

光纖黏貼技術之研發

學生：許智超

指導教授：黃安斌 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

摘要

對於地層滑動之現地監測系統，交通大學土木系大地工程研究室早已研發多時，從早期的光纖光柵應變管（FBG strain pipes）一路改良到現在所研發的節理式偏斜儀（FBG Segmented Deflectometer, FBG-SD），所有理論架構皆已趨成熟，並已實際裝設於現地量測，但於監測末期數據有發生過與理論值偏移的現象，故對於能否真正達到”長期性”監測，尚未有十足的把握。

本研究的目的主要分成三種，第一，為對 FBG-SD 之各部份組成進行分析，找出最適當之材質並進行物性與化性分析，來供長期性監測使用；第二，改良 FBG-SD 之製程與光柵黏貼方式，來提高整體的良率；第三，對改良後之 FBG-SD 進行潛變與老化測試，給予一個參考值，成為 FBG-SD 使用於長期性監測的一項依據。

實驗結果顯示，新設計之 FBG-SD 與舊設計相較之下，不但擁有較高之耐化性，且製程方面更可提高至近八成的良率；另外對於耐久性試驗的部份，新設計之 FBG-SD 之潛變量較舊設計來說小了兩倍以上，且老化性能亦相當優異；故此新設計對現地監測計畫來說，的確有所助益。

Development of Adhesive System for Bonding Optical Fiber Substrates

Student : Chih-Chao Hsu

Advisor : Dr. An-Bin Huang

Department of Civil Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

The geotechnical research laboratory at National Chiao-Tung University has been developing fiber optic sensed field monitoring systems to measure ground movement. Systems that have been developed and deployed include the Fiber Bragg Grating (FBG) strain pipe and FBG Segmented Deflectometer (FBG-SD). These systems have been performing reasonably well for the duration of research. It is uncertain, however, if the same is true on a long term basis.

The objectives of this research are to: 1) optimize the selection of substrate material on which the optic fiber sensor is attached to for long term stable performance of the FBG-SD; 2) develop an optimized procedure to bond the optic fiber to the selected substrate and maintain a high success rate; and 3) perform creep and aging tests on the completed product to verify the effectiveness of the developed technique.

The results showed that the FBG-SD assembled following the new procedure has a significantly improved chemical resistance capability. The success rate of the assembled FBG-SD's that pass the quality assurance has been raised to nearly 80%. The creeping and aging affects under the test conditions have been reduced by 50%. The aged FBG-SD was found to perform well. Thus, it can be concluded that the research has made significant improvement in the production efficiency and longevity of the FBG-SD.

誌謝

在研究所的兩年內，由於一些老師和同學的協助，使本論文得以順利完成，故於此感謝之；首先感謝吾師黃安斌教授對學生悉心的指導及教誨，於此兩年裡，無論是課業上、研究上，甚至做人處事的道理，都給予學生許多的幫助與建議，在此致上最由衷的感謝。

再者，於此研究期間裡，尚須感謝 方永壽教授、廖志中教授、潘以文教授、林志平教授及單信俞教授，您們於課業上讓學生增加了許多專業方面的知識與經驗，使得學生之學術理論與實務經驗都能夠兼顧，並且能善加利用。

而於口試期間，須感謝成功大學 羅裕龍教授與建國科技大學 許懷後助理教授給予學生在論文上之寶貴意見，使得論文能夠更加周祥與完善。

此外，對於大地工程研究室的成員們，有博士班 何彥德學長與李瑞廷學長，碩士班好友聖傑、俞傑與若安同學，還有學弟价民、崑山、源昱與全修等人，感謝你們在生活與實驗上之協助及鼓勵，使得研究所生活不至於太過枯燥，且因此而多采多姿。

最後，還要感謝我的父母、祖父母、兄長、姑姑與姑丈給於我的支持與照顧，使能夠有今天的成就；當然不能忘了感謝心愛的女友 乃懿小姐在我這兩年內之不順利與不開心時，皆能適時的對我鼓勵與支持，使我增加了信心去克服這兩年內的種種難關，並順利完成我的碩士學位。

目 錄

摘要.....	i
誌謝.....	ii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vii
表目錄.....	xi
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究流程.....	1
1.3 論文架構.....	2
第二章 光纖光柵感測器之原理與介紹.....	4
2.1 光纖介紹.....	4
2.1.1 光纖概述.....	4
2.1.2 光纖傳輸損失.....	5
2.1 布拉格光纖光柵介紹.....	6
2.2.1 光柵概述.....	6
2.2.2 應變與波長漂移關係.....	7
2.2.3 溫度與波長漂移關係.....	8
2.2.4 光柵之耐用性.....	9
2.3 節理式偏斜儀(FBG-SD)之介紹.....	10
2.3.1 節理式偏斜儀之設計.....	10
2.3.2 節理式偏斜儀之感測原理.....	11
第三章 偏斜儀材料選定.....	27
3.1 增設新實驗設備介紹.....	27
3.2 支架材質的選定.....	28

3.2.1	目前使用支架發生之問題.....	28
3.2.2	鈦金屬之介紹與比較.....	29
3.2.3	支架設計之改良.....	31
3.3	基材材料的選定.....	33
3.3.1	目前使用基材發生之問題.....	33
3.3.2	聚合物之介紹與性質.....	34
3.3.3	基材選定測試.....	36
3.4	接著劑的選定.....	37
3.4.1	目前使用接著劑之問題.....	37
3.4.2	接著劑的組成與分類.....	39
3.4.3	接著劑之黏貼理論.....	41
3.4.4	接著能力測試.....	44
3.5	偏斜儀製程之改良.....	45
3.5.1	偏斜儀製程與舊有的缺點.....	45
3.5.2	預拉光柵方法的改良.....	47
3.5.3	黏貼光柵方式之改良-軟膠式黏貼法.....	48
第四章	偏斜儀之耐用性測試.....	77
4.1	加速系統下偏斜儀之潛變測試.....	77
4.1.1	定義偏斜儀之疲勞.....	78
4.1.2	潛變試驗結果.....	79
4.2	偏斜儀之老化試驗.....	79
4.2.1	定義老化所需之試驗.....	80
4.2.2	老化試驗結果.....	80
第五章	結論與建議.....	125
5.1	結論.....	125

5.2 建議	126
參考文獻	127



圖目錄

圖 1-1	研究流程圖	3
圖 2-1	單模 (single mode) 光纖構造簡易圖 (李文淵, 2005)	14
圖 2-2	光於光纖內路徑示意圖 (李建儒, 2002)	14
圖 2-3	光散失 (陳君毅, 1998)	15
圖 2-4	光纖直徑改變造成的光損失 (Pedrotti and Pedrotti, 1993) ..	16
圖 2-5	局部彎曲造成的光損失 (Pedrotti and Pedrotti, 1993)	17
圖 2-6	整體彎曲造成的光損失 (Pedrotti and Pedrotti, 1993)	18
圖 2-7	全像式干涉法 (Meltz and Morey, 1991)	19
圖 2-8	相位光罩法 (曾昱璋, 2003)	19
圖 2-9	光纖光柵量測原理示意圖 (簡旭君, 2002)	20
圖 2-10	光纖光柵感測器量測原理示意圖 (Kersey, 1993)	21
圖 2-11	量測節理實體圖	22
圖 2-12	FBG-SD 示意圖 (何彥德, 2005)	22
圖 2-13	延伸節理實體圖	23
圖 2-14	FBG 節理式偏斜儀放入測傾管示意圖 (Huang, 2006)	24
圖 2-15	量測原理示意圖 (黃正中, 2005)	25
圖 2-16	FBG-SD 整體位移分析圖.....	25
圖 3-1	標準型定量點膠機.....	50
圖 3-2	點膠機操作說明圖 (摘自尚貫股份有限公司)	50
圖 3-3	UV 光照燈	51
圖 3-4	恆濕恆溫箱	52
圖 3-5	偏斜儀舊設計	53
圖 3-6	感測器於監測完成取出之腐蝕情形	53
圖 3-7(a)	AutoCAD 圖 (量測節理右段)	54

圖 3-7(b) AutoCAD 圖 (量測節理左段)	54
圖 3-8 舊軸承設計	55
圖 3-9 新軸承設計	55
圖 3-10(a) 3D 圖 (量測節理左段)	56
圖 3-10(b) 3D 圖 (量測節理右段)	56
圖 3-11 ABS 之三公分圓柱實體圖	57
圖 3-12 玻璃轉移溫度圖 (李育德, 1996)	57
圖 3-13 PC (上方) 與 MC-Nylon (下方) 三公分圓柱實體圖	58
圖 3-14 PC 吸水率變化圖	59
圖 3-15 MC-Nylon 吸水率變化圖	60
圖 3-16 PC 置入 HCl 之重量變化圖	61
圖 3-17 PC 置入 NaOH 之重量變化圖	62
圖 3-18 MC-Nylon 置入 HCl 之重量變化圖	63
圖 3-19 MC-Nylon 置入 NaOH 之重量變化圖	64
圖 3-20 光訊號減弱之情形	65
圖 3-21 光柵發生多波峰之情形	65
圖 3-22 光柵之正常波形	66
圖 3-23 與光纖鍵結之示意圖	66
圖 3-24 活潑氫與 $-NCO$ 、 $-COOH$ 及 $-COCl$ 反應示意圖	67
圖 3-25 氫氧基與 $-NCO$ 、環氧基及 $-R-CH_2-OH$ 反應	67
圖 3-26 因擴散與糾纏而相結合之情形	68
圖 3-27 機械投錨 (釘著) 理論示意圖	68
圖 3-28 接著能力測試架設圖	69
圖 3-29 舊式設計預壓方式實體圖	69
圖 3-30 FBG-SD 之感測元件實體圖	70

圖 3-31	FBG-SD 標定架設圖	70
圖 3-32	感測器裝箱以便拿至現地使用	71
圖 3-33	新設計預拉架設圖	71
圖 3-34	改良之軟膠式黏貼法	72
圖 3-35	於 FBG 上做記號之示意圖	72
圖 4-1	潛變試驗結果 (黃正中, 2005)	82
圖 4-2	疲勞試驗架設示意圖	83
圖 4-3(a)	L 疲勞試驗拉邊	84
圖 4-3(b)	L 疲勞試驗壓邊	85
圖 4-3(c)	L 疲勞試驗拉減壓	86
圖 4-4(a)	K 疲勞試驗拉邊	87
圖 4-4(b)	K 疲勞試驗壓邊	88
圖 4-4(c)	K 疲勞試驗拉減壓	89
圖 4-5(a)	J 疲勞試驗拉邊	90
圖 4-5(b)	J 疲勞試驗壓邊	91
圖 4-5(c)	J 疲勞試驗拉減壓	92
圖 4-6	潛變試驗架設示意圖	93
圖 4-7(a)	L 潛變試驗拉邊	94
圖 4-7(b)	L 潛變試驗壓邊	95
圖 4-7(c)	L 潛變試驗拉減壓	96
圖 4-8(a)	K 潛變試驗拉邊	97
圖 4-8(b)	K 潛變試驗壓邊	98
圖 4-8(c)	K 潛變試驗拉減壓	99
圖 4-9(a)	J 潛變試驗拉邊	100
圖 4-9(b)	J 潛變試驗壓邊	101

圖 4-9(c) J 潛變試驗拉減壓.....	102
圖 4-10 老化試驗之溫度標定.....	103
圖 4-11(a) L 初始標定	104
圖 4-11(b) L 一日標定	105
圖 4-11(c) L 二日標定	106
圖 4-11(d) L 四日標定	107
圖 4-11(e) L 七日標定	108
圖 4-11(f) L 十四日標定	109
圖 4-11(g) L 解析度變化	110
圖 4-12(a) K 初始標定	111
圖 4-12(b) K 一日標定.....	112
圖 4-12(c) K 二日標定	113
圖 4-12(d) K 四日標定	114
圖 4-12(e) K 七日標定	115
圖 4-12(f) K 十四日標定.....	116
圖 4-12(g) K 解析度變化.....	117
圖 4-13(a) J 初始標定	118
圖 4-13(b) J 一日標定	119
圖 4-13(c) J 二日標定	120
圖 4-13(d) J 四日標定	121
圖 4-13(e) J 七日標定	122
圖 4-13(f) J 十四日標定.....	123
圖 4-13(g) J 解析度變化	124



表目錄

表 2-1	FBG-SD 之規格表 (何彥德, 2005)	26
表 3-1	金屬物理性質比較 (賴耿陽, 1980)	73
表 3-2	鈦金屬的抗酸鹼能力表 (賴耿陽, 1980)	74
表 3-3	塑膠材料性質介紹.....	75
表 3-4	各種原子或分子間作用力.....	76
表 3-5	接著能力測試表	76



第一章 前言

1.1 研究動機與目的

為預防大規模的邊坡與地層滑動，必須要有長期且持續性的監測儀器來量測地層內的局部變形；但欲量得地層內的局部變形，並不是一件容易的事情；除了靈敏度要高之外，還需要非常的穩定。以往傳統的監測設備皆屬電子式的感測器，這些電子式感測器於現地長期使用下，容易受到溼氣而造成損壞或喪失監測功能；除此之外，電子式感測器容易受到電磁波干擾而產生不必要的雜訊，使得儀器的讀數非常不穩定。相對於這些電子式感測器來說，光纖式感測器不易受到溼氣與電磁波影響，十分具有發展的潛力，所以我們便於數年前著手發展光纖式感測器，而且並進一步地研發了光纖光柵極（Fiber Bragg Grating, FBG）感測器，也就是我們所謂的“節理式偏斜儀（FBG Segmented Deflectometer, FBG-SD）”。

如今節理式偏斜儀的研發已漸趨成熟，但若要將其投入長期性現地監測計畫，我們便要思考偏斜儀是否能適應現地的地理環境，並且確保其耐用性。偏斜儀主要分為兩個部份：外部支架與內部感測元件，外部支架為鋁金屬構成，內部感測元件為塑膠材料（ABS），並使用接著劑將光柵極黏貼於其上；所以本研究的主要目的便是將這兩部分的材料做更替，尋找更適合的材料，然後對這些材料進行所需的物性與化性試驗，接著再將此偏斜儀進行耐久性的測試，訂定偏斜儀的使用環境限制與可量測範圍，確定其規格。

1.2 研究流程

本研究內容主要在於對構成偏斜儀之各部份進行材料選定，並進行所需之試驗，詳細之研究流程如圖 1-1 所示。

1.3 論文架構

本篇論文共分為六章，對各章節之概述如下：

第一章 前言

旨在敘述本論文之研究動機與目的，並介紹研究流程。

第二章 光纖光柵感測器之原理與介紹

先對光纖與光柵進行概略性介紹，再敘述節理式偏斜儀之設計與感測原理。

第三章 偏斜儀材料選定

分析偏斜儀之各部份所會發生之問題，查閱相關資料文獻，選擇出較適當之材料，並對該材料進行適當之物性與化性試驗；接著分析舊有製作過程的缺失，並想出適當之改良方式，進而增加偏斜儀的良率。

第四章 偏斜儀之耐用性測試

材料選定加上製程改良完畢，接著便對偏斜儀進行潛變與老化試驗，分析結果，並定出偏斜儀之規格。

第五章 結論與建議

整合與探討本研究之過程與經驗，提出適當之結論與建議。



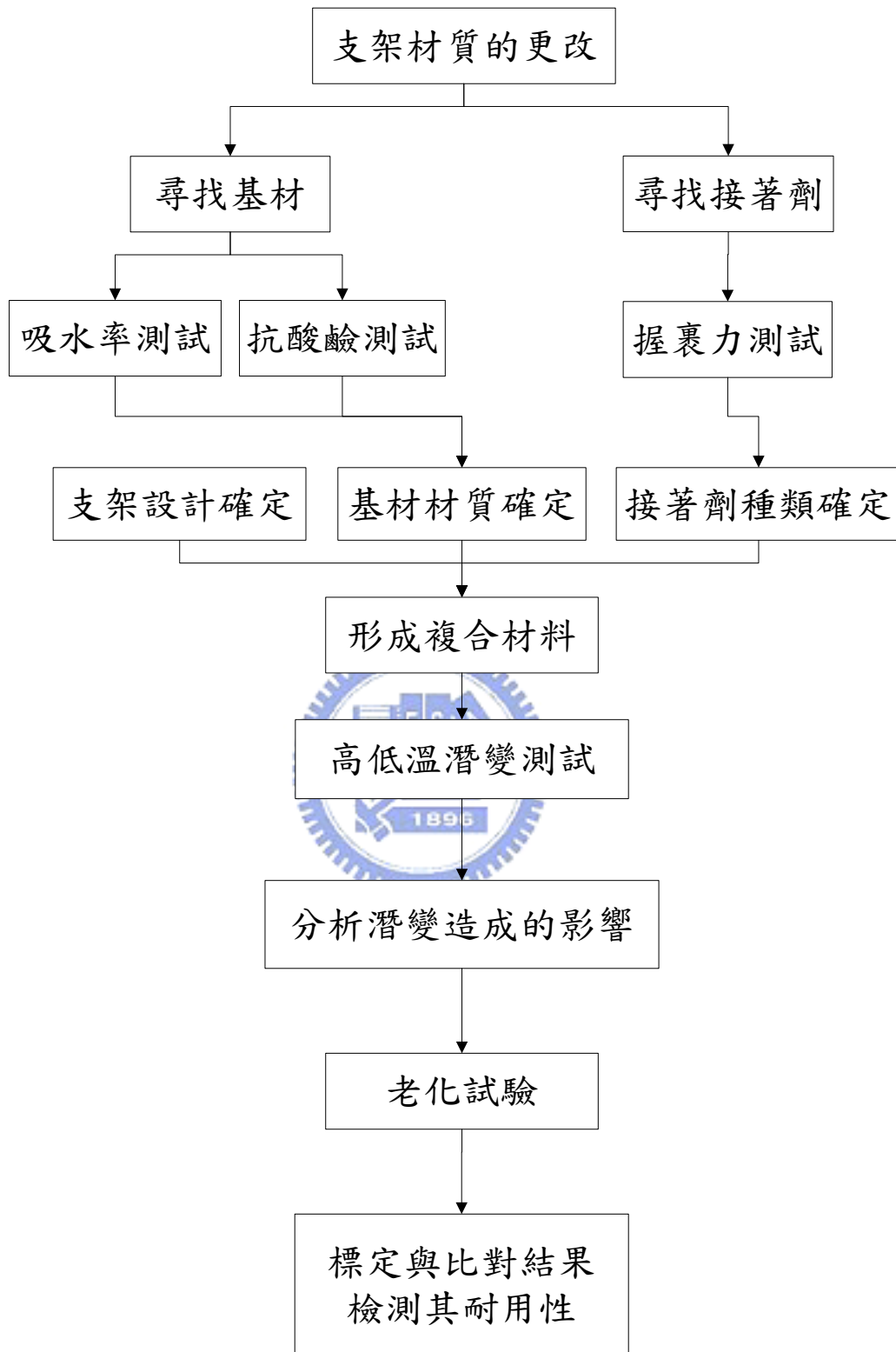


圖 1-1 研究流程圖

第二章 光纖光柵感測器之原理與介紹

2.1 光纖介紹

2.1.1 光纖概述

光纖是由光導纖維簡稱而來，它主要是由二氧化矽 (SiO_2) 這種玻璃材質抽絲合成的光傳輸媒介，並藉由光波來傳送使用者所需的訊息。光纖的內層為折射率較高之核心 (Core) 所構成，核心外面再包著一層折射率較低之被覆層 (Cladding)，當光線進入光纖時，光會藉由全反射在光纖核心中傳播，其最大的優點就是能將光能量的損失降到最低；最外面一層稱為保護層 (Coating)，功用在於保護核心與被覆層，與光的傳播無關 (圖 2-1)。

我們所使用之單模 (single mode) 玻璃光纖直徑約在 100 至 125 μm 之間；由於光纖具有下列優點：(1) 低傳輸損耗 (2) 經濟性優異 (3) 不受電磁干擾 (4) 無須電迴路 (5) 耐環境性優異 (6) 體積小、重量輕 (7) 可與微電子裝置相容，目前已廣泛應用於通訊、軍事、醫學上，還有各種機密儀器與感測器的製作，也正積極發展中。

光在光纖內傳輸主要是根據史涅爾定律 (Snell's law)，由於核心的折射率 (n_1) 比被覆層的折射率 (n_2) 大，所以核心內的光線進入被覆層時，會有部分光線反射回到核心中，而剩餘的光則會以另一角度折射進入被覆層中，其公式如下：

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

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，所有入射光線將全部反射回原來介質當中，此稱為內全反射 (Internal Total Reflection)，而光在光纖中主要就是靠此原理來傳輸 (何彥德，2005)，如示意圖 2-2 所示。

2.1.2 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，其公式如下：

$$Loss = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2-3)$$

其中：

P_{out} = 輸出能量

P_{in} = 輸入能量

以對數的單位分貝 (decibels, dB) 來定義的話，其公式如下：

$$Loss|_{db} = 10 \times \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2-4)$$

光傳遞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每公里損失之分貝數來作為光損耗計算單位，對單模光纖而言，最低能量損失其波長約為 1550nm，損失量大約是 0.2 dB/km。

光纖主要有三種損失，分述如下：

1. 材料損失 (material loss)：由於光纖內含有過渡金屬元素 (如 Sc、Ti、V、Mn、Cr... 等)，這類金屬在光譜範圍內有廣大的吸收帶，所以光能易被材料所吸收；另外光纖所含的氫氧離子，亦會造成損失 (李建儒，2002)。
2. 光散射損失 (light scattering loss)：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。圖 2-3 為光散失現象示意圖，圖中不規則區域為光纖中折射率不均勻所在，光束接觸到此一區域時，由於折射率改變使得傳播方向改變，產生所謂光散射。

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 (圖 2-4)、局部彎曲 (microbend) (圖 2-5)、整體彎曲 (macrobend) (圖 2-6)。如上述三圖中所示，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。

2.1 布拉格光纖光柵介紹

2.2.1 光柵概述

光纖光柵的發現最早是在 1978 年，由加拿大的 Ken Hill 所發現，他是以前兩束不同方向的 488nm 氬離子雷射打在摻鍍光纖上，此兩道光束所形成的駐波會使摻鍍光纖在光軸上產生週期性的明暗條紋，此即為最早的光纖光柵。

到了 1989 年 G. Meltz 使用外部干涉旁照法 (全像式干涉法)，使光纖光柵特性在製作上更能掌控，他是利用兩束紫外光從旁干涉式照射光纖，成功地在光纖核心 (core) 中產生折射率變化的光柵，此種技術很快就成為製作光纖光柵的主流，其原因為此法製作出光纖光柵的效果較早期 Hill 的方法還佳，且光纖光柵的週期可由兩束紫外光干涉角度變化來設計得到，圖 2-7 為示意圖 (曾昱璋，2003)。

直到 1993 年 Ken Hill 改進先前製作光纖光柵技術，發展出相位光罩

(Phase mask) 法製作光纖光柵，更把光纖光柵推展到另一個高峰；運用此方法作出的光纖光柵在效能上比上述兩種方法更好。如圖 2-8 所示，此方法是利用含鍍量高的光纖對紫外光具有光敏特性 (photo sensitivity) 所製造出來，Hill 將含鍍量高的光纖置於紫外光照射區內，紫外光經相位光罩，將產生的干涉條紋寫入光纖上，使光纖折射率產生週期性變化，類似一道道柵欄的區域，此即為現今普遍所使用的布拉格光纖光柵 (Fiber Bragg grating)。

當一寬頻光耦合進入布拉格光纖光柵時，除了滿足布拉格條件 (Bragg condition) 的特定波長外，其餘波長都會因為相位差而相消 (簡旭君, 2002)。

布拉格反射波長 λ_B 為：

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (2-5)$$

n = 光纖纖心的有效折射率

Λ = 折射率週期性改變的間距

圖 2-9 為光纖光柵構造示意圖，光柵中的週期明暗條紋類似在光纖中製造一系列透鏡組合，當寬頻光束通過這些透鏡組合時，將會造成某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，則被反射光波頻率亦不相同。

2.2.2 應變與波長漂移關係

如圖 2-10 中，當光柵受到外力而產生 $\Delta\varepsilon$ 的應變時，造成原本間距 Λ 的改變增加量為 $\Delta\Lambda$ ，帶入(2-5)式可以得到：

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

根據應變的定義

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (2-7)$$

得到

$$\Delta l = \left(\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}\right)l = \left(\frac{2n}{\lambda_B}\right) \times \frac{\Delta\lambda_B}{2n} \times l \quad (2-8)$$

因此

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (2-9)$$

此外，外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：

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

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

最後造成圖 2-10 中右下角之”波長-光強度圖”之虛線部分的反射波長飄移，藉由圖中虛線與實線的反射波尖峰值之變化，即可正確獲得光纖光柵所承受應變大小。

2.2.3 溫度與波長漂移關係

當光纖光柵受到溫度變化時，波長飄移量可由下式表示：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\xi + \alpha) \times \Delta T = K_t \times \Delta T \quad (2-12)$$

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 $6.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，450°C 時則變為約 $9.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，而

熱膨脹係數 $\alpha = 0.55 \sim 1.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。然而在室溫條件下， 1°C 的溫度變化約使得布拉格飄移約 $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{nm}$ 。

2.2.4 光柵之耐用性

布拉格光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG) 為構成許多光學感測器之重要元件，故 FBG 的可靠度與耐用性對各種光學儀器與感測器來說來說十分重要；若要對進行 FBG 之耐用性質分析主要可分成三點來研究 (Limberger, 1999)：

1. 折射率 (Refractive index) 的降低或衰退程度：由於光柵是靠著紫外光雷射照射摻鍺 (Germanium) 光纖，其中氧化鍺 (GeO) 的結構會因為紫外光的照射而與附近之氫分子鍵結而產生 OH 鍵 (光折變效應，Photorefractive Effect)，因此造成光纖核心 (Core) 之折射率產生微小變動，此變量即形成所謂的光柵 (Raman, 1999)；完成之光柵其中的鍵結並沒有很快的結束反應，會持續地緩慢作用，折射率會持續變化且反射波長也會持續下降，因此需要退火 (Annealing) 來加速此反應完成，所以退火完成之光柵折射率便不會再有變動，亦不容易衰退。
2. 寫入光柵時操作員操作程序上所造成之光纖抗拉強度的減弱：其原因有二：(1) 光纖披覆 (Coating) 之剝除與再披覆 (Recoating) (2) 紫外光雷射 (UV laser) 之光照度大小；故光柵寫入前操作員必須要進行剝除披覆後之拉力測試，且必須控制光照度而避免光強度過高，如此才能保持住光柵之抗拉強度。
3. 波長量測儀器之精度 (Accuracy) 與波長尖峰值的長期穩定度 (Long-term stability)：於 Nellen et al. (2003) 之文獻中有提到對 FBG 之耐用性做過相關之研究，他們證實並指出”完全退火完成

之光柵 (FBGs) 能夠連續五年於攝氏 230°C 的高溫下，其波峰值均能維持在 1 pm 之偏移量內”；而 Kronenberg et al. (2002) 亦指出”溼度 (Humidity) 對 FBG 之訊號反應與對光纖之披覆層之影響皆非常小”，FBG 之訊號反應即為所謂的反射波峰值；由這些學者的資料，我們可以得知光柵對於我們所研發之節理式偏斜儀 (FBG-SD) 來說，可以不將光柵之耐用性考慮進去，原因是我們所使用的光柵不但皆已退火完成，且 FBG-SD 所遭遇的環境不會有此種高溫之情形。

2.3 節理式偏斜儀(FBG-SD)之介紹

節理式偏斜儀 (FBG Segmented Deflectometer, FBG-SD) 的研發，是從五年前之光纖光柵扭曲儀 (陳至揚，2001) 改善設計而產生，又經過數位學長測試 (簡旭君，2002；黃正中、何彥德，2005)，已算將近完成，詳細介紹如下面兩小節所述。



2.3.1 節理式偏斜儀之設計

FBG-SD 之設計乃是以 1m 為一個單元，而一個單元中主要可分為兩個部分：1. 量測節理 (Measurement segment) 以及 2. 延伸節理 (Extension segment)。

1. 量測節理 (圖 2-11)：此部份之設計是將一塑膠 ABS 製成之柔性軟管加工，再將 FBG 貼附於相對的兩側，此部份為應變感測元件部分；然後再將感測元件之兩端加裝鋁金屬片作為剛性材料，當兩端剛性鋁片旋轉時會造成柔性感測元件之彎曲，感測元件會帶動光柵應變，藉著光柵之應變量可以決定兩剛性段之夾角；剛性材料所受到的應力傳到中間柔性材料上，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，這會使解析度有提升的作用。兩端鋁片上各裝有一個金屬滾輪支架 (Wheel stud)，其大小和形狀與傳統測傾管內部凹槽之寬度與深度相匹配，藉由彈簧 (Spring) 之拉力來保持量測節理與側傾管凹槽密合，如圖 2-12 所示。且於量測節理內安裝一個金屬軸承 (Hinge)，與測傾管方向垂直，軸承可限制量測節理只能以橫向軸承為中心旋轉而增加結果分析之可靠度。感測元件部份之一端以螺絲加上金屬圓棒 (Pin) 固定於量測節理上，其主要作用是可帶動感測元件彎曲，並且在量測節理上加工出一長方形溝槽，使得 Pin 可延溝槽滑動，而大幅減少軸向力所造成的誤差。

2. 延伸節理 (圖 2-13)：此部份為兩剛性鋁片組成，目的在於配合量測需求，控制量測節理間的距離；延伸節理為剛性體，不具任何自由度，兩端各有數個螺孔，以便連接用，內部無感測元件，可將光纖延長線配置於內側，節省空間並保護光纖避免損壞。圖 2-14 為量測節理與延伸節理組合並放入測傾管之示意圖。

2.3.2 節理式偏斜儀之感測原理

FBG-SD 之感測原理是由測傾管之變形所帶動；當測傾管因地層發生小變動而發生扭曲時，管內之 FBG-SD 之剛性鋁金屬支架會被帶動變形，然後剛性支架再帶動柔性感測元件部份，感測元件彎曲，光柵讀數跟著改變，光柵讀數變化可換算成 FBG-SD 之彎曲角度，可由此推算地層之側向移動量。

感測元件在前一節有敘述，為光纖光柵貼附於塑膠 ABS 管之兩側，且一端與鋁支架緊密固定，另一端為 Pin 固定在長方形溝槽裡，可縱向自由滑動；當變形發生時，感測元件就如同懸臂樑 (Cantilever beam) 受到點荷重

一樣，兩側的 FBG 會產生同大小但不同方向之應變，一邊受拉伸長，另一邊受壓縮短（圖 2-15）；藉由所改變之波長量（ $\Delta\lambda$, pm）乘上該感測元件之標定係數（ k , °/pm），即可反算出此段量測節理之彎曲角度（ $\Delta\theta$, °），然後累加彎曲角度與節點間距（ L , mm）的乘積，即可求得該地層（或量測區）的測向移動量（ ΔD , mm），公式如下所示，其中 n 表示節點數：

量測節理之彎曲角度（ $\Delta\theta$ ）：

$$\Delta\theta = \Delta\lambda \times k \quad (2-13)$$

地表測向位移（ ΔD ）：

$$\Delta D = \sum_{i=1}^n \left(L_i \times \sin \left[\sum_{i=1}^n \Delta\theta_i \right] \right) \quad (2-14)$$

示意如圖2-16所示，在 FBG-SD 整體位移的分析上，必須假設傾斜管底部為固定端(1點)，分析時由底部固定端向上累加計算。所以當地層發生位移時，軸承 2、軸承 3 與軸承 4 分別轉動角度 θ_1 、 θ_2 與 θ_3 ，由下往上分析時，軸承 2 轉動角度 θ_1 時， L_1 、 L_2 、 L_3 也必須隨著轉一角度 θ_1 ，所以此時節點 3、4 與 5 的位置轉到 3'、4' 與 5' 點，依此類推，當軸承 3 轉動角度 θ_2 時， L_2 與 L_3 也跟著轉動，4' 與 5' 轉動位置到 4'' 與 5''，最後當軸承 4 轉動一角度 θ_3 ，5'' 轉動位置到 5'''。

FBG-SD 的量測原理與傳統傾斜儀（Inclinometer）有所不同，傳統傾斜儀量測的是重力方向之夾角，可量測出各點與重力方向之”絕對角度”；而 FBG-SD 是以最下端感測節理之固定端為基準點，各點量測到的是相較於初始值之”相對角度”改變量，與傳統傾斜儀的原理是不同的。

而 FBG-SD 所量測到每 1pm 之光柵漂移量，其對應之角度變化為 0.0010° ，也就是說其解析度（Resolution）可達到 0.0010° ，且其相關係數皆可達到 0.9995 以上；相對於傳統傾斜儀的解析度 0.0023° 來說，高了許多；此優點對於地層與邊坡的滑動前預警來說，比傳統傾斜儀更能提早感覺到

地層級將滑動；且 FBG-SD 具有不需供電、遠距離傳輸、即時量測與不受電磁干擾等優點，十分具有實用價值。表 2-1 顯示 FBG-SD 之規格。



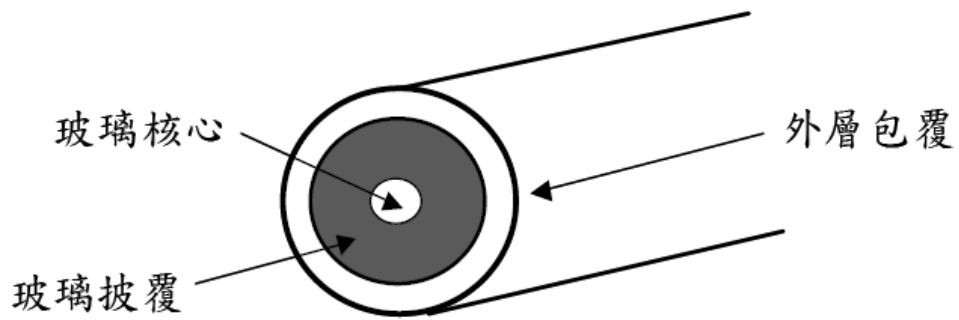


圖 2-1 單模 (single mode) 光纖構造簡易圖 (李文淵, 2005)

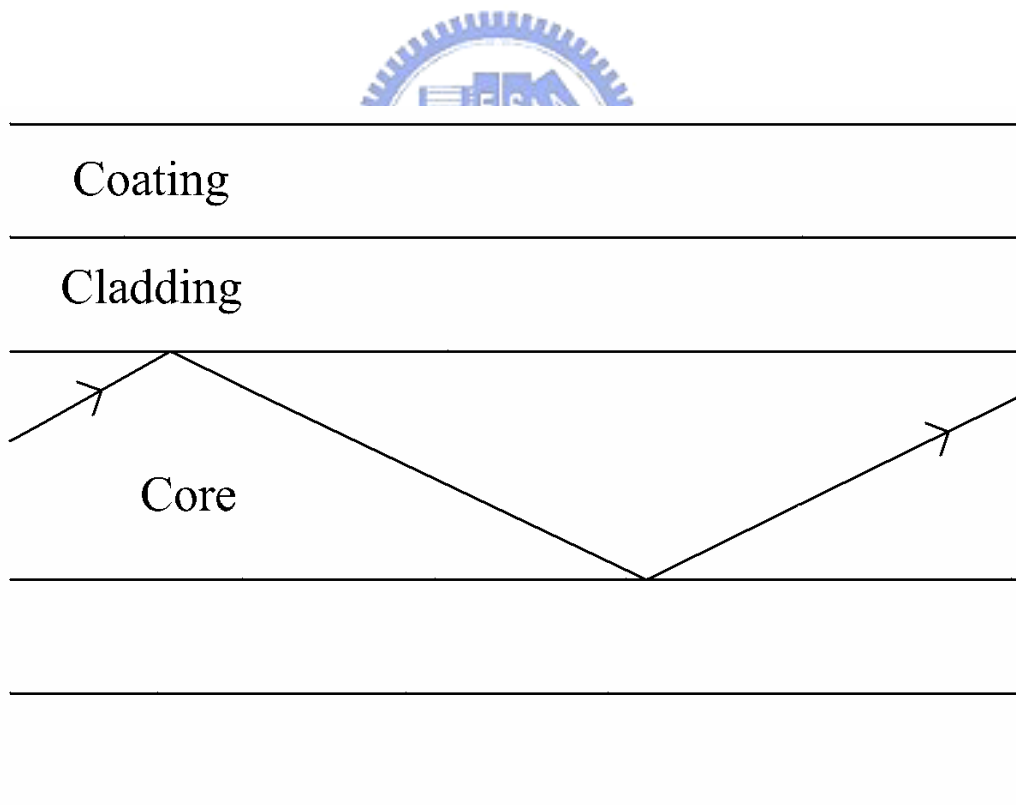


圖 2-2 光於光纖內路徑示意圖 (李建儒, 2002)

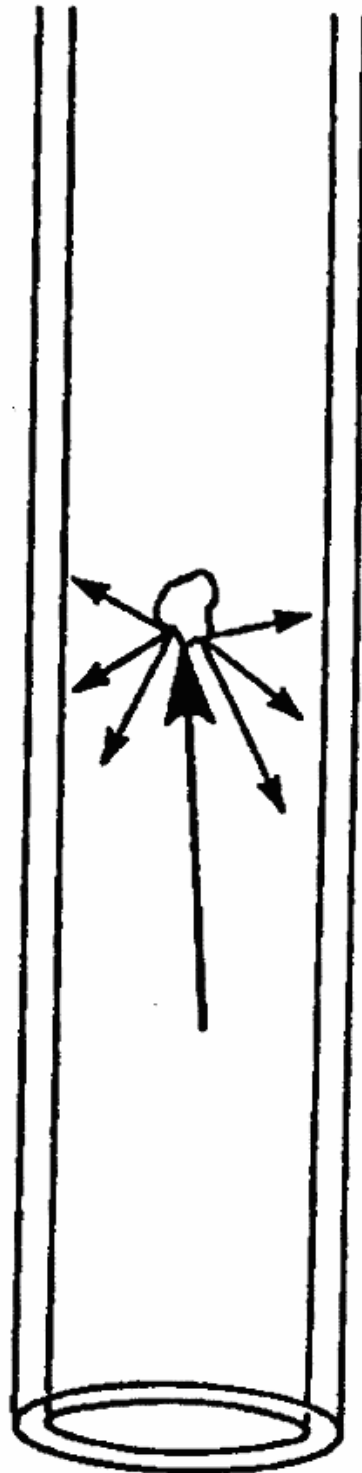


圖 2-3 光散失 (陳君毅, 1998)

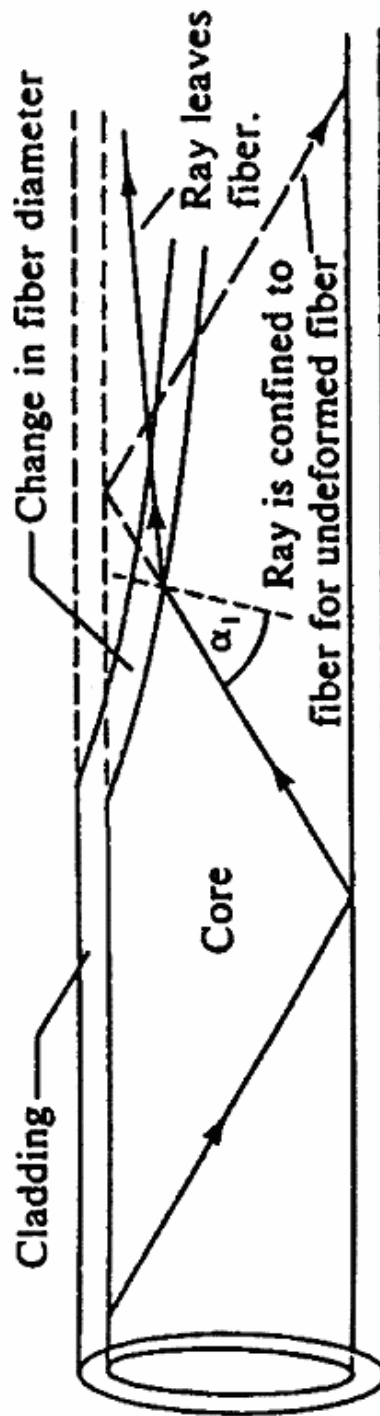


圖 2-4 光纖直徑改變造成的光損失 (Pedrotti and Pedrotti, 1993)

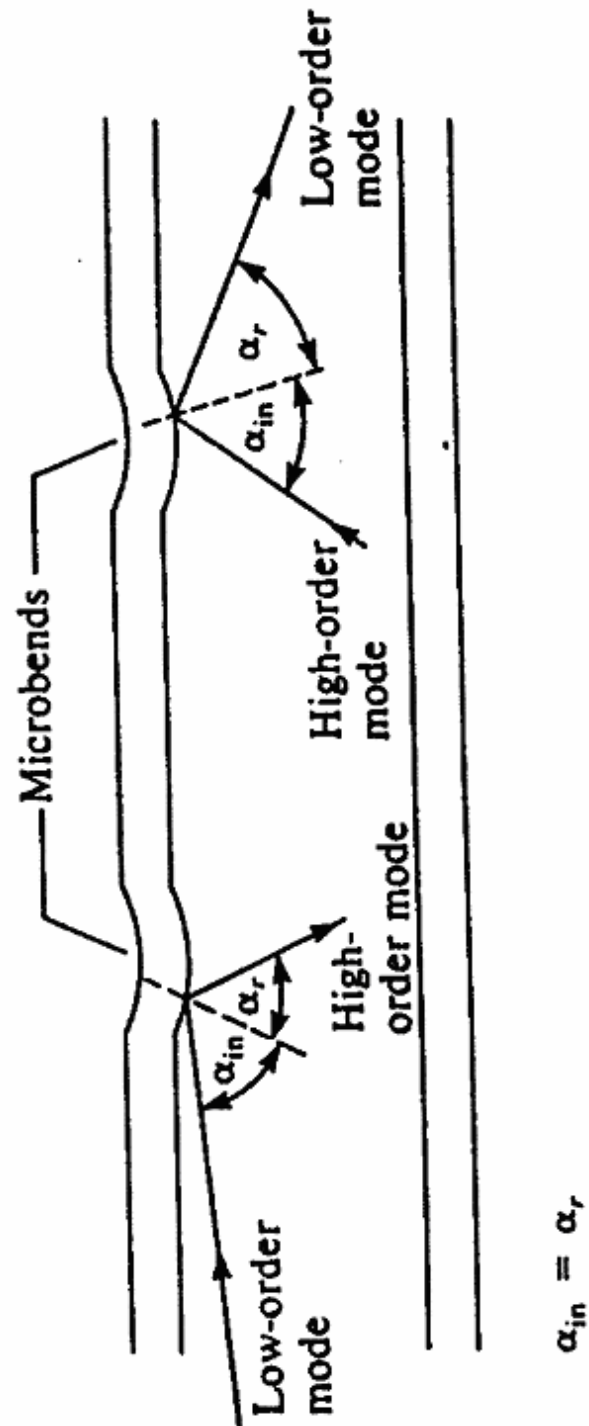


圖 2-5 局部彎曲造成的光損失 (Pedrotti and Pedrotti, 1993)

