

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

非飽和土壤傍壓儀現地試驗

Pressuremeter Test In Unsaturated Soils



研究生：黃秉濬

指導教授：黃安斌 博士

中華民國一百年八月

非飽和土壤傍壓儀現地試驗

學生：黃秉濬

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

由於現場試驗不易，非飽和力學特性之決定，大多根據現場取得土樣所進行室內非飽和試驗，以求得包括土壤保水特性曲線以及在不同基質吸力條件下之剪力強度等。然而土壤保水特性曲線會受到現地應力狀態、試體擾動、初始孔隙比、含水量等影響，利用現地試驗求取非飽和土壤強度可能為一更佳的選擇。本研究將一現有傍壓儀配合光纖光柵感測技術，使得傍壓儀之應變與壓力量測更為靈敏。在交通大學光復校區設定試驗場址，進行不同基質吸力情況下之現場傍壓儀試驗。本論文敘述傍壓儀之改良，傍壓儀儀器設備與現場試驗程序，最後用傍壓儀試驗結果配合非飽和土壤擴孔理論來詮釋力學特性。

關鍵字：非飽和土壤、基質吸力、傍壓儀、光纖光柵、張力計、擴孔理論。

In Situ Pressuremeter Test for Unsaturated Soils

Student : Bin-Ching Huang

Advisor : Dr. An-Bin Huang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Because the difficulties involved in field tests in unsaturated soils, we often perform laboratory tests on reconstituted soil samples to determine the mechanical properties of unsaturated soils, such as soil water characteristic curves and shear strength under various matric suctions. However, soil water characteristic curve can be affected by stress state, disturbance, initial void ratio, and moisture content, etc. Characterization of unsaturated soils in situ can be a more desirable approach. Taking advantage of the optic fiber Bragg grating sensing techniques, the author modified an existing pressuremeter to enhance the sensitivity of its strain and pressure measurement capabilities. A test site was set up within the campus of National Chiao Tung University. A series of field pressuremeter tests were performed in unsaturated soils under various matric suctions. The thesis describes the modification of the pressuremeter and the field test procedure. The pressuremeter test results are interpreted according to cavity expansion theory considering the effects of matric suction.

Keywords : unsaturated soils, matric suction, pressuremeter, fiber grating, Tensiometer, cavity expansion theory

致謝

研究所多念了一年，總算順利完成了論文，在此感謝吾師 黃安斌教授對學生的悉心教導，培養學生處理事情的態度與解決事情的能力。口試期間謝謝成功大學張文忠 助理教授、建國科技大學許懷後 助理教授、以及何彥德 博士於口試過程提供寶貴的意見與建議，使得本論文能夠更加完善，在此由衷的感謝。

在交大的這段時間感謝 方永壽教授、廖志中教授、潘以文教授、單信瑜教授及林志平教授，不論是在課業、研究或是未來生涯規劃上的指導與建議，讓學生受益良多。

在交大的日子裡，首先謝謝博士班的瑞庭學長，讓我在研究期間遇到困難時給予建議；謝謝我一起奮鬥的戰友佳諺，跟我一起同樂野共苦；也謝謝黃門學長姐小朱、Su、琅哥與學弟妹信忠。心宇、古老大、正憲、建智、子賢、韻如、志峯、軒豪以及其他大地組的學長學弟同學，讓我在交大的生活更加豐富。

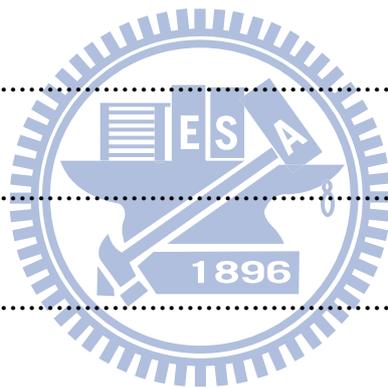
最後謝謝我的家人爸爸、媽媽把我生的這麼健康，才能讓我順利完成學業。在此將本論文獻給我的老爸，希望你喝酒能節制點，好好保重身體，再創人生新的高峰。

目錄

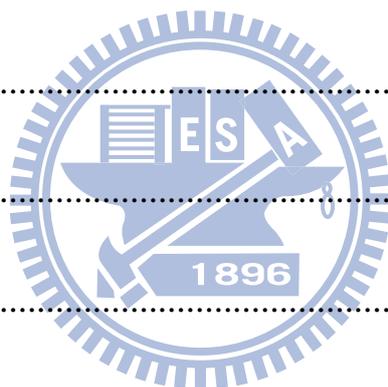
| | |
|------------------------|-----|
| 中文摘要 | I |
| 英文摘要 | II |
| 致謝 | III |
| 目錄 | IV |
| 圖目錄 | X |
| 表目錄 | XVI |
| 第一章 研究動機與目的 | 1 |
| 1.1 研究動機 | 1 |
| 1.2 研究目的 | 2 |
| 第二章 文獻回顧 | 5 |
| 2.1 土壤吸力理論 | 5 |
| 2.2 非飽和土壤剪力強度 | 7 |
| 2.3 現地土壤基質吸力量測方法 | 9 |
| 2.4 傍壓儀之定義與原理 | 11 |
| 2.5 傍壓儀之試驗程序 | 11 |
| 2.5.1 應力控制 | 11 |



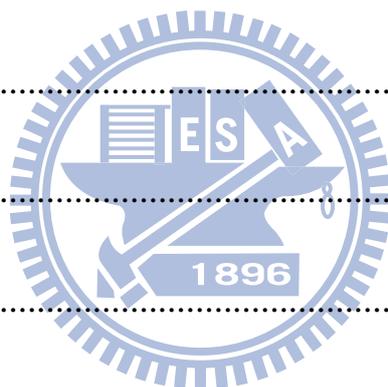
| | |
|-----------------------------|----|
| 2.5.2 應變控制 | 12 |
| 2.5.3 加壓減壓試驗 | 13 |
| 2.6 傍壓儀之試驗結果 | 13 |
| 2.6.1 剪力模數 | 14 |
| 2.6.2 低通濾波正割剪力模數 | 14 |
| 2.6.3 基質吸力與剪力模數之關係 | 16 |
| 2.6.4 非飽和土壤擴孔理論 | 16 |
| 2.7 非飽和土壤參數說明 | 19 |
| 2.7.1 極限擴孔壓力法 | 20 |
| 2.7.2 降伏壓力法 | 22 |
| 2.8 光纖光柵感測器簡介 | 23 |
| 2.8.1 光纖結構 | 24 |
| 2.8.2 光纖傳輸原理 | 24 |
| 2.8.3 光纖光柵波長飄移量與溫度的關係 | 25 |
| 第三章 儀器構造介紹改良與標定 | 40 |
| 3.1 儀器構造介紹 | 40 |
| 3.1.1 壓力來源與連接管路 | 40 |



| | |
|---------------------------|----|
| 3.1.2 壓力控制系統 | 40 |
| 3.1.3 傍壓儀本體 | 41 |
| 3.1.4 張力計 | 42 |
| 3.2 儀器構造改良 | 43 |
| 3.2.1 壓力計 | 43 |
| 3.2.2 應變感測器 | 43 |
| 3.3 試驗儀器標定 | 44 |
| 3.3.1 應變感測器標 | 45 |
| 3.3.2 壓力計標定 | 45 |
| 3.3.3 薄膜勁度標定 | 46 |
| 3.3.4 系統勁度標定 | 46 |
| 3.4 改良光纖式與電子式試驗儀器比較 | 47 |
| 第四章 試驗規劃與程序 | 61 |
| 4.1 選址 | 61 |
| 4.2 地電阻探測 | 61 |
| 4.3 薄管取樣 | 62 |
| 4.4 土壤基本物理性質試驗 | 62 |



| | |
|--------------------------------|----|
| 4.4.1 含水量試驗 | 63 |
| 4.4.2 比重試驗 | 63 |
| 4.4.3 篩分析與比重計試驗 | 63 |
| 4.4.4 阿太堡試驗 | 64 |
| 4.5 飽和壓密不排水三軸試驗 | 64 |
| 4.6 土壤水分特性曲線試驗 | 65 |
| 4.7 非飽和傍壓儀試驗程序 | 66 |
| 4.7.1 試驗孔位鑽掘 | 67 |
| 4.7.2 安全檢查 | 67 |
| 4.7.3 光纖訊號檢測 | 68 |
| 4.7.4 試驗壓力控制程序 | 68 |
| 4.7.5 改變試驗場址基質吸力 | 69 |
| 第五章 試驗結果與討論 | 81 |
| 5.1 非飽和傍壓儀試驗結果 | 81 |
| 5.1.1 傍壓儀施作深度 0.75m 試驗結果 | 81 |
| 5.1.2 傍壓儀施作深度 1.5m 試驗結果 | 82 |
| 5.1.3 傍壓儀施作深度 2.25m 試驗結果 | 83 |



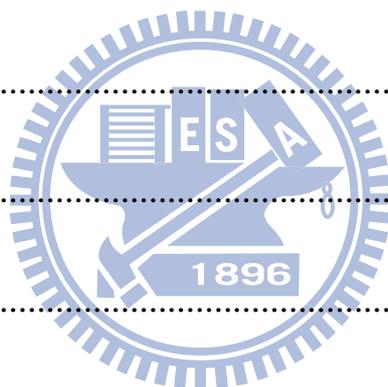
| | |
|---------------------------------|-----|
| 5.2 傍壓儀試驗結果與基質吸力 | 84 |
| 5.2.1 基質吸力與初始孔內壓力 | 84 |
| 5.2.2 基質吸力與降伏壓力 | 84 |
| 5.2.3 基質吸力與極限壓力 | 85 |
| 5.3 加壓減壓試驗結果 | 85 |
| 5.3.1 低通濾波分析參數選擇 | 86 |
| 5.3.2 加壓減壓試驗深度 0.75m 試驗結果 | 87 |
| 5.3.3 加壓減壓試驗深度 1.5m 試驗結果 | 88 |
| 5.3.4 加壓減壓試驗深度 2.25m 試驗結果 | 89 |
| 5.4 非飽和土壤參數分析結果 | 90 |
| 5.4.1 試驗深度 0.75m 非飽和土壤參數 | 91 |
| 5.4.2 試驗深度 1.5m 非飽和土壤參數 | 91 |
| 5.4.3 試驗深度 2.25m 非飽和土壤參數 | 92 |
| 第六章 結論與建議 | 137 |
| 6.1 結論 | 138 |
| 6.2 建議 | 140 |
| 參考文獻 | 141 |



圖目錄

| | |
|--|----|
| 圖 1.1 研究流程圖 | 4 |
| 圖 2.1 非飽和土壤廣義莫耳庫倫破壞包絡面 | 29 |
| 圖 2.2 破壞包絡面截距沿一直線於 $\tau-(u_a-u_w)$ 平面 | 30 |
| 圖 2.3 傳統之張力計構造示意圖 | 30 |
| 圖 2.4 傍壓儀本體與薄膜 | 31 |
| 圖 2.5 典型傍壓儀試驗結果與潛變曲線 | 31 |
| 圖 2.6 剪力模數 | 32 |
| 圖 2.7 正割剪力模數 | 32 |
| 圖 2.8 正規化剪力模數遞減曲線 | 33 |
| 圖 2.9 正常壓密黏土 PI=0% 與 PI=50% 模數遞減曲線 | 33 |
| 圖 2.10 減壓段原始壓力與應變關係圖 | 34 |
| 圖 2.11 減壓段壓力與應變關係圖 | 34 |
| 圖 2.12 減壓段原始與濾波剪力模數遞減曲線圖 | 35 |
| 圖 2.13 (a)窗型函數頻率(b)希望的頻率(C)濾波後的頻率 | 35 |
| 圖 2.14 最佳夯實初始剪力模數、基質吸力、淨正向應力關係圖 | 36 |
| 圖 2.15 最佳含水量初始剪力模數、基質吸力、淨正向應力關係圖 | 36 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 圖 2.16 圓柱體與元素塊體在距離為 r 時擴張情形 | 37 |
| 圖 2.17 元素塊體應力分佈圖 | 37 |
| 圖 2.18 莫爾-庫倫破壞準則決定 c 、 ϕ | 38 |
| 圖 2.19 光纖光柵量測原理示意圖 | 38 |
| 圖 2.20 光纖構造 | 39 |
| 圖 2.21 跳躍折射率光纖之光傳播圖 | 39 |
| 圖 3.1 現場非飽和傍壓儀試驗示意圖 | 48 |
| 圖 3.2 高壓控制箱 | 48 |
| 圖 3.3 低壓調壓閥 | 49 |
| 圖 3.4 傍壓儀本體示意圖 | 49 |
| 圖 3.5 中心桿件與簧片示意圖 | 50 |
| 圖 3.6 應變感測器組裝完成示意圖 | 50 |
| 圖 3.7 錐狀貫入式張力計示意圖 | 51 |
| 圖 3.8 張力計系統示意圖 | 51 |
| 圖 3.9 指針式張力錶示意圖 | 52 |
| 圖 3.10 低壓力 FBG 壓力計實體圖 | 52 |
| 圖 3.11 高壓力 FBG 壓力計 | 53 |



| | |
|--------------------------------------|----|
| 圖 3.12 應變感測器剖面圖 | 53 |
| 圖 3.13 應變感測器示意圖 | 54 |
| 圖 3.14 傍壓儀簧片標定示意圖 | 54 |
| 圖 3.15 簧片標定結果圖 | 55 |
| 圖 3.16 低壓壓力計標定結果圖 | 55 |
| 圖 3.17 高壓壓力計標定結果圖 | 56 |
| 圖 3.18 傍壓儀薄膜勁度標定成果 | 56 |
| 圖 3.19 傍壓儀系統勁度標定成果 | 57 |
| 圖 3.20 交通大學光復校區 A-2 鑽探孔位 | 58 |
| 圖 3.21 A-2 孔位深度 13.25m 傍壓儀試驗結果 | 59 |
| 圖 3.22 電子式與光纖式傍正規化模數遞減曲線比較圖 | 60 |
| 圖 4.1 試驗規劃流程圖 | 72 |
| 圖 4.2 交通大學光復校區試驗位置圖 | 73 |
| 圖 4.3 試驗場址地電阻分佈剖面圖 | 74 |
| 圖 4.4 薄管取得土樣 | 75 |
| 圖 4.5 貫入式取土器 | 75 |
| 圖 4.6 土壤粒徑分佈曲線 | 76 |

| | |
|---|-----|
| 圖 4.7 交通大學光復校區-飽和壓密不排水試驗結果 | 77 |
| 圖 4.8 交通大學光復校區-應力路徑圖有效摩擦角 $\phi' = 33.37^\circ$ | 78 |
| 圖 4.9 土壤水分特性曲線試驗結果 | 78 |
| 圖 4.10 手動鑽掘工具 | 79 |
| 圖 4.11 張力計與傍壓儀試驗施作孔位距離(0.75m) | 79 |
| 圖 4.12 張力計與傍壓儀試驗施作孔位距離(1.5m) | 80 |
| 圖 4.13 張力計與傍壓儀試驗施作孔位距離(2.25m) | 80 |
| 圖 5.1 試驗深度 0.75m 非飽和傍壓儀試驗結果 | 95 |
| 圖 5.2 試驗深度 0.75m 潛變曲線 | 96 |
| 圖 5.3 試驗深度 1.5m 非飽和傍壓儀試驗結果 | 97 |
| 圖 5.4 試驗深度 1.5m 潛變曲線 | 98 |
| 圖 5.5 試驗深度 2.25m 非飽和傍壓儀試驗結果 | 99 |
| 圖 5.6 試驗深度 2.25m 潛變曲線 | 100 |
| 圖 5.7 基質吸力與初始孔內壓力關係圖 | 101 |
| 圖 5.8 基質吸力與降伏壓力關係圖 | 102 |
| 圖 5.9 基質吸力與徑向壓力增量關係圖 | 103 |
| 圖 5.10 基質吸力與極限壓力關係圖 | 104 |

| | |
|---|-----|
| 圖 5.11 基質吸力與淨極限壓力關係圖 | 105 |
| 圖 5.12 初始剪力模數 G_0 與基質吸力關係圖 | 106 |
| 圖 5.13 傍壓儀試驗剪力模數 G_{ur} 與基質吸力關係圖 | 107 |
| 圖 5.14 $\omega_c=0.01\pi$ 與 $\omega_c=2.4\pi$ 濾波模數遞減曲線圖 | 108 |
| 圖 5.15 試驗深度 0.75m 加壓減壓試驗結果(suction 為 2kPa) | 109 |
| 圖 5.16 試驗深度 0.75m 加壓減壓試驗結果(suction 為 4kPa) | 110 |
| 圖 5.17 試驗深度 0.75m 加壓減壓試驗結果(suction 為 10kPa) | 111 |
| 圖 5.18 試驗深度 0.75m 剪力模數遞減曲線 | 112 |
| 圖 5.19 試驗深度 0.75m 濾波剪力模數遞減曲線 | 113 |
| 圖 5.20 試驗深度 0.75m 正規化模數遞減曲線 | 114 |
| 圖 5.21 試驗深度 0.75m 濾波正規化模數遞減曲線 | 115 |
| 圖 5.22 試驗深度 1.5m 加壓減壓試驗結果(suction 為 4kPa) | 116 |
| 圖 5.23 試驗試驗深度 1.5m 加壓減壓試驗結果(suction 為 8kPa) | 117 |
| 圖 5.24 試驗試驗深度 1.5m 加壓減壓試驗結果(suction 為 18kPa) | 118 |
| 圖 5.25 試驗深度 1.5m 剪力模數遞減曲線 | 119 |
| 圖 5.26 試驗深度 1.5m 濾波剪力模數遞減曲線 | 120 |
| 圖 5.27 試驗深度 1.5m 正規化模數遞減曲線 | 121 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 圖 5.28 | 試驗深度 1.5m 濾波正規化模數遞減曲線..... | 122 |
| 圖 5.29 | 試驗深度 2.25m 加壓減壓試驗結果(suction 為 4kPa) | 123 |
| 圖 5.30 | 試驗深度 2.25m 加壓減壓試驗結果(suction 為 8kPa) | 124 |
| 圖 5.31 | 試驗深度 2.25m 加壓減壓試驗結果(suction 為 18kPa) | 125 |
| 圖 5.32 | 試驗深度 2.25m 剪力模數遞減曲線..... | 126 |
| 圖 5.33 | 試驗深度 2.25m 濾波剪力模數遞減曲線..... | 127 |
| 圖 5.34 | 試驗深度 2.25m 正規化模數遞減曲線..... | 128 |
| 圖 5.35 | 試驗深度 2.25m 濾波正規化模數遞減曲線..... | 129 |
| 圖 5.36 | 試驗深度與 ϕ' 、 ϕ^b 關係圖 | 130 |
| 圖 5.37 | 非飽和土壤傍壓儀試驗比較 c' 、 ϕ' 、 ϕ^b 關係圖 | 131 |
| 圖 5.38 | 試驗深度 0.75m 非飽和傍壓儀試驗破壞包絡線..... | 132 |
| 圖 5.39 | 試驗深度 0.75m- ϕ^b 線性回歸 | 133 |
| 圖 5.40 | 試驗深度 1.5m 非飽和傍壓儀試驗破壞包絡線..... | 134 |
| 圖 5.41 | 試驗深度 1.5m- ϕ^b 線性回歸 | 135 |
| 圖 5.42 | 試驗深度 2.25m 非飽和傍壓儀試驗破壞包絡線..... | 136 |
| 圖 5.43 | 試驗深度 2.25m- ϕ^b 線性回歸 | 137 |

表目錄

| | |
|-------------------------------------|----|
| 表 2.1 傍壓儀試驗步驟比較表..... | 28 |
| 表 2.2 淨極限壓力 P_L^* 判斷黏土強度經驗法則..... | 28 |
| 表 2.3 淨極限壓力 P_L^* 判斷砂土強度經驗法則..... | 29 |
| 表 4.1 含水量試驗結果..... | 70 |
| 表 4.2 體積含水量與飽和度結果..... | 70 |
| 表 4.3 比重與乾濕單位重結果..... | 71 |
| 表 5.1 非飽和傍壓儀試驗參數..... | 93 |
| 表 5.2 加壓減壓試驗剪力模數參數..... | 93 |
| 表 5.3 非飽和土壤參數..... | 93 |
| 表 5.4 非飽和土壤傍壓儀試驗結果比較..... | 94 |



第一章 研究動機及目的

1.1 研究動機

傳統土壤力學大多考慮飽和狀態為主，其假設土壤孔隙中均充滿水分，而當土壤受到外力作用時，其力量分別由土壤顆粒與孔隙水所承擔，而在力學分析上，若土壤破壞時可知土壤內部孔隙水壓變化時，則可採用有效應力方法來分析；若無法量測孔隙水壓變化時，可以總應力方法分析。但在地下水位面以上稱之為毛細現象區(capillary fringe)之土壤通常是非飽和，土壤內部孔隙水承受張力，或負的孔隙水壓。從有效應力觀點來看，當土壤孔隙水壓力為負值時，使得土壤之有效應力增加，土壤的強度與穩定性也提高。

對於山區邊坡而言，常於雨季過後，因降雨入滲使得土壤內部毛細現象消失，土壤有效應力降低而發生邊坡崩塌與滑動。但由許多坡地監測顯示，在某些應力條件下，土壤處於非飽和狀態時，仍會隨時間的增加而產生位移的潛變(creep)現象，潛變的現象會隨土壤飽和度的增加而更加嚴重，也是本研究需要探討的重要課題。一般在大地工程界裡，假設地下水位面是一水平面，而在地下水位面以下，土壤屬於飽和狀態；地下水位面以上，土壤屬於非飽和狀態。

近年來，有許多國內外學者開始對非飽和土壤作一些相關的研究，但較多的試驗中主要以室內實驗為主，其室內試驗包含土壤的土水特性曲線的量測與非飽和三軸試驗等，而在非飽和土壤的土水特性曲線量測中，在相同的含水量

與土壤單位重之情況下，土壤之土水特性曲線會受到現地應力狀態、土壤試體之重模與非重模、土壤初始孔隙比、土壤初始含水量及土壤在高基值吸力下均會影響土水特性曲線的行為，然而，在現地土壤的土水特性曲線量測，試驗結果顯示，現場土壤之土水特性曲線與室內試驗所量測結果有明顯之差異，故利用現地試驗來找出非飽和土壤的工程性質，不失為更佳之選擇。

傍壓儀試驗乃是一種現地土壤試驗的方法，試驗中在一鑽孔表面施加壓力然後觀測與紀錄周圍土壤應變與孔壁施加應力變化之關係。配合現地張力計與含水量計的裝設，在不同飽和度下進行多組傍壓儀試驗，比較非飽和傍壓儀現地試驗結果，進而得出其非飽和土壤之工程性質。



1.2 研究目的

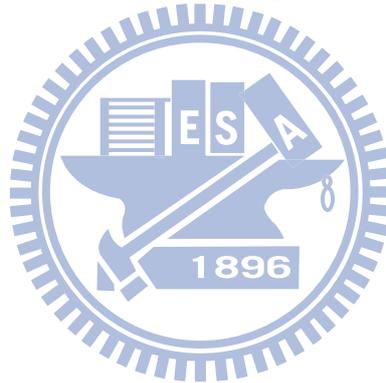
本研究流程圖如圖 1.1，本研究目的在土壤不同基質吸力的條件下，進行多組不同深度的傍壓儀現地試驗，為了提高試驗儀器的靈敏度，減少電磁波訊號的干擾，利用光纖光柵作為傍壓儀應變與應力感測來改良一現有電子式傍壓儀。壓力量測參考高聖傑(2006)所研發之光纖光柵壓力計，配合傍壓儀中心桿件光纖光柵應變感測器，利用串接的方式由光纖解讀儀器一起擷取光纖光柵。

從非飽和土壤力學的觀點配合現地傍壓儀試驗結果，希望能夠得到下列幾項結果：

(1) 土壤強度參數凝聚力 c 及摩擦角 ϕ ，並考慮到基質吸力改變的影響，得到

非飽和土壤強度參數 ϕ^b 。

- (2) 從傍壓儀試驗過程中的加壓減壓試驗，分析應力應變關係的迴圈(Loop)，並對減壓區段作割線處理，得到土壤非飽和情況下剪力模數 G 與應變相關的遞減曲線。
- (3) 傍壓儀試驗每一應力增量穩定後，保持應力大小不變的情況下 30-60 秒之變形量為潛變量，並繪製成潛變曲線，當潛變曲線由擬彈性線段開始發生塑性行為的降伏壓力，此壓力又稱潛變壓力(creep pressure)，觀察相同的土壤在不同基質吸力的情況下，與潛變壓力的關係。



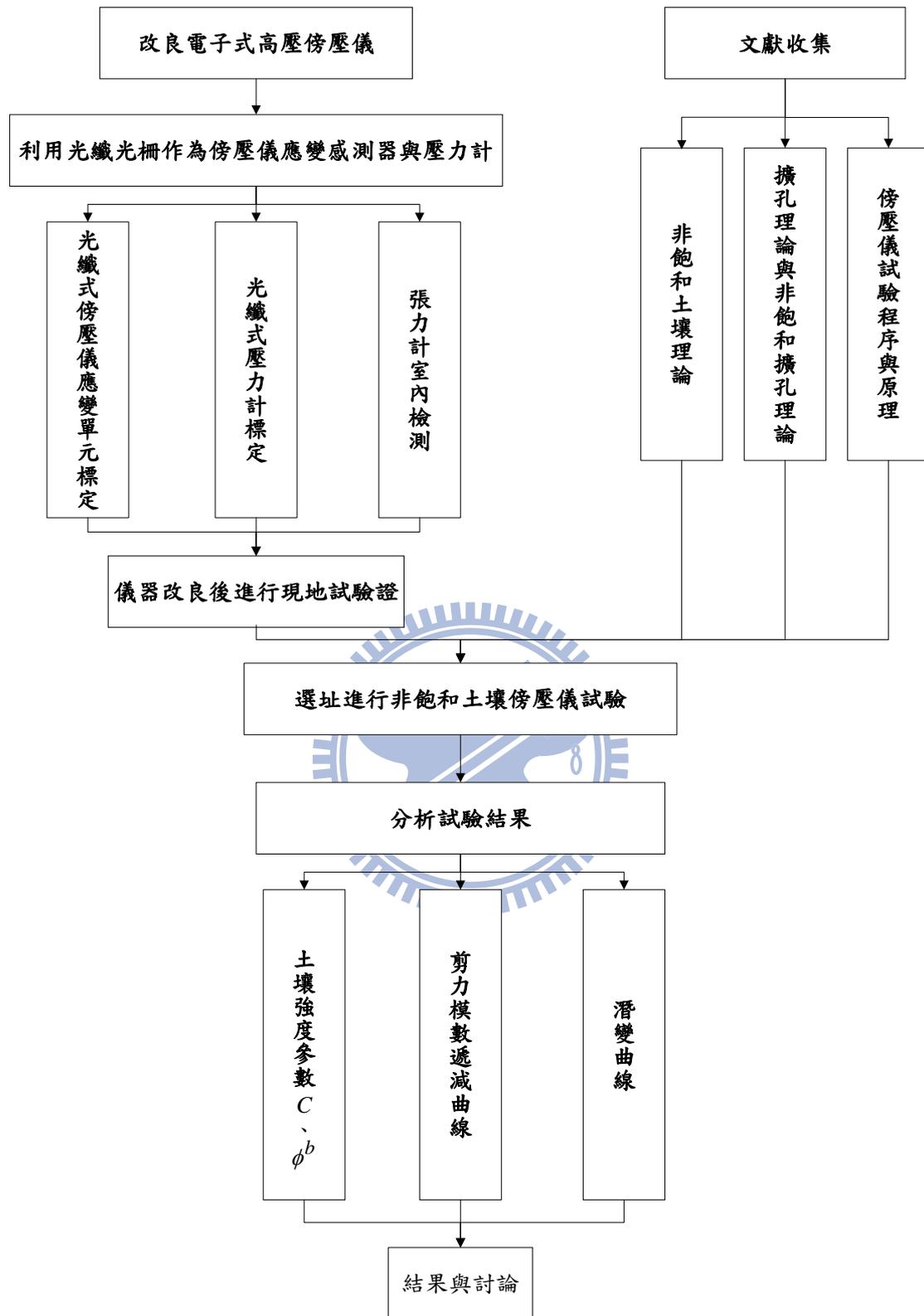


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本研究改良鄭孟雄 (1999)軟岩用高壓傍壓儀，利用光纖光柵具有高靈敏度、不受電磁波干擾等優點作為傍壓儀側向應變量測，取代舊有電阻式應變片量測缺點。於非飽和土壤進行傍壓儀試驗，試驗時利用灑水方式改變土壤含水量，當土壤基值吸力變化後，根據試驗結果探討對於土壤強度、潛變、潛變壓力、剪力模數遞減曲線的影響。

