

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

複材內部損傷探測(3/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-002-002-

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：單秋成

計畫參與人員：江家慶，陸本葳，林昭甫

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 1 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☒ 成果報告
☐ 期中進度報告

複材內部損傷探測(3/3)

Investigation of internal damage in composite materials

計畫類別：☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC 92-2212-E-002-175

執行期間：92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

計畫主持人：單秋成

計畫參與人員：江家慶，陸本葳，林昭甫

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☐ 精簡報告 ☒ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年 ☐ 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學機械研究所

中 華 民 國 93 年 10 月 5 日

摘要

複合材料具有質輕、比强度高、耐酸鹼腐蝕、耐疲勞負載等優點，其中纖維積層板複材(fiber laminar composites)因其疊層具有方向性，可應不同使用需求作彈性設計，有其特殊的實用價值，因此受到廣泛地研究。

在使用過程中，當複合材料受到衝擊及循環負載時，材料內部便會開始產生微損傷，這些損傷在表面無法以肉眼看出，但卻已使材料的機械性質減損，且可成為進一步損傷破壞之誘導因子，在長期受外力作用後，將導致損傷大規模擴展，並可能造成突發且災難性的破壞！因此，如何精確掌握複材料使用之損傷發展，是判斷材料是否仍可繼續使用之重要依據，對於提高材料使用的安全性相當重要。

目前對於複材損傷的掌握，經過多年的發展，仍大體停留在間接且定性的偵測方法上：如勁度遞減，超音波掃描、X-ray 照相、電子光斑等，對複材內部損傷的觀察，多有無法直接接觸到缺陷及無法作線上即時量測的限制。另一方面，光纖因徑細質輕，將其埋入材料之中，進行材料內部應變、應力分析，這對於突破上述傳統量測技術的限制，有相當大的潛力！光纖又具有多點量測、即時反應、耐高溫、不受電磁場干擾...等優點，目前國外已有將光纖埋入機身各部，形成可即時監控的智慧型結構，以增加航空器飛行的安全。

綜合以上所述，本計畫擬深入探討複材內部因衝擊及疲勞負載所造成的損傷機制，期能突破傳統對於損傷間接、定性的觀察，進而得到更具實用價值的定量分析。目前已初步搜集瞭解國內外對於光纖感測器應用的發展進況，並擬著手建立一套實用的光纖即時感測系統，進行複材內部應變分析及損傷探討，建立複材損傷之預測模式。這幾個研究主題將涵蓋：(1)光纖本身的機械性質以及不同疊層含光纖之複材的機械性質的探討；(2) 鑲埋光纖感測器之方法；(3)光纖光柵訊號量測系統之建立與發展；(4)光纖光柵波長或頻譜與複合材料內部缺陷發展的關連性，藉此建立複材內部損傷的即時監測系統，以提昇複合材料在使用上的可靠度，並希望對進一步對智慧型材料/結構之應用有所幫助。

關鍵詞：碳纖維/環氧樹脂複合材料，光纖光柵感測器，智慧型材料/結構，複合材料內部缺陷偵測，脫層，基材裂縫。

Abstract

Polymeric based composite materials have better specific stiffness/strength, corrosion resistance, and most importantly, their directional properties may be tailor made. They are however prone to develop caused by tool drop, bird-strike, hailstorm and so on. Cyclic loading during service may induce sub-surface defects. These insidious defects may grow during service and eventually lead to catastrophic failures. If on-line monitoring of the emergence and development of these defects is possible, the safety and reliability of composite structure may be much improved.

Although the detection and examination of internal defects has been under investigation for many years, the available techniques such as X-ray radiography, ultrasonic scan, modulus degradation etc still have many serious limitations. Of these the most important limit is that observation is only indirect and difficult to be applied to on-line real time monitoring. On the other hand, optical fiber sensors can give real-time response, free of electro-magnetic interference, high temperature resistant and is capable of multi-point measurement on the same fiber. Optical fiber has a small diameter and may be embedded inside a composite material and literally come into contact or at least into very close proximity of the internal defects.

This project proposes to develop an optical fiber grating sensor. Related techniques about deriving strain signal from single and multiple gratings, embedding the sensor into a thermosetting and a thermoplastic resin based composites, establishing the method of interpretation of FBG signal in the face of internal damages resulted from impact and fatigue damages will be developed. It is hoped that through this development, the safety and reliability of composite structure can be greatly improved.

Keywords : , polymeric composite, Fiber Optic sensor, Fiber Bragg grating, internal defects, delamination, matrix cracking.

目錄

1	研究動機	1
2	文獻資料回顧	2
2.1	複合材料受衝擊及疲勞後的損傷探討	2
2.2	複材內部損傷之觀察及量測	3
2.3	光纖感測器的發展	4
2.4	光纖光柵感測器	6
3	實驗方法	9
3.1	光纖拉伸強度測試	9
3.2	鑲埋光纖對複合材料強度影響測試	9
3.3	複合材料內部損傷偵測實驗	9
4	結果與討論	10
4.1	不同剝纖衣方法及保護裸光纖方式對光纖強度之影響比較	10
4.2	埋入光纖對複材層板強度影響	10
4.3	複材層板預埋光纖	11
4.4	光纖感測器訊號量測系統之建立	11
4.5	多點感測方法之建立	12
4.6	利用內埋光纖光柵感測器偵測複合材料之內部損傷。	12
4.6.1	不同層間埋設 FBG 感測器以偵測複材損傷之形式與成長機構	12
4.6.2	同一層平行等距埋設多個 FBG 感測器以偵測複材損傷之成長	13
5	結論	15
6	本計劃自評	15
7	參考文獻	16

1 研究動機

複合材料具有質輕、比强度高、耐酸鹼腐蝕、耐疲勞負載等優點，是繼傳統金屬材料以來，應用最廣的材料之一，其應用範圍包括土木工程、海洋工程、民生工業、航太工程、飛機蒙皮、交通工具...等。其中纖維積層板複材(fiber laminar composites)因其疊層具有方向性，可應不同使用需求作彈性設計，有其特殊的實用價值，因此受到廣泛地研究。

在使用過程中，當複合材料受到衝擊時，材料內部便會開始產生微損傷，這些損傷在表面無法以肉眼看出，但卻已使材料的機械性質減損，且可成為進一步損傷破壞之誘導因子，在長期受外力作用後，將導致損傷大規模擴展，並可能造成突發且災難性的破壞！因此，如何精確掌握複材料使用之損傷發展，對於提高材料使用的安全性相當重要。

由於複合材料領域的發展已漸趨成熟，不但已掌握製程技術，各種疊層的特性探討也有許多完整的研究成果，因此，近來複合材料的研究，已有朝向智慧型材料發展的趨勢。而光纖感測器由於具有多點量測、即時反應、細徑質輕、不受電磁場干擾...等優點，目前已有許多應用於航太結構中的研究成果，將光纖埋入機身各部，形成可即時監控的智慧型結構，以增加航空器飛行的安全。

對於複材損傷的掌握，間接的方法有以勁度遞減的方法，推論材料內部損傷發展；直接的方法有以各種超音波掃描、X-ray 照相、掃描式電子顯微鏡、電子光斑等，對複材的損傷進行觀察，但這些方法各有優點，但也都有其使用上或功能上的限制，因此，利用光纖的細質輕、多點量測之優點，將其埋入材料之中，進行材料內部應變、應力分析，這對於突破傳統量測技術只能作間接與定性檢測的限制，有相當大的潛力！藉此項新興的技術，可以進行複合材料內部損傷的探討，以及複材積層板內部應變分佈分析。

綜合以上所述，本計畫將深入探討複材內部因衝擊及疲勞負載所造成的損傷機制，預期能突破傳統對於損傷定性的觀察，進而得到更具實用價值的定量分析。目前已初步搜集瞭解國內外對於光纖感測器應用的發展進況，並擬著手建立一套實用的光纖即時感測系統，進行複材內部應變分析及損傷探討，建立複材損傷之預測模式。這幾個研究主題將涵蓋：(1)光纖本身的機械性質以及不同疊層含光纖之複材的機械性質的探討；(2) 鑲埋光纖感測器之方法；(3)光纖光柵訊號量測系統之建立與發展；(4)光纖光柵波長或頻譜與複合材料內部缺陷發展的關連性，藉此建立複材內部損傷的即時監測系統，以提昇複合材料在使用上的可靠度，並希望對進一步對智慧型材料/結構之應用有所幫助。

2 文獻資料回顧

2.1 複合材料受衝擊及疲勞後的損傷探討

衝擊是複合材料使用時最需注意的問題之一，尤其是做為飛機蒙皮之複合材料，經常會受到飛鳥、碎石、工具掉落等衝擊而在內部產生微損傷，這些損傷雖然無法從肉眼看出，且無立即明顯的機械性能降低，但經長期動態使用後，往往因損傷累積而造成突發而劇烈的結構破壞！

一般積層板複材受衝擊的損傷特性包括基材損傷：基材破壞、纖維破壞和界面破壞等[1]。在高速衝擊時的破壞情形主要是貫穿導致纖維斷裂，而在低速衝擊時，主要是樹脂破裂並伴隨脫層現象。試片在整個衝擊過程中的變化為：當撞頭碰到試片之同時，試片之受力面產生彎曲並造成挫曲，而內部並隨脫層，試片的另一面則受張力而造成拉伸破壞[2]。1983年，Ramkumar[3]指出一般積層板複材在低速衝擊後疲勞之損傷模式主要為脫層成長，而不同的損傷模式之衝擊能量吸收取決於負載型式，一般說來，基材或界面損傷所需的衝擊能量低於纖維斷裂所需的衝擊能量。

複合材料組成特性對衝擊的反應有不同的影響，例如，1991年Cantwell[4]在其研究報告中提到連續性纖維複材較具抗衝擊性，而在低速衝擊時，纖維具儲存衝擊能量功能。而1989年Hong[5]則提到基材衝擊損傷後，造成脫層而使複材承受負載能力下降50%以上。在界面的影響方面，纖維表面處理對耐衝擊和殘餘強度有重要影響，Cantwell[4]指出經較高程度氧化處理的纖維複材受衝擊時，局部損傷程度較小，且可增加橫向破壞應力，而使損傷由基材內部產生，可以吸收更多衝擊能量。

另一方面，複材的疊層順序、厚度及幾何形狀也都對衝擊有很大的影響，研究中發現，單向複材之耐衝擊性較低，而具 $\pm 45^\circ$ 疊層的複材則具優越的耐衝擊性[4]。1988年Liu[6]針對不同複材預測其可能脫層的位置，研究結果顯示多角度複材之脫層最可能發生在界面處，尤其在彎曲剛性差異(bending stiffness mismatch)最大處，如 $\pm 45^\circ$ 層間即屬此類。因此，脫層的起始最容易發生在積層中纖維方向變化最大之處。而厚度的影響上，Cantwell[7]於1988年指出排列相同的積層板中，疊層較薄的材料對脫層較為敏感，且衝擊損傷在下層開始；而較厚的複材的起始破壞在上層。

複材的疲勞損傷成長與金屬大不相同，一般金屬材料為單一裂縫成長導致材料橫斷面積減少，當材料超過其強度極限即破壞，但複合材料卻為多重裂縫之生成、成長與增加，裂縫之起始發生在最弱層，然後裂縫數增加，隨著疲勞過程，裂縫發生在下一個最弱層處，不同層之裂縫連結而導致脫層，最後材料破壞。

由於脫層是複材最重要的損傷機制之一，其影響複材使用安全甚巨，是判斷材料是否仍可繼續使用之重要依據，而其成因包括：製程不良、靜態或動態使用等。一般材料內部之脫層無法由表面看出，1998 年 N. H. Tai, M. C. Yip and J. L. Lin[8]提出一系列有關衝擊能量大小與脫層面積之關係，以及衝擊後疲勞之脫層成長情形，研究結果顯示脫層面積隨衝擊能量增加而增加，而脫層亦隨疲勞負載而明顯成長，此外，低能量衝擊後的殘餘靜態強度並沒有明顯下降，但其疲勞殘餘強度則明顯衰減。其研究利用 SEM 觀察衝擊損傷情形，發現衝擊對不同積層也會產生不同的損傷模式，在不同層間之破壞形態有不同的特徵。1999 年 N. H. Tai [9] 等人再次針對厚度對衝擊前後的疲勞行為的影響提出詳細的描述。而 Noriyuki[10]則以實驗的方法，利用三點彎曲測試測量積層板複材的層間剪強度(interlaminar shearing strength)，藉此預測衝擊損傷程度。同年，Palozotto[11]則以有限元素法分析低能量衝擊對三明治板(sandwich plates)複合材料的影響。2000 年，仍陸續有學者利用有限元素法分析或預測複合材料受低能量衝擊後的損傷或殘餘強度[12, 13, 14]。而 Aymerich[15]則是以超音波檢測複材的衝擊損傷，其結果並與 X-ray 做比較。

以上所提到的許多研究，對於衝擊對複材的影響，提供了明顯的輪廓，但多僅止於定性的探討，而以理論數值分析的方法預測或分析複材的衝擊性質，則一方面很難有直接的證據證明其假設正確與否，且其結論也難以普遍適用於其它不同疊層之複材。因此，如何得到一個定量的衝擊損傷研究，且可普及於諸多積層板複材，將是未來一項重要的課題。再者，若能進一步即時藉掌握脫層之生成與成長，而開發成智慧型材料，那麼複合材料的應用將向前跨躍一大步。