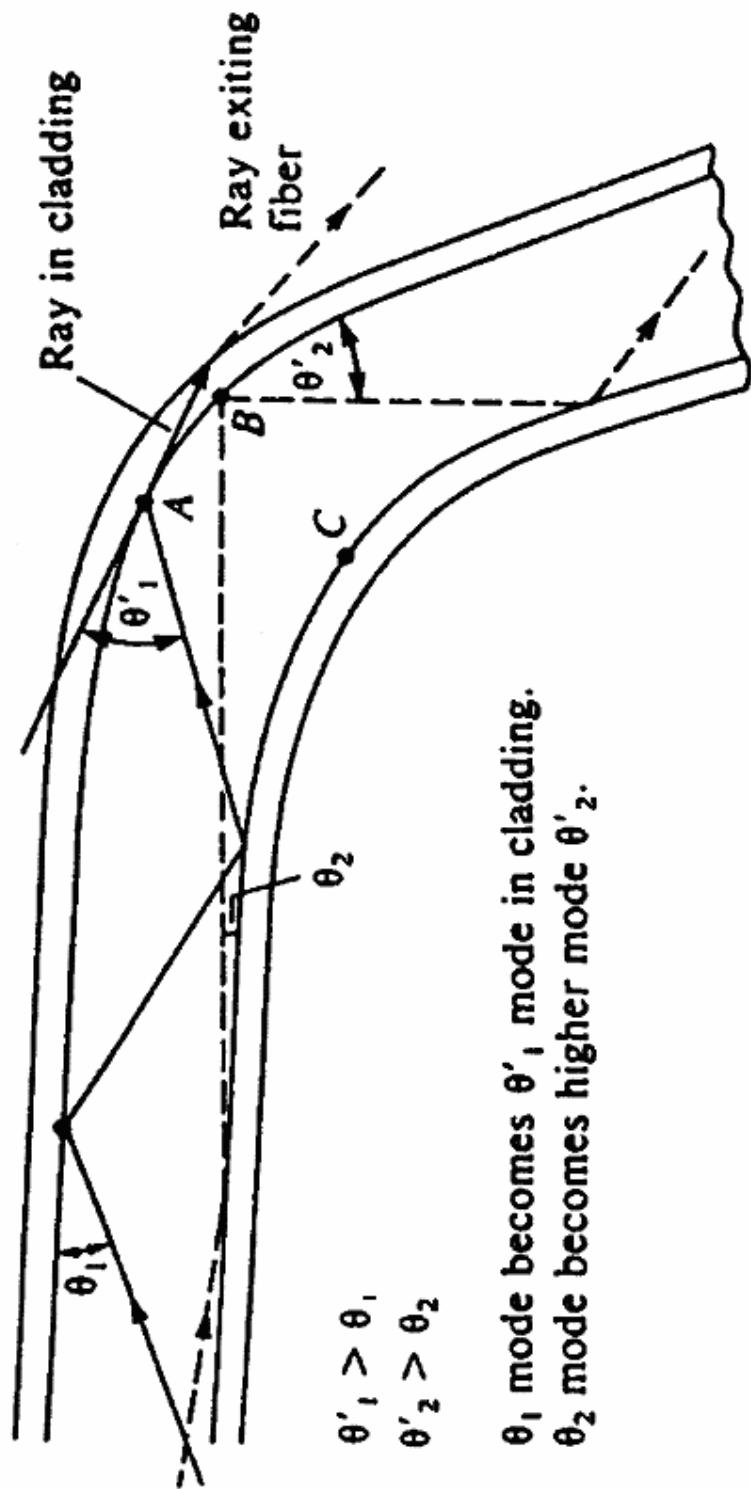


圖 2-6 整體彎曲造成的光損失 (Pedrotti and Pedrotti, 1993)

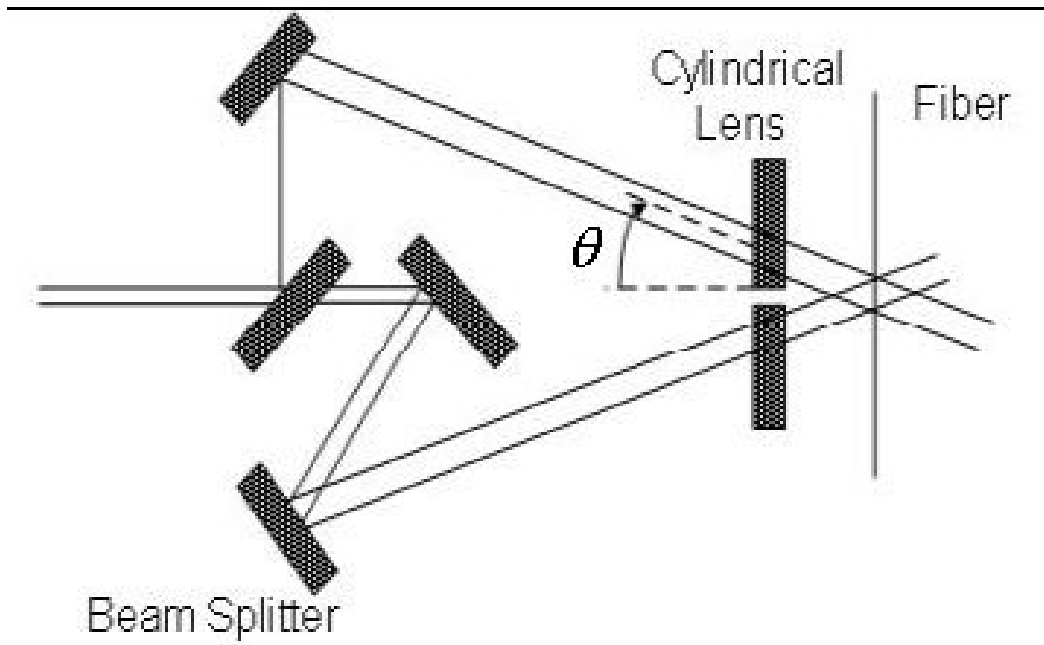


圖 2-7 全像式干涉法 (Meltz and Morey, 1991)

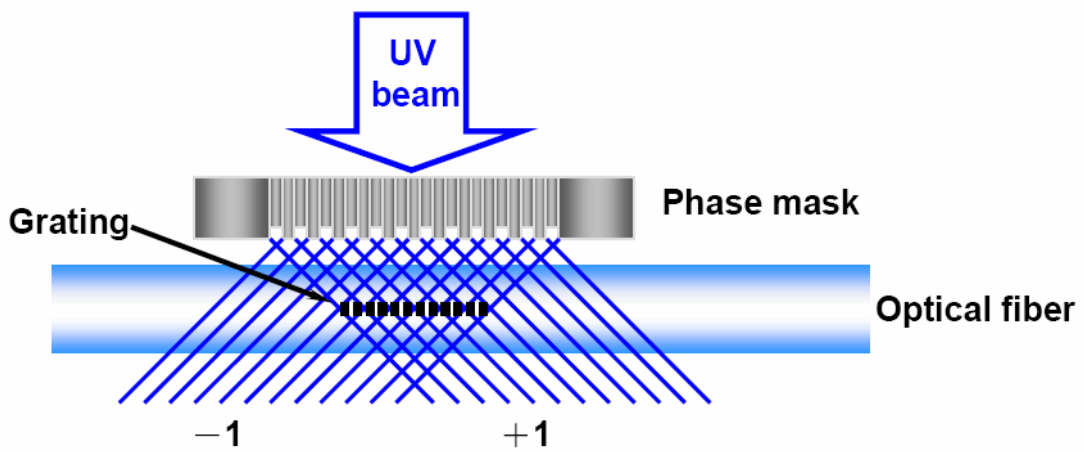


圖 2-8 相位光罩法 (曾昱璋, 2003)

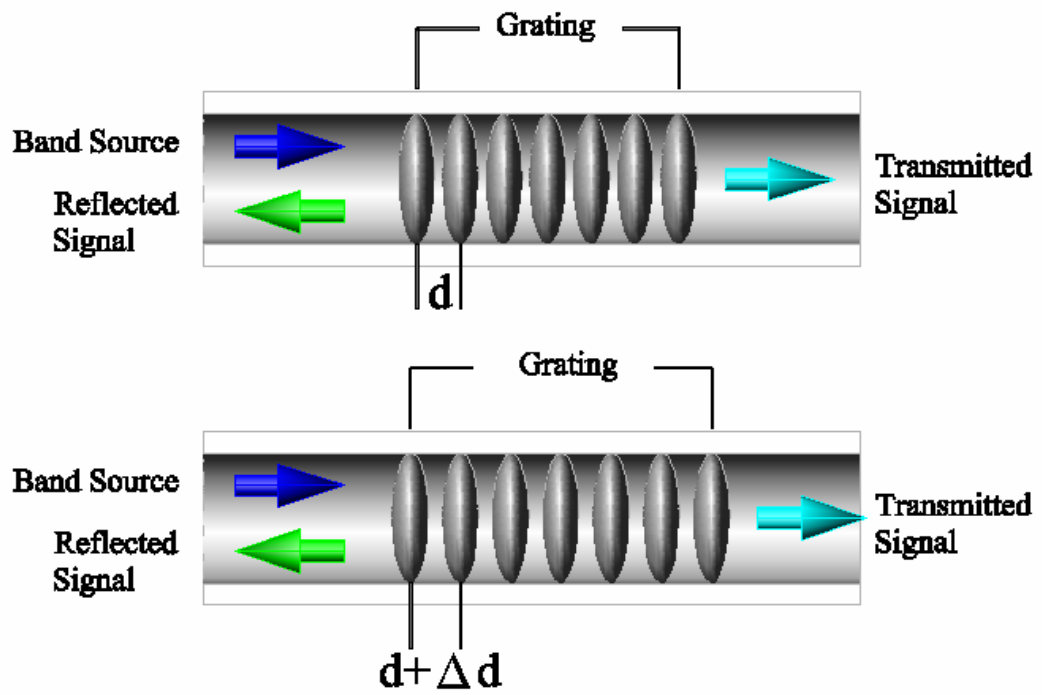


圖 2-9 光纖光柵量測原理示意圖 (簡旭君, 2002)



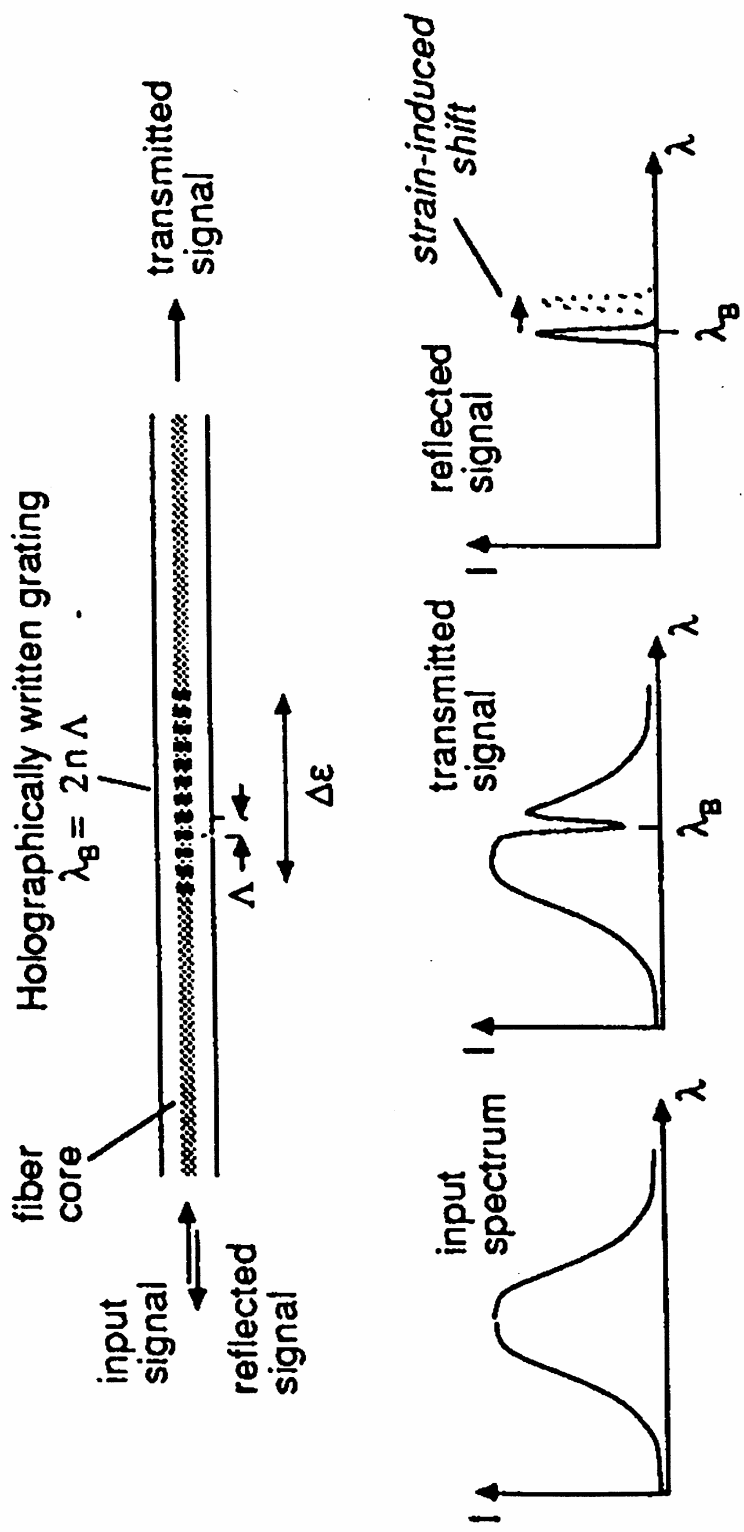


圖 2-10 光纖光柵感測器量測原理示意圖 (Kersey, 1993)

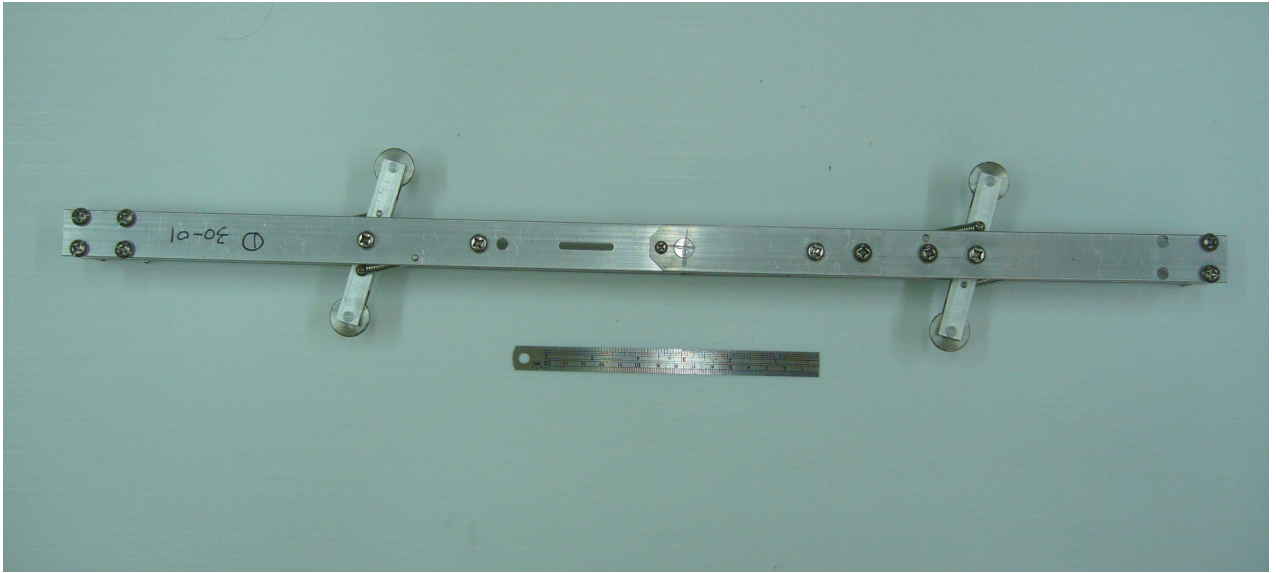


圖 2-11 量測節理實體圖

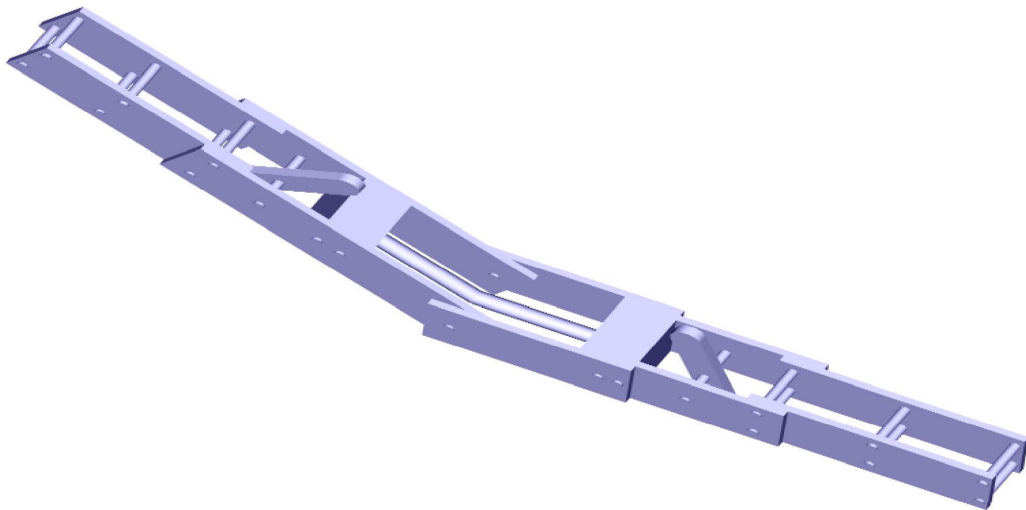


圖 2-12 FBG-SD 示意圖 (何彥德, 2005)



圖 2-13 延伸節理實體圖



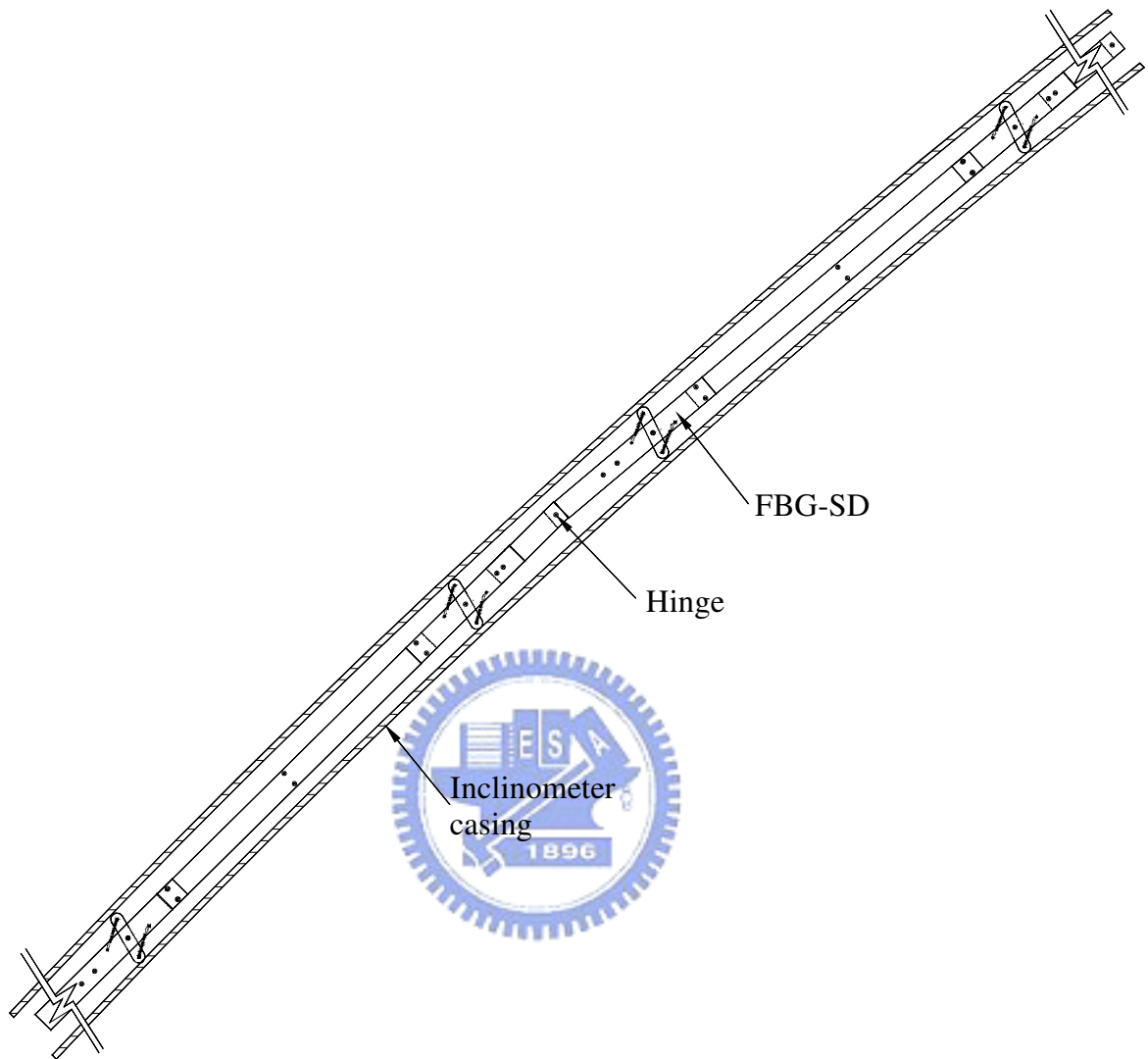


圖 2-14 FBG 節理式偏斜儀放入測傾管示意圖 (Huang, 2006)

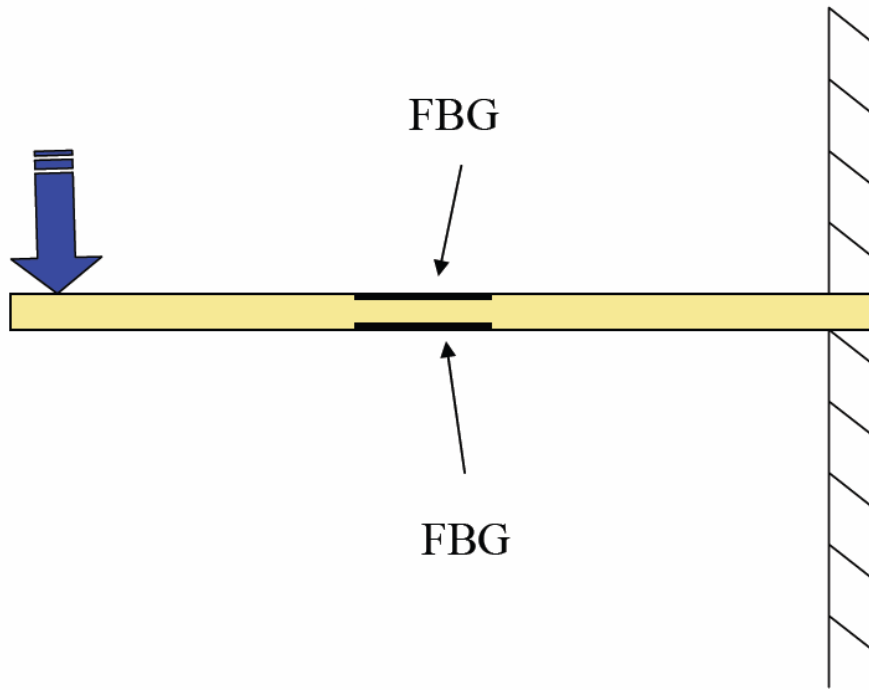


圖 2-15 量測原理示意圖 (黃正中, 2005)

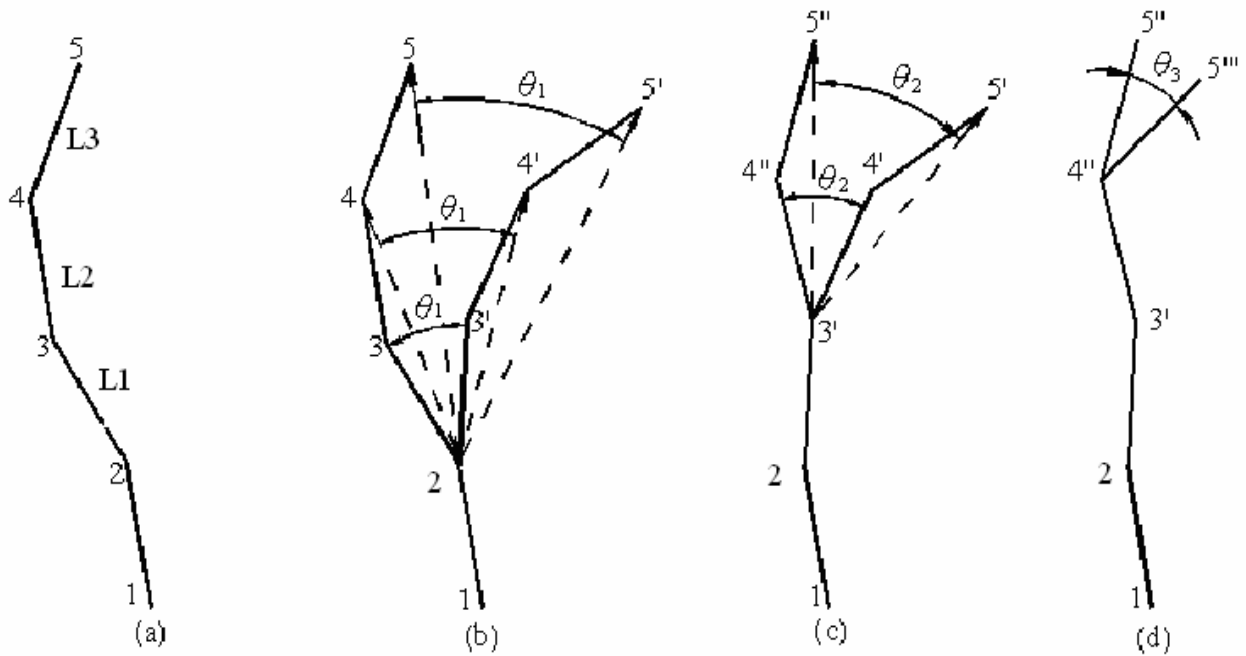


圖 2-16 FBG-SD 整體位移分析圖

表 2-1 FBG-SD 之規格表 (何彥德, 2005)

	FBG-SD
每段長度	1m(可依需求調整)
量測範圍	$\pm 2.5^\circ$
感測器 ABS 大小(直徑)	12mm
解析度	0.0010 度
重複性	0.0059 度

解析度：FBG-SD 每 1pm 之波長漂移量所造成之角度變化量。

重複性：標定數據中，重複之兩點的誤差最大值，定義為重複性。



第三章 偏斜儀材料選定

3.1 增設新實驗設備介紹

點膠設備

為了使接著劑能均勻的塗佈於基材溝槽上，必須要有一精準的點膠設備，為達此目的，研究室購入了型號為 WY-6000 之標準型定量點膠機，圖 3-1 為其實體圖；WY-6000 是運用氣壓與控制點膠時間來達到均勻塗佈且控制用量的效果，可準確控制每次塗佈接著劑的用量；圖 3-2 為儀器示意圖，編號 1~8 分別是：

1. 壓力錶
2. 壓力調整鈕
3. 時間設定鈕
4. 針筒套頭連接口
5. 電源開關
6. 定量選擇開關
7. 真空鈕
8. 動作指示燈



UV 光照燈

如圖 3-3 所展示之實體圖，UV 光照燈為因應 UV 型接著劑之固化方式所購入，型號為 PERTEX 400 UV SYSTEM；使用方法為塗佈完成 UV 接著劑於待黏貼物後，將 UV 光照燈開啟，靜置三分鐘預熱，接著將 UV 光照燈架高於 UV 燈管之焦距內，照射 20~25 秒，即完成程序；其規格列於下方：

1. 電力：220V/3A
2. 尺寸：290×215×160 mm³
3. 重量：5 kg

4. 波長分佈：UV – 365 nm /250 nm，Visible – 400~780 nm
5. 燈管壽命：1000 hr
6. 輸出功率：125 mW/cm²
7. 照射面積：140×110 mm²
8. 焦距：12~15 cm

恆濕恆溫箱

為了實驗的進行，我們需要一個能長時間很穩定維持住溫度之儀器，所以便向巨孚儀器工業股份有限公司 (<http://www.giant-force.com.tw/>) 購入型號為 GTH-800-20-SP 之恆濕恆溫箱，實物圖如圖 3-4 所示；此儀器能長時間很準確的控制溫度與濕度，對於之後的潛變與老化試驗十分重要，且此儀器能應付熱固形接著劑之溫度要求，使其固化；規格如下：

1. 溫度範圍：-20°C ~ 130°C
2. 濕度範圍：10% ~ 98%
3. 溫濕度控制精度：±0.2°C，±2.5%
4. 加溫時間：從室溫至 100°C，在 30 分鐘內完成
5. 降溫時間：從室溫至 -20°C，在 40 分鐘內完成
6. 內箱尺寸：100×100×80 cm³（注意：擺放待側物的體積不可超過內箱之 2/3）

3.2 支架材質的選定

3.2.1 目前使用支架發生之問題

節理式偏斜儀 (FBG-SD) 的感測方法主要是由外部支架 (剛性) 來帶動內部的感測元件段 (柔性)，並對感測元件產生保護作用，故外部支架的設計與材質的選擇也就相當重要；圖 3-5 為舊支架的設計樣式，材質為鋁金屬，外部支架共分為兩部份：量測節理 (Measurement segment) 與延伸節

理 (Extension segment) 兩部份，圖上方為量測節理部份，為固定感測元件並控制其變型用，長度為六十二公分，中間之節點 (Hinge) 與金屬小圓棒 (Pin) 即為控制變型處，由地層的變動帶動鑽孔內之傾斜管，再由傾斜管帶動支架的節點、Pin 帶動感測元件，感測元件的彎矩變形直接反應在布拉格光纖光柵上，我們就從光柵波長的變化值推求地層變位；圖下方為延伸節理部份，為兩段主要段銜接與延長所用，長度為五十七公分。

於進行長期監測的地層中，必定免不了地下水的存在，而地下水會使許多金屬氧化，產生鏽蝕的問題，如鐵、鋁...等，皆會受到水的影響，且地下水必不一定為中性，所以金屬支架之耐酸鹼腐蝕能力也相當重要；圖 3-6 為 FBG-SD 於一年之監測完成後所取出之情形，圖中的鋁金屬支架已經嚴重鏽蝕，不但影響整體的美觀，更無法確定支架能否重複使用，故選定一種適當的金屬來做為支架之材料，對長期監測來說顯得相當重要；我們最後選定了鈦金屬來做支架的新選擇，關於鈦金屬的介紹還有與其他金屬的比較，將於下一節詳述。



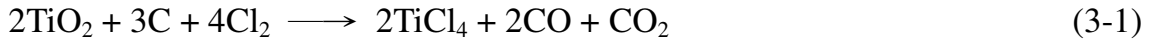
3.2.2 鈦金屬之介紹與比較

鈦為構成地殼的主要元素之一，含量為 0.44~0.57%，佔第九位，化學符號為 Ti，原子序為 22，原子量為 47.90，屬週期系 IVB 族；鈦廣泛存在於許多岩石中，石油、煤炭、天然水、植物、動物機體和骨骼、火山灰燼、深海污泥以及隕石中也都含鈦。

根據「金屬鈦理論與應用」(賴耿陽，1990)所述：鈦的發現一開始是在 1791 年，由英國化學家兼礦物學家 W.格雷哥爾首先在鈦鐵礦中發現鈦的氧化物；接著於 1795 年時，德國科學家克拉普羅特 M.H.在研究金紅石礦石時再次發現鈦，並命名為 titanium，它來源於希臘神話中大地之子 Titans 之名，以表示金屬鈦所具有的天然強度；在 1910 年，由美國冶金家 M.A.

亨特用金屬鈉還原四氯化鈦，製得金屬鈦。

鈦金屬的製法在現在的工業上，是先將鈦鐵礦或金紅石在碳存在下加熱，通氯氣，使二氧化鈦轉化為揮發性的四氯化鈦：



把蒸出的四氯化鈦冷凝提純，然後在氫氣氛中用金屬鈉或金屬鎂高溫還原四氯化鈦，即得金屬鈦。

另一種是克羅爾法 (Kroll, 1977)，此法用鎂作還原劑，在常壓下以熔融的鎂還原四氯化鈦：



反應在氫氣氛中進行，當鎂消耗到 60% 左右時，可將熔融的氯化鎂從反應器中放出，使四氯化鈦蒸氣與留下的金屬鎂繼續反應。此法製得的鈦呈海綿狀，中間混雜有氯化鎂，可在粉碎後用稀酸浸提法或高真空蒸餾法將之除去而得到純鈦。

在物理性質方面，鈦的融點約為 1730 度，密度為 $4.51 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ，約為低碳鋼 (7.85 g/cm^3) 與不銹鋼 (8.00 g/cm^3) 的一半，故同體積相對地輕很多，對於我們與一般的工業上來說，便於進行運送、加工，非常有利；鈦金屬的比強度 (比強度 = 抗拉強度/密度) 為鋁的 1.3 倍、鋼的 1.5 倍，在 $-253\sim 600^\circ\text{C}$ 的溫度範圍內，為所有金屬材料中最高，故可減小物體的體積或厚薄程度；鈦的熱傳導率為 $0.041 \text{ (kcal/s cm g)}$ 、熱膨脹率為 $9.0(10^{-6}/^\circ\text{C})$ ，比起鋁跟鋼都來的小，膨脹率低加上對熱的反應較不敏感，鈦金屬對於製造較精密之設備或儀器有相當的幫助。表 3-1 為鈦與其他金屬之物理性質比較。

化學性質方面，鈦具有相當優異的抗腐蝕性，常溫下，金屬鈦表面容易形成一層保護性氧化膜，不受王水、硝酸、潮濕氯氣、稀硫酸、稀鹽酸和稀鹼溶液的侵蝕；低溫時，鈦在空氣中穩定，隨著溫度上升，氧化速率

也隨之增加，在 250°C 左右，鈦的表面即失去光澤，形成藍至金黃色的氧化物薄層，溫度再升高，氧化層增厚，顏色變為黃棕色，當溫度高達 1200°C 時，氧化過程會逐漸加速。總括來說，相較於易氧化易腐蝕的鋁、鐵、銅... 等金屬，鈦的抗腐蝕性著實來的優良許多。

表 3-2 為鈦金屬的抗酸鹼能力表，表中耐蝕度分為三類，A 代表 0.1mm/year 以下的腐蝕，耐蝕性完全；B 代表 0.1~1.3mm/year 的腐蝕，可用為耐蝕材料；C 代表 1.3mm/year 以上的腐蝕，不可用為耐蝕材料。

鈦具有密度小、耐高溫、耐腐蝕、比強度高特性，大量用於製造軍用超音速飛機的結構部件，噴氣發動機的壓縮部件，飛機機架的構件、機殼、隔火牆、鉚釘，空運裝備的結構部件，軍事設施和軍事艦艇的裝甲板、上層結構部件、熱交換管、開關，以及螺旋槳的葉片等；在民用工業中，鈦及其合金可用於製造各種泵、閘門、過濾設備的金屬絲網和各種機器零件；粉末狀鈦可在電子管製造工藝中用作除氧劑，可以說用途非常廣（賴耿陽，1990）。



3.2.3 支架設計之改良

由 3.2.1 節可以得知，若以鋁金屬做為支架材質，是比較無法長期使用的，故更換材質為必行之要務；從 3.2.2 節所提到關於鈦的物理與化學性質的介紹，我們可以知道，鈦金屬相對於鋁金屬來說，優點共有下列數點：(1) 彈性係數 (E) 大 (2) 熱膨脹與熱傳導低 (3) 比強度高 (4) 耐酸鹼性質優異。

E 值大代表著在相同的應力作用下，所造成的應變會比較小，對熱不敏感則是代表著較不易受到溫度變化的影響，這兩點對可以減低支架部份對偏斜儀標定所造成之誤差；耐酸鹼性質優異可以確保支架不易受到未知的地下狀況所影響，這對於現地監測計畫上的幫助，是鋁支架所無法比擬的；

比強度為抗拉強度除以密度的值，鈦的比強度高代表著支架設計上可以更改減小其厚度，縮小體積，這對價格較高的鈦金屬來說，可減低其成本，且增加了運送偏斜儀的便利性，另外現地架設儀器方面，對於現地直徑受限的鑽孔來說，施工與配線上都更有緩衝的空間，這對計畫的進行會有明顯的幫助。

圖 3-7(a)、(b)為用 AutoCAD 所繪之鈦支架新設計代表圖，與舊設計所不同的地方有下列幾點：

1. 量測節理之長度減短：量測節理段的長度從原本的 62 公分減少成 30 公分；雖然加上延伸節理之總長依舊為 1 公尺，但欲運送偏斜儀時，量測節理與延伸節理是分開封裝的，量測段為每根分開裝盒，延伸段則可全部裝置於同一大箱中，減小了封裝所需的空間，便可有更充裕的緩衝空間可以用來配置解讀儀或其他現地所需之工具。
2. 整體厚度減小：對於節理式偏斜儀來說，我們以五至七段為一組，意思是這七段於兩邊之上端會有各有一條光纖延長線 (Patchcords) 接至讀取儀上，而每段皆是以對接頭 (Adaptor) 串接起來；無法全部串接成一組是因為光訊號在通過對接頭或融接點會有訊號強度減弱之現象，故無法串接太多段，七段已是上限值；所以說，依計畫要求若需裝設 25m 之偏斜儀，則會有 4~5 組的延長線 (8~10 條) 配置於側傾管內，以舊設計來說，延長線過多會造成鑽孔內之摩擦力過大而使得現地裝設較為不便，若使用新設計則可避免此情形，更可以於每組下端加設延長線出鑽孔，避免上端延長線受因外力損壞而需重新裝設。
3. 軸承 (Hinge) 製作方式的改進：以往的舊支架為採用類似錨碇的方式，如圖 3-8 所示，於實心鋁柱上敲出十字刻痕，利用擴張的方

式固定住軸承，可是鋁金屬相對於鈦金屬來說相對的較軟，故舊支架使用時間一久，軸承部份會越來越鬆，這會造成標定係數的改變 (k)，相當嚴重；而新的設計，不但使用較硬之鈦金屬，且不同於舊設計，改用強制固定的方式，如圖 3-9 所示，將空心鈦柱上下端強迫性的迫開，完全密合於鈦版之斜開口上，如此可提高標定數據的準確性與重複性，更可提高支架之耐用性。圖 3-10(a)、(b)為鈦支架 AutoCAD 圖轉換之 3D 示意圖。

3.3 基材材料的選定

3.3.1 目前使用基材發生之問題

偏斜儀內部的感測元件，為塑膠材料、接著劑與光纖光柵 (FBG) 等三種物件所構成，其中的塑膠材料即是我們所謂的基材；我們會選用塑膠，主要是因為相較於金屬支架而言，塑膠可視為柔性物體，若我們選用金屬做為基材，則地層發生變位而帶動側傾管與支架時，會因為感測元件強度過高而造成支架無法帶動基材，而使得軸承 (Hinge) 處破壞。

近年來我們所選用的塑膠材料為 ABS (丙烯腈-丁二烯-苯乙烯) (圖 3-11)；選用 ABS 之主要是因為其價格較低、加工性高與易於被黏貼等性質而用，但使用後發現了兩個問題：

1. **長期於地下水之環境**：因為 ABS 在塑膠材料中為一吸水率不算低的材料，且耐化性不佳，故長期浸置於地下水中，不但容易有吸水軟化的問題，且易受酸鹼腐蝕，造成其強度降低，材料性質改變。
2. **受力之長期潛變**：物質潛變之定義，依材料學所述為”當應力 (或載重) 不變時，應變隨時間的累積增加”，可用一個式子表示：

$$\epsilon_{ss} = A\sigma^n e^{-(Q/RT)} \quad (3-3)$$

其中： ϵ_{ss} = 潛變固體 (Creeping solid) 之應變速率

A = 潛變常數

σ = 潛變固體之應力

n = 潛變指數 (Creep exponent), 介於 3~8 之間

Q = 潛變促動能量 (Activation energy of creep)

R = 氣體常數

T = 溫度

由此可知，對塑膠來說，潛變速率是隨溫度增加的；而材料”開始潛變”的溫度與材料的狀態溫度有關，一般法則為：金屬為 $0.3\sim 0.4 T$ 、聚合物為 $0.4\sim 0.5 T$ ，T 為其金屬之熔點 (T_M) 與聚合物玻璃轉移溫度 (T_g) (Ashby and Jones, 1982)；由於 ABS 之 T_g 較低，所以潛變容易發生，會造成在監測末期之讀數會與理論值有較大的差異。

基於上述兩個問題，基材必須更替並選擇一耐用性較高之塑膠，以提高偏斜儀之可靠度。



3.3.2 聚合物之介紹與性質

塑膠即為所謂的高分子聚合物 (Polymers)，聚合物一詞衍生自希臘文，有“多項構件組合”的含意，又可被稱為高分子或巨分子 (Macromolecules)；一般而言，聚合物的分子是由較小而結構簡單的單位，藉由共用電子對形成的共價鍵，而結合成高分子量 (1000 以上) 的物質 (葉明國，1994)。

聚合物的各種性質，主要取決於兩種特性：(1) 結晶性 (2) 玻璃轉移溫度，詳細介紹如下所述：

1. 結晶性：聚合物之構造是由許多線狀之高分子化合物組成的集合體，依分子成正規排列的程度，稱為結晶化程度 (或結晶度)；此性質為控制著聚合物結構之主要因素，而也影響著聚合物的基本性

質。依結晶度的不同，對聚合物產生的結構形式可分為很多種，如鏈狀、支鏈狀與網狀...等，如圖 3-12 所示；若結晶度愈高，則聚合物的抗張性增強、延伸度減低、硬脆性增大、光澤性增加、吸水性減低、化學穩定性增高、染色親和力減低；反之，若結晶度愈低，則這些聚合物之基本性質則呈相反的效應（游振宗，1992）。

一般聚合物（塑膠）之分類可分為（1）熱塑性塑膠與（2）熱固性塑膠兩種；熱塑性塑膠又可以結晶程度分成結晶性與非結晶性，而熱固性塑膠皆可算是高結晶性之網狀結構，雖然熱固性塑膠結晶性高、各種性質優異，但也因此較不易黏著，對必須用接著劑的偏斜儀來說，反而不甚方便（李繼強，1982）；以熱塑性塑膠來說，較常見的工程用塑膠有：ABS（丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑膠，Acrylonitrile-butadiene-styrene plastics）、PC（聚碳酸酯，Polycarbonate）、PE（聚乙烯，Polyethylene）、PVC（聚氯乙烯，Polyvinylchloride）、PP（聚丙烯，Polypropylene）、Nylon（聚醯胺，Polyamide）、PMMA（聚甲基丙烯酸甲酯（壓克力），Polymethylmethacrylate）、POM（聚縮醛（塑膠鋼），Polyacetal）、PS（聚苯乙烯，Polystyrene），詳細性質介紹如表 3-3 所示。

2. 玻璃轉移溫度：塑膠材料在某一溫度以下，會表現出類似玻璃般較硬的特性，此時便稱此材料處於玻璃狀態（Glassy state），而該臨界溫度則是此一材料的玻璃轉移點或玻璃轉移溫度（Glass transition temperature），符號為 T_g ；在 T_g 以下，塑膠之行為類似玻璃，超過 T_g 其行為開始轉為軟而有彈性的橡膠態，溫度再高則進入粘性液態，如圖 3-12 所示， T_1 與 T_2 的範圍叫轉移區（Transition region），一般以玻璃區之斜率與液態區之斜率在此轉移區之交叉點當作玻璃轉移溫度（ T_g ）之值；此玻璃轉移行為亦可看出塑膠之結

晶性，結晶性低之塑膠其玻璃轉移越明顯，反之則否。

塑膠之玻璃轉移溫度 (T_g) 對的潛變的影響甚鉅，故考慮各塑膠材質的 T_g 值對偏斜儀來說是必須的；各種常用之工程塑膠之 T_g 值亦收錄於表 3-3。

3.3.3 基材選定測試

對本研究來說，為了因應之後的老化試驗規定，溫度至少要超過 70°C ，故必須考慮塑膠基材之”熱變形溫度 (Heat deflection temperature, HDT)” ，HDT 的定義為，塑膠材料在高溫且受壓下能否保持不變的外型，一般表示塑膠材料的短期耐熱性 (ASTM D648)；為了以求保守，需選擇 HDT 至少超過 75°C 之塑膠材料。

接著為了避免潛變過於容易發生，我們要考慮塑膠之玻璃轉移溫度 (T_g)；如 3.3.1 節所述，對聚合物而言，潛變發生的條件溫度為 $0.4\sim 0.5 T_g$ ，地下溫度最高以保守 40°C 來考量，則 T_g 則需至少為 100°C 以上，此為第二考慮因素。

