

97-35-7322
MOTC-IOT-96-H1DB007

全光纖式邊坡穩定監測系統整合 與現地應用測試(1/4)



交通部運輸研究所
中華民國 97 年 3 月

97

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試
(1/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1009700789

定價 200 元

97-35-7322
MOTC-IOT-96-H1DB007

全光纖式邊坡穩定監測系統整合 與現地應用測試(1/4)

著者：李豐博、饒正、黃安斌、蔡東霖、李瑞庭

交通部運輸研究所

中華民國 97 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目資料

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試
．(1/4) / 李豐博等著．-- 臺北市：交通部
運輸研究所，民97.03

面；公分

參考書目：面

ISBN 978-986-01-3845-0(平裝)

1. 防災工程 2. 山坡地 3. 光纖感測

445.5

97006343

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試 (1/4)

著者：李豐博、饒正、黃安斌、蔡東霖、李瑞庭

出版機關：交通部運輸研究所

地址：台北市敦化北路240號

網址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電話：(04) 26587176

出版年月：中華民國97年3月

印刷者：德輝興業有限公司

版(刷)次冊數：120冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價：200元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

五南文化廣場：臺中市中山路6號•電話：(04)22260330

GPN：1009700789

ISBN：978-986-01-3845-0 (平裝)

著作財產權：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

交通部運輸研究所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(1/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-01-3845-0 (平裝)	政府出版品統一編號 1009700789	運輸研究所出版品編號 97-35-7322	計畫編號 96-H1DB007
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：李豐博 研究人員：饒正 參與人員：林隆貞 聯絡電話：04-26587192 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：國立交通大學防災工程研究中心 計畫主持人：黃安斌 研究人員：黃安斌、蔡東霖、李瑞庭 地址：新竹市大學路 1001 號 聯絡電話：03-5712121		研究期間 自 96 年 3 月 至 96 年 11 月
關鍵詞：光纖、光纖感測、光纖水壓計、地下水文數值模型、邊坡穩定			
摘要： 目前針對潛在性及滑動中之邊坡監測，大多採用傳統傾斜管配合手動式傾斜儀監測滑動面之所在位置及滑動量，監測地下水位則多使用開口式水位計。這些監測儀器幾乎全部使用手工，在儀器現場紀錄讀數。此一安排不但費時，在雨季或邊坡發生滑動時時，現場紀錄儀器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。光纖相較於電子式儀器的優點在於訊號傳輸距離遠可達數十公里及在光纖傳輸線上可連接多點或分佈式之感測器。本計畫以阿里山台18線公路五彎仔路段作為本試驗之場址，使用本研究團隊研發之光纖感測地層移動監測系統與分佈式光纖水壓計來監測該地區之地層滑動及水壓變化，並配合地下水文數值模型分析，以作為該地滑區日後穩定評估之依據。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
97 年 3 月	124	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐密 ☐機密 ☐極機密 ☐絕對機密 （解密條件：☐ 年 月 日解密，☐公布後解密，☐附件抽存後解密， ☐工作完成或會議終了時解密，☐另行檢討後辦理解密） ☒普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Integration and Field Testing of an All Fiber Optic Slope Stability Monitoring System (1/4)			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-01-3845-0 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009700789	IOT SERIAL NUMBER 97-35-7322	PROJECT NUMBER 96-H1DB007
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lee Feng-Bor PROJECT STAFF: Jao Cheng PHONE: (04) 26587192 FAX: (04) 26564418			PROJECT PERIOD FROM March 2007 TO October 2007
RESEARCH AGENCY: National Chiao Tung University, Natural Hazard Mitigation Engineering Research Center PRINCIPAL INVESTIGATOR: Huang An-Bin PROJECT STAFF: Huang An-Bin, Tsai Tong-Lin, Lee Jui-Ting ADDRESS: #1001, Ta Hsueh Rd. , Hsinchu, 300, Taiwan, R.O.C PHONE: (03) 5712121			
KEY WORDS: Fiber optic, Fiber optic sensor, fiber optic piezometer, ground water flow numerical model, Slope Stability			
ABSTRACT: For monitoring slopes that are potentially unstable or where sliding is progressing, inclinometer casings are typically used. Open-end piezometers are commonly used to monitor ground water levels. Readings from these instruments are mostly taken in the field manually. The procedure is time consuming and hazardous during the rainy season or when the slope is unstable. The potential danger may prevent the critical instrument readings from being taken when they are needed the most. Many automated electronic devices have been developed recently. These devices are mostly expensive and subject to electromagnetic interference, lightning and deterioration when deployed in the field. In comparison with electronic devices, the fiber optic sensors can easily transmit signals by tens of kilometers through light. Multiple sensors can be connected to a single fiber optic. A test site was set up at a Five-turn-point section of Highway 18 near Mt. Alishan. The fiber optic ground displacement and ground water monitoring sensors developed by the research team were deployed at the test site. Coupled with field measurements, a ground water flow numerical model will be established for future studies.			
DATE OF PUBLICATION March 2008	NUMBER OF PAGES 124	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ 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整合與現地應用測試(1/4)

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
表目錄.....	IX
圖目錄.....	V
第一章 緒論.....	1-1
1.1 計畫背景.....	1-1
1.2 計畫工作項目說明.....	1-3
1.3 計畫執行進度說明.....	1-3
第二章 研究場址相關資料.....	2-1
2.1 過去研究相關監測資料說明.....	2-6
2.2 研究場址之現場探勘與監測孔位的選定.....	2-10
第三章 光纖光柵監測系統.....	3-1
3.1 光纖光柵感測原理.....	3-1
3.2 光纖光柵節理式偏斜儀.....	3-2
3.3 光纖光柵節理式偏斜儀之改良.....	3-4
3.4 光纖光柵水壓計.....	3-6
3.5 光纖光柵水壓計之改良.....	3-10

3.6 光纖拉伸計	3-14
第四章 現地監測儀器安裝與量測數據說明	4-1
第五章 研究場址地下水流模型選定與數值模式之建立	5-1
5.1 相關地下水流模型簡介	5-7
5.2 場址地下水流模型初步選定	5-10
5.3 數值模式之建立	5-13
5.3.1 控制方程式、邊界條件與初始條件	5-13
5.3.2 離散方程式	5-14
5.4 模式驗證與初步測試	5-16
5.4.1 模式驗證	5-16
5.4.2 模式初步測試	5-18
第六章 結論與建議	6-1
6.1 結論	6-1
6.2 建議	6-2
參考資料	參-1
附錄 1 期中委員審查見暨辦理概況	附錄 1-1
附錄 2 期中委員審查見暨辦理概況	附錄 2-1
附錄 3 簡報資料	附錄 3-1

表 目 錄

表 2.1 A-A 剖面監測項目狀態說明	2-7
表 2.1 B-B 剖面監測項目狀態說明	2-8
表 2.3 水位觀測井監測資料	2-9
表 4.1 NCTU-02 光纖光柵水壓計配置圖	4-4
表 4.2 NCTU-03 光纖光柵水壓計配置表	4-4

圖 目 錄

圖 2.1 阿里山公路五彎仔路段航照圖	2-2
圖 2.2 阿里山公路五彎仔路段—監測儀器配置圖	2-2
圖 2.3 A-A 剖面示意圖	2-4
圖 2.4 B-B 剖面示意圖	2-5
圖 2.5 傾斜觀測管 B-8 示意圖	2-11
圖 2.6 傾斜觀測管管內檢查過程圖	2-11
圖 3.1 光纖光柵量測原理示意圖	3-2
圖 3.2 FBG 偏斜儀設計示意圖	3-4
圖 3.3 節理式設計之訊號放大效應	3-4
圖 3.4 鋁擠型偏斜儀支架設計概念圖	3-5
圖 3.5 製作完成之鋁擠型偏斜儀支架	3-5
圖 3.6 光纖光柵內連續遞增之漸變應變	3-6
圖 3.7 連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改變	3-7
圖 3.8 FBG 波長飄移分析示意圖	3-7
圖 3.9 漸變週期式 FBG 水壓計構造示意圖	3-9
圖 3.10 等週期波長式 FGB 水壓計構造示意圖	3-9
圖 3.11 等週期波長式 FGB 水壓計標定結果	3-10
圖 3.12 FGB 水壓計改良斷面示意圖	3-11
圖 3.13 改良式 FGB 水壓計	3-11

圖 3.14 大量串接 FBG 水壓計與傳統水位管之比較.....	3-12
圖 3.15 FBG 水壓計現場安裝構想圖.....	3-13
圖 3.16 光纖位伸計實體圖.....	3-14
圖 3.17 光纖拉伸計初使與受力後狀態圖.....	3-15
圖 4.1 全光纖式監測儀器配置圖.....	4-3
圖 4.2 節理式光纖光柵偏斜儀實體圖.....	4-5
圖 4.3 NCTU-01 節理式光纖光柵偏斜儀裝設概況圖.....	4-6
圖 4.4 C-11 傾斜觀測管量測概況圖.....	4-7
圖 4.5 NCTU-02 之五組光纖光柵水壓計實體圖.....	4-8
圖 4.6 NCTU-02 光纖光柵水壓計裝設概況圖.....	4-9
圖 4.7 NCTU-02 光纖光柵水壓計裝設概況圖.....	4-10
圖 4.8 C-11 與 NCTU-01 傾斜觀測管量測結果圖.....	4-11
圖 4.9 NCTU-02 光纖光柵水壓觀測井結果圖.....	4-12
圖 4.10 NCTU-03 光纖光柵水壓觀測井結果圖.....	4-13
圖 4.11 交通大學結構大樓 9M 傾斜觀測管測試場景.....	4-14
圖 4.12 光纖拉伸計固定於 9M 傾斜觀測管示意圖.....	4-14
圖 4.13 光纖拉伸計製作示意圖.....	4-14
圖 4.14 光纖拉伸計固定端處上膠示意圖.....	4-14
圖 4.15 IP 量測 9M 傾斜觀測管結果圖(喇叭型).....	4-14
圖 4.16 光纖拉伸計量測 9M 傾斜觀測管結果圖(喇叭型).....	4-16
圖 4.17 IP 量測 9M 傾斜觀測管結果圖(大肚型).....	4-17

圖 4.18 光纖拉伸計量測 9M 傾斜觀測管結果圖(大肚型)	4-18
圖 5.1 Lai Ping Road 三度空間滲流分析之有限元架構	5-1
圖 5.2 土壤與岩石之水土特性曲線	5-2
圖 5.3 典型降雨情況下地層內水流之分析	5-3
圖 5.4 不同降雨強度情況下地下水壓之分析	5-4
圖 5.5 降雨量、地下水及地表位移量之關連性	5-5
圖 5.6 相關儀器設置位置圖	5-6
圖 5.7 四彎處降雨量、地下水及地表位移量之關係	5-7
圖 5.8 都布假設之非拘限地下水流模型示意圖	5-8
圖 5.9 多水層地下水流模型示意圖	5-9
圖 5.10 坡地非飽和地下水流模型示意圖	5-10
圖 5.11 地下水撿層法與微流速儀量測法檢測成果	5-11
圖 5.12 地質剖地面示意圖	5-12
圖 5.13 垂直模擬剖面示意圖	5-13
圖 5.14 質量守衡誤差模擬結果	5-17
圖 5.15 體積含水量模擬結果	5-18
圖 5.16 坡地非飽和地下水流模擬結果	5-19
圖 5.17 壓力水頭隨時間變化模擬結果	5-20

第一章 緒 論

1.1 計畫背景

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

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

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

本計畫所希望達到之總目標有以下四項：

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

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

1.2 計畫工作項目說明

本年度計畫之主要工作內容為：

1. 具有部分或全分佈式監測功能，能夠維持長期應變解讀誤差在 $5\mu\epsilon$ 以內之光纖訊號解讀系統之實用化。
2. 可與 FBG-SD 匹配，低解析度能承受大變形，低成本光纖地層感應系統之研發與功能測試。
3. 光纖水壓計之改良、功能測試以及與地層位移監測系統之整合。
4. 配合現有邊坡穩定監測，在現場另行安裝整合完成之光纖感應監測系統，將兩種監測系統所做結果做比較以評估光纖監測系統之有效性與經濟性。

1.3 計畫執行進度說明

本研究團隊對於計畫工作內容執行進度如下：

1. 蒐集完成研究所需之參考文獻。
2. 完成試驗場址之現場踏勘。

3. 改良現有光纖水壓計安裝機制及模擬現場安裝試驗。
4. 改良現有 FBG-SD 偏斜儀，以便現場安裝。
5. 試驗場址地下水模型之選定。

第二章 研究場址相關資料

根據交通部勘查全臺灣公路，目前全臺灣最危險公路依序為阿里山公路、蘇花公路、南橫公路、竹東到尖石的縣道一二二線及台七線北橫公路，其中以阿里山公路五彎仔路段最為嚴重。自民國71年拓寬通車後，該路段常常發生路面下陷龜裂及檔土結構物錯動破壞，且每年投入許多經費養護、整治，但該路段至今仍繼續滑動中。而在民國92年6月發生大規模崩坍，其中崩坍範圍如圖2.1所示，阿里山公路31.5k裸坡崩坍後，不但造成沿線交通中斷3個月且該路段因此改線。

因此民國93年交通部公路總局第五區養護工程處委託青山工程顧問公司進行五彎仔地滑區調查與監測，圖2.2顯示五彎仔地滑區所埋設監測儀器配置圖，據研究結果，該地區目前還仍在繼續滑動中，其中以N2、N3及N4滑動塊體滑動量最大，在雨季期間，平均每月滑動可達1.5公分。另外圖2.3及圖2.4中，岩層層面與坡面傾向並非一致，故排除地層滑動與順向波之關連性，其可能滑動機制為崩積層與岩層介面之滑動或沿著深層破碎岩層弱面滑動，加上該區域涵蓋有剪裂帶且岩層也相當破碎。雨季期間，受地表水入滲的影響，局部區域地層之水位或水壓遽增，也可能是地層滑動主要之原因。



圖 2.1 阿里山公路五彎仔路段航照圖 (青山工程顧問公司, 2006)

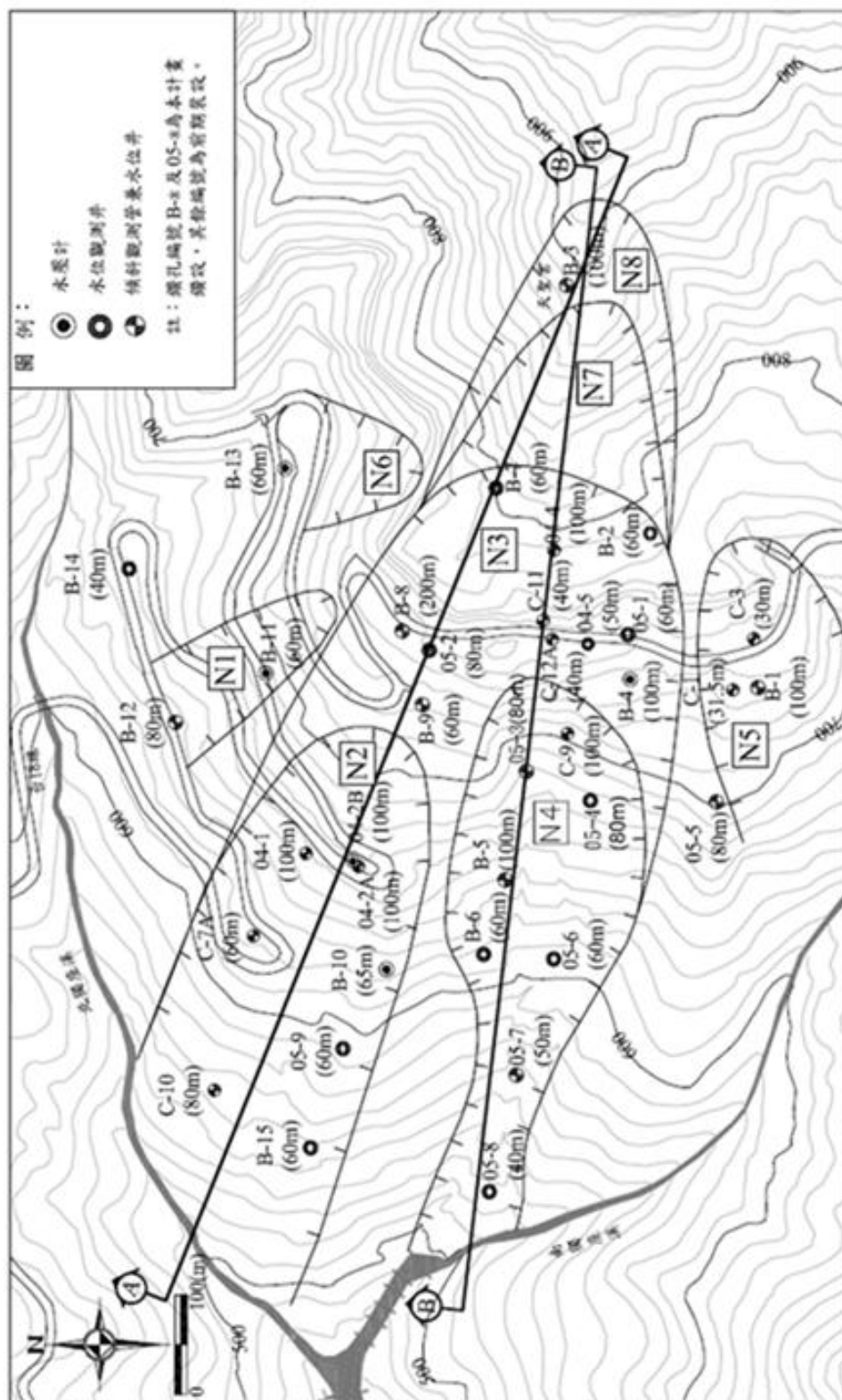


圖 2.2 阿里山公路五彎仔路段-監測儀器配置圖（青山工程顧問公司，2006）

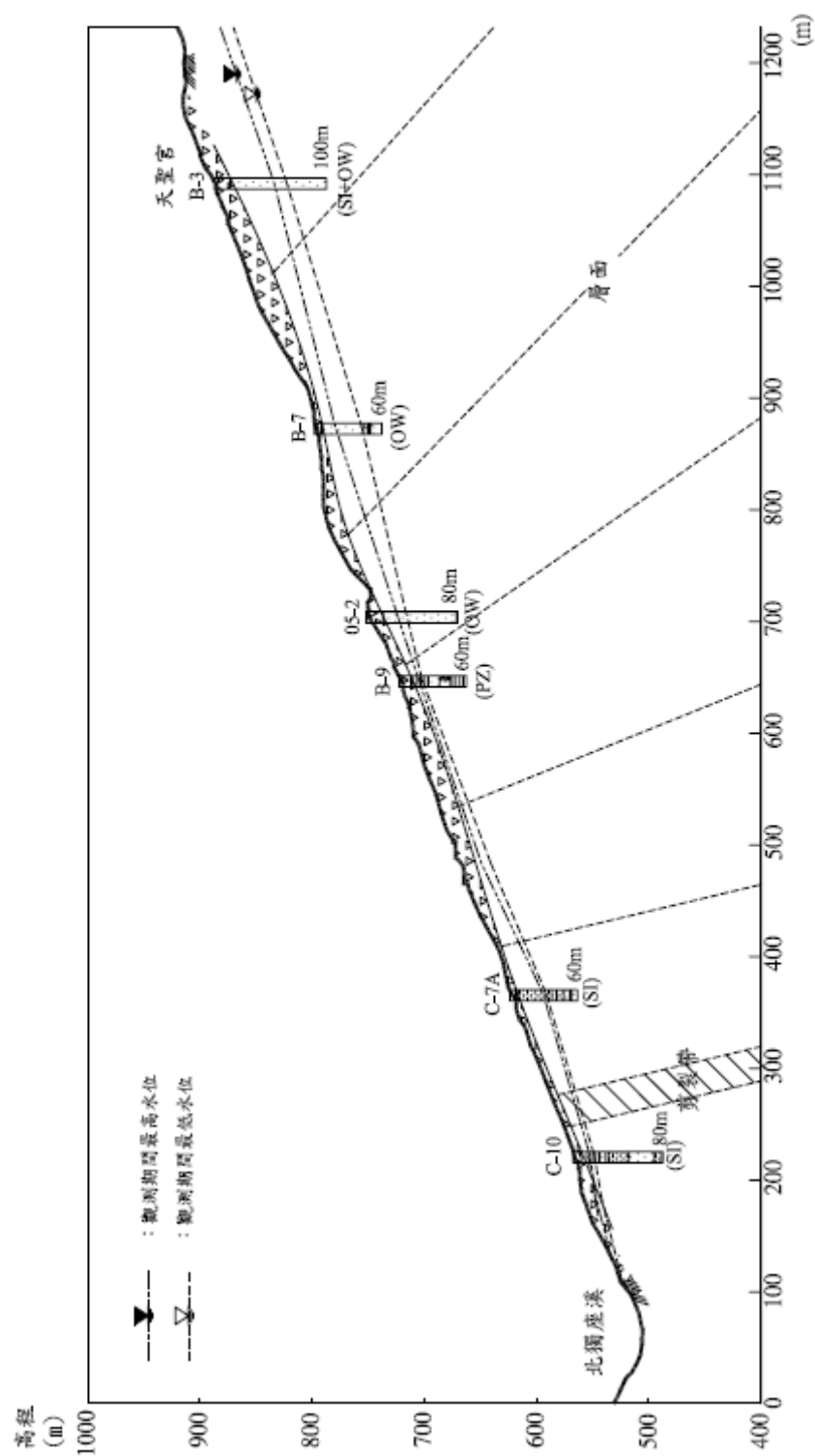


圖 2.3 A-A 剖面示意圖 (青山工程顧問公司, 2006)

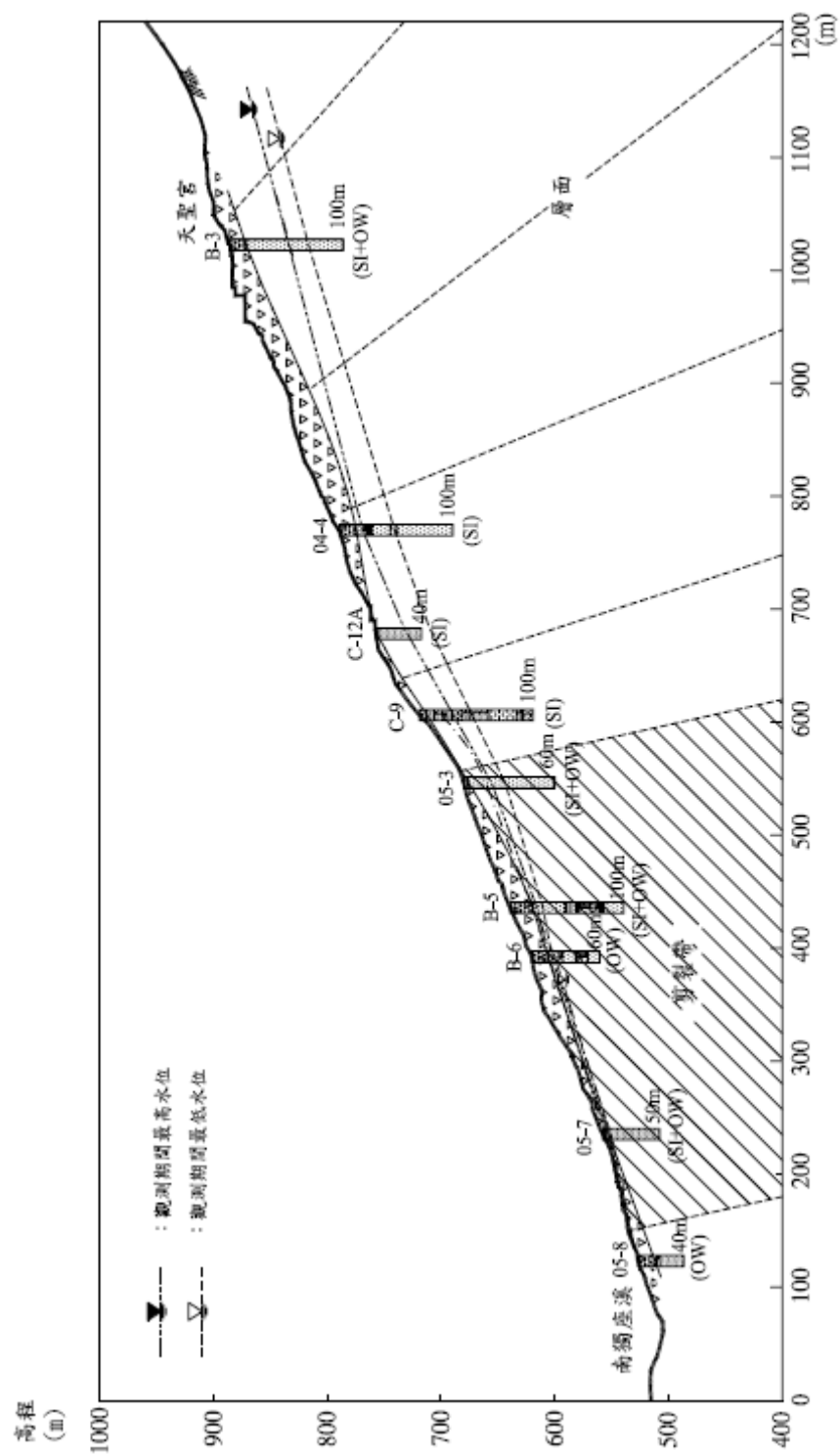


圖 2.4 B-B 剖面示意圖 (青山工程顧問公司, 2006)

2.1 過去研究相關監測資料說明

根據臺灣營建研究院及青山工程顧問公司之前相關研究報告指出，目前安裝於阿里山五彎仔各式監測儀器，大多因坡面滑動而造成破壞，無法繼續發揮監測功能。表2.1及表2.2為該地區監測儀器目前狀態說明。

其中A-A剖面(圖2.3)，目前可持續監測的孔位為傾斜觀測管B-3及B-8；豎管式水壓計B-9；水位觀測井B7及05-2。而B-B剖面(圖2.4)可繼續監測的孔位為傾斜觀測管B-3及05-03。

另外，根據青山工程顧問公司到查結果，將阿里山五彎仔地區分為8個滑動塊體，如圖2.2。其中以N2、N3及N4滑動塊體滑動量最大，尤其在雨季期間，平均每月滑動可達1.5公分。可從水位觀測井B2、05-02及05-01的觀測數據得知(見表2.3)，在暴雨其間該區域之水位變化均可達數十至二十公尺以上，顯示該區域地質是非常破碎且影響水位變化的可能原因並非由地表水入滲，而是由側向水流補注所造成，導致地下水位上升快速，土壤有效應力減小，降低土壤之抗剪強度，造成該區域滑動量為最大。

表 2.1 A-A 剖面監測項目狀態說明（青山工程顧問公司, 2006）

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

表 2.2 B-B 剖面監測項目狀態說明（青山工程顧問公司, 2006）

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

表 2.3 水位觀測井監測資料（青山工程顧問公司, 2006）

儀器編號	深度 (m)	96/06/09 暴雨時變化
04-05	50	LWL:45.5m HWL:30.5m Δ :15m
B-2	60	LWL:51.6m HWL:34.6m Δ :17m
B-7	60	LWL:41m HWL:34.9m Δ :6.1m
B-14	60	LWL:8.3m HWL:8.1m Δ :0.2m
B-15	60	LWL:10m HWL:9m Δ :1m (位於剪裂帶)
05-1	60	LWL:45.2m HWL:25.3m Δ :19.9m
05-2	80	LWL:46.1m HWL:27.8m Δ :18.3m
05-4	80	(2006/05/26 已斷裂)
05-6	60	LWL:9.2m HWL:7.4m Δ :1.8m (位於剪裂帶)
05-8	40	LWL:13.7m HWL:6.8m Δ :6.9m
05-9	60	LWL:8.9m HWL:6.9m Δ :2m (位於剪裂帶)

