

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

光纖時域反射於碳纖管式
結構健康檢測技術之研發與應用
—碳纖自行車架之應用

Development and Applications in the Use of Optic Time Domain

Reflectometry in Health Monitoring for Tubular Carbon Fiber Structure

—The Use of Carbon Fiber Bicycle

研究生：蘇意婷

指導教授：黃安斌 博士

中華民國九十九年七月

光纖時域反射於碳纖管式結構健康檢測技術之研發與應用

—碳纖自行車架之應用

Development and Applications in the Use of Optic Time Domain

Reflectometry in Health Monitoring for Tubular Carbon Fiber Structure

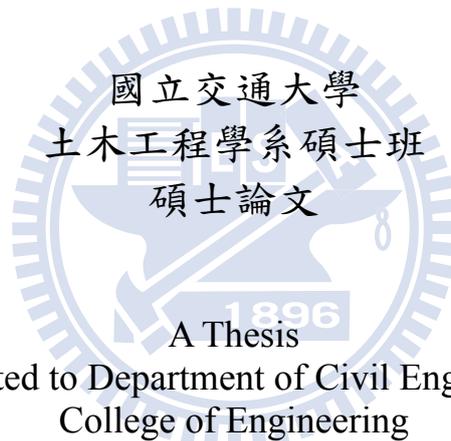
—The Use of Carbon Fiber Bicycle

研究生：蘇意婷

Student: I-Ting SU

指導教授：黃安斌 博士

Advisor: Dr. An-Bin Huang



A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Civil Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

光纖時域反射於碳纖維管式結構健康檢測技術之研發與應用

—碳纖維自行車架之應用

學生：蘇意婷

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

碳纖維由於有極高的比強度和比彈性係數、質輕等優點被廣泛使用於各領域。碳纖維結構物為脆性材料，破壞前夕並無明顯塑性變形。為了使其能夠可靠及安全，最重要的是能夠即時監控損害的發生與發展。目前較少有檢測方法能夠即時監測正在使用的碳纖維自行車。本研究建議使用光纖結合光時域反射的非破壞檢測方法來即時健康檢測碳纖維自行車的疲勞損傷及內部缺陷。

光纖直徑小、不受電磁波干擾、耐高溫，可以內埋在碳纖維複合材料中，利用光時域反射儀(OTDR, Optical Time Domain Reflection)偵測事件損失的特性來反應內部缺陷。本研究內容有關於碳纖維試片、碳纖維管埋設光纖的製作以及研發內埋光纖於碳纖維自行車架使其能夠健康檢測的技術之過程。

在實驗室進行碳纖維試片以及碳纖維管內埋設光纖線，分別施作 V 型與 U 型撓曲試驗以及三點彎曲試驗等破壞試驗，使用 OTDR 儀器量測光纖損耗量的變化，進而探討光纖結合碳纖維損傷缺陷與光損失之關係，驗證其可行性。

關鍵字：碳纖維、碳纖維管式結構、結構健康檢測、光纖、光時域反射

Development and Applications in the Use of Optic Time Domain
Reflectometry in Health Monitoring for Tubular Carbon Fiber Structure
—The Use of Carbon Fiber Bicycle

Student : I-Ting SU

Advisor : Dr. An-Bin Huang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Carbon fiber are used in various fields due to their light weight, high specific strength and specific elasticity. Carbon fiber srtuctures are brittle materials. There are no significant plastic deformations before destruction. In order to make them reliable and safe, the most important is the ability to instantly monitor the occurrence of damage and development. At present, there are less methods to be able immediately monitor the carbon fiber bicycle while the carbon fiber bicycle are in used. This study suggests that combined use of fiber optical time domain reflectometry for non-destructive testing methods to real-time health monitoring of fatigue damage in carbon fiber bike and internal defects.

Optical fiber has a small diameter, is unaffected by electro-magnetic interference and is reasonably temperature resistant. It can be embedded in the carbon fiber composite material and we could use OTDR(Optical Time Domain Reflection) to detect the characteristics of the loss of internal defects.

This research is about how to embed optical fiber in carbon fiber specimen with carbon fiber tube and the process to develop the carbon fiber bicycle embedded optical fiber which help healthy monitor the carbon fiber bicycle. In the laboratory, we did the experiment about V-type, U-type bending test and the three-point bending tests, which used OTDR to detect bending loss, and then discuss the relations about the light loss and carbon fiber defects further.

Keywords : carbon fiber, carbon fiber tubue, structure health monitoring, optical fiber, optical time-domain reflectometry

誌謝

在碩士生活當中，這一路走來雖然有些跌跌撞撞，但是在這期間，有家人的關心、師長指導、各位同窗好友的鼓勵下，順利完成了碩士研究，得以完成這本論文。在此，獻上萬分的感激。

首先，由衷的感謝指導教授 黃安斌 博士這些年來課業與學業上悉心的指導與幫助，讓我出國到大陸作研究，並教導我生活中的處世態度，使我在各方面皆有所精進與成長。最後論文能順利完成，謹致上誠摯的感激與謝意。

論文初成，承蒙成功大學張文忠 助理教授、建國科技大學許懷後 助理教授、以及何彥德 博士 於口試過程細心給予詳加指正與寶貴意見，使本論文能夠更趨嚴謹，在此由衷的感謝。

在學期間承蒙 方永壽教授、潘以文教授、廖志中教授、單信瑜教授與林志平教授在課業、研究與未來生涯規劃上的指導與建議，學生受益無窮，在此致上萬分感謝。

在研究上，感謝實驗室學長瑞庭、凱丞、全修、重錡的照顧與指導，以及讓人備感溫馨，畢業後回校指導的學長小叮噹、价民、超哥、崑山等學長。在生活上，感謝照顧我有如親哥哥的學長們文凱、智仁、貓伯、聰吉、永奇、瑋晉、浚昇、謝帥、誠師父、德哥。感謝在實驗生活當中，一起同甘共苦，有如家人般照顧我的同學們瑞陽、彥琅、奕蓁、瑛伶、阿政、智棟、哲毅、佩鐸、彭桑、峯哥、碩哥、彥森、偉欽、炳宏、里泉，以及世界上最可愛、最貼心的

學弟妹們 giga、文蕙、育芬、秉濬、信忠、心宇、景宇、阿康、卓民、威廷、佳諺、培旻、子奕、King、楚鈞、世輝、阿仁還有助理思傑、顥如，在此一併感謝。因為有你們，讓實驗室的生活變得更加有趣，像是相處在一個大家庭之中。

感謝台灣育華公司以及深圳柏冠公司提供我實驗設備，以及總經理、陳副總、蔡經理、財務劉經理、楊協理、葉協理的協助與照顧，和柏冠員工張勇等各位組長的協助與幫忙。

感謝我親愛的家人，爺爺、奶奶、爸爸、媽媽、意恬、郁秀、琬晴、琨茜你們是我心靈的支柱，也是我堅強的後盾。也謝謝在新竹一直照顧我的朋友們，怡君和亮瑩學姊。最後感謝交大的土地公保佑論文能平安順利完成。

由於你們的支持與鼓勵使我能克服萬難完成學業，沒有你們就沒有現在的我，謝謝你們對我的關心與付出。

蘇意婷 謹誌 中華民國九十九年七月

目錄

中文摘要.....	I
Abstract.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	V
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XI
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究方法與內容.....	3
1.3 論文內容概述.....	4
第二章 研究背景.....	6
2.1 結構健康檢測(Structural Health Monitoring, SHM).....	6
2.1.1 結構健康檢測的介紹.....	6
2.1.2 結構健康檢測的發展.....	7
2.1.3 結構健康檢測的步驟 (結構損傷檢測和統計模型識別模式).....	9
2.1.4 土木結構的健康檢測.....	12
2.1.5 傳感技術的發展.....	14
2.2 非破壞檢測(Non-Destructive Testing, NDT).....	15
2.2.1 非破壞檢測定義.....	15
2.2.2 非破壞檢測種類與簡介.....	16
2.2.3 非破壞檢測標準.....	19
2.2.4 缺陷位置偵測的應用.....	19
2.3 光纖的原理.....	20
2.3.1 光纖簡介.....	20
2.3.2 光纖傳輸原理.....	22
2.3.3 光纖種類.....	23

2.3.4 光纖傳輸損失	24
2.3.5 光纖感測器之種類	26
2.4 OTDR 原理	28
2.4.1 雷利散射損失(Rayleigh scattering loss)	29
2.4.2 光纖線路上之佛瑞奈反射(Fresnel reflections)	29
2.4.3 OTDR 量測原理	30
2.4.4 OTDR 的軌跡圖	30
2.4.5 回返信號之產生與距離之關係	31
2.5 OTDR 的主要特性參數	32
2.5.1 動態範圍(Dynamic Range)	33
2.5.2 盲區(Dead Zone)	33
2.5.2.1 事件盲區(Event Dead Zone)	34
2.5.2.2 衰減盲區(Attenuation Dead Zone)	34
2.5.3 脈衝寬度(Pulse)	34
2.6 OTDR 的參數設置	35
2.7 OTDR 剪動變形實驗	37
2.8 碳纖維複合材料簡介	38
2.8.1 碳纖維的發展史	38
2.8.2 碳纖維的種類與用途	39
2.9 碳纖維複合材料的破壞	40
2.9.1 碳纖複合材料的衝擊特性	41
2.9.2 複合材料的非破壞檢測	42
2.9.2.1 複合材料的品質管理與評定	42
2.9.2.2 複合材料的定期檢測	43
2.9.2.3 常用的複合材料非破壞檢測方法	43
第三章 碳纖車架內埋光纖感測器及 OTDR 檢測	59
3.1 碳纖車架介紹	60

3.1.1 預浸布	60
3.1.2 碳纖維車架的組成	61
3.1.3 成型設備	61
3.2 碳纖維管內埋設光纖感測器測試	61
3.2.1 實驗設備	62
3.2.2 研發方法	62
3.3 碳纖維車架內埋設光纖感測器的研發	64
3.3.1 實驗設備	64
3.3.2 研發方法	64
3.3.3 埋設成果	67
第四章 碳纖維結合光纖感測器之破壞試驗	87
4.1 碳纖維試片內埋設光纖感測器撓曲試驗	87
4.1.1 碳纖維試片內埋設光纖感測器製作	87
4.1.2 試驗方法與結果	88
4.2 碳纖維管內埋設光纖感測器三點彎曲試驗	92
4.2.1 碳纖維管內埋設光纖感測器製作	92
4.2.2 試驗方法	94
4.2.3 試驗結果	95
第五章 結論與建議	112
5.1 結論	112
5.2 建議	113
參考文獻	115

圖目錄

圖 1.1 研究流程圖.....	5
圖 2.1 光纖構造圖.....	48
圖 2.2 巨觀彎曲造成光損失.....	48
圖 2.3 微觀彎曲造成光損失.....	49
圖 2.4 在光纖中的雷利散射.....	49
圖 2.5 OTDR 量測示意圖.....	50
圖 2.6 OTDR 軌跡圖.....	50
圖 2.7 光時域反射儀動態範圍示意圖.....	51
圖 2.8 事件盲區和衰減盲區.....	51
圖 2.9 不同的脈衝寬度量測曲線.....	52
圖 2.10 光纖彎曲損失對應圖.....	52
圖 2.11 光纖與 TDR 之錯動變型實驗.....	53
圖 2.12 光纖與 TDR 之錯動變型實驗剪動變形器.....	53
圖 2.13 剪動量為 0mm 與 1mm 之光纖 b(訊號 2 為斷裂處).....	54
圖 2.14 剪動 0mm 與 2mm 時光纖 a(訊號 3 為錯動點).....	54
圖 2.15 光纖 a 剪動量與光損失之關係.....	55
圖 2.16 複合材料之特性圖.....	56
圖 2.17 纖維強化複合材料破壞示意圖(一).....	56
圖 2.18 纖維強化複合材料破壞示意圖(二).....	57
圖 2.19 超音波檢測原理示意圖 C-scan.....	57
圖 2.20 X-Ray 射線照相檢測.....	58
圖 3.1 車架形成流程圖.....	69
圖 3.2 碳布埋設光纖示意圖 (把管壁厚度放大 100 倍的示意圖).....	70
圖 3.3 車架組合圖(一).....	70
圖 3.4 車架組合圖(二).....	71
圖 3.5 車架模具.....	71
圖 3.6 熱壓臺.....	72
圖 3.7 碳纖管埋設的光纖線尺寸.....	72
圖 3.8 碳纖管內埋設光纖線示意圖.....	73
圖 3.9 配合接頭形狀修改模具.....	73
圖 3.10 修改模具整體.....	74
圖 3.11 接頭外部有樹脂無法拔出帽蓋.....	74
圖 3.12 樹脂由帽蓋流入接頭內.....	75
圖 3.13 接頭套上耐熱橡膠.....	75
圖 3.14 碳纖管內埋設光纖線成型前.....	76

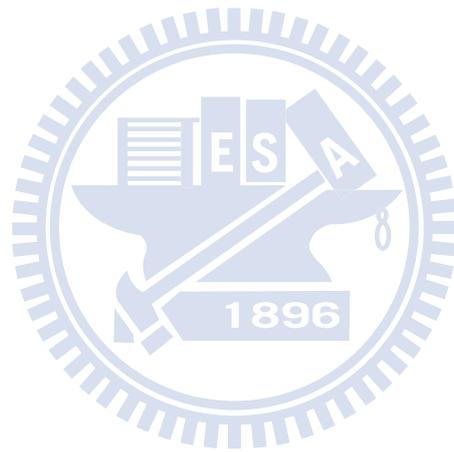
圖 3.15 碳纖管內埋設光纖線成型後	76
圖 3.16 成型後 OTDR 偵測光纖在碳纖管內狀況	77
圖 3.17 埋設光纖設計圖(盲區在車架外)	77
圖 3.18 光纖線盲區放置於車架外	78
圖 3.19 光纖線盲區放置於車架外加熱成型	78
圖 3.20 噴油前的磨砂	79
圖 3.21 改善埋設後光纖佈設圖(盲區在車架內)	79
圖 3.22 碳纖車架埋設的光纖線尺寸	80
圖 3.23 車架模具示意圖	80
圖 3.24 模具修改處(接頭放置位置)	81
圖 3.26 貼好的車架放入模具內準備加熱成型	82
圖 3.27 車架成型後開模	82
圖 3.28 開模接頭保護位置	83
圖 3.29 車架取出模具後(尚未修邊處理)	83
圖 3.30 車架內埋光纖圖	84
圖 3.31 車架膠合後	84
圖 3.32 光纖在車架內訊號狀況	85
圖 3.33 車架未來可能發生損壞之結構健康狀況(一)	85
圖 3.34 車架未來可能發生損壞之結構健康狀況(二)	86
圖 3.35 車架未來可能發生損壞之結構健康狀況(三)	86
圖 4.1 內埋光纖的碳纖試片	99
圖 4.2 V 型缺口撓曲試驗(8mm)	99
圖 4.3 裸光纖的撓曲損失對應圖	100
圖 4.4 碳纖試片(內埋光纖)的撓曲損失對應圖	100
圖 4.5 U 型缺口撓曲試驗(8mm)	101
圖 4.6 裸光纖的撓曲損失對應圖	101
圖 4.7 碳纖試片(內埋光纖)的撓曲損失對應圖	102
圖 4.8 碳纖試片(內埋光纖)的撓曲損失對應圖(1625nm 與 1550nm 波長)	102
圖 4.9 U 型缺口撓曲試驗(16mm)	103
圖 4.10 碳纖試片(內埋光纖)的撓曲損失對應圖(1625nm 與 1550nm 波長)	103
圖 4.11 碳纖管布線狀況(一)	104
圖 4.12 碳纖管布線狀況(二)	104
圖 4.13 碳纖管製作模具(一)	105
圖 4.15 成型設備	106
圖 4.16 碳纖成型狀況	106
圖 4.17 成型狀況	107
圖 4.18 成型的碳纖管	107
圖 4.19 三點彎曲試驗	108

圖 4.20 三點彎曲試驗施加荷重狀況(一)	108
圖 4.21 三點彎曲試驗施加荷重狀況(二)	109
圖 4.22 碳纖維管撓度變化量與光損耗之關係(1625nm 波長)	109
圖 4.23 碳纖維管撓度變化量與光損耗之關係(1550nm 波長)	110
圖 4.24 碳纖維管應力與光損耗之關係(1625nm 波長)	110
圖 4.25 碳纖維管應力與光損耗之關係(1550nm 波長)	111



表目錄

表 2.1 常見材料和纖維補強複合材料的特性	46
表 2.2 碳纖維的分類	47
表 4.1 三點彎曲試驗結果(最初偵測到的事件)	97
表 4.2 三點彎曲試驗結果(最後偵測到的事件)	98



第一章 緒論

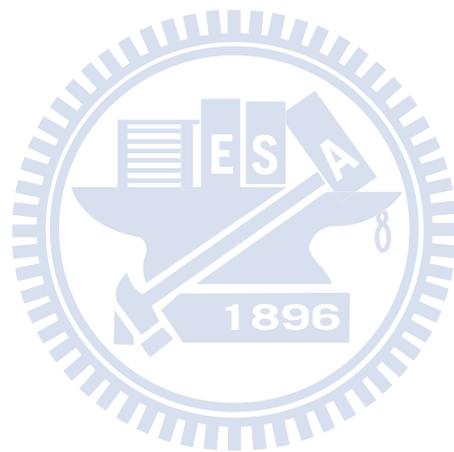
1.1 研究動機與目的

災害防治和安全監測預警是為世界各國所重視的課題，目前結構健康檢測的技術逐漸應用廣泛，在土木工程當中結構健康監測的技術已被廣泛的應用，例如：光纖分佈式橋梁與道路安全健康監測技術應用與開發等。藉由這種健康結構檢測技術應用與開發的觀念應用在碳纖構造物的安全檢測上。

碳纖具有質量輕、高強度與高彈性率的特點，因此使用極少量之材料即可製作質量輕且強固之碳纖管式結構元件。近來金屬材料與能源成本不斷上升，使用碳纖取代金屬材料之經濟性不斷增高。碳纖複合材料的相關產業目前逐漸被廣泛的應用於生活當中，如：網球拍，自行車架、汽車、飛機、風力發電、船舶結構支架等之應用，研究需求性提高。

碳纖複合材料的非均質性與非均向性之材料特性，成品容易有不一致的現象。為了檢驗材料結構強度設計以及檢測品質的狀況，破壞性試驗為主要且常用之檢測碳纖結構元件強度與安全性的方法。此外碳纖複合材料為脆性，一旦受到強烈撞擊，或疲勞與老化作用使得結構弱化，常造成無預警的破壞。以現今自行車支架所使用碳纖管式結構為例，其碳纖厚度小於 1mm，直徑大多在 10cm 以下，內部如果出現裂縫將容易造成材料破壞，騎乘者受傷。

為了避免碳纖維結構元件在無預警的狀況下產生破壞，嘗試使用結構健康監測的觀念來檢測碳纖維結構元件之安全性，此研究以碳纖維自行車架為主要對象。研發光纖光時域反射法為碳纖維管式結構物健康檢測之方法，對碳纖維自行車製造進行使用後的品質管理與安全檢測，來提高碳纖維自行車架之安全性。此技術也可以推廣應用於類似碳纖維結構如：汽車、飛機、船舶、風力葉片等。



1.2 研究方法與內容

使用光纖為感測器埋設於碳纖管式結構物-碳纖車架上，碳纖管結構受外力扭曲或產生裂縫，埋設的光纖也同樣的感受變形。光纖變形使光能量損耗驟降並用 OTDR 量測其損耗檢測車架的損傷，進一步對碳纖車架進行健康安全預警與評估。

研究內容如圖 1.1 碳纖車架埋設光纖首先須了解車架的製程，之後配合製程設計埋設方法與步驟，對埋設光纖於碳纖車架進行設計。第一階段在實驗室內製作碳纖試片結合光纖線並作撓曲試驗以推估事件發生的變形量驗證其可行性。

第二階段在工廠現場初步埋設光纖於碳纖車架上，研究過程中高溫高壓的環境使光纖線埋設於車架內困難、光纖線出口太小容易使光纖線折斷、如何保護光纖線、埋設後須熔接光纖接頭與外觀處理、OTDR 盲區有某一定的埋設長度以及放置外觀的影響等都是問題所在。改善光纖埋設過程成為實驗的重要部分，於是採取將光纖接頭與光纖線一起內埋於碳纖車架內的方法，過程中多次修改模具以及尋找耐熱接頭與耐熱套管等埋設材料，不斷執行車架埋設以及改良埋設過程，直到可行為止。

第三階段在實驗室內對碳纖管做軸向加載破壞實驗，在碳纖試片以及碳纖管內埋設光纖線，分別施作撓曲試驗以及三點彎曲試驗等破壞試驗，檢驗光纖

感應成效與量測結果並且討論。

1.3 論文內容概述

論文內容主要分為五章：

第一章：為緒論，說明研究動機與目的、研究流程與方法。

第二章：為研究背景，對相關研究進行說明，內容為介紹基本光纖原理、OTDR 的原理以及碳纖複合材料簡介。

第三章：包含碳纖車架的概述以及對碳纖車架埋設光纖之規劃、實驗之方法與實驗設備等實驗內容進行說明，最後作成果討論。

第四章：在碳纖試片以及碳纖管內埋設光纖線，分別施作撓曲試驗以及三點彎曲試驗等破壞試驗，了解碳纖埋設光纖是否能夠感應到破壞的發生以及對應的損耗量為何，並且對各項埋設成果與破壞試驗之結果進行討論分析。

第五章：結論與建議，綜合本研究之試驗結果與研究過程作出結論，並提出後續研究方向之建議。

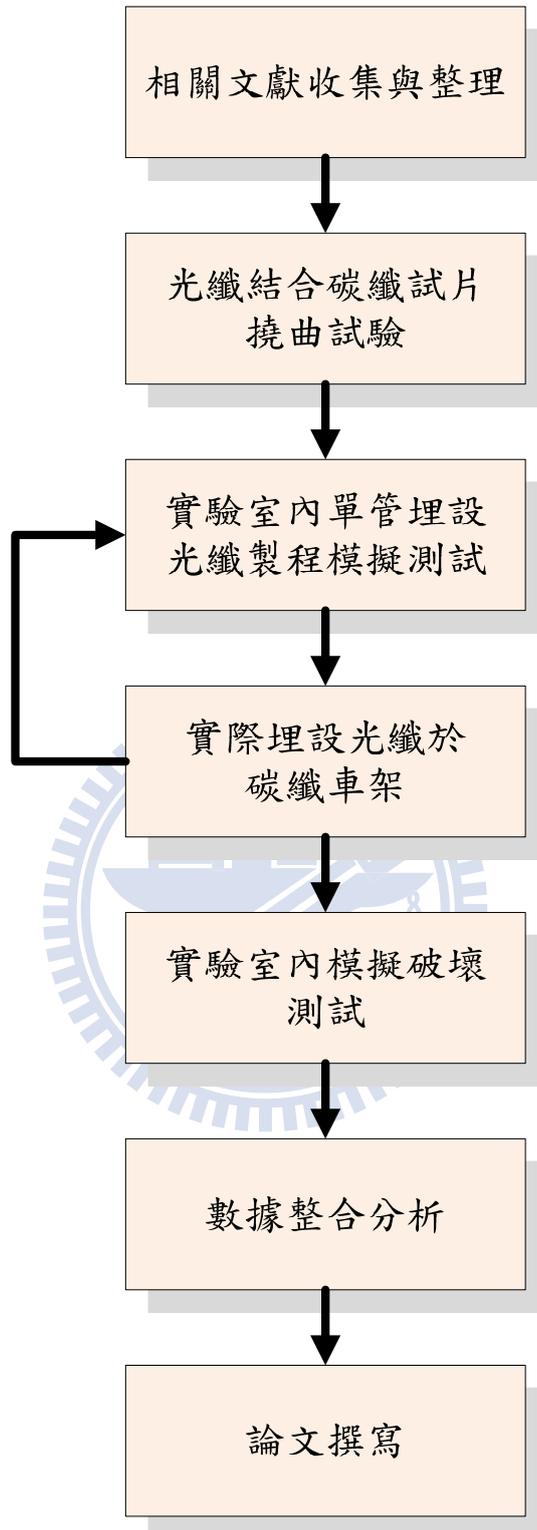


圖 1.1 研究流程圖

第二章 研究背景

2.1 結構健康檢測(Structural Health Monitoring, SHM)

近年來結構健康檢測的技術被世界各國廣泛的研究與應用，其動機主要為災害防治和結構安全監測預警對於人類生命安全與經濟利益影響很大，因此研究與預測各種災害發生的機制及防災對策是現今被所重視的課題。結構健康檢測技術為利用感測器來監控結構物目前與長期的健康狀況，除了提供有關何時需要維護與修繕的訊息外，亦可以提早對可能發生的危害提出警訊。

2.1.1 結構健康檢測的介紹

Mufti(2001)認為結構健康檢測的目的就是監測結構原來的行為並且準確和有效地去確定結構的健康和狀態。Farrar 和 Worden(2007)等學者對於航空工程、土木工程和機械工程的基礎建設實施損傷檢測和辨識過程稱為結構健康檢測 (Structural Health Monitoring, 簡稱 SHM)，也就是對一個結構或機械系統在使用一段期間後定期進行測量與觀察，從這些量測當中得到損傷的資訊並且進行統計分析這些特性來確定當前結構系統的健康狀態。長期的 SHM 可以定期更新結構執行環境下發生老化、疲勞和損傷的訊息。在發生天災或人為的意外事件時，SHM 可以迅速提供有關結構狀態即時和可靠的訊息。

非破壞檢測與 SHM 的不同在於非破壞檢測為直接量測物體評估整體結構

狀況，而 SHM 技術則是連續監測評估結構物在不同的時間點原處的改變狀態而評估整體結構狀況，也就是發展自動且持續的監測系統和檢測系統(Farrar & Worden, 2007)。

SHM 這項技術是由很多系統組合而成的，包括感測系統、數據取得的系統、資料庫系統、通訊系統、損傷檢測系統和模式建立的系統。發展這樣的系統將會牽涉很多學科包括結構、材料、損傷檢測、感測器研發、數據蒐集和智能處理以及電腦通訊系統。

SHM 可提供具有強大的經濟和生命安全的效益包括：可以在使用的狀態下即時監測、評估與分析結構、減少停機的時間、連續性監測提高安全性和可靠度以及減少維修成本。隨著減少停機時間以及提高可靠度，可以讓服務的結構更有效率、更低成本的被使用(Mufti et al., 2005)。

2.1.2 結構健康檢測的發展

在 1970 和 1980 年代，石油工業的發展建造了越來越多的海上平台。海上平台所處環境複雜並且惡劣，在長期受到各種環境因素作用下結構抵抗力衰減，而海洋平台部份結構位於海平面以下，並不容易發現結構損傷以及複雜的環境下結構損傷量測困難。為了保障海洋平台的安全運行，開發了許多結構損傷檢測的方法應用在海上平台，量測其自然頻率和以結構動力的特性來檢測破壞情況(Vandiver, 1977)。Viero 和 Roitman (1999)的文獻曾經提到使用實驗模型的實驗分析與理論計算的方法應用在海上平台的損傷檢測。

在 1970 年代末和 1980 年代初，隨著太空梭的發展，航空界開始研究使用振動型的損傷檢測方法，目前美國太空總署正在持續研究這個技術和應用在未來可重複使用的火箭設計上。此外，在機身面板等部位為了辨識疲勞損害已經發展模態檢測系統，主要機制為這些部位通常覆蓋著耐熱的材料不適合目視檢測，無法使用局部非破壞檢測技術，因而發展模態檢測系統作為結構檢測方法 (Farrar & Worden, 2007)。

在 1990 年代中期，研究可重複使用的火箭之複合燃料箱成為發展複合材料損傷檢測的動機。高速碎片的衝擊所造成複合燃料箱分層的破壞，如果要進行檢測，感測器必須避免火花的產生，這個挑戰導致 SHM 在光纖傳感系統的發展 (Farrar & Worden, 2007)。

Doebbling et al. (1996) 和 Sohn et al. (2003) 的文獻提到有關很多損傷識別的學術研究。由上述不同科技的發展以及許多行業(包括國防、土木工程、汽車和半導體製造業等。)因為不同的研究成果促進現今 SHM 的能力。

SHM 的研究更進一步的促進許多發展包括：確定傳感器最佳的數量與位置的開發方法、辨識微小破壞的靈敏度、辨識因為不同環境的改變或試驗條件變化所造成的破壞、發展非破壞和破壞的結構檢測方法以及不同破壞檢測的方法應用在一般的案例做性能比較。

2.1.3 結構健康檢測的步驟 (結構損傷檢測和統計模型識別模式)

一般而言 SHM 有幾個步驟，包括損傷檢測、損傷定位、損傷量化、預知使用壽命、自我診斷和自我修復。為了能夠實踐這些步驟，發展損傷檢測、系統識別模式和感測器等技術已經成為 SHM 最重要的部份。

結構損傷檢測的方法一般分為破壞性檢測和非破壞性檢測。常用的非破壞檢測法(超音波檢測、放射線檢測等)大多數為局部的檢測特性，必須在已知大概缺陷位置後，才能發揮其效用。對於大型的結構而言，局部的非破壞檢測方法過於費時並且不適用，發展整體性的非破壞損傷檢測方法已經應用在現今大型的結構當中(Chang et al., 2003)。所謂整體性即檢測方法不受局部範圍而限制，目前有很多學者藉由動力特性的改變，研究出了整體性的非破壞損傷檢測方法。當結構體若有缺陷產生時，附近的材料性質都將會受到改變，其動力特性隨之變化，這些特性包含了自然頻率、振態及阻尼參數等，可藉由量測結構系統之自然頻率與振態形狀的變化來偵測構件損傷是否存在，以及損傷所在位置(連祥益，2001；蘇文喜，2003)。因此有很多學者利用這些特性，應用系統識別的方法發展結構損傷檢測。

系統識別是一種從量測數據建立動態模型的技術，動態模型是使用數學模型來描述系統的動態行為或過程。依據振動量測所得之系統反應或特徵資料(如結構系統之自然頻率與模態振型)，反求結構系統物理參數的改變(如勁度降低的多寡)，識別各結構元件的損傷位置與程度(張祐誠，2006)。目前已經有許多學

者發展不同的系統識別分析方法主要有基於振動參數(頻率、模態變化、模態曲率、柔度曲率等)的方法、有限元素模型更新方法、統計模型方法、遺傳算法和人工神經網路方法、小波變換以及小波變換神經網路方法等(Zhou et al., 2009)。

Farrar et al. (2001)用四大步驟定義 SHM 的過程包括：

1. 操作評估

操作評估是試圖回答對於實施損害檢測識別的能力的四個問題：

- (1) 有什麼生命安全或經濟的理由施作 SHM?
- (2) 系統的損害如何被調查和多種損傷的可能性，哪些例子最被關心?
- (3) 什麼是系統進行監測的條件，在操作的狀況以及環境當中?
- (4) 在操作環境下蒐集數據受到什麼限制?