由表 3-3 所示，符合上述兩者條件之常用工程塑膠為 PC (圖 3-13 上方) 與 MC-Nylon (圖 3-13 下方)，接著對這兩種塑膠進行吸水率試驗與耐酸鹼試驗來做選定。

吸水率高對塑膠來說，如 3.3.1 節所述，容易有軟化之行為，故選定吸水率較低之塑膠相當重要；吸水率試驗之試體以偏斜儀之設計為依據，將直徑為 12 mm 圓柱塑膠棒 (PC、MC-Nylon)，裁切成 30mm 之高度，置入此試體 4 個 (每個重 3 g) 於玻璃燒杯中，倒入純水至完全覆蓋過試體，每日進行面乾內飽和之秤重，以 4 個試體之平均重量改變率 ($\Delta W/W_0, \%$) 為紀錄值，至兩個禮拜為止，畫出吸水率與時間之關係圖；試驗結果如圖 3-14 (PC)、3-15 (MC-Nylon) 所示。耐酸鹼試驗步驟則比照吸水率之實驗步

驟，同樣兩個禮拜後取出，畫出其重量改變率 ($\Delta W/W_0, \%$) 之關係圖，而酸性溶液為鹽酸 (HCl, pH=1) 稀釋至 pH=2，鹼性溶液則為氫氧化鈉 (NaOH, 固體) 加水調配成 pH=11 之溶液，試驗結果 PC 為圖 3-16、3-17，MC-Nylon 為圖 3-18、3-19。

由吸水率試驗的結果可知，塑膠圓柱體的飽和約在第十到第十一天的時候發生，PC 的吸水率為 0.5%，而 MC-Nylon 則約為 8.25%；而在抗酸鹼試驗的部份，結果顯示 PC 依舊為 0.5%，但 MC-Nylon 則變為約 5.5~6%，與其吸水率有段差距，故從結果研判 MC-Nylon 於酸鹼性溶液中約會有 2.25~2.75% 的腐蝕量，且相較於 PC，試驗完後 MC-Nylon 表面已明顯變粗糙，可看出已受到酸鹼腐蝕；綜合這兩項試驗結果，可以確定 PC 較 MC-Nylon 吸水率低且不易受到酸鹼影響，固決定以 PC 作為本研究的塑膠基材。



3.4 接著劑的選定

3.4.1 目前使用接著劑之問題

對於偏斜儀來說，接著劑的目的除了保護光柵 (FBG) 外，主要為支架帶動基材形變時，基材能順利的將力傳遞到光柵上，使光柵產生應變，讀取儀才能接收到光柵反射波長的變化，接著劑之重要性可想而知。對於舊設計及更早之前所使用的接著劑，發生了一些問題，如下所敘述：

1. 抗拉強度不足：接著劑若抗拉強度不足，會使得偏斜儀於製作完成，進入標定程序時，產生接著劑受拉力而裂開，這會造成應變無法均勻傳遞，使得光柵反射波長呈現多波峰之情形，更嚴重者，會造成光柵損傷訊號減弱，甚至斷裂；故選擇抗拉强度高之接著劑是很重要的。
2. 與光柵膠結能力不良：某些接著劑與光柵接著後，於標定至角度較

大時，發生光柵之反射波峰讀數慢慢往回漂移的現象，原因是接著劑與光柵之握裹力不夠，造成光柵回彈且無法隨著基材變形而拉伸，應力無法全部傳遞，並且使得光柵之預拉量減小甚至消失。

3. 上膠不均勻：因為早期使用接著劑的方式是採用手持其外瓶上膠，由於人為力道不容易控制，接著劑不可能均勻塗佈，而造成反射波訊號減弱或產生多波峰之情形；此問題已解決，方式有二：

- 點膠設備的使用：點膠機的購入，以氣壓與時間來控制接著劑的用量與均勻性，使用方式之詳細介紹於 3.1 節；可減少由於接著劑塗佈不均勻而造成光纖或光柵產生應力集中之現象，使得之光纖或光柵損傷而發生光訊號減弱（圖 3-20）甚至消失之情形。

- 製程的改良：舊製程的製作方式為將接著劑塗佈於光柵上直接固化，容易造成多波峰之情形（圖 3-21）發生；而新製程為間接式黏貼光柵，可避免此問題；正常之波形如圖 3-22 所示，新製程之介紹將於 3.5 節詳述。

4. 縮率過大：所謂的縮率，就是接著劑於固化時會造成光柵預拉量的減少；起初認為造成光柵縮率的主要因素為接著劑之固化縮量，實則不然，經多次實驗後得知，造成光柵縮率的主因為玻璃纖維與塑膠材料之熱膨脹係數差異過大所致；如 2.2.3 節所述，光柵 1°C 之溫度飄移量約為 11 pm ，換算成應變約為 $9.5\ \mu\varepsilon$ ，而 PC（聚碳酸酯） 1°C 之應變量約為 $66\ \mu\varepsilon$ ，所以只要溫度變化 1°C ，兩者應變差了約 $56.5\ \mu\varepsilon$ ，換算成光柵漂移約為 65.7 pm ，差異非常大。故對於本研究之製程來說，需要利用升溫黏貼之接著劑（如熱固膠）是無法使用的，必須選擇不會使溫度變化過大之接著劑，才能保有偏斜儀之預拉量。

3.4.2 接著劑的組成與分類

根據美國標準試驗法（ASTM）的定義，所謂接著劑（Adhesive）乃是”一種能利用其對各種材料表面之附著力量，而使相同或不同的材料結合在一起之物質”；使用接著劑有以下之優點（沈志輝，2002）：

1. 可接著接合薄膜、纖維、粉末等其它方法無法接合之物質
2. 大面積接合有效平均分散應力
3. 接合介面提供特殊性質如絕緣或異方向導電
4. 接合面阻絕溼氣
5. 可接合不同材質，應用於不同金屬可防止腐蝕
6. 提供快速廉價之接合替代性

接著劑種類繁多，組成也不盡相同，為了因應不同之被接著物而有著不同的成分，以下為各組成成份之介紹：

1. 主劑：為接著劑的主要成分，為控制接著劑性能的主要因素，可為有機或無機化合物。
2. 固化劑：流動狀態之接著劑塗佈於被接著物表面，然後通過適當方法使其成為固體才能承受各種負荷，此過程稱為固化；固化可以為物理變化，如溶劑的揮發、乳液的凝聚、熔融體的凝固；亦可以為化學變化，使接著劑發生反應而集成為固體的高分子物質。
3. 可塑劑：可塑劑之主要目的為改善接著劑之脆性，提高其柔韌性與伸張量，降低膠體開裂程度；但用量過多反而會使得強度與耐熱性下降，需配合使用條件確定用量。
4. 稀釋劑：用來降低接著劑之黏度的液體物質可稱之為稀釋劑，可為水或有機溶劑；一般來說，接著劑強度隨著稀釋劑用量的增加而下降。
5. 填充劑：為了改善接著劑的加工性、耐久性、強度及其他性能或降

低成本等而加入的一種非黏性的固體物質稱為填充劑；常用的主要是無機物、金屬、金屬氧化物或礦物之粉末。

6. 耦合劑：在黏貼過程中，為了使接著劑和被接著物表面之間形成一層牢固的界面層，使原來無法黏貼或不易黏貼的材料間透過此界面層而使其黏著力提高，這一界面層的成分稱為耦合劑；近年來因應光纖發展，而開發出黏貼玻璃纖維之矽甲烷耦合劑（Silane Coupling），可以使玻璃與接著劑產生共價鍵而相結合；圖 3-23 為其鍵結示意圖，左方為攪入矽甲烷耦合劑之接著劑，右方為光纖（玻璃纖維）。
7. 其他：為了滿足某些特殊要求，改善接著劑的某一性能，而在接著劑中加入一些其他助劑，如顏料、老化防止劑、防腐劑...等。

近年來接著劑的開發不斷，分類方式也因需求而有許多種類，如：依組成分類、依外觀型態分類、依應用範圍分類、依固化方式分類...等，方式非常多樣；此以最常用之固化方式分類作為介紹，其主要分類如下：

1. 反應型：接著劑經過化學反應而發生固化成為固體，分成兩大類。
 - 常溫固化：常溫下即可產生化學反應，分成三種。
 - 溼氣硬化型：藉著接觸到空氣中水分子而發生反應。
 - 厭氧型：在空氣中維持液態，遮斷空氣而發生反應之接著劑。
 - 觸媒添加型：添加催化劑而發生反應之接著劑。
 - 加熱固化：加熱才能產生化學變化之接著劑。
2. 熱熔融型：常溫時可能為粉末或棒狀，透過加熱熔融後，塗佈在接著處，待冷卻即固化；此固化過程為物理變化，可藉由加熱融化而拆除。
3. 感壓型：於常溫可長時間保持黏著性，稍微施加壓力即可接著；接

著劑不發生固化作用，因此可反復使用。

4. 再濕型：以水濕潤乾燥之接著處（水型），或以溶劑將接著劑合成溶液，待溶劑揮發後固化（溶劑型）。
 - 水型
 - 溶劑型

3.4.3 接著劑之黏貼理論

接著的理論有很多種，通常接著劑與被接著物間之結合力是無法以單一一種來解釋，概括來說，欲解釋表面結合力可分為：(1) 化學鍵力（主價鍵力）(2) 分子間作用力（次價鍵力）(3) 吸附理論 (4) 靜電理論 (5) 擴散理論 (6) 機械結合理論；以下詳細介紹，以便於分析接著之結合力：

化學鍵力：

化學鍵主要可分為共價鍵、離子鍵與金屬鍵三種，但以有機之接著劑與被接著物（塑膠）來說，主要之化學鍵力為共價鍵。

共價鍵力比分子間作用力要大的多，為理想之接著劑之要素；共價鍵的產生能有利於提高接著強度、防止裂縫、抵抗應力集中與減小氣候環境造成老化；接著介面之化學鍵可藉由下述途徑發生化學反應而形成

(Hofricher, 1948)：

1. 通過接著劑與被接著物中之活性基團反應行程化學鍵：
 - 活潑氫與 $-NCO$ 、 $-COOH$ 及 $-COCl$ 反應，如圖 3-24 所示。
 - 氫氧基與 $-NCO$ 、環氧基及 $-R-CH_2-OH$ 反應，如圖 3-25。
2. 通過耦合劑使接著劑與被接著物分子間形成化學鍵：接著體系中，很多情況下接著劑與被接著物表面之間無法直接發生化學反應；為为了提高接著強度、改善耐環境能力，通常會採用耦合劑來達到此目的。如前述圖 3-23 所示。

3. 通過表面處理獲得活性基團，與接著劑形成化學鍵：許多被接著物表面經過處理後可獲得活性基團，在接著過程中與接著劑發生化學反應；例如表面電暈放電（Corona Discharge）處理、金屬表面氧化、陽極處理、酸洗處理，這些方式可形成—OH（氫氧基），與膠著劑發生化學反應。

分子間作用力：

分子間作用力又稱次價鍵力，分為凡得瓦力與氫鍵；凡得瓦力又分為取向力、誘導力與色散力：

1. 取向力：極性分子與極性分子靠近時，二者的固有偶極因取向而產生的分子間作用力稱為取向力。
2. 誘導力：極性分子與非極性分子靠近時，非極性分子被極性分子固有偶極所極化，產生誘導偶極；這種極性分子與非極性分子間的作用力即稱為誘導力。
3. 色散力：色散力為非極性分子間，瞬時偶極處在異級相鄰時產生的作用力。非極性分子內，電子與原子核在運動過程中，產生瞬時不對稱狀態，致使分子的正負電荷重心不重合，產生瞬時偶極。兩個相鄰瞬時偶極或瞬時偶極極其誘導偶極間作用力，就是色散力。
4. 氫鍵：氫鍵是由電負性原子共享氫質子而產生的；一般表示方式為 $X-H\cdots Y$ ，其中的 $H\cdots Y$ 即為氫鍵；本質上是帶有部份負電荷的原子 Y 與電偶矩很大的極性鍵 $X-H$ 間的靜電吸引作用；其鍵能比化學鍵小很多，但比凡得瓦力大一些，鍵結能量表列於3-4中。

吸附理論：

跟據膠黏應用手冊（陳根座，1994）所引述，吸附理論於1940年代由McLaren所提出；此理論認為接著過程可分為兩個階段；第一階段為接著

劑分子通過布朗運動，向被接著物表面移動擴散，使兩者的極性基團相互靠近；第二階段是吸附引力的產生，當接著劑與被接著物體兩者的分子間距達到 10^{-9} m 以下時，便產生分子間引力，此即凡得瓦力；其作用能 E 如下列公式所示：

$$E = -\frac{2}{R^6} \left[\mu^4 / 3KT + \alpha\mu^2 + \frac{3}{8}\alpha^2 I \right] \quad (3-4)$$

其中： μ = 分子偶極矩

α = 極化率

I = 分子電離能

R = 分子間距離

K = 波茲曼常數

T = 絕對溫度

由上式看出，兩者的極性越大，分子間距越小，接著越緊密，吸附能力越強。

靜電理論 (Deryagin, 1949) :

靜電理論認為在接著處存在雙電層，此雙電層會產生靜電引力；雙電層的存在是由於不同相內的荷電粒子（電子或離子），因兩相性質差異引起轉移而形成的；靜電能量如下列式所示：

$$W = \frac{2\pi Q^2}{\epsilon} h \quad (3-5)$$

其中：W = 靜電吸引之作功

Q = 電荷的表面密度

H = 放電距離

ϵ = 介質的介電常數

擴散理論 (Voyutskii, 1950) :

此理論為兩種高分子聚合物在互相緊密接觸時，由於分子的布朗運動

或鏈段的擺動所產生之互相擴散現象，如圖 3-26 所示；為穿越接著劑與被接著物介面交織進行，擴散的結果導致界面的消失和過度區的產生；可藉由增長兩者接觸時間與提高溫度來提高接著力。

機械投錨理論：

於接著前以砂紙或噴砂法調整被接著物的表面，形成凹凸不平處，擴大接觸面積且可使接著劑如釘子般勾住凹處，亦稱為釘著理論；如圖 3-27 所示。

3.4.4 接著能力測試

為了因應本研究需求，我們向尚貫股份有限公司、永寬化學股份有限公司 (<http://www.everwide.com.tw>) 與東服企業有限公司

(<http://www.orient-service.com.tw>) 購入 18 種黏貼光纖專用接著劑，依其固化方式分類如下：

1. 熱固型接著劑：A、B、C、D、E、F、G。
2. UV 固化型接著劑：H、I、J、K。
3. 雙液型瞬間接著劑：L。

由於種類繁多，故本研究必須先對這些接著劑進行篩選；而對於 FBG-SD 來說，接著劑最重要的性能就是其對玻璃纖維的接著能力，能力越好對偏斜儀也越有益處，可避免長時間後發生光柵與接著劑相對滑動的情形發生；關於初步接著能力測試之實驗步驟與結果，介紹如下：

1. 剪裁光纖：以一般 Single-mode 之光纖（型號為 SM250）作為本試驗之測試光纖；先將其剪裁 20 cm 作為一段，並將其兩端以除漆劑剝除 1 cm 之 Coating。
2. 接著固化：將著將其兩端以膠帶暫時黏貼於有兩個 ϕ 6mm 孔徑之鋁塊上，以點膠設備均勻塗佈所需試驗之接著劑於其上，厚度約 2

mm，並依照其固化方式將其固化。

3. 試驗架設：將上述步驟完成之試驗體之一端以螺絲牢固於光學桌上，而另一端固定於螺旋微調儀上，如圖 3-28 所示；將著旋轉微調儀旋鈕使其拉動試驗體，至光纖拉斷或脫落為止即結束，並紀錄其拉伸量

結果如表 3-5 所示，有些接著劑結果為”脫落”，這代表其與光纖是無法產生足夠鍵結的，接著能力太弱，首先刪除；再者有些結果為”拉斷”，但其拉伸量不高，這代表著此接著劑在固化的過程中，改變了光纖表面之性質，使光纖抗拉強度減低導致受拉斷裂，此接著劑亦無法使用；故剩餘之接著劑即為可用之種類，但對於 FBG-SD 來說，熱固型接著劑是無法使用的，如 3.4.1 所述，由於 PC 與光柵之熱膨脹係數差異，會造成光柵縮量過大，雖然其中有些具有不錯之接著能力，但亦不能使用，須待未來研發不同於現在之設計才可使用之；所以最後決定能進行偏斜儀之潛變與老化試驗的接著劑為 J、K 與 L。

接著將此三種接著劑以比照上述與 3.3.3 節之方式進行酸鹼測試；首先步驟比照上述 1.~2.，剪裁光纖、接著固化，並在步驟 3.前將試驗體塗佈在尚貫股份有限公司所構入型號為 AX019 之防水矽膠，再將其放置於酸鹼溶液與純水中，酸鹼調配方式比照 3.3.3 節；放置兩個禮拜後取出，進行上述步驟 3.之試驗，然而結果卻發現，不論於純水、酸性或鹼性溶液中，接著能力與未置入溶液中沒有明顯之差異，故可確定此包覆著 AX019 防水矽膠之試驗體，抵抗酸鹼能力是足夠的。

3.5 偏斜儀製程之改良

3.5.1 偏斜儀製程與舊有的缺點

節理式偏斜儀 (FBG-SD) 之製作流程可概略分成三個步驟：(1) 前置

作業 (2) 光柵黏貼 (3) 組裝標定，如下所述：

1. 前置作業：

- A. PC (聚碳酸酯) 加工：將長 205 mm、直徑 12 mm 之 PC 圓棒表面 ± 180 度的地方，加工出 1.5 mm 深的 v 型溝槽；接著於一端加工出兩個 $\phi 6$ mm 之孔洞。
- B. 確定光柵黏貼位置：以丙酮擦拭 PC 之溝槽，避免加工所殘留之油漬；接著自有兩孔洞那端量起 6 cm 處做記號，此為 FBG 之中心點。

2. 光柵黏貼：

- A. FBG 預拉：因光柵本身壓縮能力不佳，所能承受壓縮的量有限，故給予光柵足夠之預拉量，其作用為增加 FBG-SD 之可量測範圍；舊設計如圖 3-29 所示，先將 PC 以不鏽鋼外罩固定，並於其中一端以 M10 之螺絲將 PC 旋緊，以計算螺距的方式給予 PC 棒 $3000 \mu \varepsilon$ 左右之壓縮量，再黏貼 FBG，固化後再鬆開螺絲使 FBG 拉伸約 3000 pm 的量；此方式不但無法準確控制所需之預拉量，且於鬆開螺絲時很容易造成接著劑受到快速解除應力而開裂，造成 FBG 損壞。改良方式將於 3.5.2 節詳述。
- B. FBG 塗佈接著劑：舊有的方式是先將 FBG 之中心置於 PC 記號處，以膠帶暫時固定，接著從 FBG 中心開始往左右各 1.5 cm 均勻塗佈接著劑，使塑膠基材與 FBG 結合；此方法由於接著劑直接塗佈於 FBG 上，容易損傷 FBG 而造成訊號減弱或雙波峰之情形。改良方式於 3.5.3 節詳述。
- C. 其餘作業：黏貼完成後，將 PC 上下旋轉 180° ，重複步驟 A~B 黏貼另一面，此部份即可稱作 FBG-SD 之感測元件；將感測元

件上下四個端點熔接上長度為 35 cm 之光纖包覆線 ($\phi 900 \mu\text{m}$ and $\phi 3\text{mm}$)，並於交接面處上塗佈三秒膠暫時固定，接著塗佈在尚貫股份有限公司所構入型號為 AX019 之防水矽膠於感測元件上，等待防水矽膠固化後，將四個端點以”光纖熔接機”熔接四個光纖接頭 (FC-APC Pigtail)，即完成感測元件；實體圖如 3-30 所示。

3. 組裝標定：

- A. 組裝作業：將完成之感測元件與有金屬滾輪 (Wheel stud) 部份之金屬支架組裝結合，插入金屬圓棒 (Pin) 並固定，此部份即為所謂的量測節裡 (Measurement segment)，如圖 2-12。
- B. 標定作業：將量測節理一端以 M6 之螺絲固定鎖緊在光學桌板上，另一端以微調儀側向推動，即得到波長 v.s. 角度改變量的關係圖與標定係數 (k)，如圖 3-31 所示；標定完成後，將量測節理拆下、上螺絲與裝箱 (圖 3-32)。

FBG-SD 之量測節理段製作完成後，將其與延伸節理 (Extension segment，圖 2-14) 以螺絲做一剛性連結，即可用於現地監測上。

3.5.2 預拉光柵方法的改良

如上節所述，FBG 之預拉是必須且待改良的，在本節介紹改良之預拉方式，不同於過去採用預壓 PC 的方式，為直接預拉 FBG 於”預拉臺”上，再黏貼於 PC 上，不但可避免上節所提到之問題，還可準確控制預拉量，其步驟如下：

1. 剝除 Coating：將 FBG 之一端端點處以光纖剝線鉗剝除 15 mm 之 Coating (此稱為滑動端)，另一端則先保留 8~10 cm，再剝除 15mm 之 Coating (此稱為固定端)，然後使用膠帶將兩端暫時固

定於預拉臺之溝槽上。

2. 接上光纖讀取儀：於上述固定端之端點處使用光纖臨時對接器連接延長至光纖讀取儀，讀取並確定 FBG 之讀數。
3. 兩端固定：使用於尚貫股份有限公司所購入型號為 3008UV 之金屬專用接著劑，塗佈於步驟 1.所述之預拉臺溝槽上，使用 UV 光照燈（圖 3-3），使其固化並黏貼住光纖與金屬溝槽。
4. 預拉光柵：以雙手緩慢且微小的拉動滑動端，並注視讀取儀讀數，至讀數增加 4000 pm 為止，將滑動端以螺絲固定住，並觀測讀取儀以確定讀數穩定不變。

到此即完成 FBG 預拉工作，接著便是進行黏貼 FBG 於 PC 上之步驟（3.5.5 節），待確定接著劑完全固化後，才可鬆開滑動端。預拉 FBG 之架設圖如圖 3-33 所示。

3.5.3 黏貼光柵方式之改良-軟膠式黏貼法

本節介紹之黏貼方式，與舊設計不同的地方是可避免接著劑固化直接影響到 FBG，造成其損傷；以尚貫股份有限公司所購入型號為 E6000 之軟膠先覆蓋一薄層於 FBG 上，再於其周圍覆蓋硬膠，由於軟膠不會與 FBG 產生共價鍵，僅以分子間作用力相結合，強度不高但可緊密包住 FBG，故不會接著而損傷 FBG，示意圖如圖 3-34 所示；以下為步驟介紹：

1. 確定位置：自 FBG 剝除 Coating 處往兩端各於 5mm、10mm、20mm 與 25mm 處作記號，並令其為 A、B、C、D 點，如圖 3-35 所示。
2. 剝除 Coating：以除漆劑小心地塗抹於 B~C 間，等待約 30 秒，隨即以棉面沾適量酒精將此處之 Coating 剝除；此處即為主要接著劑主要接著處。
3. 光柵預拉：將 FBG 放置於 PC 之 V 型溝槽上，並使 FBG 中心對準

所標示之記號；接著比照 3.5.2 節之預拉方式，使 FBG 能有 4000 pm 之預拉量。

4. 一次上膠：預拉完成後，於上述 A~D 處塗佈接著劑（硬膠）至溝槽的一半深度，並依照其所要求之使用方式固化；固化後，自左方 A 點塗佈 E6000（軟膠）至右方 A 點，亦塗佈至溝槽一半深度，等待 30~40 分鐘使其固化。
5. 二次上膠：一次上膠完成後，接著自左方 D 點再次塗佈接著劑（硬膠）至右方 D 點，並填滿 v 型溝槽，待固化後即完成上膠作業，才可將預拉臺之滑動端鬆開。

此方式塗佈接著劑較以往之方式來的複雜且繁瑣，但由於避免了 FBG 之損傷或斷裂，大幅的減少了 FBG 的損失，不但節省了不必要的花費，更提高了製程的良率，從舊製程的 60% 提高到將近 80%，故目前因應計劃所製作之 FBG-SD 皆以此製程來進行。





圖 3-1 標準型定量點膠機

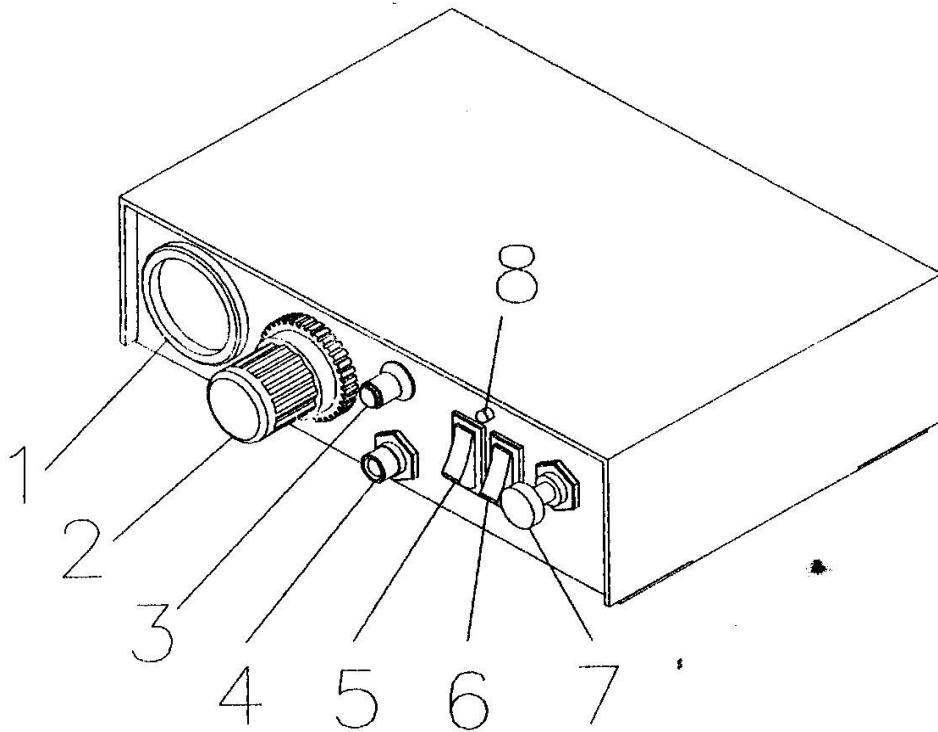


圖 3-2 點膠機操作說明圖 (摘自尚貫股份有限公司)

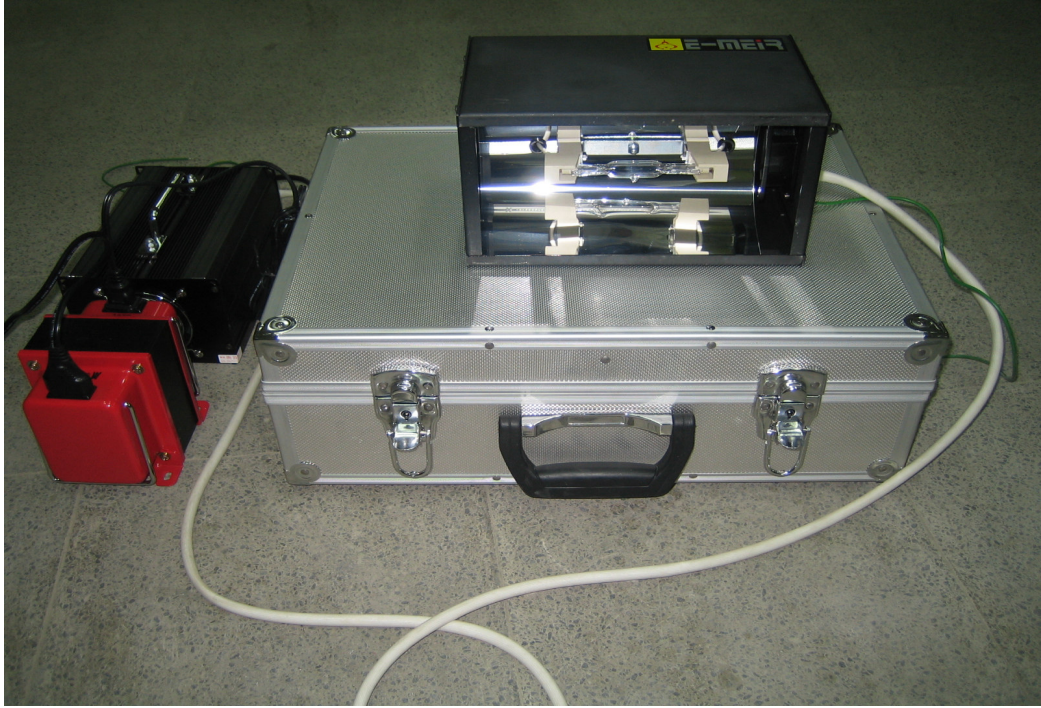


圖 3-3 UV 光照燈





圖 3-4 恆濕恆溫箱



圖 3-5 偏斜儀舊設計



圖 3-6 感測器於監測完成取出之腐蝕情形

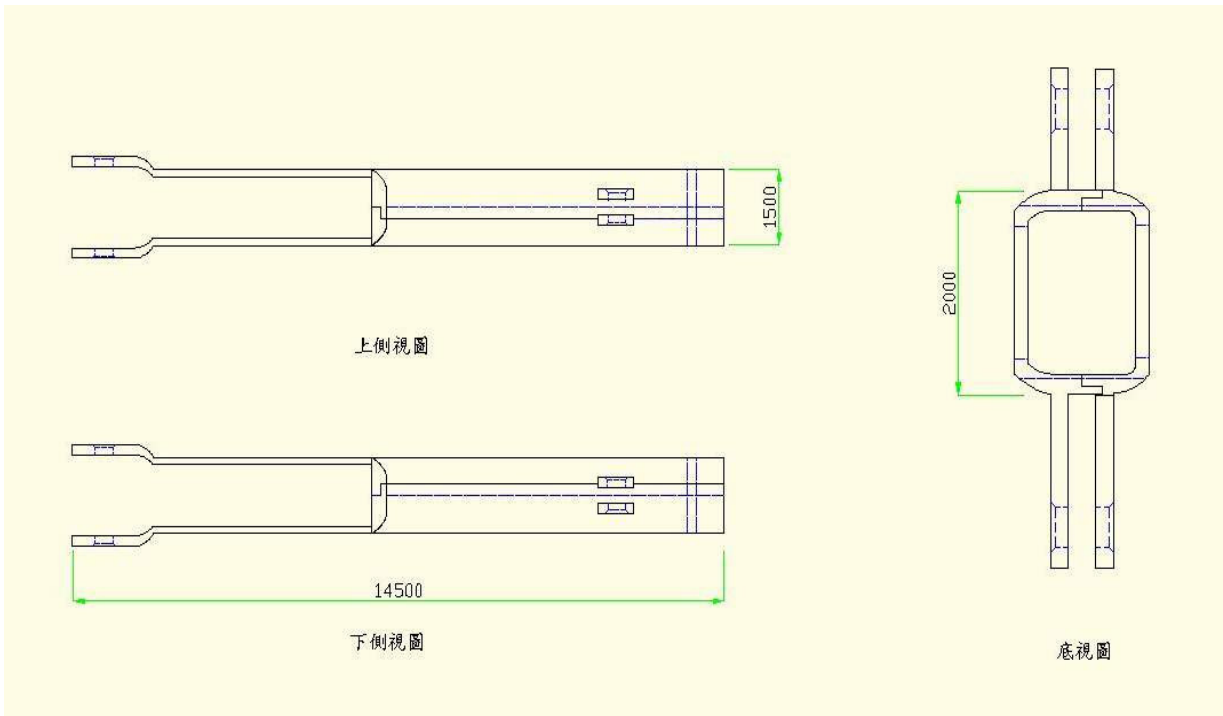


圖 3-7(a) AutoCAD 圖 (量測節理右段)

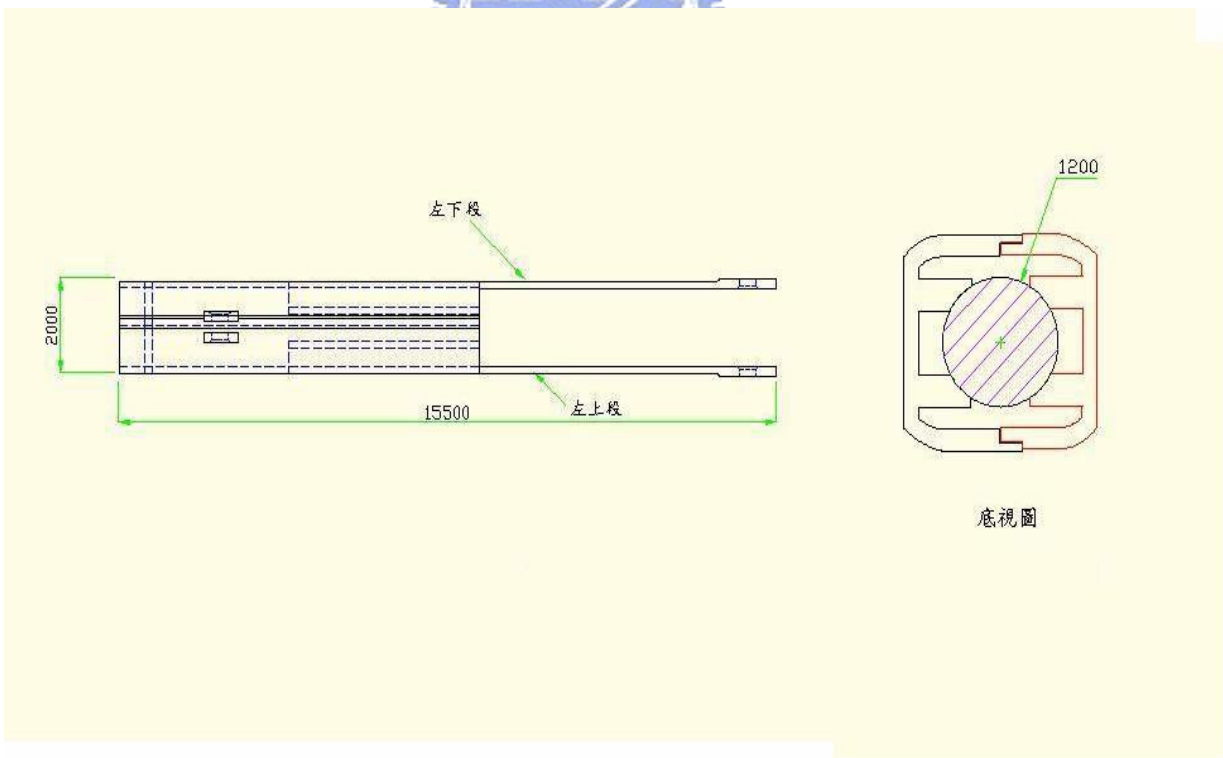


圖 3-7(b) AutoCAD 圖 (量測節理左段)



圖 3-8 舊軸承設計



圖 3-9 新軸承設計

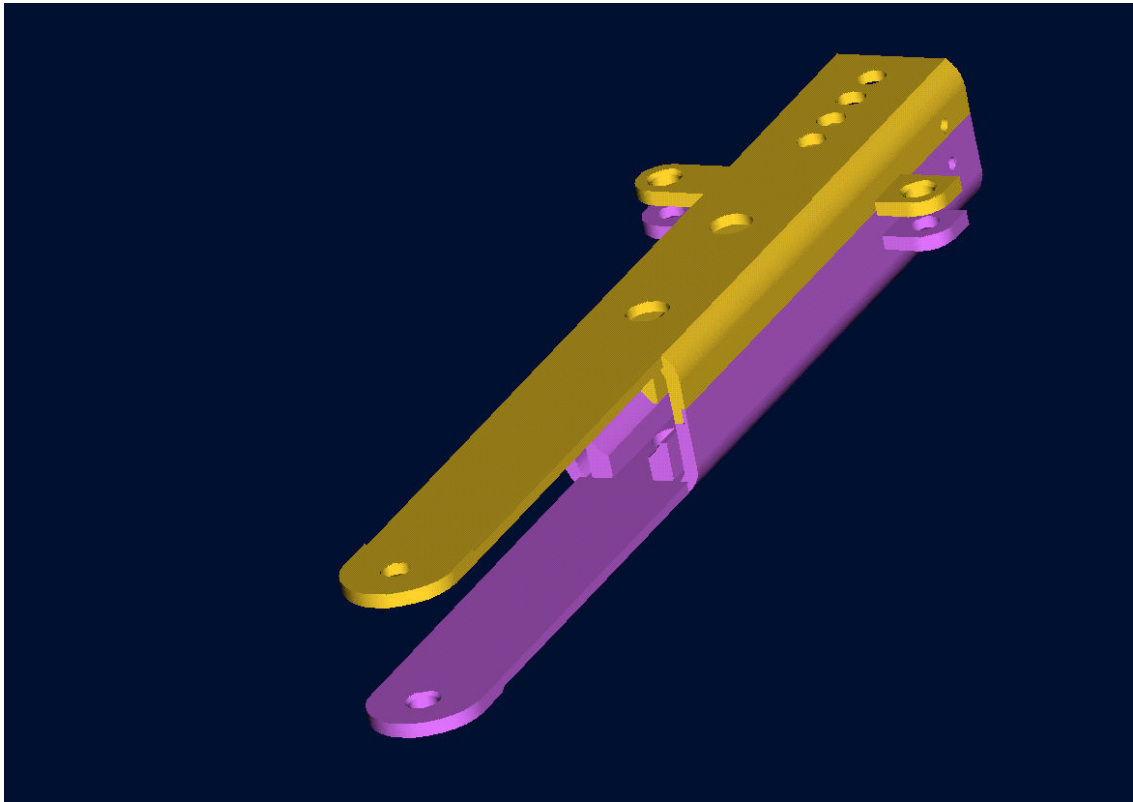


圖 3-10(a) 3D 圖 (量測節理左段)



圖 3-10(b) 3D 圖 (量測節理右段)

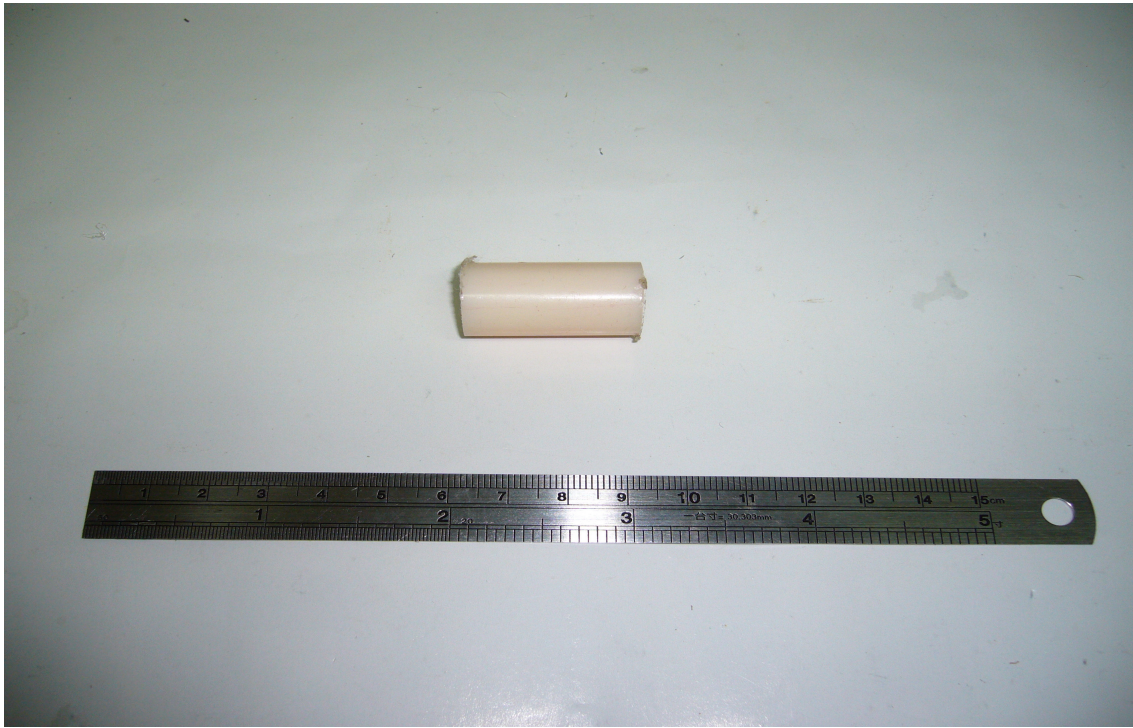


圖 3-11 ABS 之三公分圓柱實體圖

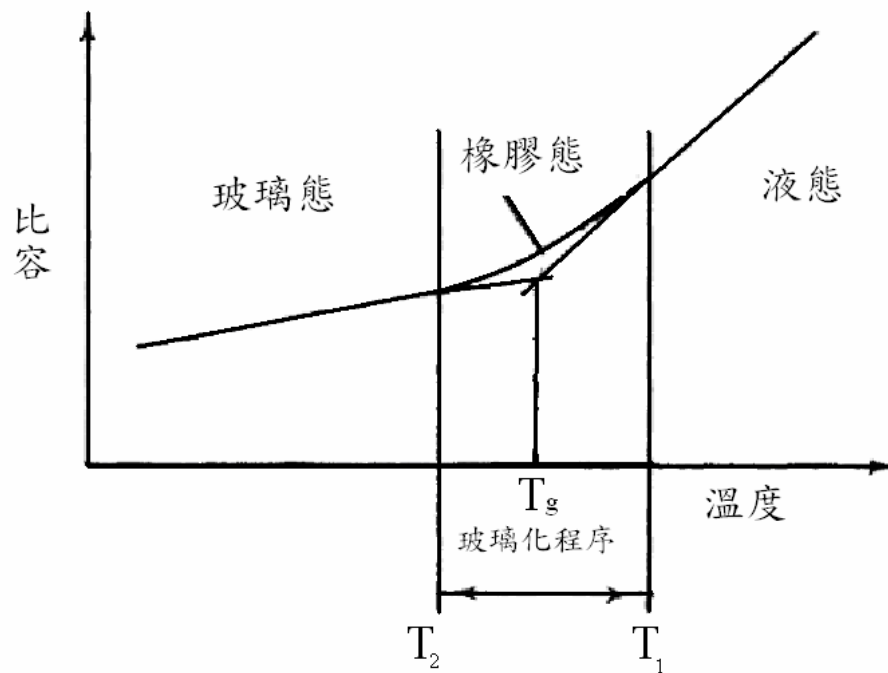


圖 3-12 玻璃轉移溫度圖 (李育德, 1996)

(圖中之比容值代表聚合物內，分子佔有的體積大小。)



