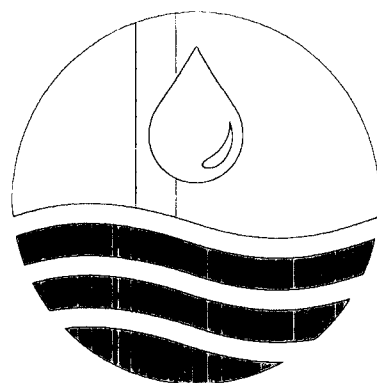




MOEAWRA0980054

義興電廠邊坡分層地下水壓自動化監測應用之探討

A feasibility study on the automated distributive pore water pressure monitoring at the Yi-Shin power plant slope



主辦機關：經濟部水利署
執行單位：國立交通大學

中華民國 九十八 年 十二 月



MOEAWRA0980054

義興電廠邊坡分層地下水壓自動化監測應用之探討

A feasibility study on the automated distributive pore water pressure monitoring at the Yi-Shin power plant slope



主辦機關：經濟部水利署

執行單位：國立交通大學

中華民國九十八年十二月

摘 要

水庫邊坡常用之安全監測系統，包括傾斜儀、水位計與水壓計等，大多以人工方式於現場紀錄讀數，此種量測方式不僅費時，且在雨季或颱風時，監測人員非常危險，然而這些情況下卻是最需要監測的時候，故有必要對邊坡進行儀器自動化之研究。近年來監測系統之自動化備受重視，過去的研究計畫所研發之自動化監測系統(如光纖水壓計)已獲初步成果，本計畫進一步建立應用於水庫邊坡之即時安全監測系統，並進行現地安裝測試，達到自動化擷取監測資料之目標。

本計畫以義興電廠附近邊坡為監測標的，該電廠為石門水庫上游重要之水利工程設施，民國 75 年 3 月 23 日前池邊坡曾發生地層滑動事件，且造成重大損失，故為確保電廠與輸水壓力鋼管之安全，目前已於附近邊坡上裝設有傾斜管，並採人工量測方式，過去量測結果顯示編號 S6 傾斜管變位仍持續增加中，另外過去的研究計畫曾於 96 年在 S6 孔下邊坡 1 米處裝設光纖光柵偏斜儀並證明其具有自動化的可行性。

所以本計畫整合光纖感測、地電阻影像探測等技術應用於該電廠邊坡，進行分層地下水壓自動化監測系統現場安裝測試及邊坡穩定分析，並評估現有邊坡穩定方法與提供改進方向，提供未來現地邊坡穩定的設計參考。本計畫於現地鑽設 2 孔，每孔深度 50 米，安裝 20 組

光纖光柵水壓計，並架設自動化量測設備。且於現地進行 141 米地電阻量測，結果顯示當時地下水位約位於地表下 35~37 米處，並完成 8 組室內土壤物性與三軸實驗與現地傍壓儀實驗。最後綜合上述各項資料的結果提出適用於邊坡分層地下水壓量測的邊坡穩定分析的方法。水庫設施自動化監測乃各國安全管理趨勢，尤其颱風、地震等特殊天候發生時，自動化監測系統能及時反應現地狀況，故本計畫執行之成果，未來將可以考量應用至其他水庫，以提升水庫安全管理效能。

Abstract

Safety monitoring systems for the earth slopes around reservoirs often include inclinometers, water level observation wells and piezometers. These instruments have traditionally be read manually. This process is time consuming and can be dangerous during rainy or typhoon seasons. However, this is also the time when the instrument readings are desperately needed. Taking instrument readings automatically can be very desirable. Progress in fiber optic based automated ground monitoring system (e.g., fiber optic piezometers) has been made in the past few years. The main objective of this research project is to establish a real time automated monitoring system for earth slopes surrounding a reservoir and implement it in the field.

The slope of Yi-Shin power plant was the subject of this research project. The power plant is an important hydropower facility in the upstream of Shi-Men reservoir. Ground movement occurred in the storage basin area on March 23, 1986 and caused significant damage. To assure safety of the pressure pipeline of the power plant, many inclinometer casings have been installed. Readings have been taken by hand. Record shows that ground displacement in borehole S6 area is increasing. A profile of optic fiber Brag grating (FBG) ground displacement monitoring system has been installed at 1m down slope from S6 in 2007 as part of a prior research project. The research shows that the FBG system is a feasible means as an automated ground monitoring system.

This project combines fiber optic sensors and ground resistivity imaging

technique to monitor the slope of the power plant on an automated basis. The measurements intend to ascertain the pore water pressure distribution within the slope and be used in the slope stability analysis. The field readings and analyses can be used as references for the design of future slope stabilization schemes. In this projects 2 holes of 50m in depth were drilled. Twenty FBG pore pressure sensors were installed in each of the two boreholes. A total of 141m of ground resistivity imaging measurements were made. Results show that the ground water table was at 35-36m below ground surface. Eight sets of physical property and triaxial tests on soil samples recovered from the boreholes have been conducted. An overall slope stability evaluation was made based on the field pore pressure profile readings and analysis using the field/ laboratory data. The use of automated monitoring systems is a general trend internationally. They are especially important in revealing the status of a slope during typhoon or following a strong earthquake. The success of application in this project can be used as a reference in enhancing safety management for other reservoir s.

結論與建議

一、結 論

本計畫今年於規定時間內完成合約內預定工作項目與目標，將結論分項說明如下：

1. 本計畫已經收集義興電廠附近邊坡地質與監測資料，藉由所收集的資料選定仍具有潛變趨勢的義興電廠壓力鋼管右側邊坡為光纖水壓計安裝地點。
2. 本計畫已經完成現地鑽孔 2 孔，每一孔鑽孔深度 50 米，總鑽孔深度為 100 米，高於合約所要求的 50 米鑽孔深度。新鑽孔編號分別為 NCTU-01 與 NCTU-02，其中 NCTU-01 位於北水局原有編號 S6 鑽孔附近且 NCTU-02 位於北水局原有編號 S7 鑽孔附近。
3. 本計畫已經完成將 20 組光纖光柵水壓計的室內測試、製作與封裝，並將其安裝於 NCTU-01 與 NCTU-02 鑽孔內進行水壓量測，其安裝數量高於合約要求的 15 組光纖光柵水壓計。
4. 本計畫已經於現地佈設光纜與架設光纖光柵自動化監測儀器，可進行光纖光柵水壓計自動化與即時量測。
5. 本計畫選擇以 S7 號孔附近為施測起始點橫向穿過壓力鋼管施作地電阻影像剖面探測，並已經完成 141 米地電阻施測，高於合約要求 130 米的量測長度，並推估當日地下水位置約為地表下 35~37

米處。

6. 本計畫已經完成合約內 8 組粒徑分佈、比重、含水量與三軸軸向壓縮實驗。
7. 本計畫已經完成非預定工作項目內的光纖光柵傍壓儀的設計、封裝、室內測試與現地測試，並於編號 NCTU-01 號孔處進行 1 組傍壓儀實驗。
8. 地下水壓的量測結果顯示有類似棲止水位之現象。
9. 動態水壓分佈監測配合邊坡穩定分析可提供邊坡潛變之機制，但是其正確性需進一步確認。
10. 本計畫已經完成使用 SEEP/W 模擬地下水壓的變化，並將現地光纖光柵水壓計的量測結果帶入 SEEP/W 中進行模擬參數的律定，並將律定後的參數帶入 SLOPE/W 中進行邊坡穩定分析，分析後其邊坡穩定安全係數為 1.33。因目前現場監測資料有限，且還未考慮降雨所造成之入滲量，故所模擬的邊坡穩定安全係數為現場乾燥狀況，若後續加入降雨入滲量並配合長期現場水壓監測資料，其邊坡安全係數可能會降低。
11. 傳統邊坡穩定分析方法中，因無法準確量測現地地層水壓變化，故採用總應力分析方法，並假設一地下水位面來進行邊坡穩定分析，因此，所得到的分析結果無法與現地相符合，而本計畫在邊

坡穩定方法之改進為充分利用 NCTU-01 及 NCTU-02 水壓觀測井，可監測地層中每一深度水壓變化，因地層中可能有棲止水層存在；暴雨時，現場地層水壓並非呈淨水壓分佈，由水壓監測資料進行回饋分析，得到與現場一致之土壤參數，並輸入地層內水壓資料至邊坡穩定分析軟體 SLOPE/W 進行模擬，其分析結果較能反映實際狀況。

二、建議

1. 本計畫已經成功安裝光纖光柵水壓計於義興電廠附近邊坡，並已經開發出自動化監測的顯示與可設立預警值的操作介面。而預警值的建立需要長時間與大量的數據收集與判讀，本計畫結束後，將進行相關量測設備的移交，建議由相關主管機關持續進行設備維護、數據採集與分析，交通大學團隊將協助相關主管機關量測至明年 4 月份。
2. 本計畫已經初步提出配合現地分佈式水壓的邊坡穩定分析方法，建議日後相關主關機關於取得不同時間點的監測數據後可進一步對邊坡穩定進行分析。
3. 本計畫與過去的相關經驗(阿里山監測)已經證明了現地分佈式水壓監測的功能與成效。另外光纖光柵具有可單一傳輸線上多點、長距離訊號傳輸、不受水與電磁波干擾的優點，可應用於分佈式

現地水壓與分佈式鑽孔內地層側向位移(光纖光柵測傾儀)的自動化量測，將有助於改善颱風或豪雨來臨時無法以人工量測的缺點，進一步提升現地監測的效果與實際達到預警的功能，建議日後可以對於有潛在滑動趨勢的邊坡進行類似的監測與分析方法。

目 錄

摘 要.....	I
英文摘要.....	III
結論與建議.....	V
目 錄.....	IX
表 目 錄.....	1
圖 目 錄.....	2
一、前 言.....	1
1.1 計畫緣起及目的.....	1
1.2 計畫工作項目.....	2
二、光纖光柵感測器.....	4
2.1 光纖光柵原理簡述.....	4
2.2 光纖光柵傾斜/加速度感測.....	7
2.3 FBG-I/A 加速度感測原理.....	10
2.4 FBG-I/A 傾斜感測原理.....	12
2.5 FBG 水壓計.....	17
2.6 水壓計安裝方法說明.....	58
2.7 光纖光柵自動化擷取系統整合.....	72
2.8 現地水壓計安裝位置與量測結果.....	80

2.9	傍壓儀現地試驗	104
三、	地電阻影像剖面法	125
3.1	探測原理	125
3.2	探測儀器	126
3.3	資料處理與分析	127
3.4	判釋結果說明	128
3.5	隔時監測(time lapse)	130
3.6	現地地電阻施做位置	131
3.7	Wenner 與 Pole-Pole 介紹與比較施測方法	135
3.8	現地環境與施測作業	137
3.9	試驗結果與分析	139
四、	室內土壤實驗與邊坡穩定分析	143
4.1	現場鑽探位置與試驗項目說明	143
4.2	土壤三軸實驗說明	143
4.3	現場土壤物理性質與三軸試驗結果	147
4.4	義興電廠邊坡穩定分析	148
4.5	數值模擬結果	149
五、	參考文獻.....	157
附錄一	光纖光柵水壓計標定結果	161

附錄二	土壤室內實驗結果	181
附錄三	鑽探照片與記錄	191
附錄四	未來計畫	195
附錄五	光纖光柵解讀儀器使用手冊	201
附錄六	工作執行計畫書審查意見及辦理情形	216
附錄七	期中報告審查意見及辦理情形	224
附錄八	期末報告審查意見及辦理情形	240

表 目 錄

表 2.1	黏貼膠特性說明	48
表 2.2	傳統水壓計與新發展 FBG 水壓計之初步比較	57
表 2.3	現地光纖光柵水壓計安裝深度與波長對照表	89
表 3.1	各種不同地層材料之電阻率概值	131
表 3.2	義興崩塌地地電阻影像剖面法測線配置表	133
表 3.3	各施測電極排列方式綜合比較	136
表 3.4	地電阻測線施測參數	138
表 4.1	靜態三軸試驗量測系統規格表	146
表 4.2	義興崩塌地各地層分區之材料參數	152

圖 目 錄

圖 1.1	工作流程圖	3
圖 2.1	光纖光柵反射原理示意圖	6
圖 2.2	光纖光柵感測機制示意圖	7
圖 2.3	FBG accelerometer 側視圖	8
圖 2.4	FBG inclinometer 剖面圖	9
圖 2.5	FBG-I/A 加速度感測示意圖	12
圖 2.6	FBG-I/A 傾斜感測示意圖	14
圖 2.7	FBG-I/A 實體圖	16
圖 2.8	FBG-I/A 傾斜標定結果	16
圖 2.9	使用薄膜反射光強度解調壓力	18
圖 2.10	FBG 針孔式壓力計	18
圖 2.11	裸光纖光柵壓力感測器	19
圖 2.12	以聚合物為外襯之光纖光柵壓力感測器	20
圖 2.13	球狀玻璃為外殼之光纖光柵壓力感測器	21
圖 2.14	以聚合物為內襯之光纖光柵壓力感測器	22
圖 2.15	側壓式壓力感測計	23
圖 2.16	不同聚合物封裝之光纖光柵壓力感測器	24
圖 2.17	微型光纖光柵壓力感測器	25
圖 2.18	巴登管式光柵壓力感測器	27
圖 2.19	雙光纖光柵懸臂式壓力感測器	27
圖 2.20	CFBG 感測器裝置示意圖	28
圖 2.21	CFBG 感測器的反射頻譜圖	29
圖 2.22	Fabry-Perot 壓力感測器示意圖	30
圖 2.23	光纖光柵內連續遞增之漸變應變	31
圖 2.24	連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改變 ...	31
圖 2.25	FBG 波長飄移分析示意圖	32
圖 2.26	D/C-FBG 感測器之設計示意圖	33

圖 2.27	FBG 黏貼方法示意圖.....	35
圖 2.28	D/C-FBG 壓力計實體.....	38
圖 2.29	差異設計壓力感測器在三種溫度下之標定結果.....	39
圖 2.30	等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖.....	40
圖 2.31	等週期波長式 FBG 水壓計實體照片.....	41
圖 2.32	等週期波長式 FBG 水壓計標定結果.....	41
圖 2.33	等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖.....	42
圖 2.34	等週期光纖光柵水壓計實體圖.....	43
圖 2.35	等週期光纖光柵水壓計率定與理論分析比較圖.....	43
圖 2.36	光纖光柵溫度棒.....	45
圖 2.37	光柵水壓計及溫度光柵率定圖.....	45
圖 2.38	黏貼膠與鋼筋介面之黏著力測試過程圖.....	46
圖 2.39	測試試體於恆濕恆溫相箱示意圖.....	49
圖 2.40	黏貼膠受熱時 FBG 之讀數變化圖.....	49
圖 2.41	三種黏貼膠於鋼模片之黏著力測試.....	50
圖 2.42	A 膠黏著力測試結果圖.....	51
圖 2.43	B 膠黏著力測試結果圖.....	51
圖 2.44	C 膠黏著力測試結果圖.....	52
圖 2.45	等週期式 FBG 水壓計置於裝滿水之容器示意圖.....	53
圖 2.46	恆濕恆溫加熱過程示意圖.....	54
圖 2.47	等週期式 FBG 水壓計老化試驗結果圖.....	55
圖 2.48	等週期式 FBG 水壓計潛變試驗結果圖.....	55
圖 2.49	等週期式 FBG 水壓計潛變試驗過程示意圖.....	56
圖 2.50	等週期光纖光柵水壓計於具有篩孔之 PVC 管配置圖.....	59
圖 2.51	感測單元實體圖.....	60
圖 2.52	等週期 FBG 水壓計裝置改良示意圖.....	60
圖 2.53	阻隔層測試架構圖.....	62
圖 2.54	PVC 管壓力封層測試實體.....	62
圖 2.55	PVC 管內壓力隨時間變化圖.....	63

圖 2.56	大量串接 FBG 水壓計與傳統水位管之比較	64
圖 2.57	光纖光柵水壓計封裝後實體圖	67
圖 2.58	光纖光柵水壓計現場安裝圖	68
圖 2.59	台 18 線五彎仔地區於莫拉克颱風期間之水壓監測井水壓歷 時變化	69
圖 2.60(a)	台 18 線五彎仔地區於莫拉克颱風期間之水壓監測井水壓 歷時變化	70
圖 2.60(b)	台 18 線五彎仔地區於莫拉克颱風期間降雨量資料	71
圖 2.61	光纖光柵解讀系統之架構示意圖	73
圖 2.62	光纖光柵擷取系統組裝完成圖	74
圖 2.63(a)	全光纖監測畫面展示介面	75
圖 2.63(b)	自動化儀器參數設定介面	76
圖 2.63(c)	光纖水壓計歷時展示介面	77
圖 2.63(d)	光纖測傾儀位移展示介面	78
圖 2.63(e)	警戒值設定與簡訊發送設定介面	79
圖 2.64	義興電廠崩塌地遙測影像圖	83
圖 2.65	義興地區區域地質圖	84
圖 2.66	義興崩塌地鑽孔位置圖	85
圖 2.67	義興崩塌地滑動演變示意圖	86
圖 2.68	義興電廠邊坡水壓計安裝位置示意圖	87
圖 2.69(a)	現地光纖光柵水壓計讀數檢查	90
圖 2.69(b)	現地 5 米 PVC 管組裝	91
圖 2.69(c)	現地 5 米內拉釘連接	92
圖 2.69(d)	以三角架吊起 5 米長光纖光柵水壓計	93
圖 2.69(e)	將 5 米長光纖光柵水壓計管放入鑽孔內	94
圖 2.69(f)	每組 5 米長水壓計間拉釘連接	95
圖 2.69(g)	光纖接頭連接	96
圖 2.69(h)	PVC 管開口封膠保護	97
圖 2.69(i)	水壓管回填封層	98

圖 2.69(j)	水壓管封層完成.....	99
圖 2.70	NCTU-01 水壓計波長變化圖	100
圖 2.71	NCTU-01 水壓計量測結果	101
圖 2.72	NCTU-02 水壓計波長變化圖	102
圖 2.73	NCTU-02 水壓計量測結果	103
圖 2.74	變形量測器標定結果圖	106
圖 2.75	壓力計標定結果圖	107
圖 2.76	薄膜勁度標定結果圖	108
圖 2.77	系統勁度標定結果圖	109
圖 2.78	傍壓儀測試結果	111
圖 2.79	義興電廠 PMT 現地實驗結果	112
圖 2.80	傍壓之土壤分類圖	115
圖 2.81	不同傍壓儀水平應力基準點示意圖	117
圖 2.82	利用左端法求取水平應力示意圖	117
圖 2.83	利用重覆繪圖法求取水平應力示意圖	119
圖 2.84	利用潛變曲線法求取水平應力示意圖	119
圖 2.85	砂土在圓柱體擴張情形下之應力與應變關係	123
圖 2.86	砂土受壓之膨脹行為	124
圖 3.1	地電阻影像剖面法探測電極排列方式示意圖	126
圖 3.2	地電阻探測儀器	127
圖 3.3	義興崩塌地地電阻影像剖面法測線配置圖	133
圖 3.4	RIP-Y-01 探測結果解釋圖	134
圖 3.5	地電阻測線位置	137
圖 3.6	現場環境與施測情形	139
圖 3.7	測線地電阻剖面(Wenner)	141
圖 3.8	測線地電阻剖面(Pole-Pole)	142
圖 4.1	靜態三軸試驗設備示意圖	146
圖 4.2	數值模擬分析流程架構圖	152
圖 4.3	傳統邊坡穩定分析流程架構圖	153

圖 4.4	SEEP/W 網格及邊界條件設定	154
圖 4.5	SEEP/W 模擬地層內部水壓變化	155
圖 4.6	SLOPE/W 邊坡穩定結果	156

一、前言

1.1 計畫緣起及目的

水庫邊坡常用之安全監測系統，包括傾斜儀、水位計與水壓計等，多以人工方式於現場紀錄讀數，不僅費時且雨季時可能無法進行有礙設施安全監測目的。近年來監測系統之自動化備受重視，過去的研究計畫所研發之自動化監測系統(如光纖水壓計)已獲初步成果，本計畫進一步建立應用於水庫邊坡之即時安全監測系統，並進行現地安裝測試，以達自動化擷取監測資料之目標。

本計畫以義興電廠附近邊坡為標的，該電廠為石門水庫上游重要之水利工程設施，民國 75 年 3 月 23 日前池邊坡曾發生地層滑動事件，為確保電廠與輸水壓力鋼管之安全，目前已裝設有 14 支傾斜管 (S1~S14)，採人工量測方式，依據量測結果顯示 S6 傾斜管變位仍持續微量增加中。過去研究計畫曾於 96 年於 S6 孔下邊坡 1 米處裝設光纖光柵傾斜儀，並驗證具有自動化可行性，本計畫將整合光纖感測、地電阻影像探測等技術，應用於該電廠邊坡，進行分層地下水壓自動化監測系統現場安裝測試及邊坡穩定分析，評估現有邊坡穩定方法與提供改進方向，並提供未來現地邊坡穩定的設計參考。此外，水庫設施自動化監測乃各國安全管理趨勢，尤其颱風、地震等特殊天候發生時，自動化監測系統能及時反應現地狀況，故本計畫執行之成

果，將可以考量應用至其他水庫，以提升水庫安全管理效能。

1.2 計畫工作項目

本計畫年度工作項目分述如下：

1. 現地資料收集與整理：義興電廠邊坡現場勘察，地質資料收集、分析與整理。
2. 地電阻影像探測與資料分析：現地進行二維地電阻剖面影像探測及量測資料分析判釋，總測線長度至少 130m。
3. 鑽孔與取樣分析：依據現地勘察與資料分析結果，決定新鑽孔之孔數、位置與鑽孔深度(總鑽孔深度至少 50m)，鑽孔取樣，並進行岩心判釋與實驗室內物理與力學實驗(8 組基本物理試驗，包括粒徑分佈、比重、含水量等，及 8 組軸向壓縮試驗)。
4. 分層水壓計設計安裝：於新鑽孔內設計安裝至少 15 個光纖光柵 (FBG)水壓計，以監測不同含水層之水壓變化，並佈設光纜以連接至機房。
5. 自動化量測與監測系統界面開發：監測機房內安裝 FBG 自動化讀取與分析系統，進行 FBG 水壓計即時量測、結果分析，及監測系統界面開發。
6. 邊坡穩定分析：依據地電阻影像探測及水壓量測結果進行邊坡穩

定分析，評估現有邊坡穩定方法與提改進方向。

其工作流程如圖 1.1 所示。

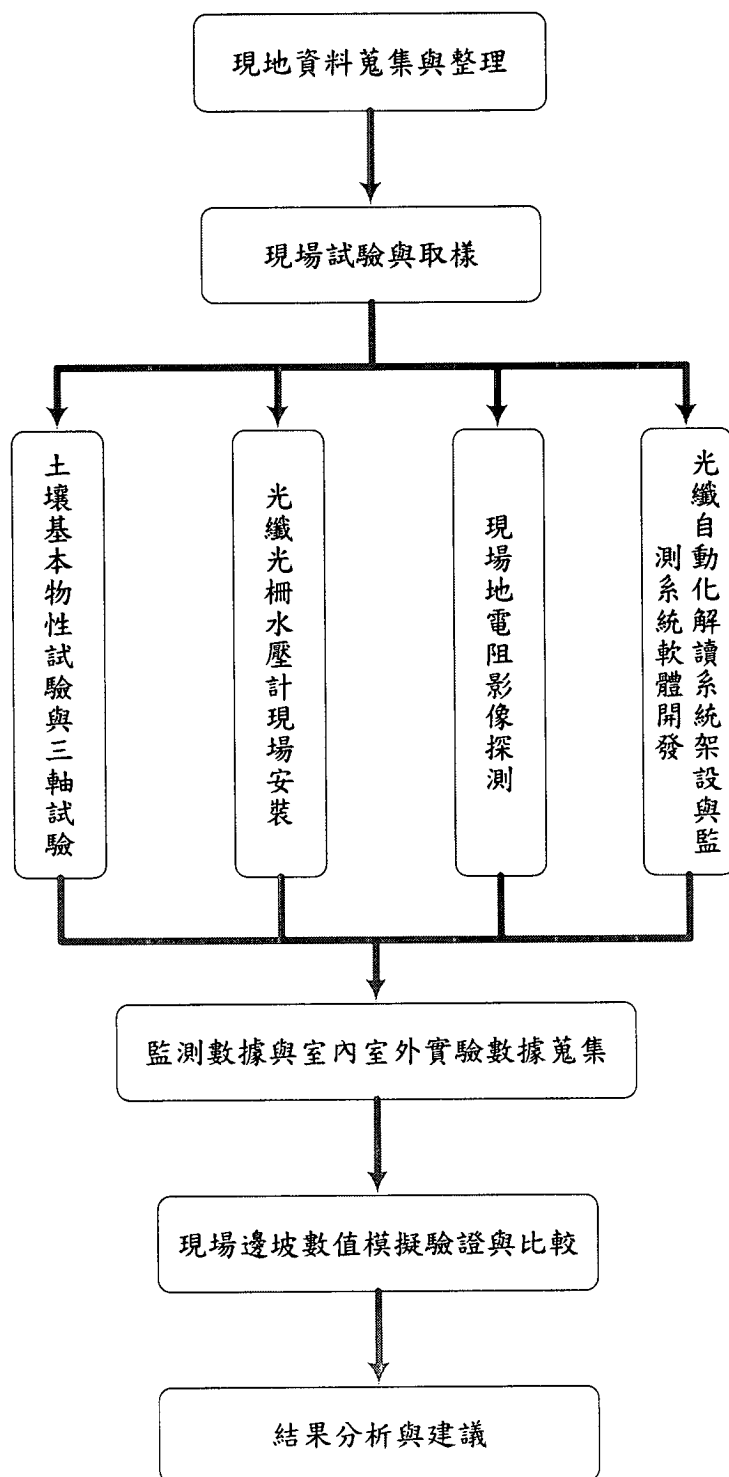


圖 1.1 工作流程圖

二、光纖光柵感測器

本章針對計畫中將使用之光纖感測技術原理與本計畫使用之光纖感測器做一敘述與說明。

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 Λ 的明暗條紋，此稱之為光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)。當一寬頻光耦合進入此一光纖時，除了滿足布拉格條件(Bragg condition)的特定波長，其餘波長都會因為相位差而相消(Hill, 2005 ; Kersey, 1992 ; Meltz, 1989 ; Measures, 2001 ; Othons, 1999 ; Rao, 1998 ; 李瑞庭, 2005)。

其布拉格反射波長 λ_B 為

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

其中：

n = 光纖纖心的有效折射率

Λ = 折射率週期性改變的間距

圖 2.1(Ho et al., 2005) 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(簡旭君，2003)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 Λ 的改變增加量為 $\Delta\Lambda$ ，帶入(2-1)式可以得到

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

根據應變的定義

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

得到

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

因此

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

當外力施加產生應變後，不只是反射回來的 λ_B 會改變，光纖的有效折射率 n 也會同時改變。因此上式可修正為

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

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

當光纖光柵受到溫度變化時，波長飄移量可由下式表示

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

其中：

ξ = 光纖的熱光係數 (Thermal Optical Coefficient)

α = 光纖的熱膨脹係數 (Thermal Expansion Coefficient)

K_T = 溫度敏感係數

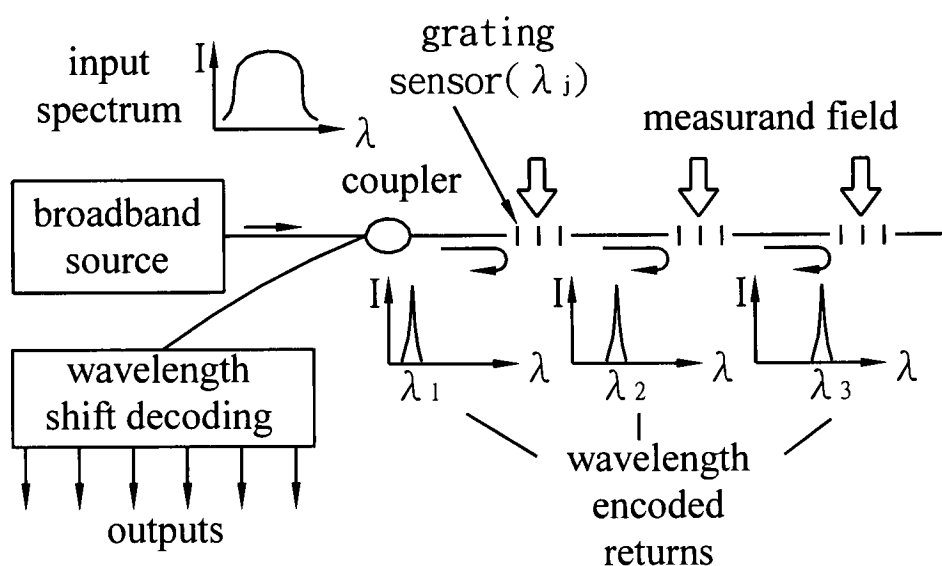


圖 2.1 光纖光柵反射原理示意圖

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 ξ 在 150°C 約為 $6.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ， 450°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°C 的溫度變化約使得布拉格飄移約 $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{nm}$ 。

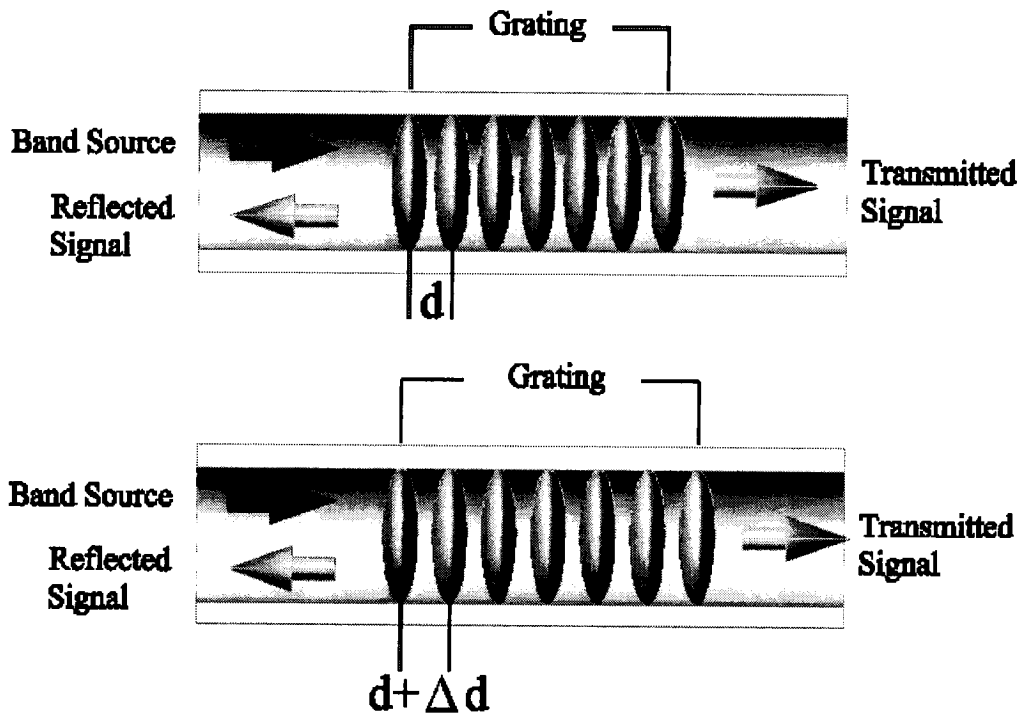


圖 2.2 光纖光柵感測機制示意圖

2.2 光纖光柵傾斜/加速度感測

本計畫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 2.3 與圖 2.4 所示(黃安斌、何彥德, 2008), 其加速度量測單元是由質量重塊與軸承桿件連接而形成, 質量重塊將分別黏著於左右之兩個光纖光柵(FBG1 與 FBG2)拉緊, 兩個 FBG 訊號透過光纖傳遞。感測元件固定於上蓋。透過軸承左右偏移, 重塊與光纖光柵所形成之組合體以軸承為軸心旋轉, 並產生側向位移量。

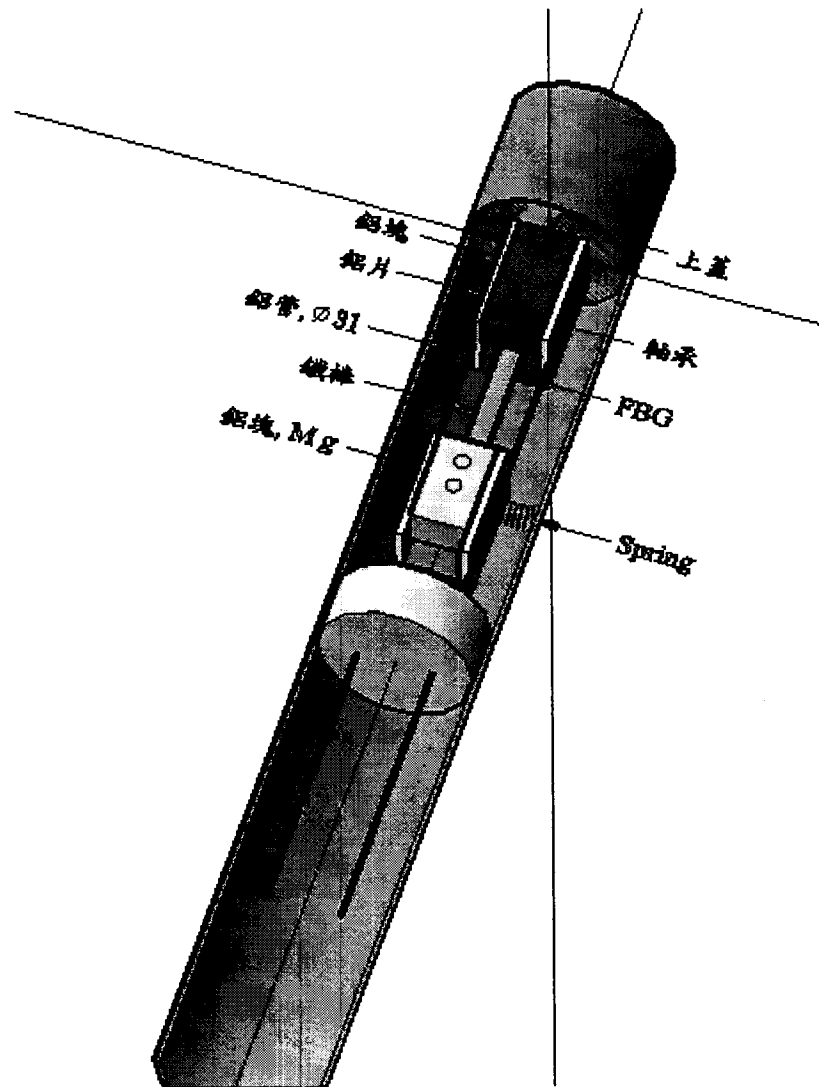


圖 2.3 FBG accelerometer 側視圖

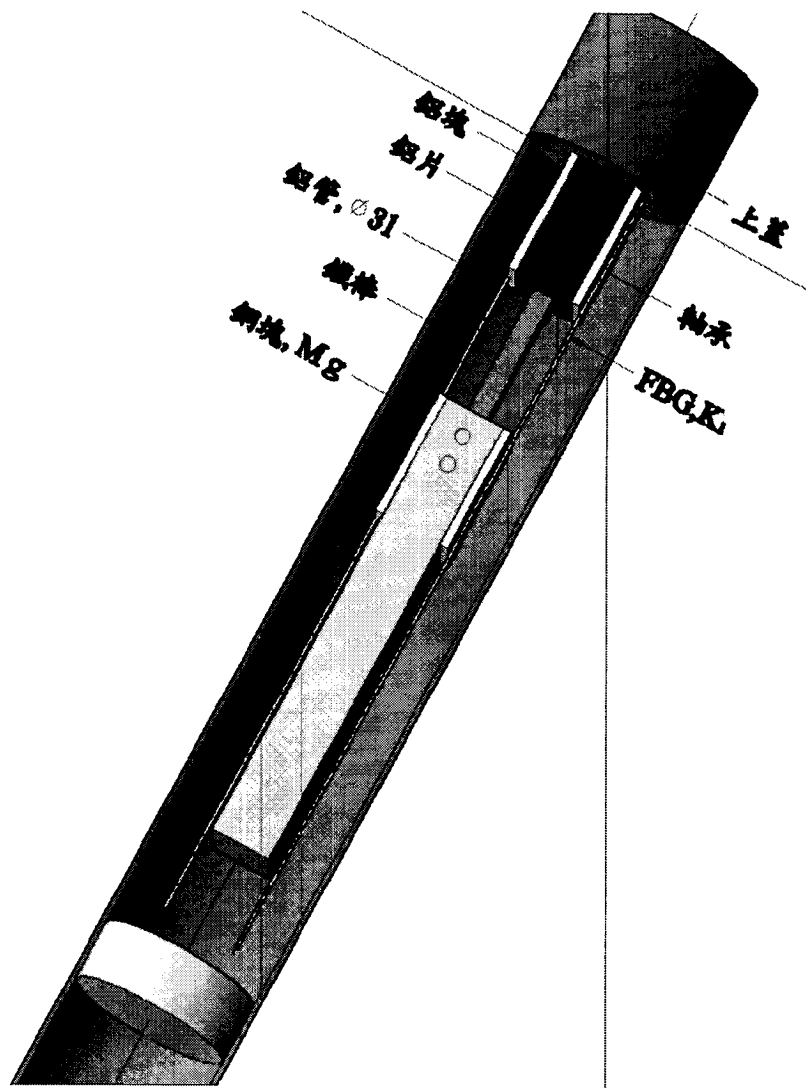


圖 2.4 FBG inclinometer 剖面圖

2.3 FBG-I/A 加速度感測原理

圖 2.5 為 FBG-I/A 加速度感測示意圖，當感測裝置相對於支架垂直方向(x 方向)產生加速度 a_x 時，感測器之系統運動公式如下：

$$M \ddot{x} + ((a/b)^2 K_1)x = -Ma_x \quad (2-9)$$

其中：

M = 重塊質量

\ddot{x} = x 方向加速度 (位移對時間之二次微分)

K_1 = 光纖光柵張力方向之勁度

a = 光纖光柵對應軸心之力臂

b = 重力塊對應軸心之力臂

將公式兩邊除以 M，得到：

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

其中：

$$\omega_o = \sqrt{((a/b)^2 K_1)/M} \quad (2-11)$$

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

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

其中：

A_x = 振幅

重塊質量所對應之週期性振波為：

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

將公式(2-11)與(2-13)重塊振幅代入公式(2-9)即可得到重塊質量

振幅 X:

$$X = \frac{-1}{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \omega_0^2} A_x \quad (2-14)$$

光纖光柵所受應變 ε_{FBG} 與 X 關係為：

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

因此透過高頻 ε_{FBG} 之擷取，即可計算振幅 X 隨時間之變化，而達

到量測之目的，其中：

$$\kappa = \frac{a/b}{L} \frac{1}{\omega_0^2} (\mu\text{strain/G}) \quad (2-16)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (2-17)$$

f_0 為初始頻率

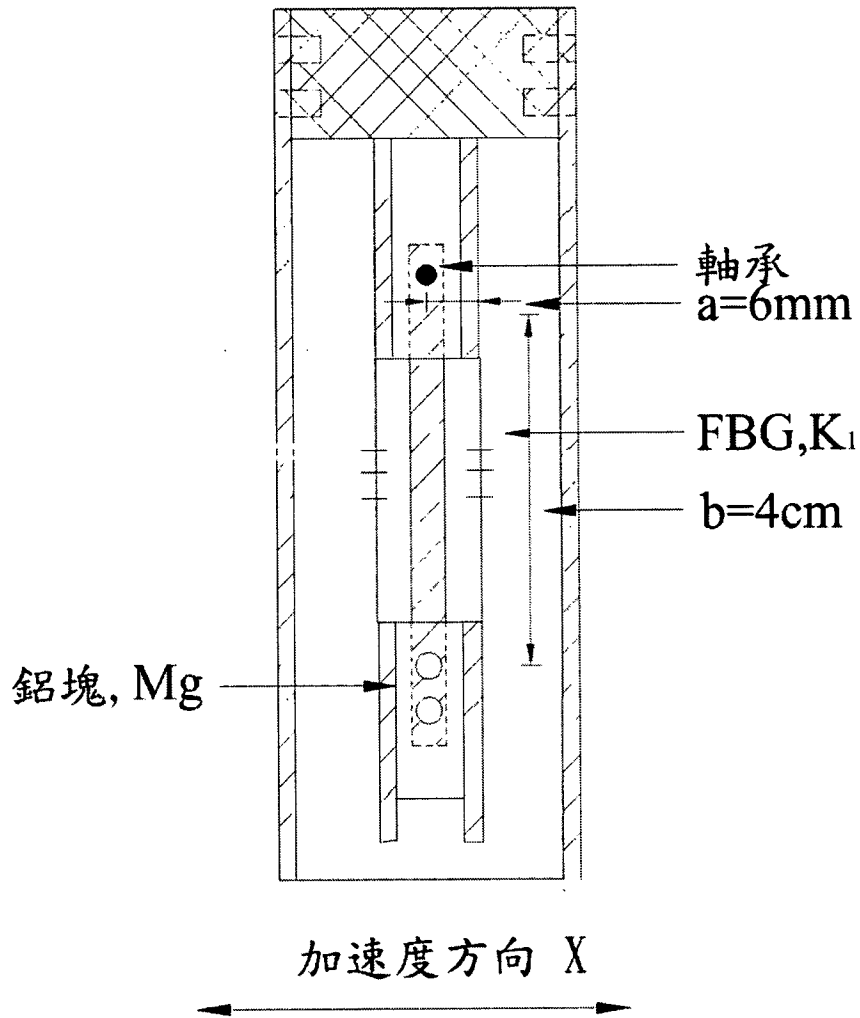


圖 2.5 FBG-I/A 加速度感測示意圖

2.4 FBG-I/A 傾斜感測原理

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

$$M_{cw} = (F_{FBG}) \times d_{FBG} \quad (2-18)$$

其中：

F_{FBG} = 光纖光柵所受拉力之改變

d_{FBG} = 光纖光柵相對於軸承之力臂

當傾斜時重塊受重力影響使得此組合體受逆時針方力矩

(moment)，此一逆時針方力矩 (M_{ccw}) 為：

$$M_{ccw} = (Mg) \times L_M \sin \theta \quad (2-19)$$

其中：

g = 重力加速度

L_M = 重塊相對於軸承之力臂

M_{ccw} 與 M_{cw} 大小相同方向相反，因此當感測裝置相對於重力方向產生傾斜角度 θ 時 (如圖 2.6 所示)，此時 θ 與 FBG 有以下之關係式：

$$F_{FBG} = \frac{MgL_M \sin \theta}{d_{FBG}} \quad (2-20)$$

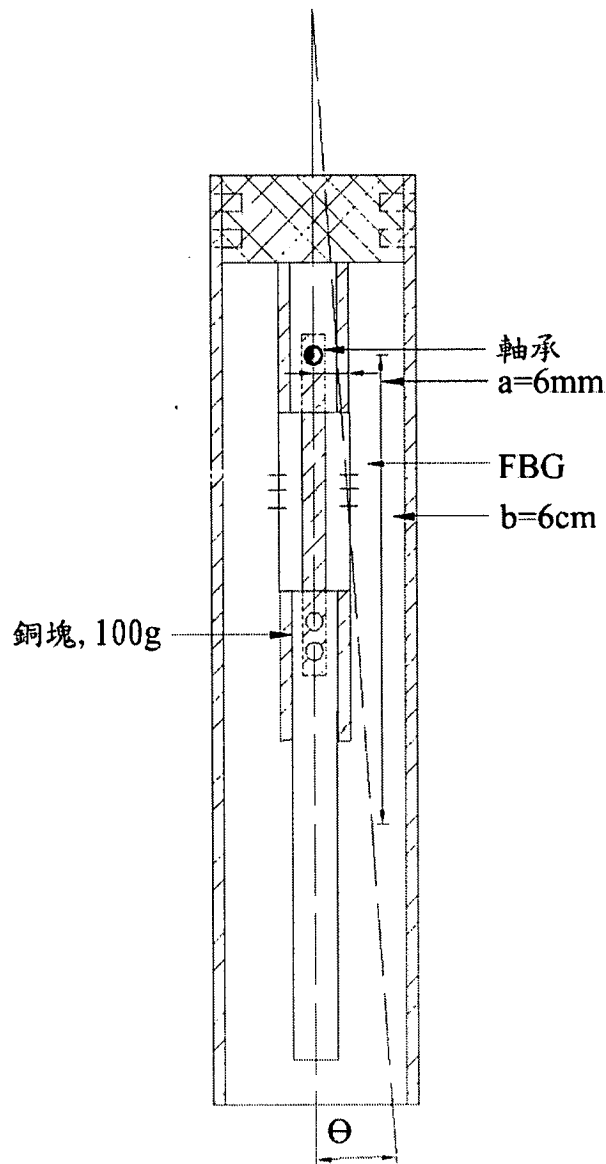


圖 2.6 FBG-I/A 傾斜感測示意圖

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

如圖 2.7 所示，每一 FBG-I/A 單元上下配有滾輪，可以配合放入傳統傾斜管中，當地層滑動時，FBG-I/A 可經由傾斜角度變化量來計

算單組 FBG 測傾儀側向移動量，最後累積計算出變形監測管因地層移動而造成之側向位移。在實驗室中可標定出光柵波長改變量與角度變化量的關係(圖 2.8)，根據標定結果計算，FBG 波長改變 1pm (解析儀所能讀取之最小 FBG 波長改變量) 所對應之角度變化量，傾斜角度精度在 0.002 與 0.004 度之間。在監測地層滑動時我們可以將多個 FBG-I/A 串接在一起，並將量測到的角度換算成側向位移量，單組 FBG 測傾儀能夠容許的傾斜角度在-10 度至+10 度之間。

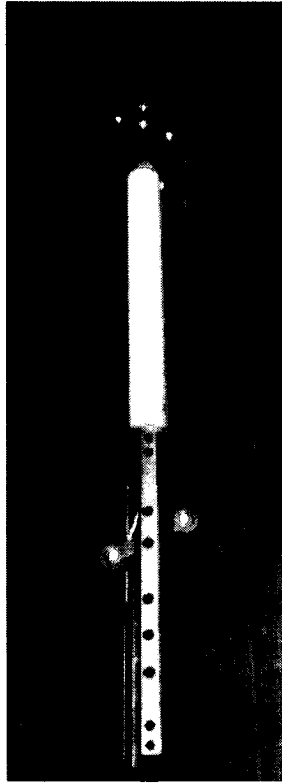


圖 2.7 FBG-I/A 實體圖

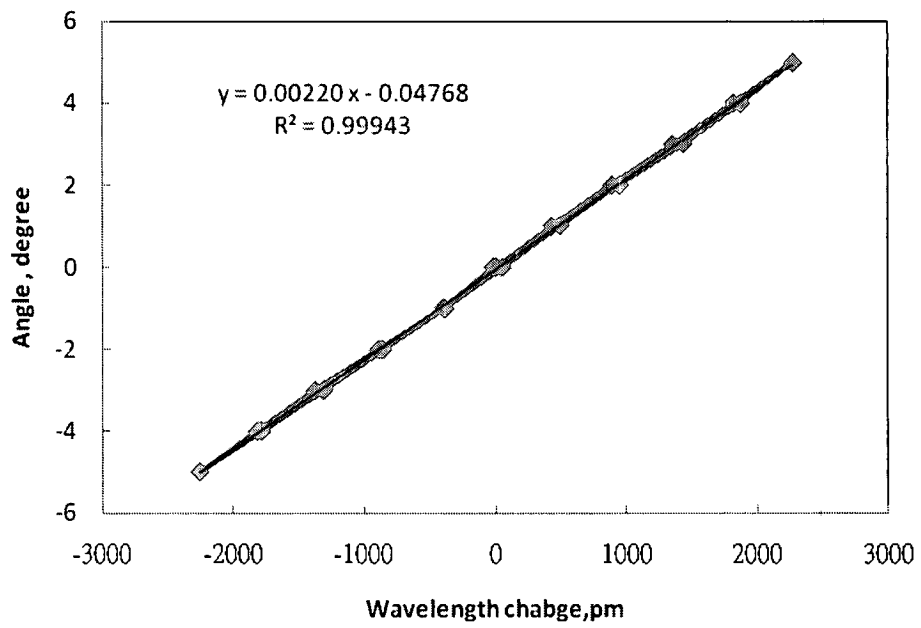


圖 2.8 FBG-I/A 傾斜標定結果

2.5 FBG 水壓計

現有光纖壓力計其壓力或位移調解 (modulate) 之方法可以包括：光強度 (intensity)、光纖光柵 (FBG) 與光干涉 (interferometry) 等。Rao et al. (1994) 使用一薄膜來反射經過光纖傳出之光源，如圖 2.9 所示。當薄膜受壓而變形後其反射之光強度減弱，然後根據光強度降低與薄膜變形之關係來調解壓力。使用光強度調解壓力最主要之缺點是長期穩定度，光強度除受調解因素影響之外也受光源強度之影響，因此當光源強度變化時會造成錯誤之解讀，不利於長期使用。

詹凱博 (2004) 使用 FBG 做為壓力調解之原件，將一 FBG 黏接在醫學用針孔內，FBG 兩端在針孔內用膠封死，在與 FBG 接觸之針邊緣開孔並以薄膜覆蓋如圖 2.10 所示。薄膜受壓後擠壓 FBG 造成 FBG 之拉伸，根據 FBG 拉伸量與 FBG 波長飄移之關係來解讀壓力之變化。此一設計有其體積小之優點，但需對 FBG 波長讀數做溫度修正，此設計之靈敏度也偏低。

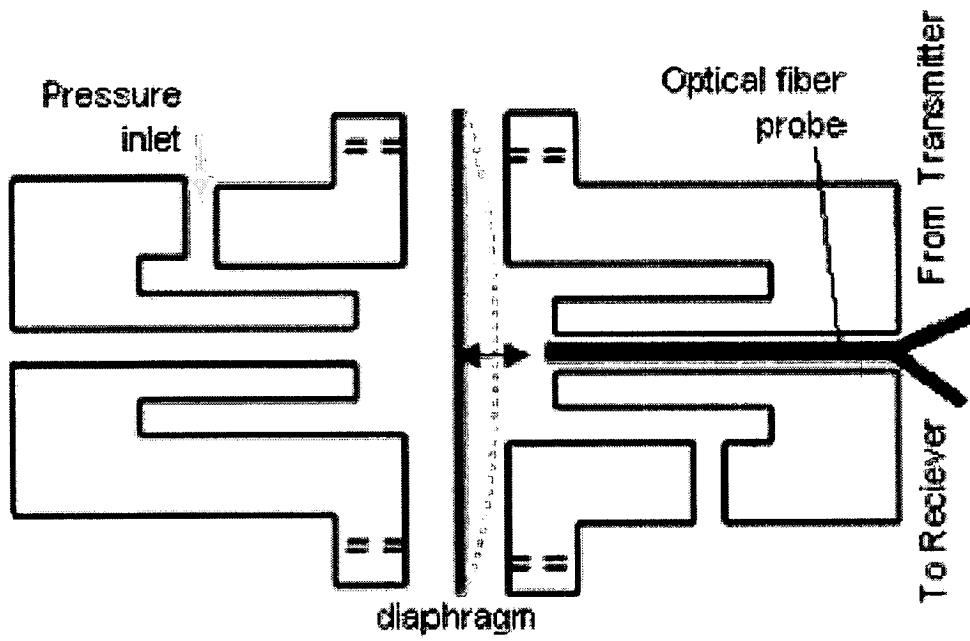


圖 2.9 使用薄膜反射光強度解調壓力

(Rao et al., 1994)

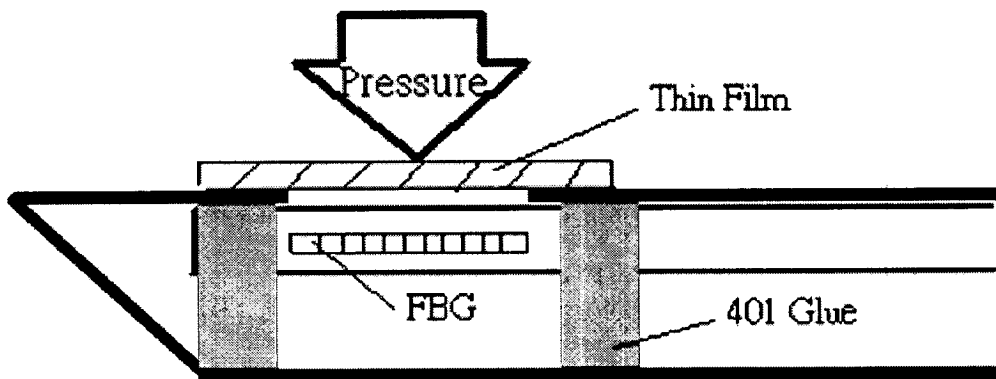


圖 2.10 FBG 針孔式壓力計

(摘自詹凱博，2004)

Raman (1999)研發直接使用裸光纖光柵感測壓力之方法如圖 2.11 所示，壓力會使光纖光柵產生徑向 (radial) 與軸向(longitudinal)之應變，利用光纖光柵感應軸向應變的方法來解讀壓力，但光纖光柵彈性模數較大，所以光纖光柵對於壓力反應靈敏度不佳，靈敏度為 $-1.98 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ 。

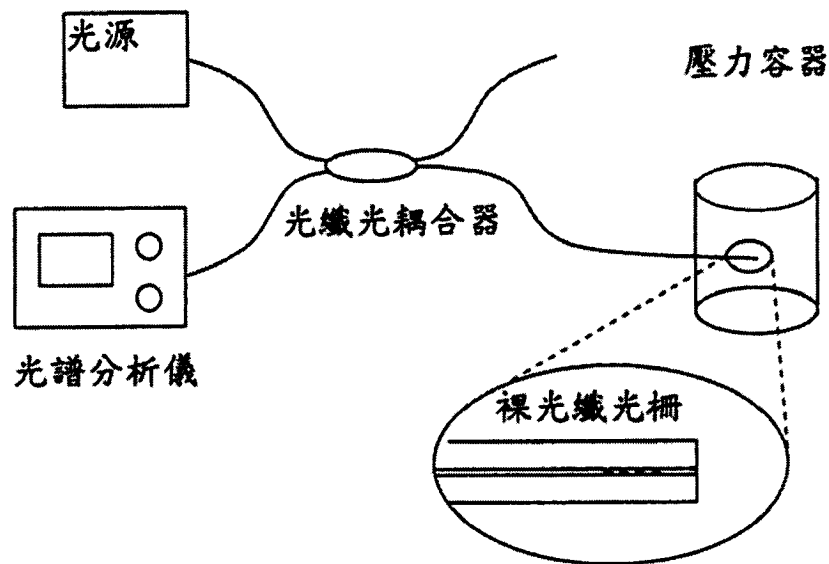


圖 2.11 裸光纖光柵壓力感測器
(Raman, 1999)

Zhang et al. (2001) 修改 Raman 的研究中靈敏度不佳的問題，利用聚合物的彈性係數較小的特性，將光纖光柵封裝於聚合物中，如圖 2.12 所示，利用聚合物受壓會產生橫向延伸之特性來增加對光纖之軸向應變以提高光纖光柵對於壓力的靈敏度，以聚碳酸酯為外觀的光纖光柵為例，其對壓力量測的靈敏度為 $-6.25 \times 10^{-5} \text{MPa}^{-1}$ 。但聚碳酸酯

缺乏彈性與耐用之特性，此壓力計讀數與壓力間缺乏重複性與線性之關係。

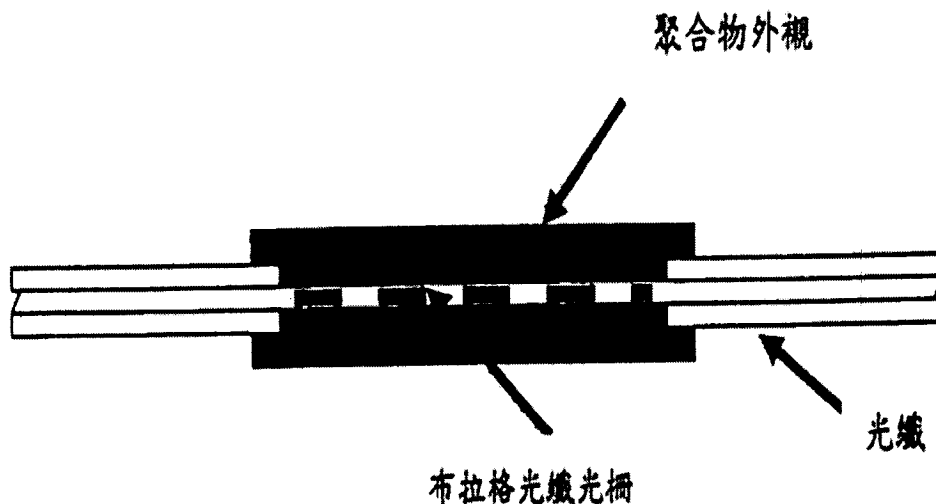


圖 2.12 以聚合物為外襯之光纖光柵壓力感測器
(Zhang et al., 2001)

Xu et al. (1996)發展出以球狀玻璃為外殼的壓力感測器，如圖 2.13 所示，當玻璃球受壓時，該玻璃球內徑將隨著壓力的變化而變形，而黏貼於玻璃球直徑上的光纖光柵也會產生軸向應變。此種感測器的靈敏度約為 $-2.12 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ 。玻璃球易碎，同時也缺乏線彈性之特性，不利於工程之應用。

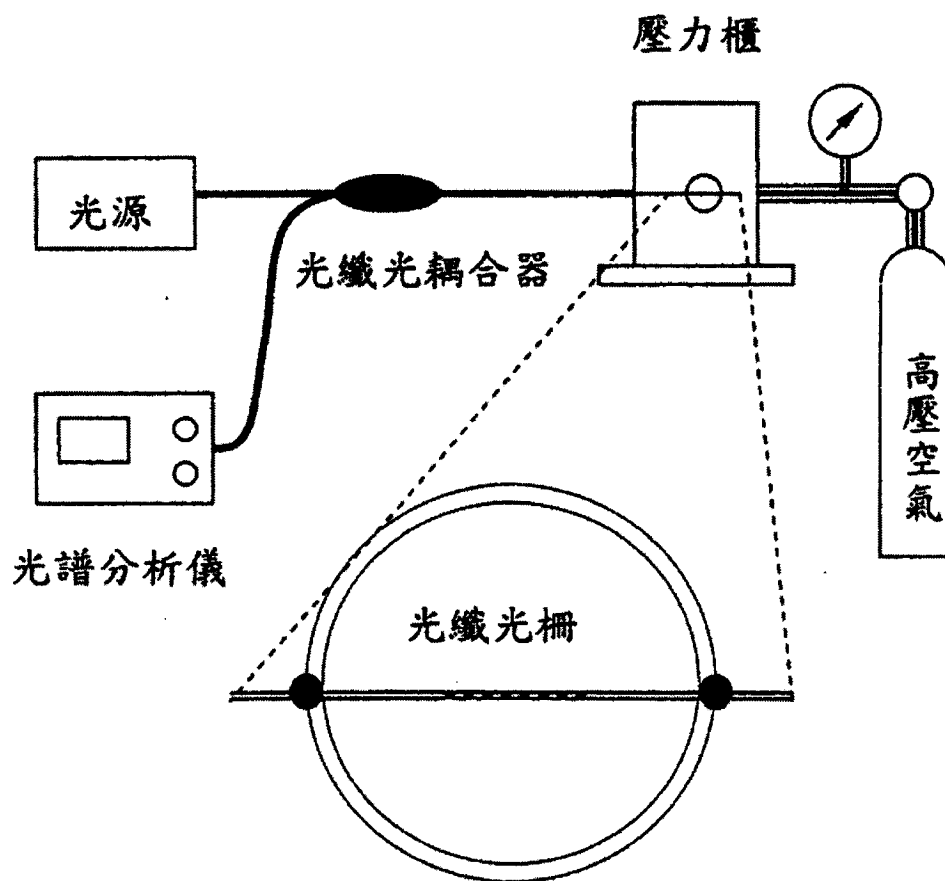


圖 2.13 球狀玻璃為外殼之光纖光柵壓力感測器

(摘自 Xu et al., 1996)

Zhang et al. (2001)發展出以聚合物為外觀加以封裝之壓力感測器，如圖 2.14 所示，此感測器有鋁質外殼，光柵穿過鋁質圓桶的中心，並以軟性聚合物將光柵固結於鋁質圓桶中，藉外界壓力對聚合物產生擠壓變形時，聚合物會往軸向變形，進而帶動光柵的變形。唯此種方式可能造成光纖光柵產生非均勻的應變，使得量測結果缺乏穩定性與重複性。

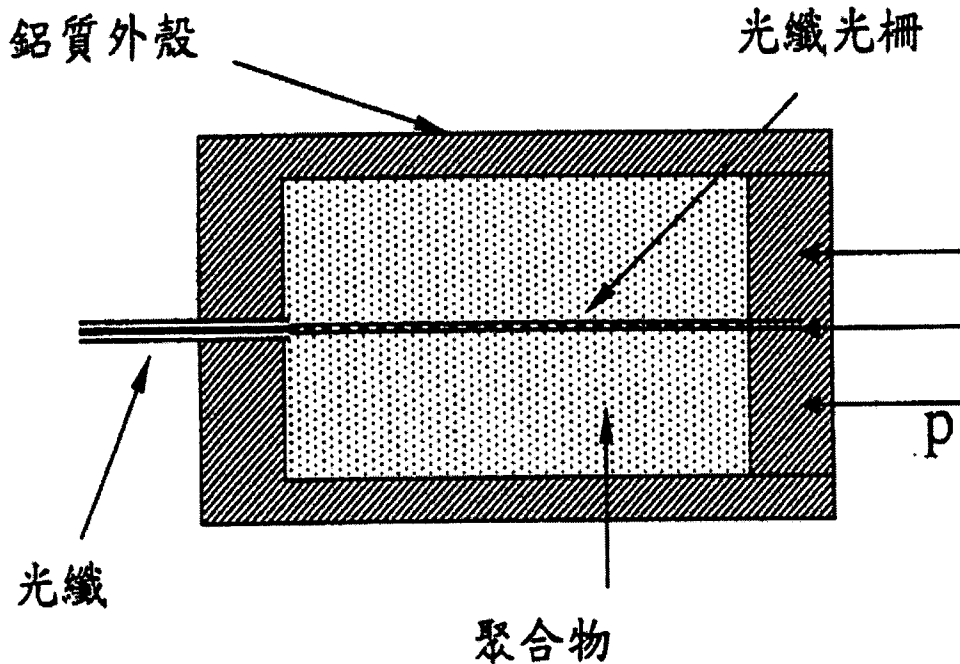


圖 2.14 以聚合物為內襯之光纖光柵壓力感測器

(摘自 Zhang et al., 2001)

Sheng et al. (2004) 為光纖光柵為撓性不能感測壓縮，所以在軸向壓縮上的線性程度不佳，此感測器乃採用拉伸光纖光柵的方式來製造壓力感測器，如圖 2.15 所示，其工作原理為將光纖光柵埋入軟性聚合物中，當感測器受到側向的外力作用時，聚合物便會往軸向伸展，使得光纖光柵也一起拉伸。軟性聚合物缺乏彈性與耐用之特性，此壓力計讀數與壓力間缺乏重複性與線性之關係。

Liu et al. (2000) 利用特殊的聚合物封裝，發展出一壓力感測器，如圖 2.16 所示，左端的 FBG1 使用受高靈敏的聚合物 A 封裝，其餘的 FBG2 由另一聚合物覆蓋 B，此聚合物 B 僅作為保護作用，不對於

FBG2 的產生應變，因此兩個光柵會發生不同的應變量，藉此得到壓力值。

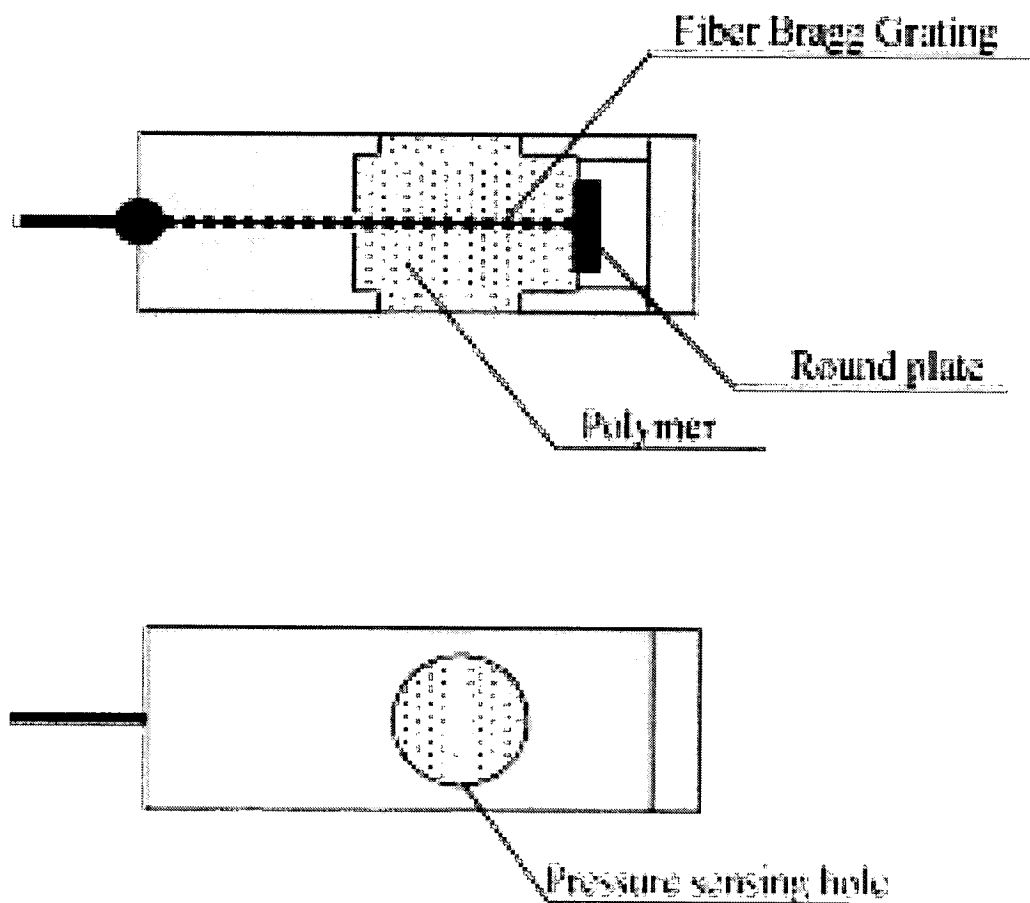


圖 2.15 側壓式壓力感測計

(Sheng et al., 2004)

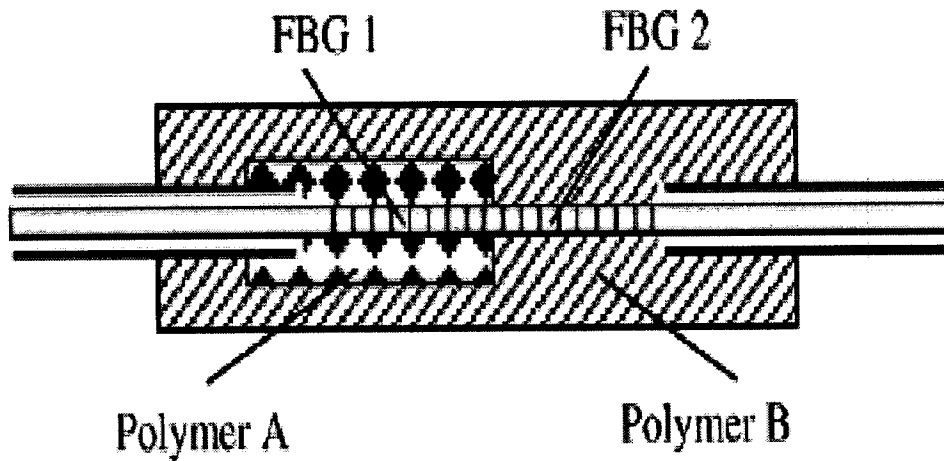


圖 2.16 不同聚合物封裝之光纖光柵壓力感測器

(摘自 Liu et al., 2000)

光纖光柵為易受溫度影響的感測器，上述之壓力感測器均未對此影響加以考慮，所以量測誤差大；另一缺點為柔性聚合物不具線彈性並且容易產生塑性變形，此種感測器不利於長期監測使用。

Heo et al. (2005) 發展出微型光纖光柵壓力感測器，其簡易構造圖如圖 2.17(a)所示，其感測物件由一圓形板所構成，光纖光柵穿過於圓板中，當壓力由物件的上方施加時，光纖光柵會被拉伸，如圖 2.17(b)所示的情形，因為此種感測器是作為按鍵使用，所以設計時不考慮溫度對於光纖光柵的影響，僅需考慮外力對光纖光柵產生的變化。

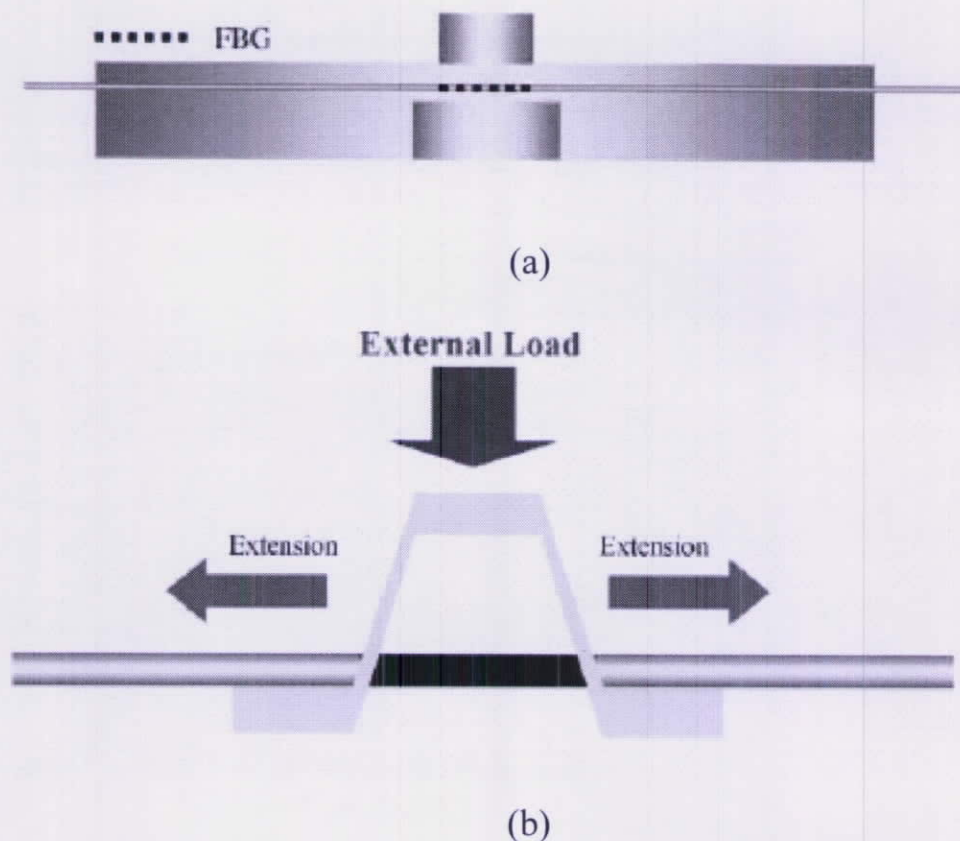


圖 2.17 微型光纖光柵壓力感測器
(Heo et al., 2005)

Kojima et al. (2003) 利用傳統壓力計常用之巴登管(Bourdon tube)發展一光柵壓力感測器，如圖 2.18 所示，巴登管是將具橢圓形斷面之銅合金薄管，彎成圓弧形，彎管之一端密封且允許有活動伸展空間，其另一端不封閉且焊定於固定管接頭上。當氣體或液體壓力自管接頭處引入時，會使彎管有向外伸展的趨勢，彎管末端連結光纖光柵，使光柵受到拉力作用，由光柵的變化向換算為壓力值，此感測器有放置一溫度光纖作為光纖受溫度影響時的比較值。此設計以考慮溫

度之修正，並有巴登管高重複性與線性之優點，但巴登管體積大同時成本高昂。

Zhao et al. (2004)利用雙 FBG 方式製作感測器，如圖 2.19 所示，此感測器的感測原理為將兩條光纖光柵分別黏貼於懸臂樑上下兩相對應的位置，當懸臂樑變形時，兩個光纖光柵會分別承受拉應力與壓應力，雖然溫度會對光纖光柵造成影響，但經由兩光纖光柵波長互減可以消除溫度對 FBG 之影響。此設計主要缺點在於懸臂樑必須有一自由端，因此無法使用懸臂樑本身來隔離 FBG 而達到氣密的效果，在此限制條件下必須另外加裝隔離膜，如圖 2.19 中之 active cylinder，才能達到壓力感測之目的。此一設計將使得感測器之複雜度提高而靈敏度乃至於線性度降低。

