

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

降雨誘發水庫集水區邊坡崩塌模式與整治策略之研發--總
計畫暨子計畫:水庫集水區邊坡非飽和表層土壤之現場試驗
與監測(I)

研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型

計畫編號：NSC 97-2625-M-009-009-

執行期間：97年08月01日至98年07月31日

執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：黃安斌

共同主持人：董家鈞、林銘郎、蔡東霖、林宏達、李維峰
陳儒賢、鄭清江

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 01 月 06 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☒ 成果報告
☐ 期中進度報告

降雨誘發水庫集水區邊坡崩塌模式與整治策略之研發--總計畫暨子計畫:

水庫集水區邊坡非飽和表層土壤之現場試驗與監測(I)

計畫類別：☐ 個別型計畫 ☒ 整合型計畫

計畫編號：NSC 97-2625-M-009-009

執行期間：2008 年 8 月 31 日至 2009 年 7 月 31 日

計畫主持人：黃安斌 教授

共同主持人：

計畫參與人員：李瑞庭、黃秉濬、古景宇

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☐ 精簡報告 ☒ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年 ☐ 二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學 土木工程學系

中 華 民 國 99 年 1 月 5 日

目 錄

中 文 摘 要.....	III
英 文 摘 要.....	IV
一、前 言.....	1
二、研究方法.....	19
三、成果說明.....	21
四、結論與討論.....	61
參考文獻.....	62

中文摘要

水庫集水區邊坡崩塌、沖蝕與土砂之運移，在水庫內淤積，已嚴重威脅國內水庫蓄水功能以及使用之壽命。國內水庫集水區發生崩塌之邊坡大多被崩積土壤所覆蓋，由於在地下水位以上，處於非飽和狀態，受負孔戲水壓的影響，維持邊坡的穩定。許多崩塌乃是受長期或暴雨影響使得土壤因飽和而失去負孔戲水壓，進而產生崩塌。本研究計畫是以「降雨誘發水庫集水區邊坡崩塌模式與整治策略之研發」為主題整合型計畫之一部份(子計畫八：水庫集水區邊坡非飽和表層土壤之現場試驗與監測)。本計畫之目的包括研發使用 PMT 做現地非飽和土壤試驗之方法與結果之解釋，非擾動非飽和崩積土行為之室內試驗與現地監測，以及水庫集水區崩積土在暴雨期間，基質吸力之變化及其與降雨間關係之分析。研究中將選擇兩處試驗基地，配合總計畫與其他子計畫進行一系列非飽和土壤取樣，現地 PMT 試驗以及邊坡穩定監測研究。

關鍵詞：邊坡穩定、崩積土、非飽和土壤、傍壓儀試驗、邊坡穩定監測

英文摘要

The collapse and erosion of earth slopes in reservoir watersheds result in transport of silt and eventual sedimentation in the reservoir. The accumulation of sediment has seriously threatened the functionality and longevity of our reservoirs. The potentially unstable slopes in the reservoir watersheds are often covered by colluvial soils and above the water table. The colluvial soils are usually in an unsaturated state. The unsaturated soil slope maintained its stability as a result of negative pore pressure existed in the ground. The collapse of earth slope occurs often due to infiltration and saturation of the surficial soils after heavy rainfall. This research project (Sub-project 8, titled: In situ testing and field monitoring for unsaturated surficial soils in reservoir watersheds) is part of a collaborative research on “Rainfall induced slope failures in reservoir watershed: their mechanisms and rehabilitation strategies.” The objectives of this project include: performance of PMT in un saturated soil and its interpretation, undisturbed sampling and field slope stability monitoring, and analysis on the correlations between the change in matric suction and rainfall intensity. Two research sites will be selected where a series of field observation/ PMT experiment, sampling and laboratory tests will be conducted to accomplish the goals of the research.

Keywords : slope stability, colluvial soil, unsaturated soil, pressuremeter test, slope stability monitoring

一、前言

水庫集水區邊坡崩塌、沖蝕與土砂之運移，在水庫內淤積，已嚴重威脅國內水庫蓄水功能以及使用之壽命。在新建水庫不易的情況下，如何延續現有水庫之運轉是一重要之議題。國內水庫集水區發生崩塌之邊坡大多被崩積土壤所覆蓋，由於在地下水位以上，處於非飽和狀態，受負孔隙水壓的影響，維持邊坡的穩定。許多崩塌乃是受長期或暴雨影響使得土壤因飽和而失去負孔隙水壓，進而產生崩塌。本研究計畫是以「降雨誘發水庫集水區邊坡崩塌模式與整治策略之研發」為主題整合型計畫之一部份(子計畫八：水庫集水區邊坡非飽和表層土壤之現場試驗與監測)。

國內外對於降雨引發崩塌之評估方法可概分為經驗法與解析法兩種。解析法是以嚴謹的力學概念為基礎，探討坡地崩塌之現象。經驗法則是根據以往崩塌資料及崩塌的內在因素與外在誘因，分析歸納出簡易的關係式，以作為未來評估崩塌之用。就學理上而言，經驗法雖然較解析法不嚴謹，但是因為具有簡單性，所以較為廣泛地被使用，尤其是對大區域之坡地崩塌分析。例如，打荻氏公式(打荻珠男，1971)、power law 公式及降雨崩塌門檻值公式。然而，經驗法雖然較解析法方便，但是可能具有地區性之限制，或是人為評估因素之影響。反之，解析法因根據嚴謹的力學基礎，所以具有通用性與客觀性，不受地區性之限制與人為因素之不必要影響。本整合型研究計畫將從解析法著手進行研究。

根據無限邊坡理論及考慮非飽和土壤強度，Fredlund et al. (1978) 提出如圖 1 所示平面應變無窮邊坡之安全係數，

$$FS = \frac{c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b}{\gamma_t Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

其中

c' = 土壤之排水凝聚力

ϕ' = 土壤之排水摩擦角

γ_t = 土壤總單位重

σ_n = 底部滑動面之正向應力

u_a = 孔隙空氣壓力

u_w = 孔隙水壓力

$(u_a - u_w)$ = 基質吸力 (matric suction)

ϕ^b = 隨基質吸力而增加之摩擦角

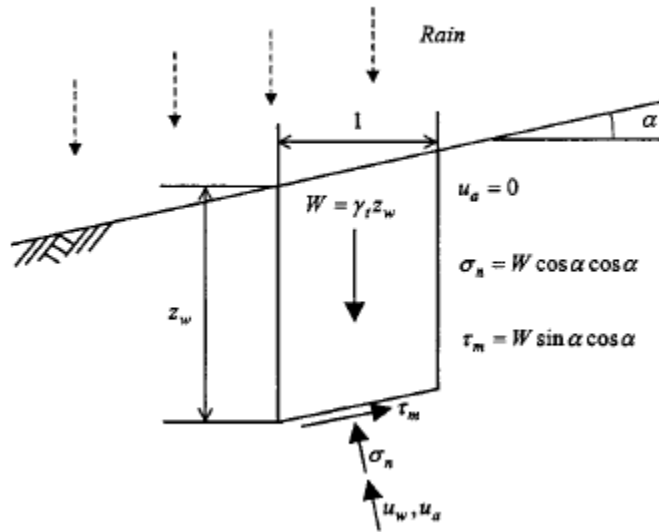


圖 1 非飽和土壤平面應變無窮邊坡之破壞（取自 Cho and Lee, 2002）

國內外研究已提出充分證據顯示土壤邊坡淺層崩塌主要之機制在於非飽和土壤內基質吸力 ($u_a - u_w$) 也就是負孔隙水壓受降雨入滲影響而降低或消失進而使得土壤強度 ϕ^b 降低，進而導致崩塌。評估不飽和邊坡破壞模式所需主要強度參數分別為 ($u_a - u_w$) 及 ϕ^b ，這兩項參數通常由室內試驗求得，決定土壤 ($u_a - u_w$) 參數最常用之室內實驗方法為壓力鍋(板)試驗，將取自現場試驗土樣依據現場孔隙比大小重模後，求得土壤體積含水量與 ($u_a - u_w$) 之關係曲線，稱之為土壤水分特性曲線 (soil-water characterization curve, SWCC)，在得知現場土壤體積含水量後，藉由 SWCC 曲線推估現場土壤 ($u_a - u_w$) 大小；而不飽和土壤強度參數 ϕ^b ，則是藉由非飽和三軸試驗所求得，而試驗中控制土壤吸力值大小之準則，為依據該土壤之土壤水分特性曲線結果來施加吸力，最後求得非飽和土壤之破壞包絡線及隨基質吸力改變之摩插角 ϕ^b 。因此，由室內試驗求得之非飽和土壤強度參數後，代入上述方程式(1)中，可求出邊坡之安全係數。目前非飽和土壤相關室內試驗，仍然存在幾項缺失：

1. 土壤水分特性曲線包含排水段與吸水段，使得同一基值吸力下會因乾溼路徑不同，而對應兩個不同之土壤體基含水量，此現象稱之遲滯效應。由於無法得知現場土壤是屬於乾至濕或濕至乾現象，若依據現場土壤體積含水量與土壤 SWCC 曲線反求土壤之基值吸力時，則會有差異存在。
2. 控制不飽和土壤三軸實驗之吸力值大小為依據該土壤之 SWCC 曲線，所以得出不飽和土壤剪力強度參數 ϕ^b 代表性可能因此受影響。
3. Ng and Pang (2000)所做數值分析顯示，使用受應力影響 (stress dependent) SWCC 計算所得孔隙水壓分佈與根據傳統由濕而乾 SWCC 之計算結果會有明顯差異，而此一差異通常導致邊坡穩定安全係數之高估。理想之 SWCC 量測應該在試體由乾而濕，並承受類似現地應力情況下進行。基於以上因素之考量，非飽和土壤強度之量測應該在保持土壤現地結構 (fabric) 及應力狀態下

進行最為理想。要達到此一目的可以從兩方面著手：方法之一是鑽取非擾動試體，然後在 K_0 壓密的情況下量測 SWCC 與非飽和土壤強度，如 Ng and Pang (2000) 所建議，或使用現地試驗的方法決定 SWCC 與非飽和土壤強度。主持人長期從事土壤現場與室內試驗技術之研發，在交通大學試驗室有完整之相關試驗設備。本研究將嘗試透過現場試驗的方法來求得 SWCC 與非飽和土壤之強度參數，並修改現有三軸系統，與子計畫三配合進行非擾動試體室內 K_0 壓密情況下 SWCC 與非飽和土壤強度量測，並與現地試驗結果比較。現場試驗使用主持人在先前國科會計畫中所研發之傍壓儀(Pressuremeter, PMT)進行。主持人所研發之光纖光柵地層移動與水壓監測技術也將在本計畫之使用或做進一步之研發以符合非飽和土壤邊坡監測之需求。研究架構如圖 2 所示。主要分為四大項目，分別為現場 PMT 試驗、光纖光柵張力計的研發與現場量測、 K_0 壓密非飽和土壤試驗裝置之研發與非擾動試體室內試驗以及現場邊坡穩並監測。

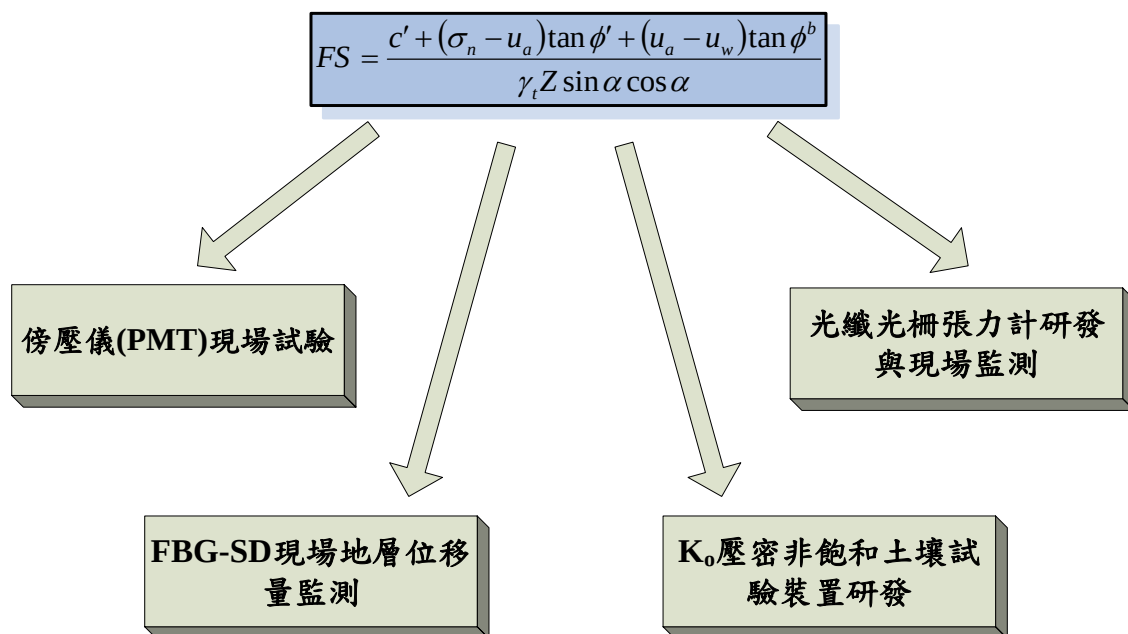


圖 2 研究架構圖

本計畫將使用之現場試驗監測儀器包括主持人所研發之 PMT 裝置、光纖光柵節理式偏斜儀 (FBG-SD) (Ho et al., 2006)、光纖光柵水壓計(Ho et al., 2007)以及使用光纖光柵做量測之非飽和土壤三軸試驗裝置。其中 FBG-SD 與光纖光柵水壓計已成功的使用於紅菜坪與阿里山五灣仔地滑之研究，在地層內做分佈式位移與水壓監測。光纖光柵水壓計與高進氣吸力值陶磁 (high air entry ceramic) 組合即可做成張力計 (Tensiometer)，進行室內或現場基質吸力量測。以下為各現場光纖感測器，三軸試驗裝置以及 PMT 之設計原理與使用方法做簡單說明：

光纖光柵感測原理簡介

光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)係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 d 的改變增加量為 Δd ，使得該特定波長 λ_B 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(Kersey, 1992 ; Meltz, 1989 ; Measures, 2001 ; Othons, 1999 ; Rao, 1998)，**錯誤！找不到參照來源。**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，不佔空間，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。

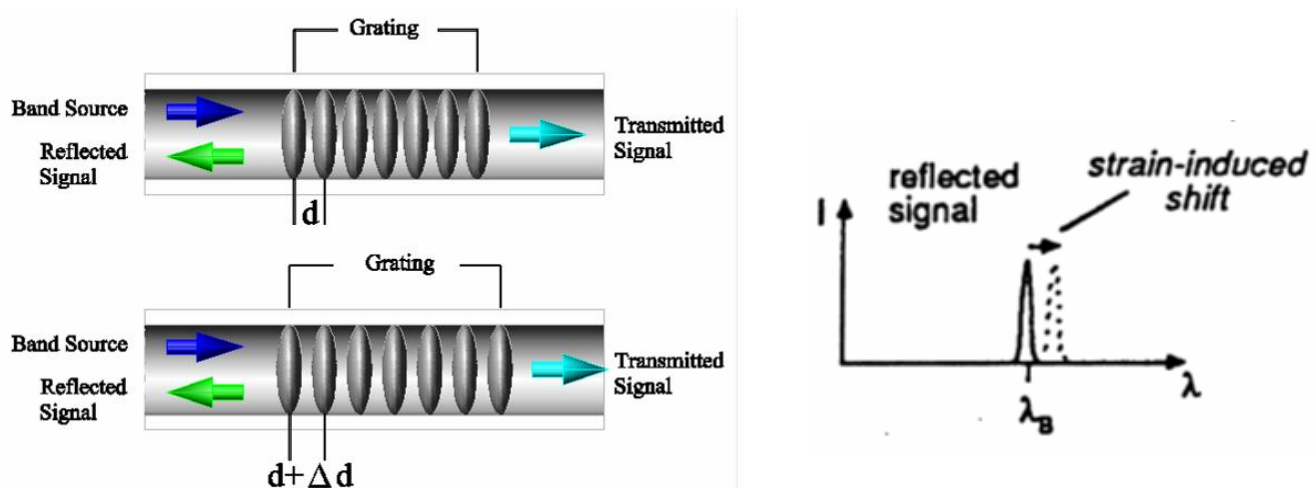


圖 3 光纖光柵量測原理示意圖 (簡旭君, 2003)

光纖光柵節理式偏斜儀(FBG-SD)

本研究團隊目前所發展出之光纖光柵地層監測技術稱之為光纖光柵節理式偏斜儀(FBG segmented deflectometer, FBG-SD)，能夠與傳統測傾管配合使用。FBG-SD 是將一長約 215mm，直徑約 10mm，使用塑鋼製成之柔性軟管(flexible tube)外，相隔 180 度黏貼成對的光纖光柵。在此應變感測元件兩端加裝鋁片剛性材料如**錯誤！找不到參照來源。**所示，將兩端剛性材料所受到的應力傳到中間柔性材料上，此時對柔性材料會有應變集中的現象，也就會有將應變放大的效果。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測傾管凹槽之密

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，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。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，如**錯誤！找不到參照來源。**所示。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。

在實驗室中可標定出光柵波長改變量與角度變化量的關係，根據標定結果計算，光柵波長改變 1 pm（解析儀所能讀取之最小 FBG 波長改變量）所對應之，剛性段間之夾角改變量在 0.0010 與 0.0012 度之間。在監測地層滑動時我們可以將多個 FBG 偏斜儀串接在一起，並將量測到的角度換算成側向位移量，偏斜儀能夠容許的彎曲角度可達 3.0 度上下。

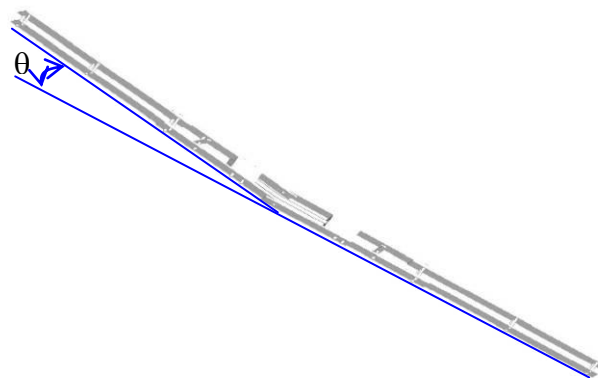


圖 4 FBG 偏斜儀設計示意圖

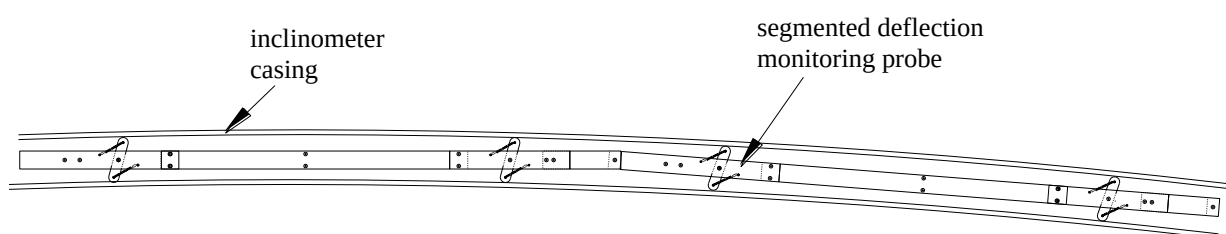


圖 5 節理式設計之訊號放大效應

光纖光柵水壓計(FBG-piezometer)

本研究團隊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 波峰漂移來調解(modulate)，這兩種方法分別敘述如下：

錯誤！找不到參照來源。展示使用等週期式使用 FBG 波峰飄移與壓力間之關係來設計。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。

錯誤！找不到參照來源。展示等週期式 FBG 水壓計之標定結果。結果顯示，在 0 至 400kPa 範圍內讀數與壓力間有高度之線性關係，其相關係數(R^2)在 0.999 以上，效果非常良好。等週期式 FBG 水壓計體積小直徑小於 15 mm，適合於現階段安裝於現有之開孔式水位計內。

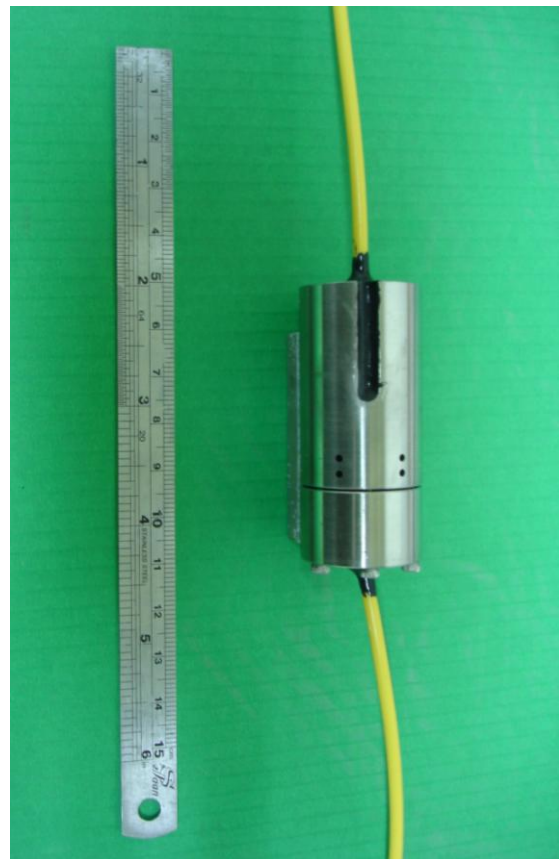
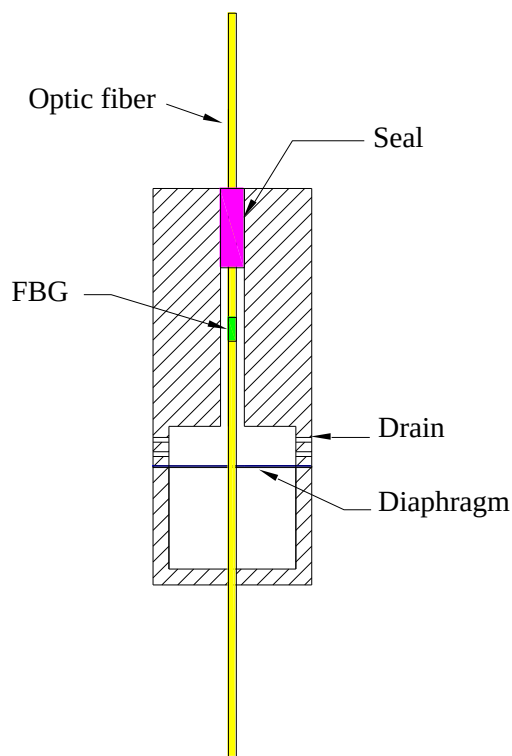


圖 6 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖

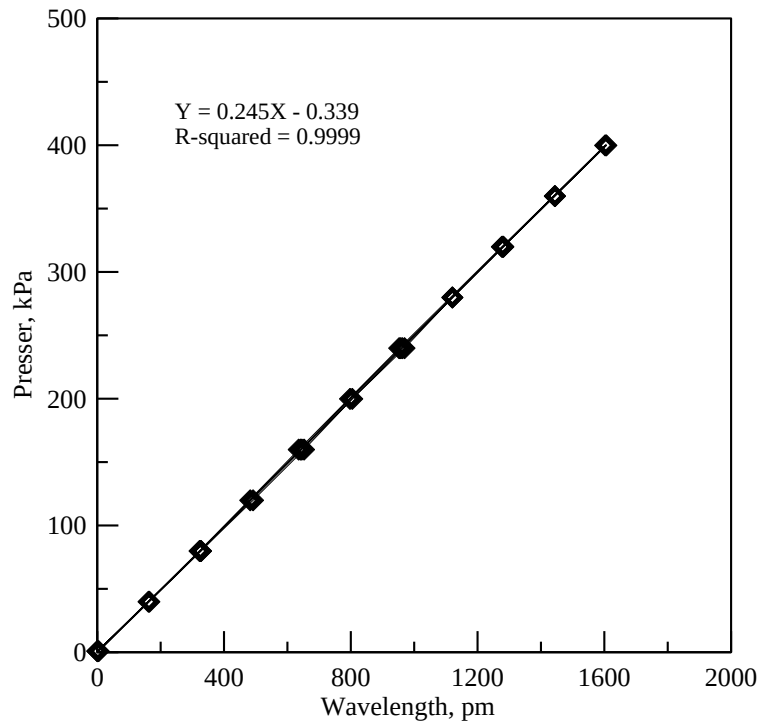


圖 7 等週期波長式 FBG 水壓計標定結果

光纖光柵張力計(FBG-tensiometer)

