



RRPG92040843 (189.P)

MOTC-STAO-92-02

道路邊坡高效能監測系統研發 與崩塌預警基準制訂

著者：黃安斌、林志平

執行單位：國立交通大學

委託機關：交通部

中華民國九十二年十二月三十一日

本報告為研究案並不代表交通部意見

道路邊坡高效能監測系統研發與崩塌預警基準制訂

著 者：黃安斌、林志平

出版機關：交通部

地 址：台北市長沙街一段二號

網 址：www.motc.gov.tw/hypage.cgi?HYPAGE=business_7.htm

電 話：(02)23492900

出版年月：中華民國九十二年十二月

印 刷 者：鴻友股份有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 120 冊

定 價：500 元

本書同時登載於交通部網站

展售處：三民書局 台北市重慶南路一段 61 號 2 樓 電話：23617511

台北市復興北路 386 號 電話：25006600

GPN：1009205292 (平裝)

交通部科技顧問室委託研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：道路邊坡高效能監測系統研發與崩塌預警基準制訂			
國際標準書號(或叢刊書)		政府出版品統一編號	
		1009205292	
		MOTC-STAO-92-02	
主管：賈玉輝 聯絡電話：02-23492860 傳真號碼：02-23122476 e-mail：yh_jea@motc.gov.tw 承辦人：許書王 聯絡電話：02-23492861 傳真號碼：02-23122476 e-mail：sy_hsu@motc.gov.tw		研究單位：交通大學防災中心 計畫主持人：黃安斌 聯絡電話：03-5722803 傳真號碼：03-5734116 e-mail：abhuang@mail.nctu.edu.tw 研究人員：林志平 通信地址：新竹市大學路 1001 號 聯絡電話：03-5712121-54910	
		其他參與合作之研究團隊	
		研究期間	
		92年2月~ 92年12月	
		研究經費	
		壹佰捌拾萬元整	
關鍵詞：道路邊坡，光纖監測，TDR，預警基準，崩塌			
摘要：台灣多丘陵與山地，鐵公路系統大多位於山區。台灣山區平均年降雨量高，每每大雨過後有很多路段都出現嚴重坍方或路基流失而造成阻斷，直接影響道路使用者之安全。本二年期研究計畫之主要目的包括：(1) 提升坡地監測系統之效能；(2) 使監測成果能充分反應監測坡地之實際狀況；(3) 監測系統之經濟化以及(4) 配合監測或監視系統訂定適當之預警管理基準。第一年計畫執行期間已研發完成能夠做地層移動監測之光纖光柵彎曲變形監測管以及一系列使用 TDR 技術之監測系統包括地層錯動，水位監測，線性伸張以及雨量計等監測儀器。預警基準之初稿包括道路邊坡崩塌分類、預警基準案例、預警基準訂定方法等工作項目也於第一年完成。第二年之研究執行期間為 92 年 2 月至 12 月，其工作項目包括：(1) 提升坡地監測系統之效能；(2) 使監測成果能充分反應監測坡地之實際狀況；(3) 監測系統之經濟化；(4) 配合監測或監視系統訂定適當之預警基準。執行團隊於新竹縣湖口與嘉義縣台 18 線五彎仔路段建立試驗站安裝光纖光柵與 TDR 地層移動監測系統進行實地測試，邀請專家學者進行審查，完成道路邊坡預警準則，於 92/12/11、12 日舉行講習會，介紹高效能邊坡監測系統、崩塌預警基準制訂標準作業方法以及本計畫所研發監測系統之實地操作。本報告詳述第二年研究工作之背景，內容及其成果。			
出版日期	頁數	工本費	本出版品取得方式
92年12月	200	500	凡屬機密性出版品均不對外公開，普通性出版品；公營、公益機關團體及學校，由本部依業務性質函送參考，其他需要者可函洽本部免費贈閱，或逕進入 www.motc.gov.tw 之科技研究項下下載。
機密等級： <input type="checkbox"/> 限閱 <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 (解密【限】條件： <input type="checkbox"/> 年 月 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密) <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
SCIENCE & TECHNOLOGY ADVISORS OFFICE
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE : Developments of advanced highway slope stability monitoring technologies and guidelines of warning systems			
ISBN(OR ISSN)		GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	PROJECT NUMBER
		1009205292	MOTC-STAO-92-02
DIRECTOR GENERAL : YU-HUEI JEA HONE : 02-23492860 FAX : 02-23122476 E-MAIL : yh_jea@motc.gov.tw SPONSOR STAFF : S.W. Hsu. PHONE : 02-23492861 FAX : 02-23122476 E-MAIL : sy_hsu@motc.gov.tw		RESEARCH AGENCY : PRINCIPAL INVESTIGATOR : An-Bin Huang PHONE : 03-5722803 FAX : 03-5734116 E-MAIL : abhuang@mail.nctu.edu.tw PROJECT STAFF : C.P. Lin, ADDRESS : 1001 Ta Hsueh Rd. Hsin Chu, TAIWAN PHONE : 03-5712121-54910	
PROJECT PERIOD	February, 2003 – December, 2003	PROJECT BUDGET	NT\$1,800,000
KEY WORDS : highway slopes, fiber optic sensors, TDR, warning mechanism, landslide			
ABSTRACT : A significant part of Taiwan is covered by mountains, most of the roadway systems are located in hilly areas. The instability of the roadway slopes directly affects the safety of the highway users. The objectives of this two-year research project are to: (1) advance our capabilities in slope stability monitoring; (2) assure that the instrumentation data substantially reflect the actual conditions of the slope; (3) improve cost effectiveness of monitoring system; and (4) establish guidelines in developing a warning system that incorporates the instrumentation system. A ground movement monitoring system using fiber optic Bragg grating sensors and a series of TDR based sensor devices which included a ground disruption movement sensor, an extensometer, a ground water level sensor, and a rainfall metering device have been developed in the first year. The warning system development which included classification of landslides types, case histories on the use of a warning system, methodology of establishing a warning system have also been completed in the first year. The execution of the second-year project started in February and ended in December of 2002. Major tasks include: (1) enhancement of the capabilities of the monitoring systems; (2) improve the monitoring system's capability to reflect the slope conditions; (3) cost optimization of the new monitoring systems; and (4) development of guidelines for the establishment of warning systems. The project team has established a test site at Hukou, Hsinchu and Five-turns on Rt. 18 in Chiayi, where the FBG and TDR monitoring systems developed in this project were installed and tested in the field. Scholars and experts were invited to review the contents of the guidelines of the warning systems. A two-day workshop was held from December 11 to 12 to discuss details of the technologies developed in this project and offered the participants to have a hands-on experience in the use of the new monitoring systems. This report describes details of the background, contents and accomplishments of the research in the second year.			
DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
2003/12	200	NT\$500	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications			



目 錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
目 錄.....	I
表目錄.....	III
圖目錄.....	III
精簡報告.....	VIII
一、前言.....	1
1.1 計畫目的.....	2
1.2 計畫工作項目與內容.....	2
二、監測技術評估.....	6
2.1 新近發展之光纖監測系統或工具.....	6
2.1.1 BOTDR 在土壤含水量分佈監測之應用.....	6
2.1.2 BOTDR 變形量測.....	12
2.2 TDR 監測技術.....	18
2.2.1 TDR 監測基本原理.....	19
2.2.2 TDR 錯動變形監測技術.....	22
2.2.3 TDR 水位監測技術.....	25
三、現地監測與量測結果.....	33
3.1 湖口台地之地形與區域地質概述.....	33
3.2 監測設備現地安裝.....	34
3.2.1 湖口台地試驗站.....	34
3.2.2 阿里山五彎仔試驗站.....	43
3.3 光纖監測結果分析.....	45
3.3.1 湖口台地試驗站結果分析.....	45
3.3.2 阿里山五彎仔試驗站結果分析.....	54

3.4 TDR 監測結果分析	56
3.4.1 湖口試驗站錯動變形監測結果	56
3.4.2 湖口監測站水壓監測結果	58
3.4.3 阿里山五彎仔監測站錯動變形監測結果	61
四、監測技術改善與研發	64
4.1 光纖光柵扭曲儀之改良	64
4.2 TDR 監測技術改善與系統研發	69
4.2.1 TDR 地層錯動變形監測技術之改良	70
4.2.2 TDR 地下水位（水壓）監測改良	82
4.2.3 TDR 變位監測技術之研發	98
4.2.4 TDR 雨量計之研發	104
4.2.5 TDR 邊坡監測系統整合	106
五、預警基準座談會與推廣講習會	123
5.1 預警基準座談會	123
5.2 推廣講習會	123
六、結論	125
七、參考文獻	129
附錄 A 各次會議意見處理情形	A-1~A-7
附錄 B 道路邊坡崩塌預警基準草案	B-1~B-23
附錄 C 預警基準訂定範例	C-1~C-2

表目錄

表 3.1 試驗地點之地層概況	36
表 3.2 湖口地區光纖光柵應變管之光纖光柵分佈情況	39
表 5.1 講習會議程	124
表 6.1 自動化邊坡穩定位移監測系統之比較	127
表 6.2 自動化邊坡穩定位移監測系統之成本分析	128

圖目錄

圖 1.1 92 年預定進度甘梯圖	5
圖 2.1 感測器示意圖	10
圖 2.2 試驗設備配置圖	10
圖 2.3 2188 分鐘後 Brillouin 頻率最大飄移量圖	11
圖 2.4 Brillouin 頻率、含水量與時間之關係圖	11
圖 2.5 聚合物膨脹、收縮時 Brillouin 頻率飄移與時間的關係	12
圖 2.6 PVC 管量測架構圖	14
圖 2.7 光纖黏貼位置與操作架構圖	15
圖 2.8 光纖受拉位置判斷圖	15
圖 2.9 實際位移量與實驗量測積分結果比較圖	17
圖 2.10 時域反射儀之基本架構	22
圖 2.11 不同之阻抗不連續所產生之反射波形	22
圖 2.12 TDR 變形監測之反射訊號與原理	24
圖 2.13 地下水水位量測之 TDR 反射訊號	27
圖 2.14 平行導體傳輸線電磁場之分佈與影響權重示意圖	29
圖 2.15 同軸纜線內電磁場之傳遞與影響權重示意圖	30
圖 2.16 TDR 水位監測之訊號分析	30
圖 3.1 試驗站邊坡滑動示意圖	34

圖 3.2 工址平面位置示意圖	35
圖 3.3 鑽孔位置圖	36
圖 3.4 湖口試驗場地概況	36
圖 3.5 岩心	37
圖 3.6 30m 長 FBG-IPi 之組合示意圖.....	38
圖 3.7 FBG-IPi 實體照片.....	38
圖 3.8 傾斜管安裝情形	39
圖 3.9 傾斜管孔口保護	40
圖 3.10 TDR 變形纜線埋設過程.....	40
圖 3.11 水壓計安裝情形.....	41
圖 3.12 以濃縮皂土粒封層	41
圖 3.13 回填粗粒料	42
圖 3.14 TDR 水壓計安裝情形.....	42
圖 3.15 TDR 水壓計測試情形.....	43
圖 3.16 I1 孔監測儀器配置	44
圖 3.17 佈設孔位平面示意圖	44
圖 3.18 佈設孔位剖面示意圖	45
圖 3.19(a) 光纖光柵應變管連接.....	46
圖 3.19(b) 固定光纖纜線.....	47
圖 3.19(c) 灌漿	47
圖 3.19(d) 調整光纖光柵應變管方向.....	48
圖 3.19(e) 光纖光柵應變管安裝完成.....	48
圖 3.20 IP 傾斜儀結果	49
圖 3.21(a) 光纖光柵應變管讀數(上坡面).....	50
圖 3.21(b) 光纖光柵應變管讀數(下坡面).....	51

圖 3.21(c) 光纖光柵應變管讀數(上坡面).....	52
圖 3.21(d) 光纖光柵應變管讀數(下坡面).....	53
圖 3.22 安裝前之改良型 FBG-IPI	55
圖 3.23 改良型 FBG-IPI 之安裝	55
圖 3.24 10/25 至 11/18 根據 FBG 所量得位移	56
圖 3.25 湖口現地試驗之原始變形資料	57
圖 3.26 湖口現地試驗之相對變形資料	58
圖 3.27 湖口地質及水位、水壓監測位置示意圖	59
圖 3.28 湖口 TDR 水壓計安裝示意圖	60
圖 3.29 TDR No 3(R2)、No 4(B2)孔位與捲尺量測比較(11/17).....	60
圖 3.30 傳統水壓計(R3) TDR 與捲尺量測比較	61
圖 3.31 P1 孔位 TDR 感測器長度與反射係數關係	62
圖 3.32 P1 孔位反射係數之差異	62
圖 3.33 I1 孔位 TDR 感測器長度與反射係數關係	63
圖 3.34 I1 孔位反射係數之差異	63
圖 4.1 改良式扭曲儀設計圖	67
圖 4.2 改良式扭曲儀波實體照片	68
圖 4.3 改良式扭曲儀波長改變量與側向位移關係圖	68
圖 4.4 改良式扭曲儀原理推導圖	69
圖 4.5 TDR 邊坡監測系統.....	70
圖 4.6 TDR 錯動變形監測波形分析	76
圖 4.7 同軸電纜壓痕變形試驗方法示意圖	77
圖 4.8 TDR 變形監測之反射訊號與原理	77
圖 4.9 壓痕變形寬度固定深度相異之波形	78
圖 4.10 壓痕變形深度固定寬度相異之波形不一致表現.....	78

圖 4.11 反射係數與壓痕深度寬度之關係	79
圖 4.12 阻抗長度數值模型元素示意圖	79
圖 4.13 TDR 錯動變形監測波形模擬之等值電路模式	79
圖 4.14 TDR 錯動變形監測波形模擬之流程圖	80
圖 4.15 壓痕處波形模擬反算波形結果	80
圖 4.16 阻抗長度數值模型反算結果	81
圖 4.17 傳輸纜線於地層錯動下之破壞示意圖	81
圖 4.18 剪動剪力標定盒之大型直剪試驗機	82
圖 4.19 剪力標定盒裝置	82
圖 4.20 變形傳輸纜線之長度標記	82
圖 4.21 空間影響權重圖	84
圖 4.22 水位觀測井之水位傳感器	85
圖 4.23 各式感測器之比較	86
圖 4.24 不同延長線之 TDR 波形比較	88
圖 4.25 等間距之 TDR 負反射波形	89
圖 4.26 水位高度與 ΔN 之關係	89
圖 4.27 定義參考點之示意圖	90
圖 4.28 感測器外圍摺痕	90
圖 4.29 感測纜線摺痕與 TDR 波形之比對	91
圖 4.30 水位高度與摺痕位置圖	91
圖 4.31 水位觀測感測器底端設計圖	94
圖 4.32 中心固定器設計圖	95
圖 4.33 水位觀測井設置示意圖	95
圖 4.34 TDR 式立管水壓計之設計圖	96
圖 4.35 TDR 開口立管式水壓傳感器安裝示意圖	96

圖 4.36 同時量測水位與導電度之感測器與 TDR 反射波形示意圖 ...	97
圖 4.37 TDR 相對變位感測器之設計概念圖	100
圖 4.38 TDR 伸縮計.....	101
圖 4.39 TDR 伸縮計之波形分析.....	101
圖 4.40 TDR 伸縮計之標定.....	102
圖 4.41 TDR 伸縮計之標定結果（新方法）	102
圖 4.42 TDR 伸縮計之標定結果（切線法）	103
圖 4.43 纜線長度對於 TDR 伸縮計影響	104
圖 4.44 TDR 雨量計之設計詳圖.....	106
圖 4.45 TDR 雨量計之 IC 版設計圖.....	106
圖 4.46 現地邊坡監測系統	107
圖 4.47 TDR 監測系統連結示意圖.....	110
圖 4.48 資料擷取系統	111
圖 4.49 Datalogger 監測程式部分片段	112
圖 4.50 Raw data 分類計算及置入資料庫過程示意圖	113
圖 4.51 TDR 網域與網際網路相關示意圖	114
圖 4.52 『TDR 邊坡資訊自動化監測系統』入口	115
圖 4.53 TDR 遠端監控程式身份驗證介面	116
圖 4.54 TDR 遠端監測程式使用介面	118
圖 4.55 TDR 水位監測文字介面.....	121
圖 4.56 TDR 水位歷史曲線變化圖.....	121
圖 4.57 TDR 變形監測文字介面.....	121
圖 4.58 TDR 變形感測器反射波形圖	122
圖 5.1 講習會情況（1）	123
圖 5.2 講習會情況（2）	124

精簡報告

台灣多丘陵與山地，鐵公路系統大多位於山區。然而，台灣山區平均年降雨量高，每每大雨過後有很多路段都出現嚴重坍方或路基流失而造成阻斷。因此，山區道路邊坡的不穩定，直接影響道路使用者之安全。關於邊坡之整治，過去幾年之研究已提供許多重要之政策研擬參考方向，目前仍有許多重要之研究案正進行中或準備進行。然而，許多重要路段，或一再發生邊坡崩塌災害、或已有災害發生之潛能或徵兆、或因其重要性而有必要長期監控邊坡安全，均已設置或有必要設置邊坡安全監測系統，透過實測加以分析、研判並提供作為道路管理者之重要參考。監測系統實測物理量提供作為防災之參考，道路邊坡之安全監測涉及三個環節：（1）確保安全監測所得之物理量為合宜之參考物理量；（2）妥善進行監測所得物理量之詮釋；與（3）訂定合宜之預警基準應用於管理層次。結合參考物理量、物理量之詮釋及預警基準，道路防災管理方能落實。本二年期研究計畫之主要目的包括：（1）提升坡地監測系統之效能；（2）使監測成果能充分反應監測坡地之實際狀況；（3）監測系統之經濟化以及（4）配合監測或監視系統訂定適當之預警管理基準。

第一年計畫執行期間已研發完成能夠做地層移動監測之光纖光柵彎曲變形監測管以及一系列使用 TDR 技術之監測系統包括地層錯動、水位監測、線性伸張及雨量計等監測儀器。預警基準之初稿包括道路邊坡崩塌分類、預警基準案例、預警基準訂定方法等工作項目也於第一年完成。第二年之研究執行期間為 92 年 2 月至 12 月，其工作項目包括：（1）提升坡地監測系統之效能；（2）使監測成果能充分反應監測坡地之實際狀況；（3）監測系統之經濟化；（4）配合監測或監視系統訂定適當之預警基準。執行團隊於新竹縣湖

口與嘉義縣台 18 線五彎仔路段建立試驗站安裝光纖光柵與 TDR 地層移動監測系統進行實地測試，邀請專家學者進行審查，完成道路邊坡預警準則，於 92/12/11、12 日舉行講習會，介紹高效能邊坡監測系統、崩塌預警基準制訂標準作業方法以及本計畫所研發監測系統之實地操作。

邊坡之安全監測常包括變形與水壓等物理量之量測，傳統監測之方法，需人工定時施測並擷取資料，效率與經濟效益不彰。近年來自動化監測系統逐漸受到重視，但自動化監測系統之價格昂貴、且儀器設備容易故障。光纖感測(Fiber Optic Sensor, FOS)和時域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)使用上孔(Up-hole)電子儀器，不容易故障且方便維修。當光纖受應力或溫度改變而產生應變時對於通過之光束的特性產生影響。FOS 就是利用此特性之改變來做監測。光纖一般的直徑約在 $125\ \mu\text{m}$ 左右，其主要成份是矽(silica)，它為非金屬，不易腐蝕或改變其性質。FOS 之感測器與訊號傳遞，如果設計方法適當，可以使用同一介質也就是同一條光纖，因此所佔體積甚小。時域反射儀是使用同軸電纜發射電磁波進行地層內部之監測。同軸電纜兼具資料之傳輸與監測感測器之功能，使用數位化方式進行資料之擷取，容易自動化與遠端即時監測。而更重要的是，這兩種監測方法都具備多種監測功能，可使用同樣之電子儀器及多工器同時進行多點，分佈式之監測，可有效地建立高效率且經濟之監測系統。光纖感測有高靈敏度之優點但是其應變範圍有限，TDR 之優缺點則與光纖有互補之關係。使用 TDR 監測地層錯動可以直至 TDR 電纜被拉斷為止，但 TDR 之靈敏度遠低於光纖感測器同時 TDR 缺乏地層錯動方向之監測能力。因此，同時發展光纖與 TDR 之地層安全監測系統以充分發揮此兩種系統之互補功能。

本研究已按照規劃之進度完成地層光纖光柵扭曲儀以及一系列 TDR 監測系統硬體在湖口及阿里山五彎仔試驗站測試之觀察，同時舉辦預警基準草案之專家座談，並整理列出傳統 IPI、FBG 及 TDR 等系統比較。其獲得結論大致如下：

- (1) 光纖光柵在光纖通訊中原本之目的是濾波以及作為波長分段之工具 (wave length division multiplexing)。如果將光纖光柵作為應變感測器，其製作規格與方法必須做相當之修改。湖口試驗站所使用之光纖光柵為製造廠商第一次以應變感測器之規格製作光纖光柵，這可能是其穩定度不理想之最大原因。其後所供應之光纖光柵應變感測器品質已大有改善。
- (2) 湖口試驗站使用 FBG-IPI 之經驗也顯示，若需達到本儀器之功能，所使用之光纖光柵掃瞄分析儀其解析度必須在 $\pm 0.1\text{pm}$ 之內，其長期之穩定度 (讀數變化量) 必須在 $\pm 1\text{pm}$ 之內。或者，可以從 FBG-IPI 之設計著手以加強扭曲儀讀數之放大效應，例如使用半徑較大之軟管或以應變集中的方法來抵銷光纖光柵掃瞄分析儀讀數解析度不足之缺點。扭曲儀如果將光纖光柵黏貼在一連續之塑膠管上，安裝時容易使光纖斷裂，研究團隊基於以上之考量已完成扭曲儀之改良，以及改良形扭曲儀之室內標定。
- (3) 阿里山所改使用之良型 FBG-IPI 安裝簡便，過程中沒有光柵之損壞，實用性極高。如果經與其他監測結果確認於 10/25 至 11/18 間確實沒有發生明顯之地層移動，即可以證明此一系統也同時具有穩定性。對於監測技術之提升將有極大之助益。
- (4) 本研究主要目的之一是利用 TDR 建立一經濟、穩定、高效率之邊坡監測系統，一般邊坡監測之物理量常包括地表位移、地

層變形、地下水位(孔隙水壓)、降雨量等。TDR 錯動變形與地下水位監測仍有許多值得改進的地方，本研究針對邊坡監測，改良現有錯動變形與水壓量測技術，並新開發 TDR 變位計及雨量計，使得 TDR 監測系統具備多種邊坡所需之監測功能，可使用同一電子儀器及多工器同時進行多點位與多功能之監測。此外，本研究亦進行監測系統整合與軟體開發，可同時整合 TDR 感測器及傳統監測儀器，並結合自動資料擷取系統、無線通訊、資料庫、網際網路、行動簡訊、伺服器等科技建立智慧型 TDR 資訊自動化系統，如配合良好的規劃設計，可有效地建立穩定、高效率且經濟之山坡地監測系統。

在未來的研究中，本研究團隊除了將進一步評估與改良本計畫所研發之監測系統外，也將進行軟硬體系統之整合，提出將新研發監測系統與崩塌預警基準機制整合之架構方案與實例。

一、前言

台灣多丘陵與山地，鐵公路系統包括鐵路、高速鐵路以及國道、省道、縣道及鄉道，甚至許多重要之產業道路均位於山區；因路網連結以及觀光發展，山區道路的使用日益頻繁。然而，台灣山區平均年降雨量高，加上九二一地震對山坡嚴重傷害，每當大雨過後，很多路段都出現嚴重坍方或路基流失而造成交通阻斷。因此，山區道路邊坡的不穩定，不但造成社會成本嚴重損失，更直接影響道路使用者之安全。因此，邊坡整治以及有效率之災修、搶通成為道路管理者最重視的一環。

關於邊坡之整治，過去幾年之研究已提供許多重要之政策研擬參考方向，目前仍有許多重要之研究案正進行中或準備進行。然而，許多重要路段，或一再發生邊坡崩塌災害、或已有災害發生之危險或徵兆、或因其重要性而有必要長期監控邊坡安全，均已設置或有必要設置邊坡安全監測系統，透過實測加以分析、研判並提供做為道路管理者之重要參考。監測系統實測物理量提供做為防災之參考，道路邊坡安全監測涉及三個環節：（1）確保安全監測所得之物理量為合宜之參考物理量（包括監測設備種類之選擇、正確且精準設置監測系統、量測之標準作業程序、有效之資料儲存與傳輸選擇）；（2）妥善進行監測所得物理量之詮釋（監測資料之分析及透過經驗或學理分析後之資料解釋）；（3）訂定合宜之預警基準應用於管理層次（工程施工、維護或道路行車管制等管理措施）。結合參考物理量、物理量之詮釋及預警基準，道路防災管理方能落實。本二年期研究計畫涵蓋上述重要工作所面臨之問題，因此實有其重要性與急迫性。

1.1 計畫目的

本研究計畫之主要目的包括以下四項：

- (1) 提升坡地監測系統之效能；
- (2) 使監測成果能充分反應監測坡地之實際狀況；
- (3) 監測系統之經濟化；
- (4) 配合監測或監視系統訂定適當之預警基準。

1.2 計畫工作項目與內容

圖 1.1 展示本年度（92 年）計畫之甘梯圖，研究團隊在此二年期計畫中，第一年（91 年）完成的工作項目及本年度（92 年）應完成之工作項目敘述如下：

(1) 第一年完成的工作項目及成果：

(A) 文獻蒐集與整理

蒐集與整理因地震、颱風、豪雨所造成之崩塌等自然災害與其他人為因素所引起之邊坡損壞案例，以分析台灣地區道路邊坡崩塌之機制，並瞭解實際應用於道路邊坡監測系統之運作現況，做為高效能監測系統研發之重要參考依據。

(B) 傳統感測系統監測能量評估與彙整

蒐集現有常用邊坡安全監測儀器系統，包括：(a) 儀器種類、型式、監測目的、可能資料記錄型式等；(b) 監測設備之檢查與維護作業程序；(c) 安全監測相關量測作業程序；(d) 監測時機；(e) 監測警戒值之訂定。

(C) 實驗室光纖監測與 TDR 監測技術與監測系統之研發與量測研究

研發以光纖與 TDR 監測為核心之邊坡安全監測技術，以便完成更高效能、更穩定、更精確性並具高可靠度的道路邊坡崩塌監

測技術。

(D) 初步現地安裝與量測試驗研究

在湖口台地的試驗站進行初步安裝與量測試驗研究，以便就光纖監測系統、TDR 監測系統與傳統感測器現地安裝問題進行初步試驗，並整理現地安裝、量測問題與工程單位互動協調等等過程建立資料，以便使安裝、試驗過程所有經驗可供工程管理、維護與決策單位參考，並讓工程管理、維護與決策單位瞭解熟悉該等新興監測技術之發展、功用與性能。

(E) 崩塌預警基準制訂

蒐集國內外相關預警模式之分析與預警管理值設定之方法，比較並評估現有道路邊坡崩塌之預警管理，以便探討、並制訂各項監測項目之合理管理基準，並已初擬一份崩塌預警基準草案。

(2) 第二年工作項目：

(A) 監測技術之改善與研發

配合光纖、TDR 監測技術之研發與改善，選擇較常用之監測儀器進行改善及研發，以提高穩定性及耐久性。

(B) 監測技術評估

就國外新近發展之監測系統或監測工具進行蒐集整理，並評估其可行性。

(C) 現地監測與量測

除原有湖口台地的現地試驗外，另外於嘉義台 18 線通往阿里山五彎仔新修聯絡道之邊坡進行光纖與 TDR 監測系統之安裝。使用安裝之監測儀器進行監測量測，找出滑動面之所在，以掌握破壞機制與過程，並做為回饋分析根據，建立崩塌預警基準。

(D) 崩塌預警基準制訂範例

完成道路邊坡預警準則草案，邀請專家學者進行審查，評估預警基準制訂之流程及方法之可行性。

(E) 先進科技於邊坡崩塌監測之推廣講習會

本計畫於 92/12/11、12 日舉行一場講習會，講習內容為高效能邊坡監測系統之介紹、崩塌預警基準制訂標準作業方法之介紹以及本計畫所研發監測系統之實地操作。講習時間為二天。邀請之對象包括中央及地方道路主管機關、顧問公司以及相關學術與專業技師單位。



工作項目	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	備註
監測技術之改善與研發	[粗線表示]											
監測技術評估		[粗線表示]										
現地監測與量測		[粗線表示]										
道路邊坡崩塌預警準則草案		[粗線表示]										
先進科技於邊坡崩塌監測之推廣講習會									[粗線表示]			
					期中報告 (七月下旬)			期末報告 (十一月下旬)				
工作進度估計百分比 (累積數)	10	20	35	45	55	65	75	85	95	98	100	
預定查核點	第一季: 監測技術之改善與研發 第二季: 監測技術評估 第三季: 現地監測與量測 第四季: 先進科技於邊坡崩塌監測之推廣講習會											
<p>說明：(1)工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。</p> <p>(2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以上因素擇一估計訂定： 1.工作天數 2.經費之分配 3.工作量之比重 4.擬達成目標之具體數字。</p> <p>(3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。</p>												

圖 1.1 92 年預定進度甘梯圖

二、監測技術評估

2.1 新近發展之光纖監測系統或工具

本節敘述最近一年在國際或國內，包括本研究團隊在使用 BOTDR 於大地工程監測之發展。

2.1.1 BOTDR 在土壤含水量分佈監測之應用

Texier et al. (2003) 嘗試使用光纖布里淵散射(Brillouin Scattering) 的原理來量測粒狀土壤的含水量，在感測器方面則是以親水性聚合物(hydrophilic polymer)做為感測物質，實驗過程是將三個光纖感測器分散在 100m 長的光纖中量測含水量，其最大量測範圍為 30%，從試驗結果推論出使用數百個光纖感測器來量測數公里長範圍內的土壤含水量是具有可行性的，試驗結果也證明使用親水性聚合物的膨脹與乾縮量來表示土壤含水量的增加或減少是具有可行性的。以下分別說明布里淵散射理論與 Texier et al. (2003)之實驗架構。

(1) Brillouin 散射原理與特性

布里淵光時域反射器(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) 正是分佈式光纖感測中最具代表性的系統之一。所謂散射是指當光束通過透明介質時，大部分的光會直接向前穿過，但是有一部分的光卻會被散射，散射發生的主要原因是因為介質的折射率不均勻所造成。光纖在製造時，必須經過加熱及冷卻的過程，當材料冷卻結晶時，分子會有不均勻排列的現象產生，因此折射率會有所變動，故會導致光的散射損失。

Brillouin 效應最早是由於法國物理學家 Leon Brillouin(1889-1969)在 1920 年所發現，Brillouin 散射最主要的特點就是散射光的頻率改變。在 Brillouin 散射中，入射光所產生的音波會造成折

射率的變動，所以會有散射的現象發生。當散射發生時，音波所扮演的角色就像是一個往前移動的布拉格光柵，入射光與音波相互作用會使得一部分的光被往後散射，且因為都卜勒效應(Doppler Effect)會使得散射光比入射光低一個頻率值，這種散射現象就稱為布里淵散射(Brillouin Scattering)，此時所降低的頻率值稱為 Brillouin 頻率。Brillouin 散射又可分為受激 Brillouin 散射(Stimulated Brillouin Scattering)與自發性 Brillouin 散射(Spontaneous Brillouin Scattering)，所謂受激 Brillouin 散射是指入射光強度高於某個臨界值(threshold value)時，幾乎所有的入射光都會被反射回輸入端，而此臨界值就稱為 SBS threshold。反之當入射光強度低於此臨界值時就稱為自發性 Brillouin 散射，而 BOTDR 主要是應用自發性 Brillouin 散射光頻率飄移量對溫度及應變的敏感性來做量測。

Brillouin 散射效應是泵激波(pump wave)、史多克斯波(Stokes wave)及音波(acoustic wave)三者相互作用所產生的結果，當散射發生時必須保持能量守恆及動量守恆，故此三種波的頻率及波向量的關係式為：

$$\omega_A = \omega_P + \omega_S \dots\dots\dots (2.1)$$

$$K_A = K_P + K_S \dots\dots\dots (2.2)$$

其中

ω_A ：音波頻率(the frequency of the acoustic wave)

ω_P ：泵激波頻率(the frequency of the pump wave)

ω_S ：史多克斯波頻率(the frequency of the Stokes wave)

K_A ：音波向量(the wave vector of the acoustic wave)

K_P ：泵激波向量(the wave vector of the pump wave)

K_S ：史多克斯波向量(the wave vector of the Stokes wave)

且音波頻率與波向量必須滿足射散關係式：

$$\omega_A = |K_A|V_A = 2V_A|K_P|\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \dots\dots\dots (2.3)$$

其中 θ 為泵激波與史多克斯波之間的角度， V_A 為音速。

由(2.3)式可看出飄移頻率在向後 ($\theta=\pi$) 時會有最大值，而在向前 ($\theta=0$) 時為零。向後的頻率飄移值 ν_B 為：

$$\nu_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2nV_A}{\lambda_p} \dots\dots\dots(2.4)$$

其中

$$|K_P| = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2nV_A}{\lambda_p}, n \text{ 為光纖折射率, } \lambda_p \text{ 為泵激光波長。}$$

BOTDR 即是利用 Brillouin 散射效應作為光纖感測，當光纖受到溫度與應變作用時，其有效折射率及音速就會改變，又因為 ν_B 與光纖的有效折射率及音速有關，所以 ν_B 也會跟著改變。我們可以藉由量測 ν_B 的改變量來得知光纖應變與溫度的分佈。

(2) 試驗結構

Texier et al. (2003) 使用 BOTDR 來量測土壤含水量之分佈，其感測器部分是使用直徑 3cm、長 3cm 的親水性聚合物圓管上 (hydrophilic polymer rod)，將 2m 長的光纖圍繞於表面上，在中央鑽一孔洞，其直徑為 1.3cm，塞入一聚合物(丙烯酸)的管子，當管子遇到水的時候會有些微的體積膨脹或收縮(圖 2.1)。而光纖圍繞時將其圍繞成直徑 3.5cm 之圓柱形，以避免光損耗，但是這樣可

能會有非線性的結果產生。

Texier et al. (2003) 在 100m 之單模光纖上設置三個感測器，感測器與感測器間相隔 10m，將感測器浸泡在攝氏 25°C 的水中(圖 2.2)。當感測器吸水膨脹時，圍繞在感測器外的光纖就會受到拉伸，此時浸泡在水中所得到的 Brillouin 頻率飄移量為最大。浸泡一段時間後，反覆持續讀取 Brillouin 頻率飄移值，發現在 2188 分鐘後，可達到最大相對飄移值(圖 2.3)。

(3) 試驗結果

圖 2.4 是表示 Brillouin 散射頻率、含水量與時間之關係。在 10.892GHz、1190 分鐘時，聚合物含水量為 32%時 Brillouin 散射頻率飄移量為最大值。由圖中可發現當 Brillouin 散射頻率飄移量達到最大值後聚合物含水量會持續增加。關於這一點 Texier et al. (2003)提出的解釋為當膨脹量達到一定後，因為圍束壓力的影響，所以導致中央的聚合物膨脹時會向兩邊伸長，故此時光纖並不會受到拉伸，也就有誤差出現。

圖 2.5 展示在吸水膨脹與排水收縮時，Brillouin 散射頻率頻飄移與時間的關係圖，在膨脹過程外部膨脹較快，內部膨脹較慢，收縮也是一樣，故會有些差異。

此文獻證明使用 3cm 的聚合物管可量測到最大的含水量大約為 32%，也證明了聚合物管膨脹與收縮與含水量具有一致性的關係，但設備可以進一步改良，將來可達到分佈式感測的效果。

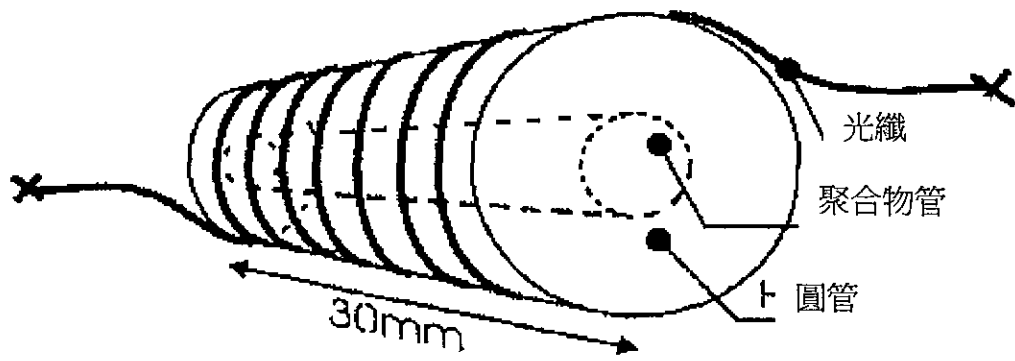


圖 2.1 感測器示意圖

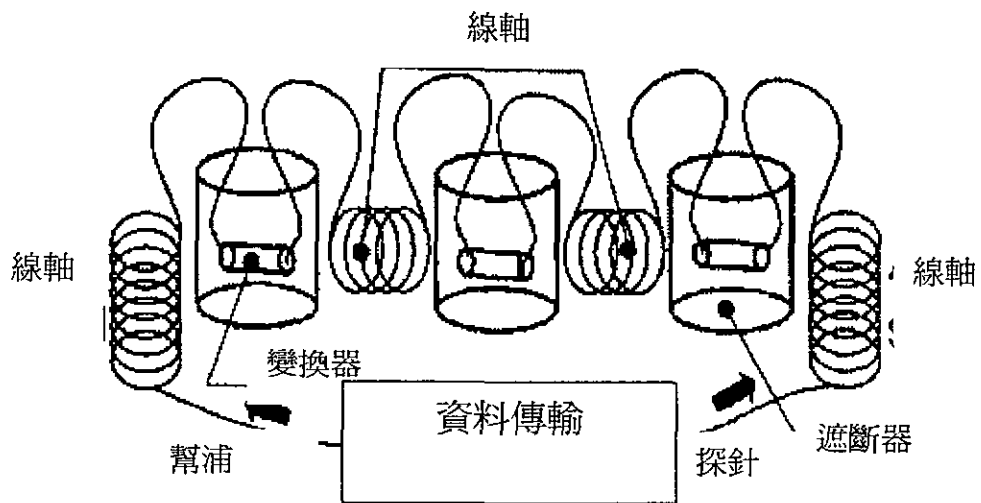


圖 2.2 試驗設備配置圖

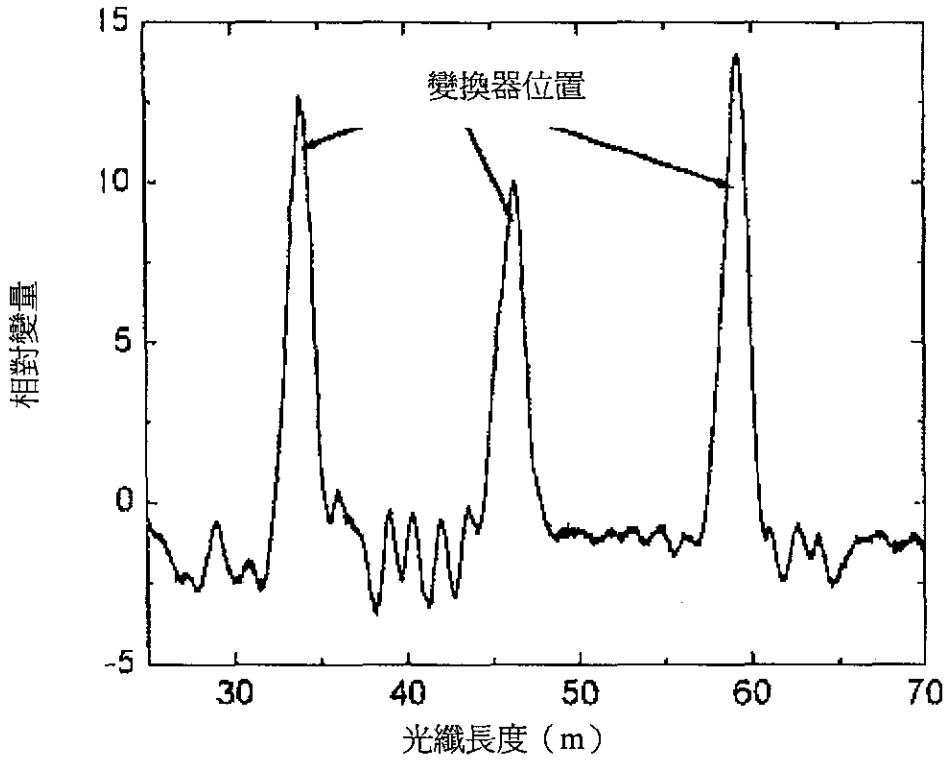


圖 2.3 2188 分鐘後 Brillouin 頻率最大飄移量圖

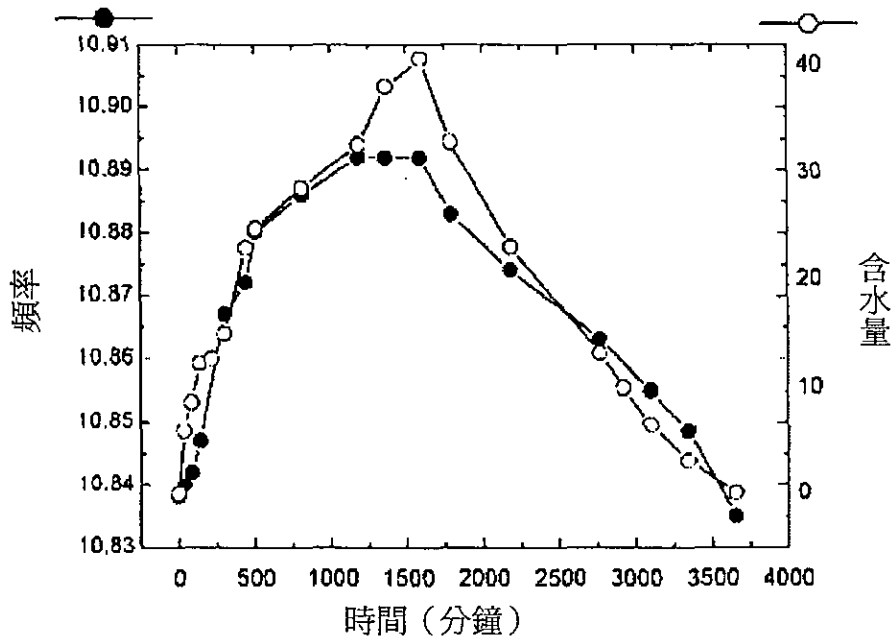


圖 2.4 Brillouin 頻率、含水量與時間之關係圖

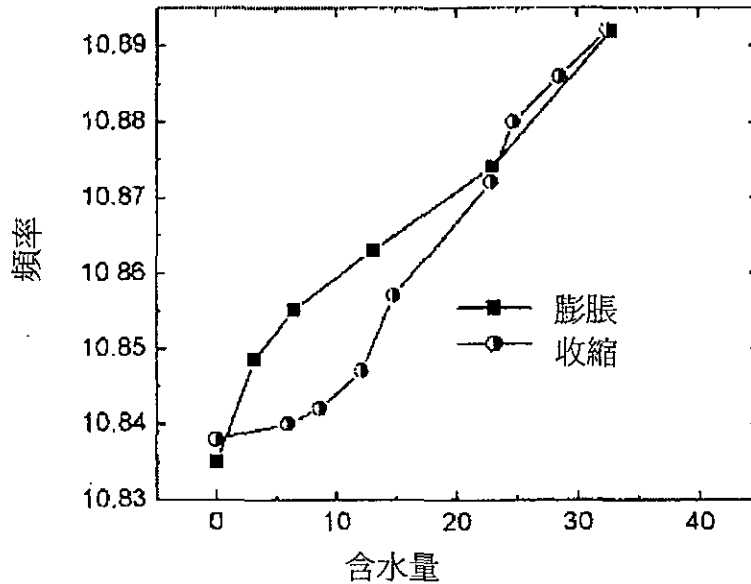


圖 2.5 聚合物膨脹、收縮時 Brillouin 頻率飄移與時間的關係

2.1.2 BOTDR 變形量測

(1) 儀器說明

傳統地滑監測是使用傾斜管與電子測傾儀，藉由測傾儀在傾斜管內移動量測不同深度的傾斜度，累積計算後得到地層的滑動量。但是若需將此種量測方式自動化，則須將多個傾斜儀固定於傾斜管內，如此一來除了不易安裝與維護外，也大幅提高成本。使用光纖作為感測器來量測應變，具有低成本、不受電磁波干擾、高靈敏度與長感測距離等優點。研究團隊嘗試使用布里淵光時域反射器 (BOTDR) 在地滑應變監測上之可行性。

本實驗所使用之量測儀器 BOTDR 最長量測應變範圍可達 80km，空間解析度最小為 1m。實驗時將單模光纖 (Single Mode Fiber, SMF) 黏貼於 2m 長的塑膠管表面，並施加外力使之彎曲變形，在採用 1m 的空間解析度與 10cm 的取樣解析度下，應變最大誤差量為 0.01%。將試驗結果經由積分反算得知塑膠管彎曲變形量與 BOTDR 讀數間之關係。結果顯示在小變形下 BOTDR 會有較大之

誤差，但隨著變形量增加精度會相對提高，這是因為其應變誤差量所佔之比例會隨著總應變量之增加而減少。本節敘述 BOTDR 做地層移動監測之方法，並敘述現有室內標定之結果。

(2) 三次仿樣法

應變管在邊坡的應用上最早是由日本學者提出，而本研究主要是探討 BOTDR 在地滑應變監測上的可行性，故採用三次仿樣法作為分析之方法，而三次仿樣法所推導出的積分公式如下：

$$\Delta = \frac{1}{r} \iint \varepsilon dx \dots\dots\dots(2.5)$$

其中：

Δ ：PVC 管橫向位移量(mm)

ε ：應變量

x ：積分範圍(mm)

r ：PVC 管半徑(mm)

(3) 實驗方法

實驗時將光纖貼在 1m 長的 PVC 管上，光纖貼在 PVC 管兩側，將 PVC 管一端固定在桌上，一端由微調儀給予側向位移，且在微調儀的另一端架設測微計來驗證所給予之側向位移量，每一次所給予之位移量為 1mm，並紀錄每一次位移後受拉側 BOTDR 之讀數，其量測架構如圖 2.6 所示。

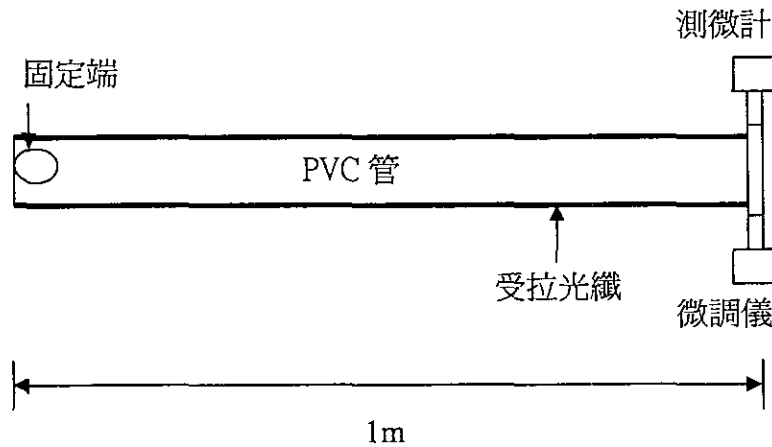


圖 2.6 PVC 管量測架構圖

如何尋找光纖應變發生的位置在本研究中是相當重要的一件事，而本研究光纖黏貼位置與操作架構如圖 2.7 所示，但光纖總長約 1120m，要在如此長的光纖中找出黏貼在 PVC 管上每 1m 的位置是相當不容易的一件事，其最主要原因有兩個，分別敘述如下：

(A)一般光纖在製造過程中已有受到微小應變，大約為 0.02%~0.03%，而儀器應變最小讀數到 0.00001%，但精確度只有 0.01%，所以即使在相同試驗條件下，每一次的讀數皆會不同，即對於微小應變無法明顯辨識。

(B)由於光纖內並非均勻結構，造成光的折射率會有些微變化，所以每一次讀數位置點會有些微差距，其前後差距最大值約為 0.025m，由上述可知應變位置確實不易求得。在本次研究中，我們先給予一個很大的位移量，找出光纖中應變有明顯變化的地方，用來判定 PVC 管上光纖的位置，其光纖受拉位置判斷如圖 2.8 所示。

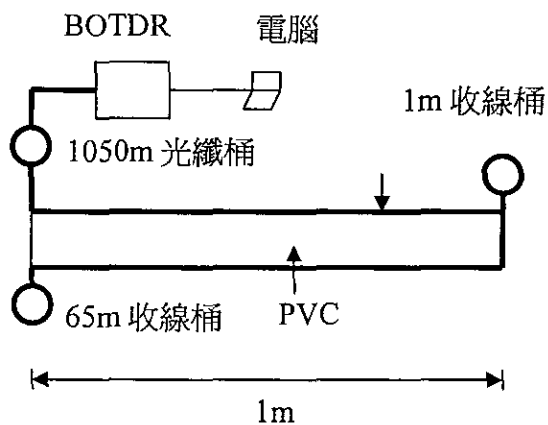


圖 2.7 光纖黏貼位置與操作架構圖

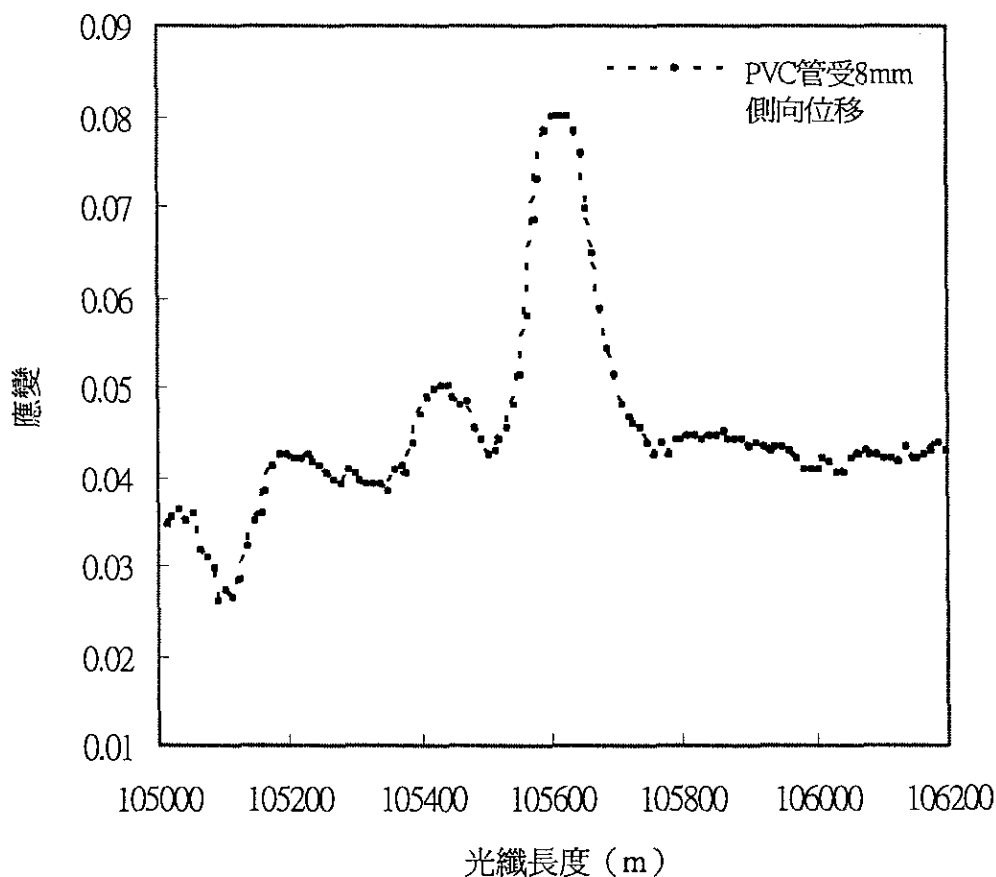


圖 2.8 光纖受拉位置判斷圖

實驗時 BOTDR 的各個參數依序為：波長為 1550nm，脈波寬度為 10ns，頻率平均次數為 215，初始頻率為 10.85GHz，掃描頻率間隔為 5MHZ，結束頻率為 10.945GHz，光纖折射率為 1.468，取樣解

析度為 0.1m，共取 20000 筆資料。其中對於取樣解析度必須做些修正，因為 BOTDR 是以讀取光反射時間再加以轉換成距離，其公式如下

$$D = \frac{ct}{2n} \dots\dots\dots (2.6)$$

其中：

D:光沿著光纖前進的距離

c:光速度，為 3×10^8 (m/sec)

t:光輸入脈波之行進時間

n:光纖核心的平均折射率

當採用 0.1m 採樣解析度時，是假設平均折射率為 1.5 的狀況下，反算得到時間為 10-9sec，故可得知其取樣間隔為 10-9sec。但是當平均折射率不為 1.5 時，其取樣解析度就要加以修正，否則在數據分析時，會找錯位置點，以本研究為例，平均折射率為 1.468，經計算後得到其取樣解析度為 0.1021m。最後將由 BOTDR 所得之應變結果經由積分反算得到橫向位移量，並將積分結果與實際值作一比較。

(4) 實驗結果

綜合上述，可以得到經由三次仿樣法積分所得之位移量，將其與實際給予之位移量做比較，其結果如圖 2.9 所示，由圖可看出除了第一點相差較大外，其餘各點與實際位移量差異在 20%內，這是因為 BOTDR 精度只有 0.01%，經過積分後得到 2.85mm 的應變量，換句話說，就是每一次讀數最大會有 2.85mm 的誤差量發生，所以在初始微小讀數時誤差量所佔比例很大，但是當位移量變大時，誤差量所佔的比例會較小，也就是精度會相對提高，且一般光纖

