

光纖光柵在地工安全監測之應用

黃安斌／國立交通大學土木工程學系教授

何彥德／奇博科技有限公司總經理

王建智／國立交通大學土木工程學系博士候選人

吳崑璋／國立交通大學土木工程學系研究生

摘要

光纖光柵 (optic fiber Bragg grating, FBG) 是多種光纖感測技術中的一種, FBG 體積小, 耐久性高, 光纖訊號可長距離傳輸而不受電磁波或短路之影響, 同時可以在同一光纖上做多點式的監測。FBG 本身就是一個非常優良的應變計或溫度計, 透過機構的設計也可以利用 FBG 做成感測器 (transducer) 做為量測其他物理量之工具。因為 FBG 之特性, 以 FBG 為核心之感測器相較於傳統電子式感測器有更高穩定性與耐用性之優勢, 尤其是在地層內使用。交通大學光纖感測試驗室在過去十數年研發成功多種 FBG 感測技術, 並應用於大地工程監測。本文首先介紹 FBG 之基本原理, 然後敘述一些 FBG 使用之案例, 並討論此間測技術在未來大地工程結構安全監測可能之發展。

光纖光柵基本原理

光纖光柵的製造係利用高能量同調雷射在光纖曝光造成折射率永久改變, 成為一系列週期為 Λ 的明暗條紋, 此稱之為光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG)。當一寬頻光耦合進入此一光纖時, 除了滿足布拉格條件 (Bragg condition) 的特定波長會產生反射外, 其餘波長都會因為相位差而相消^[1]。

布拉格反射波長 λ_B 為

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

其中：

n = 光纖纖心的有效折射率

Λ = 折射率週期性改變的間距

圖 1 為光纖光柵反射原理示意圖, 光柵中的週期明暗條紋類似在光纖中製造一系列透鏡組合, 當寬頻光束通過這些透鏡組合時, 造成某特定頻率光波被反射, 而其他頻率光波則繼續向前傳導 (圖 2), 而這些透鏡的間距不同, 則被反射光波頻率亦不相同。

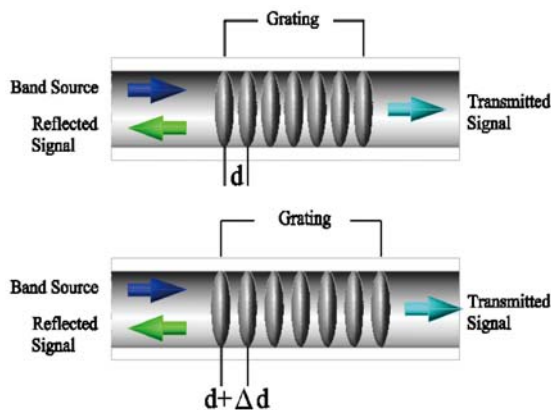


圖 1 光纖光柵感測機制示意圖^[2]

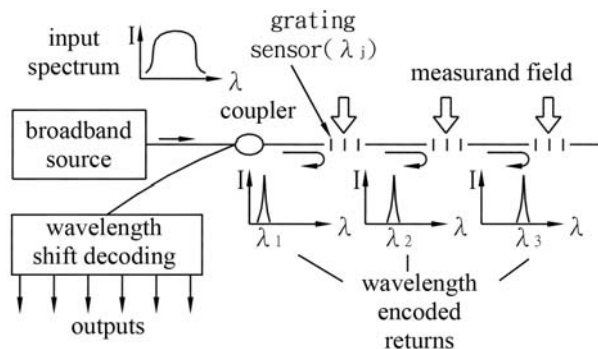


圖 2 光纖光柵串列反射原理示意圖^[3]

當光柵受到外力產生軸向應變時，則造成光纖光柵原本間距 Λ 的改變增加量為 $\Delta\Lambda$ ，帶入公式 (1) 式可以得到

$$\Delta\lambda_B = 2n\Delta\Lambda \quad (2)$$

應變的定義

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (3)$$

得到

$$\Delta l = \left(\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \right) l = \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right) \left(\frac{2n}{2n} \right) l \quad (4)$$