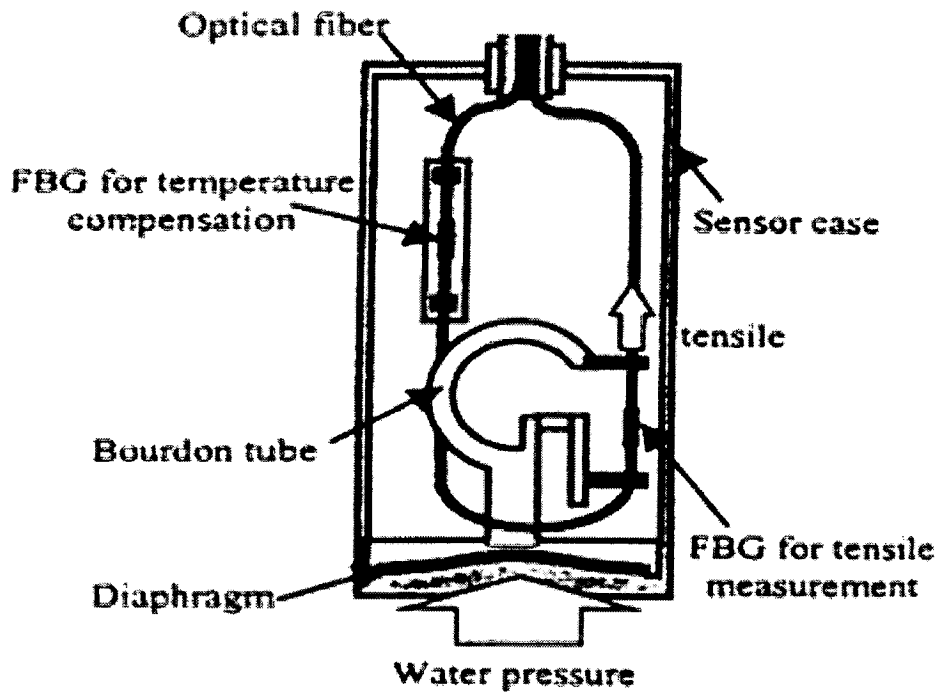


圖 2.18 巴登管式光柵壓力感測器

(Kojima et al., 2003)

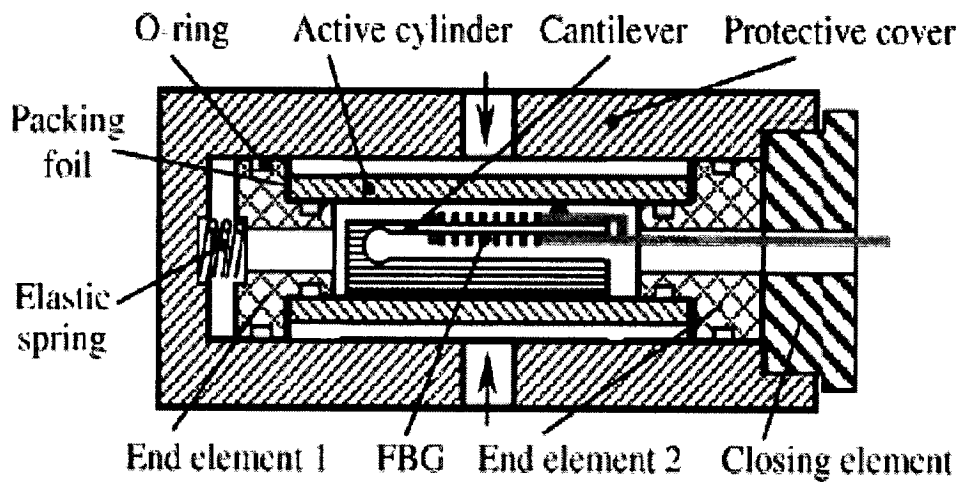


圖 2.19 雙光纖光柵懸臂式壓力感測器

(Zhao et al., 2004)

Dong et al. (2005)使用漸變式光纖光柵(CFBG) 製作感測器，將 CFBG 黏貼在一直角三角板的長邊處，如圖 2.20 所示，並斜穿過此三角板的中性軸，這種方式可以讓光纖光柵同時產生拉應變與壓應變，當變形產生時，光纖光柵的帶寬 (Bandwidth) 增加而中心波長不改變，如圖 2.21 所示。溫度只對光纖光柵中心波長產生影響而不會改變光纖光柵的帶寬，；此種解析方式可以消除溫度所產生之影響。但此設計與 Zhao et al.(2004)所用之懸臂式壓力感測器有類似之缺點，三角板本身無法隔離 FBG 而達到氣密的效果，在此限制條件下也必須另外加裝隔離膜，才能達到壓力感測之目的。此一設計將使得感測器之複雜度提高而靈敏度乃至於線性度降低。

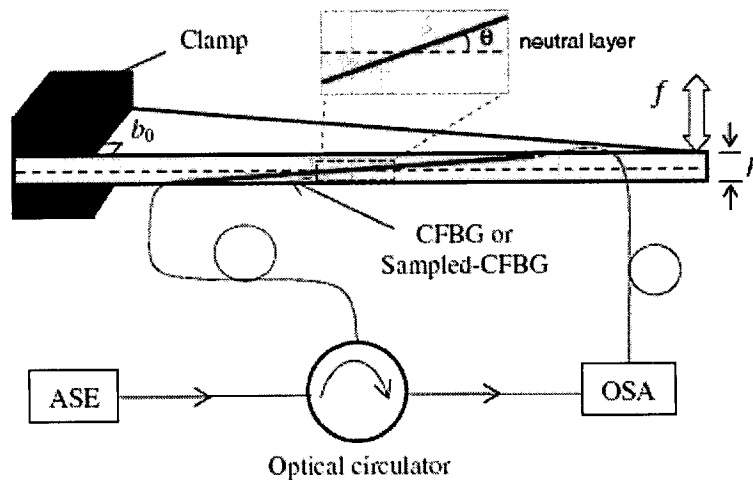


圖 2.20 CFBG 感測器裝置示意圖
(Dong et al., 2005)

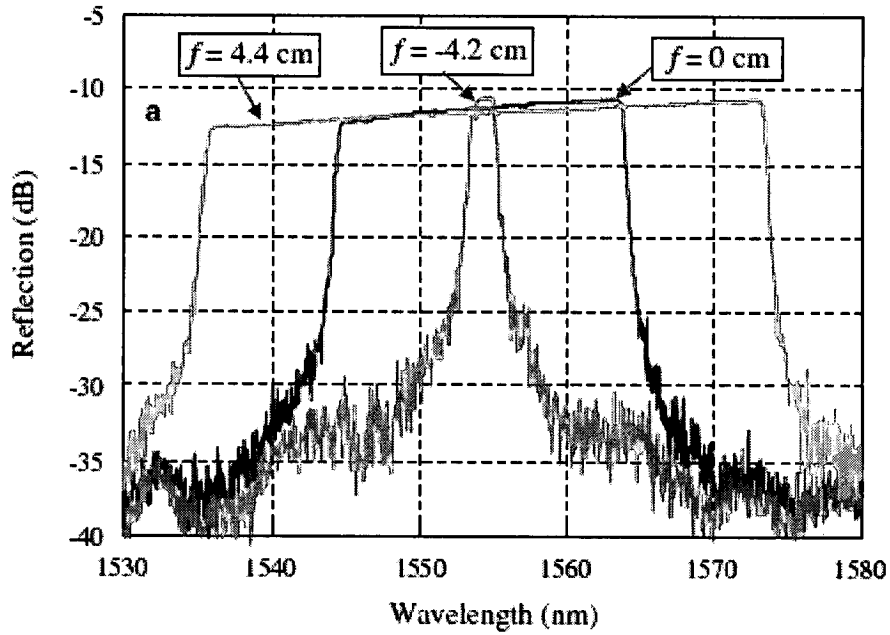


圖 2.21 CFBG 感測器的反射頻譜圖
(Dong et al., 2005)

Rao et al. (1994)以 Fabry-Perot 光干涉的技術設計一感測器如圖 2.22 所示，在光纖末端形成一空腔 (cavity)。當光離開光纖進入空腔會產生 Fabry-Perot 光干涉之效應。利用 Fabry-Perot 光干涉與空腔距離之關係來做壓力會應變之解讀。此設計不受溫度之影響，Fabry-Perot 為非分佈式 (non-distributive) 之設計，同一光纖上只能使用單一感測器，其經濟性不如 FBG 感測器。

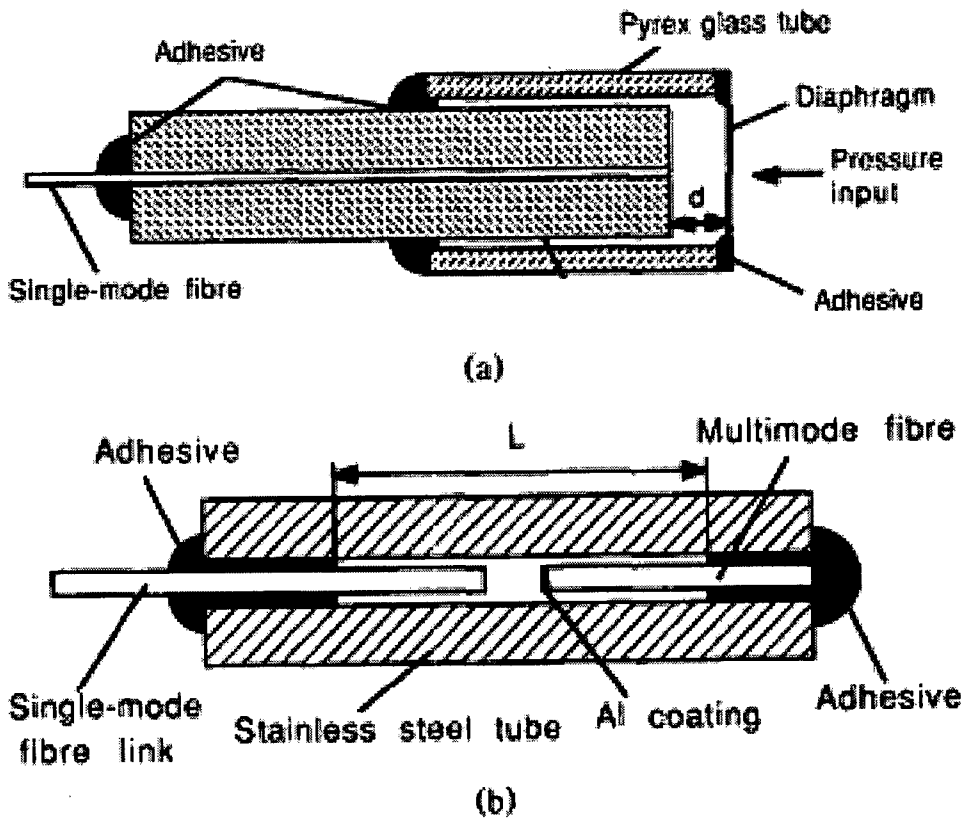


圖 2.22 Fabry-Perot 壓力感測器示意圖

(Rao et al., 1994)

本計畫已研發出使用光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG) 做水壓計，其使用 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：

1. 漸變週期式 FBG 波峰寬度分析：漸變週期式 FBG 是指 FBG 內的光柵應變之分布是漸變形式(圖 2.23)，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 2.24 所示。

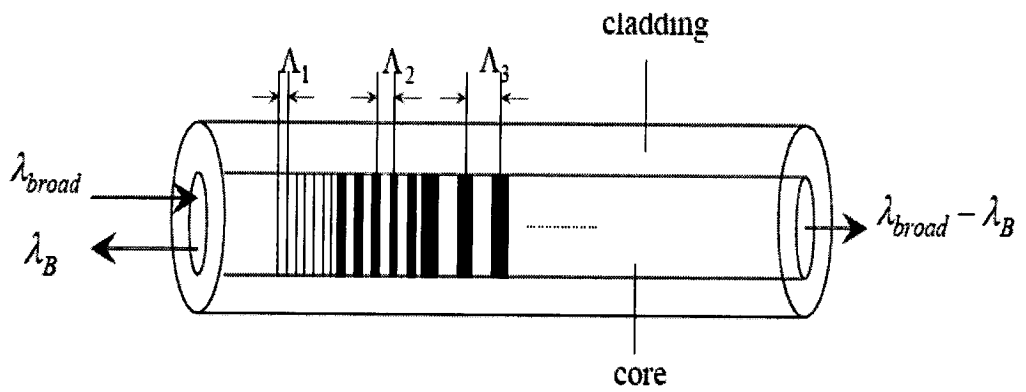


圖 2.23 光纖光柵內連續遞增之漸變應變

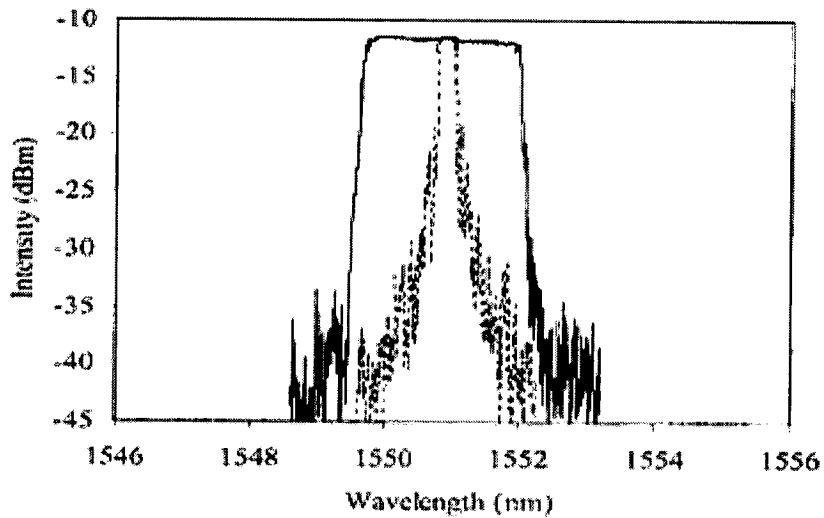


圖 2.24 連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改變

2. 等週期式 FBG 波峰飄移分析：FBG 受應變或溫度影響，易產生波長飄移（圖 2.25），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。

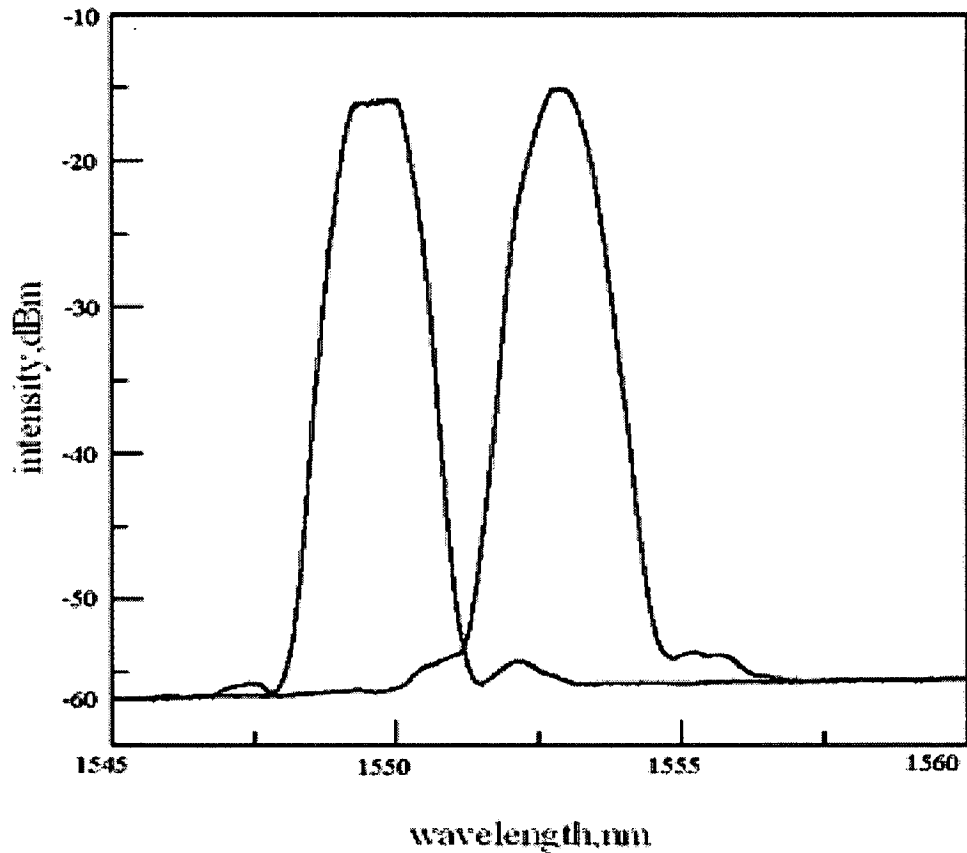


圖 2.25 FBG 波長飄移分析示意圖

差異/漸變感應式光纖光柵感測器：

差異/漸變感應式光纖光柵感測器 (Differential/Chirped Fiber Bragg Grating Sensor)，或簡稱 D/C-FBG 感測器，是利用薄板力學的理论 (溫谷琳，2003)，將多個或單一 FBG 黏貼在一邊緣束制之圓形彈性薄板(diaphragm)，如圖 2.26 所示。以圖 2.26 為例，圓形彈性薄板將光纖 (在薄板底面) 與受壓力面 (在薄板上) 完全隔離; 分成隔離區(isolated zone)與受力區 (pressurized zone)。隔離區完全密閉，感測器外部之壓力無法傳入。依照薄板理論，當邊界束制的薄型圓薄

板上面（受力區）受到壓力而使得圓心部位向下變形時，薄板底面從圓心到邊界的應變會在圓心區域呈現伸張應變，經過無應變之中性圓線（circle of neutral strain）然後於靠近邊界處成為受壓縮應變之軸對稱（axisymmetric）分佈。如果此邊界束制的圓型薄板上面（受力區）受到吸力而使得圓心部位向上變形時，上述之應變分佈則相反。

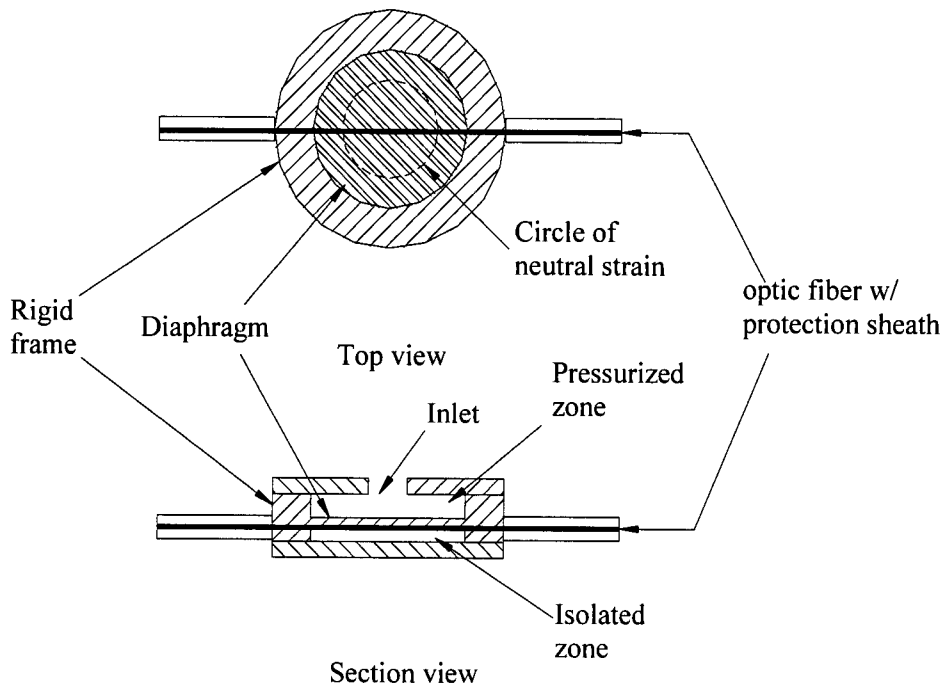


圖 2.26 D/C-FBG 感測器之設計示意圖

感測器之靈敏度可以改變薄板之半徑或/與厚度來完成。當薄板之半徑過小，只適合黏貼單一 FBG 時，例如半徑在 10mm 以下，此時使用單一 FBG（漸變設計），將其中心點與薄板中性圓線對齊來黏貼，如圖 2.27 所示。此時當薄板受拉壓力而產生非均勻之應變分佈時，黏貼於薄板半徑上的 FBG 會發生漸變（chirped）的形式，此時

FBG 的漸變反射頻譜寬度與薄板之變形量成正比。如果薄板之半徑過大，不適合黏貼單一 FBG 時，例如半徑在 20mm 以上，此時使用兩個 FBG（差異設計），將其中一個 FBG (FBG-1)中心點與薄板圓心對齊黏貼，另一個(FBG-2)則沿薄板邊緣黏貼，如圖 2.27 所示。當薄板受（應）力變形時兩個 FBG 的波峰飄移方向相反，而波峰差異量與薄板變形量成正比。在漸變設計中，溫度之變化會使得波峰飄移但不會影響反射頻譜寬度。在差異設計中，溫度之變化會使得兩個 FBG 波峰以等量同時飄移，但不會影響此兩個 FBG 波峰之差異量。因此無論使用漸變設計或差異設計，其讀數都不受溫度變化之影響。

本計畫所研發差異/漸變感應式光纖光柵感測器的優點包括：

1. 因為 FBG 之功能，單一光纖可進行多個感測器串接量測，且量測品質不隨感測點數增加而降低。
2. 隔離區與受力區完全隔離，感測元件受到保護但所量測之物理量直接施加於圓形薄板上，不影響感測器之靈敏性。可視應用需求，更改感測器的量測範圍與靈敏性。
3. 具有多功的特性，可做壓力感測器(gauge pressure transducer)，此時只需將受力區暴露在所需量測之氣/水壓力下即可達成任務。如將隔離區與一參考壓力連接，則可做為差壓計(differential pressure transducer)使用。此感測器也可做為壓力元 (load cell)，此時只需

將受力直接施加於圓形薄板之中心點。此感測器可做為位移計 (displacement transducer)，此時將一拉桿與彈簧連接再連至圓形薄板之中心點。拉桿之位移量與彈簧所產生之反作用拉力成正比，然後依據力量與 FBG 訊號間之關係來解讀位移量。

4. 使用 FBG 反射頻譜寬度(漸變設計)或 FBG 波峰差異量 (差異設計) 來解讀所感測之物理量，其讀數都不受溫度變化之影響。

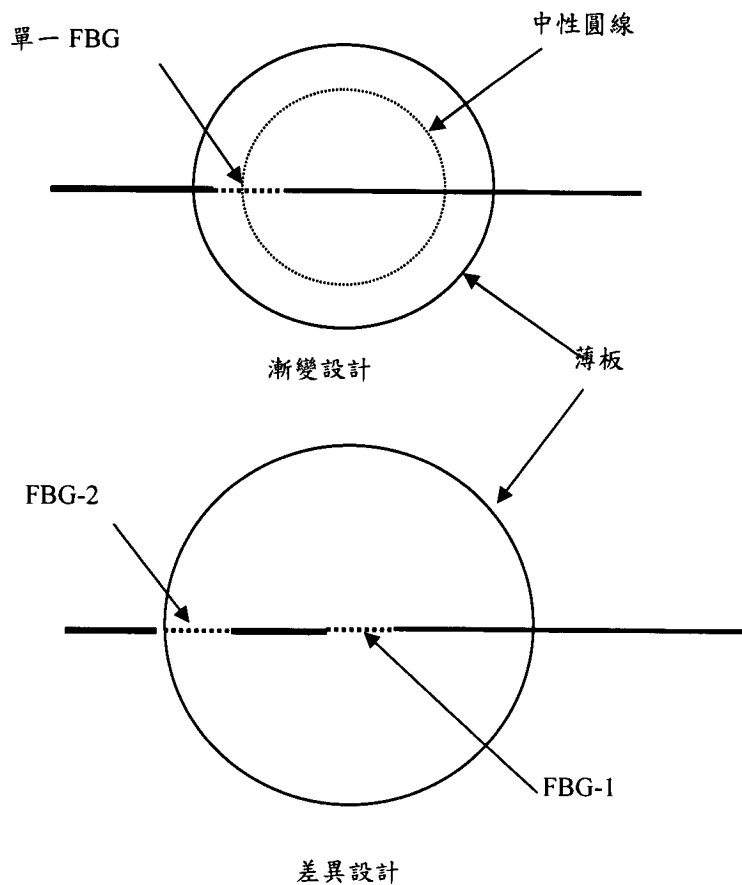


圖 2.27 FBG 黏貼方法示意圖

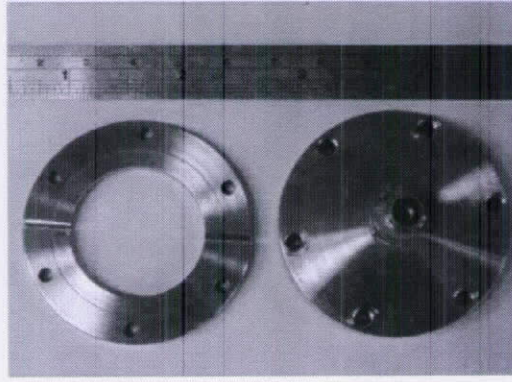
圖 2.28 展示一 D/C-FBG 壓力計之實體照片，圖 2.28 (a) 為剛體框架，(b) 為組合完成之 D/C-FBG 壓力計(c)為根據差異設計原理而製作受壓力面直徑 30mm 厚度 0.5mm 之圓形彈性薄板以及黏貼在其上之兩個 FBG。圖 2.29 展示使用上述 D/C-FBG 壓力計分別在 25°、40° 與 50°C 情況下所做之壓力與 FBG 波長差異讀數間之標定。結果顯示，在此三種溫度下都可獲得 R^2 (相關係數) 在 0.998 以上之線性標定結果，線性標定斜率在此溫度範圍內介於 5.7 至 6.2 之間，溫度增加一倍，線性標定斜率降低 7.5% 左右。

等週期式光纖光柵感測器：

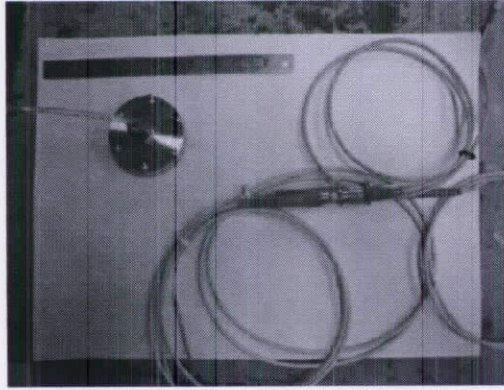
D/C-FBG 感測器雖然有以上許多優點，但其體積較大，圖 2.28 所示之壓力計，其總直徑（包括剛體框架）50mm，厚度 12mm。現有常用開口式地下水位觀測計之內徑在 1 英吋以下，因此可能無法將現有設計之 D/C-FBG 感測器置入。為便於與現有常用系統之匹配，本計畫同時也研發體積較小，使用 FBG 波峰飄移原理來設計之壓力計。圖 2.30 展示使用等週期式使用 FBG 波峰飄移與壓力間關係來設計壓力計之概念圖。將 FBG 光纖之一端固定於水壓計底部使其不產生位移，另一端則黏著於於一彈性金屬薄膜上，當水壓計內部受壓力作用改變時金屬膜隨之變形，因此 FBG 所感受之應變也隨之變化。

當金屬膜仍在彈性限度內，FBG 即呈現等週期式之變化，FBG

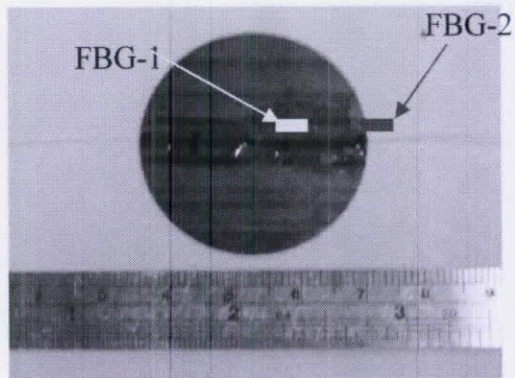
波峰值與壓力有一線性關係。但此一設計無法隔離溫度改變對 FBG 波峰值之影響，因此必須加入另一呆 (dummy) FBG 做為感應溫度變化之用。使用等週期式 FBG 應變原理所製作之一直徑 20mm 壓力計展示於圖 2.31。圖 2.32 所示之標定結果其 R^2 (相關係數) 在 0.999 以上，在類似壓力範圍內 (250kPa) 其相關係數與靈敏性較 D/C-FBG 設計更為理想。但等週期式設計需要做溫度效應之修正，同時除壓力量測外比較不易用來做拉壓力或為移監測之用。



(a)剛體框架



(b)組合完成之 D/C-FBG 壓力計



(C)圓形彈性薄片

圖 2.28 D/C-FBG 壓力計實體

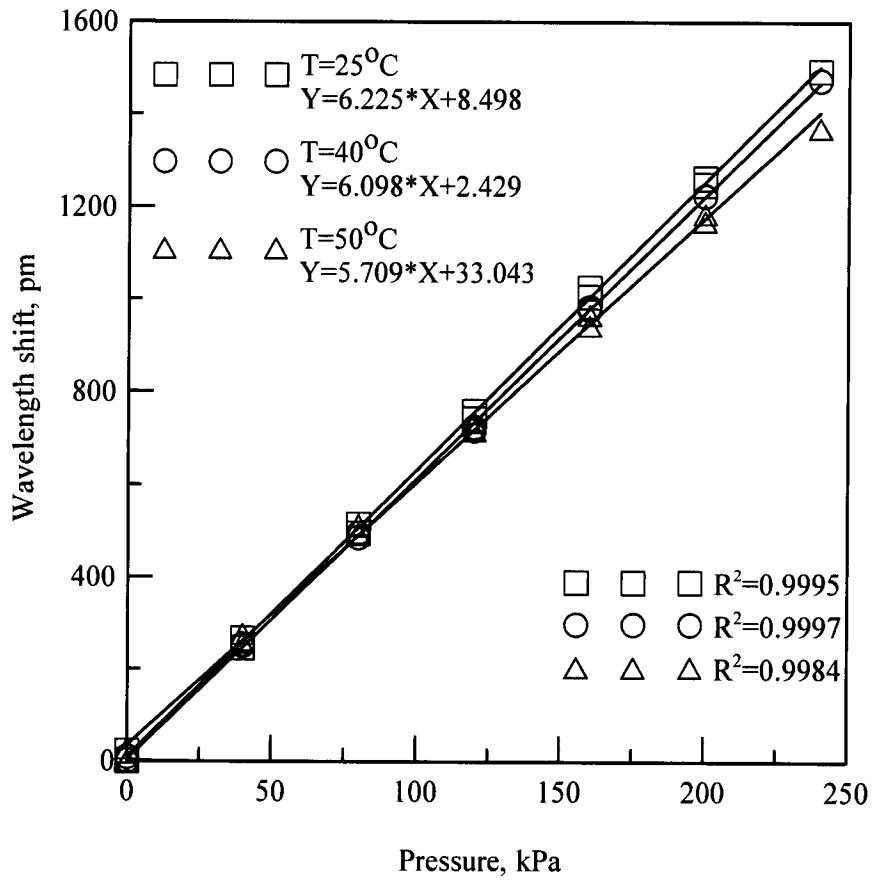


圖 2.29 差異設計壓力感測器在三種溫度下之標定結果

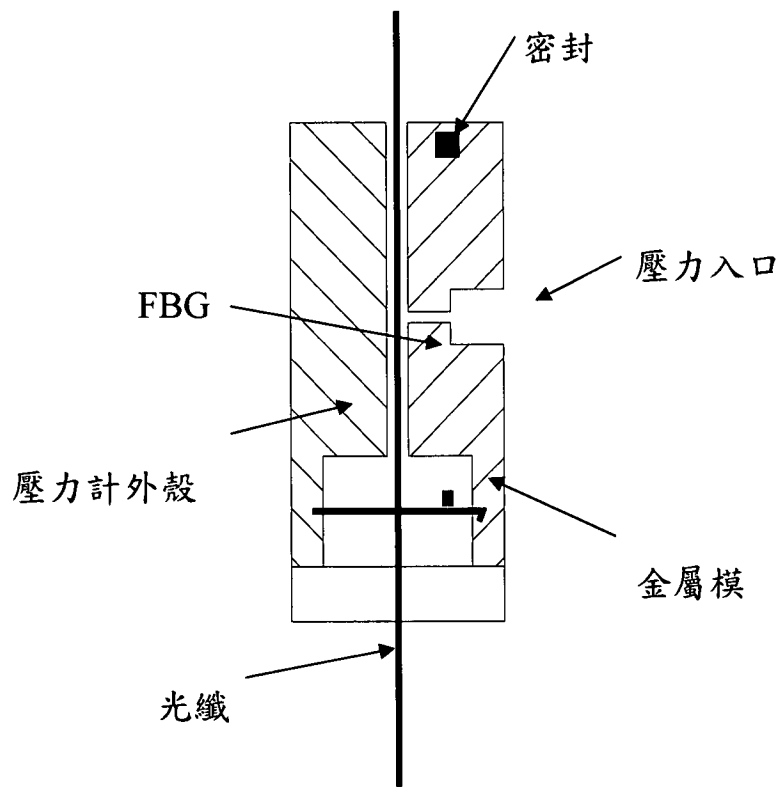


圖 2.30 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖

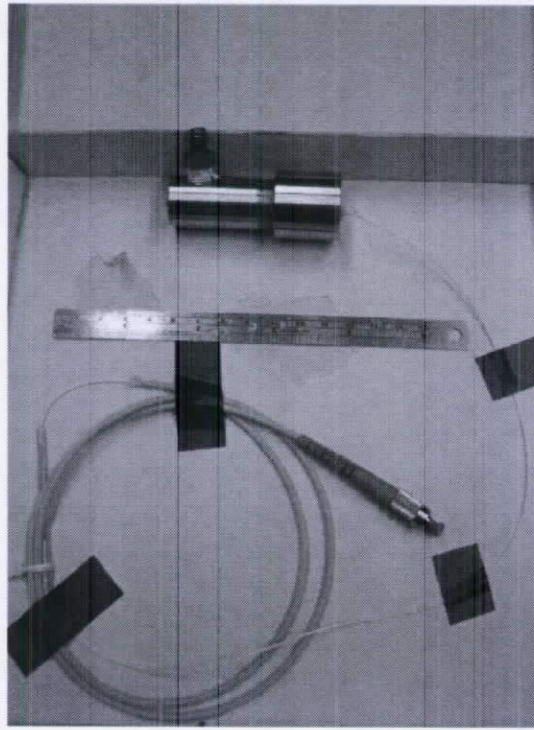


圖 2.31 等週期波長式 FBG 水壓計實體照片

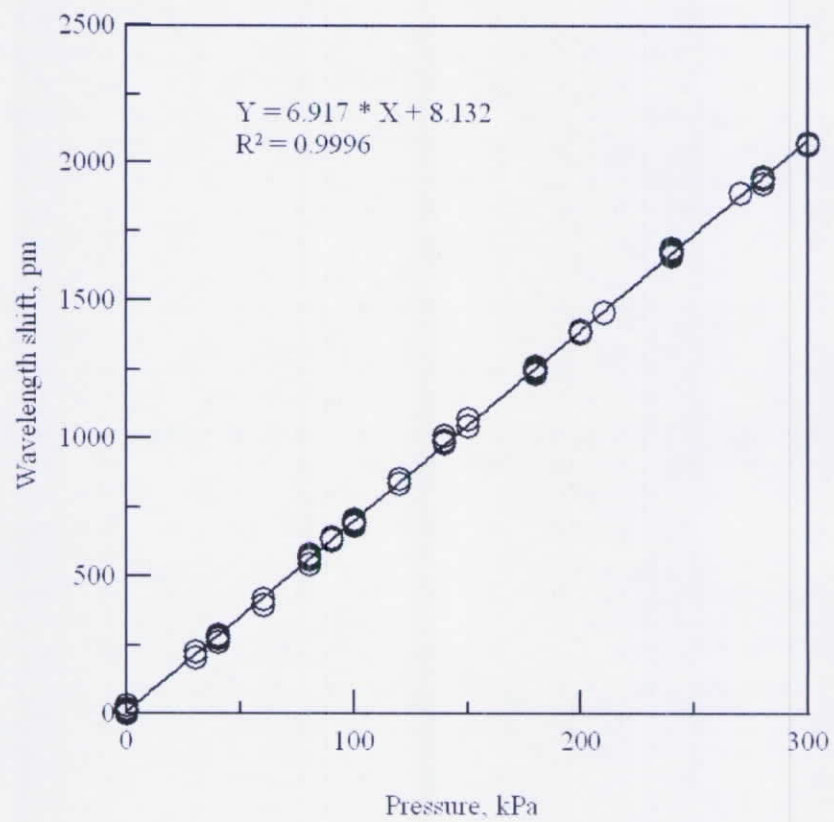


圖 2.32 等週期波長式 FBG 水壓計標定結果

本計畫持續對 FBG 水壓計進行改良，以提高量測精度與使用性，使用雙薄膜提高 FBG 水壓計的精度，其設計與實體如圖 2.33 與圖 2.34 所示。圖 2.35 為本計畫所製作出的雙薄模式光纖柵水壓計之標定與理論分析比較圖，結果顯示，水壓計精度為 0.14kPa，相當於可量測 1.4cm 的水位變化，較使用薄膜理論分析的 2.02cm 為高，且在 0 至 300kPa 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，效果良好。等週期式 FBG 水壓計體積直徑小於 4cm，適合於安裝於現有之開孔式水位管內。

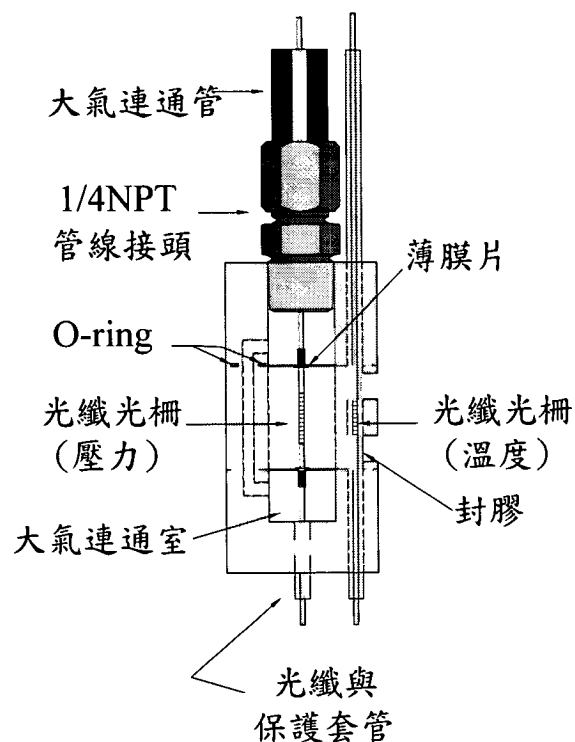


圖 2.33 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖

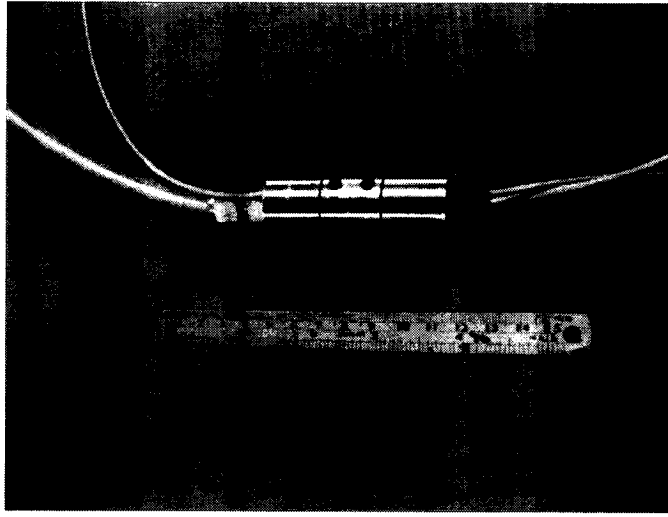


圖 2.34 等週期光纖光柵水壓計實體圖

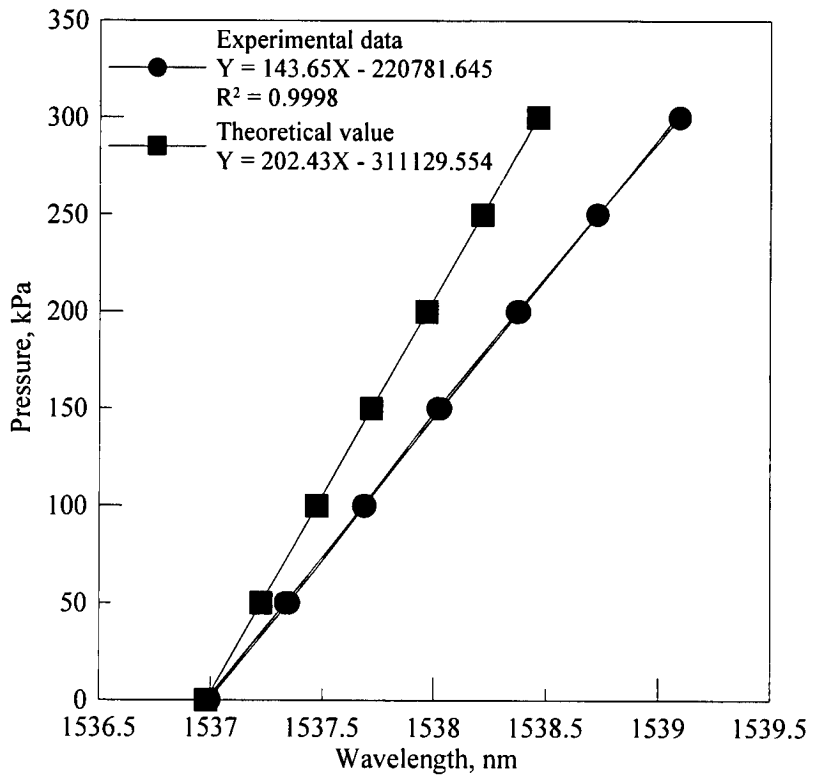


圖 2.35 等週期光纖光柵水壓計率定與理論分析比較圖

等週期式光纖光柵水壓計在使用時會配合一「光纖光柵溫度感測器」來感應溫度變化與修正溫度對水壓計所造成的誤差。本計畫所製作出的光纖光柵溫度感測器是利用材質與光纖光柵水壓計相同之不銹鋼管製作而成，如圖 2.36 所示。其製作方式是將光纖光柵安裝於不銹鋼管內，兩端利用熱固膠固定於不銹鋼管上，當有溫度變化時不銹鋼管體積產生變化使得光纖光柵讀數發生改變，且因為其為兩端密閉之堅硬鋼棒，所以外部壓力對其所造成之影響非常微弱，將此光纖光柵溫度感測器與光纖光柵水壓計放在一起，則可間接用來進行溫度之修正。但是因為溫度感測器與水壓計並非在安裝在同一構件上，所以對於熱膨脹效應的反應會有些微之不同。本計畫在不改變水壓計體積的前提下，改良將溫度感測器放置在水壓計的本體上，如此可直接的量測水壓計本身對於溫度變化的反應，設計示意圖及實體圖如圖 2.33 及圖 2.34 所示。一般地下水溫度大約在 5 度到 15 度之間，故標定的範圍設定為 0 到 40 度之間，圖 2.37 為光纖光柵水壓計及溫度光柵的標定曲線，由標定結果可得到每 1°C 的變化造成約 30pm 的波長漂移量。

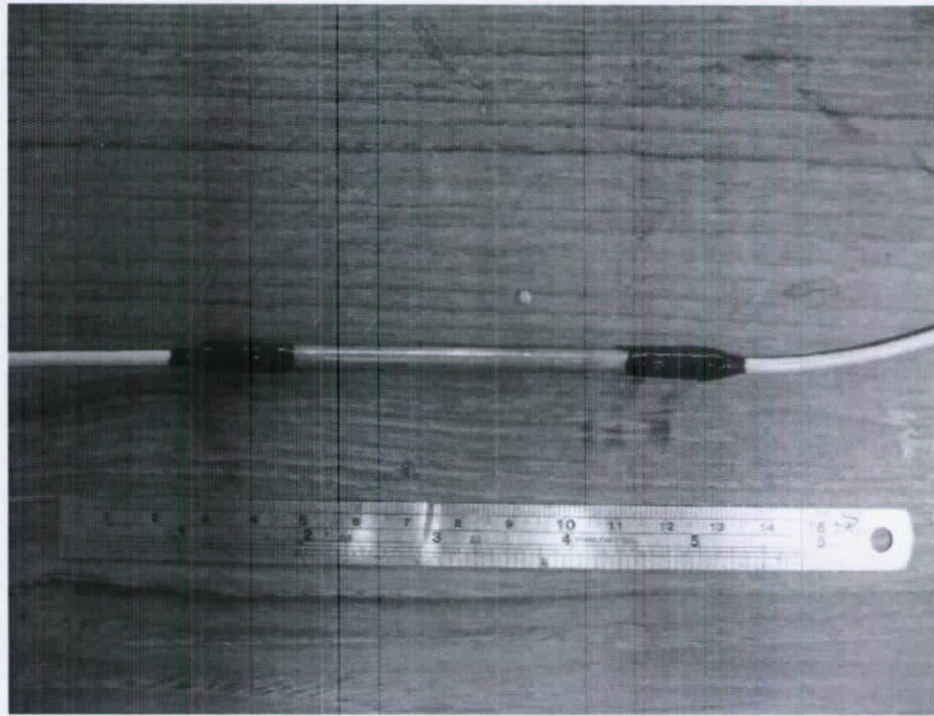


圖 2.36 光纖光柵溫度棒

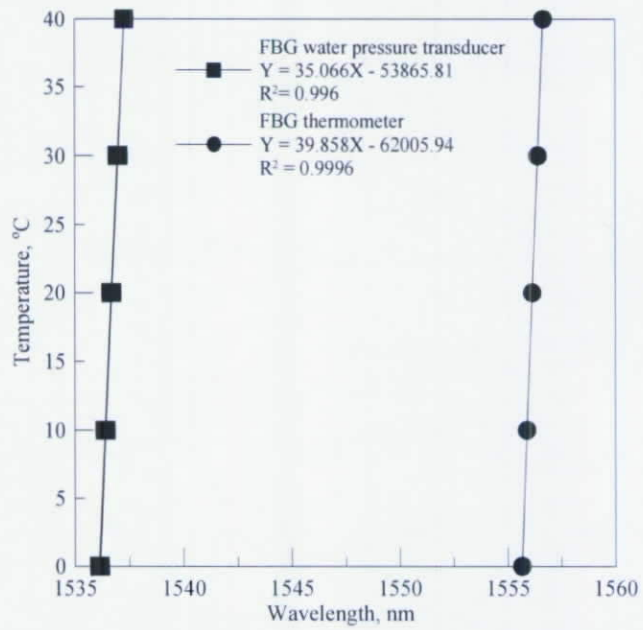


圖 2.37 光柵水壓計及溫度光柵率定圖

光纖黏貼膠之選擇與黏著性試驗

貼膠與鋼筋介面之黏著力測試，本計畫分別使用三種不同種類的黏貼膠作測試，本研究計畫所使用之黏貼膠的材質均為環氧樹脂成分，其型號分別為 A 膠為 JA643、B 膠為 353ND 及 C 膠為 Power3077，而三種膠的使用方法如表 2.1 所示。圖 2.38 為黏貼膠與鋼筋介面之黏著力測試過程圖，其測試方法為將光纖一端黏貼於鋼筋表面，另一端黏貼於測微計上方的鋁片。當旋轉測微計之旋桿時，使得測微計上方之鋁片向左移動，而光纖將會趨於緊繃狀態。若破壞處為黏貼膠與鋼筋介面時，則代表其黏貼膠與鋼筋介面之黏著力不足，反之，破壞處為光纖本體時，代表其黏貼膠與鋼筋介面的黏著力足夠。經測試結果後，其破壞處都於光纖本體，表示此三種類型的黏貼膠黏著力足夠。

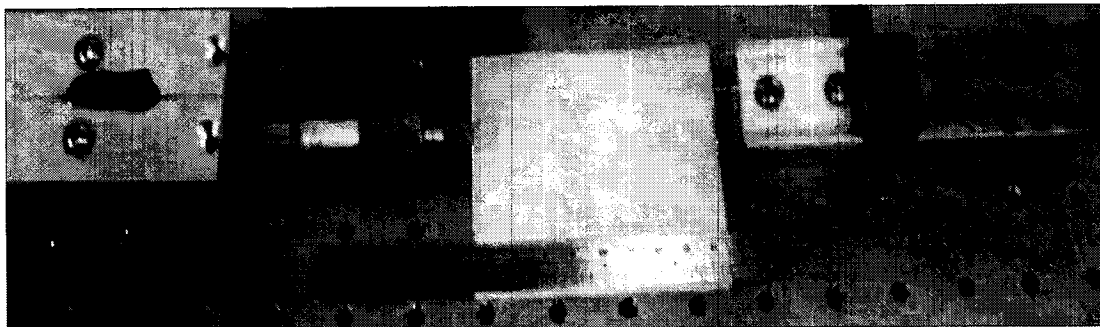


圖 2.38 黏貼膠與鋼筋介面之黏著力測試過程圖

根據前述測試結果得知，所使用之三種類型的黏貼膠對於鋼筋介面的黏著力是足夠的，但因外在環境的不確定因素及耐候性之問題，所以本研究將針對三種類型的黏貼膠作一試驗，其試驗方法為將 FBG 先施加預力後，分別用三種類型的黏貼膠，黏貼於鋼筋表面，並將黏

貼於鋼筋表面之 FBG 放置於恆濕恆溫箱中，見圖 2.39。

而本研究所設定恆濕恆溫箱的加溫速率為 $20^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ ，最高溫度維持在 80°C 且持續維持 15 小時，降溫速率與加溫速率相同。由圖 2.40 可看出，所使用之 B 和 C 黏貼膠在溫度 80°C 的情況下，FBG 的波長值會隨著時間增加而慢慢降低，尤其以 C 黏貼膠降低速率愈快，則表示 B 和 C 黏貼膠的黏著力會因溫度所影響。反觀所使用之 A 黏貼膠，其 FBG 波長值不會因時間增加而降低，代表其黏著力不會因溫度所影響。

表 2.1 黏貼膠特性說明

型號	外觀	黏度(cp)	耐溫(°C)	固化時間	完全固化	特性
POWER 3077	透明	1000	-54~95	15~30 秒	24 小時	1.不活化材質 2.高黏度 3.大間隙填補 4.高耐震
353ND	琥珀色	3000~5000	-55~250	80°C : 30 分鐘 100°C : 10 分鐘 120°C : 5 分鐘 150°C : 1 分鐘		1.高黏著性 2.高透光性 3.高穩定性
JA643	淡黃色	90000~110000	-40~135	135°C : 45 分鐘		1.高穩定性 2.耐衝擊 3.高黏著性

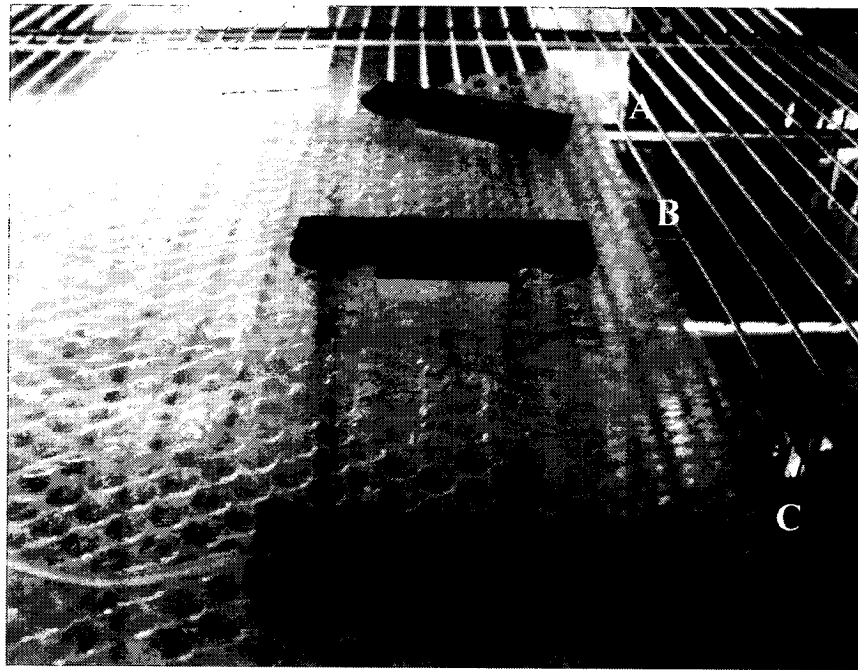


圖 2.39 測試試體於恆濕恆溫相箱示意圖

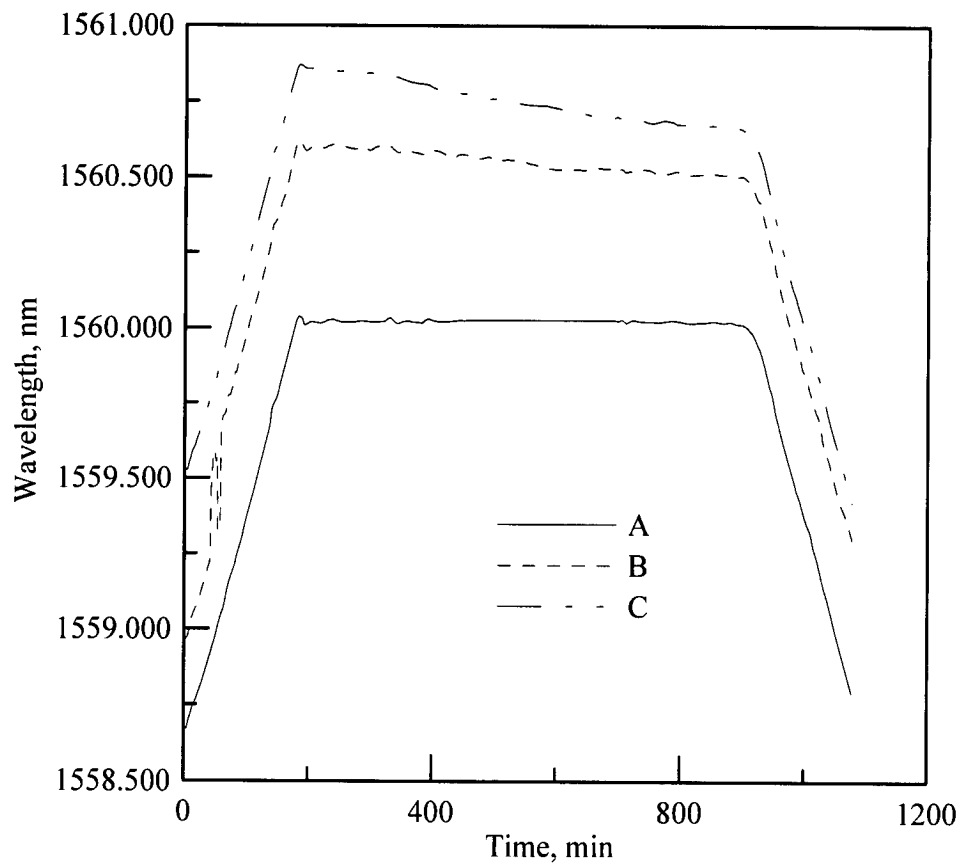


圖 2.40 黏貼膠受熱時 FBG 之讀數變化圖

另外，本計畫再次針對三種黏貼膠，黏貼於鋼模片施作八次來回

之-20 度至 70 度溫度測試，如圖 2.41 所示。圖 2.42 與圖 2.43 所呈現結果，該兩種黏貼膠並不會受來回高低溫溫度影響其黏著力大小。圖 2.44，當 C 膠進行第二次來回溫度測試時，可發現其黏著力明顯下降許多，隨後幾次來回溫度測試，黏著力下降幅度趨於平緩。

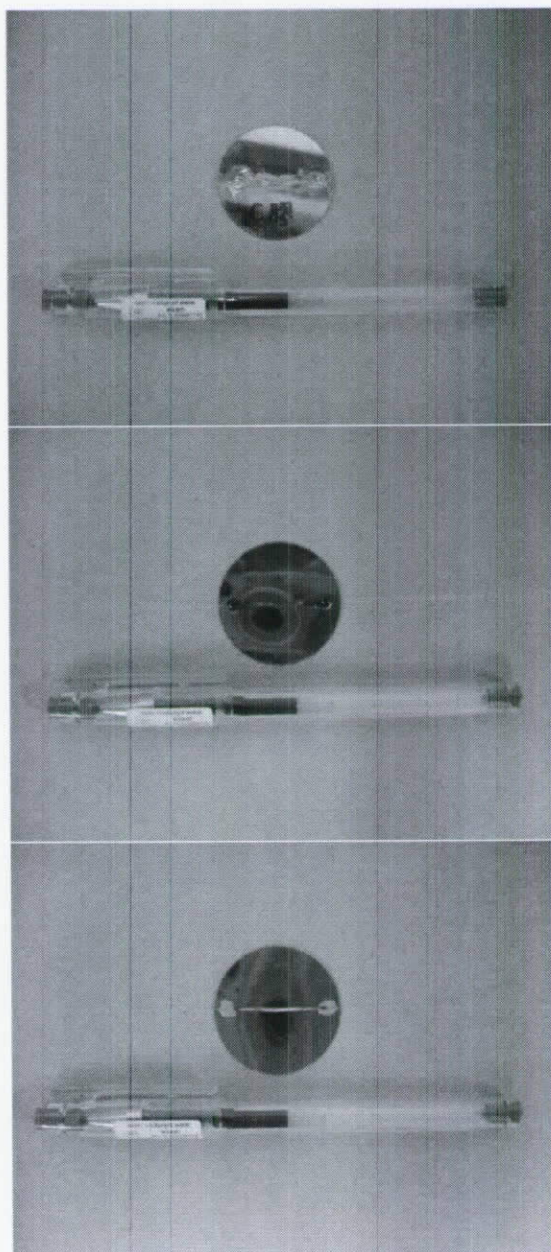


圖 2.41 三種黏貼膠於鋼模片之黏著力測試

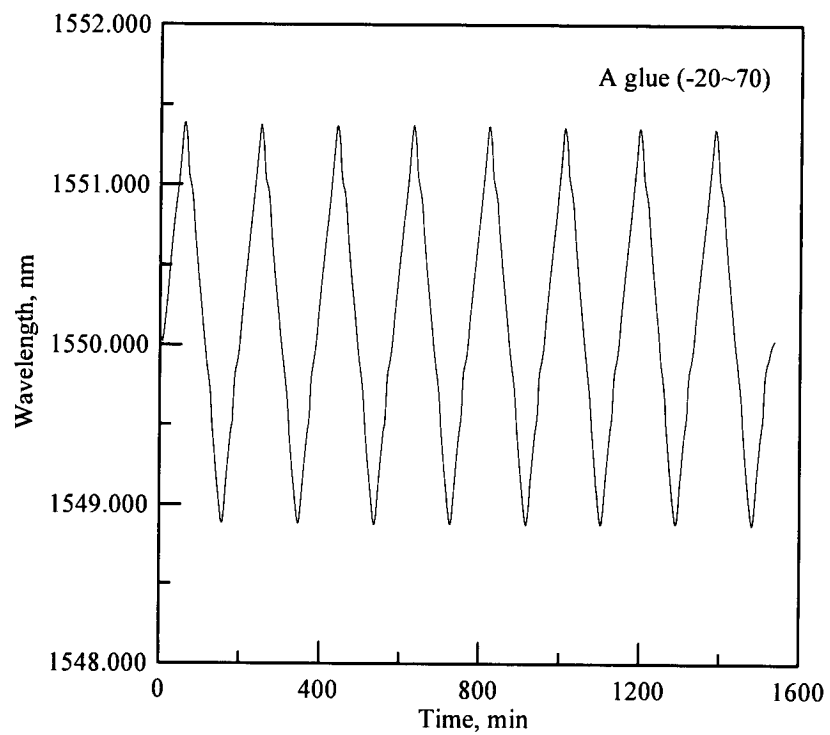


圖 2.42 A 膠黏著力測試結果圖

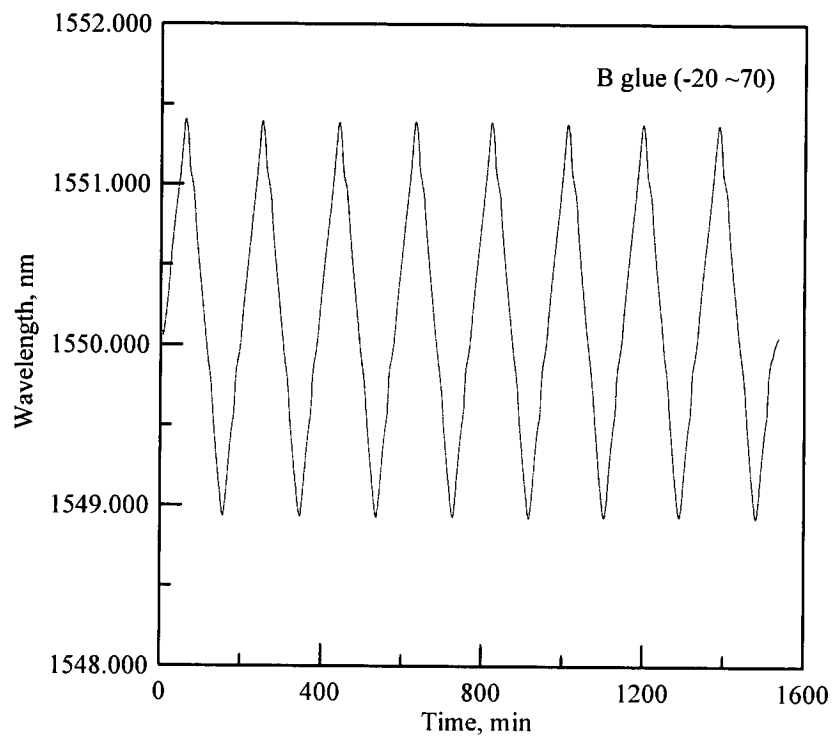


圖 2.43 B 膠黏著力測試結果圖

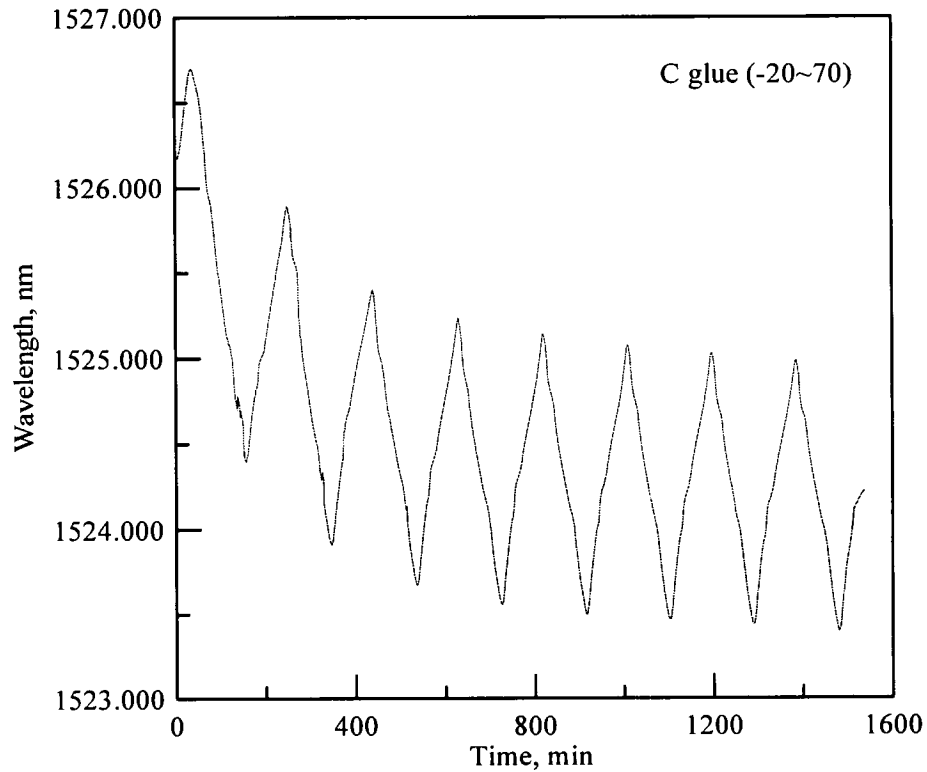


圖 2.44 C 膠黏著力測試結果圖

綜合上述的結果，本研究將採用 A 膠黏貼 FBG 於鋼模片表面。

光纖光柵水壓計之耐久性評估

關於老化試驗本研究根據中華民國國家標準 CNS 3556 進行，其步驟如下：

1. 所用之老化試驗機或類似裝置，其溫度之許可差不得超出 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。
2. 老化試驗之溫度為要求為 70°C ，且依照本研究之需要將等週期 FBG 水壓計放入裝滿水之容器裡。
3. 試驗所需時間為 24hr、48hr、96hr、168hr、336hr，每階段皆記錄需要之數據。

如圖 2.45 所示，將等週期式光纖光柵水壓計至於裝滿水之容器中，並將水溫加至 70°C 及使得水溫變化不超過規範所規定之容許範圍值(見圖 2.46 所示)。爾後，分別記錄每階段之數據。而圖 2.47 顯示本次試驗所得之結果，該圖所呈現當時間增加至 5000 分鐘而 FBG 波長值變動量約為 70pm ，初步評估其等週期式 FBG 水壓計並未有脫膠現象，但後續仍需將等週期 FBG 水壓計重新標定並與未施作老化試驗前所做試驗結果相互比較。

圖 2.48 所示，為等週期式 FBG 水壓計置放於密閉式儲存槽中，並予以加壓至 300kPa ($\sim 3\text{kg}/\text{cm}^2$) 及維持至 5000 分鐘，由此圖所得出 FBG 波長變動量約為 20pm ，其表示在固定依壓力作用下($\sim 3\text{kg}/\text{cm}^2$)，初步評估等週期式 FBG 水壓計受潛變效應約 $20\mu\epsilon$ 。圖 2.49 為等週期式 FBG 水壓計潛變試驗過程試驗之架設。表 2.2 為傳統水壓計與 FBG 水壓計比較。

