

漫談光纖傳輸之 損失量測

南開科技大學 數位生活創意系 鍾秋嬌

一、前言

近年來電信固網業者推動光纖到府方案，進入光世代網路服務，從電信機房利用光纖迴路連接光化交接箱、社區、辦公大樓甚至到家庭住宅等，以各式光網路設備，搭配乙太網路(Ethernet)或VDSL等技術，作為固網IP網路之接取電路，透過彙集網路提供用戶連接網際網路或可管理式IP服務等寬頻傳輸服務之業務。光世代網路服務使用光纖網路，不僅具有防護電磁干擾的能力，搭配高速寬頻設備建置網路，更能保障傳輸高品質、高頻寬及高可靠度之特性。

光纖通訊的普及化，針對光纖傳輸所要求的品質也就越來越嚴格，從光纖鏈路的建置、維護、狀態檢測及事件偵測等施工議題逐漸受到重視與探討。藉由國家通訊傳播委員會的規範：新建之建築物建置光纖骨幹時必須接受檢測，所以制定施工規範及檢驗方式，要求光纖施工品質要有一定標準。有鑒於此，勞動部在通信技術(電信線路)職類乙級

技術士技能檢定項目中，即要求如何進行光纖的佈建、連接、檢測等操作技能、施作品質之優劣來做為評鑑依據[1]。

工程人員不僅需對光纖傳輸的特性應有基本了解，包括光於介質中傳輸的特性、在不同介質 n_1 與 n_2 的折射率與入射角 θ_i 與折射角 θ_{refr} 的關係，以及光纖的構造及斯乃爾定律(Snell's law)等相關知識都是從事於光纖佈建、光纖通訊等技術人員不可或缺的專業。除此之外，在光纖佈放階段所造成的接頭插入損失或光纖收容所造成的彎曲損耗，也都是施工人員必須避免的疏失。本文將藉由兩項實作數據來探討光纖施工品質對於光纖傳輸的影響，不可忽視。

二、光纖傳輸之損失

光纖構造簡單說分為纖核(Core)、纖衣(Cladding)及保護層(Buffer)等，說明如圖1，光源傳輸主要是在纖核與纖衣中藉由折射率不同而產生全反射進行傳輸。

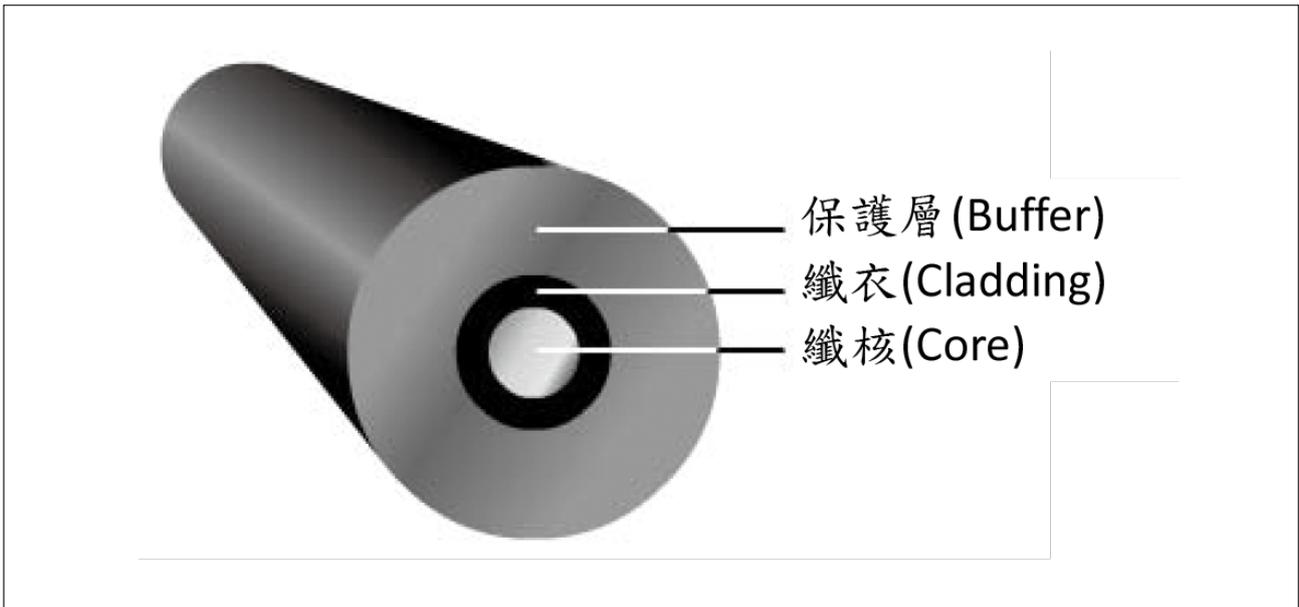


圖1 光纖構造

光源在光纖中傳遞會因為散射、材料吸收、連接、彎曲等因素造成其光功率損失。一般可將光纖傳輸損失分類為內在損失及外在損失兩大類，內在損失主要來自材料吸收、材料散射、波導散射等因素，外在損失主要來自外在因素所造成的損失如：彎曲損失、微彎曲損失、接續損失、光纖製造、施工時受到損壞而造成的損失。