因此

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (5)$$

在室溫條件下， 1°C 的溫度變化約使得布拉格波長飄移約 $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{ nm}$ 。現有之 FBG 解讀技術其解析度可達 1 pm ($1 \text{ pm} = 10^{-3} \text{ nm}$, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)，FBG 做為溫度計可以有 0.08°C 左右之解析度。基於以上原因，FBG 具有與應變計同樣的功能。但與傳統電子式應變計不同的是，多個 FBG 可以用同一光纖做訊號傳遞，只要各 FBG 之 L 有足夠差距，既使在有應變的情況下，各 FBG 所反射之波長 λ_B 仍然不會重合，因此可以根據 λ_B 來辨識每個 FBG 訊號之來源。但與傳統電子式應變計類似，FBG 必須做溫度變化之修正。使用現有技術，在單一光纖上通常可以安裝 10 個以內之 FBG，而同一 FBG 解讀系統可以安裝 8 條以上之光纖，所以 FBG 感測系統有相當高之監測能量。透過機構的設計也可以利用 FBG 做成感測器 (transducer) 做為量測其他物理量之工具，例如壓力計、位移計與加速度計等。以下介紹一些 FBG 感測技術之應用實例。

FBG 在地工結構安全監測之應用

使用 FBG 應變管做基樁橫向載重變形監測

傳統應變管 (pipe strain gage, PSG) 是將電子式應變計，延軸向之方向黏貼在一均勻斷面之軟管上，根據應變 (ε) 量測與軟管相對於管底橫向位移 (y) 之數學關係來估算此軟管隨軸向位置 (x) 之橫向位移分佈。此應變與位移之關係如下：

$$y = \frac{1}{r} \iint \varepsilon dx^2 \quad (6)$$

其中

r = 應變管半徑

x = 延軸向之距離

作者於雲林麥寮六輕工業區中，在一預鑄混凝土基樁橫向載重試驗中使用 FBG 應變管量測此基樁橫向位移隨深度之分佈。本次試驗總共使用 60 個光纖光柵，分別分佈在一 28 mm 直徑，20 m 長之 PVC 管兩側，FBG 間距 50 cm，製作完成應變管如圖 3 所示。試驗樁為預鑄預力混凝土樁，長 20 m、外徑 50 cm，內徑 32 cm。基樁貫入地層後其中空部分再放入鋼筋籠、傳統地層移動監測用之傾斜管、及 FBG 應變管，以混凝土灌漿填滿。灌漿後傾斜管及光纖光柵應變管相對關係如圖 4。

圖 5 顯示加載 3、9、15 噸期間，FBG 應變管所承受的應變分佈，以及 FBG 應變管讀數經計算所得變形量與使用傳統手動式傾斜儀量測所得變形量之比較結果。結果顯示應變大多集中在地表下 5 m 以內，樁身位移量也大多由此段區域開始大幅度增加，符合長樁之一般行為。FBG 與傾斜儀量測結果有相當高的一致性，雖然傾斜儀數據之穩定性比較差。



