

全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試

Integration and Field Testing of an All Fiber Optic slope stability monitoring system

主辦單位¹：交通部運輸研究所港灣技術研究中心

合作單位²：國立交通大學防災工程研究中心

黃安斌² 饒正¹ 蔡東霖² 李瑞庭²

Huang, An-Bin² Jao Cheng¹ Tsai, Tong-Lin² Lee, Jui-Ting²

摘要

目前針對潛在性及滑動中之邊坡監測，大多採用傳統傾斜管配合手動式傾斜儀監測滑動面之所在位置及滑動量，監測地下水位則多使用開口式水位計。這些監測儀器幾乎全部使用手工，在儀器現場紀錄讀數。此一安排不但費時，在雨季或邊坡發生滑動時時，現場紀錄儀器讀數可能無法進行或非常危險，而這些情況下也可能是最需要監測儀器讀數的時候。近年來雖有可做自動化監測之電子式監測儀器之研發，但電子式自動化監測系統具有價格昂貴、易受電磁波干擾、雷擊破壞、且儀器設備若長期處於潮濕環境容易短路故障等缺點。光纖相較於電子式儀器的優點在於訊號傳輸距離遠可達數十公里及在光纖傳輸線上可連接多點或分佈式之感測器。本研究以阿里山台18線公路五彎仔路段作為本試驗之場址，使用本研究團隊研發之光纖感測地層移動監測系統與分佈式光纖水壓計來監測該地區之地層滑動及水壓變化，並配合地下水文數值模型分析，以作為該地滑區日後穩定評估之依據。

關鍵詞：光纖、光纖感測、光纖水壓計、地下水文數值模型、邊坡穩定

Abstract

For monitoring slopes that are potentially unstable or where sliding is progressing, the inclinometer casings are typically used. Open end piezometers are commonly used to monitor ground water levels. Readings from these instruments are mostly taken in the field manually. The procedure is time consuming and hazardous during the rainy season or when the slope is unstable. The potential danger may prevent the critical instrument readings be taken when they are needed the most. Many automated electronic devices have been developed recently. These devices are mostly expensive and subject to electromagnetic interferences, lightning and deterioration when deployed in the field. In comparison with electronic devices, the optic fiber sensors can easily transmit signals by tens of kilometers through light. Multiple sensors can be connected to a single optic fiber. A test site will be set up at

the Five Turn Point of Highway 18 near Alishan. The fiber optic ground displacement and ground water monitoring sensors developed by the research team will be deployed at the test site. Coupled with field measurements, a ground water flow numerical model will be established for future studies.

Keywords : Optic fiber, Fiber optic sensor, fiber optic piezometer, ground water flow numerical model, Slope Stability

一、前言

國內目前針對潛在或持續滑動之邊坡的監測，大多採用傳統傾斜管配合手動式傾斜儀 (inclinometer probe, IP)，視情況之需要配合開口式水位管(open ended piezometer)做地下水位之監測。IP 是以手動的方法放入傾斜管中紀錄讀數，開口式水位管則是以皮尺放入管中決定水位之深度。國內有許多公路或鐵路(包括高速鐵路)邊坡，由於其位置偏遠或不易到達，難以使用傳統傾斜管與手動式傾斜儀做邊坡穩定監測，此類監測系統自動化與遠距離訊號傳輸確實有其必要性。傾斜管之監測可以用管內傾斜儀 (in place inclinometer, IPI) 以長期置入的方法做自動化監測。開口式水位管內可置入電子式水壓計以水壓感測水位。配合自動資料擷取系統，可自動紀錄 IPI 與電子式水壓計讀數。但電子式自動化監測系統具有價格昂貴、易受電磁波干擾、雷擊破壞、且儀器設備若長期處於潮濕環境容易短路故障等缺點。同時傳統開口式水位管受其尺寸限制，在同一鑽孔內通常最多安裝兩管，對於地下水位/水壓之判讀多所限制。