最大應變量可達 1-3%，若以 1% 來積分計算，可得為 285mm 的橫向位移量，此時誤差量所佔的比例就會很小了。

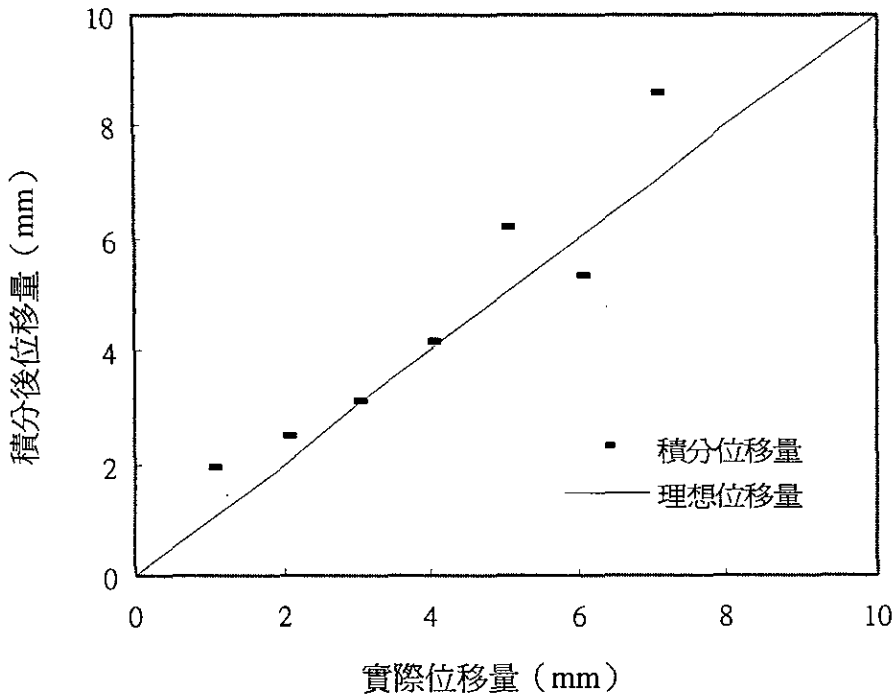


圖 2.9 實際位移量與實驗量測積分結果比較圖

(5) 評估與結論

BOTDR 有潛能做分佈式土壤，包括邊坡土壤含水量之監測，土壤內含水量突然的增加可以是邊坡穩定之警訊，因此如將此一系統做適當之安排應當有潛能成為邊坡穩定監測方法之一。BOTDR 具有大範圍，全分佈式感測的優點，但是其空間解析度以及應變量測數據之解析度尚不理想，這是在 BOTDR 能夠大量使用前必須突破之瓶頸。

2.2 TDR 監測技術

常見之大地工程的監測項目包括水壓、地層錯動、相對位移等，近年來電子感測器、無線通訊、自動化資料擷取系統等電子科技之快速發展已逐漸改變山坡地安全監測之實務（Dunnicliff and Green, 1993），雖然電子化監測技術使得監測之工作更為快速與便利，但常缺乏長期監測所需要之穩定性與可靠度。一般電子感測器屬於主動元件，必須供電或持續激發感測元件以維持感測功能。電子感測器常需埋入土體中或於惡劣的環境中運作，而電子感測器對於水、濕氣、雷擊等不具抵抗性且常有溫度效應，因此電子感測器常在現地監測一段時日後發生故障或出現不合理之讀數。有鑑於此，先進地工監測技術應逐漸改使用上孔（Up-hole）設備探測被動式（Passive）機械或光纖傳感器，探測之媒介包括電磁波與光波，分別使用同軸電纜及光纖作為傳輸線，而其傳感器常為傳輸線之一部分，這類被動式監測技術兼具傳輸與監測傳感之功能，其監測系統兼具機械式之穩定性與電子式之便利性。時域反射法（Time Domain Reflectometry, TDR）為一實用且經濟之被動式監測技術（O'Connor and Dowding, 1999），電磁波時域反射法之原理與雷達（Radar）相同，主要不同點在於 TDR 所發送之電磁波為引導波（Guided Wave），以同軸電纜將電磁波引導至需要監測之地點。TDR 之傳感器為導波器（wave guide）的一種，利用不同的感測機制，時域反射法可用於監測土壤含水量、地層錯動及地下水位。TDR 監測技術使用上孔電子儀器，不容易故障且方便維修，傳輸線兼具資料之傳輸與監測感測器之功能，並具備多種監測功能，可使用同樣之電子儀器及多工器同時進行多點、多功能之監測，可有效地建立穩定、高效率且經濟之監測系統。

2.2.1 TDR 監測基本原理

時域反射法之基本原理與雷達相同，由製波器發射一電磁脈衝進入同軸電纜，並由示波器記錄由於電纜阻抗不連續所造成之反射。電纜阻抗是由電纜之斷面幾何與電纜絕緣介質所決定，因此當電纜斷面因受力而變形時，或電纜絕緣介質不同時，將產生阻抗不連續。當電磁波碰到阻抗不連續所產生之回彈訊號為接收器所接收，再透過電磁波速與時差之計算，便可知道阻抗不連續處之遠近，最早的 TDR 技術即是用在檢測通訊纜線的受損與否以及定位該受損位置。圖 2.10 為 TDR 設備之簡圖，它包含階躍脈衝電壓產生器 (Step Generator)、訊號採樣器(Sampler) 與示波器 (Oscilloscope)，脈衝產生器產生電壓脈衝傳至同軸纜線，訊號採樣器擷取並透過示波器顯示由同軸纜線傳回之反射訊號。同軸纜線由一組內、外導線所組成，外導線以封閉的方式包圍內導線，可降低外在訊號之干擾；感測導波器為同軸纜線之延伸使得電磁波傳進所要量測之材料或環境中。在大地工程監測方面，依應用原理可歸類為三：

(1) 界面型

利用 TDR 之反射訊號定位出感測器內不同介質之間的界面，應用此原理可設計 TDR 水位 (水壓) 計，使用中空同軸纜線作為水壓計之開口立管，因為空氣與水之電磁性質不同，水位進入纜線中將在空氣與水之介面產生阻抗不連續面，此不連續面之高程即為所欲量測之水位 (水壓) (Ross 1974；Dowding et al. 1996)。

(2) 摺痕型

同軸電纜即為感測器，在介質材料固定的情形下，纜線阻抗由纜線之幾何形狀決定，當電纜受到外在環境之影響造成電纜幾何形狀改變時，可由 TDR 反射訊號監測之，利用此一原理可監測地層內

部之錯動變形 (Dowding et al., 1989 ; Dowding and Huang, 1994 ; Aimone-Martin and Francke, 1997 ; Dowding and O'Connor, 2000) 。

(3) 速度型

設計一感測器為同軸纜線之延伸，將欲量測之材料作為感測器之介質，在感測器幾何性質固定下，利用反射訊號可量測材料之電磁波速，據以計算材料之介電度並進一步推估材料之基本物理性質，例如土壤之含水量與密度等 (Top et al., 1980 ; Lin et al., 2000) 。

邊坡安全監測所需之傳感器主要利用第 (1) 項與第 (2) 項原理。TDR 量測系統之傳輸纜線包括同軸纜線與感測器，電磁波在傳輸纜線中之傳遞由 Maxwell 方程式控制，因為傳輸電纜之特殊電磁場結構，電磁波在傳輸纜線中之傳遞可以用導線之電流與正負導線之電壓來描述，因此 Maxwell 方程式可以簡化成電壓與電流之波動方程式，波動方程式之解答中兩個最重要的元素分別為特徵阻抗 (Characteristic Impedance) 與傳遞常數 (Propagation constant)。特徵阻抗是纜線之電壓與電流之比值，它是纜線之本質特性，為纜線幾何形狀與纜線介質之電磁性質 (介電度與導電度) 之函數，當纜線中因特徵阻抗不同而產生阻抗不連續時，電磁波會在阻抗不連續面產生反射波與透射波；傳遞常數是傳輸纜線另一項本質特性，為纜線介質之電磁性質的函數，它控制了電磁波在纜線中傳遞之速度與衰減。

同軸纜線與感測器之絕緣介質一般採用低衰減 (低導電度) 之材料，因此其衰減特性可忽略，電磁波在傳輸纜線中傳遞之速度由介質之介電度決定：

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots (2.7)$$

其中 c 為光速， ϵ_r 為介質之介電常數。傳輸纜線之阻抗為纜線之

斷面幾何與介電度決定，以同軸纜線為例可表示為：

$$Z = \frac{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots (2.8)$$

其中 a 為內導線之外徑、 b 為外導線之內徑、 μ_0 為真空之磁導率 (Magnetic permeability)、 ϵ_0 為真空之介電常數、 Z_p 為介質為真空時 ($\epsilon_r^* = 1$) 之阻抗。當入射之方波 V_i 於電纜中遇到阻抗不連續 (Z_0 與 Z_i 之交界) 時將產生反射與透射，反射波可表示為：

$$V_r = \rho V_i \dots\dots\dots (2.9)$$

其中反射係數為電纜阻抗之函數

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \dots\dots\dots (2.10)$$

圖 2.11 顯示電磁波經過阻抗 Z_0 遇到不同阻抗 Z_i 時產生不同之反射，若 $Z_i = Z_0$ (即 $\rho = 0$ ，沒有阻抗不連續面)，則不會產生反射訊號，當 $Z_i > Z_0$ 時， $\rho > 0$ ，可觀察到一正的反向波，當 $Z_i < Z_0$ 時， $\rho < 0$ ，可觀察到一負的反向波。阻抗不連續之位置 x 可由波速與電磁波碰到不連續面回彈為接收器所接收之時差 TD 求得：

$$x = v * TD \dots\dots\dots (2.11)$$

時域反射儀所產生之階躍脈衝訊號，實際上並非一理想之階躍脈衝，其脈衝訊號具有一定的上升時間 (rise time)，當脈衝之上升時間為零時，表示該脈衝為一理想的階躍脈衝，具有完美的空間解析度，亦即反射訊號可直接反應電學阻抗之改變，但實際上無法達到此一理想狀況。因此，空間解析度由脈衝之上升時間決定，TDR 在時間域之反射波形並不直接反應電子阻抗在空間之形狀，反射訊號波形為輸入脈衝之時域訊號與電子阻抗之空間訊號依照波傳原則

混合而成，因此，解釋 TDR 反射訊號時必須考慮輸入脈衝之特性。

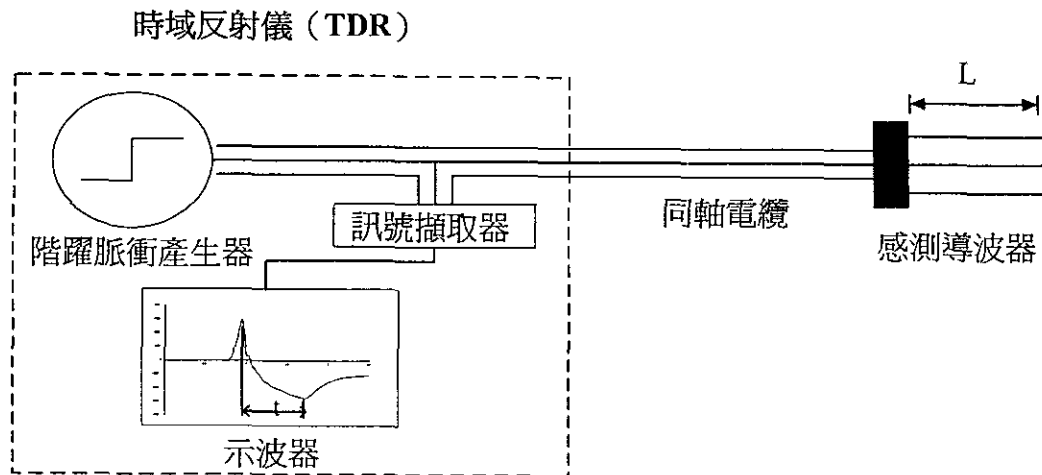


圖 2.10 時域反射儀之基本架構

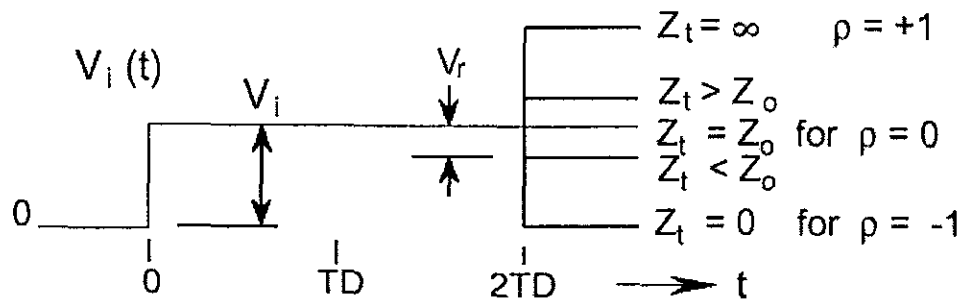


圖 2.11 不同之阻抗不連續所產生之反射波形

2.2.2 TDR 錯動變形監測技術

由上述之基本原理得知，TDR 製波器發出之脈衝訊號在傳輸電纜中遇到斷面幾何形狀不同時(即纜線阻抗不連續)會產生反射訊號，可以應用此項原理監測地層之錯動變形。首先在欲監測之地層中鑽孔，放入同軸纜線，然後用水泥漿填塞，以其與地層形成一體。隨著地層發生錯動變形，同軸纜線在錯動面上產生斷面幾何改變，造成該處纜線阻抗之改變，錯動變位量越大，阻抗之改變量越大，阻

抗改變所產生之 TDR 反射訊號亦會隨變形之增加而增強。如圖 2.12 所示，由 TDR 產生電磁波經同軸纜線至變形感測纜線時，即於接頭位置產生一起點反射，而於 TDR 之波形上顯現一凸起之反射波形；電磁波繼續前進當遇到錯動變形之凹痕時，產生另一反射訊號，而於 TDR 之波形上顯現一向下凹之反射波形；當電磁波至感測電纜末端時，產生一終點反射，於 TDR 之波形上顯現上揚之反射波形。其中凹痕所引起之界面反射訊號，會隨著凹痕變形量之增加而增強，由反射訊號之大小，可以間接估計錯動變位量(Dowding et al., 1988；Dowding et al.,1989；Aimone-Martin and Francke, 1997)。

同軸電纜受到之錯動變形是否足以產生反射訊號，取決於變形之曲率 (Curvature)，變形曲率夠大方能產生局部凹痕，使得斷面幾何及電纜阻抗產生改變。因此，同軸電纜非常適合監測錯動變形，但不適合大迴轉半徑撓曲變形之監測，錯動變形在錯動面之位置會產生非常大曲率之變形，由 TDR 反射訊號可以有效估計錯動破壞之位置及錯動量。同軸電纜除了可以偵測側向之錯動變形外，亦可偵測張力裂縫所產生之頸縮變形，唯電纜張力頸縮變形所以起斷面幾何改變之靈敏度不及錯動變形所產生之斷面幾何改變。

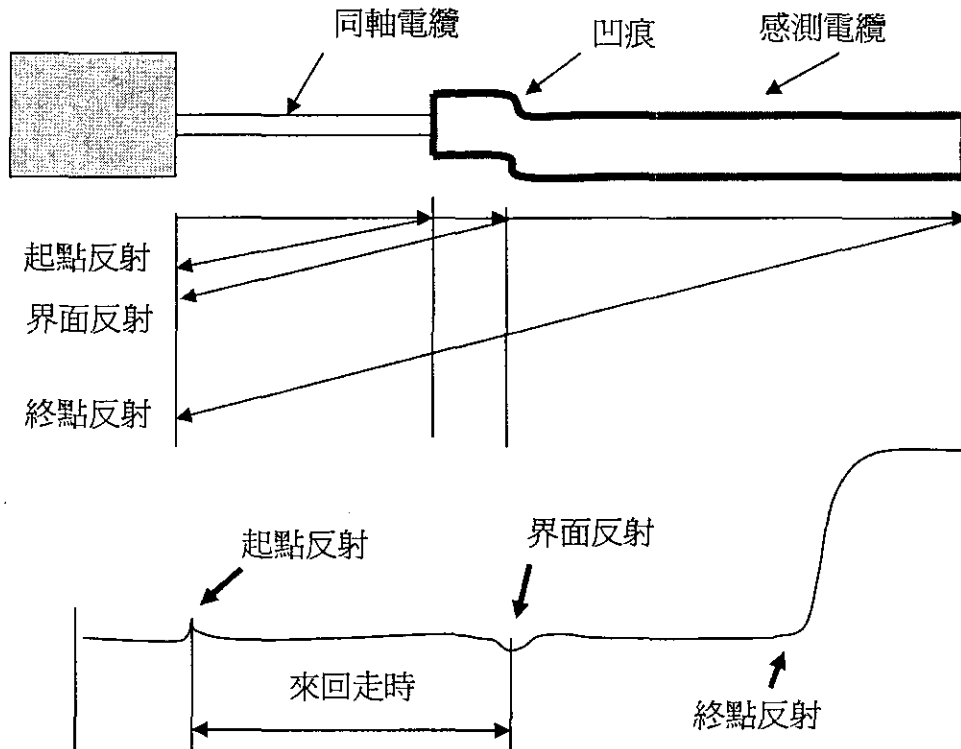


圖 2.12 TDR 變形監測之反射訊號與原理

由上述之原理得知，TDR 錯動變形感測電纜最適合岩層滑動（如順向坡）或崩積層滑動之監測，亦可監測土體內部沿薄剪動帶之滑動，局部之應變及薄剪動常發生於支撐開挖邊緣、土堤下、不穩定坡內，在大應力梯度的環境下，土壤應變變得相當大且集中在薄的剪動帶(區)，以致會導致土壤之漸進式破壞。若安裝一組同軸纜線/薄水泥漿系統，使其可隨著土壤受剪變形而變形，則此系統便可反應土壤之局部剪動行為。利用 TDR 量測土壤錯動變形時，需注意周遭澆置薄水泥漿之特質與適應性。纜線之設計旨在量測土壤之錯動變形，而薄水泥漿所扮演的角色係固定纜線並將土壤之變形傳遞至纜線上，因此在選用纜線周遭的澆置材料時，澆置材料的強度與勁度需與土壤相當，若材料之強度與勁度小於土壤之強度與勁度，則此材料將吸收一小部分之變形；反之，若材料強度、勁度大於土壤，則所測得的變形，不全然反應真實的土壤應變。在小應變範圍內

，土體內沒有局部大的剪應變梯度產生，則感測電纜所受到之變形會偏向大迴轉半徑之撓曲變形，此時便無法由反射波形瞭解土壤內部之變形，但一般土壤之滑動破壞，通常伴隨應變集中之剪力破壞，因此 TDR 感測電纜在土壤之應用主要在監測大應變範圍下是否產生應變集中及滑動破壞之可能性。

目前對於邊坡滑動之變位監測，主要是利用傾斜管及較費人力的手動量測，首先在地層內部鑽孔，然後搭接、埋置傾斜管，再定期派人員至現地垂放傾斜儀，由每一量測間距（即傾斜儀長度）內之傾角計算土層垂直傾斜管軸向之側向位移。在邊坡監測中，傾斜管監測資料分析之主要工作為由變形剖面判斷滑動面及錯動變形量，傾斜管所量測到之變形剖面為真正變形剖面按傾斜儀長度（約 50cm）分段之多段式線性近似，在空間上並非真正的連續監測，對於薄剪帶之分辨能力較差，且當錯動變形量大於傾斜管直徑的某一比例後，傾斜儀便無法下探，目前尚有定置型之傾斜儀（in-place inclinometer, IPI），可以提供自動化監測，但價格昂貴，且單孔之量測點數受限於線路，一般小於 20 點，空間之連續性不佳，現地穩定性也有待評估。相對而言，TDR 感測電纜非常經濟，具有空間上連續監測之特性，且可以在時間上做定期之自動化監測，對於破壞預警及破壞機制可更有效掌握，但在小變形之監測上，例如開挖面檔土結構之監測，則無法提供撓曲之變形剖面。

2.2.3 TDR 水位監測技術

傳統水位之量測需使用如蜂鳴器之水位指示器以人工定時量測。然而，邊坡不穩定常發生於惡劣氣候，受限於人員安全考量無法立即得知邊坡之水位變化，近年來自動化之監測系統逐漸受到重視，但自動化監測系統之價格昂貴、且水中之儀器設備容易故障。時

域反射法(TDR)係將電子儀器置於地表面上(Up-hole)，不容易故障且方便維修，其感測器即為其傳輸纜線之一部分，並無其它任何容易故障之電子元件，且由 TDR 反射訊號可得知整個傳輸線(包括感測器與延長線)之狀況，從而可自動得知線路之問題所在。

時域反射儀的原理是由製波器發射一電磁脈衝進入同軸電纜及感測導波器，並由示波器記錄由於電纜阻抗不連續所造成之反射。電纜阻抗是由電纜或感測器內介質的介電度決定，當介質改變時，將產生阻抗不連續，利用此一原理可製作地下水位感測器，Ross (1974)與 Dowding et al. (1996) 曾經提出利用 TDR 來監測水位，其感測導波器的型式包括平行導體傳輸線與中空螺旋絕緣同軸纜線。如圖 2.13 所示，將感測導波器置於一水位立管中，當水位上升至感測導波器內某一位置時，將在水面位置產生阻抗不連續面，其中起點反射是由同軸電纜與感測器之接頭所引起，界面反射為空氣與水之阻抗不連續面，終點反射為感測器開放迴路之反射訊號。空氣的介電度為 1，水的介電度約為 80，電磁波之速度與介質之介電度平方根成反比，因此，利用來回走時及已知介質之波速，即可求得地下水位之高度。平行導體傳輸線與中空螺旋絕緣同軸纜線之斷面圖如圖 2.14 與圖 2.15 所示，平行導體傳輸線屬於開放型式的傳輸線，水在這類型感測器中之流動較為容易，不易產生阻塞現象，但開放式的傳輸線沒有庇護(shield)，易受到環境雜訊的影響。反之，中空螺旋絕緣同軸纜線之訊號較佳，但其水路較容易受到阻塞。TDR 水位監測之原理雖然簡單，但仍缺乏感測器之設計準則及資料自動分析程序，所需探討的議題如下所述。

(1) 平行導體傳輸線之空間影響範圍

平行導體傳輸線屬於開放型式的傳輸線，其橫斷面電磁場之分

佈示意圖如圖 2.14 所示，電磁波在傳輸線之傳遞速度由兩導體間及周圍的介質所決定，圖 2.14 亦顯示其空間影響權重之分佈，越接近導體之介質，對於其波傳遞速度之影響越大。由於平行導體傳輸線沒有金屬外殼的區隔，電磁波之傳遞容易受到外界干擾，所以雜訊較大，此外其波速較易受到周圍介質的影響，因此有必要進一步探討平行導體傳輸線的電磁場影響範圍，可據以決定當使用平行導體傳輸線時立管所需之最小尺寸。

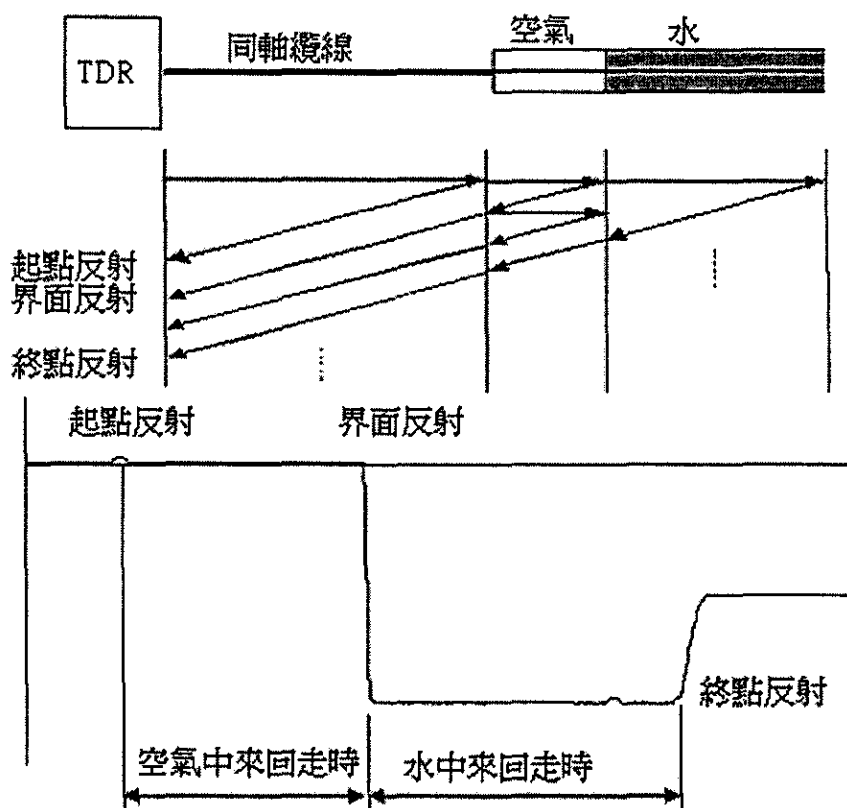


圖 2.13 地下水位置量測之 TDR 反射訊號

(2) 傳輸線導體間之絕緣

中空螺旋絕緣同軸纜線屬於封閉式的傳輸線，其橫斷面電磁波之分佈示意圖如圖 2.15 所示，電磁場之傳遞僅侷限於同軸纜線之間，且波傳遞速度僅受內外導體間介質決定，不受外界物質之干擾，圖

2.15 亦顯示其空間影響權重之分佈，越接近內導體之介質，對於其波傳速度之影響越大。

雖然電磁場在中空螺旋絕緣同軸纜線中的傳遞僅侷限於同軸纜線內，不受外界物質影響，但其內外導體間，若取一橫斷面來看，僅有局部為螺旋狀絕緣體所隔離，所以當地下水存在於中空螺旋絕緣同軸纜線內某高度時，浸在水中的內外導體間並無完全絕緣，造成介質導電損失，電磁波在浸水段快速衰減，當水的導電度越高時，電磁波衰減越快，一般浸水段超過 1m 時，即看不到 TDR 之終點反射波形。此外當水位驟降時，水分子附著於內導體而緩慢下降，此時水滯現象會影響量測結果；又當中空螺旋絕緣同軸纜線設置於山區或濕氣重的環境，水氣也會影響量測的準確度。由圖 2.14 與圖 2.15 顯示，若能於導體間影響權重最大處加以絕緣，避免導電損失，使之不直接與外界物質（水或水氣）接觸時，應能改善感測器開放迴路端之波形訊息、水氣與水滯現象的影響，增加水位量測的準確度。

(3) 水位量測之波形分析與標定

圖 2.16 顯示一典型的 TDR 水位量測波形，其中， t_1 為同軸纜線與感測器界面反射時間點， t_2 為空氣與水界面之反射時間點， t_3 為終端反射時間點，水位之量測可由 t_1-t_2 或 t_2-t_3 之走時決定。假設訊號擷取之取樣間距為 Δt ，且 $t_i=N_i\Delta t$ ，則空氣段長度 (L_1) 與浸水段長度 (L_2) 可由下列式子決定：

$$L_1 = \frac{(t_2 - t_1) \times CV_{p1}}{2} = \frac{\Delta t \times CV_{p1}}{2} (N_2 - N_1) \dots \dots \dots (2.12)$$

$$L_2 = \frac{(t_3 - t_2) \times CV_{p2}}{2} = \frac{\Delta t \times CV_{p2}}{2} (N_3 - N_2) \dots \dots \dots (2.13)$$

其中 C 為光速； V_{p1} 為電磁波在空氣段的傳遞速度與光速之比值

； V_{p2} 為電磁波在浸水段的傳遞速度與光速之比值。

因此 TDR 水位監測之波形分析主要在反射時間點的決定，有時同軸纜線與感測纜線界面之反射訊號並不明顯， t_1 可由同軸纜線（延長線）與感測纜線分開時之終點反射決定。若感測纜線之導體間未絕緣，則電磁波在水中之能量衰減很快，當浸水段超過某一長度後即看不到終點反射，因此常無法決定 t_3 的時間點，因此一般水位是由空氣段來決定。

由於反射訊號並非理想的階躍脈衝，有一定的上升時間，且反射點距離儀器越遠其上升時間越長，使得波形更趨於平緩，因此反射時間點常由一水平切線與上升（或下降）斜切線之交點決定，如圖 2.16 所示。傳統的切線法在反射點的決定上較不明確，受到雜訊的影響而不易自動化，且反射點之確切位置容易受到纜線長度的影響，因此水位波形分析的程序與準確度有待進一步改良。

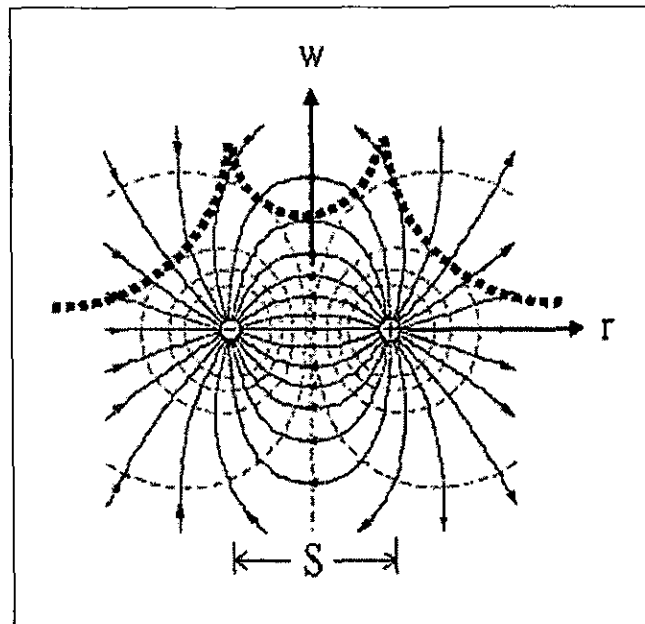


圖 2.14 平行導體傳輸線電磁場之分佈與影響權重示意圖

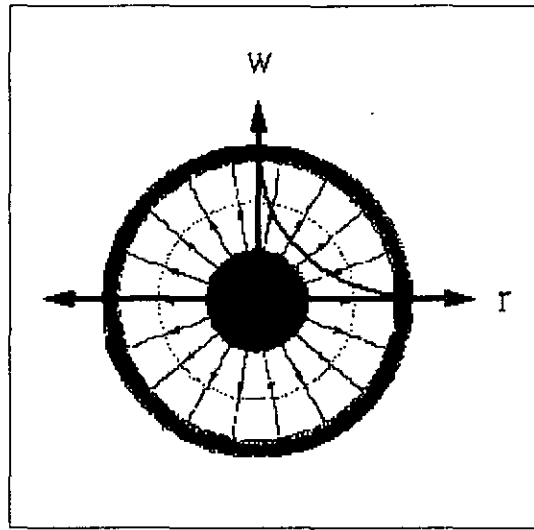


圖 2.15 同軸纜線內電磁場之傳遞與影響權重示意圖

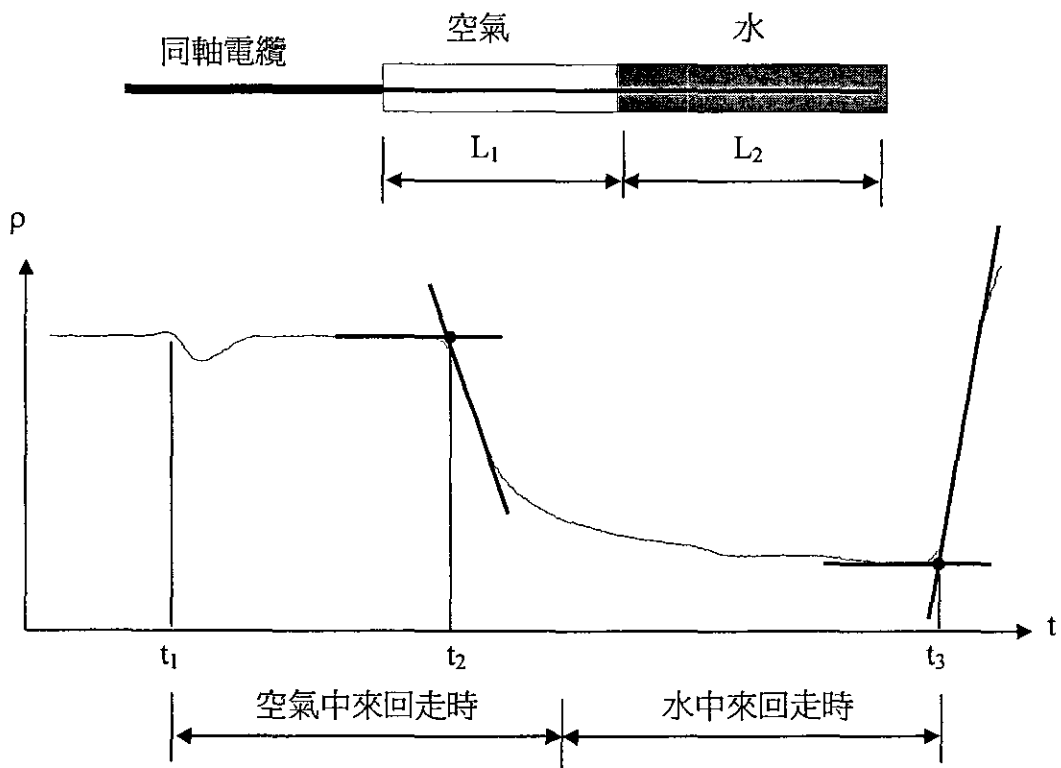


圖 2.16 TDR 水位監測之訊號分析

(4) 同時量測水位與地下水導電度

部分研究指出，地下水之水質與邊坡之穩定性亦有間接關連性。TDR 量測技術亦可應用在導電度的量測上 (Topp et al., 1980; Topp et al., 1988)，地下水之導電度會影響水位量測之反射波形振幅，因此應可透過適當設計及波形分析利用水位感測導波器同時監測地下水位及地下水導電度。

TDR 水位監測系統對於水位高度的改變，可由 TDR 波形上之反射點走時分析得知，並利用前述之標定方法可計算出水位高度；但本研究發現，水中導電度的改變，對於 TDR 波形亦會有所影響，其影響是當導電度不變時，TDR 波形於開放端會收斂至固定的高度，導電度越高，波形收斂值越低。若將導體絕緣，對於 TDR 波形將會更穩定、水位量測將會更準確；導體若不絕緣，波傳能量損失太快，雖提升了導電量測的靈敏度，卻降低了導電量測的範圍，但導體間若能絕緣處適當的裸露，利用 TDR 波形來感測水中能量的損失並量化導電度，利用此原理可製造出同時量測水位高度與水中導電度的感測器。

本計畫擬提出之可同時量測水位與導電度的中空同軸絕緣傳感器，將其感測器底端絕緣處局部剝除適當長度，以決定量測的靈敏度與導電度量測範圍。

(5) 地下水與孔隙水壓設置方法

對於山坡地或邊坡的穩定監測，通常會採取設置水位觀測井或開口立管式水壓計來監測水位的變化，由於傳統的 TDR 水位觀測感測器底端容易為淤泥或異物所堵塞，並且其勁度太高，於現場進行安裝時，工作性不佳，感測器通常無法使之保持垂直狀態，因此會影響到水位量測的準確度。

傳統的水壓計，底端是由一過濾器（filter）連接一截一截的PVC管而組成，於現場安裝時，filter與PVC管或PVC管與PVC管單元的連接，完全是使用化學膠水來膠著，並且須待膠水乾涸後，方能膠著另一單元，施工性差。由於近年環保意識抬頭，黏著用的膠水亦可能會影響到地下水的水質。有鑑於傳統的水位觀測或水壓計的施工過程，所引發與造成的種種施工過程或環境污染等問題，需針對地下水與孔隙水壓傳感器提出改進的方法。

三、現地監測與量測結果

本計劃於新竹湖口台地以及阿里山五彎仔路段設置現地監測與量測場址，其結果分述如下：

3.1 湖口台地之地形與區域地質概述

湖口台地整體大致呈東高西低的形貌，等高線 300m 以上部分均位在台地東側。台地南邊之鳳山溪在義民橋附近向西北轉折，造成南岸的沈積河岸及北岸的侵蝕岸。

試驗站選定在義民橋附近的鳳山溪北岸至台地之間。台地面平均高度約 100m，向南緩降至鳳山溪床，高程約 20m，高差 80m，此區域內多崩坍地形的特徵，如圖 3.1 所示。

根據該區域地質調查資料，其出露的地層有更新世楊梅層、店子湖層，全新世階地堆積層及沖積層，前兩種地層特性說明如下：

楊梅層為構成湖口台地之基盤岩層，其與上覆之店子湖層呈不整合接觸，多出露於台地邊緣之崩崖或侵蝕谷。根據楊梅層岩性差異，可以分為下段的照鏡段及上段的照門段(塗明寬與陳文政，1990)，岩性均以砂岩及泥岩為主，但是在上段含有礫石夾層及貝殼碎片等。崩塌區多為照門段岩層，僅少部份為照鏡段岩層，兩段岩層在調查區中可以細分為二小段及七小段。

店子湖層為湖口台地附近分布最廣的岩層，主要岩性為礫石層與表層之紅土組成，紅土與礫石層之間常呈不規則的凸鏡體交錯疊置狀，此層的傾角相當平緩，但是在台地的邊緣有隨地形變化之情形，店子湖層的厚度各處不同，依據鑽井資料，最厚可達 17.5m。

湖口台地主要的地質構造有湖口背斜、湖口斷層(古兆禎，1963；湯振輝，1963；柏尼刺，1977)與不整合面。不整合面的證據極為

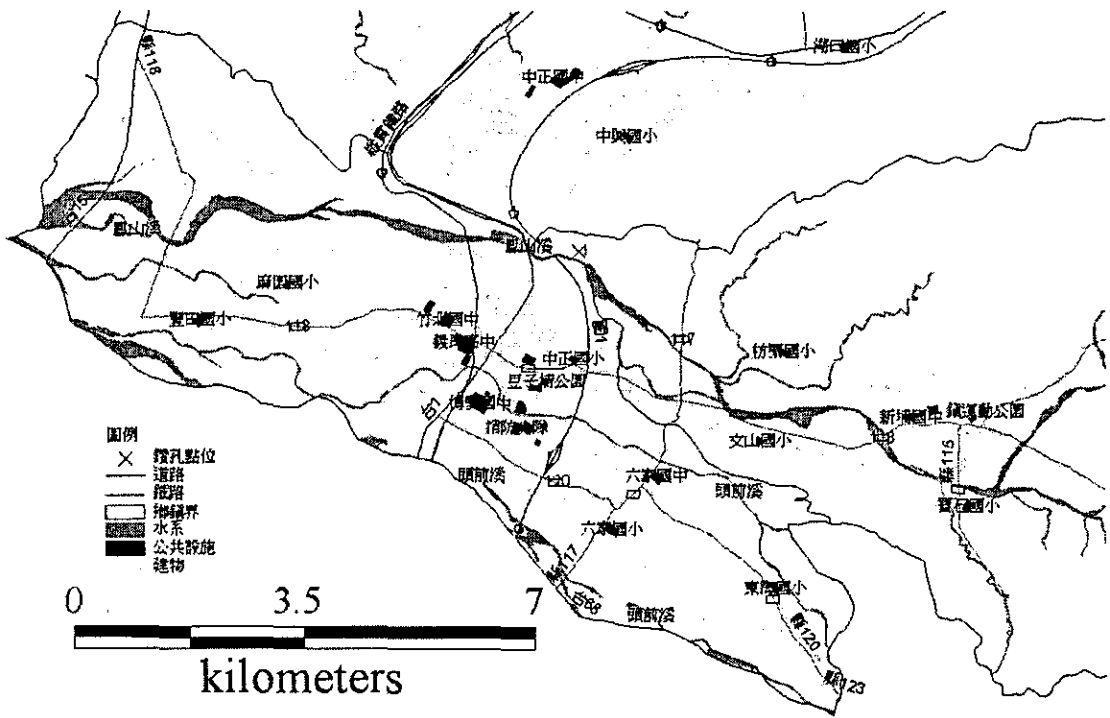


圖 3.3 鑽孔位置圖



圖 3.4 湖口試驗場地概況

表 3.1 試驗地點之地層概況

層次	平均深度(m)	地層說明
I	0.0~3.4	表層棕色粉土質粘土偶夾卵石
II	3.4~5.6	黃棕色粉土質細砂偶夾卵石
III	5.6~7.2	灰棕色粉土質細砂
IV	7.2~8.4	黃棕色細砂偶夾卵石
V	8.4~12.6	灰色泥岩及粉土質細砂互層
VI	12.6~13.3	黃棕色細砂夾卵石
VII	13.3~19.0	灰色粉土質細砂及泥岩互層
VIII	19.0~29.3	灰色中、細砂
IX	29.3~30.0	灰色泥岩

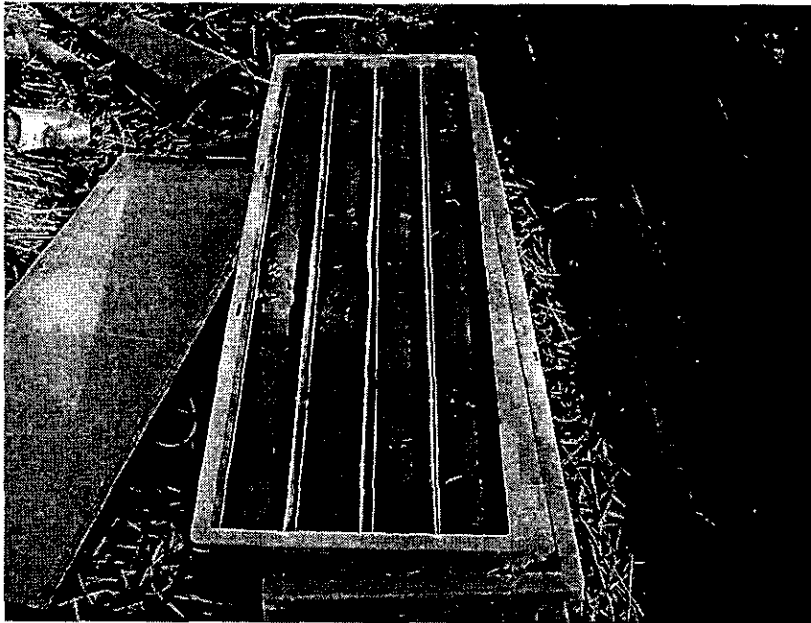


圖 3.5 岩心

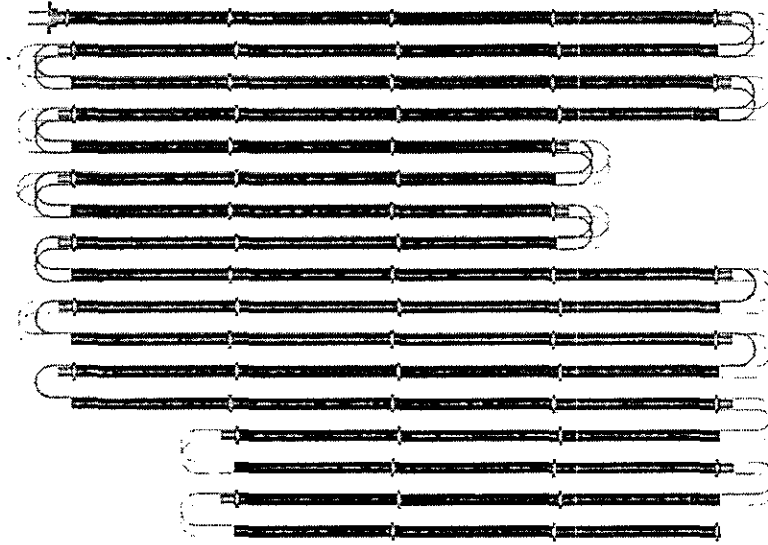


圖 3.6 30m 長 FBG-IPI 之組合示意圖

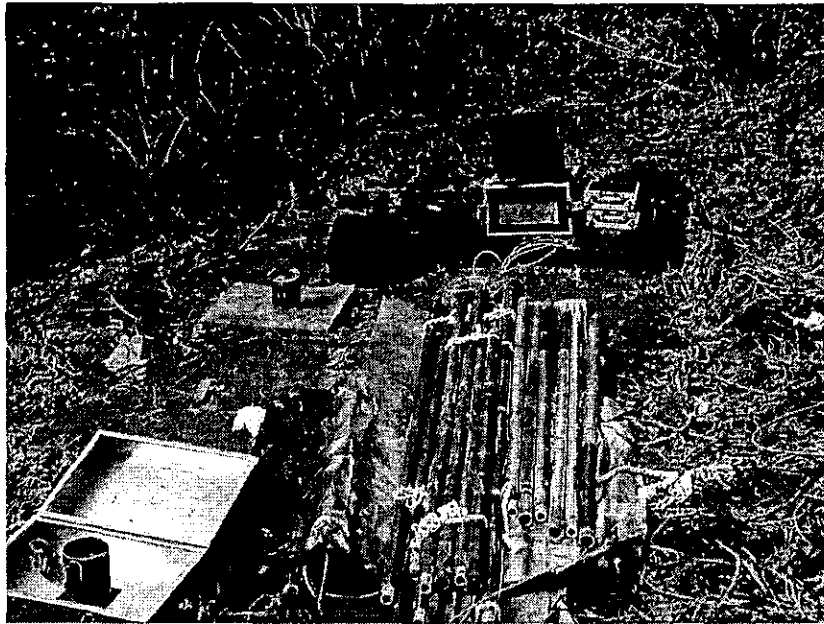


圖 3.7 FBG-IPI 實體照片

表 3.2 湖口地區光纖光柵應變管之光纖光柵分佈情況

深度 (m)	光柵反射 波長(nm)	光纖光柵 編號	深度 (m)	光柵反射 波長(nm)	光纖光柵 編號
1.25	1533	FBG1B-1-33	0.25	1533	FBG1A-1-33
3.25	1536	FBG1B-2-36	2.25	1536	FBG1A-2-36
5.25	1539	FBG1A-3-39	4.25	1539	FBG1B-3-39
7.25	1542	FBG1A-4-42	6.25	1542	FBG1B-4-42
9.25	1545	FBG1A-5-45	8.25	1545	FBG1B-5-45
11.25	1548	FBG1A-6-48	10.25	1548	FBG1B-6-48
13.25	1551	FBG1A-7-51	12.25	1551	FBG1B-7-51
14.75	1542	FBG2B-1-42	14.25	1542	FBG2A-1-42
15.75	1545	FBG2B-2-45	15.25	1545	FBG2A-2-45
16.75	1548	FBG2B-3-48	16.25	1548	FBG2A-3-48
17.75	1551	FBG2B-4-51	17.25	1551	FBG2A-4-51
18.75	1554	FBG2B-5-54	18.25	1554	FBG2A-5-54
19.75	1557	FBG2B-6-57	19.25	1557	FBG2A-6-57
20.75	1560	FBG2B-7-60	20.25	1560	FBG2A-7-60
21.75	1542	FBG3B-1-42	21.25	1542	FBG3A-1-42
22.75	1545	FBG3B-2-45	22.25	1545	FBG3A-2-45
23.75	1548	FBG3B-3-48	23.25	1548	FBG3A-3-48
24.75	1551	FBG3B-4-51	24.25	1551	FBG3A-4-51
25.75	1554	FBG3B-5-54	25.25	1554	FBG3A-5-54
27.75	1557	FBG3B-6-57	26.75	1557	FBG3A-6-57
29.75	1560	FBG3B-7-60	28.75	1560	FBG3A-7-60



圖 3.8 傾斜管安裝情形

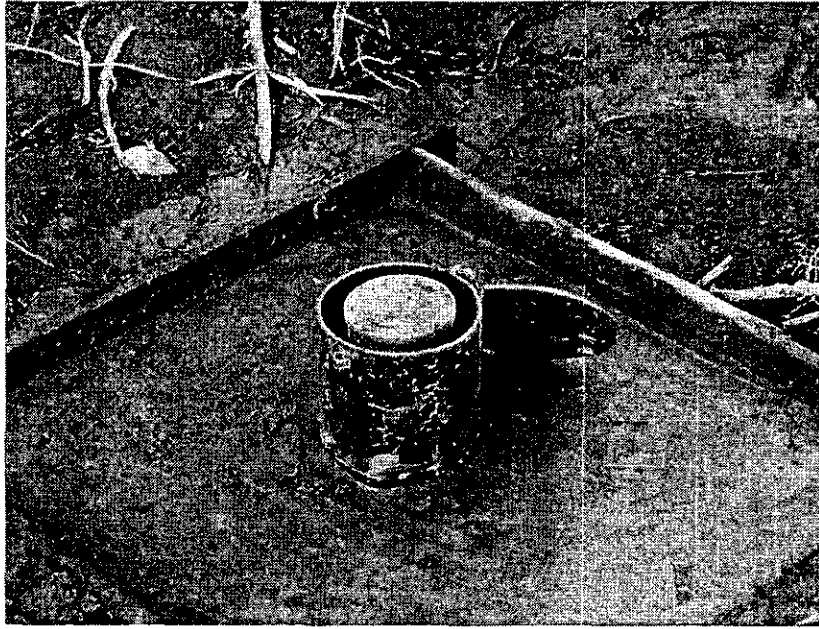


圖 3.9 傾斜管孔口保護

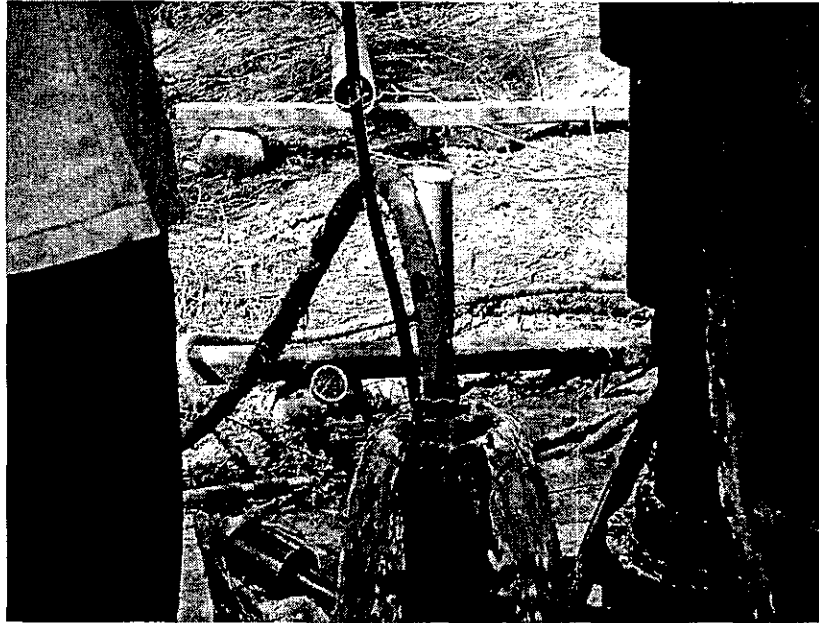


圖 3.10 TDR 變形纜線埋設過程

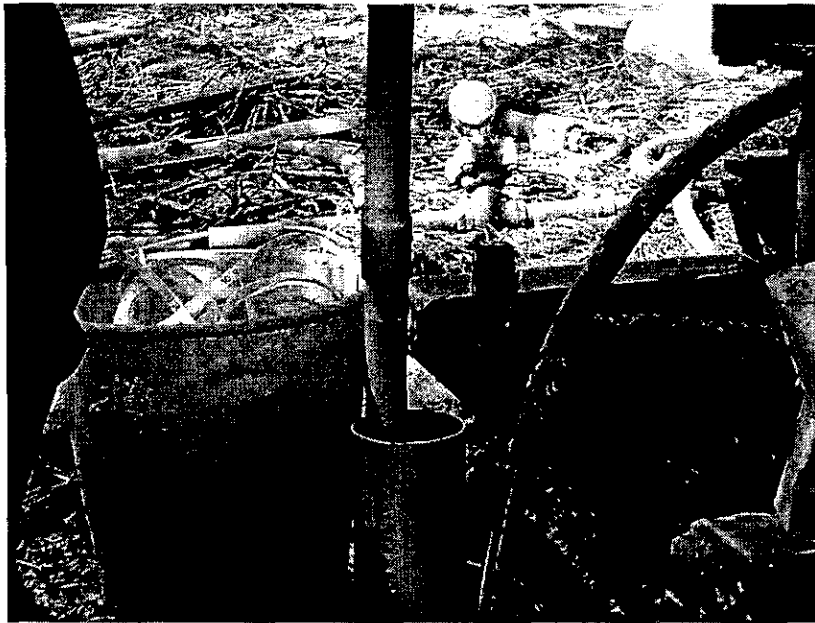


圖 3.11 水壓計安裝情形



圖 3.12 以濃縮皂土粒封層



圖 3.13 回填粗粒料

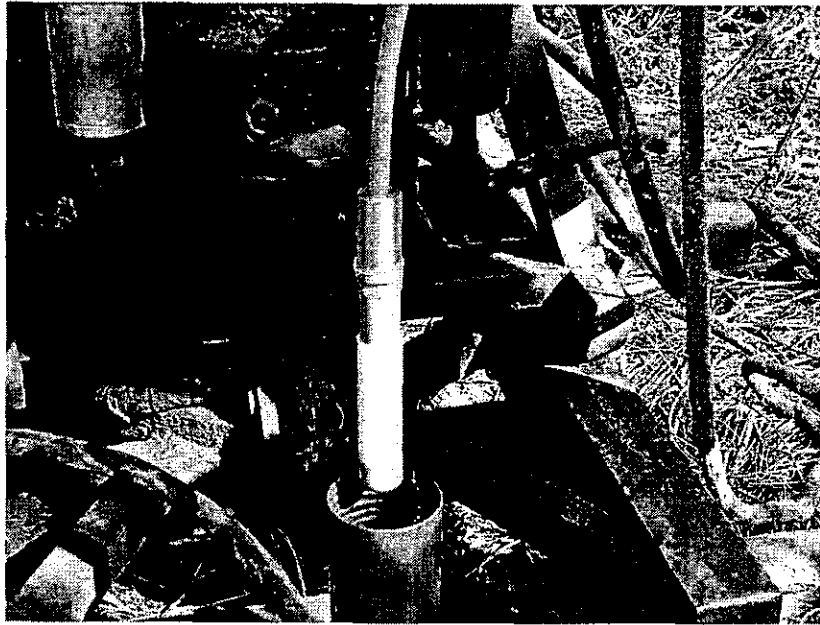


圖 3.14 TDR 水壓計安裝情形

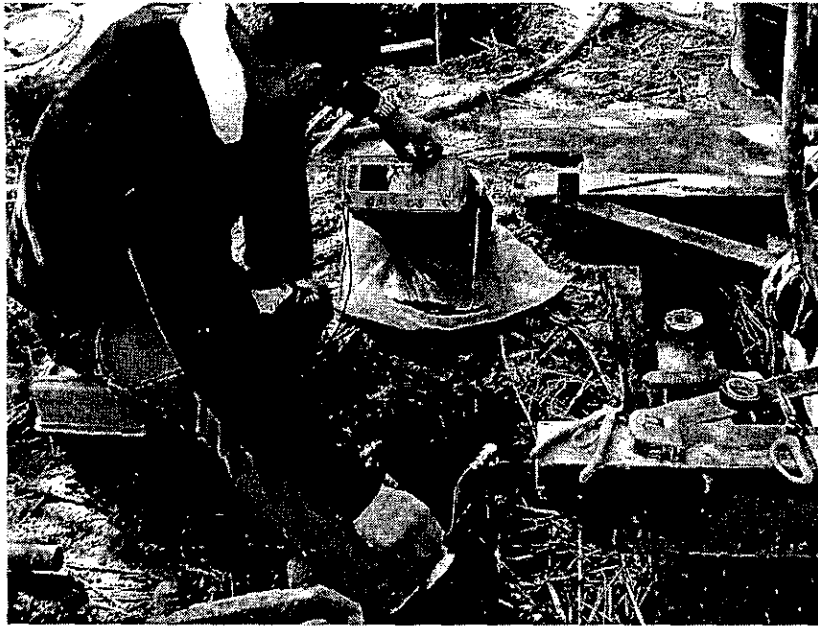


圖 3.15 TDR 水壓計測試情形

3.2.2 阿里山五彎仔試驗站

嘉義縣台 18 線通往阿里山俗稱五彎仔路段於今年 8 月間發生坍方。公路總局在原坍方路段上方修建聯絡道路。根據雲林科技大學張睦雄教授在此區域所做鑽探，崩坍以及聯絡道路下方約有 10m 左右之崩積層，其下方之岩層以砂岩與頁岩為主。因為本路段之重要性以及過去此區域地層多次發生坍方之紀錄，決定在此安裝光纖與 TDR 監測系統作為另一個試驗站。