材料吸收損失(material absorption losses)又可分為本質吸收及雜質吸收，本質吸收主要為光源因材料分子震動而吸收光源的能量。雜質吸收主要是因為材料中含有雜質而造成光源的損耗。如果說定義輸出光： P_{out} ，入射光： P_{in} ， l 為光纖長度， α 為光纖衰減係數約0.2 ~ 0.4 dB/km，光纖輸出的功率與輸入功率的關係式為： $P_{out} = P_{in} \cdot e^{(-\alpha l)}$ 。線性散射起因是光纖製造時光纖內的分子排列不均勻而造成折射率分布不一樣，當入射光與散射光頻率相同時因折射率微小不同而造

成散射，一般稱為瑞利散射(Rayleigh scattering)，此瑞利散射的損失(LRS)與波長的四次方成反比[2]，因此瑞利散射在短波長850 nm處對光纖的損失影響最大。

而外在因素的彎曲損失(bending loss)是因為光纖軸心彎曲而造成傳導模態光源折射出外殼，而造成光源損耗甚至無法傳遞的情形，說明如圖2。一般而言，當入射光的入射角大於或等於臨界角時產生全反射現象，但當光纖受到彎曲時則彎曲點其入射角會小於臨界角而無法滿足全反射條件以致光折射出外殼而造成損失。彎曲損失(Lb)是曲率半徑(R)的函數，可以表示為： $L_b = C_1 \cdot e^{(-C_2 R)}$ ，其中 C_1 、 C_2 為常數。從這個關係式可以看出曲率半徑R影響了彎曲損失Lb，也就是說曲率半徑越小彎曲損失Lb就越大。經由公式推導可以得到曲率半徑的臨界值(RC)近似為 $R_C \cong \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}$ 。從這個式子也說明了另一個資訊：曲率半徑與光源的波長是有關係的。

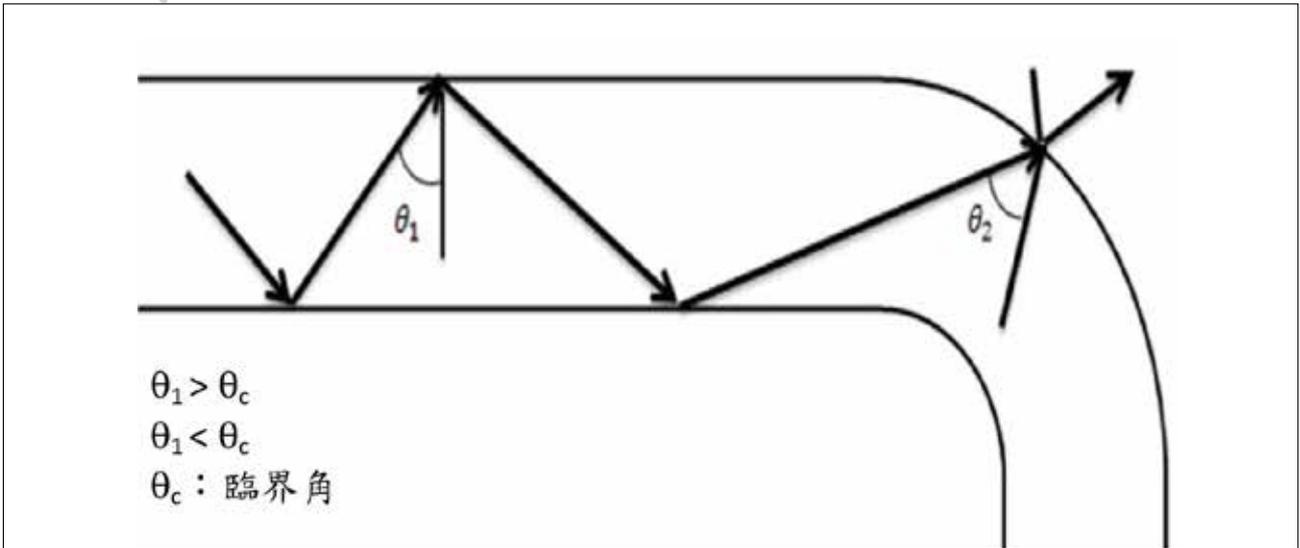
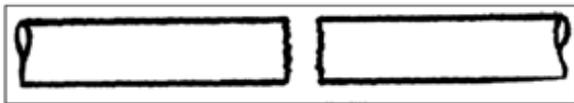