2. 數據的蒐集、標準化與篩選

數據的蒐集是 SHM 的一部份，涉及了蒐集的方法、次數、傳感器的種類、數量和位置以及儲存的硬體傳輸設備。

數據的標準化對於損傷識別過程很重要，也就是數據的來源需要分類、簡化以及統計量化處理。當環境或操作改變，數據的標準化有助於比較同樣時間下量測的數據。

數據篩選就是選擇需要的資料去除不需要的資料特性的選取過程，通常基於個人知識直接參與蒐集數據。以上這些步驟都是執行 SHM 的一部份過程而且需要持續的過程。

3. 特徵擷取和壓縮資料

結構健康檢測的過程中最受關注的技術是數據特徵(features)的識別，藉此可以區分破壞和非破壞的結構。Fassois & Sakellariou (2007); Friswell(2007); Mal et al. (2007); Staszewski & Robertson (2007) 的許多文獻中有提到關於 SHM 部份的特徵擷取。其中最常見的特徵擷取方法是量測結構系統的反應量的改變，如振幅和頻率。另一種特徵擷取方法為發展應用在關於缺陷的損傷識別，在模擬實際操作狀況下建立初始參數能夠敏感的預測損傷，使用數值模擬作為分析工具，並且透過電腦模擬了解缺陷。針對重要的結構部位做損傷累積的測試的研究(破壞試驗、疲勞試驗或老化試驗等)，可以用來確定適當的特徵。

此外，SHM 需要蒐集結構經歷一段很長的時間和執行環境的數據，其執行操作和診斷訊息的技術產生的數據比傳統偵測結構動態訊息還多，由於需要比較蒐集結構的終生參數，對於壓縮數據的處理是有益且必要的。為了保留結構變化的特性在存在的環境和操作變化，SHM 另一項特點就是必須發展強大的數據壓縮技術。

4. 統計模型的發展

統計模型的發展是關於運用演算法擷取特徵參數量化結構損害的狀態。所有演算法解析量測的統計分佈或取得特性參數，為了提高損害識別的過程。使用在統計模型的演算法通常分為：

(1) 監督式學習的演算法。例如：群組分類和回歸分析。

(2) 非監督式學習的演算法。例如：ART、特徵組織圖。

丹麥學者 Rytter (1993) 描述結構損傷的診斷可以分成五個步驟依序為：

- (1) 存在。診斷結構是否有損害存在。
- (2) 位置。確認結構構件的損害的位置在哪裡。
- (3) 類型。結構構件的損傷類型。
- (4) 程度。損傷的嚴重程度。
- (5) 預測。損傷對於結構安全性的影響。

這些問題的答案的順序描述象徵對損害狀態知識的增加。當應用在非監督式學習的統計模式，典型的回答關於損害的存在和損害的位置問題；應用在監督式學習結合分析模式，統計程序可以使用更好決定損害的型態，損害的範圍和結構剩餘的使用壽命。

2.1.4 土木結構的健康檢測

在世界先進國家當中，廣大的國境內發達的公路建設以及橋梁數量十分驚人，維護管理所花費的時間人力與資源也很可觀。例如：美國約有 760,000 座公路橋梁中超過 30% 之橋梁老舊或結構安全有缺陷。這些結構安全有缺陷的橋梁，對於交通系統安全及經濟發展造成重大的阻礙，並且產生安全危害、安全養護與重建的龐大支出成為政府機關的主要問題，如何能在最經濟的方式與合

理的頻率下對目前數量龐大的橋梁與公路進行檢測維修是各國發展 SHM 的主要目標(李有豐等人, 2002)。

SHM 已經在土木工程中備受重視, 並且廣泛的研究與應用(Brownjohn, 2007)。對於土木工程而言, 土木工程災害的發生是不被社會所接受的。每個土木結構物存在於各式各樣的環境當中(不同的外力、溫度、應力等)是獨特的個體, 不像機械結構有固定測試的標準, 幾乎很難預測結構物未來執行功能的狀況如何, 因此在過去土木工師採用保守的安全規範來建造工程以及制訂檢驗項目來保持完善的土木結構物。保守的做法常導致昂貴的成本, 高齡結構物的維修與維護不易、甚至於在災害發生後不易去監測結構物的健康狀態。例如: 許多橋梁和大型建築建在地震區, 地震災害過後因為不能確定這些結構的安全性需要廣泛的區域以及費時的安全檢查而不能立即開放(Mufti et al., 2005)。

因此發展 SHM 技術有助於大型複雜結構設施安全運轉和適時維護。對長期的 SHM 而言, 結構物在使用的環境下不可避免的會隨著時間老化和疲勞, 定期更新資料輸出的過程可得知關於結構是否繼續執行預期的功能; 對短期的 SHM 而言, 由其是在特別的事件發生像是地震、颱風等天然災害使得橋梁突然損壞, SHM 可以用於快速的災害調查和及時的提供關於結構整體的可靠信息。

目前世界上許多重要的橋梁已經成功實施和運行長期結構健康監測系統, 如: 香港的青馬大橋、日本的明石海峽大橋、加拿大聯邦大橋等。很多大橋都安裝了溫度傳感器、應變計、加速度計、光纖傳感器、位移傳感器、腐蝕傳感

器、全球定位系統、地震儀、濕度計、雨量計等感測器量測長期橋梁的數據。SHM 已經在土木工程中實際應用，光纖分佈式橋梁及高架道路結構監測技術的開發(使用光纖光柵感測器埋於混凝土結構物內施作長期的健康安全監測)、港灣構造物安全檢測、核電廠結構安全之監控及使用年限之延長評估等(Ko & Ni, 2005)。

2.1.5 傳感技術的發展

近年來 SHM 的研究促進智能傳感器以及特殊傳感技術發展。結構健康檢測能夠對大型複雜結構進行監測和損傷檢測並且提供隨時安全可靠的結構訊息，使用的傳感器也做了相當大的改善，包括傳感器精度的提高、傳感器的數據處理已經能與數據採集同步，以及傳感器能夠方便大量的佈設等。

傳統的傳感器因為導線的高成本和在大結構安裝與維護的困難，已經發展了無線傳感器的技術。但是目前使用無線傳感器網路同樣困難，因為龐大的監測數據必須傳輸到中央工作站集中分析，數據儲存龐大，而無線傳感器很難滿足傳輸這些數據的頻帶寬和電源需求，正在發展中。

近年來發展智能傳感器技術使得密集陣列傳感器的損傷監測變成可能。具有嵌入式微處理器的智能傳感器和無線通信技術在土木基礎設施的監測控制和維護具有很大的潛力，儘管如此但目前此項技術仍有些問題需要解決。

2.2 非破壞檢測(Non-Destructive Testing , NDT)

2.2.1 非破壞檢測定義

檢測最重要的目的就是檢測出材料中的損害，損害(Damage)被定義為對物質進行改變，導致其目前或未來的表現受到不利的影響（沒有比較物質改變前後的損害狀態是無意義的，假設物質初始的狀態為沒有受到損害的狀態）。對於結構和機械的系統而言，損害為材料或幾何的改變以及包括邊界條件的改變和系統連接導致其目前或未來的表現受到不利的影響。更進一步推論所有的損害來自於材料性質，對於材料而言，損害稱為缺陷(Defect)或瑕疵(Flaw)。缺陷(Defect)定義為材料由於原始生產、製造、加工、使用等過程所產生的不完美，會影響材料使用性能者。在適當的負載情況下缺陷或瑕疵以不同的速度成長和聚集，造成部分或系統損害。損害不意味著系統的功能完全喪失，而是系統不再以最理想的方式運轉，隨著損害擴大達到某一程度將不被使用者接受則稱破壞(Failure)。以時間的觀點來看，隨著時間增長損害會逐漸累積，例如：疲勞或腐蝕的累積。相對地也會發生於一些短期的破壞事件，例如：人為災害、天然災害等(陳永增&鄧惠源，2009)。

非破壞檢測(Non-Destructive Testing , NDT)就是利用物理或機械方法或技術，在不破壞材料的情況下，檢測出材料是否產生缺陷。常見的非破壞檢測方法利用包括光學特性、磁特性、導電性、輻射特性及超音波傳導特性等作為檢

測原理。在缺陷檢測方面選用適當的非破壞檢測方法可以檢測出表面、近表面或內部缺陷，並判斷缺陷位置與大小(嚴重性)。

2.2.2 非破壞檢測種類與簡介

非破壞檢測領域不斷研發新的檢測方法，其目的主要為配合更複雜的檢測環境、以及更精確更有效率的檢測缺陷，其常用的非破壞檢測簡單分類如下：

(莊東漢，2007；陳永增&鄧惠源，2009)

1. 液滲檢測(PT)：

(1) 基本原理：利用毛細作用將滲透液滲入材料表面缺陷中，再利用顯像劑將滲透液吸出，形成可見的顯示。

(2) 材料限制：非多孔質材料。

(3) 使用器材：滲透劑、清洗劑、顯像劑、黑光燈。

(4) 最佳檢測方向：無方向性。

(5) 優點：操作研判簡便快速、廉價、不需特殊儀器及電源、適合多數材料、可攜性高。

(6) 缺點：僅能檢測開口至表面的缺陷、檢測溫度受限制、必須注意通風、永久紀錄較難。

2. 磁粒檢測(MT)：

(1) 基本原理：利用磁化裝備將鐵磁性材料磁化，材料表面或近表面的缺陷會在材料表面形成磁漏場，造成磁粒聚集而形成顯示。

(2) 材料限制：鐵磁性材料。

(3) 使用器材：磁場產生設備、磁粒(乾式或濕式)、退磁設備、黑光燈。

(4) 最佳檢測方向：磁力線垂直缺陷。

(5) 優點：操作簡便、可攜性高、對於表面及近表面的缺陷顯示清晰。

(6) 缺點：僅適合鐵磁性材料、試件檢測後常需退磁、複雜形狀磁化較難、永久紀錄較難。

3. 超音波檢測(UT)：

(1) 基本原理：利用低能高頻電波轉換成超音波傳入材料內產生折射、反射、衰減、共振等現象，再傳回探頭轉換成電波，利用形成的回波偵測缺陷。

(2) 材料限制：粗糙、晶粒粗大試件檢測靈敏度低。

(3) 使用器材：超音波檢測儀、探頭、耦合劑、標準或比較規塊。

(4) 最佳檢測方向：超音波垂直缺陷。

(5) 優點：穿透力強、可檢測很厚的工具、對裂痕檢測靈敏度高、可用電池電源，攜帶性高、可立即研判，並得知缺陷深度位置、可接紀錄器。

(6) 缺點：不適合粗糙，晶粒粗大試件、薄件或小件以及表面缺陷檢測不佳、需參考規塊與耦合劑、技術性較高。

4. 射線檢測(RT)：

- (1) 基本原理：X 射線照相利用 X 光穿透材料，將材料吸收 X 光能量情形記錄在底片上，再透過判片檢測出材料中之缺陷。γ 射線照相利用 γ 光穿透材料，將材料吸收 γ 光能量情形記錄在底片上，再透過判片檢測出材料中之缺陷。
- (2) 材料限制：材料吸收係數不宜太大或太小。
- (3) 使用器材：X 光機、電源、底片、底片套、增感屏、沖洗裝置、判片燈及防護裝備；γ 射源及屏體、遙控設備、其餘器材同 X 光機。
- (4) 最佳檢測方向：射線方向平行缺陷。
- (5) 優點：可用於各種材質、可做全材料缺陷檢測、可做永久紀錄、易判別缺陷種類、γ 射線不需電源。
- (6) 缺點：輻射危險需特別管制、儀器昂貴且笨重、γ 射線會衰減、X 射線需電源、不易得知缺陷深度位置。

5. 渦電流檢測(ET)：

- (1) 基本原理：利用通過交流電的線圈探頭接近導體試件，使試件產生渦電流。當試件表面或近表面有缺陷或物理性質結構改變時，渦電流改變振幅及相位，並改變拾取線圈磁場，利用儀器分析拾取線圈磁場的檢測方法。
- (2) 材料限制：導體(非鐵磁性較佳)。

(3) 使用器材：渦電流檢測儀、檢測探頭(表面、外繞、內繞)、標準或比較規塊。

(4) 最佳檢測方向：渦電流垂直缺陷。

(5) 優點：可測導電率、塗膜厚度與缺陷檢測、線圈探頭不需接觸試件、適用於高溫高壓或輻射區、形狀不規則試件、結果可儲存列印保存。

(6) 缺點：僅能用於導電材料、內部缺陷無法檢測、需用參考規塊，判定訊號不易、對於曲折表面易產生錯誤顯示或遮蓋適切顯示。

2.2.3 非破壞檢測標準

檢測標準會規定檢測的適用範圍、所需的設備、相關的技術、必須遵循的程序和可接受的合格基準。其中又分成兩大類，第一類是針對檢測方法的一般敘述(通則)；第二類是針對特定產品的檢測程序說明。

目前對於非破壞檢測標準(使用規範)訂定大致分成兩種，一為國家訂定的標準，另一為專業(產業)協會所訂定的標準。國內用於非破壞領域較著名且使用較多的標準包括：中國國家標準(CNS)、美國材料試驗學會(ASTM)的標準、美國機械工程師學會(ASME)、日本工業標準(JIS)及國際標準組織(ISO)等單位。

2.2.4 缺陷位置偵測的應用

一般缺陷產生的位置可分成表面、近表面與內部缺陷三種(陳永增&鄧惠源，2009)，不同非破壞檢測方法在檢測應用上也有所不同，以下簡單說明缺陷

位置與非破壞檢測應用的限制：

1. 表面缺陷：

此類缺陷外露於材料表面，可以利用液滲、磁粒、渦電流、射線檢測法驗出，利用超音波檢測表面缺陷時應注意探頭的不感應區。

2. 近表面缺陷：

(又稱次表面缺陷)是指缺陷位在材料表面下方，接近表面處，但缺陷未外露於材料表面上。一般是指在材料表面下方 6mm 以內之缺陷。此類缺陷除了目視與液態檢測無法檢測外，可以利用磁粒、渦電流、射線與超音波檢測檢驗。

3. 內部缺陷：

是指缺陷完全埋在材料下面，且距離材料表面較遠者。此類缺陷一般使用射線檢測與超音波檢測檢驗。



2.3 光纖的原理

2.3.1 光纖簡介

對於光纖的研究，在早期 1950 年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和高功率光源；華裔英籍科學家高錕(Charles K. Kao)博士於 1966 年發表介電波導管的光波傳送的論文提出光纖通信的理念；1970 年，美國 Corning Glass 公司的唐納(Donald)、羅伯特(Robert)及彼特(Peter)正式宣布製造出第一條損耗低於 20dB/Km

的光纖；而後於 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。1986 年指數型砷化鎵雷射二極體的發明，以及 1300nm 光纖衰減偵測器問世，使得光通信系統中的光纖長度可達 10Km，到了 1988 年第一條跨洋光纜鋪設成功。1990 年代中期，分波多工及光放大功能的實際應用，使得 1550nm 波長範圍之信號可以在光纖系統中傳輸。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(Sterling, 1993; Downing, 2005)。

光纖主要是由二氧化矽(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。光纖之結構為圓柱狀如圖 2.1，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(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)，會覆以樹脂，功用在於保護核心與被覆層，與光的傳播無關(Ghatak, 1998; Chen & Palais, 2004)。

一般所使用之單模(single mode)玻璃光纖核心直徑約在 100 至 125 μm 之間，楊氏模數介於 65~85GPa 之間(Pigeon et al., 1992; Antunes et al., 2008)，具有許多優點：低傳輸損耗、經濟性優異、不受電磁干擾、無須電迴路、耐環境性

優異、體積小、重量輕、可與電子裝置相容，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。

2.3.2 光纖傳輸原理

光在同一均質介質中是直線前進的，當遇到不同的介質時，除了部分光線被反射回到原來介質，根據史涅爾定律(Snell's law)而部分光線則以另一角度折射進入新的介質當中，其公式為：

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2.1)$$

其中

n_1 、 n_2 分別為入射端與折射端介質折射率

ϕ_1 、 ϕ_2 分別為入射角及折射角

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)。光在光纖內傳播，即是全反射現象，而局限在光纖內前進。

2.3.3 光纖種類

依照模數的多寡與折射率的分佈，大致可以把光纖分類成下列三種。其中步階式指核心與外層的折射率呈階梯式的變化，而漸進式指折射率從核心到外層逐漸縮小的分佈(簡旭君，2003；張國鎮等人，2004；Downing，2005)。

1. 多模步階式光纖(Multi-mode Step Index Fiber)

核心約為 $50\mu\text{m}$ ，有許多傳播模態，不同的模態的光延著不同的路徑前進，光所走的長度不同，因此到達接收端之時間也會不同，會產生嚴重的色散(Dispersion)現象。

2. 多模漸進式光纖(Multi-mode Graded- Index Fiber)

為了改善多模光纖的色散現象，將折射率按照平方分佈變低，光以蛇行的方式進行。光行進的速度與介質的折射率成反比，因此當光線通過折射率低的部分時，速度會加快，各模態的軸方向傳播速度約相等，而模態總數也大約為多模步階式光纖的一半而已，大大改善了色散現象。

3. 單模步階式光纖(Single-mode Step Index Fiber)

核心約為 $10\mu\text{m}$ ，使能量要集中在一個模態之內，要將核心的半徑或折射率差減至很小，入射光也必須要以幾近垂直的角度入射才行。單模光纖無傳播時間差，頻寬因此變的相當廣，其資料傳輸速率(data rate)與衰減現象(attenuation)表現都是最好的。但單模光纖的核心小，耦合光線的難度較高，價格也較貴。海底電纜系統用單模光纖，而電話幹線或資料連線則採用多模光纖。作為光纖

感測器，因為要求接收之光訊號無失真問題採用單模光纖。

2.3.4 光纖傳輸損失

在通訊系統的設計中，接收器所接收到的信號強度必須在某個最低極限值之上；因此傳輸過程所引入的衰減損耗將限制了該系統的傳送最大距離。

光纖損失定義為輸出能量與輸入能量之比值如下式：(簡旭君，2003；張國鎮等人，2004；Downing，2005；Palais，2006)

$$\text{Loss} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (2.3)$$

其中 P_{out} = 輸出能量， P_{in} = 輸入能量。在通訊系統中以對數的單位分貝 (decibels, dB) 來定義的話如下：

$$\text{Loss}|_{\text{dB}} = 10 \times \log \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (2.4)$$

其中 P_{out} = 輸出能量， P_{in} = 輸入能量。 P_{in} 與 P_{out} 必須同單位(例如：瓦特或豪瓦)，dB 負號表示損耗，正號表示增益，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。

光纖能量損失的原因如下：(郭宏源，2002；簡旭君，2003；Chen & Palais，2004；張國鎮等人，2004；Downing，2005)

1. 材料吸收損失(material absorption losses)

材料吸收損失又分成本質吸收及介入雜質的吸收；本質吸收在紫外線光域是因光激發電子轉態而吸收光能量，在紅外線光域則因材料分子震動而吸收光

能量。

2. 散射損失(scattering losses)

光纖製造過程不均勻而導致光纖之幾何特性不夠理想，主要分雷利散射(Rayleigh scattering)及麥氏散射(Mie scattering)，雷利散射是光纖製造時需經歷加熱、冷卻的過程，但在冷卻、結晶過程中，分子的排列不均勻，造成折射率的微小變動，這種現象是無可避免的，而這些不均勻的組織會造成光的散射，其損失與光波長的四次方成反比。麥氏散射是因為光纖為圓柱型介質波導，若其結構不均勻，如核心與外殼的介面不規則，核心與外殼的折射率差的變動，核心直徑的變動、受應力、核心內之氣泡等，則會造成麥式散射。

3. 彎曲損失(bending loss)：

當光纖彎曲時，將會引起光損耗，可分為下列兩種原因：

(1) 巨觀彎曲(macroscopic bending)

巨觀彎曲表示大尺度的彎折，通常是故意的行為造成。光在光纖內傳輸是靠全反射現象，把光信號局限在核心內，也就是光入射角必須大於全反射所需的臨界角；當光纖彎曲時造成部分光入射角小於臨界角，光線將穿出核心進入外殼，造成核心處的光損耗，如圖 2.2。實際例子中，125 μm 的直徑之光纖可被彎成小於 25mm，其功率損耗仍可忽略。

(2) 微觀彎曲(microscopic bending)

微觀彎曲會在光纖中隨機出現，光纖外有一覆蓋層保護，這些保護層多少

會帶來不均衡壓力失於光纖，而使得光纖產生些微的彎曲現象，於是帶來光損耗，這是因為微彎曲會造成光的散射而射出光纖，如圖 2.3。

2.3.5 光纖感測器之種類

光纖感測技術最先應用於航太飛行器，以全程監視零組件狀況及機體結構完整性。例如：將能夠傳導光的纖維埋入複合材料中，一旦材料開始出現裂紋，光纖受拉力而斷裂，使原本固定傳送至感應器的光電訊號為之中斷，因有預警而採行必要措施。最近研究顯示，光纖經過事前處理，如調變光之傳送強度、相位及頻率，使其在感測機構中能更迅速地測出材料之機械性及化學性的變化，並提供結構損傷的即時狀況。光纖感測器的優點主要有下列幾項(Sterling, 1993；張安華，2005)：

- (1) 不受電磁、電場、雷電、溫度等干擾。
- (2) 傳輸損耗低，光纖的最低損耗已達0.2dB/km，因此很適合做長距離的傳輸。
- (3) 體積小、重量輕。
- (4) 長期使用準確性佳，光纖感測器利用波長或頻率檢測來獲取資訊，不會產生傳統感測器利用偵測電阻變化，因電阻隨時間而產生之改變而導致之數值量測誤差。
- (5) 高靈敏度，光纖感測器量測精度在靜態下，而一般傳統感測器由於電子雜訊干擾，其靈敏度常被限制。
- (6) 抵抗環境能力佳，光纖非金屬製成，無生鏽之困擾。此外光纖感測器可以與

現有的龐大光通訊市場之儀器及元件整合，形成監測網路，因此近年來國外研究指出已運用於土木工程各個領域，包括橋梁、隧道、水壩及古蹟建築物監測上。

1.以感測元件分類

(1) 本質式 (Intrinsic) 光纖感測器

這系統中，光纖本身扮演感測器角色，當被感測物體受外在環境的改變時，將調變光纖中光波的傳導模式，而光的傳導模式改變主要是外在的因素擾動而改變光纖的長度、折射率、偏極面所致。光纖作為主要的感測元件，其要求較高，通常以單模光纖為主。

(2) 非本質式 (Extrinsic optical fiber) 光纖感測器

在這系統中，光纖只負責傳遞訊號的工作，即感測元件間傳輸的介質，因此感測過程中必須要有其他的感測元件配合。

2.以解調方式分類

(1) 相位 (Phase) 調變

運用光傳輸路徑長度上的改變來解調。通常需要一個調變訊號跟一個與外在環境改變隔離的參考訊號做比較，當同調的兩道光重合時，光波長的相位分佈會影響其干涉現象，由調變光波間的相對性相位差，將可作干涉性的量測。相位調變之感測器可以有極高的靈敏度以及動態量測範圍。但是當監測儀器在沒有啟動的狀態下，相位變化的過程便無法被紀錄下來，因此不容易做到直接

量測。

(2) 光強度 (Intensity) 調變

運用光的吸收、放射損失、散射、及發光特性。通常系統架構最為簡單，且光強度調變之感測器可以得到絕對的量測。但由於需要外接光源，光強度可能會有擾動，其靈敏度會受到限制。

(3) 波長 (Wavelength) 調變

運用光波長的飄移來解調。處理過後的光纖感測器暴露在感測環境下，可以由光譜之改變來獲得物理量變化。波長調變之感測器不僅有相位調變感測器之優點，而且只要儀器一啟動光波長可以直接被讀取，因此可以做到直接量測(簡旭君，2003；張國鎮等人，2004；Chen & Palais，2004)。

2.4 OTDR 原理

光時域反射儀(Optical Time-Domain Reflectometer，OTDR)顧名思義是以時間定義域來量測光纖傳輸狀態之儀器。利用的技術是藉由雷射二極體發光元件產生的週期性脈波入射至待測光纖，光脈衝在光纖中產生的背向散射光(Backscattering)，產生回返信號，藉由回返信號之時間決定光纖發生事件或故障的位置。

背向散射光就是光脈衝在光纖中行進時會有一些光向後反射，而折回到光纖輸入端的光。發生背向散射光的原因是光纖之雷利散射(Rayleigh scattering)和

弗瑞奈反射(Fresnel reflections)所造成的。雷利散射的發生是由於光纖內的密度及組成不均勻所產生折射率的微小變動，造成散射現象(大約有 0.0001%沿脈衝相反的方向被散射回來)；而弗瑞奈反射是由於在連接點、接續及光纖端面的折射率改變所造成的(許正榮，2007)。

2.4.1 雷利散射損失(Rayleigh scattering loss)

光纖製造過程中分子在玻璃熔解狀態下隨機移動，熱提供了分子運動所需的能量，當冷卻時隨機運動的分子凍結，造成密度變化及折射率的變化，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就是所謂的雷利散射(Rayleigh scattering)，如圖 2.4。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，產生散射。雷利散射具波長之相關性($\propto \frac{1}{\lambda^4}$)波長越長越不顯著(王萬易，1996；吳彥然，2006)。

2.4.2 光纖線路上之佛瑞奈反射(Fresnel reflections)

當光從一種折射率的介質傳輸至另一折射率的材質時，有一部分光經常返回原介質，這種反射稱為佛瑞奈反射(Fresnel reflections)。如光纖裂痕、連接器斷裂，造成一邊為光纖折射率 n_1 ，一邊為空氣折射率 n_2 ，兩者折射率不同，產生反射，其反射功率(P_r)與入射功率(P_i)之比為

$$\frac{P_r}{P_i} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (2.5)$$

其中 P_r 為反射功率、 P_i 入射功率。大多數情況下在光纖內光傳播路 n_1 與 n_2 均相差甚小，其不連續所引起之反射功率甚不顯著，所以在光纖發生反射型事件會出現佛瑞奈反射(Fresnel reflections) (王萬易，1996；吳彥然，2006)。

2.4.3 OTDR 量測原理

OTDR 量測原理如圖 2. 5 所示，主要由光源、分光器、檢光器及顯示器所組成(Derickson，1998)。其操作原理是利用訊號處理單元(Signal Processing Unit)觸發一個短且高功率的光脈衝經由分光器耦合到光纖，光脈衝在光纖中行進時會有部份的光向後散射而折回，這折回的散射光會經由分光器而被反射到檢光器，經由檢光器轉為電訊號並將其放大輸出，再由類比數位轉換器(Analog Digital Converter)經過訊號處理單元處理過後做為顯示器的垂直輸入端。因為到達檢光器的光功率相當微弱，所以 OTDR 必須作重複的量測以達精確的數值，因此我們可以将螢幕顯示的測量值加以平均處理，以改善 SNR 值(許正榮，2007)。

2.4.4 OTDR 的軌跡圖

當偵測光纖時光脈衝沿著光纖傳播，儀器接收到背向散射脈衝的結果造成 OTDR 的軌跡顯示在螢幕上並且提供有關被偵測光纖的訊息，橫軸座標相當於偵測光纖的位置，縱軸為光功率(dB)，如圖 2. 6 是典型的 OTDR 軌跡(Derickson，1998)。由 OTDR 軌跡依據光功率大小可以知道光纖沿線上所有事件的發生以及對應的位置。在一條 OTDR 的軌跡上面可以有很多事件出現，每一個事件都有

它的意義。

OTDR 軌跡由四大部分組成，第一部份是丁狀突起，由光纖最前端接頭因為折射率不同產生弗瑞奈反射的現象，一般發生在光纖接頭、接頭對接處、光纖出現裂縫和光纖尾端；第二部份是下降的斜直線，在軌跡中直線隨著距離而衰減代表每公里光纖的衰減(dB/km)為雷利散射現象產生，一般發生在光纖線內；第三部份是階梯形的下降，光纖熔接處因為光能量的損失而造成曲線的突然下降，一般出現在熔接點、光纖受壓變形或彎曲處，這是因為光反射離開纖心造成光損耗；第四部份是雜訊層，光纖的尾端沒有光訊號可以被偵測，曲線將下降到雜訊層。

光纖熔接處和彎曲稱為非反射事件因為他們是內部損耗不是反射訊號。接頭、機械熔接和缺陷都有微小缺口，空氣與玻璃接處產生折射率不同而造成弗瑞奈反射稱為反射事件。比較大的反射發生在光纖終端，光纖終端的反射的強度依照光纖尾端表面的狀況而定，有 4%的光功率可以被反射回 OTDR。(Sterling, 1993; 崔志龍, 2003; 吳彥然, 2006)。

2.4.5 回返信號之產生與距離之關係

週期光脈波進入光纖後，因為雷利散射和弗瑞奈反射而造成背向回返信號經 2.4.3 所述各項步驟處理後表達於顯示螢幕上，OTDR 的螢幕顯示縱軸為光功率值與橫軸為距離之對應關係。信號往返之時間 t 與距離 D 之關係(王萬易, 1996; 張安華, 2005; 許正榮, 2007)

$$D = \frac{c \times t}{2 \times n} = \frac{ct}{2n} \quad (2.6)$$

式中 D=光沿著光纖行進的距離、

c=光在真空中之傳播速度(3×10^8 m/s)、

t=信號往返之時間、

n= 光纖核心(core)折射率。

2.5 OTDR 的主要特性參數

OTDR 參數的設定包括：平均時間、脈衝寬度、儀器的操作等，都直接影響測試品質。平均時間是指 OTDR 所看到的反射訊號是隨時在變動的，把某一時段的訊號值加起來後平均之，使反射訊號變成一個不再跳動的訊號，如此可以大幅減少雜訊的影響，OTDR 便可以更清楚地看見光纖線路的情況，平均時間越長，測量的結果越準。除了以上所提及的參數外，另外還有動態範圍(Dynamic Range)和測量範圍(Measurement Range)、盲區(Dead Zone)、空間解析度(Spatial Resolution)等重要參數需要被瞭解，以下將針對這幾種參數各做介紹(吳彥然，2006)。

2.5.1 動態範圍(Dynamic Range)