近來國內已研發成功光纖光柵 (fiber Bragg grating, FBG) 節理式偏斜儀 (FBG segmented deflectometer, FBG-SD)，其設計是與傳統傾斜管匹配，將 FBG-SD 插入固定於地層內之傾斜管，以 FBG-SD 節理間偏斜角度之改變來估算傾斜管之變形分佈。FBG-SD 已成功的應用於公路邊坡或地層開挖支撐變形之監測，另外，邊坡破壞經常也涉及地下水壓變化，因此若能同時監測水壓則更能有效反應地層之破壞潛能。

故使用光纖感應系統做邊坡穩定監測需要實用而能夠維持長期穩定之訊號解讀裝置。市場上現有光纖訊號解讀系統並不一定能夠滿足現場監測在經濟與穩定性之需求，而必須在軟硬體方面做必要之檢測與改良。國內外在 FBG 水壓感測技術方面也有初步之發展，但其實用性仍然有限。

數值分析顯示，原深層地下水位之邊坡在不同降雨程度下其地下水位會會有不同程度上升，受地下水位上方土層為非飽和及滲流的影響，降雨前後地層內水壓分佈常是非線性的。如果使用傳統在鑽孔內只量測一至兩個深度然後以線性內差的方法來估算水壓分佈的方法會有明顯的誤差。此一現象也顯示做地層內分佈式水壓監測之重要性。

本研究之目的是進一步改良光纖地層位移與水壓監測技術之穩定性與經濟性、將光纖感應水壓計與地層移動監測系統加以整合，如此可以更充分的發揮邊坡穩定監測之功能。另一方面，本計畫將光纖感應器之解讀系統、光纖轉換器以及數值訊號傳輸系統做一整合，如此可以全時間以自動化之方式將數據傳輸至管

理單位並與預警機制配合使用。

二、研究場址地區說明

2.1 研究場址之現場探勘與監測孔位的選定

本研究於 95 年 5 月 5 日至阿里山五彎仔現地勘查，依據現有監測資料，目前傾斜觀測管 C-11 有持續量測中，以及水位觀測井 B2，在暴雨期間，內水位變化遽增，可達數十公尺。B2 與 C-11 兩鑽孔都位於 N3 滑動區之上緣，此處之數據在數值分析中可提供重要之邊界條件。故選擇於傾斜觀測管 C-11 附近新增一傾斜觀測管，深度為 40m 並裝設所研發之 FBG-SD 偏斜儀監測管內變形，如此新鑽孔中 FBG-SD 之讀數可以與 C-11 中傳統 IP 讀數相比較。而關於水壓觀測部分，為了考量現場封層技術，將原計畫設置在 B-2 旁 100 公尺水位觀測井分成兩部分，一先在 C-11 旁設置深度 40 公尺的水壓觀測井，並以間隔五公尺之距離，安裝五組光纖光柵水壓計，其目的可先測試現場封層技術是否可到達預期目標，另一方面日後可與 NCTU-01 傾斜觀測管中裝設之 20 組 FBG-SD 所量測的資料及以傳統 IP 量測 C-11 傾斜觀測管變形資料相互比較。而在 B-2 孔位設置深度為 60 公尺水位觀測井，孔位編號為 NCTU-03，該孔位同樣以間隔五公尺的距離，裝設 10 組光纖光柵水壓計，以監測 NCTU-02 與 NCTU-03 兩水壓觀測管中之水壓隨深度的變化。另外，該三點位置距離監測小屋不遠，[圖 2.1](#) 為光纖式監測儀器於現場配置圖。