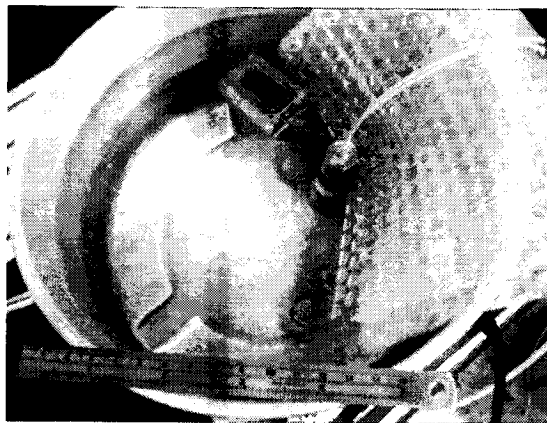


圖 2.45 等週期式 FBG 水壓計置於裝滿水之容器示意圖

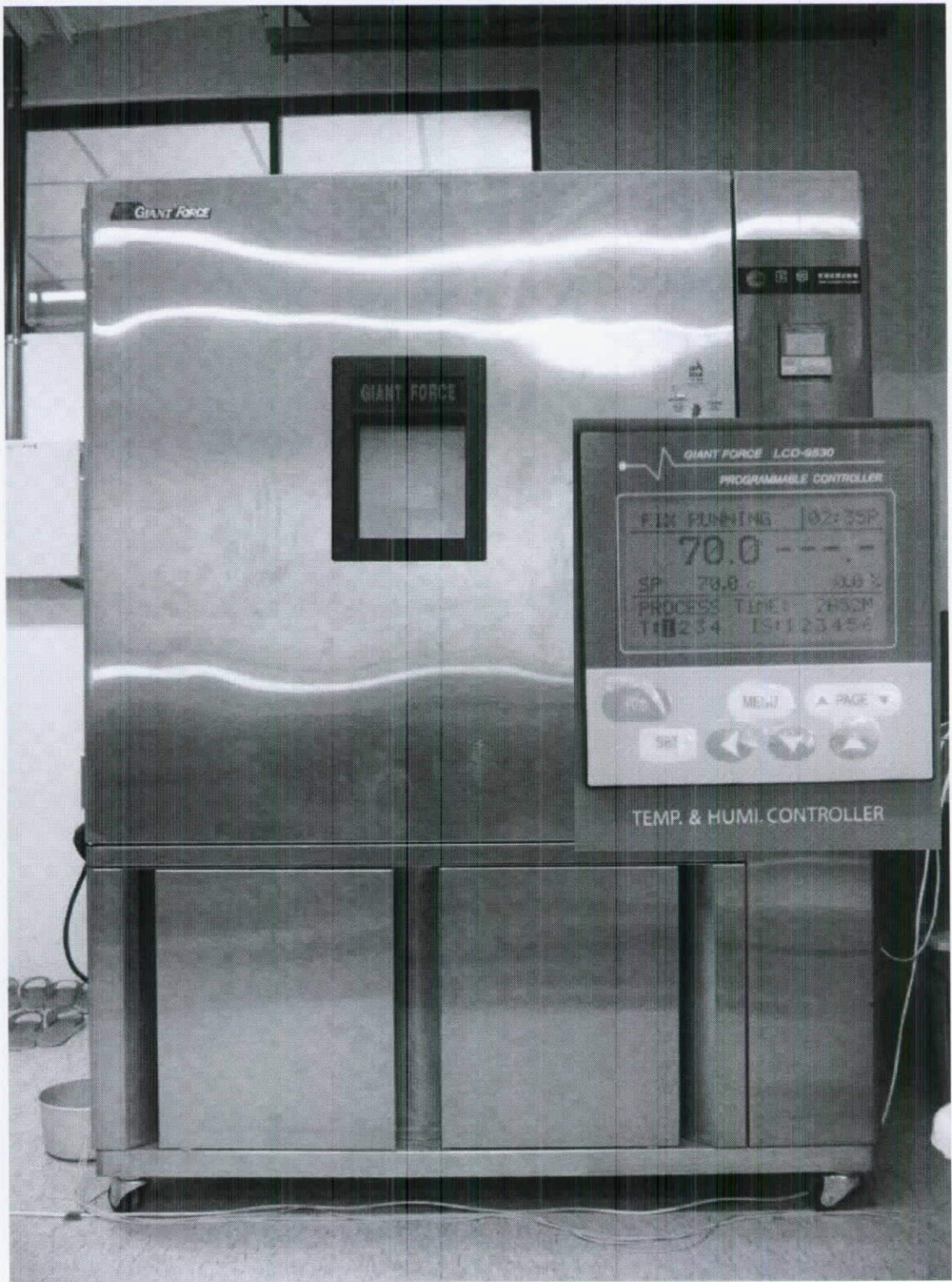


圖 2.46 恆濕恆溫加熱過程示意圖

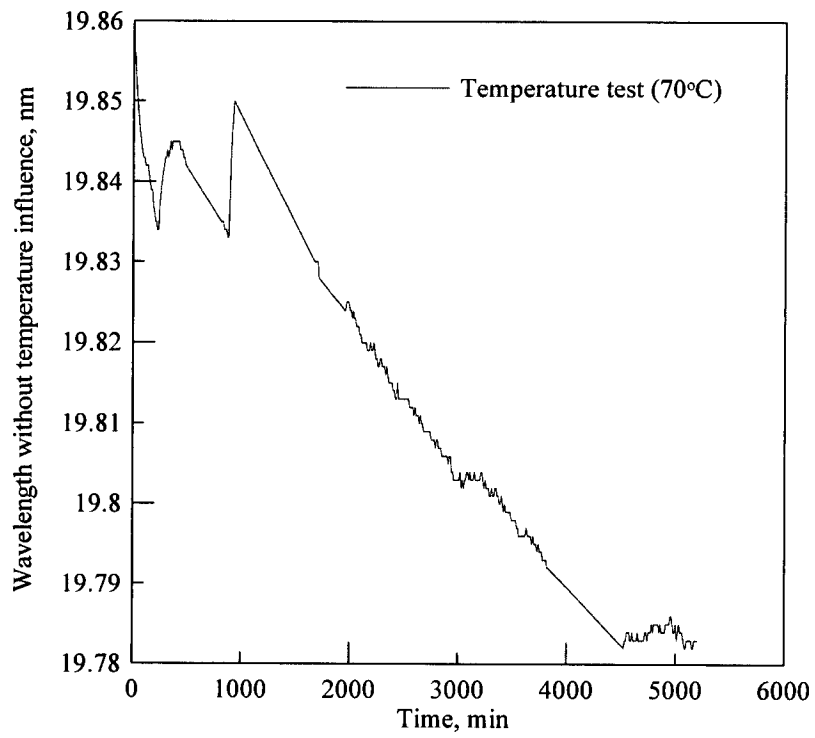


圖 2.47 等週期式 FBG 水壓計老化試驗結果圖

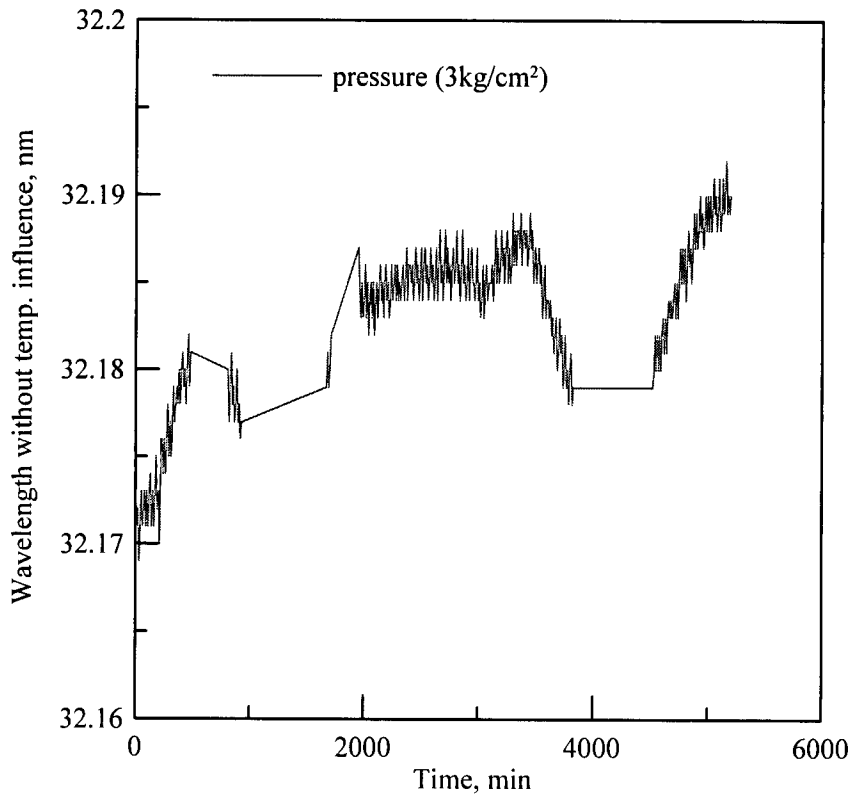


圖 2.48 等週期式 FBG 水壓計潛變試驗結果圖

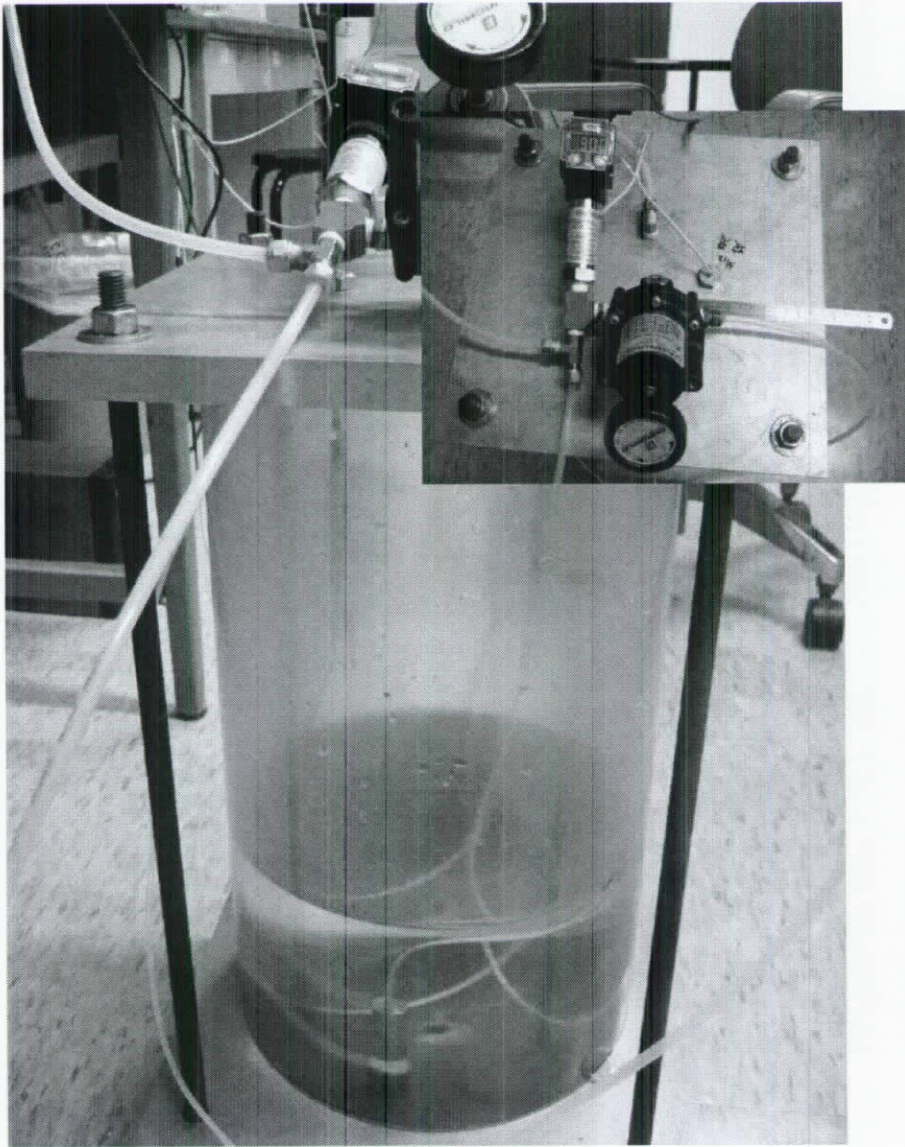


圖 2.49 等週期式 FBG 水壓計潛變試驗過程示意圖

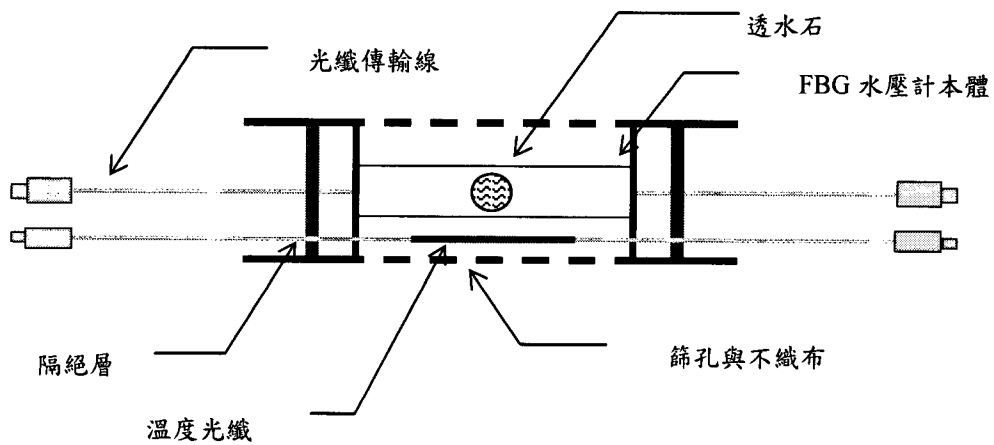
表 2.2 傳統水壓計與新發展 FBG 水壓計之初步比較

監測技術	傳統測水壓計	FBG 水壓計
功能與特性	使用應變片感應壓力所導致一薄膜之變形，以電壓或電流傳遞訊號，非分佈式設計。	使用 FBG 感應壓力所導致一薄膜之變形，以光傳遞訊號，部分分佈式設計。
應用限制	受潮濕環境影響容易產生短路，壽命有限，非分佈式設計不易大量使用	體積小，材料穩定，適於大量而分佈式之佈設。
儀器放置方式	下孔式(downhole)： 精密的水壓計需將擷取系統置入在地層內，減少傳輸線雜訊的影響。	上孔式(uphole)： 精密的儀器放置於地面，僅需將 FBG 置入地層。
電子元件型式	電子感應器： 電子感應器需要外部電源供應以維持或激發電子元件功能。	傳輸線式傳感器： 傳感器不需供應電源，僅在量測時發送光源進行檢測即可。
耐久性與使用壽命	內部為複雜昂貴電子元件，容易受水、濕氣、雷擊影響而喪失功能或降低耐久性，平均使用壽命短。	傳感器無複雜電子元件，因其傳輸線式特性而不易受水與濕氣、影響功能性。
管理維護便利性	雖可自動化，仍會因為主動式與下孔式特性而不易管理維護。	FBG 技術易於自動化，提供遠端管理便利性，透過光譜變化可自我檢測光纖狀態，便於維護。
安裝成本	少量時，成本適中但大量使用時成本過高。	少量時，成本高但大量使用時其單價適中。
成本效益	傳統水壓計單位造價昂貴，成本隨數量而增加，但效益則因其不易管理維護而降低。	FBG 技術透過分工器可進行一機不同監測功能與多點監測，有效降低整體監測系統成本，並可獲得良好的效益。
精度	0.1cm~10cm，可隨現場需要調整。	精度一般為 5~10 公分。

2.6 水壓計安裝方法說明

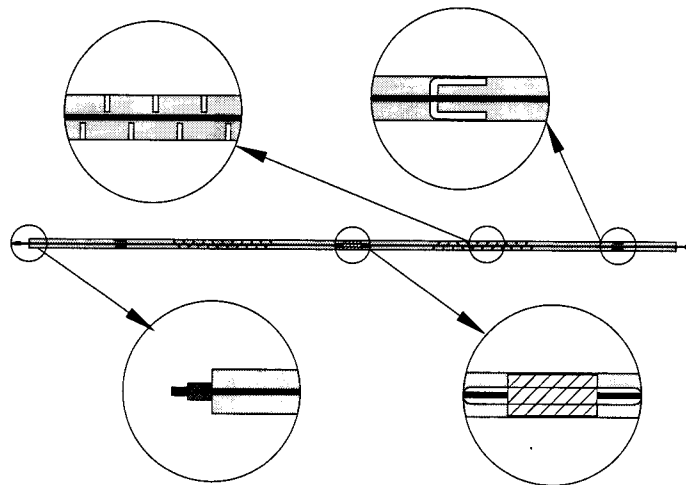
傳統開口式水位計以手動的方法量測，由於封層不易，在同一鑽孔中通常只能安裝兩個水位計。近來有用電子式水壓計放入水位計內以便於自動紀錄水位之變化。但電子式設備有耐用性不佳，易受電磁波干擾等之缺點。本計畫預計將採取的方式為將等週期 FBG 水壓計固定於長 0.5m、直徑約為 27mm 的 PVC 管內，而 PVC 管外將予以打孔和包不織布並在孔內上下處予以隔絕，只能使得該範圍透水，而該部分稱為感測單元。至於連接部份，以相同直徑大小之 PVC 管作銜接以保護光纖傳輸線，其在鑽孔內之裝設示意圖如圖 2.50 所示。圖 2.51 為感測單元實體圖，將製作完成之等週期光纖光柵水壓計放置於具有篩孔之 PVC 管中心處，依據需求其具有篩孔之 PVC 長度可依業主或量測範圍需要而調整，而本次所製作之感測單元長度為 50 公分，而阻隔層設置於距離 PVC 管兩端處往內各 15 公分處，其方法是使用現有之水管塞頭並用拉釘與以固定，最後灌注灌注膠增加其阻絕效果。

此一安排有利於水壓計之現場安裝，光纖光柵水壓計以及其連接之 PVC 管可以直接安裝於鑽孔中而無須另外安裝水位管。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（例如白皂土）回填，如圖 2.52 所示。



透水縫隙與不織布

水管塞頭



PVC管與光纖線

水壓計放置處

圖 2.50 等週期光纖光柵水壓計於具有篩孔之 PVC 管配置圖

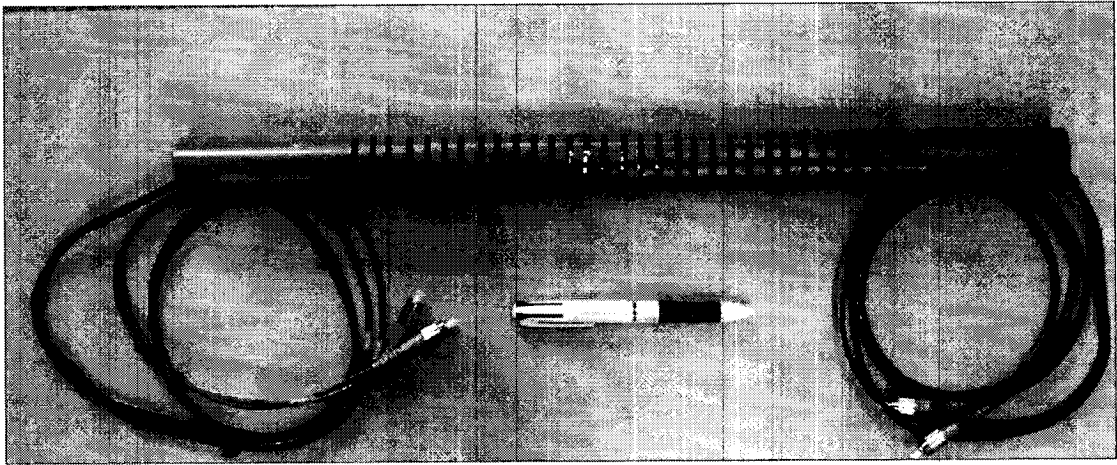


圖 2.51 感測單元實體圖

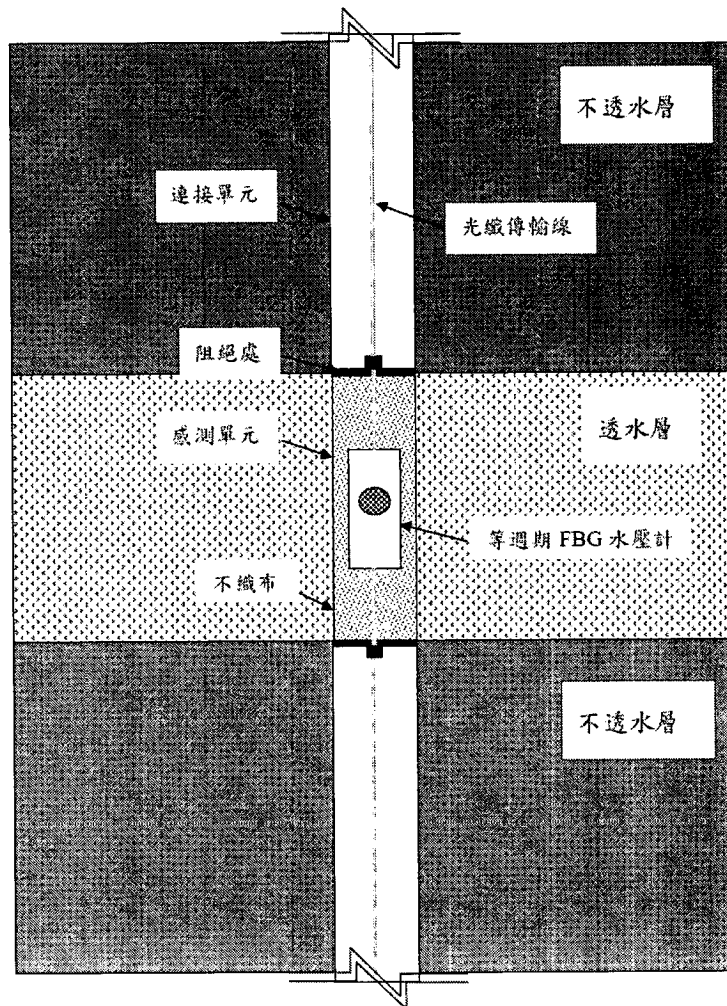


圖 2.52 等週期 FBG 水壓計裝置改良示意圖

為了證明阻隔層之阻隔效果，本計畫先利用未具有篩孔之 PVC 管作測試並在 PVC 管內埋設光纖傳輸線，其測試架構如圖 2.53 與圖 2.54 所示。而測試方法如下說明：

步驟一：封層

先使用「水管膠」將套有光纖線的水管塞頭與測試用 PVC 管之間的縫隙予以封住，再以「拉釘」將 PVC 管與水管塞頭固定，最後以「灌注膠」將水管塞頭填滿 5-8 公分，等待膠乾即完成「封層」。

步驟二：壓力測試

將裝有光纖線並封層完成之 PVC 管一端給予輸入 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 之壓力（約 300kPa ），當 PVC 管內壓力達到 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 之壓力時，透過輸入壓力之管線所配置之閘門阻斷壓力源，藉由 PVC 管另一端所配置之電子式水壓計及運用 Agilent 電表連續擷取 PVC 管管內之壓力變化，假若 PVC 管內壓力隨時間變小時，則代表阻隔層未阻隔確實。圖 2.55 為連續擷取 PVC 管內壓力變化圖，由該圖可知 PVC 管內壓力並未明顯減少，代表此阻隔方法是可行的，而 PVC 管內壓力微量的變動，在感測儀器誤差範圍之內，主要是電子式水壓計受外界溫度變化所影響，使得量測壓力值有些微的變動。

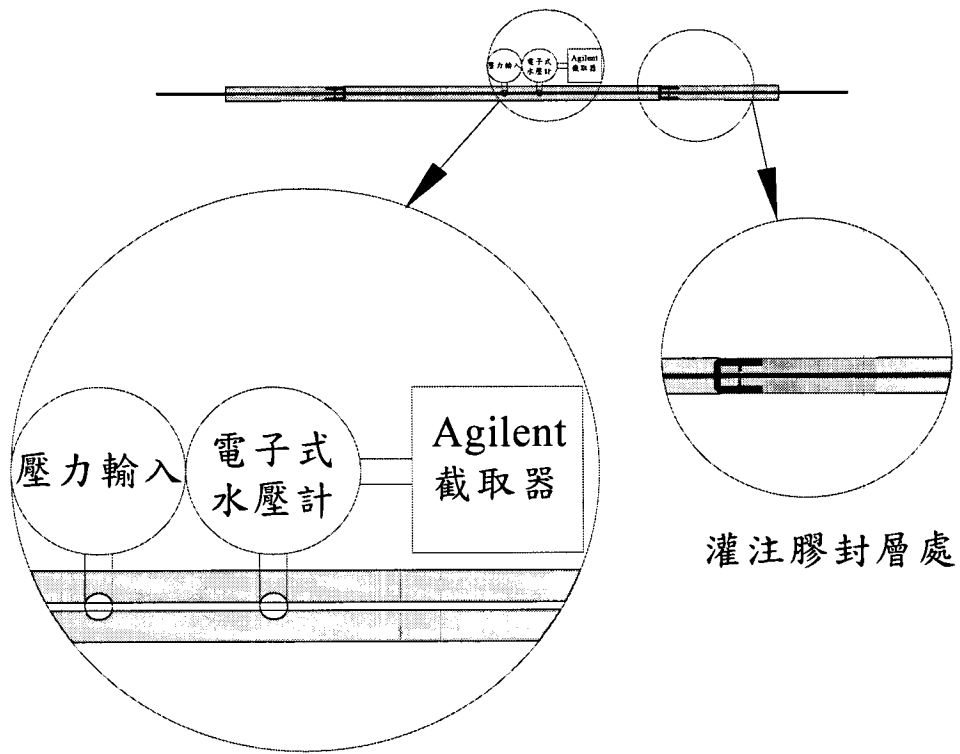


圖 2.53 阻隔層測試架構圖

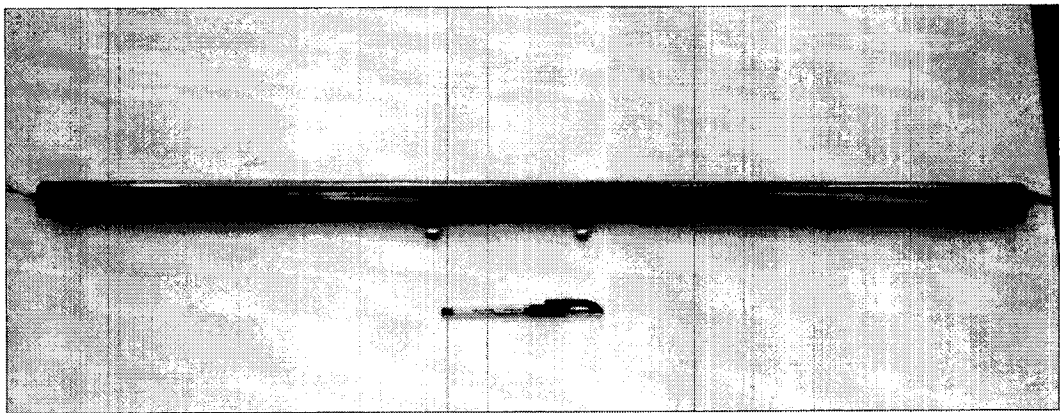


圖 2.54 PVC 管壓力封層測試實體

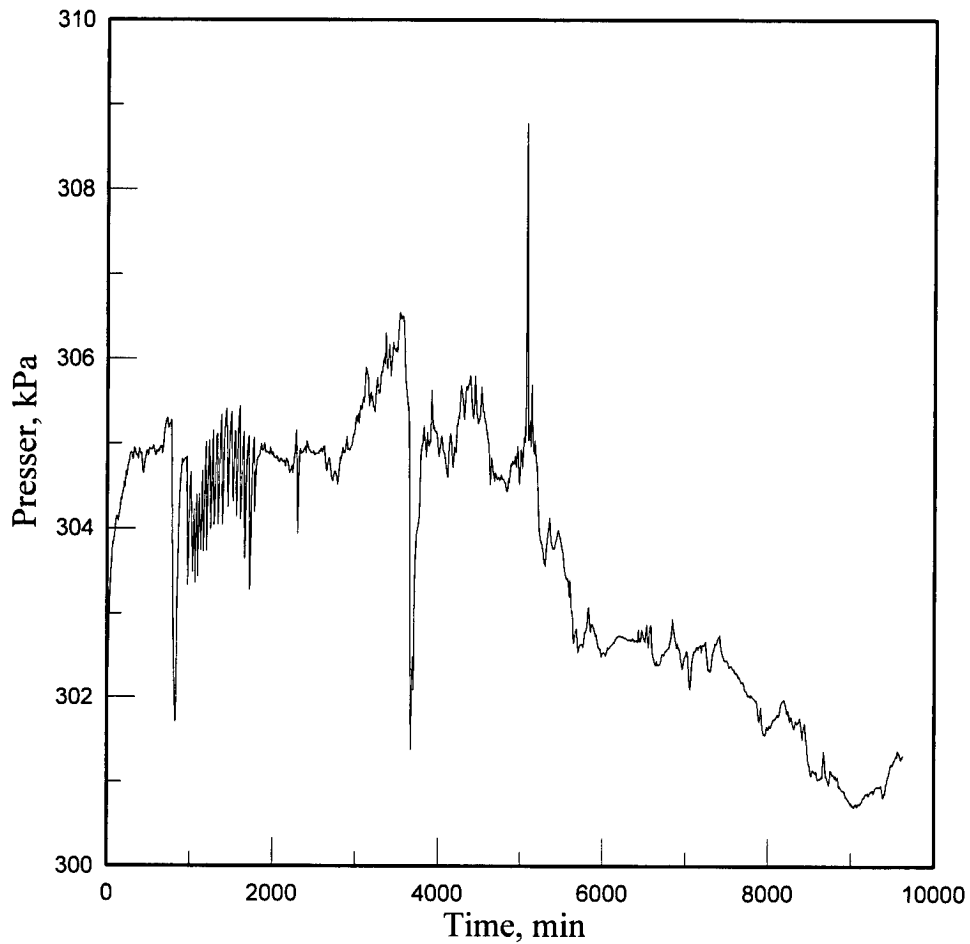


圖 2.55 PVC 管內壓力隨時間變化圖

本計畫計畫使用等週期波長式 FBG 水壓計，並特別製作符合現場需求精度與量測範圍之光纖光柵水壓計。

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，所以將 FBG 水壓計本體兩側設置阻絕層並固定於 PVC 管之中心處，於該 PVC 管外圍施作間距 5mm 寬 2mm 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。

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 2.56。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。

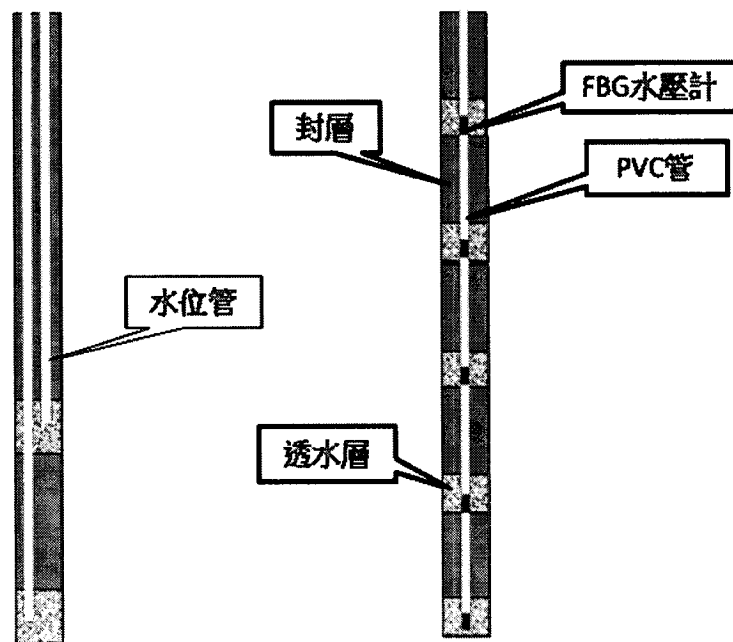


圖 2.56 大量串接 FBG 水壓計與傳統水位管之比較

封裝完成後之 FBG 水壓計實體如圖 2.57 所示，現場施工如圖 2.58 所示。分佈式水壓的量測可以提供 1.即時的水壓監測系統，以增進監測效率 2.提高義興電廠邊坡的安全度，降低發生破壞的機率 3.依據所收集到的資料，提供未來其他水庫邊坡穩定分析與設計的參考。

由分佈式水壓的量測來對邊坡進行安全監測與分析是本計畫的主要目標。分佈式水壓的量測不同於水位井的量測方式，其量測結果

可分為下列 2 點說明：

1.當暴雨來臨時，地層內水壓有可能會產生上(孔頂)大下(孔底)小的現象，並隨著時間的延長，最大水壓會逐步向下延伸，最終達到一平衡狀態，此現象推估主要是由於地表與地底下滲流所產生。

2.傳統的水位管是藉由水位管不同深度在水位管上的微小開口，收集沿著水位管不同深度地下水的流入並於水位管底部的量測水位變化。而現地地層內可能具有受局部地質構造儲存的棲留水，藉由地層內的分佈式水壓可以直接量測到此棲留水的水壓變化。

暴雨來臨時，接近地表的土層內會產生水壓急遽上升的現象，現有的邊坡穩定分析方式是藉由地下水位管的量測來定義地下水位面的高度，然後假設地下水壓力的分佈是由地底朝地下水位面呈現三角形線性遞減。此種方式將無法量測與分析暴雨來臨時地下水位面以上地層內的水壓力變化，此種水壓力急遽上升的現象與機制有可能是導致邊坡滑動的主要原因之一。

另外對於棲止水壓的量測，可以提供地層內不同深度的水壓力變化量測，此種現象可能是在現有水位管量測低水位狀況下邊坡會發生滑動的機制與原因之一。土壤的總應力為有效應力加上水壓力，現有的水位管量測無法直接量測得到不同深度的水壓力變化，藉由多點分佈式的水壓力量測，可以針對不同封層內每一水壓計進行量測與分

析。本工作團隊依據過去的經驗(阿里山監測)已經驗證了分佈式水壓計的量測效果，圖 2.59 為莫拉克颱風時在阿里山分佈式水壓計的歷時量測結果，圖 2.60(a)為水壓計 3D 歷時量測結果，圖 2.60(b)為莫拉克颱風台 18 線雨量資料。

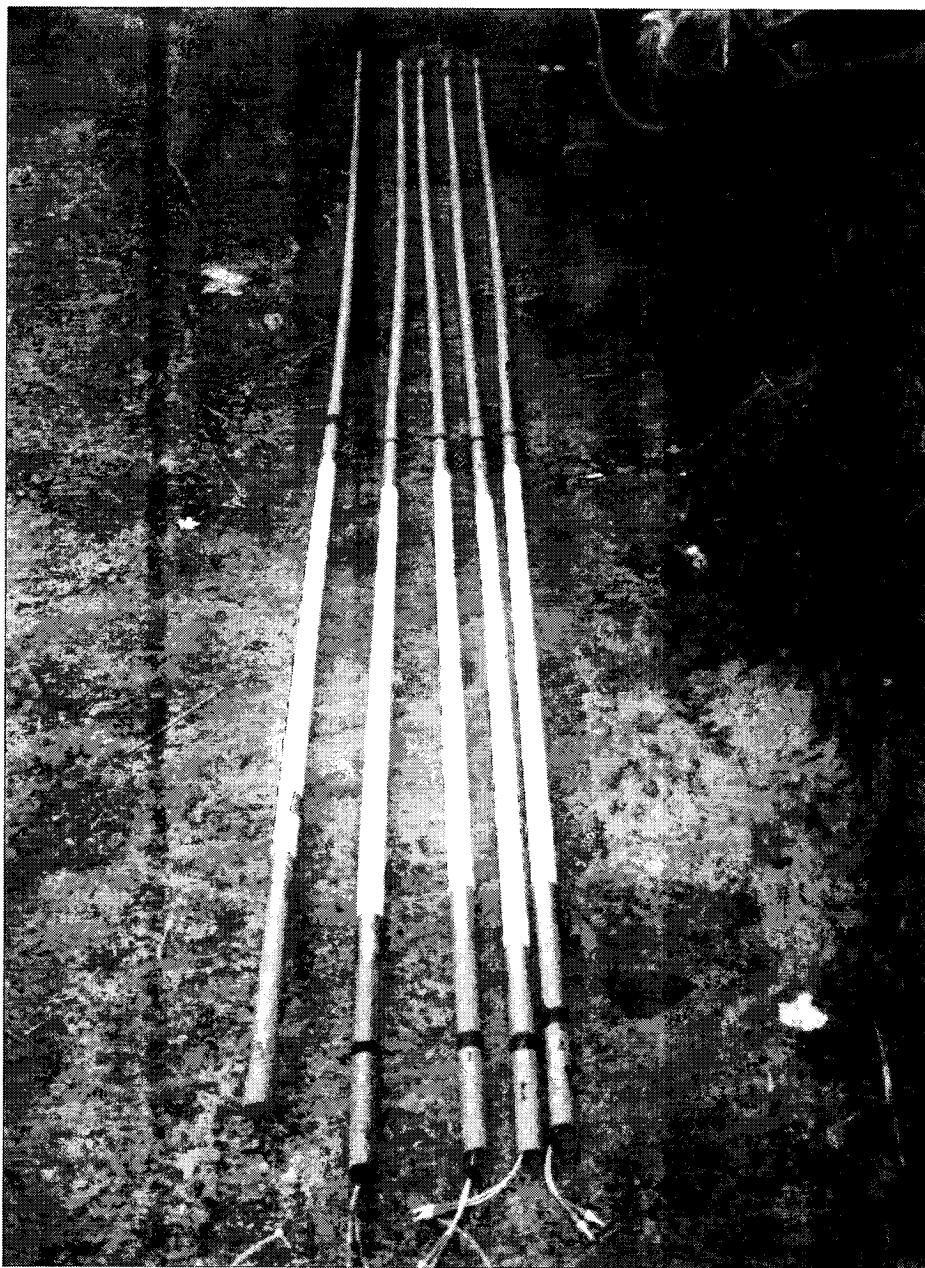


圖 2.57 光纖光柵水壓計封裝後實體圖

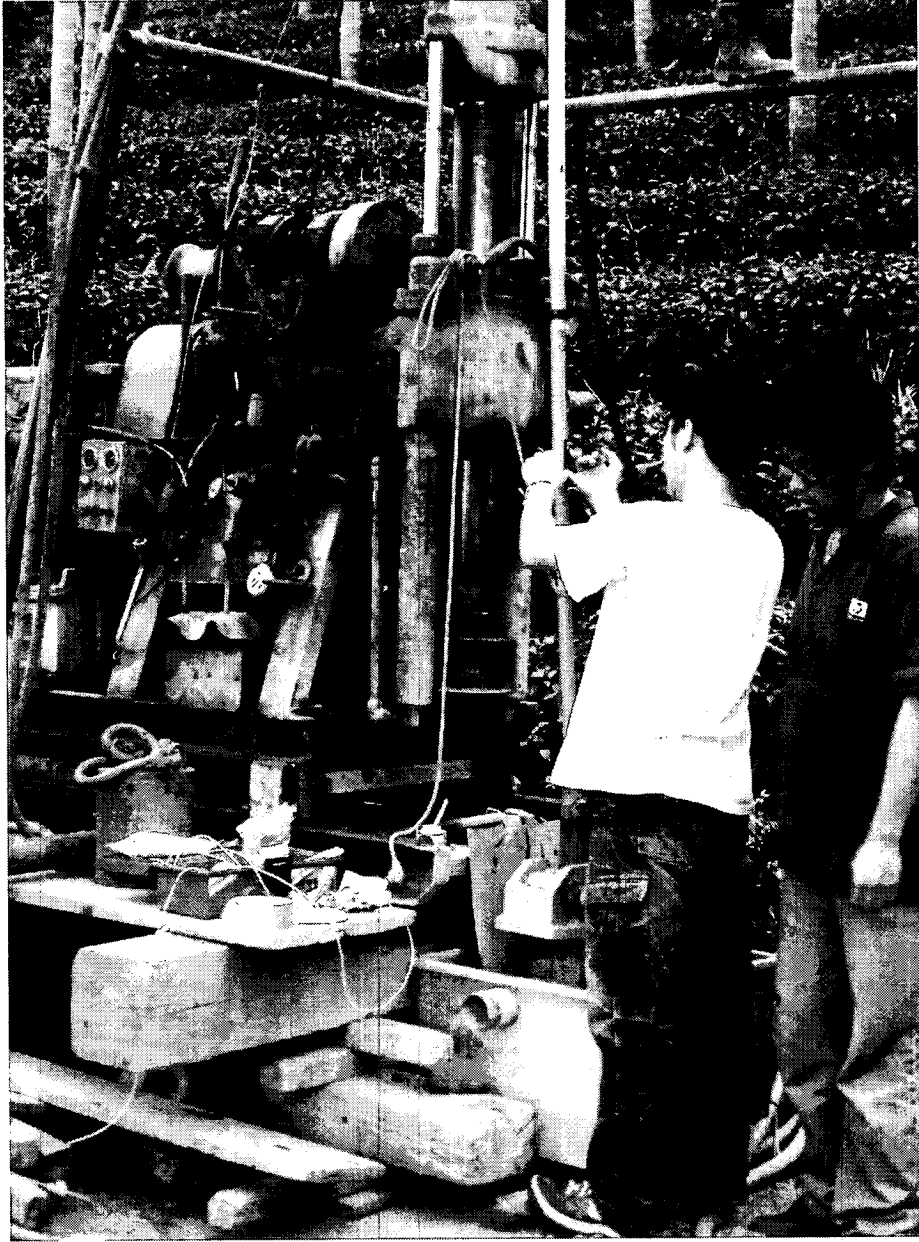


圖 2.58 光纖光柵水壓計現場安裝圖

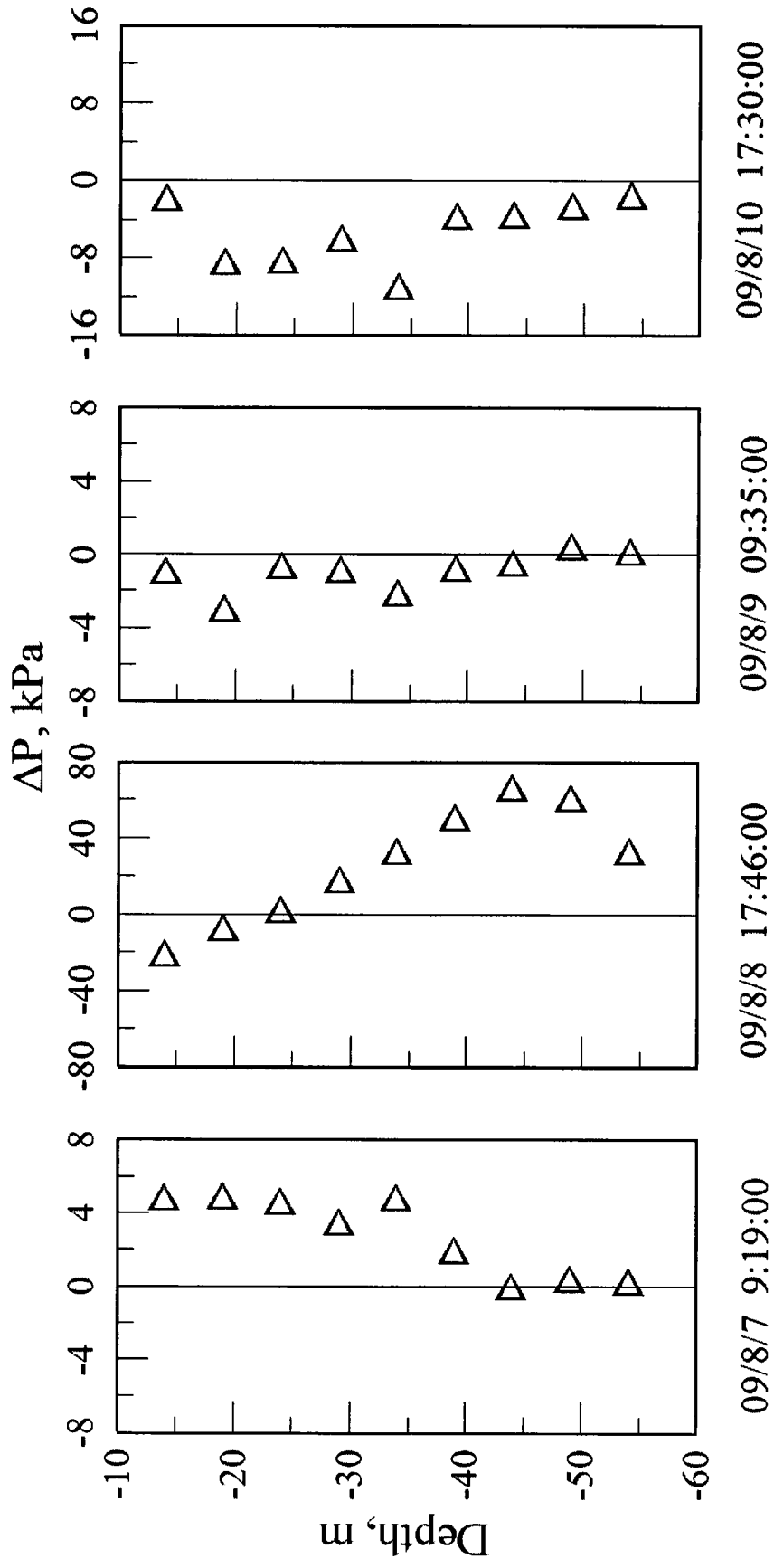


圖 2.59 台 18 線五彎仔地區於莫拉克颱風期間之水壓監測井水壓歷時變化

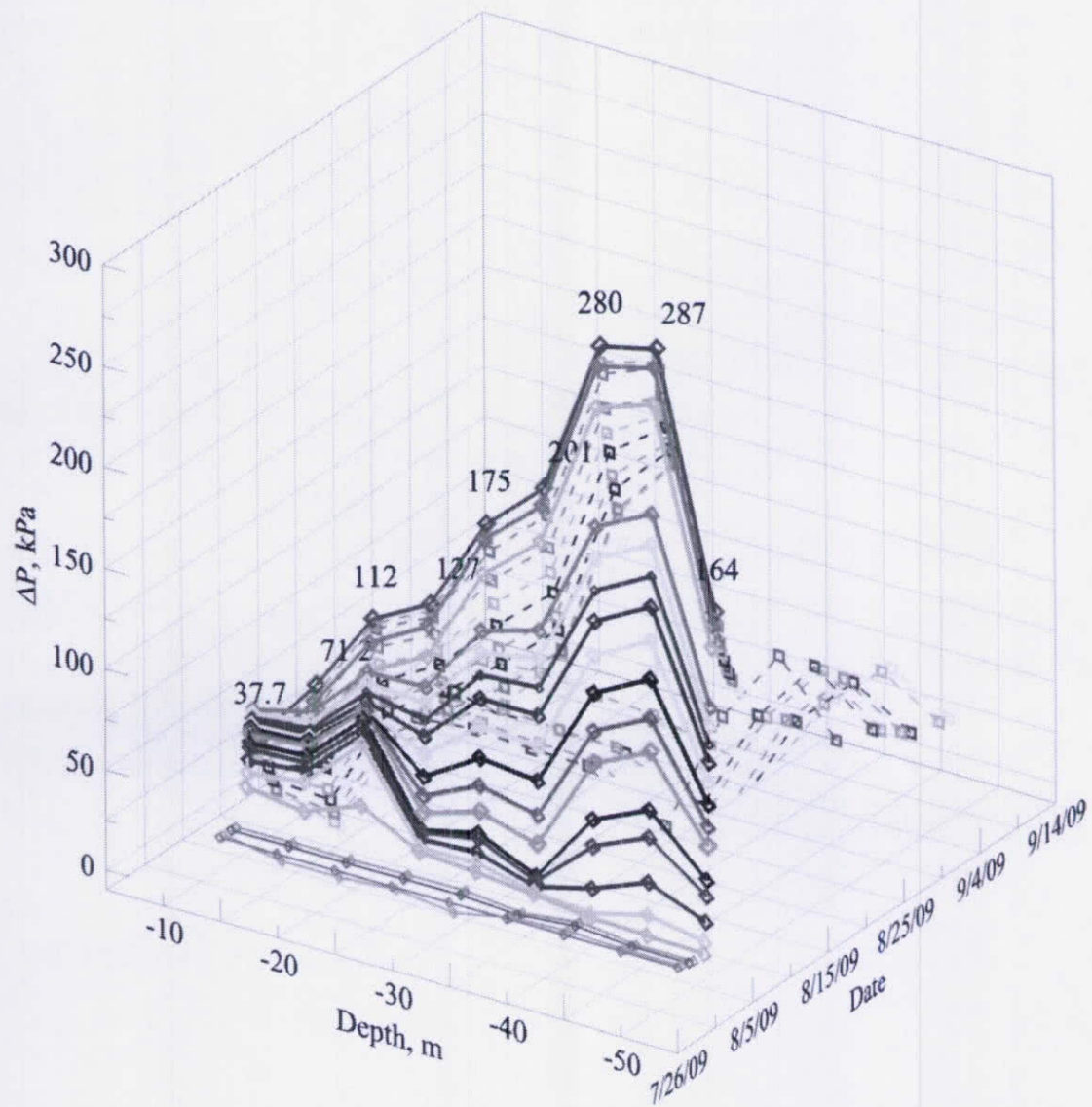


圖 2.60(a) 台 18 線五彎仔地區於莫拉克颱風期間之水壓監測

井水壓歷時變化

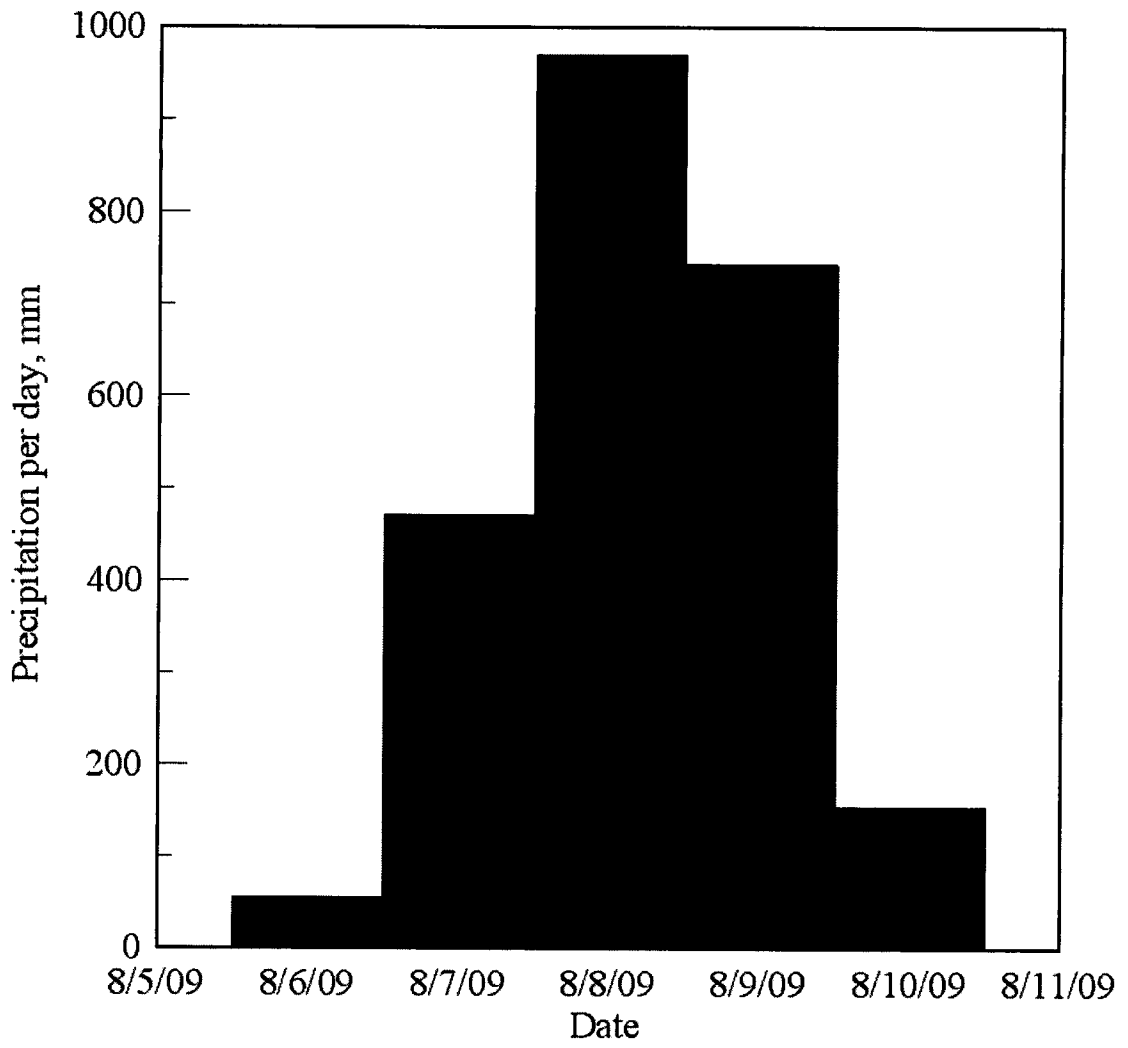


圖 2.60(b) 台 18 線五彎仔地區於莫拉克颱風期間降雨量資料

2.7 光纖光柵自動化擷取系統整合

由於光纖感應相對於傳統電子式監測儀器有許多優點，學術界與產業界已對如何將光纖監測技術應用於土木工程系統中投入了大量的資源。光纖光柵可能是現有許多光纖監測技術中最具有潛力而應用也最為廣泛之光纖感測技術。但是現有光纖光柵讀取設備多為國外進口，由光電專業人員設計，價格昂貴，加上土木或大地工程監測地區常處於潮濕惡劣環境及監測為長期性，另外，監測範圍也相當廣泛，而相鄰監測點位距離有時相距甚遠，必須利用光纜將每一監測點位連接集中於臨時監測站或工務所等地方，然而目前市面上所提供之光纖光柵解讀系統只能適於室內使用且擷取頻道甚少，故不盡然符合土木或大地工程監測所需。所以在實際光纖監測應用時經常需要使用光纖切換器（Optical switch）來增加光纖訊號擷取頻道數目而各系統間往往存在軟體介面整合的問題。

本計畫以工業級電腦作為光纖光柵解讀系統之硬體平台，以 Labview 程式軟體為系統整合之軟體開發介面，圖 2.61 展示為光纖光柵解讀系統之架構示意圖(李瑞庭，2005)。圖 2.62 與圖 2.63 為本計畫設備組裝完成圖與操作設計之軟體介面。

○ 監測機房

○ 光纖光柵解讀系統架構

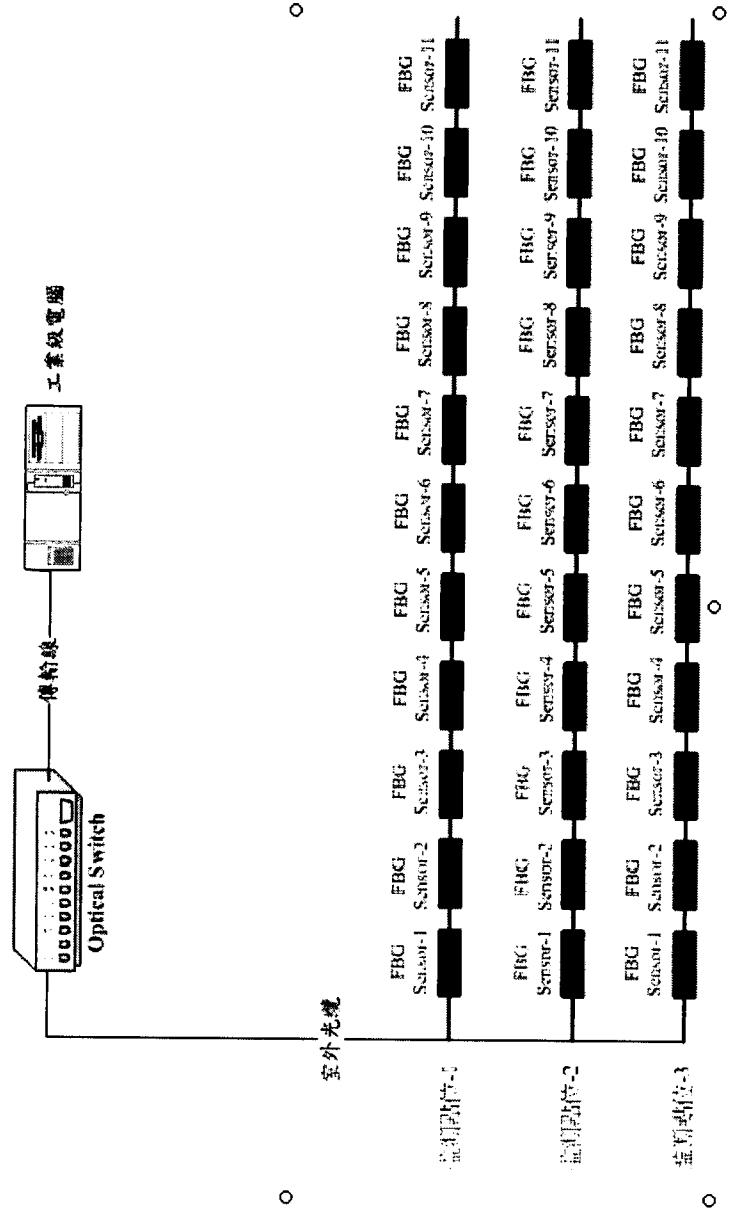


圖 2.61 光纖光柵解讀系統之架構示意圖

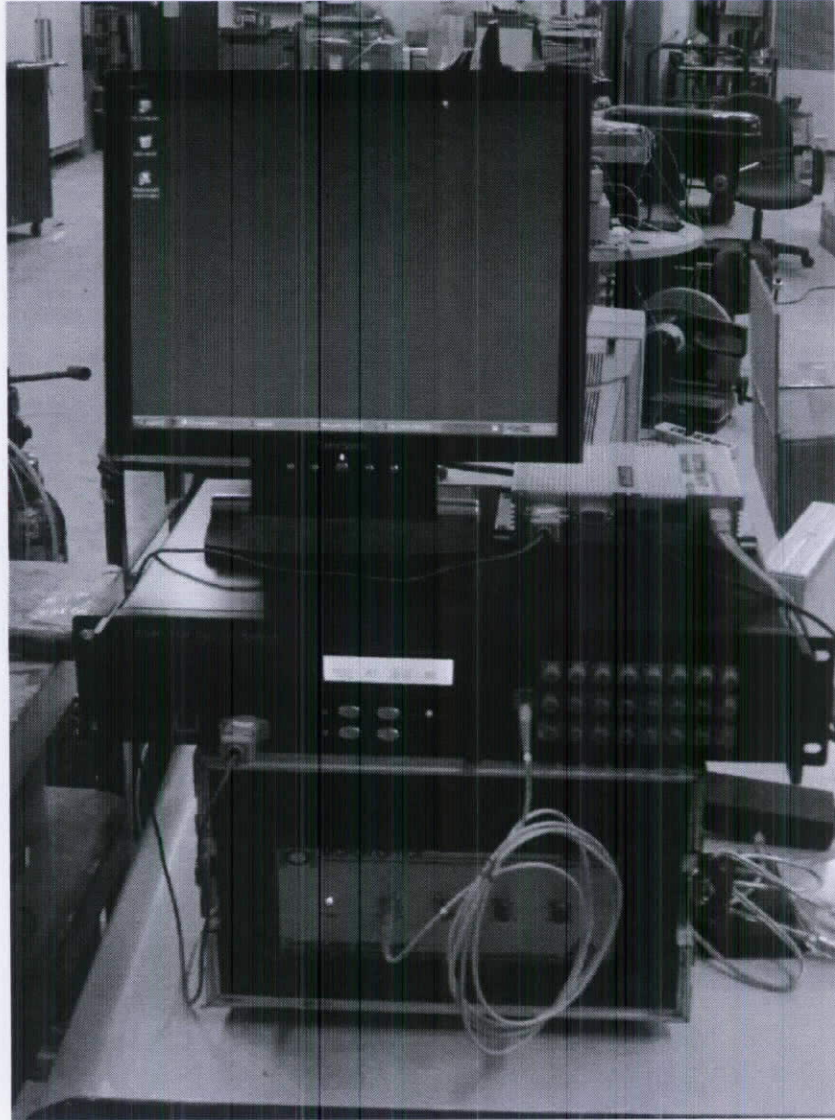


圖 2.62 光纖光柵擷取系統組裝完成圖

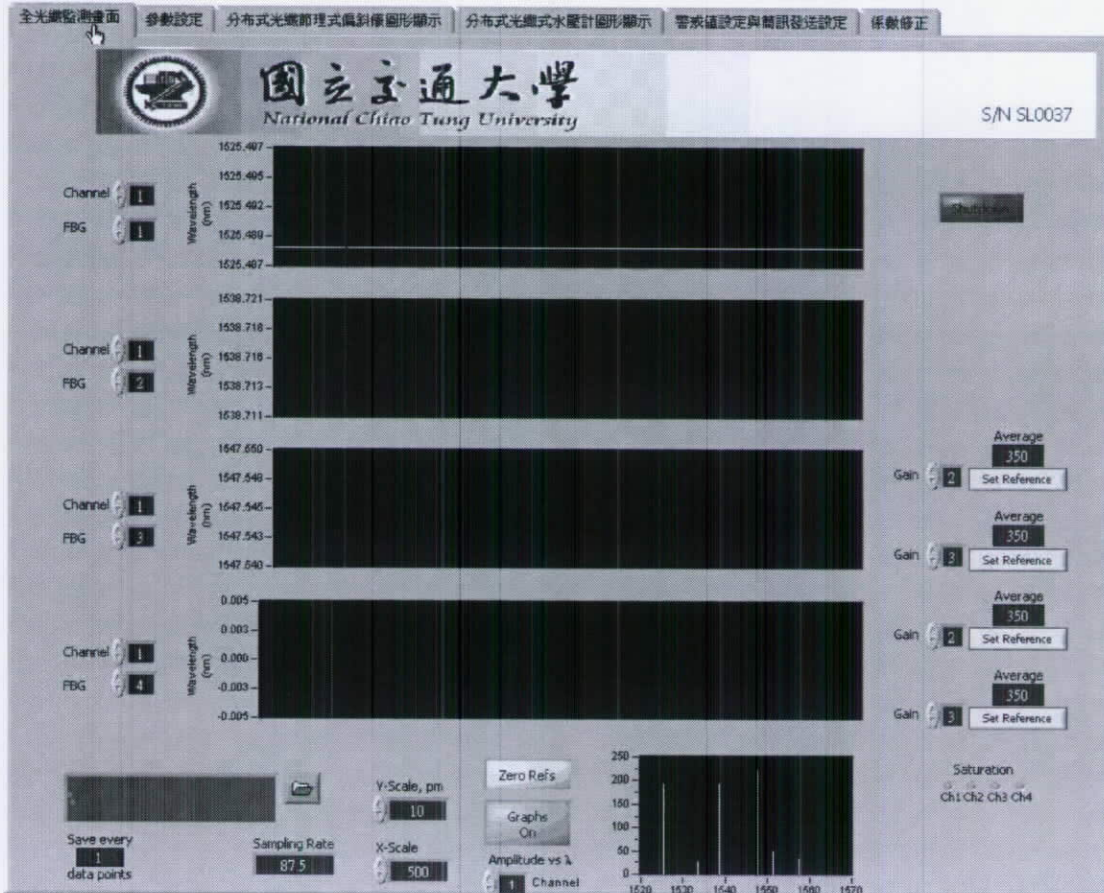


圖 2.63(a) 全光纖監測畫面展示介面

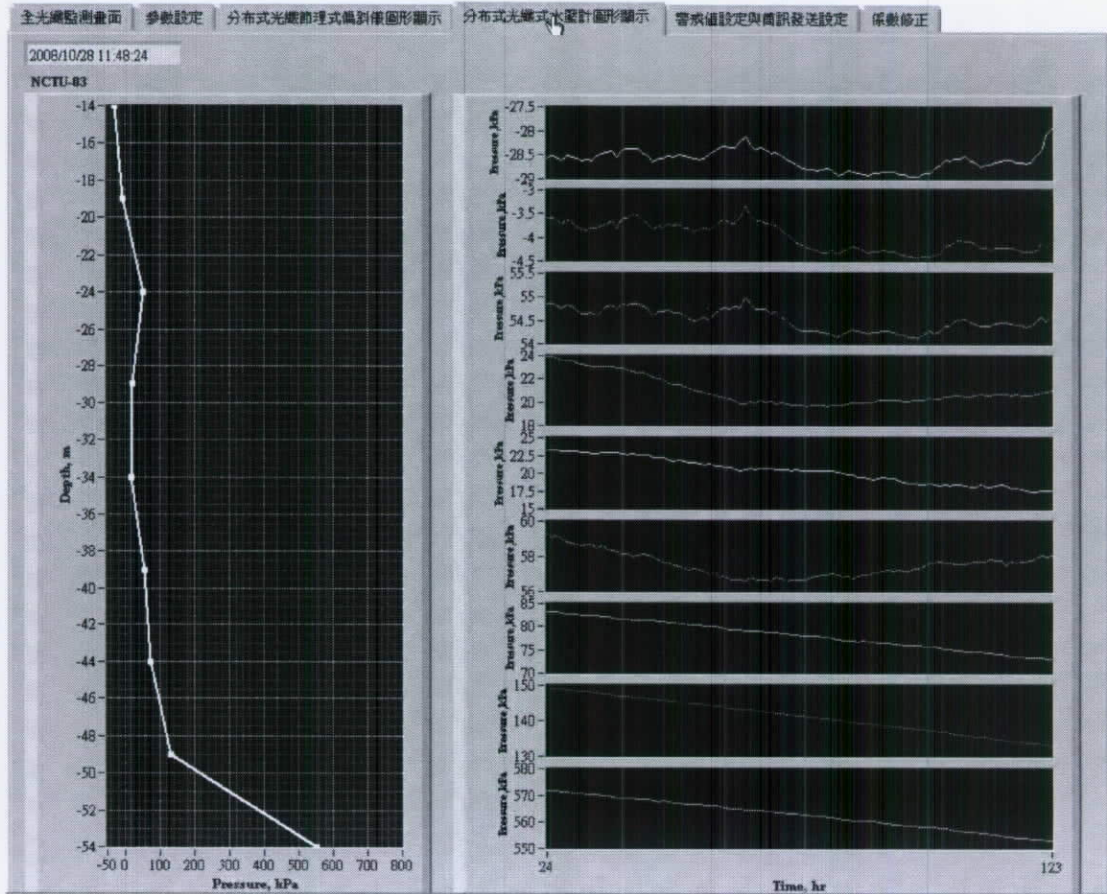


圖 2.63(c) 光纖水壓計歷時展示介面

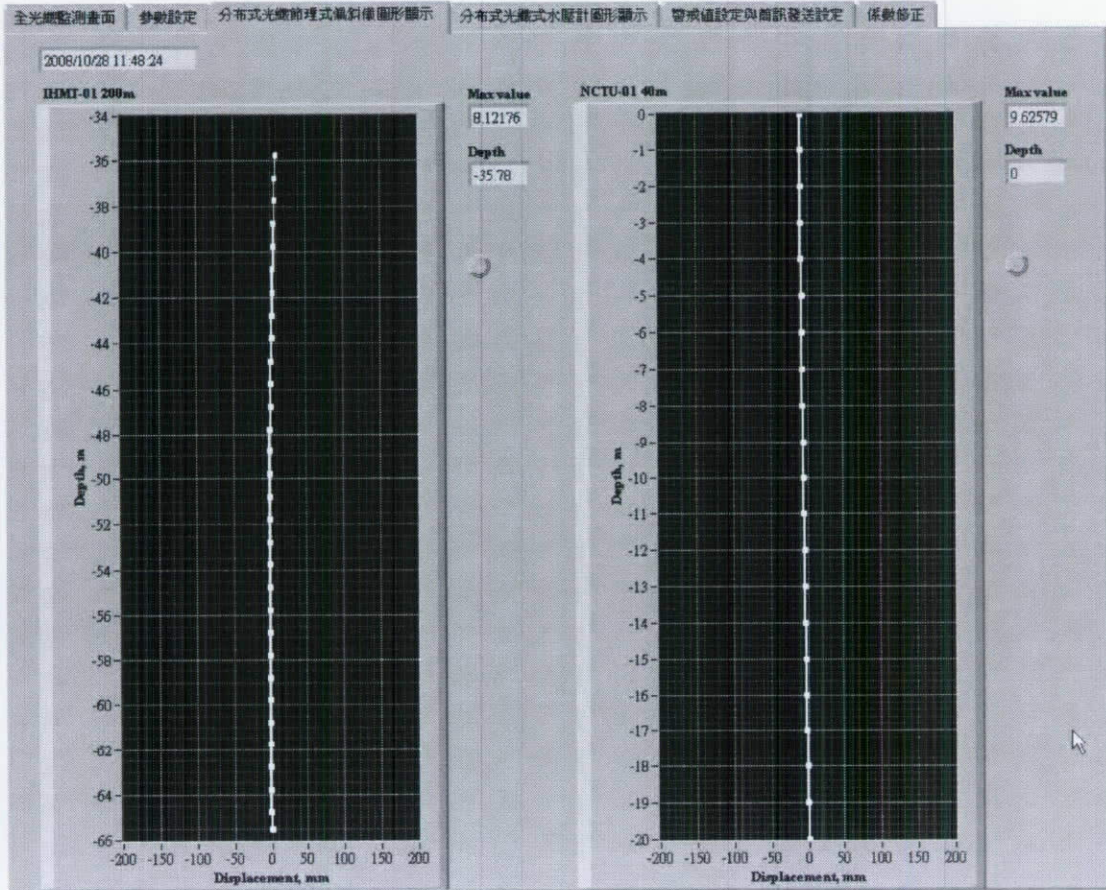


圖 2.63(d) 光纖測傾儀位移展示介面

2.8 現地水壓計安裝位置與量測結果

義興電廠附近崩塌地的行政區畫分隸屬於桃園縣復興鄉，位於榮華壩下游約5公里處，其發電用水乃藉由榮華壩抬高蓄水位，然後經由輸水隧道將水引至下游機組發電。義興電廠之前池及壓力鋼管，位在大漢溪左岸側標高255公尺至445公尺間之山坡上，其平均坡度約為三十度，為義興電廠之重要結構物(水利署北區水資源局，2009)。

根據98年度水利署北區水資源局榮華壩定期檢查報告與每月份工作月報，指出義興電廠輸水鋼管編號#31支墩混凝土基座於94年間產生龜裂，混凝土表面沿裂痕突出，95年6月經北水局修復後未有類似情形發生；96年12月現地檢查時又發現該處產生龜裂，長期觀察該裂縫有擴大之傾向，位於該處之L7收斂儀變化量亦略有增加情形。於97年5月迄今檢查其裂縫有再發生情況表面並略有惡化跡象，報告中指出可能原因為修補不良及本處基礎地質條件較差所致。

根據北區水資源局月工作報表指出，鋼管右側的邊坡S6、S7等2支傾斜管分別於地表下7~8 m處及17m處有一明顯潛在滑動面，S6號傾斜管累積變位量較95年10月量測時之上下坡面方向數據變動最多達2.5cm。S7傾斜管量測結果可能有一較深層滑動面(約27m深度，累積變位約5cm)形成，顯示鋼管右側之邊坡仍具潛移趨勢，且豪雨可能再度影響邊坡之穩定，除注意後續之變化外，必要時建議進行邊坡改

善。98年5月份工作月報表指出該月量測結果S7傾斜管變動較上月量測時之數據變動約增加0.1cm。

義興電廠可由北橫公路(台7號)省道約24.5公里處轉進該崩塌區，圖2.64為該崩塌區之遙測影像。依據經濟部中央地質調查所96年調查報告指出義興電廠附近崩塌地位於雪山山脈地質區內，以厚層砂岩或粉砂岩與砂岩薄互層為主，如圖2.65所示。在崩塌區岩層為灰白色膠結良好、抗蝕能力好之細粒至中粒之砂岩。崩塌區坡角岩盤由粉砂岩組成，地表由覆蓋一薄之堆積與礫石，新鮮之粉砂岩強度頗高，風化後之粉砂岩則因裂隙發達而強度較差。邊坡中段岩盤由粉砂岩與砂岩組成，其緻密堅實強度頗高。接近地表部分岩層，因為受風化與解壓影響，岩體破碎且容易積蓄地下水。另外電廠前池附近岩盤則以粉砂岩偶夾薄層砂岩為主，風化後的粉砂岩較為破碎且偶有黃泥填充於裂縫中。

依據過去歷年來監測資料，義興電廠上方邊坡崩塌地能有持續性蠕動之現象，且經濟部中央地質調查所96年鑽孔(圖2.66)與分析結果指出：

- (1).義興電廠的崩塌地其範圍可延伸至現今台7號公路上方的邊坡。
- (2).依據圖2.67中AH-07鑽孔地表下方34.5m與AH-01鑽孔地表下方44.5m兩處的連線為古滑動面，在此滑動面下方的岩層完整，滑動面

以上岩層即相當破碎。

(3).藉由AH-03與AH-05的皆含有20m左右厚度的崩積物質，可證明這古崩塌地的存在。

(4).由於有古崩塌層的存在，所以現今山坡岩層間有破碎帶及崩積物存在，而破碎帶、崩積層與岩盤的交界面及崩積層間等處都是有可能發生潛變的位置，也是發生潛變最主要的因素。

本計畫於 8 月 14 日進行現地勘察，並依據過去監測資料，發現主要滑動發生在面對義興電廠壓力鋼管右側邊坡上，又現地水位觀測資料指出平時現地水位高度約在地底下 40~45 米位置(經濟部中央地質調查所，2007)，所以本計畫選擇靠近原有編號 S6 與 S7 號測傾管孔位置旁各鑽一孔，每一鑽孔深度為 50 米，編號分別為 NCTU-01 與 NCTU-02(圖 2.68)，每一鑽孔內將安裝 10 個光纖水壓計，共計 20 個光纖水壓計，另外光纖訊號可以傳遞 10 公里以上，因此將在現場以光纜將光纖水壓計直接與控制室中之光纖解讀裝置連接。

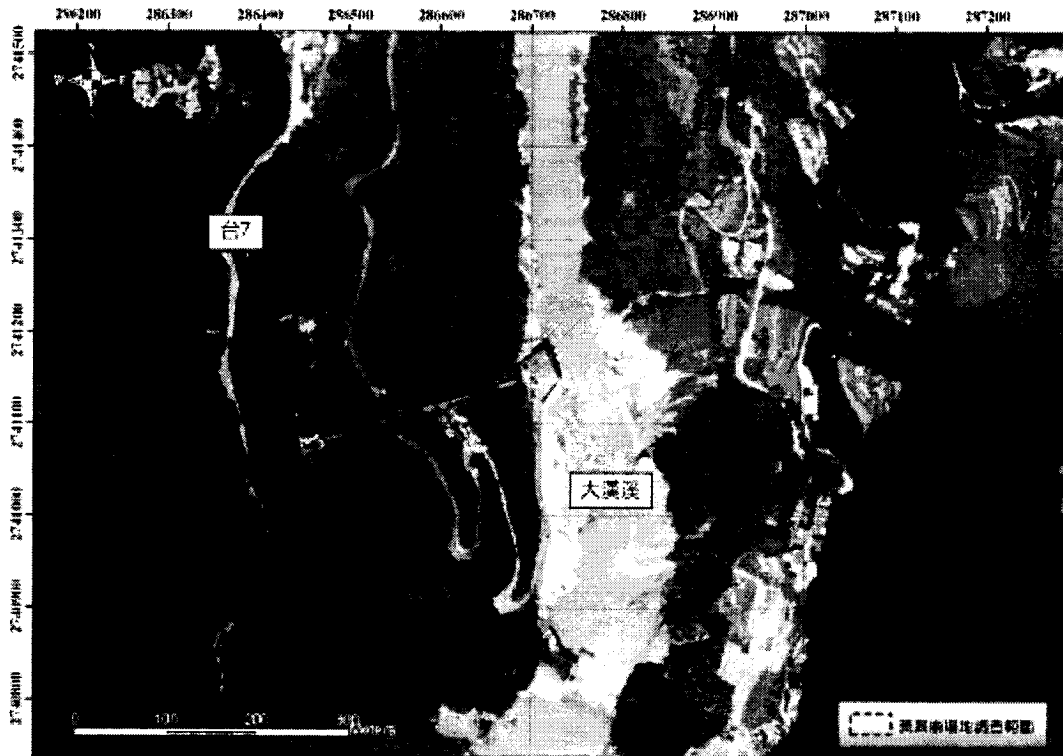


圖 2.64 義興電廠崩塌地遙測影像圖

(經濟部中央地質調查所，2007)

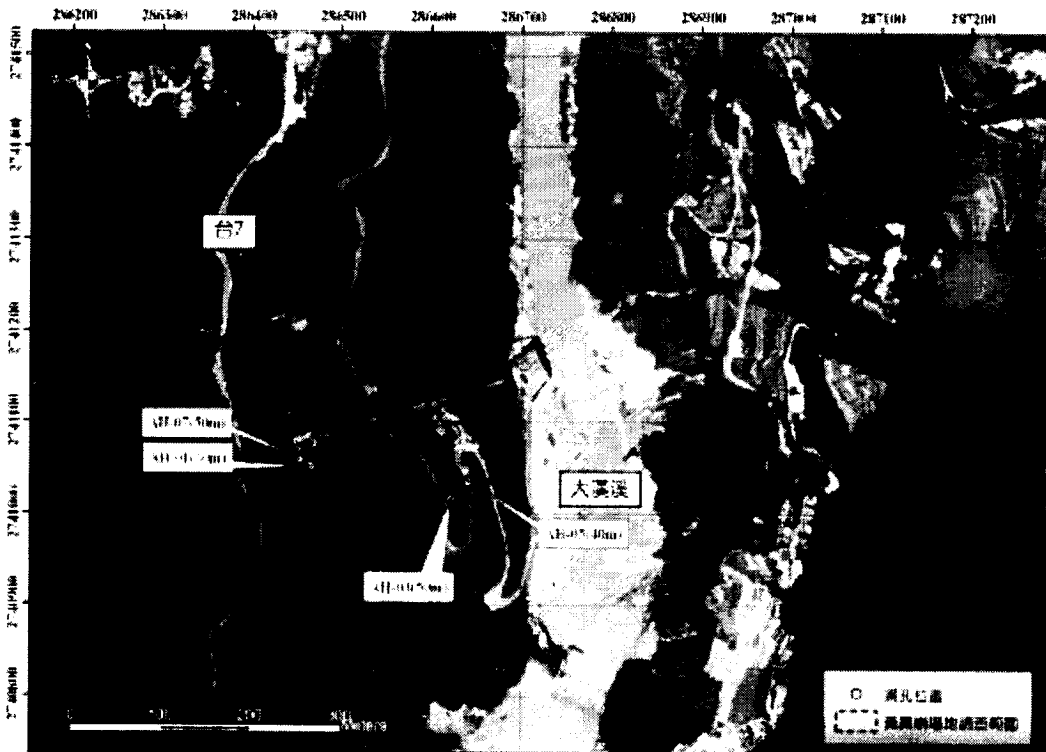


圖 2.66 義興崩塌地鑽孔位置圖

(經濟部中央地質調查所，2007)

