

# Development of Optic Fiber Bragg Grating Displacement and Pressure Sensors

An-Bin Huang, Yen-Te Ho and Jui-Ting Lee

*Department of Civil Engineering, National Chiao-Tung University, Hsinchu, Taiwan, China*  
*\* email: [abhuang@mail.nctu.edu.tw](mailto:abhuang@mail.nctu.edu.tw), [ytho.2004@seed.net.tw](mailto:ytho.2004@seed.net.tw), [ruting.cv92g@nctu.edu.tw](mailto:ruting.cv92g@nctu.edu.tw)*

**ABSTRACT:** Displacement and groundwater are important elements in slope stability monitoring. If automated, these readings can be used as a basis to predict potential slope failure and dispatch early warning messages. Electrical sensors capable of detecting ground displacement and monitoring groundwater pressure have been available for decades. With the help of computer based data logging system, they too can be automated and fulfill similar functions. The electrical sensors are mostly non-distributive in nature and are prone to electromagnetic interference. It can be rather impractical if the electrical sensors are used on a long term basis and/or deployed massively. Optical fiber sensors generally have the advantages of small size, immune to electromagnetic interference and being able to transmit signal in long distance. The optical Fiber Bragg Grating (FBG) is one of the many available fiber optic sensor technologies. The authors used FBG as a sensing medium and developed a ground displacement monitoring device referred to as the FBG Segmented Deflectometer (FBG-SD) and an FBG piezometer system. Taking advantage of the partially distributive nature of FBG, these sensors can be readily installed in a series to measure the profile of ground displacement and groundwater pressure distribution in the field. The paper describes the design principles, laboratory calibration and field installation of these FBG sensors.

**KEYWORDS:** Fiber Bragg Grating, ground displacement monitoring, pressure sensor.

## 1 前言

量測地層位移與水壓變化在土木工程的安全監測上是很重要的，傳統監測地層的變化常使用測傾儀 (Inclinometer) 來量測傾斜管之側向位移量，測傾儀是由 Green and Mickelsen (1988) 在 1952 年研發出來的地層側向位移感測器，今天它已經是最普遍使用在地層位移量測上的監測工具。其原理是藉由手動的方式將一測傾探管 (inclinometer probe, IP) 放入預埋之傾斜管內來量測 IP 與重力方向之相對偏斜角，並由電纜線將訊號傳輸到地表，再經由簡單計算得到位移量，現有 IP 之傾斜角解析度約為 (H : V) 1:25000 (Mickelsen, 1996)。近來也有可長期植入傾斜管內做自動化監測之植入式測傾探管 (inplace inclinometer probe, IPI) 之研發。但是 IPI 為電子式感測器，在現地使用上具有受潮易損壞、易受電磁波干擾、易受雷擊破壞與不容易做成多點式量測的缺點。

光纖感測技術具有許多傳統電子感應技術沒有的優點，包括具有體積小、傳遞資訊不受電磁波干擾與可以在同一光纖上做多點分佈式的監測等優點，除此之外光纖主要構成材料為矽，不易氧化，故可以很容易在光纖表面進行加工，增加其抗水性與抗化學性，使其長期埋在地下或水中不受腐蝕，延長使用年限。所以近十年已研發出數種光纖壓力感測器 (Dong et al., 2005; Kashyap, 1999; Kojima et al., 2003; Liu et al., 2000; Xu et al., 1993; Zhao et al., 2004)，而光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG) 正是其中一種最常使用在量測壓力的感測元件，一般 FBG 壓力感測器可以依量測光柵週期分佈形式分為兩種類型，一種為等週期式光纖光柵感測器 (Uniform Fiber Bragg Grating Sensor)，是量測壓力變化所造成之光柵中心波長漂移量 (Heo et al., 2005; Kashyap, 1999; Kojima et al., 2003; Liu et al., 2000; Rao, 1994; Xu et al., 1996; Zhang et al., 2001)。作者使用光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG) 作為感測元件，發展出能感測地層變形分佈的光纖感測器。另一種為 FBG

