

節理式光纖光柵感測器之研發

學生：黃正中

指導教授：黃安斌 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

現今常用的地中滑動監測儀器有插入型傾斜儀、定置型傾斜儀、管式應變計和新發展的時域反射法(TDR)監測技術。而插入型傾斜儀由於量測方便、精度高所以使用最頻繁，但易受電磁波的影響。定置型傾斜儀雖然可自動化，但所費不貲。管式應變計由於使用應變片貼於管壁上，雖可自動化量測，但因線路龐大又電子訊號的互相干擾，往往影響量測精度。TDR 利用電磁脈衝於同軸電纜中行進時，碰到截面變化而反射量測地層滑動，但同軸纜線之變形受到外部束制材料的影響而有所不同，進而影響到滑動量的反算。

本研究主要的目的是希望，利用光纖光柵感測系統單線多點感測及光纖傳輸不受電磁干擾等特性，發展出一套穩定、解析度高且量測深度不受限之儀器，若再搭配自動擷取以及預警系統，則可不分時間、地點，在危機發生之前立刻採取反應動作，降低災害的發生。本論文將闡述節理式光纖光柵感測器之發展以及現場測試結果。

Development of An Optic Fiber Grating Segmented Deflection Monitoring Probe

Student: Cheng-Chung Huang

Advisor: Dr. An-Bin Huang

Department of Civil Engineering
National Chiao-Tung University

Abstract

The inclinometer probe (IP), in place inclinometer (IPI), pipe strain gage and the more recently developed time domain reflectometry (TDR) technique have been used as tools to monitor ground movement. IP with its advantages of convenience and high resolution is probably the most popular one. The pipe strain gage is made by attaching strain gages on a flexible pipe, can be automated, but is expensive to use. A large number of strain gages and thus signal cables are required in the pipe strain gage, it is likely to be interfered by the electromagnetic noise. TDR senses ground movement through distortion to a coaxial cable induced by the ground movement. The signal can be affected by the nature of the material surrounding the TDR cable.

The objective of this reach is to take advantage of the unique capabilities of the fiber Bragg gratings and to develop a stable measurement system with sufficient resolution for ground movement monitoring purposes. When coupled with an automated data logger, the monitoring system is capable of providing early warning against

excessive ground movement and prevent disasters. The thesis describes the development of this optic fiber grating segmented deflection monitoring probe and the result of its field applications.



目 錄

目 錄.....	IV
圖 目 錄.....	VII
表 目 錄.....	XIII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 內容架構.....	2
第二章 研究背景.....	5
2.1 現有地中位移監測儀器.....	5
2.1.1 插入型傾斜儀(Inclinometer Probe, IP).....	5
2.1.2 定置型傾斜儀(In-place Inclinometer, IPI).....	7
2.1.3 管式應變計(Pipe Strain Gage).....	8
2.1.4 時域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR).....	13
2.2 光纖光柵感測系統.....	16
2.2.1 光纖簡介.....	16
2.2.2 光纖傳輸原理.....	17
2.2.3 光纖傳輸損失.....	19
2.2.4 光纖光柵感測器.....	21
2.2.5 應變與波長飄移關係.....	22

2.2.6	溫度與波長飄移關係	23
2.2.7	光纖披覆層(Coating)之影響	23
2.2.8	偏斜儀之研究	24
第三章	節理式光纖光柵感測器	38
3.1	試驗設備	38
3.2	節理式光纖光柵感測器之設計	41
3.3	量測原理	43
3.4	材料及製作之改進	44
3.5	橫向變形計算分析	48
第四章	室內標定及測試	64
4.1	室內標定	64
4.1.1	量測節理變形係數標定	64
4.1.2	溫度效應試驗	66
4.1.3	潛變效應試驗	67
4.2	室內傾斜管試驗	69
4.2.1	9m傾斜管變形一致試驗	69
4.2.2	9m試驗	71
第五章	湖山現地應用實例	95
5.1	試驗場址說明	95

5.1.1 試驗緣由	95
5.1.2 場址位置敘述	96
5.1.3 區域地質	97
5.2 節理式光纖光柵感測器之裝設	98
5.2.1 孔CB50-2.....	98
5.2.2 孔CB73-1.....	99
5.3 CB50 監測結果分析	100
5.3.1 孔CB50-1 傾斜管監測結果分析.....	100
5.3.2 孔CB50-2 光纖光柵感測器監測結果分析	102
5.4 孔CB73 監測結果分析	105
5.4.1 孔CB73-2 傾斜管監測結果分析.....	105
5.4.2 孔CB73-1 光纖光柵感測器監測結果分析	106
第六章 結論及建議.....	129
6.1 結論.....	129
6.2 建議.....	130
參考文獻.....	133
附錄.....	137

圖 目 錄

圖 1-1 研究流程圖	4
圖 2-1 測傾管(IP)及計算示意圖	26
圖 2-2 伺服加速度傾斜儀系統構造示意圖.....	26
圖 2-3 偏心漂移(BIAS-SHIFT)誤差來源示意圖.....	27
圖 2-4 BIAS-SHIFT修正.....	27
圖 2-5 不同儀器所造成的ROTATION ERROR.....	28
圖 2-6 ROTATION ERROR與儀器軸心傾斜示意圖	28
圖 2-7 ROTATION ERROR修正.....	29
圖 2-8 DEPTH-POSITION ERROR來源.....	29
圖 2-9 定置型傾斜儀裝設示意圖.....	30
圖 2-10 孔內測傾儀(IPI)示意圖(左)剛性連桿 (右)柔性連桿.....	30
圖 2-11 管式應變計裝設示意圖	31
圖 2-12 應變管變形與應變值相關係圖-S型應變曲線.....	31
圖 2-13 「S」型、「上半S」型與「弓」型(下半S型)應變圖形...32	
圖 2-14 變形錯動感測器原理示意圖.....	32
圖 2-15 TDR儀器簡圖.....	33
圖 2-16 光纖構造.....	33
圖 2-17 跳躍折射率光纖中的光傳播圖.....	34

圖 2-18 光纖光柵量測原理示意圖.....	34
圖 2-19 光纖光柵感測器量測原理示意圖.....	35
圖 2-20 光纖光柵偏斜儀.....	35
圖 2-21 偏斜儀在彎曲段彎曲情況示意圖.....	36
圖 2-22 偏斜儀串接使用示意圖.....	37
圖 3-1 傳統傾斜儀(IP).....	51
圖 3-2 光纖光柵讀取儀.....	51
圖 3-3 光纖融接設備.....	52
圖 3-4 螺旋測微器.....	52
圖 3-5 節理式光纖光柵感測器示意圖.....	51
圖 3-6 ABS軟管示意圖.....	54
圖 3-7 黏貼完成之變形軟管.....	54
圖 3-8 量測節理.....	55
圖 3-9 導輪實物圖.....	55
圖 3-10 軸承及滑動端的橢圓形孔.....	56
圖 3-11 滑動端的橢圓形孔及孔中的剛棒.....	56
圖 3-12 兩量測節理與其連接的延伸節理.....	57
圖 3-13 良好的波形.....	57
圖 3-14 雙波峰的波形.....	58

圖 3-15 量測原理示意圖	58
圖 3-16 FBG預拉方式示意圖	59
圖 3-17 塑膠螺絲的滑動端	59
圖 3-18 塑膠螺絲滑動端的量測節理組裝圖	60
圖 3-19 角度旋轉計算方式示意圖	60
圖 3-20 計算方式步驟一	61
圖 3-21 計算方式步驟二	61
圖 3-22 計算方式步驟三	62
圖 3-23 計算方式步驟四	62
圖 3-24 計算方式步驟五	63
圖 4-1 量測節理標定方式示意圖	73
圖 4-2 量測節理係數標定圖(相關係數 $R^2=1$)	74
圖 4-3 量測節理係數標定圖(相關係數 $R^2=0.9995$)	75
圖 4-4 溫度效應試驗方式示意圖	76
圖 4-5 FBG溫度改變與波長改變關係圖	77
圖 4-6 FBG溫度改變與波長相減值關係圖	78
圖 4-7 潛變試驗結果圖	79
圖 4-8 9M傾斜管架設圖	80
圖 4-9 9M試驗固定方式示意圖	81

圖 4-10	尺讀與傾斜儀讀數比較-喇叭型	82
圖 4-11	尺讀與傾斜儀讀數比較-大肚型	83
圖 4-12	9M傾斜管變形一致試驗-喇叭型	84
圖 4-13	9M傾斜管變形一致試驗-大肚型	85
圖 4-14	變形產生方式	86
圖 4-15	9M試驗-喇叭型變形一(6MM)	87
圖 4-16	9M試驗-喇叭型變形二(9MM)	88
圖 4-17	9M試驗-喇叭型變形三(12MM)	89
圖 4-18	9M試驗-喇叭型變形四(15MM)	90
圖 4-19	9M試驗-大肚型變形一(3MM)	91
圖 4-20	9M試驗-大肚型變形二(5MM)	92
圖 4-21	9M試驗-大肚型變形三(8MM)	93
圖 4-22	9M試驗-大肚型變形四(24MM)	94
圖 5-1	各孔號傾斜管相關地形位置	109
圖 5-2	湖山湖南壩址地形圖	109
圖 5-3	湖山湖南壩址地質圖	110
圖 5-4	修改前CB50-2 現場裝設圖	111
圖 5-5	孔CB50-2 保護措施狀況	111
圖 5-6	修改前CB50-2 孔FBG深度示意圖	112

圖 5-7 室內預先組裝情況圖.....	113
圖 5-8 修改後CB50-2 現場安裝圖.....	113
圖 5-9 修改後CB50-2 孔FBG深度示意圖.....	114
圖 5-10 孔CB73-1 現場裝設情況.....	115
圖 5-11 孔CB73-1 裝設結束情況.....	115
圖 5-12 孔CB73-1 FBG深度示意圖.....	116
圖 5-13 孔CB50 監測儀器方向圖.....	117
圖 5-14 孔CB50-1 傾斜管位移變化圖(A向).....	118
圖 5-15 孔CB50-1 傾斜管位移變化圖(B向).....	119
圖 5-16 孔CB50-2 改良前光纖光柵監測儀器分析結果圖(A向).....	120
圖 5-17 維修期間傾斜儀替代監測結果圖(A向).....	121
圖 5-18 維修期間傾斜儀替代監測結果圖(B向).....	122
圖 5-19 孔CB50-2 改良後光纖光柵監測儀器分析結果圖(A向).....	123
圖 5-20 孔CB50-2 改良後光纖光柵監測儀器分析結果圖.....	124
圖 5-21 孔CB73 監測儀器方向圖.....	125
圖 5-22 孔CB73-2 傾斜管位移變化圖(A向).....	126
圖 5-23 孔CB73-2 傾斜管位移變化圖(B向).....	127
圖 5-24 孔CB73-1 光纖光柵監測儀器分析結果圖(A向).....	128
圖A-1 CB50-1 鑽孔地質柱狀剖面圖.....	137

圖A-2 CB50-1 鑽孔地質柱狀剖面圖(續).....138

圖A-3 CB50-2 鑽孔地質柱狀剖面圖.....139

圖A-4 CB50-2 鑽孔地質柱狀剖面圖(續).....140

圖A-5 CB73-1 鑽孔地質柱狀剖面圖.....141

圖A-6 CB73-1 鑽孔地質柱狀剖面圖(續).....142

圖A-7 CB73-2 鑽孔地質柱狀剖面圖.....143

圖A-8 CB73-2 鑽孔地質柱狀剖面圖(續).....144



表 目 錄

表 3-1 位移計算結果.....63



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

長久以來，可能最廣為採用的地層滑動監測設備即為傾斜儀，其發展歷史已有 50 年以上，精度好使用廣，一直扮演著地層滑動監測利器的要角。但是由於其使用電子迴路作為感測及訊號傳輸工具，雖然發展歷史長久，但仍然無法克服周圍環境中電磁波的干擾(如高壓電線電塔)。除此之外，在量測施做上使用人力，量測費時。而地層滑動往往是伴隨著暴雨或地震的發生所引起，因此在量測時機的選取以及人員安全的考量上往往不易選擇，時常在真正需要瞭解情況的時候反而無法得知。



雖然定置型的孔內傾斜儀可自動化的量測，但由於孔內空間限制，裝測多點時纜線會佔據孔內大部分空間，在安裝時造成困難，因此量測點數往往不足，且所費不貲。

由於近年來光纖通訊技術進展迅速，光纖感測技術也逐漸成熟，其優點包括分佈式多點感測、體積小、感測器與傳輸線路均在同一光纖上、傳輸不受電磁波干擾等，此外光纖主要材料為矽材，非金屬不易氧化，並可以長期埋在地下或水中不受腐蝕，在光纖外側可進行表面加工，增強其抗油性、抗水性與抗化學性等，增加使用壽命。隨著

光纖在通訊科技上應用日益頻繁，製造成本大幅降低，製程與品質日益進步，若再配合自動化擷取系統以及危機通報機制，就可以不論時間、氣候，當地層有滑動現象時立即得到資訊。

由以上光纖感測器在客觀條件上所擁有的許多得天獨厚的優勢，足以取代傳統電子式感測器，若能有效利用光纖感測技術優點，並克服其在應用上困難，此一技術勢必成為監測上的重要工具。因此本研究希望能利用光纖光柵感測器研發出易於運送、拆裝，且可隨需要增加長度及量測點數之精確儀器，使監測成為一項準確、方便也能及時反應的高科技工作。



1.2 內容架構

本研究之目的在於將光纖光柵測量技術利用於大地工程監測工作方面，藉由所研發的節理式光纖光柵感測器達到精確、方便且快速的監測，若再配合自動化擷取以及預警系統則能達到及時預警的最大功效。本研究流程如圖 1-1 所示，內容如下：

- 1.研發並製作一適用的光纖光柵感測儀器。
- 2.利用室內之光學桌進行試驗，藉以瞭解研發的儀器其波長改變與外在各項變因之間的關係。
- 3.於室內進行現地地層變形情況模擬，測試所研發儀器的效能。

4. 進行現地實際監測試驗，瞭解於現地實際使用結果。



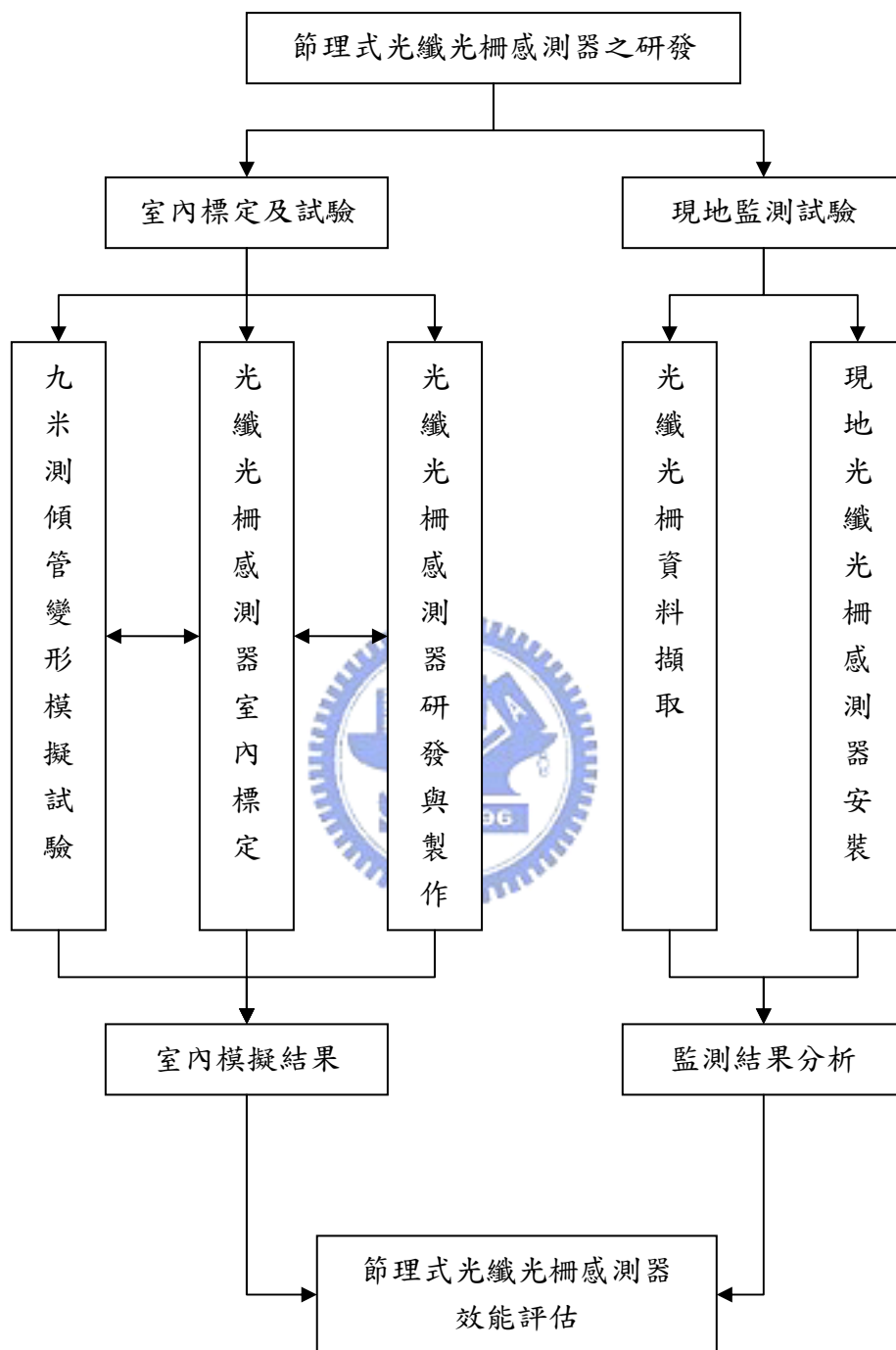


圖 1-1 研究流程圖

第二章 研究背景

2.1 現有地中位移監測儀器

2.1.1 插入型傾斜儀(Inclinometer Probe, IP)

傾斜儀之發展為 1952 年 S.D.Wilson 在 Harvard University 所提出 (Gordon and Mikkelsen, 1988), 於 1950 年代由 Slope Indicator Company 將其商品化。傾斜儀觀測傾斜度及位移量的改變, 是利用裝設好的傾斜觀測管, 如土體或連續壁中等, 藉由管內之凹槽引導傾斜感應器進行逐段觀測, 將各段之位移量累加, 如此便可探測出滑動面的深度、滑動量大小及滑動速率。如圖 2-1 所示。

一般傾斜儀系統可分為四個部分: 觀測套管、傾斜感應器、控制電纜及測讀儀。觀測套管管徑可選擇 1.9~3.8 in(48~96mm), 管徑大則能測到的滑動量就大, 也較容易觀測到薄的剪動帶, 但裝置較大孔徑的傾斜觀測管則需較多的花費, 因此需同時考量經費的因素。


傾斜感應器為一種輕便的量測儀器, 通常安置於一個易於操作且附滑輪的桿件中, 以便滑入觀測套管中的凹槽內。傾斜感應器依感應原理及構造不同可分為下列四種形式:

1. 擺動電阻式(Pendulum-Resistance Element)
2. 應變計式(Strain-Gage)

3. 振弦式(Vibrating-Wire)

4. 伺服加速度計測式(Servo-Accelerometer)

伺服加速度式由於反應快、靈敏度高且量測角度範圍廣，因此已取代其他類成為現今最常使用之形式。伺服加速度計測方式為將”擺”置於一個可產生扭矩的線圈磁場內，利用位置探測器探測出”擺”在重力方向的位置。若此系統傾斜，則”擺”與系統垂直方向必產生位移，此時位置探測器將會產生訊號，並轉換成一個恢復電壓將”擺”回推至原來的位置，利用解讀儀即可探測出傾斜量，伺服加速度計測式內部系統構造如圖 2-2 所示。



控制電纜作用為傳輸訊號及控制傾斜感應器深度，因此控制電纜必須柔軟、易收拾且嚴密的防水，最重要的是不能隨時間或受力而伸長而造成讀數上的誤差。解讀儀負責供給電力及將電壓訊號轉換為傾角數值，測得之讀數可以選擇以人力紀錄或儲存於解讀儀中帶回作分析。

傾斜儀雖然是一套穩定且值得信賴的儀器，但仍有許多的誤差影響，若無法排除這些誤差的因素或將其加以修正，那麼由測量到的資料往往無法得到正確的資訊。誤差的來源有人為的紀錄錯誤(可由小心施做及檢查克服)，自然誤差如溫度、濕度的影響(通常影響較小)，以及系統誤差(主要的影響因素)。系統誤差主要有四：

1. Bias-shift：此誤差為最常見之誤差，起因於儀器校正時一小偏斜量，如圖 2-3 中之 b 值。只要加以稍微練習即可輕易的修正。修正結果如圖 2-4 所示。
2. Sensitivity drift：為最不常見的誤差，但同時也是最難察覺的，其誤差來源是由於儀器之校正值改變，如圖 2-3 中之 k 值，只要將儀器送回儀器廠商重新校正即可克服此問題。
3. Rotation error：此誤差為傾斜管裝設時傾斜及儀器軸心偏差所造成，微小的儀器軸心偏差量即會造成嚴重的誤差，圖 2-5 即為使用不同儀器所量測到同一時間同傾斜管之傾斜量，由於不同的儀器其感測器軸心傾斜量不同，而造成量測值的差異。儀器截面軸心傾斜造成 Rotation error 示意如圖 2-6 所示，修正結果如圖 2-7。
4. Depth-position error：起因是由於傾斜管彎曲以及感測器放置深度誤差所造成，如圖 2-8 所示。

2.1.2 定置型傾斜儀(In-place Inclinator, IPI)

為了將傾斜管觀測技術自動化，近年來發展了定置型傾斜儀技術(In-place Inclinator, IPI)，裝設示意如圖 2-9。IPI 利用多個可直接裝置於現地的傾斜儀以達到自動化目的，但受限於測傾儀纜線與 ABS 管直徑，單一 ABS 管能夠置入的測傾儀數量有限，因此兩孔內傾斜

儀之間，通常以連桿連接，以減少傾斜儀的使用數量。因此 IPI 可分為剛性與柔性連桿兩種形式，如圖 2- 10 所示，剛性連桿 IPI 可維持變形量測連續性，但其分段線性化的分段長度為測傾儀單元與剛性連桿長度總和，因此儀測長度(gauge length)大為增加，使得空間解析度更差，發生大變形時也容易造成儀器毀損。相反地，柔性連桿 IPI 儀測長度(gauge length)則不變，但因為連桿為柔性，測傾儀所量測到角度僅代表儀器段傾斜角，必須利用線性外差方式計算變形曲線，因此變形曲線誤差隨連桿長度增加而增加。現有自動化測傾管觀測缺點可歸納如下：(1)由於成本與安裝空間的限制，孔內測傾儀的數量受到限制，空間解析度不佳；(2)剛性連桿變形量測範圍較小；(3)柔性連桿之量測範圍較不受限但變形量測存在線性外差可能造成誤差；(4)孔內測傾儀本身由複雜的電子元件所構成，昂貴的主動式電子元件具有容易受到水、濕氣、雷擊影響的先天性缺陷。

2.1.3 管式應變計(Pipe Strain Gage)

管式應變計用於邊波監測之應用，首先由本之專家學者提出，並對其原理作詳細的研究。管式應變計之裝設如圖 2- 11 所示。

1. 藤原明敏(1976)依據應變管觀測的結果，將地層滑動的程度分為確定變動、準確定變動、潛在變動、異常變動四種。

2. 中村浩之(1969)將應變片黏貼於測傾管，埋入不同地質之地滑時，認為應變片之黏貼間隔，在黏土質中建議為 90cm 以下、風化岩層以 45cm 較為妥當，對應變計黏貼間隔做了具體的建議。

在針對應變管在邊波滑動位置判斷上：

1. 福本安正(1975)利用應變計黏貼於鋼管上的室內實驗，假設不同深度的滑動面，量測施力在鋼管上的室內實驗，假設不同深度的滑動面，量測施力在鋼管不同深度的應變，調查滑動面上的力矩分佈曲線，證實低剛性鋼管或滑動面深度大時，應變管因受土壓力所造成之力矩分佈曲線易成 S 型，其最大力矩發生於滑動面上、下兩處，當滑動面深度較淺時力矩分佈曲線易成弓型。
2. 玉田文吾等人(1976)利用滑動模型，埋入應變管實驗，發現最大力矩發生於滑動面的下方，其曲線成弓型，與福本安正相同。
3. 山口真一(1976)利用應變管認定日應變量在 3.0×10^{-3} 以上之位置可判定為滑動面，較藤原明敏的月應變量 5.0×10^{-3} 較為保守。

雖然日本對於管式應變計之使用成效良好，但主要的目的為判斷

滑動面存在之位置，因此對於應變管位移量的推算研究並不多。

在國內相關研究包括：

1. 陳信雄(1976)利用應變管推定滑動面之位置，認為月應變量在 1.0×10^{-3} 以上者即可判定為滑動面，若日應變量為負者，該深度即為滑動面所在；若為正值，則滑動面應位於該深度下方一公尺內。
2. 謝豪榮(1981)指出利用應變管所得累積應變量柱狀圖中，曲線呈現最大彎曲點處可視為地層滑動面。
3. 許海龍、林川肆(1987)利用三次仿樣湊合法模擬應變量之連續性，並指出在剪力曲線中最大剪力處且在土壓力作用分佈曲線上之主動土壓力作用與土壓反力交界處，為滑動面所在位置，惟假設條件在於應變管之深度大且底端固定於地底岩盤中。
4. 陳水龍(1992)認為，以三次仿樣內插法推估應變管變形時，所假設邊界條件十分重要，尤其在滑動面接近邊界時，不合理的假設對滑動面位置判斷將造成誤差，因此假設地面點所受淨土壓力等於第二及第三觀測點所受淨土壓力連線外插值；底部固定端所受淨土壓力為倒數第二點及倒數第三點淨土壓力外插值。另外，除滑動面位置很淺時，應變曲線呈半

S 型外，在滑動面位置要有完整 S 型應變曲線，才能合理推算各量，否則會推算出錯誤的位移量。

一般利用應變管判斷地層滑動面時，乃藉由量測各點應變值，繪製累積應變對深度關係，找出最大應變值深度，即認定此處為滑動面位置，然而這類方法較為粗略。

以力學觀點來判斷滑動面位置，地層中若有滑動區域產生，就意味著該滑動區域地質剪力強度小於外力所產生的剪力，使該處地質產生剪力破壞，致土體產生滑動，並帶動應變管一起移動，但在初期滑動量並不顯著時，應變管不致發生剪力斷裂，只由於滑動的外力而產生變形。除了地面以外，滑動所產生有可能在應變管中任何一點，應變管可以比擬成一條彈性懸臂樑，其變形具有諧和性——即連續性——當滑動發生在樑中任何一點時，如圖 2-12 中的 c 點即為滑動點，c 點至 a 點間(如 b 點)因 c 點的右移，亦被迫跟著右移，使樑的左側產生伸張變形，應變值為正值，變形未延伸至 a 點以下，故 a 點以下應變值為 0；c 點至 e 點間(如 d 點)亦被土塊推擠強迫右移，但變形量逐漸變小，至 e 點以上完全不再有變形，只隨著土塊右移，故樑在 c 點至 e 點的左側產生壓縮變形，應變值為負值，e 點以上的點位應變值為 0，c 點恰為由伸張變形轉為壓縮變形之反曲點，其應變值為 0，整支樑應變值如圖 其形狀猶如一「S」字型。

總而言之，若應變管設置之應變計間距很小，在產生滑動時，在應變圖上可得到一理想的「S」型，「S」型中央即為滑動面位置，此判斷與日本福本安正(福本安正, 1975)的試驗結果相同。但若間距太大，如「S」型區域內未設置任何應變計，則畫不出「S」型，即找不到該滑動面位置。若「S」型區域內只量測到圖 2- 13(a)中的 c、e 點間之任意點 d，形成在應變圖上只有「上半 S」型(圖 2- 13b)，可知滑動面應該在「上半 S」之下端點與應變值最高點中間。若只測到圖 的 a、c 點間任意點 b，形成在應變圖上只有「下半 S」型(圖 2- 13c)，可知滑動面在「下半 S」之上端點與應變值最高點中間，此型即日本福本安正所稱之「弓」型，他將應變圖在有滑動面產生時分為「S」型與「弓」型兩種。但在滑動面產生時，理論上在應變圖上除了滑動面很淺時，其應變圖形成「弓」型之下半 S 型外，當滑動面深度不是很淺時其應變圖上只有「S」型，出現「上半 S」型或「下半 S」型，肇因於應變計間距過大，致資料不全而未能完整畫出「S」型。但福本安正所述之兩型，對滑動面位置的判斷與本文相同。若在應變圖上限兩個以上明顯的「S」圖形，表示該區域有兩處以上的滑動面。(陳水龍, 1993)

2.1.4 時域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)

時域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)為一種被動式監測技術，具備分佈式及多種監測功能，如 TDR 變形錯動感測器、TDR 地表變位計、以及 TDR 立管式水壓計。TDR 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及感測導波器，並由示波器記錄因感測導波器內阻抗不連續所造成的反射。描述電磁波於傳輸線內(包括同軸電纜與感測導波器)傳遞行為主要的參數為傳遞常數及特徵阻抗。傳遞常數控制電磁波傳遞速度與衰減，受到傳輸線內絕緣體介質電學性質(介電度與導電度)影響；特徵阻抗是由電纜斷面幾何與電纜絕緣介質所決定，控制波傳反射訊號率大小。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的回傳反射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位置。藉由分析回傳反射訊號大小可獲得許多額外的訊息，圖 2-14 為 TDR 儀器元件簡圖。在大地工程監測方面，依應用原理可歸類為：

1. 皺摺型：利用 TDR 反射訊號監測電纜受到外在環境影響造成電纜幾何形狀改變時的波形反應並予以定性甚至定量描述，例如岩石、土壤、結構物剪力變形所造成埋置其中電纜幾何形狀改變。

2. 界面型：利用 TDR 於不同介質界面位置會產生反射訊號的原理，定位得該介面。例如地下水壓監測(空氣與地下水界面)或橋墩土壤沖蝕監測(河流與河床土壤界面)。
3. 速度型：係將所欲研究材料作為感測導波器內部絕緣介質，分析反射訊號走時獲得材料介電常數，利用經驗關係式推估土壤含水量等工程特性。
4. 穩態值型：同樣是將所欲研究材料作為感測導波器內部絕緣介質，利用反射訊號穩態值大小計算量測材料導電度，進而推估土壤鹽度。
5. 頻譜分析型：將所欲研究材料作為感測導波器內部絕緣介質，利用頻譜分析技術分析不同頻率的電學性質特性，可藉由電學性質在不同頻率的表現探討土壤與孔隙水交互作用。



利用皺摺型原理，有可監測地層錯動變形的 TDR 錯動變形感測器。藉由 TDR 製波器發出的脈衝訊號在遇到電纜斷面幾何改變時時會產生反射訊號，如圖 2- 15 所示。因此應用此項原理可用來監測地層內部錯動變形，首先在所要量測變形的地層內鑽孔，放入變形感測同軸纜線，然後用水泥漿填塞而與地層形成一體。地層發生錯動變形將改變同軸纜線幾何形狀，TDR 反射波形反應亦會隨變形增加而增

加，由走時分析及波速可求得發生錯動變形位置，藉由實驗室標定可量化變形量。由於 TDR 錯動變形感測器整體都可作為感測的功能，因此對於薄的錯動面有良好的檢測能力，可有效偵測滑動面位置。有效克服存在於傳統式 IP，IPI 或 FBG 偏斜儀的儀測長度(gauge length)問題。但相對而言，感測纜線對於一般不會產生材料破壞與纜線斷面之幾何改變的撓曲變形類型不具辨識能力。

TDR 的傳輸距離視所使用之同軸電纜其導電性質而定，理論上若是電阻無限小則電磁脈衝所能傳導的距離則為無限大，但實際上則依舊有其限制，若使用品質良好之同軸電纜，則可監測之距離可達 500 公尺。



TDR 錯動變形感測器與傳統 IP 相比，一般而言，TDR 錯動變形感測器對應變梯度較小的厚剪動帶分辨率較低。相對地，由於一般傾斜儀長度為 50cm，對於局部相對錯動變形量測所得為整體平均效果，若薄剪動帶持續變形，則傾斜儀將無法置入。在資料的獲取方面，測傾管量測需耗費人力與時間，對於偏遠不易到達的區域，常受氣候影響而無法觀測，因此常在最需要預警觀測的地震、暴雨發生時缺少觀測資料。IPI 雖可進行自動化觀測，但其間距受到電纜線安裝與經費限制，間距常大於 2m 而無法正確解釋薄剪動帶滑動變形現象，IPI 電子元件長期穩定性也有待評估。相較於 IP 或 IPI，TDR 錯動變形感

測器具有空間上連續監測的獨特優點，可以量測薄剪動帶，適合滑動面位置調查或監測。TDR 錯動變形感測器不需特製套管，設備之成本與施工性亦優於 IP 及 IPI。(交通大學, 2005)

2.2 光纖光柵感測系統

2.2.1 光纖簡介

光纖是一根透明細桿，外觀類似釣魚線，直徑約在 $125\ \mu\text{m}$ 至 $450\ \mu\text{m}$ 之間，材質上，傳統光纖使用玻璃材料，傳輸效果佳，訊號損耗低，但容易受外力破壞，且技術層次較高，成本降低幅度有限；而近年來隨著石油化學科技的進步，塑膠亦成為光纖的新材料(Pedrotti and Pedrotti, 1993)。塑膠材質的光纖訊號損耗稍高，但以其耐用性與較低廉的價格獲得短距離使用者的青睞，美國通用電子公司即以強化塑膠材質光纖作為洛杉磯級核子動力潛艦在通訊、控制與戰管的資料傳輸管線。而兩者均提供相較於空氣的光傳輸低消耗路徑。

對於光纖的研究，最早是針對醫學上常用的內視鏡所需柔性攝影管開始，隨著 1960 年代雷射光的誕生，光纖傳輸找到了理想的窄頻率高功率光源；1977 年美國最大通訊公司 AT&T 開始採用光纖取代傳統的銅導線做為中央資料交換機的傳輸線路，效果卓著，而後包括

南方貝爾、西南聯合通訊等通訊公司也相繼跟進。光纖所具有的高傳輸量、低功率損耗、較輕的質量與較小的截面積使得它迅速取代了傳統的銅導線而成為通訊界的新寵，此外光纖具有抗電磁波干擾、高強度與不易被竊聽等等的優點，材料製造成本因為量產而逐漸降低，已被工商各界大量採用。(陳至揚, 2001)

2.2.2 光纖傳輸原理

光纖一般是由矽玻璃或塑膠製成，中心為折射率較高核心(Core) 其外披覆折射率較低外層(Cladding)所組成如圖 2- 16，光束藉由全反射在光纖中傳播，而其最大的優點就是光能量的損失因為內全反射的作用而降到最低。

如圖 2- 17 所示為一跳躍折射率光纖(step-index fiber)，其特色就是核心與外層的折射率有一明顯的差距(refractive index changes in step fashion)，而核心的折射率比外層要大，藉著光行進於核心及外層的介面上來回反彈使得光線在光纖中穿梭傳遞。

根據史涅爾定律(Snell's law)，當光線由折射率較大介質進入折射率較低介質時，將有部分光線被反射回到原來介質，而部分光線則以另一角度折射進入較低折射率介質當中，其公式為：

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2-1)$$

其中

n_1 、 n_2 = 入射端與折射端介質折射率

ϕ_1 、 ϕ_2 = 入射角及折射角

當入射角逐漸增大時，折射角也隨之變大，直到折射角等於 90 度時，光線便尋該折射介面傳播，此時入射角即稱為臨界入射角 α_c ，其公式如下：

$$n_1 \sin \alpha_c = n_2 \sin 90^\circ \Rightarrow \alpha_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2-2)$$

當入射角持續增大，此時光線將不再產生折射，所有光線將全部反射回原來介質當中，此稱為內全反射 (Internal Total Reflection)。

如圖 2-17 中，兩條光線都從 A 點注入光纖核心中，其中實線的光比虛線的光入射角小。兩條光線由外界(空氣中)射入光纖中時，發生了一次折射，使得兩條光的折射角都比原本的入射角來的小。

接下來，我們注意虛線的光(初始入射角較大者)。再通過 A 點進入核心後，這條光在核心與外層的介面 B 又發生了一次折射，然後在於外層與空氣的介面 C 再折射一次然後離開了光纖。

再看實線的光，在 A 點折射後，光在核心與外層的介面 B' 點發生了一次內全反射，於是光就被限制在光纖中傳遞。我們以 α_c 表示在核心與外層間發生內全反射的臨界入射角。

大於 α_c 入射角的光線會在光纖中傳播，實線的光線就是要在光纖

中傳遞的臨界光線(critical ray)。臨界光線與光纖的中心線夾了一個 θ_c 的角，大於 θ_c 角度的光線不會在光纖中傳遞，如 θ_1 的光線就離開了光纖。這個 θ_c 角稱為臨界傳播角(critical propagation angle)，這個 θ_c 與前面的臨界入射角並不相同。我們由簡單的幾何可得到下面式子：

$$\sin \alpha_c = \cos \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-3)$$

小於臨界傳播角(θ_c)的光線會光纖中傳播，由電磁理論及克斯-韓森偏移(Goos-Hanchen Shift)光線在光纖傳播所引起相位變化必須為 2π 的倍數，否則會產生相位抵銷，造成傳播角不連續，而這些不連續傳播角個數即稱為模(mode)。如圖 2-17 所示為三條不同傳播角度的光線，當 θ_c 增大時，傳播模式(modes of propagation)的個數也會跟著增加。而 θ_c 決定於 n_2/n_1 ，所以傳播模式的個數跟著相對折射率差

$$\frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \times n_1} \text{ 而增加。}$$

2.2.3 光纖傳輸損失

光纖損失定義為輸出能量與輸入能量之比值，

$$Loss = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2-4)$$

其中

P_{out} = 輸出能量

P_{in} = 輸入能量

以對數的單位分貝 (decibels) 來定義的話如下：

$$Loss|_{db} = 10 \times \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2-5)$$

光纖能量的損失會因光纖長度增長而增加，所以一般定義損失時會以單位距離光能損失的分貝來作為光損耗計算單位。

光纖損失的原因有以下幾大類：

1. 材料損失 (materials loss)：光能被材料所吸收。
2. 光散射 (light scattering)：光能會被材料分子構造及結構上的缺陷所散失。在散射損失中包括雷利散射(Rayleigh scattering)、麥散射(Mie scattering)、布里淵散射(Brillouin scattering)及 Raman 散射。所謂的散射是指當光束通過透明介質時，大部分的光會直接向前通過，因為介質折射率不均勻所造成一小部分的光被散射。
3. 波導及彎曲損失 (waveguide and bending loss)：因為光纖結構上的變形造成的，如直徑的改變、局部彎曲 (microbend)、整體彎曲 (macrobend)。在這類光能損失通常由於光束傳播時，由於各種可能彎曲造成光束無法按正常路線前進，導致一部份光束穿過外層離開光纖，造成光損失。

上述的光纖損失皆因波長而改變，我們可以藉由選擇適當的工作波長（operating wavelength）來將這些損失減到最低。以本研究所使用波長在 1550nm 附近為例，其光纖損失大約在 0.16dB/km 。

2.2.4 光纖光柵感測器

光纖光柵的製造是利用高能量同調雷射在光纖曝光造成折射率永久改變，成為一系列週期為 Λ 的明暗條紋，此稱之為光纖光柵(Fiber Grating)。當一寬頻光耦合進入此一光纖時，除了滿足布拉格條件(Bragg condition)的特定波長，其餘波長都會因為相位差而相消。

布拉格反射波長 λ_B 為

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (2-6)$$

n = 光纖纖心的有效折射率

Λ = 折射率週期性改變的間距

圖 2-18 為光纖光柵構造示意圖，光柵中的週期明暗條文類似在光纖中製造一系列透鏡組合，當寬頻光束通過這些透鏡組合時，將會造成某些特定頻率光波被反射回發射端，而其他頻率光波則繼續向前傳導，而這些透鏡的間距不同，則被反射的光波頻率亦不相同。圖 2-19 為其作用示意圖，左下角為入射光的頻譜，中間為穿透光纖光柵後的光頻譜，右下角實線為反射光波的頻譜，穿透光與反射光頻譜

疊加即為原始的入射光頻譜。

2.2.5 應變與波長飄移關係

如承受 $\Delta\varepsilon$ 的光柵，當光柵受到外力產生應變時，造成原本間距 Λ 的改變增加量為 $\Delta\Lambda$ ，帶入(2-4)式可以得到

$$\Delta\lambda_B = 2n\Delta\Lambda \quad (2-7)$$

根據應變的定義

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (2-8)$$

得到

$$\Delta l = \left(\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}\right)l = \left(-\frac{2n}{\lambda_B}\right) \times l \quad (2-9)$$



因此

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (2-10)$$

此外，應力施加產生應變以後，不只是反射回來的 λ_B 會改變，光纖的有效折射率 n 也會同時改變。因此上式應該被修正為

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K \frac{\Delta l}{l} = K\varepsilon \quad (2-11)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{K \times \lambda_B} \quad (2-12)$$

最後造成圖 2-19 右下角頻譜圖中虛線部分的反射頻譜，藉由圖中虛線與實線的反射頻譜尖峰值變化量，即可正確獲得光纖光柵所承受應變大小。

2.2.6 溫度與波長飄移關係

當光纖光柵受到溫度變化時，波長飄移量可由下式表示

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\xi + \alpha) \times \Delta T = K_t \times \Delta T \quad (2-13)$$

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

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

K_t = 溫度敏感係數

布拉格波長飄移並非完全線性，在高溫時溫度變化會使波長飄移較為顯著，因為在 ξ 在 150°C 約為 $6.9 \times 10^{-6} / 1^\circ\text{C}$ ，450°C 時則變為約 $9.6 \times 10^{-6} / 1^\circ\text{C}$ ，而熱膨脹係數 $\alpha = 0.55 \sim 1.1 \times 10^{-6} / 1^\circ\text{C}$ 。然而在室溫條件下，1°C 的溫度變化約使得布拉格飄移約 $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{ nm}$ 。