由於目前對於現場不飽和土壤基質吸力量測，多利用傳統張力計量測某深度土壤之基值吸力變化。張力（負壓力）之讀取使用機械式或電子式壓力計來量測，若要測得不飽和土壤不同深度之基值吸力，則必須依不同深度安裝多個張力計，但電子式儀器多為主動式設計，電子線路隨感測器埋入地下需要電力才能發送訊號，耐用性有限，另一方面電子式儀器為非分佈式感測器，因每一感測器之訊號傳輸線為獨立無法串接，所以同一鑽孔不易埋置多個感測器。而光纖感測方式相較於電子式的方法有許多優點，如具有多功或部分分佈感測之特性，也就是同一訊號傳輸線可佈設多個感測點且訊號不互相干擾，所以在同一鑽孔中可在不同深度設置多個感測點，根據主持人目前所研發技術，每一訊號傳輸線可佈設 6 個以上感測器。

光纖光柵張力計為這次研究項目重點之一，主要將現有光纖光柵水壓計予以改良，其方法為在光纖光柵水壓計側邊加上一 U 形狀之高進氣陶石透水石，其構造示意圖如錯誤! 找不到參照來源。所示。如果只使用單一光纖光柵張力計做現場量測時，高進氣陶石透水石可以如圖 8(a)直立的方式排列，以便於現場以貫入的方式安裝光纖光柵張力計。Mikkelsen and Green (2003)所提全灌漿（fully grouted）方法可經濟而簡單的在同一鑽孔內安裝多個電子式水壓計（multi-piezometer）。利用光纖光柵為部分分佈感測器之優點，同一光纖可以連接多個光纖光柵張力計，使用同一鑽孔做地層內基質張力分佈量測將比電子式水壓計更為簡易與有效。但此一技術從未在非飽和土壤中嘗試。在非飽和土壤中同一鑽孔安裝多點光纖光柵張力計時，高進氣陶石透水石需以如圖 8(b)所示，橫向排列。為確保壓力或張力量測是相對於當時之大氣壓力，張力計參考壓力室（參考圖 8）端將以通氣管（vent tube）與地表大氣壓力連通，水儲存室將使用不銹鋼管線及無體積變化閥門（參考圖 8）與地表連通，如此可使用除氣水將水儲存室內受負水壓影響而氣化之水以循環的方法排出，確保張力量測之正確性。類似通氣管與水循環管線系統已在現有電子式張力計中使用。當周圍土壤達飽和時，張力計所量水壓變正值而自動成為水壓計。

錯誤! 找不到參照來源。為採用 fully grouted 方法在同一鑽孔內安裝多個光纖光柵張力計之示意

圖，但回填料不一定是灌漿材料。鑽孔之回填材料必須事先加以測試，已確定回填料不會影響基質吸力之量測數值。回填材料之選擇目前尚無經驗依據，關於鑽孔回填材料材質特性選擇，如透水性、SWCC 特性，厚度等因素，將於實驗室進行一系列回填材料對崩積土層 SWCC 量測結果影響之測試如圖 10 所示，以做為光纖光柵張力計監測孔回填材料選擇依據。

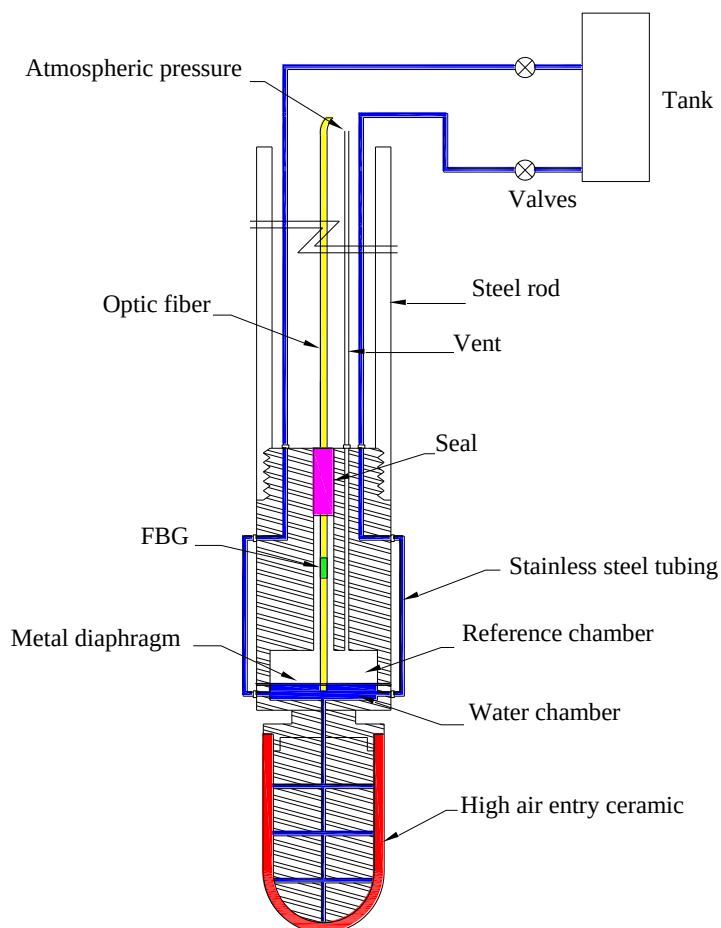


圖 8(a) 單一光纖光柵張力計示意圖

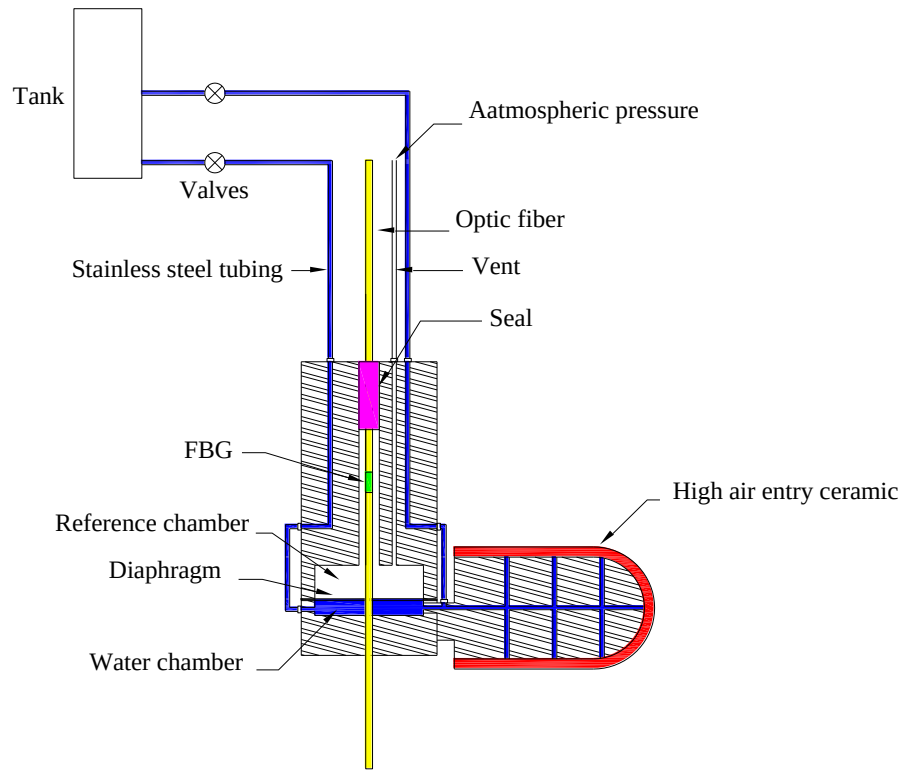


圖 9(b) 多點光纖光柵張力計示意圖

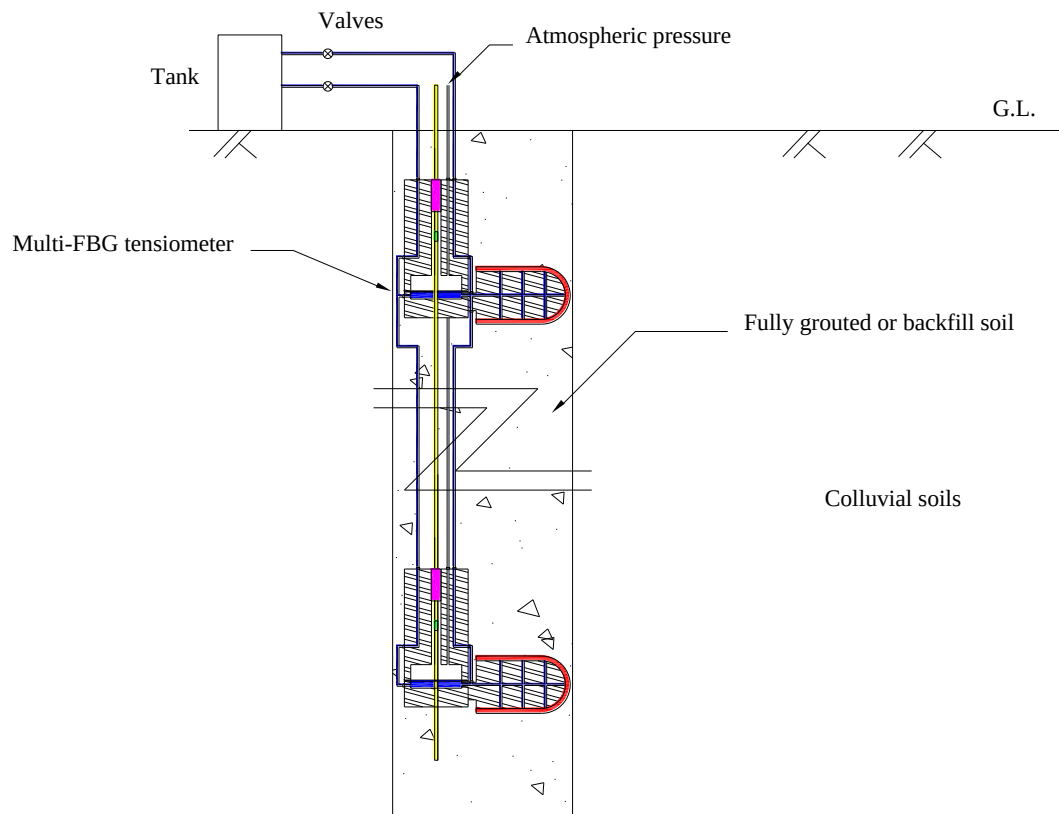


圖 10 同一鑽孔內安裝多個光纖光柵張力計之現場安裝示意圖

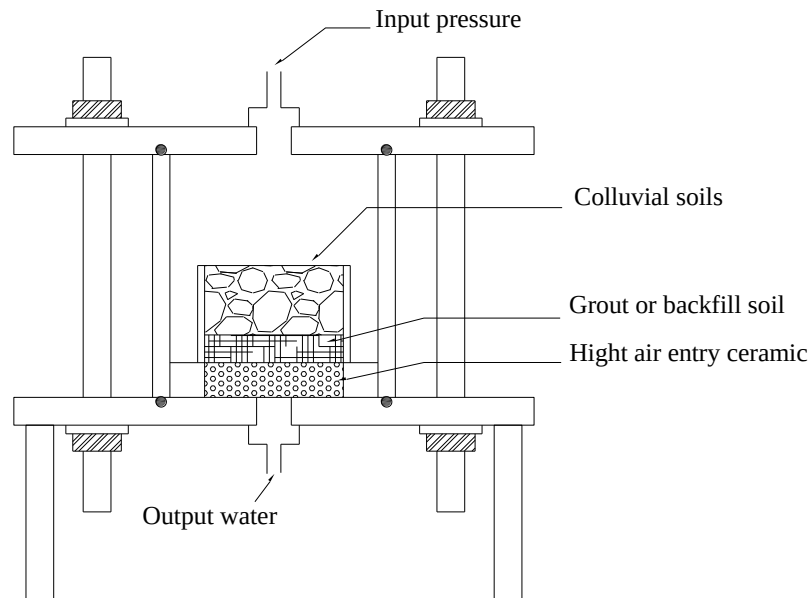


圖 11 考慮 grout or backfill soil 之崩積土層土水特性曲線試驗架構示意圖

全光纖式非飽和土壤三軸試驗裝置

錯誤！找不到參照來源。為交通大學正在研發之全光纖式非飽和三軸儀器示意圖，該儀器中之 load cell、pore pressure transducer、differential pressure transducer 及試體軸向變形均將使用光纖光柵作為感測機制，此三軸儀器使用類似 Ng et al. (2002) 所報導雙室 (double cell) 的方法量測試體體積變化。使用此設計，以及室壓伺伏控制使得軸向壓密過程中試體橫向應變為零即可達到 K_0 壓密功能。使用此一功能可以在 K_0 壓密，模擬現地應力狀態下進行 SWCC 試驗。除本子計畫外，此試驗裝置也將提供給子計畫三使用，進行一系列崩積土層相關室內試驗如 SWCC、非飽土壤強度、壓縮性、透水係數等。

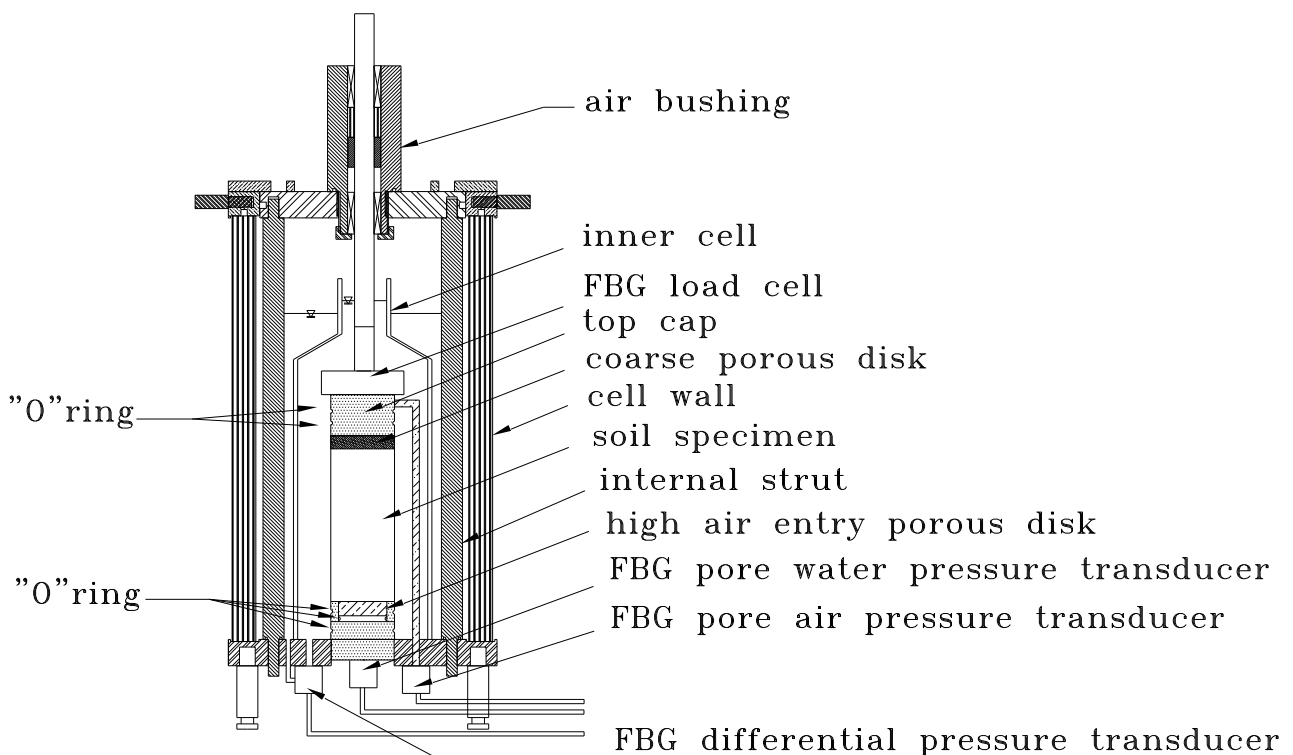


圖 12 全光纖式非飽和三軸試驗室

高壓傍壓儀構造及功能

本研究將使用之傍壓儀(PMT)為主持人在國科會贊助下所研發，在本研究中主要目的為求得現場崩積土層在不同飽和度情況下之應力-應變與強度關係。傍壓儀雖然依地質條件或設計理念而有不同之形式，但大體可分為(1)壓力來源及連接管路(2)控制系統(3)轉接器(4)傍壓管四部份，本儀器各項配件佈置如**錯誤！找不到參照來源**。所示，以下就本儀器之儀器構造及功能分別加以說明。

1. 壓力來源：為使傍壓儀使用氣壓作為壓力源(大約為 10 MPa)，使用高壓管線連接傍壓管與地表壓力控制裝置。
2. 壓力控制系統：為使各項壓力源之壓力能夠符合試驗所要求之精度，在壓力源與傍壓管間，設有一控制箱。藉由耐高壓及高精度之壓力表及調壓閥調整壓力至試驗所需。調整後之壓力連接至轉接盒，再送至傍壓管。
3. 轉接器：為使傍壓管內與地面間電路之連接，不受到鑽孔孔壁塌陷導致之損壞及避免地下水之干擾，而使連通管線置於高壓管線內保護。因此在地表上需設有一轉接器以使電路得以連接電腦及供電器(Power supply)。

傍壓管(probe)：全長為 1075 mm，直徑為 74 mm(不含保護殼)。依結構體主要可分為兩段，一為壓力室長度為 740 mm，其中可膨脹部分長度=410mm，長徑比等於 5.4，依據 Borsetto (1983)利用不同型式傍壓管進行比較，建議傍壓管之長徑比應大於 4，以減少因 membrane 兩端束制，造成傍壓管擴張時非成圓柱體膨脹之影響，因此一長徑比應可符合要求。最大允許變形量 20mm，大約等於 27%之徑向變形量(Cavity strain)。傍壓管依功能區分包含 Membrane、保護殼(protective sheath)、應變量測單元(displacement unit)、應力轉換計(pressure transducer)及資料擷取與類比數位轉換系統，各單元配置圖如圖 14 因為類比數位轉換在傍壓管底部進行，量測訊號以數位形式傳輸至地表，以確保其穩定性。

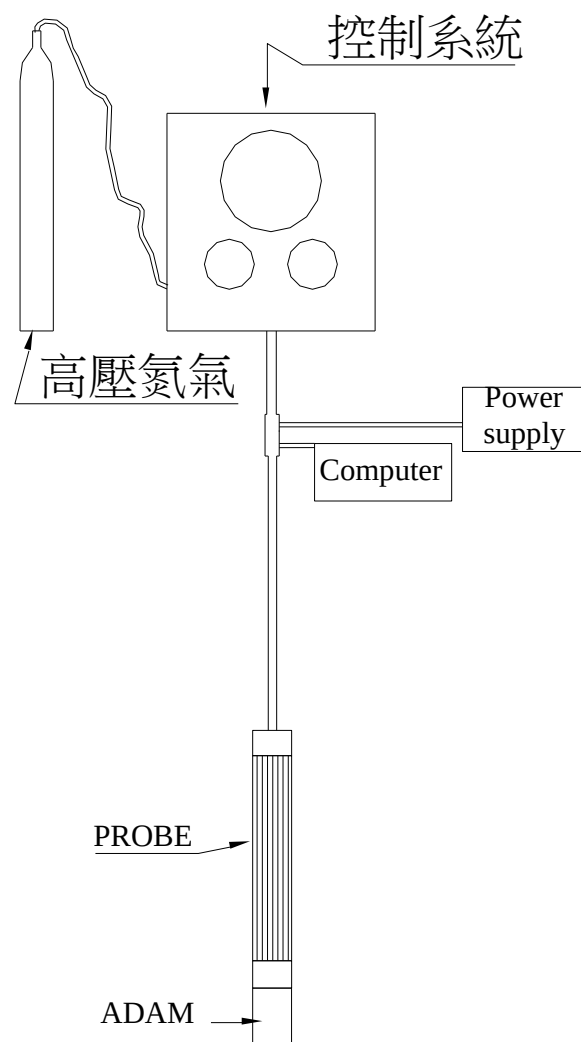


圖 13 傍壓儀系統架構圖

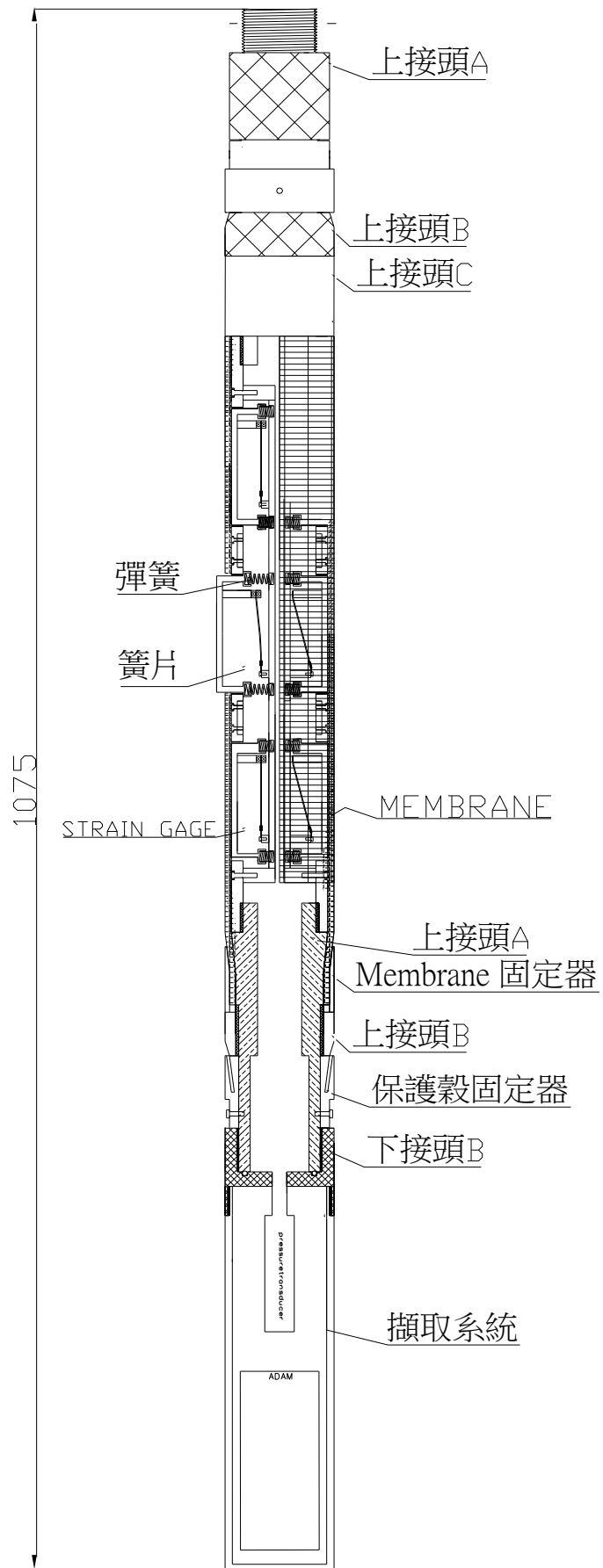


圖 14 傍壓管配置圖

雖然使用 PMT 在現地測試非飽和土壤行為有許多優點，但現有使用 PMT 在非飽和土壤中做試驗之報導極為有限。Kandaris (2006) 使用 PMT 在沙漠土壤中做試驗並與 SPT 之 N 值比較並建立 PMT 試驗結果與 N 值間之經驗關係，但對非飽和土壤行為並無嚴謹之考量。本計畫 PMT 之使用將從非飽和土壤應力-應變與強度行為做出發點，利用 curve fitting 的方法(Huang et al.,1986)來求得現場崩積土層不同深度，現地狀態下之應力-應變關係與不飽和土壤強度參數 ϕ^b 。

本子計畫之主要目的包括：

- 使用 PMT 做現地非飽和土壤試驗之方法與結果之解釋
- 非擾動非飽和崩積土行為之室內試驗與現地監測
- 水庫集水區崩積土在暴雨期間，基質吸力之變化及其與降雨間關係之分析

非飽和土壤之擴孔理論

Vesic, 1972 利用圓柱狀擴孔理論，且考慮土壤之彈性參數(楊氏模數 E 及波桑比 ν)及土壤強度參數(凝聚力 c 及摩擦角 ϕ)，圖 15 為表示圓柱狀擴孔伸張圖，其中塑性區域的大小可由 R_u 及 R_p 所控制，而塑性區域內之土壤其顆粒塑性壓縮特性為凝聚力 c 、摩擦角 ϕ 及體積應變 ε_v 所詮釋；在塑性區域外之土壤則以楊氏模數 E 及波桑比 ν 來描述土壤之線彈性行為，若考慮塑性與彈性之間的邊界平衡條件時，可推導出土壤極限擴孔壓力為：

$$p_u = cF_c + pF_p \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_p = (1 + \sin \phi)(I_{rr} \sec \phi)^{\sin \phi / (1 + \sin \phi)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_c = (F_p - 1) \cot \phi \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{(1 + I_r \varepsilon_v \sec \phi)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$I_r = \frac{E}{2(1 + \nu)(c + p \tan \phi)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

