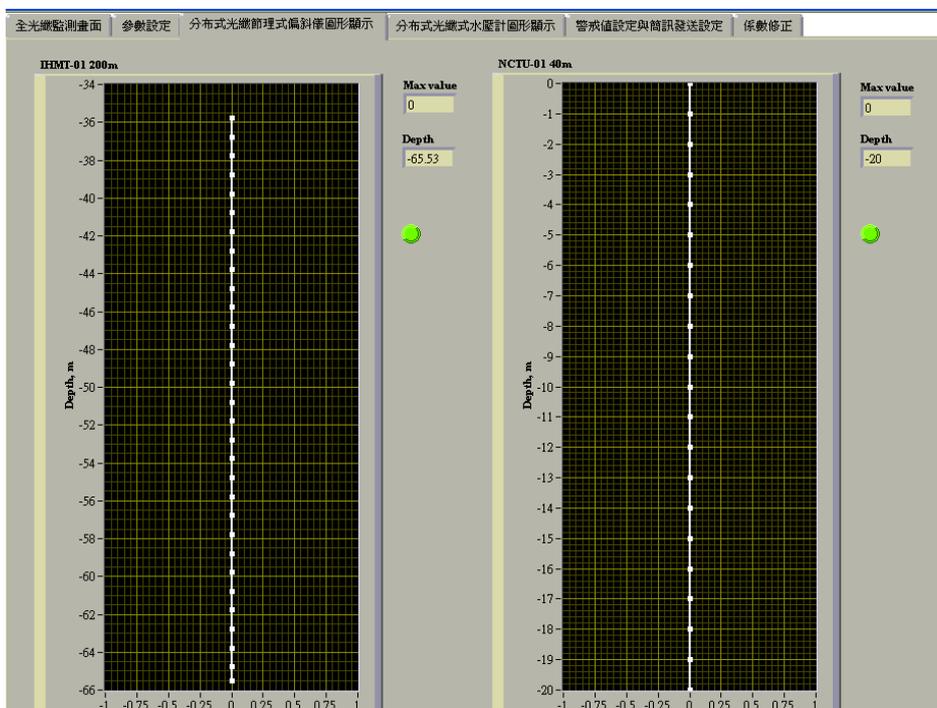


圖 3.8 光纖感測器自動化擷取系統地層位移畫面

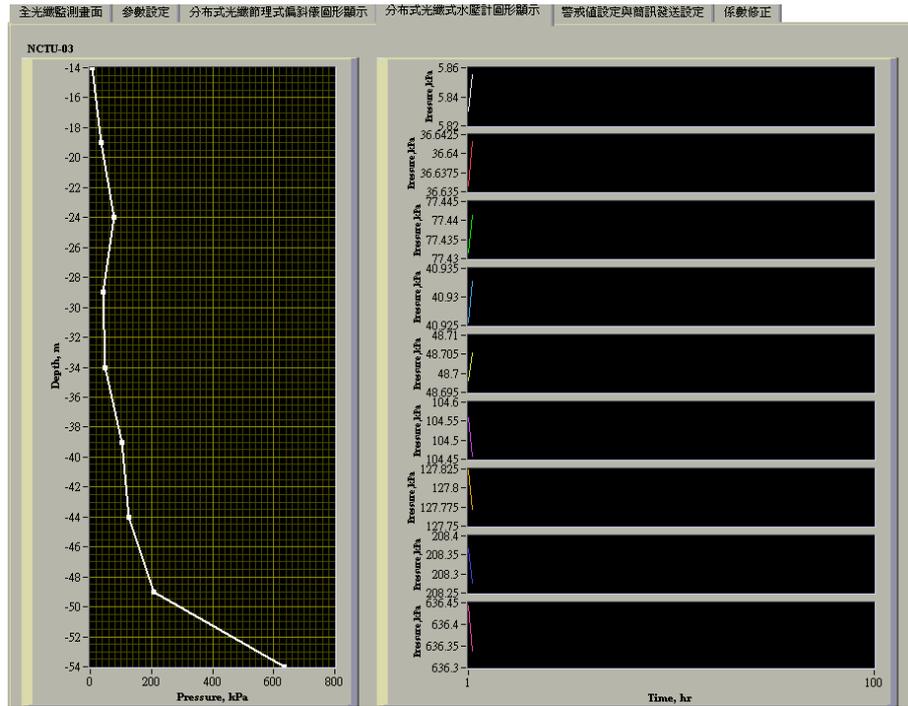


圖 3.9 光纖感測器自動化擷取系統水壓分布及歷時畫面

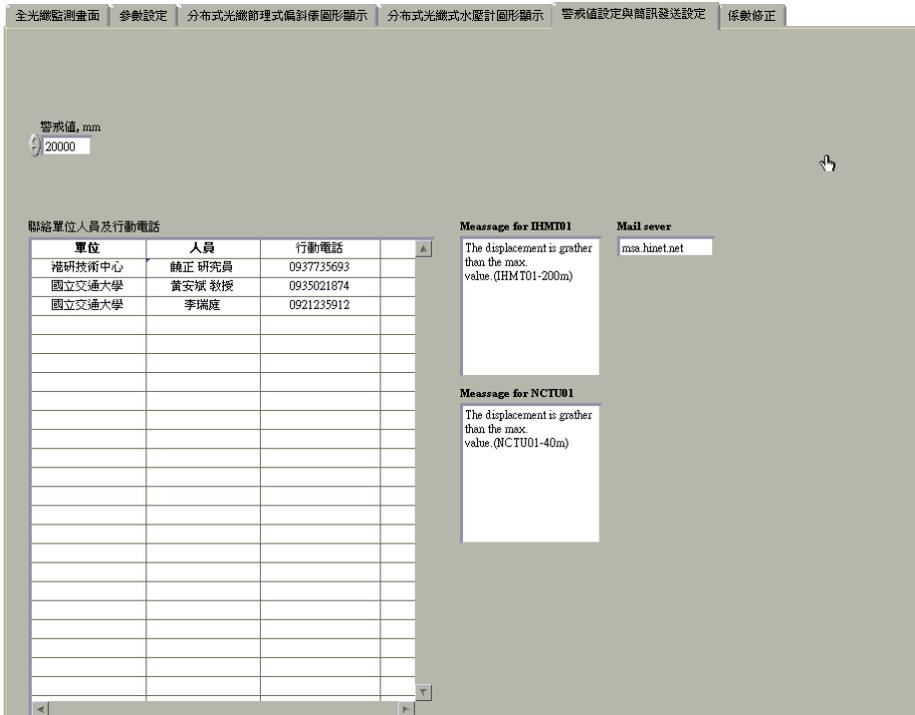


圖 3.10 自動化光纖解讀系統警訊發送畫面



圖 3.11 低耗電量工業型電腦



圖 3.12 工業級網路路由器



圖 3.13 高供電量(4800W)不斷電系統



圖 3.14 現場光纖監測儀器擷取系統圖

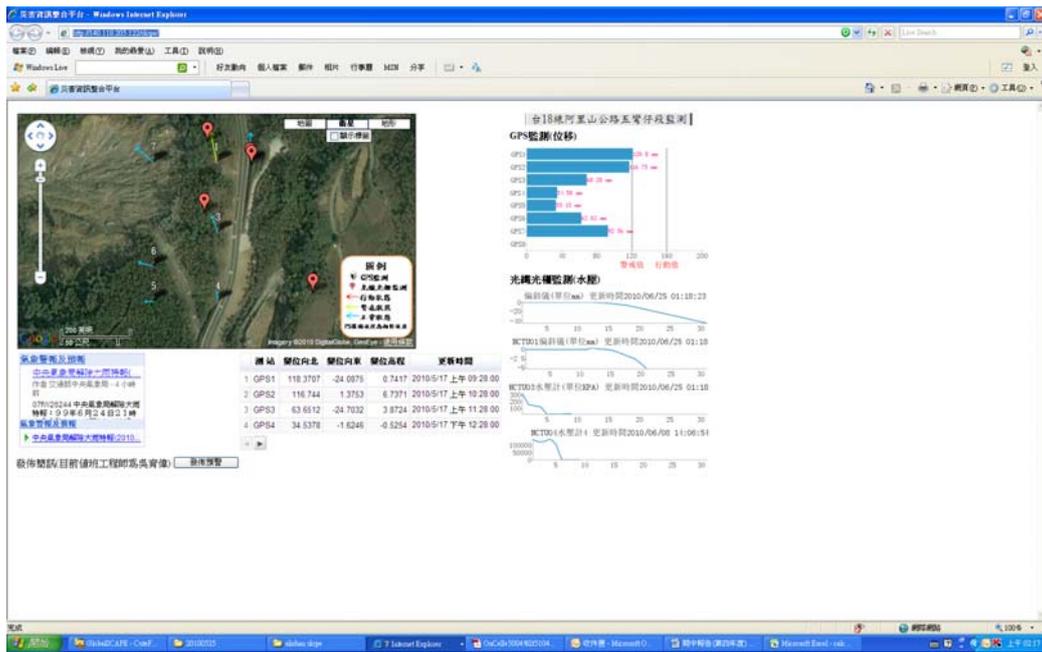


圖 3.15 台科大網路即時監測畫面圖

## 第四章 歷年現場監測儀器數據與成果比較

### 4.1 辛樂克與莫拉克颱風期間現場監測儀器資料

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。

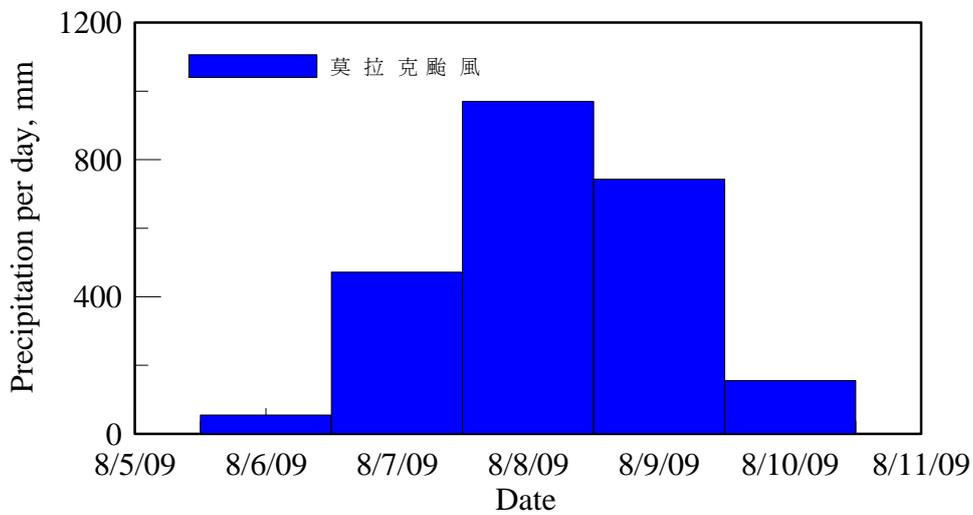
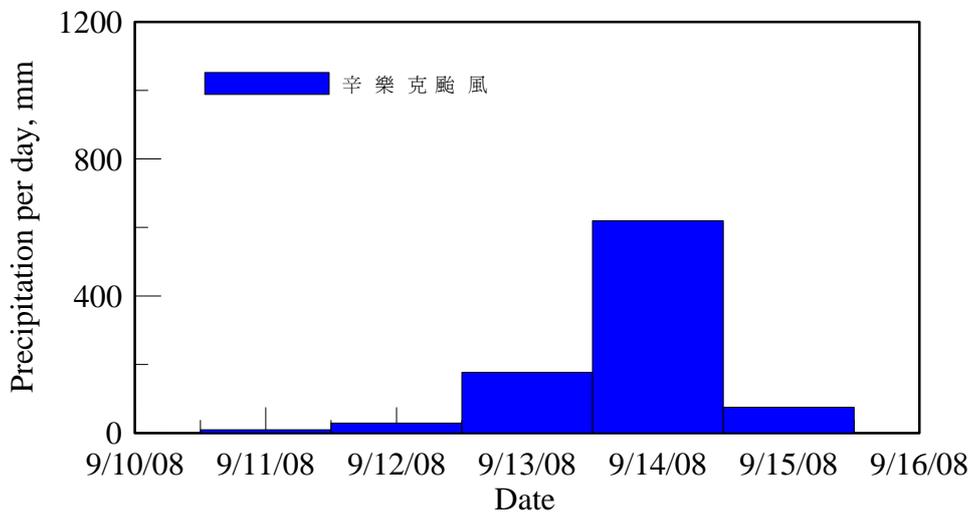


