

FBG 感測器應用於水下爆震實驗之動態響應量測

陳雅惠*¹ 徐慶瑜* 江家慶** 羅光閔*** 陳俊彰**

*海軍軍官學校 船舶機械學系

**國立高雄科技大學機械工程系

***國立高雄科技大學 造船及海洋工程學系

關鍵詞：FBG，應變感測器，水下爆震

摘要

短週期光纖光柵又稱為布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Grating ; FBG)，因其具有靈敏度高、不受電磁波干擾、微小尺寸、能在惡劣環境下操作等優於一般應變規的特性，相當適合用於航太、國防領域作為埋入亦或是表貼的即時應變量測，且光纖因質輕徑細已成為訊號傳輸的主流工具，現在配合光通訊頻寬及光纖感測器性質，將大幅提高監測系統效率與可靠性。本論文針對複合材料之結構於水下爆震實驗時，進行 FBG 感測器設計與實驗量測。首先，將完成製程之 FBG 感測器進行應變校正實驗及溫度校正實驗，其校正結果，其應變校正之靈敏度為 $0.001 \text{ nm}/\mu\epsilon$ 線性度(R^2)為 1；溫度校正之靈敏度為 $0.0098 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ，線性度(R^2)為 0.9986。最後設計一半圓筒殼型之複合材料結構置放浮於水槽中，將 1.2 g TNT 炸藥置於結構下方 30 cm 處進行水下爆震試驗，過程結合光纖監測技術，將 FBG 感測器表貼及埋貼於結構上，量測結構在承受爆震負荷下的動態響應，量測結果距炸藥最近點量測之應變為約為 $994.32 \mu\epsilon$ ，結構側邊量測之應變約為 $731.55 \mu\epsilon$ ，顯示本論文設計之 FBG 應變感測器確可應用於水下爆震量測用。

前言

近年光纖光柵感測器(Fiber Grating Sensors)的研究日益多元化，而光纖感測及通訊技術逐漸成熟，尤其有關材料或結構智慧監測的應用上扮演極重要之角色。目前大多數光纖光柵感測器之研究與應用，主要為檢測特徵波長(如 FBG 反射頻譜之峰值波長)用來監測溫度、應變等物理量。因為光纖光柵感測器其具有多點量測、即時反應、細徑質輕、高頻寬、不受電磁場干擾等優點，因此相對於傳統的電阻式應變規，具有可應用於較複雜環境之優勢。而光纖光柵感測器之直徑約 $125 \mu\text{m}$ ，相當適合埋入於材料之中，進而開發成微小尺寸之應變感測器。

目前 FBG 應變感測器的開發日趨蓬勃發展，且應用之領域越來越廣泛。2021 年 Wu 等 [1] 研製了一種利用光纖布拉格光柵(FBG)感測技術的新型應變規(如圖 1)，該儀器專為在靜態或動態負載下測量樹幹的應變分佈而設計。該文詳細解釋了應變儀設計的主要原則，通過實驗室校驗，發現在聚甲酯(POM)和聚乳酸(PLA)基材上的 FBG 應變規比金屬應變規展現更好的性能。為了驗證這種 FBG 的新型應變規性能，在樹上的不同高度設置了一組傳感

器。首先，進行對該樹幹拉力測試，證實新型應變規在靜態負載下的良好性能。接著，通過在颱風期間成功記錄樹幹的動態反應，進一步證明新型應變規的動態性能表現優異。

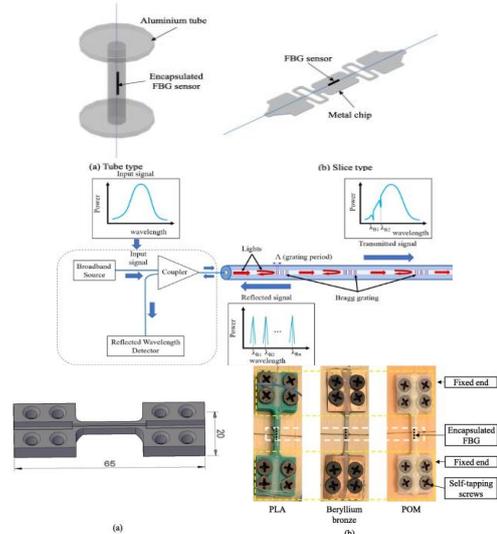


圖 1. 聚甲酯 (POM) 和聚乳酸 (PLA) 基材上的 FBG 應變儀比金屬應變儀[1]