動態範圍是決定 OTDR 量測光纖距離的參數。動態範圍越高，OTDR 能夠分析光纖的距離越長。其定義為起始發射端的 dB 值 $P(0)$ 與 98% 雜訊(Floor98)之間的差值。其公式可表示如下：(陳建村，2002；吳彥然，2006)

$$DR(\text{dB})=P(0)-\text{Floor}98 \text{ 或 } DR(\text{dB})=X+|\alpha L| \quad (2.7)$$

式中 α = 光纖衰減係數(dB/km)，如圖 2.7。一般動態範圍為 35dB 的 OTDR，實際可量測動態範圍在 30dB 左右。假定使用 1550nm 波長量測光纖衰減為 0.20dB/km 的單模光纖，並且每 2km 存在 0.1dB 的熔接點，量測距離可達 120km。

2.5.2 盲區(Dead Zone)

光時域反射儀使用高靈敏度與低功率之光偵測器(Photo-detector)，當光纖中的折射率突然改變時會產生的 Fresnel 反射，其能量較強且會容易造成光偵測器飽和的現象，導致檢光器暫時的盲目而需要一定的恢復時間，在此期間將無法判讀事件，稱為盲區。盲區的大小與脈衝寬度、反射係數、損耗等因素有關。脈寬越短，盲區越小，但短脈衝同時又減小了動態範圍，因此要在盲區和動態範圍之間折衷選擇脈寬。盲區有兩種型態，可以分為事件盲區(Event Dead Zone)與衰減盲區(Attenuation Dead Zone)兩種，說明如下(王萬易，1996；Derickson，1998；吳彥然，2006；許正榮，2007)。

2.5.2.1 事件盲區(Event Dead Zone)

事件盲區是指光纖發生兩個反射事件能夠被分辨的最小距離，被定義為在反射訊號的起始點與最高點往下 1.5dB 的邊界兩者之間的距離，如圖 2.8。在事件盲區內可知道事件的距離，但每個事件各自的損耗不可測。因為係分辨兩事件之最小距離故又稱空間解析度 (Spatial resolution) 或事件解析度 (event resolution)。一般而言，測試脈波為方波，其事件盲區或空間解析度公式如下：

$$\Delta Z = v_g \cdot W \quad (2.8)$$

其中 W 為脈波寬度、 v_g 為光脈波傳波速度。由式中得知預得良好之空間解析度，需使用短脈波。

2.5.2.2 衰減盲區(Attenuation Dead Zone)

衰減盲區是指光纖發生兩個反射事件能夠量測另一事件損耗的最小距離，定義為反射訊號的起始點與平穩曲線 $\pm 0.5\text{dB}$ 對應的軌跡兩者之間的距離，如圖 2.8。衰減盲區與入射光脈衝寬度有關，窄脈衝寬度衰減盲區小，大寬度之脈衝寬度衰減盲區大，如圖 2.9。

2.5.3 脈衝寬度(Pulse)

若波長已知，當光脈衝寬度變大時，其所傳輸的功率增加，能承受更長距離的衰耗，因此能測得更遠距離的後散光，所以動態範圍變大時 Fresnel 反射反射波最大功率的功率寬度也因此變大，使得盲區的長度變大，造成 OTDR 的空

間解析度變差(王萬易，1996；陳建村，2003)。

2.6 OTDR 的參數設置

大多數 OTDR 對於待測光纖通過發射測試脈衝，會自動地選擇最佳的獲取參數，使用者只需選擇波長、獲取時間及必要的光纖參數(如折射率、散射係數等)。自動獲取參數需要一定的時間，因而在已知測量條件下，操作者可人工選擇測量參數(許正榮，2007)。

1. 波長選擇

光系統的行為與傳輸波長直接相關，不同的波長有各自不同的光纖衰減特性及光纖連接中不同的行為，例如：同種光纖 1550nm 比 1310nm 波長量測彎曲更敏感、單位長度衰減更小、測得熔接或連接器損耗更高。1625nm 波長對於光纖彎曲損失較敏感，1550nm 波長居中，1310nm 波長最不敏感，如圖 2.10。

2. 脈寬

脈寬控制 OTDR 注入光纖的光功率，脈寬越寬，動態測量範圍越大，可用於測量更長距離的光纖，但寬脈衝也將在 OTDR 曲線波形中產生更大的盲區；窄脈衝注入光功率低，但可減小盲區。

3. 測量範圍

OTDR 測量範圍是指 OTDR 獲取數據取樣的最大距離，此參數的選擇決定了取樣分辨率的大小。測量範圍通常設置為待測光纖長度 1~2 倍距離之間。

4. 獲取時間

由於背向散射光訊號極其微弱(大約每米 100 光子)，一般採用統計平均的方法來提高信雜比，獲取時間越長，信雜比越高。

5. 光纖參數

光纖參數的設置包括折射率和背向散射係數的設置。折射率參數與距離測量有關，背向散射係數則影響反射與回波損耗的測量結果。雷力散射的功率與發射信號的波長有關，波長較短功率較高。



2.7 OTDR 剪動變形實驗

崔志龍(2003)以 OTDR 結合傳統 TDR 錯動變形試驗找出錯動事件點的位置。在實驗室內，使用 OTDR 來進行剪動變形實驗，實驗時取長度約為 1400m 之單模光纖，其對 1550nm 光波長之衰減量為 0.19 dB/km。將光纖 a 在剪動帶約 1m 之長度黏貼於全長 1.7m 的 CommScope 電纜(剪動產生部分變形由電纜承受)；光纖設置於附近與 a 做比對，如圖 2. 11。以上配置完成後放入剪動變形器中，如圖 2. 12 所示，並將石膏澆灌於盒內靜置兩天。藉由轉動旋轉桿推動剪力盒使其產生錯動變形，每轉動 1/4 圈產生 1mm 錯動變形量。

其試驗結果如圖 2. 13 所示，可以發現在剪動 1mm 的狀況下，OTDR 量測到光纖 b 已斷裂。如圖 2. 14 所示，剪動 2mm 的狀況下光纖 a 出現非反射事件，光損耗產生。損耗與錯動量呈現正相關，光纖 a 位置誤差 2m；光纖 b 位置誤差 2m，如圖 2. 15。量測錯動變形 OTDR 比 TDR 能較早發現辨別出錯動位置，錯變變形量與光損失呈現正相關。相較之下 OTDR 靈敏度比 TDR 高、量測距離衰減較低、量測錯動變形範圍較小，因此利用 OTDR 結合傳統 TDR 錯動變形試驗找出錯動事件點的位置。

2.8 碳纖維複合材料簡介

科技的發展常取決於該領域材料的進步，隨著航太工業的發展單一材料的應用在高溫壓及腐蝕環境的嚴苛條件下已經無法滿足所需。複合材料與傳統材料不同的地方是複合材料是利用兩種或兩種不同性質的材料，以不同的加工法結合在一起，取得原材料的優點發揮協同作用，製成性能優異並滿足需求的一種新材料，其中以纖維強化的複合材料性較佳，應用也較廣泛，碳纖複合材料即是纖維強化材的其中一種(馬振基，1988；劉國雄等人，2006)。

碳纖維複合材料相較於其他材料具有質輕，高強度與高硬度的特點，如表 2.1、圖 2.16。單位質量的強度和模量稱為比強度和比模量。比強度和比模量是在質量相等的前提下衡量材料承載能力和剛性特性的一種指標。對於航空、航太的結構部件，汽車、火車、艦艇、分離核燃料的高速離心機等運動、轉動結構，這是個常重要的指標，它意味著可以製成性能好而又重量輕的結構。隨著研究技術不斷成熟，應用領域逐漸廣泛(馬振基，1988；林金福等人，2002)。

2.8.1 碳纖維的發展史

碳纖維是指纖維中含碳量在 95%左右的碳纖維和含碳量在 99%左右的石墨纖維(林金福等人，2002)。碳纖維的研究與應用已經有 100 多年的歷史，1880 年美國發明家愛迪生先生曾經利用竹絲經碳化製成碳素纖維製作電燈泡燈絲。1950 年代末期，美國因為開發太空方面需要用新的材料，因此有耐高溫材料碳

纖維的上市。1959年，美國聯合碳化公司(Union Carbide Co.)以嫫縈(Rayon)為原料、日本大阪工業研究所的進藤教授(A.Shindo)以丙烯腈(PAN)原料製成碳纖維。1965年日本羣碼大學的大谷杉郎教授(S.Otani)發展出以瀝青(Pitch)為原料製成碳纖維的產品。至1970年代左右，“夢想中的比鋁還輕，比鋼還強的材料”碳纖維的生產，已經開始步上軌道，並成為今日的主流。(馬振基，1988；周森，2002)

2.8.2 碳纖維的種類與用途

製造碳纖維的母材發展至今不下百種，在製程之難易、成本、含碳量等考量之下，真正實用為聚丙烯腈(Polyacrylonitrile 簡稱 PAN)、瀝青(Pitch)與嫫縈(Rayon)三種母材，其中採用聚丙烯腈生產碳纖維最多。

碳纖維因原料與製程方式不同可分為泛用碳纖維、高強度碳纖維、高彈性模數碳纖維及活性碳纖維等四類，如表 2.2(馬振基，1988；林金福等人，2002)。

碳纖維發展初期為低性能碳纖維，主要利用其耐熱、優良導電性、耐蝕性、比重小等特性。後來因為高性能碳纖維生產後，其強度高、彈性優異、熱固性與熱塑性能夠適合各種形狀設計等特性使其應用範圍更廣泛，也應用在各種生活方面，如下：

1. 體育休閒方面：碳纖維具有質輕、機械性質強等多方面的優點，因此廣泛

用於自行車、網球拍、羽球拍、釣魚竿、高爾夫球拍、球棒等方面。

2. 航太空業方面：噴射機、人造衛星、火箭飛機、太空航行器等方面。
3. 其他：遊艇、船身、汽車骨架、風力發電風車葉片等方面。

2.9 碳纖維複合材料的破壞

複合材料的破壞成長模式為多重裂縫(multiple crack)之生成與增加，裂縫最初發生在最弱層或是最弱的鍵結處，如破斷之纖維、氣泡、空孔等缺陷破壞隨著受到靜態負荷與疲勞過程裂縫發生在下一個最弱層或是最弱的鍵結處，裂縫數目逐漸增加，不同裂縫連結導致脫層，最後導致材料的斷裂(何彥儒，2007)。

由 Westergard 及 Irwin(1957)所述的彈性理論之應力分析知道，裂縫尖端應力分佈有三種主要的荷重模型，這些模型有不同裂縫表面位移(Crack surface displacement)，一般發生的破壞都由以下二或三種型式的破裂組合而成。

1. Mode-I 開口式破壞：開口或張力模型，變形垂直於裂縫面且與裂縫前緣垂直。
2. Mode-II 滑動式破壞：滑動或平面內剪力模型，變形是在裂縫面上，而且亦垂直於裂縫前緣。
3. Mode-III 撕開式破壞：撕開模式，變形在裂縫上面，但與裂縫前緣平行。

碳纖維複合材料的基本損傷模式有下列四種(Karger-Kocsis & Friedrich, 1988)：(1)基材裂縫(matrix cracking)；(2)纖維破裂(fiber breakage)與纖維拉出(fiber pull-out)；(3)纖維基材介面脫鍵(fiber/matrix interface debonding)；(4)脫層(delamination)等四種，如圖 2.17、圖 2.18。這些損傷模式有可能單獨存在也可

能同時存在，而且由某個單一的損傷可能導致其他類型的損傷模式發生，而損傷發生關係到複合材料之纖維、基材、纖維與基材之鍵結三者間與各種條件加載造成。

2.9.1 碳纖複合材料的衝擊特性

衝擊力是指短時間內在材料上的小面積造成相當大的接觸力量，在衝擊接觸時，常伴隨著彈性、塑性變形和破壞事件的發生(Ramkumar, 1983)。

近年來，纖維強化複合材料被廣泛的應用是因為具有重量輕盈、比强度高、抗腐蝕等優點，但是在耐衝擊性方面卻沒有金屬材料來的優秀，原因在於纖維強化複合材料一般都比金屬材料來的硬脆，在延展性與吸收衝擊能量的能力也沒金屬材料來的好(Liu, 1998)。複合材料在應用中難免受到衝擊，由其是那些表觀上不使複合材料破壞的低能衝擊，往往造成材料的內部損傷，進而使材料性能大大下降。衝擊損傷是複合材料結構中所需要考慮的主要損傷形式，衝擊後的壓縮強度是評定材料和改進材料所需要的主要性能指標。

衝擊損傷可按衝擊能量和結構上的缺陷情況分為三類(林金福等人, 2002)：

1. 高能量衝擊，在結構上造成貫穿性損傷，並伴隨少量的局部分層。
2. 中等能量衝擊，在衝擊區造成外表凹陷，內表面纖維斷裂和內部分層。
3. 低能量衝擊，在結構內部造成分層，而在表面只產生目視幾乎不能發現的表面損傷。高能量衝擊和中等能量衝擊造成的損傷為可見損傷，而低能量衝擊的損傷為難見損傷。損傷會影響材料的性能，特別是使壓縮強度下降很多。

衝擊引起內部缺陷造成複合材料內部應力分布不均勻及應力集中而產生破壞。此外，衝擊破壞會造成碳纖複合材料的脫層(delamination)破壞 (Liu, 1998)。在靜態與周期性的負荷之下，脫層的生長都會導致突發式的破壞(Avva et al., 1986)。

2.9.2 複合材料的非破壞檢測

由於複合材料的材料和製品是一次成型，同時生產製造出來的，對製成品的材料性能和質量狀況的檢測，一般採用無需破壞樣品的非破壞檢測方法。又由於複合材料是細觀非均質材料，本質上是結構物，材料細觀結構的複雜性，使得複合材料製品在成型過程中，可能產生如孔隙、分層、雜質、纖維鋪設偏差、組成(樹脂和纖維)分佈不均勻等諸多類型的缺陷，對材料性能和製品質量造成顯著影響。因此，非破壞檢測對複合材料製品質量的評定有著極重要的意義(林金福等人，2002)。

非破壞檢測技術(Non-Destructive Testing technology)是利用物理或機械方法或技術，在不破壞材料的情況下，檢測出材料是否產生缺陷的檢測技術(陳永增 & 鄧惠源，2009)。

2.9.2.1 複合材料的品質管理與評定

非破壞檢測目的之一，就是對非連續加工(多道加工程序)或連續加工(自動化生產)的原材料、半成品、成品以及產品構件提供即時的製程質量控制，特別

是控制產品材料的生產品質，例如缺陷情況、組織狀態、鍍層厚度監控等等，透過檢測所得到的資料又可反應給設計與工程部門，進而改進設計與製造工程以提高產品品質(何彥儒，2007)。

2.9.2.2 複合材料的定期檢測

如果複合材料有疲勞損傷或產品中原本存在的微小缺陷在使用過程中逐漸擴大成為危險性缺陷等情況，使用非破壞檢測技術對使用期間或正在運行中的設備構件進行經常性的定期檢查或線上監測，能及時發現影響設備繼續安全運行或使用，防止事故的發生是重要的課題，對於鍋爐、飛機、核能反應爐、電力設備以及碳纖自行車等相關的碳纖構造物而言，也能避免內部缺陷造成破壞影響安全。

2.9.2.3 常用的複合材料非破壞檢測方法

1. 超音波檢測

超音波非破壞檢測檢測的方法是利用超音波在被測樣品內傳播，遇到缺陷發生的發射波和透射波的頻率、振幅和相位等參數的變化，判斷樣品內部的缺陷和組織結構的狀況，從而達到檢驗樣品質量的目的。目前已發展有三類超音波非破壞檢測(林金福等人，2002；何彥儒，2007)。

(1) 超音波-A 掃描：

可以記錄和顯示發射信號和回波信號，探測和表徵被測樣品的內部缺陷，也可用於量測被測樣品的厚度。

(2) 超音波-B 掃描：

超音發射和接收器探針沿被測樣品表面掃描，通過檢測樣品上表面、下表面和內部缺陷的反射信號，可探測前進方向上遇到的樣品內部缺陷，但不顯示缺陷的寬度。

(3) 超音波-C 掃描：

檢測樣品每一不同深度反射面，在平面區域缺陷位置和面積大小，如圖 2.19。



2. X-Ray 照相檢測

利用射線照相檢測(Radiography Testing)方面，一般大多使用 X 射線和 γ 射線，射線會在經過檢測物的時候依照其內部密度的不同，射線會不等吸收，在檢測物後方放置對射線敏感的特殊膠片，依射線被吸收的不同呈現在底片上的曝光程度也會有所不同，X-Ray 射線(X 射線)在通過對其吸收率較大的材質或是缺陷時，便能在底片上有較為明顯的影像差異效果，對於通過吸收程度較小的材質、區域或是遇到缺陷的厚度較小的情形成像變會不明顯，這時可以考慮對試片的缺陷處滲入對 X-Ray 有高度吸收力的化學藥劑(顯影劑)，但是此方法的缺點在於若是內部裂縫沒有通到外部的話，藥劑便無法產生效果。膠片經過

X-Ray 感光後，經過多道的暗房處理程序，就可以得到具有與試片結構和內部缺陷相對應，以不同顏色深淺程度顯示的圖像；透過對底片上圖像的觀察可以評定試片中缺陷的種類、大小、形狀和分布狀況等，如圖 2. 20(何彥儒，2007)。

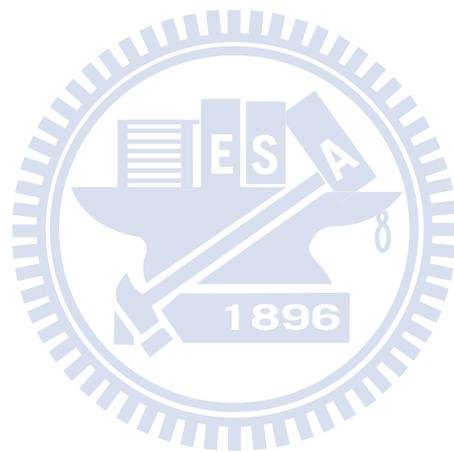


表 2.1 常見材料和纖維補強複合材料的特性

(林金福等人，2002)

材料名稱	密度 (10^3kg/m^3)	縱向拉伸 強度(MPa)	縱向彈性 模量(GPa)	比強度 (10^3m)	比剛度 (10^6m)
鋼	7.81	4120	207	54	2.7
鋁	2.68	620	73	24	2.8
鈦	4.70	1900	115	41	2.5
玻璃(塑)鋼	2.0	780	40	40	2.0
高強度碳/環氧	1.55	1620	140	107	9.2
高模量碳/環氧	1.67	600	290	37	17.7
硼/環氧	2.1	1400	215	68	10
硼/鋁	2.49	1400	239	57	9.8

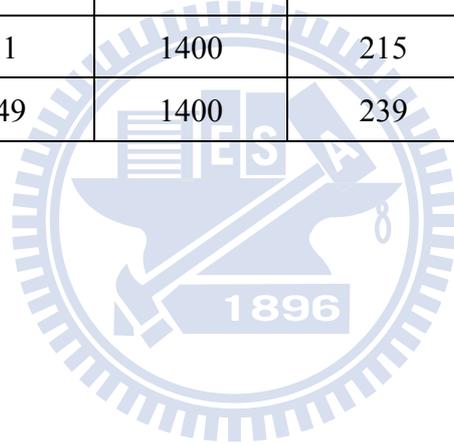


表 2.2 碳纖維的分類
(馬振基，1988)

碳纖維之分類 (括弧內為其他之稱呼)	原 料	機 械 特 性			用 途
		強度 (GPa)	彈性模 數 (GPa)	伸度 (%)	
低彈性模數碳纖維 (泛用碳素纖維)	Rayon 和 等質 Pitch	0.8	40	2.0	主要為耐熱材料或 震動材料
高彈性模數，高伸度碳 纖維(高強度碳纖維)	聚丙烯 腈 (PAN)	2.5~5.0	200~300	1.0~2.0	主要為高級複合材 料
高彈性模數，低伸度碳 纖維(高強度碳纖維)	液晶 Pitch 和 PAN	2.0~3.5	350~750	0.4~1.0	主要為結構材料之 彈性補強和耐熱材 料
活性碳纖維	PAN Rayon 酚樹脂	—	—	—	吸附材料和電池用 電極材料

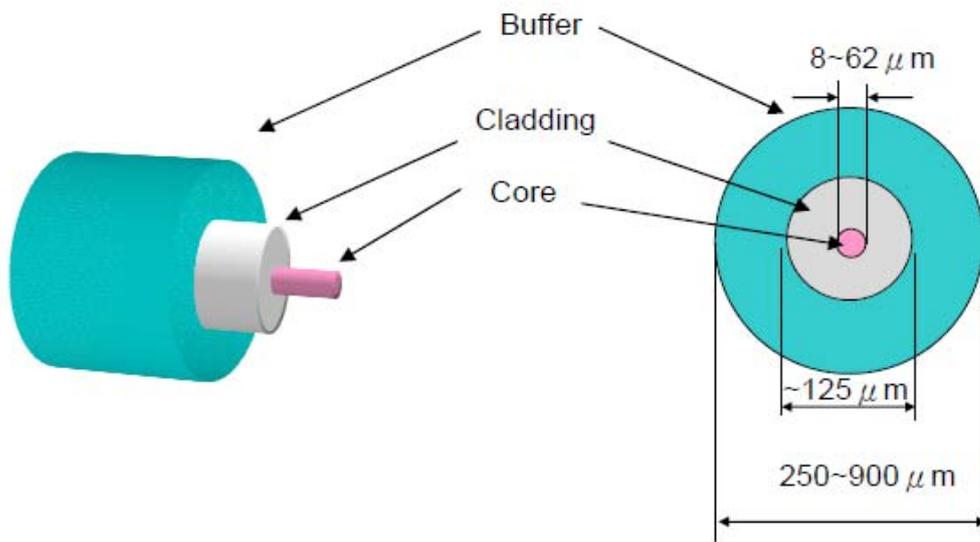


圖 2.1 光纖構造圖
(Ghatak, 1998)

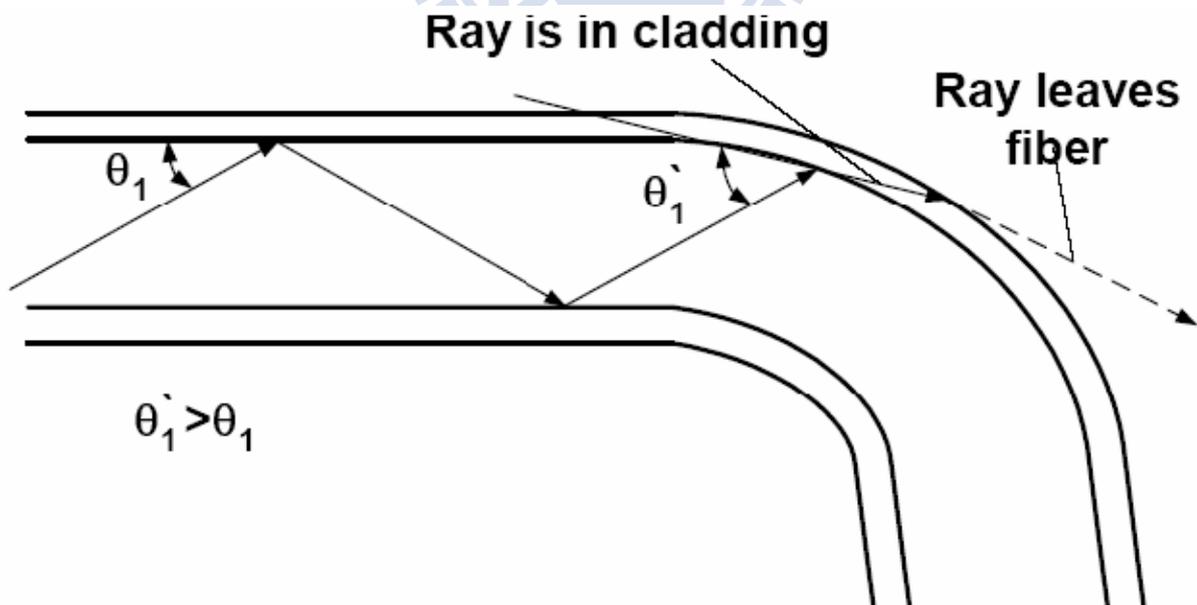


圖 2.2 巨觀彎曲造成光損失
(郭宏源, 2002)

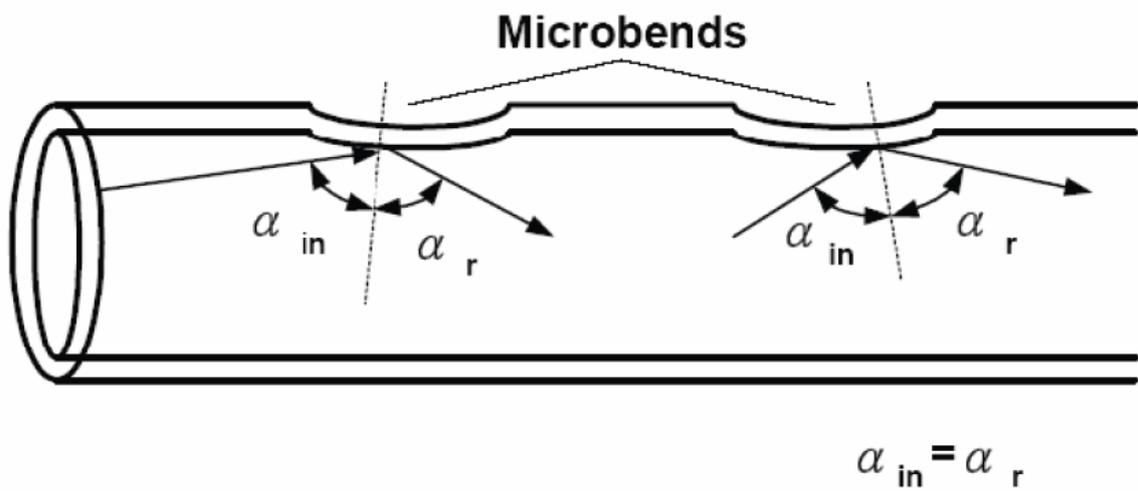


圖 2.3 微觀彎曲造成光損失
(郭宏源，2002)

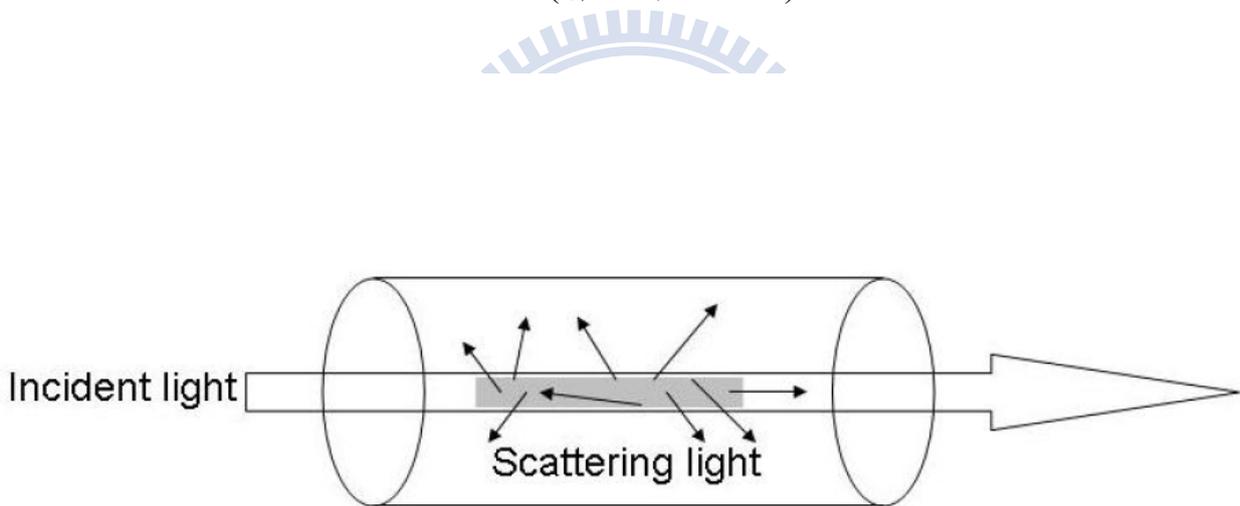


圖 2.4 在光纖中的雷利散射
(吳彥然，2006)

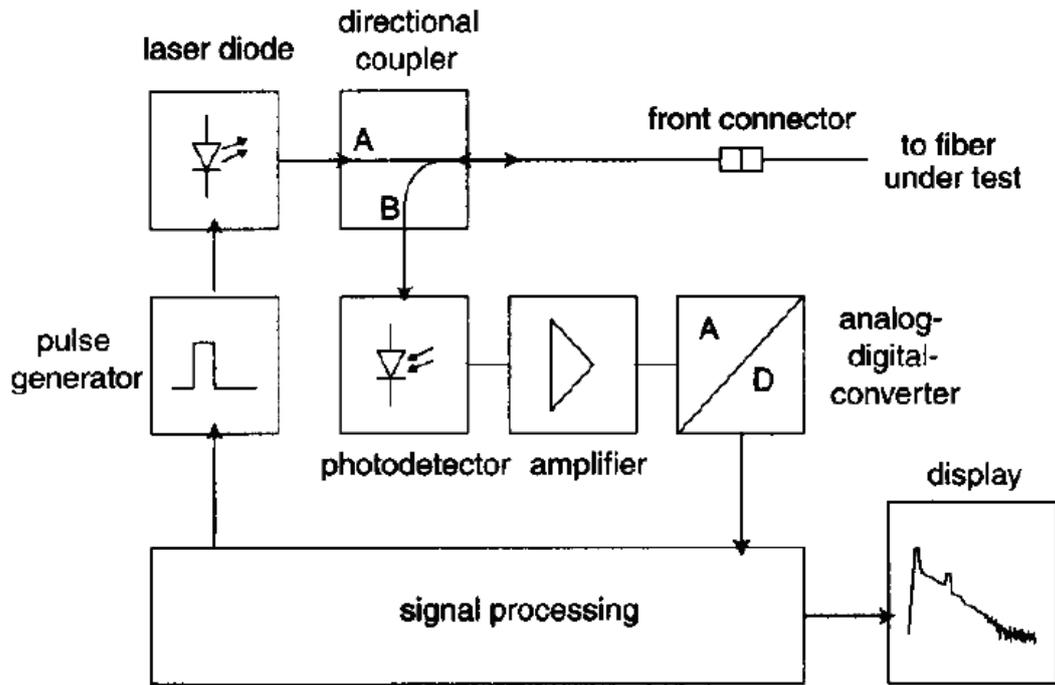


圖 2.5 OTDR 量測示意圖
(Derickson, 1998)