圖 4.1 辛樂克與莫拉克颱風期間累積降雨量

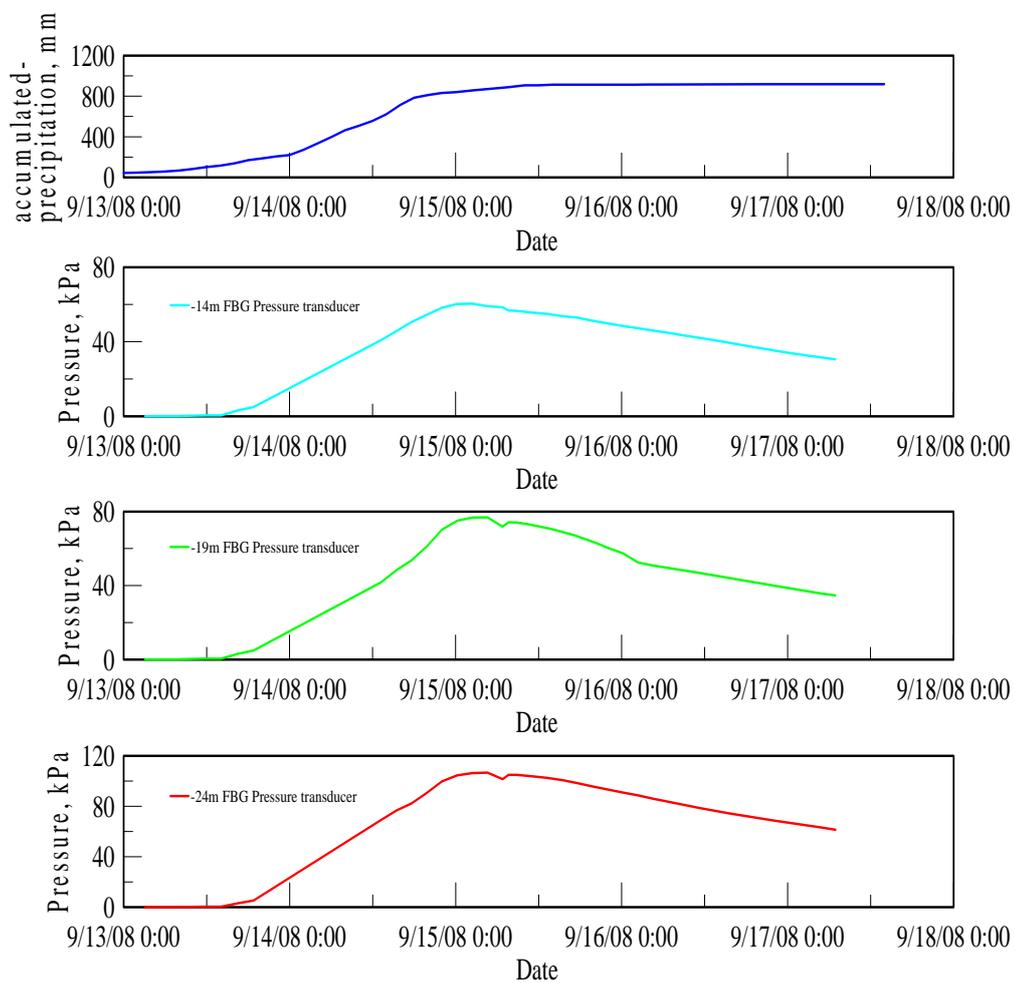


圖 4.2 NCTU-03 -14m~-24m 水壓與辛樂克颱風之累計降雨量變化

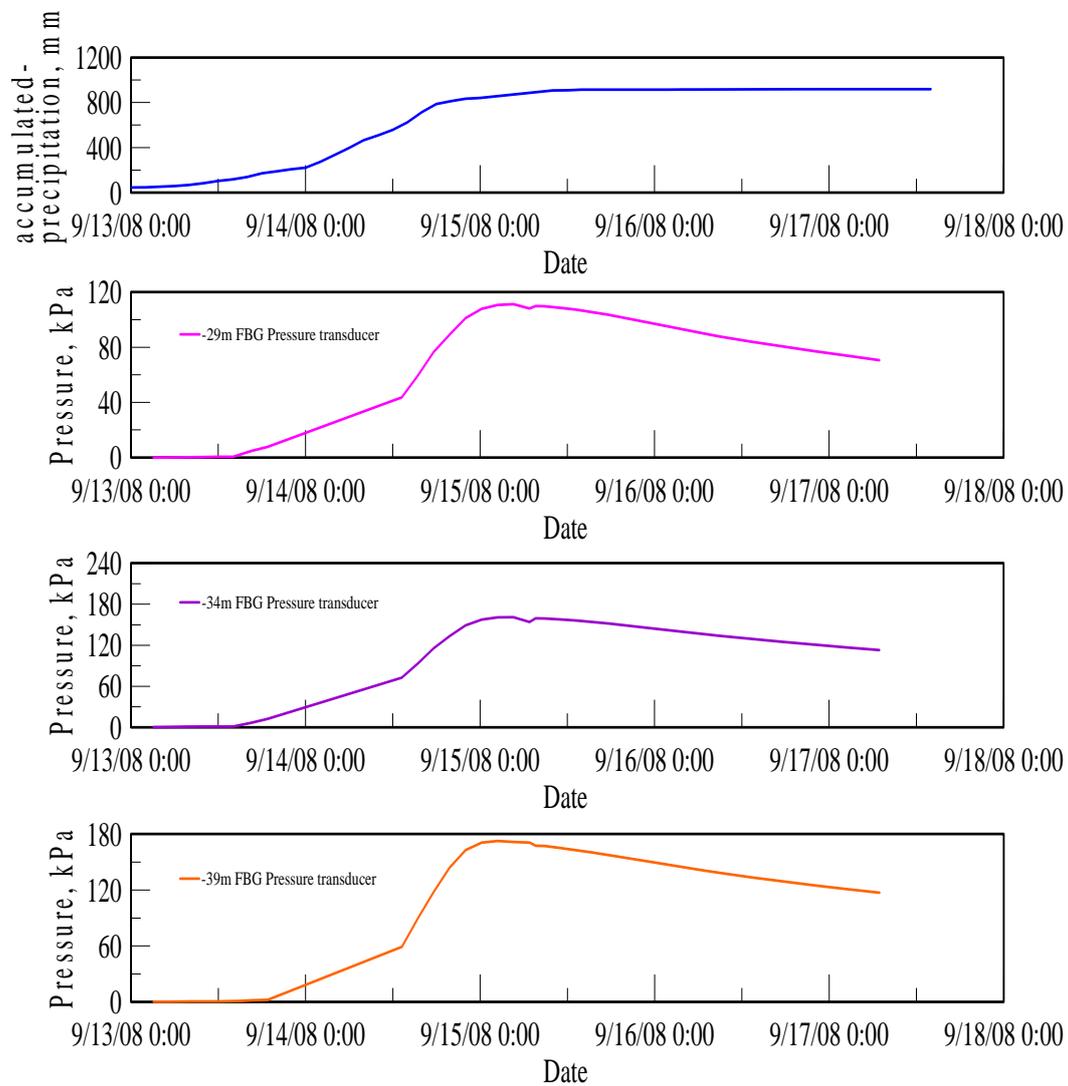


圖 4.3 NCTU-03 -29m~-39m 水壓與辛樂克颱風之累計降雨量變化趨勢

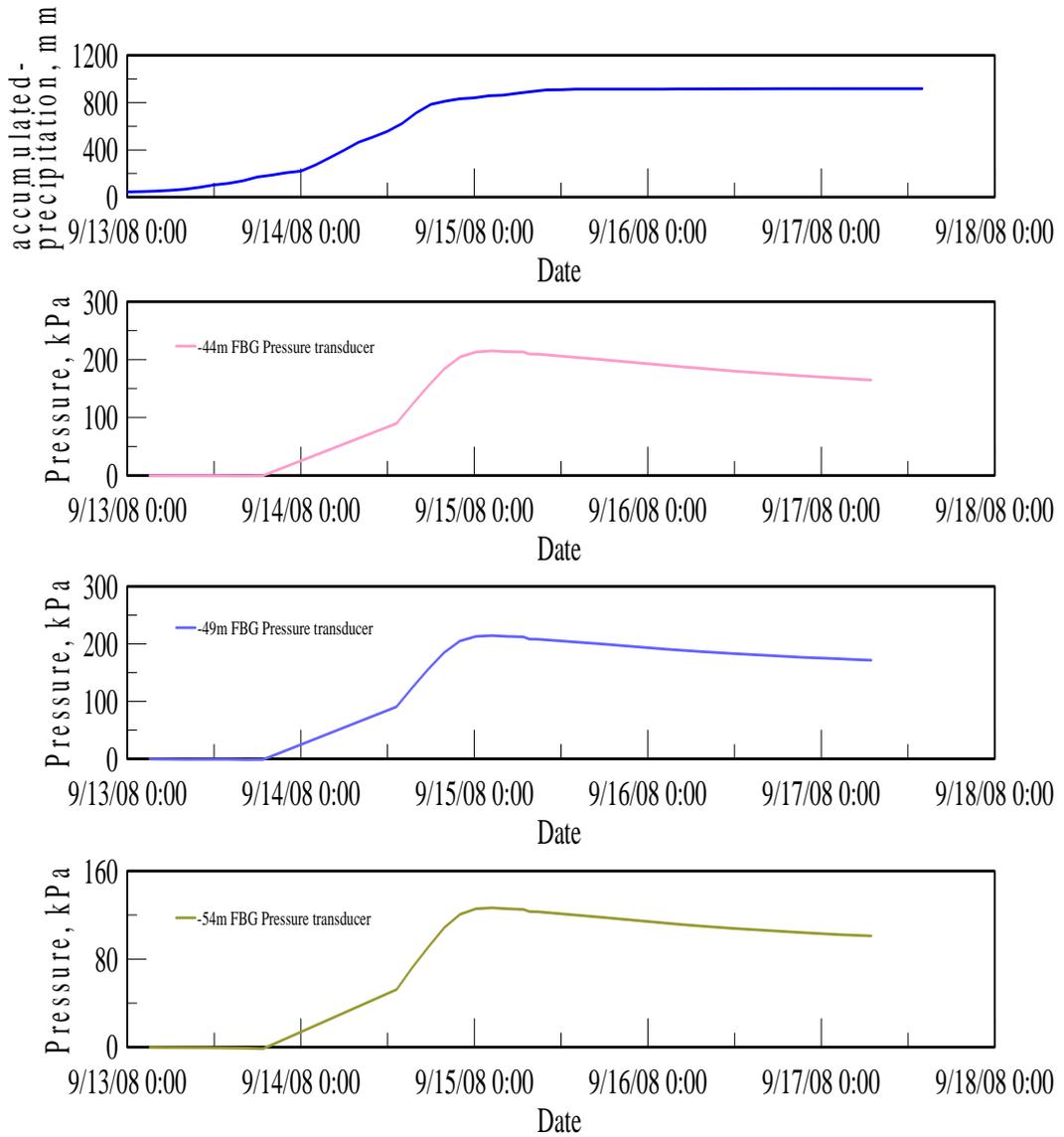


圖 4.4 NCTU-03 -44m~-54m 水壓與辛樂克颱風之累計降雨量變化趨勢圖

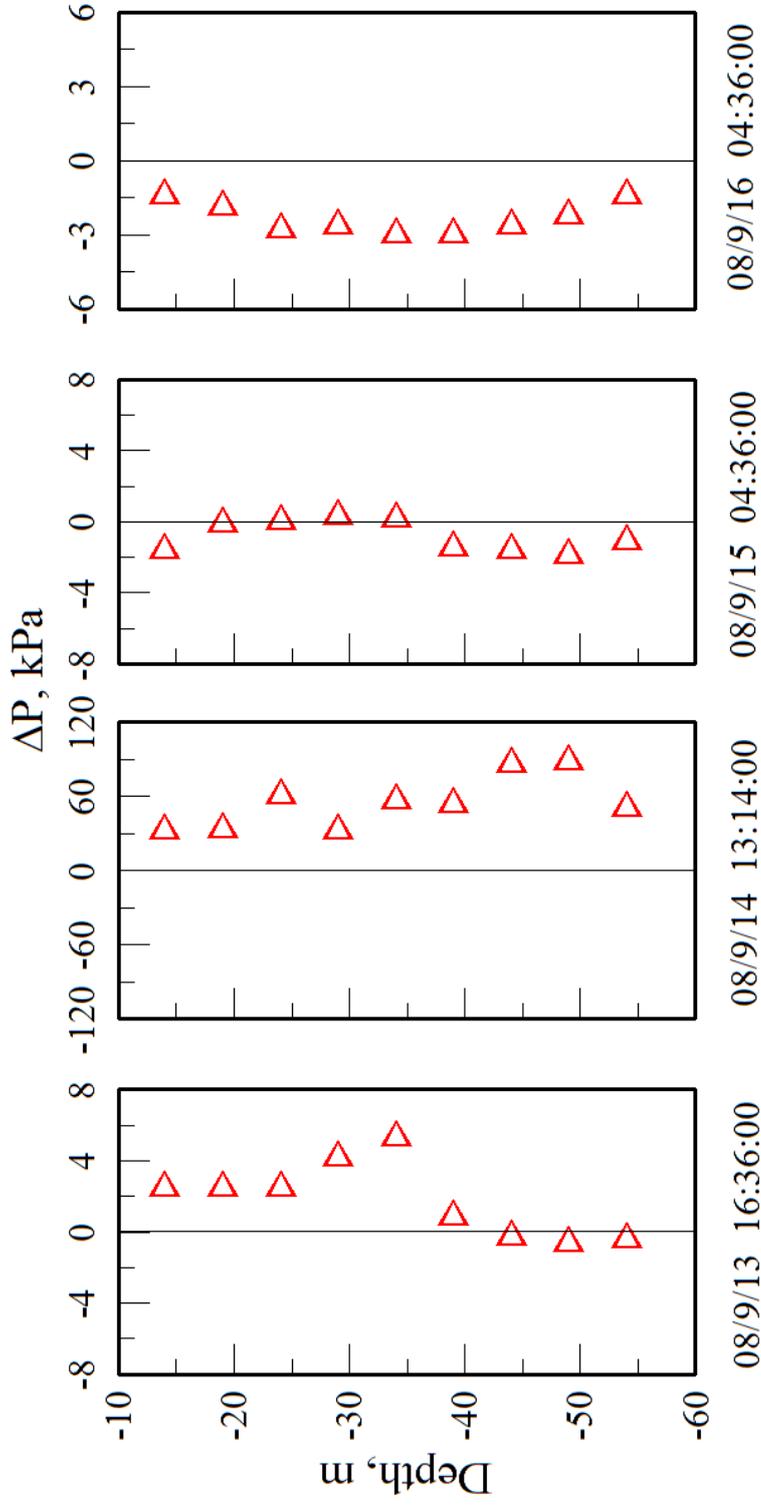


圖 4.5 NCTU-03 水壓歷時變化於辛樂克颱風

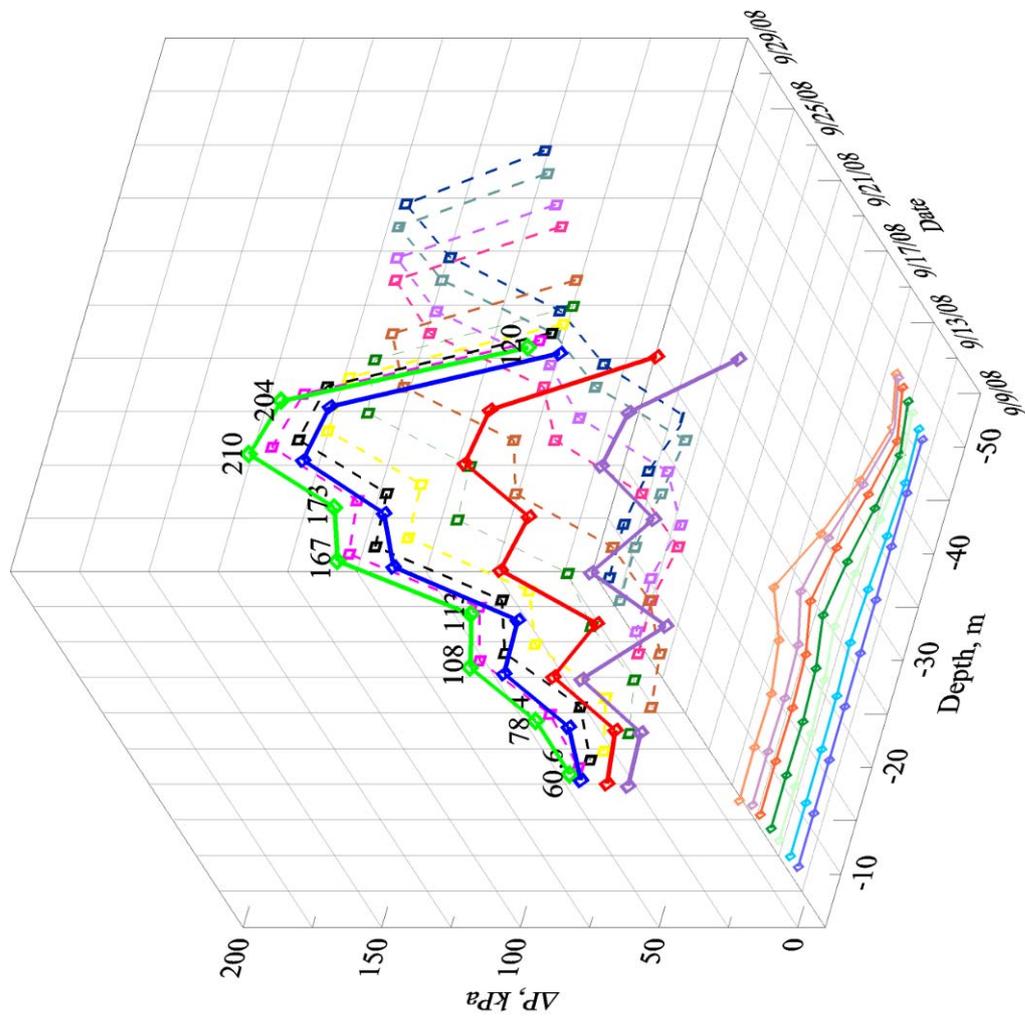


圖 4.6 NCTU-03 3D 水壓歷時變化於辛樂克颱風風量變化趨勢圖

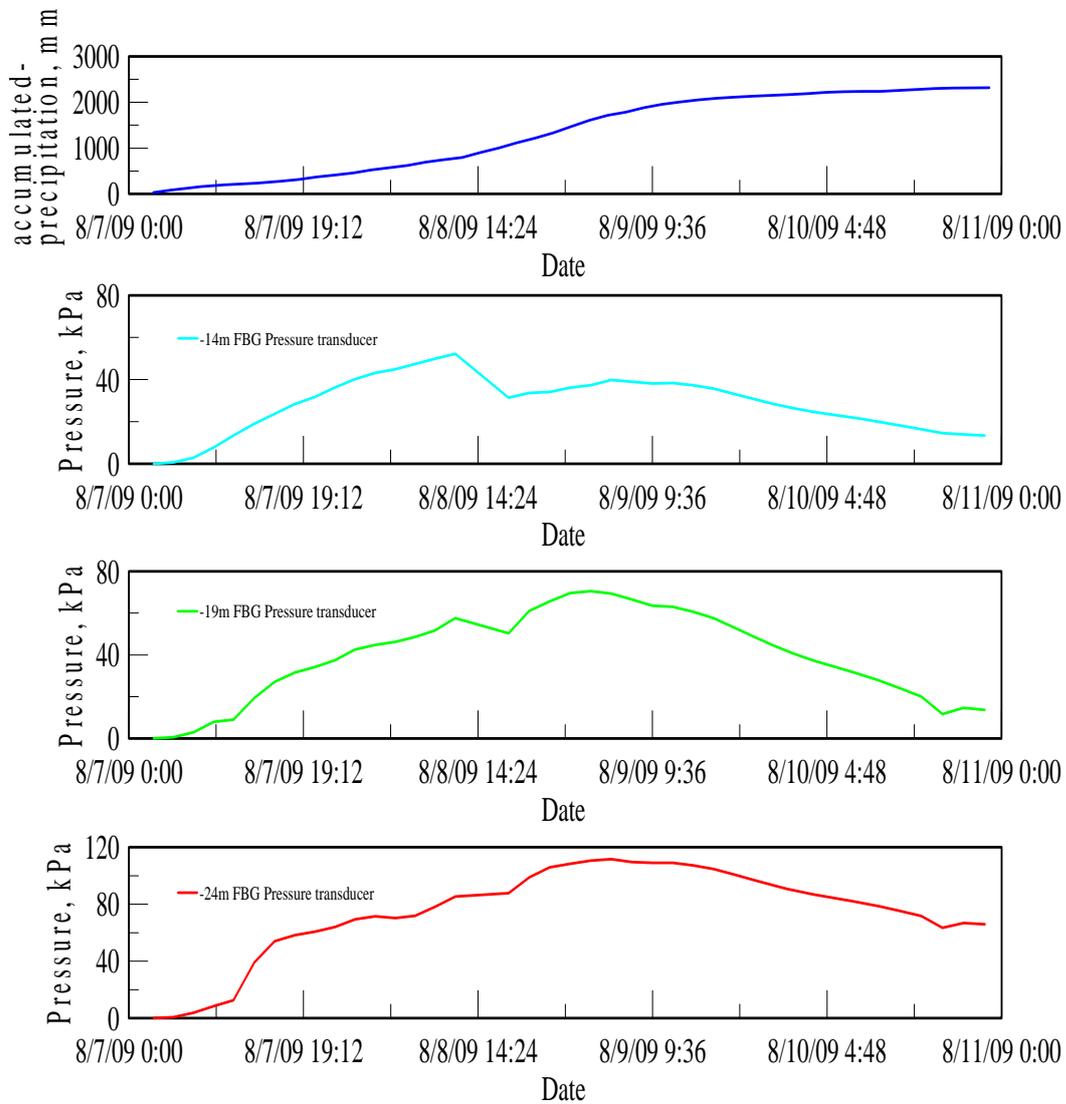


圖 4.7 NCTU-03 -14m~-24m 水壓與莫拉克颱風之累計降雨量變化趨勢圖

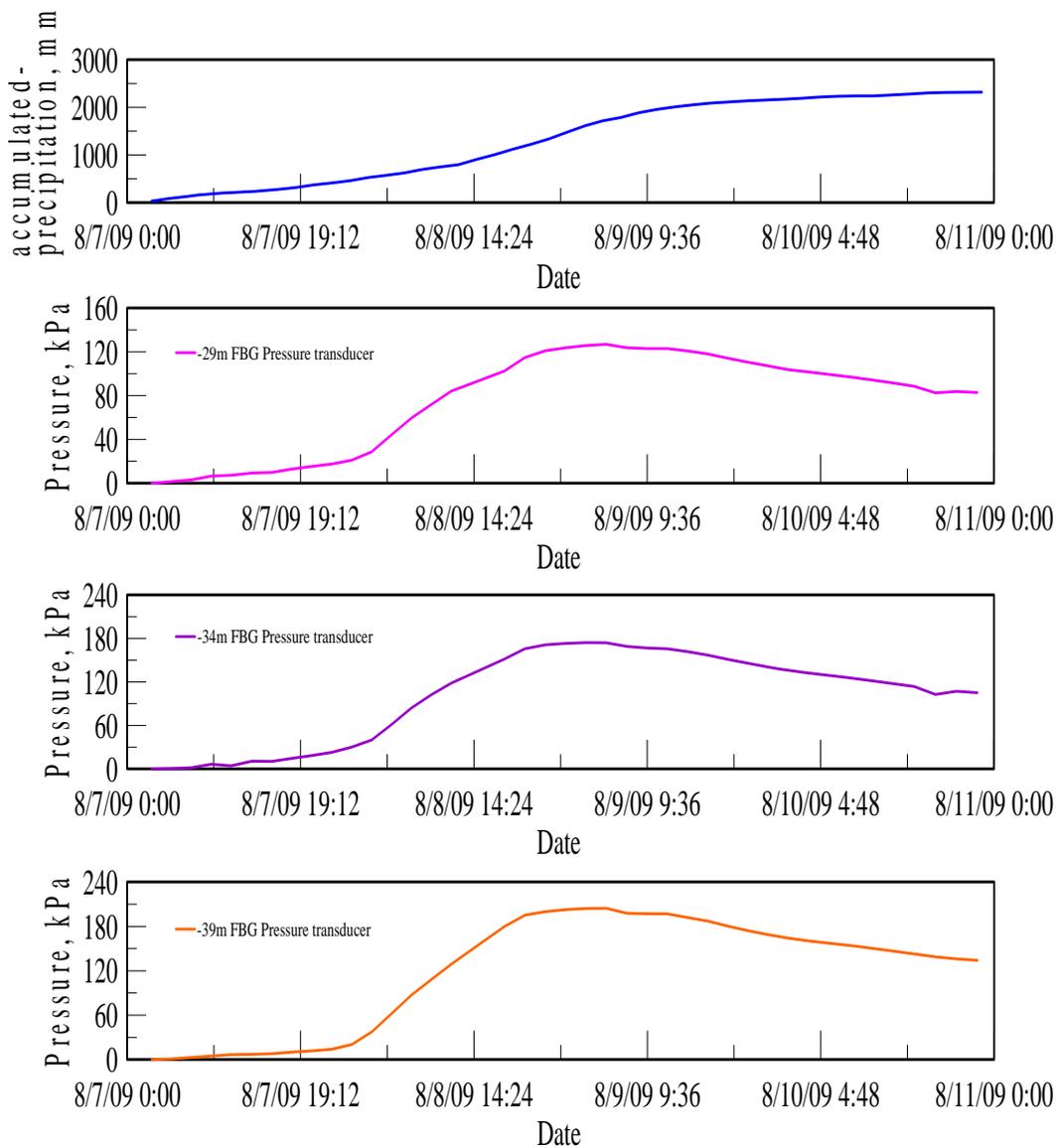


圖 4.8 NCTU-03 -29m~-39m 水壓與莫拉克颱風之累計降雨量變化趨勢圖

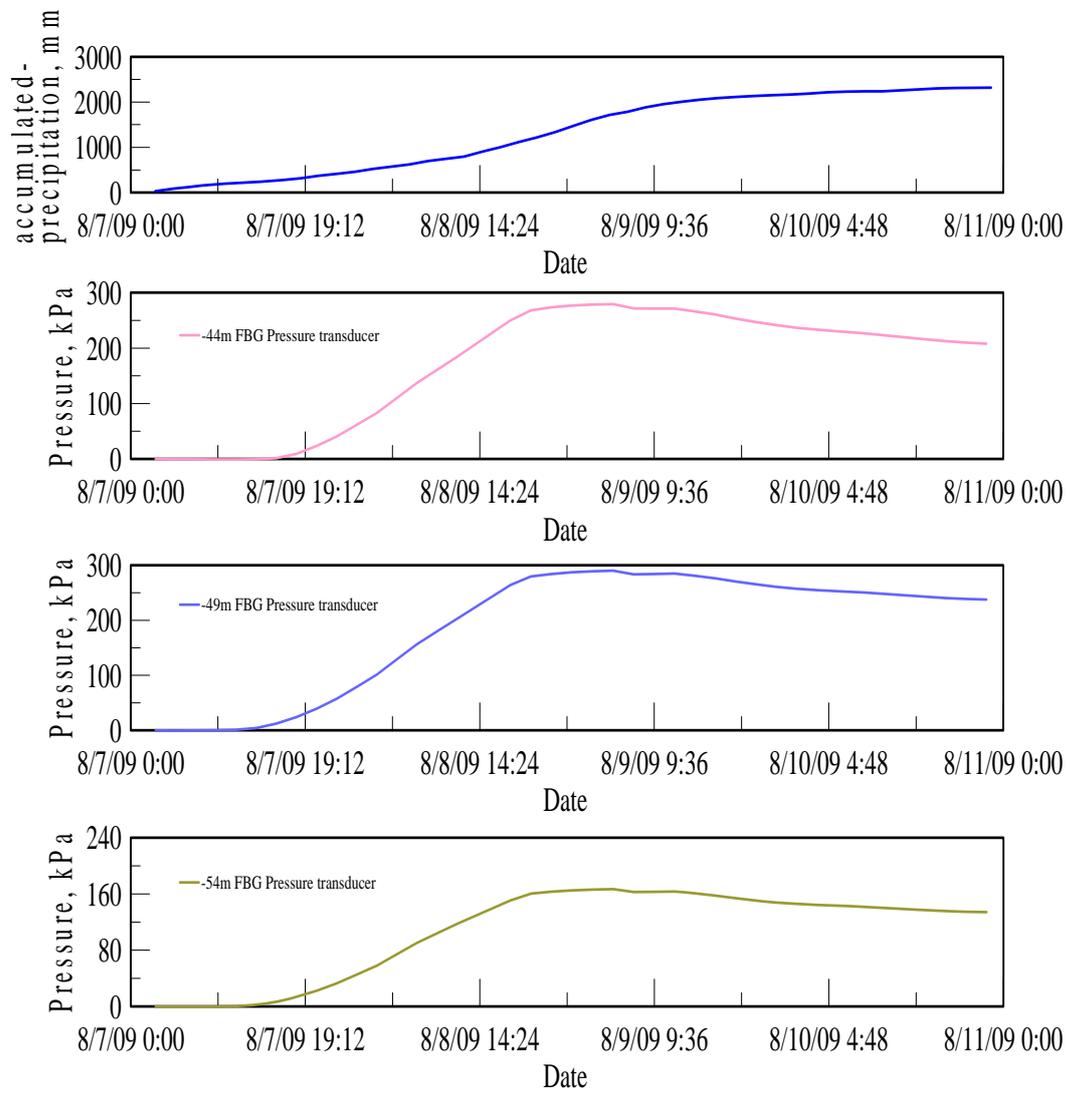


圖 4.9 NCTU-03 -44m~-54m 水壓與莫拉克颱風之累計降雨量變化趨勢圖

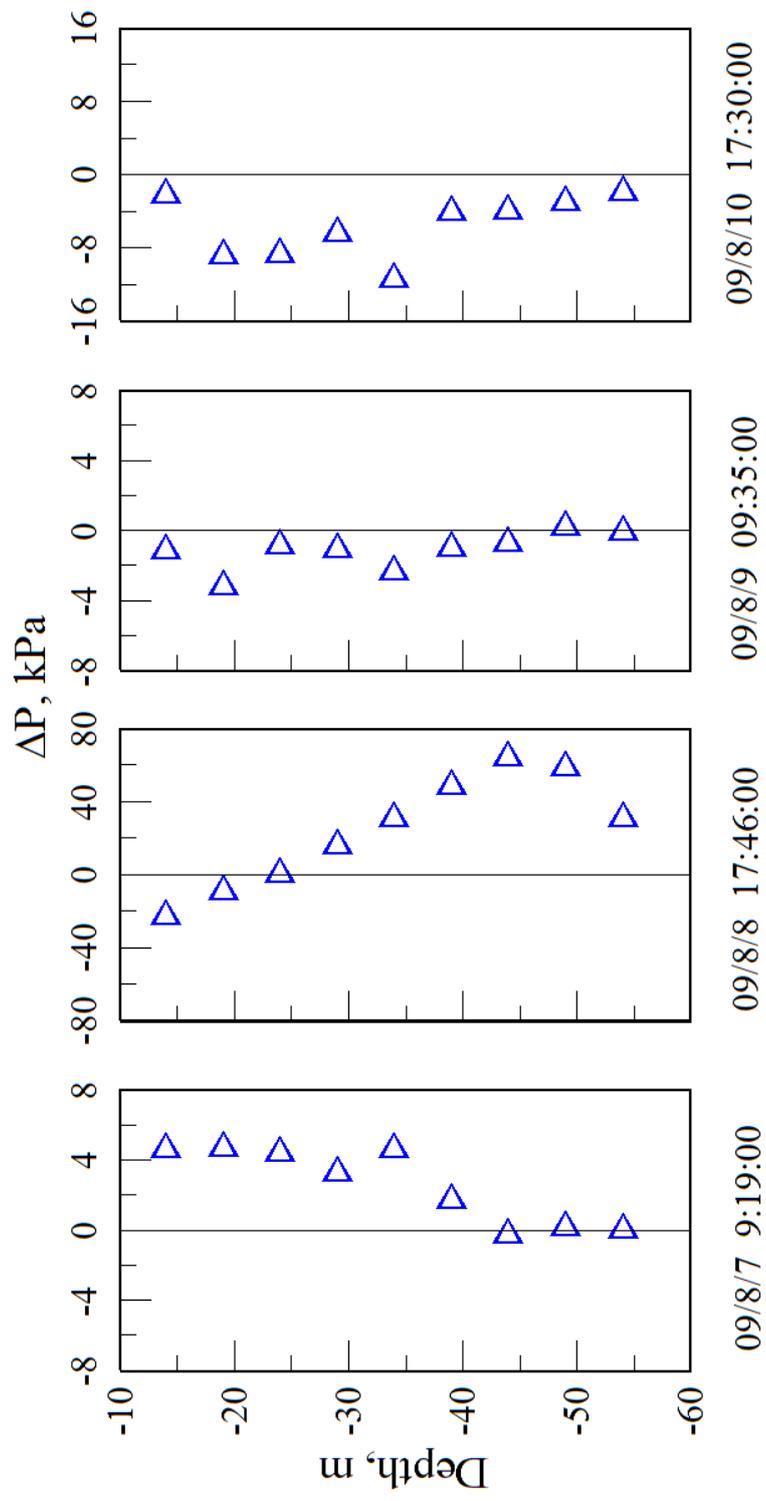


圖 4.10 NCTU-03 水壓歷時變化於莫拉克颱風

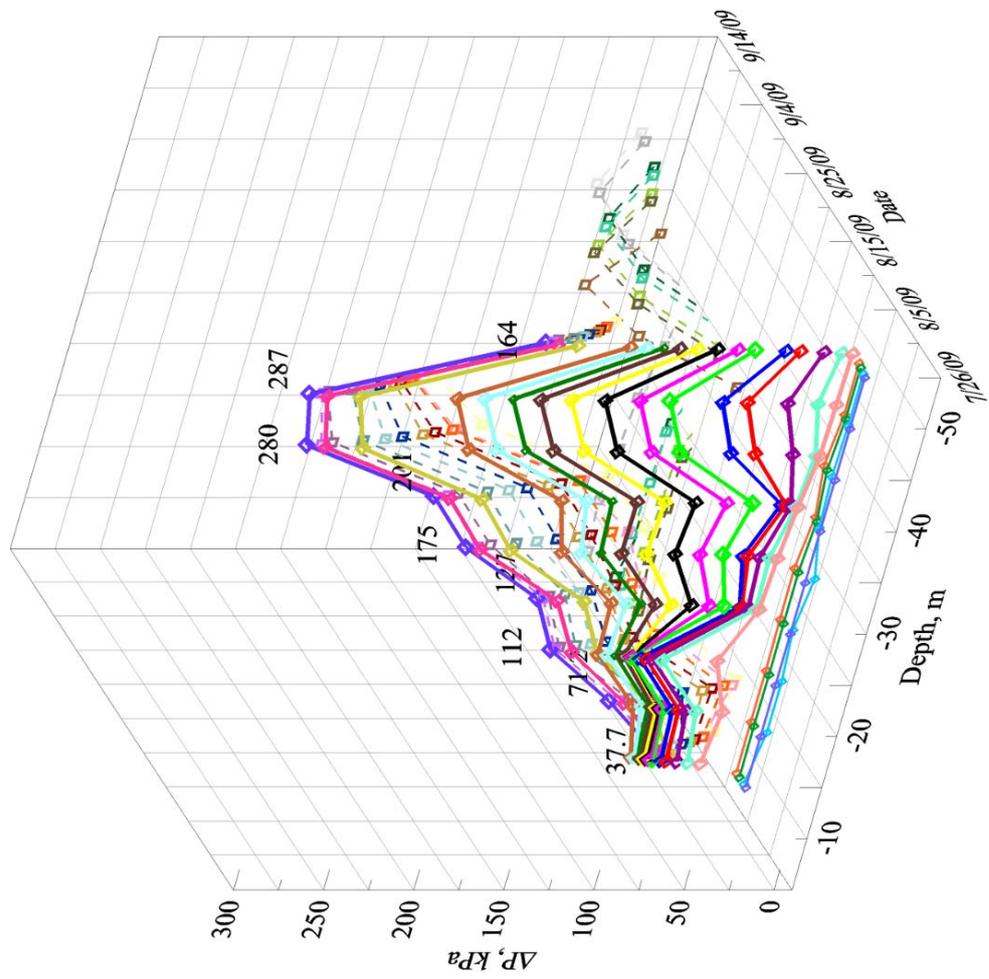


圖 4.11 NCTU-03 3D 水壓歷時變化於莫拉克颱風圖

## 4.2 光纖傳感器與傳統監測儀器效能評估

光纖光柵傳感器歷經4年驗證期間，且於辛樂克、莫拉克及凡那比颱風能有效發揮其監測功能，相較於傳統式感測器有較高之穩定性與耐久性，而表4-1為光纖傳感器與傳統監測儀器之效能評估表。

表 4-1 光纖傳感器與傳統監測儀器效能評估表

	傳統手動傾斜儀與開口式水壓計	光纖光柵節理式偏斜儀與水壓計
優點	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可達到自動化監測。</li> <li>2. 儀器靈敏度相較光纖光柵節理式偏斜儀低。（傳統手動傾斜儀0.04mm/m；光纖光柵節理式偏斜儀0.017mm/m）</li> <li>3. 傳統手動傾斜儀可量測與重力方向之角度。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 儀器耐久性高、靈敏度高。</li> <li>2. 訊號不易受到外在電磁波影響。</li> <li>3. 同一監測孔內，可以達到部分分佈式之量測。</li> <li>4. 為被動式感測元件，儀器相較電子式儀器不需電力即可運作，故穩定性高。</li> <li>5. 訊號傳輸距離遠，可達數十公里。</li> </ol>
缺點	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 同一監測孔內，無法達到部分分佈式量測。</li> <li>2. 監測儀器容易受其電磁波干擾且穩定度低。</li> <li>3. 傳輸訊號線過長，雜訊大，讀數</li> <li>4. 容易受到影響。</li> <li>5. 耐久性低，易受潮濕損壞。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 光纖光柵節理式偏斜儀於計算時有累積誤差存在。</li> <li>2. 光纖光柵節理式偏斜儀只能量測相對角度變化。</li> </ol>

## 第五章 研究場址地下水流模擬

### 5.1 現場地下水流數值模式簡介

本研究利用加拿大 Geo-Slope 公司所發展的軟體，該軟體包含 SEEP/W(地下水流滲流分析)、SLOPE/W(邊坡穩定分析)、SIGMA/W(土壤應力應變分析)等，而在現場單一剖面地下水流模擬，則以 SEEP/W 作為本研究模擬程式。

而全區域的地下水模擬，則以美國地質調查所 Michael G. McDonald 及 Arlen W. Harbaugh (1988, 1996) 兩人所發展之模式，利用現場既有地下水觀測井資料，經由模式率定參數後，作為單一剖面地下水模擬之邊界水位設定參數來源，以下各節為敘述模擬程式之理論及現場模擬成果。

#### 5.1.1 SEEP/W 程式理論說明

SEEP/W 為二維分析模型，為利用有限元素法架構來分析多孔介質土壤的地下水滲流與孔隙水壓力變化等問題。其控制方程式(Governing equation)如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots\dots\dots (5.1)$$

方程式中

$H$  為總水頭 (m)

$k_x$ 、 $k_y$  分別為  $x$  與  $y$  方向之水力傳導係數 (m/sec)

$Q$  為邊界流通量

$\theta$  為體積含水量

$t$  為時間

而上述控制方程式，可考量不同時間狀態(transient)下之土壤體積含水量變化，以求解不同時間地下水滲流狀態下，各網格點之水壓力及滲流力變化，若考量穩定狀態(steady-state)時，則方程式對時間則無影響，因此方程式中  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ ，其控制方程式為(5.2)所示。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

另外，SEEP/W 數值模擬程式中，對於非飽和土壤分析時，則須考量水力傳導係數  $k$  與體積含水比  $\theta$  之關係，一般水力傳導係數與體積含水比之關係可藉由實驗方法或利用相關條件來預測其特性，因此 SEEP/W 程式中，考量不同學者所提出方法。表 5-1 為各學者所提出之水力傳導係數與體積含水量之關係。而方程式(5.3)為 Fredlund et al (1994)所提出之水力傳導係數與體積含水比之關係。

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^{yi}} \theta'(e^{yi})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^{yi}} \theta'(e^{yi})} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

方程式中，

$k_w$  為對於特定狀態下之含水量或負孔隙水壓力所計算出水力傳導係數(m/sec)

$k_x$  為飽和狀態之水力傳導係數(m/sec)

$\theta$  為體積含水量

$e$  為自然對數值， $e = 2.71828$

$\psi$  為基質吸力

而(5.3)方程式中之  $\theta'$  須藉由方程式(5.4)得出

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \dots\dots\dots (5.4)$$

其中，

$a$  為土壤之空氣進氣值(air-entry)

$n$  為土壤含水量方程式中，彎曲點之斜率控制參數

$m$  為與土壤殘餘含水量有關之參數

而方程式之  $C(\psi)$ ，可由方程式(5.5)求得

$$C \left( \psi = 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\psi}{C_r} \right)}{\ln \left( 1 + 1000000 / C_r \right)} \right) \dots\dots\dots (5.5)$$

式中

$C_r$  為常數值，一般為 1500 kPa，與殘餘含水量下之基值吸力有關

**表 5-1 水力傳導係數與體積含水量之預測方法**

控制方程式	參考來源
$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^{yi}} \theta'(e^{yi})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^{yi}} \theta'(e^{yi})}$	Fredlund et al, 1994
$k(\Theta)_i = \frac{k_s}{k_x} \frac{30T^2}{\mu g \eta} \frac{\xi^y}{n^2} \sum_{j=i}^m [(2j+1-2i)h_i^2]$	Green and Corey, 1971
$k_w = \frac{k_s * \left[ 1 - (\alpha\psi^{(n-1)}) * (1 + (\alpha\psi)^n)^{-m} \right]^2}{(1 + \alpha\psi^n)^m}$	Van Genuchten, 1980

而土壤體積含水比與土壤基值吸力(matric suction)有關，隨著土壤體積含水比降低，其土壤基值吸力會增加。因此，針對不同土壤性質則土壤體積含水比與基值吸力有不同之曲線，而 SEEP/W 程式中引入許多研究學者所提出之數學方程式，可依據土壤之粒徑分佈曲線、土壤空氣進氣值等，模擬出土壤體積含水比與基值吸力之關係曲線，表 5-2 為研究學者所提出之土壤體積含水比與基值吸力之關係。

方程式(5.6)為 Fredlund and Xing (1994)所提出之土壤體積含水比與基值吸力之關係，該方程式主要控制參數為土壤空氣進氣值、曲線轉折點之斜率控制與土壤殘餘含水量。

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \dots\dots\dots (5.6)$$

其中

$\theta_w$  為體積含水量

$\theta_r$  為殘餘體積含水量

$\theta_s$  為飽和體積含水量

$e$  為自然對數值， $e = 2.71828$

$\psi$  為負的孔隙水壓力

$a, m, n$  為曲線控制參數

表 5-2 水力傳導係數與體積含水量之預測方法

數學方程式	參考來源
$S_r = \frac{\theta_w}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c)$	Kovacs, 1981
$V_i = \frac{W_i}{\rho_p} * e$	Arya and Paris, 1981
$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m}$	Van Genuchten, 1980
$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]\right\}^m}$	Fredlund and Xing, 1994

### 5.1.2 MODFLOW 程式理論說明

MODFLOW 程式主要由美國地質調查局(U.S.G.S.)所發展，為利用有限差分方法求解地下水流控制方程式，其控制方程式如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (5.7)$$

其中

$k_{xx}$ 、 $k_{yy}$ 、 $k_{zz}$  分別為沿 x、y、z 軸方向之水力傳導係數

$W$  為每單位體積之體積流率

$S_s$  為孔隙介值比儲水率

$h$  為壓力水頭

$t$  為時間

該模式可用於一維、二維及大部分的三維地下水流模擬，不論為穩態或非穩態；侷限與非侷限含水層；或者侷限與非侷限含水層互層狀況，該模式均可模擬。

## 5.2 阿里山公路五彎仔路段全區域地下水流模擬結果說明

本研究在現場地下水流分析中，主要分為兩大部分，先期利用 MODFLOW 程式並配合現場既有觀測井以模擬研究區域地下水位高程變化，表 5-3 為 MODFLOW 程式參數設說明，表 5-4 及表 5-5 為現場既有現場觀測井地下水位變化於辛樂克與莫拉克颱風期間，因此利用 MODFLOW 程式模擬莫拉克及辛樂克颱風初期現場地下水位變化，其模擬方式為輸入現場水位高程，及假設初期每一網格滲透係數為  $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ ，河流水位高程為地表高程，河流面與河床高度相差 2 公尺，利用 Ucode 反推現場滲透係數，以模擬現場初期地下水位高程，圖 5.1 及圖 5.3 分別為辛樂克與莫拉克颱風前期現場地下水位高程變化圖；而辛樂克與莫拉克颱風後期地下水位高程為多考慮地表入滲之影響，其假設初期地表入滲率為  $1 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$ ，並再次利用 Ucode 反推現場滲透係數及地表入滲率，圖 5.2 及圖 5.4 分別為辛樂克與莫拉克颱風後期現場地下水位高程變化圖。因此，藉由 MODFLOW 程式模擬莫拉克颱風前、後期現場地下水高程變化，以作為後續利用 SEEP/W 模擬 B-B 剖面(圖 5.5)之地下水位邊界條件設定依據。

表 5-3 Modflow 程式參數設定說明

參數說明	參數設定值
地層條件	單一層非侷限含水層
模擬網格數	140*80
網格大小	100 m
網格初始水位高程	800 m

表 5-4 現場觀測井於辛樂克颱風期間地下水位變化表  
(青山顧問報告, 2009)

觀測井編號	辛樂克颱風		
	高水位	低水位	上升量
04-5	***	704.9	***
B-2	761.6	734	27.6
B-7	785.5	755.9	29.6
T-1	814.6	776.8	37.8
T-2	768.7	725.5	43.2
T-5	787.2	755.3	31.9

表 5-5 現場觀測井於莫拉克颱風期間地下水位變化表  
(青山顧問報告, 2009)

觀測井編號	莫拉克颱風		
	高水位	低水位	上升量
04-5	736.4	704.9	31.5
B-2	772.2	734	38.2
B-7	786.6	755.9	30.7
T-1	815.1	776.8	38.3
T-2	768.6	725.5	43.1
T-5	798.3	755.3	43

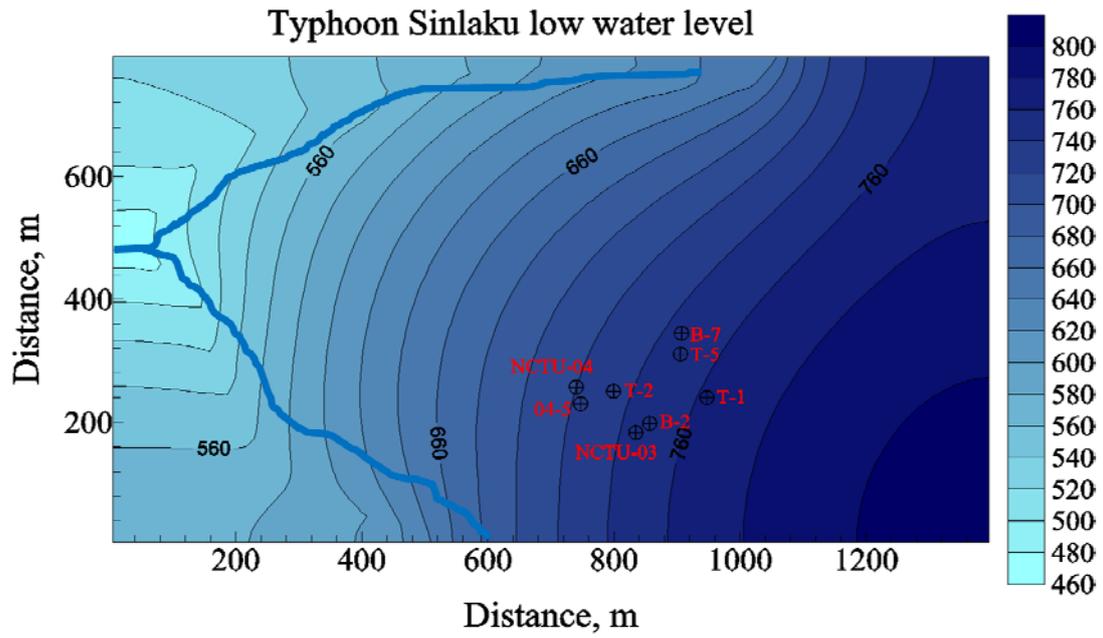


圖 5.1 辛樂克颱風前期現場地下水位高程變化圖

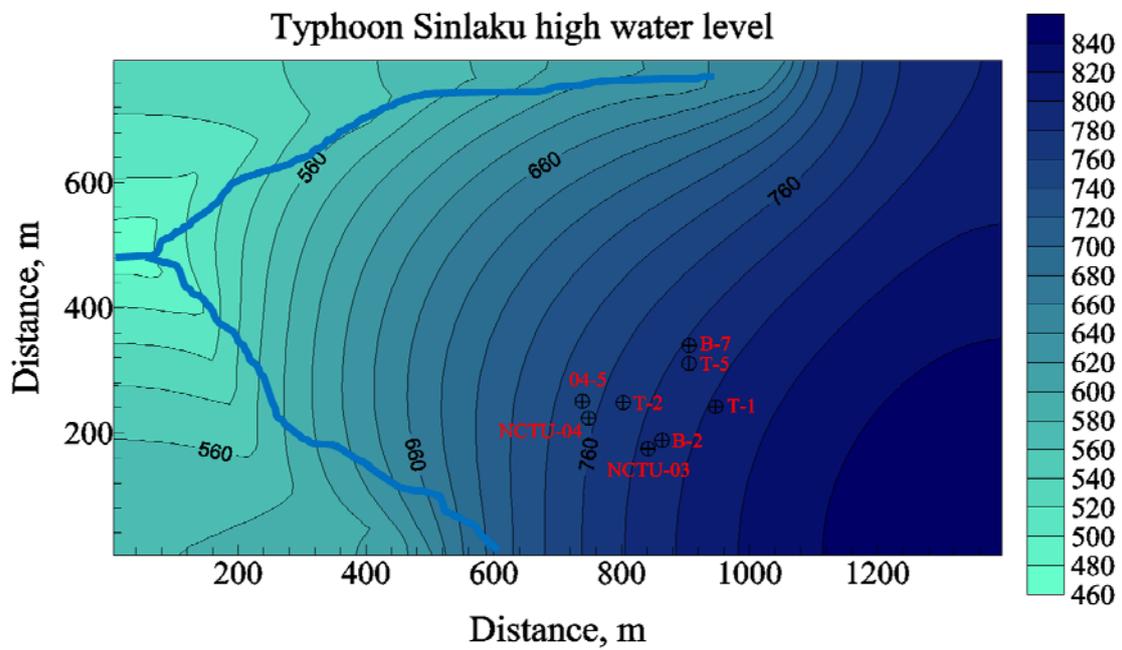


圖 5.2 辛樂克颱風後期現場地下水位高程變化圖

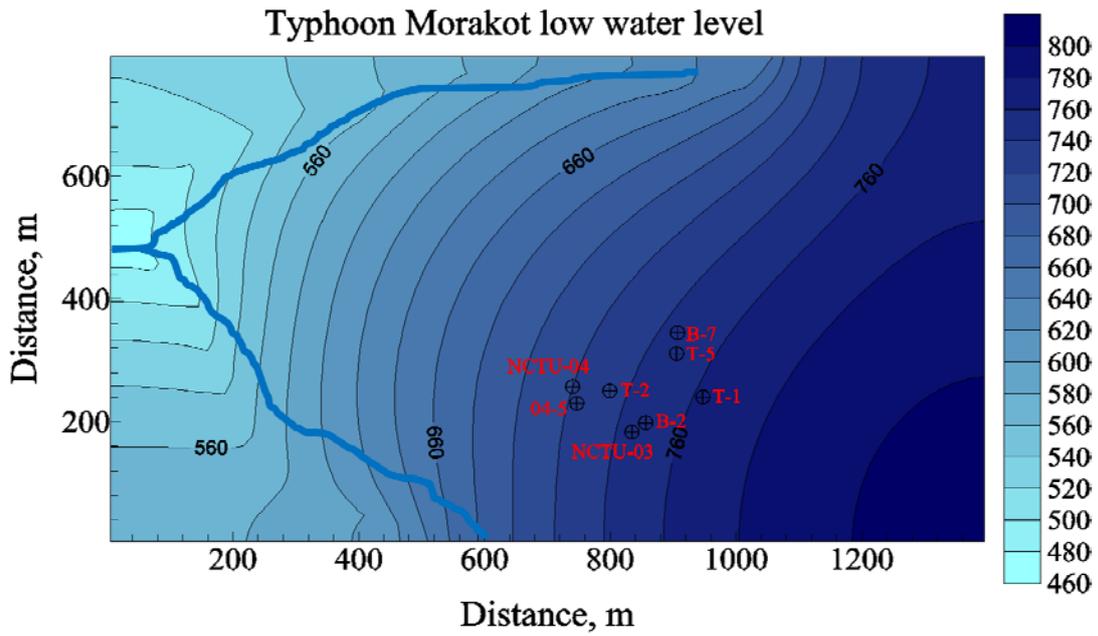


圖 5.3 莫拉克颱風前期現場地下水位高程變化圖

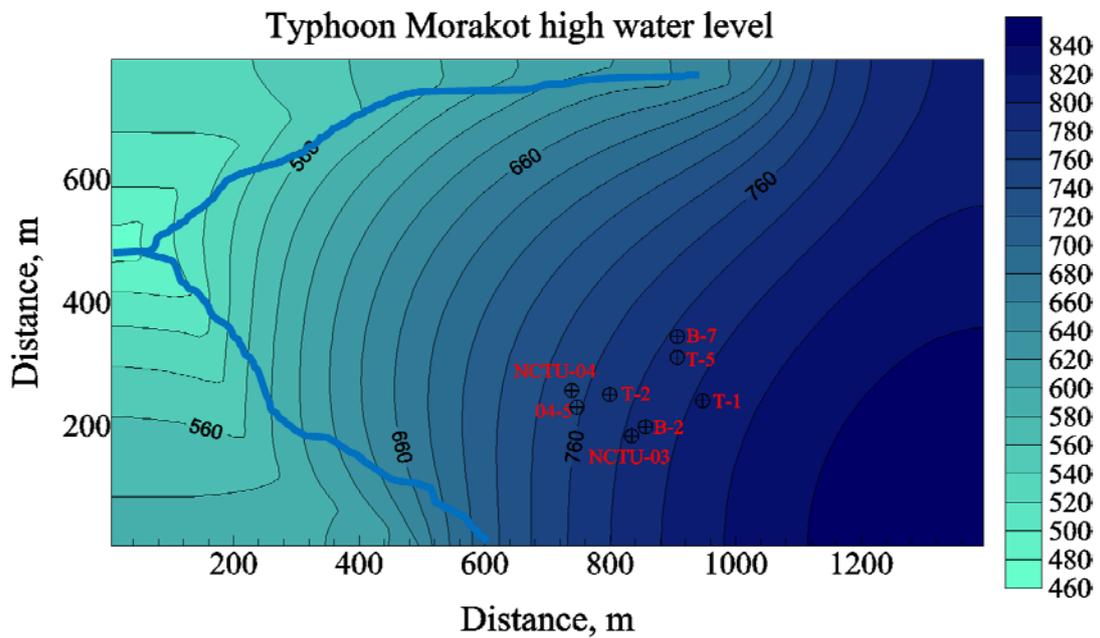


圖 5.4 莫拉克颱風後期現場地下水位高程變化圖

### 5.3 B-B剖面地下水流模擬結果說明

本研究針對臺 18 線阿里山五彎仔邊坡進行地下水模擬，而模擬斷面為在所安裝之分佈式水壓觀測井 NCTU-03 與 NCTU-04 之斷面，其目的可依據 NCTU-03 與 NCTU-04 所測得之各深度水壓變化值作為該模擬區域參數值之率定，以提供後續五彎仔邊坡區域之地下水流模型之參數。圖 5.5 為現場地下水流模型圖，在地下水流模型之兩側為水位控制邊界，以控制常期地下水位與暴雨(颱風)時期現場地下水位之變化，而地表面則會依據暴雨期間現場雨量計所測得之降雨量，將降雨量累積後乘上一係數，以作為降雨入滲於土壤之入滲量，該係數則會依據現場 NCTU-03 與 NCTU-04 分佈式水壓觀測井監測資料來作為調整依據，底層則假設為一不透水邊界。

表 5-6 為現場地下水流模型參數說明表，該表內之水力傳導係數為依據現場 NCTU-03 與 NCTU-04 所測得各深度水壓變化資料，利用試誤法調整得出，該地下水流模型中，斜線部分為高透水係數之材料，如圖 5.5 中之編號 8，而地層中水力傳導係數區分界線為圖 5.5 虛線表示。

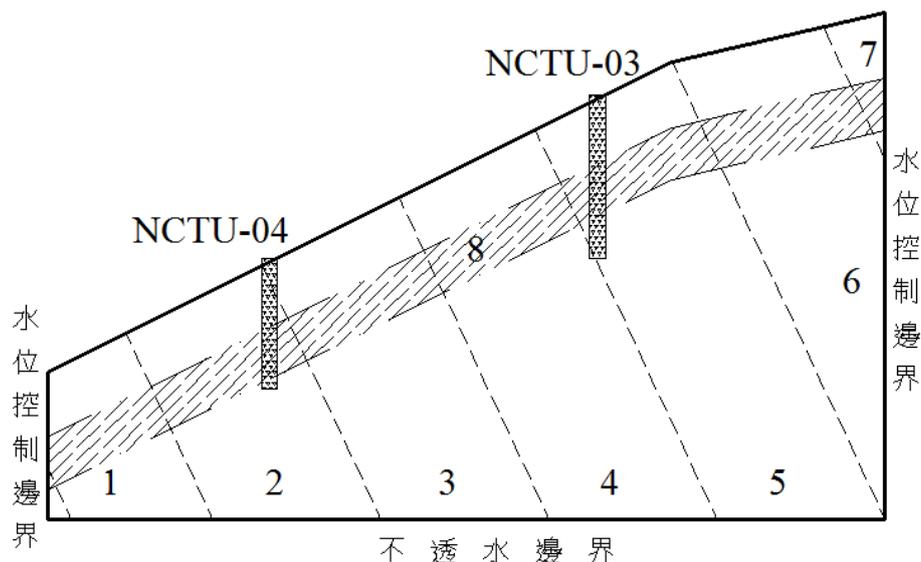


圖 5.5 現場地下水流模型圖

表 5-6 地下水流模型參數說明表

分區區域	水力傳導係數 k (m/sec)
1	$1 \times 10^{-5}$
2	$3 \times 10^{-5}$
3	$1 \times 10^{-5}$
4	$5 \times 10^{-5}$
5	$3 \times 10^{-4}$
6	$2 \times 10^{-3}$
7	$2 \times 10^{-5}$
8	$9 \times 10^{-3}$

因此，將現場地下水流模型參數率定完成後，分別以主要事件辛樂克與莫拉克颱風作為地下水流模擬驗證結果說明。而地下水流模擬結果，作為後續該現場邊坡分析之參數。

### 5.3.1 辛樂克颱風現場地下水流模擬測試結果

圖 5.6 為現場模擬區域於辛樂克颱風期間之降雨量，由監測資料顯示現場累積降雨量約達 900 mm，而由 NCTU-03 水壓觀測井所監測到最大水壓力變化為 210 kPa，約 7 層樓高水位變化量，圖 5.7 為 NCTU-03 水壓觀測井於辛樂克颱風期間內，地層中各深度水壓隨時間變化之 3D 圖形。

而於現場地下水流模擬部分，初期先以穩定狀態(steady-state)模擬，利用 NCTU-03 水壓觀測井監測資料作為地下水流模擬程式參數調整依據，以模擬辛樂克颱風前期階段之地下水位變化及後期階段之地

下水位變化，圖 5.9 及圖 5.10 為利用 SEEP/W 模擬辛樂克颱風前期階段與後期階段於 NCTU-03 各深度水壓變化值，並與現場實際監測資料互相比對。

圖 5.9 中模擬結果顯示，實際監測數據與模擬結果有些差異，尤其在 -14m 至 -30m 間，因受到土壤基質吸力影響，故模擬結果呈現負水壓狀況。

對於現場地下水流模擬之入滲量輸入的大小，則先將水位控制邊界由低水位調整至高水位，將穩態模擬結果與實際 NCTU-03 水壓監測結果比較，固定模擬程式中之地表入滲邊界線，如圖 5.8。再利用試誤法調整地表入滲量之大小，則地表入滲量為  $8 \times 10^{-7}$  m/sec。

將穩態調整後之輸入參數，進行暫態(transient)模擬，以模擬在不同時間點位下，現場地層中各深度之水壓隨時間變化，其模擬結果並與現場 NCTU-03 水壓觀測井所量測結果互相比較，圖 5.11 所示。