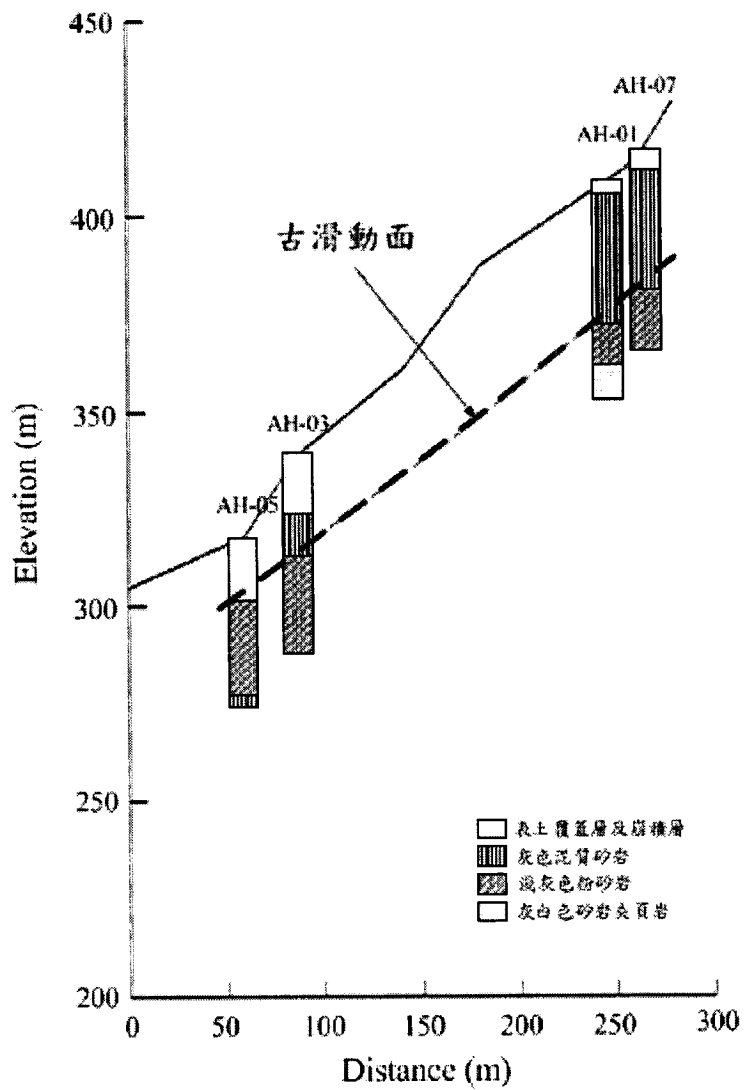


圖 2.67 義興崩塌地滑動演變示意圖

(經濟部中央地質調查所，2007)

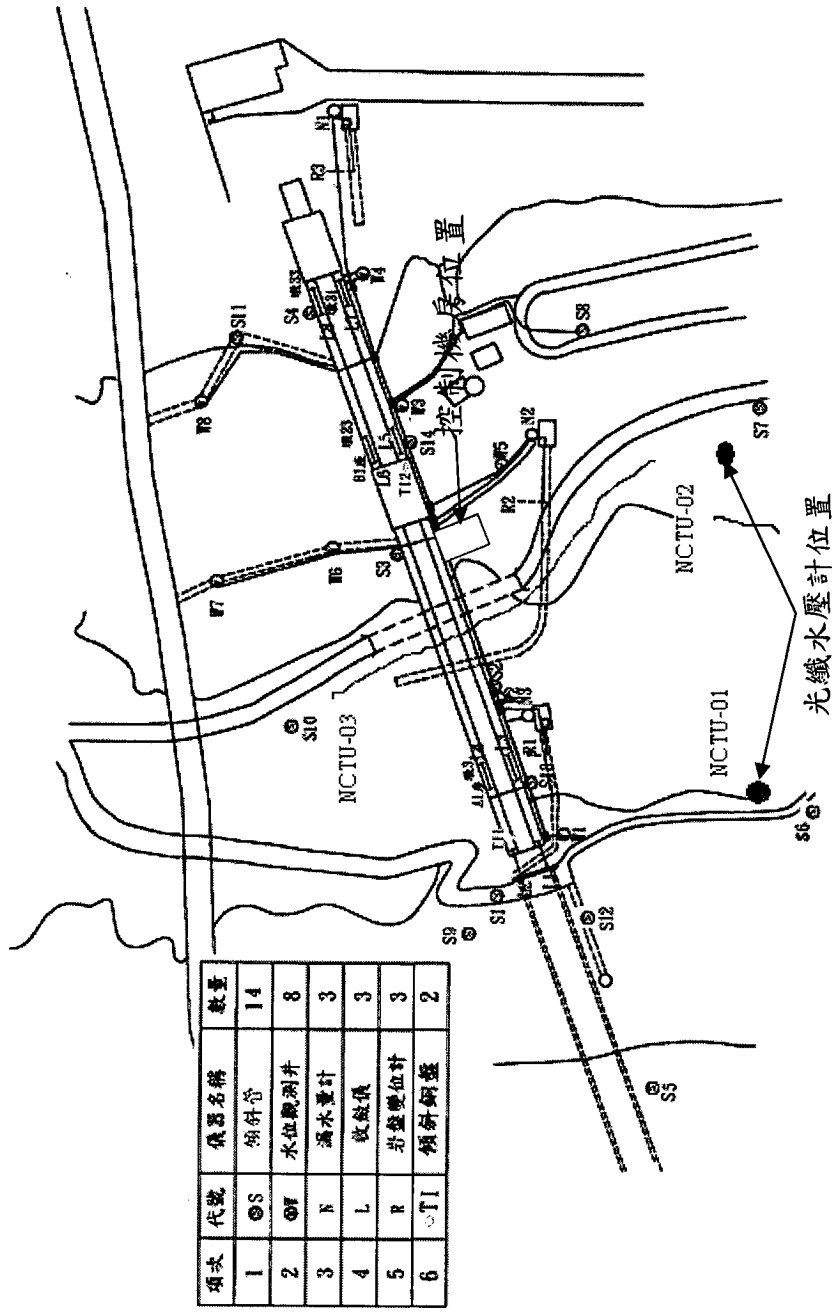


圖 2.68 義興電廠邊坡水壓計安裝位置示意圖

本計畫所安裝光纖水壓計之波長與深度配置如表 2.3 所示。其中各個水壓計標定係數如附錄一所示。

圖 2.69(a) ~ 圖 2.69(j)為現地光纖光柵水壓計安裝標準作業流程圖。圖 2.69(a)為現場首先檢測所有水壓計訊號，並記錄讀數，確認當天所要安裝水壓計之完整性。由於運送 5 米長水壓計(PVC 管)之限制，所以必須分為兩節運送(2 米與 3 米)並於現地進行 PVC 管搭接，圖 2.69(b)為現地 5 米長水壓計組裝。圖 2.69(c)為使用拉釘搭接兩段 PVC 管，避免 PVC 管搭接觸之斷裂。圖 2.69(d)為使用三角架將 5 米長水壓計拉起放置於鑽孔上方。圖 2.69(e)為將水壓計放入鑽孔內。圖 2.69(f)為兩組 5 米水壓計間以拉釘加以搭接。圖 2.69(g)為將兩組光纖水壓計接頭互相連接。圖 2.69(h)將 PVC 管的開口以防水膠帶黏貼，避免封層時回填粒料的灌入。圖 2.69(i)將封層粒料倒入鑽孔內，使用特密管回填的方式，將 50 米長 PVC 管放置鑽孔底部，然後由鑽孔底部開始回填粒料並使用測桿量測回填深度。圖 2.69(j)為水壓計安裝完成。圖 2.70 與圖 2.71 為 NCTU-01 的波長改變與水壓變化量測結果圖，由於 NCTU-01 進行非工作項目內的傍壓儀實驗，故所耗費時間較長。圖 2.72 與圖 2.73 為 NCTU-02 的波長改變與水壓變化圖。

表 2.3 現地光纖光柵水壓計安裝深度與波長對照表

NCTU-01				NCTU-02			
高層 (329m)	深度 (m)	編號	波長 (nm)	高層 (279m)	深度 (m)	編號	波長 (nm)
324.7m	-4.3	LP-B-T-5	1524	274.7m	-4.3	LP-C-B-3	1524
319.7m	-9.3	LP-B-T-4	1530	269.7m	-9.3	LP-C-B-2	1530
314.7m	-14.3	LP-B-T-3	1536	264.7m	-14.3	LP-C-B-1	1554
309.7m	-19.3	LP-B-T-2	1542	259.7m	-19.3	LP-A-T-4	1524
304.7m	-24.3	LP-B-T-1	1548	254.7m	-24.3	LP-A-T-3	1536
299.7m	-29.3	LP-B-B-5	1524	249.7m	-29.3	LP-A-T-2	1542
294.7m	-34.3	LP-B-B-4	1530	244.7m	-34.3	LP-A-T-1	1548
298.7m	-39.3	LP-B-B-3	1536	239.7m	-39.3	LP-A-B-3	1524
284.7m	-44.3	LP-B-B-2	1542	234.7m	-44.3	LP-A-B-2	1530
279.7m	-49.3	LP-B-B-1	1548	229.7m	-49.3	LP-A-B-1	1554

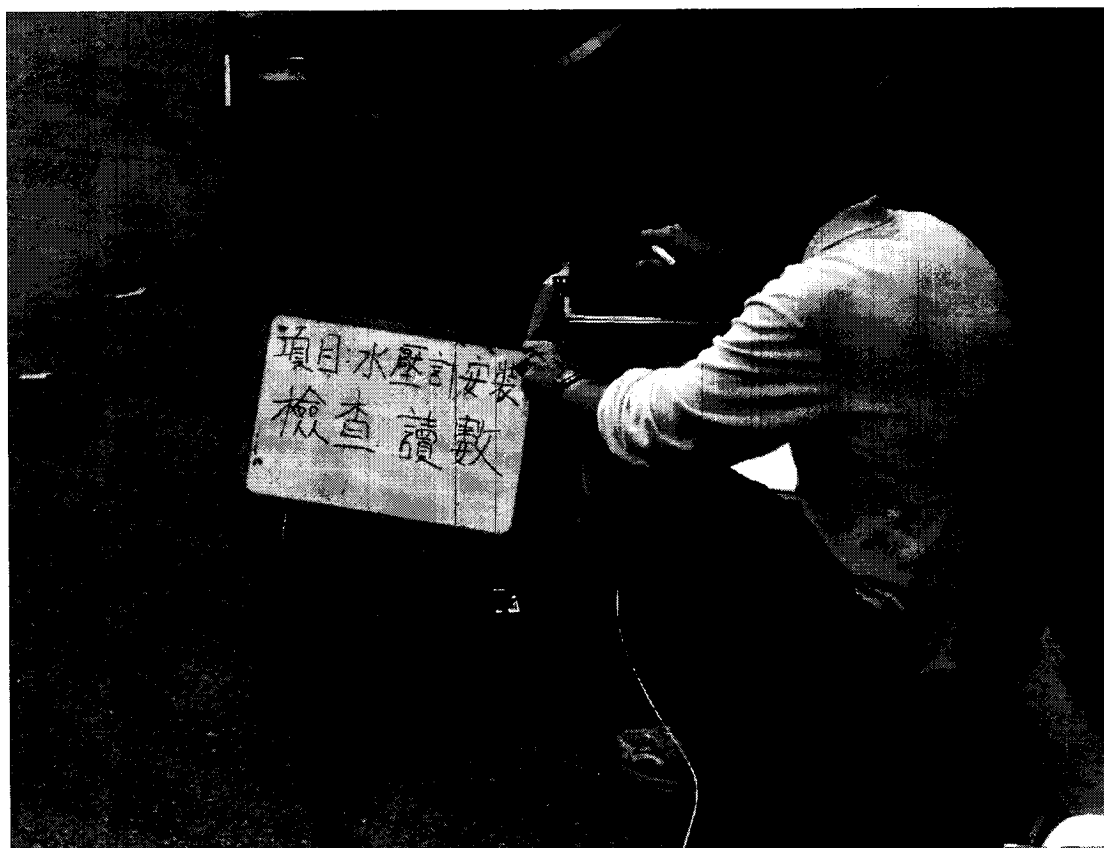


圖 2.69(a) 現地光纖光柵水壓計讀數檢查



圖 2.69(b) 現地 5 米 PVC 管組裝



圖 2.69(c) 現地 5 米內拉釘連接



圖 2.69(d) 以三角架吊起 5 米長光纖光柵水壓計

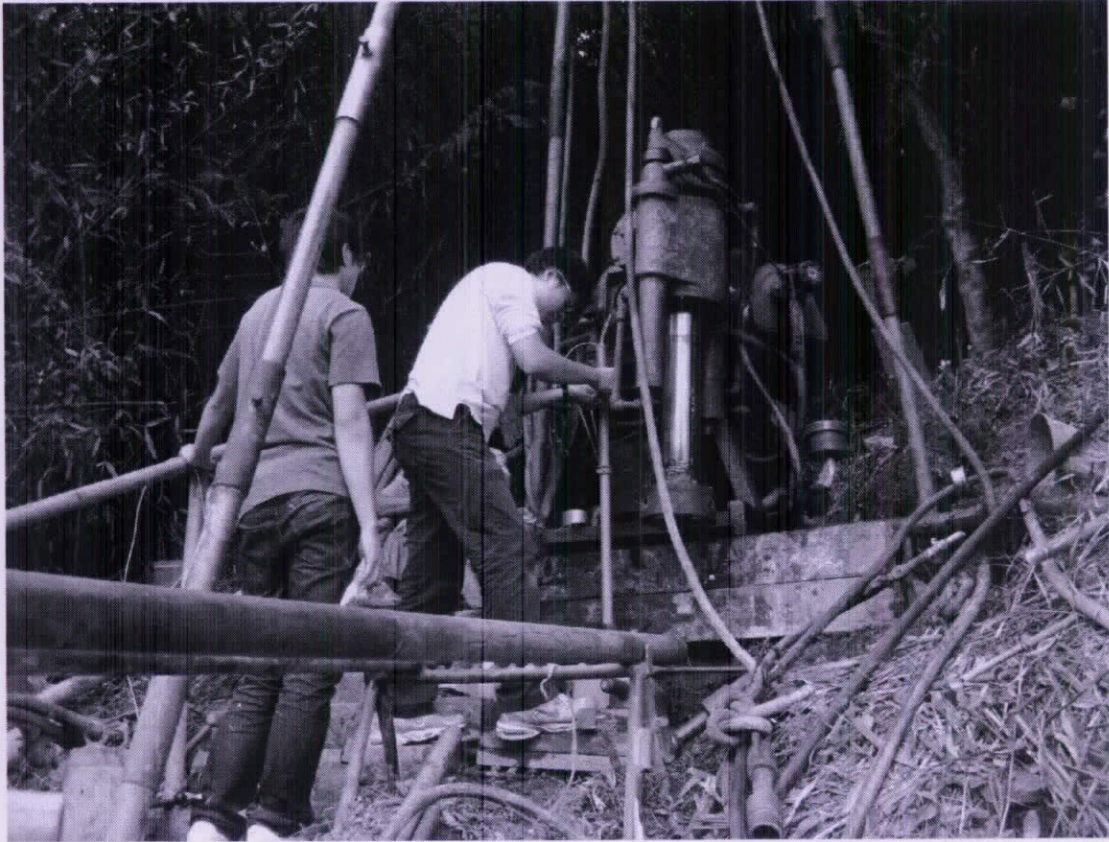


圖 2.69(e) 將 5 米長光纖光柵水壓計管放入鑽孔內

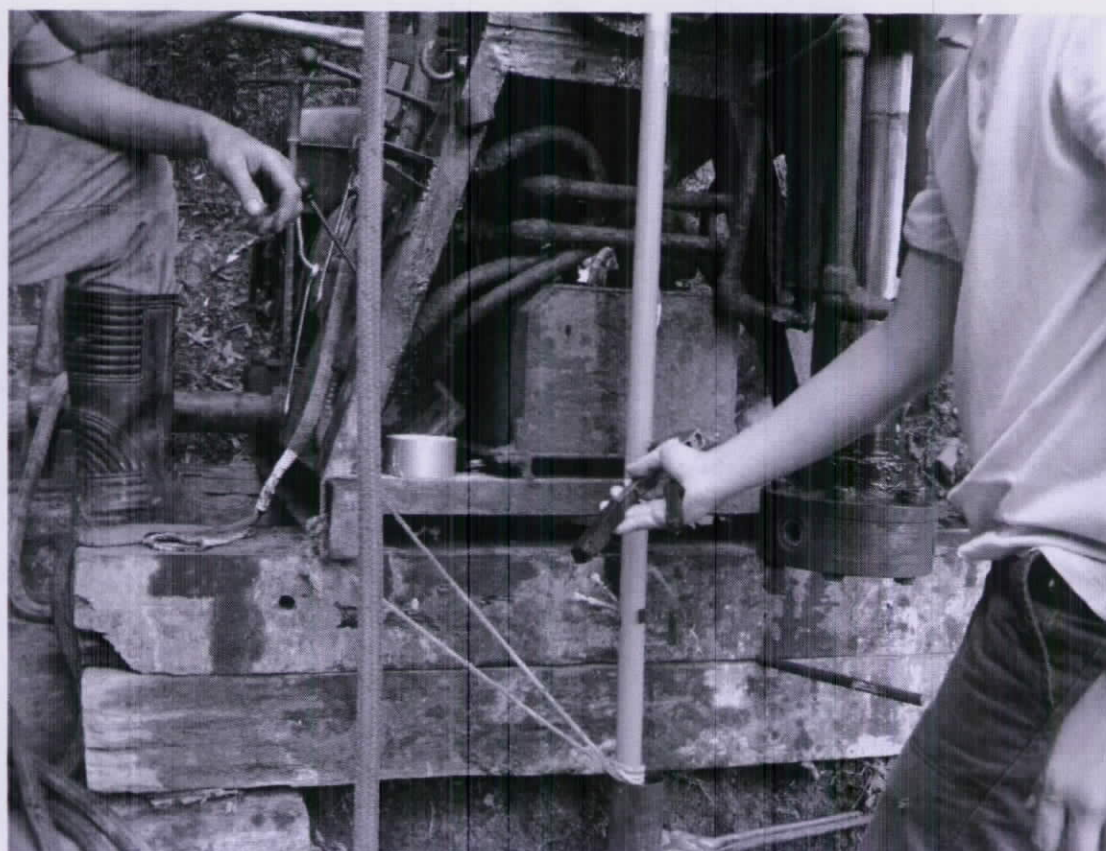


圖 2.69(f) 每組 5 米長水壓計間拉釘連接

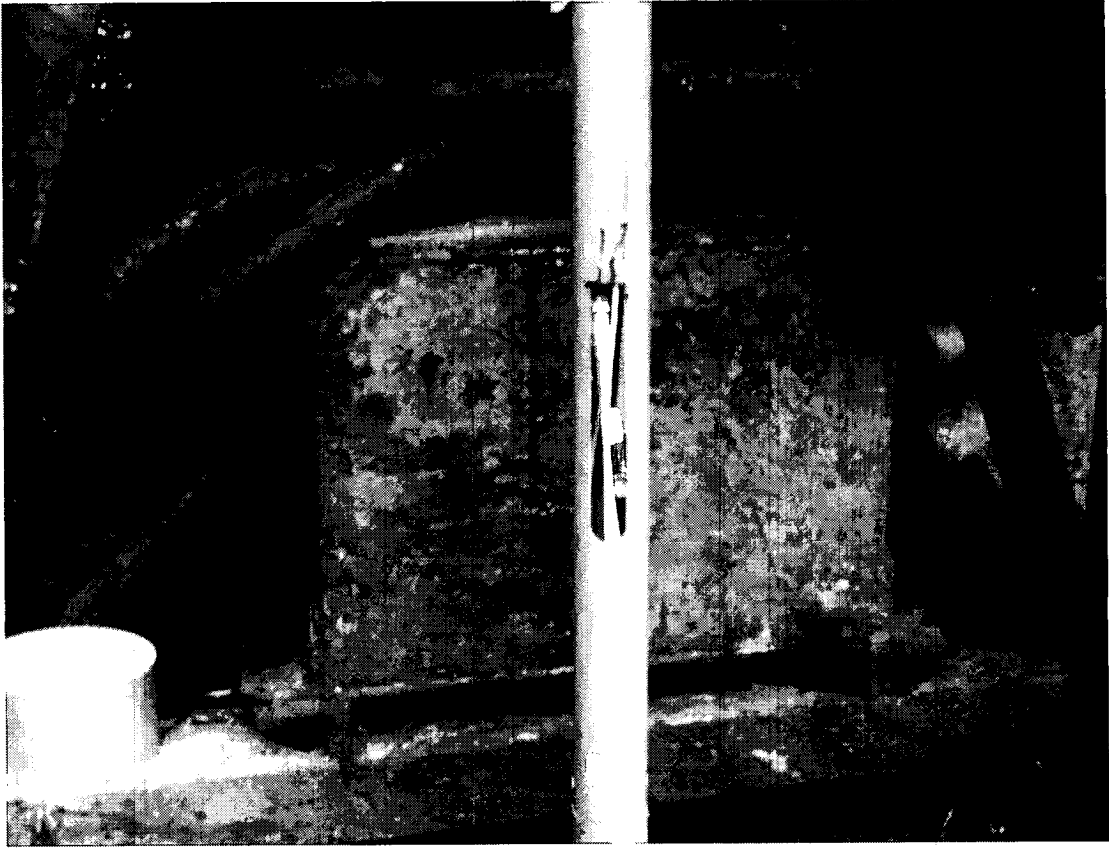


圖 2.69(g) 光纖接頭連接



圖 2.69(h) PVC 管開口封膠保護



圖 2.69(i) 水壓管回填封層

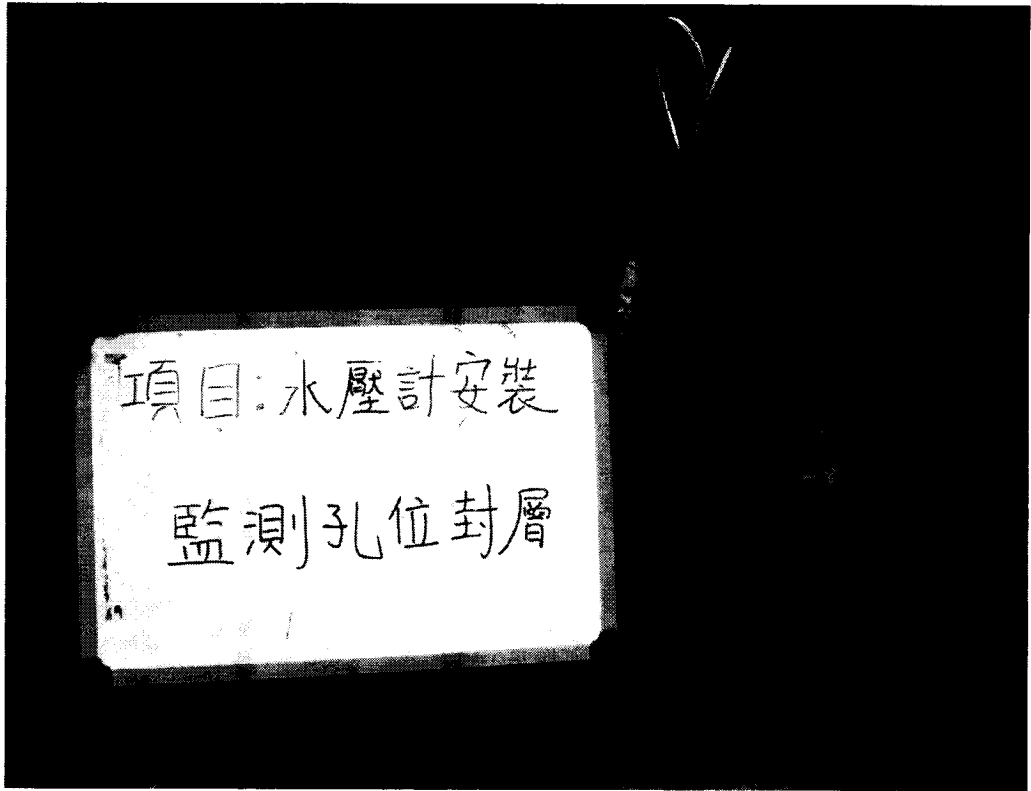


圖 2.69(j) 水壓管封層完成

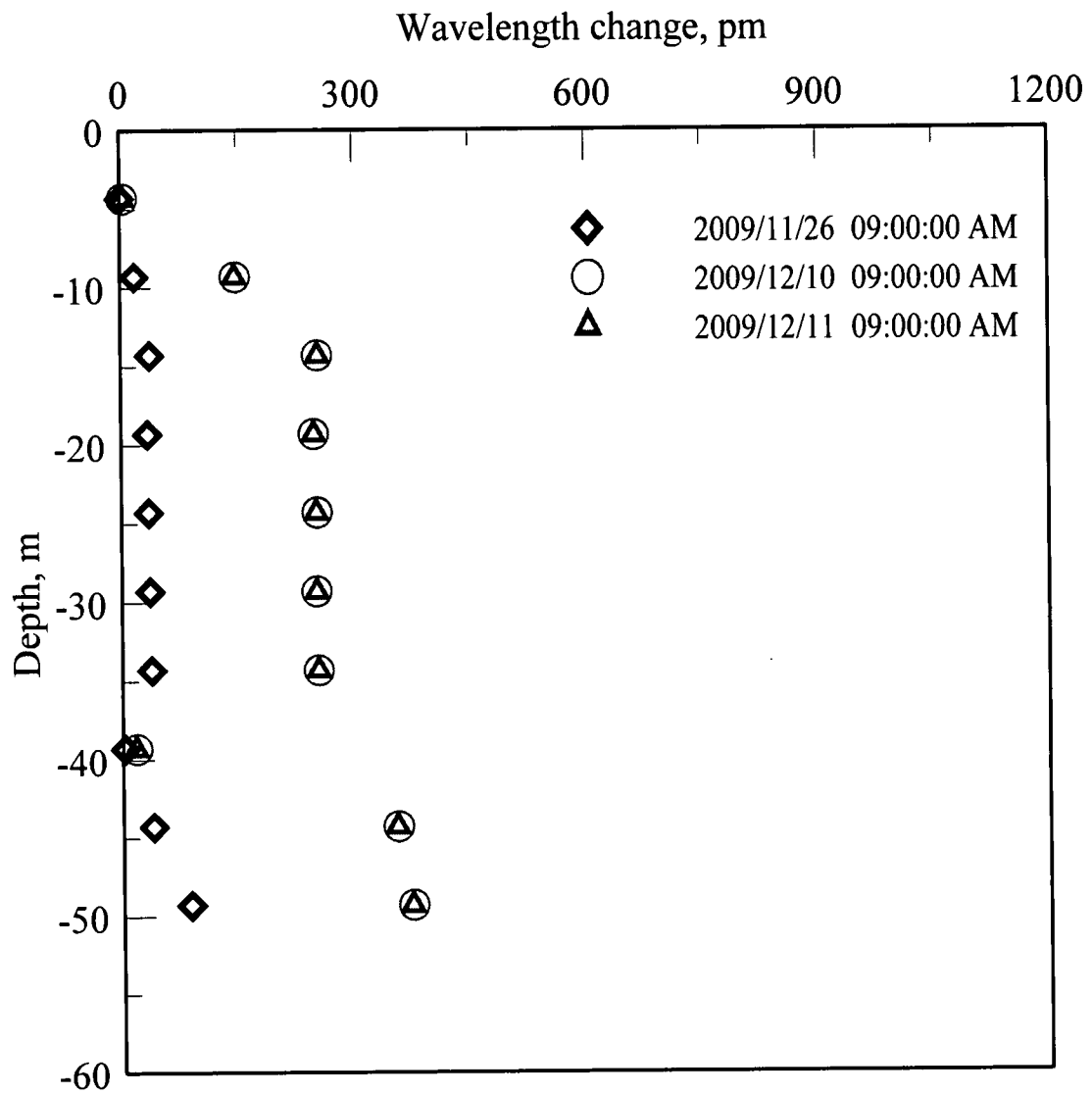


圖 2.70 NCTU-01 水壓計波長變化圖

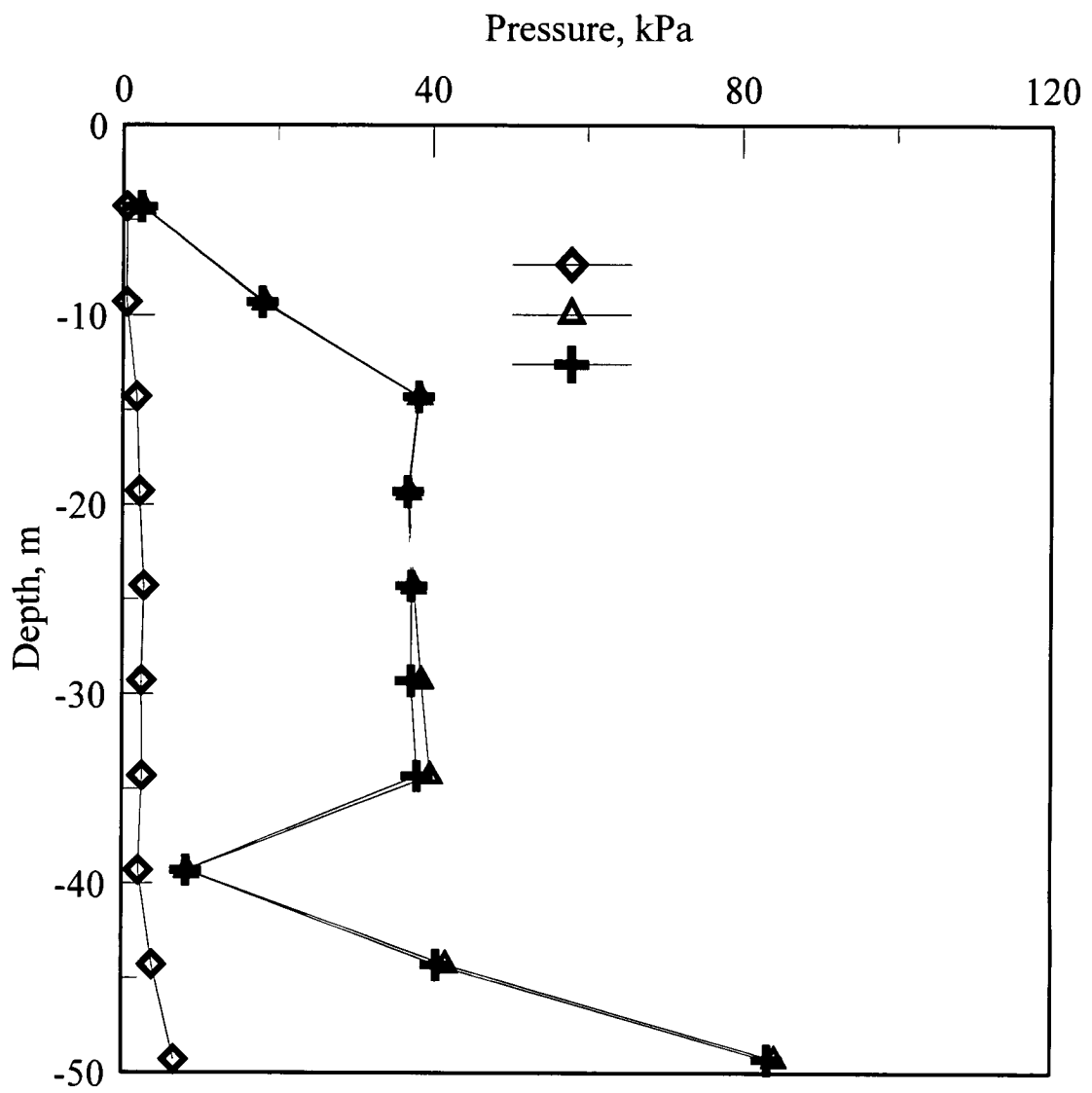


圖 2.71 NCTU-01 水壓計量測結果

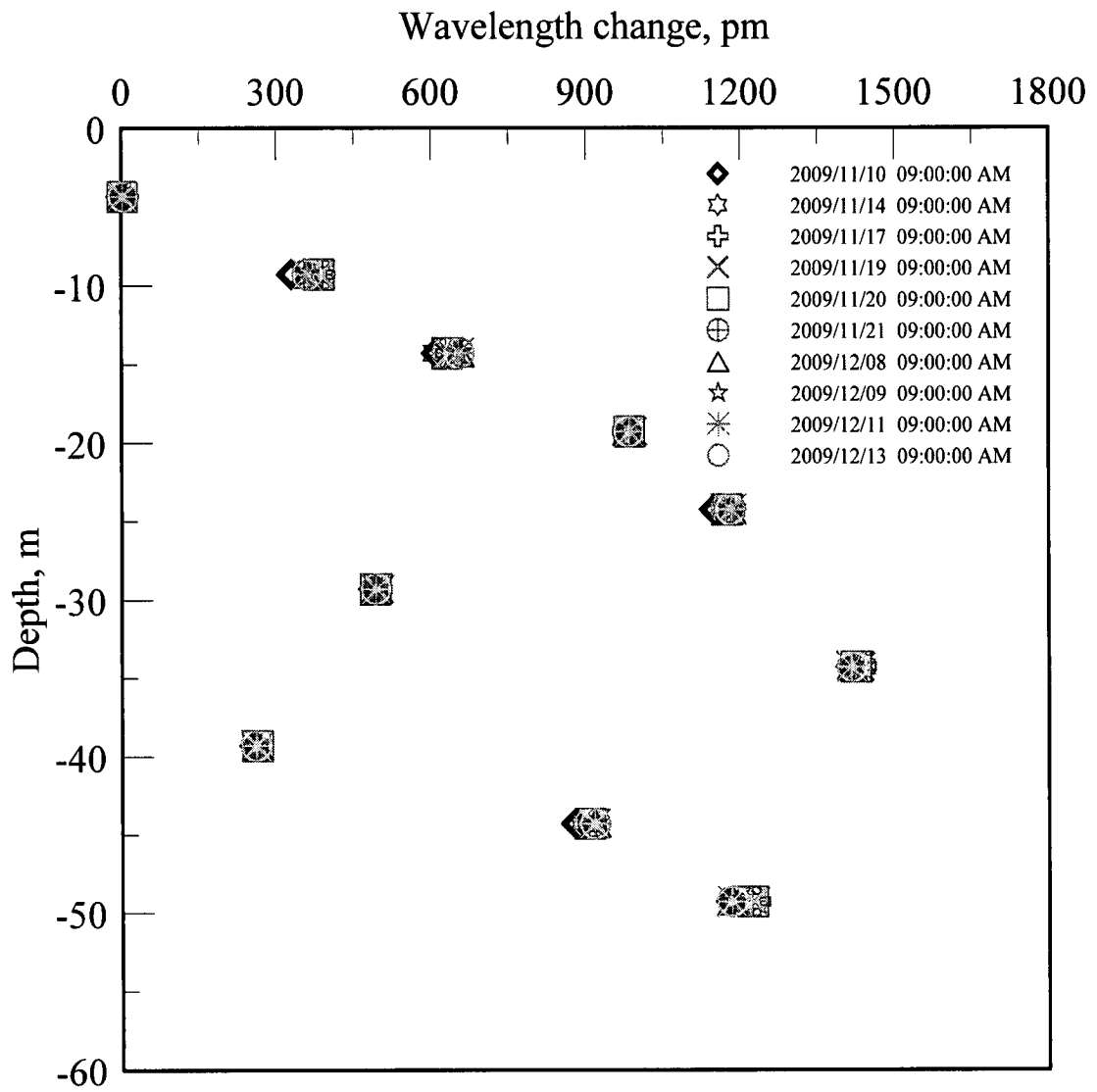


圖 2.72 NCTU-02 水壓計波長變化圖

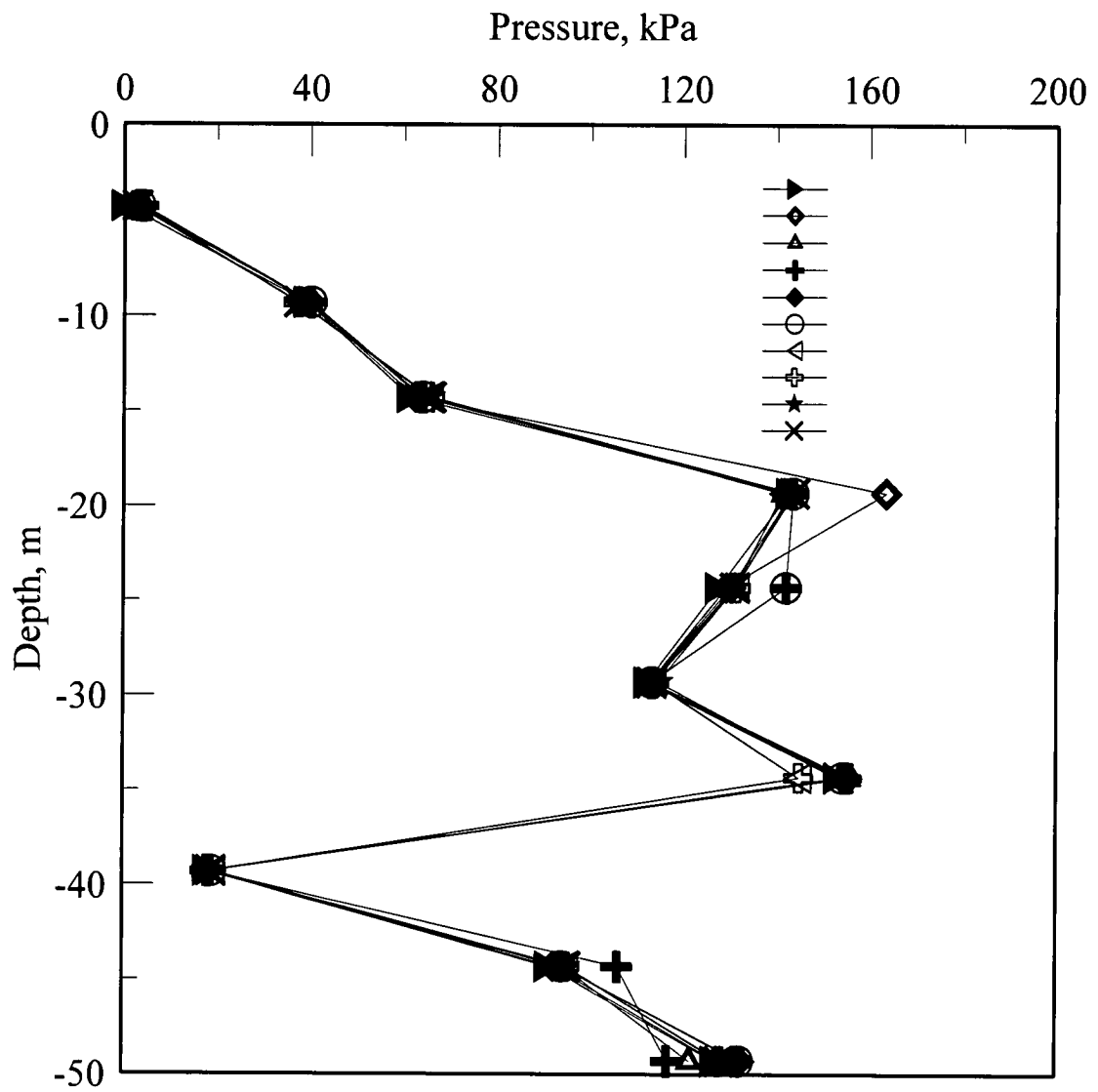


圖 2.73 NCTU-02 水壓計量測結果

2.9 傍壓儀現地試驗

傍壓儀實驗並不是本計畫工作項目之一，本計畫為求得更多實驗參數用以進行邊坡穩定分析，故將於義興電廠邊坡進行傍壓儀實驗，本章主要是敘述新研發的 FBG 傍壓儀原理與測試結果。

儀器構造及功能

本計畫所使用之傍壓儀大體可分為1.壓力來源2.訊號擷取系統3.傍壓管三部份，以下針對各部份作一介紹。

壓力來源:為了使傍壓儀具有足夠之壓力，考慮到現地試驗之方便性與提供穩定的壓力來源，故準備氮氣瓶為提供本次試驗所需壓力之來源，氮氣瓶所提供壓力上限為 10kg/cm^2 。

訊號擷取系統:本試驗主要採用光纖光柵感測系統，光纖光柵感測器的訊號擷取為可攜式低速靜態光纖光柵解調器，共有 4 個通道，每個通道可讀取 64 個 FBG 訊號，所量測 FBG 的中心波長解析度為 1pm 。

壓力計:本計畫使用 FBG 來製作壓力計，將 FBG 貼於圓型薄片上，可隨所需量測範圍調整薄片厚度，依據彈性力學分析，當圓形薄片受到垂直平面的壓力時，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 隨著壓力的增減產生漸變的形式。

傍壓管:傍壓管全長為 1075 mm，直徑為 74 mm(不含保護殼)。

依結構體主要可分為兩段，一為壓力室長度為 740mm，可膨脹部分長度為 410mm，一為資料擷取室長為 265 mm。依功能包含中心桿件(membrane)與應變量測單元(displacement unit)，其功用及設計理念如下所述。

傍壓管膜 (membrane) :係使用現有天然橡膠橡皮膜，其直徑為 68mm，長度為 510mm，厚度為 4.3mm。

中心桿件:為使變形量測單元之安裝及各元件具有固定位置，於壓力室中設有一中空圓桿。於置入傍壓管前先將量測應變臂變形之簧片鎖上，將簧片上之黏貼之 FBG 接頭串接，可方便組裝作業，再利用螺栓與壓力室外壁結合。

應變量測單元: 本系統採用徑向變形直接量測之方式，設置了中層之應變臂，中層擁有四個變形量測器，各以間隔 90°之方向排列。每個變形量測器包含了主體、彈簧與簧片。當傍壓管膜未膨脹時應變量測主體上之連桿向內壓迫簧片，而簧片於受壓側及受張側分別貼有 FBG，以消除溫度對 FBG 的影響。

儀器標定

傍壓儀之壓力及變形並非直接與土體接觸，而係透過薄膜傳達壓力及利用薄膜內之應變量測單元量測徑向變形。因此在試驗前或儀器組裝後，皆需先進行標定以消除可能產生之系統誤差。各項標定說明

如下:包含有四項標定:1.變形量測器標定 2.壓力計標定 3.薄膜勁度標定 4.系統勁度標定(圖 2.74~圖 2.75)

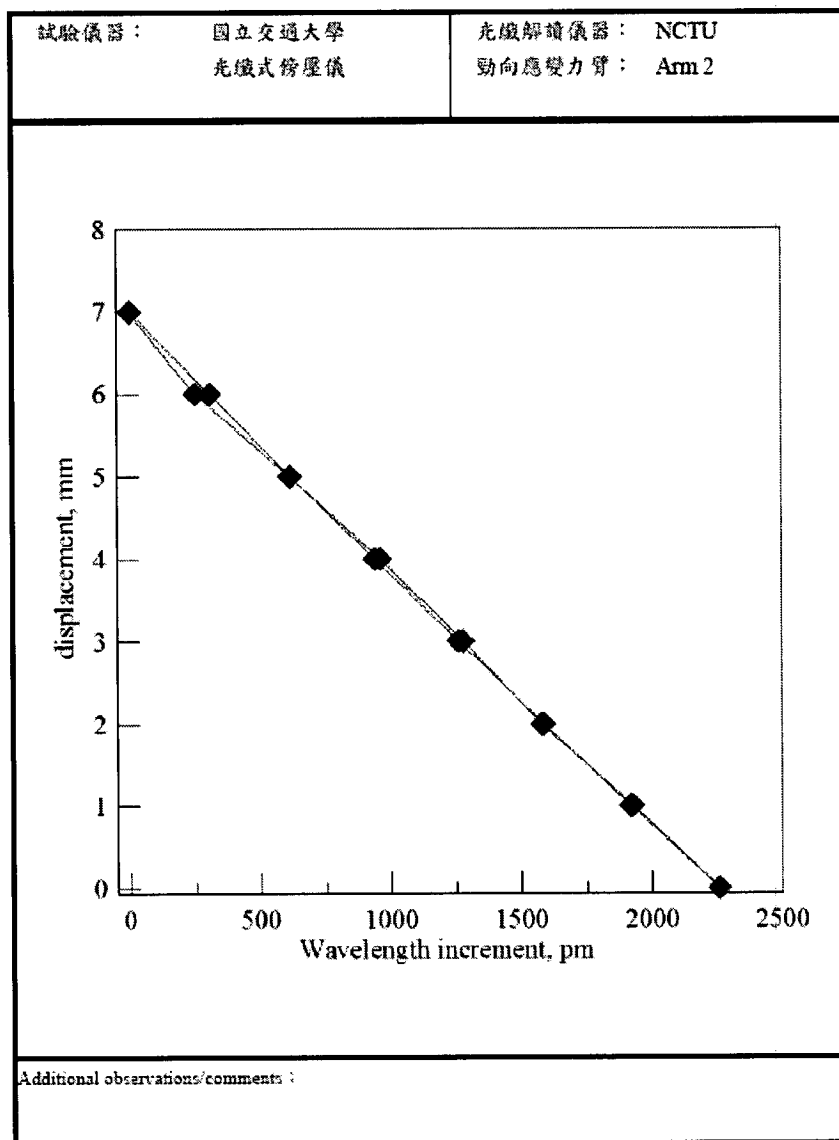


圖 2.74 變形量測器標定結果圖

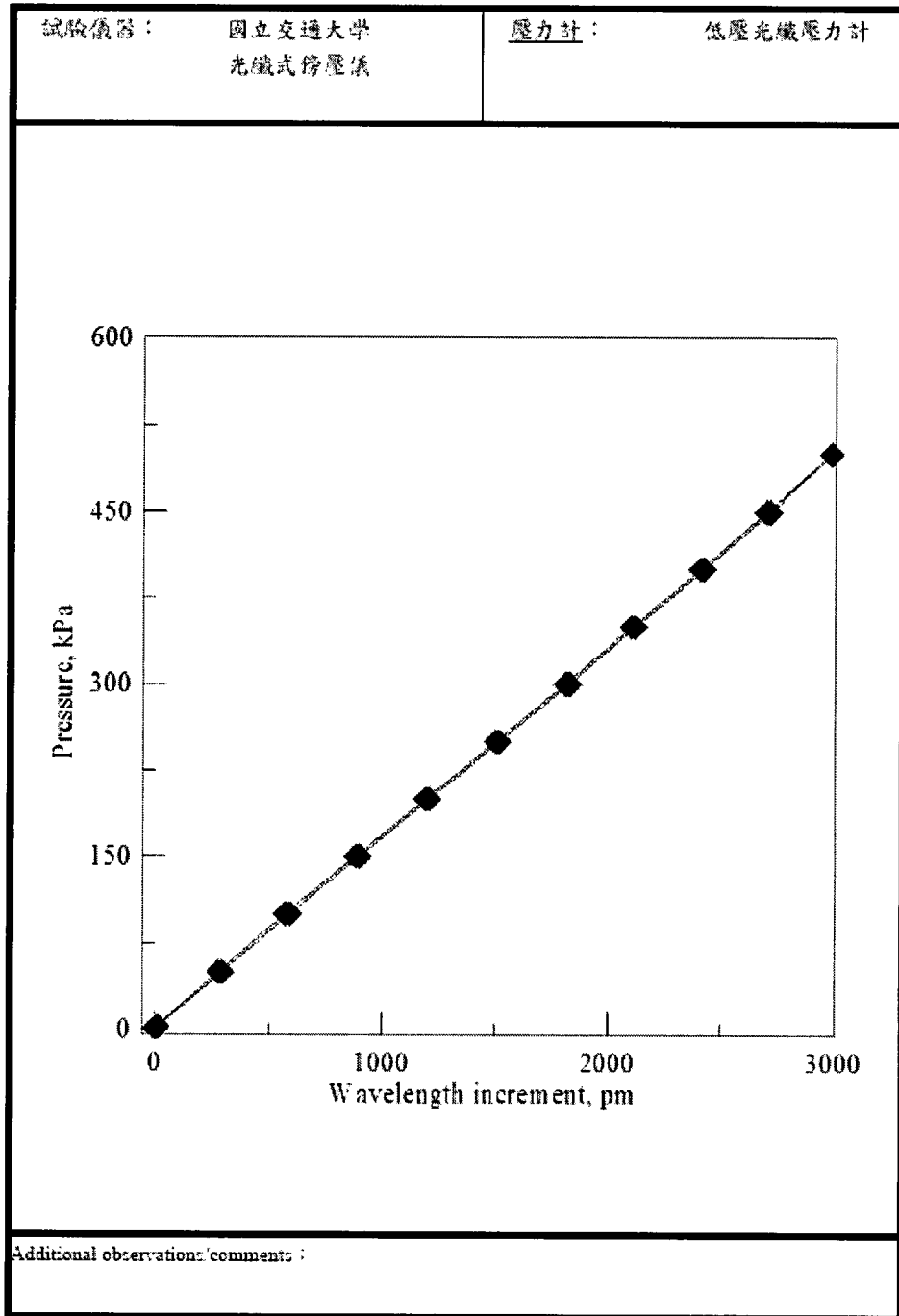


圖 2.75 壓力計標定結果圖

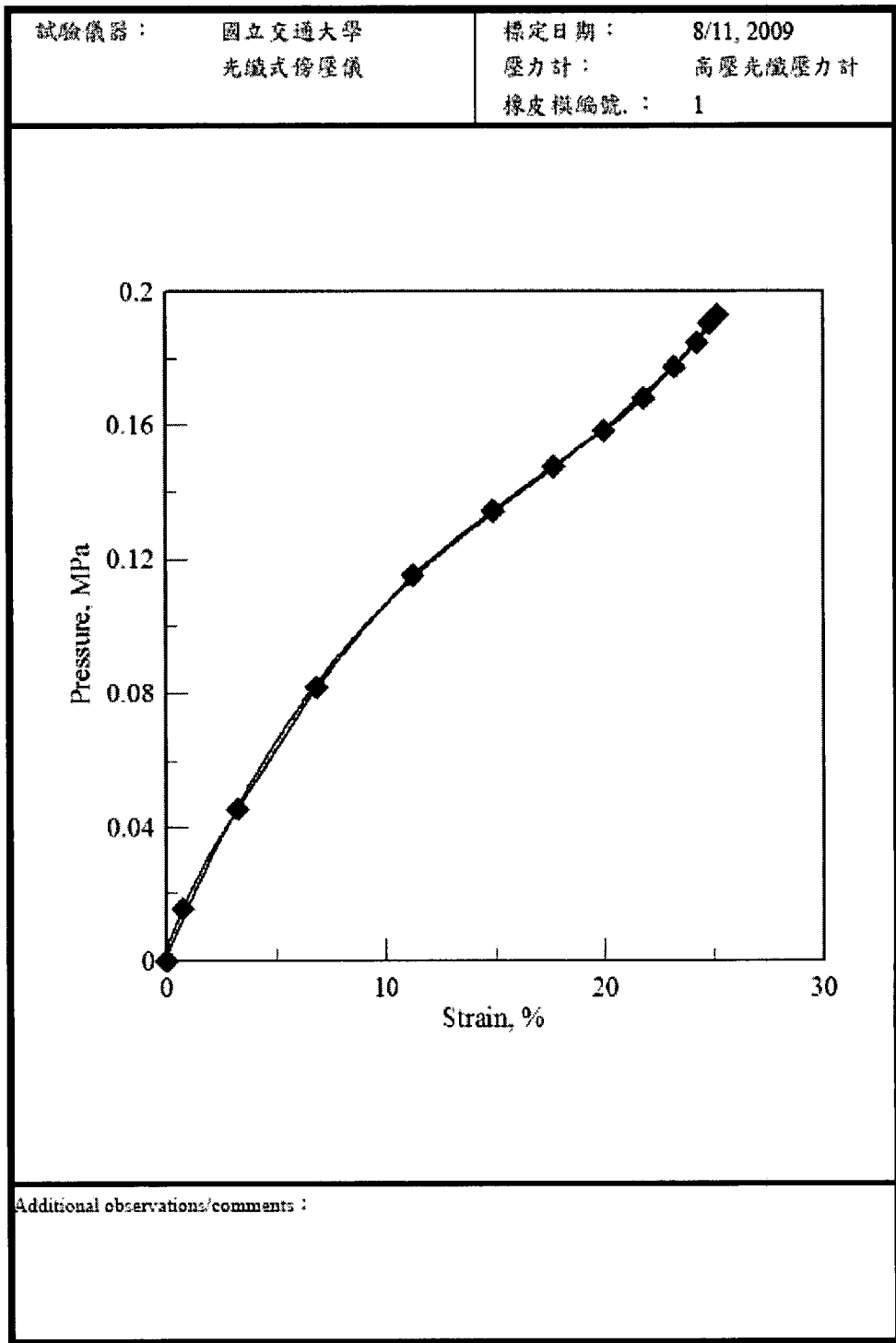


圖 2.76 薄膜勁度標定結果圖

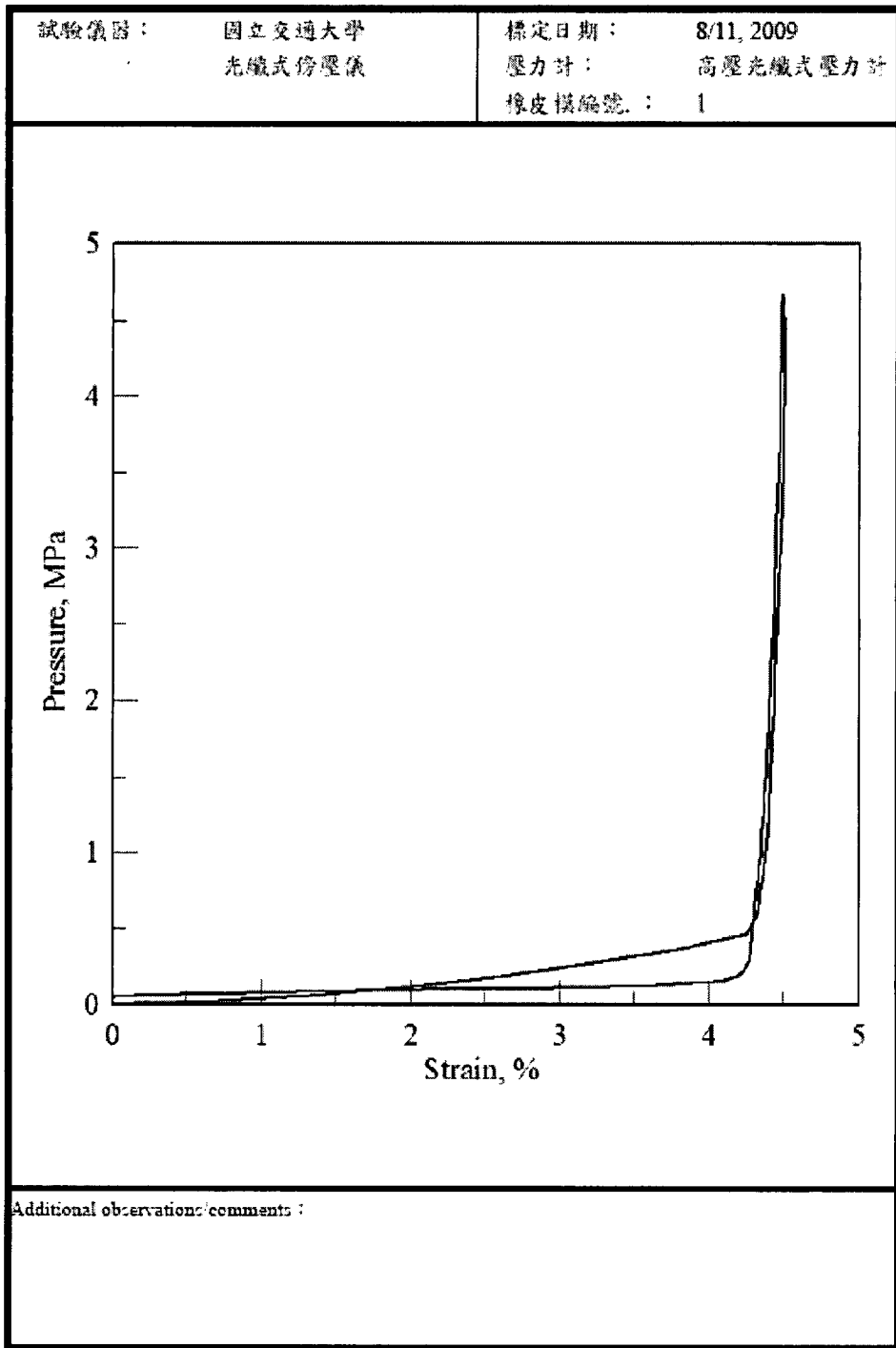


圖 2.77 系統勁度標定結果圖

傍壓儀試驗方法與步驟

傍壓儀試驗係藉由施加壓力量取土壤變形行為之方式，其施加應力之增量及停滯時間，有不同的學者提出之經驗值。通常依試驗控制條件之不同，有應力控制及應對控制兩種，本次實驗採用應力控制方式，當施加應力在 2MPa 以下，每一應力增量為 0.1MPa，並進行一次反覆載重試驗，記錄間隔時間 5 秒。在 2~5MPa 間，每一應力增量為 0.3MPa，並進行一次反覆載重試驗，記錄間隔時間 5 秒。在 5MPa 以上，每一應力增量為 0.5MPa，並進行至少二次反覆載重試驗，記錄間隔時間 5 秒，當應變量達到最大應變量時(20mm)停止試驗，其測試結果如圖 2.78 所示。本次實測位於 NCTU-01 號孔內深度 6~8 米處，其實驗結果如圖 2.79 所示。

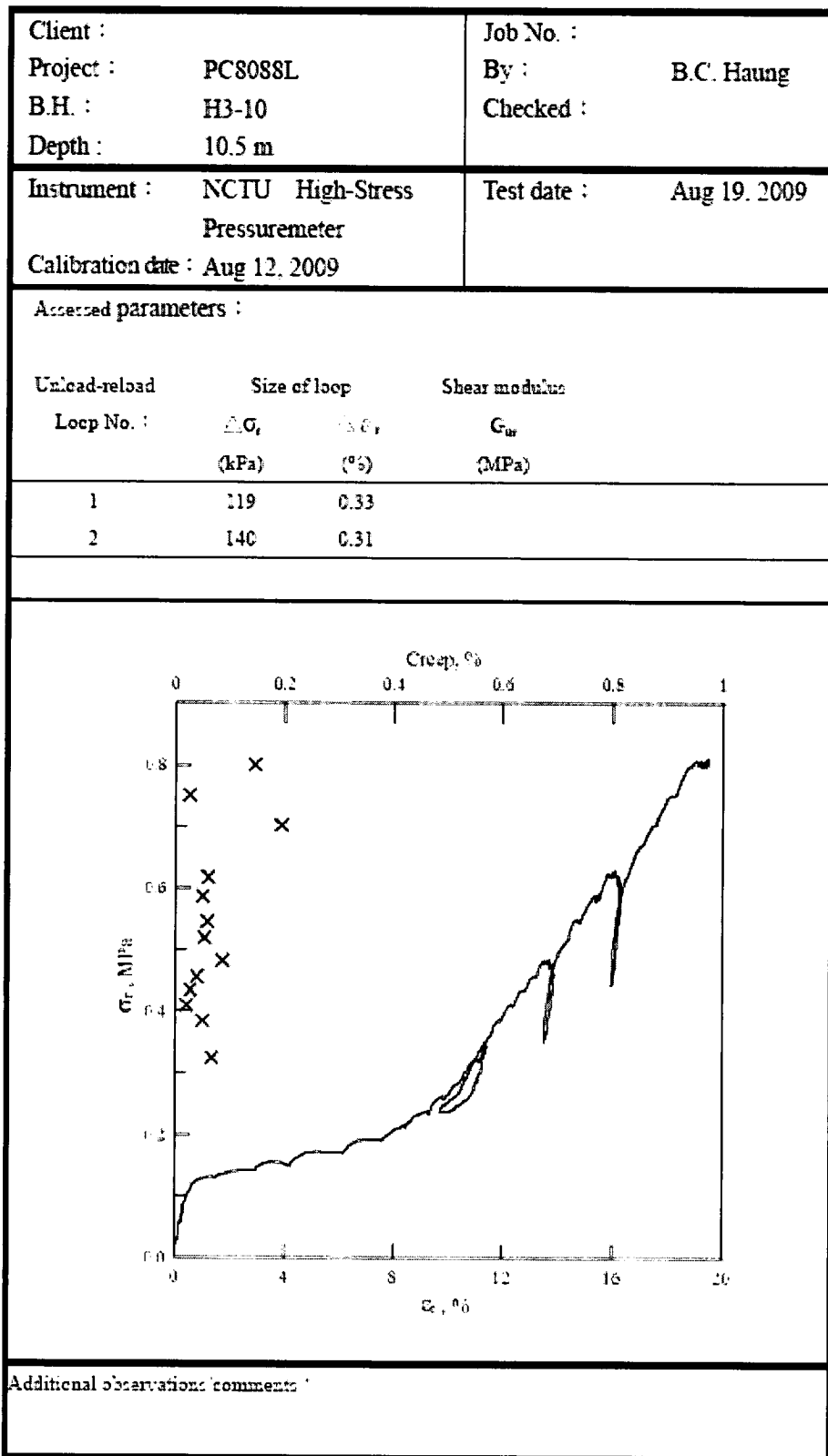


圖 2.78 傍壓儀測試結果

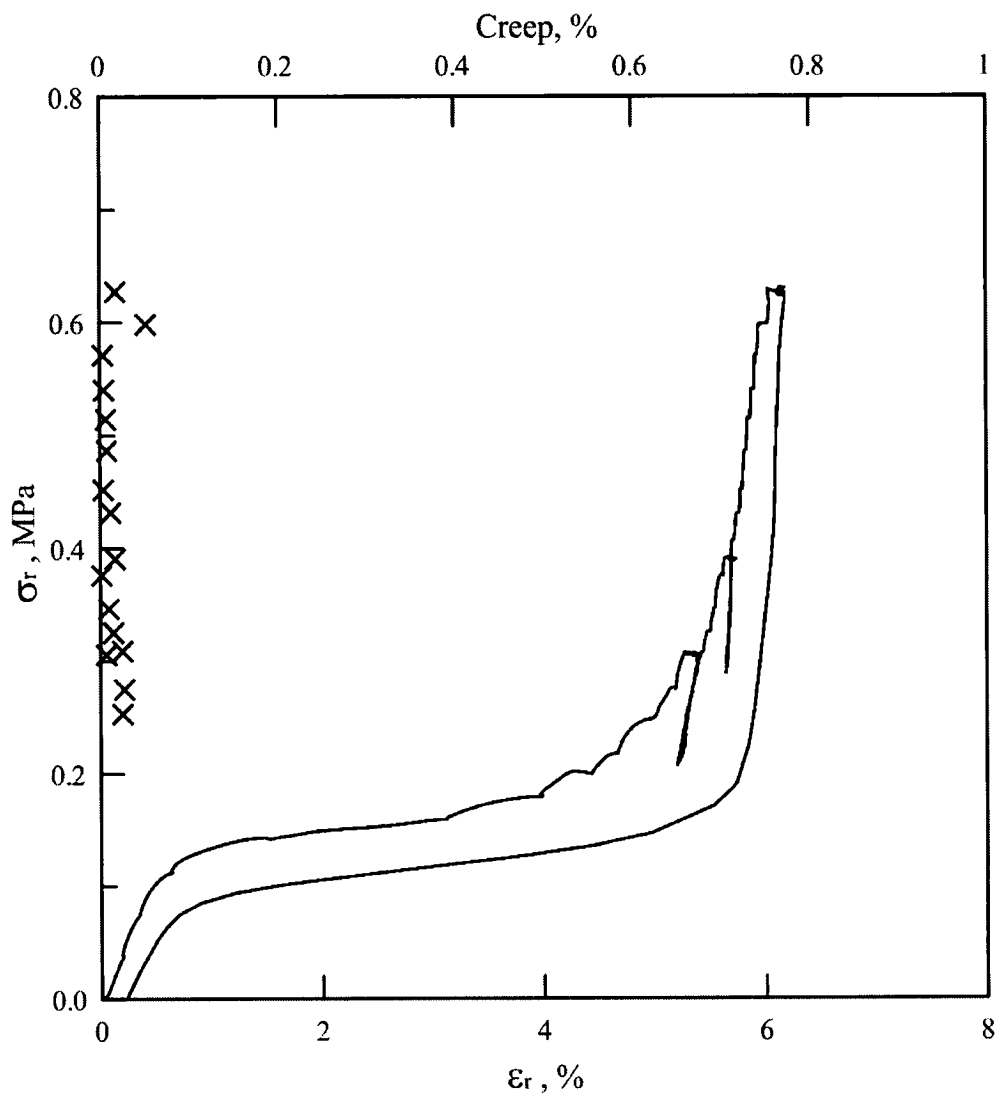


圖 2.79 義興電廠 PMT 現地實驗結果

傍壓儀現地試驗和所有之試驗一樣，其最終目的在於求取我們所需之工程參數，Clarke (1995)指出傍壓儀試驗可求取下列工程參數(摘自蘇志鐘，2000)

1. 土壤種類
2. 現地水平應力 σ_h
3. 剪力模數 G
4. 有效應力摩擦角 ψ'
5. 卜生比 ν
6. 膨脹角 ϕ
7. 不排水剪力強度 S_u
8. 有效凝聚力 c'
9. 壓密及潛變
10. 過壓密比

而傍壓儀試驗時僅能求取作用應力及體積變化或徑向變化，要用來求取所需之工程參數，需要利用適當之技巧。隨著傍壓儀之發展，對各種參數之解析，以建立各種地層及參數之關係。

土壤種類

不同之地質材料在試驗過程中，含有不同之應力及徑向變形之曲線，因此可據以判斷地層種類。Baguelin(1982)進一步利用自鑽式傍壓儀，藉由不同密度之土體，對產生一定量之變形量需有不同之施加應力，結合現地水平應力，定義一分類係數 β 之經驗式，據以分出土壤種類及緊密度，詳如圖 2.80。藉由修正使用預鑽式後段試驗曲線，亦可使用於預鑽式傍壓儀。

$$\beta = \left(\frac{p_{20} - p_5}{p_{20} - \sigma_h} \right) * 100 \quad (2-21)$$

式中 P_{20} 及 P_5 為應變量為 20 及 5 時之施加應力。

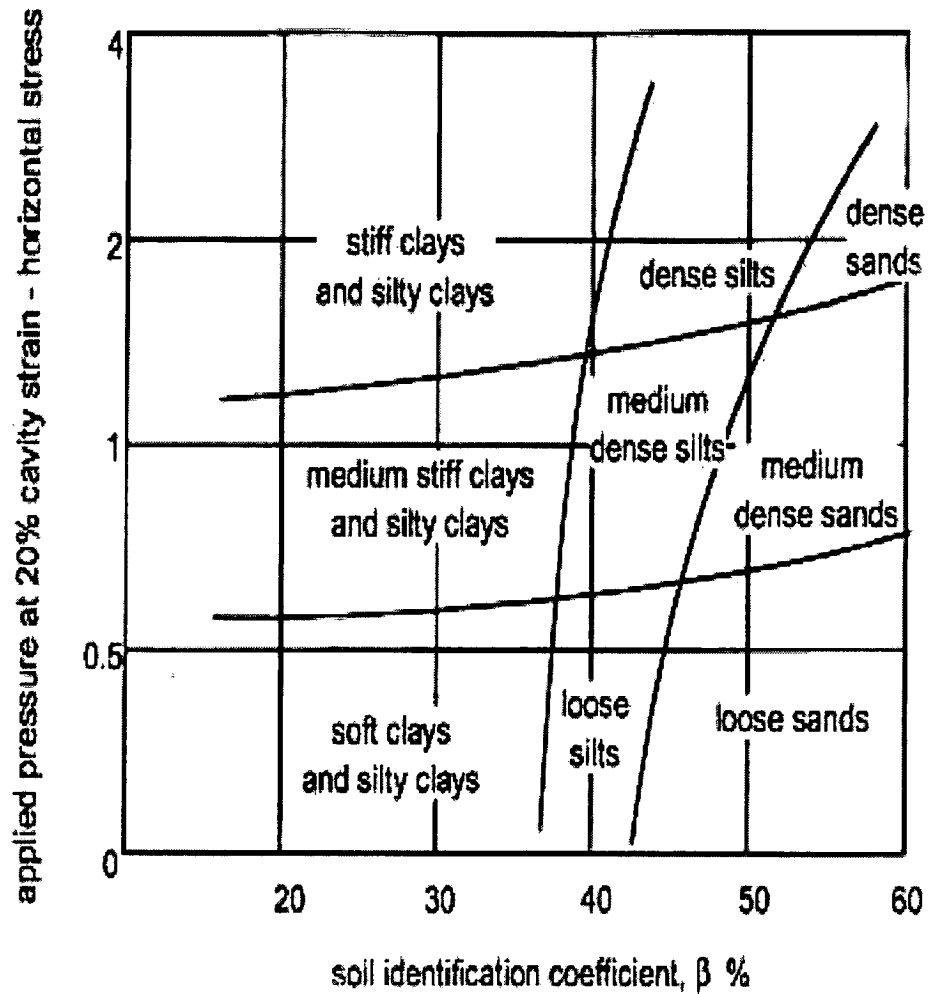


圖 2.80 傍壓之土壤分類圖

(Becue et al., 1966)

現地水平應力 σ_h

水平應力可由傍壓儀試驗曲線直接求出，而不同之傍壓管形式對土壤造成不同之擾動，因此試驗曲線之初始段，會有不同之反應，不同之傍壓管之典型壓力-乙孔徑變化量圖形如圖 2.81 所示。一般常用於決定水平現地應力之方法有：

1. 左端法(left-off method)

如圖 2.82 所示，Dalton & Hawkins (1982)將體積應變或徑向應變繪於圖之橫軸，施加應力繪於圖之縱軸，試驗曲線初始段為一直線，表示所施加之應力小於現地應力，亦即土體尚未承受額外之應力。當試驗曲線有一明顯之變化點時，表示所施加之應力已大於現地應力，此時土體開始受壓而變形。此方法通常使用於自鑽式傍壓儀。

2. 重複繪圖法(graphical iteration method)

Marsland and Randolph (1977)建議，降伏應力為現地水平應力與粘土不排水剪力強度之和，且其尖峰剪力強度可計算而得，此剪力強度與所選取之水平應力大小有關。變更不同之試驗曲線起點，直到尖峰剪力強度與水平應力之和與試驗曲線上降伏點重合為止，此時之起點之應力值即為現地水平應力，其步驟詳如圖 2.83 所示。

3. 曲線回歸法(curve fitting method)

Arnold(1981)與 Huang et al(1986)利用一連續方程式去回歸試驗所得曲線，當連續方程式與試驗曲線重合性良好時，則求解此方程式。由降伏應力為現地水平應力與不排水剪力強度之和之觀念，求得水平應力值。

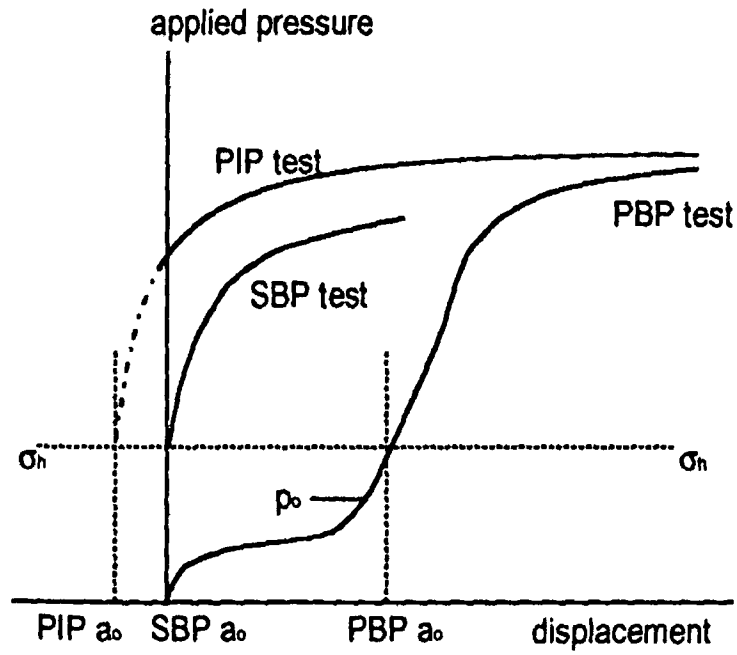


圖 2.81 不同傍壓儀水平應力基準點示意圖

(Clarke,1995)

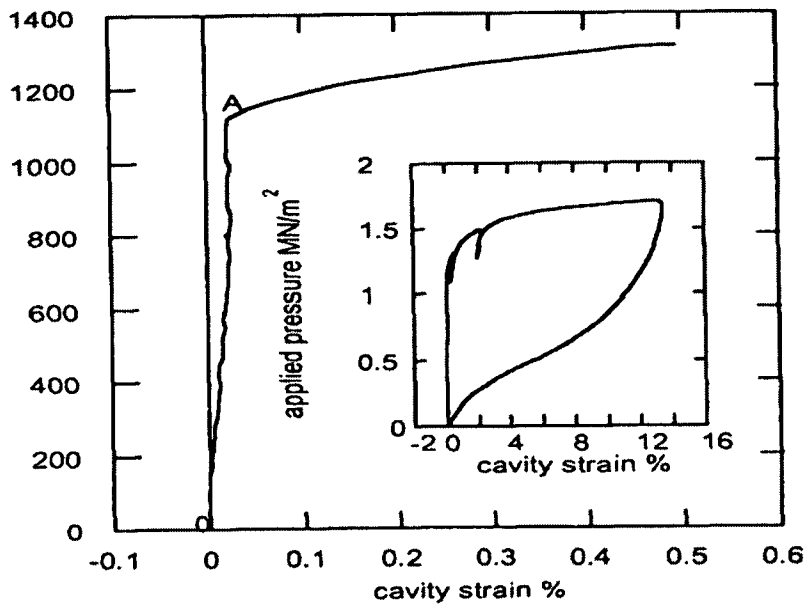


圖 2.82 利用左端法求取水平應力示意圖

(Clarke,1995)