水壓計，此水壓計具有體積小、重複性高與可多點串連之特性。

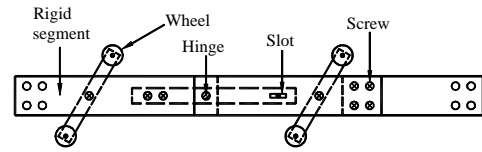
本文介紹此兩種感測器之基本設計原理室內標定界果與在現地使用之狀況。

## 2 光纖光柵偏斜儀

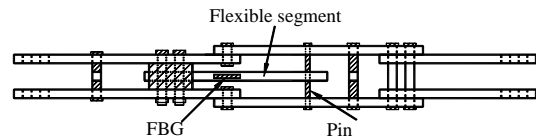
作者研發出光纖光柵偏斜儀(Fiber Bragg Grating Segmented Deflectometer, FBG-SD)來量測局部地層位移，將其量測原理、材料測試、實驗室與現地應用結果分別說明如下。

### 2.1 FBG-SD 結構與原理

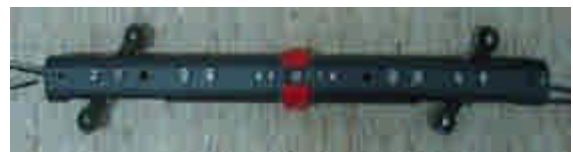
FBG-SD 是由兩端剛性鋁片加上中間一節柔性塑膠材料所組成，將 FBG 貼覆在塑膠管上來量測塑膠管表面因彎曲而產生之應變量，當兩端剛性鋁片相對旋轉時會造成柔性材料之彎曲，藉由塑膠管上彎曲之應變量可以決定兩剛性段間之夾角，其示意與實體如圖 1 所示。在應變感測元件兩端加裝鋁片，可以將兩端剛性材料所受到的應力傳到中間柔性材料上，這種設計原理對中間塑膠管會有應變集中的現象，也就會有將應變放大的效果，這對於精度的提昇會有很大的幫助。在應變感測元件兩端加裝鋁片剛性材料構成節理 (Segment) 之部分，節理又分量測節理 (Measurement segment) 與延伸節理 (Extension segment) 兩部分。量測節理上裝有滾輪支架 (Wheel stud)，其大小與形狀與傳統測傾管 (Inclinometer casing) 及其內部之凹槽相匹配，藉由彈簧 (Spring) 之拉力來保持支架與測傾管凹槽之密合。延伸節理為一硬體，沒有任何自由度，其目的為根據量測需要來伸長或縮短量測節理間之距離。量測節理內安裝一個軸承，其與監測管方向垂直，其目的在於限制量測節理只能以橫向軸承為中心旋轉而增加結果分析之可靠度。塑膠管之一端以雙螺絲固定於量測節理內，在量測節理刻畫出一長方形溝槽，其主要作用是在大幅減少軸向力所造成的誤差，將一支鋼性桿件穿過量測節理與塑膠管垂直連接，如此一來，外力會藉由量測節理傳送到塑膠管上對 FBG 造成彎曲應變。FBG-SD 組裝是以量測節理與延伸節理交互連接而形成，連結完成之偏斜儀隨即放入測傾管中 (圖 2)。測傾管因地層滑動或被監測結構體變形而發生扭曲的時候，放在傾斜管中的 FBG-SD 經由光纖量測塑膠管管彎曲變化量，計算並累積 FBG-SD 因地層移動而造成之彎曲角度，再根據此角度之變化來計算地層移動量。



(a) FBG-SD 俯視圖



(b) FBG-SD 側視圖



(c) FBG-SD 實體圖

圖 1. FBG-SD(a) 俯視圖 (b) 側視圖 (c) 實體圖

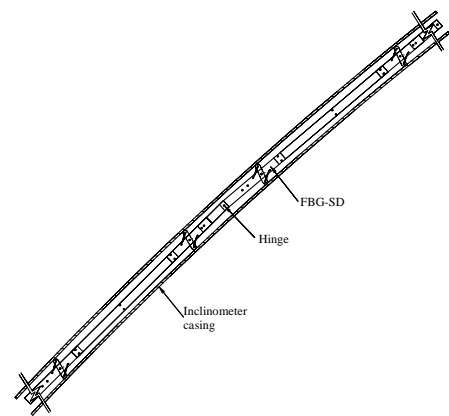


圖 2 FBG-SD 連結量測示意圖 (Ho et al., 2006)