2.2.7 光纖披覆層(Coating)之影響

光纖除了中間的核心(core)和外層(Cladding)之外，製作上常會加上一披覆層(Coating)避免光纖損傷和直接暴露於環境中。披覆層兩種最常使用的材質為acrylate和polyimide，polyimide的披覆層較

polyimide材質薄，且polyimide(300°C)較acrylate (100°C)能抵抗較高的溫度。但polyimide材質的化學耐久性卻較acrylate材質來得差。

對於光纖光柵的應變量測而言，因為光纖外有此披覆層的存在，所以光纖光柵與其黏貼物體間之黏著力就變得極為重要。若是當光纖與其披覆層或披覆層與黏貼物體之間有滑動之情況產生，則所量測到的應變讀數將不會是正確的。Nath et al. (1991)觀察到的確 polyimide 材質的披覆層不論對光纖本身或黏貼物體間皆有夠強的黏著力。而 Roberts and Davidson (1991)則發現 acrylate 材質的披覆層對光纖本身的黏著力不如對黏貼之物體。Carman and Sendekyj (1995)建議對於需承受較大應力的情況，還是將介面的剪力強度量化加以瞭解，才能對於此問題加以釐清。



2.2.8 偏斜儀之研究

陳至揚(2001)論文中嘗試以傳統傾斜儀為概念，結合光纖光柵系統，研發出光纖光柵感測偏斜儀，如圖 2- 20 所示。偏斜儀之兩端各為一剛性桿件，桿件各上附兩組滑輪，使偏斜儀能沿著傾斜管中之凹槽滑入傾斜管進行觀測。兩剛性桿件中以一得爾林之塑鋼材料連接，將 FBG 黏貼於此得爾林材料上。利用 FBG 受拉伸張時反射的波長增加，反之受壓縮短時則反射波長減少的性質。當偏斜儀滑入傾斜管中

時如圖 2-21，剛性桿件藉由兩組滑輪於溝槽中上下移動。在傾斜管因地層滑動而產生變形，藉由中央的感測元件彎曲而產生反射波長的改變，量測到傾斜管彎曲的變化量，再套用三次仿樣法求出傾斜管在地層中變位彎曲的情況。

陳至揚(2001)所研究試驗之偏斜儀為手拉式單節的偏斜儀，其於論文中並提出，可將偏斜儀串接置於現地做連續性自動化監測的提議，如圖 2-22 所示。本研究承接其構想，致力於利用光纖光柵其波長改變與應變間精準的關係，發展出一套適於自動化地滑監測的儀器，促使土木工程監測方法自動化與精確度的提升。



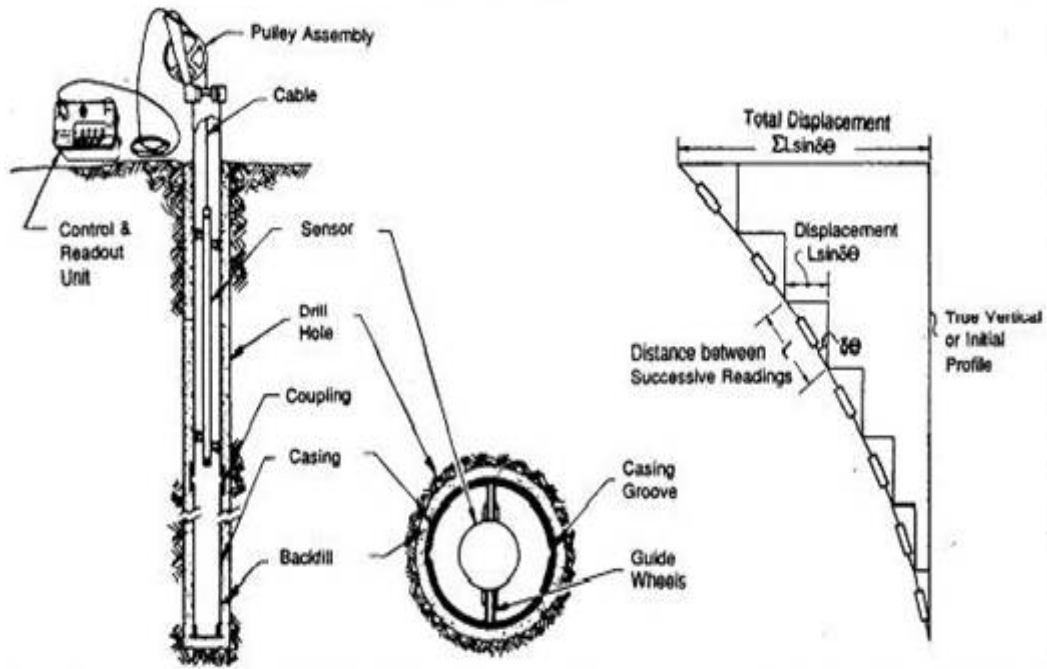


圖 2-1 測傾管(IP)及計算示意圖

(Gordon et al., 1988)

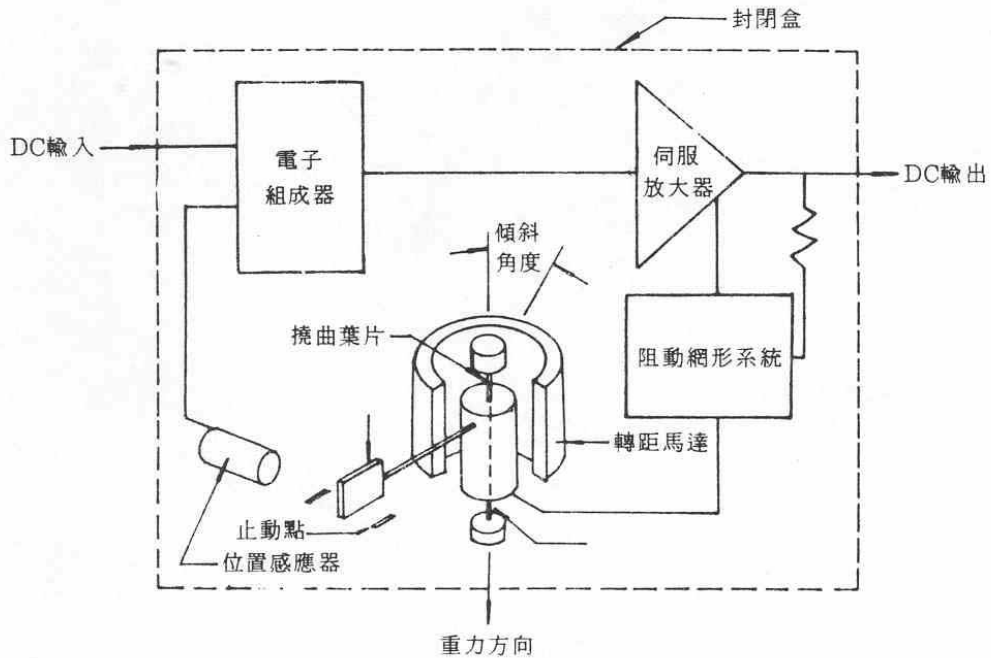


圖 2-2 伺服加速度傾斜儀系統構造示意圖

(摘自地工技術,1985)

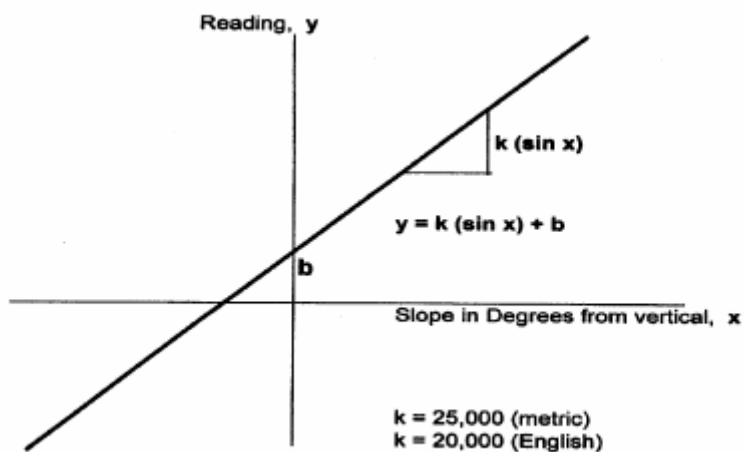


圖 2-3 偏心漂移(bias-shift)誤差來源示意圖

(摘自 Mikkelsen, 2003)

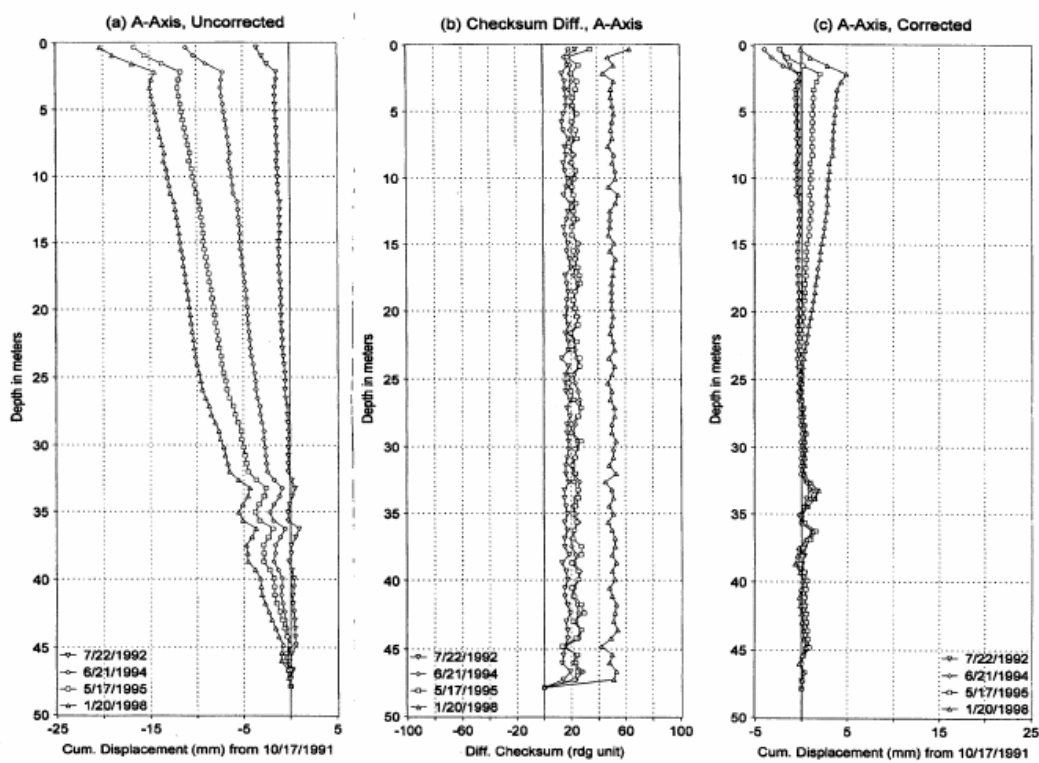


圖 2-4 Bias-shift 修正

(摘自 Mikkelsen, 2003)

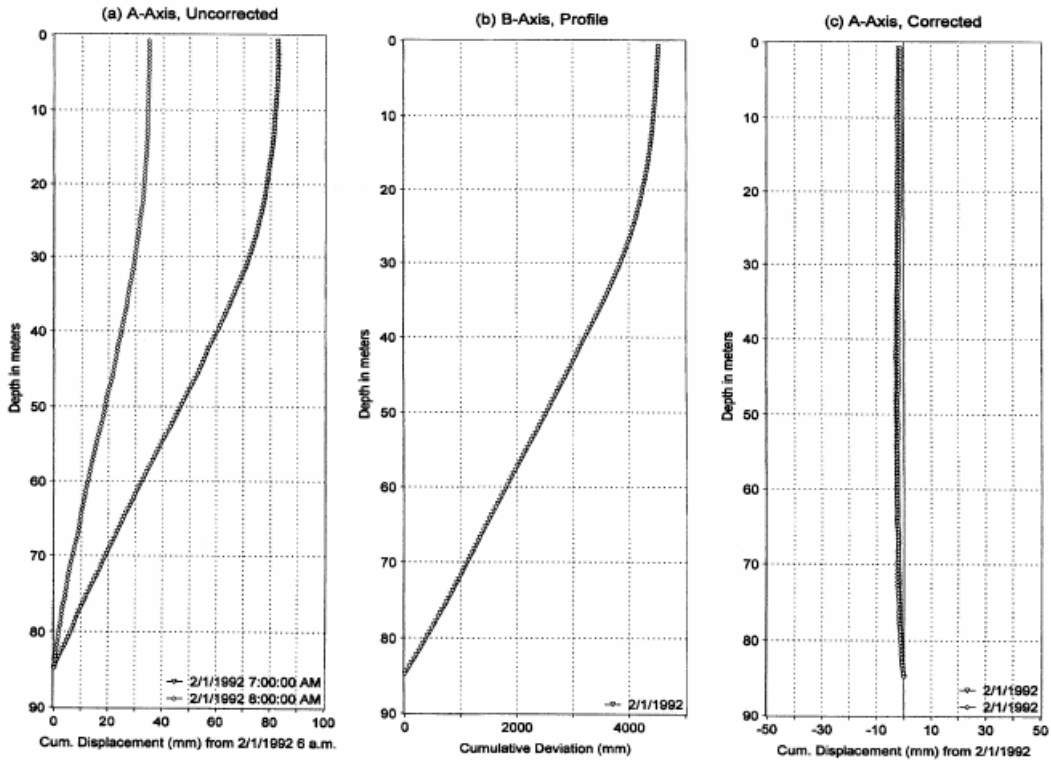


圖 2-5 不同儀器所造成的 Rotation error

(摘自 Mikkelsen, 2003)

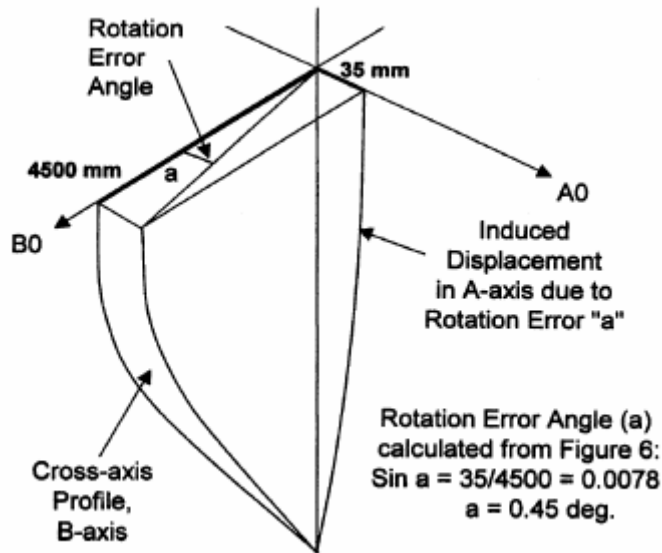


圖 2-6 Rotation error 與儀器軸心傾斜示意圖

(摘自 Mikkelsen, 2003)

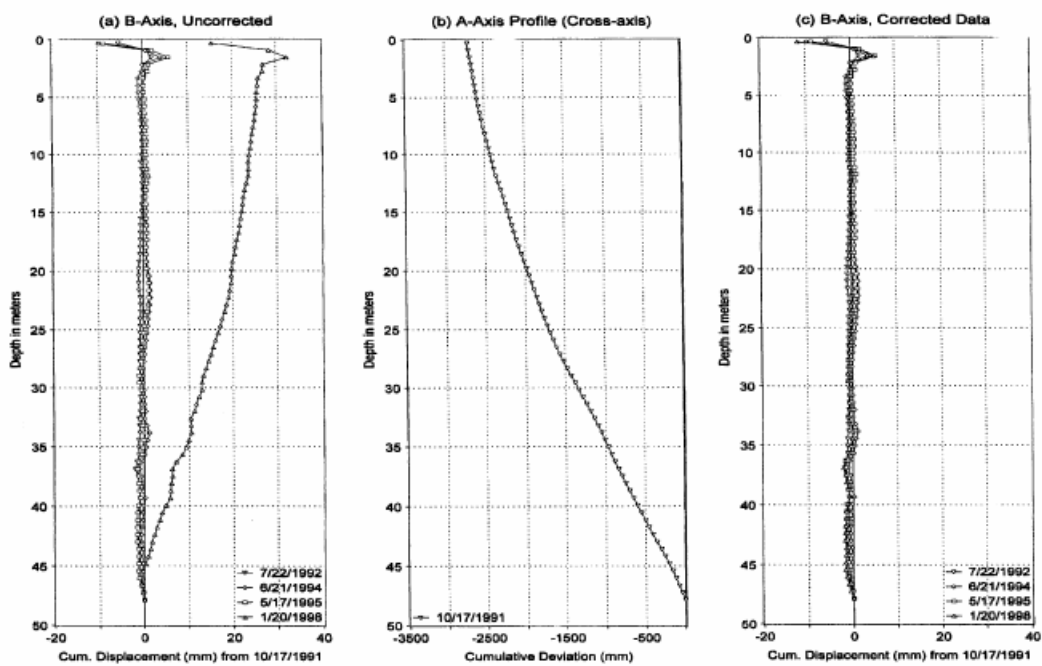


圖 2- 7 Rotation error 修正

(摘自 Mikkelsen, 2003)

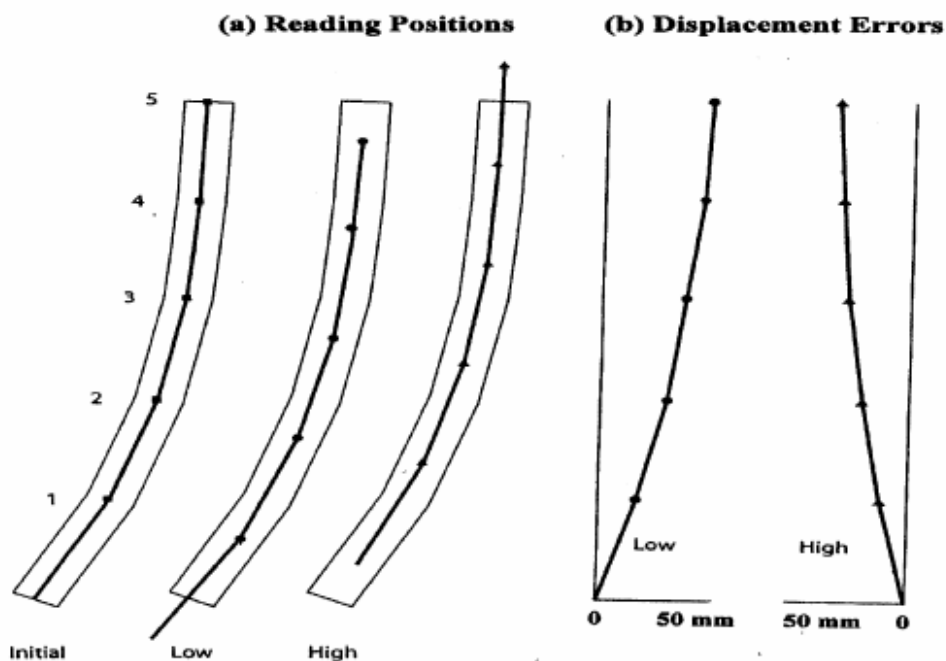


圖 2- 8 Depth-position error 來源

(摘自 Mikkelsen, 2003)

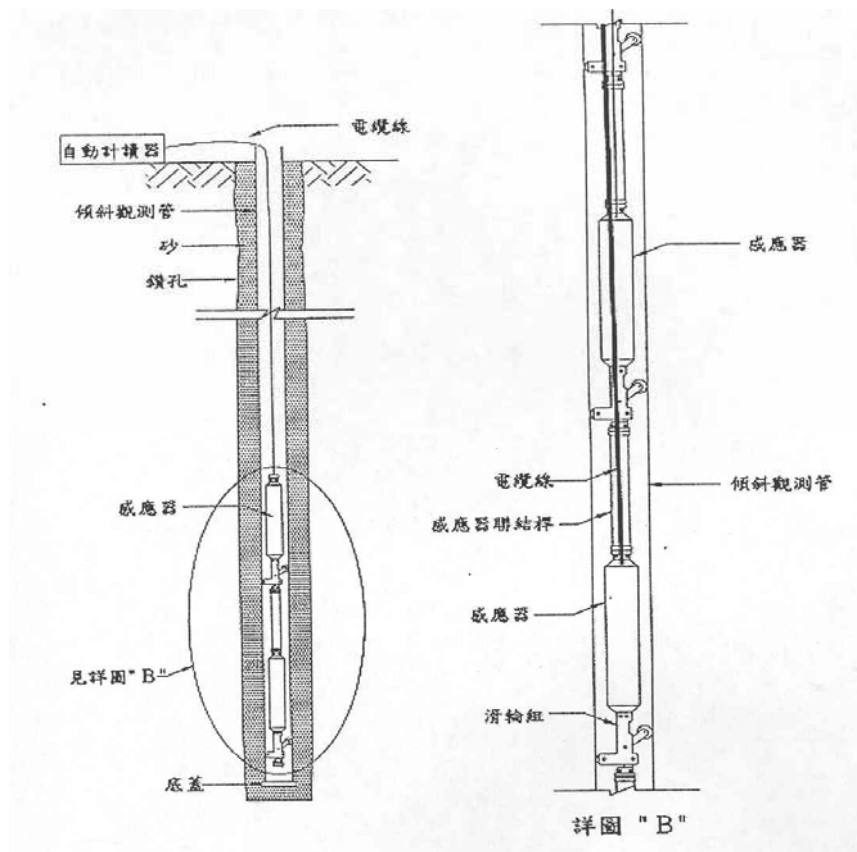


圖 2-9 定置型傾斜儀裝設示意圖

(摘自李秉乾等, 2003)

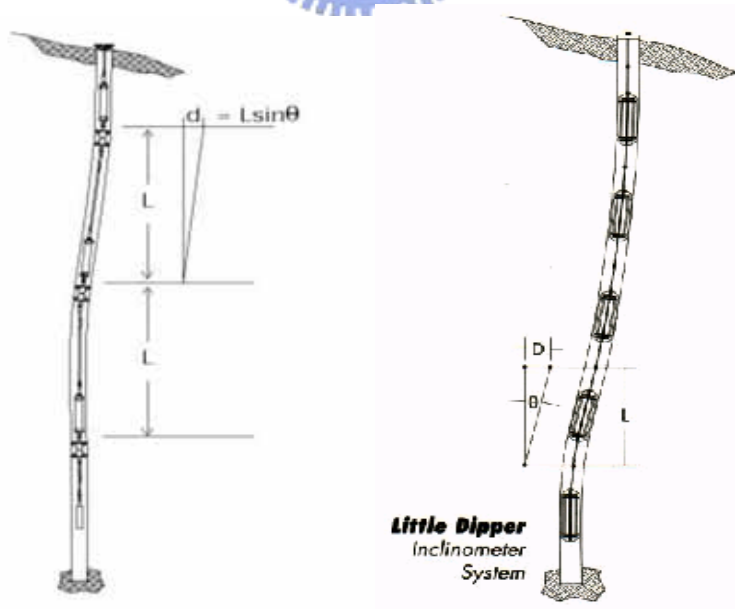


圖 2-10 孔內測傾儀(IPI)示意圖(左)剛性連桿 (右)柔性連桿

(摘自交大防災中心, 2005)

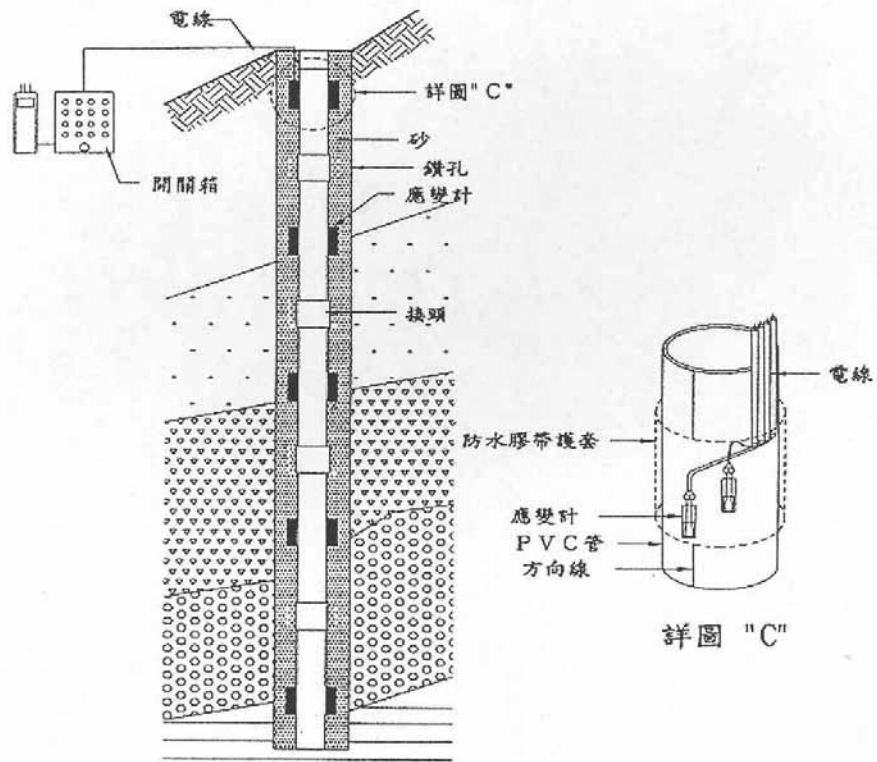


圖 2-11 管式應變計裝設示意圖

(摘自李秉乾等, 2003)

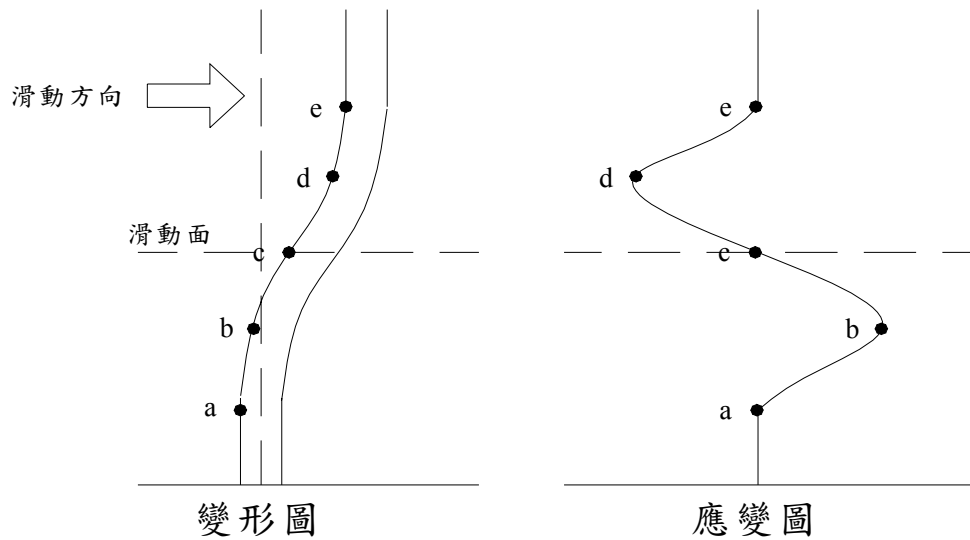


圖 2-12 應變管變形與應變值相關係圖-S 型應變曲線

(摘自陳水龍, 1992)

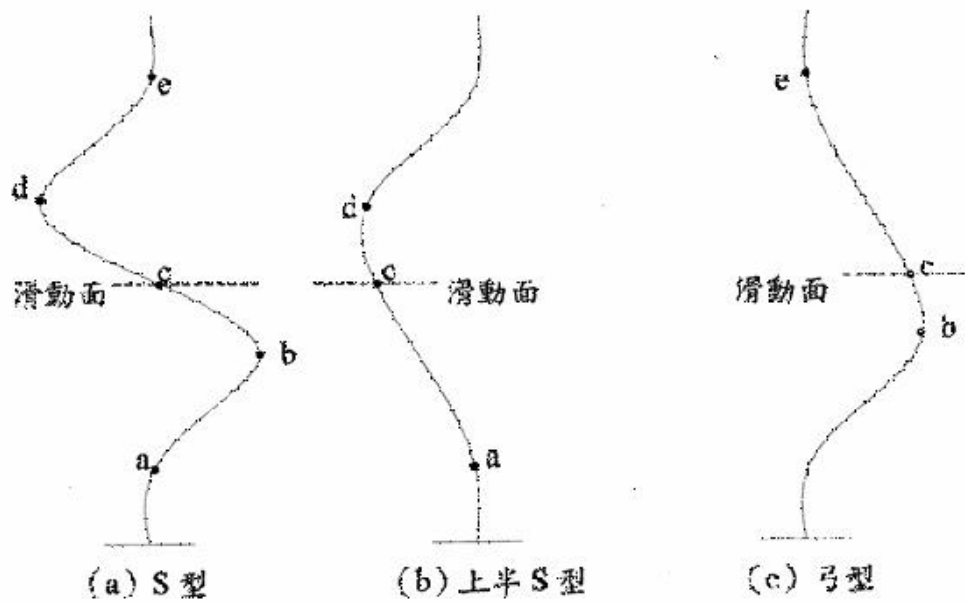


圖 2-13 「S」型、「上半 S」型與「弓」型（下半 S 型）應變圖形

與滑動面位置關係圖 (摘自陳水龍, 1992)

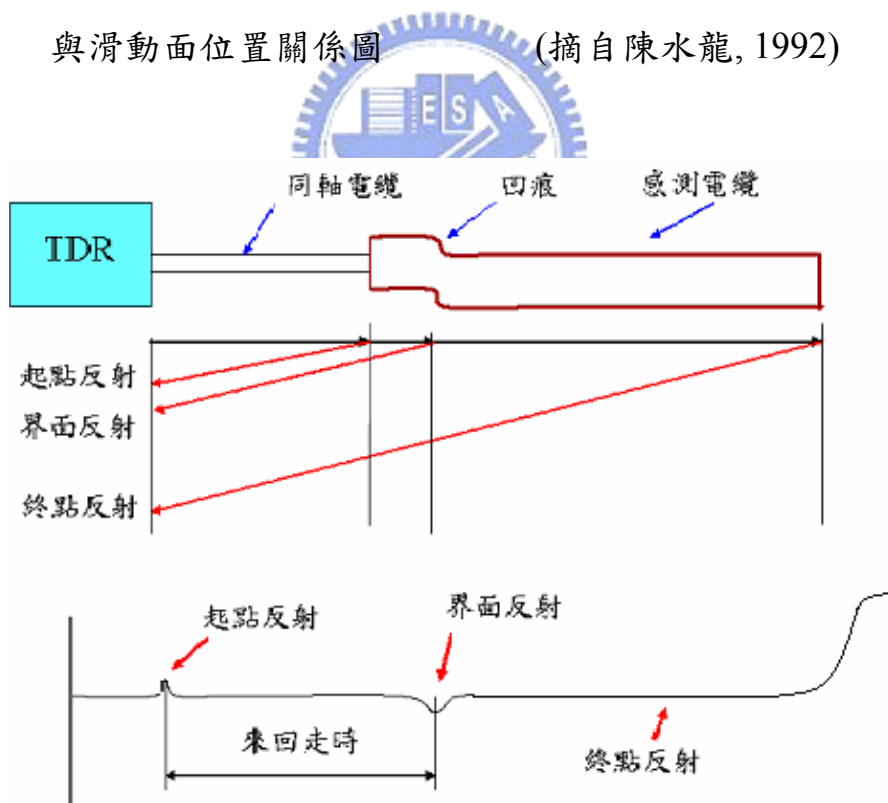


圖 2-14 變形錯動感測器原理示意圖

(摘自交大防災中心, 2005)

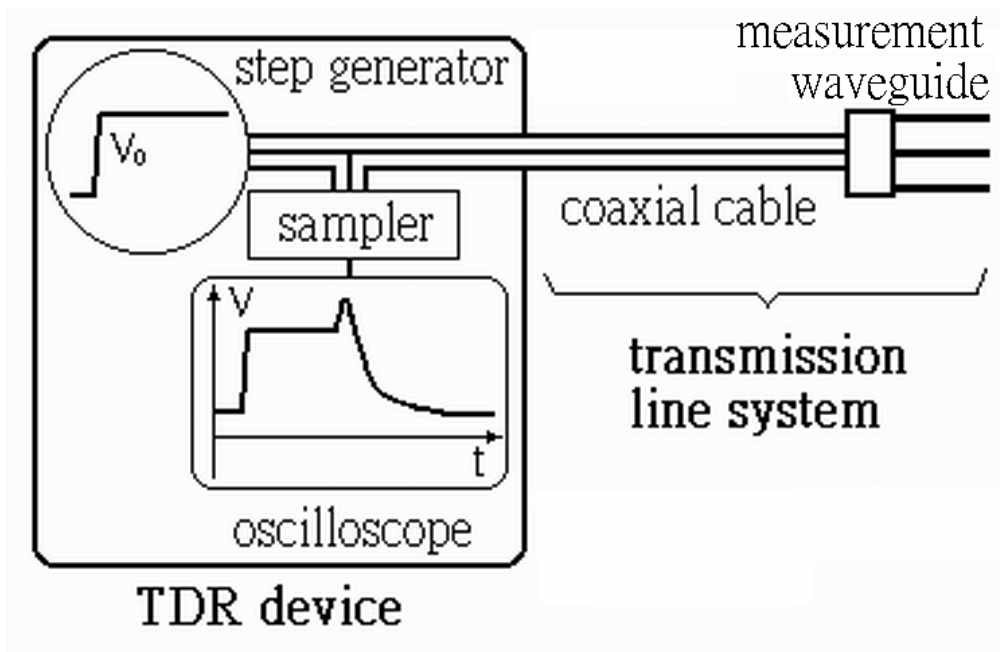


圖 2- 15 TDR 儀器簡圖

(摘自交大防災中心, 2005)

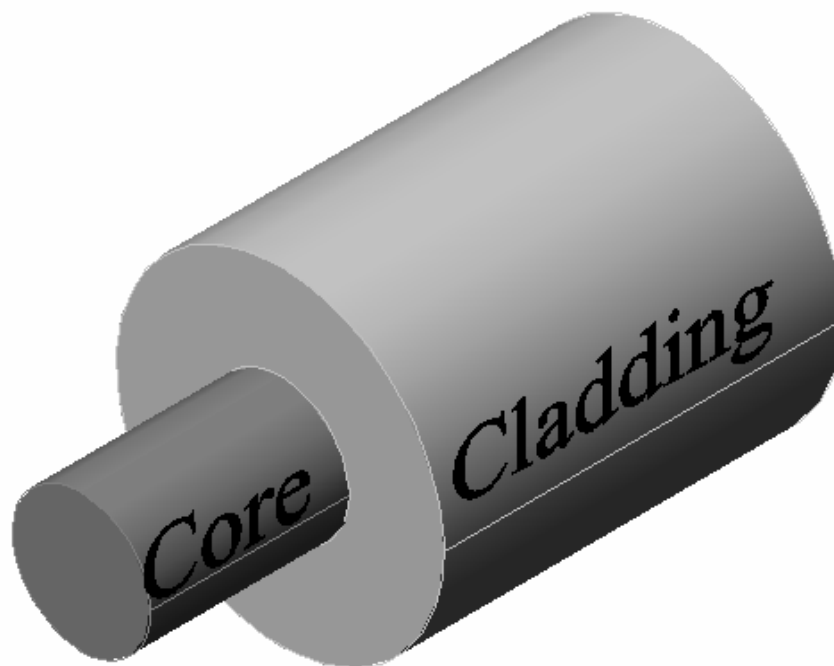
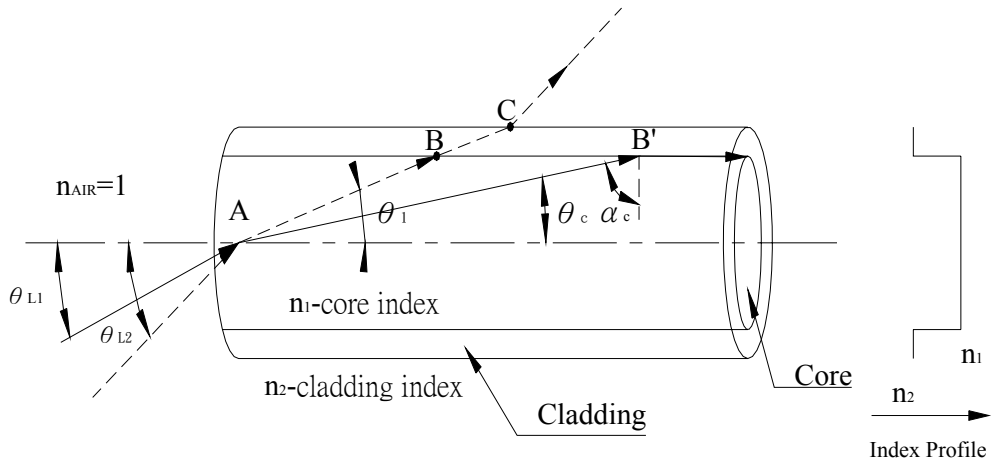


圖 2- 16 光纖構造

(摘自簡旭君, 2003)



$$n_1 > n_2$$

θ_{L1} -Launch Angle that become θ_c

θ_{L2} -Launch Angle-unconfined ray

圖 2-17 跳躍折射率光纖中的光傳播圖

(摘自 Hecht, 1987)

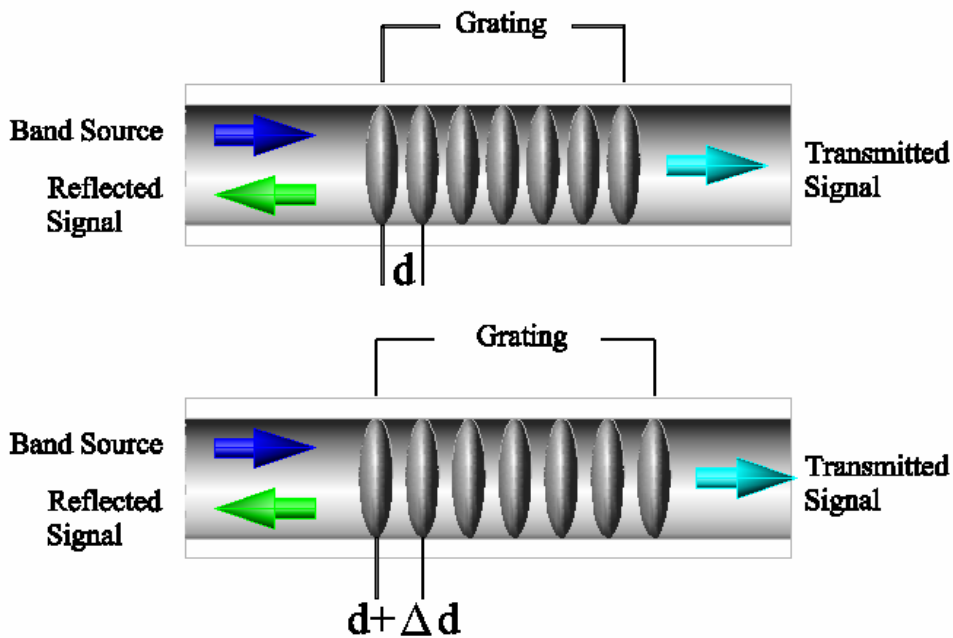


圖 2-18 光纖光柵量測原理示意圖

(摘自簡旭君, 2003)

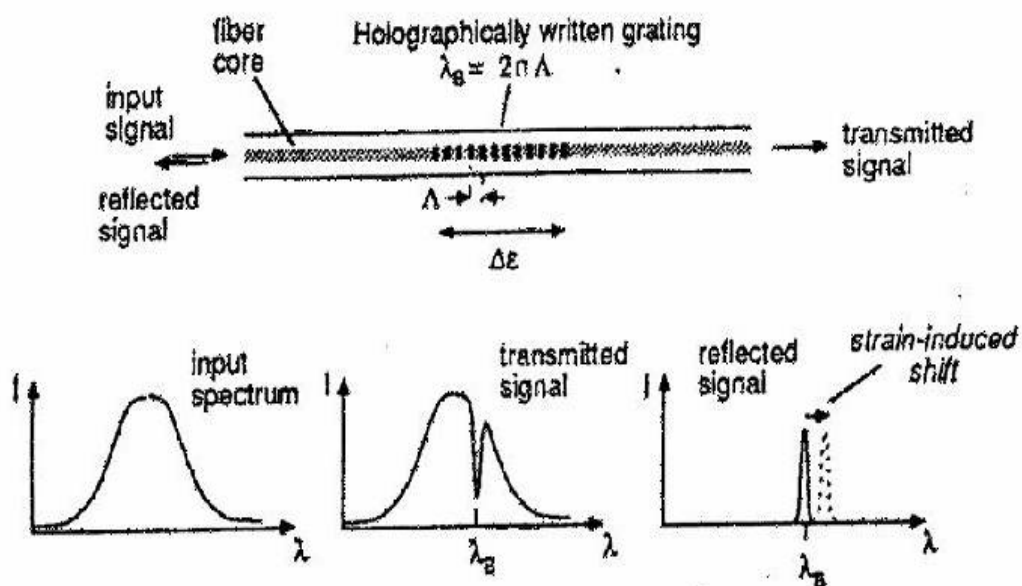


圖 2-19 光纖光柵感測器量測原理示意圖

(摘自 Kersey, 1993)



圖 2-20 光纖光柵偏斜儀

(摘自陳至揚, 2001)

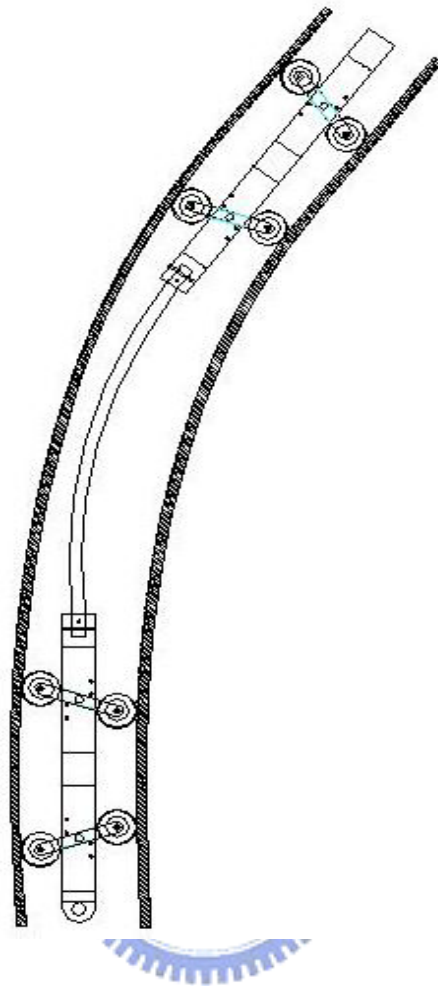


圖 2-21 偏斜儀在彎曲段彎曲情況示意圖

(摘自陳至揚, 2001)

