

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

非飽和土壤光纖感測三軸試驗裝置之

研發與應用

Development and Applications of a
Triaxial Testing Device for Unsaturated Soils
Using Fiber Optic Sensors

研究生：田凱丞

指導教授：黃安斌 博士

中華民國九十七年八月

非飽和土壤光纖感測三軸試驗裝置之研發與應用

Development and Applications of a Triaxial Testing Device for
Unsaturated Soils Using Fiber Optic Sensors

研究生：田凱丞

Student: Kai-Cheng Tien

指導教授：黃安斌 博士

Advisor: Dr. An-Bin Huang



August 2008
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年八月

非飽和土壤光纖感測三軸試驗裝置之研發與應用

學生：田凱丞

指導教授：黃安斌 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

目前室內土壤試驗中所使用的量測儀器均以電子式感測器為主，在非飽和土壤三軸試驗中，為決定基值吸力對剪力強度的影響，使吸力達到平衡需耗費之試驗時間較長，而電子式感測器易受電磁波干擾，在長時間處於浸水或潮濕環境也容易發生短路故障以及訊號飄移等缺點。

本研究目的為利用光纖光柵多工、高靈敏度、高穩定度及不會短路等優點，應用布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)做成的感測器來全面取代傳統三軸試驗裝置中所使用之電子式荷重元、位移計與壓力計等。本論文首先介紹光纖光柵感測器設計原理與感測器之室內標定，最後進行非飽和土壤三軸試驗以評估非飽和土壤光纖感測三軸試驗裝置之可行性與準確性。

關鍵字：光纖光柵、光纖光柵感測器、非飽和土壤、土壤水分特性曲線、基值吸力。

Development and Applications of a Triaxial Device
for Unsaturated Soils Using Fiber Optic Sensors

Student : Kai-Cheng Tien

Advisor : Dr. An-Bin Huang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

The response of soil specimen in a triaxial cell is typically monitored using electronic sensors. For triaxial tests on unsaturated soil specimens, a long period is generally required to allow matrix suction within the specimen to reach a stable value. The electronic sensors are subject to electro-magnetic interference (EMI) and prone to zero shift and short circuit when exposed in water for a prolonged period. The objective of this research is to develop and verify the feasibility for a triaxial testing device to be instrumented completely using Optic Fiber Bragg Grating (FBG) sensors. The FBG instrument includes a load cell, gauge and differential pressure transducers and a linear displacement sensor. This set up takes advantage on the distributive, high sensitivity/stability and immune to EMI and short circuit characteristics of the FBG sensors. The thesis introduces the basic principles of FBG sensors and their calibrations. Procedures of using this sensors in a series of unsaturated soil tests and their results are described. The feasibility and accuracy of the FBG sensors are evaluated.

Keywords : optic fiber Bragg grating, optic fiber Bragg Grating sensors, unsaturated soils, soil-moisture characteristic curve, matric suction

誌謝

不知不覺間，兩年的碩士生活就要結束了，這一路走來雖然有些起起伏伏，但是在這其間有家人的關心、師長指導、女友的陪伴以及各位同窗好友的鼓勵下順利完成了碩士研究，得以完成這本論文。在此，獻上萬分的感激。

首先，由衷的感謝吾師 黃安斌 博士兩年來課業與學業上悉心的指導與幫助，以及在生活與處世態度上之關懷與啟發，使我在各方面皆有所精進，謹至上誠摯的感激與十二萬分的謝意。

論文初成，承蒙台灣科技大學林宏達 教授、中原大學馮道偉 教授、暨南大學張文忠 助理教授以及建國科技大學許懷後 助理教授 於口試過程給予詳加指正與寶貴意見，使本論文能夠更趨嚴謹，敬表謝意。

兩年的研究生生活中也感謝實驗室的學長:彥德、瑞庭、小叮噹、价民、崑山的指導，以及同窗好友 全修、凱哥、智仁、比爾在論文上的共同衝刺，還有學弟妹 瑞陽、意婷、彥琅、瑛伶、秉濬以及培旻，因為有你們讓實驗室的生活從有趣變得更加有趣，睡在實驗室的日子裡也不會再睡過頭。

最後感謝我親愛的家人，以及最愛的女友 幸娟，你們是我心靈的支柱，你們的支持與陪伴是我努力的最大動力，謝謝你們。

田凱丞 謹誌

中華民國九十七年八月

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XI
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究方法與內容.....	2
1.3 論文內容概述.....	3
第二章 研究背景.....	5
2.1 土壤吸力理論.....	5
2.2 土壤水分特性曲線.....	7
2.2.1 水分特性曲線之定義.....	7
2.2.2 水分特性曲線之量測.....	9
2.3 非飽和土壤之應力狀態與剪力強度.....	12
2.3.1 非飽和土壤應力狀態.....	12
2.3.2 非飽和土壤的剪力強度.....	13
2.3.3 水分特性曲線與土壤剪力強度之關係.....	16
2.4 基質吸力之控制.....	17
2.4.1 前言.....	17
2.4.2 高進氣吸力值陶瓷板.....	17
2.4.3 軸平移技術.....	19
2.5 光纖光柵感測系統.....	20
2.5.1 光纖結構.....	20
2.5.2 光纖傳輸原理.....	21

2.5.3 光纖傳輸損失	22
2.5.4 布拉格光纖光柵簡介	23
2.5.5 光纖光柵波長飄移量的關係	24
第三章 土壤試驗規劃及設備	34
3.1 試驗規劃	34
3.2 現地取樣	34
3.3 土樣處理與土壤一般物理性質	35
3.3.1 含水量試驗	36
3.3.2 比重試驗	36
3.3.3 粒徑分析試驗	37
3.3.4 阿太堡試驗	37
3.3.5 透水試驗	38
3.4 試驗儀器	38
3.4.1 氣壓與水壓控制系統	39
3.4.2 量測系統	39
3.4.3 訊號擷取系統	39
3.4.4 自製壓力板試驗儀	40
3.4.5 三軸室	40
3.4.6 壓力機	41
3.5 土壤水分特性曲線試驗	41
3.5.1 試驗步驟	42
3.5.2 控制條件	44
3.6 飽和壓密不排水三軸試驗	44
3.6.1 試驗步驟	45
3.6.2 控制條件	47
3.7 非飽和固定含水量三軸試驗	47
3.7.1 試驗設備	47

3.7.2 試驗步驟	49
3.7.3 控制條件	53
第四章 試驗結果與討論	72
4.1 光纖光柵感測器設計與改良	72
4.1.1 光纖光柵位移計	72
4.1.2 光纖光柵荷重元	74
4.1.3 光纖光柵差壓計與水壓計	75
4.1.4 光纖光柵溫度棒	77
4.2 光纖光柵感測器標定	78
4.2.1 實驗設備	78
4.2.2 光纖光柵位移計標定	81
4.2.3 光纖光柵荷重元(Load Cell)標定	83
4.2.4 光纖光柵差壓計與水壓計標定	85
4.3 土壤水分特性曲線試驗	90
4.4 飽和壓密不排水三軸試驗	91
4.4.1 圍壓的影響	92
4.4.2 剪力強度參數 c' 、 ϕ' 之討論	93
4.5 非飽和固定含水量三軸試驗	93
4.5.1 重複性試驗	94
4.5.2 基質吸力的影響	94
4.5.3 非飽和土壤剪力強度參數之決定	95
4.6 電子式與光纖式量測系統結果比較	97
4.6.1 軸向應力	97
4.6.2 孔隙水壓及基值吸力變化	98
第五章 結論與建議	144
5.1 結論	144
5.2 建議	146



圖目錄

圖 1-1 研究流程圖.....	4
圖 2-1 典型土壤水分特性曲線(摘自林宏達、拱祥生, 2001).....	27
圖 2-2 土壤水份特性曲線各區段說明圖.....	27
圖 2-3 非飽和土壤廣義莫耳庫倫破壞包絡面.....	28
圖 2-4 破壞包絡面截距沿一直線於 $\tau - (u_a - u_w)$ 平面.....	28
圖 2-5 破壞包絡線非線性行為.....	29
圖 2-6 利用 Kelvin 毛細作用模型描述高進氣吸力值陶瓷板工作原理(Fredlund and Rahardjo, 1993).....	29
圖 2-7 使用軸平移與不使用平移法之應力-應變曲線比較.....	30
圖 2-8 光纖構造.....	30
圖 2-9 跳躍折射率光纖之光傳播圖 (摘自 Hecht, 1987).....	31
圖 2-10 光散射示意圖 (摘自簡旭君, 2003).....	31
圖 2-11 光纖直徑改變造成光損失(摘自簡旭君, 2003).....	32
圖 2-12 局部彎曲造成光損失(摘自簡旭君, 2003).....	32
圖 2-13 光纖整體彎曲造成的光損失(摘自簡旭君, 2003).....	33
圖 2-14 光纖光柵量測原理示意圖(摘自簡旭君, 2003).....	33
圖 3-1 土壤試驗流程圖.....	59
圖 3-2 玉峰國小及砂崙仔位置圖.....	60
圖 3-3 玉峰國小試驗場址-車棚旁遊戲器材區場景圖.....	61
圖 3-4 玉峰國小鑽探孔位置場景圖.....	61
圖 3-5 砂崙仔崩塌地處理工程處試驗場址.....	62
圖 3-6 砂崙仔崩塌地處理工程處鑽探孔位置場景圖.....	62
圖 3-7 玉峰國小-土壤含水量與深度示意圖.....	63
圖 3-8 砂崙仔崩塌地處理工程處-土壤含水量與深度示意圖.....	63
圖 3-9 玉峰國小-土壤粒徑分佈圖.....	64
圖 3-10 玉峰國小-4 號篩以下土壤粒徑分佈圖.....	64
圖 3-11 砂崙仔崩塌地處理工程處-土壤粒徑分佈圖.....	65
圖 3-12 砂崙仔崩塌地處理工程處-4 號篩以下土壤粒徑分佈圖.....	65
圖 3-13 自製壓力板試驗儀.....	66
圖 3-14 高進氣吸力值陶瓷板安裝圖.....	66
圖 3-15 非飽和土壤之三軸試驗之控制條件(取自 Fredlund, D. G. and Raharjo, H., 1993).....	67
圖 3-16 耐高壓高進氣吸力值陶瓷板.....	68
圖 3-17 非飽和體積量測(取自 Ng et al., 2002).....	69
圖 3-18 非飽和體積量測系統.....	70
圖 3-19 非飽和土壤三軸試驗儀.....	71
圖 4-1 光纖光柵位移計設計圖.....	101

圖 4-2	PC 軟管示意圖	102
圖 4-3	光纖光柵位移計量測原理示意圖	102
圖 4-4	光纖光柵位移計斜面機制示意圖	103
圖 4-5	光纖光柵位移計安裝圖	104
圖 4-6	光纖光柵荷重元設計圖	105
圖 4-7	光纖光柵荷重元安裝圖	106
圖 4-8	光纖光柵差壓計設計圖	107
圖 4-9	光纖光柵水壓計設計圖	108
圖 4-10	光纖光柵溫度棒	109
圖 4-11	光纖光柵讀取儀	110
圖 4-12	光纖融接設備	110
圖 4-13	恆濕恆溫箱	111
圖 4-14	螺旋測微器	112
圖 4-15	光纖光柵位移計標定配置圖	112
圖 4-16	光纖光柵位移計標定結果	113
圖 4-17	光纖光柵荷重元標定-土壤直剪試驗儀加載系統	114
圖 4-18	光纖光柵荷重元標定結果	115
圖 4-19	光纖光柵荷重元溫度標定與修正結果	116
圖 4-20	光纖光柵差壓計標定結果	117
圖 4-21	光纖光柵水壓計壓力標定配置圖	118
圖 4-22	1 號光纖光柵水壓計標定結果	119
圖 4-23	2 號光纖光柵水壓計標定結果	120
圖 4-24	光纖光柵水壓計溫度標定示意圖	121
圖 4-25	1 號光纖光柵水壓計受溫度影響下波長變化圖	122
圖 4-26	2 號光纖光柵水壓計受溫度影響下波長變化圖	123
圖 4-27	光纖光柵溫度棒之溫度標定	124
圖 4-28	1 號光纖光柵水壓計溫度標定與參考 FBG 法修正結果	125
圖 4-29	2 號光纖光柵水壓計溫度標定與參考 FBG 法修正結果	126
圖 4-30	玉峰國小-土壤水分特性曲線試驗結果	127
圖 4-31	砂崙仔崩塌地處理工程處-土壤水分特性曲線試驗結果	128
圖 4-32	黏土、粉土及砂的典型土壤水份曲線圖(Scott et al., 2001)	129
圖 4-33	玉峰國小-飽和壓密不排水三軸試驗結果	130
圖 4-34	砂崙仔崩塌地處理工程處-飽和壓密不排水三軸試驗結果	131
圖 4-35	玉峰國小-應力路徑圖	132
圖 4-36	砂崙仔崩塌地處理工程處-應力路徑圖	132
圖 4-37	玉峰國小-軸向應變 15%時之莫爾圓	133
圖 4-38	砂崙仔崩塌地處理工程處-軸向應變 15%時之莫爾圓	133
圖 4-39	玉峰國小重複性試驗-非飽和應力應變曲線	134

圖 4-40 玉峰國小重複性試驗-基值吸力變化與體積變化	135
圖 4-41 玉峰國小-非飽和應力應變曲線	136
圖 4-42 玉峰國小-基值吸力變化與體積變化	137
圖 4-43 非飽和土壤廣義莫耳庫倫破壞包絡面	138
圖 4-44 將破壞包絡面投影至 $(\sigma - u_a)$ - τ 平面	138
圖 4-45 玉峰國小-非飽和三軸試驗破壞包絡線	139
圖 4-46 玉峰國小- φ^b 線性迴歸	140
圖 4-47 玉峰國小電子式與光纖式量測結果比較-非飽和應力應變曲線	141
圖 4-48 玉峰國小電子式與光纖式量測結果比較-基值吸力變化與體積變化	142
圖 4-49 電子式與光纖式荷重元驗證	143



表目錄

表 3-1 玉峰國小-土壤含水量試驗結果	54
表 3-2 砂崙仔崩塌地處理工程處-土壤含水量試驗結果	54
表 3-3 玉峰國小-土壤比重試驗結果	55
表 3-4 砂崙仔崩塌地處理工程處-土壤比重試驗結果	55
表 3-5 玉峰國小-透水試驗結果 (e=0.77).....	56
表 3-6 砂崙仔崩塌地處理工程處-透水試驗結果 (e=0.52).....	57
表 3-7 三軸試驗量測系統規格表	58
表 4-1 玉峰國小-壓力板試驗數據一	99
表 4-2 玉峰國小-壓力板試驗數據二	99
表 4-3 砂崙仔崩塌地處理工程處-壓力板試驗數據一	100
表 4-4 砂崙仔崩塌地處理工程處-壓力板試驗數據二	100



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

目前室內土壤試驗中所使用的感測器均以電子式感測器為主，傳統電子式感測器雖已發展了長久的時間，但是仍有一些無法避免的問題存在，像是電壓不穩定造成之雜訊、周圍環境電磁波之干擾以及電線容易受水侵蝕而產生短路，這些都影響到量測的品質，若長期使用則有訊號飄移的現象。而光纖感測技術具有許多傳統電子感測技術沒有的優點，包括體積小、耐久性高、及光纖利用光來傳遞資訊不受電磁波干擾也沒有短路的憂慮。加上光纖感測系統可用來測量各種物理量的微小變動，如聲音、溫度、壓力、磁場、振動等，尤其對於應變和溫度變化的量測，以布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)做成的感測器，更具有高靈敏度及高穩定度。

而在非飽和土壤三軸試驗中，為研究基值吸力對剪力強度的影響，需使吸力達到平衡，要達到吸力平衡需耗費較長時間，但是在長時間處於潮濕環境下傳統電子式感測器容易發生訊號飄移與短路故障等缺點。本研究目的為利用光纖光柵多工、高靈敏度、不易被腐蝕及無短路憂慮等優點發展出沉水式(Submersible)，不受電磁波干擾之光纖感測原件並應用於非飽和土壤三軸試驗裝置之中。

1.2 研究方法與內容

本研究流程如圖 1-1 所示，本研究目的為研發一非飽和土壤光纖感測三軸試驗裝置，首先進行光纖光柵感測器製作，接著進行感測器之標定及可行性分析，然後進行非飽和三軸試驗，同時以電子式與光纖式兩種量測儀器進行量測並擷取實驗數據，最後則進行數據之比對，以評估非飽和土壤光纖感測三軸試驗裝置之可行性與準確性。

在進行非飽和三軸試驗前，透過室內試驗對試驗場址土樣之基本物理性質、力學性質、透水性質以及土壤保水特性進行探討。而非飽和三軸試驗主要為控制基質吸力大小，使土壤處於不同飽和度的狀態下，以適當的應變速率進行非飽和固定含水量試驗，觀察土壤在非飽和狀態下之力學行為，及求取剪力強度參數。試驗所選用之土樣為石門水庫上游之玉峰國小校內土樣和砂崙仔崩塌地處理工程處(桃 113 線 4K+800)之堆積材料，進行下列之試驗：

1. 土壤基本物理性質試驗：如含水量、比重、粒徑分析、阿太堡試驗等。
2. 三軸透水試驗。
3. 土壤水分特性曲線試驗。
4. 飽和等向壓密不排水三軸試驗。
5. 土壤於非飽和狀態下之固定含水量之三軸試驗。

藉由上述之試驗了解土壤材料之特性，而試驗所得之剪力強度參數與透水

係數可提供現地之邊坡穩定性分析與破壞機制之數值模擬。

1.3 論文內容概述

論文內容主要分為五章：

第一章：為緒論，說明研究動機與目的、研究流程與方法。

第二章：為研究背景，對前人於非飽和土壤相關研究進行說明，以及介紹基本光纖及光纖光柵原理。

第三章：就土壤試驗之規劃及設備進行說明，包括土壤試驗之步驟與試驗控制條件以及實驗設備。

第四章：對各項試驗之結果進行討論分析。

第五章：結論與建議，綜合本研究之試驗結果與研究過程作出結論，並提出後續研究方向之建議。



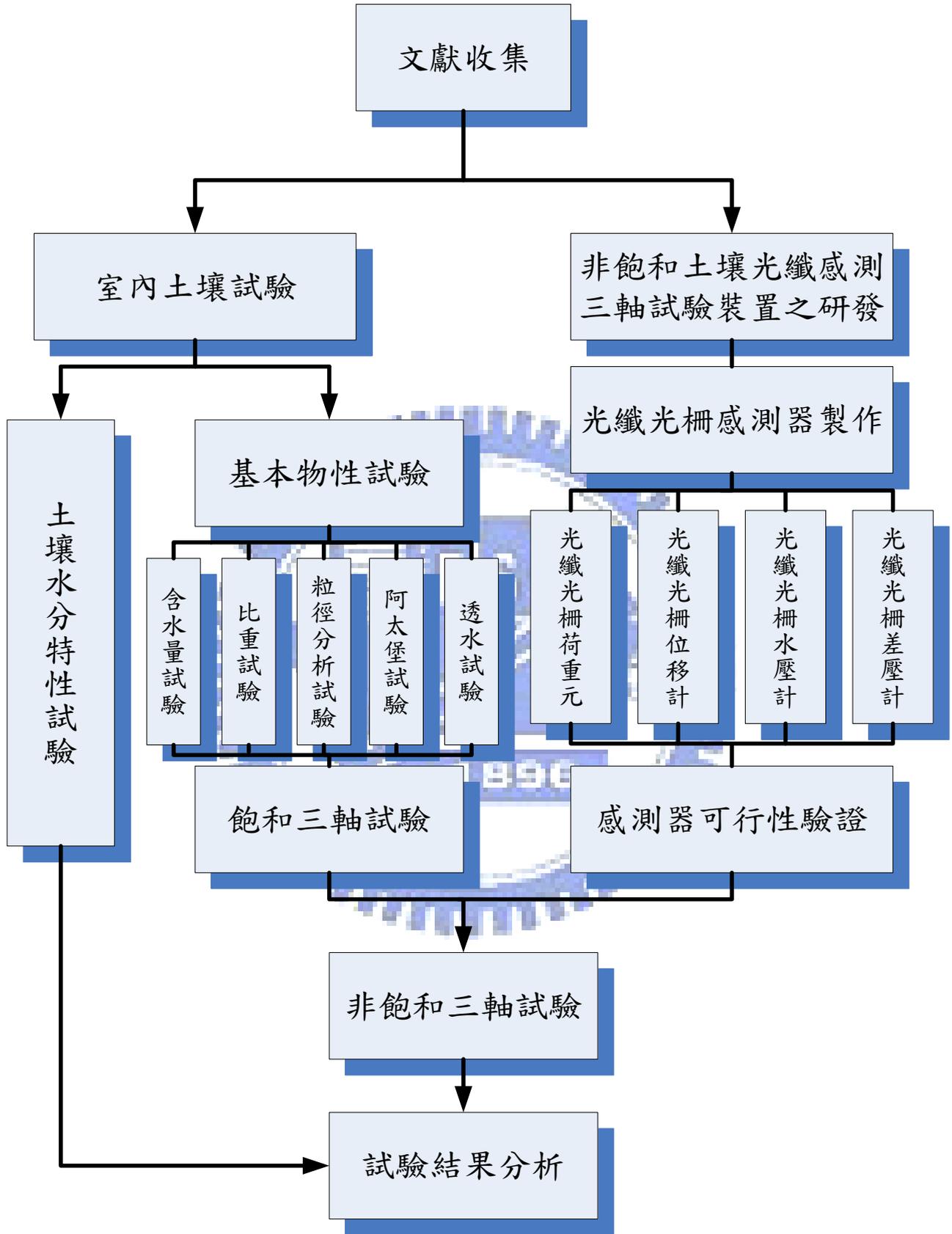


圖 1-1 研究流程圖

第二章 研究背景

非飽和土壤牽涉土壤顆粒、孔隙水、孔隙空氣三相材料之互制行為，理論較為複雜且實驗不易進行，本章先敘述土壤的吸力理論，然後就土壤水分特性曲線的定義、特性與現象作簡單之描述，並說明土壤水分特性曲線的量測方法，接著回顧與整理前人有關非飽和土壤中吸力對剪力強度影響與相關特性之研究，最後介紹非飽和土壤試驗基質吸力的控制。

2.1 土壤吸力理論

當土壤顆粒之間承受一固定總應力時，若土壤顆粒間的吸力 (Suction) 發生變化，土壤的含水量也會隨之變化，進而土壤的強度也會大受影響。關於土壤吸力理論早在 1900 年土壤物理學中闡述 (Buckingham, 1907; Schofield, 1935; Bolt and Miller, 1958; Corey and Kemper, 1961; Corey et al., 1967)。Croney and Colman (1948) 更指出土壤吸力用於解釋非飽和土壤之力學機制的重要性。

土壤由飽和狀態變成非飽和狀態的過程中，隨著含水量的降低，毛細作用 (Capillary Action)、吸附 (Adsorption) 和孔隙水中溶質的滲透作用對於土壤行為的影響漸漸增加，而這些現象就構成了非飽和土壤的吸力。土壤吸力跟其濕度有關，一般稱之為總吸力。總吸力主要包含兩個不同的部分，一為基質吸力 ($u_a - u_w$)，另一則是滲透吸力 (π)，其各別的定義如下：

1. 基質吸力 (Matric Suction) :

是指土壤顆粒材料中，孔隙空氣壓力 (u_a) 與孔隙水壓力 (u_w) 之壓力差。隨著土壤飽和度之提高，土壤之基質吸力逐漸降低，當完全飽和時，基質吸力等於零 (Fredlund and Rajardjo, 1993)。

2. 滲透吸力 (Osmotic Suction) :

由於溶解在水中的物質及離子被水的吸引力影響而降低了自由能量，造成純水會往高濃度溶質處移動的現象。其吸力大小取決於孔隙水中鹽分的含量 (Fredlund and Rajardjo, 1993)。

根據上述的定義我們可以將總吸力 (Ψ)，寫成式 (2-1) :

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \dots\dots\dots(2-1)$$

式中，($u_a - u_w$) 為基質吸力

u_a 為孔隙空氣壓力

u_w 為孔隙水壓力

π 為滲透吸力值

大多數涉及非飽和土壤的工程問題，是因環境變化(例如地下水位的變化、雨水的入滲)使得土壤含水量變化所造成，此變化主要造成土壤吸力中基質吸力的改變，對滲透吸力變化一般影響不大，但若涉及土壤的化學污染問題，則土壤中的含鹽量將有顯著的變化，此時則需考慮滲透吸力變化對基質吸力的影響

(Fredlund and Rajardjo, 1993)。本研究主要針對土壤內基質吸力與含水量之關係以及基質吸力與剪力強度之關係做分析與探討，故忽略滲透吸力。

2.2 土壤水分特性曲線

現地基質吸力的量測方法主要是使用張力計跟濾紙法，但因為使用上有許多限制，且量測的範圍有限，所以現地量測仍然有許多不便之處，需藉助室內試驗來進行，室內試驗主要可以有效的控制基質吸力的範圍，並從而衍生出土壤水份特性曲線。

2.2.1 水分特性曲線之定義

在飽和土壤中施加一個極小之吸力 (Suction) 或張力時，土壤內的水分不致流出，直至吸力超過某一界限值時，水分才由土壤內較大的孔隙開始流出，此一界限吸力稱為進氣吸力 (Air Entry Suction)。當吸力再增加時，更多的水分將從土壤中流出，在此種情形下孔隙中的水會沿著土壤顆粒周圍的水膜移動，當已經沒有水分可從孔隙中流出時，即表示土壤整體的勢能達到平衡的狀態。

一般而言，土壤在平衡時所保持的水量為孔隙大小及其所佔體積之函數，即為基質吸力 (Matric Suction) 之函數，此函數可用曲線表示，稱為土壤水分保持曲線 (Soil-Moisture Retention Curve)，或土壤水分特性曲線 (Soil-Moisture Characteristic Curve)。

典型之土壤水分特性曲線主要由兩種曲線形成，如圖 2-1：(1)去水(Desorption)段：為土樣自飽和開始，逐漸施加吸力慢慢使土壤乾燥，同時連續測定其含水量和吸力，又稱為脫附段。(2)吸水(Sorption)段：為藉由降低吸力，以逐漸濕潤原本乾燥之土樣，又稱之為吸附段。其中 θ_s 為土壤在大氣壓力下飽和時的體積含水比， θ_r 為殘餘體積含水比。土壤在排出水分後再重新濕潤的過程中，會有部份的空氣殘留在土壤中，因此最後的體積含水比會小於初始之體積含水比，此二者之間的差值稱之為殘餘含氣量，此一現象稱之為遲滯現象(Hysteresis)。

土壤水份特性曲線上有兩個特徵值具有重大的意義，其中一個特徵值為進氣吸力值 (u_a-u_w)，只有當土壤內的吸力(u_a-u_w)大於進氣吸力值，空氣才能進入土壤的孔隙中，迫使孔隙水排出，土壤的含水量則降低，進氣吸力值的大小與土壤最大的孔隙尺寸有關。另一個的特徵值為殘餘含水量值 (θ_r)，表示土壤不被排出的水分，殘餘含水量 θ_r 則是與土壤的礦物成份、孔隙水的化學成份及細孔隙之分佈有關。

體積含水比的定義如下：

$$\theta = \frac{V_w}{V} = \frac{SV_v}{V} = \frac{Se}{1+e} \dots\dots\dots(2-2)$$

式中， θ 為體積含水比

V 為總體積

V_w 為孔隙水體積

V_v 為孔隙體積

S 為飽和度

e 為孔隙比

Scott et al. (2001) 根據完整的土壤水份特性曲線，定義出土壤在非飽和 (Unsaturated) 的過程中，土壤的組成結構將隨著吸力的增加分為三個獨立的階段，如圖 2-2 所示，分別為毛細飽和階段 (Capillary Saturation Zone)、非飽和階段 (Desaturation Zone) 及殘餘飽和階段 (Zone of Residual Saturation)。在毛細飽和階段，土壤內的所有孔隙幾乎被水所填滿，當土壤中的吸力達到空氣進氣值時，則進入非飽和階段，此時土壤的飽和度隨著吸力的增加而迅速下降。當土壤的飽和度繼續降低至殘餘飽和階段時，非飽和土壤中的液相呈不連續，水分不易再自土體中移除。

2.2.2 水分特性曲線之量測

土壤水分特性曲線的試驗方法，一般常用的為基質吸力控制範圍小於 1500 kPa 的壓力板試驗 (Pressure Plate Test)，搭配基質吸力控制範圍大於 1500 kPa 的鹽溶液法 (Salt Solution Method) 及可以建立張力對深度關係的濾紙法 (Filter Paper Method)。以下就分別對此三種方法進行介紹：

1. 壓力板吸力試驗：

目前最通用決定土壤水分特性曲線之方法為進行壓力板試驗，以觀察土壤在乾濕變換的過程中土壤含水量與基值吸力之關係，可作為決定非飽和土壤剪力強度試驗中施加基值吸力的範圍，為非飽和土壤基礎研究的第一步。

該實驗必須採用具有可耐高壓的壓力板儀，其試驗步驟為：將飽和之高進氣吸力值陶瓷板及土樣放入壓力板儀之底部，接著施加空氣壓力至預定的基值吸力(軸平移技術)，此時土壤中的水分會從土中經由高進氣吸力值陶瓷板於壓力板儀底部流出，直至土壤吸力平衡，當吸力達到平衡後將土樣取出量測其含水量。重複上述步驟，變化不同吸力大小，則可得出土壤去水段之水分特性曲線。

2. 鹽溶液法：

前文曾經提及室內試驗可以有效控制量基質吸力值的量測範圍，尤其是在量測較大的基質吸力時（吸力大於 1500 kPa），鹽溶液法為替代壓力板試驗的一個較有效的量測方法。

在高的基質吸力之下（吸力大於 1500 kPa），土壤的基質吸力等於總吸力（Fredlund and Xing，1994），所以土壤的吸力可以寫成下式：

$$\psi = \frac{RT}{v} * \ln R_h \dots\dots\dots (2-3)$$

式中， Ψ 為吸力 (suction)

R 為理想氣體常數 (ideal gas constant, 8.31432 Joules/mole.K)

T 為絕對溫度

v 為 1000 莫爾水的體積 (0.018 m³)

R_h 為相對濕度

鹽溶液法主要是與土壤水分系統中吸力與相對濕度間的勢能平衡有關，因此土壤的吸力可以由相對濕度的增減來做估計。一般使用鹽 (NaCl) 與一定量的水攪拌成為鹽溶液，並將土樣及濾紙一併放入密閉的玻璃盆中，鹽溶液與土樣在密閉的玻璃盆中會產生水蒸氣，從而得到相對應的相對濕度與溫度。

3. 濾紙法：

濾紙法可以用來測定土壤中的總吸力及基質吸力，因為其測定的方法是利用濾紙作為傳感體，因此濾紙法為測定土壤中吸力的間接法。濾紙法可以量測很大範圍的吸力值，量測通常在實驗室內，用取自於現地的原狀土或擾動土進行。

濾紙法主要是以濾紙能夠與土壤間的水分或是水蒸氣交換，而達到平衡為其基本假設。當乾的濾紙放在土壤試樣中，與土壤試樣直接接觸時，土壤試樣中的水分便會流入濾紙中，並達到平衡，此平衡時的含水量可以得到相對於土壤試樣中的基質吸力；當乾的濾紙放置在土壤試樣的上方，既不與土壤試樣直接接觸時，土壤試樣中所產生的水蒸氣會進入濾紙內，並達到平衡，此平衡時的含水量可以得到相對於土壤試樣中的總吸力。

2.3 非飽和土壤之應力狀態與剪力強度

2.3.1 非飽和土壤應力狀態

Fredlund and Morgenstern (1977)認為非飽和土體單元為四相系統，包含土壤顆粒、空氣、水以及氣水交界面(收縮膜)，並在土壤顆粒不可壓縮，與土壤行為不受化學性質影響的假設下，以多相連體力學的觀點進行理論性之應力分析，分析結果提出部分飽和土壤可用三個應力狀態參數(σ 、 u_a 、 u_w)中之任兩個的組合來定義其應力狀態：

$$(\sigma - u_w) \text{ 及 } (u_a - u_w) \dots\dots\dots(2-4)$$

$$(\sigma - u_a) \text{ 及 } (u_a - u_w) \dots\dots\dots(2-5)$$

$$(\sigma - u_a) \text{ 及 } (\sigma - u_w) \dots\dots\dots(2-6)$$

由於多數的工程問題之孔隙氣壓力皆為一大氣壓 (Zero Gauge Pressure)，因此 (2-5) 式的應力狀態變數組合在應用上較為恰當。(2-5)式的三維應力變數

組合，經實驗證明不僅可以成功解釋非飽和土體之應力平衡狀態，且已相當廣泛的應用在土壓力、剪力強度、體積變化相關的土壤問題上。

2.3.2 非飽和土壤的剪力強度

土壤剪力強度的意義，是指破壞發生時，破壞面上所能提供之最大剪應力。而土壤的剪力強度，包括飽和時的剪力強度及非飽和時的剪力強度，對於飽和土壤之剪力強度，因其無孔隙氣壓值，故可以用莫爾-庫倫破壞準則 (Mohr-Coulomb) 及有效應力的觀念 (Terzaghi) 來說明。如式 (2-7) 所述：

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_w)_f \tan \phi' \dots\dots\dots(2-7)$$

式中， τ_f 為破壞時破壞面上之剪應力

c' 為有效凝聚力參數

σ_f 為破壞時破壞面上之總正向應力

ϕ' 為有效內摩擦角

而非飽和土壤剪力強度之研究，首先由 Bishop and Blight(1963)提出非飽和土壤之剪力強度模式，可以式 (2-8) 表示：

$$\sigma' = \sigma - [u_a - \chi(u_a - u_w)] \dots\dots\dots(2-8)$$

式中， σ' 為有效應力

σ 為總應力

χ 為與飽和度、土壤結構、應力狀態及乾濕週期有關之參數

當飽和度為零時， $\chi=0$ ，當完全飽和時， $\chi=1$

土壤的剪力強度與土壤所受之應力狀態是有關的，Fredlund 等人(1978) 從應力場的分析中，將飽和土壤之莫爾-庫倫 (Mohr-Coulomb) 破壞準則擴展到非飽和土壤之範圍，提出以 $(\sigma - u_a)$ 與 $(u_a - u_w)$ 二個獨立應力狀態變數構成不飽和土壤的剪力強度公式，其方程式如下：

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \dots\dots\dots(2-9)$$

式中， c' 為有效凝聚力

$(\sigma_f - u_a)_f$ 為破壞時破壞面上的淨正向應力

$(u_a - u_w)_f$ 為破壞時破壞面上的基質吸力

ϕ' 為 $(\sigma_f - u_a)_f$ 引起的有效內摩擦角

ϕ^b 為 $(u_a - u_w)$ 增加造成剪應力增加所對應的角度。

則 (2-9) 式可以描繪成以垂直軸為剪力強度 τ ，兩相互垂直之水平軸分別為基質吸力 $(u_a - u_w)$ 與淨正向應力 $(\sigma - u_a)$ 所構成之三維莫爾-庫倫 (Mohr-Coulomb) 破壞包絡面，如圖 2-3 所示。

Ho and Fredlund(1982)認為非飽和土壤剪力強度方程式中之基質吸力項，可以考慮成對土壤凝聚力項之增加，如式 2-10 所示：

$$C = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \dots\dots\dots(2-10)$$

式中， C 為土壤的總凝聚力（或稱外視凝聚力 Apparent Cohesion）

則(2-9)式可改寫為：

$$\tau_f = C + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' \dots\dots\dots(2-11)$$

因此將破壞包絡面投影於由以垂直軸為剪力強度 τ 和水平軸為基質吸力 $(u_a - u_w)$ 的平面上，可發現其與剪力強度 τ 軸之截距沿著一直線，如圖 2-4 所示，此截距為基質吸力作用下之土壤總凝聚力(total cohesion)，而此直線顯示剪力強度的增加與基質吸力基質吸力的增加有關，基質吸力增加造成剪應力增加所對應的角度為 φ^b 。

由許多的研究結果顯示，非飽和土壤之剪力強度會隨基質吸力的增加而呈非線性變化(Vanapalli et al., 1996)。

Escario & Juca (1989) 在其近幾年的研究結果指出，當施加的基質吸力值到達土壤進氣吸力值之後，土壤孔隙中開始有空氣進入，所以呈現非飽和狀態，在此狀態下的非飽和土壤剪力強度可能呈線性增加、維持常數或非線性增加，且在吸力值較大的情況下，因為含水量喪失，所以無法有效的提供吸力給土體，土體強度可能會降低。

此外，Fredlund (1987) 提出許多方式以掌握破壞包絡線之非線性行為，如圖 2-5 所示。圖 2-5 中破壞包絡線以 B 點可以劃分為兩個線性部分(AB 段和 BD 段)，A 點為飽和狀態時的土壤剪力強度，在淨正向應力 $(\sigma_n - u_a)$ 保持常數的條件下，AB 段中土壤所受到之基質吸力小於進氣吸力值 $(u_a - u_w)_d$ ，仍然是處於飽和的狀態，抗剪強度隨著基質吸力之增加而增加，剪應力與基質吸力曲線的角度 φ^b (吸力增加造成剪應力增加所對應的角度) 等於 φ' (有效內摩擦角)。但是基質吸力不斷增大，可能會使土壤中的孔隙水排出，當基質吸力超過土壤的進氣吸力值

$(u_a - u_w)_d$ 時（圖中之B 點），空氣進入土壤孔隙中，使土壤的飽和度降低，土壤開始處於非飽和狀態，因此當基質吸力進一步增加所造成剪力強度的增加，不如淨正向應力增加所引起剪力強度的增加多，故 ϕ^b 減小低於 ϕ' 值，這種方法之特點是建議使用兩條包絡線以掌握破壞包絡線之非線性行為。第二種方式則是使用較低之包絡線（AE段），即基質吸力對剪應力面上之包絡線為 ϕ^b ，此法較簡單，但所得之剪力強度比實際上的強度低。第三種方法則是將破壞包絡線區分成許多線段，以模擬高度非線性之破壞包絡線。然而為方便分析起見，一般還是看成線性變化(Fredlund et al.,1978)。

2.3.3 水分特性曲線與土壤剪力強度之關係

從前文中可以得知土壤的水分特性曲線，可以完整的描述土壤從飽和狀態到非飽和狀態，以及土壤內部水以及氣水交界面(收縮膜)上的應力變化，且由於非飽和剪力強度試驗有費時與不易量測之缺點，因此可以藉水份特性曲線來預測非飽和土壤的剪力強度 Vanapalli and Fredlund(1996)發展了一套經驗式，以飽和土壤之剪力強度參數和土壤水分特性曲線去推估非飽和土壤的剪力強度，公式如下：

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \dots\dots\dots(2-12)$$

式中， θ 為體積含水比

θ_s 飽和時之體積含水比

θ_r 為殘餘含水量

2.4 基質吸力之控制

2.4.1 前言

在非飽和土壤試驗中，非飽和土壤的孔隙中存在著水和空氣，因此儀器必須可以分別獨立控制及量測土壤中的孔隙水壓力和孔隙氣壓力，因此需採用高進氣吸力值陶瓷板進行控制與量測。另外，非飽和土壤中負的孔隙水壓通常直接量測，而孔隙氣壓力通常等於現場大氣壓力，孔隙氣壓力減去負的孔隙水壓力即等於基質吸力，但是當孔隙水壓力經常保持在負值時，將導致量測系統中水的氣化，影響孔隙水壓的量測與控制，為避免此情況發生通常採用軸平移技術加以克服。因此大部分室內試驗都採用高進氣吸力值陶瓷板配合軸平移技術對非飽和土壤直接進行基質吸力的量測工作。以下將分別介紹高進氣吸力值陶瓷板的功能與量測原理及軸平移技術。

2.4.2 高進氣吸力值陶瓷板

在非飽和土壤室內試驗中，要使得孔隙水壓力和孔隙氣壓力能分別獨立控制及量測的關鍵在於高進氣吸力值陶瓷板。高進氣吸力值陶瓷板是用高嶺土燒結製成，具有許多均勻小孔，充水飽和後每個小孔會產生一收縮膜，收縮膜產生的表面張力(T_s)可阻擋空氣通過陶瓷板，而陶板表面眾多小孔(半徑為 R_s)所產生之收縮膜結合起來，就可以在空氣和水之間起隔膜作用，如圖 2-6 所示，如

此空氣便無法通過陶瓷板。基質吸力則為收縮膜上方之氣壓與收縮膜下方之水壓的差值，而陶板之進氣吸力值指的是自由空氣通過飽和陶板所需之最大基質吸力。基值吸力與陶板孔隙大小之關係如下式：

$$(u_a - u_w)_d = \frac{2T_s}{R_s} \dots\dots\dots(2-13)$$

式中， $(u_a - u_w)_d$ 為陶板之進氣吸力值(air entry value of ceramic disk)

T_s 為水-氣交界面之表面張力 (20°C 時，其值為 72.25mN/m)

R_s 為陶板孔隙之半徑

陶板的孔隙大小取決於製造過程中所採用之設備與燒結之技術，而最大進氣吸力值之選擇，則須根據試驗土樣之土壤水分特性曲線而定，此外陶瓷板的滲透係數也是試驗考慮的重點之一，因為它直接影響到試驗時陶瓷板上下孔隙水壓力達平衡所需要的時間，以及孔隙水排出的時間。陶瓷板的滲透係數與其孔隙大小有關，孔隙越大則滲透係數越高，相對的陶瓷板上下水壓平衡所需的時間也越短；此外陶瓷板的厚度也會影響水壓平衡的時間，陶瓷板越薄則水壓平衡所需的時間越短，但是陶瓷板厚度越薄，在試驗過程中越容易破裂。

因此陶瓷板在非飽和土樣和孔隙水壓量測系統之間作為分界面，陶瓷板中的水將土壤中的孔隙水和量測系統中的水連接起來，而在此同時，空氣不能穿過高進氣值陶瓷板進入量測系統，必需注意的是，陶瓷板必須在飽和的情況下才能進行孔隙水壓力的量測工作。故當孔隙水壓力接近-1 大氣壓力時(及零絕對壓力)將會遇到問題，因為當量測系統中的水壓力接近-1 大氣壓力時，水將開始

出現穴蝕(汽化)現象發生，使量測系統中充滿氣體，造成量測系統中的水會被迫進入土中。為避免上述現象之發生，我們採用軸平移技術加以克服，而此技術將在下一小節說明。

2.4.3 軸平移技術

現地非飽和土壤中之孔隙空氣壓力通常等於大氣壓力，而孔隙水壓力則小於大氣壓力，兩者間的壓力差即為基值吸力。隨著土壤中顆粒孔隙越小及相關氣候條件的配合，土壤中之基值吸力將達到相當大的範圍，此時孔隙水壓力的數值相當的小。但實驗室內受限於水壓計之限制無法量測如此小的負孔隙水壓力，甚至只有當孔隙水壓力大於大氣壓力時，才可以正確量測。

因此，在實驗室內做非飽和土壤試驗時，為避免量測負的孔隙水壓力或因孔隙水壓力接近-1 大氣壓使得水開始產生氣化，通常採用軸平移技術。具體做法是同時將孔隙空氣壓力及孔隙水壓力增加同樣大小之壓力，使試體維持同樣基值吸力，但孔隙水壓力為正的壓力表壓力，避免了穴蝕現象的發生。

Bishop and Blight (1963) 首先將軸平移方法運用於非飽和夯實黏土的無圍壓縮試驗上，試驗過程中保持有效圍壓為 0 (即 $\sigma_3 - u_a = 0$)，控制孔隙氣壓並量測孔隙水壓，進行二組試驗，其中一組採用軸平移法，將孔隙氣壓增加到 482.6kPa，另一組則在大氣壓力下進行。圖 2-7 為兩組試驗之應力-應變曲線，可發現在未達尖峰強度前的部分，兩組試驗幾乎是相同的，過了尖峰強度後，兩者才有明顯的差別，因此使用軸平移法並不會影響土樣的剪力強度。

2.5 光纖光柵感測系統

本節將簡單描述光纖與光纖光柵之原理，而所謂的光纖感測是將物理量的變化如溫度、應變、加速度、位移、壓力等變化，解調成在光纖內傳輸之光信號的改變。除了溫度之外，大部分的物理量改變皆可以由應變的變化經過適當轉換來獲得。