圖 3 製作完成之 FBG 應變管

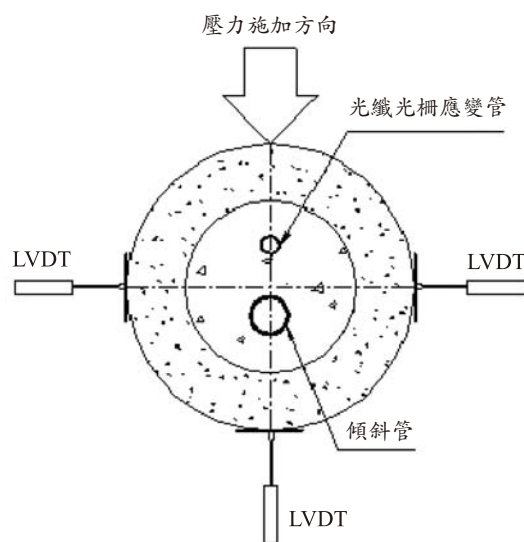


圖 4 樁試驗中位移監測設備配置

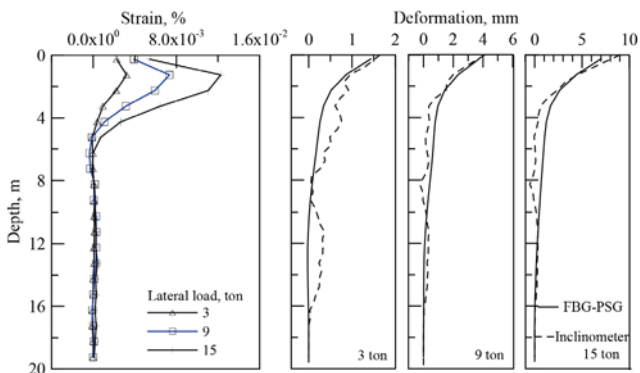


圖 5 FBG 應變管之應變與位移分佈

使用 FBG 做潛盾隧道環片應變監測

台北市捷運信義線隧道施工採用潛盾工法，關於潛盾隧道結構之設計，各顧問公司並無統一，也無所謂「正確」的分析方法，只是一種長久以來「約定俗成」的分析流程及方式，由於缺乏可靠的量測資料來確認分析的結果及安全性，故在台北市信義線隧道環片裝設光纖光柵進行量測。作者在隧道環片組裝及混凝土預鑄前於鋼筋上黏貼 FBG 做應變量測，為隧道襯砌環片從製作到安裝完成進行長期監測，以進一步了瞭解施工中及日後營運通車時，隧道環片之受力情形。

作者於環片預鑄廠內完成 FBG 安裝作業 (圖 6)，於環片的上 (長鋼筋)、下 (短鋼筋) 端各安裝 4 個 FBG 感測器，其中 3 個為 FBG 應變計，1 個為 FBG 溫度計，所以單一環片內共安裝有 6 個 FBG 應變計與 2 個 FBG 溫度計。在長鋼筋、短鋼筋上也各安裝一個電子振旋式 (vibrating wire, VW) 應變計做相互比較之用。裝有 FBG 感測器之環片於 2006 年底製作完成，2007 年初進行單片載重試驗，並將 FBG 與 VW 應變讀數做相互比較，如圖 6 所示。

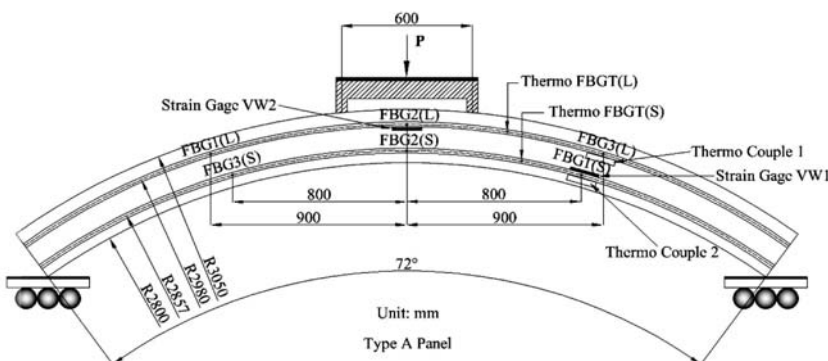


圖 6 FBG 應變計安裝與環片載重試驗示意圖 [4]

圖 7 與圖 8 展示載重試驗中短、長鋼筋上 FBG 讀數與電子式應變計量測結果。由圖 7 顯示 FBG 與 VW 應變計在類似位置有接近的量測結果與相同的變化趨勢，此監測結果表示 FBG 應變計與電子式應變計能相輔相成、互相率定。FBG 應變計與 VW 應變計的差別在圖 8 可明顯看出，當下層短鋼筋降服後，載重轉為上層長鋼筋承受，FBG 此時變化很明顯，VW 應變計則是緩緩上升，由此可看出 FBG 之高靈敏度特性。

受工程延誤影響，裝有 FBG 感測器環片之現場安裝於 2008 年 3 月完成。圖 9 展示一環片在安裝初期應變讀數之變化，此時感測器就在潛盾機旁邊，VW 應變計讀數受電磁波影響無法辨識。圖 10 展示在安裝自動記錄系統後所從 2008 至 2012 年因信義線通車而停止記錄前之應變讀數。圖 10 顯示環片內之應變除隨季節性溫度變化做波動外，受環片周圍土壓力逐漸增加之影響而緩面增加其壓應變。其他相關之結果分析請參考 Huang et al. [4]。