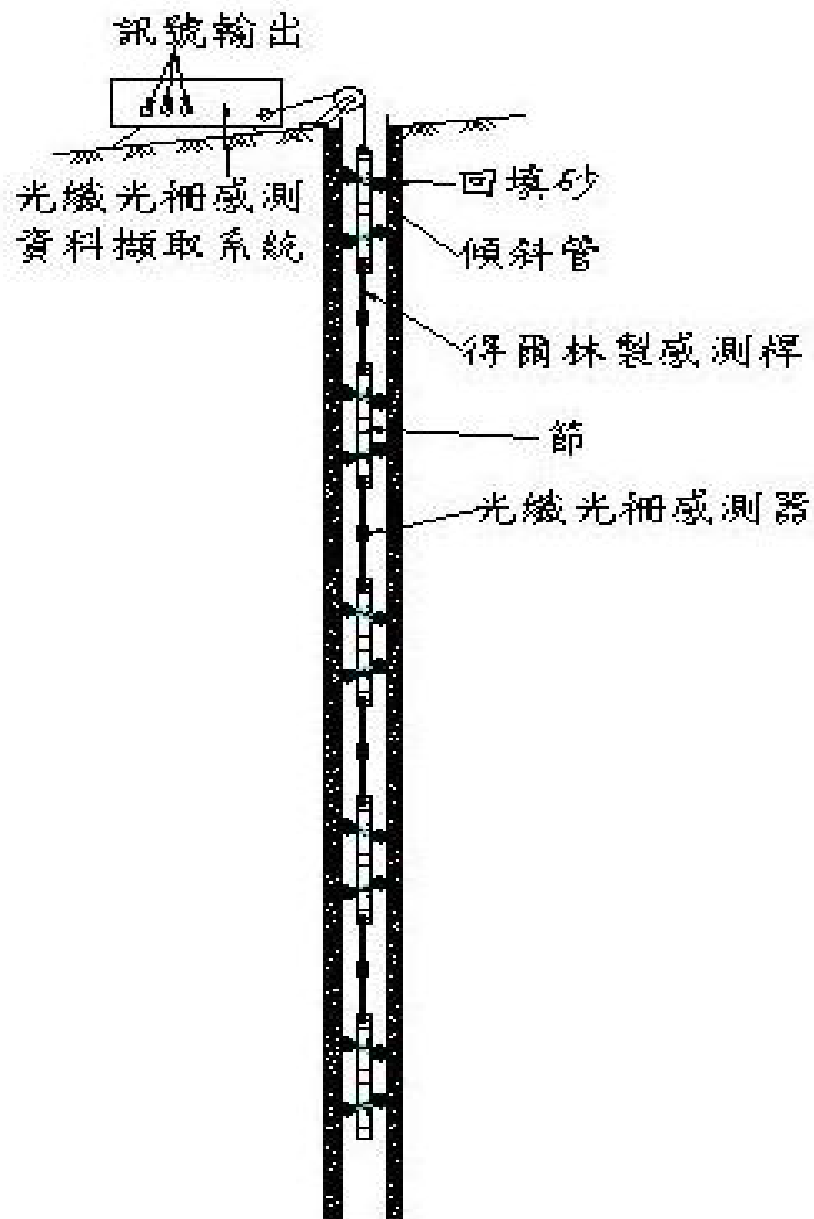


圖 2-22 偏斜儀串接使用示意圖

(摘自陳至揚,2001)

第三章 節理式光纖光柵感測器

3.1 試驗設備

在研發節理式光纖光柵感測器中，使用之主要儀器包括如下：

傳統傾斜儀

本研究所採用的手拉式測傾儀器 (Inclinometer Probe, IP) 為 slope-indicator 公司生產，如圖 3-1 所示。儀器規格如下：

傾斜儀長度：50cm

最小量測間距：50cm。

最大量測傾角度：與重力方向傾斜角最大 53° 。

工作溫度： $-20^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$

儀器解析度：0.02mm

重複性： $\pm 0.003^\circ$

量測精度：每次讀數存在 $\pm 0.25\text{mm}$ 誤差，或是相當 25m，累積 6mm 誤差 (slope-indicator, 2002)。

光纖光柵讀取儀

Fiber Bragg Grating Swept Laser Interrogator (FBG-SLI)

本研究採用 Micron Optical 製造，型號為 Sm420 之光纖光柵掃瞄

分析儀，如圖 3-2 所示。規格如下：

可量測頻道數(numbers of optical channels)：4

單一頻道最大 FBG 感測器數量：64

工作波長範圍：1525~1565 nm

波長精準度：一般 ± 5 pm，最大 ± 10 pm

解析度(resolution)：小於 1 pm (約 $0.8\mu\epsilon$)

重複性(repeatability)：一般 ± 2 pm，最大 ± 5 pm

掃瞄頻率(scan frequency)：108 Hz

最小 FBG 波長間距(minimum FBG spacing)：0.5 nm

所適用 FBG 規格：反射率(reflectivity) $>90\%$ 、反射光頂點以下 3dB 處

寬小於 0.25nm。

動態量測範圍(dynamic range)：25 dB

使用電源：110V 或 220V 交流電

工作溫度：10°C-40°C

接頭樣式：FC/APC

資料擷取卡：PC-CARD DIO48

電腦：IBM-X22 及所附微軟作業系統

光纖續接設備

光纖內之光傳播主要是利用光束在光纖內部進行全反射，使得光

訊號損失降到最低，然而由於光纖一般為玻璃製成，一旦斷裂並無法像電線一般續接，而必須將需要續接的兩個光纖核心斷面完全對準，並且將核心材料融合一體，才能使得續接所造成光耗損降至最低。續接光纖時所需設備包括：光纖用剝線鉗、切割刀、融接機及加熱器，如圖 3-3 所示，並應準備廢棄光纖用垃圾桶，收納所棄置光纖。

光纖融接機是利用放電將相互靠近光纖核心材料融化接續，因此在續接前應保持融接部位清潔，以避免光束通過時產生過大損耗；在續接完成後，光纖表面並無披覆層保護，此時光纖無法承受稍大拉力或剪力，而重新包上披覆層也較為麻煩，因此在狀況允許下，通常使用熱縮套管來替代被剝除披覆，所以一般融接機均附有加熱設備，方便在續接完成後立即施做，避免再次斷裂。

光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)

本研究採用布拉格反射波長(λ_B)介於 $1527nm$ 至 $1563nm$ 、反射波長寬($\Delta\lambda$)小於 $0.3nm$ 、反射率(reflectivity)大於 99.5% 之光纖光柵。

螺旋測微計 (Micrometer)

如圖 3-4 所示，此裝置目的作為應變管變形模擬時，施加變形量之用，其底座上鑽有間距 25 mm 、直徑 6 mm 螺孔，方便固定。上方基座亦鑽有直徑 6 mm 及 2 mm 螺孔，可以固定各式夾具。此螺旋測微計精度為 0.001 mm 。

3.2 節理式光纖光柵感測器之設計

本研究所研發、試驗用之節理式光纖光柵感測器設計上乃是以 1m 為一個單元，而一個單元中又主要分為兩個部分：(1) 量測節理以及 (2) 延伸節理。儀器設計示意圖如圖 3-5 所示

(1) 量測節理：此量測節理之設計是將一長 205mm，直徑約 10mm，使用 ABS 製成之柔性軟管(flexible tube)，相隔 180 度加工刻畫一寬及深各 1mm 之 V 型直線溝槽，如圖 3-6 所示，再將兩 FBG 成對黏貼於兩側所刻畫之 V 型溝槽中，黏貼好之情況如圖 3-7 所示此部分稱為變形軟管。然後在此應變感測元件兩端加裝鋁片或其他剛性材料，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。以上部分合稱為量測節理，如圖 3-8 所示。

量測節理上裝有一不銹鋼金屬片(導輪)如圖 3-9 所示，其大小和形狀與傳統傾斜管及其內部之凹槽相匹配，藉由彈簧之拉力來保持支架與傾斜管凹槽之密合，導輪之目的為利用彈簧反彈之力，將量測節理的位置確定在傾斜觀測管的中間，因此不論傾斜觀測管如何位移，管中之儀器將會隨之位移，因此達到量測地中位移之目的。

量測節理內安裝一組與導輪所在溝槽的平面垂直之軸承，安裝在量測節理之中心點，其目的在於限制量測節理只能以軸承為中心，與

導輪所構成的平面平行之方向旋轉，使此儀器只能以軸承為原心旋轉此自由度，增加結果分析之可靠度。如圖 3-10 所示，

變形軟管之一端以雙螺絲固定於量測節理內，另一端插入一剛性短棒，並束制於於量測節理上一橢圓之孔上，如圖 3-11 所示，使軟管可自由的於橢圓孔中滑動，而變形軟管之中心始終於節理之中心密合。由於變形軟管可自由的延伸，因此可解除感測器受到重力與摩擦力對感測器之影響。

(2) 延伸節理：延伸節理為兩剛性鋁片所組成，不具有任何自由度，其目的為根據量測需要改變量測節理間之距離，以及連接兩量測節理，如圖 3-12 所示。延伸的方法為利用鋁片兩端所鑽之數組孔徑 6mm、相距 25mm 的孔，藉由螺絲與量測節理上之孔位鎖住做接續的動作。由於延伸節理並不具有任何自由度，必須與量測節理之部分有如同一剛性體，因此一接續部分採用四顆螺絲，並且在兩剛性鋁片中間加上內徑剛好容許螺絲通過之中空金屬管做支撐，避免因為螺絲鎖緊而造成的支架向中間擠壓而變形。由於有支持柱之支撐所以可以將螺絲盡量所緊，使得量測節理與延伸節理之間無任何的自由度，因為若是此兩部分有相對的位移，則軸承之角度改變量會因為此兩部分產生相對的位移而減低了軸承角度的旋轉量造成誤差的產生。而在延伸節理上加鑽數組孔位，其優點及用意為能夠稍微的改變一單元的長

度。以 100cm 一單元為例，則可改變為最長 110cm、最短 95cm 之單元長度，不僅能視需要小幅調整每一單元的長度，還能使兩量測節理間傳遞光訊號之光纖能適當的收藏於支架之間，進而擁有能整齊收藏訊號線、使光訊號有最小之衰減以及大幅降低裝設時因線路暴露於外而造成斷裂之可能性。

節理式光纖光柵感測器可在室內預先將量測節理與延伸節理交互連接在一起，可連接為長約 2~3m 為一長度，其長度受限於運輸工具之長度。運送至現場後將各段逐一組裝後即可放入傾斜管中。傾斜管因地層滑動而發生扭曲時，經由量測 FBG 之波長改變量，再藉由事先於室內標定波長改變量與角度變化之關係，計算並累積節理式光纖光柵感測器因地層移動而造成之彎曲角度，進而計算地層之移動量。

3.3 量測原理

節理式光纖光柵感測器量測變形是利用變形軟管的變形產生讀數，變形軟管與剛性支架組合成量測節理。變形軟管一端與支架固定，另一端為可於支架縱向方向自由滑動之滑動端。當變形產生時，變形軟管之受力行為就如同懸臂樑受到一點荷重之行為一般，如圖 3-15 所示。貼於 ABS 變形軟管兩側之 FBG，因為變形軟管受彎曲而

造成中性軸兩側的 FBG 一側受拉伸長，另一側受壓縮短，受拉側擷取到的反射波長增加，受壓側擷取到的反射波長減少，藉由所改變的波長量比對波長改變量與軸承轉角的標定係數，即可反算出此單元量測節理因傾斜觀測管彎曲而旋轉的角度，經過計算得到位移量。

此儀器的量測原理與傳統傾斜儀有所不同。傾斜儀量測的是儀器與重力方向之夾角，可量測出與重力方向之絕對角度。而此儀器所量測得到的是變形前後的反射波長值，再藉由變形標定係數求得軸承角度改變量來計算變形量。因此量測到的是相較於初始值相對的傾斜角度改變，而非如同傾斜儀一般與重力方向絕對的傾斜角度改變。

3.4 材料及製作之改進

(1) 軟管材料選擇：

陳至揚(2001)中提到的偏斜儀設計，用來感應變形之軟管採用的材料為得爾林的塑鋼類材料。由於偏斜儀之設計，中間之軟管尚須承受下端之重量，故選擇材料較為堅硬且有韌性之得爾林。本設計之軟管並無此需要。最重要的是，得爾林與黏著劑之黏著效果不佳，對於剝離力之抵抗不足，因此會出現 FBG 與軟管材料脫離之情況。因此本設計將軟管之材料改以 ABS 材料取代得爾林，經過測試黏著之效果足以抵抗剝離力，使 FBG 與 ABS 之材料緊密結合，且 ABS 材料

之軟管柔軟度較得爾林材料為佳、變形量較大，因此光纖光柵之波長改變也較明顯。

(2)FBG 黏貼：

由於 FBG 於玻璃核心(Core)及外層(Cladding)之外仍有一壓克力材質之披覆層(Coating)，當將 FBG 黏貼在 ABS 軟管上時，黏著劑所包覆黏著住的為其外層之披覆層。當 FBG 受力伸長或縮短時，此披覆層與核心間可能會有相對的滑動，造成其潛變之問題。為了降低潛變之效應，因此選擇將黏貼 FBG 時將披覆層去除，直接黏貼於 ABS 軟管上之作法，此作法能大幅的降低潛變效應以及 FBG 反應穩定之時間。



(3)黏著劑選擇：

簡旭君(2003)中提到其所使用之黏著劑為 Micro-Measurement 公司所生產 M-BOND 200 環氧樹脂。經試驗此黏著劑較硬也較脆，當軟管受彎時黏著劑會產生龜裂，並可聽見裂開的聲音。由於貼於軟管上的 FBG 已將其光柵部分的披覆層去除，故黏著劑直接包覆於光柵之外，當黏著劑受彎曲而開裂後，會造成黏著劑傳遞應力不均勻。由於光柵之部分長約 2~3cm，若光柵整體受力不一致，會使光纖光柵讀取儀擷取到兩個以上之波峰值。受力均勻之 FBG 其波形如圖 3-13 所示，若是出現多波峰之波形則如**錯誤! 找不到參照來源**。所示。經過

測試與選擇採用由 Cyberbond 公司生產，型號為 3077 的瞬間接著劑。此黏著劑硬度較低，容許應變程度較大，在此儀器設計之使用範圍內不會出現龜裂之情況，且與 FBG 及 ABS 軟管相互之黏著力足夠，因此改使用此黏著劑作為黏貼之用。

(4) 黏貼時預拉 FBG：

當 FBG 貼於物體上受彎曲時時，若光柵距離伸長而導致波長增加時，其伸長量與波長增加量呈現良好的線性關係。但若為縮短時，由於光纖柔軟且細小，縮短量與波長減少量之關係則有較不線性之可能。因此，本研究採用製作時事預拉的方式來克服此一問題。在將 FBG 黏貼於 ABS 軟管上時，將 FBG 預拉，使其波長先增加約 1500~2000pm，因此當 FBG 縮短時，其波長會在彈性範圍內線性減少。預拉的方式如圖 3-16 所示，預拉時將光纖一端黏貼於一 PVC 管上，另一端懸掛一重物使 FBG 拉伸，再將 FBG 黏貼於 ABS 軟管上，待黏著劑固化即完成黏貼。此一改進對量測節理的標定其線性程度有良好的效果。

(5) 軸承設計：

本儀器早期的設計並未有軸承之設計，單元間之連接全仰賴變形軟管與兩側單元之固定，因此儀器之自重皆依靠軟管承受，因此當變形時軟管除受到傾斜管變形影響，同時也受到自重的影響，所以波長

改變之因素則非單純受變形之原因。因此將單元間連接方式改為剛性之鋁片，在兩單元的鋁片銜接處加入一軸承，再將變形軟管改為一端固定一端滑動的設計。在變形時剛性支架相互夾角的改變，因軟管一端為滑動端，所以當夾角改變時軟管可依其長度改變量自由滑動，因此不會受到擠壓，而自重也由剛性支架承受，而不會影響到變形軟管上。

(6) 變形軟管摩擦力降低：

本研究所設計之節理式光纖光柵感測器，主要感測變形的機制在於利用ABS軟管的彎曲，造成貼於表面的FBG伸長或縮短進而造成波長之改變，再利用波長的改變量反推位移量。因此ABS軟管的受力行為對於量測有極大的關係。早先之軟管滑動端，束制方式為採用四顆塑膠螺絲間隔 90° 圍繞軟管設置，如圖 3-17 及圖 3-18 所示，利用其螺絲尖端固定軟管滑動方向，但當軟管滑動時螺絲與軟管間之摩擦力過大，因此當變形完成後需經過長時間的等待，方能將摩擦力逐漸釋放。後來將軟管中穿過一金屬棒，並於剛性支架上增加一橢圓形溝槽，將金屬棒穿過剛性支架，使金屬棒僅能於支架縱向滑動，此方法能大幅度降低摩擦力的產生使讀數能較快速穩定。

(7) 導輪設計：

本儀器之設計需每個量測單元不論傾斜管如何變形，皆能位於傾

斜管中間，才能適當的反映出變形的情況。因此導輪需有一足夠之彈力支持，使導輪能與傾斜管之溝槽緊密接觸，但又不能過緊，過緊則會使得導輪與溝槽之摩擦力過大，甚至無法以重力裝入傾斜管中，而且摩擦力也會對於試驗之結果產生不良影響。初期曾使用過 O-ring 及壓簧，但由於橡膠之材質，會有老化失去彈力之問題，而壓簧之設計會因壓簧上產生鏽蝕或附著物而使得彈力下降。最後採用利用兩側以彈簧拉住以產生拉力。此設計之好處在於彈簧儘管表面鏽蝕或有附著物，亦不會影響其彈力，改變彈簧之粗細及長度即可輕易的改變彈力大小。



3.5 橫向變形計算分析

本研究所設計之節理式光纖光柵感測器，由於一量測節理其兩端各有延長節理，故量測節理會較量測節理多一段，加上量測節理所量測的到之角度為兩剛性段藉由軸承旋轉之相對角度，因此有一基本假設。假設最下端之延長段為固定不動端，而接下來之量測節理量測到之旋轉角度為其上方延長節理所旋轉之角度。故計算上最底端之一截延長節理其位移量為零。

由於儀器設計上唯一可轉動的地方是量測節理之軸承，因此將一軸承至另一軸承之長度當作計算的基本單元長度。當計算某一量測節

理因角度改變而造成之位移時，將上方每一軸承位移前之位置相對於此一軸承之距離看做是一個向量，如圖 3-19 所示，點 3、4、5 相對於點 2 之距離皆可視為一向量，由於點 2 有一旋轉角 θ ，故將每一向量依此量測節理旋轉之角度旋轉同一角度，到達最後之位置。則此點之計算結束，再往上計算上一點之量測節理角度改變所造成之位移影響。此計算之方式與軟體 AutoCAD 中之”旋轉”此功能相同，亦即是當計算某一量測節理之角度改變時，及其上方之所有單元視為一個剛體，而此剛體依此量測節理之角度改變以軸承之位置為支點做整體的旋轉。



圖 3-20~圖 3-24 為利用 AutoCAD 依此一過程旋轉之分解說明，圖上之座標為 AutoCAD 中此軸承點所代表之座標。見圖 3-20，點 0~點 5 為一組五單元之儀器，其初始之位置於 I，假設此儀器受到一地層之滑動，造成其四個量測節理（點 1、2、3、4）由下而上分別改變一角度-10 度、+15 度、-9 度及+17 度（逆時針方向為正）。依此儀器的基本假設，最下端（點 0~點 1）為固定端，故點 1 之軸承位移為零。點 1 上方的四個單元因第一個軸承正時針旋轉 10 度而整個旋轉至位置 II。經過此過程由於點 1 之軸承角度旋轉所造成的位移改變已計算結束。如同上述之過程，如圖 3-21 所示，由於點 2 逆時針旋轉 15 度，點 3~5 也整體旋轉至位置 III。依此類推而上，計

算至最後移動至如圖 3-23 中的位置 V。

如圖 3-24 所示，計算完後儀器由位置 I 位移至位置 V，其兩位置座標之差值即為所求得之位移量。





圖 3-1 傳統傾斜儀(IP)