而光纖感測器體積小、重量輕、不受電磁波干擾、傳輸損耗低、靈敏度高、安全性高、以及特有的多工性質，加上可以輕易和現有龐大之光通訊市場儀器及元件整合，因此近年來被廣泛地應用在許多地方，如工業、軍事、生物、電子、航太、機械、化工、造船、土木等領域。

2.5.1 光纖結構

光纖之結構為圓柱狀，如圖 2-8 所示，主要構造可分為纖核(Core)、纖殼(Cladding)以及作為保護之塗抹層(Coating)等三部分。其成分主要由高含矽量之玻璃或多種成分之玻璃或塑膠組成，中心為折射率(Refractive Index)較高之纖核(Core)，外層則是披覆折射率較低之纖殼(Cladding)；為了保護光纖不易受彎曲折斷，在纖殼外層在覆上樹脂加強光纖強度與韌性(Coating)。其中纖核(Core)直徑依光纖種類不同在 5~75 μm 間，而纖殼直徑範圍則在 100~200 μm 間。纖核和纖殼為構成整個光纖之基本要件，但光纖常用於惡劣之環境中，故一般除了在纖殼外層塗上約為 200~1000 μm 不等之聚合物(Polymer)材質塗佈層(Coating)作

為保護外，最後再使用尼龍製成之外皮包覆做成商品用光纖。

2.5.2 光纖傳輸原理

光纖一般是由矽玻璃或塑膠製成，中心為折射率較高纖核(Core)其外披覆折射率較低之纖殼(Cladding)所組成如圖 2-8，而光束藉由全反射在光纖中傳播，其最大優點為光能量之損失會因內全反射降至最低。圖 2-9 為一跳躍折射率光纖(Step-index Fiber)，其特色為纖核與纖殼折射率有一明顯的差距，而纖核的折射率大於纖殼，藉著光行進於纖核及纖殼間之介面上來回反彈使得光在光纖中傳遞。

根據史涅爾定律(Snell's law)，當光線由折射率較大介質進入折射率較低介質時，將有部分光線被反射回到原來介質，而部分光線則以另一角度折射進入較低折射率介質當中，其公式為：

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \dots\dots\dots(2-14)$$

其中， n_1 、 n_2 為入射端與折射端介質折射率

ϕ_1 、 ϕ_2 為入射角及折射角

當入射角逐漸增大時，折射角也隨之變大，直到折射角等於 90 度時，光線便尋該折射介面傳播，此時入射角即稱為臨界入射角 α_c ，其公式如下：

$$n_1 \sin \alpha_c = n_2 \sin 90^\circ \Rightarrow \alpha_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \dots\dots\dots(2-15)$$

當入射角持續增大，此時光線將不再產生折射，所有光線將全部反射回原

來介質當中，此稱為內全反射(Internal Total Reflection)。

2.5.3 光纖傳輸損失

在光纖傳輸過程中會使得光能量損失，而造成能量損失的主要原因基本上可分為下列三種：

- 1.材料損失(Material Loss)：光能量會被材料本身所吸收。
- 2.光散射 (Light Scattering)：光能量被材料分子結構上之缺陷所散射，如圖 2-10 所示。
- 3.波導及彎曲損失 (Waveguide and Bending Loss)：為光纖結構上之變形所造成，包括直徑之改變、局部之彎曲或整體之彎曲，如圖 2-11 至圖 2-13 所示。



因此由造成光纖損失之第三點來看，可以發現當光纖結構受到外力過度壓迫變形或者局部曲率過大時，都有可能引起光能量的損耗，在安裝感測器時要避免線路受重壓或局部扭轉太大。

而光纖損失之定義為輸出能量與輸入能量之比值，多以對數單位分貝(decibels dB)來表示，而其數學表示式如下：

$$Loss|_{db} = 10 \times \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \dots\dots\dots(2-16)$$

其中， P_{out} 為輸出能量

P_{in} 為輸入能量

另外，光纖能量之損失會因光纖長度增長而增加，所以一般定義損失時會以單位距離光能損失之分貝來作為光損耗計算單位，一般以每公里損失之分貝所表示。

而單模光纖的最低傳輸損失，約在波長 1550 nm 附近，其損失極限值大約在 0.16 dB/km。實際上，針對直線傳輸的光纖而言，最主要之損耗來自於雷射散射損耗，但於工程應用上，需將光纖傳輸工作路徑上之轉折、端點及分段連結器、接合處等產生之損耗列為主要的訊號損失來源。

2.5.4 布拉格光纖光柵簡介

光纖光柵的製造是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 Grating)。

布拉格光纖光柵亦被稱為反射式(Reflection)光纖光柵，其週期大約為 $1 \mu\text{m}$ 。其原理為，當在光纖中傳播之光波遇到布拉格光纖光柵時，會有一特定波長的光受光纖光柵影響耦合至一反向前進的光上，也就是說入射光中該波長的光在短週期光纖光柵處產生了反射效果。除了滿足布拉格條件(Bragg Condition)的特定波長，其餘波長都會因為相位差而相消。

布拉格反射波長 λ_B 為：

$$\lambda_B = 2n\Lambda \dots\dots\dots(2-17)$$

其中， n 為光纖纖核的有效折射率

Λ 為折射率週期性改變的間距

圖 2-14 為光纖光柵構造示意圖，光柵中之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，將會造成某些特定頻率光波被反射回發射端，而其他頻率光波則繼續向前傳導，而這些透鏡的間距不同，則被反射的光波頻率亦不相同。

2.5.5 光纖光柵波長飄移量的關係

根據文獻，可知布拉格光纖光柵反射波長的飄移量(Wavelength Shift) $\Delta \lambda_B$ 和所受之應變及溫度變化量有關，其關係式如下：

$$\Delta \lambda_B = 2n\Lambda \left[\left\{ 1 - \left(\frac{n_e^2}{2} \right) \langle p_{12} - \nu(p_{11} - p_{12}) \rangle \right\} \varepsilon + \left(\alpha + \frac{dn_e}{n_e} \right) \Delta T \right] \dots\dots\dots(2-18)$$

其中， p_{11} 和 p_{12} 為光纖的應變張量

ν 為光纖之波松比(Possion's Ratio)

ε 為光纖光柵所受之應變

α 為光纖熱膨脹係數(Thermal Expansion Coefficient)

ΔT 為所受之溫度變化量

我們把上式作簡化，便可寫成為：

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \varepsilon + (\alpha + \zeta) \Delta T = K_\varepsilon \varepsilon + K_T \Delta T \dots\dots\dots(2-19)$$

其中， $\zeta = \frac{dn_e}{dT}$ 為光纖熱光係數(Thermal Optical Coefficient)

$$p_e = \left(\frac{n_e^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} - p_{12})] \text{ 為光彈常數(Photoelastic Constant)}$$

K_ε 為所受應變之敏感係數

K_T 為所受溫度變化量之敏感係數

布拉格光纖光柵在受溫度和應變變化之環境下，其中心反射波長會受其影響而產生中心頻譜位移的現象，以下分別從應變變化和溫度變化加以討論其影響：

1. 波長飄移量與應變之關係

首先將先前(2-19)有關溫度變化 ΔT 設為 0，也就假設系統處於恆溫狀態下，只單純討論應變與波長之關係。其式子簡化如下：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon = K_\varepsilon \varepsilon \dots\dots\dots(2-20)$$

其中， ε 為應變大小

K_ε 為所受應變的敏感係數

$$p_e = \left(\frac{n_e^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} - p_{12})] \text{ 為光彈常數(Photoelastic constant)}$$

一般物質在平常狀態下，原子間格之間維持一定的排列，彼此之間會有固定的拉引力互相作用，原子間之排列是呈現同向性(Isotropic)。當受外來之外力時，物體形狀會因此而改變。而其原子間排列則呈現非同向性(Anisotropic)，因此折射率也隨之會改變。 K_ϵ 大約為 0.74，也就是說 $1\mu\epsilon$ 的拉應變會使得布拉格光纖光柵中心波長往長波長的方向移動，且其飄移量大約為 1.15pm~1.2pm。

2. 波長飄移量與溫度之關係

當光纖光柵受到環境溫度變化，其波長飄移可由(2-19)簡化得知，而得到下式：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T = K_T T \quad \dots\dots\dots(2-21)$$

其中， ζ 為光纖的熱光係數(Thermal Optical Coefficient)

α 為光纖的熱膨脹係數(Thermal Expansion Coefficient)

K_T 為溫度敏感係數

布拉格波長飄移並非完全線性，在高溫時溫度變化會使波長飄移較為顯著， $\alpha \approx 0.55 \sim 1.1 \times 10^{-6}$ ，而 ζ 從 150°C 的 $6.9 \times 10^{-6}/1^\circ\text{C}$ 變化成 450°C 時的 $9.6 \times 10^{-6}/1^\circ\text{C}$ 。然而在室溫條件下，1°C 的溫度變化約使得布拉格飄移約 11.5~12pm。

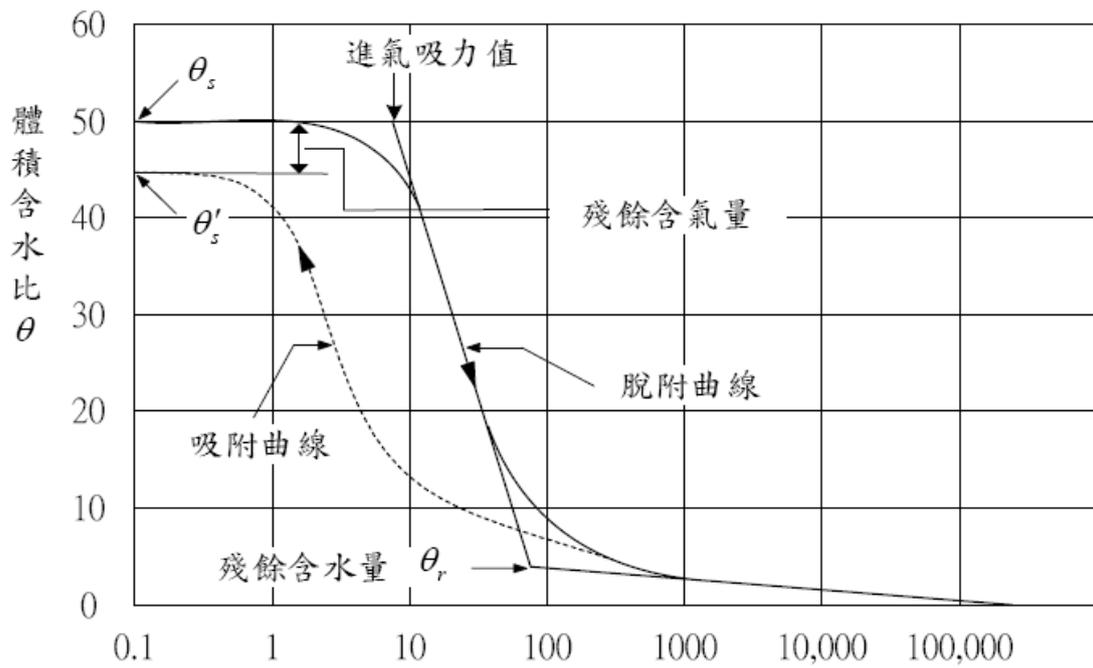


圖 2-1 典型土壤水分特性曲線(摘自林宏達、拱祥生，2001)

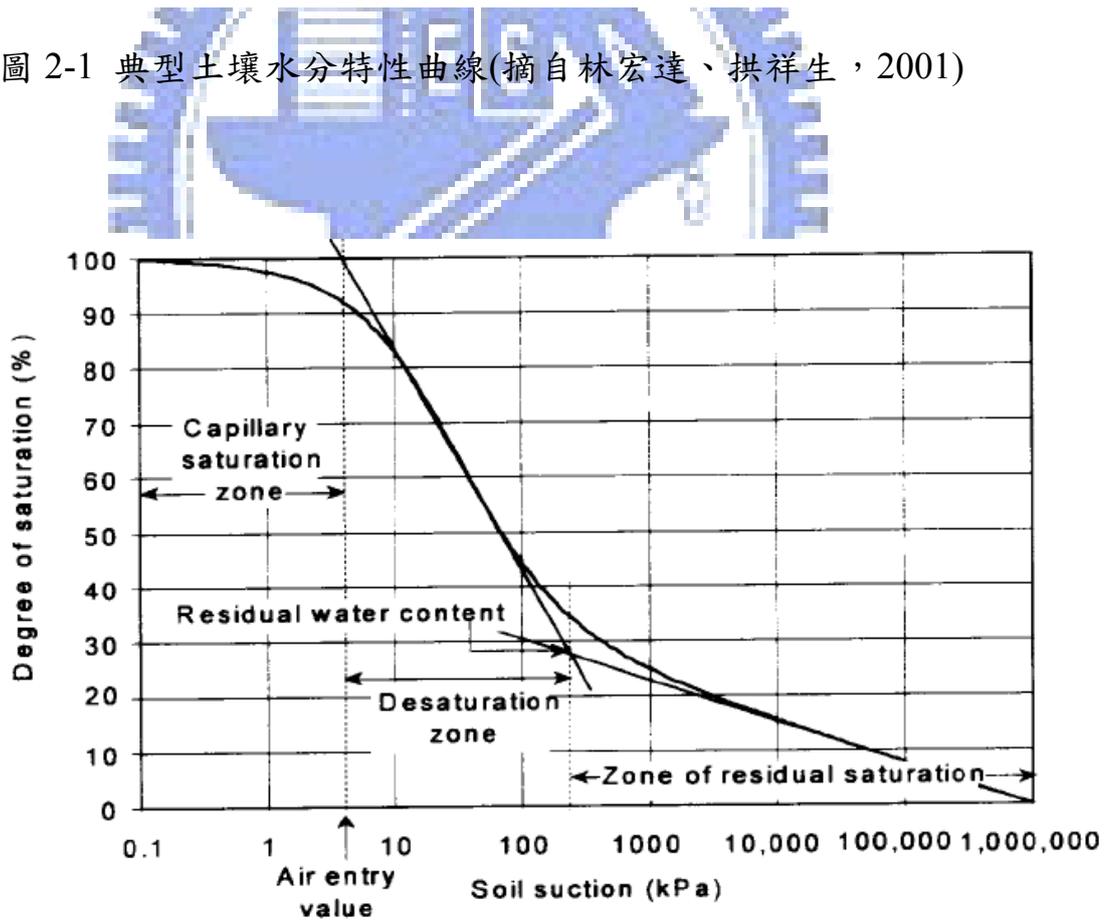


圖 2-2 土壤水份特性曲線各區段說明圖

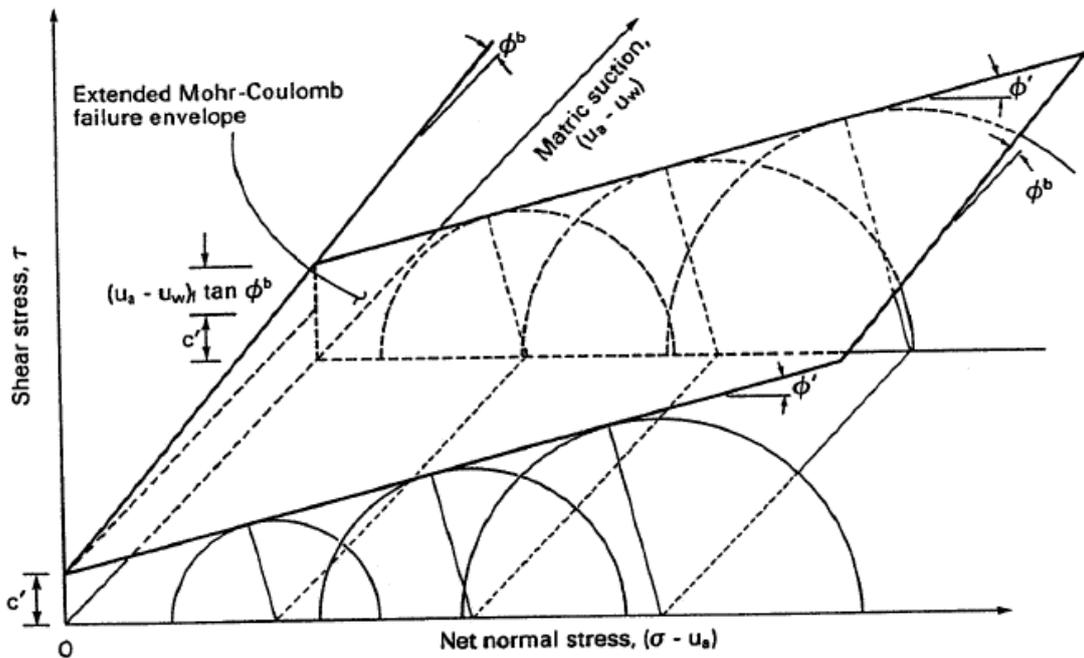


圖 2-3 非飽和土壤廣義莫耳庫倫破壞包絡面

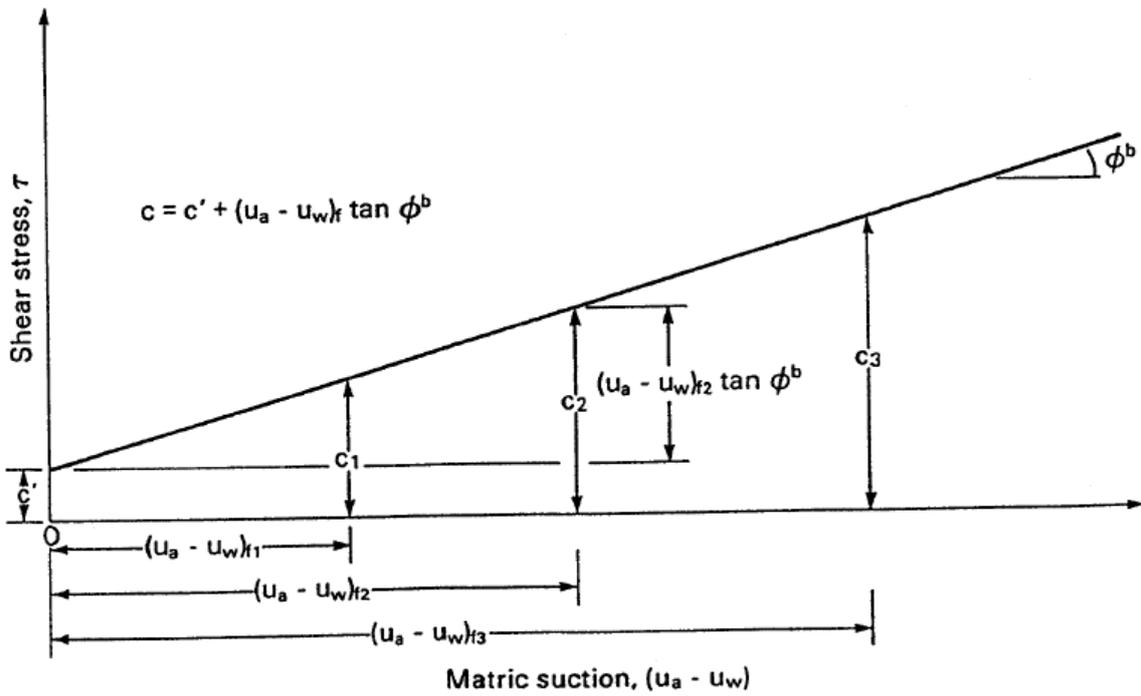


圖 2-4 破壞包絡面截距沿一直線於 $\tau - (u_a - u_w)$ 平面

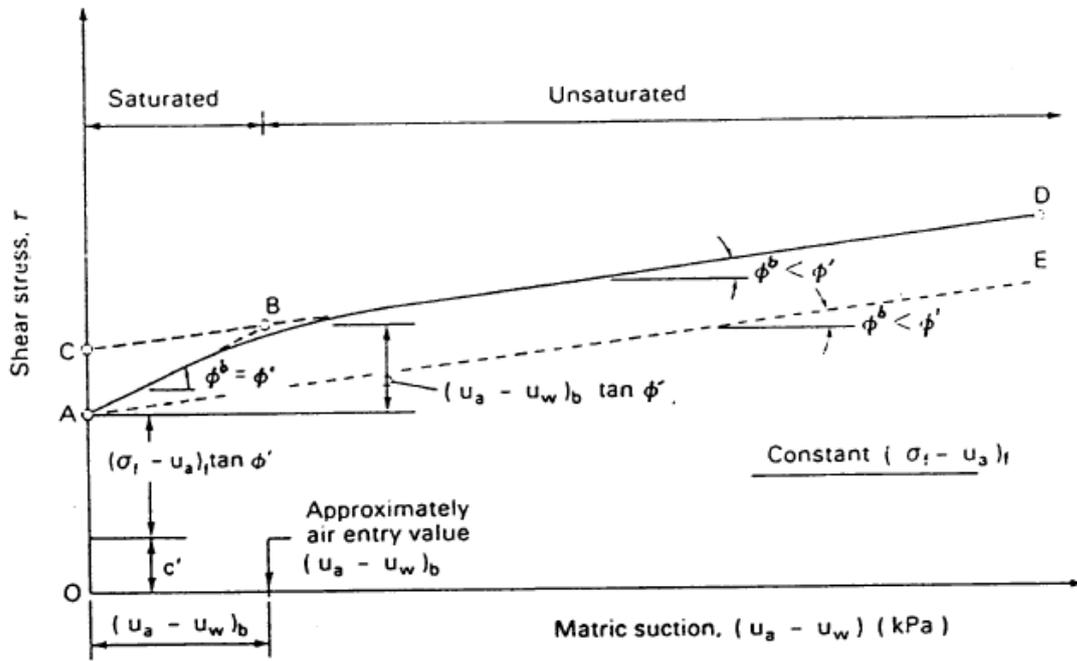


圖 2-5 破壞包絡線非線性行為

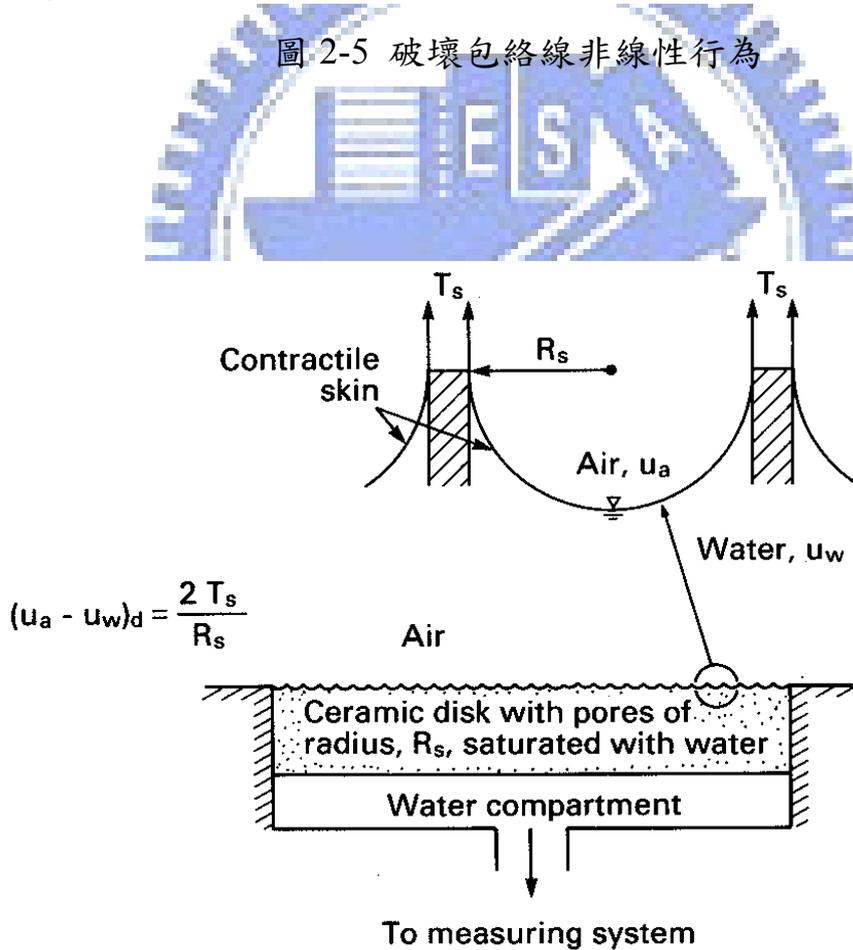


圖 2-6 利用 Kelvin 毛細作用模型描述高進氣吸力值陶瓷板工作原理 (Fredlund and Rahardjo, 1993)

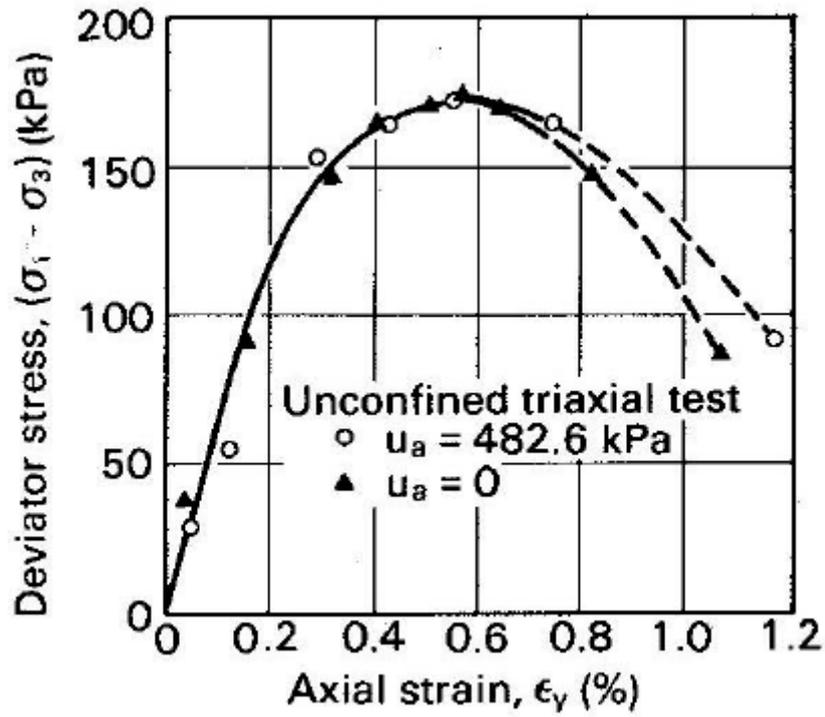


圖 2-7 使用軸平移與不使用平移法之應力-應變曲線比較

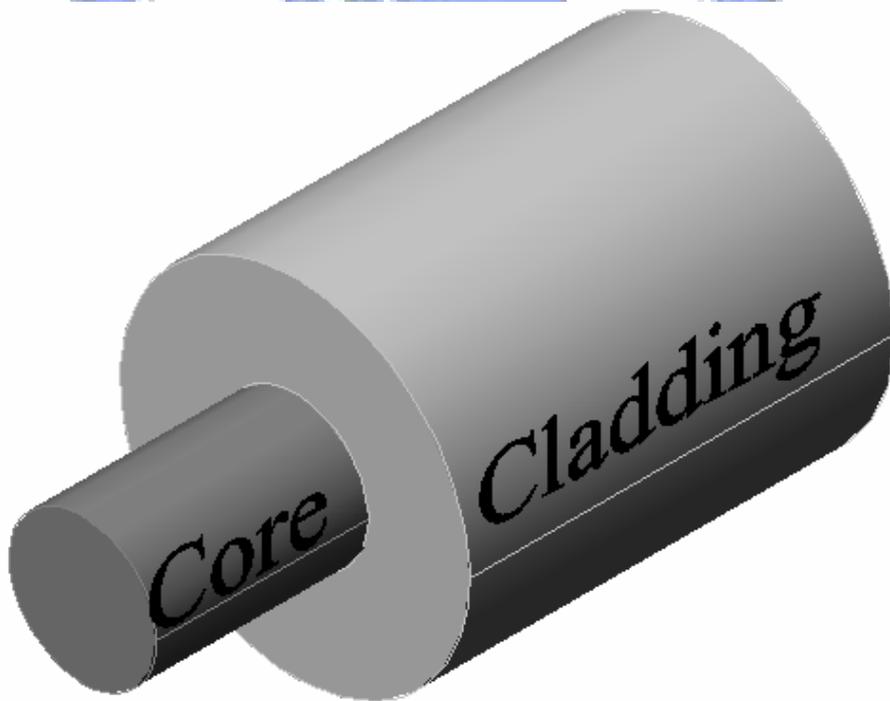
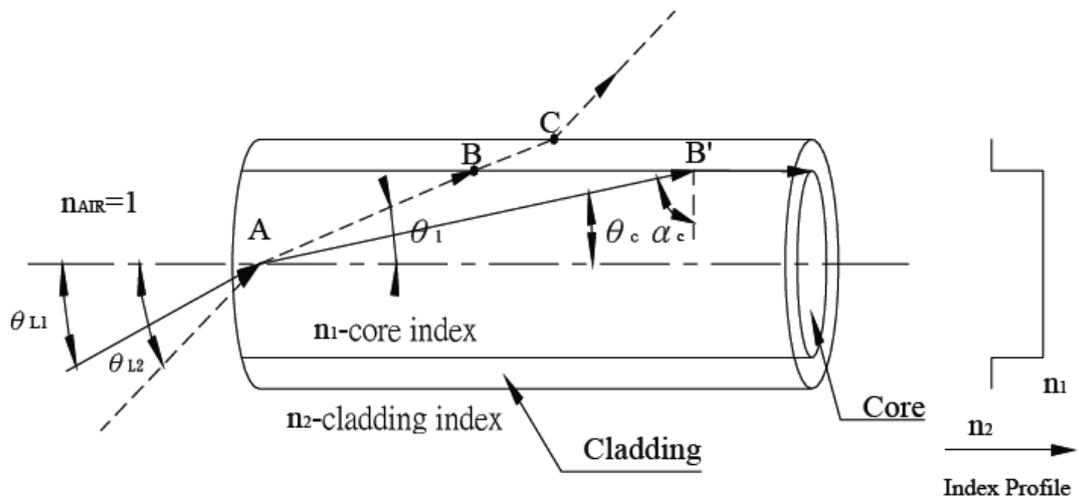


圖 2-8 光纖構造



$$n_1 > n_2$$

θ_{L1} -Launch Angle that become θ_c

θ_{L2} -Launch Angle-unconfined ray

圖 2-9 跳躍折射率光纖之光傳播圖 (摘自 Hecht, 1987)

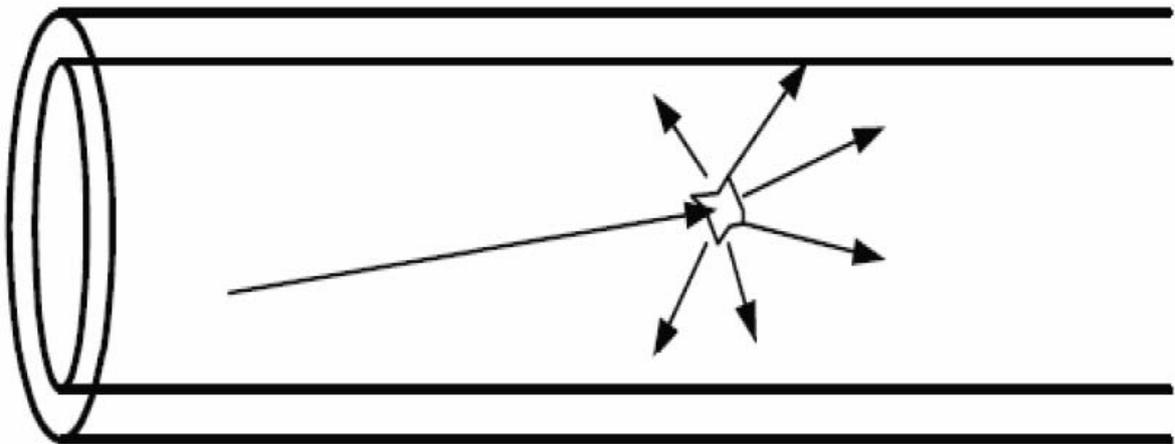


圖 2-10 光散射示意圖 (摘自簡旭君, 2003)

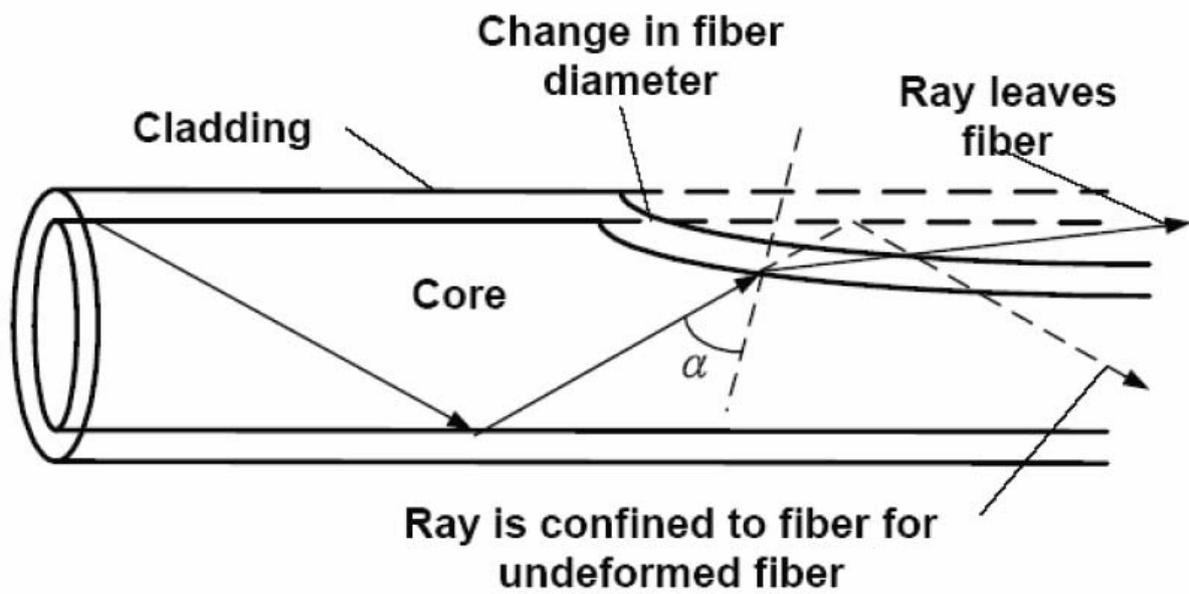


圖 2-11 光纖直徑改變造成光損失(摘自簡旭君,2003)

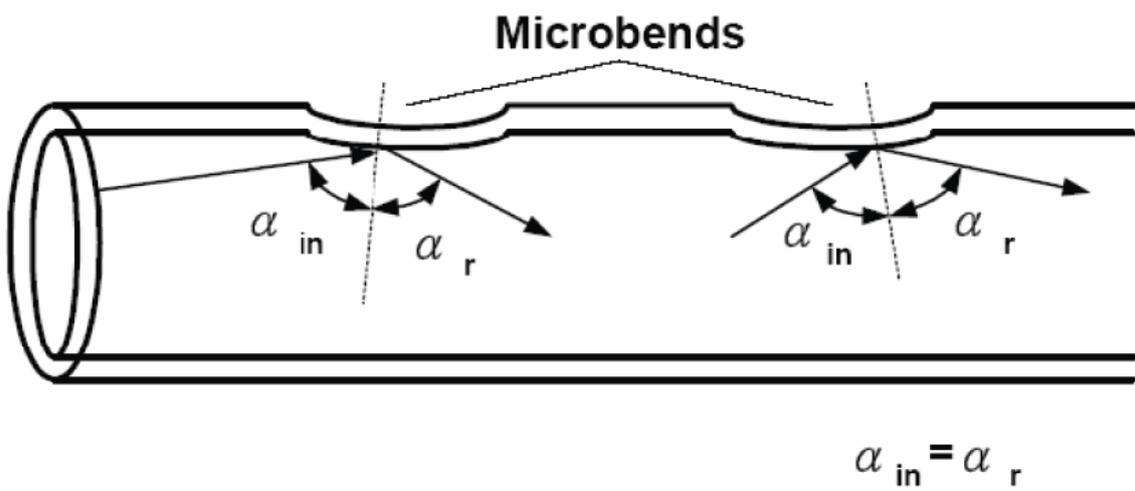


圖 2-12 局部彎曲造成光損失(摘自簡旭君,2003)

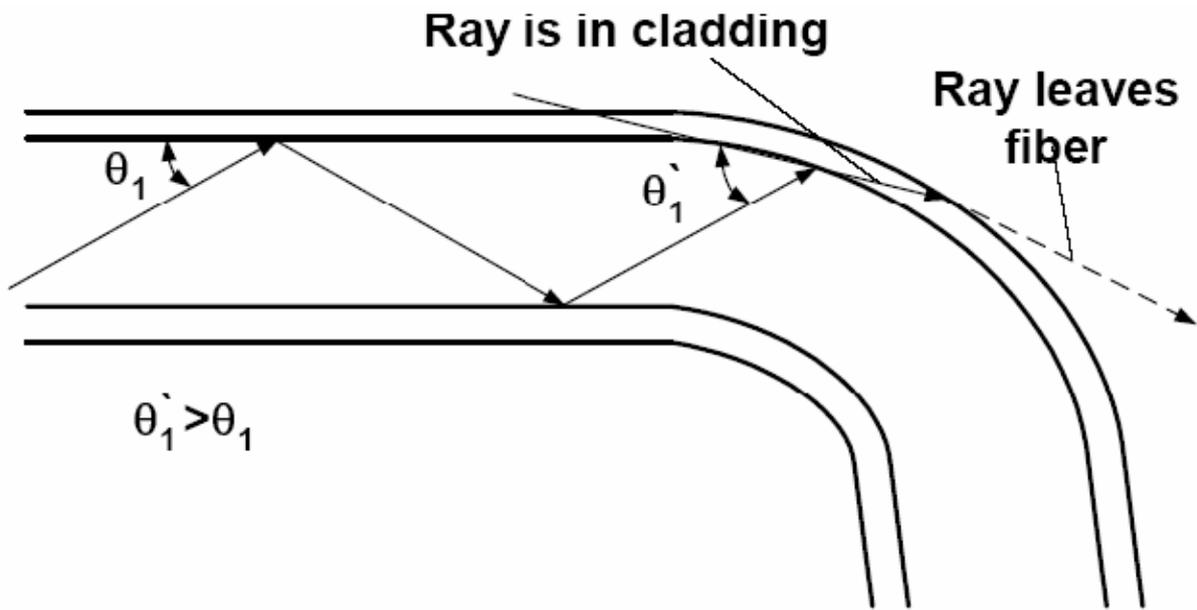


圖 2-13 光纖整體彎曲造成的光損失(摘自簡旭君, 2003)

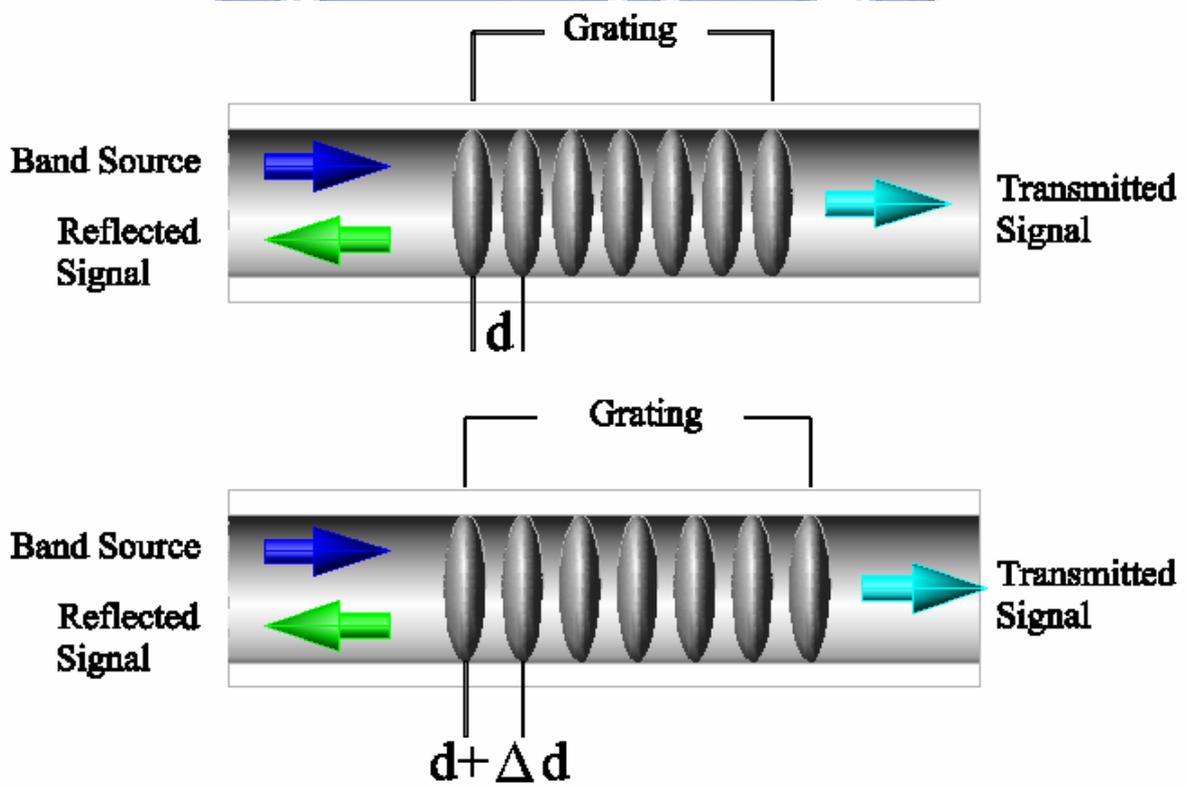


圖 2-14 光纖光柵量測原理示意圖(摘自簡旭君, 2003)

第三章 土壤試驗規劃及設備

本章先就研究之土壤試驗之規劃進行說明，接著介紹有關土壤水分特性曲線試驗、飽和壓密不排水三軸試驗，以及土壤於非飽和狀態下之固定含水量三軸試驗其試驗設備、試驗步驟，以及控制條件等作一敘述。

3.1 試驗規劃

本研究之土壤試驗之流程如圖 3-1 所示。本試驗先於新竹縣玉峰國小及桃園縣砂崙仔崩塌地處理工程處進行現地鑽探取樣，另外也取地表之土樣回實驗室。將鑽探與地表取得之土樣，進行基本物理性質試驗，求得土壤的基本參數資料後，再將土樣重模並控制孔隙比，進行壓力板試驗以求得土壤水分特性曲線，且為了得到飽和狀態下的土壤剪力強度參數，進行三組飽和三軸壓密不排水試驗，藉以求得飽和狀態下土壤的剪力強度參數 c' 、 ϕ' ，最後進行非飽和三軸試驗，非飽和三軸試驗為控制圍壓與基值吸力，以求得非飽和土壤之剪力強度參數 ϕ^b 。

3.2 現地取樣

本試驗主要是針對石門水庫上游崩積土為主，因此選定之第一個鑽探取樣場址為新竹縣尖石鄉玉峰村玉峰國小，第二個場址為桃園縣復興鄉之砂崙仔崩塌地處理工程處(桃 113 線 4K+800)，玉峰國小及砂崙仔崩塌地處理工程處位置

如圖 3-2 所示。

為了分析現地土壤吸力與含水量及強度之關係，故於現地進行鑽孔並取土樣帶回試驗室，玉峰國小試驗場址之實驗鑽孔所在位置位於玉峰國小停車場旁的遊戲器材區之草地上，見圖 3-3、3-4，在玉峰國小內所選定之場址鑽取深度 4 m 的鑽孔；而砂崙仔崩塌地處理工程處之實驗鑽孔位於座標(N24。40'33.7" E121。21'29.6"、高程 691.4m)處，見圖 3-5、3-6，砂崙仔試驗場址鑽取深度 10 m 的鑽孔，並將取得之鑽探土壤帶回試驗室進行室內試驗。