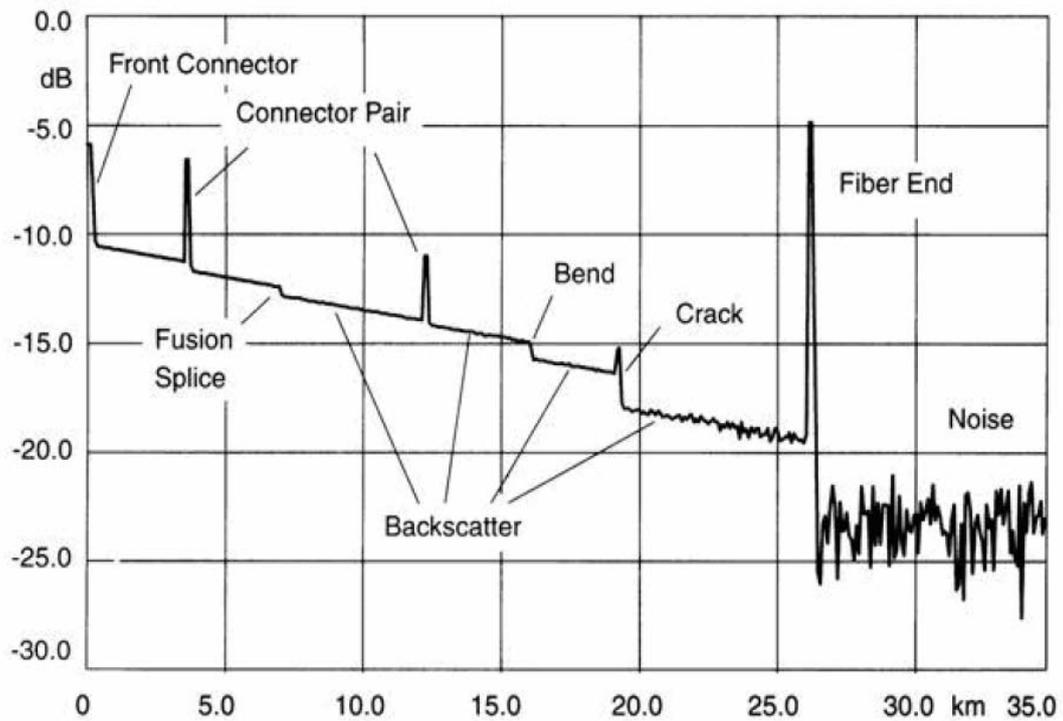


圖 2.6 OTDR 軌跡圖
(Derickson, 1998)

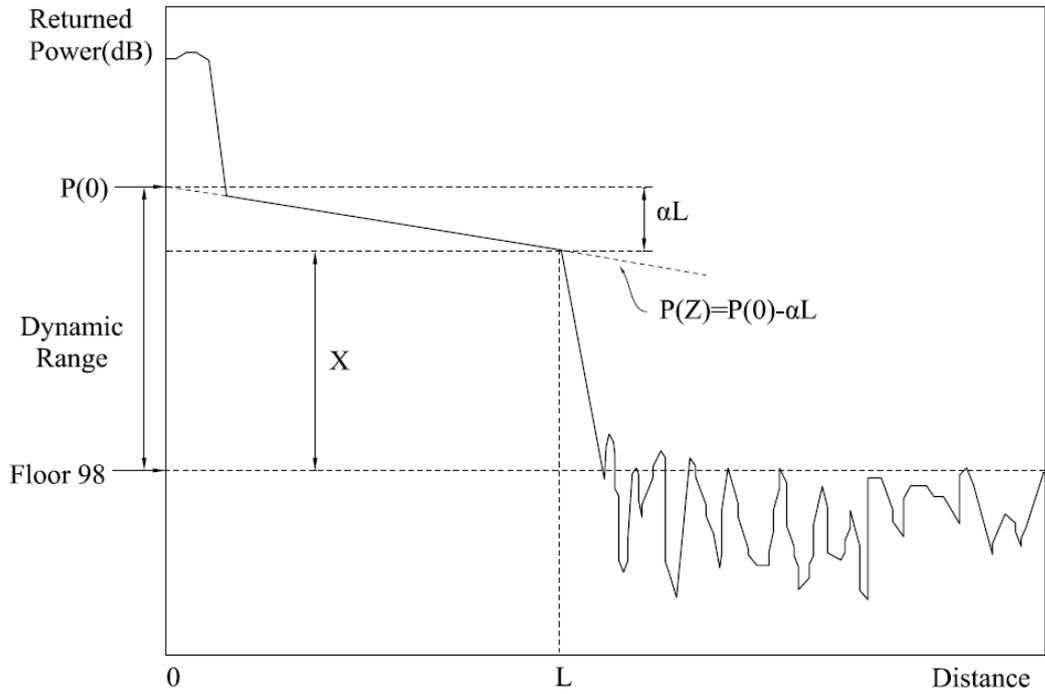


圖 2.7 光時域反射儀動態範圍示意圖

(陳建村，2003)

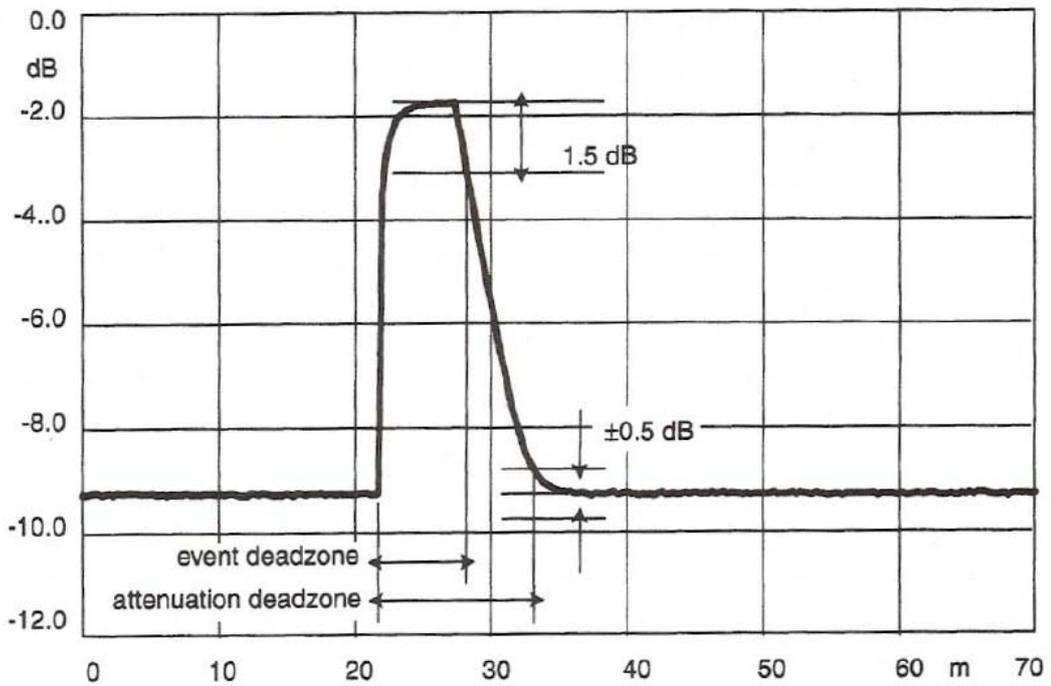


圖 2.8 事件盲區和衰減盲區

(Derickson，1998)

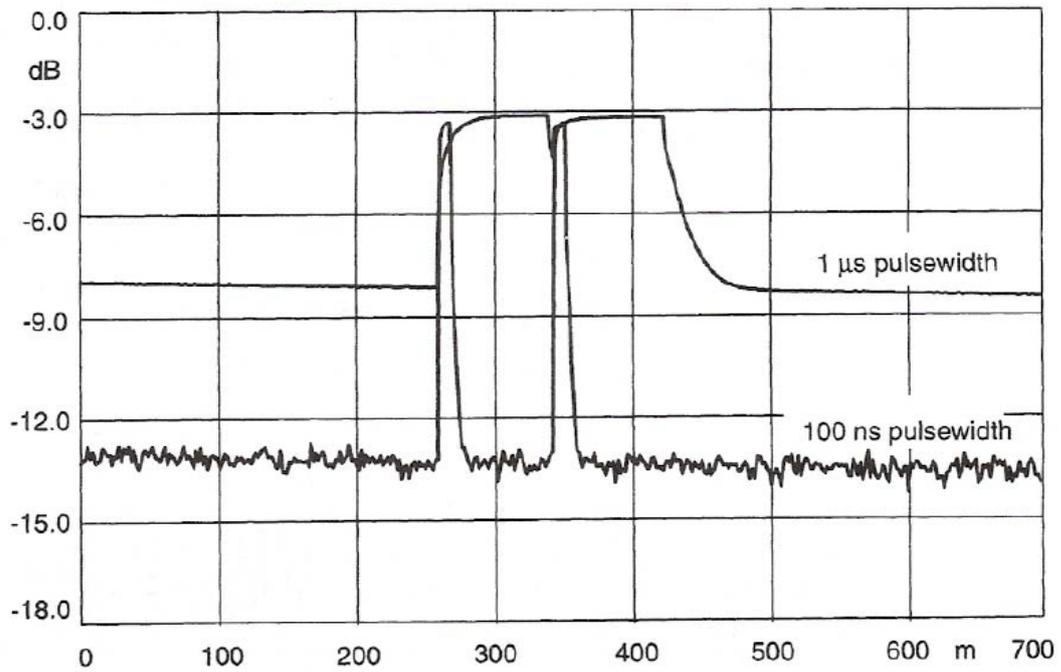


圖 2.9 不同的脈衝寬度量測曲線
(Derickson, 1998)

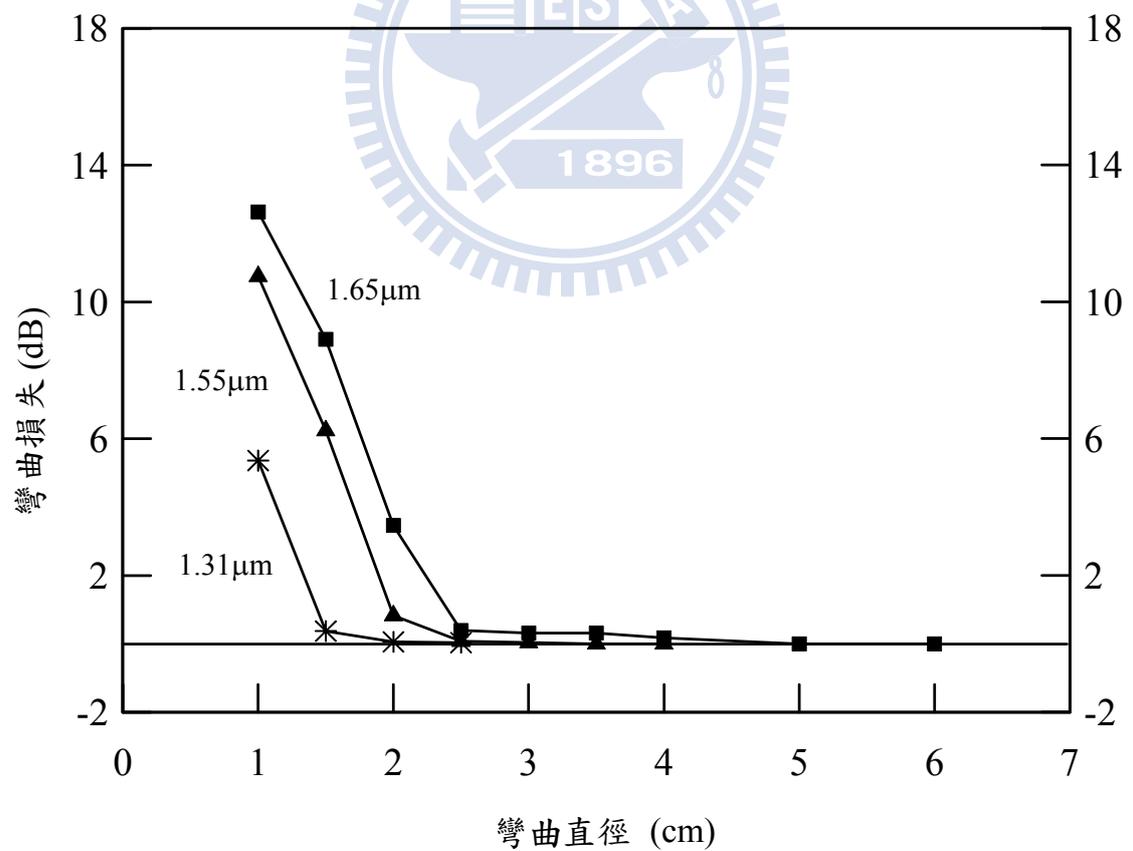


圖 2.10 光纖彎曲損失對應圖
(王萬易, 1996)

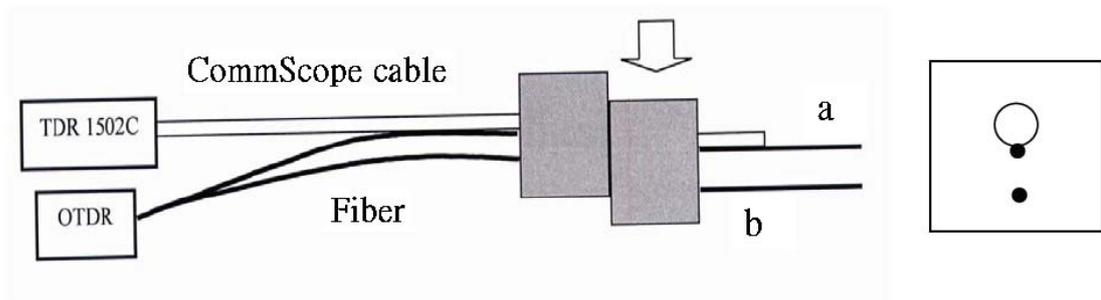


圖 2.11 光纖與 TDR 之錯動變型實驗
(崔志龍，2003)



圖 2.12 光纖與 TDR 之錯動變型實驗剪動變形器
(崔志龍，2003)

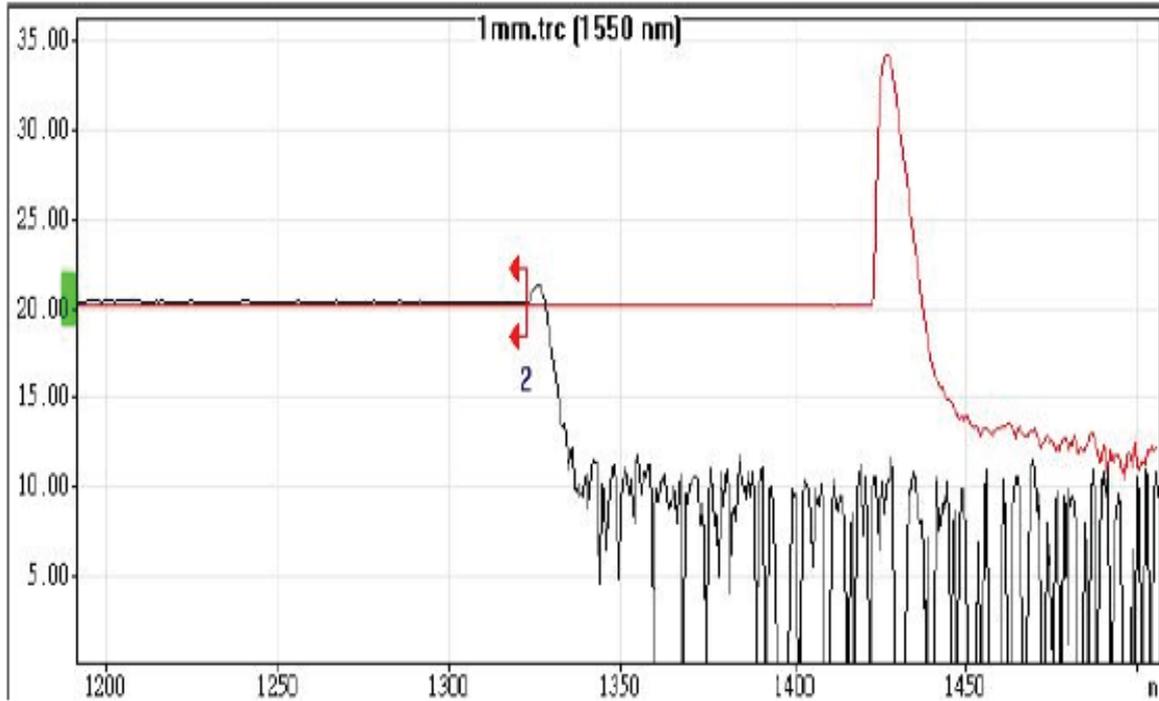


圖 2.13 剪動量為 0mm 與 1mm 之光纖 b(訊號 2 為斷裂處)

(崔志龍，2003)

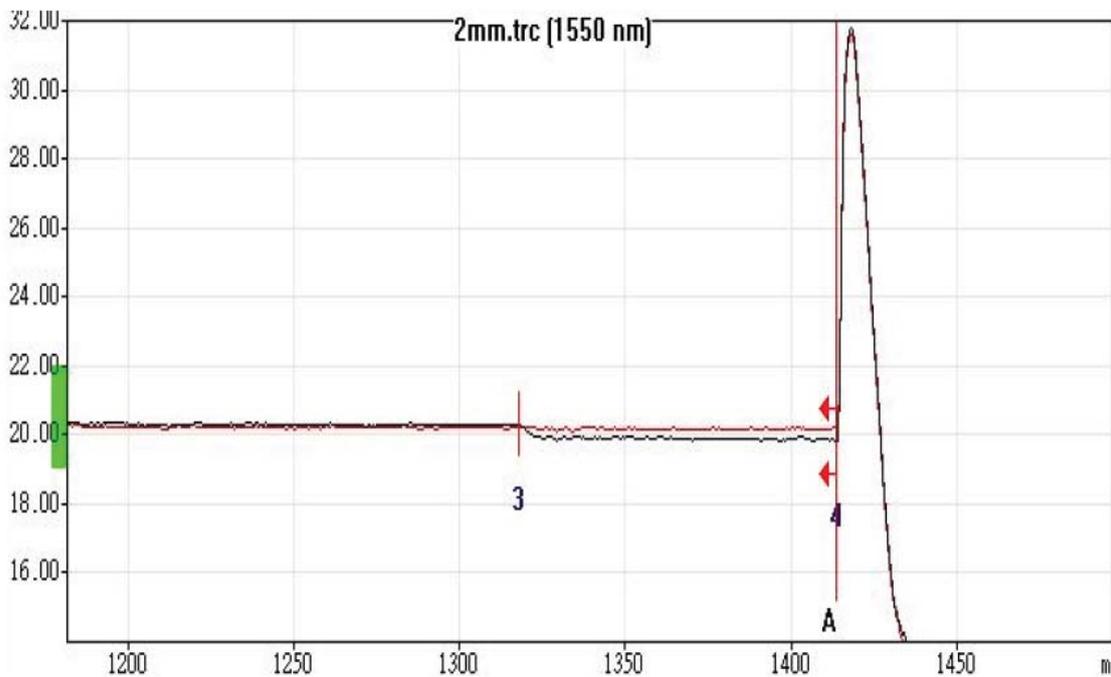
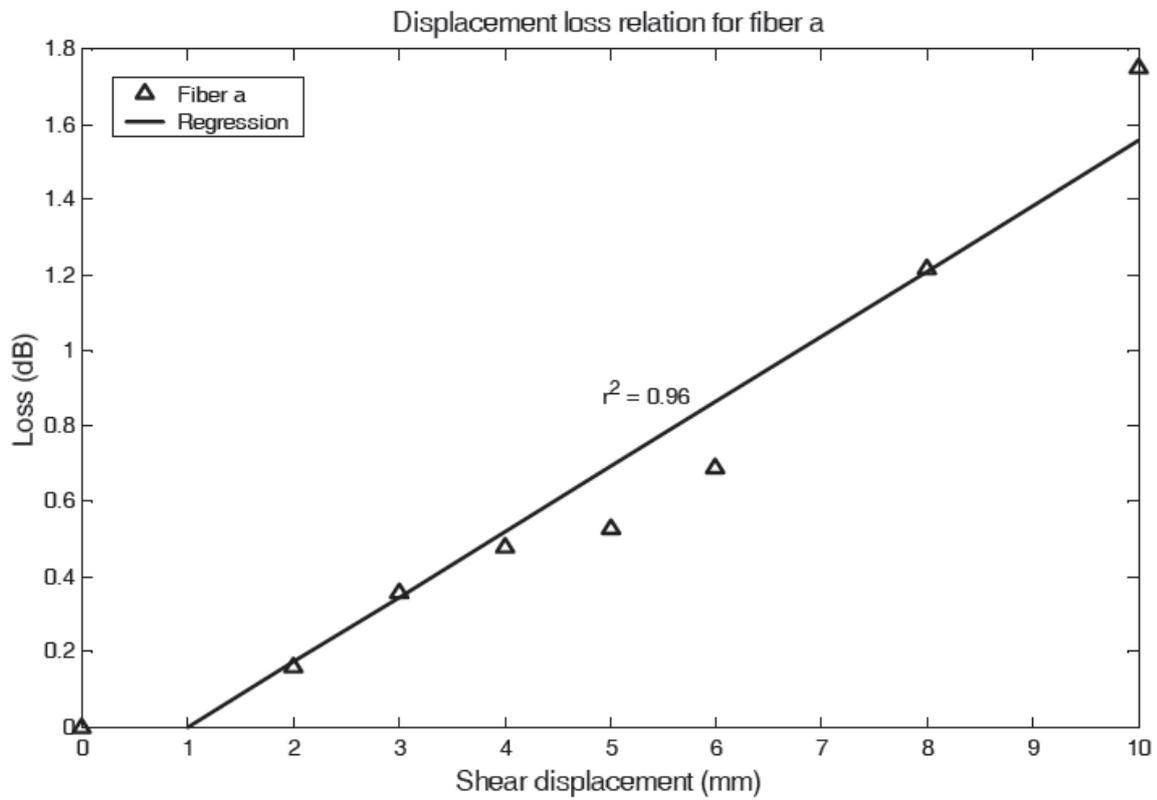


圖 2.14 剪動 0mm 與 2mm 時光纖 a(訊號 3 為錯動點)

(崔志龍，2003)



剪動量(mm)	2	3	4	5	6	8	10
損耗量(dB)	0.16	0.36	0.48	0.53	0.69	1.22	1.75

圖 2.15 光纖 a 剪動量與光損失之關係
(崔志龍，2003)

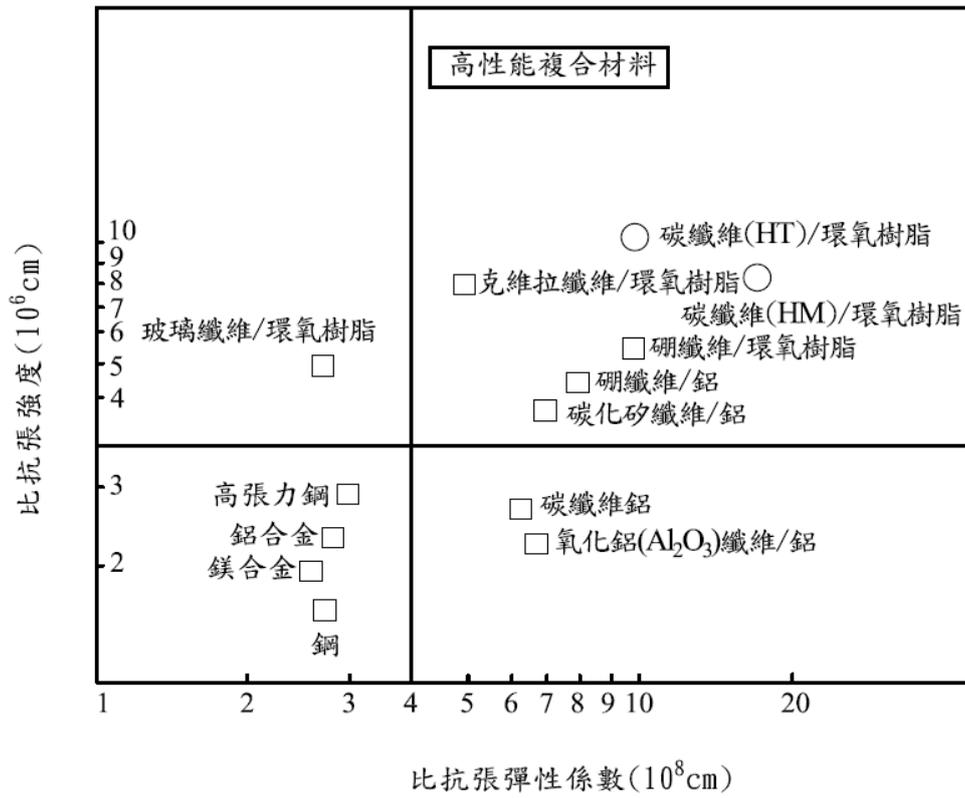
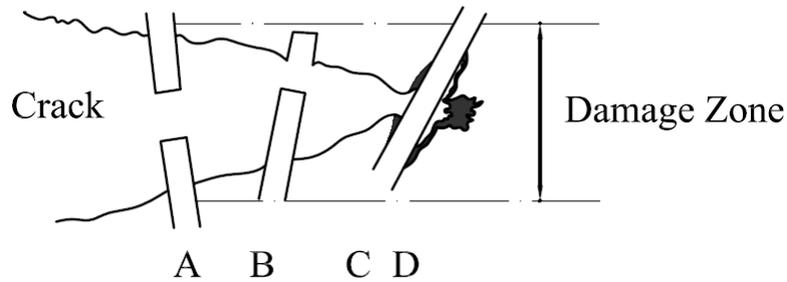
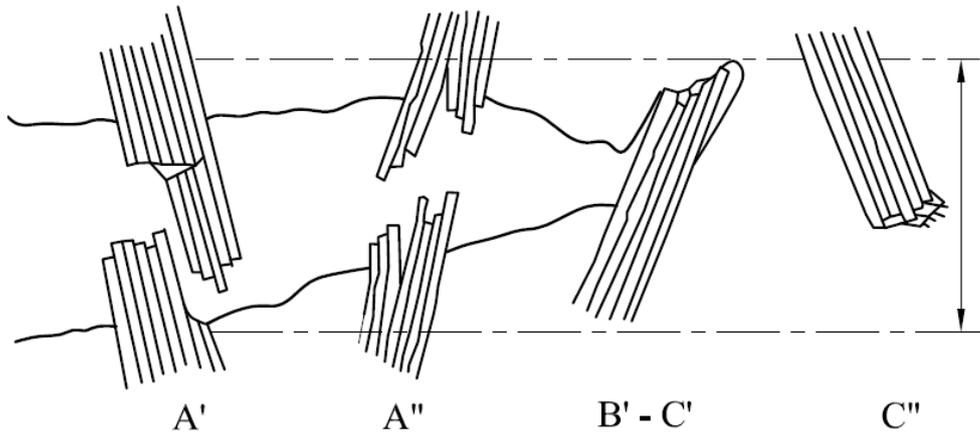


圖 2.16 複合材料之特性圖
(馬振基，1988)



- A - Fiber fracture
- B - Fiber pull-out
- C - Fiber debonding
- D - Matrix deformation

圖 2.17 纖維強化複合材料破壞示意圖(一)
(J.Karger-Kocsis and K.Friedrich, 1988)



- A' - Cleavage of fiber bundle with fiber fracture
- A'' - Splitting of fiber bundle with fiber fracture
- B'-C' - Debonding along fiber bundle before pull-out
- C'' - Debonding at fiber bundle end with crazing

圖 2.18 纖維強化複合材料破壞示意圖(二)
(J.Karger-Kocsis and K.Friedrich, 1988)

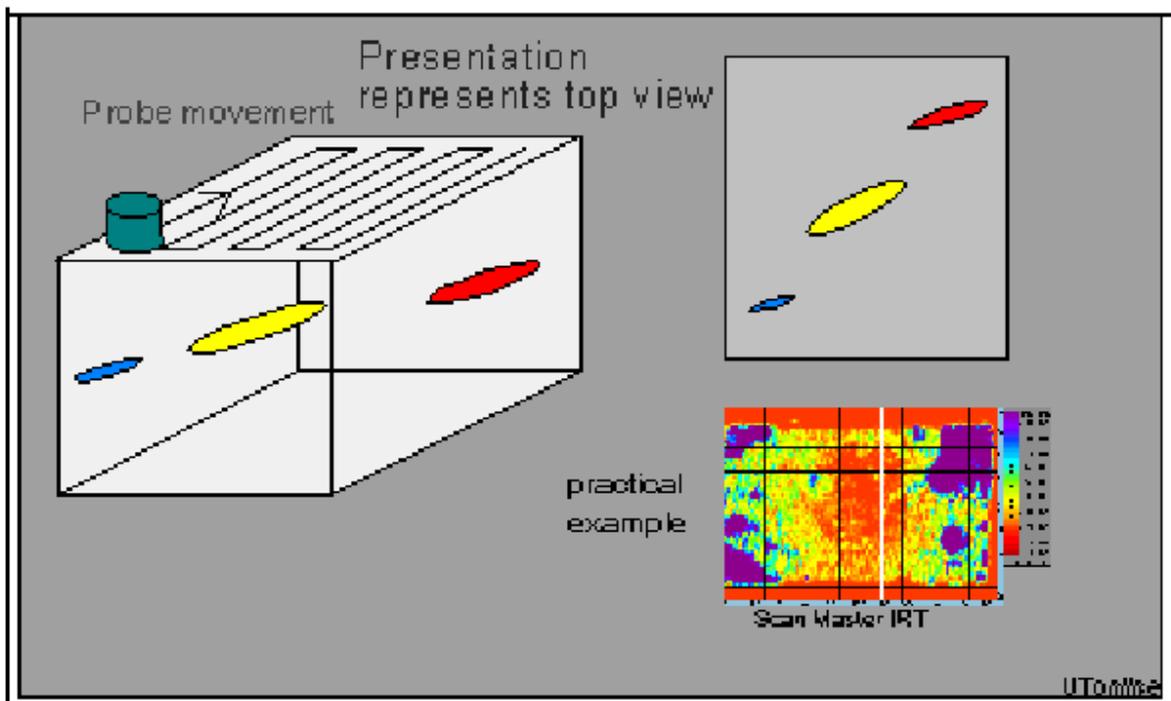


圖 2.19 超音波檢測原理示意圖 C-scan
(何彥儒, 2007)