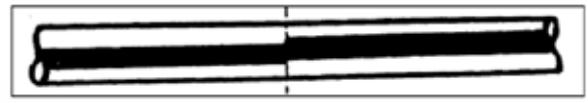
圖2 光纖彎曲造成光源折射出外殼

第二種外在因素造成的損失是微彎曲損失(micro bending loss)，即彎曲半徑接近光纖直徑的彎曲。造成微彎曲的原因有可能是第一層被覆不當、光纜佈放時不當拖拉、光纖收容固定不適當、外層材料與光纖溫度係數不同等因素造成。接著討論的是接續損失，通常接續方式可分為永久性接續(splicing)

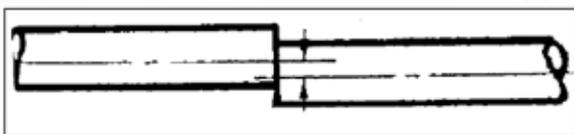
及可裝卸連接(connecting)，只要光纖兩端端面處理不當，說明如圖3，切面不平、缺角、軸心沒對準等，兩端光纖的外徑、孔徑、折射率不同都會造成接續損失。此外，製造損失(Lm)則是因為光纖製造或施工時受到損壞而造成損失。



(a)光纖切面不平



(b)纖核沒對準



(c)光纖軸心沒對準



(d)光纖孔徑不一致

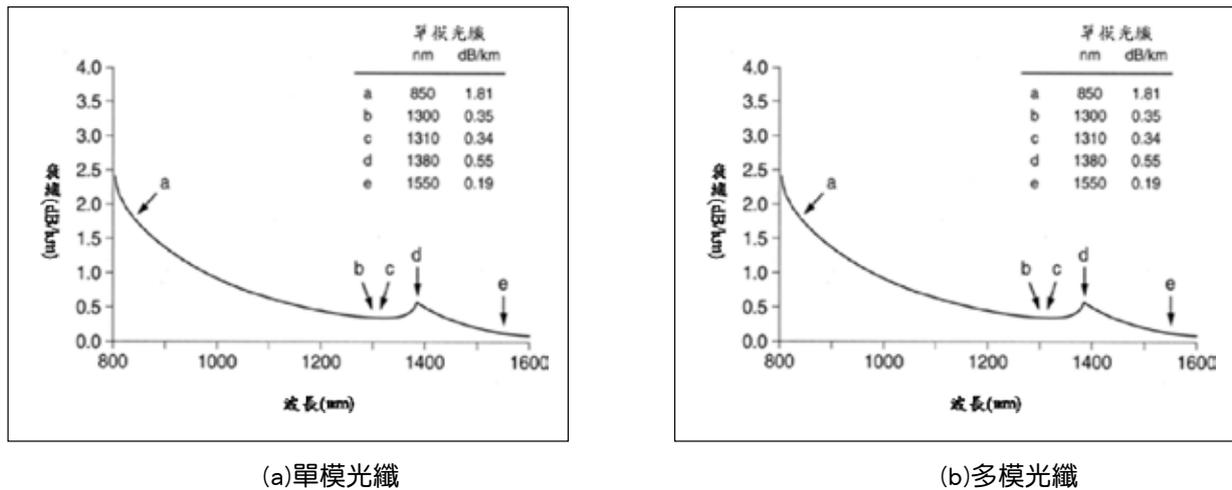
圖3 光纖端面處理不當因素[3]

三、光纖鏈路損失量測

(一) 彎曲損失

經由光纖設備，一般包括：光纖配線箱、光纖連接器、光纖收發器、光纖放大器、光

纖感測器等進行光纖鏈路的建置。檢測的光源信號一般以光源波長在1310nm或1550nm為主，主要是取其相對較小衰減值的優勢，說明如圖4。



(a)單模光纖

(b)多模光纖

圖4 光纖衰減與光源波長的關係[4]

為了取得量測數據，建置的光纖鏈路使用光纖引線(一端SC接頭，線徑為900 μm)編號RA及RB，線軸長度分別為：98.1m與97.3m；另單模虛擬光纖(不含接頭，線徑為250 μm)編號R1及R2，光纖軸長度分別為：

761.8m與1505.8m。光纖鏈路中RA與R1、R1與R2、R2與RB之間均以熔接方式進行接續，分別標示為接續點1、接續點2及接續點3。相關數據詳細列於表1及表2，鏈路示意如圖5。