阿里山試驗站所使用之 FBG-IPI 為改良式扭曲儀設計圖（詳述於第四章）。FBG-IPI 與 TDR 同軸電纜都安裝於圖 3.17 中之 II 鑽孔。此鑽孔位於台 18 線之下邊坡總深度 40m。孔內 FBG-IPI 與 TDR 同軸電纜之分佈配置如圖 3.16 所示。此配置便於未來兩種監測儀器讀數間相互之比較。

本工址鑽有兩孔，相關平面示意圖如圖 3.17 所示。TDR 錯動變形感測器則於 92/09/10 進行埋設，其中一孔埋設 PVC 管內，孔號為

P1，TDR 錯動變形感測器埋於管內與水壓計形成共構系統，埋設深度 39.22m；另一孔埋設傾斜管，孔號為 I1，TDR 錯動感測器埋於傾斜管管外，埋入時與傾斜管共構埋入，埋設深度 39.7m。埋設後 PVC 或傾斜管與 TDR 錯動變形感測器共構系統相關剖面示意圖為圖 3.18。

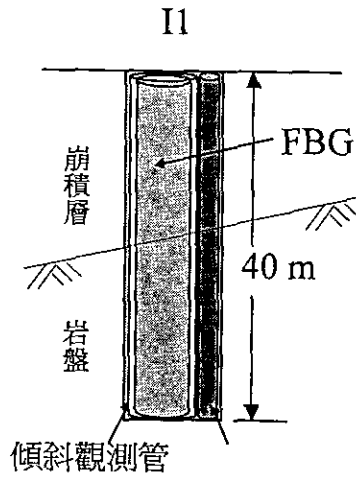


圖 3.16 I1 孔監測儀器配置

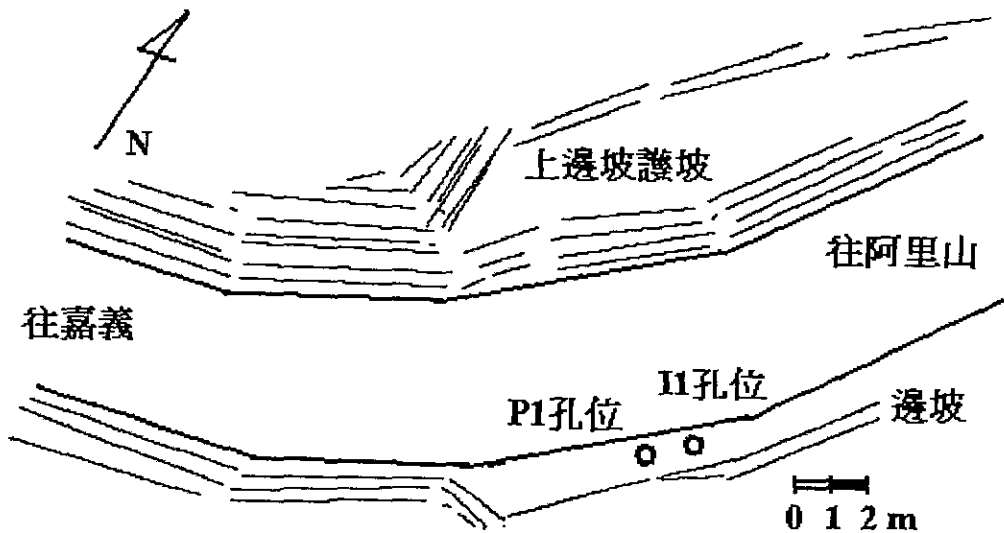


圖 3.17 佈設孔位平面示意圖

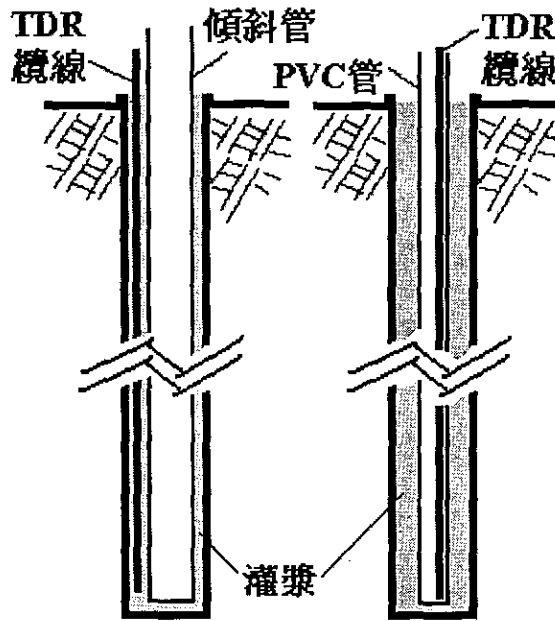


圖 3.18 佈設孔位剖面示意圖

3.3 光纖監測結果分析

3.3.1 湖口台地試驗站結果分析

原 FBG-IPI 設計以與直徑 7cm 傾斜管內槽溝匹配之支架支撐插入傾斜管內。安裝時發現由於傾斜管內槽溝位置之誤差過大，使得原本設計之 FBG-IPI 無法插入。因此決定將 FBG-IPI 外之支架拆除，然後將 FBG-IPI 放入傾斜管內以灌漿方法固定。FBG-IPI 安裝情況如圖 3.19(a)至圖 3.19(e)所示。在安裝完成後的灌漿作業時，由於灌漿管不慎拉斷其中一段光纖傳輸線路，因此最後在完成後在上坡面至 12.25m 處光纖光柵失去作用，連帶造成下坡面該段位置無法修正因溫差造成之光柵讀數反應，在數據判讀上，造成莫大的困難。

圖 3.20 為安裝後以 92/01/02 至 06/03 間 IP 傾斜儀量測所得之相對結果，該處地表共移動 10.12mm，在深度約為 6.5m 的地方，傾斜管有一明顯的突起，在該處上方傾斜管傾斜幅度也較下方為大，因此可以判斷該處應為滑動面。

FBG-IPI 在 92/01/02 至 06/03 間所得之相對讀數，光柵波長之改變量分別展示於圖 3.21(a)至圖 3.21(d)，將 03/26 前後之讀數分別展示。本次經驗顯示在長期使用光纖光柵掃瞄分析儀時，光柵之波長會隨每次開機之外在氣溫以及開機時間而有飄移現象。因此光柵之溫度效應修正非常重要，但原設計做溫度校正所安裝之光柵於灌漿時折斷因此失去讀數（圖 3.21 上坡面 12m 深度以上之讀數）而無法做溫度效應之修正。為降低開機時間之影響，03/26 日以後所得 FBG 讀數都是在光纖光柵掃瞄分析儀開機後 1 小時開始。

依據光纖光柵掃瞄分析儀之規格，其重複性在 $\pm 5\mu m$ 之間、對於波長判定誤差最大 $\pm 10\mu m$ 而言，圖 3.21(c)及圖 3.21(d)中，在包含溫度效應影響下，大部分波長變化量仍在此範圍中，而根據手拉式傾斜儀讀數而言，此段時間內地表滑動量約不到 0.1mm，以現有光纖光柵應變管及設備仍無法達到所需之穩定度。



圖 3.19(a) 光纖光柵應變管連接

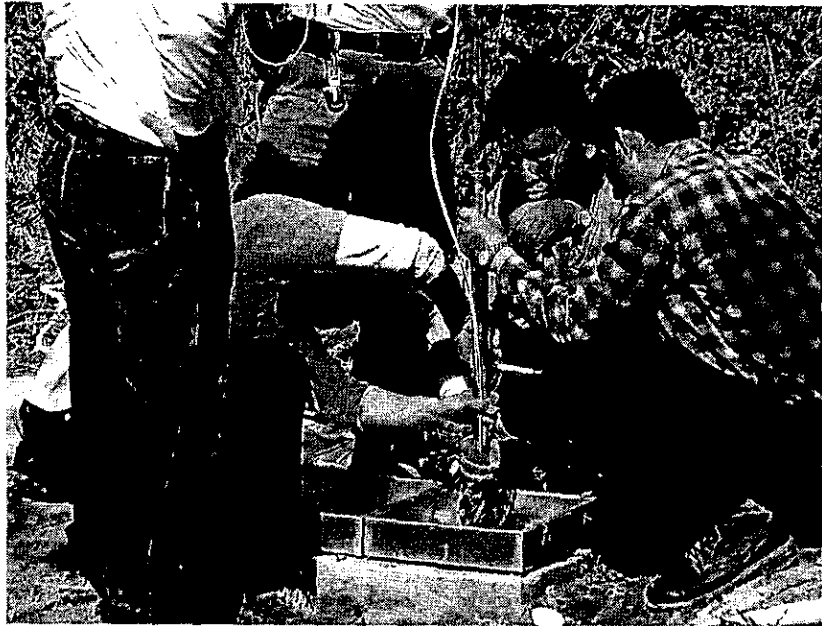


圖 3.19(b) 固定光纖纜線

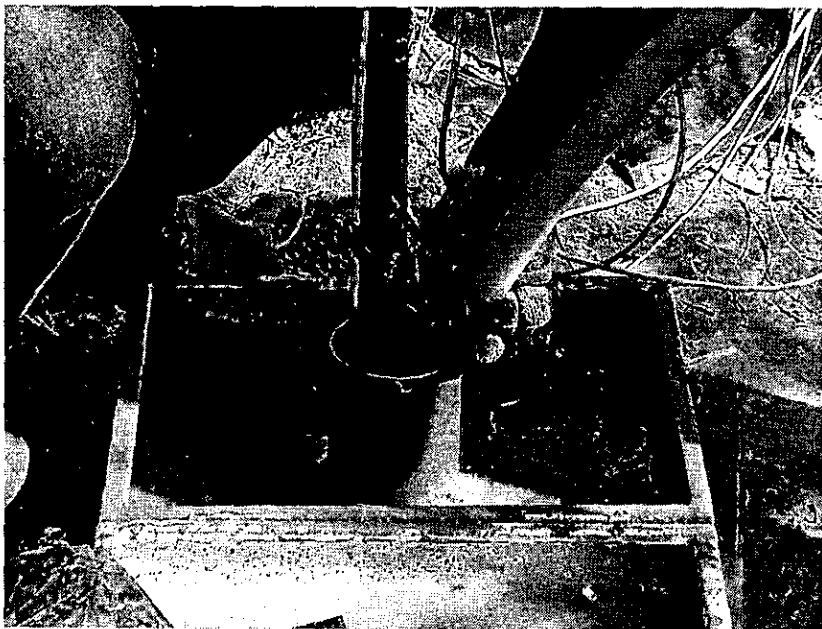


圖 3.19(c) 灌漿

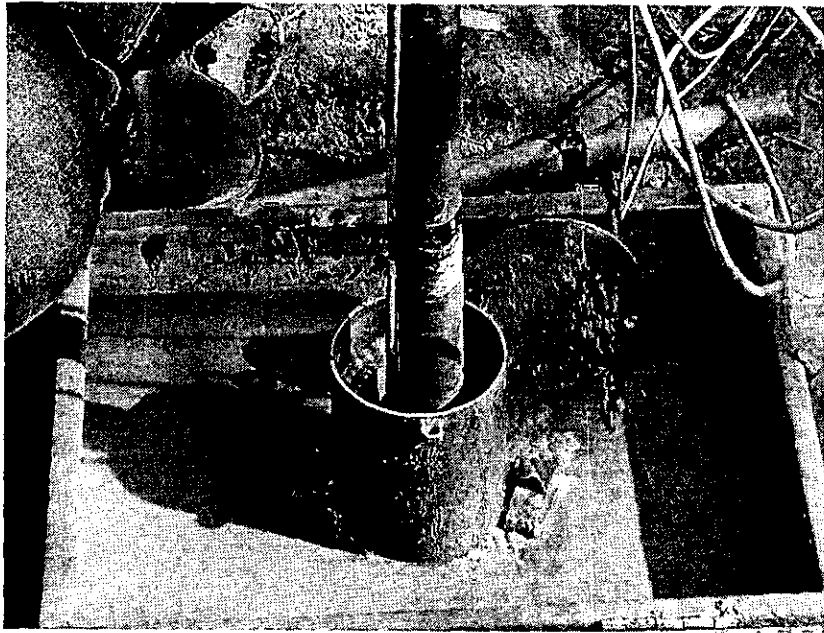


圖 3.19(d) 調整光纖光柵應變管方向



圖 3.19(e) 光纖光柵應變管安裝完成

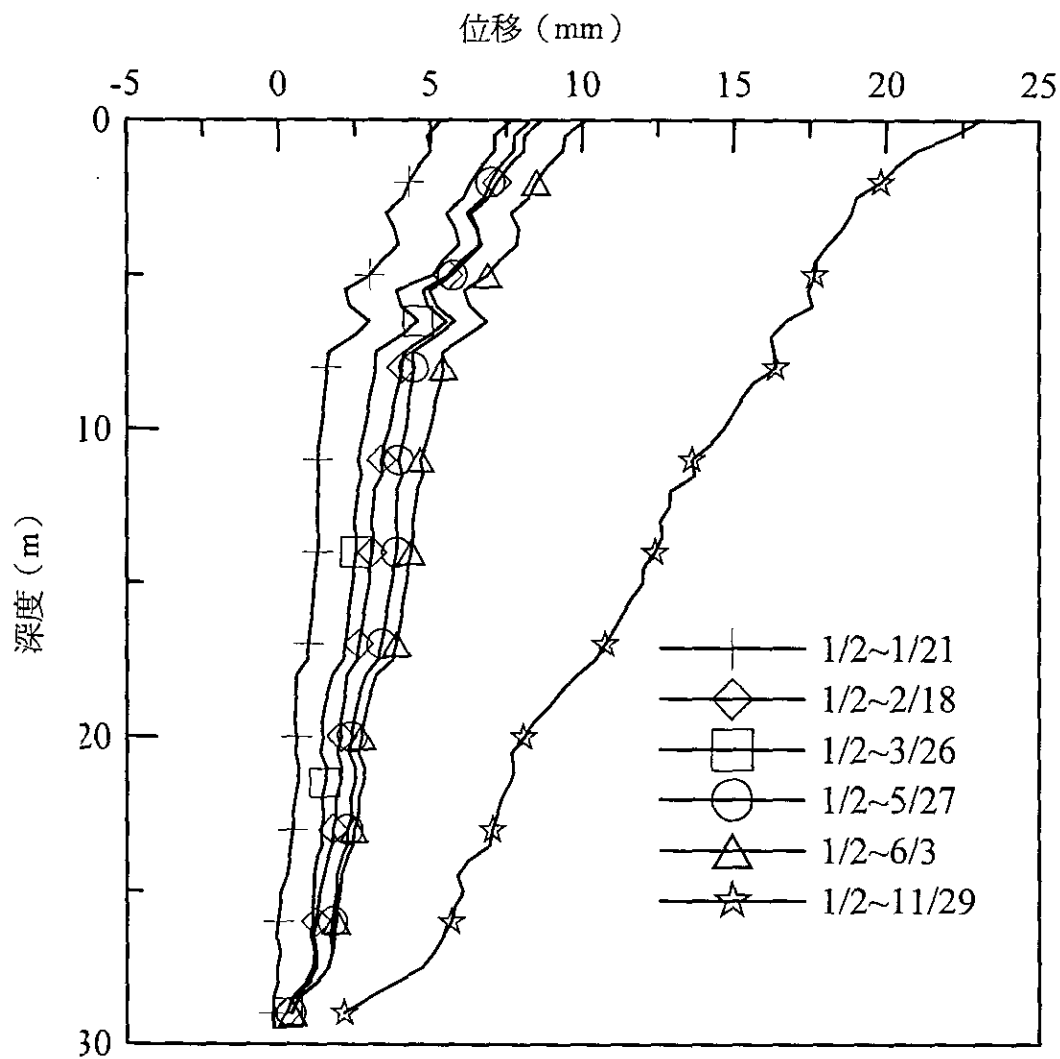


圖 3.20 IP 傾斜儀結果

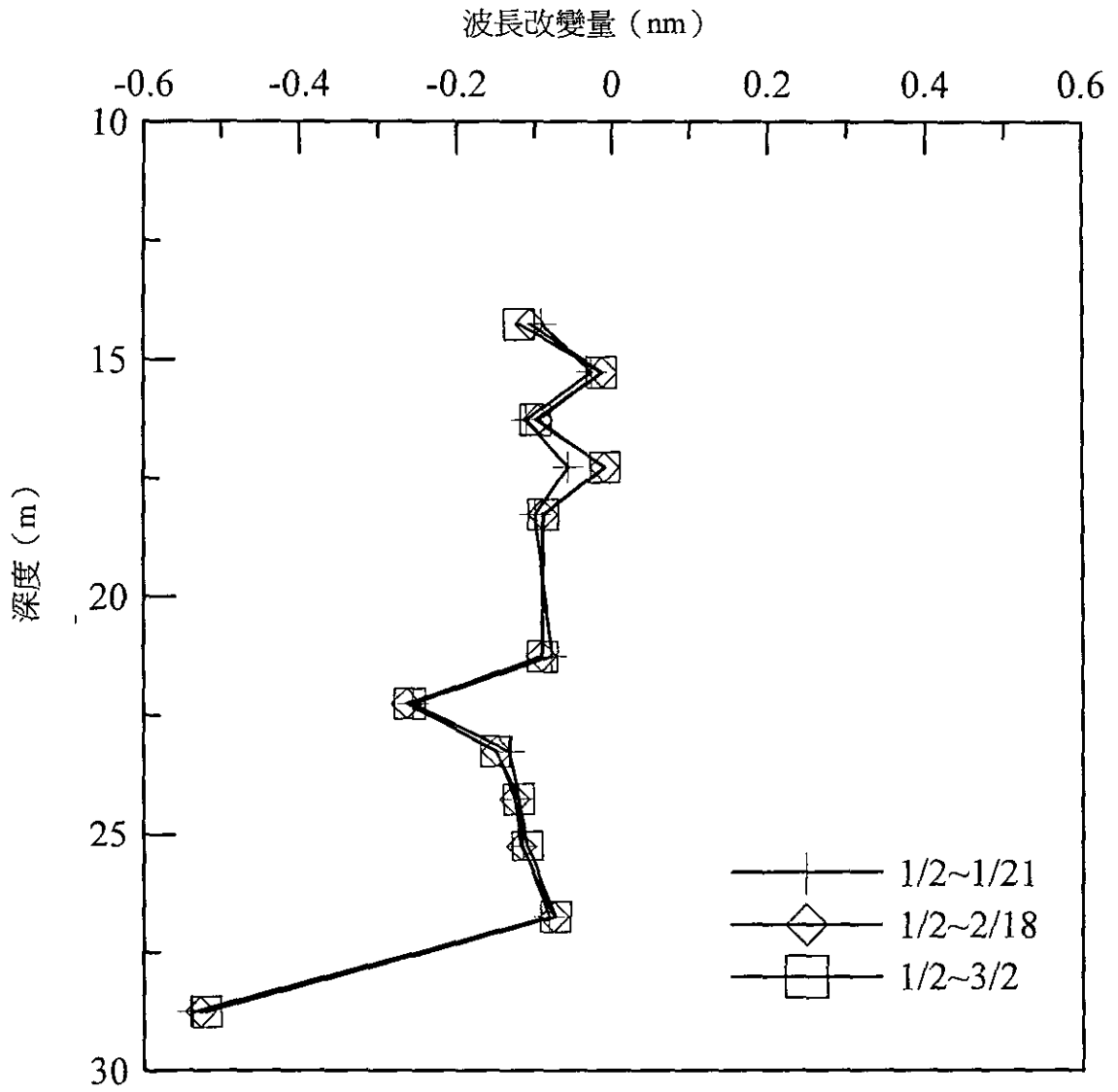


圖 3.21(a) 光纖光柵應變管讀數(上坡面)

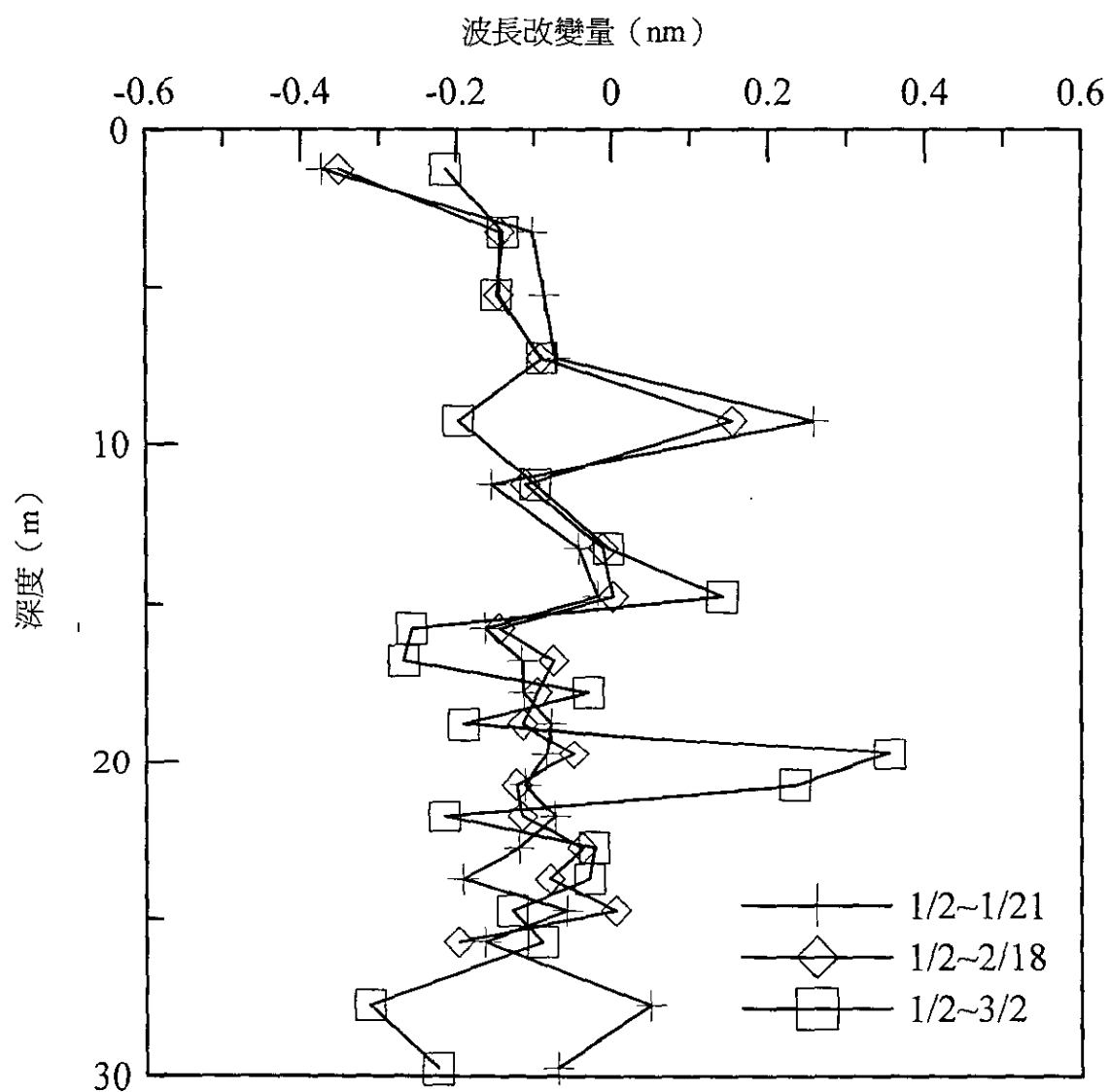


圖 3.21(b) 光纖光柵應變管讀數(下坡面)

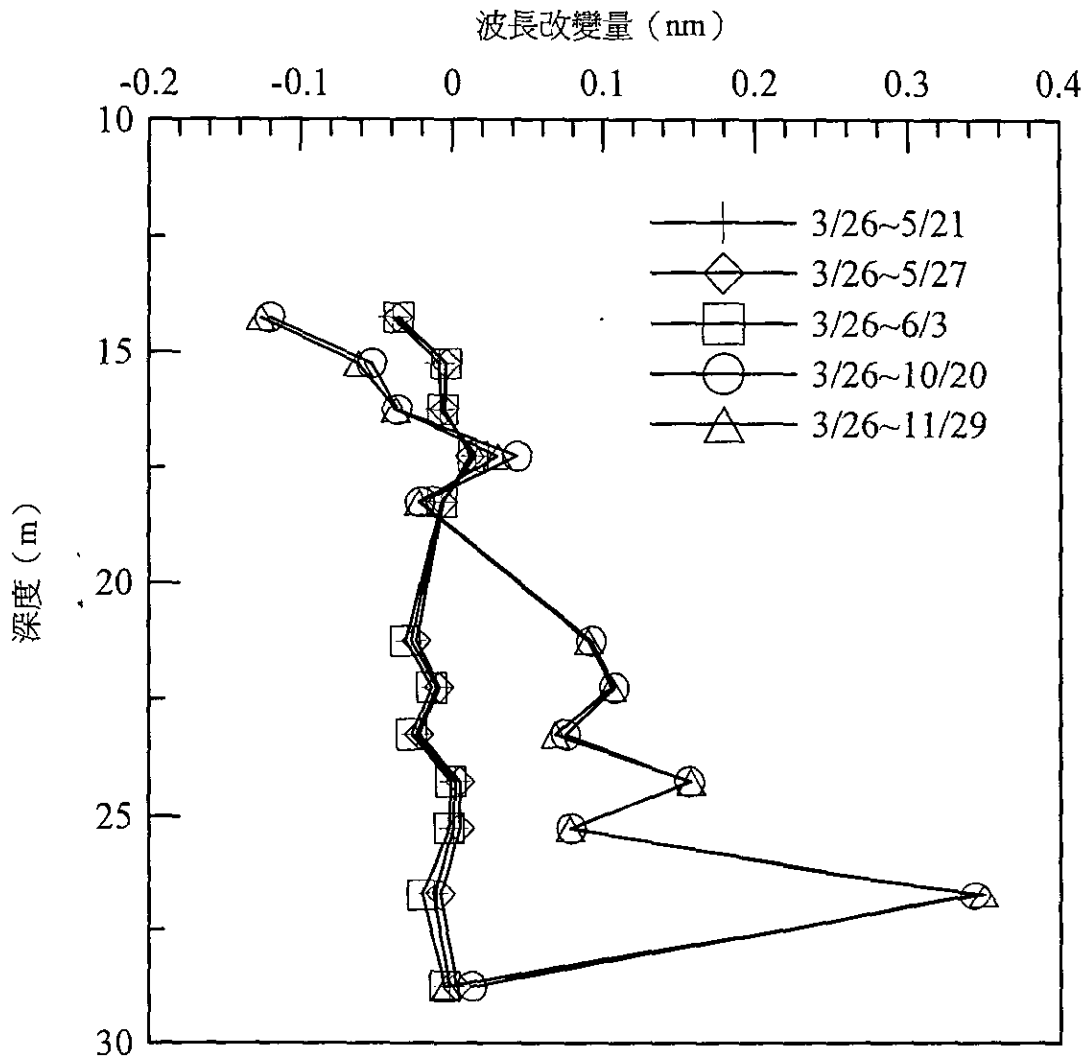


圖 3.21(c) 光纖光柵應變管讀數(上坡面)

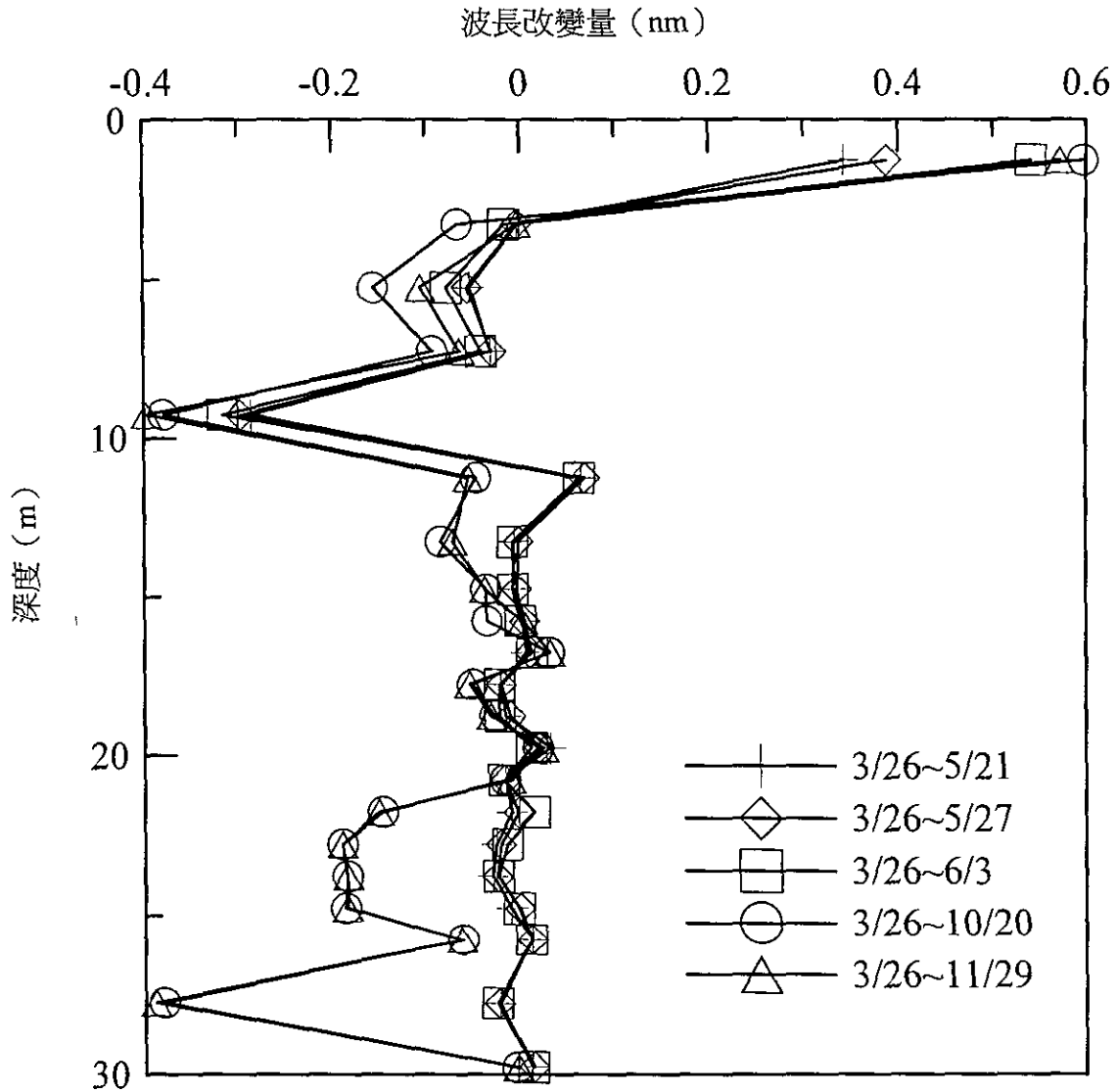


圖 3.21(d) 光纖光柵應變管讀數(下坡面)

在湖口使用 FBG-IPI 之經驗顯示，若需達到本儀器之功能，所使用之光纖光柵掃瞄分析儀其解析度必須在 $\pm 0.1pm$ 之內，其長期之穩定度（讀數變化量）必須在 $\pm 1pm$ 之內。或者，可以從 FBG-IPI 之設計著手以加強扭曲儀讀數之放大效應，例如使用半徑較大之軟管或以應變集中的方法來抵銷光纖光柵掃瞄分析儀讀數解析度不足之缺點。

3.3.2 阿里山五彎仔試驗站結果分析

FBG-IPI 於 92/10/25 裝設，總深度為 20m 裝在 I1 孔之上部（從地表向下 20m），由於孔深為 40m，故底部以 PVC 管支撐。圖 3.22 與圖 3.23 分別展示安裝前之改良型 FBG-IPI 與安裝之情形，安裝完成後即紀錄初始讀數。接著於 11/18 在試驗站作第二次量測，並將結果經由計算來推估地層之移動，如圖 3.24 所示。根據圖 3.24 所示之結果，此監測點在 10/25 與 11/18 並沒有明顯之移動。

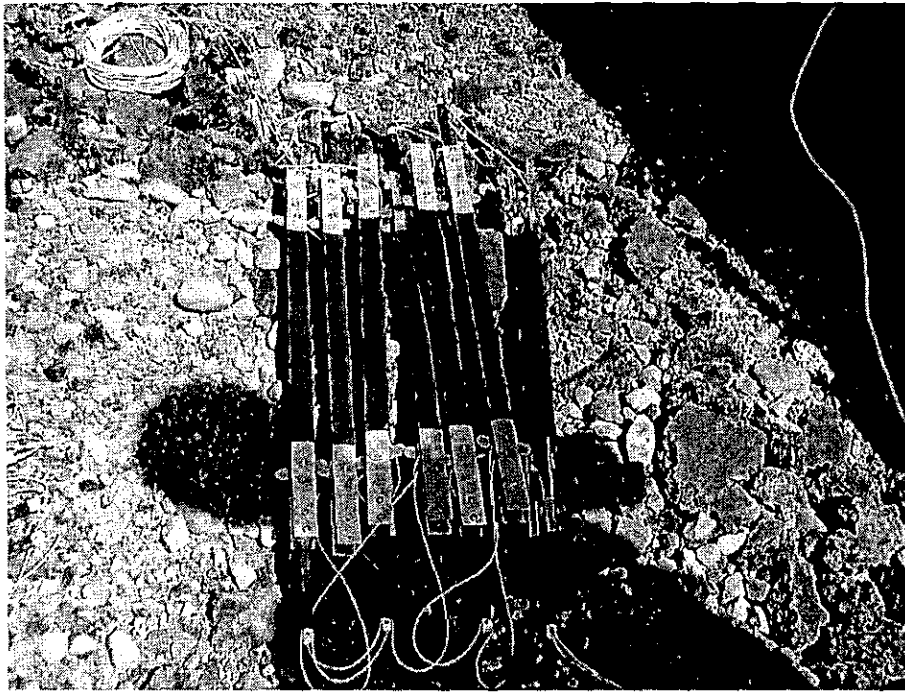


圖 3.22 安裝前之改良型 FBG-IPI



圖 3.23 改良型 FBG-IPI 之安裝

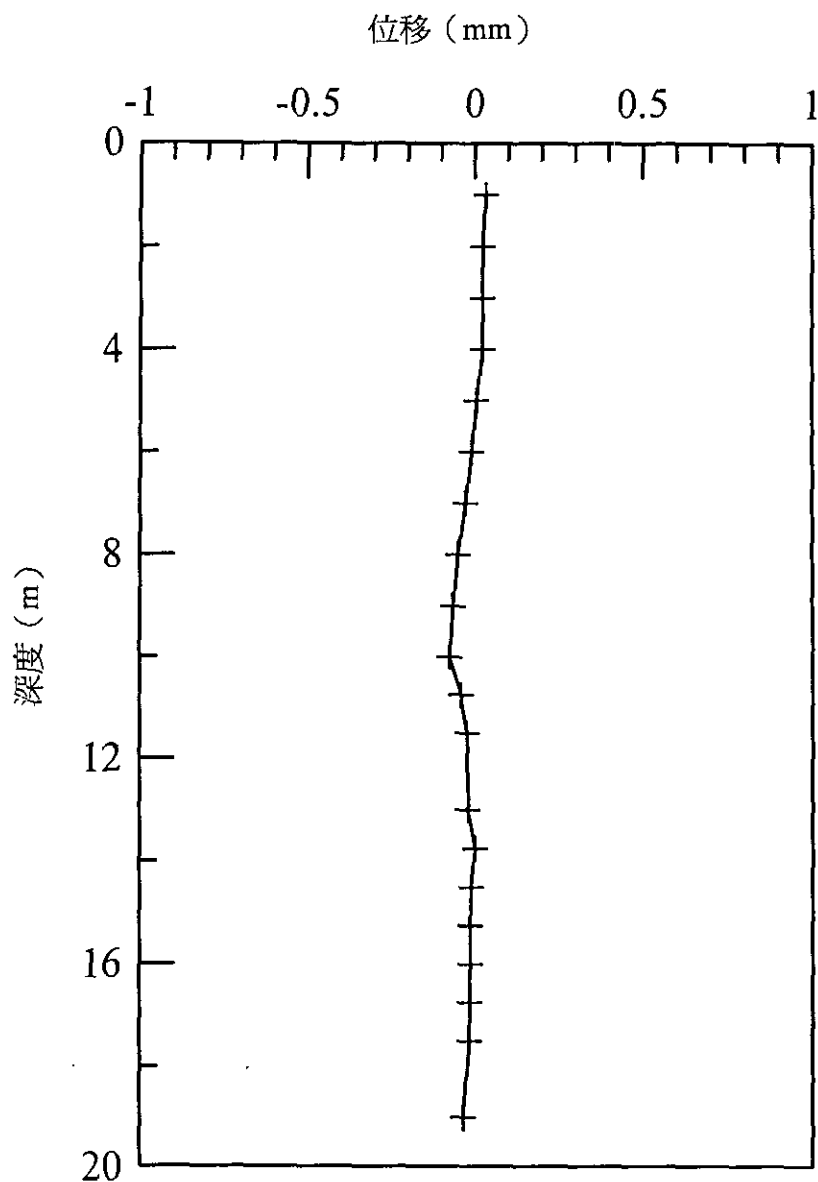


圖 3.24 10/25 至 11/18 根據 FBG 所量得位移

3.4 TDR 監測結果分析

3.4.1 湖口試驗站錯動變形監測結果

經由先前變形傳輸纜線之埋設以及監測資料之擷取，我們獲得圖 3.25 之 TDR 現地變位原始資料，因為埋設於線地之 TDR 變形傳輸纜線長度約為 34m，電阻為 75 歐姆，擷取資料時所使用之延長線長度為 2m，電阻為 50 歐姆，因此由圖中之資料我們可知，由於傳輸纜線與延長線之電阻不同，因此在延長線與傳輸纜線結合處之

TDR 反射訊號呈現階梯狀之上升，由於距離地表 4 至 5m 處之 TDR 反射波形相當怪異，經由實驗室之試驗探討至目前為止仍無法獲得較佳之解釋，故以圖 3.26 之現地試驗相對變形資料，來探討此一現地變形資料，由圖中我們可清楚得知 TDR 變形相對值均為零，即埋設於現地之傳輸纜線尚未受到錯動變形，亦即湖口現地尚未有明顯的滑動跡象。截至 92/11/17，錯動變形量測與先前監測資料比較並無明顯變化，結果如圖 3.25 監測歷程與圖 3.26 反射係數與初始差異所示。

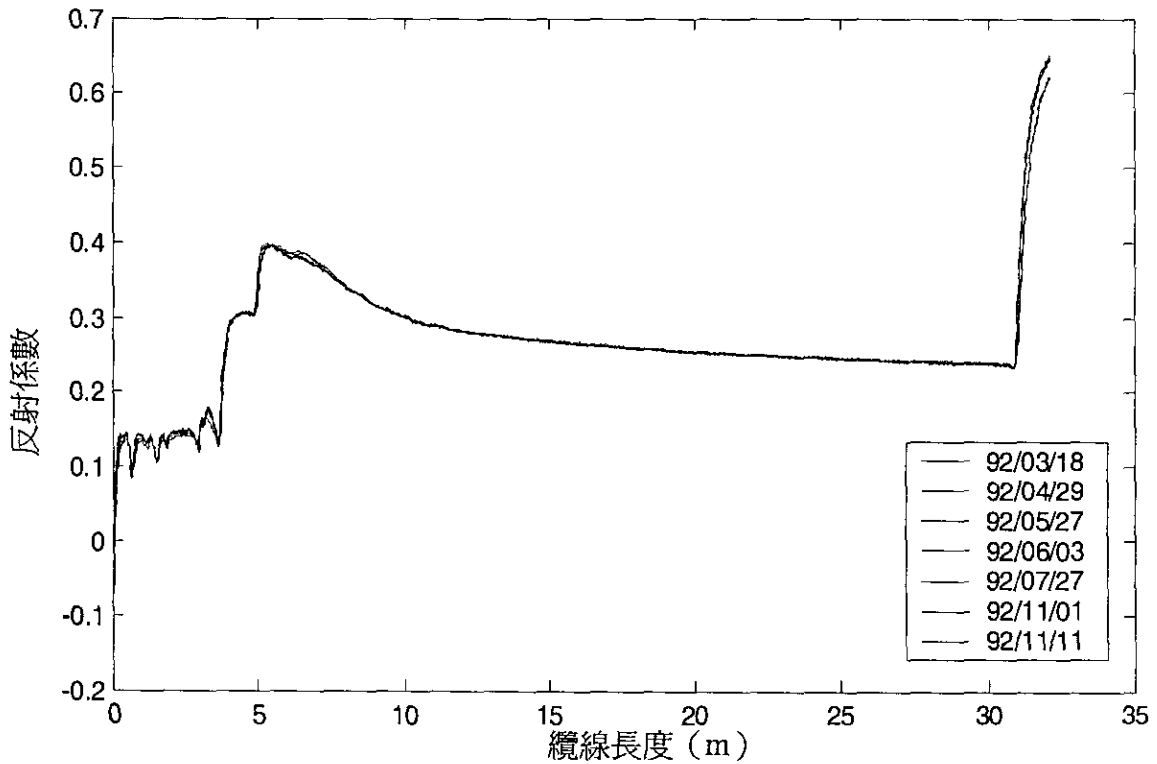


圖 3.25 湖口現地試驗之原始變形資料

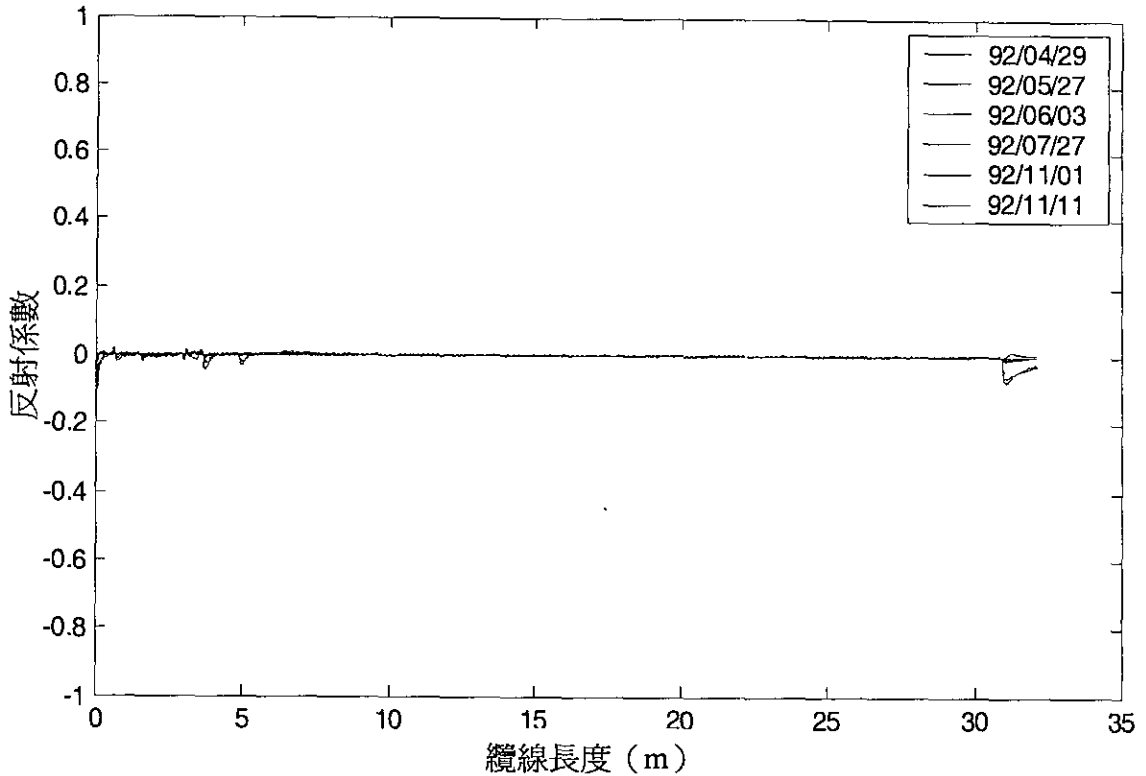


圖 3.26 湖口現地試驗之相對變形資料

3.4.2 湖口監測站水壓監測結果

本計畫於湖口台地南邊之鳳山溪，在義民廟附近道路旁之邊坡裝設了單孔多深度之 TDR 式水壓計（單孔兩種深度）與兩孔傳統開口式水壓計（其中一孔為單孔兩種深度）。根據該區之區域地質調查資料，其出露的地層有更新世楊梅層、店子湖層，全新世階地堆積層、沖積層等。如圖 3.27 所示，大約地表下 8.4~12.6m 處與 13.3~19.0m 處有不透水泥岩層存在。因此，TDR 水壓計將以此為埋設深度之依據。上游井裝設了 TDR 水壓計與傳統開口式水壓計。將單孔兩種深度的 TDR 水壓編號，第一號 TDR 水壓計埋設深度為 16.01m。第二號 TDR 水壓計埋設深度為 10.02m，其監測安裝示意如圖 3.28 所示，傳統開口式立管水壓計埋設深度在 15.7m 處，安裝於 TDR 水壓計旁約 1.5m 處。下游井僅裝設傳統開口式立管水壓計

，單孔兩種深度，編號為第三號，埋設深度為 17.16m，與編號為第四號，埋設在 13.20m 處。

本研究不定時量測水位高度，其水位高度以地表為起算點，量測結果如圖 3.29、圖 3.30 所示。圖 3.29 為編號三、四號傳統開口式立管水壓計，使用 TDR 水位計量測之水位觀測結果，為驗證 TDR 水位量測之準確度，手動量測之結果亦顯示在圖 3.29 上，兩者相當吻合。圖 3.30 為傳統開口式水壓計，使用 TDR 與手動量測之結果比較。顯然 TDR 水位感測器確實有量測到水位之變化。

截至目前量測(92/11/17)，本次 TDR 與捲尺量測最大誤差量 0.13m，紅字部分為過去呈現誤差過大之處，研判因捲尺為簡陋判別水位方法，不同人量測結果互異；TDR 則使用 SOP 標準程序，計算水位為各量測波形相對量加上初始標定值，理論上，勢必減少系統誤差。除上述之外，當感測器移入或移出非固定式 TDR 監測井時(孔徑小)，因感測器本身佔有體積，將導致水位上升或下降，亦是誤差來源之一。

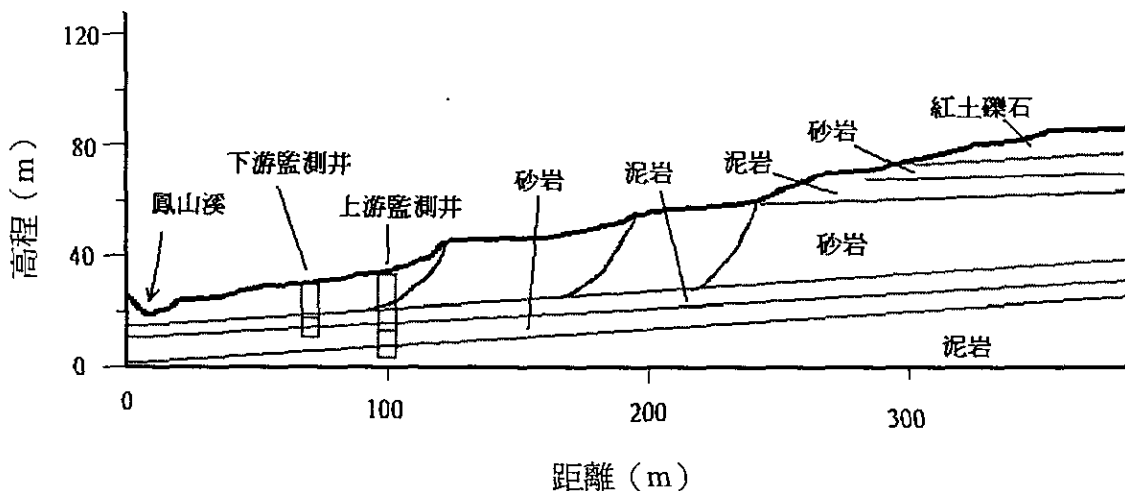


圖 3.27 湖口地質及水位、水壓監測位置示意圖

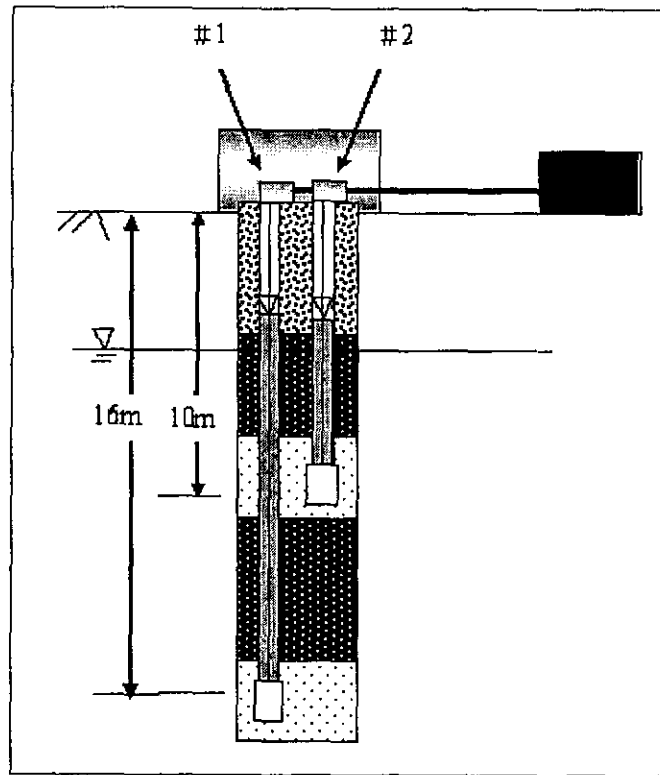


圖 3.28 湖口 TDR 水壓計安裝示意圖

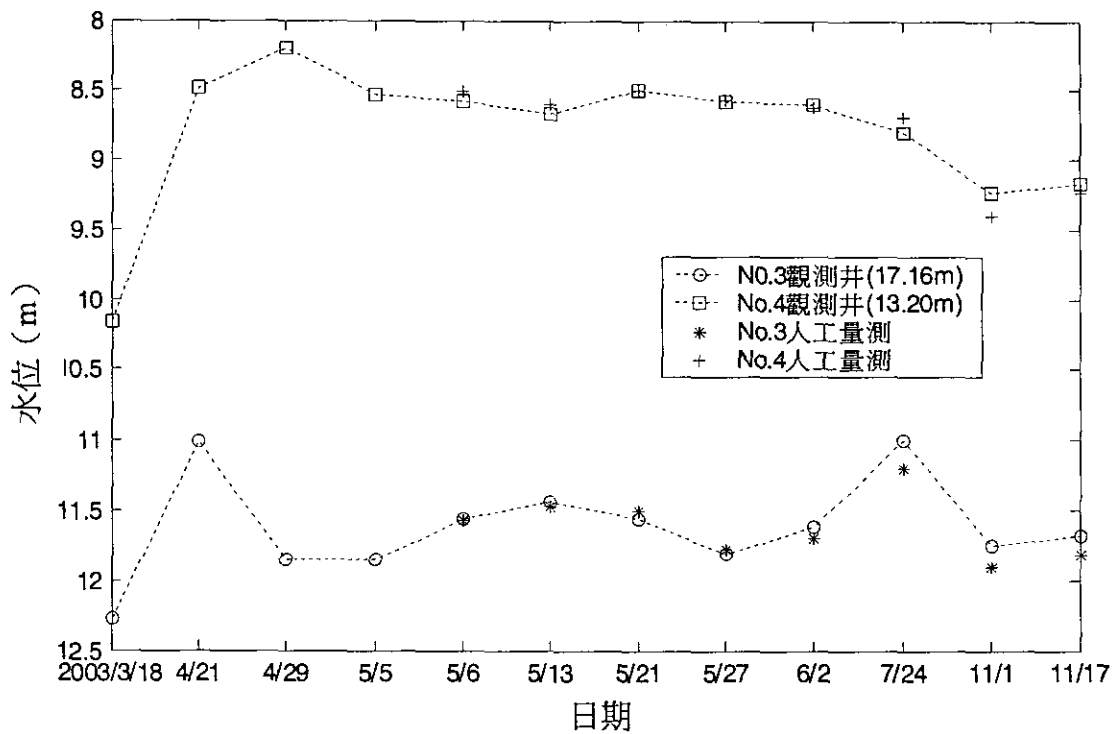


圖 3.29 TDR No 3(R2)、No 4(B2)孔位與捲尺量測比較(11/17)