圖 3-13 PC (上方) 與 MC-Nylon (下方) 三公分圓柱實體圖



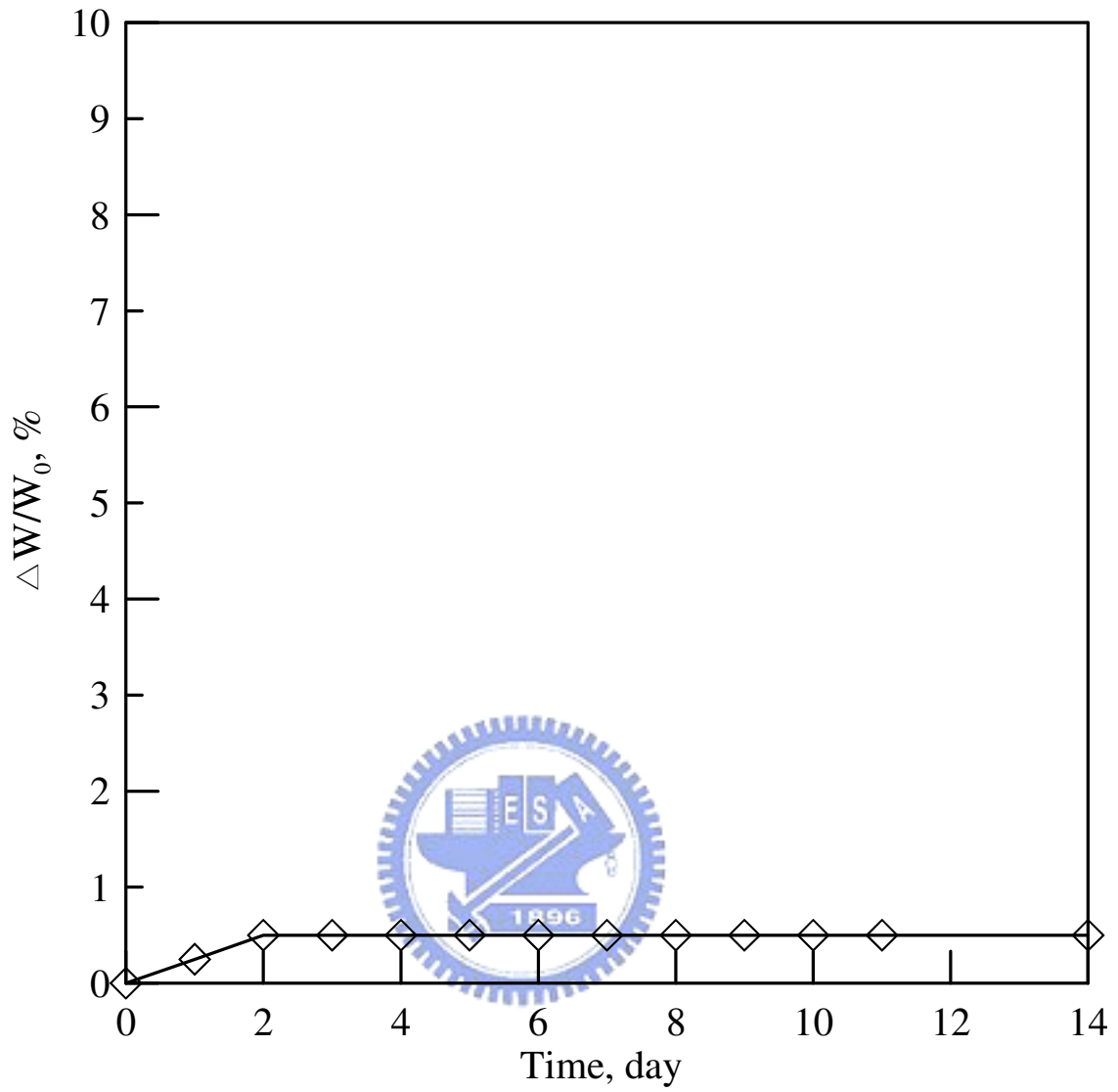


圖 3-14 PC 吸水率變化圖

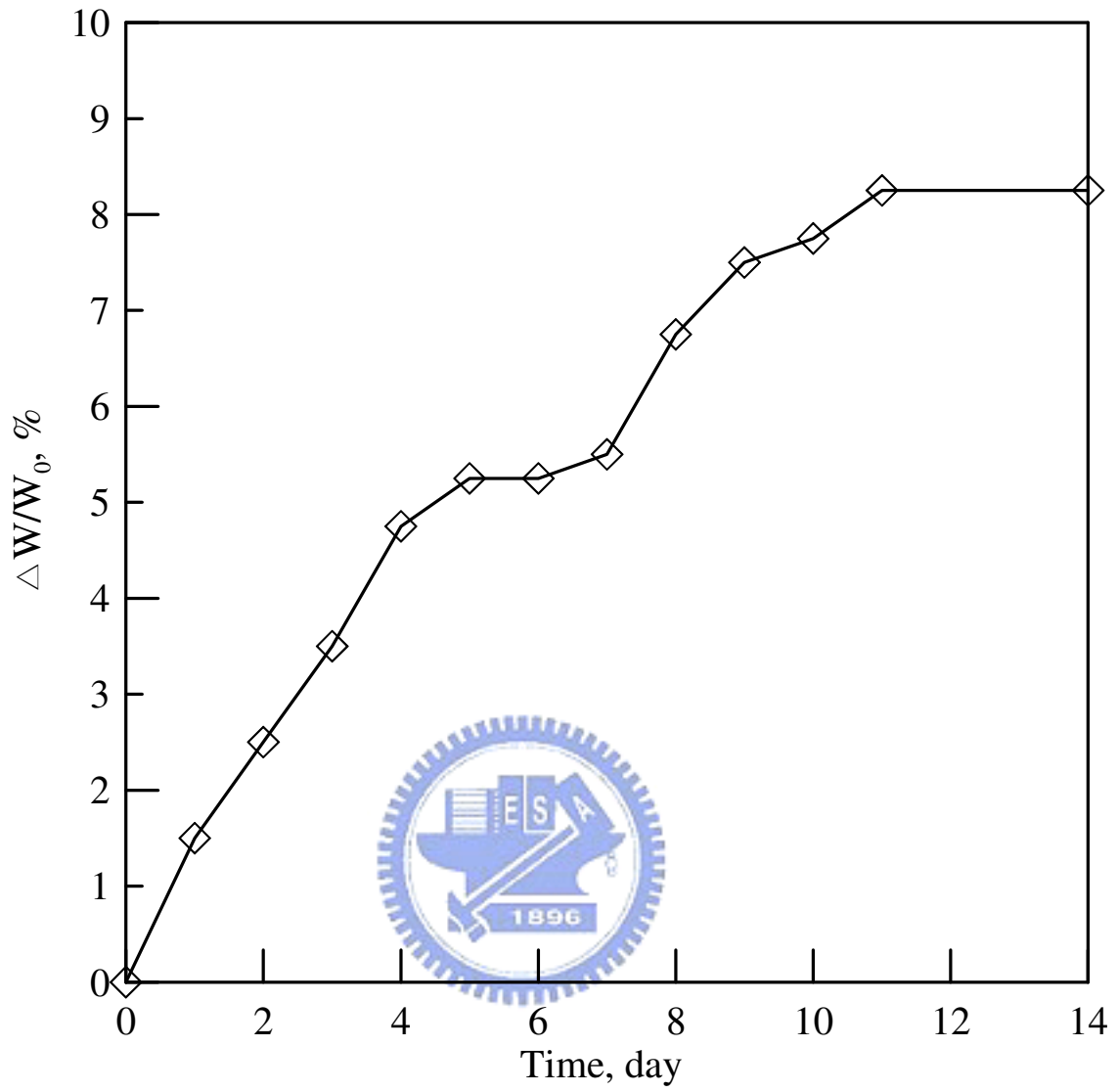


圖 3-15 MC-Nylon 吸水率變化圖

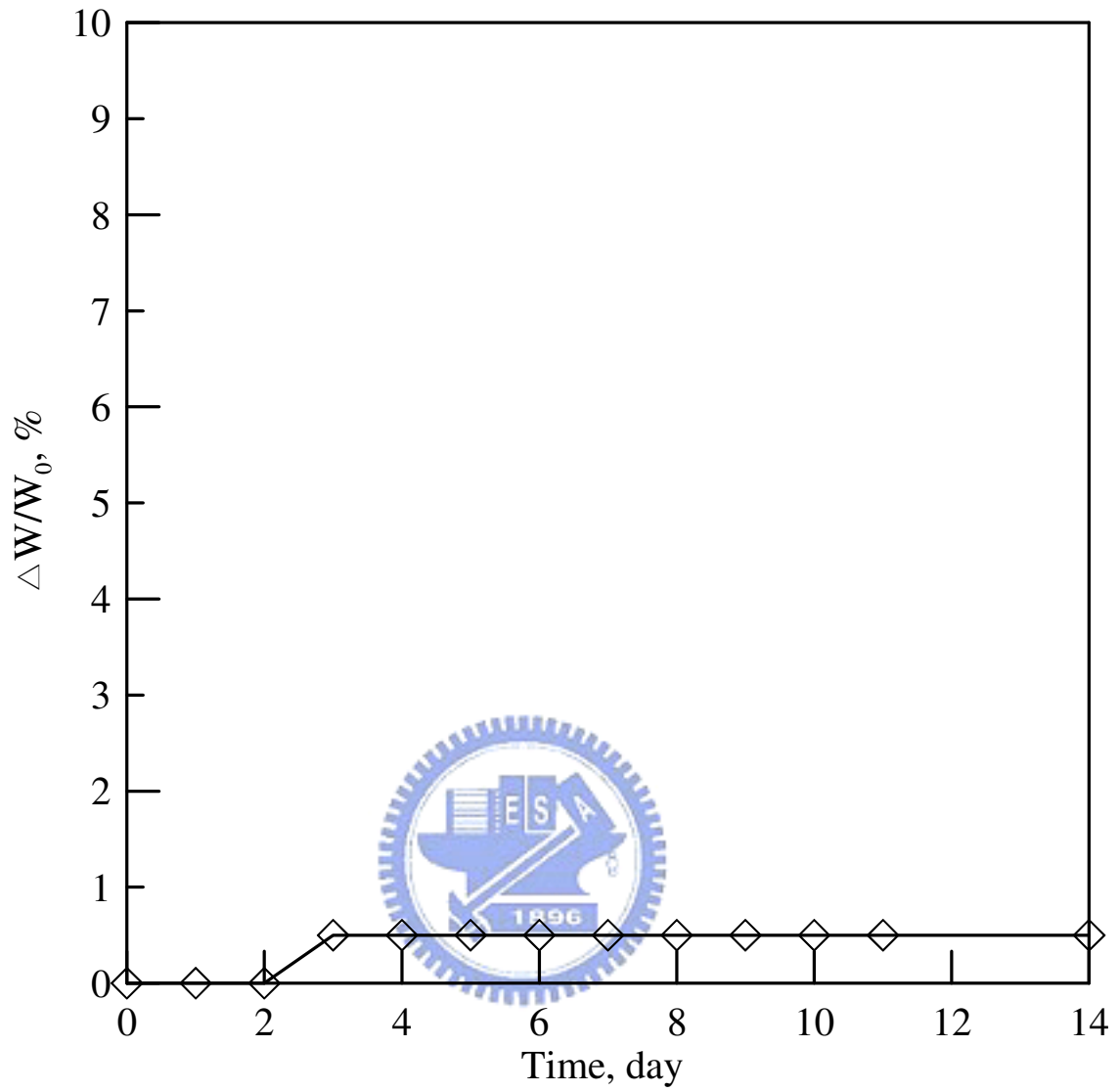


圖 3-16 PC 置入 HCl 之重量變化圖

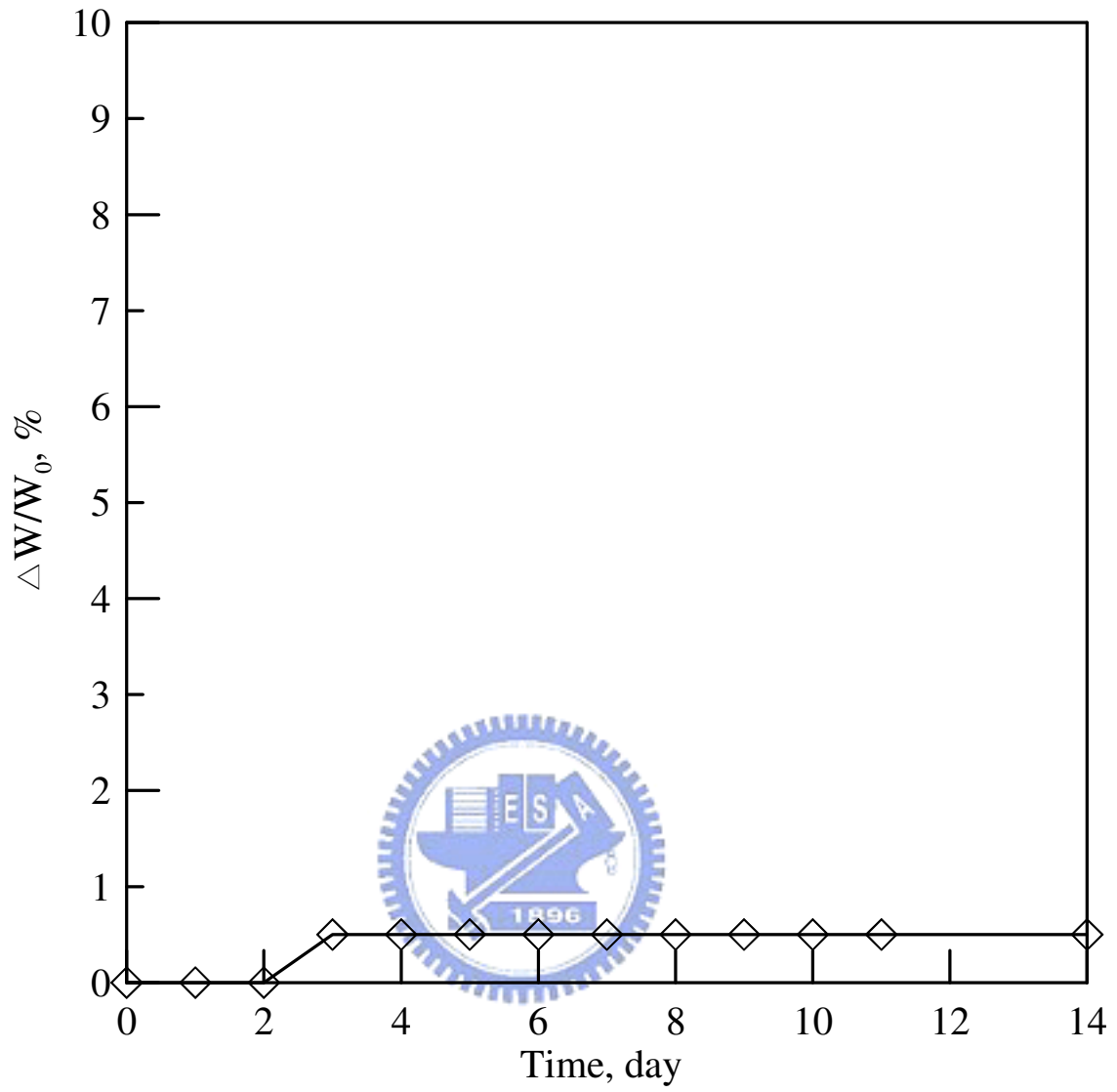


圖 3-17 PC 置入 NaOH 之重量變化圖

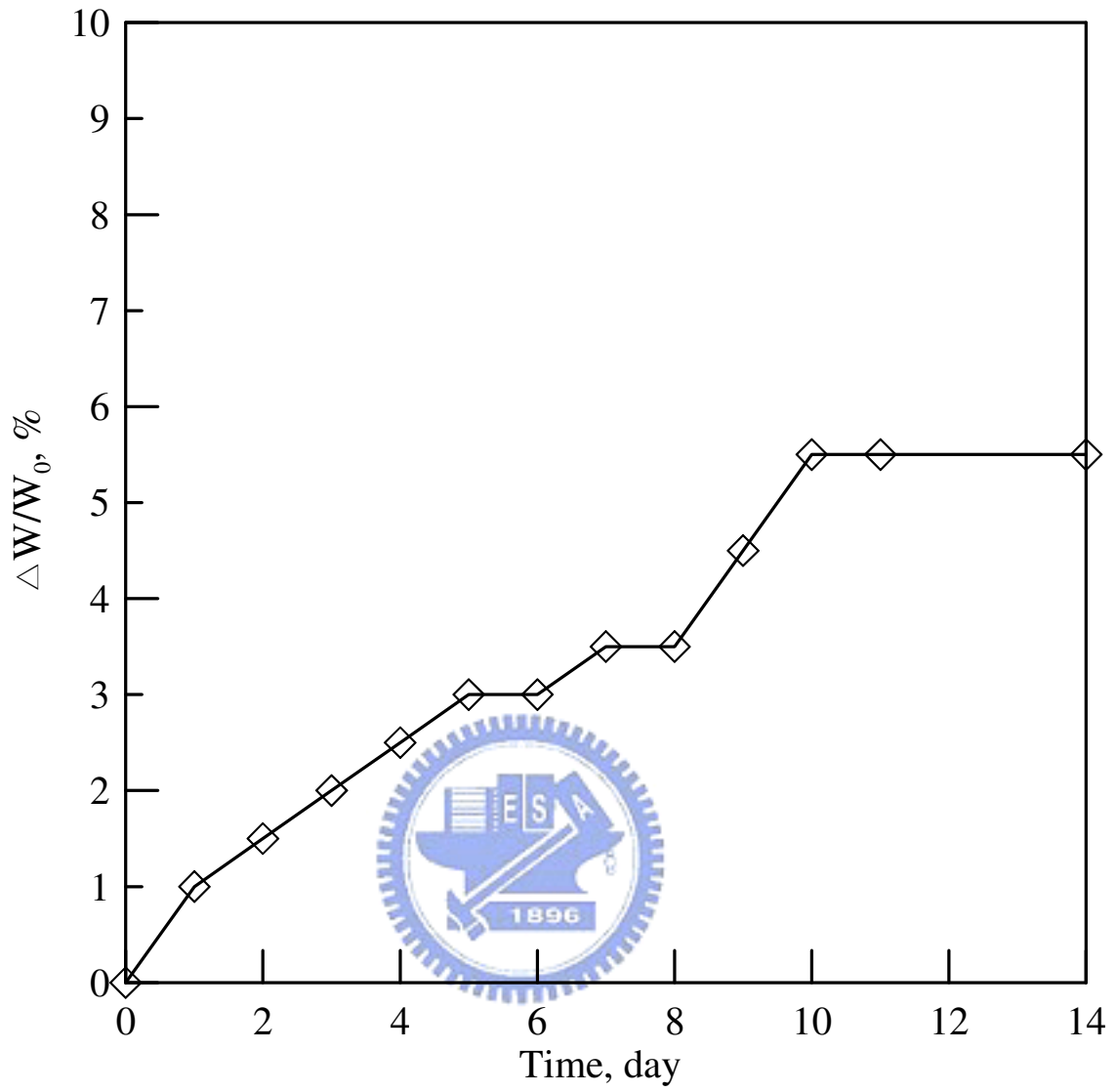


圖 3-18 MC-Nylon 置入 HCl 之重量變化圖

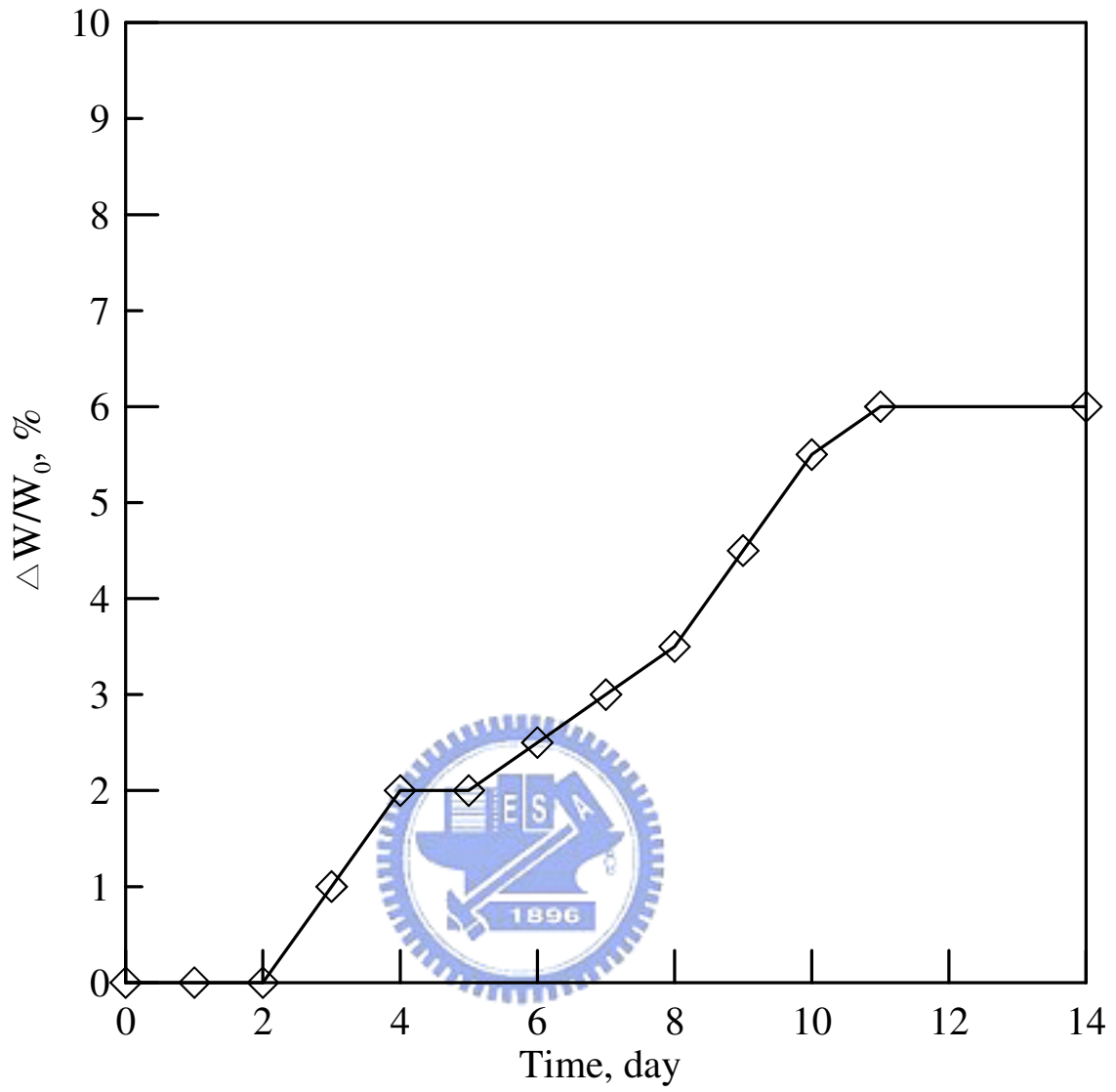


圖 3-19 MC-Nylon 置入 NaOH 之重量變化圖

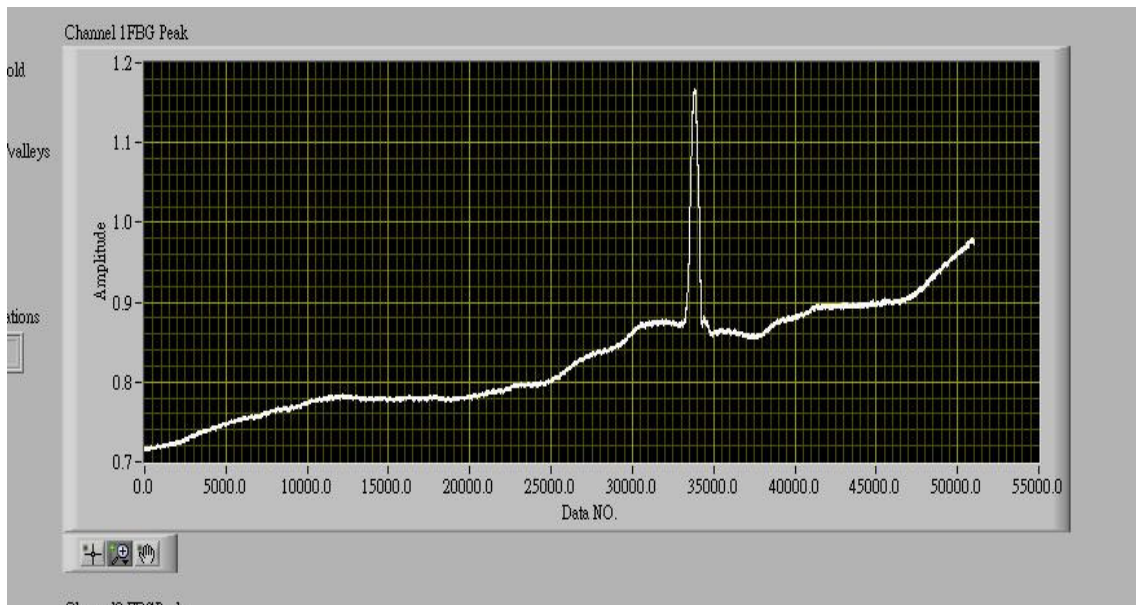


圖 3-20 光訊號減弱之情形

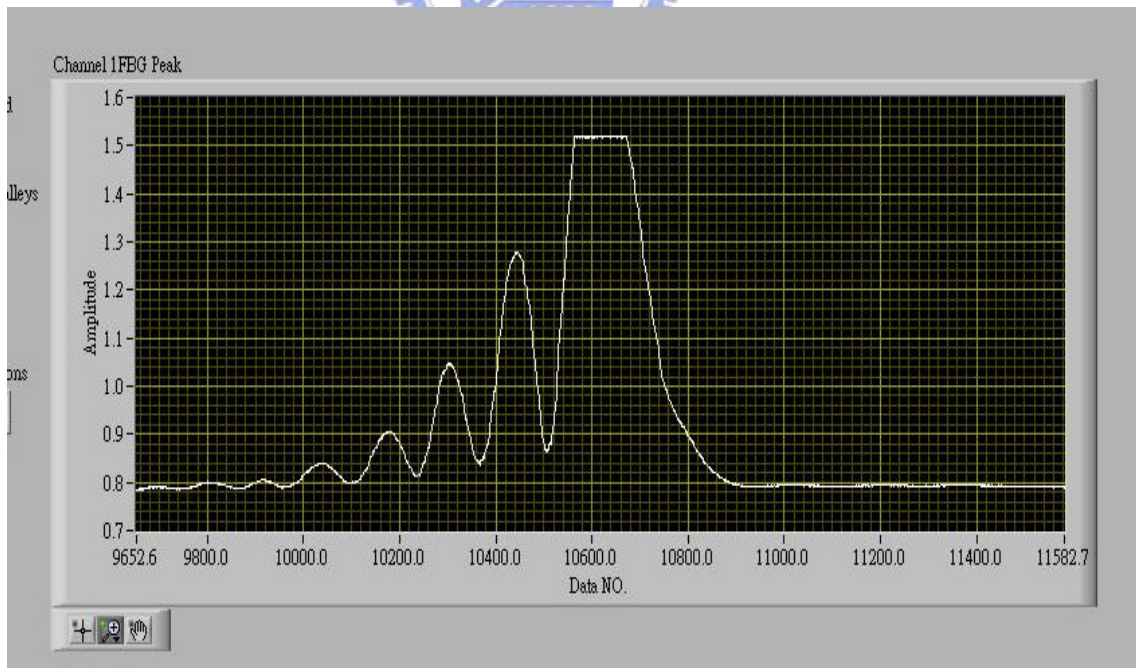


圖 3-21 光柵發生多波峰之情形

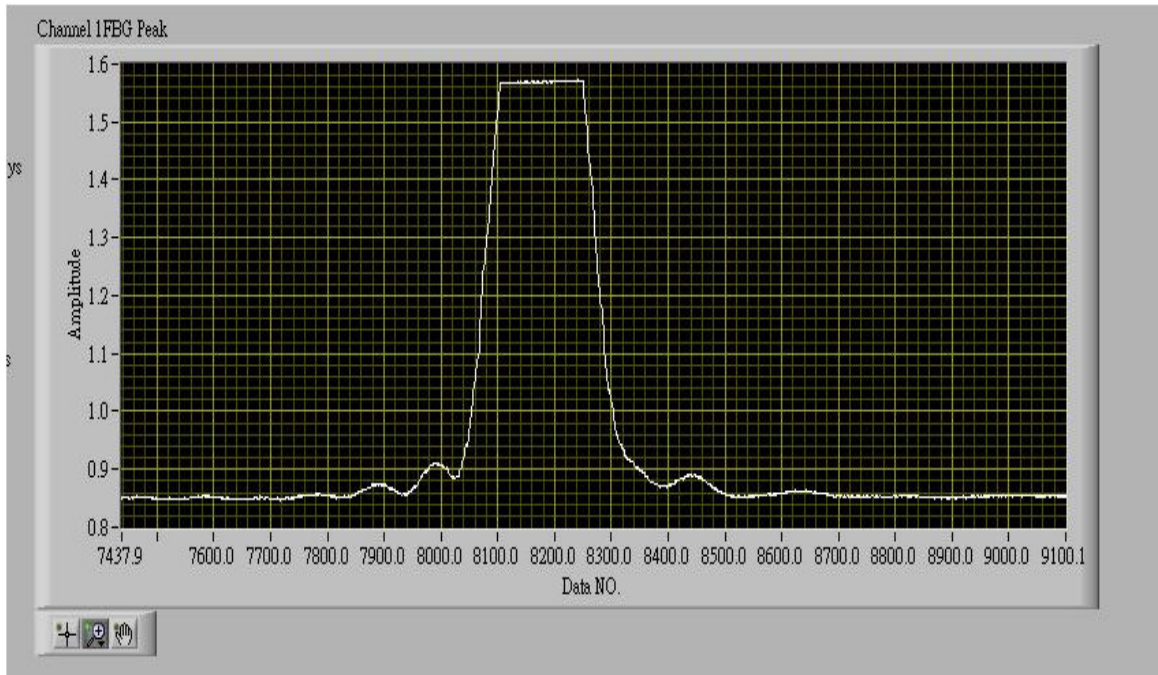


圖 3-22 光柵之正常波形

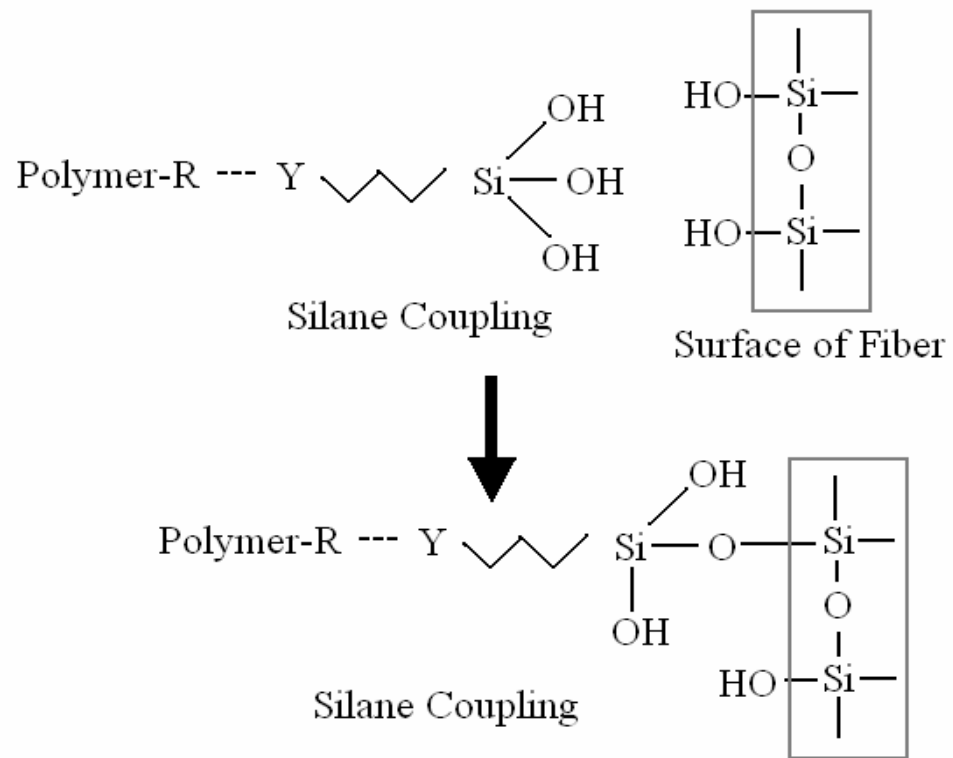


圖 3-23 與光纖鍵結之示意圖

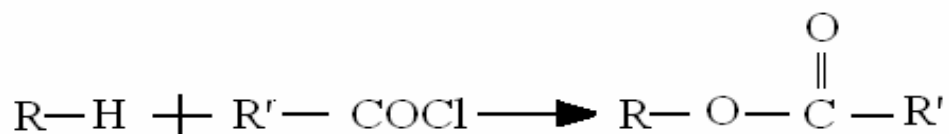
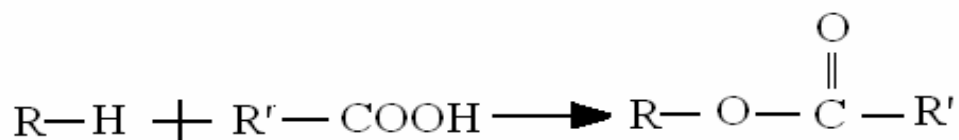
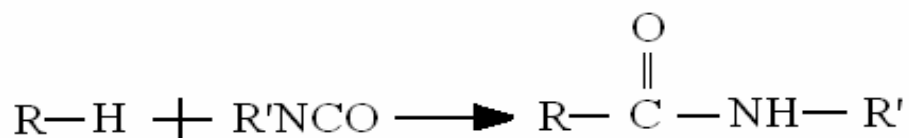


圖 3-24 活潑氫與-NCO、-COOH 及-COCl 反應示意圖

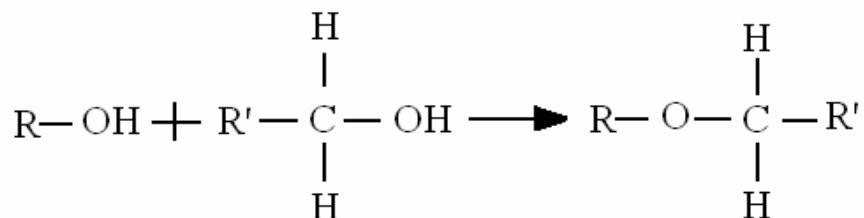
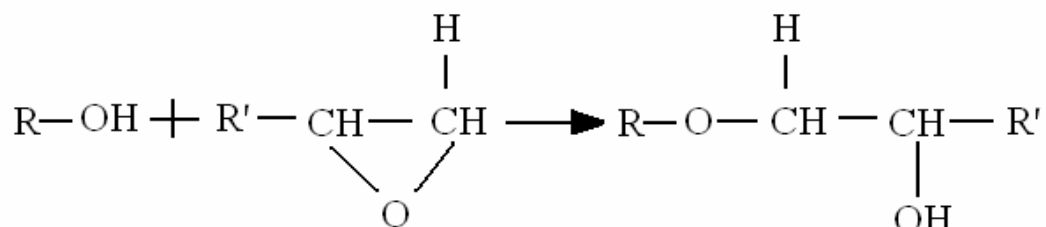
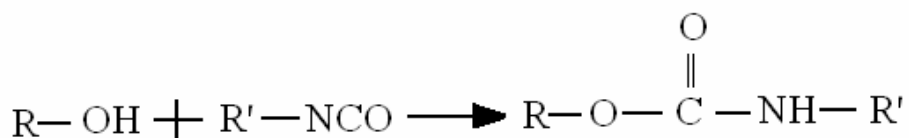


圖 3-25 氫氧基與-NCO、環氧基及-R-CH₂-OH 反應

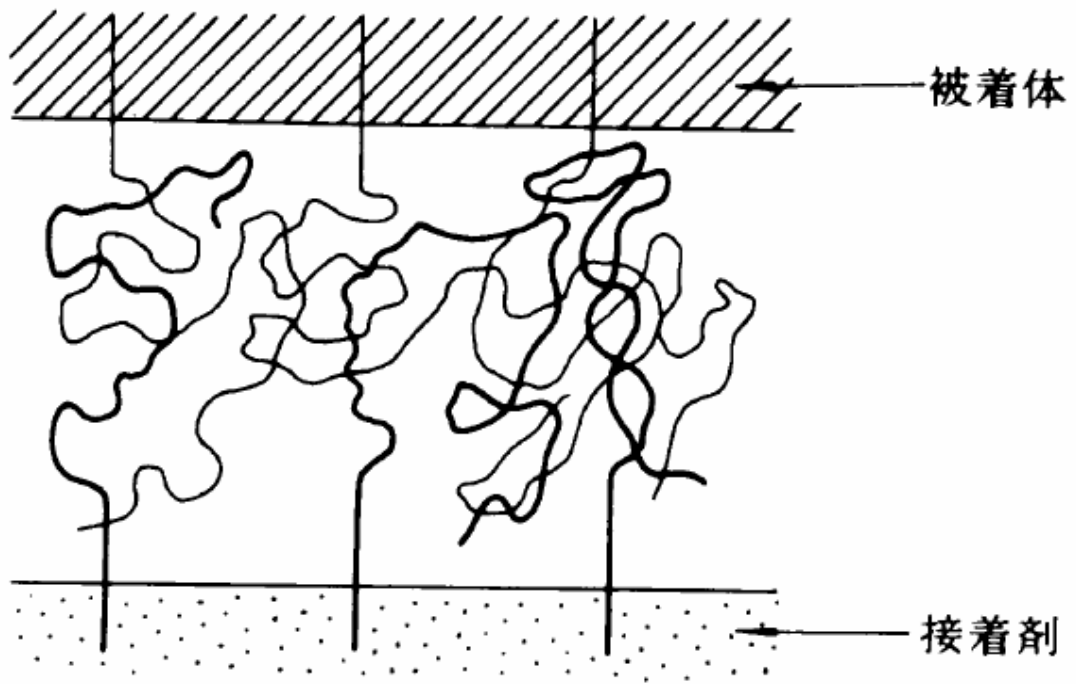


圖 3-26 因擴散與糾纏而相結合之情形

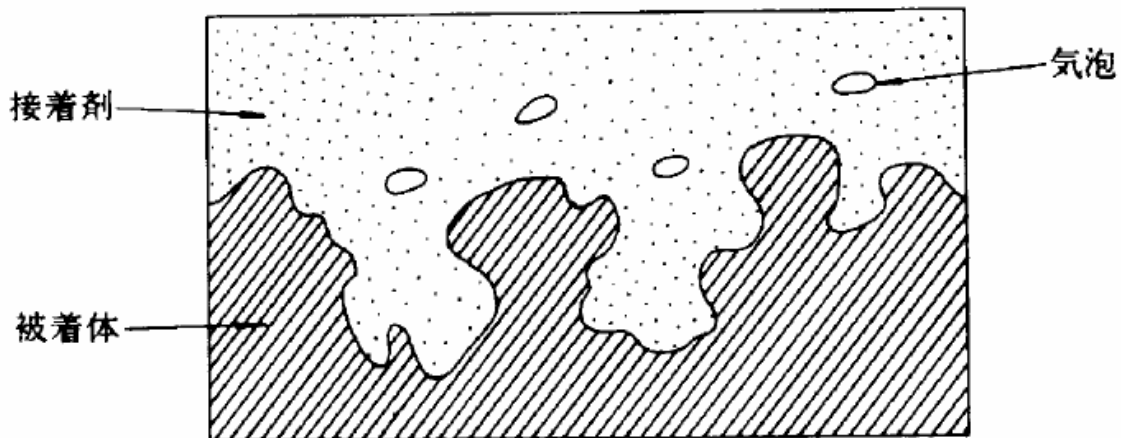


圖 3-27 機械投錨（釘著）理論示意圖

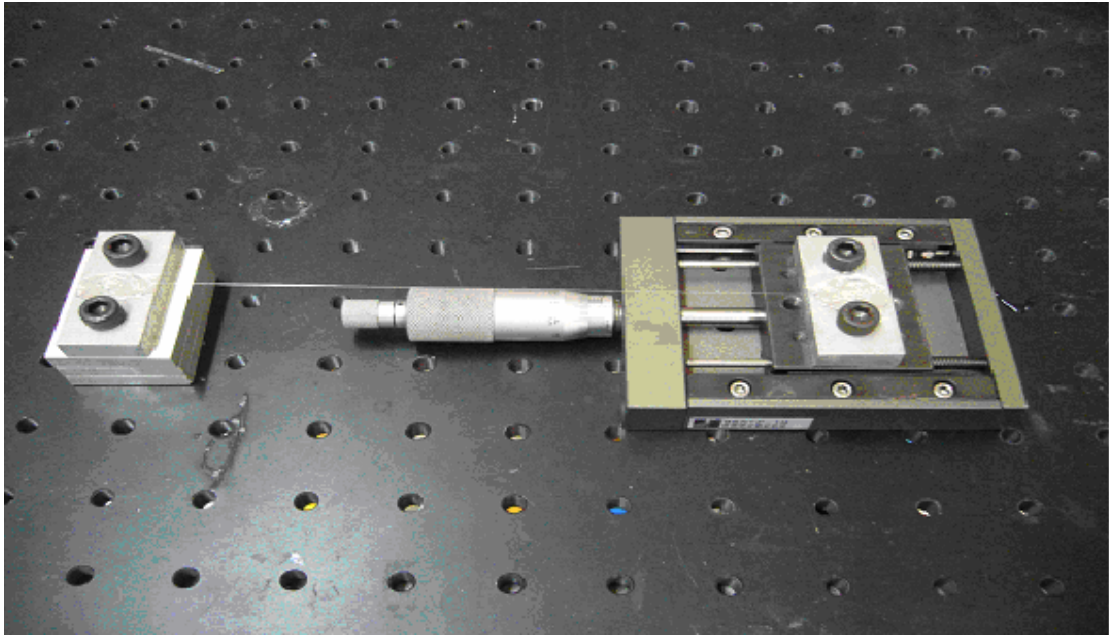


圖 3-28 接著能力測試架設圖



圖 3-29 舊式設計預壓方式實體圖

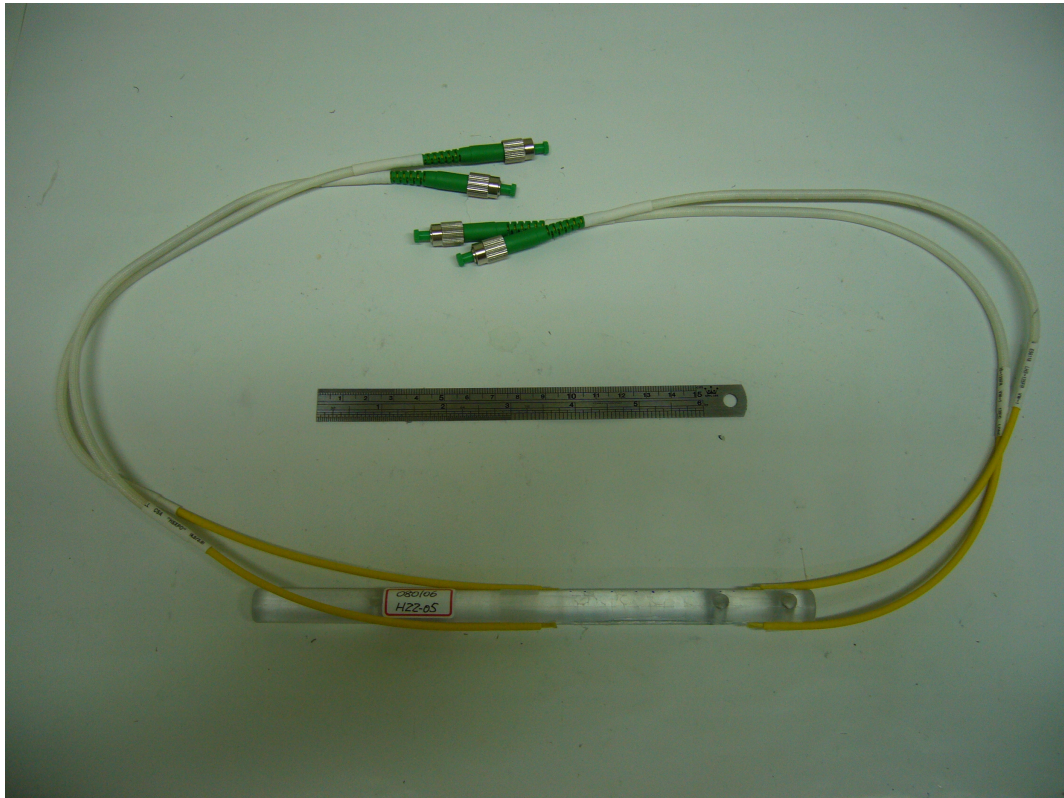


圖 3-30 FBG-SD 之感測元件實體圖

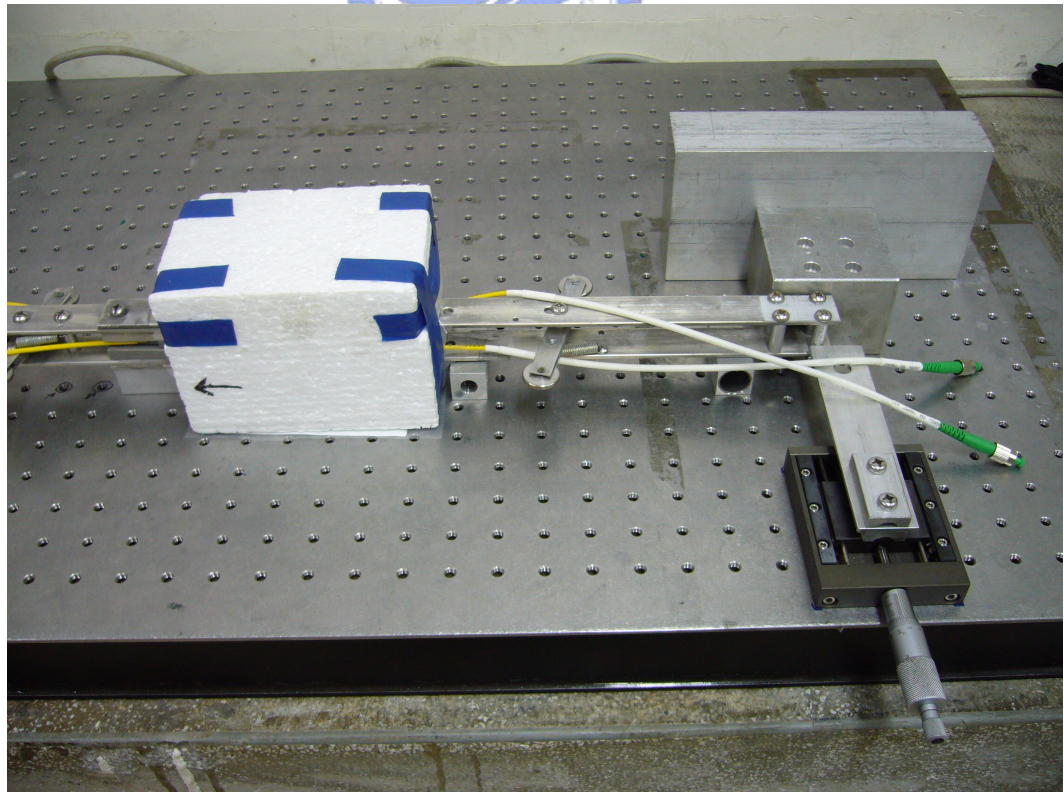


圖 3-31 FBG-SD 標定架設圖

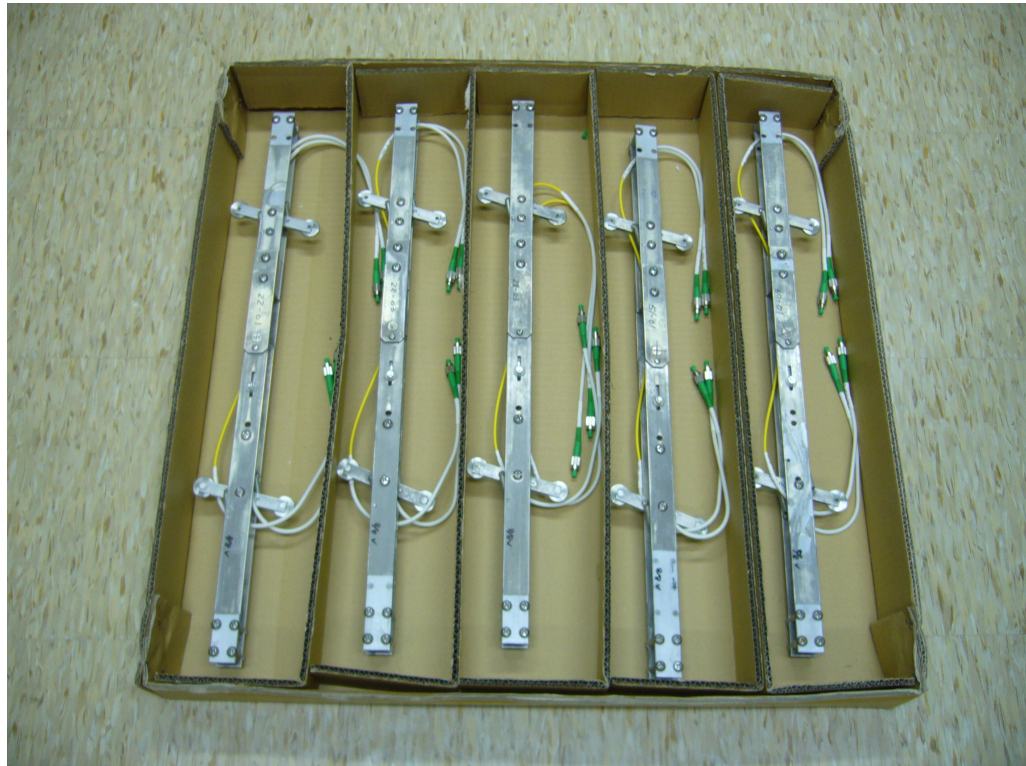


圖 3-32 感測器裝箱以便拿至現地使用



圖 3-33 新設計預拉架設圖

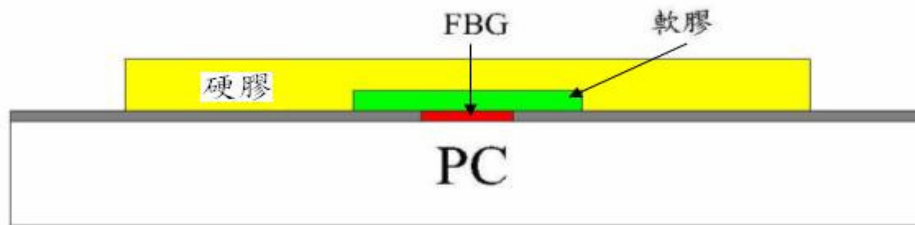


圖 3-34 改良之軟膠式黏貼法



圖 3-35 於 FBG 上做記號之示意圖

表 3-1 金屬物理性質比較 (賴耿陽, 1980)