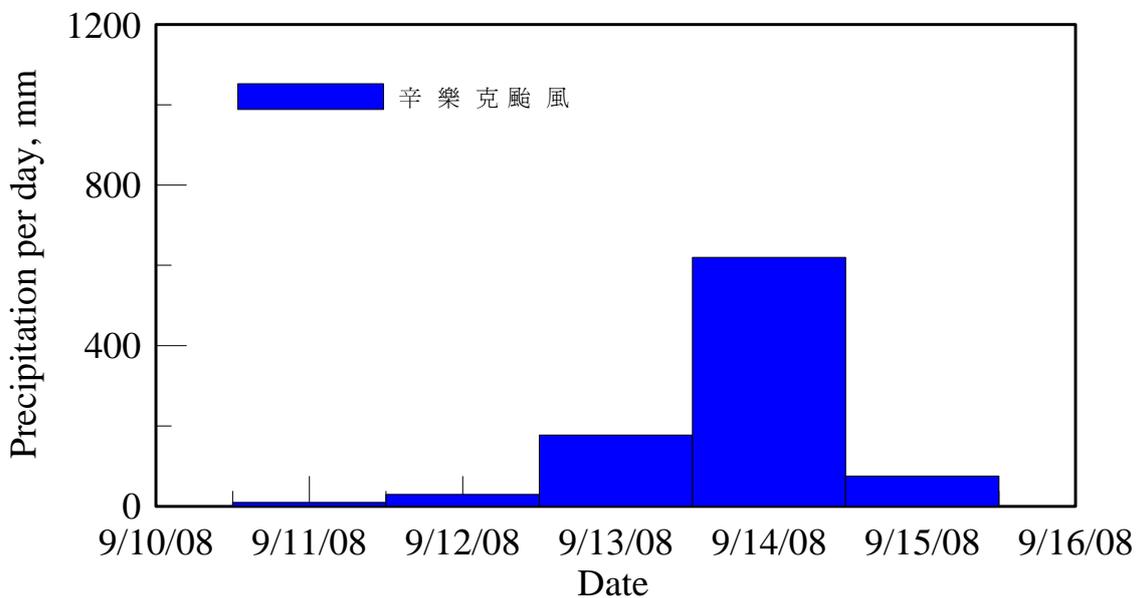


圖 5.6 辛樂克颱風現場降雨量

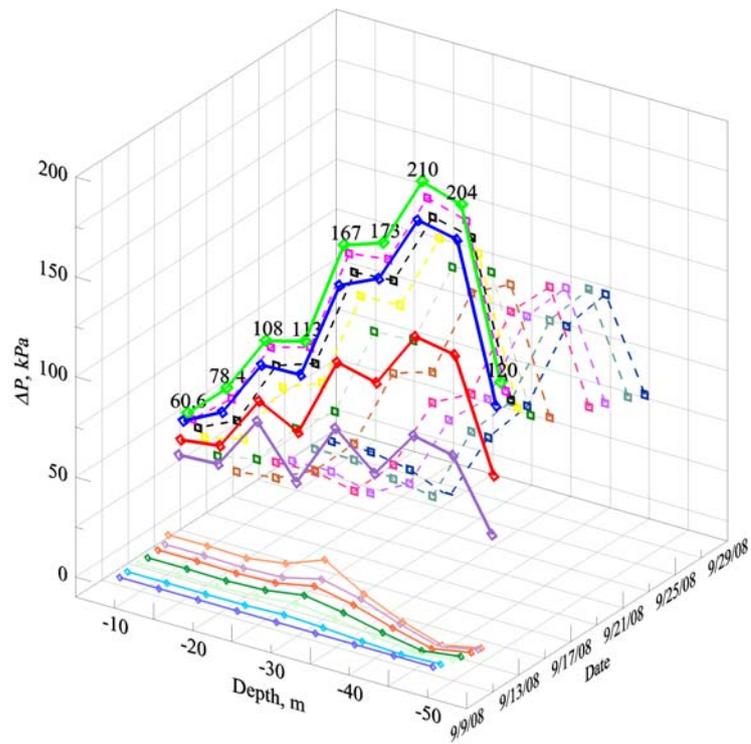


圖 5.7 NCTU-03 水壓觀測井於辛樂克颱風 3D 歷時變化圖

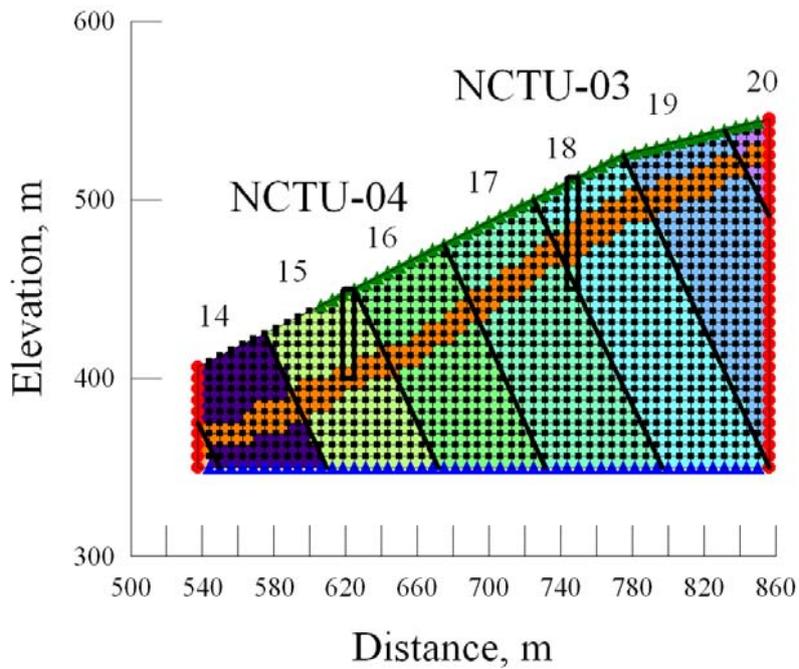


圖 5.8 考量入滲邊界之 SEEP/W 現場地下水流模型圖

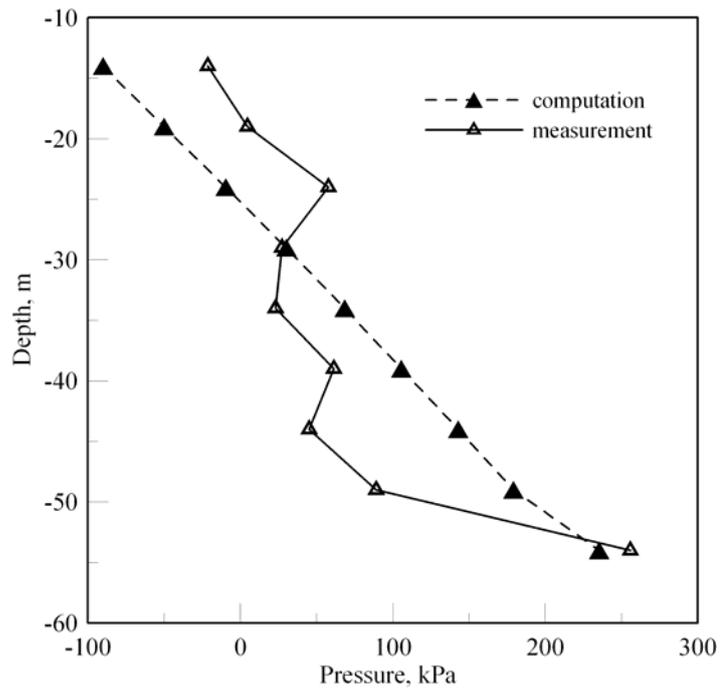


圖 5.9 低水位穩態狀態於辛樂克颱風之模擬值與實際監測值比較圖

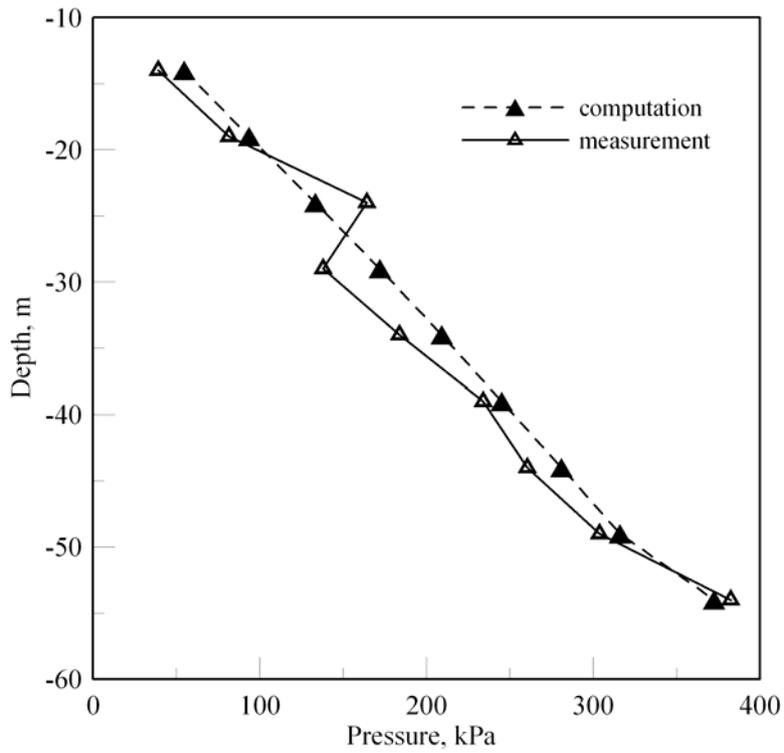


圖 5.10 高水位穩態狀態於辛樂克颱風之模擬值與實際監測值比較圖

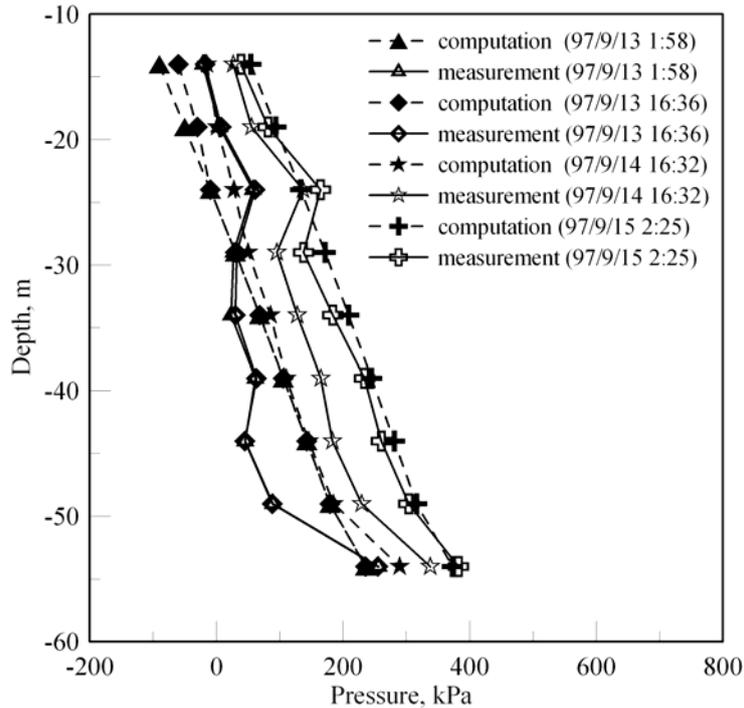


圖 5.11 暫態狀態下於辛樂克颱風之模擬值與實際監測值比較圖

### 5.3.2 莫拉克颱風現場地下水流模擬測試結果

圖 5.12 為現場模擬區域於莫拉克颱風期間之降雨量，由監測資料顯測現場累積降雨量約達 2100 mm，而由 NCTU-03 水壓觀測井所監測到最大水壓力變化為 287 kPa，約 10 層樓高水位變化量，與辛樂克颱風其水壓監測值約增加 80 kPa，而累積降雨量部分則高出 1200 mm，圖 5.13 為 NCTU-03 水壓觀測井於莫拉克颱風期間內，地層中各深度水壓隨時間變化之 3D 圖形。

而於現場地下水流模擬部分，初期先以穩定狀態(steady-state)模擬，利用 NCTU-03 水壓觀測井監測資料作為地下水流模擬程式參數調整依據，以模擬莫拉克颱風前期階段之地下水位變化及後期階段之地下水位變化，圖 5.14 及圖 5.15 為利用 SEEP/W 模擬莫拉克颱風前期階段與後期階段於 NCTU-03 各深度水壓變化值，並與現場實際監測資料互相比對。

圖 5.14 中模擬結果顯示，實際監測數據與模擬結果在低水位時期有些差異，尤其在-14m 至-30m 間，因受到土壤基質吸力影響，故模擬結果呈現負水壓狀況。

對於現場地下水流模擬之入滲量輸入的大小，則先將水位控制邊界由低水位調整至高水位，將穩態模擬結果與實際 NCTU-03 水壓監測結果比較，固定模擬程式中之地表入滲邊界線。再利用試誤法調整地表入滲量之大小，則地表入滲量為 $1 \times 10^{-6}$  m/sec。

將穩態調整後之輸入參數，進行暫態(transient)模擬，以模擬在不同時間點位下，現場地層中各深度之水壓隨時間變化，其模擬結果並與現場 NCTU-03 水壓觀測井所量測結果互相比較，圖 5.16 所示。

因此，藉由辛樂克與莫拉克颱風之現場地層水壓監測資料，可對現場地下水流模型進行驗證與測試，進而推估地表入滲量、地下水位變化對於現場地層內部水壓變化影響，以間接方式推求降雨量與現場地表入滲量及地下水位變化之關係，並可作為後續評估現場邊坡穩定性，利用土壤有效應力之觀念及配合現場地下水流模型得出之地層水壓分佈，可推求不同時間點，地層中各點有效應力變化值，進而建立邊坡安全係數，提供與預測邊坡破壞可能性。

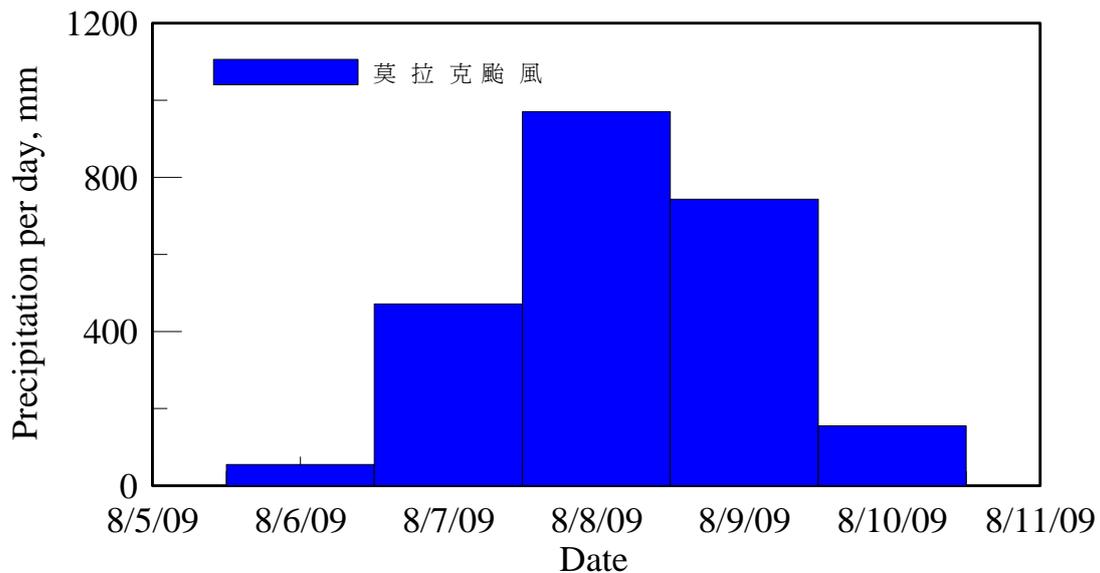


圖 5.12 莫拉克颱風現場降雨量

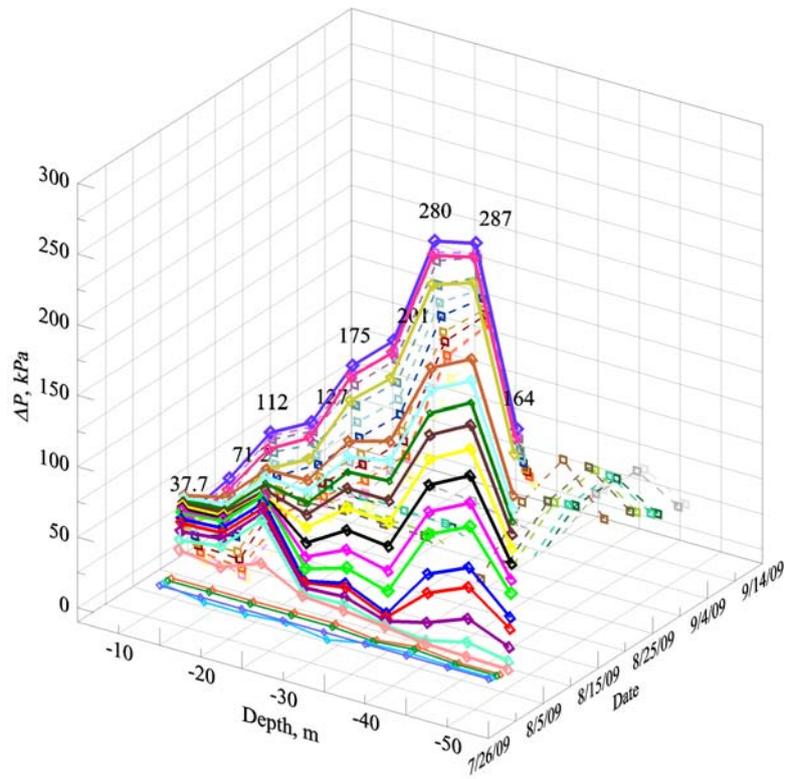


圖 5.13 NCTU-03 水壓觀測井於莫拉克颱風 3D 歷時變化圖

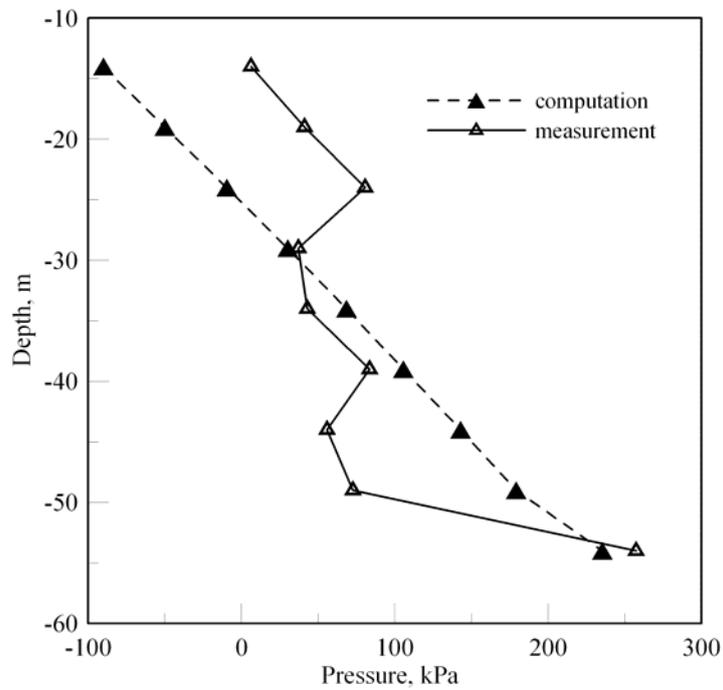


圖 5.14 低水位穩態狀態於莫拉克颱風之模擬值與實際監測值比較圖

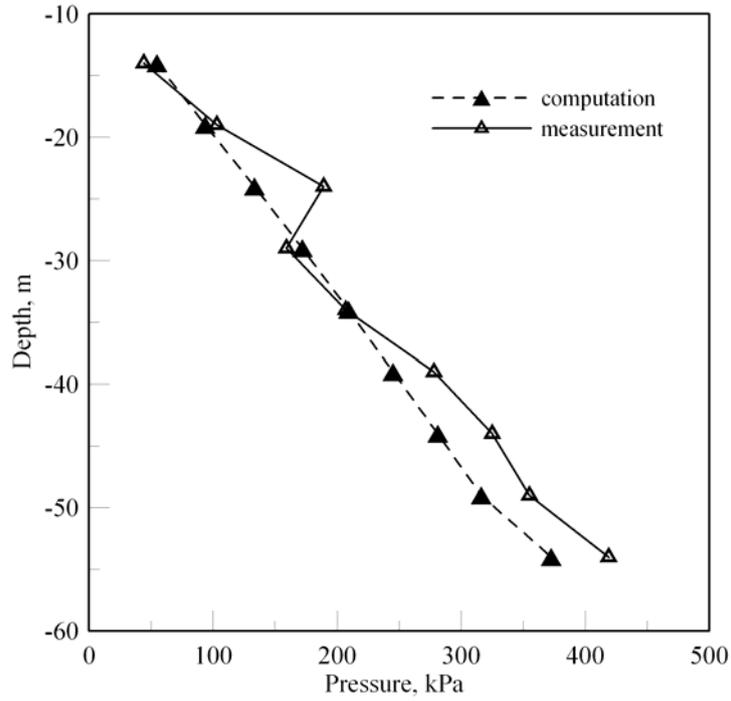


圖 5.15 高水位穩態狀態於莫拉克颱風之模擬值與實際監測值比較圖

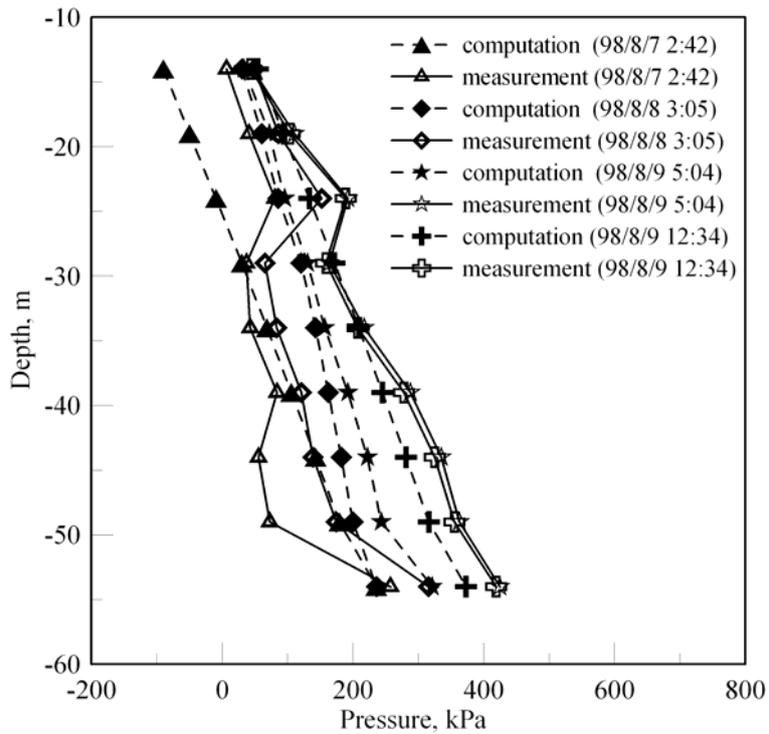


圖 5.16 暫態狀態下於莫拉克颱風之模擬值與實際監測值比較圖

## 第六章 邊坡穩定分析與破壞潛勢定義說明

### 6.1 邊坡破壞模式說明

一般邊坡崩坍形式依其移動方式可分為墜落(fall)、傾翻(topple)、滑動(slide)、轉動(slump)、流動(flow)與潛移(creep)等六種，如圖6.1所示。常見暴雨引發坡地崩塌以流動、滑動與轉動居多，坡地崩塌分析理論主要為描述坡地是否會發生轉動或滑動等現象。

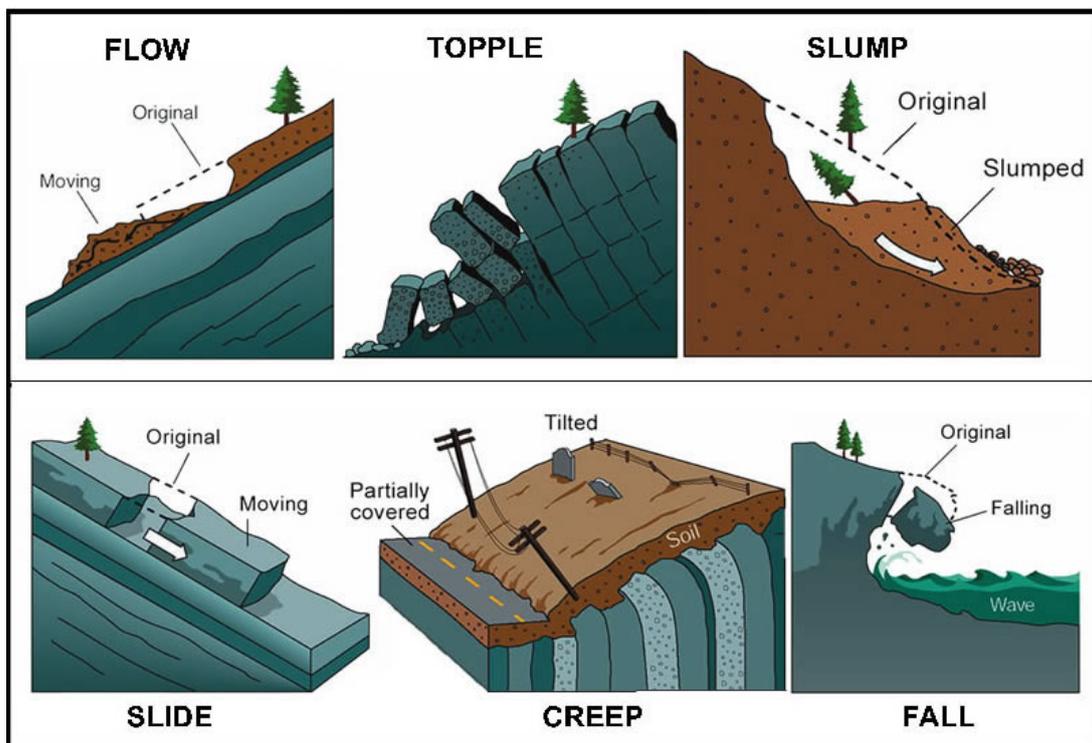


圖 6.1 邊坡坡地崩塌類型圖 (Geoscience Australia, <http://www.gov.au/hazards/landslide/causes.jsp>)

### 6.2 邊坡穩定分析方法與室內環剪模擬實驗介紹

#### 6.2.1 邊坡穩定分析方法介紹

常見之邊坡崩塌分析可分為極限平衡法(Limited equilibrium analysis)與變形分析法(Deformation analysis)兩大類，而本小節主要闡述

極限平衡法。

極限平衡法可分為單一自由體分析法(Feebody analysis)及切片分析法(Slices analysis)。若土壤具凝聚性，且考慮地形變動及孔隙水壓力分佈，切片分析法為較適當之分析方法，切片作用力與破壞說明圖，如圖6.2所示。其破壞面為一弧形剪切破壞，假設切片間的剪力合力為零，並且利用力矩平衡之方式作分析，利用滑動塊整體力矩平衡，其安全係數如下式表示

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n - (W_n - u_n b_n) \tan \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \dots\dots\dots (6.1)$$

方程式(6.1)中

$c'$  為土壤凝聚力(Cohesion)

$\phi'$  為土壤摩擦角度

$b_n$  為各切片寬度

$W_n$  為各切片重力

$u_w$  為各切片破壞圓弧上壓力水頭

因方程式(6.1)不滿足靜力平衡，其推估值略低於正確方法所得值之10%~15%左右，若為高孔隙水壓之坡地，則產生誤差高達50%。

Bishop(1955)則改善方程式(6.1)式中無法滿足垂直力平衡之缺點，其安全係數滿足垂直力及整體力矩平衡，如方程式(6.2)表示

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n - (W_n - u_n b_n) \tan \phi') \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \dots\dots\dots (6.2)$$

其中

$$m_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{FS} \dots\dots\dots (6.3)$$

方程式(6.2)中安全係數(FS)存在於方程式之兩邊，因此須利用試誤法(try-and-error)找出安全係數之數值，當安全係數小於1即代表破壞。Bishop修正分析法以簡單之方法應用於坡地穩定度分析，並結合電腦數值計算，目前已廣泛應用於工程實務上。

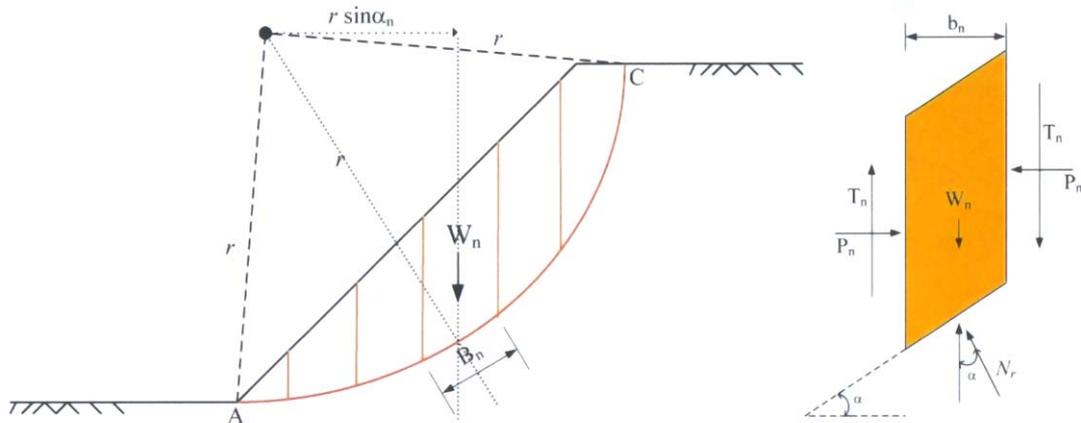


圖 6.2 破壞面切片作用力示意圖

### 6.2.2 室內環剪模擬實驗介紹

一般邊坡滑動時，為大範圍之滑動，破壞面之滑動位移及速率非常大，圖6.3為Sassa et al., 2004利用環剪試驗儀器模擬現場邊坡滑動受剪行為，以解決傳統三軸儀器土壤於受剪時，破壞面位移會受到儀器限制，無法實際模擬現場邊坡滑動狀況。

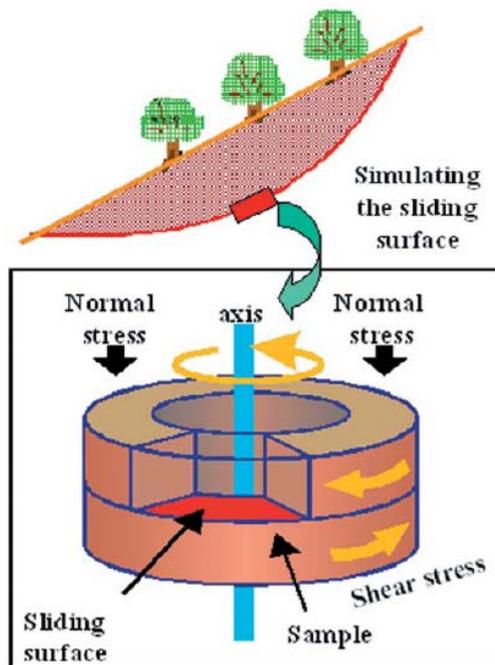


圖 6.3 利用環剪試驗模擬邊坡滑動面之應力元素 (Sassa et al.,2004)

圖6.4(a)為模擬邊坡受到地震作用下應力條件，其假設一可能滑動面受到土壤重力及地震力作用，圖6.4(b)為受到動態作用下之總應力與有效應力路徑圖，其中有效應力路徑受其動態載重下所產生超額孔隙水壓影響。圖6.5為模擬砂土層受剪過程中應力路徑結果，其中藍色線代表總應力路徑，紅色線代表有效應力路徑。

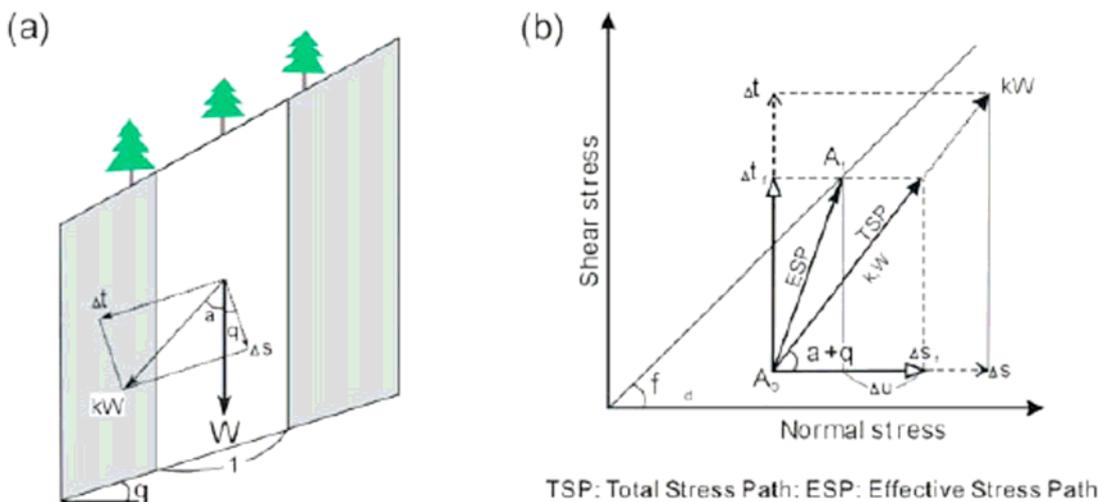


圖 6.4 應力狀態於實際邊坡與環剪儀器 (Sassa et al.,2004)

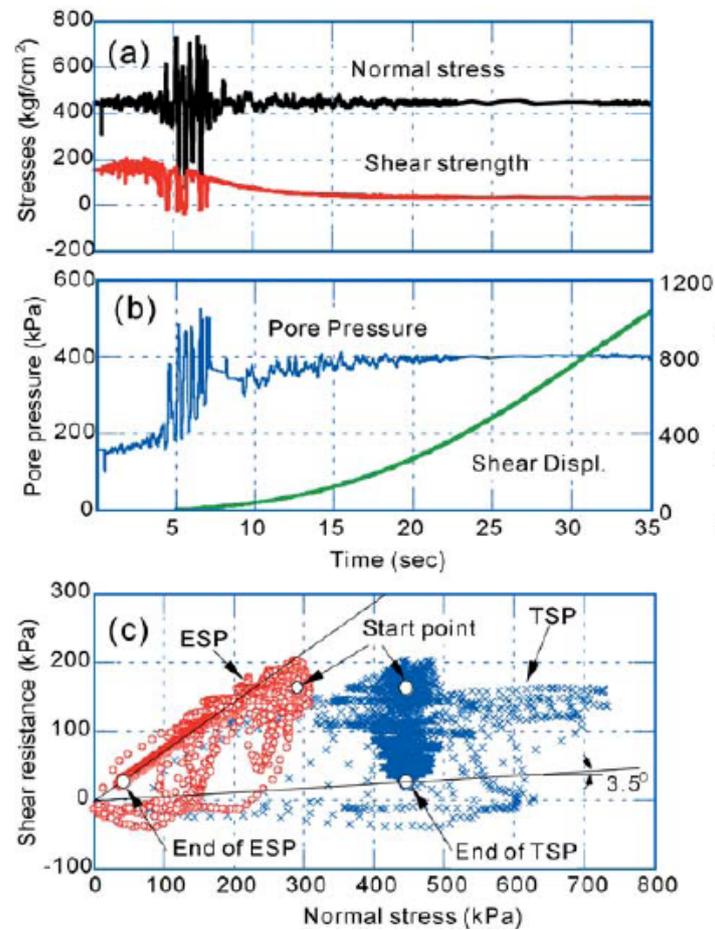


圖 6.5 模擬飽和砂土層於不排水條件下受剪行為 (Sassa et al.,2004)

圖6.6為Minamata邊坡斷面圖，分別在A點與B點取樣進行實驗，圖6.7為模擬Minamata邊坡滑動結果，當孔隙水壓力隨降雨量增加後，初始應力點會向左邊水平移動而到達破壞包絡線產生破壞，因此，藉由此應力路徑觀點，若知道邊坡內水壓分佈及變化時，可利用有效應力路徑方式來判別邊坡是否發生破壞。