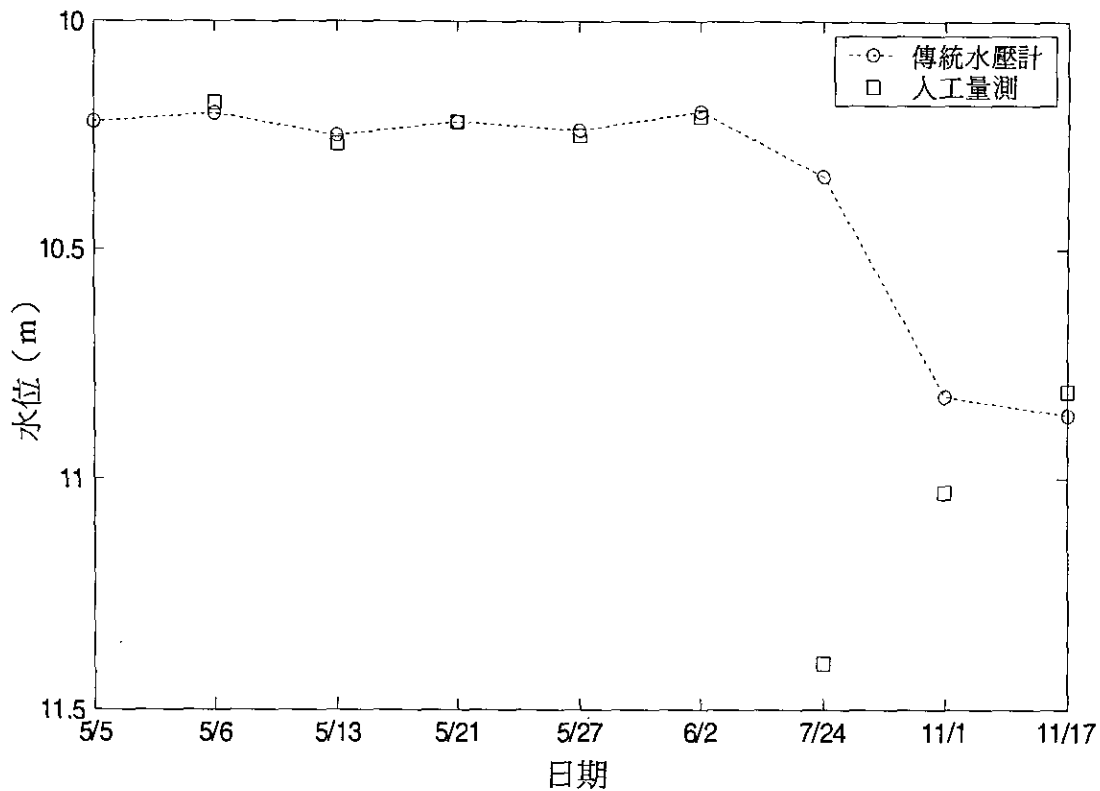


圖 3.30 傳統水壓計(R3) TDR 與捲尺量測比較

3.4.3 阿里山五彎仔監測站錯動變形監測結果

由圖 3.31 感測器長度與反射係數顯示，於 P1 孔位處並無明顯錯動變形發生。圖 3.31 為以 92/9/16 反射係數為初始基準值，與 92/11/17 量測值之間的差異。

I1 孔位錯動變形監測處感測器接頭遭不明原因破壞約 10cm，故轉接處裁去 10cm，但仍不影響監測結果判釋，唯 TDR 資料擷取波形需予以平移，以對於同一位置錯動變位進行比較。圖 3.33 為平移修正後反射係數與感測器長度關係，圖 3.34 則為與 92/9/16 日反射係數差異，由上兩圖發現，並無明顯錯動發生。

由於此場址距離埋設時間尚短暫，因此初步量測結果僅三筆資料，但由現有資料判釋而言，此場址尚未有明顯邊坡滑動發生。

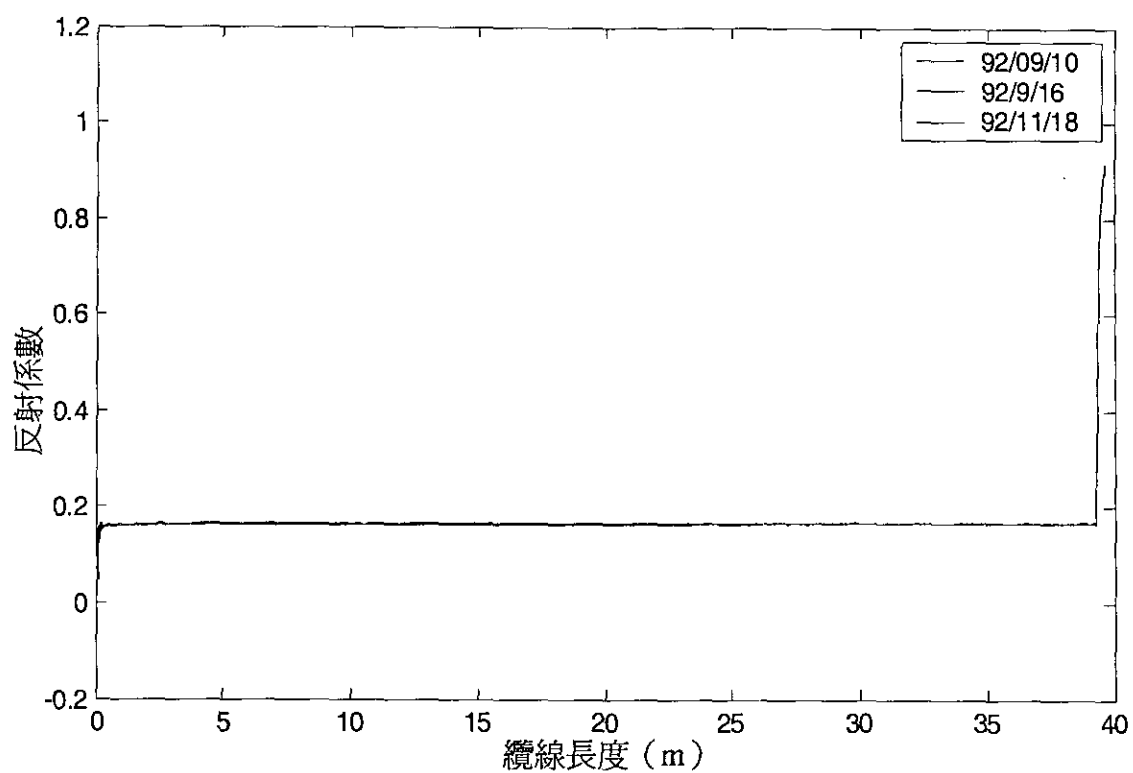


圖 3.31 P1 孔位 TDR 感測器長度與反射係數關係

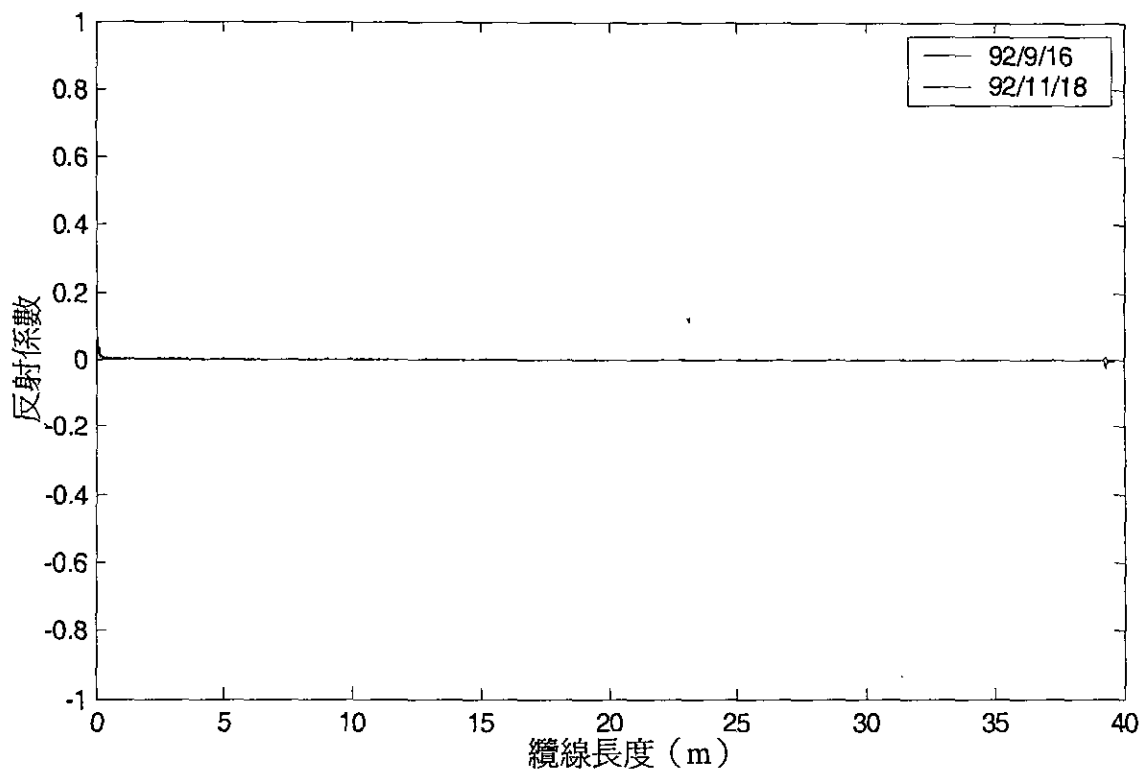


圖 3.32 P1 孔位反射係數之差異

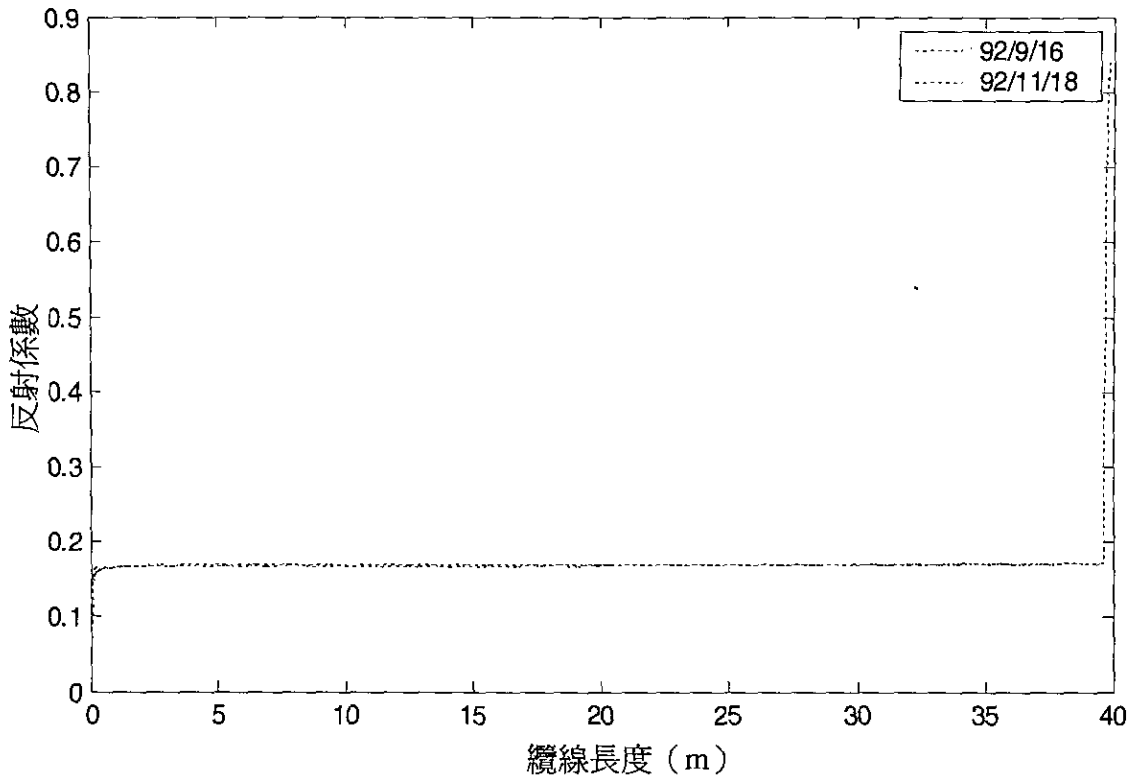


圖 3.33 I1 孔位 TDR 感測器長度與反射係數關係

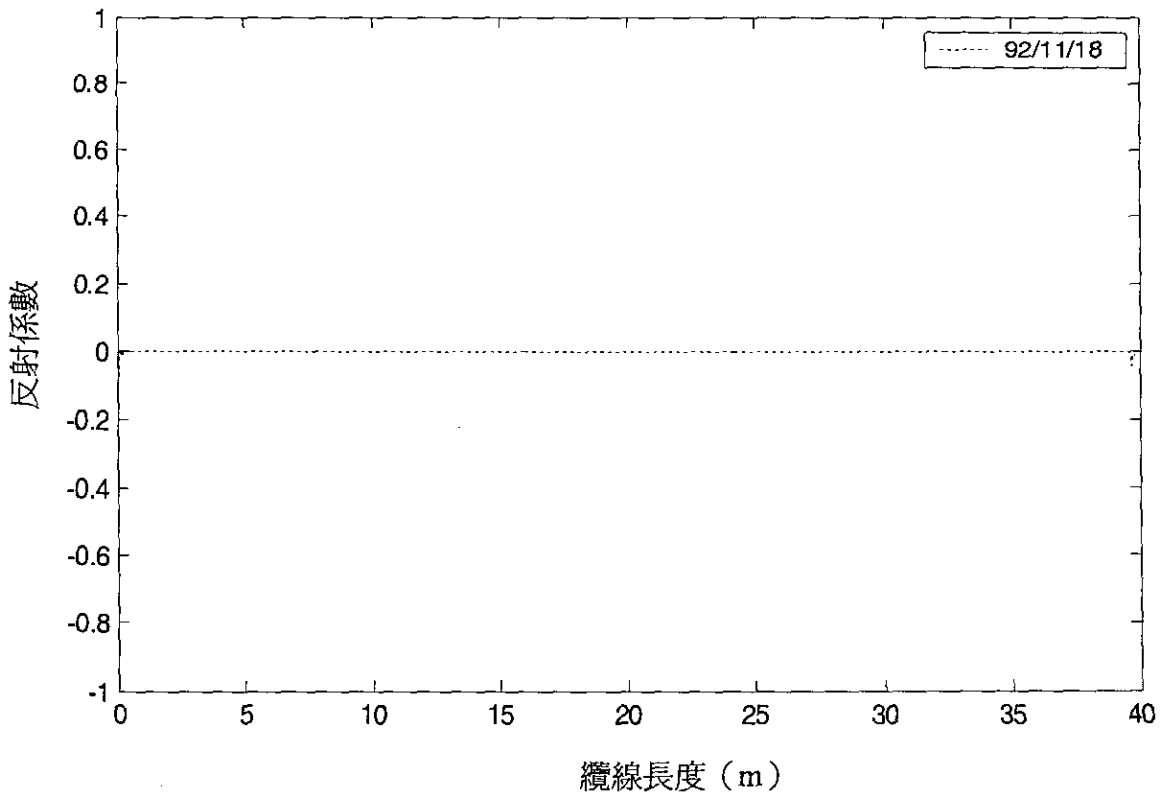


圖 3.34 I1 孔位反射係數之差異

四、監測技術改善與研發

4.1 光纖光柵扭曲儀之改良

在湖口使用第一代 FBG-IPI 之經驗顯示，若需達到本儀器之功能，所使用之光纖光柵掃描分析儀其解析度必須在 $\pm 0.1\mu m$ 之內，其長期之穩定度（讀數變化量）必須在 $\pm 1\mu m$ 之內。或者，可以從 FBG-IPI 之設計著手以加強扭曲儀讀數之放大效應，例如使用半徑較大之軟管或以應變集中的方法來抵銷光纖光柵掃描分析儀讀數解析度不足之缺點。扭曲儀如果將光纖光柵黏貼在一連續之塑膠管上，安裝時容易使光纖斷裂，研究團隊基於以上之考量已完成扭曲儀做進一步的改良，分別說明如下：

(1) 儀器感測元件之改良

新設計的感測元件，其結構如圖 4.1 所示，新的設計是因為限於光柵讀取儀器精確度只有 $10\mu m$ ，所以經過累加計算後，可能會造成過大的誤差量，所以重新設計之元件兩端是由剛性鋁片所組成，中間為一柔性材料(塑鋼)，將光柵貼覆在塑鋼上，將兩端剛性材料所受到的應力傳到中間柔性材料上，此時對柔性材料會有應變集中的現象，也就會有將應變放大的效果，對於解析度之增加會有很大幫助。圖 4.2 顯示改良設計之實體照片。

(2) 新感測元件公式原理

推導公式是由懸臂樑理論與三角函數關係所組合而成的，將其與波長讀數間之關係分別說明如下：

(A) 懸臂樑理論與波長關係之推導：

懸臂樑上任一點側向位移如式 4.1 所示，其與懸臂樑水平之夾角如式 4.2，結合式 4.1 與式 4.2 可得出角度與位移之關係，如式 4.3 所示

。而我們經由標定可以得出波長改變量與側向位移改變量之關係，其試驗結果如圖 4.3 所示，故我們可以間接求得波長改變量與角度改變量之關係。

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\theta = \frac{PL^2}{2EI} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$\theta = \frac{3\delta}{2L} \dots\dots\dots(4.3)$$

(B) 三角函數與波長關係之推導：

由於在改良式測傾儀中，第一節塑鋼在遠端點因外力影響所形成的角度會變成下一節改良式測傾儀的初始角度，故對於相同的垂直地表面基準線而言，會需要將角度相加後，再以 tan 函數表現出鋁管的側向位移量，但此時所求得的位移量並非全部的位移量，而需加上塑鋼的側向位移量才是全部的位移量，其原理推導關係如圖 4.4 所示。

綜合上述，所推導之公式如下：

$$d1=LF*\tan(RF1)+LR*\tan(FR1)$$

$$d2=LF*\tan(FR1+RF2)+LR*\tan(FR1+FR2)$$

$$d3=LF*\tan(FR1+FR2+RF3)+LR*\tan(FR1+FR2+FR3)$$

所以我們可以推導出：

$$L=d1+d2+d3=LF*(\tan(RF1)+\tan(FR1+RF2)+\tan(FR1+FR2+RF3))+$$

$$LR*(\tan(FR1)+\tan(FR1+FR2)+\tan(FR1+FR2+FR3))$$

若假設最前面一段與地面並不是垂直，有一角度 FR0，則公式

修正如下：

$$L=d_1+d_2+d_3=LF*(\tan(FR_0+RF_1)+\tan(FR_0+FR_1+RF_2) + \tan(FR_0+FR_1+FR_2+RF_3))+ LR*(\tan(FR_0+FR_1)+ \tan(FR_0+FR_1+FR_2) + \tan(FR_0+FR_1+FR_2+FR_3))$$

所以最後一段 $d_N=LF*\tan(\sum^{FR_N} + RF_N)+LR*\tan(\sum^{FR_N})$ ，N 從 0 開始。所以經由此種設計，我們發現當側向位移為 1mm 時，波長改變量約為 600pm，換句話說也就是當最小波長改變量為 10pm 時，側向位移為 0.0167mm，又本中心新購儀器可達精確度為 1pm，故預估可量測到最小的側向位移量為 0.00167mm。

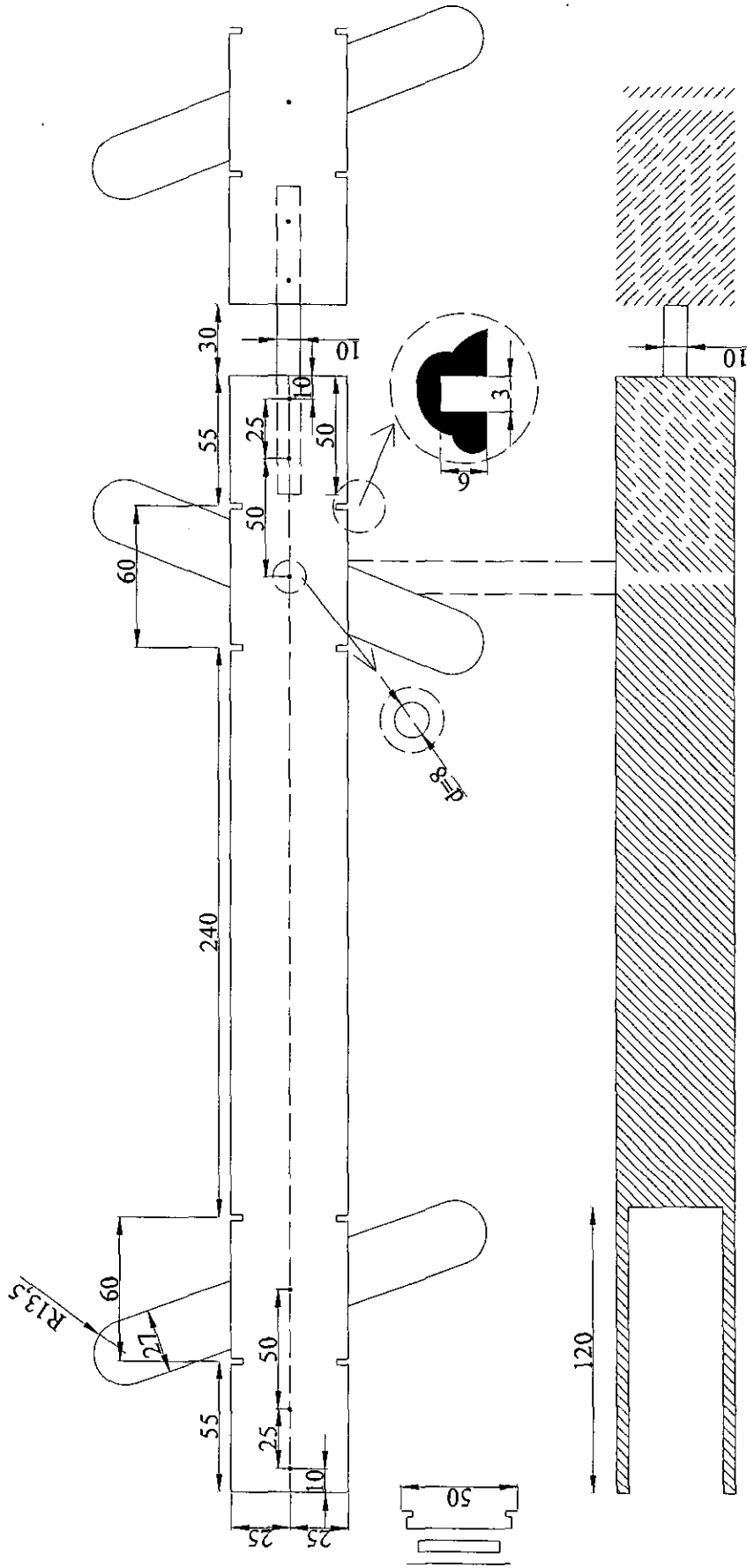


圖 4.1 改良式扭曲儀設計圖

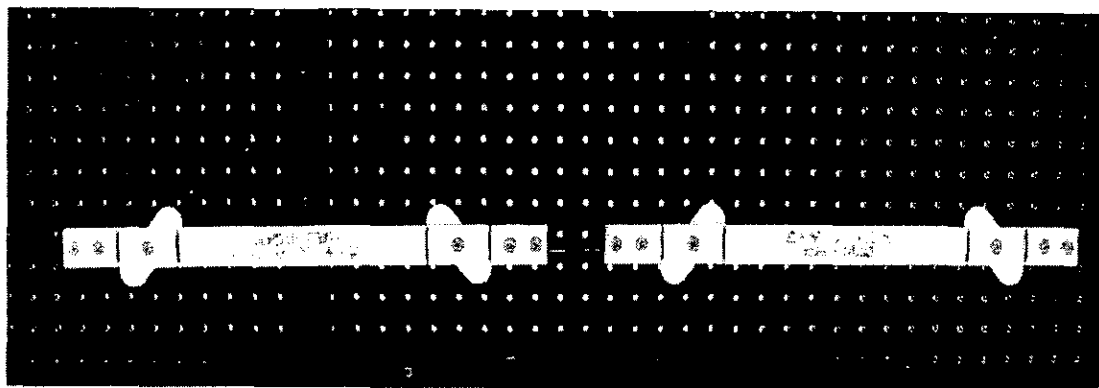


圖 4.2 改良式扭曲儀波實體照片

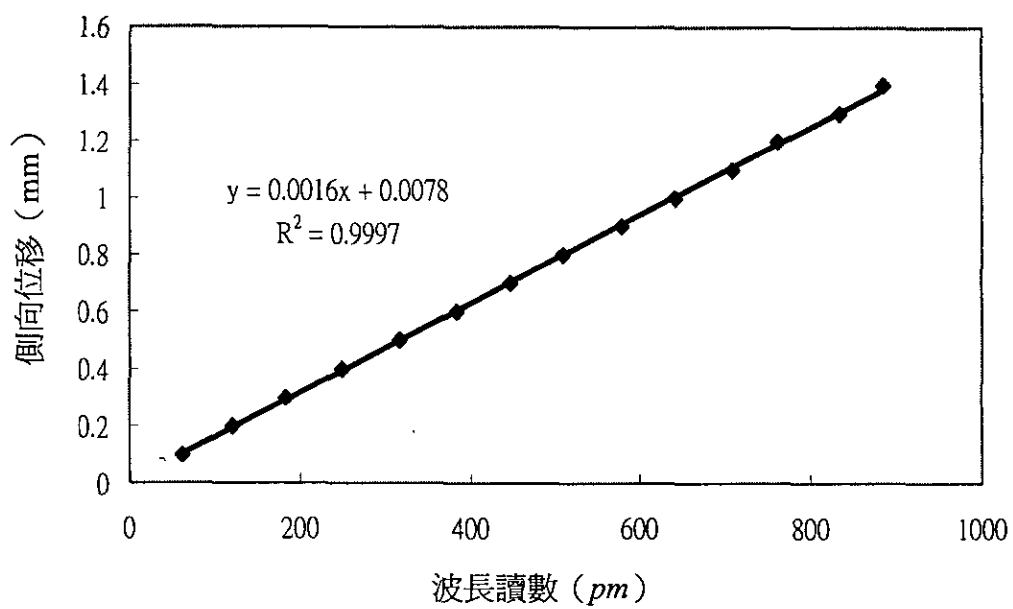


圖 4.3 改良式扭曲儀波長改變量與側向位移關係圖

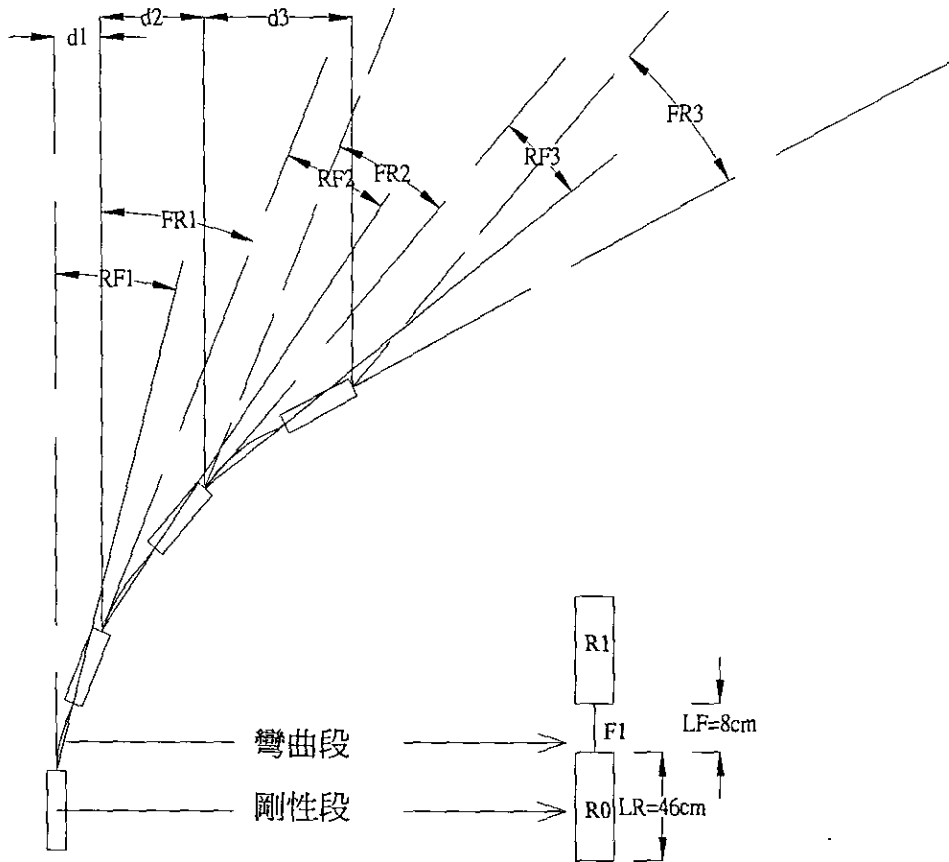


圖 4.4 改良式扭曲儀原理推導圖

4.2 TDR 監測技術改善與系統研發

TDR 是以電磁波為探測媒介的被動式監測技術，可應用於土壤含水量、導電度、地下水位、錯動變形等物理量之監測，其監測感測器即為傳輸線的一部份，在監測之同時具有線路自我診斷之功能，其中錯動變形偵測還具有空間連續性之特色。被動式監測技術具有較高的穩定度與耐久性，且儀器可透過一多工器進行多功、多頻道監測，降低監測器系統之成本；相較於光纖監測技術，TDR 儀器之硬體技術較為成熟且經濟。本研究主要目的之一是利用 TDR 建立一經濟、穩定、高效率之邊坡監測系統，一般邊坡監測之物理量常包括地表位移、地層變形、地下水位(孔隙水壓)、降雨量等。TDR

錯動變形與地下水位監測仍有許多值得改進的地方，本研究針對邊坡監測，改良現有錯動變形與水壓量測技術，並新開發 TDR 變位計及雨量計，使得 TDR 監測系統具備多種邊坡所需之監測功能，可使用同一電子儀器及多工器同時進行多點位與多功能之監測。此外，本研究亦進行監測系統整合與軟體開發，可同時整合 TDR 感測器及傳統監測儀器，並結合自動資料擷取系統、無線通訊、資料庫、網際網路、行動簡訊、伺服器等科技建立智慧型 TDR 資訊自動化系統，如配合良好的規劃設計，可有效地建立穩定、高效率且經濟之山坡地監測系統。圖 4.5 為 TDR 邊坡監測系統之示意圖，後續章節將分別介紹本監測系統之各個部份。

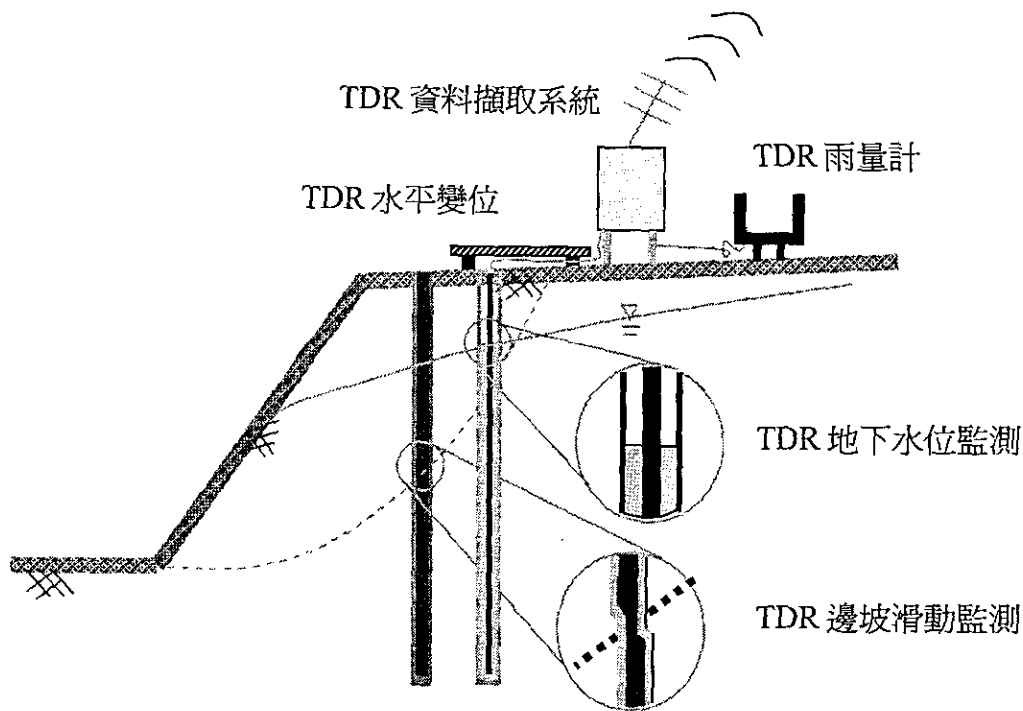


圖 4.5 TDR 邊坡監測系統

4.2.1 TDR 地層錯動變形監測技術之改良

目前 TDR 監測技術可有效定位地層滑動面，但尚無法準確估計滑動量與剪力帶寬度，現有之量化方法係利用反射訊號之峰值或面

積與變形量之經驗關係得到，但此關係除了錯動變形量之外，亦受到許多因素的影響，包括纜線長度、剪力帶寬度等。外在的變形模式（如塊體的剪力滑動）造成埋設電纜的斷面幾何產生變化，TDR 反射波形直接反應同軸電纜之阻抗變化（與斷面幾何變化相關）。解釋 TDR 反射波形應該分為三個層次，首先，理論上可由反射波形反推電子阻抗沿同軸纜線軸向之變化，再來是解釋電子阻抗剖面所反應之斷面幾何變化，最後是該斷面幾何變化所反應之破壞機制與變形量，如圖 4.6 所示。

為簡化問題，以了解變形特性對於反射訊號隨變形量之變化，首先採用如圖 4.7 顯示之電纜壓痕變形試驗，可以簡單控制斷面幾何改變之剖面，研究電纜變形剖面與反射訊號之特性。已知在同軸電纜電學性質固定下，特徵阻抗的改變是起因於同軸電纜幾何形狀改變，當纜線受壓產生壓痕（Crimp），該壓痕將造成纜線幾何的改變並在該處產生阻抗不連續，造成反射值的改變並反映在波形上（如圖 4.8 所示）；圖 4.9 顯示壓痕寬度固定下（ $B=6\text{ mm}$ ），對應不同壓痕深度的波形，隨著變形量增加，反射值逐漸增加；圖 4.10 則顯示壓痕變形深度固定但其寬度相異之試驗結果，結果顯示，雖然變形量一樣，但反射值或積分面積並不一致，由此可知，傳統利用反射值或反射積分面積之方法並不正確，必須將變形寬度之影響一併考慮。由於階躍脈衝具有一定的上升時間，在同一壓痕深度（ $D=2.5\text{ mm}$ ）下，壓痕寬度較小（ $B=6\text{ mm}$ 、 $B=12\text{ mm}$ ）的波形的反射值無法到達該壓痕深度應反映的現象，如壓痕寬度大（ $B=24\text{ mm}$ 、 $B=36\text{ mm}$ ）者顯示。整理反射係數與各寬度和深度組合的關係如圖 4.11 所示，式 4.4 的關係主要是由壓痕深度所造成的影響，如果在此壓痕變形深度固定但其寬度相異的情況下仍採用傳統之式 4.5 經由

反射值 (V_r) 來計算反射係數與壓痕變形間的關係，將會獲得不一致之結果。是故 TDR 反射波形行為除了主要受到阻抗不連續（由壓痕深度控制）影響外，另外壓痕寬度（長度）亦影響該行為。在量化分析上有必要考慮壓痕（變形）寬度之影響。

纜線長度、變形帶寬度、多重反射等皆會影響該波形反射值大小。本研究發展包含上述各因子建立在波傳理論上的數值模式，利用此數值模式進行變形量長度、寬度對於 TDR 波形影響之探討。以有限元素的概念將原本連續的 TDR 傳輸纜線系統分成個別的元素，每一元素包含獨立的阻抗 (Z_i) 與長度 (L_i)，以此將傳輸纜線離散化，以圖 4.12 之壓痕變形試驗為例，其變形感測電纜可分為三段或五段之阻抗不連續元素。再利用 Lin (2001) 之波傳推導，將傳輸線以如圖 4.13 所示之等值電路模式求得 TDR 反射訊號之系統函數，藉由頻譜分析可有效地模擬 TDR 反射波形，如圖 4.14 所示之流程。利用此波傳數值模式可對於壓痕寬度與深度定量性地模擬反算各段傳輸線之長度與阻抗值。圖 4.15 顯示壓痕處波形模擬反算波形之結果，模擬之波形與實測之波形比對之結果相當不錯。圖 4.16 為反算所得到之阻抗值與變形量之關係，比較傳統方法算得反射係數與利用數值模型算得特徵阻抗值 Z_2 （可利用式 4.4 計算得較正確的反射係數），可發現原先傳統方法因壓痕寬度較小（ $B = 6 \text{ mm}$ 、 $B = 12 \text{ mm}$ ）的波形的反射值無法到達該壓痕深度應反映的現象而獲得較不正確反射係數值的情況皆有所改進，反算之結果更接近實際因壓痕深度所造成之阻抗變化。幾何上深度變形導致阻抗之改變不受壓痕寬度影響，證實了阻抗變化在量化纜線壓痕變形上的適用性。

本計畫將解釋 TDR 反射波形之研究方法應該分為三個層次，首先，理論上可由反射波形反推電子阻抗沿同軸纜線軸向變化，再來

是解釋電子阻抗剖面所反應之斷面幾何變化，最後是該斷面幾何變化所反應之破壞機制與變形量。上述之研究主要針對前兩個層次，但斷面阻抗變化量或幾何變化量並不能直接反應破壞機制與該機制之變形量，需要進一步研究。廣義上，電纜之破壞機制非常複雜，包括張力破壞、錯動破壞、及張力錯動混合式破壞，且錯動之帶寬（Shear bandwidth）與張力之帶寬（Tension bandwidth）亦是影響斷面幾何改變之重要因子。雖然研究仍朝描繪廣義之破壞機制繼續努力，但在邊坡穩定監測之應用上，與傾斜管之目的相同，主要針對同軸電纜之側向錯動破壞機制，因此問題可以大為簡化，反射波形主要之影響因子可參數化為剪力帶寬與錯動變形量。以往之實驗模型並無法真實模擬實際現地的地層滑動破壞模式，過去之室內標定試驗僅利用傳輸纜線受室內直剪之變形與 TDR 反射波形間之關係，而沒有真正模擬變形傳輸纜線於邊坡產生滑動破壞時之實際變形破壞模式。圖 4.17 顯示傳輸纜線於邊坡產生滑動破壞時之實際變形破壞模式，錯動變形感測纜線於滑動破壞之邊坡中受到剪力帶寬度之影響，並非單純的直剪試驗所能夠模擬。因此本計畫將 TDR 錯動變形感測纜線標定盒與大型直剪試驗（圖 4.18）結合，以研發出較能模擬真實現地狀況之剪力盒試驗，並以此標定盒進行一系列模擬感測纜線埋設於現地之受剪試驗，進而探討現地邊坡滑動破壞時剪力帶寬度、灌漿強度等影響 TDR 反射訊號之因素，亦可用以評估不同感測纜線於不同地質材料中之行為，研擬感測纜線之設計準則。此 TDR 錯動變形標定試驗與過去之 TDR 纜線直剪試驗不同，其標定盒可調整剪力帶寬度，並可施加垂直應力，模擬現地之覆蓋土壓。

圖 4.19 為剪力標定盒設計之完成品，由圖可知當橫向剪力作用在剪力標定盒時，由於變形帶動桿件的作用，使得剪力標定盒所受

之側移量將均勻分配且成階梯狀，與先前所預設傳輸纜線變形模式相似，因此利用此一剪力標定盒施做現地邊坡破壞模擬試驗，探討剪力帶寬度、材料性質、灌漿強度等影響因素對傳輸纜線之影響，並利用試驗所擷取之資料以及傳輸纜線之外觀變化情形，以進行側向錯動量與 TDR 反射波形間之研究；而且試體在剪動達破壞後，試驗完成後將剪力標定盒與石膏模型試體從大型直剪試驗儀中取出，並將石膏試體剖開取出包裹於石膏模型中之變形傳輸纜線，因事先於變形傳輸纜線上標記長度之刻畫如圖 4.20 所示，故可紀錄傳輸纜線破壞後之縱向剖面直徑(D)變化情形，配合 TDR 所擷取之反射訊號(ρ)以及所記錄之側向錯動量(δ)，進而探討影響 TDR 反射訊號的因素，從中獲得更多有關現地錯動之訊息。

由於邊坡現地之破壞機制並非與以往之室內單剪試驗相同，因此將邊坡現地破壞模式簡化成剪動帶 (ω) 與側向變形量 (δ) 兩參數模型，據此規劃了錯動變形室內模擬試驗以探討 TDR 反射係數之各項影響因素，以進一步了解傳輸纜線在現地之破壞模式，進而從中獲取更多有關 TDR 反射訊號與傳輸纜線側向變形量間之關係，而剪力帶寬度之影響目前初步研究成果如下所述：

- (1) 試驗中所使用之剪力帶寬度 (ω) 不同時，將影響能夠產生反射訊號所需之初始變位 (δ)，當剪力帶寬度越寬之情形下，將使能夠產生反射訊號所需之初使變位增加。
- (2) 標定盒試驗之剪力帶寬度 (ω) 大小與傳輸纜線所受之實際剪動帶寬度並無相對應之關係，而與傳輸纜線真實破壞模式有著較大的關連，故對於 TDR 反射訊號之探討需配合傳輸纜線之真實破壞模式，才能較正確的解析 TDR 反射波形所代表的意義。

(3) 剪動帶越寬將導致在相同之側向變形量下，傳輸纜線有效變形區間之直徑變化量將越平緩，導致在相同側向變形量下得到較小之 TDR 反射訊號，因此便影響到纜線變形與相對之 TDR 反射訊號判別。

TDR 並不適合大迴轉半徑之撓曲變形，對應變梯度較小之厚剪動帶分辨率較低。但相對地，一般傾斜儀之同側兩輪之間距約為 50cm，對於局部之相對錯動變形造成平均效果，若薄剪動帶變形持續，則傾斜儀將因此而無法下探，此外，在資料的獲取方面，傾斜管量測需耗費人力與常受限天候的紀錄觀測，量測一剖面常需半小時或者更多；而定置型傾斜儀之間距受到電纜線安裝與經費之限制，間距大於 2m，無法正確解釋薄剪動帶之滑動變形。相較於傾斜儀，TDR 具有空間上之連續監測之獨特優點，可以量測非常薄之剪動帶，且 TDR 只需按一個鈕即可完成資料擷取與分析，其數位化之量測方式亦可輕易地採用遠端控制及訊號之自動擷取，非常適合邊坡穩定之監測。此外，TDR 不需特製套管，設備之成本與施工性亦優於傾斜儀，可利用同一 TDR 反射儀及多工器同時監測多孔資料，其感測器即為其傳輸纜線之一部分，並無其他容易故障之他電子元件，且由 TDR 反射訊號可得知整個傳輸線（包括感測器與延長線）之狀況，從而可自動得知線路之問題所在。若能繼續在 TDR 變形量化分析及靈敏度上有所提升，對邊坡監測之技術將有很大的貢獻。