本章節主要敘述非飽和土壤基質吸力理論、張力計量測原理及方法、傍壓儀試驗程序與數據分析方法、非飽和土壤擴孔理論。



2.1 土壤吸力理論

土壤之吸力理論，有多位學者開始闡述(Buckingham, 1907 ; Schofield, 1935 ; Bolt and Miller, 1958 ; Corey and Kemper, 1961 ; Corey et al., 1967)。其主要理論為當土壤顆粒之間承受固定總應力時，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，進而影響土壤的強度大小。Corey 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)：

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)：

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

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

2.2 非飽和土壤剪力強度

土壤剪力強度的定義為當破壞發生時，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-庫倫破壞準則及有效應力的觀念來說明。如式 (2-2) 所述：

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

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



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 (2-3) 下：

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (2-3)$$

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 (2-3) 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 2.1 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 (2-4) 所示：

$$C = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2-4)$$

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

則 (2-5) 式可改寫為：

$$\tau_f = C + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' \quad (2-5)$$

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 2.2 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 。

2.3 現地土壤基質吸力量測方法

土壤的吸力質是可以量測的，一般量測土壤吸力值之方法有許多種，能夠配合現地直接量測與裝設，最好的選擇就是使用張力計(Tensiometer)。張力計量測基質吸力之原理為利用陶瓷透水石，當陶瓷透水石吸取張力計內部的水、直到張力計吸住水的拉應力同等於土壤吸住水之拉應力時，此時張力計所測得張力值即是土壤的張力值，當達到平衡狀態時，土壤與張力計之間不會有水的流動。

直接量測土壤吸力值，張力計之陶瓷透水石需要飽和，陶瓷透水石作為土壤及壓力計之間的介面，其作用為維持量測系統之水與土壤中之空氣之壓力平衡。飽和陶瓷透水石的壓力平衡能力可用空氣進氣值來做為指標，其透水板之空氣進氣值之大小，可用公式(2-6)來估計。

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{r} \quad (2-6)$$

T_s = 水的表面張力在某一溫度下

u_a = 土體內之孔隙空氣壓力

u_w = 量測系統中之水壓力

r = 透水板內之最大的孔隙曲率之半徑

一般用於現場量測土壤吸力之張力計，其構造包含陶瓷透水石、儲存液體及壓力錶，如圖 2.3 所示。其量測儀器可分為三種類型：(1) 水銀張力計；(2) 真空錶張力計；(3) 電子式張力計。

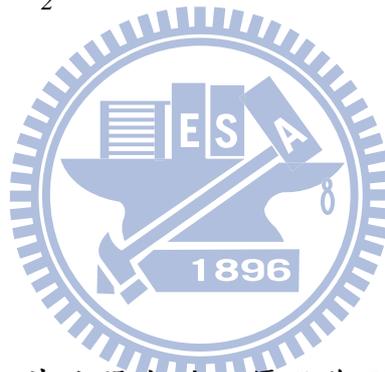
(1) 如圖 2.3(a)為此形式之構造圖，主要為將充滿水之管子連接至杯狀之陶瓷透水石與水銀儲存槽，當張力作用於陶瓷透水石時，會使得水銀流入管中且高於本身儲存槽內之自由面，另外，若把儲存水銀槽之表面當作一基準面時，此時張力的大小可由式 (2-7) 表示之。

$$suction = (\rho_{Hg} - \rho_{H_2O})r - \rho_{H_2O}(h+d) \quad (2-7)$$

式中

ρ_{Hg} ：水銀的密度。

ρ_{H_2O} ：水的密度。



(2) 如圖 2.3(b)所示。其此張力計之優點為可藉由真空錶直接測讀土壤吸力值之大小、若土壤張力區的範圍超過此張力計之長度時，可更換較長之管子，以量測土壤內部之吸力、可量測小範圍之正壓力等，缺點為真空計所量得之張力值須扣除管子內所儲存水之高度之壓力值。

(3) 主要為張力計上之真空計更換為電子式之壓力計，其目的可長時間監測土壤吸力值變化，可安裝至陶瓷透水石旁，量測時較符合實際值，可消除深度上之修正。其構造示意圖如圖 2.3(c)。

2.4 傍壓儀之定義與原理

傍壓儀正式之定義，由 1991 年國際土壤力學與基礎工程協會(ISSMFE)所認定，而其正式定義如下(Mair and Wood, 1987)傍壓儀就是，在一個圓柱體探管中，藉由一個固定於探管上之可膨脹性的薄膜，向預先鑽好之鑽孔壁均勻施加壓力之儀器。

傍壓儀之設計基本原理為利用高壓鋼瓶提供之高氣壓，強行將氣壓壓入地底探管(probe)之薄膜(membrane)中，如圖 2.4 所示，藉由薄膜之膨脹，均勻地向鑽孔壁(borehole wall)四周施加側向壓力。藉由量測探管中之壓力與體積變化關係，並加上其壓力與體積之修正(calibration)，進而利用不同土壤屬性之擴孔原理(theory of expanding cavities)與修正過之壓力體積變化關係，來推估土層性質參數。

2.5 傍壓儀之試驗程序

傍壓儀試驗係藉由施加壓力至孔壁使土壤產生變形行為，其施加應力之增量及停滯時間，有不同的學者提出之不同的經驗值。通常依試驗控制條件之不同，分別為應力控制及應變控制兩種，鄭孟雄(1999) 將各種建議如整理成表 2.1。

2.5.1 應力控制

最早由 Menard 等人 (1957)提出最少需有 10 個應力增量，且觀測每一應力

增量下之 60 秒內的體積變化，其中 30 秒至 60 秒內體積變化為土壤之潛變行為，此種方法並已為 ASTM 所建議。實際上因在試驗前並不知道土體之極限強度，而無法於試驗前得知各應力增量之大小，因此利用各土壤之種類及鬆緊程度之不同，以各土壤極限強度經驗值供操作者參考。

Mair and Wood (1987)則以同樣觀念建議於軟弱粘土時每一應力增量為 15 kPa、在堅硬粘土及緊密砂土時每一應力增量為 100 kPa、而於軟弱岩石時每一應力增量為 500 kPa，每一應力增量下，應保持壓力 2 分鐘。Windle (1987)針對自鑽式傍壓儀(CSBP)系統則建議採用 1 分鐘。ISRM 針對岩石使用之條件，建議至少要為 5 次以上之應力增量，且如果要求取岩體之勁度時，在每一次解壓前需保持應力 10 分鐘。



2.5.2 應變控制

使用應變控制時如果土體尚在彈性階段，進行解壓-加壓之步驟時，因為土體之變形量尚小，導致試驗資料點數少，會使試驗成果之解析變為較困難。且在土體降伏應力之臨界值附近，會使應變突然快速增加，如果沒有快速之回饋控制系統，將使土體降伏應力甚難求出。因此通常在土體尚為彈性時，先採用應力控制，等土體降伏後再以應變控制方式進行試驗。

Briaud 等人 (1986)建議利用應變控制時，每一應變增量為初始體積之 40 分之 1，且每一應變增量需保持 15 秒，並記錄每一應變增量最終值。

2.5.3 加壓減壓試驗

瞭解現地土體之勁度為傍壓儀試驗之一主要目的，原則上可利用初始彈性段之應力-應變曲線斜率求得。但因傍壓儀施作過程不可避免會對同圍土體造成擾動、弱化，使初始之斜率較低。利用反覆載重斜率以求得其現地之土體勁度。

2.6 傍壓儀之試驗結果

如圖 2.5 所示典型傍壓儀試驗之結果圖，當壓力灌入傍壓儀本體使薄膜膨脹，當壓力大到足以克服薄膜本身勁度時，壓力才能傳至孔壁土體，此時壓力為 P_0 ， P_0 為初始孔內應力；其後持續加壓，壓力持續傳遞至土體，此時應力應變曲線會呈現小位移量的擬彈性行為，直至降伏壓力 P_f ，又稱為潛變壓力；當施加壓力大於土壤強度，應力應變曲線呈現塑性行為，直至土壤極限強度 P_L 。Baguelin 等人 (1978) 提出淨極限壓力 P_L^* 的經驗法則，用來判斷黏土與砂土的強度如表 2.2、表 2.3 所示，淨極限壓力 P_L^* 與極限強度 P_L 、初始孔內應力 P_0 以公式 (2-8) 表示。

$$P_L^* = P_L - P_0 \quad (2-8)$$

傍壓儀試驗得到的應力應變曲線，可以利用加壓減壓試驗分析土體剪力模數，利用擴孔理論、曲線回歸等方法來得到工程參數，本章節將介紹如何建立這些參數。

2.6.1 剪力模數

剪力模數 G 可以用來評估土壤彈性行為特性，剪應力與剪應變的關係為剪力模數。假設土壤在傍壓儀試驗施作的過程中為彈性行為，如圖 2.6 所示，便可由應力應變斜率，得到一平均剪力模數 G_{ur} ，以公式 (2-9) 表示，由公式 (2-9) 推導出兩倍的應變大小為剪應變。

$$G_{ur} = \frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon} \times 0.5 = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2-9)$$

剪力模數 G 可以用來評估土壤彈性行為特性，假設土壤在傍壓儀試驗施作的過程中為彈性行為，如圖 2.6 所示，便可由應力應變斜率，得到一平均剪力模數 G_{ur} ，以公式 (2-9) 表示。

土壤內的剪力模數並非是一個定值，會隨著應變量的增加而減少，如圖 2.7 所示，對加壓減壓試驗的解壓段，進行割線處理，可得一正割剪力模數 G_{sec} 。Wood and Richart (1977) 指出剪力模數會隨應變振幅大小的變化而遞減的特性，故將正割剪力模數與應變關係繪製成關係曲線，此曲線稱為剪力模數遞減曲線。Luna and Jadi (2000) 研究當剪應變在約 $10^{-3}\%$ 以下，剪力模數約為一定數值，幾乎不會發生改變，如圖 2.8 所示。Vucetic and Dobry (1991) 指出黏土模數遞減曲線，會隨著 PI 的增加而減低衰減速率，如圖 2.9 所示。

2.6.2 低通濾波正割剪力模數

加壓減壓載重試驗量測到的應變非常小，故難免會量測到許多雜訊，進而

對試驗結果產生影響。如圖 2.10 所示，Li (1998)利用減壓加壓試驗的減壓應力應變曲線，將減壓曲線分別視為線性與非線性段如圖 2.11 所示，非線段經過低通濾波(Low-pass filter)方法處理，過濾掉會使試驗結果失真的雜訊，最後得到如圖 2.12 所示數值分析處理後的剪力模數遞減曲線。Wang (2007)同樣利用低通濾波方法原理處理非線性正割剪力模數，並利用 MATLAB 軟體編寫程式碼，作為正割剪力模數遞減曲線回歸(curve fitting)與應變轉換的研究。

低通濾波(Low-pass filter)原理由式 (2-10) 表示之，式 (2-11) 中 $h(t-KT)$ 為一傅立葉轉換方程式，並受到比例係數週期 T 與截頻點 ω_c 的影響。由於低通濾波使用傅立葉轉換處理圖像分析，在圖像數據邊界會產生不連續的現象，此現象稱為 Gibbs 現象。為了消除 Gibbs 現象遭成的影響，使用公式 (2-12) 視窗訊息處理常式。其原理如圖 2.13 所示，(a)為希望的窗型函數頻率響應(b)希望的頻率響應(c)濾波後的頻率響應。

$$f(t) = \sum_{k=t/T-N/2}^{t/T+N/2} f(KT)h(t-KT)\omega_b(t-KT) \quad (2-10)$$

$$h(t-KT) = \frac{2\sin[\omega_c(t-KT)]}{\omega_s(t-KT)} \quad (2-11)$$

$$\omega_b = 0.42 + 0.5\cos\frac{2\pi t}{NT} + 0.08\cos\frac{4\pi t}{NT} \quad (2-12)$$

T ：週期

N ：數據資料筆數

ω_c ：截頻點。

ω_s ：自然頻率。

$f(KT)$ ：原始實驗數據壓力大小。

$h(t-KT)$ ：低通濾波轉換方程式。

ω_b ：視窗訊息處理常式，處理傅立葉級數造成的 Gibbs 現象。

2.6.3 基質吸力與剪力模數之關係

Mancuso (2002)利用共振柱扭剪試驗，研究非飽和夯實砂土在小應變下的行為與初始剪力模數的量測，影響初始剪力模數大小的因素主要為基質吸力與土壤結構。試驗所準備的試體為最佳夯實砂土與最佳含水量夯實試體，控制不同基質吸力與淨正向應力進行扭剪試驗，試驗結果如圖 2.14、2.15 所示。試驗結果顯示當基質吸力大小範圍控制在 0~200kPa，對初始剪力模數的影響最大，當超過基質吸力超過 200kPa 界限值後，淨正向應力對初始剪力模數有影響較大的趨勢。當最佳夯實土壤初始剪力模數增加範圍 50~85%與最佳含水量夯實土壤初始剪力模數增加範圍 40~65%主要是依靠應力大小來決定。

2.6.4 非飽和土壤擴孔理論

傍壓儀在施作過程中僅觀測應力及應變，因此對試驗結果之解析通常需依據兩個步驟來進行，首先指定一材料組合率(constitutive)再以一數學方程式或數值模式，回歸(fit)試驗所得應力及應變關係，據以分析各項工程參數，隨著傍壓儀之發展有相當多不同的學者提出不同之材料組合率。利用最簡單之平面應變

及虎克定律，可得彈性部分之理論解，並瞭解土體在受力時應力-應變關係，以作為其他材料組合率解析之基礎。Clarke (1995)指出理論彈性解所需基本假設如下：

(1) 在考慮鑽孔壁內土壤，受側壓儀所均勻施加之側向應力作用下，產生一無限中空圓柱膨脹行為。

(2) 土壤之受力狀態為軸對稱(axially symmetric loading)及平面變形(plane deformation)。

(3) 土壤視為一無限均質體(homogeneous)及均向(isotropic)。

(4) 土壤之應力-應變關係為唯一。

(5) 傍壓管中之薄膜擴張視為一無限中空圓柱膨脹狀態。

常態下，在鑽孔初始體積為 $V_0 = a_0^2 h \pi$ (其中 a_0 為鑽孔初始半徑， h 為量測室之高度)。而在試驗過程中，傍壓管之高度 h 是假設為固定不變，所改變的是傍壓儀薄膜膨脹之半徑 a (亦即鑽孔半徑)。所以，其體積改變量 ΔV 如 (2-13) 式：

$$\Delta V = V - V_0 \quad (2-13)$$

ΔV ：為鑽孔受力後之體積膨脹增加量

V_0 ：為鑽孔之初始體積(由試驗 P_0 中對應出的體積)

V ：鑽孔受力後擴張之鑽孔體積

而其體積變化應變量 ε_c 可由 (2-14) 式來表示

$$\varepsilon_c = (a - a_0) / a_0 = \Delta a / a_0 \quad (2-14)$$

ε_c : 為鑽孔之體積應變量

a_0 : 為鑽孔之初始半徑

a : 為鑽孔受力後之擴張半徑

Timoshenko and Goodier (1934)曾指出在一無限長圓柱體中，承受一垂直圓柱體表面應力作用下，圓柱體表面將成徑向平面應變擴張。在傍壓儀外側之土層，在承受來自傍壓儀內部之均勻徑向應力作用下，亦將成為徑向平面應變擴張。如此可將土層分成細小之元素塊體(element)，其總應力平衡將符合 (2-15)

式：

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2-15)$$

σ_r : 為元素塊體之徑向應力

σ_θ : 為元素塊體之環向應力

r : 為元素塊體至軸心最短距離

因此，當傍壓儀施加壓力 $P_0 = \sigma_h$ (水平應力) 時，元素塊體距離軸心最短距離為 r ，其最長距離為 $r + \delta r$ (δr 為元素塊體厚度)。而當傍壓儀施加一膨脹壓力 P_0 改變成 $P_L (P_L > \sigma_h)$ 後，土壤受壓後造成向外徑向擴張，所以元素塊體距離軸心最短距離將變成 $r + y$ (y 為元素塊體至傍壓管半徑中土壤受力擴張量)，環繞軸心周長將由 $2\pi r$ 變成 $2\pi(r + y)$ ，元素塊體的厚度變成 $\delta r + \delta y$ (δy 受力後元素塊體厚

度增加量)，在元素塊體上受到之環向張力應變 ε_θ 為：

$$\varepsilon_\theta = \frac{y}{r} \quad (2-16)$$

式中 ε_θ ：環向張力應變

元素塊體之厚度改變量 δy ，將造成徑向應變 ε_r

$$\varepsilon_r = \frac{\delta y}{\delta r} \quad (2-17)$$

式中 ε_r ：為徑向應變(radial strain)

δy ：為元素塊體本身受力後擴張量

δr ：為元素塊體本身之厚度

鑽孔受力前後土體元素變化如圖 2.16、圖 2.17 所示。

Timoshenko and Goodier (1934)指出在考慮理想線彈性等向狀況下，依據虎克定律(Hook's Law)，在主要徑向平面中，徑向應變及軸向應變與其對應之主軸應力關係如公式 (2-18) 下：

$$\begin{aligned} E \times \Delta \varepsilon_r &= \Delta \sigma_r - \nu(\Delta \sigma_\theta + \Delta \sigma_z) \\ E \times \Delta \varepsilon_\theta &= \Delta \sigma_\theta - \nu(\Delta \sigma_z + \Delta \sigma_r) \\ E \times \Delta \varepsilon_z &= \Delta \sigma_z - \nu(\Delta \sigma_\theta + \Delta \sigma_r) \end{aligned} \quad (2-18)$$

2.7 非飽和土壤參數說明

由擴孔理論可以求出土壤強度參數凝聚力 c 及摩擦角 ϕ ，在土壤為非飽和的情況下，還要多考慮一項參數，由基質吸力增加造成剪應力增加所對應的角

ϕ^b 度。但是求取土壤強度參數的方法不僅一種，有許多學者提出了求取土壤強度參數的方法，Vesic (1972)利用擴孔理論提出極限壓力控制方程式求取土壤強度參數，Muraleetharan 等人(1998)則將非飽和土壤觀念導入 Vesic (1972)極限壓力控制方程式，求取非飽和土壤強度參數；Schnaid (2004)利用莫爾-庫倫破壞準則，由降伏壓力與初始孔內應力決定土壤強度參數有效摩擦角與總凝聚力。

2.7.1 極限擴孔壓力法

Vesic (1972)利用圓柱擴孔理論，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)，為圓柱擴孔伸張圖，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方程式 (2-19)：

$$p_u = cF_c + pF_p$$

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

$$F_c = (F_p - 1) \cot \phi \quad (2-19)$$

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

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

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量 (2-20) 表達：

$$R_p / R_u = (I_{rr} \sec \phi)^{0.5} \quad (2-20)$$

Muraleetharan 等人(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方程式為 (2-21)：

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

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

$$F_c = (F_p - 1) \cot \phi$$

$$I_{rr} = \frac{1 + \varepsilon_v}{\frac{f_2}{I_r} - \frac{2(1+\nu)\Delta(u_a - u_w)}{H(1-2\nu)} \sin \phi + \frac{2(1+\nu)\Delta u_a}{E} \sin \phi + \varepsilon_v} \quad (2-21)$$

$$f_2 = \cos \phi$$

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

其中 F_c 及 F_p 為圓柱擴孔伸張因子(dimensionless cylindrical cavity expansion factors)

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)



2.7.2 降伏壓力法

Schnaid (2004)以圓柱擴孔理論為背景基礎對傍壓儀試驗結果做出解釋，考慮圓柱體在與理想線彈塑性無關的模式下能夠使用莫爾庫倫破壞準則，依據虎克定律，圓柱座標內的主應力能夠滿足不等式 $\sigma_r \geq \sigma_v \geq \sigma_\theta$ ， σ_r 為淨徑向應力， σ_v 為淨垂直應力， σ_θ 為環向應力。滿足不等式的假設情況下，垂直應力可以推斷為中間的主應力，且在垂直方向沒有任何的應變情形發生。

在只有軸對稱與軸向平面應變的條件下圓柱體發生膨脹，傍壓儀試驗參數

降伏應力 P_f 可以用圖 2.18 莫爾庫倫破壞準則來解釋，降伏應力可以定義為公式

(2-22)：

$$P_f = P_o(1 + \sin \phi') + c \cos \phi' \quad (2-22)$$

P_o 為初始孔內應力

P_f 為降伏壓力

c 為總凝聚力

ϕ' 為有效摩擦角

當降伏應力 P_f 等於徑向應力 σ_r ，環向應力 σ_θ 表達成公式(2-24)徑向應力 σ_r 與有效摩擦角 ϕ' 的關係式：

$$\sigma_\theta = \sigma_r \cdot \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} - \frac{2c \cdot \cos \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (2-23)$$

2.8 光纖光柵感測器簡介

光纖光柵感測器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，並且有體積小、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等優點，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。下列各節為對光纖結構、光纖傳輸原理、光纖光柵飄移量與溫度的關係作出介紹。

2.8.1 光纖結構

光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)一般是利用矽玻璃或塑膠製成，藉著與外層(coating)不同的光學性質，在光纖曝光時造成一系列折射率週期性永久的改變，對應折射率週期性改變的間距為 d ，當一寬頻光源進入此一光纖時，除了滿足布拉格條件(Bragg condition)的特定波長 λ_B ，其餘波長都會因為相位差而相消；而當 FBG 受到外力產生應變時，造成原本間距 δ 的改變增加量為 $\Delta\delta$ ，使得該特定波長 λ_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)，圖 2.19 為其量測原理示意圖。



2.8.2 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 2.20，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 2.21 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 (2-24) 所示：

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2-24)$$

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(2-25)所示：

$$n_1 \sin \alpha_c = n_2 \sin 90^\circ \Rightarrow \alpha_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2-25)$$

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)。

2.8.3 光纖光柵波長飄移量與溫度的關係

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(2-26)：

$$\Delta \lambda_B = 2n\Lambda \left[\left\{ 1 - \left(\frac{n_e^2}{2} \right) \langle p_{12} - \nu(p_{11} - p_{12}) \rangle \right\} \varepsilon + \left(\alpha + \frac{dn_e}{n_e} \right) \Delta T \right] \quad (2-26)$$

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

把(2-26)式作簡化，便可寫成為(2-27)：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T = K_\varepsilon\varepsilon + K_T\Delta T \quad (2-27)$$

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

$p_e = \left(\frac{n_e^2}{2}\right)[p_{12} - \nu(p_{11} - p_{12})]$ 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(2-27)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。其式子簡化如公式(2-28)：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon = K_\varepsilon\varepsilon \quad (2-28)$$

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(2-28)簡化得知，而得到公式(2-29)：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T = K_T T \quad (2-29)$$

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。

表 2.1 傍壓儀試驗步驟比較表 (摘自鄭孟雄, 1999)

| 作者 | 所需應力增量數目 | 應力增量 (kPa) | | 每一增量時間 (分鐘) | 反覆載重前要求 (分鐘) | 控制方式 |
|---------------|------------|------------|-----|-------------|--------------|------|
| | | | | | | |
| Menard | 10 | - | | 1 | - | 應力控制 |
| Mair & Wood | - | 軟弱粘土 | 15 | 2 | - | 應力控制 |
| | | 堅硬粘土 | 100 | | | |
| | | 軟岩 | 500 | | | |
| Windle | - | - | | 1 | - | - |
| ISRM | 5 | - | | - | 10 | 應力控制 |
| Briaud et al. | 1/40 V_i | - | | 0.25 | - | 應變控制 |
| Clark & Smith | - | - | | - | 10 | 應力控制 |

表 2.2 淨極限壓力 P_L^* 判斷黏土強度經驗法則 (摘自 Baguelin et al., 1978)

| P_L^* (kPa) | Description |
|---------------|-------------|
| 0~75 | Very Soft |
| 75~150 | Soft |
| 150~350 | Firm |
| 350~800 | stiff |
| 800~1600 | Very stiff |
| 1600+ | Hard |

表 2.3 淨極限壓力 P_L^* 判斷砂土強度經驗法則 (摘自 Baguelin et al., 1978)

| P_L^* (kPa) | Description |
|---------------|--------------|
| 0~200 | Very loose |
| 200~500 | Loose |
| 500~1500 | Medium dense |
| 1500~2500 | Dense |
| 2500+ | Very dense |

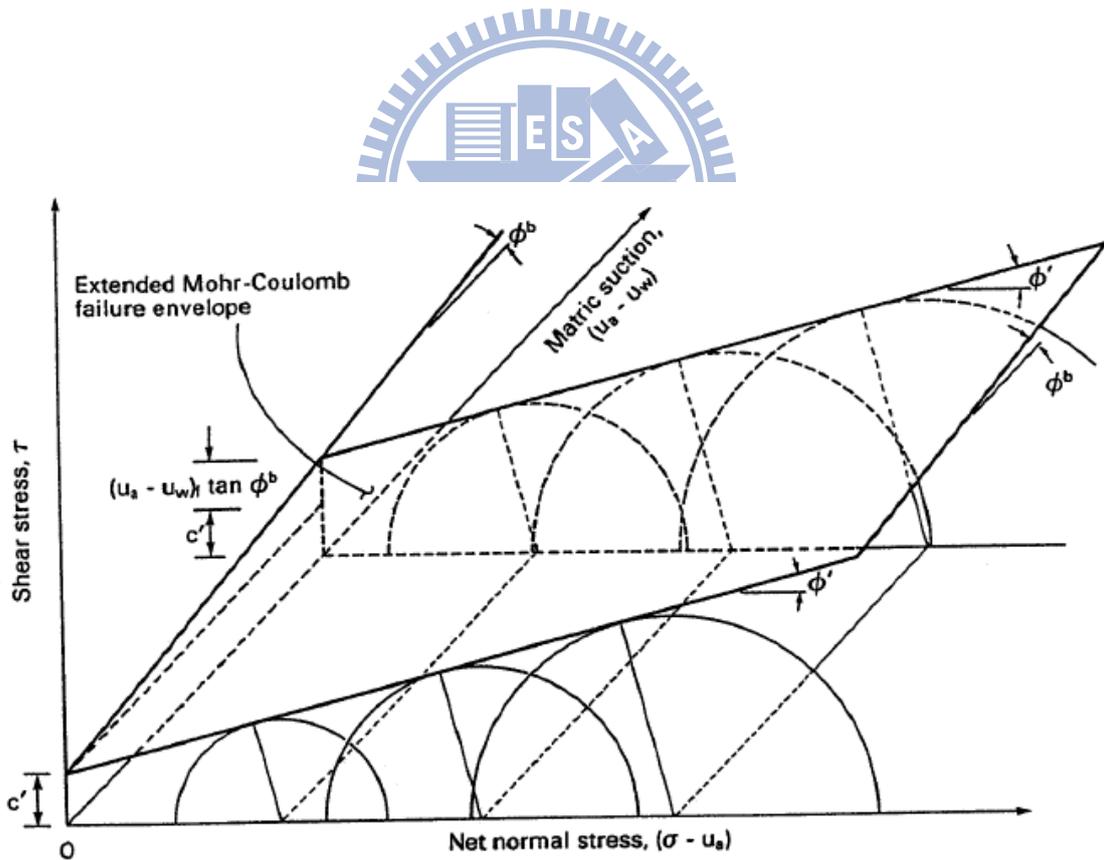


圖 2.1 非飽和土壤廣義莫耳庫倫破壞包絡面(Fredlund et al.1978)