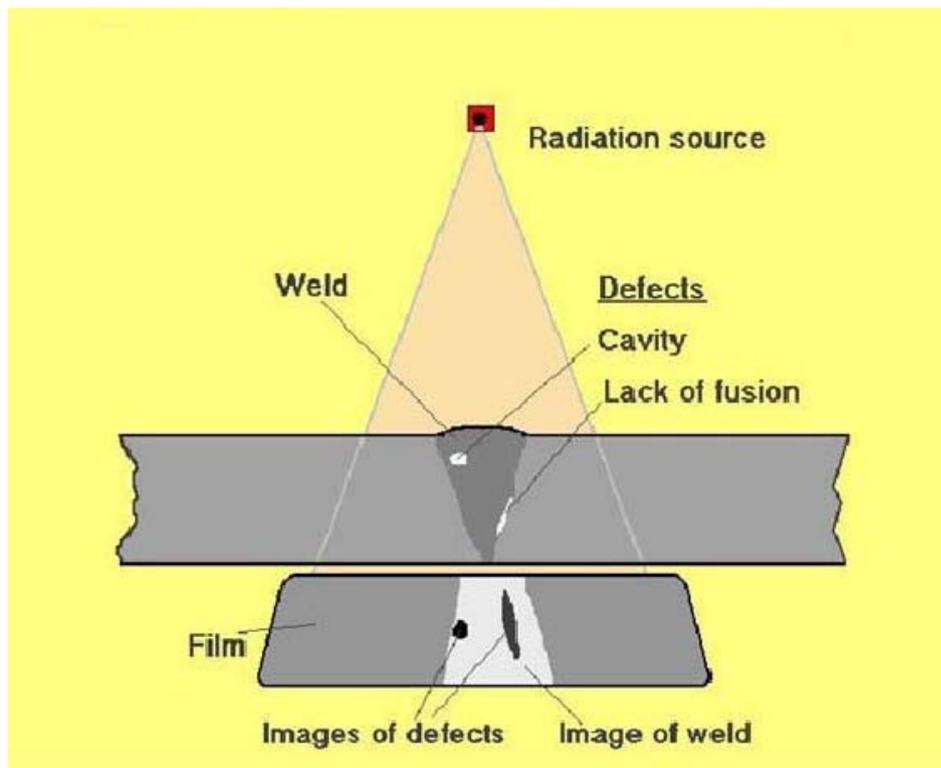


圖 2. 20X-Ray 射線照相檢測
(何彥儒，2007)



第三章 碳纖車架內埋光纖感測器及 OTDR 檢測

碳纖車架主要優勢是質輕又兼具有彈性的自行車，有鋼材與鈦合金自行車的優點。碳纖車諸多性能良好有高附加價值及應用的潛力與發展的空間。但是現今碳纖自行車為新興產業，其生產技術的純熟度、外型多樣化對於結構設計與材質選用是否得宜等因素對車架品質產生了不穩定性，在加上碳纖車架在使用中難免受到衝擊，由其是低速衝擊造成表觀上看不見內部的損傷，會使材料性能下降而造成脫層等碳纖複合材料的破壞。這些影響因素使得碳纖自行車的檢測變的非常重要，在技術上尚未有更好的改善之前需要採取一些檢測評估的方法才能確保使用上的健康與安全。

目前發展的破壞性檢測如衝擊測試、疲勞測試、剛性測試等可以抽樣檢驗評估車架強度與剛性，但是碳纖車架採用人工黏貼成型的方式，影響因素太多仍然無法確定每一台車架品質是否一致。非破壞性檢測如 X-Ray、超音波掃描等方法除了過程繁雜、放射線管理問題、檢測費用昂貴、未能即時檢測使用等限制因素等不能簡便應用。其他非破壞檢測在碳纖車架內部埋設感測器監測其健康狀況，受限於碳纖車架管壁很薄(小於 1mm)以及碳纖車架重量的控制，因此內埋比管壁厚度厚的感測器、重量重的感測器執行有困難。

現今在碳纖自行車架的非破壞檢測的文獻仍然很少，並且有其發展空間。在碳纖車架內埋光纖感測器能克服上述的困難可以簡便安全的使用。光纖線質量較輕、體積小、對車架重量與強度影響很少，內埋有可行性因此做此研究。

3.1 碳纖車架介紹

碳纖車架埋設光纖首先須了解車架的製程，之後配合製程設計埋設方法與步驟，如圖 3.1。碳纖車架之製造是先由碳纖預浸布黏貼成車架形狀後，再經由加溫加壓的處理過程而產生車架雛型，最後經由膠合後上下叉成一整體再經由各種包裝如補土、噴油等加工以及美化等過程而形成碳纖車架，之後再由各種自行車零件搭配組合而形成腳踏車整體。

3.1.1 預浸布

碳纖車架之製造首先由碳纖預浸布黏貼成車架的形狀。車架預浸布種類數百種，在使用上因各種不同類型的車架而使用種類有所不同，在同一款車架也使用數種不同類型的預浸布。預浸布在未成形時可以裁剪成各種形狀黏貼成車架的主體，不同的碳纖角度排列則會影響車架的剛性或扭力等物理特性，因此多半用各種不同的角度排列相互疊加。

本實驗所使用的碳纖預浸布為深圳柏冠公司所提供的碳纖預浸布其中一種，材料性質為樹脂含量 37%、拉伸強度 4900MPa、拉伸彈性率 240GPa。預浸布疊層分為 0° 碳紗厚度約 0.11mm、±45° 角度碳紗厚度約 0.22mm、90° 碳紗厚度約 0.11mm 三種。車架主體由 2 片 ±45° 角度碳紗(厚度約 0.22mm)和 2 片 0° 碳紗厚度約(0.11mm)互相交疊而成，總共四層疊層，車架管壁基本厚度大約 0.66mm。若加上補強的預浸布車架管壁厚度也是小於 1mm，如圖 3.2(把管壁厚度放大 100

倍的示意圖)。

3.1.2 碳纖車架的組成

碳纖車架本體呈四邊形，分為前三角和後三角。前三角為碳布分別把四個部位包成各種形狀再搭接組合，最後加溫加壓成型。後三角分為後上叉、後下叉分別成形後以膠合型式與前三角車架組合，如圖 3.3、圖 3.4。

3.1.3 成型設備

1. 模具

模具主要功能是使碳布成型為各種形狀的車架，不同形狀的車架就有不同的模具，如圖 3.5。碳布內裝氣袋，在模具內灌氣壓氣壓 10 kg/cm^2 使碳布固定形狀，而外壓由熱壓臺壓力撐住並且加熱。

2. 熱壓台

採用柏冠公司所使用的熱壓成型設備。熱壓臺的溫度 150°C 、外部機器油壓產生 100kg/cm^2 壓力、氣袋內氣壓 10 kg/cm^2 ，如圖 3.6。高溫高壓的環境是埋設光纖線需要克服的條件之一。

3.2 碳纖管內埋設光纖感測器測試

在埋設光纖於碳纖車架之前，先用碳纖管測試是否能夠在高溫高壓環境下光纖感測器埋設能正常。光纖線在碳纖管的出口是量測光纖的必須條件，如何保護光纖線出口是設計與改善的重點。設計將接頭與光纖線一起埋設也就是將

pigtail 埋設於碳纖管中並且嘗試如何放置於模具內並且修改模具。

3.2.1 實驗設備

- 1.光纖線：採用 SM/125/250 單模光纖 20m，線直徑 0.25mm。
- 2.光纖接頭：FC/PC
- 3.光纖套管：0.9mm 的 Hytrel 耐高溫套管
4. 埋設項目：碳纖管(車架下管)

3.2.2 研發方法

1.準備特製光纖 pigtail：

在埋設光纖於碳纖車架之前置作業，先準備在高溫高壓環境特製的光纖線。光纖線必須有接頭在車架外才可量測，考慮光纖線出口太細小容易損壞，因此使用 SM/125/250 FC/PC 單模光纖的 pigtail 線全長 20m。接頭必須使用耐 150°C 的接頭 FC/PC 較為適用。在光纖接頭前端 7cm 採用耐熱式 900 μ m 的 Hytrel 套管，其餘長度 19.93m 為裸光纖如圖 3.7。接頭加熱加壓時光纖線與接頭銜接點會受到損壞，因此在光纖接頭前端有耐熱套管保護光纖線，套管管徑對於碳纖管壁較大，耐熱套管也不宜太長。

2.碳纖管埋設光纖線：

光纖接頭的位置須要將車架模具作適當修改，是埋設光纖需要克服的困難之一，而碳纖管埋設光纖相較碳纖車架內埋設光纖容易，於是先以碳纖管取代

車架作為埋設對象。作為模擬車架的碳纖維管，選擇車架下管為埋設對象(下管長度較長)。預浸布為非均向特性，因此按照車架設計黏貼的步驟以每片預浸布大小裁切成碳纖維管疊層由內到外分別為第一層 137mm×500mm×0.22mm $\pm 45^\circ$ 碳紗、第二層 139mm×500mm×0.11mm 0° 碳紗、第三層 141mm×500mm×0.22mm $\pm 45^\circ$ 碳紗、第四層 143mm×500mm×0.11mm 0° 碳紗，選擇在第三層碳紗及第四層碳紗之間的夾層內埋設光纖，量測光訊號。在直徑為 40mm 長度 500mm 的碳纖維圓管埋設光纖，埋設光纖線長度受限於管徑與管長無法過長，因此使用 20m。主要以能在碳纖維管成型後讀取光訊號以及模具修改成功為主。埋設好光纖線後再把最後一層的碳布貼上，如圖 3.8。

3.修改模具

配合接頭形狀修改模具多次，接頭以平緩的角度銜接主體模具成果最好。接頭成型後較不易折斷、接頭的光纖線不容易扭曲，如圖 3.9、圖 3.10。

4.保護光纖接頭

保護光纖接頭是研發中最重要的部分。為了避免接頭弄髒以及加熱的過程熔化，接頭帽蓋從原本塑膠材質換用鋁製帽蓋。此外，碳布加熱流出的樹脂會流入鋁製帽蓋的縫隙裡面以及流入接頭內，如圖 3.11、圖 3.12。套上耐熱橡膠套保護，防止樹脂流入鋁製帽蓋的縫隙裡面以及流入接頭內。最後接頭部分需要用小片碳布小心的固定形狀，如圖 3.13、圖 3.14。

5.埋設成果：

上述步驟完成後加熱 150°C 並在碳布內的氣袋灌入氣壓 10 kg/cm² 成型，成型後如圖 3. 15。成型後透過 OTDR 用 1625nm 波長、10ns、15 秒解讀光訊號。OTDR 軌跡圖型顯示光訊號在碳纖管內能夠通過，如圖 3. 16。可以將此種埋設型式應用在車架上。

3.3 碳纖車架內埋設光纖感測器的研發

3.3.1 實驗設備

碳纖管埋設光纖試驗成功後，嘗試在碳纖車架內採用類似的方法埋設光纖，光纖線圍繞車架左右兩側，車架模具也與碳纖管做同樣的修改，放置接頭位置選定在下管。

- 1.光纖線：採用 SM/125/250 單模光纖 50m，線直徑 0.25mm。
- 2.光纖接頭：FC/PC
- 3.光纖套管：0.9mm 的 Hytrel 耐高溫套管
- 4.埋設項目：碳纖車架

3.3.2 研發方法

1.埋設型式選擇：

初始車架埋設光纖線是將埋設車架光纖線的盲區放置到車架外面，如圖 3. 17、圖 3. 18。在加熱成型階段，如圖 3. 19 以及後續的磨砂、膠合、噴油等階段

都容易產生不容易保護光纖線的問題，如圖 3. 20，所以有 3.2 節光纖接頭埋設的研發採用此種方式將光纖線整體埋置在車架內上述問題都可以得到解決。除此之外車架外觀也比較美觀因此在碳纖車架上埋設型式採用接頭式的埋設方法，如圖 3. 21。

2.準備特製光纖 Pigtail：

SM/125/250 FC/PC 單模光纖的 pigtail，線全長 50m。使用 OTDR 時前端會有前端盲區，而尾端必須避免後方訊號和尾端的弗瑞奈反射訊號重疊，造成判讀上的困難，配合偵測儀器 OTDR 的衰減盲區 10m 以及事件盲區 3m 加上感測段採用 50m 線長。單模光纖線在碳纖的出口處較脆弱，容易產生接頭加熱加壓時光纖線與接頭銜接點損壞，因此需要用耐熱套管保護光纖線。在光纖接頭前端 7cm 採用耐熱式 900 μ m 的 Hytrel 套管，其餘長度為裸光纖，如圖 3. 22。

3.修改車架模具：

光纖接頭與車架結合為一體，必須在車架模具做適當的修改。模具依照 3.2 節碳纖管測試修改模具的結果做同樣的修改，如圖 3. 23、圖 3. 24。

4. 布線方式：

配合製造流程，光纖在車架仍為預浸布時就需埋設。總共四層碳紗的疊層埋設在第三層與第四層的碳紗之間(也就是靠近車架管狀的最外夾層)，如圖 3. 2。埋設一條 50m 光纖 pigtail 全部埋設於車架內，繞一圈車架整體線長約 168cm，因此在車架左右側平面大約各繞 15 圈放置光纖，埋設好光纖線後再把

最後一層的外觀碳布貼上，光纖接頭外露於車架，埋設過程如圖 3. 25。在埋設完成後會再用 OTDR 量測確定埋設的光纖線無問題。

5. 保護接頭處理：

如同 3.2.2 節為了避免接頭弄髒以及加热的過程融化，接頭帽蓋從原本塑膠材質換用鋁製帽蓋。此外，碳布加熱流出的樹脂會流入鋁製帽蓋的縫隙裡面以及流入接頭內，如圖 3. 11、圖 3. 12。套上耐熱橡膠套保護，防止樹脂流入鋁製帽蓋的縫隙裡面以及流入接頭內。最後接頭部分需要用小片碳布小心的固定形狀，如圖 3. 13、圖 3. 14。

6. 熱壓成型：

在未成型的車架內放入氣袋後放置模具內，如圖 3. 26 放置好位置後模具閉合放入熱壓臺之後承受 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 外壓，而模具內的氣袋承受 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 內壓、 150°C 高溫下成型 45 分鐘，光纖無斷裂以及能夠傳輸光訊號。

7. 車架脫模：

車架成型後開模如圖 3. 27、接頭保護如圖 3. 28。將車架取出模具後等待冷卻再將氣袋取出如圖 3. 29。

8. 車架修邊處理與膠合：

車架修邊處理乾淨完後就可以量測光訊號如圖 3. 30 所示，訊號良好即可進行後又膠合。膠合後下又必須讓車架再進一次烤箱(135°C 環境下 45 分鐘)，膠合完成後如圖 3. 31。

3.3.3 埋設成果

使用 OTDR 儀器 1625nm 波長量測埋設車架內的光纖訊號，光纖接頭與車架一同埋設因此不需熔接光纖接頭。車架埋設訊號如圖 3.32 所示，在車架成型加熱過程中有均勻的光損耗發生，損耗量約 2.6~2.8dB，整體大致成為一個良好量測的曲線。光纖與碳纖兩者互相結合為一體，碳纖發生嚴重受力的行為(裂痕或者彎曲變形)連帶光纖也能感測的到(光纖就會產生事件損耗)，利用 OTDR 可以量測這些事件。儀器動態範圍 35dB 在此範圍之內發生的事件曲線皆可量測的到，根據之後車架發生的事件曲線可以判定車架是否受到損傷與破壞，並且施作自行車的結構健康檢測調查表，可預估未來有下列情況發生：

1.損壞狀況(一)：如圖 3.33 所示，曲線從埋設後的情況下降至事件 1 或事件 2 的狀況。可以推估損害的發生可能有：

- (1)製造損害：在製造時是否有偏離正常程序，造成曲線異常。
- (2)運送損害：車架運送途中受到擠壓或微量變形。
- (3)使用性損害：車架剛性變型過大，有可能導致搭接處和膠合處有異常；
內部有脫層現象。

2. 損壞狀況(二)：如圖 3.34 所示，曲線從埋設後的情況下降至事件 1 的狀況。
可以推估損害的發生可能有：

- (1)製造損害：在製造時碳布有扭曲，造成曲線異常。
- (2)運送損害：車架運送途中受到衝擊撞傷。

(3)使用性損害：車架某部位有受到撞傷，長期受力後裂縫擴大導致脫層破壞。

3. 損壞狀況(三)：如圖 3.35 所示，曲線從埋設後的情況下降至事件 1 的狀況，

則是損壞狀況(二)的破壞擴大導致車架內部有斷裂情形。

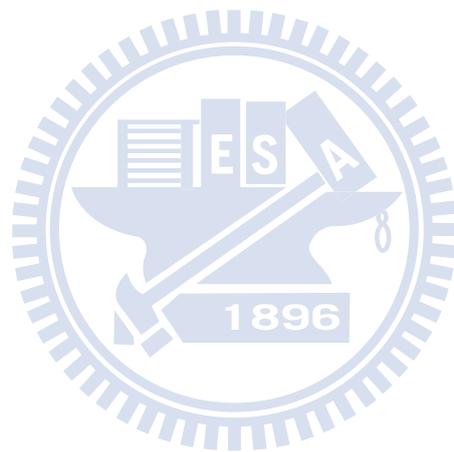




圖 3.1 車架形成流程圖

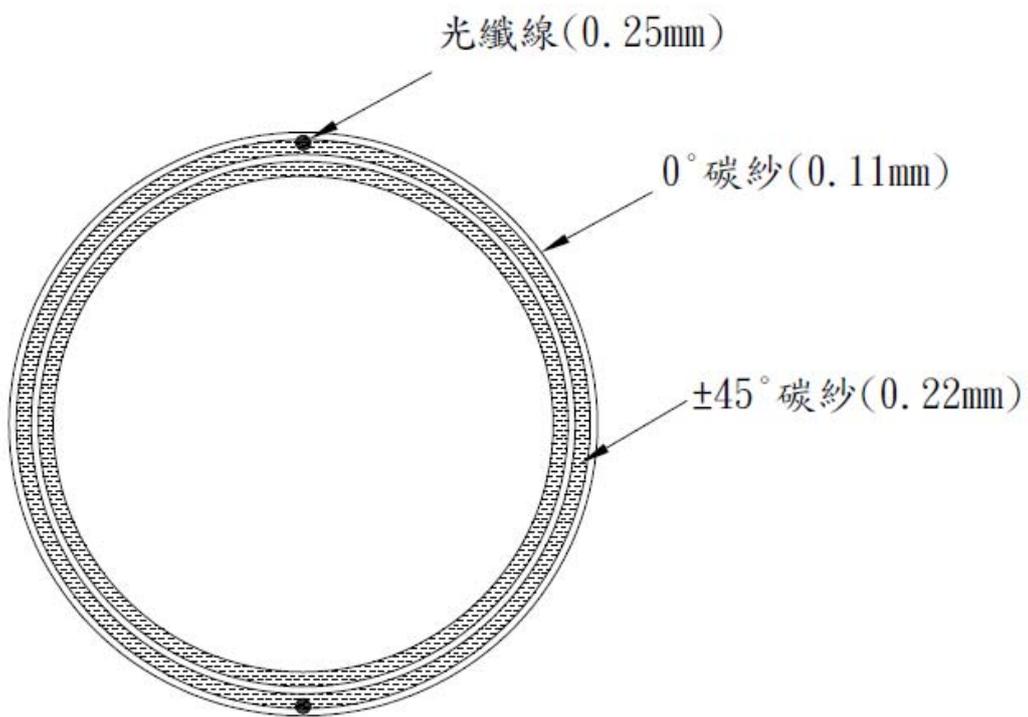


圖 3.2 碳布埋設光纖示意圖 (把管壁厚度放大 100 倍的示意圖)

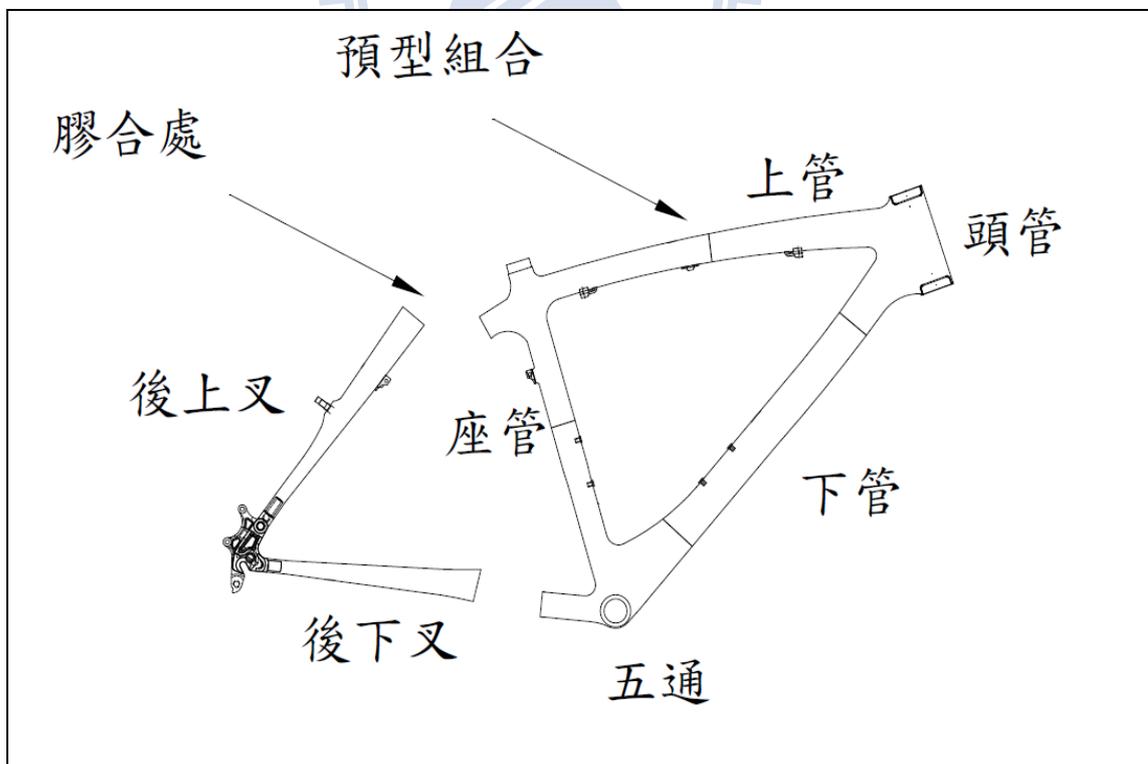


圖 3.3 車架組合圖(一)



圖 3.4 車架組合圖(二)



圖 3.5 車架模具



圖 3.6 熱壓臺

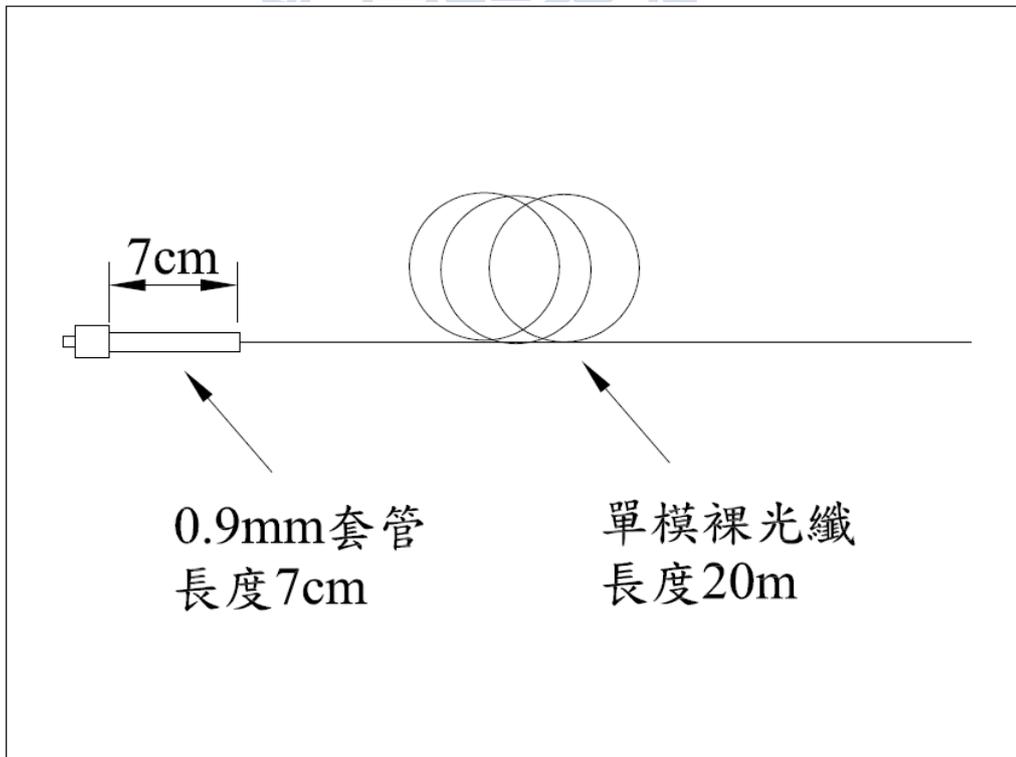


圖 3.7 碳纖管埋設的光纖線尺寸

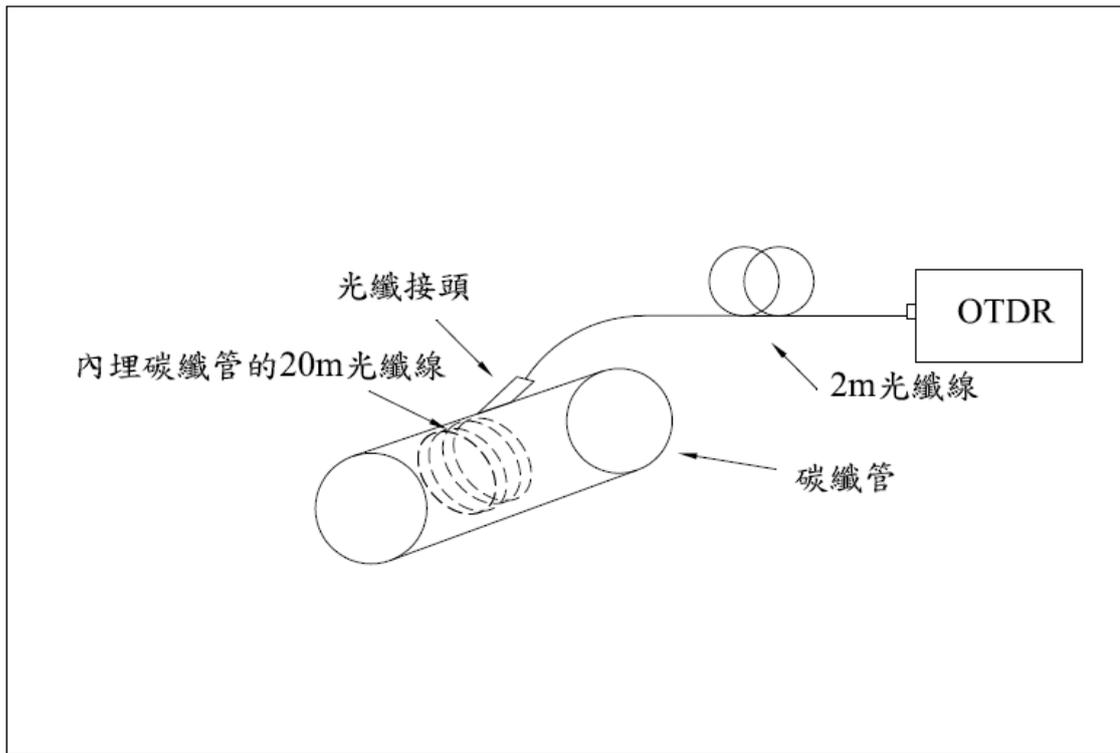


圖 3.8 碳纖管內埋設光纖線示意圖



圖 3.9 配合接頭形狀修改模具



圖 3.10 修改模具整體



圖 3.11 接頭外部有樹脂無法拔出帽蓋



圖 3.12 樹脂由帽蓋流入接頭內



圖 3.13 接頭套上耐熱橡膠



圖 3.14 碳纖管內埋設光纖線成型前



圖 3.15 碳纖管內埋設光纖線成型後

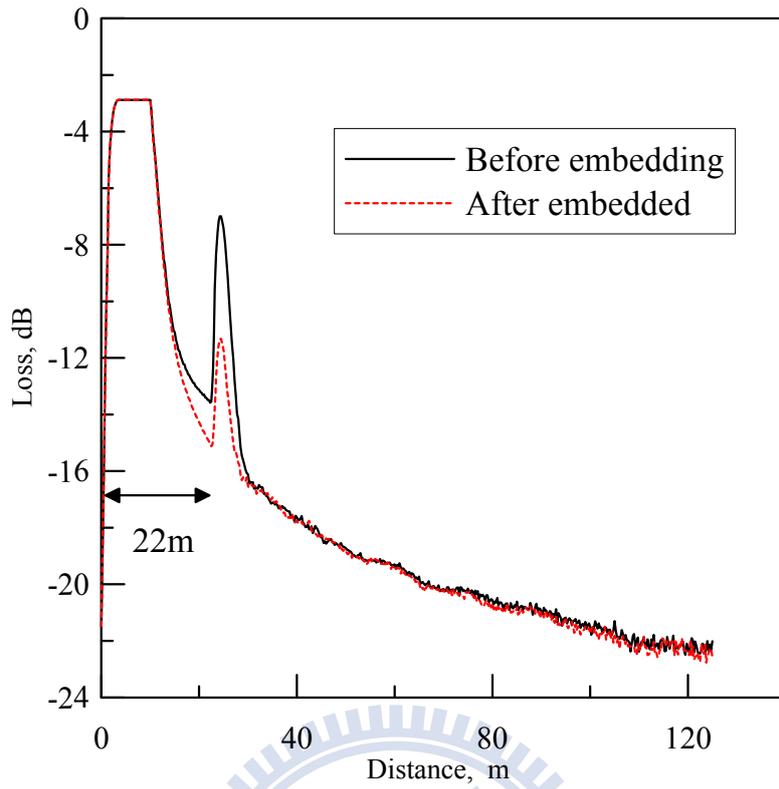


圖 3.16 成型後 OTDR 偵測光纖在碳纖管內狀況

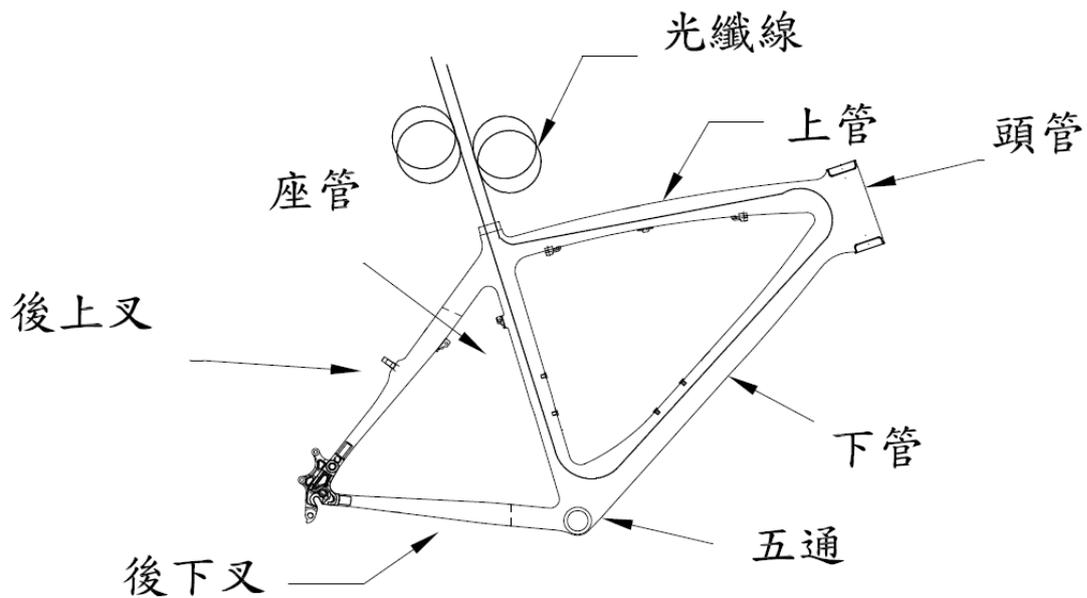


圖 3.17 埋設光纖設計圖(盲區在車架外)