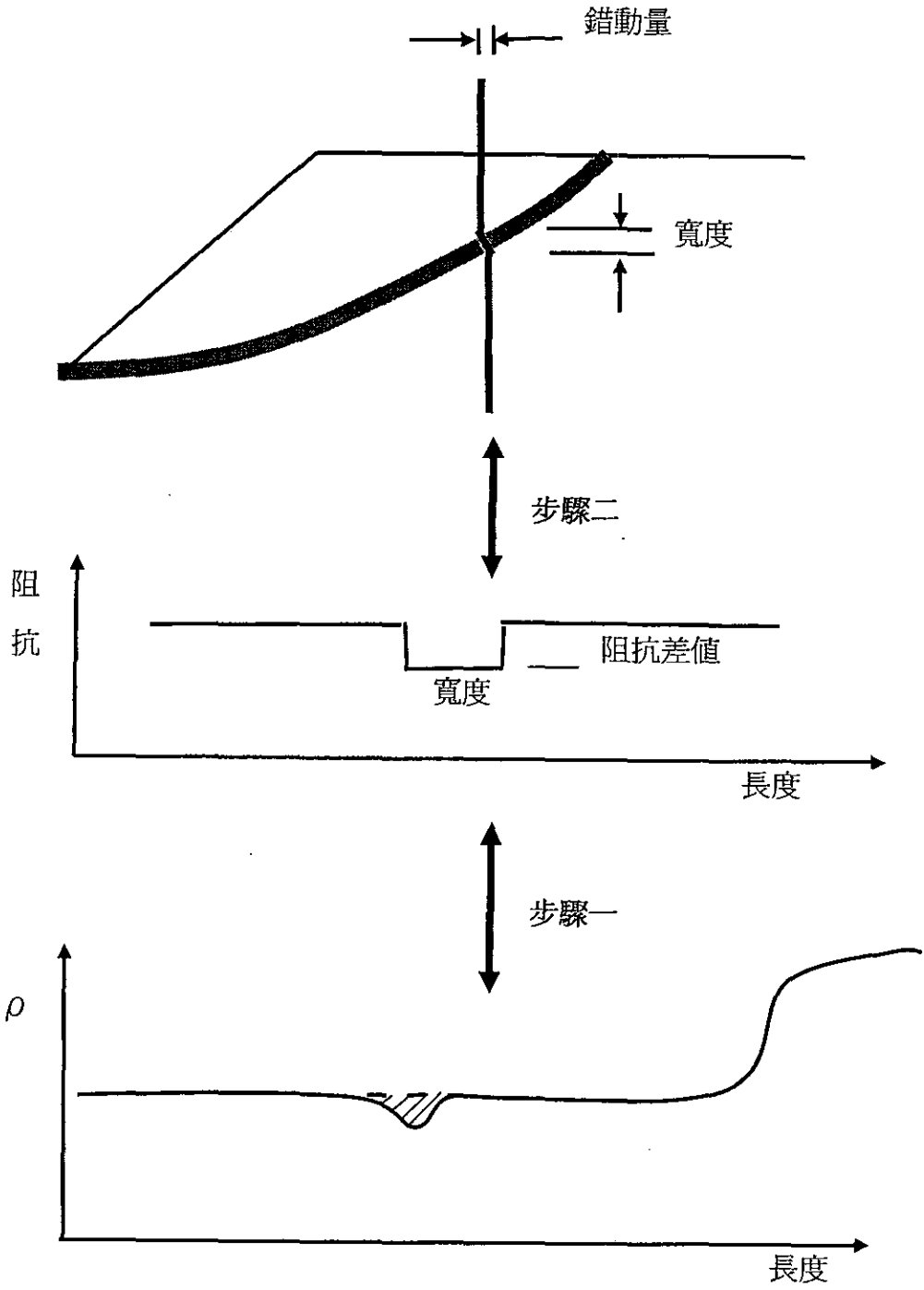


圖 4.6 TDR 錯動變形監測波形分析

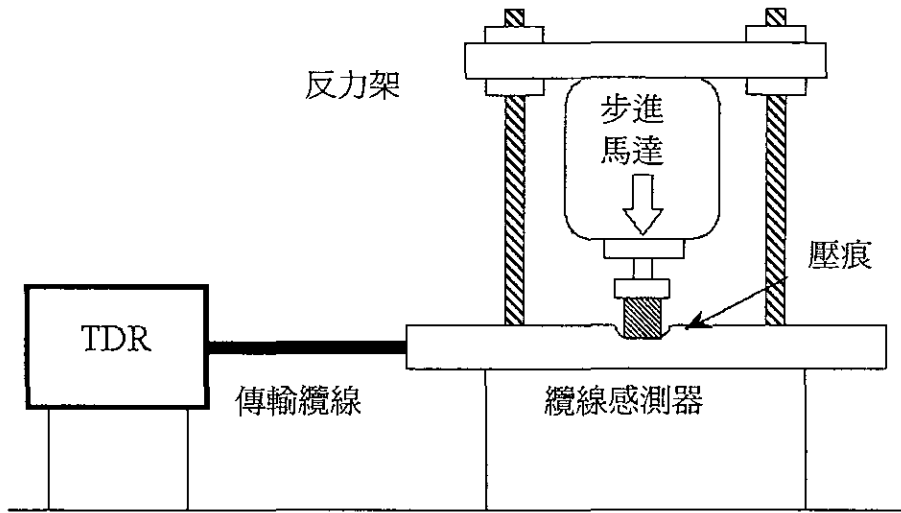


圖 4.7 同軸電纜壓痕變形試驗方法示意圖

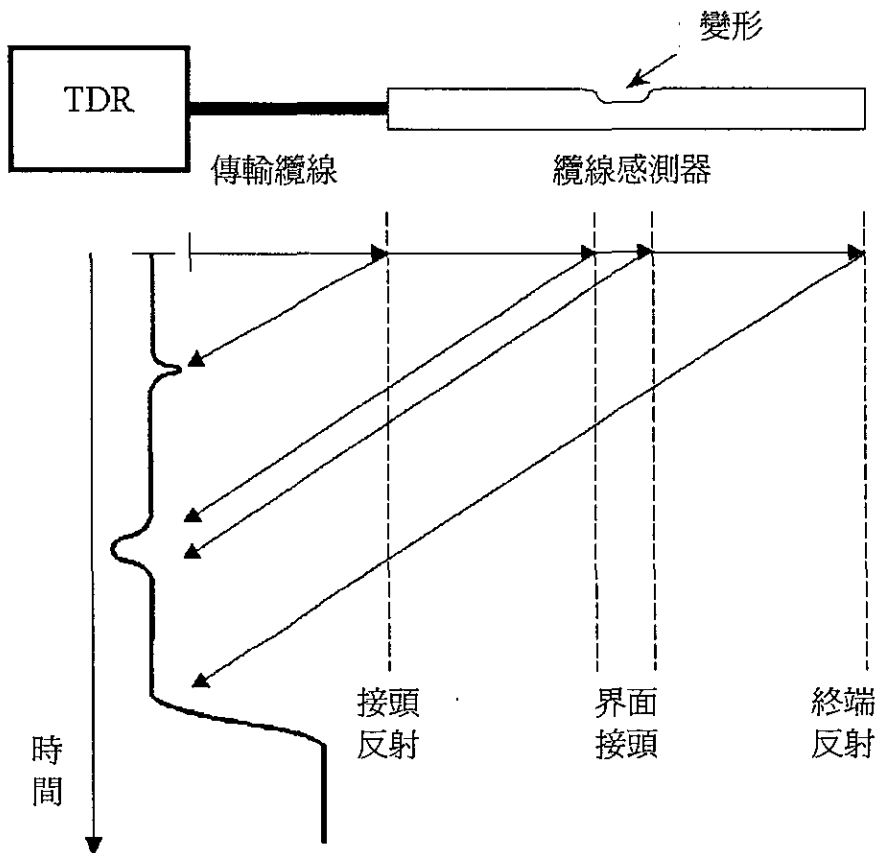


圖 4.8 TDR 變形監測之反射訊號與原理

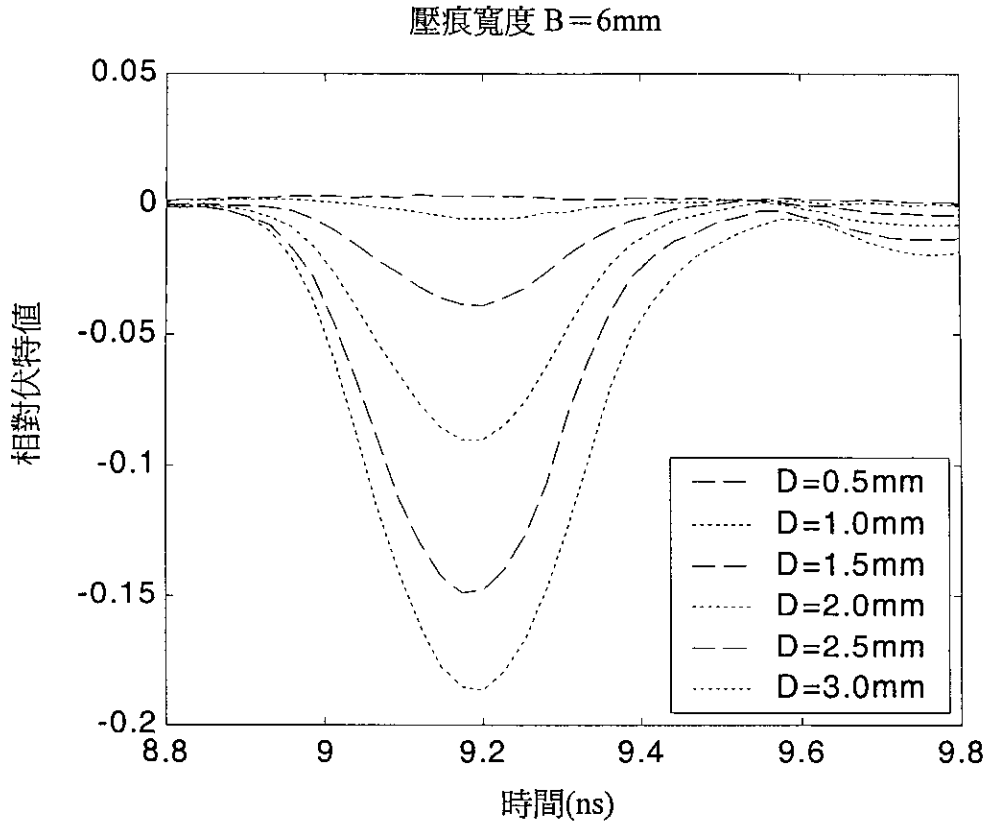


圖 4.9 壓痕變形寬度固定深度相異之波形

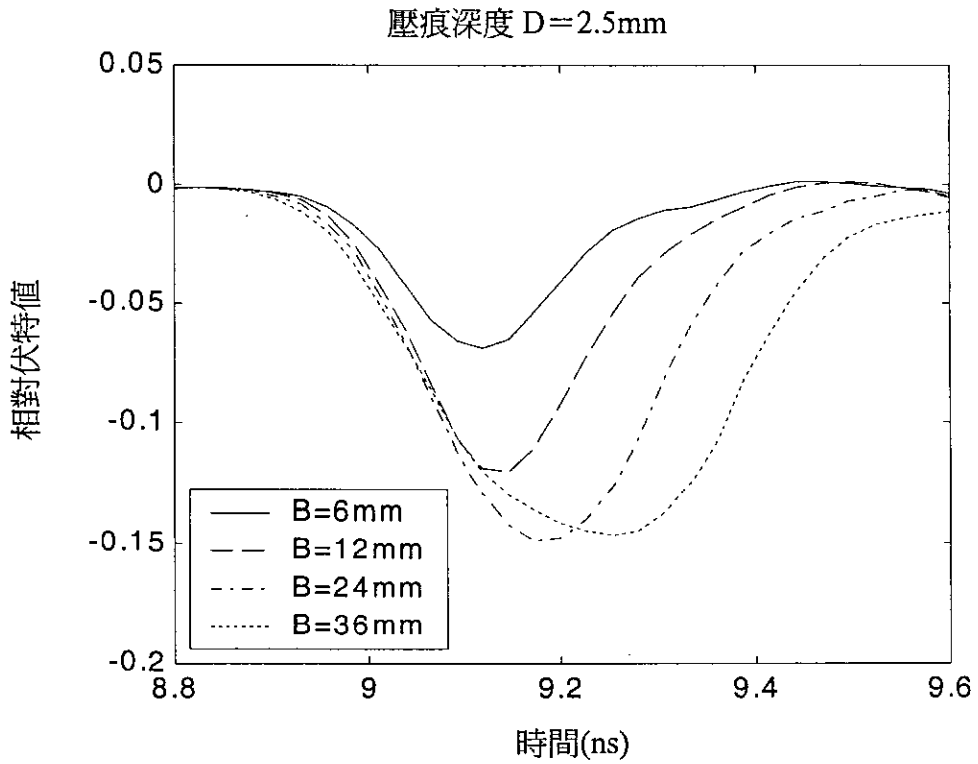


圖 4.10 壓痕變形深度固定寬度相異之波形不一致表現

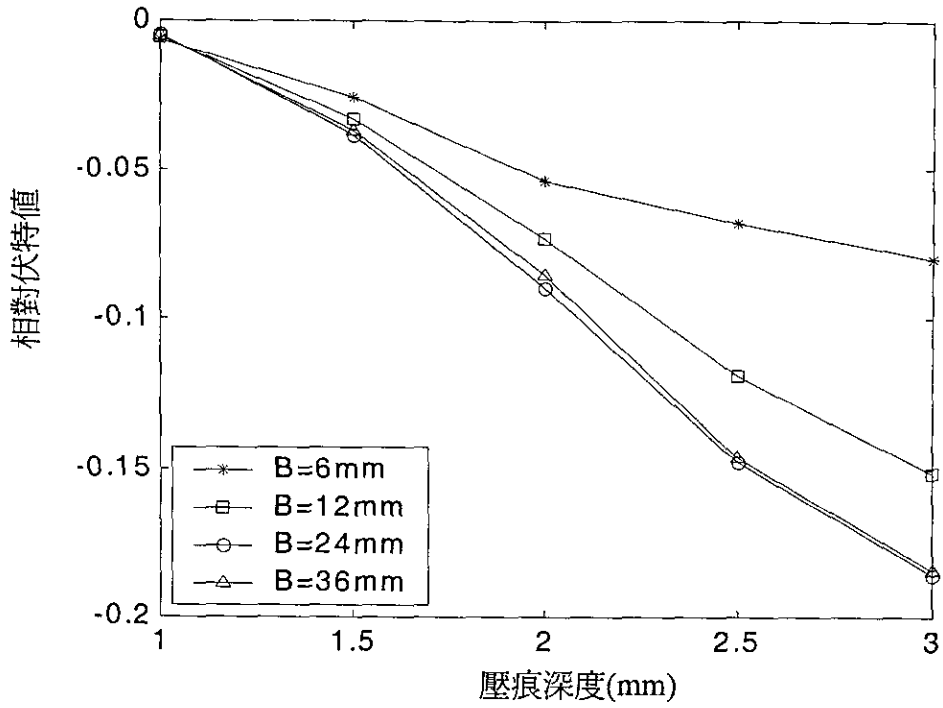


圖 4.11 反射係數與壓痕深度寬度之關係

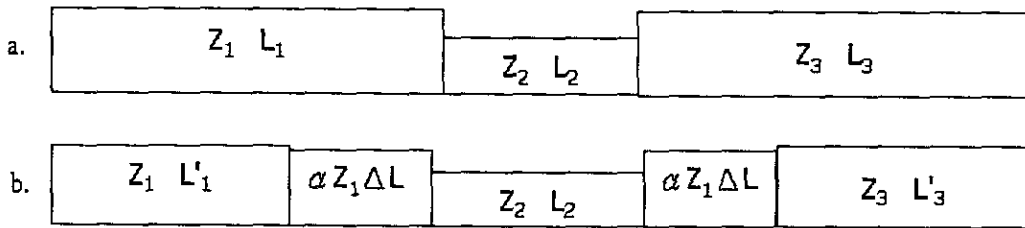


圖 4.12 阻抗長度數值模型元素示意圖

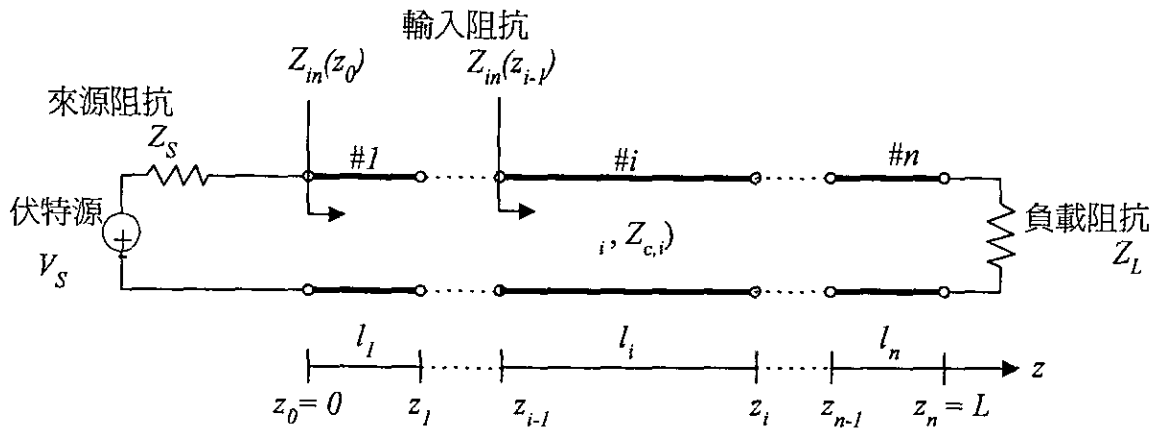


圖 4.13 TDR 錯動變形監測波形模擬之等值電路模式

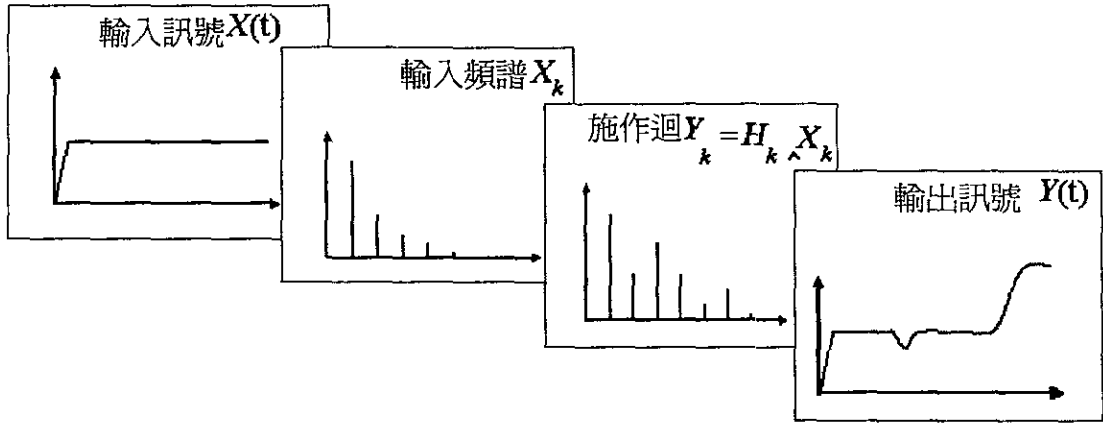


圖 4.14 TDR 錯動變形監測波形模擬之流程圖

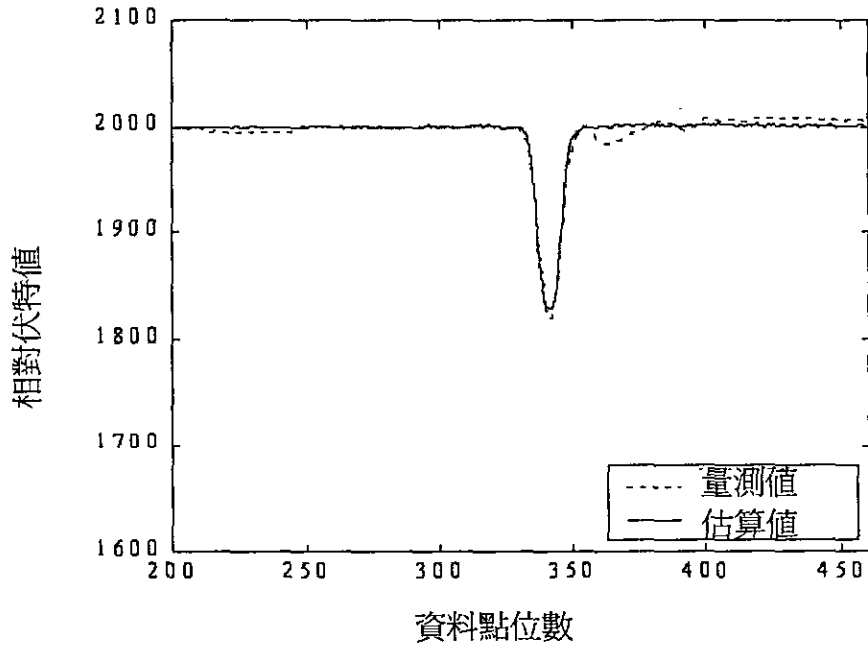


圖 4.15 壓痕處波形模擬反算波形結果

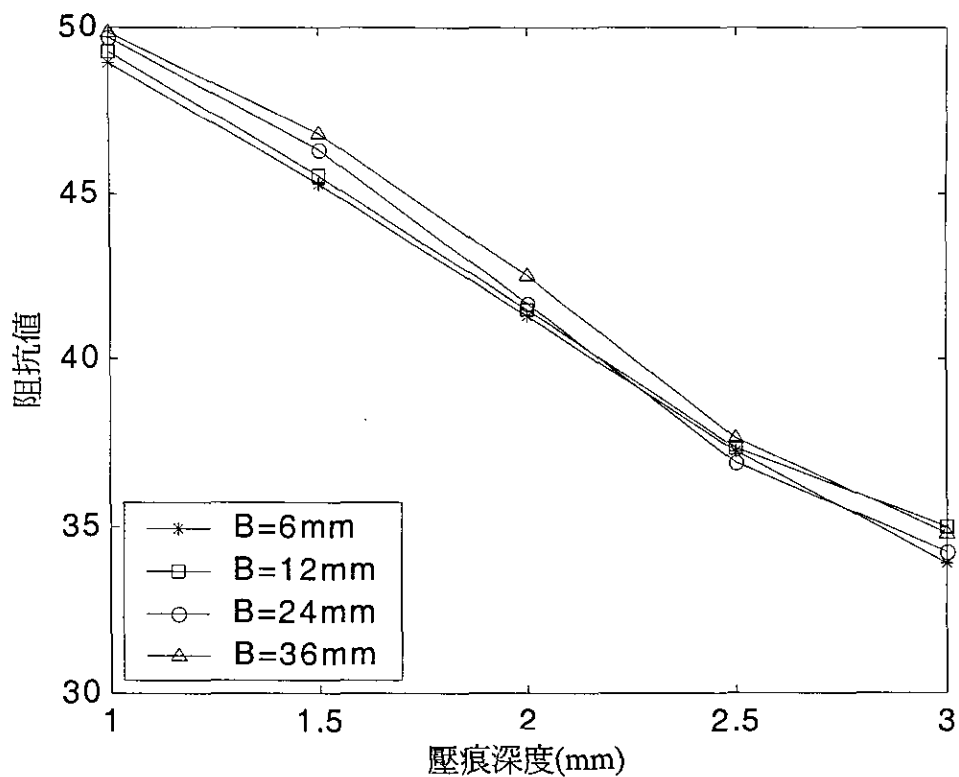


圖 4.16 阻抗長度數值模型反算結果

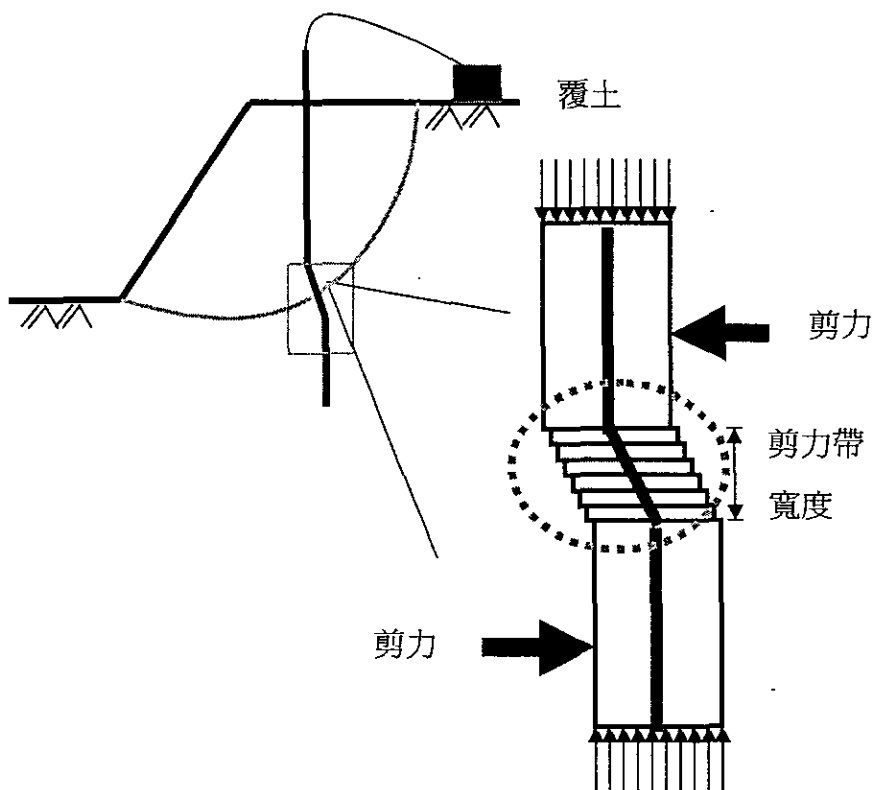


圖 4.17 傳輸纜線於地層錯動下之破壞示意圖

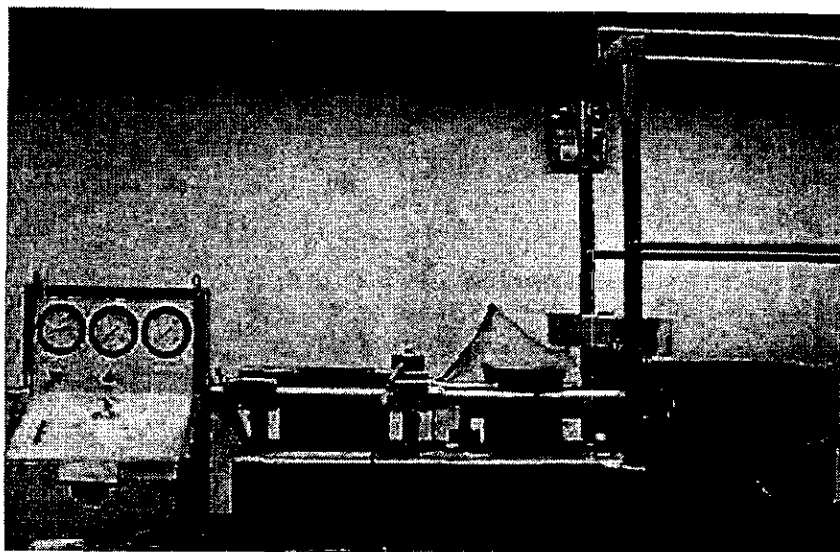


圖 4.18 剪動剪力標定盒之大型直剪試驗機

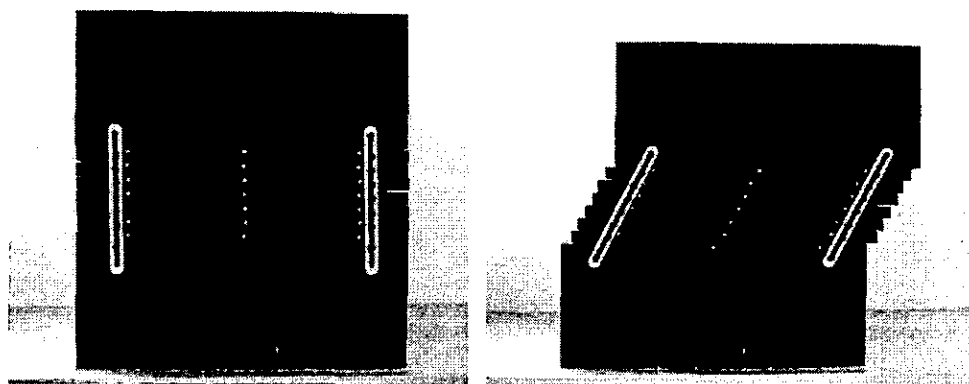


圖 4.19 剪力標定盒裝置

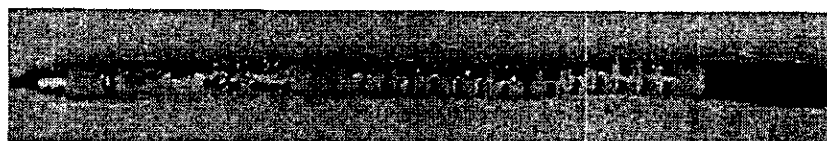


圖 4.20 變形傳輸纜線之長度標記

4.2.2 TDR 地下水位（水壓）監測改良

本計畫改良現有的 TDR 水位監測技術，在感測導波器方面，提出利用絕緣物質包覆導體之觀念並定義平行導體傳輸線之空間影響範圍，可得到易於走時分析的良好波形，在走時分析方面，提出可

自動化及穩定的分析方法。根據這些感測器之改良，進一步研發完成 TDR 水位觀測井及 TDR 開口立管式水壓計，其中 TDR 立管式水壓計之設計可大幅降低立管式水壓監測之時間延遲 (Time lag)。目前界面量測之準確度可達 ± 0.5 mm，且不受量測範圍所影響。此外，亦正進行研發可同時監測水位與水中導電度之感測導波器。

(1) 平行導體傳輸線之空間影響範圍

平行導體感測器屬於開放式的傳輸線，因此有必要定義其空間影響範圍，當用平行導體感測器監測地下水位時，可據以決定 PVC 管之最小尺寸。本研究採用之平行導體感測器，其導體直徑為 2mm，淨間距為 3mm，當有介質存在於平行導體周圍時，其周圍的介電度將會改變，若在空氣段，其會變成空氣與物質之平均介電度，若在浸水段，其會變成水與物質之平均介電度，因為空氣的介電度為 1，水的介電度約為 80，若有其他的物質介入，在空氣段恐怕不會有明顯的改變，但在浸水段則會有明顯的改變，平行導體電磁場之傳遞在某範圍外，其影響微乎其微，因此平行導體感測器浸於水中時，計算平行導體周圍的平均介電度，並與水的介電度比較，即可得知平行導體之影響範圍。試驗步驟：

- (A) 準備 60cm 長的各種不同管徑之 PVC 管 (直徑分別為 440mm、82mm、70mm、43mm、25mm 與 15mm)，並將底端以冒蓋封死。
- (B) 將 PVC 管站立且固定，並將水注入 PVC 管內，保持水位高度不變。
- (C) 將平行導體纜線置入 PVC 管內，且保持在管內中央位置。
- (D) 量測個別管徑之 TDR 波形。
- (E) 計算個別波形之平均介電度。

若 PVC 管的管徑夠大，將不會影響到平行導體纜線周圍的介電度，反之將會影響平行導體纜線周圍之介電度，所以所量測到的平行導體纜線之介電度為水與 PVC 管之平均值，計算此平均介電常數 (K_{av})，即可得知平行導體纜線之最小影響空間範圍。圖 4.21 為平均介電常數 K_{av} 與水之介電常數(K_w)比值與 PVC 管徑之關係，由此圖可知該感測器之空間影響範圍約為 25mm，亦即在 8 倍間距(S)外的所有物質，對電磁波傳遞之影響很小，幾乎可忽略不計。

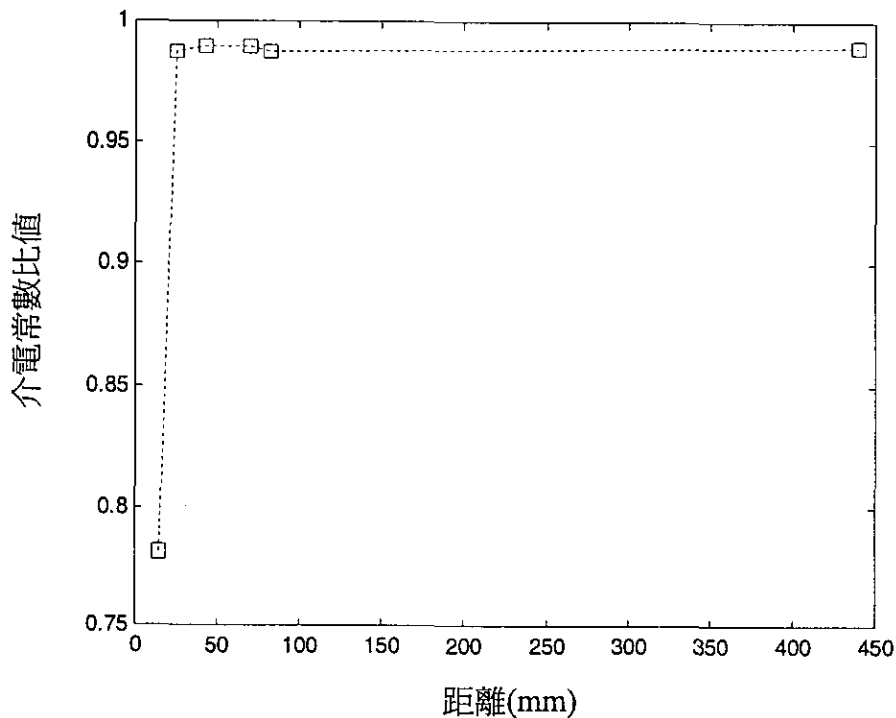


圖 4.21 空間影響權重圖

(2)傳輸線導體間之絕緣

本計畫提出使用導體間絕緣之平行導體或中空同軸纜線作為水位感測導波器，如圖 4.22 所示，其優點有二：

(A)當水位上升至中空同軸纜線之中時，由於在內導體最敏感的範圍，即在權重最大的範圍由絕緣體所包覆，電磁波在同軸纜線上的衰

減將趨緩，因此 TDR 波形開放迴路端必有一明顯的端點反射訊號。

(B)當水位驟降或濕氣相當重時，電磁波速度及 TDR 波形不受影響。

圖 4.23 展示不同型態之水位感測導波器，本計畫針對這四種感測器進行一系列的評估，證實導體間之絕緣對於波形的穩定性及量測準確度皆有幫助，其中以中空星形絕緣同軸纜線之量測穩定性最佳，但中空同軸纜線之設置必須注意防堵之設計。

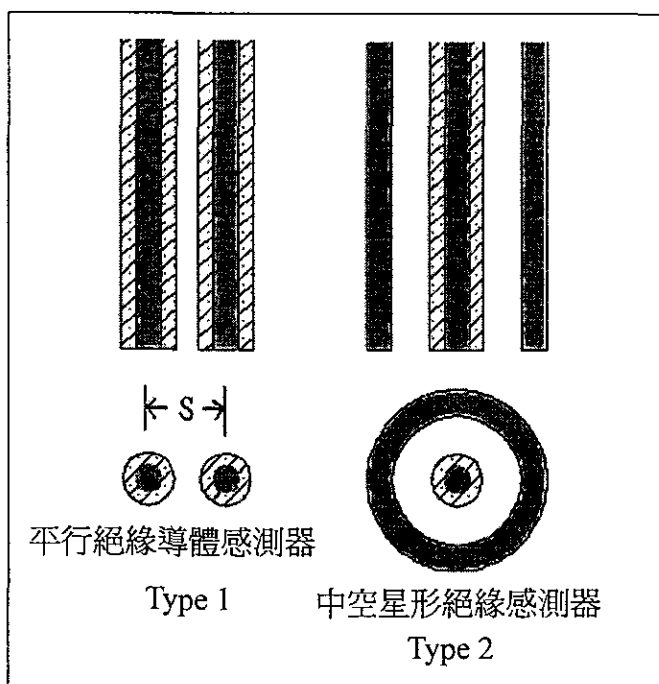
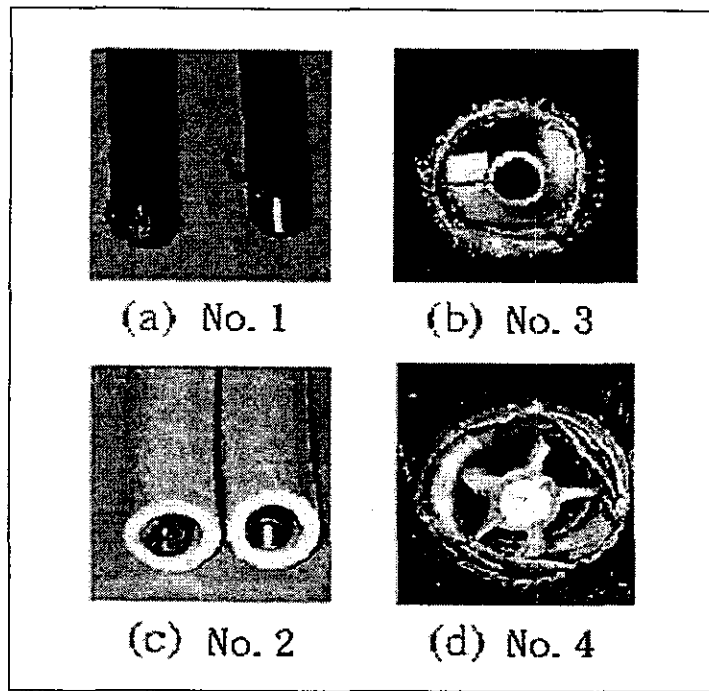


圖 4.22 水位觀測井之水位傳感器



(a) 平行導體纜線 (b) 中空螺旋絕緣同軸感測器
 (c) 平行導體纜線之絕緣 (d) 中空星形絕緣同軸感測器

圖 4.23 各式感測器之比較

(3) 水位量測之波形分析與標定

由於 TDR 具有多工性能，於現地施行 TDR 監測系統時，不論是水位監測或其他監測項目之間可能會有一些距離，因此延長線的使用是必須的，但延長線的使用對於 TDR 水位監測波形的影響為何，是必須要瞭解的。延長線之品質越好（衰減越小），對於反射訊號上升時間（rise time）之影響越小，本計畫使用一般的 RG8 同軸纜線作為延長線，圖 4.24 為不同長度延長線之 TDR 波形比較圖，當延長線長度越長時，TDR 波形入水點之負反射越趨緩和，且最終反射係數也越小。同一條延長線，當水位高度以等間距改變時，各個水位高度的 TDR 負反射波形，其波形間的水平間隔相等，如圖 4.25 所示。本研究發現，即使使用不同長度之延長線，水位高度改變時，各個水位高度之 TDR 負反射波形間的水平間隔皆相等。因此，可

畫出不同延長線長度之水位高度與 ΔN （入水反射與終點反射之間隔資料點數）之間的線性關係，如圖 4.26 所示。由圖 4.26 可判別出，幾乎每一條曲線皆重疊，因此證明延長線的長度增長，反射訊號上升時間會跟隨著增加，但不會影響 TDR 波形入水段負反射的水平間隔。

為因應反射訊號上升時間所造成的影響，本研究另提出一種計算水位的方法，設置一水平切線，此切線將與 TDR 波形相交兩點，如圖 4.27 所示，利用此兩點計算空氣段的長度。參考點的標準決定步驟（SOP），茲說明如下：

- (A)預先準備一 20cm 長之感測器。
- (B)將延長線和 20cm 長之感測器連接，並量測水位高度 15cm 和 20cm 時之 TDR 波形。
- (C)固定以 15cm 高的水位高度之 TDR 負反射波形之最低點做一水平切線。
- (D)此水平切線將會與水位高度為 20cm 時之 TDR 波形相交於一點，定義此點為延長線與傳感器之接頭 t_1 點，以此為參考依據。
- (E)此後，當實際量測水位高度時，此水平切線將會與另一入水之 TDR 負反射波形相交，此相交點定義為 t_2 點。
- (F)以 t_1 與 t_2 點之差，可查圖 4.27，計算傳感器之空氣段長度。

另外一種增加水位量測可靠度的方法為利用壓痕標示感測器位置。如前已述，TDR 纜線的阻抗受纜線間所填充的介質或纜線的幾何斷面所影響，因此改變纜線的幾何斷面，於 TDR 波形上亦可得到一反射記號，如圖 4.28 所示為一中空同軸纜線感測器長 100cm，改變其感測器之斷面形狀，並測試其 TDR 波形的反應。圖 4.29 為摺痕前及摺痕後 TDR 波形差異之比對，摺痕位置為 20cm、50cm 和

80cm，當水位高度上升至某高度時，可直接由 TDR 波形上，粗略的判別水位高度的範圍，藉此利於標定與粗略判斷，並且將可能的誤差降底，可增加判斷的準確度與減少誤差。如圖 4.30 所示，將水位高度上升至 35cm 及 70cm 時，已知摺痕位置，由 TDR 波形上即可輕易判別水位高度粗略範圍與高度。

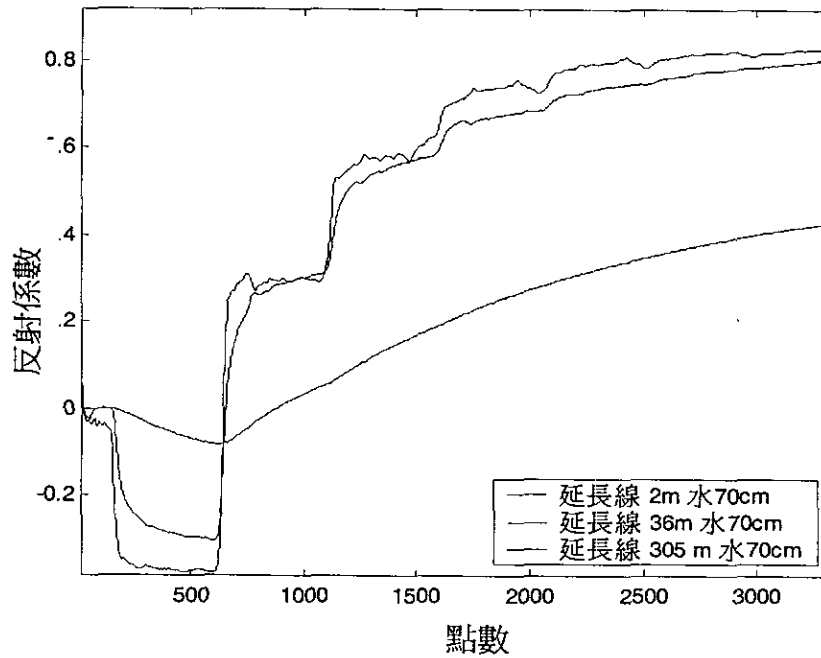


圖 4.24 不同延長線之 TDR 波形比較

36m 延長線+1m 水位感測器配合不同入水深度圖

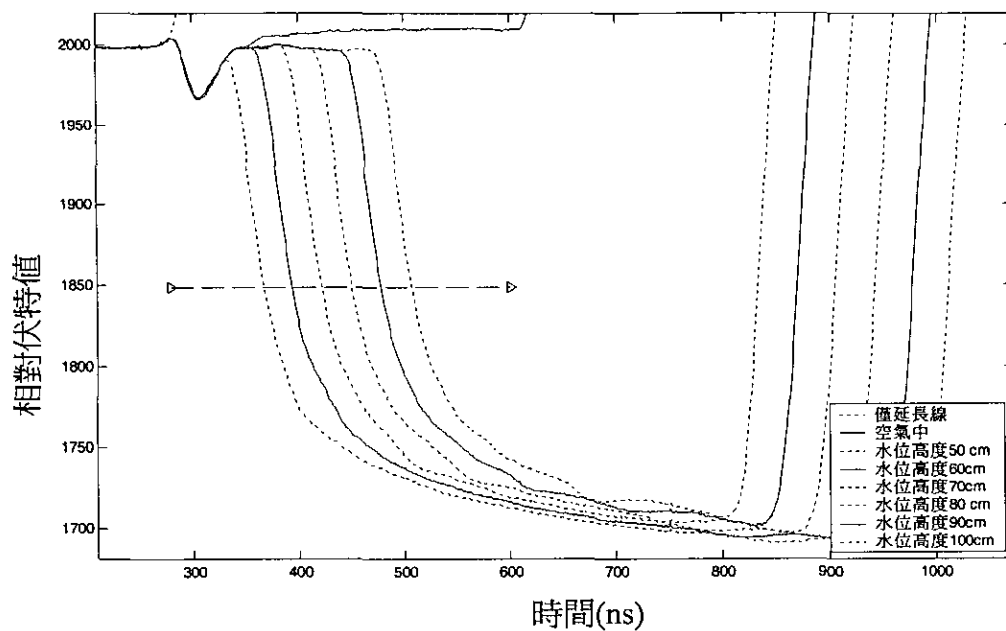
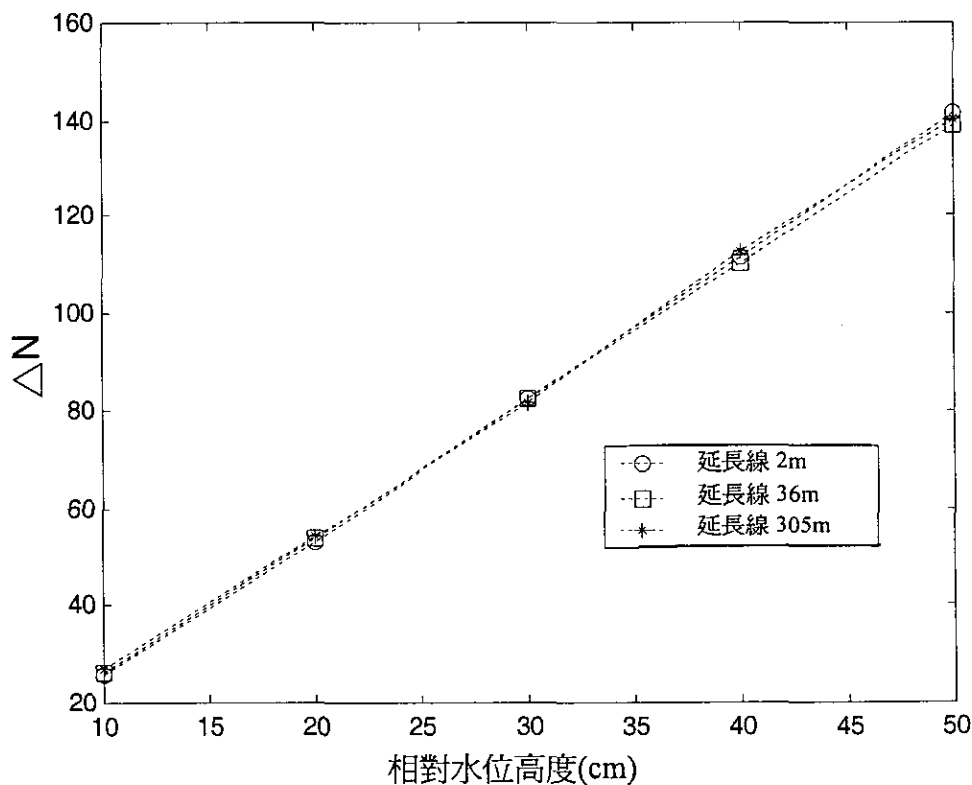


圖 4.25 等間距之 TDR 負反射波形


 圖 4.26 水位高度與 ΔN 之關係

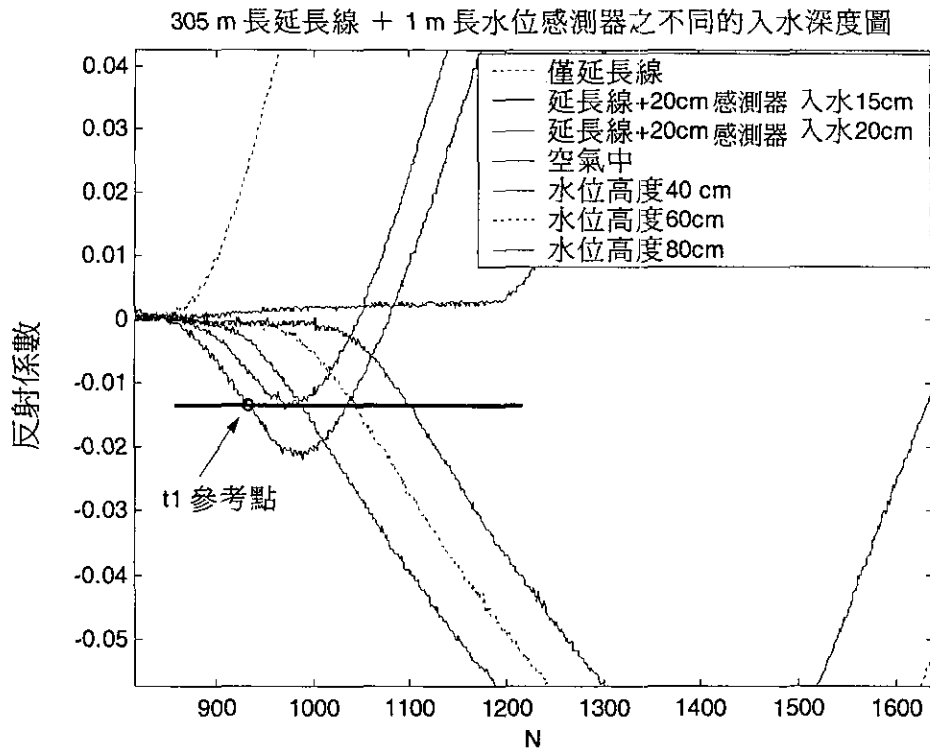


圖 4.27 定義參考點之示意圖

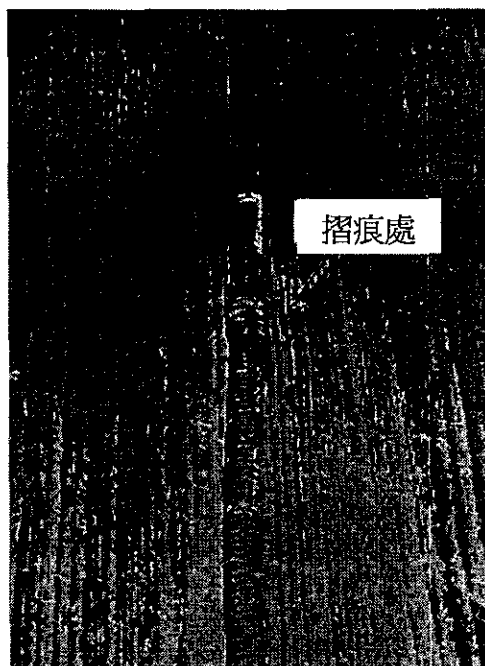


圖 4.28 感測器外圍摺痕

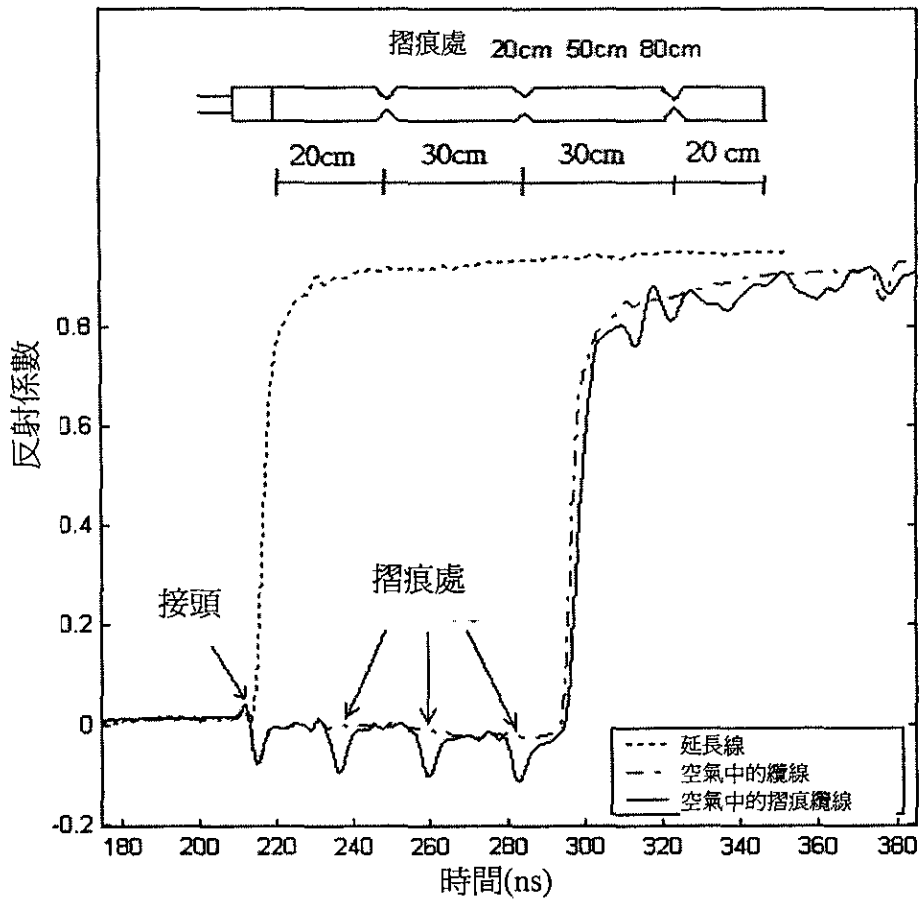


圖 4.29 感測纜線摺痕與 TDR 波形之比對

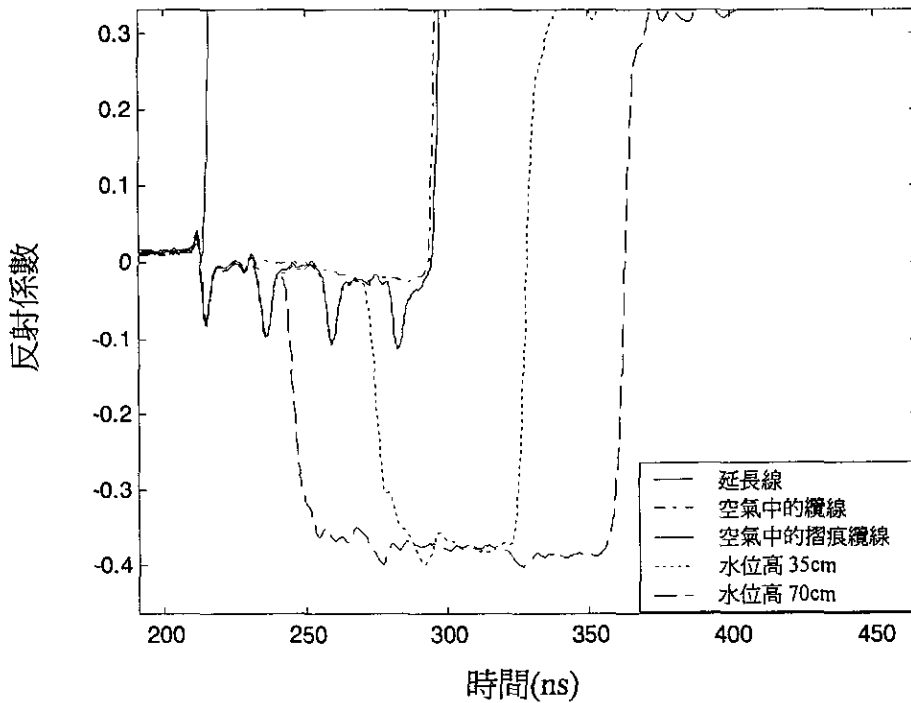


圖 4.30 水位高度與摺痕位置圖

(4) 地下水與孔隙水壓設置方法

(A) 水位觀測井之水位傳感器

針對水位觀測井之水位量測，本研究建議採用圖 4.22 Type 1 與 Type 2 兩種型式之水位傳感器，只要將傳感器置入觀測井之中並固定之，即可進行監測。中空同軸感測器之底端容易堵塞，若採用 Type 1 型態之傳感器，則完全沒有此種問題，取材簡單且製作容易。Type 1 傳感器是以兩根銅桿組成，其直徑為 2mm，間距為 $S=3\text{mm}$ 。本研究建議，若監測環境之傳感器長度不長時，例如油槽或消防栓，可採用桿狀或棍狀組成之傳感器，直接置入；若監測環境很深，需很長的傳感器時，如深層之地下水位監測，則建議採用線型的平行傳感器，底端以重物纏住，利用重物之自重將傳感器拉伸並保持垂直。若使用中空同軸感測器，本研究之底端防堵設計如圖 4.31 所示，水位觀測井感測器底端的過濾器 (filter) 是以不鏽鋼製成，目的是要使 TDR 系統所使用的量測感測器增加自重，因而可保持垂直的狀態，且不因長期與地下水接觸而產生化學變化或生鏽。此過濾器採用內母牙設計，可直接將感測器旋轉鎖住，並提供一足夠之強度，不致鬆脫滑落。過濾器四周的 4 個開槽設計亦提供了另一種功能，可使感測器底部，不會因施工處理過程或地下水流所夾雜淤泥而造成感測器底端的堵塞，且不直接接觸孔底。本研究亦設計了一使感測器能懸垂並固定的中心固定器，如圖 4.32 所示，其主要目的是使水位感測器能置於孔徑中心，並且以感測器與底端的不鏽鋼過濾器之自重，使之懸吊整個感測器的作用。

上述之水位觀測井設置與本研究建議使用之傳感器安裝，如圖 4.33 所示，首先先鑽孔 (borehole) 並下套管 (casing)，典型的觀測井井孔內徑為 1.5~2.0in，最小的內徑可為 1.25in。套管底端要加帽蓋

並使其底部管壁有打孔或留有溝槽（範圍長度最少約 2ft），並使用濾網加以包覆以防止土壤顆粒流入堵塞。套管外側要用乾淨砂或較細的礫石回填，回填要高於套管底部打孔的部位。套管的上端必須要密封（grouting）封住，可使用混凝土或其他材料填充，並且要高於地表面，以防止地表面逕流水流入鑽孔裏，並且要加一管帽保護，管帽要有預留通氣孔，以便管底的地下水流自由進出。

(B)開口立管式水壓傳感器

針對傳統或現有的開口立管式水壓計（Casagrande type or another type）水壓的監測，本研究建議直接可仿照上述之水位觀測井監測方法，以平行導線或中空同軸纜線直接置入立管之中進行監測，因為傳統開口立管式水壓計，立管本身就是一個觀測井，只是立管在回填裝設過程有別於水位觀測井。

對於即將設立之新的水壓計，本研究建議可採用同軸式的水壓計，亦即將立管直接以中空同軸纜線取代，傳統所使用之立管直徑，一般約為 2.5cm，若以中空同軸纜線取代，其直徑僅有 1.25cm，若取其橫斷面來看，其內部尚有內導體與絕緣物質，僅剩的空間就比 1.25cm 更小，因此大大降低了水位反應時間。

本研究所設計之 TDR 水壓計，如圖 4.34 所示，此水壓計的設計可直接將 TDR 的量測纜線旋轉鎖住，並提供一足夠之強度，不致使之鬆動滑落，施工上簡易，有別於傳統的開口式立管水壓計，需以膠水黏著並且需等待膠水乾涸方能施工。TDR 式的水壓計底端是以不鏽鋼與陶瓷兩種材料所製成，有別於傳統所用的 PVC 與陶瓷材質，採用不鏽鋼的目的，是要使 TDR 系統所使用的立管，亦即感測器保持垂直的狀態。另水壓計最底部亦有一錨定設計，目的是使 TDR 式水壓計能於現地施工時，將立管置於鑽孔的中心位置，且當過濾

器完全被粒料所回填時，可產生一反力裝置，此時地面上的操作人員可將立管拉伸，更能確保立管的垂直度。

上述之開口立管式水壓計設置與本研究建議使用之傳感器安裝，如圖 4.35 所示。首先鑽孔 (borehole)，典型開口立管式水壓計之立管直徑為 1in，本研究提出以 TDR 中空同軸感測器取代立管，將整個傳感器置入孔內，底端需用乾淨砂或較細的礫石回填，回填高度約 60cm，高於底部過濾器部位。緊接著需用皂土密封 (Seal) 封層約 30cm 厚，然後將整個孔內完全以混凝土或其他材料填充，並且要高於地表面，以防止地表面逕流水流入鑽孔裏，並且要加一管帽保護，管帽要有預留通氣孔，以便管底的地下水流自由進出。

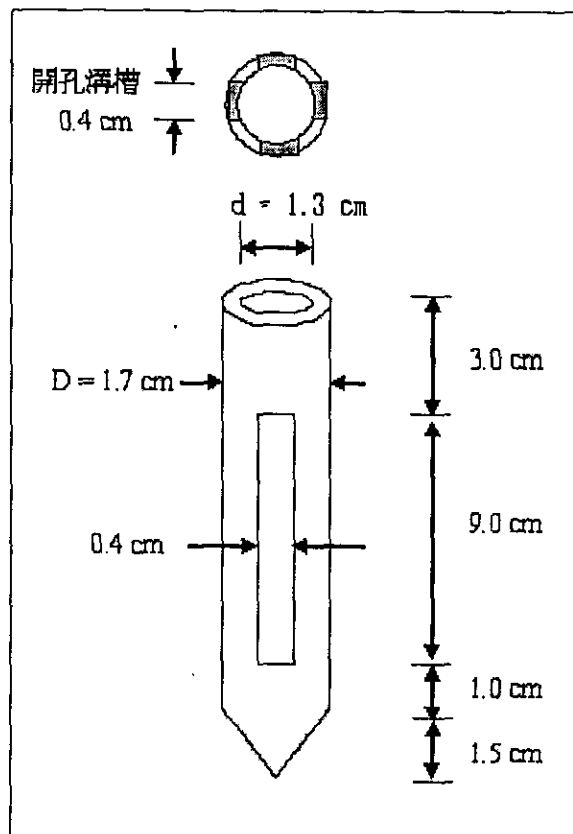


圖 4.31 水位觀測感測器底端設計圖

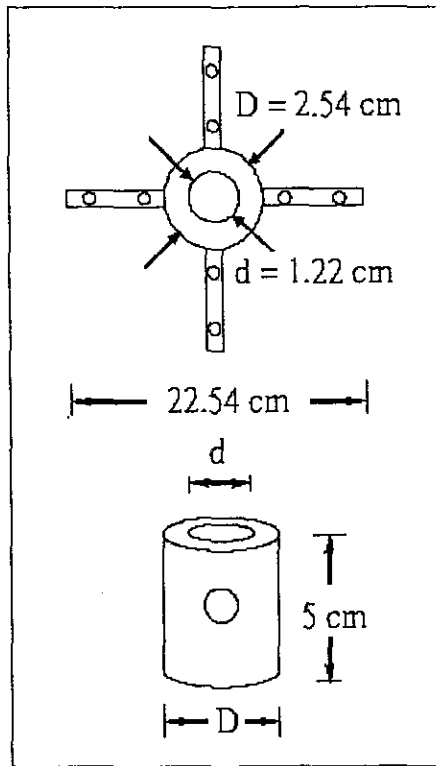


圖 4.32 中心固定器設計圖

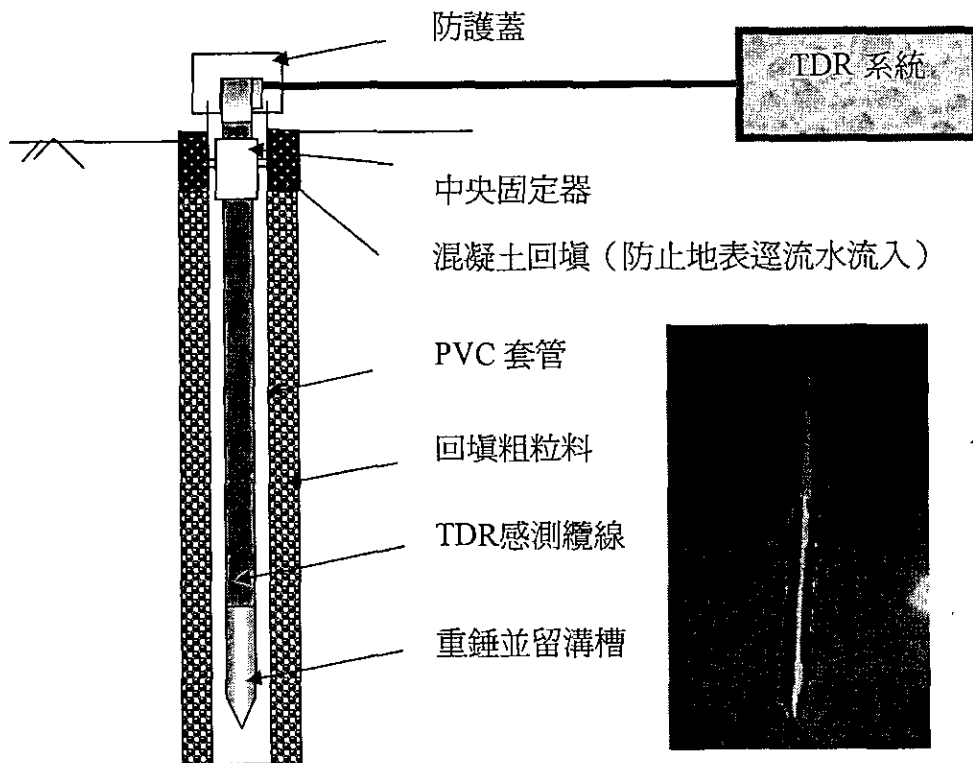


圖 4.33 水位觀測井設置示意圖

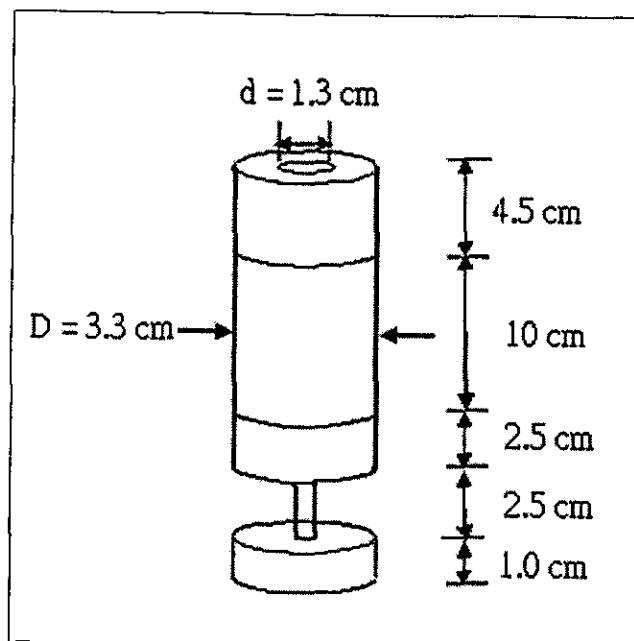


圖 4.34 TDR 式立管水壓計之設計圖

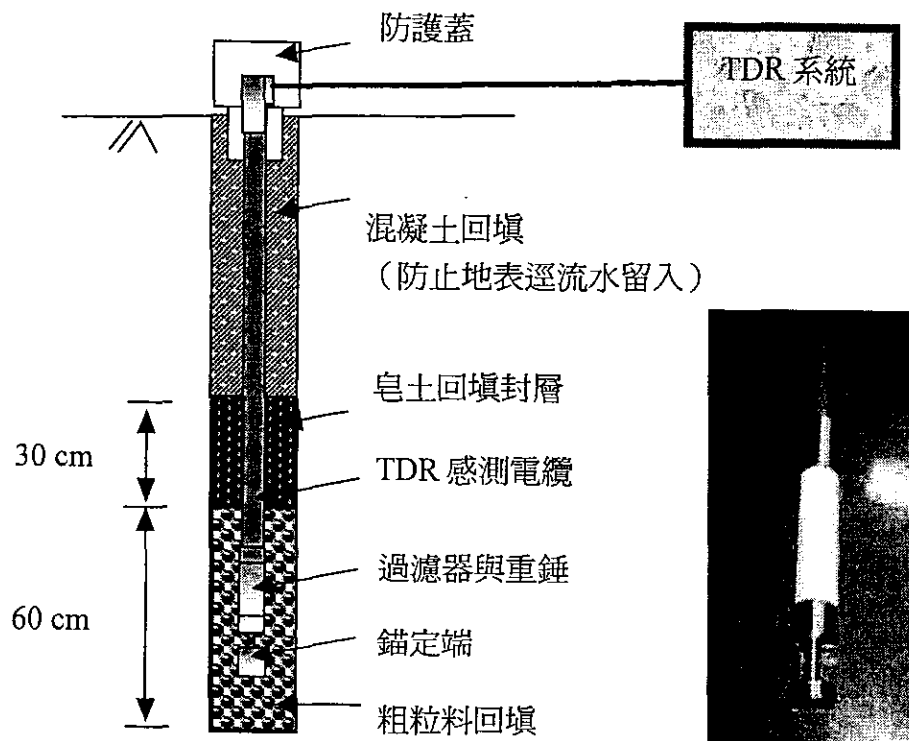


圖 4.35 TDR 開口立管式水壓傳感器安裝示意圖

(5) 地下水質監測

本計畫擬提出之可同時量測水位與導電度 (σ) 的中空同軸絕緣傳感器如圖 4.36 所示，設計該感測器底端絕緣處局部剝除 L3，若 L3 太長，雖提高量測的靈敏度，但降低了導電度 (σ) 量測範圍，反之若內導體完全絕緣，則量測不到水中的導電度 (σ)。本研究擬固定 L3 (等於 5mm)，改變水中導電度 (σ)，量測 TDR 波形最終收斂高度 ρ_{∞} ，並利用不同導電度之液體來進行標定。圖 4.36 中， ρ_0 為初始訊號反射係數大小， ρ_{∞} 為最終訊號反射係數大小。本研究提出之導電度感測，完全是由 TDR 最終訊號反射係數 ρ_{∞} 的大小來進行標定，不同導電度將會使 TDR 波形能量衰減而產生不同的 ρ_{∞} 。導電度 σ 與最終反射係數 ρ_{∞} 的大小成反比。