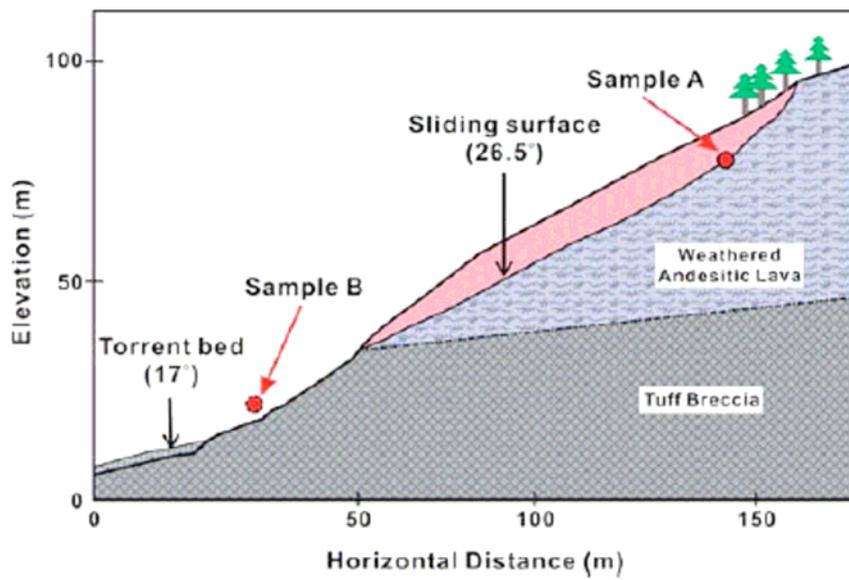


圖 6.6 Minamata 邊坡斷面圖 (Sassa et al.,2004)

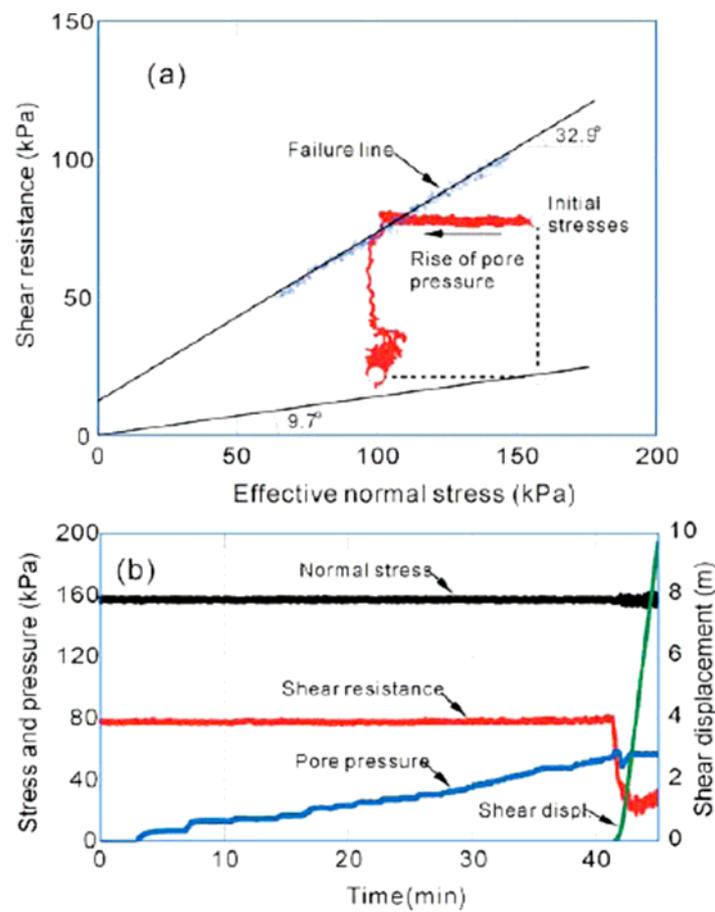


圖 6.7 模擬 Minamata 邊坡受剪應力路徑結果 (Sassa et al.,2004)

### 6.3 現場邊坡初始應力狀態之建立

本研究為利用加拿大Geo-Slope公司所發展之軟體中之SIGMA/W有限元素分法，求解現場邊坡各元素之初始應力狀態，圖6.8為現場邊坡模型示意圖，而在邊坡模型邊界設定條件上，為假設邊坡模型左右邊界為滾接狀態，使得邊坡變形時，水平方向不能移動，垂直方向可移動，邊坡模型底部則假設為絞接支承，即水平及垂直方向不能移動，並利用線彈性模式求解及考慮初始地下水位狀況，而邊坡模型參數設定方面，如表6-1。其假設土體為均質狀態下，其土壤飽和單位重為 $20 \text{ kN/m}^3$ 、楊氏系數為 $4 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ 、波松比為0.3，進行邊坡數值模擬。圖6.9至圖6.14為邊坡各元素之各方向應力結果圖。其中 $\sigma_{yy}$ 代表垂直應力， $\sigma_{xx}$ 代表水平側向應力， $\sigma_{zz}$ 代表垂直該平面之應力， $\sigma_{xy}$ 代表剪力應力， $p$ 代表平均主應力值， $q$ 代表軸差應力值。

表 6-1 現場邊坡模型參數設定說明

參數說明	參數設定值
模擬組構條件	線彈性行為
土壤單位重	$20 \text{ kN/m}^3$
楊氏(彈性)模數	$40000 \text{ kN/m}^2$
波松比	0.3
網格數目	9847
網格點位間距	$6.25 \text{ m}$

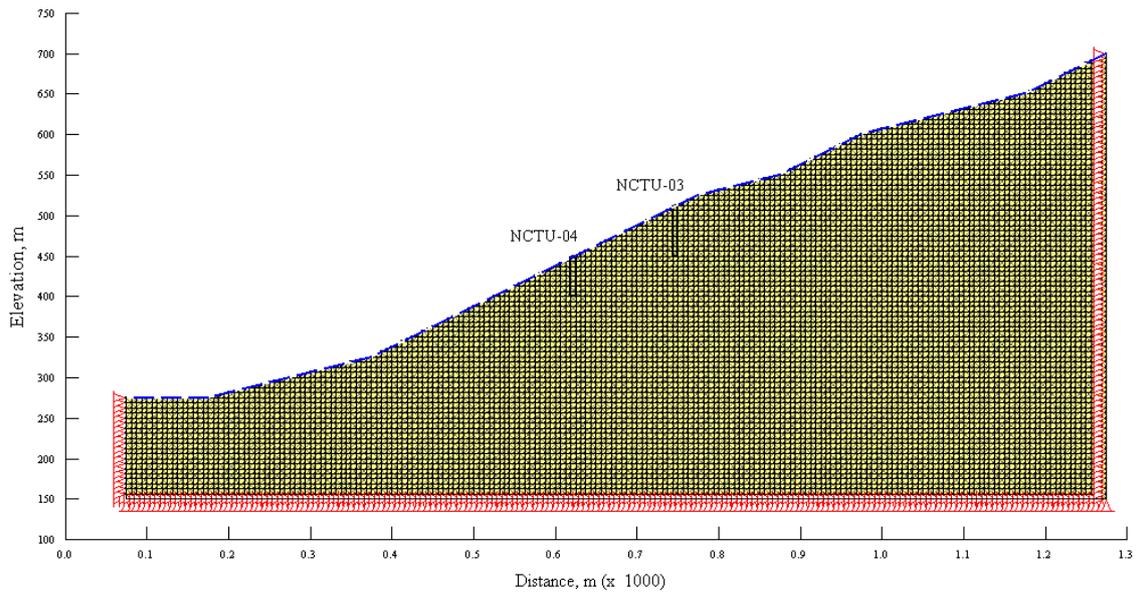


圖 6.8 現場邊坡模型網格示意圖

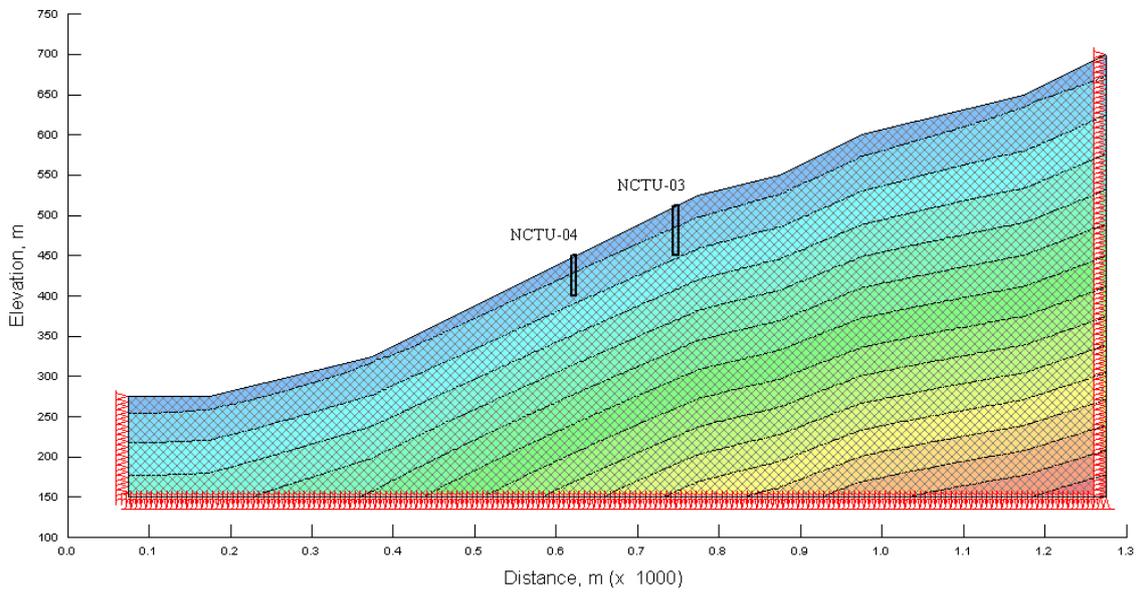


圖 6.9 模擬邊坡各元素  $\sigma_{xx}$  應力大小示意圖

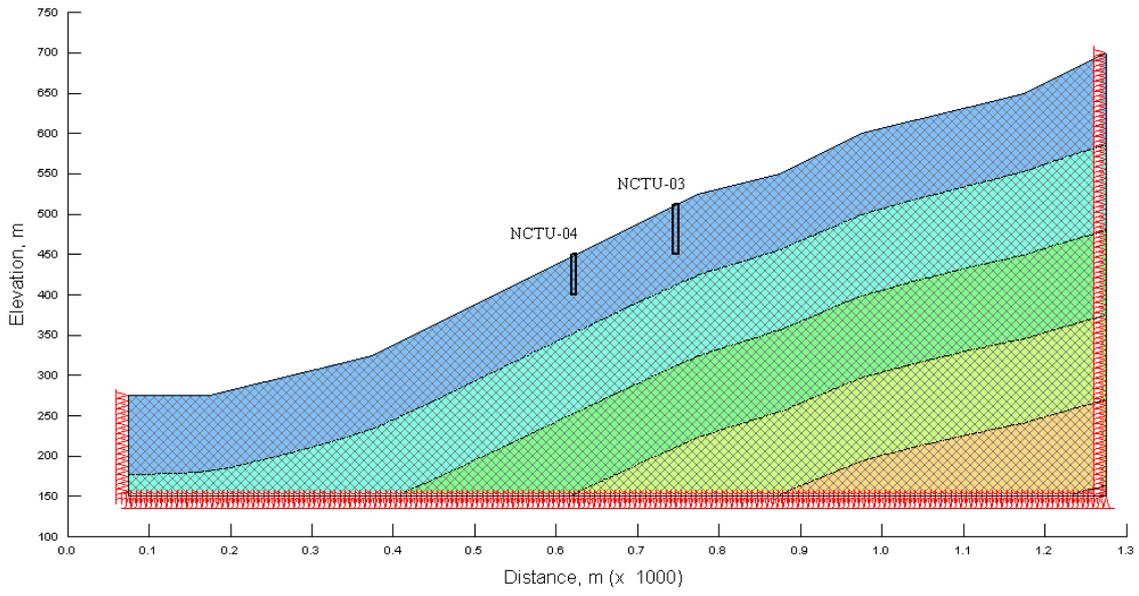


圖 6.10 模擬邊坡各元素  $\sigma_{yy}$  應力大小示意圖

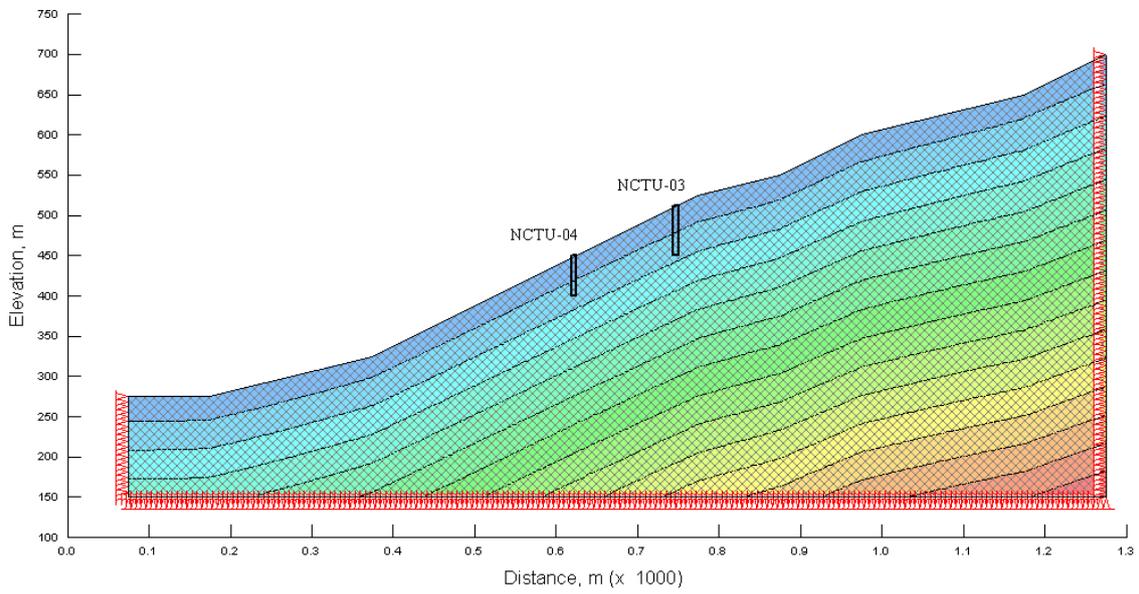


圖 6.11 模擬邊坡各元素  $\sigma_{zz}$  應力大小示意圖

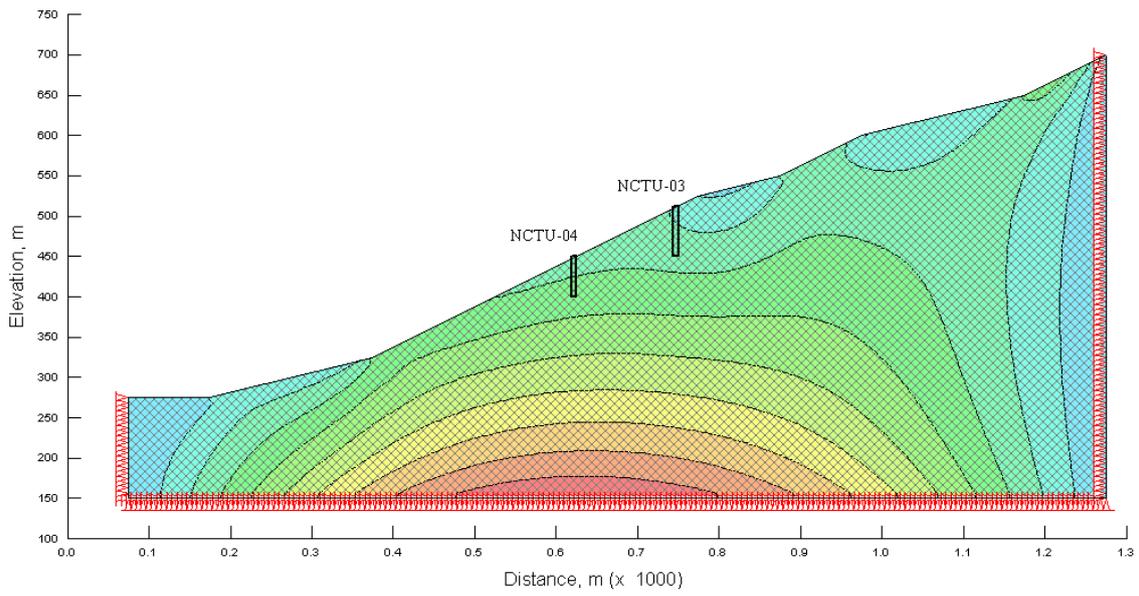


圖 6.12 模擬邊坡各元素  $\sigma_{xy}$  應力大小示意圖

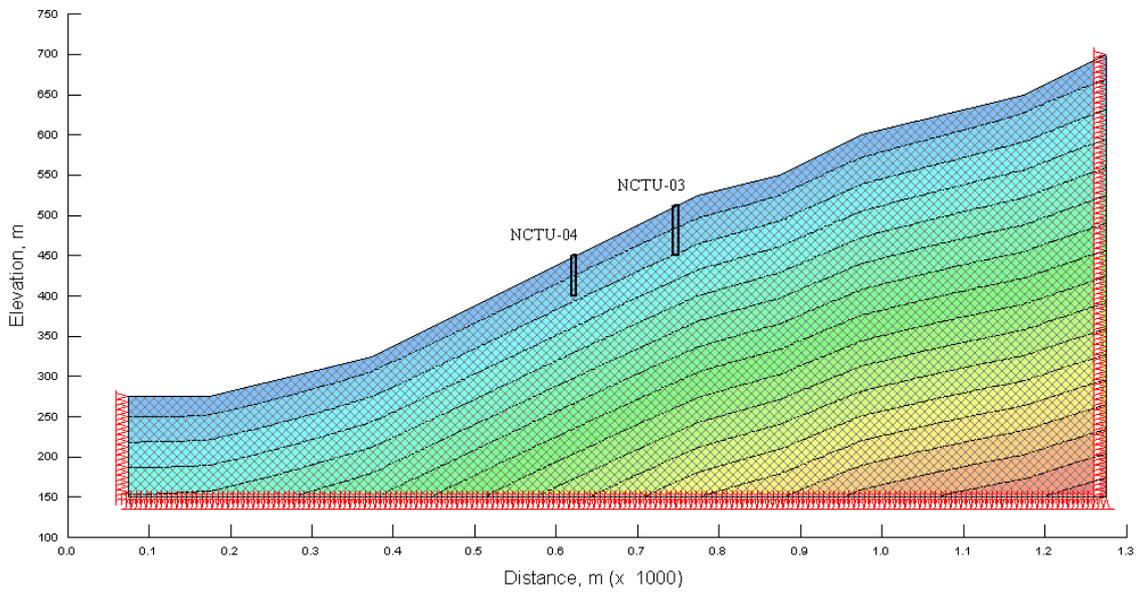


圖 6.13 模擬邊坡各元素  $p$  應力大小示意圖

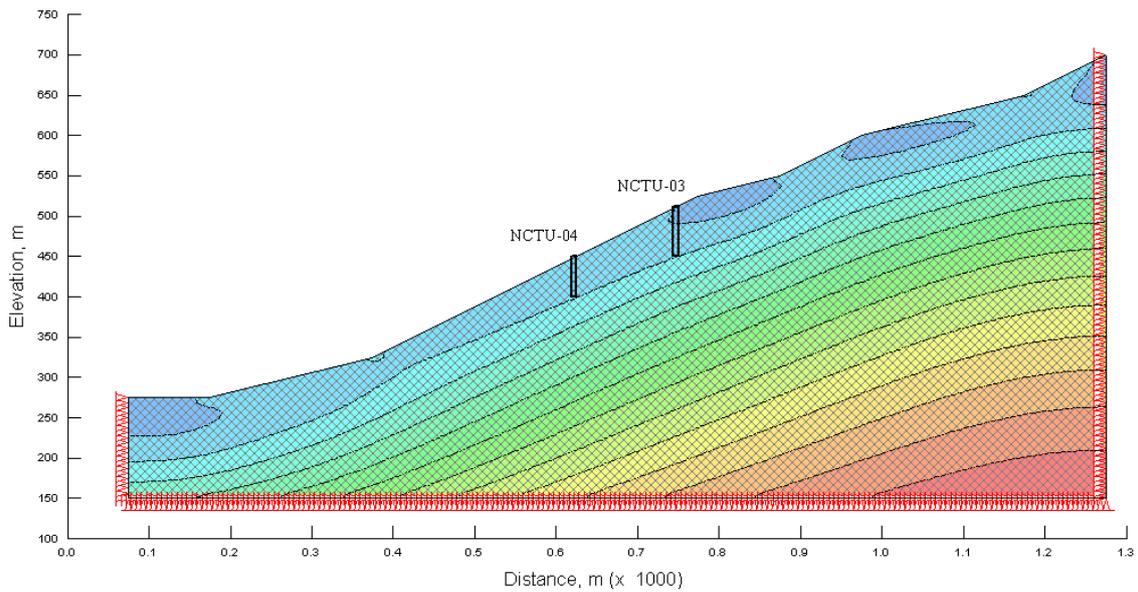


圖 6.14 模擬邊坡各元素  $q$  應力大小示意圖

#### 6.4 邊坡破壞潛勢定義說明

根據土壤破壞準則，利用SIGMA/W有限元素法先求解出現場邊坡各網格元素初始應力大小，透過公式(6-4)及(6-5)，以 $p'$ - $q$ 圖表示得到每一網格初始應力狀態，而公式(6-3)與(6-4)為表示有效應力摩擦角與 $p'$ - $q$ 圖斜率關係，因此，可求得土壤在極限狀態下之 $\psi$ ，而表6-2為利用土壤破壞時之摩擦角來定義土壤在不同極限狀態下值，可定義出紅色潛勢、黃色潛勢及綠色潛勢之邊坡破壞預警。

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \dots\dots\dots (6-4)$$

$$q = \left[ \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2}{2} + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right]^{1/2} \dots (6-5)$$

$$M = \frac{q}{p} = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \dots\dots\dots (6-6)$$

$$\sin \phi' = \frac{3M}{6 + M} \dots\dots\dots (4-7)$$

表 6-2 邊坡破壞潛勢範圍大小

	紅色潛勢	黃色潛勢	綠色潛勢
$\phi'$	$\geq 35^\circ$	$20^\circ \sim 35^\circ$	$\leq 20^\circ$
$M(q/p')$	$\geq 1.42$	$0.77 \sim 1.42$	$\leq 0.77$

當土壤中孔隙水壓上升時，則土壤有效應力會降低，若以p-q圖表示地層中某一點應力變化，則水壓上升時，該點主應力p值會變小而往左邊移動，當接近土壤破壞包絡線時，則發生破壞，如圖6.15中藍色圓點變化。而破壞準則訂立為求得土壤破壞時摩擦角所對應之p-q圖中斜率，若土壤破壞時的摩擦角為30度，則對應p-q圖中之  $\tan \psi = 1.2$ ，因此藉由數值模擬方式可求解出B-B剖面各點之初始應力及孔隙水壓力大小，故可利用土壤摩擦角對應  $\tan \psi$  值與某一網格點之  $\tan \psi$  值的比值建立安全係數，當安全係數大於1時，則該點為安全狀態，反之，若小於1時，則該點產生破壞，因此藉由有效應力之觀念，可反映現場邊坡每一網格點之安全值大小，並以等高線之方式表示現場邊坡之安全係數變化。

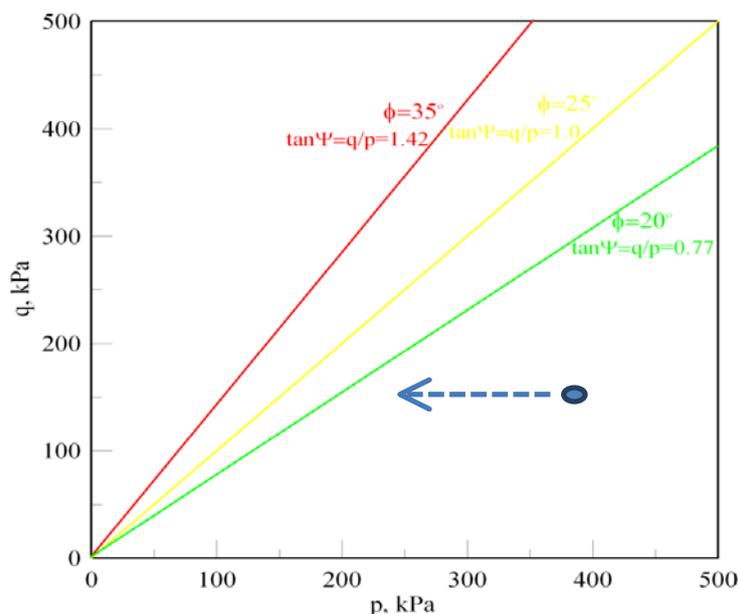


圖 6.15 不同摩擦角所對應 p-q 圖之斜率說明

圖6.16為邊坡安全預警機制流程圖，藉由邊坡所安裝分佈式水壓觀測井，可量得地層內部孔隙水壓變化，並透過數值模擬方式可預先建立現場邊坡初始應力狀態，應用有效應力觀念，將即時量測現場孔隙水壓，利用有效應力法則，可即時計算不同時間狀態下之有效應力值，根據安全係數之定義(如圖6.16中)，即可求得不同時間點下之安全係數，當安全係數大於等於2時，顯示綠燈狀態，表示現場邊坡目前處於安全狀態；安全係數介於1與2之間時，則為警戒狀態，顯示黃燈，表示公路單位目前值班人員須密切注意現場監測數據；當安全係數小於等於1時，顯示紅燈，表示現場邊坡可能處於不安全情況，則系統將發送簡訊至各單位，值班人員須至現場觀察目前邊坡狀態，以提供相關可靠資訊，作為後續決策之依據。

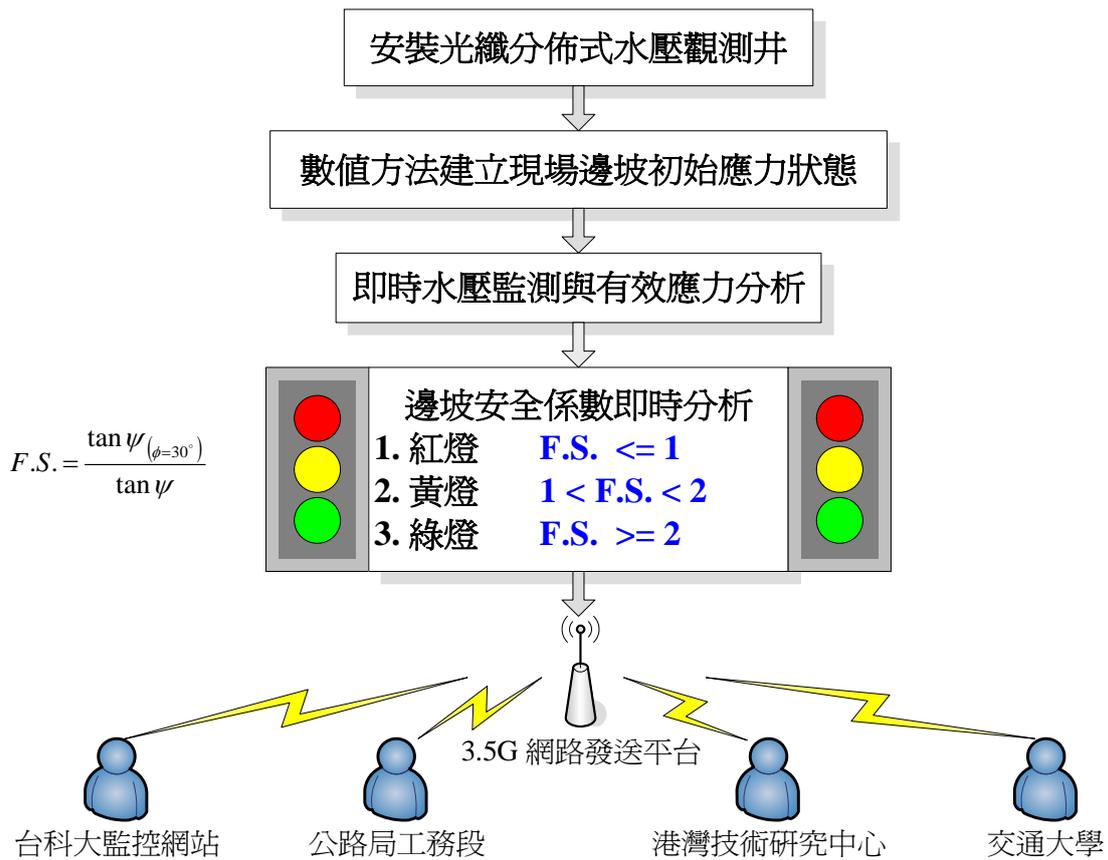


圖 6.16 邊坡安全預警機制流程圖

## 6.5 阿里山公路五彎仔路段邊坡破壞分析

圖6.17為顯示B-B剖面於莫拉克颱風前期低水位狀況之邊坡安全係數等高線趨勢圖，此節安全係數定義為  $\tan \psi / \tan \psi_{(\phi=30^\circ)}$ ，當  $\tan \psi / \tan \psi_{(\phi=30^\circ)}$  大於等於1時為破壞，反之小於1時則代表安全狀況，隨著降雨量增加，以及地表水入滲與側向水流補注，使得土壤中孔隙水壓力增加，造成有效應力降低，圖6.18至圖6.20為表示不同時間情況下，現場邊坡安全係數等高線變化趨勢，可看出隨著孔隙水壓力增加於B-B剖面邊坡淺層及深層有破壞之趨勢，圖6.21為於莫拉克颱風高水位時期之邊坡安全係數變化圖，其邊坡淺層有明顯破壞面產生，將此破壞面作為SLOPE/W邊坡穩定之驅動面，其假設之摩擦角為30度且土壤無凝聚力，可得出該驅動面之安全係數為1.545(如圖6.22)，而現場傾斜觀測數據及勘察該監測區域並無過大變形量產生及災變發生。

圖6.23為NCTU-03孔位各深度之  $\tan \psi / \tan \psi_{(\phi=30^\circ)}$  於莫拉克颱風時期變化趨勢圖，可看出各深度點位距破壞面還有一些差距。

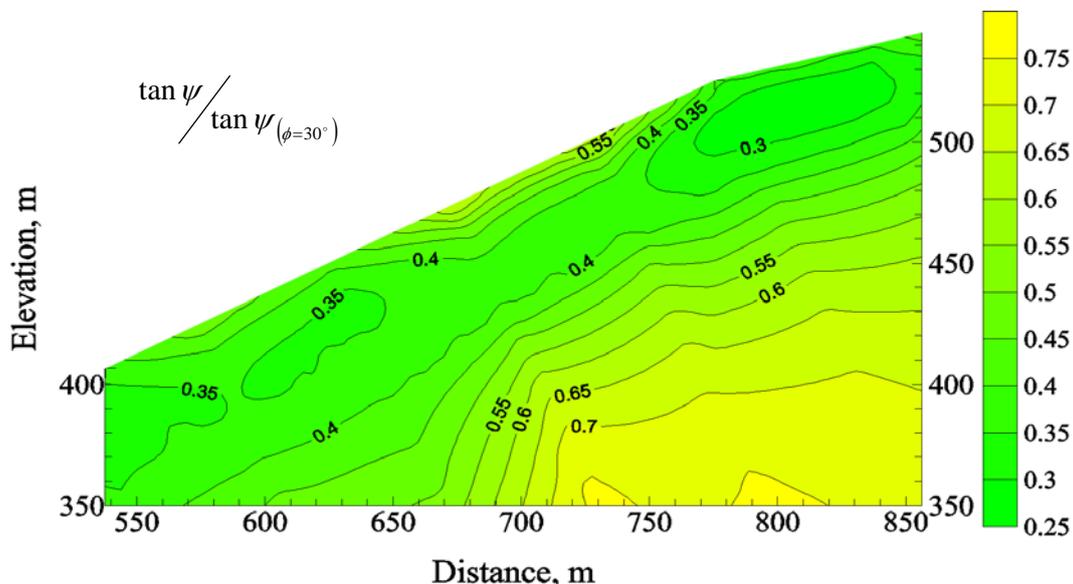


圖 6.17 低水位時期 B-B 剖面安全係數等高線(莫拉克颱風)

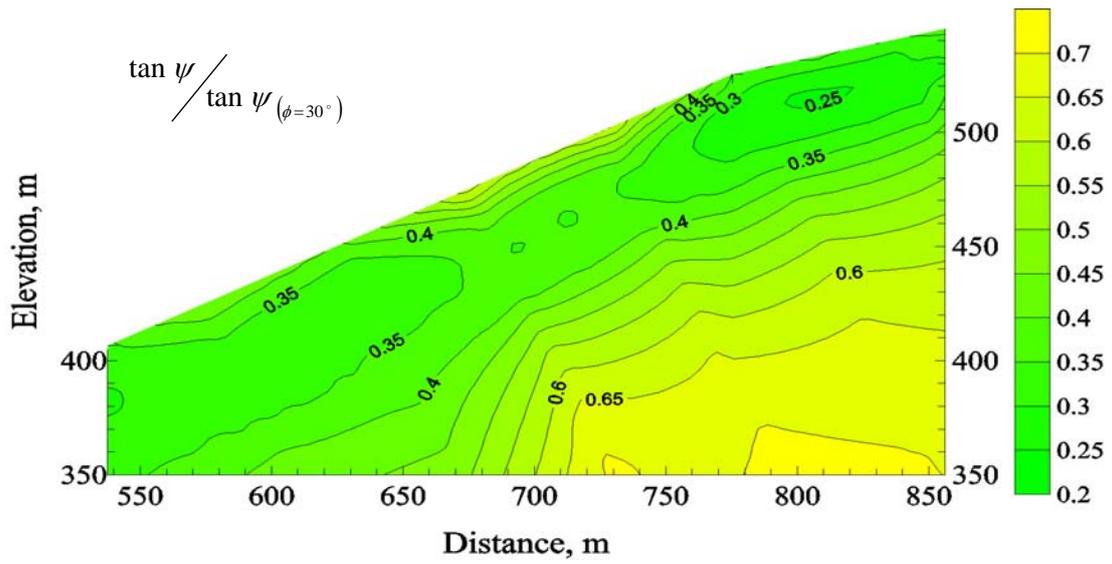


圖 6.18 T=14.4hr 時 B-B 剖面安全係數等高線(莫拉克颱風)

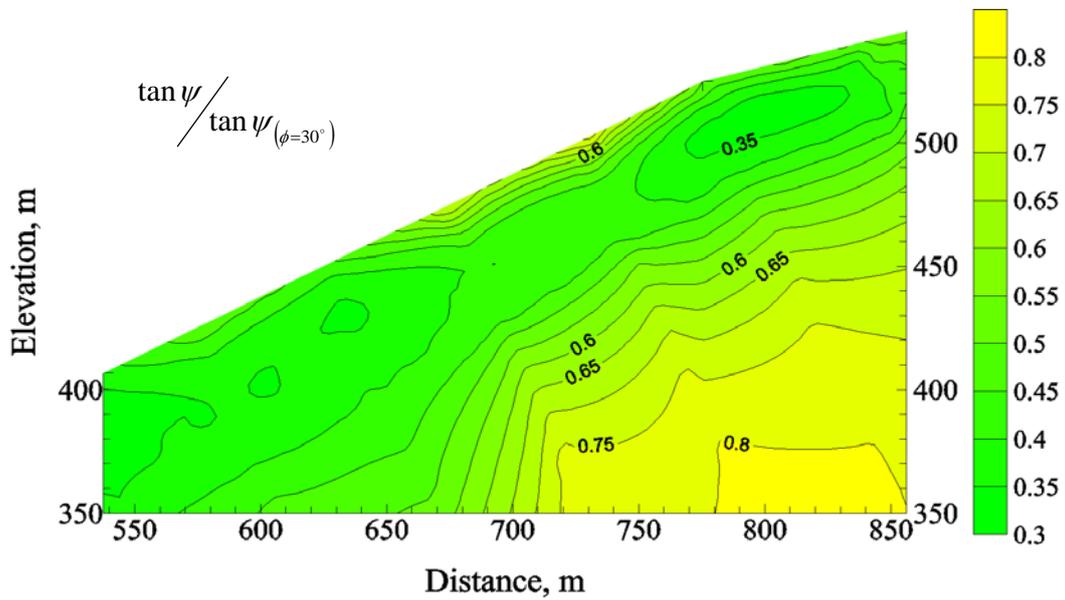


圖 6.19 T=28.8hr 時 B-B 剖面安全係數等高線(莫拉克颱風)