光纖光柵對於外力與溫度所造成的應變非常敏感，故如何降低溫度對感測器的影響是一件非常重要的事。作者將 2 個 FBG 以 180 度之方向對貼於塑膠管棒之兩側，當 PC 受外力彎曲時，一邊 FBG 受拉伸長，一邊 FBG 受壓縮短，但所受溫度之影響是相同的，故其受外力與溫度之應變量分別如公式(1)與(2)所示，藉由公式(1)與公式(2)之相減可消除溫度之影響，如公式(3)所示。

$$\varepsilon_{B1} = \varepsilon_T + \varepsilon_M \quad (1)$$

$$\varepsilon_{B2} = \varepsilon_T - \varepsilon_M \quad (2)$$

$\epsilon_M$  = FBG-SD 彎曲所造成 FBG 在 PC 棒軸向的應變量

$\epsilon_T$  = 溫度變化對 FBG 所造成的應變量

$$\epsilon_{B1} - \epsilon_{B2} = 2\epsilon_M \text{ 或}$$

$$\epsilon_M = \frac{1}{2}(\epsilon_{B1} - \epsilon_{B2}) \quad (3)$$

依據上述原理製作出 FBG-SD，並在室溫下對單一根 FBG-SD 進行標定，其靈敏度約為 FBG 1pm 波長漂移量對應 0.001 度角度變化量(圖 3)。

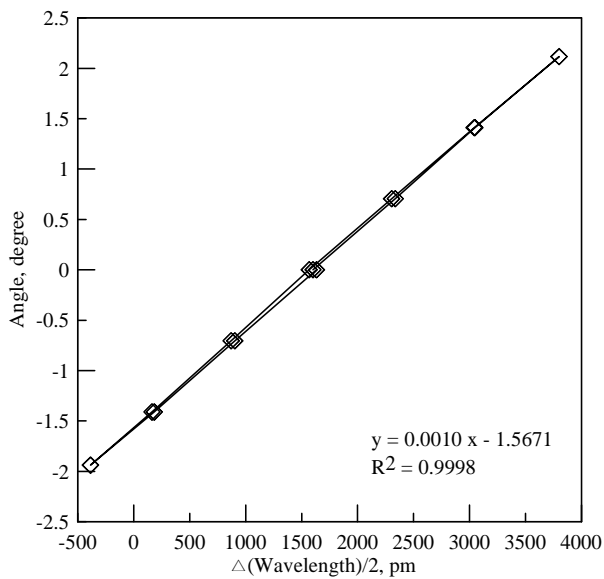


圖 3 單一根 FBG-SD 標定結果

### 2.2 酸鹼測試與溫度標定

不同的現地具有不同酸鹼值的地下水，而感測器需能適應不同的環境以發揮其量測功能。作者先對感測基材塑膠管進行吸水率測試，吸水率高對塑膠來說，容易有軟化之行為發生，故選定吸水率較低之塑膠基材相當重要。作者所做之吸水率試驗，是將 4 個直徑為 12 mm、長 30mm 之塑膠管圓柱，放置於玻璃燒杯中，然後倒入純水將塑膠管圓柱完全覆蓋，總共實驗時間為 14 天，每日進行 PC 圓柱面乾內飽和之秤重，紀錄平均重量改變率 ( $\Delta W/W_0, \%$ )，其吸水率約為 0.5%，其試驗結果如圖 4 所示。接著依據相同實驗過程，將 PC 圓柱放置於鹽酸(HCL, PH=2)之酸性溶液與氫氧化鈉 (NaOH, PH=11) 之鹼性溶液中，並記錄其重量改變率，其結果顯示兩者吸水率皆約為 0.5%(圖 5 與圖 6)，且塑膠管表面並無明顯粗糙痕跡。由上述實驗結果可知塑膠管具有低吸水率與良好之抗酸鹼性。接著作者將組裝完成之 FBG-SD 放入恆濕恆溫箱中，進行 0 至 40 度的溫度標定，實驗結果顯示在 FBG-SD 上受拉邊與受壓