性質 \ 材料	鈦 (Ti)	鋯 (Zr)	鋁合金	低碳鋼	不銹鋼
融點 (oC)	1730	1845	576~638	1539	1415
密度 (g/cm ³)	4.51	6.49	2.80	7.85	8.00
彈性係數 (kg/mm ²)	10850	9100	7280	21000	20400
原子序	22	40	13(Al)	26(Fe)	26(Fe)
原子量	47.90	91.22	26.97	55.84	55.84
Poisson 比	0.34	0.33	0.33	0.3	0.3
熱傳導率 (kcal/s cm g)	0.041	0.040	0.290	0.145	0.039
線膨脹係數 (10 ⁻⁶ /oC)	9.0	5.8	23.6	11.6	16.5

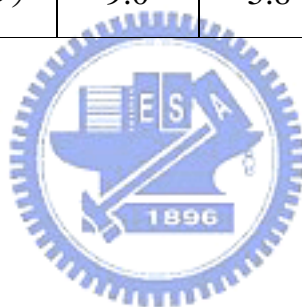


表 3-2 鈦金屬的抗酸鹼能力表 (賴耿陽, 1980)

藥品名	重量濃度 (%)	耐蝕度
醋酸	5~99.5	A
硝酸	10~70	A
	65(沸騰)	A
鹽酸	1	A
	3~5	A
	20~37	B
	10(沸騰)	C
硫酸	5	A
	10	B
	60~70	B
	70 以上	C
氫氧化鉀	10	A
	10(沸騰)	A
氫氧化鈉	40	A
	40(沸騰)	A

註：A 代表 0.1mm/year 以下的腐蝕，耐蝕性完全。

B 代表 0.1~1.3mm/year 的腐蝕，可用為耐蝕材料。

C 代表 1.3mm/year 以上的腐蝕，不可用為耐蝕材料。

表 3-3 塑膠材料性質介紹

材質	比重	彎曲係數(kg/cm ²)	玻璃轉移溫度(Tg, °C)	熱變形溫度(HDT, °C)
ABS	1.07	250~950	96.5	94
PC	1.20	950	145	130
HDPE	0.94	70	-20	43
PVC	1.50	700~1300	146	54
PP	0.92	560	-14	99
Nylon-6	1.15	560~980	55.5	67
Nylon-66	1.15	880~980	78	66
MC-Nylon	1.17	980~1120	137	149
PMMA	1.20	900~1300	110	68
POM	1.42	910	-67.5	110
PS	1.10	350~700	85	100

彎曲係數代表塑膠材料之 E 值 (Young's modulus)，由 ASTM D790 試驗法所求得。

表 3-4 各種原子或分子間作用力

類型	作用力種類	能量(kcal/mol)
化學鍵	離子鍵	586~1047
	共價鍵	63~712
	金屬鍵	113~348
凡得瓦力	取向力	<20
	誘導力	<2
	色散力	<40

表 3-5 接著能力測試表

接著劑固化方式	種類	拉伸量(mm)	結果	可用與否
UV 型接著劑	I	3.92	脫	X
	H	2.77	脫	X
	J	5.89	斷	O
	K	6.57	斷	O
熱固型接著劑	G	0	脫	X
	A	5.54	斷	O
	E	2.98	脫	X
	D	2.3	脫	X
	C	3.02	斷	X
	B	6.81	斷	O
	F	6.9	斷	O
瞬間型接著劑	L	6.54	斷	O

第四章 偏斜儀之耐用性測試

自舊設計以來，皆未對偏斜儀進行足夠的耐用性測試；為了因應長期性計畫，除了選定適當材質外，應該給予一個耐用性可供參考之資料，雖然於有限的時間內，無法進行一、兩年之長期試驗，但可利用加速系統或相關規範來對 FBG-SD 訂定一種概念性的性質，作為相對應之參考；且上章節所選定可供試驗之接著劑有三種，孰好孰壞，尚無法定論，故以本章之潛變與老化試驗對此三種接著劑進行篩選，並於第五章將 FBG-SD 制定規格。

4.1 加速系統下偏斜儀之潛變測試

關於之潛變試驗，已試驗過（黃正中，2005），但其試驗結果（圖 4-1）準確性不佳以致無法判斷，原因有三點：

1. 試驗方式是採用類似標定之方式，將 FBG-SD 置於光學桌上，藉由螺旋測微器給予固定角度；此方法的問題在於此試驗為位移控制而非力控制，且微調儀上之鋁片與 ABS 之熱膨脹有著不小的差異（約 3 倍），實驗前後溫度不同的狀況下讀數是無法確定的。
2. 試驗時間僅為 56 小時，僅僅兩天多的時間，時間過短會導致潛變不明顯，結果無法判斷。
3. 雖然從圖 4-1 看起來潛變之影響不大，但圖中 Y 軸之範圍過大，相對於潛變來說，是無法在圖中表示出來的。

本研究以加速系統進行試驗，可藉此來加速潛變效應，即可在有限時間內看出 FBG-SD 潛變之情形；關於加速系統，本研究是採用 3.1 節所介紹型號為 GTH-800-20-SP 之恆濕恆溫箱模擬，給予 0°C~40°C 之溫差並循環 7 次，濕度調整至 98% 以模擬現地監測時含有地下水之狀況；一般來說，位

於有地下水的地層裡，整年的水中溫差是不大的，這點可以由行政院環保署的”縣市別地下水監測數據查詢

(<http://wq.epa.gov.tw/WQ/Public2/ImageGW.asp>)”查證，水溫變化是不大的，保守估計溫度上下限為 20°C~30°C，故給予 0°C~40°C 的確有達到放大溫度效應來加速潛變的效果；以下為試驗之步驟與結果。

4.1.1 定義偏斜儀之疲勞

關於潛變試驗，本研究主要的分成 (1) 0 度角與 (2) 2 度角來進行，顧名思義，0 度角即為固定住 FBG-SD 使其在不受力的狀態下進行，示意圖如圖 4-2 所示；將已完成之 FBG-SD 依此圖水平放置於上述之加速系統內，開啟加速系統並紀錄其讀數變化至結束為止，此 0 度角之試驗我們可稱之為”疲勞”試驗。

依材料學之定義，”疲勞”發生之原因為”物體受到反覆之力變化或溫度變化而造成之材料性質改變”(Ashby and Jones, 1982)；試驗結果如圖 4-3(a~c)~4-5(a~c)所示，由 4-3 至 4-5 分別為不同之接著劑，依序是 L、K 與 J，其中(a)定義為拉邊，(b)定義為壓邊，而(c)為拉邊減去壓邊除以二之值，標定皆是以此拉減壓值為基準，潛變之量亦以此值之變化多寡為主。

結果圖之(a)、(b)可以很明顯看出各種接著劑隨著時間與溫度而呈現出一種正弦波圖形，但從幾張圖裡無法看出各種接著劑的差異，原因是波長隨著溫度的變化量很大，而疲勞造成之波長漂移相對來說是很小的。

結果圖(c)為拉減壓值，圖中之點是由圖(a)減去圖(b)之值得來，並取其溫度穩定點(0°C與40°C)來繪圖，原因為儀器在接收讀數時，由於可調式雷射(Tunable LASER)在應用上會有時間差，故只有在溫度穩定時，儲存之讀數才會準確；而由這三張圖可以看出，疲勞對這三種接著劑之影響並不會非常大，最大為 K，漂移了約 10pm 的量，再者為 L，約 5pm，而 J 則

近乎沒變化。

4.1.2 潛變試驗結果

潛變試驗亦是於加速系統下進行，且採用掛重物之方式使 FBG-SD 達到 2.1° 之角度變量，以避免之前如學長採用光學側微器所造成之誤差，實驗架設圖如圖 4-6 所示；結果圖為 4-7(a~c)~4-9(a~c)，接著劑之依序為 L、K、J。

(a)、(b)圖亦如同上節所述，分別為拉邊與壓邊；而單由拉邊與壓邊來看，可發現，拉邊在此加速系統潛變下，波長已有明顯往下降低之趨勢，但壓邊則否，原因是 FBG 之預拉量加上溫度上升過高所致，由於在製作 FBG-SD 之過程中，FBG 之預拉量已達到 4000pm，且在彎曲 2.1° 之角度變量下，波長變化更可上升 6000pm 以上，再加上從 20°C 之室溫升溫至 40°C ，波長變化更超過 7500pm，換算成應變變化量則將近 $6500 \mu\varepsilon$ ；接著劑於長時間受到此反覆溫度變化與巨大應變量的影響，導致接著能力逐漸減弱，故經長時間後即有此向下降低之潛變發生。

但若單看拉邊或壓邊，還是無法分別接著劑之優劣；即從(c)圖之拉減壓圖來分析，即可發現，三種接著劑之波長漂移量以 L 為最低 (50pm)，而以 J 為最高 (60pm)；但若單看潛變之影響，則需扣除”疲勞”之波長變化值，其結果 L 與 K 之潛變量皆約為 45pm，而 J 之潛變量為 60pm，較另兩種高出不少。

4.2 偏斜儀之老化試驗

至目前為止，尚未對 FBG-SD 進行過老化試驗，故對於此物之耐用性是不確定的；但是對於 FBG-SD 所應用之長期性地下監測計畫來說，老化試驗是有其必要性的。以下介紹本研究所進行之老化試驗。

4.2.1 定義老化所需之試驗

一般來說，老化試驗並不是給予一個確切的數值來保證有多久時間可供使用，而是一個參考性的指標，作為相對比較之用。

對於聚合物之老化試驗，因應不同之種類，已有各種不同的規範，且不同環境下所需進行之老化試驗也是不盡相同的；對於本研究之 FBG-SD 來說，其基材為 PC，所遭遇環境為有地下水之鑽孔，此種情形尚未有規範可供參考，故本研究以實驗室所能適用之儀器來尋找相關規範；而所找到最適當之相關規範編號為 CNS（中國國家標準）3556 之老化試驗法。

此試驗規範所制定之條件為如下：

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

本研究之實驗步驟為，將完成之 FBG-SD 置入滿水之不鏽鋼盆中，放於 70°C 之溫控盤上來進行老化。對於 FBG-SD 之老化試驗，最重要的即為其標定數據是否會改變，解析是否會降低，故將於試驗所需之時間進行標定，並紀錄角度隨波長之改變量（解析度，degree/pm）的變化值，確定老化程度。

4.2.2 老化試驗結果

圖 4-10 為此溫控盤之溫度穩定圖，結果顯示此溫控盤符合規範要求，溫差皆在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 之內。

圖 4-11~4-13(a~g)為不同接著劑之隨著老化之標定係數與解析度變化

圖，依序為 L、K、J，(a)~(f)分別為初始標定係數、一日標定、二日標定、四日標定、七日標定與十四日標定，(g)為解析度變化圖。

以 L 而言，其標定圖之趨勢線到了 336hr 後，亦有著相當高之 R^2 值， R^2 值高代表著感測器之線性程度也高；而且，由解析度變化圖顯示，其解析度降低的相當緩慢，於十四天之老化過程中，僅僅降低了 0.00007° ；故可以研判此接著劑為此三種接著劑中有著最優良之抗老化能力。

而以 J 來說，其解析度與 R^2 值皆是接近 336hr 時有忽然較大幅度降低之情形出現，雖然整個過程其解析度僅降低了 0.00010° ，但其後期有出現快速降低之趨勢，且 R^2 值在最後突然從 0.9992 降至 0.9979，此對 FBG-SD 於現地監測來說，已無法使用；故可知 J 在此老化試驗的環境下，其抗老化能力僅能達到七天（168hr）而不能超過十四天（336hr）。

至於 K，其在老化第二天就已發現其預拉量僅剩 1000pm 左右，所以其解析度與線性程度也在此就大幅降低，且逐日漸增，所以可知此種接著劑之抗老化能力是這三者中最差的。

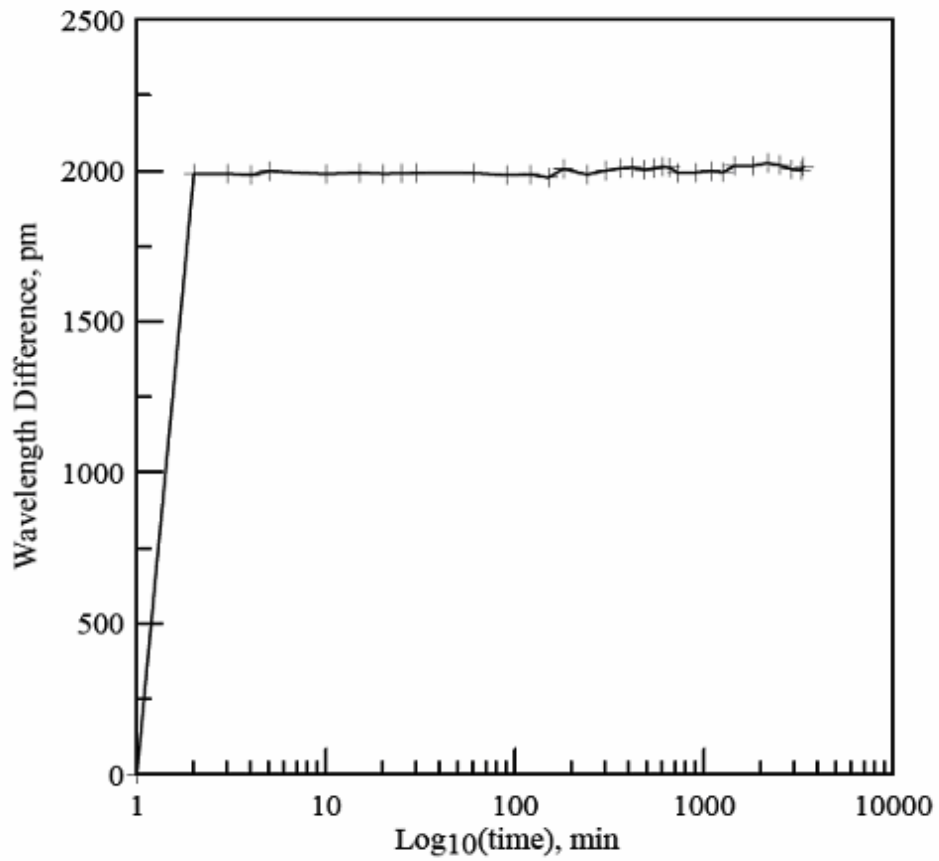


圖 4-1 潛變試驗結果 (黃正中, 2005)



圖 4-2 疲勞試驗架設示意圖



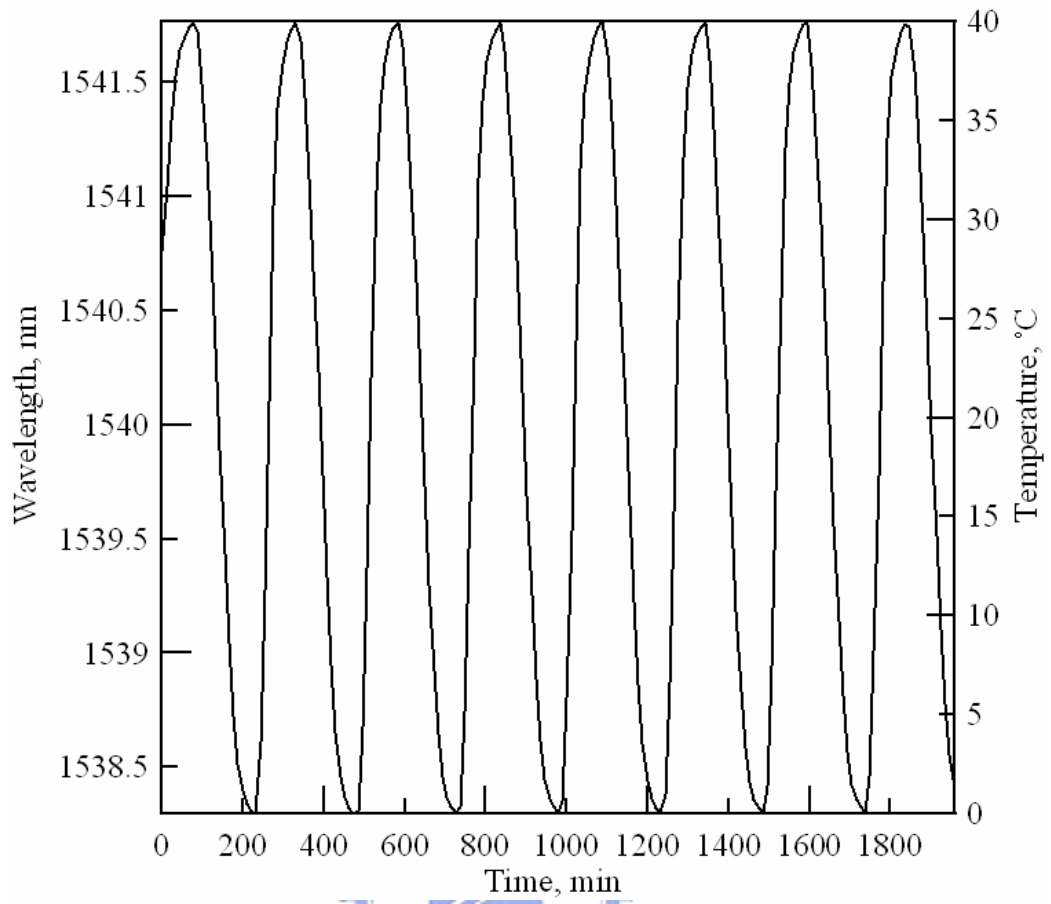


圖 4-3(a) L 疲勞試驗拉邊

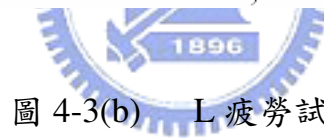
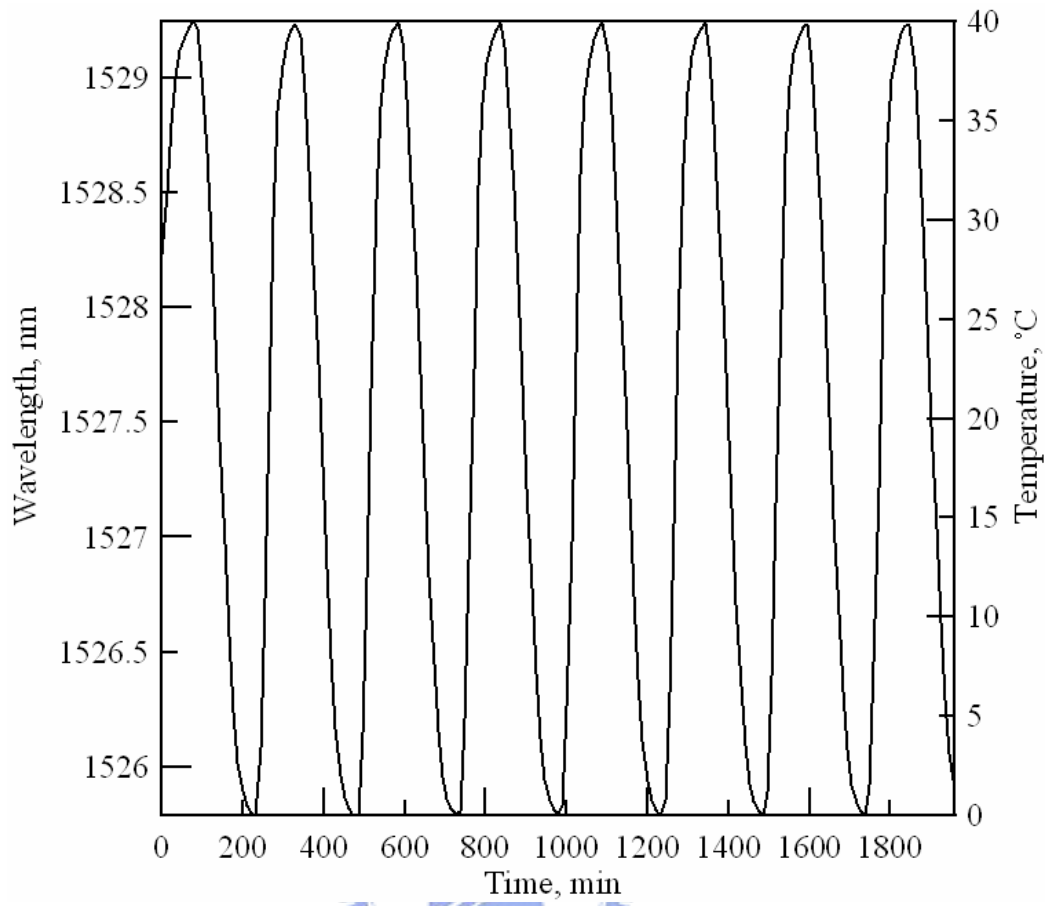


圖 4-3(b) L 疲勞試驗壓邊

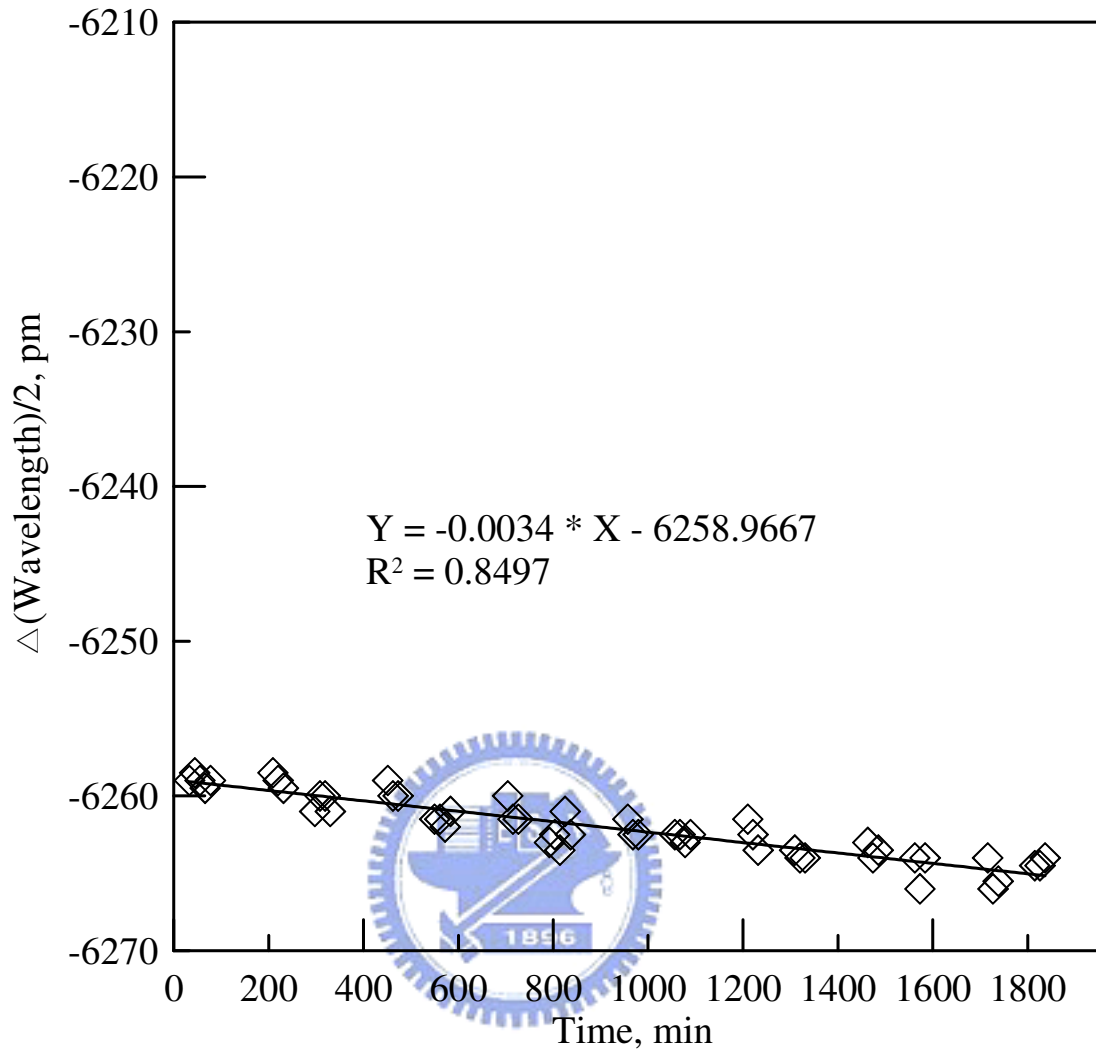


圖 4-3(c) L 疲勞試驗拉減壓

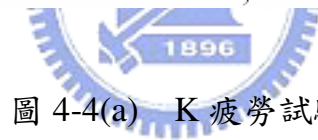
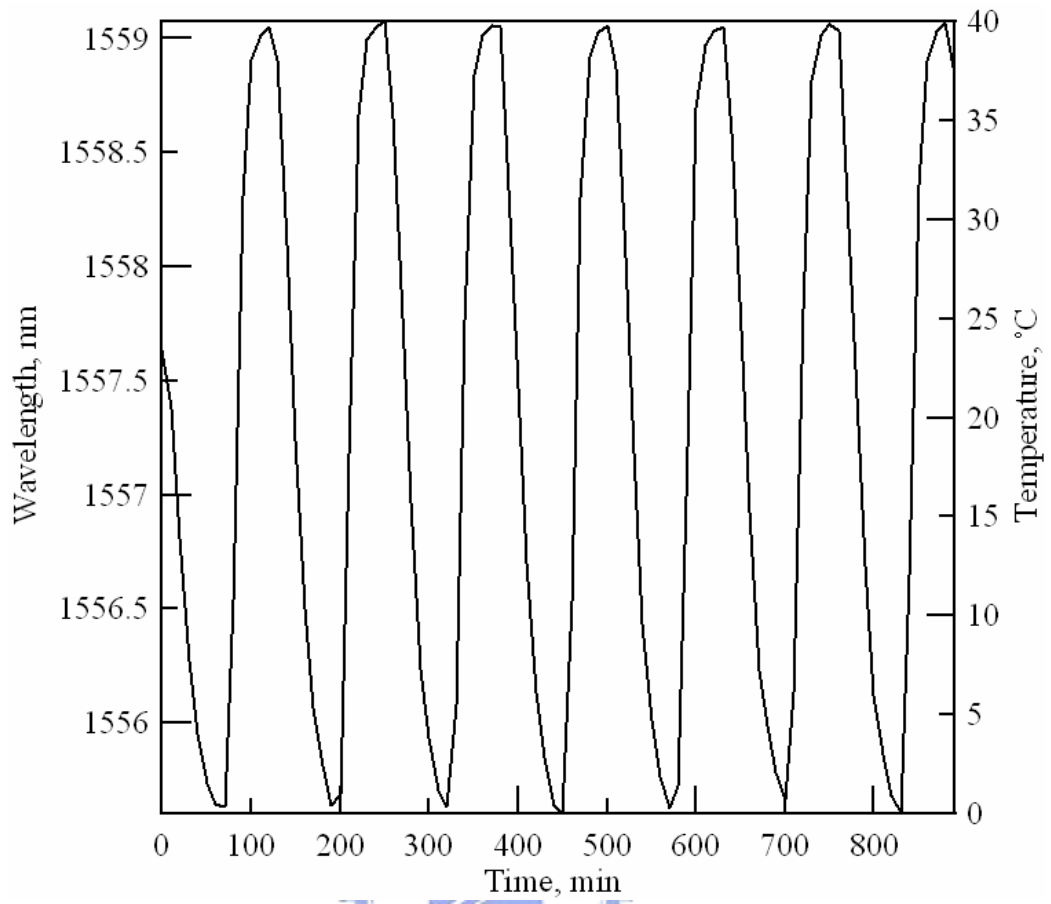