3.3 土樣處理與土壤一般物理性質

新竹縣尖石鄉玉峰村玉峰國小與砂崙仔崩塌地處理工程處為本研究選定之非飽和土壤之試驗場地，在兩處試驗場址進行鑽探及土壤取樣，並將兩處試驗場址取得之土壤進行室內一般物理性質試驗，但砂崙仔崩塌地處理工程處取樣結果顯示約 2 公尺以下之土層多為破碎岩石，因此只取表層土壤進行試驗。

首先將鑽探取得之土樣進行含水量之量測，接著將兩場址所取得之表層土樣放置於烘箱內烘乾，並將黏結之土樣粉碎除去樹枝、草根等雜物，接著將土樣進行篩分析試驗，並將土樣大於 4 號篩以上之土樣去除，保留 4 號篩以下之土樣進行試驗，處理好之 4 號篩以下土樣將用來進行比重試驗、透水性試驗、土壤水分特性曲線試驗、飽和三軸試驗及非飽和三軸試驗，以下分別敘述含水量試驗、比重試驗、粒徑分析試驗、阿太堡試驗及定水頭試驗之結果。

3.3.1 含水量試驗

土壤中含水量的多寡，對於試驗整體而言絕對具有其一定的影響性，含水量越高，相對的土壤的強度也變得較弱。為了求得玉峰國小內之土壤的含水量(ω)，以作為往後試驗及模擬時之基本參數之用，故依照深度由地表至深度 4 m，每 0.5 m 為一段，共 8 組土樣進行含水量試驗，試驗結果顯示玉峰國小內土樣的平均含水量約為 8.81%，如表 3-1 及圖 3-7 所示；而砂崙仔崩塌地處理工程處因下層土層多為破碎岩石，故在進行現地鑽孔時只於地表下 1 m 及 1.5 m 進行劈管取樣，將所取的之土樣進行含水量試驗，試驗結果顯示砂崙仔崩塌地處理工程處之土樣的平均含水量約為 7.026 %，如表 3-2 及圖 3-8 所示。

3.3.2 比重試驗

比重之定義為材料之單位重與水單位重之比值，在土壤力學中常需要利用土壤比重一值做各種不同的運算。為求得玉峰國小內土壤的比重(G_s)，以作為往後試驗運算時之基本參數，本實驗也依照深度由地表至深度 4 m，每 0.5 m 為一段，共 8 組土樣進行比重試驗，試驗結果顯示玉峰國小內之平均土壤比重約為 2.68，如表 3-3 所示；而砂崙仔崩塌地處理工程處則取表土進行比重試驗，實驗結果顯示砂崙仔崩塌地處理工程處其平均土壤比重約為 2.69，而劈管取樣得到地下 1m 與 1.5m 之平均土壤比重為 2.665，如表 3-4 所示。

3.3.3 粒徑分析試驗

土壤的粒徑分佈曲線為土壤力學試驗中最為重要的一環，其不僅可以顯示出土壤中顆粒尺寸的範圍，以判別土壤為粗粒土壤還是細粒土壤，另外其也提供了各種粒徑顆粒的分佈型態，因此本粒徑分析試驗進行篩分析試驗與比重計試驗。試驗結果顯示玉峰國小內之鑽探取得之土壤為粗粒土壤，其粒徑分佈曲線如圖 3-9 所示，而其取 4 號篩以下之土樣其粒徑分佈曲線如圖 3-10 所示，4 號篩以下之土樣為細粒土壤；而砂崙仔崩塌地處理工程處鑽探取樣之土壤為粗粒土壤，其粒徑分佈曲線如圖 3-11 所示，其取 4 號篩以下之土樣其粒徑分佈曲線如圖 3-12 所示，4 號篩以下之土樣為細粒土壤。取 4 號篩以下進行粒徑分析試驗，其原因為進行透水試驗、土壤水分特性曲線試驗、飽和及非飽和三軸試驗時試體所用之重模土樣為 4 號篩以下之土壤。

3.3.4 阿太堡試驗

阿太堡試驗的結果中，可以得到三個特徵值，分別為液性限度值 (LL)、塑性限度值 (PL) 及塑性指數值 (PI)，其中液性限度值 (LL) 及塑性指數值 (PI) 為確定細粒土壤分類的指標，故兩場址皆選取 40 號篩以下之土壤進行阿太堡試驗。試驗結果顯示玉峰國小之土樣的液性限度 (LL) 為 27.2 %，塑性限度 (PL) 為 20 %，塑性指數 (PI) 為 7.2 %，為中塑性；而砂崙仔崩塌地處理工程處之土樣的液性限度 (LL) 為 20.3 %，塑性限度 (PL) 為 17.9 %，塑性指

數 (PI) 為 2.4%，為低塑性。

3.3.5 透水試驗

為了解玉峰及砂崙仔兩試驗場址之水力傳導係數，本實驗取兩場址之表土進行定水頭試驗，試驗土樣為經過處理之 4 號篩以下土壤，而試體之孔隙比玉峰國小 $e=0.77$ 、砂崙仔崩塌地處理工程處 $e=0.52$ ，實驗施加固定之水頭壓力並收集固定時間內所流出之水量以計算土樣之水力傳導係數，試驗結果顯示玉峰國小內之平均水力傳導係數約為 2.45×10^{-5} (cm/s)，如表 3-5 所示；而砂崙仔崩塌地處理工程處其平均土壤水力傳導係數約為 7.30×10^{-5} (cm/s)，如表 3-6 所示。

經過上面一系列之土壤一般物性試驗，玉峰國小與由砂崙仔崩塌地處理工程處 4 號篩以下之土樣其統一土壤分類法 (USCS) 分類為：玉峰國小之土樣其通過 200 號篩之土樣小於 50% 屬於粗粒土壤，且通過 4 號篩之土樣大於 50% 屬於砂，另外 200 號篩以下含量大於 12% 而 $PI > 7$ 屬於粘土質，因此其統一土壤分類為 SC；而砂崙仔崩塌地處理工程處之土樣其通過 200 號篩之土樣小於 50% 屬於粗粒土壤，且通過 4 號篩之土樣大於 50% 屬於砂，另外 200 號篩以下含量大於 12% 而 $PI < 4$ 屬於粉土質，因此其統一土壤分類為 SM。

3.4 試驗儀器

以下將介紹土壤水分特性試驗、飽和壓密不排水三軸試驗及非飽和固定含水量試驗之試驗儀器，其中包括氣壓與水壓控制系統、量測系統、訊號擷取系

統、自製壓力板試驗儀、三軸室以及壓力機。

3.4.1 氣壓與水壓控制系統

空壓機為提供試驗所需壓力之來源，壓力上限為 10 kg/cm^2 。利用手動式調壓閥提供試體所需之圍壓，反水壓部分亦使用手動式調壓閥施壓於除氣水桶，利用塑膠管路，將水壓施加於試體內部；壓力表可顯示圍壓及反水壓之大小，精度為 0.2 kg/cm^2 。

3.4.2 量測系統

本試驗量測設備，除一般飽和三軸試驗所量測之軸向荷重、軸向應變、圍壓及超額孔隙水壓。另外於非飽和三軸試驗時利用差壓計進行體積變化之量測，詳述於 3.7.1 節。

軸向荷重量測使用荷重元 (load cell)，將其置於三軸室頂部，此荷重元可用於量測軸向荷重達 1 kN ；軸向應變之量測使用 Linear Variable Differential Transformer (LVDT)，可量測 40 mm 之變形；圍壓及孔隙水壓量測採用可耐壓 1000 kPa 水壓計 (pressure transducer)，另外在進行非飽和三軸試驗時會加上光纖光柵感測器進行量測，試驗所使用各項量測設備之規格如表 3-7 所示。

3.4.3 訊號擷取系統

本試驗於施加軸向荷重時，主要量測 load cell (軸向荷重)、LVDT (軸向位移) 及水壓計 (圍壓及反水壓) 之變化值。本研究使用安捷倫公司 (Agilent) 所製

造編號 34970A 之訊號擷取儀，34970A 是一個三槽式主機，包含一個內建的 6.5 位數萬用電錶，它提供了 8 種交換與控制插入式模組，內建的 GPIB 與 RS-232 介面將訊號傳回電腦，再配合安捷倫公司所附之程式進行即時試驗資料變化、處理和紀錄。

另外，光纖光柵感測器的訊號擷取則是由 MICRON OPTICS 公司所出產之 sm125 可攜式低速靜態光纖光柵解調器，其有 4 個 channels，每個 channel 可讀取 128 個 FBG 訊號，其使用 MOI 峰值探測演算法，不用多次平均，就能測量 FBG 的中心波長，達到 10 倍的實際採樣解析度，即 0.5 pm。sm125 光纖光柵解調器是為測量低速變化，像應力、溫度和壓力等參數而設計的，也適合長期監測使用。

3.4.4 自製壓力板試驗儀

自製壓力板試驗儀，如圖 3-13 所示，其以不銹鋼支撐連接壓力板儀上下蓋，中間之軸室為中空圓柱型，其材質為透明之壓克力，可觀察試體在試驗過程中之變化。另外，壓力板試驗儀採用美國 Soil Moisture 公司出品，進氣值分別為 1bar、3bar 及 15bar 的高進氣吸力值陶瓷板，高進氣吸力值陶瓷板之安裝如圖 3-14 所示。

3.4.5 三軸室

三軸試驗設備主要以不銹鋼內支撐與三軸室下部緊密結合，三軸室為中空

圓柱型，其材質為透明之壓克力，可觀察試體在試驗過程中之變化，承受之最大氣壓為 10 kg/cm^2 ，基座配合試體大小為直徑 5cm，高度 10cm；試體頂蓋及底座皆放置一銅製透水材料。

三軸室上端並裝有一氣壓缸 (Double Bellofram Piston)，內部含有 3 個大小不同之氣囊 (bellofram)，因此可獨立控制垂直應力，使加壓荷重桿受圍壓作用時，保持加壓荷重桿之平衡與穩定。

3.4.6 壓力機

研究採用之儀器為日本誠研社 (SEIKEN) 所製之三軸壓縮試驗裝置，為齒輪式應變控制，加載速度分為三種不同速度分別為 0.012 mm/min 、 0.102 mm/min 及 1.06 mm/min ，耐荷重為 10 kN。

3.5 土壤水分特性曲線試驗

在非飽和土壤力學行為中基質吸力扮演著極為重大的角色，且基質吸力又會因土壤內水含量的多寡而產生相對應的剪力強度，因此基質吸力與含水量之關係為本研究探討的主要目的之一。

土壤水分特性曲線 (Soil-Water Characterization Curve, SWCC) 的試驗方法，一般常用的為基質吸力控制範圍小於 1500 kPa 的壓力板試驗 (Pressure Plate Test)，搭配基質吸力控制範圍大於 1500 kPa 的鹽溶液法 (Salt Solution Method) 及可以建立張力對深度關係的濾紙法 (Filter Paper Method)。

目前最通用決定土壤水分特性曲線之方法為壓力板試驗，以觀察土壤在乾濕變換的過程中土壤含水量與基值吸力之關係，可作為決定非飽和土壤剪力強度試驗中施加基值吸力的範圍，為非飽和土壤基礎研究的第一步，因此本實驗之土壤水分特性曲線試驗法採用壓力板試驗。

壓力板試驗必須採用具有可耐高壓的壓力板試驗儀，將飽和之高進氣吸力值陶瓷(High Air Entry Ceramic)板及土樣放入壓力板試驗儀之底部，接著施加空氣壓力至預定的基值吸力(軸平移技術)，此時土壤中的水分將會從土中經由高進氣吸力值陶瓷板從壓力板試驗儀底部流出，直至土壤吸力平衡，此時將土樣取出量測其含水量。重複上述步驟，變化不同吸力大小，以得出土壤之水分特性曲線。

3.5.1 試驗步驟

將現地取回的土樣取經處理後之 4 號篩以下土壤進行重模製作試體，並參考 ASTM D3152-1994 年之規範及 Soil Moisture 公司壓力板操作手冊，利用壓力板試驗儀進行吸力試驗，藉以求得基質吸力與含水量之關係。詳細之試驗步驟如下：

1.高進氣吸力值陶瓷板飽和

Soil Moisture 公司壓力板操作手冊中指出需將水淹滿陶瓷板的表面，浸泡時間至少需要一天，當陶瓷板完全浸濕，即達飽和狀態。

2.試體製作

將 4 號篩以下土樣以乾灑法填入直徑 60mm，高度 20mm 之鋼環模具中，並控制其孔隙比，玉峰國小 $e=0.77$ 、砂崙仔崩塌地處理工程處 $e=0.52$ 。在施做試驗時，鋼環可以防止土樣側向變形。

3.試體飽和

將鋼環及其內的重模土樣放置於壓力板試驗儀中使其吸水飽和，大約在一天後，當試體表面出現一層水膜時，即可視為已達飽和狀態。試體放置於壓力板試驗儀中，需注意使試體底表面與陶瓷板完全接觸。

4.基質吸力施加

試驗中最重要的步驟就是基質吸力的施加，由之前的敘述，可以知道基質吸力為空氣壓力 (u_a) 與水壓力 (u_w) 之間的差值，為了方便起見，必須控制試體內的水壓力為零 (即 $u_w=0$)，這樣所施加空氣壓力就會是等於基質吸力。當基質吸力施加後水分會從土中流出，並經由出水管流入玻璃

量管中，當土壤中水分與基值吸力已達平衡則水分不再排出。因此本試驗於基值吸力施加後每 30 分鐘紀錄排出之水分，當兩次紀錄之水分流出小於 0.1 ml 時，則視土樣達平衡狀態。

5.繪製水分特性曲線

量測每個試體最終重量，將試體送進 105°C 烘箱，烘乾 24 小時之後取出秤重，求其每個吸力階段的含水量，繪製水分特性曲線，藉由 $se = \omega G_s$ 求得每一階段之飽和度，如此可建立基值吸力與土樣飽和度的關係。

3.5.2 控制條件

試體施加空氣壓力分別為 10、30、50、70、90、110、150、200、250、300kPa。並控制玉峰國小之試體孔隙比為 0.77、砂崙仔崩塌地處理工程處之試體孔隙比為 0.52 進行壓力板試驗。

3.6 飽和壓密不排水三軸試驗

為得知飽和狀態下的土壤剪力強度參數，本研究進行飽和壓密不排水三軸試驗，藉以求得飽和狀態下土壤的剪力強度參數 c' 、 ϕ' 。作為探討基質吸力對非飽和土壤抗剪強度影響之比較。以下介紹此試驗之試驗步驟以及控制條件。

3.6.1 試驗步驟

1. 試體製作

依據實驗規劃之初始孔隙比計算出進行實驗所需之土重，並採用濕夯法 (wet tamping) 進行試體之製作。首先將製作試體用之分裂模置於三軸試體底座上，套上橡皮膜後抽氣，使橡皮膜緊附在模具上，放入底層濾紙後開始製作試體。經由計算後秤取試體所需之 4 號篩以下土樣，並將土樣加入少量水分後均勻拌合，使其含水量約 8%，然後將土樣分為五等份重，接著將五份土樣填於直徑 50 mm、高度 100 mm 之鋼模內，每層利用夯錘夯實至要求之緊密度，每層高度為 20mm。

試體製作完畢後安裝上層濾紙，將三軸室之內支撐固定後，放下荷重桿輕觸試體後固定荷重桿，再結合上蓋與橡皮膜，使試體在加載之前不產生任何軸向應變，最後拆除模具，再套上三軸室壓克力外罩。

2. 試體排氣

將三軸室組裝完成後，接上水管將清水經室壓閥進入三軸室，使水面高於試體高度後關閉室壓閥，接著給予圍壓約為 10~20 kPa，使試體能夠自立，另外將下部進水閥連接一通入二氧化碳 (CO₂) 之管線，上部進水閥則打開排氣，以置換試體內部之空氣，二氧化碳通入壓力為約 5 kPa，通入時

間約為 30 分鐘；通入二氧化碳後，由試體底部注入除氣水（Deaired Water），使空氣由試體上方排出，直到試體內部充滿除氣水為止。

3. 試體飽和

排氣完成後，進行試體之飽和。將試體上下接通水管線，緩慢施加室壓及反水壓於三軸室，本研究之室壓為 320 kPa，反水壓為 300 kPa。施加反水壓後之飽和時間約 12 小時左右，進行 B-check 動作，以判定試體是否達到飽和，B 值於 0.95 以上即可進行壓密。

4. 試體壓密

飽和完畢後即可進行壓密試驗，並將壓密過程中試體排出之水量集中至體積變化儀。等待超額孔隙水壓消散完畢之後，壓密即完成。判斷壓密完成之方法，以體積變化儀之水量不再變化，並將試體進水閥關閉，若孔隙水壓沒有增加之趨勢，即為壓密完成，可進行下一階段之試驗步驟。若體積變化儀之水量已不再變化，但將進水閥關閉後，孔隙水壓又不斷上升，即有可能為試體漏水，若有此現象則試驗應當重新施作。

5. 試體剪動

將試體上下閥門關閉，試驗採用應變控制方式，試驗全程紀錄其軸向應力、軸向應變及超額孔隙水壓。試驗完成時，量測試體破壞後壓密排水體積，並計算其壓密後之孔隙比 e_c 值，做為試驗結果分析比較的依據。

3.6.2 控制條件

試驗控制之初始孔隙比玉峰國小為 0.87、砂崙仔崩塌地處理工程處為 0.70；試驗有效圍壓分別為 50、100、200 kPa；試體剪動速率為 0.102mm/min，則剪動約三小時可達 20%軸向應變，以此試驗控制條件下求得各組模擬試體於飽和時之抗剪強度參數 c' 、 ϕ' 。

3.7 非飽和固定含水量三軸試驗

非飽和土壤之三軸試驗可分為 CD(Consolidated Drained Test)、CU(Consolidated Undrained Test)以及 CW(Constant Water Content Test)三種試驗，上述試驗之控制條件如圖 3-15，而本實驗採用 CW 試驗。

3.7.1 試驗設備

為了量測非飽和土壤剪力強度及決定非飽和土壤之破壞包絡面，需進行非飽和土壤三軸剪力強度試驗，因非飽和土壤的孔隙中存在著水及空氣，因此儀器必須能分別獨立控制與量測孔隙氣壓力及孔隙水壓力，使其不互相干擾；此

外，當孔隙水壓力經常保持在負值時，將導致量測系統中的水汽化，進而影響孔隙水壓之量測與控制。為解決上述問題，於試體底座裝置高進氣吸力值陶板與使用軸平移(Axial Translation)技術分別克服。

在試驗設備方面，本研究參考褚炳麟及黃隆茂(1993)所研發之耐高壓透氣盤底座，及林宏達和拱祥生(2001)之不飽和土壤三軸剪力試驗儀之介紹，規劃本實驗之非飽和土壤三軸試驗裝置；因非飽和三軸試驗設備與飽和三軸試驗設備差異不大，因此本校之非飽和三軸試驗儀，仍採用本校飽和三軸試驗儀之三軸室、三軸試驗之控制面板與壓力系統，針對非飽和土壤試驗之不同處及量測所需處加以改良，以下為改良之重點。

1.耐高壓之高進氣吸力值陶瓷板底座

為了能分別獨立控制與量測孔隙氣壓力及孔隙水壓力，本試驗於三軸室底座上安裝耐高壓高進氣吸力值陶瓷板，試驗採用之高進氣吸力值陶瓷板為美國 Soil Moisture 公司出品，其直徑 4.2cm、厚度 1.1cm、透氣值為 3 bar，而耐高壓之高進氣吸力值陶瓷板底座其原理主要是利用鑲在高進氣吸力值陶瓷板上的多孔鋼板來抵抗與試體接觸之應力，以避免陶瓷板產生裂縫，如圖 3-16 所示。

2. 體積量測系統(Double Cell)

本研究之非飽和三軸試驗為採用 CW 試驗法，由圖 3-15 之試驗控制條件可知此試驗方法需進行體積變化量測，因此參考 Ng et al., (2002) 之非飽和試驗之體積量測方法，如圖 3-17 所示，設計本研究之體積量測系統。體積量測系統為利用差壓計紀錄一參考水頭與內部三軸室(inner cell)之水頭變化，利用水頭之壓力變化換算為水頭之水位變化在乘上水頭變化部份之截面積可得到體積之變化，本實驗之內部三軸室如圖 3-18 所示，圖 3-19 為本研究之非飽和三軸試驗儀器。

3.7.2 試驗步驟

非飽和三軸試驗中試體製作與排氣之方法與飽和壓密不排水三軸試驗相同，一樣採用濕夯法(wet tamping)進行試體之製作，不同處為將試體底座上之金鋼砂透水石換成耐高壓多孔陶板，並加上一內部三軸室(inner cell)用以量測試體之體積變化，其試體製作及架設流程如下：

1. 試體製作

(A) 首先將多孔鋼板放置於高進氣吸力值陶瓷板上，接著將製作試體用之分裂模置於三軸試體底座上，套上橡皮膜後抽氣，使橡皮膜緊附在模具上，放入底層濾紙後開始製作試體。

(B)秤取試體所需之 4 號篩以下土樣，並將土樣加入少量水分後均勻拌合，使其含水量約 8%，含水量約 8% 之選定是為使試體濕潤在試體製作完成後有自立性，然後分五層將土樣夯實於直徑 50 mm、高度 100 mm 之鋼模內，注意每層均利用夯錘夯實至要求之緊密度，每層高度為 20mm。

(C)試體製作完畢後安裝上層濾紙，再結合上蓋與橡皮膜後拆除模具，接著將內部三軸室套上，並將三軸室之內支撐固定後放下荷重桿，當荷重桿輕觸試體上蓋後，連接荷重桿並固定荷重桿，使試體在加載之前不產生任何軸向應變，再套上三軸室壓克力外罩。

2. 試體排氣

試體排氣之方法與飽和壓密不排水三軸試驗相同，唯一不同處則因為試體底座上之金鋼砂透水石換成耐高壓多孔陶板，其滲透係數小，故不接通二氧化碳取代試體內空氣。排氣之步驟為將三軸室組裝完成後，接上水管將清水經室壓閥進入三軸室，使水面高於試體高度後關閉室壓閥，接著給予圍壓約為 10~20 kPa，使試體能夠自立。完成後將下部進水閥接通由試體底部注入除氣水 (Deaired Water)，使空氣由試體上方排出，直到試體內部充滿除氣水為止。因為陶瓷板之滲透係數小，所以在通入除氣水時需加壓，此時反水壓為 60 kPa、室壓為 70 kPa。

3.高進氣吸力值陶瓷板與試體之飽和

由於 Soil Moisture 公司壓力板操作手冊中指出需將水淹滿陶板的表面，浸泡時間至少需要一天，當陶瓷板完全浸濕，即達飽和狀態，因此本實驗利用試體注水排氣與飽和試體的同時進行陶瓷板的飽和動作。

試體之飽和時，將試體上下接通水管線，施加室壓及反水壓於三軸室，此時室壓為 215 kPa，反水壓為 200 kPa。施加反水壓後之飽和時間約 12 小時後進行 B-check 動作，以判定試體是否達到飽和。因為非飽和三軸試驗之試體下方裝有高進氣吸力值陶瓷板，所以無法接通二氧化碳取代試體內空氣，因此本試驗之 B-check 值皆無法達到 0.95 以上，但因實驗為非飽和試驗，故當 B-check 值達 0.8 以上即可行壓密。

選定 B-check 值達 0.8 以上即可進行壓密其原因為，經過多次試驗 B-check 值達 0.8 以上後很難再提升，且當 B-check 值達 0.8 以上之試體於基值吸力施加後期會有水分排出，因此此狀況下之試體其體積含水量大於施加所施加吸力之平衡時體積含水量，故決定本試驗之 B-check 值達 0.8 以上即可行壓密。

4. 試體壓密與基值吸力平衡

試體達飽和後，首先進行試體之壓密試驗，本壓密試驗控制之有效圍壓為 $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$ ，其試驗步驟為先將上、下反水壓閥關上，增加室壓至預定之壓力後打開上、下反水壓閥讓水排至水體積變化儀，經過約 1 小時後水體積變化儀之水量變化小於 0.5 ml 時，則進行基值吸力之施加。

接著進行基值吸力之施加，其步驟為將施加孔隙氣壓之管線連接至上反水壓閥，將孔隙氣壓調至與試體內部之反水壓相等後，打開上反水壓閥讓氣壓進入試體中，然後保持室壓比氣壓大的原則，逐漸增加室壓與孔隙氣壓直到預定之氣壓與室壓；調整到預定之壓力後，打開下反水壓閥讓水排出至水體積變化儀中，繼續試體的壓密以及基值吸力的平衡。試體受空氣壓力作用約 1 天，試體逐漸達到吸力平衡、水分不再排出，當經過 1 小時水體積變化儀之水量變化小於 0.1 ml，即視為壓密與吸力平衡階段完成，試體內部趨於穩定。

5. 試體剪動

待施加之基質吸力已平衡，將試體下反水壓閥門關閉，試驗採用應變控制方式，試驗全程紀錄其軸向應力、軸向應變及超額孔隙水壓與超額孔隙氣壓，另外，利用差壓計量測因體積變化而造成外部參考水頭與內部三軸室頸部間之水頭變化，用以計算試驗過程中試體體積之變化情形。試驗完成

時，計算試體壓密排水後之體積，並計算其孔隙比 e_c 值，做為試驗結果分析比較的依據。

3.7.3 控制條件

試驗控制之初始孔隙比玉峰國小為 0.87、砂崙仔崩塌地處理工程處為 0.70；試驗有效圍壓皆為 100 kPa、施加之吸力分別為 30、90、200 kPa；剪動速率為 0.012 mm/min，以求得基值吸力對非飽和試體抗剪強度之影響。

非飽和三軸試驗中，試體破壞時之應變與土壤種類與應力歷史有關，而試體破壞時間則與陶瓷板之滲透係數相關，陶瓷板滲透係數越低其超額孔壓力消散時間越久，試體破壞時間越長。而非飽和固定含水量三軸試驗之剪動速率，其速率需使所量測之超額孔隙水壓力有足夠時間平衡，因此本試驗嘗試使用試驗室內壓力機之兩種剪動速率 0.102 mm/min 與 0.012 mm/min 進行試驗，最後為確保使所量測之超額孔隙水壓力有足夠時間平衡，因此最後選用實驗室內壓力機之最慢剪動速率 0.012 mm/min 進行試驗。

表 3-1 玉峰國小-土壤含水量試驗結果

試體編號	土壤深度(m)	含水量 w (%)	平均含水量 (%)
A	0 ~ 0.5	7.22	8.81
B	0.5 ~ 1.0	9.54	
C	1.0 ~ 1.5	9.18	
D	1.5 ~ 2.0	11.73	
E	2.0 ~ 2.5	10.90	
F	2.5 ~ 3.0	9.62	
G	3.0 ~ 3.5	6.19	
H	3.5 ~ 4.0	8.71	

表 3-2 砂崙仔崩塌地處理工程處-土壤含水量試驗結果

試體編號	土壤深度(m)	含水量 w (%)	平均含水量 (%)
取樣管 1	0.5 ~ 1	7.058	7.026
取樣管 2	1 ~ 1.5	6.995	

表 3-3 玉峰國小-土壤比重試驗結果

試體編號	土壤深度(m)	比重 Gs	平均比重
A	0 ~ 0.5	2.67	2.68
B	0.5 ~ 1.0	2.68	
C	1.0 ~ 1.5	2.69	
D	1.5 ~ 2.0	2.69	
E	2.0 ~ 2.5	2.68	
F	2.5 ~ 3.0	2.66	
G	3.0 ~ 3.5	2.69	
H	3.5 ~ 4.0	2.66	

表 3-4 砂崙仔崩塌地處理工程處-土壤比重試驗結果

試體編號	土壤深度(m)	比重 Gs	平均比重
A	表土	2.686	2.69
B	表土	2.691	
C	表土	2.64	
取樣管 1	0.5 ~ 1.0	2.68	2.665
取樣管 2	1.0 ~ 1.5	2.65	

表 3-5 玉峰國小-透水試驗結果 (e=0.77)

水頭壓力		量測時間	流出水量	試體高度	試體面積	水力傳導係數 k
kPa	cm-H ₂ O	sec	cm ³	cm	cm ²	cm/s
11.01	112.30	300	2.50	14.7	38.48	2.83*10 ⁻⁵
10.25	104.54	300	2.10			2.56*10 ⁻⁵
10.56	107.70	300	2.05			2.42*10 ⁻⁵
10.67	108.83	180	2.03	8	36.32	2.28*10 ⁻⁵
10.71	109.24	180	2.00			2.24*10 ⁻⁵
10.74	109.54	180	1.85			2.07*10 ⁻⁵
9.89	100.87	300	3.90	8	36.32	2.84*10 ⁻⁵
9.85	100.46	300	3.50			2.56*10 ⁻⁵
9.75	99.44	300	3.10			2.29*10 ⁻⁵
平均水力傳導係數 k (cm/s)				2.45*10 ⁻⁵		

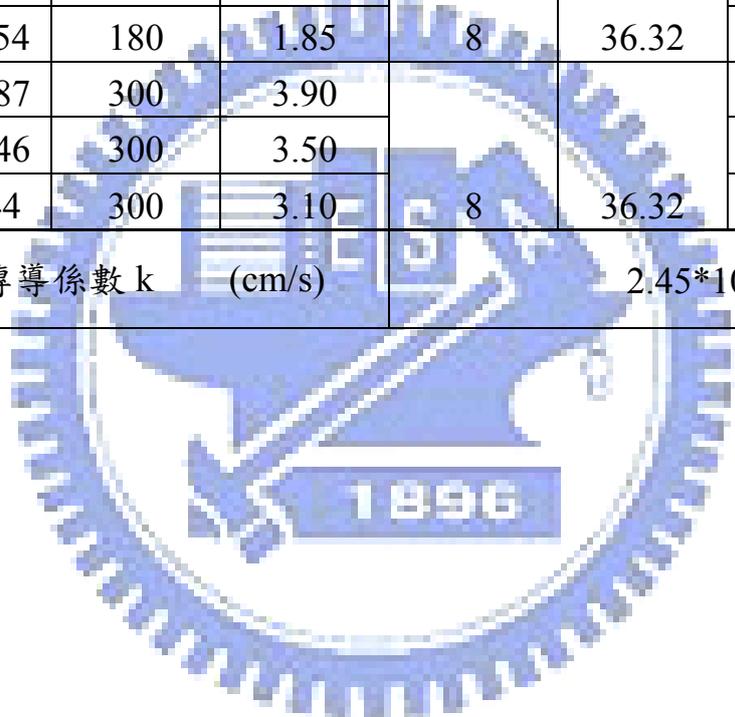


表 3-6 砂崙仔崩塌地處理工程處-透水試驗結果 (e=0.52)

水頭壓力		量測時間	流出水量	試體高度	試體面積	水力傳導係數 k
kPa	cm-H ₂ O	sec	cm ³	cm	cm ²	cm/s
10.10	103.01	300	5.4	14.7	38.48	6.67*10 ⁻⁵
10.25	104.54	300	4.95			6.03*10 ⁻⁵
10.12	103.22	300	4.7			5.80*10 ⁻⁵
10.18	103.83	300	6.0	14.7	38.48	7.36*10 ⁻⁵
10.37	105.77	300	6.45			7.76*10 ⁻⁵
10.18	103.83	300	6.6			8.09*10 ⁻⁵
10.37	105.77	300	6.7	14.8	38.48	8.12*10 ⁻⁵
10.32	105.26	300	6.5			7.92*10 ⁻⁵
10.26	104.65	300	6.5			7.96*10 ⁻⁵
平均水力傳導係數 k (cm/s)				7.30*10 ⁻⁵		

表 3-7 三軸試驗量測系統規格表

感測器	量測範圍	解析度
LVDT	40 mm	0.01 mm
電子式荷重元	1 kN	0.1N
電子式水壓計	1000 kPa	0.01 kPa
光纖光柵荷重元	1 kN	1 N
光纖光柵位移計	25 mm	0.05 mm
光纖光柵水壓計	1000kPa	0.3 kPa
光纖光柵差壓計	10 kPa	0.004 kPa
光纖光柵溫度棒	15~35 °C	0.04 °C

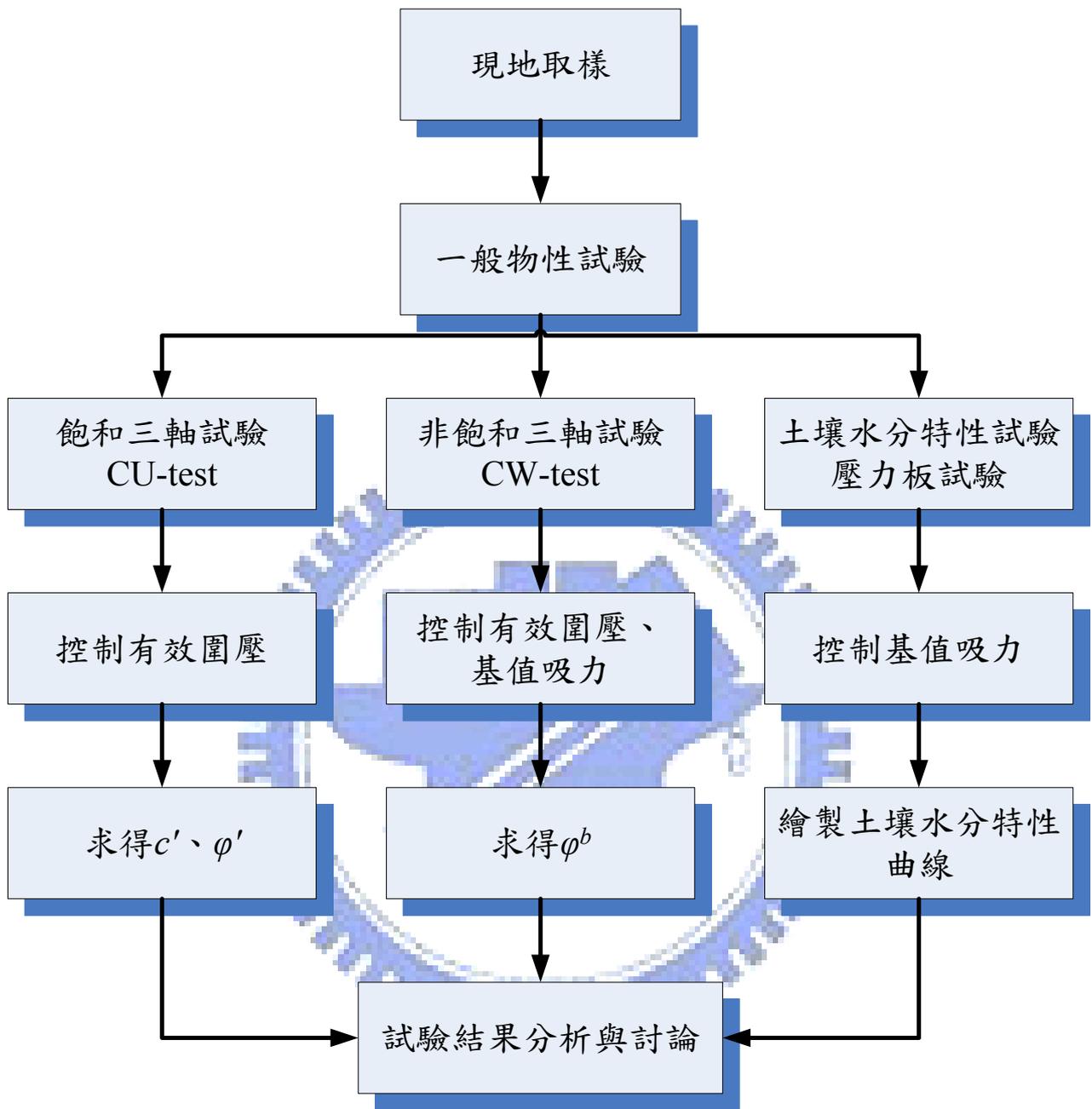


圖 3-1 土壤試驗流程圖



圖 3-2 玉峰國小及砂崙仔位置圖



圖 3-3 玉峰國小試驗場址-車棚旁遊戲器材區場景圖



圖 3-4 玉峰國小鑽探孔位置場景圖



圖 3-5 砂崙仔崩塌地處理工程處試驗場址



圖 3-6 砂崙仔崩塌地處理工程處鑽探孔位置場景圖

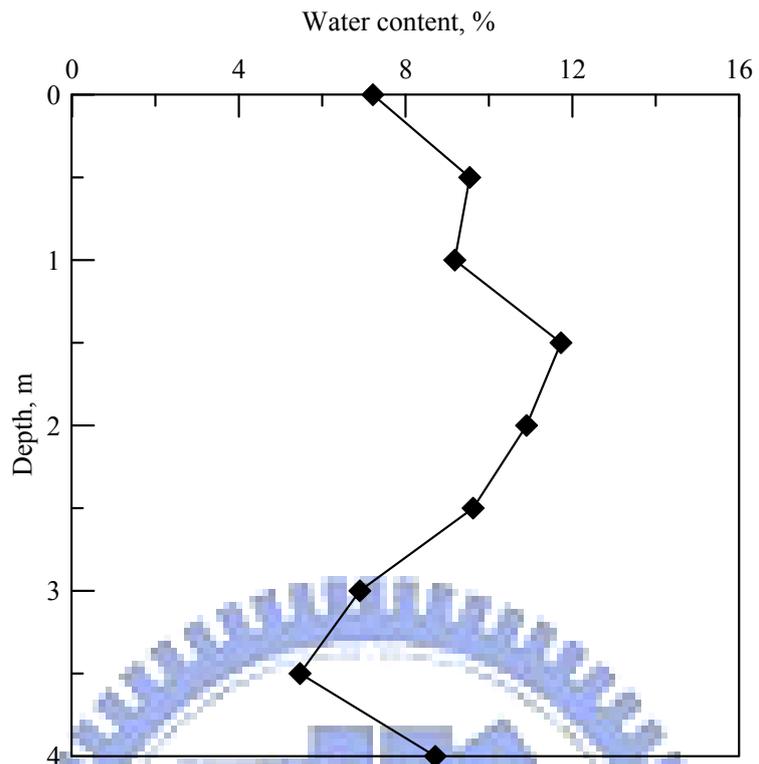


圖 3-7 玉峰國小-土壤含水量與深度示意圖

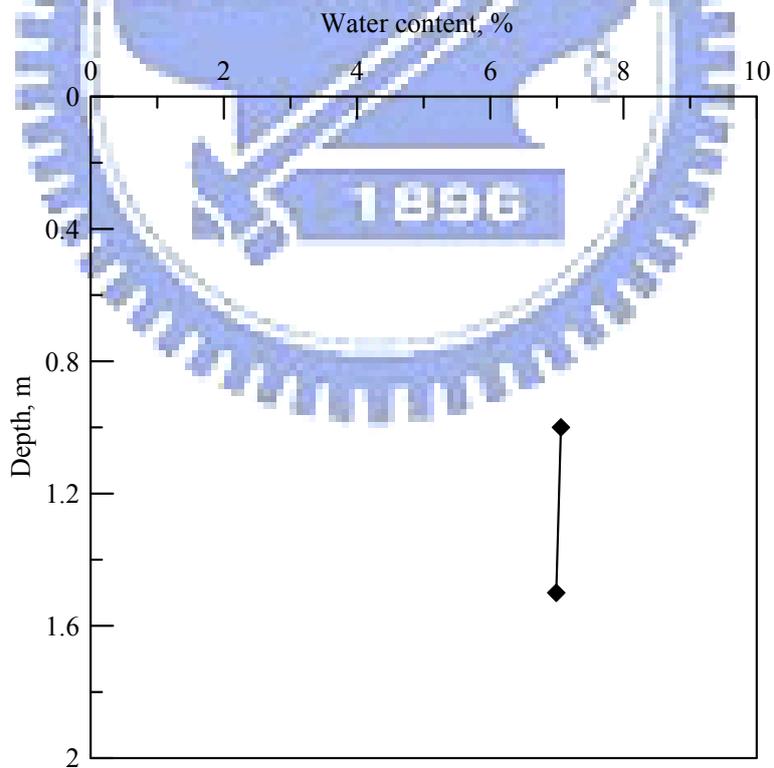


圖 3-8 砂崙仔崩塌地處理工程處-土壤含水量與深度示意圖

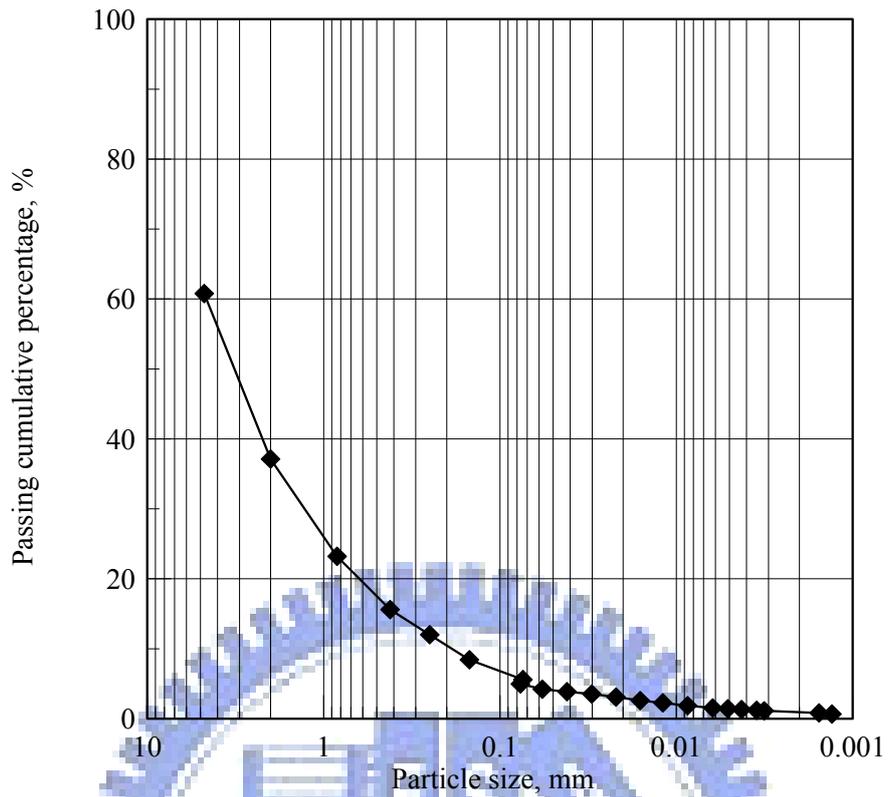


圖 3-9 玉峰國小-土壤粒徑分佈圖

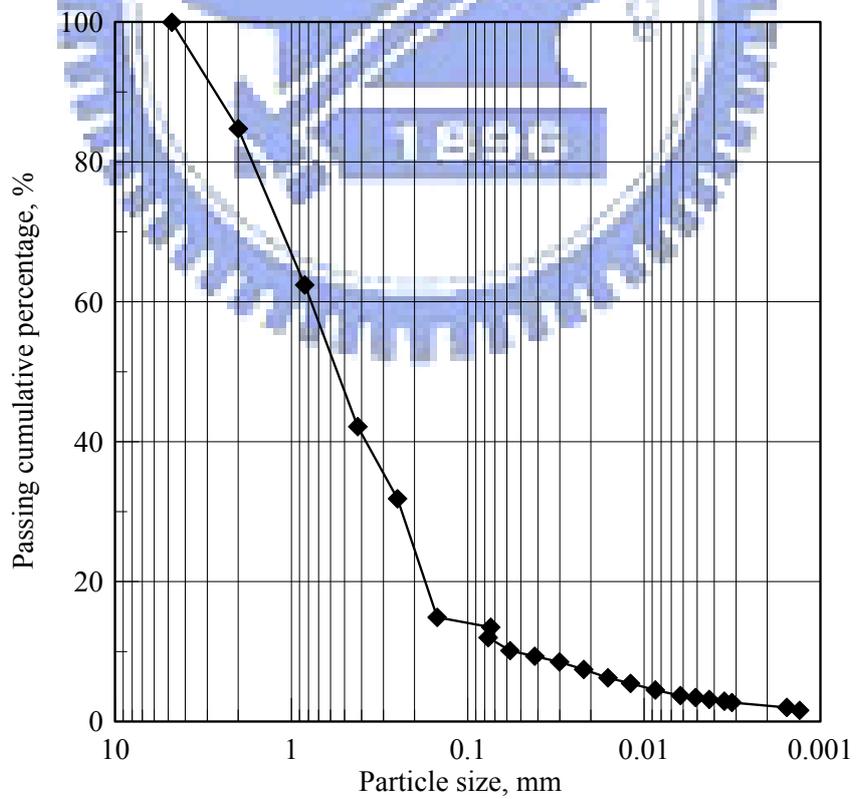


圖 3-10 玉峰國小-4 號篩以下土壤粒徑分佈圖

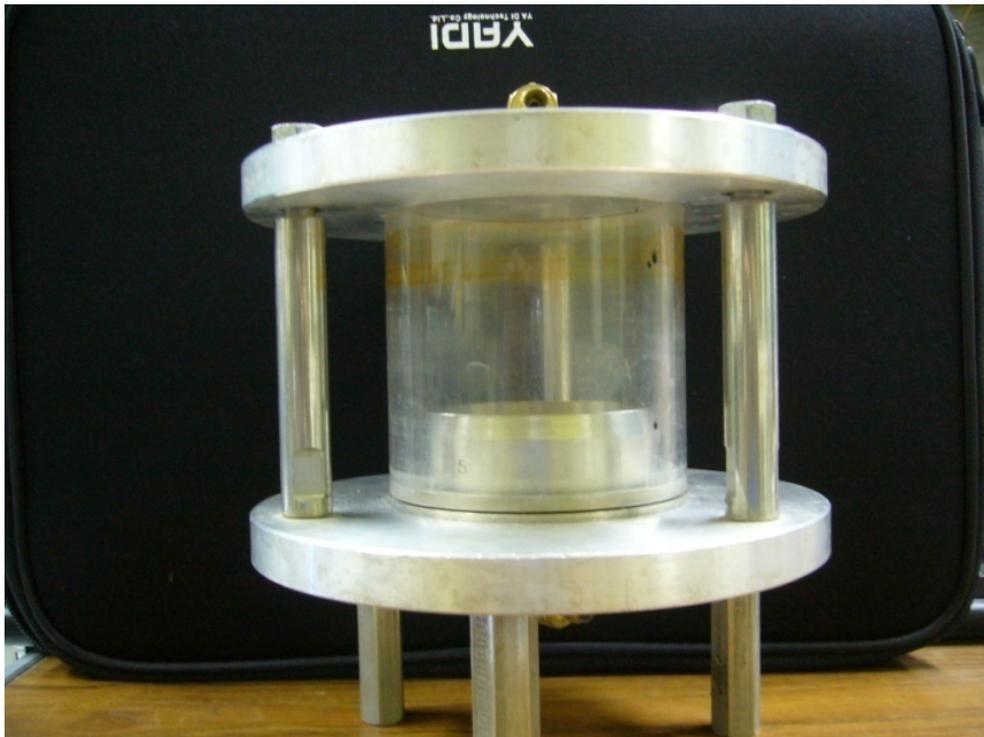


圖 3-13 自製壓力板試驗儀



圖 3-14 高進氣吸力值陶瓷板安裝圖

Test Methods	Consolidation Prior to Shearing Process	Drainage		Shearing Process		
		Pore-Air	Pore-Water	Pore-Air Pressure, u_a	Pore-Water Pressure, u_w	Soil Volume Change, ΔV
Consolidated Drained (CD)	yes	yes	yes	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>M</i>
Constant water content (CW)	yes	yes	no	<i>C</i>	<i>M</i>	<i>M</i>
Consolidated undrained (CU)	yes	no	no	<i>M</i>	<i>M</i>	—
Undrained	no	no	no	—	—	—
Unconfined compression (UC)	no	no	no	—	—	—

M = Measurement, *C* = controlled.