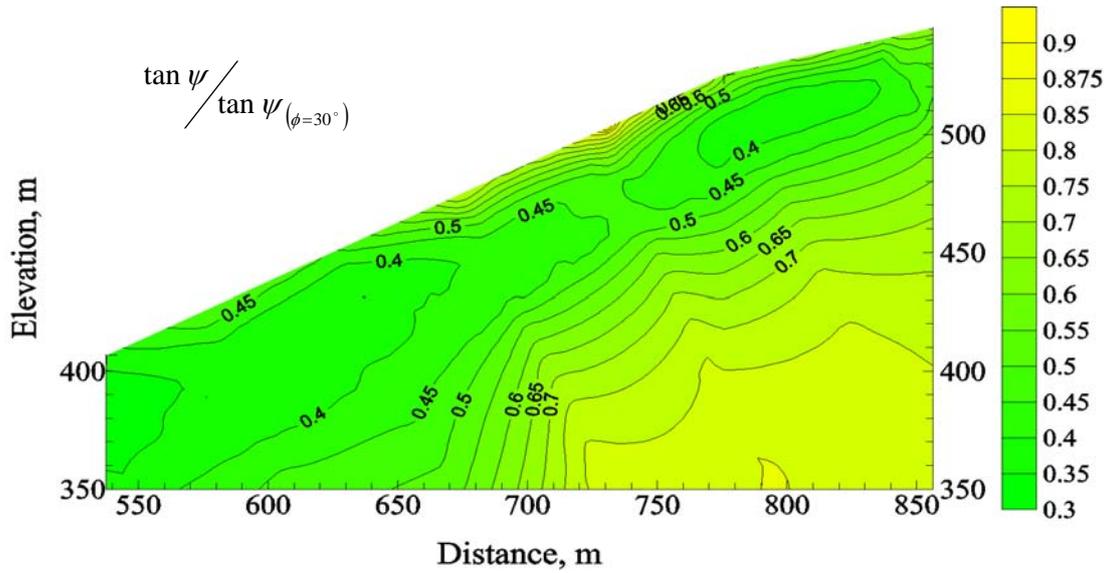


圖 6.20 T=43.2hr 時 B-B 剖面安全係數等高線(莫拉克颱風)

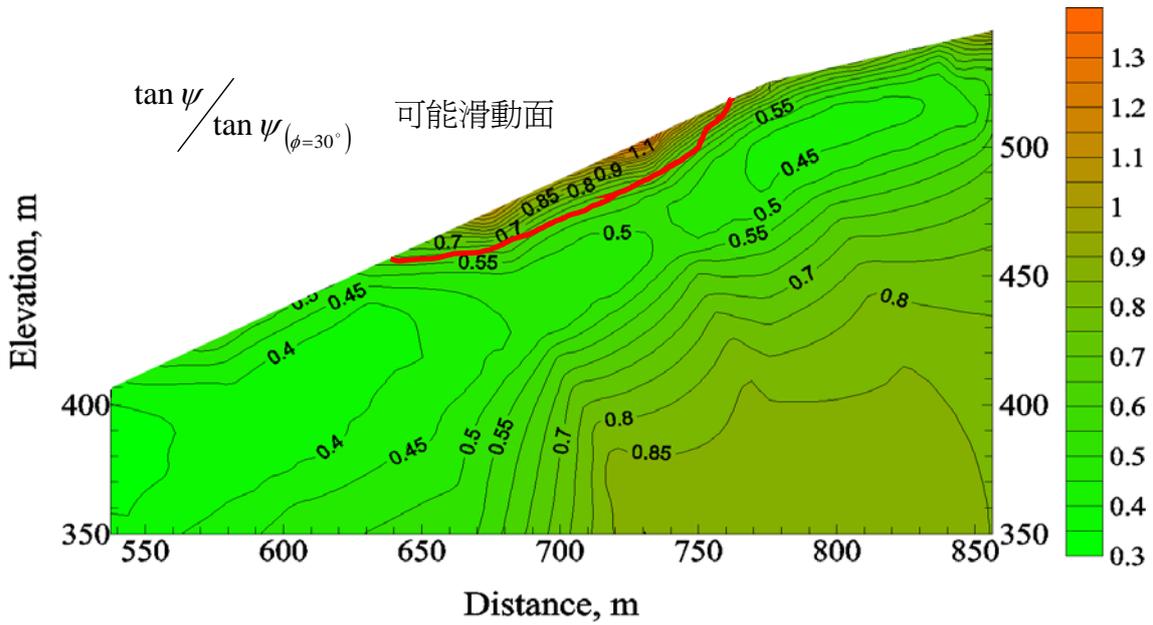


圖 6.21 高水位時 B-B 剖面安全係數等高線(莫拉克颱風)

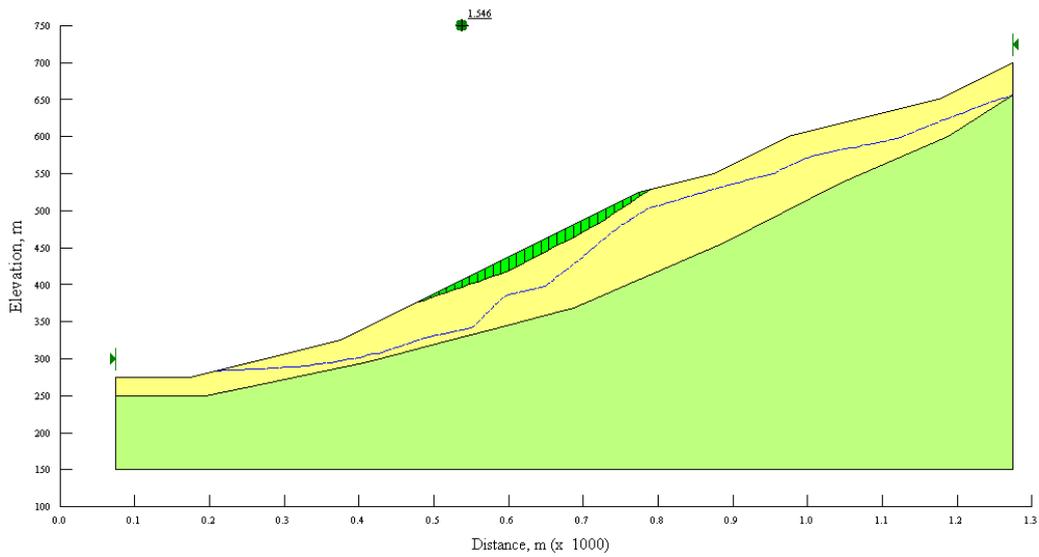


圖 6.22 SLOPE/W 模擬 B-B 剖面邊坡圖

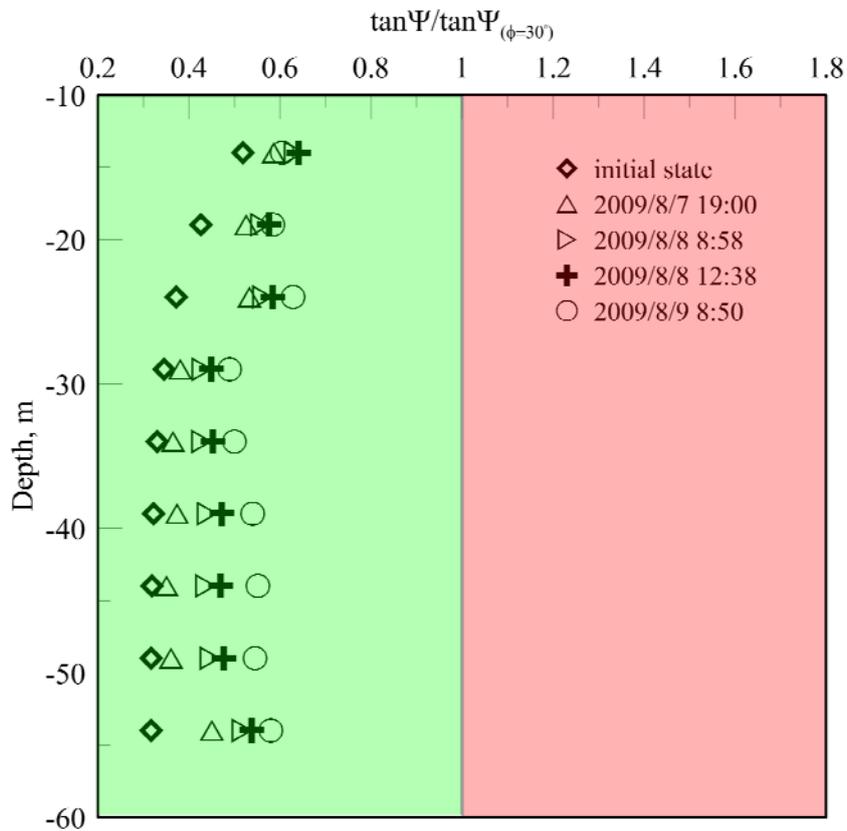


圖 6.23 NCTU-03 孔位於莫拉克颱風時各深度安全係數變化軌跡圖

## 第七章 光纖式與電子式感測器成本與效益分析

### 7.1 光纖式與電子式感測器成本比較

表7-1為光纖感測器與傳統電子感應器成本差異比較，依據不同感測精度及量測範圍其光纖光柵水壓計及偏斜儀與傳統式電子感測器其成本差異約為 $\pm 30\%$ ，由於光纖光柵解讀儀設備受限於部分光學零組件之價格，相較於傳統電子感測器擷取設備高於2倍以上，但對於大範圍監測區域，若大量使用光纖感測器時，一台光纖光柵解讀儀器可同時擷取各光纖感測器訊號，因此，光纖光柵解讀設備費用可大幅降低。

表 7-1 光纖感測器與傳統電子感應器成本差異比較

感測器種類	成本差異百分比
光纖光柵水壓計	$\pm 30\%$
偏斜儀	$\pm 30\%$
解讀設備	+ 200%

### 7.2 光纖式與電子式感測器效益分析

表7-2為光纖式與電子式感測器效益分析比較表，由於光纖感測器訊號不受電磁波影響，訊號傳輸距離遠，相較於電子式感測器訊號穩定性高，歷經四年計畫期間，現場光纖感測器持續發揮其功能，故在耐久性方面可超過3年以上，而光纖感測器相對於電子式感測器，有較多複雜性，故在使用及安裝方面須具有相關光電背景專業訓練。

表 7-2 光纖感測器與傳統電子感應器效益比較表

感測器種類	光纖式傳感器	電子式傳感器
耐久性	3年以上	1年以上
訊號品質	清晰不受電磁波影響	易受電磁波影響
專業人員	需要	較不需要
技術性	高	低

## 第八章 結論與建議

本計畫之目的為利用4年研究期間研發及整合光纖式感測器與自動化解讀/數據傳輸設備，藉由光纖感測器分佈感測之優點，量測地層水壓及位移分佈，並實際應用於臺18線阿里山公路五彎仔路段。計畫期間，經歷辛樂克、莫拉克與凡那比颱風之考驗，都能夠有效發揮監測功能，完整紀錄颱風期間監測點地層內各深度水壓及位移變化。透水壓監測資料，結合數值分析，可建立現場地下水流模型，根據有效應力之觀念，分析現場邊坡穩定性並建立預警基準，提供相關單位做決策參考依據，以下為本計畫之結論與建議。

### 8.1 結論

1. 目前現場監測資料已透過 FTP 架構方式傳輸至台科大網路系統，以提供現場即時監測資料。
2. 利用現場水流模型結合邊坡穩定分析，可建立現場邊坡紅色、黃色及綠色潛勢破壞範圍大小，以作為日後現場邊坡安全預測依據。
3. 利用分佈式水壓量測技術，及配合有效應力方法，可有效預測可能之淺、深層滑動面位置。
4. 歷經辛樂克、莫拉克及凡那比颱風驗證下，能有效發揮其監測功能，相對於傳統式感測器，有較高之耐久性及穩定性。
5. 本計畫經過4年驗證與成果，可予以落實應用在非靜態水壓之分佈式監測技術之推廣、提供降雨量與地層滲流量之關係、提供實際水壓分佈做邊坡穩定分析及自動化光纖解讀系統現場架設，可達到現場即時預警功能。

## 8.2 建議

1. 本計畫已驗證光纖光柵水壓與地層位移監測系統之實用性以及其技術上之優勢。有鑑於近來公路邊坡多次發生崩塌並造成人命之損失，應該考慮類似系統之使用與推廣。
2. 對於 3G 網路傳輸系統，於本計畫使用期間內，偶而會因電信業者之終端機及外在訊號源干擾，造成網路傳輸不穩定，建議可採用有線寬頻網路交替使用。

## 參考文獻

1. Bear J (1972) Dynamics of fluids in porous media, Dover, Mineola, New York.
2. Ho, Y.T., Huang, A.B., and Lee, J.T. (2006), "Development of a fiber Bragg grating sensed ground movement monitoring system," Journal of Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, Vol.16, pp.1733-1740.
3. Hurley DG, Pantelis G (1985) Unsaturated and saturated flow through a thin porous layer on a hillslope. Water Resources Research 21: 821-824
4. Van Genuchten, M. Th., "A closed-Form Equation for Predicting Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils." Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, 892~898, 1980.
5. Fetter CW, Applied Hydrogeology, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
6. McDonald, J. M., and Harbaugh, A. W., A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model, Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, 1988.
7. Kersey, A.D., 1992, "Multiplexed Fiber Optic Sensors," Proceedings, Fiber Optic Sensors, Boston, Massachusetts, Eric Udd, editor, sponsored by SPIE-The International Society for Optical Engineering, pp.200-227
8. 畢慶昌 (1969), 俯衝運動在臺灣地體構成中的作用, 台灣省地質調查所彙刊, 第20號。
9. 黃安斌、何彥德, 2008, "雙質量式光纖光柵加速度傾斜感測裝置", 中華民國專利, 申請中。

10. 李瑞庭，2005，「光纖光柵讀取系統軟體之研發」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹。
11. 高聖傑，2006，「光纖光柵壓力計之研發」，交通大學土木工程系碩士論文。
12. 簡旭君，2003，「光纖光柵應變管之研發」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹。
13. 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。
14. 劉憲德、曾俊傑（未發表），阿里山公路沿線地質與山崩災害調查研究報告，經濟部中央地質調查所。
15. 黃良雄，地層下陷數值模式發展(一)，國科會，民國87年10月。
16. 楊錦釗，黃良雄，海岸地區地陷潛能與危險評估技術(3/3)，經濟部水利署，民國92年12月。
17. 蔡東霖，”區域性地下水超抽導致地層下陷模式之發展與應用”，國立交通大學土木工程研究所博士論文，新竹，台灣，民國90年。
18. 青山顧問有限公司（民國96），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。
19. 青山顧問有限公司（民國96），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。
20. <http://www.gov.au/hazards/landslide/causes.jsp>

## 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(4/4)

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)游教授繁結 (中興大學):</p> <p>1. 水壓計的裝置何以需間串聯之?管內是否相通?</p> <p>2. 水壓計靈敏度 28.5 mm,此靈敏度較傳統式之水壓計,其效果如何?</p> <p>3. 五彎仔 C-11、B2 兩處監測兩處監測顯示地下水位可達數十公尺,宜有較精確之數據呈現,又此地紀錄有無其他不同形式之水位計可估此比對。</p>	<p>1. 水壓計之串聯,目的為量得地層內部不同深度之水壓變化,因地層水壓若受到滲流影響,非靜水壓分佈。而各水壓計為不連通,只量測該深度水壓變化。</p> <p>2. 該計畫所用之FBG水壓計,其量測範圍可達600kPa以上變化,其靈敏度,在同一量測範圍相較其傳統式水壓計約略相同,但傳統式容易受電磁波干擾、溫度及無法多點量測等缺點。</p> <p>3. 該兩處 C-11、B2 監測顯示之地下水位變化,為根據青山顧問監測報告資料,至於水位估計可藉由其它水位管估計,但需考慮地層情況影響。</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
4. P3-4，文章中的圖號說明與實際所示圖號之點位不一致。	4. 感謝委員指正，P3-4 中之文章圖表以檢核修正。	同意
5. 圖 3.2，何以有深度愈深水壓愈小的情形（-45m 左右。）	5. 圖 3.2 為現場 NCTU-03 水壓監測井，表示各深度之水壓變化值，由於地層可能受滲流影響，故水壓分佈並分成靜水壓型態，可能有大有小之分佈。	同意
6. 圖 3.3，何以水壓有負壓的情形？	6. 圖 3.3 為表示現場 NCTU-04 水壓觀測井歷時變化，因該處地下水低於監測範圍內，故水壓幾乎成為零壓力狀態，而壓力負值可能為張力所產生現象，因地下水面上為負壓狀態。	同意
7. 圖 3.5，65m 以下深度之變位量何以未呈現？又深度 200m 之鑽孔，其上層變位僅 20mm，此等變位量是否仍在儀器的誤差範圍內？	7. 圖 3.5 所顯示為 IHMT-01 傾斜管變形圖，而 65m 以下為呈現變化量，為未安裝監測儀器，故無呈現變形狀況；關於上層位移變化量 20mm 為實際監測結果，且還在儀器可量測範圍內。	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>(二)李教授振誥 (成功大學):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫為四年期計畫之第四年，故請對前三年之計畫作一簡要概述與成果展現，並說明第四年與前期之關聯性。</li> <li>2. 建議對於實驗室光柵波長改變與角度變化量之關係，應有多次成果展示(圖 2.21)</li> <li>3. P5-9 之五彎仔地區之坡面邊界設定為不透水與底部為流量邊界之合理性，請再檢討。</li> <li>4. P5-9 之輸入 <math>\theta_s</math>、<math>\theta_r</math>、<math>\xi</math> 與 <math>N</math> 值之實驗值請列出，並對逆向問題所求之水力傳導係數值，亦請列出。另一方面，對正向問題之評估(圖 5.9)亦請現場水位資料驗證。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議，於期末報告初稿提供計畫前三年成果簡要說明，並說明今年度計畫與前三年之關聯性。</li> <li>2. 關於圖 2.21 為 FBG I/A 感測器之角度與 FBG 波長關係圖，即為該感測器標定(率定)圖，一般感測器率定為一測回(來回)，得知其感測器之靈敏度與線性度，來評斷感測器是否可使用。</li> <li>3. 感謝委員指正，對於地下水流數值模擬邊界條件假設，予以重新檢核，並參照相關文獻建議。</li> <li>4. 對於 P5-9 之輸入 <math>\theta_s</math>、<math>\theta_r</math>、<math>\xi</math> 與 <math>N</math> 值為數值模擬合理假設值利，並用現場地下水位監測資料值及試誤法率定現場土層之水力傳導係數，其相關係數已附於期末報告內文中。</li> </ol>	<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
5. 對於本案建議以未飽和邊坡穩定分析模型來分析本案之穩定性與孔隙水壓。	5. 感謝委員建議，對於以未飽和模式作為模擬現場邊坡穩定分析與孔隙水壓，已於輸入參數中考量未飽和模式作分析。	同意
6. 對於光纖光柵法應用於水壓之成果與一般常用之水壓計，其優劣請說明。	6. 對於 FBG 水壓計與傳統水壓計比較表，已附於期末報告內文中。	同意
(四)徐教授耀賜 (逢甲大學):		
1. 警戒值、行動值之定義可再補強以資明確。	1. 感謝委員建議，對於警戒值、行動值之定義，已於期末報告中詳加敘述。	同意
2. 公路單位如何配套，宜說明之。	2. 感謝委員建議，對於公路單位如何配套方法，本計畫僅提出參考配套，並附於期末報告中。	同意
3. P4-1，邊坡滑動宜分成淺層、中層、深層。	3. 感謝委員建議，對於邊坡崩坍分析理論，已於期末報告中說明之。	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
4. 如瞬間發生時，位移量甚大，監測儀器可行嗎？（註：漸變、緩變可監測，急變時監測困難）	4. 目前任何監測儀器設備若大於其量測範圍則發生破壞，但對於長期潛變監測，因 FBG 感測器靈敏度較高，故可監測為小變形，以求得長時間之變化量。	同意
5. 邊坡分析之例如以 >45 度者更佳。	5. 本研究為探討現場邊坡因降雨入滲改變地層水壓分佈，來分析邊坡穩定情況，並無探討地形改變因素。	同意
6. 高程大之邊坡平時可能毫無地下水，豪雨時方有入滲水。	6. 當無降雨時，依據現場監測結果，地下水位甚低，但並無完全無地下水存在。	同意
7. 邊坡不穩定因素除水之外，重力、震動亦是。	7. 本研究為探討現場邊坡因降雨入滲改變地層水壓分佈，來分析邊坡穩定情況，並無探討重力、震動因素，對邊坡穩定之影響。	同意
8. 此系統之適用地質，地形可稍著墨。	8. 感謝委員建議，對於系統之適用地形，已於期末報告中敘述。	同意
9. 此系統之警戒值與水保局黃、紅色警戒值如何結合。	9. 對於如何結合水保局紅、黃警戒值，應可利用雨量關係結合。	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>(五)謝科長明志 (港灣技術研究中心):</p> <p>1. P3-4 起, 3.2.1 節描述水壓、傾斜監測儀, 最近所量得的數據 (2010 年 6 月中), 其中在邊坡高處的 NCTU-03 , 於 6/10~6/15 各監測點水壓都有增加, 表示這段時間有水陸續滲入。但在邊坡低處的 NCTU-04, 地下 30m 以上的水壓卻減少, 好像上方的水並沒有滲流到下方? 現象有點怪異。且 NCTU-04 多點水壓呈現負值。</p> <p>2. P3-4 描述, 傾斜儀每一感測點間距為 1m, 但圖 3.4 及圖 3.5 所示, 卻是間距 2m, 請檢核。</p> <p>3. 圖 3.4 所示 5 天內的位移量, 可能-7m 處有一淺層滑動面, 圖 3.5 所示 5 天內的位移量, 可能-35m 處有一滑動面, 不知鑽孔時的地質紀錄, 有否顯示這兩個位置有阻水層存在? 請檢核。</p>	<p>1. 根據監測數據分析, 下邊坡處之 NCTU-04 水壓監測井, 各深度水壓並未改變, 研判可能受地層結構影響, 而水壓監測數據呈現負值, 為受其地層土壤吸力值影響。</p> <p>2. 感謝委員指正, 對於圖 3.4 與圖 3.5 已檢核修正。</p> <p>3. 感謝委員建議, 由鑽探報告顯示, NCTU-01(圖 3.4)與 IHMT-01(圖 3.5) 並無阻水層存在。</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 3.4 及圖 3.5，請標示儀器設置後的第一筆觀測值及日期，以得知累計位移量。</p>	<p>1. 遵照辦理，已將圖 3.4 與圖 3.5 設置時之第一筆資料，附於期末報告中。</p>	<p>同意</p>
<p>(六)陳副研究員志芳 (港灣技術研究中心):</p> <p>1. 由於本計畫今年是最後一年(4/4)，建議在期末報告時，將這幾年所監測到比較完整的資料，例如 2008 年 9 月的辛樂克颱風及 2009 年 8 月莫拉克颱風所監測到的水壓及傾斜滑動變化資料等，一起放到期末報告裡面。</p> <p>2. 在第四章訂定警戒值行動值，是用有限差分法並採用莫拉克颱風降雨量與水壓資料，求得邊坡各網格元素應力 <math>p</math>-<math>q</math> 圖，最後再訂出警戒值、行動值，建議在期末報告時能將較詳細的參數放進去，例如網格數、網格尺寸及模擬邊坡範圍等參數。</p>	<p>1. 感謝委員建議，關於這幾年所監測之完整資料，如辛樂克與莫拉克颱風，將附於期末報告附件中。</p> <p>2. 感謝委員建議，關於邊坡數值模擬部分，參數設定、邊界值、網格數及大小，將於期末報告該章節中詳加說明。</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
<p>3. 第三章之 3.2.1 節中，文與圖有誤，需再檢核。</p> <p>~~~以下空白~~~~</p>	<p>3. 感謝委員指正，已重新檢核文與圖內容，並於修定期末報告中。</p> <p>~~~~以下空白~~~~</p>	<p>同意</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(4/4)

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)游教授繁結 (中興大學):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本年度委辦工作項目第 4 項需比較光纖與感應系統之結果及其效益評估，但似未見本項工作成果之具體呈現，宜再加強內容。</li> <li>2. 現場地下水流模擬之過程，選用數據參數等應列示出，以利研讀。</li> <li>3. 莫拉克颱風累積雨量 2,100mm，約等於 2.1m，何以水壓變化可達 10 層樓高，亦即約達 30~35m 之高，其可信度如何？宜有一合理之說明，以該資料模擬有無意義？</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 關於光纖式與傳統式感測器之成果及效益分析比較已於期末報告定稿中，詳加敘述。</li> <li>2. 感謝委員建議，對於現場地下水流模擬所選用之參數說明，已於期末報告書定稿內說明。</li> <li>3. 根據以往青山顧問報告顯示，現場於豪大雨後水位變化可達 10~20 米變化，而鑽探報告顯示該區域崩積岩層且非常破碎，滲透性高。經豪大雨後，若受到側向水流補注，該岩層水壓容易遽增，根據分佈水壓監測資料，配合模擬分析，可有效掌控地層水流分佈特性。</li> </ol>	<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
4. 建議第 1 點似未在本 文內有詳細分析，故 此一建議之依據何 在？	4. 對於建議第 1 點之敘 述，為根據現場分佈水 壓監測資料來研判，說 明部分於期末報告定 稿詳述。	同意
5. 本研究案係屬業務機 關之應用需求而辦理 之項目，故其結果應 具體提出可落實應用 之項目。	5. 感謝委員建議，對於計 畫可落實應用項目，於 期末報告定稿中結論 與建議詳細說明。	同意
6. 地下水壓分層設置感 應器進行監測之構想 甚佳，惟此等設置能 否確實掌握地下水脈 分佈，可再深加檢 討。	6. 感謝委員對於本計畫 成果給予肯定，由分佈 式監測技術觀點，可有 效掌控地層中，不同深 度水壓變化，藉由水壓 變化可找出可能之水 脈。	同意
(二)徐教授耀賜 (逢甲大 學):		
1. 英文名詞寫法宜一 致。	1. 感謝委員指正，已修改 於期末報告定稿中。	同意
2. 何以高低水位時邊坡 穩定之F.S均小於1? (簡報 18 頁)	2. 簡報第 18 頁之邊坡穩 定 F.S 均小於 1，該成 果為摘自青山工程顧 問報告之內容。	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
3. 簡報 28 頁，何以低水位均相同？	3. 該低水位數值為摘自青山工程顧問報告內文。	同意
4. 瞬間暴雨造成入滲之影響如何評估？	4. 於模擬程式中，已遽增水位及考慮降雨強度來模擬現場地下水流狀況。	同意
5. Slope 不穩定之主因除了水之外，重力分量亦是主因，至於深層崩壞之原因甚為複雜，非單一因素造成(簡報 49 頁)。	5. 感謝委員建議，目前此研究為藉由有效應力概念，配合現場水壓監測與數值模擬，來計算安全係數，唯一可行性方案，但對於深層破壞仍需多加探討與確定。	同意
6. 可否敘明本計畫之實務應用可行性。	6. 於期末報告定稿中，已詳加敘述。	同意
7. Sliding 瞬間發生如何預測？請補充說明。	7. 對於邊坡瞬間滑動，發生原因甚多，並不為計畫所研究範圍，本研究為發展光纖式感測器與實地應用，藉由現場實際分佈水壓監測，配合數值分析，已有效應力觀念，建立預警機制，提供相關單位參考。	同意
8. 全文應細讀，錯字應修正。	8. 感謝委員指正，已詳加閱讀報告內容，並修正錯字。	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
9. 結論及建議尚有加強空間。	9. 感謝委員建議，結論與建議部分已修改於期末報告定稿。	同意
10. 警戒值、行動值之處理原則為何？	10. 對於警戒值為提供管理者目前邊坡有趨於破壞之可能性，需保持警戒狀態，當到達行動值時，則需派人至現場觀察，視現場狀況予以回報並做後續決策。	同意
(三)李教授振誥（成功大學）：		
1. FBG 水壓計率定(圖 2.12)，請增加描述測試頻率次數，以提供週期波長式 FBG 之準確性。	1. 感謝委員建議，對於光纖式水壓計之詳細說明表，已附於期末報告定稿中。	同意
2. 第 5-1 頁中，請增加說明土壤入滲量之評估方式，亦即入滲係數之假設理由。	2. 感謝委員建議，對於土壤入滲量之評估與入滲係數之假設理由，為針對現場水壓監測結果，進行參數調整，另外，入滲量之設定為依據現場降雨量監測數據，作為設定依據。	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
3. 圖 5.1 之現場水力邊界與 6 層水力傳導係數之假設理由其與現場地質剖面之關係，特別上下邊界之設定與左右定水頭邊界應合乎現場情形。	3. 對於模擬的上下邊界設定為依據 MODFLOW 依據下場水位井監測數據來率定出該阿里山五彎仔區域路段之地下水流分佈，而 6 層水力傳導係數為依據分佈式水壓觀測井監測結果，進行參數率定。	同意
4. 請對圖 5.5 與圖 5.6 比較值之誤差，提供造成差異之理由。同理，圖 5.10 與圖 5.11 亦同。	4. 感謝委員建議，對於圖 5.5 與圖 5.6；圖 5.10 與圖 5.11 所產生之誤差理由，已於報告內容中說明。	同意
5. 請補充說明 MODFLOW 應用於現場之水文地質模型之水力邊界設定與土壤參數輸入之設定情形，並加入率定水位，以了解模擬模式之合理性。	5. 關於 MODFLOW 模擬現場地下水流參數，已於期末報告定稿中詳加說明。	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>(四)謝科長明志 (港灣技術研究中心):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 分析模式上在地表下約 30m 處設有一高透水的破碎帶，是否依 NCTU-03 紀錄研判。</li> <li>2. 凡那比颱風 NCYU-04 有紀錄到水壓監測值，但卻未用到本次分析中，是何考慮，請說明。</li> <li>3. 本監測系統與台科大防救災系統的聯結是透過 FTP 方式傳輸監測資料，目前的傳輸頻率為多久傳一次？若要達到及時警戒，請研議傳輸頻率應多快才合適。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 現場數值模擬於地表下設有一高滲透係數的材料，為依據 NCTU-03 分佈式水壓監測數據結果設定之。</li> <li>2. 凡那比颱風監測資料相較於莫拉克與辛樂克颱風降雨量及水壓變化量來得低，故無模擬現場地下水流分佈與邊坡穩定分析。</li> <li>3. 平時傳輸數據為 1 小時傳輸一次，若於豪雨季及颱風時期，則為 5 分鐘傳送一次數據，並發送訊至台科大網管中心密切注意，該時段數據變化。</li> </ol>	<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>(五)林副研究員雅雯 (港灣技術研究中心):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 研究團隊成功量測到辛樂克及莫拉克颱風阿里山五灣仔水壓變化，水壓有快速增加，建議比對當初200m 鑽孔出來的地質柱狀圖，以了解及確認透水層位置。</li> <li>2. 報告 p.3-4 最大變形量約 66mm 與圖 3.6 似乎不合與逢甲地表變形量，水壓之間關係為何？請補充。</li> <li>3. 現有水壓監測數值模擬，建議建立警戒水壓、行動水壓，並顯示於台科大建立之位置。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議，根據青山顧問報告及200m 鑽探報告，均顯示該區域岩層均非常破碎，對於是否可判定透水層位置，則還需根據岩層裂隙是否有互相連通性，以利判定透水層可能之位置。</li> <li>2. 感謝委員指正，p.3-4 已修正於期末報告定稿中，而逢甲所監測為實際地表位移量，地層傾斜管為相對改變量，故兩者監測數據有不同之處，對於水壓與地表變形量目前無法得到實際之關係量。</li> <li>3. 感謝委員建議，對於警戒值、行動值，已提出安全係數作為依據，並可提供台科大網站相關資訊。</li> </ol>	<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. 現場水壓與崩坍之間的關係及數值模擬、監測區域是否 200m 內能定出滑動面的位置。</p> <p>5. 報告撰寫格式請參照本所出版品要點，文章與圖之吻合(如 p.3-4, p.4-1)，圖想表達的內容，請再檢核，並建議再增加監測所得數據相關分析敘述。</p> <p>~~~以下空白~~~~</p>	<p>4. 關於滑動面之位置，目前已提出利用有效應力觀念，來判定可能潛在滑動面，但還須更多監測資料加以驗證。</p> <p>5. 感謝委員指正，對於報告格式已修改為正式出版品之規定，圖表內容以詳加確認與修改完成。</p> <p>~~~~以下空白~~~~</p>	<p>同意</p> <p>同意</p>

## 附錄三

### 期中報告簡報資料

# 全光纖式邊坡穩定監測系統 整合與現地應用測試 ( 4/4 ) 2010-期中報告

黃安斌、李瑞庭、何彥德



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

## 2010-工作內容

2

- 現場光纖監測感測器與自動化光纖解讀系統量測設備維護與優化。
- 完成現場數值模擬，包含現場水壓變化與雨量關係等。
- 提供警戒值、行動值與管理值與相關單位(公路局等)，且該監測資料會與台科大網路系統整合。
- 光纖與傳統感應系統結果之比較以及效益評估

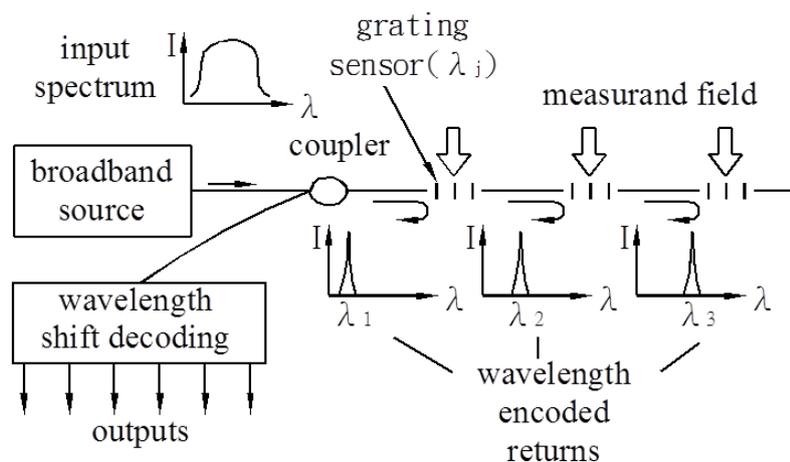
## 研究方法及進行步驟

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
- 以3.5G網路平台傳輸數據，並與台科大網路系統整合，提供即時資訊
- 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
- 藉由有效應力觀點，提供警戒值、行動值與管理值

## 光纖光柵感測原理

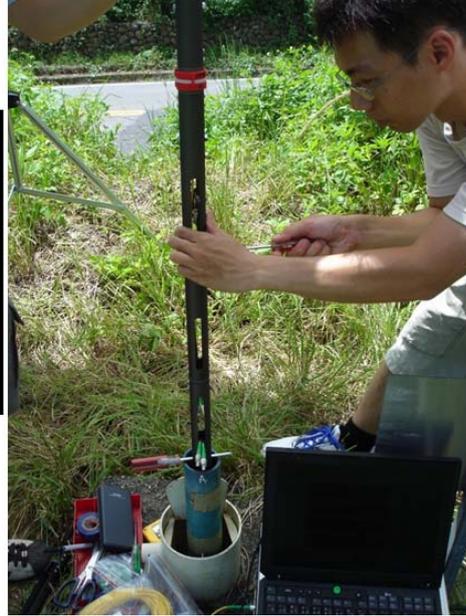
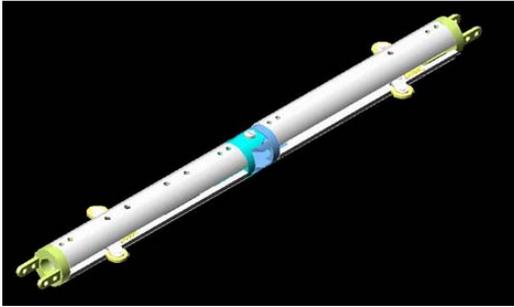
4



光纖光柵反射原理示意圖 (Ho et al., 2005 )