4. 觀測潛變曲線法

Me'nard (1957)將試驗結果以壓力及變形為軸繪出，定義傍壓儀試驗時，每一應力增量維持 60 秒，在第 30 秒至 60 秒之變形量定義為當時壓力之潛變量，當潛變值最小時，表示施加應力與現地應力取得平衡，此時對應之應力即為現地應力。其典型圖形如圖 2.84 所示，本研究將採用此種方法，分析方法將於第四章說明。

剪力模數 G

地層內之土體剪力模數並非一定值，係隨著應變量之增大而漸小，因此在不同之變形量或不同之施作程序下，而定義不同之剪力模數及彈性模數，通常利用試驗初始段求取 G_i 或利用減壓-加壓線段求取 G_{ur} 。

Mair and Wood(1987)曾提出，在中空圓柱體受軸對稱荷重時，則土壤之剪力模數將可表示為：

$$G = (P - P_0) \frac{V_0}{\Delta V} \quad (2-22)$$

因此，藉由量測傍壓儀之壓力與體積變化，便可由上式推估出受測土壤之剪力模數，進而利用下式推估其彈性模數

$$E_s = 2(1 + \nu)G \quad (2-23)$$

式中 E_s ：為土壤之彈性模數

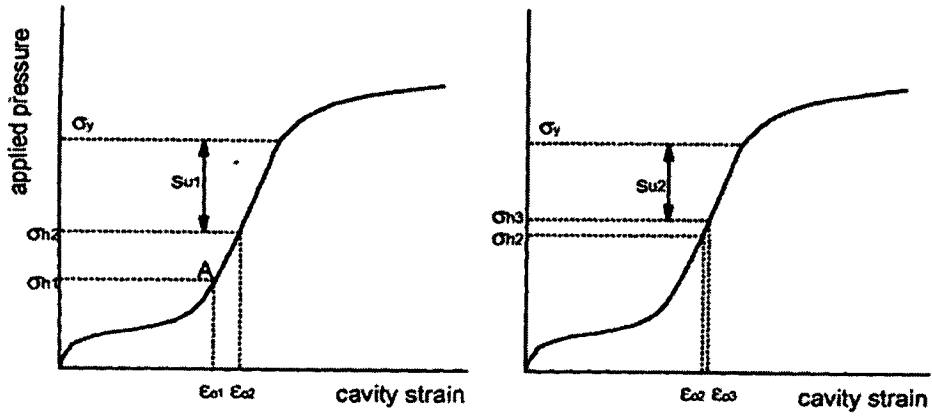


圖 2.83 利用重覆繪圖法求取水平應力示意圖
(Clarke,1995)

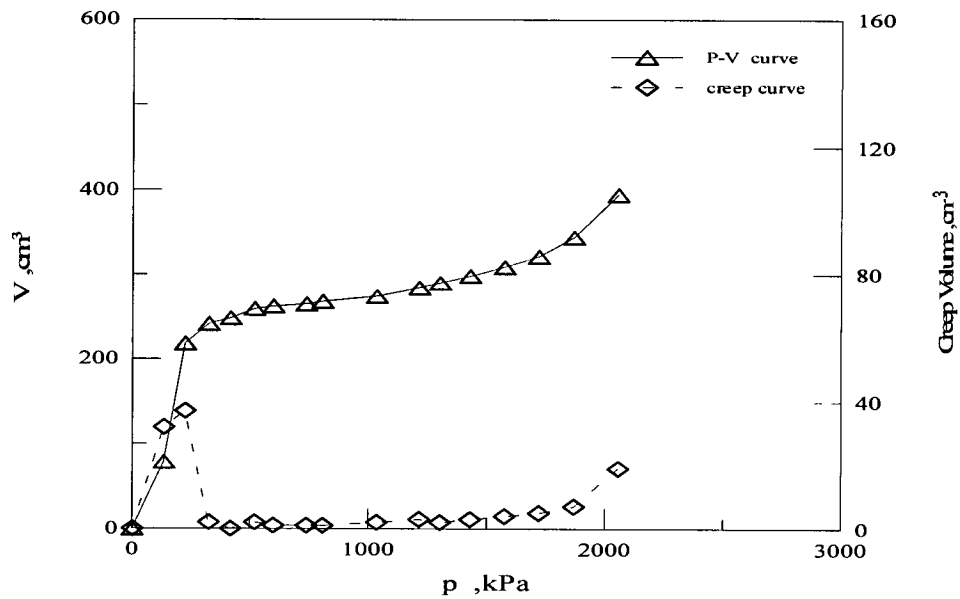


圖 2.84 利用潛變曲線法求取水平應力示意圖

(摘自林文森,1998)

$$G_{ur} = \left[0.5 \frac{a_u}{a_r} \left(\frac{dp_u}{d\varepsilon_c} \right)_u + 0.5 \frac{a_e}{d\varepsilon_c} \left(\frac{dp_r}{d\varepsilon_c} \right)_r \right] \quad (2-24)$$

式中 u 代表解壓部份，r 代表再壓部份

即使係自鑽式傍壓儀，亦不可避免會對地層造成擾動，因此初始

段之曲線係一受擾動後之地層反應。為瞭解地層真實之模數，通常進行反覆載重試驗。

有效應力摩擦角 ψ' 及膨脹角 ϕ

Hughes et al.(1977)利用自鑽式傍壓儀在緊密砂土中進行試驗，由試驗結果提出一旦發生破壞時，其承載壓力與承載應變存在一關係式：

$$\log_e(p - u_0) = s \log_e[(\varepsilon_c / (1 + \varepsilon_c) + c/2)] + A$$

$$\text{其近似解為 } \log_e(p - u_0) \cong s \log_e[(\varepsilon_c + c/2)] + A \quad (2-25)$$

式中 A：為常數

u_0 ：為孔隙水壓

c：為一常數

$$s = \frac{(1 + \sin \psi) \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (2-26)$$

畫出雙對數圖如圖 2.85，則其斜率為 s。

Rowe(1962) 利用數值方法和試驗結果，提出應力膨脹理論，建立出由鬆砂到緊砂之全應力-應變曲線如圖 2.86。應力比 $K(=\sigma_1/\sigma_3)$ 是伴隨著剪應變而有所不同，如此砂中之體積變化將成一函數關係，此函數將可利用膨脹角來表示。而膨脹角 ψ 之定義為：微量之體積應變 ε_v 與剪應變 γ 之關係比，如(2.27)式：

$$\sin\psi = -\frac{d\varepsilon_v}{d\gamma} \quad (2-27)$$

式中 ψ : 為膨脹角

γ : 剪應變

而破壞時之相對密度下，亦即降服應力發生後，在特定體積剪力
摩擦角 ϕ'_{cv} (破壞時) 狀況中，破壞之應力比為 K_{pcv}

$$K_{pcv} = \frac{1 + \sin\phi'_{cv}}{1 - \sin\phi'_{cv}} \quad (2-28)$$

式中 K_{pcv} : 為破壞時之應力比

ϕ'_{cv} : 為其破壞時之剪力摩擦角

Rowe 由充分的擴孔資料提供，所有的試驗破壞都將歸於定量體
積狀態。所以，應力比與體積變化之改變可藉由應力膨脹關係來表示：

$$\frac{1 + \sin\phi'}{1 - \sin\phi'} = \left(\frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi}\right) \left(\frac{1 + \sin\phi'_{cv}}{1 - \sin\phi'_{cv}}\right) \quad (2-29)$$

亦可轉換成主應力、體積應變和剪應變來表示

$$\frac{\sigma'_r}{\sigma'_\theta} = K_{pcv} \left(\frac{1 - d\varepsilon_v/d\gamma}{1 + dv/d\gamma}\right) \quad (2-30)$$

式中

σ'_r : 為有效之徑向應力

σ'_θ : 為有效之環向應力

而當大應變發生時 $d\varepsilon_v/d\gamma$ 值將會趨近零，所以由總應力平衡方程

式與上式(2.30)結合得:

$$\frac{d\sigma_r}{d\varepsilon_\theta} = -\sigma_r' \left(\frac{1 + K_{acv} (d\varepsilon_r / d\varepsilon_\theta)}{\varepsilon_r - \varepsilon_\theta} \right) \quad (2-31)$$

其中 $K_{acv} = 1/K_{pcv}$ 、 $\sigma_r = p$ 和 $\varepsilon_\theta = \varepsilon_c$

(2.26)式與擴孔理論中 Rowe(1962)所提之膨脹角觀念結合，將可導出由礦物摩擦角 ϕ'_{cv} 與上式斜率值 s 來評估尖峰摩擦角 ϕ' 與膨脹角

$$\psi, \text{ 其式如下 } \sin \phi' = s / [1 + (s - 1) \sin \phi'_{cv}] \quad (2-32)$$

$$\text{與 } \sin \psi = s + (s - 1) \sin \phi'_{cv} \quad (2-33)$$

不排水剪力強度 s_u

一般在黏土層中由傍壓儀試驗評估其不排水剪力強度之方法有數種，其中 Gibson 和 Anderson(1961)所提之理論公式解如下：

$$\sigma_{rr} = P_y + s_u \left(\ln \frac{\Delta V}{V} + \ln \frac{G}{s_u} \right) \quad (2-34)$$

利用上式，將壓力與體積應變量作一半對數曲線圖，則其曲線之斜率即代表土壤之不排水剪力強度。

Baguelin et al.(1978)則提出，若將應力-體積應變曲線轉換成剪應力與體積應變曲線，則其曲線尖峰值即為土壤之不排水剪力強度。

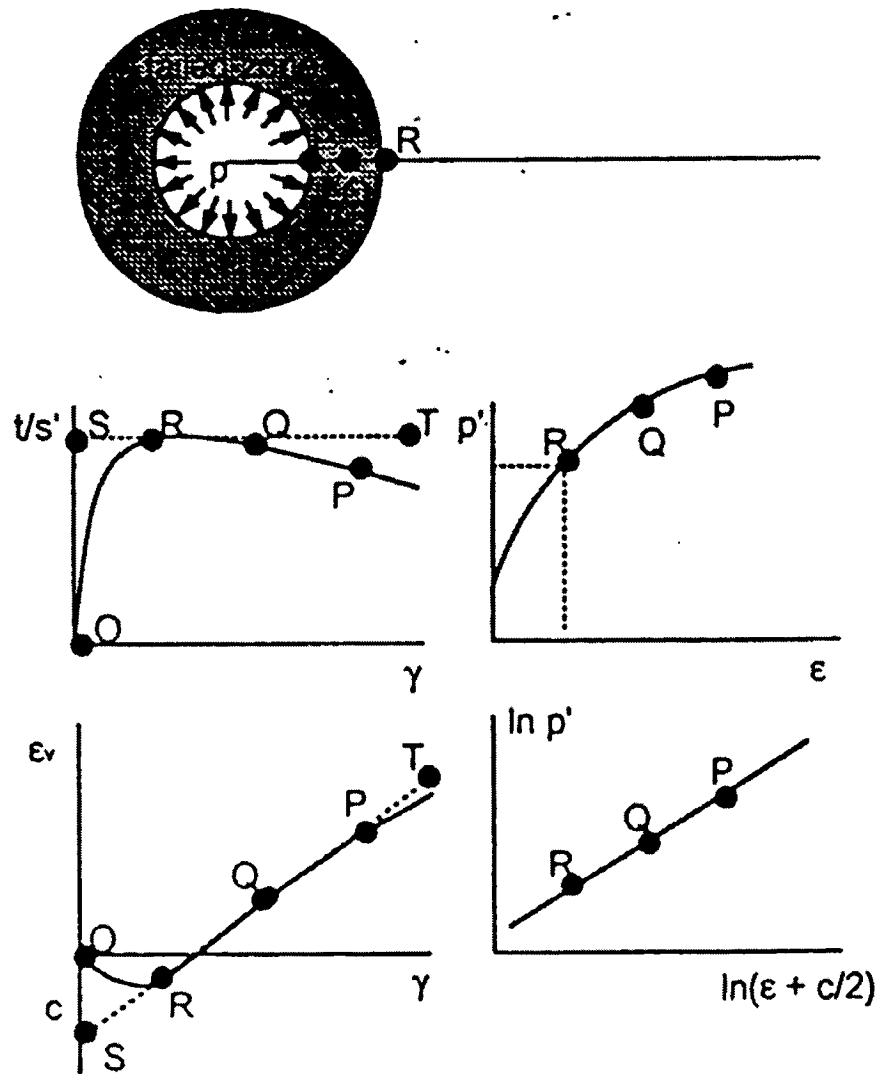


圖 2.85 砂土在圓柱體擴張情形下之應力與應變關係

(Hughes et al., 1977)

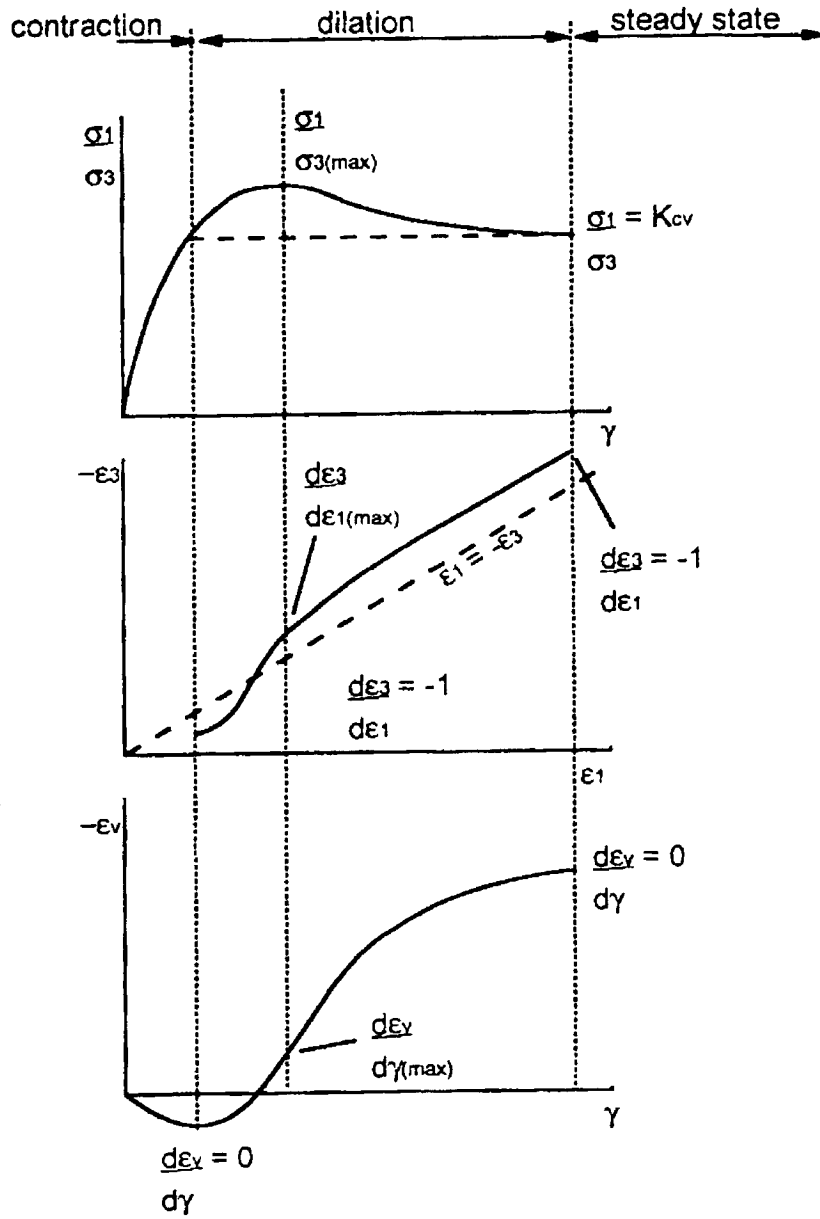


圖 2.86 砂土受壓之膨脹行為

(Manassero, 1989)

三、地電阻影像剖面法

本計畫現地試驗主要為使用地電阻影像剖面探測方法，茲將地電阻影像剖面探測之探測原理、儀器設備、資料處理分析與判釋結果說明敘述如下：

3.1 探測原理

地電阻影像剖面探測法，其原理主要將直流電藉由插於地表或探測孔內之一對電極(電流極)通入地下，電流流經地層造成人工電場，由地表上之另一對電極(電位極)量測此電場之電位差，此電位差因地層之導電性及探測點間異常物質之不同而有異常不均之分佈。由通入地下之電流強度、量測得之電位差及電流極間之相對位置，依歐姆定律求出地層之視電阻值及電性地層之構造，進而推估調查區域間異常帶之分布狀況，地表二維地電阻影像剖面法探測電極排列方式示意圖詳圖 3.1。

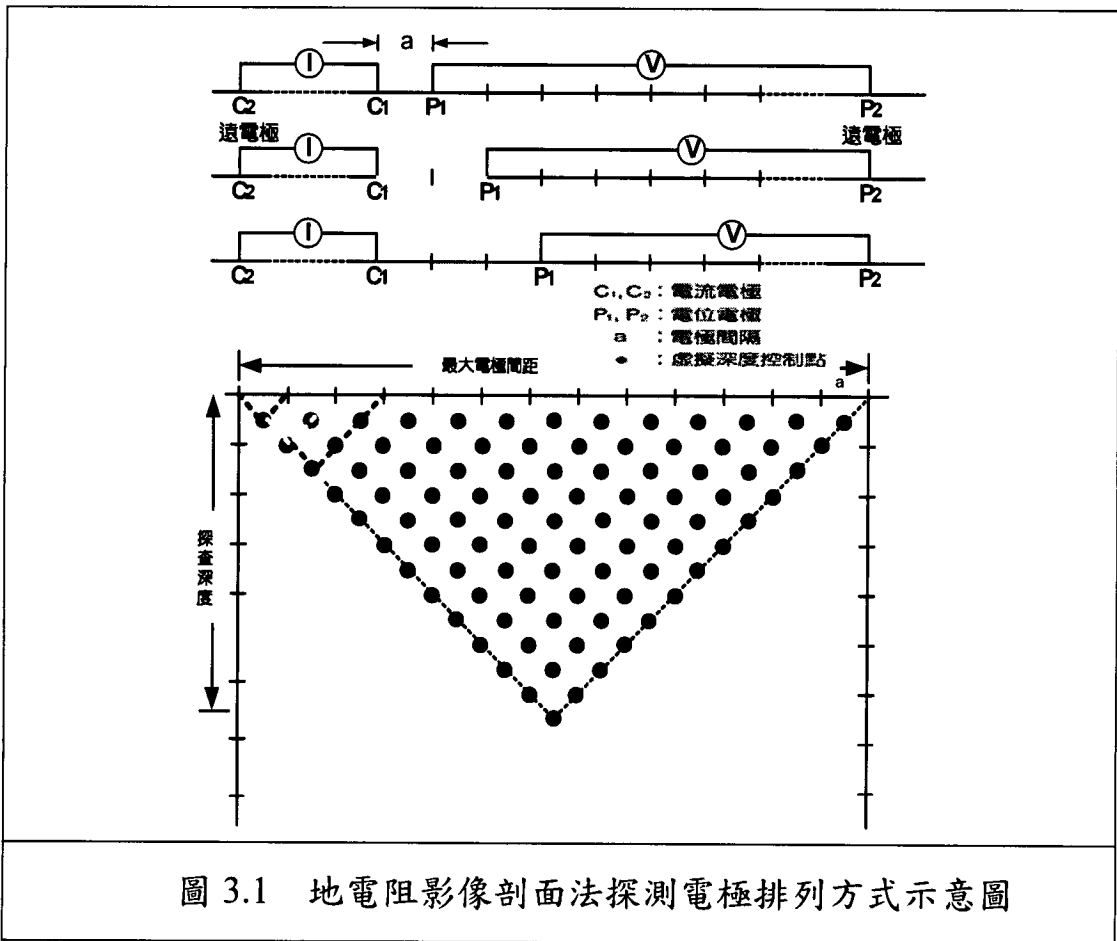


圖 3.1 地電阻影像剖面法探測電極排列方式示意圖

3.2 探測儀器

本次計畫所用之儀器為美國 AGI 電探儀微電腦，如圖 3.2 所示。地電阻探測全套設備共計包括電阻探測儀、28 節點切換盒 3 組(共計 84 節點)，多波道探測電纜(每組 28 節點)3 組，不銹鋼電極棒、皮尺、電線等，其中電阻探測儀有信號疊加及貯存等功能。

- a. 輸出電流：可達 2A
- b. 輸出電壓：可達 400V
- c. 輸出功率：200W
- d. 量測解析度：可達 30nV

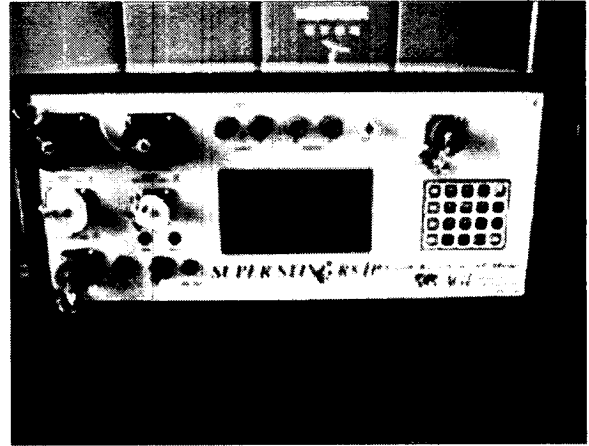


圖 3.2 地電阻探測儀器

3.3 資料處理與分析

地電阻影像剖面探測法是使用二支電極棒（以 C1 與 C2 表示）將電流通入地層中以造成人為電場。用另外二支電極棒（以 P1 與 P2 表示）測量此電場的電位差。此電位差與通入地下的電流強度、電極間的相對位置及各地層的導電性有關。在一電性地質半空間地層，各物理量間之關係，如下式：

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} \right) - \left(\frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_2} \right) \right\} \quad (3-1)$$

式中 V 為電位極間的電位差； ρ 為地層的電阻率；I 為通入地下的電流強度；C1P1、C1P2、C2P1、C2P2 為電流極至電位極間之距離，上式可改寫成

$$\rho = K \frac{V}{I} \quad (3-2)$$

式中

$$K = 2\pi \left\{ \left[\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} \right] - \left[\frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_2} \right] \right\}^{-1} \quad (3-3)$$

因此若測得 I、V 及電流極與電位極的相對位置即可算出此均質半空間介質的電阻率。但地層實際上並非均質半空間狀況，因此依上式算得的電阻率稱為「視電阻率」(apparent resistivity)，寫成

$$(3-4)$$

視電阻率通常不代表地下各地層之實際電阻率，而是代表在此種電極排列情形下所有電性地層之綜合效應。電流極展距越大，其效應越接近下部地層之性質，因此在探測中將電流極展距逐次加大，可逐次測獲由淺至深的地層反應訊號。資料經適當的處理與解釋可推算得地層的真正電阻率。

3.4 判釋結果說明

由於物質的電性影響著地電阻法判釋的結果，以下就電阻率之特性作一說明：

電阻率指示物質導電性的良劣。在一般導體之導線兩端接上可變的電位差 V，每次加上不同的電位差時，而量測導線上的電流 I，發現兩者間是線性關係變化。

$$\frac{V}{I} = R \quad (3-5)$$

此處電阻 R 就是導線兩端電位差與其上電流 I 成線性關係時的比例常數，金屬導體皆有此重要的結果，此結果稱為歐姆定律(Ohm's law)。

導線上電阻 R 與材料特性關係可由下式表示：

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3-6)$$

可視為導線電阻的一般定義。 ρ 即為導線材料的電阻率， l 為導線長度， A 為導線截面積，電阻單位為歐姆 (ohm，符號為 Ω)。由此可知，導線上的電阻就某一材料而言，線徑 (即截面) 越小，電阻愈大，而長度越長電阻也越大。導線材料上的電阻率 ρ 的倒數 $1/\rho$ 稱為導電率 σ 。因此在取材上盡量使用高導電率，即低電阻率，則其電阻就愈小。由於分佈範圍很大，不同的地層及不同含水狀態常表現明顯的電阻率差異，是地層分辨的良好依據。

而在此我們所關心的是地層的電阻率分布情形，地層的電阻率與地層水的含量、鹽度及分佈狀態有關，也與組成地層的固體顆粒的導電性有關。一般的地層，其固體顆粒為普通造岩礦物的組合體，導電性很低，可視為絕緣體，所以一般地層的電阻率主要決定於地層中水的含量、鹽度及分佈狀態。一般而言，水的含量愈高，鹽度愈高，水的連通性愈佳，其電阻率愈低。地層的粒度愈細，其可交換離子(exchangeable ions)愈多，

電阻率愈低。因此可以由地層的電阻率來研判地層的含水程度、粒度及岩性，藉以研判地層的形貌及構造，表 3.1 為各種不同地層材料之地電阻率概值；但相同岩性在不同的區域所顯現的地電阻值差異非常大，故表 3.1 之數據僅能作一參考依據。在一般說來，其地電阻影像剖面只能代表現地地下地電阻的相對性，通常相對地電阻高者(一般剖面表示顏色為紅色區域)，有可能為孔洞、不透水岩層(一般岩層電阻率均高)或地盤改良固結區；相對低者(一般剖面表示顏色為藍色區域)，可能為含水帶、斷層泥或直接為地下水、海水等。但實際情形，還必須配合當地地質鑽探資料和地層狀況加以比對。

3.5 隔時監測(time lapse)

由於地層中可能出現相近或相同的電阻率，但是在岩性及其性質上卻是不同的岩層，一直是地電阻法解釋上問題。比如說低電阻率的位置，有可能是含水量豐的砂岩層，也有可能含泥量較高岩層，一時很難辨別，可能需要其他地質資料輔助解釋。幸運的是，在淺地層中常存在淺層地下水，地下水常因降雨及其消散狀況而改變，因為地電阻率對水相當敏感，因此隔一段時間量測一次，觀測其間的變化，假設岩層在觀測期間無變化，如此觀測所得的結果即是地下消長的變化情形。一般隔時地電阻影像剖面法可以變化率表示，負值表示含水量增加，正值表示含水量減少。在增減的過程，還可能得知水流路徑。

表 3.1 各種不同地層材料之電阻率概值

地質材料	電阻率 $\rho(\Omega\cdot m)$
砂岩 Sandstone (in general)	100~8,000
花崗岩 Granite、片麻岩 Gneiss	7,000~15,000
輝長岩 Gabbro	10,000~40,000
石英岩 Quartzite	5,000~10,000
粗砂 Coarse Sand、礫石 Gravel (乾燥)	20,000~80,000
砂 Sand (乾燥)	5,000~20,000
粉砂 Silt (乾燥)	400~2,000
純水 Fresh Water	10,000
海水 Sea Water	0.2~1
粗砂 Coarse Sand、礫石 Gravel (飽和)	1,000~5,000
砂 Sand (飽和)	200~1,000
粉砂 Silt (飽和)	30~200
黏土 Clay (飽和)	15~30

3.6 現地地電阻施做位置

過去本崩塌地曾經施做過地電阻影像剖面探測(經濟部中央地質調查所, 2007), 共有 3 條探測線(圖 3.3), 分別編號為 RIP-Y-01、RIP-Y-02 與 RIP-Y-03。其主要探測是沿著壓力鋼管南側與北側分別佈設(表 3.2), 但是 RIP-Y-02 與 RIP-Y-03 離壓力鋼管較近, 受到隧道及錨座屏蔽下方資料的影響, 故可信度不若 RIP-Y-01 高。RIP-Y-01 探測結果推估崩積層約在地表下 20~25m, 且崩積層之下為岩層(圖 3.4)。本計畫將依據過去探測的結果, 避開壓力鋼管對地電阻探測的影響, 且依據過去邊坡滑動的情況, 以及現場會勘討論結果, 選擇以 S7 號孔附近為施測起始點橫向穿過壓力鋼管施作地電阻影像剖面探測, 該測線為 NCTU-03, 其總施測長

度約為 141 米，如圖 2.68 所示。其目的藉以現場地電阻探測，以了解該剖面之現場地層內部含水量狀況，並配合 NCTU-01 及 NCTU-02 所裝設之分層水壓計的量測結果，來研判現場可能之地下水水流方向或路徑，將其研判結果作為邊坡穩定數值模擬地下水流輸入參數，其模擬結果可作為該現場後續整治與監測孔位佈設依據之參考。

表 3.2 義興崩塌地地電阻影像剖面法測線配置表
(經濟部中央地質調查所，2007)

測線名稱	方向	電極數目	長度	備註
RIP-Y-01	N80°E	28 根	135 m	壓力鋼管南側
RIP-Y-02	N75°E	40 根	195 m	壓力鋼管北側
RIP-Y-03	N75°E	28 根	135 m	壓力鋼管北側

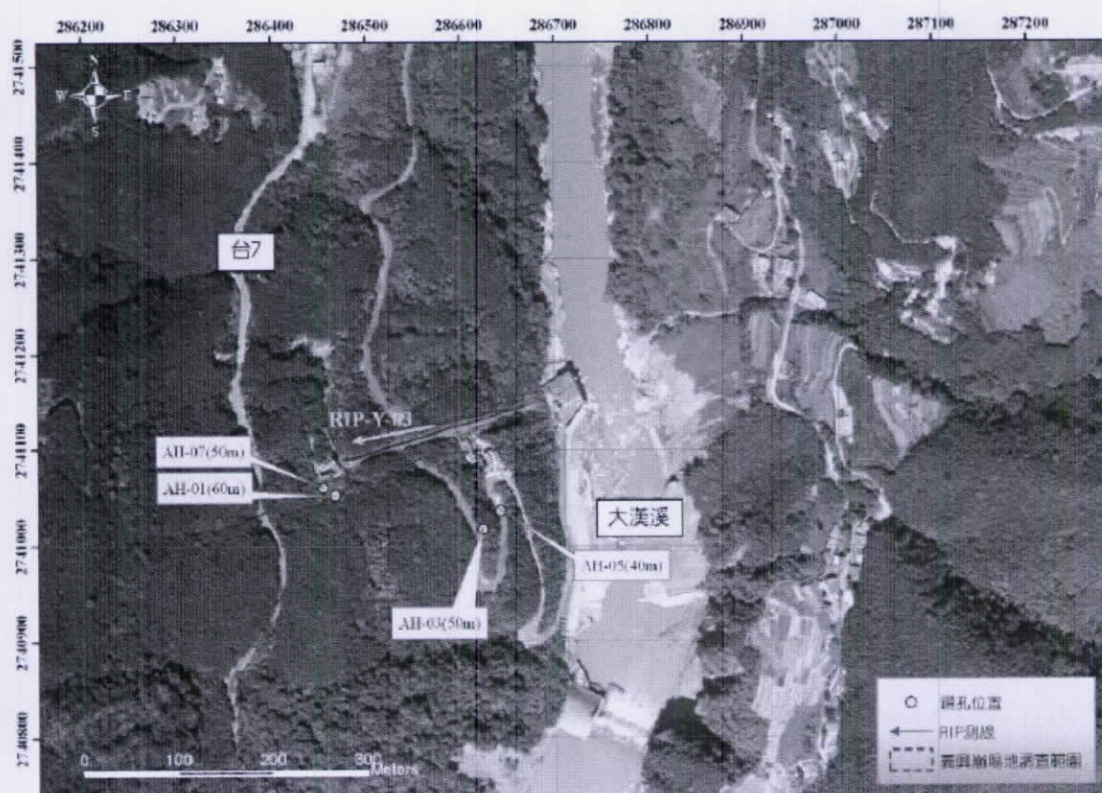


圖 3.3 義興崩塌地地電阻影像剖面法測線配置圖
(經濟部中央地質調查所，2007)

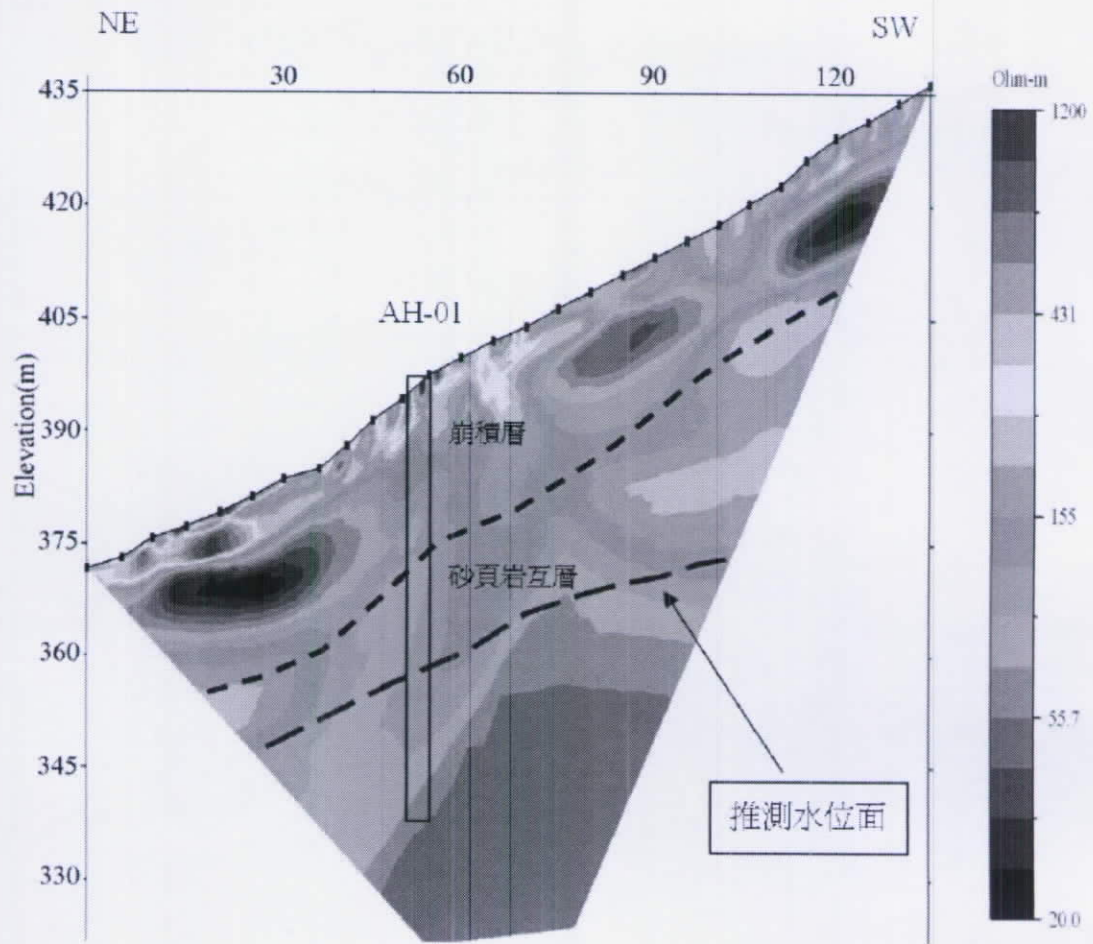


圖 3.4 RIP-Y-01 探測結果解釋圖

(經濟部中央地質調查所，2007)

3.7 Wenner 與 Pole-Pole 介紹與比較施測方法

Wenner alpha 電極排列常以 Wenner 簡稱，電流極在外側，電位極在內側，單位電極距離皆等於 a ，測線展距等於 $3a$ 。當電極間距增加 n 倍，測線展距變成 $3na$ 。Wenner-Schlumberger 電極排列與 Wenner 相似，測深參數 n 定義為電流極 C_1 與電位極 P_1 以及 C_2 與 P_2 兩間距與電位極 (P_1 、 P_2) 間距 a (最小單位電極間距) 之比值，若 n 等於 1 時，Wenner 可視為 Schlumberger 的特例，因此稱為 Wenner-Schlumberger。

Pole-Pole 電極排列法又稱雙極法，假設電流極 C_2 和電位極 P_2 位於無窮遠，電極間距增加 n 倍，展距變為 na 。與 Pole-Dipole 相同遇到無理想遠電極之限制，因此 C_2 、 P_2 分別和 C_1 、 P_1 間距大於 10 倍 (理想為 20 倍) 的 C_1P_1 間距 (na) 之外， C_2 與 P_2 距離最少為 2.5 倍 (理想為 3 倍) 的 C_1P_1 間距。避免有負值或零值錯誤出現。

Wenner 為例來說，其電極排列法以四根電極成等間距排列，其電極排列幾何參數 $k=2\pi a$ ，故訊號強度衰減係數是 $1/k$ ，即為 $1/2\pi a$ ，與其他的電極排列法比較起來相對訊號衰減程度低，故訊號強度較強。因此 Wenner 適合用在以監測為目的之工址，以降低背景雜訊大時所造成的影響。根據 Edwards (1977) 提出的測深參數，Wenner 的探測深度約為展距的 0.173 倍，相對適用於淺層的調查。依照靈敏度剖面的結果分析，Wenner 排列下的電阻率值對於垂直方向靈敏度較高，電阻率值變化明顯，但是在水準方向卻不顯著，

因此垂直方向解析度優於水準方向，若當地質狀態為垂直向下的水準層狀變化時，以Wenner來施測會得到較佳的探測結果。

表3.3為Wenner與Pole-Pole施測方法比較表。

表 3.3 各施測電極排列方式綜合比較

電極排列方式	訊號衰減強度	探測深度 Z_e/L (Z_e :測深, L :展距)	較佳解析方向
Wenner	$1/2\pi a$ (佳)	0.17 (最差)	垂直向
Pole-Pole	$1/2\pi a$ (佳)	0.86 (佳)	皆較差

Wenner較適用於以監測為目的之工程；深層探測則以Pole-Pole為主；至於各種排列在地層的解析能力，於垂直向與水準向各有其優缺點，則須依不同的工程探測目的來選擇最佳的排列方式。

3.8 現地環境與施測作業

本計畫中採用二維地電阻探測義興電廠區域之地下水層，以了解計畫區內其地下水位分佈之情形。測線之整體佈設如圖 3.5 所示，其測線沿著道路佈置，測線中間將經過一隧道。

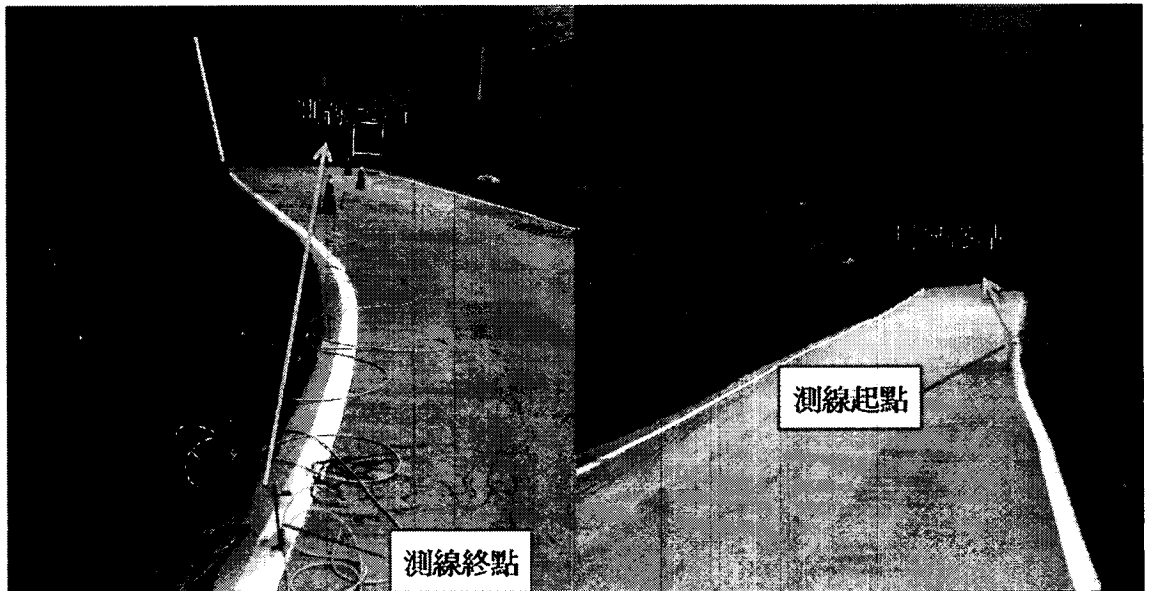


圖 3.5 地電阻測線位置

測線位於道路旁並切過一個大彎道，測線 57 公尺到 93 公尺區間經過一隧道，電極間距各為 3 公尺，全長各 141 公尺。現地各測線的施測參數如表 3.3 所示。

表 3.4 地電阻測線施測參數

電極間距(m)		3
電極數目		48
測線展距		141
施測方式		Wenner、Pole-Pole
座 標	起點	T97 (286615, 2741484)
	終點	T97 (286590, 2740952)
	遠電極	T97 (286536, 2741484) T97 (286590, 2741060)

測線之現場環境及測線佈設分於如圖 3.6 所示。測線主要是沿著道路山壁側佈設，部份穿越道路，整體測線約略成直線；測線全部位於柏油路上，以鑽機鑽入約 15 公分再將鋼棒釘入土層如圖 3.6(a)所示；主機放置位置位於測線 70 公尺處之隧道內，主機佈置如圖 3.6(b)所示；另測線經過一個地下排水涵洞，位於測線 99 公尺至 102 公尺處，如圖 3.6(c)與圖 3.6(d)所示；由於部分測線橫越整個馬路，故為避免電擊棒與纜線受車子壓毀而損壞，因此於試驗時則全線進行交通管制。

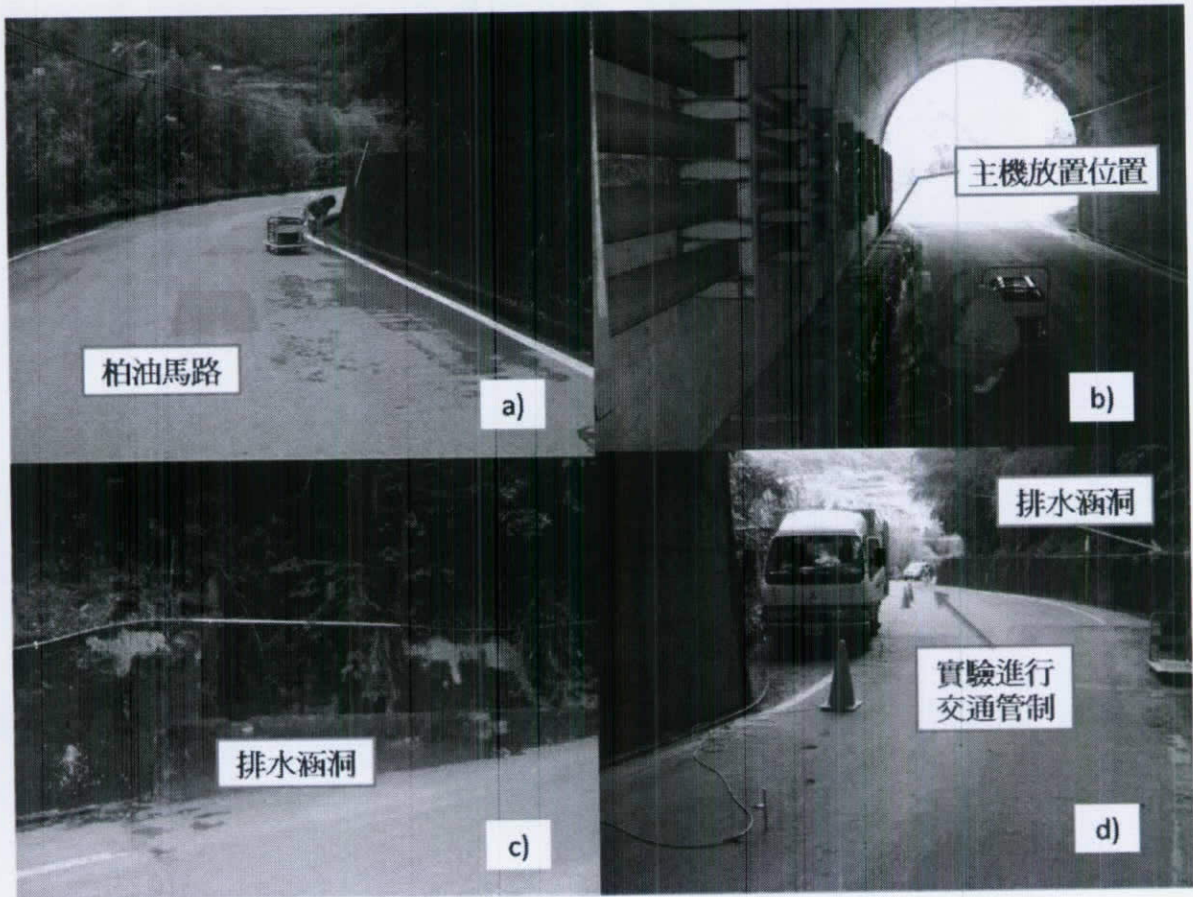


圖 3.6 現場環境與施測情形

3.9 試驗結果與分析

分析結果如圖 3.8、圖 3.9 所示，兩個影像剖面是由不同施測方式所得之結果，圖 3.8 採用 Wenner 法施測，探測深度約 20 公尺；圖 3.9 採用 Pole-Pole 法施測，探測深度約達 90 公尺深。由圖 3.8 可知，其表層大多為 10~40(ohm.m)之低電阻層，約 5~10 公尺左右，推測係因施作前幾天連續下雨，並入滲至下方土層所致；而在地表 15 公尺以下，皆為高電阻形態，其電阻分佈約為 250~400(ohm.m)，其可能因地層下方為較破碎岩層，故孔隙較大所致。整體結果與圖 3.9 淺層結果相符合。

由圖 3.9 可知在測線 102 公尺，深度 1.5 公尺處，有一低電阻存在，電阻約為 10~20(ohm.m)，其可能係測線經過地下排水涵洞所造成，另測

線 96~125 公尺，深度 45~50 公尺處，有一高電阻存在，其可能為測線邊界效應影響所致；而整體結果顯示在地表下 35~37 公尺處有一明顯之高低電阻交界面（虛線處），推測其可能為地下水位之位置。

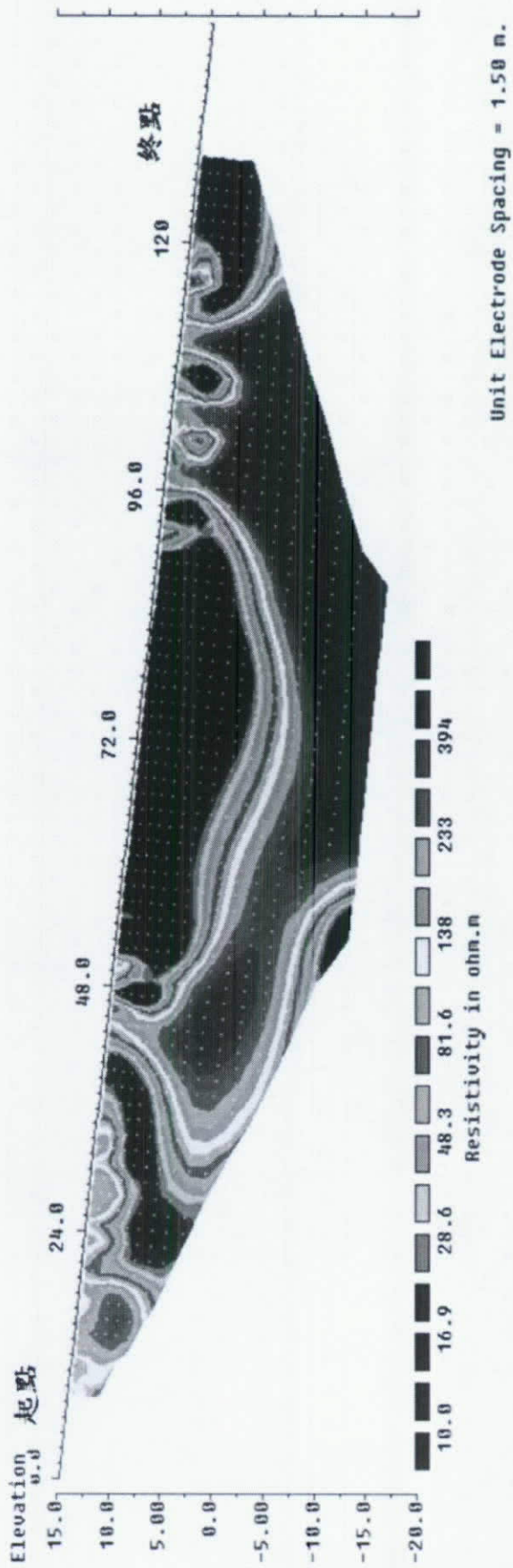


圖 3.8 測線地電阻剖面(Wenner)

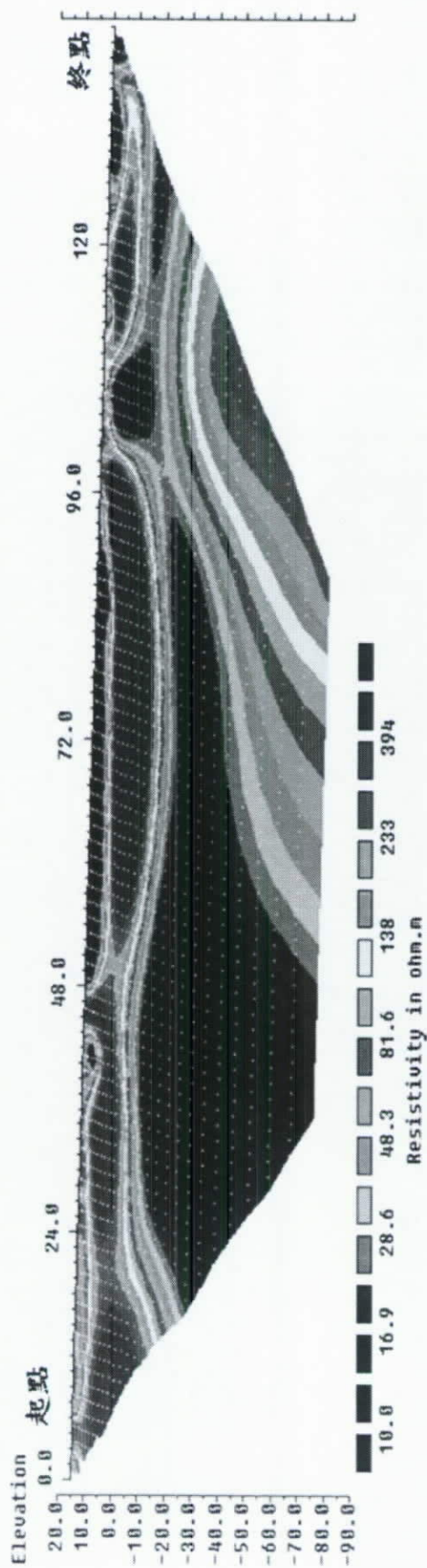


圖 3.9 測線地電阻剖面(Pole-Pole)

四、室內土壤實驗與邊坡穩定分析

工作團隊於交通大學內擁有一間土壤力學實驗室、一間標度槽實驗室與兩間光纖監測實驗室。於土壤實驗室內具備有 3 組土壤物理實驗設備與 3 組三軸實驗設備，本章主要是敘述本計畫中將使用到的靜態三軸實驗設備與方法。

4.1 現場鑽探位置與試驗項目說明

依據現場勘察與過去研究資料分析結果，鑽孔位置選定於 NCTU-01 與 NCTU-02，如圖 2.68 所示，鑽孔方式採用目前 HQ 地質鑽探方法，並以劈管取樣，鑽孔直徑約為 10 公分，每一鑽孔深度為 50 公尺，之後，鑽孔取樣試體，進行 8 組基本物理試驗，包括粒徑分佈、比重、含水量，及 8 組軸向壓縮試驗，以求得現場土壤力學參數凝聚力 c 及摩擦角 ϕ ，其現場鑽探施作過程中已安排 1 人至現場監督。

4.2 土壤三軸實驗說明

靜態三軸試驗裝置之主要功能是進行軸向應變控制之垂直荷重試驗，以決定試體受壓之不排水剪力強度，本計畫所採用之靜態三軸試驗設備包含三軸室、垂直荷重加載系統、氣壓及水壓控制系統、量測設備及訊號擷取系統等五項(黃耀道，2008)。

1. 三軸室

圖 4.1 為靜態三軸試驗設備示意圖，用以安裝土壤試體進行試驗，試體直徑為 70mm，高度 140mm，試體頂蓋及底座皆有一透水石。三軸試驗設備以壓克力外罩所組成，並以不銹鋼內支撐與三軸室下部緊密結合。輸氣管線連接至三軸室上方外，所有輸水管線皆連接至三軸室底部圓盤。為量測試體所承載之軸向力，將荷重元 (load cell) 架設於三軸室內試體之頂部。

2. 垂直荷重加載系統

試驗加載系統係採用 Wykeham Farrance 之荷重支架 (load frame)，底部配備一具最大壓力 100kN 之壓縮試驗機 (stepless compression test machine)，提供軸向壓縮速率精度可達 0.0001mm/min，可調整快速或慢速加壓，所以適合施做需精確控制應變速率之靜態三軸試驗。

3. 氣壓與水壓控制系統

空壓機為提供試驗所需壓力之來源，壓力上限為 10 kg/cm²。利用手動式調壓閥提供試體所需之圍壓，反水壓部分亦使用手動式調壓閥施壓於除氣水桶，利用高壓塑膠管路，將水壓施加於試體內部，壓力表可顯示圍壓及反水壓之大小，精度為 0.2 kg/cm²。

4. 量測設備

本試驗量測設備包含軸向荷重、軸向應變、圍壓及超額孔隙水壓。軸向荷重量測使用荷重元 (load cell)，將之置於三軸室內試體之頂部 (圖 4.25) 此荷重元可用於量測軸向荷重達 5kN；軸向應變之量測同樣使用 Linear Variable Differential Transformer (LVDT)，可量測 50mm 之變形；圍壓及孔隙水壓量測採用可耐壓 700kPa 水壓計 (pressure transducer)，試驗所使用各項量測設備之規格如表 4.1 所示。

5. 訊號擷取系統

本試驗以應變控制方式施加軸向荷重時，主要量測 load cell、LVDT 及兩個 pressure transducer (圍壓及反水壓) 之變化值。因此，各量測元件感應器 (sensor) 所量測到的電壓值所輸出的類比訊號透過 A/D 卡轉換為數位訊號傳輸至電腦，配合 LabVIEW 程式，可即時處理並記錄試驗所獲得之訊號。

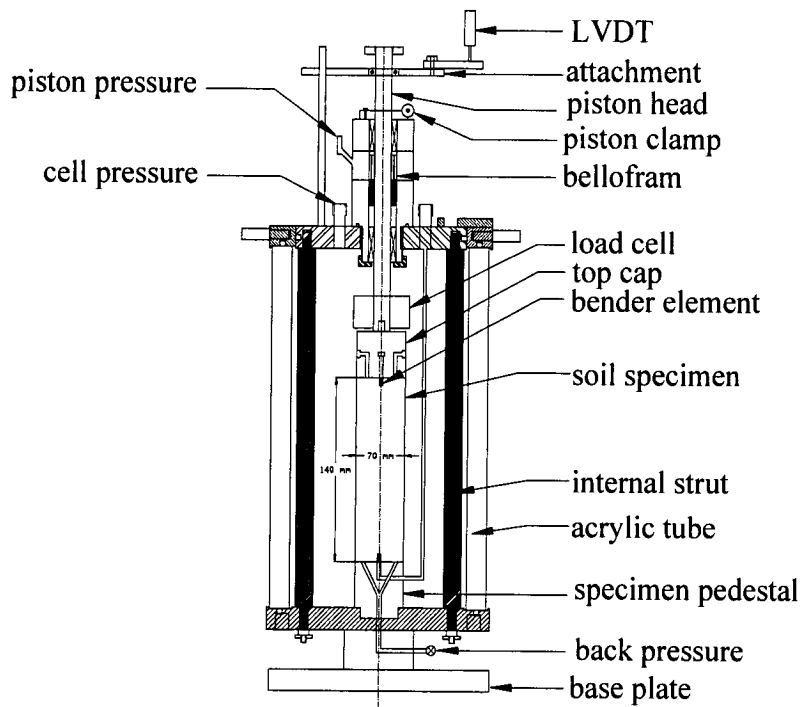


圖 4.1 靜態三軸試驗設備示意圖

表 4.1 靜態三軸試驗量測系統規格表

感應器	量測範圍	解析度
LVDT	50 mm	0.01 mm
荷重元	5kN	0.1N
水壓計	700 kPa	0.01 kPa

4.3 現場土壤物理性質與三軸試驗結果

本計畫取 NCTU-01 與 NCTU-02 鑽孔其中 NCTU-01 孔取樣結果照片如附錄三。10m 以上為崩積土與破碎岩層，10m 以下至 50m 為完整岩心。所示土樣進行室內物性與三軸實驗，其結果整理如附錄二。

在土壤三軸試驗中，主要探討不同圍壓下土壤之力學行為，其中藉由應力路徑以了解其土壤在飽和狀態下之基本力學性質。飽和壓密不排水試驗結果討論如下：

1. 軸差應力-應變關係

軸差應力均隨圍壓增加而增加，而軸差應力之轉折點都在軸向應變達 2% 前發生，而後隨著軸差應力持續升高，呈現出部分應變硬化 (strain-hardening) 的行為，直到試體軸向應變達接近 20%，此種趨勢仍未停止。

2. 應力路徑圖

義興電廠 NCTU-01 與 NCTU-02 孔表土土樣之試驗結果，其應力路徑在不同圍壓下其最後之破壞包絡線仍趨於一致。將試驗結果可發現土樣表現出之行為呈現出膨脹趨勢；而由應力路徑圖中可發現各曲線均有一明顯之轉折點 (elbow)，將此轉折點對應至孔隙水壓變化與軸向應變關係圖中，約略是孔隙水壓曲線之相位轉換點。

綜合以上試驗結果，軸差應力之轉折處與孔隙水壓的相位轉換點 (或曲線斜率之變換點) 大致相同；在應力應變曲線中，軸差應力並無明顯的尖峰值。

4.4 義興電廠邊坡穩定分析

義興崩塌地模擬利用 SLOPE/W 程式亦為加拿大 Calgary 大學所發展的套裝軟體，其主要功能為邊坡穩定分析，可分析簡單或複雜的邊坡穩定問題，其分析原理係採二維極限平衡理論，主要以切片法進行邊坡分析與安全因子計算。

SLOPE/W 為一功能強大之邊坡穩定分析軟體，除一般常用之圓弧形破壞面之外，亦可進行岩盤上的非均質邊坡分析 (heterogeneous slope overlying bedrock)、塊狀破壞分析 (block failure analysis)、外部荷重及加勁材 (external loads and reinforcements) 以及複雜孔隙水壓條件下之分析 (complex pore-water pressure condition)。

一般邊坡穩定分析大多採用極限平衡法，認為邊坡的破壞是沿著某個破壞滑動面。其滑動力主要由自重及外力造成，而其剪力強度則由莫耳-庫倫破壞準則來提供。極限平衡法係計算邊坡此一滑動面之力平衡以求得其安全係數。極限平衡法係將破壞圓弧面分成若干切片，而考慮每一個切片之極限平衡條件，極限平衡法採用靜力方程式來求解安全係數，其中以力矩平衡或力平衡及適當之假設可以推導出邊坡之安全係數，而切片法可視為此極限平衡法的特例，對於所選定的滑動面而言，安全係數即為一個用來折減土體剪力強度的係數，以便使土體進入極限平衡狀態。

4.5 數值模擬結果

傳統邊坡穩定分析方法中，因無法準確量測現地地層水壓變化，故採用總應力分析方法，並假設一地下水位面來進行邊坡穩定分析，因此，所得到的分析結果無法符合實際狀況。

本計畫主要為利用 SEEP/W 程式模擬義興電廠邊坡地層內部水壓分佈，以作為後續邊坡穩定中，地層水壓輸入參數來源，而 SEEP/W 模擬程式中，所使用的參數的準確性，為利用現場所安置兩點光纖光水壓觀測井所測得之地層內部水壓變化及地電阻所施測之結果，以重新率定 SEEP/W 所輸入之參數，並針對不同的降雨量及入滲量，來模擬現場邊坡地下水壓變化，並輸入至 SLOPE/W 進行現場邊坡穩定分析，以評估現場邊坡穩定情況，圖 4.2 為數值模擬分析流程架構圖。

本計畫在現場地下水壓(流)模擬中，主要分為三種不同之地質，分別為崩積土、破碎岩石(盤)及新鮮岩盤，初始邊界條件為左右邊界設定不同之總水頭高度，分別為 320m 及 570m；底部假設無流量邊界，並進行模擬分析，圖 4.5 為該現場地下水壓(流)模擬分析網格設定，在崩積土與破碎岩石(盤)之網格大小為 5m 間隔，而新鮮岩盤網格大小則為 10m，以配合現場所安置之光纖光柵水壓觀測井，其水壓計間隔為 5m 一個，圖 4.4 為現場地下水壓(流)分析結果圖，圖面中藍色虛線代表地下水位面。

SEEP/W 參數率定中，以 NCTU-02 光纖光柵水壓觀測井之監測資料以作為率定參數來源，其觀測井位置如圖 4.4 所示，將率定後之參數，重新輸入至 SEEP/W 模擬現場地下水壓分佈，並作為 SLOPE/W 水壓輸入參數來源。

表 4.2 為義興電廠邊坡模擬地質參數設定，在崩積土層參數中，以三軸試驗結果得知摩擦角約為 32 度，無凝聚力，而破碎岩石及新鮮岩盤之物性與力學參數，為仿照「經濟部中央地質調查所，2008，義興崩塌地水文地質對坡地穩定性影響調查評估，第一期 96 年度分冊報告，第 66 頁」，圖 4.6 為義興電廠邊坡模擬結果，該現場水壓參數來源為 SEEP/W 模擬結果，其邊坡穩定安全係數為 1.33。

因目前現場監測資料有限，且還未考慮降雨所造成之入滲量，故所模擬的邊坡穩定安全係數為現場乾燥狀況。若後續加入降雨入滲量並配合長期現場水壓監測資料，其邊坡安全係數有可能會降低。

圖 4.3 為傳統邊坡穩定分析方法，為根據現場地形資料建立模擬網格，配合現場取樣與相關室外、室內試驗以及開口式水壓監測資料，輸入現場土層力學參數、地下水位面與入滲量等，求得現場地層水位分佈，並輸入至邊坡穩定模擬程式中。

本計畫對於邊坡穩定監測與分析改進方向可分為下列幾點說明：

1. 傳統的水位管是藉由水位管不同深度在水位管上的微小開口，收集沿著水位管不同深度地下水的流入並於水位管底部量測水位變化。而現地地層內可能具有受局部地質構造儲存的棲留水，藉由地層內的分佈式水壓可以直接量測到此棲留水的水壓變化，傳統的水位管則無法量測到此種現象。對於棲止水壓的量測，可以提供地層內不同深度的水壓力變化量測，此種現象可能是在現有水位管量測低水位狀況下邊坡會發生滑動的機制與原因之一。
2. 當暴雨來臨時，地層內水壓會產生上(孔頂)大下(孔底)小的現象，並隨著時間的延長，最大水壓會逐步向下延伸，最終達到一平衡狀態，此現象推估主要是由於地表與地底下滲流所產生。而暴雨來臨時，接近地表的土層內會發生水壓急遽上升的情況，現有的

邊坡穩定分析方式是藉由地下水位管的量測來定義地下水位面的高度，然後假設地下水壓力的分佈是由地底朝地下水位面呈現三角形線性遞減。此種方式將無法量測與分析暴雨來臨時地下水位面以上地層內的水壓力變化，此種水壓力急遽上升的現象與機制有可能是導致邊坡滑動的主要原因之一。

3. 由於現場地層狀況複雜，所以邊坡穩定模擬網格中之地下水壓變化，可能非靜態水壓力分佈，故若以傳統邊坡穩定方式模擬，固定一地下水位面及假設不同之地表入滲量，因為是假設的地表滲流量，所以無法有效反映出現場實際狀況。因此，本計畫充分利用 NCTU-01 及 NCTU-02 水壓觀測井，可監測地層中每一深度水壓變化，因地層中可能有棲止水層存在；暴雨時，現場地層水壓並非呈靜水壓分佈，由水壓監測資料進行回饋分析，得到與現場一致之滲流參數，並輸入地層內水壓資料至邊坡穩定分析軟體 SLOPE/W 進行模擬，改進傳統邊坡穩定方法，其分析結果能反映現地實際狀況。
4. 本計畫已經改進了現場傳統水位管監測的方法，也驗證了分佈式水壓計的量測效果，並使用分佈式水壓量測的結果改進了傳統的邊坡穩定分析方法。土壤的總應力為有效應力加上水壓力，現有的水位管量測無法直接量測得到不同深度的水壓力變化，藉由分佈式的水壓力監測，可以針對不同封層內每一水壓計進行量測與分析，但是現有義興電廠邊坡只有安裝 2 孔水壓管，無法反應整體邊坡水壓變化的情況，建議新增監測孔數，規劃如附錄四所示。

表 4.2 義興崩塌地各地層分區之材料參數

地層參數	崩積土	破碎岩石(盤)	新鮮岩盤
單位重 $\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	20	22	26
摩擦角 $\phi(\text{deg})$	32	34	42
凝聚力 $c(\text{kPa})$	0	90	800

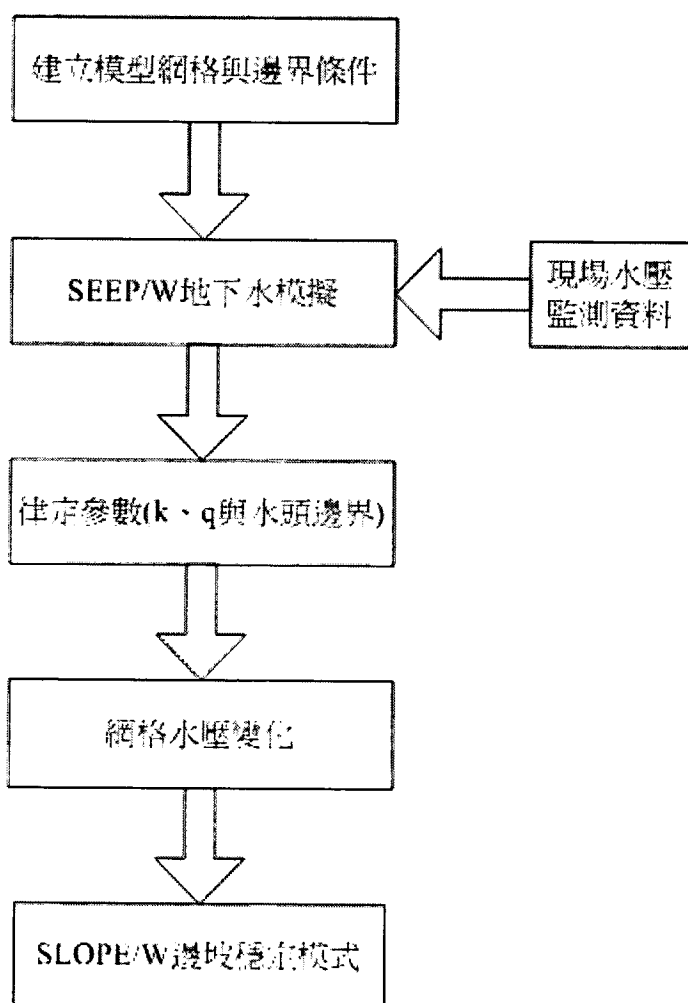


圖 4.2 數值模擬分析流程架構圖

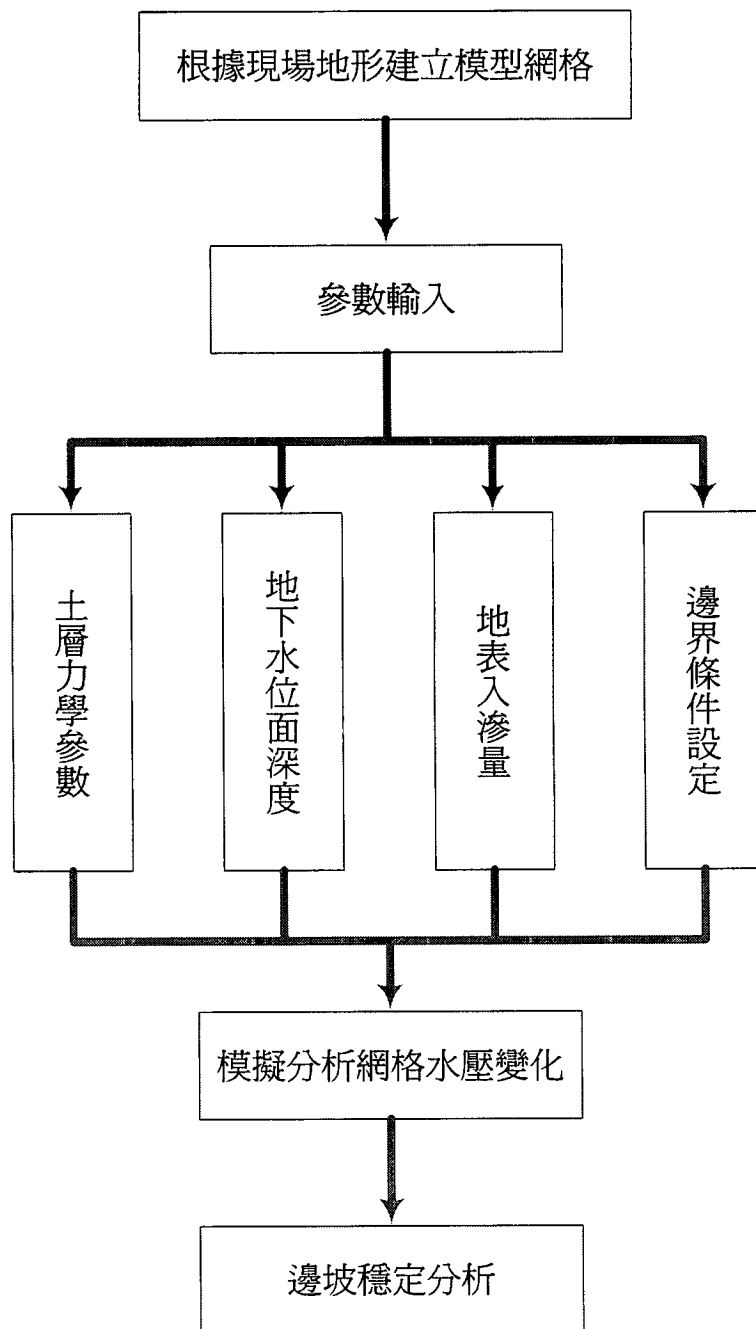


圖 4.3 傳統邊坡穩定分析流程架構圖

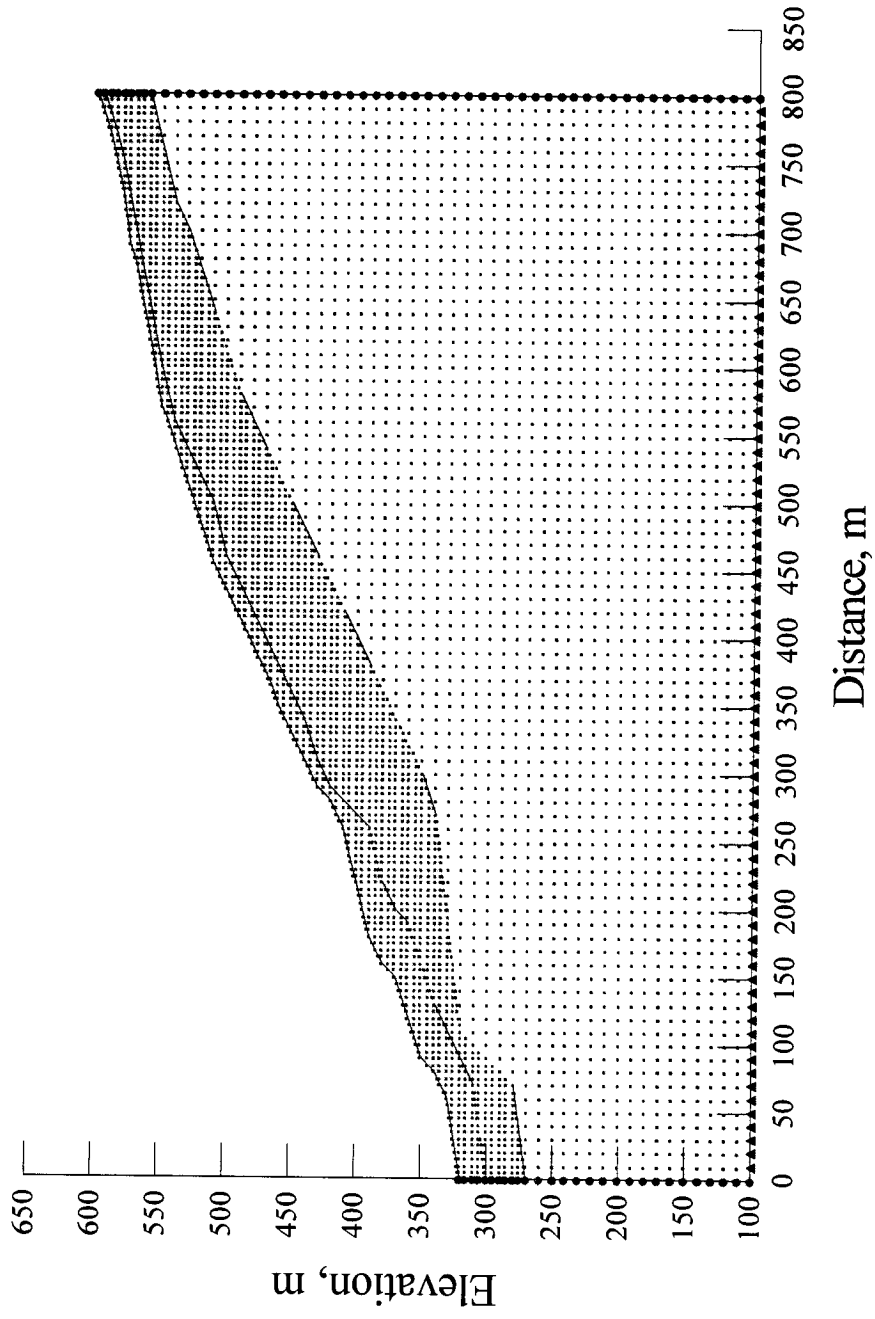


圖 4.4 SEEP/W 網格及邊界條件設定

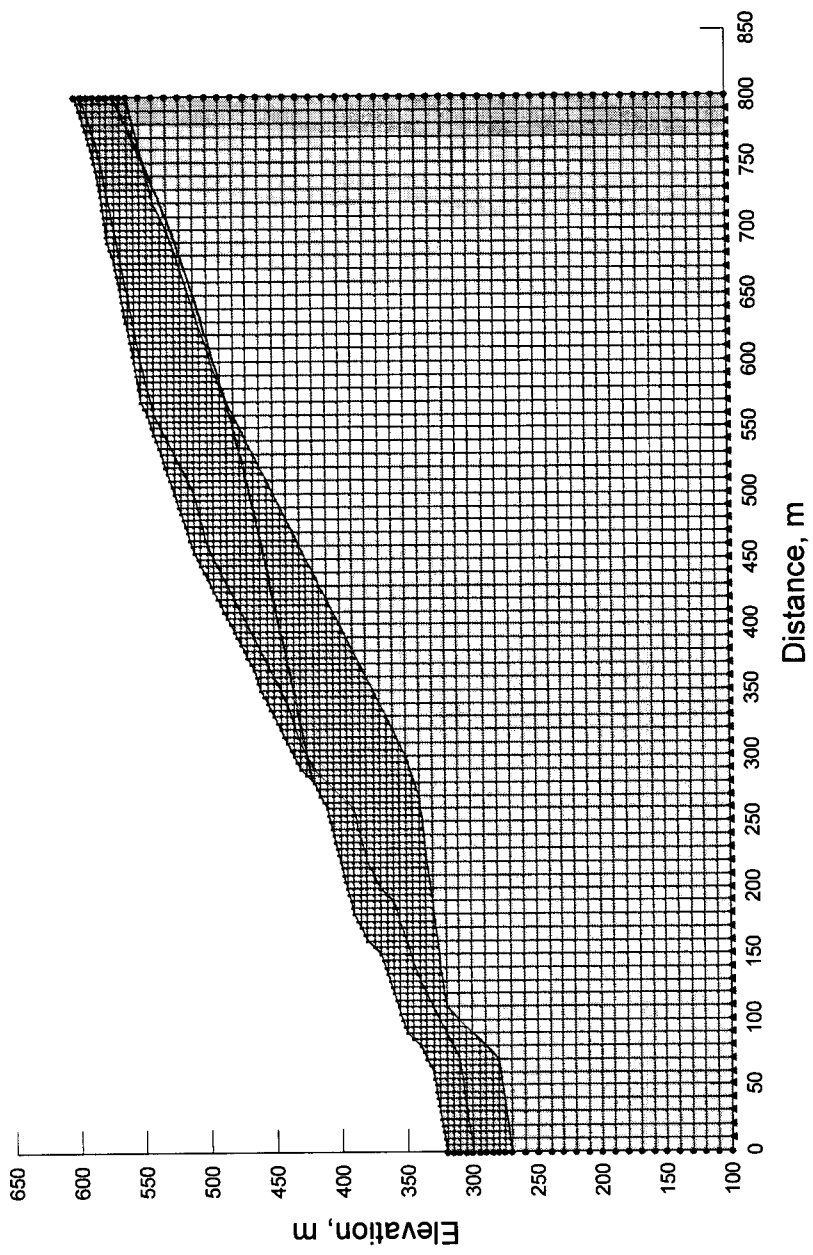


圖 4.5 SEEP/W 模擬地層內部水壓變化

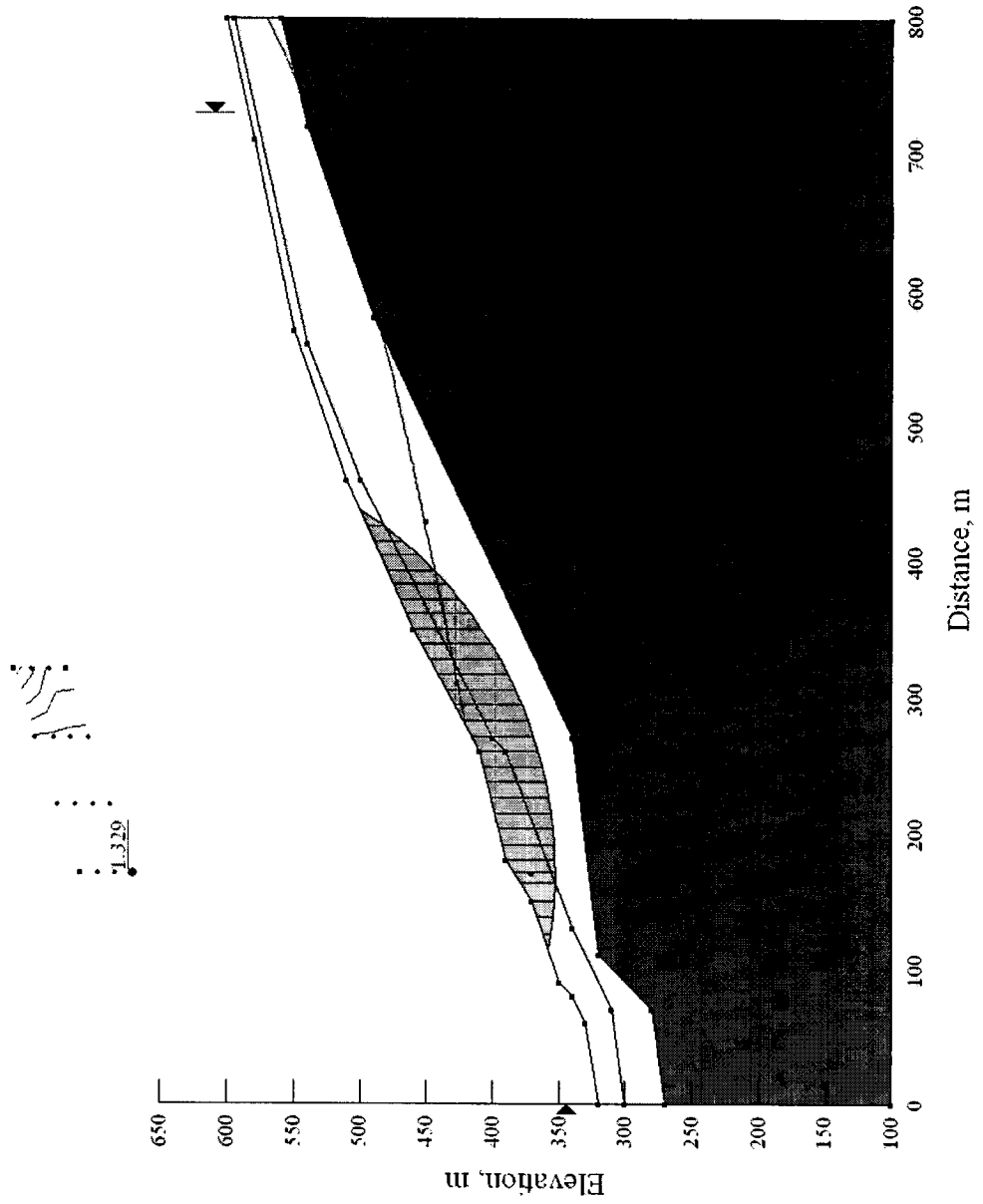


圖 4.6 SLOPE/W 邊坡穩定結果

五、参考文献

5. Baguelin, F., Jezequel, J.F and Shields, D.H., 1978, "The Pressuremeter and Foundation Engineering", Trans. Tech. Publication.
6. Clarke, B.G., 1995, "Pressuremeters in Geotechnical Design", Blackie Academic and Professional, Glasgow, pp148-153.
7. Dong, X., Shum, P., Yang, X., Lim, M. F., and Chan, C. C., 2005, "Bandwidth-tunable filter and spacing-tunable comb filter with chirped-fiber Bragg gratings", Optics Communications, Vol. 259, Issue. 2, pp. 645-648.
8. Heo, J. S., Chung, J. H., and Lee, J. J., 1, "Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors", Sensors & actuators. Part A, Physical, Vol. 126, Issue. 2, pp. 312-327.
9. Hill, K.O., Fujii, F., Johnson, D.C., and Kawasaki, B.S., 1978, "Photosensitivity on Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication," Applied Physics Letter, No.32, pp.647-649.
10. 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.
11. Huang, A.B., Chameau, J.L. and Holtz, R.D., 1986, "Interpretation of pressuremeter data in cohesive soils by simple algorithm" , Geotechnique, 36(4), pp599-603.
12. Hughes, J.M.O., Wroth, C.P. and Windle, D., 1977, "Pressuremeter

- tests in sand”, *Geotechnique*, 27(4), 455-477.
13. 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.
14. Kojima, S., Hishida, Y., Fukuchi, K., and Hongo, A., 2003, “Optical Fiber Sensor Using Fiber Bragg Grating for River Management”, 16th International Conference on Optical Fiber Sensor, Nara, Japan, pp. 112-115.
15. Liu, Y. Q., Guo, Z. Y., Zhang, Y., Liu, Z. G., and Dong, X. Y., 2000, “Research on the simultaneous measurement of pressure and temperature using one fiber grating ” , *Chin J Lasers A*, Vol. 27, pp. 1002-6.
12. Marsland, A. and Randolph, M. F., 1977, “Comparisons of the results from pressuremeter test sand large in-situ plate test in London Clay”, *Geotechnique* 27(2), 217-243.
13. Me'nard, L. (1957), “An apparatus for measuring the strength of soil in place”, Thesis, University of Illinois.
14. Meltz, G., Morey, W. W., and Glam, W. H., 1989, “Formation of Bragg Grating in Optical Fibers by Transverse Holographic Method”, *Opt. Lett.* Vol.14, pp.823-825.
15. Measures, R. M., 2001, “Structural Monitoring with Fiber Optic Technology”, Academic, California.
16. Othonos, A., and Kalli, K., 1999, “Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing,” Artech House, Boston, 422p.