表1 光纖鏈路規格與相關數據

| 編號 | RA | RB | R1 | R2 |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| 種類 | 引線 | 引線 | 單模虛擬光纖 | 單模虛擬光纖 |
| 規格 | 一端SC接頭 | 一端SC接頭 | 不含接頭 | 不含接頭 |
| 線徑(μm) | 900 | 900 | 250 | 250 |
| 長度(m) | 98.1 | 97.3 | 761.8 | 1505.8 |
| 總衰減(dB) | 0.064 | 0.045 | 0.269 | 0.529 |

表2 接續點標號與相關數據(以光源波長1310nm測得)

| 接續編號 | 1 | 2 | 3 |
|------------|--------|-------|--------|
| 接續方式 | 熔接 | 熔接 | 熔接 |
| 接續損失(dB) | 0.00 | 0.040 | -0.142 |
| A端 B端位置(m) | 98.1 | 860.1 | 2365.9 |
| B端 A端位置(m) | 2171.1 | 665.3 | 97 |

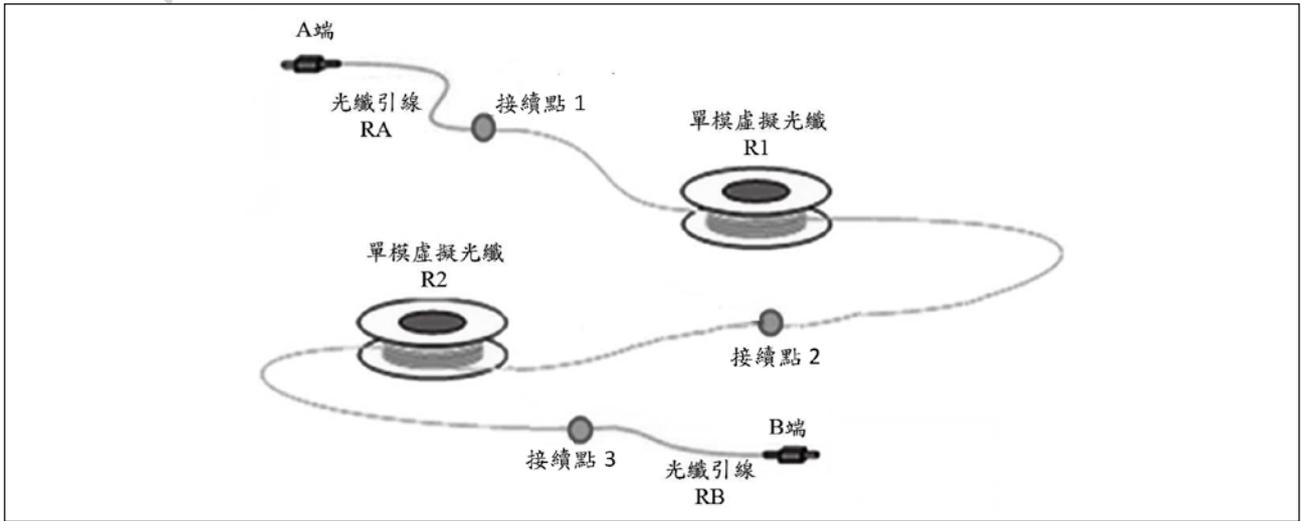


圖5 光纖鏈路示意圖[5]

本文使用EXFO - FTB200光時域反射器 (Optical Time Division Reflector, OTDR) 以光源波長分別為1310nm及1550nm進行光纖鏈路的損耗量測及事件判讀。在此將重點放在接續點2進行後續的說明，並分別以A端B→端及B端→A端進行雙向之反覆測試，其中光源波長為1310nm的軌跡圖與事件說

明如圖6及圖7。

從圖6、圖7的軌跡圖及事件說明看出接續點2在熔接工法上呈現不錯的接續品質。實驗將在此接續點2逐步以不同曲率半徑進行彎曲並測試其損失的情形，所得到的曲率半徑與光源波長1310nm及1550nm所對應之損失數值如表3所示。