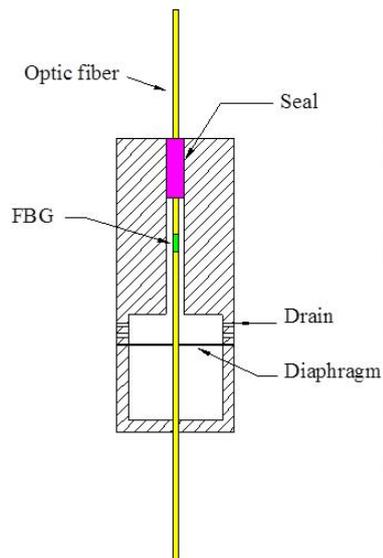
# 光纖光柵節理式偏斜儀

5

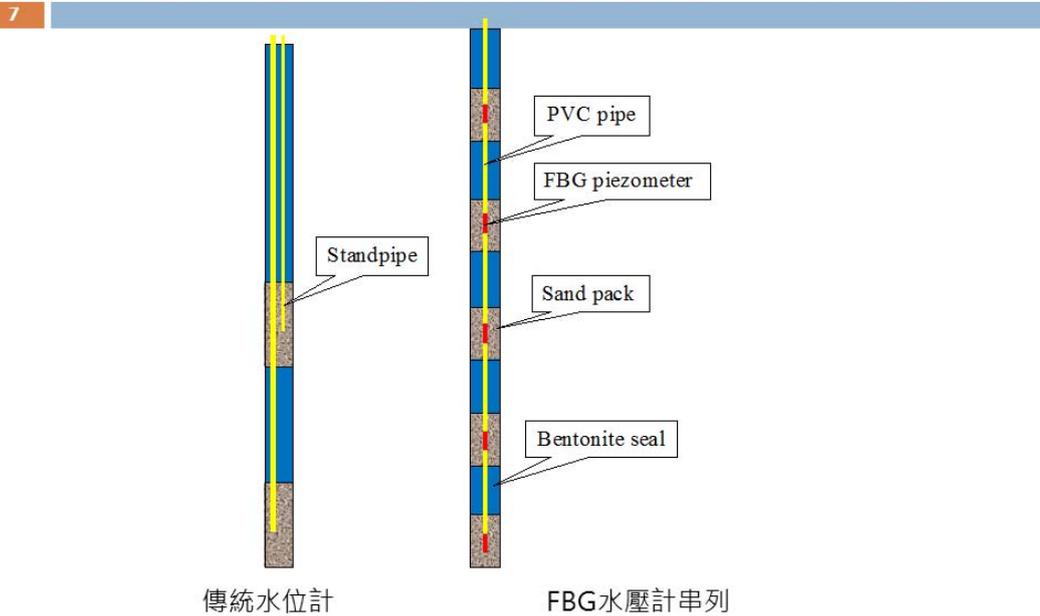


# 光纖光柵水壓計

6



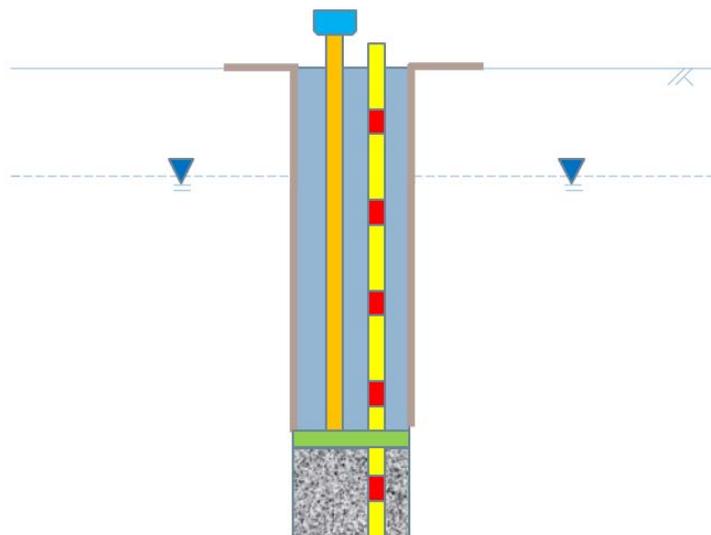
## FBG水壓計串列



## 分佈式水壓計現場安裝封層技術

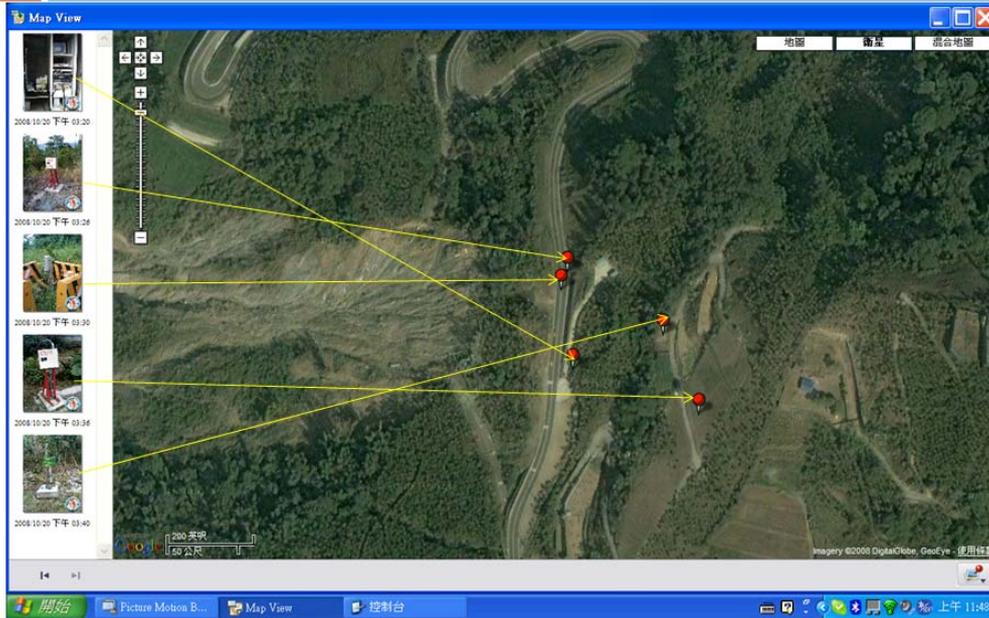
8

- 利用特密管施作原理



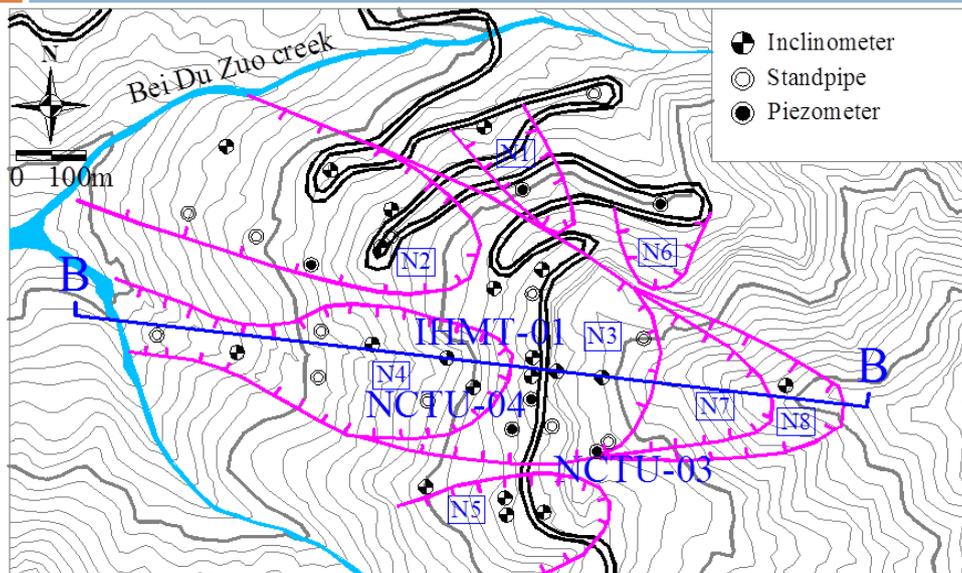
# 現場光纖監測儀器安裝

9



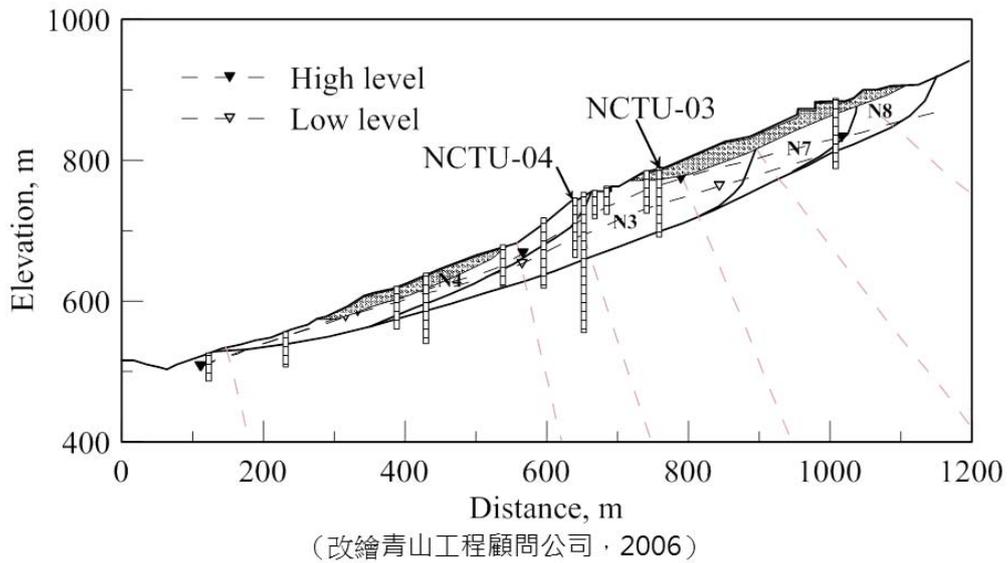
# 現場監測孔位分佈圖

10



## 深層滑動B-B剖面

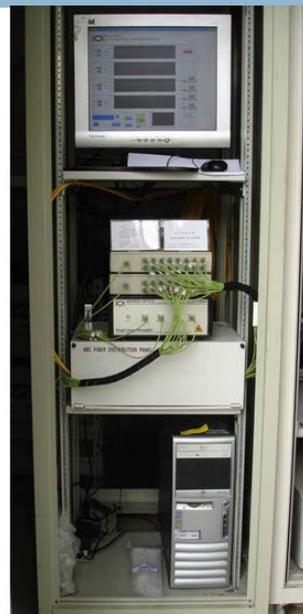
11



## 光纖自動化監測系統



4800W battery  
20W Industrial PC



# 無線網路傳輸系統更新

13



3.5G  
提高網路傳輸品質  
減少訊號斷訊問題

# 台科大網路系統整合

14

<http://140.118.205.122/slope/>



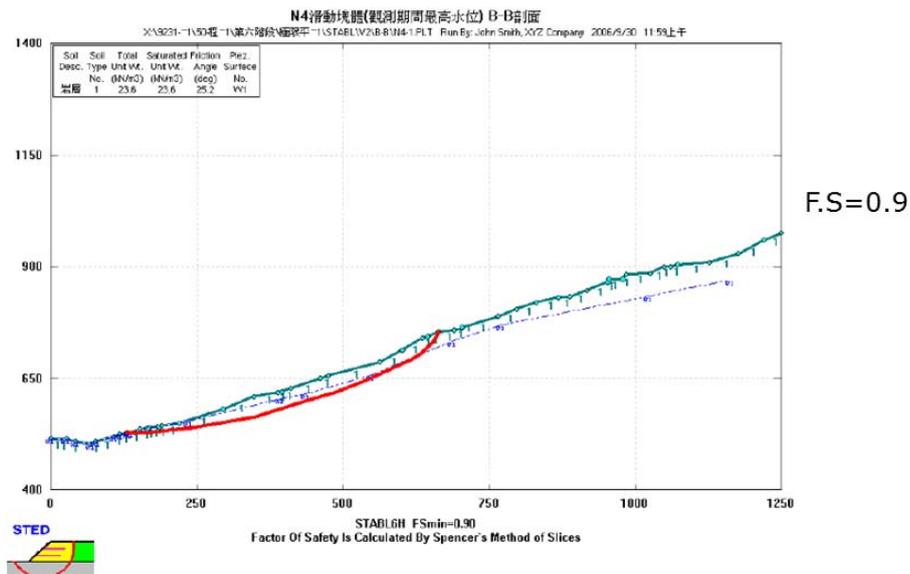
## 邊坡地層特性

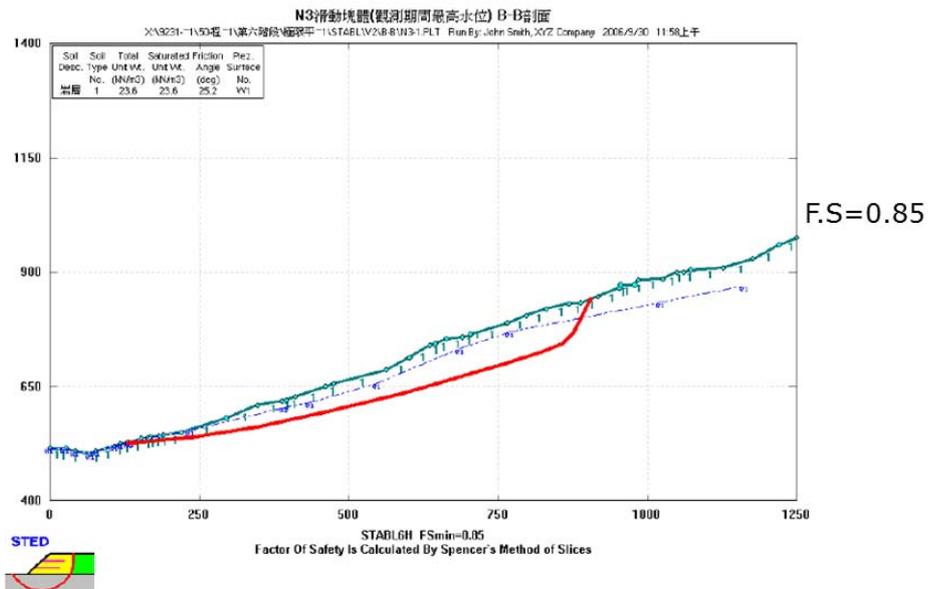
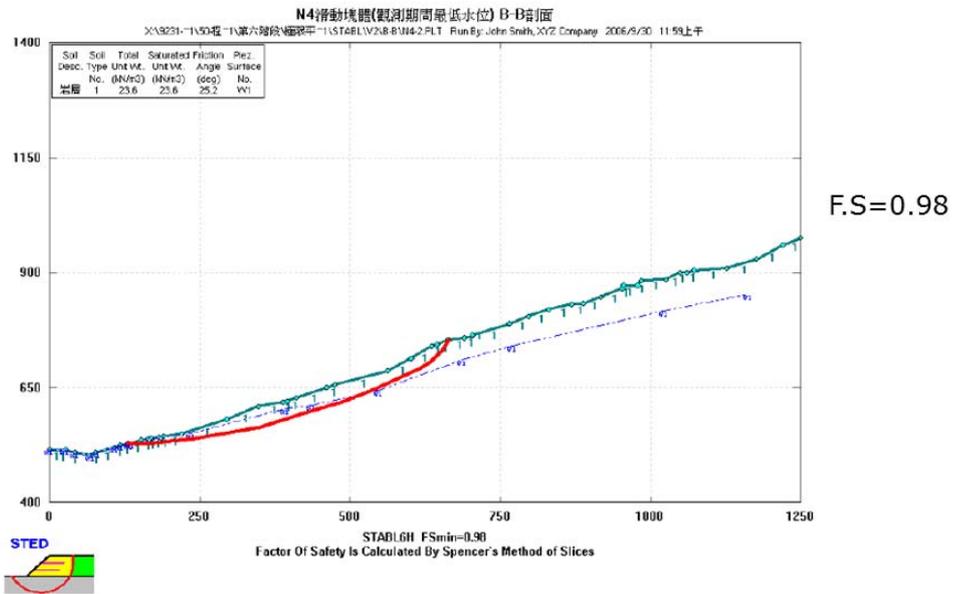
15

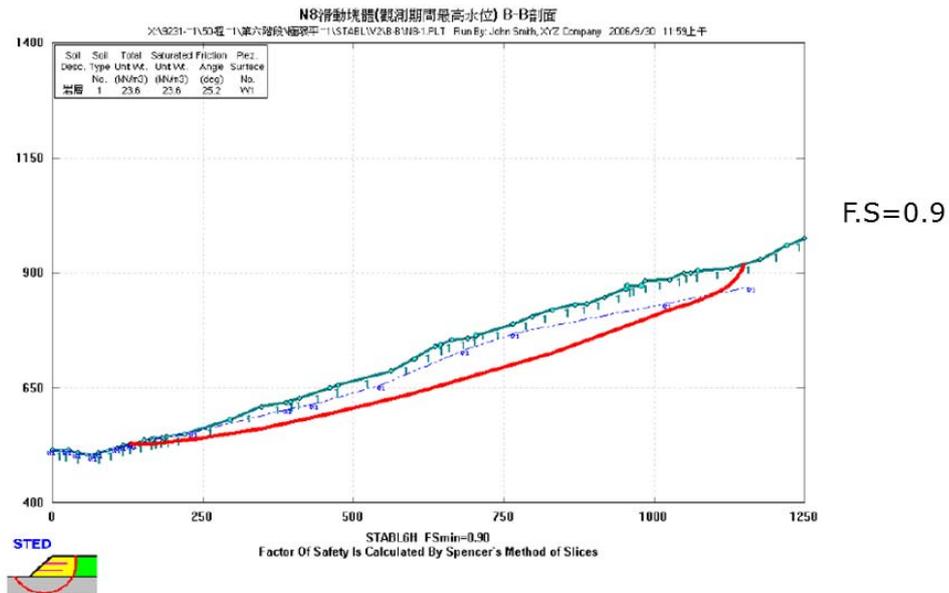
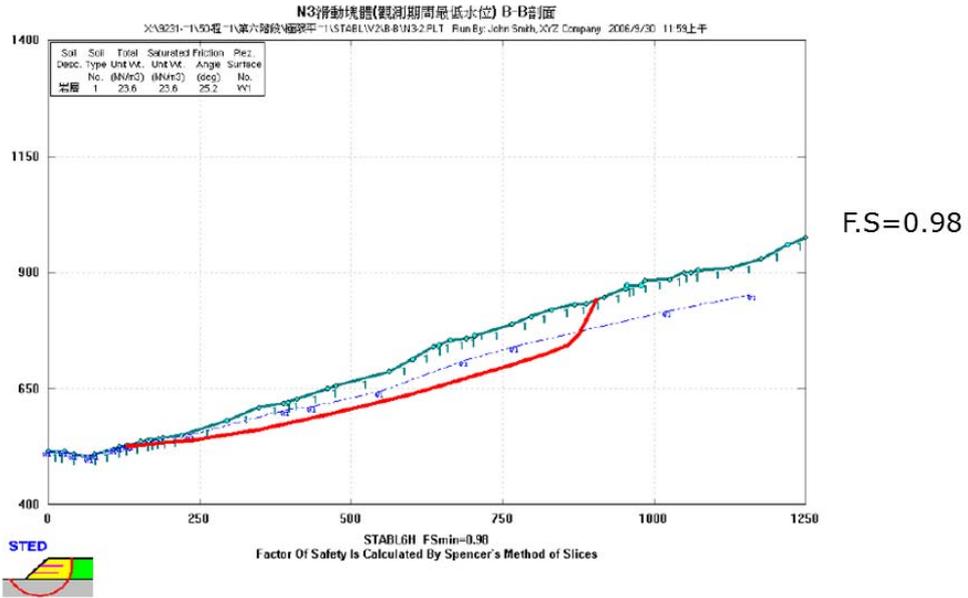
- 由崩積層與破碎岩石所組成，至最深鑽孔200m深度
- 暴雨期間水位變化均可達數十至二十公尺以上 – 水壓分佈監測之重要性
- 顯示影響水位變化的可能原因包括側向水流補注，導致地下水位上升快速 – 滲流分析之重要性

## 現有邊坡穩定分析結果

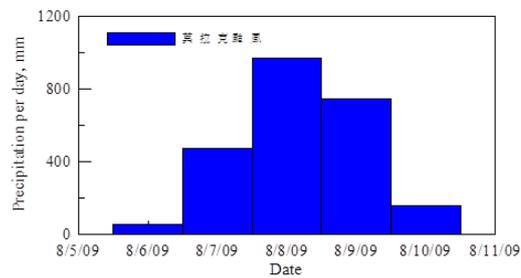
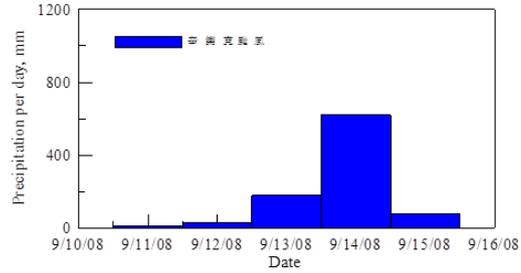
16



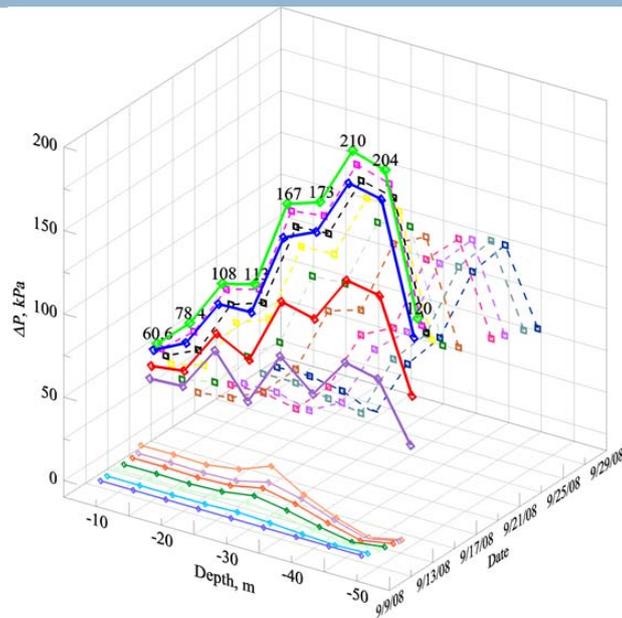




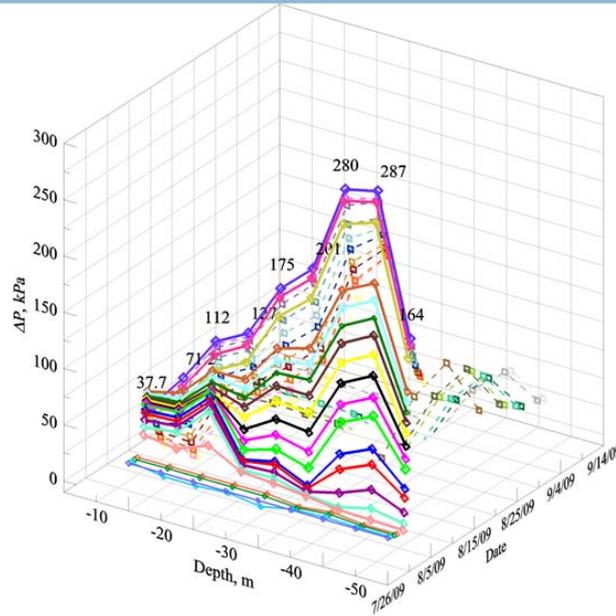
# 辛樂克與莫拉克颱風降雨量



# 辛樂克颱風期間水壓讀數

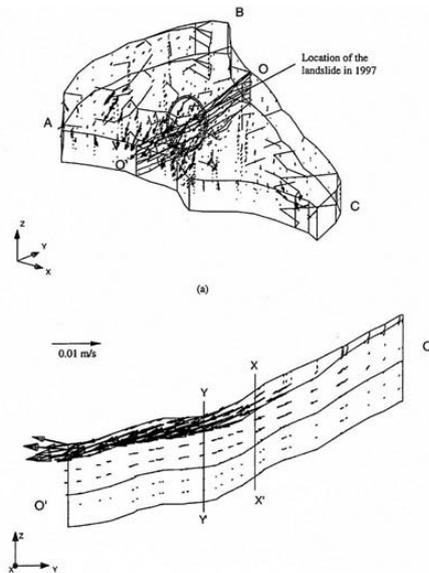


# 莫拉克颱風期間水壓讀數



# 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：

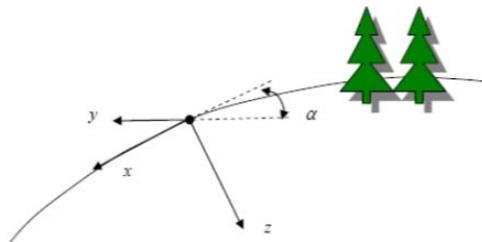
- 同時考慮垂直流與水平流。
- 地質不需要有類似阻水層與含水層規則互層之分布。
- 可較嚴謹地考慮降雨入滲至土壤之機制。

# 非飽和地下水流模型

26

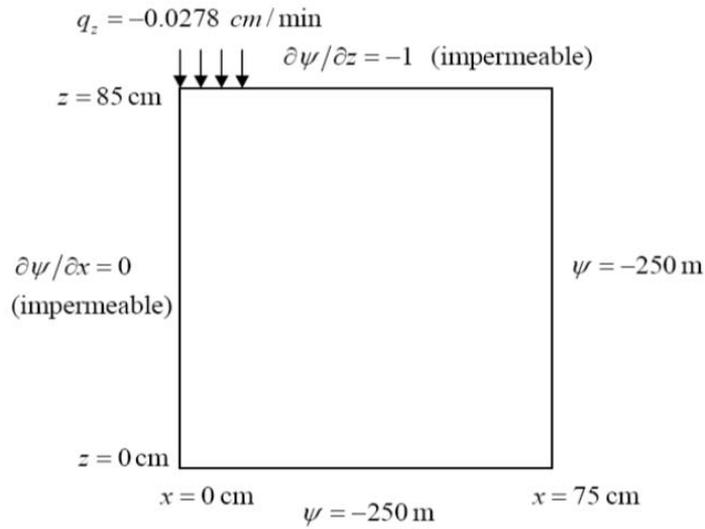
$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial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

式中， $\psi$  為壓力水頭(pressure head)， $\alpha$  為坡地之角度(slope angle)， $K_x$  與  $K_z$  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)。



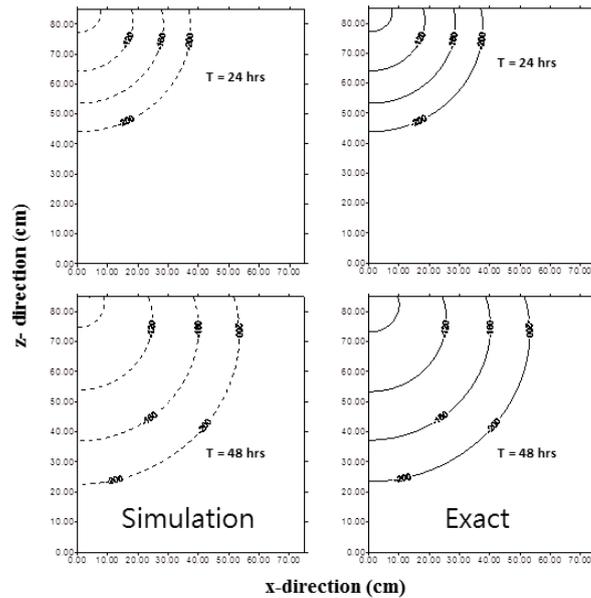
# 驗證案例區域示意圖

27



# 數值模擬與解析解之比較

28



# 都布非拘限地下水流模型

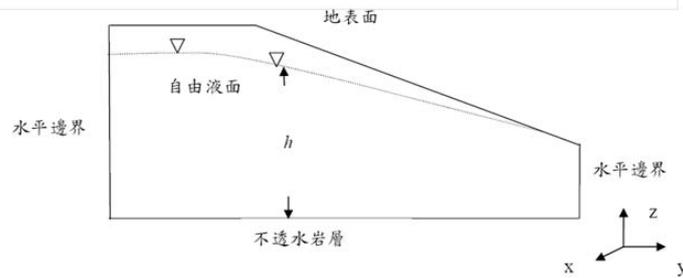
29

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

$h$  為水頭或水位(hydraulic head)。

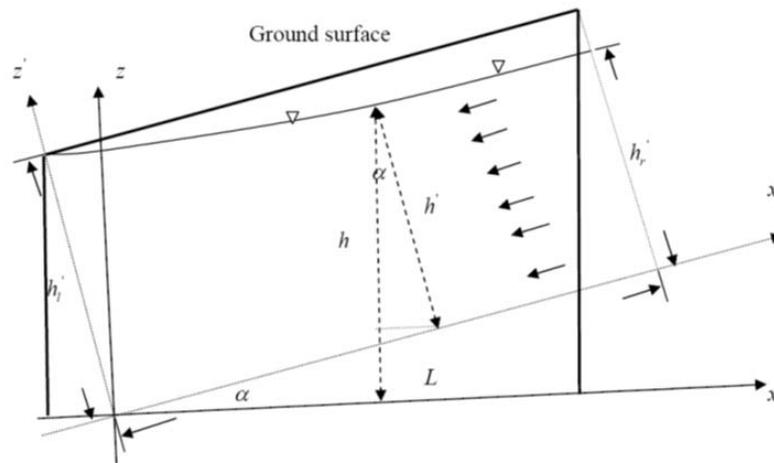
$K_x$  與  $K_y$  分別表示  $x$  與  $y$  方向之水力傳導係數(hydraulic conductivity)。

$S_y$  為 比出水係數(specific yield)。



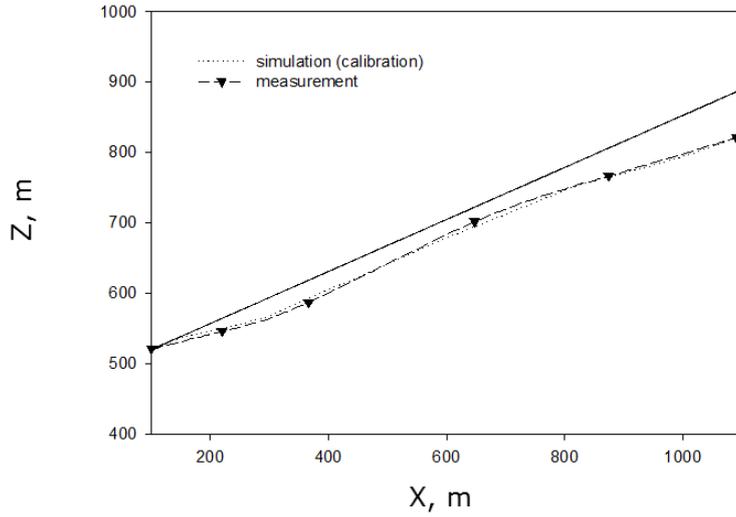
# 簡易地下水流模式

30



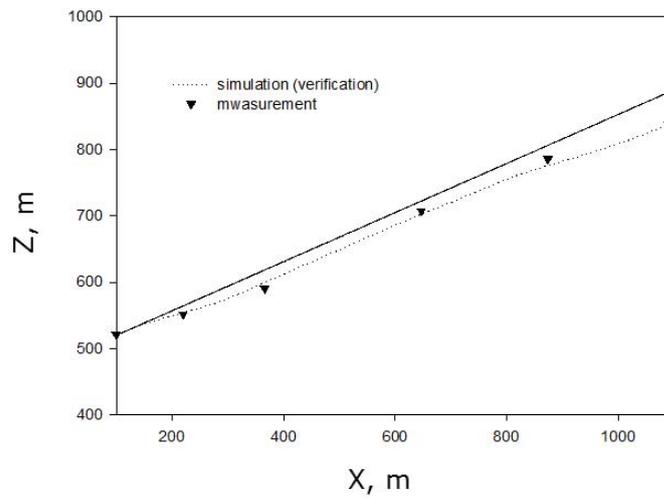
## 簡易地下水流模式標定 - 低水位

31



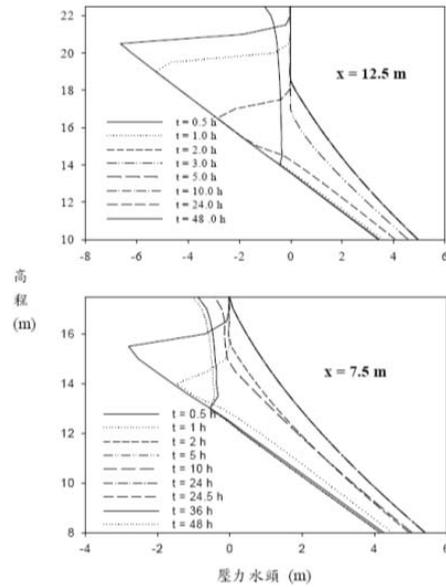
## 簡易地下水流模式標定 - 高水位

32



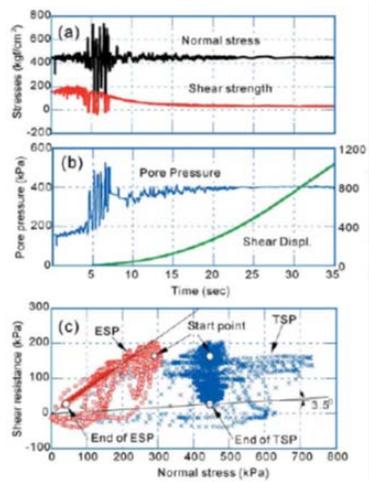
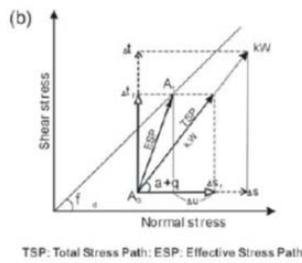
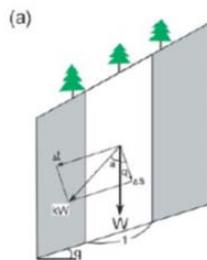
# 模式之降雨入滲測試結果