邊的 FBG 具有一致性的應變變化(圖 7)。

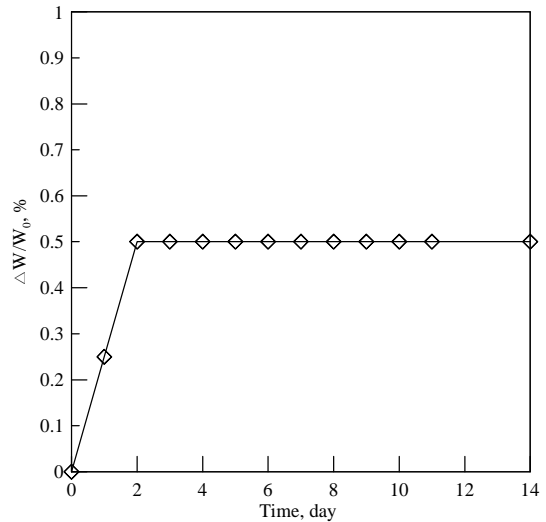


圖 4 PC 置入水中重量變化圖

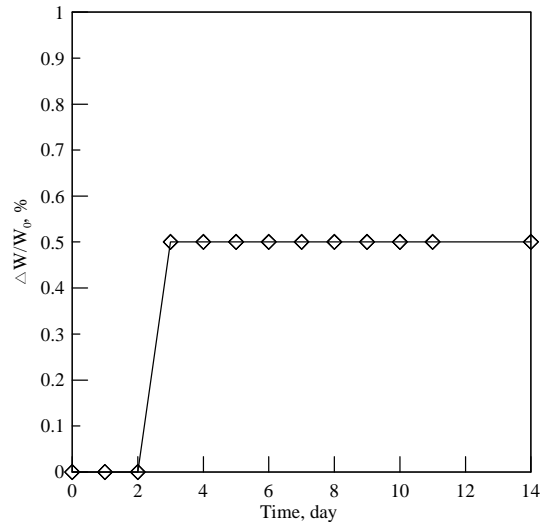


圖 5 PC 置入 HCl 中重量變化圖

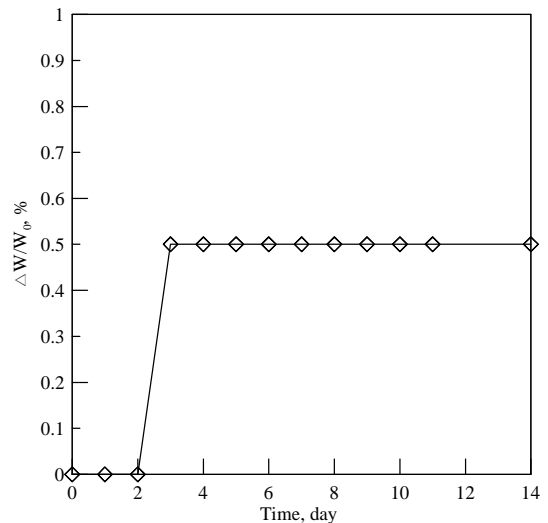


圖 6 PC 置入 NaOH 中重量變化圖

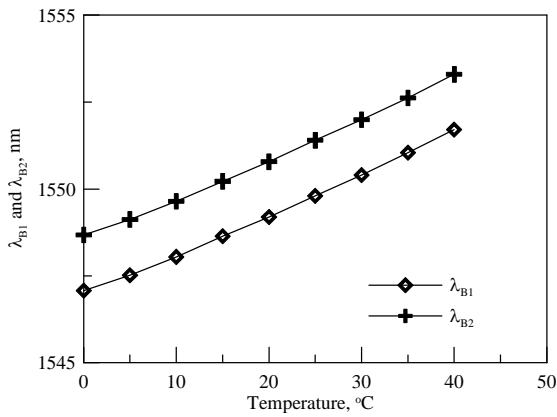


圖 7 FBG-SD 溫度標定結果 (Ho et al., 2006)