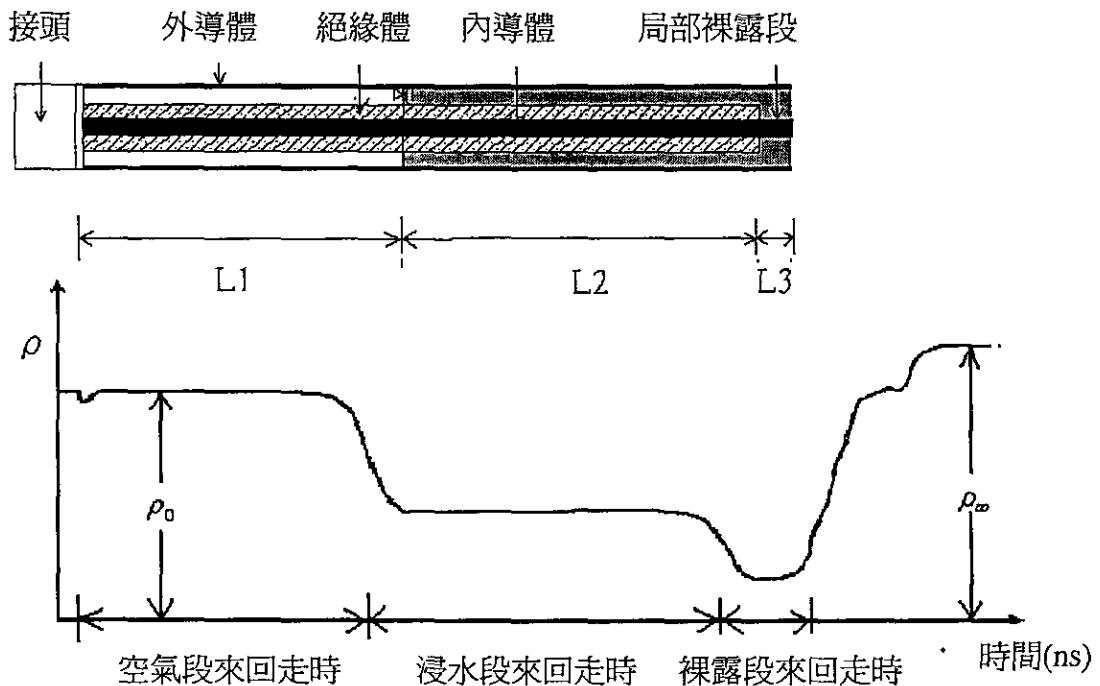


圖 4.36 可同時量測水位與導電度之感測器與 TDR 反射波形示意圖

4.2.3 TDR 變位監測技術之研發

已知 TDR 製波器發射一電磁脈衝進入同軸電纜，可由示波器記錄由於傳輸纜線系統中阻抗不連續所造成之反射，若於傳輸線中設計一可隨外部位移而移動之阻抗不連續面，則可用以量測相對位移量。地表與孔內之位移伸縮計具有經濟、連續與自動監測之優點，也常用於邊坡及土石流之監測(Corominas et al., 2000)，本計畫根據上述原理製作利用時域反射技術之 TDR 伸縮計(TDR Extensometer)，可利用時域反射儀之多工特性，同時監測變位、水位等不同參數，可有效利用時域反射儀，降低整體監測之成本，而 TDR 伸縮計亦可有效輔助地層錯動之監測，量化地層之滑動量。

由 TDR 傳輸纜線系統原理中可知，不同介質界面處，存在系統阻抗不連續界面，由 TDR 製波器發出之脈衝訊號遇到該處會產生反射訊號。據此原理，於 TDR 傳輸纜線系統延伸出一感測器，感測器基本設計概念簡圖如圖 4.37，其樣品如圖 4.38 所示。在該感測器內設計一個可以與外部變位連動之阻抗不連續界面，並經過適當配置使得界面產生元件的移動量 ΔL_{IMI} 與感測器傳輸系統外的外部變位量 ΔL 連動($\Delta L_{IMI} = \Delta L$)。如圖 4.37 所示， ΔL_{IMI} 可由反射訊號之走時求得 ΔT ，藉由計算界面變位量 ΔL_{IMI} ，即可求得相同的外部變位量 ΔL 。

(1)時域反射伸縮計之標定

TDR 伸縮計之波形分析方法與水位監測之波形分析相同，可使用傳統之切線法或使用本研究新提出之參考線法 (Reference line method)，如圖 4.39 所示。

TDR 取樣頻率設定為儀器之最高解析，其取樣時間 $\Delta t = 6.67 \times 10^{-12}$ sec，相當於 1 mm 的空間解析度，依此設定進行數位式資

料擷取。由於取樣時間固定，因此變位與取樣點數 ΔN 成正比。變位的標定方法採用精度為 0.002cm 之標定系統，令每次量測水平變位值間距固定為 0.5cm，用以求得 $L = g(\Delta N)$ 之標定關係，如圖 4.40 水平切線交點所示。而圖 4.40 中三角形交點為利用傳統切線法 (Tangent Line Method) 分析所得 ΔN 估算值。

圖 4.41 與圖 4.42 分別顯示以本研究所提出參考線法以及傳統切線法標定本研究研發之時域反射伸縮計其標定結果。比較其中的量測工作範圍 (work range)，可以發現切線法所得之量測範圍較參考線法小，這是因為伸縮計阻抗不連續界面接近纜線接頭時，其阻抗變化劇烈造成反射值變化不穩定，對於分析上要求切線值穩定之切線法該變化劇烈區段不利於分析所致。此外，針對量測工作範圍可計算得標定之全尺度非線性誤差 (Full Scale Non-Linearity Error, %FS)，參考線法平均為 1.02 %FS，而切線法為 4 %FS。其最大誤差可經由相同標定程序計算得參考線法為 0.48mm，切線法則為 5 倍的 2.6mm。

以參考線法可以得到精度 0.5mm，小於儀器最小取樣時間相對的空間解析度 1mm，其原因乃是因為參考線法其分析方法具有採用線性內插的特性所致，標定分析證實研發之時域反射伸縮計配合本研究所提出的新分析方法具有良好的精度。而已知纜線長度增加會造成波形趨緩，對於參考線法是否會造成分析特性上的影響改變將是未來研究的課題。

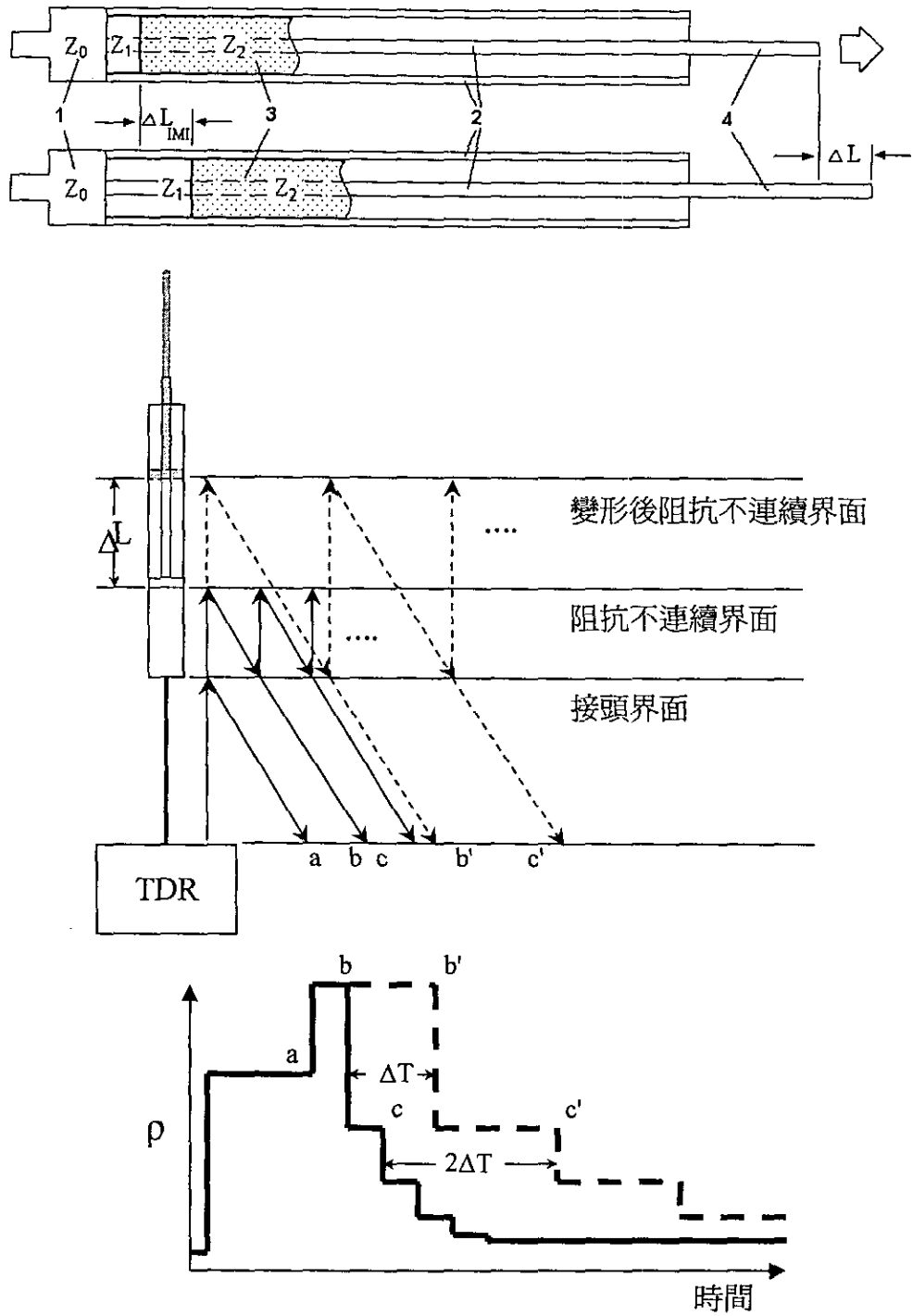


圖 4.37 TDR 相對變位感測器之設計概念圖

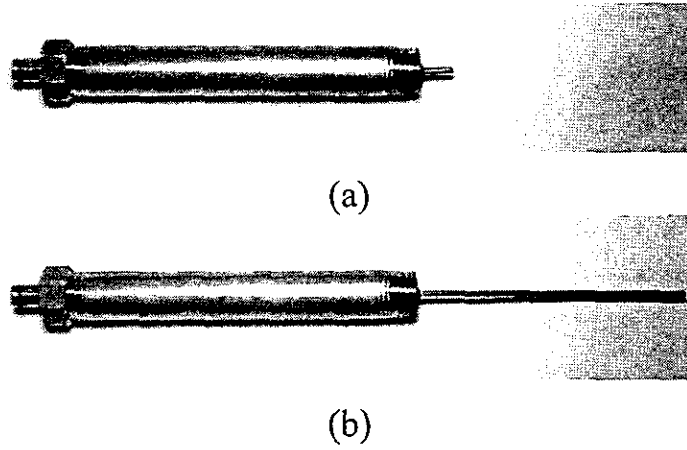


圖 4.38 TDR 伸縮計

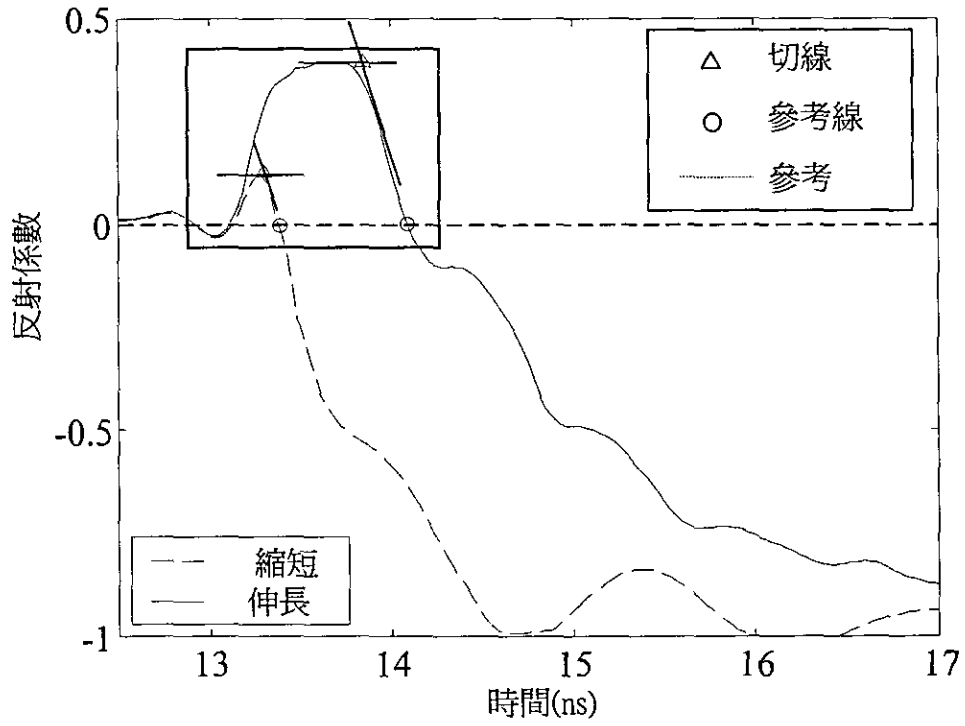


圖 4.39 TDR 伸縮計之波形分析

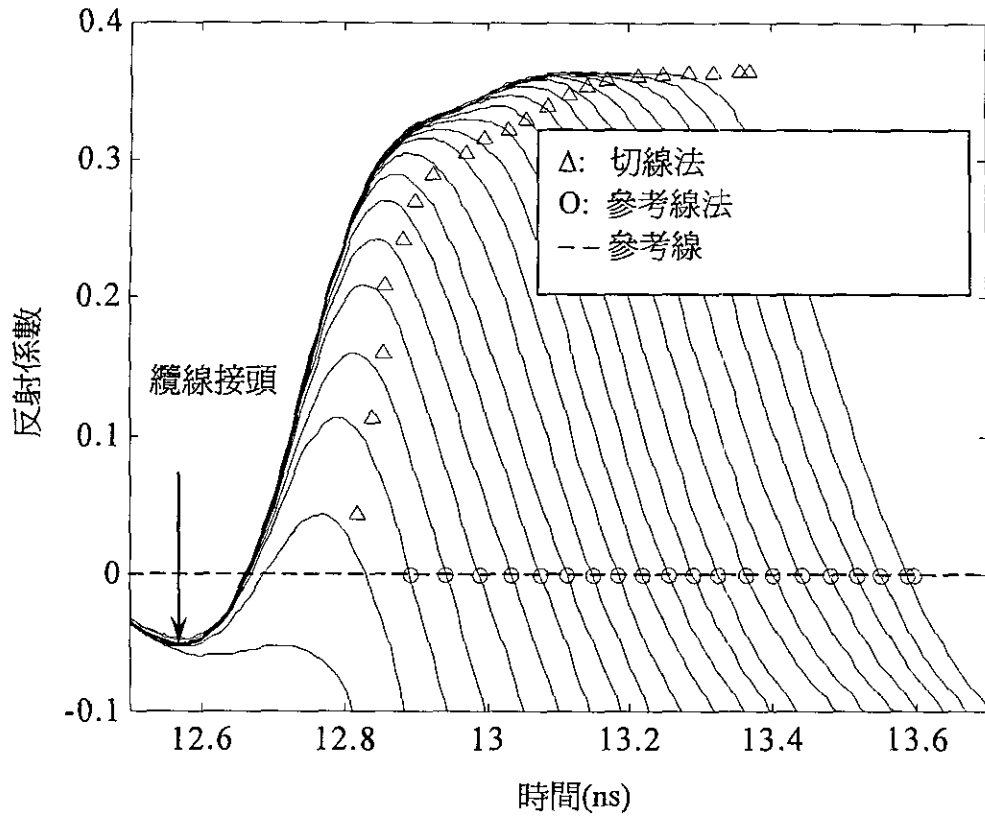


圖 4.40 TDR 伸縮計之標定

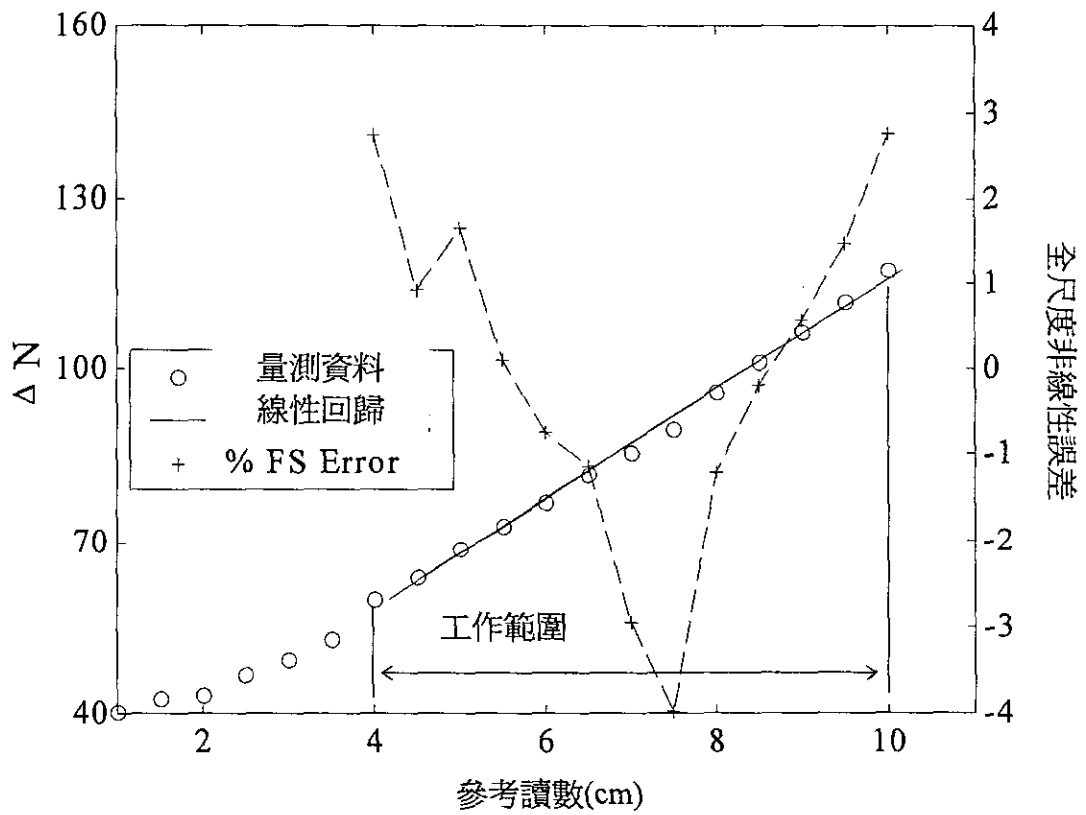


圖 4.41 TDR 伸縮計之標定結果 (新方法)

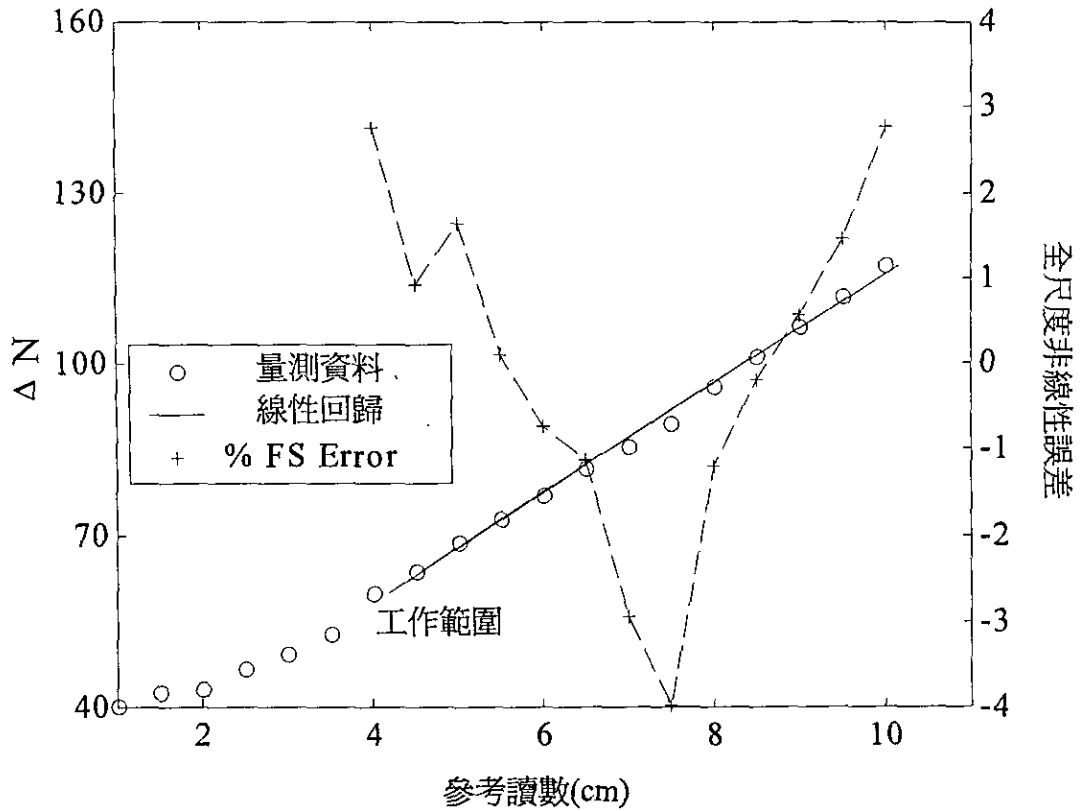


圖 4.42 TDR 伸縮計之標定結果 (切線法)

(2) 纜線長度對時域反射伸縮計之影響

時域反射伸縮計，所使用的方式為介面式，著重於擷取的時域反射波形與介面移動量的相互關係，而纜線長度對於時域反射相關感測器具有的重要影響，是在於纜線本身具有的電阻將使得時域反射儀所發出的電磁波其上升時間變長 (波形減緩)，進而影響定義時域反射伸縮計介面位置，因此有必要探討現地設置時纜線長度對於時域反射伸縮計的影響。

本計劃以不同的纜線長度(1、2、12、22、36 m)，以發展之參考線法，分別標定接續不同纜線長度時的時域反射伸縮計。圖 4.43 為纜線長度分別時 1m 與 36m 時時域反射伸縮計的波形，比較 1m 纜線長度波形，可明顯看到接續 36m 纜線後的上升時間變長所造成的波

形減緩，使得時域反射伸縮計波形在其多重反射處不若纜線長度僅 1m 時明顯，而更符合本計劃所使用之參考線法的理想情況。比較兩者對應之精度，1m 為 0.508mm，36m 為 0.138mm，顯示時域反射伸縮計不受纜線長度影響。此外，由於波形減緩，傳統的切線法將變得不適用，顯然本計劃所發展之時域反射伸縮計與標定方法具有相當的實用性。

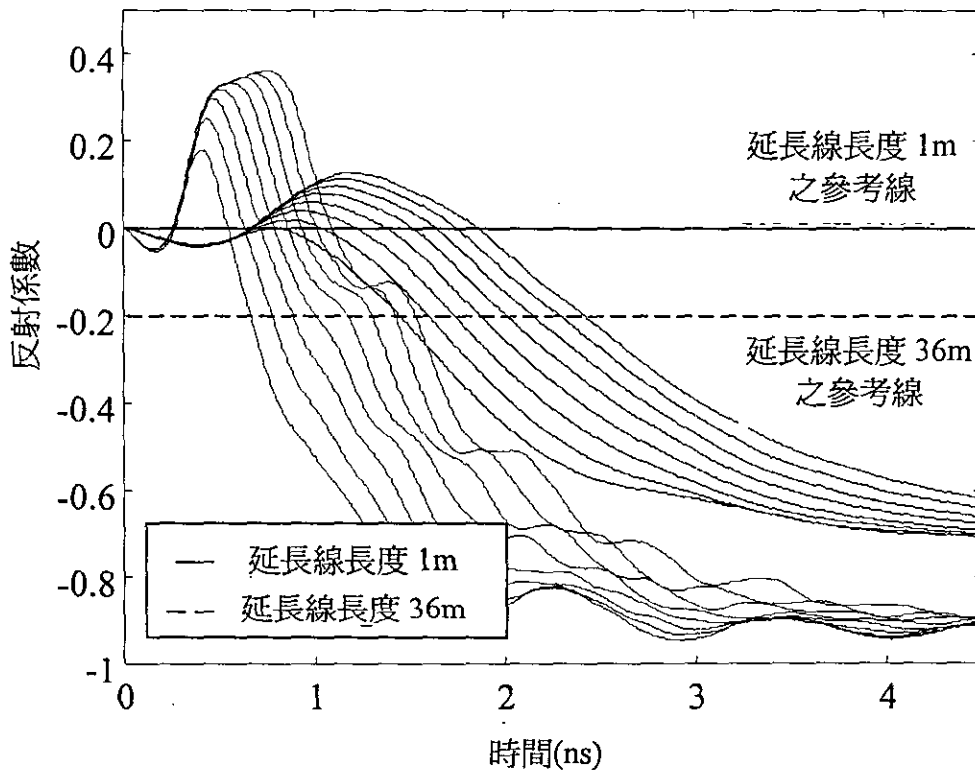


圖 4.43 纜線長度對於 TDR 伸縮計影響

4.2.4 TDR 雨量計之研發

為改善傳統雨量計之缺點與增加 TDR 監測系統之完整性，本研究擬提出一種新型雨量計，稱為 TDR 雨量計，乃是利用前述之 TDR 水位量測原理與設備，再搭配一由本研究研發之收集雨量之儲排水器，構成 TDR 雨量計。此儲排水器可設定水位的累積高度，當水位達到此設定高度時，儲水器會自動排水，當水完全排出後，又

會自動關閉排水口，繼續收集雨水。

圖 4.44 為 TDR 雨量計之儲排水設計圖，其最上端為承雨器，向下連接儲水管，儲水管底端設置感測式排水閥，儲水管中有同軸纜線，纜線上端有一接頭外接延長線至 TDR 系統；降雨經由承雨器收集並流入儲水管中儲存，時域反射儀發出電磁方波，經傳輸接頭進入所連接的同軸纜線，電磁方波碰到空氣-水的阻抗不連續界面，產生反射訊號回傳至時域反射儀；當雨水收集累積至預設的高度時，感測式排水閥則自動開啟排水，當儲水管中的水全部排除後，感測式排水閥自動關閉，整個排水歷時僅需 3~4 秒鐘；利用時域反射儀所得反射波在時間的改變量 Δt_{TDR} ，反算空氣-水界面絕對位置或相對其改變量 ΔL ，即可求得儲水管中累積的雨量。以上五個元件即可成為基本之雨量計量測單元，提供量測雨量的功能；本裝置在基本之雨量計量測單元外面加上定位座元件，提供固定與保護功用。

感測排水閥主要由 IC 版、電磁閥與一組水位感測器所組成，IC 版用來控制電磁閥的排水，且由一高低感測器來感測水位，感測器是由兩條不同長度之銅導線組成，並依附在 TDR 傳感器上，兩條銅導線長度差，即為儲水管之儲水高度，可依需求而設定儲水高度。

IC 版上有兩個預設的電磁迴路，一是電磁閥與長銅導體，另一是電磁閥與短銅導體；一開始電磁閥是關著的，當水位慢慢累積並儲存至設定之高度時，水會將短銅導體與電磁閥連通，迴路一通即會啟動 IC 版，並控制電磁閥打開閥門排水，直至水完全排除，水會將長銅導體與電磁閥短路，此時會啟動 IC 版，並控制電磁閥關閉閥門，完成排水動作。電磁閥需以 24 伏電壓驅動，IC 版的設計如圖 4.45 所示。目前正進行原型製作之改良。

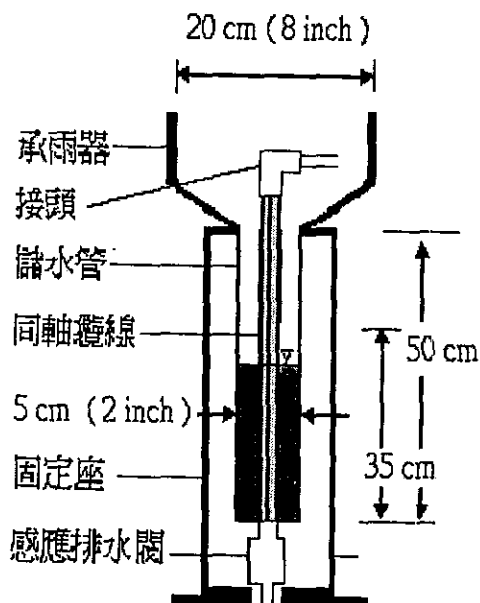


圖 4.44 TDR 雨量計之設計詳圖

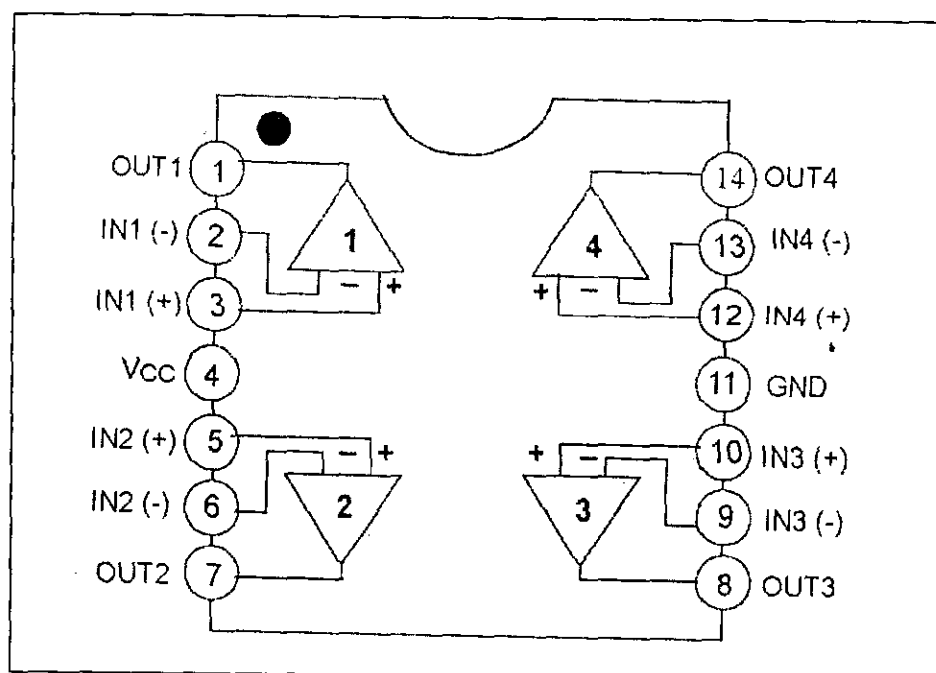


圖 4.45 TDR 雨量計之 IC 版設計圖

4.2.5 TDR 邊坡監測系統整合

(1) TDR 自動化監測系統

有別於傳統的監測方式，TDR 監測系統最大的優點為其多功能

且多工之上孔式整合型監測，加上自動化、無線通訊、遠端伺服器後，可構築一系列完整的監測系統。目前已研發的 TDR 監測感測器一般在邊坡監測的幾何配置如圖 4.46 所示，多孔、多工的特性可大大的降低成本，另外全系統配合 TDR 已將監測的資料完全數位化，同時具有自我診斷的機制，能立即且正確反應系統錯誤，可快速的修復及維護。

TDR 監測系統的感測器包括 TDR 水位/水壓感測器、TDR 錯動變形感測器、TDR 水平變位計、TDR 雨量計等，可同時多工多孔運作。TDR 自動監測系統也支援多數的傳統數位量測儀器，如電子式水壓計、傾斜儀(IPI)等，可與 TDR 感測器搭配使用，資料儲存處理各自獨立，不會相互衝突。在 TDR 監測系統的限制方面，雖然在同一個監測站可同時監測數十個以上的監測孔，但孔與孔之間的距離不可超過 1km，因 TDR 反射訊號會隨著傳輸距離的加大而衰減，故在監測規畫階段，須決定監測站數目，才可確保 TDR 監測系統能夠發揮最大的效能。

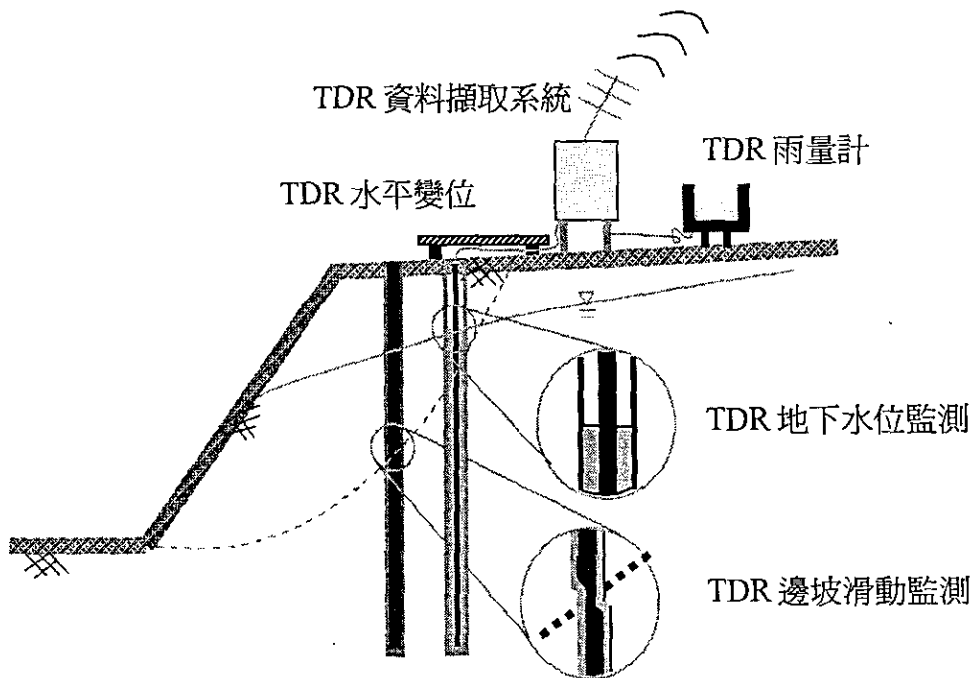


圖 4.46 現地邊坡監測系統

(2) TDR 監測系統硬體設備

本監測系統主要是利用時域反射儀(TDR)產生脈衝導入感測器(Sensor)內，再將感測器的反射訊號用資料擷取器(Datalogger)記錄其波形，以 ASCII 文字格式儲存於內建記憶體內，同時資料擷取器連接行動數據機(Modem)，再利用遠端電腦下載即時資料，以達到自動化監測的目的。此外，因考慮內建記憶空間不足的問題，本監測系統另外加裝 storage，如此可在現場儲存數日的監測資料。各元件功能細述如下：

(A) Sensor

TDR 監測系統可視需要裝設不同功能的感測器，目前可監測的範圍包地層錯動變形、地下水位高度、雨量、水壓量測、水平變位等。

(B) Datalogger

本計畫使用數位量測資料擷取器可視為現場的小型電腦，可透過程式載入的方式控制其運作，依據所擷取資料形態的不同，套用不同的參數執行程式。內建一組 128KB 的記憶體，可外接 12V 電源，預留四排接孔可連接不同的量測系統，如 TDR，水壓計，傾斜儀等。

(C) TDR

本計畫所使用之時域反射儀(TDR)內含一脈衝電壓產生器，產生脈衝電壓傳至同軸電纜線，由訊號採樣器擷取由同軸纜線傳回之反射訊號，此反射訊號可由 Datalogger 自動下載，借由波形之判斷可決定欲量測之資料值，如地下水位高度與地層錯動變形。

(D) Multiplexer

多工器(Multiplexer)的目的在於使同一資料擷取系統連接數個感測器，擴充監測系統之效能與經濟效益，本計畫使用的多工器一片

可增加 8 個感測器，可多片串聯，最多可支援 256 個感測器同時運作。

(E)Storage

資料儲存器俗稱硬碟，可擴充 Datalogger 之內建暫存記憶體，透過程式可將 Datalogger 擷取的資料記錄於硬碟中儲存；若硬碟與 Datalogger 和數據機同時串接使用，亦可透過無線傳輸方式直接下載硬碟資料。

(F)Communication & Modem

本計畫除使用資料儲存器儲存現場資料外,另外有三種方式可將監測資料作遠端傳輸，有無線電(Radio)、無線電話(Phone Modem，GSM)和網際網路(TCP/IP)進行遠端資料擷取，可視現場狀況決定傳輸方式。

(G)Power (Battery and Solar Panel)

現場監測系統各元件均使用 12V 直流電源，本系統提供一 12V 蓄電池，蓄電池可接 110V 交流電蓄電，若在野外無固定電源時可外接太陽能電板蓄電。為維持 Datalogger 及 TDR 之正常運作，需維持 9.6V 以上之電壓。

(H)Security

Datalogger、TDR100、Multiplexer 等較精密儀器將使用一塑鋼盒(40 X 45 X 25cm)加以保護，若作適當的處理亦可有良好的防水功能，外殼附兩套直徑為 1cm 的鎖孔，可上鎖防竊。

(I)Server

未來將藉由電腦伺服器(Server)作為本監測系統自動控制及資料處理中心，透過數據機可利用無線傳輸的方式分別連接 Datalogger 及 Storage；連接 Datalogger 可隨時監控現場監測儀器的運作狀況，連接 Storage 可下載即時的監測資料。電腦伺服器同時運作資料庫軟

體，同步記錄及計算龐大的監測資料。

(J)Client Computer

遠端的個人電腦未來可透過網際網路的通道與伺服器連接，利用網頁(Web)介面與使用者做即時連結，以達到真正自動化監測的目標。

圖 4.47 為 TDR 監測系統架構示意圖，從現場感測器擷取資料到使用者得知即時的監測資料，此一系列的過程可由此圖示完整說明。圖 4.48 為 TDR 資料擷取系統硬體元件實體圖。

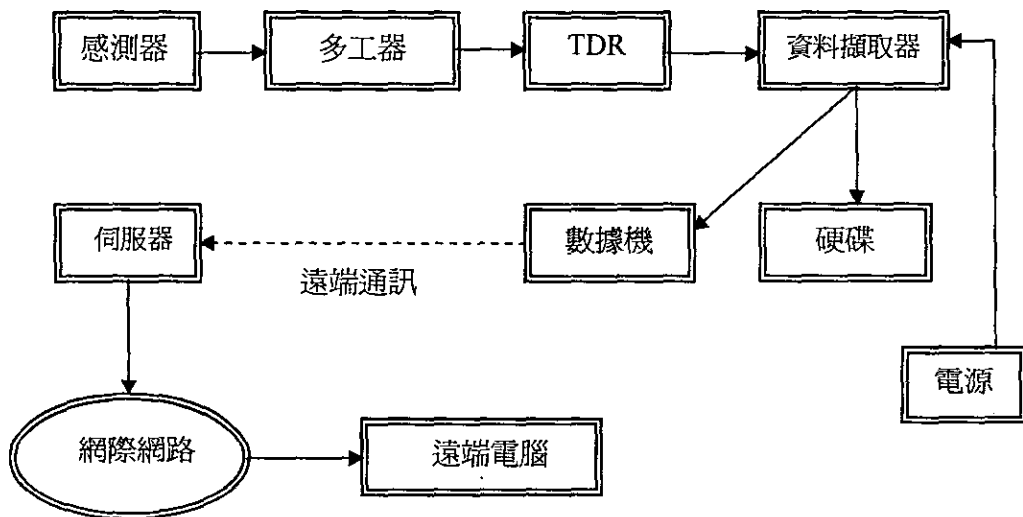


圖 4.47 TDR 監測系統連結示意圖

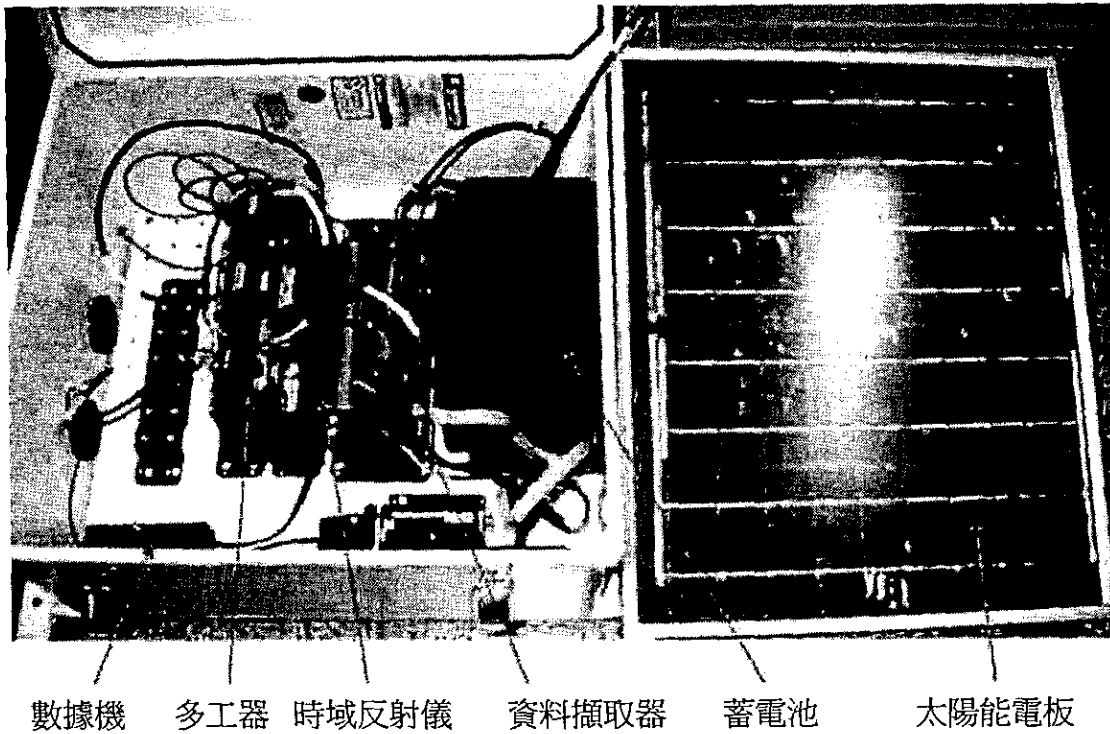


圖 4.48 資料擷取系統

(3)TDR 監測系統軟體架構

TDR 監測系統各硬體元件須配合固定的應用程式才可執行，如 PC208W、PCTDR 等；在遠端伺服器內，同時架設資料庫與網頁伺服器，與網際網路連接，以提供客戶在遠端監控的便利性。從現場的資料擷取(Data Acquisition)，到伺服器資料庫(Database)，最後到網路架構(Network)都須適當的軟體相互協調方能順利運作。

(A)Data Acquisition

在資料擷取之控制軟體方面，Datalogger 須使用 PC208W 下達程式指令始可運作，其中操作細項可分為 setup，connect，program，status 等選項，相關的硬體設定、通訊連結、程式運作都須由 PC208W 來控制執行。

Datalogger 擷取到由 TDR 感測器回傳的反射訊號，先記錄於記憶體內，再儲存於硬碟中，依據程式所下的參數來設定資料的儲存

格式，或是回傳至遠端伺服器的時間間隔，此處回傳的檔案為最初的原始資料(Raw data)，須經由遠端伺服器再做進一步的處理。

圖 4.49 為 TDR 監測程式碼的部分片段，目的是將 TDR 以一小時間隔的時間把檢測到的 TDR 反射波形記錄於 Storage 中。

```
Table 1 Program
01: 3600 Execution Interval (seconds)

1: Batt Voltage (P10)
1: 1 Loc [ Bat_Volt ]

2: Do (P86)
1: 45 Set Port 5 High

3: TDR100 Measurement (P118)
1: 00 SNR Address
2: 1 Waveform
3: 1001 IDMP Max & Probe Selection
4: 4 Waveform Averaging
5: 1 Yp
6: 2048 Points
7: 40 Cable Length (meters)
8: 20 Window Length (meters)
9: 0 Probe Length (meters)
10: 0 Probe Offset (meters)
11: 2 Loc [ WC_1 ]
12: 1.0 Muft
13: 0.0 Offset

4: Do (P86)
1: 55 Set Port 5 Low

5: Do (P86)
1: 10 Set Output Flag High (Flag 0)

6: Set Active Storage Area (P80)
1: 1 Final Storage Area 1
2: 101 Array ID

7: Real Time (P77)
1: 1220 Year,Day,Hour/Minute (midnight = 2400)
```

圖 4.49 Datalogger 監測程式部分片段

(B) Database

因現場傳回的檔案為原始資料(Raw data)，由人工直接判讀非常的不方便，也因須進一步完成自動化的過程，所以將 Raw data 存入伺服器後即進行處理，利用 Java 語言撰寫的分類程式，將 Raw data 依各個不同性質的監測資料加以分類，如此易於人工判讀且方便存檔備份。將 Raw data 分類後，同樣以 Java 撰寫的程式做細部計算，將不同類別的監測資料計算出可判斷的數值，或繪出 TDR 原始波形，最後將這些結果依檔頭索引置入資料庫 (Database) 中。為與網頁做互動式連接，本系統使用 XML 語言格式作為資料庫與網頁相互溝通的橋樑。

圖 4.50 為 Raw data 分類計算及置入資料庫過程的示意圖，目的是將零亂的原始檔案作有系統的分類，之後置入資料庫以便網頁搜尋。

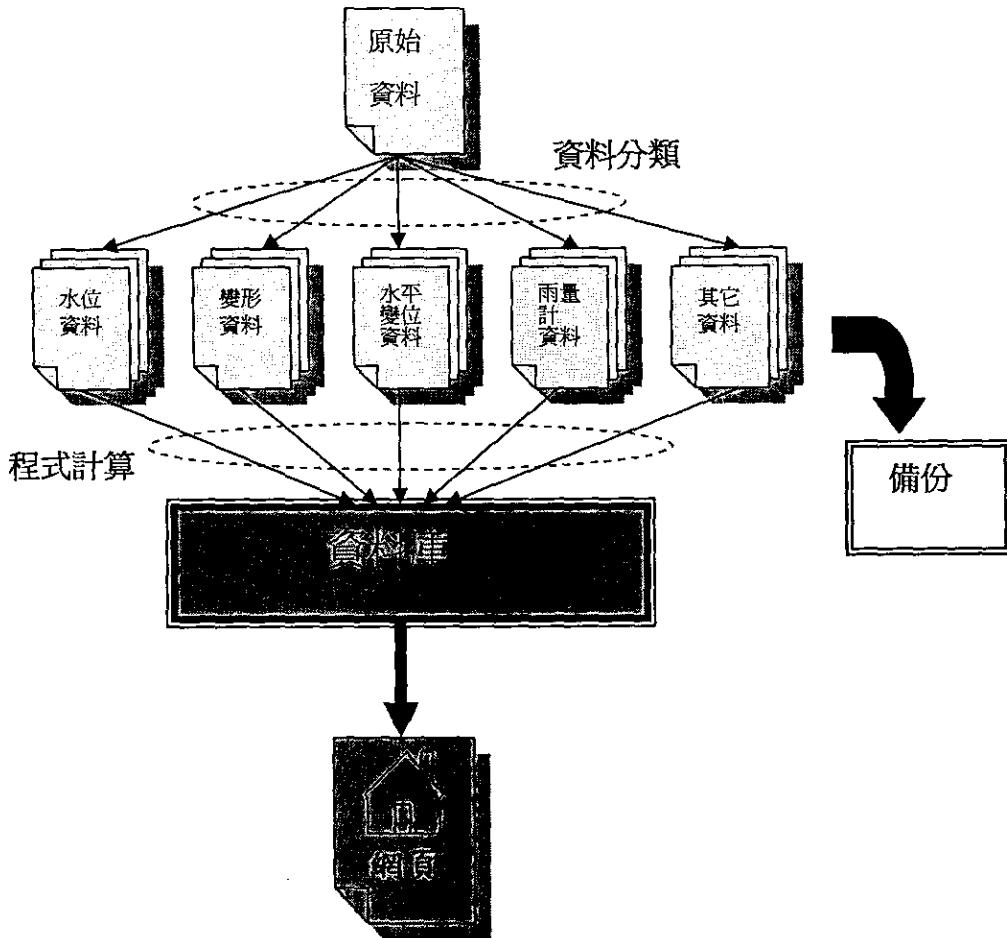


圖 4.50 Raw data 分類計算及置入資料庫過程示意圖

(C) Network

為求 Anytime、Anywhere 即時自動化監測的目標，本系統架構已延伸至與網際網路的結合，在主要的伺服器主機(TDR Server)上架設 Database Server、Web Server、Application Server 及 Authenticated Server，配合 Dns Server 和其它 TDR 工作群組，組合成一 TDR 網域，此設計完全模擬企業網路在 Internet 上的架構，如此可增加本系統在企業網路與網際網路上執行的可行性。

在網際網路上，未來只要客戶在任何時間、任何地點使用遠端電腦連接上網，透過 Authenticated Sever 通過驗證，即可在 Web Server 的網頁上點擊(click)所欲知的資訊，如現場即時的水位高度、地層錯動的位置或是即時降雨量，在數秒鐘內即可用網頁的介面呈現於客戶終端機螢幕前，相信可提供客戶最大的便利性，也相信此 TDR 自動化邊坡監測系統會成為未來邊坡破壞性監測的主流。圖 4.51 為 TDR 網域在網際網路上的相關示意圖。

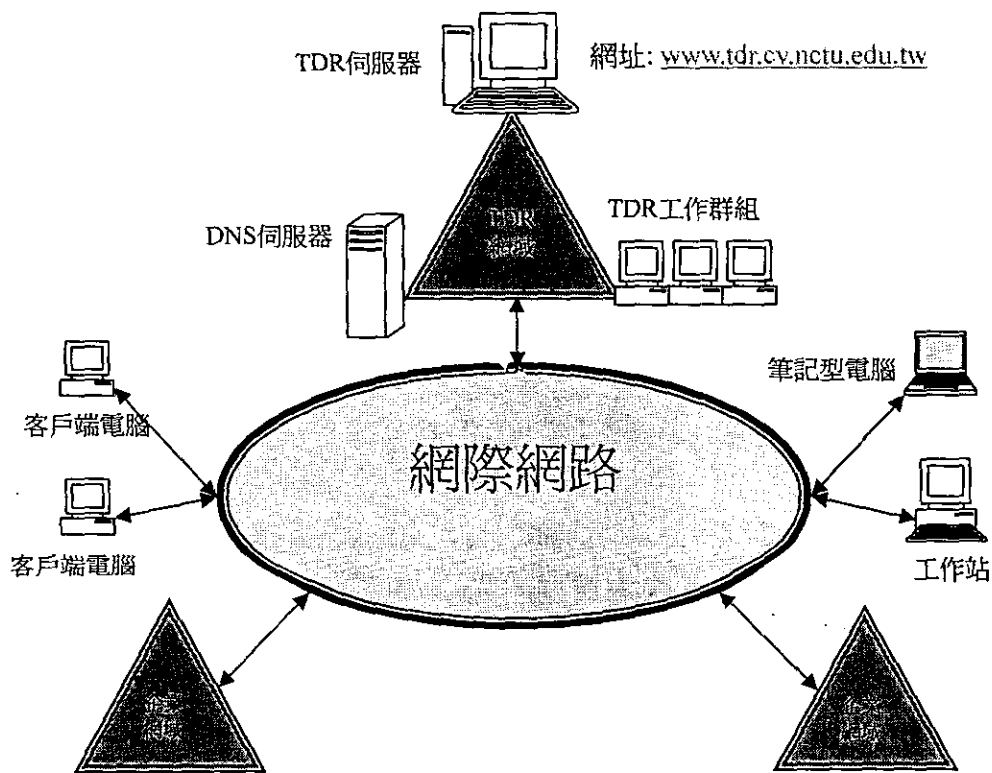


圖 4.51 TDR 網域與網際網路相關示意圖

圖 4.52 為 TDR 入口網站首頁內容，網站的網址為 [Http://geotdr.cv.nctu.edu.tw/automatic/](http://geotdr.cv.nctu.edu.tw/automatic/)。其製作所使用的工具有標準網頁語法 HTML、網頁製作軟體 FrontPage、以及影像繪圖軟體 PhotoImpact 等。此網站除了可查詢監測資料外，也將 TDR 自動化監測系統的研究架構做概括性的簡介，網頁上也配置許多的按鈕元