三、光纖光柵監測系統

本研究應用光纖感測技術於大地工程監測方面之研發已有多多年之研發經驗。本節將針對研究中使用之光纖感測技術原理以及將現有之技術改進與研發作一詳細敘述。

3.1 光纖光柵感測原理

光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)是利用雷射在光纖曝光時造成一系列折射率週期性永久的改變，對應折射率週期性改變的間距為 d ，當一寬頻光源進入此一光纖時，除了滿足布拉格條件(Bragg condition)的特定波長 λ_B ，其餘波長都會因為相位差而相消；而當 FBG 受到外力產生應變時，造成原本間距 δ 的改變增加量為 $\Delta\delta$ ，使得該特定波長 λ 反射回來一增加量 $\Delta\lambda_B$ ，利用兩者，可以求得應力施加後所引致的應變量大小，[圖 3.1](#) 為其量測原理示意圖。

由於 FBG 特性，在實務的應用上，應力施加產生應變以後，不只是反射回來的 $\Delta\lambda_B$ 會改變，光纖的有效折射率 n 也會同時改變；而且也會受溫度影響而改變其反射波長，但是藉由本計畫團隊在長達六年的研究，相關的修正技術已經有效掌握，並在實際的應用中獲得良好的成效。目前 FBG 技術已經可以作為傳統應變計的良好替代方案，且具有被動式感測器的相關優點。FBG 與傳統電阻量測器最大的不同點，在於光纖的多工特性，並不受限於傳統電子迴路一對一訊號傳輸的要求，只要在光柵製作時安排不同的波長的光柵製作於同一條光纖上，

利用足夠強度的寬頻光源，就可以同時量測數點至數百點的應變訊號。若以傳統的電路排列需要安置數百條的電線，且電線之間彼此因為電磁效應會相互的干擾，產生雜訊，影響量測結果的準確性；光纖感測器不但只需要一至兩條的光纖即可，不占空間，另外沒有電磁干擾的問題，只要光源足夠就可以大量使用，準確性不減。

3.2 光纖光柵節理式偏斜儀設計原理說明

本研究目前所發展出之 FBG 地層監測技術稱之為光纖光柵節理式偏斜儀 (FBG segmented deflectometer, FBG-SD)，[圖 3.2](#) 所示，其 FBG-SD 可分為量測節理 (measurement segment) 與延伸節理 (extension segment) 兩部分。量測節理上裝有支架 (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傾斜觀測管凹槽之密合。延伸節理為一硬體，沒有任何自由度，其唯一目的為根據量測需要來改變或延長量測節理間之距離。量測節理內安裝兩個軸承，其中一個軸承與監測管方向同軸 (軸向軸承，longitudinal bearing)，其目的在於解除感測器受監測管軸向力 (包括重力與摩擦力) 與扭力對感測器之影響，另一個軸承與監測管方向垂直 (橫向軸承，lateral bearing)，安裝在量測節理之中心點，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。柔性軟管之一端以雙螺絲固定於量測節理內，另一端插入軸向軸承中，可以延軸向滑動或轉動，柔性軟管之中心與橫向軸承在同一位置。偏斜儀在現場組裝，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。傾斜管因為地層滑動或被監測結構體變形而發生扭曲的時候，變形監測管經由光纖或其他應變感應器量測柔性軟管彎曲變化量，計算並累積變形監測管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。

3.3 光纖光柵水壓計與現地安裝封層說明

本研究所研發之水壓計使用光纖光柵 (FBG) 做水壓計之解析方法使用 FBG 波峰漂移方法來調解 (modulate)，而方法敘述如下：

[圖 3.3](#) 為光纖光柵水壓計示意圖，其設計原理主要將 FBG 光纖之一端固定於水壓計底部使其不產生位移，另一端則黏著於一彈性金屬薄膜上，當水壓計內部受壓力作用改變時金屬膜隨之變形，因此 FBG 所感受之應變也隨之變化。當金屬膜仍在彈性限度內，FBG 即呈現等週期式之變化，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，因此必須加入另一呆 (dummy) FBG 做為感應溫度變化之用。