圖 3-15 非飽和土壤之三軸試驗之控制條件(取自 Fredlund, D. G. and Raharjo, H., 1993)

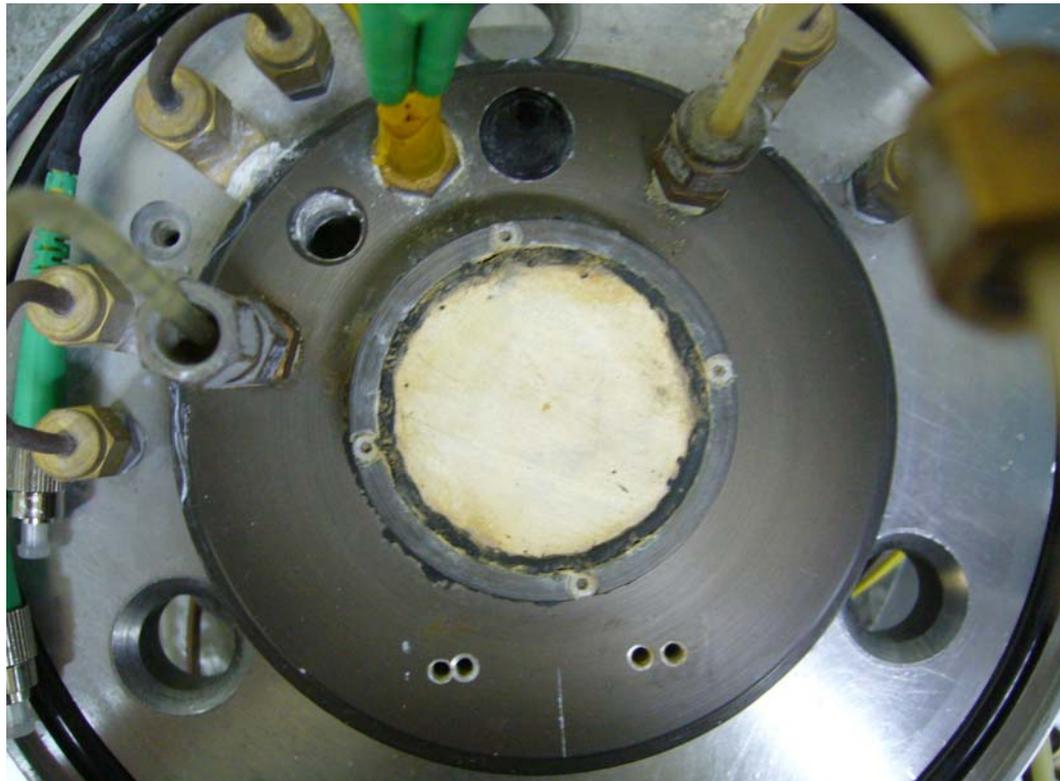


圖 3-16 耐高壓高進氣吸力值陶瓷板

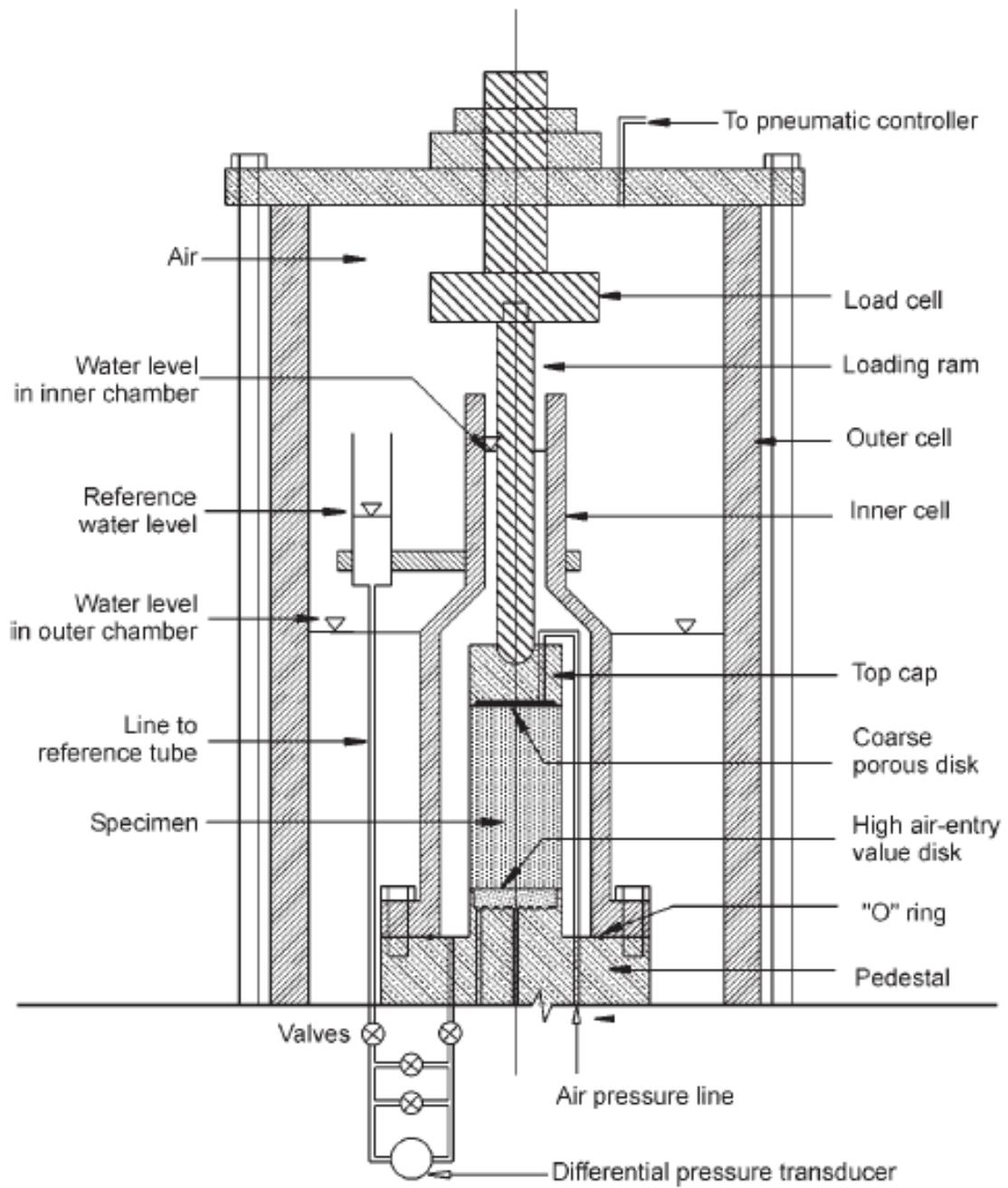


圖 3-17 非飽和體積量測(取自 Ng et al., 2002)

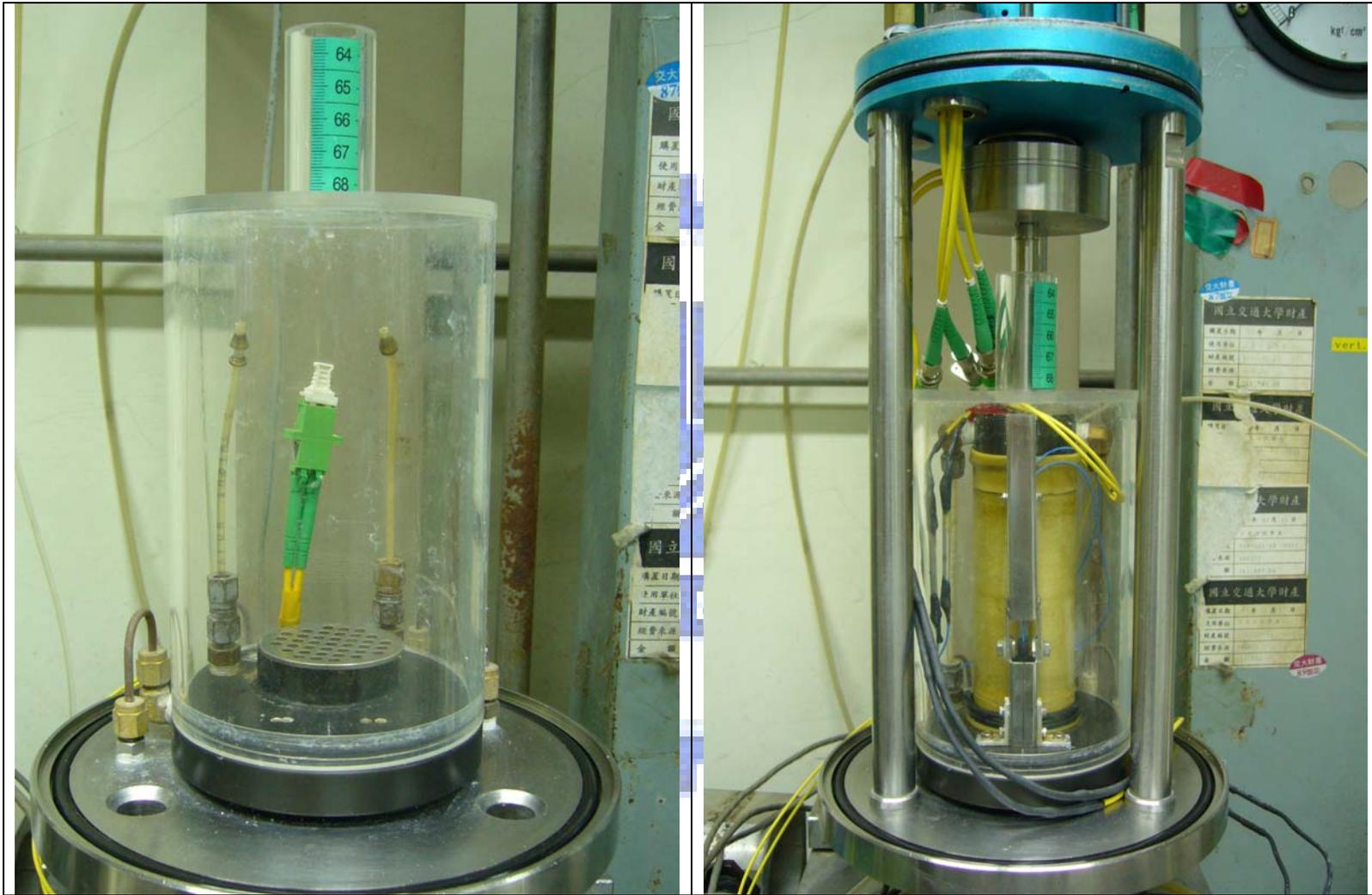


圖 3-18 非飽和體積量測系統

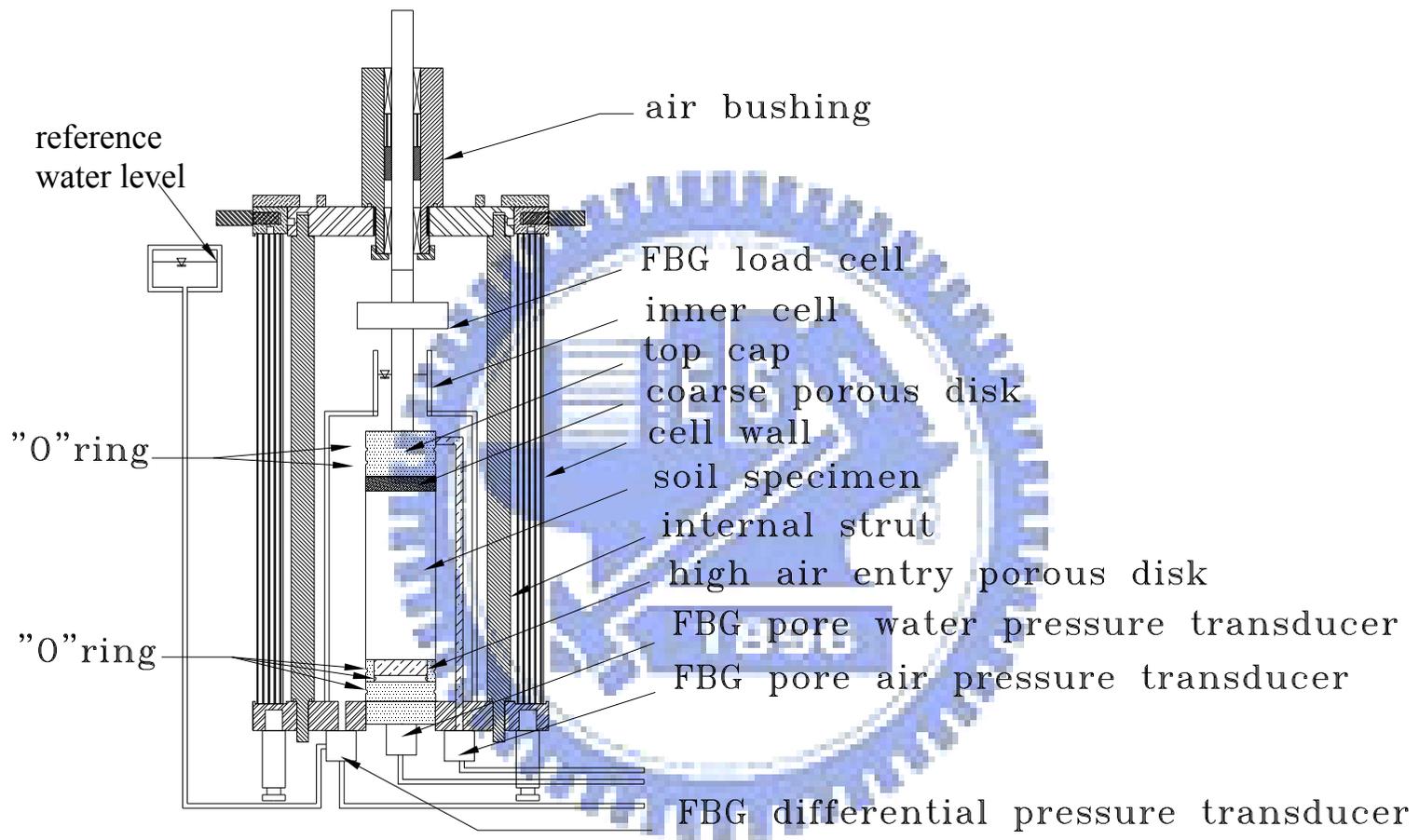


圖 3-19 非飽和土壤三軸試驗儀

第四章 試驗結果與討論

本章首先說明非飽和三軸試驗所需之光纖光柵感測器其設計原理與改良重點，接著就本試驗所需之感測器之標定結果進行討論，然後分別對於土壤水分特性曲線試驗、飽和壓密不排水三軸試驗以及非飽和固定含水量三軸試驗之試驗結果，逐一進行探討，最後將非飽和三軸試驗中電子式與光纖式量測系統所得之量測結果做一比較與討論。

4.1 光纖光柵感測器設計與改良

為了發展出適合室內非飽和三軸試驗之光纖感測原件，本研究參考黃正中(2005)、高聖傑(2006)所研發之節理式光纖光柵感測器與壓力式光纖光柵感測器並進行改良，以下介紹各感測器之設計原理與改良重點。

4.1.1 光纖光柵位移計

光纖光柵位移計為參考黃正中(2005)研發之節理式光纖光柵節理式偏斜移 (Fiber Bragg Grating Segmented Deflectometer, FBG-SD) 進行改良，FBG-SD 原設計目的為量測地層橫向位移隨深度之分佈。為了能於三軸室內量測試體之變形，利用 FBG-SD 之原理將其尺寸縮小並進行改良，其設計如圖 4-1 所示，以便於量測三軸試體軸向之位移。

光纖光柵位移計量測變形是利用變形軟管的變形產生讀數，變形軟管與剛

性支架組合成量測節理。量測節理之設計為使用 PC 製成之柔性軟管(Flexible Tube)，相隔 180 度加工刻畫一寬及深各 1mm 之 V 型直線溝槽，如圖 4-2 所示，再將兩 FBG 成對黏貼於兩側所刻畫之 V 型溝槽中，此部分稱為變形軟管。然後在此應變感測元件兩端放入剛性支架中，則量測過程中會將剛性支架兩端所受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，兩者合起來則為量測節理。在量測節理中變形軟管一端與支架固定視為固定端，另一端為可於支架縱向方向自由滑動之滑動端，滑動端是利用插入一剛性短棒，使其束制於量測節理上一長條滑動軌道上，使軟管可自由的於滑動軌道滑動，而變形軟管之中心始終於節理之中心密合。由於變形軟管可自由的延伸，因此可解除感測器受到重力與摩擦力對感測器之影響。

光纖光柵位移計之量測原理如一懸臂樑受到一點荷重之行為，如圖 4-3 所示。貼於 PC 變形軟管兩側之 FBG，因為變形軟管受彎曲而造成中性軸兩側的 FBG 一側受拉伸長，另一側受壓縮短，受拉側擷取到的反射波長增加，受壓側擷取到的反射波長減少，藉由量測所改變的波長量比對標定所得之波長改變量與垂直向位移的標定係數可得位移量。

在黃正中(2005)所設計之 FBG-SD 其是利用 FBG-SD 所轉動之角度乘上其標定係數後求得地層中之水平位移，但光纖光柵位移計為量測試體垂直向位移與光纖光柵反應之關係，而量測原理之懸臂樑受一點荷重之行為其是水平向位移與光纖光柵反應之關係，因此將位移計其上端設計為一斜面，利用此機制可使

安裝於試體頂蓋之鋼片在土壤試體產生垂直位移時產生水平位移以推動位移計，水平位移則會使得位移計產生角度變化，造成變形軟管上之光柵波長產生變化，利用標定得到垂直位移與光柵反應之標定值則可用於非飽和三軸試驗之量測。其斜面量測機制示意圖如圖 4-4 所示，而安裝情況如圖 4-5 所示。

4.1.2 光纖光柵荷重元

光纖光柵荷重元為參考高聖傑(2006)研發之漸變式光纖光柵壓力感測器所進行改良，其設計如圖 4-6 所示。在漸變式光纖光柵壓力感測器之設計中，其所量測為一均勻分佈水壓力，然而為了能於三軸室內量測試體所受荷重，利用漸變式光纖光柵壓力感測器之原理將其進行改良，荷重元為量測加壓軸桿傳至土壤試體之載重，此載重為一集中載重，因此本研究之光纖光柵荷重元於圓形薄板中心鑽孔安裝一短柱與加壓軸桿連接，其安裝情況如圖 4-7 所示。

在高聖傑(2006)設計之漸變式光纖光柵壓力感測器為被圓形薄板分成兩區的剛性構件所構成，其感測器之量測原理以彈性力學薄板變形為基礎，依照薄板理論，當邊界束制的薄型圓板受到垂直於平面的力時，從圓心到邊界的應變會呈現先受伸張再受壓縮分佈，因此黏貼於薄板半徑上的光纖光柵會發生漸變的形式，在圓板越接近中心與邊界，所產生的應變越大。其量測為將兩光纖光柵一個黏貼於純受拉區一個黏貼於受壓區，因此薄板產生變形時，受拉區的光纖光柵會往長波長方向飄移，而受壓區的光纖光柵往短波長方向飄移，以提高感測器的解析度，以下為本研究進行之改良重點。

本研究因為於圓形薄板中心鑽孔安裝一短柱與加壓軸桿連接，造成於圓形薄板同一面上黏貼兩光柵於受拉區與受壓區有其困難度，且如果將光纖光柵於180度對貼於感測器之兩側，因貼於同一物體上而有相同之熱漲冷縮係數，再經由將兩側波長相減之動作，可消除因溫度改變所造成之誤差。因此本研究之光纖光柵荷重元於圓形薄板對稱之上下兩側貼上光纖光柵，且在受到載重時薄板兩側之光纖光柵一邊受拉、一邊受壓，因此薄板產生變形時，受拉的光纖光柵會往長波長方向飄移，而受壓的光纖光柵往短波長方向飄移，藉此方式可以提高感測器的解析度並消除溫度之影響，另外，經過測試圓板越接近邊界其應變越大，為了能再提高量測之精度，於是兩光柵對貼於荷重元邊界。經由標定求得載重與兩光纖光柵反應關係則可用於非飽和三軸試驗量測。

另外，本設計中圓形薄板是利用螺絲鎖上，因此此圓形薄板是可替換，如果實驗欲增加量測範圍則可將圓形薄板換成較厚之薄板，而試驗欲增加量測精度則可將圓形薄板換成較薄之薄板，所以本設計之光纖光柵荷重元可視實驗所需而調整適用範圍。

4.1.3 光纖光柵差壓計與水壓計

光纖光柵差壓計與光纖光柵水壓計為參考高聖傑(2006)研發之拉伸式光纖光柵壓力感測器所進行改良，拉伸式光纖光柵壓力感測器原設計目的為監測現地邊坡之水壓，為了能於三軸室內量測試體之水壓力變化，利用拉伸式光纖光柵水壓計之原理將進行改良，其設計分別如圖 4-8、4-9 所示。

光纖光柵差壓計與光纖光柵水壓計其基本設計原理皆和高聖傑(2006)相同。其設計以圓柱型中空鋼材為外殼，內部含有一光纖光柵與作為感測元件的金屬薄片組成，含有光纖光柵的光纖之一端固定於壓力計一端，此部分視為固定不動點，而另一端則黏著於一彈性金屬膜上，當壓力計內部壓力改變時金屬膜隨之變形，因此光纖光柵所感受的應變也隨之變化。在彈性金屬膜的線彈性範圍內，此設計的光纖光柵波長做等週期式之變化，因此光纖光柵波峰值與壓力有一線性關係。但此設計無法隔離溫度改變對光纖光柵波峰值之影響，因此必須利用一光纖光柵溫棒進行溫度變化之修正，以下為光纖光柵差壓計與水壓計之改良重點。

1.光纖光柵差壓計：

為了能連接非飽和三軸試驗裝置之進水管線以量測試驗之水壓力變化，光纖光柵差壓計為將連接金屬薄膜兩側之水室皆設計為 1/8NPT 接頭以裝上壓力管線，使得受壓之金屬薄膜兩側承受兩不同水壓，當兩側壓力改變，則固定於差壓計金屬膜上之光纖光柵所感受之應變也隨之變化，標定差壓對光纖光柵變化之關係則可用於非飽和三軸試驗之量測上。另外，由高聖傑(2006)之研究可知金屬薄膜之變形受薄膜直徑影響很大，當薄膜直徑越大在同壓力下其光柵之應變也越大，為了能夠量得較微小之壓力變化，光纖光柵差壓計其金屬膜半徑設計較一般光纖光柵水壓計大(差壓計金屬薄

膜半徑為 20mm，水壓計金屬薄膜半徑為 6.5mm)，使得金屬膜於較小之差壓下也能使光纖光柵產生不同之應變。

2. 光纖光柵水壓計：

光纖光柵水壓計設計則於進水端以 1/8NPT 接頭連接非飽和三軸儀之壓力管線，而其上蓋只鑽一直徑 3mm 之小孔作為光柵串接用，另外上蓋兩側也鑽有兩直徑 2mm 的小孔，其功用為避免封閉端其因為金屬薄膜產生變形造成壓力改變以及溫度變化時造成封閉端內氣體收縮或膨脹造成壓力之變化，進而影響水壓力之讀數。

4.1.4 光纖光柵溫度棒

光纖光柵溫度棒是利用材質與光纖光柵差壓計及光纖光柵水壓計相同之不銹鋼管製作而成，如圖 4-10 所示，其設計為將光纖光柵安裝於不銹鋼管內，兩端利用熱固膠固定於不銹鋼管上，當有溫度變化時不銹鋼管體積產生變化使得光纖光柵讀數發生改變，且因為其為兩端密閉之鋼棒，所以不受壓力之影響，進行非飽和試驗時將此光纖光柵溫度棒與光纖光柵差壓計及光纖光柵水壓計放在一起，則可用來進行溫度之修正。

4.2 光纖光柵感測器標定

將各光纖光柵感測器製作完成後，需進行標定與測試以瞭解是否達到預期的用途，而感測器之標定分為量測變形係數標定、溫度效應試驗兩項試驗。量測變形係數標定為標定所欲探討之物理量所對應的 FBG 波長改變量，溫度效應目的是瞭解溫度變化對 FBG 波長造成之影響。

4.2.1 實驗設備

在改良及標定各式光纖光柵感測器中，使用之主要儀器包括如下：

光纖光柵讀取儀 **Fiber Bragg Grating Swept Laser Interrogator (FBG-SLI)**

本研究採用 Micron Optical 製造，型號為 Sm420 之光纖光柵掃瞄分析儀，如圖 4-11 所示。規格如下：

可量測頻道數(numbers of optical channels)：4

單一頻道最大 FBG 感測器數量：64

工作波長範圍：1525~1565 nm

波長精準度：一般+/- 5 pm，最大+/- 10 pm

解析度(resolution)：小於 1 pm (約 0.8 $\mu\epsilon$)

重複性(repeatability)：一般 ± 2 pm，最大 ± 5 pm

掃瞄頻率(scan frequency)：108 Hz

最小 FBG 波長間距(minimum FBG spacing)：0.5 nm

所適用 FBG 規格：反射率(reflectivity) $>90\%$ 、反射光頂點以下 3dB 處寬小於 0.25nm。

動態量測範圍(dynamic range)：25 dB

使用電源：110V 或 220V 交流電

工作溫度：10°C-40°C

接頭樣式：FC/APC

資料擷取卡：PC-CARD.DIO48

電腦：IBM-X22 及所附微軟作業系統

光纖續接設備

光纖內之光傳播主要是利用光束在光纖內部進行全反射，使得光訊號損失降到最低，然而由於光纖一般為玻璃製成，一旦斷裂並無法像電線一般續接，而必須將需要續接的兩個光纖核心斷面完全對準，並且將核心材料融

合一體，才能使得續接所造成光耗損降至最低。續接光纖時所需設備包括：光纖用剝線鉗、切割刀、融接機及加熱器，如圖 4-12 所示，並應準備廢棄光纖用垃圾桶，收納所棄置光纖。

光纖熔接機(Splicer, Sumitomo Electric Industries, Ltd.) 是用以接合光纖的儀器，其加工原理是利用放電將相互靠近光纖核心材料融化接續，並於接合完成後實驗拉力測試，以確保接合完成。因此在續接前應保持融接部位清潔，以避免光束通過時產生過大損耗；在續接完成後，光纖表面並無披覆層保護，此時光纖無法承受稍大拉力或剪力，而重新包上披覆層也較為麻煩，因此在狀況允許下，通常使用熱縮套管來替代被剝除披覆，所以一般融接機均附有加熱設備，方便在續接完成後立即施做，避免再次斷裂。

光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)

本研究採用布拉格反射波長(λ_B)介於 $1527nm$ 至 $1563nm$ 、反射波長寬($\Delta\lambda$)小於 $0.3nm$ 、反射率(reflectivity)大於 99.5% 之光纖光柵。

恆濕恆溫箱

為了進行溫度標定，試驗需要一個能長時間穩定維持溫度之儀器，因此向巨孚儀器工業股份有限公司購入型號為 GTH-800-20-SP 之恆濕恆溫箱，如圖 4-13 所示；此儀器能長時間準確的控制溫度與濕度，其規格如下：

溫度範圍：-20°C ~ 130°C

濕度範圍：10% ~ 98%

溫濕度控制精度：±0.2°C，±2.5%

加溫時間：從室溫至 100°C，在 30 分鐘內完成

降溫時間：從室溫至-20°C，在 40 分鐘內完成

內箱尺寸：100×100×80 cm³

螺旋測微計

如圖 4-14 所示，此裝置目的作為應變管變形模擬時，施加變形量之用，其底座上鑽有間距 25 mm、直徑 6 mm 螺孔，方便固定。上方基座亦鑽有直徑 6 mm 及 2 mm 螺孔，可以固定各式夾具。此螺旋測微計精度為 0.001mm。

4.2.2 光纖光柵位移計標定

光纖光柵位移計量測變形係數標定為標定垂直位移變化所對應的 FBG 波長改變量，而溫度效應的影響也將進行討論。

1. 光纖光柵位移計變形係數標定

標定時將光纖光柵位移計一端固定於光學桌上，垂直位移的產生為在微調儀上安裝標定組件，利用微調儀沿光纖光柵位移計上方斜面推動光纖光柵

位移計，如圖 4-15 所示。微調儀調整一次前進 2mm，共推 10 次總共 20mm，皆下來再逐次退回 2mm，直到退回到原點，因為本研究之非飽和三軸試驗所需量測之軸向位移約為 17mm~20mm，故選擇只標定至位移量為 20mm 即停止。將此 20 個位移之波長相差量記錄下來，依試驗順序畫圖形。

標定結果之圖形為二次曲線，將此各個點所成之二次曲線以相關係數表示其相關性。此設計所試驗出之位移與波長改變量之相關係數可達

$R^2=0.9996$ ，圖 4-16 為光纖光柵位移計標定結果。光纖光柵位移計標定結果為二次曲線其原因是為了量測土壤試體之軸向位移，在位移計上端設計為一斜面，使安裝於試體頂蓋之鋼片在土壤試體產生垂直位移時產生水平位移以推動位移計，然而位移計上端斜面為一固定角度之斜面，當位移計被推動而發生轉動，則此時斜面與水平面之夾角會發生改變，此外隨著軸向位移變大，推動位移計之鋼片距離位移計轉軸距離也會逐漸變小，因此造成位移計標定結果為二次曲線。

2. 溫度效應試驗

由於非飽和三軸試驗通常是長時間的，因此外界的溫度會有所改變。因此在溫度變動的情況下，溫度對於儀器本身的影響將會是一個很重要的考慮因素，亦會是一個重要的誤差來源。

一般情況下 FBG 本身也會有熱漲冷縮之效應，熱漲會使得光柵之間距伸長，將會導致波長增加，而冷縮則有波長降低的情況。雖然溫度改變 1°C 對 FBG 之波長只改變約 10pm，但是一旦使用了黏著劑貼在物體上之後，熱漲冷縮則之係數則視黏貼之物體其熱漲冷縮係數而定。是故黏貼過後的 FBG 因溫度改變 1°C 之波長改變量可能遠大於 10pm。由黃正中(2005)的研究可知，將 FBG 採用 180 度對貼於 PC 軟管之兩側，因貼於同一物體上而有相同之熱漲冷縮係數，而造成相同之波長改變量，再經由將兩側波長相減之動作，可得到單純因 PC 軟管變形之波長改變量，雖然此方式並未能穩定的完全消除因溫度改變所造成之誤差，不過已能將此誤差控制在一可接受範圍中，因此光纖光柵位移計不進行溫度之標定。

4.2.3 光纖光柵荷重元(Load Cell)標定

1. 光纖光柵荷重元之變形係數標定

光纖光柵荷重元之標定是利用土壤力學試驗所用之土壤直剪試驗儀的加載設備進行標定，如圖 4-17 所示，利用直剪試驗儀加載設備可施加一垂直載重於光纖光柵荷重元，載重來源為數顆 16kg 和 10kg 之砝碼，標定過程為開始先記錄初始讀數，之後利用砝碼增加載重，待光纖光柵讀數穩定後紀錄讀數，再增加下一階之載重，當載重施加至目標載重後，再逐步減少載重至初使值。載重施加為第一階 16kg，第二階至第九階為每次施加 10kg

載重，總共所施加之載重為 96kg，載重選擇只施加至 96kg 是因為此載重已可符合本實驗之非飽和三軸試驗所需量測之載重。圖 4-18 為光纖光柵荷重元的標定結果，其解析度達到 0.1kg，而其相關係數 R^2 均達 0.9995 以上。

光纖光柵荷重元受拉與受壓的變化是利用中心波長 (Peak value) 飄移計算，其計算公式如下：

$$\lambda_1 = \lambda_t + \lambda_{tensile} \dots\dots\dots(4-1)$$

$$\lambda_2 = \lambda_t - \lambda_{compressed} \dots\dots\dots(4-2)$$

式中， λ_1 、 λ_2 為兩光柵的總波長改變量

λ_t 為溫度對光柵波長造成的改變量

$\lambda_{tensile}$ 、 $\lambda_{compressed}$ 為拉應變與壓應變對光柵波長的改變量

接著將(4-1)減去(4-2)後，得到應變量。

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = \lambda_{tensile} + \lambda_{compressed} \dots\dots\dots(4-3)$$

2. 溫度效應試驗

光纖光柵荷重元因為其光纖光柵黏貼方式與光纖光柵位移計相同，皆為將光纖光柵於 180 度對貼於感測器之兩側(對貼法)，因貼於同一物體上而有相同之熱漲冷縮係數，再經由將兩側波長相減之動作，故可消除因溫度改變所造成之誤差，為驗證對貼法確實可消除溫度效應所帶來之誤差，因此

進行了相同荷重壓力下改變環境溫度之標定，試驗方法為將光纖光柵荷重元施加一載重後放入恆濕恆溫箱內，然後調整溫度在 15~35°C 之間上下變化並記錄荷重元兩側之光纖光柵讀數，將兩纖光光柵讀數分別繪圖，並將兩光柵改變量相減後繪於同一圖上，其結果如圖 4-19 所示，由圖 4-19 可看出兩光柵讀數受溫度變化之斜率一致，而兩光柵變化量相減後溫度對應之光柵讀數幾乎為零，因此可證明將光纖光柵於 180 度對貼於感測器之兩側，經由將兩側波長相減之動作，可消除因溫度改變所造成之誤差。

4.2.4 光纖光柵差壓計與水壓計標定

光纖光柵差壓計與水壓計標定流程為實驗開始後先記錄初始讀數，之後增加壓力，待光纖光柵讀數穩定後紀錄讀數，再增加其壓力值，待壓力施加達容許變形極限後，再逐步返回壓力值。另外，在標定同時需串接另一光纖光柵溫度棒，作為溫度變化參考光纖(參考 FBG 法)，以減低室溫變化對實驗結果的影響。

1. 光纖光柵差壓計與水壓計之變形係數標定

光纖光柵差壓計與光纖光柵水壓計的解析方式採用光柵的中心波長 (Peak value) 飄移，其計算公式如下：

$$\Delta\lambda = \lambda_t + \lambda_{tensile} \dots\dots\dots(4-4)$$

式中， $\Delta\lambda$ 為光柵的總波長改變量

λ_t 為溫度對光柵波長造成的改變量

λ_{tensile} 為外力對光柵波長造成的改變量

(A) 光纖光柵差壓計

光纖光柵差壓計標定因為其靈敏度太高無法用氣壓控制來進行標定，因此光纖光柵差壓計標定是利用一固定位置之參考水頭和一利用應變控制之平台上升下降以改變水頭壓力的方法進行標定，實驗利用差壓計量測兩水頭間的水頭差以進行差壓計標定，而水頭的變化量測則由裝設於上生平台上之位移計紀錄高度之變化，位移計的精度為 0.001 mm。標定過程中，每次平台上升約 5mm，總共上升高度為 50mm，光纖光柵差壓計標定結果如圖 4-20 所示。圖中包含了兩組重複加載試驗，由圖中斜率可知光纖光柵差壓計的解析度可達到 0.37mm 之水頭壓力，而其相關係數 R^2 均達 0.999 以上。而標定水頭差為 50mm 是因為 50mm 已符合非飽和三軸試驗體積量測時所需之水頭變化，非飽和三軸試驗體積變化量測將於第三章已介紹。

(B) 光纖光柵水壓計

光纖光柵水壓計標定其實驗配置圖如圖 4-21 所示，以氣壓設備對感測器施加一定壓力。光纖光柵水壓計設計最大容許壓力為 1000kPa，標定程序為先記錄其光纖初始波長，然後每一階施加水壓 30kPa，待光纖光柵讀數穩定後紀錄讀數，再增加下一階的壓力值，重複上步驟直到施加壓力達到

600kPa，然後開始減低施加的壓力，每一階減少 30kPa 直到壓力為 0，將標定記錄結果繪圖，圖 4-22、4-23 分別為 1 號水壓計與 2 號水壓計之標定結果。

圖 4-22、4-23 中各包含了三組重複加載試驗，由圖中斜率可知 1 號光纖光柵差壓計與 2 號光纖光柵水壓計的解析度分別約為 0.26kPa 與 0.24kPa，其相關係數 R^2 均達 0.999 以上。而標定水壓最大為 600kPa 是因為本研究之非飽和三軸試驗所需量測之最大水壓力為 500kPa。

2. 溫度對於壓力感測器之影響

當實驗中溫度發生變化時，光纖光柵受到溫度效應之影響，將會造成光纖光柵反射波長改變。因此實驗進行時，利用光纖光柵溫度棒之波長變化來消除溫度對光纖光柵差壓計與光纖光柵水壓計的影響(參考 FBG 法)，使光纖光柵差壓計與水壓所量測之變化為單純之壓力變化量，得以應用於非飽和三軸實驗之量測。

為了瞭解溫度對壓力感測器的影響，本節將討論光纖光柵水壓計在不同溫度下壓力與光柵波長變動量的關係，實驗配置圖如圖 4-24 所示，將感測器放置在恆濕恆溫箱內，以控制感測器在不同溫度下壓力與光纖飄移量的關係。

圖 4-25、4-26 為 1 號水壓計與 2 號水壓計做溫度標定的實驗結果，當中三組數據分別代表感測器在不同溫度下光柵波長之變化，從圖中可以發現不同溫度下感測器的起始波長會隨溫度改變，但由斜率可發現溫度的改變對感測器的靈敏度並無太大的影響。此外，圖中三條線段斜率雖然有微小的差異，但在壓力與反射波長飄移的關係上，仍有良好的線性關係，其相關係數 R^2 皆達 0.999 以上。

為驗證參考 FBG 法可確時消除溫度對波長變化之影響，於是利用光纖光柵水壓計進行同壓力下改變不同溫度之試驗，因此將光纖光柵水壓計放入恆濕恆溫箱內，調整溫度在 15~35°C 之間上下變化並記錄光纖光柵水壓計與光纖光柵溫度棒之讀數，並嘗試利用參考 FBG 法消除溫度效應，參考 FBG 法其步驟如下：

(A) 首先，利用光纖光柵溫度棒其光柵波長飄移量與溫度改變之標定結果，如圖 4-27 所示，兩者之關係可得一方程式如下：

$$\Delta\lambda_{t-thermometer} = 27.341 \times T - 679.14 \dots\dots\dots(4-5)$$

式中， $\Delta\lambda_{t-thermometer}$ 為光纖光柵溫度棒其溫度對光柵波長造成的改變量

T 為溫度

(B) 接著，進行光纖光柵水壓計其光柵波長飄移量與溫度改變之標定，其計算公式如下：

$$\Delta\lambda_t = M_t \times T + c \dots\dots\dots(4-6)$$

式中， $\Delta\lambda_t$ 為光纖光柵水壓計其溫度對光柵波長造成的改變量

T 為溫度

c 為一常數

(c)將實驗時之光纖光柵溫度棒其波長飄移量帶入(4-5)式，可得到當時之溫度 T，接著將所得到之溫度 T 帶入各光纖光柵水壓計標定出之(4-6)式，可得到光纖光柵水壓計其溫度對光柵波長造成的改變量。將光纖光柵水壓計其光柵的總波長改變量 $\Delta\lambda$ 減去所得到之光纖光柵水壓計其溫度對光柵波長造成改變 $\Delta\lambda_t$ ，即可得到單純受壓力變化之光柵波長改變量 $\lambda_{tensile}$ ，如下式：

$$\lambda_{tensile} = \Delta\lambda - \lambda_t \dots\dots\dots(4-7)$$

式中， $\lambda_{tensile}$ 為外力對光柵波長造成的改變量

$\Delta\lambda$ 為光柵的總波長改變量

λ_t 為溫度對光柵波長造成的改變量

將單純受壓力變化之光柵波長改變量 $\lambda_{tensile}$ 帶入各光纖光柵水壓計之標定值，即可得到實驗時所量測之水壓力。

參考 FBG 法其消除溫度效應之驗證試驗其結果如圖 4-28、4-29 所示，圖中一斜線為實際量測到之光纖光柵水壓計受溫度變化之光柵讀數改變，另

一斜線為利用參考 FBG 法所求得之光纖光柵水壓計受溫度變化之光柵讀數改變，將實際量測值減去參考 FBG 法所推求之值，可得到修正後光纖光柵水壓計其受溫度造成之光柵波長改變量幾乎為零，因此證明利用參考 FBG 法修正可消除溫度效應對光纖光柵水壓計之影響。

4.3 土壤水分特性曲線試驗

本試驗所取的土樣為玉峰國小及砂崙仔崩塌地處理工程處之表層土壤，將所取得之表土進行重模之壓力板試驗，試驗數據整理，如表 4-1、4-2、4-3、4-4 所示，並將試驗結果探討如下：