2.2 研究場址之現場探勘與監測孔位的選定

本團隊於95年5月5日至阿里山五彎仔現地勘查，依據現有監測資料，目前傾斜觀測管C-11有持續量測中，以及水位觀測井B2，在暴雨期間，內水位變化遽增，可達數十公尺。B2與C-11兩鑽孔都位於N3滑動區之上緣，此處之數據在數值分析中可提供重要之邊界條件。所以本團隊選擇於傾斜觀測管C-11附近新增一傾斜觀測管，深度為40m並裝設本團隊所研發之FBG-SD偏斜儀監測管內變形，如此新鑽孔中FBG-SD之讀數可以與C-11中傳統IP讀數相比較。而關於水壓觀測部分，本團隊為了考量現場封層技術，將原計畫設置在B-2旁100公尺水位觀測井分成兩部分，一先在C-11旁設置深度40公尺的水壓觀測井，並以間隔五公尺之距離，安裝五組光纖光柵水壓計，其目的可先測試現場封層技術是否可到達預期目標，另一方面日後可與NCTU-01傾斜觀測管中裝設之20組FBG-SD所量測的資料及以傳統IP量測C-11傾斜觀測管變形資料相互比較。而在B-2孔位設置深度為60公尺水位觀測井，孔位編號為NCTU-03，該孔位同樣以間隔五公尺的距離，裝設10組光纖光柵水壓計，以監測NCTU-02與NCTU-03兩水壓觀測管中之水壓隨深度的變化。另外，該三點位置距離監測小屋不遠，圖2.1標示星點位置，有助於日後長期自動化監測之效果。

根據文獻資料，傾斜觀測管B-8為該區域深度最大之監測孔位，深度達200m，圖2.5、圖2.6為本團隊利用假的測傾儀(IP)檢視目前傾斜觀測管情況，依調查結果約在深度105m處有明顯折點。本團隊在7月初嘗試於傾斜觀測管B-8之75m以上，裝設長度為10公尺之可移動式之FBG-SD偏斜儀，監測該傾斜觀測管整體變形，但由於安裝過程中光纖傳輸線因裝置時造成折損，而無法進行量測。



圖 2.5 傾斜觀測管 B-8 示意圖



圖 2.6 傾斜觀測管管內檢查過程圖

第三章 光纖光柵監測系統

研究團隊在使用光纖感測技術於大地工程監測方面之研發已有多
年之研發經驗。本章針對計畫中使用之光纖感測技術原理以及為本計
畫所做之技術改進與研發做一敘述。

3.1 光纖光柵感測原理

光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)是利用雷射在光纖曝光時造成
一系列折射率週期性永久的改變，對應折射率週期性改變的間距為 d ，
當一寬頻光源進入此一光纖時，除了滿足布拉格條件(Bragg condition)
的特定波長 λ_B ，其餘波長都會因為相位差而相消；而當 FBG 受到外力
產生應變時，造成原本間距 δ 的改變增加量為 $\Delta\delta$ ，使得該特定波長 λ
反射回來一增加量 $\Delta\lambda_B$ ，利用兩者，可以求得應力施加後所引致的應變
量大小，圖 3.1 為其量測原理示意圖。

由於 FBG 特性，在實務的應用上，應力施加產生應變以後，不只
是反射回來的 $\Delta\lambda_B$ 會改變，光纖的有效折射率 n 也會同時改變；而且
也會受溫度影響而改變其反射波長，但是藉由本計畫團隊在長達六年
的研究，相關的修正技術已經有效掌握，並在實際的應用中獲得良好
的成效。目前 FBG 技術已經可以作為傳統應變計的良好替代方案，且
具有被動式感測器的相關優點。FBG 與傳統電阻量測器最大的不同
點，在於光纖的多工特性，並不受限於傳統電子迴路一對一訊號傳輸
的要求，只要在光柵製作時安排不同的波長的光柵製作於同一條光纖
上，利用足夠強度的寬頻光源，就可以同時量測數點至數百點的應變
訊號。若以傳統的電路排列需要安置數百條的電線，且電線之間彼此
因為電磁效應會相互的干擾，產生雜訊，影響量測結果的準確性；光
纖感測器不但只需要一至兩條的光纖即可，不占空間，另外沒有電磁
干擾的問題，只要光源足夠就可以大量使用，準確性不減。

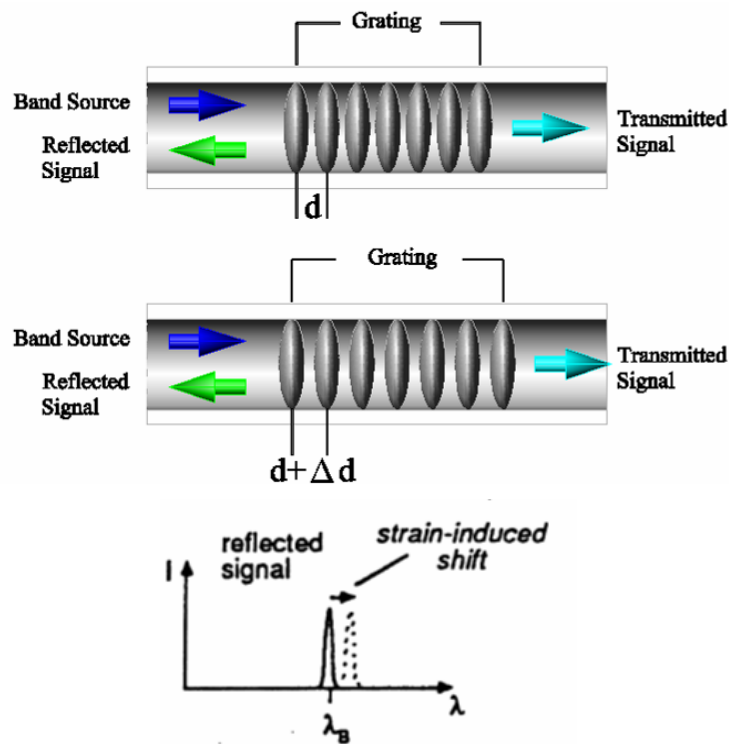


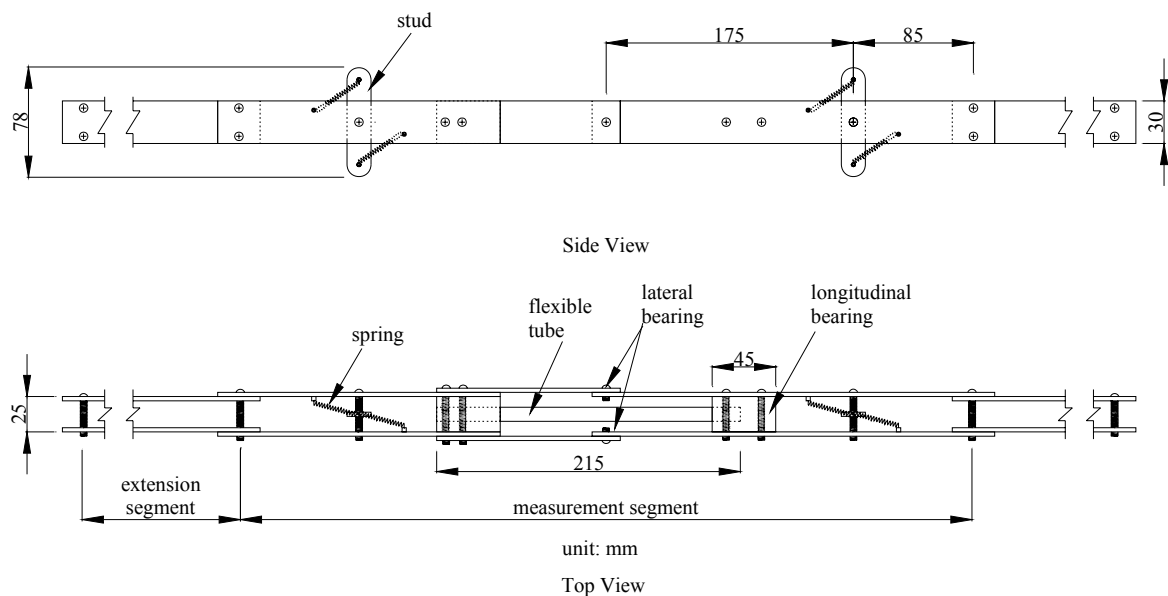
圖 3.1 光纖光柵量測原理示意圖 (簡旭君, 2003)

3.2 光纖光柵節理式偏斜儀

本工作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 3.2 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 3.3）。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。



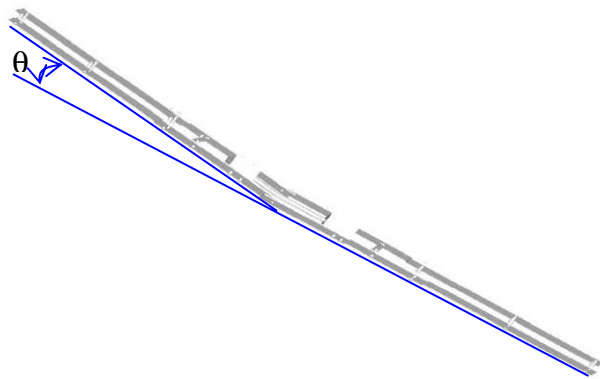


圖 3.2 FBG 偏斜儀設計示意圖

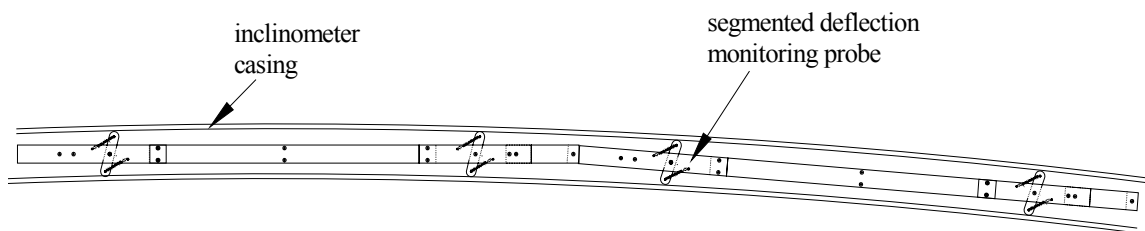


圖 3.3 節理式設計之訊號放大效應

3.3 光纖光柵節理式偏斜儀之改良

為便於將來大量安裝，研究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 3.4 所示。

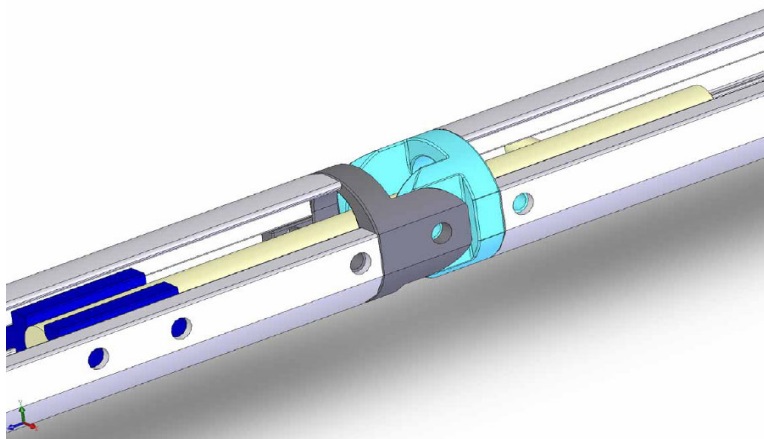


圖 3.4 鋁擠型偏斜儀支架設計概念圖

圖 3.5 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。

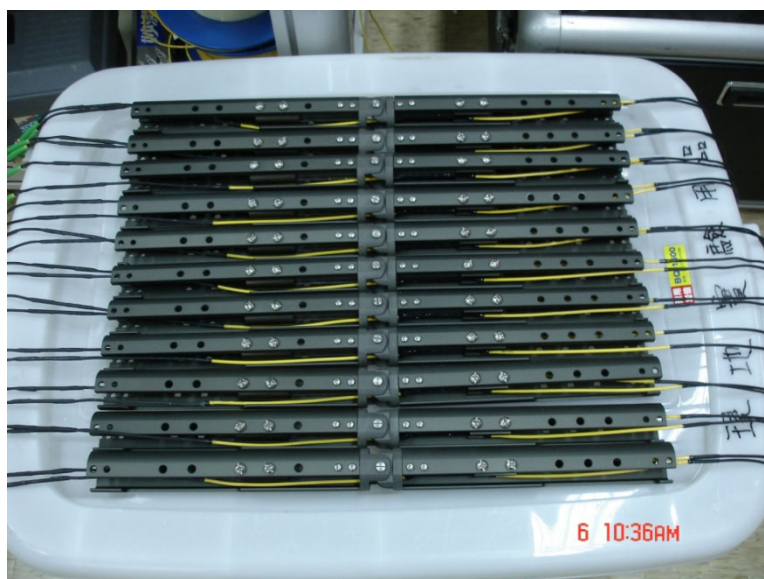


圖 3.5 製作完成之鋁擠型偏斜儀支架

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。

3.4 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 3.6)，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 3.7 所示。

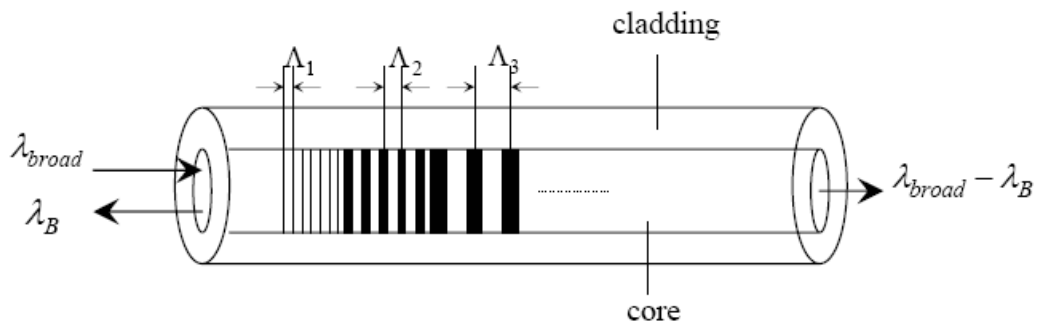


圖 3.6 光纖光柵內連續遞增之漸變應變

FBG 波峰飄移分析：FBG 受應變或溫度影響，易產生波長飄移(圖 3.8)，假設一個 FBG 初始波長為 λ_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 λ_2 ，而此波峰變寬量會正比於 FBG 應變量。

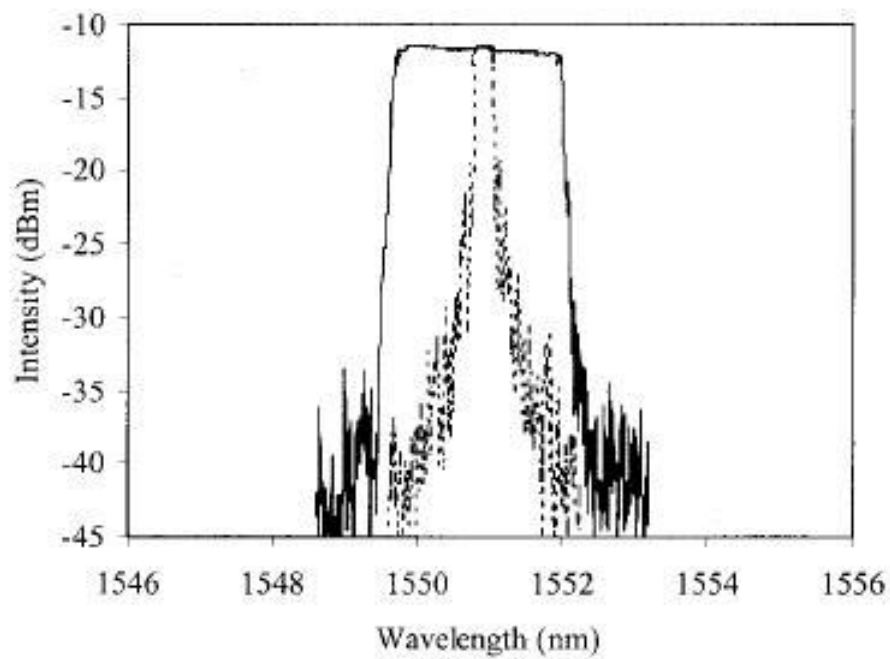


圖 3.7 連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改變

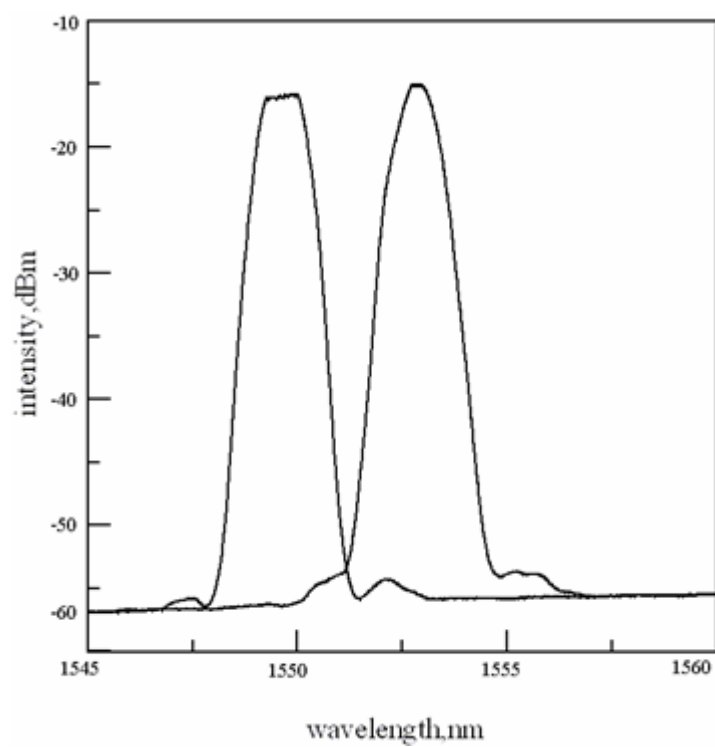


圖 3.8 FBG 波長飄移分析示意圖

採用漸變週期式 FBG 來製作水壓計如圖 3.9 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 3.7 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 3.10 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 3.11 展示等週期式 FBG 水壓計之標定結果。結果顯示，在 0 至 400kPa 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 0.999 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。

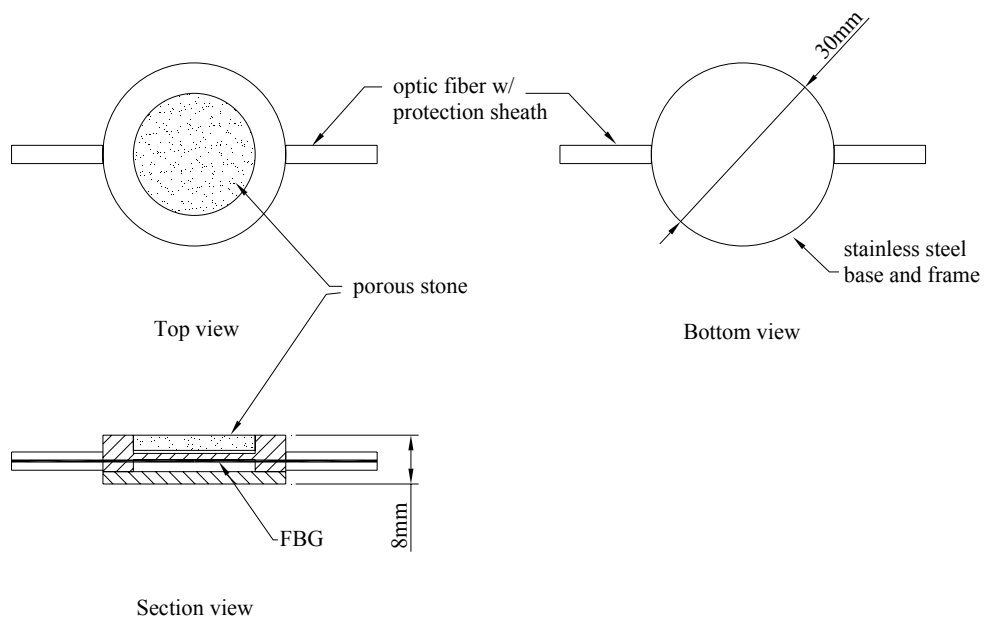


圖 3.9 漸變週期式 FBG 水壓計構造示意圖

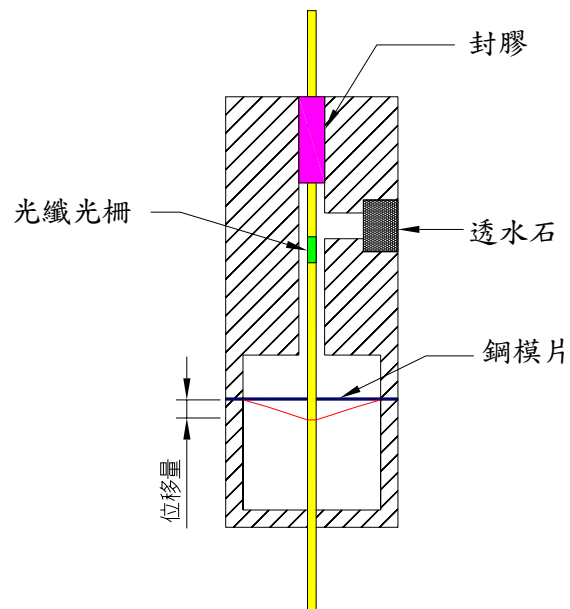


圖 3.10 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖

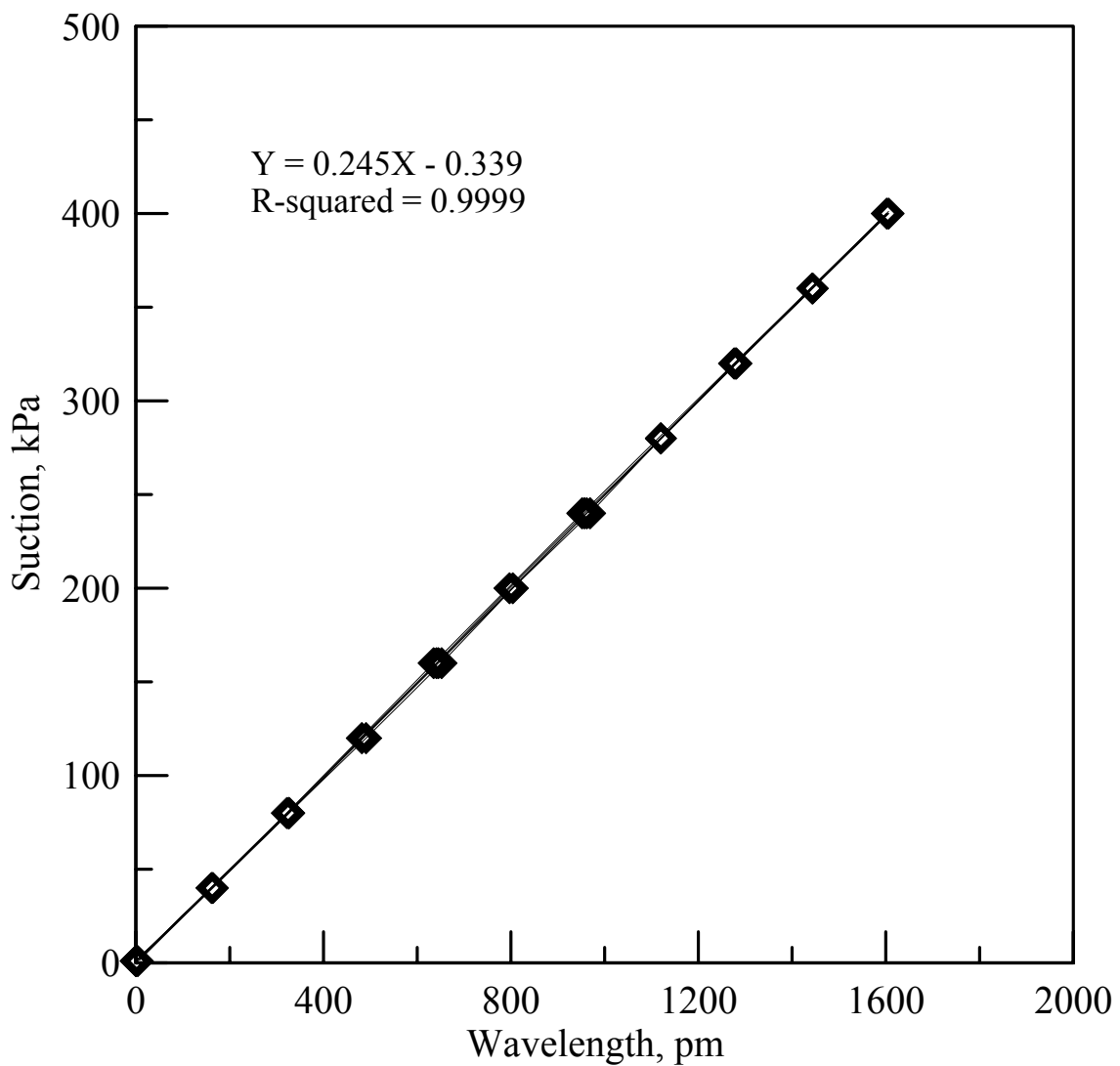


圖 3.11 等週期波長式 FBG 水壓計標定結果

3.5 光纖光柵水壓計之改良

本計畫使用如圖 3.10 所示之等週期波長式 FBG 水壓計。根據圖 3.11 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 3.12、圖 3.13 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。

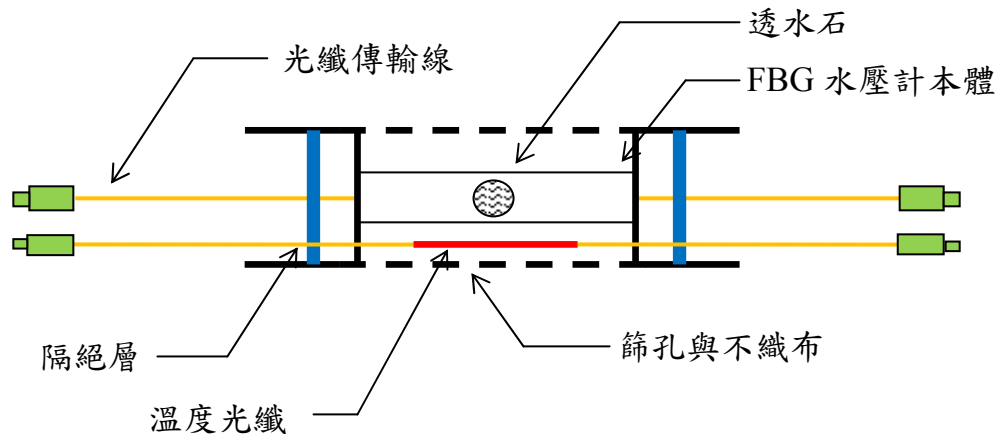


圖 3.12 FBG 水壓計改良斷面示意圖

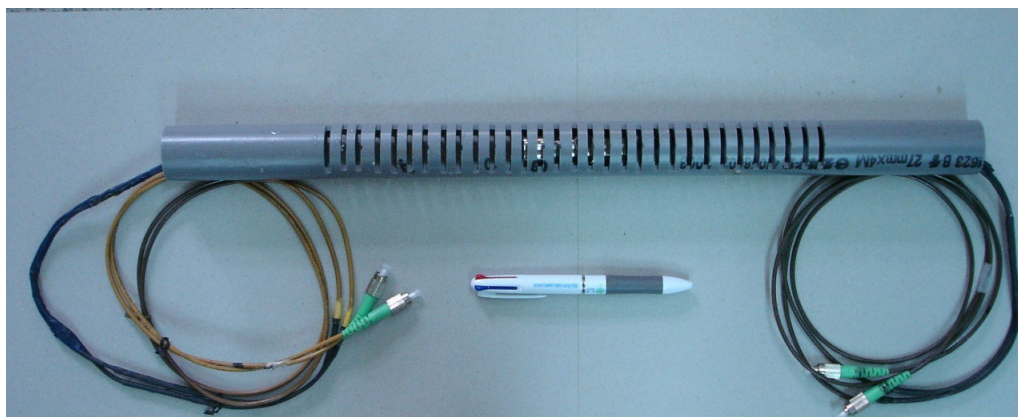


圖 3.13 改良式 FBG 水壓計

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 3.14。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突出接頭，這是將 FBG 水壓計置入 PVC 管之另一原因。