由於 FBG 水壓計之量測訊號是藉由光纖傳輸線來傳輸，當於現場裝設時，可能因人為因素而造成損壞，所以本研究將 FBG 水壓計裝置於長 50 cm，直徑為 27 mm 之 PVC 管內。而 FBG 水壓計本體位於兩側阻絕層之內並固定於 PVC 管之中心處，於該 PVC 管外圍施作間距 5 mm 寬 2 mm 的篩孔及包裹不織布，使得 FBG 水壓計能感測外圍水壓或水位的變化。

使用 PVC 管包覆的另一原因是可將 10 個水壓計串連在一起，在監測技術上

將是一創新。此一安裝與傳統鑽孔（直徑約 100mm）中最多只安裝兩個水位管間之比較展示於圖 3.4。為確保封層（使用白皂土顆粒）施工順利，PVC 管外圍必須保持平直而無突出接頭，這是將 FBG 水壓計置入 PVC 管之另一原因。

四、阿里山五彎仔光纖式監測儀器安裝與量測數據說明

圖 2.1 為此次研究中，所裝置之全光纖式監測儀器佈設位置圖，圖中 NCTU-01 孔位深度為 40 公尺，由孔底處設置 20 組節理式光纖光柵偏斜儀，而每組光纖感測器間距為 1 公尺，以長期監測傾斜觀測管之變形，圖 4.1 為 10 月 8 日至阿里山五彎仔裝設節理式光纖光柵偏斜儀概況圖。由圖 4.2 數據分析顯示，10 月 8 日至 10 月 26 日之間，在地表下 36 公尺處有明顯之滑動面，其滑動量約為 6mm，而 10 月 12 日至 10 月 26 日 NCTU-01 所裝設之 FBG-SD 量測結果為在地表下 36 公尺處也有明顯滑動產生且最大滑動量為 12mm。NCTU-02 孔位深度為 40 公尺，主要設置 5 組光纖光柵水壓計，以量測該孔隨深度之水壓變化，而每個光纖光柵水壓計間距為 5 公尺。圖 4.3 為 NCTU-02 光纖光柵水壓觀測結果圖，該圖顯示地表下 18 公尺至 32 公尺範圍，水壓有明顯變化，其變化量約為 80kPa 至 90kPa 之間。NCTU-03 設置於圖 2.1 中 B-2 孔位旁，其目的可作為地下水數值模型之邊界條件，圖 4.4 為 NCTU-03 量測結果且由圖可得知該孔地下水水位位於地表下 40 公尺處，而隨著深度增加水壓也跟著增加，也表示出目前孔內水壓力未受地下水滲流影響。

五、研究場址地下水流數值模式之建立

5.1 控制方程式、邊界條件與初始條件

本研究採用垂直二維方式來模擬五彎仔地區之地下水流，假設土壤為等向 (isotropic)，其坡地非飽和地下水流控制方程式可表示如下

$$c(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \dots \dots \dots (1)$$

式中， $c(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ ，x 與 z 分別表示水平與垂直座標，如圖 5.1 所示。

求解式(1)需要初始條件與邊界條件，初始條件可表示如下

$$\psi(x, z, t = 0) = \psi^0(x, z) \dots \dots \dots (2)$$

式中， $\psi^0(x, z)$ 表示初始時之壓力水頭分佈函數。另外，邊界條件可分為壓力水頭邊界條件與流量邊界條件兩種。壓力水頭邊界條件可表示為

$$\psi(\Omega, t) = \psi' \dots \dots \dots (3)$$

式中， ψ' 表示壓力水頭值，可為時間之函數， Ω 代表邊界之座標。流量邊界條件可表示為

$$-K \left[\frac{\partial \psi}{\partial x} \bar{i} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \bar{k} \right] \cdot \bar{n} = f \dots\dots\dots (4)$$