圖 3.18 光纖線盲區放置於車架外



圖 3.19 光纖線盲區放置於車架外加熱成型



圖 3.20 噴油前的磨砂

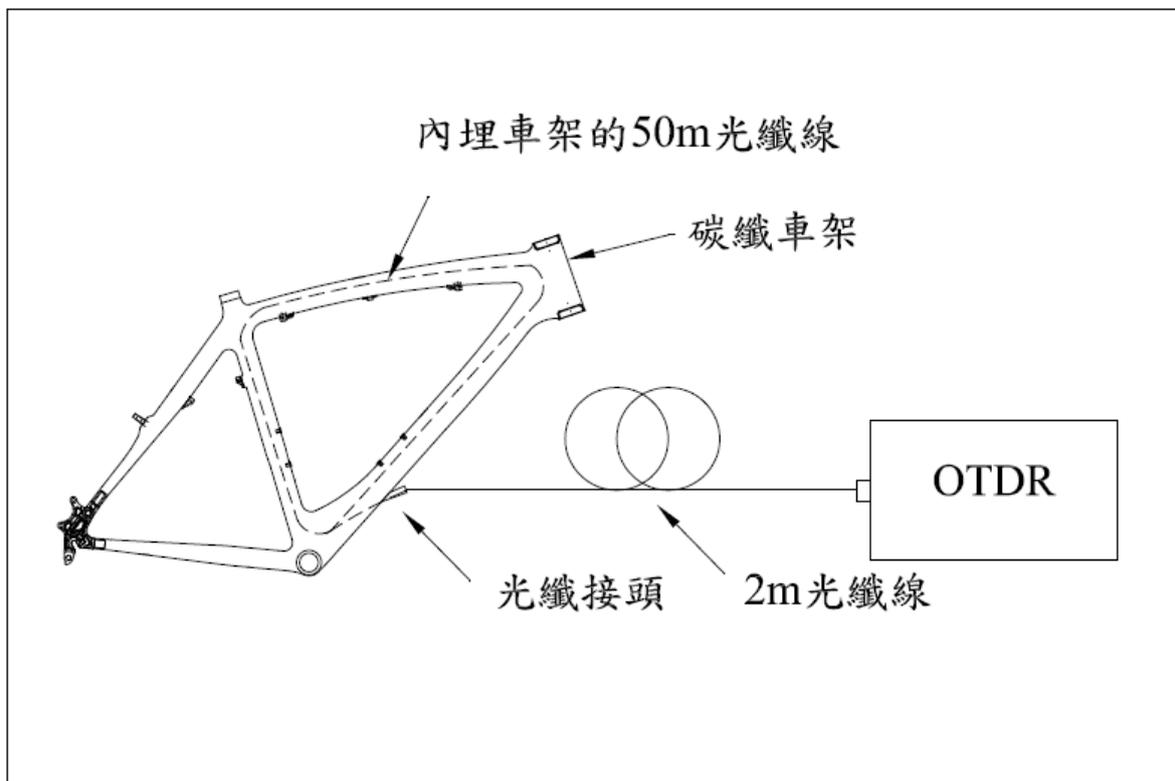


圖 3.21 改善埋設後光纖佈設圖(盲區在車架內)

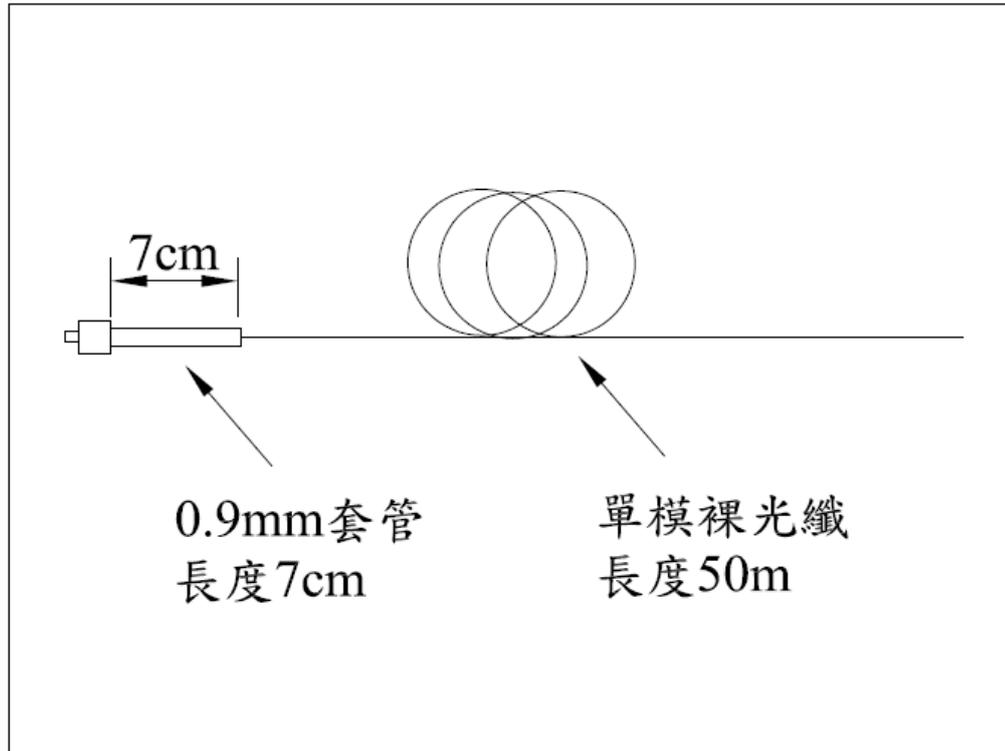


圖 3.22 碳纖車架埋設的光纖線尺寸

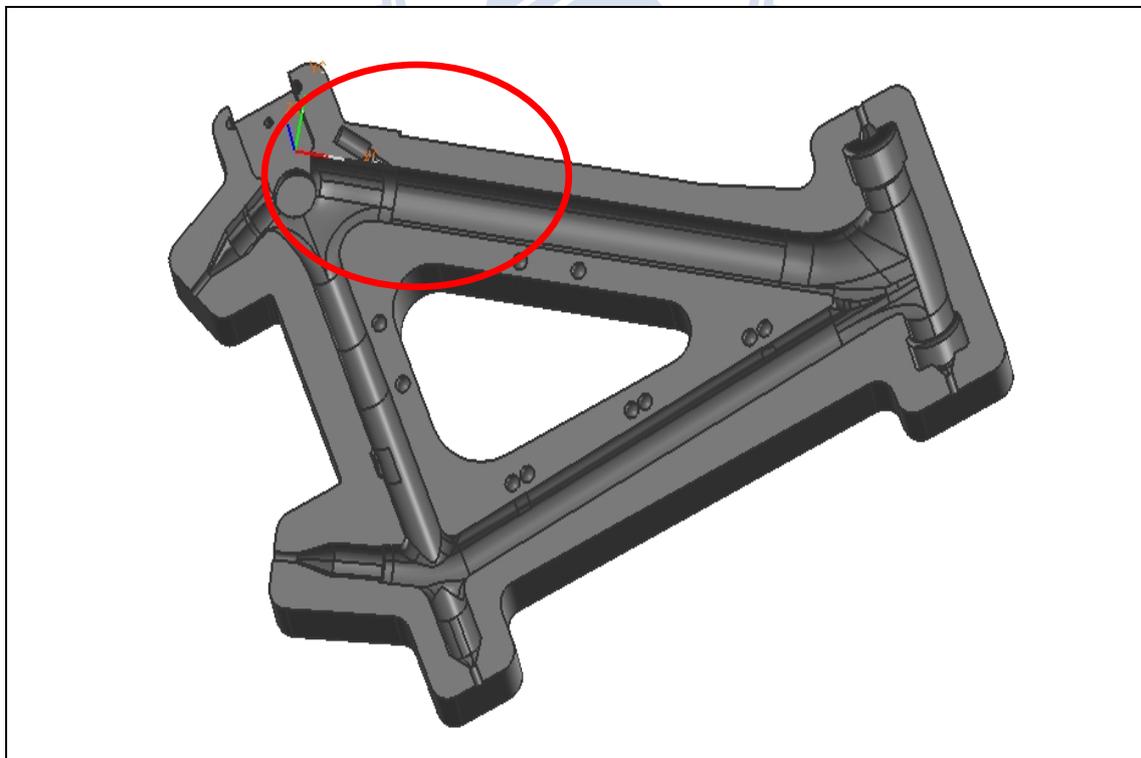


圖 3.23 車架模具示意圖

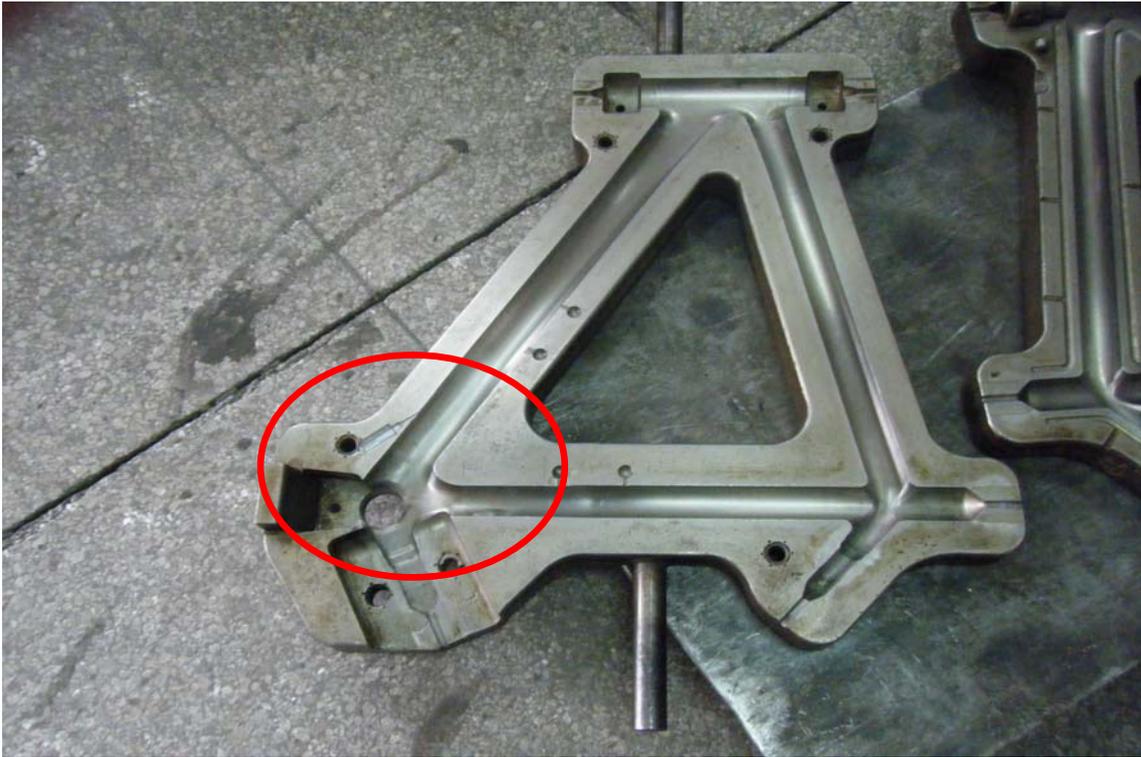


圖 3.24 模具修改處(接頭放置位置)



圖 3.25 埋設光纖線於未成行車架內



圖 3.26 貼好的車架放入模具內準備加熱成型



圖 3.27 車架成型後開模



圖 3.28 開模接頭保護位置



圖 3.29 車架取出模具後(尚未修邊處理)



圖 3.30 車架內埋光纖圖



圖 3.31 車架膠合後

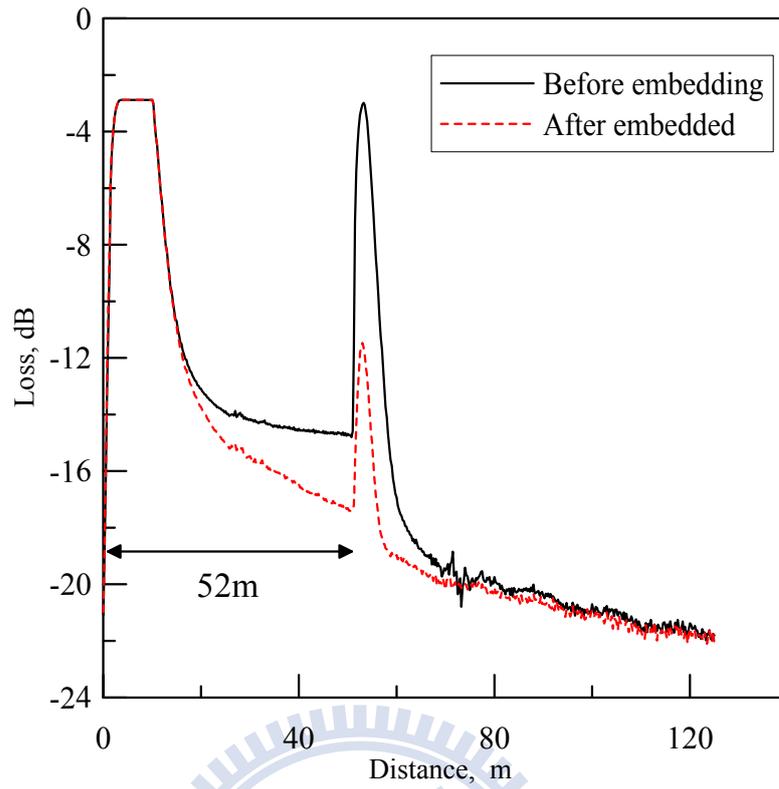


圖 3.32 光纖在車架內訊號狀況

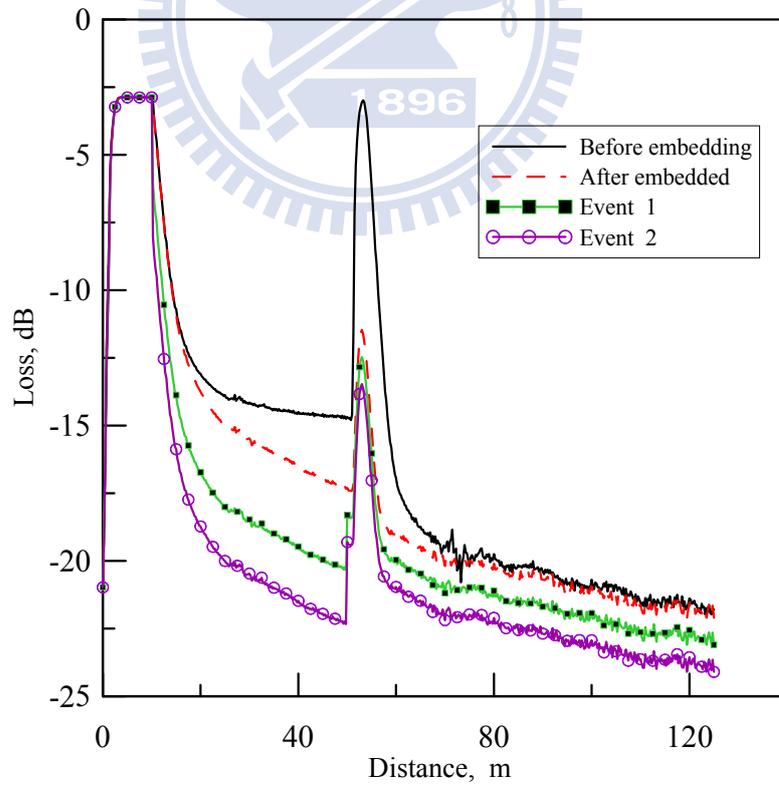


圖 3.33 車架未來可能發生損壞之結構健康狀況(一)

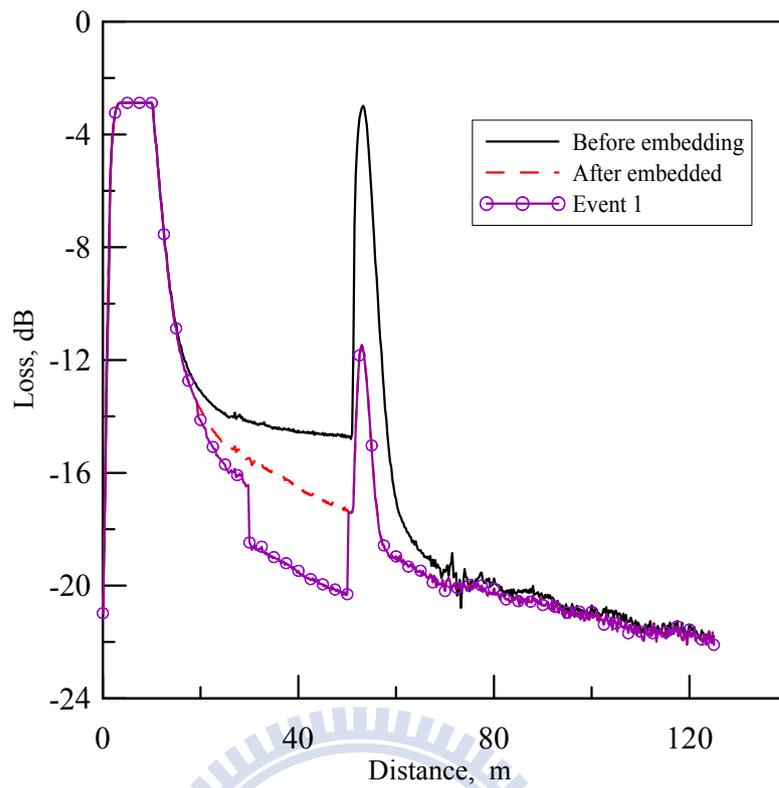


圖 3.34 車架未來可能發生損壞之結構健康狀況(二)

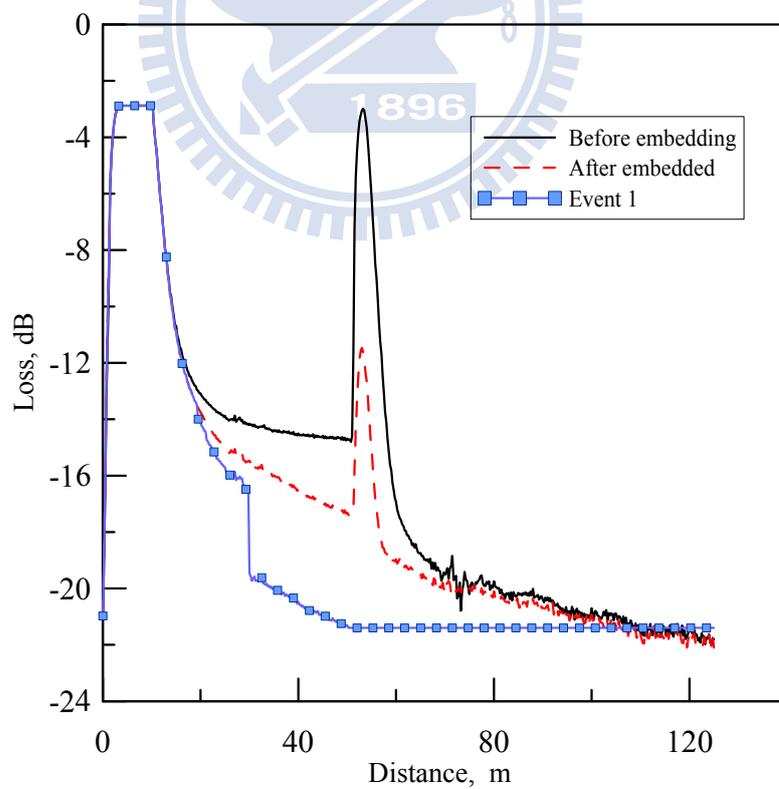


圖 3.35 車架未來可能發生損壞之結構健康狀況(三)

第四章 碳纖結合光纖感測器之破壞試驗

OTDR 為一種非破壞檢測技術，光纖傳輸本身具有受外力變形作用高靈敏反應之特性，由於光纖的彎曲、損害、斷裂造成光傳輸時能量上的損耗，可藉由 OTDR 儀器量測光纖受彎曲所造成的事件損失。在碳纖試片以及碳纖管內埋設光纖線，分別施作撓曲試驗以及三點彎曲試驗等破壞試驗，了解碳纖埋設光纖是否能夠感應到破壞的發生以及對應的損耗量為何。

4.1 碳纖試片內埋設光纖感測器撓曲試驗

在實驗室內製作碳纖試片內埋光纖感測器。將試片施作 V 形缺口撓曲試驗和 U 形缺口撓曲試驗，此外還將缺口寬度增加偵測其變化量。此試驗能了解碳纖埋設光纖是否能夠感應到破壞的發生以及其損耗量，另外有使用 1625nm 與 1550nm 雙波長量測分析。

4.1.1 碳纖試片內埋設光纖感測器製作

本實驗採用深圳柏冠公司所提供的碳纖預浸布，材料性質為樹脂含量 37%、拉伸強度 4900MPa、拉伸彈性率 240GPa。在第一層 5mm×60mm×0.22mm ±45° 碳紗、第二層 5mm×60mm×0.11mm 0° 碳紗、第三層 5mm×60mm×0.22mm ±45° 碳紗、第四層 5mm×60mm×0.11mm 0° 碳紗，選擇在第三層碳紗及第四層碳紗之間的夾層內埋設光纖(如同車架埋設光纖方法)，厚度約 0.66mm 的試片。黏貼

完後放置試片用模具內加熱如圖 4. 1 所示。成型後再將試片用熱固膠黏貼於 V 型和 U 型的缺口的鋁板上，利用碳纖試片(內埋光纖)施作 V 型和 U 型的缺口彎曲破壞並且量測光纖損耗量。

4.1.2 試驗方法與結果

1. V 型缺口撓曲試驗：

V 型缺口撓曲試驗如圖 4. 2 所示，V 型缺口寬 8mm 深 4mm；尖點同樣大小。將尖點與螺旋測微儀用螺絲鎖在一起並且固定在光學桌上；缺口則在另一端以同樣高度相對固定在光學桌上。以螺旋測微儀以 0.05mm 為一單位移動，使固定在缺口的光纖線和碳纖試片(內埋光纖)撓曲變形，並且使用 LVDT 量測撓度，藉由 OTDR 量測光纖線和碳纖試片(內埋光纖)的事件損失，以及討論 V 型缺口撓曲試驗與光損失量之關係。

(1) 缺口黏貼裸光纖線結果

以 1625nm 波長量測如圖 4. 3 所示縱軸為光能量(dB)，橫軸為撓度變化(m)。以 0.05mm 為一單位對單純的光纖線作撓曲試驗，光纖線在 0.49mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到事件 0.441dB；最後在 1.03mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到 9.096dB 而後光損耗量過大儀器無法再讀取。整體相關係數 R^2 約為 0.960，可了解單純的光纖線撓曲破壞與光損失量有正相關性，並且光纖在 0.49mm 的微小撓度變化時 OTDR 儀器可以感應到有光損失存在。

(2) 缺口黏貼碳纖試片(內埋光纖) 結果

以 1625nm 波長量測如圖 4.4 所示縱軸為光能量(dB)，橫軸為撓度變化(m)。
以 0.05mm 為一單位對碳纖試片(內埋光纖)作撓曲試驗，在 0.59mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到事件 0.388dB；最後在 1.23mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到 8.775dB 而後光損耗量過大儀器無法再讀取。整體相關係數 R^2 約為 0.952，可了解碳纖試片(內埋光纖)的撓曲破壞與光損失量有正相關性，並且光纖在 0.59mm 的微小撓度變化時 OTDR 儀器可以感應到有光損失存在。

(3) 小結

V 型缺口撓曲試驗能夠在單純的裸光纖線或內埋光纖的碳纖試片感應到光損失的發生，而且在很小的彎曲撓度約 0.5mm 時 OTDR 儀器即可感應到有光損失發生。其中以裸光纖線在 0.49mm 的撓度最先感應到有變形的發生，其次為內埋光纖的碳纖試片在 0.59mm 的撓度，單純的裸光纖線比內埋光纖的碳纖試片靈敏度較高，而撓曲試驗與量測的光損失有正相關。

2. U 型缺口撓曲試驗：

將缺口的形狀改變從 V 型改變成 U 型，U 型缺口撓曲試驗如圖 4.5 所示，U 型缺口寬 8mm 深 4mm；尖點同樣大小。試驗方法如同 V 型缺口撓曲試驗，藉由 OTDR 量測光纖線和碳纖試片(內埋光纖)的事件損失，以及討論 U 型缺口撓曲試驗與光損失量之關係。

(1)缺口黏貼裸光纖線結果

以 1625nm 波長量測如圖 4.6 所示縱軸為光能量(dB)，橫軸為撓度變化(m)。以 0.05mm 為一單位對單純的光纖線作撓曲試驗，光纖線在 0.49mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到事件 0.368dB；最後在 0.88mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到 7.518dB 而後光損耗量過大儀器無法再讀取。整體相關係數 R^2 約為 0.912，可了解單純的光纖線撓曲破壞與光損失量有正相關性，並且光纖在 0.49mm 的微小撓度變化時 OTDR 儀器可以感應到有光損失存在。

(2)缺口黏貼碳纖試片(內埋光纖) 結果

以 1625nm 波長量測如圖 4.7 所示縱軸為光能量(dB)，橫軸為撓度變化(m)。以 0.05mm 為一單位對碳纖試片(內埋光纖)作撓曲試驗，在 0.43mm 撓度變化時，OTDR 儀器偵測到事件 0.480dB；最後在 1.06mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到 12.31dB 而後光損耗量過大儀器無法再讀取。整體相關係數 R^2 約為 0.973，可了解單純的光纖線撓曲破壞與光損失量有正相關性，並且光纖在 0.43mm 的微小撓度變化時 OTDR 儀器可以感應到有光損失存在。

(3)缺口黏貼碳纖試片(內埋光纖) 結果(1625nm 與 1550nm 波長比較)

以 1625nm 與 1550nm 雙波長量測數據與分析，如圖 4.8 所示縱軸為光能量(dB)，橫軸為撓度變化(m)。使用 1625nm 波長量測，以 0.05mm 為一單位對碳纖試片(內埋光纖)作撓曲試驗，在 0.36mm 撓度變化時，OTDR 儀器偵測到事件 0.601dB；最後在 1.21mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到 9.402dB。

使用 1550nm 波長量測，以 0.05mm 為一單位對碳纖試片(內埋光纖)作撓曲試驗，在 0.36mm 撓度變化時，OTDR 儀器偵測到事件 0.45dB；最後在 1.21mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到 8.901dB。

1625nm 波長相對 1550nm 彎曲損失偵測比較靈敏，量測光損失以 1625nm 波長感應撓曲程度比較明顯。

(4) 小結

U 型缺口撓曲試驗，也是同樣在很小的彎曲撓度約 0.5mm 時 OTDR 儀器即可感應到有光損失發生。U 型缺口撓曲試驗與 V 型缺口撓曲試驗，雖然形狀不同但缺口寬度一致，因此數據差異性小。以 1625nm 與 1550nm 雙波長量測數據與分析比較，1625nm 波長偵測對彎曲損失比 1550nm 波長靈敏，量測光損失以 1625nm 波長感應的撓曲程度比較明顯。

3. U 型缺口撓曲試驗(缺口寬從 8mm 變成 16mm)：

嘗試將缺口寬度增加，U 型缺口撓曲破壞試驗如圖 4. 9 所示，U 型缺口寬 16mm 深 4mm；尖點寬 8mm 深 4mm。試驗方法如同 V 型缺口撓曲試驗，藉由 OTDR 量測碳纖試片(內埋光纖)的事件損失，以及討論 U 型缺口撓曲試驗與光損失量之關係。

(1) 缺口黏貼碳纖試片(內埋光纖) 結果(1625nm 與 1550nm 波長比較)

以 1625nm 與 1550nm 雙波長量測數據與分析，如圖 4. 10 所示縱軸為光能量(dB)，橫軸為撓度變化(m)。使用 1625nm 波長量測，以 0.05mm 為一單位對碳

織試片(內埋光纖)作撓曲試驗，在 0.9mm 撓度變化時，OTDR 儀器偵測到事件 0.675dB；最後在 2.05mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到 6.421dB。

使用 1550nm 波長量測，以 0.05mm 為一單位對碳纖試片(內埋光纖)施作撓曲試驗，在 0.9mm 撓度變化時，OTDR 儀器偵測到事件 0.571dB；最後在 2.05mm 的撓度變化時，OTDR 儀器偵測到 5.539dB。

(2) 小結

碳纖試片(內埋光纖)在 0.9mm 撓度變化時 OTDR 儀器才偵測到光損耗，因此缺口寬度增加，偵測的靈敏度降低，而 1625nm 波長偵測仍然對彎曲損失比 1550nm 波長靈敏。

4.2 碳纖管內埋設光纖感測器三點彎曲試驗

OTDR 可以量測光纖事件點所造成損失之特性，將此特性應用在量測內埋在碳纖管的光纖受載重破壞時，將造成局部光纖彎曲之行為的光能量之損失，使用 OTDR 偵測此事件典之能量損失。在實驗室對碳纖管內埋光纖感測器施作三點彎曲試驗，由此實驗可得知隨著載重破壞的程度之增加碳纖管內埋光纖的光能量損失之關係。