2.2 複材內部損傷之觀察及量測

有關複材內部損傷之觀察及量測的技術很多，包括：

1. 超音波 C-Scan，有許多學者深入研究超音波掃描複材脫層的方法[12]，但仍有其侷限，C-Scan 掃描複材之脫層可供大約地描述通過整個厚度的脫層疊合面積，但對於各不同深度層間(interface)的脫層面積及位置則難以精確判斷，另一方面，超音波 C-Scan 一般需將試片浸在水中進行，而且掃描費時，難以作連續、線上監測。
2. 掃描式電子顯微鏡(SEM) 則可觀察破斷面，但檢測過程必須先破壞試片，無法在整個實驗過程中作持續的觀察，不利於損傷的成因探討及監測。
3. X-ray 照相亦能大概描述通過整個厚度的脫層疊合面積，但對於各不同深度的脫層面積及位置則無法判斷，另一方面，複材 X-ray 照相需以能吸收 X-ray 之化學溶液充份滲透到內部缺陷區域，對未連通到外面的內部缺陷無法應用，故通常只在試片破壞後進行，不利於損傷的成因探討及監測。
4. 電子斑點干涉術(ESPI)進行複合材料的非破壞性檢測，藉以瞭解複合材料內部脫層缺陷的位置及形狀大小[16,17]，其原理為利用內部缺陷影響外表面變形，進而形成表面反射光產生不同之干涉圖形，因此對各不同深度的脫層面積及確實位置不容易判斷。
5. 勁度遞減(Modulus degradation)為間接但相當常用的方法 [18, 19]，在一定程度反映內部破壞的發展，但無法得知缺陷之實質情況。

2.3 光纖感測器的發展

由於光纖具有徑細質輕，訊息在其中傳遞，有高頻寬、不受電磁場干擾、同一光纖多點量測等優點，光纖通訊目前已廣泛應用於航太、醫學、化學...等各領域，至於工程量測，也有嘗試在航太結構的研究，嘗試將光纖埋入機身各部，形成可即時監控的智慧型結構，以增加航空器飛行的安全。或是將光纖鑲埋在橋樑及建築結構體中，作為即時的安全監控系統。

光纖感測器的基本原理乃是利用光纖做光訊號的傳輸介質，光源所產生的光波經由光纖導引至待測區，待測區環境的變化將造成光波特性的變化，分析光波特性的改變即可得到受

測物之物理量變化。一般而言，光纖感測器可分為本質型(intrinsic)和非本質型(extrinsic)兩種。所謂本質型感測是指光波未離開光纖，而由外在環境的改變直接造成光纖內部光波特性的改變；而非本質型感測之光波被導引至待測區後，離開光纖而被外在環境調制後再耦合進入原來或另一光纖。光纖感測器常用的調變方式可分為：光強度調變、光相位調變、光波長(頻率)調變及光偏極化調變等方式，這些調變方式可單獨或交互應用。

光纖感測器幾乎可以感測所有傳統感測器所能感測的物理量，諸如溫度、壓力、應力、位移、電壓、電流、磁場、轉矩、轉動率、加速度、液高、流速、聲音、輻射量...等，又因具有多項傳統感測器所不可及的優點，因此可望逐漸取代很多傳統感測器，而成為未來感測器的主流。

早期的光纖感測器，以光通過感測區後的相位或強度的改變，來感測受測環境參數改變量，這種方式簡單而方便，但缺點是光的強度很容易因連接點而損失，必須以參考光源校正。另外，也有將一束光分離經過兩條長度相近的光纖，而後再將兩束光結合，其中一條為參考光纖，另一條光纖經過待測物後會改變光的速度或路徑，造成兩光束的光程差而產生干涉，利用此一原理來感測受測物區的物理量，可精密地測量微小的變形(deformation)。但這種方法的缺點是，由於整條光纖都相當於是感測器，因此，會有許多非感測區所產生的訊號，造成量測的誤差，而且無法做到微小區域的量測。

光纖感測器較成熟的應用自 1990 年代開始，1990 年 Mathews 和 Sirkis[20]以光纖干涉儀的方法量測材料，並以有限元素法解決因光纖存在而造成部份區域的應力狀態的改變。而 Sirkis 和 Dasgupta 等人[21]則發表一連串有關光纖在複合材料智慧系統上的研究，其主要內容包括建立埋入式光纖感應器之相位與應變關係、披覆材料的最佳化、微感測器對複合材料的靜態、動態負載的影響等。同年，Measures[22]分別就飛機機翼埋入光纖探傷系統、Fabry-Perot 光纖干涉儀之應變進行研究，並將光纖感測器埋入複合材料中，測試音洩訊號。

近年來，由於光纖光柵(FBG)的研發，利用光纖光柵做為感測器成為更實用且高精密度的量測方式，它是利用光波長調變，具有可單點、多點同時量測，以及單一光纖多參數同時量測的優點，尤其配合 WDM 的研發成熟，使其功能更具彈性及多樣化，是目前最熱門的光纖感測器之一。

2.4 光纖光柵感測器

光纖光柵(FBG)之發展始於 1978 年，K. O. Hill [23]在利用氬離子雷射光耦合入光纖時，因量測駐波造成之相位光柵所發現。而直到 1989 年，Meltz 利用兩道同調紫外光($\lambda \sim 240\text{nm}$)，在光感含鍍光纖上以干涉方式側寫(side-writing)製成 FBG[24]，使 FBG 進入實際應用階段。

光纖光柵(FBG)的製作，乃是利用紫外光雷射經過相位光罩(Phase Mask)後，產生干涉投射到光纖上，使光纖核心(Core)折射率產生週期性的變化，而形成光柵結構，即所謂的光纖光柵。

光纖光柵的反射率及透射率是由紫外光雷射的曝光量來控制。當多波長光源進入光纖，經過光柵結構時，特定波長的光會反射，其餘波長的光則穿過光柵，以達到特定波長濾波的功能。

經 FBGs 過濾的波長(λ_b)稱為布拉格波長(Bragg Wavelength)與 Grating Pitch(Λ)之關係為：

$$\lambda_b = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

上式之 n_e 為平均折射率(Average Refractive Index)。當光纖光柵的溫度改變或產生應變時， λ_b 即隨生 n_e 及 Λ 之漂移(Shift) 而變化。換言之， λ_b / λ_b 為光纖溫度(T)及應變(ε) 的函數：

$$\lambda_b / \lambda_b = F(T, \varepsilon) \quad (2)$$

因此，在溫度變化可忽略的情況下，或是經過適當的溫度校正之後，只要量得波長的漂移量，便可得到光纖感受到的應變量。而以 FBGs 量測材料應變時， 1μ 的應變(ε)大約相當於 1pm 的波長變化。

與傳統電子應變計相較，FBG 感應器有以下幾項優點：(1)較不受電磁效應，適於嚴格的環境要求，如核電廠[25]。(2)細徑質輕，適宜埋入複合材料，可進行材料內部結構監測與分析，是電子應變計所無法做到的。(3)抗腐蝕，適於深海工程及化學腐蝕環境。(4)耐高溫，一般電子應變計無法在高溫中進行。(5)使用壽命長，適於對長期監測材料。自 1990 年 Dunphy[26]

首次將 FBG 感應器埋入環氧樹脂複合材料的應用以來，FBG 感應器之最大的優勢及特色，便是其易於直接深入材料中，進行諸多材料內部的應力、應變分析或使用監測，這點對於探討複合材料內部損傷機制，以及複合材料構件完整性分析與監測，應可有很大的貢獻。

近年來，由於 FBG 已逐漸廣泛應用於航太工程、土木結構、醫學工程、化學等領域[27]。在鑲埋式 FBGs 感測器方面，初期研究對光纖鑲埋於複材內部的可行性評估與機械性質的探討[28,29]，而目前已能成功地利用 FBGs 感測器鑲埋於複材中進行內部應變量測[30,31]。近來，更使複材的演進由早期的追求高比強度，發展為具感應及反應功能的智慧型材料或結構，藉由埋於結構內之感測偵測周圍環境如溫度、應力、應變，並能作出適當反應，保護結構免於受損，或調整結構至最佳使用狀態 [32-34]。

然有關內埋光纖感測器對複材內部損傷監測之研究，目前多停留在「想當然」之描述，有進行實際量測工作者，其結果往往僅止於示範其可行性，對於深入掌握量測到之頻譜訊號與破壞之關連的研究，目前仍甚為缺乏，本計劃即擬填補此一缺口。

雖然光纖有細徑質輕的優點，然而當較多光纖埋入複材內部，或者光纖所鑲埋之位置在某些疊層間時，其對複材機械性質的影響仍需加以釐清。1995 年 Carman[28]提出有關複材鑲埋光纖後機械性質的研究報告，文中指出：埋入之光纖若不適當，例如埋在非 0^0 層的光纖將造成局部扭曲及樹脂區域集中現象，這點對薄試片尤為明顯，但在受拉伸負載時，影響較小。而光纖埋入方向與負載方向垂直以及當試片受壓縮負載時影響較大。另外，該文亦提到埋入光纖之體積容率對複材彈性模數的影響，這對智慧型材料中的光纖網狀佈置非常重要。

1996 年 Mall[35]提出一系列 Gr/Epoxy 積層複材鑲埋光纖後的機械性質實驗結果，其研究選擇 0^0 、 90^0 、 $\pm 45^0$ 等疊層之 30 層積層板，鑲埋之光纖直徑為 $125\mu\text{m}$ 、 $240\mu\text{m}$ 兩種，實驗方法是將兩種直徑的光纖分別以不同排列方向及位置，埋入 2~3 根於積層板中，測量其壓力強度減損的程度，並觀察不同組合之試片的受壓破壞模式，結果顯示：(1)光纖與纖維強化方向平行：無明顯的壓力衰減。(2)光纖與強化方向垂直：(i) $240\mu\text{m}$ 光纖：壓力強度衰減 20~27%。(ii) $125\mu\text{m}$ 光纖：不論是否置於對稱或不對稱處，皆無明顯衰減。(3)材料損傷觀察：(i) 光纖與纖維強化方向平行：無明顯破壞特徵。(ii) 光纖與纖維強化方向垂直：微裂縫起始於基材集中處，然後產生光纖與基材的脫鍵，最後造成補強纖維挫曲。然而，本研究只提供埋入光纖後對複合材料壓應力衰減的影響，並無法提供完整的衰減造成因素的影響。

複材在長期動態使用時，其內部損傷逐漸累積，當其損傷到達疲勞壽命極限時，材料可

能發生突發性的破壞！因此即時監測材料的動態負載，對於其使用安全相當重要。1996 年 Liu[36]利用 FBG 感測器貼於 Gr/Epoxy 積層板複材表面，進行材料的靜態及動態負載量測，文中指出 FBG 光譜圖為疲勞週次數(fatigue cycles)的函數。然而，上文指出 FBG 光譜的變化乃是因為材料受疲勞負載後，FBG 感測器與材料表面脫層所致，如果這是正確的，那麼此量測方式顯然並非穩定可靠的量測系統，因為當 FBG 感測器之脫層與複材表面嚴重脫層時，由 FBG 感測器所得的光譜圖便失去意義，因此，如果能將 FBG 感測器鑲埋於材料之中，將可改善此一問題。

在複材損傷探討的應用方面，因複材的損傷機制遠比金屬複雜，而複材的損傷多半是由內部所產生，有別於一般金屬是由表面裂紋成長，因此不易從肉眼檢測出來，嚴重影響材料使用的安全。因此若能藉由鑲埋式光纖感測器，觀察材料內部損傷機制，將有助於材料使用安全的提高。Nobuo[37] 及 Hiroaki [38]分別於 1999、2000 年先後提出利用光纖感測器量測積層板複材之基材橫向微裂縫的方法，藉光強度變化分析複材微裂縫密度成長；或利用光譜圖之光譜變化，分析複材微裂縫密度。

綜合以上之探討，複合材料之基礎應用與發展已相當成熟，然而，在其使用安全方面，始終無法像傳統金屬材料那麼令人信任，原因便在於複合材料的損傷機制複雜，影響其損傷的因素繁多，因而，除了設計更多的實驗建立有效的複合材料資料庫，或更精確的數值分析外，人們寧可希望能有直接可靠的使用監測系統，確保其動態使用的安全，因此帶動了智慧型材料的發展。可喜的是近年來光電的發展突飛猛進，而光纖的應用更是日新又新，吾人藉由光纖感測器的獨特優異性質，即將解決前述複合材料使用的安全問題。此外，光纖感測器也能突破一些傳統量測技術的限制，進而有助於釐清原本難解的問題。本計畫將開發一套適於量測複材內部損傷的光纖光柵即時感測系統，解決當前複材損傷機制偵測的問題，期能有助於先進的智慧型材料的發展。本計劃主要有下列方向：

建立在複材層板預埋光纖感測器之方法。

1. 製程對光纖及埋入光纖之複材層板機械性質的影響探討。
2. 測試系統之建立，包括光纖感測器應變訊號調變及解調之儀器系統。
3. 多點感測方法之建立。

4. 利用內埋光纖光柵感測器偵測複合材料之內部損傷。

3 實驗方法

3.1 光纖拉伸強度測試

光纖試片：參考 ASTM D3379-75 將裸光纖製成試片，試片共分四組：(1)裸光纖置於 RH=65%實驗室。(2)裸光纖置於 RH=30%之乾燥箱。(3)裸光纖經 2%Silane 塗層後置於 RH=65%實驗室。(4)裸光纖經 4%Silane 塗層後置於 RH=65%實驗室。每組測試 20 根試片，試片置放時間均為一天。本實驗所使用之 Silane 為 3-Glycid -oxy-propyl-tri-methoxy- silane，能與 Epoxy 產生良好的鍵結。