17. Raman, K., 1999, "Fiber Bragg Gratings," Academic Press, 458p.
18. Rao, Y.-J, 1998, "Fiber Bragg Grating Sensors: Principles and Applications," Optic Fiber Sensor Technology, Edited by K.T.V. Gattan and B.T. Meggitt, Published by Chapman and Hall, London, Vol.2, pp.355-379.
19. Rao, Y. J., Jackson, D. A., Jones, R., and Shannon, C., 1994, "Development of prototype fiber-optic-based Fizeau pressure sensors with temperature compensation and signal recovery by coherence reading", Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, Issue 9, pp. 1685 – 1695.
20. Rowe, P.W. (1962), "The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact", Proc. Royal Soc. (Series A), 500-527.
21. Xu, M. G., Geiger, H., and Dakin, J. P., 1996, "Fiber Grating Pressure Sensor with Enhanced Sensitivity Using a Glass-bubble Housing", Electron Lett., Vol. 32, pp. 128-129.
22. Zhang, Y., Feng, D., Liu, Z., Guo, Z., Dong, X., Chiang, K. S. and Chu, Beatrice C. B., 2001, "High-Sensitivity Pressure Sensor Using a Shielded Polymer-Coated Fiber Grating", Photon. Technol. Lett., Vol. 13, pp. 618-619.
23. Zhao, Y., Yu, C., and Liao, Y., 2004, "Differential FBG sensor for temperature-compensated high-pressure (or displacement) measurement", Optics & Laser Technology, Vol. 36, pp. 39 – 42.
24. 林文森，1998，"軟弱岩石中之傍壓儀試驗"，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹。
25. 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。
- 26.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。
- 27.經濟部中央地質調查所，2007，”義興崩塌地水文地質對坡地穩定性影響調查評估”，台北。
- 28.黃耀道，2008，”台灣中西部粉土質沙土液化行為分析”，博士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹。
- 29.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。
- 30.經濟部中央地質調查所，2008，義興崩塌地水文地質對坡地穩定性影響調查評估，第一期 96 年度分冊報告，台北。
- 31.經濟部水利署，2009，石門水庫暨榮華壩等壩堰安全監測分析及檢查 98 年度水庫設施定期檢查報告，第二篇榮華壩(含義興電廠、輸水路等)定期檢查報告，台北。
- 32.經濟部水利署北區水資源局，2009，石門水庫暨榮華壩等壩堰安全監測分析及檢查，98 年度監測分析工作月報表，桃園。

附錄一 光纖光柵水壓計標定結果

附錄一 光纖光柵水壓計標定結果

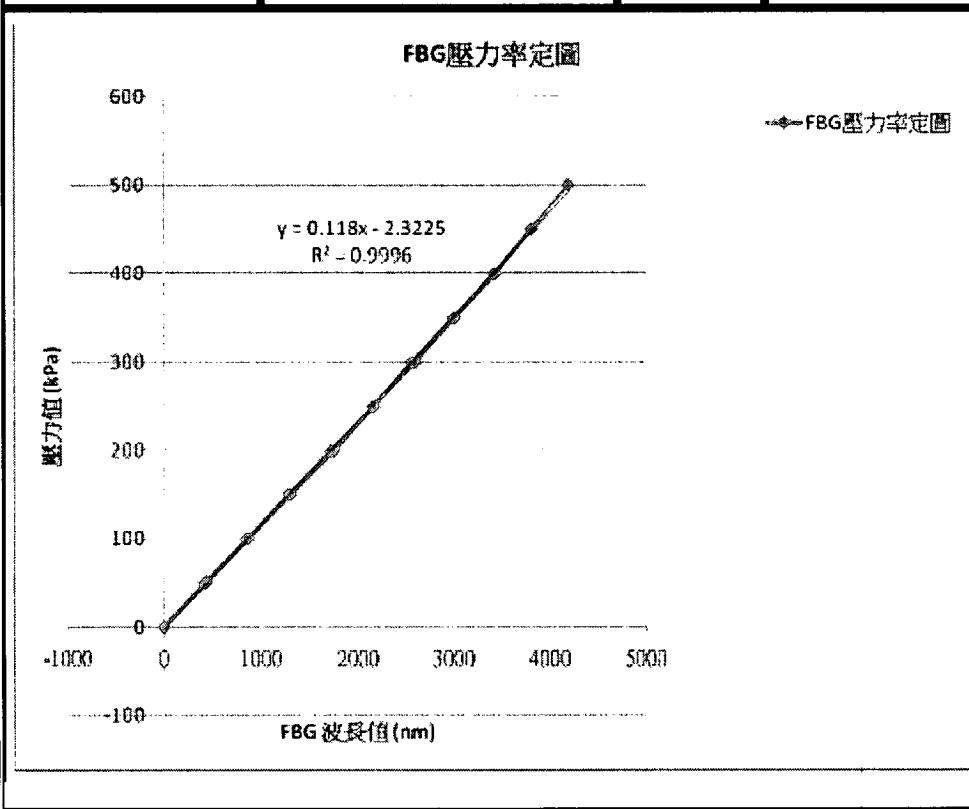


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-A-B-1		
FBG 初始波長(壓力)	1553.966 mm	FBG 初始波長(溫度)	1553.987 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1557.916 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1555.987 mm
FBG 完成波長(壓力)	1554.928 mm	FBG 完成波長(溫度)	1555.278 mm
FBG 水壓計率定參數	0.118 kPa/pm	R ²	0.9995





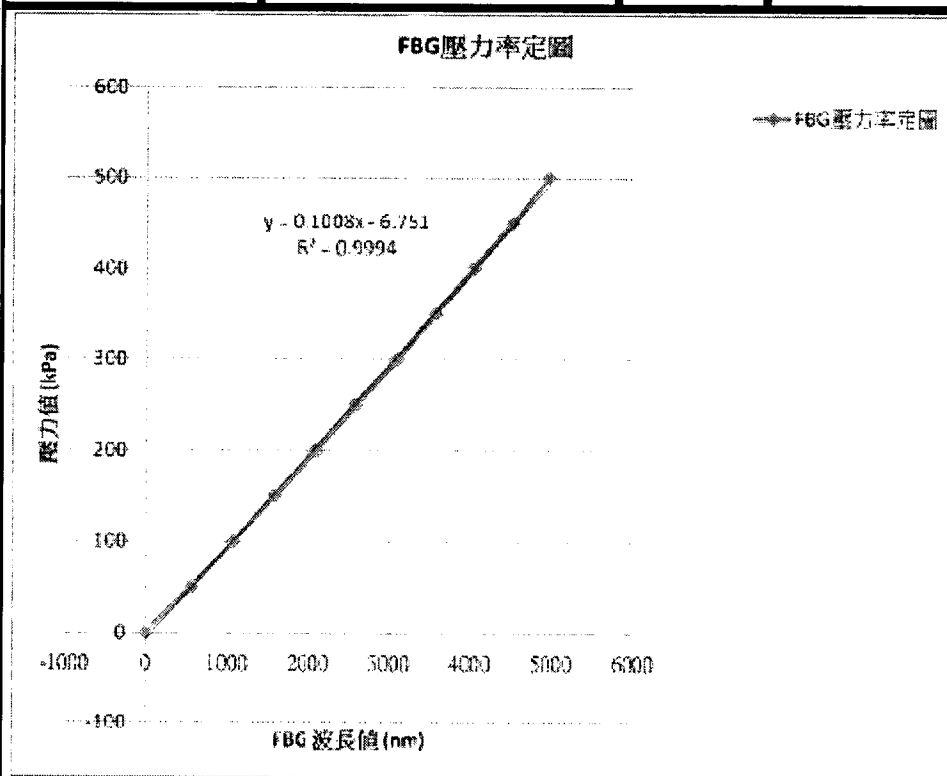
HAZARD MITIGATION
RESEARCH CENTER

國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-A-B-2		
FBG 初始波長(壓力)	1529.866 mm	FBG 初始波長(溫度)	1529.852 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1532.666 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1531.852 mm
FBG 完成波長(壓力)	1532.288 mm	FBG 完成波長(溫度)	1530.457 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1108 kPa/pm	R^2	0.9994



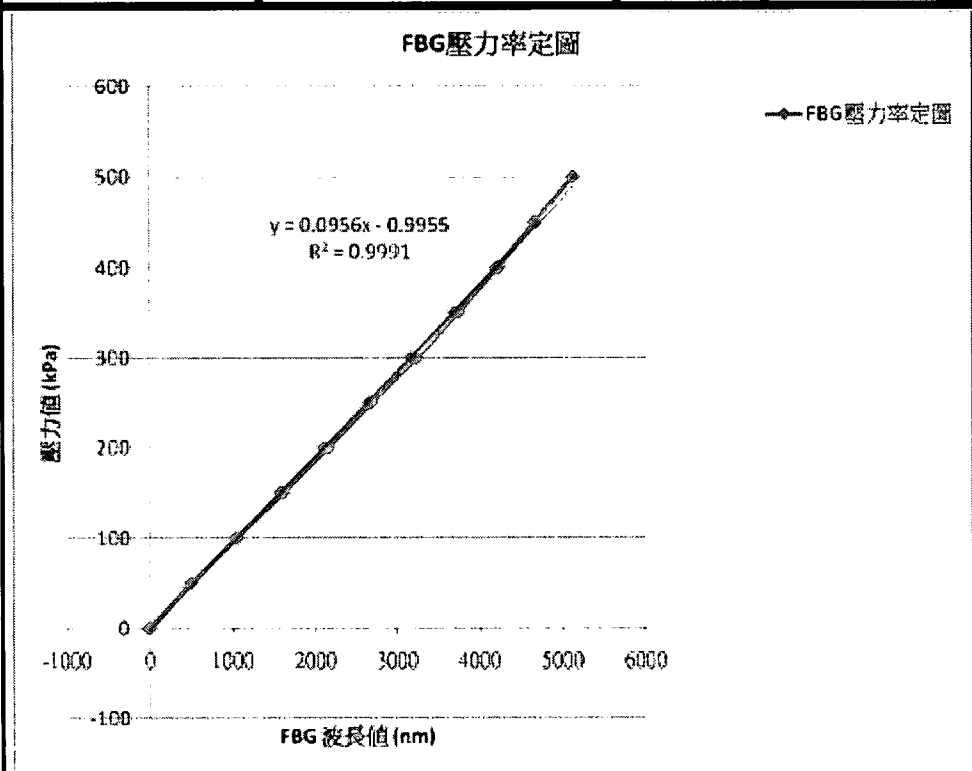


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-A-B-3		
FBG 初始波長(壓力)	1523.988 mm	FBG 初始波長(溫度)	1523.896 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1526.787 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1525.896 mm
FBG 完成波長(壓力)	1525.611 mm	FBG 完成波長(溫度)	1524.277 mm
FBG 水壓計率定參數	0.0956 kPa/pm	R ²	0.9991



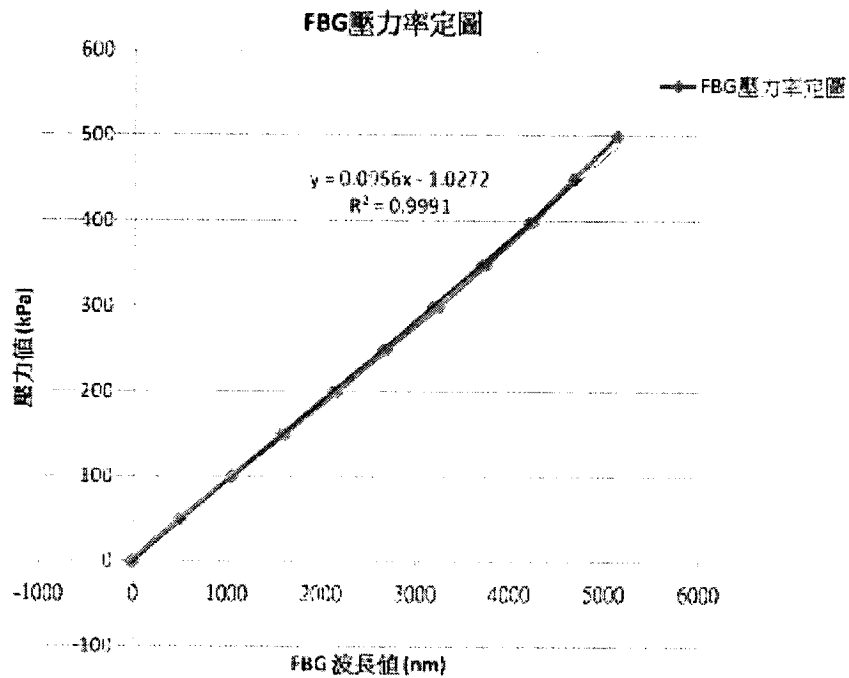


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-A-T-1		
FBG 初始波長(壓力)	1547.830 mm	FBG 初始波長(溫度)	1547.910 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1550.630 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1549.910 mm
FBG 完成波長(壓力)	1549.348 mm	FBG 完成波長(溫度)	1548.229 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1154 kPa/pm	R ²	0.9995



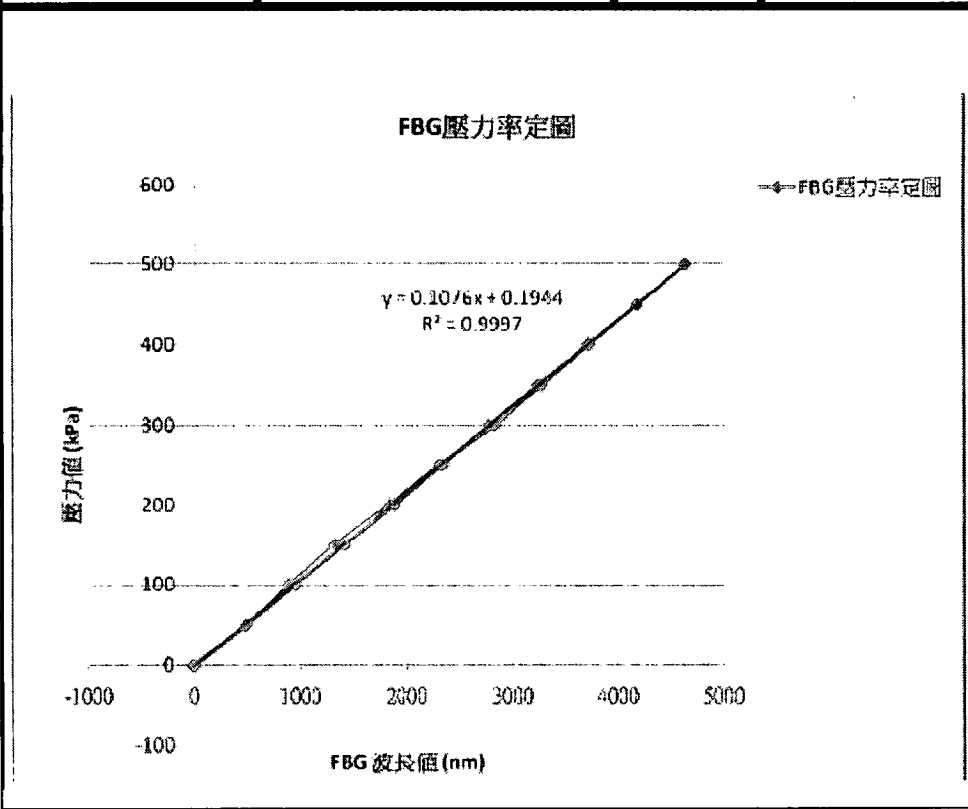


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-A-T-2		
FBG 初始波長(壓力)	1541.985 mm	FBG 初始波長(溫度)	1542.101 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1544.785 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1544.901 mm
FBG 完成波長(壓力)	1543.655 mm	FBG 完成波長(溫度)	1543.424 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1076 kPa/pm	R ²	0.9997



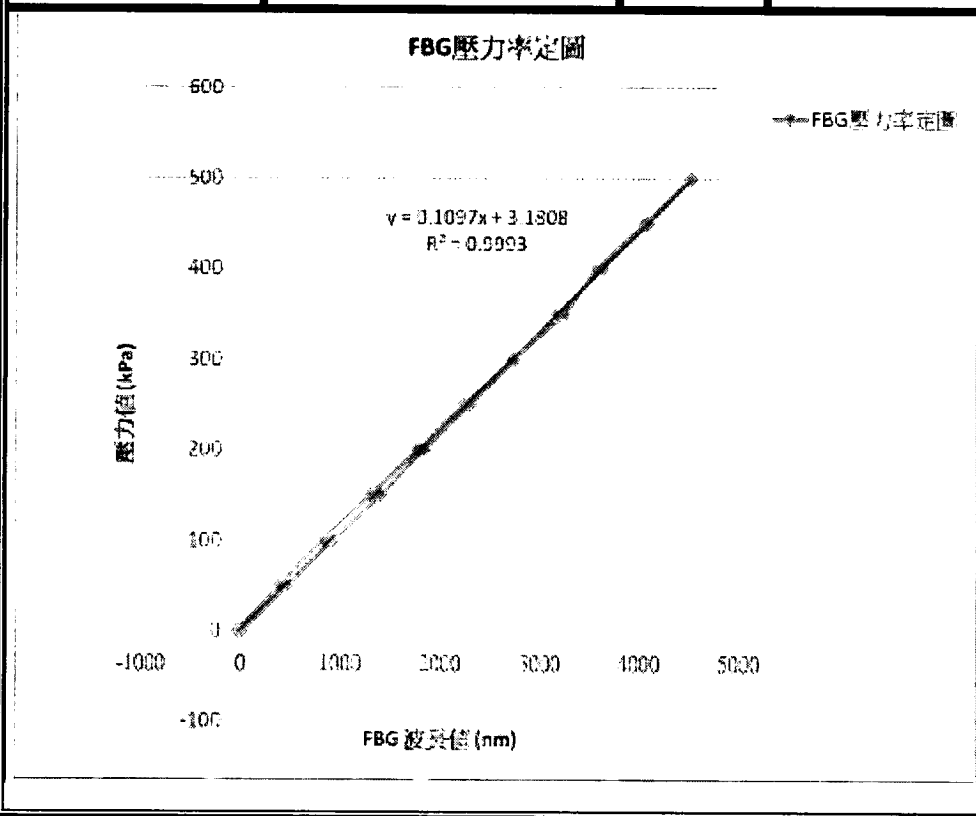


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-A-T-3		
FBG 初始波長(壓力)	1536.030 mm	FBG 初始波長(溫度)	1536.196 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1538.830 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1538.196 mm
FBG 完成波長(壓力)	1536.971 mm	FBG 完成波長(溫度)	1536.898 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1097 kPa/pm	R^2	0.9993



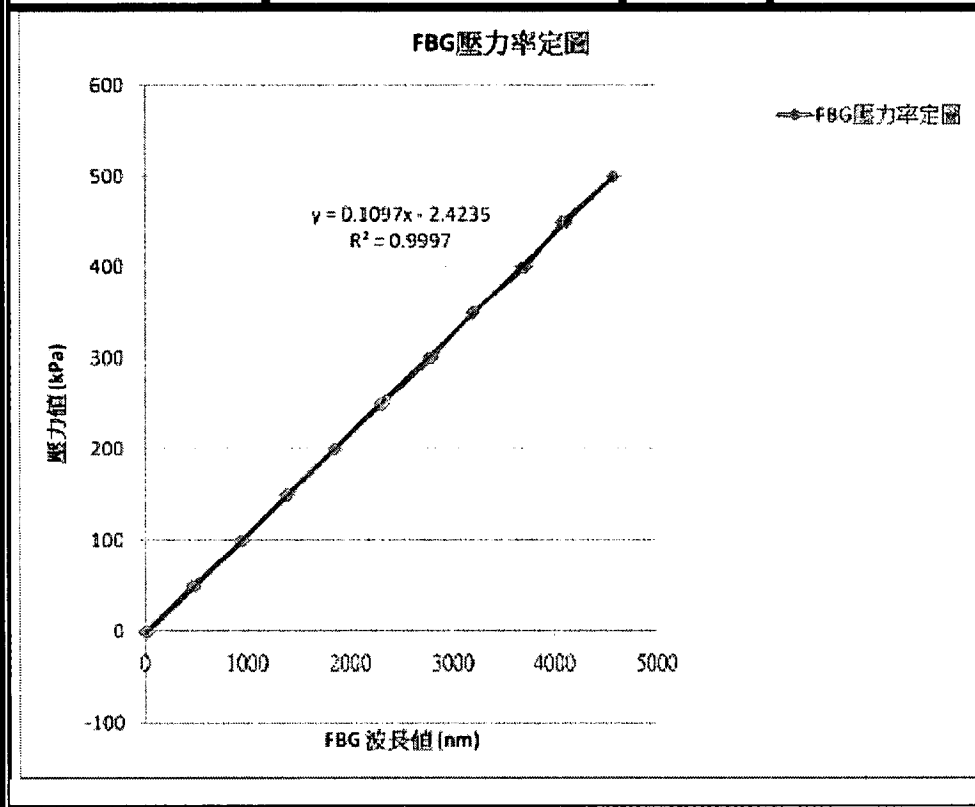


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-A-T-5		
FBG 初始波長(壓力)	1523.944 nm	FBG 初始波長(溫度)	1524.189 nm
FBG 預拉波長(壓力)	1525.744 nm	FBG 預拉波長(溫度)	1526.989 nm
FBG 完成波長(壓力)	1525.016 nm	FBG 完成波長(溫度)	1525.718 nm
FBG 水壓計率定參數	0.1097 kPa/pm	R^2	0.9997





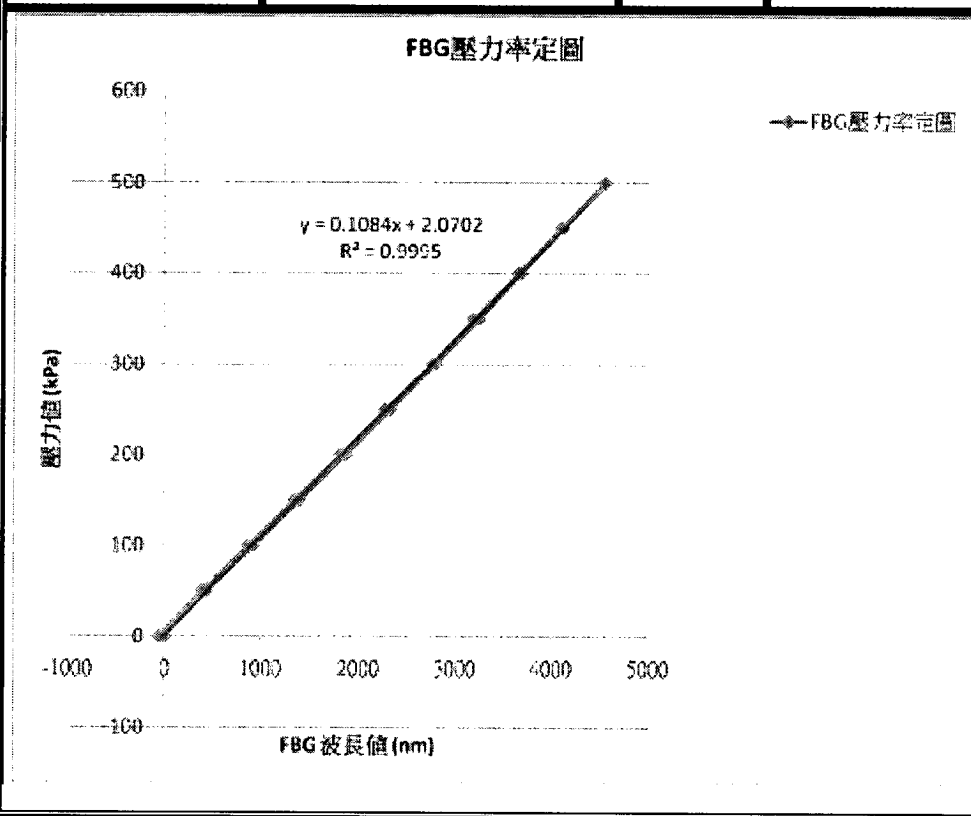
HAZARD MITIGATION
RESEARCH CENTER

國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-B-B-1		
FBG 初始波長(壓力)	1547.798 mm	FBG 初始波長(溫度)	1547.976 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1550.748 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1549.976 mm
FBG 完成波長(壓力)	1548.718 mm	FBG 完成波長(溫度)	1548.226 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1084 kPa/pm	R ²	0.9995



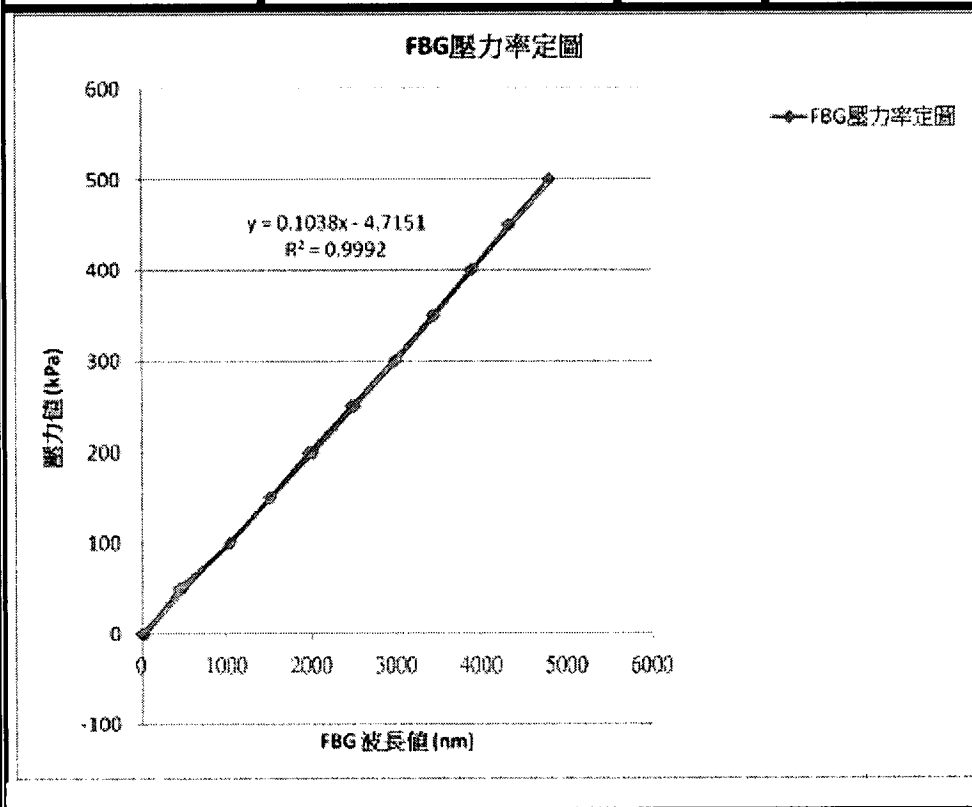


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-B-B-2		
FBG 初始波長(壓力)	1542.129 mm	FBG 初始波長(溫度)	1542.115 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1545.079 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1544.115 mm
FBG 完成波長(壓力)	1543.739 mm	FBG 完成波長(溫度)	1542.871 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1038 kPa/pm	R^2	0.9992



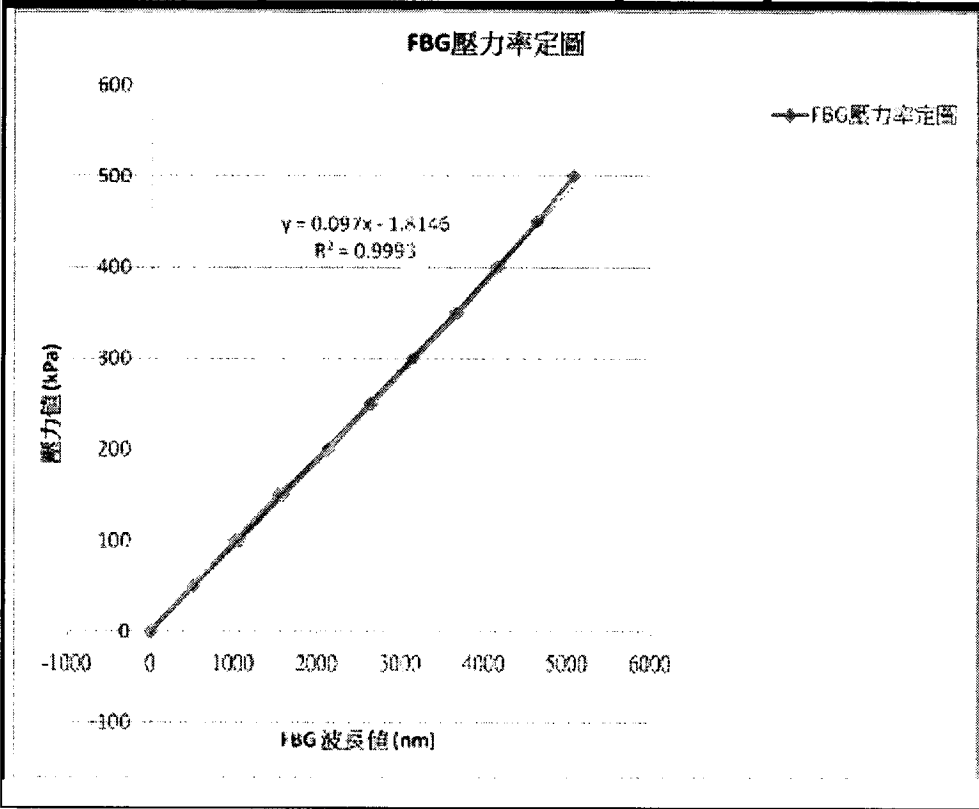


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-B-B-3		
FBG 初始波長(壓力)	1536.060 mm	FBG 初始波長(溫度)	1535.914 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1539.010 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1537.914 mm
FBG 完成波長(壓力)	1538.133 mm	FBG 完成波長(溫度)	1536.306 mm
FBG 水壓計率定參數	0.0970 kPa/pm	R ²	0.9993



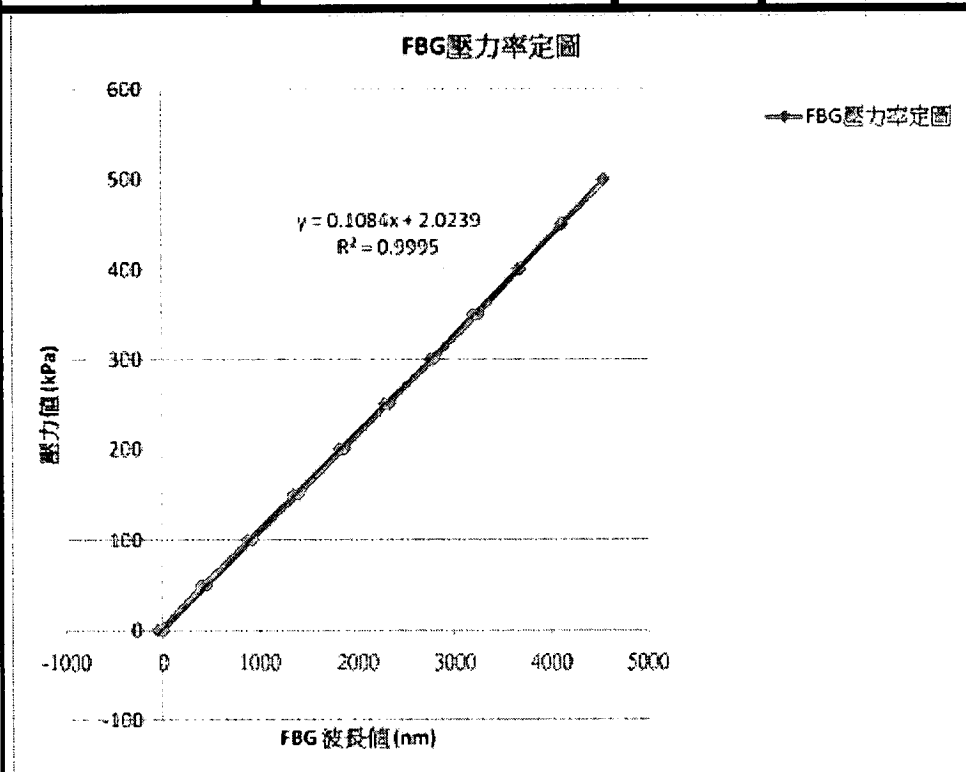


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-B-B-4		
FBG 初始波長(壓力)	1553.772 mm	FBG 初始波長(溫度)	1553.785 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1556.772 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1555.785 mm
FBG 完成波長(壓力)	1554.714 mm	FBG 完成波長(溫度)	1554.119 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1084 kPa/pm	R ²	0.9995





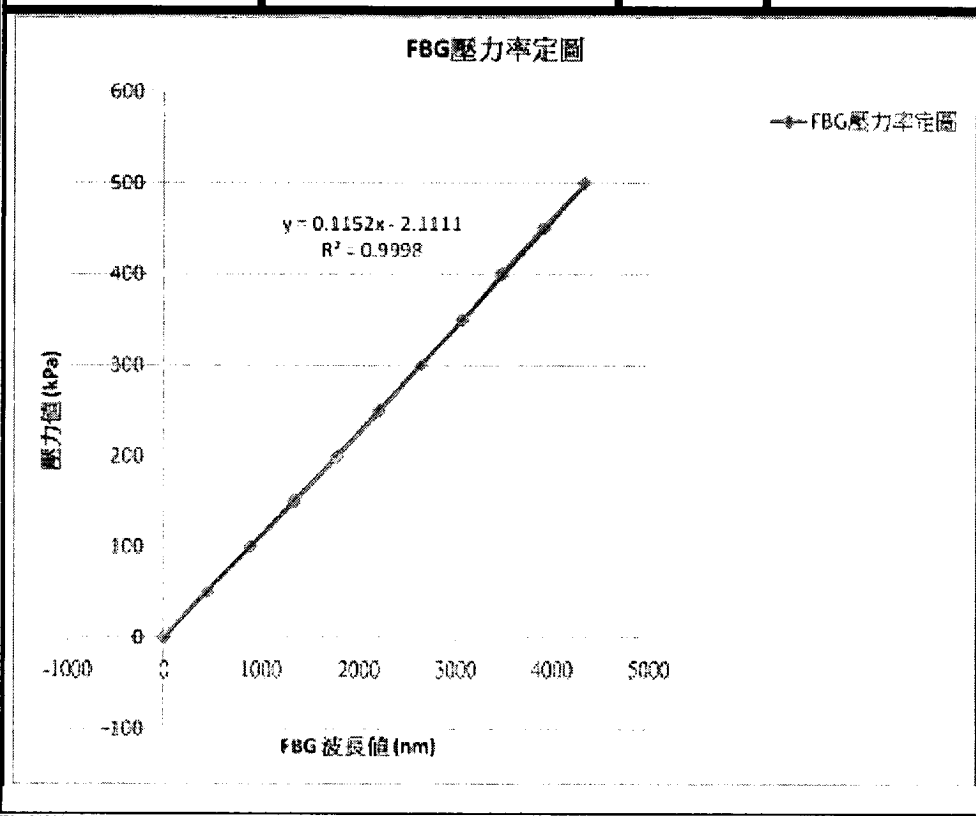
HAZARD MITIGATION
RESEARCH CENTER

國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-B-B-5		
FBG 初始波長(壓力)	1524.012 mm	FBG 初始波長(溫度)	1523.876 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1526.962 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1525.876 mm
FBG 完成波長(壓力)	1525.874 mm	FBG 完成波長(溫度)	1524.419 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1152 kPa/pm	R ²	0.9998



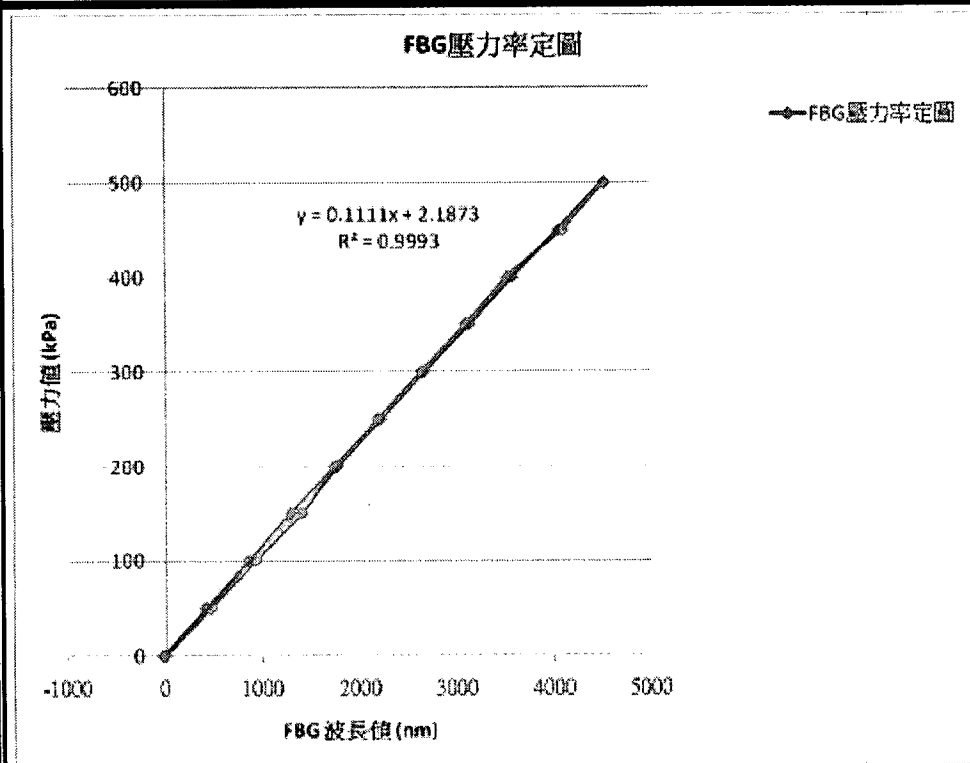


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-B-T-1		
FBG 初始波長(壓力)	1547.812 mm	FBG 初始波長(溫度)	1547.922 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1550.762 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1549.922 mm
FBG 完成波長(壓力)	1548.925 mm	FBG 完成波長(溫度)	1548.813 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1111 kPa/pm	R^2	0.9993



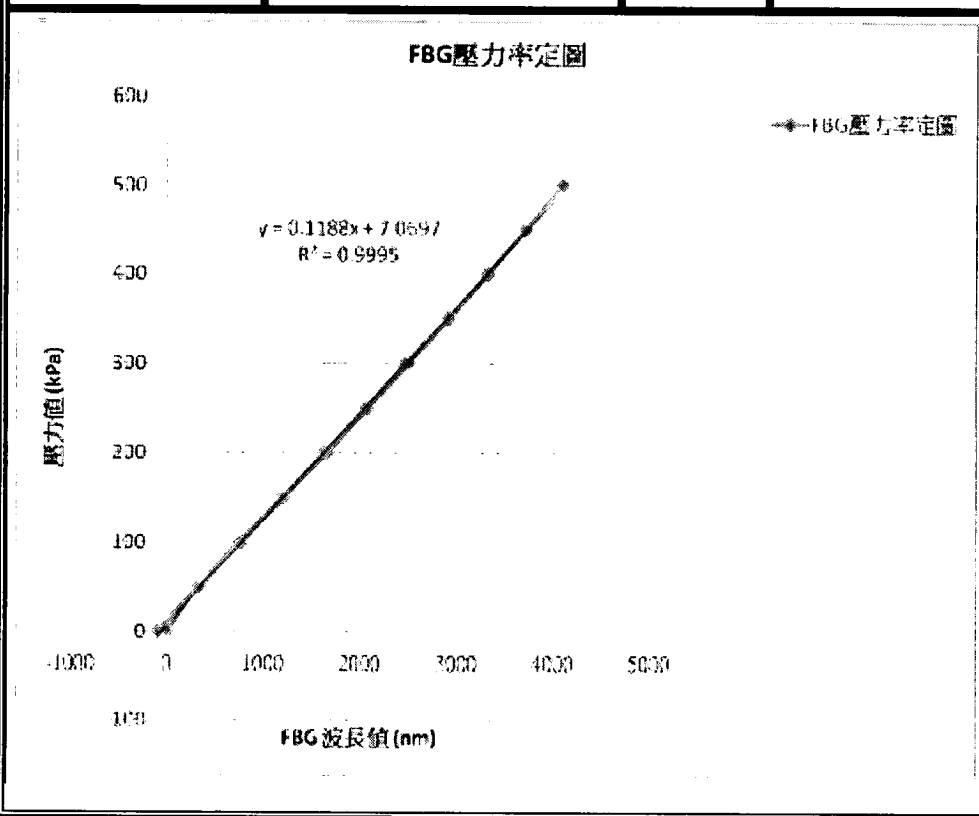


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-B-T-2		
FBG 初始波長(壓力)	1542.018 mm	FBG 初始波長(溫度)	1541.987 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1544.818 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1543.987 mm
FBG 完成波長(壓力)	1543.930 mm	FBG 完成波長(溫度)	1542.912 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1188 kPa/pm	R ²	0.9995



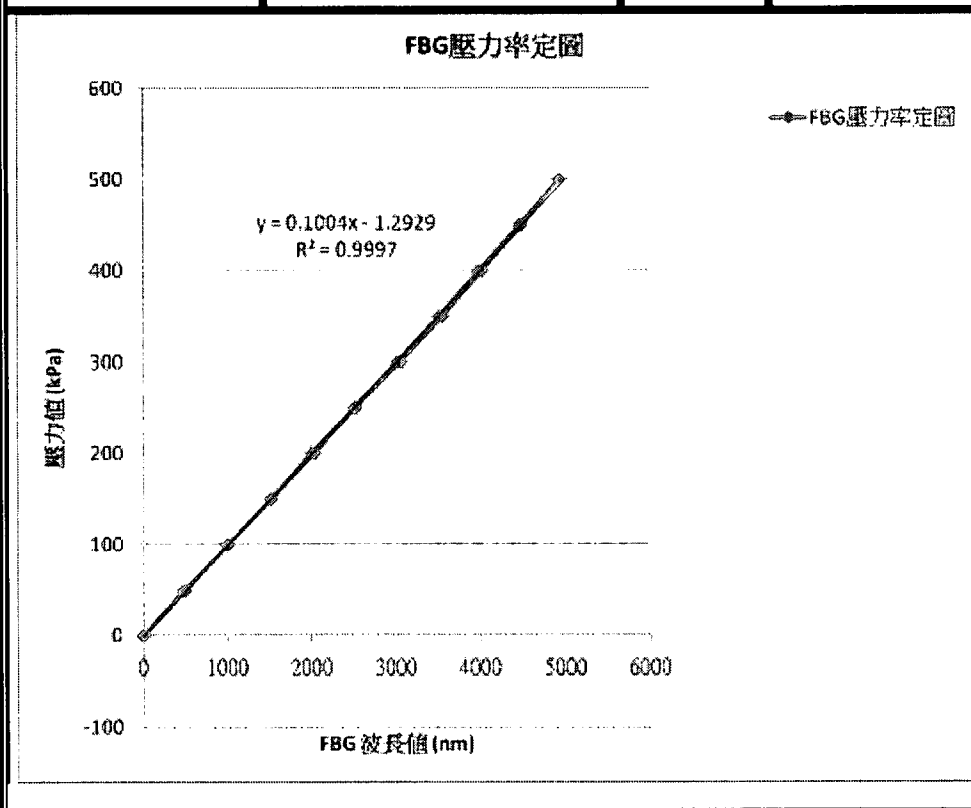


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-B-T-3		
FBG 初始波長(壓力)	1536.081 mm	FBG 初始波長(溫度)	1536.119 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1538.881 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1538.119 mm
FBG 完成波長(壓力)	1538.618 mm	FBG 完成波長(溫度)	1536.723 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1004 kPa/pm	R ²	0.9997





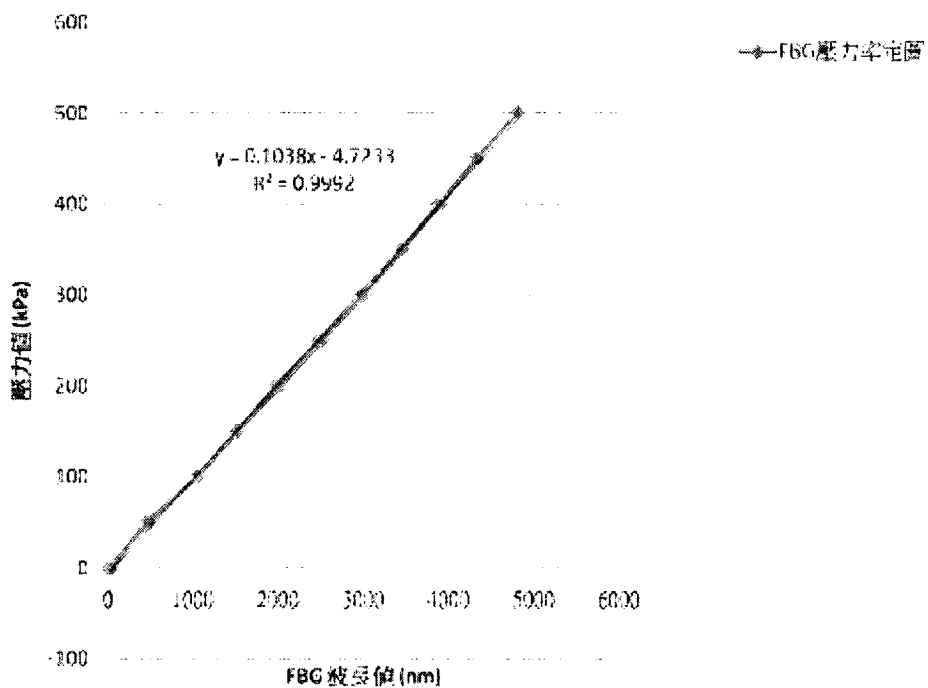
國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-B-T-4		
FBG 初始波長(壓力)	1529.879 mm	FBG 初始波長(溫度)	1530.034 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1532.829 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1532.034 mm
FBG 完成波長(壓力)	1531.655 mm	FBG 完成波長(溫度)	1530.454 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1038 kPa/pm	R ²	0.9992

FBG壓力率定圖



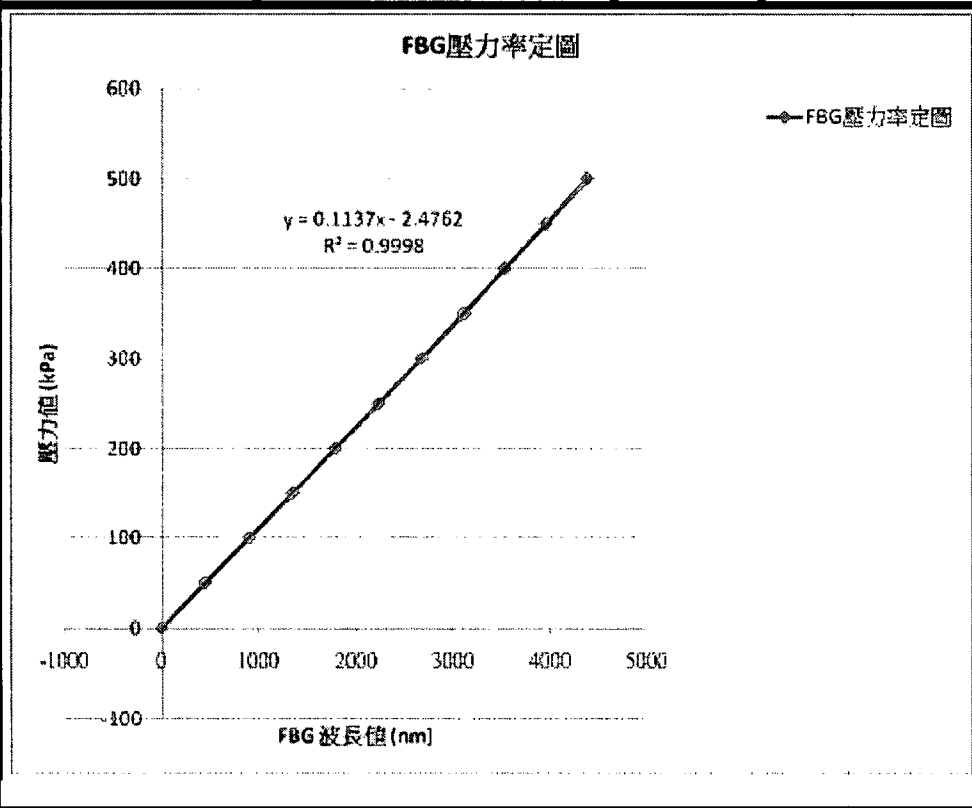


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-B-T-5		
FBG 初始波長(壓力)	1524.025 mm	FBG 初始波長(溫度)	1524.077 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1526.825 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1526.077 mm
FBG 完成波長(壓力)	1526.929 mm	FBG 完成波長(溫度)	1524.918 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1137 kPa/pm	R^2	0.9998





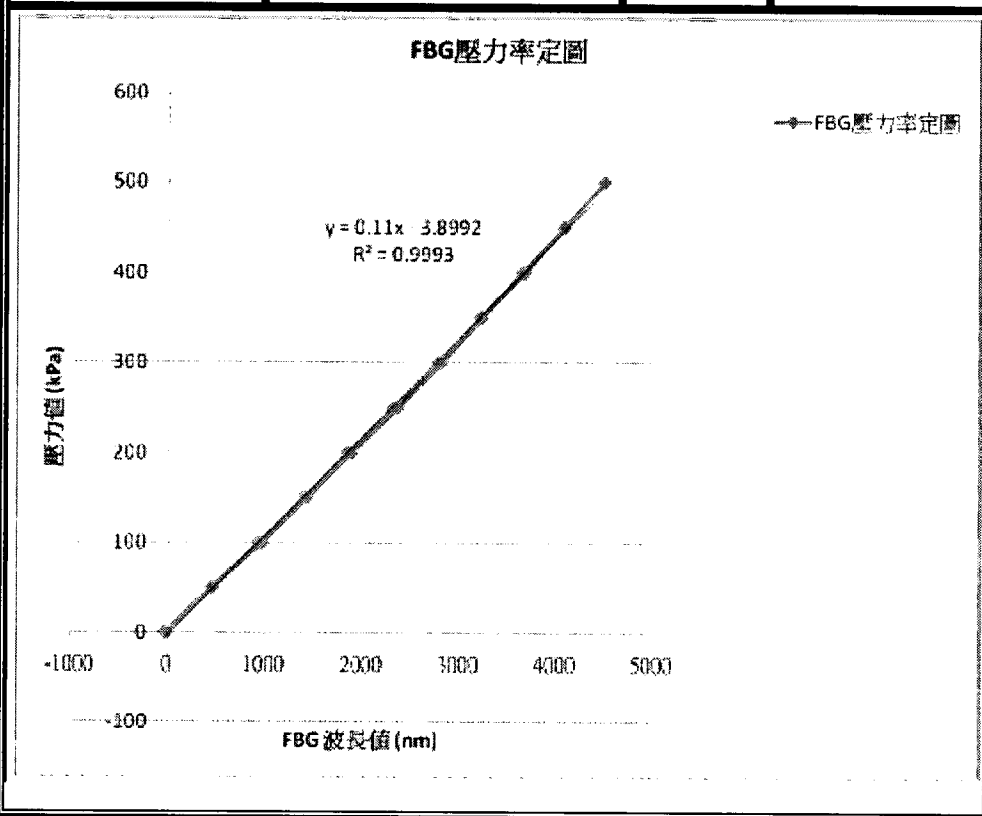
HAZARD MITIGATION
Natural
RESEARCH CENTER

國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-C-B-1		
FBG 初始波長(壓力)	1524.011 mm	FBG 初始波長(溫度)	1524.083 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1526.811 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1526.083 mm
FBG 完成波長(壓力)	1524.639 mm	FBG 完成波長(溫度)	1524.735 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1100 kPa/pm	R ²	0.9993



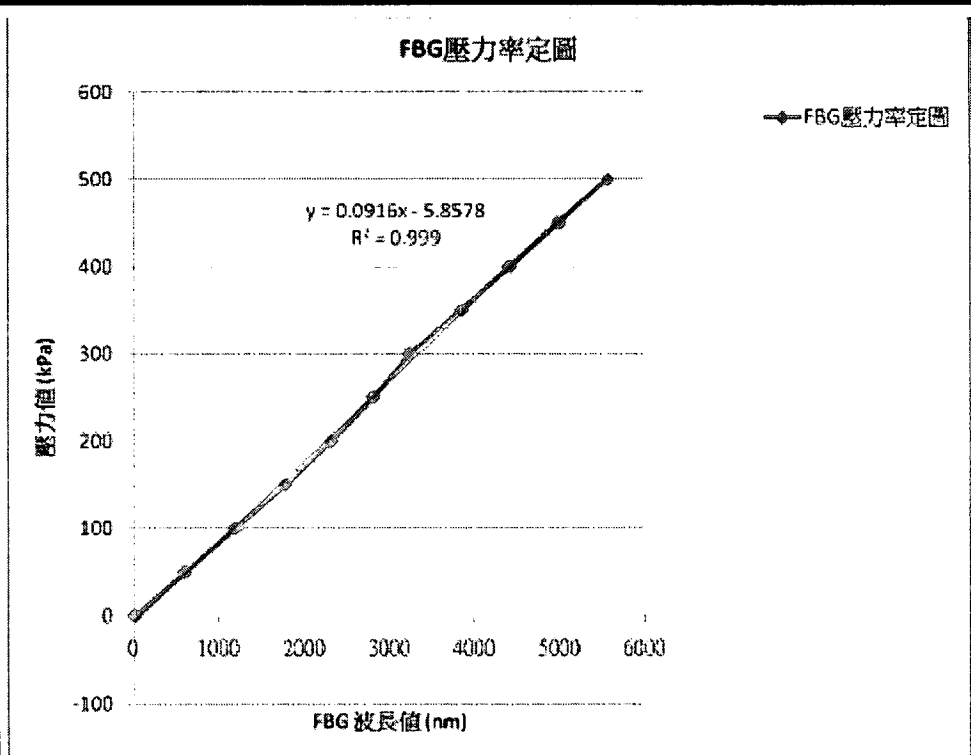


國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-C-B-2		
FBG 初始波長(壓力)	1529.966 mm	FBG 初始波長(溫度)	1529.995 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1533.366 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1531.995 mm
FBG 完成波長(壓力)	1532.041mm	FBG 完成波長(溫度)	1530.033 mm
FBG 水壓計率定參數	0.0916 kPa/pm	R ²	0.9990





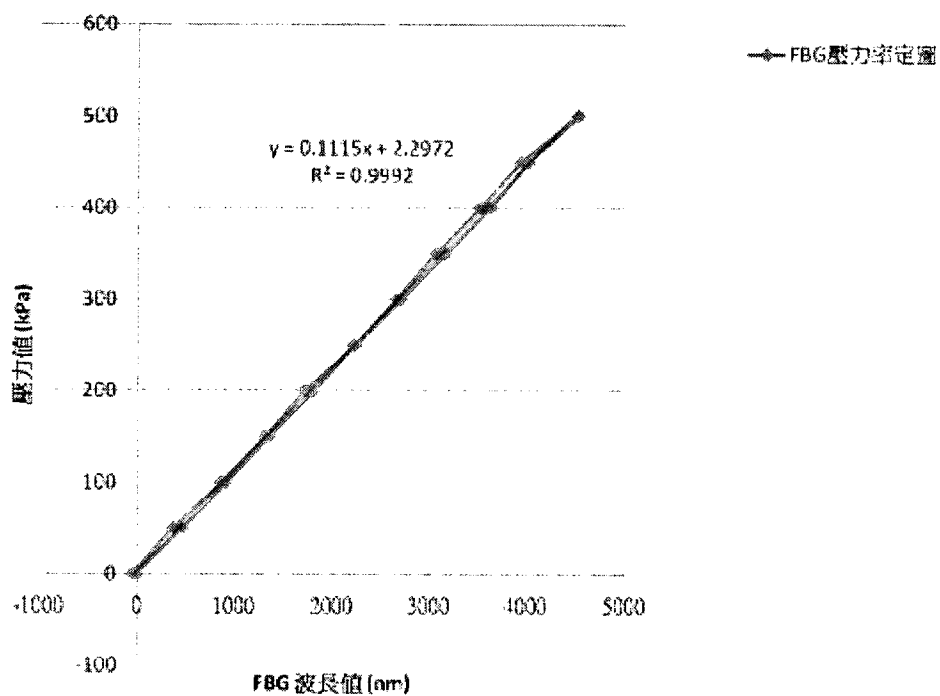
國立交通大學
防災工程研究中心

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER, NCTU

NATURAL HAZARD MITIGATION RESEARCH CENTER NCTU

FBG 水壓計編號	LP-C-B-3		
FBG 初始波長(壓力)	1553.987 mm	FBG 初始波長(溫度)	1553.889 mm
FBG 預拉波長(壓力)	1556.877 mm	FBG 預拉波長(溫度)	1555.889 mm
FBG 完成波長(壓力)	1555.712mm	FBG 完成波長(溫度)	1554.468 mm
FBG 水壓計率定參數	0.1115 kPa/pm	R ²	0.9992

FBG壓力率定圖



附錄二 土壤室內實驗結果

附錄二 土壤室內實驗結果

表 1 室內土壤物性實驗結果

NCTU-01			NCTU-02		
深度(m)	比重 Gs	含水量 W(%)	深度(m)	比重 Gs	含水量 W(%)
0	2.59	30.1	0	2.67	28.5
2	2.44	18.2	2	2.44	17.6
4	2.67	16.2	4	2.66	15.2
6	2.72	13.5	6	2.70	14.1