圖 4-4(a) K 疲勞試驗拉邊

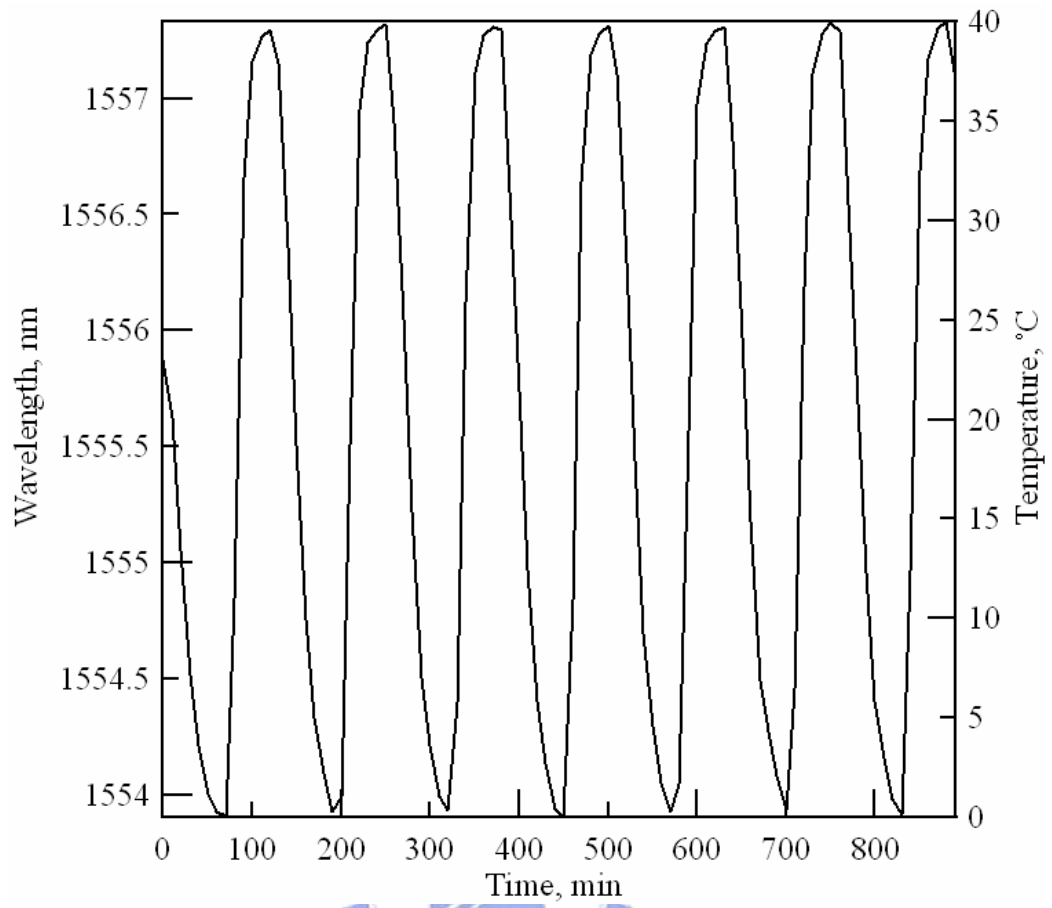


圖 4-4(b) K 疲勞試驗壓邊

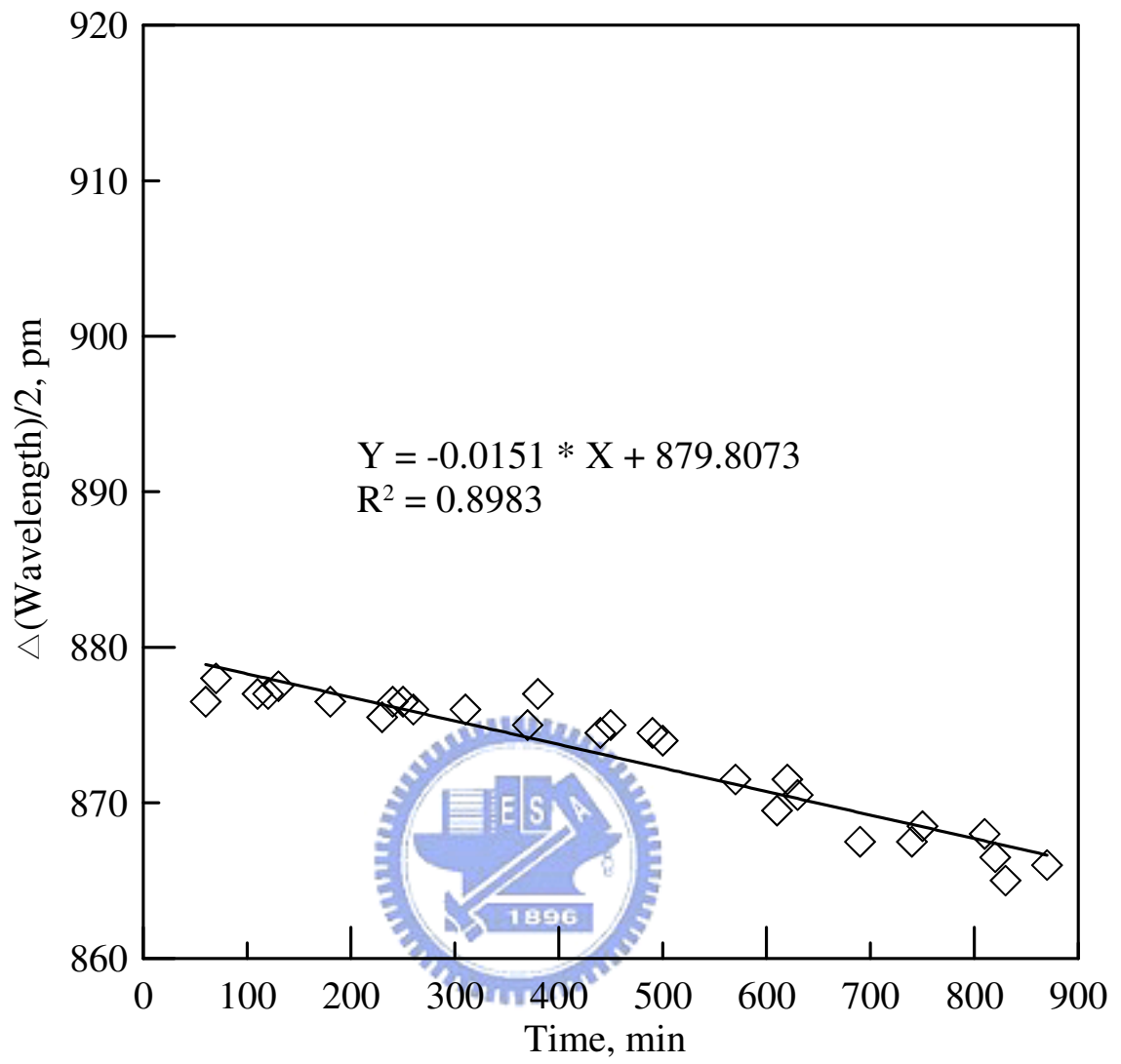


圖 4-4(c) K 疲勞試驗拉減壓

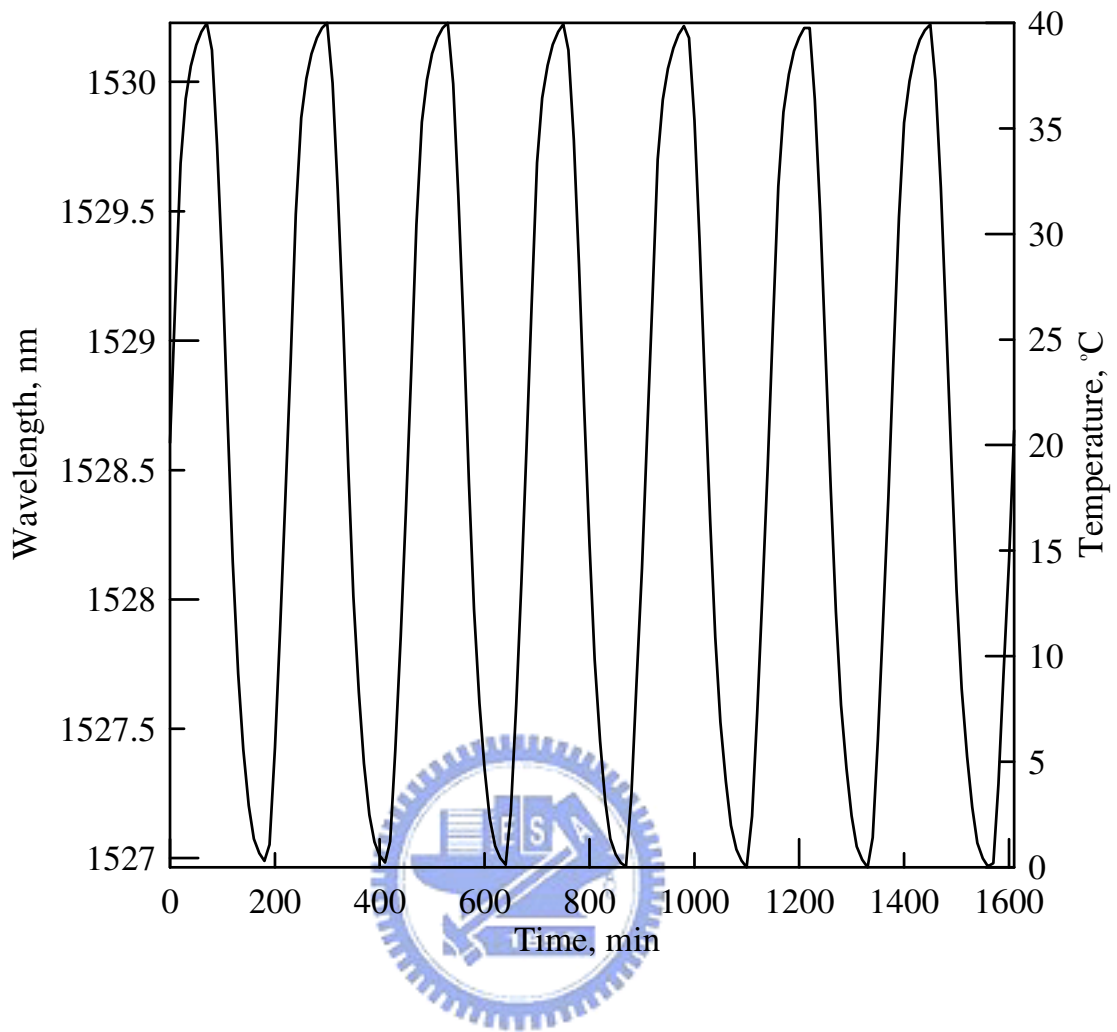


圖 4-5(a) J 疲勞試驗拉邊

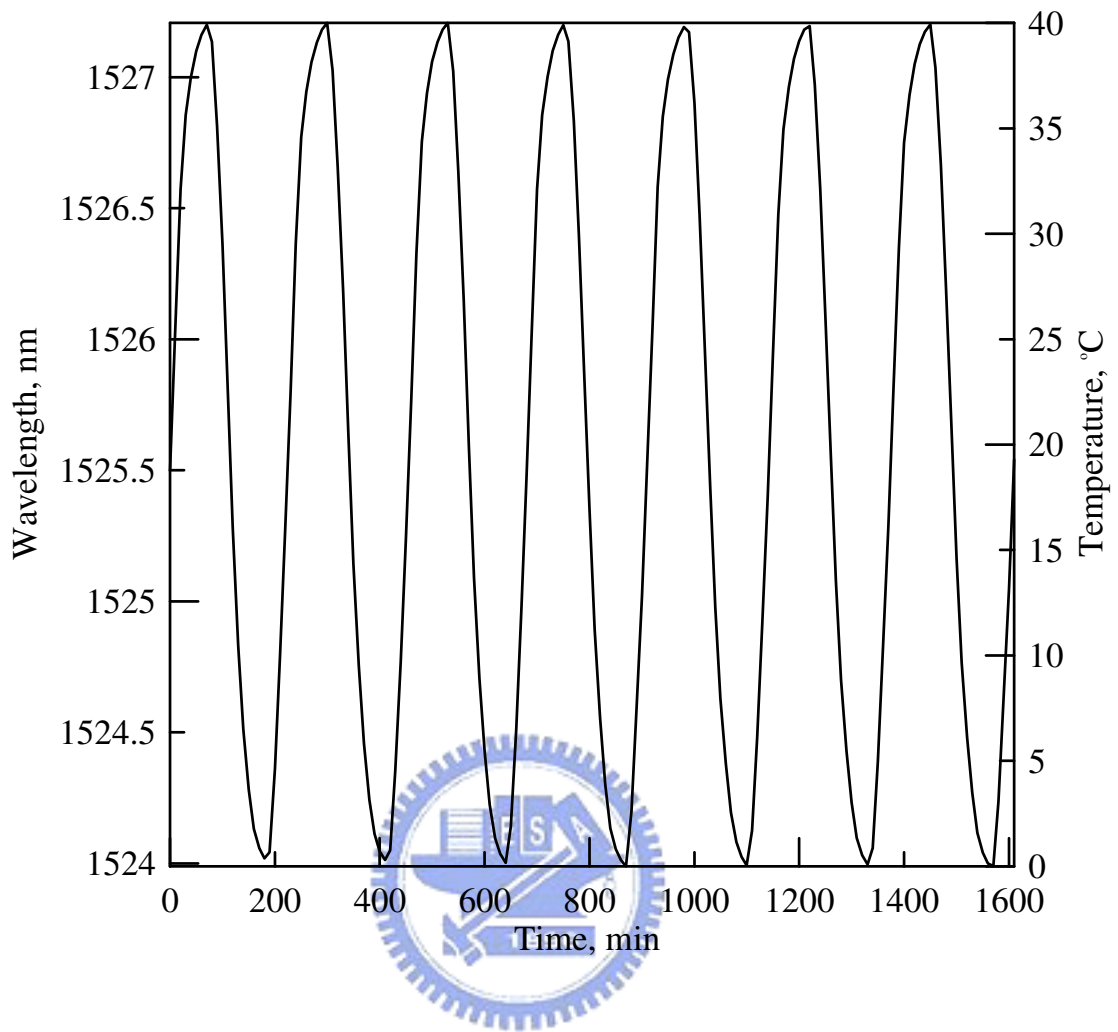


圖 4-5(b) J 疲勞試驗壓邊

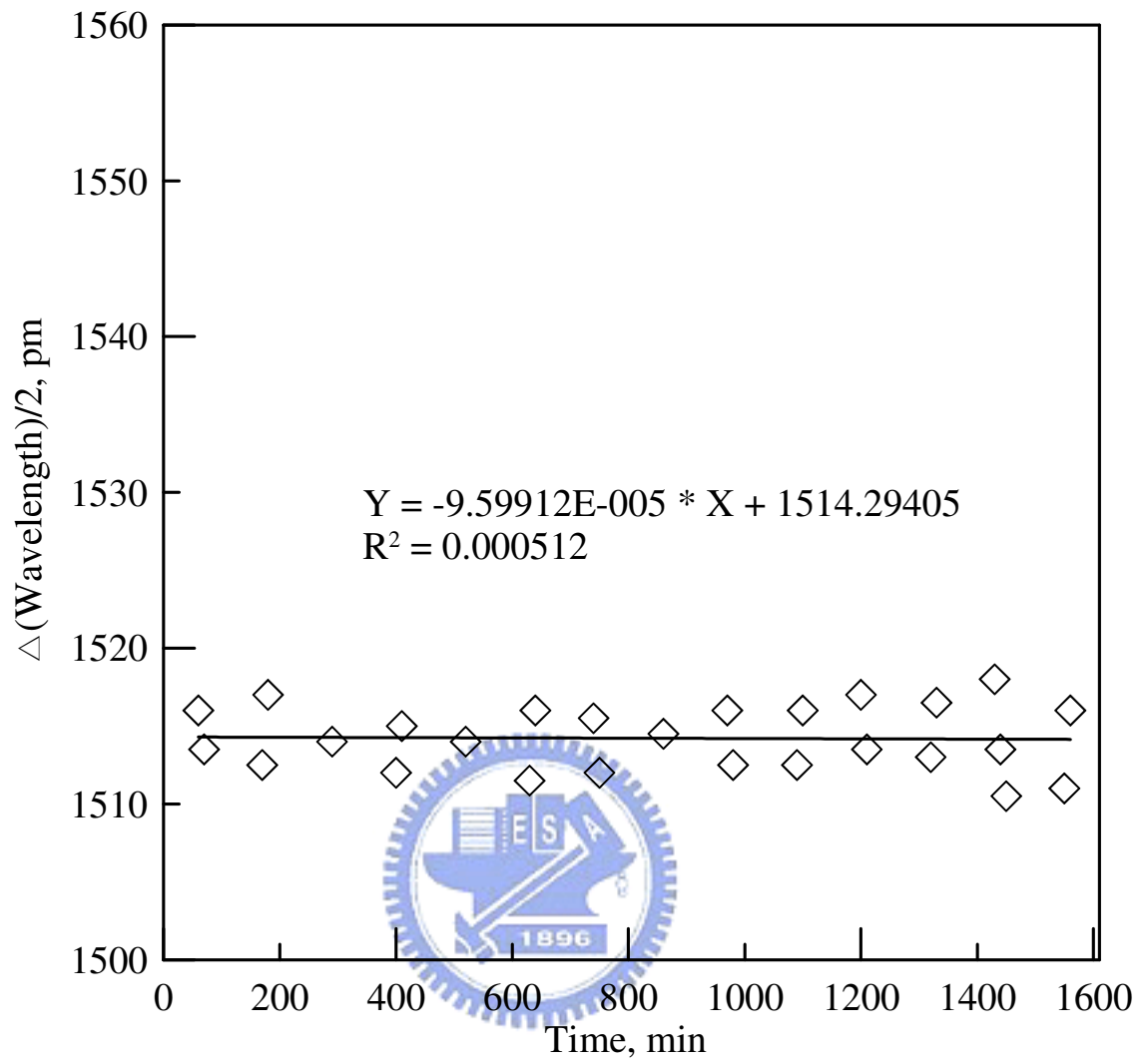


圖 4-5(c) J 疲勞試驗拉減壓

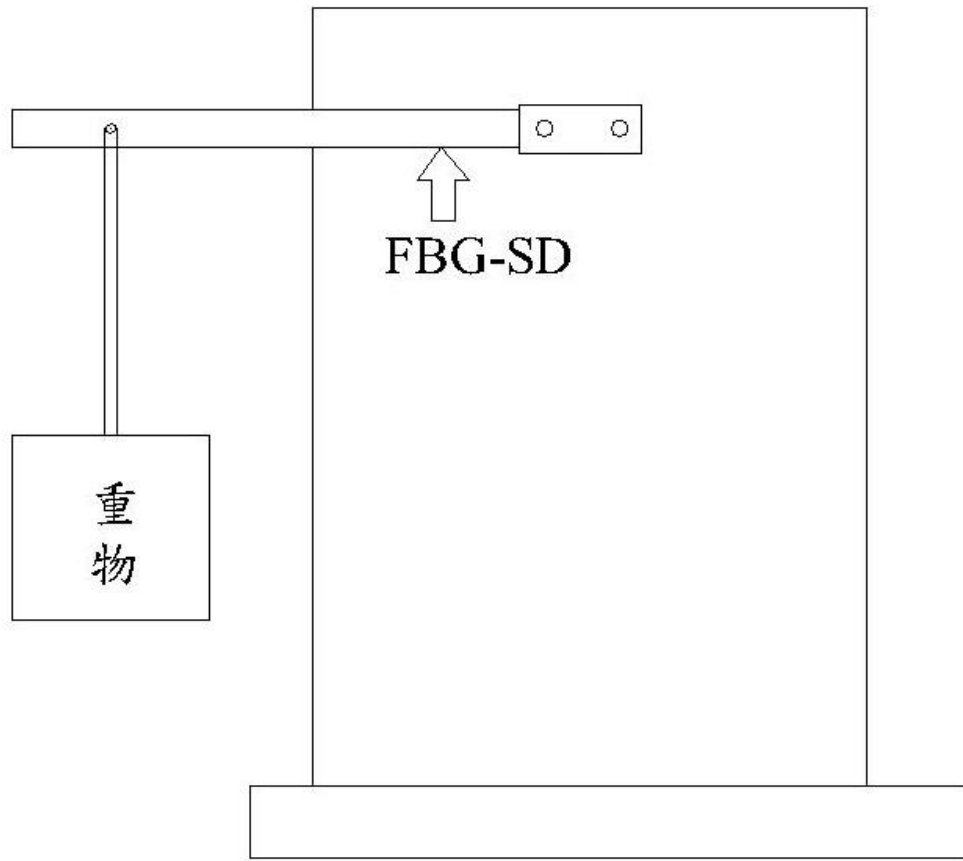


圖 4-6 潛變試驗架設示意圖

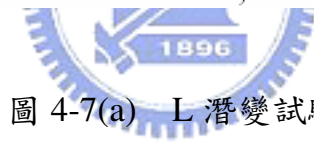
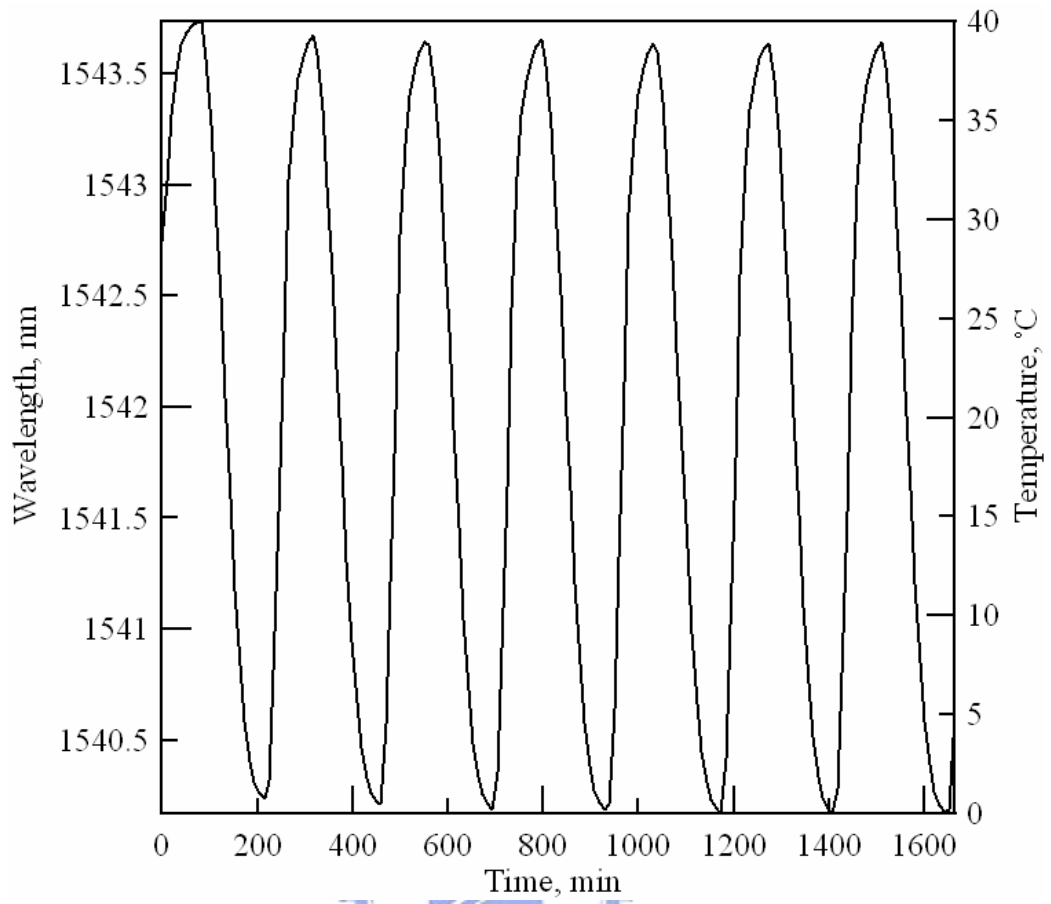


圖 4-7(a) L 潛變試驗拉邊

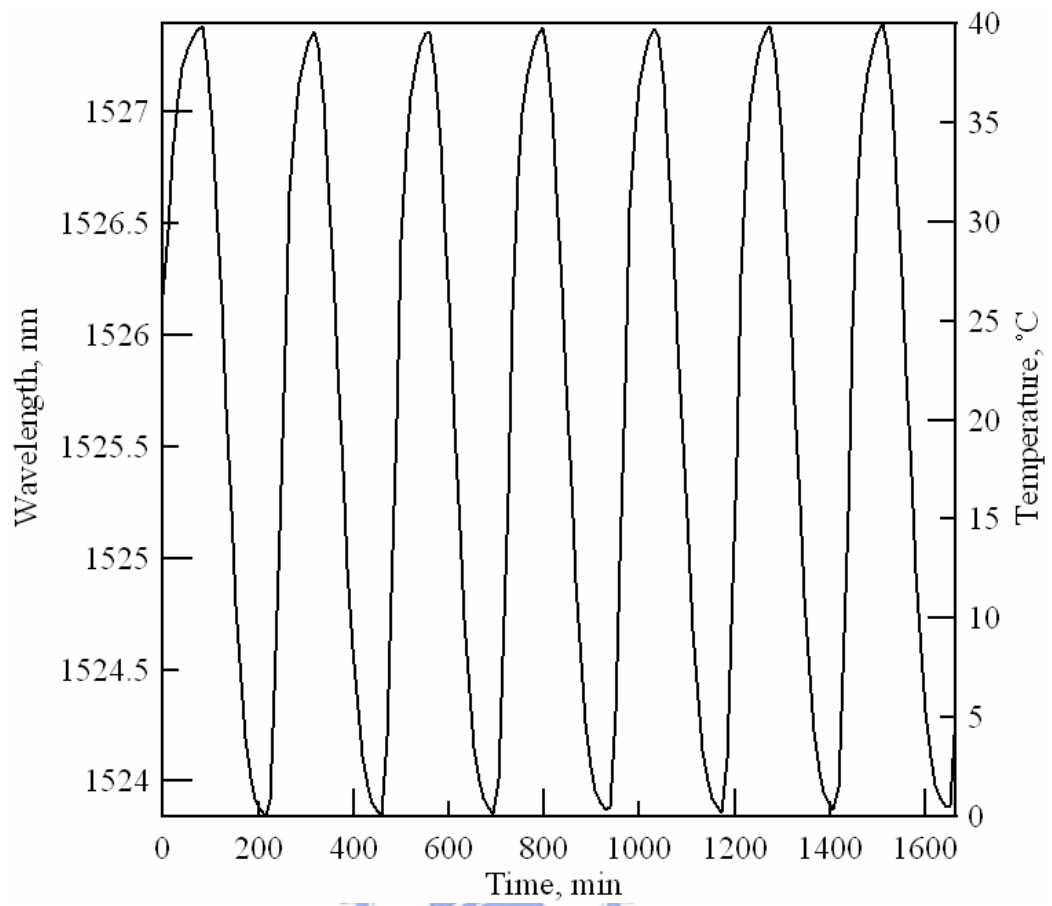


圖 4-7(b) L 潛變試驗壓邊

Equation $Y = 8206.95 - 0.0696 * X + 1.8642E-005 * \text{pow}(X,2)$
 $R^2 = 0.9905$

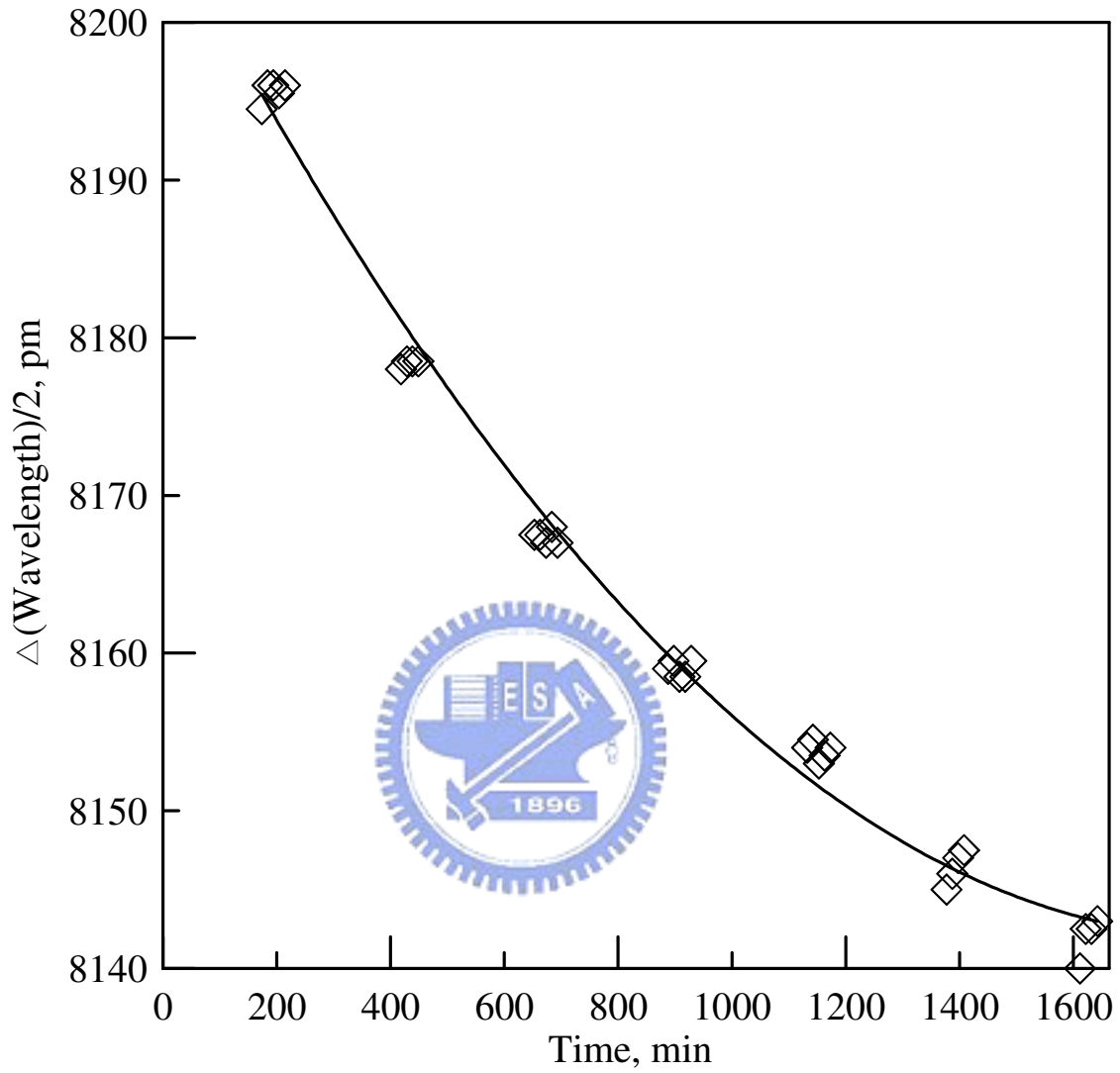


圖 4-7(c) L 潛變試驗拉減壓

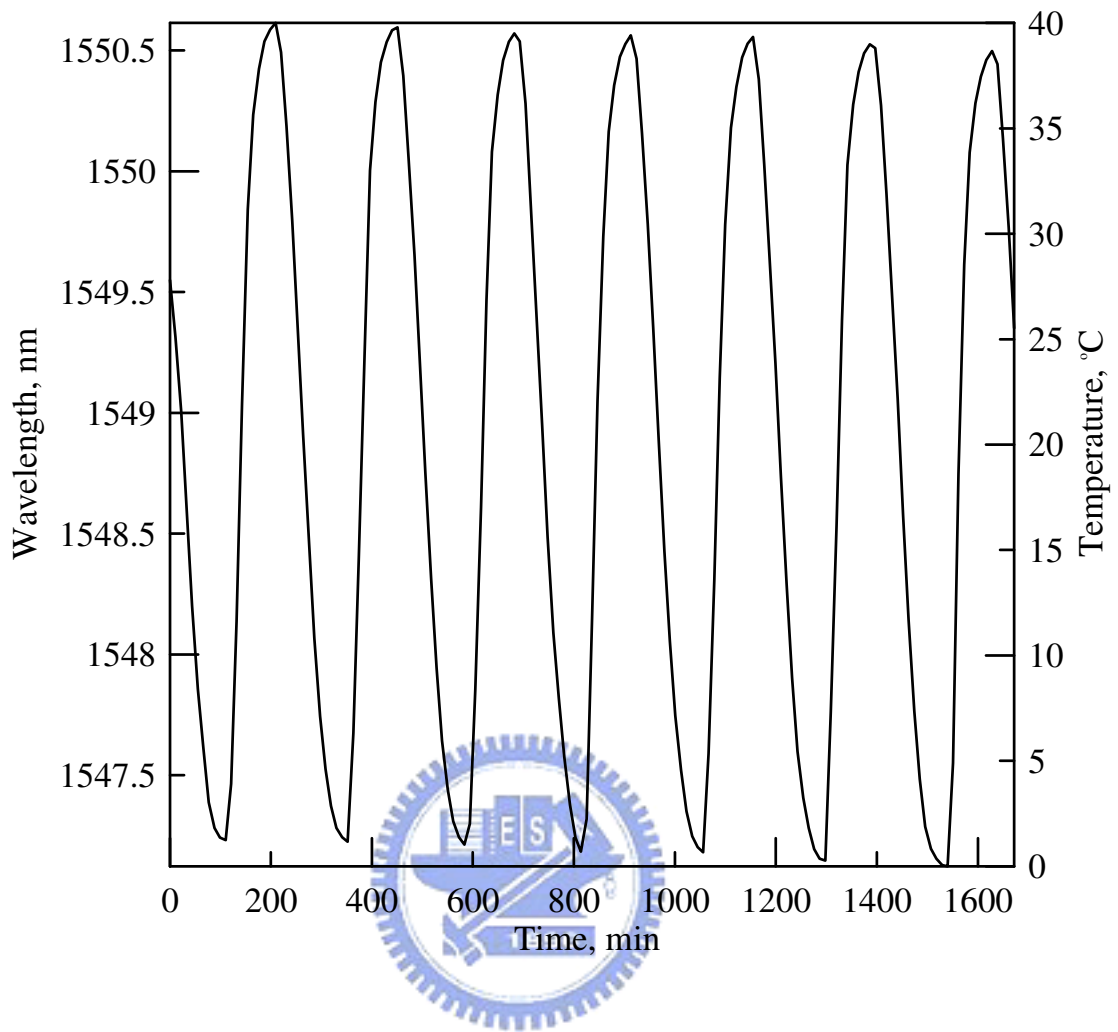


圖 4-8(a) K 潛變試驗拉邊

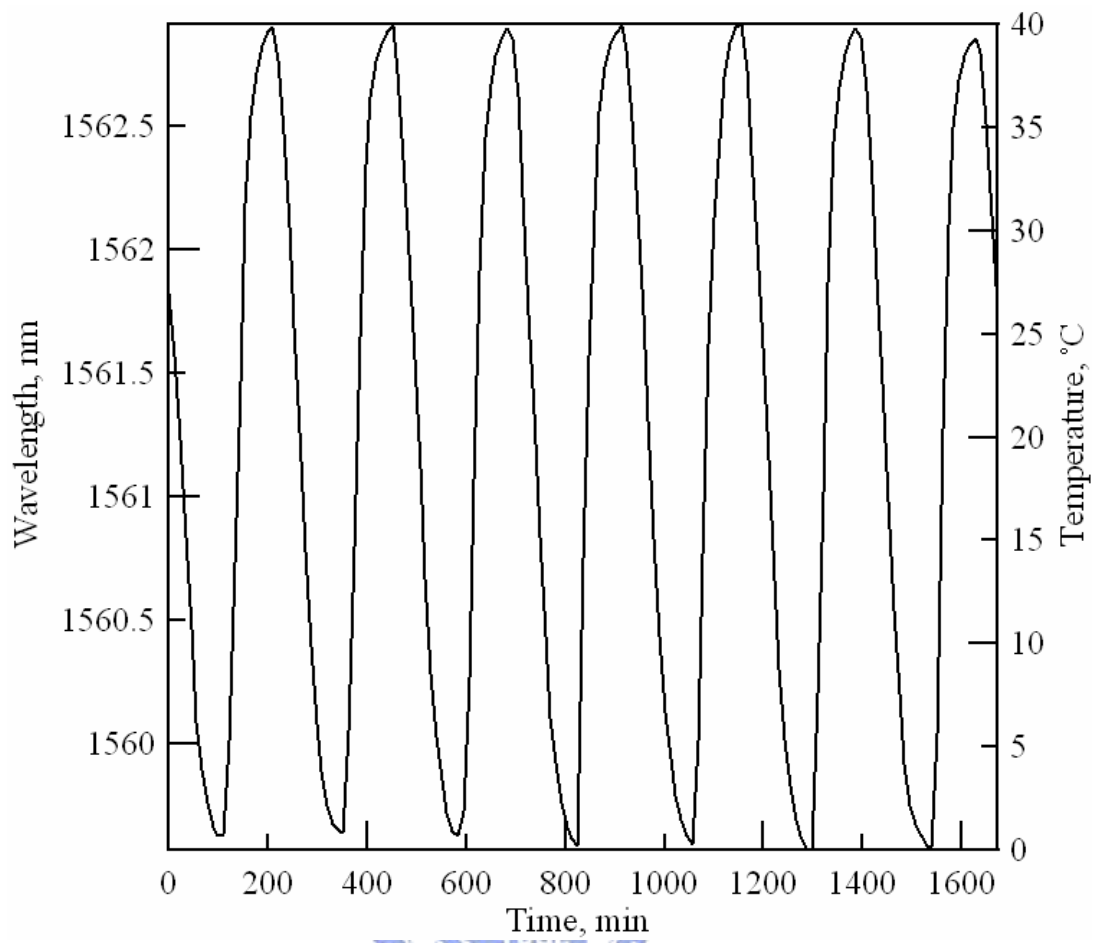


圖 4-8(b) K 潛變試驗壓邊

$$Y = -6131.0598 - 0.0596 * X + 1.5078E-005 * \text{pow}(X,2)$$
$$R^2 = 0.9562$$

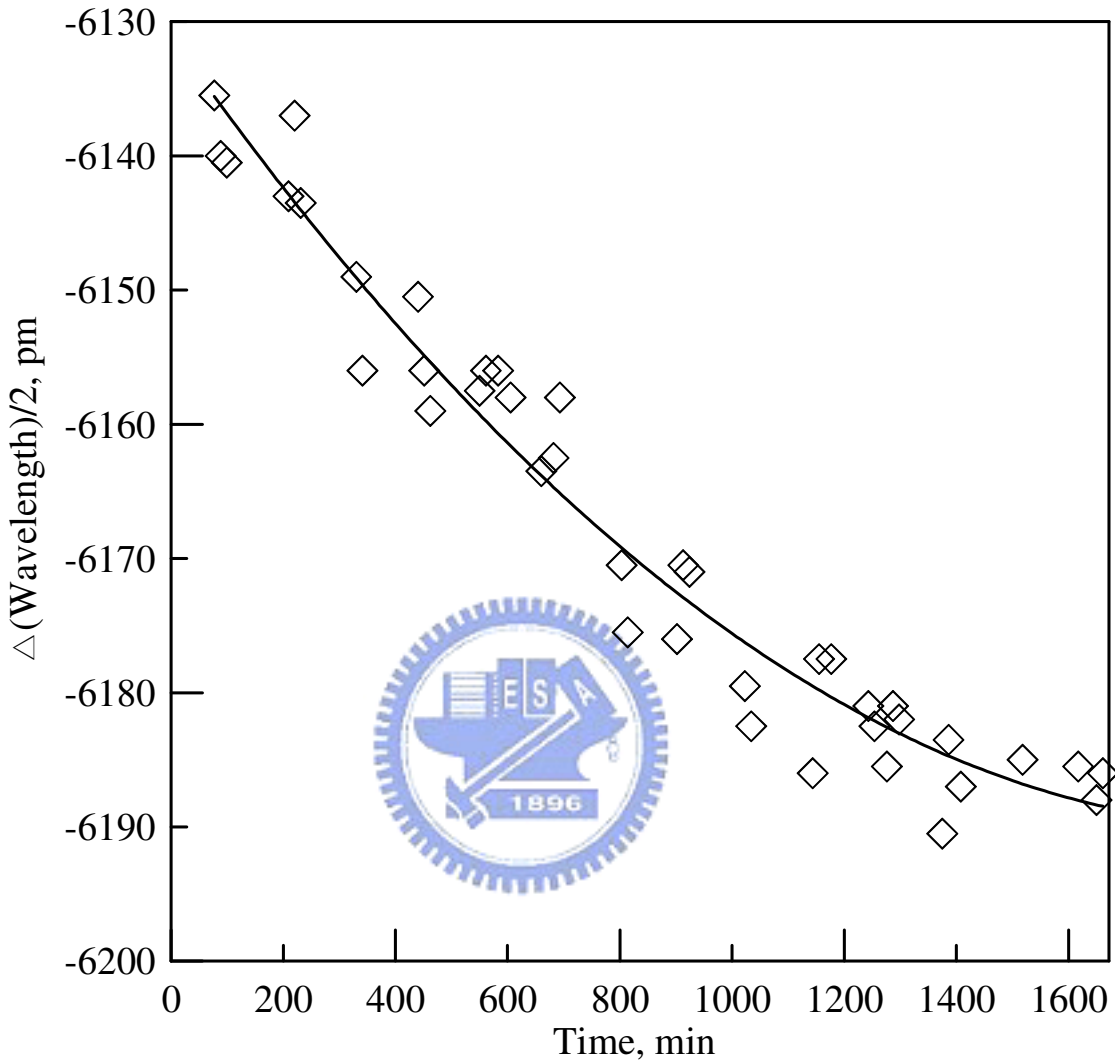


圖 4-8(c) K 潛變試驗拉減壓

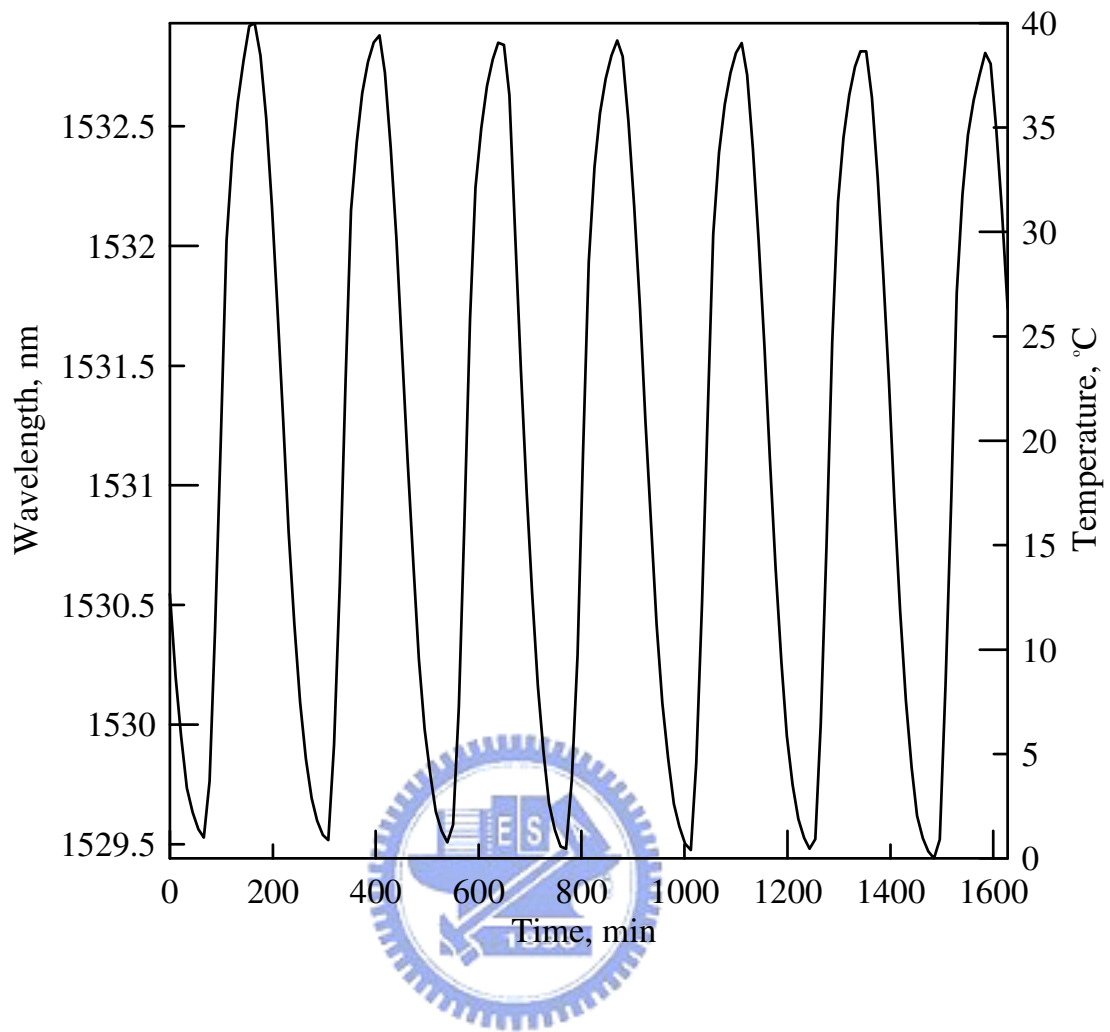


圖 4-9(a) J 潛變試驗拉邊

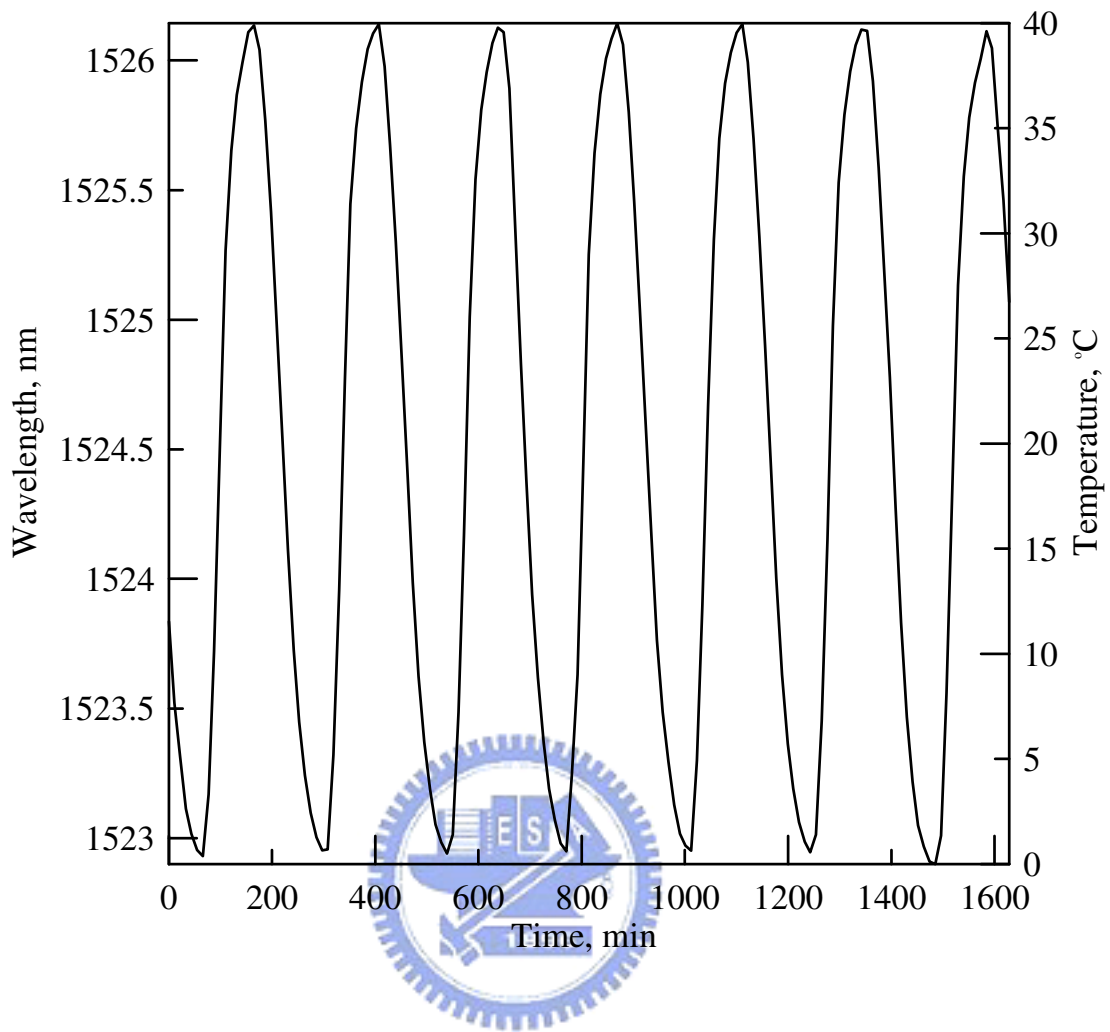


圖 4-9(b) J 潛變試驗壓邊

$$Y = 3410.4198 - 0.0872 * X + 3.0736E - 005 * \text{pow}(X,2)$$
$$R^2 = 0.9423$$