33



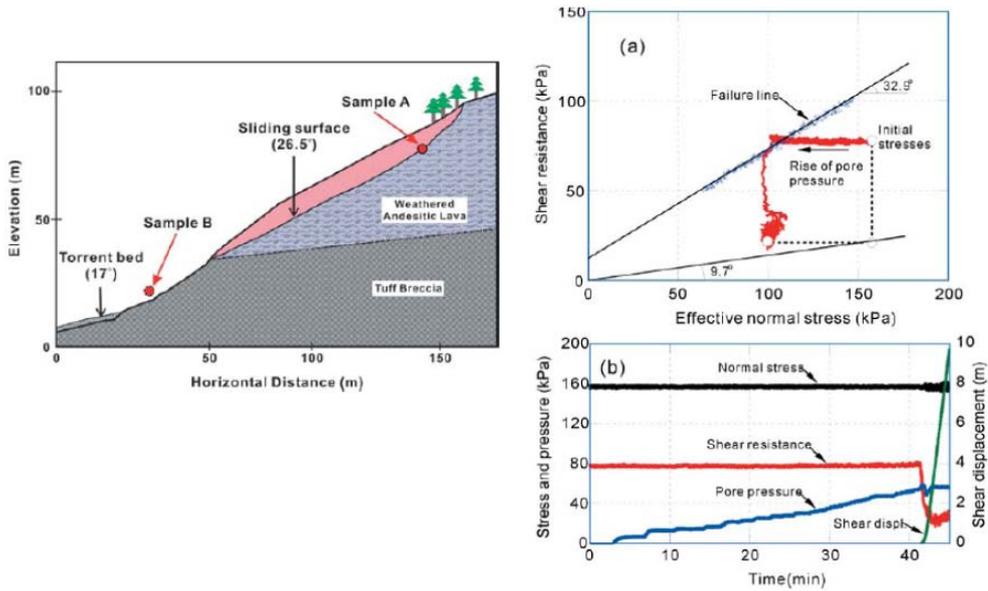
# Sassa et al., 2004

34



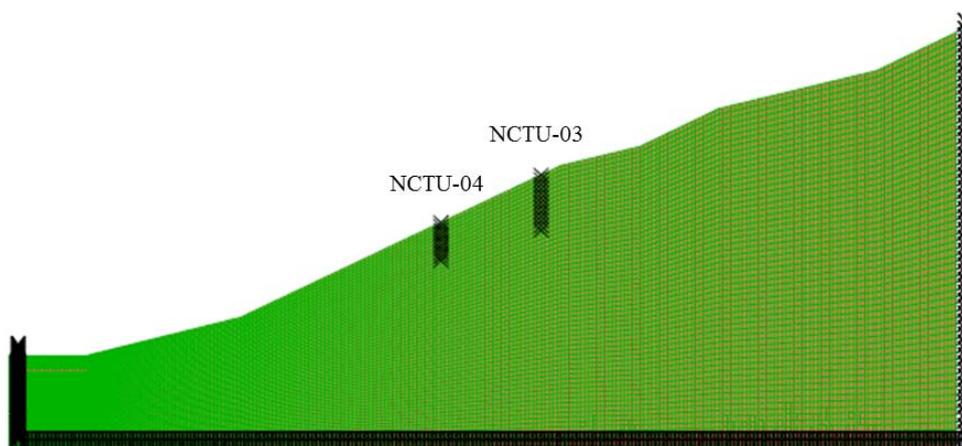
# Minamata Slope in Japan

35



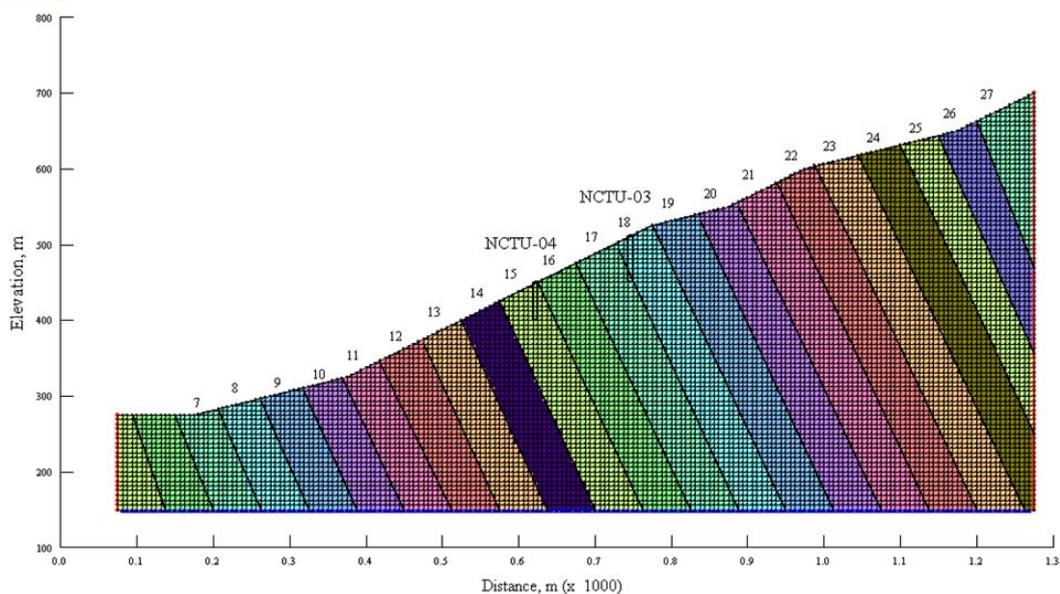
## 有限差分模擬B-B邊坡應力分佈

36



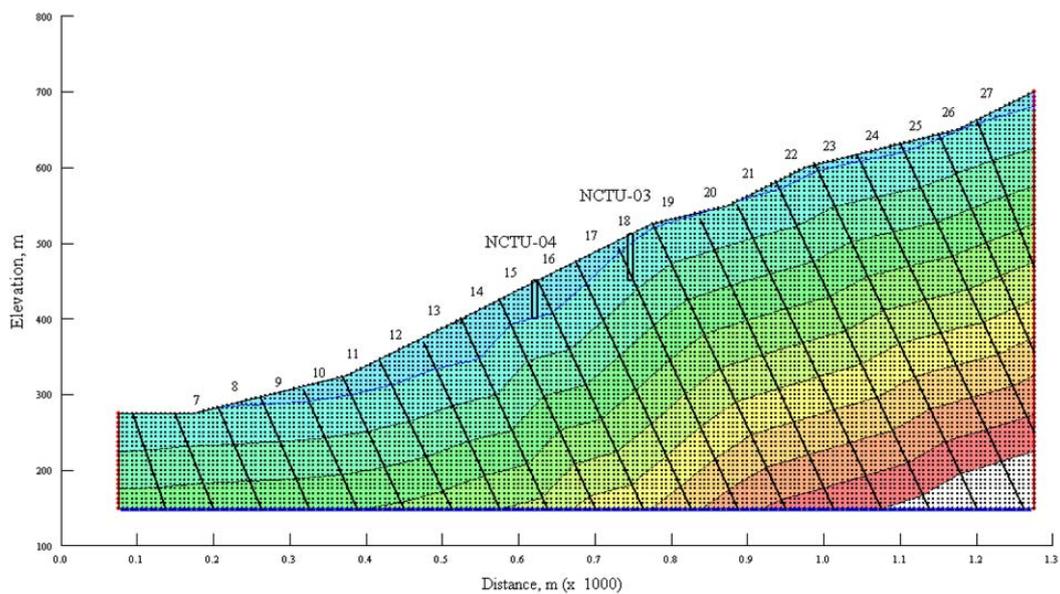
# 有限元素B-B滲流分析

37



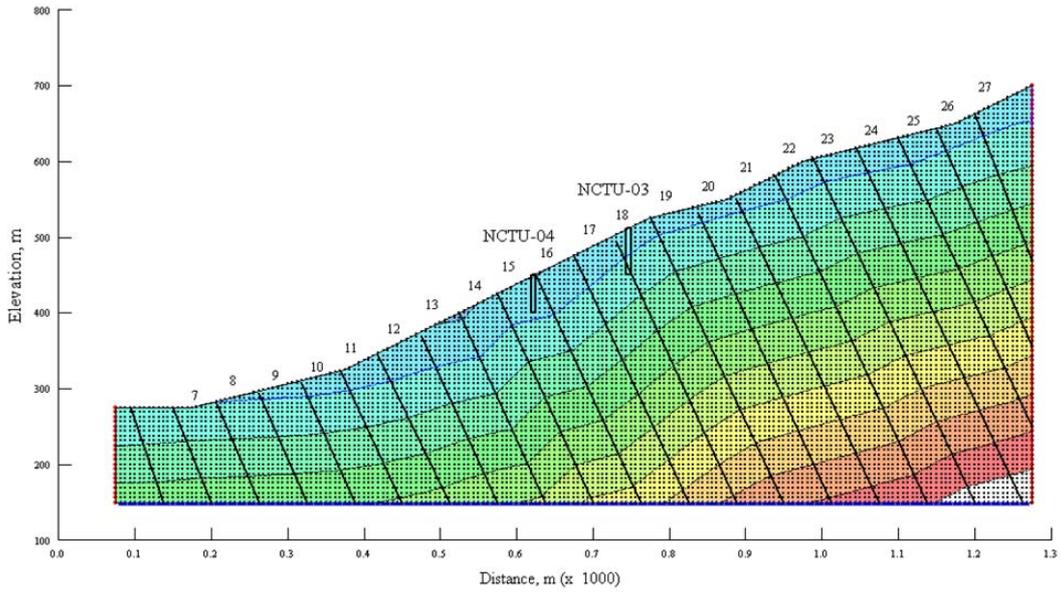
# 高地下水水位檢驗

38



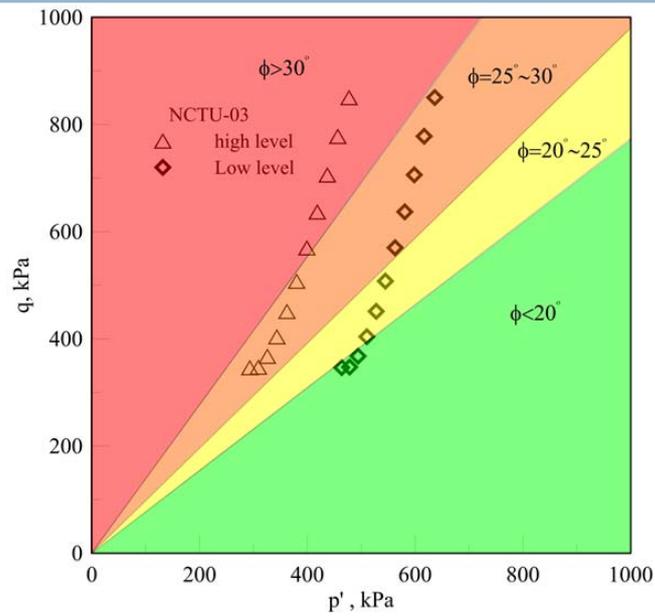
# 低地下水水位檢驗

39



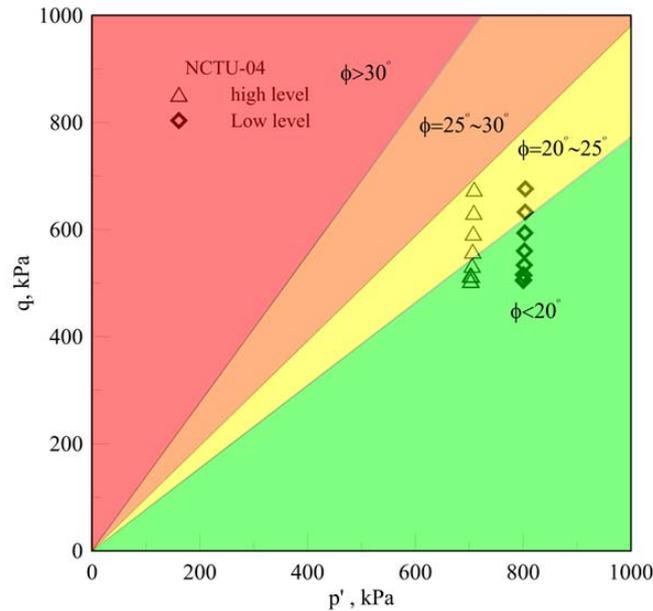
# NCTU-03 p'-q

40



## NCTU-04 $p'$ - $q$

41



## 後續工作

42

- 收集暴雨期間地下水壓與地層移動分佈數據
- 完成數值模擬分析，根據邊坡剖面建立 $p$ - $q$ 分佈
- 滲流分析：NCTU-03輸入邊界條件+地表入滲（降雨），使用NCTU-04讀數做驗證
- 根據水壓量測/分析計算 $p'$ - $q$ 分佈，根據 $p'$ - $q$ 與破壞包絡線之關係做預警基礎
- 持續蒐集現場監測數據，及傳統儀器與光纖監測儀器效能評估。
- 架設遠端伺服器，利用數值分析做即時計算並提供邊坡安全訊息



## 附錄四

### 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 ( 4/4 ) 2010-期末報告

黃安斌、李瑞庭、何彥德



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

## 2010-工作內容

2

- 現場光纖監測感測器與自動化光纖解讀系統量測設備維護與優化。
- 完成現場數值模擬，包含現場水壓變化與雨量關係等。
- 提供警戒值、行動值與管理值與相關單位(公路局等)，且該監測資料會與台科大網路系統整合。
- 光纖與傳統感應系統結果之比較以及效益評估

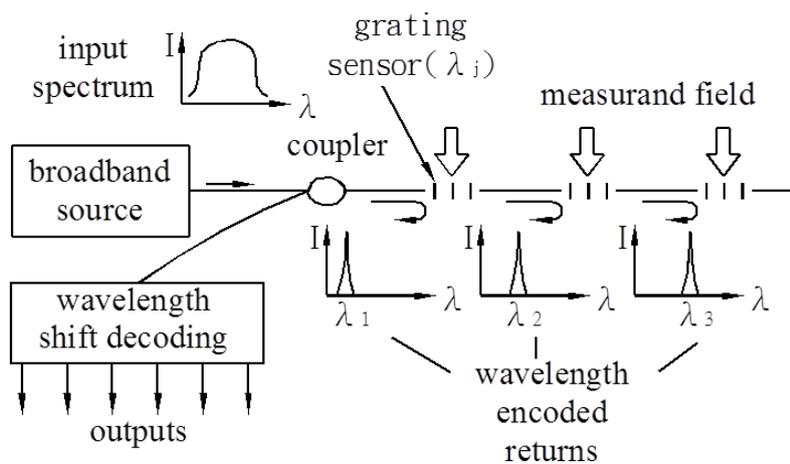
# 研究方法及進行步驟

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
- 以3.5G網路平台傳輸數據，並與台科大網路系統整合，提供即時資訊
- 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
- 藉由有效應力觀點，提供警戒值、行動值與管理值

# 光纖光柵感測原理

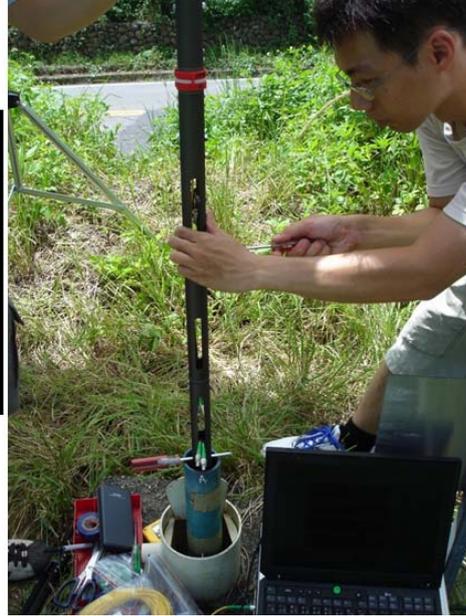
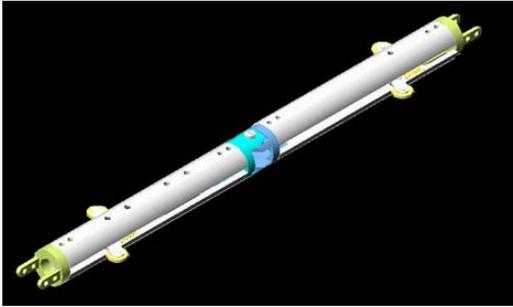
4



光纖光柵反射原理示意圖 (Ho et al., 2005)

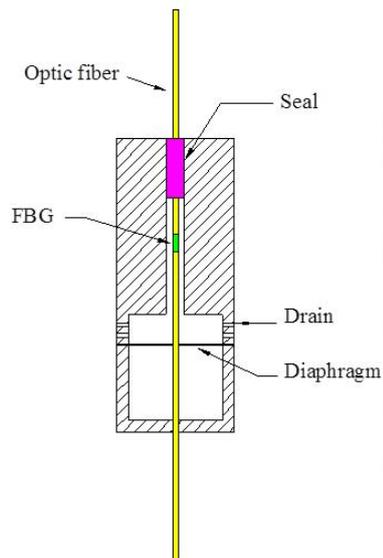
# 光纖光柵節理式偏斜儀

5

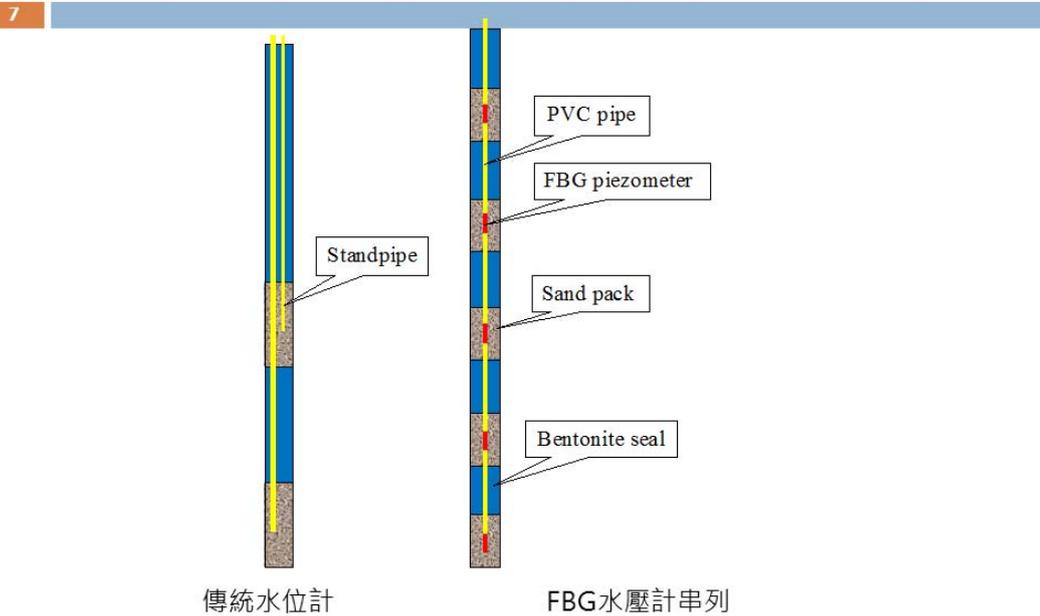


# 光纖光柵水壓計

6



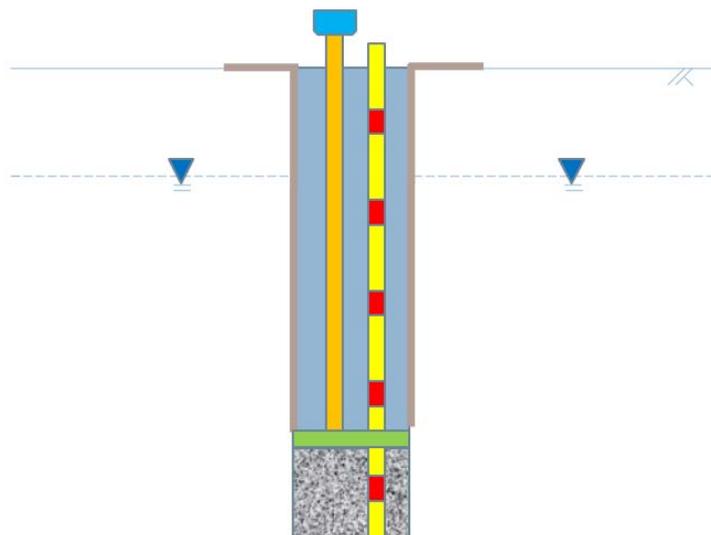
## FBG水壓計串列



## 分佈式水壓計現場安裝封層技術

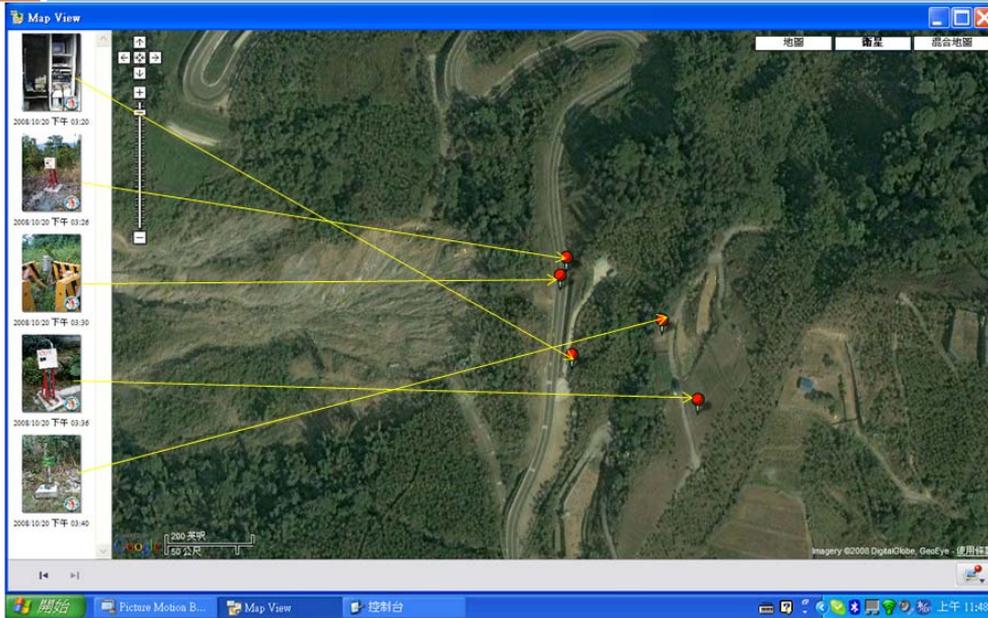
8

- 利用特密管施作原理



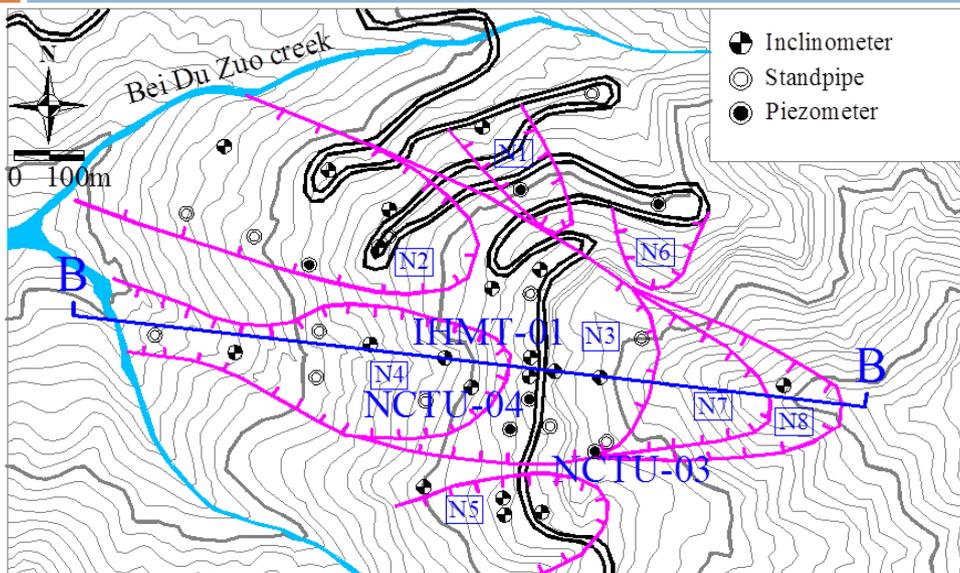
# 現場光纖監測儀器安裝

9



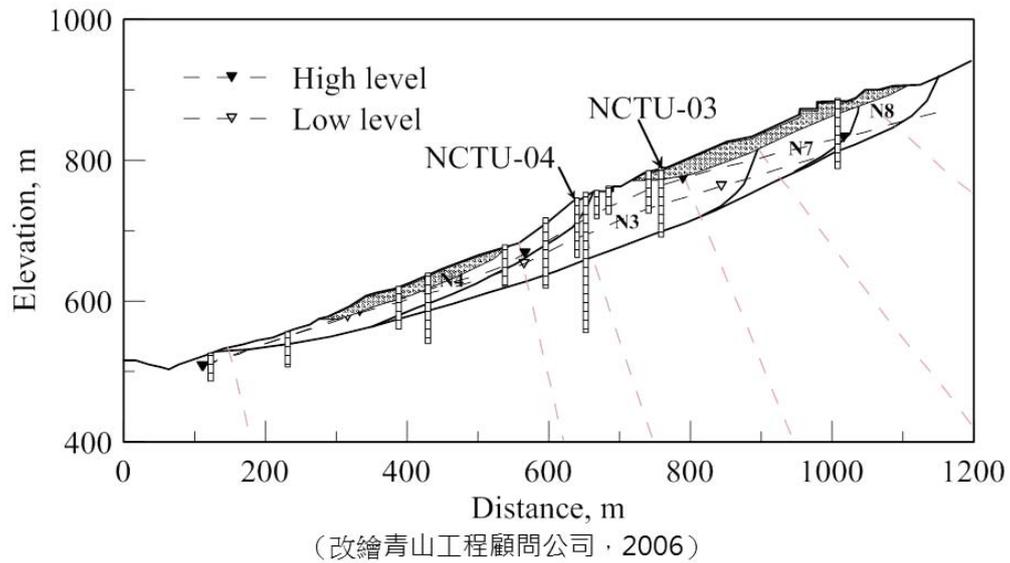
# 現場監測孔位分佈圖

10



## 深層滑動B-B剖面

11



## 光纖自動化監測系統



4800W battery  
20W Industrial PC



# 無線網路傳輸系統更新

13

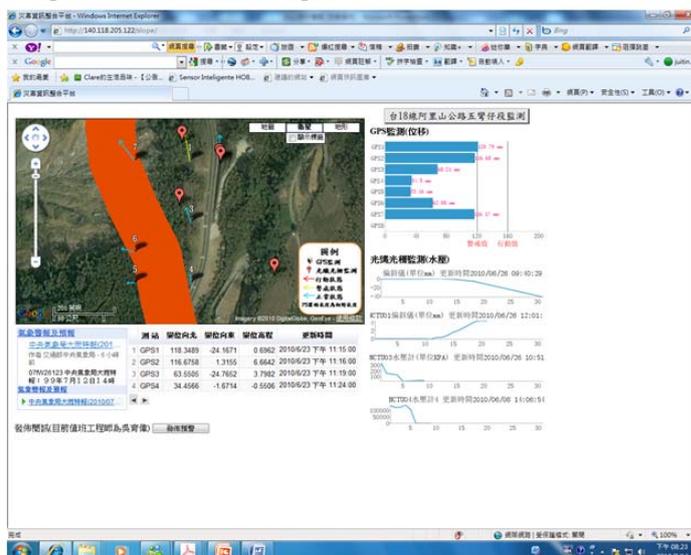


3.5G  
提高網路傳輸品質  
減少訊號斷訊問題

# 台科大網路系統整合

14

<http://140.118.205.122/slope/>



## 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

## IHMT-01 孔位Lugen試驗結果

16

試驗深度 (m)	Q (L/min)	透水係數 (cm/sec)
71~76	12.58	$\cong 2 \times 10^{-4}$
101~106	13.39	$\cong 2 \times 10^{-4}$

1 Lugen  $\cong 1.33 \sim 1.67 \times 10^{-5}$  cm/sec

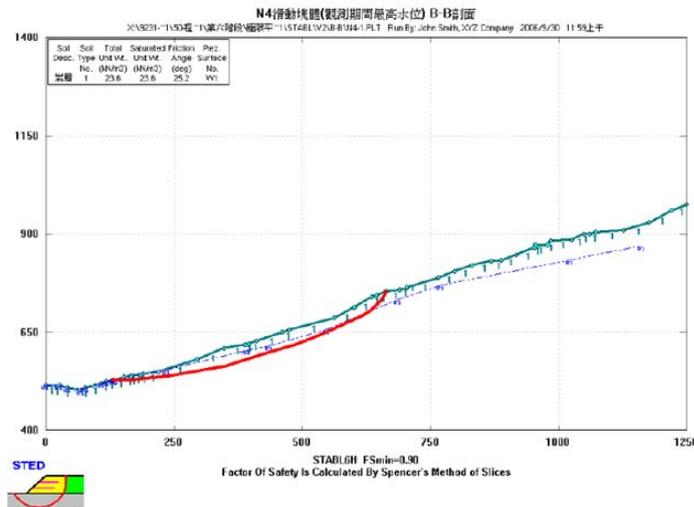
71~76m

101~106m



# 現有邊坡穩定分析結果

17



F.S=0.9

(摘自青山顧問報告, 2006)

# 現有邊坡穩定分析結果

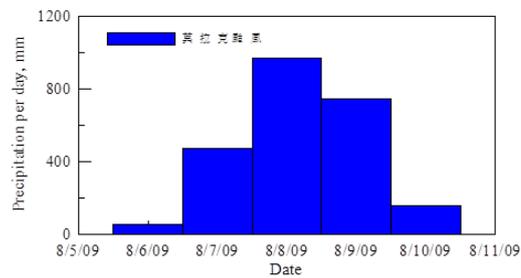
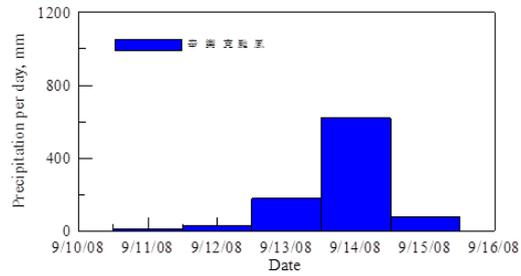
18

剖面	地下水位	滑動塊體	安全係數	
			PC-STABLE 程式	SLOPE/W 程式
B-B	低水位	N4	0.98	0.92
	低水位	N3	0.98	0.94
	低水位	N8	1.02	1.00
B-B	高水位	N4	0.9	0.82
	高水位	N3	0.85	0.81
	高水位	N8	0.9	0.86

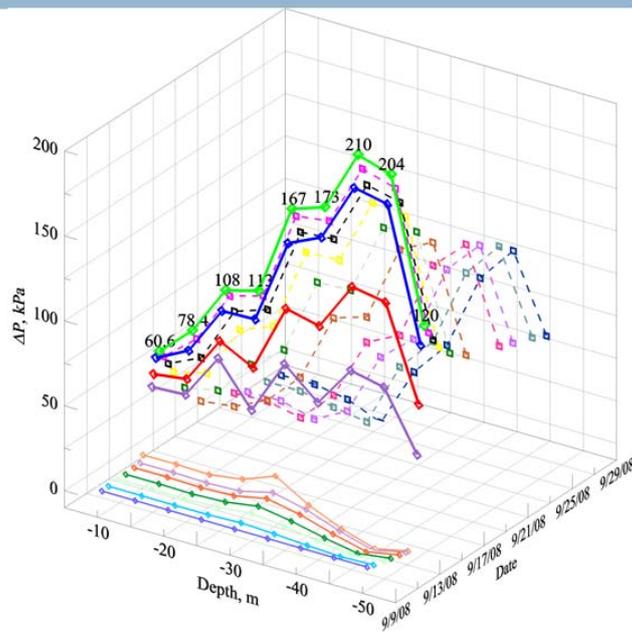
(摘自青山顧問報告, 2006)

邊坡穩定模擬於高低水位時, F.S均小於1

# 辛樂克與莫拉克颱風降雨量



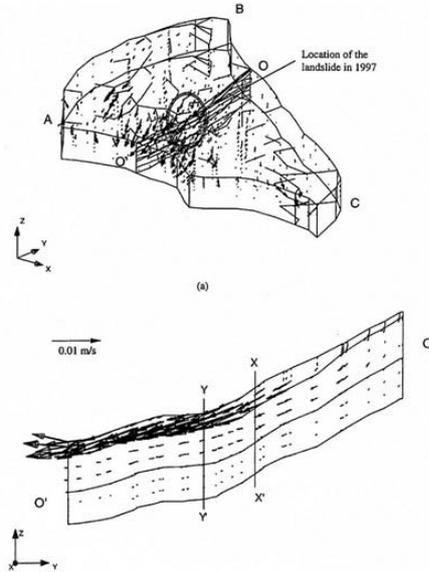
# 辛樂克颱風期間水壓讀數





# 降雨情況下地層內水流之分佈

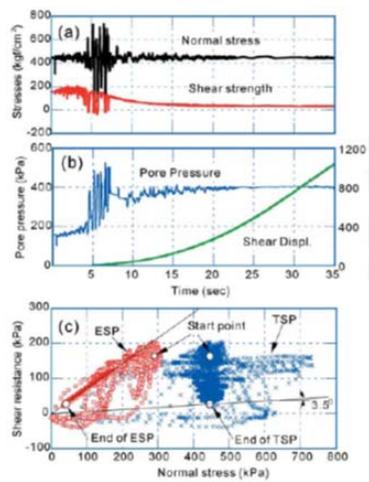
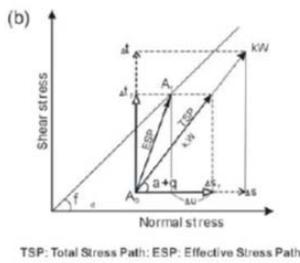
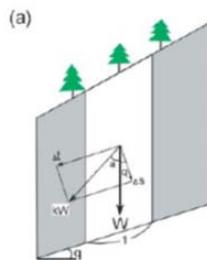
23



(取自Ng et al., 2001)

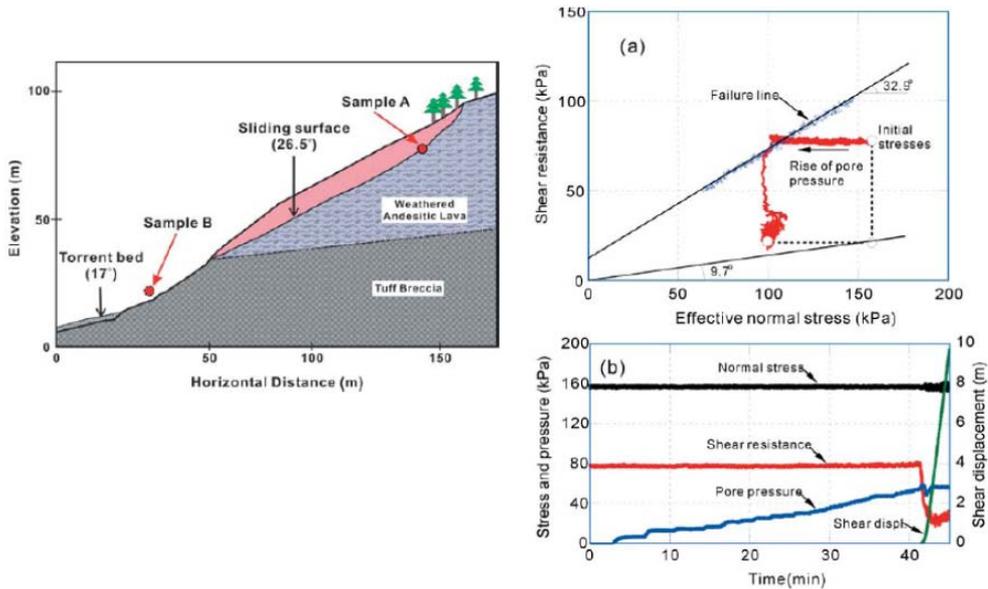
# Sassa et al., 2004

24



# Minamata Slope in Japan

25



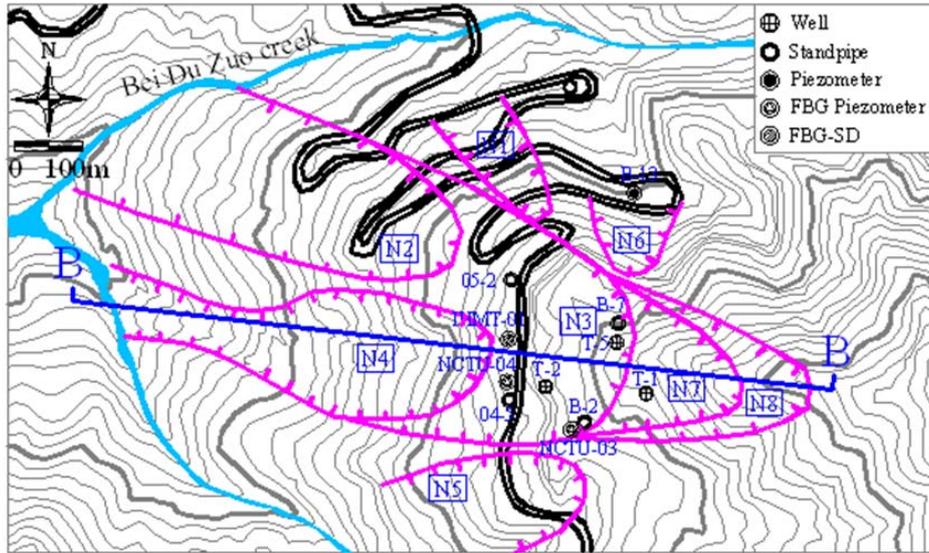
## 現場地下水流模擬流程

26

- 利用Modflow程式及現場水位觀測井，來模擬大區域之地下水位變化。
- 藉由 Modflow 模擬之地下水位結果，作為B-B斷面之地下水位邊界。
- 利用SEEP/W模擬B-B斷面，並以NCTU-03及NCTU-04分佈式水壓觀測井監測資料作為參數調整依據，以模擬B-B斷面水壓變化。

# 阿里山五彎仔現場既有監測井

27



# 既有監測井觀測資料

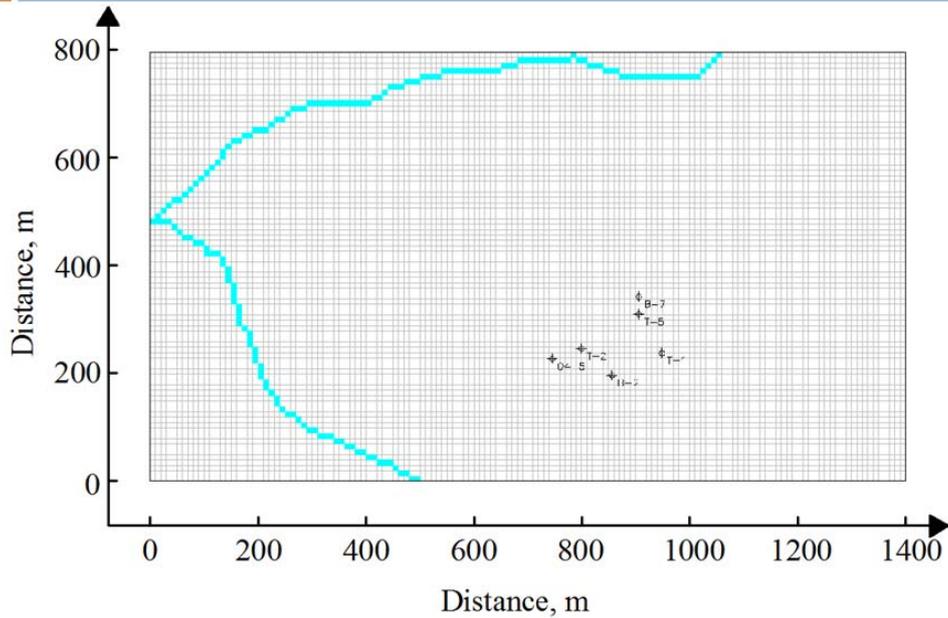
28

孔位編號	莫拉克颱風			辛樂克颱風		
	高水位	低水位	上升量	高水位	低水位	上升量
04-5	736.4	704.9	31.5	***	704.9	***
B-2	772.2	734	38.2	761.6	734	27.6
B-7	786.6	755.9	30.7	785.5	755.9	29.6
T-1	815.1	776.8	38.3	814.6	776.8	37.8
T-2	768.6	725.5	43.1	768.7	725.5	43.2
T-5	798.3	755.3	43	787.2	755.3	31.9

(摘自青山顧問報告, 2009)

## Modflow 模擬全區域地下水位

29



## Modflow 模擬參數設定

30

- 1. 假設單層且非侷限含水層
- 2. 網格數 $140 \times 80$ ，每一網格為10m
- 3. 輸入各觀測井地下水位高度
- 4. 假設每一網格初始水頭高程為800m
- 5. 假設河流水流面為地表高程、河床與水位面相差2公尺高。