¹ 陳雅惠 (chenyahui1201@gmail.com)

在纖維增強複合材料的持續監控過程中，通常需要將傳感器網絡貼附到複合材料結構的表面以監測應變(如圖 2)。然而，這種方法需要額外的體積並增加重量，2021 年 Groo 等[2]為了解決上述問題，將激光誘導石墨烯(LIG)應變規直接轉印到商用玻璃纖維預浸料表面，從而實現原位自感應變。由此開發出複合材料中的嵌入式應變傳感器，相比現有的替代方案，它不需要外部粘合，因此能夠減輕重量並克服這種限制。

此外，Groo 等使用的這種簡易印刷技術可按照各種應用的尺寸和感測需求進行客製化。他們所開發的 LIG 應變規能夠監測複合材料在拉伸加載和卸載過程中的單調循環應變(如圖 3)。同時，他們也證實 LIG 應變規能夠追蹤複合材料在進行頻率響應和正弦基礎激勵測試中的動態運動。因此，能夠追蹤應變的靜態或動態變化，確定材料經歷的變形程度，並可以用於分析材料的頻率內容，從而進行結構健康監控。

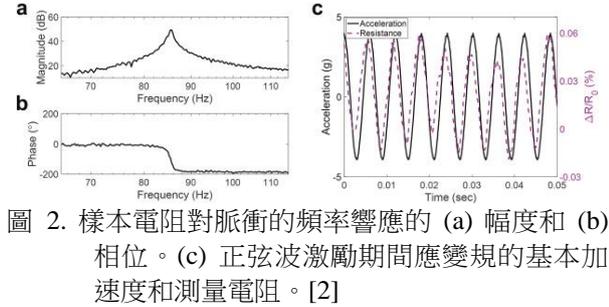


圖 2. 樣本電阻對脈衝的頻率響應的 (a) 幅度和 (b) 相位。(c) 正弦波激勵期間應變規的基本加速度和測量電阻。[2]

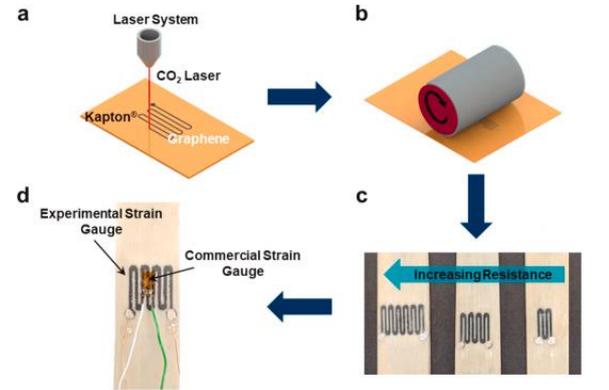


圖 3. LIG (a) 印刷和 (b) 轉移過程示意圖。(c) 具有不同電阻的轉印應變片的圖像。(d) 使用 LIG 和商用應變規完成的樣品圖像。[2]

FBG 感測器對於監測複合材料固化成形有良好特性，由於溫度敏感係數為 $12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 與應變敏感係為 $1.1\sim 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，利用 FBG 敏感係數監測複合材料成形即可得知複材成形變化趨勢。若將同時考慮應變值與溫度變化量，對於布拉格光纖光柵之反射波長之漂移量來解釋同時發生兩種物理效應之變化比

較複雜，一般皆分開討論，若只考慮應變變化時，應變敏感係數(K_ϵ)大約等於 0.796，當應變 $1/\mu\epsilon$ 時，而布拉格波長受拉應變影響而使波長往正方向飄移約 $1.1\sim 1.2 \text{ pm}$ ，其 R-square(R^2)值在 0.99 左右 [3]。

本文主要設計一水下爆震試驗，以探討 FBG 感測器應用於水下爆震動態量測之可行性。

FBG 應變感測器開發與驗證

1. 布拉格光纖光柵應用於量測應變原理

光進入週期性之狹縫光柵結構時，會產生明暗之繞射條紋稱為繞射現象，如圖 4 所示，且相異狹縫之繞射光會相互干涉，根據幾何光學之週期性狹縫繞射原理，可得光柵傳播方程式為(1)[4]：

$$n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} ; m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