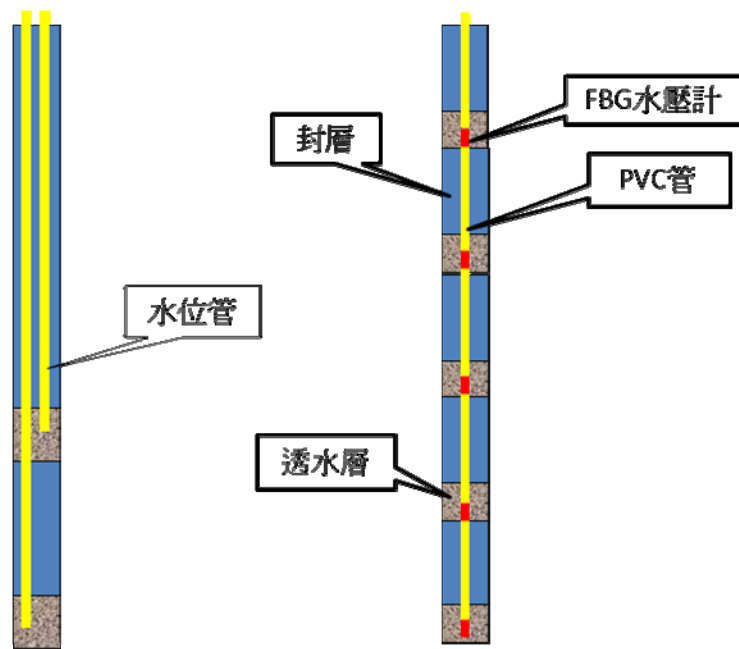


圖 3.14 大量串接 FBG 水壓計與傳統水位管之比較

本團隊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 3.13 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 3.15 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 3.15 所示。

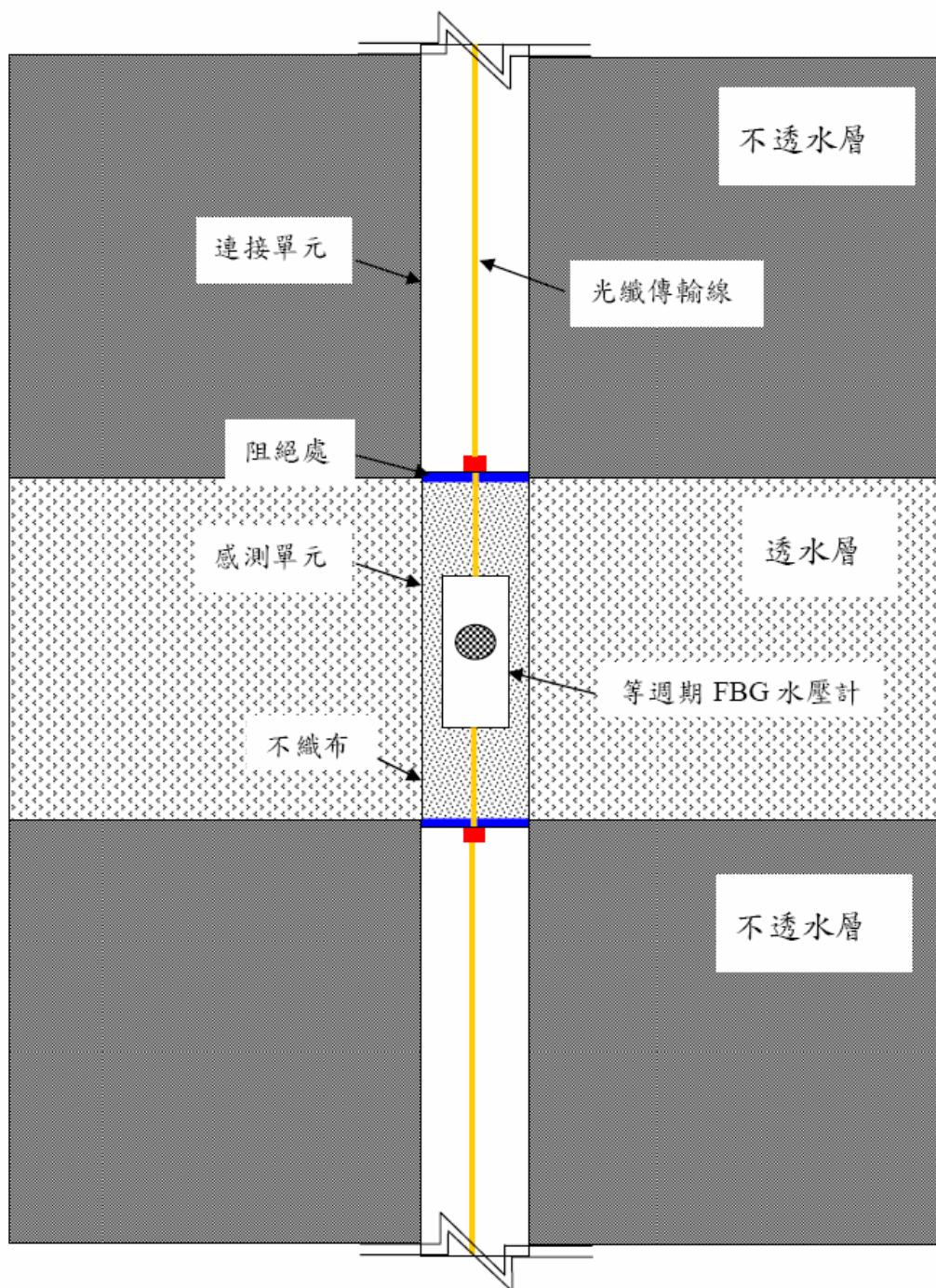


圖 3.15 FBG 水壓計現場安裝構想圖

3.6 光纖拉伸計

光纖拉伸計之感測跟上述之FBG感測原理不相同，主要是利用布理淵散射原理，來解析光纖中之每點應變量大小，而本研究所用之儀器為日本ANDO廠商所生廠之儀器，型號為AQ8603，此儀器最高解析度為 $30\mu\epsilon$ 。

本研究之光纖拉伸計感測器示意圖如圖3.16所示，其長度為1.2公尺，感測器製作過程中會將一單模光纖施加一預拉量，目的是當感測器受外力時，可增加感測器之靈敏度。當受到外力或位移時則光纖應變量會增加或減少，圖3.17顯示光纖拉伸計感測器在初始未受外力以及受到拉力狀況下所量得之應變讀數。因單模光纖可承受 $15,000\mu\epsilon$ 至 $20,000\mu\epsilon$ 應變量，故可將此感測器裝置於傾斜管外，以補足光纖光柵節理式偏斜儀感測範圍量之不足。

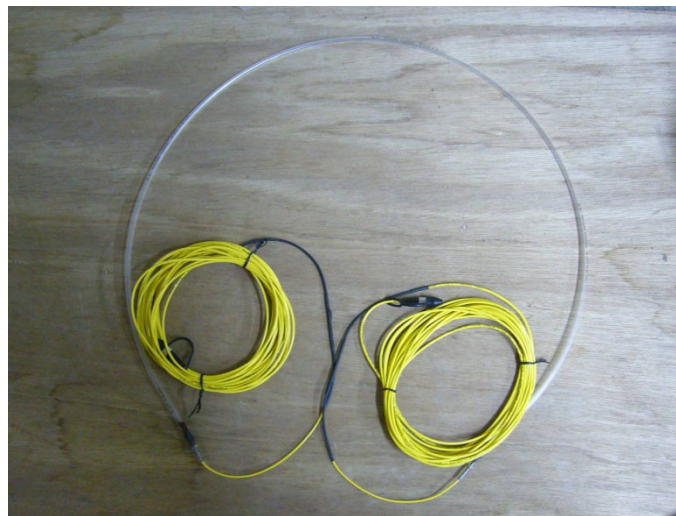


圖 3.16 光纖拉伸計實體圖

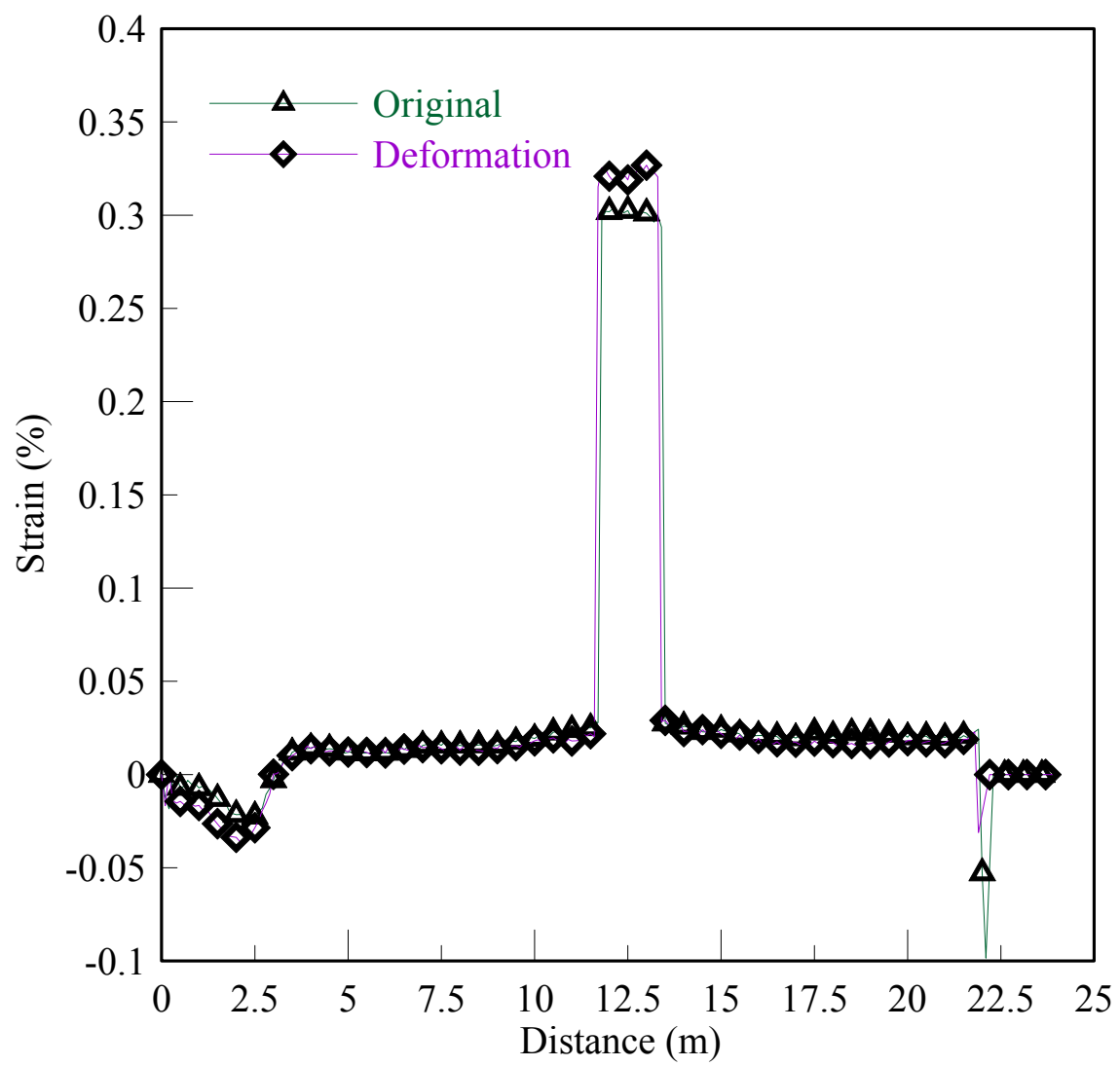


圖 3.17 光纖拉伸計初使與受力後狀態圖

第四章 現地監測儀器安裝與量測數據說明

圖4.1為此次計畫中，所裝置之全光纖式監測儀器佈設位置圖，圖中NCTU-01孔位深度為40公尺，由孔底處設置20組節理式光纖光柵偏斜儀，而每組光纖感測器間距為1公尺，以長期監測傾斜觀測管之變形，圖4.2及圖4.3為10月8日至阿里山五彎仔裝設節理式光纖光柵偏斜儀概況圖。圖4.4為利用傳統測傾儀量測C-11傾斜觀測管之概況圖，由圖4.8數據分析顯示，10月8日至10月26日之間，在地表下36公尺處有明顯之滑動面，其滑動量約為6mm，而10月12日至10月26日NCTU-01所裝設之FBG-SD量測結果為在地表下36公尺處也有明顯滑動產生且最大滑動量為12mm。NCTU-02孔位深度為40公尺，主要設置5組光纖光柵水壓計，以量測該孔隨深度之水壓變化，而每個光纖光柵水壓計間距為5公尺。表4.1為NCTU-02孔位之5組光纖光柵水壓計配置表，圖4.9為NCTU-02光纖光柵水壓觀測結果圖，該圖顯示地表下18公尺至32公尺範圍，水壓有明顯變化，其變化量約為80kPa至90kPa之間。圖4.5及圖4.6為10月11日於現場裝置光纖光柵水壓計概況圖。NCTU-03設置於圖4.1中B-2孔位旁，其目的可作為地下水數值模型之邊界條件，而表4.2為該孔位所設置光纖光柵水壓計配置表，圖4.7為10月26日本團隊於現場裝設光纖光柵水壓計概況圖，圖4.10為當天量測結果且由圖可得知該孔地下水位位於地表下40公尺處，而隨著深度增加水壓也跟著增加，也表示出目前孔內水壓力未受地下水滲流影響。

關於光纖光柵拉伸計，本研究團隊並未在這次研究中安裝於現場測試，而是在交通大學結構大樓試驗室9M傾斜觀測管先進行初步測試，圖4.11為測試場地實景圖。圖4.12至圖4.14為光纖拉伸計之製作過程與如何將光纖拉伸計固定於9M傾斜觀測管上之示意圖，此次試驗中，主要測試在邊坡中可能發生之兩種變形曲線，分別為喇叭形狀及大肚形狀，而兩種形狀所施加之位移量分別為5mm、10mm及15mm，在喇叭形狀的測試中，光纖拉伸計在5mm及10mm之位移狀況下，其變化趨勢與圖4.15由IP量測變化趨勢結果相吻合，但是在位移量為15mm時，則

有向內變化趨勢，初步研判可能是固定光纖拉伸計於傾斜觀測管之環狀束制器可能與傾斜觀測管有相對滑動而導致變化量有變小之結果。而大肚形的測試中，圖4.18光纖拉伸計有顯示出變形形狀之趨勢，但每階之變化量並未隨著外加之位移量增加而增加，其中可能原因如上述所敘，另外，因大肚形狀曲線中包含兩個轉折點處，而在轉折點處左右地方分別為受拉及受壓處，若光纖拉伸計固定範圍處含蓋一轉折點時，其拉伸量會因此受其影響(光纖拉伸計所感應為該長度範圍內之平均應變量)，以致無法量測出正確變化量。

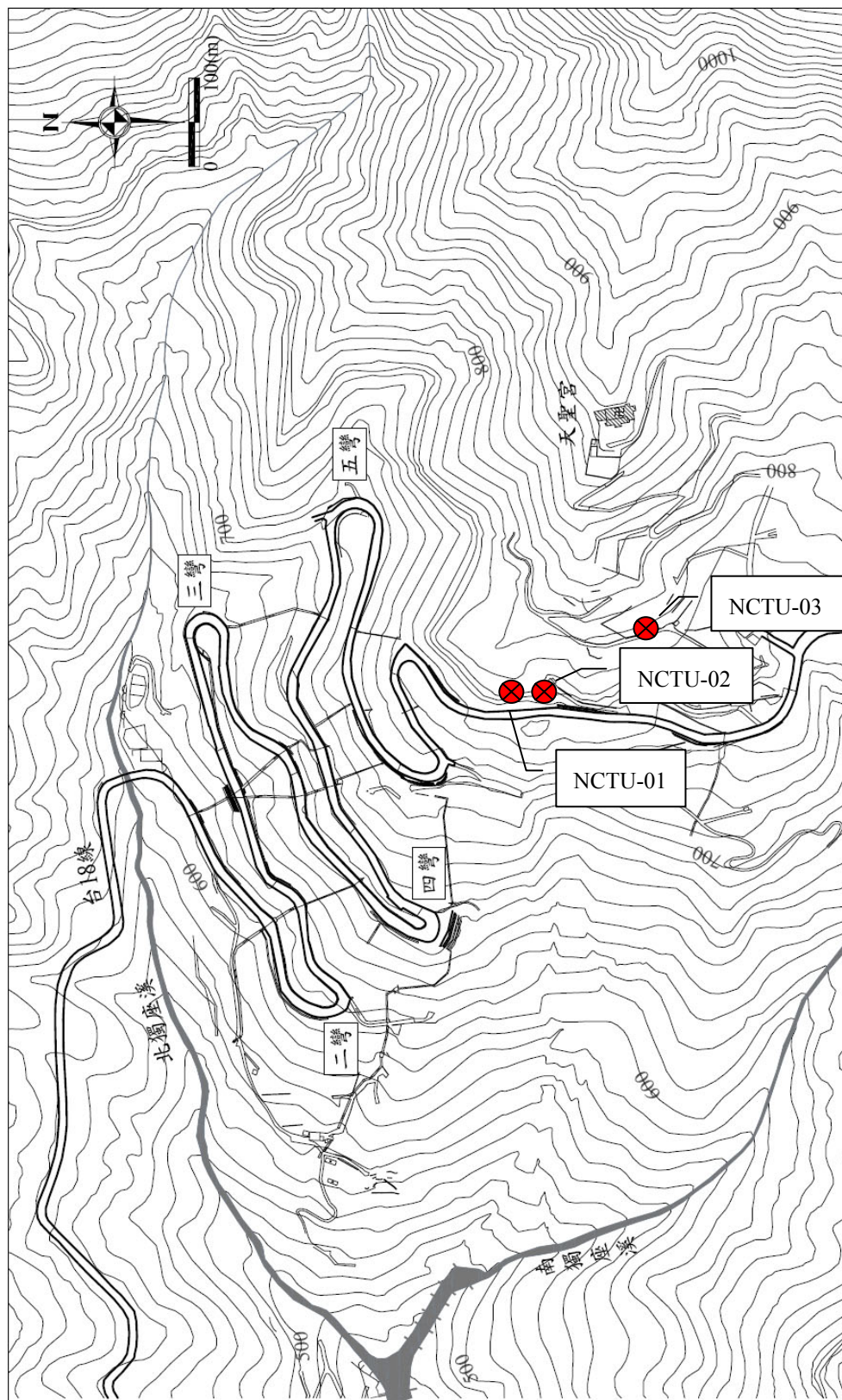


圖 4.1 全光纖式監測儀器配置圖（青山工程顧問公司, 2006）

表 4.1 NCTU-02 光纖光柵水壓計配置表

水壓計編號	埋設深度, m	透水範圍, m	實際透水範圍, m	配置波長, nm	率定係數, kPa/pm
1	39	37~40	36.95~40	1542	0.093
2	34	32~36	32~35.4	1536	0.226
3	29	27~31	22.9~30.3	1554	0.140
4	24	22~26	22.9~30.3	1530	0.261
5	19	17~21	17.8~21.7	1524	0.095

表 4.2 NCTU-03 光纖光柵水壓計配置表

水壓計編號	埋設深度, m	透水範圍, m	實際透水範圍, m	配置波長, nm	率定係數, kPa/pm
A-1	54	52~56	50.7~56	1554	0.617
A-2	59	57~60	57~60	1542	0.489
A-3	49	47~51	46.9~50.2	1524	0.219
A-4	44	42~46	42~46.05	1530	0.214
A-5	39	37~41	37~41	1536	0.229
B-1	34	32~36	31.8~36.1	1554	0.197
B-2	29	27~31	26.95~31	1542	0.205
B-3	24	22~26	22~26	1536	0.227
B-4	19	17~21	16.85~21	1530	0.254
B-5	14	12~16	12~16	1524	0.232