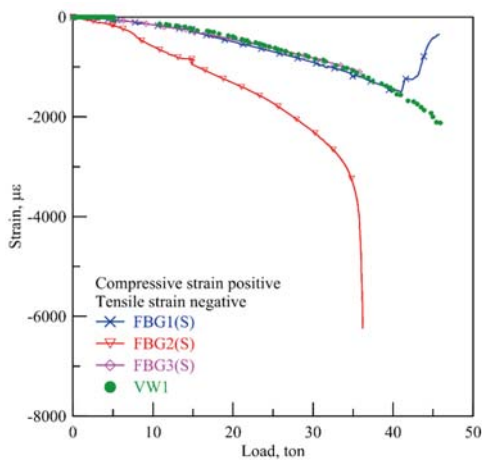


圖 7 短鋼筋上 FBG 與 VW 應變計量測結果 [4]

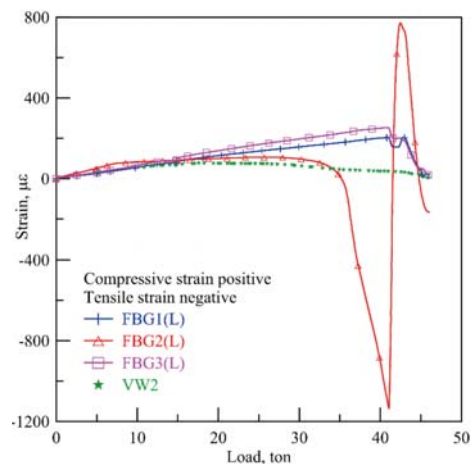
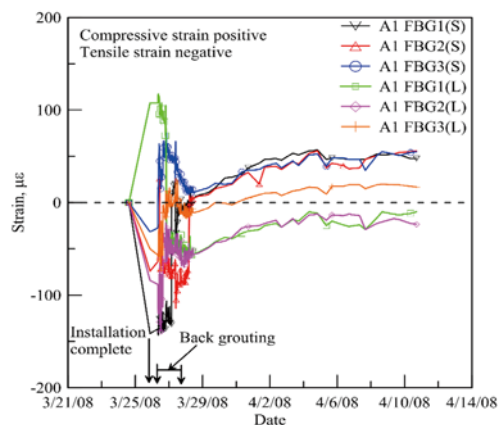
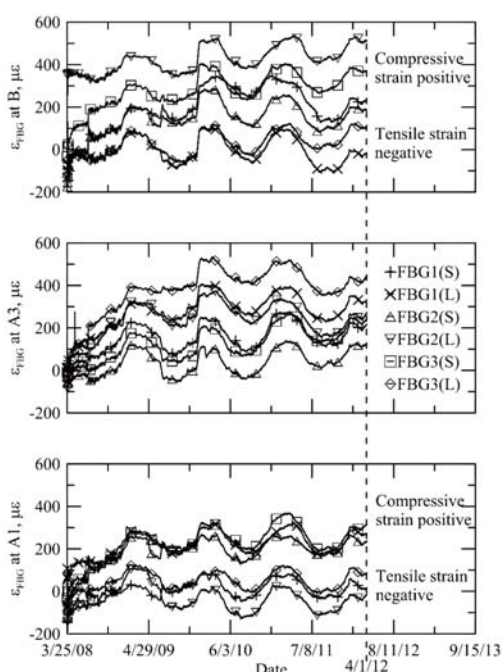


圖 8 長鋼筋上 FBG 與 VW 應變計量測結果 [4]

圖 9 環片安裝初期讀數^[4]圖 10 環片長期應變讀數^[4]

FBG 在坡地安全監測之應用

經驗指出，在沒有地震力影響情況下，天然邊坡崩塌最主要的因素是降雨造成地層內水壓的增加。降雨期間邊坡地層內水壓與滲流現象是一水力與土壤力學互制的複雜行為。有限之量測數據指出^[5]地層內可能存在動物坑道、植物根生長與壞死所遺留之孔隙、或破裂岩層等，稱之為巨孔隙 (macro-pore) 或土管 (soil pipe)，其水力傳導係數遠大於上下周圍地層，因此量得之水壓經常與隨深度做線性增加之趨勢 (靜態水壓分佈) 相差甚遠。Johnson and Sitar^[5]指出，邊坡地層內之滲流特性不只是有區域之特性 (site specific) 而且在同一地點也可能因降雨型態以及來自於上邊坡地層內之入滲特性或地層內滲流管道之堵塞等因素，隨時間而改變 (time