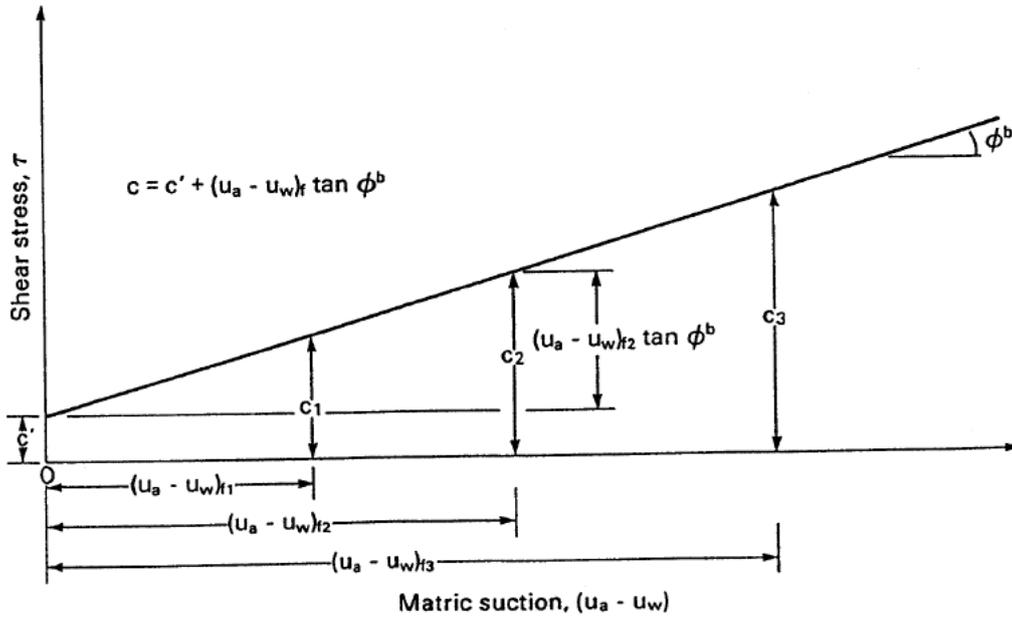


圖 2.2 破壞包絡面截距沿一直線於 $\tau - (u_a - u_w)$ 平面 (Ho and Fredlund, 1982)

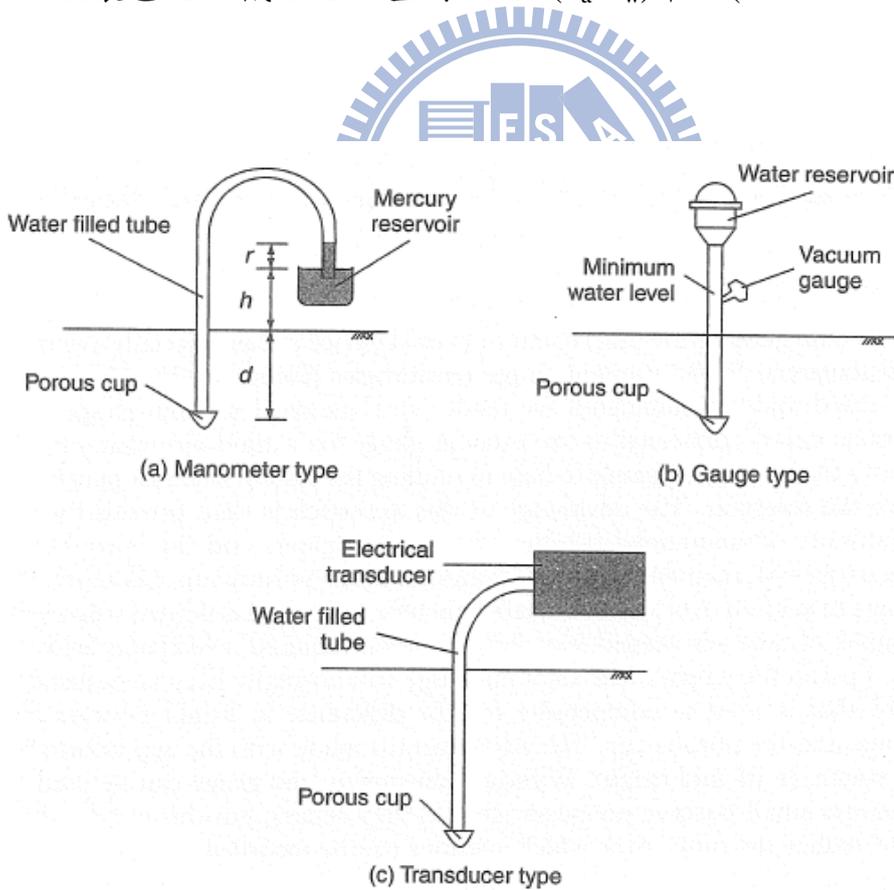


圖 2.3 傳統之張力計構造示意圖 (摘自 Ridley and Wray, 1995)

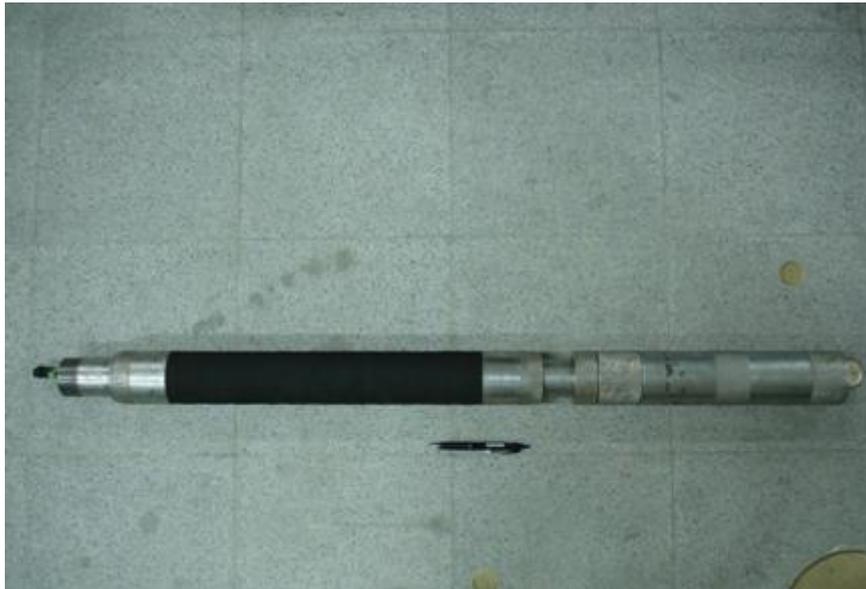


圖 2.4 傍壓儀本體與薄膜

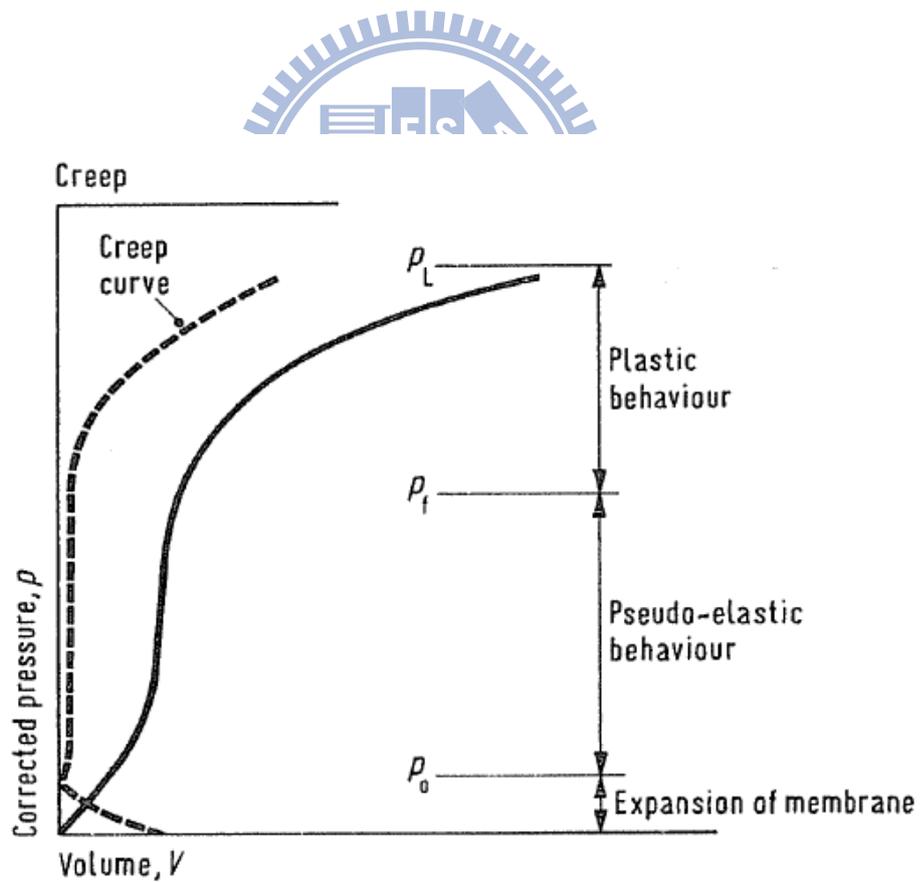


圖 2.5 典型傍壓儀試驗結果與潛變曲線 (摘自 Mair et al., 1987)

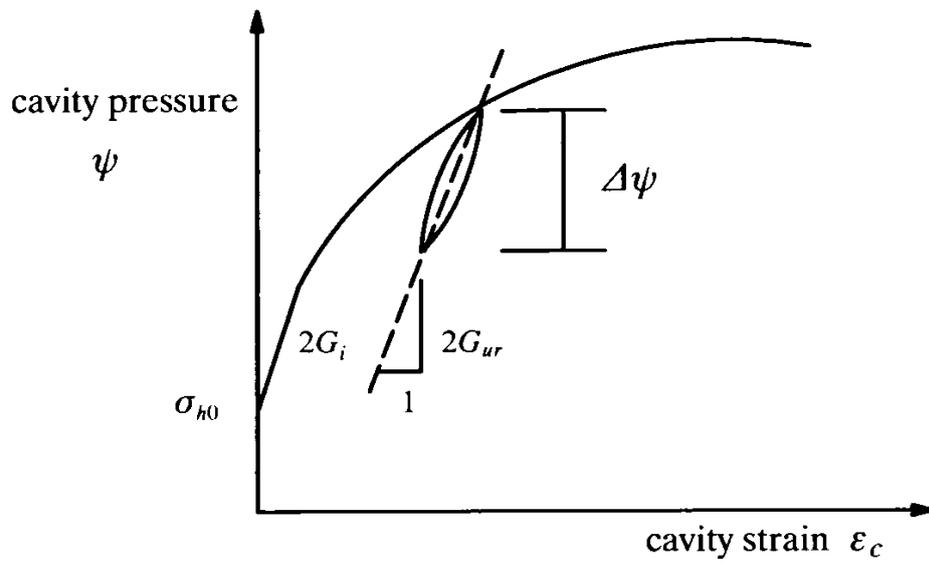


圖 2.6 剪力模數 (摘自 Wroth, 1982)

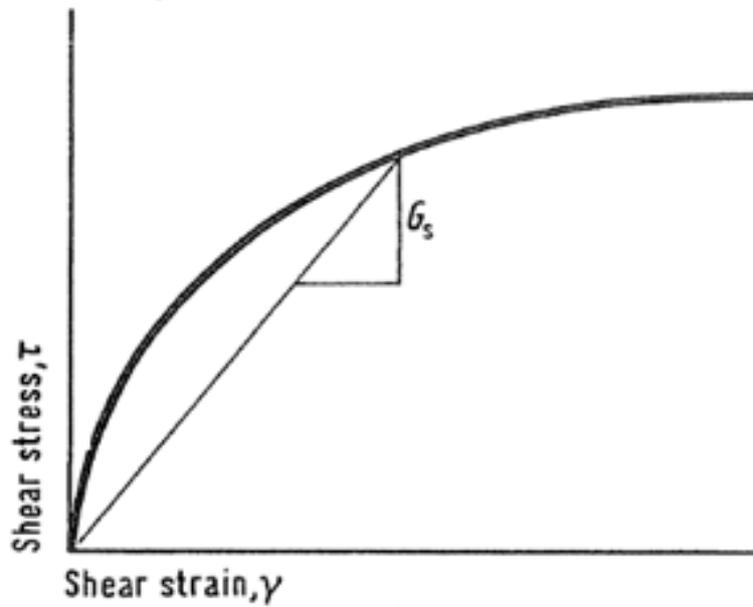


圖 2.7 正割剪力模數 (摘自 Mair and Wood, 1987)

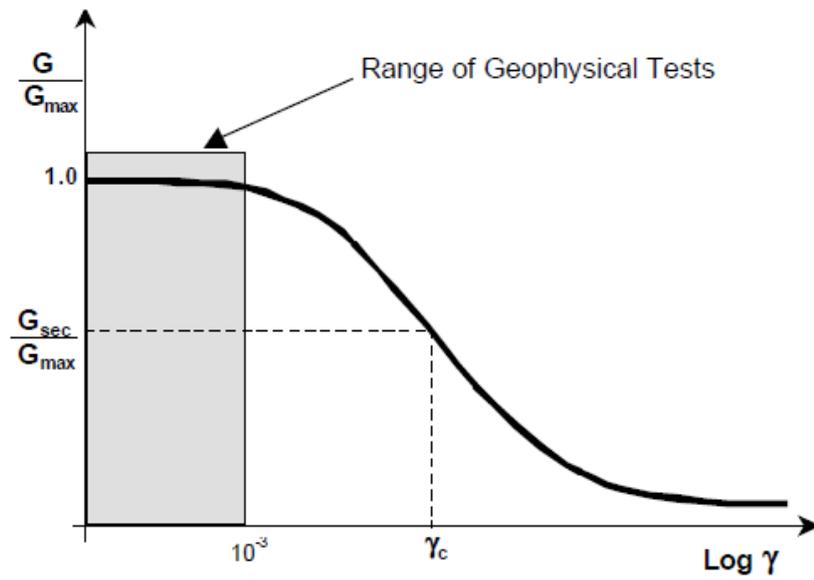


圖 2.8 正規化剪力模數遞減曲線 (摘自 Mair and Wood, 1987)

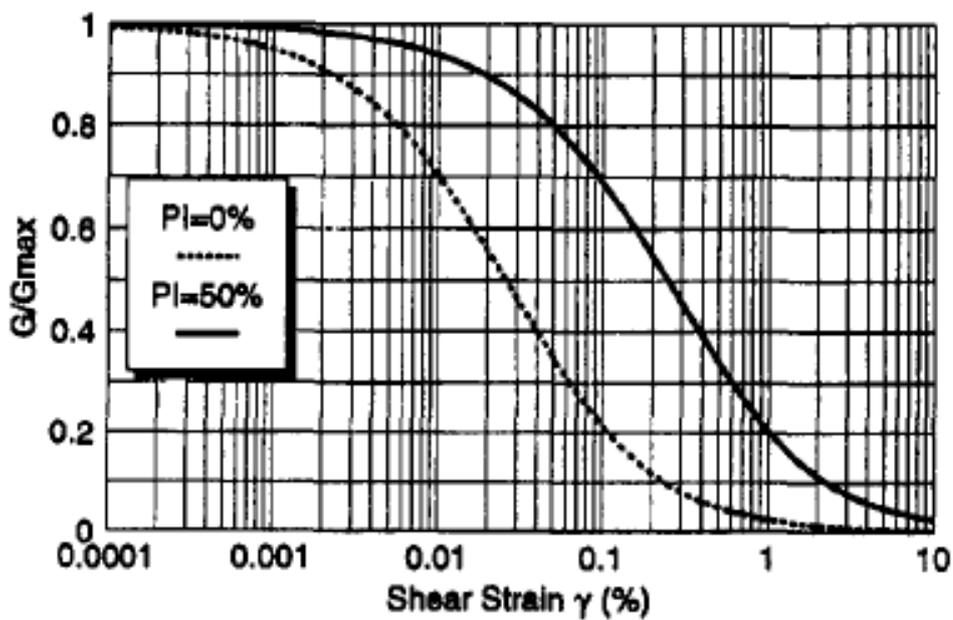


圖 2.9 黏土 PI=0%與 PI=50%模數遞減曲線 (摘自 Mair and Wood, 1987)

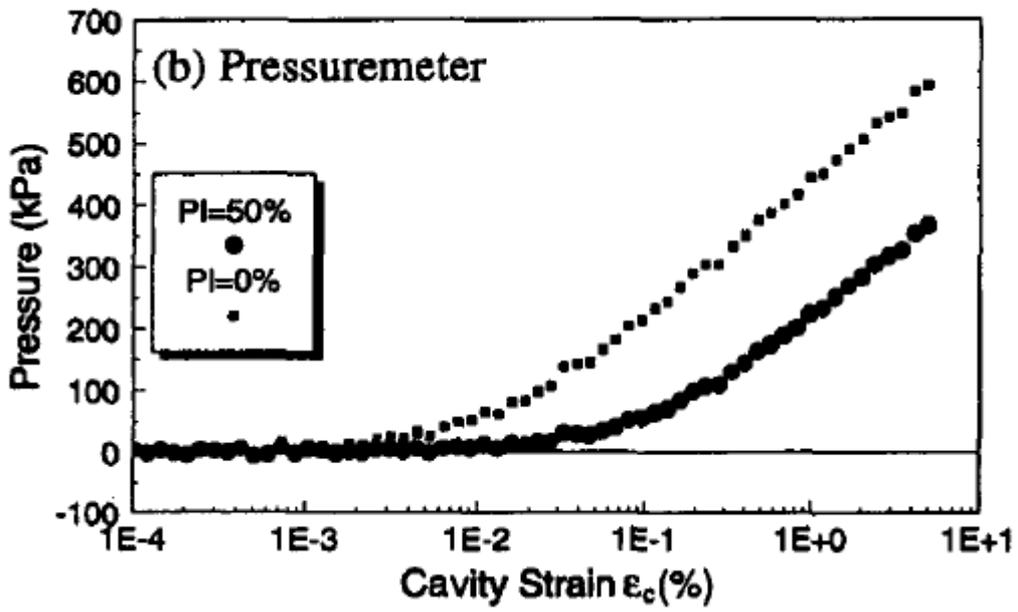


圖 2.10 減壓段原始壓力與應變關係圖(摘自 Li, 1998)

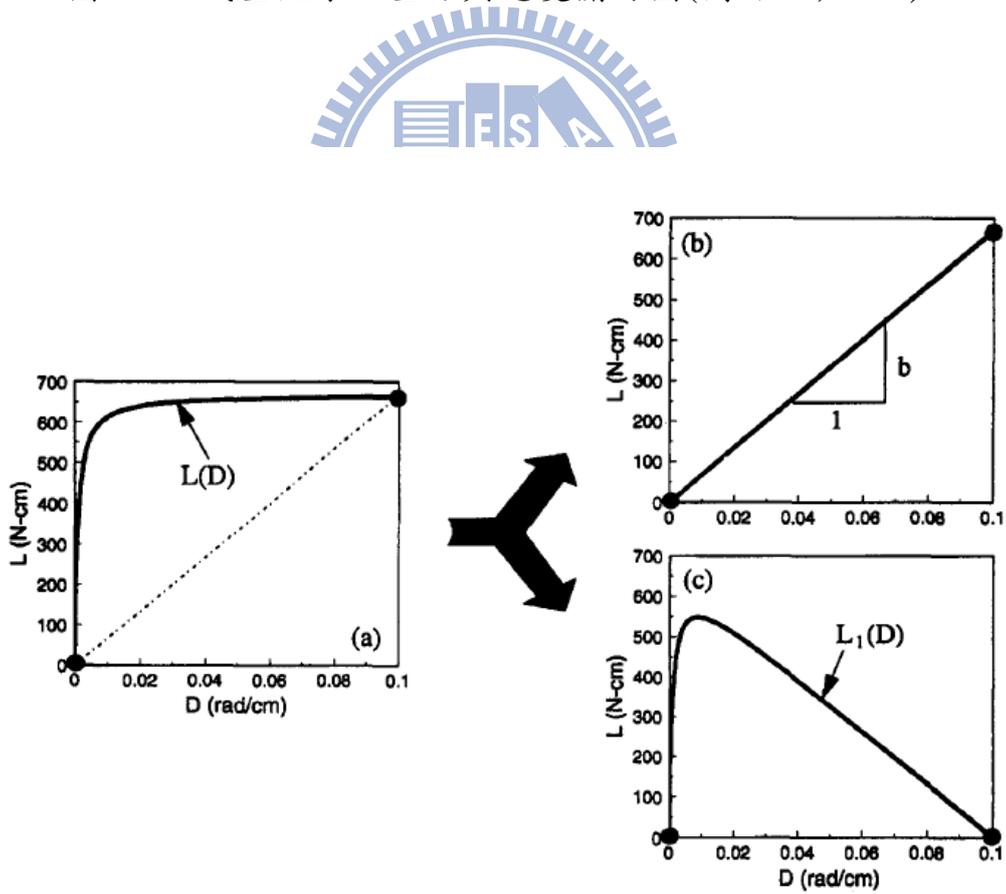


圖 2.11 減壓段壓力與應變關係圖(摘自 Li, 1998)

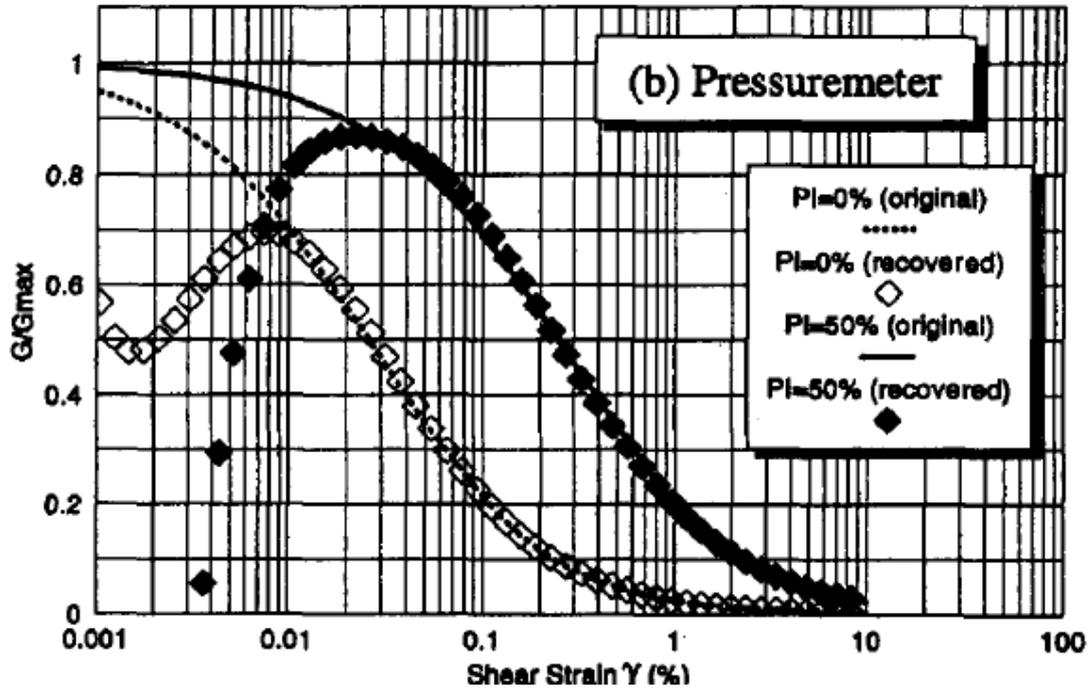


圖 2.12 減壓段原始與濾波剪力模數遞減曲線圖(摘自 Li, 1998)

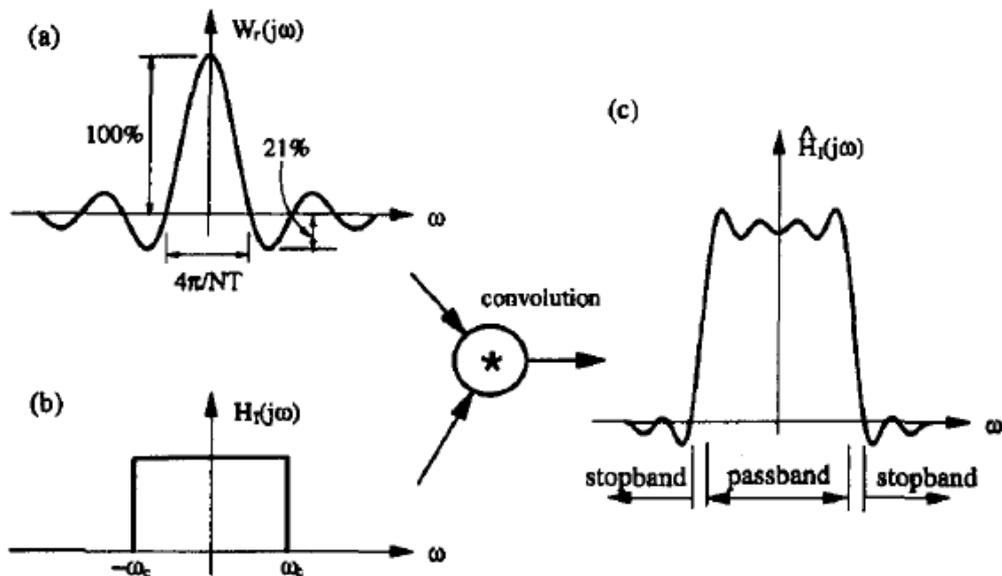


圖 2.13 (a)窗型函數頻率(b)希望的頻率(C)濾波後的頻率(摘自 Li, 1998)

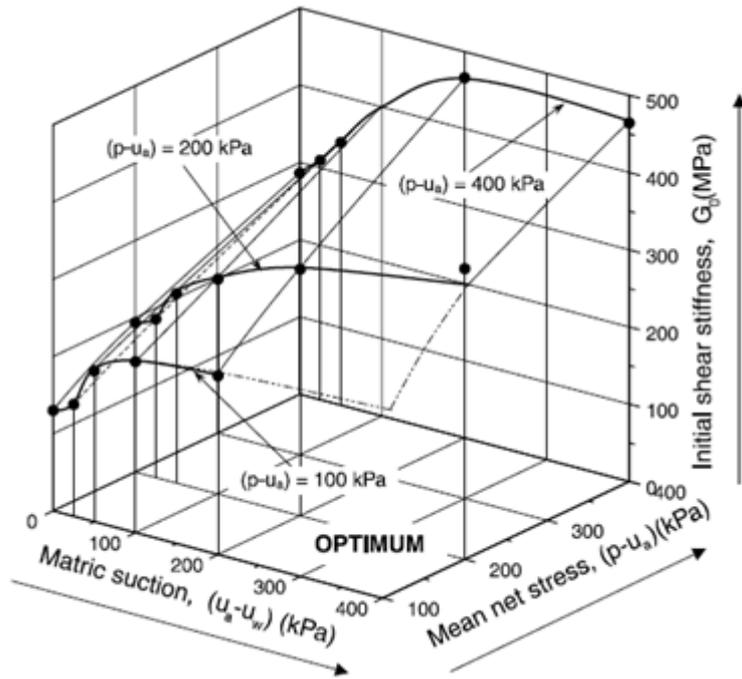


圖 2.14 最佳夯實初始剪力模數、基質吸力、淨正向應力關係圖 (Mancuso, 2002)