件以提供使用者點選查詢相關文獻，可分為上方按鈕列及側邊按鈕列兩部分。上方按鈕列共六個選單，依序為 System、Hardware、Software、JavaCode、Links、及 Contact Us，主要介紹系統的軟體、硬體設施、Java 程式的原始碼、以及其他相關參考網站的連結等。側邊按鈕列共五項選單，分別為 TDR 基本原理、TDR 監測感測器、TDR 資料擷取設備、TDR 遠端監控程式、及 TDR 其他研究，其主要是介紹 TDR 的相關資訊。其中點選『TDR 遠端監控程式』，則系統會要求使用者輸入帳號及密碼，如圖 4.53 所示，此為遠端電腦進入系統查詢程式的唯一途徑，待通過身份確認後即可查詢監測資料。

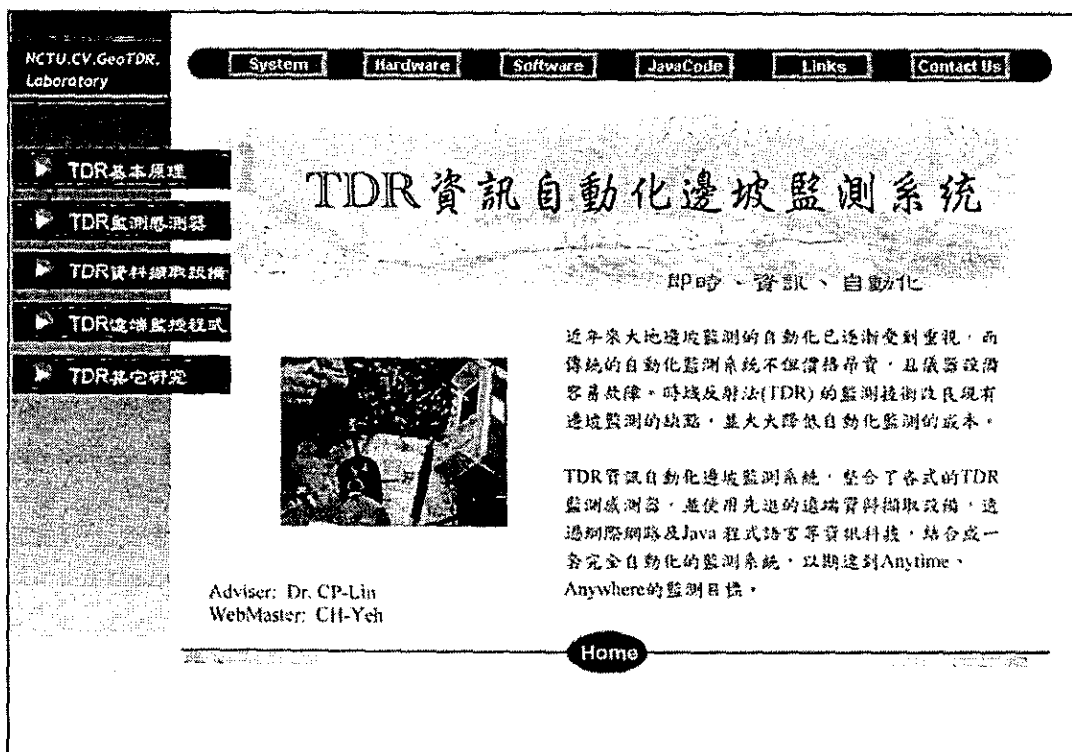


圖 4.52 『TDR 邊坡資訊自動化監測系統』入口

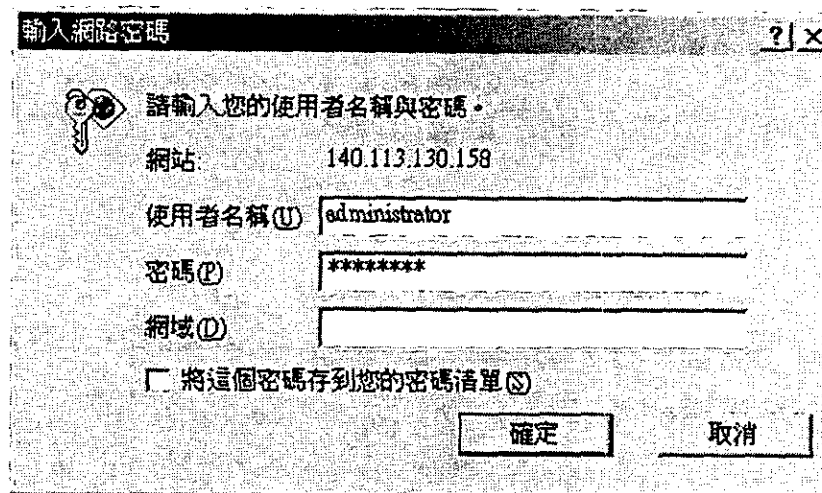


圖 4.53 TDR 遠端監控程式身份驗證介面

(2) TDR 遠端監控程式

『TDR 遠端監控程式』是一 Java 語言撰寫的網頁監測程式，其操作介面是以視窗圖形化(GUI, Graphical User Interface)的方式處理。圖形化的視窗介面是 Java 程式的特色之一，其中有內建專門處理網頁及繪圖元件的函式庫，如 Applet、JApplet、AWT、Swing 等(註一)，是提供使用者與應用程式互動的溝通管道。TDR 監測程式使用了許多標準的圖形使用者介面(GUI)，如按鈕(Button)、標籤(Label)、以及文字區域(Text Area)等。此程式的圖形繪製使用了『JfreeChat』的圖形函式庫。

邊坡監測資料的查詢方法依其屬性的差異而有不同，本程式的網頁查詢介面是以標籤面版(Tabbed Panel)為主體，依監測感測器的型式再分成四至五個標籤頁面，每個標籤頁面又分為兩個子面版(Panel)，分別占據上窗格及下窗格兩個部分，如圖 4.54 所示。上窗格的子面版是詳細文字資料的查詢區，由三個元件所組成：第一個為單行文字方塊，是下 SQL 查詢指令的命令列；第二個是多行文字區，其功能是用文字方式顯示詳細監測資料的區域；第三個是查詢按鈕，為實際執行查詢命令的觸發點。下窗格的子面版是監測資料

的圖形顯示區，依監測屬性的不同有不同的元件組成，大致可分為下列五種：

(A)圖形 XY 軸刻度調整選單

是使用 Swing 元件內的下拉式選單(Combo Box)所組成，可依視覺需求彈性調整曲線繪圖區內 X 軸及 Y 軸的刻度大小，其刻度範圍的設計視曲線圖的類型而定。

(B)單行文字方塊

是下 SQL 查詢指令的命令列，主要是要求曲線繪圖區按照命令列的 SQL 指令畫出曲線圖。

(C)繪圖按鈕

是用 Swing 元件內的按鈕(JButton)建立，曲線繪圖區內 XY 軸刻度大小的調整及曲線圖的繪製皆由此按鈕觸發執行。其按鈕名稱為『Draw』。

(D)重設按鈕

與繪圖按鈕相同也是使用 Swing 元件的 JButton 所建立，主要功能是清除繪圖區內的曲線圖，同時將所占的記憶體空間釋放出來。按鈕名稱為『Reset』。

(E)曲線圖繪圖區

是使用 Java 外部圖形函式庫『JfreeChart』組建而成，其主要功能是繪出各種監測的統計圖等。

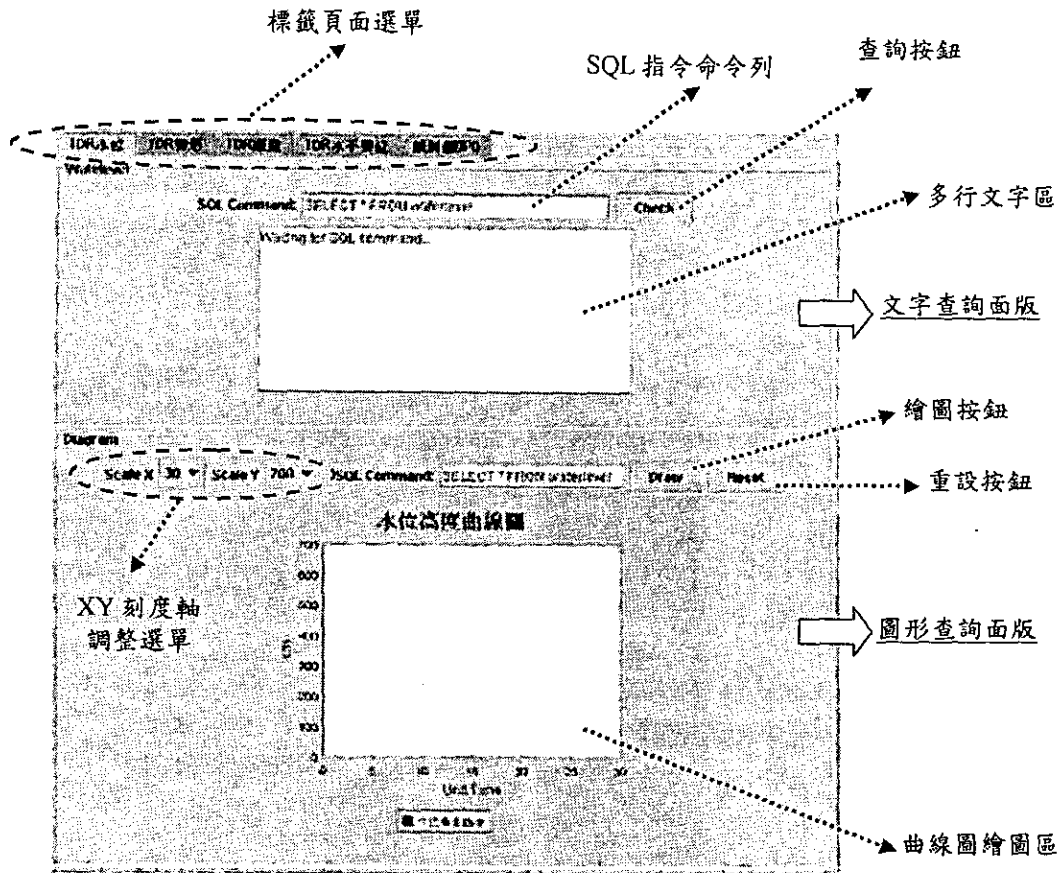


圖 4.54 TDR 遠端監測程式使用介面

(3)TDR 監測程式使用方法

為簡化視窗介面的使用方法，本程式各個感測器所設計的監測介面皆類似，主要分為文字及圖形查詢兩部分，但所下的 SQL 指令不會相同，所顯示的監測結果也差異極大。各式感測器可由命令列下指令的方法得到欲知的監測資訊，其各介面的使用方法及說明於以下詳述。

(A)水位監測介面

在主程式標籤頁面預設的版面即為水位監測程式介面。在文字查詢面版部分，於命令列打上 SQL 指令後點擊『Check』按鈕，即在多行文字區顯示監測資訊，可針對單筆、多筆、或已指定範圍的水位監測資料做查詢，其每一筆資料的詳細資訊有現場電壓伏特數

(Voltage)、纜線長度(X1)、採樣視窗長度(deltaX)、以及水位高度四項。文字面版配置如圖 4.55 所示。而在圖形查詢面版部分，在下達查詢指令後點擊『Draw』按鈕，在曲線繪圖區內即顯示水位高度歷史曲線圖，如圖 4.56 所示。圖形刻度軸的調整為下拉式選單，X 軸為單位時間，最大刻度為 30，最小為 10，其單位可以是時、日或月，完全依查詢指令所搜尋的範圍而定。Y 軸為水位高度，最大刻度為 700，最小為 100，單位為 cm，可依當時所查詢的水位高度隨性調整，原則上以能包含所有查詢的水位資料為準。欲清除繪圖區的曲線圖則點擊『Reset』即可。

(B)變形監測介面

在主程式標籤頁上點擊『TDR 變形』標籤即進入變形監測程式介面。在文字查詢面版的 SQL 命令列打入查詢指令後，點擊『Check』即在多行文字區內顯示詳細變形監測的資訊，有現場電壓伏特值(Voltage)、纜線長度(X1)、以及採樣視窗長度(ΔX)三項。其文字面版如圖 4.57 所示。圖形查詢面版部分，在命令列下達指令後按『Draw』即顯示圖形，是以畫出 TDR 反射波形為主，最多查詢五筆監測資料，而多筆波形圖可相互重疊比較其變化程度。沒有 XY 軸刻度調整選單，X 軸為感測器長度(V_p 為 1)，單位為 m，Y 軸為反射係數 ρ 值，其單位刻度介於 1 與 -1 之間。清除繪圖區的按鈕為『Reset』，而在圖形查詢面版內的 TDR 反射波形圖如圖 4.58 所示。

(C)雨量監測介面

在主程式標籤頁上點擊『TDR 雨量』標籤即進入雨量監測程式介面。其文字面版查詢方式與水位監測程式相同，而每一筆雨量資料詳細的監測資訊有時間(Time)、現場電壓伏特數(Voltage)、纜線長度(X1)、採樣視窗長度(deltaX)、以及累積雨量等五項，文字查詢面

版如圖 4.57 所示。在圖形面版方面，查詢方式和水位監測大致相同，不同的是當按下繪圖按鈕『Draw』時，會同時顯示兩種不同的監測圖，一是單位時間降雨量直方圖，另一是累積雨量曲線變化圖，如圖 4.58 所示。其圖形刻度 X 軸是單位時間，單位是依查詢資料的時間範圍而定，Y 軸為雨量，單位為 mm。按下『Reset』可清除繪圖區內所有的統計直方圖及曲線圖。

(D)水平變位監測介面

在主程式標籤頁上點擊『TDR 水平變位』標籤即進入水平變位監測程式介面。在文字查詢方面亦與水位監測程式相同，每一筆文字監測的資訊包含現場電壓伏特數(Voltage)、纜線長度(X1)、採樣視窗長度(deltaX)、以及累積水平變位量等四項數值。另外在圖形查詢面版方面，其查詢方式和結果圖形的顯示與水位監測程式相同，其中不同的是繪圖區 Y 軸為累積水平變位量，單位為 mm。

(E)其他傳統監測儀器監測介面

除了 TDR 感測器外，本程式亦可處理其他傳統的邊坡監測儀器，如電子式水壓計、孔內傾斜儀等。本研究以孔內傾斜儀(IPI)為例說明。在主程式標籤頁上點擊『傾斜儀(IPI)』標籤即可進入傾斜儀監測程式介面。在文字查詢面版部分，於命令列打上 SQL 指令後點擊『Check』按鈕，即在多行文字區顯示監測資訊，其每一筆資料的詳細資訊包括監測時間(Time)、現場電壓伏特數(Voltage)、傾斜儀感測器編號(IPI_Id)、X 方向傾角、及 Y 方向的傾角等五項。在圖形查詢面版部分，下達查詢指令後點擊『Draw』按鈕，會在曲線繪圖區內顯示各單一感測器的傾角累積變化量，其圖形 X、Y 刻度的單位分別為時間及累積傾斜角度(徑度)。

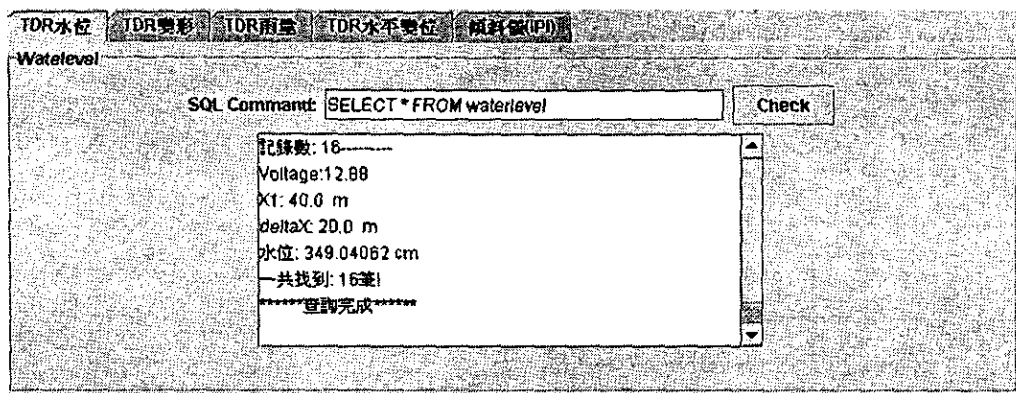


圖 4.55 TDR 水位監測文字介面

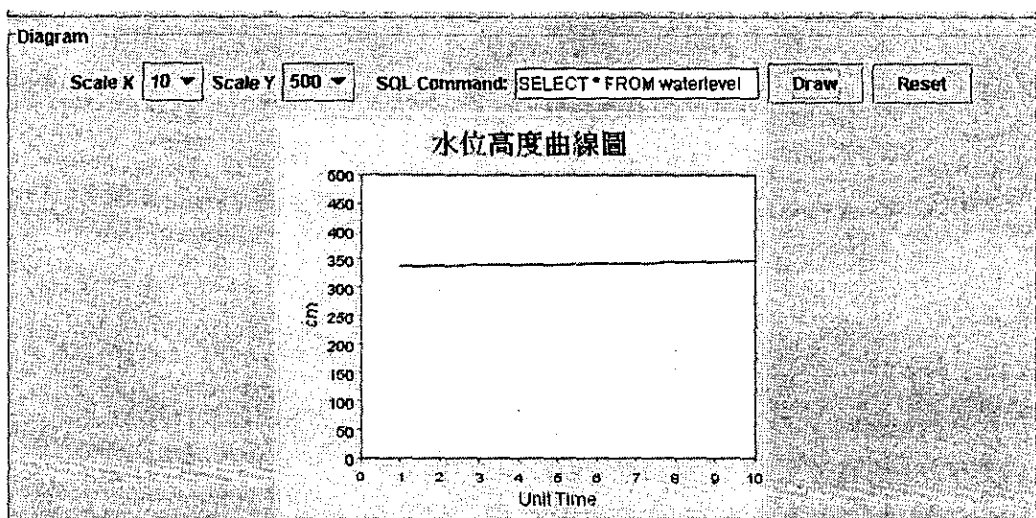


圖 4.56 TDR 水位歷史曲線變化圖

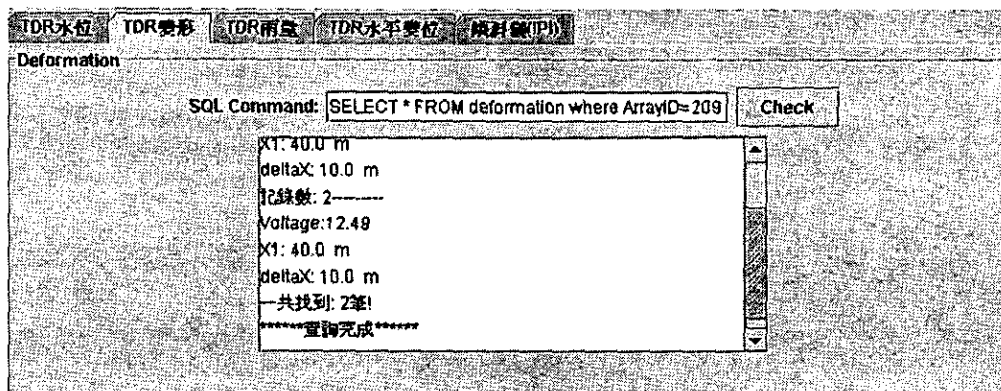


圖 4.57 TDR 變形監測文字介面

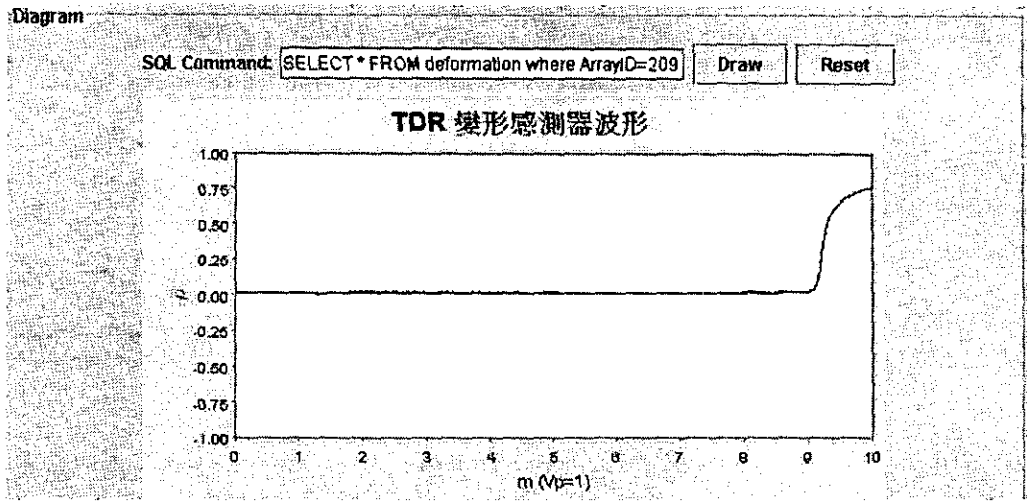


圖 4.58 TDR 變形感測器反射波形圖

五、預警基準座談會與推廣講習會

5.1 預警基準座談會

第一年(91年)完成之道路邊坡崩塌預警基準草案，第二年進行修改。總共舉辦二次座談會，邀集相關學者專家以逐條方式進行討論。第一次在 92/7/25 舉辦，第二次於 92/10/7 舉辦，修改完成後之版本如附錄 B 所示。

5.2 推廣講習會

推廣講習會與財團法人台灣營建研究院聯合辦理，並於 92/12/11、12 完成。12/11 安排學員至嘉義縣阿里山路段進行光纖及 TDR 監測技術的現場教學參觀。12/12 則在台北舉辦，議程如表 5.1 所示，活動相關圖片如圖 5.1 及圖 5.2 所示。

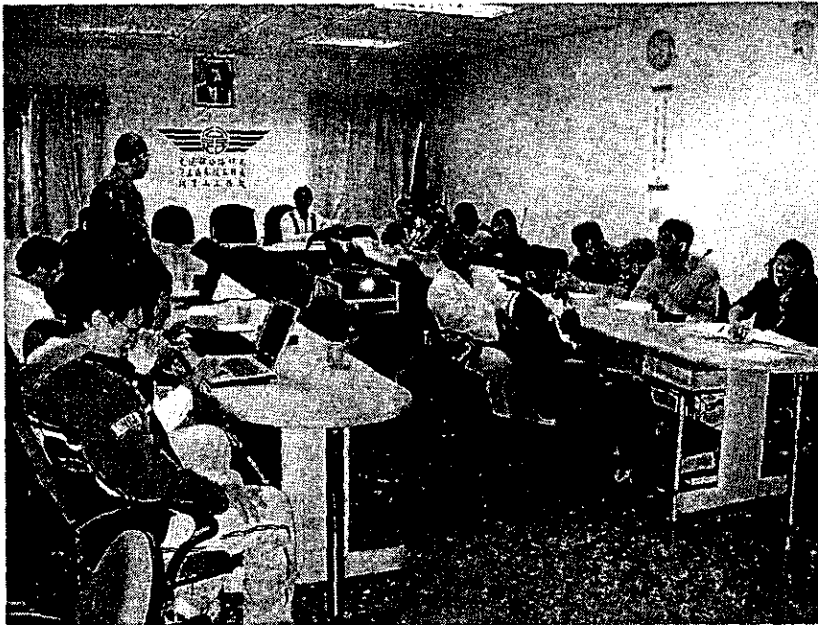


圖 5.1 講習會情況 (1)



圖 5.2 講習會情況 (2)

表 5.1 講習會議程

			主講人	主持人
11 日	10:00~12:00	高效能監測系統於五灣仔邊坡之應用	黃安斌教授 林志平助理教授 (於嘉義縣番路鄉)	
	13:00~15:00	現場實作		
12 日	08:30~09:00			
	09:00~09:15	開幕致詞	梁樾 局長	王明德 院長
	09:15~10:05	道路邊坡管理系統開發與應用	廖洪鈞 教授	梁樾 局長
	10:20~11:10	坡地監測系統	廖瑞堂 總經理	李維峰 組長
	11:10~12:00	台灣山區道路工程地質特性與邊坡監測規劃	董家鈞 助理教授	
	13:00~13:50	道路邊坡高效能監測系統研發成果	黃安斌 教授	林美聆 教授
	13:50~14:40	新式邊坡檢、監測儀器介紹	林志平 助理教授	
	15:00~15:50	大型崩塌地監測案例分析	張睦雄 助理教授	李泰明 副局長
	15:50~16:40	先進邊坡修護與安全檢測技術	李維峰 組長	
16:40~17:00	綜合座談	各主講人	李維峰 組長	

六、結論

本研究已按照規劃之進度完成地層光纖光柵扭曲儀以及一系列 TDR 監測系統硬體在湖口試驗站測試之觀察，同時舉辦預警基準草案之專家座談，並整理列出傳統 IPI、FBG 及 TDR 等系統比較，如表 6.1 所示，成本分析比較詳見表 6.2，其他重要結論如下所述：

- (1) 光纖光柵在光纖通訊中原本之目的是濾波以及作為波長分段之工具 (wave length division multiplexing)。如果將光纖光柵作為應變感測器，其製作規格與方法必須做相當之修改。湖口試驗站所使用之光纖光柵為製造廠商第一次以應變感測器之規格製作光纖光柵，這可能是其穩定度不理想之最大原因。其後所供應之光纖光柵應變感測器品質已大有改善。
- (2) 湖口試驗站使用 FBG-IPI 之經驗也顯示，若需達到本儀器之功能，所使用之光纖光柵掃瞄分析儀其解析度必須在 $\pm 0.1\text{pm}$ 之內，其長期之穩定度 (讀數變化量) 必須在 $\pm 1\text{pm}$ 之內。或者，可以從 FBG-IPI 之設計著手以加強扭曲儀讀數之放大效應，例如使用半徑較大之軟管或以應變集中的方法來抵銷光纖光柵掃瞄分析儀讀數解析度不足之缺點。扭曲儀如果將光纖光柵黏貼在一連續之塑膠管上，安裝時容易使光纖斷裂，研究團隊基於以上之考量已完成扭曲儀之改良，以及改良形扭曲儀之室內標定。
- (3) 阿里山所改使用之良型 FBG-IPI 安裝簡便，過程中沒有光柵之損壞，實用性極高。如果經與其他監測結果確認於 10/25 至 11/18 間確實沒有發生明顯之地層移動，即可以證明此一系統也同時具有穩定性。對於監測技術之提升將有極大之助益。
- (4) 本研究主要目的之一是利用 TDR 建立一經濟、穩定、高效率

之邊坡監測系統，一般邊坡監測之物理量常包括地表位移、地層變形、地下水位(孔隙水壓)、降雨量等。TDR 錯動變形與地下水位監測仍有許多值得改進的地方，本研究針對邊坡監測，改良現有錯動變形與水壓量測技術，並新開發 TDR 變位計及雨量計，使得 TDR 監測系統具備多種邊坡所需之監測功能，可使用同一電子儀器及多工器同時進行多點位與多功能之監測。此外，本研究亦進行監測系統整合與軟體開發，可同時整合 TDR 感測器及傳統監測儀器，並結合自動資料擷取系統、無線通訊、資料庫、網際網路、行動簡訊、伺服器等科技建立智慧型 TDR 資訊自動化系統，如配合良好的規劃設計，可有效地建立穩定、高效率且經濟之山坡地監測系統。

本計畫已實際的研發成功以光纖光柵與電磁波時域反射為感應原理之道路邊坡穩定監測系統，同時展示其實用性。在土木工程領域中任何一種新技術都必須經過廣泛之使用，確認後才能夠在一般工程中使用。研究團隊認為本計畫中所研發之監測技術具有許多優點值得推廣，建議藉由交通部的支持，繼續推廣這些新技術。阿里山五彎仔路段即可作為一示範路段安裝一系列本計畫所研發之監測系統最為長期觀察與展示之用。

表 6.1 自動化邊坡穩定位移監測系統之比較

	IPI	FBG-IPI	TDR
監測原理	量測傾斜角	使用應變管原理量測扭曲度	根據電纜受錯動所產生介電性質之改變
解析度 (斜率)	視感測器而定， 1/1000 至 1/25000	視應變管半徑而定， 1/5000 至 1/10000	1/1000 以下
量測範圍	視傾斜管扭曲度與 IPI 長度相對尺寸而定，儀器之有效監測傾斜角範圍是 $\pm 30^\circ$	光纖所能承受最大應變量為 1%，可以用應變管半徑之大小來調整其解析度與量測範圍，以將其表現最佳化	幾公釐到幾公分，視感測器之設計而定，靈敏度高則範圍較小。
訊號傳遞介質	輸出電壓類比訊號，每一 IPI 使用單獨之訊號線	以光為訊號傳遞介質	以電磁波為訊號傳遞介質
耐久性	中	高	高
工作度	高	中	高
經濟性	成本高，維修不易	成本中等，維修容易，維修費低。	成本低，維修容易，維修費低
限制條件	訊號線體積大，傾斜管內空間有限，受制於訊號線之體積，所能安置之 IPI 數量有限。 儀器本身為剛性材料，當測傾管嚴重扭曲時，儀器容易受損。	光纖監測為全新之技術，儀器設備尚未大量生產，監測儀器資料擷取系統費用高昂。	1. 無方向性。 2. 可由反射訊號之變化速度瞭解邊坡之穩定性，但位移量化(絕對值)之方法仍在改良中。

表 6.2 自動化邊坡穩定位移監測系統之成本分析

	IPI	FBG--IPI	TDR
鑽孔	配合傾斜管尺寸 每米約 1000 元	配合傾斜管尺寸 每米約 1000 元	配合同軸電纜尺寸 每米可低於 1000 元
傾斜管材料	需要 每米約 1000 元	需要 每米約 1000 元 軟管形不需要	不需要
灌漿	傾斜管安裝時需要 灌漿	傾斜管或 FBG 軟管安裝 時需要灌漿	同軸電纜安裝時 需要灌漿
感應器材料 費	每 IPI 單元： 30,000 至 40,000 元	每米包含兩個 FBG 與一 米支架：6,000 元	每米同軸電纜： 100 至 300 元
現場安裝費 用	每 30 米 6,000 元	每 30 米 6,000 元	除灌漿外無其他 安裝費用
資料擷取系 統	150,000 元以內	300,000 至 1,800,000 元	300,000 元以內

七、參考文獻

1. 工業技術研究院能源與資源研究所，1989，台灣省重要都會區環境地質資料庫。
2. 中華水土保持學會，2000，“梨山地滑地區管理準則之研究”，台灣省政府農林廳水土保持局第二工程所。
3. 中興大學水土保持研究所，1990，“花蓮縣銅門村土砂災害之研究調查”。
4. 日本土砂災害之預知與對策編輯委員會，1985，“土砂災害之預知與對策”，日本土質工學會。
5. 日本文部省自然災害特別研究成果 No.A-57-4，“扇狀地洪水及土砂災害發生之防止減輕研究”，第 84-85 頁。
6. 日本地盤工程學會，1998，“切工法面の調査”。
7. 日本建設省河川局砂防部，1982，“坡面崩壞防止工事之設計實例”，日本全國治水防砂協會。
8. 日本砂防學會(1992)，“土砂災害對策-扇狀地對策、土石流對策等(1)”，山海堂，pp274-287。
9. 日本高速道路調查會，1988，“地 危險地 動態觀測施工 關 研究(3)報告書”，日本道路公團。
10. 日本道路公團，1983，“設計要領第二集”。
11. 日本道路協會，1983，“落石對策便覽”，pp.35-41。
12. 日本道路協會，1986，“道路土工斜面安定工指針”，日本道路本工委員會。
13. 古兆禎，1963，“臺灣西北部臺地之空照地質學的研究”，中國地質學會會刊第 6 號，第 51~60 頁。

14. 江晏佃，1999，“山區道路落石危險度與危害度之評估與預測”，國立交通大學，碩士論文。
15. 池谷 浩、水山高久，1982，“土石流流動及堆積相關研究”，土研報，第 157 號，第 88-153 頁。
16. 李德河，1984，“邊坡破壞時間之預測”，土工技術雜誌第七期，第 7~12 頁。
17. 亞新工程顧問公司，1987，“公路局中部橫貫公路邊坡維護管理系統建立工作服務報告”，台灣省交通處公路局。
18. 林四川、徐振煌、周楊國、卓卿仁，2001，“環境敏感地質之道路邊坡坍塌整治案例探討”，第九屆大地工程學術研討會論文摘要集。
19. 林志平、湯士弘(民國 91 年)，時域反射伸縮計，專利申請，國立交通大學智慧財產權中心編號 02(專)A024。
20. 林銘郎，洪如江，1992，“峽谷地區河谷解壓節理與落石災害”，地質防災技術研討會論文集，台灣，新竹，第 13-41 頁。
21. 青木佑久，1980，“過去土石流災害降雨特徵之研究”，土木技術，22-2，pp.71-76。
22. 柏尼刺，1977，“臺灣的第四紀斷層活動與地盤升降”，中國地質學會專刊第 2 號，第 43-56 頁。
23. 范正成，1999，“陳有蘭溪流域一級溪流土石流臨界降雨線及其與地文因子之關係”，第八屆大地工程學術研究討論會，屏東科技大學，pp.273-274。
24. 范正成，王聖岑，1998“利用集水區模型與人工降雨定量推估花蓮縣銅門村土石流發生處之尖峰逕流量”，台灣水利，第 46 卷，第 2 期，民國八十七年六月，PP.1~11。(NSC-84-2621-P-002-028)

B)

25. 范正成，吳明峰，彭光宗，1999，“一級河川土石流發生臨界降雨線之研究”，第八屆大地工程學術研究討論會，屏東縣恆春，民國88年8月18-20日。
26. 范正成、毛振泰，1997，“花蓮縣秀林鄉土石流發生處降雨特性分析”，中華水土保持學報，第二十八卷第一期，民國八十六年三月，PP.47-57. (NSC-82-0414-P002-026-B)
27. 范正成、姚政松，1997，“台灣東部地區土石流發生的水文及地文條件之初步研究”，中國農業工程學會八十六年度學術研討會，台南市。中華民國八十六年十二月十七日。PP.525~532.
28. 范正成、彭光宗，張國良，1998，“土石流危險因子與臨界降雨線關係之研究”，中國農業工程學會八十七年度學術研討會，台北市，民國八十七年十二月二十二日。PP.221~228.
29. 國立交通大學防災工程研究中心，2000，“寶山第二水庫工程計畫壩體動態分析與試驗期末報告”，經濟部水利處中區水資局，pp.2-15~2-16。
30. 國立成功大學防災研究中心，1998，“地質危險區公路及河川橋樑之維護管理與防救災對策之研擬~以台十一線及二十一線為例期末研究報告”，台灣省交通處公路局。
31. 捷統工程顧問股份有限公司，1998，“北迴線 NO+720 至 N1+020 間邊坡監測防災警示系統工程施工計畫書”。
32. 許中立、陳德天、李金來，2002，“嘉義大埔泰山段地層滑動問題之探討”，坡地防災學報，第一卷，第一期，pp.57~70。
33. 陳至揚，2001，“光纖光柵感測扭曲儀之研發”，交通大學土木工程系碩士論文。

34. 陳坤泉，2001，“土石壩監測要領與研判”，水庫安全監測講習會。
35. 陳玠文、張睦雄、郭治平、簡世杰，2001，“監測系統於邊坡滑動機制之個案探討”，第九屆大地工程學術研討會論文摘要集。
36. 陳時祖，1995，“阿里山公路沿線公路邊坡崩塌與雨量關係之研究”，行政院國家科學委員會，防災科技研究報告 83-14 號。
37. 游繁結、陳重光，1987，“十八重溪土石流災害之探討”，農林學報，37(1)：第 1-18 頁。
38. 游繁結、陳重光，1987，“豐丘土石流災害之探討”，中華水土保持學報，18(1)：第 76-92 頁。
39. 渡，1971，“地 型 對策”，地 ， Vol. 8，No. 1。
40. 湯振輝，1963，“湖口背斜石油地質”，臺灣石油地質第二號，第 241-252 頁。
41. 黃立煌，1985，“崩積土邊坡水壓計資料分析”，地工技術雜誌第十二期，第 26~34 頁。
42. 塗明寬、陳文政，1990，“五萬分之一臺灣地質圖說明書”，圖幅第七號-中壢，中央地質調查所，第 23-37 頁。
43. 新亞建設開發股份有限公司，2002，第二高速公路後續計劃西湖大甲段第 C312 標通宵-苑裡段工程監測系統工程觀測報表，交通部台灣區國道新建工程局。
44. 楊錦釧、唐世彥，1994，“土石流發展段之數值模擬(I)”，行政院國家科學委員會防災科技研究報告 NSC82-0414-P009-002B。
45. 經濟部中央地質調查所，1994，“新竹縣新埔鎮湖口台地南緣崩塌地調查與整治方案規劃計畫”。
46. 葉克家、連和政，1994，“土石流堆積模式之研究(I)”，行政院

- 國家科學委員會防災科技研究報告 NSC82-0414-P009-003B。
47. 廖志中、潘以文、莊士弘，1998，“落石潛在危險度不確定性評估模式”，岩盤工程研討會論文集。
 48. 廖洪鈞，1999，“山坡地開發安全監測工程技術”，都市防災及山坡地災害防治研討會論文集。
 49. 廖洪鈞、林郁欽，2001，“坡地社區邊坡崩塌機率之電子評估表”，第九屆大地工程學術研討會論文摘要集。
 50. 廖洪鈞、郭瑞柏、廖瑞堂、黃國書，2001，“網路技術於坡地安全監測之應用”，第九屆大地工程學術研討會論文摘要集。
 51. 廖洪鈞、廖瑞堂，1999，“坡地社區開發安全監測手冊”，內政部營建署研究報告。
 52. 廖瑞堂，2001，“山坡地護坡工程設計”，科技圖書股份有限公司。
 53. 廖瑞堂、陳昭維、徐適康，2001，“自動化監測在坡地防災及救災工程運用案例”，第九屆大地工程學術研討會論文摘要集。
 54. 蔣博文，2001，“利用自發性布里淵散射技術之分佈型應變與溫度感測”，國立交通大學光電研究所碩士論文。
 55. 鄭瑞昌、江永哲，1986，“土石流發生特性之研究”，中華水土保持學報，17(2)：第 50-69 頁。
 56. 蕭文雄、林建宏，2001，“山坡地社區防災與風險管理機制之探討”，台北都會區地質災害研討會論文集。
 57. 謝正倫等，1998，“地質危險區公路及河川橋樑之維護管理與防救災對策之研擬~以台十一及二十一線為例”期末報告，台灣省交通處公路局研究計畫。
 58. 謝正倫等人，1992，“花東兩縣土石流現場調查與分析”，中華水

- 土保持學會，第 23 卷第二期第 109~122 頁。
59. 謝豐隆，2000，“落石邊坡危險度與危害度分級與預報”，國立交通大學，碩士論文。
 60. 謝獻仁，1998，“類神經網路於落石坡危險度評估”，國立交通大學，碩士論文。
 61. 瀨尾克美、橫部幸裕，1978，“土砂害降雨量之研究”，新砂防，Vol.108，pp.14-18。
 62. 藤原明敏，1976，“地 解析 防止對策”，理工圖書。
 63. AIMONE-MARTIN, C.T., ORAVECZ, K.I., AND NYTRA, T.K., 1994, “TDR Calibration for Quantifying Rock Mass Deformation at WIPP Site, Carsbad, New Mexico, “Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental”, Infrastructure and Mining Applications, Evanston, Illinois, U.S., Bureau of Mines., Special Publication SP 19-94., pp.507-517.
 64. Ayyub, B.M. and Chao, R.J., 1997., “Uncertainty modeling in civil engineering with structural reliability applications”, In Uncertainty modeling and analysis in civil engineering, pp.3-32.
 65. Bunce, C.M., 1994., “Risk analysis for rock fall on highways”, M.Sc. dissertation, the Department of Civil Engineering, University of Alberta, Canada.
 66. Bunce, C.M., Cruden, D.M., and Morgenstern, N.R., 1997. “Assessment of the hazard from rock fall on a highway”, Can.Geotech.J.34, pp.344-356.
 67. Bunce, C.M., Cruden, D.M., and Morgenstern, N.R., 1997., “Assessment of the hazard from rock fall on a highway”, Can.Geotech.J.34, pp.344-356.
 68. Burland, J.B., and J.F.A. Moore., 1974., The Measurement of Ground Displacement Around Deep Excavations. In Field Instrumentation in

- Geotechnical Engineering, John Wiley&Sons, Inc. New York, pp.70-84.
69. Caine, N., 1980, The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows, *Geografiska Annaler*, Vol.62, pp.23-27.
70. Corominas, J., Moya, J., Lloret, A., Gili, J.A., Angeli, M.G., Pasuto, A., and Silvano, S., 2000, "Measurement of Landslide Displacements Using a Wire Extensometer", *Engineering Geology*, Vol.55, pp.149-166.
71. DOWDING, C.H., HUANG, F.C., AND MCCOMB, P.S., 1996, "Water Pressure Measurement with Time Domain Reflectometry Cables", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.19, No.1, pp.58-64.
72. DOWDING, C.H., SU, M.B., AND O'CONNOR, 1988, "Principles of Time Domain Reflectometry Applied to Measurement of Rock Mass Deformation", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.25, pp.287-297.
73. DOWDING, C.H., SU, M.B., AND O'CONNOR, 1989, "Measurement of Rock Mass Deformation with Grouted Coaxial Antenna Cables", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.22, pp.1-23.
74. Dunicliff, J. and Green, G.E., (Consultant) 1998, "Geotechnical Instrumentation Reference Manual", National Highway Institute U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, D.C., No.13241-Module 11.
75. Dunicliff, J. and Green, G.E., 1993, "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", John Wiley & Sons, New York.
76. Dutro, H.B., and R.D. Dickinson., 1974 Slope Instrumentation Using Multiple-Position Borehole Extensometers. In *Transportation Research Record 482*, TRB, National Research Council , Washington, D.C., pp.9-17.

77. Fell, R., Finlay, P.J. and Mostyn, G.R., 1996, "Framework for assessment the probability of sliding cut slopes", Proc. 7th Int. Symp. on Landslides, Trondheim, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol.1, pp.201-208.
78. Finlay, P.J., 1996, "The risk assessment of slopes", PhD Thesis, School of Civil Engineering, University of New South Wales.
79. Gillon, C. 1995., How to Do Differential GPS Without Known Coordinates for Your Base Station. Earth Observation Magazine, Vol. 4, No.4 (April), pp.50-51.
80. Gould, J.P., and C.J. Dunnicliff., 1971, Accuracy of Field Deformation Measurements. In Proc., Fourth Pan-American Engineering, San Juan, American Society of Civil Engineers, New York, Vol.1, pp.313-366.
81. Green, G.E., and P.E. Mikkelsen., 1988, Deformation Measurements with Inclometers. In Transportation Research Record 1169, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.1-15.
82. Heimovaara, T.J., 1994, "Frequency Domain Analysis of Time Domain Reflectometry Waveforms : Measurement of the Complex Dielectric Permittivity of Soils", Water Resources Vol.30, No.2, pp.189-199.
83. Hungr, O. and Beckie, R.D., 1998, "Assessment of the hazard from rock fall on a highway:Discussion", Can.Geotech.J.35, pp409-410.
84. Keefer, D.K., Wilson, R.C., Mark, R.K., Brabb, E.E., Brown, W.M., Ellen, S.D., Harp, F.L., Wiczoreck, O.F., Alger, C.S. and Zatkan, R.S., 1987, "Real time Landslide warning during heavy rainfall", Science, Vol.238, pp.921-925.
85. Kersey, A.D., 1993, "Multiplexed Fiber Optic Sensors", Proceedings, SPIE, Vol.CR44, pp.200-225.
86. Kurashima, T., Horiguchi, T., Izumita, H., Furukawa, S., and Koyamada, Y., 1993, "Brillouin Optical-Fiber Time Domain

- Reflectometry”, IEICE Trans. Commun. Vol.E76-B, No.4, pp.382-389.
87. Lin, C.P., 1999, “Time Domain Reflectometry for Soil Properties”, PhD, thesis, Purdue University, U.S.
 88. Lin, C.P., Drnevich, V.P., Feng, W., and Deschamps, R.J., August, 2000, “Time Domain Reflectometry for Compaction Quality Control”, Use of Geophysical Methods in Construction, Geotechnical Special Publication No.108, ASCE. pp.15-34.
 89. Moon, A.T., Oldss, R.J., Wilson, R.A. and Burman, B.C., 1992, “Debris flow zonation at Montrose Victoria”, In Landslides, Proc. Sixth Int. Symp. On Landslides (Ed. Bell, D.H.), Christchurch, New Zealand, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol.2, pp.1015-1022.
 90. Morgan, G.C., Rawlings, G.E. and Sobkowicz, J.C., 1992, “Evaluating total risk to communities from large debris flows”, In Geotechnique and natural hazards, pp.225-236.
 91. O’CONNOR, K.M. AND DOWDING, C.H., 1999, GeoMeasurement by Pulsing TDR and Probes, CRC.
 92. O’CONNOR, K.M., PETERSON, D.E., AND LORD, E.R., 1995, “Development of a Highwall Monitoring System using Time Domain Reflectometry”, Proc., 35th U.S. Sym. Rock Mdch., Reno, Nevada, June, pp.79-84.
 93. Phil, F. and R., Chowdhury., 2002, Uncertainties in rainfall-induced landslide hazard.
 94. Pierson, L.A., 1992, “Rockfall hazard rating system”, In Rockfall Prediction and control and landslide case histories, Transportation Reserch No.1343, pp.6-13.
 95. Pirce, C.E., Bilaine, C., Huang, F.C., and Dowding, C.H., 1994, Effects of Multiple Crimps and Cable Length on Reflection Signatures from Long Cables, Proceedings of the Symposium on

- Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining applications, Northwestern University Evanston, Illinois, Step 7-9, pp.540-554.
96. Preemchitt, J., Brand, E.W. and Chen, P.Y.M., 1994, "Rain-induced landslides in Hong Kong 1972-1992", *Asia Engineer*, June, pp.43-51.
 97. Romana, M.R., 1993, "A Geomechanics Classification for Slope : Slope Mass Rating", *Comprehensive Rock Engineering Vol.3*, pp.575-599.
 98. Ross G.F., 1976, "Apparatus and Method for Sensing a Liquid with a single Wire Transmission Line", U.S. Patent No.3, 995, 212.
 99. Ross, G.F., 1974, "Apparatus and Method for Measuring the level of a Contained Liquid", U.S. Patent No.3, 832, 900.
 100. Spring, G.S. and Hummer, J., 1995, "Identification of hazardous highway locations using knowledge-based GIS: A case study", *Transportation Research Record 1497*, Transportation Research Board, pp.83-90.
 101. Stewart, J.C., Martin, K.L. and Jennetta, A.R., 1993, "U.S. Department of Energy uses GIS to evaluate waste management alternatives", *Geo Info Systems 3*, No.7. pp.60-63.
 102. SU, M.B., 1987, Quantification of Cable Deformation with Time Domain Reflectometry, Ph.D. Dissertation, Northwestern Univ., Evanston, IL, 112 pp.
 103. Su, M.B., and Chen, Y.J., 2000, "TDR Monitoring for Integrity of Structural Systems", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.6, No.2, pp.67-72.
 104. Takahashi, T., 1980, "Debris flow on prismatic open channel", *J. Hydr. Div., ASCE*, Vol.106, No.3, pp.381-396.
 105. Talahashi, T., 1991, "Debris Flows", *International Association for Hydraulic, Research*.
 106. Texier, S., Pamukcu, S., and Toulouse, J., 2003, "Water-Content

- Measurement in Sub-Surface with a Distributed Brillouin Scattering Fiber-Optic Sensor,” Proceedings, 12th Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, MIT, Boston, Massachusetts, Vol. 1 , pp. 287-292.
107. TOPP, G.C., DAVIS, J.L., AND ANNAN, A.P., 1980, “Electromagnetic Determination of Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurement Using Time Domain Reflectometry”, Water Resources Research, Vol. 16, pp.574-582.
108. Topp, G. C., Yanuka, M., Zebchuk, W. D., and Zegelin, S., 1988, “Determination of Electrical Conductivity Using Time Domain Reflectometry: Soil and Water Experiments in Coaxial Lines,” Water Resources Research, Vol. 24, No. 7, pp. 945-952.
109. Turner, A.K., and Schuster, R.L., 1996, “Landslides Investigation and Mitigation”, Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 673p.
110. USBR, 1987, Embankment Dam Instrumentation Manual.
111. Van, C.J., 1993, “Application of geographic information systems to landslide hazard zonation : a review of principles and practice”, ITC Publication No.15, ITC, Enschede, The Netherlands.
112. Varnes, D.J., 1978, “Slope Movement Types and Processes in Schuster and Krizek eds Landslides-Analysis and Control”, T.R.B. Special Report 176.
113. Wadge, G, Wislocki, A., and Pearson, E.J. 1993, “Spatial Analysis in GIS for Natural Hazard Assessment”, in Goodchild, M.F., Parks, B.O. and Steyaert, L.T. (eds.) Environmental Modelling with GIS. Oxford University Press, Oxford. pp.332-338.
114. Wadge, G, Wislocki, A., Pearson, E.J. and Whittow, J.B., 1993, “Mapping natural hazards with spatial modelling systems” in Mather, P.M. (ed.) Geographical Information Handling - Research and Applications, John Wiley & Sons, Ltd. pp.239-250.

115. Wang, H.N., Ho, K.S. and Chan, Y.C., 1997, "Assessment of consequence of landslides", Proceedings of the international workshop on landslide risk, Hawaii, U.S.A., pp.111-149.