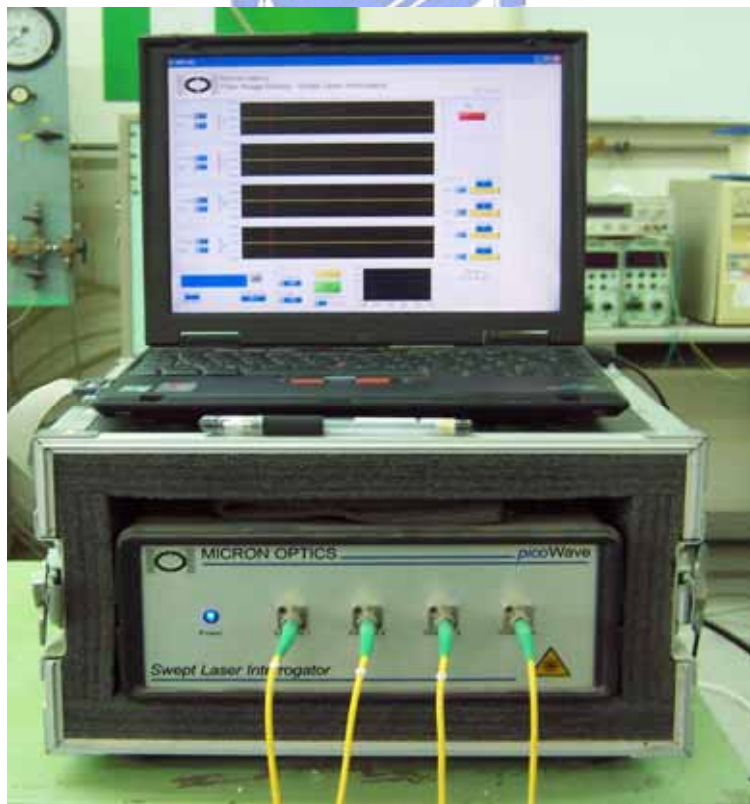


圖 3-2 光纖光柵讀取儀



圖 3-3 光纖融接設備

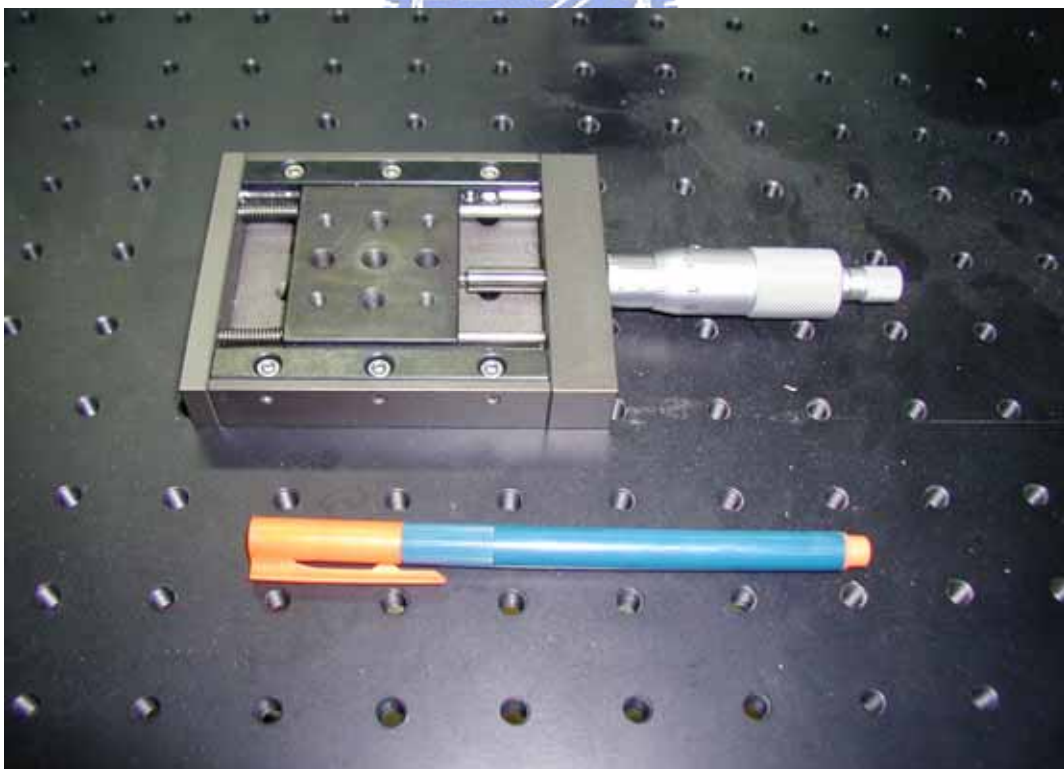


圖 3-4 螺旋測微器

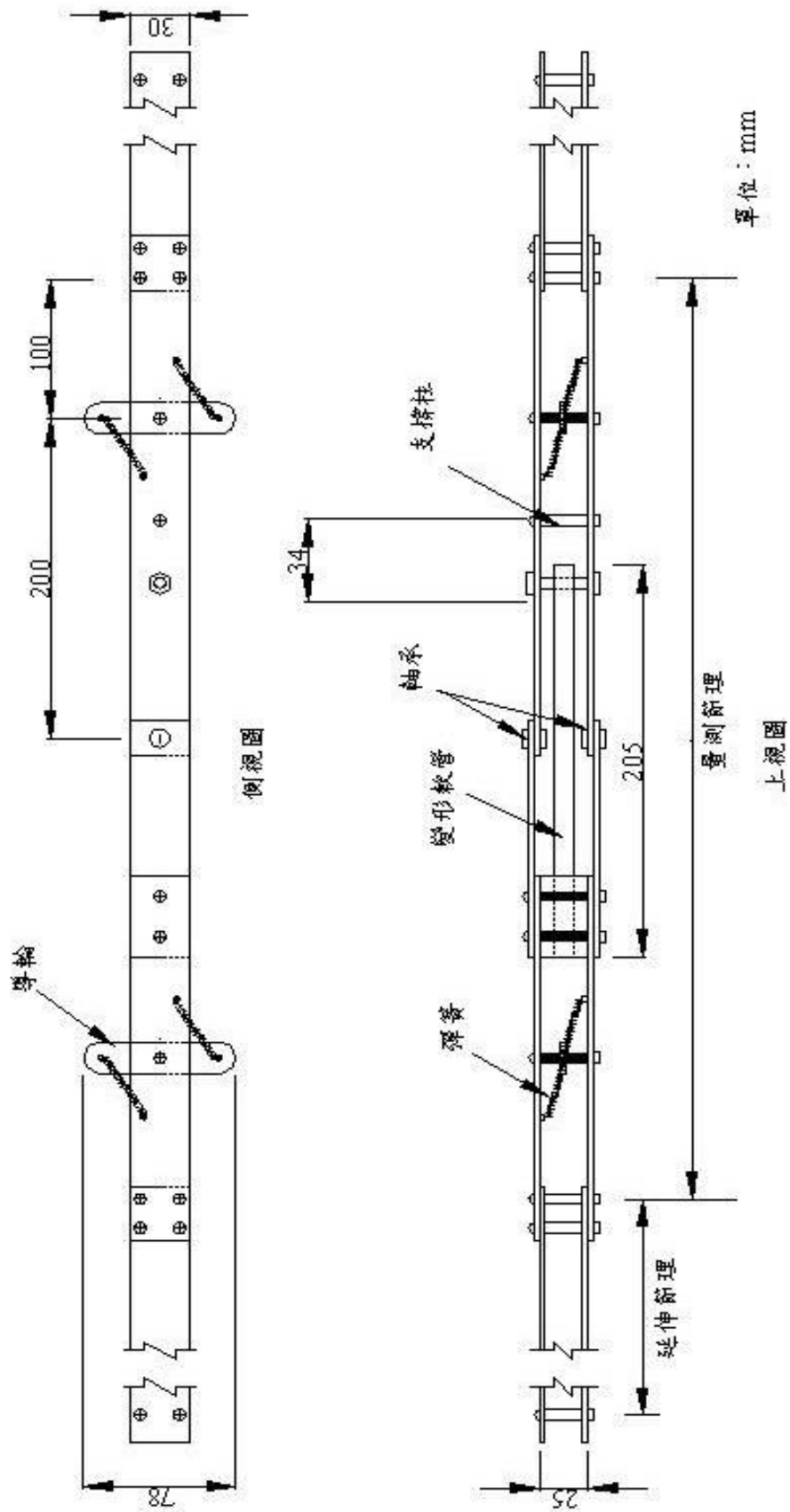


圖 3-5 節理式光纖光柵感測器示意圖



圖 3-6 ABS 軟管示意圖

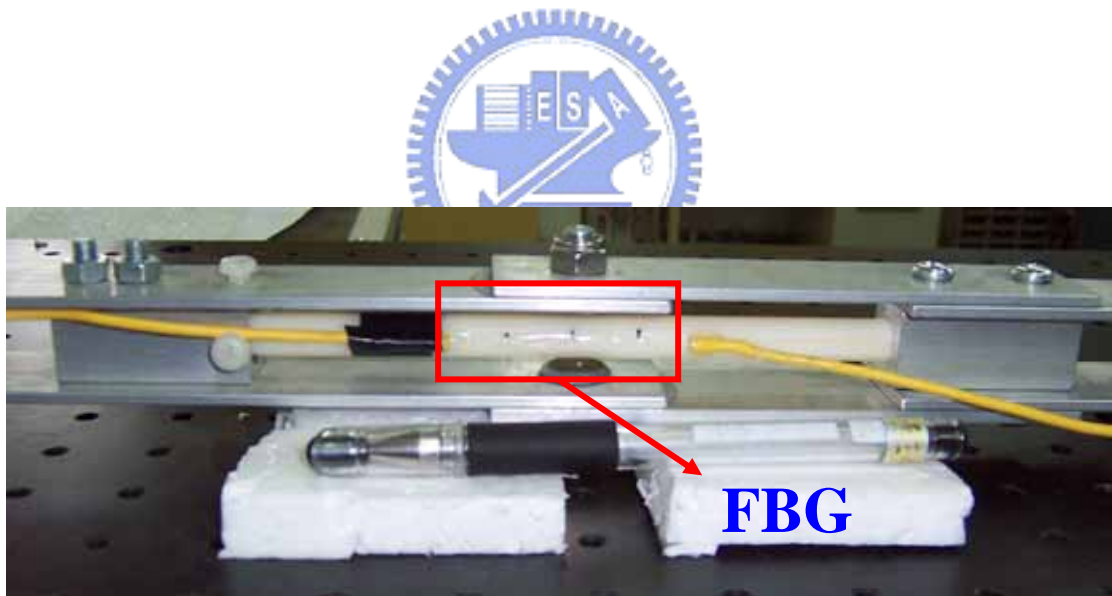


圖 3-7 黏貼完成之變形軟管



圖 3-8 量測節理

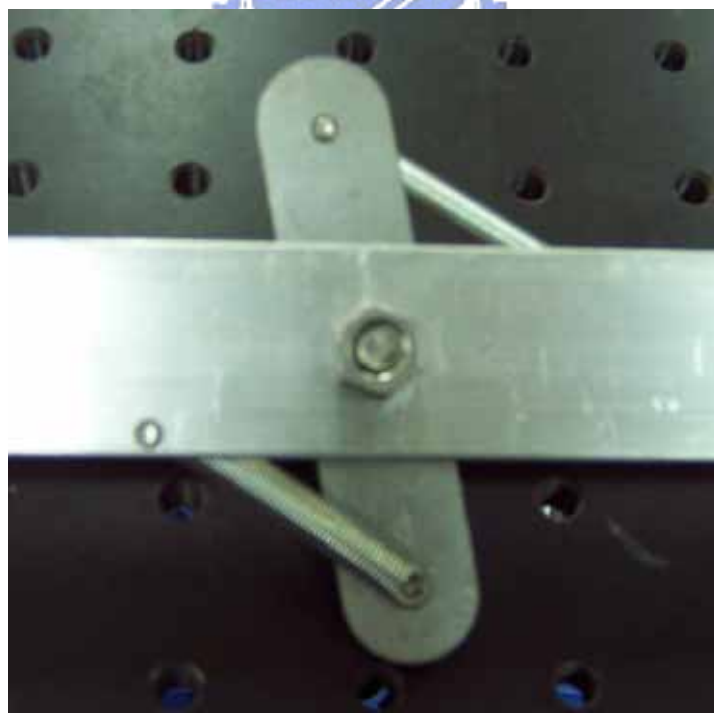


圖 3-9 導輪實物圖



圖 3-10 軸承及滑動端的橢圓形孔

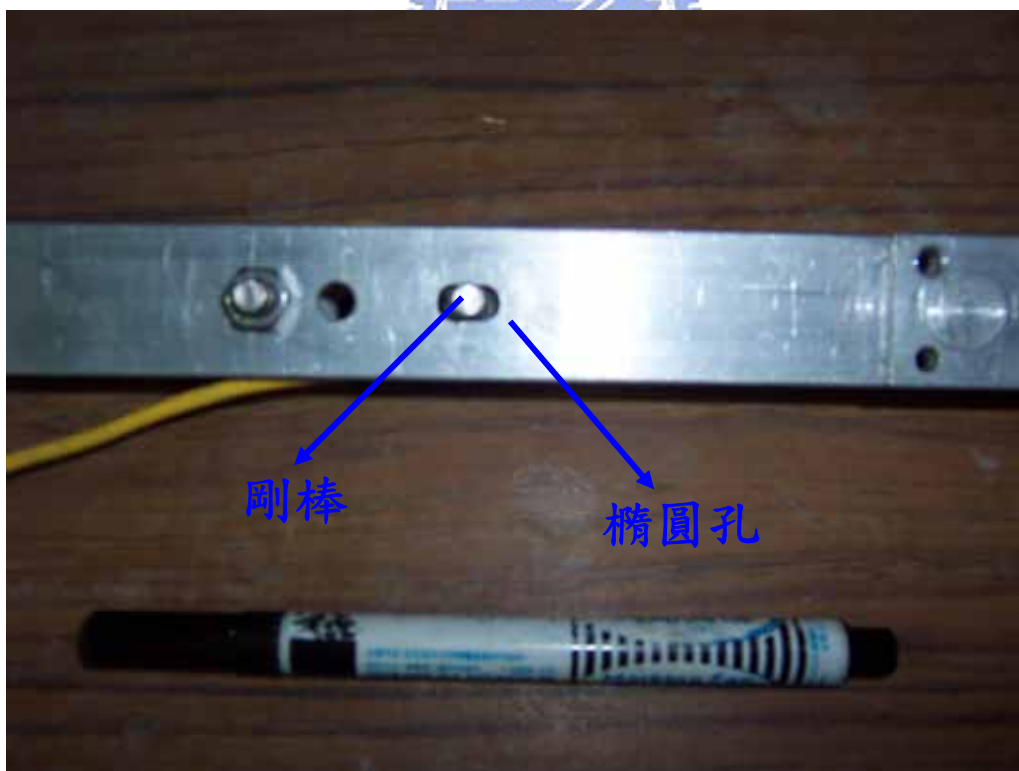


圖 3-11 滑動端的橢圓形孔及孔中的剛棒



圖 3- 12 兩量測節理與其連接的延伸節理

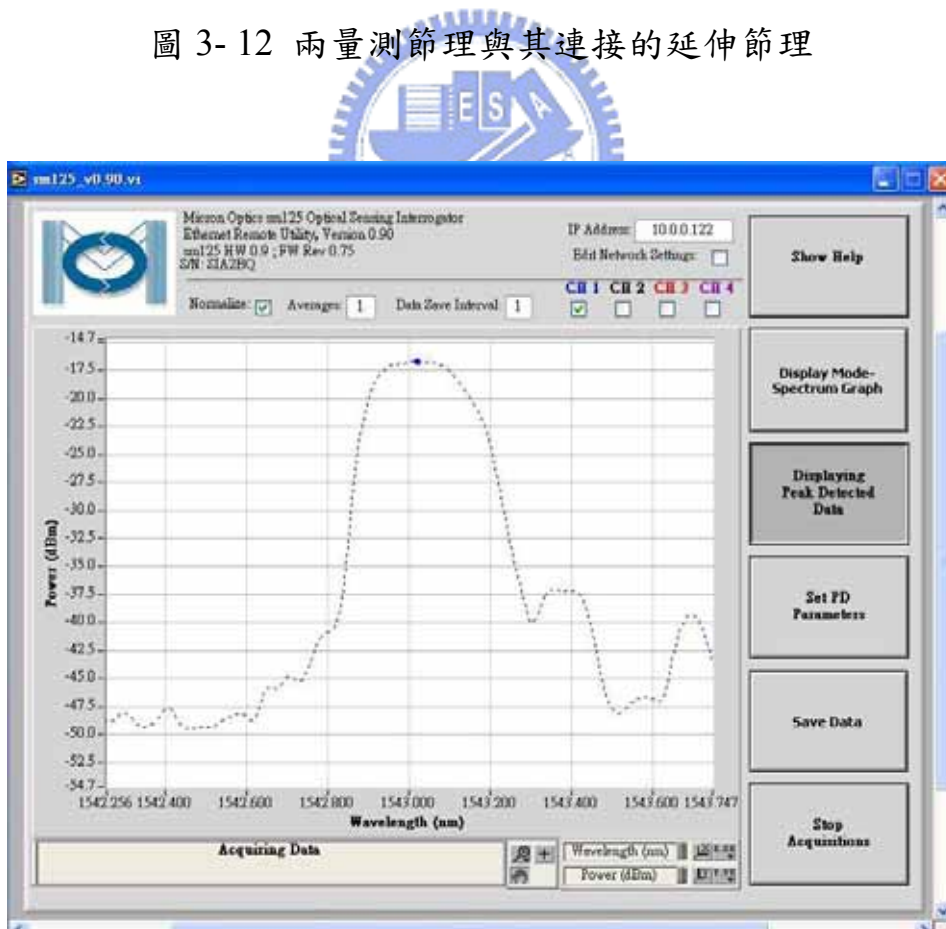


圖 3- 13 良好的波形



圖 3-14 雙波峰的波形

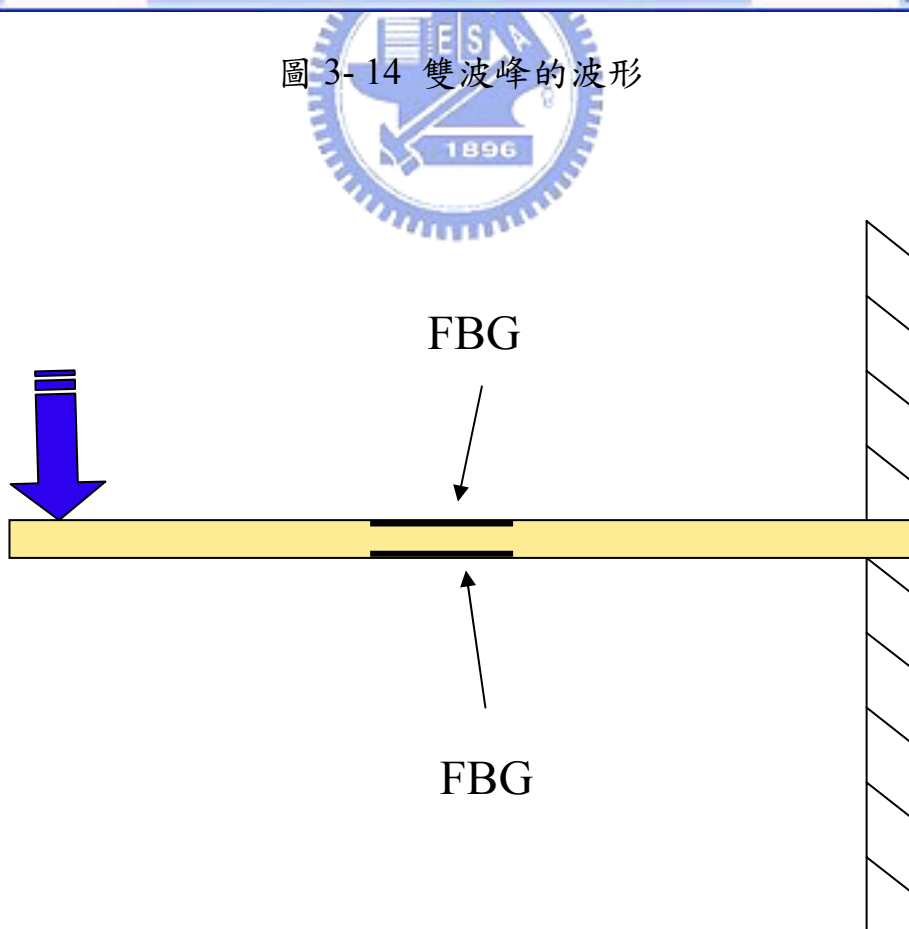


圖 3-15 量測原理示意圖

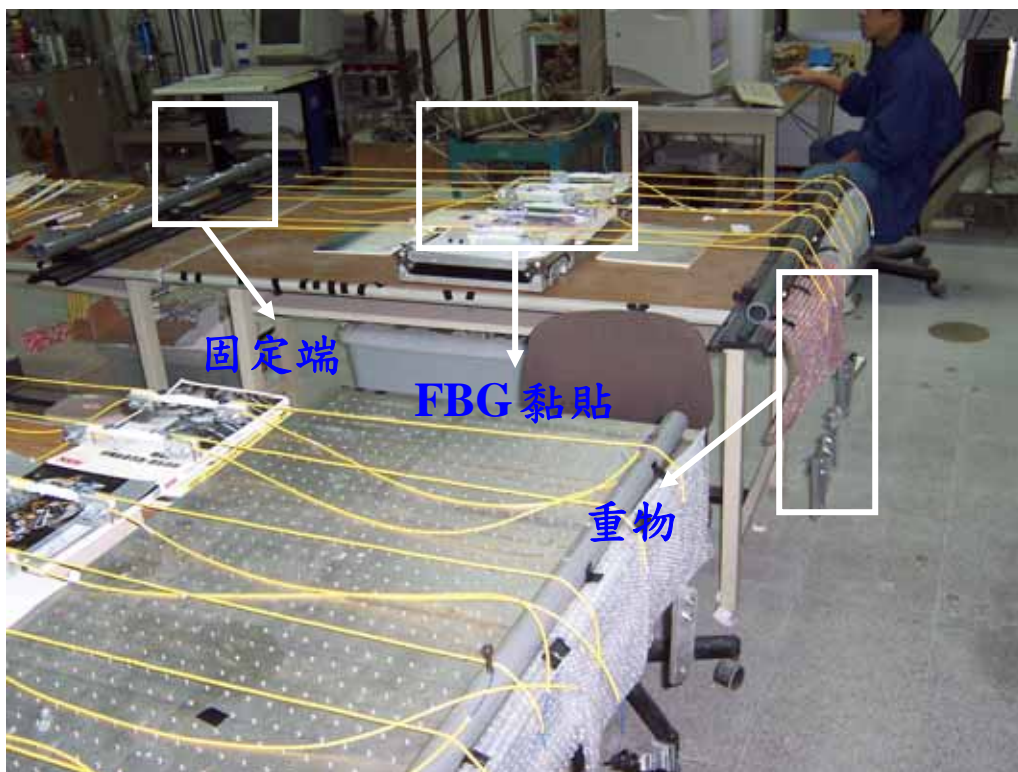


圖 3-16 FBG 預拉方式示意圖

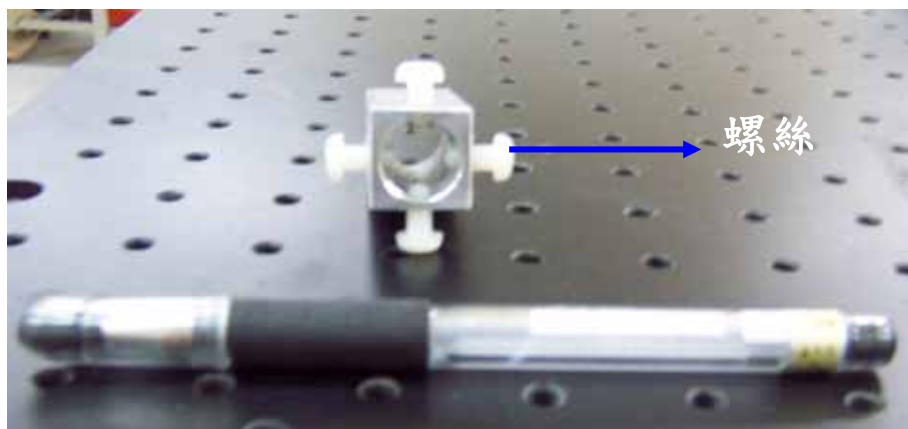


圖 3-17 塑膠螺絲的滑動端

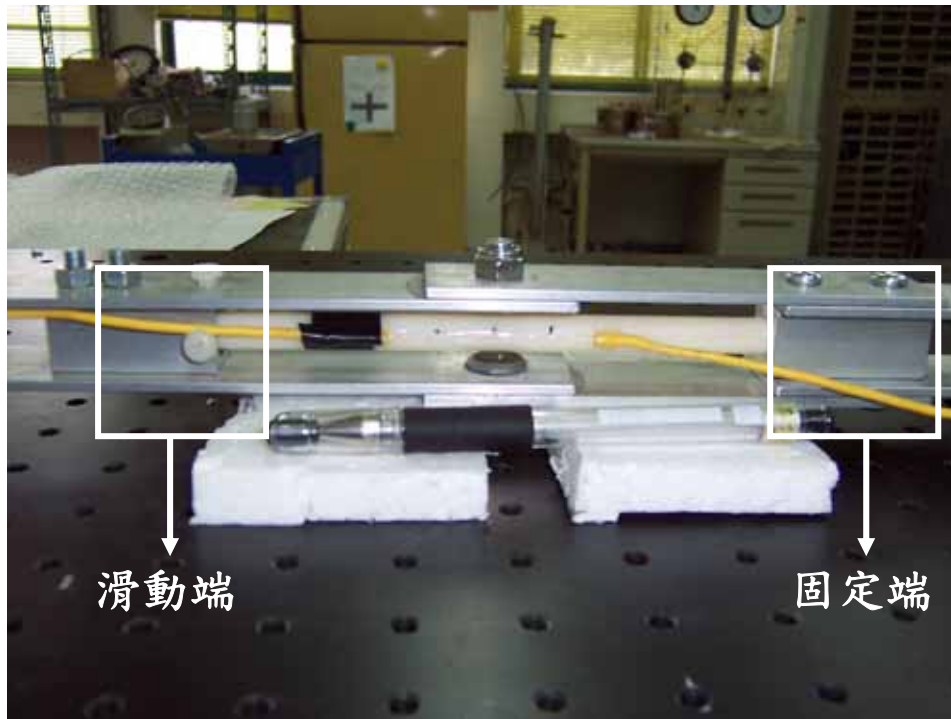


圖 3-18 塑膠螺絲滑動端的量測節理組裝圖

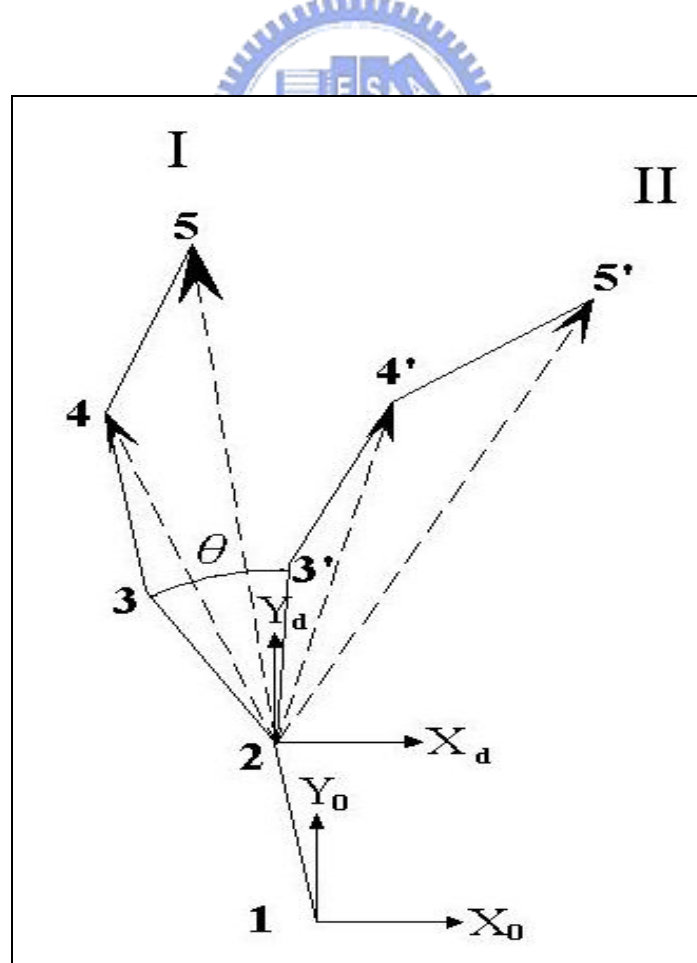


圖 3-19 角度旋轉計算方式示意圖

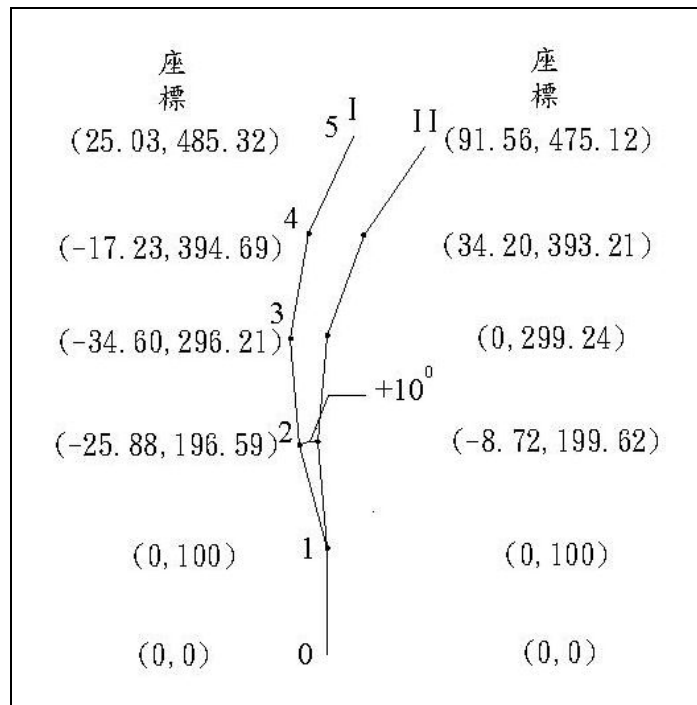


圖 3-20 計算方式步驟一

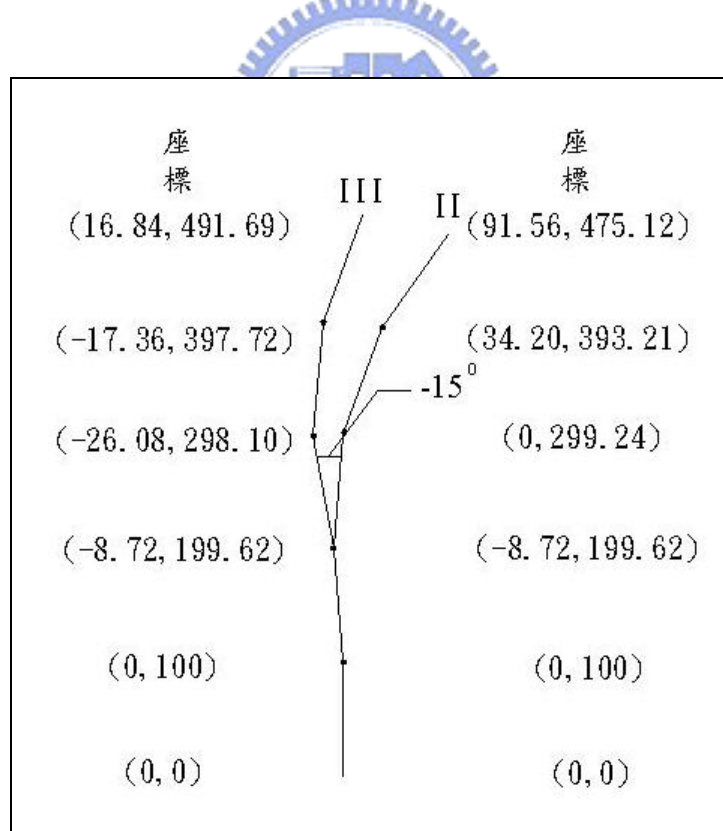


圖 3-21 計算方式步驟二

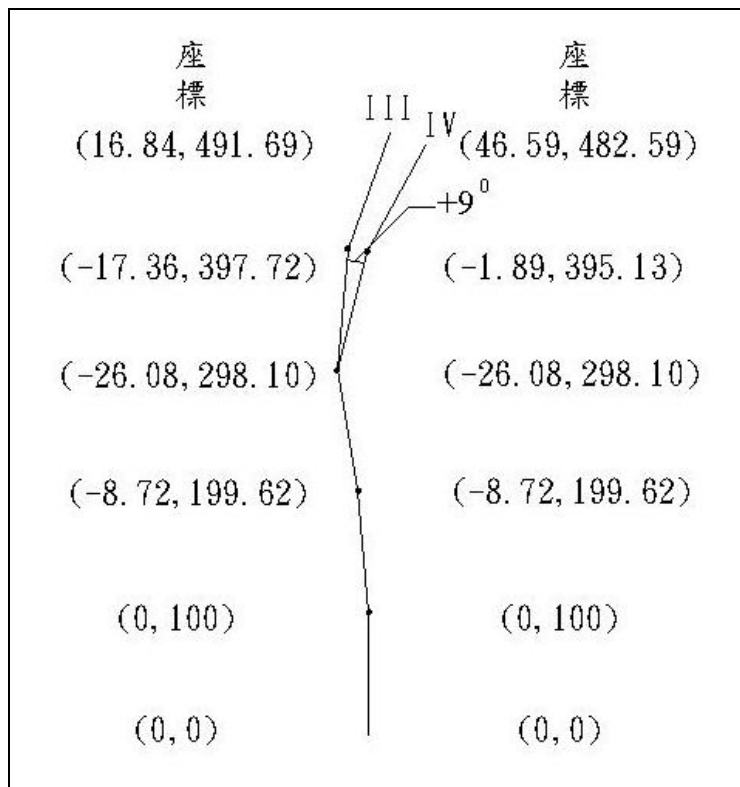


圖 3-22 計算方式步驟三

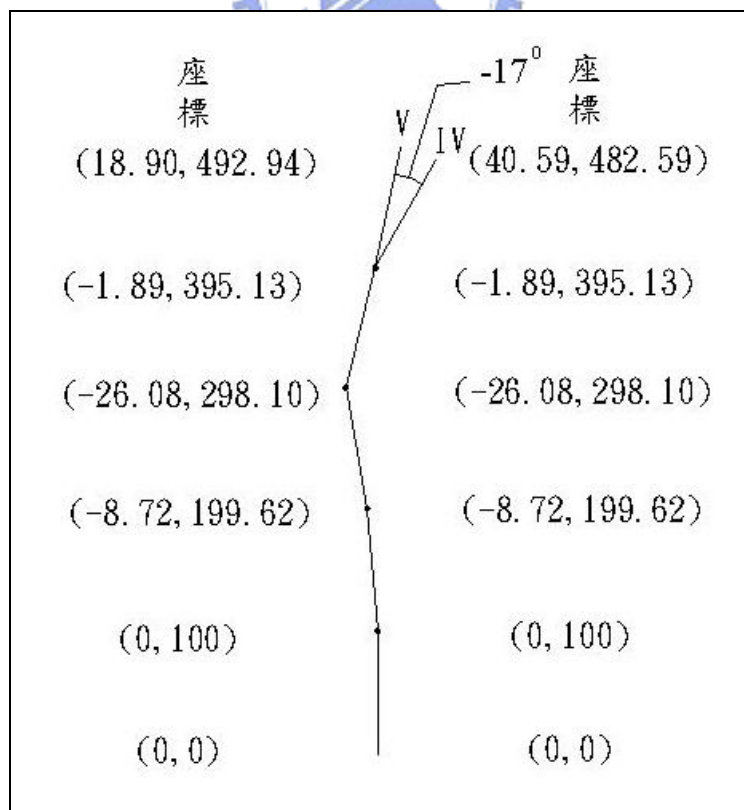


圖 3-23 計算方式步驟四

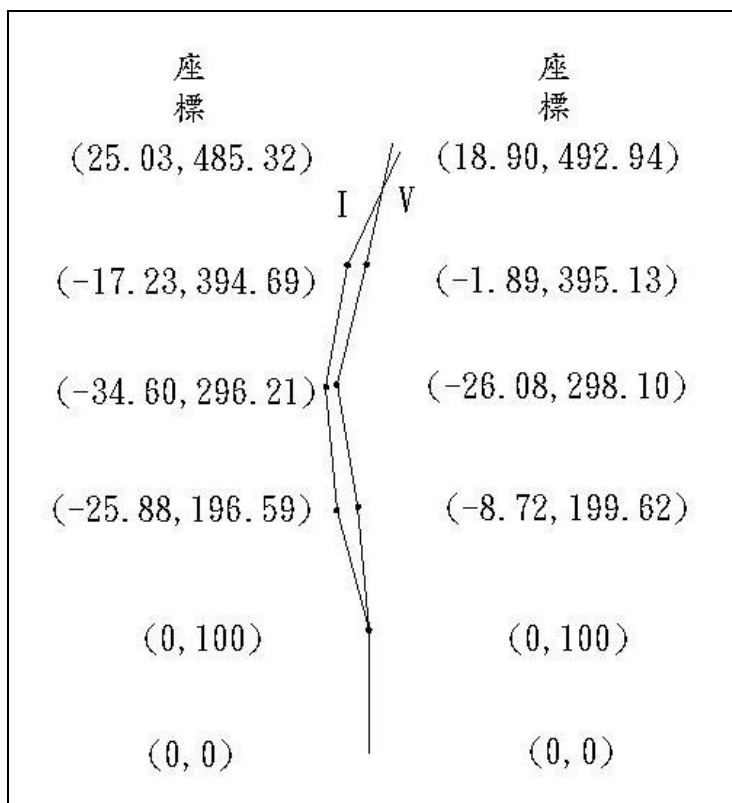


圖 3-24 計算方式步驟五

表 3-1 位移計算結果

初始位置(mm)		軸承轉角(度)	結果位置(mm)		位移量(mm)	
X	Y		X	Y	X	Y
0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	100.00	10	0.00	100.00	0.00	0.00
-25.88	196.59	-15	-8.71	199.62	17.17	3.03
-34.60	296.21	9	-26.08	298.10	8.52	1.89
-17.23	394.69	-17	-1.89	395.13	15.34	0.44
25.03	485.32	0	18.90	492.94	-6.13	7.62

第四章 室內標定及測試

變形軟管製作完成後，當進行各項標定與測試以瞭解是否達到預期的用途。本研究欲於光學桌上進行量測節理變形係數標定、潛變效應試驗以及溫度效應試驗。待瞭解量測節理之變形係數後，將數個單元之節理式光纖光柵感測器予以組裝，再於室內之 9m 傾斜管進行傾斜管變形模擬試驗，藉由變形模擬試驗印證節理式光纖光柵感測器量測變形的效果。

4.1 室內標定



室內標定分為量測節理變形係數標定，溫度效應試驗以及潛變效應試驗三項試驗，量測節理變形係數標定為標定軸承角度改變所對應的 FBG 撥常改變量，溫度效應及潛變效應試驗目的是瞭解溫度變化以及潛變現象對 FBG 波長造成之影響。

4.1.1 量測節理變形係數標定

由於變形軟管製作上之限制，目前為止尚無法將每一量測節理的角度改變與波長改變量之係數控制到一致，因此在每一量測節理使用之前需要進行個別的標定，以得到每一變形節理角度與波長改變之係數。

標定時將量測節理一端固定於光學桌上，如圖 4-1 所示，利用兩

金屬塊將軸承兩端夾緊，使得量測節理大致上呈現一直線。位移的方式為利用微調儀於另一端推動量測節理。微調儀所推動產生位移處距軸承約 325mm，微調儀一次調整前進 3mm，共推 4 次總共 12mm，此時軸承轉動之角度約 2.1 度。皆下來再逐次退回 3mm，共退 8 次總共 24mm，此時軸承轉動至約 -2.1 度。最後再往前逐次推 3mm，共推 4 次回到原點。將此 17 個角度之波長相差量記錄下來，依試驗順序畫出使其成為來回一週之閉合圖形。此圖形將會成為一直線，將此各個點所成之直線以相關係數表示其相關性。此設計所試驗出之角度與波長改變量之相關係數最好可達到相關係數 $R^2=1$ ，若是相關係數低於 $R^2=0.9995$ ，為了使得儀器的準確度能更精準，則將此變形軟管淘汰不用。此設計及製作過程之成功率能夠高達九成以上，失敗之次數很少。圖 4-2 為標定之相關係數 $R^2=1$ 之情況，圖 4-3 為標定之相關係數 $R^2=0.9995$ 之情況。儘管 $R^2=0.9995$ ，其線性之情況依舊是非常好。

根據現有的 50 組標定結果統計得知，軸承轉角改變 1° 使得波長改變約 800~1000pm。保守以 800pm 來計算，光纖光柵讀取儀所能量測到最小為 1pm，因此所能量測到最小之角度改變為 0.00125° ，也就是目前所使用的 100cm 為一單元的感測器，最小能量測到 0.022mm 的位移。而標定的角度達 2.1° ，則位移量已達 35mm，若是以地層之滑動量，1m 之滑動量為 35mm 已是很可觀的滑動量，因此對於地層之監

測已是足夠的，故選擇只標定至正負兩度。

4.1.2 溫度效應試驗

由於監測通常是長時間的，因此外界的溫度一定有所改變。高溫可高達四十度，低溫也可低至零度。而監測儀器在溫度變動如此劇烈的情況下，溫度對於儀器本身的影響將會是一個很重要的考慮因素，亦會是一個重要的誤差來源。

由於FBG本身一樣會有熱漲冷縮之效應，熱漲會使得光柵之間距伸長，將會導致波長增加，而冷縮則有波長降低的情況。雖然溫度改變 1°C 對FBG之波長只改變約 10pm ，但是一旦使用了黏著劑貼在物體上之後，熱漲冷縮則之係數則視黏貼之物體其熱漲冷縮係數而定。是故黏貼過後的FBG因溫度改變 1°C 之波長改變量可能遠大於 10pm 。為了降低因溫度變化而造成之波長改變，本研究將FBG採用 180 度對貼於ABS軟管之兩側，期望兩側之FBG因貼於同一物體上而有相同之熱漲冷縮係數，而造成相同之波長改變量，再經由將兩側波長相減之動作，希望能得到單純因ABS軟管變形之波長改變量。

試驗之方式如同圖 4-4 所示，將一製作完成之變形軟管利用膠帶貼於一容器底部，使其固定不動，並於管壁上固定一溫度計，溫度計之量測範圍為 $-10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，量測精度為 1°C 。首先於容器內加入較冰

冷的水，待FBG之讀數反應穩後予以紀錄波長讀數，再加入較熱之水使水溫上升，待穩定後再予以紀錄波長讀數，重複此步驟直至實驗結束。

由圖 4-5 可知，軟管兩側所黏貼之FBG中心波長，平均水溫上升 1°C 之波長改變量約為 120pm ，此數量為未上膠之十多倍。若將兩側所量測到的各溫度時之波長相減，再將兩FBG之波長相差值繪於製如圖 4-6，由圖中可清楚瞭解在整個溫度改變之過程中，兩側FBG之熱漲冷縮之情況相當一致，因此其波長改變量之值也頗一致。兩側波長相減後可絕大部分的消除掉溫度效應之影響，在整個溫度改變 40°C 中，其波長相減之結果誤差量不超過 20pm ，而地層內溫度改變量在 5°C 以下，預計溫度誤差在 5pm 以內。雖然此方式並未能穩定的完全消除因溫度改變所造成之誤差，不過已能將此誤差控制在一可接受範圍中，因此此設計已能初步的將溫度效應之誤差大幅的消除。

4.1.3 潛變效應試驗

為瞭解改用之 ABS 材料與黏著劑及光纖光柵三者間之膠著是否牢固，會否如未改變之前標定變形係數時，出現波長增加或減少至最大後，急速回彈且回彈量高達變化量之 $5\%\sim 10\%$ 。且本研究所研發之儀器需長時間置於現地進行監測，因此需要對其無應變之情況下的長

時間波長改變情況，亦即是潛變之問題加以瞭解。試驗之方式如同變形軟管變形係數標定一般，將其至於光學桌上，藉由螺旋測微器給予其一角度變化後不再改變，待數據大致穩定後記錄數據長時間之改變情況。

本試驗給予如同變形軟管標定 2.1° 的角度改變，從變形前開始記錄讀數，連續記錄至試驗結束，將得到之讀數繪製如圖 4-7 所示。

試驗時間經過 56 個小時，未變形前光纖光柵所量得的波長初始值分別為 54.383nm 和 61.811nm，兩讀數相減之波長相減值為 7428pm。受到位移量後波長反應之最大值分別為 55.472nm 和 60.910nm，波長相減值為 5438pm，因此角度改變 2.1° 其波長相減值改變量為 1990pm。

56 小時過後波長分別為 55.581nm 和 60.996nm，波長相減值為 5415pm，由數據可知 56 小時後波長相減值由 5438pm 變成 5415pm，波長相減值改變量變為 2013pm，相差 23pm，佔總波長改變量 1990pm 的 1.2%。此試驗由於放置時間不夠長，且因為無恆溫空間可供試驗，因此尚有溫度效應之影響，故還未能看出明顯的潛變穩定於何時。但由結果可瞭解現階段的變形軟管設計已較先前設計大幅降低潛變之現象。

4.2 室內傾斜管試驗

4.2.1 9m 傾斜管變形一致試驗

為瞭解節本研究之設計是否能夠成功的反映出地層中傾斜管之變形，因此設計一傾斜管組來進行此試驗，利用此傾斜管組之變形，模擬實際地層中傾斜管由於地滑所造成之變形。此傾斜管組的組成是由三支約 3m 的傾斜管連接，成為一組長約 9m 的傾斜管組，再將三支 9m 傾斜管藉由八組夾具一起束制住，並利用螺絲將夾具固定於結構大樓中的大型結構實驗室之樓梯柱之上，三管分別稱為內管(Inside pipe)、中管(Middle pipe)及外管(Outside Pipe)。架設好之 9m 傾斜管如圖 4-8 所示，夾具固定之方式見圖 4-9。若將管口視為地表，深度為 0 來看，八組夾具固定之深度分別為 0.0m、0.7m、2.2m、4.2m、4.7m、6.2m、7.2m、8.5m。夾具主要之目的是為了將三支 9m 傾斜管一起束制住，使得此三支傾斜管能成為一傾斜管組，當給予此傾斜管組一位移時，能給予此三支傾斜管一致之位移。當實驗時將傾斜管中分別放置節理式光纖光柵感測器以及傳統之傾斜儀，藉由此兩套儀器所量測出之位移量相互做比較。

本研究預計試驗之變形曲線有兩種，分別是(1)變形量由底部往上逐漸增加，稱之為「喇叭型」，以及(2)變形量由底部往上先增加後減

少，稱之為「大肚型」。選擇此兩種變形曲線的完因有二：(一)由於試驗的長度只有九 m，若是要模擬更複雜的變形曲線恐無法順利模擬出來。(二)所有的變形曲線大略上可粗分為兩類：無反曲點(喇叭型)及有反曲點(大肚型及 S 型)此兩種，若是大肚型能夠順利量測出來，相信 S 型或是更複雜之情況也能夠順利的量測出來。

此傾斜管之夾具上貼有鋼尺，可由鋼尺讀取固定螺絲的移動量 (Gage reading)，但由於鋼尺的精度只達 1mm，且讀數之方式為利用肉眼讀取，肉眼讀取的實際位移量恐精準度不足。

經試驗兩種變形曲線的尺讀位移量和傳統傾斜儀如圖 4-10 及圖 4-11 所示，肉眼所讀取以及傾斜儀之值雖相去不遠，但傳統傾斜儀之值似乎較為穩定且精準，加上由於傳統傾斜儀於實務上已行之有年，可信度也較肉眼之讀數高，故此試驗是以傾斜儀所量測到之位移量當標準值，希望能先量測出如同傾斜儀之位移曲線。

由於兩組儀器需相互比較，因此首要步驟先要確定，此三傾斜管是否真如我們假設的擁有一致的位移量，因此在試驗前必須先檢測此傾斜管組是否合於我們的要求。此兩種變形曲線的傾斜管變形一致試驗結果分別如圖 4-12 及圖 4-13 所示，由此兩圖可知此三傾斜管之位移非常的一致，證明此傾斜管組可用來比較兩組儀器所量測之位移量，而不會產生傾斜管是否位移一致之疑慮。

4.2.2 9m 試驗

證明了此傾斜管組之位移量一致之後，本試驗選擇中管裝入所研發之節理式光纖光柵感測器，內管放入傳統傾斜儀。產生變形的方式是在夾具與樓梯柱間放置厚約 3mm 之鋁片，如圖 4-14 所示，依所需增加的變形量放置所需之鋁片。施做喇叭型變形時於最上層(深度 0m)之夾具放置鋁片，大肚型則於中間(深度 4.2m)放置鋁片。尚未開始變形前先讀取光纖光柵及傾斜儀之讀數，此為初始值，給以一變形後等待約 3~5 分鐘，再讀取光纖光柵以傑傾斜儀之讀數，此為結果值，由此二值則可得到一變形之曲線。再增加鋁片之數量使傾斜管變形，等待讀數穩定後讀取數據，與最初之初始值相比較再得一變形曲線，依此程序施做，得到一組變形量由小到大之變形圖。

喇叭型四組變形圖，如圖 4-15~圖 4-18 所示，最大變形量分別為 6mm(變形一)、9mm(變形二)、12mm(變形三)及 15mm(變形四)。喇叭型變形時，下面四組夾具並沒有鬆開，故下半部之變形應當為接近零，此部分光纖光柵之結果與傾斜儀相同，數值幾乎皆為零。上半部之變形量測則稍微有點誤差，變形一結果幾乎完全相同，誤差小於 1mm，變形二可能在施做上有點問題，誤差稍大約為 2mm。變形三及變形四因計算上累加於變形二之上，故受到變形二之影響有如同變

形二上半部之誤差情況，變形三及變形四誤差再逐漸累積，到變形四時誤差最大將近 3mm。但若個別比較則變形三及變形四個別誤差最大皆不超過 0.5mm。由以上之結果可證明，在喇叭型變形的測量方面，此儀器能夠有很良好的表現。

大肚型四組變形圖，如圖 4- 19~圖 4- 22 所示，變形量分別為 3mm(變形一)、5mm(變形二)、8mm(變形三)及 24mm(變形四)。大肚型變形時，僅將中間的夾具有開，最上及最下兩組夾具則維持鎖緊，以產生大肚型之變形。大肚型變形之變形量由小到大，最大的誤差量大約從最小 3mm 累積至 6mm 左右。由圖知道，大肚型變形之結果較喇叭型變形稍差，但趨勢吻合，僅在於所量測到之結果稍有誤差。

由以上的試驗可知，現階段的節理式光纖光柵感測器已能很成功的反映出變形的趨勢，只是在變形量之量測上還有些許的誤差。現階段儀器的量測長度為 1m 為一單元，若是能改為 50cm 為一量測長度則量測的誤差量則會降低，量測精度及解析度都會提升。

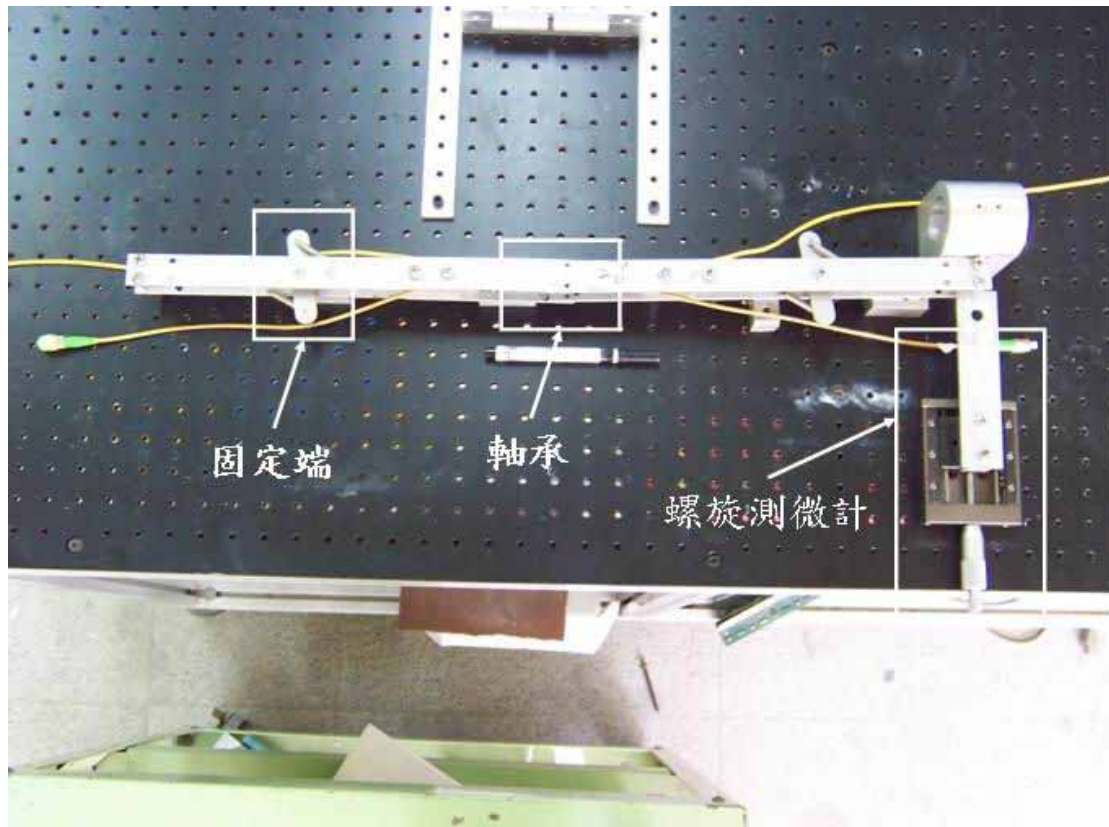


圖 4-1 量測節理標定方式示意圖



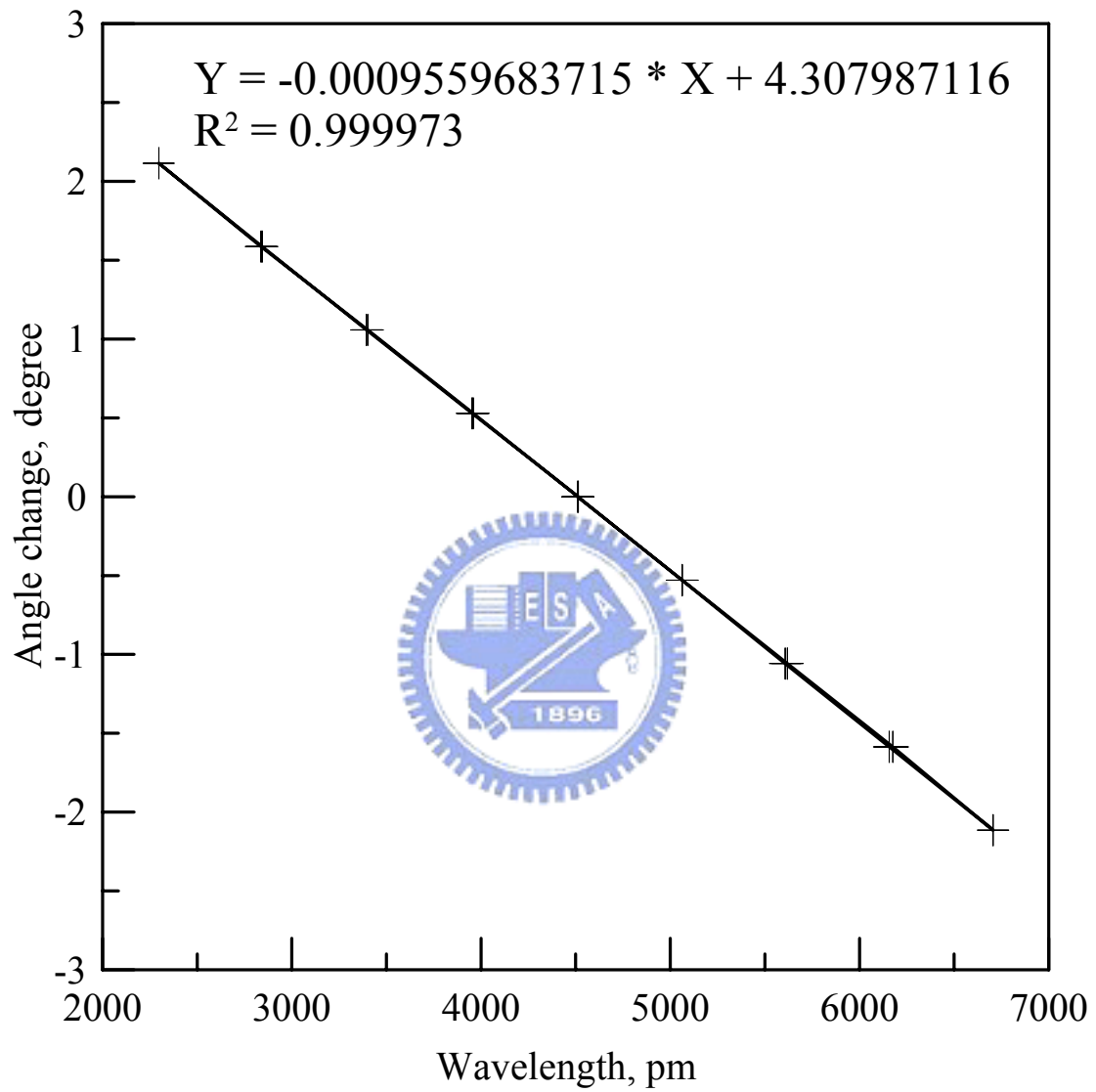


圖 4-2 量測節理係數標定圖(相關係數 $R^2=1$)

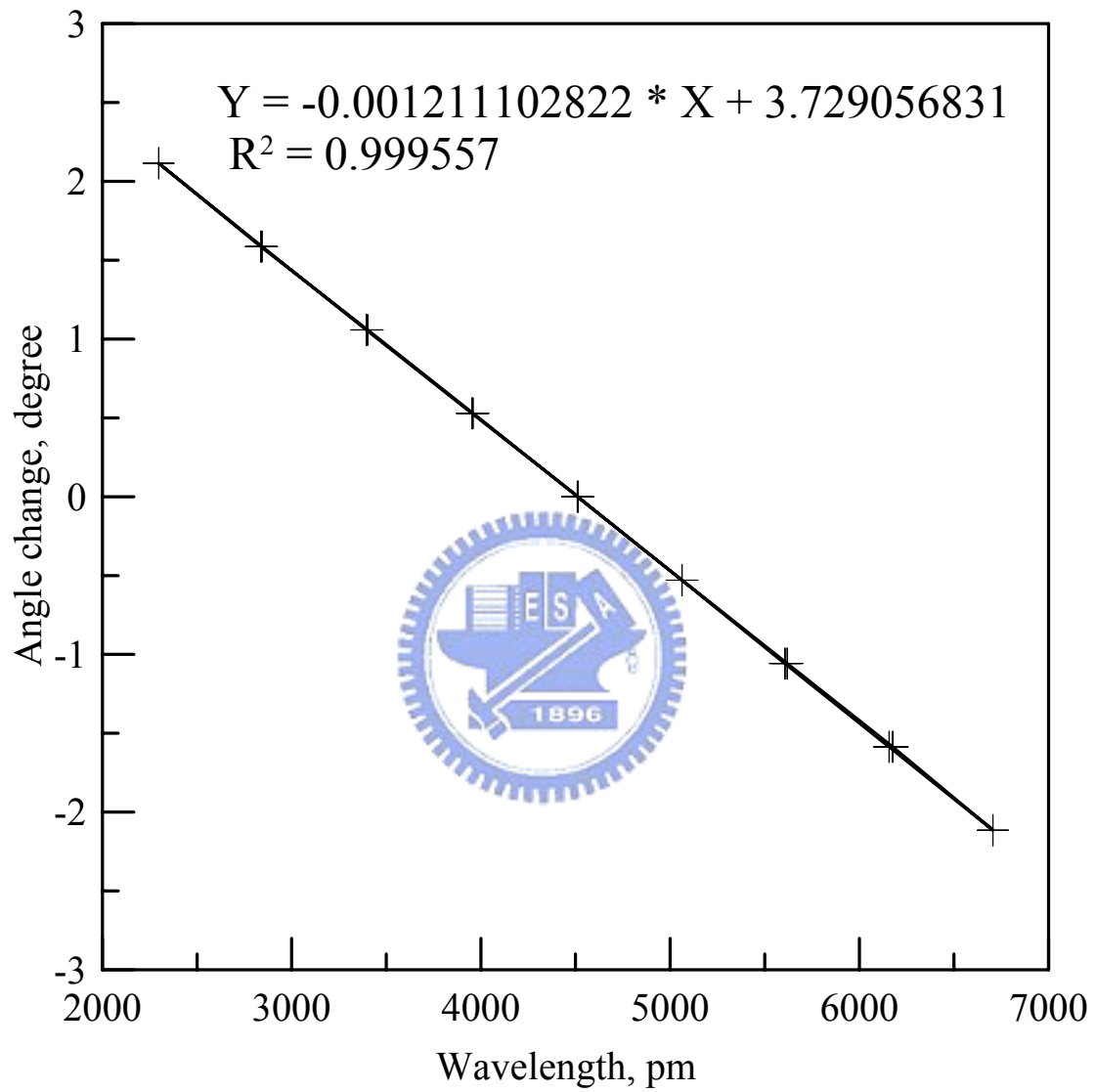


圖 4-3 量測節理係數標定圖(相關係數 $R^2=0.9995$)