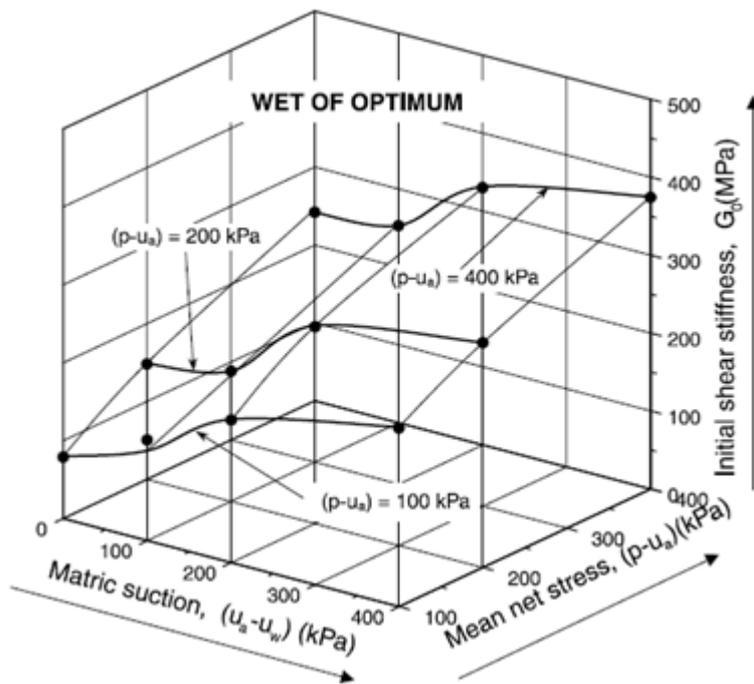


圖 2.15 最佳含水量初始剪力模數、基質吸力、淨正向應力關係圖 (Mancuso, 2002)

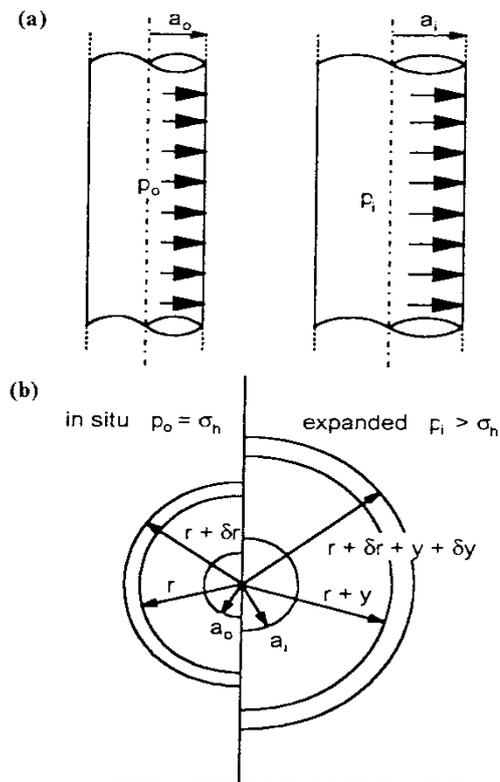


圖 2.16 圓柱體與元素塊體在距離為 r 時擴張情形 (摘自 Mair and Wood, 1987)

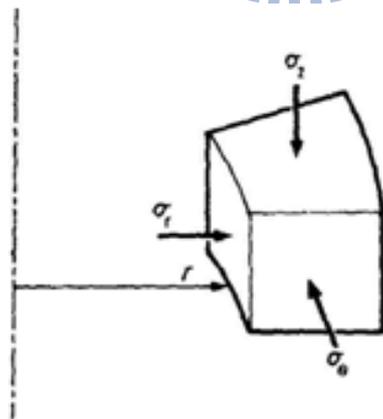


圖 2.17 元素塊體應力分佈圖(摘自 Mair and Wood, 1987)

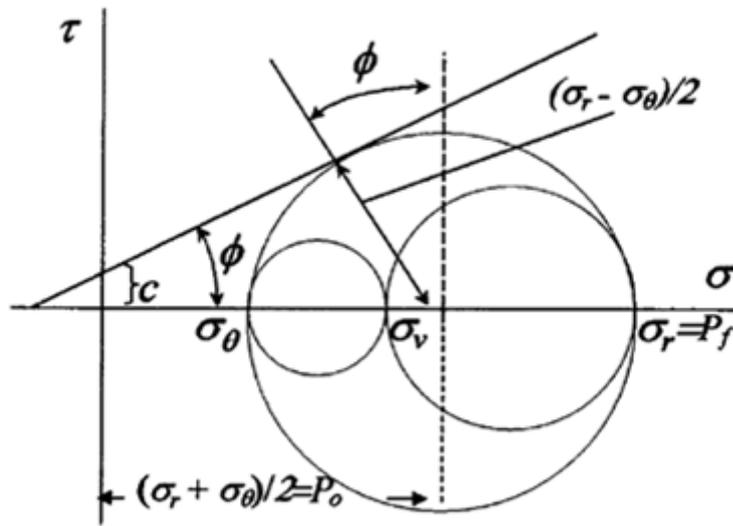


圖 2.18 莫爾-庫倫破壞準則決定 c 、 ϕ (摘自 Schnaid, 2004)

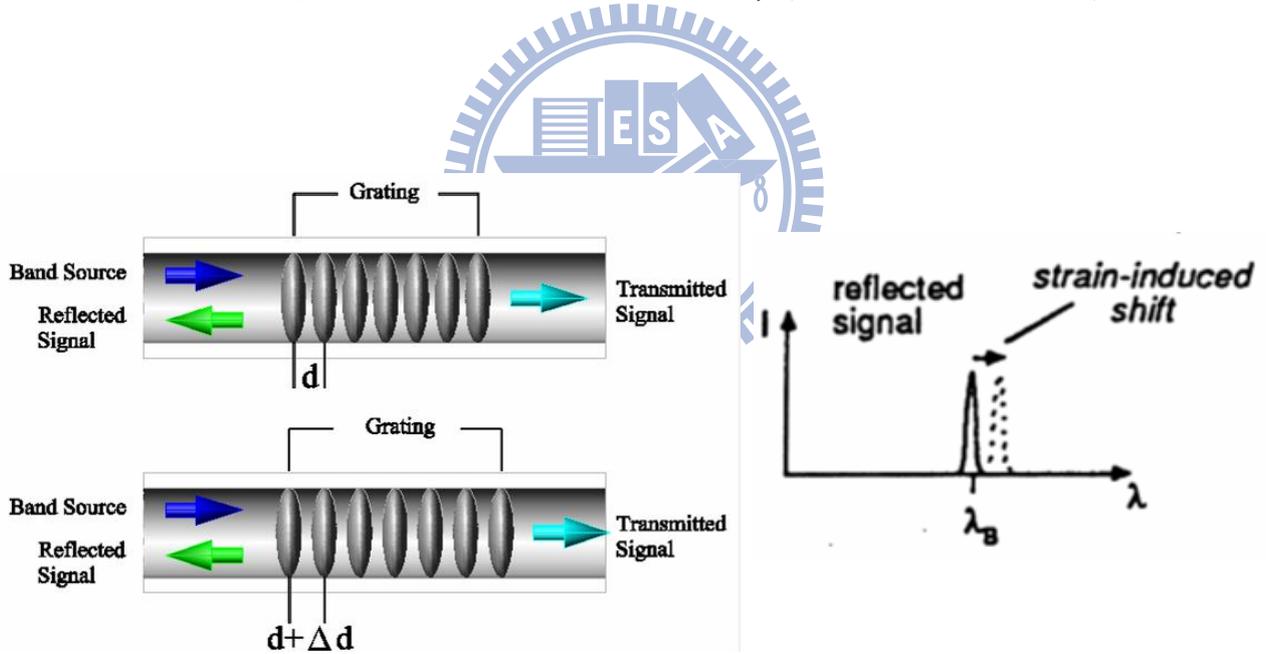


圖 2.19 光纖光柵量測原理示意圖 (摘自簡旭君, 2003)

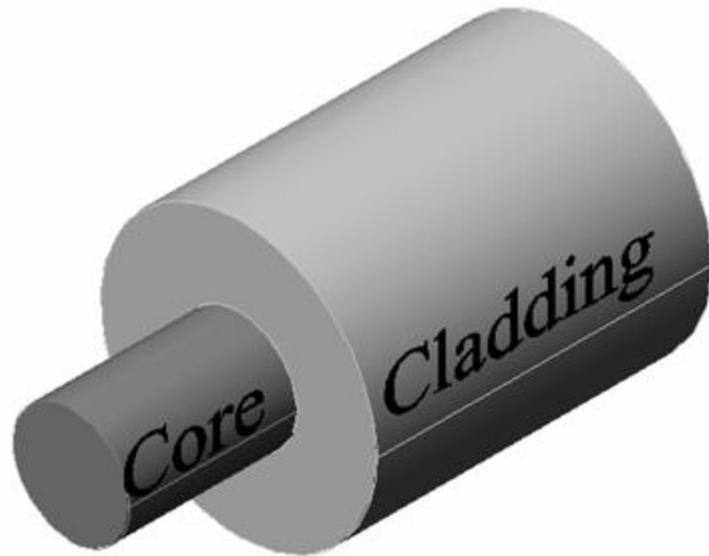
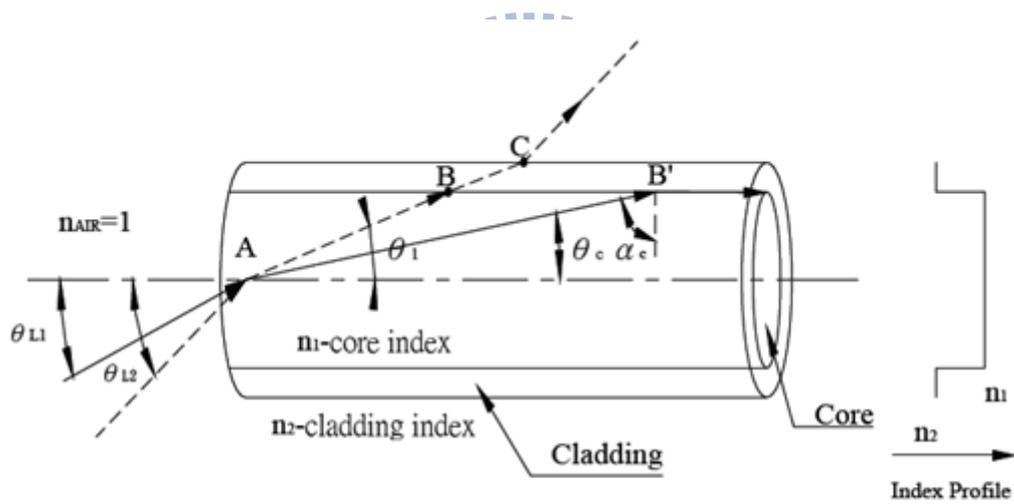


圖 2.20 光纖構造(摘自簡旭君, 2003)



$$n_1 > n_2$$

θ_{L1} -Launch Angle that become θ_c

θ_{L2} -Launch Angle-unconfined ray

圖 2.21 跳躍折射率光纖之光傳播圖 (摘自 Hecht, 1987)

第三章 試驗儀器構造介紹改良與標定

3.1 試驗儀器構造介紹

本論文使用之傍壓儀構造大體可分為壓力來源及連接管路、控制系統、傍壓儀本體三部份作詳細介紹。圖 3.1 為現場非飽和傍壓儀試驗示意圖，包含傍壓儀量測系統與張力計。

3.1.1 壓力來源與連接管路

為使傍壓儀具有足夠之壓力，並考慮到現地試驗的方便性，使用高壓氮氣瓶作為壓力源(大約為 10 MPa)，足以供傍壓儀試驗者依不同地質條件下進行試驗。將高壓氮氣瓶裝上調壓閥後，需要使用管線連接壓力控制閥與傍壓儀本體，而一般 PVC 管無法承受高壓，不適用於傍壓儀試驗系統內。高壓尼龍管有彈性、耐高壓，採用之材質有尼龍管、銅管及不鏽鋼管，選用高壓尼龍管為連接管路為最好的選擇。值得注意的是，當壓力過大時高壓尼龍管接頭常常有洩漏的問題，使用止洩帶可以有效防治洩氣的問題。

3.1.2 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，設有高壓控制箱如圖 3.2 所示，經過高壓管線供給傍壓儀本體較大的壓力，通常是在地質條件為岩石下進行傍壓儀時適用。在高壓控制箱與傍壓儀本體間連接

低壓調壓閥如圖 3.3，藉由低壓調壓閥輸出較小的壓力進入傍壓儀本體，非常適合在地質條件為土壤的情況下進行傍壓儀試驗時使用。

3.1.3 傍壓儀本體

傍壓儀本體全長為 1075 mm，直徑為 76 mm。依結構體主要可分為兩段，本體壓力室長度為 740 mm，其中可膨脹部分長度=410mm。最大允許變形量 20mm，大約等於 27%之徑向變形量(cavity strain)，如圖 3-3。傍壓儀本體外部包含傍壓管薄膜，內部則有中心桿件。

傍壓儀所用之薄膜，使用現有之 Menard GB Probe 之耐高壓橡皮膜，內含一圈鋼絲，其外徑為 68 mm，長度為 510 mm，厚度為 4.3 mm。為避免採用膠合方式無法拆卸，設計一套裝膜與拆膜的工具，因此設計時須注意，要使傍壓儀管徑大於膜徑。在傍壓儀兩端工牙，並輔以薄殼束環將皮膜逼緊，避免產生漏氣的情形。

傍壓儀本體內部中設有一中空圓桿，由四組應變量測主體所組成，每一組應變量測主體互相正交，在應變量測主體下各有一個長度 55mm，寬度 5mm，厚度 0.5mm 在正反兩面黏有光纖光柵的簧片如圖 3.5。中心桿件置入傍壓管前先將量測應變感測器之簧片鎖上，將簧片鎖上後光纖光柵進行串接，並確保應變感測器放置傍壓儀本體後並不會壓到光纖，減低光纖訊號，才方可完全組裝，組裝完成後如圖 3.6 所示。

3.1.4 張力計

本試驗利用古景宇(2011)研發錐狀貫入式張力計如圖 3.7 所示，作為量測現地土壤基質吸力大小，張力計設計時考慮到傍壓儀試驗有多組試驗施作於孔內深度較大的土層，並非只有在地表施作，但一般市面所販售之真空錶張力計無法貫入深度較深的位置，故需要錐狀貫入式張力計作為本試驗所使用。

為了配合錐狀貫入式張力計設計，張力計陶瓷透水石為環狀，直徑為 35.5mm，高度 25mm，安裝張力計前，先將張力計陶瓷透水石浸泡在除氣水裡 24 小時，確保陶瓷透水石為飽和狀態。在量測土壤基質吸力時因為氣穴效應的影響，容易使張力計量測基質吸力失敗，故需要將張力計系統內的空氣排出，使用除氣水施加壓力透過管線將水灌入張力計系統，另一邊管線接上雙向閘門，並再加壓灌水時打開門閘，使得張力計系統中的空氣溶於水中排出，將氣穴效應的影響減至最之低，整體張力計系統示意圖如圖 3.8 所示。

陶瓷透水飽和與除氣的步驟完成後，便可將張力計系統安裝在現地量測基質吸力。裝設時利用鑽桿鑽掘至設定之深度，使用不同長度的PVC管，把錐狀貫入式張力計固定在PVC管底部，用鐵鎚將貫入式張力計敲入，確保陶瓷頭與周圍土壤接觸良好無誤後，將指針式張力錶如圖3.9所示鎖上PVC管內部延伸出來的管線後，即可觀測錶上的數值。

3.2 儀器構造改良

本試驗所使用之傍壓儀為鄭孟雄(1999)研製高壓傍壓儀，為了使光纖光柵感測器完全取代電子式感測器，將對儀器構造進行部分進行改良，改良可分為(1)壓力計(2)應變感測器二個部份，並在下面章節展示改良成果。

3.2.1 壓力計

量傍壓儀光纖光柵應變感測器訊號的擷取與現地試驗的方便性，故將電子式壓力計改良成光纖式壓力計，光纖式壓力計之設計則參考高勝傑(2006)研發之光纖光柵壓力計，利用圓形薄板力學理論將光纖光柵黏貼在邊緣束制之圓形彈性薄板，當圓形薄板受到拉壓力而產生非均勻之應變分佈時，黏於薄板上的光纖光柵會產生漸變的形式，此時光纖光柵的波長改變量與薄板變形量成正比。

本研究雖然在土壤進行傍壓儀試驗，但為了驗證儀器的可行性，增加試驗的靈敏度與精確度，製作低壓壓力計如圖 3.10 與高壓壓力計如圖 3.11。當於土壤施作傍壓儀試驗時，則以低壓之壓力計的讀數為主，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，則以高壓之壓力計為主，該壓力計感應範圍為 0~10MPa，可感應 0.1kPa 之壓力變化。

3.2.2 應變感測器

傍壓儀試驗是藉由施加壓力量取土體變形之試驗儀器，故希望傍壓儀的應變感應器能夠量測到極小的土體變形量。本試驗儀器改良鄭孟雄(1999)傍壓儀應

變感測單元，採用徑向變形直接量測之方式，並在中心桿件設置了之簧片，每間隔 90° 之方向設置一組。完整一組變形量測器包含了線性軸承、軸桿、應變量測主體、彈簧及簧片如圖 3.12 所示。

簧片於受壓側及受張側分別黏貼光纖光柵作為應變計(strain gage)，用對貼的方式消除溫度變化產生波長的飄移。當薄膜受壓力向外擴張時，彈簧利用本身彈力將應變量測主體向外彈出，而簧片亦因滑輪之牽動而向外彈出；當壓力減少時，應變量測主體上的線性軸承沿著軸桿與簧片也順勢返回原位，故在這加減壓一來一回的位移之間，可量測土壤之徑向應變或體積應變。

本設計所使用之厚度 0.5mm 之簧片，簧片之寬度為 10mm。為了避免簧片長期使用生鏽而導致伸展不易，設計之簧片材料選擇不銹鋼材質。而簧片上所黏貼之裸光纖，為了避免光纖受到擠壓或撞擊造成波長訊號消失，利用空心套管將裸光纖部分穿過，計算好在傍壓儀本體內仍有足夠的空間後，在兩端製作光纖轉接頭，作為波長訊號的輸出來源如圖 3.13 示意圖。

3.3 試驗儀器標定

傍壓儀之壓力及變形並非直接與土體接觸，而係透過薄膜傳達壓力及利用薄膜內之應變感測器量測徑向變形。因此在試驗前或儀器組裝後，皆需先進行標定以消除可能產生之系統誤差。傍壓儀儀器需要進行的標定有應變感測器標定、壓力計標定、薄膜勁度標定、系統徑度標定。

3.3.1 應變感測器標定

本研究係以簧片上黏貼之光纖光柵直接量測徑向應變量，為了解應變量與光柵波長變化量的關係，以及應變感測器是否有線性與重複性，故必需先進行標定。標定時利用特殊設計之標定台，將傍壓儀放置標定台上使其固定，如圖 3.14 所示。標定台上有可將傍壓儀上應變感測主體手動微調壓入與放鬆的設計，最後將 LVDT 架在標定台上讀取位移量之讀數，得到各組應變量測器之應變量與光柵波長變化量之關係。

標定開始時利用標定台先將應變感測主體壓入傍壓儀本體內，此時初始位移量為 0mm，並記錄光柵波長之原始讀數，之後應變感測主體每前進 1mm，等待光柵波長穩定後記錄讀數，當位移量達到 7mm 後將應變感測主體壓回，應變感測主體每後退 1mm 記錄一筆讀數。應變感測器來回標定之結果如圖 3.15。

由標定之結果顯示，各組應變量測器相關係數 R^2 均達 0.999 重複性皆甚佳，顯示應變量測之方式係可行，簧片亦不會產生永久變形。

3.3.2 壓力計標定

為了配合光纖光柵應變感測器，方便擷取傍壓儀試驗過程中應力與應變相關資料，本試驗所用之壓力計為光纖式壓力計。壓力計製作完成後需要驗證壓力與光柵波長變化量的關係是否有重複性與線性，方可為傍壓儀所用。標定開始後先記錄光柵波長初始讀數，過程中以氣壓設備對壓力計施加一定的壓力，待光柵波長讀數穩定後在記錄讀數，加壓至光柵所能承受之容許變形強度後，

逐步減少其壓力。考慮到土壤與岩石施作傍壓儀所需要壓力大小不同，為了提高傍壓儀試驗結果的精準度，使用不同厚度金屬薄片製作低壓壓力計與高壓壓力計，並分別進行標定，標定結果如圖 3.16、3.17 所示。

3.3.3 薄膜勁度標定

當傍壓儀試驗施作時，壓力直接施加於薄膜，但薄膜本身擁有勁度，當施加之壓力大到足以克服薄膜壓力時，壓力才能真實傳至土體。故傍壓儀試驗之結果需要扣除薄膜勁度影響的壓力，最後得到的淨作用力才是土體真實承受的壓力。

因此傍壓儀裝上薄膜後在現地試驗使用前需要進行標定，得到應力應變轉換公式。標定時將傍壓儀本體直立於地表，並逐漸加壓觀察其變形量，當變形量達到最大容許應變量後即可減壓，最後得到應力應變圖即為標定成果如圖 3.18 所示。

3.3.4 系統勁度標定

傍壓儀試驗採用直接量測變形量的方式，而量測應變的感測器由彈簧、軸承、應變量測主體、滑輪等所組成，各項材料間難免受到摩擦力之影響，造成在小應變時雖然應變量測主體以感受到變形，但簧片受到摩擦力的影響尚未產生變形，當累積至一定的變形量並克服摩擦力後簧片才會突然變形。

因此為了減低摩擦力造成對傍壓儀試驗結果造成之影響，需要事先進行標

定。標定之方法係將傍壓管置入鋼筒中，當傍壓管之薄膜接觸到筒壁時，依試驗之加載速度，進行加載-解壓步驟。當假設鋼筒之勁度大，不產生變形之情況下，原本桿件與簧片之接觸摩擦力，隨著壓力之增大，而被克服產生變位，此時其壓力-變位之斜率即為系統勁度。其標定之成果如圖 3.19 所示。

3.4 改良光纖式與電子式試驗儀器比較

為了驗證傍壓儀改良成果，與鄭孟雄(1999)研製軟岩高壓傍壓儀結果做為比較，選定鄭孟雄曾經施作傍壓儀試驗位址再進行一次軟岩高壓傍壓儀試驗，試驗位址選定在交通大學光復校區西側 A-2 鑽探孔位如圖 3.20 所示，試驗深度選定 13.25m，試驗深度 Ps-Log 試驗得到最大剪力模數 G_{max} 為 434kPa，傍壓儀試驗結果如圖 3.21 所示。

改良後光纖式傍壓儀應變感測器標定後每 1pm 約 0.007mm 之位移量，比起電子式應變感測器標定後每 1mV 約 0.13mm 之位移量，解析度與靈敏度提高。比較加壓減壓載重試驗結果，擷取傍壓儀試驗結果中加壓減壓載重試驗得到的 Loop1 與 Loop2，使用最大剪力模數 G_{max} 與割線剪力模數 G_{sec} 作正規化剪力模數遞減曲線，並與鄭孟雄電子式傍壓儀試驗得到的 Loop1 與 Loop2 作為比較，如圖 3.22 所示，發現電子式傍壓儀模數遞減曲線，剪應變可量測範圍僅僅約 $10^{-2}\%$ ，而光纖式傍壓儀模數遞減曲線可達到 $10^{-3}\%$ 剪應變可量測範圍，接近小應變的量測範圍。

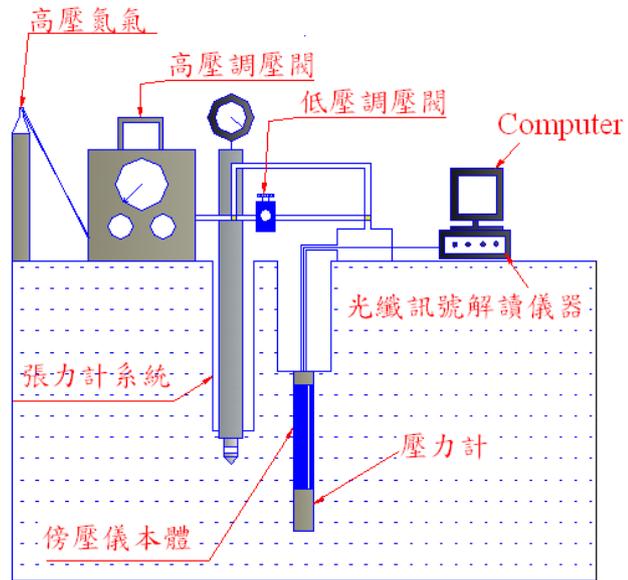


圖 3.1 現場非飽和傍壓儀試驗示意圖



圖 3.2 高壓控制箱



圖 3.3 低壓調壓閥



圖 3.4 傍壓儀本體示意圖



圖 3.5 中心桿件與簧片示意圖



圖 3.6 應變感測器組裝完成示意圖



圖 3.7 椎狀貫入式張力計示意圖(摘自古景宇, 2011)

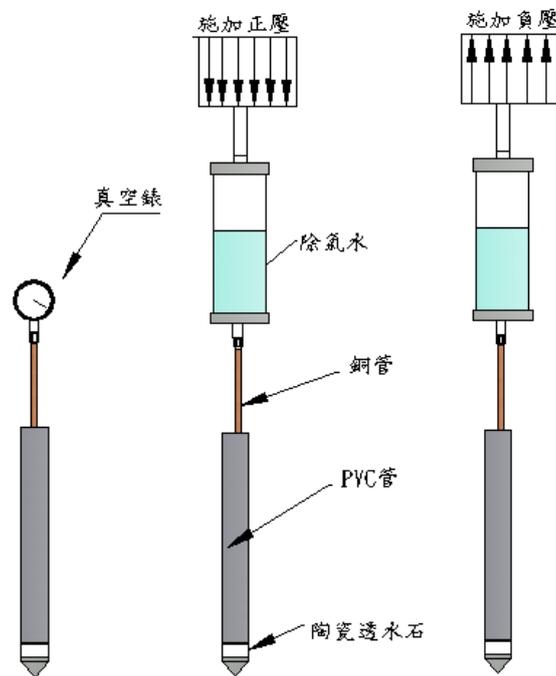


圖 3.8 張力計系統示意圖



圖 3.9 指針式張力錶示意圖

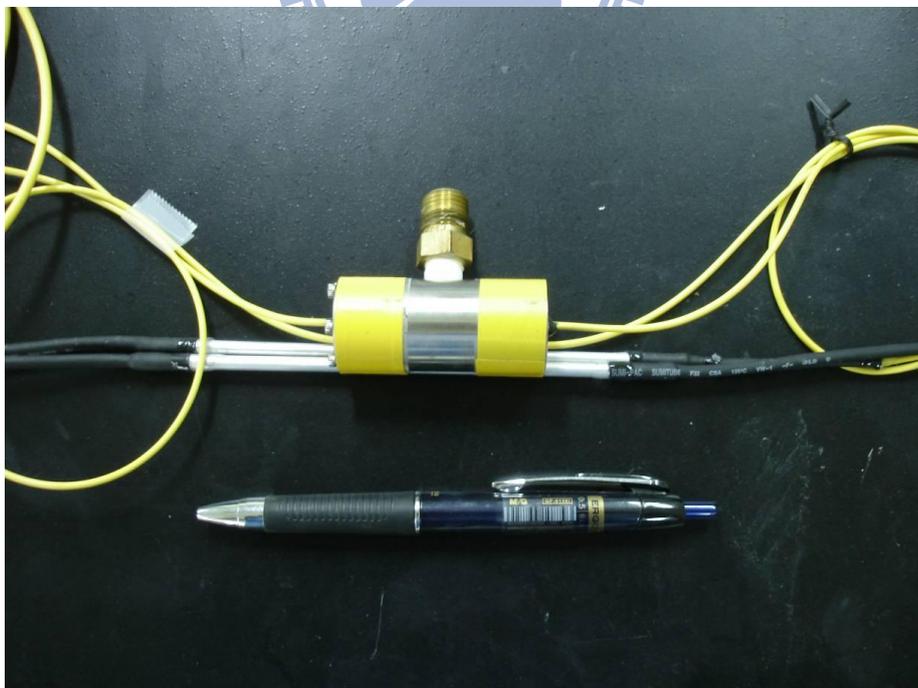


圖 3.10 低壓力 FBG 壓力計實體圖(範圍 0~800 kPa)