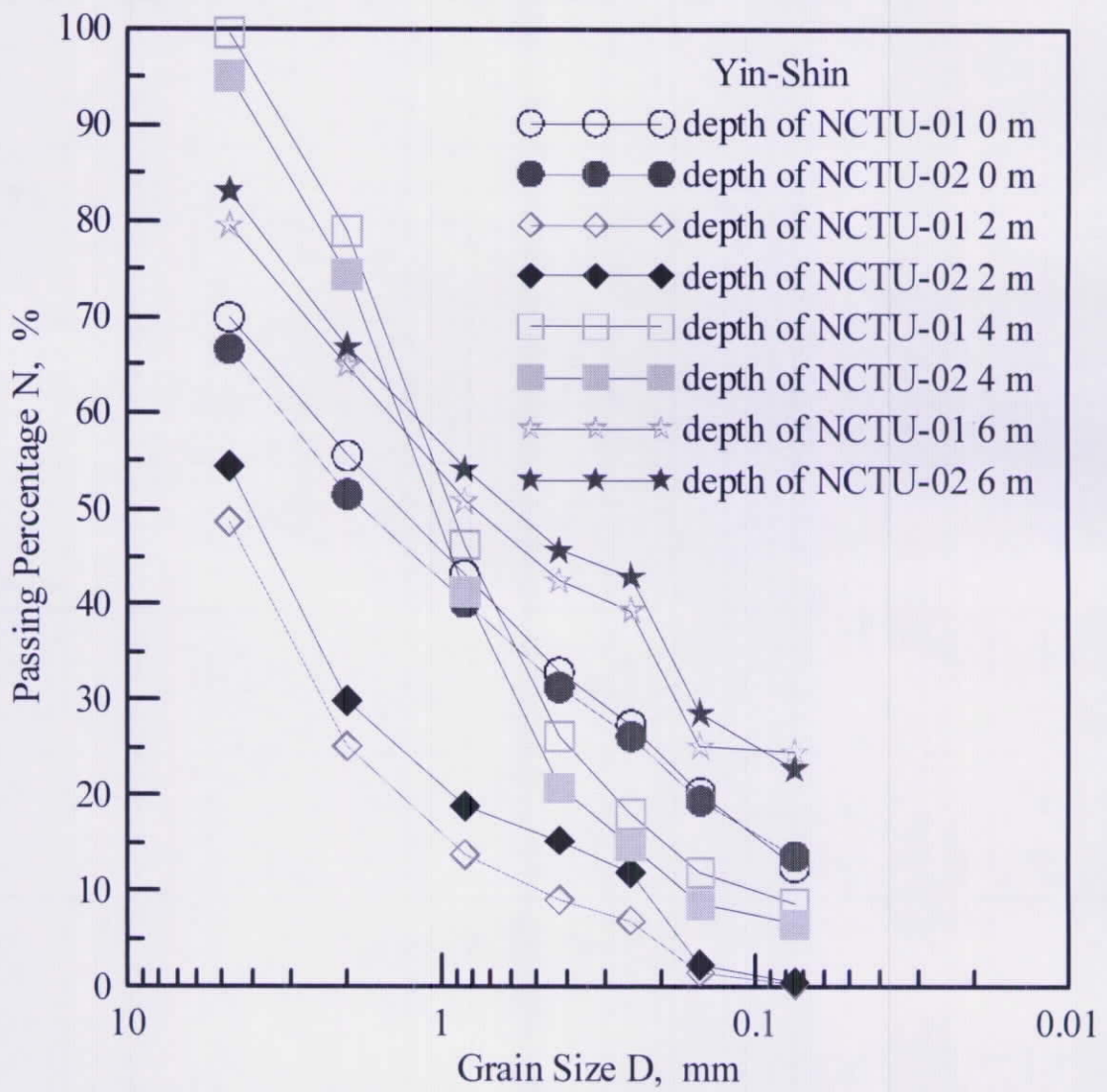


圖 1 粒徑分佈曲線圖

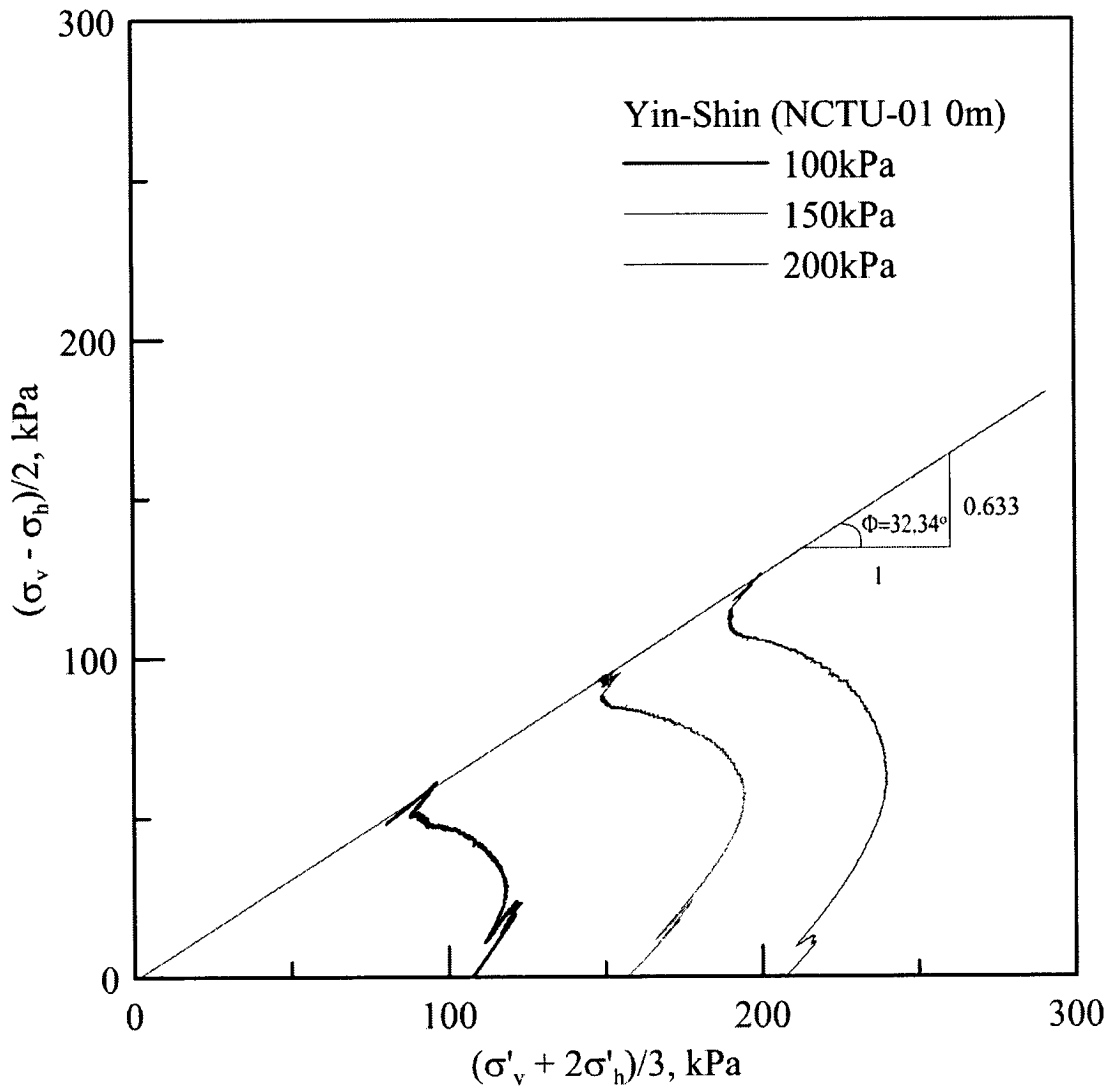


圖 2 NCTU-01 0m 三軸軸向壓縮實驗結果

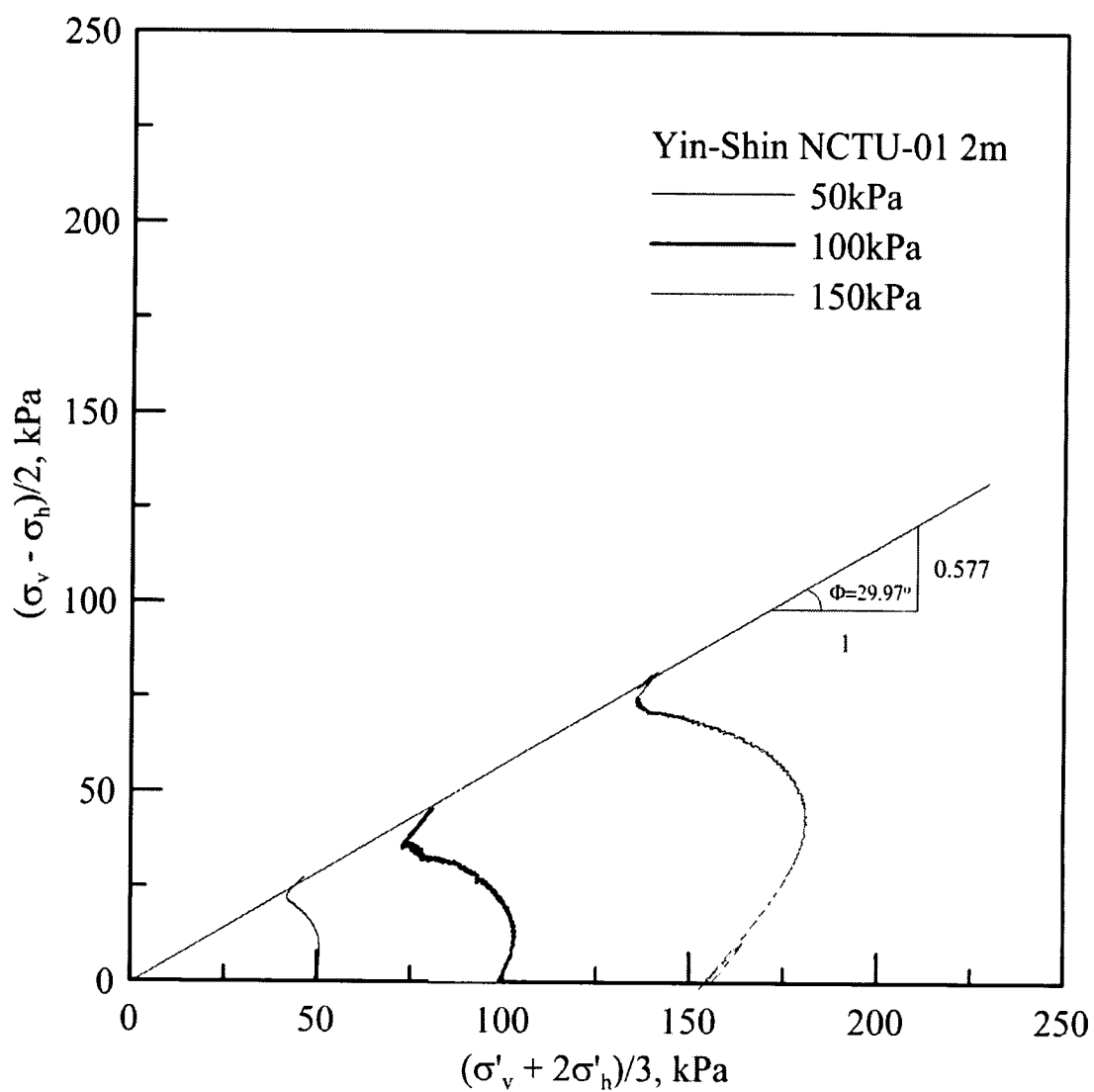


圖 3 NCTU-01 2m 三軸軸向壓縮實驗結果

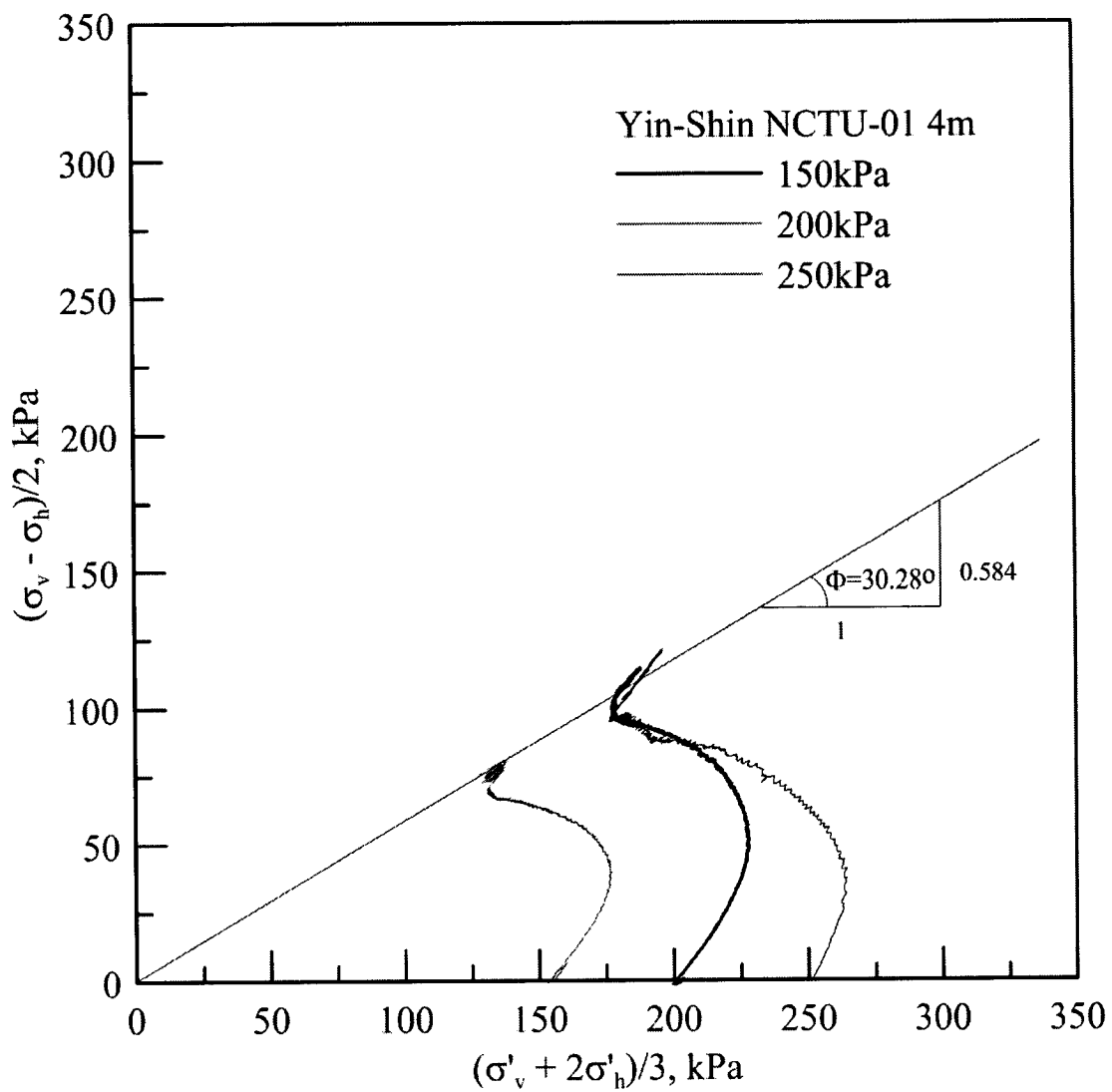


圖 4 NCTU-01 4m 三軸軸向壓縮實驗結果

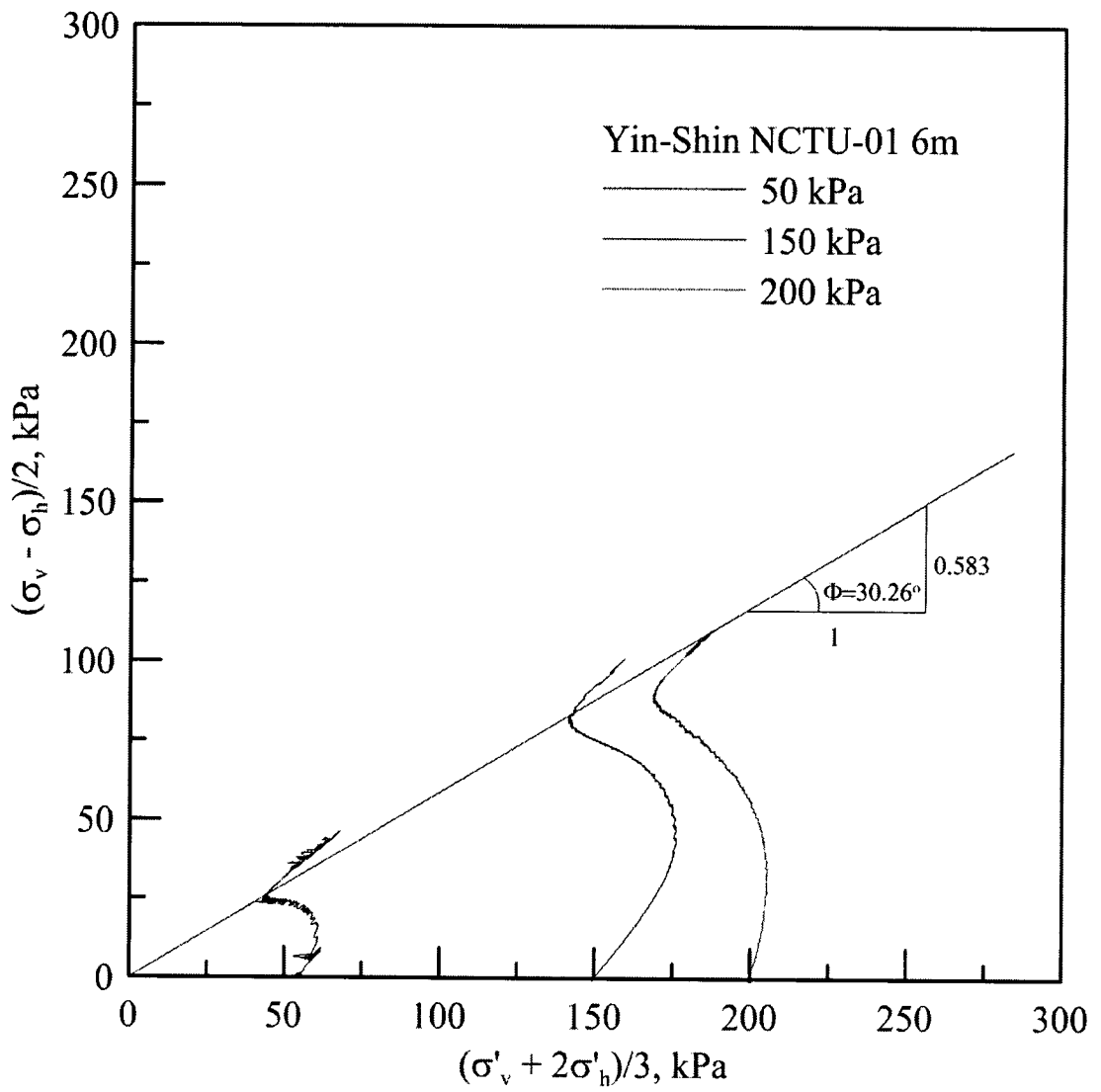


圖 5 NCTU-01 6m 三軸軸向壓縮實驗結果

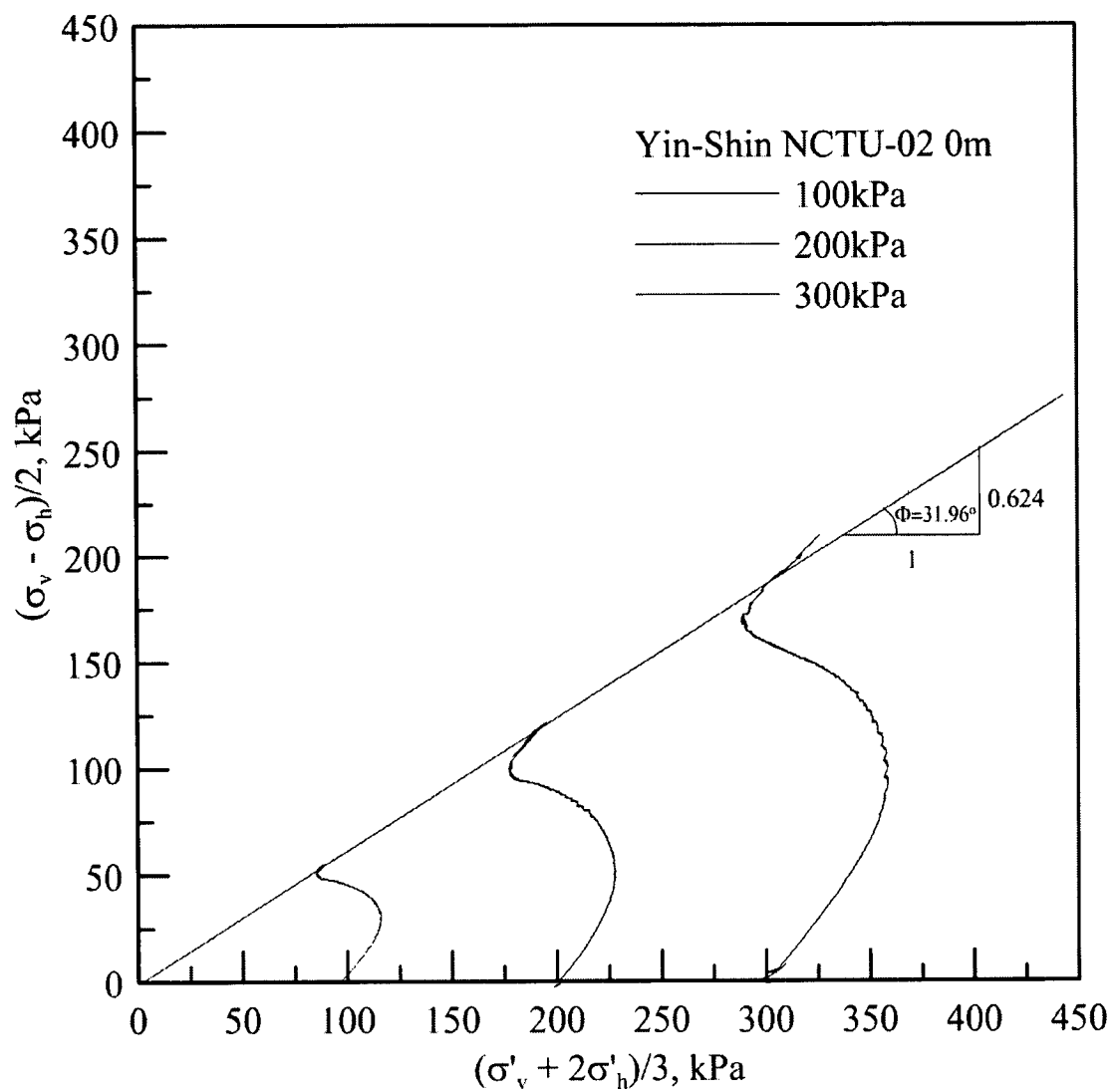


圖 6 NCTU-02 0m 三軸軸向壓縮實驗結果

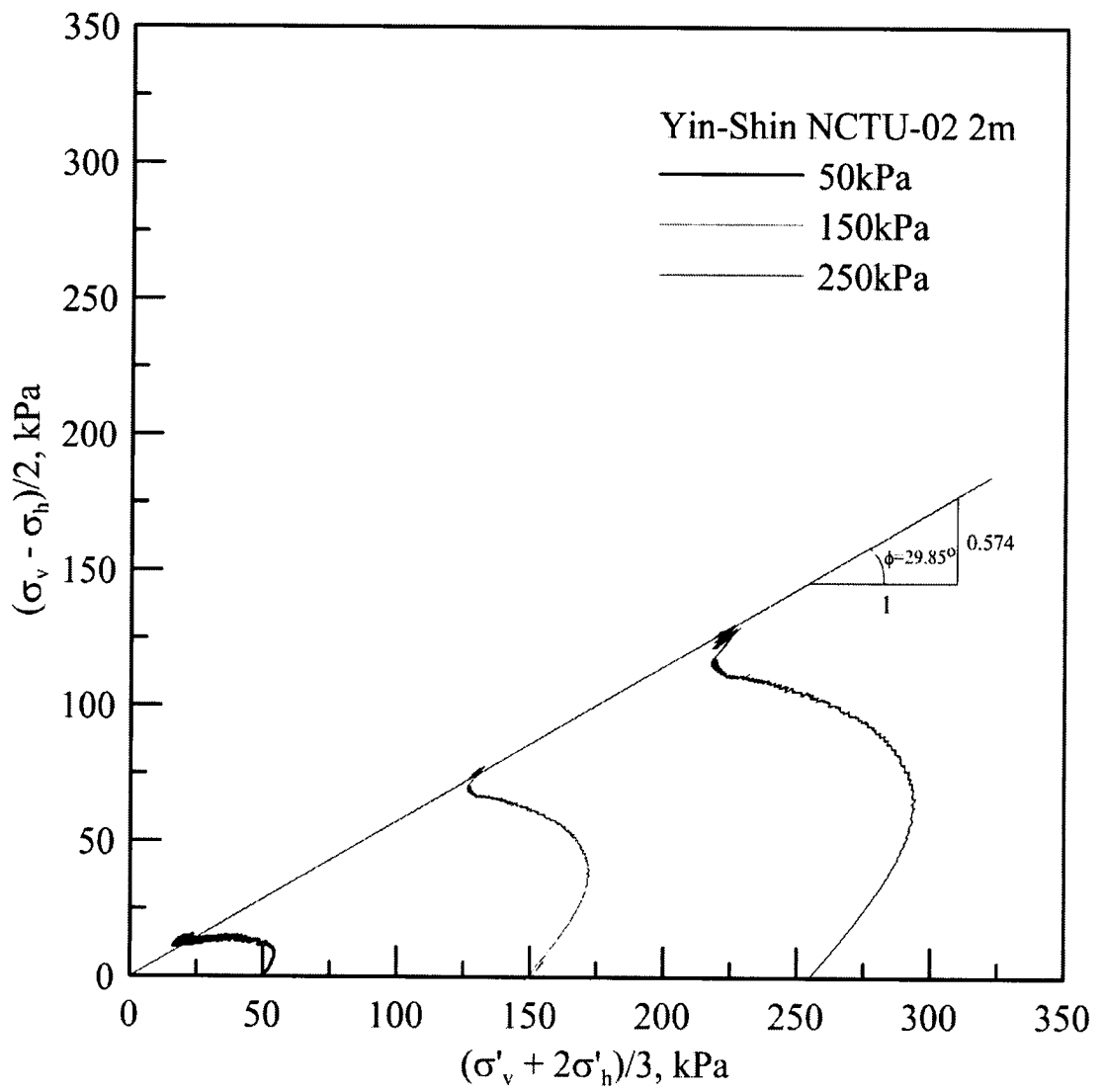


圖 7 NCTU-02 2m 三軸軸向壓縮實驗結果

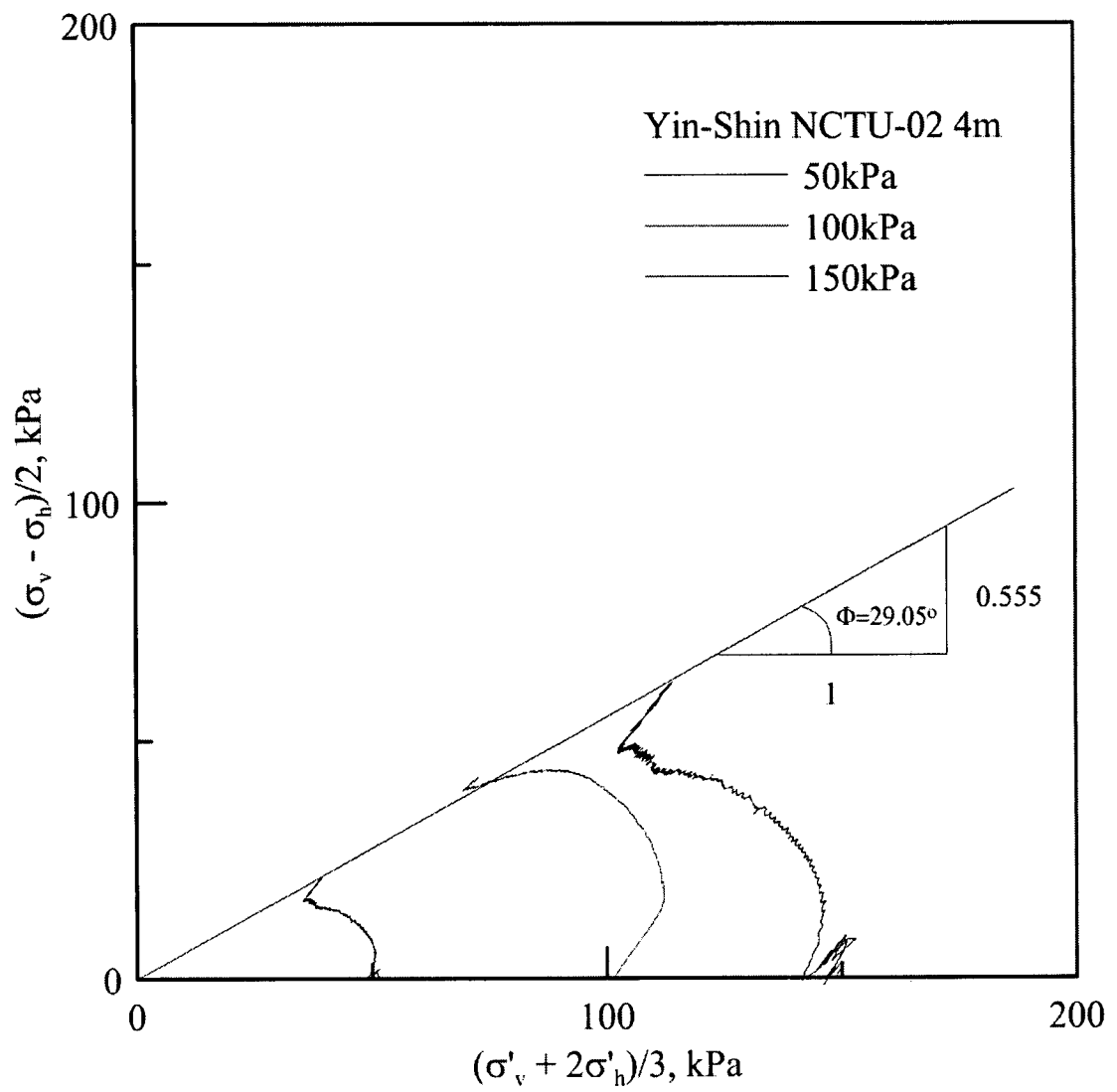


圖 8 NCTU-02 4m 三軸軸向壓縮實驗結果

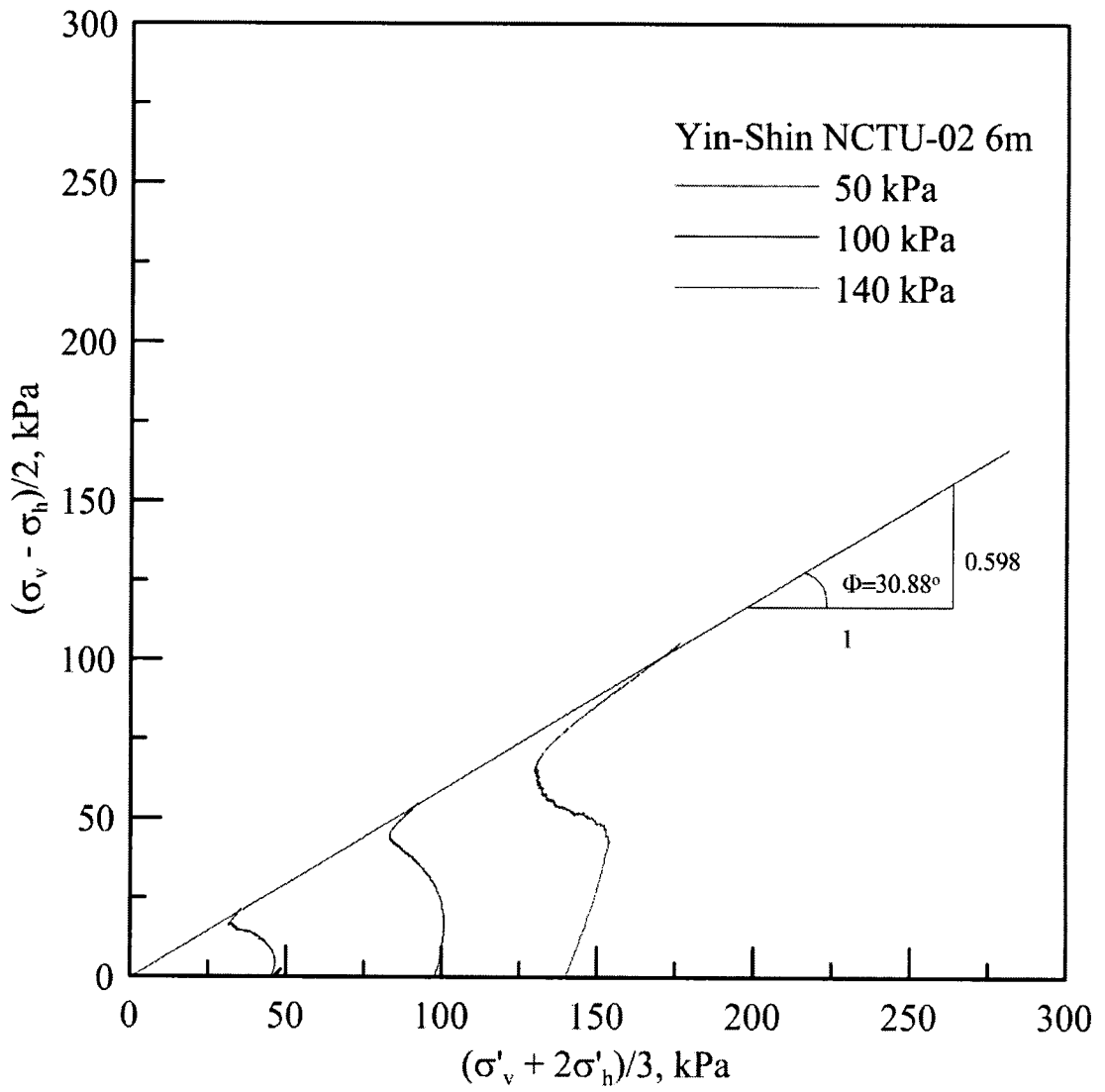
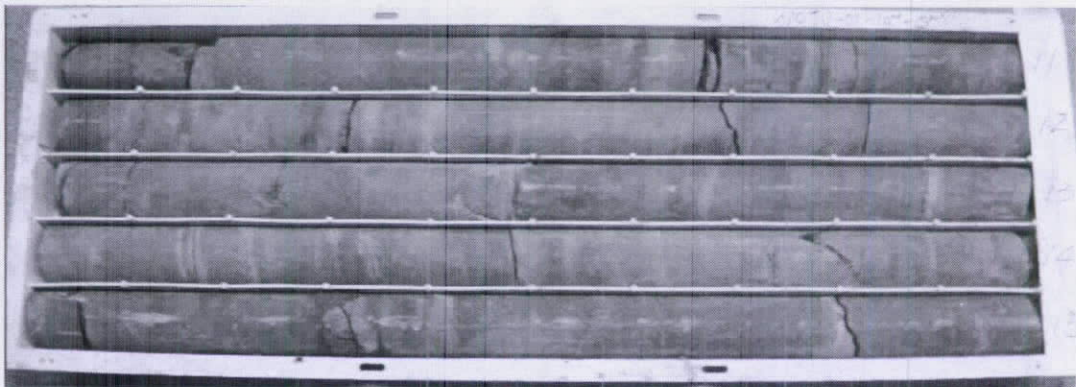
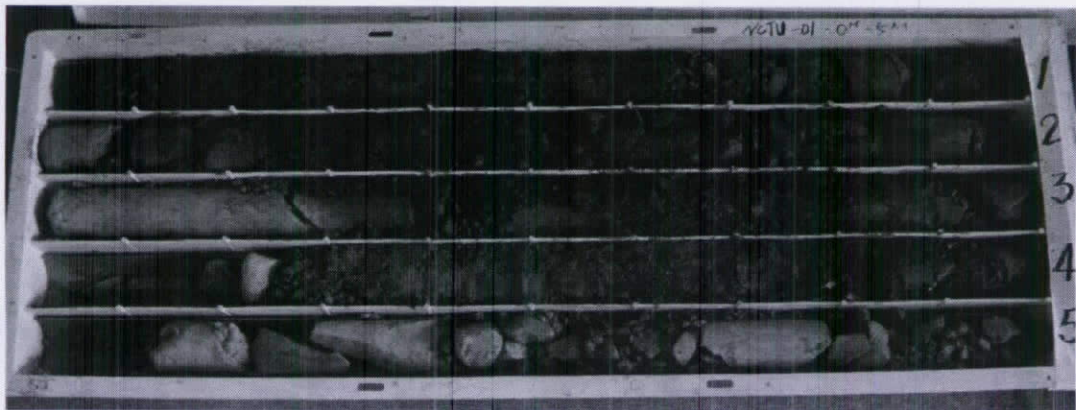


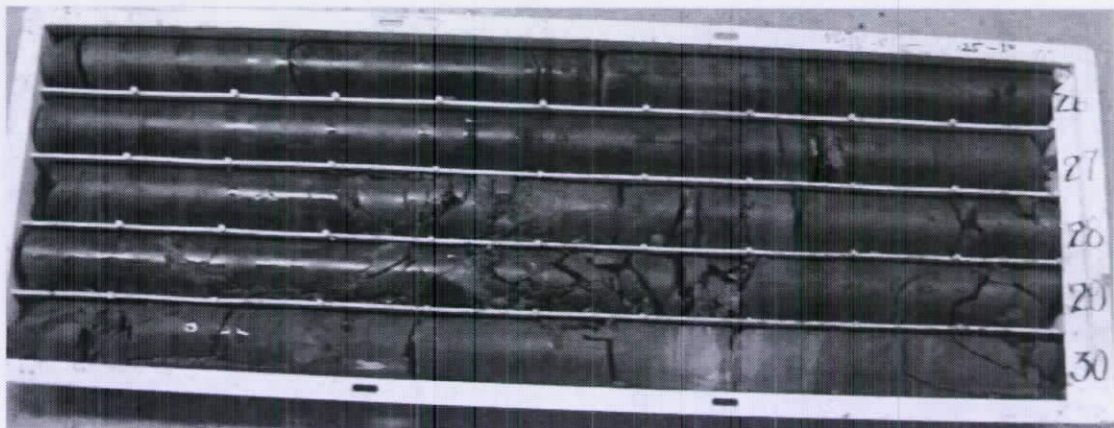
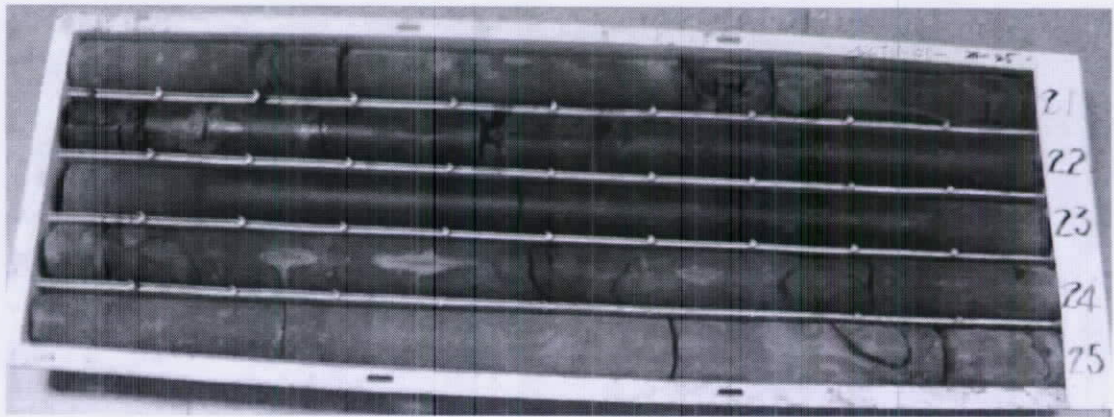
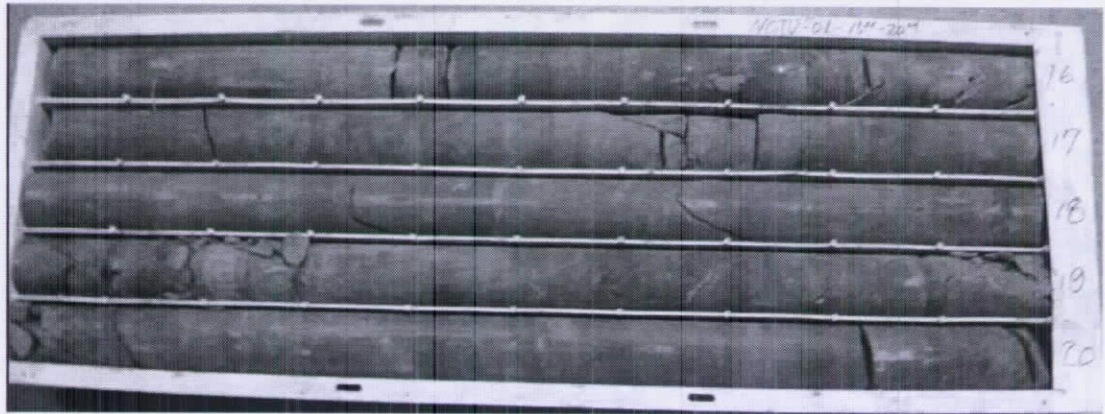
圖 9 NCTU-02 6m 三軸軸向壓縮實驗結果

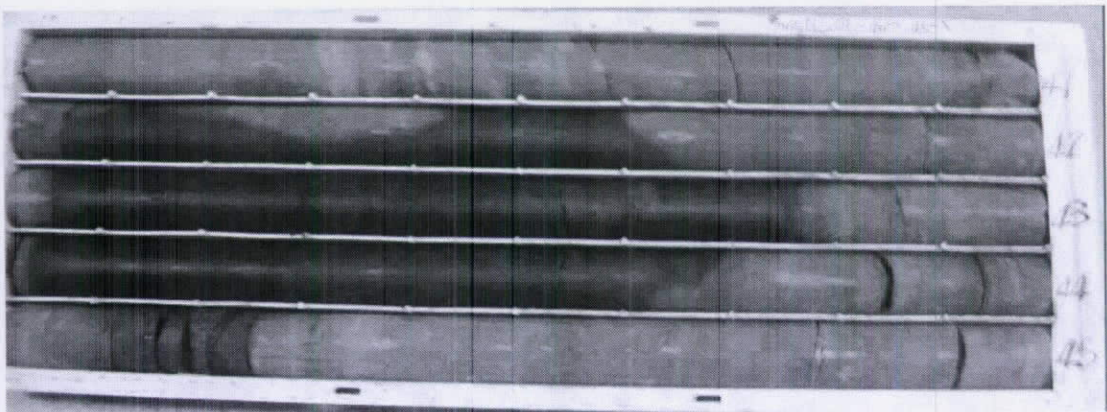
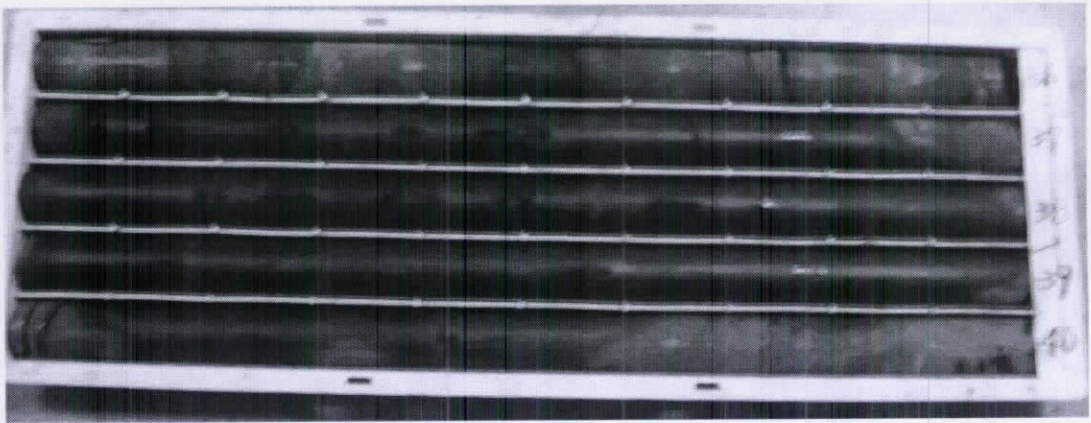
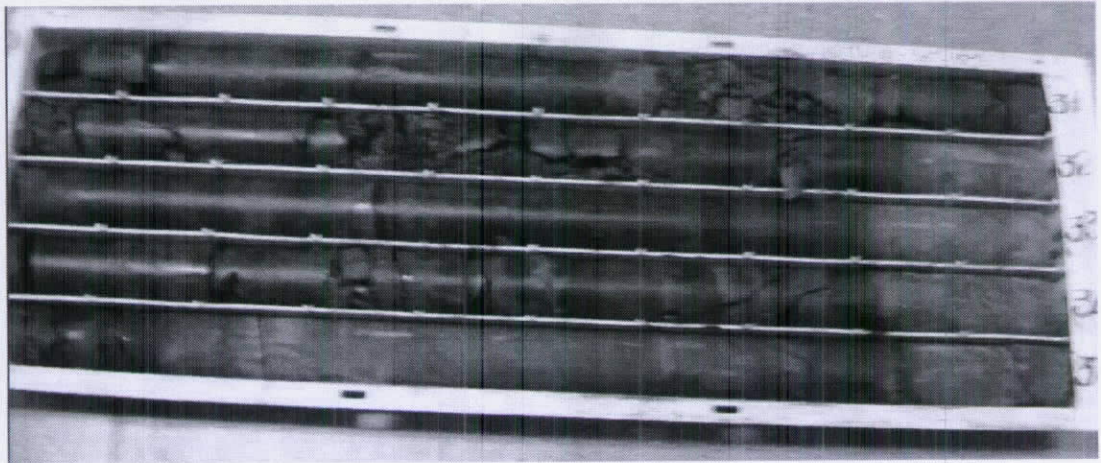
附錄三 鑽探照片與記錄

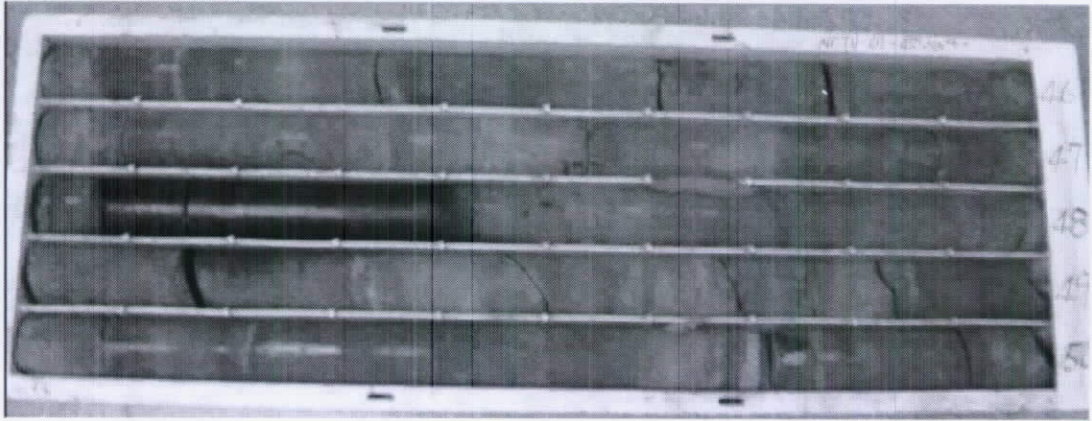
附錄三 鑽探照片與記錄

本計畫取 NCTU-01 與 NCTU-02 鑽孔其中 NCTU-01 孔取樣結果照片如附錄三。10m 以上為崩積土與破碎岩層，10m 以下至 50m 為完整岩心。









附錄四 未來計畫

附錄四 未來計畫

一、緣起

義興電廠為石門水庫上游重要之水利工程設施，民國 75 年 3 月 23 日前池邊坡曾發生地層滑動事件，且造成重大損失，故為確保電廠與輸水壓力鋼管之安全，目前已於附近邊坡上裝設有水位管與傾斜管，其中水位管採自動化量測，傾斜管採人工量測方式。附錄圖 6.1 為現有儀器安裝位置圖。整理與摘錄 98 年北區水資源局每月的監測報表與 98 年上半年度榮華壩定期安全報告，指出 W4 及 W8 水位井水位分別平日位於地表下約 10m~20 m 外，其餘水位井水位含新設置之 W6N 及 W7N 約在地表下 30~45 m 之間，各水位井水位變動不大。但受颱風及降雨影響部分水位井水位有明顯升降情形，以 W3 及 W5 水位井較為明顯。W3 水位在降雨量少時仍維持稍高水位，比較去年同期水位亦呈現升高情形；該孔於雨季期間水位略高於 92 年訂定之水位警戒線，報告中建議密切觀察此現象是否對邊坡有不利影響。

鋼管右側邊坡 S6、S7 等 2 支傾斜管分別於地表下 7~8 m 處及 17m 處有一明顯潛在滑動面，S6 期間累積變位量較 95 年 10 月量測時之上下坡面方向數據變動最多達 2.5cm，於 96 年 4 月起北水局委託交通大學於 S6 附近架設一傾斜管自動化觀測儀進行測試，經與其擷取之數值比對，半年之變動約 0.6-0.7cm 與該管變動趨勢相似，基於安全考量仍建議針對該區域邊坡進行穩定處理工作。S10 本期間累積變位量與較 95 年 10 月量測時之數據變動約 1.6cm，顯示受降雨影響邊坡仍具產生蠕動之趨勢。

根據監測月報表指出，S7 傾斜管量測結果可能有一較深層滑動面(約 27m 深度，累積變位約 5cm)形成，顯示右側之邊坡仍具潛移趨勢，豪雨可能再度影響邊坡之穩定，必要時建議進行邊坡改善。S7 傾斜管 98 年 5 月份單月變動約 0.1cm (增加)。鋼管左側邊坡 S11 傾斜管，其累積變位量期間量測結果變動較 95 年 10 月量測時之上下坡面方向數據變動達 2.9cm，98 年 5 月份單月變動約 0.3cm (增加)，其中 S11 傾斜管於 1.5m 處有淺層滑動面，由於該處地形較為陡峭，淺層邊坡可能較不穩定所致，S11 傾斜管基座連結通達道路之混凝土

面裂縫亦有擴大情形（裂縫寬度約為 6cm）。原 S8 傾斜管自 92 年 1 月即改為自動監測，每隔 3m 裝設一感應器，但自動量測結果誤差過大且維修不易目前已改以人工方式觀測，98 年 5 月份單月變動量測變動約 0.25cm（減少、下坡面）變化量稍大。義興電廠邊坡變位以鋼管左右兩側傾斜管較明顯，邊坡持續有潛變趨勢。過去的研究計畫曾於 96 年在 S6 孔下邊坡 1 米處裝設光纖光柵偏斜儀，進行地層位移監測；98 年於 S6 與 S7 號孔附近安裝光纖光柵水壓計，進行分層地下水壓量測，並將原有 S6 號孔光纖光柵偏斜儀與光纖光柵水壓計串連一起，完成自動化量測。附錄表 6.2 為北水局在義興電廠前池邊坡所安裝的監測系統項目、目的及數量表。

二、工作項目

計畫中將規劃安裝前期研究計畫所研發之分佈式光纖感測器來量測地層移動與水壓之分佈。配合光纖水壓計在安裝，在效率與品質上應該遠優於傳統分層與電子水壓計的方法，可以在單一鑽孔內安裝多點水壓計觀測水壓剖面，增進水壓監測之效能。光纖測傾儀則可提供相對於傳統電子式測傾儀較高之穩定性與耐久性之感測效果，且可在同一鑽孔內進行多點地層位移量測。上述光纖感測器可藉由光纜與光纖讀取系統連接在一起，提供即時監測資料與分析結果。工作項目說明如下：

1. 光纖光柵測傾儀安裝：建議於原有測傾管旁新鑽孔並安裝光纖光柵測傾儀，每一鑽孔深度約為 40 米，扣除原本已安裝光纖光柵偏斜儀的 S6 號孔，需另外安裝 13 孔光纖光柵測傾儀，總安裝深度約為 520 米，每一米安裝一組雙軸向(X,Y)方向的光纖光柵測傾儀，每一孔深度與安裝數量可以依據現場需要調整並將其自動化。
2. 光纖光柵水壓計安裝：光纖光柵水壓計的安裝，扣除原本現有 2 孔水壓計外，另外新裝設 6 孔水壓計，每一孔深度約為 50 米，總安裝深度為 300 米，每 5 米進行安裝一個光纖光柵水壓計。其建議安裝感測器數量與深度如附錄表 6.3 所示。
3. 數據整理與分析：過去研究計畫已經對使用光纖光柵分層

式水壓計提出分析流程，可以進一步結合光纖光柵測傾儀的量測結果，了解邊坡的滑動機制與提供預警值。

三、預期成果

計畫預計可以提供下列成果

- 1.提供庫區邊坡即時安全監測系統，可提高庫區邊坡安全度，降低發生破壞的機會。
- 2.確保庫區邊坡上水工結構物的安全。
- 3.增進庫區邊坡安全檢測效率，降低檢測費用。
- 4.藉由分佈式自動化光纖光柵量測技術所提供的資料，建立現地邊坡滑動機制與評估現有邊坡穩定方法及改進方向，並提供未來現地邊坡穩定的設計參考。

水庫設施自動化監測乃各國安全管理趨勢，尤其颱風、地震等特殊天候發生時，自動化監測系統能及時反應現地狀況，故本計畫執行之成果，未來將可以考量應用至其他水庫，以提升水庫安全管理效能。

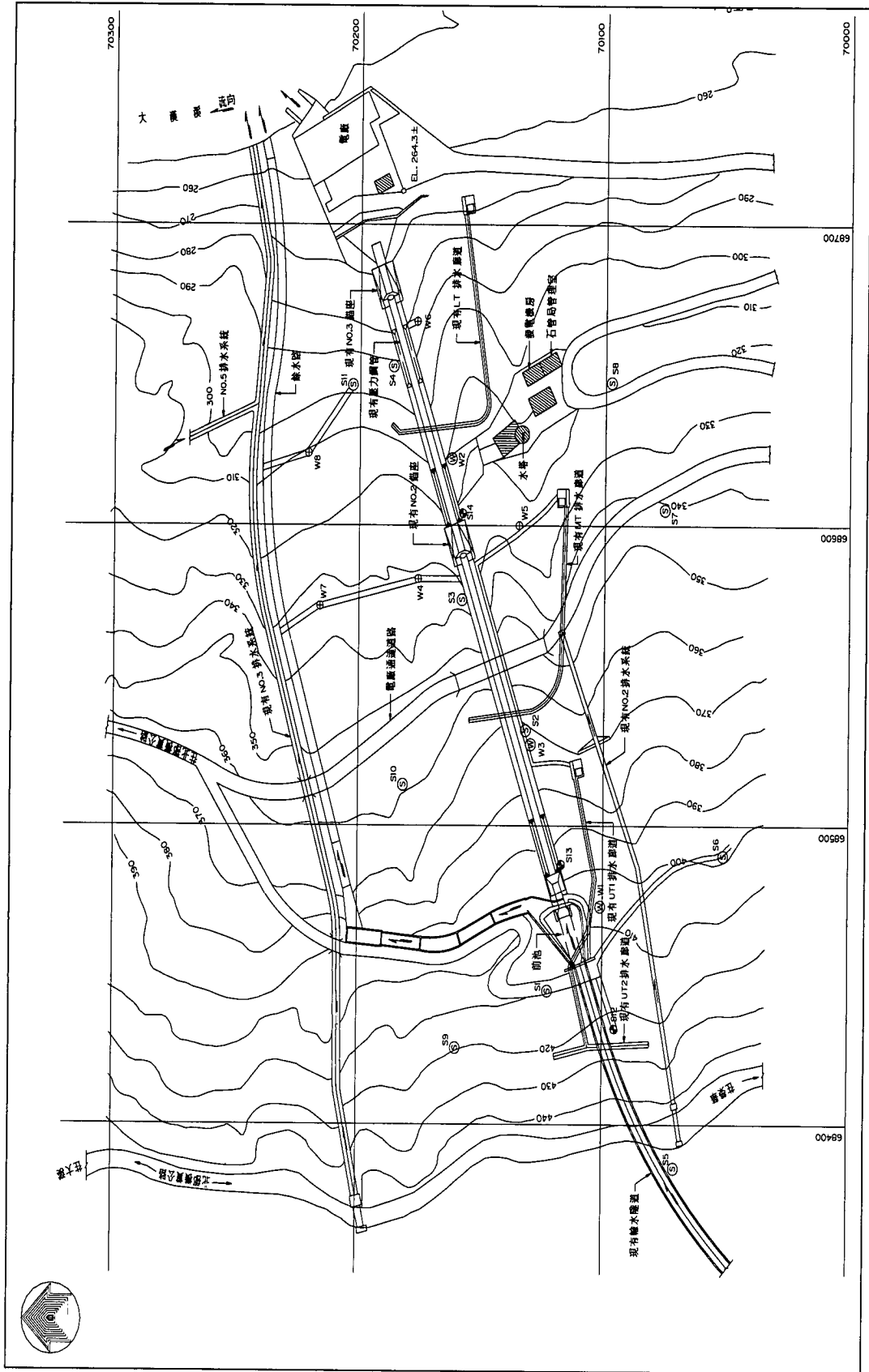


圖 6.1 現場監測恐未配置圖

表 6.2 義興電廠前池邊坡監測系統項目、目的及數量表(北水局，

2009)

儀器名稱	數量	資料收集/量測 頻率	量 測 目 的	現況說明
伸縮儀	6 處	每週一次	裝設於廊道內，以量測排水廊道附近邊坡變位	75 年裝設之伸縮儀已故障，91 年 12 月重新裝設
量水堰	3 處	每週一次	裝設於廊道出口處，以量測排水廊道之出水量	自動
傾斜銅盤	2 處	每月一次	量測 NO.1 及 NO.2 錨座之傾斜情形	正常
長度精密儀 (收斂儀)	8 組	每週一次	量測前池及各支墩間相對間距變化情形	75 年及 84 年裝設之長度精密儀(收斂儀)已故障，91 年 12 月重新裝設
垂直測傾管	14 孔	每月一次	量測前池山坡之變位情形	正常，其中一孔 B8 為自動量測，94 年 7 月份取消自動量測改採人工量測
地下水位觀 測井	8 孔	每週一次	量測前池山坡地下水位變化情形	自動 98 年 2 月新設兩孔 W6N、W7N，原 W6、W7 作廢
地震儀	3 部	不定時蒐集	地震紀錄	2 部為自動 1 部為舊有儀器

表 6.3 建議光纖光柵感測器安裝數量與深度

儀器名稱	光纖光柵水壓計	雙軸向(X,Y)光纖光柵測傾儀
鑽孔深度	300 米(6 孔)	520 米(13 孔)
感測器安裝間距	5 米	1 米
數量	60 組	520 組

附錄五 光纖光柵解讀儀器使用說明手冊

附錄五 光纖光柵解讀儀器使用手冊

1. 儀器說明

本光纖光柵解讀儀，其優點為穩定性高，人機介面為筆記型電腦，適用於室內與工程人員現場安裝檢測及量測數據之讀取/記錄。

儀器應用範圍：

1. 可做為簡易光柵波形光譜分析儀。
2. 可做為土木工程結構中，應變及溫度感測器的測量。
3. 儀器穩定性高，適用於室內與戶外。

光柵波長量測範圍，nm	1525~1565
光頻道數量	24
光源強度，mW	10
波長精度，pm	30
波長解析度，pm	1
量測頻率，Hz	200
動態量測範圍，dB	>20
儀器操作溫度範圍，度C	0~60
儀器操作電壓範圍	110V，~5W
儀器重量，KG	~5
儀器尺寸大小 WxDxH，mm	235x180x83

2. 儀器使用方法說明

儀器使用方式步驟說明：

1. 將光纖光柵解讀儀器支電源開關撥至 ON 處，此時儀器運作狀態 Power 顯示燈呈現”亮”的狀態。(如圖 2.1 所示)
2. 將排線連接線分別接至光纖光柵解讀儀與筆記型電腦連接槽處。
3. 完成步驟 2 後，開起筆記型電腦之電源，隨後點選本磁碟機(C) 中的 FBGSLIv40ver_ihsin 程式(紅色圈框)，如圖 2.2 與 2.3 所示。

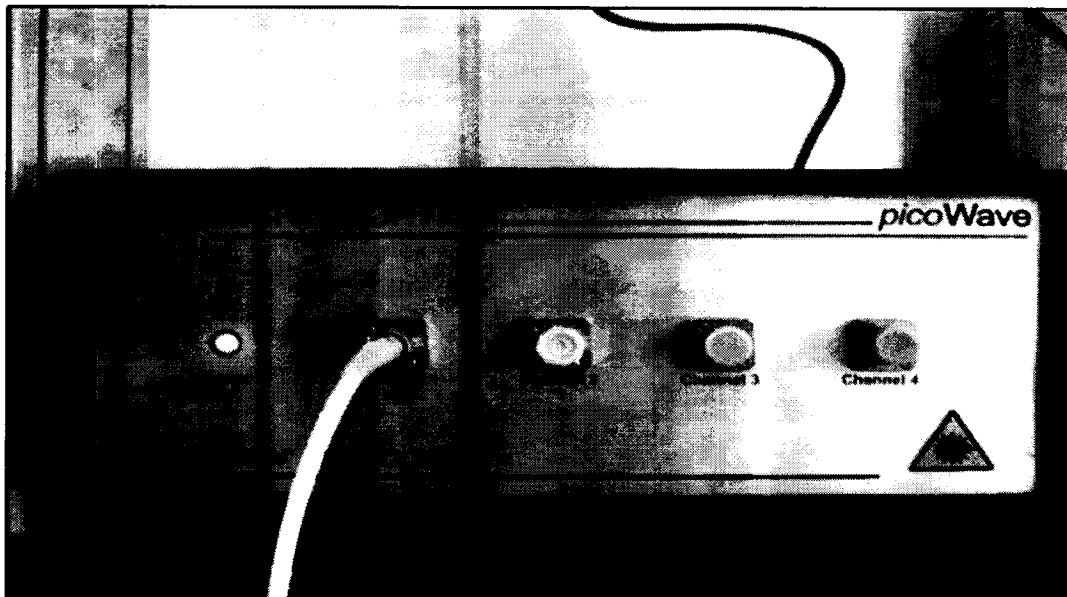


圖 2.1 光纖光柵解讀儀

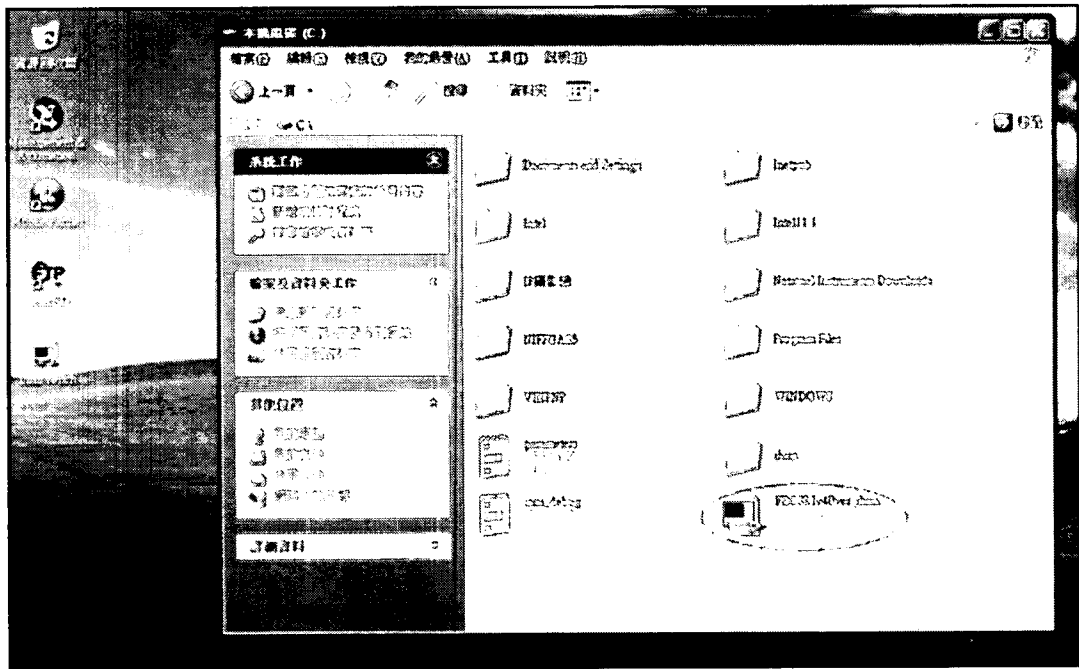


圖 2.2 軟體控制畫面

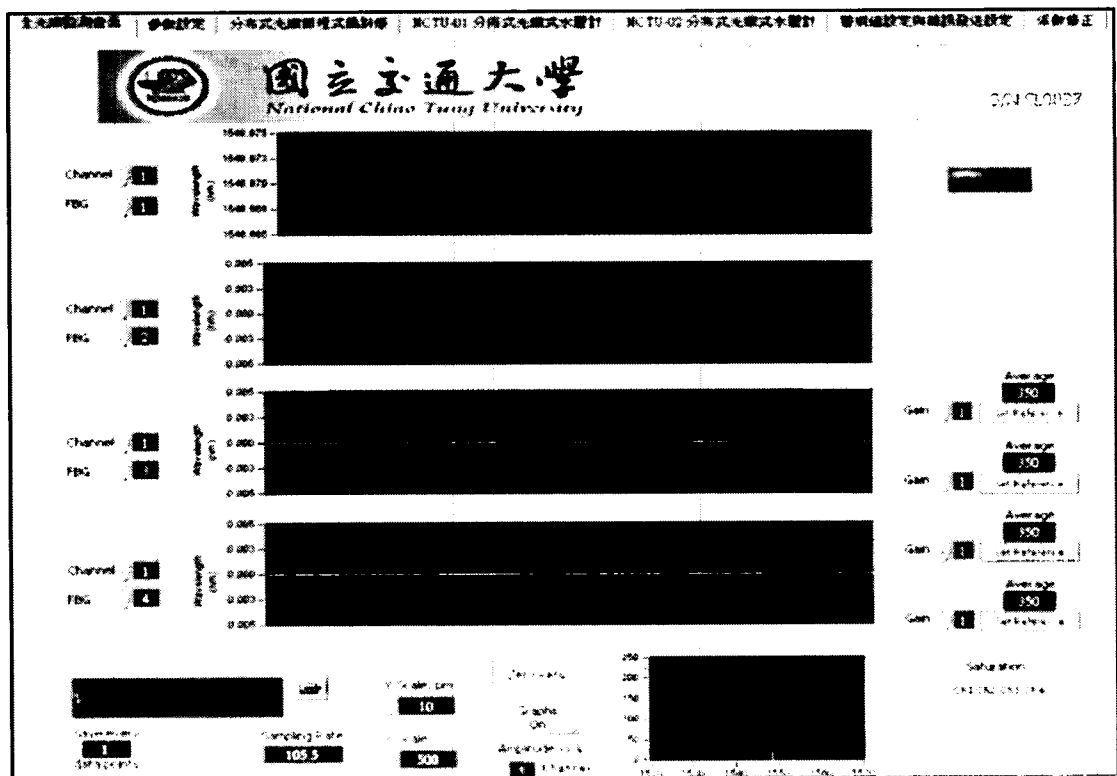


圖 2.3 光纖自動化監測儀器畫面

4. 本磁碟機(C)中的 ihsin 資料夾，為監測數據自動記錄存取之資料夾 channel1.txt~ channe24.txt，如圖 2.4 所示。

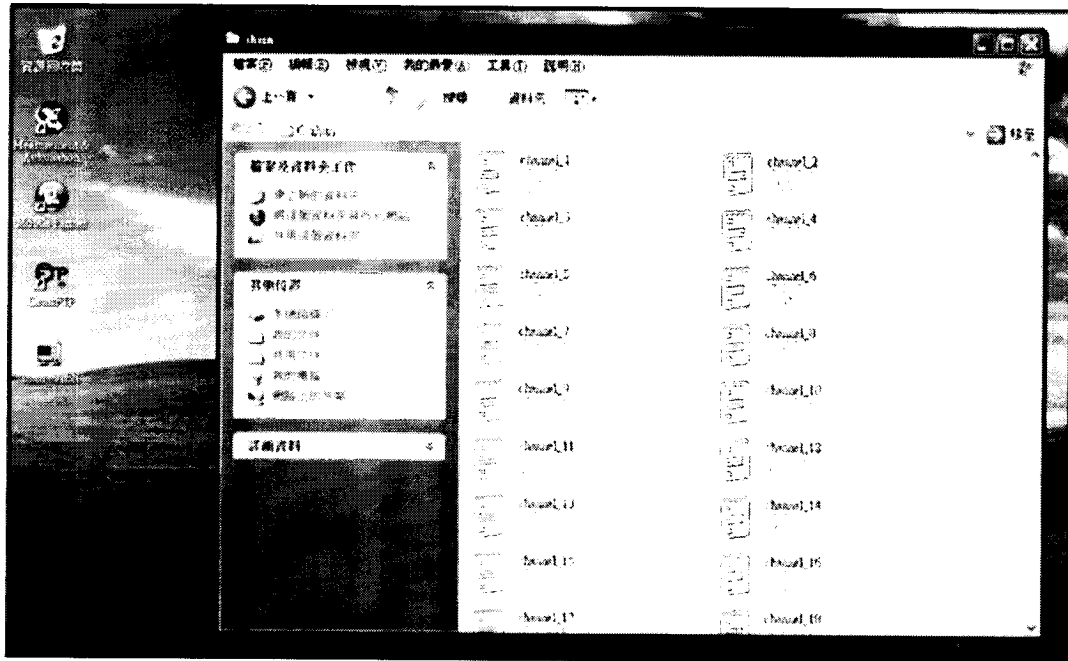


圖 2.4 存取監測資料說明

5. 以下為資料點選存取與文字說明之範例。

首先先點選 channel1.txt(紅色圈框所示)，如圖 2.5。

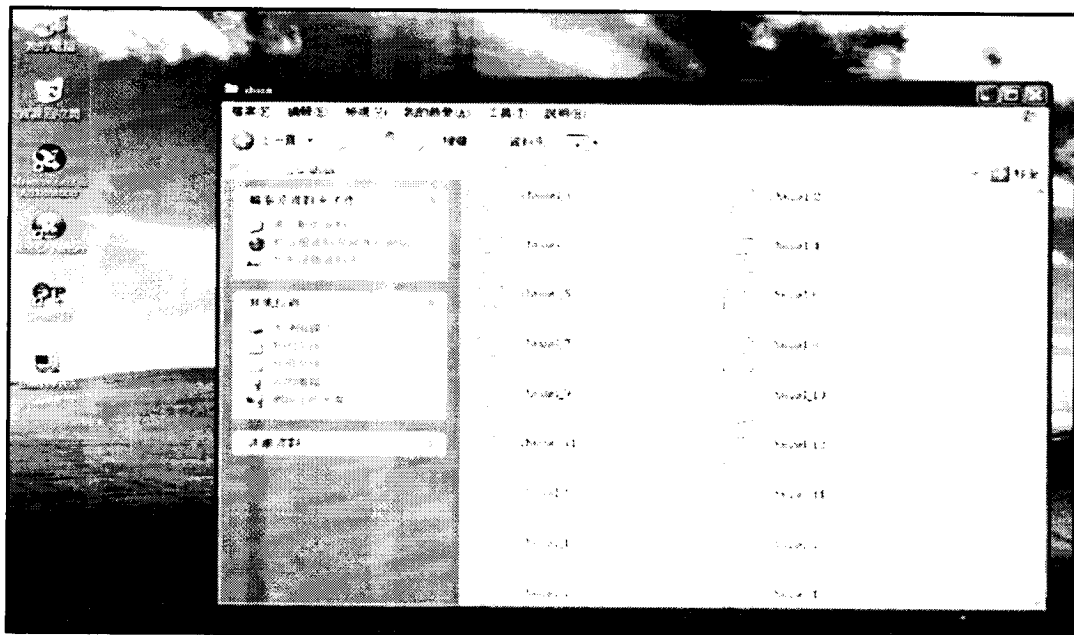


圖 2.5 存取範例說明

6. 點選 channel1.txt 資料夾後，左邊紅色圈框則表示監測日期與時間。

7. 中間藍色圈框則表示 chr1 這時間點的監測值需要抓 3 次。右邊綠色圈框則是代表 chr1 有 4 個水壓計它們的變化值。如圖 2.6 所示

日期時間	3	1523.466050	1536.468240	1542.862285	1548.949127	1554.992399	0.000000	0.000000
2009/12/07 18:09:05	3	1523.466050	1536.468240	1542.862285	1548.949127	1554.992399	0.000000	0.000000
2009/12/07 18:18:54	3	1523.466341	1536.468251	1542.862110	1548.948510	1554.992284	7.085200E-13	-9.744586E-13
2009/12/07 18:27:33	3	1523.466066	1536.468216	1542.862026	1548.948405	1554.992204	-9.530205E-13	2.897390E-13
2009/12/07 18:36:54	3	1523.465458	1536.468152	1542.862101	1548.948261	1554.992105	-2.380372E-12	4.352582E-13
2009/12/07 18:45:33	3	1523.464999	1536.467955	1542.862051	1548.948292	1554.992222	-2.420555E-12	4.859300E-13
2009/12/07 18:54:12	3	1523.464972	1536.467977	1542.862133	1548.948140	1554.992087	4.920761E-13	5.119156E-13
2009/12/07 19:02:51	3	1523.465086	1536.468034	1542.862265	1548.947804	1554.992062	2.640133E-12	6.704275E-13
2009/12/07 19:11:30	3	1523.465047	1536.468067	1542.862366	1548.947794	1554.992005	1.141416E-12	9.452249E-13
2009/12/07 19:20:09	3	1523.465741	1536.468194	1542.861164	1548.947781	1554.991802	5.577451E-12	1.201832E-12
2009/12/07 19:28:48	3	1523.468875	1536.468089	1542.862196	1548.947647	1554.992073	6.999864E-12	1.301877E-12
2009/12/07 19:37:27	3	1523.468463	1536.468068	1542.862333	1548.947578	1554.992008	7.924942E-12	1.488973E-12
2009/12/07 19:46:06	3	1523.467521	1536.467917	1542.862191	1548.947760	1554.992294	4.344786E-12	1.348651E-12
2009/12/07 19:54:45	3	1523.467783	1536.468089	1542.862184	1548.947769	1554.992864	7.264914E-12	1.338256E-12
2009/12/07 20:03:24	3	1523.468095	1536.467866	1542.862120	1548.947722	1554.992894	9.451599E-12	1.554586E-12
2009/12/07 20:12:03	3	1523.468117	1536.467926	1542.862054	1548.947808	1554.992272	1.128228E-11	1.740755E-12
2009/12/07 20:20:42	3	1523.469100	1536.468030	1542.862096	1548.947866	1554.992811	1.230416E-11	1.520155E-12
2009/12/07 20:29:21	3	1523.468195	1536.467899	1542.861963	1548.947871	1554.992597	8.737646E-12	1.538995E-12
2009/12/07 20:38:00	3	1523.467586	1536.467780	1542.862140	1548.947932	1554.992763	6.394996E-12	1.575375E-12
2009/12/07 20:46:39	3	1523.467647	1536.467652	1542.861997	1548.947947	1554.992620	3.348240E-12	1.288234E-12
2009/12/07 20:55:18	3	1523.467758	1536.467770	1542.862013	1548.947961	1554.992550	1.540744E-12	9.980499E-13
2009/12/07 21:03:57	3	1523.468212	1536.467532	1542.861854	1548.947814	1554.992648	3.439928E-12	1.212876E-12
2009/12/07 21:12:36	3	1523.468501	1536.467651	1542.861901	1548.947896	1554.992589	4.951549E-12	1.415564E-12
2009/12/07 21:21:15	3	1523.468960	1536.467575	1542.861942	1548.947542	1554.992544	3.347590E-12	1.384731E-12
2009/12/07 21:29:54	3	1523.468926	1536.467511	1542.861833	1548.947900	1554.992572	6.808422E-12	1.327862E-12
2009/12/07 21:38:33	3	1523.469738	1536.467583	1542.861864	1548.947822	1554.992461	8.245369E-12	1.384330E-12
2009/12/07 21:47:12	3	1523.469892	1536.467599	1542.861833	1548.947918	1554.992433	8.298450E-12	1.357896E-12
2009/12/07 21:55:51	3	1523.469883	1536.467618	1542.861854	1548.947849	1554.992494	1.027924E-11	1.240011E-12
2009/12/07 22:04:30	3	1523.469521	1536.467614	1542.861950	1548.947887	1554.992443	1.334813E-11	1.225869E-12
2009/12/07 22:13:09	3	1523.469670	1536.467521	1542.861933	1548.947944	1554.992400	1.516063E-11	1.382526E-12
2009/12/07 22:21:48	3	1523.469464	1536.467527	1542.861776	1548.947870	1554.992412	1.186306E-11	1.529908E-12
2009/12/07 22:30:27	3	1523.469324	1536.467538	1542.861818	1548.947932	1554.992424	1.475070E-11	1.684699E-12
2009/12/07 22:39:06	3	1523.469425	1536.467521	1542.861744	1548.947947	1554.992410	8.143875E-12	1.572776E-12
2009/12/07 22:47:45	3	1523.469446	1536.467426	1542.861682	1548.947884	1554.992259	3.655519E-12	1.465725E-12
2009/12/07 22:56:24	3	1523.469644	1536.467291	1542.861656	1548.947887	1554.992496	-2.278284E-12	1.446746E-12
2009/12/07 23:05:03	3	1523.469664	1536.467393	1542.861829	1548.947835	1554.992294	-1.182343E-13	1.429856E-12