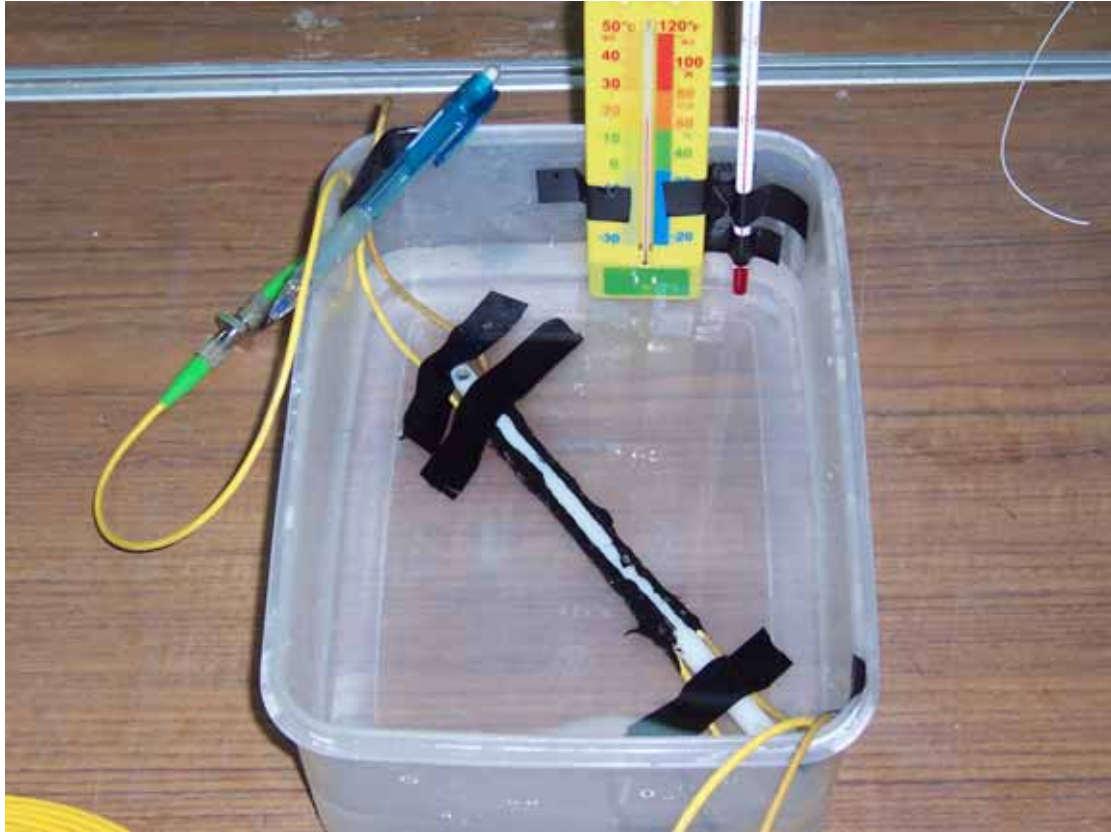


圖 4-4 溫度效應試驗方式示意圖



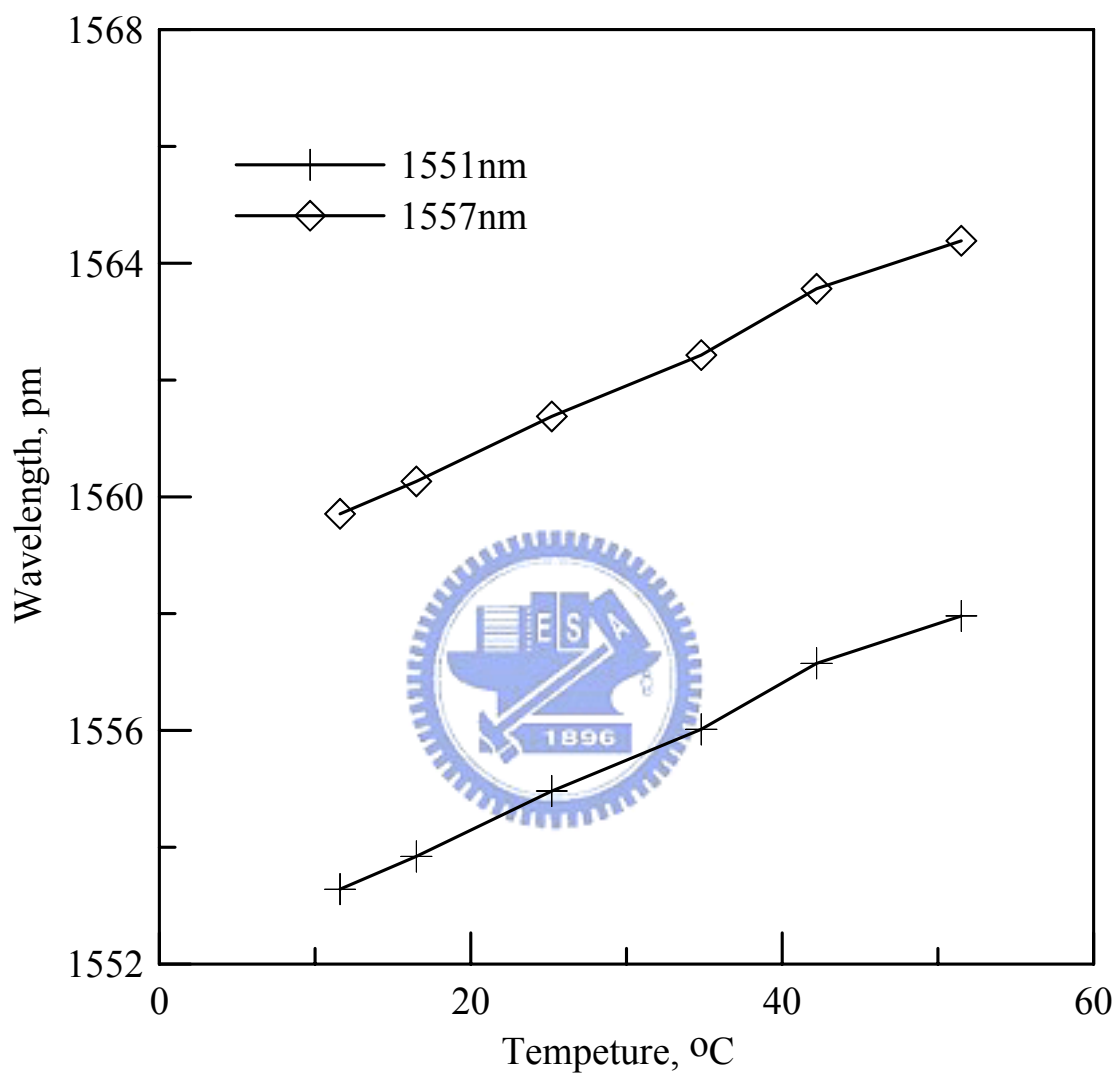


圖 4-5 FBG 溫度改變與波長改變關係圖

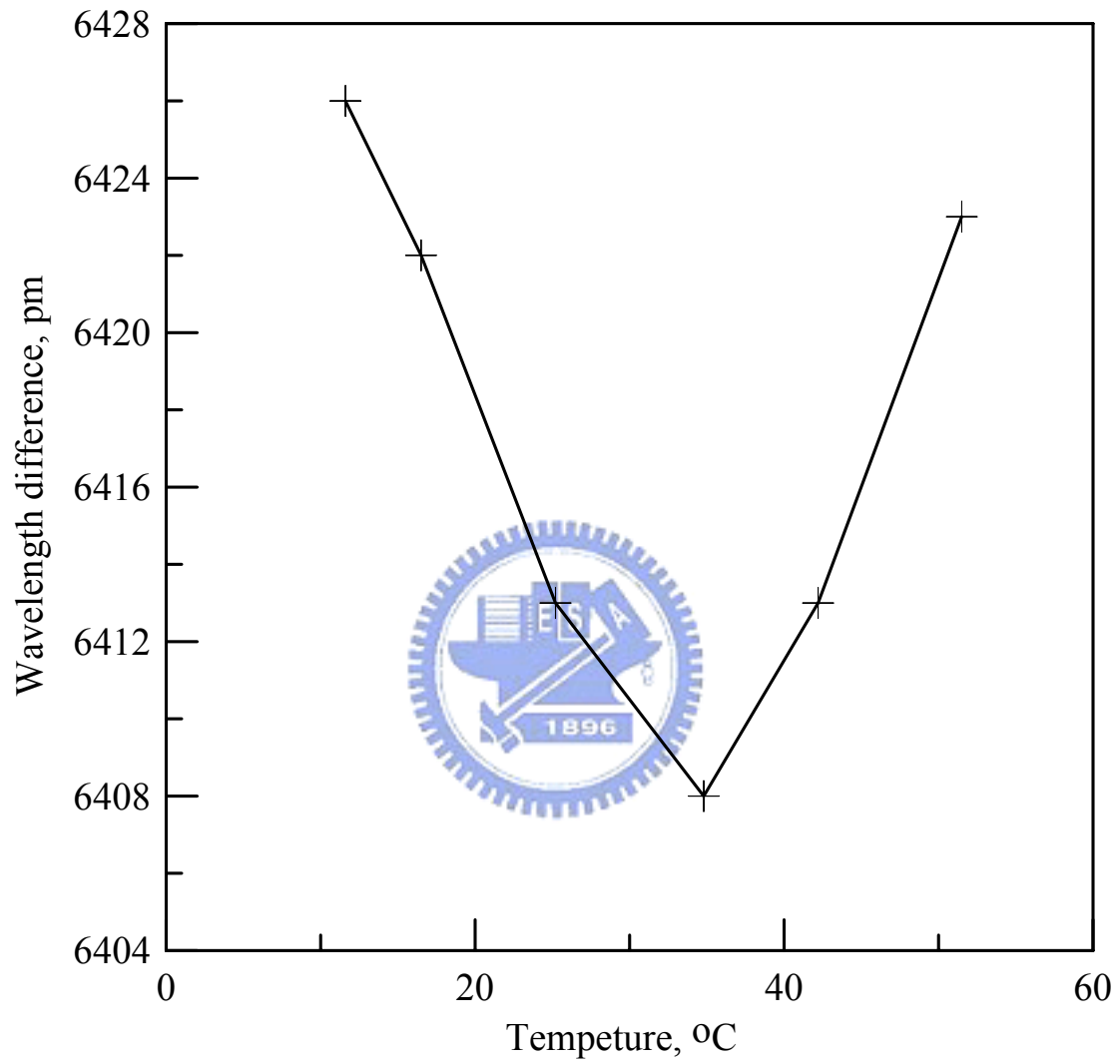


圖 4-6 FBG 溫度改變與波長相減值關係圖

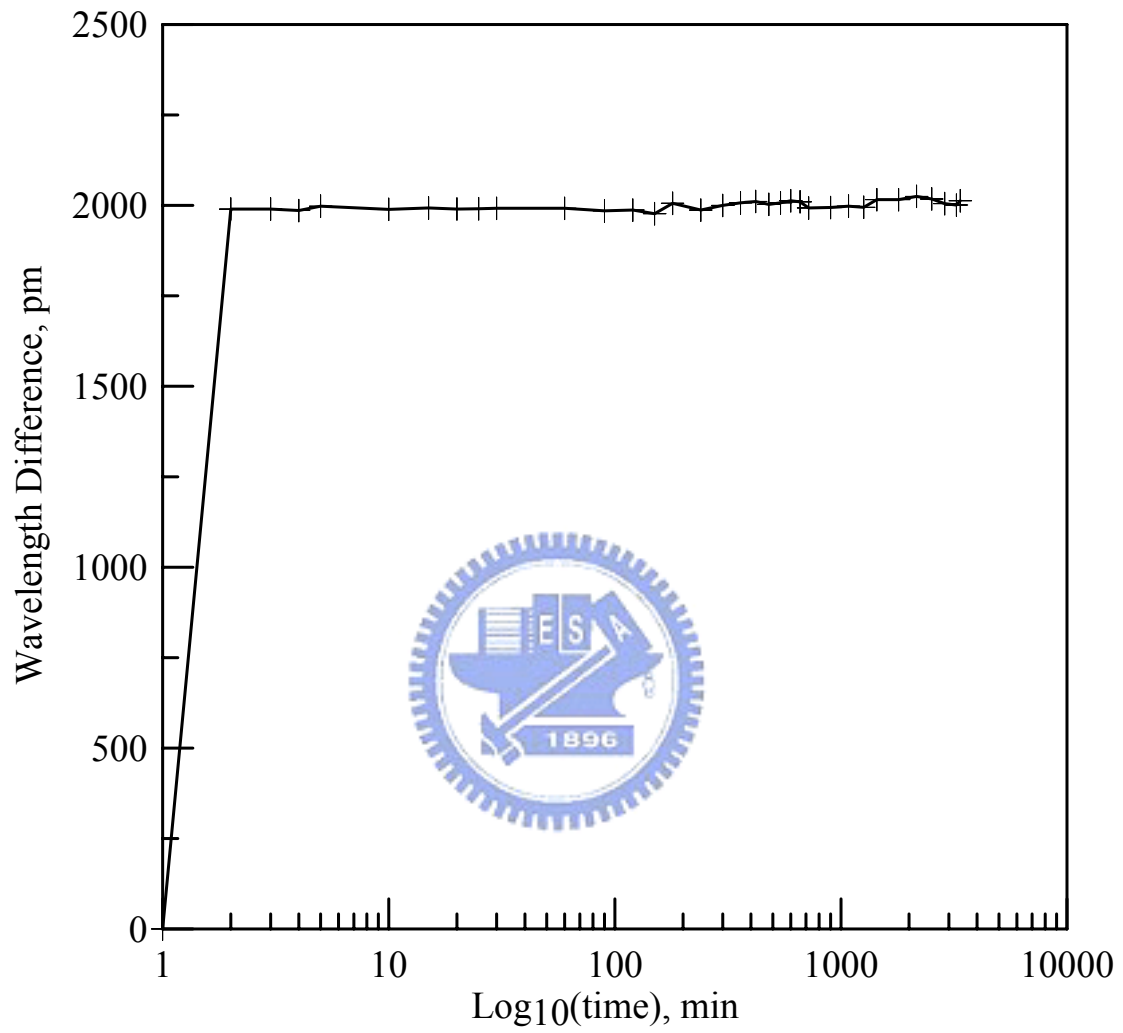


圖 4-7 潛變試驗結果圖



圖 4- 8 9m 傾斜管架設圖



圖 4-9 9m 試驗固定方式示意圖

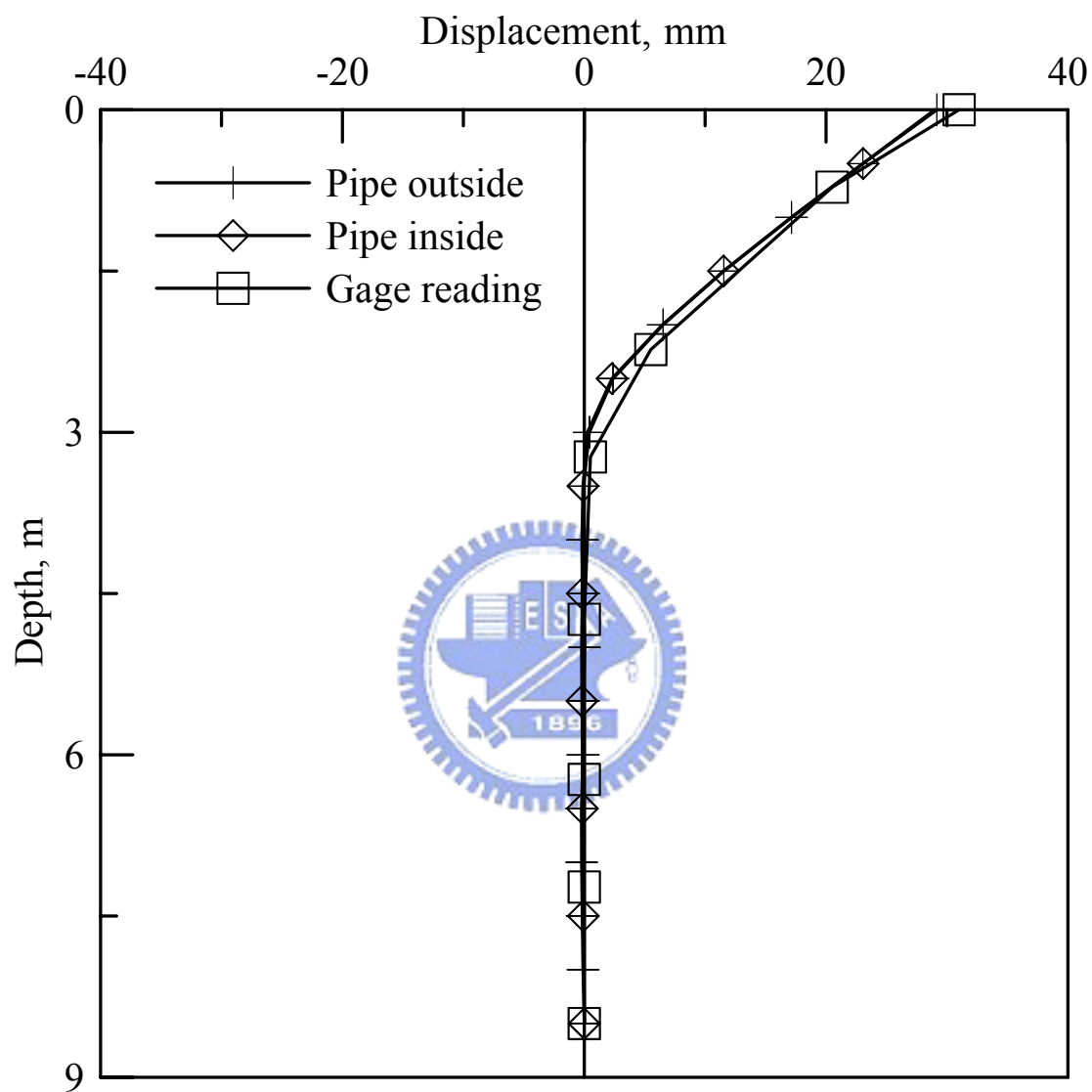


圖 4-10 尺讀與傾斜儀讀數比較-喇叭型

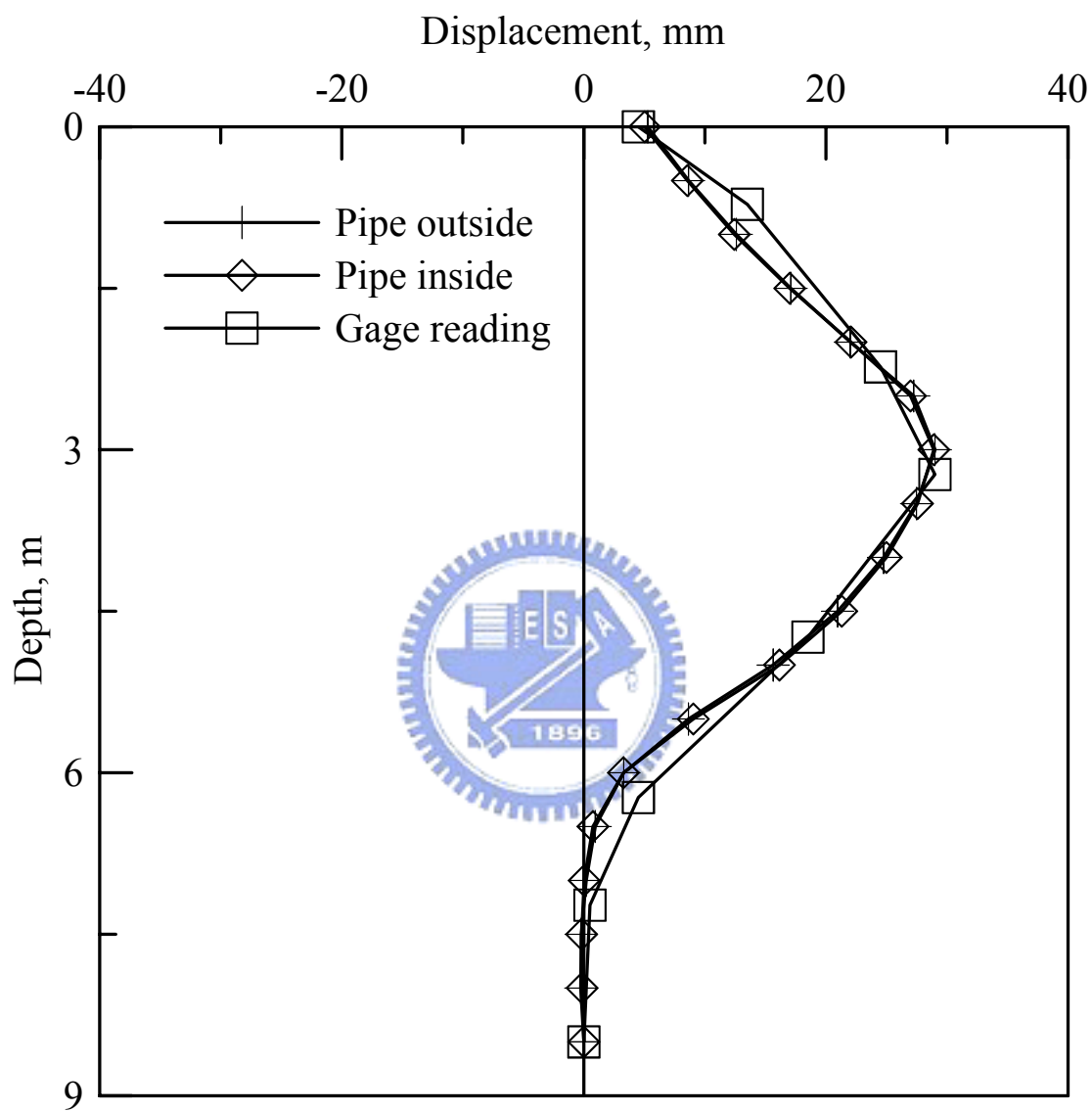


圖 4-11 尺讀與傾斜儀讀數比較-大肚型

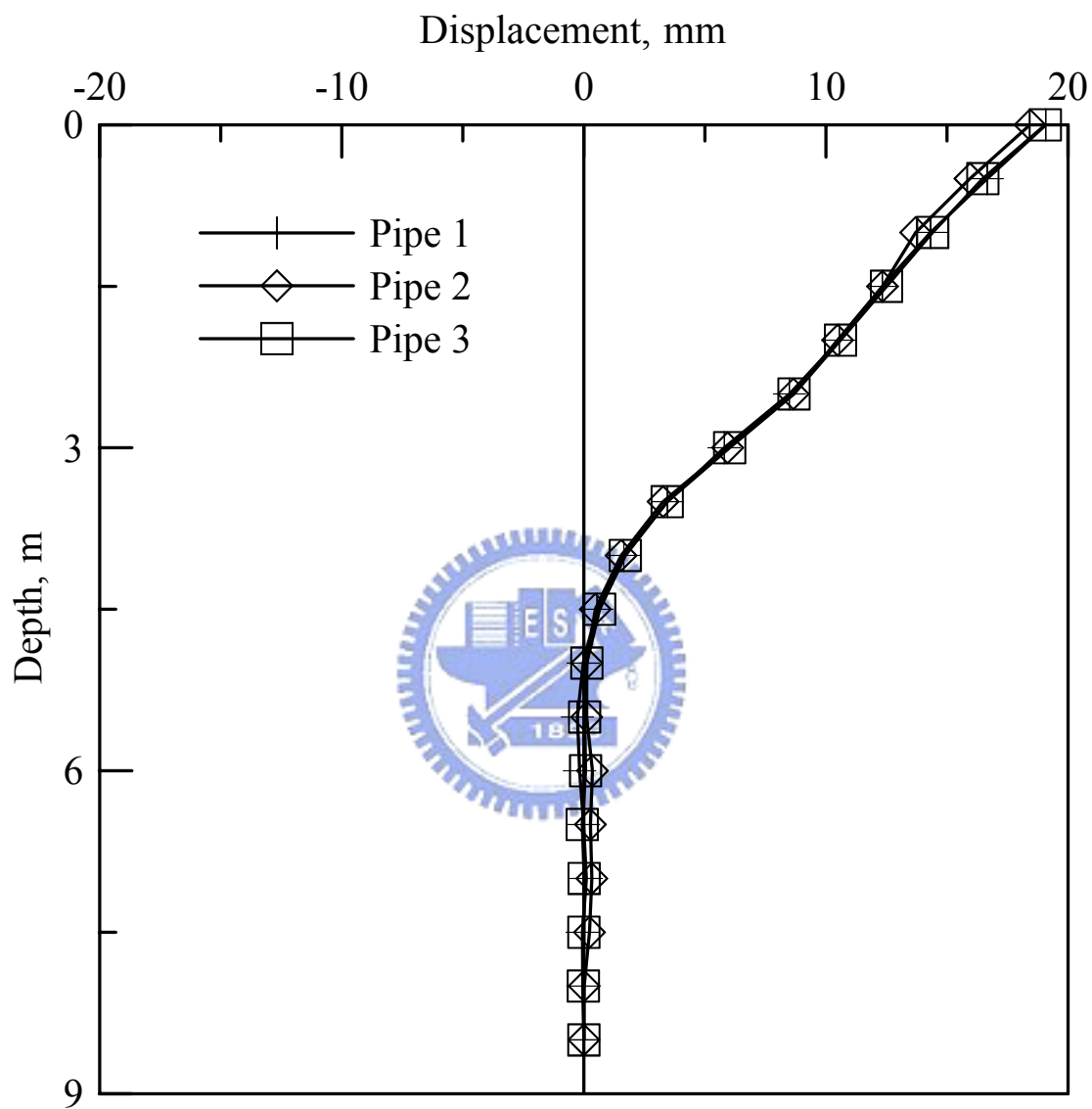


圖 4-12 9m 傾斜管變形一致試驗-喇叭型

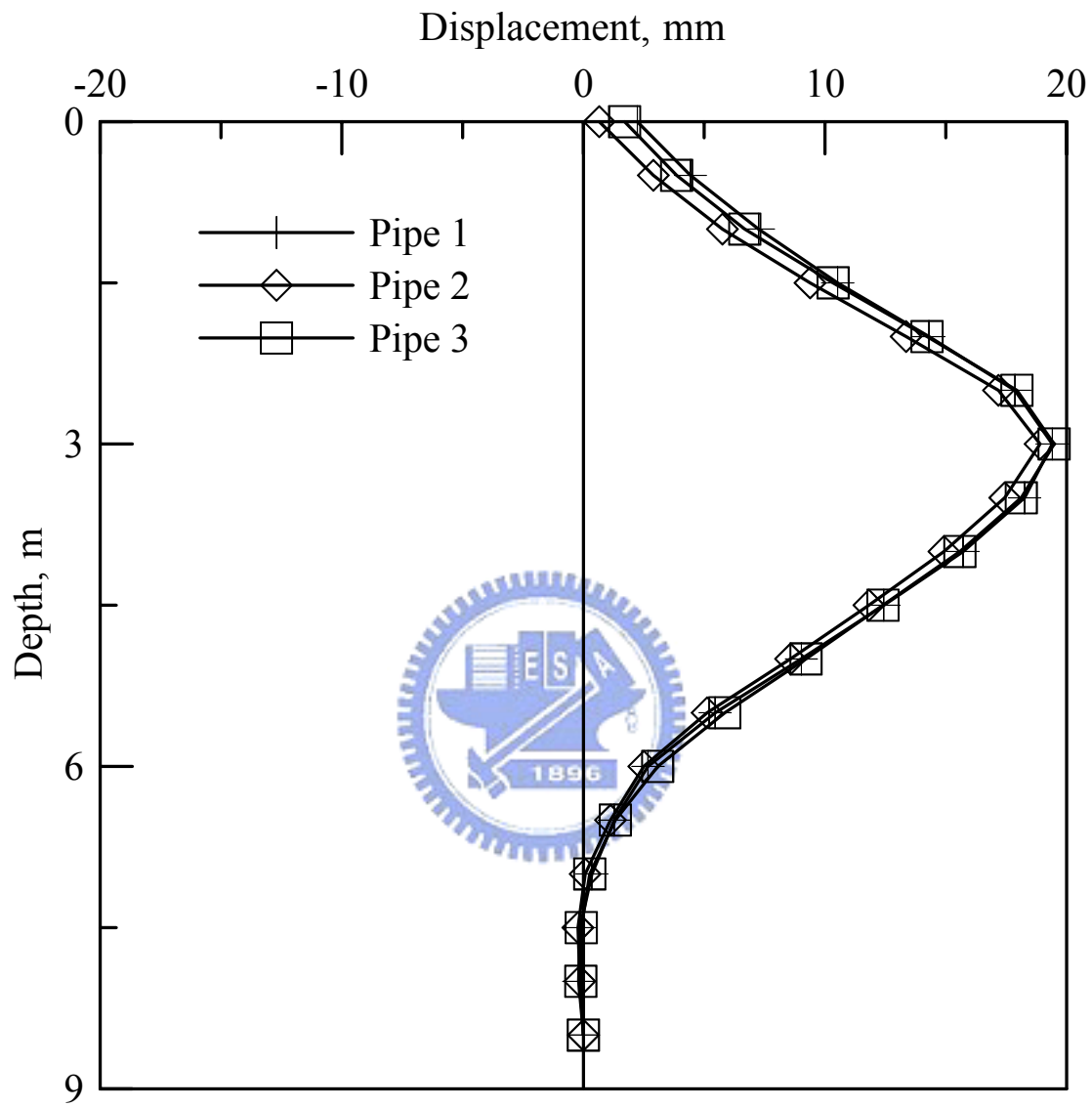


圖 4- 13 9m 傾斜管變形一致試驗-大肚型

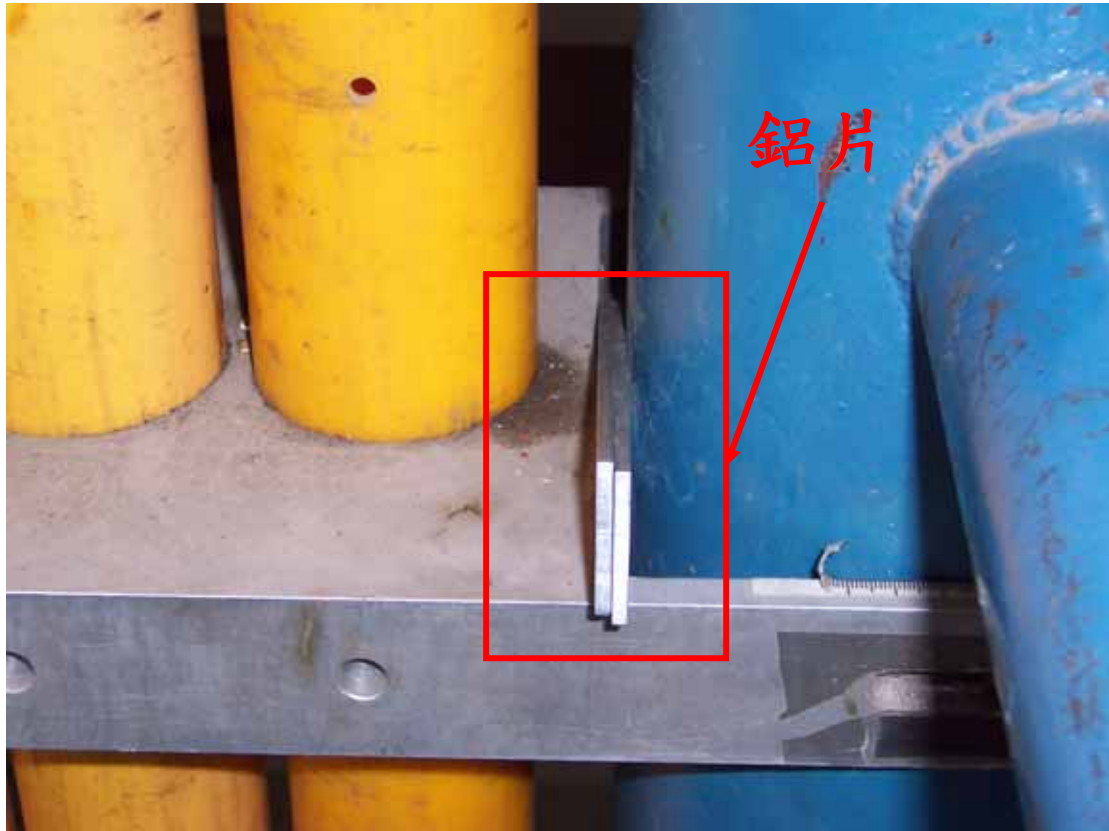


圖 4-14 變形產生方式



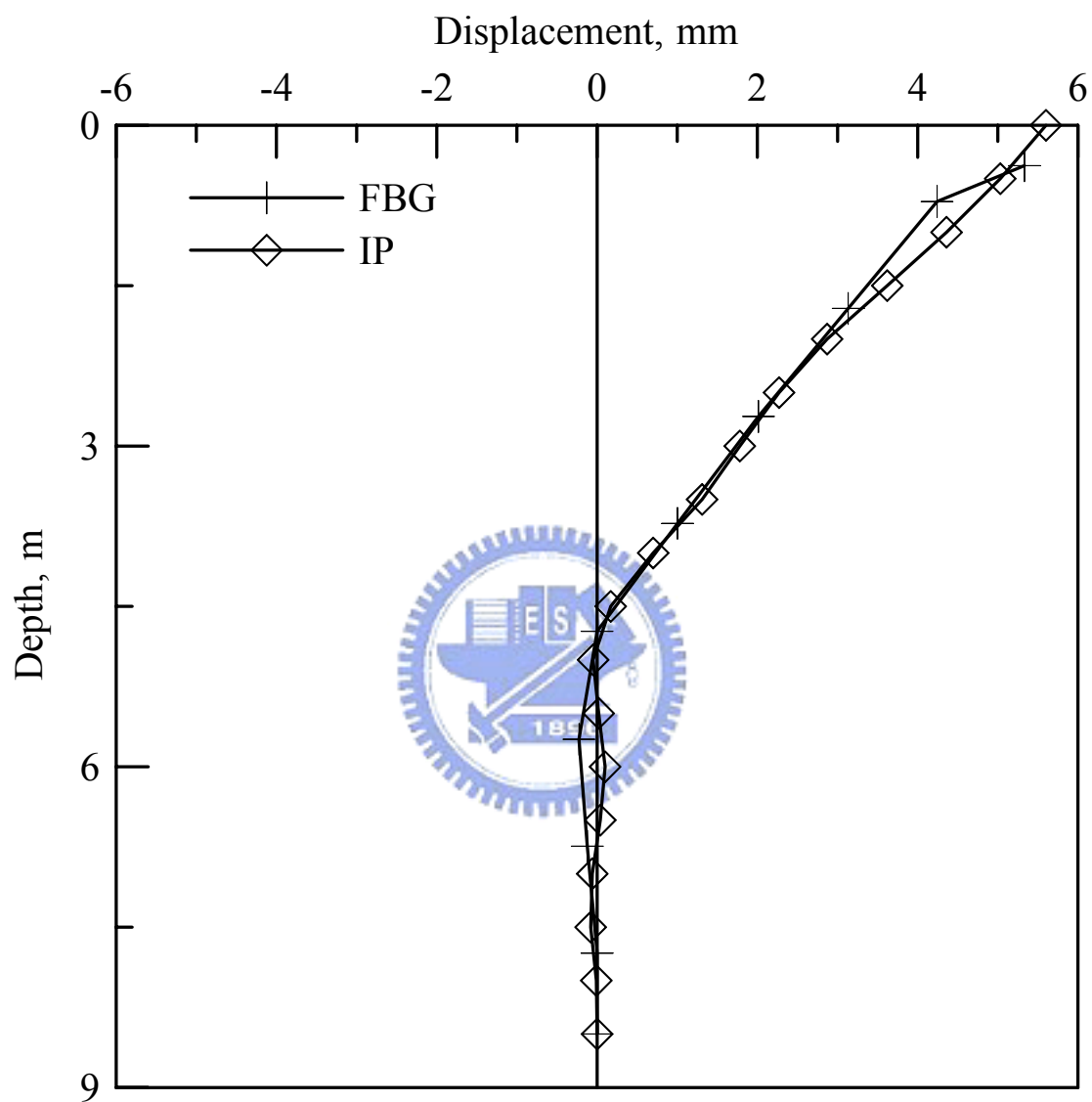


圖 4-15 9m 試驗-喇叭型變形一(6mm)

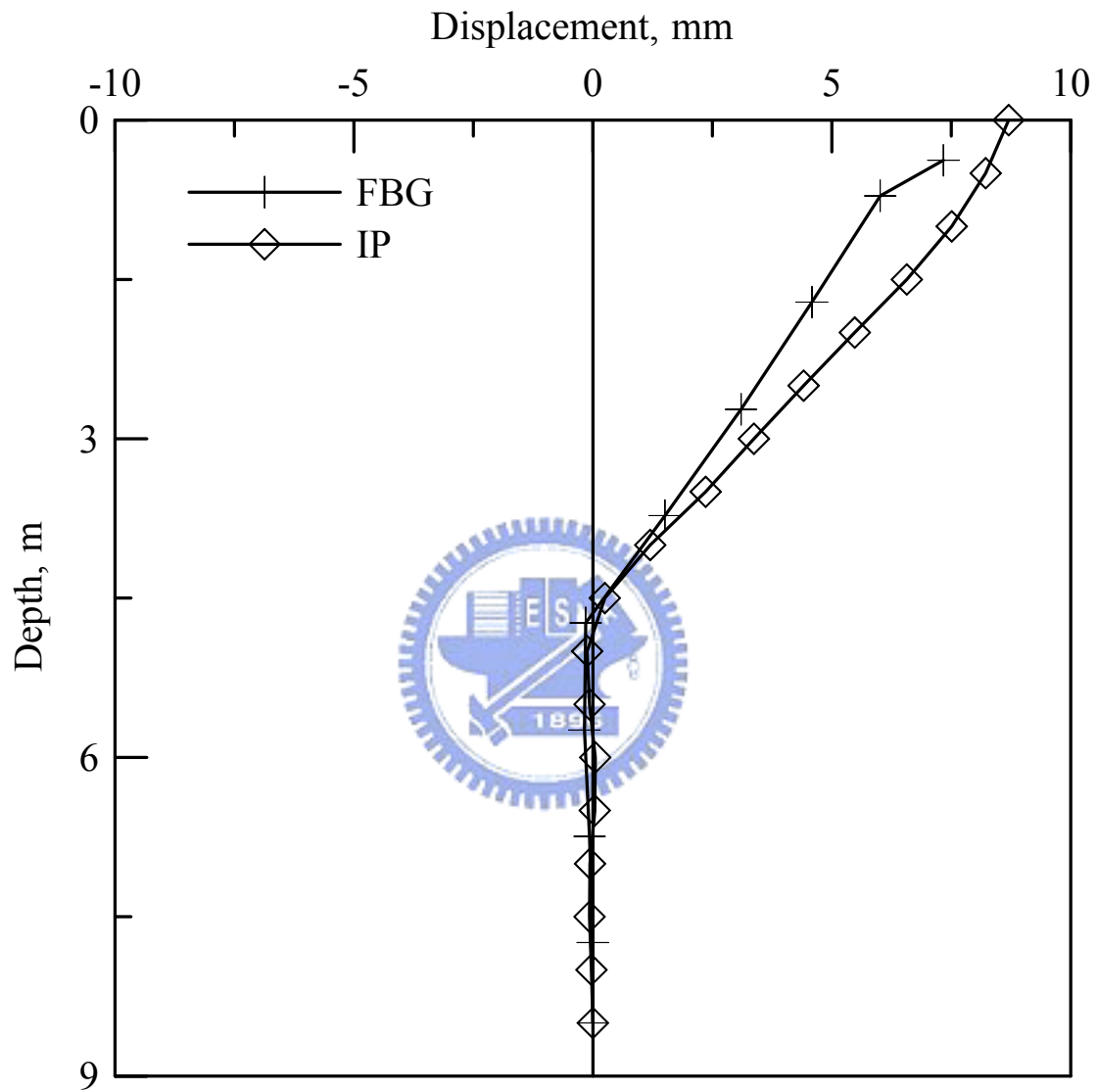


圖 4-16 9m 試驗-喇叭型變形二(9mm)

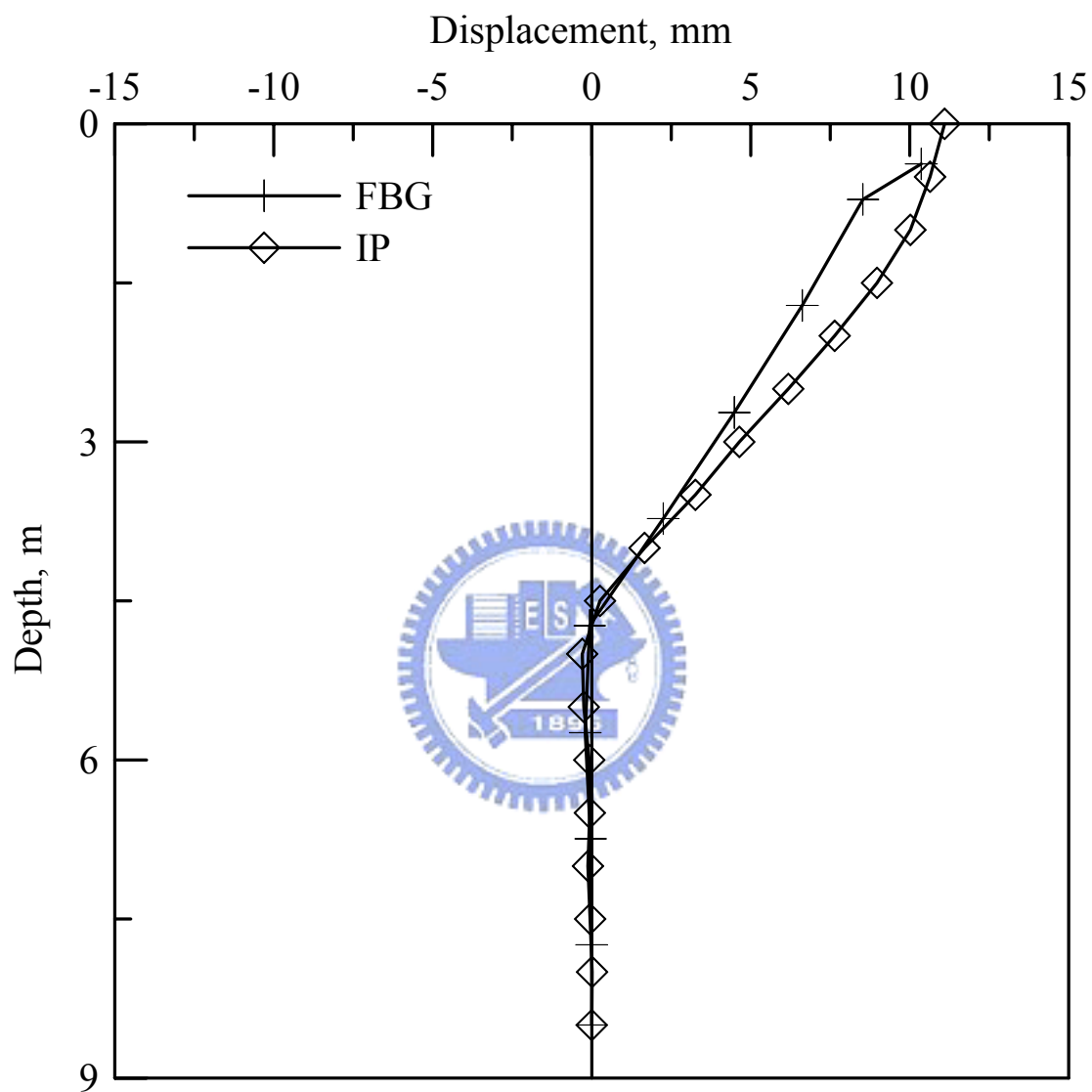


圖 4- 17 9m 試驗-喇叭型變形三(12mm)