其中 F_c 及 F_p 為圓柱狀擴孔伸張形狀因子(dimensionless cylindrical cavity expansion factors)； I_r 為勁度指數(rigidity index)； I_{rr} 為遞減勁度指數(reduced rigidity index)。

I_r 勁度指數為在均向壓縮應力下，土壤剪力模數與剪力強度之比值； I_{rr} 的值受塑性區域之體積改變影響，另外，Vesic, 1972 應用土壤力學基本理論及室內試驗，來估算土壤在塑性區域之改變量，且顯示一些參數會影響極限擴孔壓力(ultimate cavity pressure)，如土壤之初始應力狀態、土壤強度、體積變化及勁度指數，而土壤塑性區域之大小可由勁度指數來表達。

$$R_p / R_u = (I_{rr} \sec \phi)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Muraleetharan et al., 1998 引用非飽和土壤控制參數淨正向應力(net normal stress)及基質吸力(matric suction)擴展 Vesic, 1972 所推導出之土壤極限擴孔壓力為：

$$p_u = F_p \left[(p - u_{af}) - \frac{E}{H(1-2\nu)} \Delta(u_a - u_w) + \Delta u_a \right] + F_c c + u_{af} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$F_p = (1 + \sin \phi) I_{rr}^{\sin \phi / (1 + \sin \phi)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$F_c = (F_p - 1) \cot \phi \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$I_{rr} = \frac{1 + \varepsilon_v}{\frac{f_2}{I_r} - \frac{2(1+\nu)\Delta(u_a - u_w)}{H(1-2\nu)} \sin \phi + \frac{2(1+\nu)\Delta u_a}{E} \sin \phi + \varepsilon_v} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$f_2 = \cos \phi \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)[(p - u_a) \tan \phi + c]} \quad \dots\dots\dots (12)$$

其中 F_c 及 F_p 為圓柱狀擴孔伸張形狀因子(dimensionless cylindrical cavity expansion fators)

p 為初始總平均正向應力

u_{af} 為在塑性區域之最後孔隙空氣壓力(final pore air pressure in plastic zone)

c 為土壤的凝聚力

I_{rr} 為遞減勁度指數(reduced rigidity index)

I_r 為勁度指數(rigidity index)

ε_v 為塑性區域之極限狀態壓力下之體積應變(volumetric strain in the plastic zone at the limit pressure)

$\Delta(u_a - u_w)$ 為擴孔伸張期間之土壤基質吸力改變量(change in matric suction during the cavity expansion)

Δu_a 為擴孔伸張期間之土壤孔隙空氣壓力改變量(change in pore air pressure during the cavity expansion)

E 為楊氏模數

ν 為波桑比

H 為與土壤基質吸力有關之彈性模數(Elastic modulus with respect to the matric suction)

而推導方程式(7)中，假設極限壓力下之擴孔半徑為 R_u 且塑性範圍區域為 R_p 所圍繞，在塑性範圍

區域外土壤為彈性行為，而 R_u 與 R_p 的關係可表達如下式：

$$R_u / R_p = I_{rr}^{0.5} \quad (59)$$

由於方程式(7)中有許多變數均與土壤之含水量有關，若須能有效應用在實際架構來詮釋非飽和土壤中應力應變行為，須做下列合理之假設：

1. 土壤之土水特性曲線可應用在此方程式中，因為方程式(7)內的土水特性由土壤飽和度所表

達，所以假設土水特性曲線不會隨傍壓儀薄膜伸張而改變。

2. 非飽和土壤之剪力強度參數 c' 、 ϕ 及 ϕ^b 為已知條件，或者可合理的估計。
3. 土壤之彈性模數 E 、基質吸力有關之彈性模數 H 及波桑比 ν 可由傍壓儀試驗結果得知，此外，由於這些參數已受到土壤含水量改變而改變時，則所得的極限壓力對於土壤含水量之改變較小。
4. 土壤孔隙空氣壓力隨傍壓儀薄膜伸張永遠維持零壓力狀態。
5. 土壤初始之平均應力大小須合理估計。

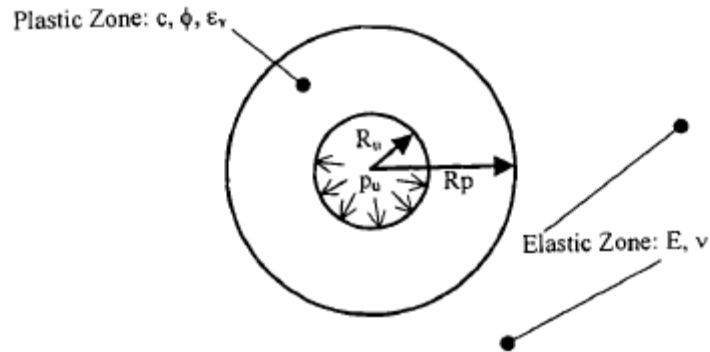


圖 15 圓柱狀擴孔伸張圖 (Vesic, 1972)

全灌漿材應用於部分分佈式光纖光柵張力計之數值模擬

圖 20 為 Contreras et al., 2007 所提出全灌漿材應用於現地水壓監測概念，並用 SEEP/W 針對其概念來模擬，其模擬結果為選用全灌漿材之透水係數與現地土壤透水係數相差 10^3 範圍內，則在相同深度於全灌漿材內，所監測的水壓會與在現地土壤所測得之水壓相同。而本研究將採用全灌漿材作為部分分佈式光纖光柵張力計現場監測之回填材料，因目前有關土壤基質吸力量測，每隔一段時間需要將張力計重新飽和，為了增加土壤基質吸力量測週期，而使用全灌漿方法，將全灌漿材視為大型高進氣陶石透水石(high-air entry ceramic)，其灌漿材之透水係數將與光纖光柵張力計所使用之陶石透水板的透水係數一致，平常無監測時，將灌漿材保持飽和狀態，直到需監測土壤基質吸力時，則將飽和灌漿材系統予以關閉，故只需將全灌材保持飽和狀態即可，不需將光纖光柵張力計重新飽和。

所以本研究將使用 SEEP/W 程式來模擬實際狀況，已決定全灌漿材之透水係數及灌漿範圍，並與全灌漿材之土水特性曲線(SDWCC)試驗相互驗證。

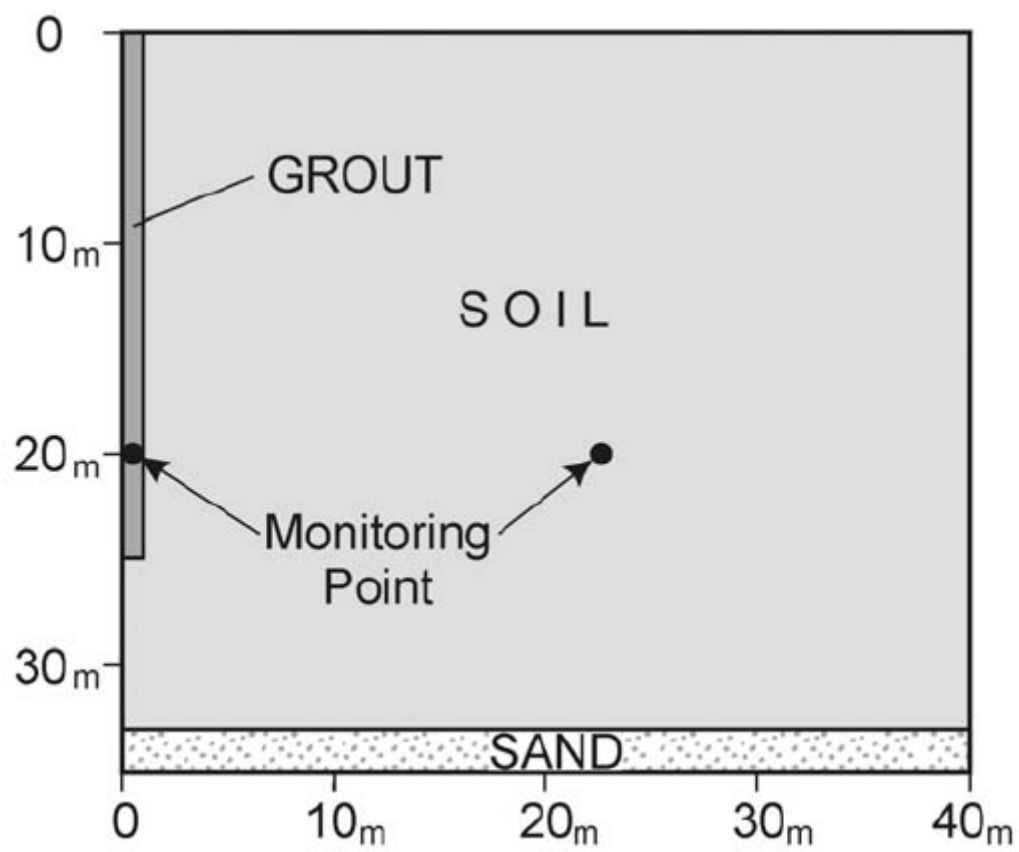


圖 16 數值模擬全灌漿材內滲流壓力 (Contreras et al., 2007)

二、研究方法

本子計畫將與總計畫以及其他子計畫配合，研發試驗/監測裝置，並在兩個試驗場址進行一系列之現地試驗與監測。其內容如下：

現場試驗場址選擇

石門水庫乃至於國內許多水庫都有嚴重之淤積現象，其集水區邊坡崩塌情況嚴重，本計畫之執行對水庫集水區邊坡整治有直接助益。本計畫將在石門水庫集水區選擇一試驗場址作為研究標的。但石門水庫集水區內坡地遙遠，颱風季節（需要收集數據時）常有交通中斷或因安全考慮而無法前往之情況，因此是以在其自然/安全情況下進行現場試驗/觀察/取樣為主。華梵大學興建於坡地，常有邊坡崩塌之發生，數年前校園內即已設有監測系統，長期量測崩積土層移動、表層土壤基質吸力與含水量之變化。受校園之便，所有在華梵大學校園內之監測系統都可輕易的加以自動化，或以人工降雨的方式改變試驗現場之入滲情況，將大為提升本研究之效率。現有非飽和土壤相關研究大多以殘餘土、風化土、膨脹土、或乾燥區域之土壤為主。本研究將針對崩積土壤做一系列非飽和情況下其行為之試驗研究，並將邊坡崩塌與降雨事件對水庫輸砂量間之關係做一評估，在學術上將有其開創性。

現場 PMT 試驗規劃

目前華梵大學校區除了設有許多相關監測邊坡滑動的監測儀器，另外也設有專門監測隨著深度變化的電子式張力計及含水量計之研究斷面。本研究計畫將在該試驗場址附近配置一可施作傍壓儀之試驗區域，進行一系列之 PMT。預計 PMT 試驗深度將在 2m 左右之非飽和土層內。傍壓儀孔位橫方向，類似 PMT 試驗深度將設置單點監測之 FBG-tensiometer (圖 8a)。在 FBG-tensiometer 監測點先以鐵鎚打擊的方法將一鋼棒貫入土中然後拔出以製造一 2m 深，15mm 直徑之孔洞。將單一 FBG-tensiometer(圖 8a)安置在一 15mm 直徑鋼管之頂端，隨預鑽之孔洞以貫入的方法置入地層內。在 PMT 試驗區域，以灑水方式改變場址土壤含水量變化，在土壤不同飽和度，乾至濕與濕至乾情況下進行一系列 PMT。在 PMT 進行過程中量測周圍土層含水量及基質吸力。PMT 試驗結果分析所得應力-應變關係曲線與不飽和崩積土層強度參數 ϕ^b 再與使用現場索取試體所做一系列非飽和 SWCC 及三軸試驗結果做比較，已確認 PMT 現地試驗之功效。PMT 現場試驗監測儀器配置如圖 17 所示。由於所有 PMT 試驗與現場土層含水量及基質吸力都在 2m 左右深度，非飽和土壤中進行，全部之鑽孔取樣作業都可以手動方式進行，成本與困難度不高。

本研究部分所得結果將是子計畫四、五與六分析所需之重要土壤參數。

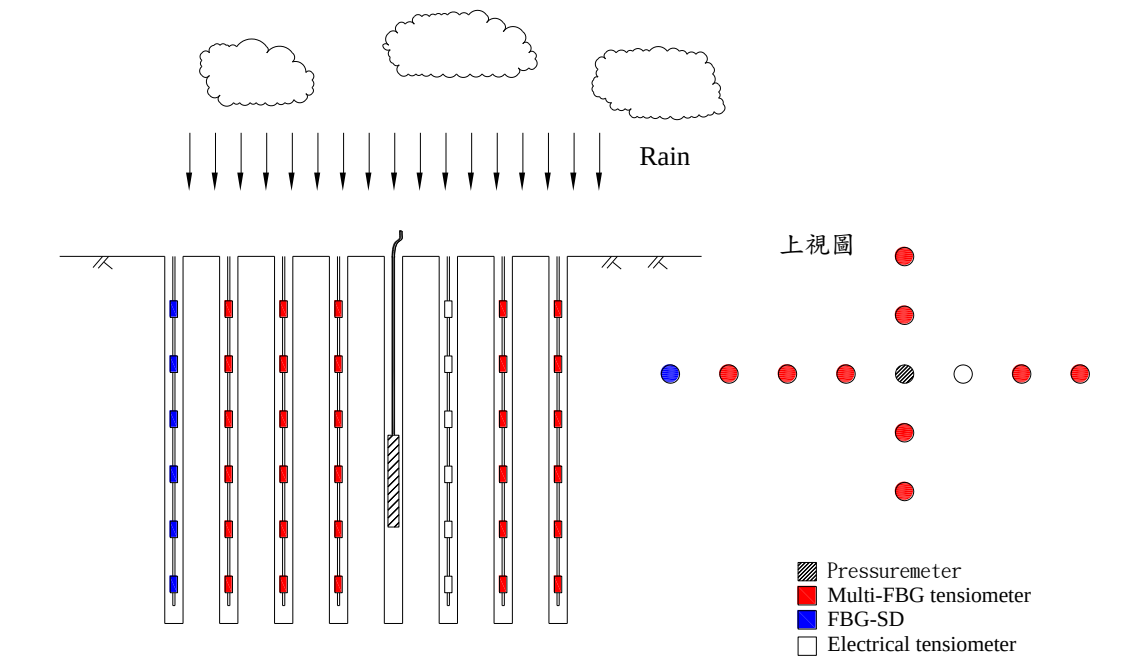


圖 17 現場監測儀器配置圖

非擾動試體取樣與室內試驗

如前述，所有 PMT 試驗與現場土層含水量及基質吸力都在 2m 左右深度，非飽和土壤中進行，全部之鑽孔取樣作業都可以手動方式進行。華梵大學已有淺層鑽孔與非擾動取樣之設備及多年之經驗。本計畫將與子計畫三配合在華梵大學以及石門水庫集水區所選擇之試驗場址進行一系列之淺層鑽孔與非擾動土壤取樣。石門水庫集水區鑽孔取樣深度預估也將在 5m 以內，以手動方式做鑽孔取樣。所得試體，將分別在交通大學與台科大進行相關之非飽和土壤試驗。室內試驗之工作將由子計畫一、三與本子計畫配合執行。所得結果提供子計畫四、五與六分析所需之土壤參數。

試驗場址邊坡穩定監測

配合華梵大學現有監測剖面以及石門水庫集水區所選擇之試驗場址，將各設置非飽和土壤層邊坡穩定之現場監測系統。按照當地地層狀況，鑽孔監測深度將在 10 至 30m 之間。鑽孔深度將視現場地質地形因素來決定。在鑽孔作業之同時也進行使用 Guelph 滲透計量測非飽和土壤孔隙水之滲透性。華梵大學已有 Guelph 滲透計，將提供本研究使用。在地下水位以下或岩層將進行 Lugeon 試驗，已提供土壤/岩層導水係數。此系列試驗所得結果將是子計畫五分析時重要之參數。使用交通大學所研發 FBG-SD，配合鑽孔及傾斜管之安裝做地層位移監測。以同一鑽孔安裝多點光纖光柵張力計（圖 8b）的方法感測地層內基質吸力（地下水位以上）以及水壓（地下水位以下）之分佈。選擇颱風季節，以全自動化資料擷取方式，紀錄暴雨前後地層內基質吸力分佈與地層位移之變化。此系列數據配合子計畫七所得結果將與子計畫二、四、五與六做相互比對與驗證。

三、成果說明

現地土壤基本物理試驗說明

以砂崙仔土壤性質而言，其土壤比重 $G_s=2.69$ ，土壤平均含水量為 7.02%，土壤液性限度為 20.3、塑性限度為 17.9、塑性指數為 2.4，土壤透水係數約為 $7.3 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ ，圖 18 為砂崙仔土壤粒徑分佈圖；而玉峰國小土壤性質，其土壤比重 $G_s=2.68$ ，土壤平均含水量為 8.81%，土壤液性限度為 27.2、塑性限度為 20、塑性指數為 7.2，土壤透水係數約為 $2.5 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ ，圖 19 為玉峰國小土壤粒徑分佈圖。

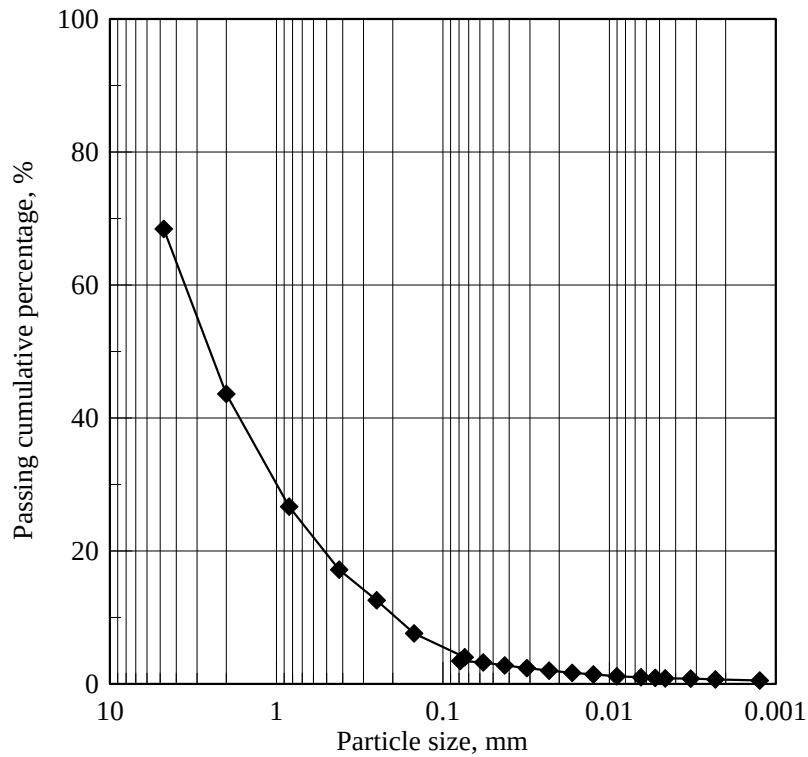


圖 18 石門水庫試驗區-砂崙仔 (田凱丞, 2008)

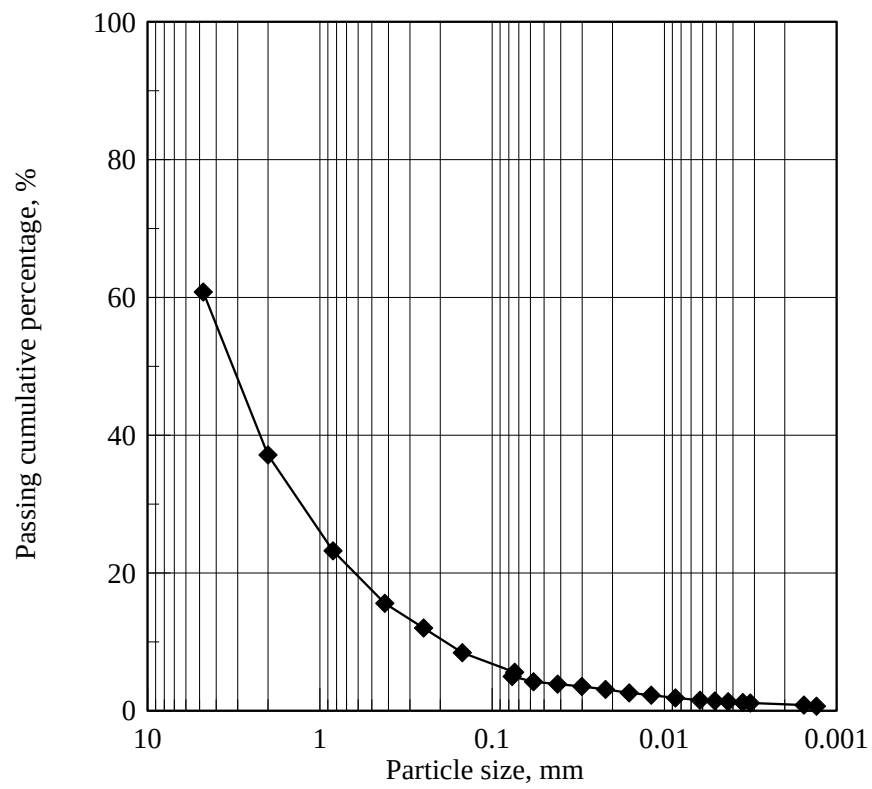


圖 19 石門水庫試驗區-玉峰國小 (田凱丞, 2008)

現地土壤土水特性曲線(SWCC)量測

在土壤土水特性曲線中，其試驗標準程序為依照 ASTM D6836-02，土壤基質吸力範圍為 0~300kPa。圖 20 及圖 21 看出在砂崙仔與玉峰國小的土壤試驗結果，其兩者之土壤進氣值(air-entry value)都非常低，約為 10kPa。

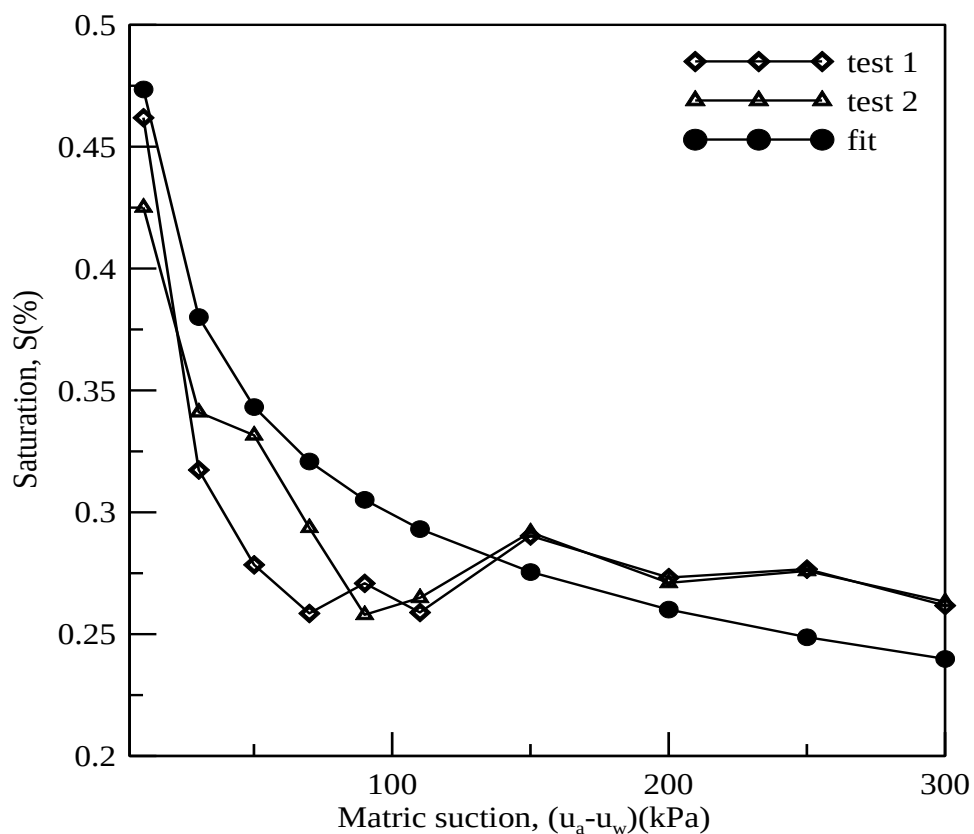


圖 20 石門水庫試驗區-砂崙仔 (田凱丞, 2008)