式中， \bar{n} 表示邊界之單位方向向量， f 為流出邊界之水流通量。符號 \cdot 表示內積(inner product)。

利用兩步驟有限差分 Crank-Nicolson 法(Hills et al., 1989; Hsu et al., 2002) 可將式(1)離散化(discretization)。其步驟一可表示為

$$C_{i,j}^n \frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{K_{i+1/2,j}^n}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i+1,j}^* - \psi_{i,j}^*}{\Delta x} + \frac{\psi_{i+1,j}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta x} \right) - \frac{K_{i-1/2,j}^n}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i-1,j}^*}{\Delta x} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) + \frac{K_{i,j+1/2}^n}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j+1}^* - \psi_{i,j}^*}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j+1}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta z} \right) - \frac{K_{i,j-1/2}^n}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j}^* - \psi_{i,j-1}^*}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i,j-1}^n}{\Delta z} \right) + \frac{K_{i,j}^n - K_{i,j-1}^n}{\Delta z} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{式中， } K_{i+1/2,j}^n = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i+1,j}^n)}{2}, \quad K_{i-1/2,j}^n = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i-1,j}^n)}{2}, \quad K_{i,j+1/2}^n = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i,j+1}^n)}{2}, \quad K_{i,j-1/2}^n = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i,j-1}^n)}{2} \text{。 } \Delta t$$

為時間間距(time interval)， Δx 與 Δz 分別為 x 與 z 方向之網格大小(grid size)。上標 n 表示模擬時刻，下標 i 與 j 分別為 x 與 z 方向之格網點位置。步驟二可表示為

$$C_{i,j}^{n+1/2} \frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{K_{i+1/2,j}^{n+1/2}}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i+1,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\psi_{i+1,j}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta x} \right) - \frac{K_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{2\Delta x} \left(\frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) + \frac{K_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j+1}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j+1}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta z} \right) - \frac{K_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{2\Delta z} \left(\frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta z} + \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i,j-1}^n}{\Delta z} \right) + \frac{K_{i,j}^{n+1/2} - K_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta z} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{上述方程式中， } C_{i,j}^{n+1/2} = \frac{(C_{i,j}^n + C_{i,j}^*)}{2}, \quad K_{i+1/2,j}^{n+1/2} = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i+1,j}^n + K_{i,j}^* + K_{i+1,j}^*)}{4}, \quad K_{i-1/2,j}^{n+1/2} = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i-1,j}^n + K_{i,j}^* + K_{i-1,j}^*)}{4},$$

$$K_{i,j+1/2}^{n+1/2} = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i,j+1}^n + K_{i,j}^* + K_{i,j+1}^*)}{4}, \quad K_{i,j-1/2}^{n+1/2} = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i,j-1}^n + K_{i,j}^* + K_{i,j-1}^*)}{4}, \quad K_{i,j}^{n+1/2} = \frac{(K_{i,j}^n + K_{i,j}^*)}{2}, \quad K_{i,j-1}^{n+1/2} = \frac{(K_{i,j-1}^n + K_{i,j-1}^*)}{2}$$

初始條件可離散化如下

$$\psi_{i,j}^0 = \psi^0(x_i, z_j) \dots\dots\dots (7)$$

壓力水頭邊界條件可離散化為

$$\psi_{i_b,j_b}^{n+1} = \psi'(\Omega, t = (n+1)\Delta t) \dots\dots\dots (8)$$

式中， i_b 與 j_b 表示邊界之網格點位置。若錯誤! 找不到參照來源。中之 AD 邊界為流量邊界，其邊界條件可離散化為

$$-K_{i_b,j_b}^{n+1} \left[-\sin \alpha \left(\frac{\psi_{i_b+1,j_b}^{n+1} - \psi_{i_b,j_b}^{n+1}}{\Delta x} \right) + \cos \alpha \left(\frac{\psi_{i_b,j_b}^{n+1} - \psi_{i_b,j_b-1}^{n+1}}{\Delta z} + 1 \right) \right] = f \dots\dots\dots (9)$$