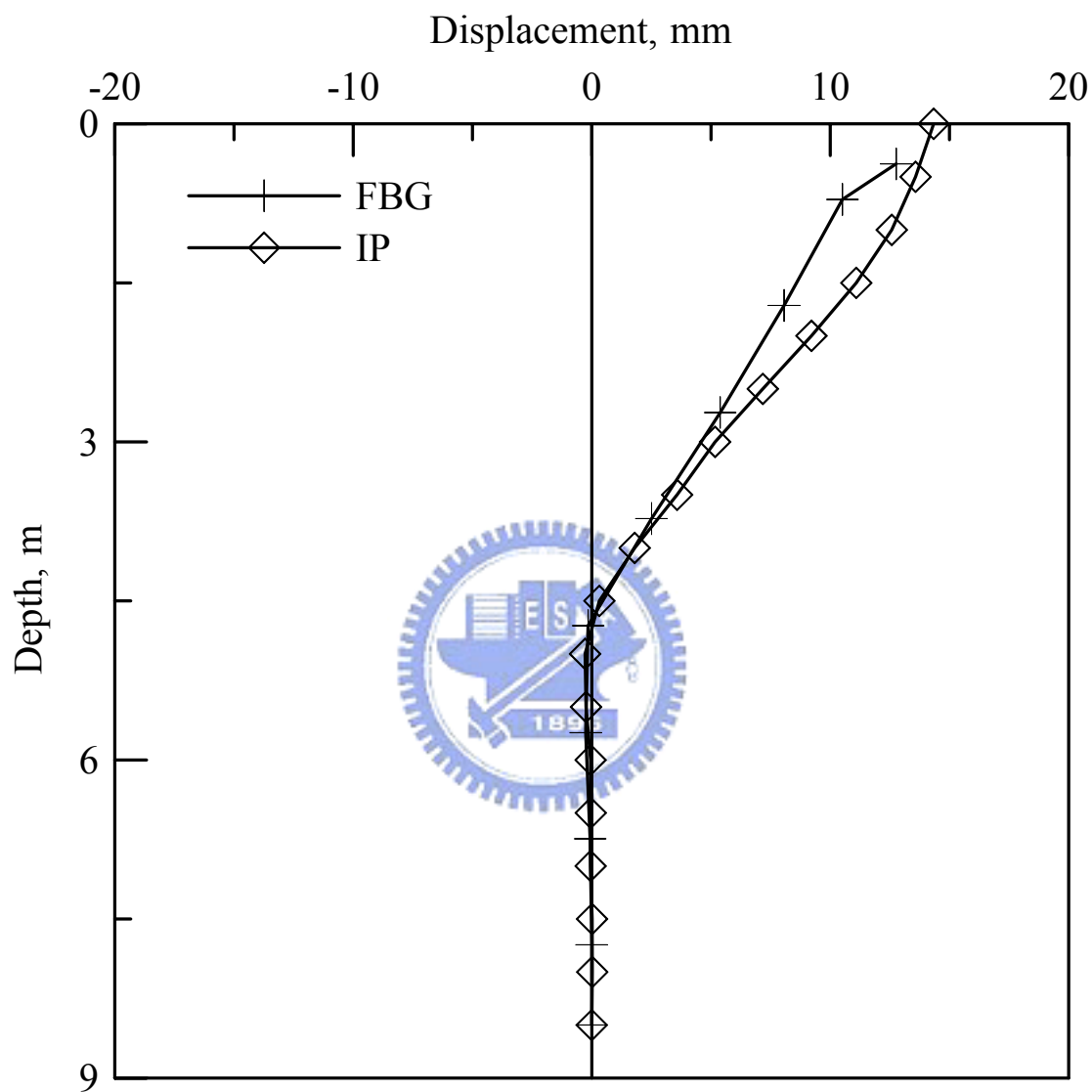


圖 4- 18 9m 試驗-喇叭型變形四(15mm)

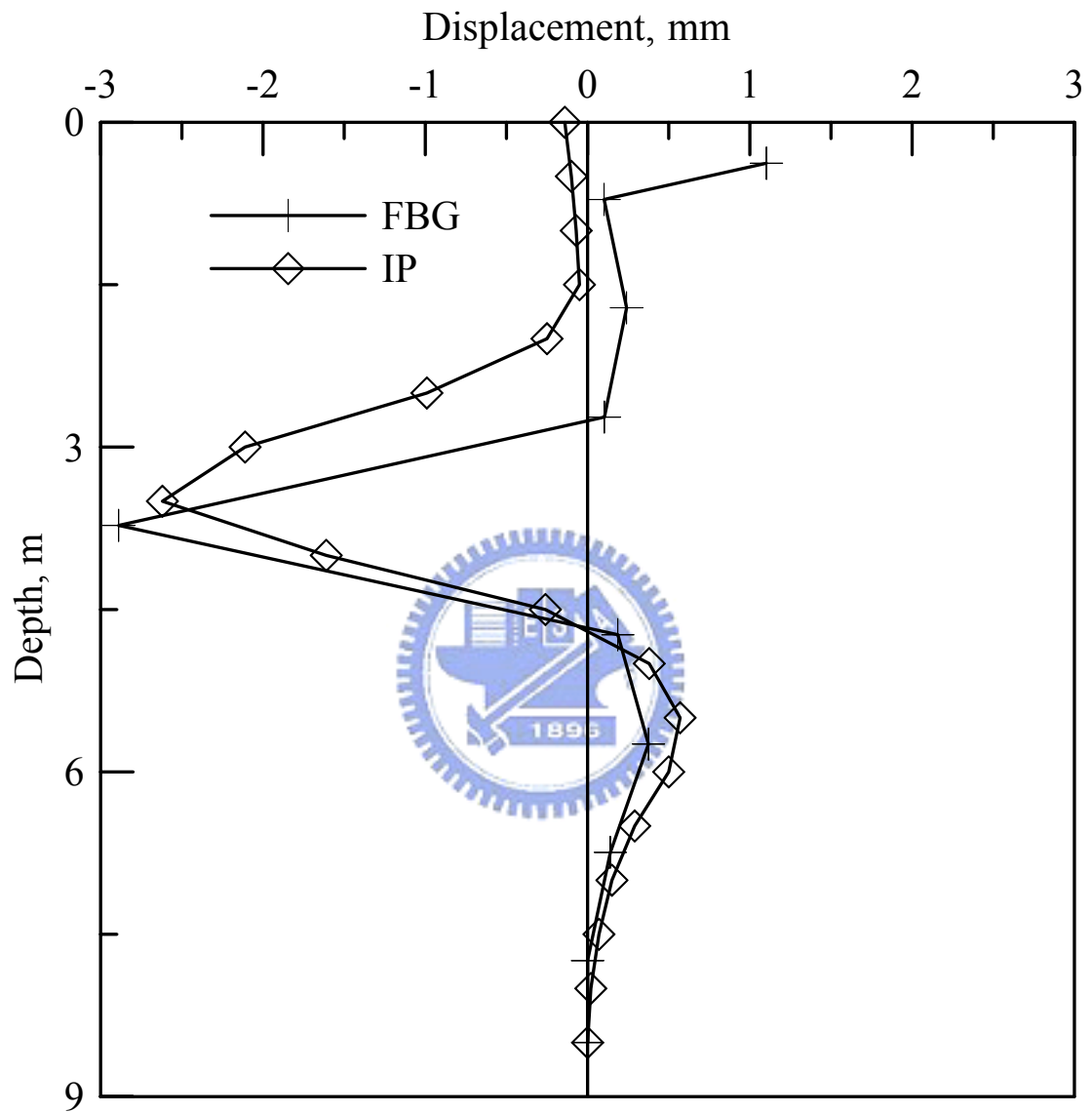


圖 4-19 9m 試驗-大肚型變形一(3mm)

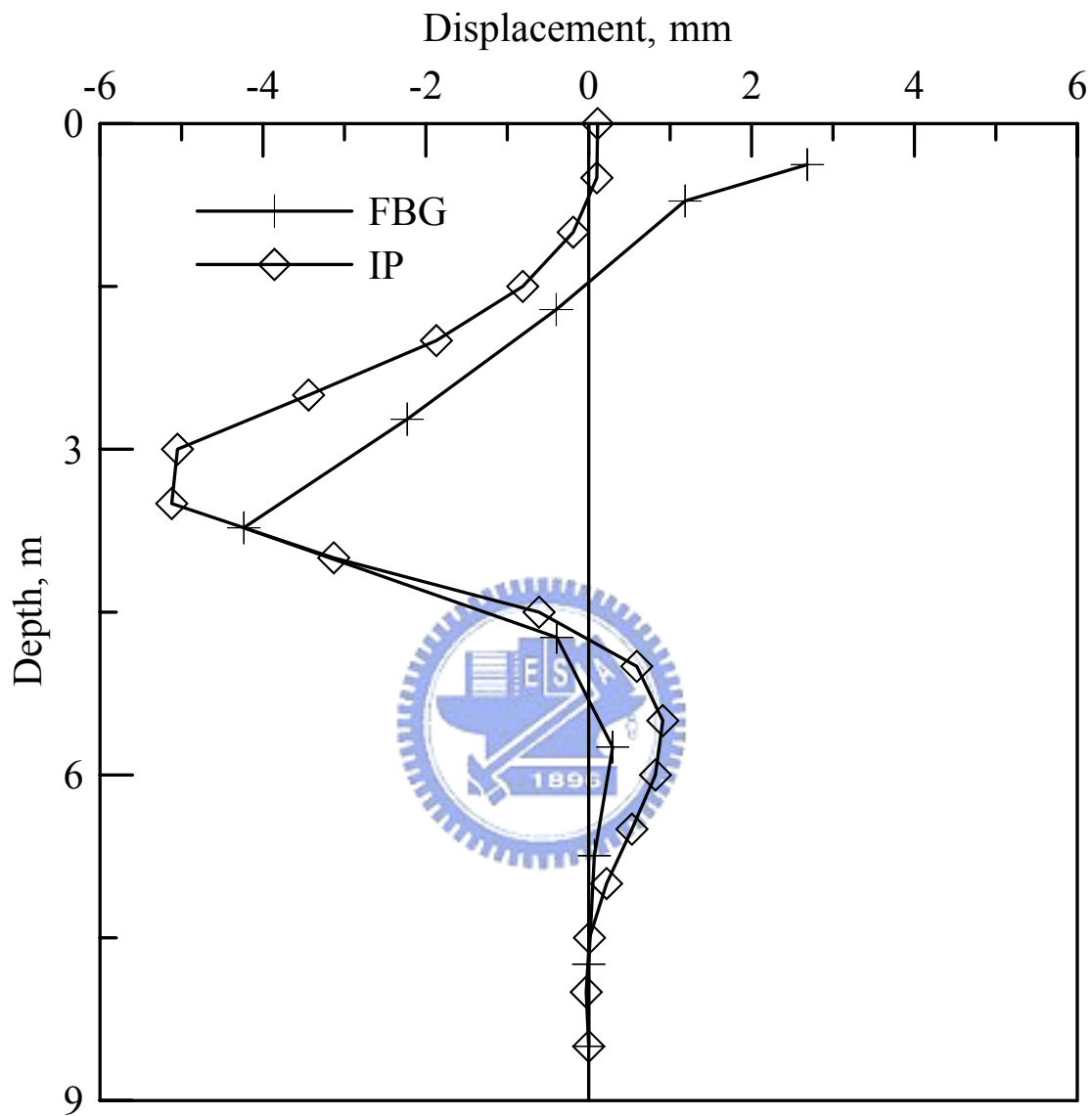


圖 4-20 9m 試驗-大肚型變形二(5mm)

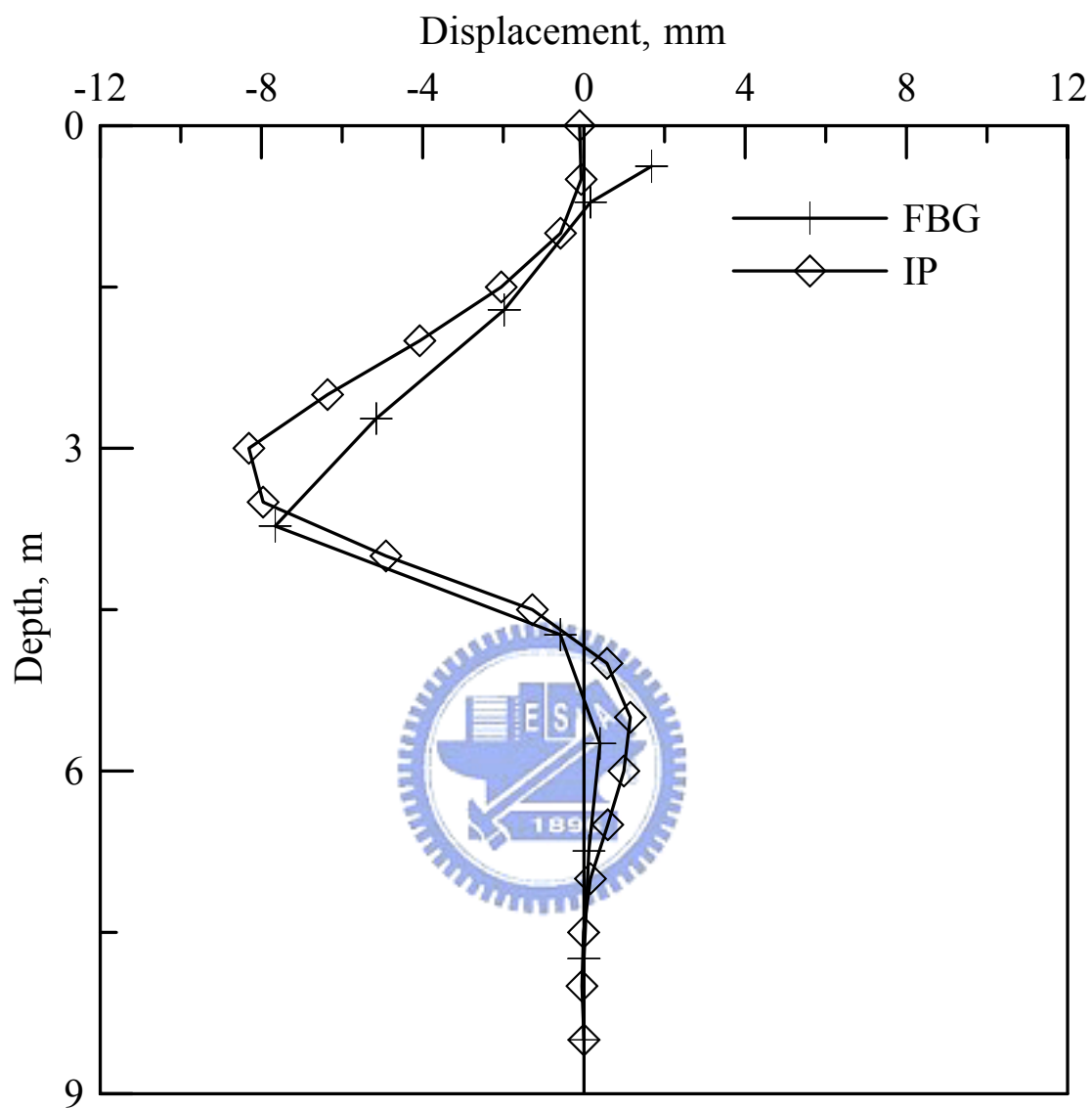


圖 4-21 9m 試驗-大肚型變形三(8mm)

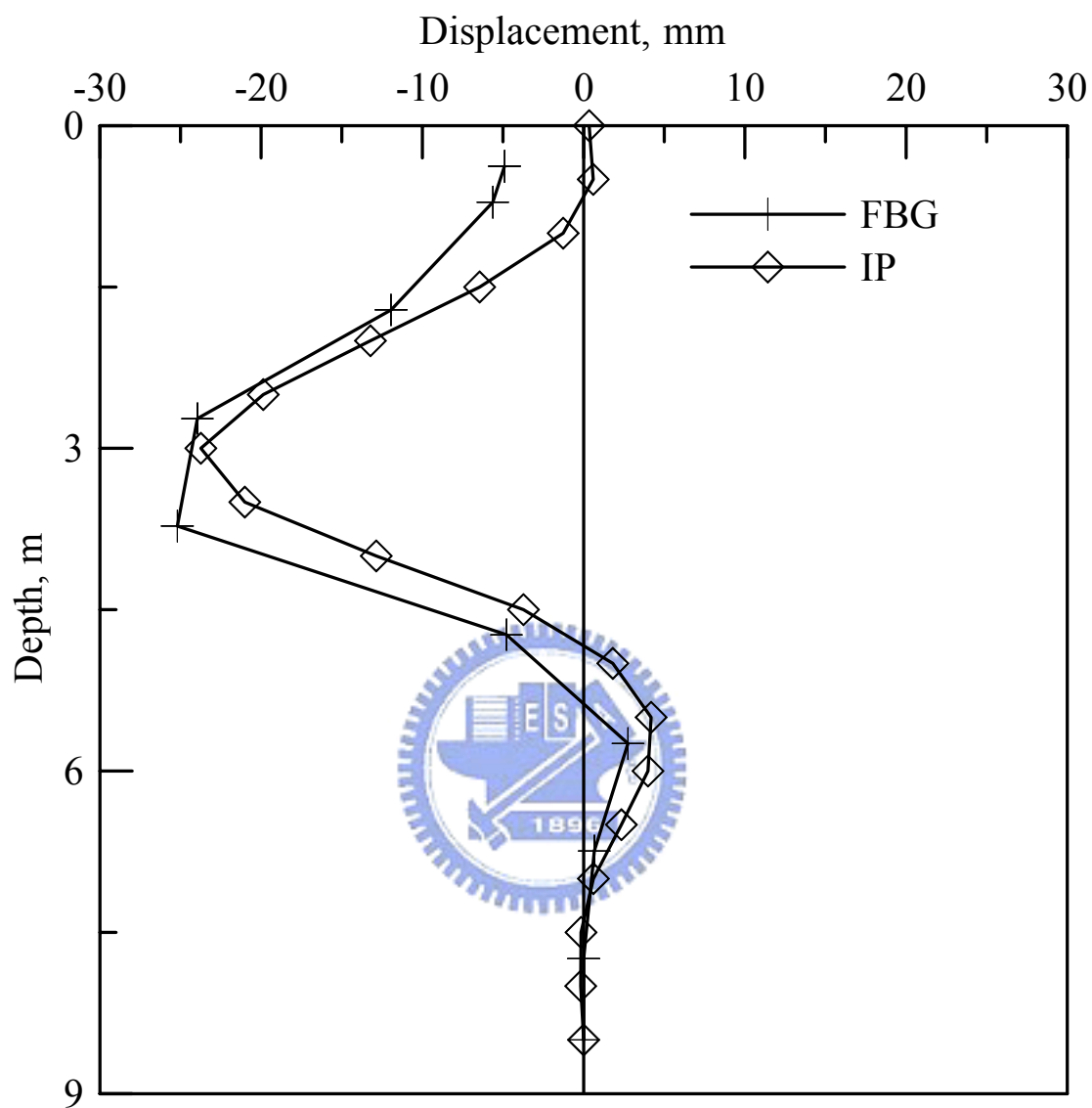


圖 4- 22 9m 試驗-大肚型變形四(24mm)

第五章 湖山現地應用實例

5.1 試驗場址說明

印證了節理式光纖光柵感測器具備了反應傾斜管變形的能力，本研究計畫於現地進行實際的地層滑動監測，試驗的場址選擇在雲林縣斗六市及古坑鄉交界處，湖南、湖山兩水庫預定地內兩處有滑動疑慮之邊坡，藉由傳統傾斜儀及節理式光纖光柵感測器進行監測。

5.1.1 試驗緣由

湖山水庫工程計畫於民國九十二年辦理壩區工程施工調查規劃與設計工作。在湖山主壩左壩座邊坡及溢洪道邊坡設有傾斜管(編號CB-73、CB-74及CB-50)進行地層變位量測。為水庫安全，有必要於水庫施工前、施工中以及完工後持續觀察，並同時發展測試新的長期監測技術—光纖變形監測及其輔助之電磁波時域反射(TDR)監測系統，俾供經濟部水利署中區水資源局長期且確實的監測資料，預先研判水庫邊坡之穩定情形。

本研究運用所研發的節理式光纖光柵感測來進行此計畫中之光纖變形監測部分，於調查中存疑之潛在滑動面處進行試驗，望能藉由傳統之傾斜儀以及節理式光纖光柵感測器瞭解滑動面之位置，並對於兩套儀器之量測結果作一比較。

為了進行比較，因此於舊有之 CB73 孔 (深度 28m) 旁續鑽一深 32m 之孔，稱之為 CB73-1，舊有之 CB73 改稱為 CB73-2。舊有的 CB50 (深度 38.5m)，在一產業道路旁之小山坡上，因機具的限制於此產業道路上增加一深 32m 之孔，稱此孔為 CB50-2，舊有之 CB50 改為 CB50-1。試驗孔位位置如圖 5-1 所示。

5.1.2 場址位置敘述

湖山、湖南兩座水庫預定壩址位於斗六市東南方 9 公里之斗六丘陵地區，屬斗六市及古坑鄉境內，為北港溪支流梅林溪上游之山坑，水庫之主要水源將由清水溪本流，桶頭附近引取餘水調蓄，其地理位置如圖 5-2 所示。湖山水庫由湖山主壩與湖山副壩組成，湖山主壩位於土地公坑溪谷上，谷底標高約 145m，谷底寬約 20m；湖山副壩座則落於於中坑溪溪谷上，谷底標高約 159m，谷底寬不及 10m，利用相鄰主壩與副壩蓄積兩溪谷構成單一集水區。(中興顧問，2003)

湖南水庫座落於於湖山水庫西南方，湖南壩位於南勢坑溪溪谷，谷底標高約 146m，谷底寬約 110m。壩址附近溪谷寬闊，以一薄山脊丘嶺與湖山水庫相鄰。考量水庫後續發展，開挖薄山脊連通湖山水庫與湖南水庫，規劃為湖山湖南水庫庫區。因此湖山湖南水庫由湖山主壩、副壩、湖南壩等主要構造物之組成，壩體皆為土石壩形式。水庫

溢洪道設計於兩水庫之間薄山脊向下游面邊坡，呈北向約略偏西 10° ，藉由導水隧道匯流入梅林溪內。(交大防災中心, 2000)

5.1.3 區域地質

本區域地質出露於大尖山斷層兩側的岩石以第三紀中新世晚期至第四紀更新世之沈積岩為主。依據雲林圖幅的分層，大尖山斷層沿線最老的岩層為南莊層，往上依序出現關刀山砂岩、十六份頁岩、大窩細砂岩、卓蘭層及頭嵛山層的香山砂岩(梅山層)和火炎山礫岩(湖本層)，以及不整合覆蓋於上述岩層的階地堆積層和沖積層，而與其相關的地質構造有觸口斷層、水社寮斷層、社稜坪斷層、檳榔宅斷層、鹿寮斷層和內寮向斜，相關地質圖如圖 5-3 所示。

壩址區及淹沒區地層均屬梅山層，係由砂層(SS)、砂泥互層(SS/MS)及泥層(MS)等三主要岩性及其互層所組成，地質年代較新，岩質軟弱，部份岩層膠結較差，鑽探過程岩心常因細料被水沖走而呈鬆散狀，抗風化能力差，遇水後極易軟化、崩解，強度極低，應屬膠結鬆散之軟岩。壩區內存在內林(梅林)背斜，內林背斜軸約以 250m 距離平行於湖山主壩、副壩下游側而斜切於湖南壩左岸。

主要不連續面大致可歸納為岩層層面、因邊坡解壓產生之兩組傾角近垂直之走向節理及傾向節理。特別是接近河谷邊緣，受河谷下切

側蝕，產生相對發達之節理。由於岩層層面傾向向北約 20° ，以致北向邊坡常存在順向層面破壞，或與節理面複合之岩楔平面滑動破壞之潛勢，三壩址左岸均為順向坡，此外，三壩址之左壩座附近皆存在舊崩塌地。壩址區各山脊部份地下水位多在地表 20m 以下，山腰部份的地下水位在地表下 10m 左右，坡趾河谷處於雨季時常有湧泉現象（中興顧問, 2003）。

5.2 節理式光纖光柵感測器之裝設

5.2.1 孔 CB50-2



計畫開始時，本研究所研發之光纖光柵感測器尚未發展至最後階段，所裝設之儀器為最後改良前之設計，因此有變形軟管摩擦力的問題，且 FBG 出現數點損壞之情況。為解決摩擦力之問題因此再度修改設計獲得解決後，經同意將其帶回修改設計並維修後再放回繼續監測，因此此處曾裝設過兩套儀器。

初期裝設的儀器尚未有量測節理及延伸節理之分別，此兩部分為同一單元，因此需要在現地一單元一單元之裝置，現場裝置照片如圖 5-4 所示，由於此孔剛好位於產業道路上，為避免車輛經過將光纖壓斷導致失去訊號，因此需要將其保護，保護之情況如圖 5-5 所示，由

於保護得當於監測期間並未有被壓斷之情況發生。FBG 波長及深度位置設計如圖 5- 6 所示。由於需全部於現場裝設，因此 32m 的深度花費將近 18 個小時。所以花費過多之時間，也是非節理式設計另一個極大的缺點。

待修改過後之設計，擁有量測節理及延伸節理兩部分的設計。此設計不僅修正了摩擦力過大之問題，並且將一單元分為量測節理及延伸節理兩部分。分為兩部分就可以在室內預先將部分之儀器事先接好，預先接好的長度視運送之交通工具長度而定，但也不宜過長。本試驗預先將儀器連接為 2~3m 之長度，於室內預先連接好之情況如圖 5- 7 所示，因此到現地後只需將段與段中間之延伸節理加以組裝即可，此設計縮短到只需約三分之一裝置的時間。現場裝設的狀況如圖 5- 8 所示，FBG 波長及深度位置設計如圖 5- 9 所示。

5.2.2 孔 CB73-1

因為時間以及監測上需要，加上孔 CB73-1 摩擦力的問題較為輕微，故此處之監測儀器並未帶回做修改。因此此處之監測儀器為非節理式的光纖光柵感測器，從裝置後至監測結束並未有抽換之動作。現場裝設情況如圖 5- 10 所示，裝設結束情況見圖 5- 11，FBG 波長及深

度位置設計如圖 5-12 所示

5.3 CB50 監測結果分析

CB-50 此場址位於水庫溢洪道邊坡，孔 CB50-1 供傳統傾斜儀量測，孔 CB50-2 則放置光纖光柵感測器。傾斜管 A 方向與放置光纖光柵感測器用的之傾斜管 A 方向標示於圖 5-13 中，圖中箭頭標誌方位即此處邊坡層面，位態為 $N55^{\circ}W, 13^{\circ}NE$ ，並且指向下坡面。圓形標誌代表傾斜管，穿越該圓形標誌直線代表 A 方向，CB50-1 與 CB50-2 所用傾斜管 A 方向分別是 $N12^{\circ}E$ 與 $N60^{\circ}E$ ，傾斜觀測管中的兩組溝槽其方向與邊坡可能滑動方向較相同者定義為 A 方向，另一組則定義為 B 方向。A+方向指向下坡，B+方向則定義為 A+方向順時針旋轉 90° 。

5.3.1 孔 CB50-1 傾斜管監測結果分析

本研究之傾斜管量測結果參考 Mikkelsen(2003)，修正傾斜儀量測常見誤差來源。由於量測次數過多，為了判別方便，只呈現數組具代表性之重要數據以利分析結果判釋。

由圖 5-14 及圖 5-15 可知至 6 月 22 日前，A 方向與 B 方向在深層皆未有明顯滑動，僅是左右搖晃約 1mm 之差異，相對於 CB50-1 傾斜管 39m 長度，該搖晃角度甚小，為 0.013° 。其次，觀察 3 月 7 日量測

資料，其量測時間前一日凌晨(3月6日)，於宜蘭南澳發生台灣罕見，芮氏規模 5.5 的雙主震，分析結果顯示深度 2.5m 處存在位移，往下邊坡方向滑動 8mm，對應 B^+ 方向也是在 2.5m 處發生 2mm 變位，比對 3 月 7 日前之資料，可歸納此一現象為地震所造成的地層滑動。

地層滑動的現象於 3 月 7 日至 5 月 5 日呈現穩定，A 方向與 B 方向在這段期間位移仍是 8mm 與 2mm。5 月初梅雨季開始，比較梅雨季開始前後兩筆監測資料(5 月 5 日與 5 月 20 日)，明顯可知梅雨季開始後，如 5 月 20 日量測資料顯示， A^+ 方向與 B^+ 方向位移量增加至 20mm 與 5mm，顯示 3 月 6 日雙主震使得 CB-50 淺層滑動，而緊接梅雨造成淺層持續不穩定。

最後，6 月中旬發生中南部豪大雨，並造成雲嘉南高屏地區重大災情，6 月 22 日至現場量測傳統傾斜儀時發現，在 2.5m 深度有不易放入的現象，同時分析結果顯示位移繼續增大， A^+ 方向與 B^+ 方向位移量增加至 40mm 與 10mm。

由上述可發現 3 月 6 日雙地震、5 月初梅雨季、以及 6 月中旬中南部豪大雨造成 CB50-1 淺層 2.5m 深度處發生位移，其 A 方向與 B 方向呈現良好的比例關係，經由計算可得合位移量為 41mm，方向指向 $N26^\circ E$ 。

5.3.2 孔 CB50-2 光纖光柵感測器監測結果分析

由圖 5- 16 來看，孔 CB50-2 光纖光柵感測器所得到之地層移動量皆很明顯，但由傳統傾斜儀的數據可了解，此兩處場址位移雖然時正時負，卻依舊是在原點附近晃動，而且位移量皆不明顯，故可視之為位移極小或沒有位移。相較起來光纖之值稍嫌過大。

由此三次量測所得到的兩條位移曲線，雖然其值偏大但卻有相同之趨勢。此原因極有可能是因為初始值錯誤所導致。初始值之錯誤應該是由於光纖光柵感測器的設計上有所缺陷。此時所放置的設計，量測軟管四周是由四顆塑膠螺絲控制其滑動方向(前幾章所說明及試驗的設計為此時所用設計的再改良)。由於塑膠螺絲與量測軟管此兩者間磨擦力的影響，在裝置完成時摩擦力並未完全釋放掉，導致初始值受到摩擦力之影響。當初始值量測後摩擦力逐漸釋放，此不受摩擦力影響之初始值才是實際之初始值。由於後者之初始值才是正確之值，因此造成量測得到之移動量過大之情況。若不以 1 月 18 日之值為初始值，改以 2 月 24 日之值為初始值，則 3 月 7 日所得到之位移量則較小。

由圖 5- 16 發現，3 月 7 日和 1 月 18 日的相對位移量和 2 月 24 日和 1 月 18 日的相對位移，在地下 17m 處突然有極大的差異，然後

在 10m 後趨勢完全相同，兩者只僅存在一個偏移量。因此 CB50-2 所裝設之 FBG 光纖光柵偏斜儀應該是在 17m 存在誤差，使得上方位移存在偏移量所致。綜合 CB50-1 傾斜管資料與前述說明，初步排除此段時間中 CB50-2 有造成光纖光柵感測器感應之滑動發生。

針對此時之光纖光柵感測器存在的問題，經過計畫審查委員同意後，將設置於孔 CB50-2 的光纖光柵感測器帶回改良，修改為如前述所說明之新設計。為了將摩擦力之影響大幅降低，因此將此儀器量測軟管的支架設計改用其他方式替代。修改後之量測節理標定即為 4.1.1 節所說明之標定結果，由此修正後之設計望能得到更可信之結果。

在 4 月 15 日至 5 月 24 日修改期間，孔 CB50-2 的監測工作改由傳統傾斜儀替代，量測資料如圖 5- 17 和圖 5- 18 所示。4 月 15 日至 5 月 5 日期間，傾斜管尚稱穩定，然而 5 月初梅雨季開始，經過連續降雨，5 月 24 日上山裝設修改過之儀器。在裝設之前，需量測一筆傾斜儀資料作為初始資料對照之用，此時由傾斜儀資料可發現，5 月 24 日孔 CB50-2 與 5 月 20 日孔 CB50-1 傾斜管皆有量測到地層因梅雨季的連續降雨所產生之地層滑動現象。

5 月 24 日完成修改後之儀器安裝，由於當日裝設到最後雨勢增大，為顧及相關電子儀器，避免淋雨損壞，因此保護措施做好後立即量測數據，沒有充分等待其數據及溫度完全反應穩定。因此圖 5- 19

中所顯示的 5 月 24 日至 6 月 2 日之間存在大幅度位移 80mm 情況。但由其下方趨勢幾乎為一直線可判斷，該異常大幅度位移乃是其裝設當日儀器尚未達到完全穩定以及溫度效應所致。

6 月 2 日至 6 月 9 日雖有位移量發生，但位移量小且趨勢相同，因為儀器及溫度誤差累積之結果，因此判定其無滑動。6 月 9 日至 22 日期間中南部發生連續豪大雨，對照監測資料，可發現深度 6m 以上出現滑動的跡象，而 6 月 24 日量測時深度 21m 以下有一條傳輸用的光纖失去訊號，但可從相對的另一側光纖數據得知該處並無明顯的滑動產生，故假設 21m 為不動點，以 6 月 9 日 21m 處資料為原點，累積計算得到圖中 6 月 24 日的位移量。

由於節理式光纖光柵感測器之位移計算方式需累加角度來計算，因此若是深層有一小角度誤差則計算至上方則會有一可觀之位移量誤差，如圖 5-19 中吃誤差一般，此現象與傳統傾斜儀(IP)誤差來源中之 bias-error 相似，因此若加以修正此角度所造成之誤差累積，修正後結果如圖 5-20 所示，則可更明顯的看出地層之滑動。

由分析結果可知場址 CB50-2 在深度約 6m 處有土體滑動現象，特別是該現象伴隨連續降雨發生。雖然光纖光柵感測器分析結果與同地點的傳統傾斜儀分析結果在深度的判釋上有所差異，但節理式光纖光柵感測器分析結果仍能提供定性的參考。

5.4 孔 CB73 監測結果分析

CB-73 場址位於湖山左壩座邊坡，孔CB73-1 放置光纖光柵感測器，孔CB73-2 供傾斜儀量測，孔CB73-1 的A方向與傾斜管CB73-2 的A方向標示於圖 5- 21。圓形標誌代表傾斜管，穿越該圓形標誌直線代表A方向，圖中箭頭標誌方位即為該處邊坡層面位態，為 $N63^{\circ}W$ ， $16^{\circ}NE$ ，並且指向下坡面(A⁺方向)。傾斜觀測管中的兩組溝槽其方向與邊坡可能滑動方向較相同者定義為A方向，另一組則定義為B方向。A⁺方向指向下坡，B⁺方向則定義為A⁺方向順時針旋轉 90° 。



5.4.1 孔 CB73-2 傾斜管監測結果分析

由文獻中得知，CB73-2 孔位處於民國 84 年大規模崩坍的谷地中，地表存在覆蓋崩積土，而文獻中之舊有傾斜管在 2.9m 深度被剪斷，因此 CB73-2 的淺層崩積土應該為滑動變形的來源機制。

孔 CB73-2 傾斜管分析結果如圖 5- 22 和圖 5- 23 所示，觀察截至 2 月 1 日數筆資料分析結果，A 方向與 B 方向位移甚小(2mm 內)可以確認為穩定狀態。2 月 24 日資料顯示在地下 7.5m 處出現大肚子形狀，由於傾斜管總長為 28.5m，此處相當於由底部向上算起第七根傾斜管接頭位置，顯然該接頭並未銜接良好，或該處存在不良之灌漿，造成

空洞，使得傾斜管在該處存在較大的變化，並隨時間增大曲率。

文獻中(巨延工程,1995a)指出此區域容易受到暴雨或大地震發生而不穩定，但是經過3月6日芮氏規模5.5的雙主震發生後，並未在3月7日與3月22日的資料發現立即性的位移變化，而是遲至4月25日開始於深度3.5m位置發生剪動，A⁺方向位移為5mm，然而B方向位移量不明顯。

比對今年梅雨季開始前後兩筆監測資料(5月5日與5月20日)，顯示梅雨造成深度3.5m處，A⁺方向變位由5mm增大至37mm，B⁺方向則有6mm的變位，同時現場量測也有傾斜儀不易通過該處之現象。A⁺方向於5月20日到6月9日間維持37mm變位，而B⁺方向變位持續增加，6月9日達到8mm。

6月9日至6月22日其間，中南部發生連續豪大雨，待6月22日量測時欲將傾斜儀置入孔CB73-2量測資料時，已經完全無法放入，經由鐵捲尺量測剪動面深度，約在深度3.5m處。

5.4.2 孔CB73-1 光纖光柵感測器監測結果分析

由圖5-24來看，2月1日至2月24日，有一約50mm滑動量，但由傳統傾斜儀枝節股顯示，在3月22日之前的資料並無明顯變化。

造成此現象的原因是因為裝設於孔 CB73-1 的光纖光柵感測器中，變形軟管四周是由四顆塑膠螺絲控制其滑動方向，使得裝置完成時摩擦力並未能即時完全釋放掉，導致初始值受到影響，該摩擦力需要時間才能慢慢消除，因此直至 3 月 7 日的變化應該是摩擦力導致的誤差為主要因素。

由 4 月 25 日資料可發現往 A+ 方向發生 15mm 變形，而 5 月 5 日為誤差之影響，但由其趨勢一致可瞭解其實並無變形產生。造成趨勢相同但位移量卻逐漸增加的主要原因有可能是因為儀器以及溫度效應微小誤差所致，雖然此誤差量極小，但由於累加計算的關係，乃造成此種現象，或者是變形軟管摩擦力仍未釋放完全所致。

5 月初梅雨季開始，至 5 月 24 日量測資料時顯示孔 CB73-1 的傾斜管發生地滑現象，由資料所得知，變形曲線在淺層 3~4m 深度位置發生顯著變化，而且同地點的孔 CB73-2 傾斜管分析結果在 5 月 20 日時已經在深度 3.5m 位置發生剪動，可以判定 5 月 20 日該處確實有發生滑動。

6 月 2 日與 9 日兩筆資料顯示地層回復穩定，同樣與傳統傾斜管分析結果吻合。然而 6 月 22 日量測時，傳統傾斜管已經被剪斷而無法放入傾斜儀進行量測。由於光纖光柵感測器為置入型的現地監測儀器，因此只要訊號仍能傳回，仍能獲得相關資料，因此可以發現 6 月

22 日該處再次發生位移量約為 40mm 的滑動，滑動面大約在深度約 3 ~4m 淺層處，與同地點傾斜管經由捲尺量測得的 3.5m 深度相符。



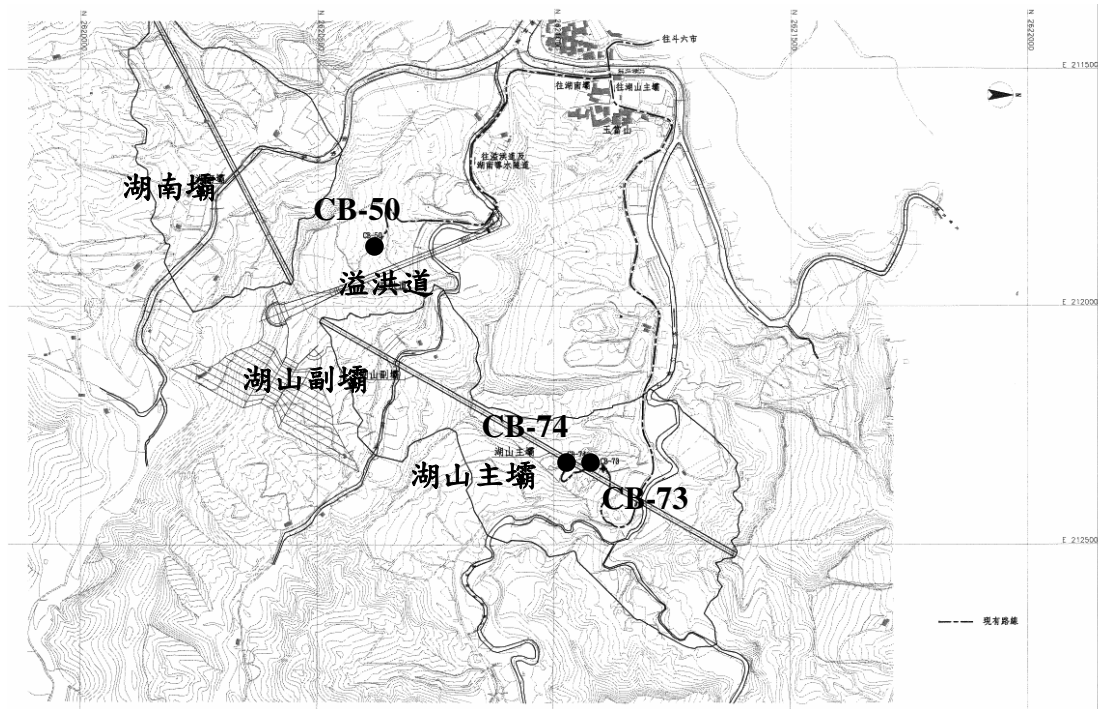


圖 5-1 各孔號傾斜管相關地形位置

(摘自交大防災中心,2005)