## 低地下水位模擬流程

31

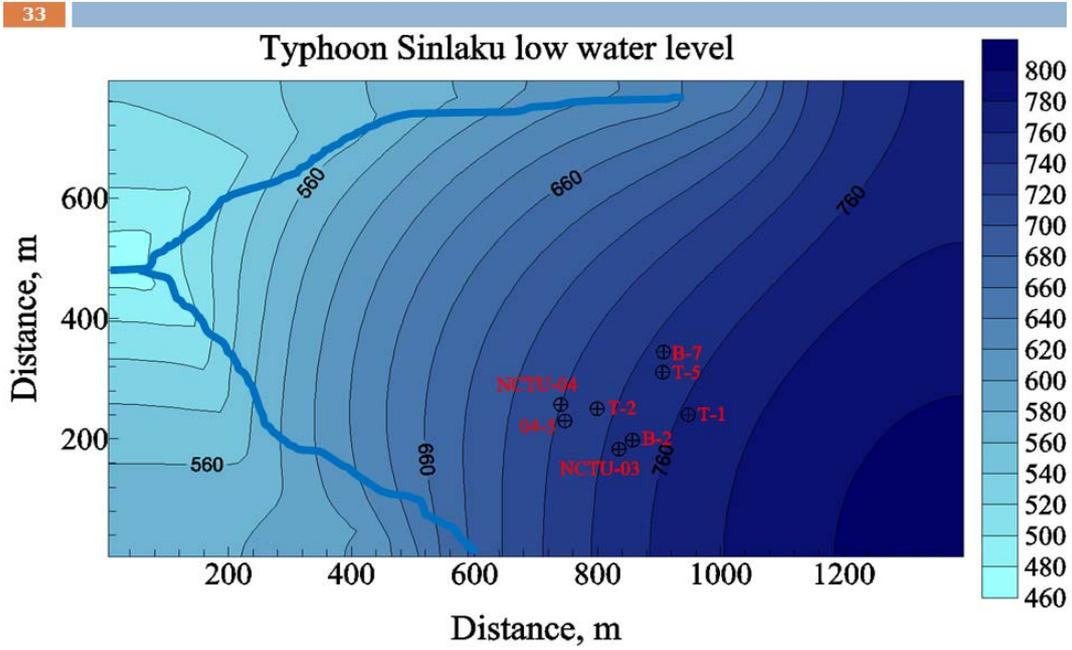
- 輸入現場各網格滲透係數，其初始值設定為  $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$
- 利用Ucode模式，反推現場滲透係數值。
- 模擬出現場地下水位分佈。

## 高水位模擬流程

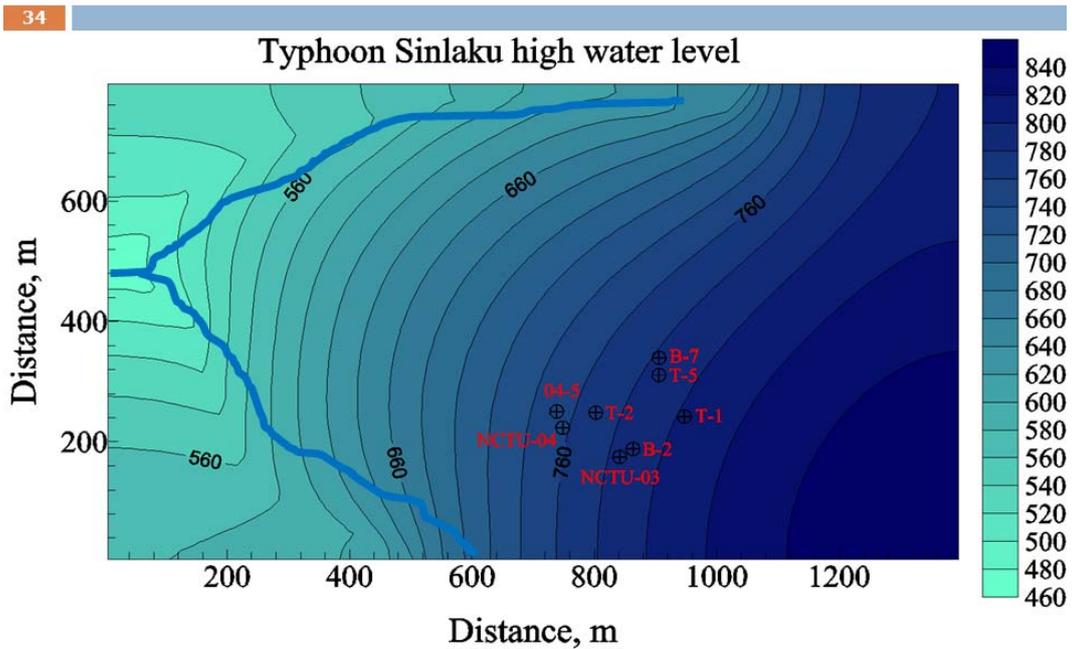
32

- 輸入現場各網格滲透係數，其初始值設定為  $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ；而入滲率初始設定為  $1 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 。
- 利用Ucode模式，反推現場滲透係數值與入滲率值。
- 模擬出現場地下水位分佈。

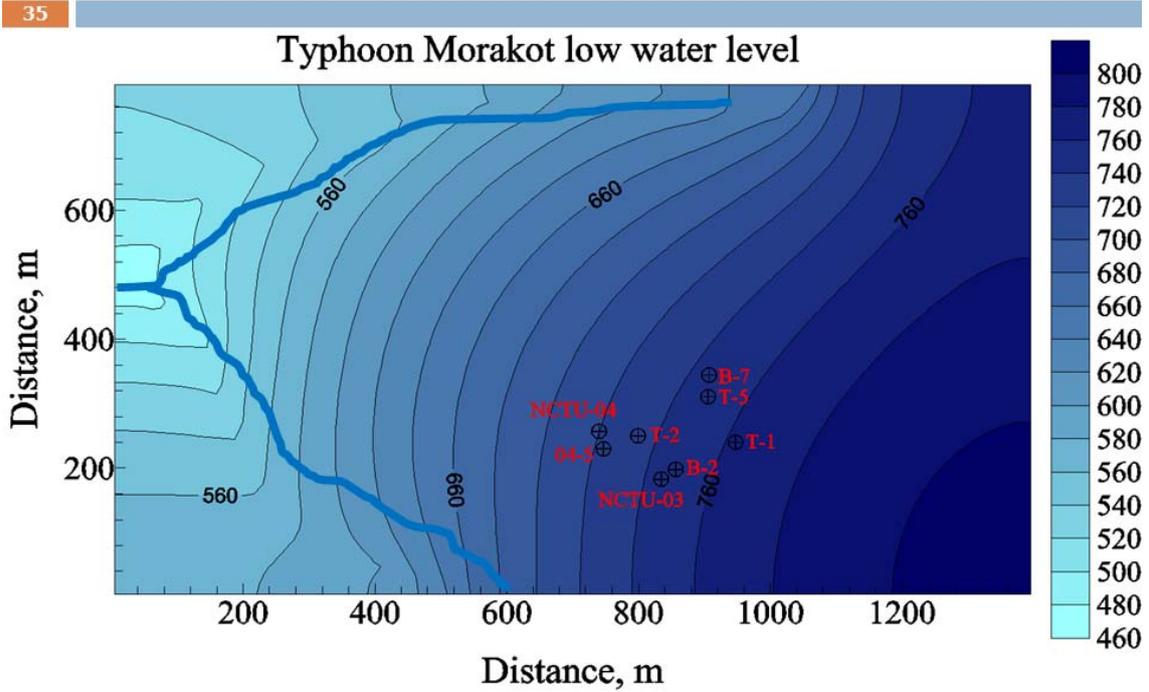
# 低地下水位 (辛樂克颱風前期)



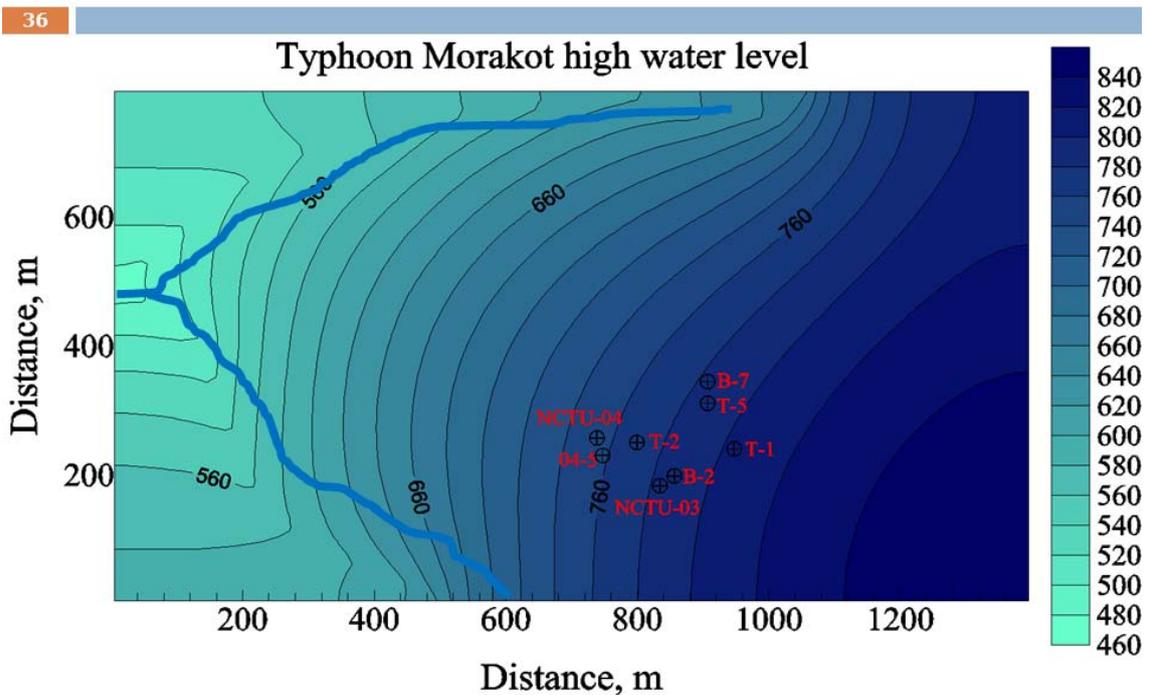
# 高地下水位 (辛樂克颱風後)



# 低地下水位 (莫拉克颱風前期)

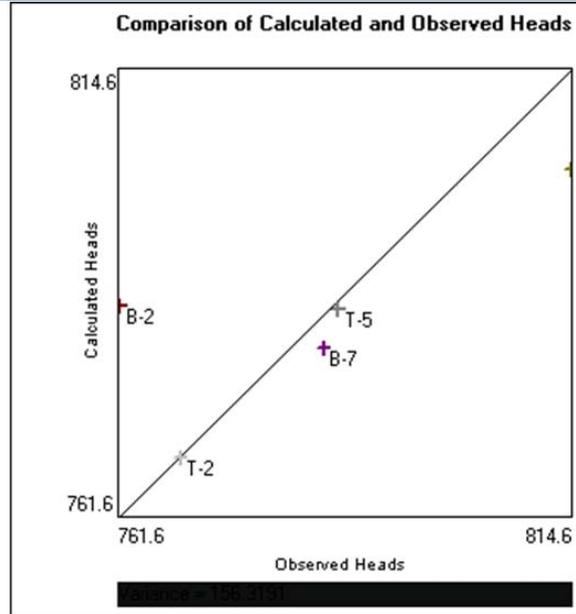


# 高地下水位 (莫拉克颱風後)



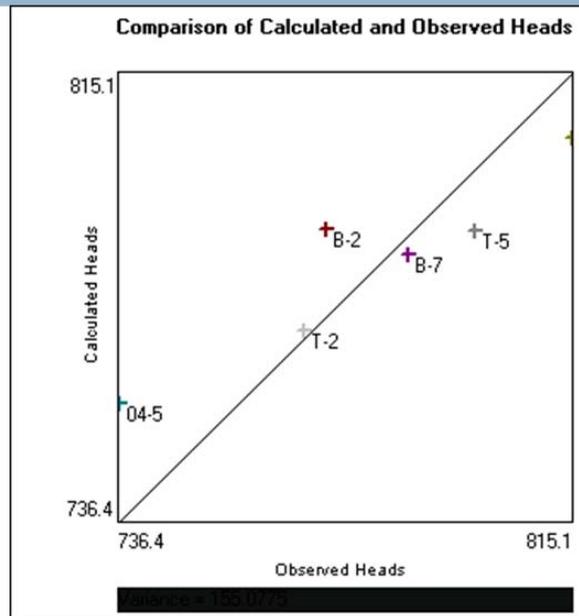
# 模擬驗證結果於辛樂克颱風

37



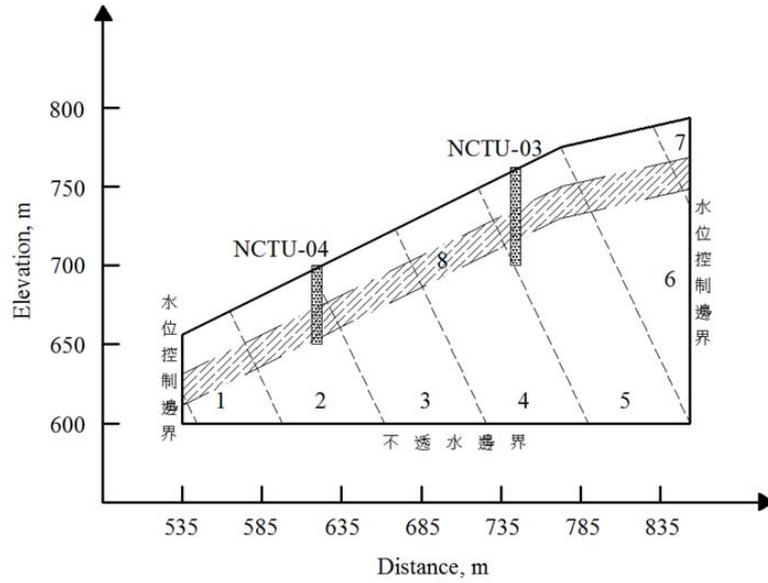
# 模擬驗證結果於莫拉克颱風

38



## SEEP/W 模擬B-B斷面

39



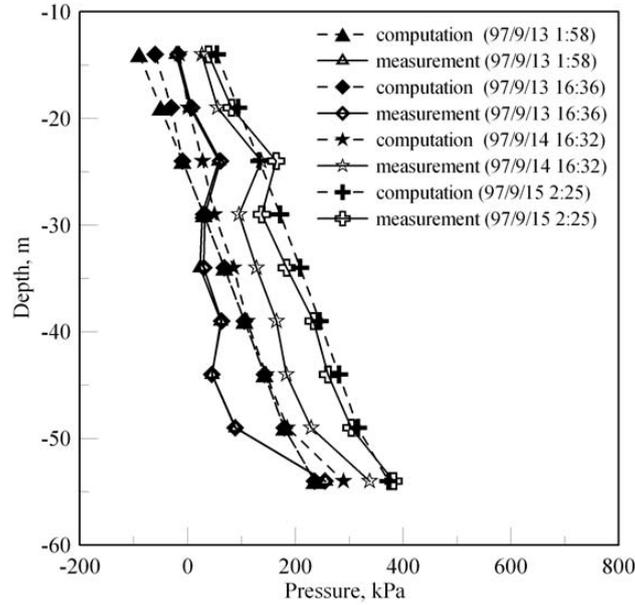
## SEEP/W 參數設定

40

分區區域	水力傳導係數k(cm/sec)
1	$1 * 10^{-3}$
2	$3 * 10^{-3}$
3	$1 * 10^{-3}$
4	$5 * 10^{-3}$
5	$3 * 10^{-2}$
6	$2 * 10^{-1}$
7	$2 * 10^{-3}$
8	$9 * 10^{-1}$

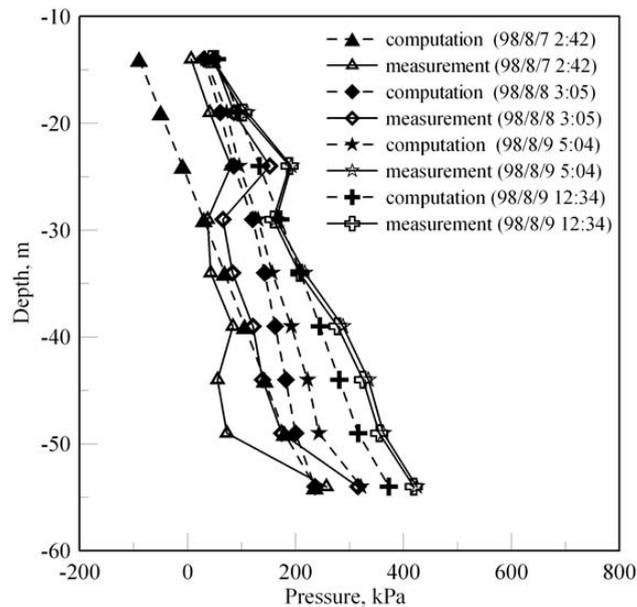
## 暫態模擬於辛樂克颱風 (NCTU-03)

41



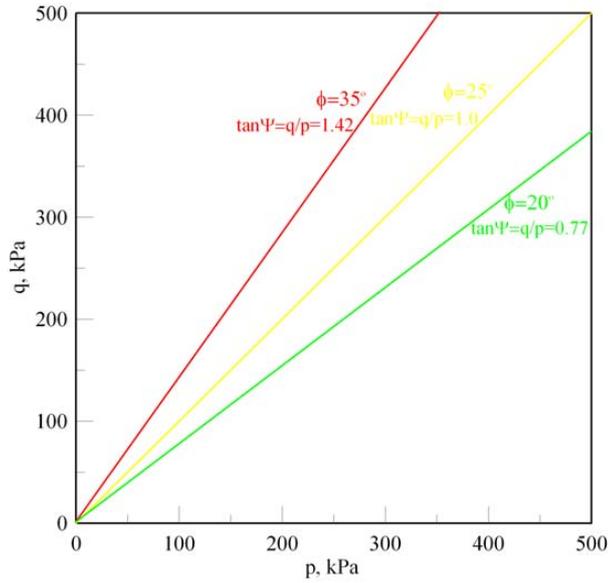
## 暫態模擬於莫拉克颱風 (NCTU-03)

42



# 邊坡破壞法則說明

43



$$\frac{\tan \psi}{\tan \psi_{(\phi=30^\circ)}} > 1 \text{ 不安全}$$

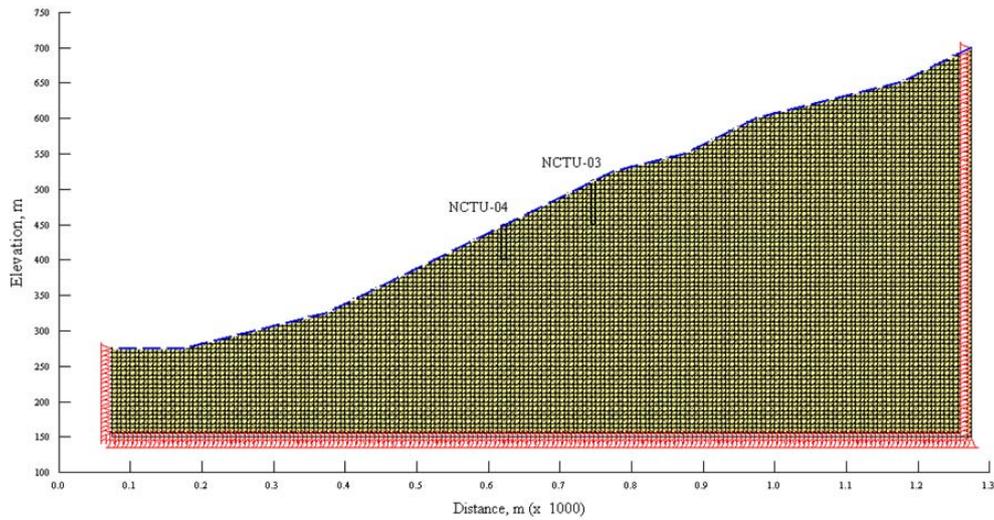
$$\frac{\tan \psi}{\tan \psi_{(\phi=30^\circ)}} < 1 \text{ 安全}$$

$$\phi = 30^\circ \rightarrow \tan \psi = 1.2$$

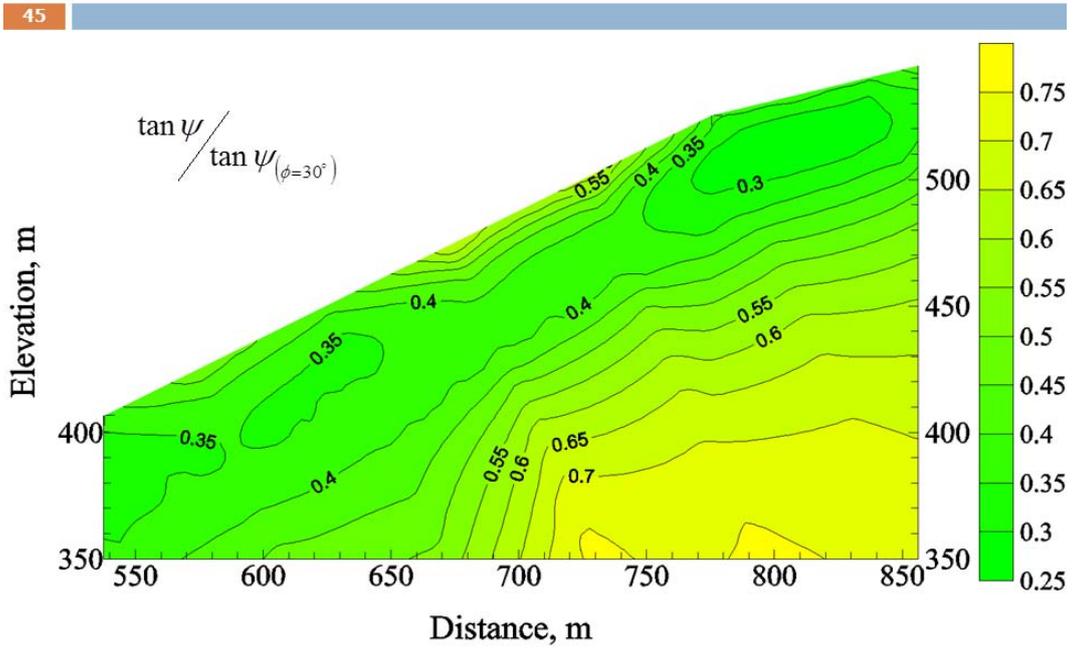
$$\phi = 35^\circ \rightarrow \tan \psi = 1.42$$

# 有限元素模擬B-B邊坡應力分佈

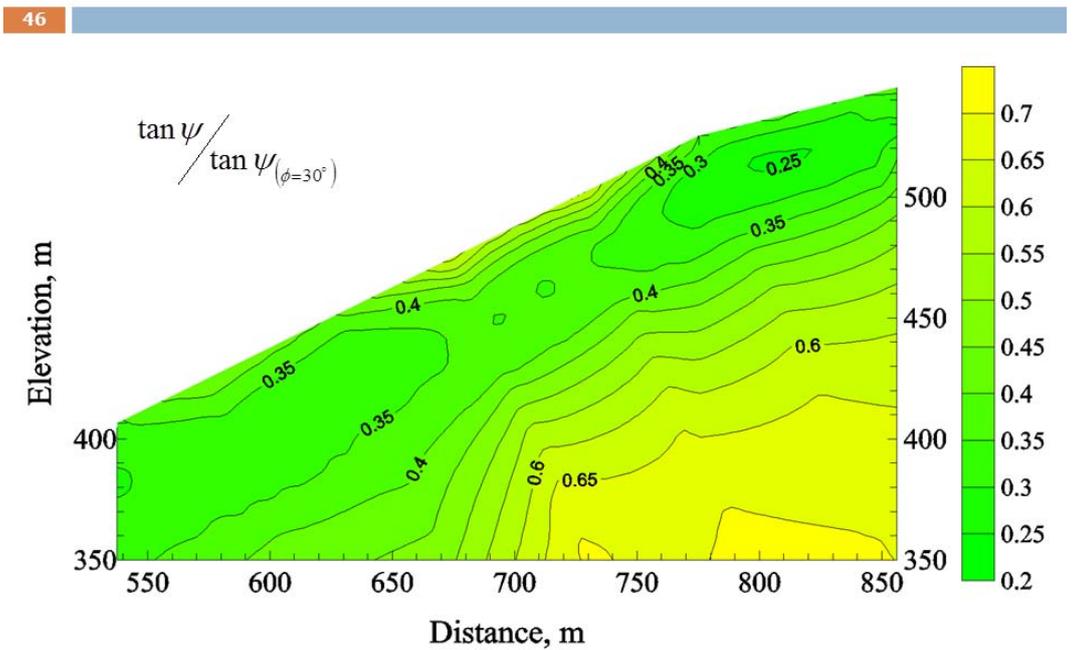
44



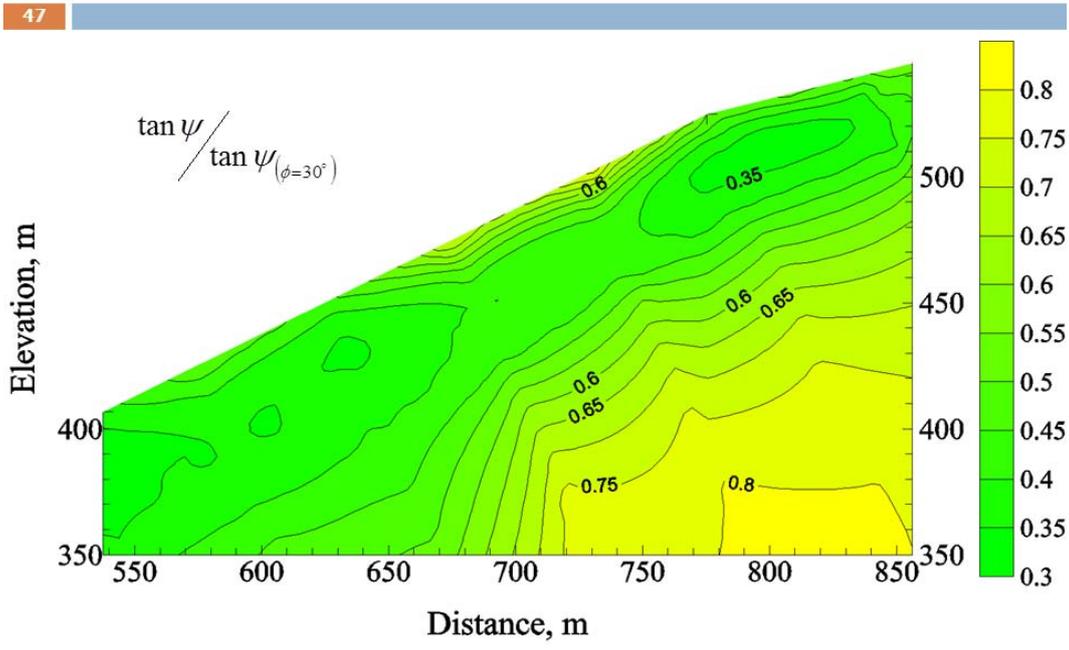
# 邊坡於低水位情況



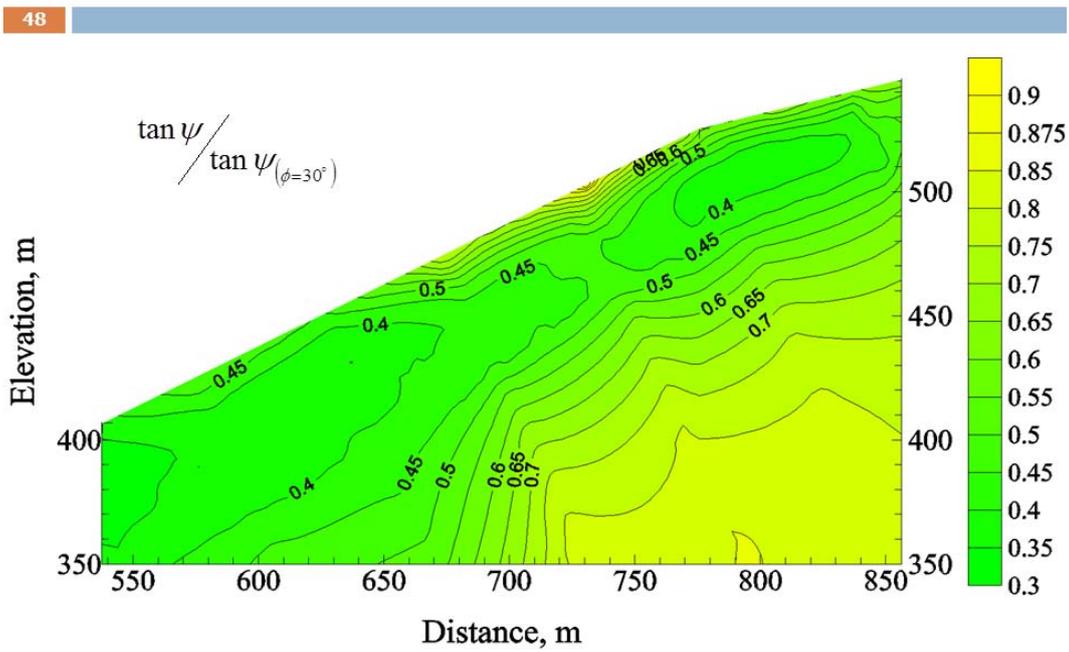
# 莫拉克颱風時期 (T=14.4 hr)



# 莫拉克颱風時期 (T=28.8 hr)

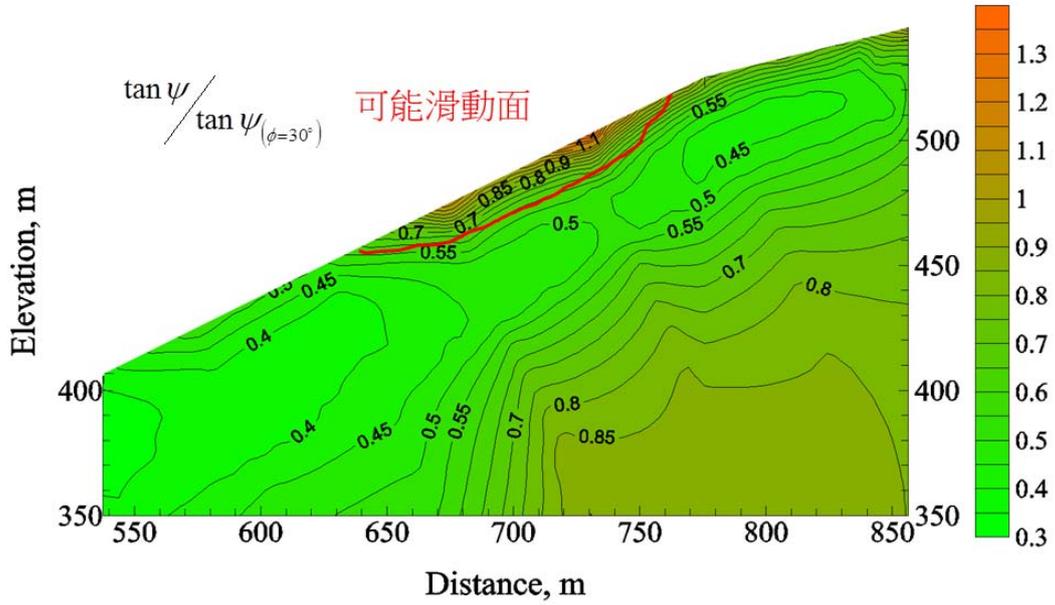


# 莫拉克颱風時期 (T=43.2 hr)



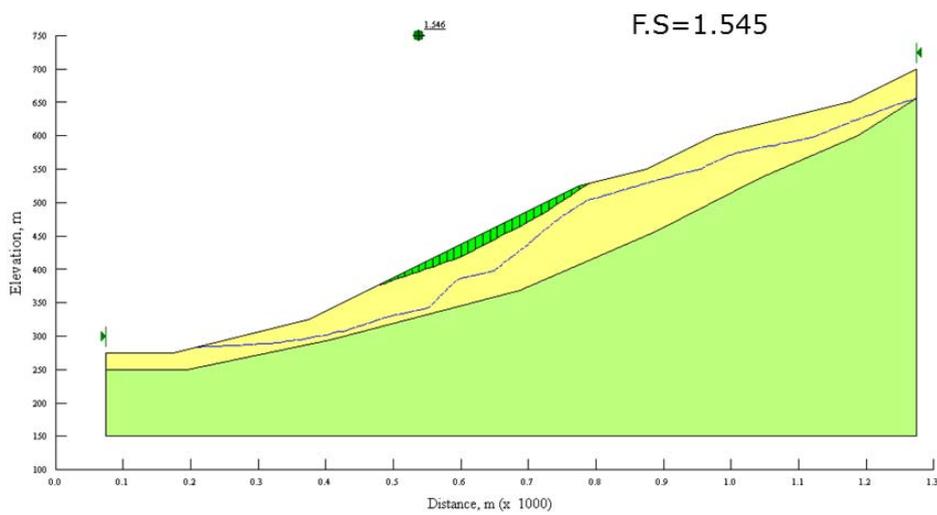
# 莫拉克颱風時期高水位

49



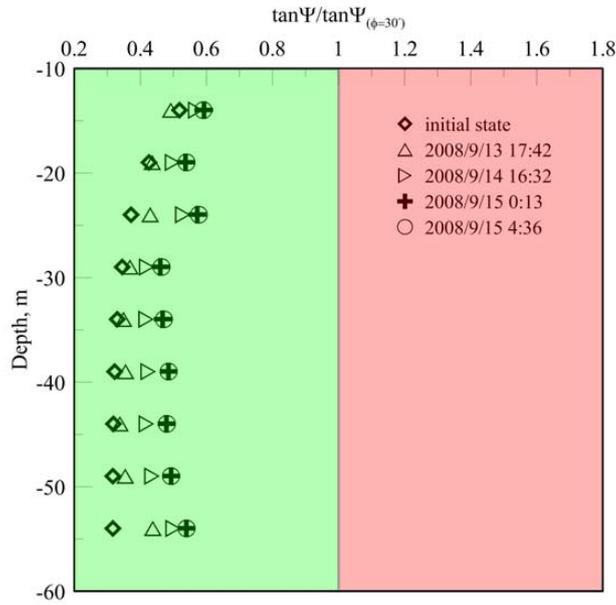
# SLOPE/W for Typhoon Morakot

50



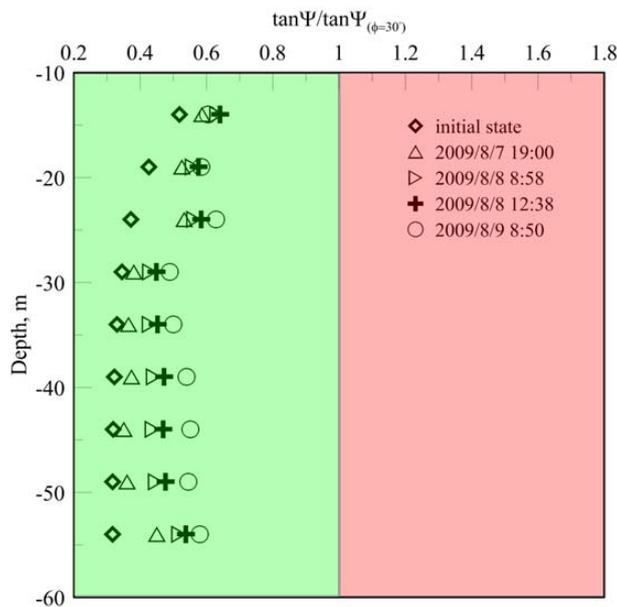
## NCTU-03 p'-q for Typhoon Sinlaku

51



## NCTU-03 p'-q for Typhoon Morakot

52



## 成本評估

53

感測器種類	成本差異百分比
光纖光柵水壓計	± 30%
偏斜儀	± 30%
解讀設備	+ 200%

## 效益評估

54

感測器種類	光纖式傳感器	電子式傳感器
耐久性	3年以上	1年以上
訊號品質	清晰不受電磁波影響	易受電磁波影響
專業人員	需要	較不需要
技術性	高	低

## 結論

55

- 已透過**3.5G**及**FTP**方式傳輸監測至台科大網路系統，以提供現場即時監測資料。
- 利用分佈式水壓量測技術，及配合有效應力方法，可有效預測可能之淺、深層滑動面位置。
- 於辛樂克、莫拉克及凡那比颱風驗證下，能有效發揮其監測功能，相對於傳統式感測器，有較高之耐久性及穩定性。

## 結論

56

- 利用現場水流模行結合邊坡穩定分析，可建立現場邊坡紅色、黃色及綠色潛勢破壞範圍大小，以作為日後現場邊坡安全預測依據。