壓力板試驗的試驗結果如圖 4-30、4-31。土樣在基質吸力為 10 kPa 時體積含水比開始快速下降，玉峰國小之試驗結果一直到吸力值為 300 kPa 仍然沒有趨於平緩，即尚未達到殘餘體積含水比；而砂崙仔崩塌地處理工程處在吸力值到達 90 kPa 後土壤的體積含水比之變化就趨於平緩，並趨於一定值(即殘餘體積含水比)。由實驗結果顯示兩處場址土樣之保水能力不佳，在小基質吸力下，空氣即開始進入土壤孔隙中，使孔隙水排出土體，實驗結果表現出介於 Sand 與 Silt 兩條曲線間之土壤水份特性曲線，如圖 4-32 所示，圖中 SLG 代表沙崙仔崩塌地處理工程處、UF 代表玉峰國小。其主要原因為土樣孔隙較大，利於空氣之進入與孔隙水之排出；而細料的保水能力雖然較佳，但是由於含量太少，所以對整體土樣之保水能力影響不大，不過土壤殘餘之水分則大部分為細料所保持，由

粒徑分析試驗之曲線看來兩試驗場址之粒徑分佈差異不大，而造成兩試驗場址特性曲線之差異應為塑性指數 PI 大小有關，土壤之保水能力隨著其塑性指數 PI 增加而增加，因此本試驗中有較高 PI 值之玉峰國小土樣其土壤水分性曲線較接近 Silt 之曲線，而 PI 值較低之砂崙仔崩塌地處理工程處其土壤水分特性曲線較接近 Sand 之曲線。

另外，吸力施加時間的長短，對於土體保水能力，有著一定的影響，當施加時間過久，土壤可能呈現乾掉的現象，含水量就會大幅降低。因此需注意吸力施加及試體平衡的時間。吸力施加的時間，並不是固定，而是當試體水份沒有排出時即表示其勢能平衡，所以時間並不是固定（8 小時至 24 小時不等）。

4.4 飽和壓密不排水三軸試驗

本節主要探討不同圍壓下飽和土壤之力學行為，其中包括軸差應力-應變曲線、孔隙水壓激發情形及應力路徑，藉以了解選定之兩試驗場址其土層在飽和狀態下之基本力學性質。試體壓密前之初始孔隙比玉峰國小為 0.87、砂崙仔崩塌地處理工程處為 0.70，屬於中等緊密與緊密狀態；而在壓密完成後，其相對密度隨壓密應力之不同而趨於更加緊密狀態。飽和壓密不排水試驗結果討論如下：

4.4.1 圍壓的影響

1. 軸差應力-應變關係

如圖 4-33、4-34 所示，玉峰國小及砂崙仔崩塌地處理工程處土樣之試驗結果，其軸差應力均隨有效圍壓增加而增加，而軸差應力之轉折點都在軸向應變達 1% 前發生，而後隨著軸差應力持續升高，呈現出部分應變硬化 (strain-hardening) 的行為，直到試體軸向應變達 20%，此種趨勢仍未停止。

2. 孔隙水壓激發情形

如圖 4-33、4-34 所示，孔隙水壓對軸向應變之關係，其所激發孔隙水壓之大小均隨有效圍壓增加而增加。初始有效圍壓大者，其所激發之孔隙水壓值越高，且達相位轉換狀態所需之軸向應變愈大；而在相位轉換點後，其應力應變曲線明顯的轉折爬升，即使在大變形時，也不見試體有應變軟化 (strain-softening) 之跡象，因而無法達到穩定變形之狀態。

3. 應力路徑圖

玉峰國小及砂崙仔崩塌地處理工程處土樣之試驗結果，其應力路徑如圖 4-35、4-36 所示，在不同有效圍壓下其最後之破壞包絡線仍趨於一致。試驗結果可發現土樣表現出之行為呈現出膨脹趨勢；而由應力路徑圖中可發

現各曲線均有一明顯之轉折點(elbow)，將此轉折點對應至孔隙水壓變化與軸向應變關係圖中，約略是孔隙水壓曲線之相位轉換點。

綜合以上試驗結果，軸差應力之轉折處與孔隙水壓的相位轉換點(或曲線斜率之變換點)大致相同；在應力應變曲線中，軸差應力並無明顯的尖峰值，故依 ASTM D4767-88 中之建議，取軸向應變 15% 時之應力狀態繪製莫爾圓。

4.4.2 剪力強度參數 c' 、 ϕ' 之討論

圖 4-37、4-38 為取軸向應變 15% 時之應力狀態繪製莫爾圓，由破壞包絡線可得玉峰國小 $c'=11.7$ kPa、 ϕ' 為 33.1° 、砂崙仔崩地處理工程處 $c'=6.8$ kPa、 ϕ' 為 36.3° 。試驗結果顯示所選定之兩試驗場址之土樣有效凝聚力極小對整體強度之影響不顯著。

4.5 非飽和固定含水量三軸試驗

目前為止非飽和固定含水量三軸試驗以玉峰國小試驗場址所取得之土樣總共進行 5 組成功試驗，其中 3 組為重複性試驗。試體之初始孔隙比與飽和壓密不排水三軸試驗之試體相同，其初始孔隙比皆為 0.87，而試驗之控制條件為固定有效圍壓($\sigma_3 - u_a$)為 100 kPa，而所施加之基質吸力($u_a - u_w$) 分別為 30、90、200kPa，剪動速率為 0.012 mm/min。非飽和固定含水量試驗結果討論如下：

4.5.1 重複性試驗

因非飽和三軸試驗為本實驗室初次進行研究，為確保實驗結果為有重複性之試驗，非受當天實驗環境以及其他人為因素而出現單一不可重複之試驗結果，因此進行本重複性試驗。

本次重複性試驗之比較為進行三次相同控制條件之試驗，其控制條件皆為初始孔隙比 0.87、有效圍壓($\sigma_3 - u_a$)為 100 kPa，而所施加之基質吸力($u_a - u_w$)為 30kPa，試驗之結果如圖 4-39、4-40 所示。

由圖 4-39 可以看出三次試驗其應力應變曲線以及孔隙水壓激發之情況幾乎一致，因此證明實驗在非飽和剪力強度的重複性是沒有問題的，接著由圖 4-40 中發現基值吸力的變化也趨於一致，但是在體積變化的量測上發現三次試驗於剪動過程中的體積改變量有明顯差異，其中有一組試驗之體積變化特別大，造成此種試驗結果的原因可能為利用差壓計量取水頭變化以求得體積變化的過程中，因為剪動過程需要近 28 小時的時間，其中水頭的水蒸發造成體積量測影響。另外，壓密後的孔隙不同也會造成其剪動過程中所能產生之體積變化量的不同。

4.5.2 基質吸力的影響

圖 4-41、4-42 為試體在有效圍壓 100 kPa 下，施加基質吸力 30、90、200 kPa 所得之非飽和三軸試驗結果。經比較圖 4-33、圖 4-41 可發現在相同有效圍壓作用下，試體破壞時之軸差應力隨基質吸力之增加而增加，但本試驗施加三種不

同之基值吸力其所得之軸差應力差異不明顯。而其應力應變曲線都有相同之趨勢，即軸差應力一開始快速上升，於軸向應變達 1% 前形成一轉折點，於轉折點後軸差應力仍持續上升，呈現應變硬化之現象，此趨勢與飽和壓密不排水試驗之結果相同。由於軸差應力-軸向應變曲線並無明顯之尖峰值，因此與飽和壓密不排水試驗一樣，均視軸向應變達 15% 時之應力為試體破壞時之應力。

4.5.3 非飽和土壤剪力強度參數之決定

1. c' 、 ϕ' 之決定

由 Ho and Fredlund (1982) 將飽和土壤之莫爾-庫倫 (Mohr-Coulomb) 破壞準則擴展到非飽和土壤之範圍，並提出以 $(\sigma - u_a)$ 及 $(u_a - u_w)$ 兩獨立應力變數的線性組合，來表示非飽和土壤之剪力強度，其方程式為：

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \dots\dots\dots(4-8)$$

式中， c' 為有效凝聚力

$(\sigma_f - u_a)_f$ 為破壞時破壞面上的淨正向應力

$(u_a - u_w)_f$ 為破壞時破壞面上的基質吸力

ϕ' 為 $(\sigma_f - u_a)_f$ 引起的有效內摩擦角

ϕ^b 為 $(u_a - u_w)$ 增加造成剪應力增加所對應的角度。

4-8 式可以描繪成以垂直軸為剪力強度及兩相互垂直之水平軸分別為基質吸力與淨正向應力所構成延伸的莫爾-庫倫 (Mohr-Coulomb) 破壞包絡線圖，如圖 4-43 所示。

要決定非飽和土壤剪力強度參數，首先應決定有效摩擦角 ϕ' 與有效凝聚力 c' 。根據廣義莫爾庫倫破壞包絡面為三維平面，故欲決定 c' 與 ϕ' ，須先固定基質吸力。而本研究進行飽和壓密不排水三軸試驗，則可由飽和壓密不排水試驗之結果可得知，玉峰國小 $c'=11.7 \text{ kPa}$ 、 $\phi'=33.1^\circ$ ；砂崙仔崩塌地處理工程處 $c'=6.8 \text{ kPa}$ 、 ϕ' 為 36.3° 。

2. ϕ^b 之決定

ϕ^b 可經由固定有效圍壓 $(\sigma_3 - u_a)$ ，變化基質吸力 $(u_a - u_w)$ 之試驗結果來決定。如圖 4-43、4-44，其具體做法為，將不同基質吸力作用下之莫爾圓投影到 $(\sigma - u_a) - \tau$ 平面上，以斜率為 $\tan\phi'$ 之直線切於莫爾圓，直線與剪力強度 τ 軸之截距即為此基質吸力作用下之土壤總凝聚力 (total cohesion)；而由不同之基質吸力與其所對應之土壤總凝聚力進行回歸分析，則可求得 ϕ^b 。

目前本研究於非飽和三軸試驗之結果僅只有三組，因此利用目前之三組結果進行 ϕ^b 之求取，圖 4-45 為軸項應變達 15% 時之莫爾圓投影在剪力強度 τ 與淨正向應力 $(\sigma - u_a)$ 所組成之平面後之莫爾圓，而其破壞包絡線與剪力強度軸的截距即為總凝聚力 C ，圖 4-46 為將土壤總凝聚力與基值吸力進行

迴歸分析之結果，經由迴歸分析可得玉峰國小 φ^b 為 2.3° ，但目前之非飽和三軸試驗結果並不夠多組，如後續研究有再補充相關試驗，則可得到更準之 φ^b 。

4.6 電子式與光纖式量測系統結果比較

發展光纖光柵量測系統運用於非飽和三軸試驗為本研究重點，圖 4-47、4-48 為非飽和三軸試驗電子式與光纖式量測系統之結果。在體積變化的量測上，則因為本實驗室之電子式差壓計於長時間量測下其受電磁波等影響，其數值跳動過大無法準確量測，因此體積變化部份皆為光纖式差壓計所量得之結果。而從圖 4-47、4-48 可看出非飽和三軸試驗中電子式與光纖式量測系統之結果有些許所差異，以下就電子式與光纖式量測系統之量測結果做一討論。

4.6.1 軸向應力

由圖 4-47 可發現在軸向應力的量測上電子荷重元所量測到之軸向應力皆大於光纖式荷重元，為了檢驗是否為光纖式荷重元發生問題，於是重新進行了光纖光柵荷重元的標定，但標定結果其相關係數為 0.999 以上，載重與光纖光柵變化依然為線性關係。於是又進行了同時於電子式及光纖式荷重元直接加載之試驗，其試驗方法為電子式荷重元與光纖式荷重元直接相疊放置於壓力機上施加壓力，其試驗結果如圖 4-49 所示，由圖 4-49 可看出在電子式與光纖式荷重元的量測上其結果幾乎一致，可確定光纖式荷重元之量測為正常和準確，因此可確

定光纖式荷重元在非飽和三軸試驗之應用上為可行的。

而造成電子荷重元所量測到的軸向應力皆大於光纖式荷重元的原因則為電子荷重元安裝於三軸室外部而光纖式荷重元裝設在三軸室內部、試體之上方，因此在三軸室外部之電子式荷重元所量得之載重會受到摩擦力的影響所以量得的應力較大，故於內部量測之光纖式荷重元所得之量測值較為接近試體所受之軸向應力。

4.6.2 孔隙水壓及基值吸力變化

由圖 4-47 可發現在孔隙水壓的激發曲線於趨勢上則非常一致，除了於基值吸力為 200kPa 的試驗中激發之孔隙水壓光纖式水壓計所得到知量測值較電子式水壓計大，但其趨勢一致；接著由圖 4-48 發現在基值吸力的變化上電子式量測系統與光纖式量測系統所得到之結果相當一致，因此可確定光纖式水壓計在非飽和三軸試驗之應用上為可行的。

表 4-1 玉峰國小-壓力板試驗數據一

土樣編號	吸力(kPa)	含水量 %	體積含水量 %	飽和度 %
1	10	23.42	35.18	80.86
2	30	18.10	27.19	62.50
3	50	16.64	24.99	57.45
4	70	16.02	24.05	55.29
5	90	15.54	23.34	53.65
6	110	15.16	22.76	52.32
7	150	13.79	20.71	47.60
8	200	13.07	19.63	45.12
9	250	12.97	19.47	44.77
10	300	12.30	18.47	42.46

表 4-2 玉峰國小-壓力板試驗數據二

土樣編號	吸力(kPa)	含水量 %	體積含水量 %	飽和度 %
1	10	20.55	30.86	70.94
2	30	16.48	24.75	56.88
3	50	15.57	23.38	53.73
4	70	14.77	22.19	51.00
5	90	13.98	20.99	48.25
6	110	13.52	20.30	46.67
7	150	13.32	20.01	46.00
8	200	12.90	19.38	44.54
9	250	12.72	19.10	43.91
10	300	12.20	18.32	42.12

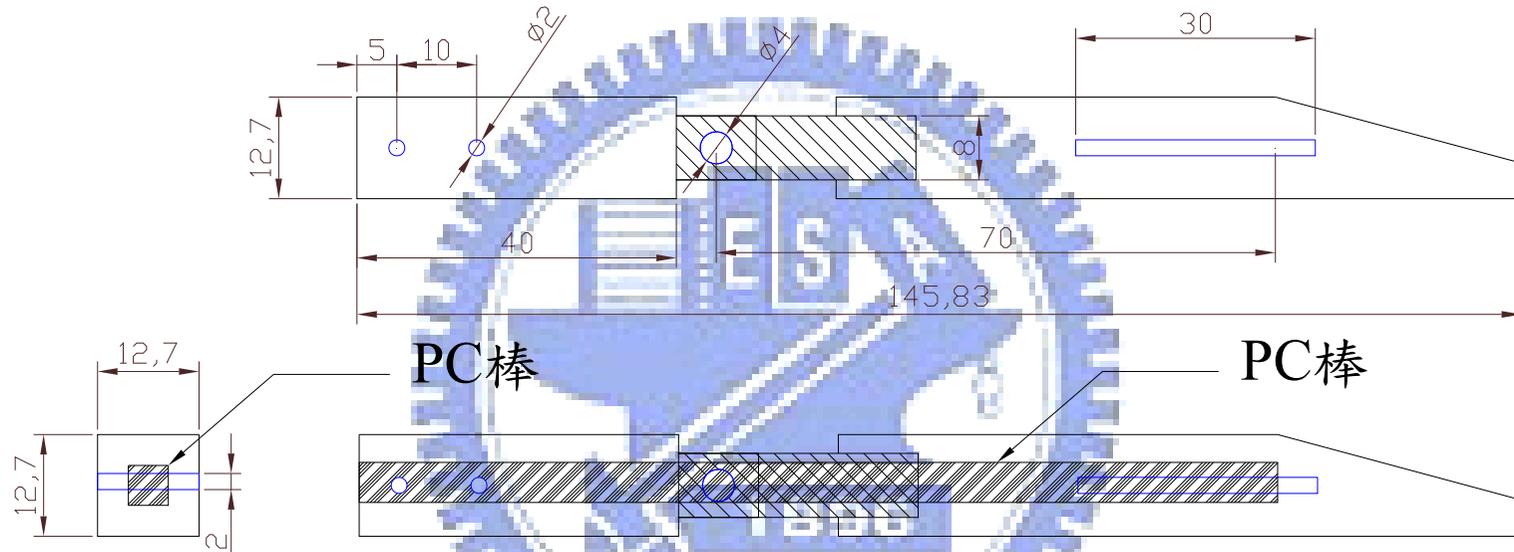
表 4-3 砂崙仔崩塌地處理工程處-壓力板試驗數據一

土樣編號	吸力(kPa)	含水量 %	體積含水量 %	飽和度 %
1	10	8.30	14.55	42.51
2	30	6.66	11.67	34.10
3	50	6.47	11.35	33.16
4	70	5.73	10.05	29.37
5	90	5.03	8.83	25.79
6	110	5.17	9.06	26.49
7	150	5.70	9.98	29.18
8	200	5.29	9.27	27.10
9	250	5.39	9.44	27.59
10	300	5.14	9.01	26.33

表 4-4 砂崙仔崩塌地處理工程處-壓力板試驗數據二

土樣編號	吸力(kPa)	含水量 %	體積含水量 %	飽和度 %
1	10	9.02	15.81	46.19
2	30	6.19	10.86	31.74
3	50	5.44	9.53	27.85
4	70	5.05	8.85	25.85
5	90	5.29	9.27	27.09
6	110	5.05	8.86	25.89
7	150	5.67	9.93	29.03
8	200	5.33	9.35	27.32
9	250	5.40	9.47	27.67
10	300	5.11	8.96	26.18

位移計上視圖



位移計側視圖

位移計剖面圖

圖 4-1 光纖光柵位移計設計圖

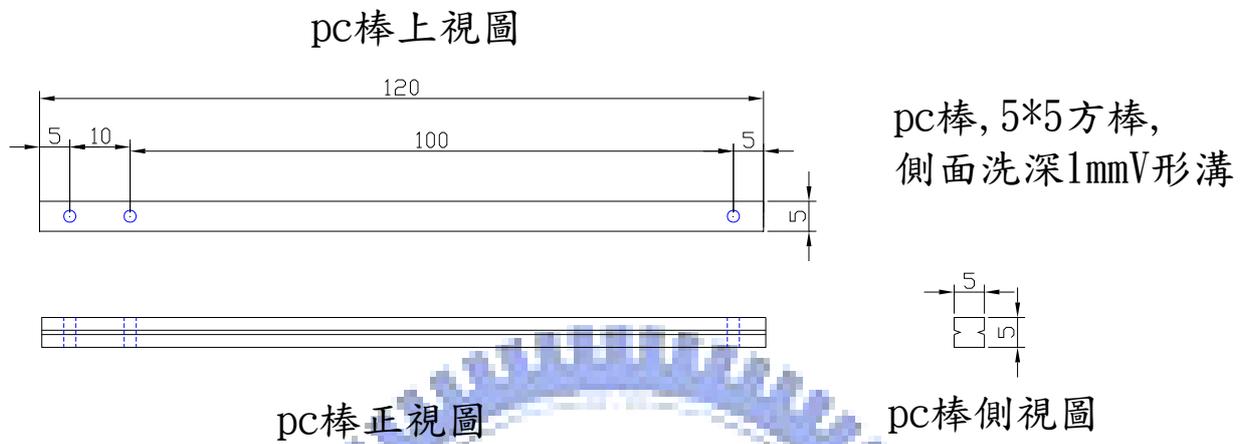


圖 4-2 PC 軟管示意圖

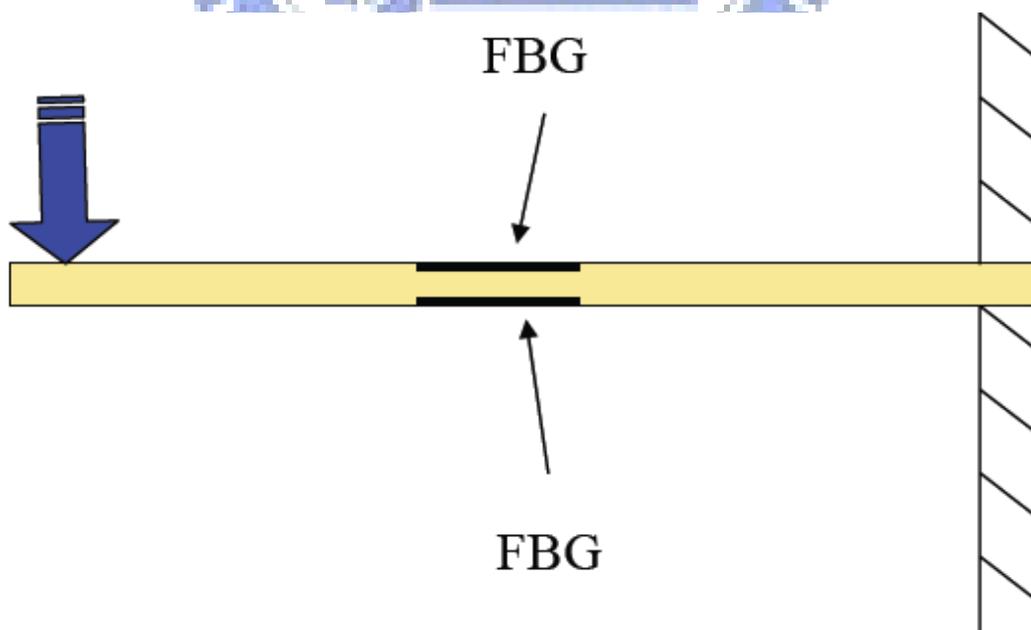


圖 4-3 光纖光柵位移計量測原理示意圖

試體受剪動，試體發生軸
向位移，頂蓋及其上推動
鋼片下降沿斜面推動位移
計

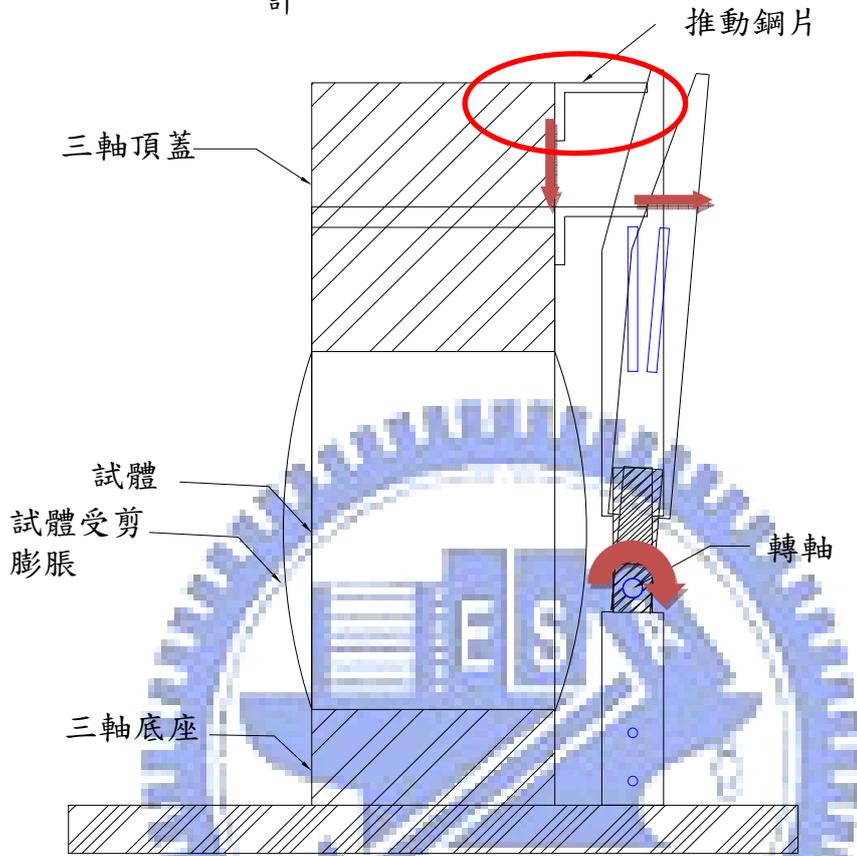


圖 4-4 光纖光柵位移計斜面機制示意圖

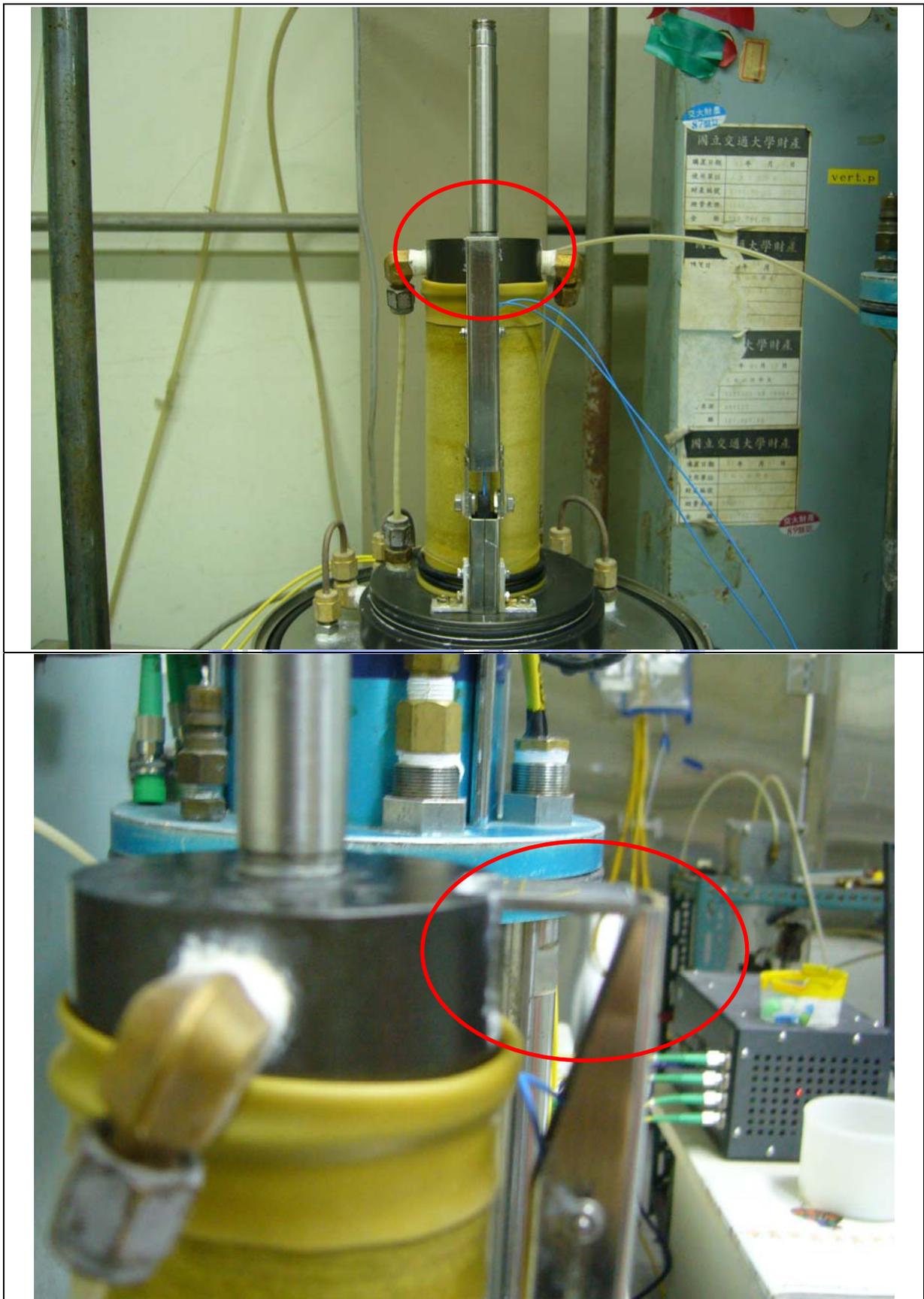


圖 4-5 光纖光柵位移計安裝圖

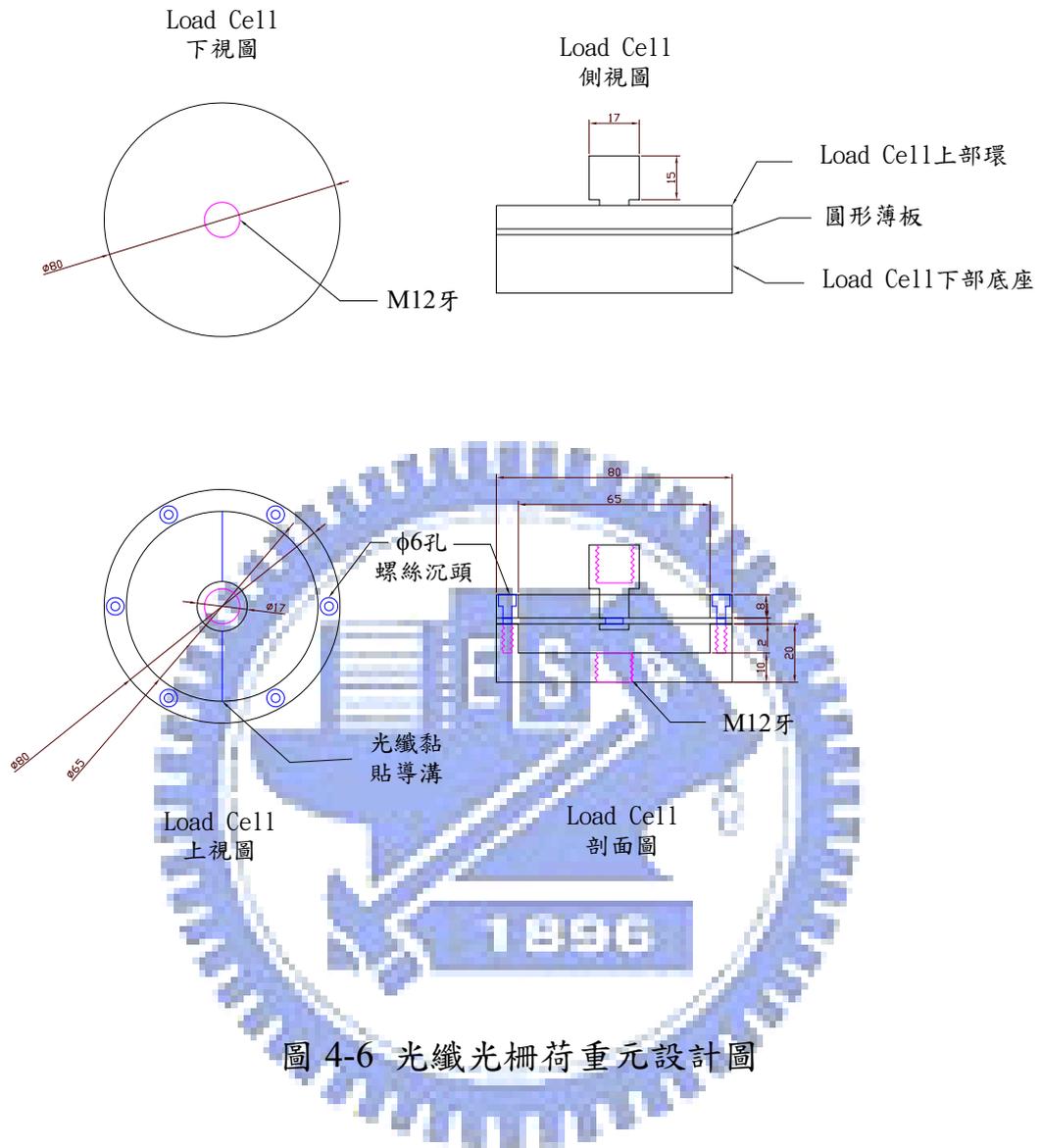


圖 4-6 光纖光柵荷重元設計圖

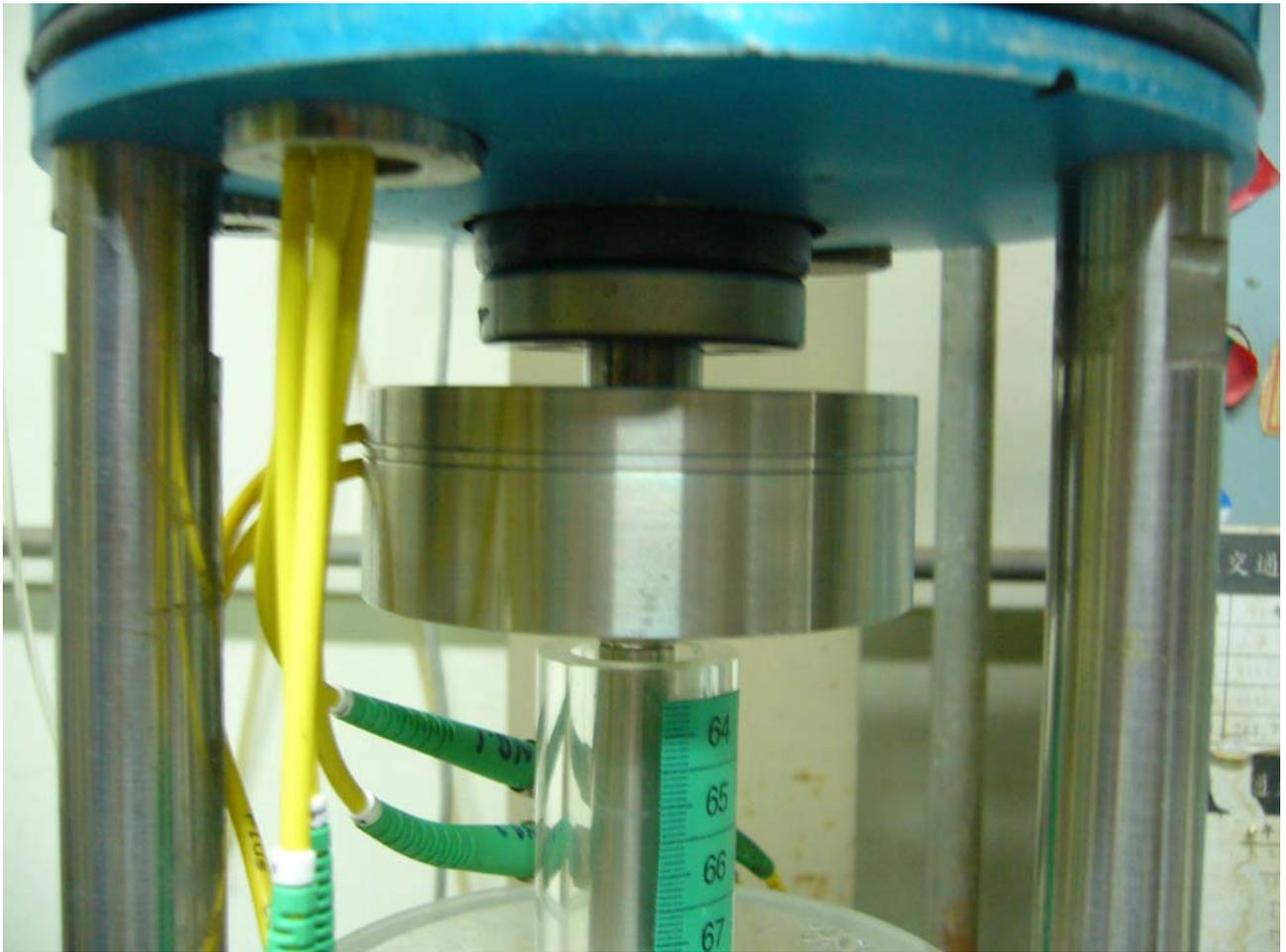
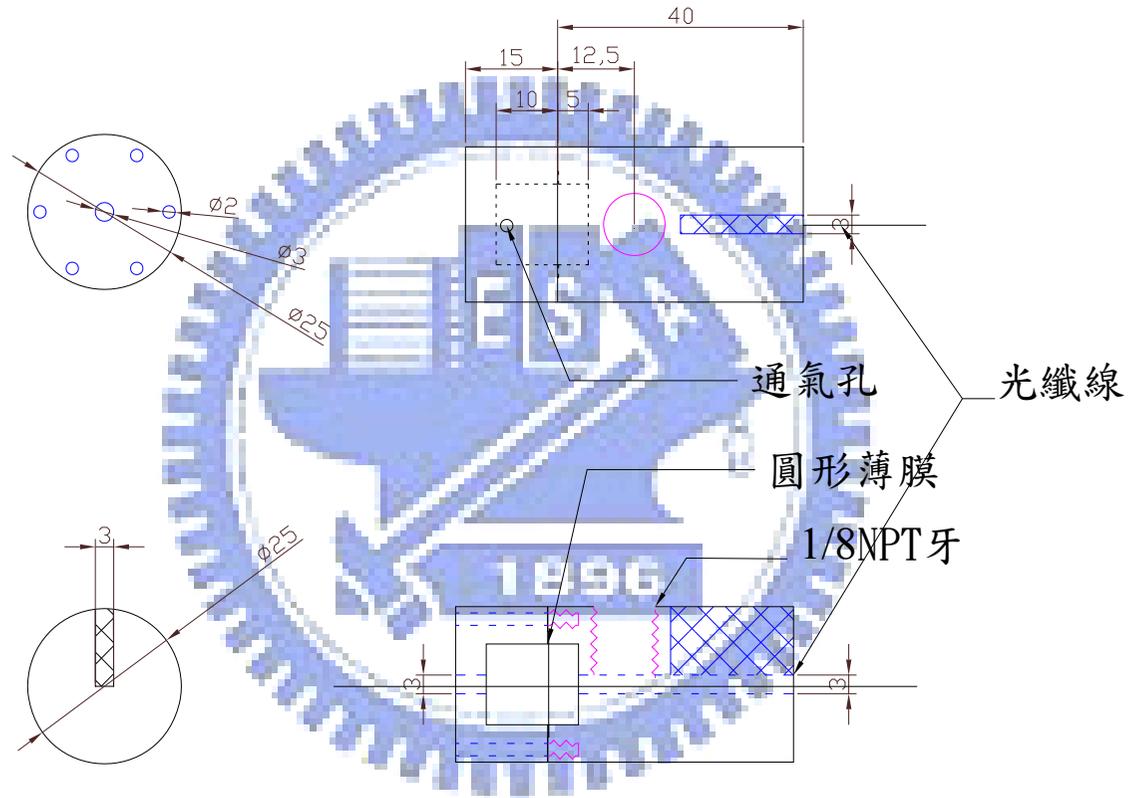