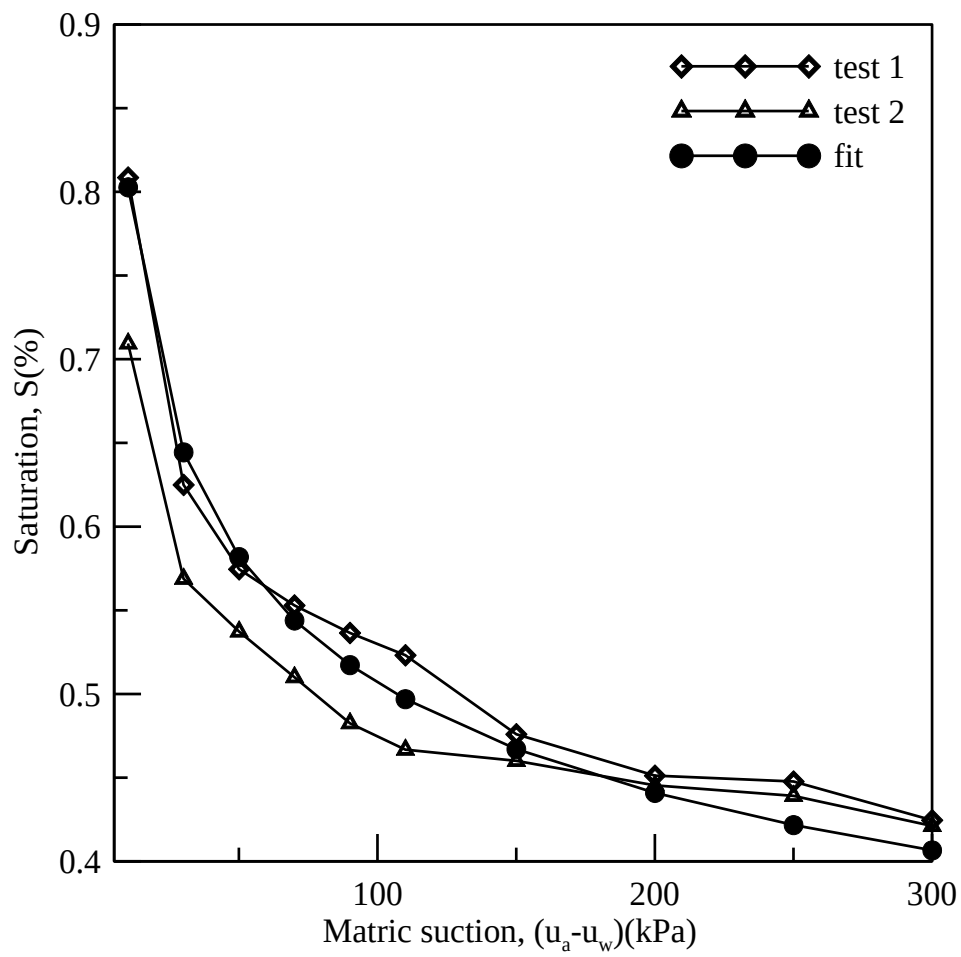


圖 21 石門水庫試驗區-玉峰國小 (田凱丞, 2008)

非飽和三軸試驗儀器驗證

傳統飽和三軸儀器無論是試體受剪動時，是否有排水與不排水均可從量測試體剪動過程時之水壓變化或排出試體水之體積，得到試體體積變化過程。然而，非飽和三軸試驗中，因試體為非飽和狀態，若要量得試體受剪動時的體積變化，則無法從量測試體內部水壓變化來反算其體積變化。因此，Ng et al., 2002a 提出以雙室(double cell)的方法，來量測試體剪動過程之體積變化，其主要以高靈敏度之差壓計來量測外部參考水位高程(reference water level)與內室(inner cell)的壓力變化，圖 22、圖 23 為全光纖式非飽和三軸儀器構造示意圖，由於光纖感測不易受到電磁波影響，所以在量測過程不易雜訊干擾，故將非飽和三軸儀器量測設備更改為光纖感測系統，如載重元(load cell)、水壓計(piezometer)、位移計(LVDT)及差壓計(differential pressure transducer)。在光纖式載重元方面，其可感應 1N 之變化量，光纖式水壓計可感應 0.3kPa 的水壓力變化，光纖式位移計感測機制為採用 Ho et al., 2006 所發展節裡式偏斜儀設計理念，其在受力面處設計一傾斜面(1:1)，以增加量測之靈敏度，如圖 24 所示。當試體受剪動過程時，試體產生軸向位移，其試體頂蓋上之推動鋼片，將沿著位移計上之斜面滑動而使得位移計產生水平向之位移，其可感應 0.05mm 之位移變化量。在光纖式差壓計感測方面，其可感應 0.004kPa 之變化量(約 0.13cm^3)，圖 8 至圖 28 分別為上述光纖式感測器標定結果圖。

本研究之非飽和土壤三軸試驗方法採用定含水量方法(constant water content, CW)，其給予試體一固定之基質吸力下，剪動過程中不排水，且須量測試體在剪動時的水壓變化，並記錄試體內部所激發超額孔隙水壓的大小，而剪動速率為 0.012mm/min，圖 29 至圖 30 為針對試體在同一基質吸力(30kPa)下之重複性試驗，其驗證光纖式非飽和三軸儀器之可行性，因此，若在固定的圍壓狀態下，改變土壤不同基質吸力，可得到不同吸力狀態下之剪力強度，進而求得因基質吸力所貢獻之強度參數 ϕ'_b ；若固定一基質吸力，改變不同的圍壓狀態，則可得到土壤顆粒之摩擦角 ϕ' 。

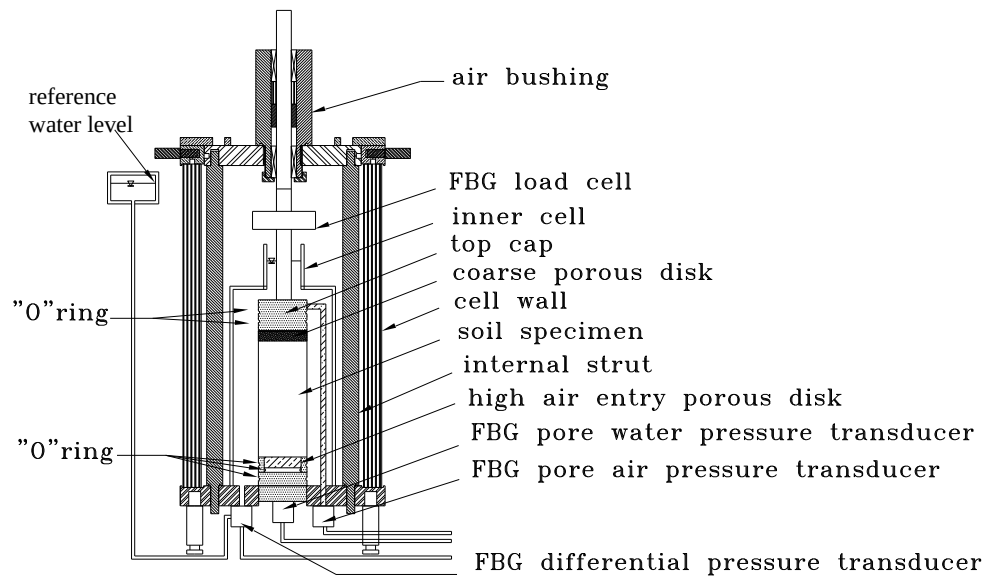


圖 22 全光纖式非飽和三軸儀器示意圖

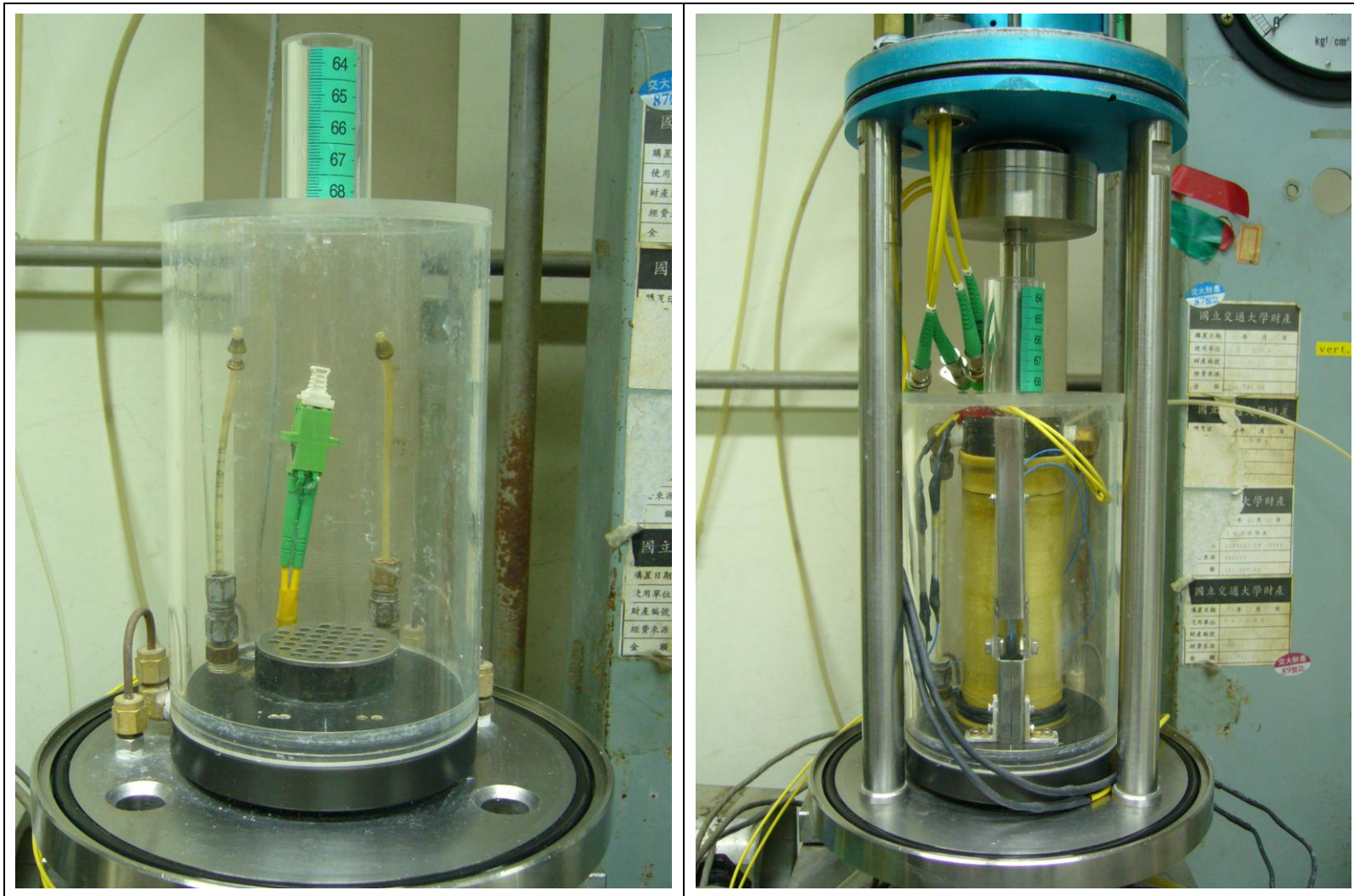


圖 23 全光纖式非飽和三軸儀器實體圖 (田凱丞, 2008)

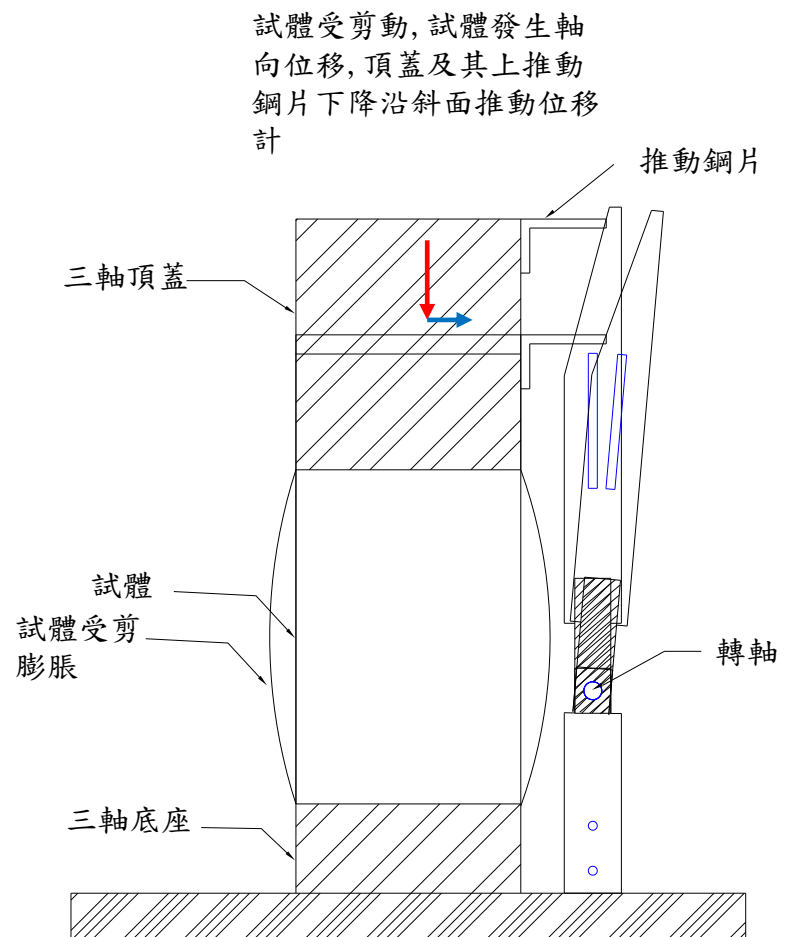


圖 24 光纖式位移感測器之傾斜面設計機制示意圖 (田凱丞, 2008)

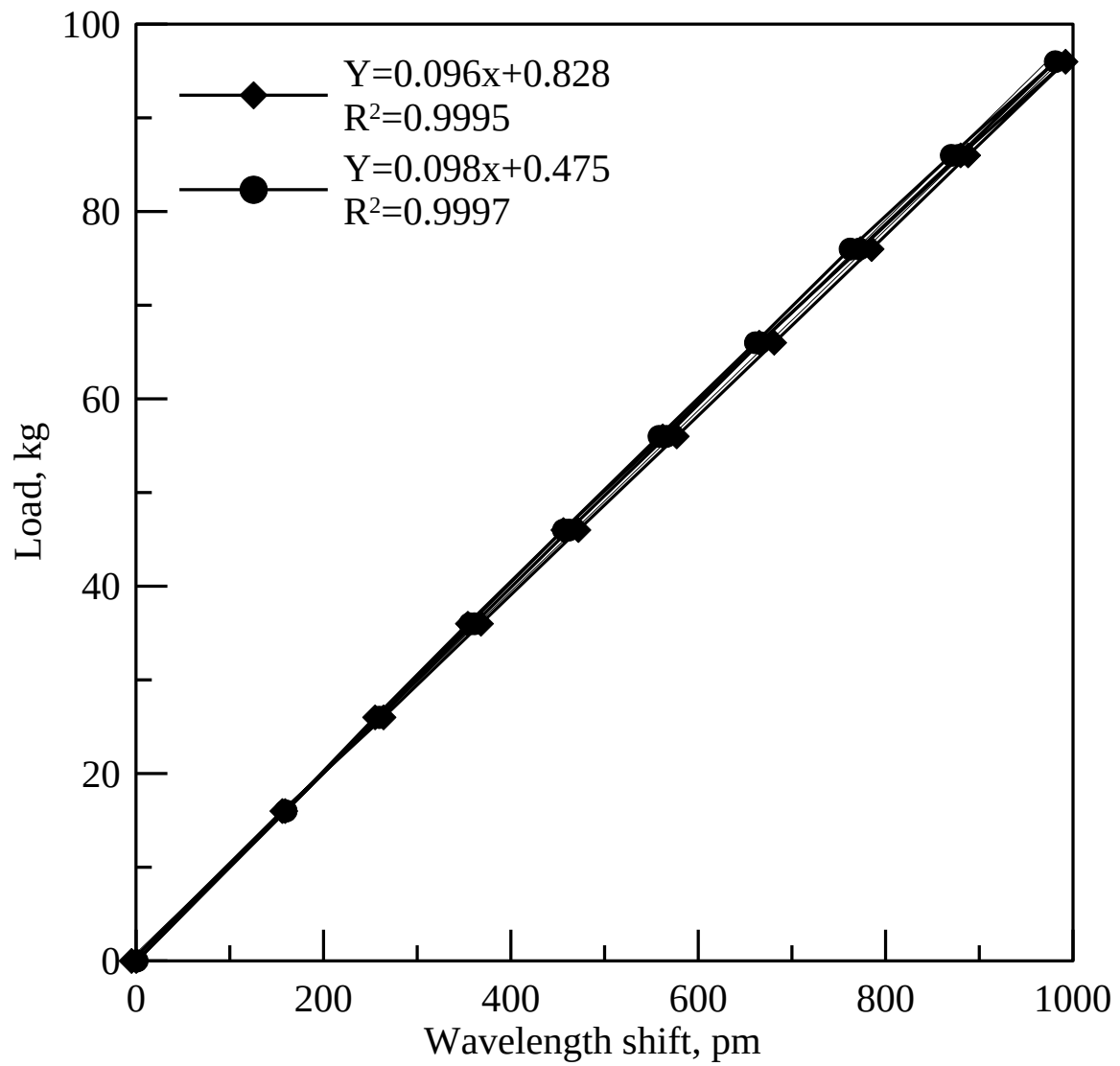


圖 25 光纖式荷重元標定結果圖 (田凱丞, 2008)

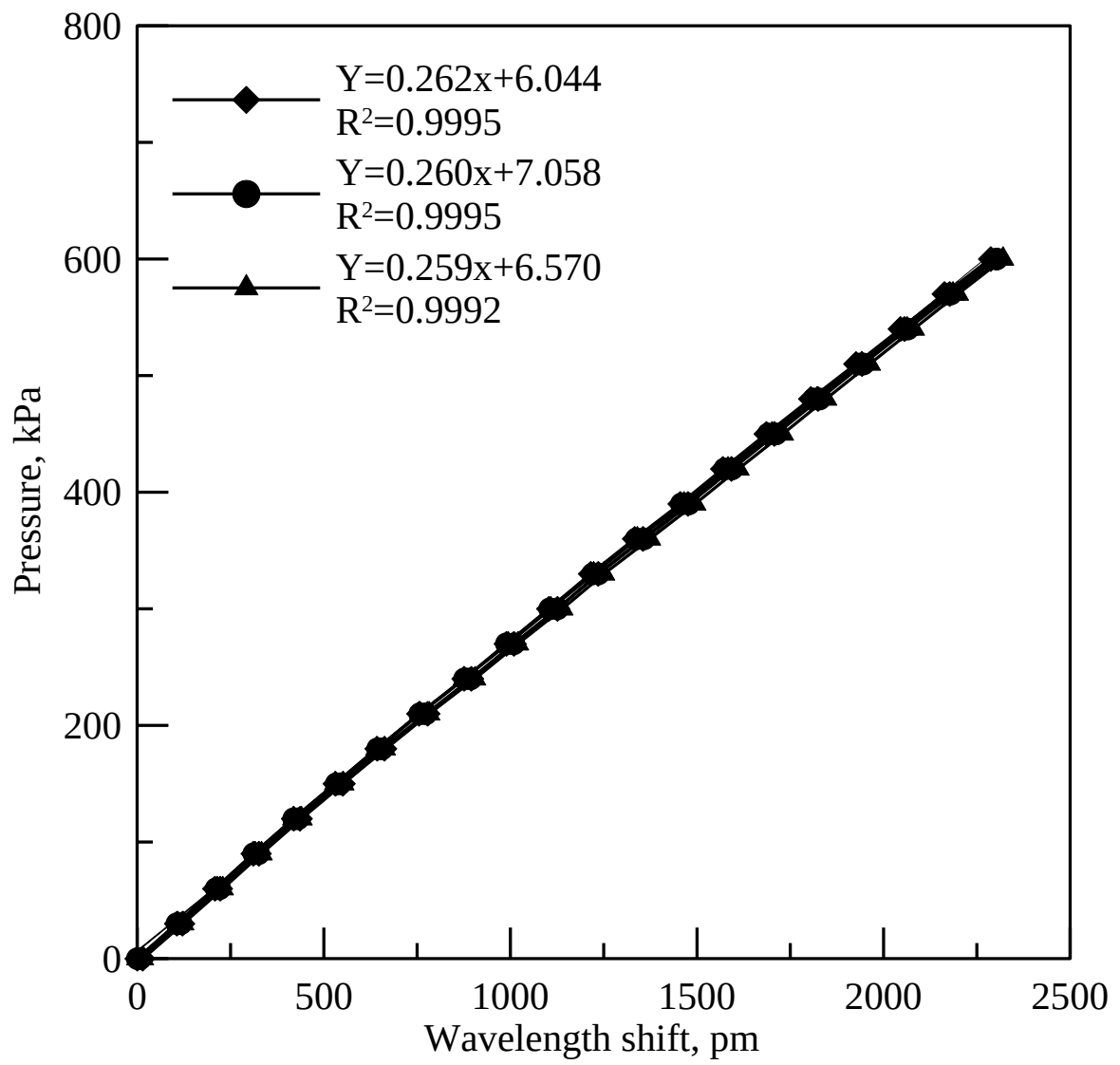


圖 26 光纖式水壓計標定結果圖 (田凱丞, 2008)

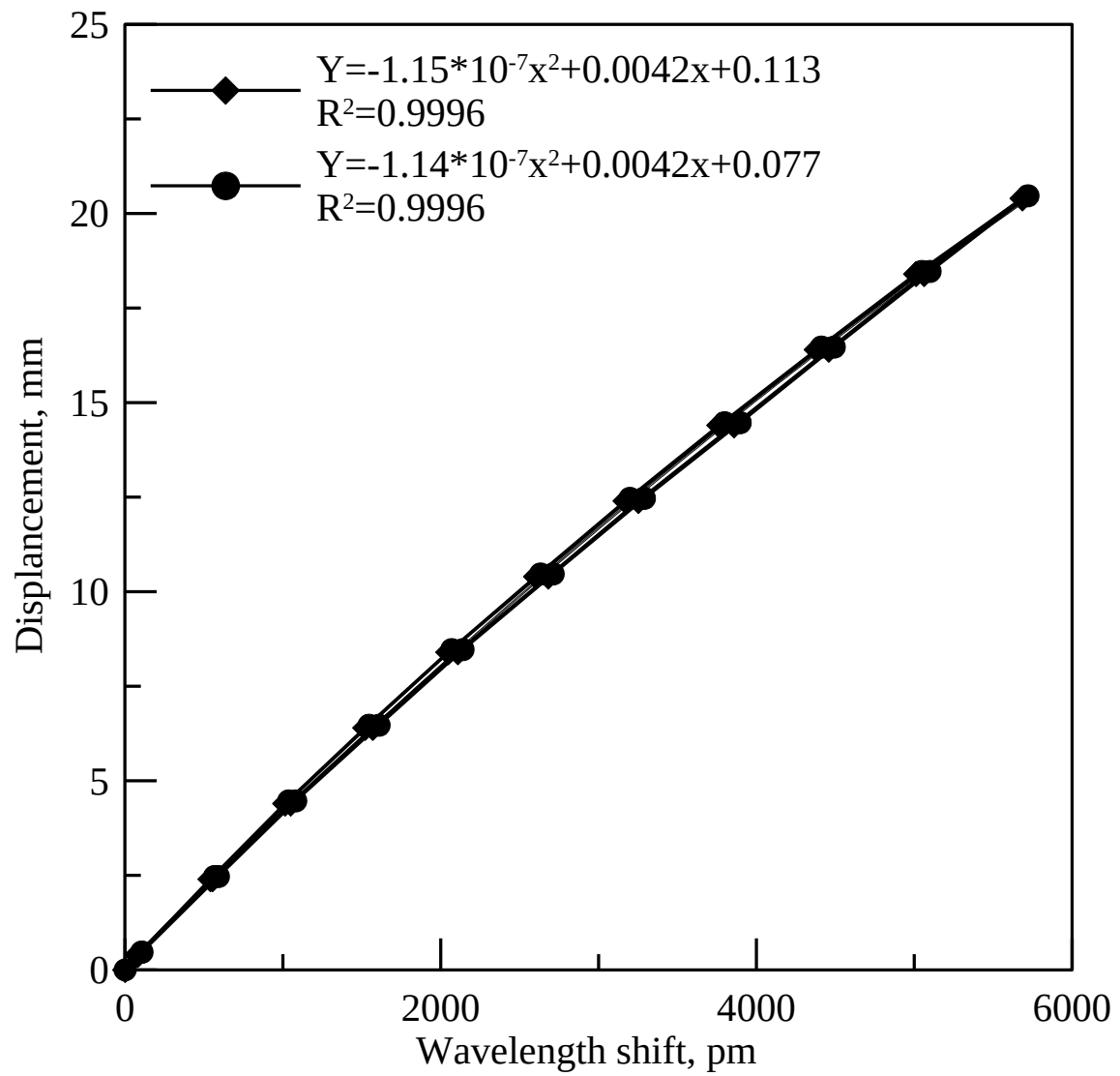


圖 27 光纖式位移計標定結果圖 (田凱丞, 2008)