若 BC 邊界為流量邊界條件，則可離散化為

$$-K_{i_b, j_b}^{n+1} \left[\frac{\psi_{i_b, j_b+1}^{n+1} - \psi_{i_b, j_b}^{n+1}}{\Delta z} + 1 \right] = f \dots\dots\dots (10)$$

5.2 現場場址數值模式初步測試

模式初步測試假設 Z1= 10m、Z2= 50m、L= 100m，且 Van Genuchten 土壤參數 $\theta_s=0.47$ 、 $\theta_r=0.17$ 、 $K_s=0.00001\text{m/sec}$ 、 $\zeta=0.011$ 、 $N=2.2$ 。在初始時地下水為穩定狀態(steady state)，河川水位為 10m 固定不變，不考慮 AD 邊界之降雨量，CD 邊界上之初始地下水水面位於 z=30m 滿足靜水壓分佈，兩天後地下水水面隨時間線性上升至 z=40m 並保持不變下，壓力水頭模擬結果如圖 5.2 所示。其中，圖 5.2 (a)表示初始穩定狀態之等壓力水頭分佈，圖 5.2(b)與圖 5.2 (c)為模擬時間為 12 小時與 24 小時之等壓力水頭分佈，圖 5.2 (d)則表示地下水水面隨時間線性上升至 z=40m 保持不變之穩態等壓力水頭分佈。另外，在 x=70m、z=30m 與 x=80m、z=30m 兩處之壓力水頭隨時間變化模擬結果，如圖 5.2 所示。由圖 5.2 可知，本研究所建立之數值計算模式可合理地模擬坡地地下水流。

六、結果分析與討論

本研究已成功在阿里山五彎仔邊坡裝設光纖光柵節理式偏斜儀及光纖光柵水壓計，且針對光纖光柵之水位觀測井部分，NCTU-02 光纖光柵水壓觀測井顯示地表下 18 公尺至 32 公尺範圍，水壓有明顯變化，其變化量約為 80kPa 至 90kPa 之間；NCTU-03 光纖光柵水壓觀測井量測結果，可得知該孔地下水水位位於地表下 40 公尺處，而隨著深度增加水壓也跟著增加，也表示出目前孔內水壓力未受地下水滲流影響，主要是本研究裝設之感測之時間未在該地區雨季期間，故光纖光柵水壓觀測井只呈現靜水壓分佈。爾後，將持續監測光纖式感測器讀數隨時間之變化及針對雨季期間之資料取得，已作現場地下水模擬參數之率定及驗證。

參考文獻

1. 簡旭君 (2003)，光纖光柵應變管之研發，交通大學土木工程系碩士論文。
2. 高聖傑 (2006)，光纖光柵壓力計之研發，交通大學土木工程系碩士論文。
3. 畢慶昌(1969)，俯衝運動在臺灣地體構成中的作用，台灣省地質調查所彙刊，第 20 號。
4. 劉憲德、曾俊傑 (未發表)，阿里山公路沿線地質與山崩災害調查研究報告，經濟部中央地質調查所。
5. 黃良雄，地層下陷數值模式發展(一)，國科會，民國 87 年 10 月。
6. 楊錦釗，黃良雄，海岸地區地陷潛能與危險評估技術(3/3)，經濟部水利署，民國 92 年 12 月。
7. 蔡東霖，”區域性地下水超抽導致地層下陷模式之發展與應用”，國立交通大學土木工程研究所博士論文，新竹，台灣，民國 90 年。