其中， λ 為傳播之光波長、 Λ 為光柵週期長度、 n 為介質的折射率、 θ_1 為入射角、 θ_2 為 1 階繞射角、 m 為繞射階數。

光纖傳輸原理是利用光的全反射於光纖中傳遞，在光的入射角度不同時，會產生不同的全反射及傳播模態，因此定義傳播常數 β 為式(2)[4]：

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} = \frac{2\pi}{\lambda} n \sin \theta \quad (2)$$

n_{eff} 為光纖的有效折射率， θ 為光傳播反射角。

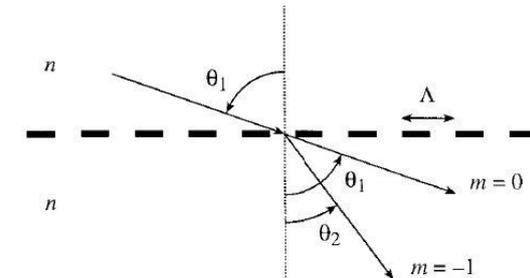


圖 4. 光柵原理示意圖 [5]

由式(1)及(2)可得下式(3)[4]：

$$\beta_2 = \beta_1 + m \frac{2\pi}{\Lambda} ; \beta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n \sin \theta_2 ; \beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n \sin \theta_1 \quad (3)$$

光纖是具有軸對稱性的圓柱形光波導體，根據幾何光學 Snell's Law 的定理，光纖是藉由 core 及 cladding 的折射率之差異(core 的折射率略大於 cladding)，使光纖之入射光能在 core 與 cladding 的交接面上以全反射的方式沿著光纖軸向行進。將光柵的結構製作於光纖的 cladding 中即可得到所謂的光纖光柵(Fiber grating)。光在光纖內傳遞的傳播常

數 β_1 受到光柵繞射影響，而產生另一傳播常數 β_2 。在繞射階數為 $m = -1$ 的情況下，由式(3)可得式(4)：

$$\beta_2 = \beta_1 - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (4)$$

由式(4)中可知，光在光纖傳播受到週期性光纖光柵的擾動時，會有部分的光受到光柵結構干擾，而從原先的傳播模態 β_1 ，得到光的另一傳播模態 β_2 。此現象為光的傳播模態發生耦合(Coupling)。

而由式(2)及(4)可得週期性光纖光柵之相位匹配方程式為式(5) [4]：

$$\lambda = (n_1^{eff} + n_2^{eff}) \Lambda \quad (5)$$

n_1^{eff} 是前向傳播模式的有效折射率、 n_2^{eff} 是後向傳播模式的有效折射率。

FBG 的截面為圓形，在沿半徑方向的徑向之折射率分佈均為相等，當受到一橫向力所造成的非均勻應變場時，藉由光彈理論可以發現，截面折射率會形成橢圓型分佈，內部會由一個纖芯折射率變成兩個不同之折射率分佈，形成橢圓偏振，由光彈理論可以得知，兩個新折射率變化可以寫為[4]：

$$\Delta n_{eff-x} = -\frac{n_{eff-x}^3}{2} [p_{11}\epsilon_x + p_{12}(\epsilon_y + \epsilon_z)] \quad (6)$$

$$\Delta n_{eff-y} = -\frac{n_{eff-y}^3}{2} [p_{11}\epsilon_y + p_{12}(\epsilon_x + \epsilon_z)] \quad (7)$$

由布拉格方程式(6)式可知，當 FBG 受到橫向力時，其所造成之應變場影響會造成光柵週期及有效折射率變化而使波長產生漂移，對於光柵受到橫向力所產生的應變可由方程(7)表示，假設光纖在恆溫之環境，故波長漂移不會受到溫度變化影響，FBG 的布拉格波長中心峰位移 ($\Delta\lambda_B / \lambda_B$) 與光纖中的軸向應變 ϵ 密切相關，公式如下[4]：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \epsilon \quad (8)$$