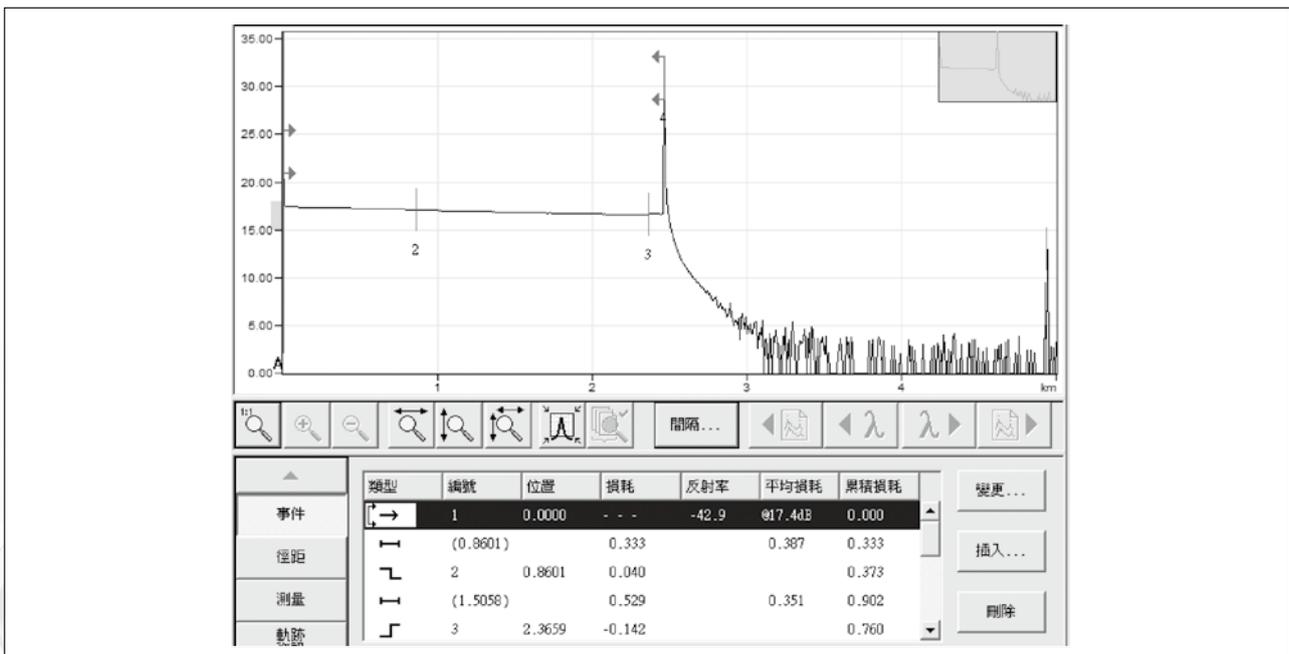


圖6 光纖鏈路A端→B端之軌跡圖及事件表

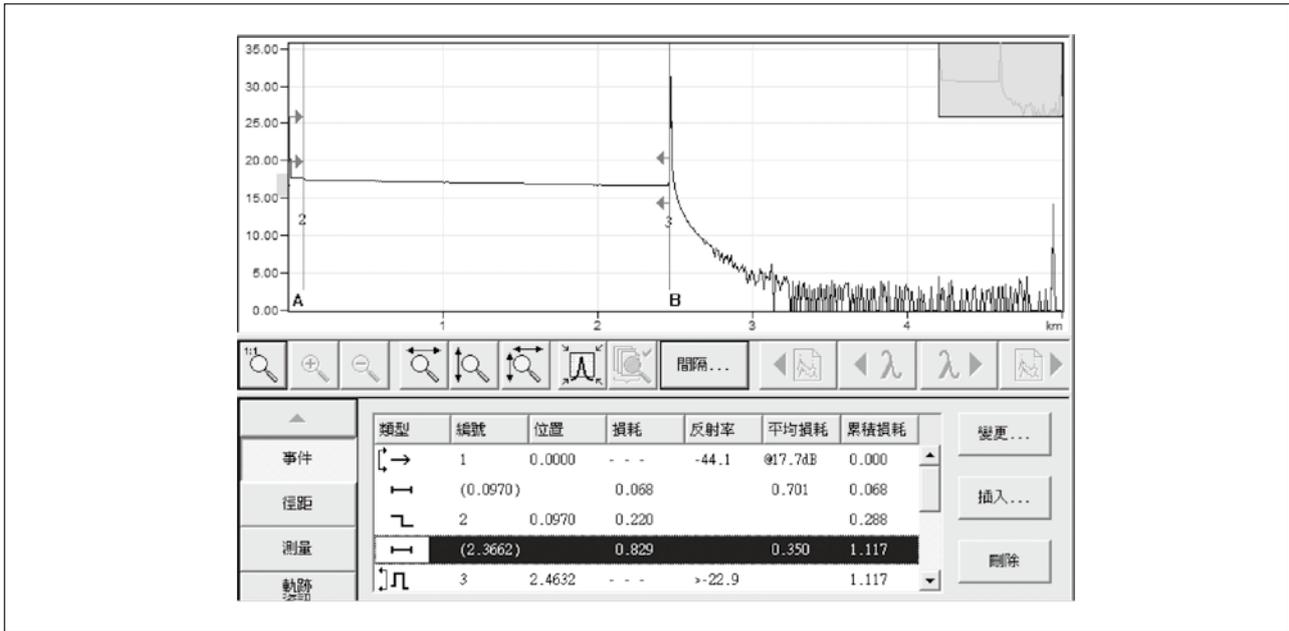


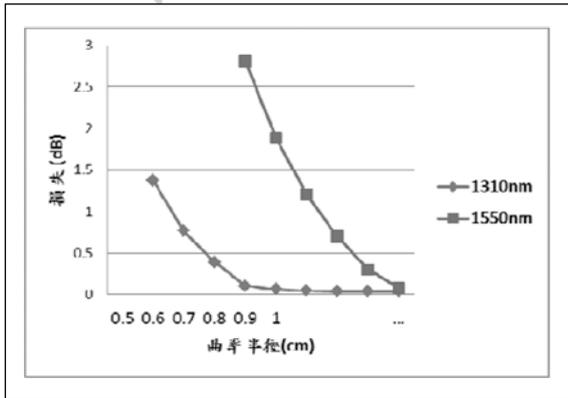
圖7 光纖鏈路B端→A端之軌跡圖及事件表

表3 曲率半徑與接續點2損失數值(單位dB)一覽表

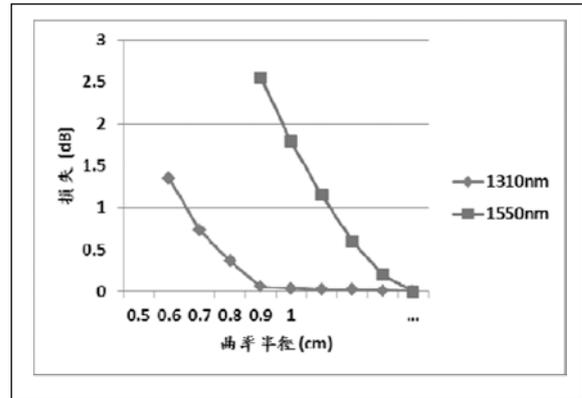
| 光源波長 | 1310nm | | | | 1550nm | | | |
|------|--------|--|-------|--|--------|--|-------|--|
| | A端 B端 | | B端 A端 | | A端 B端 | | B端 A端 | |
| 無彎曲 | 0.040 | | 0.000 | | 0.080 | | 0.000 | |
| 1 | 0.065 | | 0.037 | | 1.889 | | 1.788 | |
| 0.9 | 0.106 | | 0.057 | | 2.810 | | 2.555 | |
| 0.8 | 0.390 | | 0.363 | | - | | - | |
| 0.7 | 0.767 | | 0.728 | | - | | - | |
| 0.6 | 1.375 | | 1.346 | | - | | - | |