4.2.1 碳纖管內埋設光纖感測器製作

1. 光纖線：

SM/125/250 單模光纖 FC/PC、FC/LC 的 pigtail，線全長 80m，預防接頭加

熱加壓時光纖線與碳纖管銜接點損壞，在介面採用耐熱式 $900\mu\text{m}$ 套管，碳纖管成型後再融接光纖接頭。

2. 布線方式：

碳纖管長 30cm 管徑約 4cm，光纖線長 80m 埋設於碳纖管壁(可埋設一條或多條)，在 40m 的點位(不受盲區影響)埋設 30cm 的光纖線於碳纖管內，其中有 30cm(碳纖管長度)通過碳纖管作為感測長度如圖 4.11、圖 4.12 所示。此簡單埋設方式較容易在實驗室內製作。

3. 預浸布黏貼與埋設光纖線：

本實驗所使用的碳纖預浸布為深圳柏冠公司所提供的碳纖預浸布其中一種，材料性質為樹脂含量 37%、拉伸強度 4900MPa、拉伸彈性率 240GPa。每片預浸布大小裁切成碳纖管疊層面積由內到外分別為第一層 $140\text{mm}\times 300\text{mm}\times 0.22\text{mm}$ $\pm 30^\circ$ 碳紗、第二層 $140\text{mm}\times 300\text{mm}\times 0.22\text{mm}$ $\pm 30^\circ$ 碳紗、第三層 $140\text{mm}\times 300\text{mm}\times 0.22\text{mm}$ $\pm 30^\circ$ 碳紗，選擇在第二層碳紗及第三層碳紗之間的夾層內埋設光纖，量測光訊號。

4. 實驗室內成型設備：

實驗室內成型的模具，如圖 4.13、圖 4.14。烘箱可調整溫度達 150°C 、氣壓設備最大達 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ，如圖 4.15。

5.熱壓成型：

在未成型的碳纖維管內放入氣袋後放置模具內如圖 4.16 所示，放置好位置後模具閉合如圖 4.17 所示放入熱壓臺之後承受 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 外壓，而模具內的氣袋承受 $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 內壓， 150°C 高溫下成型 45 分鐘，成型後光纖無斷裂以及能夠傳輸光訊號如圖 4.18。

4.2.2 試驗方法

將埋設光纖感測器的碳纖維管施作三點彎曲試驗方法，將內埋光纖線的碳纖維管放置於長度 20cm 的支座上，而在中心位置處施加荷重並且使用 load cell 量測荷重，如圖 4.19、圖 4.20、圖 4.21 所示。實驗使用 OTDR 以 1625nm、1550nm 波長分別量測光纖受到彎曲破壞的事件損耗和碳纖維管所受的最大彎曲應力 (σ_{\max}) 和撓度與光損耗量之關係，最大彎曲應力可由下列公式求得(林樹均等人，2007)如下：

$$I = \pi r^3 t \quad (4.1)$$

式中， I = 慣性矩

r = 圓管半徑

t = 管壁厚度

$$M_{\max} = \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{L}{2}\right) = \frac{PL}{4} \quad (4.2)$$

式中， M_{\max} = 最大彎距

P = 荷重

L = 距離

$$\sigma_{\max} = \frac{My}{I} \quad (4.3)$$

式中， σ_{\max} = 最大彎曲應力

M = 最大彎距

y = 距離中性軸位置

I = 慣性矩

$$\delta_{\max} = \frac{PL^3}{48E_b I} \quad (4.4)$$

式中， δ_{\max} = 最大撓度

E_b = 材料彈性模數

I = 慣性矩

其中參數 $r=2\text{cm}$ 、 $t=0.66\text{mm}$ 、 $L=20\text{cm}$ 、 $E_b=240\text{GPa}$ 為已知。

4.2.3 試驗結果

三點彎曲實驗進行三組試驗結果如表 4. 1、表 4. 2 所示。圖 4. 22、圖 4. 23 為使用 OTDR 的 1625nm、1550nm 波長量測碳纖管彎曲撓度與光損耗之關係，縱軸為光能量(dB)，橫軸為量測的撓度變化量(mm)。圖 4. 24、圖 4. 25 為使用 OTDR 1625nm、1550nm 波長量測碳纖管受到的應力與光損耗之關係，縱軸為光能量(dB)，橫軸為應力變化量(MPa)。

第一組實驗在 4mm 時偵測到事件損耗為 1.128dB，所受應力為 11.384MPa，最後在 13mm 時事件損耗為 9.428dB 而後光損耗量過大儀器無法再讀取，所受應力為 23.006MPa。

第二組實驗在 4mm 時偵測到事件損耗為 0.381dB，所受應力為 5.976MPa，最後在 13mm 時事件損耗為 7.845dB 而後光損耗量過大儀器無法再讀取，所受應力為 18.325MPa。

第三組實驗在 2mm 時偵測到事件損耗為 0.663dB，所受應力為 6.254MPa，最後在 13mm 時事件損耗為 9.711dB 而後光損耗量過大儀器無法再讀取，所受應力為 27.834MPa。

由實驗室內碳纖維管內埋光纖感測器三點彎曲試驗得知隨著載重破壞程度增加光損失也增加，量測撓度與光損失呈現正相關，所受應力變化與光損失也呈現正相關，因此可以推估碳纖維管式結構受到彎曲破壞時光纖可以感應到其變化量以及損壞程度大小。而就數據分析實際撓度變化量與理論撓度值有相當的差異是因為碳纖維管是結構物其受力變形的行為模式與一般金屬材料不同。在此 1625nm 與 1550nm 波長量測到的損失差異性不大，OTDR 的事件距離量測誤差約 1m。

表 4.1 三點彎曲試驗結果(最初偵測到的事件)

1625nm 波長					
實驗組數	量測撓度 (mm)	光損耗(dB)	載重(Kg)	σ_{\max} (MPa)	δ_{\max} (mm)
第 1 組	4	1.128	19.24	11.384	0.00791
第 2 組	4	0.381	10.1	5.976	0.00415
第 3 組	2	0.663	10.57	6.254	0.00434
1550nm 波長					
實驗組數	量測撓度 (mm)	光損耗(dB)	載重(Kg)	σ_{\max} (MPa)	δ_{\max} (mm)
第 1 組	4	1.12	19.24	11.384	0.00791
第 2 組	5	0.542	11.91	7.047	0.00489
第 3 組	2	0.5	10.57	6.254	0.00434

表 4.2 三點彎曲試驗結果(最後偵測到的事件)

1625nm 波長					
實驗組數	量測撓度 (mm)	光損耗(dB)	載重(Kg)	σ_{\max} (MPa)	δ_{\max} (mm)
第 1 組	13	9.428	38.88	23.006	0.01598
第 2 組	13	7.845	30.97	18.325	0.01273
第 3 組	12	9.711	47.04	27.834	0.01933
1550nm 波長					
實驗組數	量測撓度 (mm)	光損耗(dB)	載重(Kg)	σ_{\max} (MPa)	δ_{\max} (mm)
第 1 組	13	9.551	38.88	23.006	0.01598
第 2 組	13	7.296	30.97	18.325	0.01273
第 3 組	12	9.437	47.04	27.834	0.01933

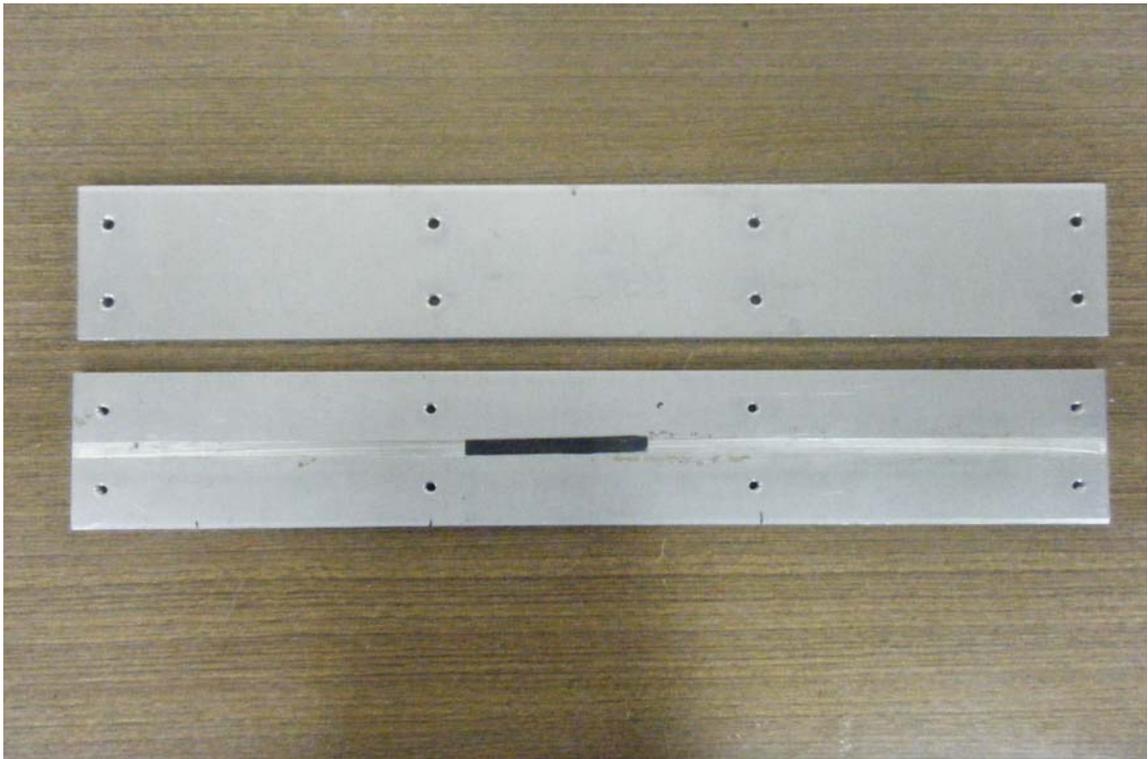


圖 4.1 內埋光纖的碳纖試片

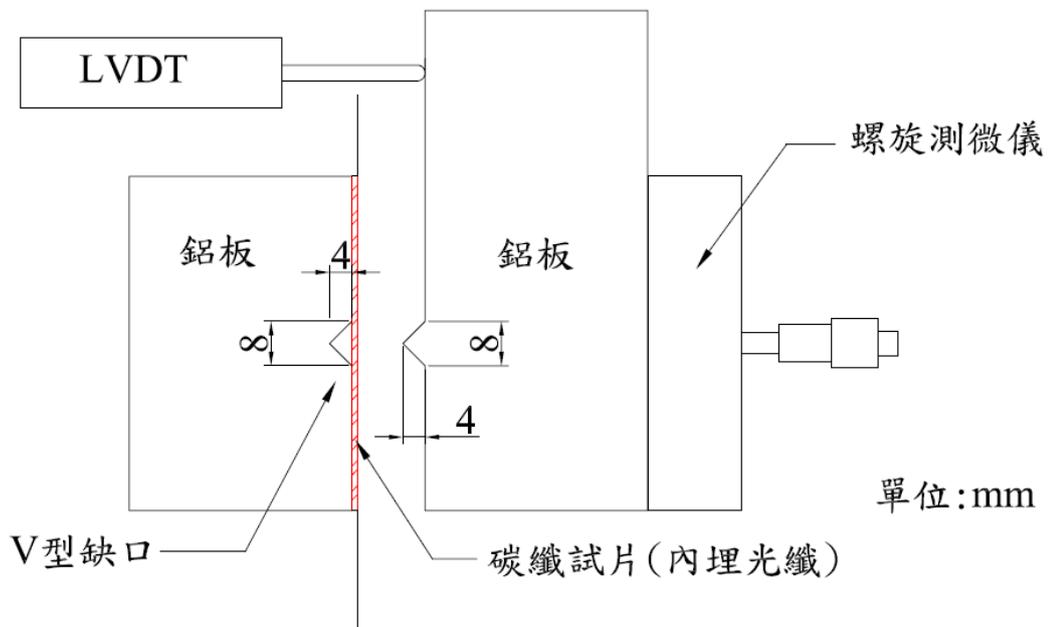


圖 4.2 V 型缺口撓曲試驗(8mm)

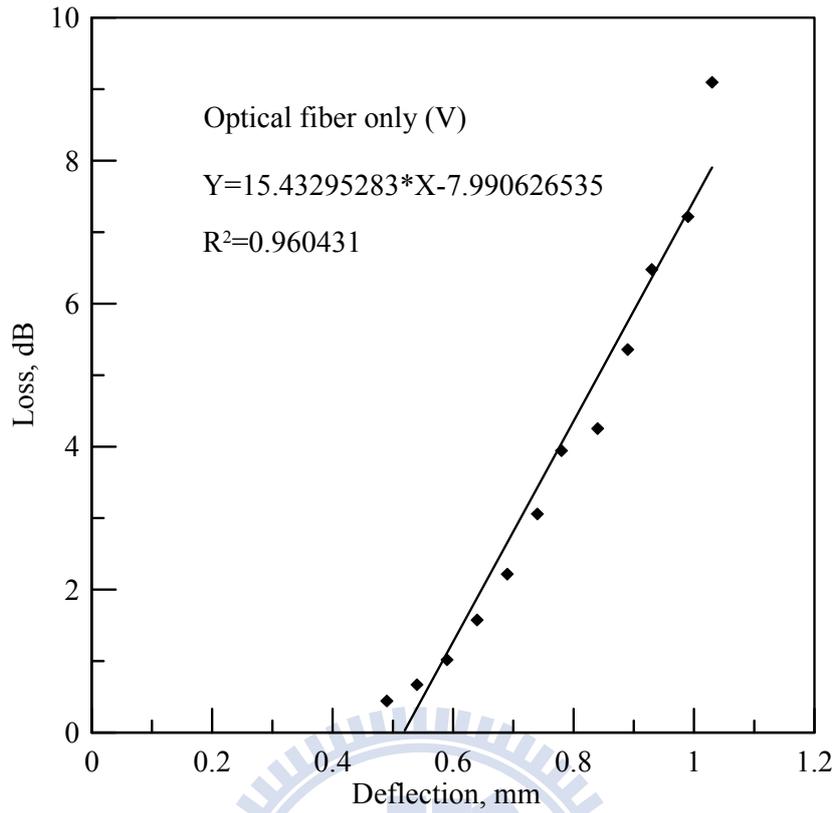


圖 4.3 裸光纖的撓曲損失對應圖

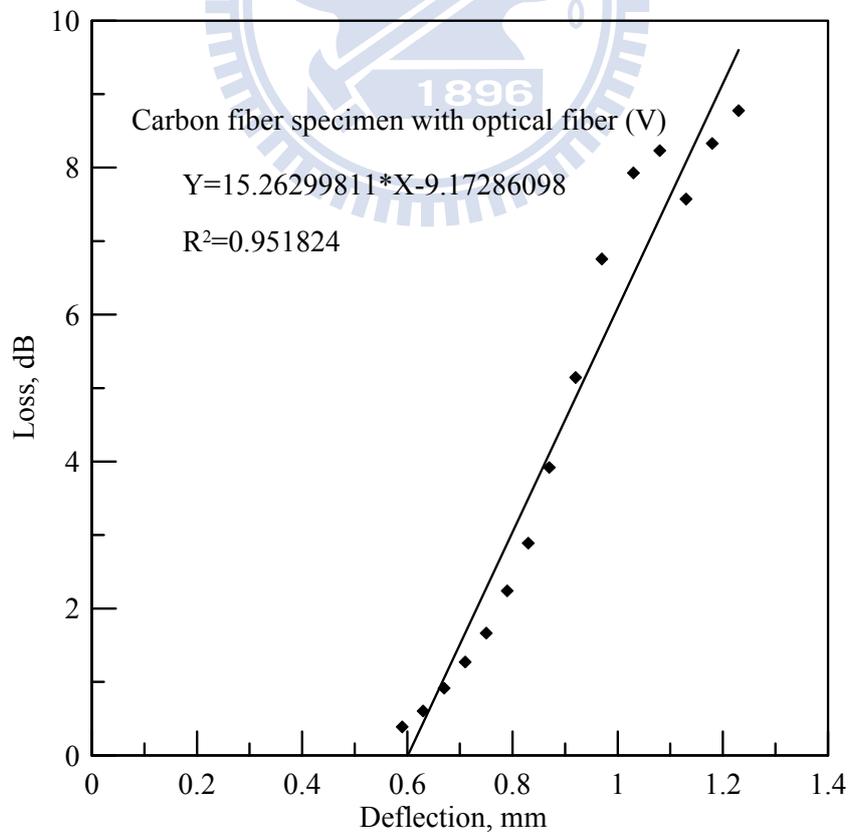


圖 4.4 碳纖試片(內埋光纖)的撓曲損失對應圖

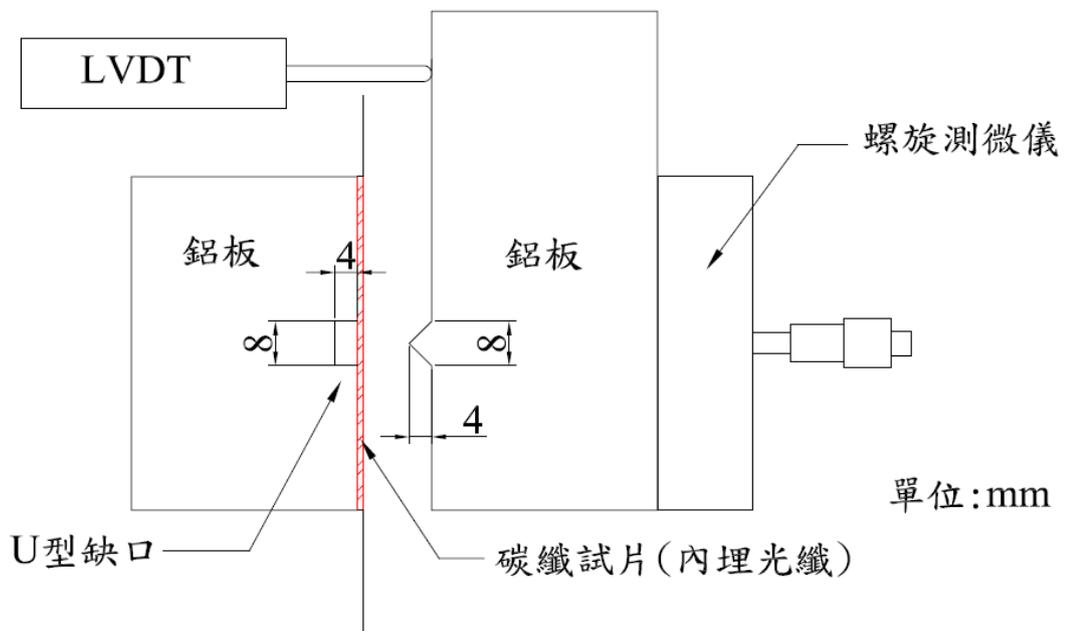


圖 4.5 U 型缺口撓曲試驗(8mm)

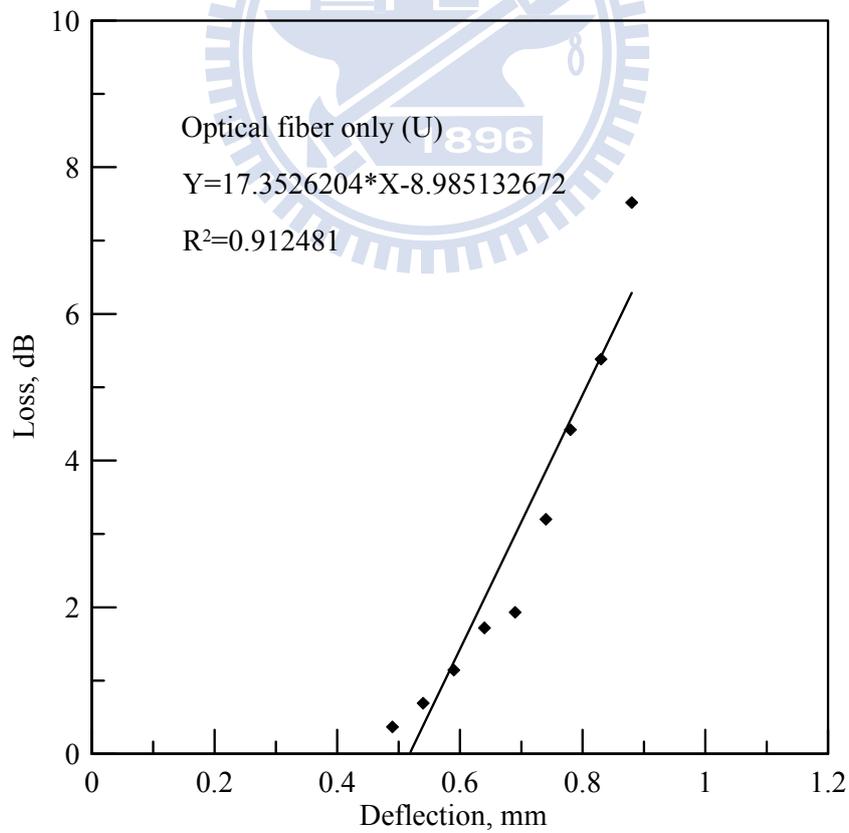


圖 4.6 裸光纖的撓曲損失對應圖

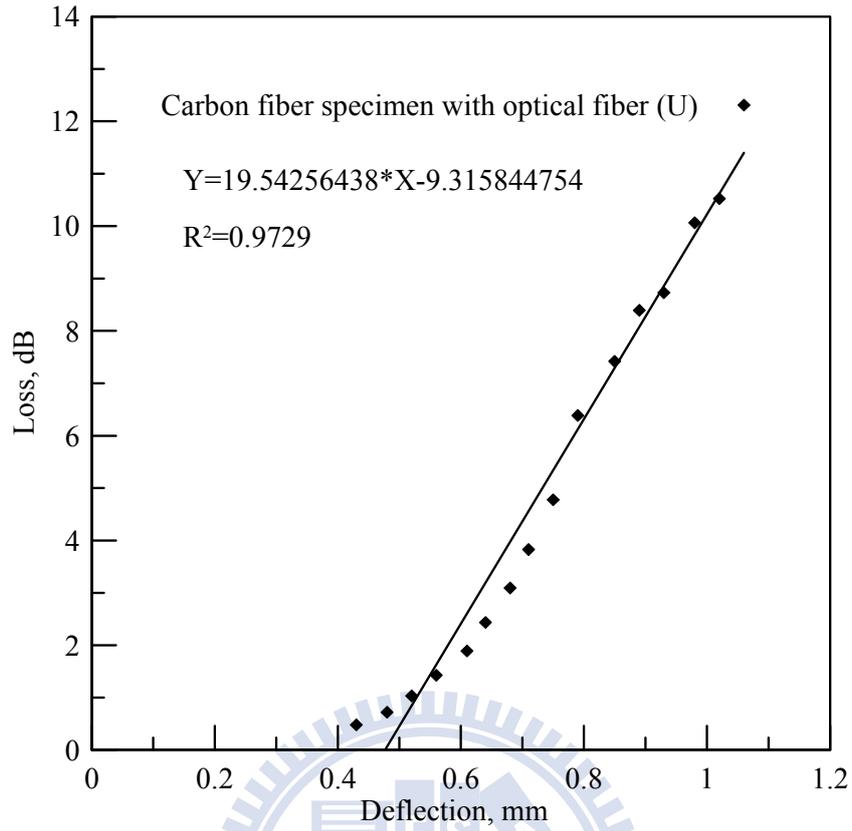


圖 4.7 碳纖試片(內埋光纖)的撓曲損失對應圖

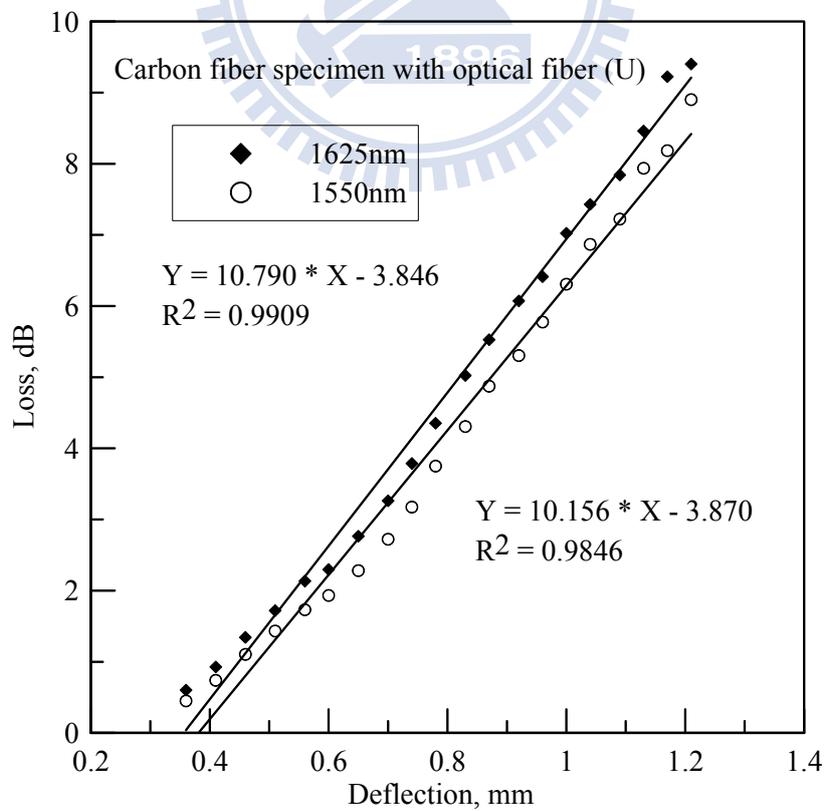


圖 4.8 碳纖試片(內埋光纖)的撓曲損失對應圖(1625nm 與 1550nm 波長)

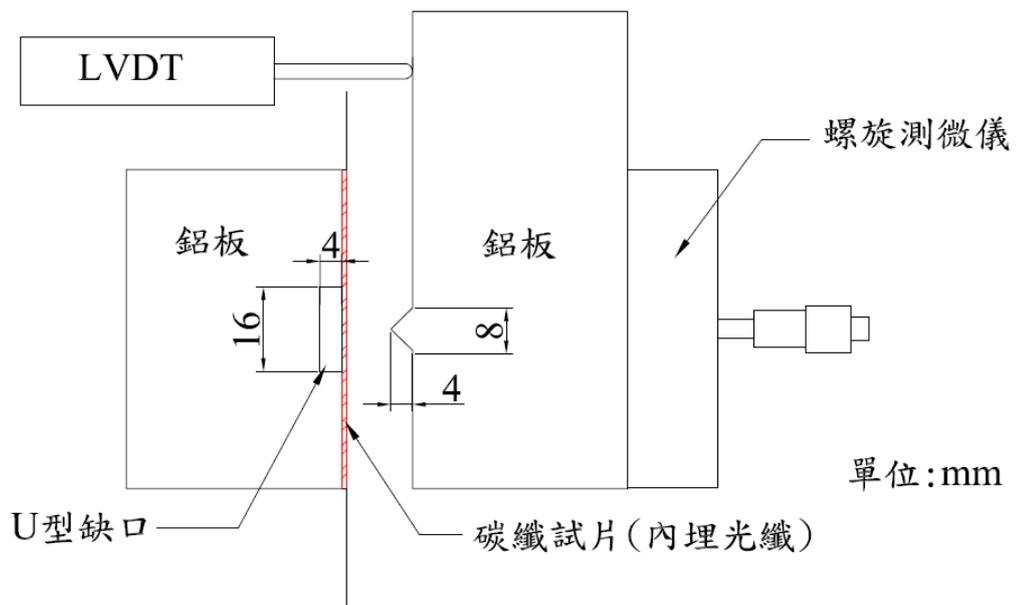


圖 4.9 U 型缺口撓曲試驗(16mm)

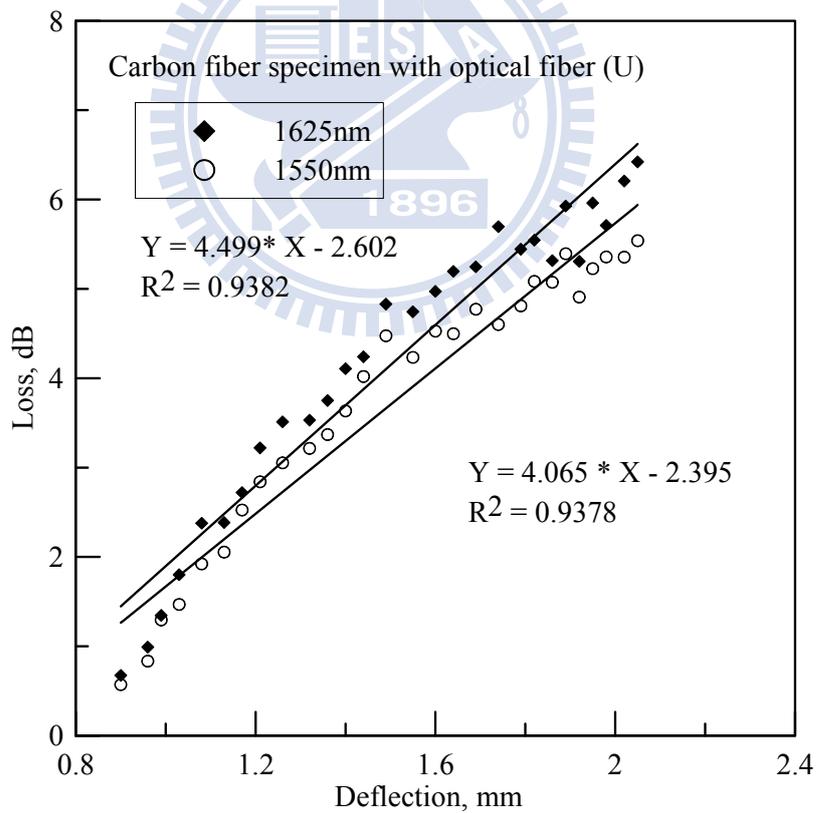


圖 4.10 碳纖維試片(內埋光纖)的撓曲損失對應圖(1625nm 與 1550nm 波長)