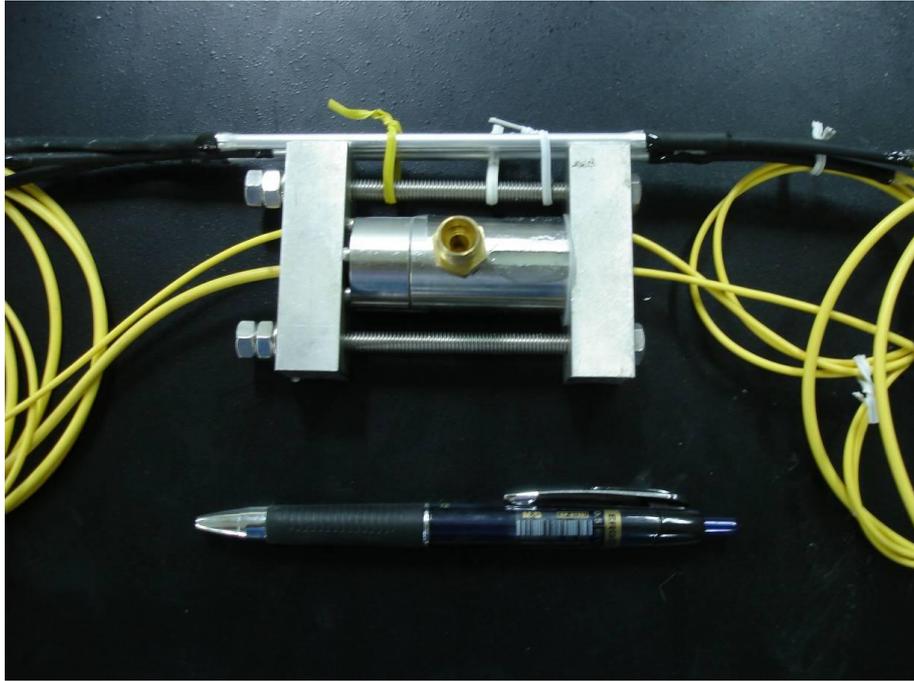


圖 3.11 高壓力 FBG 壓力計(範圍 0~10 MPa)

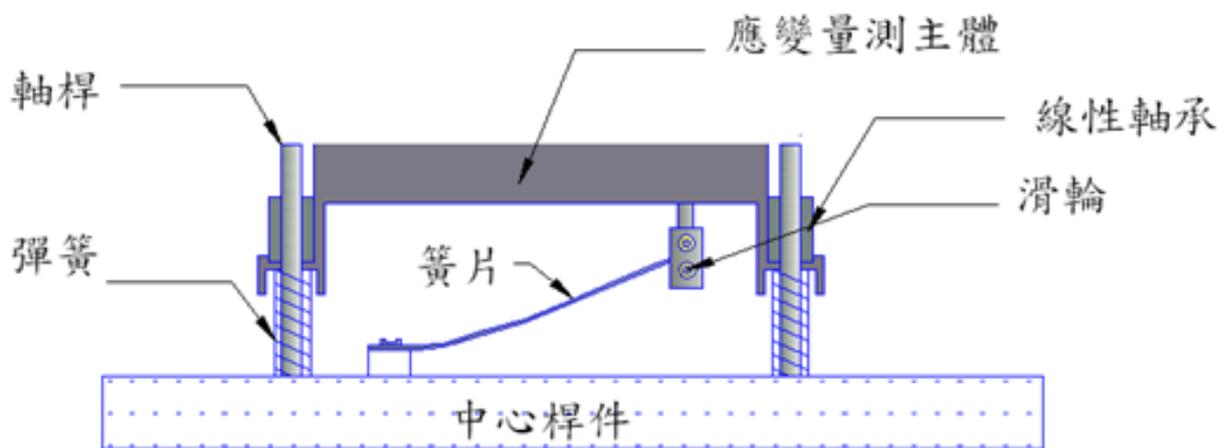


圖 3.12 應變感測器剖面圖

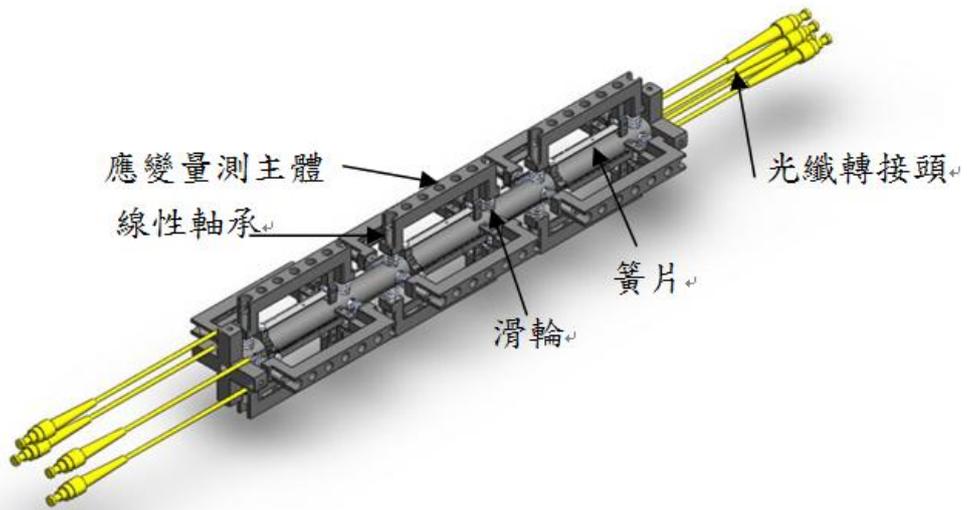


圖 3.13 應變感測器示意圖



圖 3.14 傍壓儀簧片標定試驗圖

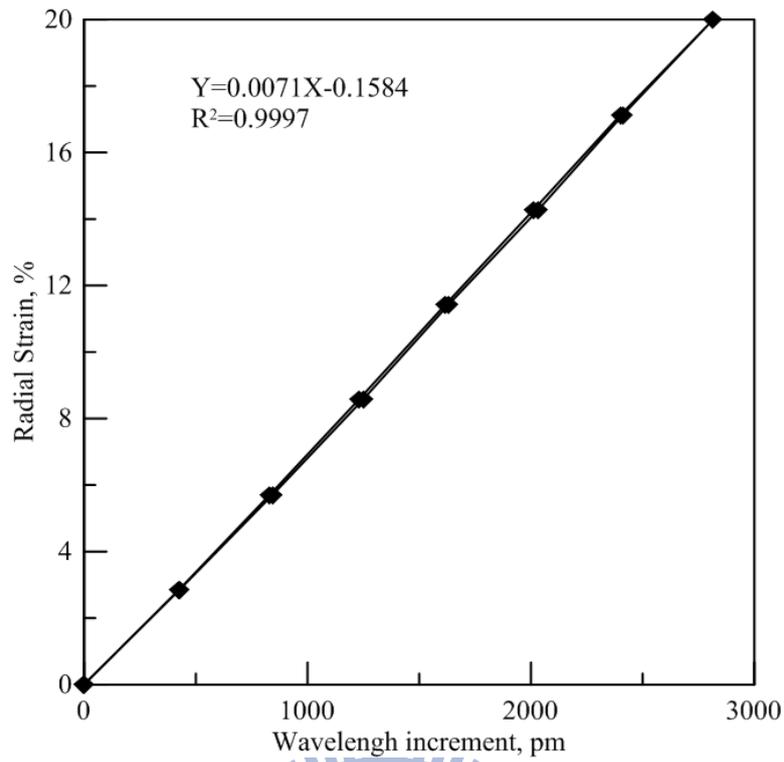


圖 3.15 簧片標定結果圖

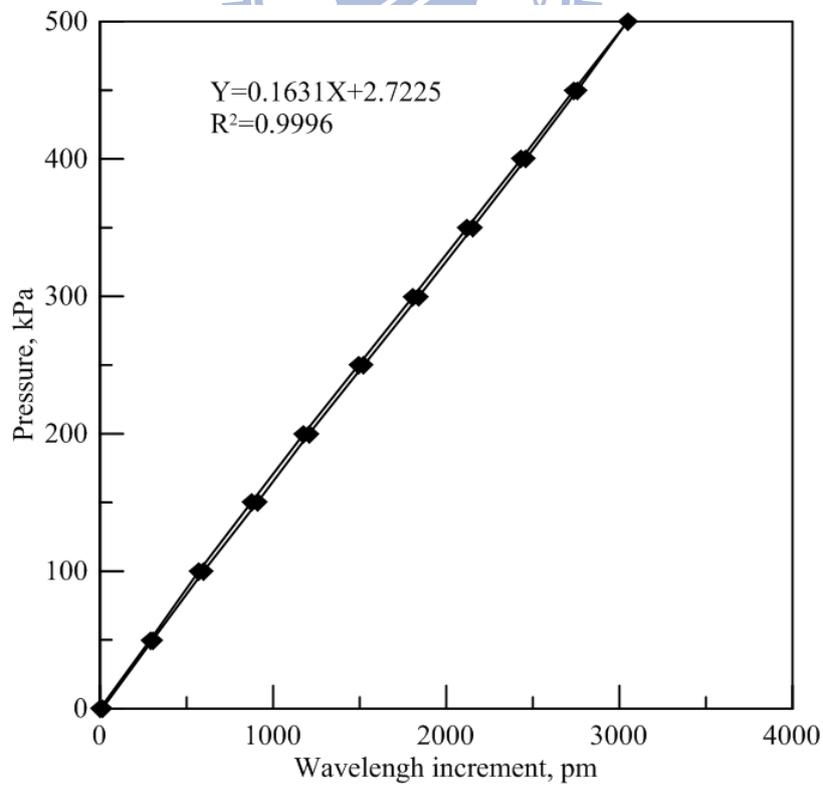


圖 3.16 低壓壓力計標定結果圖

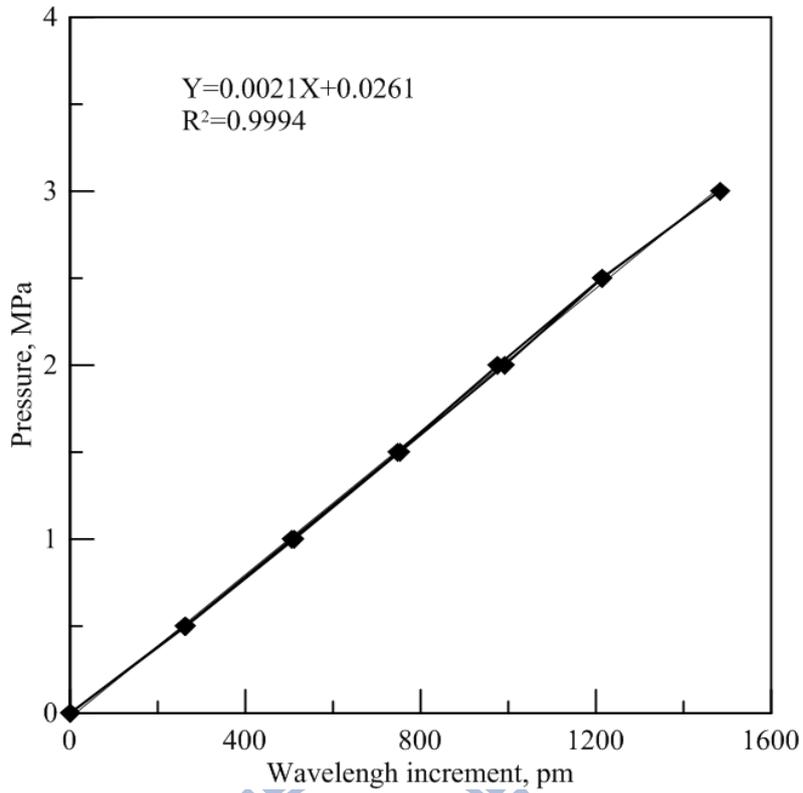


圖 3.17 高壓壓力計標定結果圖

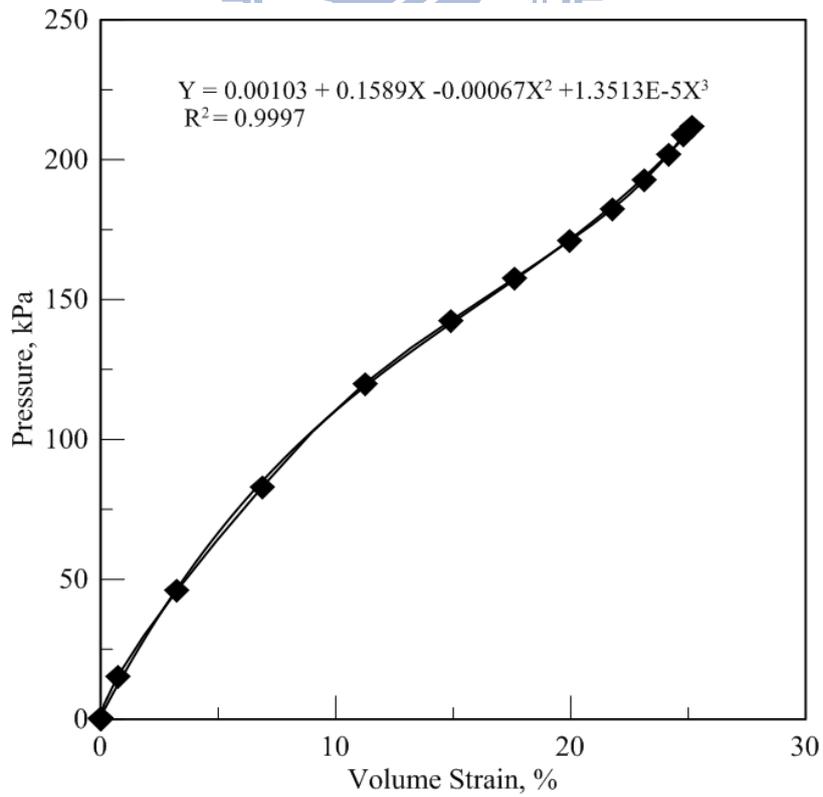


圖 3.18 倍壓儀薄膜勁度標定成果

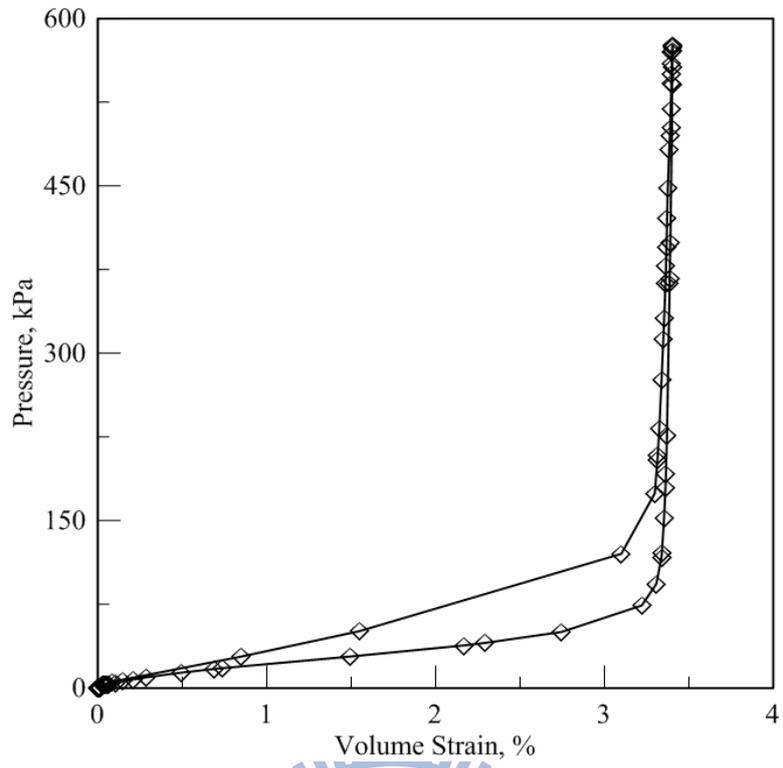


圖 3.19 倍壓儀系統勁度標定成果





圖 3.20 交通大學光復校區西側 A-2 鑽探孔位

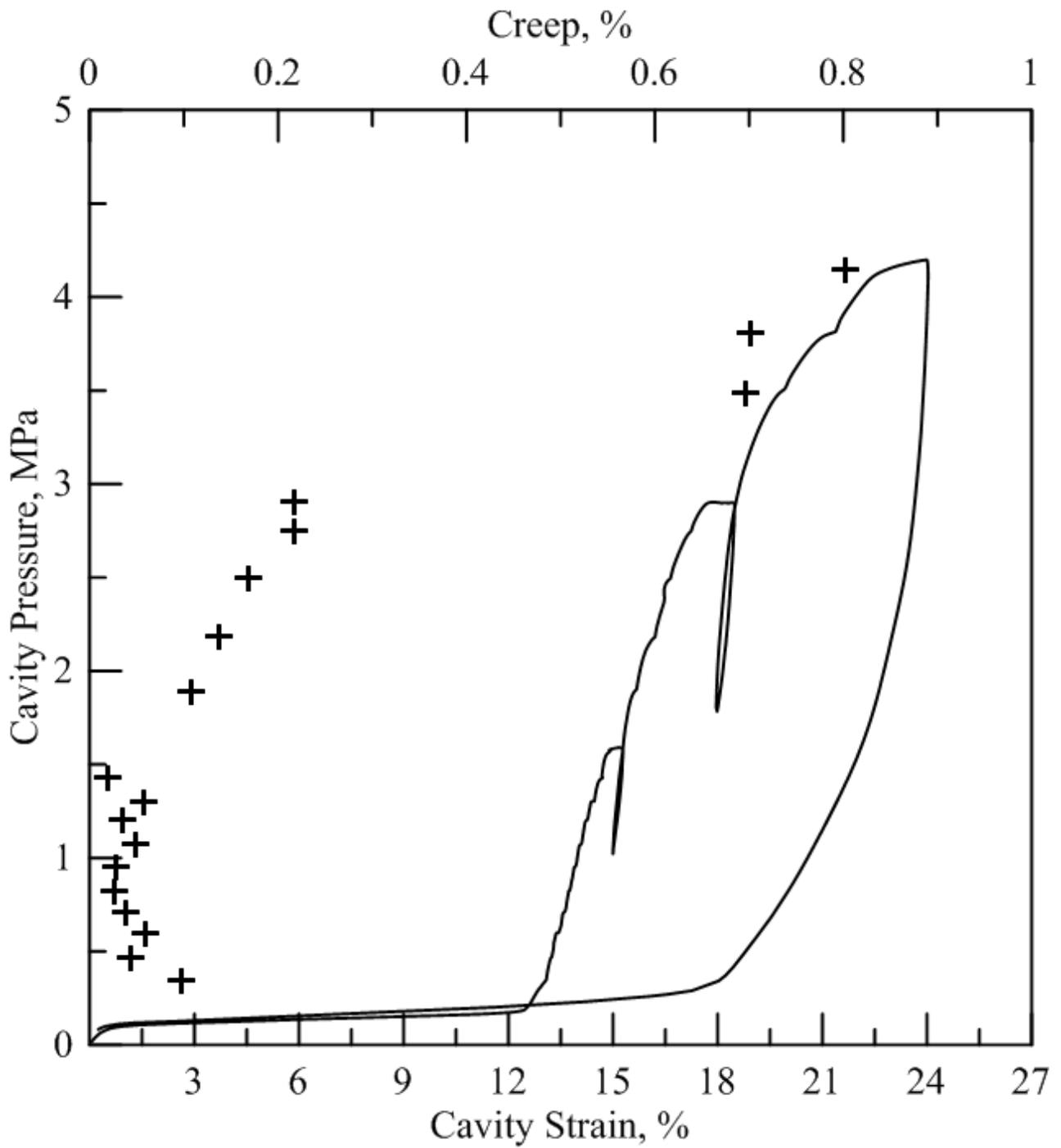


圖 3.21 A-2 孔位深度 13.25m 傍壓儀試驗結果

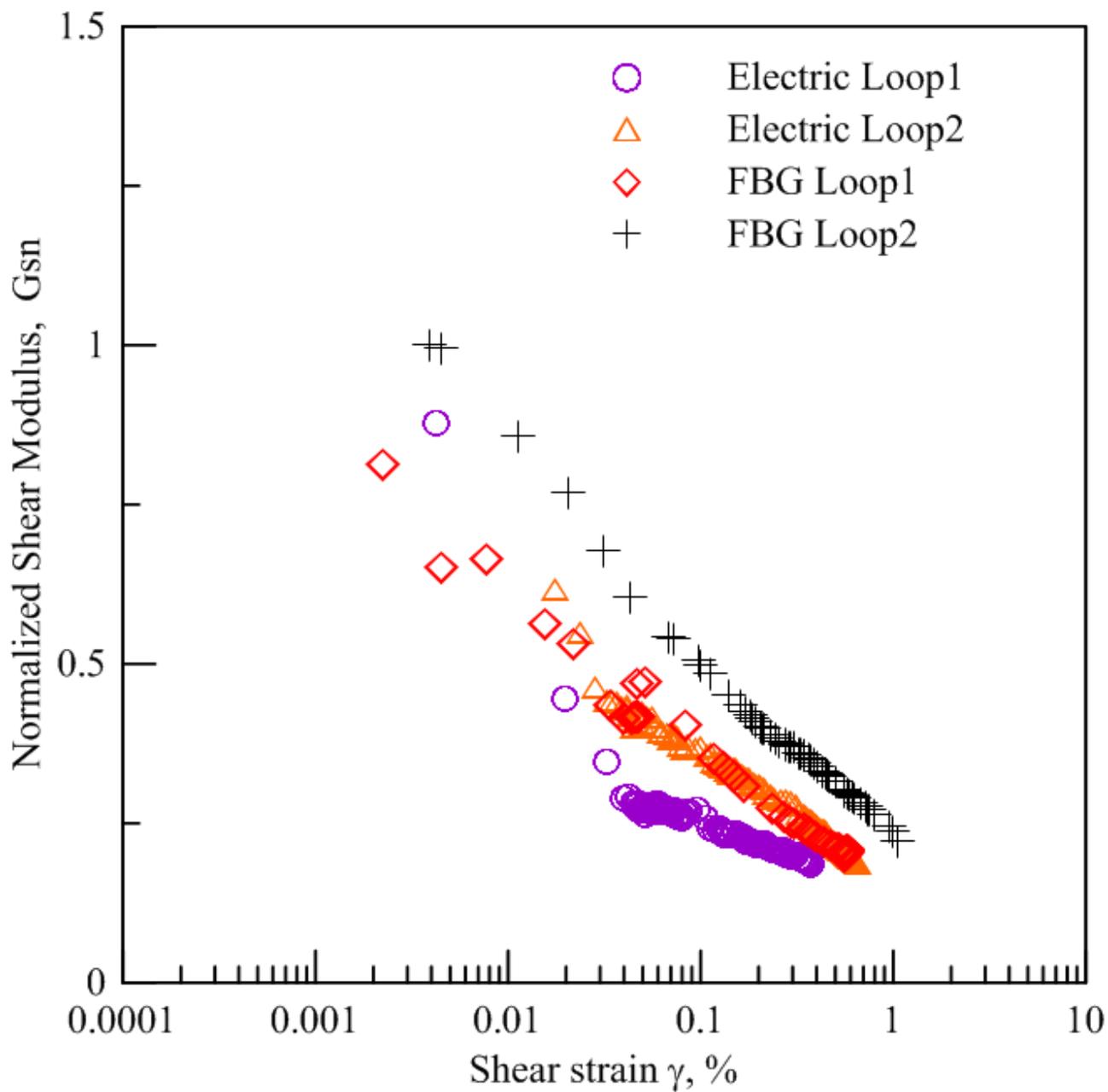


圖 3.22 電子式與光纖式傍壓儀正規化模數遞減曲線比較圖

第四章 試驗規劃與程序

本章就進行非飽和傍壓儀試驗前進行規劃與程序說明，試驗規劃流程圖如圖4.1所示。

4.1 選址

本試驗之位址位於交通大學光復校區南側如圖4.2所示。非飽和土壤傍壓儀試驗預計施作深度為3m，依據鑽探1~4m資料顯示，光復校區接近地表地層多為黃棕色覆土層，主要由黃棕色之砂質黏土所構成。為了進一步了解試驗場址的土壤性質，在試驗預定之場址進行地電阻探測、取得土樣後施作基本物性試驗、三軸試驗、與土壤水分特性曲線、土壤粒徑分佈曲線。

4.2 地電阻探測

地電阻探測是將一維的垂直與橫向探測繪製成土層的電阻率剖面圖，適合作為調查大範圍場址地表下電阻率分佈情形，非飽和土壤的基質吸力受到含水量影響非常大，而影響電阻率的因素與地質材料的導電性、顆粒排列方向、含水量、孔隙率、飽和度有關，也就是說從地表下電阻率的分佈情形，便可了解地表下土層的水文狀態，作為之後量測基質吸力的判斷。在傍壓儀試驗前一星期，在試驗場址施作三維地電阻探測，地表佈設等間距的電擊棒，位置確定後以 S 型佈線方式將每一根電擊棒串連起來，佈成一個長方形或矩形的網格，本

試驗探測範圍 X 方向為 12m，探測深度 Y 方向為 2m，試驗場址地電阻探測剖面圖如圖 4.3 所示，如剖面圖中所判斷低電阻率區域為含水量較高的地層；反之高電阻率區域為含水量較低的區域，張力計埋設在高電阻率區域應當可量測到較高的基質吸力。

4.3 薄管取樣

取得試驗場址的土樣才能進行各種室內試驗，與傍壓儀試驗結果做各種分析。土壤的取樣方式非常多，取樣方法大致分為擾動與低擾動取樣，擾動程度較高的土壤不適合做室內力學性質試驗，只能做一般的土壤物理性質試驗如比重、阿太保、含水量、篩分析試驗等等，因此本試驗場址選擇使用薄管取得低擾動土樣。

首先鑽掘至預定取樣深度，將薄管接上鑽桿後靜壓至土中，使用鐵鎚在鑽桿頂端進行敲擊，土壤受擠壓被送進薄管中即可完成取樣。最後將薄管取出地面後帶回實驗室，用頂土器將取得土樣頂出，薄管取得土樣如圖 4.4 所示，作為進行土壤基本物理性質試驗、三軸試驗、土壤水分特性曲線試驗之用。