光纖試片靜態拉伸測試是以具 5kg load cell 的 Instron 材料試驗機，，拉伸速率為：3mm/min。

3.2 鑲埋光纖對複合材料強度影響測試

參考 ASTM D3039 以 MTS810 進行鑲埋光纖複材試片的靜態拉伸強度測試，拉伸速率為 3mm/min。

試片規格參考 ASTM D3039，分別以平行及垂直強化纖維方向，將裸光纖鑲埋入 Graphite/Epoxy 複材的中間對稱層，製成兩組試片，每組試片各有四層及六層兩種規格。光纖鑲埋位置在對稱層中間。試片分八組：(1)[0⁰]₄，內埋 3 根裸光纖(2) [90⁰]₄，內埋 3 根裸光纖(3) [0⁰]₆，內埋 3 根裸光纖(4) [90⁰]₆，內埋 3 根裸光纖。以上四組所埋入之光纖方向皆與拉力方向平行，其餘四組比照前四組，但未埋入光纖。每組測試 7 根試片，記錄測試結果。

3.3 複合材料內部損傷偵測實驗

Graphite/Epoxy 採取 [0/45/90/-45]_{2S} 疊層，光纖光柵鑲埋在不同疊層之間，有關鑲埋之品質，利用光學顯微鏡檢驗，找到較佳的鑲埋方向與條件，經鑲埋光纖光柵感測器及熱壓成化後，進行試片之切割，複材試片之規格參考 ASTM D3039 拉伸試片之尺寸，(試片尺寸)，試片之中心並鑽一 6.3mm 之孔洞，利用 MTS 動態試驗機進行疲勞負載以產生內部破壞，過程中以超音波 C-Scan，應變計以及光纖光柵感測器進行監測，完成疲勞實驗後，並將試片剖

開利用光學顯微鏡觀察內部缺陷之實際情形。

4 結果與討論

4.1 不同剝纖衣方法及保護裸光纖方式對光纖強度之影響比較

製作光纖感測器過程中必須去除光纖纖衣進行紫外光曝光，完成感測器製作後，往往不會馬上鑲埋入複材中，期間不同之儲存環境，對光纖感測器之強度可能有所影響，本實驗特對剝除纖衣以及儲存環境對光纖感測器之強度之影響進行了一些澄清，結果如表一。由於裸光纖受拉伸破壞的數據分布離散性很大，因此實驗結果以韋伯統計方法計算光纖的破壞概率分佈，不同環境光纖拉伸強度之 Weibull Scale Parameter 及 Shape Parameter 顯示 RH=65%、無 Silane 塗層之裸光纖強度比 RH=30%時減少 92.03MPa，顯示置於乾燥箱確實能使光纖免於吸濕作用，而維持其強度。另外，在 Silane 塗層保護方面，根據 Silane 供應之廠商所提最佳建議量為 2%，實驗結果顯示以 2%Silane 塗層於光纖之強度比同樣濕度下之光纖強度增加 24.48MPa，可以達到保護光纖的效果，但以 4%塗層於光纖，則未能達到有效保護光纖的效果。圖一(a)~(d) 為不同環境下裸光纖之破壞概率，其中韋伯統計預測曲線與實驗值之分佈吻合。表一中可以歸納出較佳之處理方式為：以機械式剝纖衣，並在低濕度之乾燥箱儲存待用。

4.2 埋入光纖對複材層板強度影響

採用了兩種不同厚度的單向強化的疊層，分別埋入與強化纖維同向或垂直之光纖，並比較有埋入光纖與沒有埋入之複材層板強度及勁度變化情形，相關比較見表二。

表中可以歸納出光纖方向如與強化纖維同向，光纖同時扮演強化之角色，但如光纖方向與強化纖維垂直，則會大幅降低強度，其原因可以從圖二不同層間鑲埋不同角度光纖感測器之光學顯微照片瞭解，圖二顯示如光纖與其所在之相鄰疊層之纖維方向一致，則光纖可以融入該疊層，不致產生嚴重之內部缺陷。但如光纖與其所在之相鄰疊層之纖維方向有差異，則光纖可以融入該疊層，光纖周圍產生樹脂集中(matrix rich region)之現象，因為數值之強度低，受力後容易萌生裂縫，從而導致整體強度之下降。

4.3 複材層板預埋光纖

GR/EPOXY 複材必須在壓力釜中高壓高溫成化，製程中保持光纖完整性是本實驗的挑戰。藉觀察 FBGs 鑲埋入複材前後及製程中波長變化，可供瞭解、監控積層板複合材料在基材成化，溫度改變過程中其內部的變化。製程因不同材料熱膨脹不均會造成的殘留應力的現象。FBGs 在鑲埋入複材前後反射波峰相差約 1.2nm，約相當於 0.1%應變量。圖三為複材層板成化冷卻過程中光纖光柵頻譜之改變，藉此類實驗可以進一步探討複合材料在製程中不同地點之溫度，壓力，成化情形以及試片內部殘留應力不均的現象。此方面之探討因不在本研究之範圍，所以未作更深入之探討，但未來是可供研究的一個方向。

4.4 光纖感測器訊號量測系統之建立

本研究初期建立兩套量測系統，其量測儀器基本為商購，其一使用光學頻譜分析儀 (Optical Spectrum Analyser) 進行反射波長量測，頻譜的量測較為完整而且精準，但量測速度較慢，僅能用作靜態施力或穩態的測量。另一為利用 Fabry-Perot 濾波之 FBG Interrogating System，後者僅可量測局部強度最高 (local maximum) 的波長，但速度較快，每秒可量取 50 點，當動態應變頻率大於 1Hz 時已無法跟上頻率響應。另一方面，此商購之系統價格相當昂貴。

為了克服量測速度之問題，我們開發了一套利用能量調變機制的量測系統，其示意圖如圖四。本系統基本可分為四個部分：(1)寬頻光源、(2)感測用光纖布拉格光纖光柵、(3)解調用長週期光纖光柵及(4)光能量電壓訊號轉換器。寬頻光源經過布拉格光纖光柵反射後，變成窄頻強光源，經由耦合器導入長週期光纖光柵，形成如圖四中所呈現之能量調變效果。通過之光能量由光收二極體轉換成電流訊號，此電流訊號經適當轉換、放大電路，可提供容易準確量測之電壓訊號，而此電壓訊號與通過之光能量成正比。

上述長週期光纖光柵對特定波長有衰減的作用，短週期布拉格光纖光柵對特定波長有選擇性之窄頻反射效應，一寬頻光源如經過布拉格光纖光柵反射後，再經過長週期光纖光柵，則最後通過之頻譜，將視長週期光纖光柵過濾波長及布拉格光纖光柵之反射波長之相對位置，其能量由零至一個最大值之間變化。

本系統亦可用來量測長週期光纖光柵的波長變化，在此架構下，布拉格光纖光柵之反射波長必須保持不變，而長週期光纖光柵則用作感受溫度或施力等物理量之感測元件，則隨感測到的物理量的改變，其衰減波長發生相應的漂移，使光波穿透頻譜改變，利用此變動之穿透頻譜對從布拉格光纖光柵反射而來的窄頻雷射光源進行調變，可使最後通過光路的窄頻雷射光源亮度改變，藉由量測此最後通過之能量，可供推算溫度或施力等物理量。

本系統經測試其頻率反應可達 100kHz 甚至以上，因為沒有適當的動態施力源，所以更高的頻率反應情形無法獲知，相關之結果已撰寫成論文投稿於 Smart Materials and Structures. 另本系統已獲中華民國專利，其美國專利亦在申請當中。

4.5 多點感測方法之建立

上述三種量測系統，其中第一及第二種均可以同時量測一連串光纖光柵的波長，其前提是每個波長必須與其他波長有一定之區隔，以 FBG Interrogating System 為例，兩個波長之間，最少要隔上 $0.5nm$ ，其中因為要預留試片成化過程中殘留應力變化，受力以及產生破壞後之波長漂移，所以準備布拉格光纖光柵時，其波長必須相隔幾個 nm 。至於 OSA 雖沒有嚴格規定波長之區隔，但原則上兩個波長如重疊在一起無法分辨，也無從獲得有意義之數據。

建立多點感測方法之最大困難，基本在於鑲埋多點式 FBG 光纖感測器之製程，完成光纖光柵感測網路，此感測網路需由多個高反射率之布拉格光柵 (FBG) 組成，由於製作過程光纖必須為裸纖狀態 (沒有鍍層保護) 而易在後續複材製作過程或實驗過程中折斷，光纖光柵感測網路在任一點斷裂，整個網路無法連通，便會前功盡廢，因此每一含光纖光柵感測網路之複材試片均得之不易，其製作是需要相當之技術門檻，不單耗時，而且因光纖光柵價錢不便宜，所以耗費也相當貴，經歷過大量失敗後目前製程之成功率尚算堪用。

4.6 利用內埋光纖光柵感測器偵測複合材料之內部損傷。

4.6.1 不同層間埋設 FBG 感測器以偵測複材損傷之形式與成長機構

為能偵測複材損傷之形式與成長機構，本實驗採用在不同層間埋設 FBG 感測器 (如圖二)，圖二(A)是在不同層間埋入均依 0° 埋設 FBG 感測器，此法之優點為光纖光柵感測器可採穿透式量測，即以一條光纖就可形成光纖感測系統，光訊號之損耗比較低，但此光纖感測

器佈置法會使感測器周圍造成基材集中區(matrix rich region)，故光纖光柵感測器與複合材料基層板之融入性較差，故此法光纖光柵感測器所量得之應變訊號不能指出某特定疊層之應變。

圖二(B)是在不同層間依疊層方向埋設 FBG 感測器，此法可改善光纖光柵感測器與複合材料基層板之融入性，大幅減少感測器周圍造成基材集中區(matrix rich region)，使光纖光柵感測器可量得特定層之應變訊號，但此法無法構成穿透式光纖網路，即每增加一感測器時必須多增加一光耦合器，光訊號之損耗亦隨增大(每增加一個光耦合器即產生 3db 之能量衰減，若以超螢光光源 SLED 而論，最多能同時量 10 個光纖光柵感測器)。圖五為應用此法來探討複材之疲勞損傷，在以 C-Scan 非破壞方式探傷時，我們僅能觀察疲勞週次增加，圓孔附近開始有損傷產生，但無法得知哪一層有損傷發生，亦無法針對該損傷提出安全性評估，在未疲勞負載前，由於 FBG 感測器埋入複材時之製程殘留應力會導致 FBG 頻譜產生劈裂的現象，因此由頻譜劈裂程度可以估算出殘留應力，並利用損傷成長時會造成殘留應力釋放，所以只要藉由光纖感測系統就可即時監控複材損傷形式與成長機構，如圖五所示，當疲勞週次增加至 5000 次時，首先內埋在 90° 層之光纖感測器已明顯偵測到有損傷發生，其半值全寬(FWHM)由於損傷產生時會造成殘留應力釋放而變小，即頻譜劈裂之程度減少了，所以可判定 90° 層已經發生疲勞損傷，但由 C-Scan 僅發現圓孔附近開始有損傷，且不知道損傷產生的疊層；當疲勞週次增加至 25000 次時，除 90° 層發生疲勞損傷外， $\pm 45^\circ$ 層開始發生疲勞損傷，可觀察其頻譜劈裂之程度減少了，即半值全寬(FWHM)縮小，由此可判斷 $\pm 45^\circ$ 層開始發生疲勞損傷；當疲勞週次累積至 40000 次時， 0° 層開始發生疲勞損傷，其頻譜劈裂之程度及半值全寬(FWHM)縮小，由此可判斷 0° 層開始發生疲勞損傷。故含圓孔之擬均向性複合材料施予疲勞負載之損傷成長機構為首先 90° 層發生疲勞損傷，經數值模擬及切片金相觀察為基材裂縫(matrix cracking) $\rightarrow 0^\circ$ 層基材裂縫成長導致 $\pm 45^\circ$ 層開始發生疲勞損傷(基材破壞及界面破壞) $\rightarrow 0^\circ$ 層開始發生疲勞損傷--纖維斷裂(fiber breakage)。

4.6.2 同一層平行等距埋設多個 FBG 感測器以偵測複材損傷之成長

為能偵測複材損傷之成長，本計畫採中間同層平行等距埋設感測器(如圖六)，在離圓孔每 1.5mm 埋入一個 FBG 當作偵測複材損傷成長之感測器，將 FBG 感測器埋入複材時，由於製程之側向殘留應力的作用會導致 FBG 頻譜產生劈裂的現象，因此由頻譜劈裂程度可以估算出殘留應力，並利用損傷成長時會造成殘留應力釋放，所以只要藉由光纖感測網路就可

即時監控複材損傷成長，如圖六所示，當疲勞週次增加至 20000 次時，內埋之第一個感測器已明顯偵測到有變異發生，但由 C-Scan 僅發現圓孔附近開始有損傷，且在第一個感測器埋設的位置尚未看到損傷產生；當疲勞週次增加至 60000 次時，內埋之第二個感測器亦明顯偵測到有變異，C-Scan 也僅發現圓孔附近開始有損傷，且在第二個感測器的位置尚未看到任何損傷，可見內埋之 FBG 感測器比 C-Scan 能更早發現損傷，並能即時監控，以便當損傷成長至危及結構體安全時能發出警訊。