8. 青山顧問有限公司（民國 96 年），台 18 線 28.9K~31.5K（五彎仔）地滑區調查、整治規劃及安全評估地滑地區補充監測執行總報告，交通部公路總局第五區養護工程處。
9. Bear J (1972) Dynamics of fluids in porous media, Dover, Mineola, New York.
10. Fetter CW, Applied Hydrogeology, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
11. 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.
12. Hurley DG, Pantelis G (1985) Unsaturated and saturated flow through a thin porous layer on a hillslope. Water Resources Research 21: 821-824
13. McDonald, J. M., and Harbaugh, A. W., A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model, Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, 1988.
14. Van Genuchten, M. Th., "A closed-Form Equation for Predicting Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils." Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, 892~898, 1980.
15. Haverkamp R, Vauclin M, Touma J, Wierenga PJ, and Vachaud G (1977) "A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration." Soil Sci. Soc. Am. J., Vol 41, 285-294.
16. Hill RG, Porro I, and Hudson DB (1989) "Modeling one-dimensional infiltration into very dry soils. 1. model development and evaluation." Water Resources Research, Vol. 25, 1259-1269.
17. Hsu SH, Ni CF, and Hung PF (2002) "Assessment of three infiltration formulas based on model fitting on Richards' equation." Journal of Hydrological Engineering, Vol. 7, 373-379.
18. Fetter CW, Applied Hydrogeology, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
19. McDonald, J. M., and Harbaugh, A. W., A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model, Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, 1988.
20. 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

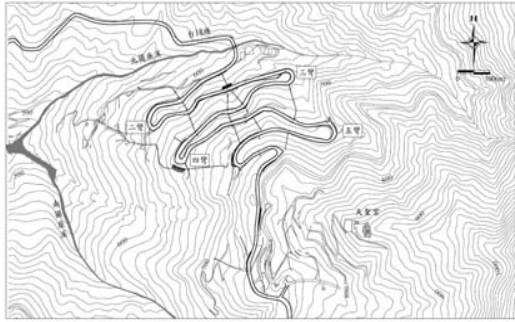


圖 2.1、光纖式監測儀器於現場配置圖
(青山工程顧問公司, 2006)

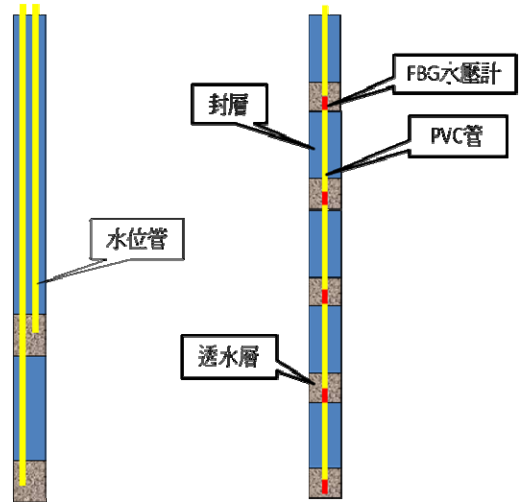


圖 3.3、傳統水位觀測管與光纖光柵水壓觀測管比較示意圖

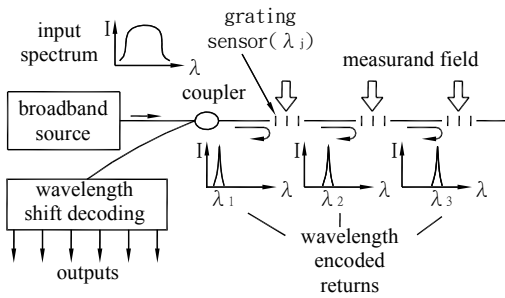


圖 3.1、光纖光柵良策原理示意圖
(Kersey, 1992)