圖 4.2 節理式光纖光柵偏斜儀實體圖



圖 4.3 NCTU-01 節理式光纖光柵偏斜儀裝設概況圖



圖 4.4 C-11 傾斜觀測管量測概況圖



圖 4.5 NCTU-02 之五組光纖光柵水壓計實體圖



圖 4.6 NCTU-02 光纖光柵水壓計裝設概況圖



圖 4.7 NCTU-03 光纖光柵水壓計裝設概況圖

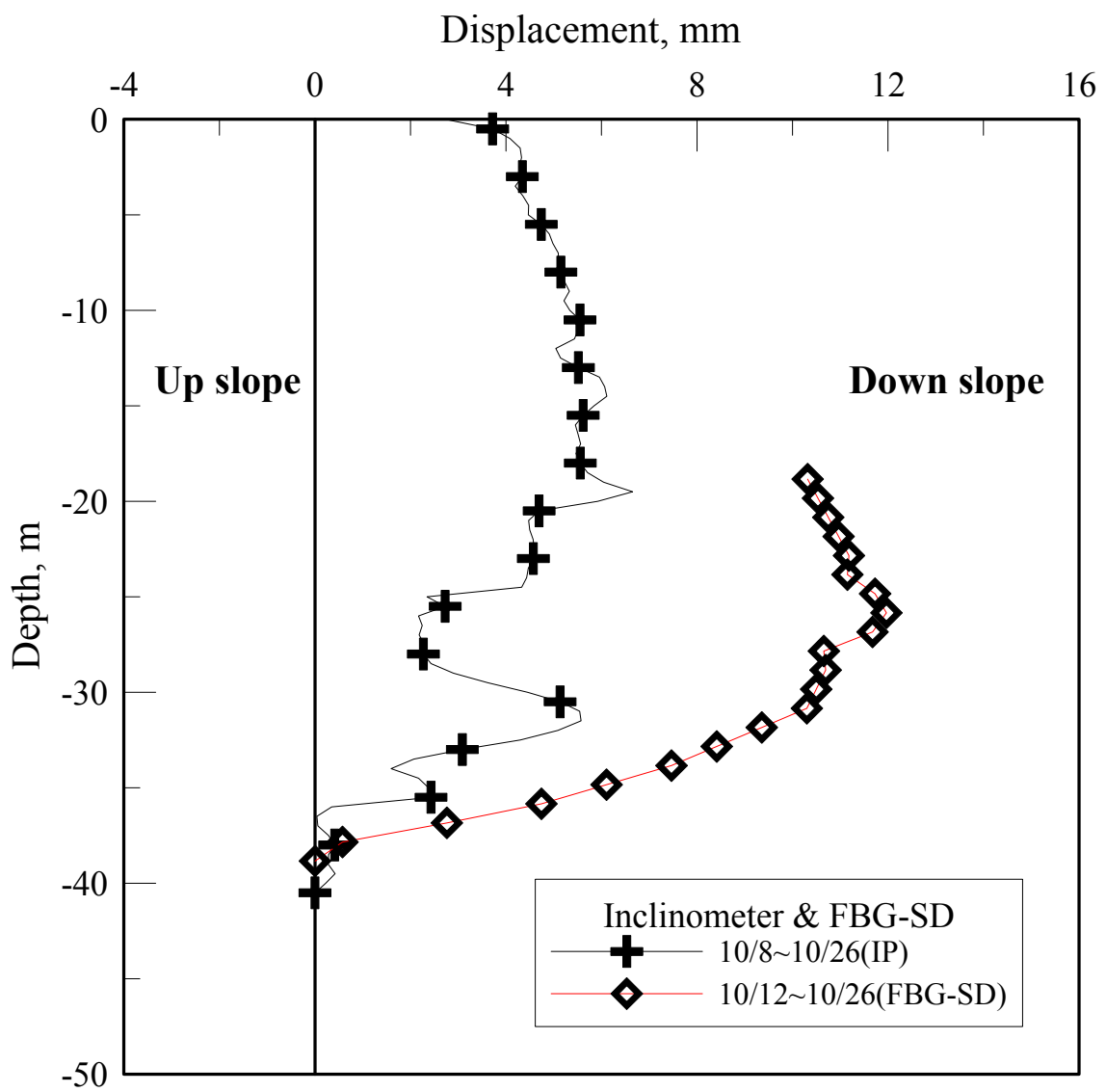


圖 4.8 C-11 與 NCTU-01 傾斜觀測管量測結果圖

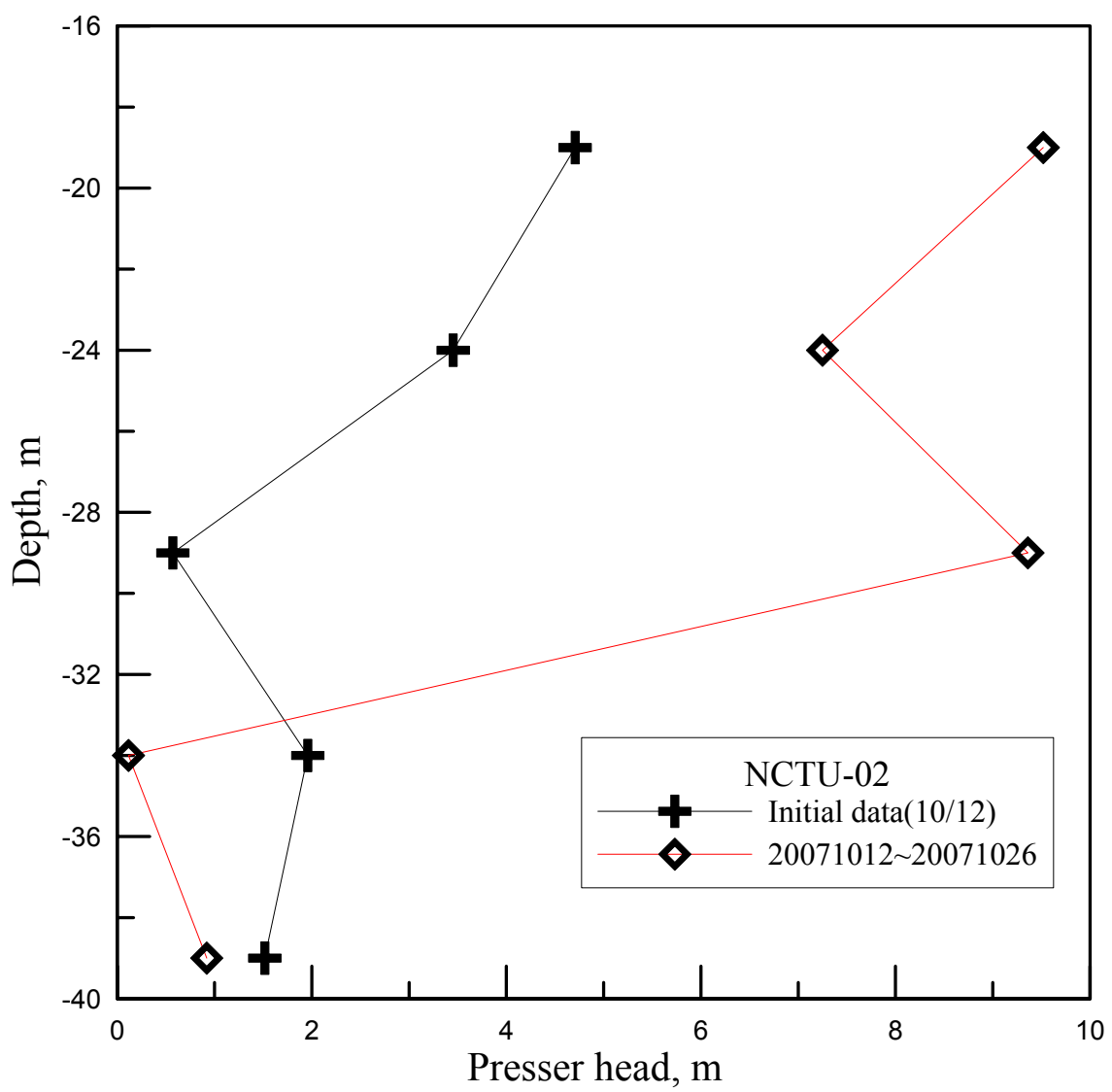


圖 4.9 NCTU-02 光纖光柵水壓觀測井結果圖

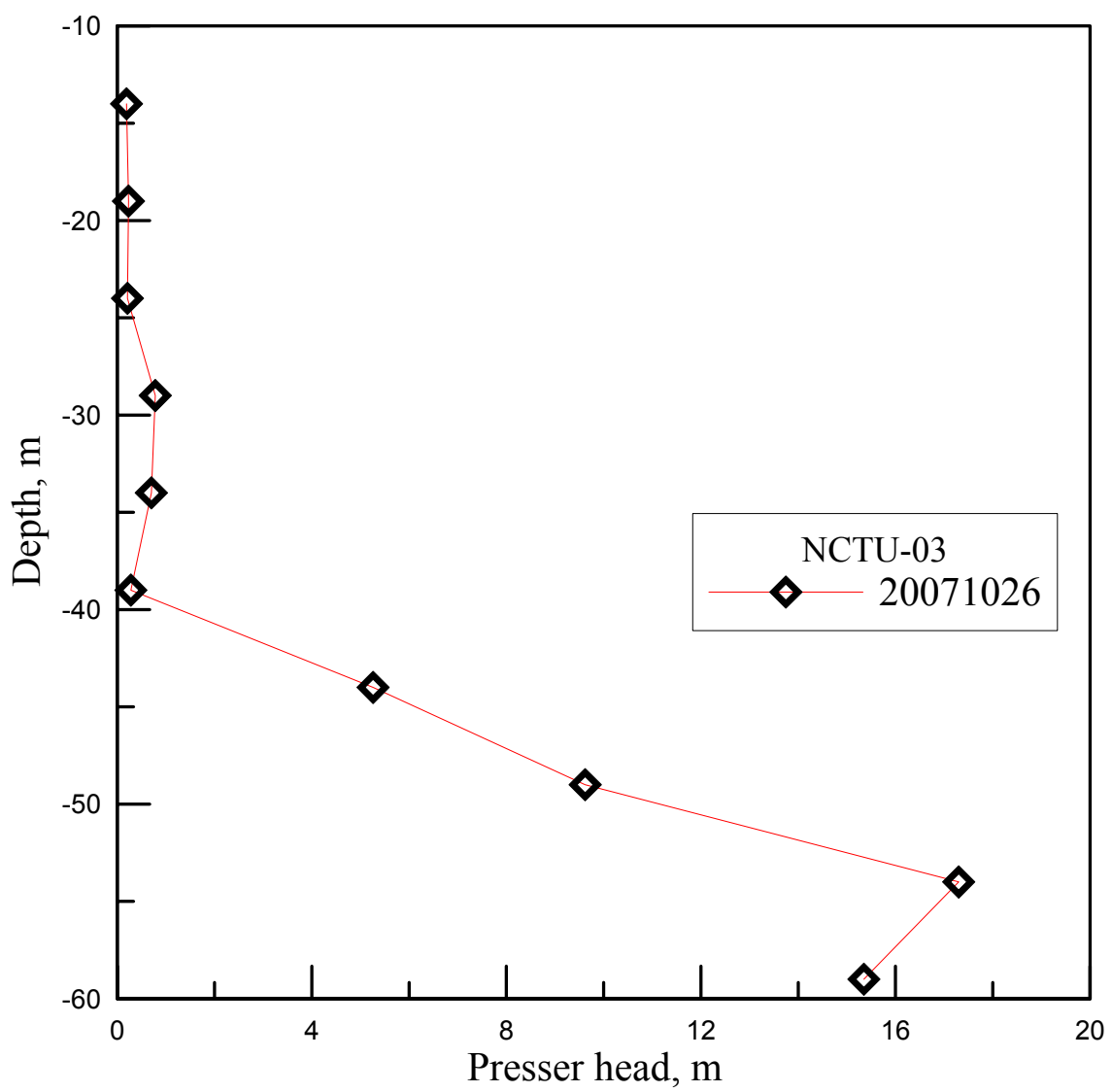


圖 4.10 NCTU-03 光纖光柵水壓觀測井結果圖



圖 4.11 交通大學結構大樓 9M 傾斜觀測管測試場景

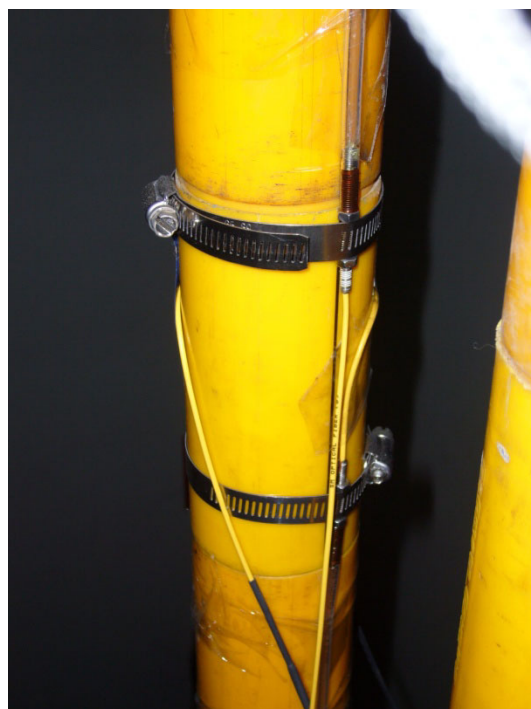


圖 4.12 光纖拉伸計固定於 9M 傾斜觀測管示意圖

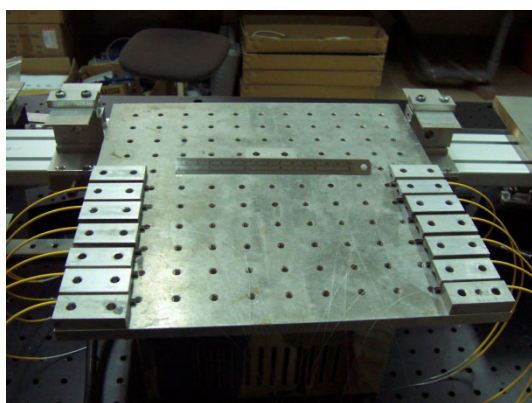


圖 4.13 光纖拉伸計製作示意圖

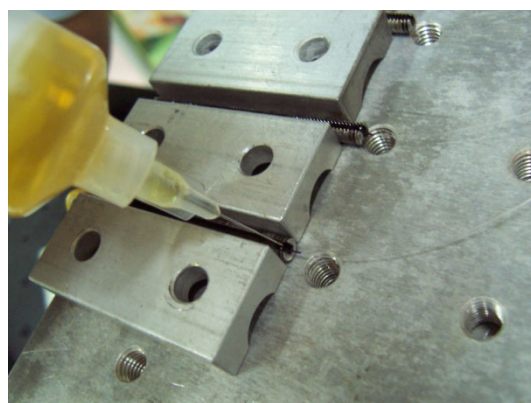


圖 4.14 光纖拉伸計固定端處上膠示意圖

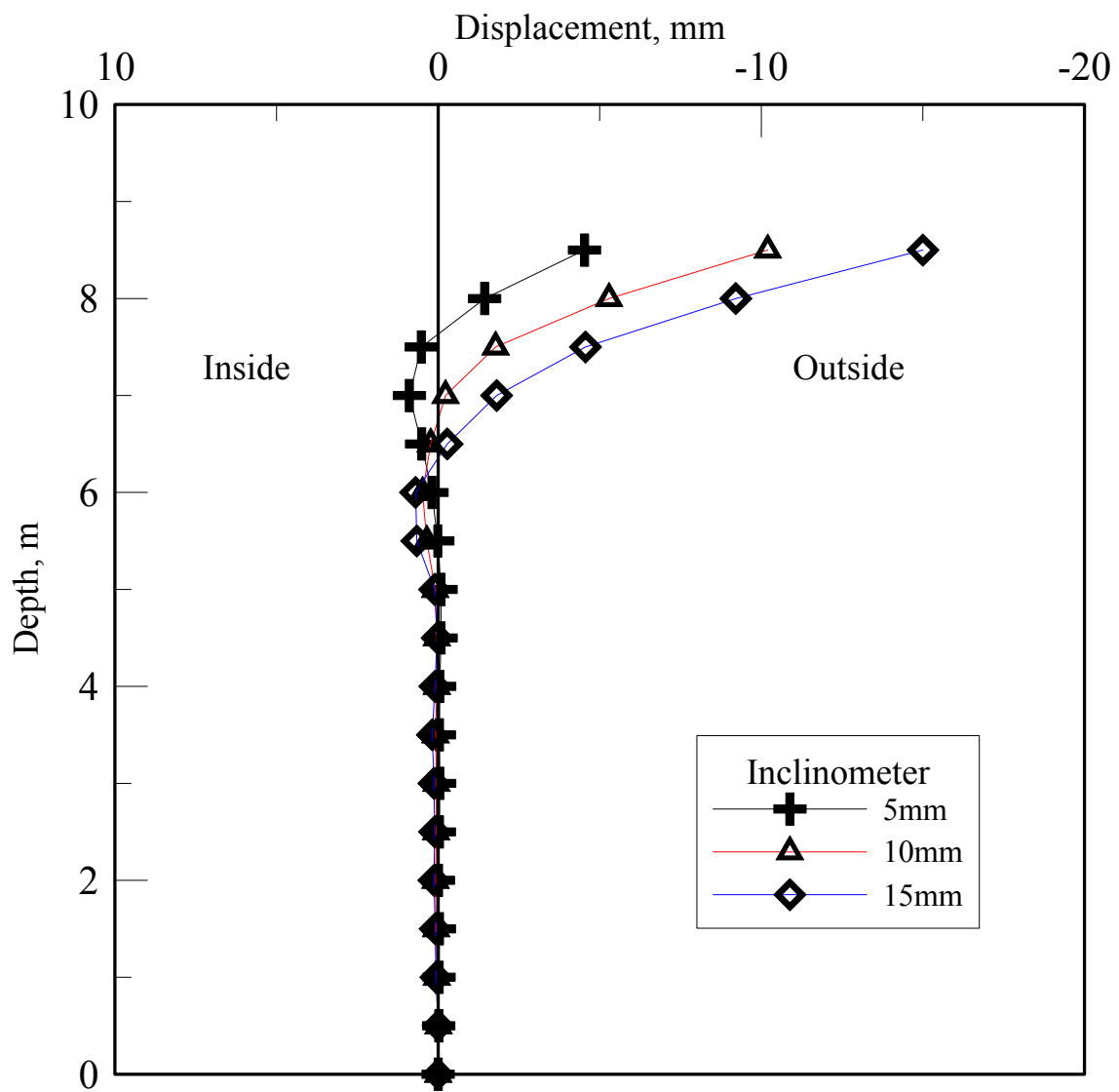


圖 4.15 IP 量測 9M 傾斜觀測管結果圖(喇叭型)

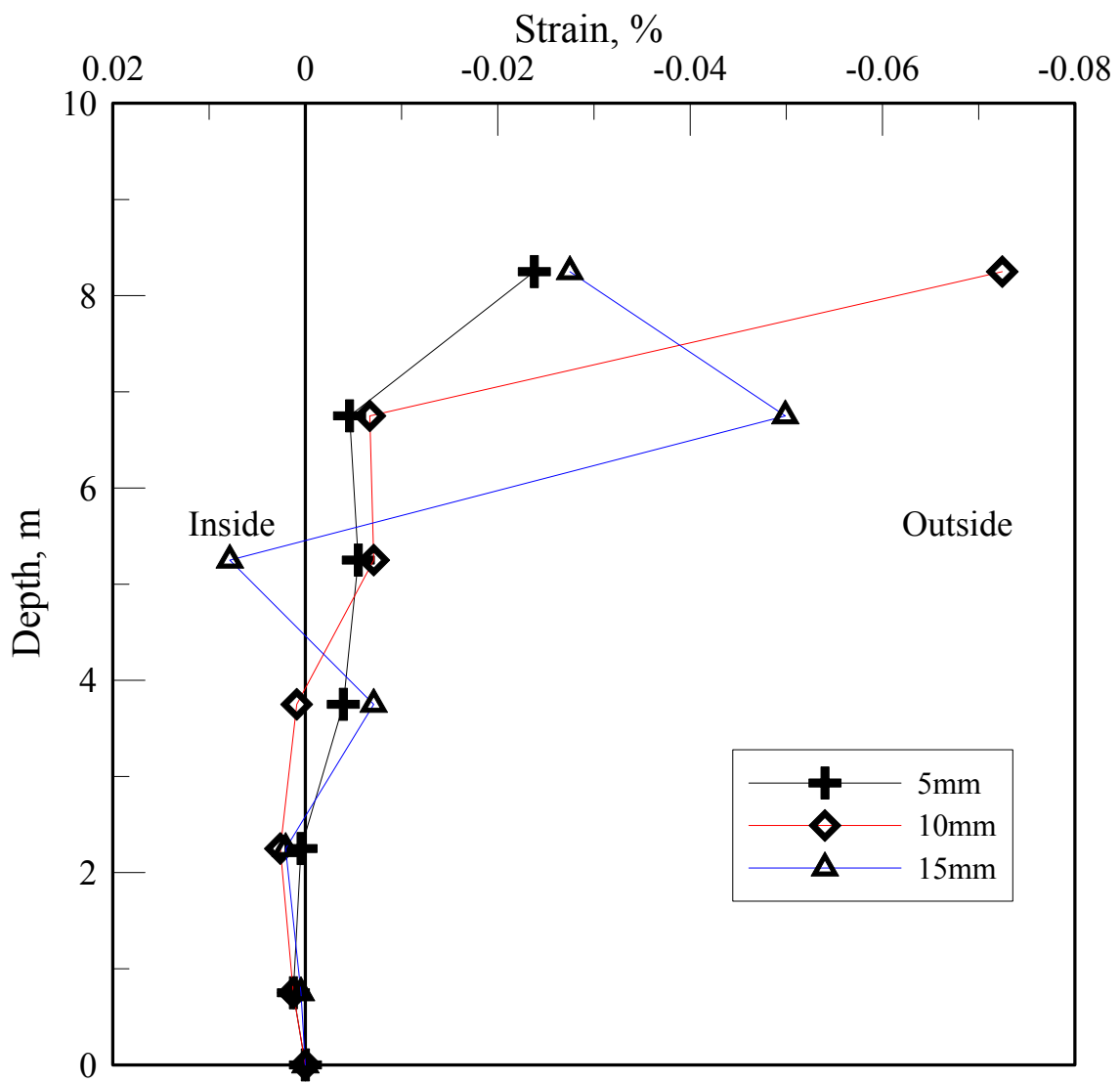


圖 4.16 光纖拉伸計量測 9M 傾斜觀測管結果圖(喇叭型)

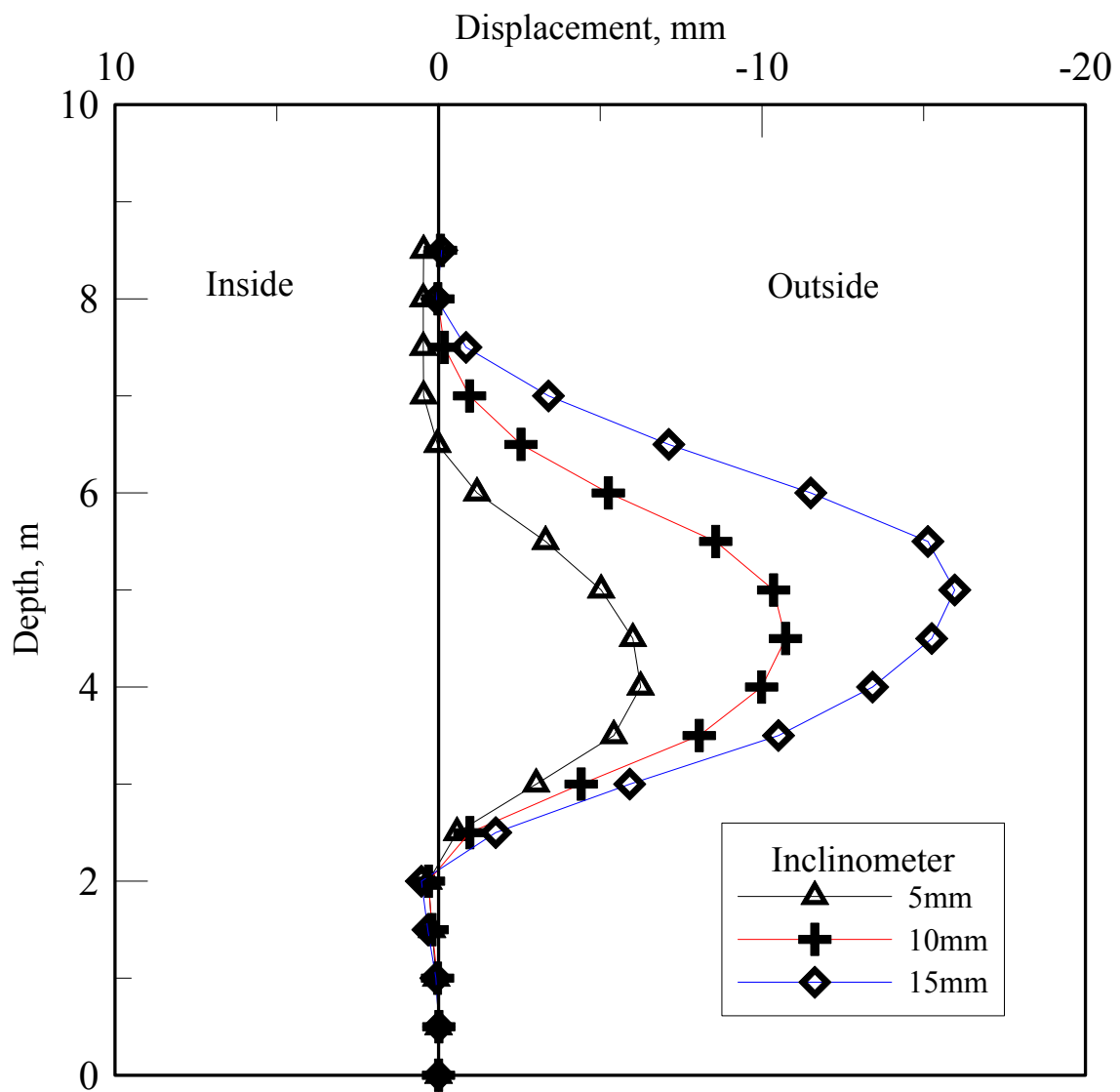


圖 4.17 IP 量測 9M 傾斜觀測管結果圖(大肚型)

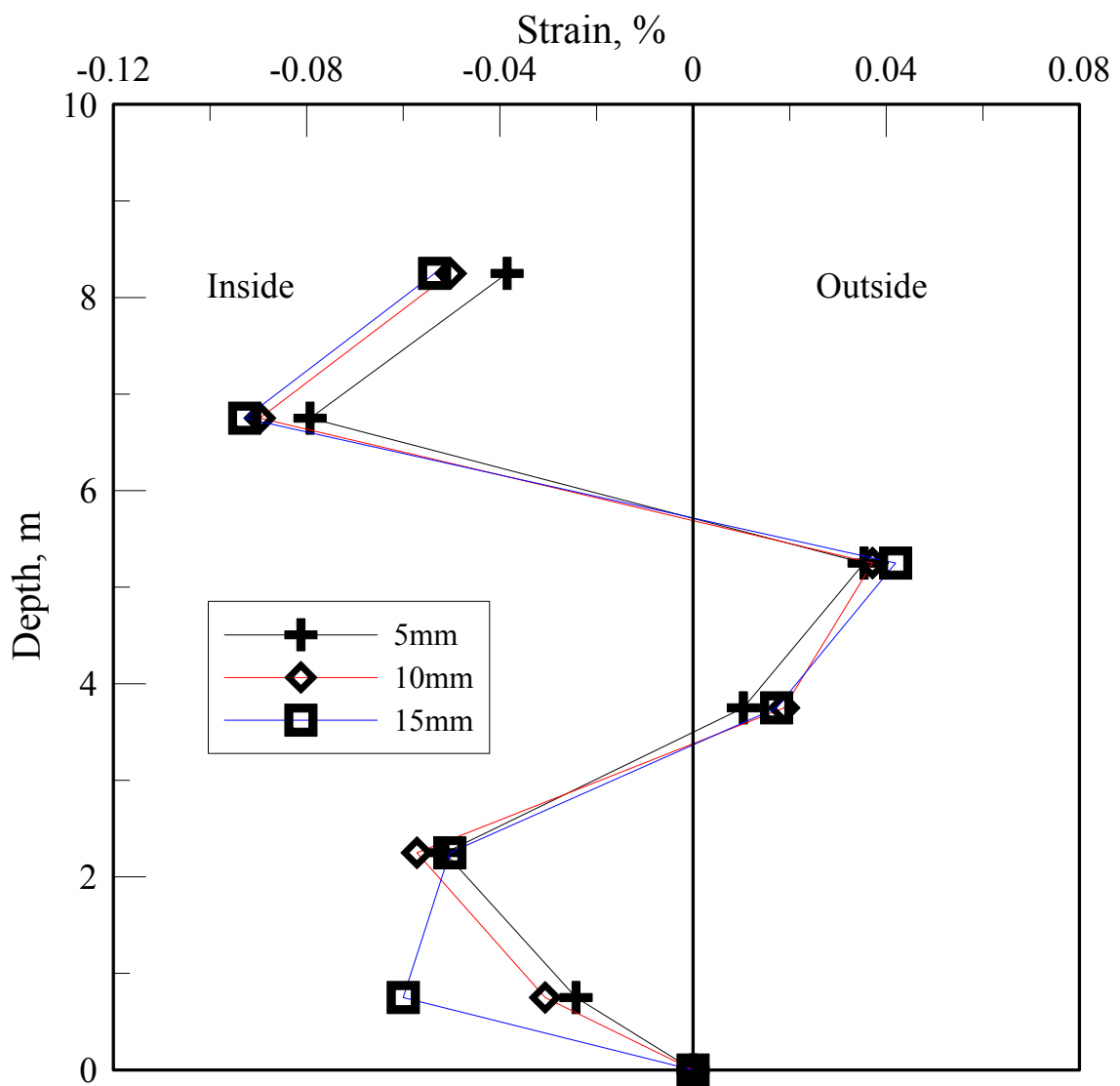


圖 4.18 光纖拉伸計量測 9M 傾斜觀測管結果圖(大肚型)

第五章 研究場址地下水流模型選定與數值模式之建立

一般而言，影響地滑之因素可概分為人為因素與自然因素兩種。其中人為因素也就是人為的開發與利用，包括道路興建與拓寬、不當的地表種植及坡頂房舍興建等。而自然因素則包括地質、地形、地震與地下水等。

Ng et al. (2001)針對香港 Lai Ping Road 邊坡做非飽和地層在不同降雨情況下其地下水滲流對地下水壓力影響之三度空間分析。圖 5.1 展示有限元素之架構。此一分析考慮在地下水位以上之地層原為非飽和狀態，此土壤與岩石之水土特性曲線 (soil water characteristics curve, SWCC) 如圖 5.2 所示。

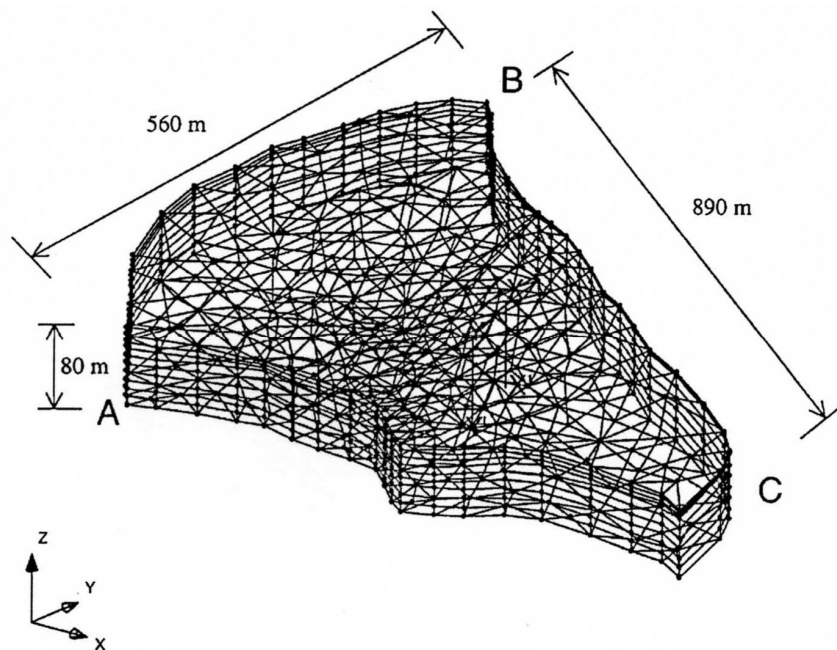


圖 5.1 Lai Ping Road 三度空間滲流分析之有限元素架構
(取自 Ng et al., 2001)

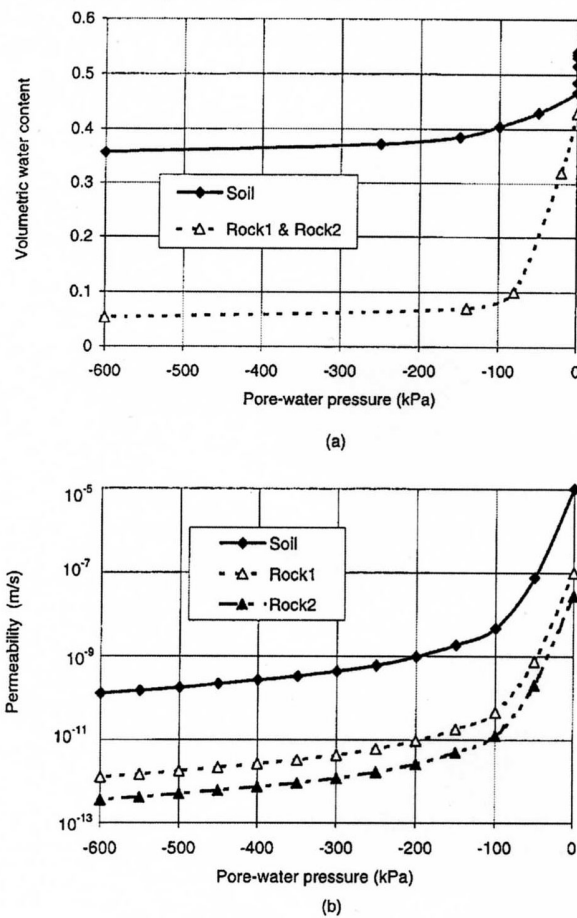


圖 5.2 土壤與岩石之水土特性曲線(取自 Ng et al., 2001)

圖 5.3 展示分析區域在一典型降雨情況下其地層內水流分佈之情況。由於土壤之透水性遠高於岩層，所以大部分水流集中於土層內。圖 5.4 敘述在不同降雨強度情況下，地下水壓之分佈。由於初始地層內為非飽和狀態，其水壓為負，在降雨發生後又有滲流的發生，所以圖 5.4 中在 20m 深度內，也就是大部分滲流發生之深度範圍內，其水壓分佈是非線性的。如果使用傳統鑽孔內一或兩點水位觀測將可能產生極大之誤差。

此 Lai Ping Road 邊坡之面基與五灣仔區域類似，但五灣仔透水層之厚度可能遠大於 Lai Ping Road 邊坡。Lai Ping Road 邊坡滲流分析指出分佈式水壓監測之重要性。在滲流土層更深之五灣仔，其內部分佈

式水壓監測之重要性更為明顯。

五彎仔地區由於在不良的地質條件及不利的地形條件下，常常因為暴雨造成地下水位上升而引發地滑，如圖 5.5 所示，其相關儀器設置位置圖如圖 5.6 所示。由圖 5.5 可發現，五彎仔地區每逢颱風暴雨，地下水位上升可達 10-25 公尺，造成邊坡下滑抵抗力大量減少及下滑力增加而導致地滑。另外，由四彎處附近之降雨量、地下水位及地層位移量之關係圖，如圖 5.7 所示，亦發現地表位移量受降雨影響甚大，每年 6-9 月份雨季，地表水位顯著上升，地層位移量亦明顯增加，但是雨季後，地層位移量又明顯趨緩。