4.4 土壤基本物理性質試驗

本研究使用試驗場址取得之土樣進行基本物理性質試驗，試驗項目包含含水量試驗、比重試驗、土壤粒徑分佈曲線、阿太堡試驗，用來求得試驗場址之一般物理性質。

4.4.1 含水量試驗

含水量對於非飽和土壤基質吸力影響性甚高，當土壤含水越高，則基質吸力越低。為了配合傍壓儀試驗施作組數與深度，埋設張力計量測到基質吸力後進行取樣，依照傍壓儀試驗每 0.75m 為施作深度，鑽掘至預定深度後，使用設計之貫入式取土器如圖 4.5 所示，可取得直徑 1.25cm 高度 6cm 的土樣，每 0.75m 可取得三組不同基質吸力的土樣，取樣範圍從地表至深度 2.25m，共九組土樣進行含水量試驗，表 4.1 為含水量試驗與孔隙比結果，表 4.2 由土樣體積推算出體積含水量與飽和度結果。

4.4.2 比重試驗

比重為土壤力學運算中常常需要利用的數值，是非常重要的可以拿來作往後試驗運算的基本參數，定義為土壤單位重與水單位重之比值。試驗場址取得土樣經過實驗求得之比重，可利用貫入式取土器得知取得土樣之體積，加上含水量試驗求出的重量含水量，可推算出體積含水量。本試驗配合傍壓儀施做深度，每 0.75m 取兩組不同基質吸力的土樣進行試驗，取樣範圍從地表至深度 2.25m，共 9 組土樣進行比重試驗，並推算出體積含水量，表 4.3 為比重與乾土與濕土單位重。

4.4.3 篩分析與比重計試驗

篩分析與比重計試驗之結果，可以繪製出土壤粒徑分佈曲線，土壤粒徑分

佈曲線可以判斷出土壤為細粒或是粗顆粒的土壤。本試驗場址取得之土樣遇水具有黏性，並可搓成細長土條不易斷裂，土樣初步判斷為黏土，無法使用一般篩分析分離土粒，故使用濕篩法，再搖篩機晃動過程中，將水注入土篩中，但即使使用濕篩法也只能分離土壤粒徑 0.05mm 以上，還需要比重計試驗的配合，才能畫出土壤粒徑分佈曲線，濕篩法與比重計試驗結果繪製成土壤粒徑分佈曲線，如圖 4.6 所示。圖 4.6 土壤粒徑分佈曲線顯示，200 號篩通過率大於 50%，依據統一土壤分類法，得知液性限度(LL)、塑性限度(PL)及塑性指數(PI)即可判斷土壤性質。

4.4.4 阿太堡試驗



阿太堡試驗之結果，可以得到三個土壤指標性質，分別是液性限度(LL)、塑性限度(PL)及塑性指數(PI)，而液性限度(LL)及塑性限度(PL)為細粒土壤分類的指標。選取試驗場址通過 40 號篩以下的土壤進行阿太堡試驗，試驗結果顯示液性限度(LL)為 37.7%，塑性限度指數(PL)為 27.5%，塑性指數(PI)為 10.2%，依據統一土壤分類法判斷為 CL 低塑性黏土。

4.5 飽和壓密不排水三軸試驗

飽和壓密不排水三軸試驗可以得知土壤在飽和的狀態下，土壤的剪力強度參數摩擦角 ϕ ，作為之後非飽和土壤傍壓儀試驗結果，與非飽和土壤剪力強度參數作為比較。本試驗使用傍壓儀試驗場址 0.5m~1m 深度之土樣，採用濕夯法

進行重模試體製作，利用夯垂將試體夯實至要求的緊密度後，將三軸壓克力罩套上後，三軸試體經過排氣、飽和、壓密三個步驟完成後，最後進行剪動，將軸向應力、軸向應變、超額孔隙水壓在剪動過程中全程記錄下來，並計算三軸試體剪動破壞後的壓密排水體積，與壓密後的孔隙比。

交通大學光復校區-飽和壓密不排水三軸試驗結果如圖 4.7 所示，考慮到土樣接近地表，不宜使用過大的圍壓，因此試驗有效圍壓分別為 50kPa、75kPa、100kPa；壓密完成後量測剪動破壞的試體烘乾前後的重量，計算得到壓密後孔隙比分別為 0.76、0.78、0.8。當有效圍壓越大，軸差應力與激發之超額孔隙水壓越高。在剪動過程中激發之超額孔隙水壓，轉折點在軸向應變約 5% 以前，之後慢慢趨於穩定，軸向應變約 20% 試體不再產生變形；軸差應力之轉折點約在 1% 以前，之後出現應變軟化的行為，直到試體軸向應變達到 20%，應變軟化現象並未停止。

交通大學光復校區-應力路徑如圖 4.8 所示，在不同有效圍壓下，破壞包絡線能趨於一致，由破壞包絡線可得有效摩擦角 $\phi' = 33.37^\circ$ ，可與非飽和傍壓儀試驗分析得到的有效摩擦角 ϕ' 進行比較，得到基質吸力與有效摩擦角 ϕ' 的關係。

4.6 土壤水分特性曲線試驗

土壤水分特性曲線主要是觀察土壤在乾濕變換的過程中含水量與基質吸力的關係，可以得知非飽和土壤剪力強度吸力值的範圍。本試驗使用壓力板試驗

作為土壤水分特性曲線的量測方法，將試驗土樣重模至鋼環中，給予試驗土樣軸向應力直到試驗土樣達到飽和狀態後，即可開始施加基質吸力，本試驗施加基質吸力的控制條件為：試驗土樣之脫附段曲線施加之空氣壓力分別為 1、2、3、4、6、8、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、150、200、250、300kPa；試驗土樣之吸附段曲線 250、200、150、90、70、60、30、20、10、8、6、4、2、1 kPa，最後將試驗結果繪製成圖 4.9。

土壤水分特性曲線如圖 4.9 所示，判斷試驗土樣為黏土。脫附段曲線一開始平穩下降，至 10kPa 時開始產生明顯變化，當吸力到達 300kPa 時曲線仍未趨於平緩，尚未達到殘餘體積含水量；吸附段曲線吸力降至 90kPa，體積含水量並未有明顯增加，直到吸力降至 30kPa 時，體積含水量開始明顯增加，在吸力降至 2kPa 時才趨於平緩。從吸附段曲線與脫附段曲線之初始體積含水量可以看出有明顯遲滯現象。吸附段曲線在 30kPa 變化到 2kPa 的過程中吸入大量水分，因此可推估試驗土樣進氣吸力值約為 30kPa~2kPa。

4.7 非飽和傍壓儀試驗程序

本試驗地點於交通大學光復校區內，傍壓儀試驗施作於土壤，預計試驗深度位於 3m 內的非飽和土層，每 0.75m 施作一組傍壓儀試驗，試驗施作深度為 0.75m、1.5m、2.25m。為了得到非飽和傍壓儀試驗試驗結果，在相同的土層深度不同的基質吸力情況下，各進行一組傍壓儀試驗結果作為比較，一共施作 9

組傍壓儀試驗。

4.7.1 試驗孔位鑽掘

利用手動鑽掘工具如圖 4.10 所示，在預進行試驗位置鑽掘孔洞，鑽掘孔洞直徑 70mm，鑽掘深度依試驗深度而有所不同。傍壓儀本體長度為 1.5m，應變感測器位於傍壓儀本體 0.75m 處，因此試驗施作深度為 0.75m 時，鑽掘深度至地表下 1.5m。同理，試驗施作深度為 1.5m、2.25m 時，需要將孔洞鑽掘至 2.25m、3m。

傍壓儀試驗位置孔洞鑽掘完成後，在孔洞位置附近再鑽掘一個孔洞用來埋設張力計，張力計埋設孔位位置與傍壓儀試驗孔位位置不宜過近，以免改變傍壓儀試驗孔位內部應力值，降低傍壓儀試驗結果的準確性，張力計與傍壓儀試驗施作距離如圖 4.11、4.12、4.13 所示。本試驗使用錐狀貫入式張力計，可將張力計埋設深度較深的位置，張力計埋設深度與傍壓儀試驗施作深度相同，目的是量測傍壓儀試驗施作深度土層內的基質吸力。

4.7.2 安全檢查

高壓氮氣瓶為傍壓儀試驗的壓力來源，屬於法定危險物品，搬運、放置動作需要小心，盡量避免產生碰撞，打開氮氣瓶瓶閥後操作人員需要在現場，才可在發生緊急情況時關掉氮氣瓶瓶閥。在試驗場址打開氮氣瓶壓力閥前需要固定住氮氣瓶，切勿直立放置且無任何固定，以防地震倒下。下一步檢查調壓閥

連接之高壓管線接頭是否鎖緊，避免試驗進行中管線漏氣；檢查傍壓儀試驗所使用高壓與低壓調壓閥是否關閉，以免過高的壓力一下湧入傍壓儀本體內，造成儀器損壞或發生爆炸的危險。

4.7.3 光纖訊號檢測

傍壓儀改良後使用光纖光柵作為應變計(strain gage)，與安裝在傍壓儀本體光纖式壓力計光柵串接，利用光纖解讀儀讀取壓力計與應變計光柵的波長。光纖光柵的強度訊號可能因為光纖線曲率過大、光纖接頭不乾淨，使得光纖光柵強度過低，在傍壓儀試驗進行中，光纖光柵強度甚至於有消失的可能。

光纖解讀儀讀取壓力計與應變計光柵的波長，如有光纖光柵強度過低的現象，使用酒精棉片沾濕酒精並擦拭光纖接頭，注意光纖線上是否放置重物或過度彎曲，光纖光柵訊號強度一切檢查無誤後方始進行試驗。

4.7.4 試驗壓力控制程序

傍壓儀試驗壓力控制分為應力控制與應變控制，本試驗採用應力控制，藉由施加壓力量測土壤變形行為。試驗開始進行時，首先打開氮氣瓶的氣閥，確保壓力來源，再打開高壓調壓閥，考慮到本試驗施作於強度較低土壤，讓高壓調壓閥提供 1 MPa 的壓力經高壓管線至低壓調壓閥，最後經由低壓調壓閥控制傍壓儀試驗每一階壓力增量所需的壓力。

本試驗每一階施加壓力增量約為 10 kPa，維持一分鐘後方可進行增加下一

階壓力，當壓力加至 200 kPa 至 400 kPa 時，停止加壓並待潛變完成至少十分鐘後，進行加壓減壓試驗，過程中以緩慢的速度控制調壓閥減少壓力，減壓壓力範圍 50 kPa 至 100 kPa，減壓完成後再進行加壓的動作，同樣以緩慢的速度控制調壓閥增加壓力至減壓前的壓力，待完成加壓減壓試驗或當應變量達至最大應變量時(大於 20mm)，停止加壓並維持壓力待潛變完成後依加壓之增量速率緩慢解壓至試驗結束。

4.7.5 改變試驗場址基質吸力

為了得到不同基質吸力情況下傍壓儀試驗結果，必須強制改變試驗場址的基質吸力。改變試驗場址的基質吸力，需要改變試驗場址的土壤含水量，當遇到降雨的情況，雨水滲入土層中使得土壤基質吸力隨著含水量之增加而逐漸下降，但大自然天候因素並不是人力所能控制，只好在試驗場址地表上大量灑水，強制改變地表下土壤含水量，此外並無其它改變基質吸力的方法。

表 4.1 含水量試驗結果

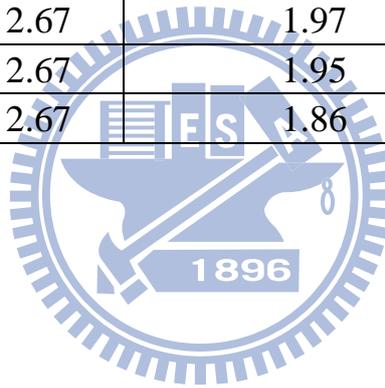
| 基質吸力(kPa) | 土壤深度(m) | 含水量 w (%) | 孔隙比 e |
|-----------|---------|-----------|-------|
| 10 | 0.75 | 22 | 0.6 |
| 4 | 0.75 | 25 | 0.66 |
| 2 | 0.75 | 30 | 0.8 |
| 18 | 1.5 | 26 | 0.74 |
| 8 | 1.5 | 29 | 0.84 |
| 4 | 1.5 | 34 | 0.94 |
| 18 | 2.25 | 22 | 0.63 |
| 8 | 2.25 | 26 | 0.7 |
| 4 | 2.25 | 31 | 0.84 |

表 4.2 體積含水量與飽和度結果

| 基質吸力(kPa) | 土壤深度(m) | 體積含水量 θ (%) | 飽和度 S (%) |
|-----------|---------|--------------------|-----------|
| 10 | 0.75 | 36 | 92.62 |
| 4 | 0.75 | 38 | 96.16 |
| 2 | 0.75 | 43 | 97.32 |
| 18 | 1.5 | 40 | 93.40 |
| 8 | 1.5 | 41 | 94.64 |
| 4 | 1.5 | 46 | 96.19 |
| 18 | 2.25 | 36 | 94.18 |
| 8 | 2.25 | 40 | 95.54 |
| 4 | 2.25 | 43 | 98.63 |

表 4.3 比重與乾濕單位重結果

| 基質吸力 (kPa) | 土壤深度 (m) | 比重 G_s | 濕單位重 $\gamma_m(\text{g/cm}^3)$ | 乾單位重 $\gamma_d(\text{g/cm}^3)$ |
|---------------|-------------|----------|--------------------------------|--------------------------------|
| 10 | 0.75 | 2.58 | 1.94 | 1.58 |
| 4 | 0.75 | 2.58 | 1.93 | 1.55 |
| 2 | 0.75 | 2.58 | 1.86 | 1.42 |
| 18 | 1.5 | 2.6 | 1.88 | 1.48 |
| 8 | 1.5 | 2.6 | 1.83 | 1.39 |
| 4 | 1.5 | 2.6 | 1.8 | 1.33 |
| 18 | 2.25 | 2.67 | 1.97 | 1.6 |
| 8 | 2.25 | 2.67 | 1.95 | 1.54 |
| 4 | 2.25 | 2.67 | 1.86 | 1.42 |