2. FBG 感測器應變校正實驗

本實驗探討布拉格光纖光柵感測器受到軸向應變作用時，其共振波長位置與傳輸損耗變化情形，而拉伸荷重範圍為 0 g 至 110 g，本實驗使用微動平台施加拉力產生軸向應變，並使用荷重元即時監測拉力荷重。當布拉格光纖光柵感測器受到拉伸負荷作用頻譜產生變化，探討光傳輸能量損失變化及波長飄移情況。實驗全程以 OSA 擷取光學頻譜訊號，分析感測器在不同負荷下的頻譜變化，本實驗架構圖如圖 5 所示。

校正結果顯示，當施加载荷重拉力由 0 $\mu\epsilon$ 增加至 2248 $\mu\epsilon$ 時，共振波長之飄移量為 2.248 nm，如表 1 所示，進而得知共振波長往長波長方向飄移，其共振波長靈敏度為 0.001 nm/ $\mu\epsilon$ ，線性度(R^2)為 1，軸向應變感測實驗頻譜圖如圖 6 所示，軸向應變波長分析圖如圖 7 所示。

表 1 FBG 軸向應變感測實驗之波長表

拉伸應變($\mu\epsilon$)	波長位置(nm)
0	1546.853
250	1547.103
500	1547.353
749	1547.602
999	1547.852
1249	1548.102
1499	1548.352
1748	1548.601
1998	1548.851
2248	1549.101
總變化量	2.248

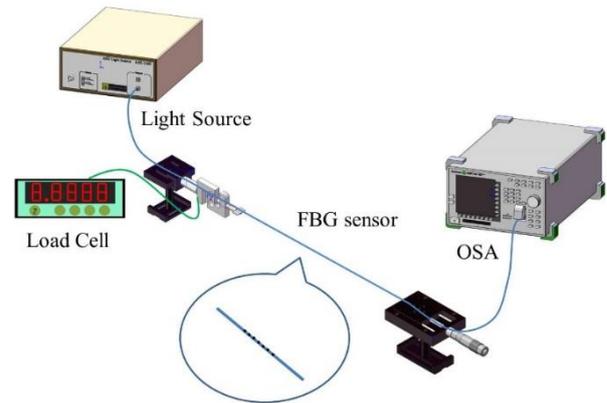


圖 5. FBG 應變感測實驗架構圖

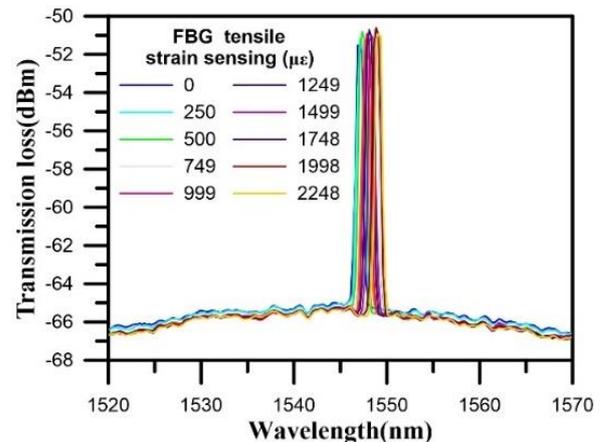


圖 6. FBG 軸向應變實驗頻譜圖

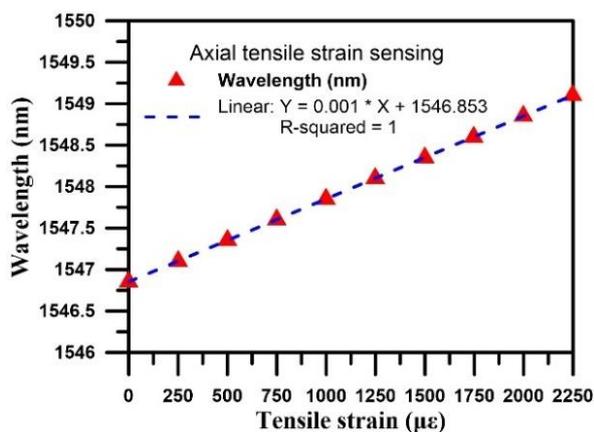


圖 7. FBG 軸向應變實驗波長分析圖

3. FBG 感測器溫度校正實驗

水下爆震物理現象十分複雜，包括初始爆轟、衝擊波、爆轟形成的氣泡等，當發生爆炸時，由於能量突然釋放，進而造成水中瞬間產生高溫及高壓之氣泡及爆震波。因此，感測器在此環境下執行即時監控動態響應時，則必須於高壓高溫環境下作業，且具可靠性。