| 0.5 | - | | - | | - | | - | |

以曲線圖方式比較兩種光源波長對應的損失情形說明如圖8，驗證曲率半徑影響了Lb彎曲損失，曲率半徑的臨界值(R_c)如公式所示為， $R_c \cong \frac{3n_2^2\lambda}{4\pi(n_2^2-n_1^2)^{3/2}}$ ，與波長成正比關係，

也就是說同樣的光纖鏈路以光源波長1550nm進行檢測時相對較無法容忍鏈路的彎曲現象。



(a) A端→B端



(b) B端→A端

圖8 光源波長對應曲率半徑的損失情形[6]

這個實驗的結論在於兩點訴求：一、光纖鏈路的彎曲現象依不同的光源波長，影響程度迥然不同；二、即使良好的接續結果仍有可能因為後續不當的收納(例如彎曲、凹折)而造成光纖鏈路嚴重的損失。

(二) 熔接損失

除了彎曲損失的議題之外，在光纖的建置工程中又以熔接損失作為評價光纖通信網路品質好壞的一個重要參數。實際操作中影響熔接損失的因素很多，本文僅針對光纖切割

角(又稱為端面角)和熔接損失之間的關係進行探討。

在此定義光纖的端面角度是藉由光纖切割刀與光纖的夾角(θ)，說明如圖9；利用圓規0度當作切割角度的基準，實驗設置如圖10。本實驗採用圖5所示光纖鏈路中的接續點2，以康寧(Corning) Opti Splice One (OS_one)光纖熔接機配備固定的V型光纖定位槽進行熔接。經過多次熔接測試，記錄R1與R2光纖端面角度、平均熔接損失的對應關係，數據說明如表4。