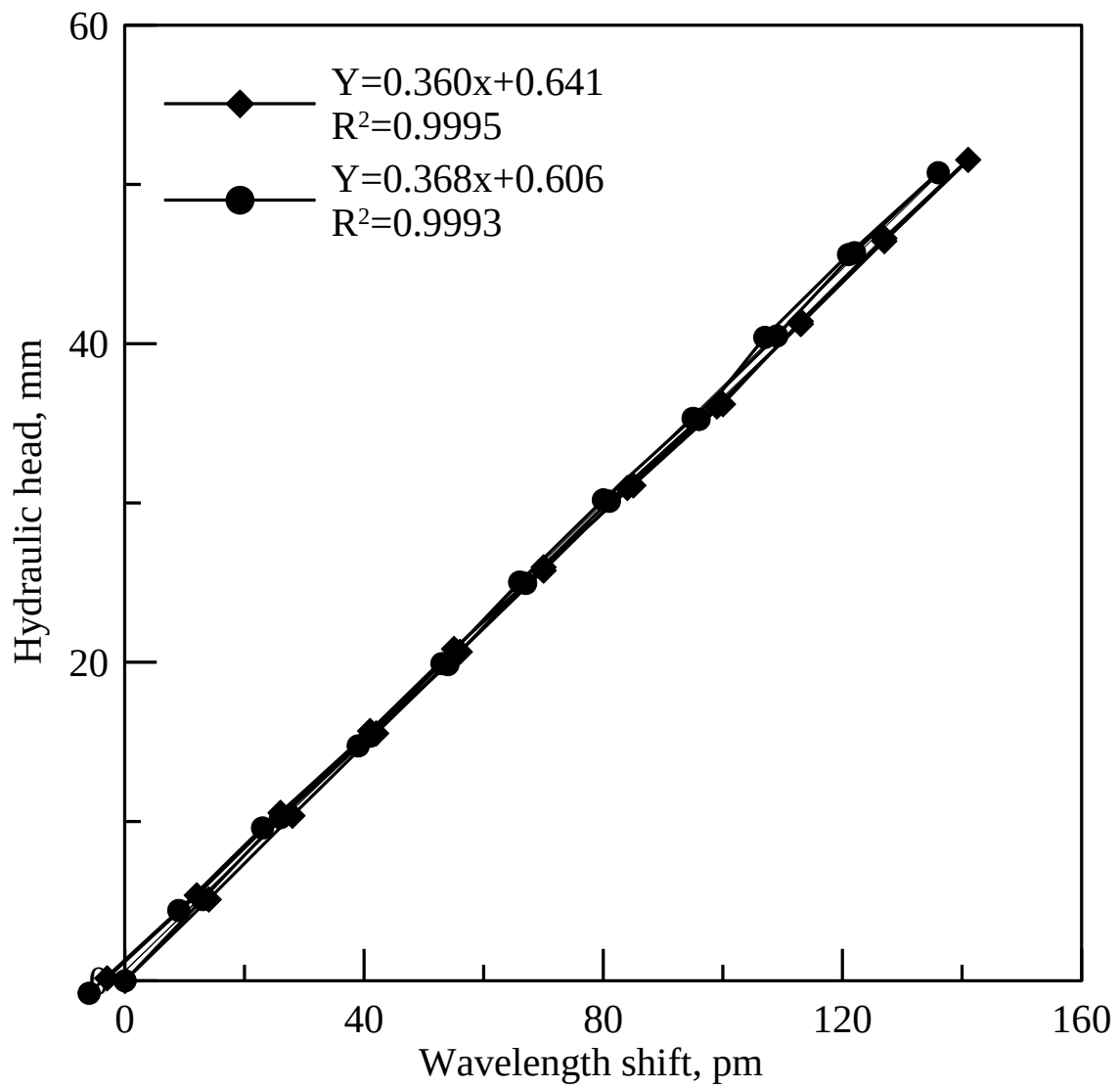


圖 28 光纖式差壓計標定結果圖 (田凱丞, 2008)

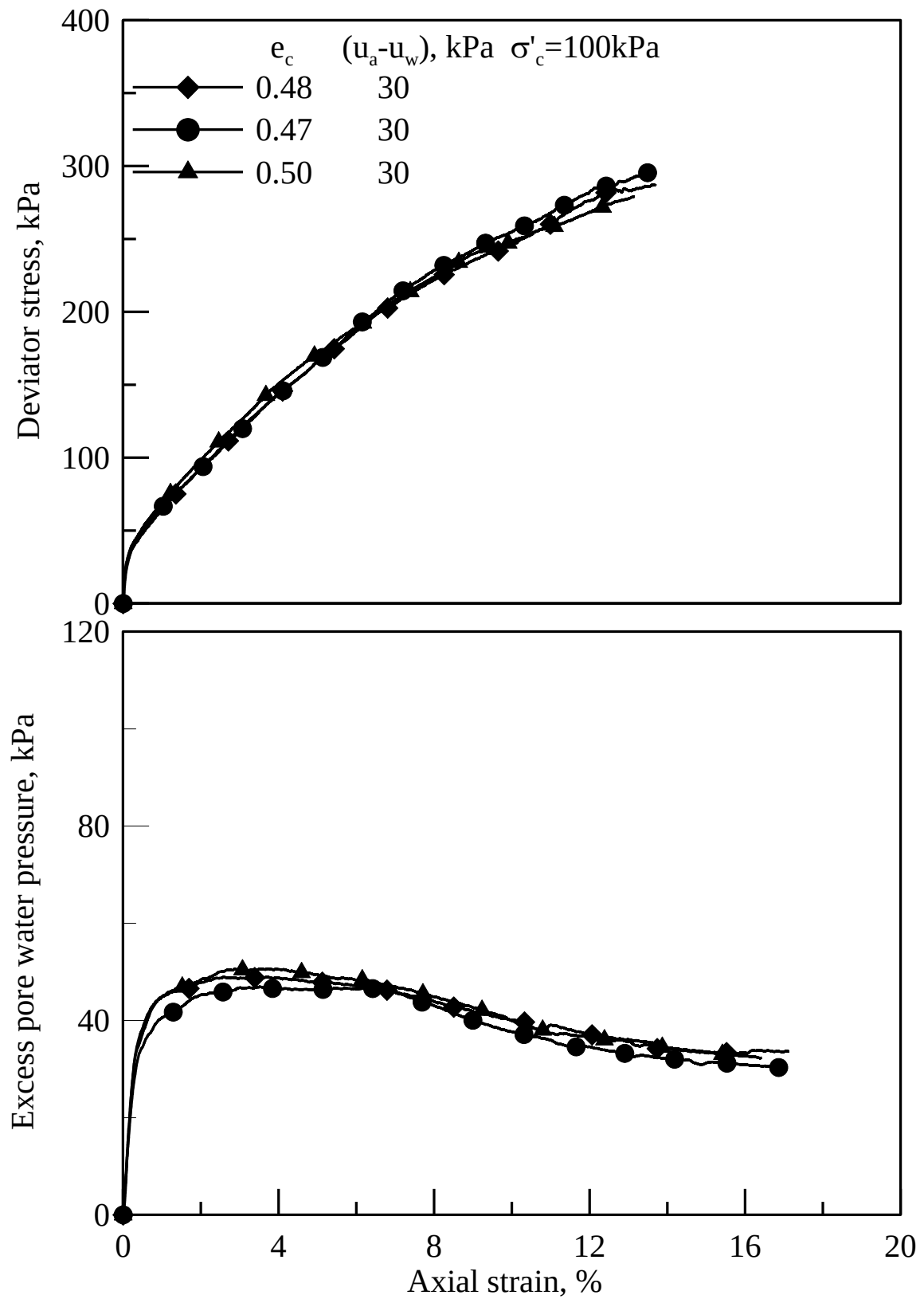


圖 29 土壤基質吸力為 30kPa 之重複性試驗-軸向應變與超額孔隙水壓及軸差應力 (田凱丞, 2008)

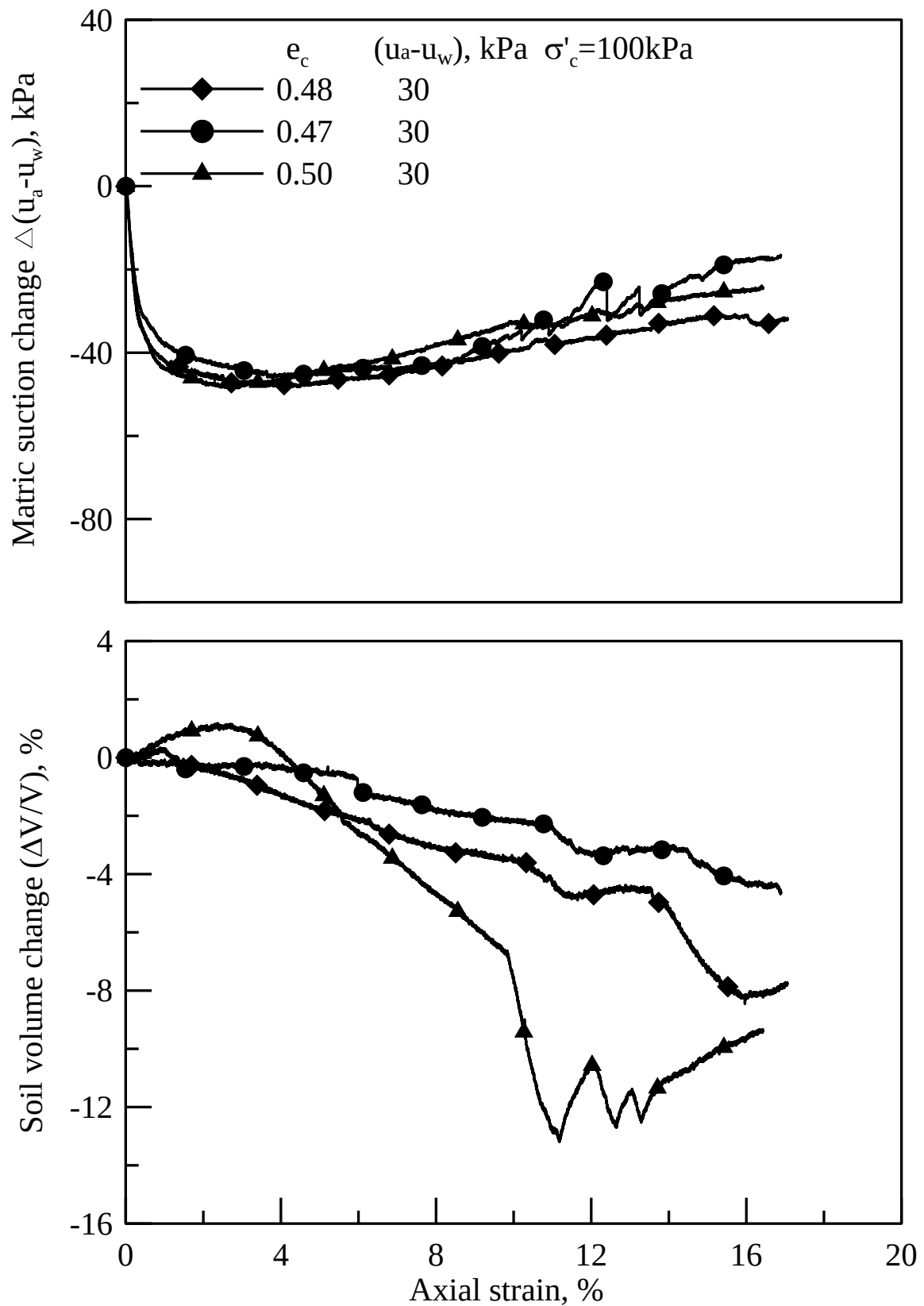


圖 30 土壤基質吸力為 30kPa 之重複性試驗-軸向應變與體積變化及基質吸力 (田凱丞, 2008)

現地土壤非飽和三軸試驗

在非飽和三軸試驗中，目前完成玉峰國小非飽和三軸試驗，其試驗所施加之土壤基質吸力為 30kPa、90kPa 及 200kPa，其試驗結果如圖 31 及圖 32 所示。而土壤基質吸力所提供之剪力強度參數 ϕ^b 為 2.3 度。

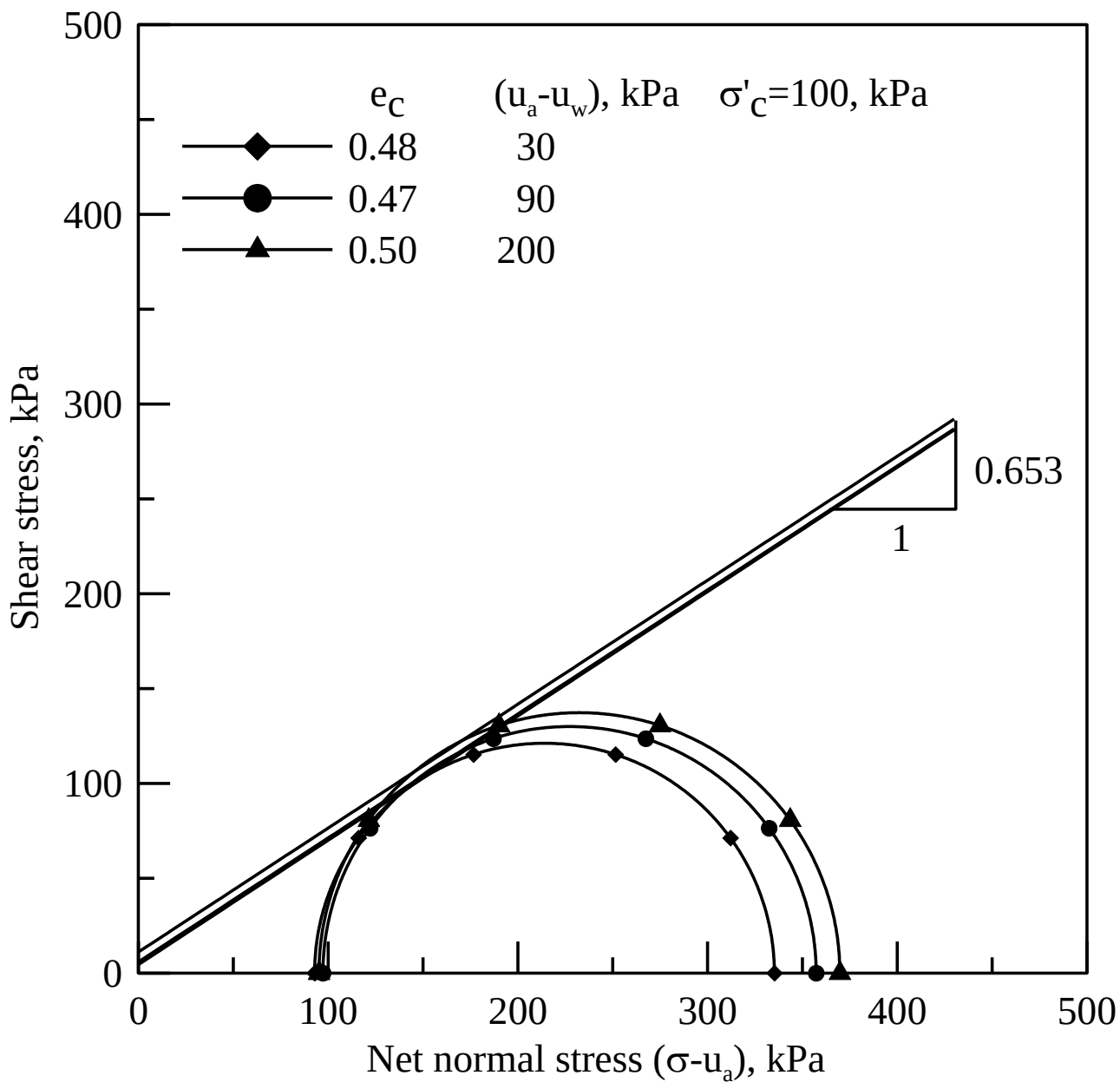


圖 31 石門水庫試驗區-玉峰國小(破壞包絡線)

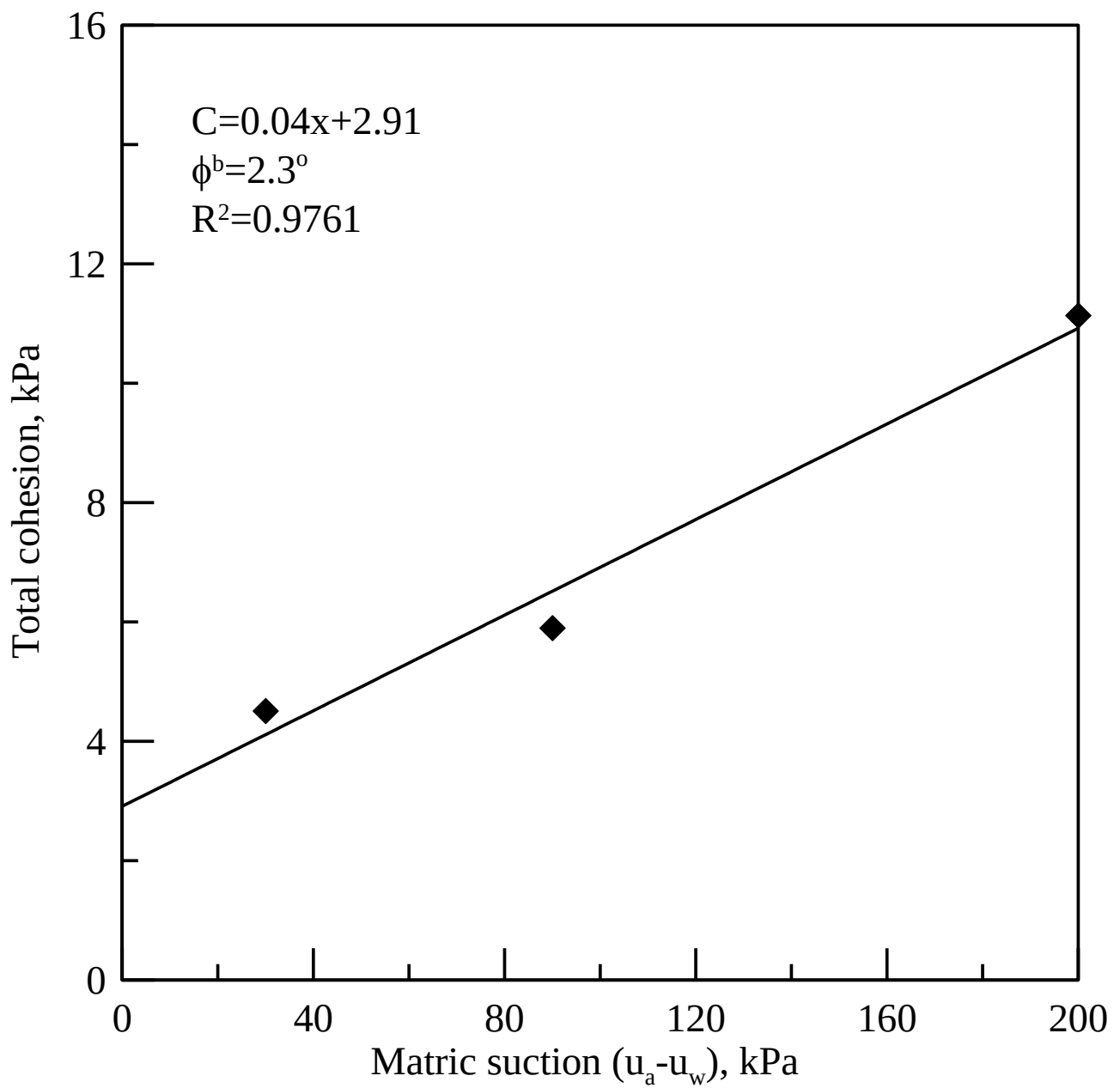


圖 32 石門水庫試驗區-玉峰國小(ϕ^b 線性回歸)

現地土壤基質吸力(matric)量測

砂崙仔與玉峰國小現場基質吸力量測結果分別為 8kPa 及 21kPa，如圖 35、圖 36。而土壤基質吸力量測所使用之感測器為將現有 Jet Full 張力計安裝一光纖光柵張力計且與傳統真空壓力計(vacuum gage)相互比較，以初步測試光纖光柵張力計之穩定性，圖 33 及圖 34 為現場土壤基質吸力量測圖。



圖 33 石門水庫集水區砂崙仔現地土壤基質量測



圖 34 石門水庫集水區玉峰國小現地土壤基質吸力量測

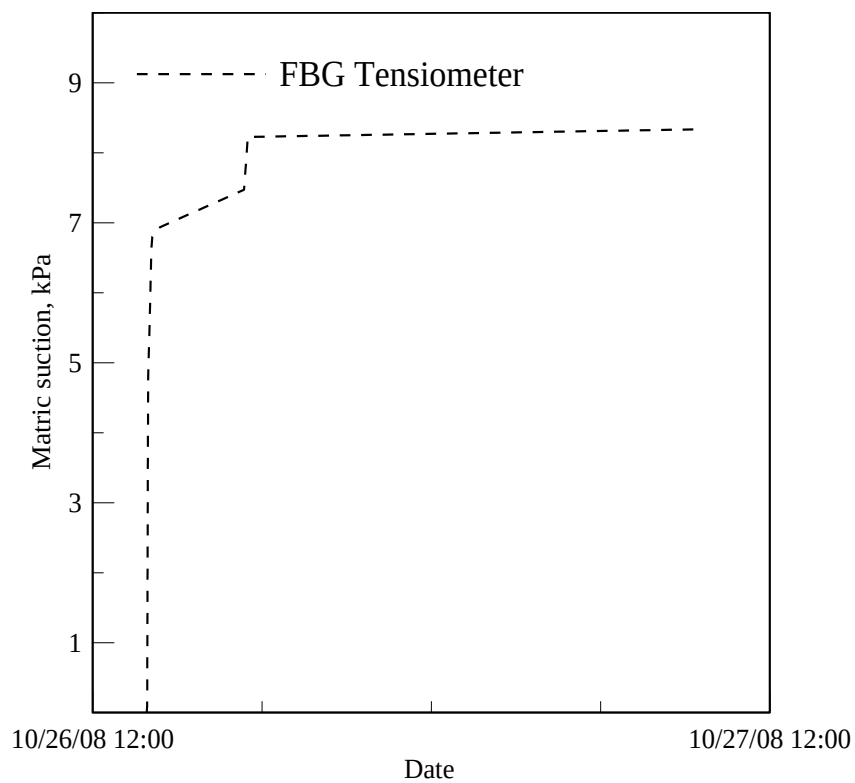


圖 35 石門水庫試驗區-砂崙仔

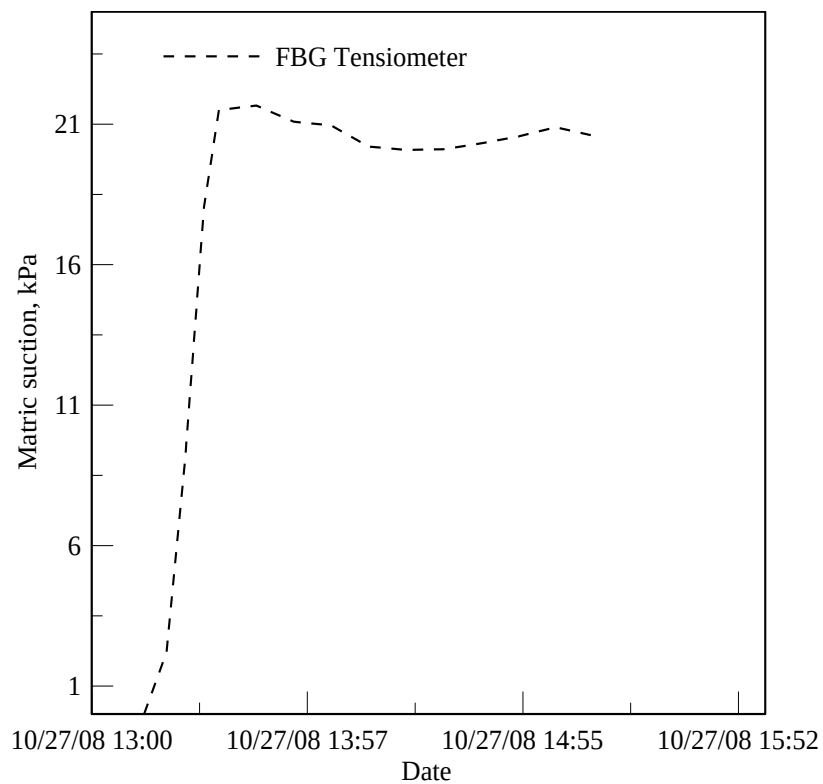


圖 36 石門水庫試驗區-玉峰國小

傍壓儀應變量測系統改良與測試

圖 13 與圖 14 為本研究所採用之傍壓儀裝置構造圖，當傍壓儀向外膨脹時，則傍壓儀內部 6 組應變力臂會向外伸張，即可量測土壤之徑向應變或體積應變。另外，傍壓儀在應用於現地應力-應變量測之前，需做傍壓儀的系統勁度量測與外圍薄膜的壓縮量量測，以求得現地土壤真實之徑向應變量與勁度。