本實驗探討布拉格光纖光柵感測器受到溫度作用時，其共振波長位置與傳輸損耗變化情形，而溫度感測範圍為 30 °C 至 100 °C，本實驗使用加熱爐控制環境溫度，升溫速率為 3 °C/min，並使用熱耦合器監測擷取及溫度校正，探討光傳輸能量損失變化及波長飄移情況。實驗全程以 OSA 擷取光學頻譜訊號，分析感測器在不同溫度下的頻譜變化，溫度校正實驗架構圖如圖 8 所示。

使用直徑 125 μm FBG 感測器進行溫度感測，當溫度由 30 °C 增加至 100 °C 時，共振波長往長波長方向飄移，共振波長之飄移量為 0.689 nm，靈敏度為 0.0098 nm/°C，線性度(R²)為 0.9986，FBG 溫度校正實驗頻譜如圖 9 所示，FBG 溫度校正實驗波長分析如圖 10 所示。

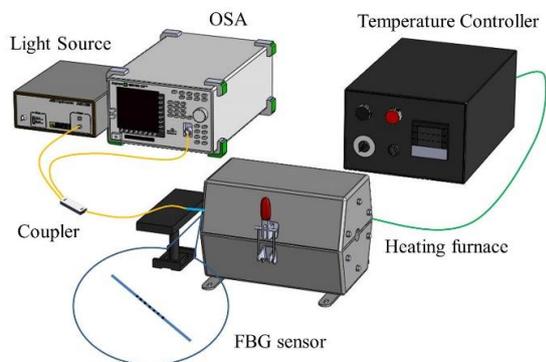


圖 8. FBG 溫度感測器溫度校正實驗架構圖

水下爆震試驗

1. 試驗場景

本論文設計一實驗，將 FRP 半圓筒殼型結構置於水槽進行水下爆震試驗，佈設 FBG 應變感測器，量測 FRP 積層板在承受爆震負荷下的動態響應。測試水槽為 4m 之正方體結構，半圓筒殼下方 30cm 處置放 1.2 g TNT 炸藥，結構下方至底部之試驗水深為 2.85 m。半圓筒殼幾何尺寸為直徑 0.55 m、長 0.6 m 的板，兩端隔板厚度為 8 mm，搭配結構膠作為隔艙壁，兩側隔板皆距離邊界 0.05 m，本實驗架構圖如圖 11 所示。