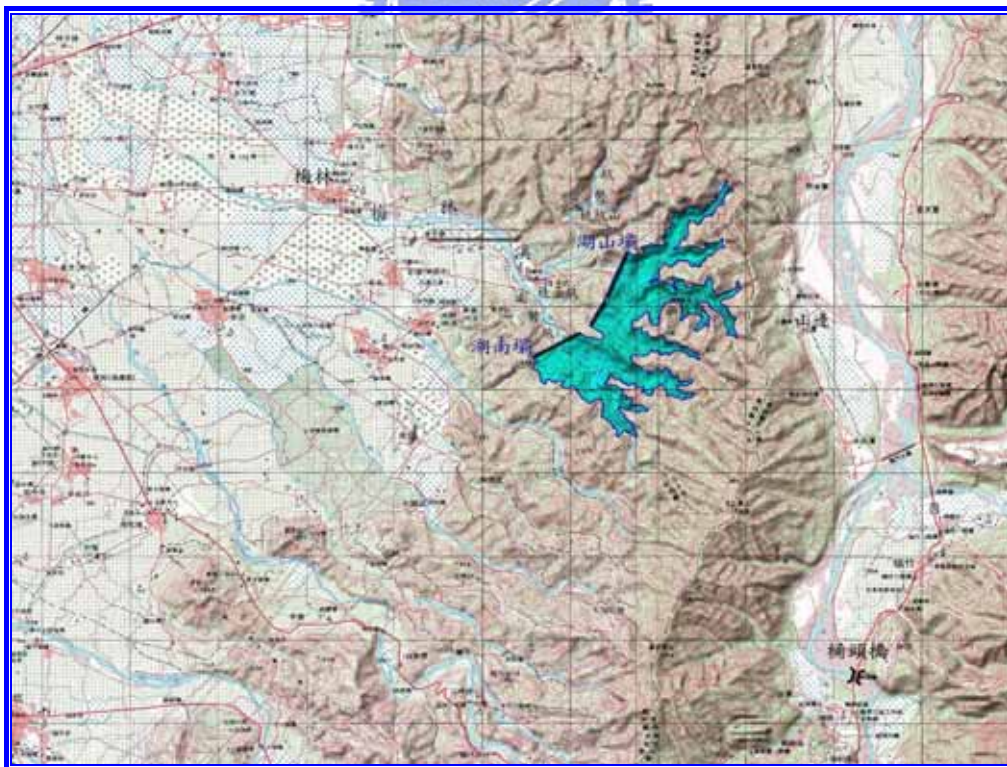


圖 5-2 湖山湖南壩址地形圖

(摘自中興顧問,2003)

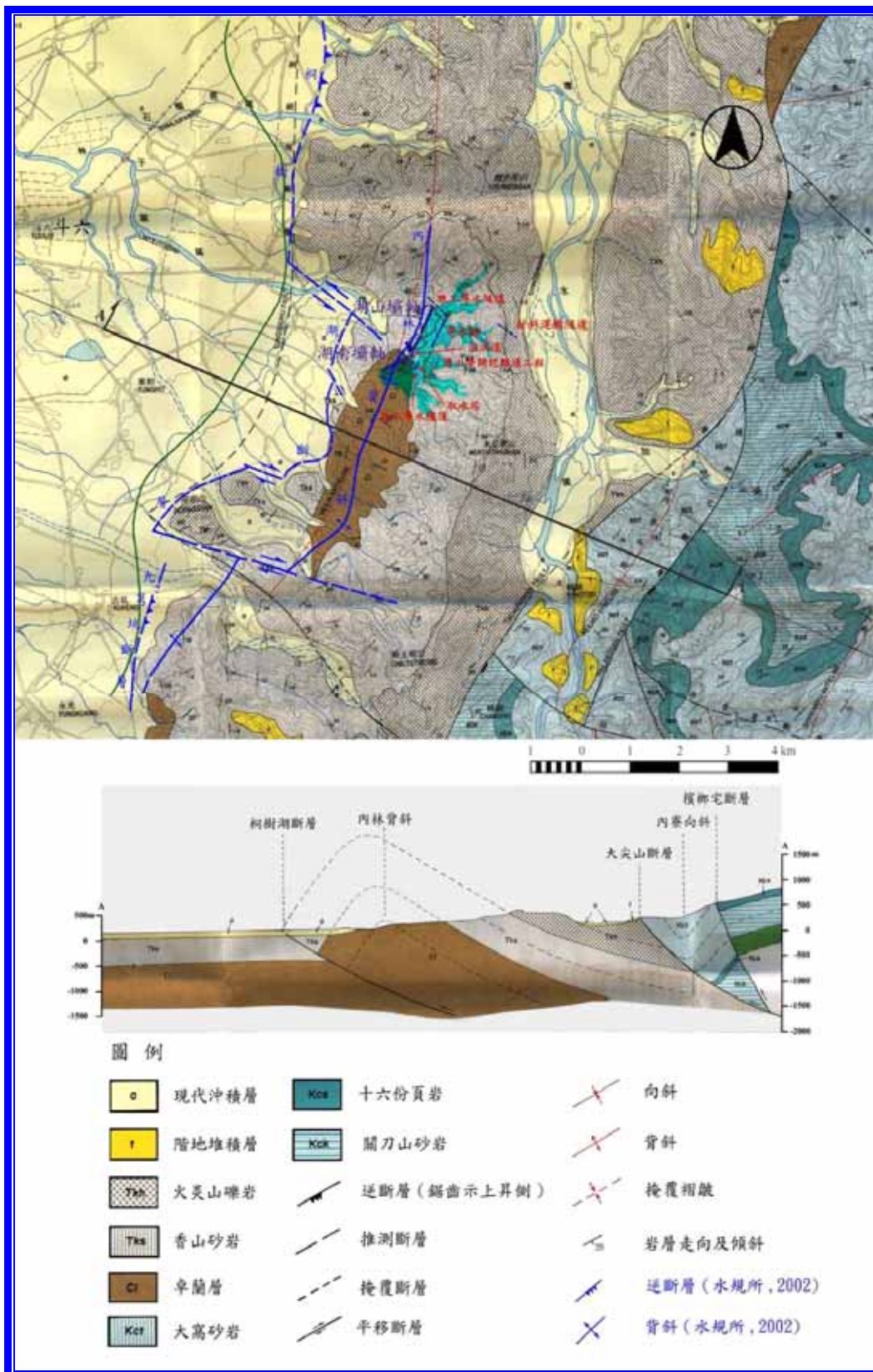


圖 5-3 湖山湖南壩址地質圖

(摘自雲林圖幅, 1998)



圖 5-4 修改前 CB50-2 現場裝設圖



圖 5-5 孔 CB50-2 保護措施狀況

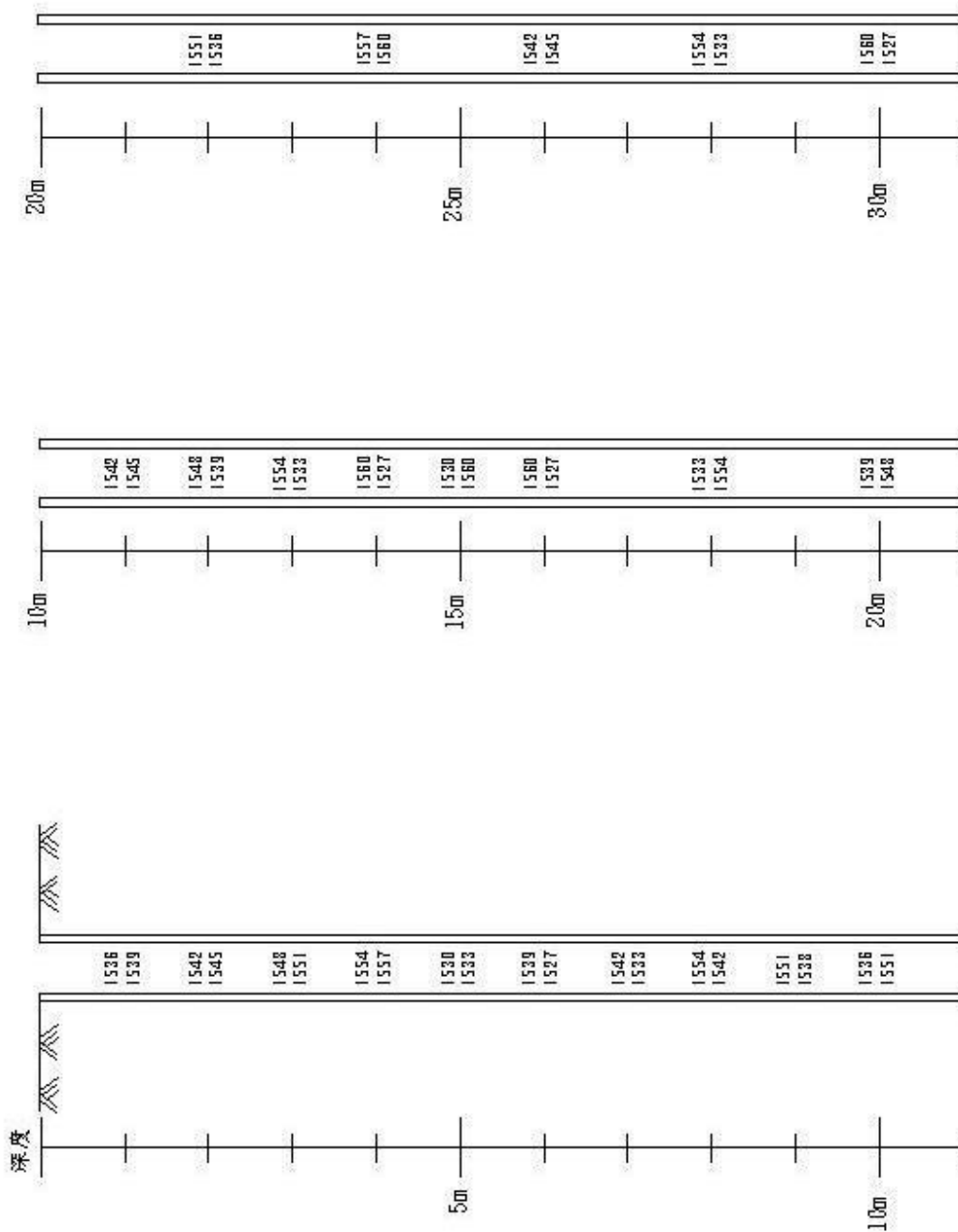


圖 5-6 修改前 CB50-2 孔 FBG 深度示意圖



圖 5-7 室內預先組裝情況圖



圖 5-8 修改後 CB50-2 現場安裝圖

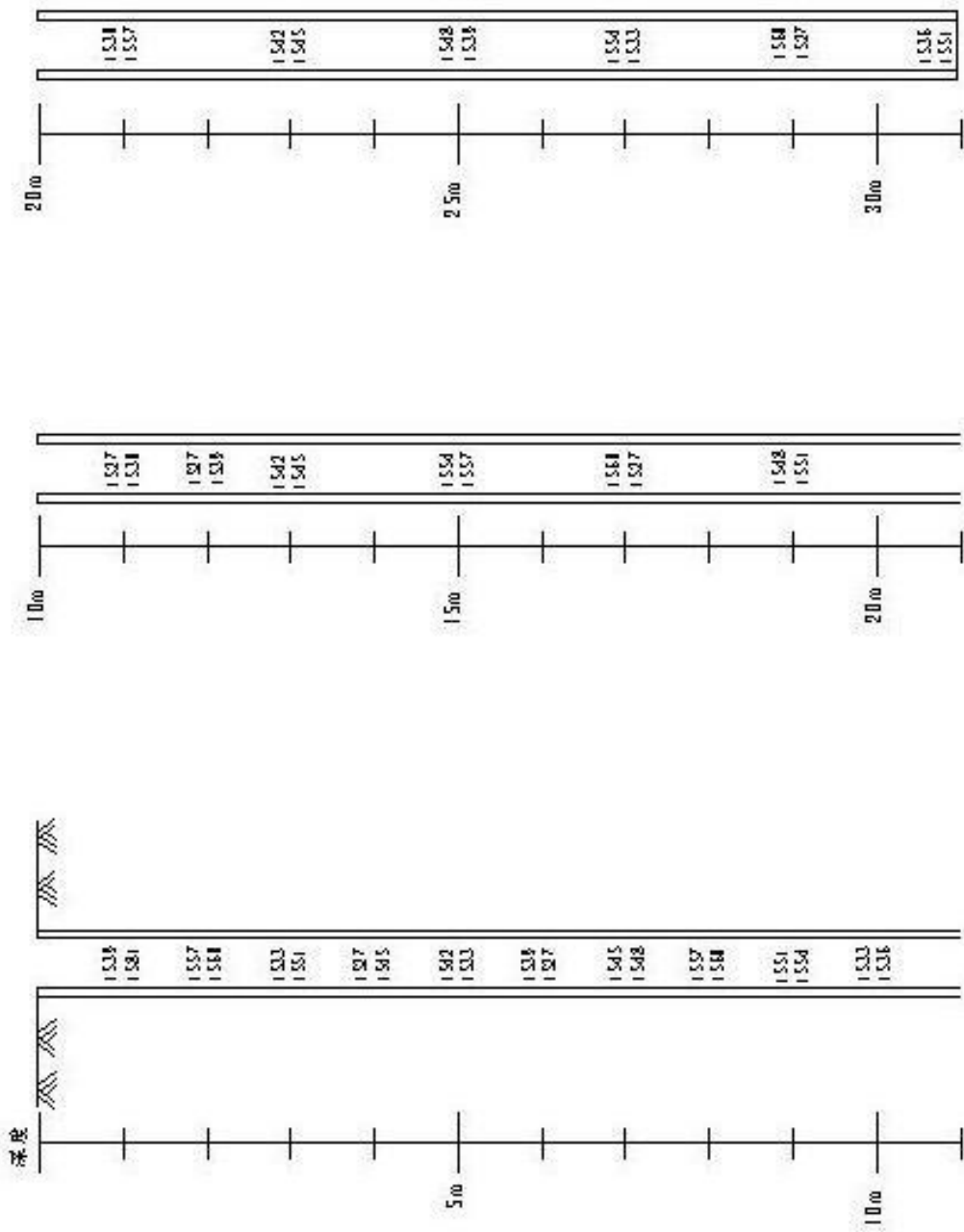


圖 5-9 修改後 CB50-2 孔 FBG 深度示意圖



圖 5-10 孔 CB73-1 現場裝設情況



圖 5-11 孔 CB73-1 裝設結束情況

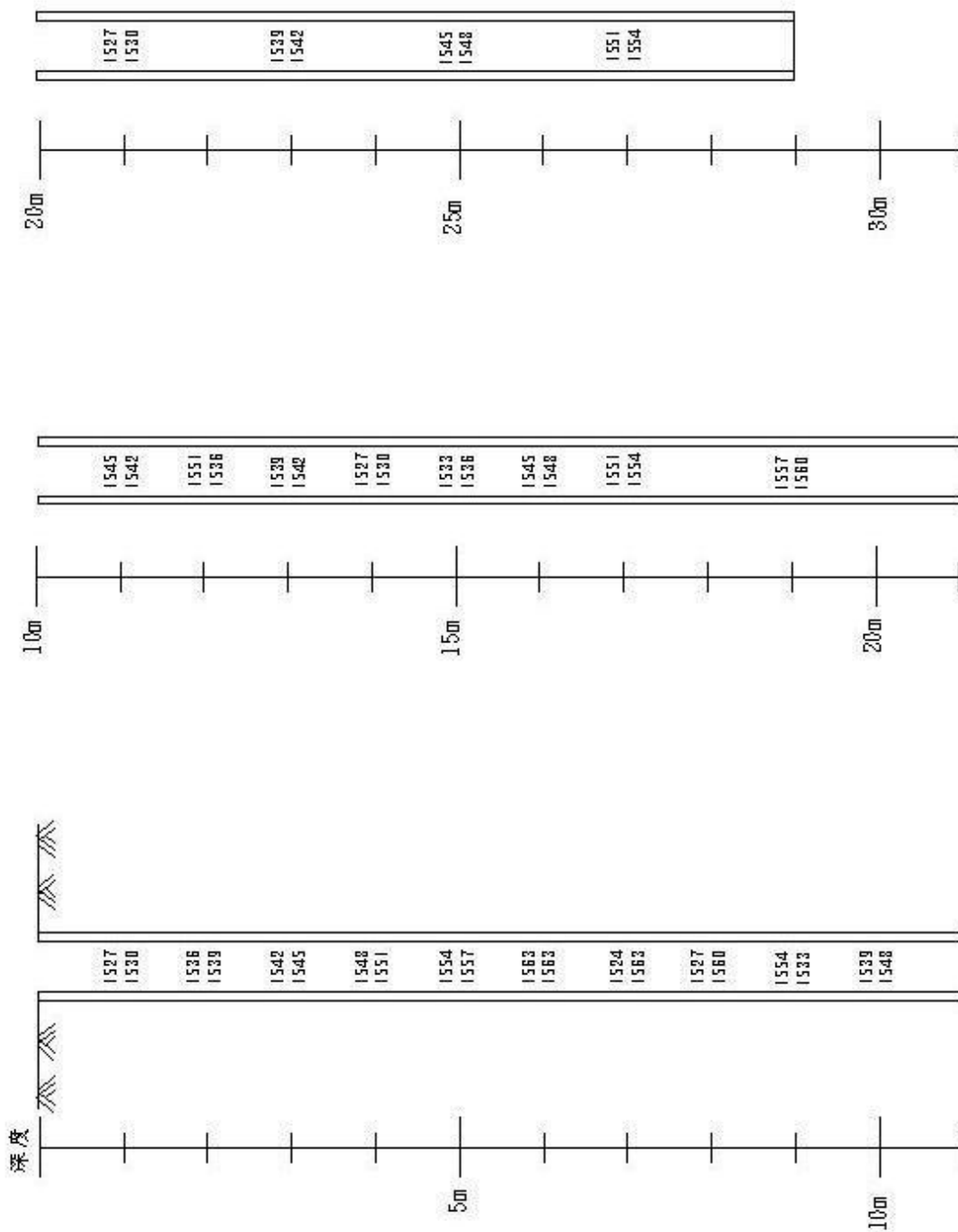


圖 5-12 孔 CB73-1 FBG 深度示意圖

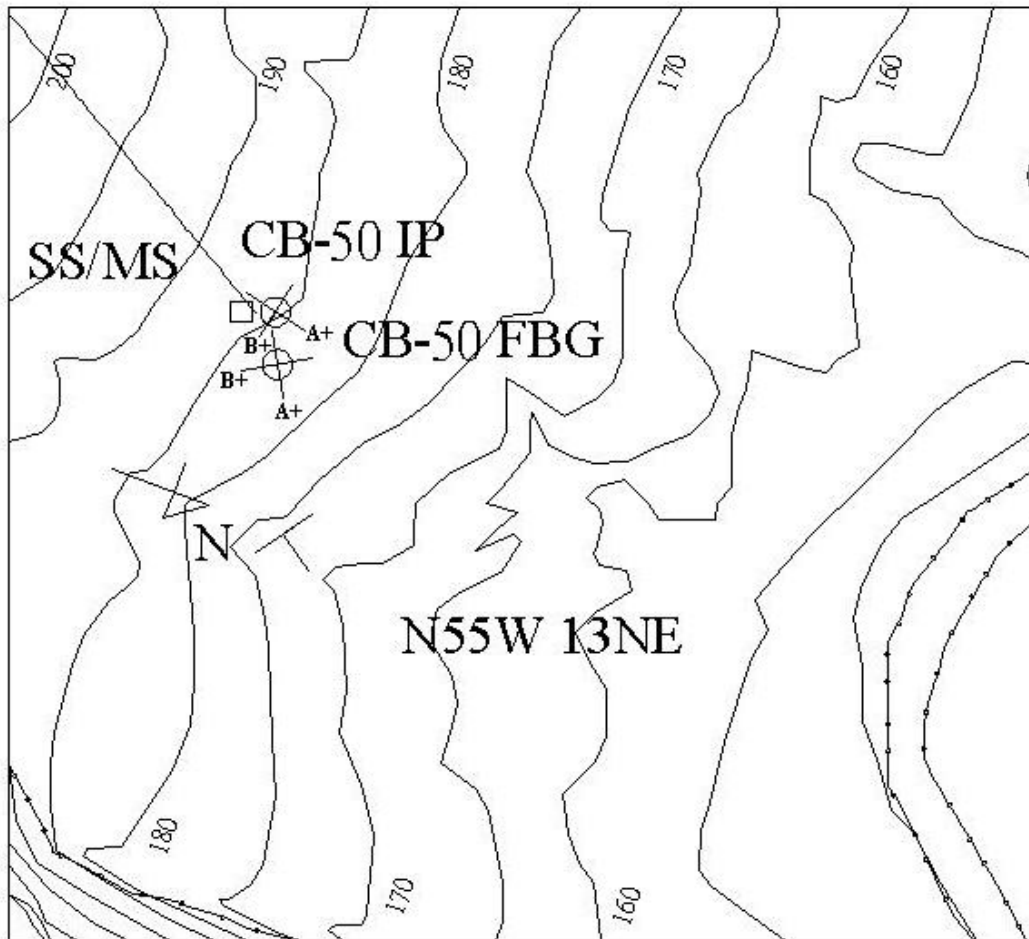


圖 5- 13 孔 CB50 監測儀器方向圖

(摘自交大防災中心, 2005)

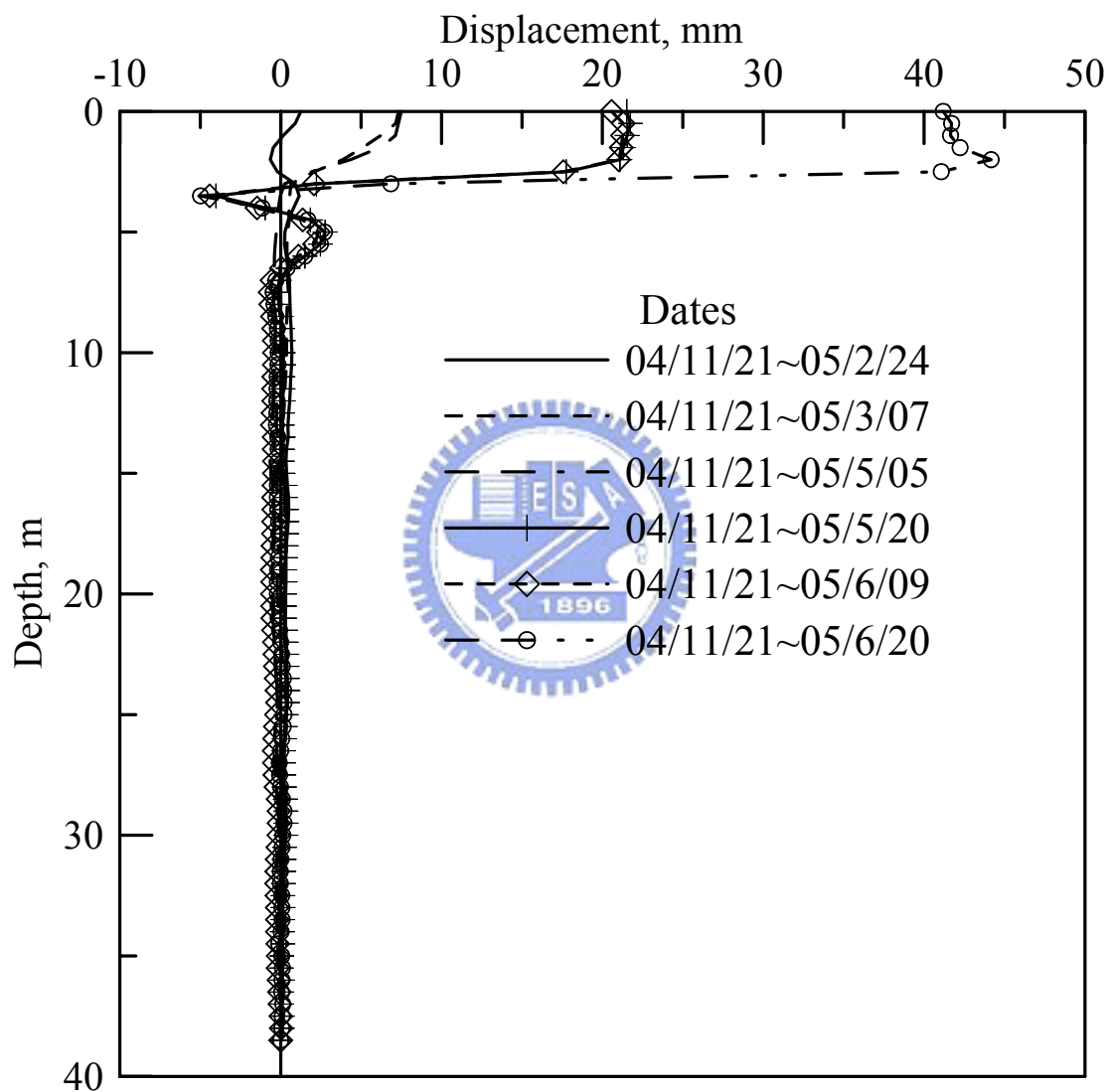


圖 5-14 孔 CB50-1 傾斜管位移變化圖(A 向)

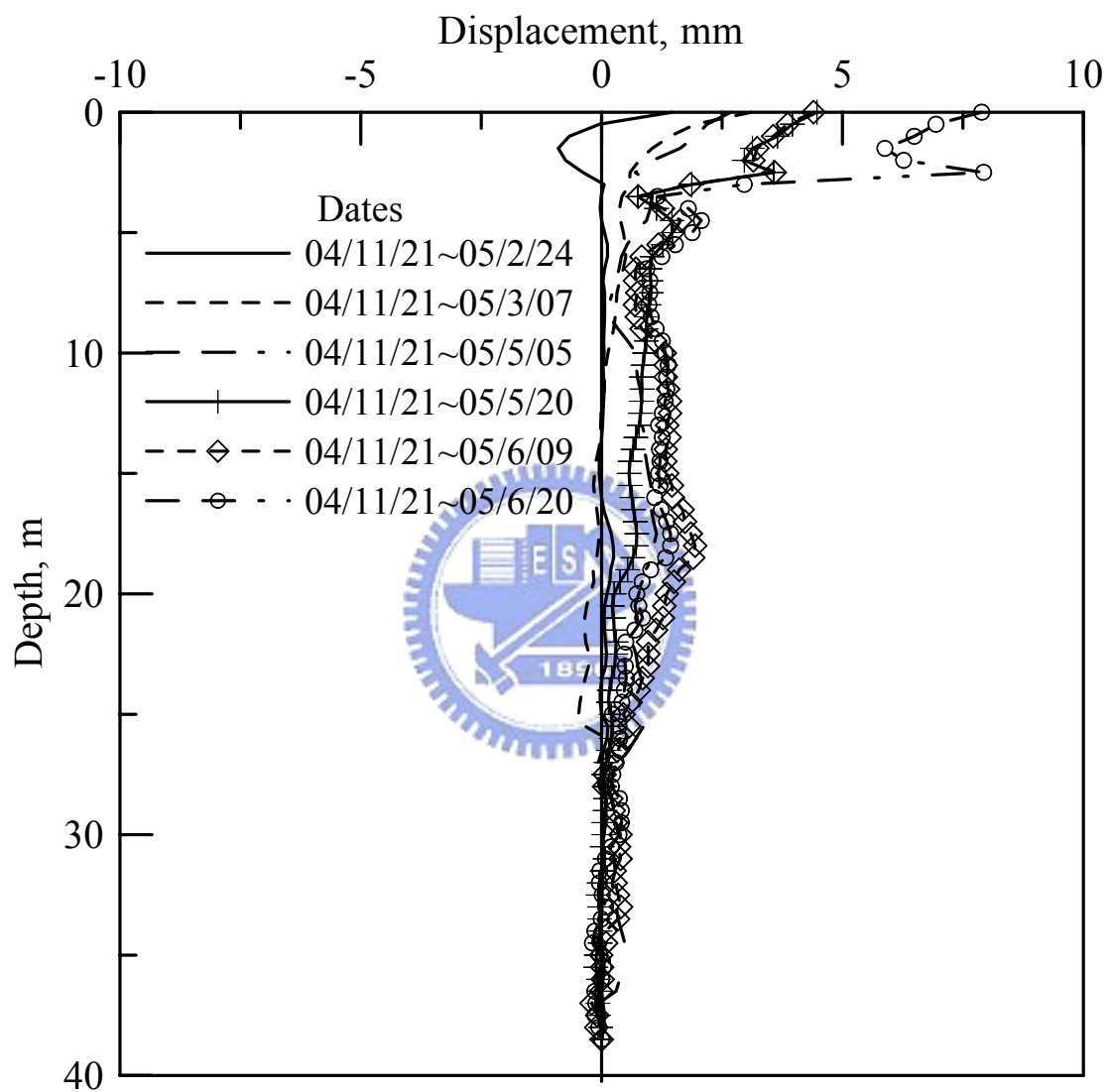


圖 5- 15 孔 CB50-1 傾斜管位移變化圖(B 向)

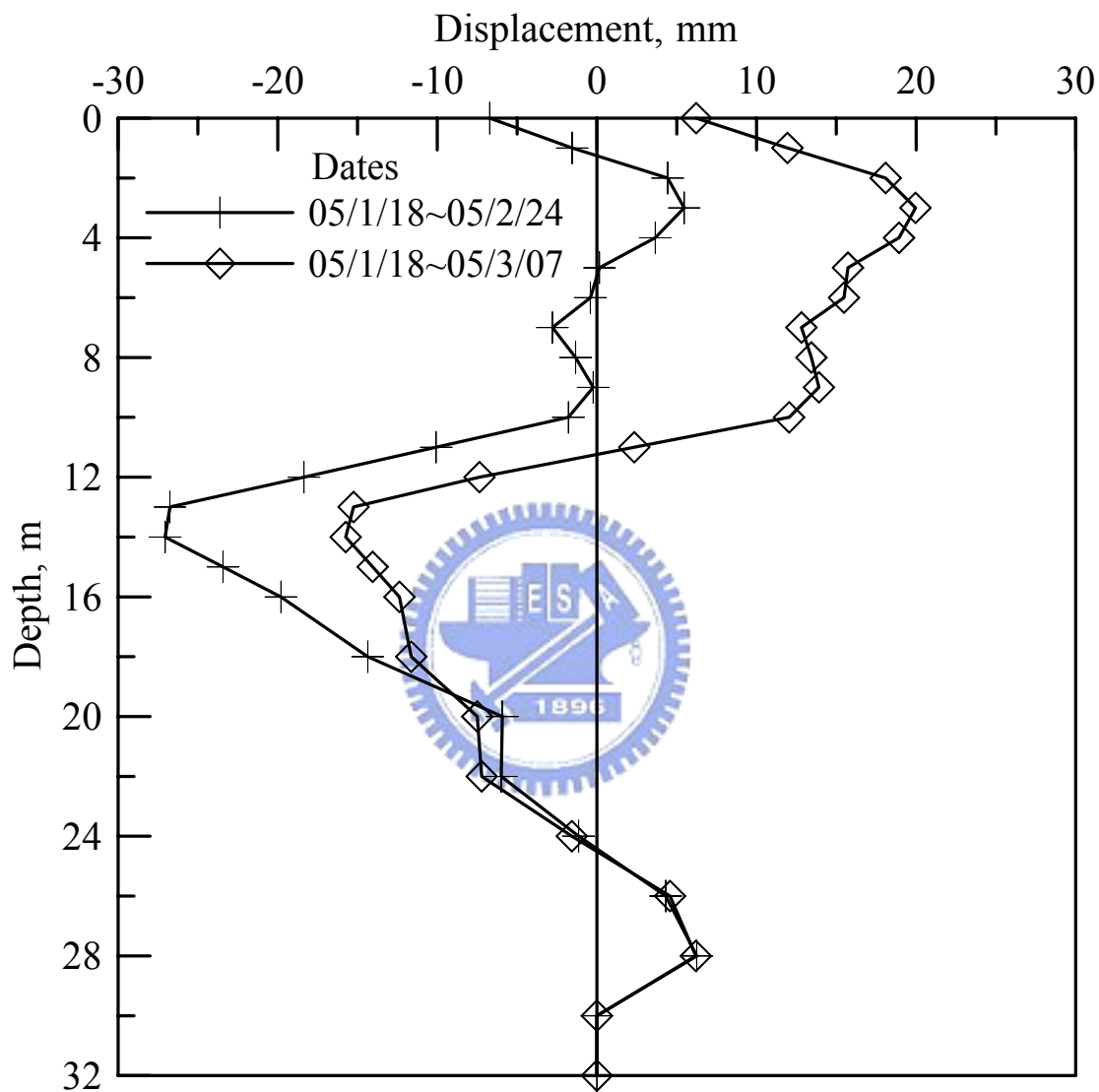


圖 5-16 孔 CB50-2 改良前光纖光柵監測儀器分析結果圖(A 向)

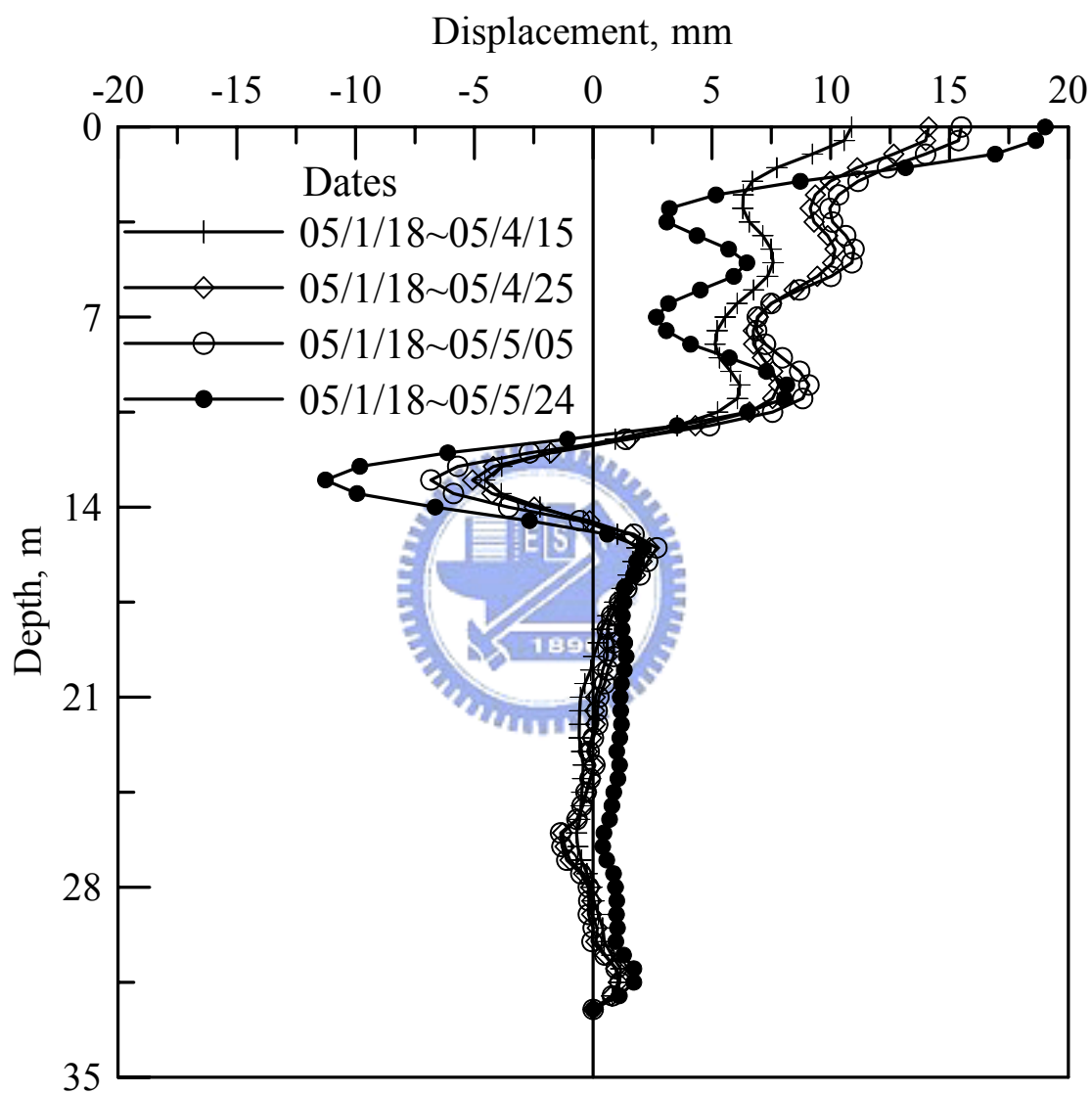


圖 5-17 維修期間傾斜儀替代監測結果圖(A 向)

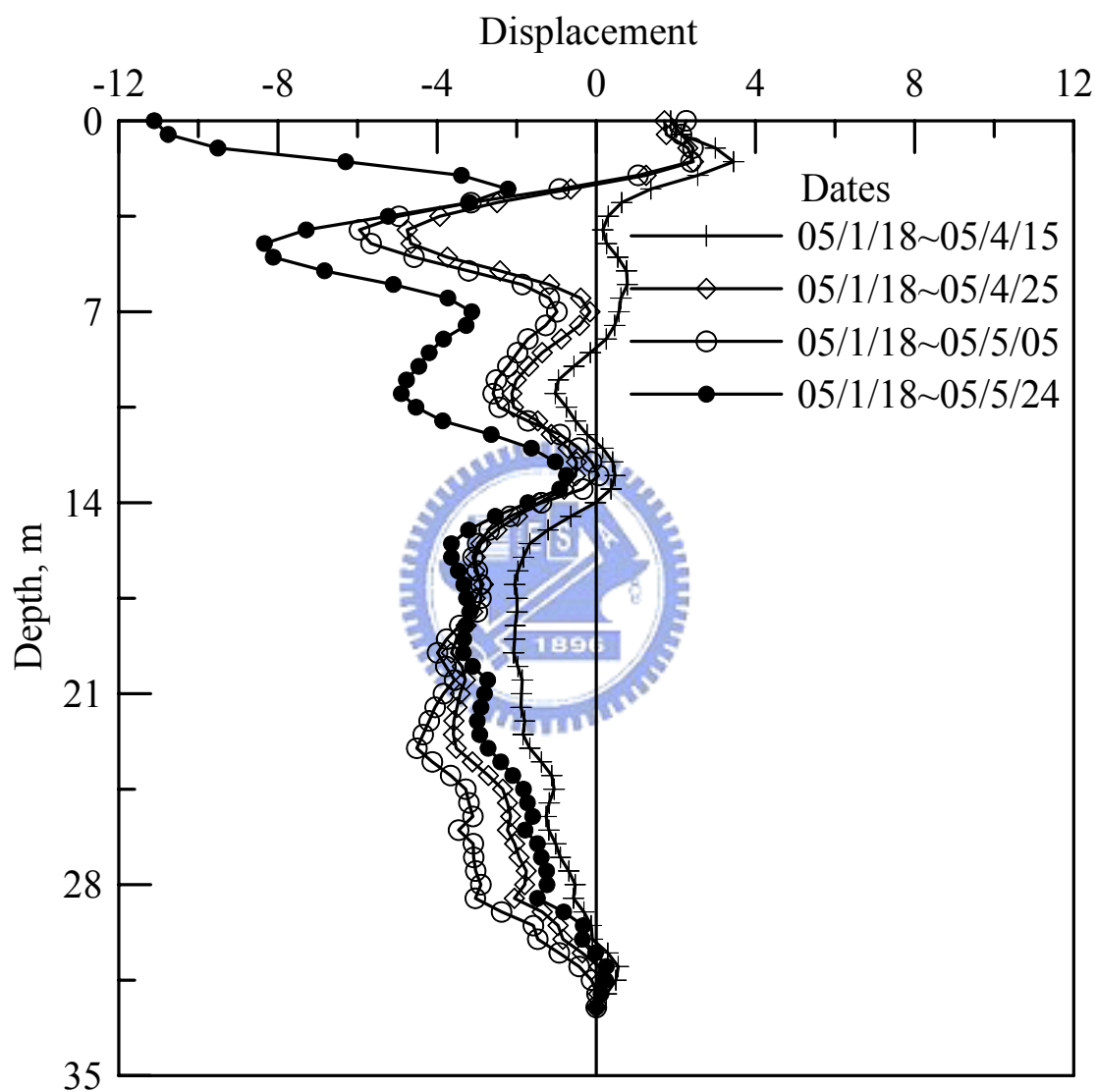


圖 5-18 維修期間傾斜儀替代監測結果圖(B 向)

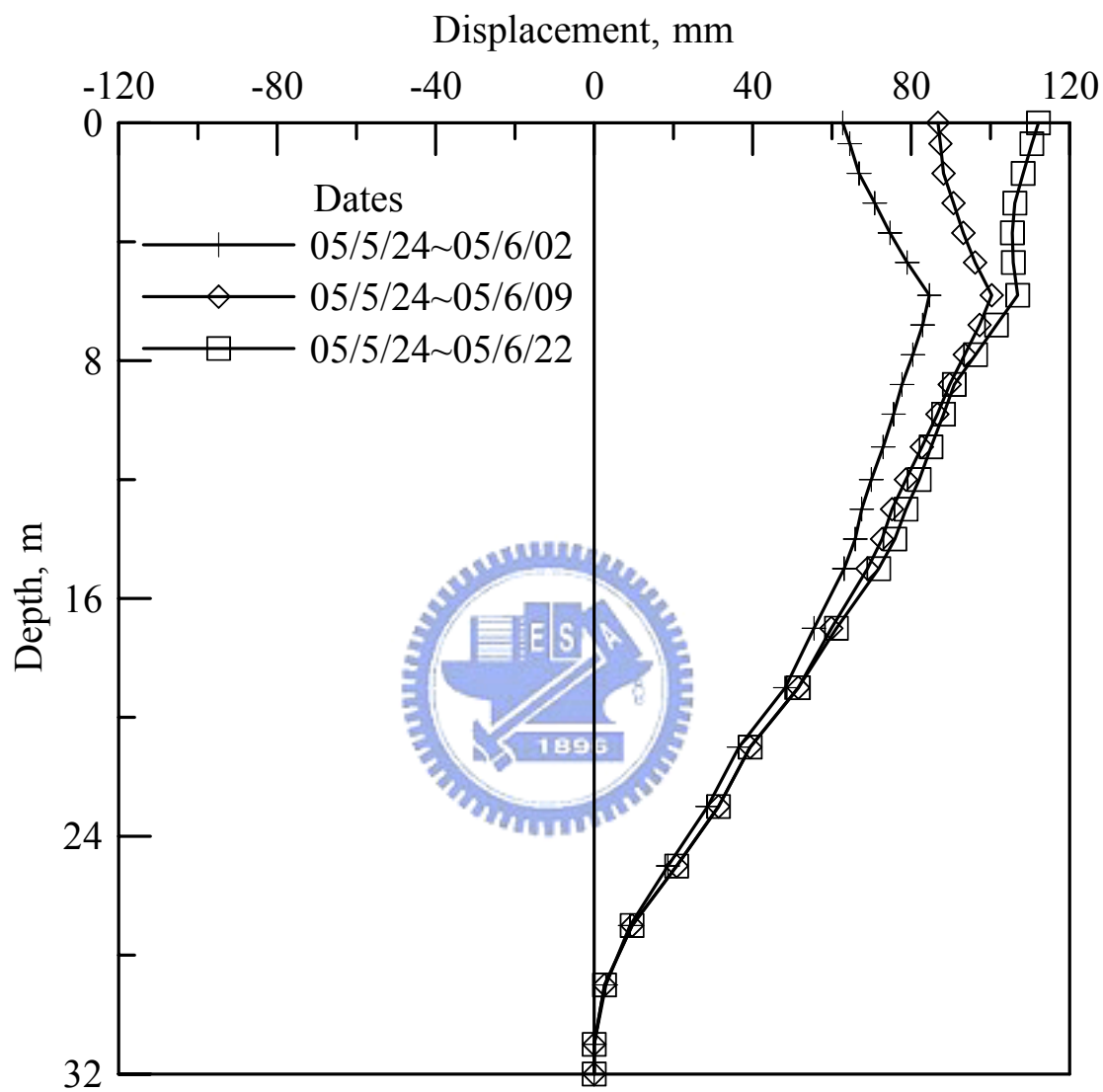


圖 5-19 孔 CB50-2 改良後光纖光柵監測儀器分析結果圖(A 向)