圖 37 與圖 38 為光纖式傍壓儀內部之高低壓氣壓計，為了增加量測上的精確度與靈敏度，當於土壤施作傍壓儀試驗時，則以低壓之 FBG 氣壓計的讀數為主，此氣壓計的感測壓力範圍 0~800kPa，可感應最小壓力為 0.01kPa；若於岩石施作傍壓儀試驗，則以高壓之氣壓計為主，該壓力計感應範圍為 0~10MPa，可感應 0.1kPa 之壓力變化。圖 39 為光纖式傍壓儀應變量感應部分實體圖，圖 40 為將傍壓儀應變量感應部分進行標定實體圖，圖 41 至圖 42 為將光纖式傍壓儀組裝完成圖，圖 43 為傍壓儀氣壓感應裝置與光纖訊號傳輸端之實體圖。

圖 44 至圖 47 為光纖式傍壓儀內部彈簧鋼片標定結果，其每一方向可感應約 0.0016mm 之位移量，而傍壓儀之直徑約為 74mm，當傍壓儀外圍薄膜膨脹時，約可感應之最小應變量為 4.3×10^{-5} 之應變量，因此，可由試驗過程中，加減壓迴圈計算出現地之模數遞減曲線，圖 48 與圖 49 為光纖式傍壓儀進行薄膜勁度測試，其目的為測式薄膜之圍束力量，當試驗完畢後，原始數據之擴張壓力必須扣除所對應當時應變的薄膜圍束壓力，才可求得真正之土壤擴張壓力，圖 50 為光纖式傍壓儀系統勁度測試，其目的為扣除薄膜之壓縮量，當施作於高壓力之土壤或岩石時，傍壓儀施加至高壓力時，因薄膜外部不易變形，且傍壓儀壓力持續增加，可能使得薄膜產生壓縮量，因此所測得的應變量必須修正。圖 51 為該現場施作傍壓儀試驗之結果圖，圖 52 現場剪力模數遞減曲線結果圖。

然而，傍壓儀於現地量測可求出不同應變量下之剪力模數、現地土壤水平應力、現地土壤之降伏應力與土壤摩擦角等。因此，在非飽和土壤力學理論中，其主要可由 $(\sigma - u_a)$ 與 $(u_a - u_w)$ 兩種狀態來描述

非飽和土壤之力學行為(Fredlund and Morgenstern, 1977)，因此， $(\sigma - u_a)$ 部分則可由傍壓儀之徑向壓力量測得出； $(u_a - u_w)$ 則必須以張力計量測土壤之基質吸力或量測土壤之土水特性曲線。

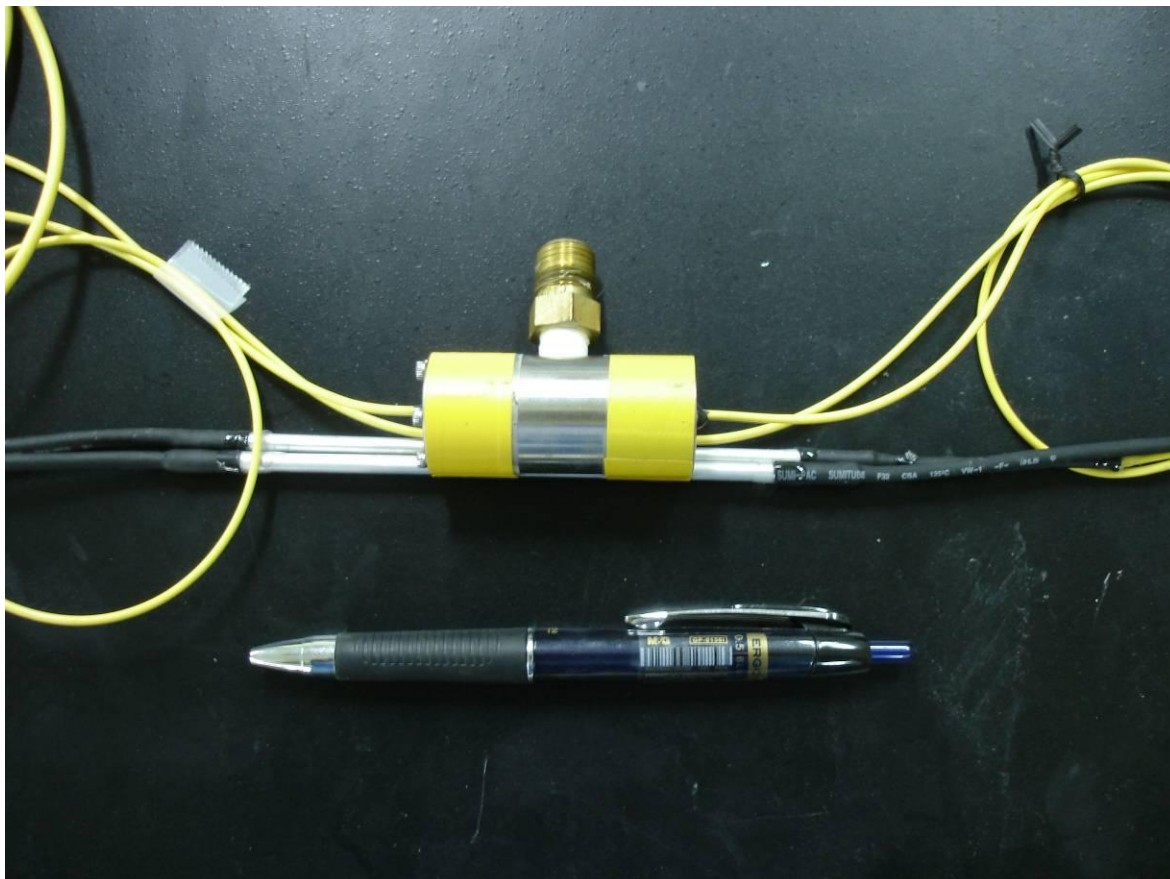


圖 37 低壓力 FBG 壓力計實體圖(範圍 0~800 kPa)

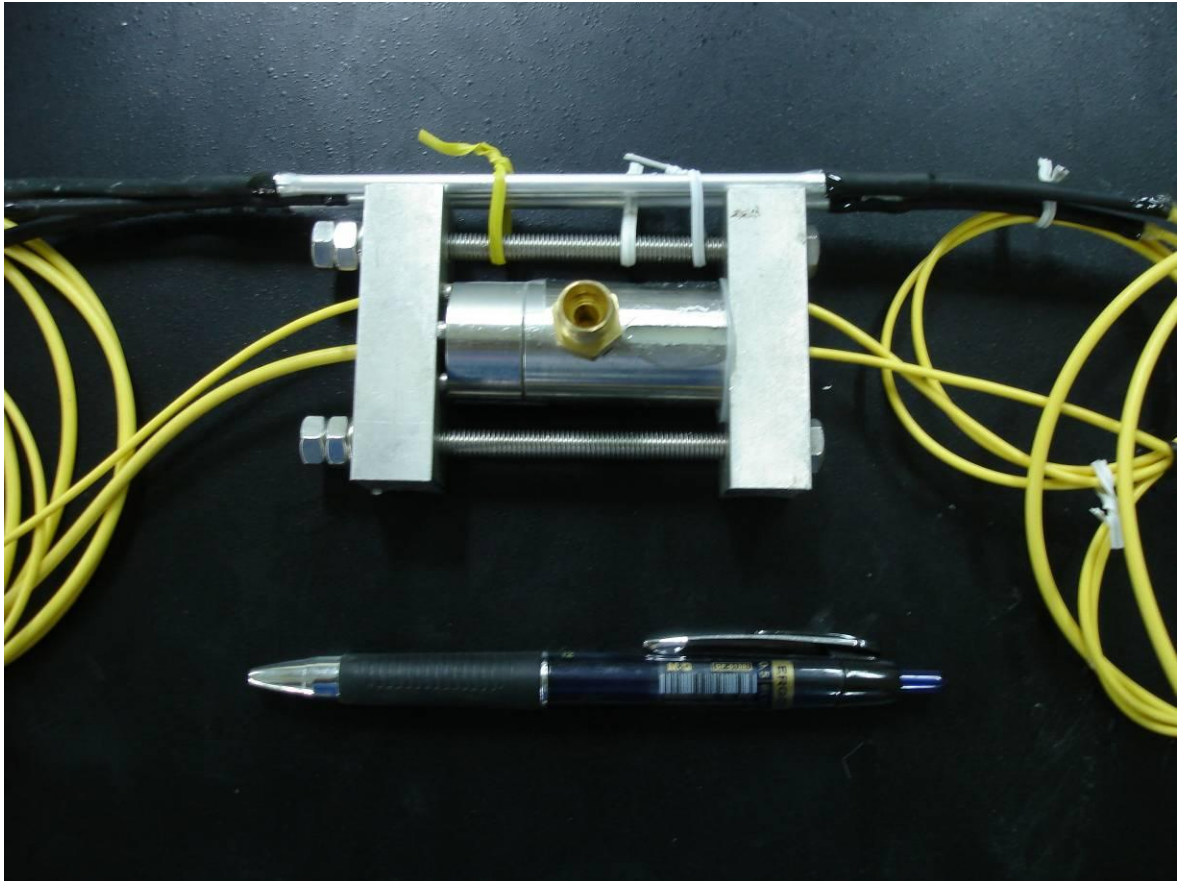


圖 38 高壓力 FBG 壓力計(範圍 0~10 MPa)