### 2.3 FBG-SD 室內 9 米傾斜管標定與現地深開挖量測

作者將 FBG-SD 放入 9 米長之傾斜管內進行標定實驗，首先將二組 9 米長的傾斜管架設在同一剛性支柱上，用特製鋼架將二組 9 米測傾管連接在一起，使得這二組測傾管在實驗時具有相同之位移量。然後將 8 組長度為 1 米之 FBG-SD 串接在一起，放入外側 9 米之傾斜管內，而後推動傾斜管，並以傳統測傾儀量測內側傾斜管的位移量，將其結果與 FBG-SD 做一比較分析，其實驗結果如圖 8 所示

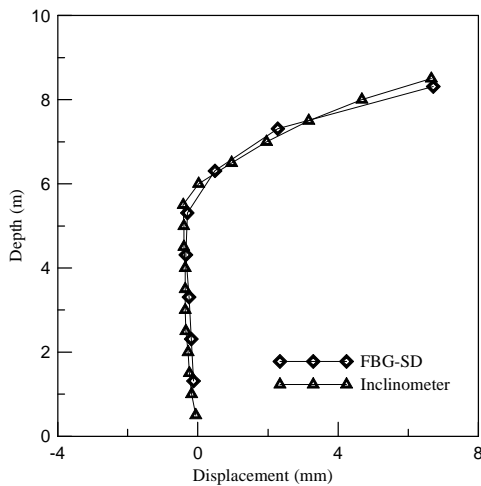


圖 8 FBG-SD 室內九米傾斜管標定結果

作者將 FBG-SD 放置於深開挖現場進行連續壁側向位移量測。此地下結構主要採用明挖工法，連續壁厚度為 1.2 米，開挖施度為 8.1 米，分為三階段開挖，並以水平鋼樑支撐連續壁。將 11 組 FBG-SD (圖 9) 裝設於 14 米深之傾斜管內 (圖 10)，並在距離 FBG-SD 裝設孔旁約 1m 處另外裝設一組深度一樣之

傾斜管，使用傳統測傾儀來量測，以作為對照比較用。圖 11 為第三階段開挖時 FBG-SD 讀數與測傾儀讀數結果之比較值，具有相當之一致性。



圖 9 現地組裝完成後之 FBG-SD

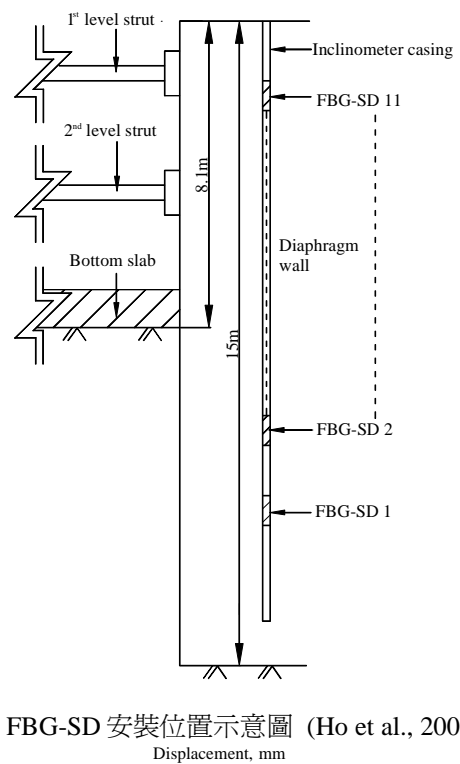


圖 10 FBG-SD 安裝位置示意圖 (Ho et al., 2006)