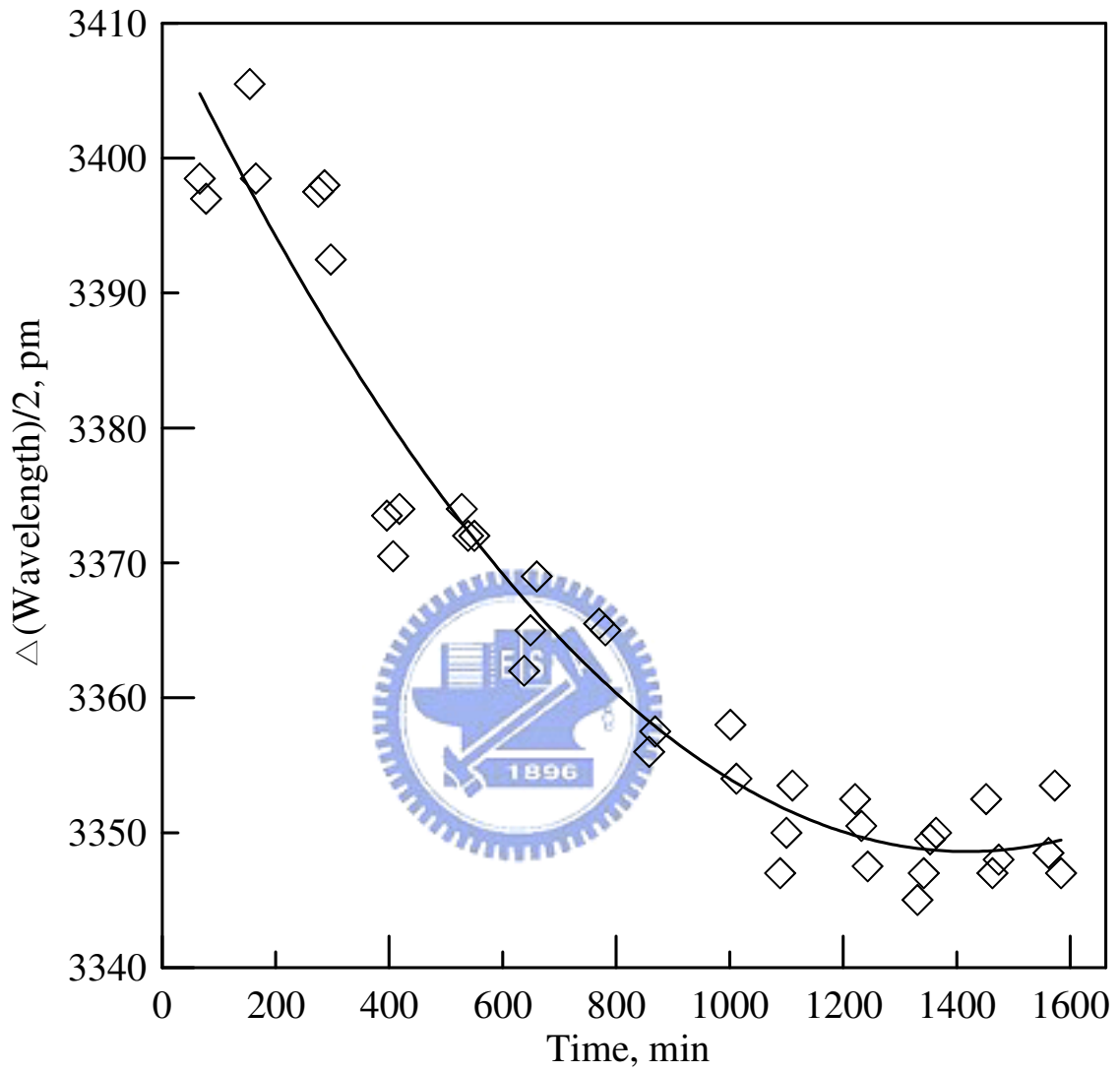


圖 4-9(c) J 潛變試驗拉減壓

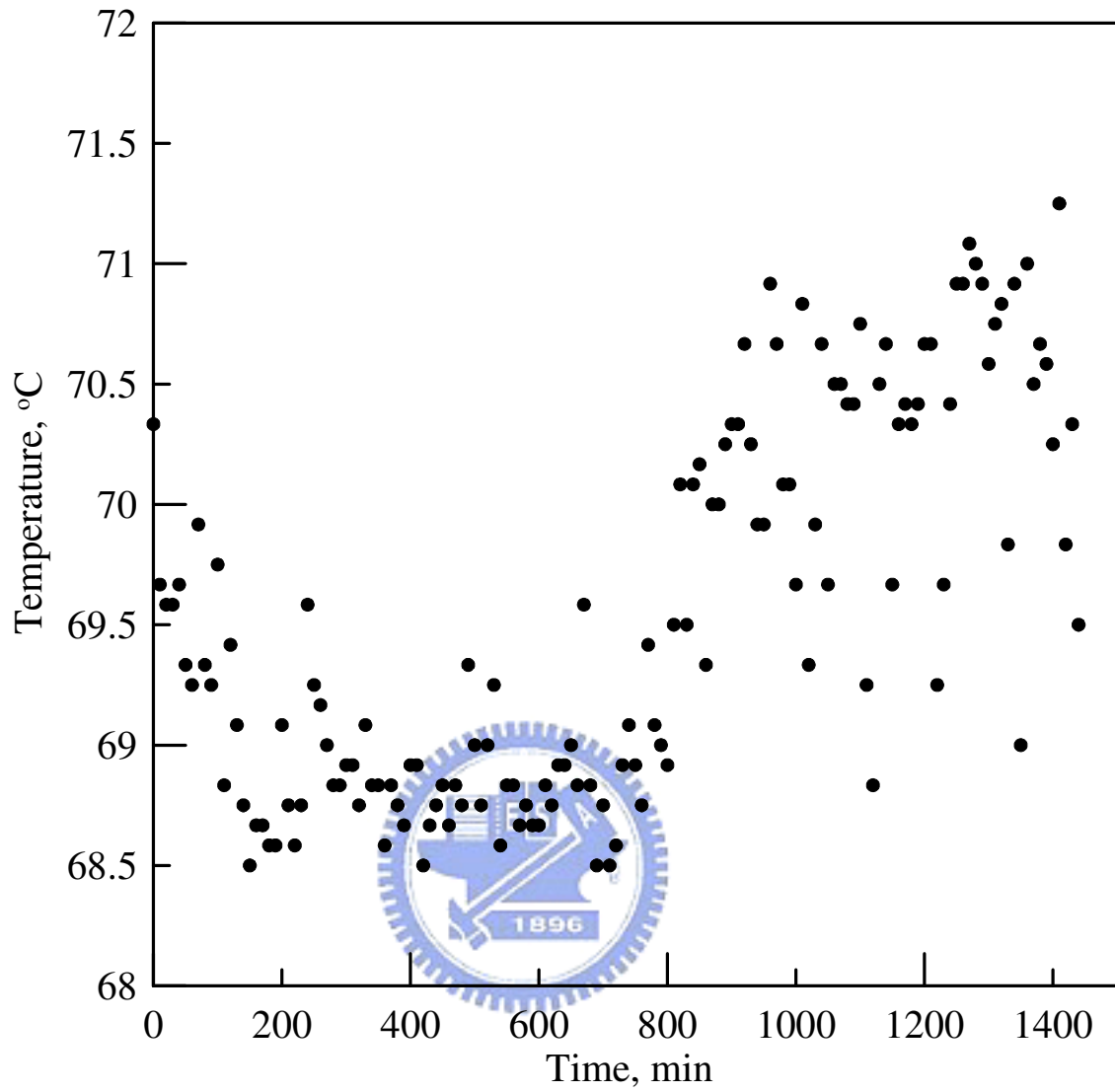


圖 4-10 老化試驗之溫度標定

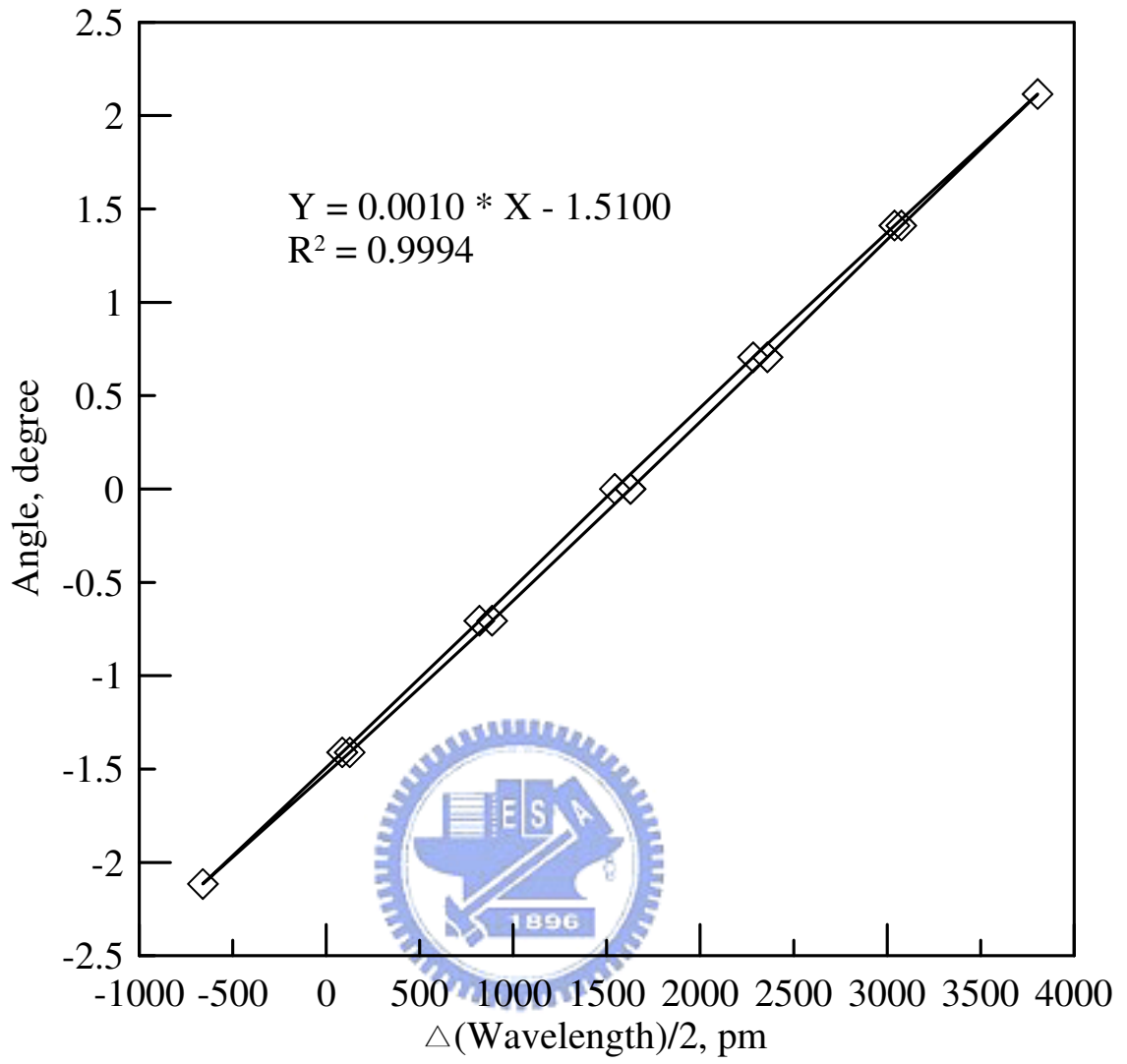


圖 4-11(a) L 初始標定

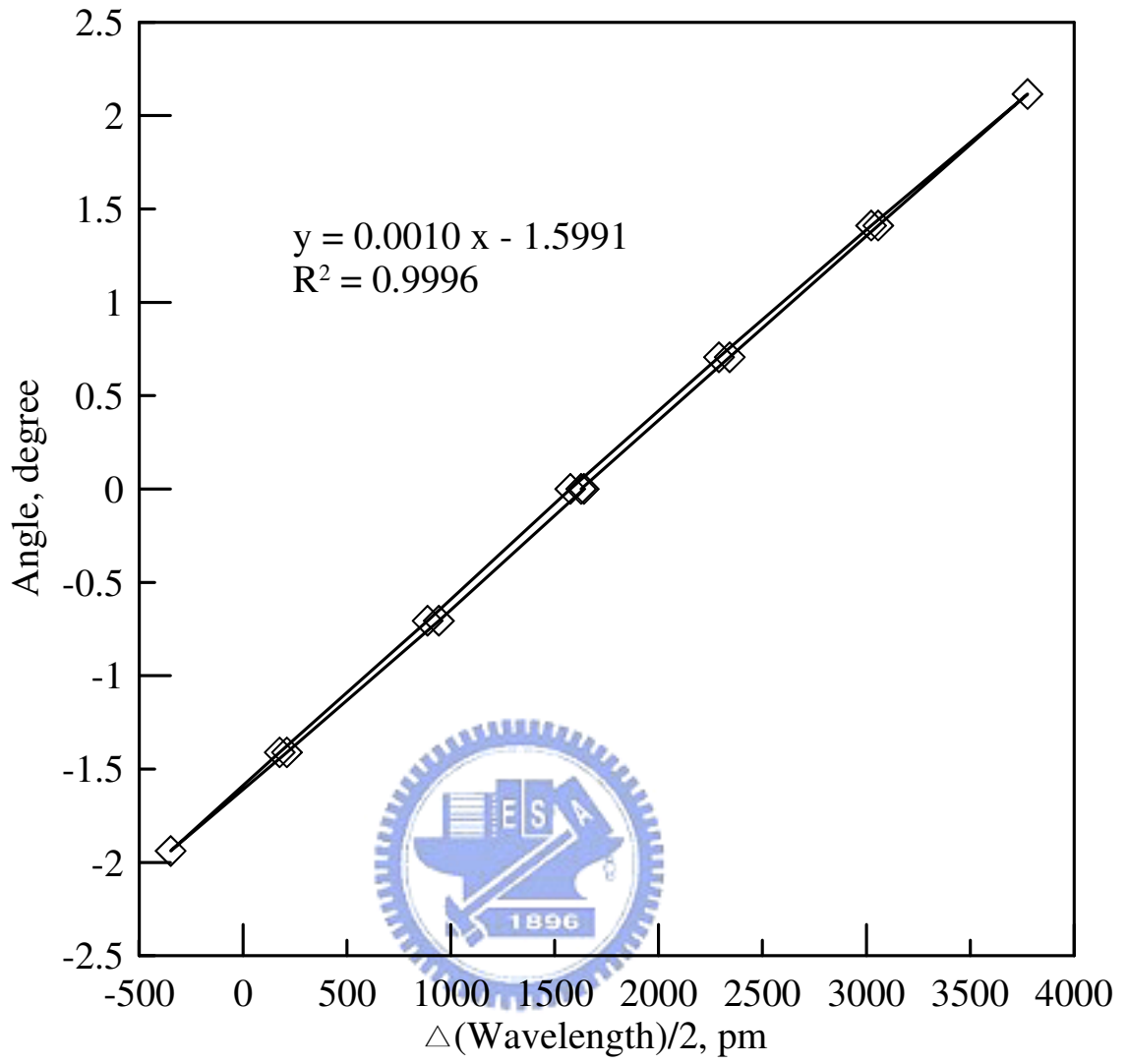


圖 4-11(b) L 一日標定

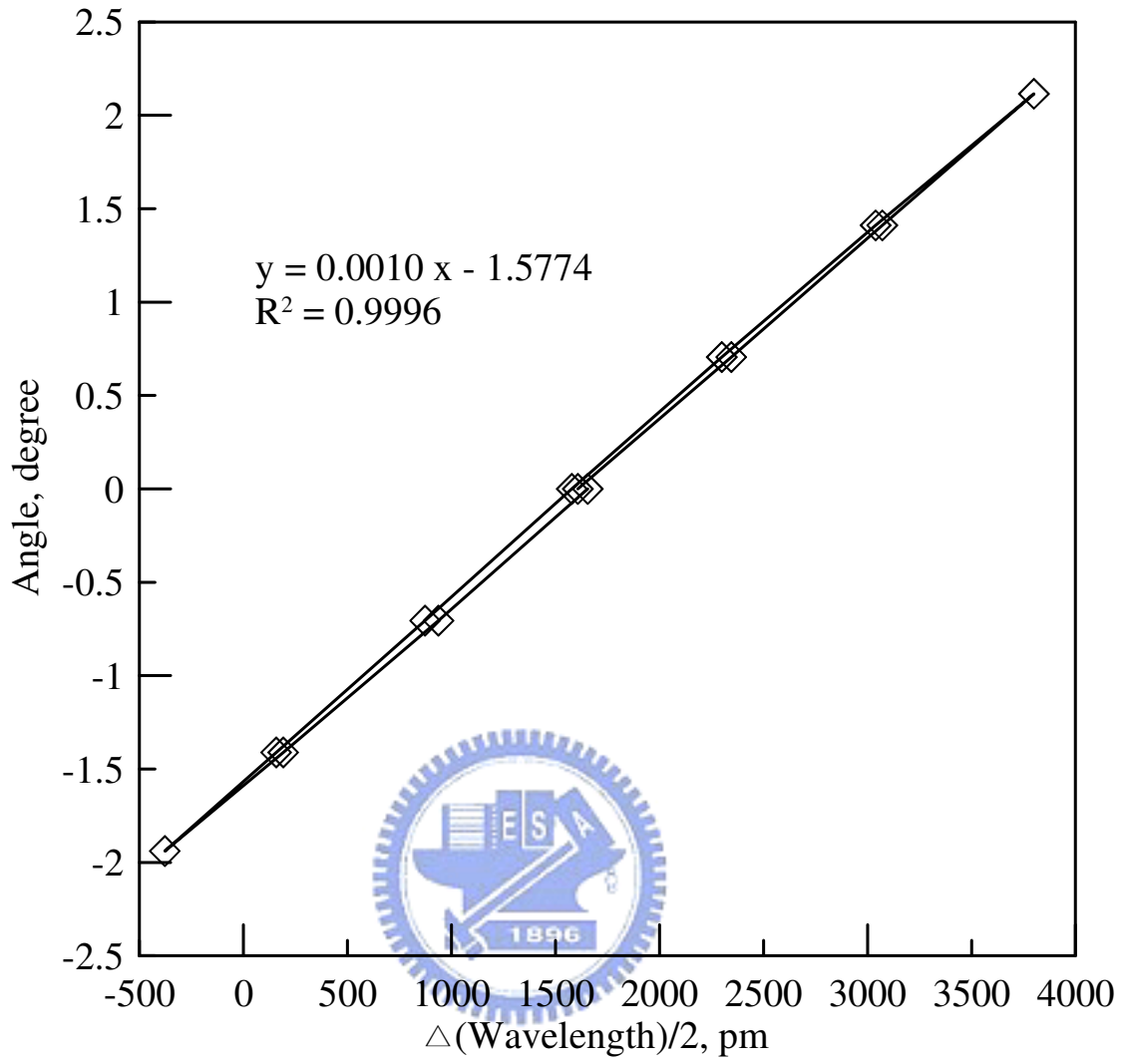


圖 4-11(c) L 二日標定

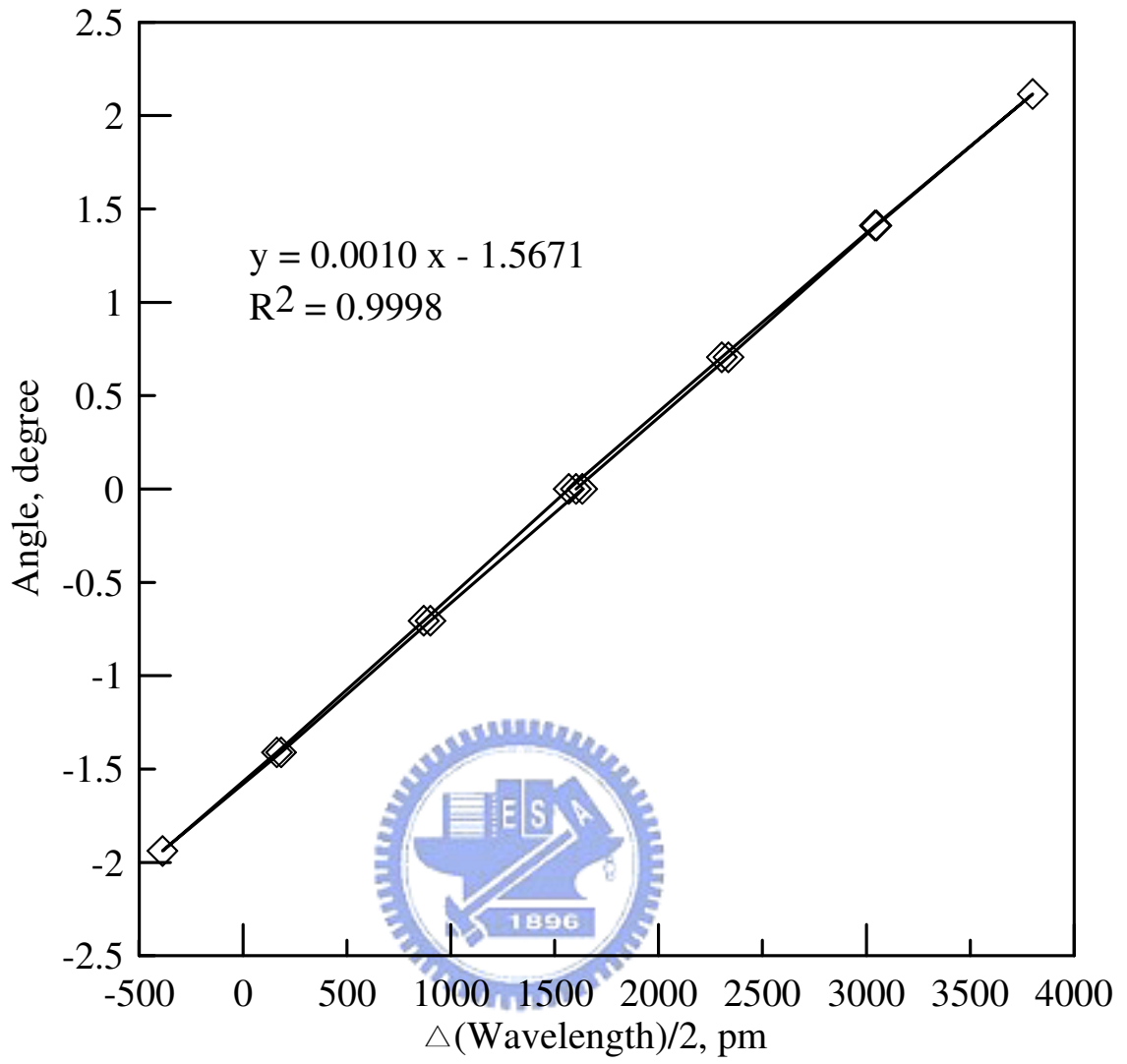


圖 4-11(d) L 四日標定

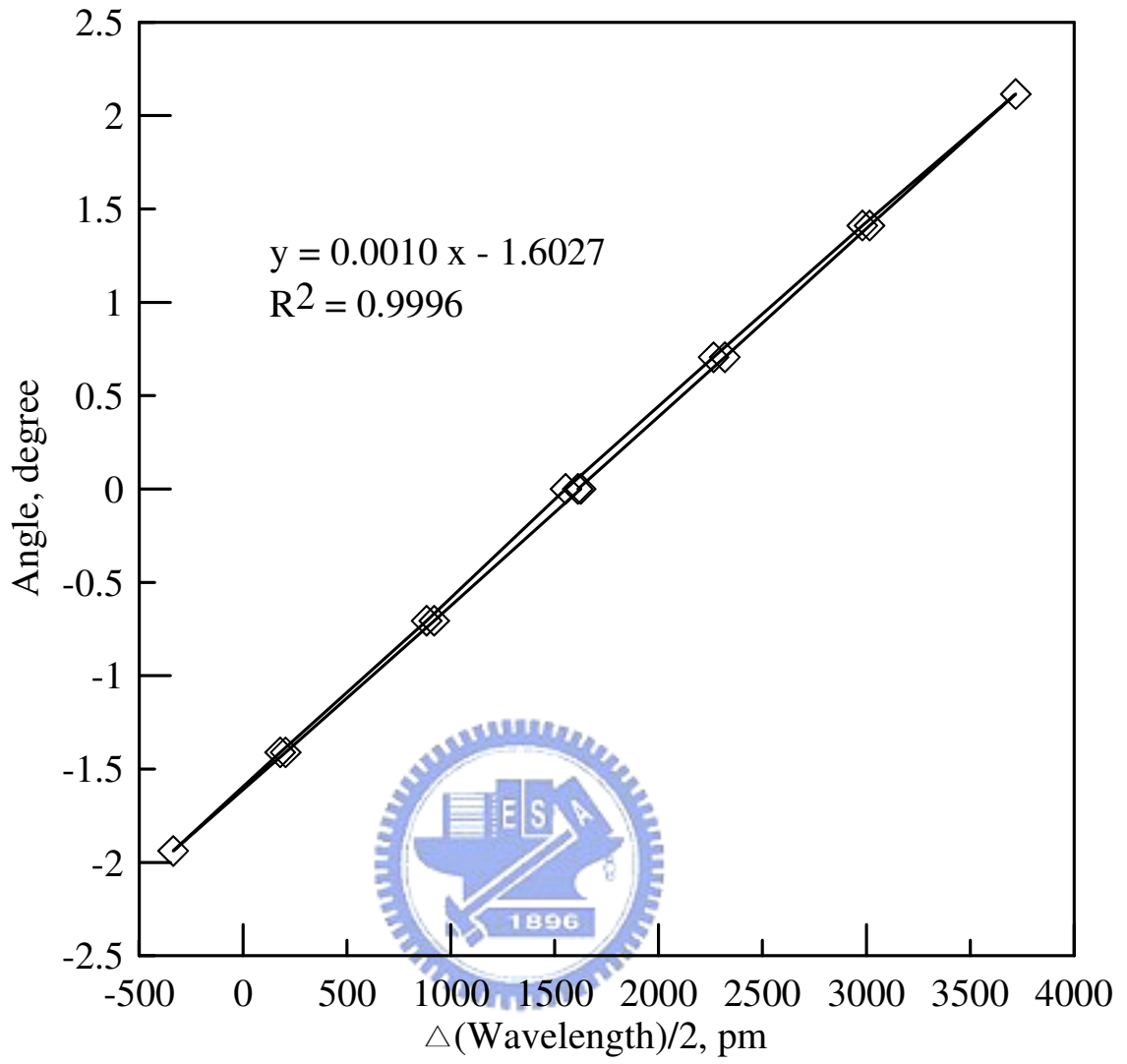


圖 4-11(e) L 七日標定

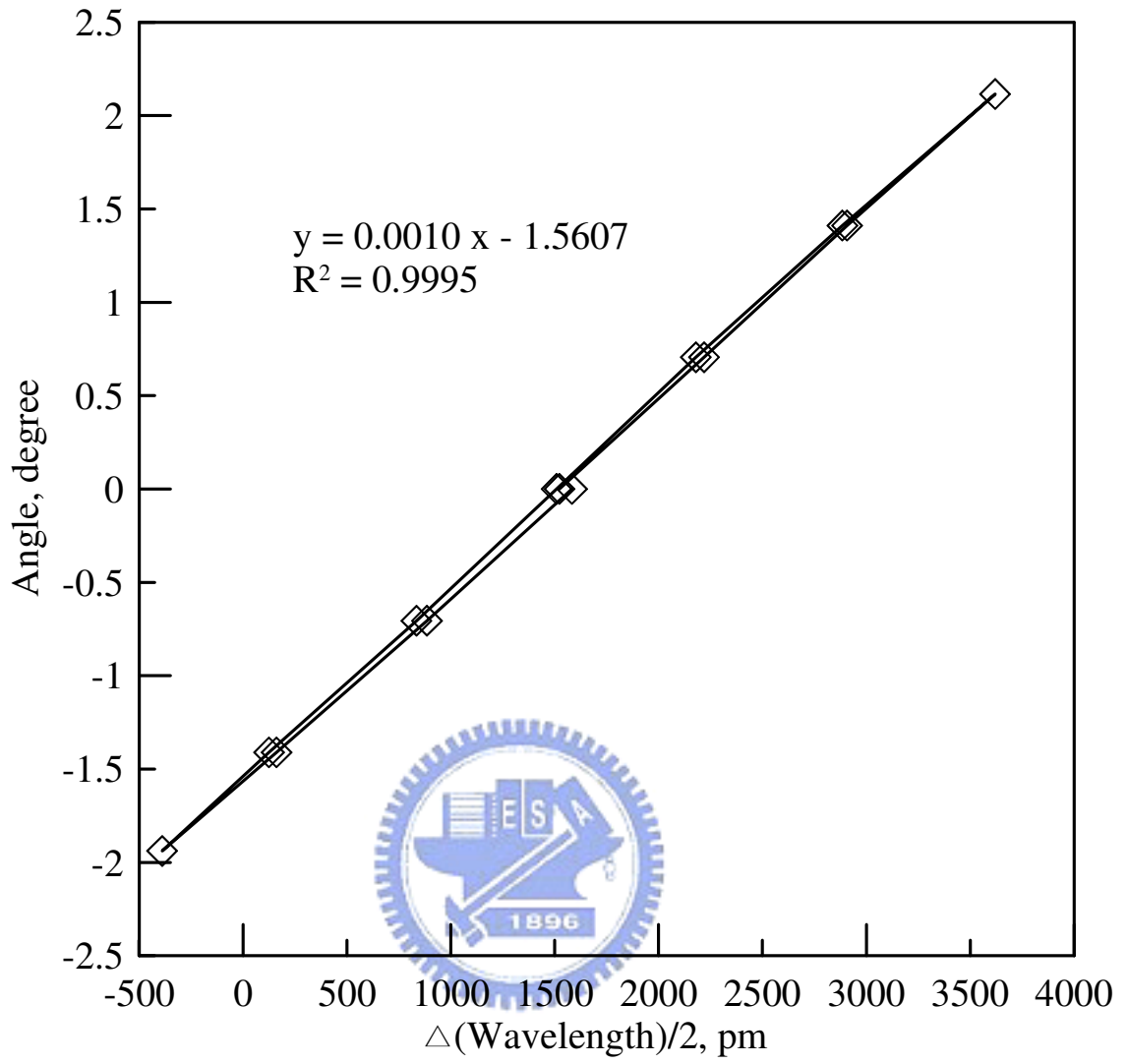


圖 4-11(f) L 十四日標定

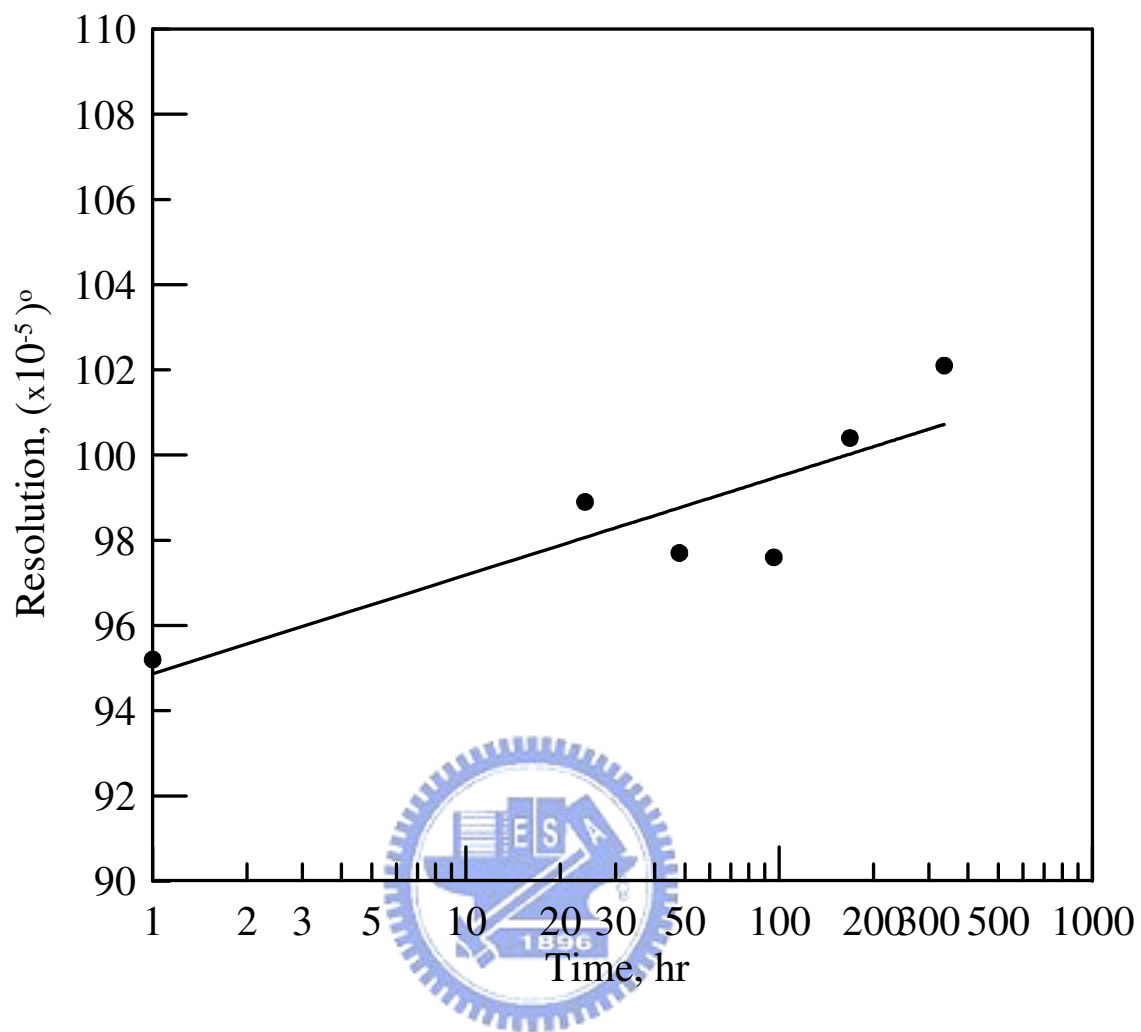


圖 4-11(g) L 解析度變化

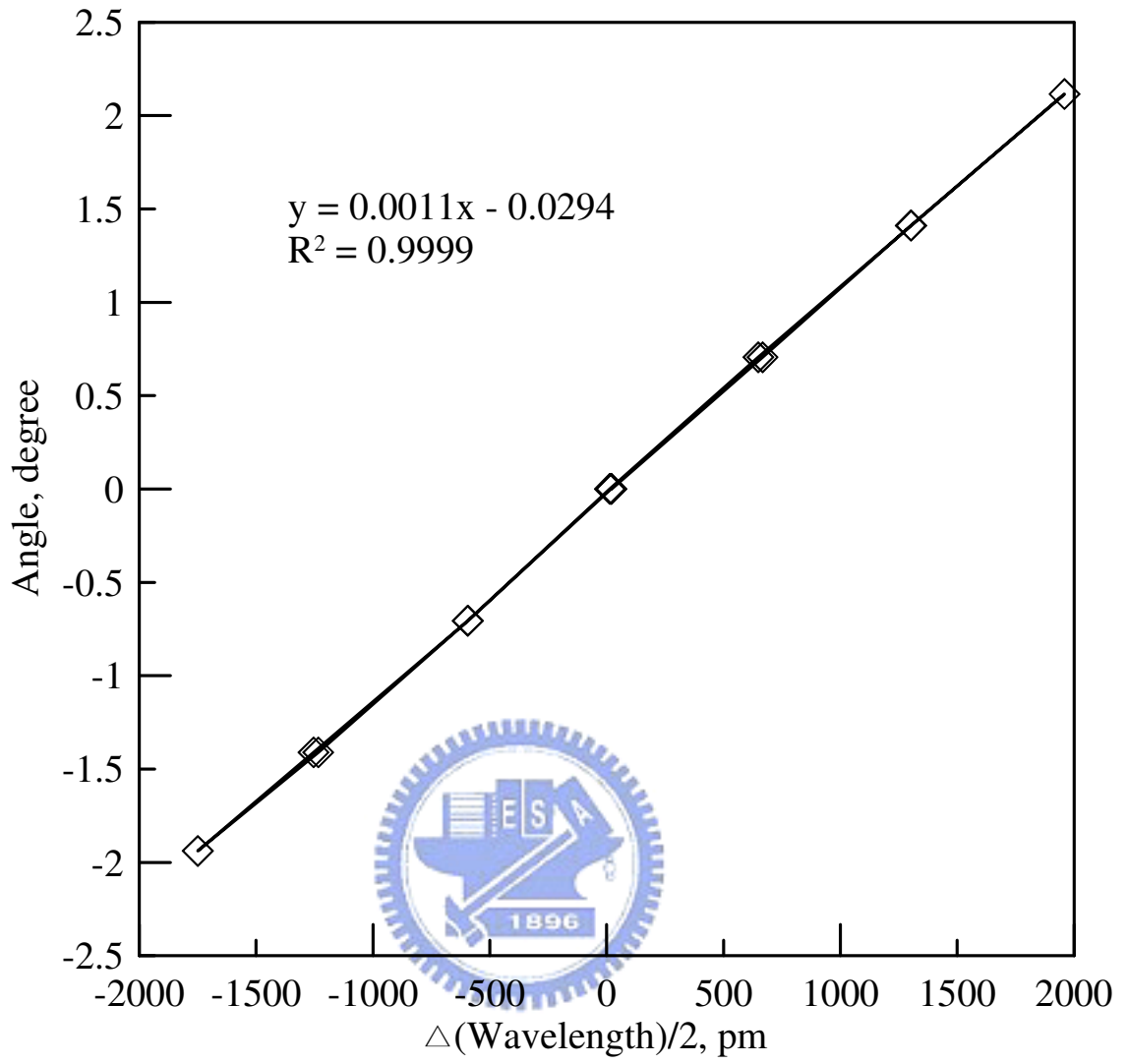


圖 4-12(a) K 初始標定

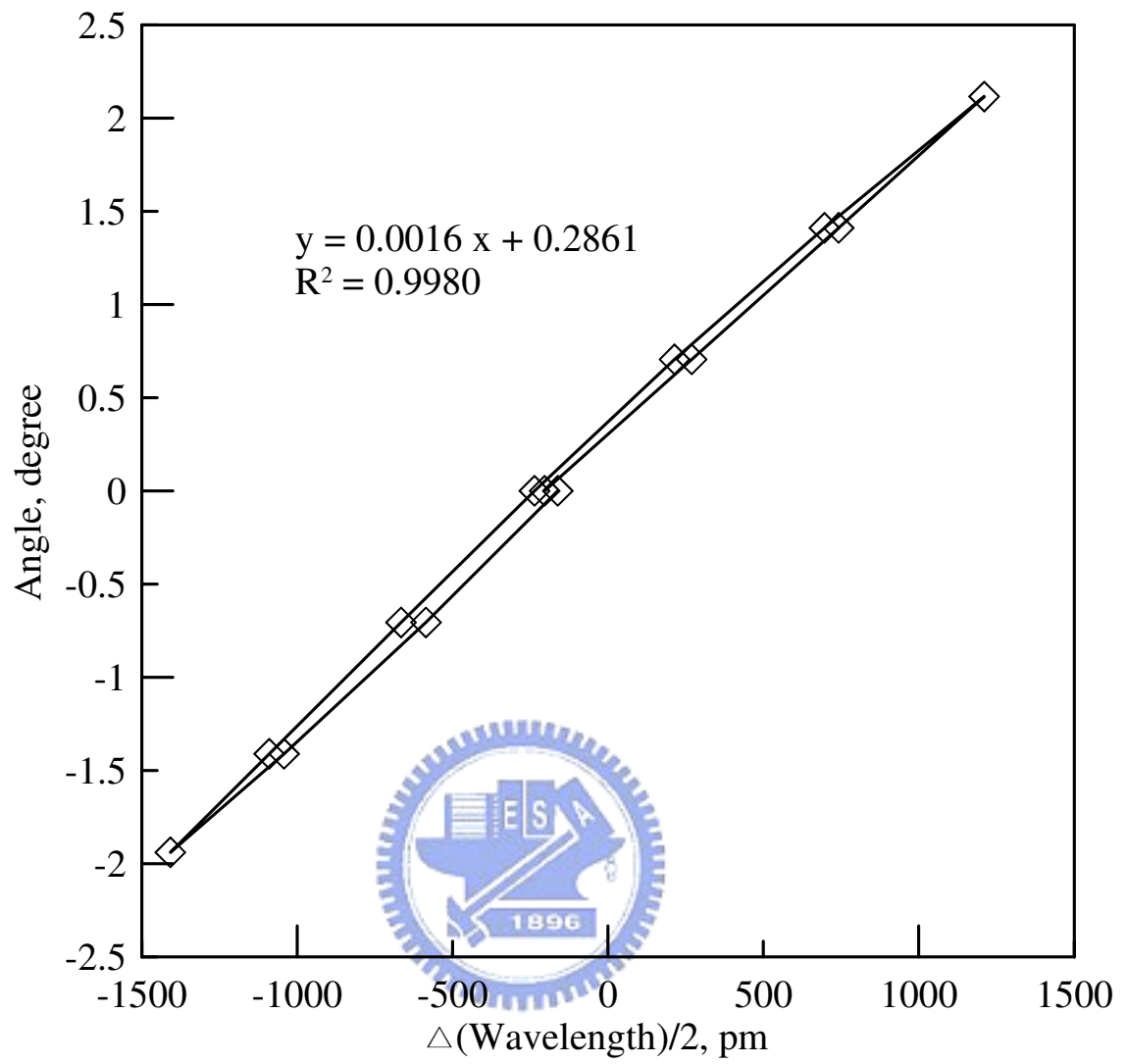


圖 4-12(b) K 一日標定

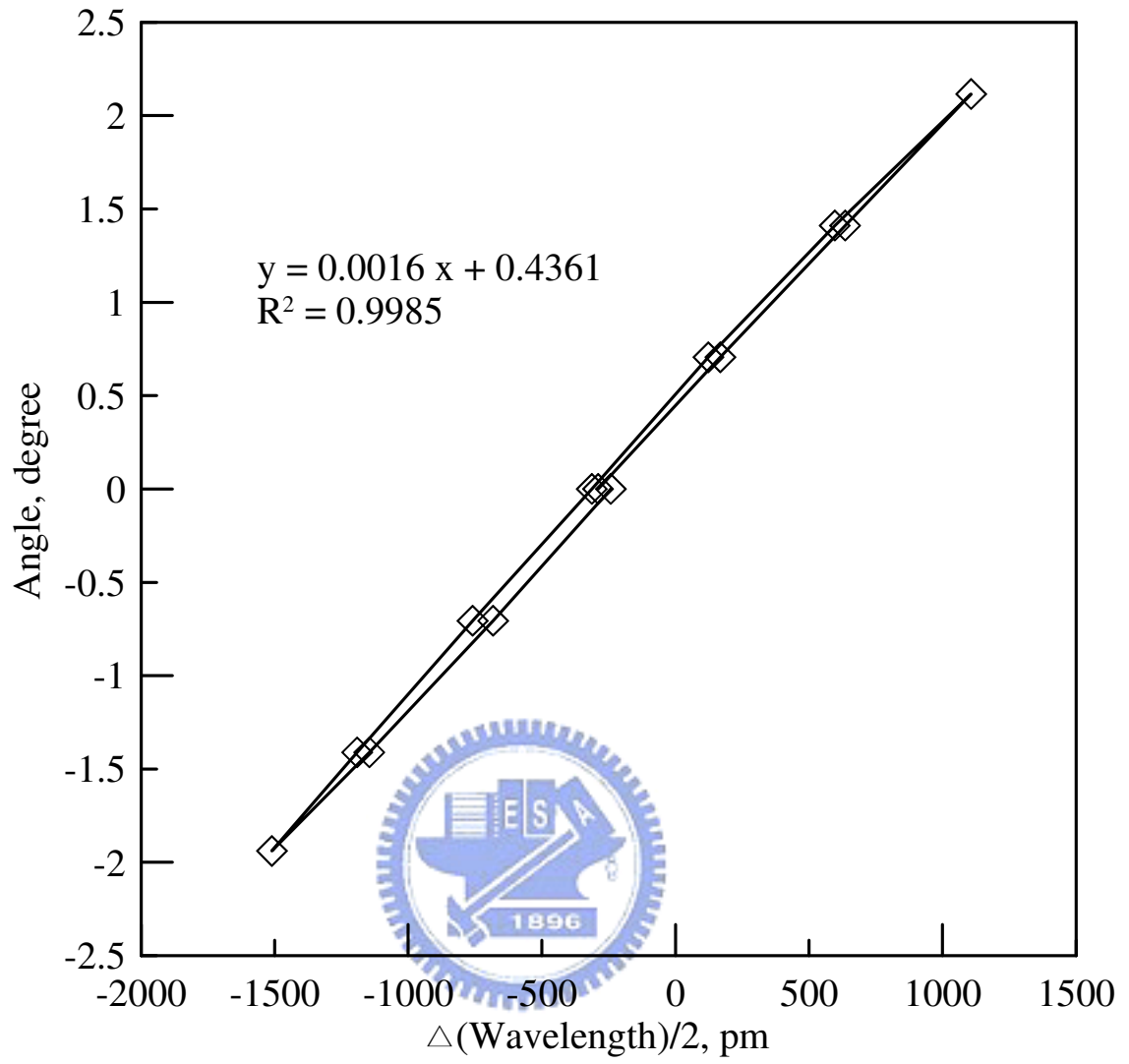


圖 4-12(c) K 二日標定

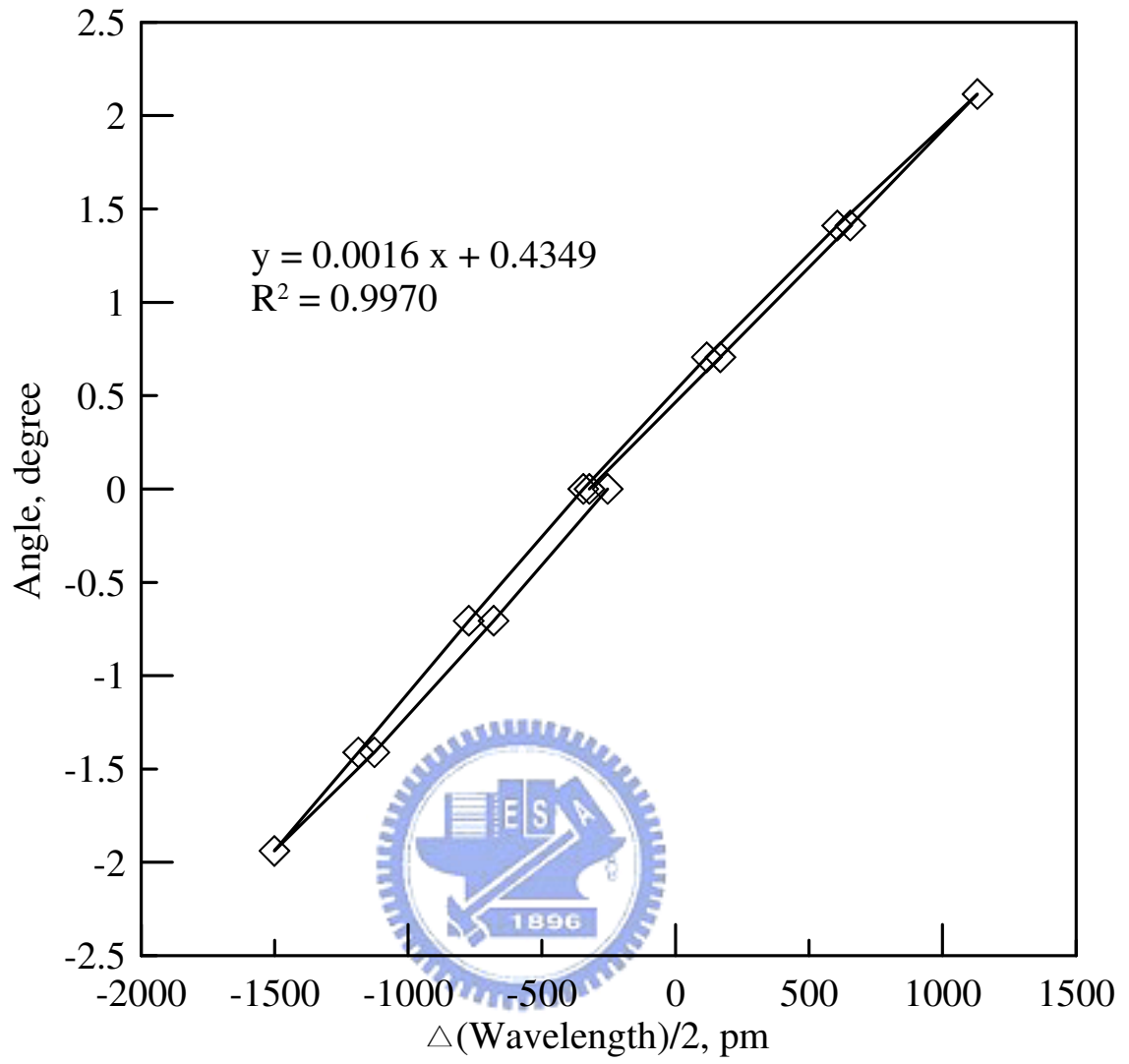


圖 4-12(d) K 四日標定

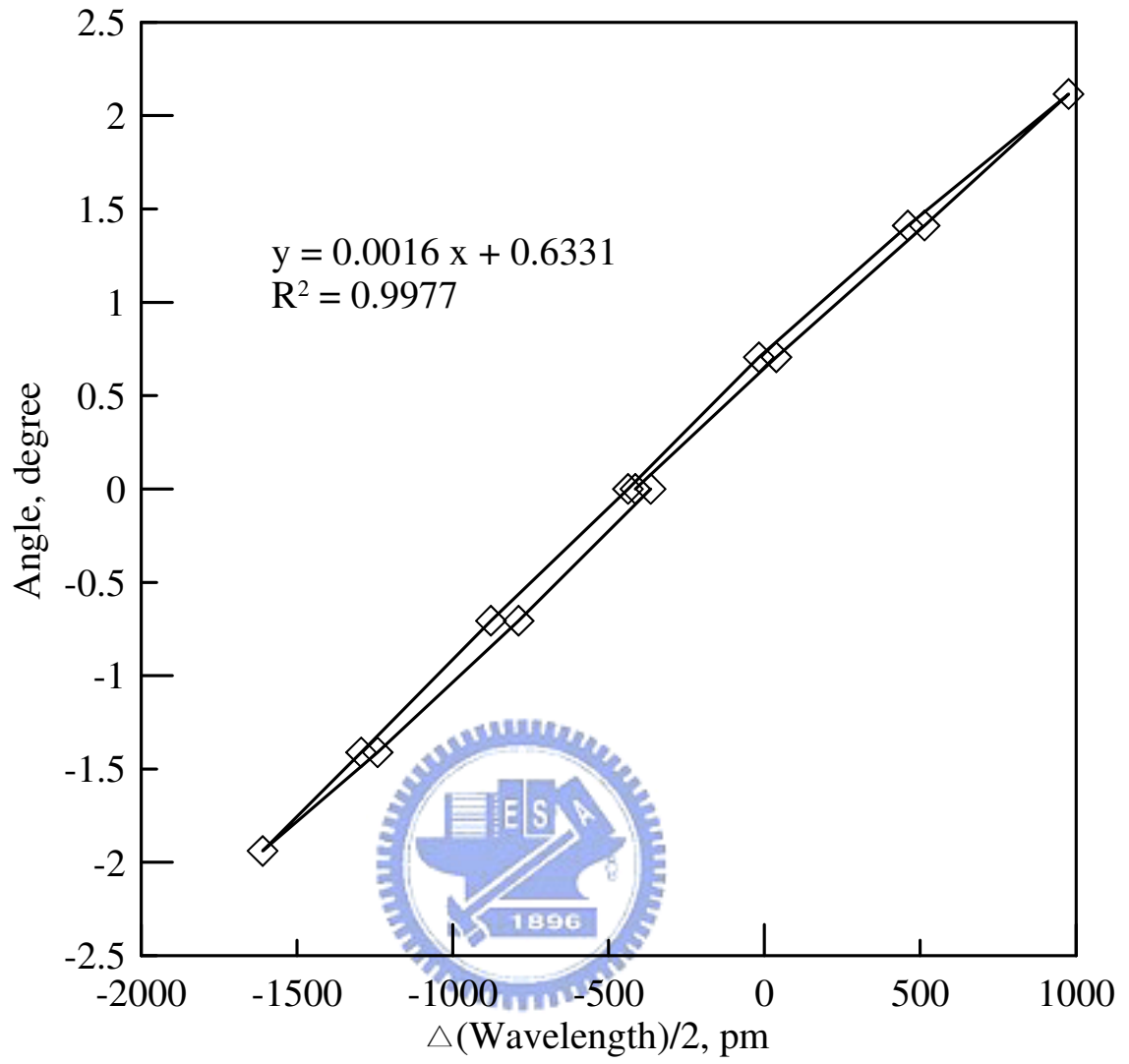


圖 4-12(e) K 七日標定

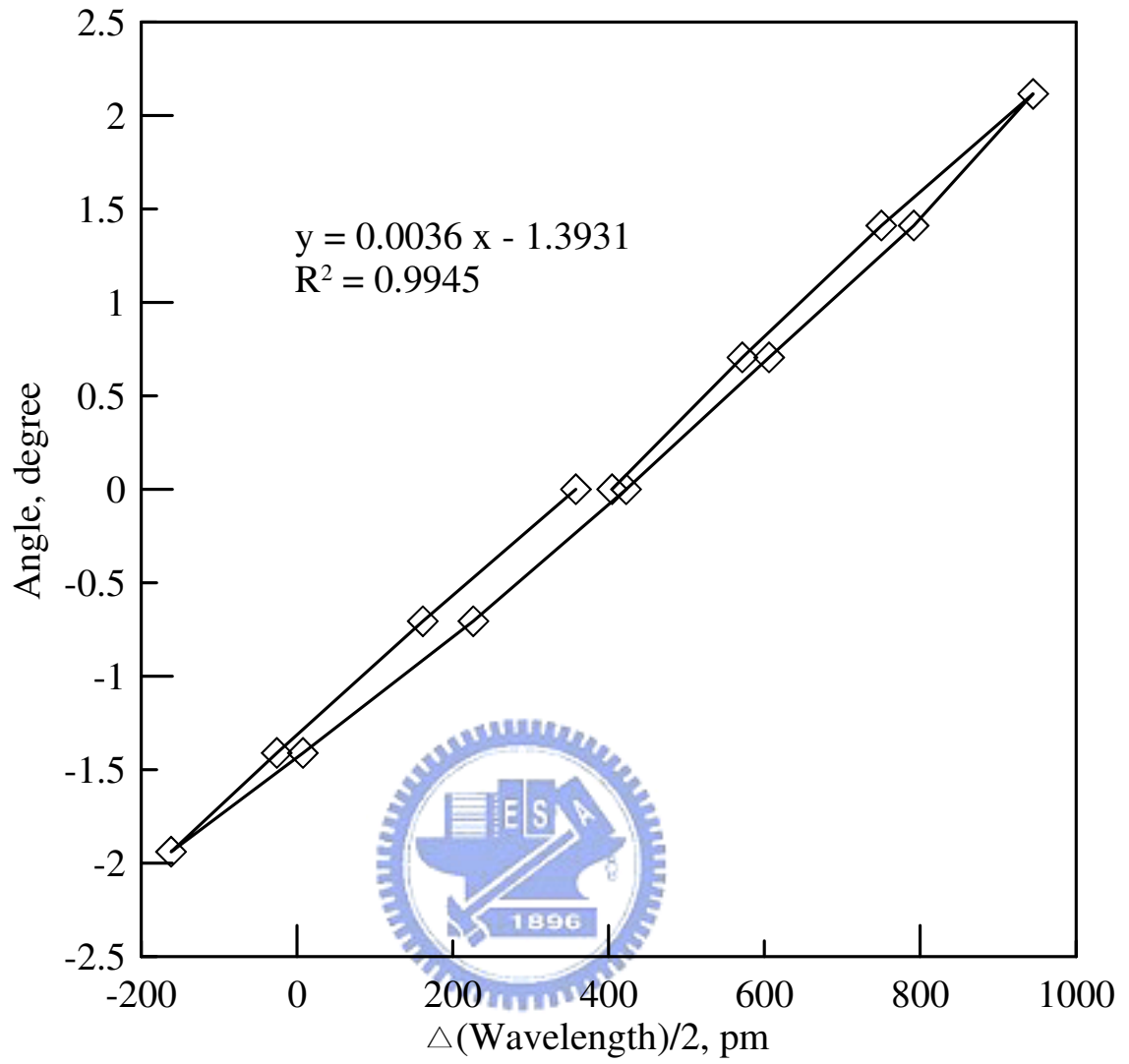


圖 4-12(f) K 十四日標定

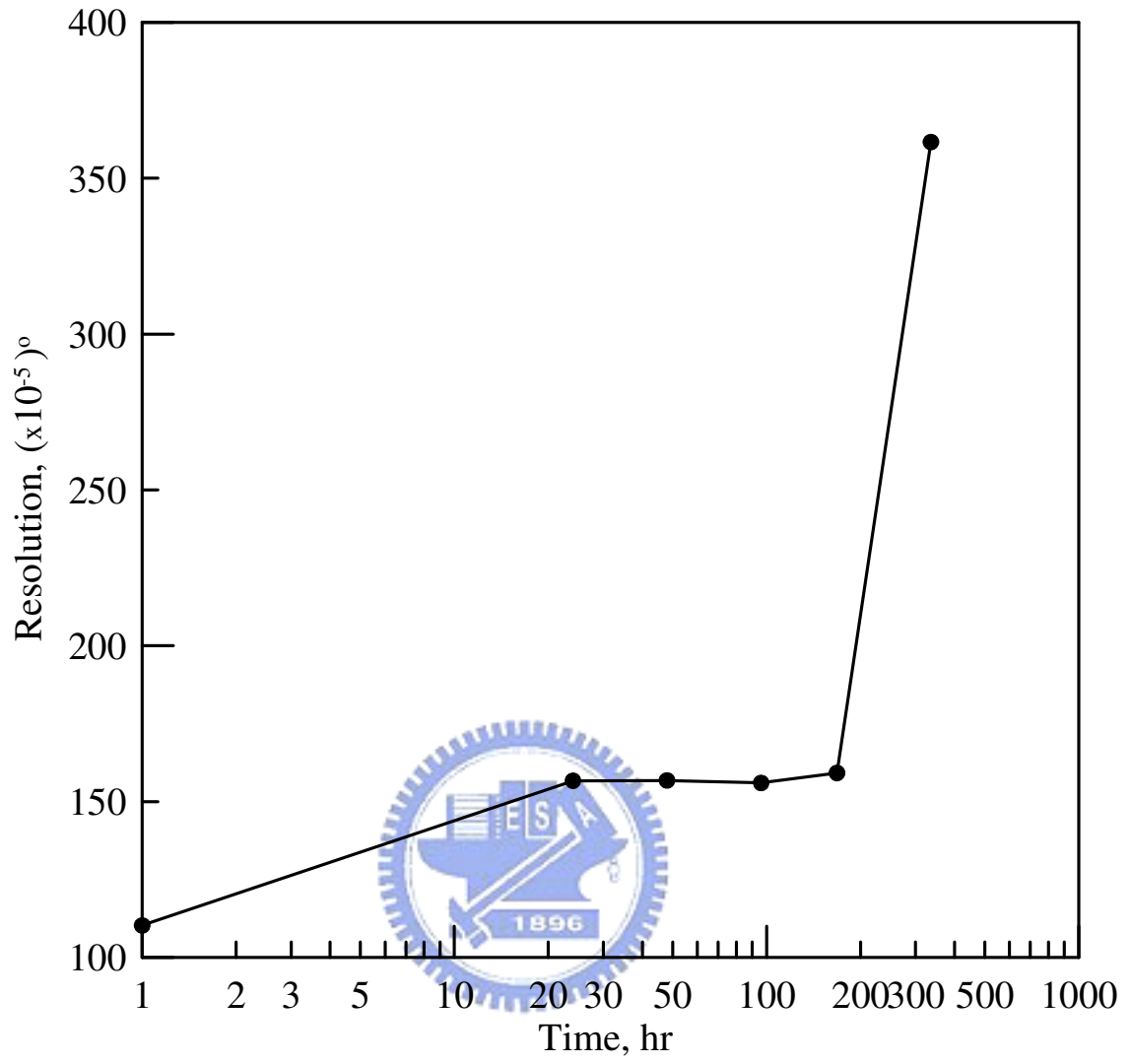


圖 4-12(g) K 解析度變化

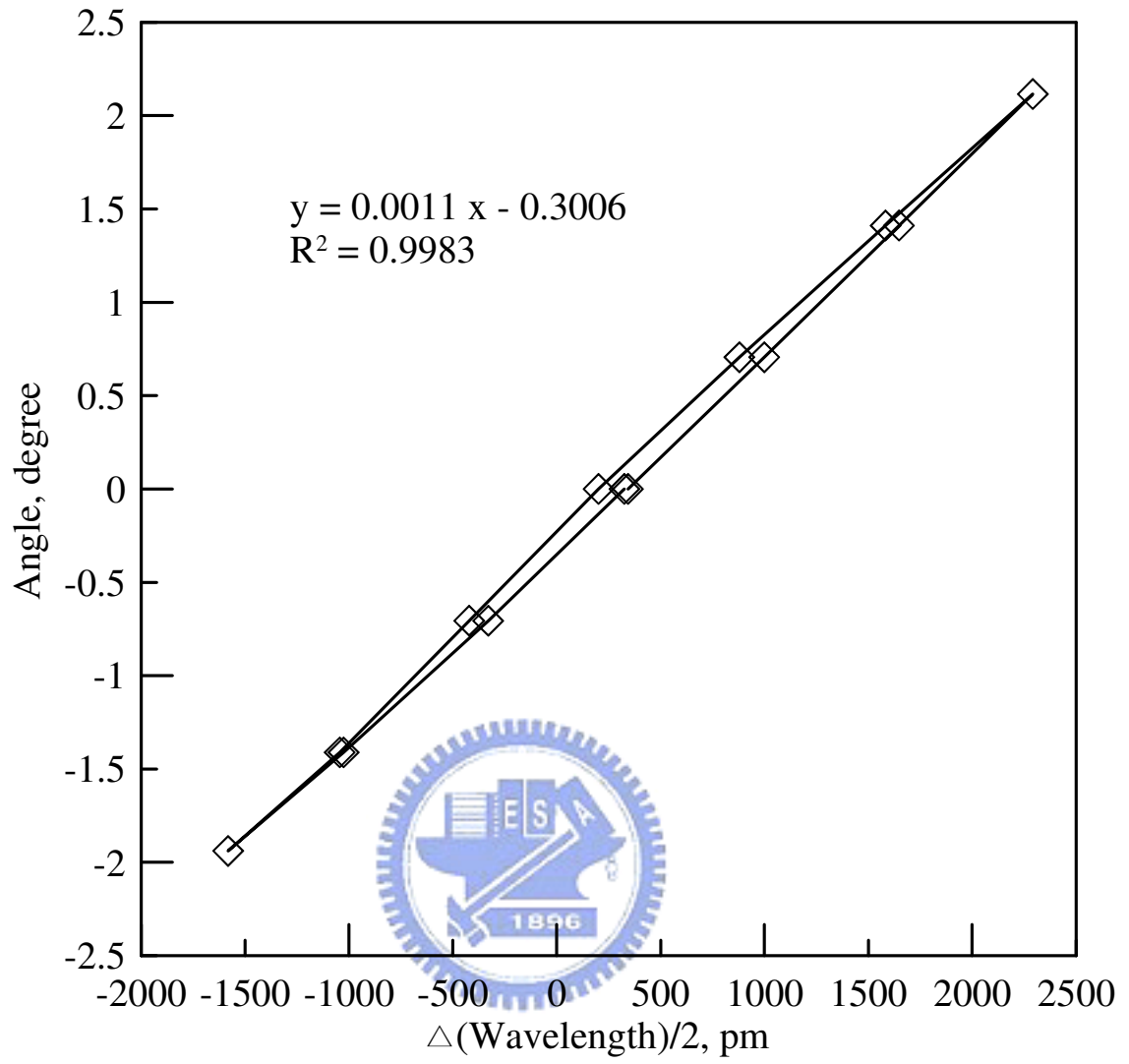


圖 4-13(a) J 初始標定

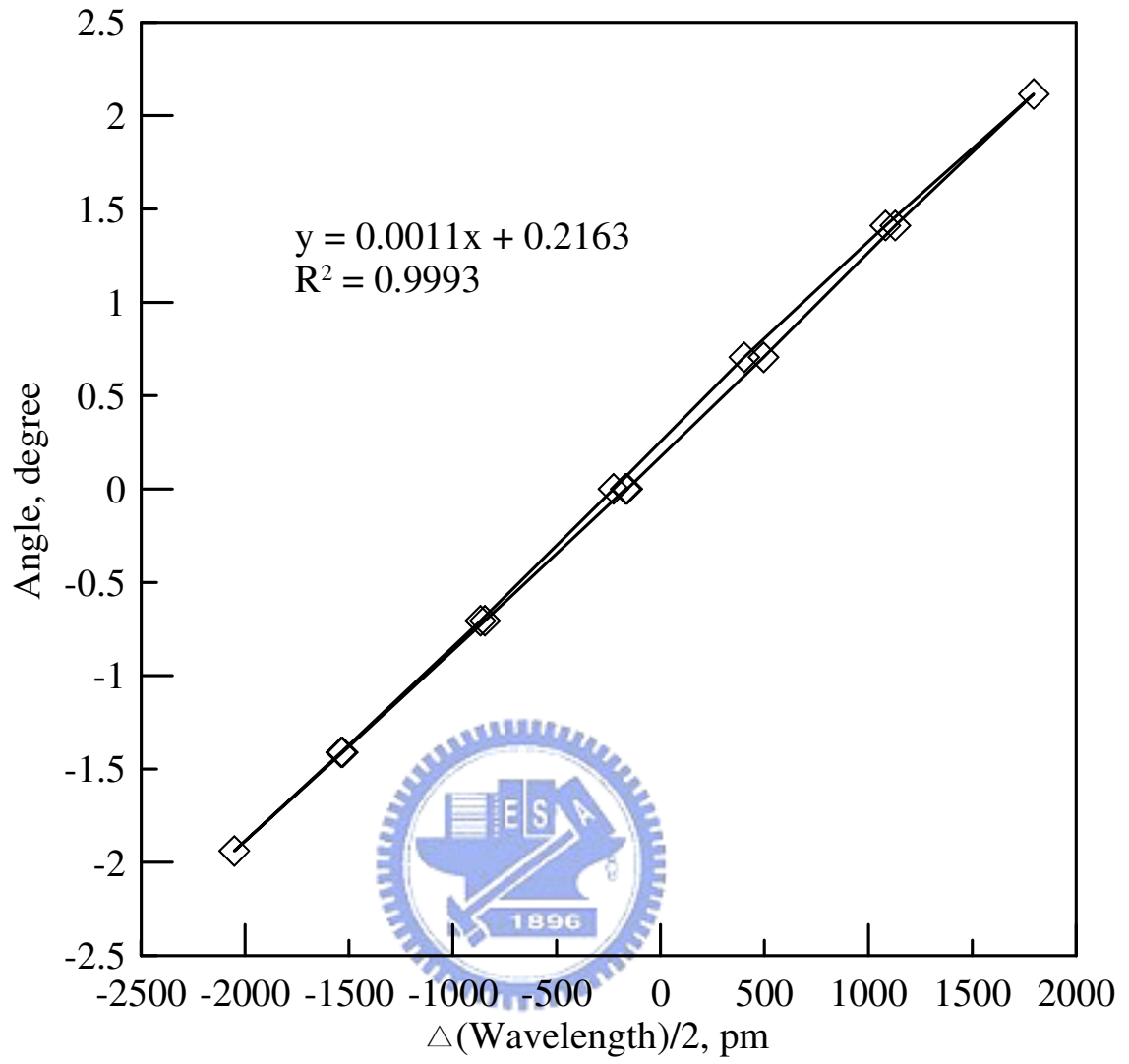


圖 4-13(b) J 一日標定

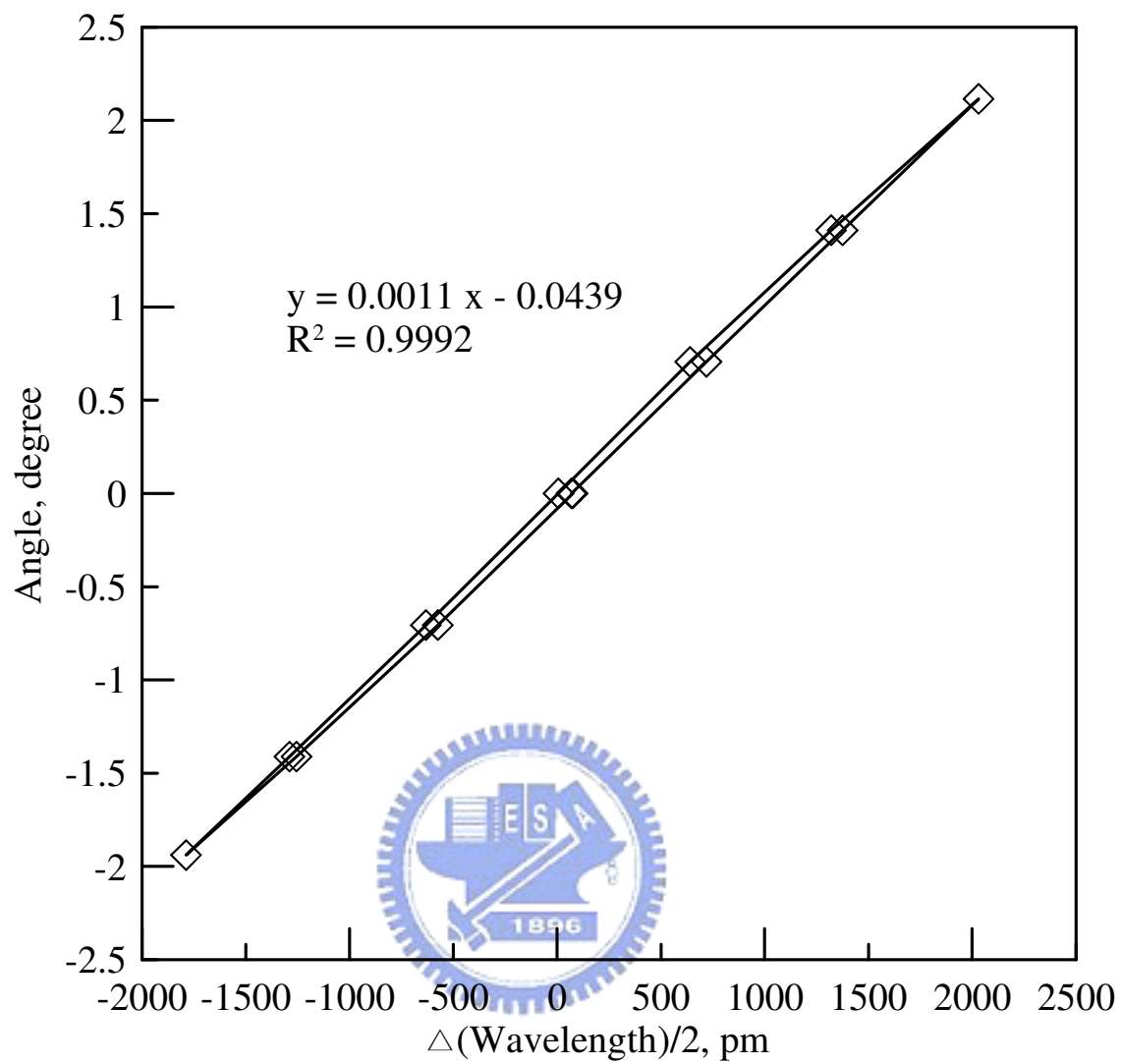


圖 4-13(c) J 二日標定

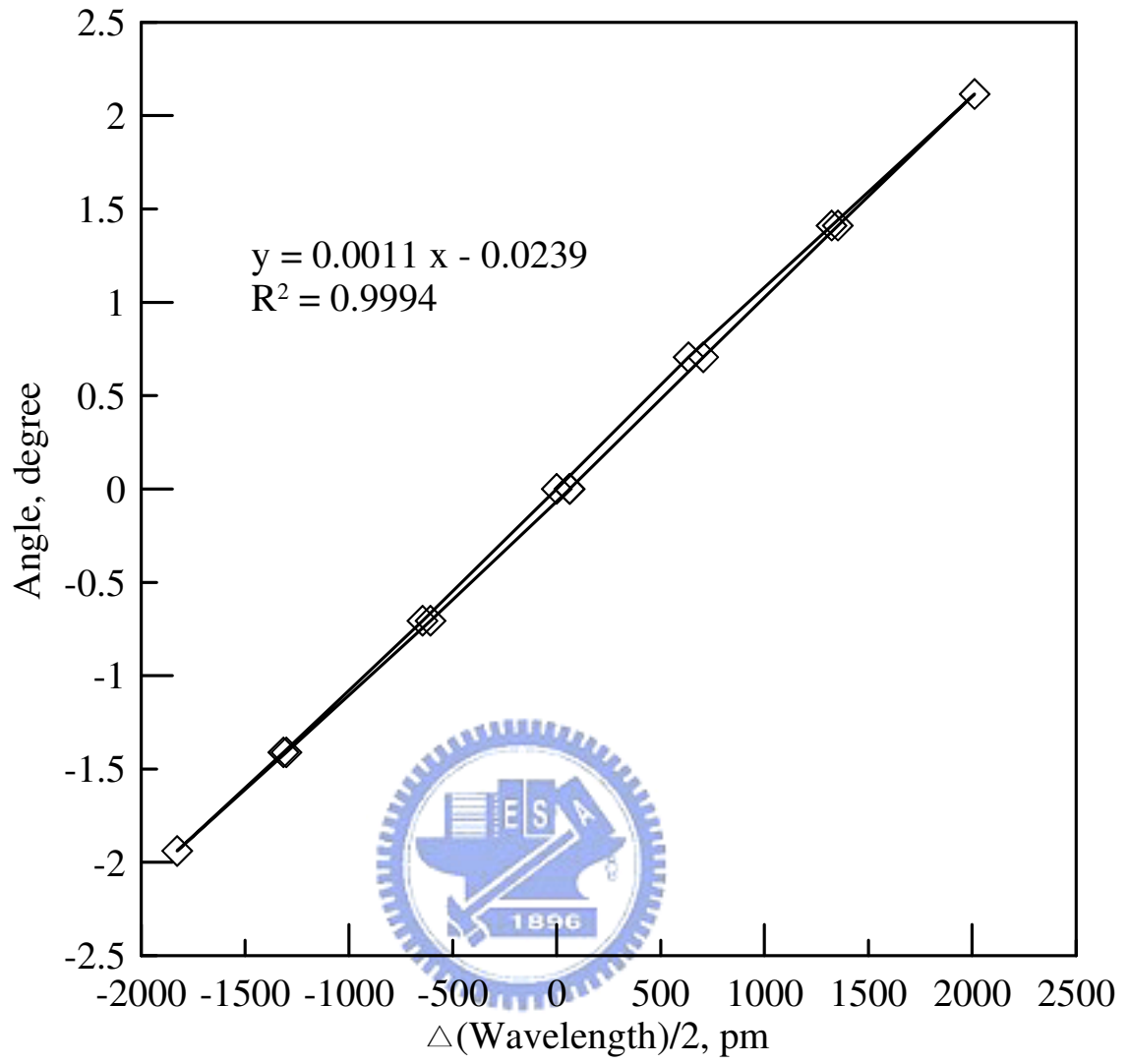


圖 4-13(d) J 四日標定

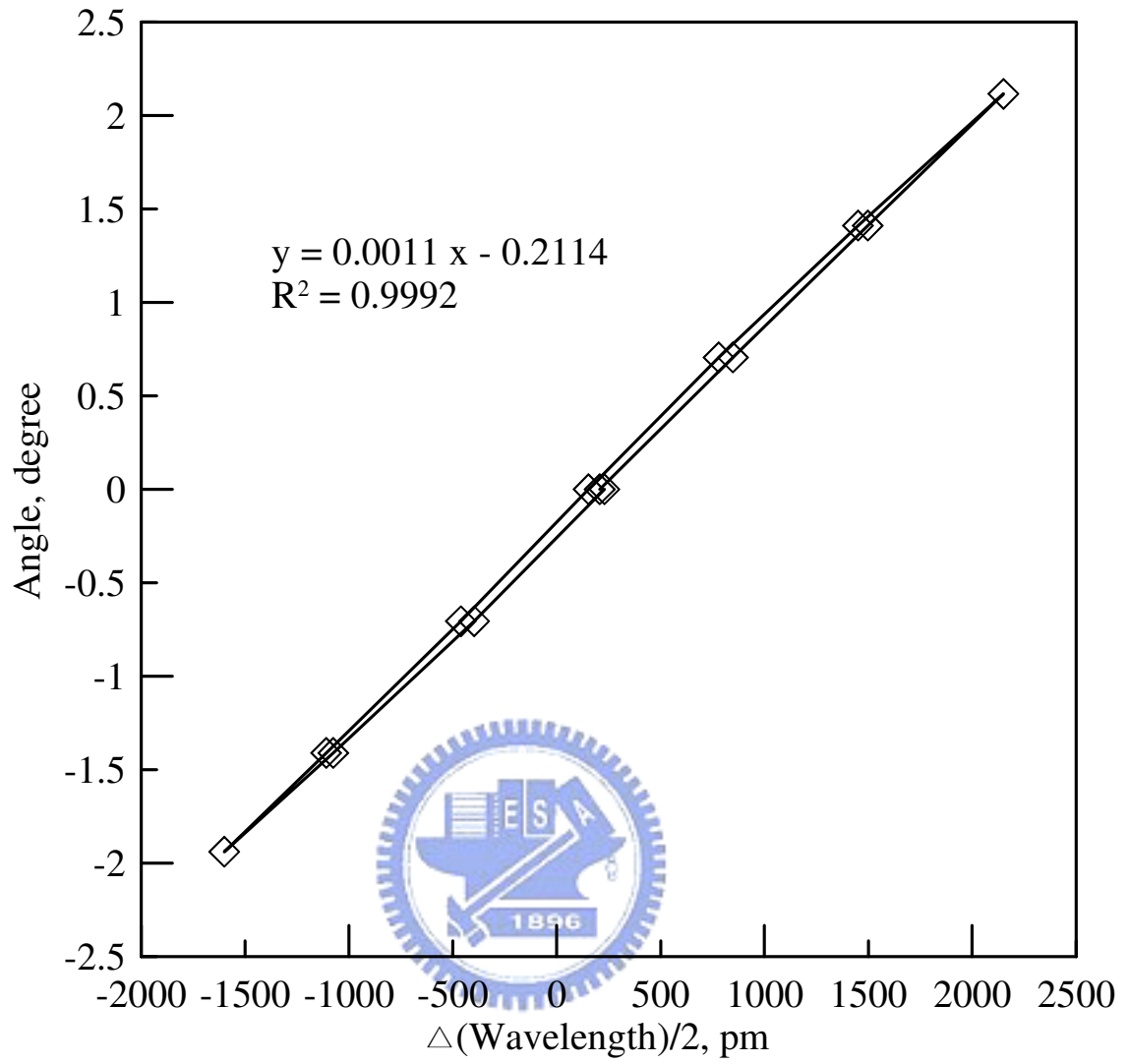


圖 4-13(e) J 七日標定

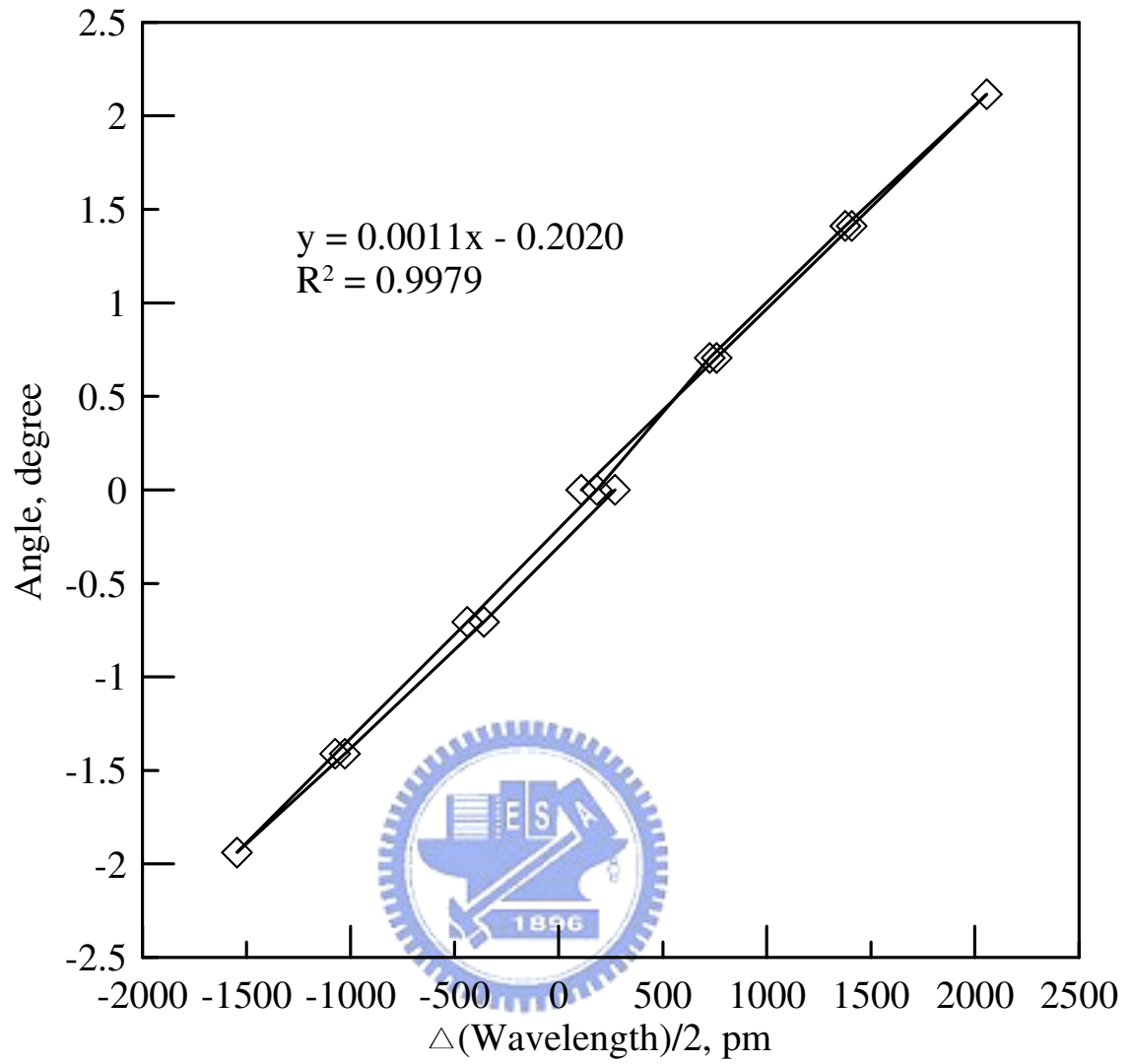


圖 4-13(f) J 十四日標定

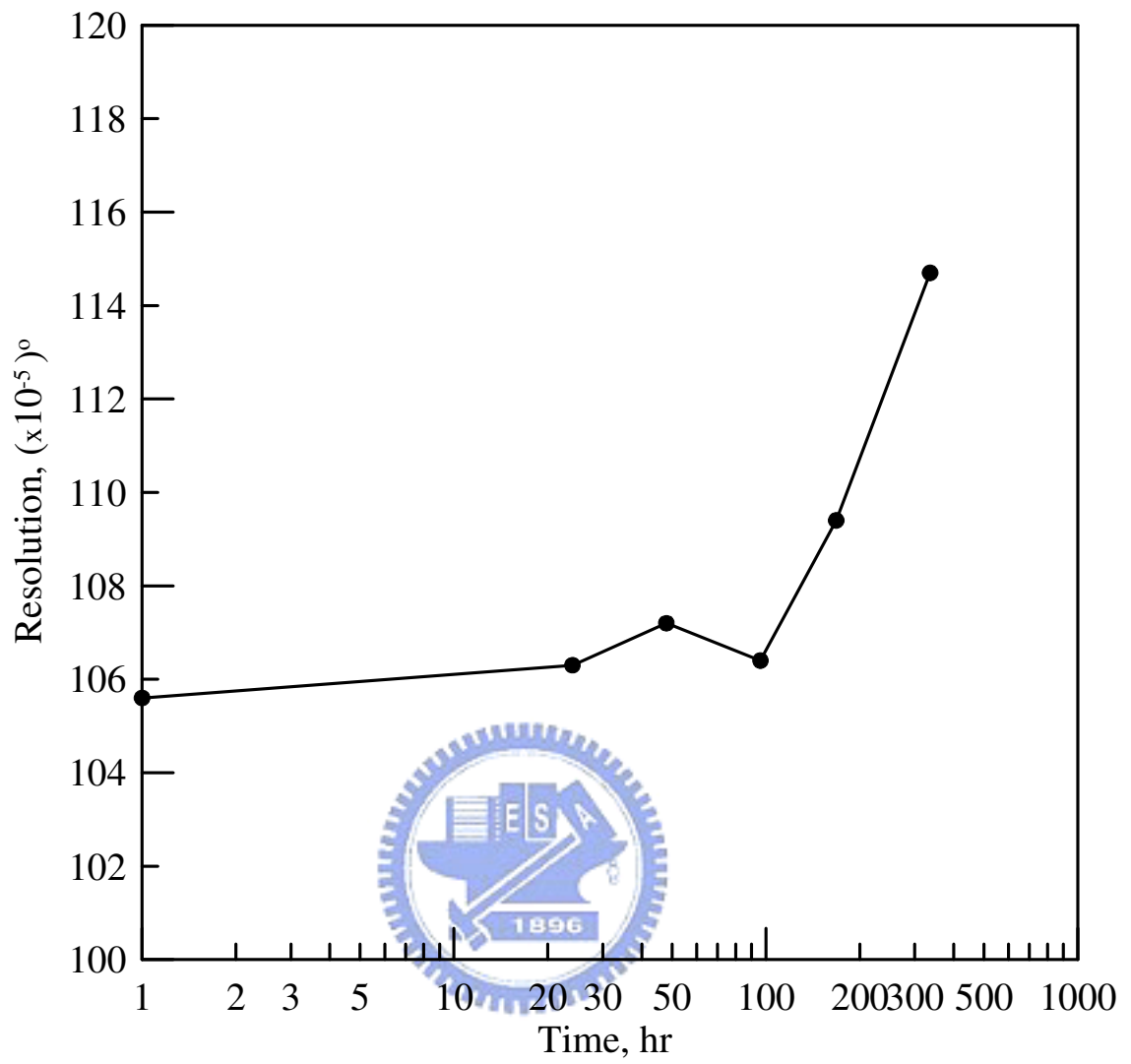


圖 4-13(g) J 解析度變化

第五章 結論與建議

5.1 結論

FBG-SD 從研發到應用已歷時數年，其各部份之材質選定與分析在本研究中得到了成果，更進行了耐久性的相關試驗；關於本研究之結論，如下列陳述：

1. 以基材來說，關於 PC（聚碳酸酯）之試驗與使用至目前為止尚符合 FBG-SD 之需求，其耐溫性、低吸水率與抗酸鹼能力將會對現地監測有所貢獻。
2. 已接著劑來說，經由潛變與老化試驗證明，L 擁有優異之環境抵抗能力，因應之後的現地監測計畫，此接著劑將會是首要選擇。
3. 製程上之新預拉方式加上新黏貼光柵方式，已成功的提高了良率，由以往的六成已經提高至將近八成。
4. 由潛變試驗可得知，預拉量之大小與溫度之高低兩項因素，對接著劑之耐用性有很大的影響；使用在高溫的地方，若降低預拉量，將可提高接著劑之耐用性，更可增加 FBG-SD 之量測範圍。
5. 於潛變試驗發現，雖然潛變發生會導致波長漂移，但卻有逐漸趨於一定值之趨勢；以 L 為例，其趨穩定之潛變量約為 45pm，佔總漂移量（2000pm）的 2.25%，較舊設計之潛變漂移量 5%~10% 來說，相對小了很多。
6. 以實驗室之實測，將以 L 接著之 FBG-SD 成品標定完後，將其靜置於實驗室內直至欲將其拿到現地使用前，再標定一次，其中間隔約兩個禮拜，發現其精度與剛完成時沒有任何差異，故可判斷老化試驗造成之精度降低之量，若將其比對之現實中之時間，應為兩個禮拜之數倍甚至數十倍之多。

5.2 建議

1. 鈦支架與鋁支架若從理論上來探討，可知鈦支架確實有許多鋁支架比不上之優點，但礙於廠商因素，至今尚未有鈦支架成品可供使用，故建議之後若取得成品，將其替換鋁支架並進行標定與物化性試驗，以輔佐理論。
2. 對於基材來說，PC 目前看來是相當不錯之工程塑膠，但其缺點為價格偏高，故尚待改善尋求價格較低但性質較好之基材。
3. 接著劑而言，熱固形接著劑對於 FBG-SD 無法使用是十分令人惋惜之事，因熱固形接著劑大多數皆為環氧樹脂（Epoxy）為主劑，其結構不同於常溫固化型接著劑，為網狀結構物而非鏈狀，結晶度高，其性質安定、抗酸鹼能力、防水性、強度、耐用性皆相當優良；故此處還尚待改善現在之設計，使其能夠使用於 FBG-SD 上，對長期監測會有顯著的幫助。
4. 雖然潛變試驗從圖中發現其漸趨穩定，但由於時間稍嫌過短，致使無法看出其是否確定完全穩定，須待後續將其實驗時間再拉長，才能看出其後續變化。