圖七所示疲勞模量隨週次變化，當疲勞週次增加至 60,000 次時，開始有偵測到疲勞模量變化，即有疲勞損傷發生，當疲勞週次增加至 100,000 次時，疲勞模量非線性現象更嚴重，在施力 5kN 產生疲勞模量轉折，表示在施力低於 5kN 時基材及纖維都能承載，當疲勞損傷初期（基材裂紋）產生時，因部分基材無法承載，使疲勞模量降低；在施力高於 5kN 之後，由於高應力主要於纖維承載，且由金相切片觀察得知，纖維斷裂疲勞損傷並未發生，所以疲勞週次 100,000 次與尚未經疲勞複材試片在高應力區之承載能力相差不大，所以可由疲勞模量轉折點之應力值判斷基材裂紋疲勞損傷之程度。

圖八為複材試片經疲勞週次 100,000 次後之裂紋密度變化，由裂紋密度(圖二)可明顯表示疲勞損傷隨著遠離圓孔而漸緩。圖九疲勞週次 100,000 次後之金相切片觀察，圖九 a-d 分別為距離圓孔 1.5、3、4.5、6mm 位置的金相觀察，圖九 a 在最靠近圓孔旁，由於應力集中的影響，可以發現疲勞損傷最嚴重，在圖九 a 有許多層間基材裂紋(matrix cracking, M)於 90 度層向鄰近 ± 45 度層延伸，形成穿層基材裂紋(Transverse matrix cracking, T)，並隨著疲勞週次增加而成長，沿著 0 度方向形成脫層破壞。圖九 b 因為較遠離圓孔，所以疲勞損傷的程度較少，多為層間基材裂紋破壞(M)，且被侷限於 90 度層間；圖九-c,d 幾乎沒發現疲勞損傷，因此越靠近圓孔疲勞損傷越嚴重。

圖十(a-f)為複材試片經不同週次疲勞後不同負載下頻譜變化，其中 FBG1 的頻譜有明顯的啁啾現象(chirped)，是由於圓孔造成不均勻應變場的影響，FBG2 亦有啁啾現象發生，但可能由於光路問題使其能量低於雜訊之下而難判讀，FBG3 由於較遠離圓孔所以保持完整 FBG 單峰頻譜，所以 FBG3 並未感測到不均勻應變場。

當負載增加，其全值半高寬 FWHM (Full width half maximum) 會有明顯的增加，因此隨著疲勞損傷的生長，會使不均勻應變場的上限值(upper limits)及下限值(lower limits)分別往高應變和低應變區擴張，所以 FBG1 所感測到之應變範圍(strain range) 隨著疲勞損傷的生長而增加，圖十為 10kN 負載下波長漂移變化，當疲勞損傷成長，其全值半高寬 FWHM (Full

width half maximum) 會有明顯的增加，圖十一中 10000 週次之前，FBG1 之啁啾頻譜之上限 (upper limits) 及下限值 (lower limits) 均往長波長移動表示感測區應變場變化一致，疲勞損傷尚未發生；10000 週次之後，在 10kN 負載下，啁啾頻譜之上限及與下限值往相反方向移動，高應變區因疲勞損傷的生長而使應變場加劇，因此啁啾頻譜之上限往長波長移動，反之，疲勞損傷區則產生無法承載及應變釋放的影响而使啁啾頻譜之下限值隨之遞減。

圖十二為監測不同週次疲勞後頻譜之能量變化，發現其結果與圖十一監測不同週次疲勞後頻譜之波長變化一致，均於 10,000-20,000 周次間發生訊號改變，並指向與疲勞損傷有關，所以無論用能量監測或波長監測均可感測疲勞損傷的生長，並能即時監控，以便當損傷成長至危及結構體安全時能發出警訊。

5 結論

本研究成功地建立光纖光柵感測器鑲埋在高分子複合材料的技術，並開發了頻率反映相當不錯的解調系統，也建立了單一光纖多點式之感測技術，最後，利用相關技術之光纖光柵反射頻譜，證明無論用頻譜之能量變化或波長變化進行監測，均可與疲勞所導致之複材內部缺陷之發展有明確的關連，為將來智慧型材料/結構之線上即時破壞監測奠定基礎。

此方法比起傳統常用之超音波 C-scan，放射線照相等方法，不單較為方便。並容許線上連續之監控，而且因感測器是鑲埋在複材內部，不影響結構外部之形狀，也可直接針對內部不同層間所發生之破壞進行偵測。

6 本計劃自評

利用光纖感測器在複合材料內部損傷的探討此一領域是一個新興的領域，國內外投入之研究仍不多，本計劃在此一領域獲得了一些前人未有的結果，相關成果除已寫成論文投稿以及尚在準備中的一些論文外，另直接、間接導致兩個專利申請的提出，此二專利台灣部份已獲通過，美國部份則尚在申請過程中。相關專利及論文如下：

本計劃所產生之專利

1. 單秋成、林志豪、江家慶、廖顯奎、曾昱璋、陳宣臣, “光纖元件之熱補償” 2002. 中華民國專利發明第 二零一八六三號, US patent 申請中。

2. 單秋成、江家慶, “能量調變型光纖光柵感應器”, 中華民國專利發明第 二零一八九八號, US patent 申請中。

本計劃所產生之論文

1. C.S. Shin, C.C.Chiang, "Fatigue Damage Monitoring in Polymeric Composites using multiple Fibre Bragg Gratings," International Journal of Fatigue, submitted.2004.
2. C.S. Shin, C.C.Chiang, "High speed and high resolution fiber grating sensor interrogating system using hybrid Bragg grating-long period grating intensity modulation", Smart Materials & Structures, submitted.2004.
3. C.S. Shin, C.C.Chiang, "Fatigue Damage Monitoring in Polymeric Composites using multiple Fibre Bragg Gratings," Third International Conference on Fatigue of Composites (ICFC3), Kyoto, Japan (2004 9/15-9/17)。
4. C.C. Chiang, C.S. Shin, "An intensity modulation based high speed and high resolution long period fiber grating sensor interrogating system" The Optics and Photonics Taiwan Conference, Taipei, 2003.
5. C.C.Chiang, C.S. Shin, "Using multi-FBGs monitoring fatigue damage in composite," The 20th National Conference on Mechanical Engineering, Taiwan, 2003.
6. C.C.Chiang, C.S. Shin, L. Wang, "High speed and high resolution strain sensing by using LPFG as filter interpretation FBG strain sensor in power detecting," The Optics and Photonics Taiwan Conference, Taipei, 2002.
7. C. L. Lin, C.S. Shin, L. Wang, "The application of multi-function FBGs sensor on composites," The 17th National Conference on Mechanical Engineering, Taiwan, 2000.
8. C. L. Lin, C.S. Shin, L. Wang, "The application of inner stress/strain measurement of composite using embedded FBGs sensor," The 25th National Conference on Mechanics, Taiwan, 2000
9. C. L. Lin, C.S. Shin, L. Wang, "The application of fiber Bragg gratings sensor on the polymer composites," The 16th National Conference on Mechanical Engineering, Taiwan, 1999.

7 參考文獻

- [1] V. S. Avva, J. R. Vala, M. Ieyaseelan, ASTM STP 893, pp. 196-206, 1986.
- [2] M. C. Tobey, O. S. Peter, Proceedings of the American Society for Composites," pp. 297-312, 1986.
- [3] R. L. Ramkumar, ASTM STP 813, pp. 116-135, 1983.

- [4] W. J. Cantwell, J. Morton, Composites, Vol. 22, No. 5, pp. 347-362, 1991.
- [5] S. Hong, D. Liu, Experimental Mechanical, pp.115-120, 1989.
- [6] D. Liu, Journal of Composite Materials, Vol. 22, pp. 674-692, 1988.
- [7] W. J. Cantwell, Composite Structures, Vol. 10, pp. 247-265,1988.
- [8] N. H. Tai, M.C. Yip and J.L. Lin, Composites Science and Technology, Vol. 58, pp.1-8, 1998
- [9] N. H. Tai, C .C. Ma, J. M Lin, G. Y. Wu, Composites Science and Technology Vol. 59 No. 11 pp. 1753-1762, 1999.
- [10] N. Miyazaki, M. Sutoh, M. Satoh, Journal of the Society of Materials Science, Vol. 48 No. 5 pp. 507-511, 1999.
- [11] A. N. Palazotto, E. J. Herup, L. N. B. Gummadi, Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference Vol. 1 pp. 739-749 1999.
- [12] M. de Freitas, A. Silva, L. Reis, Composites Part B:Engineering Vol. 31 No. 3 pp. 199-207, 2000.
- [13] G. A. O. Davies, X. Zhang, Aeronautical Journal, Vol. 104, No.1032, pp. 97-103, 2000.
- [14] B. Pradhan, S. Kumar, Composites Science and Technology, Vol.60, No.2, pp. 273-281, 2000.
- [15] A F. Aymerich, S. Meili, Composites Part B:Engineering, Vol. 31, No. 1 p 1-6, 2000.
- [16] W. C. Wang, C. H. Day, C. H. Hwang, T. B. Chiou, Res Nondestr Eval, Vol.10, pp. 1-15, 1998.
- [17] W. C. Wang, T. B. Chiou, Journal of Composite Materials, Vol. 32, No. 17, pp.1595-1615, 1998.
- [18] W. Cantwell, P. Curtis, J. Morton, Composites, Vol. 14, No. 3, pp. 301-305, 1988.
- [19] J. Karger Kocsis, K. Friendrich, Composites, Vol. 19, No. 2, pp. 105-114, March, 1988.
- [20] C. T. Mathews, J. S. Sirkis, SPIE, Vol. 1370, Fiber Optic Smart Structures and Skins III,

- pp.46-102, 1990.
- [21] J. S. Sirkis, A. Dasgupta, H. W. Haslach, Jr. I. Chopra, H. Singh, Y. Wan, C. Mathews, and K. Whipple, SPIE, Vol. 1370, Fiber Optic Smart Structures and Skins III, pp. 88-101, 1990.
 - [22] R. M. Measures, SPIE, Vol. 1370, Fiber Optic Smart Structures and Skins III, pp. 46-102, 1990.
 - [23] Kenneth O. Hill, Gerald Meltz, Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 8, Aug. 1997, pp. 1263-1276.
 - [24] G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn, Opt. Lett., Vol. 14, pp. 823-825, 1989.
 - [25] R. D. Townsend, N. H. Taylor, Proceedings of Euromaintenance'96, 1996.
 - [26] J. R. Dunphy, G. Meltz, F. P. Lamm, W. W. Morey, Proceedings of SPIE, Vol. 1370, pp.116-118, 1990.
 - [27] Y. J. Rao, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 31, 1999, pp. 297-324.
 - [28] G. P. Carman, G. P. Sendekyj, Journal of Composites Technology & Research, Vol. 17, No. 3, July 1995, pp. 183-193.
 - [29] B. Benchekchou, N. S. Ferguson, Composite Structures, Vol. 41, 1998, pp.113-120.
 - [30] W. Du, X. M. Tao, H. Y. Tam, C. L. Choy, Composite Structures, Vol. 42, 1998, pp. 217-229.
 - [31] Libo Yuan, Limin Zhou, Sensors and Actuators, A 69, 1998, pp. 5-11.
 - [32] T. B. Salzano C. A. Calder, D. W. Dehart, Experimental Mechanics, Vol. 32, No. 3, Sep. 1992, pp. 225-229.
 - [33] M. A. El-Sherif, J. Radhakrishnan, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 16, No. 2, 1997, pp. 144-154.
 - [34] Kin-tak Lau, Libo Yuan, Li-min Zhou, Jingshen Wu, Chung-ho Woo, Composite Structures, Vol. 51, 2000, pp. 9-20
 - [35] S. Mall, S.B. Dosedel, M.W. Holl, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical

Engineering Vol. 2779, pp.222-229, 1996.

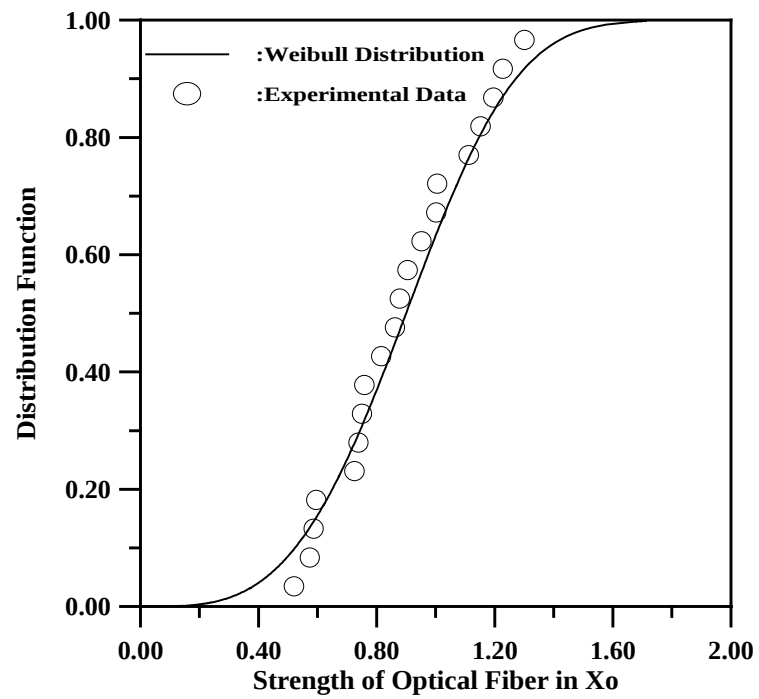
- [36] T. Liu, G. F. Fernando, Y. J. Rao, D. A. Jackson, L. Zhang, I. Bennion, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Vol. 2895, pp.249-257, 1996.
- [37] Takeda Nobuo, Kosaka Tatsuro, Ichiyama Takayuki, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Vol. 3670, pp. 248-255, 1999.
- [38] Tsutsui Hiroaki, Sanda Tomio, Okabe Yoji, Takeda Nobuo, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Vol. 3986, pp.112-120, 2000.