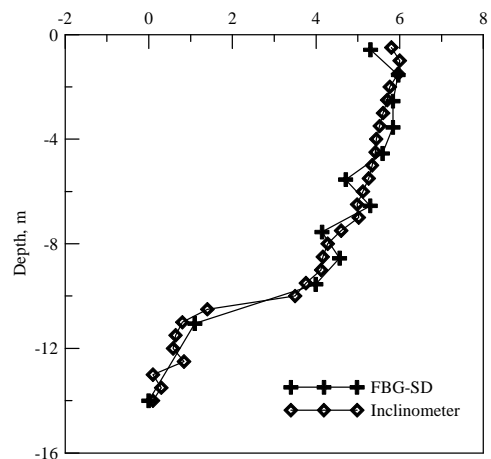


圖 11 第三階段開挖時 FBG-SD 與測傾儀讀數結果

### 3 光纖光柵水壓計

作者使用 FBG 作為感測元件來製作光纖水壓計。本節主要是敘述作者使用 FBG 設計 FBG 水壓計說明如下。

#### 3.1 拉伸式光纖水壓計

FBG 水壓計是以圓柱型中空鋼材為外殼，內部含有一 FBG 與金屬薄片，其內部結構與實體如圖 12 所示，此感測器的設計原理採用 FBG 波長與壓力間之關係來設計。FBG 之一端固定於壓力計下方，此部分視為固定不動點，而另一端則黏著於一彈性金屬模上，當壓力計內部壓力改變時金屬模隨之變形，因此 FBG 所感受的應變也隨之變化。在彈性金屬膜的線彈性範圍內，此設計的 FBG 波長做等週期式之變化，因此 FBG 波峰值與壓力有一線性關係。但此一設計無法隔離溫度改變對 FBG 波峰值之影響，因此必須加入一 FBG 感應溫度變化。作者使用直徑 20mm、厚度 0.4mm 之不銹鋼薄片製作拉伸式 FBG 水壓計，並對其進行標定，實驗結果顯示其精度約為 1pm 波長漂移量對應 0.145kPa 的壓力變化(圖 13)。作者將水壓計放入恆濕恆溫箱中，對其進行不同溫度與壓力的標定，並使用另一 FBG 消除溫度的影響，其結果顯示拉伸式 FBG 具有良好的線性與重複性(圖 14)。