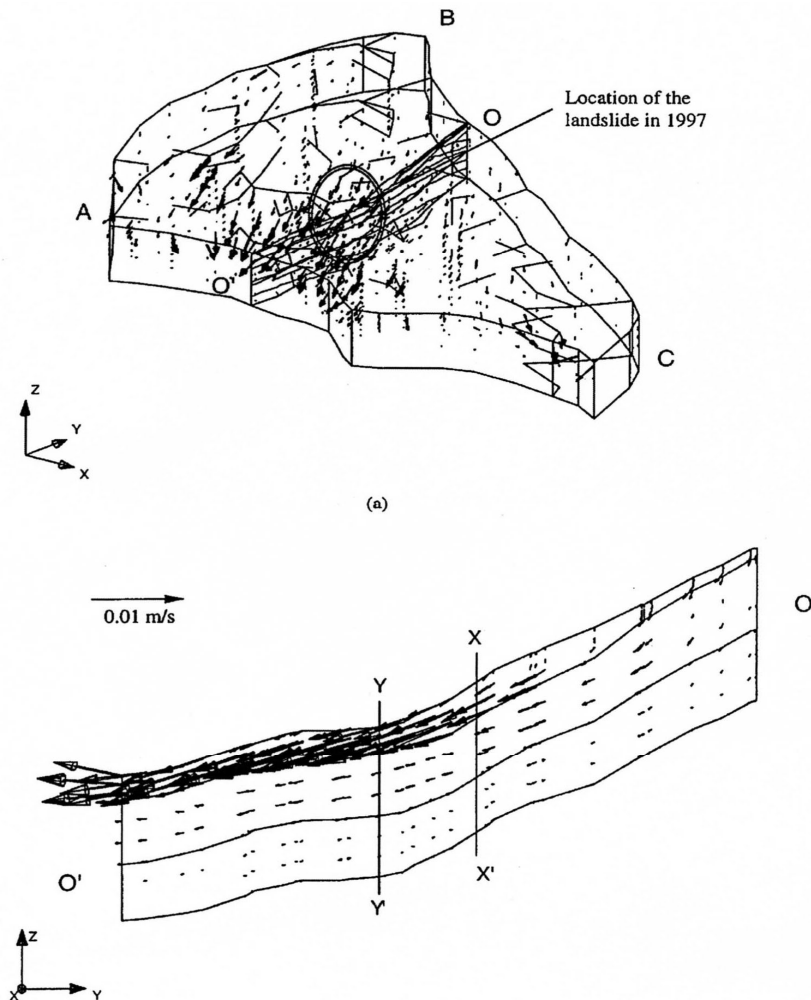


圖 5.3 典型降雨情況下地層內水流之分佈(取自 Ng et al., 2001)

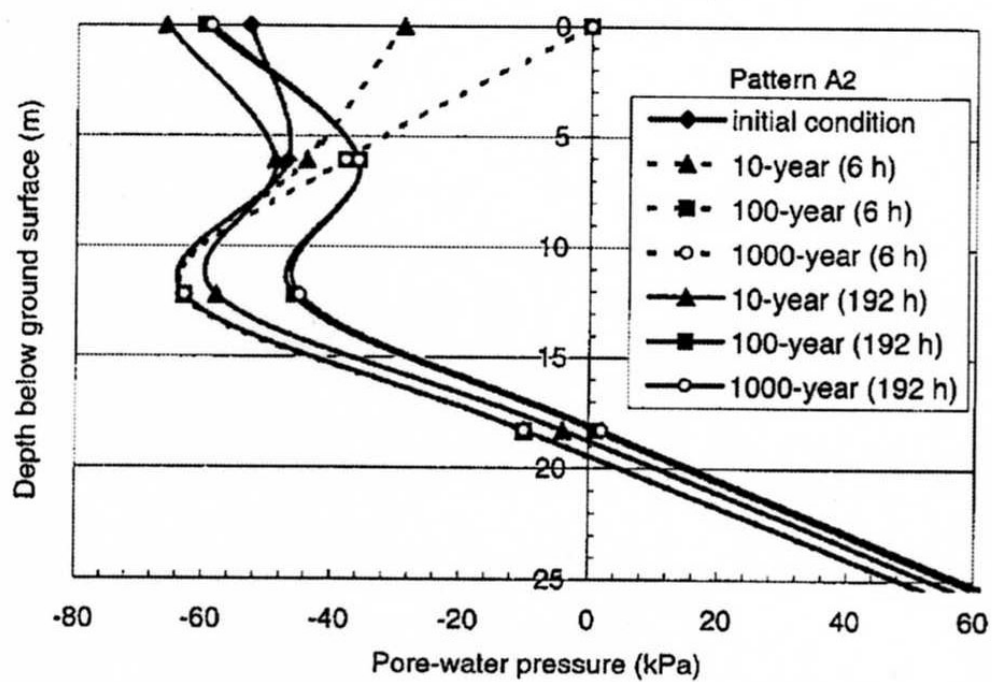


圖 5.4 不同降雨強度情況下地下水壓之分佈(取自 Ng et al., 2001)

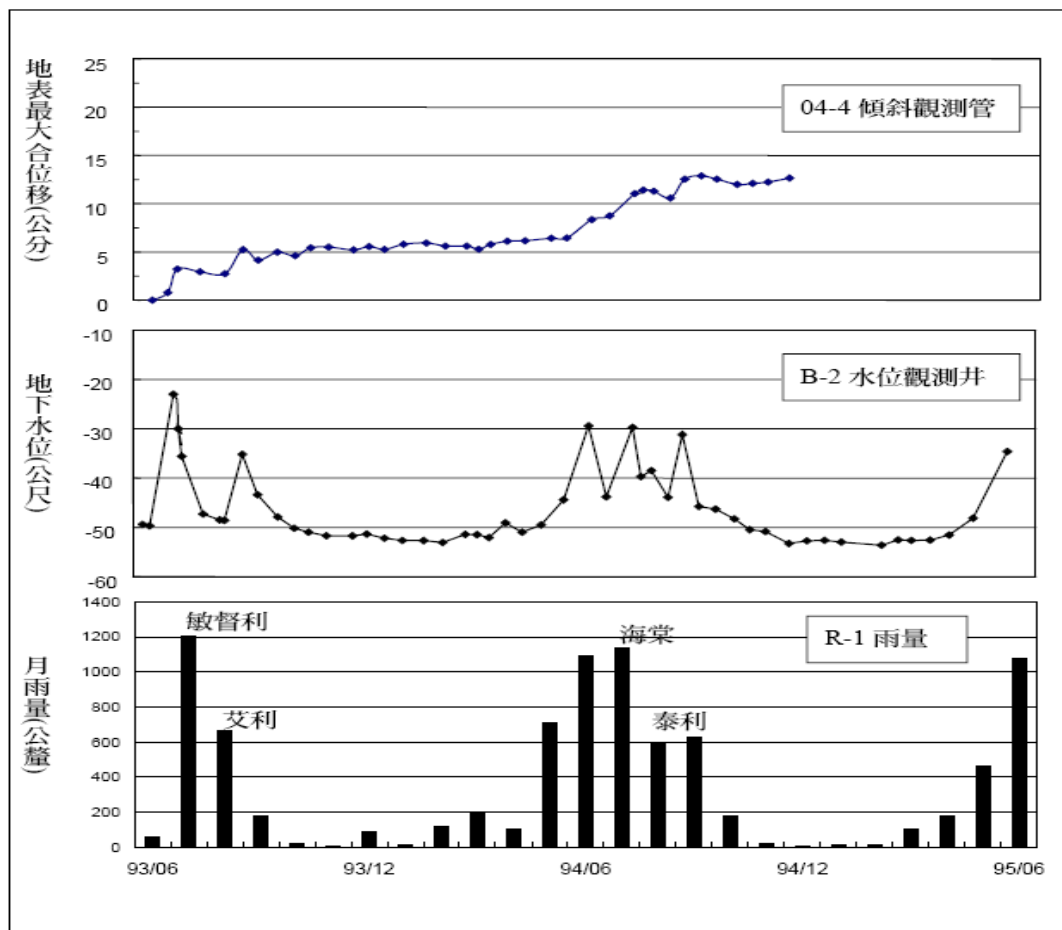
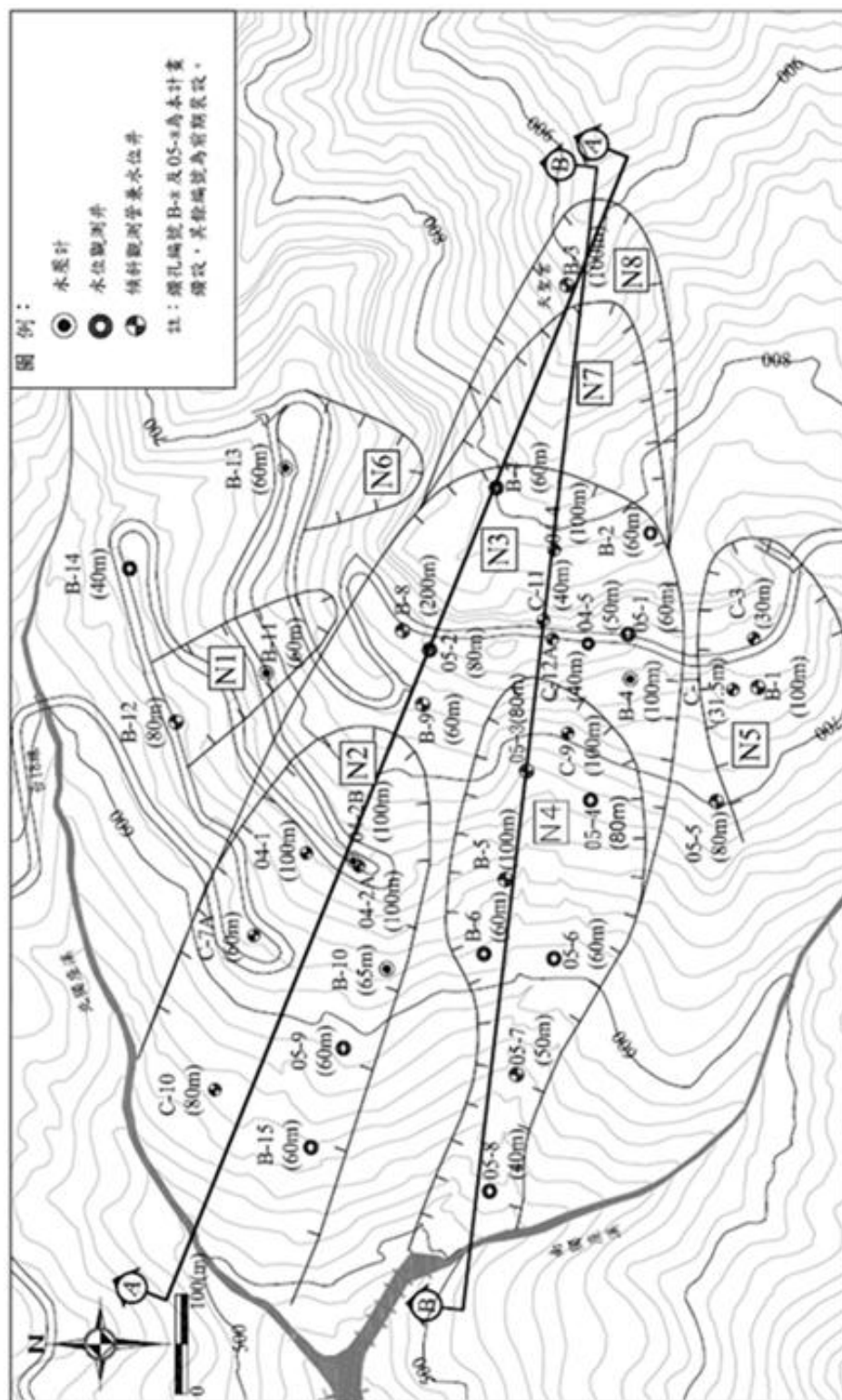


圖 5.5 降雨量、地下水及地表位移量之關連性

(青山工程顧問公司, 2006)



由上述可知，五彎仔地區之地滑，與降雨確實有極大之關連性。因此，如何經由先進的儀器，以獲得較完整且即時之監測資料，乃是地滑分析與地滑預警之重要工作。另外，若能進一步整合地下水流數值模擬，預測降雨可能產生之地下水位分佈，再根據以往地滑發生與地下水位之監測資料或配合邊坡穩定分析，即可評估降雨所引發之地滑。要執行地下水流數值模擬前，必須先選定地下水流模型。

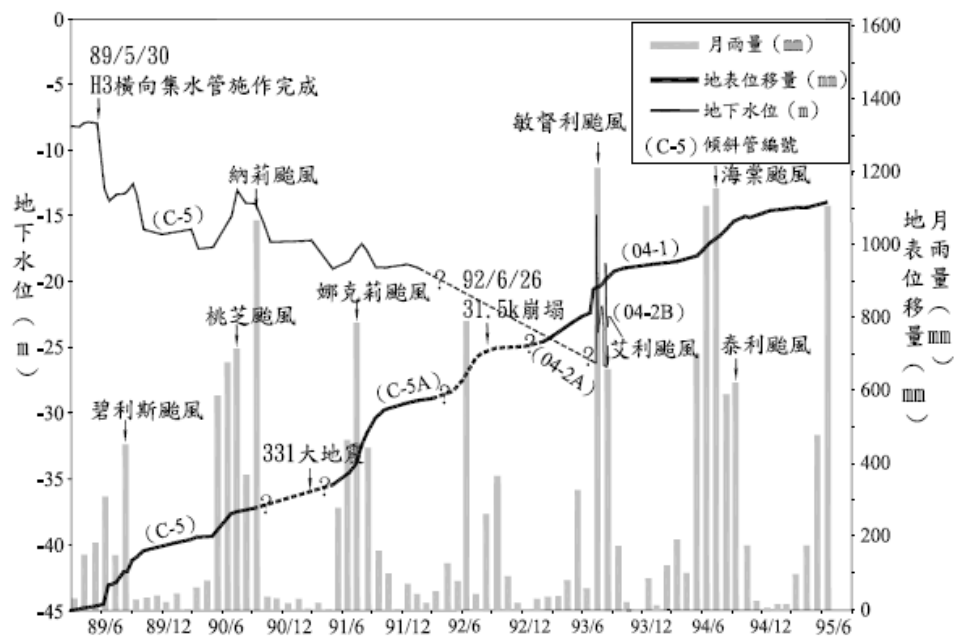


圖 5.7 四彎處降雨量、地下水及地表位移量之關係
(青山工程顧問公司, 2006)

5.1 相關地下水流模型簡介

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：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

式中，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)。都布假設之非拘限地下水流模型，如圖 5.8 所示，常被利用於壩體地下水滲流(seepage flow)之分析。

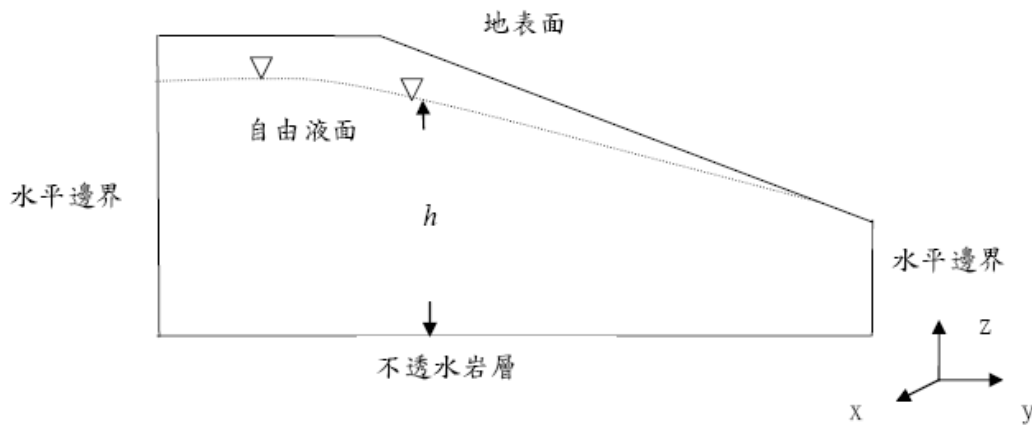


圖 5.8 都布假設之非拘限地下水流模型示意圖

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 5.9 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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

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)。

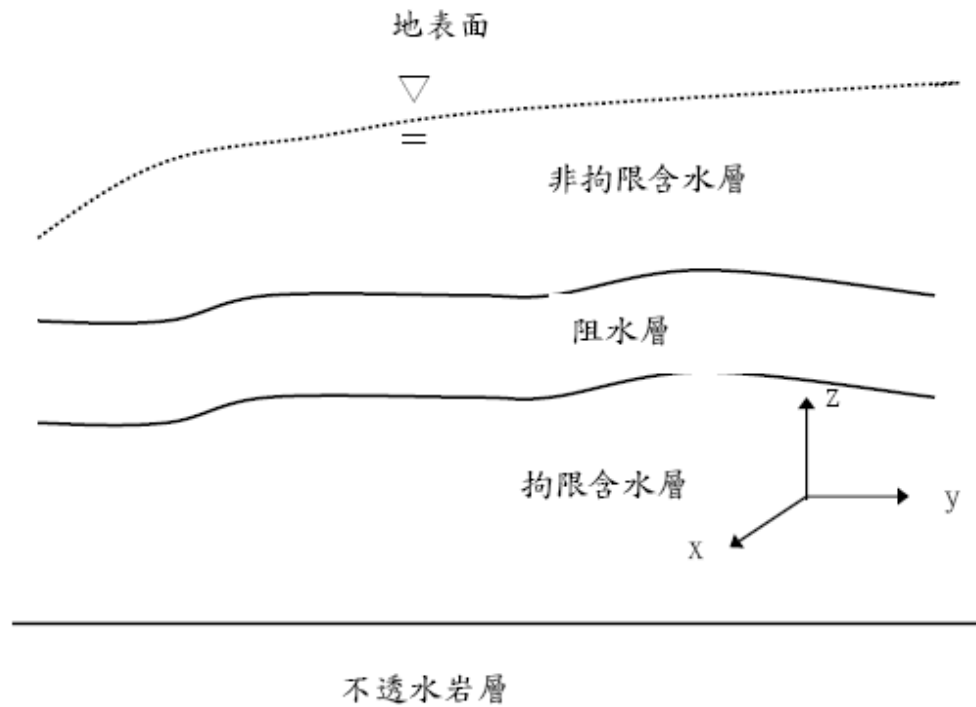


圖 5.9 多水層地下水流模型示意圖

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 5.10 所示，其控制方程式可表示為(Bear, 1972; Hurley and Pantelis, 1985)

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_L(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_L(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_L(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] \quad (5.3)$$

式中， ψ 為壓力水頭 (pressure head)， α 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)， θ 為含水量 (water content)。

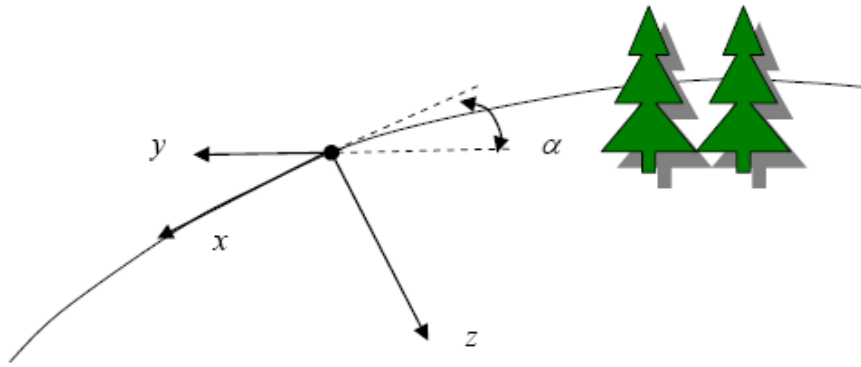


圖 5.10 坡地非飽和地下水流模型示意圖

由式(5.3)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：

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\xi \psi)^N} \right)^M \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/M} \right]^M \right\}^2 \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

其中， θ_s 為飽和含水量(saturated moisture content)， θ_r 為殘餘含水量(residual moisture content)， K_s 為飽和水力傳導係數(saturated hydraulic conductivity)， ξ 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)。

5.2 場址地下水流模型初步選定

經由地下水流特性及地質概況，可適當地選定模擬時所需使用之地下水流模型。根據地下水檢層法與微流速儀量測法之研究成果(詳見青山工程顧問公司，民國 95 年)，顯示五彎仔地區之地下水流除在水平方

向有明顯之流動現象外，垂直方向之地下水流動亦不可忽略，如圖 5.11 所示。

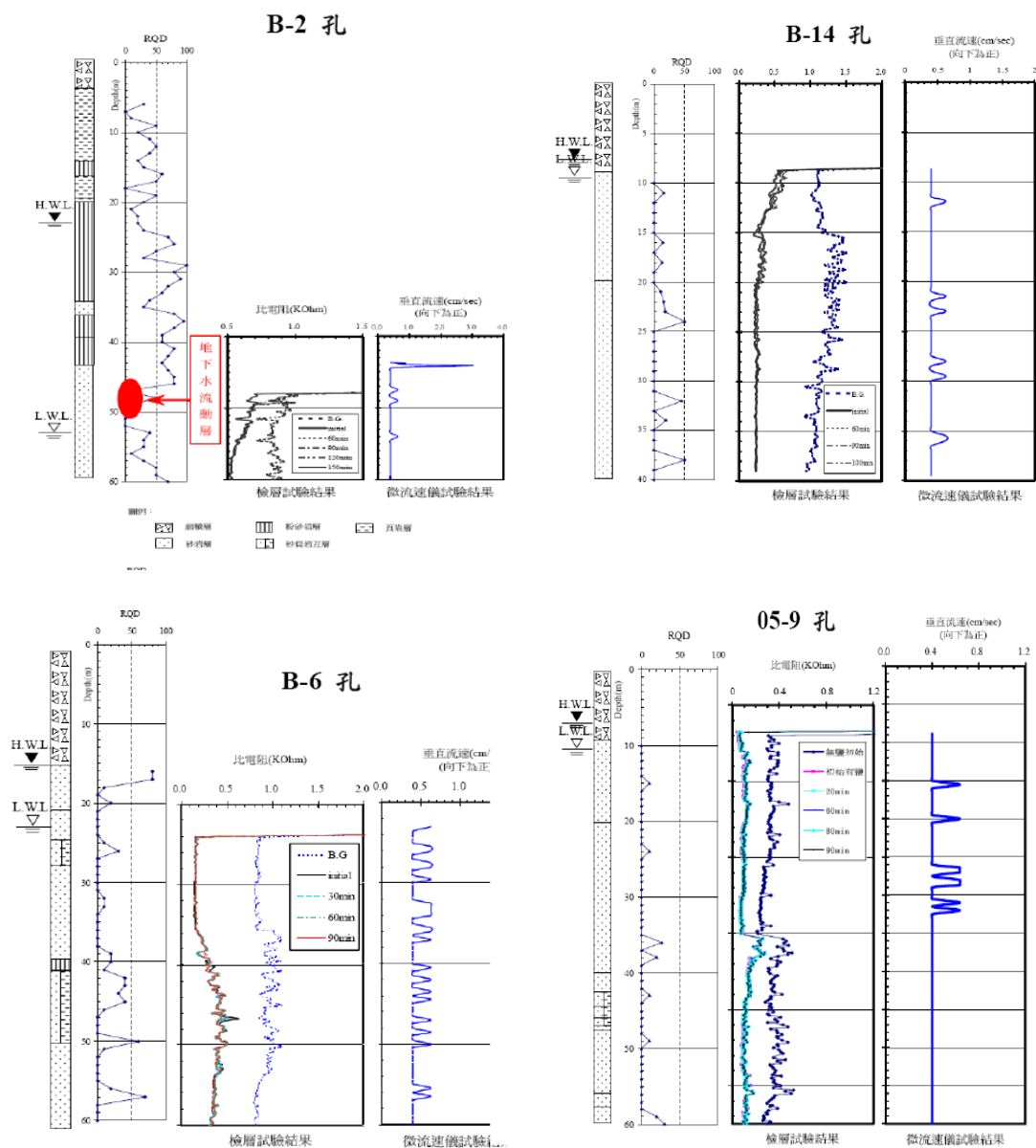


圖 5.11 地下水檢層法與微流速儀量測法檢測成果
(青山工程顧問公司, 2006)

另外，根據地質鑽探調查結果顯示五彎仔地區之地層由上而下可概分為崩積層與基盤岩層兩層。其中，崩積層大致由黃棕色之砂、粉土

及黏土夾雜塊石所組成，其厚度約 0-26 公尺不等。基盤岩層大部分以灰白色至灰色砂岩為主，灰色至深灰色粉砂岩及深灰色頁岩次之，部分則有砂岩夾頁岩薄層、砂、頁岩互層或頁岩夾薄層砂岩組成。其 A-A 與 B-B 地質剖面示意圖，如圖 5.12 所示。

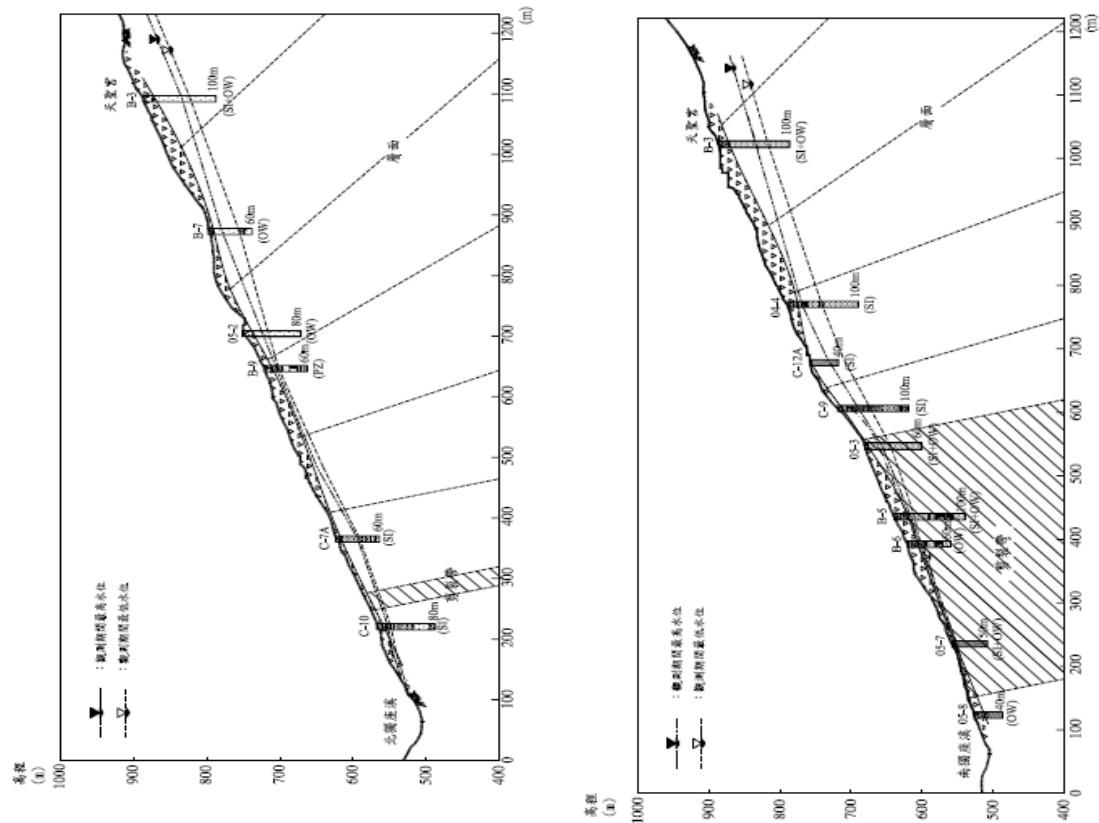


圖 5.12 地質剖面示意圖（青山工程顧問公司, 2006）

由上述可知，由於五彎仔地區垂直方向之地下水流不可忽略，因此可能較不適用都布假設之非拘限地下水流模型。另外，根據地質鑽探結果可知，五彎仔地區之地質可能不具有類似含水層與阻水層之規則互層情況，多水層地下水流模型亦可能較不適用。因此，本研究初步選定採用坡地非飽和地下水流模型來模擬五彎仔地區之地下水流。