表一：織衣剝製與光纖感測器保存對光纖感測器強度之影響

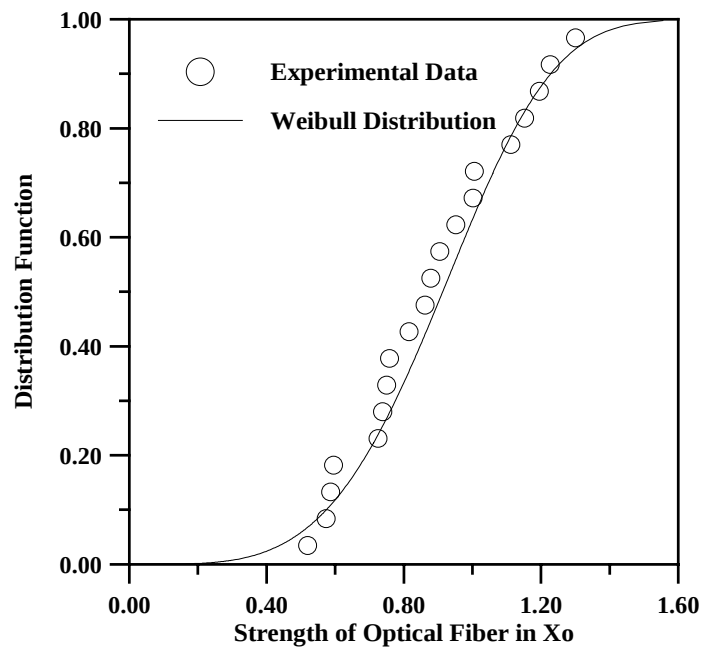
	無保護 無防潮	無保護 有防潮	以 silane 保護 無防潮	機械式剝織衣	硫酸侵蝕織衣
平均強度(MPa)	401.5	487.99	430.36	709.54	689.98
標準差(MPa)	131.75	134.1	102.15	209.04	167.39
彈性模數(GPa)				72.54	72.15

表二：埋入光纖對複合材料拉伸強度之影響

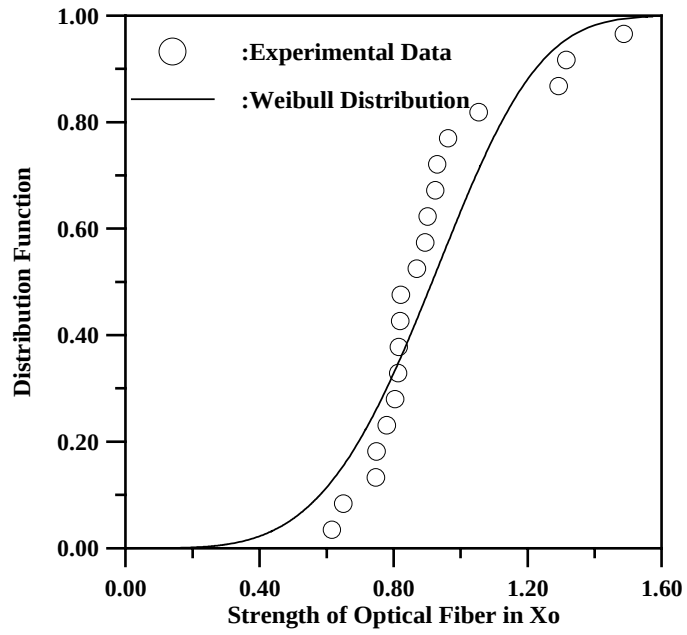
試片分類		平均強度 (MPa)	標準差 (MPa)	對強度之影 響
[0°] ₄ 試片	鑲埋三根 0° 方向光纖	1861.3	132.4	增加 4.1%
	無鑲埋	1788.8	180.9	
[90°] ₄ 試片	鑲埋三根 0° 方向光纖	43.8	8.6	減少 26.5%
	無鑲埋	59.6	6.6	
[0°] ₆ 試片	鑲埋三根 0° 方向光纖	2009.8	70.1	增加 3.8%
	無鑲埋	1936.2	90.6	
[90°] ₆ 試片	鑲埋三根 0° 方向光纖	66.5	7.4	減少 12.0%
	無鑲埋	75.5	7.8	



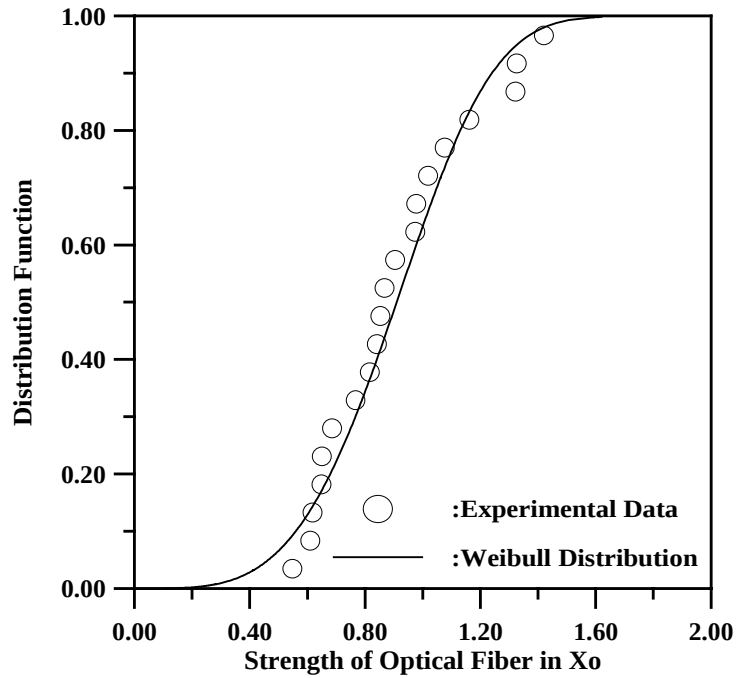
圖一(a) RH=65%、無 Silane 塗層光纖，拉伸強度理論韋伯預測曲線與實驗值。



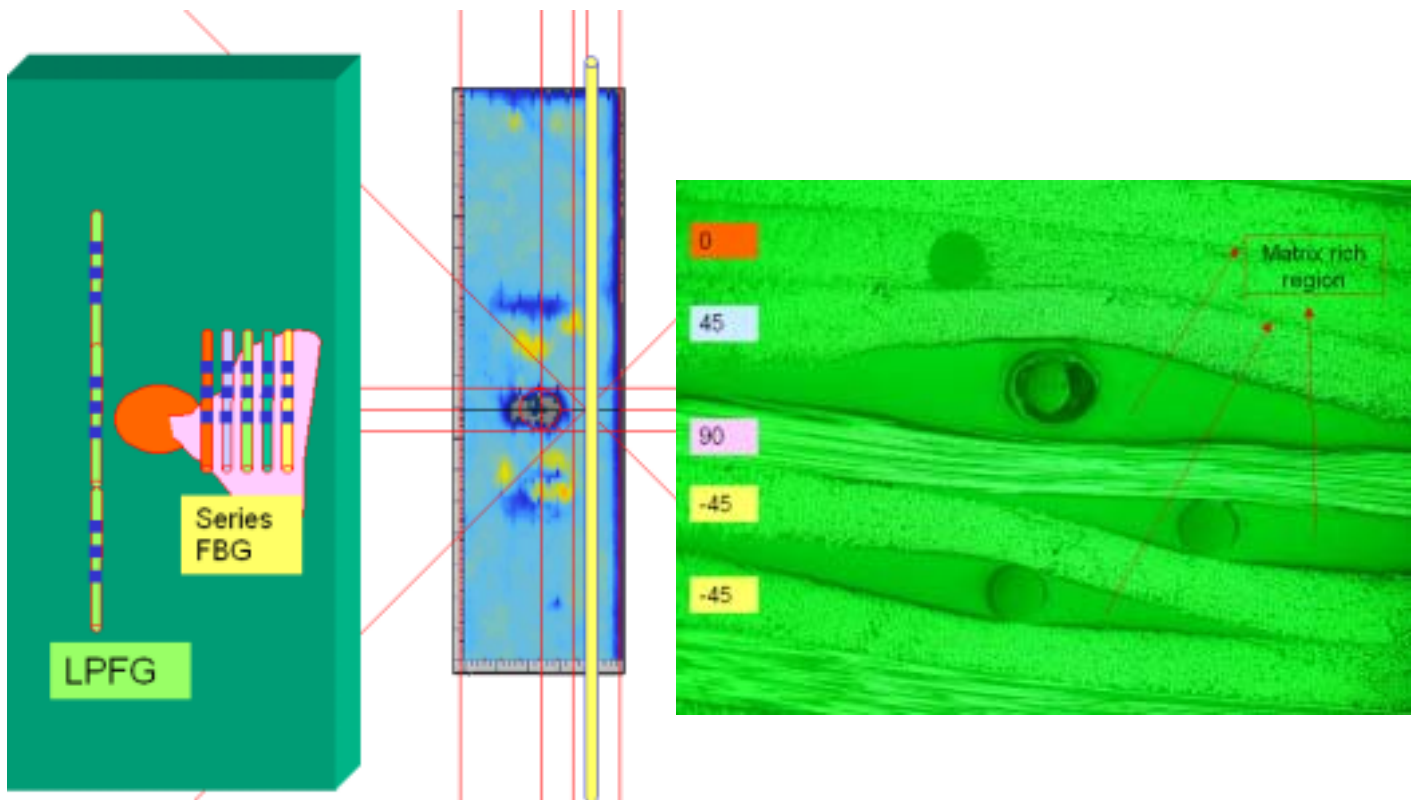
圖一(b) RH=30%、無 Silane 塗層之光纖，拉伸強度理論韋伯預測曲線與實驗值。



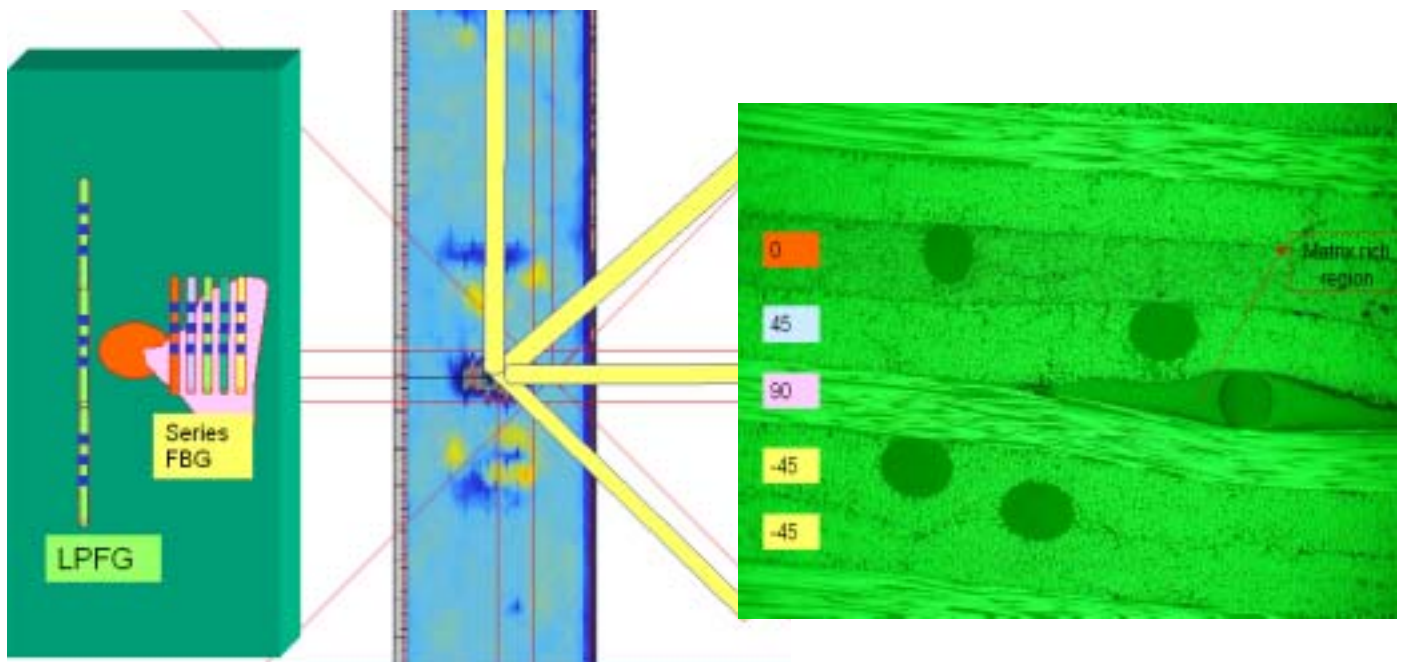
圖一(c) RH=65%、塗層 2%Silane 之光纖，拉伸強度理論韋伯預測曲線與實驗值。