圖 4-7 光纖光柵荷重元安裝圖

水壓計左側視圖

水壓計上視圖



水壓計右側視圖

水壓計剖面圖

圖 4-9 光纖光柵水壓計設計圖

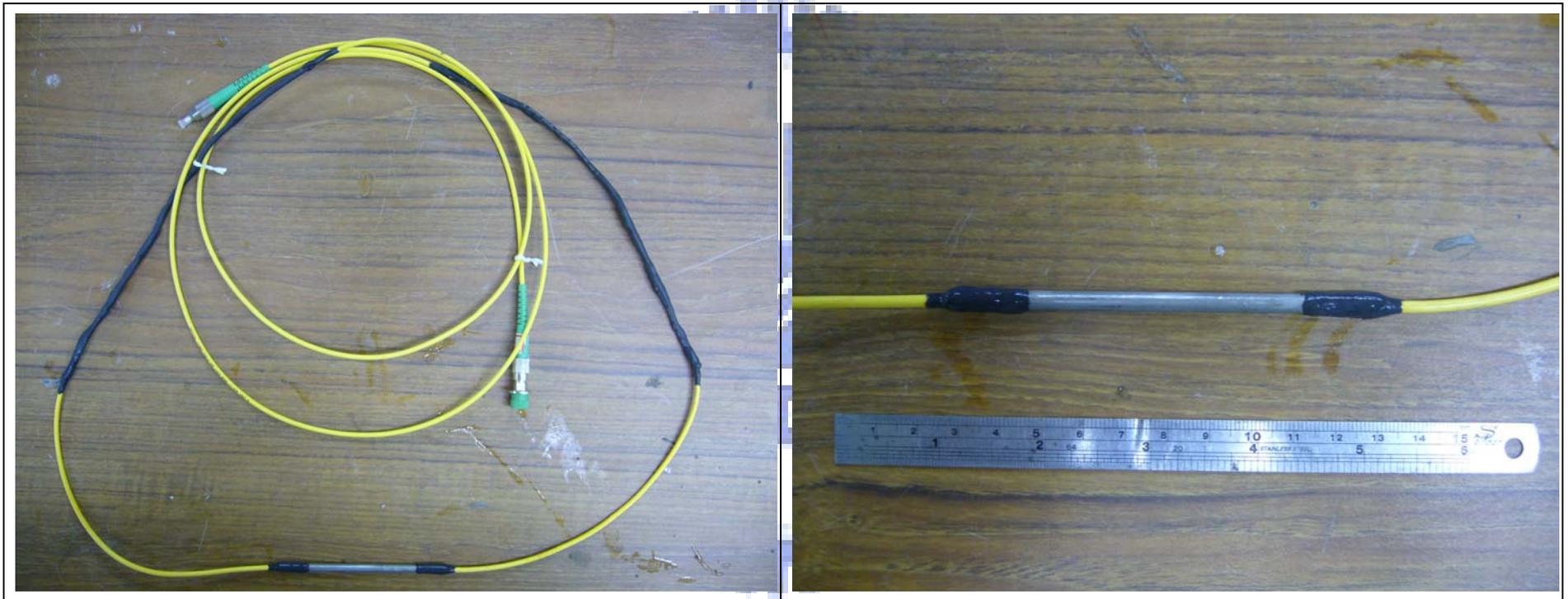


圖 4-10 光纖光柵溫度棒

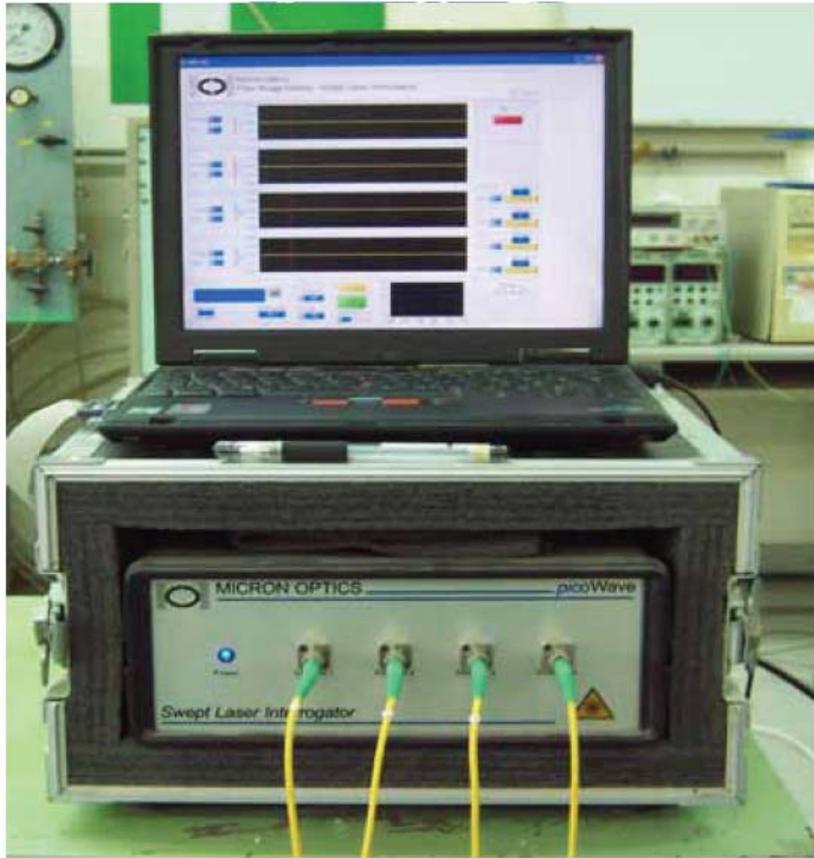


圖 4-11 光纖光柵讀取儀



圖 4-12 光纖融接設備



圖 4-13 恆濕恆溫箱

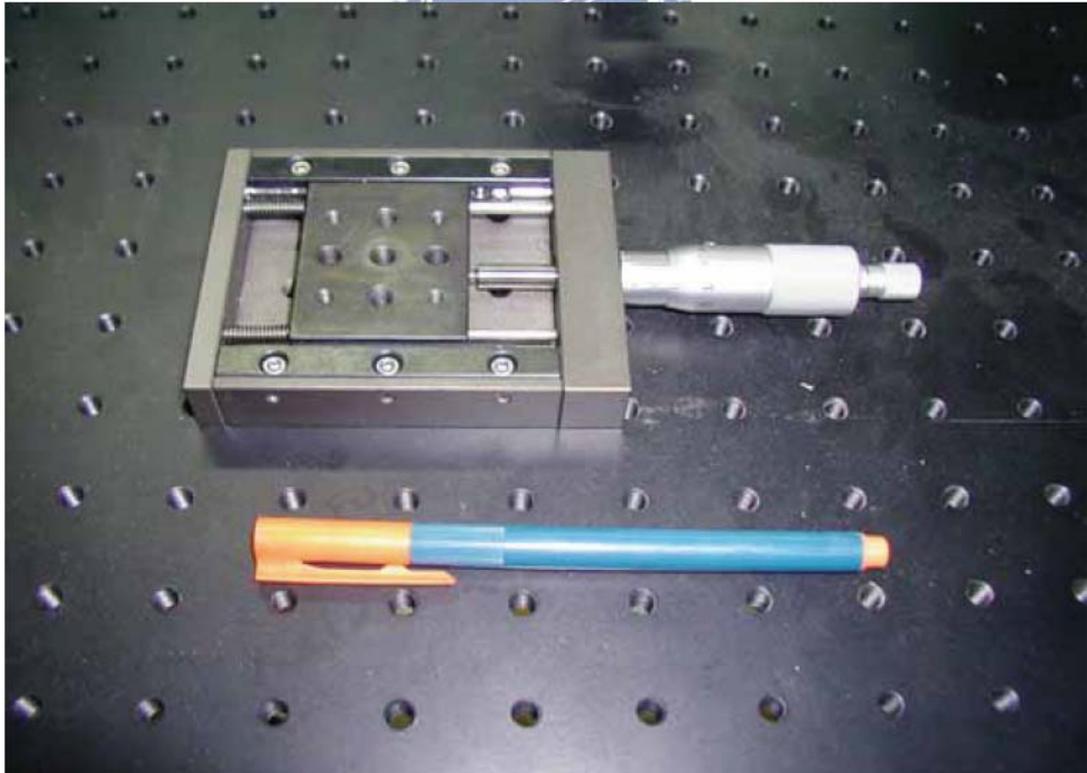


圖 4-14 螺旋測微器

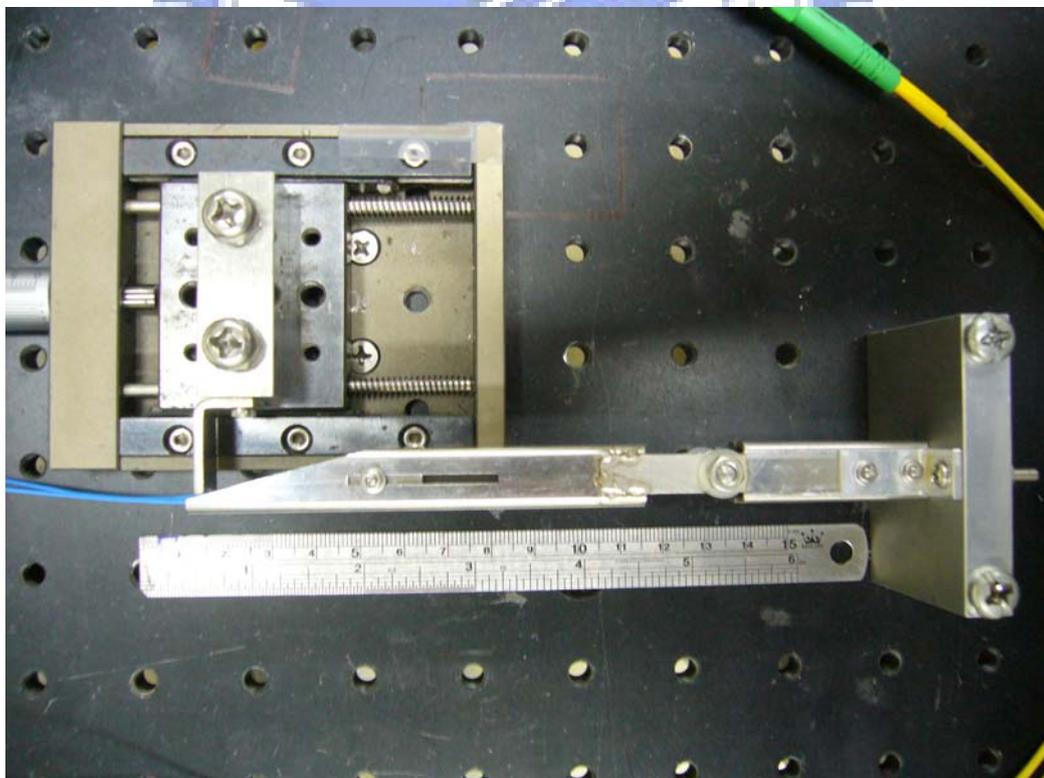


圖 4-15 光纖光柵位移計標定配置圖

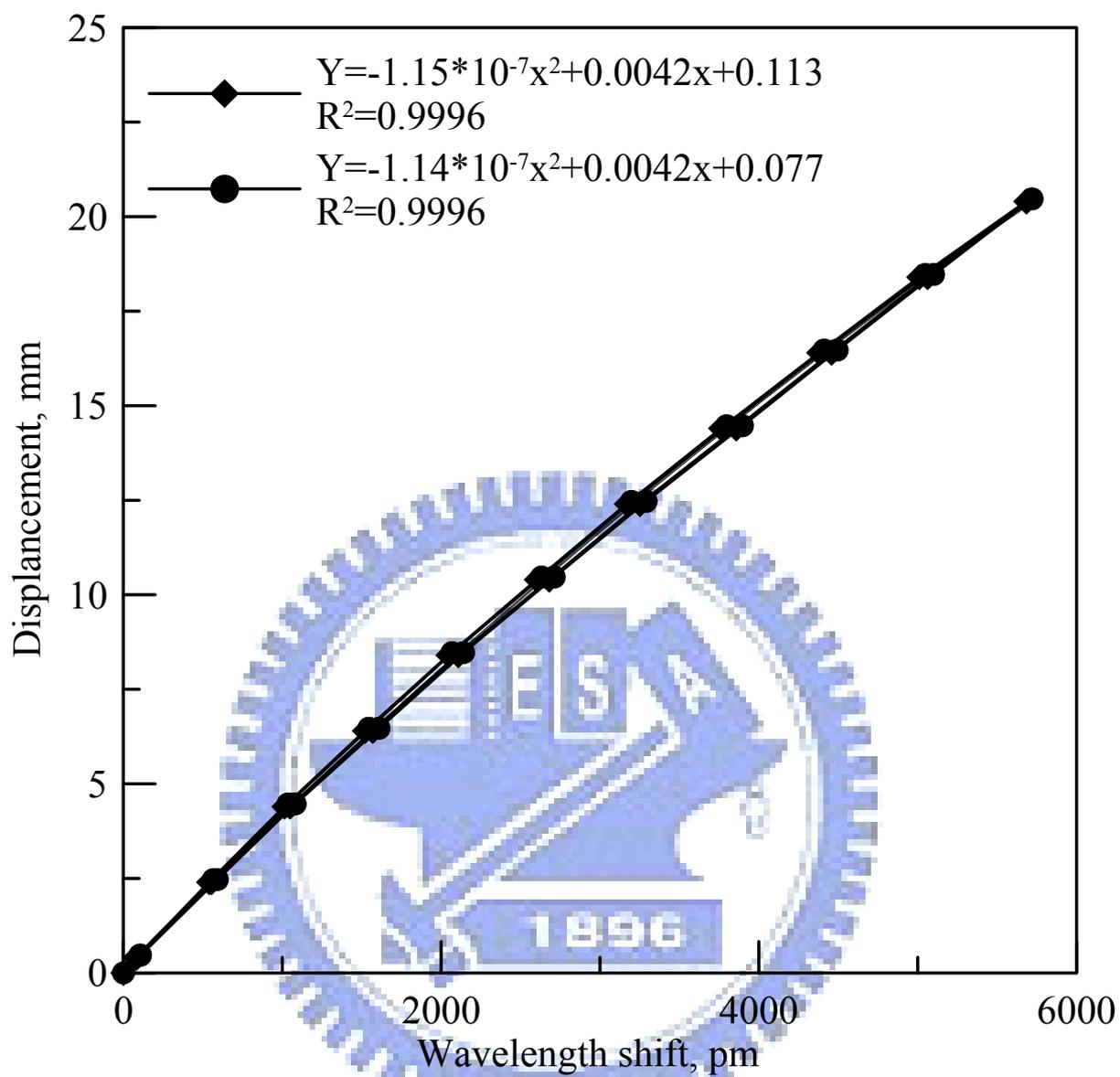


圖 4-16 光纖光柵位移計標定結果



圖 4-17 光纖光柵荷重元標定-土壤直剪試驗儀加載系統

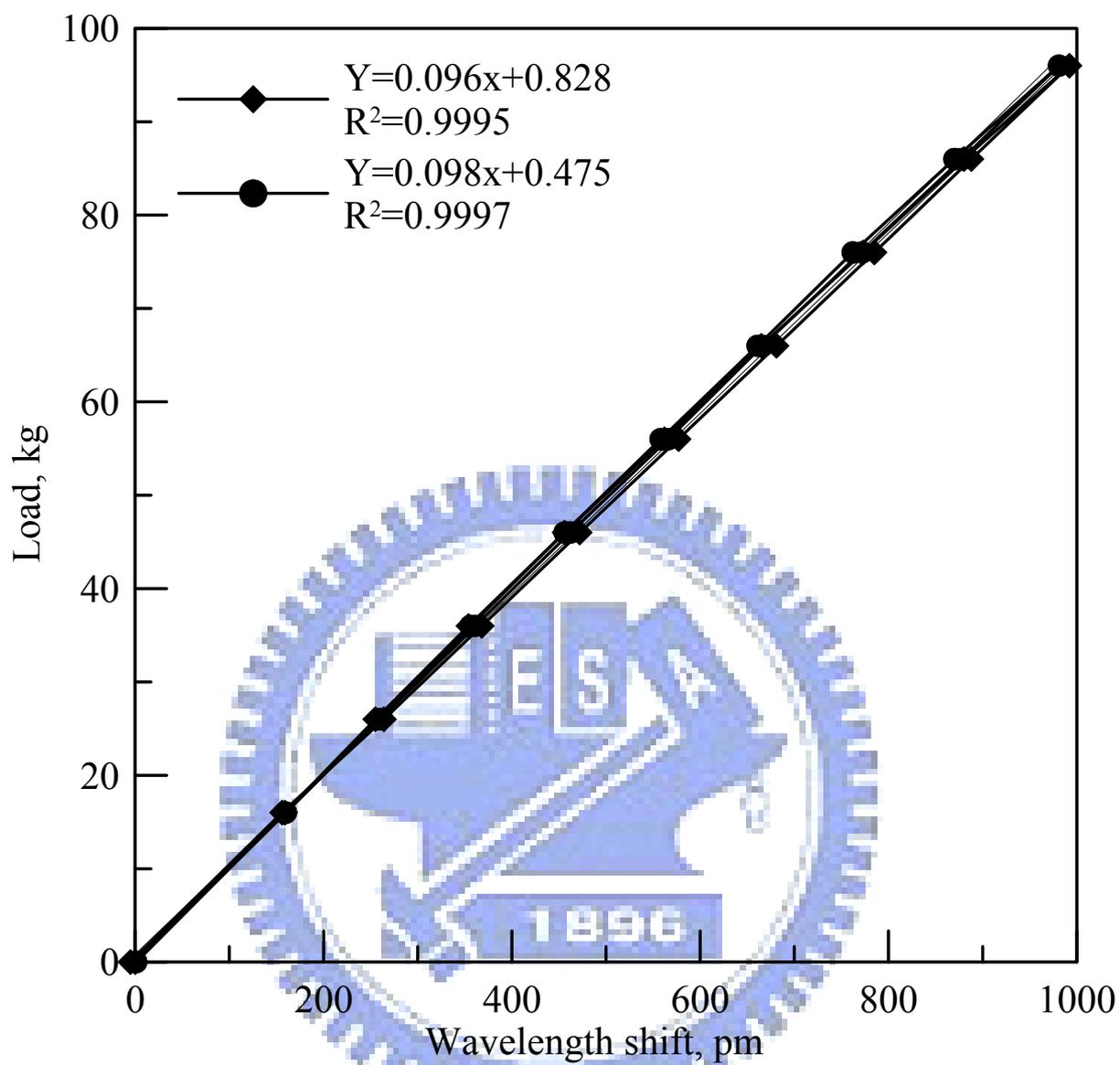


圖 4-18 光纖光柵荷重元標定結果

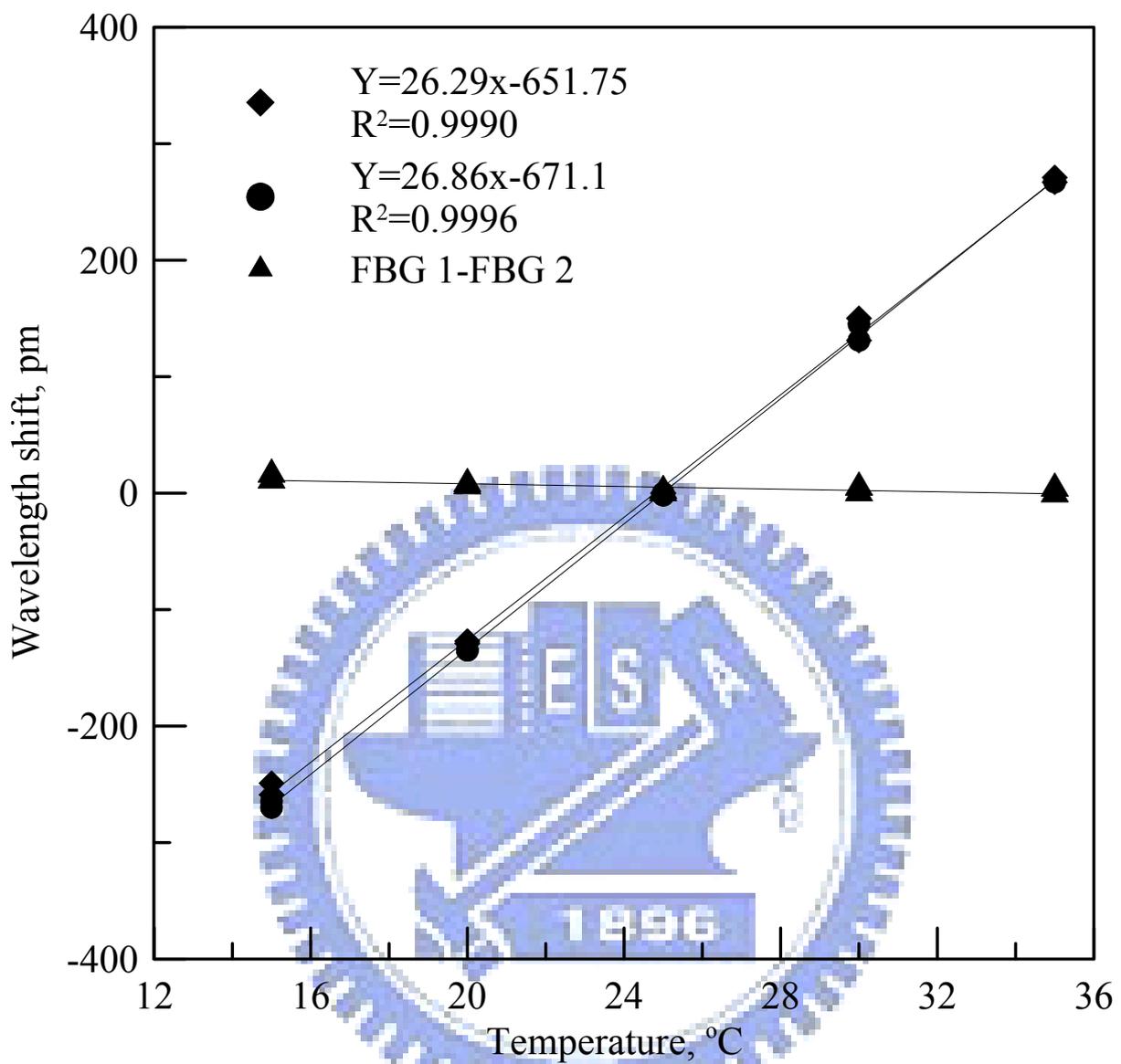


圖 4-19 光纖光柵荷重元溫度標定與修正結果

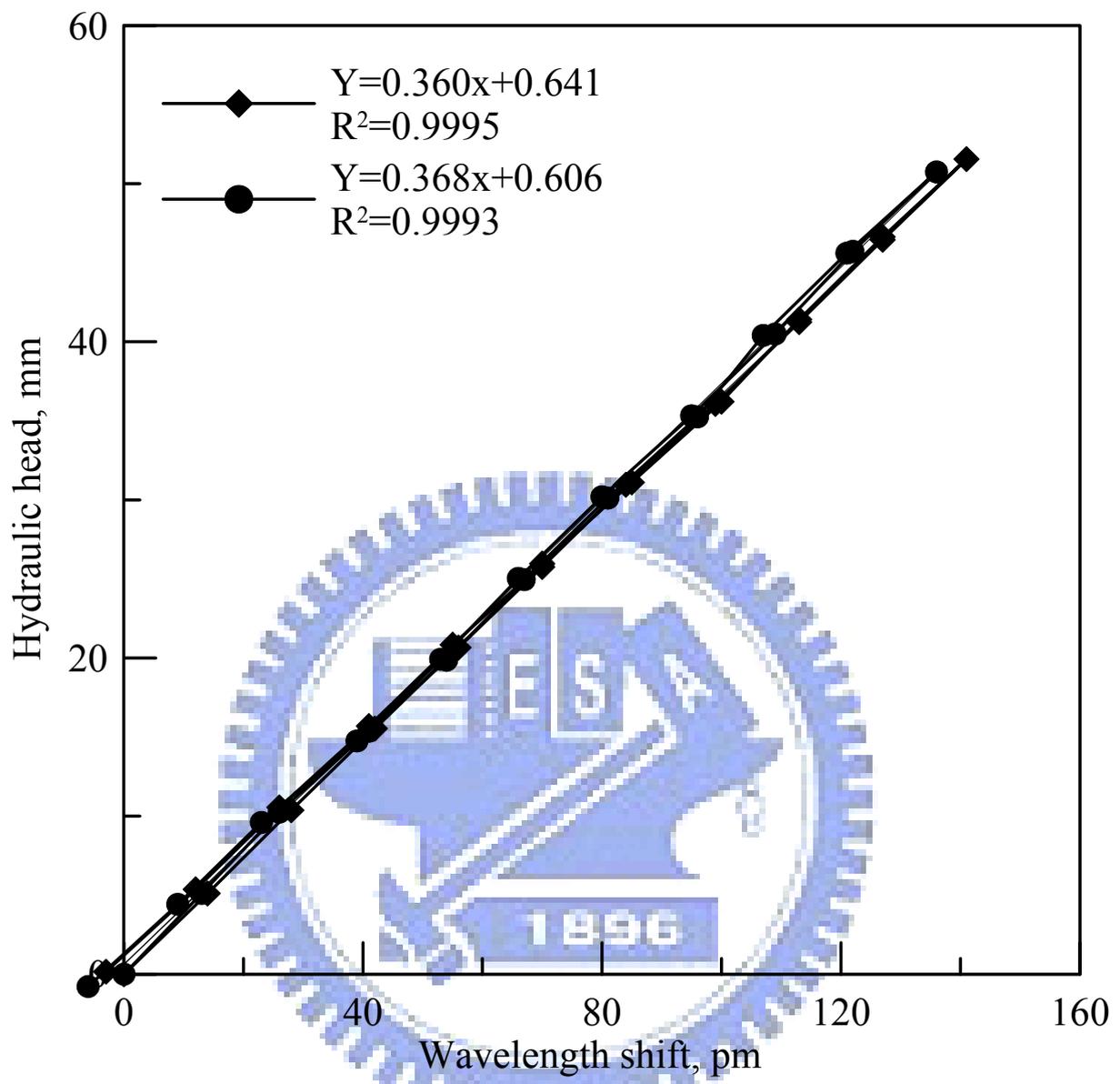


圖 4-20 光纖光柵差壓計標定結果

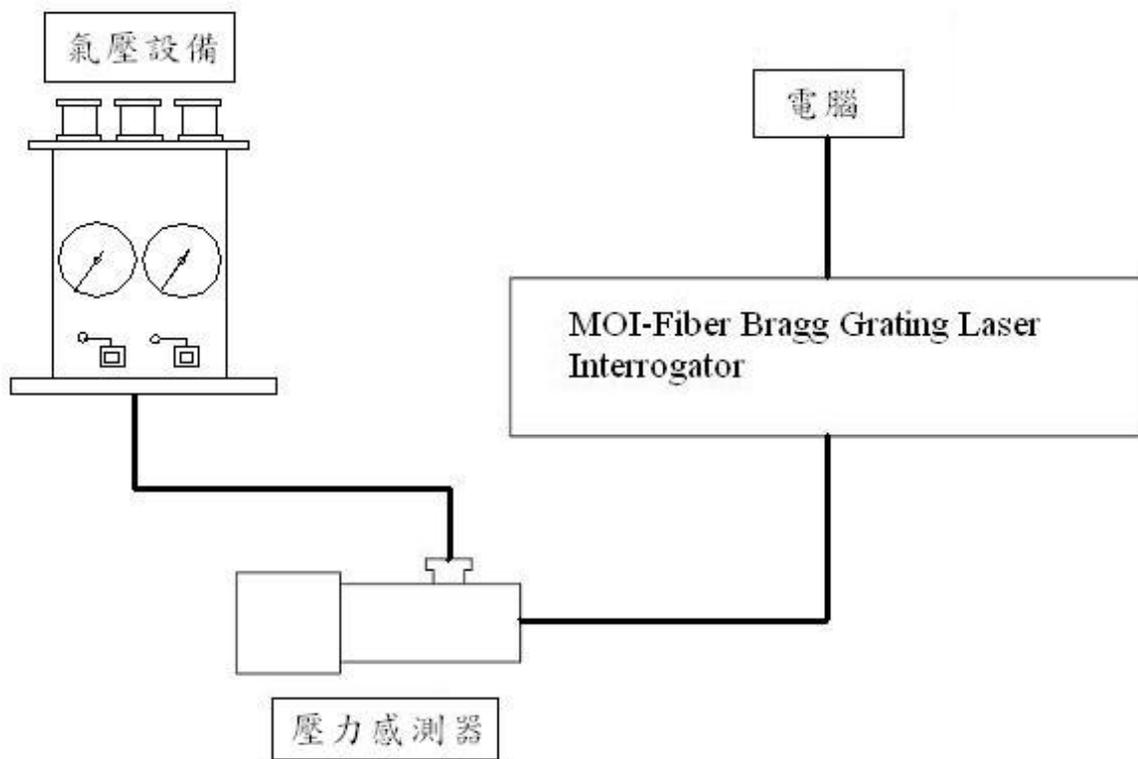


圖 4-21 光纖光柵水壓計壓力標定配置圖



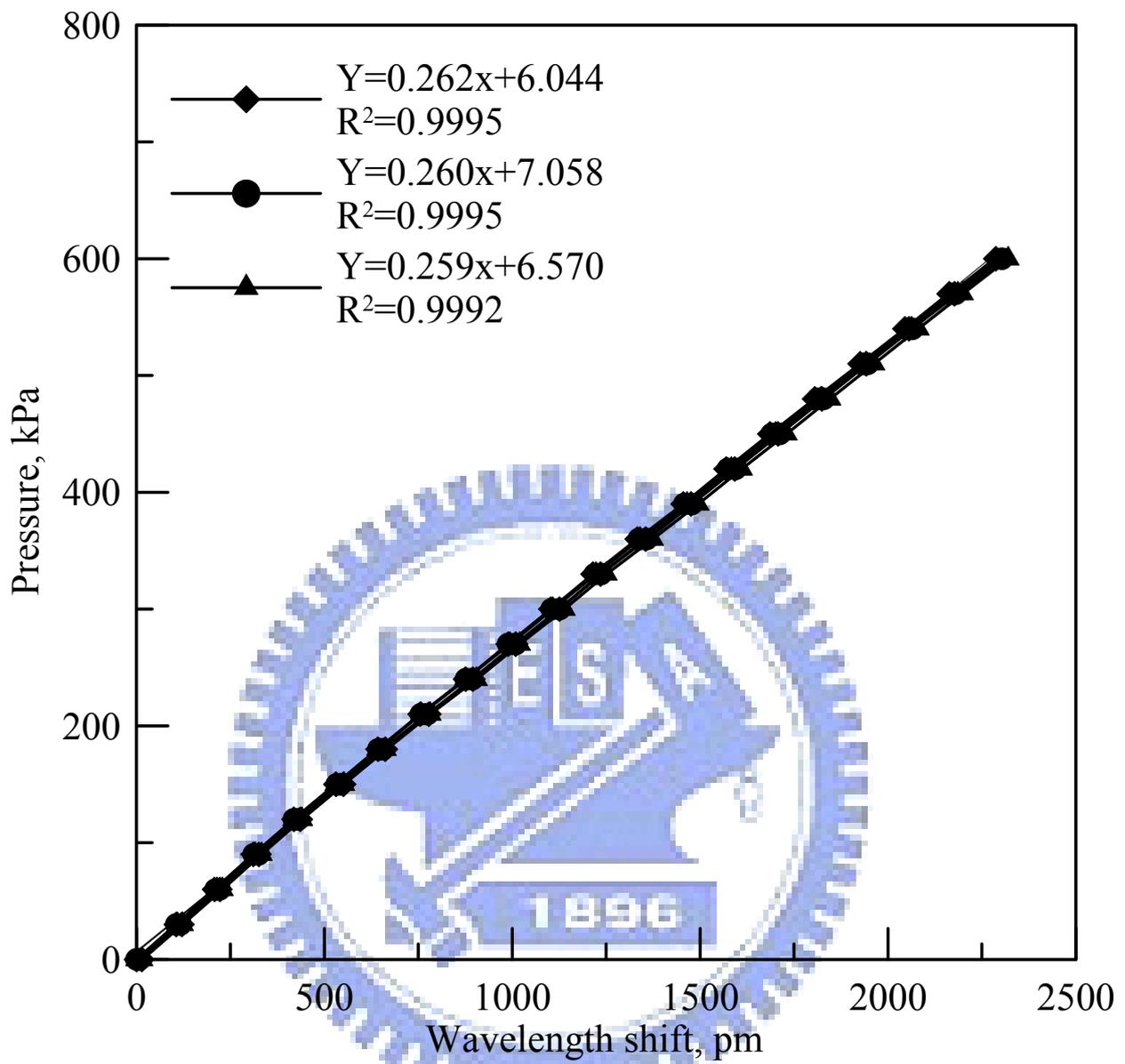


圖 4-22 1 號光纖光柵水壓計標定結果