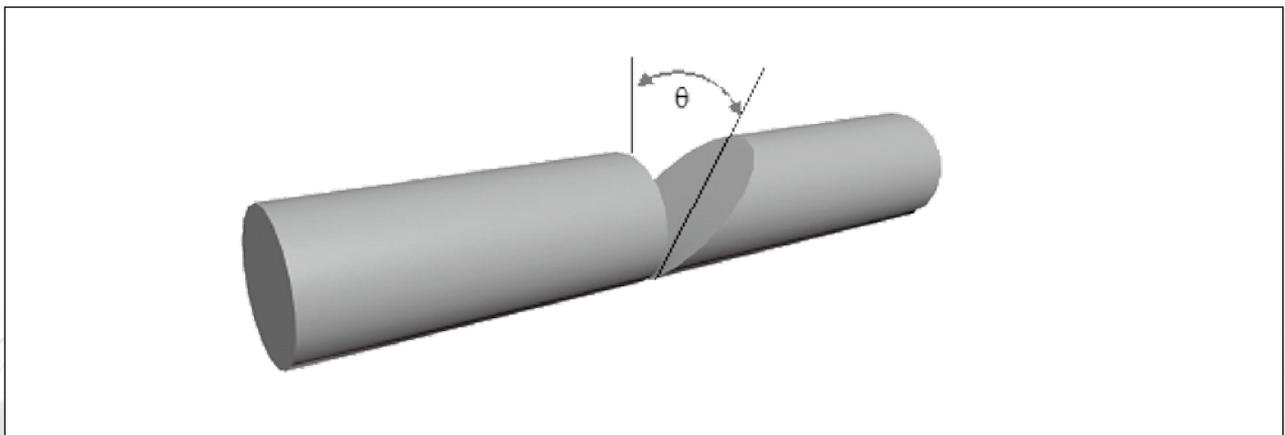


圖9 定義光纖端面角度(θ)

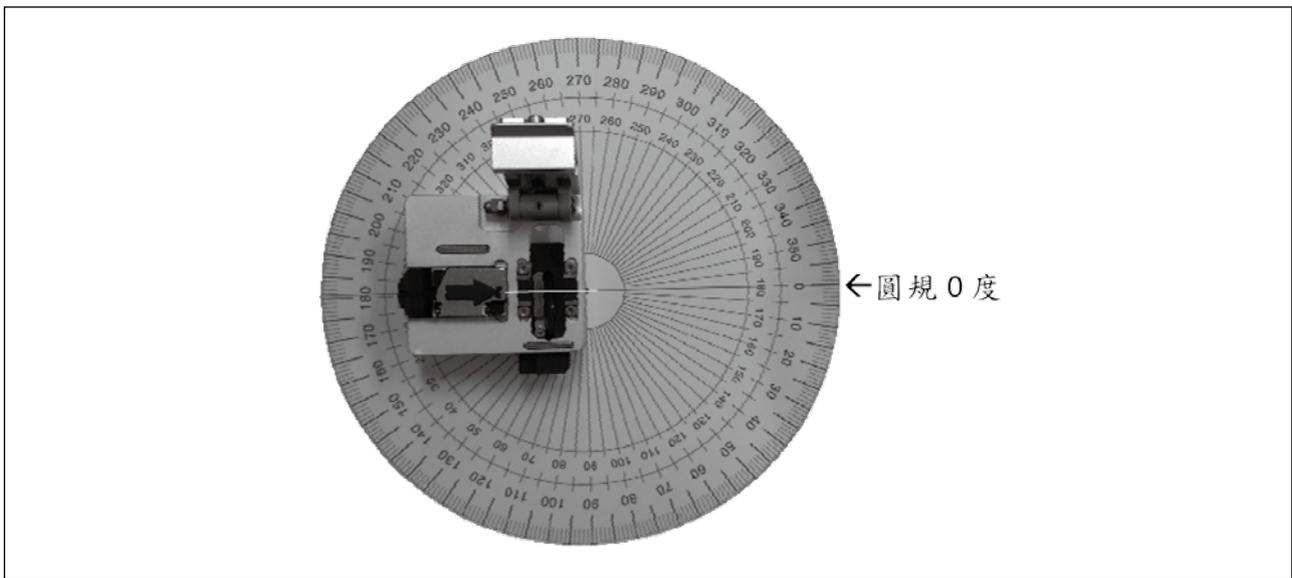


圖10 實驗設置以圓規0度當作光纖端面角的基準[7]

表4 切割角度與熔接損失(單位：dB)

| 端面角度 | 0° | 5° | 10° | 15° | 20° | 25° |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 熔接損失 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 0.10 |
| 光功率計量測 | 0.07 | 0.12 | 0.15 | 0.20 | 0.31 | 0.57 |
| OTDR量測 | 0.024 | 0.054 | 0.075 | 0.235 | 1.051 | 1.748 |