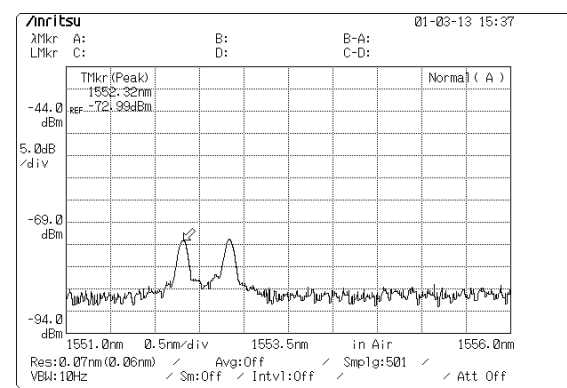
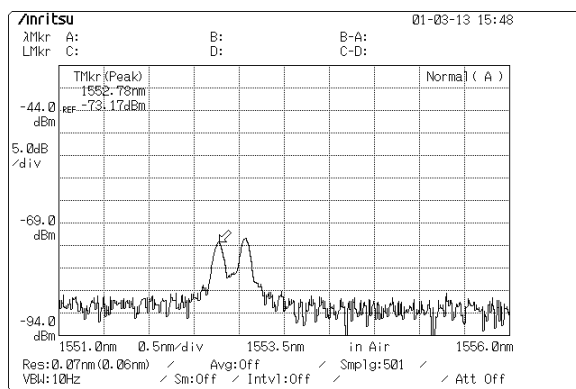
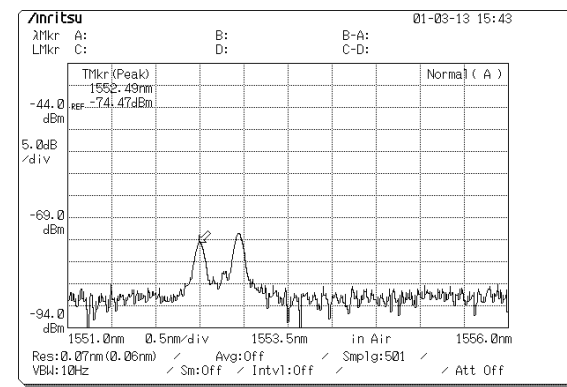
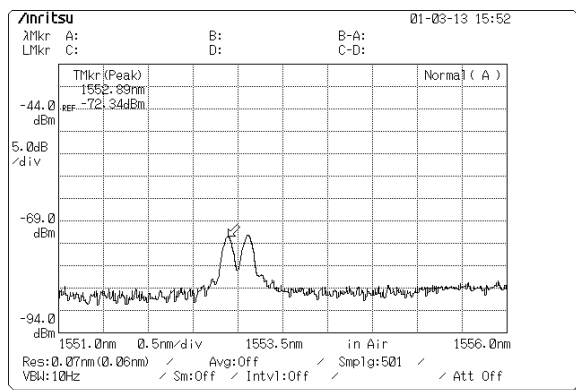
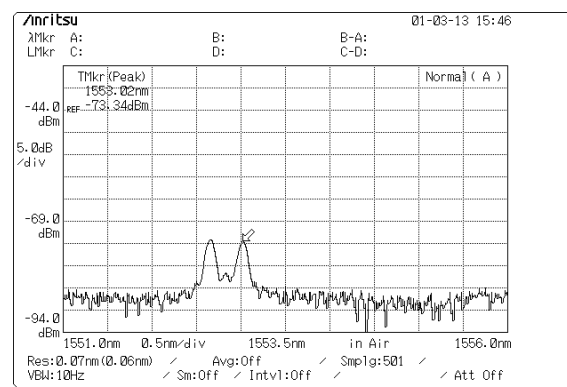
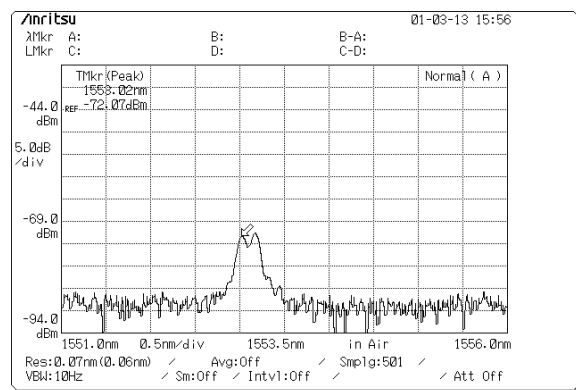
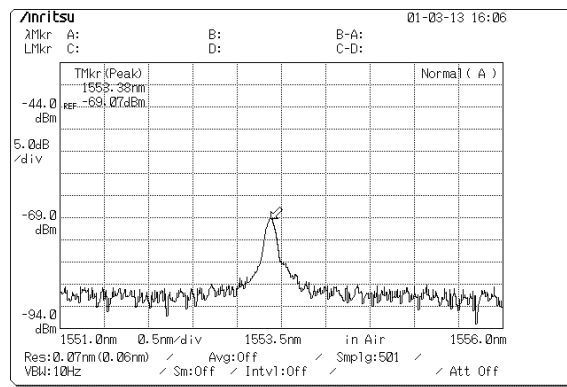
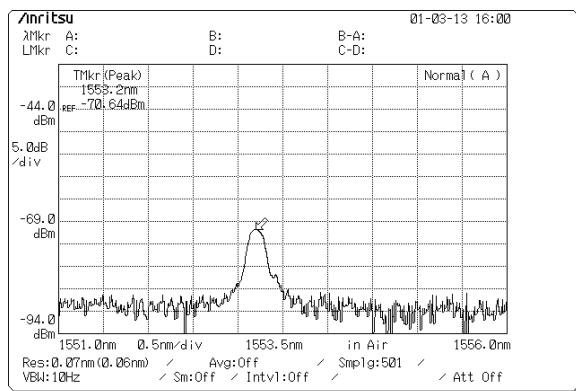
圖一(d) RH=65%、塗層 4%Silane 之光纖，拉伸強度理論韋伯預測曲線與實驗值。



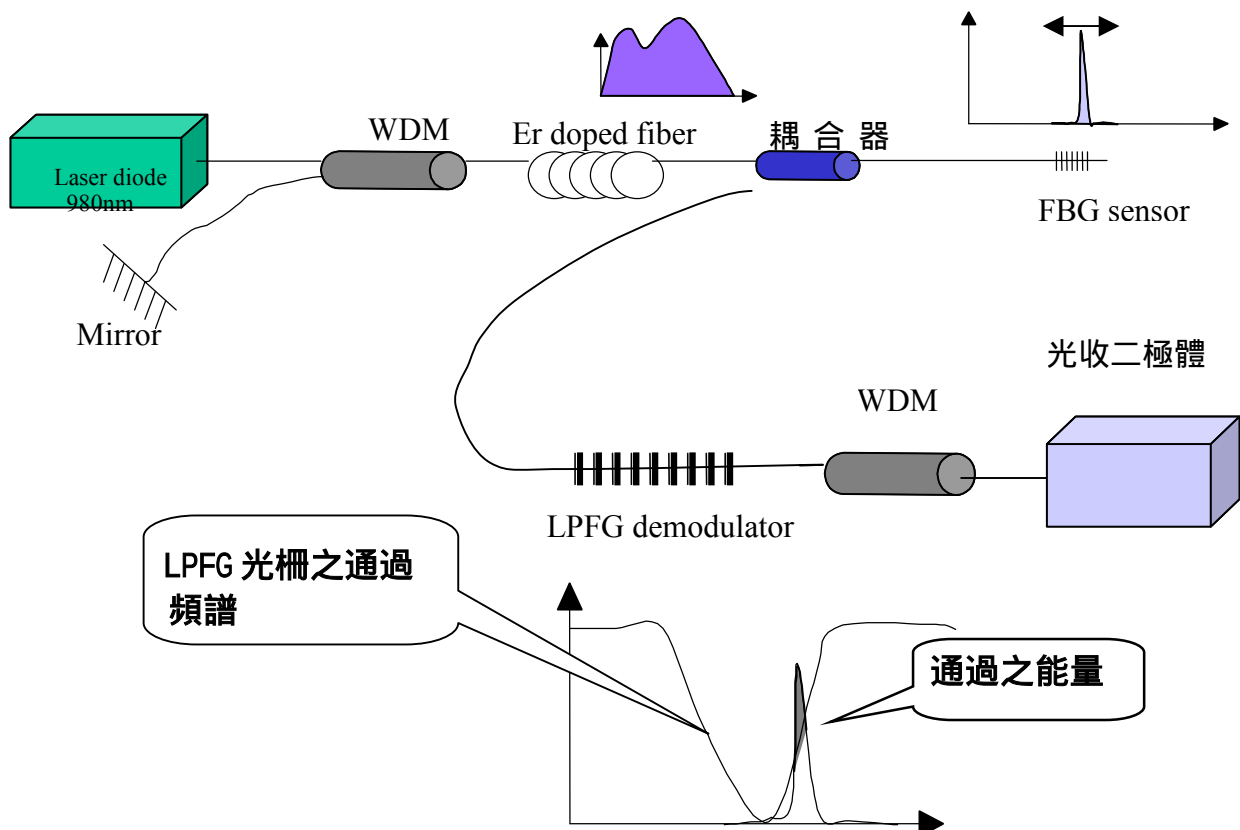
圖二(A)在不同層間埋入均依 0° 埋設 FBG 感測器



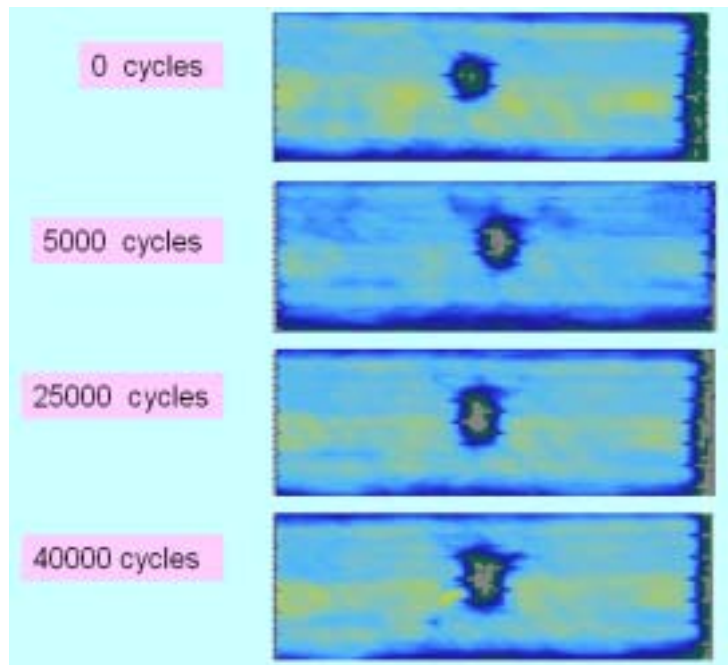
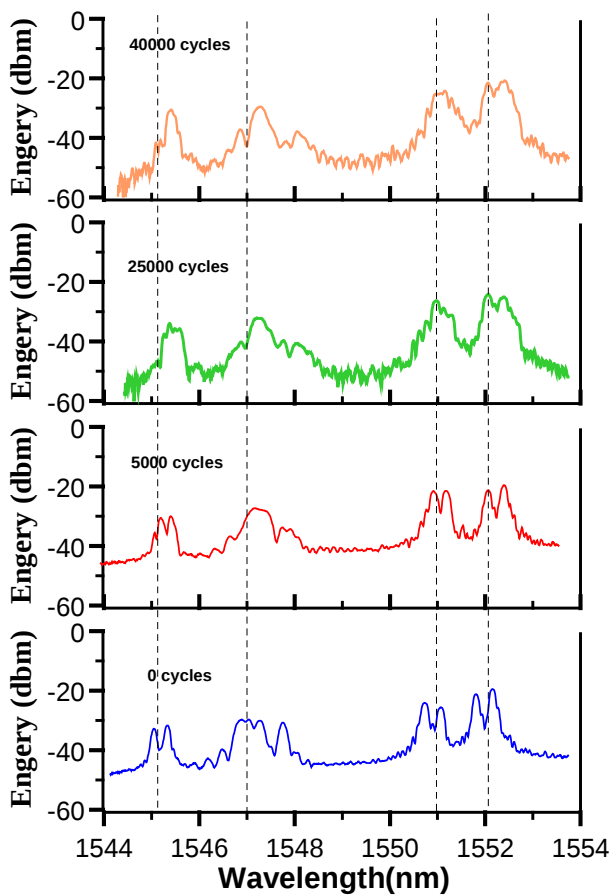
圖二(B)在不同層間依疊層方向埋設 FBG 感測器