上述地下水流模型之初步選定，乃是根據以往地下水文調查與地質調查之結果。但是吾人必須強調，地下水文調查與地質調查之結果常常具有其不確定性。因此，本研究將根據進一步之地質鑽探結果，以

及利用光纖同時量測垂直方向之水壓分佈結果，探討初步所選定地下水流模型之適用性。

坡地地下水位上升之原因，除了降雨所產生之坡地垂直入滲外，坡地內之側向入流量亦可能是重要的因素。本研究擬於 B-2 附近，裝設光纖水壓監測系統，如此不但可量測垂直方向之水壓分佈，以探討初步所選定地下水流模型之適用性外，亦可作為日後地下水數值模擬之側向邊界條件使用。

5.3 數值模式之建立

5.3.1 控制方程式、邊界條件與初始條件

本研究採用垂直二維方式來模擬五彎仔地區之地下水流，如圖 5.12 所示之 A-A 與 B-B 剖面，假設土壤為等向(isotropic)，其坡地非飽和地下水流控制方程式可表示如下

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \dots\dots\dots (5.6)$$

式中， $C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ ，x 與 z 分別表示水平與垂直座標，如圖 5.13 所示

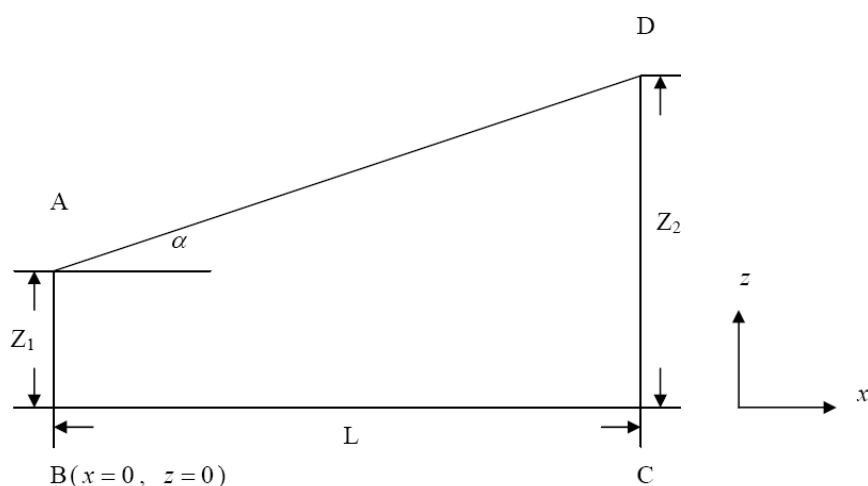


圖 5.13 垂直模擬剖面示意圖

求解式(5.6)需要初始條件與邊界條件，初始條件可表示如下

$$\psi(x, z, t = 0) = \psi^0(x, z) \dots\dots\dots (5.7)$$

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

$$\psi(\Omega, t) = \psi' \dots\dots\dots (5.8)$$

式中， ψ' 表示壓力水頭值，可為時間之函數， Ω 代表邊界之座標。流量邊界條件可表示為

$$-K \left[\frac{\partial \psi}{\partial x} \bar{i} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \bar{k} \right] \bullet \bar{n} = f \dots\dots\dots (5.9)$$

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

5.3.2 離散方程式

利用兩步驟有限差分 Crank-Nicolson 法(Hills et al., 1989; Hsu et al., 2002) 可將式(5.6)離散化(discretization)。其步驟一可表示為

$$\begin{aligned} C_{i,j}^n \frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} = & \frac{K_{i+1/2,j}^n}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i+1,j}^* - \psi_{i,j}^*}{\Delta x} + \frac{\psi_{i+1,j}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta x} \right) - \frac{K_{i-1/2,j}^n}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i-1,j}^*}{\Delta x} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) \\ & + \frac{K_{i,j+1/2}^n}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j+1}^* - \psi_{i,j}^*}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j+1}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta z} \right) - \frac{K_{i,j-1/2}^n}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i,j-1}^*}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i,j-1}^n}{\Delta z} \right) + \frac{K_{i,j}^n - K_{i,j-1}^n}{\Delta z} \end{aligned} \dots\dots\dots (5.10)$$

式中， $K_{i+1/2,j}^n = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i+1,j}^n)}{2}$ ， $K_{i-1/2,j}^n = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i-1,j}^n)}{2}$ ， $K_{i,j+1/2}^n = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i,j+1}^n)}{2}$ ， $K_{i,j-1/2}^n = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i,j-1}^n)}{2}$ 。 Δt 為時間間距(time interval)， Δx 與 Δz 分別為 x 與 z 方向之網格大小(grid size)。上標 n 表示模擬時刻，下標 i 與 j 分別為 x 與 z 方向之格網點位置。步驟二可表示為

$$\begin{aligned}
C_{i,j}^{n+1/2} \frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} &= \frac{K_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i+1,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\psi_{i+1,j}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta x} \right) - \frac{K_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) \\
&+ \frac{K_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j+1}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j+1}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta z} \right) - \frac{K_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i,j-1}^n}{\Delta z} \right) + \frac{K_{i,j}^{n+1/2} - K_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta z} \\
&\dots\dots\dots (5.11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{上述方程式中， } C_{i,j}^{n+1/2} &= \frac{(C_{i,j}^n + C_{i,j}^*)}{2}, \quad K_{i+1/2,j}^{n+1/2} = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i+1,j}^n + K_{i,j}^* + K_{i+1,j}^*)}{4}, \\
K_{i-1/2,j}^{n+1/2} &= \frac{(K_{i,j}^n + K_{i-1,j}^n + K_{i,j}^* + K_{i-1,j}^*)}{4}, \quad K_{i,j+1/2}^{n+1/2} = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i,j+1}^n + K_{i,j}^* + K_{i,j+1}^*)}{4}, \\
K_{i,j-1/2}^{n+1/2} &= \frac{(K_{i,j}^n + K_{i,j-1}^n + K_{i,j}^* + K_{i,j-1}^*)}{4}, \quad K_{i,j}^{n+1/2} = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i,j}^*)}{2}, \quad K_{i,j-1}^{n+1/2} = \frac{(K_{i,j-1}^n + K_{i,j-1}^*)}{2}
\end{aligned}$$

初始條件可離散化如下

$$\psi_{i,j}^0 = \psi^0(x_i, z_j) \dots\dots\dots (5.12)$$

壓力水頭邊界條件可離散化為

$$\psi_{i_b,j_b}^{n+1} = \psi'(\Omega, t = (n+1)\Delta t) \dots\dots\dots (5.13)$$

式中， i_b 與 j_b 表示邊界之網格點位置。若圖 5.13 中之 AD 邊界為流量邊界，其邊界條件可離散化為

$$-K_{i_b,j_b}^{n+1} \left[-\sin \alpha \left(\frac{\psi_{i_b+1,j_b}^{n+1} - \psi_{i_b,j_b}^{n+1}}{\Delta x} \right) + \cos \alpha \left(\frac{\psi_{i_b,j_b}^{n+1} - \psi_{i_b,j_b-1}^{n+1}}{\Delta z} + 1 \right) \right] = f \dots\dots\dots (5.14)$$

若 BC 邊界為流量邊界條件，則可離散化為

$$-K_{i_b,j_b}^{n+1} \left[\frac{\psi_{i_b,j_b+1}^{n+1} - \psi_{i_b,j_b}^{n+1}}{\Delta z} + 1 \right] = f \dots\dots\dots (5.15)$$

5.4 模式驗證與初步測試

5.4.1 模式驗證

利用一維垂向入滲案例來驗證模式之正確性。如圖5.13所示，若 $\alpha = 0$ ，且假設土層厚度為70cm，土層頂部有均勻入滲流量為 $q=13.69\text{cm/hr}$ ，土層底部為固定水頭 $\Psi=-61.5\text{cm}$ 。土壤之保水曲線採用 Haverkamp et al.(1977)實驗歸納所得

$$\theta(\psi) = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r)}{\alpha + |\psi|^b} + \theta_r \dots\dots\dots (5.16)$$

$$K(\psi) = K_s \frac{A}{A + |\psi|^c} \dots\dots\dots (5.17)$$

其中，水力傳導係數 $K_s=34\text{ cm/hr}$ ，殘餘體積含水量 $\theta_r=0.075$ ，飽和體積含水量 $\theta_s=0.287$ ，參數 $A=1.175 \times 10^6$ ， $\alpha=1.611 \times 10^6$ ， $b=3.96$ ， $c=4.74$ 。

在土壤初始體積含水量 $\theta=0.1$ ，空間間距與時間間距分別為 $\Delta z=1.0\text{cm}$ ， $\Delta t=0.005\text{hr}$ 下，質量守衡誤差(mass conservation error)隨時間之模擬結果，如圖5.14所示。其中質量守衡誤差可表示為

$$\text{Mass error}(\%) = \frac{\text{True mass added} - \text{Calculated mass added}}{\text{True mass added}} \times 100 \dots\dots\dots (5.18)$$

由圖5.14可知，初始時誤差隨時間增加而增大，最大誤差發生於0.05小時約為百分之五，之後誤差隨時間遞減至百分之一以下。另外，0.5小時體積含水量隨深度變化之模擬結果，如圖5.15所示。由圖5.15可知，模式之模擬結果與Hills' et al.(1988)所得之結果極為吻合。

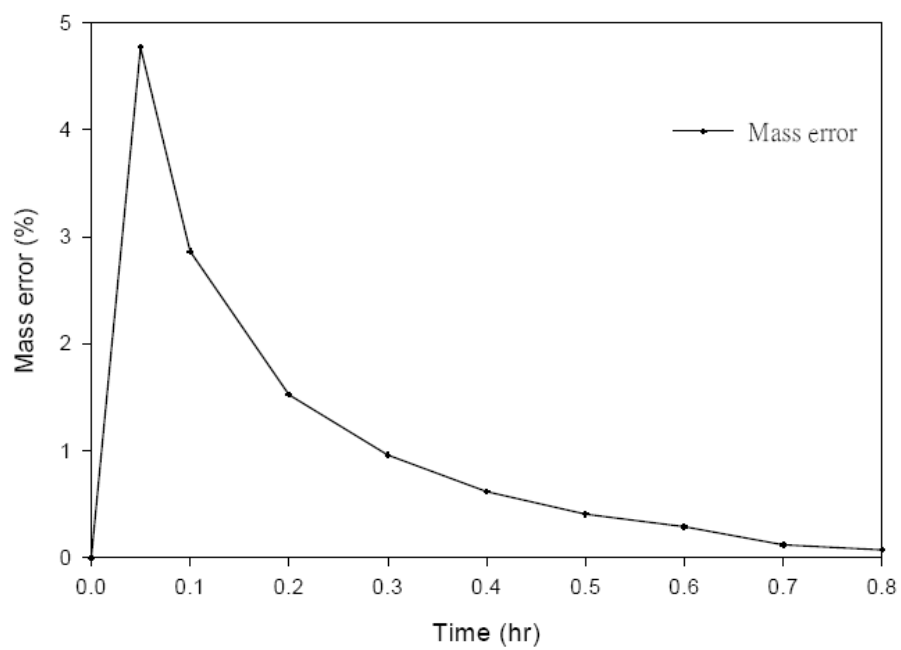


圖 5.14 質量守恒誤差模擬結果

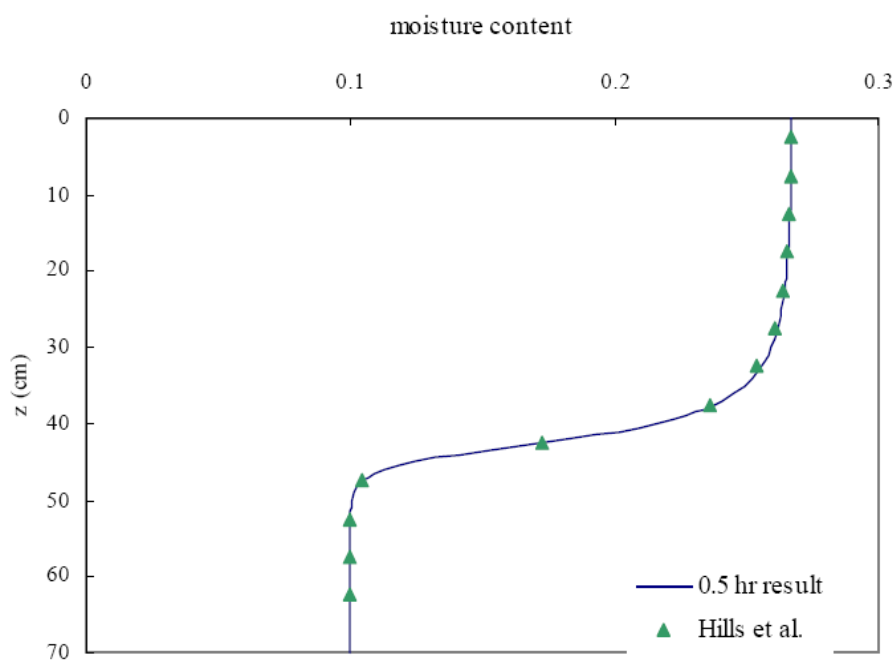


圖 5.15 体積含水量模擬結果

5.4.2 模式初步測試

參考圖 5.12，由圖 5.13 可知，AB 邊界與河川連接，因為河川水流流速遠大於地下水流速，故將此邊界條件設定為水頭等於河川水位之靜水壓分佈。假設坡地底部與不透水之岩盤接觸，將 BC 邊界設定為零流量邊界。AD 之邊界條件設定為土壤入滲能力等於降雨強度之流量邊界，但是 AD 邊界上之壓力水頭計算結果若大於零時，在不考慮漫地流(overland flow)下，則將邊界設定為壓力水頭等於零，也就是考慮窪蓄效應(ponding effect)。CD 之邊界條件可給定為壓力水頭邊界與流量邊界兩種，由於可能無法獲得邊界流量資料，因此實務上可給定為光纖監測所得之壓力水頭分佈。

模式初步測試假設 $Z1=10\text{m}$ 、 $Z2=50\text{m}$ 、 $L=100\text{m}$ ，且 Van Genuchten 土壤參數 $\theta_s=0.47$ 、 $\theta_r=0.17$ 、 $K_s=0.00001\text{m/sec}$ 、 $\zeta=0.011$ 、 $N=2.2$ 。在初始時地下水流為穩定狀態(steady state)，河川水位為 10m 固定不變，不考慮 AD 邊界之降雨量，CD 邊界上之初始地下水面位於 $z=30\text{m}$ 滿足靜水壓分佈，兩天後地下水面隨時間線性上升至 $z=40\text{m}$ 並保持不變下，壓力水頭模擬結果如圖 5.16 所示。其中，圖 5.16 (a)表示初始穩定狀態之等壓力水頭分佈，圖 5.16 (b)與圖 5.16 (c)為模擬時間為 12 小時與 24 小時之等壓力水頭分佈，圖 5.16 (d)則表示地下水面隨時間線性上升至 $z=40\text{m}$ 保持不變之穩態等壓力水頭分佈。另外，在 $x=70\text{m}$ 、 $z=30\text{m}$ 與 $x=80\text{m}$ 、 $z=30\text{m}$ 兩處之壓力水頭隨時間變化模擬結果，如圖 5.16 所示。由圖 5.16 與圖 5.17 可知，本研究所建立之數值計算模式可合理地模擬坡地地下水流。

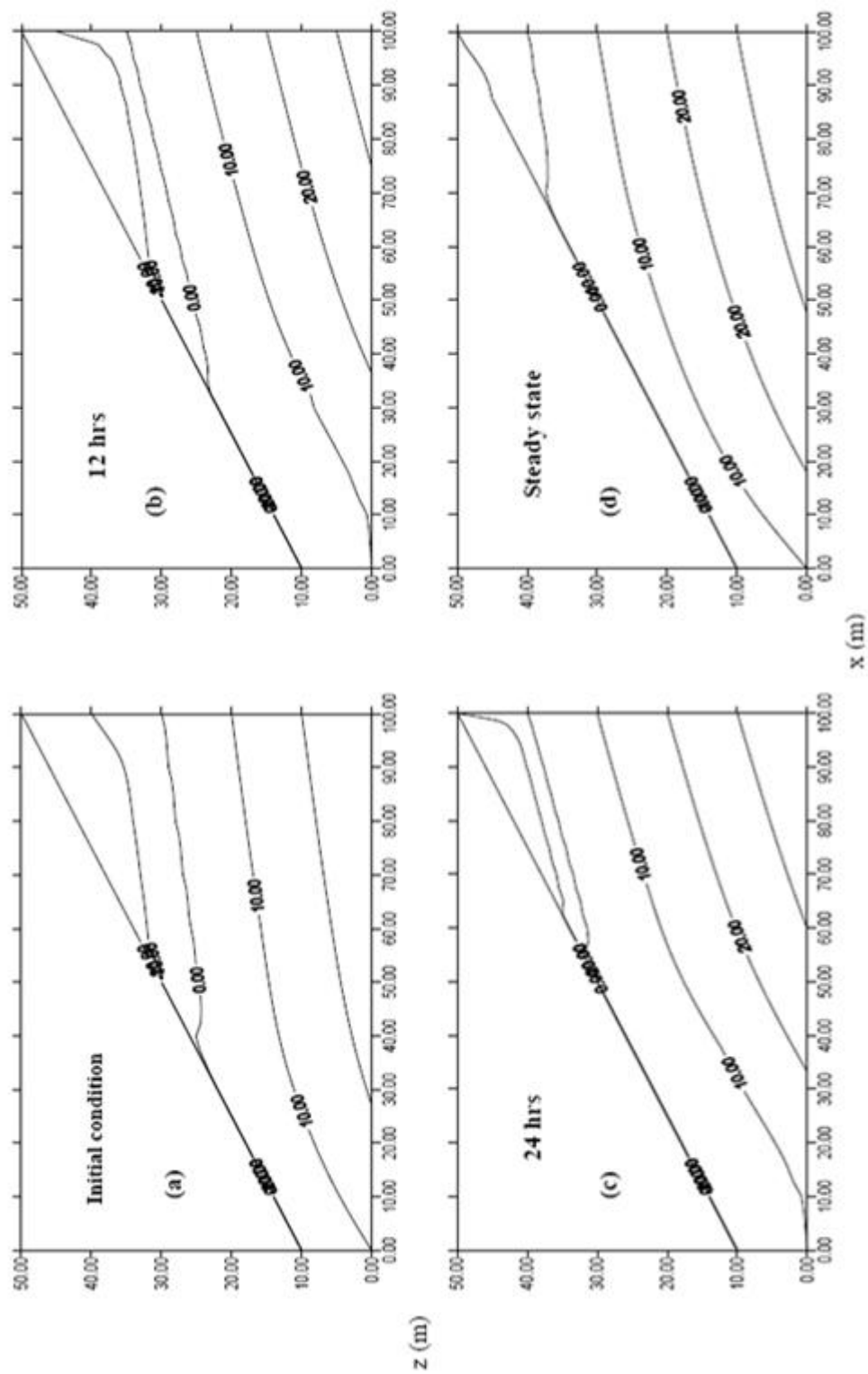


圖 5.16 坡地非飽和地下水模擬結果

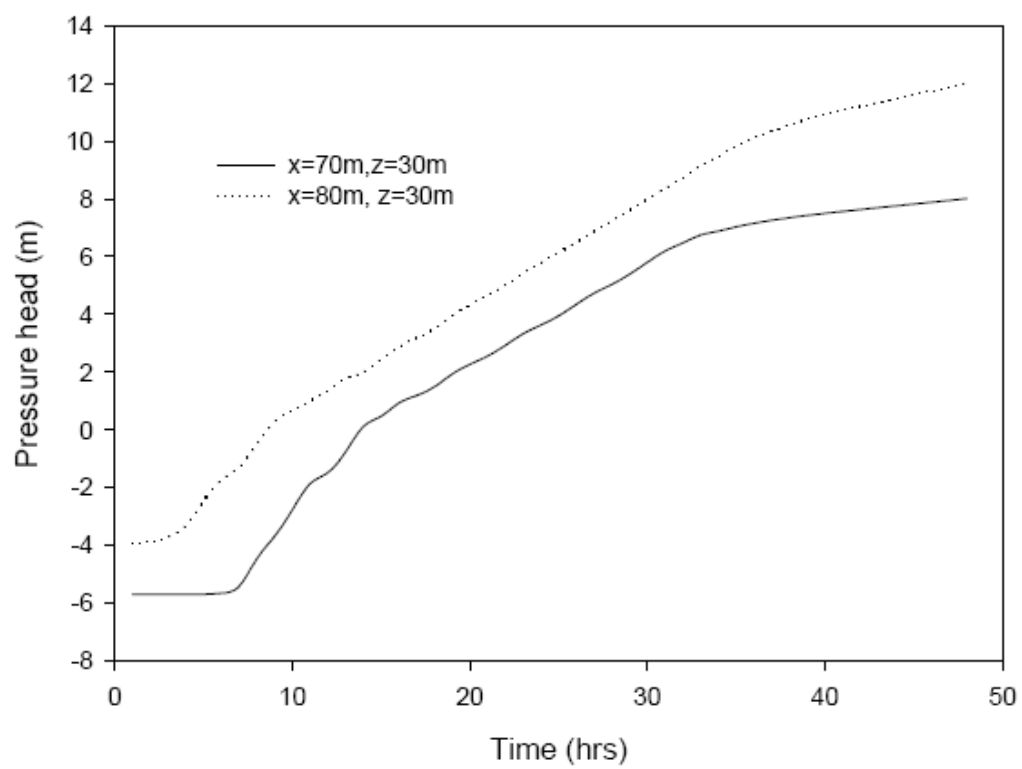


圖 5.17 壓力水頭隨時間變化模擬結果

第六章 結論與建議

6.1 結論

1. 圖 4.4 為利用傳統測傾儀量測 C-11 傾斜觀測管之概況圖，由圖 4.8 數據分析顯示，10 月 8 日至 10 月 26 日之間，在地表下 36 公尺處有明顯之滑動面，其滑動量約為 6mm，而 10 月 12 日至 10 月 26 日 NCTU-01 所裝設之 FBG-SD 量測結果為在地表下 36 公尺處也有明顯滑動產生且最大滑動量為 12mm。
2. 圖 4.9 為 NCTU-02 光纖光柵水壓觀測結果圖，該圖顯示地表下 18 公尺至 32 公尺範圍，水壓有明顯變化，其變化量約為 80kPa 至 90kPa 之間；圖 4.10 為 NCTU-03 光纖光柵水壓觀測井當天量測結果且由圖可得知該孔地下水位位於地表下 40 公尺處，而隨著深度增加水壓也跟著增加，也表示出目前孔內水壓力未受地下水滲流影響。
3. 在喇叭形狀的測試中，光纖拉伸計在 5mm 及 10mm 之位移狀況下，其變化趨勢與圖 4.15 由 IP 量測變化趨勢結果相吻合，但是在位移量為 15mm 時，則有向內變化趨勢，初步研判可能是固定光纖拉伸計於傾斜觀測管之環狀束制器可能與傾斜觀測管有相對滑動而導致變化量有變小之結果。而大肚形的測試中，圖 4.18 光纖拉伸計有顯示出變形形狀之趨勢，但每階之變化量並未隨著外加之位移量增加而增加，其中可能原因如上述所敘，另外，因大肚形狀曲線中包含兩個轉折點處，而在轉折點處左右地方分別為受拉及受壓處，若光纖拉伸計固定範圍處含蓋一轉折點時，其拉伸量會因此受其影響(光纖拉伸計所感應為該長度範圍內之平均應變量)，以致無法量測出正確變化量。
4. 根據以往地下水文調查與地質調查結果，選定採用坡地非飽和地下水流模型，模擬五彎仔地區之地下水流動情況。

6.2 建議

1. 利用具有解析解之二維飽和與非飽和地下水流案例，繼續進一步驗證模式之正確性。
2. 利用歷年降雨及地下水位觀測資料，進行五彎仔地區地下水流模擬之率定與驗證。
3. 配合光纖監測所得之壓力水頭分佈結果，進行五彎仔地區之地下水流模擬。

參考文獻

1. Bear J (1972) Dynamics of fluids in porous media, Dover, Mineola, New York.
2. Fetter CW, Applied Hydrogeology, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
3. 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.
4. Hurley DG, Pantelis G (1985) Unsaturated and saturated flow through a thin porous layer on a hillslope. Water Resources Research 21: 821-824
5. 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.
6. Ng, C.W.W., Wang, B., and Tung, Y.K., 2001, "Three-Dimensional Numerical Investigations of Groundwater Responses in Unsaturated Slope Subjected to Various Rainfall Patterns," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 38, pp.1049-1062.
7. 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.
8. Haverkamp R, Vauclin M, Touma J, Wierenga PJ, and Vachaud G (1977) "A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration." Soil Sci. Soc. Am. J., Vol 41, 285-294.
9. Hill RG, Porro I, and Hudson DB (1989) "Modeling one-dimensional infiltration into very dry soils. 1. model development and evaluation." Water Resources Research, Vol. 25, 1259-1269.