5. 雖然防水軟膠（AX019）之性能優異，但如何能確保其完全密封住 FBG-SD 之感測器部分，還有待考量；雖然 L 之防水性能優異，但水之氫氧根離子為很強之取代基，長時間接觸難保沒有影響，故尚必須制定一個標準流程來對防水軟膠進行測試。

參考文獻

- 陳致揚, 2001, “光纖光柵扭曲儀之研發”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文.
- 何彥德, 2005, “光纖感測地層內局部變形監測技術之研發與應用”, 國立交通大學土木工程研究所研討會資料.
- 簡旭君, 2002, “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.
- 李瑞廷, 2005, “光纖光柵讀取系統軟體之研發”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文.
- 黃正中, 2005, “節理式光纖光柵感測器之研發”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文.
- 李繼強, 1974, “塑膠配料”, 三民書局股份有限公司出版, 台北市.
- 李繼強, 1982, “塑膠概論”, 三民書局股份有限公司出版, 台北市.
- Brydson, J. A., 1989, “塑膠材料(上)(下)”, 范啟明譯, 大中國圖書公司, 台北市.
- 賴耿陽, 1990, “金屬鈦理論與應用”, 復漢出版社, 台南市.
- Ashby and Jones, 1982, “工程材料學(Engineering Materials)”, 劉錫蘭譯, 科技圖書股份有限公司, 台北市.
- 賴耿陽, 2003, “接著技術與接著劑應用”, 復文書局, 台南市.
- 陳根座, 1994, “膠黏應用手冊”, 電子工業出版社, 北京市.
- 李建儒, 2002, “光纖之破壞分析研究”, 國立東華大學材料科學與工程研究所碩士論文.
- 曾昱璋, 2003, “溫度補償及波長可調光柵之研製及其應用”, 國立台灣科技大學電子工程研究所碩士論文.

李文淵, 2005, “黏貼式光纖光柵頻譜特性之研究”, 國立中正大學機械工程研究所碩士論文.

陳君毅, 1998, “Bragg 光柵光纖感測器在應變量測上的應用”, 國立交通大學土木工程學系專題研究報告.

葉明國, 1994, “聚合物化學”, 新學識文教出版中心, 台北市.

游振宗, 1992, “纖維高分子化學”, 超級科技圖書股份有限公司, 台北市.

沈志輝, 2002, “鈦金屬接著劑製作研究”, 私立元智大學化學工程研究所碩士論文.

李育德, 1996, “聚合物物性”, 高立圖書有限公司, 台北縣.

陳誌偉等人, 2000, “台灣溫泉分析與分類標準化研究”, 台灣溫泉生技中心, 計劃編號:FIT-88-1B-005.

Berghmans, F., 2005, “Reliability of Optical Fibers and Components”, 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, 23-27 May, Bruges, Belgium, Organised by I. D. FOS Research, pp.20-23.

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

Kronenberg, P., et al., 2002, Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings”, Optics Letters 27, p. 1385.

Limberger, H.G., 1999, “Fibre Bragg Grating Component”, Reliability of Optical Fibres and Components: Final Report of COST246, Volotinen, T., Griffioen, W., Gadonna, M. and Limberger, H., pp.326-384, Springer-Verlag, London.

Morey, W. W., Meltz, G. and Glenn, W. H., “Fiber Bragg grating sensors,” in proc. SPIE Fiber Optic & Laser Sensors VII, 1989, Vol. 1169, pp.98.

Nellen, M., et al., 2003, “Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications”, Sensors and Actuators A 103, pp.364-376.

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

Raman, K., 1999, "Fiber Bragg Gratings", Academic Press, 458p., San Diego.

Yacobi, B.G., and Hubert, M., 2003, "Adhesive bonding in photonics assembly and packaging", American Scientific, Stevenson Ranch.

Yu, F. T. S. and Yin, S., 2002, "Fiber Optic Sensors", Marcel Dekker, New York.