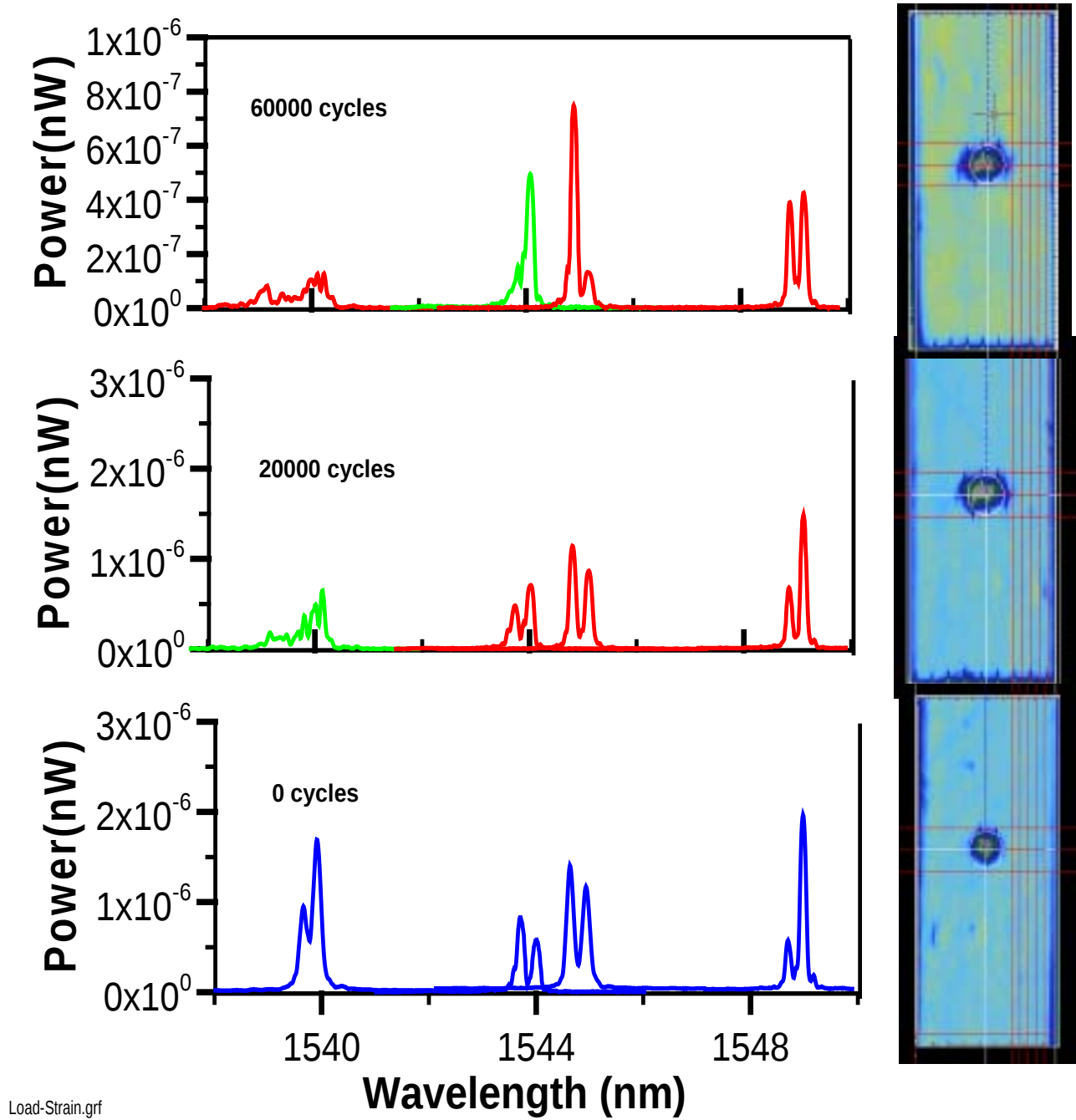
圖三：複材層板成化冷卻過程中光纖光柵頻譜之改變。



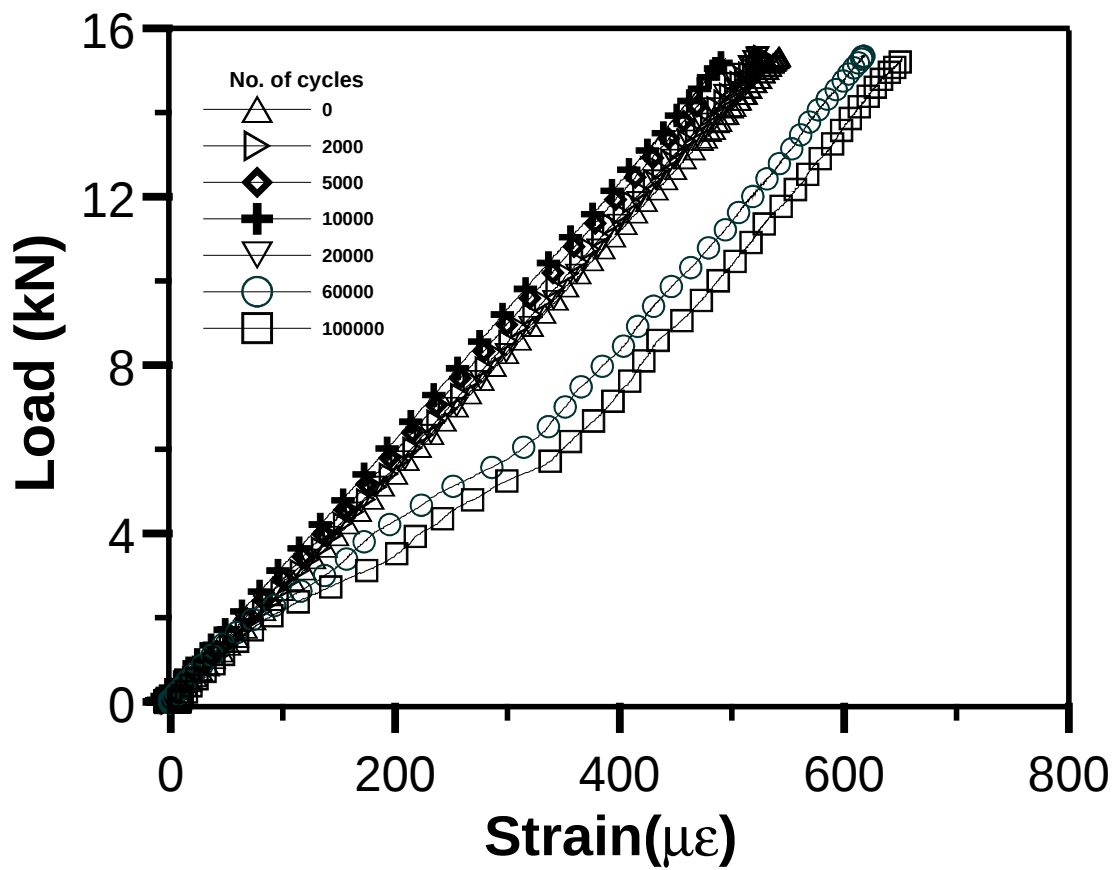
圖四：為利用長週期光纖光柵濾波效應形成能量調變機制示意圖。



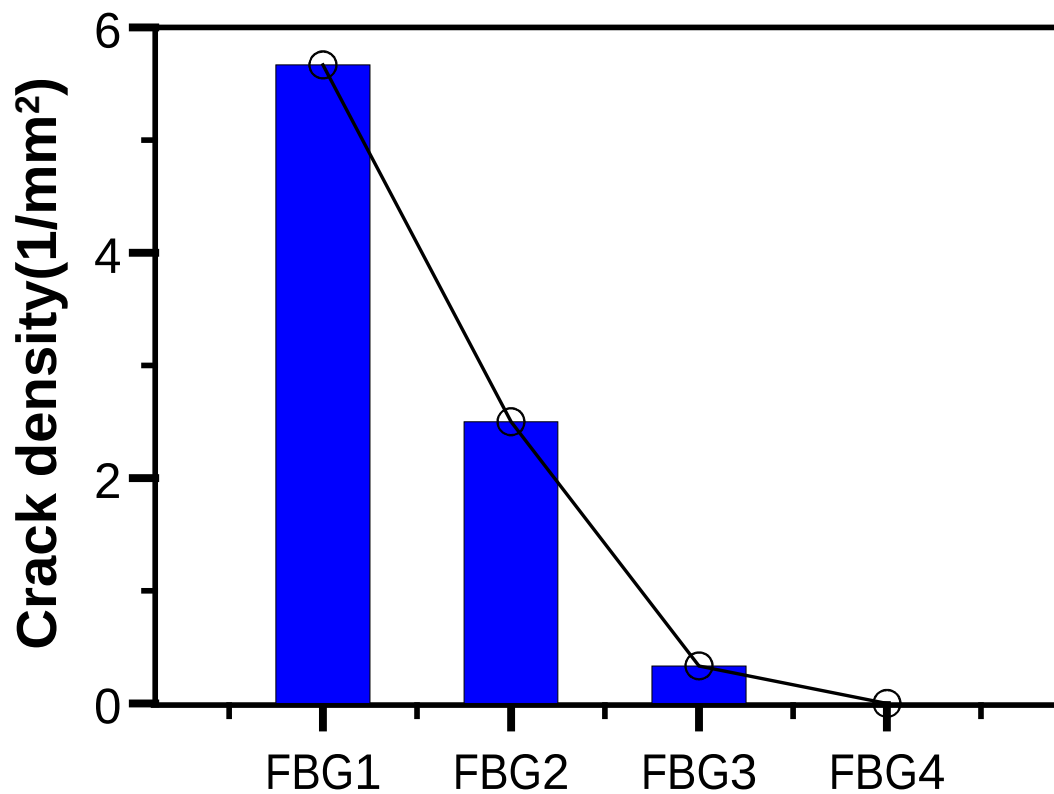
圖五：不同層間依疊層方向埋設 FBG 感測器，以量測複材損傷型態與成長



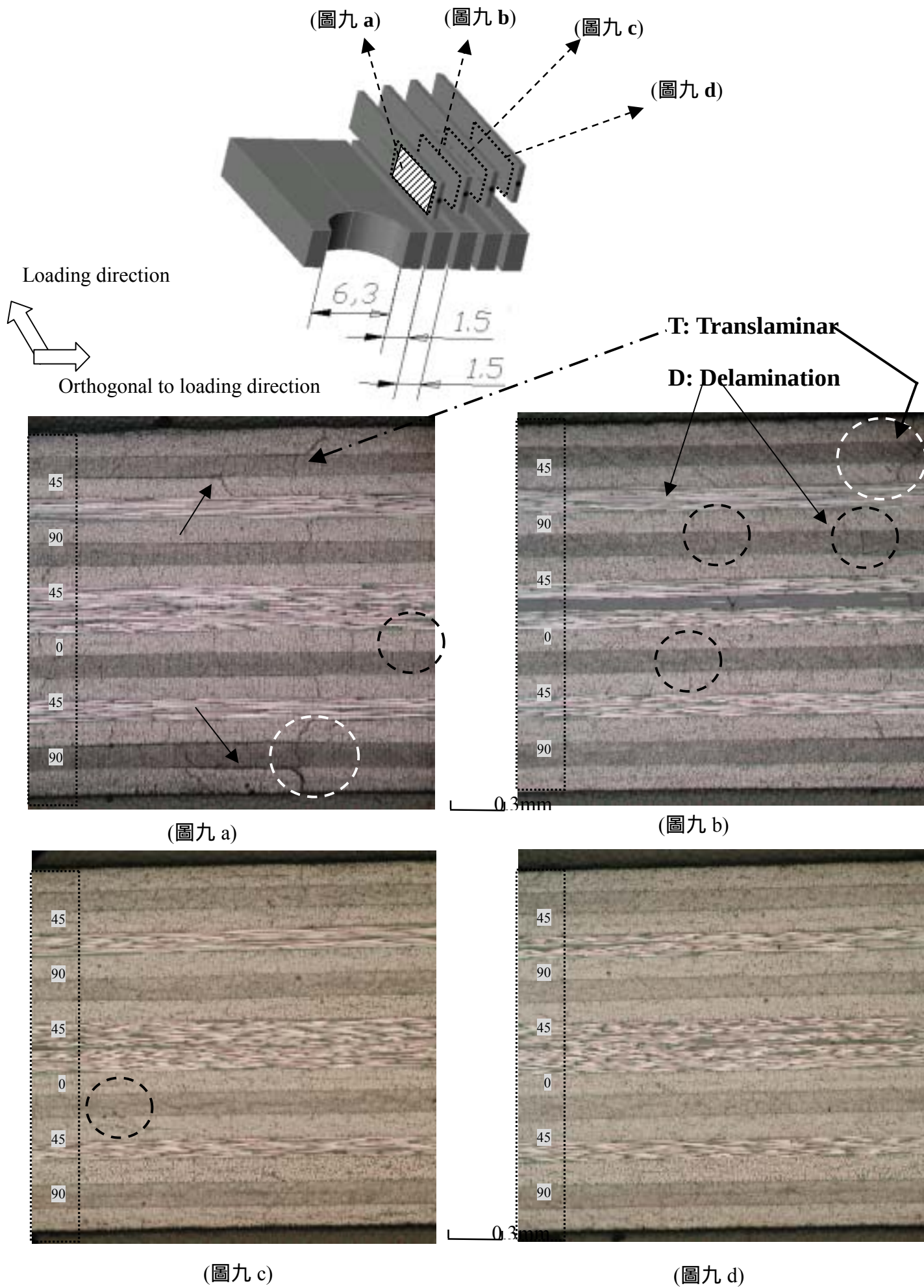
圖六: 中間同層平行等距埋設感測器, 在離圓孔每 1.5mm 埋入一個 FBG 當作偵測複材損傷成長之感測器