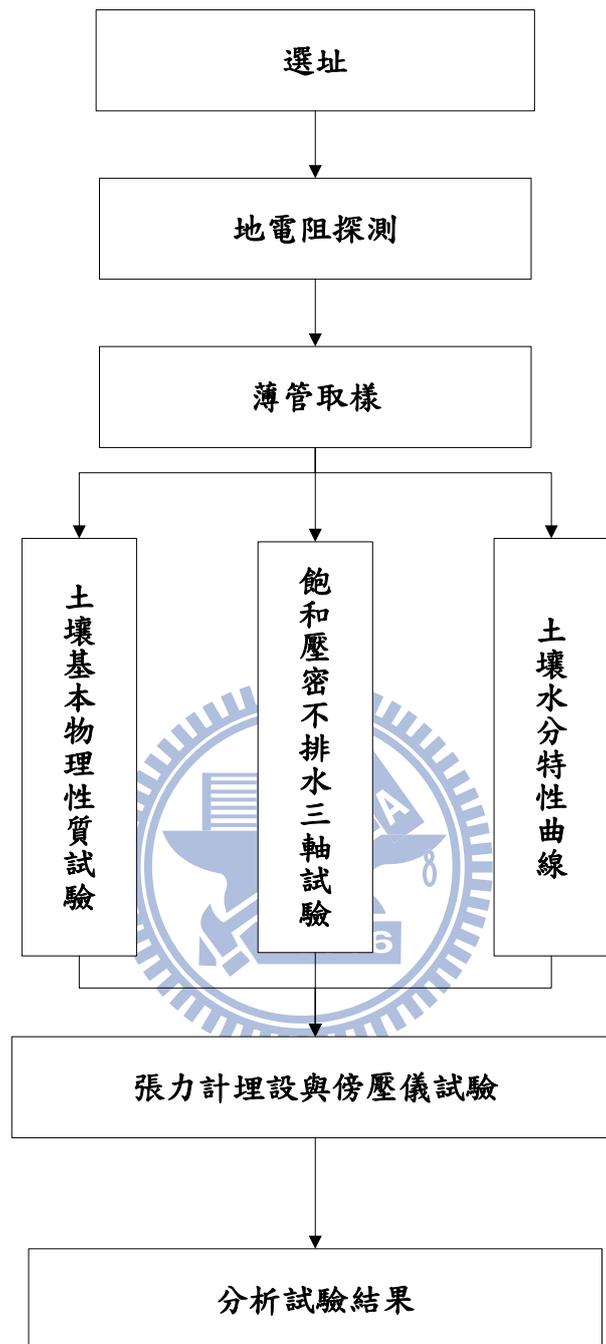


圖 4.1 試驗規劃流程圖



圖 4.2 交通大學光復校區試驗位置圖

Inverted Resistivity Image

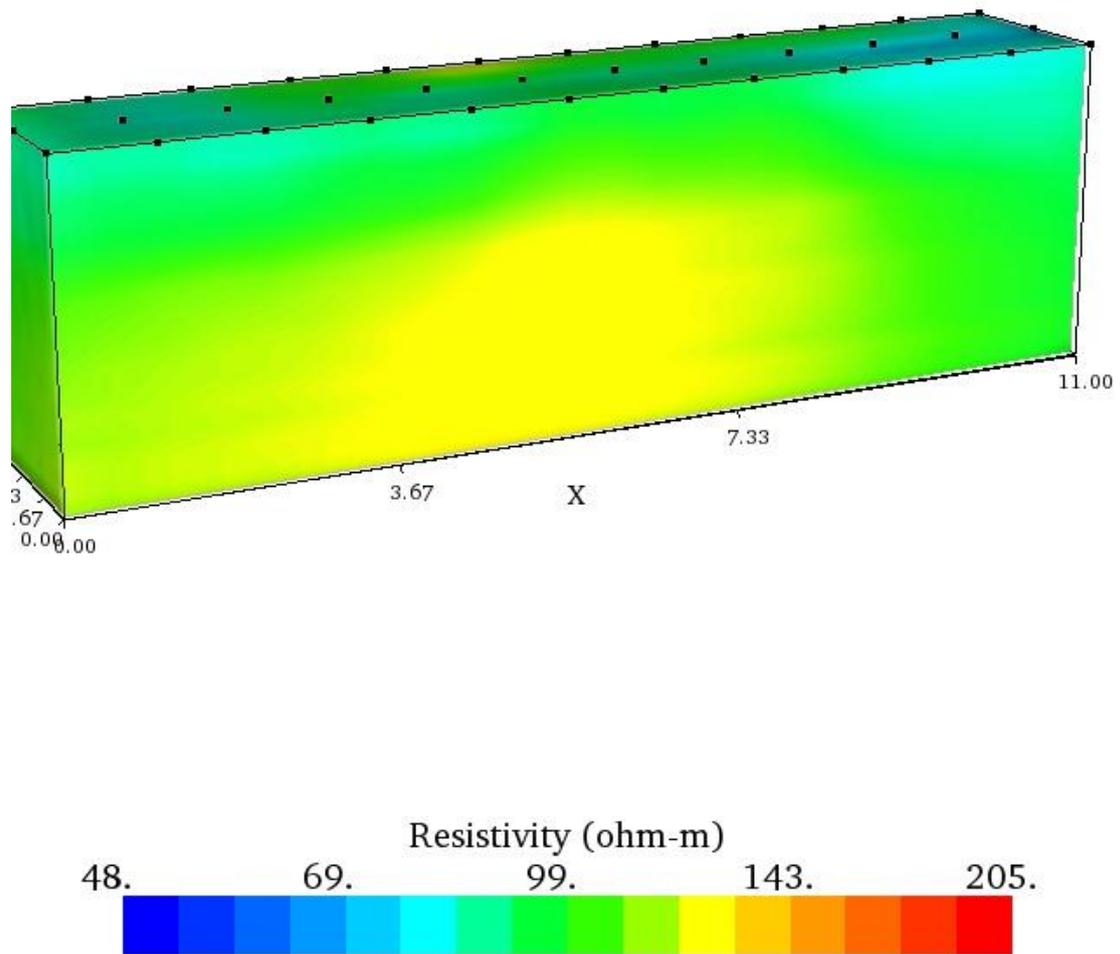


圖 4.3 試驗場址地電阻分佈剖面圖



圖 4.4 薄管取得土樣



圖 4.5 貫入式取土器

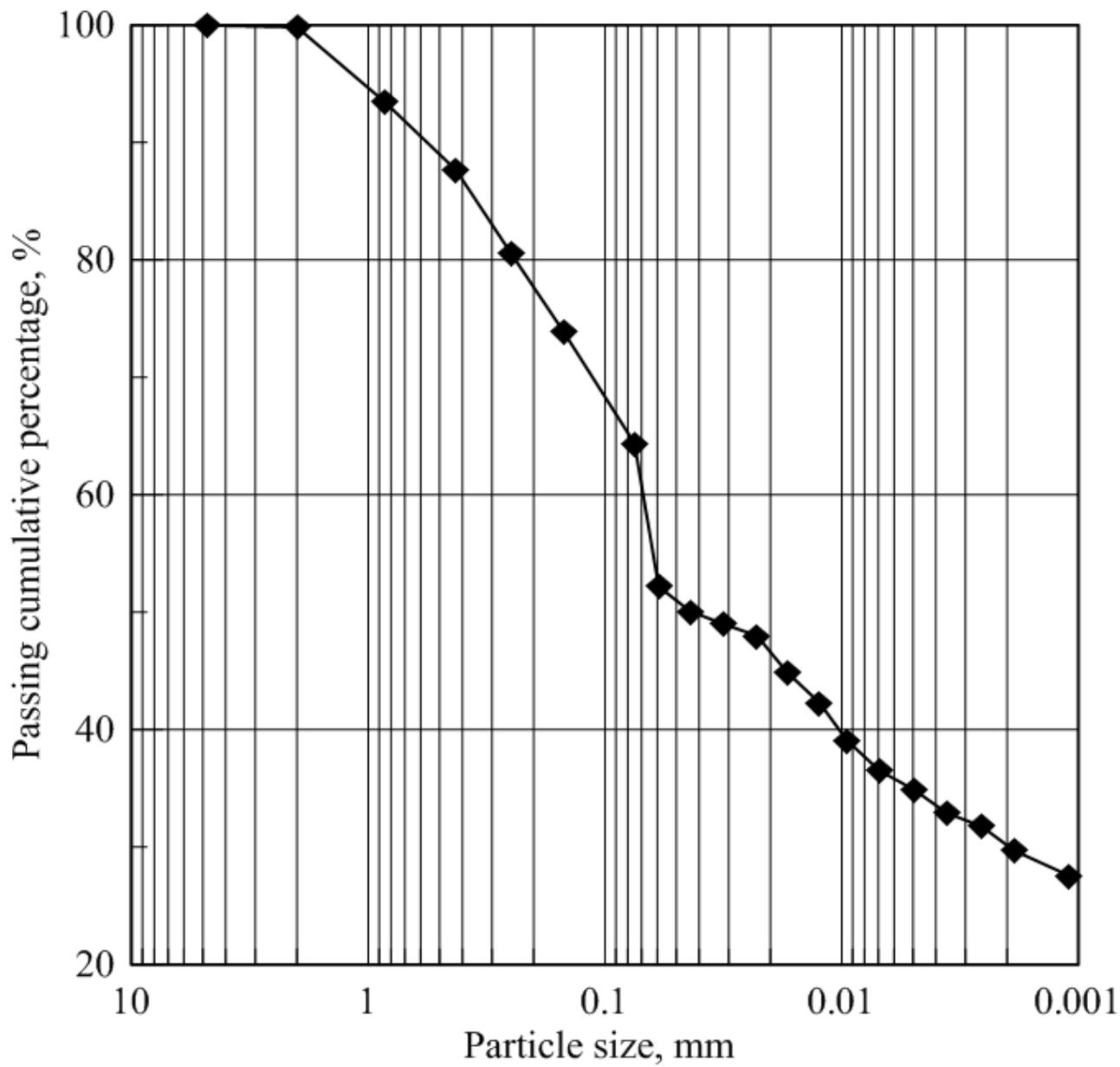


圖 4.6 土壤粒徑分佈曲線

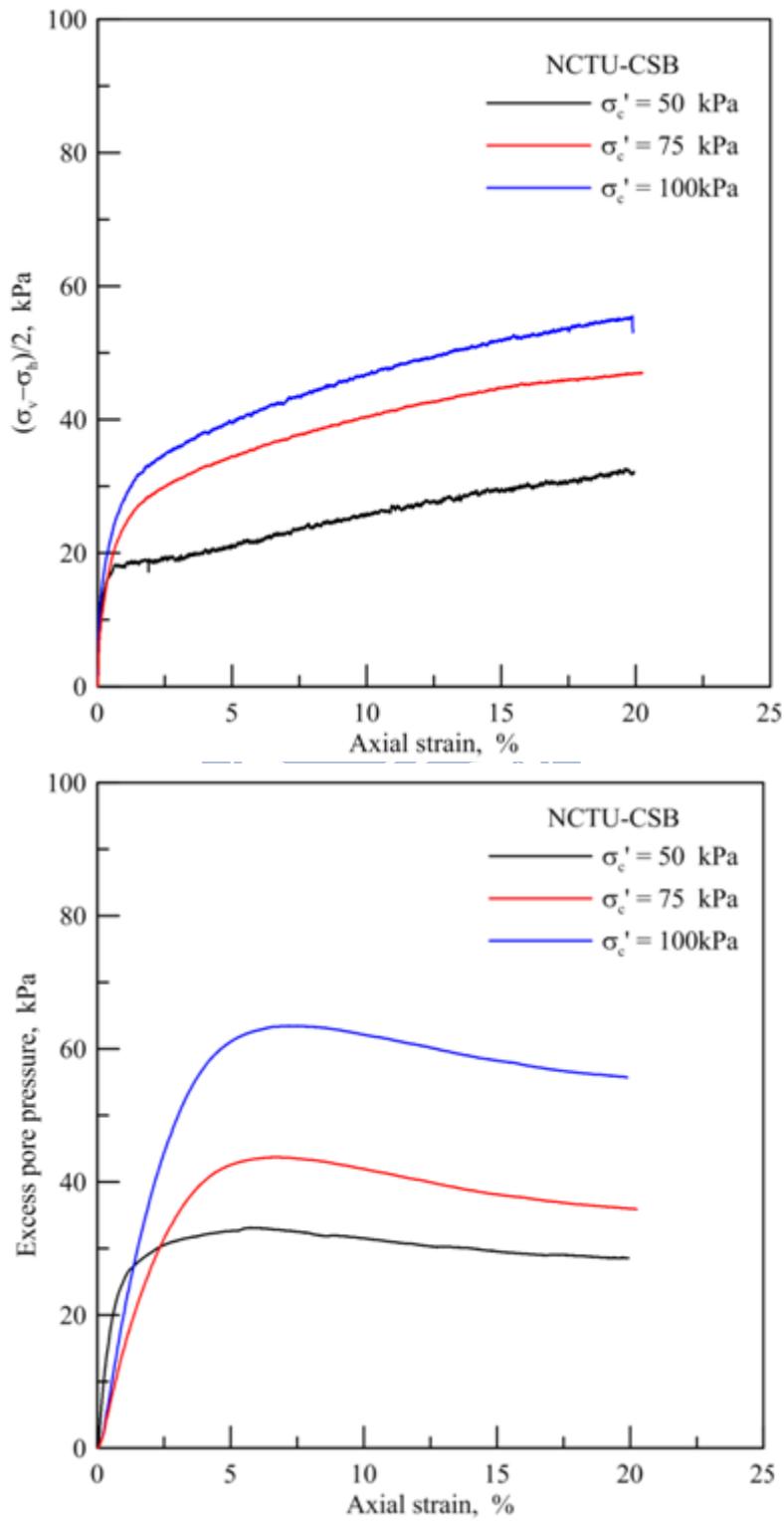


圖 4.7 交通大學光復校區-飽和壓密不排水試驗結果

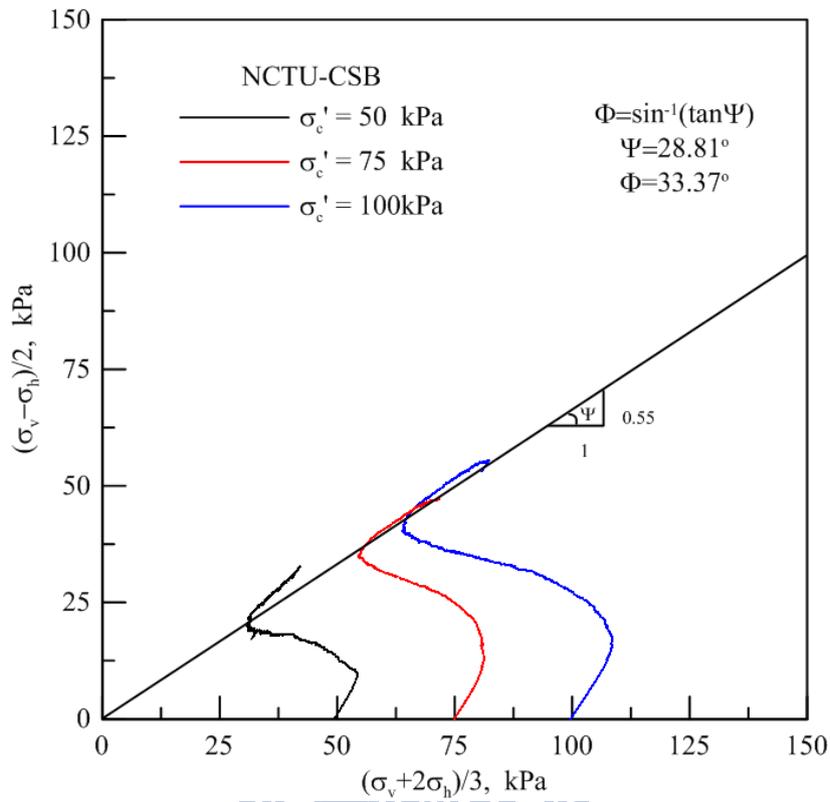


圖 4-8 交通大學光復校區-應力路徑圖有效摩擦角 $\phi' = 33.37^\circ$

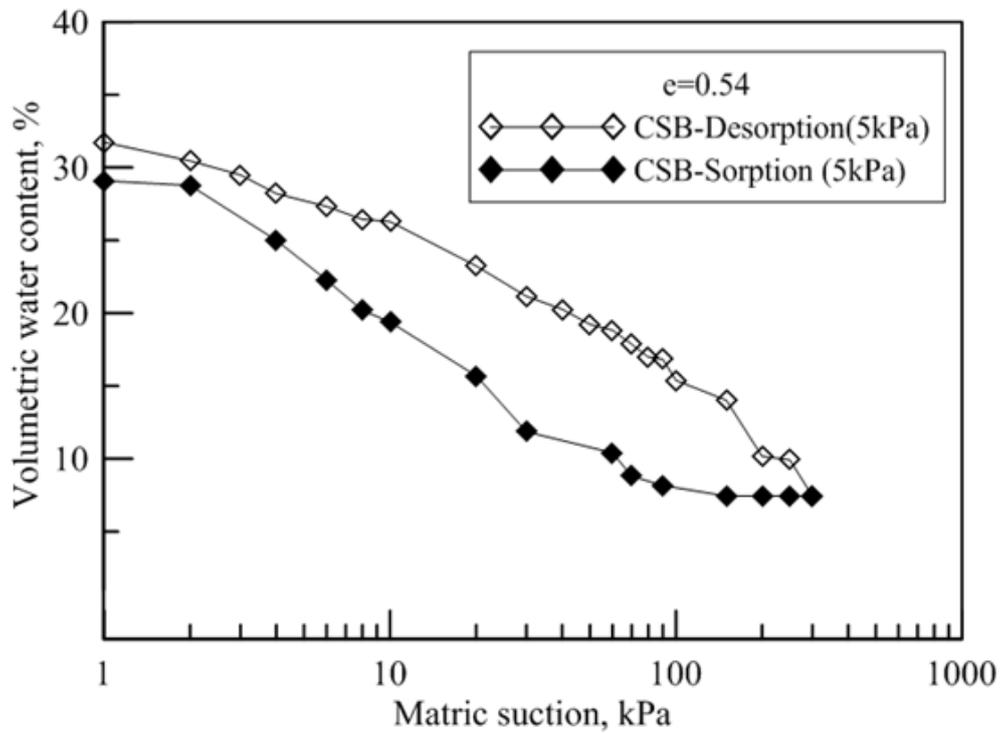


圖 4.9 土壤水分特性曲線試驗結果



圖 4.10 手動鑽掘工具

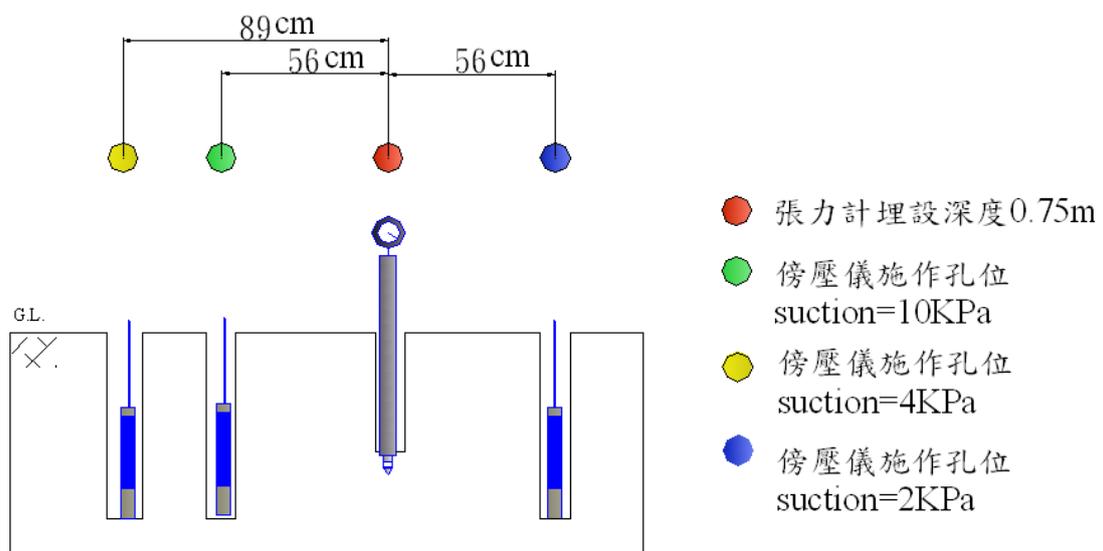


圖 4.11 張力計與傍壓儀試驗施作孔位距離(0.75m)

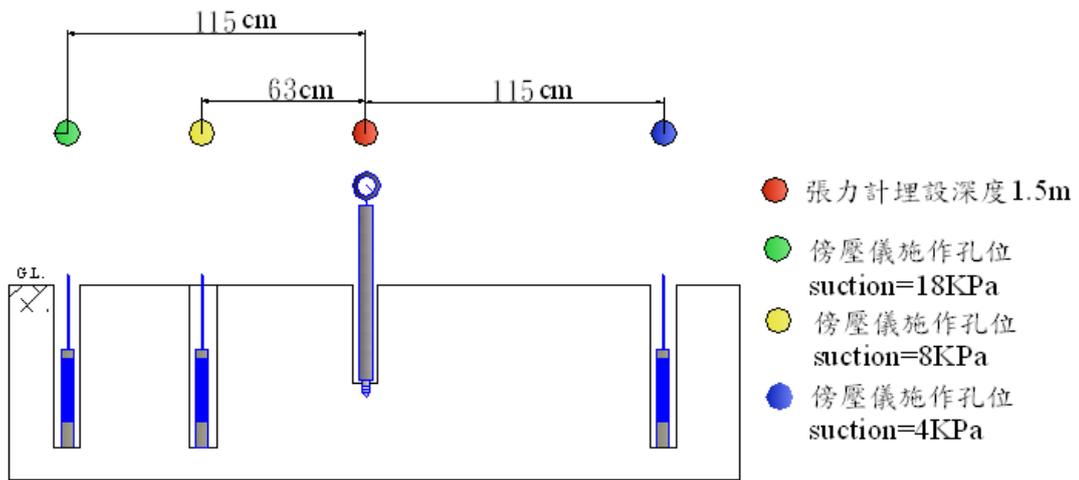


圖 4.12 張力計與傍壓儀試驗施作孔位距離(1.5m)

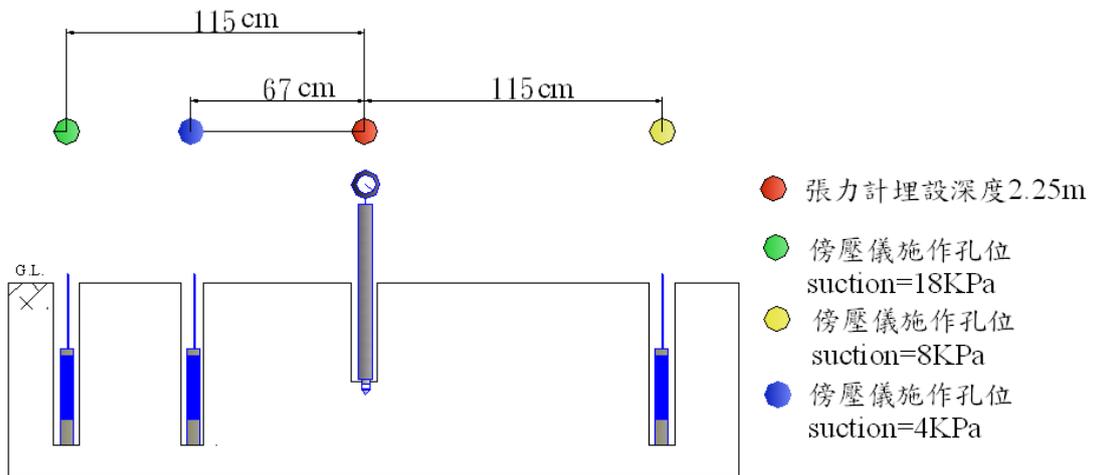


圖 4.13 張力計與傍壓儀試驗施作孔位距離(2.25m)

第五章 試驗結果與討論

本章就規劃之非飽和傍壓儀試驗結果進行討論，首先展示傍壓儀施作深度 0.75m、1.5m、2.25m 試驗結果，然後分析加壓減壓試驗結果得到的剪力遞減曲線、剪力模數，最後利用傍壓儀試驗得到降伏壓力 P_f 與初始孔內壓力 P_0 之大小，求取非飽和土壤試驗參數 c' 、 ϕ' 、 ϕ^b ，並討論得到之試驗參數在不同的基質吸力情況下做比較與討論。

5.1 非飽和傍壓儀試驗結果

本試驗採用應力控制，當施加壓力於傍壓儀本體的應變感測器，可以得到每一階壓力與應變之關係，即為傍壓儀試驗結果；截取試驗結果每一階施加壓力增量30~60秒的應變量，並繪製成曲線，即為潛變曲線，從潛變曲線可以判斷出初始孔內壓力 P_0 、降伏壓力 P_f 、極限壓力 P_L 三個參數，表5.1為非飽和傍壓儀試驗參數。

5.1.1 傍壓儀施作深度 0.75m 試驗結果

本試驗施作深度為 0.75m，分別在基質吸力為 2kPa、4kPa 與 10kPa 的情況下，一共進行三組試驗，扣除薄膜修正後的試驗結果如圖 5.1 所示。潛變曲線如圖 5.2 所示，壓力傳至孔壁土壤，此時壓力為初始孔內壓力， P_0 分別為 40.6kPa (suction 為 2kPa)、43.3kPa(suction 為 4kPa)與 42.7144kPa(suction 為 10kPa)；持續

加壓至擬彈性線段開始產生塑性行為，此轉折點的壓力為降伏壓力， P_f 分別為 118kPa (suction 為 2kPa)、130kPa(suction 為 4kPa)與 130.0331kPa(suction 為 10kPa)；最後壓力達到傍壓儀允許之最大應變量(27%)，此時壓力為極限壓力 P_L ， P_L 分別為 366kPa (suction=2kPa)、411kPa(suction=4kPa)與 376kPa(suction=10kPa)。

從圖 5.2 潛變曲線來看，在不同基質吸力的情況下，試驗深度 0.75m 初始孔內應力 P_0 大小都約為 40kPa，有重複性。再往初始孔內應力 P_0 到降伏壓力 P_f 間的擬彈性段來看，試驗深度 0.75m 在基質吸力分別為 10kPa、4kPa、2kPa 情況下，三條不同基質吸力潛變曲線彈性線段接近重合，差別並沒有很大，直到降伏壓力 P_f 才開始有了分別。基質吸力大小為 4kPa、10kPa 的極限壓力 P_L 明顯比基質吸力大小 2kPa 極限壓力 P_L 來的高，明顯可以看出基質吸力影響土壤潛變量大小，當基質吸力越小，土壤得潛變量越高；反之，當基質吸力越大，土壤得潛變量越低。

5.1.2 傍壓儀施作深度 1.5m 試驗結果

本試驗施作深度為 1.5m，分別在基質吸力為 4kPa、8kPa 與 18kPa 的情況下，一共進行三組試驗，扣除薄膜修正後的試驗結果如圖 5.3 所示。潛變曲線如圖 5.4 所示，壓力傳至孔壁土壤，此時壓力為初始孔內應力， P_0 大小約為 40kPa；持續加壓至擬彈性線段開始產生塑性行為，此轉折點的壓力為降伏壓力， P_f 大小為 112kPa 至 115kPa 之間；最後壓力達到傍壓儀允許之最大應變量(27%)，此時壓力為極限壓力 P_L ， P_L 依據基質吸力由小到大分別為 269kPa、366kPa、與

376kPa。

從圖 5.4 潛變曲線來看，在不同基質吸力的情況下，試驗深度 1.5m 初始孔內應力 P_0 大小都約為 30~40kPa。再往初始孔內壓力 P_0 到降伏壓力 P_f 間的擬彈性段來看，試驗深度 1.5m 在基質吸力分別為 18kPa、8kPa、4kPa 情況下，三條不同基質吸力潛變曲線彈性線段接近重合，差別並沒有很大，直到降伏壓力 P_f 才開始有了分別。基質吸力大小為 18kPa、8kPa 的極限壓力 P_L 明顯比基質吸力大小 4kPa 極限壓力 P_L 來的高，明顯可以看出基質吸力影響土壤潛變量大小，當基質吸力越小，土壤得潛變量越高；反之，當基質吸力越大，土壤得潛變量越低。

5.1.3 傍壓儀施作深度 2.25m 試驗結果

本試驗施作深度為 2.25m，分別在基質吸力為 4kPa、8kPa 與 18kPa 的情況下，一共進行三組試驗，扣除薄膜修正後的試驗結果如圖 5.5 所示。潛變曲線如圖 5.6 所示，壓力傳至孔壁土壤，此時壓力為初始孔內應力， P_0 大小約為 39kPa；持續加壓至擬彈性線段開始產生塑性行為，此轉折點的壓力為降伏壓力， P_f 大小為 81kPa 至 83kPa 之間；最後壓力達到傍壓儀允許之最大應變量(27%)，此時壓力為極限壓力 P_L ，極限壓力 P_L 基質吸力大小為 4kPa 的極限壓力 P_L 明顯比基質吸力大小 8kPa、18kPa 極限壓力 P_L 來的高，初步判斷為手動鑽孔孔洞大小不一所導致。

從圖 5.6 潛變曲線來看，在不同基質吸力的情況下，試驗深度 1.5m 初始孔

內應力 P_0 大小都約為 30~40kPa。再往初始孔內應力 P_0 到降伏壓力 P_f 間的擬彈性段來看，試驗深度 1.5m 在基質吸力分別為 18kPa、8kPa、4kPa 情況下，三條不同基質吸力潛變曲線彈性線段接近重合，差別並沒有很大，基質吸力對土壤潛變量大小影響較低。

5.2 傍壓儀試驗結果與基質吸力

5.2.1 基質吸力與初始孔內壓力

初始孔內壓力 P_0 為壓力克服薄膜接觸到孔壁的真正壓力，也稱為現地應力。

圖 5.7 為傍壓儀施作深度 0.75m、1.5m、2.25m 與初始孔內壓力 P_0 之關係圖，從圖 5.7 觀察到不同基質吸力大小，對初始孔內壓力 P_0 值相差不多，但初始孔內壓力 P_0 有隨著基質吸力增加慢慢上升的趨勢。

5.2.2 基質吸力與降伏壓力

當壓力達到初始孔內壓力 P_0 後，持續加壓到某一大小的壓力，潛變曲線由擬彈性變成塑性曲線，此時的壓力轉折點為降伏壓力 P_f 或是潛變壓力。降伏壓力 P_f 為判斷土壤強度大小的指標性參數，當土壤強度越大則降伏壓力 P_f 越高；反之，當土壤強度越小則降伏壓力 P_f 越低。

圖 5.8 為傍壓儀施作深度 0.75m、1.5m、2.25m 與初始孔內壓力 P_f 之關係圖，從圖 5.8 可觀察到基質吸力大小與降伏壓力 P_f 相關，基質吸力較高的降伏壓力 P_f 大小高於基質吸力較低的降伏壓力 P_f 。圖 5.9 為傍壓儀施作深度 0.75m、1.5m、

2.25m 與 P_f-P_o 之關係圖，彈性區域徑向壓力大小會影響莫爾庫倫破壞分析結果，本試驗利用莫爾庫倫破壞準則求取非飽和土壤參數，故 P_f-P_o 大小對試驗結果影響甚大。從圖 5.9 可觀察到基質吸力大小與 P_f-P_o 相關，基質吸力較高的降伏壓力 P_f 大小高於基質吸力較低的 P_f-P_o 。

5.2.3 基質吸力與極限壓力

極限壓力為傍壓儀允許最大應變量之壓力，極限壓力 P_L 也是判斷土壤強度大小的指標性參數，當土壤強度越大則極限壓力 P_L 越高；反之，當土壤強度越小則極限壓力 P_L 越低。極限壓力 P_L 大小會受到鑽孔大小不一所影響，故要使用別的方法來分析土壤強度，但極限壓力 P_L 大小對於判斷土壤強度仍有一定的參考性。圖 5.10 為傍壓儀施作深度 0.75m、1.5m、2.25m 與極限壓力 P_L 之關係圖，從圖 5.10 看不出基質吸力大小對極限壓力 P_L 的影響。

Baguelin 等人 (1978) 提出淨極限壓力 P_L^* 的經驗法則，利用 P_L-P_o 之間的差值判斷黏土與砂土強度， P_L-P_o 之值與土壤強度大小有關。圖 5.11 為傍壓儀施作深度 0.75m、1.5m、2.25m 與極限壓力 P_L-P_o 之關係圖，從圖 5.11 看不出基質吸力大小對極限壓力 P_L-P_o 的影響。

5.3 加壓減壓試驗結果

每一組傍壓儀試驗，皆施作兩組加壓減壓試驗，得到加剪載回圈 Loop1 與 Loop2，利用加剪載回圈得到應力與應變的結果，可以求取土壤的平均剪力模數

G_{ur} 。Mancuso(2002)利用共振柱扭剪試驗進行土壤最大剪力模數 G_{max} 的量測，提到影響最大剪力模數 G_{max} 大小的主要因素為土壤結構與基質吸力，故對加減載回圈解壓段(unload-loop)進行剪力模數遞減曲線分析，再將剪力模數遞減曲線中小應變量測到的雜訊進行濾波處理，找出最大剪力模數 G_{max} 。

加壓減壓試驗分析出的剪力模數參數整理於表5.2，繪製最大剪力模數 G_{max} 與基質吸力的關係如圖5.12所示，最後同樣將傍壓儀試驗施作深度的平均剪模數 G_{ur} 繪製於圖5.13，並將圖5.12、圖5.13做回歸分析，分析剪力模數與基質吸力的相關性。

5.3.1 低通濾波分析參數選擇

本研究之低通濾波分析使用Wang (2007) 編寫Matlab程式碼，平整化剪力模數遞減曲線，截止頻率 ω_c 為影響低通濾波模數遞減曲線的最大因素，給予不同的截止頻率 ω_c 平整化剪力模數遞減曲線也會有所差異，Wang (2007)經過多次低通濾波分析，發現截止頻率 ω_c 在 $0.01 \pi \sim 2.4 \pi$ 間分析結果最為符合原始剪力模數遞減曲線。

使用試驗深度0.75m，基質吸力為2kPa的加壓減壓試驗加減載回圈Loop1與Loop2作分析，平整化剪力模數遞減曲線如圖5.14所示，發現Loop1與Loop2使用截止頻率 ω_c 在 $0.01 \pi \sim 2.4 \pi$ 模數遞減曲線差異不大，但使用截止頻率 ω_c 在 2.4π 模數遞減曲線的最大剪力模數 G_{max} 有向下方發展的現象，還可能會發生最大剪力模數 G_{max} 小於其他割線剪力模數的情況，如圖5.14減載回圈Loop1所示，故本研

究使用截止頻率 $\omega_c=0.01\pi$ 分析試驗深度0.75m、1.5m、2.25m剪力模數遞減曲線。

5.3.2 加壓減壓試驗深度 0.75m 試驗結果

本試驗施作深度為0.75m，分別在基質吸力為2kPa、4kPa與10kPa的情況下進行兩組試驗，每一組試驗會得到兩個加減載回圈Loop1與Loop2如圖5.15、圖5.16、圖5.17所示。加減載回圈可分為減壓段曲線(unload curve)與加壓段曲線(reload curve)，剪力模數遞減分析使用加減載回圈的減壓段曲線進行割線處理，從所取割線應力應變的關係得到剪力模數。割線處理減載回圈的得到剪力模數有遞減的現象，將割線處理所得剪力模數繪製於圖5.18。

加壓減壓載重試驗量測到的應變非常小，難免會量測到雜訊，這是無法避免的，從圖5.18來看剪力模數遞減曲線，剪應變越小剪力模數跳動的機率越大，難以判斷最大剪力模數 G_{max} ，故使用低通濾波(Low-pass filter)方法處理，過濾掉會使試驗結果失真的雜訊，將濾波後將剪力模數遞減曲線同樣繪製於圖5.19，得到最大剪力模數 G_{max} 。

剪力模數遞減曲線的遞減速率受到孔隙比、有效圍壓、PI值等影響，為了驗證剪力模數遞減曲線的遞減速率也會受到基質吸力大小的影響，將基質吸力為2kPa、4kPa與10kPa的剪力模數遞減曲線作正規化處理，割線剪力模數除以最大剪力模數以 G_{sn} 表示，並繪製於圖5.20，濾波處理後的正規化模數遞減曲線繪製於圖5.21。如圖5.20、圖5.21所示，正規化模數遞減曲線重複性較高，但仍然可

以看出基質吸力為2kPa的正規化模數遞減曲線有向右發展的趨勢，代表遞減速率較慢；而基質吸力為10kPa的正規化模數遞減曲線有向左發展的趨勢，代表遞減速率較快，判斷剪力模數遞減速率與基質吸力大小有關。

5.3.3 加壓減壓試驗深度 1.5m 試驗結果

本試驗施作深度為1.5m，分別在基質吸力為4kPa、8kPa與18kPa的情況下進行兩組試驗，每一組試驗會得到兩個加減載回圈Loop1與Loop2如圖5.22、圖5.23、圖5.24所示。加減載回圈可分為減壓段曲線(unload curve)與加壓段曲線(reload curve)，剪力模數遞減分析使用加減載回圈的減壓段曲線進行割線處理，從所取割線應力應變的關係得到剪力模數。割線處理減載回圈的得到剪力模數有遞減的現象，將割線處理所得剪力模數繪製於圖5.25。

加壓減壓載重試驗量測到的應變非常小，難免會量測到雜訊，這是無法避免的，從圖5.25來看剪力模數遞減曲線，應變越小剪力模數跳動的機率越大，難以判斷最大剪力模數 G_{max} ，故使用低通濾波(Low-pass filter)方法處理，過濾掉會使試驗結果失真的雜訊，將濾波後將剪力模數遞減曲線同樣繪製於圖5.26，得到最大剪力模數 G_{max} 。

剪力模數遞減曲線的遞減速率受到孔隙比、有效圍壓、PI值等影響，為了驗證剪力模數遞減曲線的遞減速率也會受到基質吸力大小的影響，將基質吸力為4kPa、8kPa與18kPa的剪力模數遞減曲線作正規化處理，割線剪力模數除以最大剪力模數以 G_{sn} 表示，並繪製於圖5.27，濾波處理後的正規化模數遞減曲線繪製

於圖5.28。如圖5.27、圖5.28所示，正規化模數遞減曲線重複性較高，但仍然可以看出基質吸力為4kPa的正規化模數遞減曲線有向右發展的趨勢，代表遞減速率較慢；而基質吸力為18kPa的正規化模數遞減曲線有向左發展的趨勢，代表遞減速率較快，判斷剪力模數遞減速率與基質吸力大小有關。

5.3.4 加壓減壓試驗深度 2.25m 試驗結果

本試驗施作深度為2.25m，分別在基質吸力為4kPa、8kPa與18kPa的情況下進行兩組試驗，每一組試驗會得到兩個加減載回圈Loop1與Loop2如圖5.29、圖5.30、圖5.31所示。加減載回圈可分為減壓段曲線(unload curve)與加壓段曲線(reload curve)，剪力模數遞減分析使用加減載回圈的減壓段曲線進行割線處理，從所取割線應力應變的關係得到剪力模數。割線處理減載回圈的得到剪力模數有遞減的現象，將割線處理所得剪力模數繪製於圖5.32。

加壓減壓載重試驗量測到的應變非常小，難免會量測到雜訊，這是無法避免的，從圖5.32來看剪力模數遞減曲線，應變越小剪力模數跳動的機率越大，難以判斷最大剪力模數 G_{max} ，故使用低通濾波(Low-pass filter)方法處理，過濾掉會使試驗結果失真的雜訊，將濾波後將剪力模數遞減曲線同樣繪製於圖5.33，得到最大剪力模數 G_{max} 。

剪力模數遞減曲線的遞減速率受到孔隙比、有效圍壓、PI值等影響，為了驗證剪力模數遞減曲線的遞減速率也會受到基質吸力大小的影響，將基質吸力為4kPa、8kPa與18kPa的剪力模數遞減曲線作正規化處理，割線剪力模數除以最大

剪力模數以 G_{sn} 表示，並繪製於圖5.34，濾波處理後的正規化模數遞減曲線繪製於圖5.35。如圖5.34、圖5.35所示，正規化模數遞減曲線重複性較高，但仍然可以看出基質吸力為4kPa的正規化模數遞減曲線有向右發展的趨勢，代表遞減速率較慢；而基質吸力為18kPa的正規化模數遞減曲線有向左發展的趨勢，代表遞減速率較快，判斷剪力模數遞減速率與基質吸力大小有關。