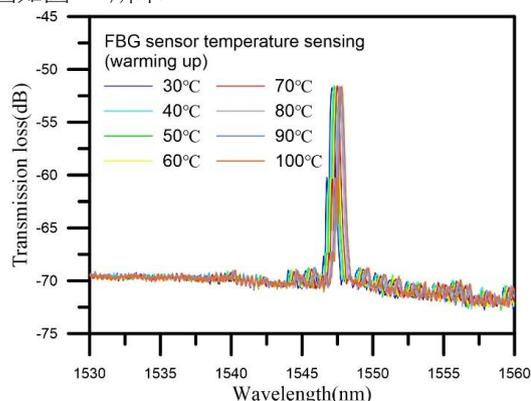


圖 9. FBG 溫度校正實驗頻譜圖

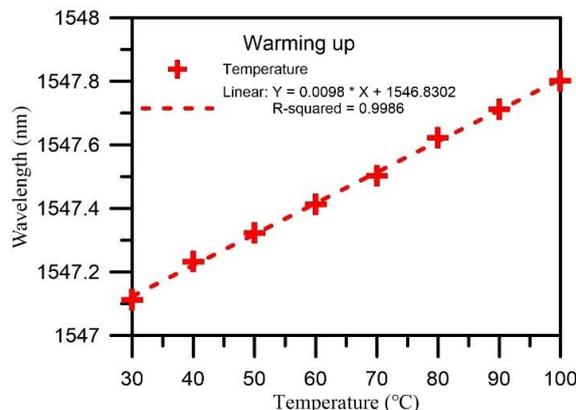


圖 10. FBG 溫度校正實驗波

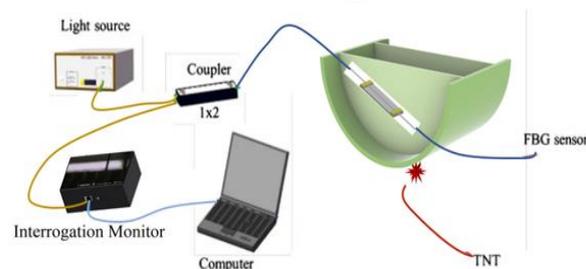


圖 11. 水下爆震試驗架構圖

2. FBG 應變感測器

使用 FBG 感測器(如圖 12 所示)之規格如下：

- Central Wavelength : 1558+/-0.3 nm
- Bandwidth : < 3 nm
- Side-Mode Suppression Ratio : > 15 dB
- Gate Length : 10 mm
- Reflectivity : > 90 %
- Fiber Type : Acrylate SMF-28e
- Fiber Length : 1/1 m



圖 12. 實驗用 FBG 應變感測器

3. 試驗模型製作

本實驗之 FRP 模型採用三明治結構，鋪設 6 層 LT800/M225 搭配 10 mm 之 PVC 芯材製作而成，並且使用對稱積層法，如圖 13 所示。以積層板的中心面為基準，在上下方向(層壓方向)將纖維布做對稱的疊層鋪設。接著依序鋪上離模布和離模紙(Peel Ply)，離模布主要用於離模時將其他耗材與成品分離，離模紙則用於分離離模布與導流網；鋪設助於樹脂擴散分佈之導流網(Distribution medium)，可使樹脂流動速度增加，可依照不同積層方法改變大小及鋪設方式。三明治結構則因芯材之孔隙率較大，樹脂流動性高，為避免過早進入抽氣管，導流網大小則僅占整體積層板之一半的面積。完成所有耗材鋪設步驟後，即可開啟真空泵浦將空氣抽出，於模型製作時以真空度 99% 及暫壓狀態仍保有 97% 為灌注標準，當真空度符合以上兩種標準後即可進行樹脂調配與灌注。本實驗選用船用真空灌注型乙炔基樹脂，其具有良好的機械性能、耐熱及耐化性，一般硬化反應可於室溫下進行且收縮性低，使大型物件之製作更容易，為船舶產業常用的樹脂種類。在樹脂調配時須先加入催化劑並均勻攪拌後才可加入硬化劑，並且同樣需均勻攪拌充分混和。在樹脂混合反應過程中會產生大量氣泡，若太早灌注則會造成氣泡殘留於成品中的風險影響品質，因此混合後須靜置到氣泡消散才可進行灌注。確認纖維完全含浸樹脂即灌注完成後，用鉗子將入料管即抽氣管夾住，保持工作範圍內的真空度，避免硬化前有過多的空氣流入影響成品品質。

為量測 FRP 積層板在承受爆震負荷下的動態結構響應，本論文水下爆震試驗佈設 2 組 FBG 應變感

測器(編號 FBG-1、FBG-2)，如圖 14 所示。因此在製作 FRP 半圓筒的過程中，SG1 感測器採用埋貼式製作，光纖則由曲板側邊穿出，成品如圖 15 所示。