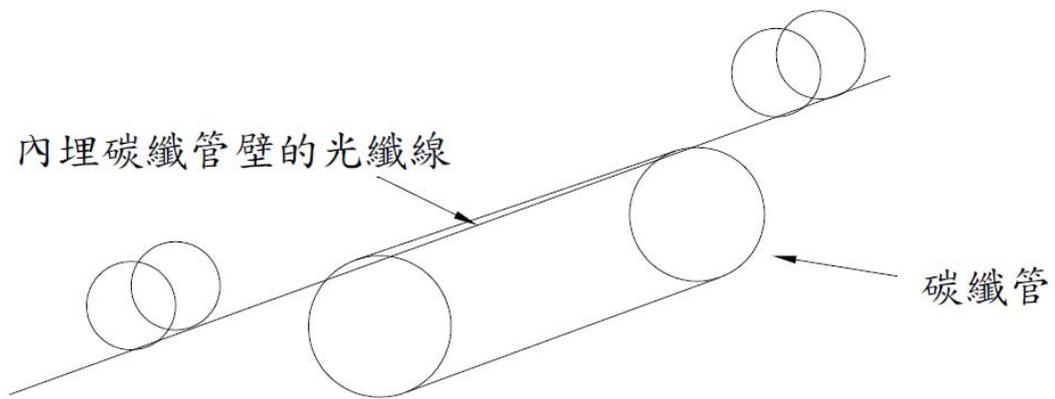


圖 4.11 碳纖管布線狀況(一)

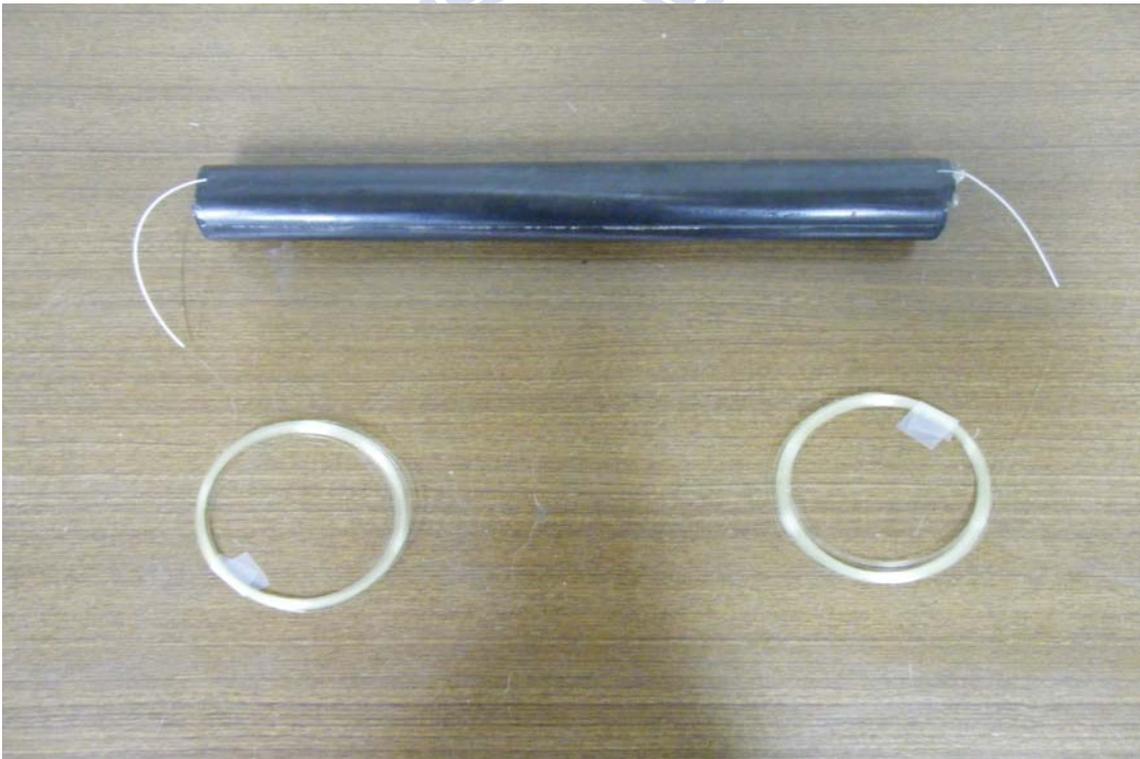


圖 4.12 碳纖管布線狀況(二)



圖 4.13 碳纖管製作模具(一)



圖 4.14 碳纖管製作模具(二)



圖 4.15 成型設備



圖 4.16 碳纖成型狀況



圖 4.17 成型狀況

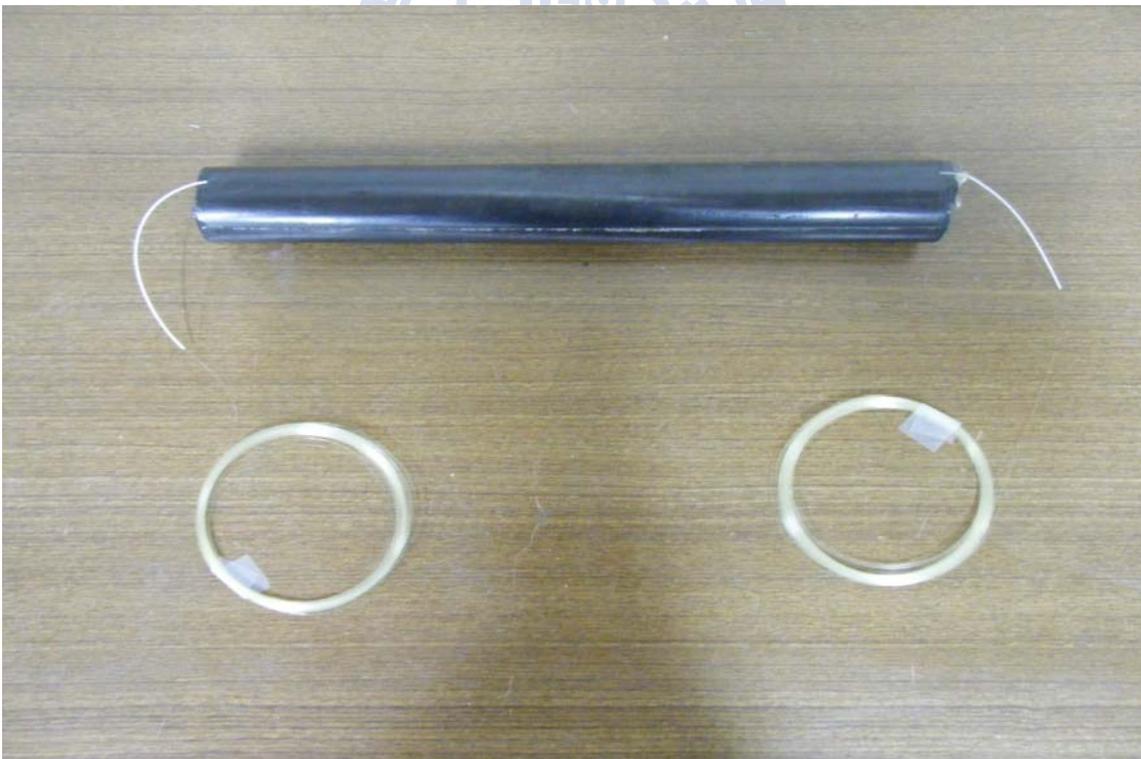


圖 4.18 成型的碳纖管



圖 4.19 三點彎曲試驗



圖 4.20 三點彎曲試驗施加荷重狀況(一)



圖 4.21 三點彎曲試驗施加荷重狀況(二)

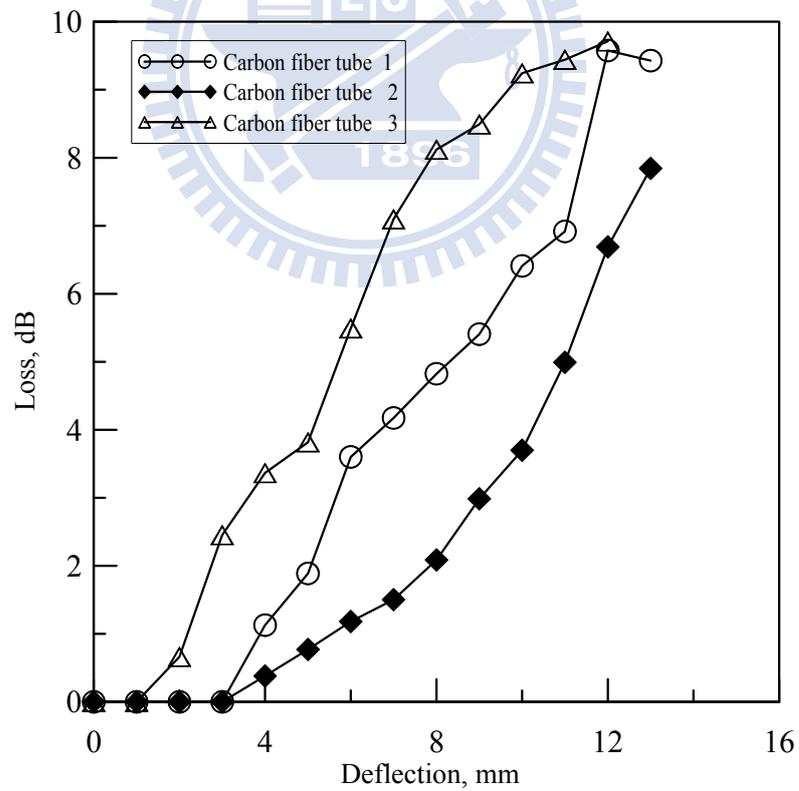


圖 4.22 碳纖管撓度變化量與光損耗之關係(1625nm 波長)

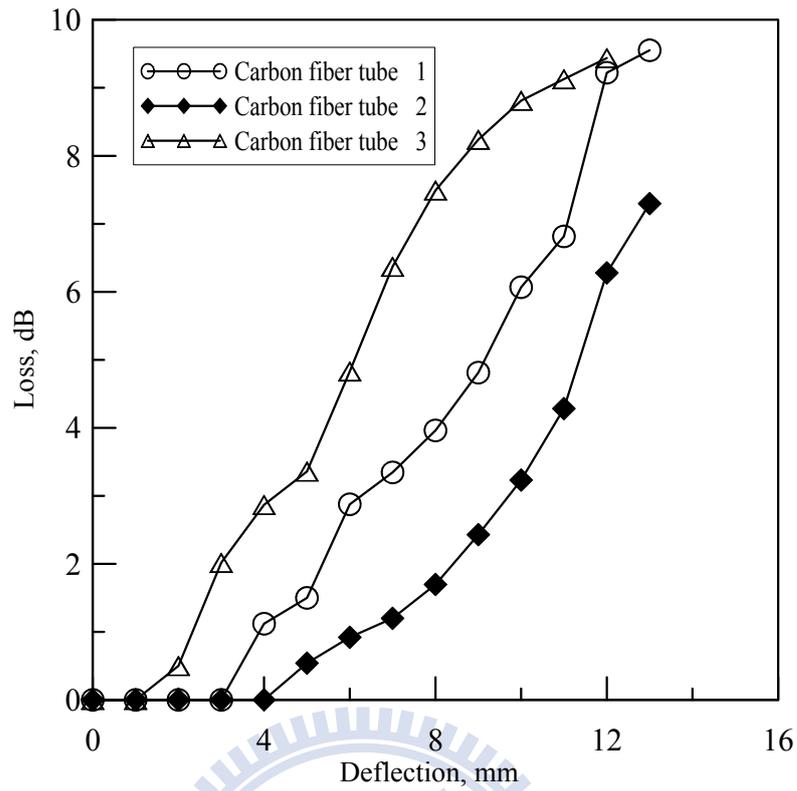


圖 4.23 碳纖管撓度變化量與光損耗之關係(1550nm 波長)

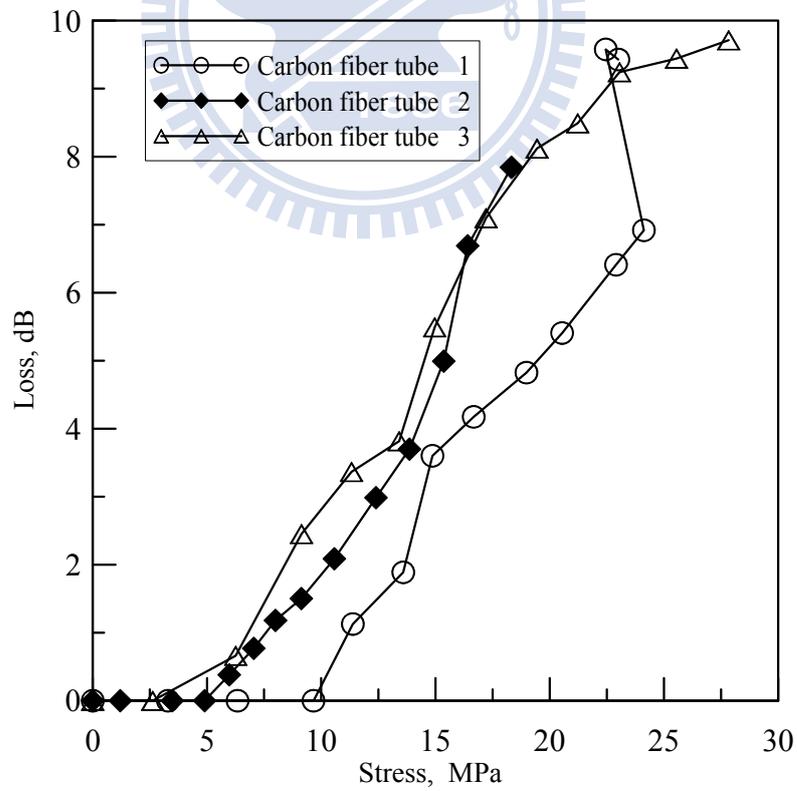


圖 4.24 碳纖管應力與光損耗之關係(1625nm 波長)

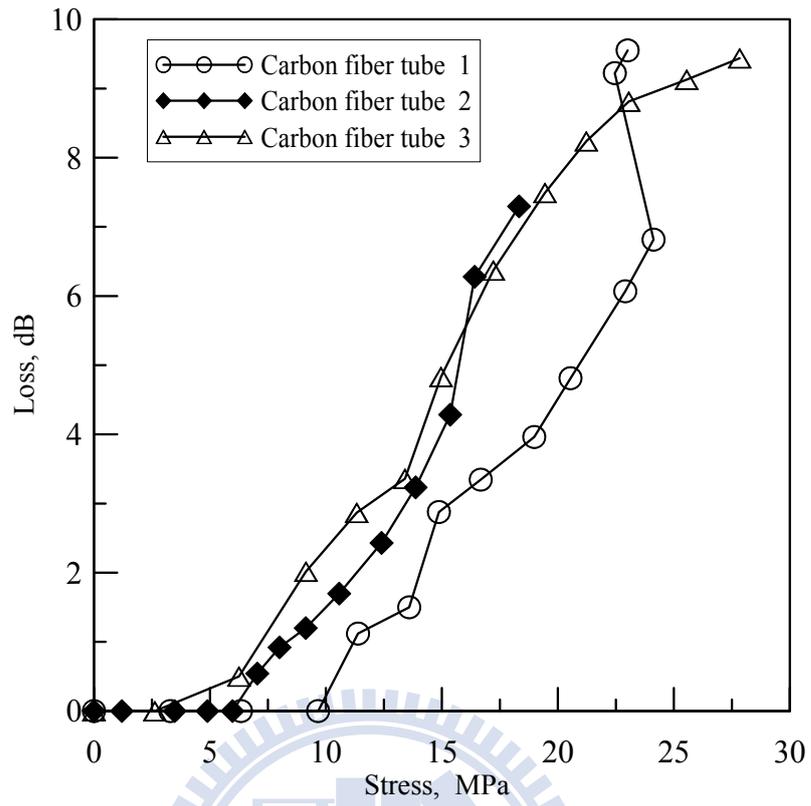


圖 4.25 碳纖管應力與光損耗之關係(1550nm 波長)

第五章 結論與建議

在產業界或學術研究中較少能夠達到碳纖維管式結構物即時健康安全監測的方法。本文研發了內埋光纖感測器於碳纖維管式結構物的方法作為即時健康安全監測的方法，並且實際埋設於碳纖維車架上。在實驗室進行碳纖維試片以及碳纖維管內埋設光纖線，分別施作 V 型與 U 型撓曲試驗以及三點彎曲試驗等破壞試驗，使用 OTDR 儀器量測光纖損耗量的變化，得知破壞大小與光纖損耗量有相關性。以下為實驗結論與建議：

5.1 結論

1. 本文研發了光纖內埋於碳纖維管式結構物(碳纖維車架)的方法，並且驗證其可行性可以在使用過後對碳纖維管式結構物進行健康安全檢測，得知損壞訊息，有助於維護碳纖維結構物的使用安全品質。
2. 在實驗室內製作 V 型與 U 型缺口的撓曲損傷缺陷於碳纖維試片上，使用 OTDR 量測光損失與損傷程度的相關係數 R^2 都達 0.9 以上，有正相關性。缺口寬度增大，光纖偵測靈敏度略變低，顯示破壞面積之大小與光纖損耗偵測有相關性)。
3. 對碳纖維管施做三點彎曲試驗，隨著載重破壞的程度之增大，量測碳纖維管內埋光纖的光能量損失隨之增加，受破壞力之大小與光纖損耗偵測有相關性。

4. 雖然 OTDR 可以檢測到有事件的發生以及位置點，但是目前所使用 OTDR 事件點位置判讀精度誤差約 $\pm 2\text{m}$ 之間，欲得知損壞點位置(如：下管、五通)其量測精度仍然不夠。
5. OTDR 量測波長以 1625nm 波長相對於 1550nm 波長彎曲度感應損耗較高，量測損耗以 1625nm 波長較為靈敏。
6. 光纖埋設環境處於高溫高壓的環境與一般常溫環境下的條件不同，在埋設時不可避免會有 2~3dB 的散射損耗，以及光纖線尾端弗瑞奈反射訊號功率減低。接頭與套管內埋於碳纖車架內，接頭與套管材質有更換較耐溫之材質但是仍然不夠保護接頭而需要使用更好的材質。研發中評估光纖接頭埋設於車架部或外部兩者皆有可性，但是評估外觀與光纖日後保護問題仍然是光纖接頭內埋對於碳纖自行車外型較少變化使用會比較方便。

5.2 建議

1. 本研究為使用非破壞的方法檢測碳纖結構物之方法，埋設及使用簡便，經濟效應也很高，適合戶外大型結構物的健康檢測，可以廣泛應用於各種領域，如：軍事、太空、運動用具、風力葉片。在未來不論在工程界或其它相關產業界都可以使用此方法更進一步的發展與創新。
2. 光纖接頭埋設於車架內，光纖接頭若全部能夠有耐熱的特殊材質製作會將接頭損耗減到最小。

3. 限制於衰減盲區 10m 影響整體埋設線長達 50m 以上甚至實驗室內埋設使用 80m 長，若能使用更精準的 OTDR(盲區縮小、辨別事件位置精準度增加)，埋設光纖線於車架上線長可以縮短至 10m 不只埋設更加方便、在事件發生的位置即可判斷在車架的某部位，將資料同整後有助於修正碳纖車架的結構改良製程、提升品質。
4. 碳纖與光纖埋設結合度尚待研究，可以用更微小的光纖線埋設。
5. 量產之可行性分析：
 - (1)單模光纖線便宜、質輕、接頭被碳纖保護不會輕易損壞。
 - (2) OTDR 儀器在光通訊界使用率高、儀器價格在光纖儀器當中屬於較便宜者。
 - (3)碳纖車架全部人工生產，因此埋設光纖影響生產製程不大。此外，光纖質輕埋設重量不影響車架重量，光纖材質為玻璃之纖維材質結合性推論為高(車架有使用玻璃纖維結合碳纖維的材質)。
- 6.未來大量使用後規畫：
 - (1)碳纖車架埋設光纖感測器有健康檢測調查表，開放全世界網路數據同整，紀錄碳纖車架損壞的歷史紀錄。可以提升業者製造的品質讓業者及使用者更了解碳纖自行車健康狀況，提供使用者品質的保障。
 - (2)OTD 儀器可放置於碳纖自行車專賣店提供使用者檢測，在不同區域放置 OTDR 監測，形成監測網路。

參考文獻

- [1] Ansari, F. (Ed.) (2005), “Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring,” Dordrecht: Springer.
- [2] Ansari, F. (1997), “Theory and applications of integrated fiber optic sensors in Structures,” In: Ansari, Maji and Leung, Editors, Intelligent Civil Engineering Materials and Structures, ASCE, pp. 2–28.
- [3] Antunes, P., Hugo Lima, Jorge Monteiro and André, P.S.,(2008) “Elastic constant measurement for standard and photosensitive single mode optical fibres,” Microwave and Optical Technology Letters Vol. 50, NO. 9, pp 2467–2469.
- [4] Avva, V. S., Vala, J. R. and Jeyaseelan, M. (1986), “Effect of Impact and Fatigue Loads on the Strength of Graphite/Epoxy Composites,” ASTM STP 893, pp.196-206.
- [5] Brownjohn, J.M.W. (2007), “Structural health monitoring of civil infrastructure,” Phil. Trans. R. Soc. A365, 589–622. (doi:10.1098/rsta.2006.1925)
- [6] Buckley, J.D. (1998), “Carbon-Carbon, An Overview,” Ceramic Bulletin, Vol.67, pp.364-368.
- [7] Chang, P.C., Flatau, A. and S.C. Liu. (2003), “Review paper: health monitoring of civil infrastructure,” Struct. Health Monit., 2(3):257-267.
- [8] Chen, C.N. and Palais, J.C. (2004), “Fiber Optical Communications and Applications,” New Wun Ching Developmental Publishing Co., Ltd, chap.1.
- [9] Dakin, J.P.(1993), “Distributed Optical Fiber Sensors,” SPIE, Vol. CR44, pp.162-199.
- [10] Derickson, D.(1998), “Fiber Optic Test and Measurement,” New Jersey: Prentice Hall PTR.

- [11] Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. and Shevitz, D.W.(1996), “Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review,” Report LA-13070-MS, Los Alamos National Laboratory.
- [12] Downing, J.N.(2005), “Fiber-Optic Communications,” Thomson learning Inc.
- [13] Farrar, C.R. and Worden, K.(2007), “An Introduction to Structural Health Monitoring,” *Phil. Trans. R. Soc. A* 365, 303–315. (doi:10.1098/rsta.2006.1928).
- [14] Farrar, C. R., Duffey, T. A., Doebling, S. W. and Nix, D. A.(2000), “A Statistical Pattern Recognition Paradigm for Vibration-Based Structural Health Monitoring,” *Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA, USA, pp. 764-773, September 8-10.
- [15] Fassois, S. D. & Sakellariou, J. S. (2007), “Time series methods for fault detection and identification in vibrating structures,” *Phil. Trans. R. Soc. A* 365, 411–448.(doi:10.1098/rsta.2006.1929)
- [16] Friswell, M. I. (2007), “Damage identification using inverse methods,” *Phil. Trans.R.Soc. A* 365,393–410.(doi:10.1098/rsta.2006.1930)
- [17] Ghatak, A. and Thyagrajan, K. (1998), “Introduction to Fiber Optics,” Cambridge University Press.
- [18] Karger-Kocsis, J. and Friedrich, K. (1988), “Fatigue crack propagation in short and long fiber- reinforced injection moulded PA 6.6 composites,” *Composites* 19(2) , pp.105-114.
- [19] Ko, J.M. and Ni, Y.Q. (2005), “Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges”, *Engineering Structures*, Vol.27, pp. 1715-1725.
- [20] Li, C., Zhang, Y.M., Liu, H., Wu, S. and Huang, C.W. (2004), “Distributed fiber-optic bi-directional strain–displacement sensor modulated by fiber Bending loss,” *Sensors and Actuators A: Physical* ., Vol.111, Issues 2-3, pp.236-239.

- [21] Liu, D. (1998), "Impact-Induced Delamination- A View of Bending Stiffness Mismatching", *Journal of Composite Materials*, Vol.22, pp. 674-692.
- [22] Lo, Y.L. and Xu, S.H. (2007), "New sensing mechanisms using an optical time domain reflectometry with fiber Bragg gratings," *Sensors and Actuators A: Physical* ., Vol.136 , Issues 2-3, pp.38-243.
- [23] Mal, A., Banerjee, S. and Ricci, F. (2007), " An automated damage identification technique based on vibration and wave propagation data," *Phil. Trans. R. Soc. A365*, pp. 479-491. (doi:10.1098/rsta.2006.1933)
- [24] Mufti, A.A. (2001), "Guidelines for Structural Health Monitoring," Winnipeg, Manitoba: ISIS Canada.
- [25] Mufti, A.A., Bakht, B., Tadros, G., Horosko, A.T. and Sparks, G. (2005), "Are Civil Structural Engineers "Risk Averse"? Can Civionics Help?," *Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring*, Ed. Farhad Ansari. Dordrecht, Netherlands: Springer, pp. 3-12.
- [26] Murukeshan, V.M., Chan, P.Y., Ong, L.S. and Seah, L.K. (2000), "Cure monitoring of smart composites using fiber Bragg grating based embedded sensors," *Sensors and Actuators*, Vol. 79, No. 2 , pp.153-161.
- [27] Palais, J.C. (2006), "Fiber Optic Communications," fifth ed., Electronics Industry Press, Beijing.
- [28] Pedrotti, F.L. and Pedrotti, L.S. (1993), "Introduction to Optics," second edition, Prentice-Hall Inc.
- [29] Pigeon F., Pelissier S., Mure-Ravaud A., Gagnaire H.; Veillas C. (1992), "Optical fibre young modulus measurement using an optical method," *Electronics Letters*, vol. 28, pp. 1034-1035.
- [30] Ramkumar, R.L. (1983), "Effect of low-velocity impact damage on the fatigue behavior of graphite/epoxy laminates", *ASTM STP 813*, pp.116-135.
- [31] Rytter, A. (1993), "Vibration based inspection of civil engineering structures," Ph.D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.

- [32] Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Czarnecki, J.J., Shunk, D.D., Stinemates, D.W. and Nadler, B.R. (2003), "A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996 – 2001," Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.
- [33] Staszewski, W. J. & Robertson, A. N. (2007), "Time-frequency and time-scale analysis for structural health monitoring," *Phil. Trans. R. Soc. A* 365, pp.449-477.(doi:10.1098/rsta.2006.1936)
- [34] Sterling, D.J. (1993), "Technician's Guide to Fiber Optics," Third Edition, Thomson Delmar Learning, New York.
- [35] Udd, E. (1993) "Fiber Optic Smart Structures," in *Fiber Optic Sensors, Proceedings of SPIE, Vol. CR44*, pp.246-270.
- [36] Vandiver, J.K. (1977), "Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamic response," *Journal of Petroleum Technology* 29, pp. 305-310.
- [37] Viero, P.F., Roitman, N. (1999), "Application of Some Damage Identification Method in Offshore Platforms," *Marine Structures*, 12(2): 107-126.
- [38] Vries, M. J. de Arya, V., and Claus, R.O., June (1996), "Fiber Sensors Guard Highways of the Future," *Laser Focus World*, pp.114-115.
- [39] Wan, K.T. and Leung, C.K.Y. (2007), "Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures," *Sensors and Actuators A*, vol. 135, no. 2, pp. 458-464, 2007.
- [40] Zhou, K., Wang, Q., Liu, W., Zhang, J.(2009), "A summary review of recent advances in research on structural health monitoring for civil engineering infrastructures," *Industrial Construction*, Vol.39, No.3, pp.96-102.
- [41] 馬振基(1988), "高分子複合材料(上冊)", 國立編譯館出版。
- [42] 王萬易(1996), "1.65 μ m 光時域反射儀在光纖通訊系統中量測探討", 國立交通大學光電工程研究所, 碩士論文。

- [43]許明發(1997)，“碳、碳纖維、碳/碳複合材料之加工技術與應用”，
滄海書局。
- [44]柯天祥(2000)，“知識庫專家系統於橋梁目視檢測之應用”，國立中央大學
土木工程學研究所，碩士論文。
- [45]連祥益(2001)，“動力互易定理於樑損傷檢測之應用”，國立中央大學土木
工程學研究所，碩士論文。
- [46]李有豐、謝尚賢等人(2002)，“建立橋樑檢測制度方法及準則之研究”，交
通部運輸研究所委託台北科技大學辦理。
- [47]林金福、林尚明、段維新、葉逸彥、嚴建國(2002)，“複合材料”，新文京
股份有限公司。
- [48]周森(2002)，“複合材料-奈米. 生物科技”，全威圖書有限公司。
- [49]許明發、郭文雄(2002)，“複合材料纖維學”，全威圖書有限公司。
- [50]陳建村(2003)，“光纖拉曼放大系統中 OTDR 即時監控技術之研究”，國立
中山大學光電工程研究所，碩士論文。
- [51]蘇文喜(2003) “模態參數於梁結構損傷檢測之應用”，國立中央大學土木工
程研究所，碩士論文。
- [52]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。

- [53] 崔志龍(2003)， “TDR 與 OTDR 錯動變形監測之研究” ，國立交通大學土木工程研究所，碩士論文。
- [54] 張國鎮、林詠彬、陳長佑、李路生(2004)， “光纖與光柵用於橋梁監測之研究” ，交通部。
- [55] 江家慶(2005)， “以內埋式光纖光柵改測器監測碳纖複合材料之疲勞損傷” ，國立台灣大學機械工程研究所，博士論文。
- [56] 李銘淵(2005)， “光纖通信概論” ，全華科技圖書股份有限公司。
- [57] 張安華(2005)， “光纖通訊與實習” ，新文京股份有限公司。
- [58] 宋宜駿(2005)， “複材自行車架重新設計與力學分析” ，國立中山大學機械與機電工程學研究所，碩士論文。
- [59] 張祐誠(2006)， “二階段結構損傷偵測分析法之研究” 國立成功大學航空太空工程學研究所，碩士論文。
- [60] 吳彥然(2006)， “光時域技術在被動光纖環狀網路上的偵測應用” ，國立台灣大學光電工程學研究所，碩士論文。
- [61] 藤井太一、座古勝(2006)， “複合材料的破壞與力學” ，五南圖書出版股份有限公司。
- [62] 劉國雄、鄭晃忠、李勝隆、林樹均、葉均蔚(2006)， “工程材料科學(新版)” ，全華圖書股份有限公司。

- [63]許正榮(2007)，“以光時域反射之鬼影特性進行分波多工被動光纖網路(WDM-PON)光纖故障偵測研究”，國立台北科技大學光電工程研究所，碩士論文。
- [64]何彥儒(2007)，“以非破壞性檢測及破壞性顯微檢測對複材積層板探傷之比較分析”，國立台灣大學工學院機械工程研究所，碩士論文。
- [65]莊東漢(2007)，“材料破損分析”，五南圖書出版股份有限公司。
- [66]林樹均、葉均蔚、劉增豐、李勝隆(2007)，“材料工程實驗與原理”，全華圖書股份有限公司。
- [67]陳永增、鄧惠源(2009)，“非破壞檢測”，全華圖書股份有限公司。
- [68]黃進國(2009)“梁結構損傷偵測”，國立中央大學土木工程研究所，博士論文。