10. Hsu SH, Ni CF, and Hung PF (2002) “Assessment of three infiltration formulas based on model fitting on Richards’ equation. “ Journal of Hydrological Engineering, Vol. 7, 373-379.
11. Fetter CW, Applied Hydrogeology, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
12. 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.
13. 簡旭君（2003），光纖光柵應變管之研發，交通大學土木工程系碩士論文。
14. 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。
15. 畢慶昌（1969），俯衝運動在臺灣地體構成中的作用，臺灣省地質調查所彙刊，第20號。
16. 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。
17. 黃良雄，地層下陷數值模式發展(一)，國科會，民國 87 年 10 月。
18. 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。
19. 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，臺灣，民國 90 年。
20. 青山顧問有限公司（民國 96 年），台 18 線 28.9K~31.5K（五彎仔）地滑區調查、整治規劃及安全評估地滑地區補充監測執行總報告，交通部公路總局第五區養護工程處。
21. 青山顧問有限公司（民國 96 年），台 18 線 28.9K~31.5K（五彎仔）地滑區調查、整治規劃及安全評估地三次總結報告，交通部公路總局第五區養護工程處。

附錄一 期中審查委員意見及辦理概況

交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）

☒期中 ☐期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(1/4)

執行單位：交通大學防災工程研究中心

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
(一)徐教授登文 (國立中興大學): 1. FBG 水壓計串列的安裝於工地，以 Bentonite 封層困難度極高研究團隊可能須花費相當 effort 在此方面。 2. 本報告提出非飽和式控制方程式，徑向 K 值的評估可能須現場間接或實驗室直接求得。	1. 感謝評審委員指導。 2. 謝謝委員之意見，會視鑽井與安裝儀器當時情況，選擇現場間接或實驗室直接求得。但此兩種方法所得之水力傳導係數可能皆無法完全代表模擬區域之水力傳導係數。因此，實際模擬時亦需配合相關地質資料給定參數，並進行參數之率定與驗證。	
(二)賴研究員聖耀 (港灣技術研究中心): 1. 本計畫已完成水壓計及偏斜儀之改良與現場安裝之構想。建議除了水壓計安裝處之透水層，全孔皆以白皂土	1. 本團隊之水壓計安裝構想與委員建議相同。其構想為以間隔 5 公尺安裝一光纖光柵水壓計，而水壓計之間將以白皂土予	

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	合作研究單位 處理情形
封層隔離各水壓計。 2. 已經選定地下水模型，是否可簡單介紹初步模擬分析結果。 ~~~~~以下空白~~~~~	以封層隔離。 2. 遵照委員建議，將於期末報告中附上現場模擬分析結果。 ~~~~~以下空白~~~~~	

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(1/4)

執行單位：交通大學防災工程研究中心

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
(一)林教授炳森 (國立中興大學):		
1. 本計畫利用全光纖邊坡穩定監測系統整合與應用於現地，具有創新性，值得進行研究。	1. 感謝評審委員肯定。	同意
2. 報告內部份打字錯誤應修正；現場變位與水壓計之監測結果，應附於報告內。	2. 感謝委員指教，於期末報告中予以修正並附上現場變位與水壓監測結果。	同意
3. P2 第 5 行”若能增加一額外低解析，能承受大變形，但低成本之配置、、”應再說明清楚。	3. 感謝委員指教，請參閱期末報告定稿第一章。	同意
4. P6 與 14 圖 2.1 中 NCTU-02、NCTU-03 位置應標示清楚，並附上監測結果及與傳統傾斜管、、等之比較。	4. 感謝委員指教，請參閱期末報告定稿第四章。	同意
5. P14，B-8，FBG-SD 偏斜儀損壞，C-11 之監測結果應附上。	5. 感謝委員請教，有關 FBG-SD 偏斜儀資料與 C-11 傾斜管觀測資料，請見期末定稿報告第四章節。另外，B-8 孔位所	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
	裝設之 FBG-SD，在安裝過程中發生損壞，故沒有監測數據。	
6. P16、17 “寬頻光源強度、、、只要光源足夠就可以大量使用、、、”是否可量化說明。	6. 感謝委員指教，根據光纖通訊相關文獻資料，光在光纖傳播時，每公里會損耗 0.3dB 光強度，而一般光纖光柵擷取系統之光源可提供之強度約在 20dB/nm(考慮光學系統損失)，光偵測器可偵測的強度約在 60~70 dB 處，則可偵測之動態範圍為 50dB，若將 50dB 除上 0.6dB(來回)可得約 80 公里的傳輸距離。	同意
7. P29 光纖拉伸計結果應補上。P30 圖 3.17 original 與 deformation 之圖例，應區分清楚。	7. 感謝委員指教，已修正於期末定稿報告中 P.3-15。	同意
8. P44 圖 5.3 掃描圖不清楚，應附圖例。	8. 感謝委員指教，已修正於期末定稿報告中。	同意
9. P46 圖 5.5 傾斜管量測資料為何？4/12 以後中斷，並與月雨量資料配合說明。	9. 圖 5.5 之目的僅在於展示五彎仔地區降雨、地下水位變化與地層位移之相關性。資料來源為青山工程顧問有限公司。	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
10. P53 地質鑽探報告應附入附錄。圖 5.12 應附圖例。	10. 感謝委員指教，請參照文獻中，青山顧問有限公司（民國 96 年），台 18 線 28.9K~31.5K（五彎仔）地滑區調查、整治規劃及安全評估地質調查總報告，交通部公路總局第五區養護工程處。	同意
11. P64 討論 5 並非結論。應討論光纖系統之優、缺點，如光纖無法測知滑動方向，若滑動變形太大，則無法測量。現地測量方面，應說明儀器裝設位置、深度與數量之原則。監測資料應附上現地結果。水壓力監測結果應加判讀，且一般須達 6 個月後才能穩定，故 NCTU-02 似乎不合理，應再檢核。應說明傳統儀器與光纖儀器之使用年限。	11. 感謝委員指教，已修改至期末定稿報告中。對於 NCTU-02 光纖光柵水壓觀測井之量測讀數，本研究團隊會依委員建議，等待 6 個月穩定後，再進行量測並檢核。對於傳統儀器與光纖儀器之使用年限，必須考慮現地影響因素，如溫度、濕度、雷擊等，而一般儀器保固期間約 1~2 年。	同意
(二)朱科長金元 (港灣技術研究中心)：		
1. 中英文摘要，內文編排，請依據本所出版品規定。	1. 感謝委員指教，已修改置期末報告定稿中。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
2. 對於數值模式分析之需要，須要之孔數及深度如何？	2. 謝謝委員之指導，就數值模擬而言，地下水觀測井數、分佈情況及觀測深度都會影響模式率定、驗證與預測之可靠度。會於後續工作中探討之。	同意
3. 各個孔數之高程，是否須要水準測量？	3. 感謝委員指教，關於個孔之高程可依據文獻中青山工程顧問有限公司報告中的 A-A 及 B-B 剖面圖反求各孔位高程，目前暫時不需施測水準高程。	同意
4. 所測得之地層滑動量，是相對量還是絕對量？	4. 感謝委員指教，目前有關傾斜觀測管的量測都為相對值。	同意
5. 數值模式所需輸入之參數為何？其基本假設條件為何？	5. 模式乃求解理查方程式 (Richards equation)，也就是假設流體在地層中之流動滿足達西定律 (Darcy's Law)。另外，數值模式所需輸入之保水曲線 (water retention curve) 相關參數可參考 Van Genuchten(1980)。	同意
6. 第五章相關之圖，請儘量清晰。	6. 感謝委員指正，請參閱於期末定稿報告第五章。	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
(三)蘇科長文崎(公路總局 養護組)：		
1. 報告中引用公路總局委託青山顧問所做報告資料部分，請以 2006 年之總結報告為依據，部分資料及圖資所列為 2004，請重新更新。	1. 感謝委員指正，已修正於期末定稿報告。	同意
2. 公路總區在五灣仔之監測已在本(96)重新委託給青山顧問再做監測儀器修復並重新監測，另外針對監測數據即時傳輸預警系統亦有委託逢甲大學進行研究，本研究可與該 2 研究作充分配合，若有需公路總局協助請另行提出。	2. 感謝委員提供研究方面之協助。	同意
3. 本研究計畫未來成果是否能達到預期以全時間以自動化之方式將數據傳至管理單位與預警機制，期待研究團隊後續能有良好成果呈現。	3. 感謝委員指教。	同意
4. 現地鑽孔孔位之決定因素請再補充說明清楚，位置圖請再標示清楚。	4. 感謝委員指教，請參閱於期末定稿報告中第二章。	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
5. 水壓計之不織布包裹在 PVC 管內或管外，P26 及 P27 之敘述不一致，請查明釐清。	5. 感謝委員指教，請參閱於期末定稿報告中第三章。	同意
6. 水壓計及偏斜儀之裝置高程建議依現地之地下常水位、高水位及滑動預估層高程等資料重新考量，各鑽孔孔位深度建議主辦單位可酌再調整，目前設置深度似乎不夠深。	6. 感謝委員指教，若明年度計畫經費許可，可增設額外監測孔位，將謹慎重新規劃及考量。	同意
7. 地下水模型之擬定，應與現地之地質狀況相契合，否則恐失去原意，另外邊界條件之設定亦應參酌現地條件之限制，並請說明彼此相互關連性。	7. 謝謝委員之指教，實際模擬時會配合相關地質資料及地下水觀測資料給定參數及設定邊界條件，並進行參數之率定與驗證。	同意
8. 圖 3.17(P30)之線條表示方式請區別。	8. 感謝委員指教，請參閱於期末定稿報告中 P.3-15。	同意
9. 對本研究之主題與目標及本年度之研究初步成果表達肯定與贊同，希望本研究之全光纖式邊坡穩定監測能對台灣山區邊坡有滑動問題者提供一實用、可行及經濟之監測系統。	9. 感謝委員給予研究方面之肯定。	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
(四)劉教授正川 (國立嘉義大學):		
1. 本研究利用自行研發之全光纖式監測系統，監測地層位移量與地下水壓，具有創新性值得肯定。	1. 感謝委員給予研究方面之肯定。	同意
2. 明年度若經費允許，建議增設更深的光纖位移計與水壓計，以探討深層之地層變位量與地下水流況，並可作為地下水流數值模擬邊界條件設定之用。	2. 感謝委員指教，將視主辦單位給予明年經費許可，增加額外監測孔位並與所建立之數值模型比較。	同意
3. 第五章之標題若可修正為”研究場址地下水流模型選定與數值模式之建立”，則更能符合所述之內容。	3. 感謝委員指教，本單位討論後，認為委員所提出之標題較為恰當，將修正於期末定稿報告中。	同意
4. 參考文獻與內文無法完全對應，請於內文中表明所引用之參考文獻。	4. 感謝委員指導，將予以修正於期末定稿報告中。	同意
5. 請補充期初與期中審查意見與答覆，以供參考。	5. 遵照辦理。	同意
6. 請補充英文摘要。 ~~~~以下空白~~~~	6. 遵照辦理。 ~~~~以下空白~~~~	同意

全光纖式邊坡穩定監測系統 整合與現地應用測試 (1/4) 2007-期末報告

黃安斌、蔡東霖、李瑞庭



HAZARD MITIGATION
Natural
RESEARCH CENTER

國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

2007-工作內容

- 現有光纖水壓監測技術之評估，選擇使用與必要之改良。
- 光纖地層位移與水壓監測系統之整合與改良。
- 可與FBG-SD匹配之光纖拉伸計之感應系統測試。
- 收集歷年現地文獻資料，進行試驗場地，地形地質與地下水文分析並選定地下水數值模型以與監測數據配合，以做為未來邊坡穩定評估之基礎。

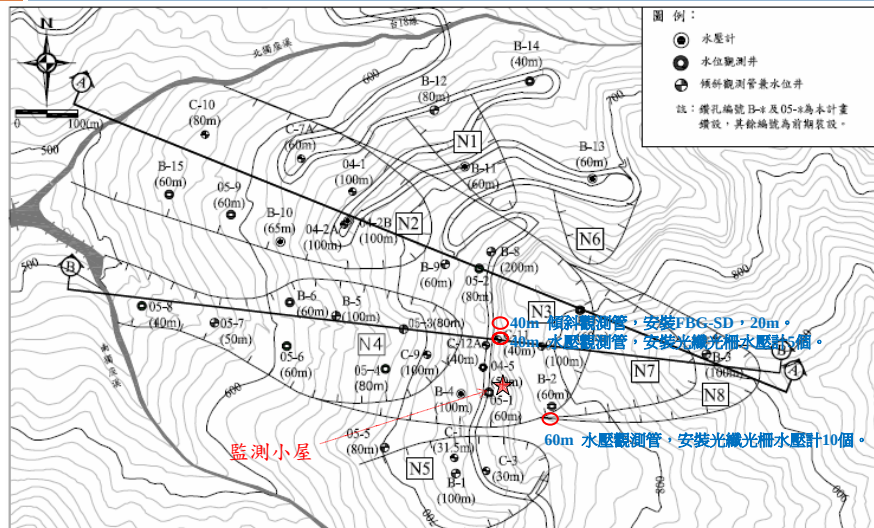
本年度完成工作項目

- 於C-11孔位旁，增加一40m深傾斜觀測管及一40m深水壓觀測管。
- 於B-2孔位旁，增加一60m深水壓觀測管。
- 40m傾斜觀測管，安裝20支之節理式光纖光柵偏斜儀，每支節理式光纖光柵偏斜儀間距為1m。
- 40m水壓觀測管，安裝5個光纖光柵水壓計，每個光纖光柵水壓計間距為5m；外圍封層間距為5m。

本年度完成工作項目

- 60m水壓觀測管，安裝10個光纖光柵水壓計，每個光纖光柵水壓計間距為5m；外圍封層間距為5m。
- 其餘5個光纖光柵水壓計，安裝置現有水壓觀測井。
- 光纖拉伸計感應系統室內測試與驗證。
- 完成現場地下水流模型驗證與初步測試。

現場光纖監測儀器安裝位置說明



(青山工程顧問公司，2006)

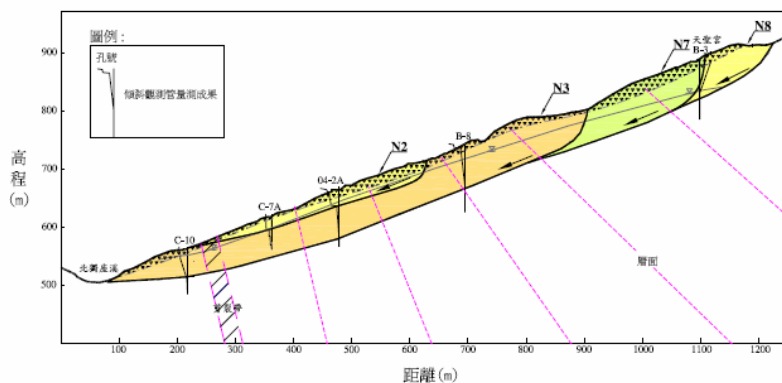
研究方法及進行步驟

- 以阿里山台18線五灣仔路段為標的
- 文獻資料收集 – 水文地質資料收集
- 現場鑽探取樣與儀器裝置
- 地形地質及地下水文分析模型建立

邊坡地層特性

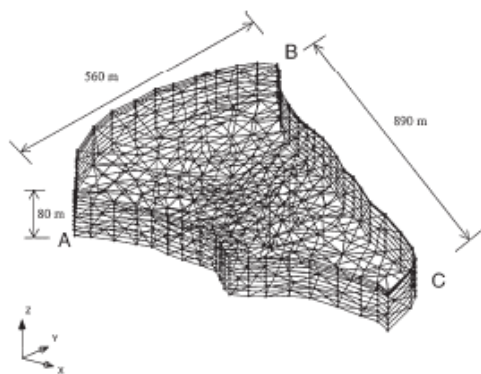
- 由崩積層與破碎岩石所組成，至最深鑽孔200m深度
- 根據B2、05-02及05-01觀測，暴雨期間水位變化均可達數十至二十公尺以上 – 水壓分佈監測之重要性
- 顯示影響水位變化的可能原因並非由地表水入滲，而是由側向水流補注所造成，導致地下水位上升快速 – 滲流分析之重要性

深層滑動



(青山工程顧問公司，2006)

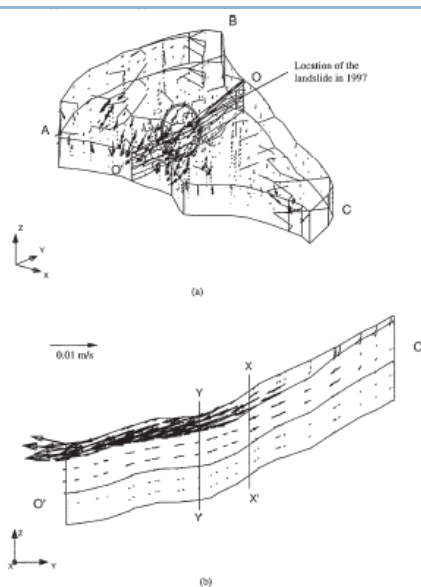
香港Lai Ping Road三度空間滲流分析



考慮非飽和土層之影響

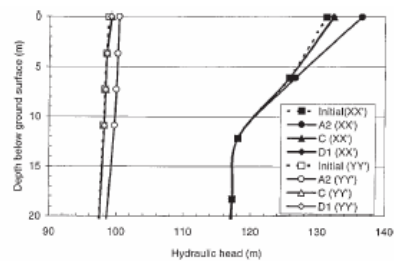
(取自Ng et al., 2001)

降雨情況下地層內水流之分佈

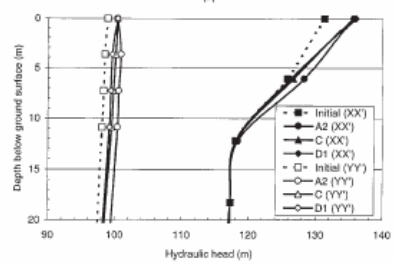


(取自Ng et al., 2001)

降雨情況下水頭之分佈



垂直流明顯
水頭非線性分佈



(取自Ng et al., 2001)

Vibrating wire piezometers

12



Vented piezometer

Multilevel piezometers

13



Signal cables are protected by PVC placement pipe.

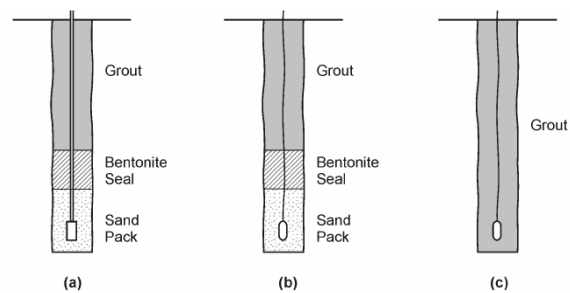
Placement pipe makes it easy to install piezometers at the specified elevations

VW piezometers in multi-level housings are installed in-line with the placement pipe.

Fully-grouted borehole provides excellent isolation of zones.

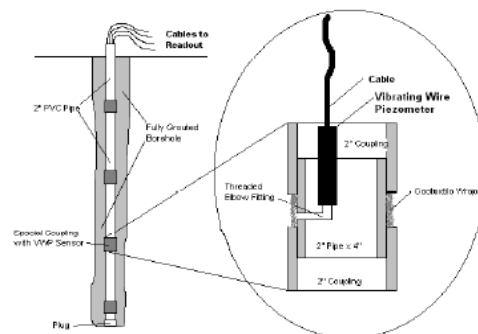
Placement pipe is also used to deliver grout to the borehole.

全灌漿孔內水壓計之安裝



(取自 Contreras et al., 2007)

同一鑽孔內安裝多個水壓計



(取自Mikkelsen and Green, 2003)

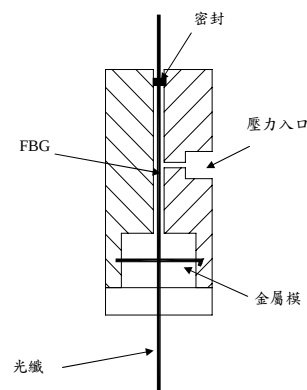
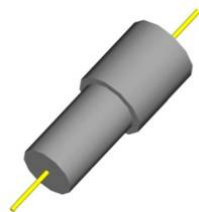
阿里山的挑戰

- 大區域的分析
- 透水層深度超過200m
- 透水層被隔離-多水層之滲流之可能
- 非線性水壓分佈之可能
- 非飽和土壤受雨水滲入之影響
- 滲流分析與監測結果之結合
- 根據滲流分析結果做預警之可能
- 多點分佈式水壓監測之重要性

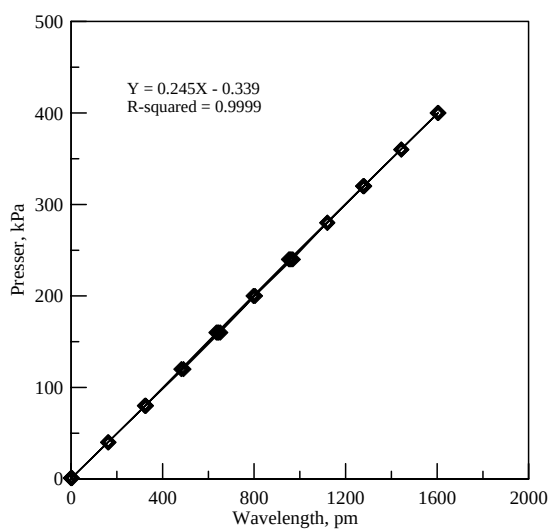
五月五日現場探勘

- 傾斜觀測管C-11與水位觀測井B2有持續量測中。
- B2與C-11兩鑽孔都位於N3上緣，可提供數值分析重要之邊界條件。
- 於C-11附近新增一傾斜觀測管，深度為40m裝設FBG-SD，讀數可以與C-11中傳統IP讀數相比較。
- B2附近增設深度達100m之鑽孔，裝設多點FBG水壓計，監測孔內水壓之分佈與變化。
- 傾斜觀測管B-8深度達200m，約在深度105m處有明顯折點。無法降至105m以下