圖 13. FRP 結構纖維鋪設方式

FRP 半圓筒殼俯視圖

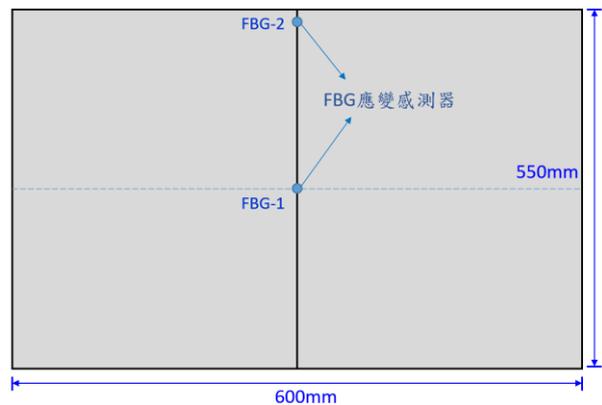


圖 14. FBG 應變感測器佈設位置

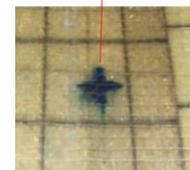
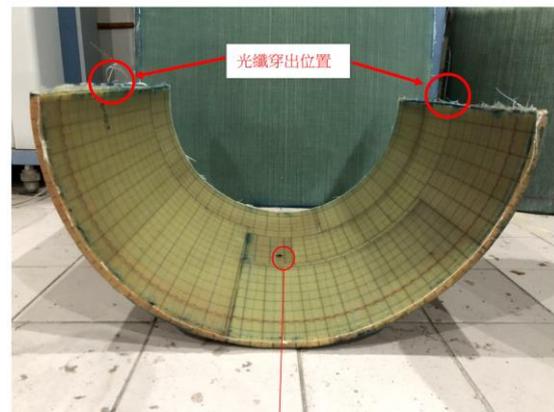


圖 15. FRP 模型含 FBG 感測器埋貼成品

4. 試驗流程

將製作好之 FRP 半圓筒殼模型上 SG2 位置表貼 FBG 應變感測器，完成全部感測器佈設。接著於模型下方 30 cm 處架設雷管後將模型吊下水，最後進行炸藥引爆及監控，如圖 16-圖 19 所示。

5. 試驗結果

經 1.2 g TNT 炸藥引爆後，佈設於 FRP 半圓筒結構 FBG 應變感測器之 SG1 位置應變量測值為 $994.32 \mu\epsilon$ ，結構側邊 SG2 應變量測值約為 $731.55 \mu\epsilon$ ，如圖 20-圖 21 所示。