specific)。傳統邊坡崩塌預警常考慮降雨或地層位移，此兩者與邊坡崩塌在時間上並沒有理論關係，因此使用這兩種指數做邊坡崩塌預警都屬於經驗法則，缺乏可靠性。水壓可能是做為邊坡崩塌預警最有效之參數。Johnson and Sitar^[5]指出，若要評估與邊坡穩定相關之水力行為，一個明顯但不簡單的方法，就是在潛在不穩定區域監測孔隙水壓。傳統水壓量測大多使用傳統開口式水位計，由於封層不易，在同一 100 mm 直徑鑽孔中通常最多只能安裝兩個水位計。近來有用電子式水壓計放入水位計內以便於自動記錄水位之變化。但若要發揮預警功能必須大量增加水壓量測點以充分反應水壓隨深度之分佈與變化，進而評估邊坡之水力行為。作者研發出使用 FBG 水壓計串列做地層內水壓分佈的方法來做邊坡穩定監測與崩塌預警。

FBG 水壓計^[6]是以圓柱型中空鋼材為外殼，內部含有一 FBG 與一彈性金屬模組成，如圖 11 所示。改變彈性鋼薄片直徑以及/或厚度可以調整水壓計之量測範圍與解析度。作者首次將此種技術於阿里山五彎仔試驗場址做現場測試，在 60 m 深鑽孔內以 5 m 間隔置入 10 個 FBG 水壓計。所有 FBG 水壓計事先依照規劃之間距固定在一外徑 35 mm 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 水壓計所在位置之 PVC 管有鑽孔以便透水，PVC 管槽溝外圍以不織布包裹做為濾層。PVC 與鑽孔間之空隙使用特密管放置白皂土做封層，FBG 水壓計所在位置周圍 PVC 與鑽孔間之空隙使用礫石回填。圖 12 展示 FBG 水壓計串列在現場之安裝。