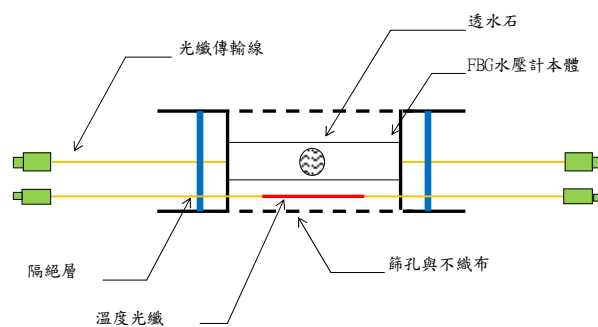
等週期式FBG波峰飄移水壓計



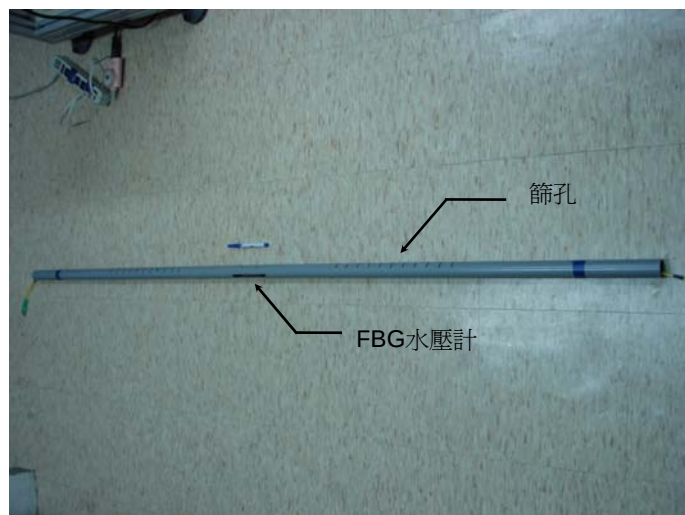
均勻拉伸式光纖光柵壓力計標定



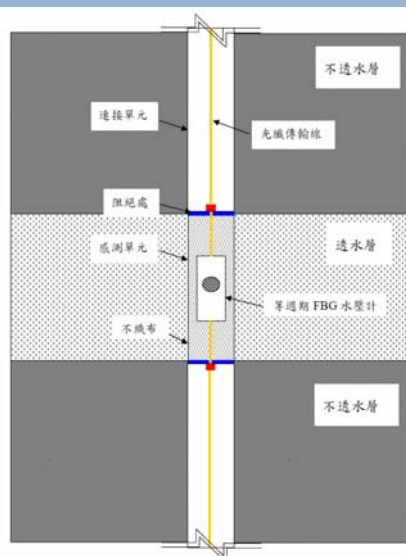
FBG水壓計光纖之連結



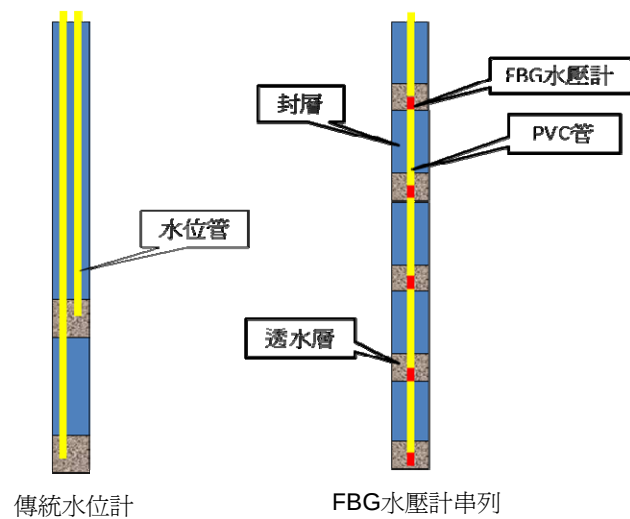
FBG水壓計置入PVC 管中



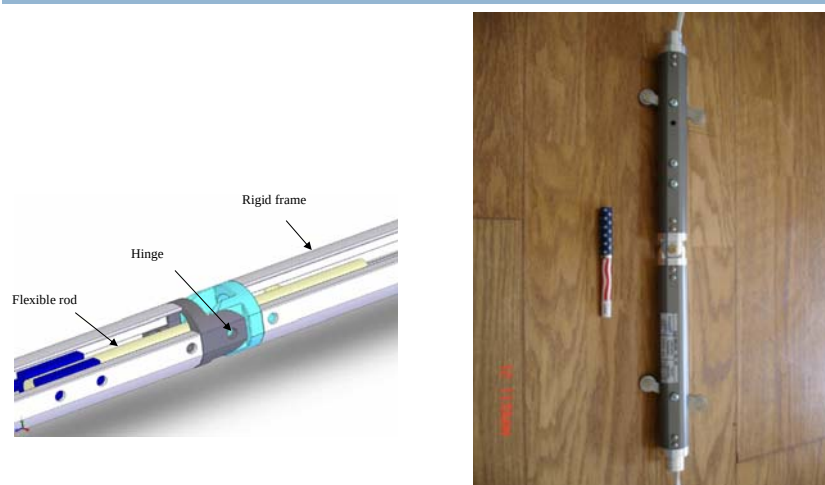
FBG水壓計之封層



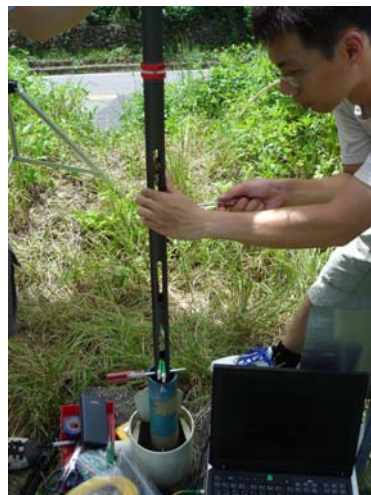
FBG水壓計串列



鋁擠型支架



7月6日B-8內FBG-SD之安裝



10月8日NCTU-01內20組FBG-SD之安裝



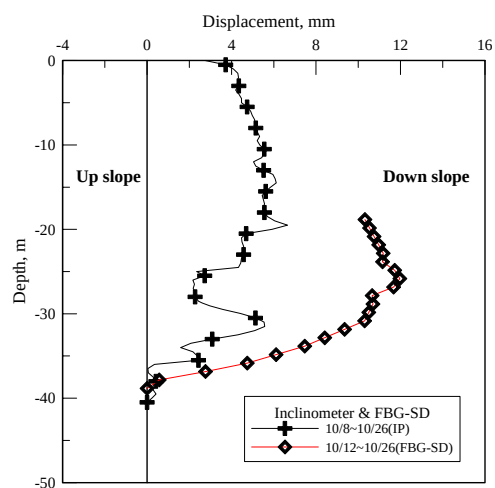
10月12日NCTU-02內5組FBG水壓計之安裝



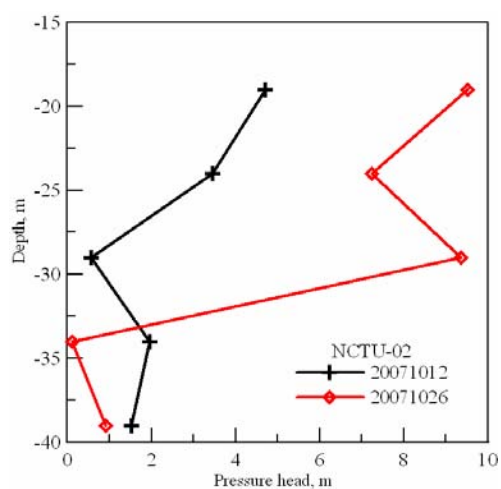
10月26日NCTU-03內10組FBG水壓計之安裝



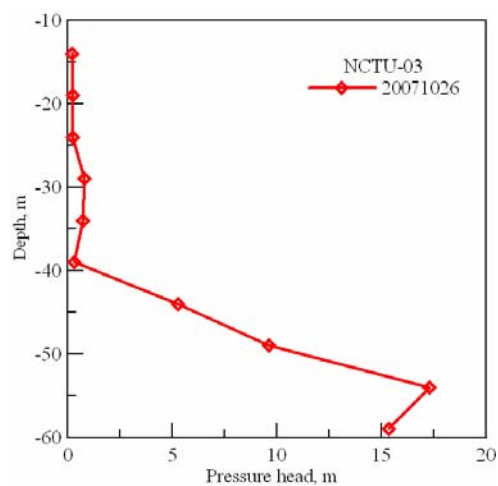
C-11與NCTU-01量測結果



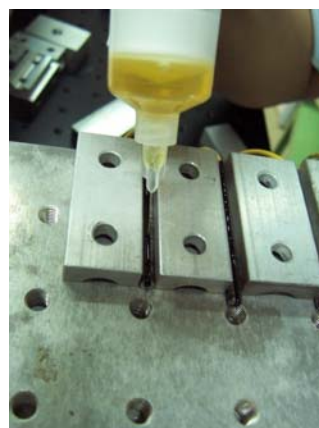
NCTU-02水壓與深度變化結果



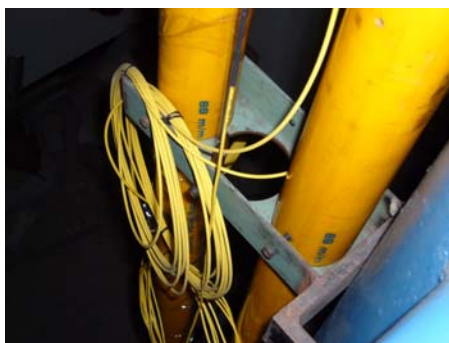
NCTU-03水壓與深度變化結果



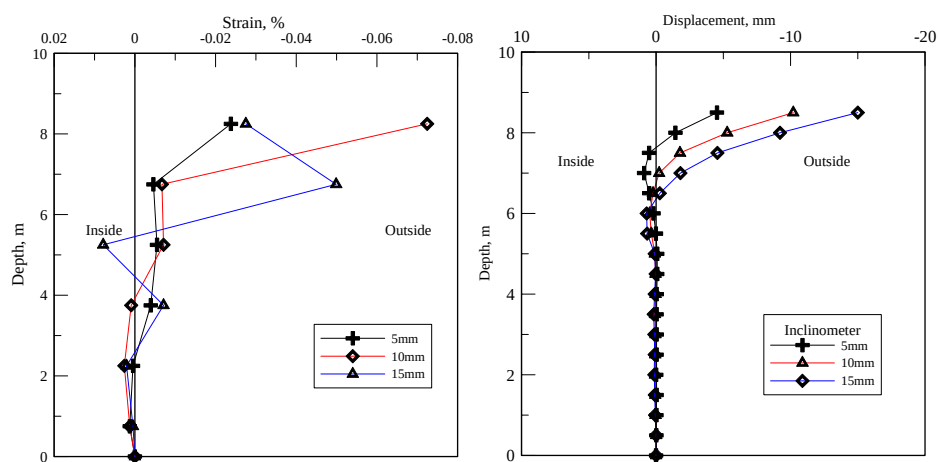
光纖拉伸計製作過程



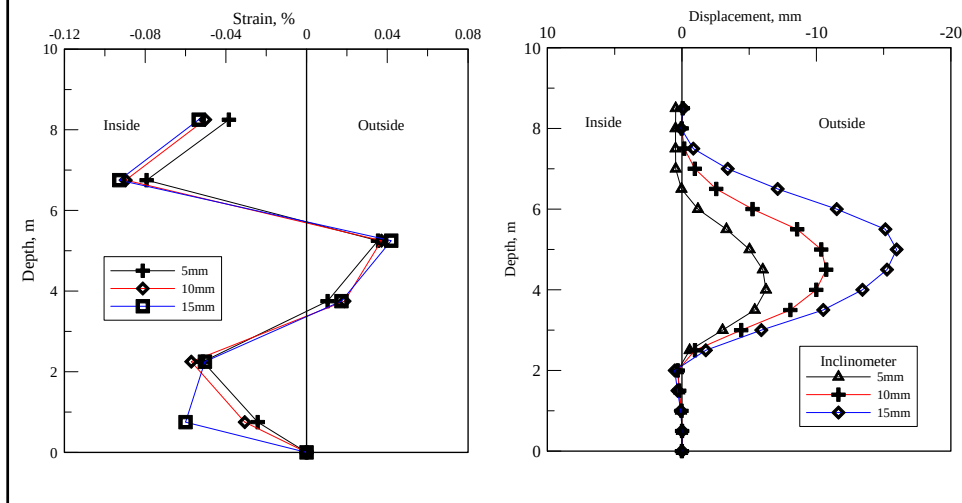
光纖拉伸計室內9M管測試



喇叭形測試結果



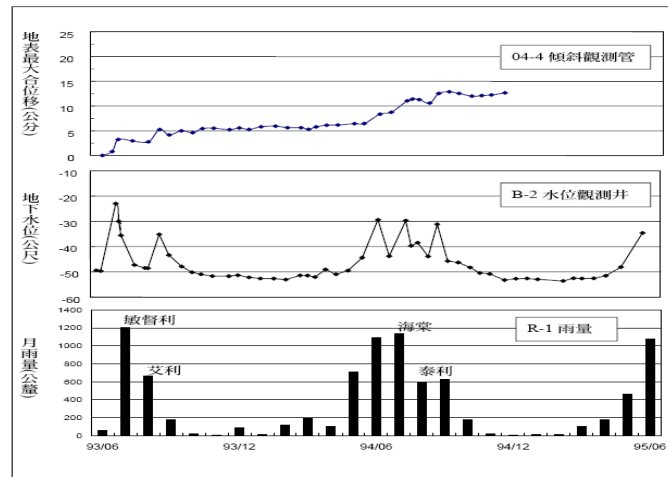
大肚形測試結果



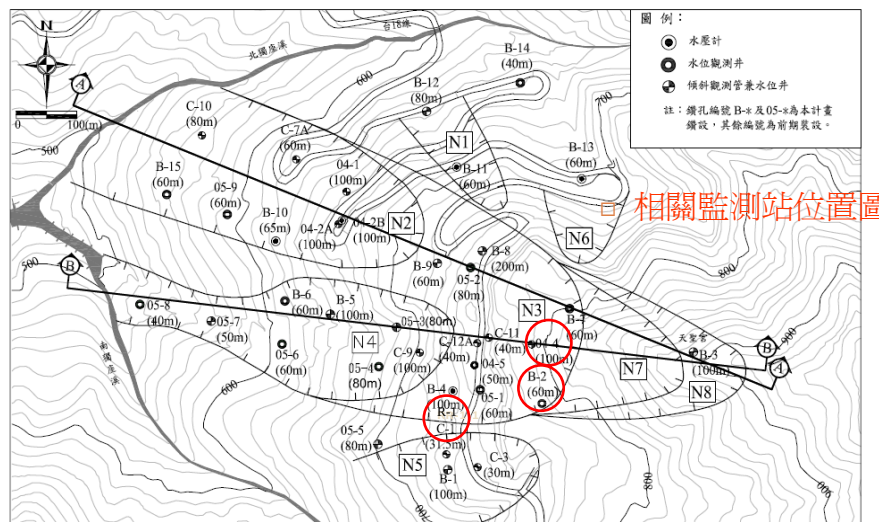
現場地下水流數值模型

- 1. 場址地下水流模型選定
 - 五灣仔地區降雨、地下水位與地滑相關性
 - 相關地下水流模型簡介
 - 場址地下水流模型選定
- 2. 數值模式之建立
 - 控制方程式、邊界條件與初始條件
 - 離散方程式
- 3. 模式驗證與初步測試
 - 模式驗證
 - 模式初步測試

五彎仔地區降雨、地下水位與地滑相關性



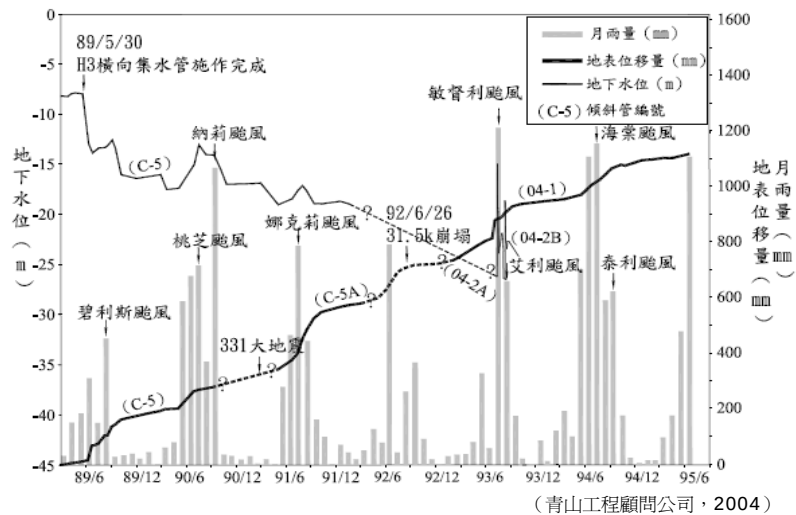
(青山工程顧問公司, 2004)



相關監測站位置圖

(青山工程顧問公司, 2004)

四彎處附近



地下水流數值模擬

- 預測暴雨可能產生之地下水位上升
- 根據以往地滑發生與地下水位之監測資料或配合邊坡穩定分析可評估降雨可能引發之地滑

相關地下水流模型簡介

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(multiaquifer)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。

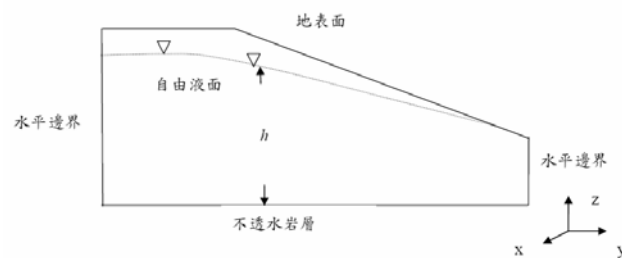
滿足都布假設之非拘限地下水流模型

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

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)。

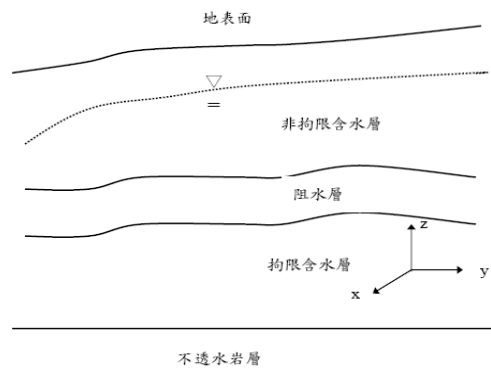
S_y 為 比出水係數(specific yield)。



多水層地下水流模型

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

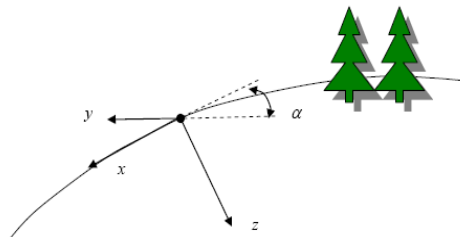
式中， h 為水頭或水位， K_x 、 K_y 與 K_z 分別表示 x 、 y 與 z 方向之水力傳導係數， S_s 為比儲水係數(specific storage)。



非飽和地下水流模型

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

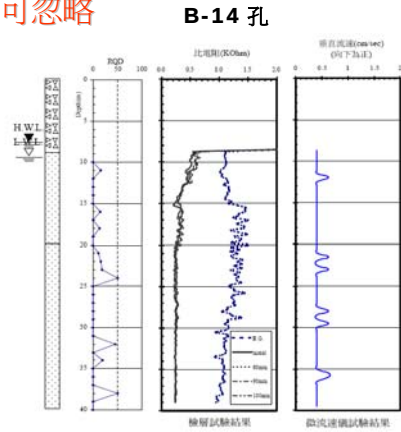
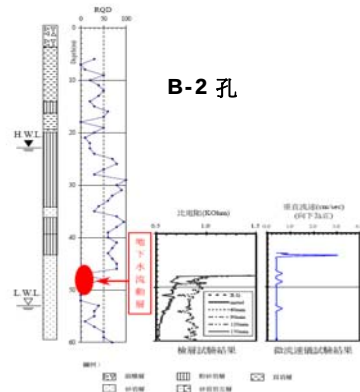
式中， ψ 為壓力水頭(pressure head)， α 為坡地之角度(slope angle)， K_L 與 K_z 分別表示與沿坡面與垂直坡面方之水力傳導係數(hydraulic conductivity)， θ 為含水量(water content)。



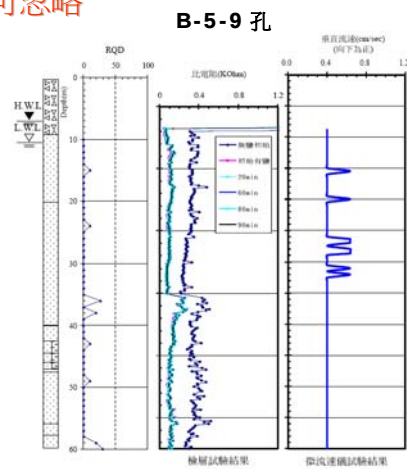
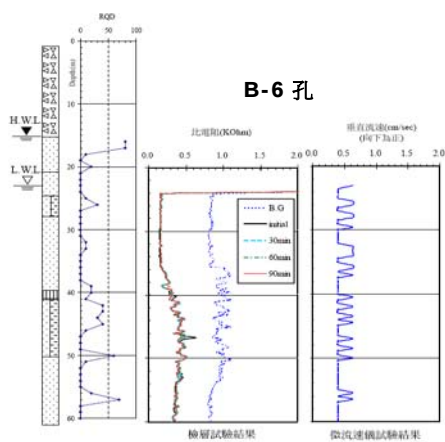
場址地下水流模型選定- (水流流況)

- 根據地下水檢層法與微流速儀量測法之研究成果(詳見青山工程顧問公司，民國95年)

垂直流不可忽略

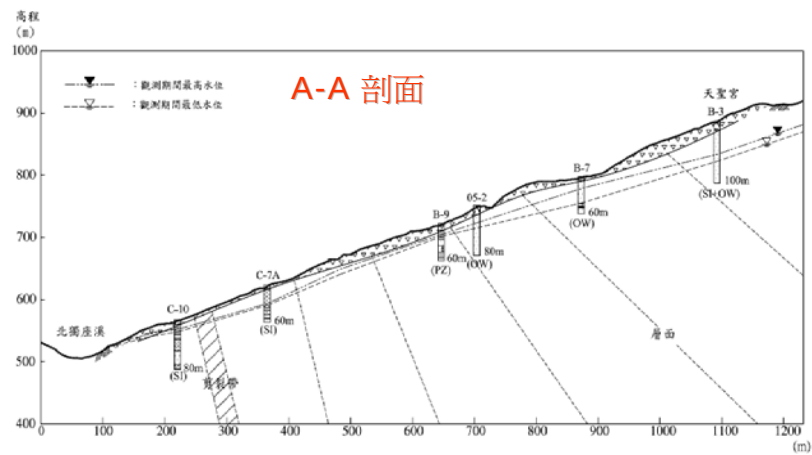


垂直流不可忽略

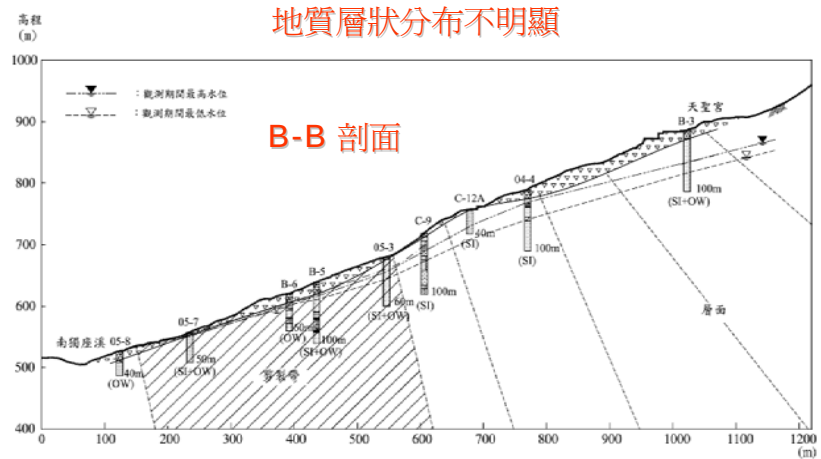


場址地下水流模型選定- (地質鑽探資料)

地質層狀分布不明顯



地質層狀分布不明顯



選定採用非飽和地下水流模型

數值模式之建立- (控制方程式、邊界條件與初始條件)

壓力水頭邊界條件

$$\psi(\Omega, t) = \psi'$$

ψ' 表示壓力水頭值，可為時間之函數， Ω 代表邊界之座標。

流量邊界條件

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

$\bar{n}$ 表示邊界之單位方向向量， f 為流出邊界之水流通量

初始條件

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

$\psi^0(x, z)$ 表示初始時之壓力水頭分佈函數

數值模式之建立- (離散方程式)

利用兩步驟有限差分Crank-Nicolson 法(Hill et al. 1989, Hsu et al. 2002, Tsai et al. 2007)

步驟一

$$\begin{aligned} C_{i,j}^n \frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} &= \frac{K_{i+1/2,j}^n}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i+1,j}^* - \psi_{i,j}^*}{\Delta x} + \frac{\psi_{i+1,j}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta x} \right) - \frac{K_{i-1/2,j}^n}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i-1,j}^*}{\Delta x} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) \\ &+ \frac{K_{i,j+1/2}^n}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j+1}^* - \psi_{i,j}^*}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j+1}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta z} \right) - \frac{K_{i,j-1/2}^n}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i,j-1}^*}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i,j-1}^n}{\Delta z} \right) \\ &+ \frac{K_{i,j}^n - K_{i,j-1}^n}{\Delta z} \end{aligned} \quad (4-10)$$

$$\begin{aligned} K_{i+1/2,j}^n &= (K_{i,j}^n + K_{i+1,j}^n)/2, \quad K_{i-1/2,j}^n = (K_{i,j}^n + K_{i-1,j}^n)/2, \quad K_{i,j+1/2}^n = (K_{i,j}^n + K_{i,j+1}^n)/2, \\ K_{i,j-1/2}^n &= (K_{i,j}^n + K_{i,j-1}^n)/2 \end{aligned}$$

步驟二

$$\begin{aligned}
 C_{i,j}^{n+1/2} \frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} = & \frac{K_{i+1/2,j}^{n+1/2}}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i+1,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\psi_{i+1,j}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta x} \right) - \frac{K_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) \\
 & + \frac{K_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j+1}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j+1}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta z} \right) - \frac{K_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i,j-1}^n}{\Delta z} \right) \\
 & + \frac{K_{i,j}^{n+1/2} - K_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta z} \quad (4-11)
 \end{aligned}$$

式中， $C_{i,j}^{n+1/2} = (C_{i,j}^n + C_{i,j}^*)/2$ ， $K_{i+1/2,j}^{n+1/2} = (K_{i,j}^n + K_{i+1,j}^n + K_{i,j}^* + K_{i+1,j}^*)/4$ ，
 $K_{i-1/2,j}^{n+1/2} = (K_{i,j}^n + K_{i-1,j}^n + K_{i,j}^* + K_{i-1,j}^*)/4$ ， $K_{i,j+1/2}^{n+1/2} = (K_{i,j}^n + K_{i,j+1}^n + K_{i,j}^* + K_{i,j+1}^*)/4$ ，
 $K_{i,j-1/2}^{n+1/2} = (K_{i,j}^n + K_{i,j-1}^n + K_{i,j}^* + K_{i,j-1}^*)/4$ ， $K_{i,j}^{n+1/2} = (K_{i,j}^n + K_{i,j}^*)/2$ ，
 $K_{i,j-1}^{n+1/2} = (K_{i,j-1}^n + K_{i,j-1}^*)/2$ 。

模式驗證與初步測試- (模式驗證)

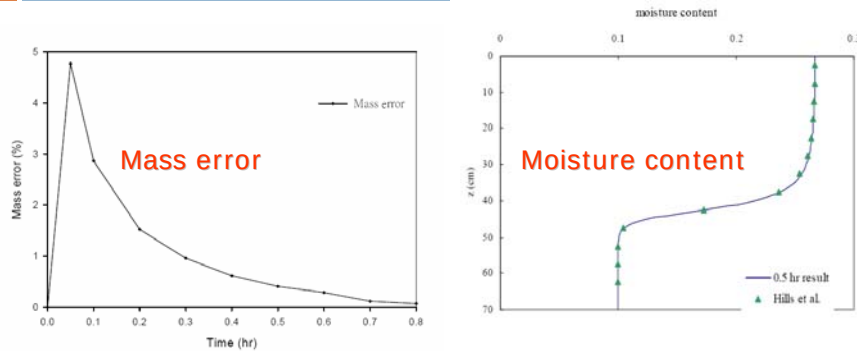
利用一維垂向入滲案例驗證模式正確性， $\alpha=0$ ，且土壤厚度
70cm， $q=13.69\text{cm/hr}$
 土層 $\psi=-61.5\text{cm}$ 均勻入滲量為，土層底部為固定水頭
 ，土壤保水曲線採用Haverkamp et al. (1977)

$$\theta(\psi) = \frac{a(\theta_s - \theta_r)}{a + |\psi|^b} + \theta_r$$

$$K(\psi) = K_s \frac{A}{A + |\psi|^c}$$

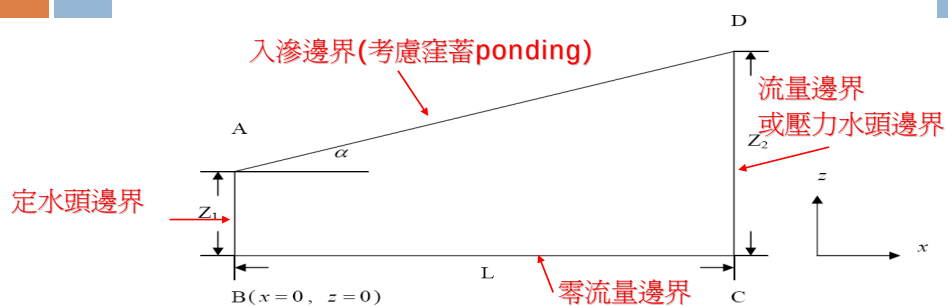
其中，水力傳導係數 $K_s=34\text{ cm/hr}$ ，殘餘體積含水量 $\theta_r=0.075$ ，飽和體積含水量
 $\theta_s=0.287$ ，參數 $A=1.175 \times 10^6$ ， $a=1.611 \times 10^6$ ， $b=3.96$ ， $c=4.74$ 。

模式驗證與初步測試- (模式驗證)



$$\text{Mass error}(\%) = \frac{\text{True mass added} - \text{Calculated mass added}}{\text{True mass added}} \times 100$$

模式驗證與初步測試- (模式初步測試)



假設 $Z_1=10\text{m}$, $Z_2=50\text{m}$, $L=100\text{m}$, AB邊界之河川水位為10m, 不考慮AD邊界之入滲量, CD邊界初始水位面為30m, 初始時為穩態滿足靜水壓分佈, 兩天內地下水面隨時間線性上升至 $z = 40\text{m}$ 並保持不變, 且 Van Genuchten $\theta_s=0.47$, $\theta_r=0.17$, $K_s=0.00001\text{m/sec}$, $\zeta=0.011$, $N=2.2$

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

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

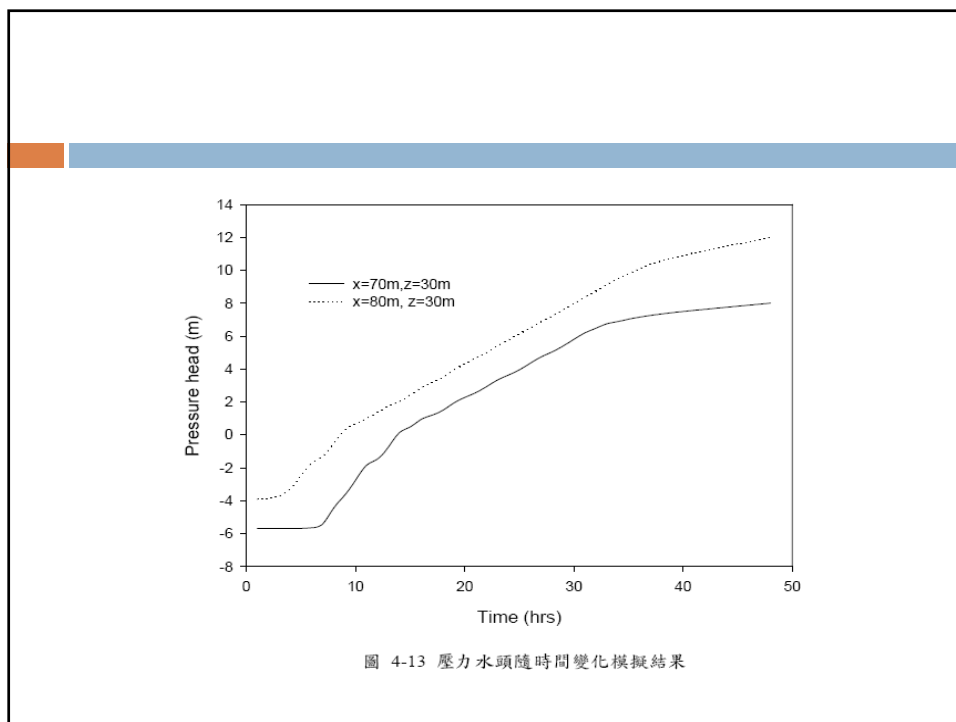
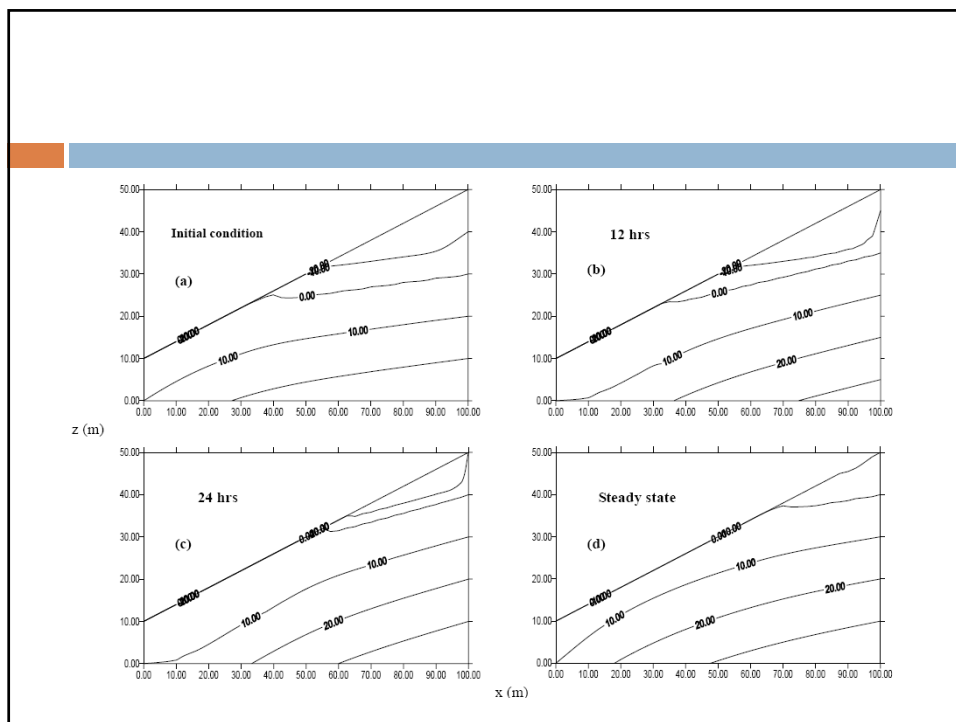


圖 4-13 壓力水頭隨時間變化模擬結果

結論

- C-11傾斜觀測管之數據顯示，在地表下36m處有明顯滑動面存在，而滑動量約為6mm。
- 裝設20組FBG-SD感測器於NCTU-01孔位；5組光纖光柵水壓計於NCTU-02孔位及10組光纖光柵水壓計於NCTU-03孔位中，且完成初始讀數之量測。
- 光纖拉伸式感測器實驗室九米傾斜觀測管，進行室內測試。有待改進。
- 選定採用坡地非飽和地下水流模型，模擬五彎仔地區之地下水流動情況
- 完成五彎仔地區地下水流數值計算模式之建立，利用一維垂向入滲案例驗證模式之正確性，並進行模式之初步應用測試

建議

- 利用具有解析解之二維飽和與非飽和地下水流案例，驗證模式之正確性
- FBG水壓與傾斜儀自動紀錄
- 利用歷年降雨及地下水位觀測資料，進行五彎仔地區地下水流模擬之率定與驗證
- 配合光纖監測所得之壓力水頭分佈結果，進行五彎仔地區之地下水流模擬與地層移動機制之建立