圖 16. FBG 感測器完成架設



圖 17. 架設雷管

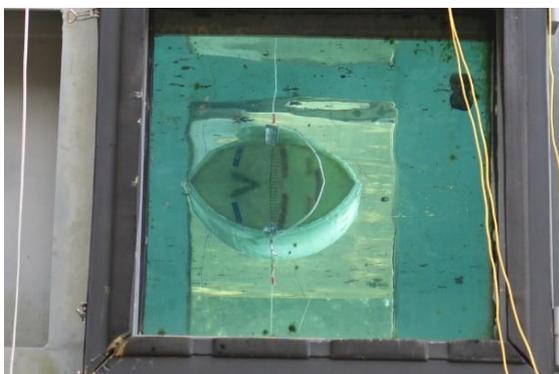


圖 18. 將模型置於水中



圖 19. 炸藥引爆

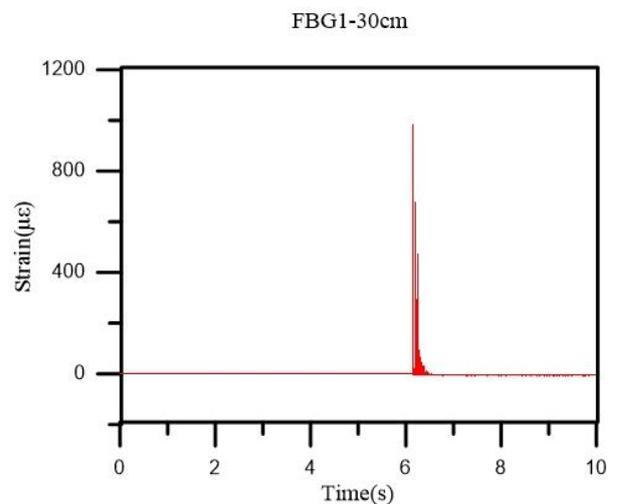


圖 20. FBG 感測器(SG1 位置)應變量測結果

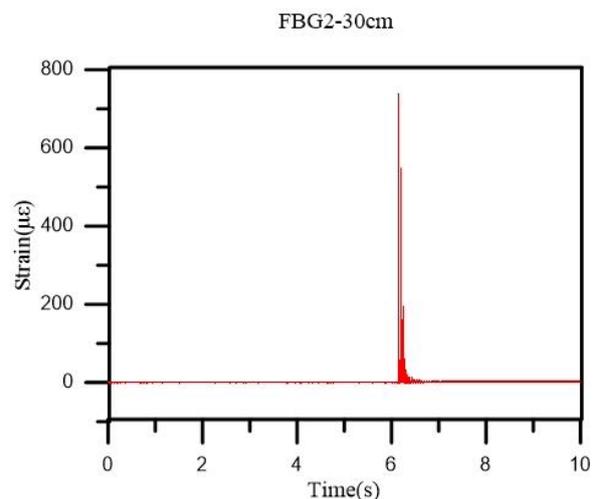


圖 21. FBG 感測器(SG2 位置)應變量測結果

結論

1. 開發一 FBG 感測器，並完成應變校正實驗，其線性度(R_2)為 1，及完成溫度校正實驗，其線性度(R_2)為 0.9986。
2. 本論文製作 FBG 應變量測感測器，在 FRP 積層製造過程中，成功完成埋貼於 FRP 層板結構之間。
3. 設計一水下爆震試驗，將 FBG 應變感測器埋貼及表貼於 FRP 半圓筒結構上，以量測結構承受爆震衝擊下之動態響應，實驗結果，FBG 皆可成功量測數據。

誌謝

本論文承蒙國科會經費補助(專題研究計畫編號：111-2221-E-012-001-、112-2221-E-012-001-)，使本論文得以順利完成，謹致感謝之意。

參考文獻

1. Wu, P. C., Tan, D. Y., Chen, W. B., Malik, N., & Yin, J. H.. Novel fiber Bragg Grating-based strain gauges for monitoring dynamic responses of Celtis sinensis under typhoon conditions. *Measurement*, 172, 108966 (2021)..
2. Groo, L., Nasser, J., Inman, D. J., & Sodano, H. A.. Transfer printed laser induced graphene strain gauges for embedded sensing in fiberglass composites. *Composites Part B: Engineering*, 219, 108932 (2021).
3. 魏伯翰，“以內埋式光纖感測器監測碳纖維複合材料固化成形過程聚合物物性”國立高雄科技大學機械工程研究所碩士論文(2009).
4. T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *Journal of lightwave technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1277-1294 (1997).
5. Hibbit, Karlsson, and Sorensen, *ABAQUS Theory Manual, Version 6.11.1, Inc., Pawtucket, RI* (2011).

FBG SENSOR APPLIED IN DYNAMIC RESPONSE MEASUREMENT OF UNDERWATER EXPLOSION EXPERIMENTS

*Y. H. Chen** *C. Y. Hsu** *C. C. Chiang*** *G. M. Luo**** *J. J. Chen***

* Department of Marine Mechanical Engineering, R.O.C. Naval Academy

** Department of Mechanical Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

Keywords: FBG, strain gauge sensor, underwater explosion

ABSTRACT

Short period fiber grating is also called fiber Bragg grating (FBG). Because of its high sensitivity, small size and immunity to electromagnetic wave interference. It can operate in harsh environments and has better characteristics than traditional strain gauges. It is quite suitable for use in aerospace and national defense fields as embedded or surface-mounted strain measurement. And optical fiber will become the mainstream tool for signal transmission due to its light weight and thin diameter. Now combined with the optical communication bandwidth and the properties of fiber optic sensors, the efficiency and reliability of the monitoring system will be greatly improved.

This paper conducts FBG sensor design and experimental measurement for composite material structures in underwater explosion experiments. First, the FBG sensor that has completed the manufacturing process is subjected to strain and temperature correction experiments. As a result of the correction, the sensitivity of the strain correction is $0.001 \text{ nm}/\mu\epsilon$ and the linearity (R^2) is 1. The sensitivity of temperature correction is $0.0098 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, and the linearity (R^2) is 0.9986. Finally, a half-cylindrical shell composite structure was designed and placed floating in a water tank, and 1.2 g of TNT explosive was placed 30 cm below the structure to conduct an underwater explosion test. Combined with optical fiber monitoring technology, FBG sensors are surface-mounted or buried on the structure to measure the dynamic response of the structure under explosion load. The measurement results show that the strain measured at the closest point to the explosive is approximately $994.32 \mu\epsilon$, and the strain measured on the side of the structure is approximately $731.55 \mu\epsilon$. It shows that the FBG strain sensor designed can indeed be used for underwater explosion measurement.