圖 39 全光纖式傍壓儀內部彈簧鋼片感測單元實體圖

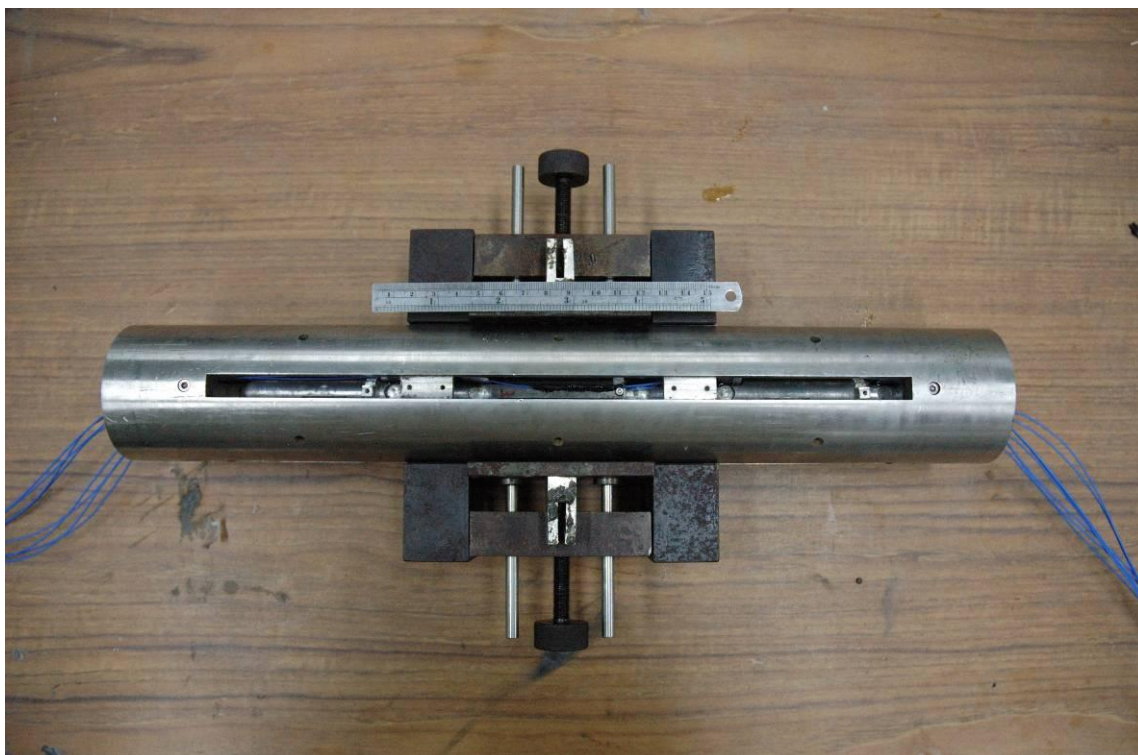


圖 40 全光纖式傍壓儀內部彈簧鋼片標定試驗圖

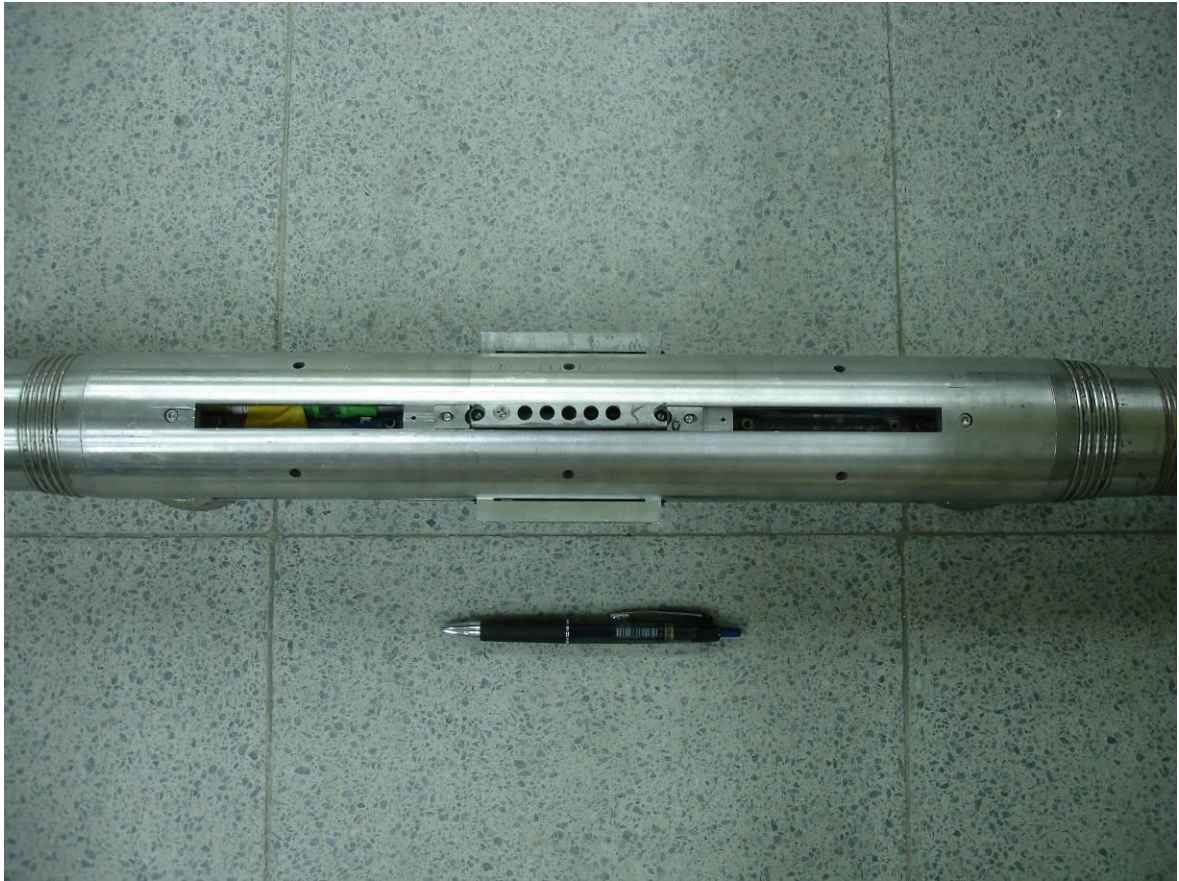


圖 41 全光纖式傍壓儀內部構造圖



圖 42 全光纖式傍壓儀實體圖

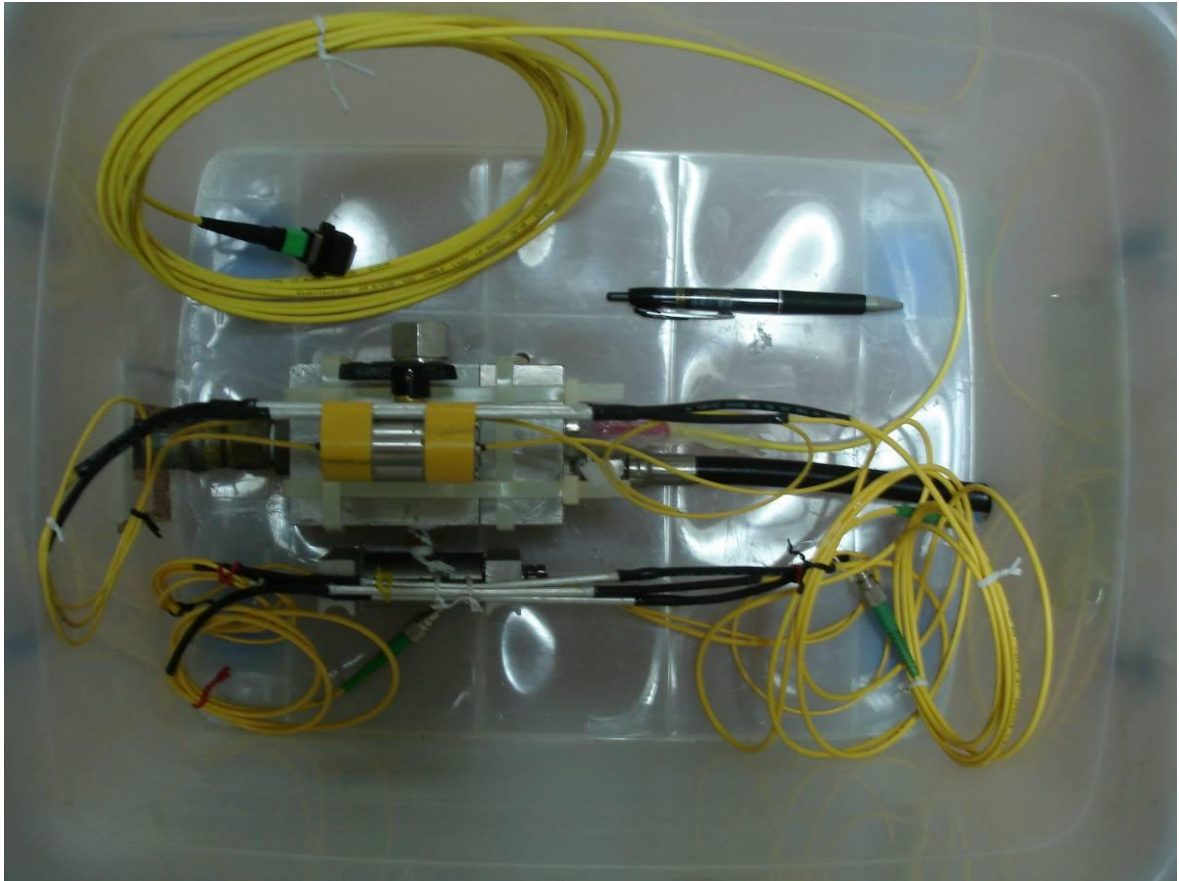


圖 43 全光纖式傍壓儀壓力與溫度及訊號接收端圖

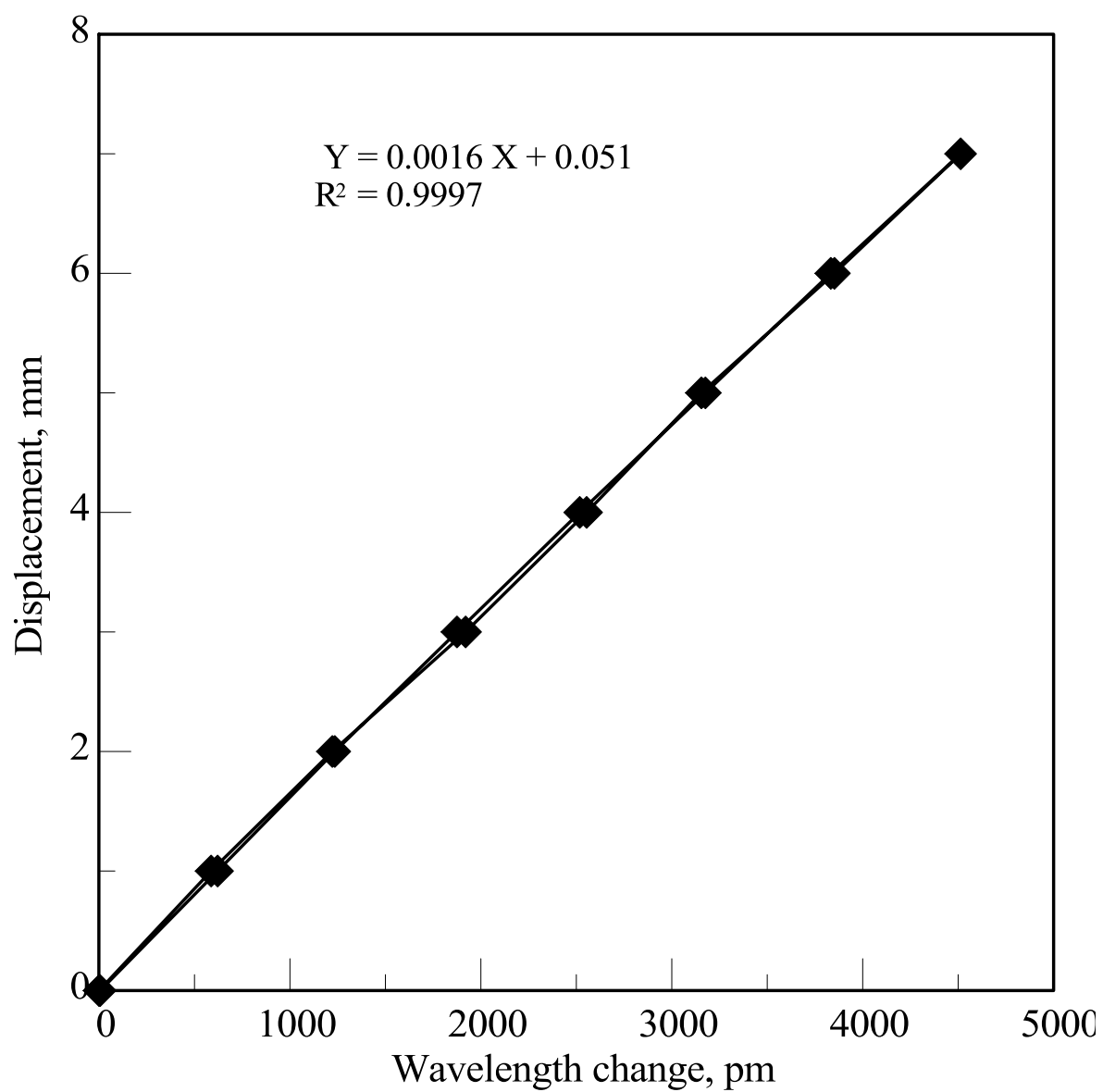


圖 44 全光纖式傍壓儀內部 X1 方向彈簧鋼片標定結果圖

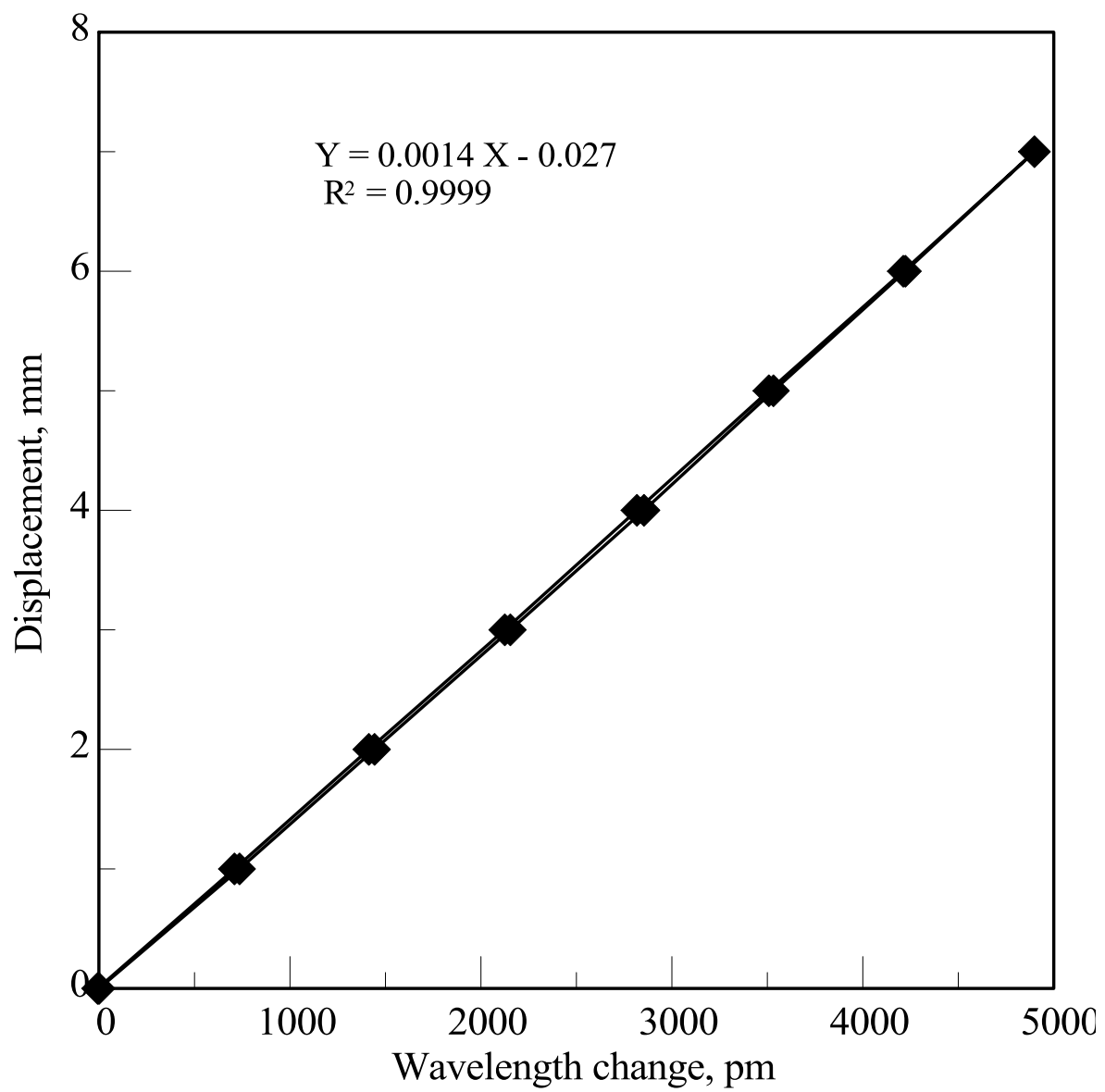


圖 45 全光纖式傍壓儀內部 X2 方向彈簧鋼片標定結果圖

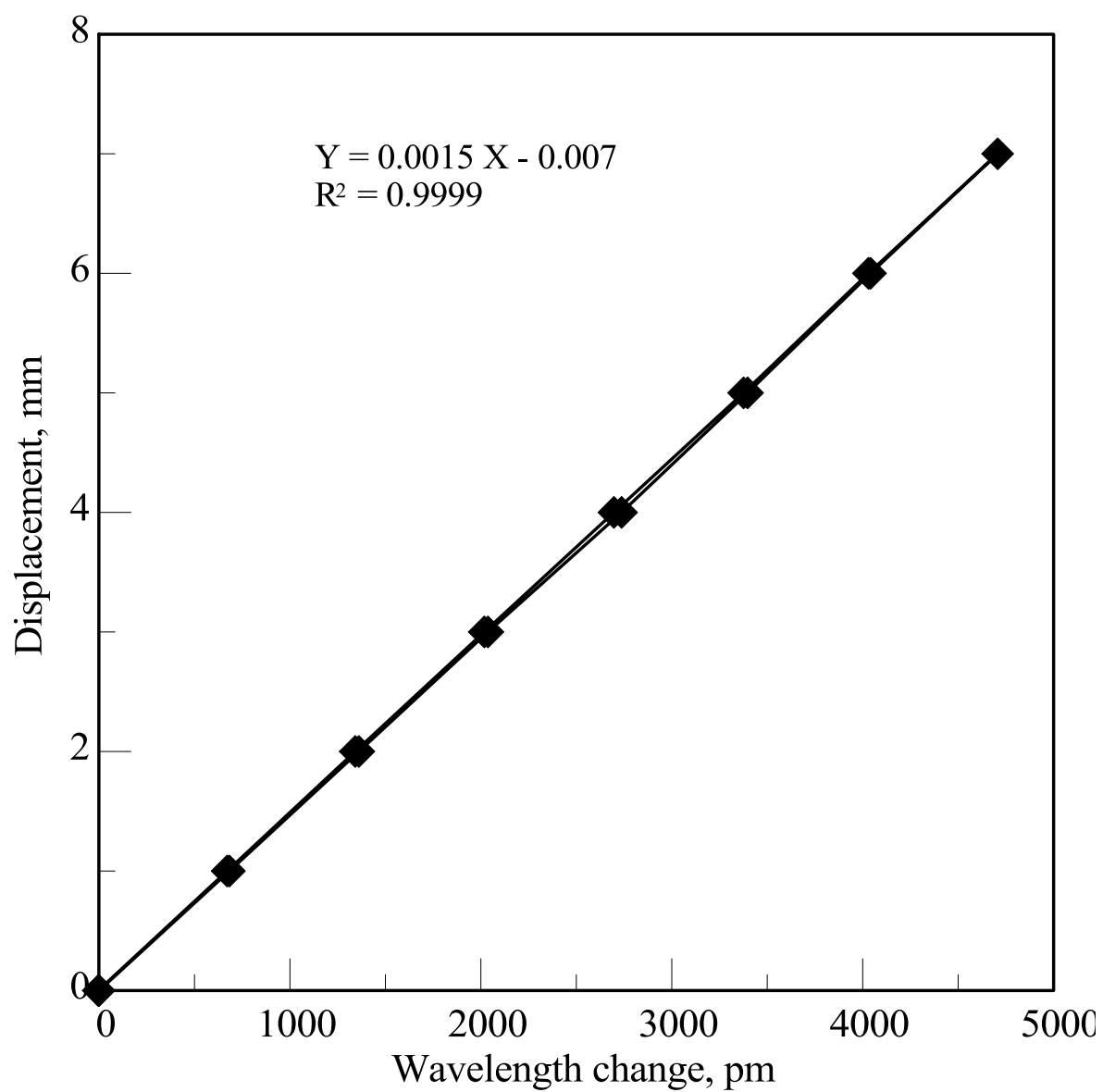


圖 46 全光纖式傍壓儀內部 Y1 彈簧鋼片標定結果圖

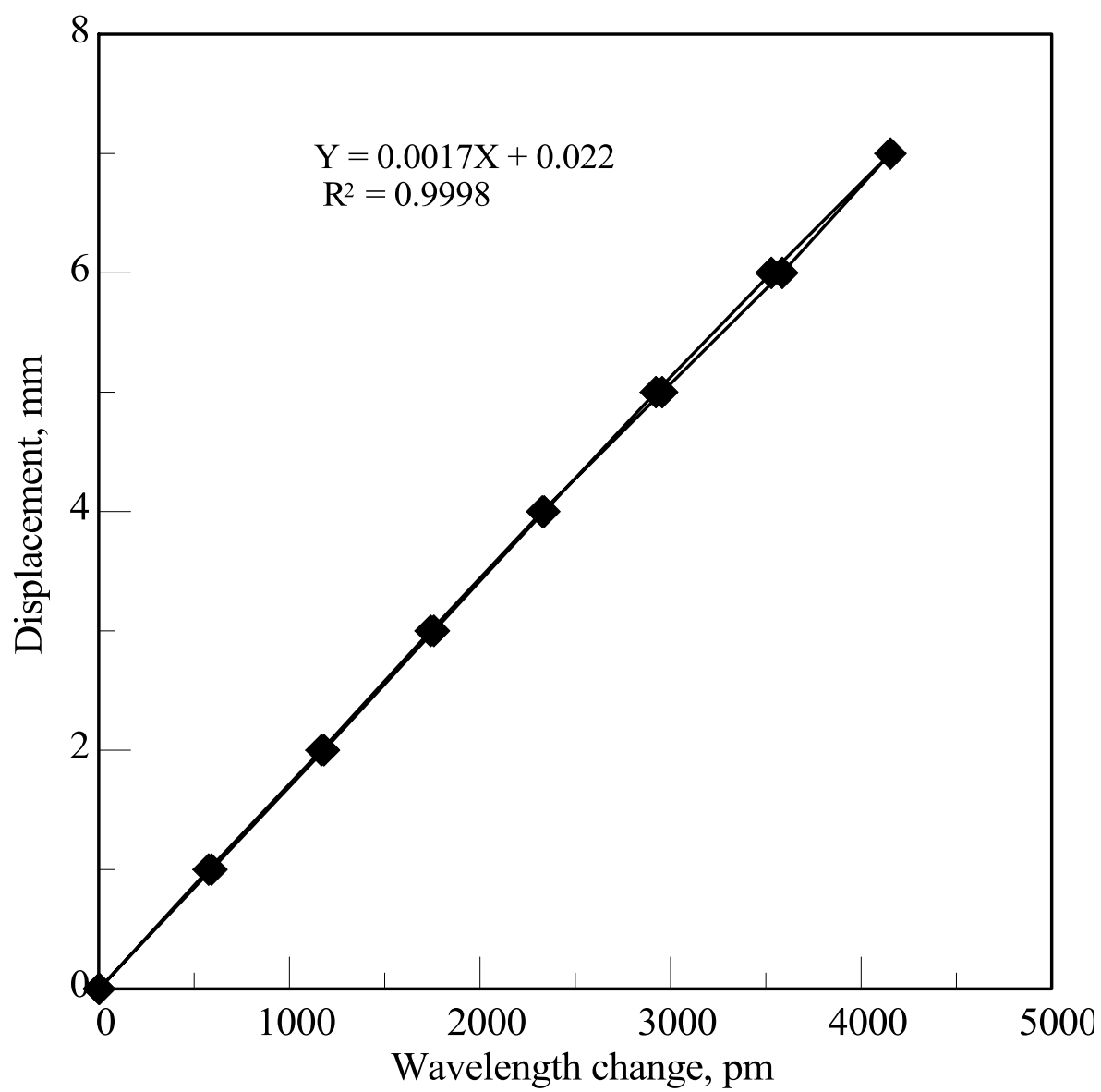


圖 47 全光纖式傍壓儀內部 Y2 彈簧鋼片標定結果圖

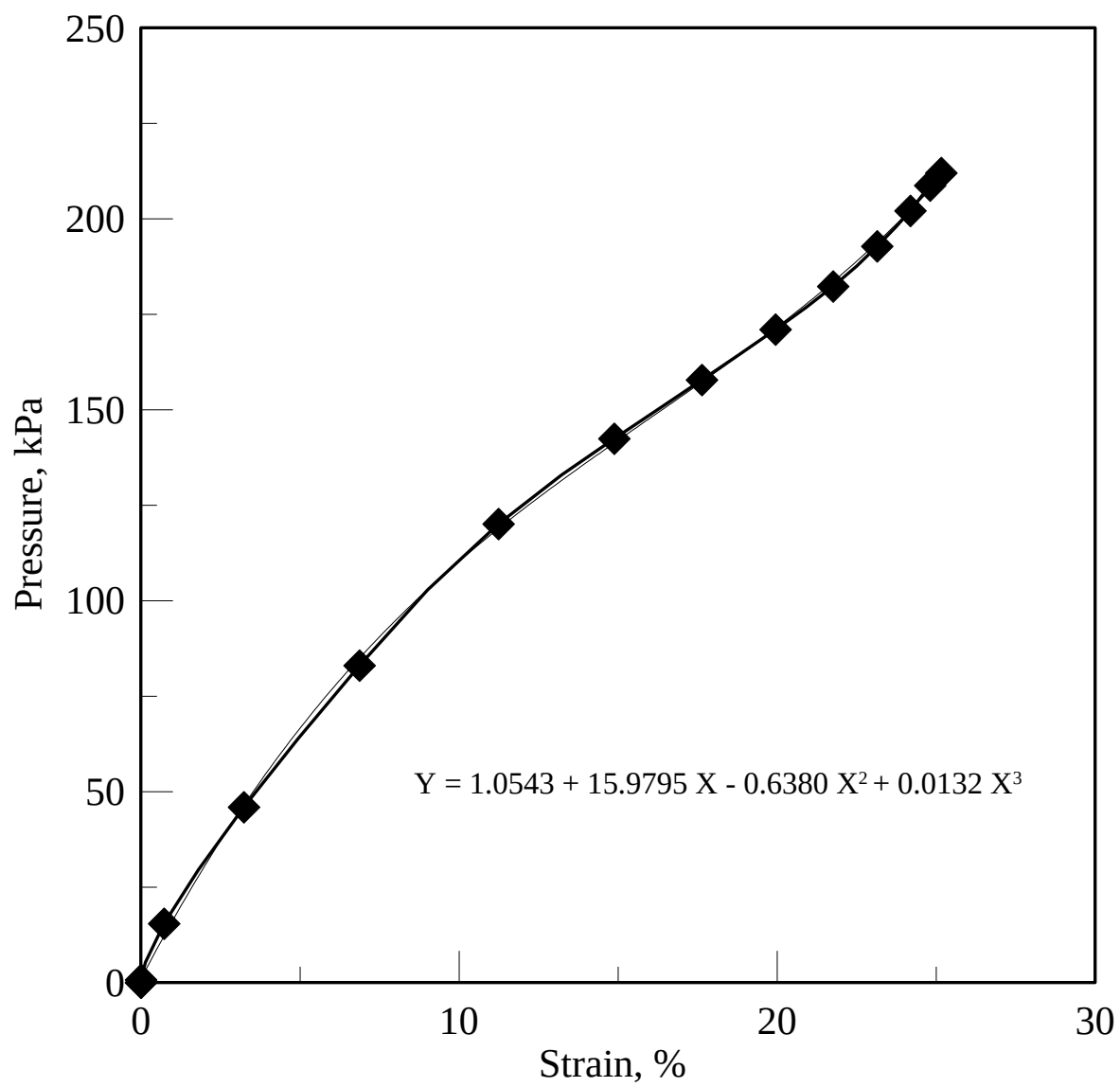


圖 48 全光纖式傍壓儀薄膜勁度測試(低壓力計量測)

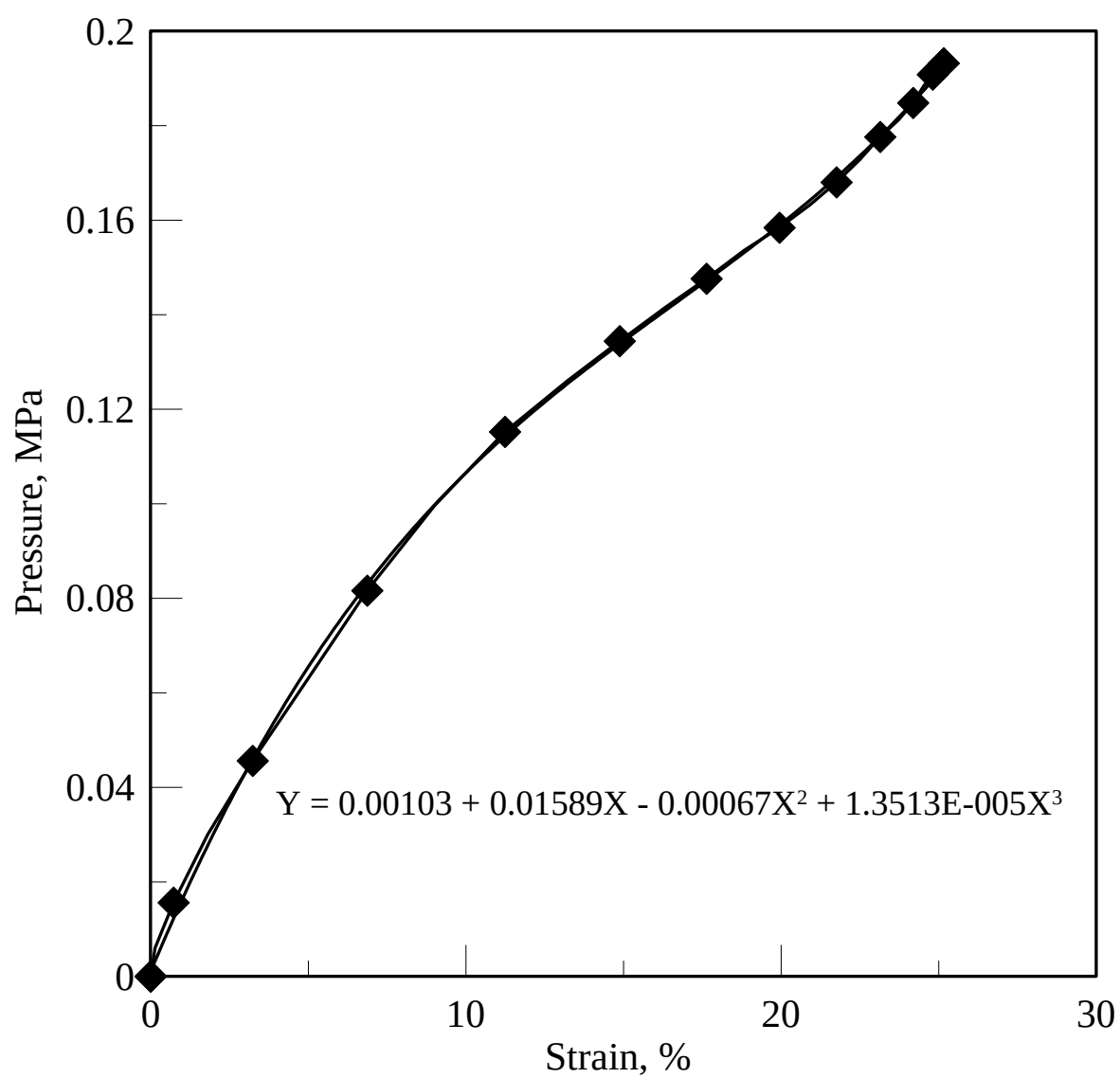


圖 49 全光纖式傍壓儀薄膜勁度測試(高壓力計量測)