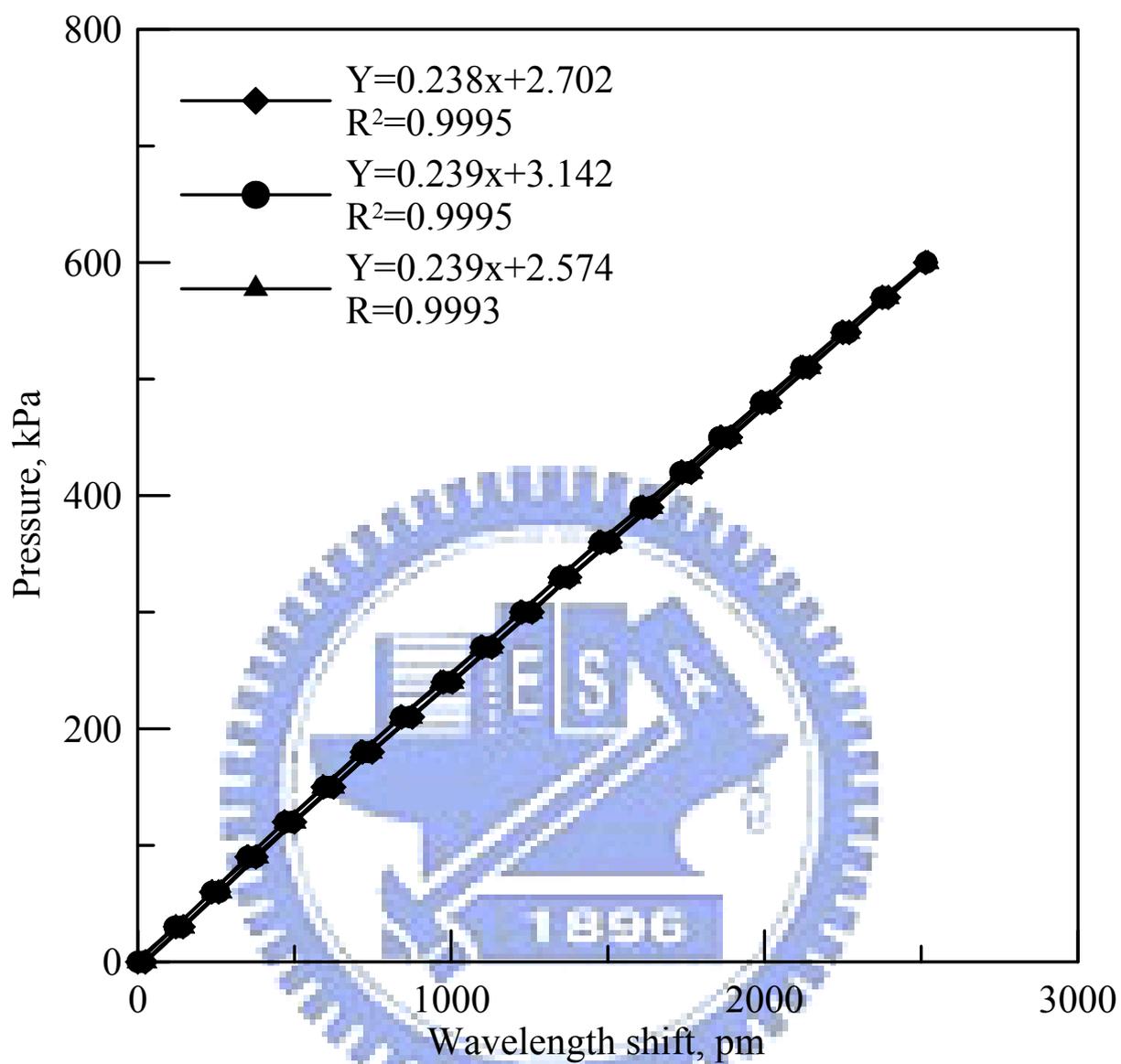


圖 4-23 2 號光纖光柵水壓計標定結果

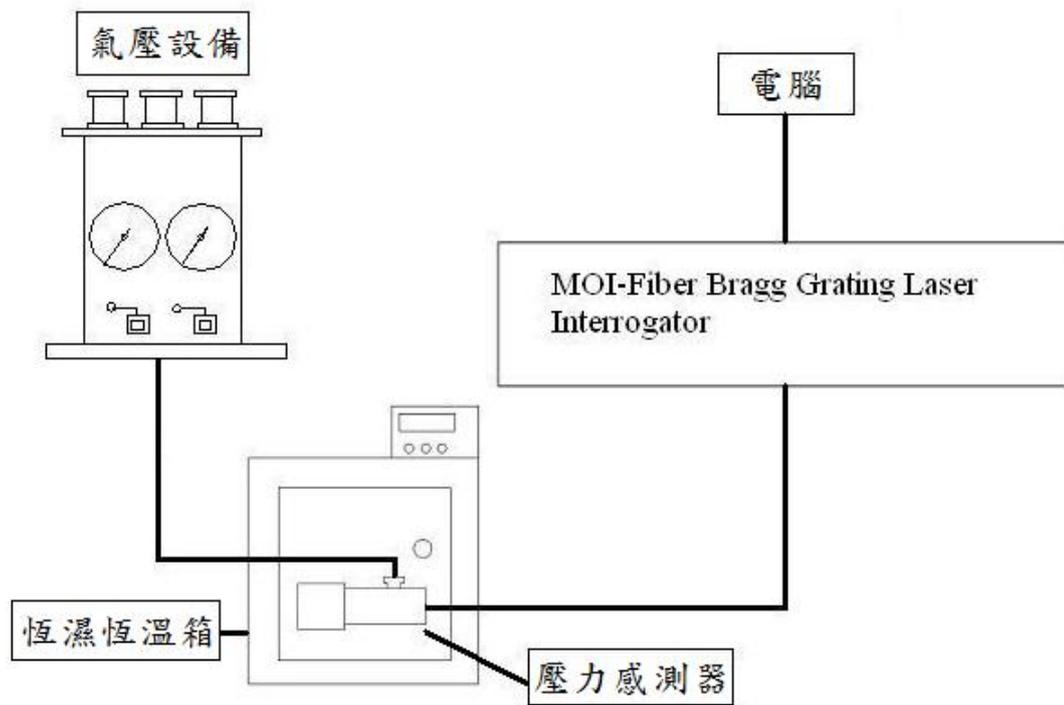


圖 4-24 光纖光柵水壓計溫度標定示意圖



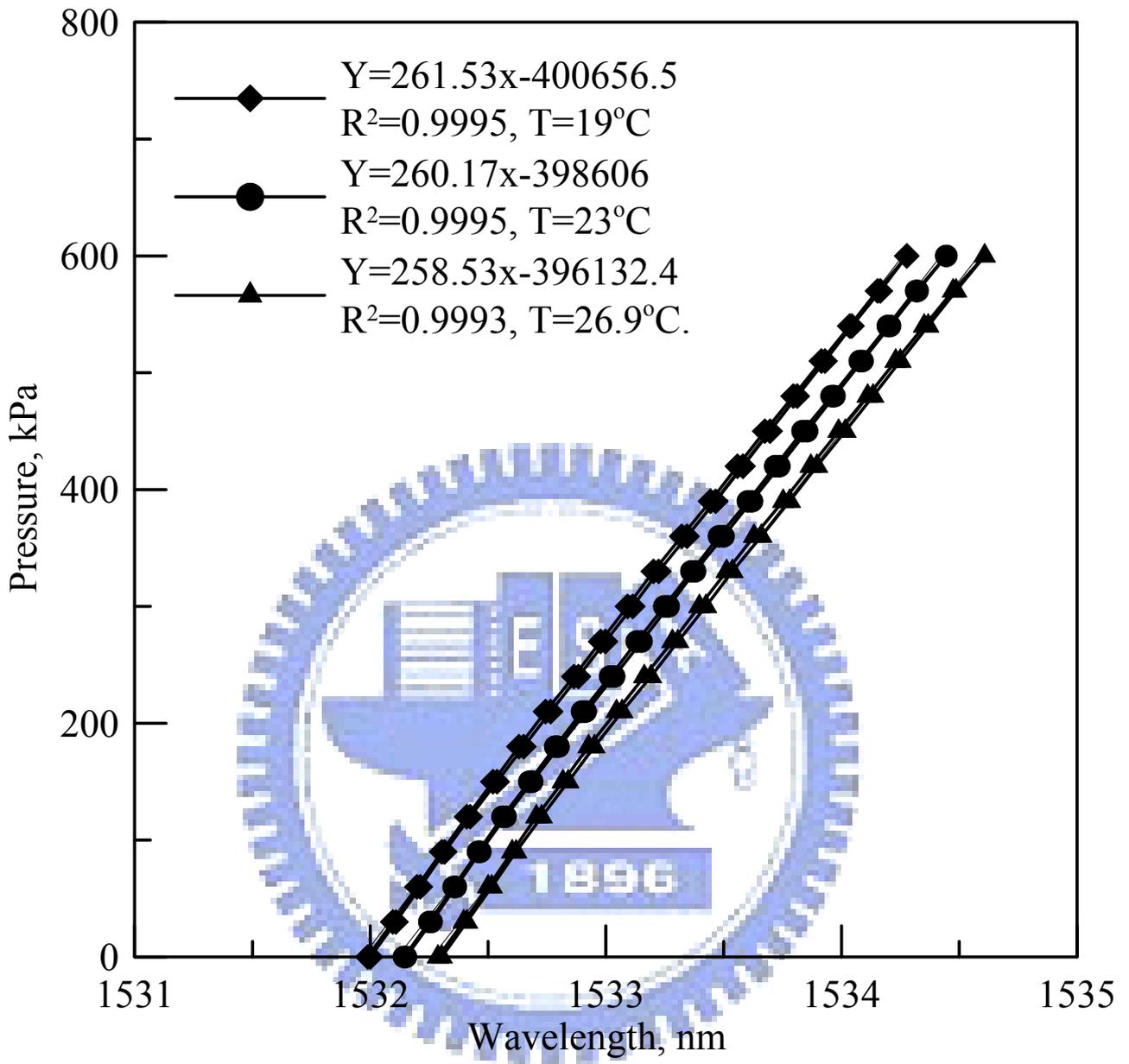


圖 4-25 1 號光纖光柵水壓計受溫度影響下波長變化圖

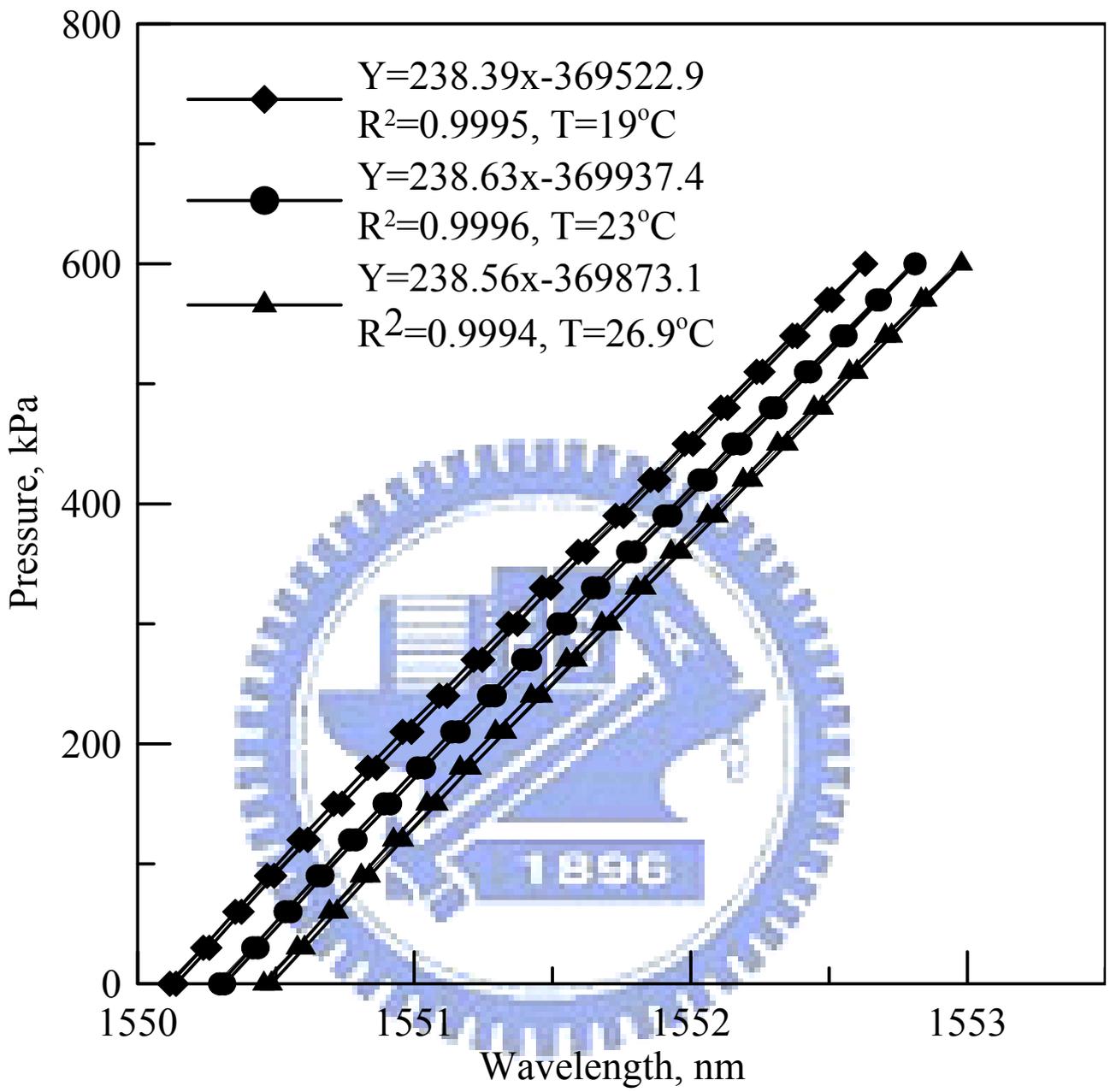


圖 4-26 2 號光纖光柵水壓計受溫度影響下波長變化圖

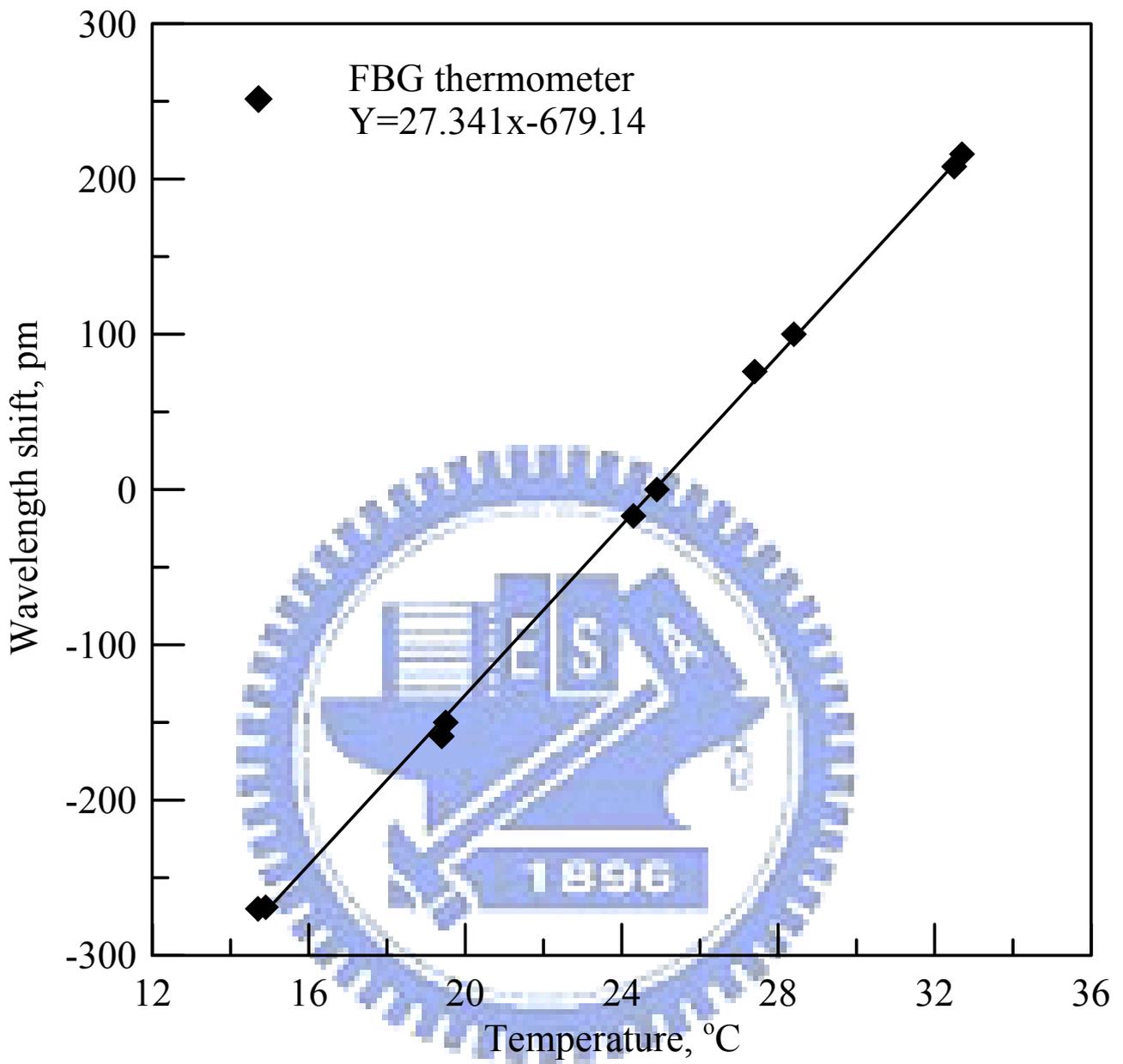


圖 4-27 光纖光柵溫度棒之溫度標定

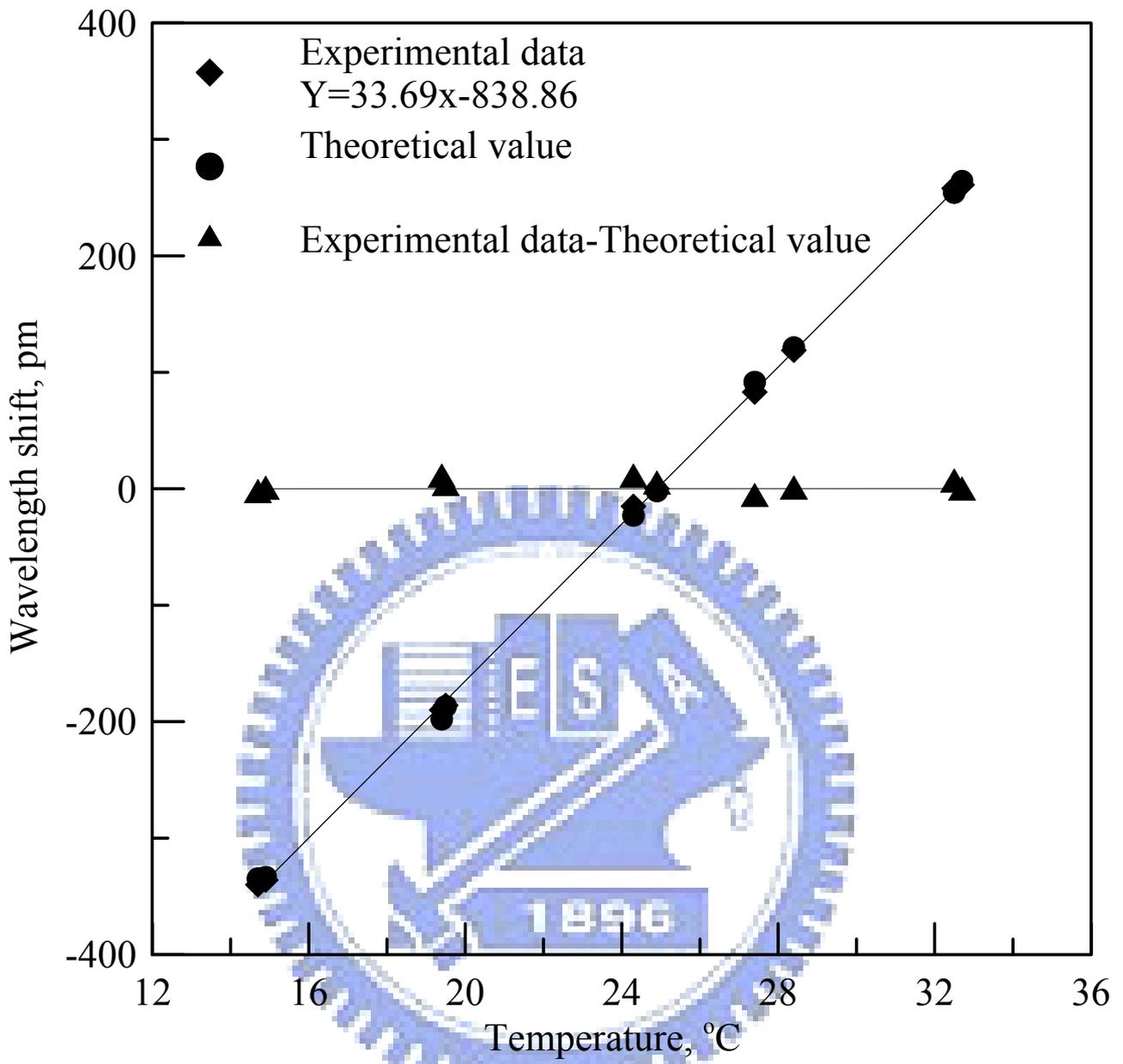


圖 4-28 1 號光纖光柵水壓計溫度標定與參考 FBG 法修正結果

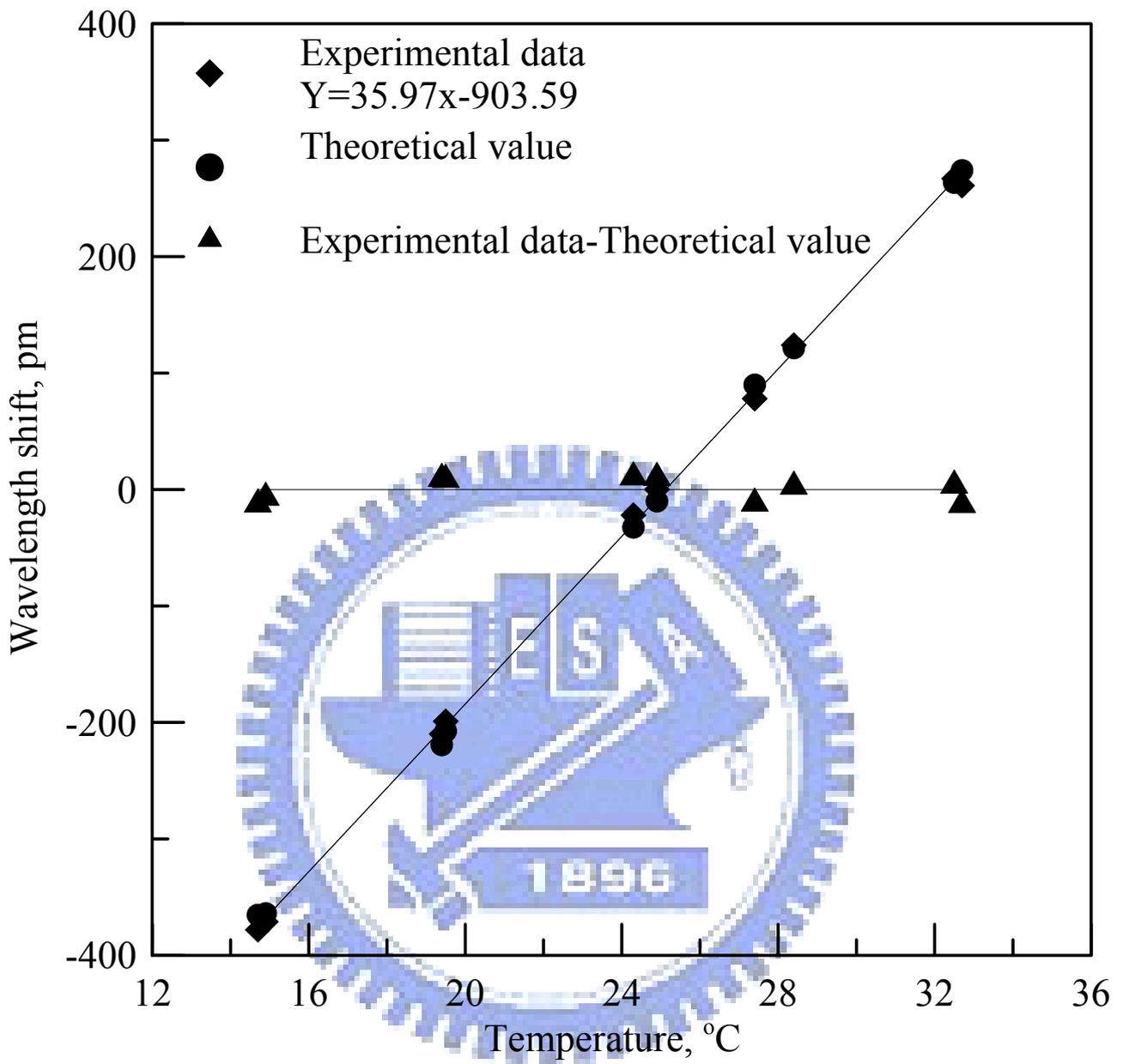


圖 4-29 2 號光纖光柵水壓計溫度標定與參考 FBG 法修正結果

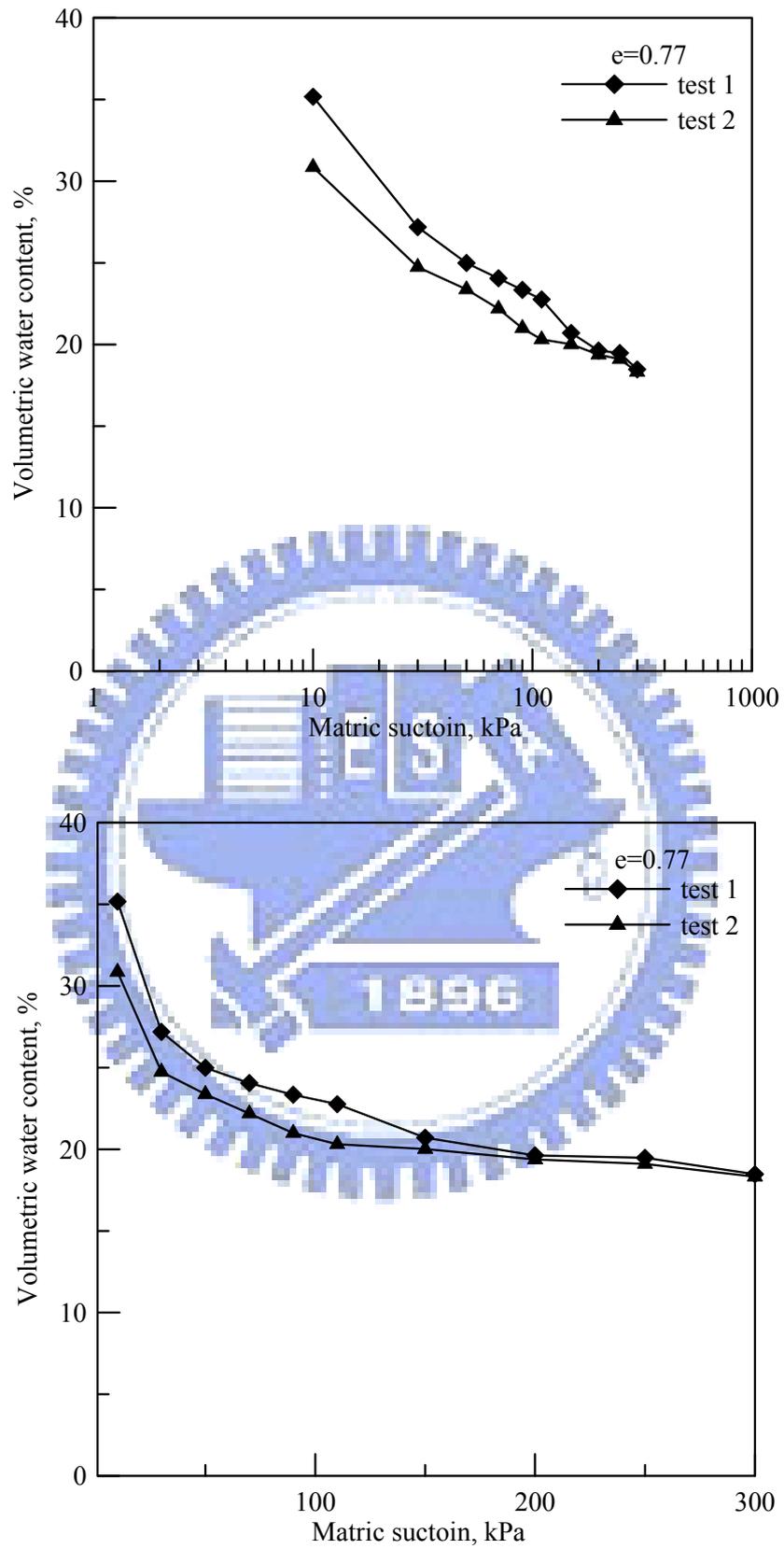


圖 4-30 玉峰國小-土壤水分特性曲線試驗結果

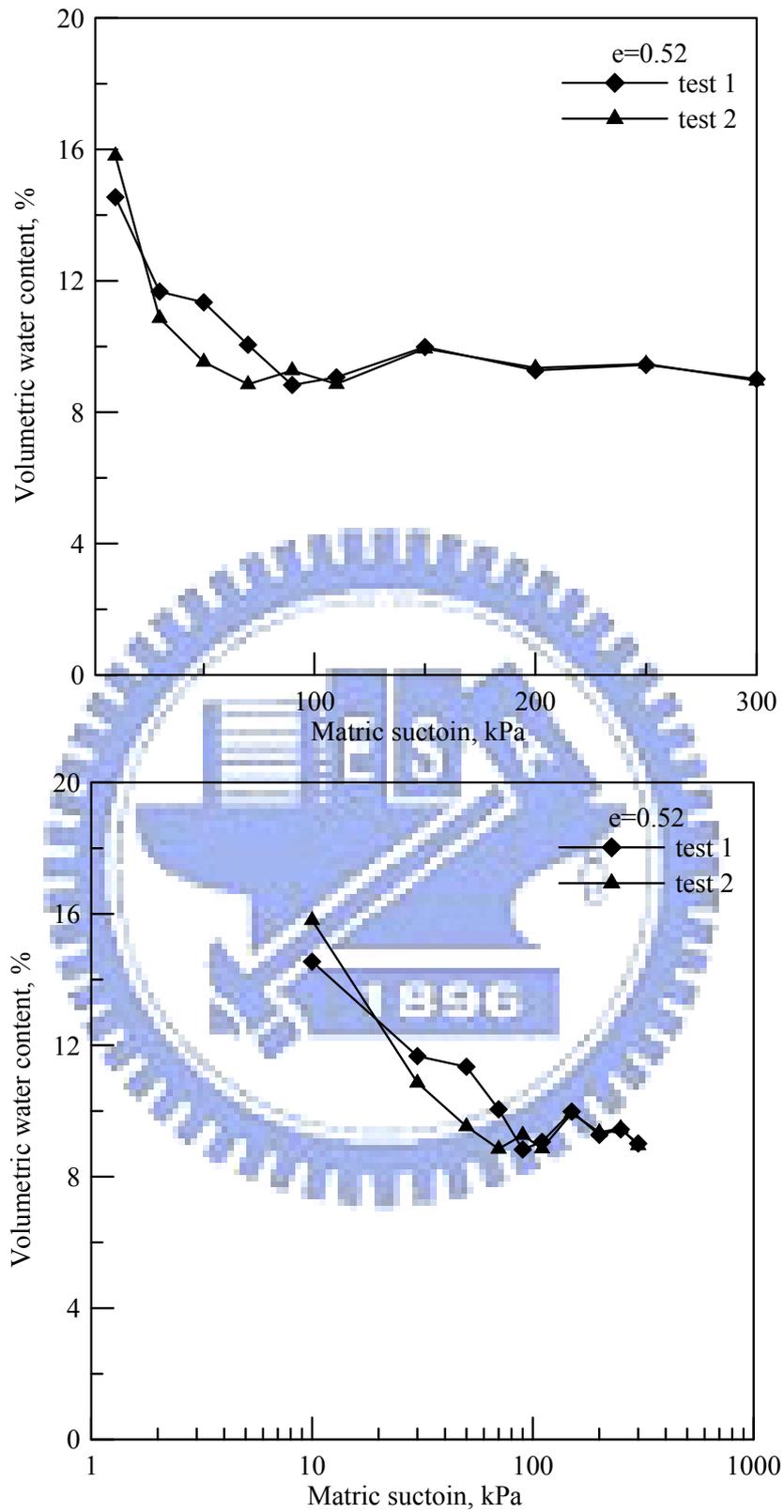


圖 4-31 砂崙仔崩塌地處理工程處-土壤水分特性曲線試驗結果

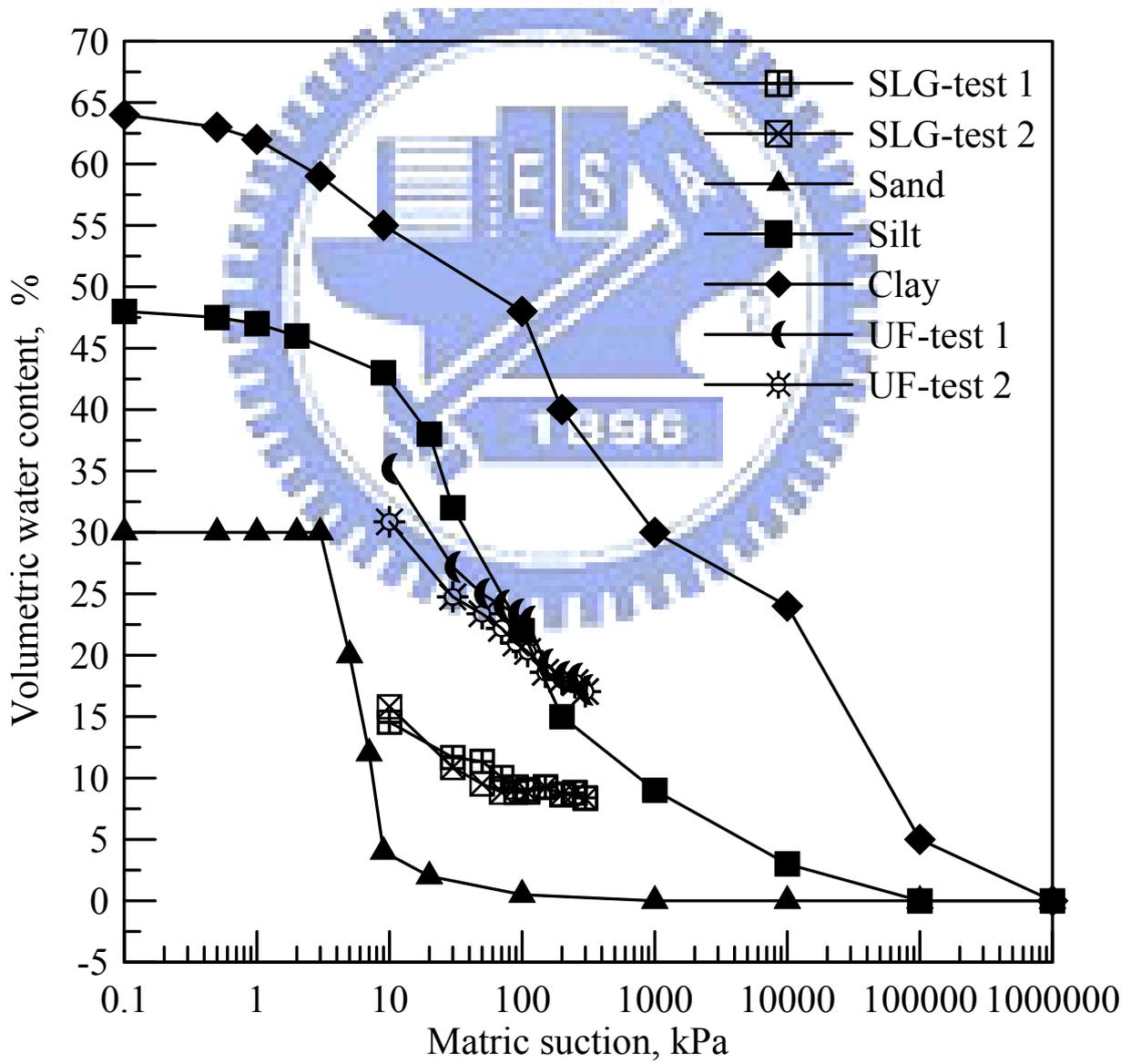
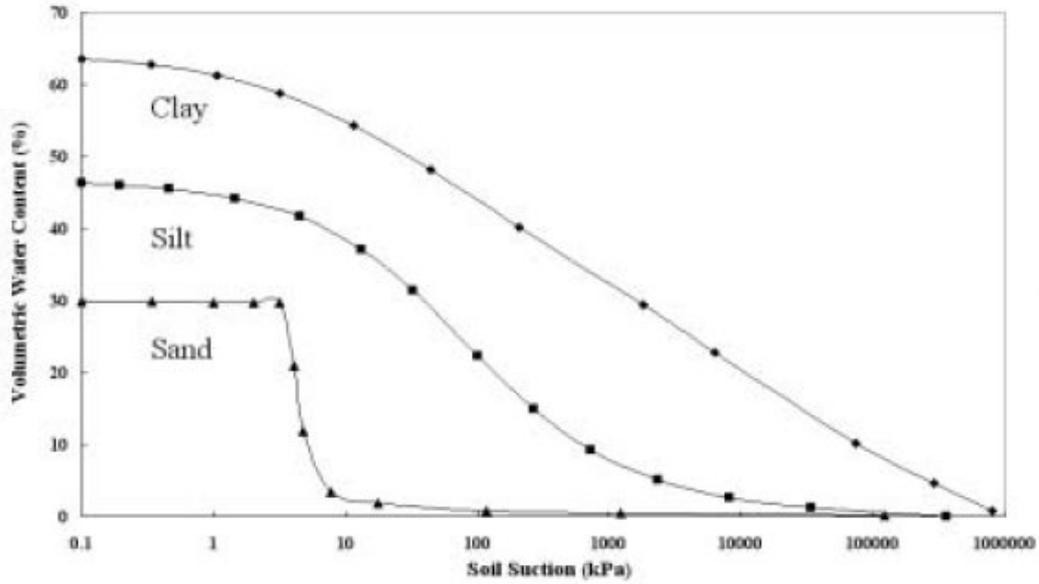


圖 4-32 黏土、粉土及砂的典型土壤水份曲線圖(Scott et al., 2001)