圖 2.6 存取數據檔說明

8. 紅色圈框 peizometernctu01.txt 代表 01 孔中的 10 個水壓計每個深度每天水壓的變化量。

藍色圈框 peizometernctu02.txt 代表 02 孔中的 10 個水壓計每個深度每天水壓的變化量。如圖 2.7 所示

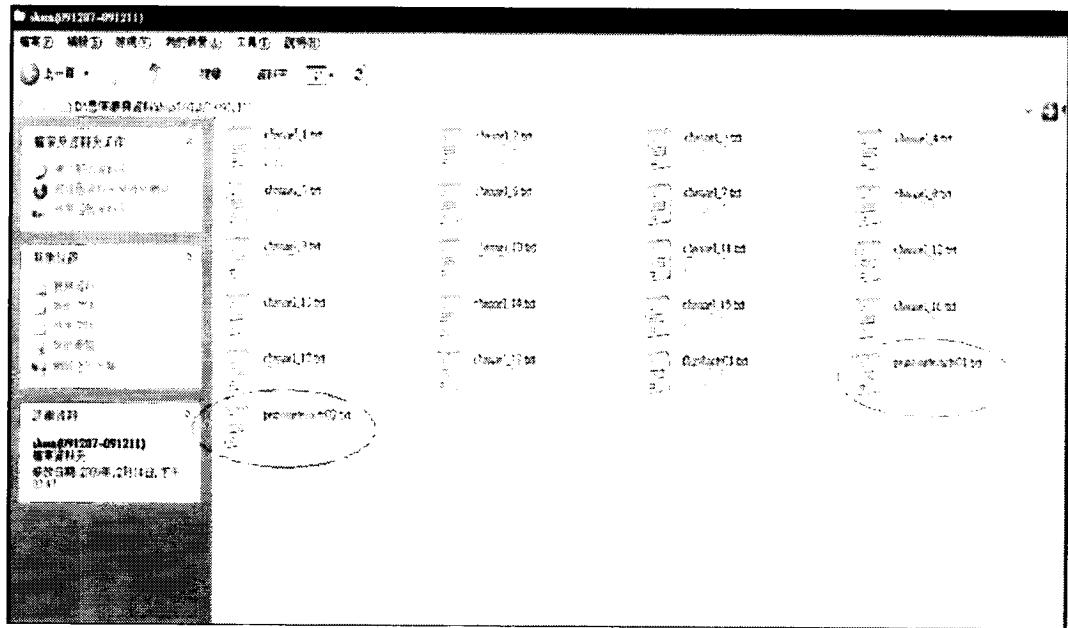


圖 2.7 水壓監測與位移監測資料檔說明

9. 以下為點選 peizometernctu01.txt 資料夾,其內容所顯示的資料。

紅色圈框則表示監測的日期與時間。

藍色圈框則表示每個水壓計的深度位置。

綠色圈框則表示水壓計的變化量。如圖 2.8 所示

line	12.10	14.30	19.30	24.30	29.30	24.30	14.30	9.30	4.30	...
2009/12/10 15:38:48	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 15:47:17	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 15:55:46	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 16:04:15	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 16:12:44	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 16:21:13	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 16:29:42	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 16:38:11	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 16:46:40	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 16:55:09	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 17:03:38	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 17:12:07	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 17:20:36	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 17:29:05	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 17:37:34	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 17:46:03	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 17:54:32	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 18:03:01	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 18:11:30	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 18:19:59	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 18:28:28	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 18:36:57	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 18:45:26	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 18:53:55	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 19:02:24	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 19:10:53	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 19:19:22	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					
2009/12/10 19:27:51	156.792300	15.985200	132.929600	120.583500	66.280000					

圖 2.8 水壓監測與位移監測資料檔數據

3. 儀器軟體操作步驟說明

在操作軟體之前，請使用者先依照儀器安裝方式說明知步驟後，再執行光纖光柵解讀程式，而以下為光纖光柵解讀儀器之操作步驟。

1. 點選我的電腦磁碟機(C)資料夾中的 FBGSLIv40ver_ihsin 程式，如

圖 3.1 內之紅色圈所示

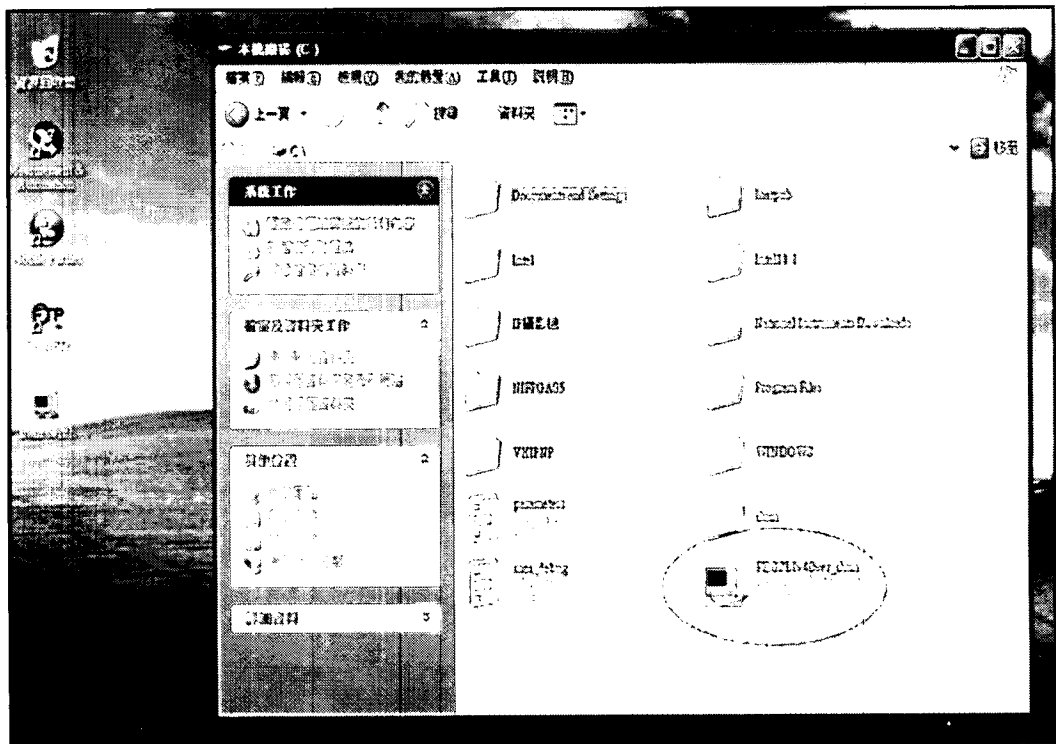


圖 3.1 程式檔名

2. 開啟 ihsin switch 程式，如圖 3.2 所示。

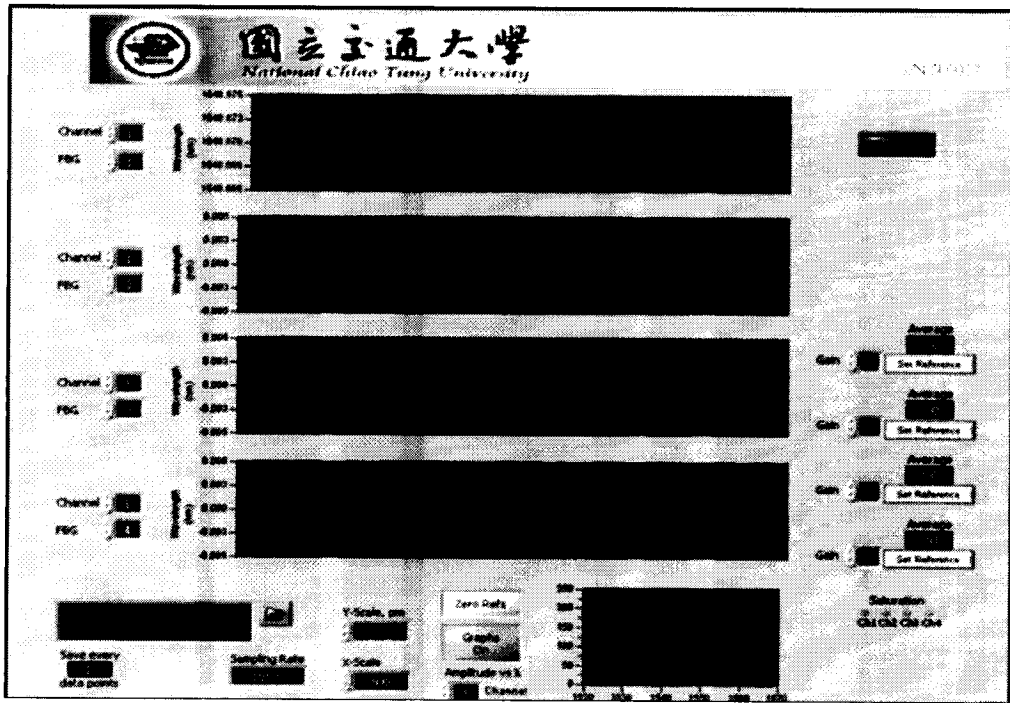


圖 3.2

3. 在 Y-Scale, pm 框格內輸入參數 10，如圖 3.3 所示。

右側圖表 Y 軸 0~250 為光纖訊號之強弱，訊號越弱擇強度越低，
X 軸為光纖波長之編號。

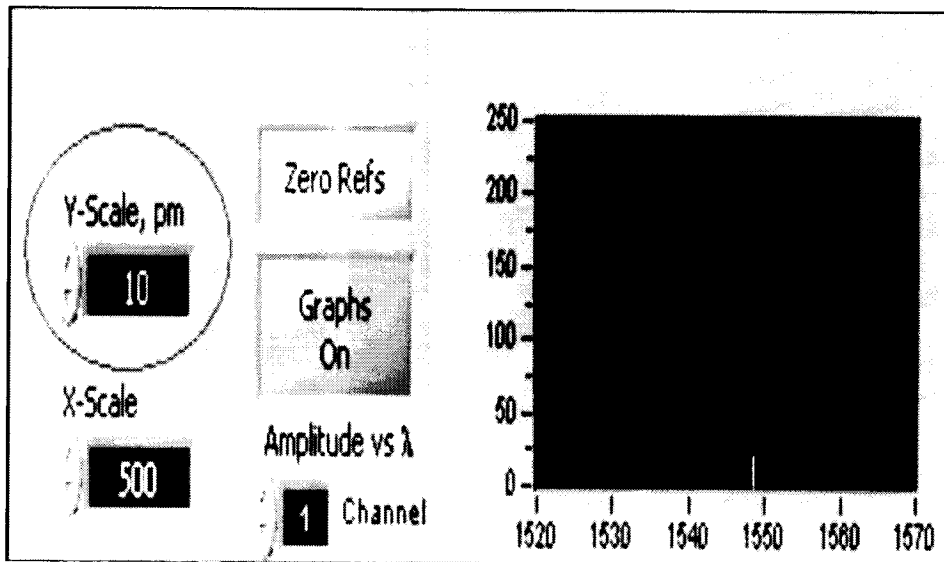


圖 3.3

4. 隨後在 Average 框格內輸入 350(此為固定參數)，Gain 改成 1，

如圖 3.4 所示。

若光纖強度訊號過弱，則可把 Gain 的強度調高，依序調成 1,2,3。例如，Gain1 讀取不到強度則可調高為 Gain2，Gain2 讀取不到則可調高為最強訊號 Gain3。

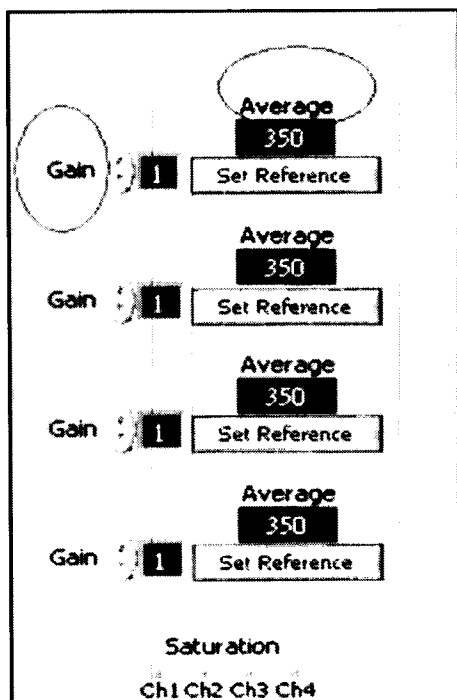


圖 3.4

5. 步驟 4 改完後再點選操作介面上 Change，如圖 3.5 所示。

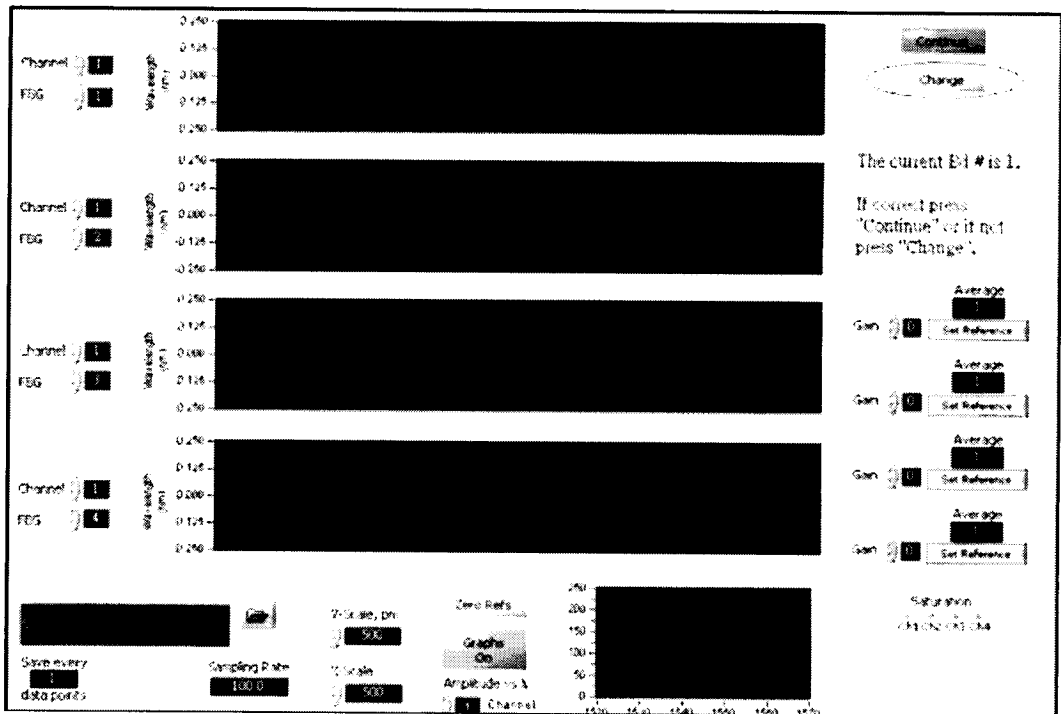


圖 3.5

6. 點選 Change 之後，其內改成 1 如圖 3.6 所示。

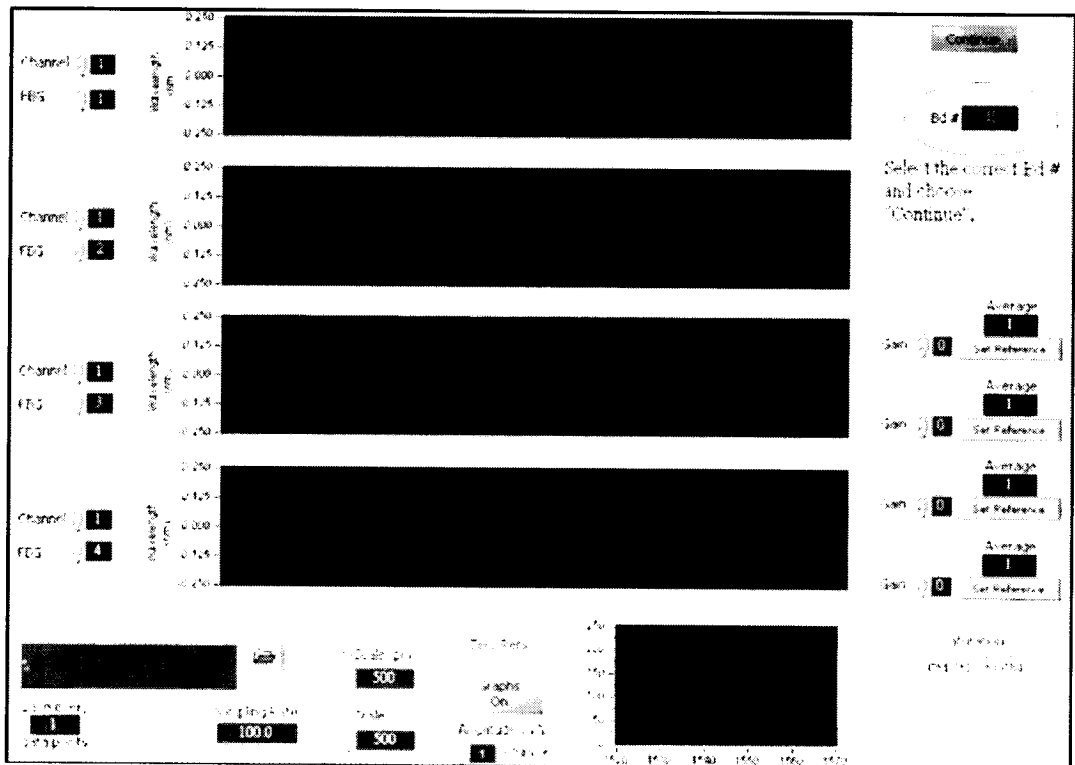


圖 3.6

7. 步驟 6 完成之後則點選綠色 Continue 鍵後，即可讓程式開始 run。

如(圖 3.7)所示。

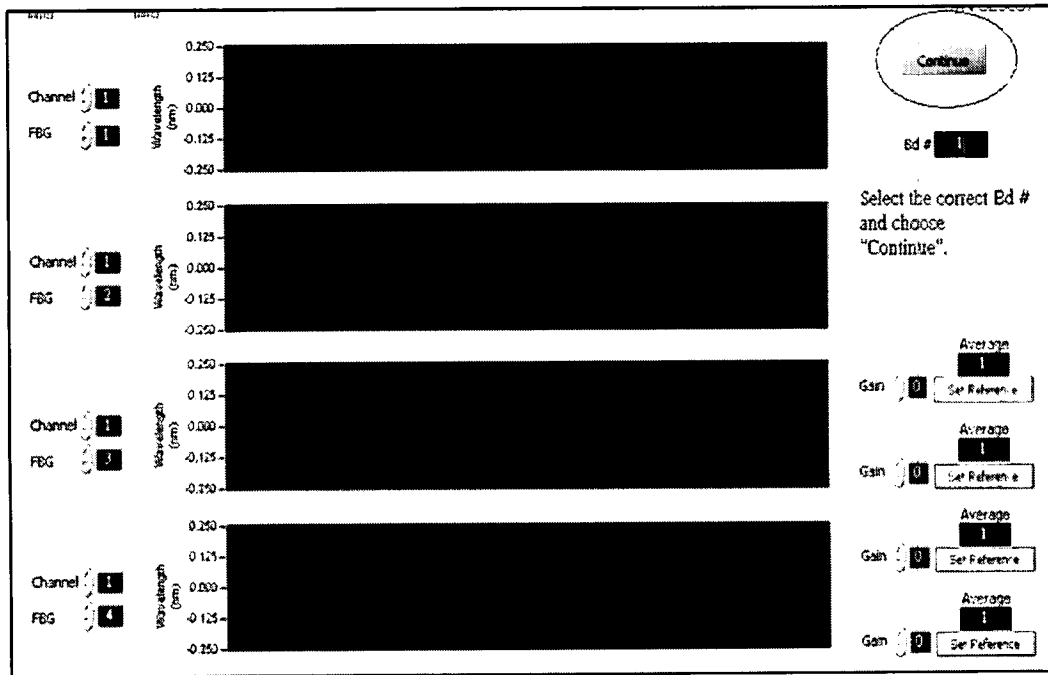


圖 3.7

8. 欲選取 Channel 則可按 switch 機台上的方向鍵(在本軟體上可搜尋到讀數 channel 為 24 個)01~24 通道。如圖 3.8 所示。

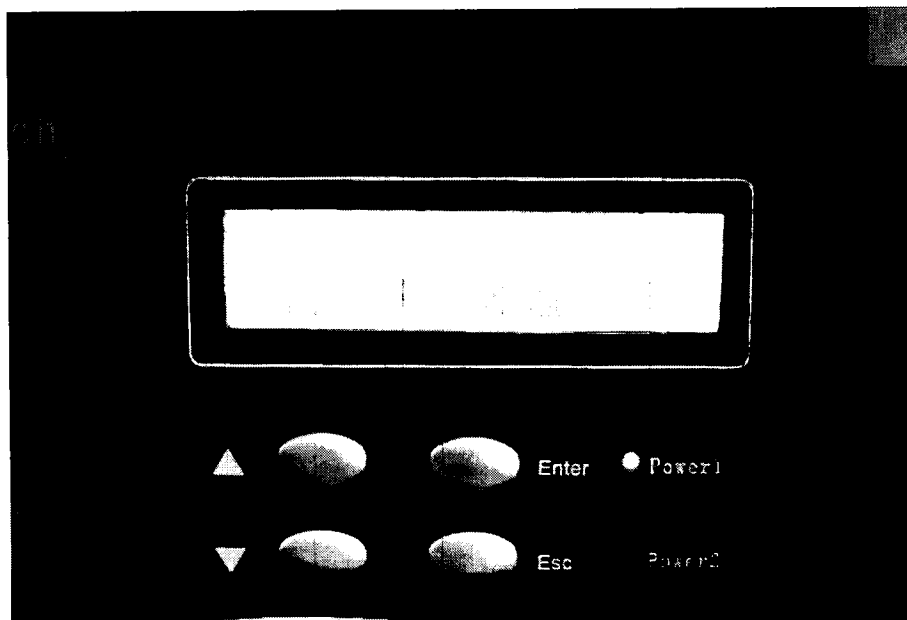


圖 3.8

4. 軟體介面說明

1. 全光纖監測畫面-為監測之主畫面，如圖 4.1。

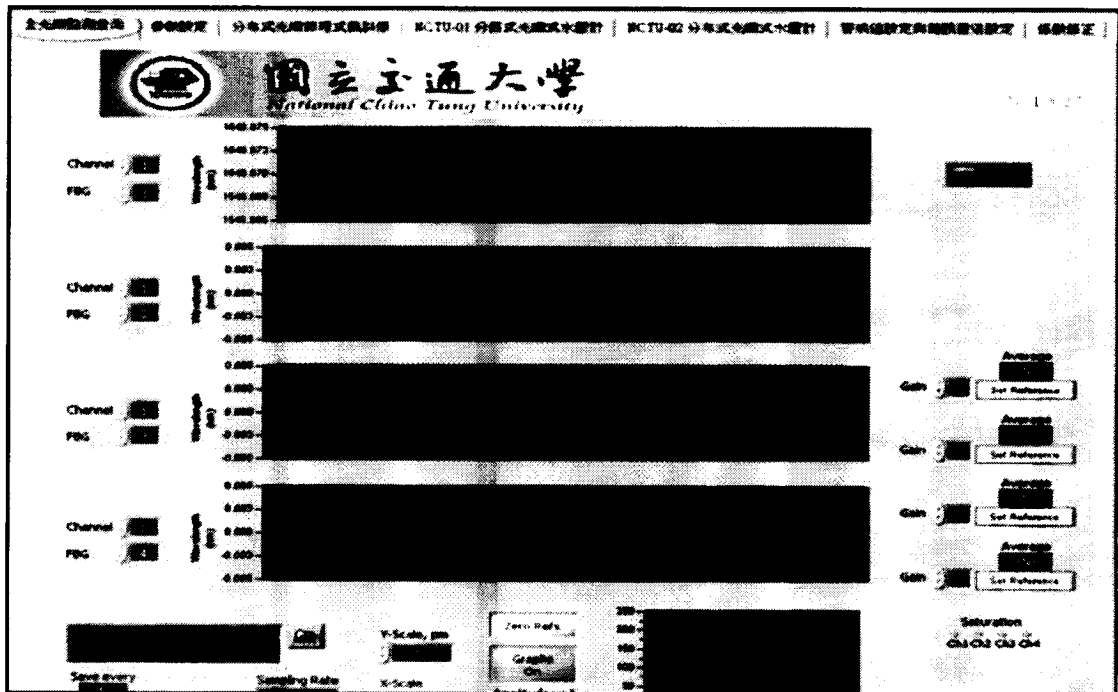


圖 4.1

2. 參數設定- 紅色圈框為資料存取之位置，黃色圈框為每 5 分鐘讀取 24 個點。中間表格欄部分為監測前已輸入好之固定參數，故無須更改。如圖 4.2 所示，若以 Channel1 為例 Gain number3-強度為 Gain3 Repeat number1-讀一次讀數。

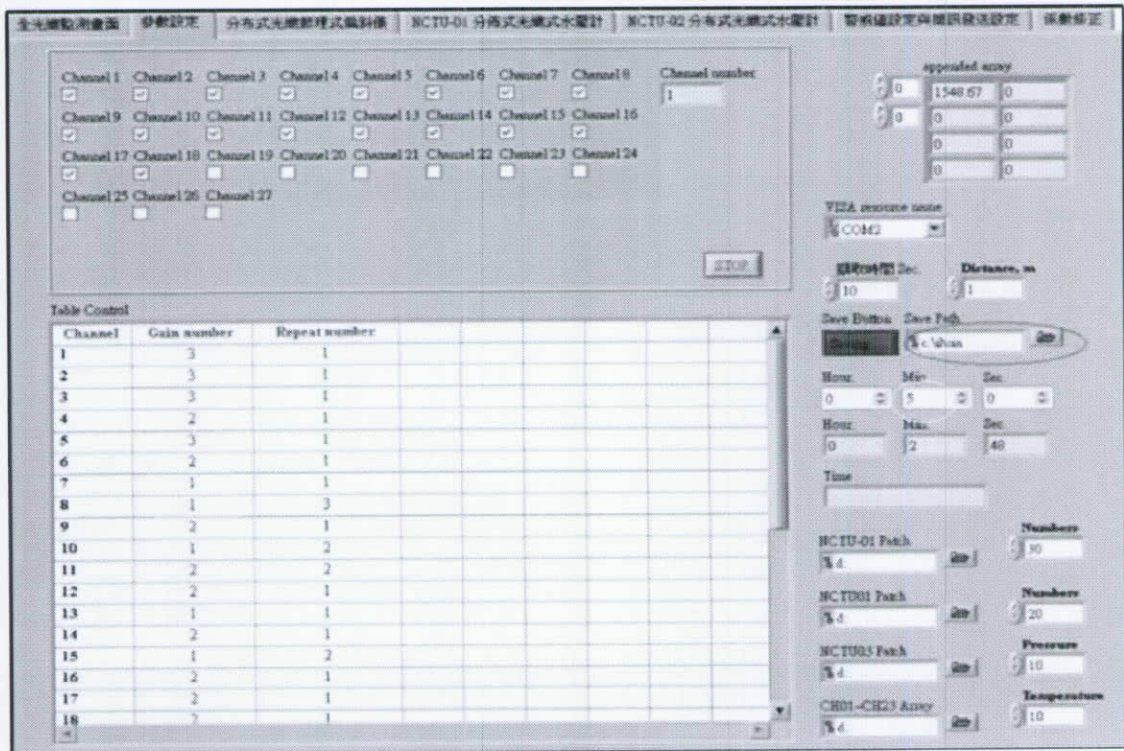


圖 4.2

3. 分佈式光纖節理式偏斜儀 - (Depth,m) 為偏斜儀之深度，
(Displacement, mm)，為偏斜儀之位移量。如圖 4.3。

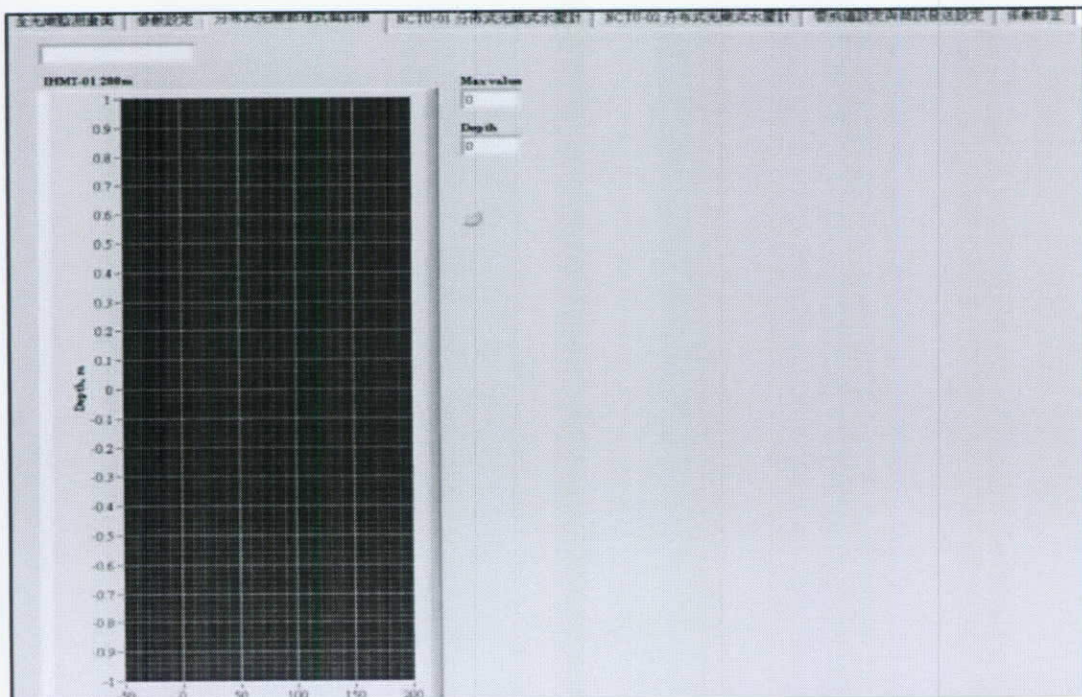


圖 4.3

4. NTCU-01 分佈式光纖式水壓計-(Depth , m)為水壓計之深度，
(Pressure, kPa)，為水壓計之壓力，如圖 4.4。

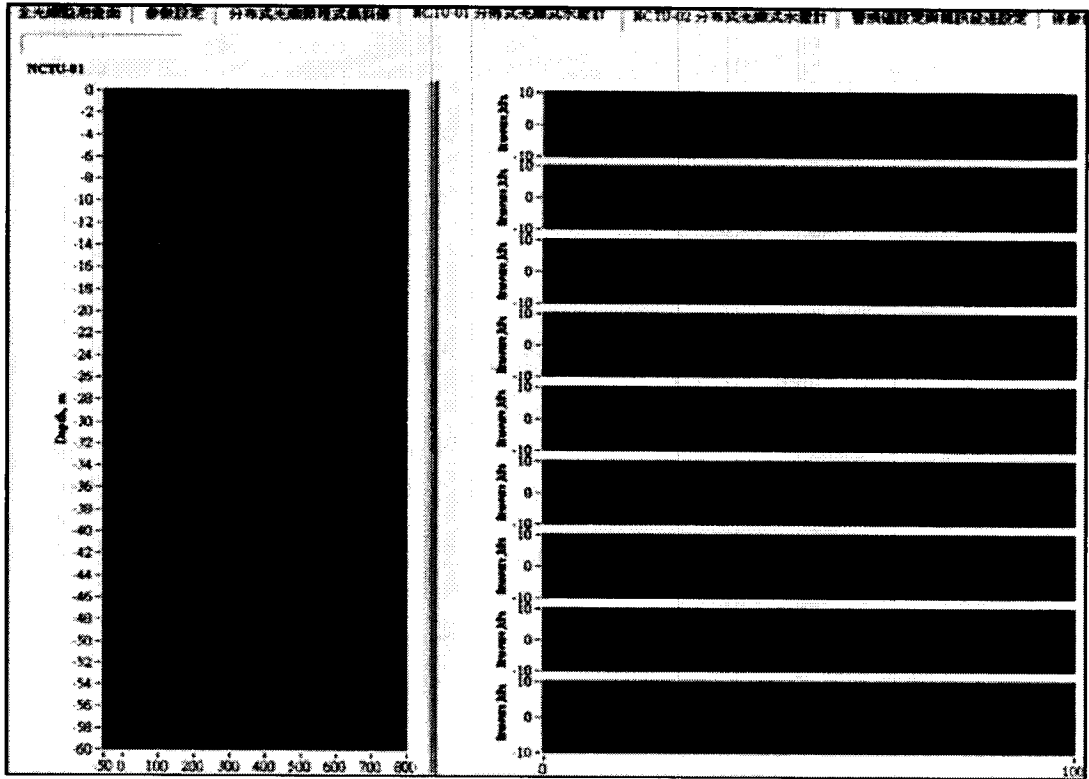


圖 4.4

附錄六 工作執行計劃書審查意見及辦理情形

附錄六 工作執行計畫書審查意見及辦理情形

藍委員振武	
工作執行計畫書審查意見	處理情形
1.建議納入地質資料比對水壓變化之關係。	感謝委員的建議，於報告中已經收集過去的地質資料並加以整理與說明，未來收集水壓計數據後將依照委員的建議加以整理與分析。
賴委員典章	
1.義興電廠地質狀況與台北水局過去資料及交大去年裝之傾斜儀監測結果，應加以綜合分析，已作為本年度設置儀器之規劃參考。	感謝委員的建議，計畫中已整合過去的監測結果並加以分析，作為新設置儀器的參考。
2.地電阻影像探測沿 NCTU-02 附近道路施做，但相對在 NCTU-01 則無此探測，對其下岩、土層及地下水之掌握較少，是否增加測線，請檢討。	感謝委員的建議，關於地電阻影像探測，其測線的佈放及長度，是依據現場勘察與討論後所決定。對於新增測線之建議，由於經費之考量，本年度暫時無法實

	施。
3.由阿里山之監測案例，看出地下水有分層現象，但地下水是否分層，應由較大範圍資料去評估，建議各點之監測資料應綜合評估，以了解是否確有分層現象。	感謝委員的建議，由於目前義興電廠附近只有水位的監測，並無分層水壓的監測，所以能夠提供分層現象的資料有限。本計畫將安裝 2 孔 FBG 水壓計監測管，在監測管安裝完成與收集數據後，將嘗試進行是否有分層現象的分析。
4.由阿里山之監測案例，在深部孔底之地下水變化很明顯，但只有一個水壓計之資料，缺乏說服力，是否深度不足，應加裝深部之水壓計，在本計畫請考慮。	感謝委員的建議，本計畫已參考義興電廠以往監測資料，將原本計畫鑽 2 孔各 30 米，更改為 2 孔各 50 米，增加深部水壓計，使用 FBG 水壓計數量增加為 20 個。
蘇委員炳勳	
1.本工作執行計畫內容著重儀器原理與適用性，委辦單位計畫工作項目期望瞭解義興電廠邊坡變位特性與穩定性等實務問題，希	感謝委員的建議，本工作團隊將會與委辦單位緊密溝通，使得本計畫能夠達成當初所設立的工作目標。

<p>望兩者更緊密結合，均可達預期目標。</p>	
<p>2.滑動面以上均為崩積層，分層裝設水壓計之實質意義請補充說明。</p>	<p>感謝委員的建議，請參見 2.6 節與 2.8 節。</p>
<p>3.新設儀器期望能掌握豪大雨期間或地震時即時資訊，以提供預警功能（含警戒值設定），希望能具體達成。</p>	<p>感謝委員的建議，本團隊已經於阿里山驗證能夠提供即時的水壓監測。故本工作團隊有能力於義興電廠附近邊坡提供即時的水壓量測訊息。</p>
<p>王委員國樑</p>	
<p>1.請補充工作人力組成及工作分配架構圖。</p>	<p>感謝委員的建議，已重新於工作執行計畫書內補充人力分配表說明。</p>
<p>2.本計畫各分項工作時間分配進度之甘梯圖，請補充。</p>	<p>已在工作執行計畫書內補充工作項目及進度表說明。</p>
<p>3.本計畫選用光纖光柵感測器是否涉及專利，選定之優劣性說明請補充。</p>	<p>感謝委員的建議，本計畫所使用光纖光柵感測器為計畫主持人所研發之，且已申請國內外專利使</p>

	用權，故無侵權問題。
4.儀器之適用範圍、可能誤差及相關之 QA & QC，建議應交待。	感謝委員的建議，水壓計的研發過去在水利署的支持下所完成，包含有環境測試、酸鹼性測試等等，已補充於 2.5 節內。
5.p.29 義興電廠附近邊坡總共有 14 孔傾斜管與 8 孔水位觀測井，如圖 3.26 似乎有誤，應是圖 3.27 才對。	感謝委員的指正，已修正於期中報告書。
6.義興電廠邊坡埋設 14 孔傾斜管與 8 孔水位觀測井，以及本計畫將埋設光纖光柵水壓計等相關之選站或選址原則，建議補充說明。	感謝委員的建議，已補充於期中報告，請參見 2.8 節與 3.6 節。
7.請補充本計畫之工作構想及流程圖，以利瞭解相關工作項目關聯性及整體工作構想。	感謝委員建議，已補充於期中報告書，請參考 P.2
8.本計畫之效益如何評估，是否應建立相關之評鑑或評斷因子較佳。	感謝委員的建議，將在系統安裝完成與開始量測數據後，建立相關評鑑因子。

郭科長耀程	
1.已勘定鑽孔孔位及地電阻探測路線，建議於報告內補充，並述明選定依據及理由。	感謝委員建議，已在期中報告書說明，請參見 2.8 與 3.6 節。
2.未來研發之儀器，其精度檢測方式建議補充述明，並與現有傳統量測方法比較，以利推廣。	感謝委員的建議，與傳統儀器之比較請參見表 2.2 與 2.5 節。
3.本計畫之分層水壓觀測，除儀器精度外，封層施工方式如何進行，尤其岩盤與管壁封層方式請補述。	感謝委員的建議，已補充於期中報告內，請參見 2.6 節。
4.建議加強義興電廠邊坡現況及觀測儀器成果分析，以利未來本計畫整體成果之研析。	感謝委員的建議，工作計畫書內已經建過去現地的監測資料做過整理與分析，用以作為現地監測選點與佈線的參考，將有助於提高本計畫的量測效果。本計畫將持續收集現有監測資料並與本計畫量測結果做一比對與分析。
5.未來技術轉移作法請補述。	感謝委員建議，本工作團隊將於

	<p>計畫驗收完成後，將該設備轉移給北水局，目前正與北水局商討轉移方式。</p>
<p>6.本次係審查工作執行計畫書，建議補充工作構想、期程及相關成員資料，以利後續執行。</p>	<p>感謝委員的建議，已補充於工作執行計畫書內。</p>
<p>邱助理工程司士恩</p>	
<p>1.本案委託目的在於探討邊坡可能潛變原因，提出穩定分析成果及建議可行整治方案，惟論述基礎闕如，應予補充。</p>	<p>感謝委員的建議，本計畫將會進行邊坡穩定相關數值模擬，並已經於期中報告中進行初步模擬測試，本工作團隊將會將模擬與現場所施測之地電阻與水壓監測資料比對。</p>
<p>2.本次會議為確認計畫工作執行方向，惟相關執行構想闕如，如鑽孔取捨佈置原則、孔徑大小、鑽孔方式、如何取樣、取樣土壤試驗項目(組數)內容、投入人力、辦理期程(工作時間排定)等，請補</p>	<p>感謝委員的建議，已於工作執行計畫書內補充說明。</p>

<p>充。</p>	
<p>3.鑽孔取樣於非飽和土壤及崩積土層辦理，如何取得完整土樣供研判參考(或辦理驗收)將為挑戰性工作，亦既鑽孔取樣應考量對邊坡穩定可能影響，並事先提出執行計畫書及如何於施作過程檢討修正，請補充。</p>	<p>感謝委員的建議，義興電廠附近邊坡在過去相關的計畫中進行過多次鑽孔與取樣(中興顧問報告等)，所以依據過去經驗，鑽孔對於義興電廠附近的邊坡穩定並不會造成影響。另外過去相關計畫的鑽孔資料已經對本地區的地質狀況做過詳細調查，所以本計畫將鑽孔取樣重模後作室內實驗使用，將實驗所得到的數據作為模擬參數使用，並與本計畫主要目地分佈式光纖水壓計的量測結果整合作一邊坡穩定分析的探討。</p>
<p>林副工程司正杰</p>	
<p>1.新設監測儀器及地電阻探測自動化量測成果，如何與目前義興電廠既有監測資料比對，以確認將來計畫成果之正確性，建議應</p>	<p>感謝委員的建議，關於地電阻部分，因以往測線佈放，為沿著壓力鋼管，無法探討現場地層內部地下水流可能之流向，故在本計</p>

<p>有相關對照及說明，以確認監測成效。</p>	<p>畫中，已修正其測線佈放位置與長度，以增加其正確性與解析度，並與後續光纖水壓計及既有水壓(水位)管做比較。</p>
<p>2.本次監測儀器須於新鑽孔內安裝 15 個光纖光柵(FBG)水壓計，現地安裝條件有無限制？其鑽孔及安裝有無精度要求？計畫執行期間，自動化量測結果如何透過相關機制偵錯與判斷是否異常？建議於後續階段報告中敘明。</p>	<p>感謝委員的建議，光纖水壓計的安裝過程與一般傳統水壓計安裝過程類似，其主要差別在於因為多個水壓計在同一孔內，所以需要多次封層，其鑽孔直徑大小因為回填粒料之需要建議在 7 公分以上，且鑽孔大小並無精度之要求。偵錯之設立，將於電腦程式中進行讀取次數設定以利於判定。</p>

附錄七 期中報告審查意見及辦理情形

附錄七 期中報告審查意見及辦理情形

藍委員振武	
期中報告審查意見	處理情形
<p>1. 水位變化時序記錄與地層地質資料宜作探討分析。</p>	<p>感謝委員的建議，北水局於義興電廠前池邊坡共安裝有 8 孔地下水觀測井，並委託中興顧問工程公司每周自動化採集數據，目前已向北水局取得 98 年上半年度榮華壩(含義興電廠、輸水路等)定期檢查報告與每月監測工作月報表進行分析與研究。中央地質調查所 96 年的調查報告則對義興電廠附近邊坡的地質狀況有詳細說明，本計畫已將地調所的調查報告整理後說明於 2.8 節內。本研究主要探討與使用多個光纖光柵水壓計來量測現地不同深度的水壓變化，不同於過去水位井的量測與分析方式，於期末</p>

	<p>報告中已經收集光纖光柵水壓計數據，並將其應用於邊坡穩定分析中(請參考 2.8 節與 4.3 節)。</p>
<p>2.工作進度計畫時間表與實際進度在報告中未列出，宜詳細明列以控制進度。</p>	<p>目前進度符合當初規畫進度，期中報告將目前各項成果展示於不同章節中，已經於期中報告修訂稿中 p.1 列出工作進度說明。</p>
<p>許委員澤善</p>	
<p>1.義興電廠附近邊坡蠕動為自民國 75 年以來的問題，廠區相關人員對穩定邊坡十分重視，因此本區除量測儀器及量測技術提升外，亦盼能說明如何應用量測結果至邊坡穩定分析及適合現地需要之穩定工程中。</p>	<p>感謝委員的建議，由分佈式水壓的量測來對邊坡進行安全監測與分析是本計畫的主要目標。分佈式水壓的量測不同於水位井的量測方式，主要量測與應用方式可分為下列 2 點說明(請參見 2.6 節)：</p> <p>1.當暴雨來臨時，地層內水壓會產生上(孔頂)大下(孔底)小的現</p>

象，並隨著時間的延長，最大水壓會逐步向下延伸，最終達到一平衡狀態，此現象推估主要是由於地表與地底下滲流所產生。

2.傳統的水位管是藉由水位管不同深度在水位管上的微小開口，收集沿著水位管不同深度地下水的流入並於水位管底部的量測水位變化。而現地地層內可能具有受局部地質構造儲存的棲留水，藉由地層內的分佈式水壓可以直接量測到此棲留水的水壓變化。

暴雨來臨時，接近地表的土層內會產生水壓急遽上升的現象，現有的邊坡穩定分析方式是藉由地下水位管的量測來定義地下水位面的高度，然後假設地下水壓力的分佈是由地底朝地下水位面呈現三角形線性遞減。此種方式

將無法量測與分析暴雨來臨時地下水水位面以上地層內的水壓力變化，此種水壓力急遽上升的現象與機制有可能是導致邊坡滑動的主要原因之一。

另外對於棲止水壓的量測，可以提供地層內不同深度的水壓力變化量測，此種現象可能是在現有的水位管量測低水位狀況下邊坡會發生滑動的機制與原因之一。

土壤的總應力為有效應力加上水壓力，現有的水位管量測無法直接量測得到不同深度的水壓力變化，藉由多點分佈式的水力量測，可以針對不同封層內每一水壓計進行量測與分析。

本工作團隊依據過去的經驗(阿里山監測)已經驗證了分佈式水壓計的量測效果。

	<p>本計畫將在後續量測到水壓計讀數後，將其放入邊坡穩定分析模式中進行邊坡穩定分析。</p>
<p>2.建議說明未來擬採用與現地滑動面結合之邊坡穩定分析方法，以及滑動面剪力抵抗強度所需之土壤或岩石力學試驗方法與條件。</p>	<p>感謝委員的建議，邊坡穩定分析的方法與初步進行邊坡分析結果請參閱第 4.3 節。本工作團隊並於計畫合約外加做現地傍壓儀試驗補充現地土壤資料，詳細試驗條件、方法與結果說明請參考 2.9 節。</p>
<p>3.經驗顯示易於滑動之邊坡，滑動面以上之破裂性高，如何得知大量串接 FBG 水壓計分層監測結果，建請補充說明。</p>	<p>感謝委員的建議，依據過去的經驗(阿里山監測)，藉由 FBG 水壓計的封裝與現地的封層，已經驗證了 FBG 水壓計分層監測的效果。本研究計畫每 5 米深度安裝一個光纖光柵水壓，每個水壓計間用白皂土封層，確保每個光纖光柵水壓計間不會連通。</p>

蘇委員炳勳	
<p>1.各組儀器封裝完成後，初始讀數及讀數與測值轉換參數等宜請務必建立。</p>	<p>感謝委員的建議，本研究已經建立該標定數據，並已經放置於期末報告附錄一。</p>
<p>2.鑽孔位置如何決定？現場安裝後，如何驗證儀器讀數是否正常，請補充說明。</p>	<p>感謝委員的建議，鑽孔位置的決定說明請參見 2.8 節與 3.6 節，儀器製作完成後經過環測與標定，現場安裝完成後，每一組 FBG 水壓計皆具有預拉值，若是 FBG 感測器出現問題，則預拉值會出現大幅度衰減變化，且可以明顯看出。95 年於阿里山所安裝的 FBG 水壓計，至今並未發生損毀。</p>
<p>3.影響儀器讀數之可靠度與穩定性因素如何，建請說明如何評估可被接受。</p>	<p>感謝委員的建議，光纖感測器的精度與穩定度高於傳統應變片式感測器，其具有不受水與電磁波影響等特性，FBG 水壓計在過去的研發過程中，已經進行過各項測試，包含老化測試等等。影響</p>

	<p>FBG 水壓計可靠度與穩定度的主要因素為溫度，本計畫已經於每組 FBG 水壓計中放置專門感測溫度變化的 FBG 感測器，並經由恆濕恆溫箱的測試，證明此種防法可以大幅降低溫度對 FBG 水壓計的影響。</p>
<p>4.何謂基質吸力，請說明是否為本計畫預期成果。</p>	<p>非飽和土壤內的負孔隙水壓稱之為土壤內基質吸力$(u_a - u_w)$。傳統土壤力學大多考慮飽和狀態為主，其假設土壤孔隙中均充滿水分，而當土壤受到外力作用時，其力量分別由土壤顆粒與孔隙水所承擔，而在力學分析上，若土壤破壞時可知土壤內部孔隙水壓變化時，則可採用有效應力方法來分析；反之，若無法孔隙水壓變化時，則以總應力方法分析。但於現實生活中，現地土壤存在</p>

著飽和與非飽和的狀態，由其在地下水水位面以上之土壤，該範圍的土壤因受到大氣壓力的影響，使得該區域土壤內部孔隙水承受張力，稱之該區域為毛細現象區 (capillary fringe)。一般孔隙水承受壓力時為正的孔隙水壓力，若承受張力時，則產生負的孔隙水壓力，因此，以有效應力觀點來看，當土壤孔隙水壓力為負值時，使得土壤之有效應力增加，這也充分說明，當人行走在海邊沙灘時，此時行走在飽和砂與乾砂範圍時，則顯得非常難行走，若行走在部分飽和砂的範圍內，則因砂土中因毛細現象，使得砂土有效應力增加，能夠承受較大外加载重而不易發生沉陷，所以行走在部分飽和砂，可更佳容易

行走。另外，對於目前山區邊坡而言，常於雨季過後，因降雨入滲使得土壤內部毛細現象消失，土壤有效應力降低而發生邊坡崩塌與滑動。

一般在大地工程界裡，假設地下水位面是一水平面，而在地下水位面以下，土壤屬於飽和狀態；地下水位面以上，土壤屬於非飽和狀態，因此，可看出在地下水面以下，為正的孔隙水壓力；地下水位面以上為負的孔隙水壓力，由於接近地表面的土壤長期受到蒸發與入滲作用，而有向上流出與向下流入的現象，使得負的孔隙水壓分別有增加與減少之狀況。

基質吸力的量測非屬本計畫預定工作，未納入計畫報告。

王委員國樑	
<p>1.建議第一、二章相關計畫緣起及目的、計畫工作項目等合併成第壹章前言，並包括計畫緣起、計畫目標、工作項目及內容、工作範圍、工作構想及流程、前期研究成果等節。</p>	<p>感謝委員的建議，已依據委員建議修改與整理第一章為前言，包括有計畫緣起與目的、計畫工作項目與工作流程圖，而前期研究成果由於內容繁多，另外整理放置於後續章節。</p>
<p>2.第三章光纖光柵感測器的內容介紹及篇幅似乎佔比例太大，建議儘量扼要，另就本計畫地電阻影像探測、鑽孔、分層水壓計等佈置之原則，應加強說明。</p>	<p>感謝委員的建議，已於期末報告中(2.6 節、2.8 節、3.6 節與 3.7 節)補充說明。</p>
<p>3.分層水壓計預計於新鑽孔內設計安裝至少 15 個光纖光柵水壓計之困難度頗大，分層與分層間之區隔如何確保，應注意其 QA 及 QC 的工作。另其代表性為何？亦請說明。</p>	<p>感謝委員的建議，本研究安裝 2 孔 FBG 水壓計，每一鑽孔內安裝 10 個 FBG 水壓計，總計安裝 20 個。每一組 FBG 水壓計間距為 5 米，採用特密管封層方法，將一組 50 米長之 PVC 管由孔口放置於孔底，然後回填粒料由 PVC 管</p>

	<p>倒入，並逐步將 PVC 管拉起與量測 PVC 管拉出高度，用以確保回填粒料之數量與位置。</p>
<p>4. 自動化量測與監測系統界面開發，建議未來能提供可能的警戒值設定，增加可能潛變的趨勢，並提供預警的效果。</p>	<p>感謝委員的建議，本計畫已經開發出自動化監測的顯示介面，將設立預警值的操作介面。而預警值的建立需要長時間與大量的數據收集與判讀，本計畫結束後，將進行相關量測設備的移交，建議由相關主管機關持續進行設備維護、數據採集與分析，並將協助相關主管機關量測至明年 4 月份。</p>
<p>5. 監測系統界面除含括光纖光柵水壓計之資料外，是否將含括以往埋設儀器量測之資料？</p>	<p>感謝委員的指正，現有的監測儀器與資料已經整合於北水局的自動化量測系統內。本計畫將依據北水局的需求，將量測結果儲存於工業電腦後，協請北水局來讀</p>

	取數據資料。
6.p.105 評估現地邊坡於深度 20~23 公尺處有疑似滑動痕跡，建議應將相關研判條件詳加說明。	感謝委員的建議，該數據是取自於 96 年地調所在義興電廠邊坡的研究報告，而滑動研判條件並非本計畫的工作項目，義興電廠邊坡相關的地質說明已整理於 2.8 節內。
郭科長耀程	
1.本報告執行情形應有摘要說明，以利掌握，請補列。	感謝委員建議，該補充執行說明已經補充於期中報告修定稿 p.1。
2.現地作業執行情形請確實更新，並將成果納入說明。	感謝委員的建議，現地鑽孔與水壓計安裝作業成果已納入與說明於期末報告 2.8 節、2.9 節、3.7 節、4.2 節與 4.3 節中。
3.北水局已經執行之地下水位、傾斜管及滲漏水量等觀測資料，請收集納入報告內說明，以利掌握邊坡現況，並作為未來校核新	感謝委員的建議，已經取得北水局 98 年度的觀測資料，已將與本計畫相關監測資料整理於期末報告 2.8 節說明。對於地下水位的

<p>增儀器精度及模式建立之參考。</p>	<p>資料，由於量測方法與原理的不同，所以並無法做為分佈式光纖光柵水壓計的儀器校核參考。</p>
<p>4. 現地鑽孔及儀器安裝應再加速辦理，以利有較充分觀測資料率定邊坡穩定模式參數。</p>	<p>感謝委員的建議，本計畫已經完成 FBG 水壓計的安裝，並將其應用於邊坡穩定分析模式中(請參見 4.3 節)。</p>
<p>5. 自動化監測系統未來將技術轉移由北水局運用，相關系統資料界面及交換方式，請洽北水局先行研商。</p>	<p>感謝委員建議，本計畫將於驗收完成後，將該設備轉移給北水局，目前已與北水局接洽中。</p>
<p>邱助理工程司士恩</p>	
<p>1. 本計畫目的為透過觀測資料蒐集，客觀研判邊坡滑動可能機制及續提後續改善工程建議，有關鑽孔位置之取舍攸關作業成敗，請於報告書內確實說明選點原則。</p>	<p>感謝委員的建議，鑽孔位置的決定已補充說明，請參見 2.6、2.8 節、3.6 與 3.7 節。</p>

<p>2.本計畫業已完成土壤試驗工作，有關材料分類及物理性質等資料，請補充。</p>	<p>感謝委員的建議，本計畫已於期末報告中將所有實驗數據整理放置於附錄二。</p>
<p>3.據簡報指出現地地下水位低，並說明鑽孔位置應可取得監測研判相關資料，惟若無法達預期，該如何提出工程改善事項，宜請預為提出因應對策。</p>	<p>感謝委員的建議，根據現有水位監測資料，一般時候水位高程位於地表下 30~40 米，本團隊鑽孔 2 孔，每一孔深度為 50 米，總鑽孔長度為 100 米(合約要求鑽孔深度為 50 米)。另外根據過去現場地質鑽探與監測結果，地層內 30~40 米以上為崩積層或破碎岩層，有可能發生滑動，以下為堅硬完整岩盤，故選擇安裝 FBG 水壓計深度為 50 米。</p>
<p>林副工程司正杰</p>	
<p>1.傍壓儀試驗非本計畫契約工作項目，本報告著重傍壓儀原理說明，未探討納入本計畫辦理之理</p>	<p>感謝委員的建議，關於傍壓儀的量測方法與原理說明於 2.9 節內。已於該章節內補充說明傍壓</p>

<p>由，以及後續邊坡穩定分析助益，建議後續加強說明，以利瞭解該試驗納入本計畫之目的。</p>	<p>儀的方法與助益。</p>
<p>結 論</p>	
<p>1.本計畫已經接近執行成果時間，請加緊趕辦已達成契約工作要求，並考量是否氣候因素等不可抗力因素影響執行進度，如有必要申請展期請依契約規定辦理。</p>	<p>感謝主席裁示，經檢討目前工作進度符合預定進度。</p>
<p>2.為利本計畫執行及相關成果呈現，請交大考量執行工作實需及本計畫期程，適時邀請本計畫審查委員現地瞭解及提供技術指導。</p>	<p>本計畫期末簡報預定在北區水資源局舉辦，將邀請委員至現地了解與提供技術指導。</p>
<p>3.本計畫期末報告審查時，請本署水利規畫試驗所派員協參加。</p>	<p>遵照辦理。</p>
<p>4.本計畫所設儀器後續移交北水</p>	<p>感謝委員建議，本計畫將於驗收</p>

<p>局之技術移轉及維護管理事宜，請交大儘速洽北水局研商後，於期末報告提出說明。</p>	<p>完成後，將該設備轉移給北水局，目前已與北水局接洽中。</p>
<p>5.本計畫期中報告原則認可，請依各與會委員及各單位代表所提意見辦理必要之補充或修正後送本署核備。</p>	<p>遵照辦理。</p>

附錄八 期末報告審查意見及辦理情形

附錄八 期末報告審查意見及辦理情形

許委員澤善	
期末報告審查意見	處理情形
1.由現場所展示之量測結果，得知本委託計畫範圍內之工作已符合計畫需要。	感謝委員的建議
2.由於利用分層地下水壓自動化監測，各鑽孔內資料隨深度之變化關係已趨於充分，但鑽孔數目是否充分，乃至於能使整個滑動剖面之水壓或變位量完整呈現，請檢討並提出具體建議。	感謝委員的建議，由於目前只有2組鑽孔，並無法充分呈現出整個滑動面水壓與變位量的變化，詳細的規畫與建議請參見附錄四。
3. 在水壓力隨深度增加而呈現不規則變化的情況下，如何應用量測結果至邊坡穩定分析中？	感謝委員的建議，請參見4.5節。

<p>4.利用三軸壓縮試驗所得強度參數，實際上代表試體受試驗條件下破壞面之剪力抵抗強度，這些破壞面是否與現地未來可能產生的滑動面相符，請檢討。</p>	<p>感謝委員的建議，傳統的三軸試驗是使用重模土壤進實驗，故破壞面可能未必與現地之狀況相符。有鑑於此，本計畫合約外，進行現地傍壓儀實驗，另外本計畫的主要目的是安裝光纖光柵水壓計與進行邊坡穩定分析，並未包含現地的滑動面研判。</p>
<p>5. 建議未來發展能像強震儀一樣，在強震中能確實紀錄水壓力或傾斜管之讀數，則應用價值將大幅提升。</p>	<p>感謝委員的建議，未來將朝向此方向發展。</p>
<p>賴委員典章</p>	
<p>1.P.4 圖 1.1 工作流程圖於文內未引述，請修正。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正，請參見 1.1 節。</p>

<p>2. P.62 步驟二：第五行「壓力隨時間變小時，則代表阻隔層未阻隔確實」，相對於圖 2.55(P.64)，請說明判定時間長短。</p>	<p>感謝委員的建議，一般封層若未阻隔確實時，加壓 300kPa(相當於 30 米水位高變化)會馬上導致壓力流失且電子式壓力表會產生變化，此次實驗室進行約 10000 分鐘的測試，證明封層效果。</p>
<p>3.P.70、71 是否將降雨資料列入比對，較清楚了解地下水是否有分層現象，以及降雨對地下水變化的關係。</p>	<p>感謝委員的建議，已經將降雨資料放入，請參考圖 2.60(a)、(b)</p>
<p>4.P.90 表 2.3 建議增列高程，以利比較。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正請參見表 2.3(將 NCTU-01 加上 329m，NCTU-02 加上 279 米)。</p>
<p>5.P.136 施測方式 Wenner 與 Pole-Pole，請補充說明電極的安</p>	<p>感謝委員的建議，已修正，請參見 3.7 節</p>

<p>排方式。</p>	
<p>6.P.131 第二段末行「藍色...」，如果圖用彩色則可，如果用黑白印製，則應以符號區分。</p>	<p>感謝委員的建議，每一份成果報告將附上資料光碟，於資料光碟中將以彩色呈現。</p>
<p>7.P.151 之地層材料參數，請與 P.181 表 1 實驗結果與岩心資料比對，並選定合適的數值。</p>	<p>感謝委員的建議，由於本計畫只有鑽孔 2 孔，並取崩積土(鑽孔上方 10 米)進行室內實驗，所以輸入參數是使用過去地調所的計畫結果來進行模擬與分析，其修正後如 4.5 節所示。</p>
<p>8.鑽探紀錄與照片建議列入附錄。</p>	<p>感謝委員的建議，如附錄三所示。</p>

<p>9.分層地下水壓自動化監測與降雨之詳細比對，有利於判定地下水層之流路，甚至滑動面之判定，值得進一步繼續研究，並請考量增加監測孔數，探討平面甚至三度空間滑動面與水流分布狀況，以利整治之規劃。</p>	<p>感謝委員的建議，監測孔數請參見附錄四。</p>
<p>10.本基地斜坡面曾受大漢溪之河階與土石流作用，再受河床下切及河階崩塌等作用，其所謂崩積層可能非順坡面均勻分佈，在探討地下水變化與穩定分析時，建議列入參考。</p>	<p>感謝委員的建議，由於本計畫目前只有鑽孔 2 孔安裝水壓計，並無大範圍監測，並無法考量非順坡面等的因素。</p>
<p>王委員國樑（書面意見）</p>	
<p>1. 摘要建議以節錄各章節重點或重要數據方式撰寫，並儘可能條列及圖表呈現。</p>	<p>感謝委員的建議，已經修正，請參考摘要。</p>
<p>2 建議補充英文摘要(abstract)。</p>	<p>感謝委員的建議，已補充英文摘要。</p>

<p>3.第壹章前言請補充計畫或工作範圍圖及前期規劃或研究扼要成果，較具完整性。</p>	<p>感謝委員的建議，為配合章節的完整性、連貫性與避免重複，工作範圍圖放置於 4.1 節。而前期規畫與研究成果篇幅眾多，整理成後放置於第二章。</p>
<p>4.第貳章光纖光柵感測器之篇幅似乎太多，並以之為章名似乎亦不妥適，建議第貳章起之各章章名，應以計畫工作項逐次撰寫較完整。</p>	<p>感謝委員的建議，因為部分委員為第一次參與光纖感測器相關計畫的審查，故第二章為整理過去的相關研究成果供委員參考。</p>
<p>5.P.85 圖 2.65 義興地區區域地質圖請標明義興壩之壩址，另建議部分圖示應以彩色呈現較妥適。</p>	<p>感謝委員的建議，每一份成果報告將附上資料光碟，於資料光碟中將以彩色呈現。</p>
<p>6. P.144 述及現場鑽探施作過程“將”安排 1 人，用語似乎是未來式，期末報告應已完成，請酌修。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正，請參見 4.1 節。</p>

<p>7. P.150 述及鑽孔土樣進行室內物性與三軸實驗，其結果整理如附錄二，似乎不妥，建議仍應將主要成果置於本文述明較妥適。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正，將附錄二放置於 4.3 節。</p>
<p>8. P.149 邊坡穩定安全係數雖大於 1，惟 1.1 的數值似乎仍存在較高風險，故對邊坡穩定安全應有較具體之建議對策。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正請參考 4.5 節。</p>
<p>9. 附錄七為期中報告審查意見，其欄位為委託服務建議書審查意見應為誤植，請修正。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正，請參考附錄七。</p>
<p>本署北水局鄭工程員友誠</p>	
<p>1. 使用手冊建議增加量測儀器操作手冊、如何校正及存檔格式說明書。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正，請參考附錄五。</p>
<p>2. 光纖監測畫面之參數、警戒值與簡訊發送設定係數修正等相關內容，建議加以說明。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正，請參考附錄五。</p>

<p>3.報告提到協助量測至 99 年 4 月份，是否契約規定，假若儀器有故障由誰負責修復，此部份建請說明。</p>	<p>感謝委員的建議，本計畫執行至 98 年 12 月 31 日，明年度的協助量測為交通大學團隊義務協助，若有儀器故障，交通大學團隊將協助排除故障。</p>
<p>4.建議於硬體設備移交前，應對本局相關人員作一完整教育訓練，如簡報所提 FBG 水壓計安裝 SOP 及軟體操作手冊等相關文件，宜再經本局相關人員意見加以編修為妥。</p>	<p>感謝委員的建議，FBG 水壓計 SOP 與軟體操作手冊為本計畫外製作，本年度計畫也並未包括教育訓練，其計畫執行時間為至 98 年 12 月 31 日。但本工作團隊為使得光纖感測器能夠長期發揮功效與進行邊坡穩定分析，願意配合北水局進行相關完整的教育訓練與文件的修改，將配合北水局所提出的相關需求。</p>
<p>本署水試所李副工程司明順（書面意見）</p>	
<p>1.建議第一章增加義興電廠位置圖、邊坡滑動與計畫安裝監測系</p>	<p>感謝委員的建議，為配合章節的完整性、連貫性與避免重複，其</p>

<p>統位置圖及相關照片，以利對事件與計畫之瞭解。</p>	<p>相關圖放置於 4.1 節與說明。</p>
<p>2.”摘要”建議依章節重點或重要成果摘錄呈現。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正摘要。</p>
<p>3.”結論”請將各工作項目完成後或各監測及分析成果獲致之結論呈現;”建議”請補充運用本監測系統應配合之週邊設備、人員訓練與使用儀器應注意事項等，以及本年度不足完成尚待下階段繼續補充之工作。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正結論與建議。</p>
<p>4.P.2 本計畫工作項目 1.現地資料收集與整理均未見相關成果，請補充。</p>	<p>感謝委員的建議，P.2 為計畫的工作項目，相關現地資料收集與整理於 2.8、3.6 與 4.3 節。</p>
<p>5.P.97、99、145 圖 2-66、2-68、3-3 放大，圖 3-3 僅見 1 條測線，圖 4-4 看不出藍色虛線之地下水</p>	<p>感謝委員的建議，每一份成果報告將附上資料光碟，於資料光碟中將以彩色呈現。</p>

<p>面線，請確認。</p>	
<p>6.工作項目 6 邊坡穩定分析，述及依據地電阻影像探測及水壓量測結果進行，然 P.149 第 4.3 節利用 SLOPE/W 程式進行義興電廠邊坡穩定分析，似僅取用 NCTU-02 水壓觀測資料，請說明。另邊坡穩定分析之過程，建請詳列(或於附錄中)呈現。</p>	<p>感謝委員的建議，由於本計畫時程較短，且另一孔 NCTU-01 加做計畫外的 PMT 實驗，所以在進行邊坡穩定分析時只有 NCTU-02 的數據可做參考。邊坡穩定的操作由於版權的問題(軟體廠商的著作權)，無法詳細敘述於報告中。</p>
<p>本署水源經營組郭科長耀程</p>	
<p>1.圖 2.5 顯示感測元件結構示意，惟如以軸承控制光纖變位方向，則是否限制量測邊坡雙向</p>	<p>感謝委員的建議，光纖光柵測傾儀或光纖光柵偏斜儀可以用 90 度轉接塊的方式，量測兩個方向</p>

<p>(X、Y)滑動量測結果，建請補充說明。</p>	<p>(X、Y)方向。</p>
<p>2.報告內諸多圖示及系統界面仍使用英文，為利推廣建議儘量中文化(如圖 2.18~2.20)。另本報告應係水利署委辦成果，未來定稿請以本署立場敘述(如以本執行團隊、工作團隊表示均不宜)。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正使用水利署立場敘述，圖 2.18~2.20 為引用國外參考文獻，並無原始檔可修正。</p>
<p>3.第 58 頁、表 2.2 傳統及 FBG 水壓計比較，建議盡量增列精度比較說明。</p>	<p>感謝委員建議，已修正，請參見 2.5 節。</p>
<p>4.第 70 頁及 71 頁，圖 2.59 及圖 2.60(a)為阿里山量測結果，請於標題述明，以免誤解。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正標題，請參見圖 2.60(a)、(b)。</p>
<p>5.圖 2.73、NCTU-2 之水壓計量測結果，壓力變化高達 160kPa(50m 深)，其原因建請釐清說明。</p>	<p>感謝委員的建議，NCTU-02 的變化高達 160kPa，有可能是地下具有棲止水所造成，建議長時間觀</p>

	<p>測後進行分析與判斷。</p>
<p>6.第 140~141 頁，地電阻探測成果請與地下水壓分佈量測比對分析，以了解實況及儀器量測值合理性。另建議地電阻成果以彩色列印，以利區別。</p>	<p>感謝委員的建議，的電阻資料只能概略判斷量測當時地下水位高度，並無法判斷水壓大小，且會受限的地形與地物的影響，由量測結果推估算地下水位至約在地表下 35~37 米處。另外每一份成果報告將附上資料光碟，於資料光碟中將以彩色呈現。</p>
<p>7.北水局之長期觀測資料，雖有收集惟但僅作部分文字描述，建議就本計畫觀測成果與北水局資料比對、圖析，尤其因對邊坡穩定予明確判斷，以利提高本計畫成果合理性。</p>	<p>感謝委員的建議，本計畫執行時間較短，目前只有 12 月份的光纖光柵水壓計量測讀數，將於 99 年 1 月取得北水局 12 月份的量測報表並進行分析比較，並將比較結果提供北水局參考。</p>

<p>8.目前邊坡穩定分析之 SF=1.1，建議提供理論觀測預警值，以利北水局接管時，如有接近警戒值狀況可有效因應妥處。</p>	<p>感謝委員的建議，由於所擷取到的水壓變化資料較少，所以此分析為提供未來配合分佈式水壓的分析流程與方法，為一概略分析結果，且修正如 4.5 節所示。警戒值的提供需長時間現地數據收集與分析後可提出。</p>
<p>9.各次會議回應意見請重新修正，並以最後成果明確說明，以利成果報告符合實際。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正。</p>
<p>本署水源經營組邱助理工程司士恩</p>	
<p>1.鑽孔作業既為全程取樣，室內土壤物性實驗建請補充透水係數資料，供地質研判參考。</p>	<p>感謝委員的建議透水係數資料並非計畫工作項目之一，且已有過去相關資料(地調所報告等)可供查詢。</p>
<p>2.依簡報資料結論之說明，模擬水壓分佈情況下邊坡「可降至」F.S.=1.1 情況(報告指出邊坡穩定</p>	<p>感謝委員的建議，已經修正如 4.5 節所示。</p>

<p>F.S.=1.1 宜請統一文字說明)，其條件係為枯水狀況，似小於規範 F.S.=1.5 規定，請重新檢核。</p>	
<p>3.所述協助主管機關量測工作期限為至明年 4 月份，建請配合明年汛期持續觀測至明年底。</p>	<p>感謝委員的建議，本計畫執行至 98 年 12 月 31 日，交通大學團隊願意義務協助北水局進行量測至 99 年 4 月，但是礙於人力與經費之關係，本工作團隊無法協助觀測至 99 年底。</p>
<p>4.水壓變化情形與地震發生具有關聯性，建請設定觀測功能以利資料收集。</p>	<p>感謝委員的建議，擷取系統為每 5 分鐘紀錄一筆資料，將可以量測到水壓與地震變化的關係。</p>
<p>本署水源經營組林副工程司正杰</p>	
<p>1. P.136 地電阻使用兩種方法施測（Wenner 法及 Pole-Pole 法），其使用上適用條件為何，有何差</p>	<p>感謝委員的建議，請參見 3.7 節。</p>

<p>異？為何施測結果似乎有落差？</p> <p>何者較為精確？施測結果係對兩圖(圖 3.7 及 3.8)分別說明，建議對兩方式研判結果作一綜合研判。</p>	
<p>2. 邊坡穩定分析工作中，依 P.150 分析結果其邊坡穩定安全係數為 1.1，惟計畫工作項目提及除進行邊坡穩定分析，需評估現有邊坡穩定方法及提出改進方向，建請補充。</p>	<p>感謝委員的建議，請參見 4.5 節。</p>
<p>結 論</p>	
<p>1.鑽探紀錄與照片請納入成果報告。</p>	<p>感謝委員的建議，已補充照片於附錄三中。</p>

<p>2.邊坡各地層材料參數設定及安定分析結果，請再檢討說明，並補充評估現有邊坡穩定方法及提出改進方向。</p>	<p>感謝委員的建議，已修正於 4.5 節中。而邊坡穩定安全係數分析係數 $F.S = 1.33$，有別於期末報告書所分析結果 $F.S = 1.1$ 之差異，為重新修正模擬之邊界條件，其邊界條件修正為依據現場所安裝之水壓觀測井資料，輸入模擬程式重新率定土壤輸入參數，所得知結果。</p>
<p>3.本計畫所設儀器後續移交北水局，相關技術移轉及維護管理等事宜，請補充說明。</p>	<p>感謝委員的建議，關於儀器設備技術說明可參照本計畫書附錄五之內容，因本計畫執行至 98 年 12 月 31 日，建議儀器後續維護管理由相關主管機關持續進行設備維護、數據採集與分析，而交通大學團隊將協助相關主管機關量測至明年 4 月份。</p>
<p>4.本計畫期末報告原則認可，請依</p>	<p>感謝委員的建議。</p>

<p>各與會委員及各單位代表所提意見辦理之必要之補充或修正，並於 98 年 12 月 25 日前提送本署。</p>	
<p>5.義興電廠壓力鋼管及邊坡之安全，請北水局持續加強監測作業，並將改善策略納入水庫安全評估審慎檢討辦理。</p>	<p>感謝委員的建議。</p>

國家圖書館出版品預行編目資料

義興電廠邊坡分層地下水壓自動化監測應用之探討 =
A feasibility study on the automated distributive pore water

Pressure monitoring at the Yi-Shin power plant slope /

國立交通大學編著. -- 臺北市：經濟部

水利署，2009.12

面；公分

參考書目：面

ISBN 978-986-02-1545-8 (平裝)

1. 地下水 2. 環境監測 3. 光纖感測

443.86

98023676

義興電廠邊坡分層地下水壓自動化監測應用之探討

出版機關：經濟部水利署 台中辦公室

編著者：國立交通大學

地址：台中市黎明路二段 501 號

電話：(04) 22501250

傳真：(04) 22501628

網址：<http://www.wra.gov.tw>

出版年月：中華民國九十八年十二月

GPN 1009804037

ISBN 978-986-02-1545-8 (平裝)

版權所有 翻印必究