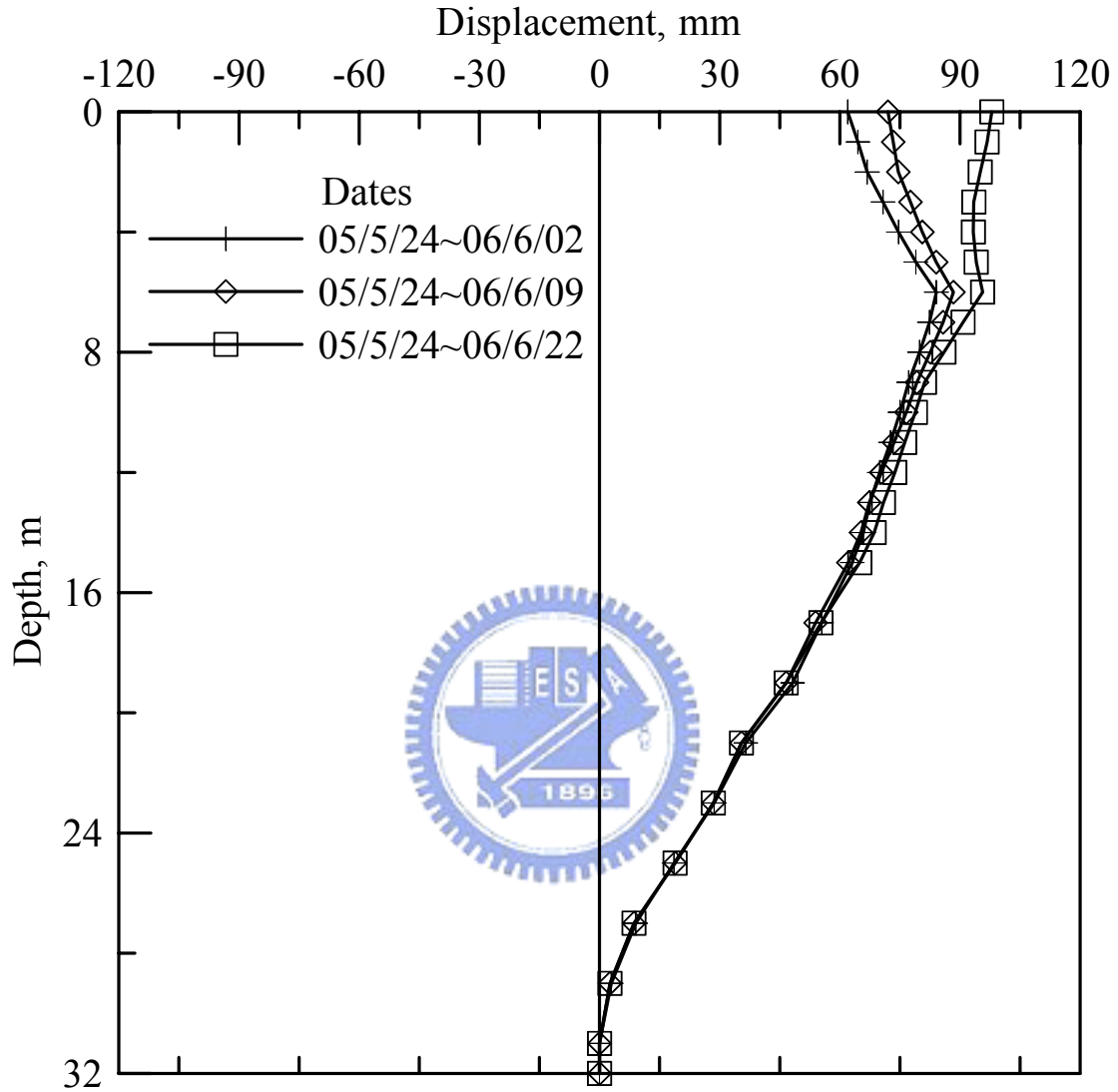


圖 5-20 孔 CB50-2 改良後光纖光柵監測儀器分析結果圖

(誤差修正後) (A 向)

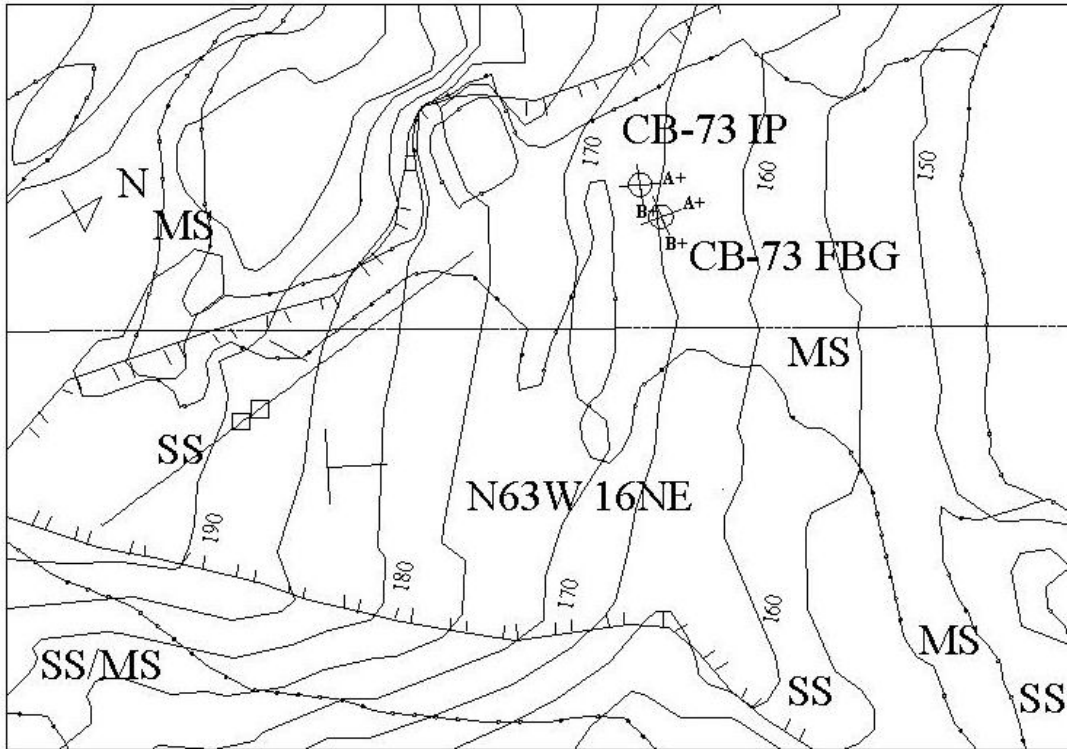


圖 5-21 孔 CB73 監測儀器方向圖

(摘自交大防災中心, 2005)

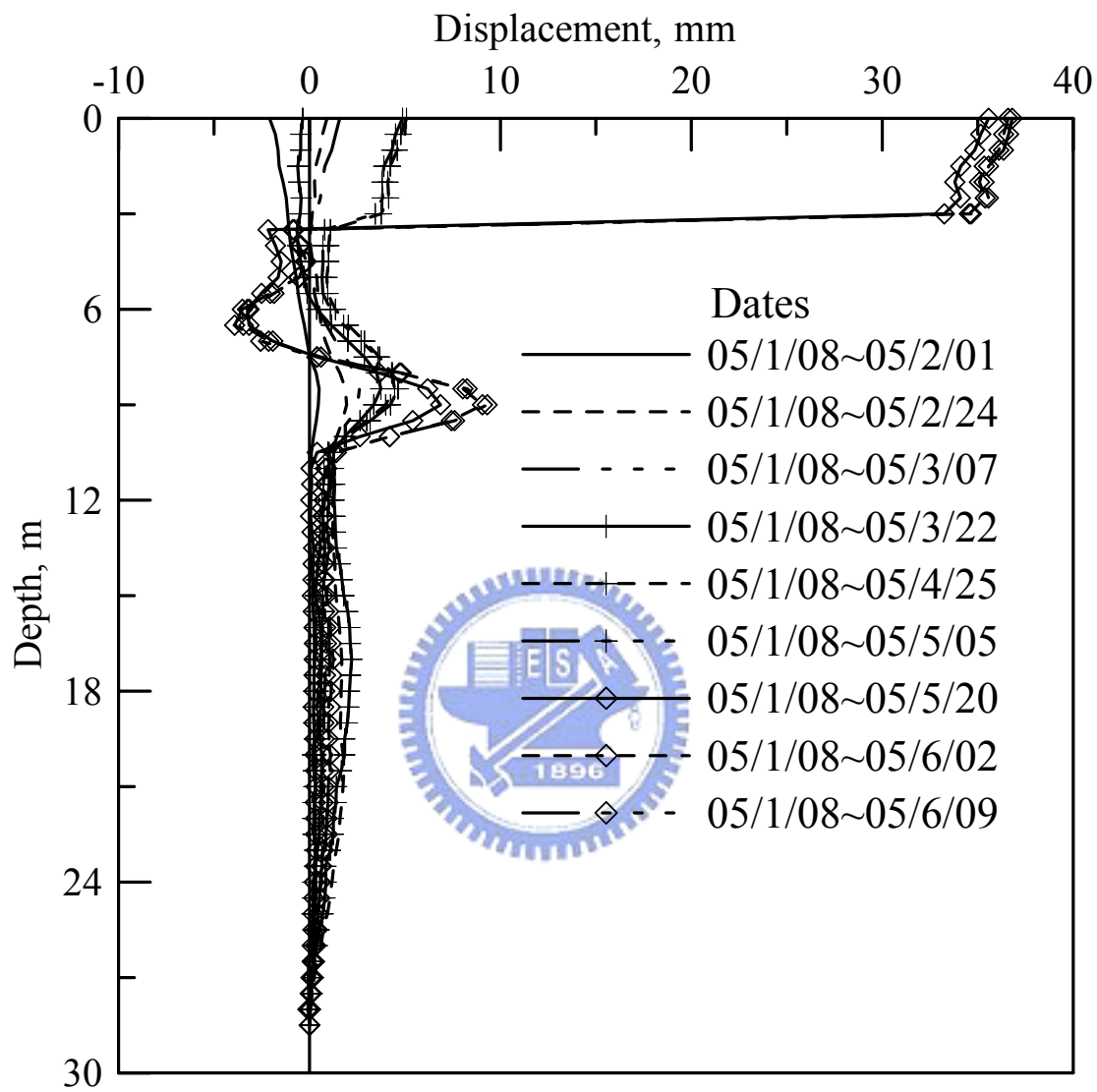


圖 5-22 孔 CB73-2 傾斜管位移變化圖(A 向)

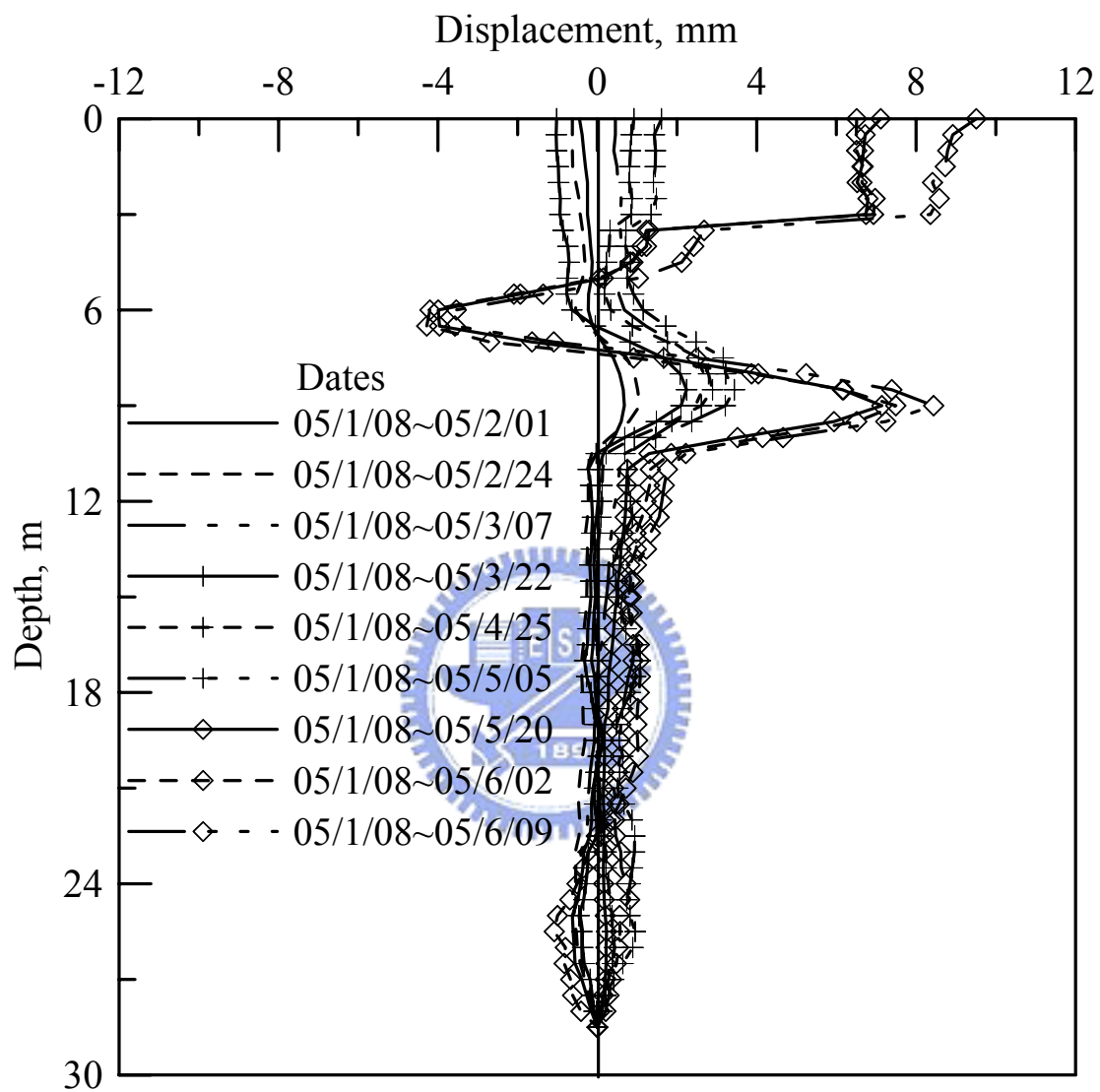


圖 5-23 孔 CB73-2 傾斜管位移變化圖(B 向)

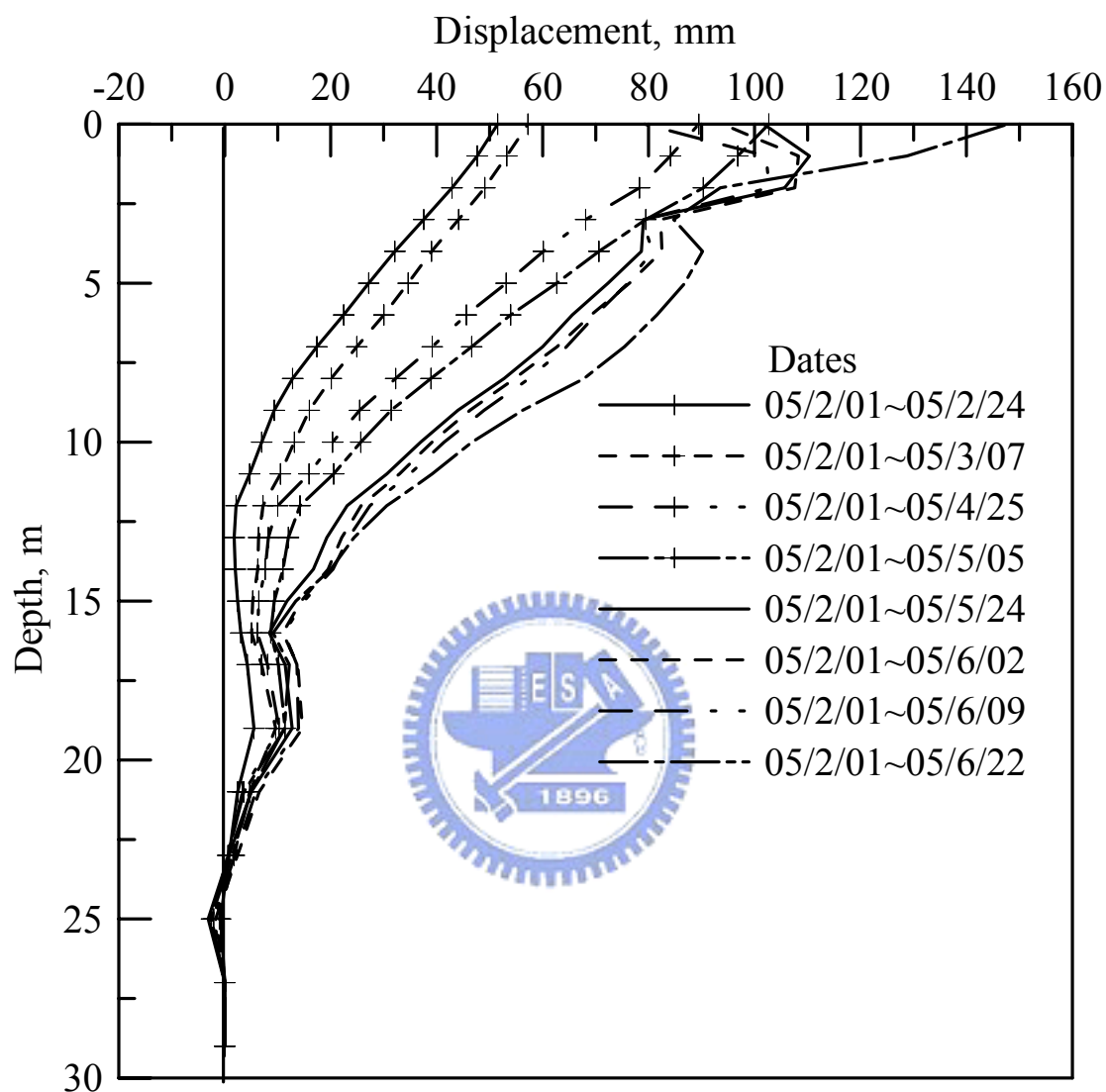


圖 5- 24 孔 CB73-1 光纖光柵監測儀器分析結果圖(A 向)

第六章 結論及建議

6.1 結論

由室內 9m 傾斜管試驗結果可知，本研究設計之光纖光柵感測器於室內之試驗已獲得初步的成果，雖然有些許誤差，但應是試驗施做上之問題。現地實際監測上，雖然受到現地環境因素的影響(如溫度變化的效應)，又加上深度達 30m，由於此儀器有計算上須累加角度來運算之缺點，因此造成誤差的累積放大，但由監測資料來看，依舊能良好的表現出地層滑動的趨勢以及位置，雖然滑動量受到誤差的影響而有差距，但此缺點可由放大儀器之靈敏度加以克服。雖然此儀器目前精度尚未能與傳統傾斜儀並駕齊驅，但具備以下之優點：

1. 具有光纖光柵感測系統多工、體積小、傳輸過程不受電磁干擾、寬頻傳輸等優點，在土木領域中，智慧型結構物、大型工程監測系統、大面積地滑監測等需要大量監測設備的工程中，這類工具更能顯露出優勢。
2. 與現今使用普遍之傾斜管搭配使用，放置於傾斜管中受到保護不易損壞，加上節理式之設計，使得儀器之安裝非常便利、快速，而且也可輕易的拔出維修。
3. 能長期放置於孔內，搭配自動擷取以及預警系統則能達到自動化

監測及預警的目標。

4. 可根據實際需要增減監測深度、改變量測點密度，不論垂直、傾斜、或水平皆能使用，並不影響其量測精度。

長遠來看，節理式光纖光柵感測器必能成為未來監測系統中之利器。

6.2 建議

針對研究之後續研究，提供以下幾點建議：

1. 由湖山現場的監測結果來看，當中有出現過量測到位移但經判斷應該為誤差之情況。此現象之產生原因有可能是因為儀器本身的儀器誤差(最大正負 10pm)以及溫度效應並未完全消除之關係所致。建議儀器方面可尋求更穩定及精度更佳的光纖光柵讀取儀。溫度效應方面可嘗試是否有更穩定消除溫度效應之方式，或是將溫度效應誤差的影響程度降低。現階段軸承旋轉 1° 波長差值約為 800~1000pm，若能增加此波長差值，則相同之儀器或溫度效應誤差相對於軸承旋轉的波長改變量的影響相對就較小。除此之外，本研究所進行的溫度效應試驗是於完全無受力無變形之情況下做，溫度效應誤差量約在 20pm 之內，但若在軟管有變形之情況下不知是否依舊，故建議後續繼續進行變形軟管在有變形量之情況

下的溫度效應試驗。

2. 儀器摩擦力方面，為了使小變形的量測更為精準，應該使導輪與傾斜管溝槽間之摩擦力盡量降低。因此還是建議導輪改採用如同傳統傾斜儀之輪式設計，此方式應能將兩者間之摩擦力降至最低。另外，施予導輪緊貼溝槽力量的彈簧最好能再增加其力量，此兩設計同時作用下，不僅摩擦力再大幅度降低，應可使小變形量之量測更佳準確。而彈簧之彈力足夠，能將量測儀器牢固的控制於傾斜管的中間，使整個變形量全數集中在軸承的部分旋轉，亦可排除是否儀器有偏移傾斜管中心而誤判位移量的疑慮。
3. 現階段所使用的變形軟管材料為 ABS 材料，經過詢問此材料在土壤中約一年左右即有材料劣化之情況，同理若浸泡於地下水中亦是如此。為了防止劣化產生造成儀器耐久度及穩定度降低，建議可嘗試使用 ABS 加上 15%~20%纖維的材料，較能抵抗劣化產生。而現階段使用之黏著劑依舊適用，短期內並不會產生劣化現象，但建議外層防水之材質可使用較能抵抗酸鹼的防水材質，以避免較高酸鹼性的地下水造成損害。
4. 本研究中所施做之 9m 試驗，其傾斜管組固定之方式稍嫌不夠牢靠，建議可更改固定方式。除此之外給予變形的方式也可一併更換，更換成能測量出實際給與變形量之裝置，再與傳統傾斜儀比

較是否更能表現出實際之變形情況。

5. 現階段製作變形軟管時預拉 FBG 之方式乃採用懸掛重物的方法，雖然懸掛之重量相同，但由於光纖本身的差異，波長的增加量參差不齊，非常不易控制。且懸掛重物端之光纖於黏著劑未固化前偶有斷掉的現象，對預拉也會產生不良影響。因此建議找尋更好之預拉方式，降低預拉量參差不齊的情況。
6. 本研究中潛變試驗之結果，雖然經過 56 小時只有約 20pm 的改變，但由於試驗之時間不夠長，加上溫度效應的雙重影響之下，導致無法明顯的觀察到波長穩定無變化的現象，建議可選擇一溫度更為穩定的場址，進行更長時間的試驗以瞭解潛變影響的真正程度，提供設計上之考量需要。
7. 目前所設計的節理式光纖光柵感測器僅能量測一個方向之位移，建議能繼續研發能同時量測到另一方向位移的設計，則能如同傾斜儀一般能利用傾斜觀測管中兩組溝槽，同時量測到兩個方向之地層變形。

參考文獻

Carman, G. P., and Sendeckyi, G. P., 1995, "Review of the Mechanics of Fiber Optic Sensors," J. Compos. Technol. Res. 17 pp.183-193.

Gordon, E. Green, and Mikkelsen, P. E., 1988, "Deformation Measurements with Inclometers," Transportation Research Record, Vol. 11669, pp.1-15.

Hecht, E., 1987, "Optics," second edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc.

Kersey, A. D., 1993, "Multiplexed Fiber Optic Sensors," in Fiber Optic Sensors, Proceedings of SPIE, Vol. CR44, pp.200-225.

Nath, D. K., Nelson, G. W., Griffin, S. E., Harrington, C. T., He, Y., Reinhart, L. J., Paine, D. C., and Morse, T. F.(1991), "Polyimide Coated Embedded optical Fiber Sensors," Structures Sensing and Control, SPIE1489, pp.17-32.

Mikkelsen, P. E., 2003, "Advances in Inclometer Data Analysis," Symposium on Field Measurements in Geomechanics, FMGM2003, Oslo, Norway, September.

Pedrotti, F. L. and Pedrotti, L. S., 1993, "Introduction to Optics," second edition, Prentice-Hall Inc.

Raymond, M., 2001, "Structural Monitoring with Fiber Optical Technolgh," A Harcourt Science and Technology Company, pp.343-354.

Roberts, S. S., and Davidson, R., 1991, "Mechanical Properties of Composite Materials Containing Embedded Fiber Optical sensors," Fiber Optical Smart Structures and Skins IV, SPIE1588, pp.326-341.

Slope indicator, 2002, "Digitilt Indicator Probe datasheet"

Slope indicator, 2000, "Digitilt Indicator Probe"

李秉乾, 許盈松, 董家鈞, 李維聰, 周天穎, 連惠邦, 2003, ”山區道路邊坡監測系統自動化及緊急臨時通報系統研發一”, 交通部。

經濟部中央地質調查所, 1998, “雲林圖幅”。

中興工程顧問股份有限公司, 2003, ”湖山水庫工程計畫—壩區工程施工調查規劃與設計補充調查與試驗階段—水庫區工程地質補充調查與試驗”, 經濟部水利署中區水資源局。

交通大學防災工程研究中心, 2000, ”雲林湖山、湖南水庫地震研究及影響評估”, 期末報告。

巨廷工程顧問有限公司, 1995a, “雲林地區水庫水源開發調查及可行性規劃、一、工程專題報告、(三)地質探查評估(初稿)”, 經濟部台灣省水利局規劃總隊。

交通大學防災工程研究中心, 2005, ”湖山水庫工程計畫—光纖監測系統應用於蓄水庫邊坡穩定之研究”, 經濟部水利署中區水資源局。

黃鉅棟, 1985, “傾斜儀介紹”, 土工技術雜誌, 第 10 期, pp17-23.

高田雄次, 1965, “地すべり地の内部ひずみ測定について”, 親ヰ京大防災研究年報, NO.8, pp.586 .

中村浩之, 1969, “地中歪計による地すべり面判定の—考察”, 地すべり vol.6, NO.1, pp.1-8.

- 福本安正, 1975, “地すべり防止杭の舉動に關する實驗的研究(1)”, 地すべり, vol.12, NO.1, pp.20-24.
- 藤原明敏, 1976, “地すべりの解析と防止對策”, 理工圖書出版。
- 玉田文吾 等, 1976, “ツベル式ぐいの應力分布と周面土の舉動”, 地すべり, vol.13, NO.1, pp.13-20.
- 陳信雄, 1976, “管狀應變計應用於龍潭地層滑動推定之研究”, 台大合作試驗報告(22), pp.2-54.
- 謝榮豪, 1981, “地滑觀測之研究”, 農發會、林務局與中興大學合作報告, pp.15.
- 謝榮豪 與 錢滄海, 1990, “應變測定管與孔內傾斜儀移動量推算之研究”, 水土保持學報, 第 21,22 期, pp.53-70.
- 謝瑞文, 1983, “應變測定管用於地滑地之研究”, 國立中興大學水土保持研究所碩士論文.
- 林川肆, 1987, “管式應變計應用於邊坡穩定之研究”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文.
- 陳水龍, 1992, “管式應變計於邊坡滑動監測之分析”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文.
- 陳至揚, 2001, “光纖光柵感測偏斜儀之研發”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。

簡旭君, 2003, ”光纖光柵應變管之研發”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。



附錄

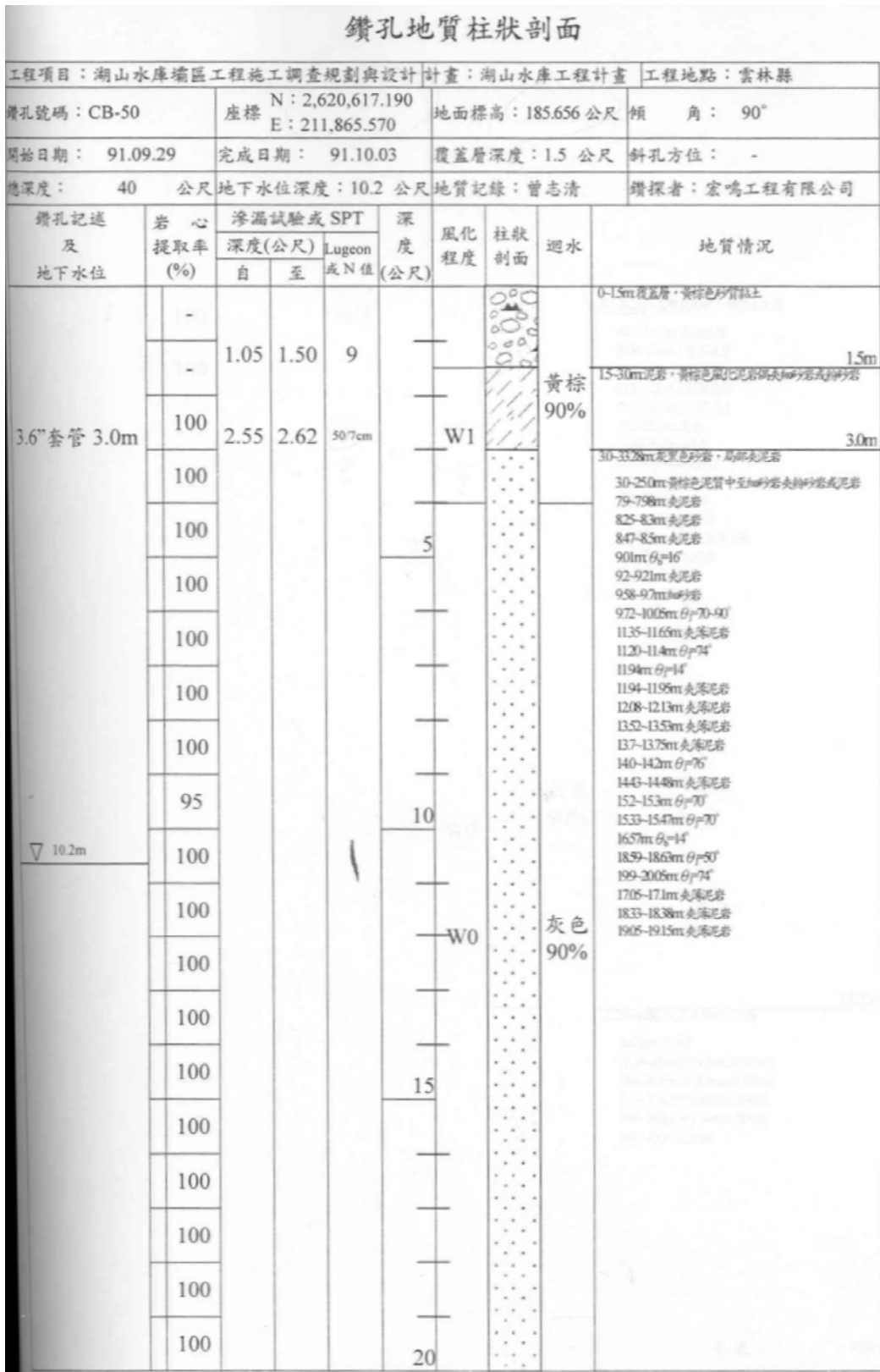


圖 A-1 CB50-1 鑽孔地質柱狀剖面圖

鑽孔地質柱狀剖面圖

工程項目：湖山水庫光纖監測計畫				地點：雲林湖山水庫溢洪道		
孔位： CB-50	孔 號：1	座 標	N：2,620,617 E：211,865	地面標高：183.656 (公尺)		
日期：12/6/2004~12/11/2004				地質紀錄人：湯士弘		
總深度：30m		覆蓋層深度：1.4m		鑽探者：屬岡鑽探工程		
鑽孔記述 及 地下水位	岩心 提取率 (%)	深 度 (公尺)	風化 程度	柱狀 剖面	迴水	地質情況
	100		良好			7.3-30m灰黑色砂岩夾泥層
	100					
	100					
	100					
	100	30				
		35				
		40				
		45				
		50				

圖 A-4 CB50-2 鑽孔地質柱狀剖面圖(續)

鑽孔地質柱狀剖面圖

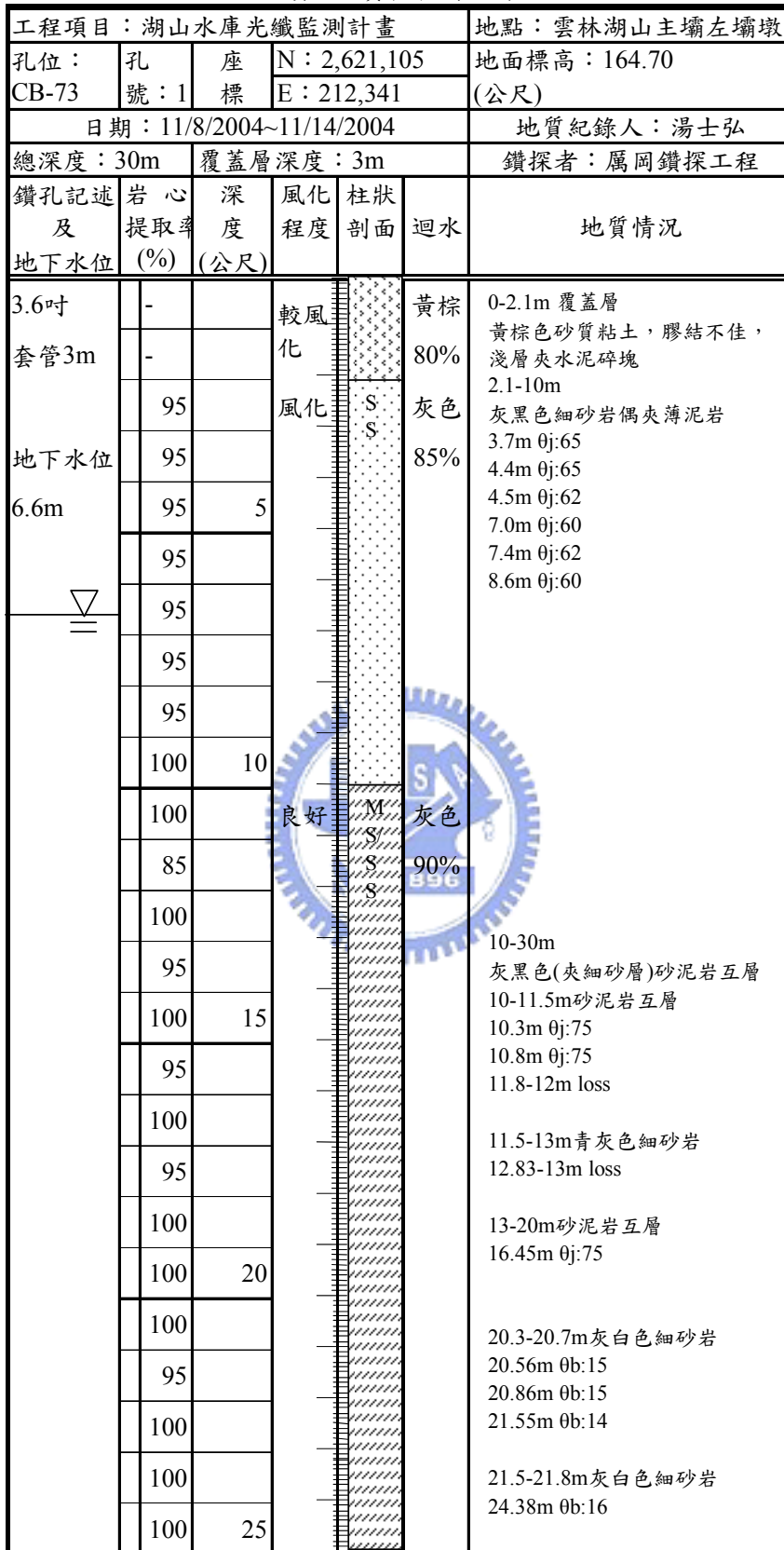


圖 A- 5 CB73-1 鑽孔地質柱狀剖面圖

鑽孔地質柱狀剖面圖

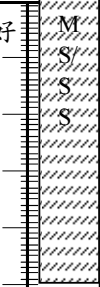
工程項目：湖山水庫光纖監測計畫				地點：雲林湖山主壩左壩墩		
孔位： CB-73	孔 號：1	座 標	N：2,621,105 E：212,341	地面標高：164.70 (公尺)		
日期：11/8/2004~11/14/2004				地質紀錄人：湯士弘		
總深度：30m		覆蓋層深度：3m		鑽探者：屬岡鑽探工程		
鑽孔記述 及 地下水位	岩心 提取率 (%)	深 度 (公尺)	風化 程度	柱狀 剖面	迴水	地質情況
	100		良好			10-30m 灰黑色(夾細砂層)砂泥岩互層
	100					25.32m 0b:16
	100					25.42m 0b:16
	100					25.72m 0b:16
	100					26.1m 0b:16
	100	30				26.3m 0b:16
						27.7m 0b:18
						29-29.5m灰白色細砂岩
						孔底30m
		35				
		40				
		45				
		50				

圖 A- 6 CB73-1 鑽孔地質柱狀剖面圖(續)

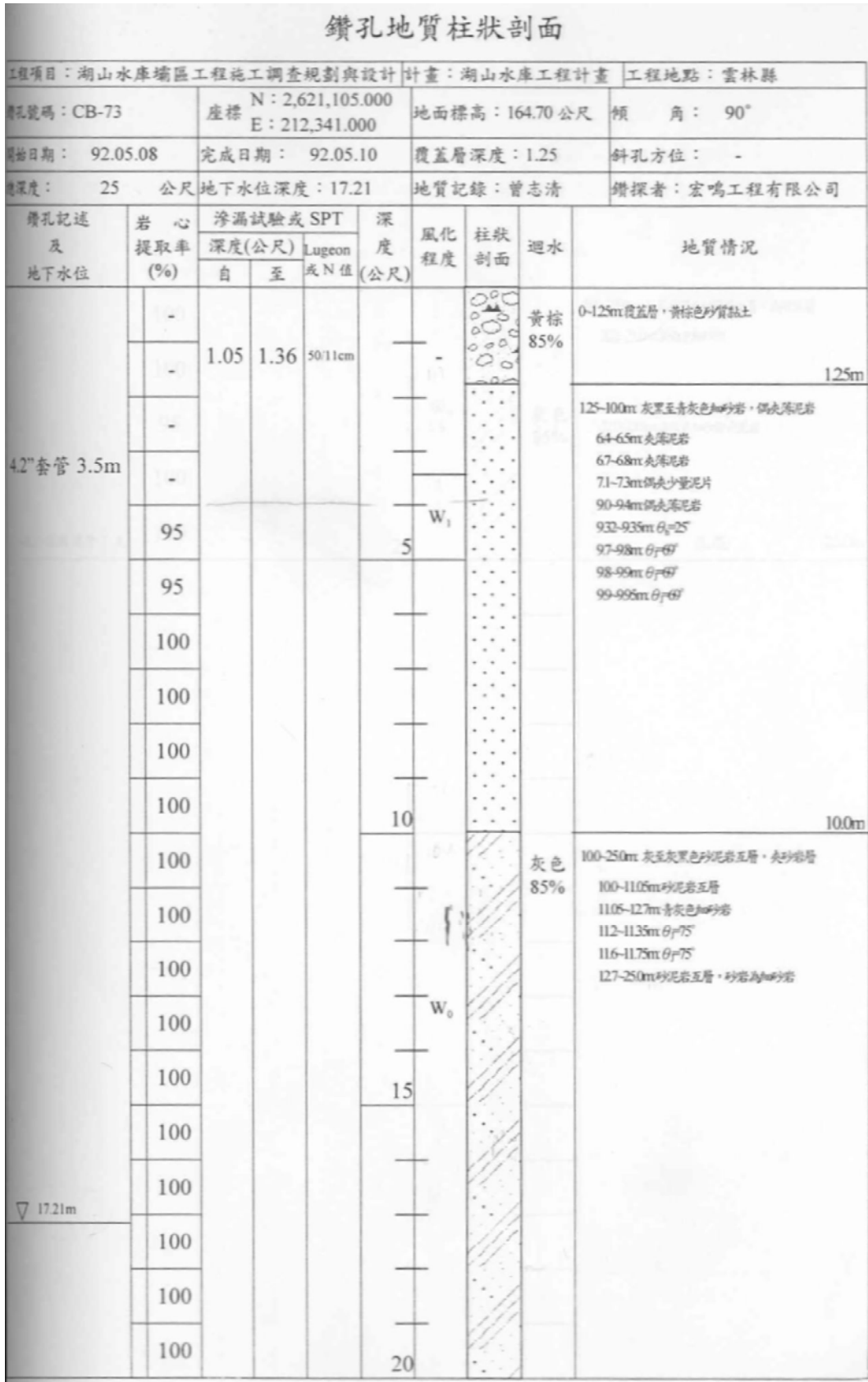


圖 A-7 CB73-2 鑽孔地質柱狀剖面圖