呈現在表4中的熔接損失值來自熔接機完成熔接時顯示的數值，光功率計量測數值來自每完成一次熔接即以光源自A端發射，B端以光功率計讀取後再以歸零值換算而得，OTDR量測值則是將A端→B端及B端→A端的檢測點取平均值。

本文藉由光纖熔接機完成熔接時由機器所顯示的熔接損失，與經由光源、光功率計量測的計算損失，以及藉由OTDR量測所顯示的損失三者之間的關聯與影響因素進行了分析與探討，說明如圖11。

熔接機接續動作是透過對光纖X軸和Y軸方向的錯位調整，在軸心錯位最小時進行熔

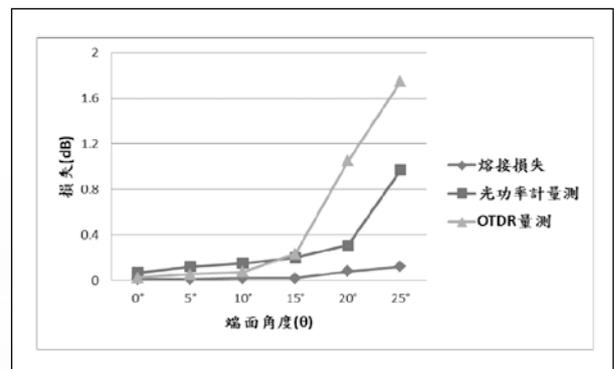


圖11 光纖熔接損失與端面角度的關聯

接的，這種能調整軸心的方法稱為纖核直視法，與功率檢測法不同，現場是無法知道熔接損失的確切數值，整個調整軸心和熔接接續過程中，利用攝影機把探測到所熔接纖核

狀態的資訊，送到熔接機的分析程式再計算出熔接損失值，這只能說明光纖軸心對準的程度，並不含有光纖本身特性所影響的損失，所以熔接機所顯示的資料配合觀察光纖接續斷面情況只是粗略地估計了光纖熔接點損失的狀況，提供光纖接續損失的參考值。而OTDR的測試方法是利用背向散射法，它包含有光纖不同形式的參數計算所得的反射損失。而光功率計量測的計算值雖是透過固定光源與光功率計的歸零值與量測讀數之間的運算，但是實驗過程中多次在跳線(或光纖引線)接頭的插拔操作下，仍有諸多待確定的因素存在。然而藉由光纖切割角度之數值分析，驗證切割角度與熔接損失之間的關聯。針對這個實驗的結論：改進熔接損失的措施在於光纖切割前的理線程序，尤其是900 μ m的光纖引線，其光纖外層的緩衝層(PVC / LSZH / FR-PVC等外被覆種類)常因盤圈方式收納以致進行熔接時會呈捲曲現象，切割前的整理不得忽視。

四、結論

光纖網路大幅度提升通信傳輸的效率，更擴大通信網路的應用層面。本文以光纖熔接機與光時域反射計(OTDR)進行光纖鏈路的熔接損失量測，根據實作的數據分析簡單歸納如下：一、驗證曲率半徑與彎曲損失的關聯性，藉檢知光纖傳輸與光源波長、彎曲損失等影響因素，以提醒光纖施作的收納工法。二、經由分析端面角度與熔接損失的關聯，藉以探討施工品質的良莠對於光纖傳輸所造成的傳輸損失將是對建置光世代通訊重要的課題。因為影響光纖鏈路損失的因素除了光纖材質製程之外，重要的因素還是在於連接

光纖之間的工法包括光纖熔接、連接器、機械接續及光纖收納等。

五、參考資料

- [1]<http://www.labor.gov.tw/home.jsp?pageno=201109290020>
- [2]https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_scattering
- [3]OTDR Pocket Guide (TC E0401), Agilent Technologies Deutschland GmbH, April 2001, Boeblingen Germany.
- [4]鄒志偉，「光纖通訊」，五南圖書出版，台北，2011年4月初版。
- [5]李梓豪，“以光時域反射計進行光纖傳輸的損耗量測與事件判讀之研究”，碩士論文，南開科技大學，電子工程系，2013年7月。
- [6]Chiu-Chiao Chung and Zih-Haob Li, “Issues of Loss Measurement and Event Detection for Fiber Transmission,” The International Congress on Natural Sciences and Engineering (ICNSE 2014) Kyoto, Japan, May 5-7, 2014
- [7]張濟民，楊小光，張偉，“光纖端面角對熔接損耗影響的研究”，中國電子科技集團公司第四十一研究所電子測試技術國家重點實驗室，山東青島266000
- [8]張至憲，“光纖熔接損耗與事件檢測議題的研究”，科技部補助大專生專題研究計畫成果報告，南開科技大學，數位生活創意系，2016年3月。