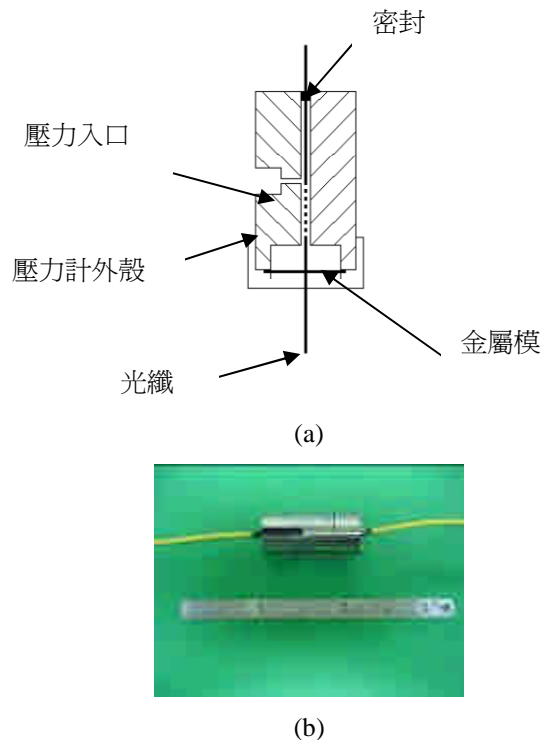


圖 12 FBG 水壓計結構(a)示意圖 (b)實體圖

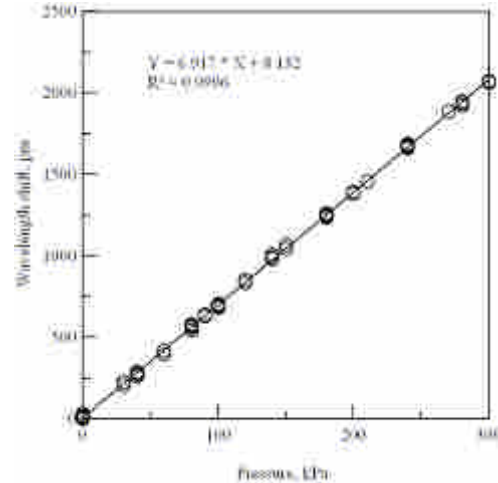


圖 13 拉伸式 FBG 水壓計標定結果

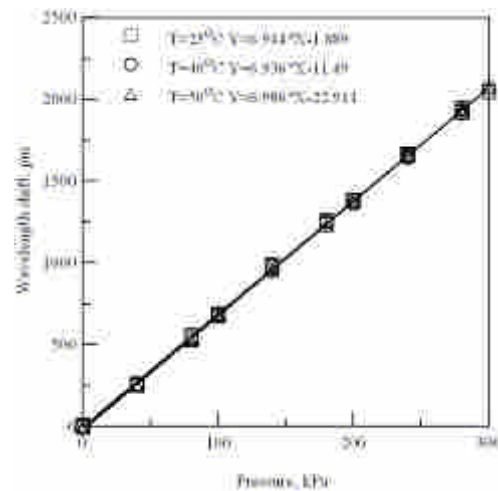


圖 14 拉伸式 FBG 水壓計溫度標定圖

#### 3.1 FBG 水壓計在阿里山邊坡之安裝

利用 FBG 部分分佈功能之優點，同一條光纖可以連接一系列之 FBG 水壓計，這是傳統開口式水位計或電子式水壓計所無法做到的。圖 15 展示在同一鑽孔內安裝多個 FBG 水壓計與傳統在單一 80mm 直徑鑽孔內只能安裝兩個水位/水壓計之比較示意圖。作者在台灣阿里山五彎仔監測路段，安裝一系列之 FBG-SD 地層位移感測與水壓監測系統。於一 40m 深鑽孔內之底部置入 20m 之 FBG-SD，其現場安裝情形如圖 16 所示。在另一 40m 深鑽孔內之底部置入 5 個 FBG 水壓計，FBG 水壓計以 5m 間隔固定在一外徑 25mm 之 PVC 套管內，PVC 管接頭向內徑突出，因此整個 PVC 管外部沒有突出部分。FBG 水壓計量測部分之 PVC 管切有槽溝以便於透水，如圖 17



所示。FBG 水壓計與有槽溝部分之 PVC 管外圍以 non-woven geotextile 以及礫石回填，其餘部分使用白皂土粒做封層。

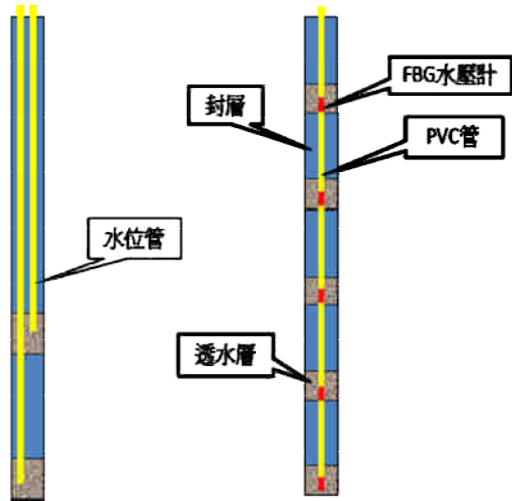


圖 15 串接多個 FBG 水壓計與傳統水位管之比較



圖 16 FBG-SD 在阿里山五灣仔之安裝

#### 4 結論

使用 FBG 做為應變感測器，依據此原理可以設計出許多適用於岩土工程現場監測之感測器。本文所述之兩種感測器，其設計原理都很簡單。依據作者之經驗，FBG 感測器之製作與現場安裝在於 FBG 佈設之規劃以及光纖之保護。理論上，FBG 訊號之解讀都可以經由電腦之使用而達自動化之目的，但岩土工程環境大多惡劣，一般電腦與 FBG 解讀系統在此惡劣環境下是否可以長期而穩定發揮其功能還需要時間與經驗之佐證。