圖 3.2、FBG 節理式偏斜儀示意圖



圖 3.2、光纖光柵水壓計示意圖



圖 4.1、NCTU-01 節理式光纖光柵偏斜儀裝設概況圖

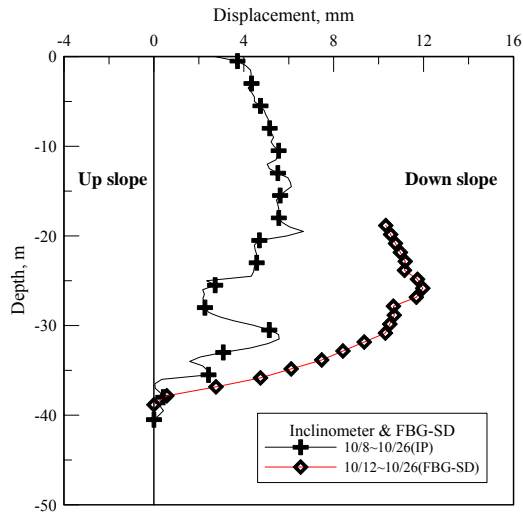


圖 4.2、C-11 與 NCTU-01 傾斜觀測管量測結果圖

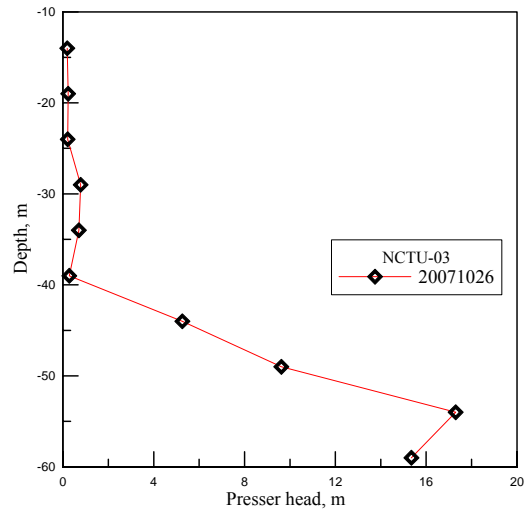


圖 4.4、NCTU-03 光纖光柵水壓觀測井結果圖

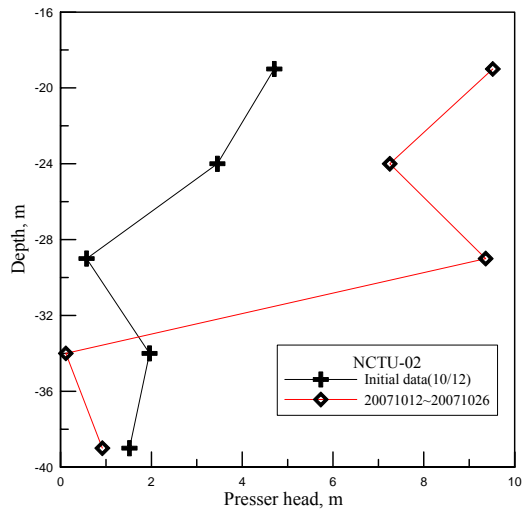


圖 4.3、NCTU-02 光纖光柵水壓觀測井結果圖

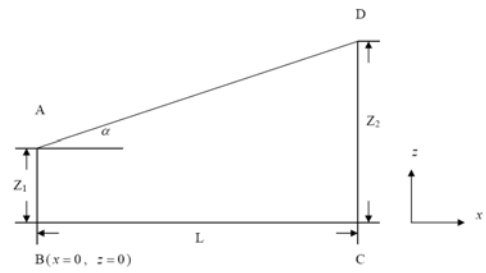


圖 5.1、現場場址垂直模擬剖面示意圖

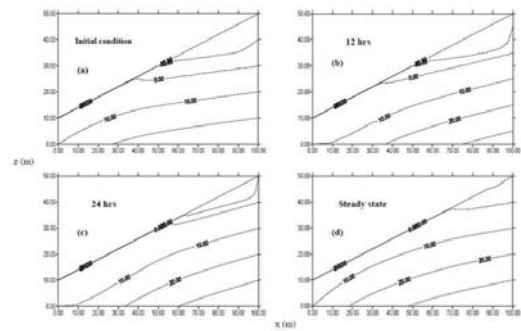


圖 5.2、現場場址坡地非飽和地下水流模擬結果