Collins and Znidarcic^[7]將邊坡簡化成無窮長而破壞面與表面平行，推導出地層內壓力水頭 (h_p) 分佈與邊

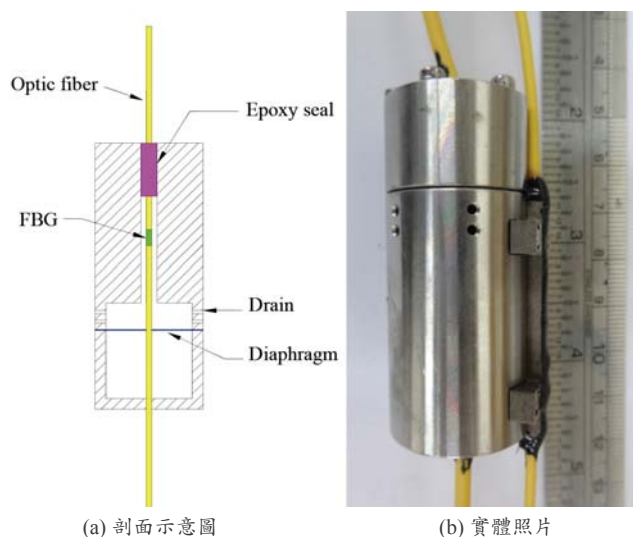


圖 11 FBG 水壓計



(a) PVC 管封裝 (b) 特密管封層
圖 12 FBG 水壓計串列封裝與現場安裝

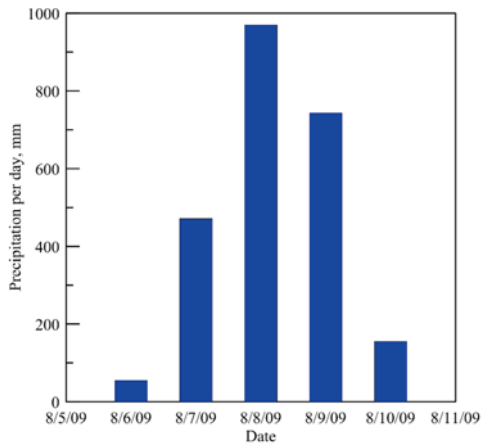


圖 13 莫拉克颱風期間降雨紀錄

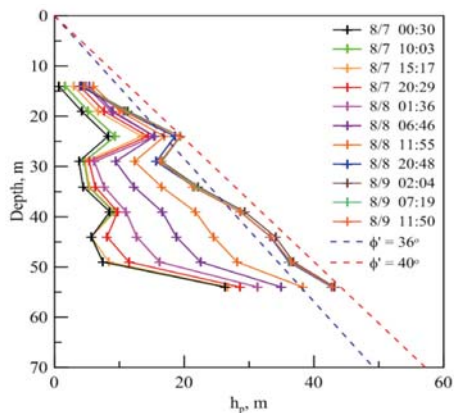


圖 14 莫拉克颱風期間壓力水頭分佈變化

坡安全係數之關係。使用 FBG 水壓計串列，可以直接將水壓量測所得，透過此一關係來預警邊坡之崩塌。FBG 水壓串列感測系統於 2007 年 10 月完成，至今已經歷經辛樂克、莫拉克與凡那比等三個重要颱風以及大或超大豪雨，在三次颱風期間之地層內水壓分佈也都有完整之紀錄。在此只展示莫拉克颱風期間之數據。圖 13 與圖 14 分別展示降雨及壓力水頭 (h_p) 分佈隨時間之發展。莫拉克颱風在此區域之累積雨量接近 3,000 mm。根據 Collins and Znidarcic^[7] 之理論， h_p 分佈曲線在深度 24 與 54 m 處碰觸或趨近對應於 $\phi' = 40^\circ$ 所對應之破壞包絡線。如果阿里山五彎仔地層內之 ϕ' 低於 40° ，監測地點

就會發生崩塌。

關於使用 FBG 水壓計串列做邊坡穩定監測之進一步細節與數據請參考 Huang et al.^[8]。

結論

FBG 是一種部分分佈之監測方法，雖然在同一光纖上可以有多點之 FBG 監測，但是只有 FBG 之處才有監測之功能。布理淵時域監測法 (Brillouin optical time domain reflectometry, BOTDR) 是一種全分佈式之光纖感測方法，在 BOTDR 系統下，光纖上任何一點都可做應變與溫度感測，未來在大地工程之應用極有潛力，唯目前在解析度與使用成本上還未達實用之地步。

FBG 水壓串列系統可以與 FBG 位移感測器結合，做整合式水壓與地層下陷分佈之監測。作者也將 FBG 水壓串列與地電阻電極結合安裝於地層內，如此水壓在某一間測點之分佈 (1D 數據) 情形可以與地電阻斷面量測 (2D 數據) 結合，使得兩者功能互補。

因為 FBG 之耐用性與訊號之穩定性，FBG 感測技術也正在積極的應用於離岸結構基礎，例如離岸風機之監測。

參考資料

- 李瑞庭，「光纖光柵讀取系統軟體之研發」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹 (2005)。
- 簡旭君，「光纖光柵應變管之研發」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹 (2003)。
- Kersey, A.D., 1992, "Multiplexed fiber optic sensors," Proceedings, Fiber Optic Sensors, Boston, Massachusetts, Eric Udd, editor, sponsored by SPIE-The International Society for Optical Engineering, pp. 200-227.
- Huang, A.B., Wang, C.C., Lee, J.T., Ho, Y.T., and Chen, C.H., 2014, "Long-term Field Monitoring of Shield Tunnel Lining," Geotechnical Research, ICE, Vol.1, Issue 3, pp. 99-108.
- Johnson, K.A., and Sitar, N., 1990, "Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, pp. 789-801.
- Ho, Y. T., Huang, A. B., & Lee, J. T., 2008, "Development of a chirped/differential optical fiber Bragg grating pressure sensor," Journal of Measurement Science and Technology (19):6pp, doi:10.1088/0957-0233/19/4/045304.
- Collins, B.D., and Znidarcic, D., 2004, "Stability analyses of rainfall induced landslides." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130: 362-372. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(362).
- Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Cheng, S.Y., 2012, "Stability Monitoring of Rainfall Induced Deep Landslides through Pore Pressure Profile Measurements," Soils and Foundations, Vol. 52, No. 4, pp. 737-747. 