(a)置入 PVC 套管之 FBG 水壓計



(b)現場封裝完成之 FBG 水壓計



(b)FBG 水壓計置入鑽孔

圖 17 FBG 水壓計在阿里山五灣仔之安裝

#### REFERENCES:

- [1] Dong, X., Shum, P., Yang, X., Lim, M. F., and Chan, C. C., 2005, "Bandwidth-tunable filter and spacing-tunable comb filter with chirped-fiber Bragg gratings", *Optics Communications*, Vol. 259, Issue. 2, pp. 645-648.
- [2] Green, G.E., and Mickelsen, P. E., 1988, "Deformation Measurements with Inclometers", *Transportation Research Record 1169*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.1-15.
- [3] Heo, J. S., Chung, J. H., and Lee, J. J., 2005, "Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors", *Sensors & actuators. Part A, Physical*, Vol. 126, Issue. 2, pp. 312-327.
- [4] Ho, Y.T., Huang, A.B., and Lee, J.T. (2006), "Development of a fiber Bragg grating sensed ground movement monitoring system," *Journal of Measurement Science and Technology*, Institute of Physics Publishing, Vol.16, pp.1733-1740.
- [5] Ho, Y.T., Huang, A.B., and Lee, J.T. (2007), "Development of A Chirped/Differential Optical Fiber Bragg Grating Pressure Sensor," *Journal of Measurement Science and Technology*, Institute of Physics Publishing, under review.
- [6] Kashyap, R., 1999, "Fiber Bragg gratings," Academic Press, San Diego, 458p.
- [7] Kojima, S., Hishida, Y., Fukuchi, K., and Hongo, A., 2003, "Opt-

- ical fiber sensor using fiber Bragg grating for river management”, 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan, pp. 112-115.
- [8] Liu, Y. Q., Guo, Z. Y., Zhang, Y., Liu, Z. G., and Dong, X. Y., 2000, “Research on the simultaneous measurement of pressure and temperature using one fiber grating”, *Chin J Lasers A*, Vol. 27, pp. 1002-6.
- [9] Liu, Y., Guo, Z., Zhang, Y., Chiang, K. S. and Dong, X., 2000, “Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fiber Bragg grating”, *Electron Lett.*, Vol. 36, pp. 564-566.
- [10] Mickkelsen, P. E., 1996, “Field Instrumentation,” Special Report 247 on Landslides Investigation and Mitigation, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., Turner and Schuster editors, pp. 278-316.
- [11] Rao, Y. J., Jackson, D. A., Jones, R., and Shannon, C., 1994, “Development of prototype fiber-optic-based Fizeau pressure sensors with temperature compensation and signal recovery by coherence reading”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 12, Issue 9, pp. 1685 – 1695.
- [12] Xu, M. G., Geiger, H., and Dakin, J. P., 1996, “Fiber Grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing”, *Electron Lett.*, Vol. 32, pp. 128-129.
- [13] Xu, M. G., Reekie, L., Chow, Y. T. and Dakin, J. P., 1993, “Optical in-fiber Grating High pressure sensor”, *Electron Lett.*, Vol. 29, pp. 398-399.
- [14] Zhao, Y., Yu, C., and Liao, Y., 2004, “Differential FBG sensor for temperature-compensated high-pressure (or displacement) measurement”, *Optics & Laser Technology*, Vol. 36, pp. 39 – 42.
- [15] Zhang, Y., Feng, D., Liu, Z., Guo, Z., Dong, X., Chiang, K. S. and Chu, Beatrice C. B., 2001, “High-sensitivity pressure sensor using a shielded polymer-coated fiber grating”, *Photon. Technol. Lett.*, Vol. 13, pp. 618-619.