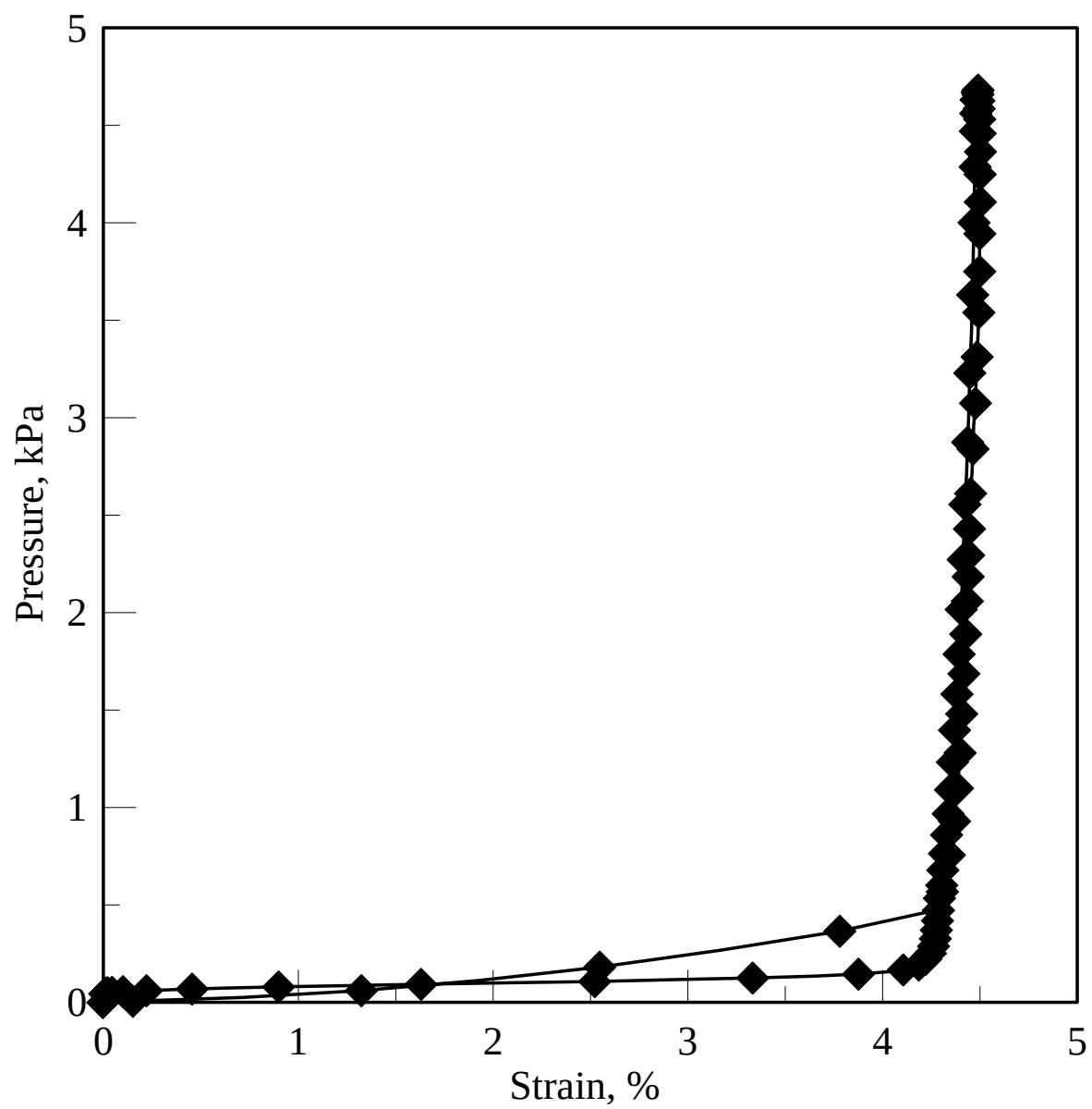


圖 50 全光纖式傍壓儀系統勁度測試結果圖

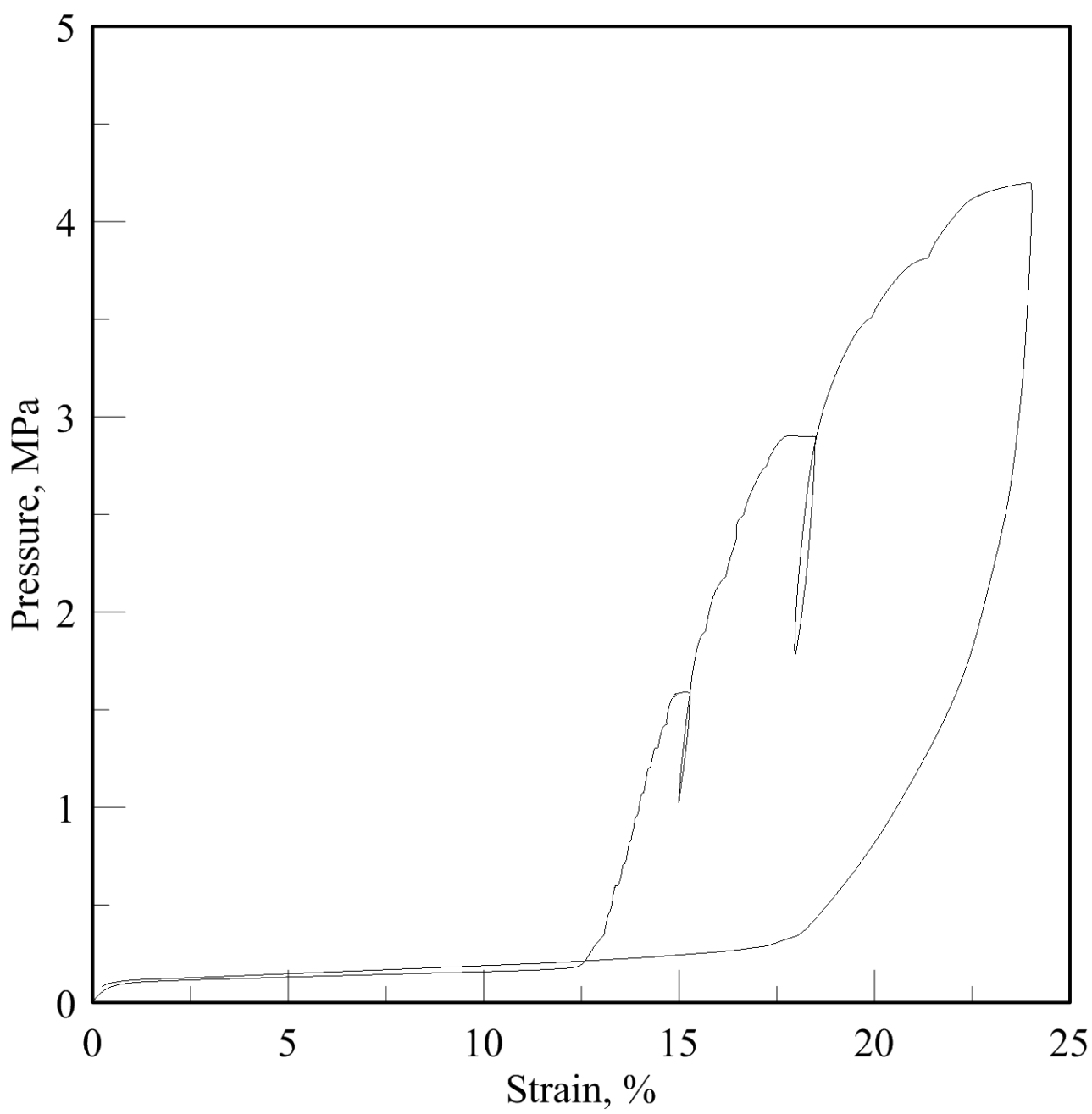


圖 51 全光纖式傍壓儀現場試驗結果圖

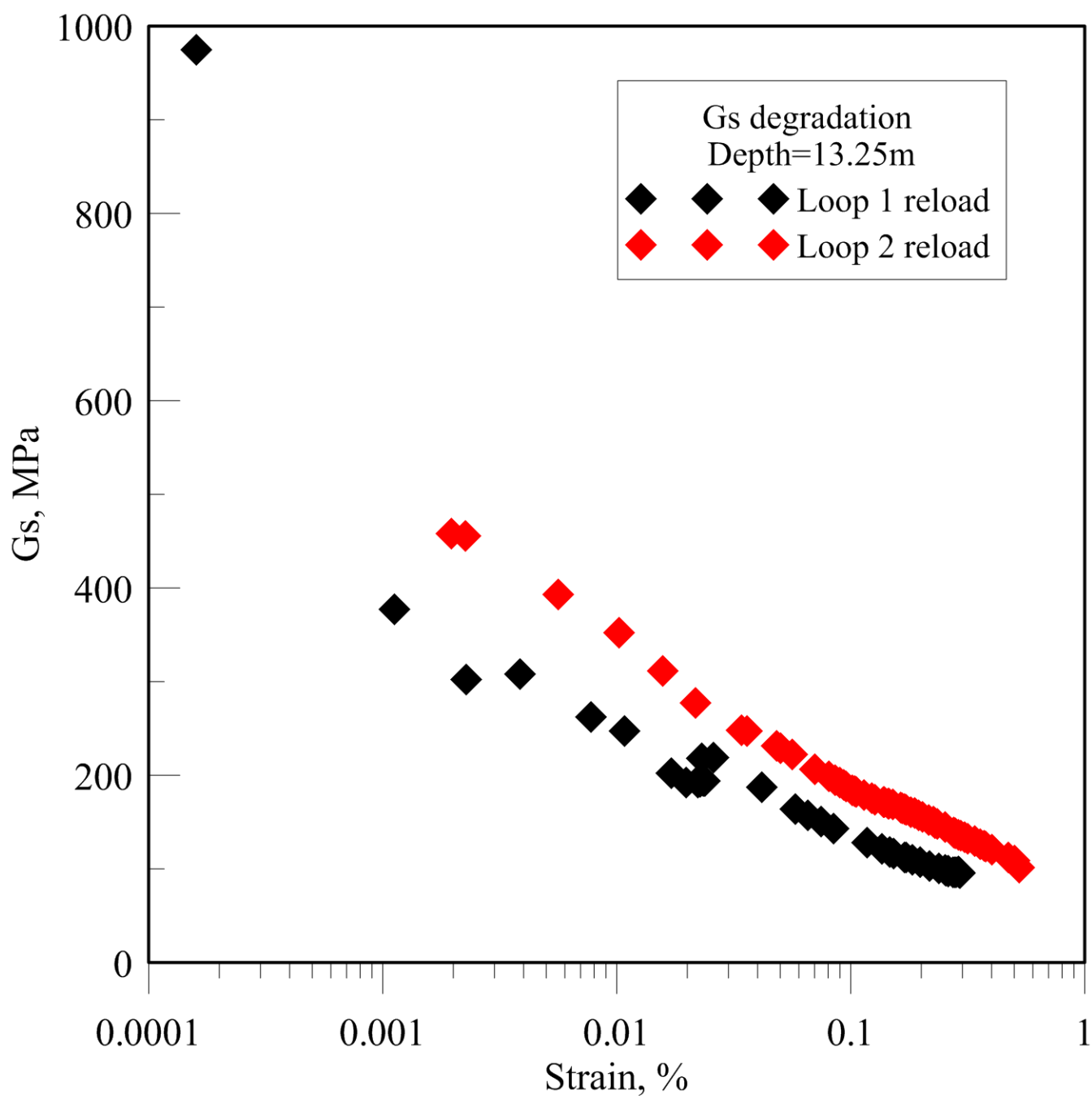


圖 52 現場剪力摩數遞減曲線結果圖

全灌漿材土水特性曲線量測儀器之試驗

為了現地之光纖光柵張力計安裝，為採用 Mikkelsen and Green, 2003 全灌漿理念，其是否可準確量測現地土壤基質吸力，則必須進行相關室內試驗與數值模擬驗證，其全灌漿之方法是否可行性應用在現地土壤基質吸力的量測。因此，本研究將以相同之含水量及單位重與淨應力，並量測此種狀況下之透水係數(permeability)，進而選擇某一透水係數之全灌漿材料，以改變不同基質吸力下，並記錄其吸力平衡之時間。圖 53 為考慮 grout or backfill soil 之土層土水特性曲線試驗架構示意圖，圖 54 為該試驗儀器之實體圖，圖 55 為 DAVI 量測系統圖，其目的為施作土壤之土水特性曲線試驗時，每次施加一吸力時，必須等待其土壤吸力穩定後，才可記錄土壤所排出之水量，由於等待的時間過長，會使得高進氣陶瓷透水板，因擴散氣體的關係，高進氣陶瓷透水板底部常會存在一些氣泡，若不將此氣泡排除，可能會造成高進氣陶瓷透水板由飽和狀態變為不飽和狀態，且氣泡在量測系統中會佔據體積，影響排水量之讀數，另外，目前已使用 SEEP/W 程式模擬，全灌漿材在現地孔隙水壓力量測之應用，圖 56 為模擬設定說明圖，圖 57 為其模擬結果，當灌漿材料之透水係數低於外圍土壤 10 的 3 次方以上，則灌漿材內部之孔隙水壓力與外圍土壤會相同，因此，本研究將以此概念應用在土壤基質吸力之量測，並以 SEEP/W 施做模擬測試及施作全灌漿材 SDSWCC 試驗，以評估其可行性。

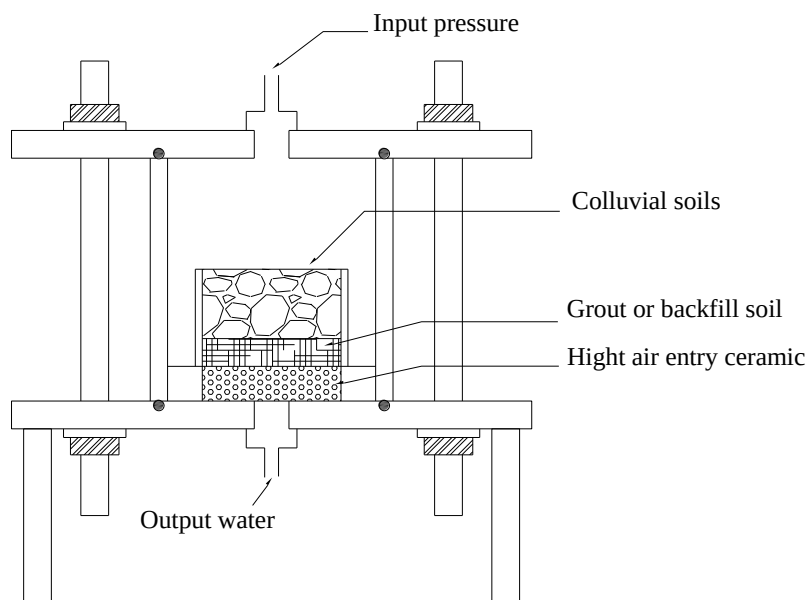


圖 53 考慮 grout or backfill soil 之土層土水特性曲線試驗架構示意圖

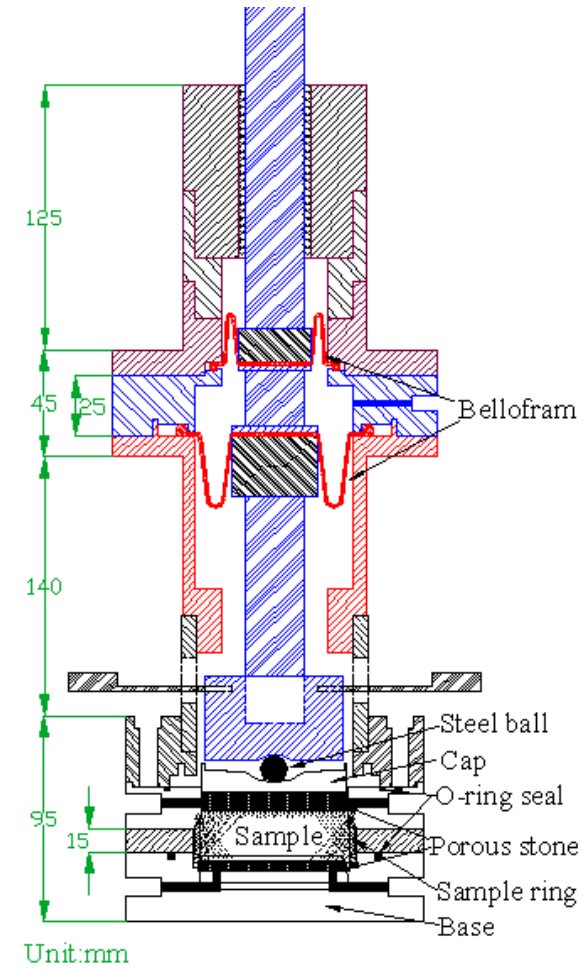
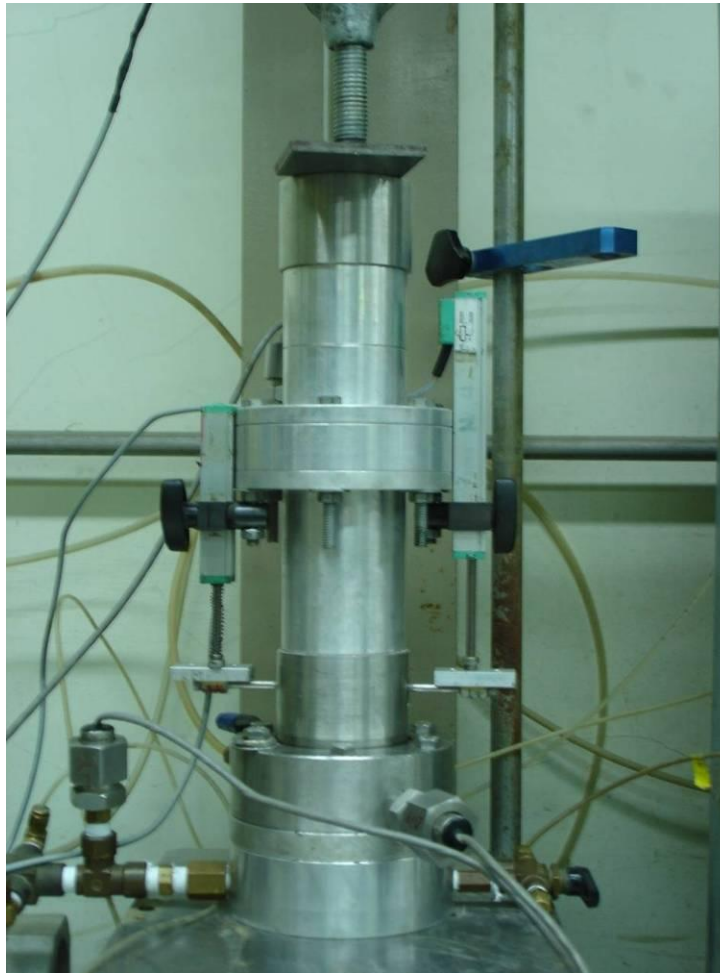
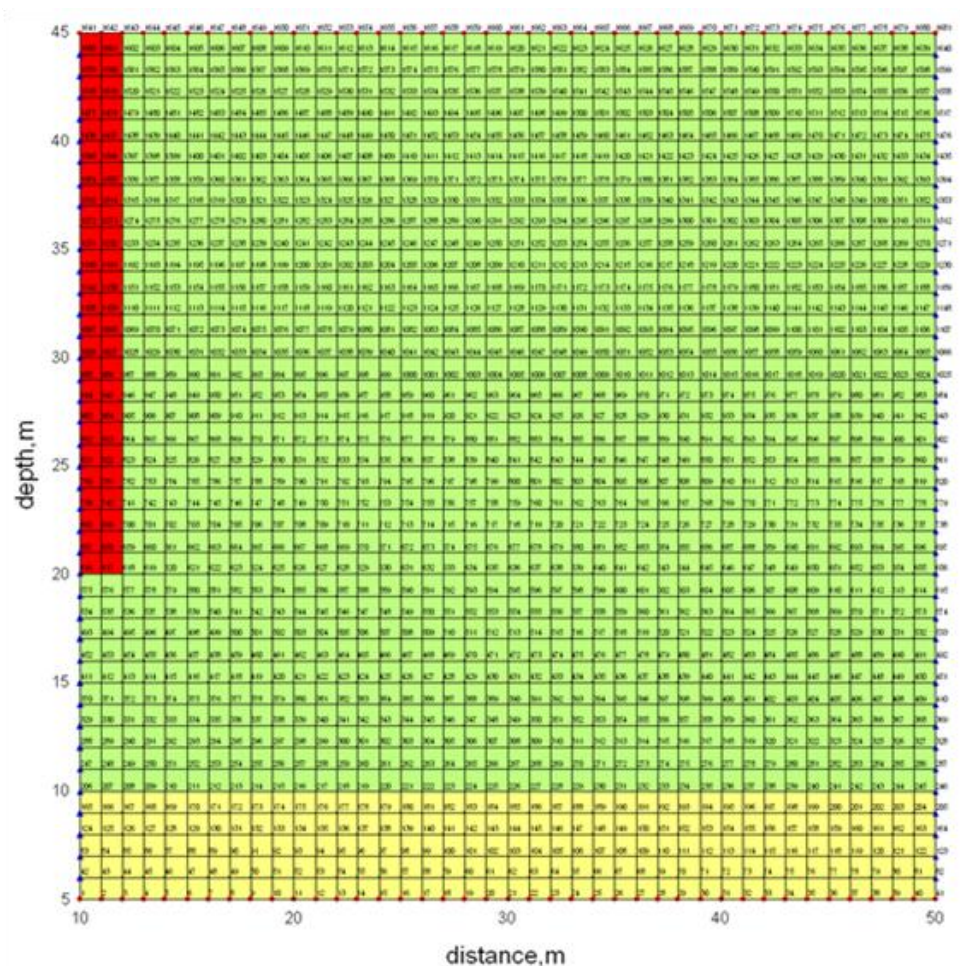


圖 54 SDSWCC 試驗儀器實體圖



圖 55 DAVI 量測系統實體圖



Ht=20m

紅色 : grout $k=10^{-7}$ cm/sec

綠色 : soil $k=10^{-5}$ cm/sec

黃色 : sand $k=10^{-2}$ cm/sec

網格左右邊界無流量。

Ht=10m

圖 56 全灌漿材應用於地層內部水壓監測模擬測試

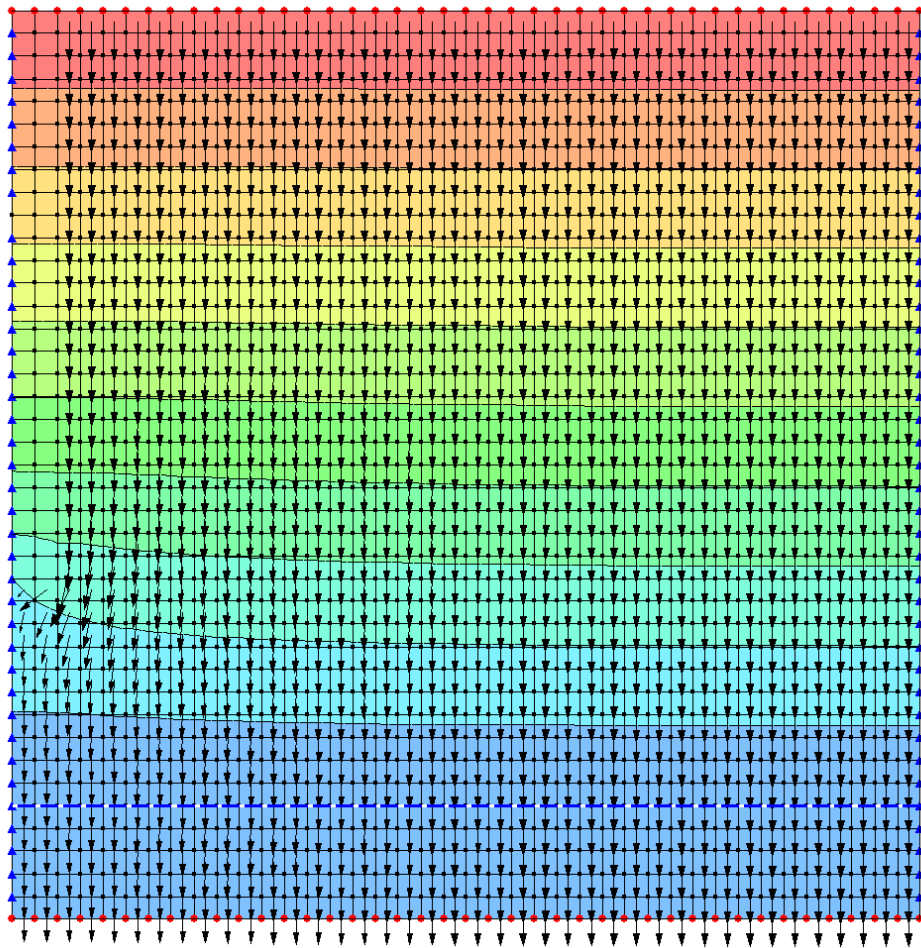


圖 57 全灌漿材應用於地層內部水壓監測模擬結果圖

四、結論與討論

1. 光纖光柵張力計部分，目前已完成單點式量測，並應用於砂崙仔與玉峰國小之實地量測。
2. 全灌漿材特性曲線試驗部分，目前儀器部分已架設完成，並進行相關測試與試驗。
3. 現場土壤非飽和三軸試驗已施作完畢，並求得現場土壤力學參數。
4. 全光纖傍壓儀部分，已改良完成並於校園內測試，可求得 $10^{-3}\%$ 之應變改變及剪力摩數遞減曲線。
5. 全灌漿材數值模擬，以利用 SEEP/W 程式初步模擬，並進一步改變參數，以求得適合之灌漿材料配比並與試驗驗證。

參考文獻

- 田凱丞 (2008)，非飽和土壤光纖感測三軸試驗裝置之研發與應用，交通大學土木工程碩士論文。
- 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。
- ひと雨による山腹崩壊について，1971，打萩珠男，新砂防。
- ASTM. D6836-02 (2002) “Standard Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge.”, West Conshohocken. Pa.
- Bishop, A.W. (1959) “The principle of effective stress.” Teknisk Ukeblad Vol. 106 No. 39 pp.859-863.
- Borsetto, M., Imperato, L., Nova, R. and Peano, A.(1983) “Effects of Pressuremeters finite length in soft clay”, Soil and Rock Investigations by In-situ Testing, Paris, Vol.2, pp211-215
- Cho, S. E. and Lee S. R. (2002). “Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 9, pp.756-763.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. 1978, “The shear strength of unsaturated soils,” Canadian Geotechnical Journal, Vol.15, No.3, pp.313-321.
- Hill, K.O., Fujii, F., Johnson, D.C., and Kawasaki, B.S., 1978, “Photosensitivity on Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication,” Applied Physics Letter, No.32, pp.647-649.
- 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.
- Ho, Y.T., Huang, A.B., and Lee, J.T. 2007. “A chirped/differential optical fiber Bragg grating pressure sensor,” Journal of Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing (under revision).
- Kandaris, P.M. 2006. “Pressuremeter testing for electric power transmission line structure foundations in desert southwest soils,” ASCE Geotechnical Special Publication No. 147, Proceedings, Unsaturated Soils 2006, Carefree, Arizona.
- Measures, R. M., 2001, “Structural Monitoring with Fiber Optic Technology”, Academic, California.
- Meltz, G., Morey, W. W., and Glam, W. H., 1989, “Formation of Bragg Grating in Optical Fibers by Transverse Holographic Method”, Opt. Lett. Vol.14, pp.823-825.
- Mikkelsen, P. E., and Green, G. E., 2003, “Piezometers in Fully Grouted Boreholes”, Symposium on Field Measurements in Geomechanics, FMGM 2003, Oslo, Norway, September.
- Miller, G.A., Muraleetharan, K.K., (2000) “Interpretation of Pressuremeter Tests in Unsaturated Soil.” Advances in Unsaturated Geotechnics, ASCE 2000, pp.40-53.

- Muraleetharan, K.K., Salehipour, S.A. Dhavala, D. (1998) "Cavity Expansion in Unsaturated Soils: Theoty and Applocation." Technical Report, University of Oklahoma School of Civil Engineering and Environmental Science, Norman.
- Ng, C.W.W., and Pang, Y. W. 2000. "Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.2, pp.157-166.
- Othonos, A., and Kalli, K., 1999, "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing," Artech House, Boston, 422p.
- Rao, Y.-J, 1998, "Fiber Bragg Grating Sensors: Principles and Applications," *Optic Fiber Sensor Technology*, Edited by K.T.V. Gattan and B.T. Meggitt, Published by Chapman and Hall, London, Vol.2, pp.355-379.
- Vesic, A.S. (1972) "Expansion of Cavities in an Infinite Soil Mass," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 98(3), pp.265-290.

行政院國家科學委員會補助國內專家學者出席國際學術會議報告

2009 年 10 月 22 日

附件三

報告人姓名	黃安斌	服務機構及職稱	國立交通大學土木工程學系教授
會議時間 地點	2009 年 10 月 5 日至 2009 年 10 月 8 日 埃及亞歷山大港	本會核定 補助文號	NSC 98-2625-M-009-003-MY2
會議名稱	(中文) 第十七屆國際土壤力學與大地工程研討會 (英文) 17 th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering		
發表演文題目	(中文)大地工程材料行為與測試 (現況報告#1) (英文) Geomaterial behavior and testing (State of the art report #1) (中文)暴雨下坡地內水壓分佈之現地監測 (英文) Field monitoring of pore-water pressure profile in a slope subjected to heavy rainfalls (中文)使用光纖感測系統進行黃河河堤安全監測 (英文) Safety monitoring of the Yellow River dike using a fiber optic sensor system		
報告內容應包括下列各項： 一、參加會議經過 本人於台灣時間 2009 年 10 月 3 日啟程，於埃及時間 10 月 4 日下午抵達會議地點。10 月 5 日上午 9:00 抵達會場聆聽開幕典禮，本人 Co-author，由美國 Prof. Paul Mayne 所發表之“Geomaterial behavior and testing” 現況報告#1 以及其他會議演講。10 月 6 日聆聽演講。10 月 7 日聆聽演講，中午 12:00 參加國際土壤力學與大地工程學會 TC-16 現地試驗委員會會議，14:00 至 15:00 於 Session PDS 3B 發表“Field monitoring of pore-water pressure profile in a slope subjected to heavy rainfalls”，做口頭報告。10 月 8 日聆聽演講，下午結束會議。10 月 12 日晚間返回台灣。 二、與會心得 會議圓滿達成任務，並收集國際間近來在相關研究方面之資訊，收穫豐盛。 三、攜回資料名稱及內容 會議論文集四冊及 CD			