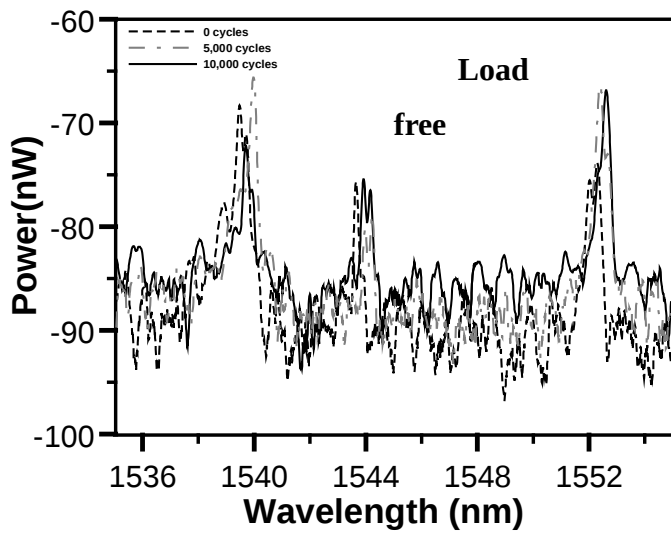
圖七：複材試片剛性隨疲勞週次增加之變化。



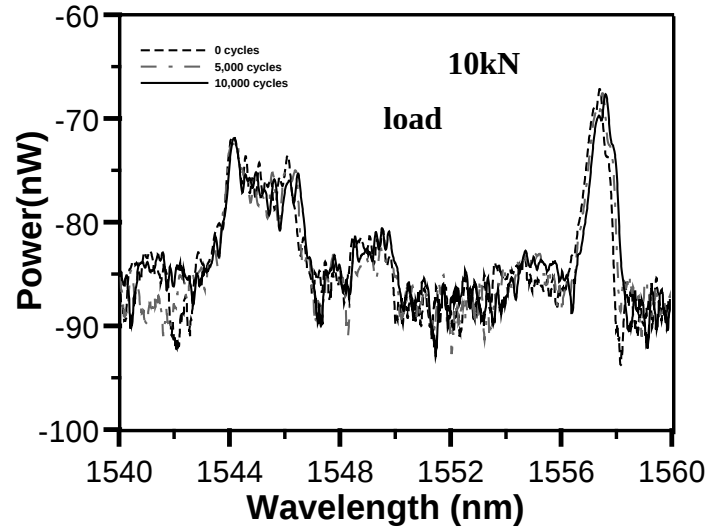
圖八：光纖光柵感測器位置之基材裂縫密度。



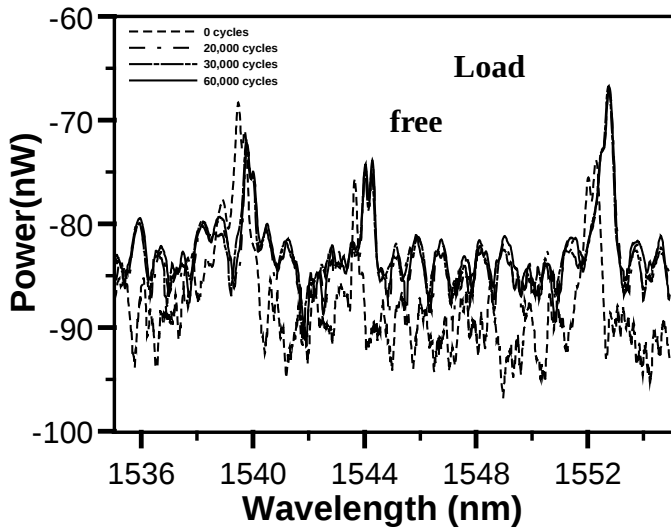
圖九：不同位置之複材內部破壞情形之光學顯微照片。



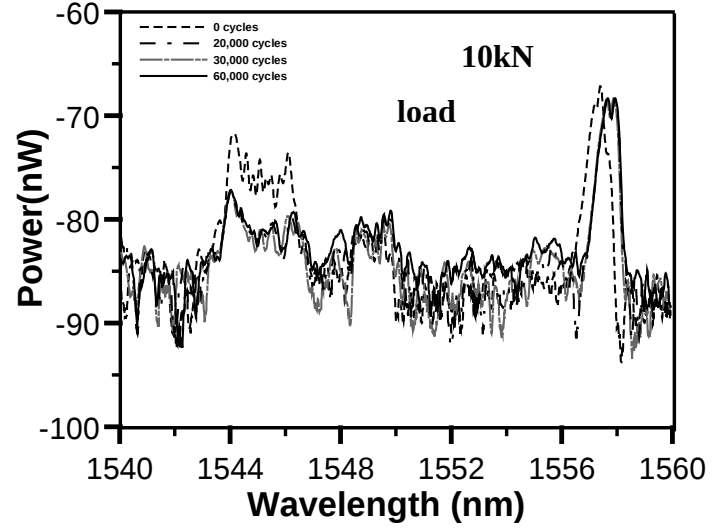
(圖十 a)



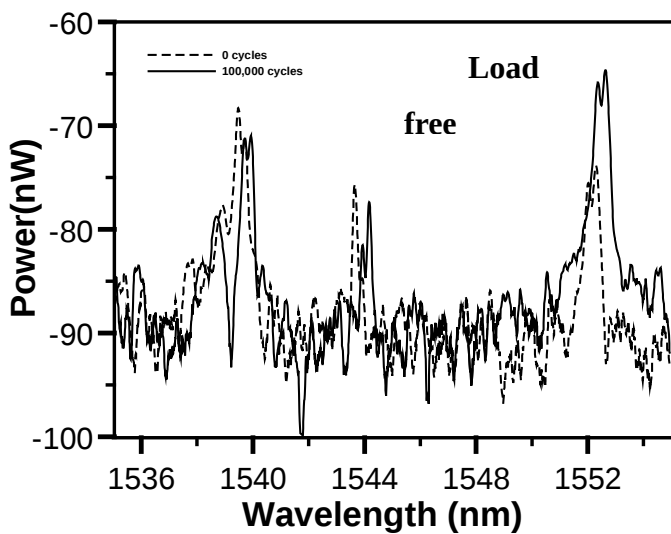
(圖十 d)



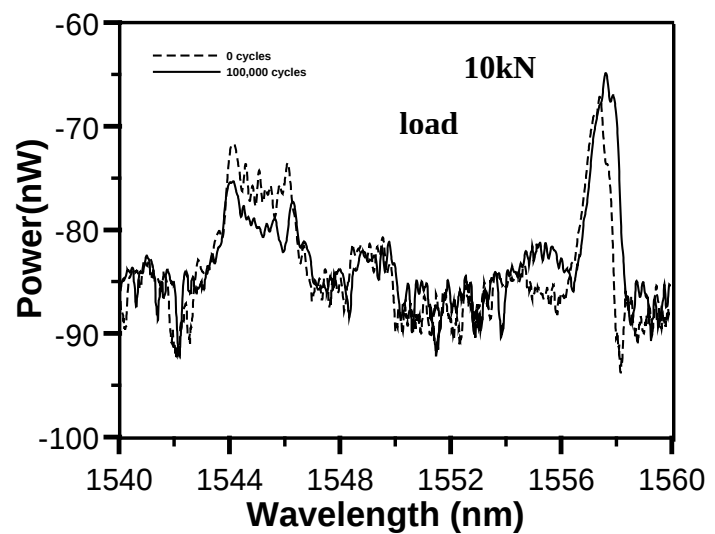
(圖十 b)



(圖十 e)

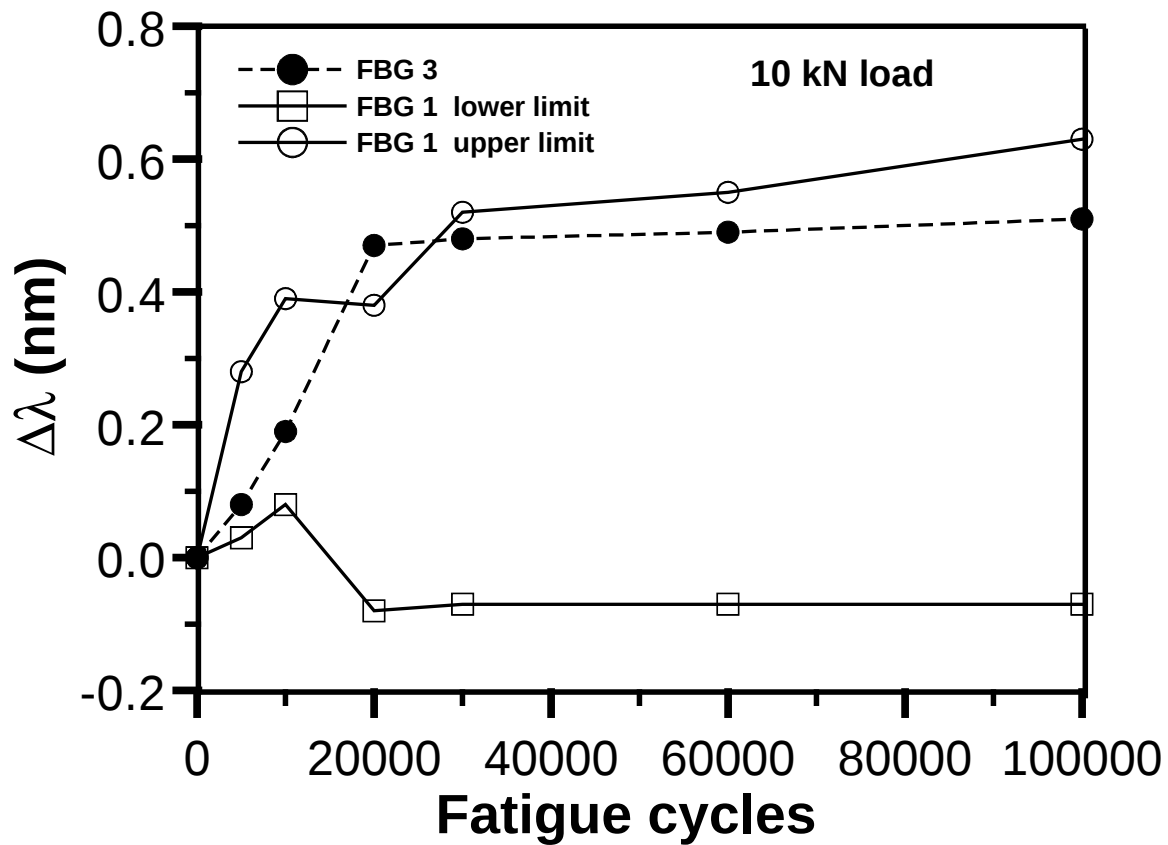


(圖十 c)

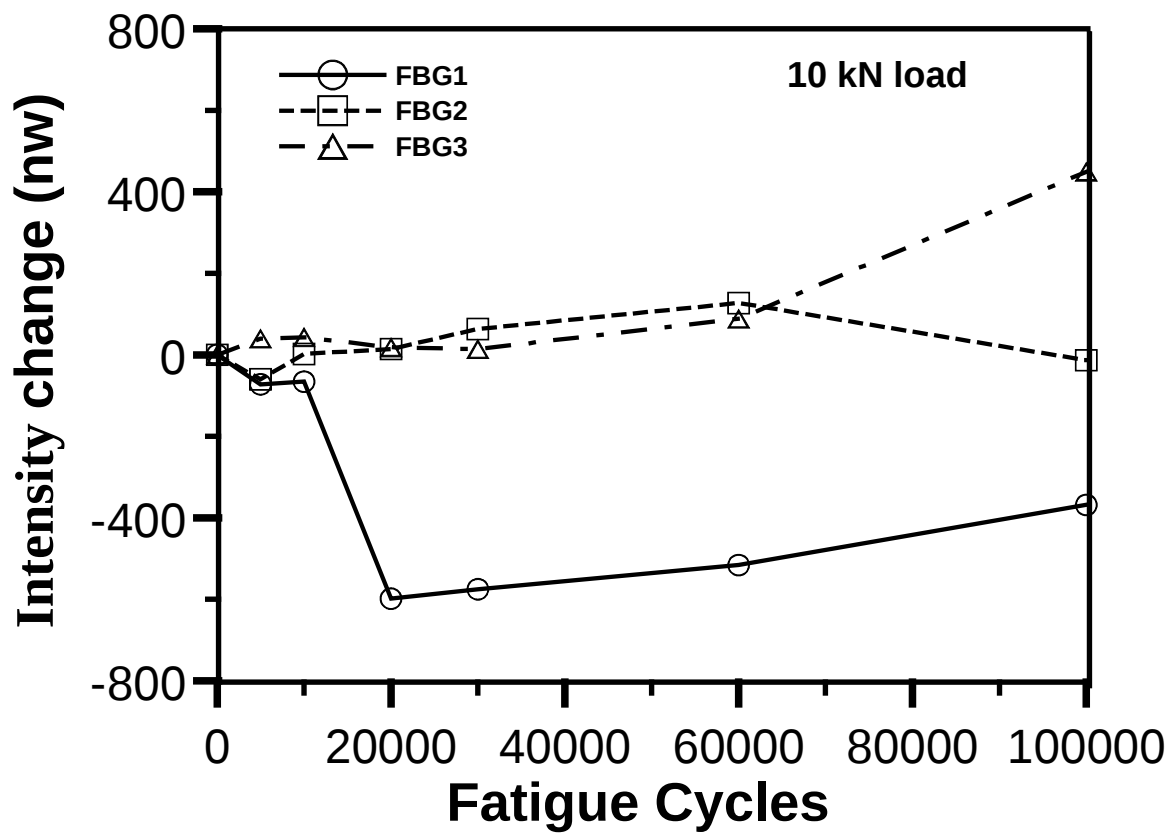


(圖十 f)

圖十 不同疲勞週次後光纖光柵頻譜在 (a~c) 0 kN 及 (d~f) 10 kN。



圖十一：不同疲勞週次下光纖光柵波長漂移之情形。



圖十二：不同疲勞週次下光纖光柵反射頻譜之能量強度變化情形。