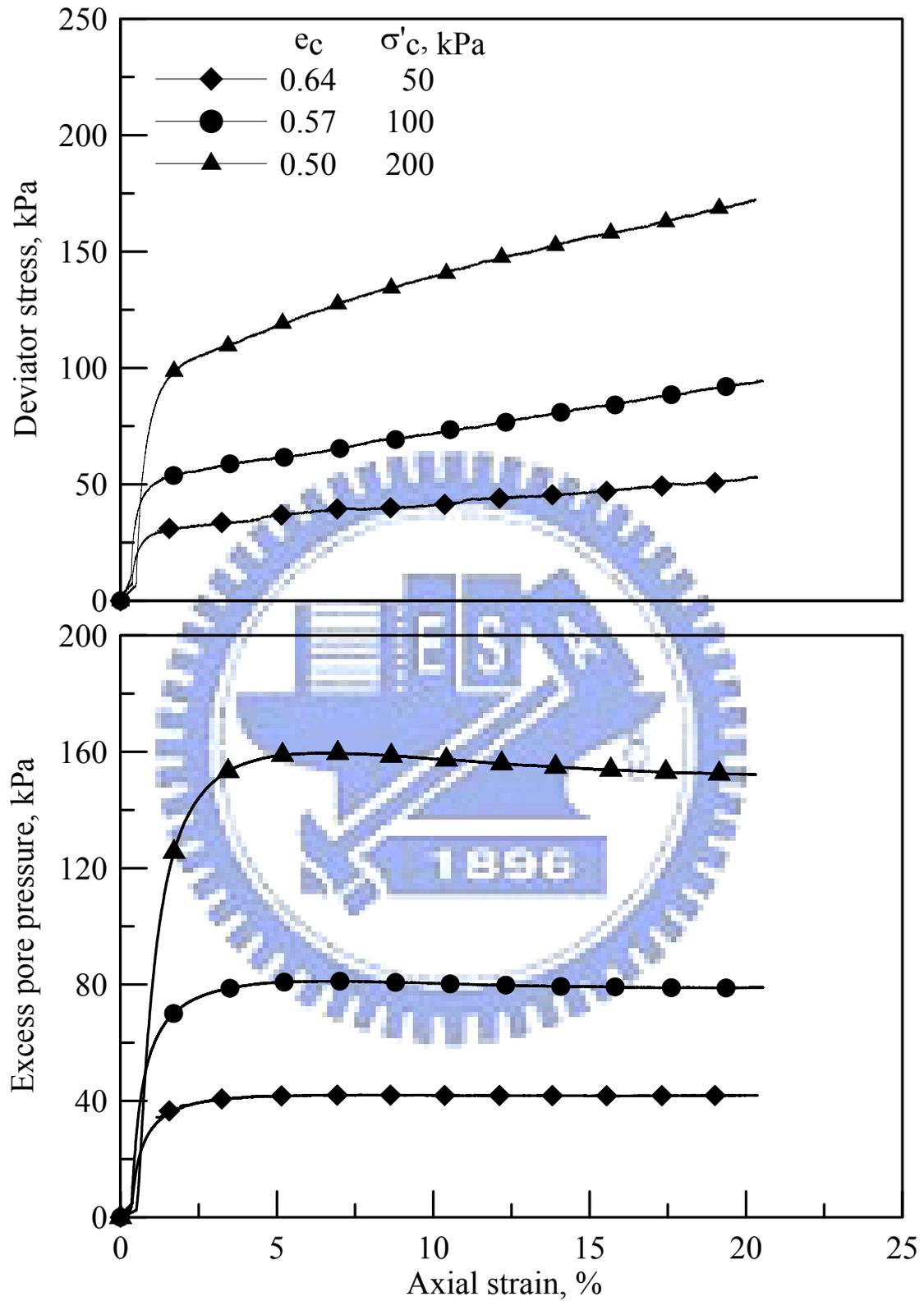


圖 4-33 玉峰國小-飽和壓密不排水三軸試驗結果

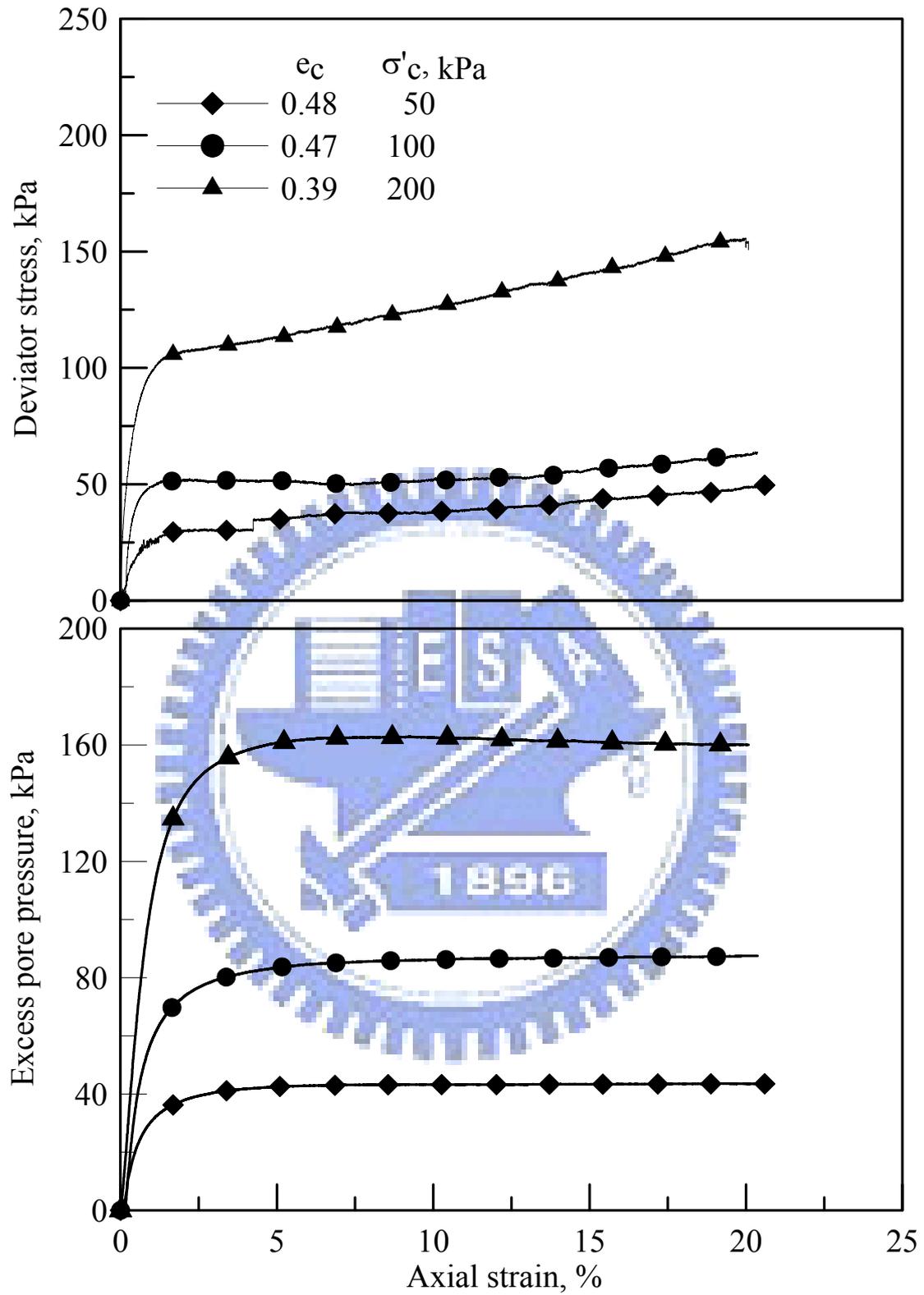


圖 4-34 砂崙仔崩塌地處理工程處-飽和壓密不排水三軸試驗結果

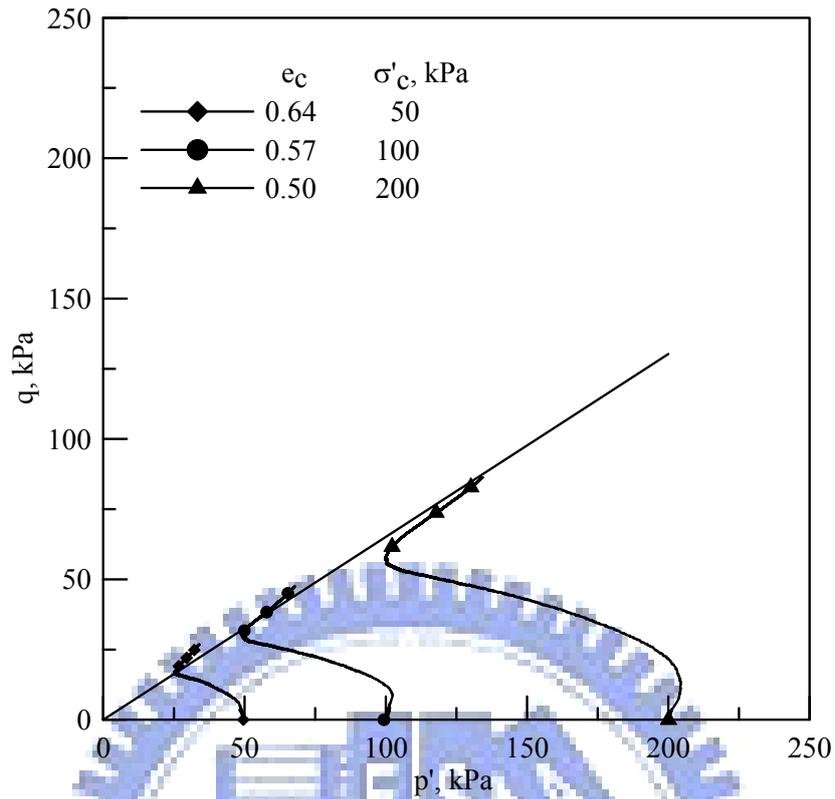


圖 4-35 玉峰國小-應力路徑圖

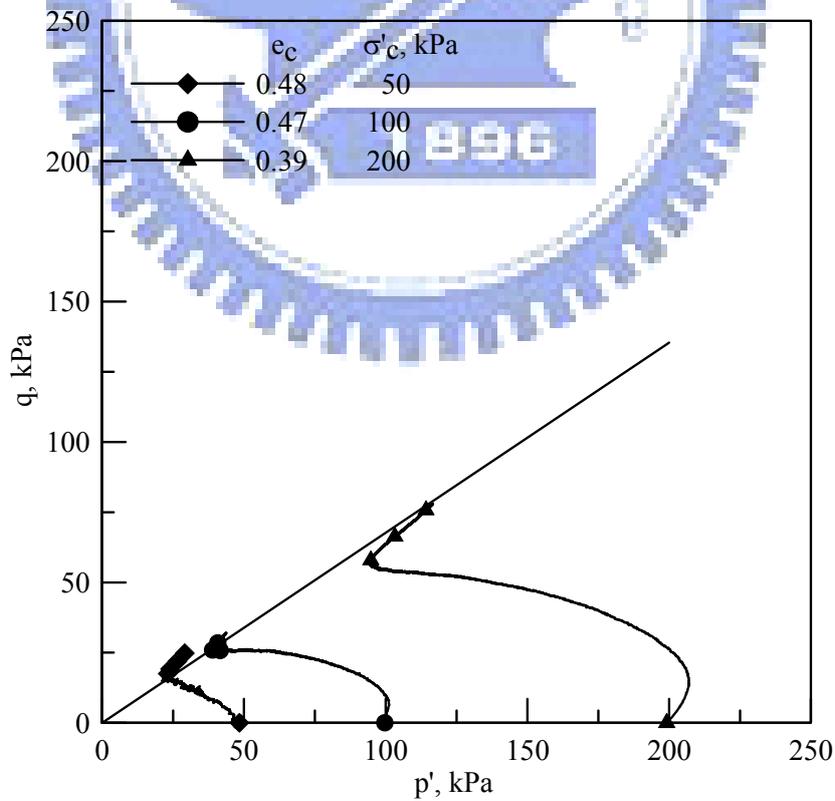


圖 4-36 砂崙仔崩塌地處理工程處-應力路徑圖

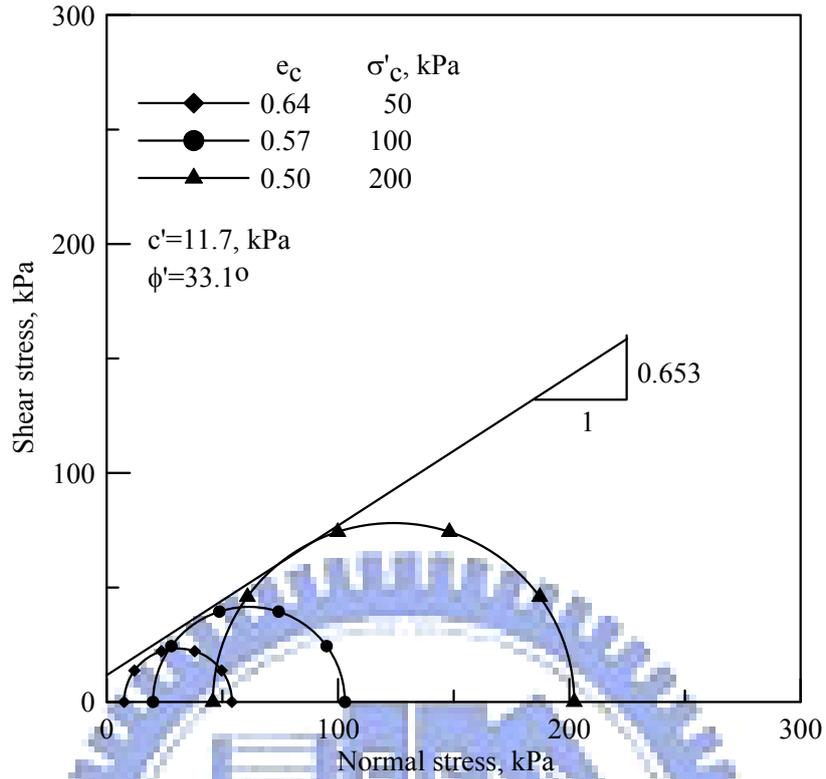


圖 4-37 玉峰國小-軸向應變 15%時之莫爾圓

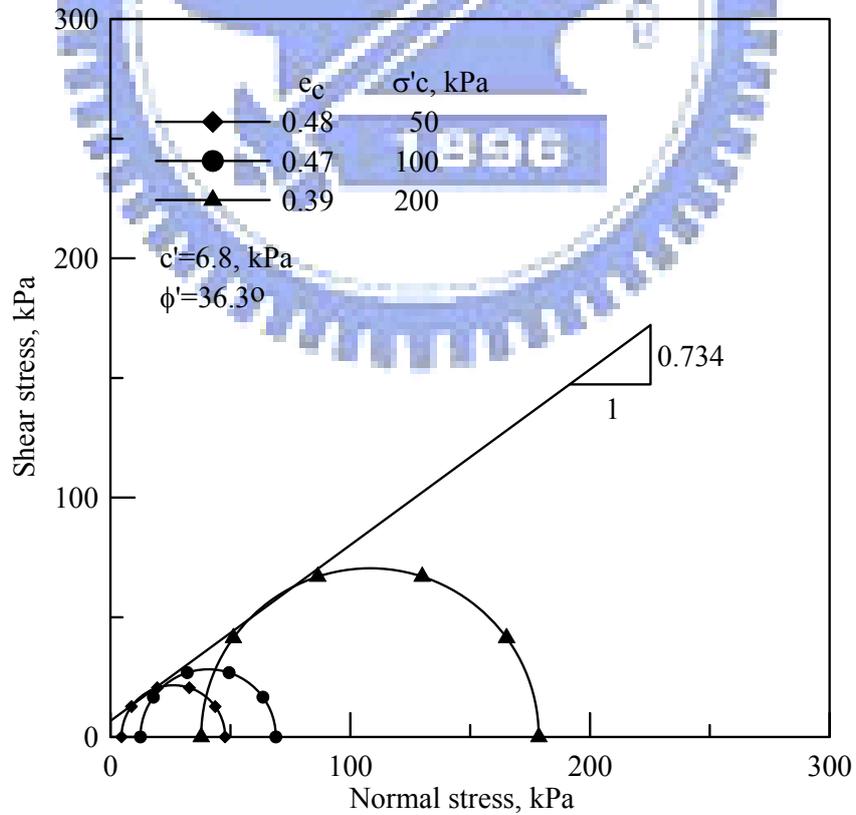


圖 4-38 砂崙仔崩塌地處理工程處-軸向應變 15%時之莫爾圓

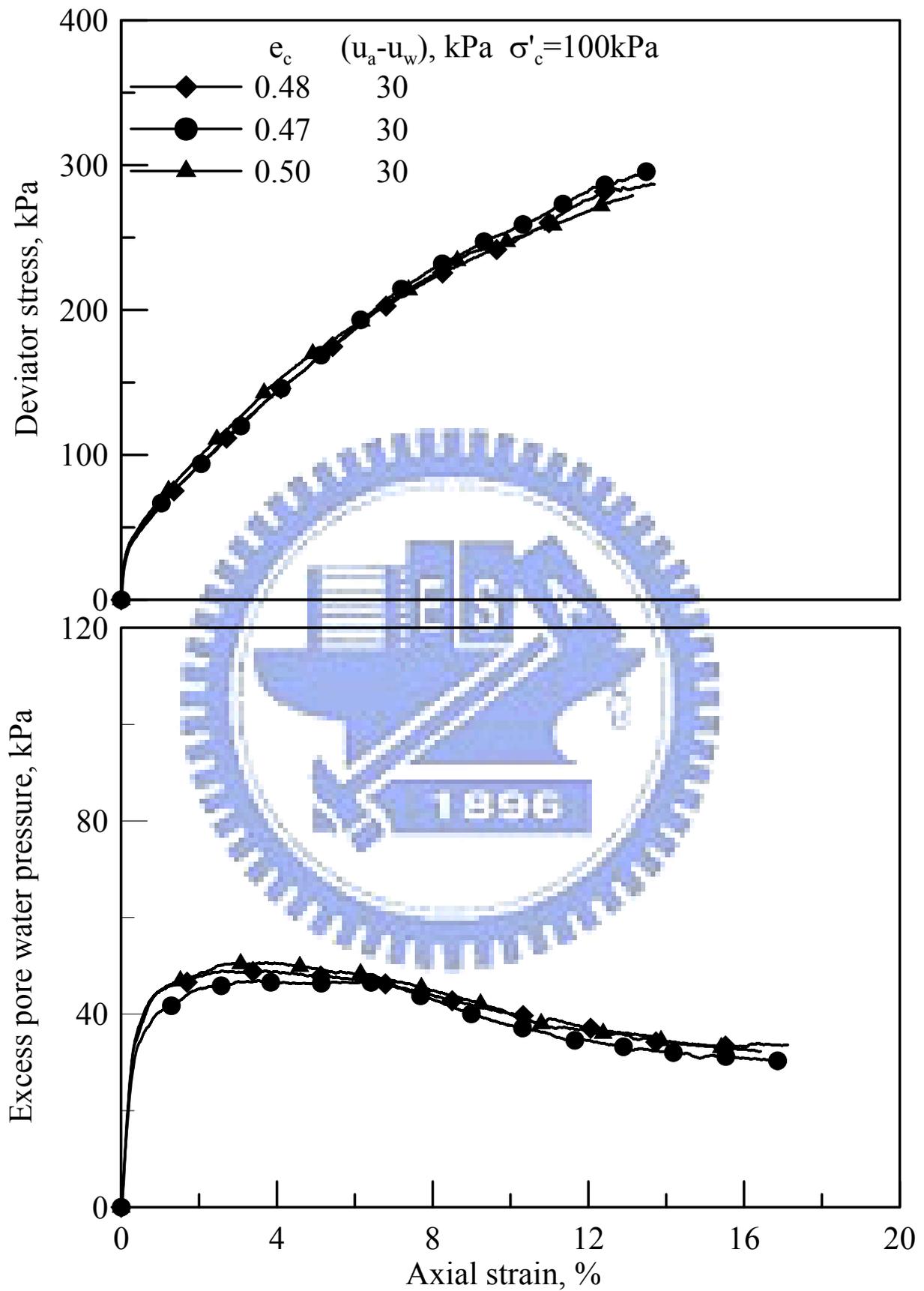


圖 4-39 玉峰國小重複性試驗-非飽和應力應變曲線

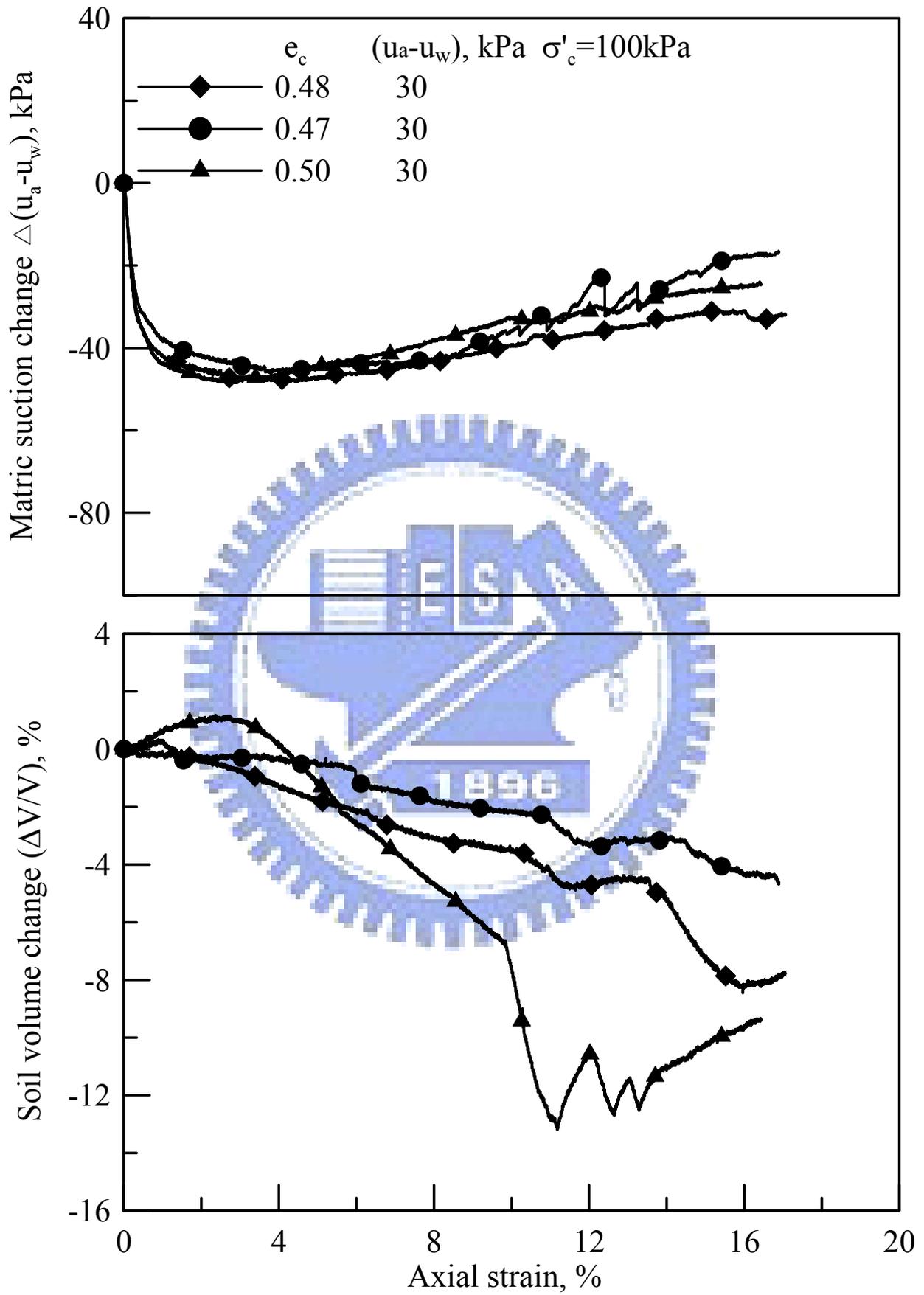


圖 4-40 玉峰國小重複性試驗-基值吸力變化與體積變化

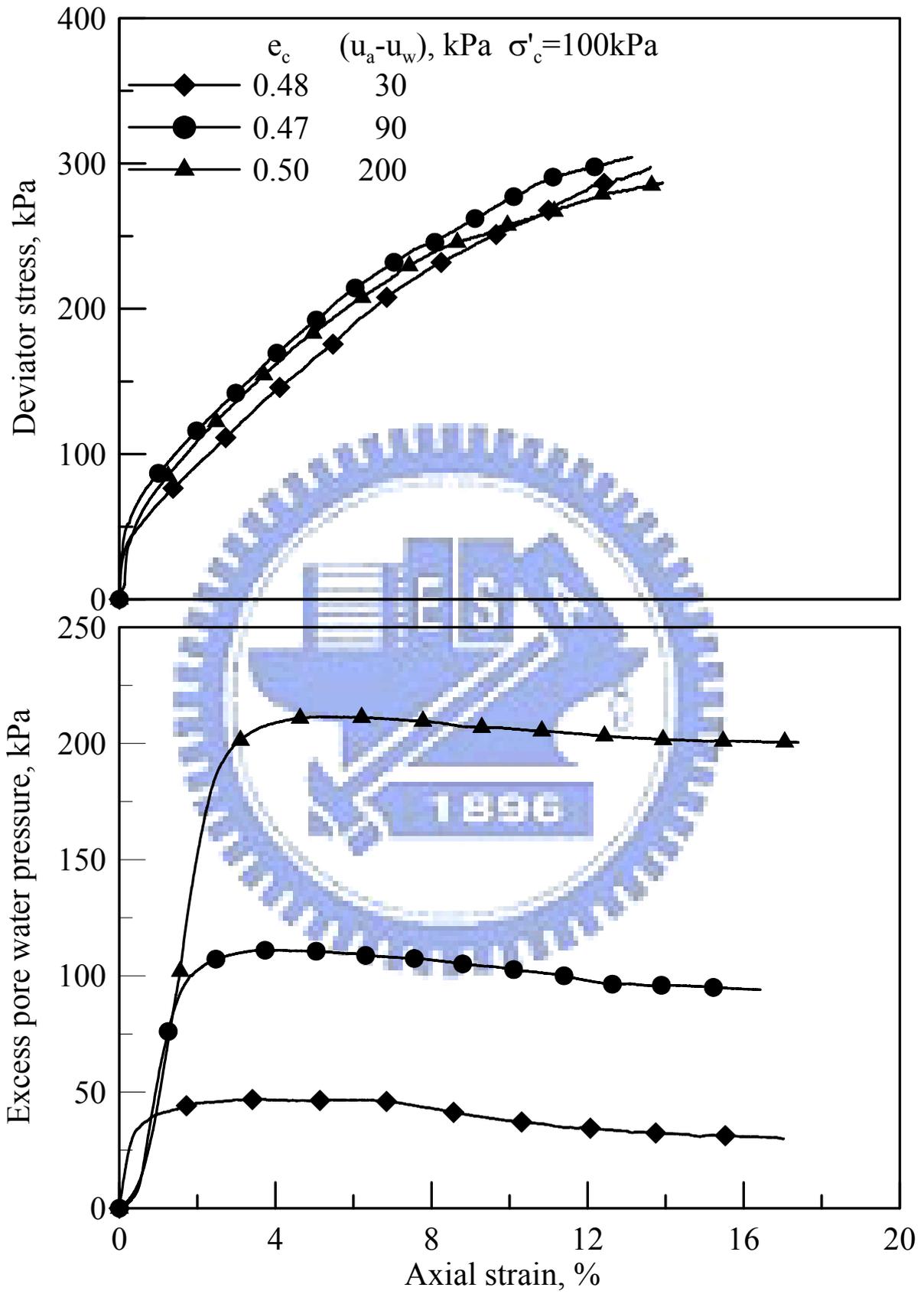


圖 4-41 玉峰國小-非飽和應力應變曲線

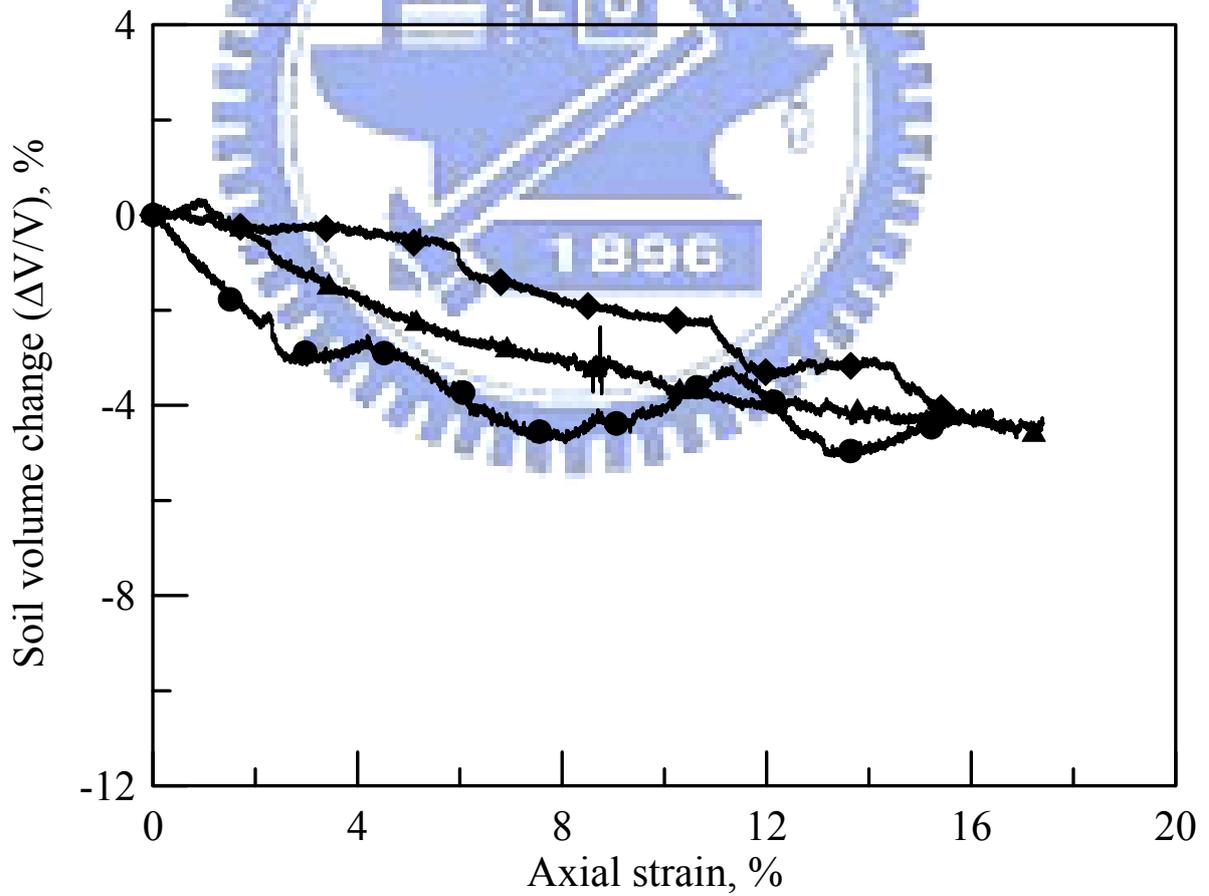
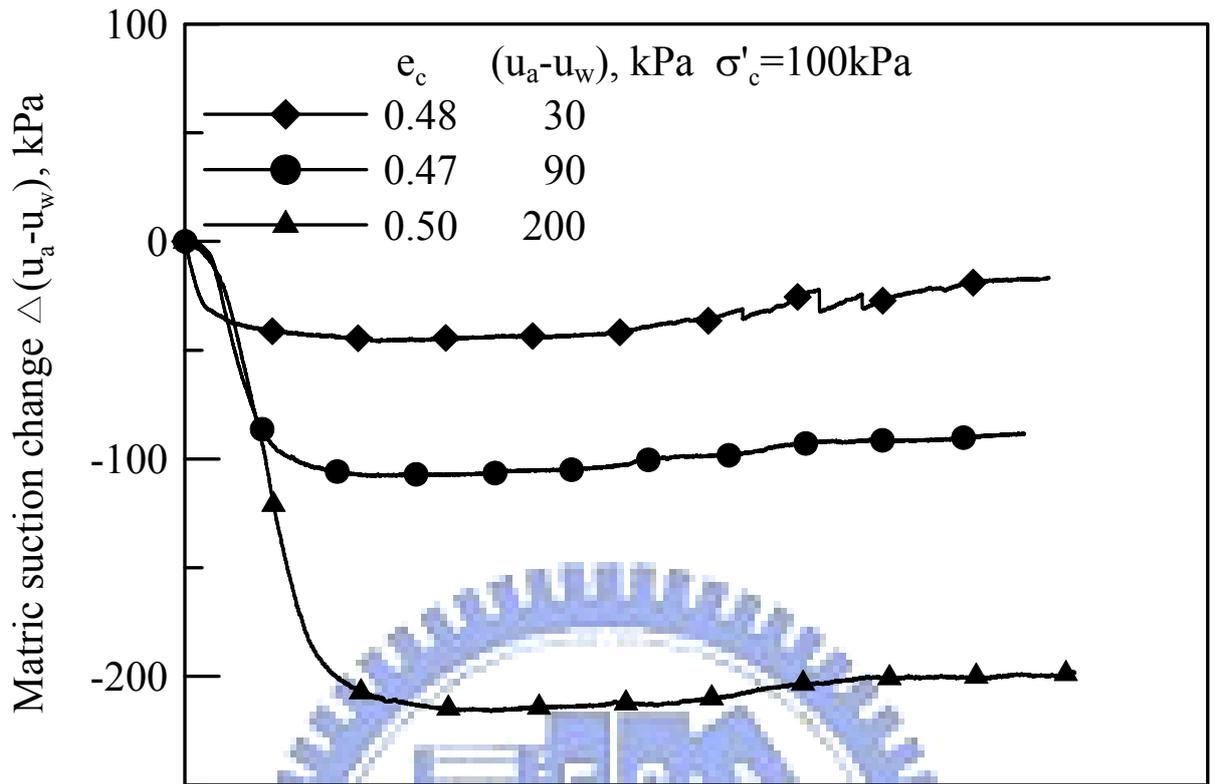


圖 4-42 玉峰國小-基值吸力變化與體積變化

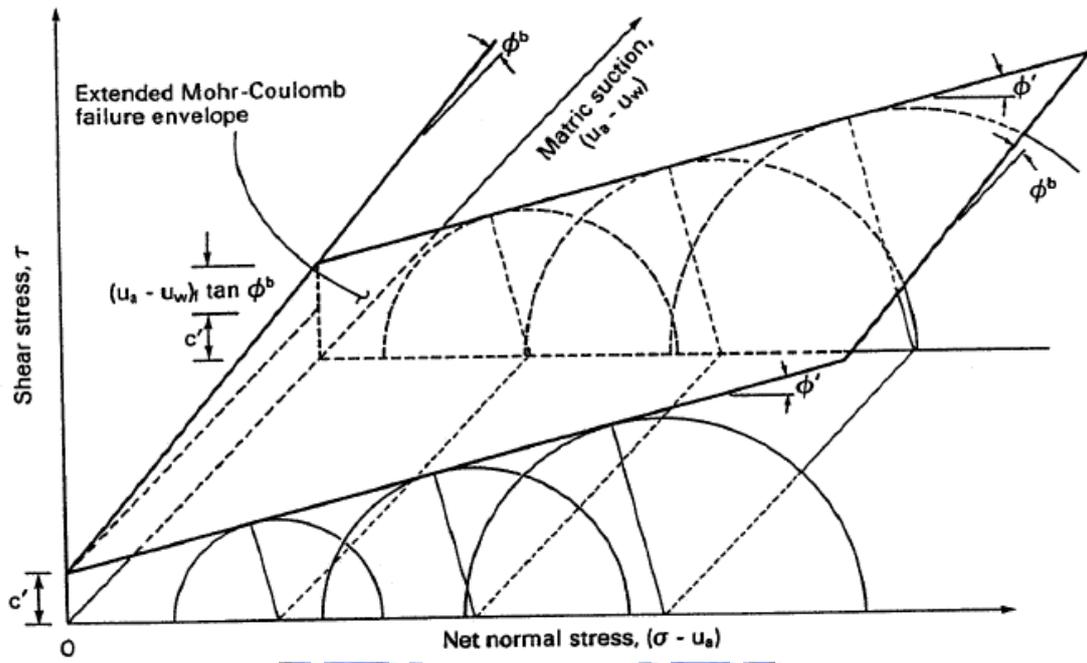


圖 4-43 非飽和土壤廣義莫耳庫倫破壞包絡面

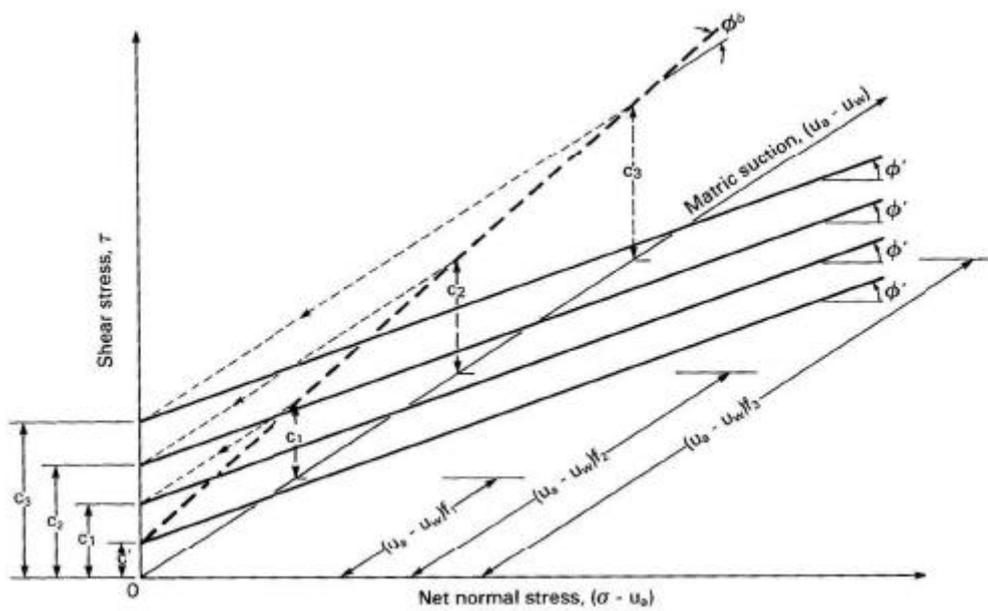


圖 4-44 將破壞包絡面投影至 $(\sigma - u_a) - \tau$ 平面

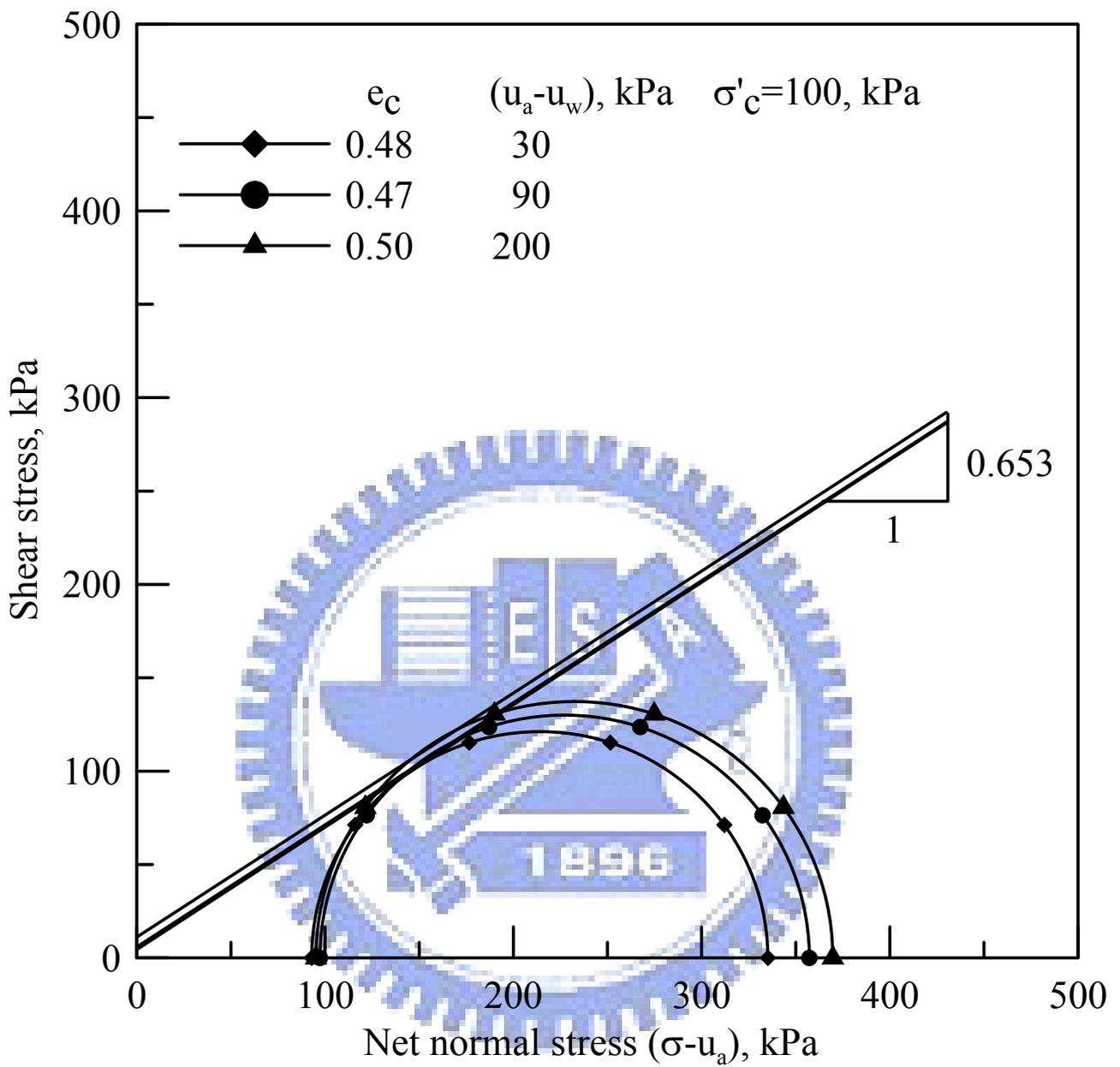


圖 4-45 玉峰國小-非飽和三軸試驗破壞包絡線

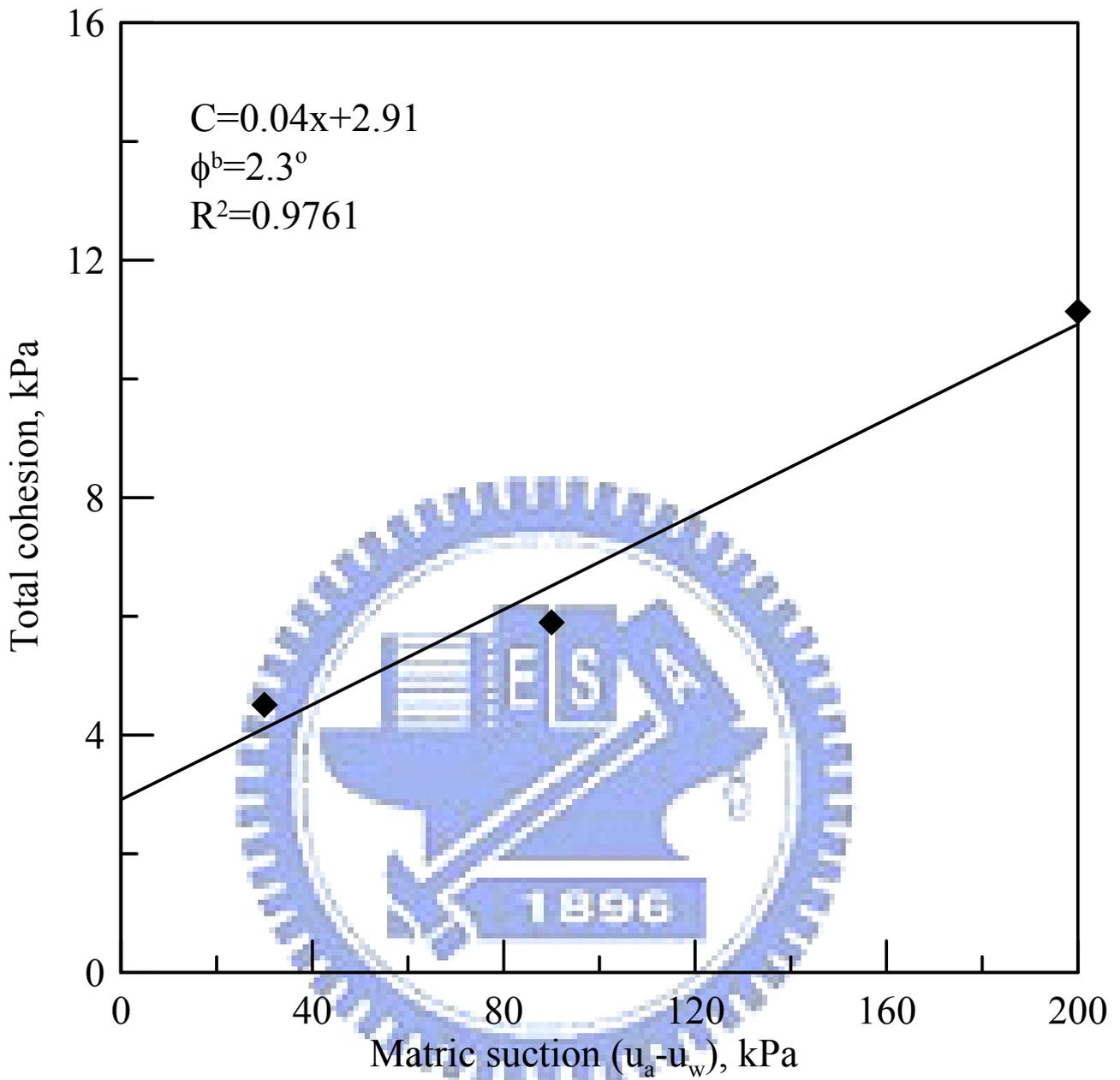


圖 4-46 玉峰國小- ϕ^b 線性迴歸

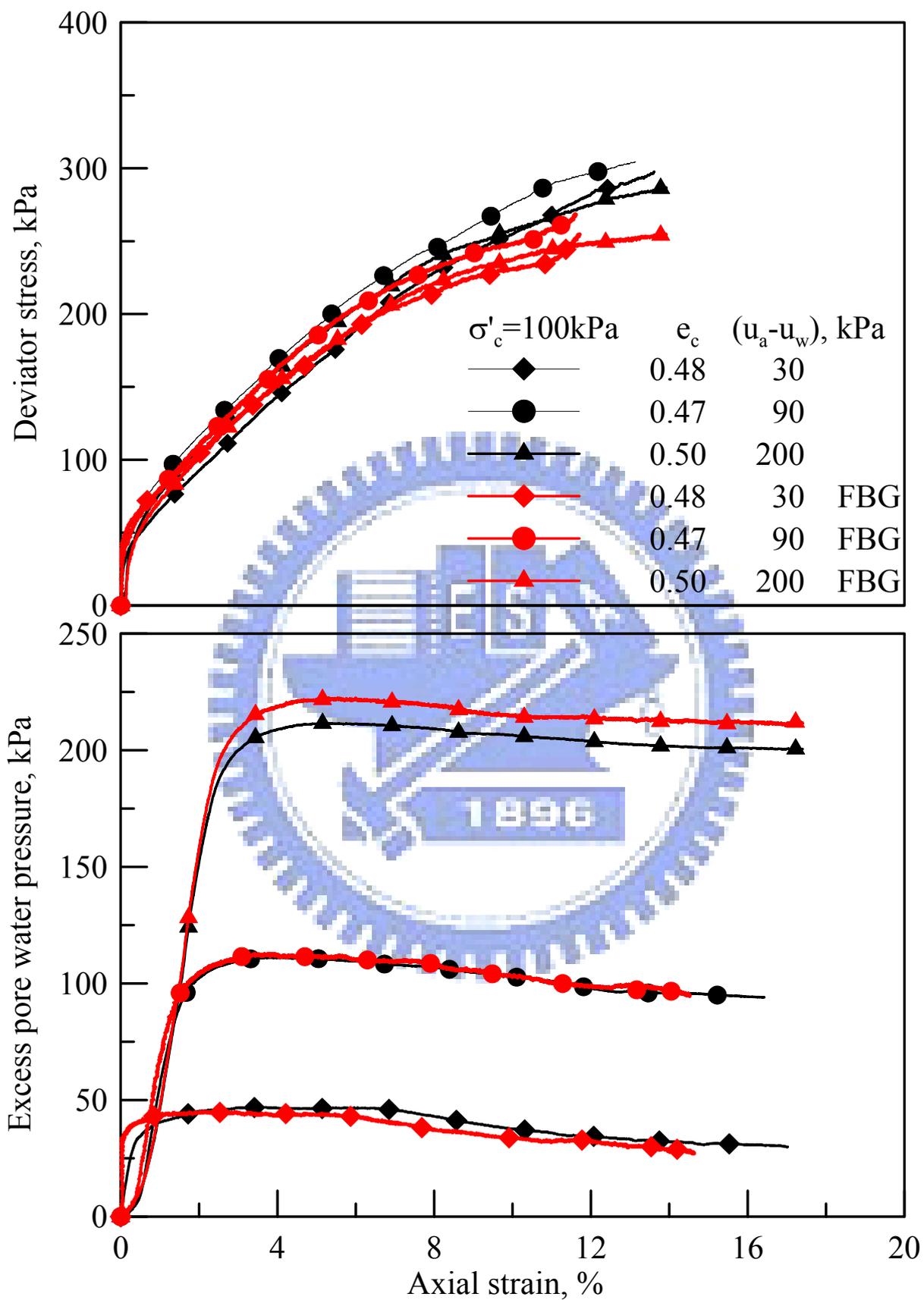


圖 4-47 玉峰國小電子式與光纖式量測結果比較-非飽和應力應變曲線

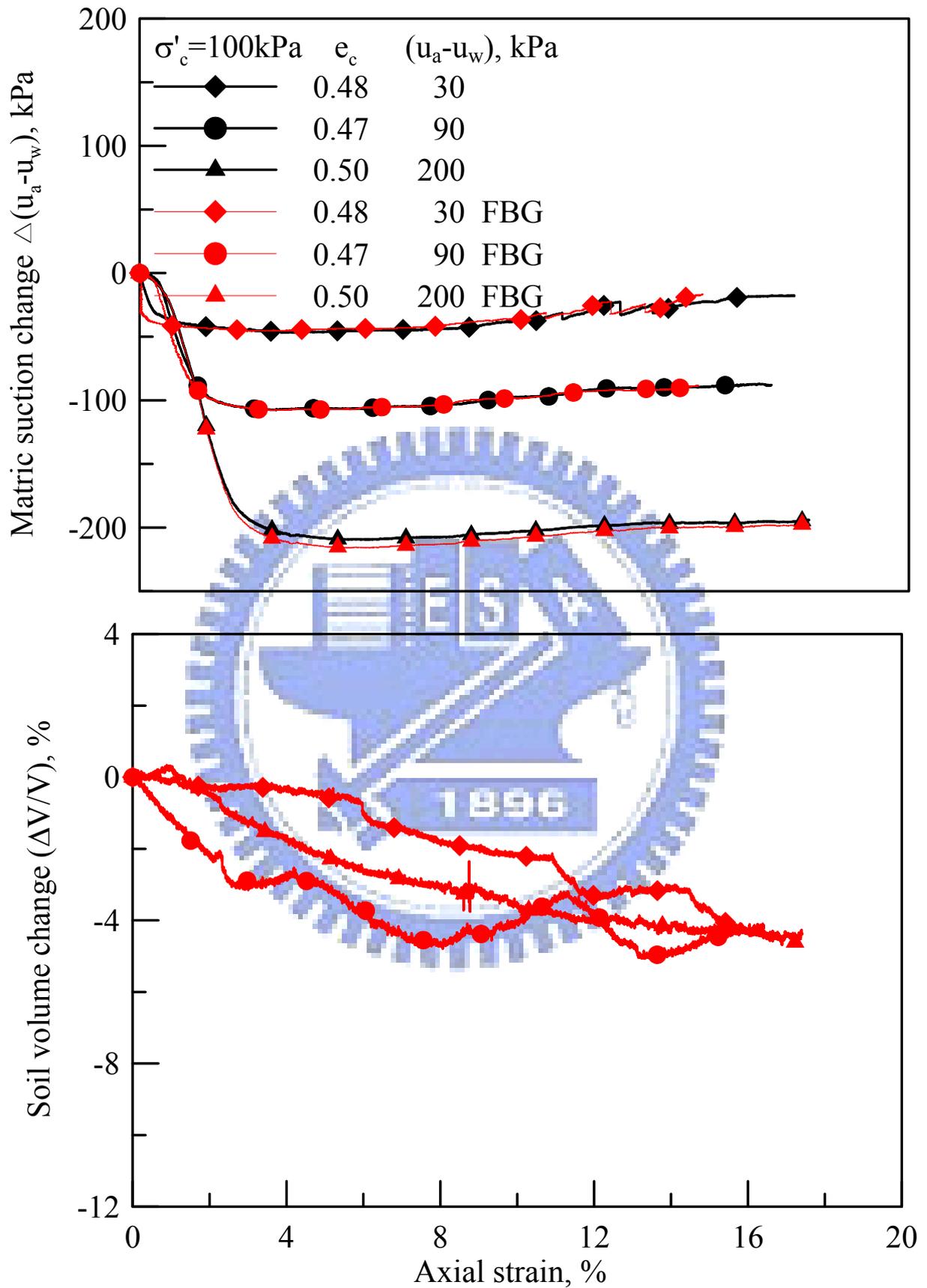


圖 4-48 玉峰國小電子式與光纖式量測結果比較-基值吸力變化與體積變化

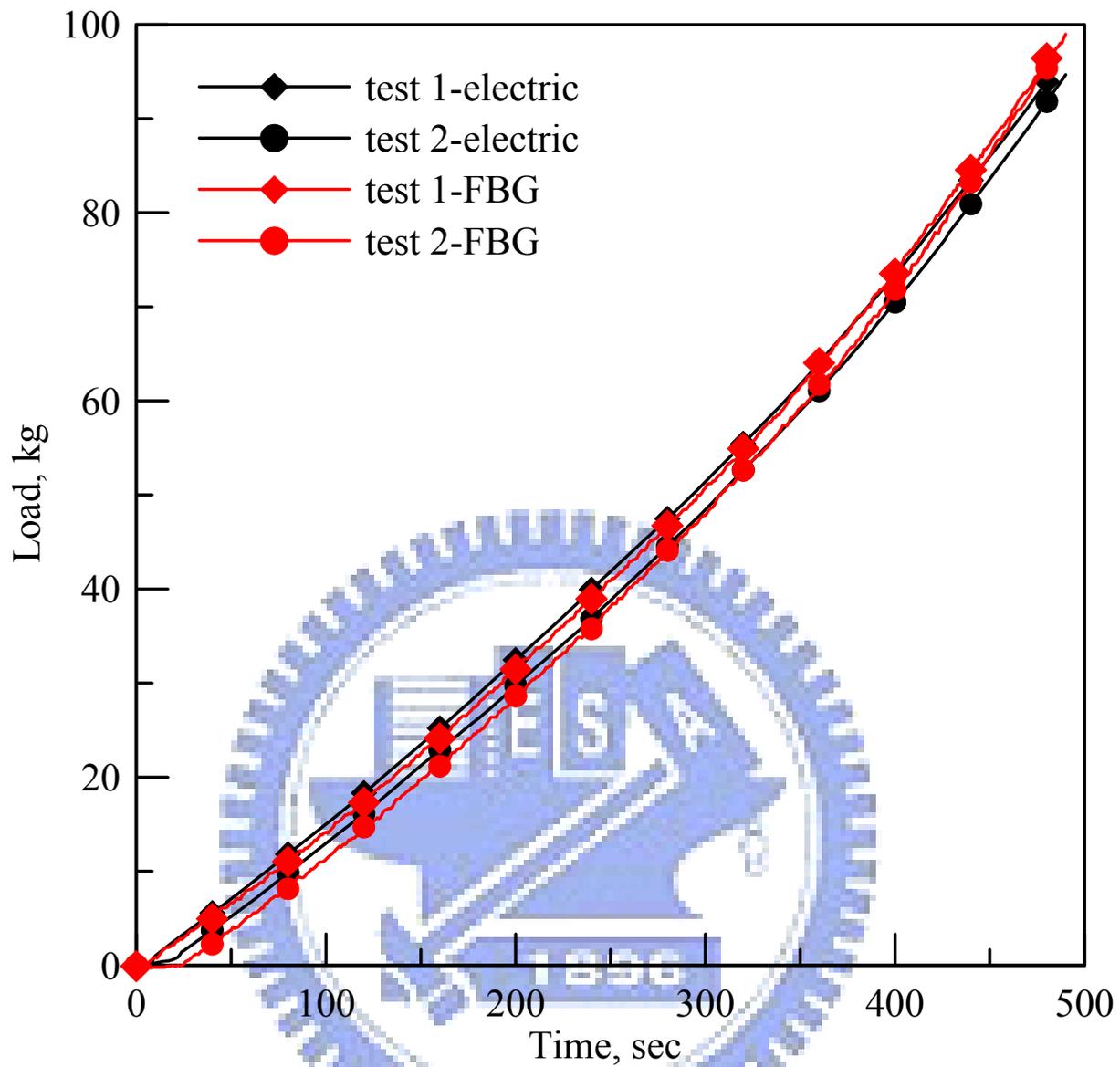


圖 4-49 電子式與光纖式荷重元驗證

第五章 結論與建議

本研究將光纖光柵感測元件製成之感測器應用於非飽和土壤三軸試驗上，希望發展出一非飽和土壤光纖感測三軸試驗裝置。另外於石門水庫上游之新竹縣玉峰鄉玉峰國小校內和桃園縣復興鄉砂崙仔崩塌地處理工程處(桃 113 線 4K+800)兩處場址取樣，進行一系列室內土壤試驗以及非飽和三軸試驗，並利用非飽和三軸試驗之結果驗證本研究研發之非飽和土壤光纖感測三軸試驗儀之可行性。以下為試驗之結論與建議：

5.1 結論

1. 由光纖光柵位移計其標定結果顯示出位移對應波長改變量之圖形為二次曲線，然而位移對應波長改變量之相關係數可達 $R^2=0.9996$ ，因此於位移的量測上為可行的。
2. 由光纖光柵壓力感測器標定結果可知：光纖光柵荷重元其解析度為 0.1kg，光纖光柵差壓計之解析度可達到 0.37mm 之水頭壓力，光纖光柵水壓計的解析度約為 0.3kPa，且其相關係數 R^2 均達 0.999 以上。
3. 由光纖光柵感測器溫度效應試驗可知，光纖光柵荷重元及光纖光柵水壓計分別利用對貼法及參考 FBG 法，可消除溫度效應帶來之誤差。

4. 比較非飽和三軸試驗中電子式與光纖式量測系統結果，可發現在軸向應力的量測上電子荷重元所量測到之軸向應力皆大於光纖式荷重元，但經由電子式及光纖式荷重元直接加載之試驗驗證後，在電子式與光纖式荷重元的量測上其結果幾乎一致，可確定光纖式荷重元之量測為正常和準確。而在孔隙水壓即基值變化之量測上，電子式與光纖式水壓計的量測結果也趨於一致，因此可確定光纖式感測器在非飽和三軸試驗之應用上為可行的。
5. 在土壤水分特性曲線試驗中，土壤飽和度由基值吸力控制，基值吸力越大飽和度越低，但當基值吸力達到一定大小後基值吸力再增加土壤中的水分也不再排出，即飽和度不再改變。由本研究之結果可發現玉峰國小之壓力板試驗結果一直到吸力值為 300 kPa 仍然沒有趨於平緩，即尚未達到殘餘體積含水比；而砂崙仔崩塌地處理工程處在吸力值到達 90 kPa 後土壤的體積含水比之變化就趨於平緩，並趨於一定值，即達到殘餘體積含水比。
6. 由飽和壓密不排水三軸試驗之莫爾圓以及其破壞包絡線可得玉峰國小 $c'=11.7\text{kPa}$ 、 ϕ' 為 33.1° 、砂崙仔崩塌地處理工程處 $c'=6.8\text{kPa}$ 、 ϕ' 為 36.3° 。
7. 玉峰國小之非飽和三軸試驗在相同有效圍壓作用下，試體破壞時之軸差應力隨基質吸力之增加而增加，因此當現地之土石材料於平時均處於非飽和之狀態下，有較高之剪力強度維持其穩定性。但玉峰國小非飽和三軸試驗中基值吸力由 30kPa 增加至 90kPa、200kPa 其軸差應力增加之幅度不明顯。

8. 非飽和三軸試驗之重複性試驗結果，在三次相同控制條件下進行非飽和三軸試驗其應力應變曲線以及孔隙水壓激發之情況幾乎一致，而在基值吸力的變化也趨於一致，體積變化的量測在剪動過程中雖有差異需要克服，但剪力強度試驗之重複性是沒有問題的。

5.2 建議

1. 目前光纖光柵位移計之設計為利用安裝於三軸試體頂蓋之鋼片推動位移計上端設計之斜面，使位移計在土壤試體產生垂直位移時推動位移計造成光纖光柵波長改變。但目前之設計在光纖光柵位移計裝設上，不易使鋼片與位移計之斜面恰好接觸，且為使小應變之量測更為準確，於摩擦力之影響也應盡量降低，因此在接觸面之位置調整與接觸型式其設計機制可進一步改良。
2. 光纖光柵感測器初步結果已證實可應用於非飽和三軸試驗上，但目前設計之量測精度還未達需求，因此建議後續可以提高光纖光柵感測器之精度。
3. 目前光纖光柵感測器量測所擷取之訊號為光纖光柵波長變化，於試驗過程中所受之應力、位移以及孔隙水壓皆無法直接顯示其物理量，建議後續可寫一程式立即將所擷取之光纖光柵讀數計算後直接顯示成所量測之物理量。

4. 目前土壤水份特性曲線是由壓力板試驗所得，壓力板試驗之試體未經等向壓密與三軸試體需經過壓密不同，且自製之壓力板儀無法做出土壤水份特性曲線之吸水段，建議未來改由非飽和三軸試驗儀進行土壤水份特性曲線之研究。且本研究之土壤水分特性曲線屬於低吸力範圍，若能增加高吸力範圍之研究，將有助於完整了解土壤水分變化之情形。
5. 本研究之非飽和三軸試驗，目前僅控制有效圍壓為 100kPa，即只模擬一種深度下土層之基值吸力對剪力強度之影響，若能控制不同有效圍壓下之狀況，將可以了解不同深度下土層之基值吸力對剪力強度之影響。



參考文獻

1. 林宏達、拱祥生(2001)， “不飽和土壤力學性質試驗及其在邊坡工程之應用”， 土工技術， 第 83 期， 第 39-52 頁。
2. 簡旭君(2003)， “光纖光柵應變管之研發”， 國立交通大學土木工程研究所， 碩士論文。
3. 黃正中(2005)， “節理式光纖光柵感測器之研發”， 國立交通大學土木工程研究所， 碩士論文。
4. 高聖傑(2006)， “光纖光柵壓力感測器之研發”， 國立交通大學土木工程研究所， 碩士論文。
5. 褚炳麟， 黃俊義， 李泰明， 黃隆茂(1993)， “部份飽和夯實礫石土之抗剪強度行為”， 第五屆大地工程學術研究討論會論文集， 第 165-172 頁。
6. Bishop, A W., and Blight, G. E., 1963, “Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Unsaturated Soils,” *Geotechnique*, Vol. 13, No. 3, pp. 177-197.
7. Bolt, G. H. and Miller, R. D., 1958, “Calculation of Total and Component Potentials of Water in soil,” *Amer. Geophys. Union Transportation*, Vol. 39, pp. 917-928.
8. Buckingham, 1907, “Studies of The Movement of Soil Moisture,” U.S.D.A. Bur. Of Soils, Bulletin No. 38.
9. C.W.W. Ng, L.T. Zhan, and Y.J. Cui(2002). “A new simple system for measuring volume changes in unsaturated soils,” *Can. Geotech. J.* 39, pp. 757-764

10. Corey, A. T. and Kemper, W. D., 1961, "Concept of Total Potential in Water and Its Limitation," *Soil Sci.*, Vol. 91, No. 5, pp. 299-305.
11. Corey, A. T., Slayter, R. O., and Kemper, W. D., 1967, "Comparative Terminologies for Water in the Soil-Plant-Atmosphere System," *Irrigation in Agricultural Soils*, R. M. Hagan et al., Eds., Amer. Soc. Agron., Mono. No. 11, Ch. 22.
12. Croney, J. D. and Coleman, J. D., 1948, "Soil Thermodynamics Applied to the Movement of Moisture in Road Foundations," *Proc. 7th Int. Cong. Appl. Mech.*, Vol. 3, pp. 163-177.
13. Fredlund, D. G. and Raharjo, H., 1993. "Soil Mechanics for Unsaturated Soils," John Wiley and Sons, New York.
14. Fredlund, D. G. and Xing, A., 1994, "Equations for the soil-water character curve," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 521-532.
15. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R., 1978, "Stress State Variable for Unsaturated Soils," *ASCE J. of Geotechnical Engineering*, Geotechnical Division, GT11, pp. 1415-1416.
16. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A., 1978, "The Shear Strength of Unsaturated Soil," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321.
17. Fredlund, D. G., Rahardjo, H. and Gan, J. K. M., 1987, "Nonlinearity of Strength Envelope for Unsaturated Soils," *Proceedings of the 6th International Conference on Expansive Soils*, New Delhi, India, pp. 49-54.
18. Ho, D. Y. F. and Fredlund, D. G., 1982, "Increase in Strength due to Suction for Two Hong Kong Soils," *Proc. of ASCE Speciality Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils*, Hawaii, pp. 263-296.
19. Schofield, R., 1935, "The PF of the Water in Soil," *Trans. 3rd Int. Congress Soil Sci.*, Vol. 2, pp. 37-48.
20. S. S. Agus, E. C. Leong., and H. Rahardjo (2001). "Soil-water characteristic curve of Singapore residual soils," *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 19, pp.285-309.
21. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., and Pufahl, D. E., and Clifton, A. W., 1996, "Model for Prediction of Shear Strength with respect to Soil Suction," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 379-392.

22. W. Scott Sillers, D. G. Fredlund and Noshin Zakerzaheh (2001). “ Mathematical attributes of some soil–water characteristic curve models,” *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 19, pp.243-283.