附錄 A

各次會議意見處理情形

「道路邊坡高效能監測系統研發與崩塌預警基準制訂」

期中簡報意見處理情形

- 一、開會時間：民國九十二年八月二十五日
- 二、會議地點：交通部 101 會議室
- 三、主持人：交通部科技顧問室 賈玉輝 主任
- 四、意見處理情形：

審查意見	處理情形
<p>陳建元</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究案在 TDR 監測技術之研發與改善成果豐碩，然在預警基準之制訂上應於期末報告中有一套完整模式（擺設位置等...）。 2. 水位觀測井之回填料原土或粗粒料回填？何者較佳？ 3. 圖 4.44 (P.98) 之 TDR 水位監測配置位置是否有足夠資訊提供邊坡之地下水分佈狀況？或因價格昂貴而需配合傳統之量測儀器？如何達最 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告中之 TDR 邊坡監測系統係一示意圖，說明 TDR 監測技術之功能與整合性，監測儀器之擺設位置將視個案而定。TDR 與光纖監測技術之優點在於具有多工性，增加監測點數不需增加監測主機，可以降低總監測系統之成本。 2. 當地層較為複雜時，回填原土有其困難度，且必須顧及堵塞之問題，因此水位觀測井與水壓計之安裝在進水段仍建議採用粗粒料，並視當地進行封層。 3. 本研究研發之監測儀器，通常配合傳統的量測儀器以資比較。最佳配置位置需視不同的個案而有所不同。

佳之配置位置？	
<p>張弘義</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 研究團隊在本研究計畫係引進最先進之時域反射儀，利用該儀器內脈衝電壓器發射一電磁脈衝進入同軸電纜，利用其反射訊號，監測含水量變化錯動變形。 2. 研究團隊所提之技術理論是可以接受，但其實用程度，建議研究團隊再做試驗，求取讀法之穩定性，下列 2 點建議研究團隊考量：(1) TDR 系統之裝設應依地質狀況分別說明；(2) TDR 在鑽孔內埋設位置（深度）請明確規範。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝指教。 2. 本研究團隊將繼續累積安裝實例與經驗，資料解讀之準確度與可靠度亦於本研究中有所突破精進。TDR 系統之安裝與傳統儀器並無太大差異，主要在於其監測機制由主動式改為被動式，另外，在變形感測電纜之安裝上要特別注意回填灌漿與現地土壤之順應性。
<p>李釗</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期中報告顯示本計畫之研發特性，雖在構想上、邏輯上對邊坡監測之執行均具可行性，但實際執行時仍有諸多困難與不確定性，可見本研究具持續研發之價值。 2. BOTDR 土壤含水量分佈監測章節在撰寫方式上不易瞭解 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝指教，研究團隊將繼續相關之研究使其更實用化。 2. 本段落已做部分之修改，希望能夠改進其可讀性。

<p>。</p> <p>3. 由於 TDR 監測技術在規劃和 操作上，有不易掌握之處。 建議在期末報告時能提供 TDR 應用之操作手冊或指引 或操作程序，以求報告完整 性並供工程界參考。</p> <p>4. 報告中錯字與參考文獻之格 式，請再加強校正。</p>	<p>3. 謝謝指教，本研究盡量將各 項 TDR 監測技術之量測方法 提出標準作業程序。</p> <p>4. 遵照辦理。</p>
<p>蔡崇義</p> <p>1. 有關 TDR 監測技術在理論與 實驗室研究，已有相當之成 果，唯使用於現場仍有多項 困難尚待克服，為能達到預 警效果，建請研究團隊在此 方面宜多著墨，排除困難， 掌握預警先機。</p>	<p>1. 謝謝指教，本研究團隊將繼 續累積現場經驗，使該技術 能在實務上落實。</p>
<p>吳鎮封</p> <p>1. 崩塌預警基準定位如何？尚 在研發階段，實際成果能否 做為研究基準之依據。</p> <p>2. 長期監測較有用，2 年是否短 了。2 年後如何處理（希望轉 移或繼續），持續研究較精 準。</p> <p>3. 感謝大部分研究計畫團隊集 中到五灣仔，請提工程處可 配合協辦事項。</p>	<p>1. 崩塌預警基準草案已經過兩 次專家學者之評審與修改， 應該可以嘗試實際使用。</p> <p>2. 研究團隊希望繼續光纖與 TDR 監測技術之實地使用已 使得這些技術更趨成熟與實 用。</p> <p>3. 謝謝指教。</p>

「道路邊坡高效能監測系統研發與崩塌預警基準制訂」

期末簡報意見處理情形

- 一、開會時間：民國九十二年十二月十八日
- 二、會議地點：交通部 101 會議室
- 三、主持人：交通部科技顧問室 賈玉輝 主任
- 四、意見處理情形：

審查意見	處理情形
李釗 教授	
1. 本計畫結合學術研究與工程實務，雖在研發過程中遭遇困難，不如預期順利，但此乃研究過程中正常現象，仍應肯定執行單位的努力。	1. 謝謝鼓勵。
2. 此次報告為二年計畫中第二年之期末報告，故應有清楚且具體的結論，而非報告初稿中之結語。	2. 結論部分已修正，並加入監測系統比較與成本分析及建議。
3. 建議報告中加附專家座談與講習會之紀錄，以期充實報告之完整性。	3. 講習會紀錄已加入第五章，專家座談之紀錄已反映於預警基準草案中（附錄 B）。
4. 崩塌預警監測成功的要件，除選擇適當的設備與解讀外，測定的佈設亦為相當重要。建議能於手冊中說明，測點佈設原則，如位置、深度掌握的原則，超過預警值應如何處理？	4. 道路邊坡崩塌預警基準草案第七則「邊坡崩塌監測系統之規劃」對這些議題有相當詳細之敘述，其內容都經過數次專家學者之討論而決定，恐不宜在此時更動。

<p>5. 文中多處英制、公制單位夾雜，請統一。</p> <p>6. 多圖利用掃瞄影像至底較黑或解析度不佳，建議做適當處理，如文字重貼，以求報告美觀（圖 4.17&4.39）。</p>	<p>5. 已更改完成。</p> <p>6. 已更改完成。</p>
<p>游繁結教授</p> <p>1. 監測儀器開發之研究應予以肯定。</p> <p>2. 光纖或同軸電纜之變量與實物之變動量間，二者之相關度宜有具體的之實用性（請參考）。</p> <p>3. 垂直埋設之可靠度不易確定，且僅屬單點之觀測，對線性之道路管理其意義可能不大，是否改為橫向（沿路線）之裝置。</p> <p>4. 崩塌預警基準之訂定盡量避免以全坡面之穩定為對象，宜以路面之穩定較適宜（僅提供參考）。</p> <p>5. 建議說明監測系統水平（沿路）布置與垂直布置之適用範圍。</p>	<p>1. 謝謝鼓勵。</p> <p>2. 在未來相關研究中，會注意相關事項。</p> <p>3. 監測系統橫向裝置是可行的方法之一。未來來計畫中會考量到這方面之規劃。</p> <p>4. 道路邊坡崩塌預警基準草案通則中即已言名「本基準適用於交通部所轄各級道路系統，提供各道路管理單位進行所屬危險道路邊坡崩塌監測預警基準訂定時之參考」</p> <p>5. 此說明已加入結論中光纖及 TDR 監測技術優缺點之說明。</p>



<p>國工局</p> <p>1. 研發之光纖及 TDR 監測技術，是否列表與傳統監測儀器比較其優缺點？</p>	<p>1. 結論中已加入光纖及 TDR 監測技術優缺點說明</p>
<p>高鐵局</p> <p>1. 請說明光纖監測系統的成本，包含維修等。</p>	<p>1. 已加入結論中光纖及 TDR 監測技術優缺點說明。</p>
<p>鐵工局</p> <p>1. 說明監測儀器佈設的位置與深度之原則，另外監測頻率如何決定？</p>	<p>1. 道路邊坡崩塌預警基準草案第七則「邊坡崩塌監測系統之規劃」對這些議題有相當詳細之敘述。</p>
<p>高工局</p> <p>1. 研究單位如何辦理研究成果之落實，請說明。</p>	<p>1. 結論中已敘述希望交通部能夠繼續支持相關之研究。</p>
<p>北市工務局</p> <p>1. 所研發之系統，是否可達全時監測。另外，系統本身是否具有自我損壞監測功能。</p>	<p>1. 所研發之系統完全由電腦操控，可全時監測也具有自我損壞監測功能。</p>
<p>營建署</p> <p>1. 各種監測儀器特點、佈設原則、所需監測數量請說明。</p>	<p>1. 道路邊坡崩塌預警基準草案第七則「邊坡崩塌監測系統之規劃」對這些議題有相當詳細之敘述。</p>

<ol style="list-style-type: none"> 2. 預警基準值，是否可建立本土化的數據。 3. 如何研判基準值所應採取的反應措施？ 	<ol style="list-style-type: none"> 2. 這必須經過長時間資料之收集才能建立。 3. 道路邊坡崩塌預警基準之主要目的是提供如何建立預警基準，至於所應採取的反應措施牽涉甚廣恐不宜在此基準中敘述。
<p>主席</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期末報告審查原則通過。 2. 各位與會的學者專家意見，請研究團隊辦理。 3. 研發監測技術應兼顧理論與經驗實務。 4. 各種監測技術的成本請列表說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝。 2. 已根據學者專家意見修改報告內容或提出解說。 3. 希望能夠繼續相關之研究將相關技術在實務中應用。 4. 已加入結論之中。



附錄 B

道路邊坡崩塌預警基準草案

本草案初稿作者

黃安斌、林志平、董家鈞、廖志中、潘以文

第一次專家學者審查參與人員 (92/07/25)

廖瑞堂、顏召宜、許書王、李維峰、黃安斌、林志平

第二次專家學者審查參與人員 (92/10/07)

廖瑞堂、顏召宜、許書王、王淳謹、黃安斌、林志平

道路邊坡崩塌預警基準草案

1 通則

本基準適用於交通部所轄各級道路系統，提供各道路管理單位進行所屬危險道路邊坡崩塌監測預警基準訂定時之參考。

【解說】：高風險性道路邊坡應透過監測系統，長時間監控其變化，並加以分析、評估，以瞭解邊坡行為以及邊坡穩定性，並透過預警基準之設定，作為道路管理單位安全管理或緊急應變之參考。

道路邊坡崩塌預警基準制定所牽涉的問題複雜程度極高，每一處道路邊坡因重要性不同(國道、省道、縣道、鄉道、山區產業道路...)、應用監測時機不同(調查、施工安全管理、長期管理維護...)、環境條件不同(包括地形、地質、氣候...)、破壞模式不同(山崩、地滑、土石流...)、發生速度不同、破壞規模以及影響範圍不同等。各道路管理單位，應依據所屬道路邊坡特性，視需要提出各路段邊坡崩塌預警基準。

2 邊坡崩塌型態與分類

邊坡崩塌運動型態區分(1)墜落；(2)傾覆；(3)滑動；(4)側落；(5)流動；(6)潛移等六種基本類型。

【解說】：依據邊坡崩塌運動型態，邊坡崩塌可分為六種基本類型，並分述如下：

(1)墜落 (falls)

當土石或岩塊下方坡度超過 76° ($H:V = 0.25:1$) 即可能自由落下，由懸崖或陡坡驟然落、跳動及滾動至崖下或坡趾之塊體運動，衝擊力大且傷害力較強。墜落型破壞常發生於多裂隙之堅硬岩盤組成之高陡坡，有時亦發生於河岸侵蝕側。破壞前，界面上幾無剪力變形，崩塌面常可見新鮮且不規則之岩面，且崩塌物堆積於坡趾處。台灣東部公路蘇澳花蓮段及中橫快速道路埔里花蓮段等，常發生本類型之邊坡崩塌。

(2)傾覆 (topples)

高角度逆向坡地層中，當土石或岩塊過度傾斜至使重心延線超過塊

體基部，即因自重產生驅動力距而發生傾覆。於岩體大型撓屈變形前，其滑動驅動力需大於地層間剪力強度，屬各地層間產生滑動，繼而產生傾覆破壞。

(3)滑動 (slides)

滑動塊體沿與坡面大致平行的滑動面發生剪力破壞或滑移，滑動面可能為層面、節理面或其他不連續面等，破壞面之型態可為平面、彎曲面或不規則面。滑動面為如碗狀凹口向上之彎曲面，稱為轉動或弧型滑動，此較易發生於較為均質者，如土壤、填土或極破碎岩體等；破壞面如近乎平面，則稱為平面滑動或側向滑動，此較易沿岩體弱面、不連續面或不同材料之界面等向外且向下滑動，通常災害範圍較大。

(4)側落 (spreads)

為土壤或岩體發生漸次逐步擴展之側向運動而導致崩塌破壞。如發生於複合地層時，可能因下層粘土質材料吸水軟化或粉土石材料受振動液化或塑性流動等，而牽動上層土岩體產生斷裂下線或側移，且一般並無明顯之剪力破壞面或塑性流區。

(5)流動 (flows)

主要為鬆散土壤或岩體，無論含水狀態如何，當其破壞情形有如液體流動之破壞型態，如岩屑或土壤之流動破壞。其流動體與圍岩間有時有明顯之接觸面或僅唯一層可塑性之流動帶，其運動速度變化可由不易察覺之蠕動潛移到快速的岩屑崩流，如泥石流、土流或土石流等。其中土石流係指土、石及水混合後，因重力作用集體運動之流體，為近年臺灣地區常見之災害類型。

(6)潛移 (Creep)

潛移是指地表土石受重力作用產生極緩慢的移動現象，其移動速度在短時間內有時難以直接察覺，移動體與穩定之間沒有明顯的破壞面。此種塊體崩壞由於移動速度緩慢，不致產生立即性的重大災害。此種現象若出現在冰緣地區，因凍融作用所引起者，即是「土石緩滑」。

3 地滑型態邊坡崩塌

台灣坡地災害型態描述常用『山崩』、『地滑』及『土石流』等三種名稱。本預警基準之訂定以地滑型態之邊坡崩塌為對象。

【解說】：『地滑』運動型態屬於滑動。邊坡滑動類型分類可根據邊坡形成方式再加以區分，邊坡依形成方式可分為自然邊坡與人工邊坡，人工邊坡可再分為挖方邊坡、填方邊坡以及半挖半填之邊坡。不論是自然邊坡或人工邊坡，地層滑動均可依材料之不同區分為土層及岩層滑動兩種，大部份土壤內之滑動屬圓弧形滑動及沿岩盤界面之非圓弧型滑動，岩坡滑動可區分為平面滑動(即順向坡滑動)、楔形滑動以及傾倒等，另外岩坡滑動後堆積於坡腳形成之崩積層，最易形成沿岩盤或原有地表面間之滑動，台灣山區道路較大規模之滑動災害以崩積層滑動(或稱老坍方滑動)及平面滑動(或稱為順向坡滑動)為主。

4 邊坡崩塌預警之意涵

邊坡崩塌預警主要目的為：在風險性高或已有邊坡崩塌的地方，根據各種邊坡崩塌徵兆觀察、紀錄或量測結果，於預期邊坡崩塌事發前提出警告，以降低邊坡崩塌之危害，並作為道路管理單位採取不同防災或緊急應變措施之重要參考。

【解說】：崩塌預警之意涵為根據各種邊坡崩塌徵兆觀察、紀錄或量測結果，於預期邊坡崩塌事發前提出警告，並作為道路管理單位採取不同防災或緊急應變措施之重要參考。

預警之意涵包括監測系統，其牽涉三個重要環節：

- (1)確保監測系統所得之物理量為合宜之參考物理量(包括監測設備種類選擇、監測系統設置位置、量測方法、量測頻率、資料儲存與傳輸)；
- (2)妥善進行監測所得物理量之詮釋(監測資料透過經驗或學理分析後之資料解釋)；
- (3)訂定合宜之預警基準。

5 邊坡崩塌預警基準訂定之道路分級

崩塌預警基準訂定之道路可分為三級：國道(包括快速道路)以及高速鐵路訂為第一等級，省道及台鐵鐵路訂為第二等級，縣道及鄉道訂為第三等級。

【解說】：根據公路法，我國公路分為四級，包括國道、省道、縣道及鄉道，四級道路服務功能與等級以及設計標準均有所不同。鐵路系統方面則包括台鐵鐵路與高速鐵路。

不同道路等級之道路邊坡對崩塌風險危害程度不同，因此將預警基準訂定之道路分級分為三級：國道(包括快速道路)以及高速鐵路訂為第一等級，省道及台鐵鐵路訂為第二等級，縣道及鄉道訂為第三等級，訂定基準應考慮道路分級。

6 邊坡安全監測應用時機

邊坡安全監測應用時機包括：(1)崩塌特性調查；(2)施工中安全監控；(3)邊坡維護與管理；(4)設計與研究之回饋。

【解說】：邊坡監測系統應用時機可由四個層面切入：

- (1)崩塌邊坡特性調查(如瞭解滑動面深度與滑動速率等)；
- (2)施工中安全監控；
- (3)邊坡維護與管理；
- (4)設計與研究之回饋。

不同應用時機之監測資料對於道路防災管理工作有不同之貢獻，而不同應用層面之監測系統，亦應有不同之規劃與預警基準訂定。

7 邊坡崩塌監測系統之規劃

欲取得適當之穩定邊坡監測基準，必須(1)選擇適當之監測儀器；(2)設置足夠之數量；(3)佈設適當之位置與深度；(4)正確之設置與長期維護；(5)適當之監測頻率。

【解說】：欲得到適當之預警基準，監測系統監測值之取得必須滿足：(1)選擇適當之監測儀器；(2)設置足夠之數量；(3)佈設適當之位置與深度；(4)正確之設置與長期維護；(5)適當之監測頻率。以下分述之：

- 1.不同監測儀器有其限制性、精度與可靠度，作為預警基準用之監測

值應將監測儀器特性納入考慮。崩塌徵兆監測值之各類監測儀器及其設置目的整理如表 1：

表 1 監測系統設置目的項目

儀器名稱	設置目的
地層傾斜儀	埋設深度須達穩定岩層，用以量測埋設邊坡位置不同深度變形。
水壓計	用以瞭解不同地層之孔隙水壓力分佈情況與變化情形。
多點式伸縮儀	瞭解邊坡地表移動或邊坡岩盤內部變形情況。
鋼筋應力計	裝設於擋土結構內，用以量測擋土結構主筋受應力之情形。
地錨荷重計	裝設於施打地錨之擋土結構，用以量測地錨荷重情形。
結構物傾斜計	裝設於擋土結構上，用以觀察擋土結構有無傾斜或變位。
沉陷觀測點	裝設於邊坡表面上，以了解邊坡表面之沈陷與隆起現象。

其他常用之監測儀器包括：應變或位移監測之地滑計、地層垂直變位之監測之沉陷計、雨量、水位與水壓監測之水位觀測井、開口式水壓計、壓氣式水壓計、電子式水壓計、土壓監測之土壓計、流量監測之流量計、雨量監測之雨量計。

2. 監測系統之規劃

不正確之監測系統規劃將降低邊坡崩塌預警功能，監測系統規劃除選擇適當之監測儀器外，尚應考慮適當之數量、位置與深度。合適之監測項目與足夠之監測數量與配置，應由專業人員視邊坡特性進行合宜之規劃。

監測系統規劃為專業工作且須因地制宜。一般而言，傾斜觀測管理設深度應超過預期滑動面以下一定深度，以確定其為不動點，否則應進行孔口測量。地滑計佈設應跨預期滑動體與不動點處，地下水位或水壓監測應接近預測滑動面，監測儀器佈設數量應足以交叉比對確認崩塌現象之真實性。

3. 監測頻率

作為預警用之監測值，必須即時提供資訊作為預警參考，規劃適當之

監測頻率相當重要，尤其是監測系統為手動擷取資料者，不恰當之監測頻率可能造成監測值來不及反應崩塌現象。

監測頻率分三種不同時期考量：監測系統剛設置完成時，監測頻率一般稍密集，待監測一段時期物理量變化趨於穩定後，可將監測頻率調整較低。然而，若監測結果有異常現象，或遭遇豪雨、地震時，有必要立即將監測頻率調整為較密集，以有效監控物理量之變化以及邊坡崩塌現象。若監測系統為自動化系統，則監測頻率問題較不大，有些情況部分監測儀器是紀錄功能是關閉的，當某一事先設定之觸發值到達時(如雨量或水位高度)，其紀錄功能方開啓。以下提出三個不同時期各類監測儀器之監測頻率如表 2，然每一邊坡之特性不同，合理之監測頻率應由專業人員根據邊坡特性決定之。

表 2 邊坡崩塌監測頻率建議表

儀器種類	監測初期	穩定期	監測結果異常、 豪雨或地震
水壓計	每週一次	每季一次	每週二次
土壓計	每月二次	半年一次	每週一次
觀測井	每週一次	每季一次	每週二次
沉陷感應器	每月一次	半年一次	每週一次
傾斜計	每週一次	每季一次	每週二次
多點伸縮儀	每月二次	半年一次	每週一次
傾斜管	每週一次	每季一次	每週二次
地表量測點	每月一次	半年一次	每週一次
結構量測點	每月一次	半年一次	每週一次

8 邊坡崩塌監測預警基準之分級與處理原則

邊坡崩塌監測預警基準可區分為注意、警戒與行動三等級，各等級之間之管理階段界限值即為管理值。

【解說】：邊坡崩塌監測預警基準即為崩塌現象所區分之各管理階段界限值，或稱為監測管理值。根據地盤變形特性，可區分為注意、警戒與行動等級，實際觀測或量測所得之物理現象到達各界限值即應預警，並根據事先研擬之各管理階段處理對策，進行適當之處理。

預警基準為位移、水壓、水位或降雨特性等直接或間接崩塌現象徵

兆監測值。不同時機、不同目的與不同徵兆監測值，可有不同管理階段分期以及所對應之不同崩塌預警基準。不同監測儀器亦應搭配適當之管理階段分期與預警基準，預警之發佈應根據多項監測值搭配解釋後進行。

1.注意等級：監測值達到某一低限標準，表示監測值之反應開始有較明確之意義。此時採取之對策包括：檢查監測系統有無異常，比較不同位置與不同種類之監測物理量是否有同樣趨勢，原未啟動之監測儀器開始加入資料擷取，道路邊坡管理人員應注意邊坡行爲，加強巡查邊坡表面，並持續觀察邊坡行爲與監測值之反應變化，直至邊坡行爲與監測值之反應朝向安全側變化。

2.警戒等級：警戒值之意義在於監測值已超出設計標準，具較高之危險，或表示邊坡略有不穩定現象。此時採取之對策可能包括：加強監測頻率，並密切注意其變化趨勢，同時著手檢討影響邊坡穩定之各項因子，評估邊坡安全性。道路邊坡管理人員應開始進行應變對策，如道路警示或適度管制，重要路段應開始準備進行邊坡加固補強之先期作業。

3.行動等級：行動等級之意義可對應於行動值，表示邊坡已確定爲不穩定，邊坡已發生明顯位移或已瀕臨破壞。此時採取之對策可能包括：以更密集的觀測頻率，監測邊坡的安全，並立即進行緊急補強及長期整治，若觀測值有明顯加速現象時，人員必須強制疏散，道路必須進行管制，禁止人車通行。

9 道路邊坡崩塌監測值

道路邊坡崩塌監測值可分爲兩類，一爲直接徵兆監測值，另一則爲間接徵兆監測值。邊坡崩塌監測之直接徵兆監測值配合間接徵兆監測值，對於預警基準訂定極有幫助。

【解說】：道路邊坡崩塌監測值可分爲兩類，一爲直接徵兆監測值，另一則爲間接徵兆監測值。

1.直接徵兆監測值：邊坡崩塌即爲斜坡塊體運動，因此邊坡變形即爲此一現象之直接徵兆。邊坡移動可從地表面觀察(地表面物體傾斜、移動、地表開裂、隆起與下陷等)或地表面下傾斜與變形量測而得

知，邊坡變形亦可由地下位移或變形量測而得知。此一直接監測值隨不同邊坡崩塌種類而有不同之現象徵兆，包括變形量、變形速度、變形範圍、變形深度等。

2.間接徵兆監測值：一般而言，地震、豪雨以及因豪雨或其他因素而造成之地下水位變化是邊坡塊體移動之重要誘因，由理論與經驗得知，上述物理量之變化可能引致邊坡崩塌。故振動、水壓或水位以及降雨特性等外在因素均屬邊坡崩塌之間接徵兆物理量。

地滑型邊坡崩塌因破壞前常累積可觀之變形量，直接量測材料變形或位移極為有效，邊坡位移量或位移速度常選擇作為預警徵兆物理量。另因邊坡滑動常與地下水壓極其相關，而降雨亦常影響地下水，因此邊坡位移量測配合降雨量或地下水壓、水位之量測，常對於監測基準訂定極有幫助。

10 邊坡穩定性之判定

道路管理單位制定預警基準之必要性，應參考不同監測儀器觀測得之位移速度，由位移速度監測值進行邊坡穩定性之研判。邊坡活動與滑動之判定標準如解說下表。

【解說】：日本地滑對策技術協會（1978）訂定之地表位移速率與邊坡滑動活動性分類準則，為國內邊坡滑移預警值訂定重要參考，根據不同監測儀器觀測得位移速度所代表地滑活動性及滑動型態，分別整理如表 3。

表 3 地表位移速率與邊坡滑動之活動性分類準則表

(日本地滑對策技術協會，1978)

變動種別	日變位量 (mm)	月變位量 (mm)	一定方向之 累積傾向	活動性判斷	滑動型態
緊急變動	20 以上	500 以上	非常顯著	急速崩壞	崩壞型、泥石流型
確定變動	1 以上	10 以上	顯著	活潑運動	崩積土滑動、深層滑動
準確定變動	0.1 以上	2.0 以上	略顯著	緩慢運動	黏土滑動、回填土滑動
潛在變動	0.02 以上	0.5 以上	稍稍有	繼續觀測	黏土滑動、崖錐滑動

藤原(1976)之研究統計為透過傾斜觀測所得之變動量，與不同活動性之地盤相關性如表 4。

表 4 傾斜變動種別一覽(藤原，1976)

變動種別	日平均變動量(秒)	累積變動值(秒/月)	傾斜量的累積傾向	傾斜運動方向與地形之相關性	綜合判定	
					變動判定	活動性
變動 A	5 以上	100 以上	顯著	有	確定	活潑運動中
變動 B	1~5	20~100	稍顯著	有	準確定	緩慢運動中
變動 C	1 以下	20 以下	略有	有	潛在	繼續觀測必要
變動 D	3 以上	無(斷續變動)	略有	無	異常	局部地盤變動或其他

日本高速道路調查會(1986)提供判斷坡地是否滑動的定性和定量標準如表 5 所示。

表 5 日本高速道路調查會地滑之判定基準

(日本高速道路調查會，1986)

監測儀器	定量的判定標準	定性的判定標準	
地表伸縮儀	>0.5mm/日	1. 觀測值隨時間而累積增加 2. 多個監測儀器顯示同樣的地滑趨勢 3. 觀測結果可確認地滑面	
孔內伸縮儀	>0.5mm/日		
光波測距儀	固定式		>5mm/回
	移動式		>10mm/回
地盤傾斜儀	>10 秒/7 日		
管式傾斜計	>50~100 μ /7 日		
管內傾斜儀	>1mm/10m/回		

11 邊坡監測系統崩塌預警基準制定原則

預警基準之制定應考慮道路分級、監測設備、評估分析工具。預警基準制定應善用各監測結果間之相關性，使用經驗與理論分析，並根據長期監測結果逐步調整預警基準內容。

【解說】：邊坡監測系統崩塌預警基準制定原則如下：

1. 預警基準內之各管理值之訂定應考慮道路分級、邊坡破壞危險程度、邊坡發生破壞後之危害程度等，不同邊坡對於風險承受能力不同，因此預警基準制定之保守程度即應有所不同。根據不同路

段之特性，如地形、行政支援、人口分佈、產業結構、經濟分析、法律責任等考量後，制定適當之預警基準，當監測結果超過預警基準就可以根據研擬妥當之對策進行處置。

- 2.各項邊坡監測項目均有其觀測上之特性，相互間皆亦有其關聯性，一般以準確性較高及與邊坡安全性較有直接關連之監測儀器量測結果為主。預警基準之訂定可依據各觀測儀器經驗上之主觀研判，或根據設計條件做為基準，若能根據實際分析結果，預測破壞點，配合長期觀測而逐步調整預警基準內相關管理值為最佳。
- 3.監測系統量測結果為預警基準之重要參數，各監測儀器監測結果有偏離預期之趨勢時，須小心辨識是否由人為錯誤或儀器功能異常等因素引起。

12 邊坡監測崩塌預警基準制定程序

邊坡崩塌預警基準之制定，應循以下步驟進行：(1)前置決策；(2)邊坡調查與資料蒐集；(4)資料分析；(5)邊坡崩塌分析與預測；(6)預警基準初步制定；(7)預警基準調整。

【解說】：道路邊坡崩塌預警基準之訂定，應循以下步驟進行：

1.前置決策

監測與減災、防災有甚高之關聯性，因此，道路等級、邊坡破壞後對道路使用之影響程度與影響範圍、邊坡崩塌之危險性與危害度評估、何時、何地需進行監測與預警、預警之管理基準分期以及相對應之處置措施等，均與監測預警基準訂定有關，必須於預警基準訂定前先加以衡量與評估。另一方面，預警之準確度以及所剩餘之反應時間一般恰成反比，因此，需要越準確之預警必須接受越短之反應時間，此一假警報之容忍程度亦應於前置決策時一併考量。

2.邊坡調查與資料蒐集

預警基準制定前，應針對該邊坡進行詳盡之調查及充分蒐集邊坡崩滑資訊，以釐清道路邊坡可能之崩塌種類與機制，包括地質條件、滑動範圍、滑動深度以及活動性等。崩塌預警基準之資料蒐集包括：環境資料、邊坡施工資料、邊坡重要性及危害程度等，上述資料詳述如下：

- (1) 與安全監測值取得或分析評估有關之規劃、設計、施工報告及重要之會議記錄。
- (2) 監測系統相關之竣工圖及設計圖，前期監測成果。
- (3) 各項設計準則，包括設計荷重、荷重條件、材料性質、設計安全係數、容許應力、容許沉陷。
- (4) 穩定分析及應力分析與結構設計成果。
- (5) 與監測物理量相關之環境資料，包括：地震、降雨、地形、地質等。

3. 資料分析

調查與蒐集所得之資料，應先確認其正確性，然後進行妥善之分析，以作為邊坡評估、現象預測以及預警基準制定之重要參考。

資料分析結果，可間接作為邊坡現象模擬時之參考，並進一步根據現象模擬成果進行預警基準訂定，或直接透過統計模式分析法協助訂定崩塌預警基準。

4. 邊坡崩塌分析與預測

依據影響監測值之各項外在因素，以理論或數值分析方法，推估於不同條件下該災害現象所應有之各種監測值。分析目的包括了解或預測邊坡行為、崩塌機制、崩塌範圍與深度。因每個邊坡都有其獨特性，分析者必須經評估後採用適當之分析工具，根據分析結果，預測可能之邊坡行為。

崩塌機制決定後，應循序進行：(1)選擇監測邊坡與崩塌相關之各種間接或直接物理量；(2)透過分析預測各種物理量可能變化之範圍與變化速率；(3)分析各種物理量間相關性，並進行評估。

5. 預警基準初步制定

預警基準制定，可依據經驗上之主觀研判、參考設計條件、模擬結果、多項監測物理量合併考量。利用設計單位其設計值，折減或增加若干百分比做為監測系統之初步預警基準。

6. 預警基準之調整

預警基準不應一成不變，隨著環境變遷及監測資料累積應隨時檢討預警基準。較佳之預警基準訂定方式，應以實際模擬結果，預測邊

坡行爲，並配合長期觀測逐步調整預警基準。

13 崩塌預警基準制定方法

崩塌預警基準制定方法分爲四大類，包括：(1)經驗法則；(2)根據長期監測資料統計分析；(3)現象模擬與預測-直接根據位移之預測訂定預警基準；(4)現象模擬與預測-間接根據與位移或崩壞相關之物理量訂定崩塌預警基準。

道路邊坡預警基準應根據上述一或多種模式之組合加以制定。

【解說】：訂定預警基準方法分述如下：

1. 決定模式分析法

依據影響監測量之各項外界因素，以理論分析法如有限元素法等分析之所得推估該監測量之預期值。如「現象模擬與預測-直接根據位移之預測訂定預警基準」

2. 統計模式分析法

以監測儀器長期之觀測值，利用迴歸分析方式，建立監測量與影響該量之外在因素間之關係。如「根據長期監測資料統計分析」

3. 混合模式分析法

以混合決定模式法與統計模式法來推估監測量之預期值。其方法乃將決定模式分析法中較不易精確分析之分量如溫度與時效影響等之分量利用統計模式分析法計算，而可較精確分析之分量如水位仍利用決定模式分析法。如「現象模擬與預測-間接根據與位移或崩壞相關之物理量訂定崩塌預警基準」

崩塌預警基準制定方法說明如下：

1. 經驗法則

由過去經驗或案例作爲預警基準訂定之參考。台灣傳統之邊坡崩塌預警基準主要多透過此一方式制定。一般預警基準值可以位移量、位移速度以及位移加速度爲訂定標的。台灣過去長期監測資料累積案例有限，因若欲此透過經驗法則訂定之監測預警基準應特別注意其適用性。未來持續累積本土化之監測經驗以作爲預警基準制定之參考相當重要。

2. 根據長期監測資料統計分析法

由以往監測資料之統計變動範圍，找出合理、正常之監測曲線包絡線，可作為預警基準訂定之參考。監測資料統計分析主要係根據各項監測值所繪過程曲線之穩定性、相關性、合理性、一致性、突變性及對稱性加以研判評估。

- (1) 穩定性：當監測量過程曲線變化之規律與趨勢成穩定狀態，則屬正常；如原因量不變而效應量之趨勢隨時間不斷向不利方向增長，則屬不穩定之異常狀態。
- (2) 相關性：平常監測值中原因量與效應量都會成一定之相關性，如其相關性較以往有所改變，則屬異常。
- (3) 合理性：監測量之變化趨勢符合自然界之物理現象則屬正常，否則屬異常。
- (4) 一致性：在相同條件下(即原因量相同)，效應量之變化形態應為一致或相似；同一位置使用不同儀器所量測之同一物理量亦應符合一致性，則屬正常，否則屬異常。
- (5) 突變性：監測量之變化過程中，如有不符合預期中或不按規律之突變，則屬異常。如為單一之突變，則可能屬人為之錯誤，如為重複或連續之突變，則可能屬儀器或系統之故障或結構已有異常現象。
- (6) 對稱性：如監測儀器埋設於具對稱之位置，則其監測量之變化亦應具對稱性，否則應為異常。

3. 現象模擬與預測--直接根據位移之預測訂定預警基準

(1) 趨勢預測法

透過經驗統計或由潛變模式計算位移之趨勢，預測崩壞發生之時間歷程，可作為預警基準訂定之參考，此一方法定出之預警值多為地盤之位移速率或累積位移值，由位移速度與崩壞時間之相關性即可提供作為預警基準訂定參考，預警基準訂定應同時考慮各管理值對應之處理手段、處理手段對應所需時間。

(2) 建立力學模式預測變位量

精確之變形特性掌握將使得此一方法變為可能，對於屬於漸進式破壞控制之邊坡而言，位移之增加將伴隨安全係數之降低，因此變形量即可望成為預警基準訂定之徵兆物理量。有限元素法或有限差分法等數值方式可作為變位預測之有效工具，若有滲流問題時，亦應一併分析。此一力學分析模式亦可考慮材料之不確定性、地下水位

高低之不確定性以及其他內、外在因素之不確定性。

4. 現象模擬與預測---間接根據與位移或崩壞相關之物理量訂定崩塌預警基準

(1) 孔隙水壓或地下水位

邊坡破壞屬於地質材料受剪破壞，因此地質材料受剪膨脹或收縮時，孔隙水壓將可能有急劇變化。所以孔隙水壓急劇變化可視為邊坡崩壞之重要徵兆。根據實驗室與現場紀錄發現，崩壞發生前 10~20 分鐘將有孔隙水壓急劇上升之情況(日本高速道路調查會，1988)。此一現象對於不排水條件下施工階段之路堤填築預警有相當之適合性，且廣泛應用於水壩填築過程中施工品質及安全監控之指標之一。然一般而言，此一現象發生後，距離崩壞之剩餘反應時間相對較短。

另一方面，孔隙水壓上升將造成有效應力下降，因而誘發位移或崩塌。利用物理模式之建構(如極限平衡法、有限元素法或有限差分法)，可適度建立地下水位或水壓與崩壞之相關性，另外累積大量邊坡崩壞或位移資料與水位間之相關性亦可提供作為預警基準訂定之參考。因為降雨後地下水位未必能即時表現，因此降雨量亦未必能即時表現地下水位提昇，所以由地下水訂定滑動預警基準值較為準確，往後，得知地下水位上下，便可由地下水位高程，得到安全係數，進而得到各個基準值。此類模式受限於地下水文條件之瞭解相當不易，水壓或水位資料之可靠度應注意與檢核。另一方面，以孔隙水壓作為預警基準訂定標準時，應特別注意水壓觀測系統之反應時間。

根據 USBR 之相關規定，穩定的設計安全係數=1.2，醞釀中的破壞安全係數=1.0。此二安全係數可作為警戒值與行動值訂定之參考，另一方式，一般常時安全係數定為 1.5，因此安全係數 1.5 對應之地下水位可作為訂定預警基準注意階段之門檻值。

(2) 累積降雨量或降雨強度

邊坡崩壞與降雨息息相關，此一影響基於地表逕流之沖刷以及雨水入滲增加水壓力、降低有效應力。此一方面預警基準訂定可分為兩個層次，一乃利用經驗值統計迴歸降雨量與邊坡崩壞關係，藉以訂定預警基準，惟此一方法需累積地區性經驗，且與監測邊坡之地質、水文地質、水文、地文、氣象條件相當有關。另一方式為建立該

邊坡降雨與地下水壓或水位上升之物理模式，再利用水位或水壓與邊坡崩壞之相關性，訂定預警基準。

(3) 建立降雨、水位與道路邊坡崩塌間相關性模式制定預警基準

建立降雨與地下水位上升間之相關性以及地下水位上升與邊坡安全性之相關性，可利用降雨作為預警基準。黃立煌(1985)根據水壓、位移量測值以及降與資料，確定其研究區域之崩積層滑動區地下水位與邊坡穩定之變化，皆與降雨有極密切之關係。

5. 多項徵兆物理量組合之預警基準制定

預警基準可由降雨、地下水位與各種變形量等單項或多項組合來訂定。

14 目視檢查

邊坡崩塌前，常伴隨明顯之地表現象，預警基準制定時應將地表現象納入考慮，且道路管理單位應重視地表現象所代表警示之意義。

【解說】：邊坡崩塌前，常伴隨明顯之地表現象，惟當其有明顯地表徵兆時，多半已超過本基準所定義之注意等級，其徵兆如下：

1. 滑動體頭部出現裂隙或下陷
2. 電桿、圍牆等發生變形
3. 開挖面出露層面或滑動面
4. 邊坡出現異常湧水
5. 擋土構造物產生裂縫或錨頭脫落
6. 邊坡上緣之張力裂隙互相連通，且裂隙寬度與錯動不斷增大
7. 滑動體趾部出現隆起、放射狀壓力裂隙、小規模塌方等
8. 趾部突然出現湧泉，或是已有之泉水變濁或乾涸等



預警基準訂定案例介紹

經驗法則

案例一：根據中華水土保持學會(1999)之資料進行整理，建議各類監測儀器於地滑管理基準值訂定可參考下表，由下表可發現預警基準值之範圍相當廣。此類模式所建立之預警基準需要累積相當實測崩壞資料，累積資料的數量與分析結果有直接的關係，因此統計模式結果適用僅限於條件相同之邊坡。

表 維護階段預警基準值
(整理自中華水土保持學會，1999)

監測方法	管理區分		
	注意	警戒	疏散
地表伸縮計 地表變位速度	0.5-25mm/日	5-100mm/日	50-500mm/日
地盤傾斜計 地表面傾斜速度	5-10 秒/日	---	10-50 秒/日
管內傾斜計 管內變位速度	0.5-1mm/日	2-5mm/日	>10mm/日
地中伸縮計 地盤變位速度	1~10mm/日	10-100mm/日	>100mm/日
降雨量 累積雨量	---	10-20mm/h 10-50mm	20mm/h 100mm

上表參考之文獻包括：日本高速道路調查會(1988)、日本道路公團(1986)、西鶴(1991)、渡(1985)、齋藤(1972)、藤田他(1988)

案例二：下表摘錄自廖瑞堂(2001)有關於山坡地工程邊坡穩定判斷之建議管理值供參考。

表 邊坡穩定判斷建議之管理值(廖瑞堂，2001)

觀測項目	考量之因素	警戒值	行動值	採用監測儀器
地層移動	1.位移傾向 2.位移速率	略有一致位移傾向 0.5mm/月	有一定位移傾向 2mm/月	傾斜觀測管 地滑計
地下水位及水壓	設計地下水位及 水壓	設計水壓	-	水位觀測井 水壓計
地面沉陷	容許沉陷量	不影響使用性	-	沉陷點或沉陷釘

註:

- 1.不同之坡地須依其地層種類及擋土型式等特性訂定管理值，本表僅供參考。
- 2.各觀測值必須已排除誤差及干擾因素後再用作判讀。

現象模擬與預測—

直接根據位移之預測訂定預警基準值

案例一：下圖摘自日本高速道路調查會(1988)之邊坡位移速度與邊坡破壞時間關係圖，由位移速度與緊急處理所需反應時間之相關性即可提供訂定預警基準值重要參考。警戒值之設定可考慮道路邊坡問題分析評估所需時間以及邊坡補強或其他處置所需反應時間，此一反應時間一般約需一週至一個月。根據下圖邊坡位移速度與邊坡破壞時間相關性(日本高速道路調查會，1988)，若採取緊急應變措施所需時間約 1 個月，應於位移速率達 5mm/day 前預警，若採取緊急應變措施所需時間約 1 週，應於位移速率達 30mm/day 前預警，並採取行動。惟透過經驗建立之模式，其變異性相當高，亦即根據下圖由位移速率推測破壞時間，可能之誤差範圍相當大。

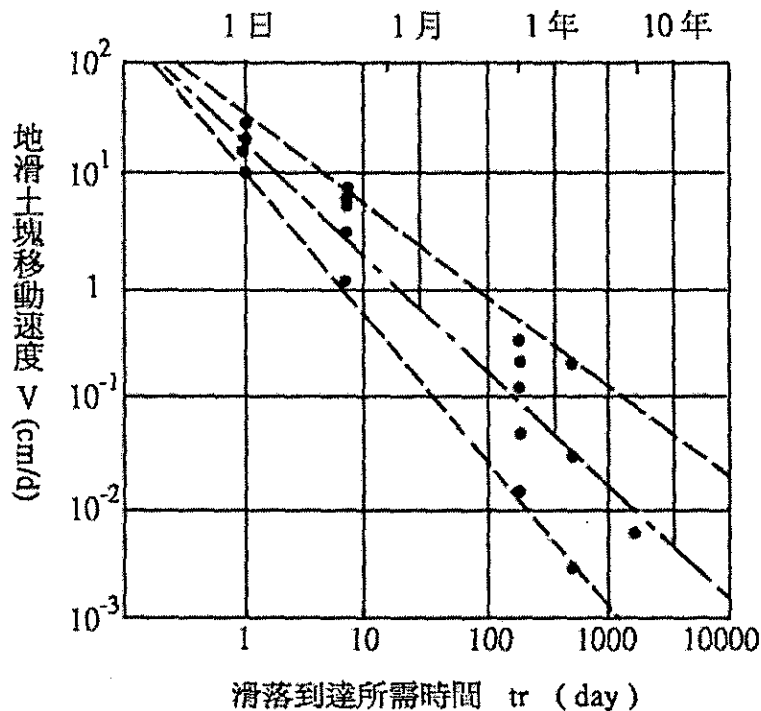


圖 邊坡位移速度與邊坡破壞時間關係圖

(摘自日本高速道路調查會，1988)

案例二：齋藤與上澤(1981)將世界各國曾發表過的潛變破壞數據加以分析整理，求出等應變速率或最小應變速率與潛變破壞所需時間的關係如下圖。由下圖得潛變方程式：

$$\log_{10}tr=2.33-0.916\log_{10}\epsilon\times 10^4\pm 0.59$$

上式中 t_r = 潛變破壞時間(分)， ϵ = 等應變速率或最小應變速率(%/分)

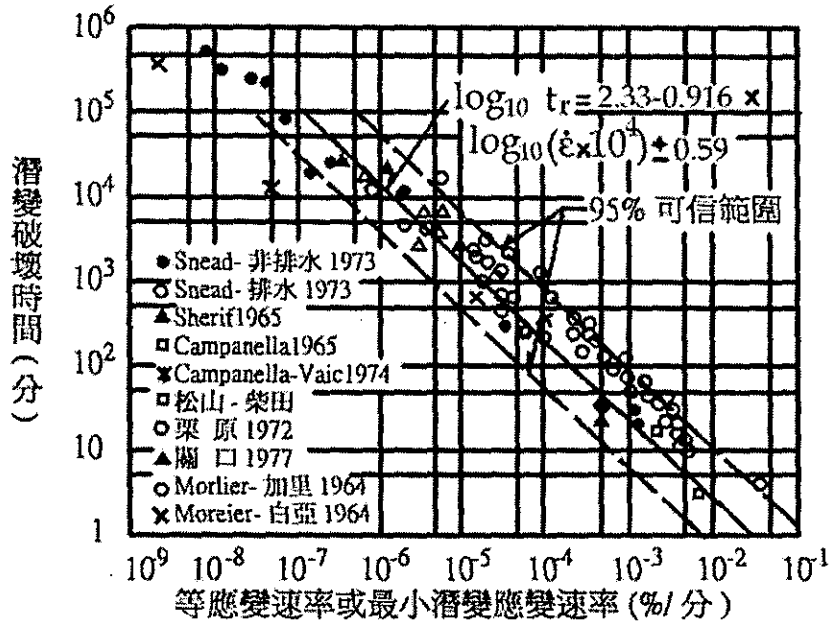


圖 二次潛變速率與潛變破壞時間之關係圖

(齋藤，1981)

當潛變繼續進行，進入三次潛變段中時，土體越近破壞其應變速率越增加，而使 $\log t_r$ 與 $\log \epsilon$ 不再保有直線關係。然而在此段中的任意時刻 t ，土體之應變速率與該時刻到土體破壞為止所剩的殘存時間之間存在著反比例的關係，即應變速率越大表示距土體破壞時間越近。以二次潛變段中的等應變速率來求得邊坡潛變破壞時間，由圖中顯示出 95%可信度範圍之上下限，其所對應的破壞時間相差約 10 倍，因此於使用此一方法預測破壞時間亦應注意其準確性。

現象模擬與預測—

間接根據與位移或崩壞相關之物理量訂定崩塌預警基準

案例一：地盤工程學會(1998)蒐集降雨紀錄與邊坡崩壞之相關性文獻，提出邊坡產生(1)表層崩壞；(2)深層崩壞；(3)填土崩壞與降雨特性之關係如下圖所示。其中影響邊坡滑動之降雨特性以降雨強度及累積降雨量為主。降雨預警基準之行動值訂定，可分別依據該邊坡地層特性或滑動不同機制，如表層崩壞、深層崩壞和填土崩壞邊坡，參考下圖之觀念根據統計加以訂定，至於警戒值與預警值則可考慮以適當平行上述曲線之臨界雨量線視邊坡因降雨而滑動之敏感性加以訂定。

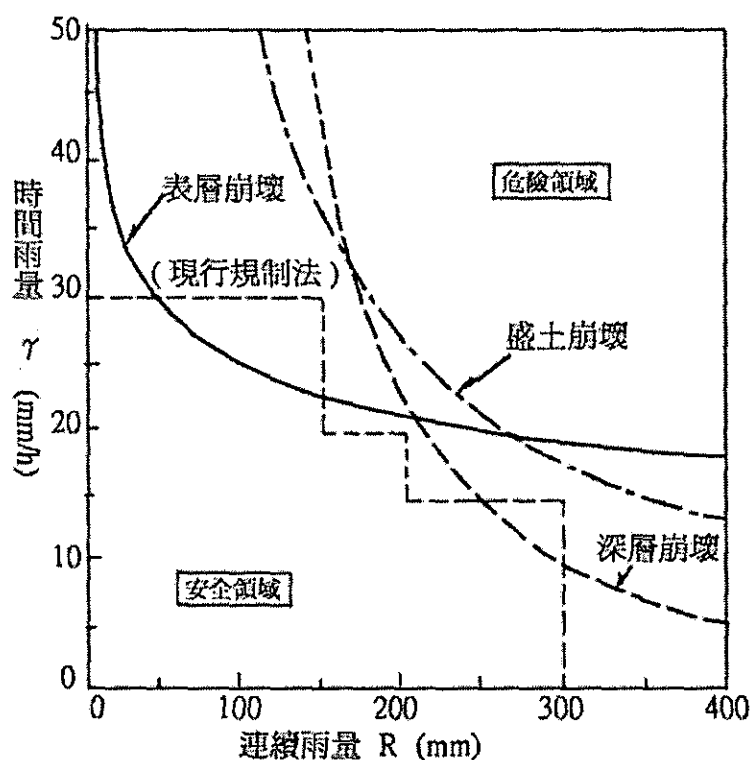


圖 臨界雨量曲線(地盤工程學會，1998)

案例二：Phil Flentje & Robin Chowdhury (2002)根據 24 小時、7 日、30 日、60 日、90 日以及 120 日的累積降雨量，並與傾斜儀監測的資料相結合，決定澳洲 Illawarra 地區 Wollongong 城市附近觸發邊坡崩塌的降雨量門檻如下圖。該區域崩積層主要以潛移型的滑動為主，滑動大多皆在豪雨後發生，主要滑動面為崩積層與岩盤之介面，滑動深度約為 1.5~8 公尺，此一區域邊坡潛移運動平均滑動為每日 0.1~15.6mm 以下。傾斜觀測管內之位移速率一般時期約為 0.0002~0.07mm/日，尖峰變形速率約為 0.0036~2.09 mm/日。此一區域於邊坡崩塌發生前 12 小時撤離了約 130 位居民，成功預警。

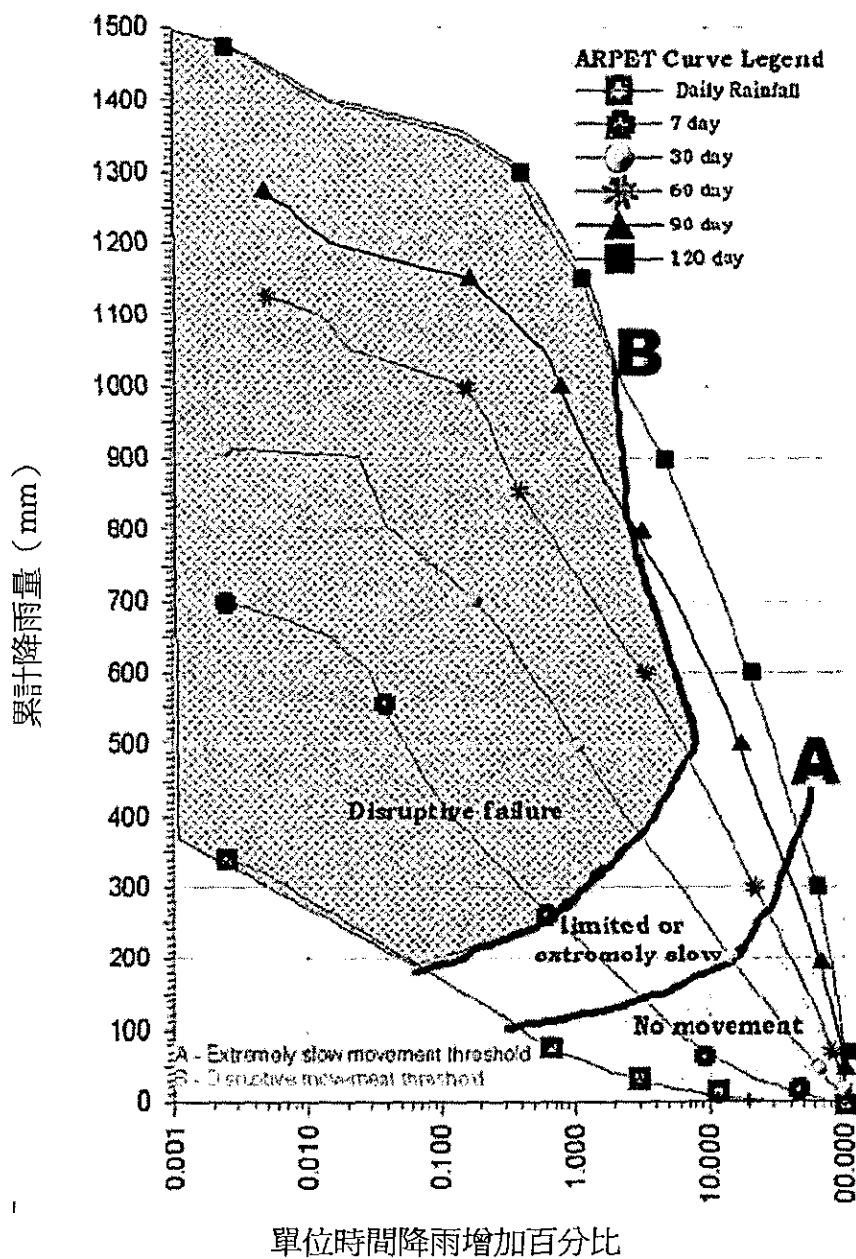


圖 澳洲 Illawarra 地區 Wollongong 城市附近地層滑動觸發之降雨 (Phil Flentje & Robin Chowdhury, 2002)

多項徵兆物理量組合之預警基準制定

案例一：中華水土保持學會(1999)針對中橫公路台 8 線與宜蘭支線（台 7 甲線）交會處之梨山村地滑區，進行降雨與地下水位之關係分析，該研究採用多變量回歸分析與以類神經網路建立二者間關係模式。利用多變數回歸分析，結果發現地下水位的上升量與累積雨量及實效雨量的相關性較高，平均降雨強度次之，降雨前的地下水位最低且為負相關，亦即降雨前的地下水位越高愈不利於地下水位上升。利用動態模式擬合與以轉換函數模擬地下水位變化，由各監測站所測得之一小時降雨量及一小時地下水位資料，先對各監測站之資料選取多場代表性降雨，並建構其時間序列之 ARIMA 模式，接著再與地下水位變化建立輸入（降雨量）－輸出（地下水位變化）間關係之轉換函數。根據邊坡穩定分析所得之安全係數，可訂定出地下水位危險值之範圍。如此，考量某一場降雨，將觀測資料輸入轉換函數，經由轉換函數可於較早之時間得知地下水位變化量，如此可提早預估邊坡之穩定性。梨山地滑地不同位置危險地下水位如下表，透過危險地下水位可反推危險雨量。

表 梨山各監測站危險地下水位高程表(中華水土保持學會，1999)

監測站	B1		B4	B5	B9		B13	C1
危險區分	注意	警戒	注意	注意	注意	警戒	注意	注意
地下水位高程 (m)	1885	1900	1900	1948	1900	1904	2042	1878

另一方面，亦可利用降雨頻率分析，得 10 年頻率之 1、2、3 日累積降雨為注意等級之預警指標，注意等級之預警指標列於下表。

表 梨山地區注意等級之 1、2、3 日累積降雨量表(中華水土保持學會，1999)

累積降雨量	1 日	2 日	3 日
注意等級預警值	260mm	380mm	433mm

除利用降雨量以及地下水位作為預警值訂定之物理量以外，中華水土保持學會(1999)同時建議針對變形量較為緩慢的邊坡，利用地層變形量作為預警物理量，地表伸縮計、地表傾斜儀、孔中傾斜儀監測值訂定之基準值表如表 14。

表 梨山地滑地位移警戒基準值(中華水土保持學會，1999)

儀器	靈敏度	精度	記錄 每日最大變化	注意	警戒	疏散
地表伸縮儀	0.025mm	1mm	1cm	1mm/小時	1cm/日	加速變形
地表傾斜儀	9"	0.01' : 36"	0.1'	0.01' /小時	0.1' /日	加速變形
孔內傾斜儀	0.01' : 36"	0.05' : 180"	無法明確判釋	無建議值	無建議值	無建議值



附錄 C
預警基準訂定範例
(以阿里山五彎仔路段為例)

示範案例：嘉義縣阿里山五彎仔路段。

崩塌類型：滑動【2】。

道路分級：第二等級，省道【5】。

預警基準：分注意、警戒、行動三個等級，各等級之對應處置方式如下【8】：

- 注意等級：
- (1) 檢查監測系統穩定性；
 - (2) 檢查不同種類之監測物理量是否有同樣趨勢；
 - (3) 確認監測數量是否足夠；
 - (4) 加強巡查坡面是否有異狀；
 - (5) 持續觀察邊坡行為及監測物理量變化。

- 警戒等級：
- (1) 增加監測頻率；
 - (2) 由監測資料分析邊坡安全性；
 - (3) 道路管理人員著手進行應變措施；
 - (4) 持續觀察邊坡行為及監測物理量變化。

- 行動等級：
- (1) 更密集監測頻率；
 - (2) 道路管理人員立即進行應變措施；
 - (3) 道路封閉、人員疏散。

監測物理量：採直接徵兆物理量（地層位移）【9】。

邊坡穩定性判別：根據光纖監測系統結果指出，截至 92/12/11 在此路段上邊坡約有 10mm 之位移，而 TDR 監測系統裝置在下邊坡，目前並無位移情況發生。根據草案第 10 條，表 3～表 5 資料研判，此路段判斷為準確定變動【10】。

預警基準制訂方法：本案例採用「經驗法則」，也就是根據過去長期監測資料累積案例而得，故讀者應該知道其適用性仍有待考量。本範例預警基準制訂參考陳玠文等人（2001）、廖瑞堂（2001）及中華水土保持學會（1999），制訂之基準如下表：

表 阿里山五灣仔預警基準建議值

監測項目	注意等級	警戒等級	行動等級	監測系統
地層移動	1. 監測值之反應有較明確的意義，如持續穩定的或一致性的位移。 2. 0.5 – 1mm/日。 3. 累積位移 > 5mm/月。	1. 監測值已超出設計標準，或邊坡出現明顯崩塌前地表現象，如擋土結構物產生裂縫等。 2. 2 -5 mm/日。 3. 累積位移 > 20mm。	1. 邊坡確定為不穩定或已發生明顯局部破壞。 2. > 10mm/日。 3. 累積位移 > 50mm/月。	光纖監測系統

註 1：上表參考文獻包括陳玠文等人 (2001)、廖瑞堂 (2001) 及中華水土保持學會 (1999)。

註 2：上表內位移數據的訂定，乃依目前光纖監測系統量測精度而訂 (如表 6.1 所示)。

註 3：不同坡地需視地層狀況、監測系統型式等訂定預警基準，上表僅供參考。

註 4：範例中【】內數字代表預警基準草案之條文。