5.4 非飽和土壤參數分析結果

傍壓儀試驗結果由擴孔理論可以推算出土壤強度參數凝聚力 c 及摩擦角 ϕ ，求出凝聚力 c 及摩擦角 ϕ 的方法有許多種，本試驗使用Schnaid (2004)提出的降伏壓力法作為分析方法，分析理論以擴孔理論與莫爾庫倫破壞準則為基礎，找出降伏壓力 P_f 與初始孔內壓力 P_0 並繪製成莫爾圓，從破壞包絡線找出有效凝聚力 c' 及有效摩擦角 ϕ' 。

本研究為非飽和傍壓儀試驗，故可以找出基質吸力增加造成剪應力增加所對應的角度 ϕ^b 。分析出總凝聚力 c 與有效摩擦角 ϕ' 後，利用總凝聚力 c 與基質吸力的增加，求出非飽和土壤參數 ϕ^b ，最後將非飽和土壤參數分析結果結整理於表 5.3，配合飽和壓密不排水三軸試驗得到的有效摩擦角 ϕ' ，將試驗深度與有效摩擦角 ϕ' 、 ϕ^b 的關係繪製於圖 5.36。

Miller (2000)與 Schnaid (2004)兩位學者分別在粉土與風化花崗岩進行非飽和土壤傍壓儀試驗，將本論文的非飽和土壤參數 ϕ^b 與兩位學者非飽和土壤參數

ϕ^b 整理於表 5.4，並繪製圖 5.37 基質吸力改變量與非飽和土壤參數 ϕ^b 的關係。

5.4.1 試驗深度 0.75m 非飽和土壤參數

本節分析試驗施作深度為0.75m的非飽和土壤，三組在深度0.75m施作的傍壓儀試驗基質吸力為2kPa、4kPa與10kPa，降伏壓力 P_f 與初始孔內壓力 P_0 大小參照表5.1非飽和傍壓儀試驗參數，決定降伏壓力 P_f 與初始孔內壓力 P_0 數值後繪製成莫爾圓，利用莫爾庫倫破壞準則繪製出破壞包絡線如圖5.38所示，得到總凝聚力 c 大小分別為10.96kPa、11.172kPa、13.003kPa，有效摩擦角 ϕ' 為34.4°。

求出三組不同基質吸力的總凝聚力 c 數值後，便可以分析有效凝聚力 c' 非飽和土壤參數 ϕ^b ，將基質吸力2kPa、4kPa與10kPa對應總凝聚力 c 的關係繪至於圖5.39，圖5.39上三組不同基質吸力的點位做線性回歸分析後，取回歸直線的斜率，即可得到有效凝聚力 $c'=2.44\text{kPa}$ 與非飽和土壤參數 $\phi^b=14.89^\circ$ 。

5.4.2 試驗深度 1.5m 非飽和土壤參數

本節分析試驗施作深度為1.5m的非飽和土壤，三組在深度1.5m施作的傍壓儀試驗基質吸力為4kPa、8kPa與18kPa，降伏壓力 P_f 與初始孔內壓力 P_0 大小參照表5.1非飽和傍壓儀試驗參數，決定降伏壓力 P_f 與初始孔內壓力 P_0 數值後繪製成莫爾圓，利用莫爾庫倫破壞準則繪製出破壞包絡線如圖5.40所示，得到總凝聚力 c 大小分別為4.65kPa、7kPa、8.78kPa，有效摩擦角 ϕ' 為31°。

求出三組不同基質吸力的總凝聚力 c 數值後，便可以分析有效凝聚力 c' 與非

飽和土壤參數 ϕ^b ，將基質吸力4kPa、8kPa與18kPa對應總凝聚力 c 的關係繪至於圖5.41，圖5.41上三組不同基質吸力的點位做線性回歸分析後，取回歸直線的斜率，即可得到有效凝聚力 $c'=6.13\text{kPa}$ 與非飽和土壤參數 $\phi^b=15.25^\circ$ 。

5.4.3 試驗深度 2.25m 非飽和土壤參數

本節分析試驗施作深度為2.25m的非飽和土壤，三組在深度2.25m施作的傍壓儀試驗基質吸力為4kPa、8kPa與18kPa，降伏壓力 P_f 與初始孔內壓力 P_o 大小參照表5.1非飽和傍壓儀試驗參數，決定降伏壓力 P_f 與初始孔內壓力 P_o 數值後繪製成莫爾圓，利用莫爾庫倫破壞準則繪製出破壞包絡線如圖5.42所示，得到總凝聚力 c 大小分別為1.935kPa、5.66kPa、5.74kPa，有效摩擦角 ϕ' 為 29.6° 。

將基質吸力4kPa、8kPa與18kPa對應總凝聚力 c 的關係繪製於圖5.43，圖5.43上三組不同基質吸力的點位做線性回歸分析後，取回歸直線的斜率，即可得到有效凝聚力 $c'=2.2344\text{kPa}$ 與非飽和土壤參數 $\phi^b=12.46^\circ$ 。

表5.1 非飽和傍壓儀試驗參數

| 基質吸力 (kPa) | 深度 (m) | P_o (kPa) | P_f (kPa) | P_L (kPa) | $P_f - P_o$ (kPa) | $P_L - P_o$ (kPa) |
|---------------|-----------|-------------|-------------|-------------|----------------------|----------------------|
| 10 | 0.75 | 48 | 118 | 366 | 70 | 318 |
| 4 | 0.75 | 53 | 130 | 411 | 77 | 358 |
| 2 | 0.75 | 53.93565 | 130.0331 | 376.9141 | 76.09744 | 322.9784 |
| 18 | 1.5 | 41.06935 | 112.8195 | 269.7734 | 71.75011 | 228.704 |
| 8 | 1.5 | 42.58948 | 113.0946 | 312.891 | 70.50509 | 270.3015 |
| 4 | 1.5 | 45.69168 | 118.5967 | 322.5569 | 72.90499 | 276.8652 |
| 18 | 2.25 | 24.90115 | 71.46408 | 272.2101 | 46.56294 | 247.3089 |
| 8 | 2.25 | 29.90934 | 81.75807 | 227.5993 | 51.84873 | 197.6899 |
| 4 | 2.25 | 31.54174 | 83.30763 | 269.5989 | 51.76589 | 238.0571 |

表5.2 加壓減壓試驗剪力模數參數

| 基質吸力 (kPa) | 土壤深度 (m) | G_o (MPa) | | G_o (MPa) | G_{ur} (MPa) | | G_{ur} (MPa) |
|---------------|-------------|-------------|--------|-------------|----------------|-------|----------------|
| | | Loop1 | Loop2 | | Loop1 | Loop2 | |
| 10 | 0.75 | 41.96 | 42.596 | 41.75 | 14.77 | 14.09 | 14.43 |
| 4 | 0.75 | 36 | 37 | 36.5 | 14.18 | 14.27 | 14.22 |
| 2 | 0.75 | 35 | 36 | 35.5 | 18.78 | 15.41 | 17.1 |
| 18 | 1.5 | 44.1 | 51.4 | 47.75 | 14.55 | 13.28 | 13.9 |
| 8 | 1.5 | 38.9 | 40.2 | 39.55 | 14.37 | 12.39 | 13.38 |
| 4 | 1.5 | 34.9 | 36.7 | 35.8 | 12.31 | 12.26 | 12.28 |
| 18 | 2.25 | 51 | 57 | 54 | 16.53 | 12.74 | 14.6 |
| 8 | 2.25 | 36.1 | 42.1 | 39.1 | 12.17 | 13.41 | 12.79 |
| 4 | 2.25 | 24 | 30 | 27 | 9.37 | 8.77 | 9.07 |

表5.3 非飽和土壤參數

| 深度(m) | c' , kPa | ϕ' | ϕ^b |
|-------|------------|---------|----------|
| 0.75 | 10.2886 | 34.4 | 14.89 |
| 1.5 | 4.085 | 31.2 | 15.25 |
| 2.25 | 2.23 | 29.6 | 12.46 |

表5.4 非飽和土壤傍壓儀試驗結果比較

| c' (kPa) | ϕ' | ϕ^b | Δ suction (kPa) | 土壤種類 | 試驗方法 | 試驗者 |
|------------|---------|----------|------------------------|------|------|----------------|
| 10.2886 | 34.4 | 14.89 | 8 | clay | PMT | 黃秉濬 |
| 4.085 | 31.2 | 15.25 | 14 | clay | PMT | 黃秉濬 |
| 2.2344 | 29.6 | 12.46 | 14 | clay | PMT | 黃秉濬 |
| 5 | 31 | 27.5 | 53 | silt | PMT | Miller (2000) |
| 10 | 43 | 11.3 | 56 | RG | PMT | Schnaid (2004) |
| 1 | 43 | 17.9 | 66 | YG | PMT | Schnaid (2004) |

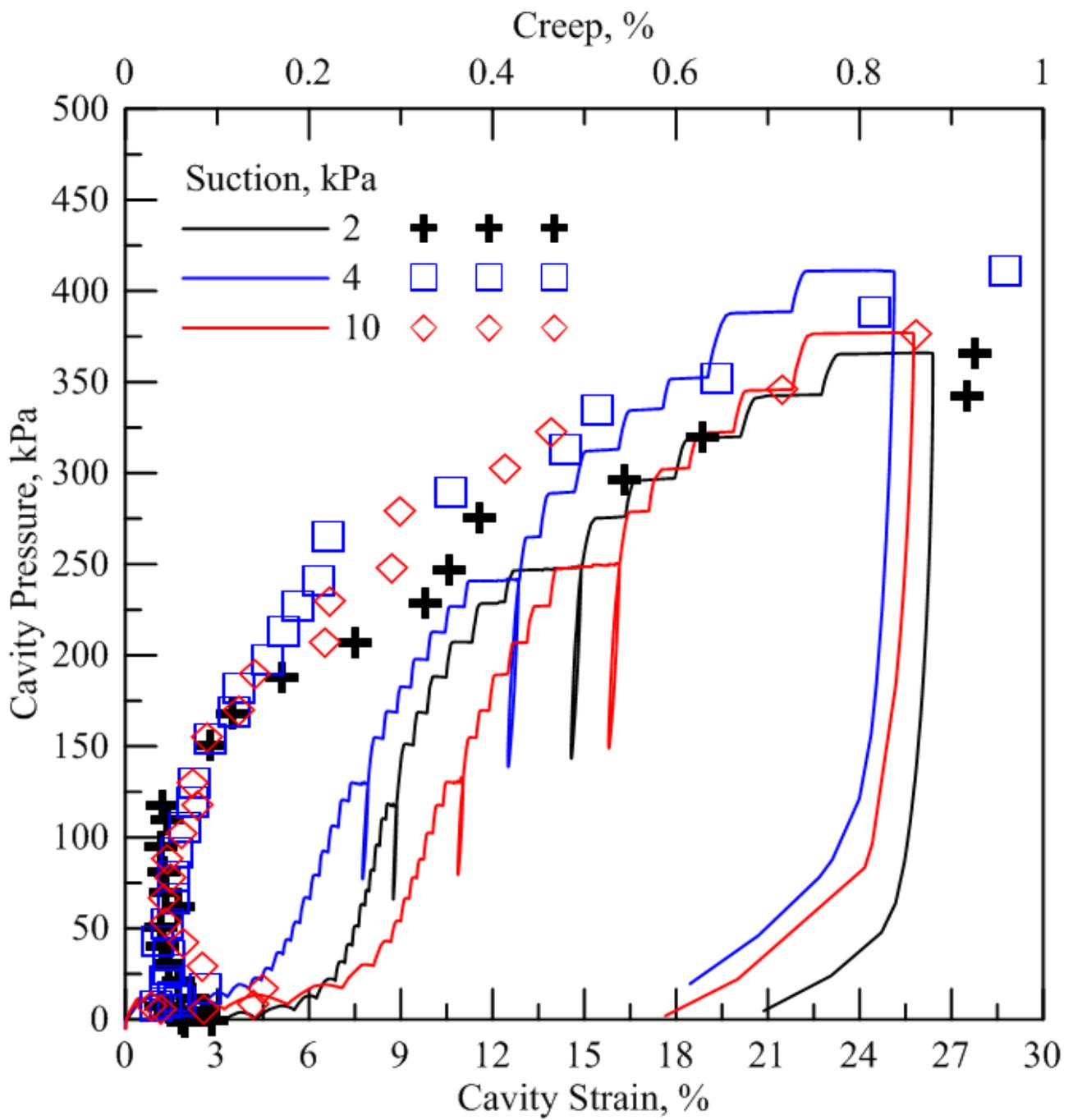


圖 5.1 試驗深度 0.75m 非飽和傍壓儀試驗結果

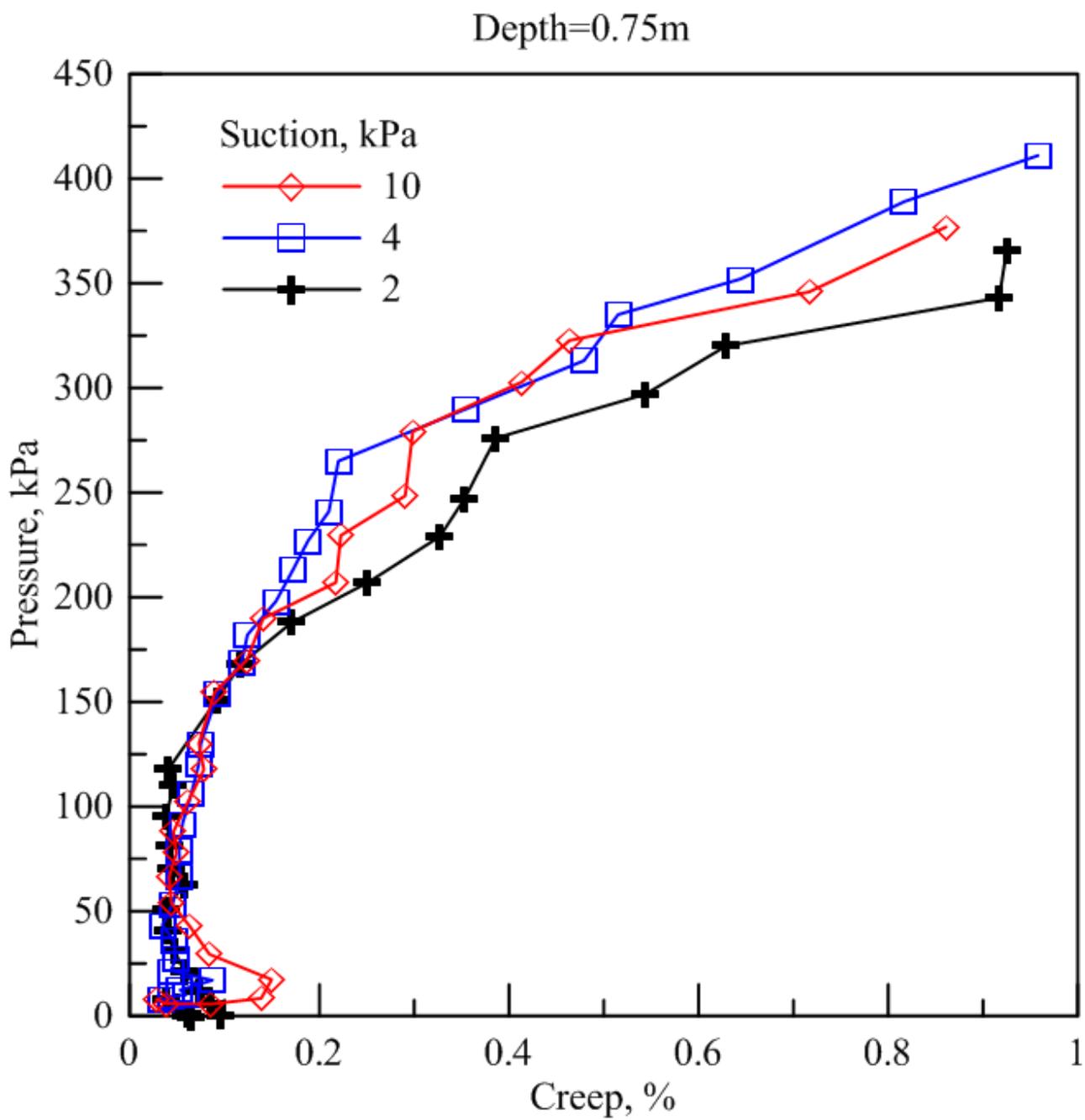


圖 5.2 試驗深度 0.75m 潛變曲線

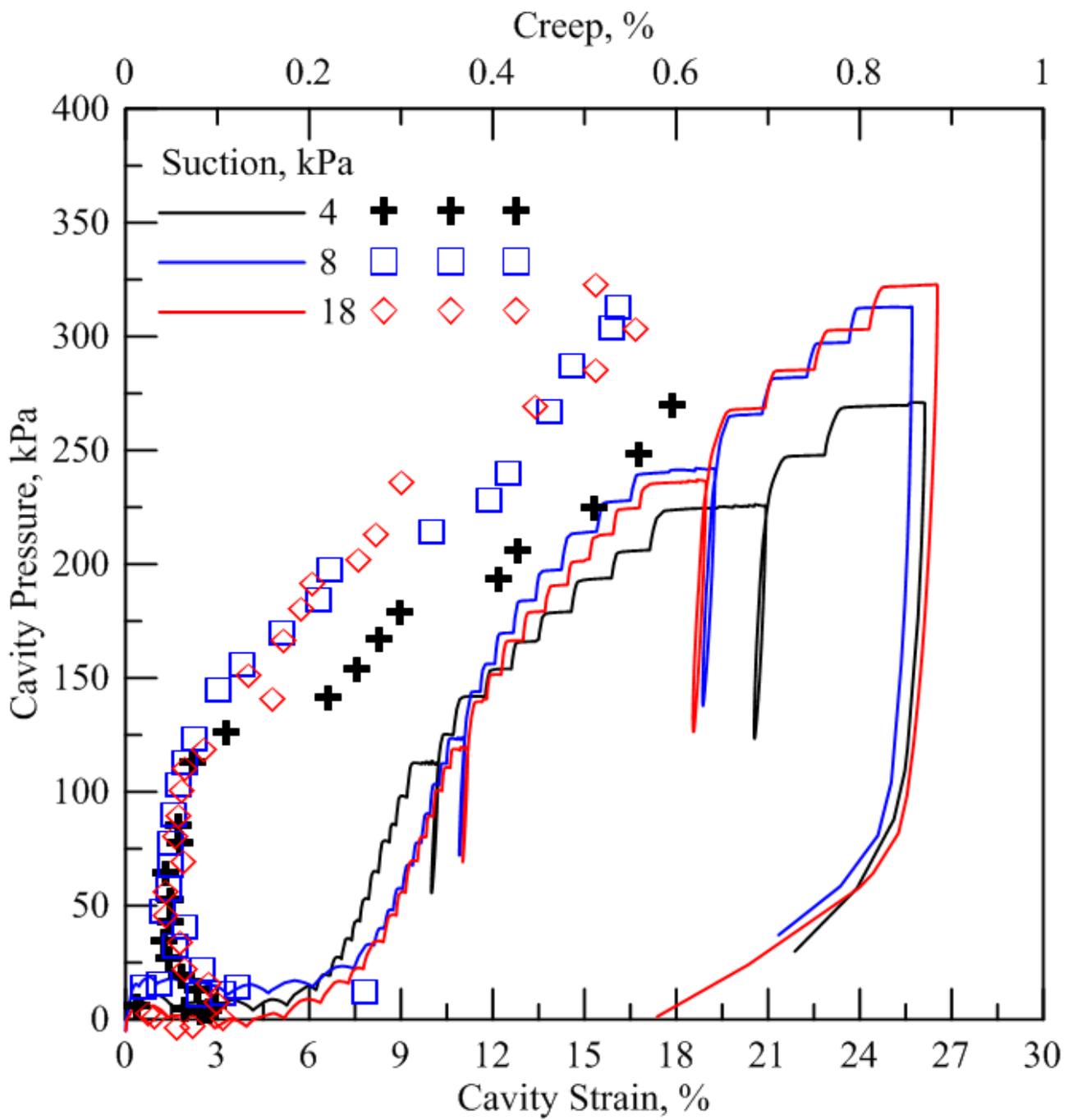


圖 5.3 試驗深度 1.5m 非飽和傍壓儀試驗結果

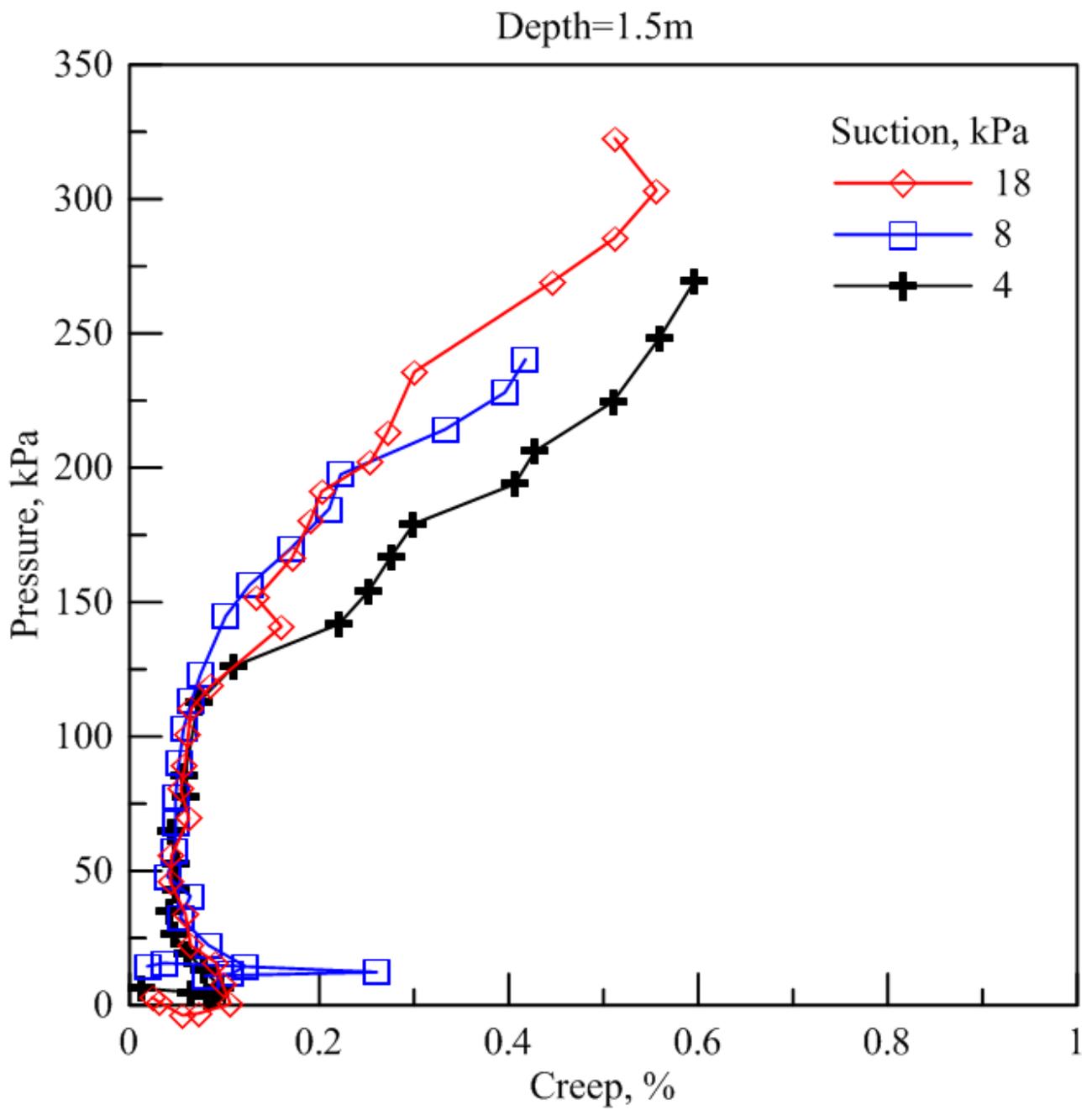


圖 5.4 試驗深度 1.5m 潛變曲線

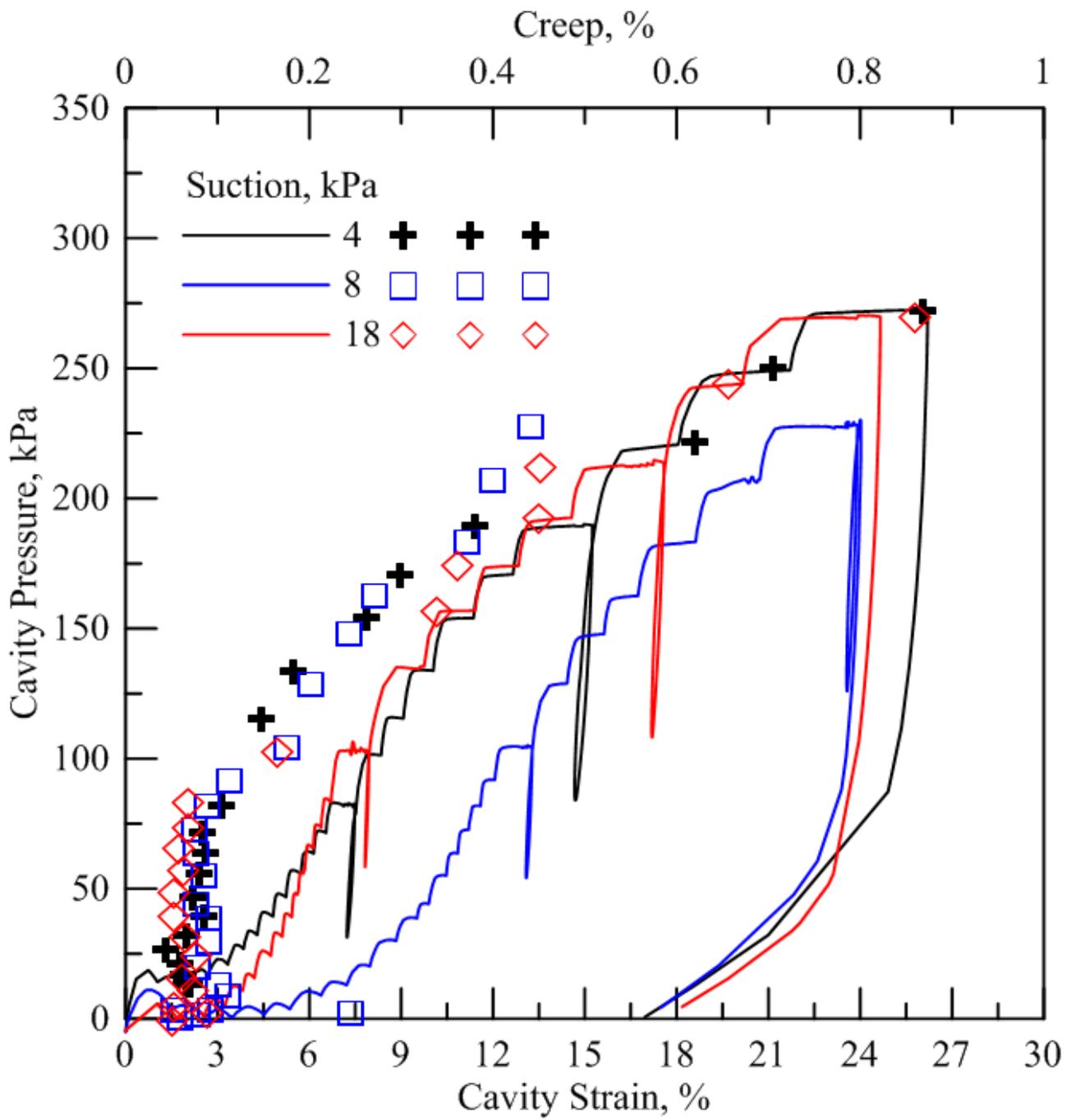


圖 5.5 試驗深度 2.25m 非飽和傍壓儀試驗結果

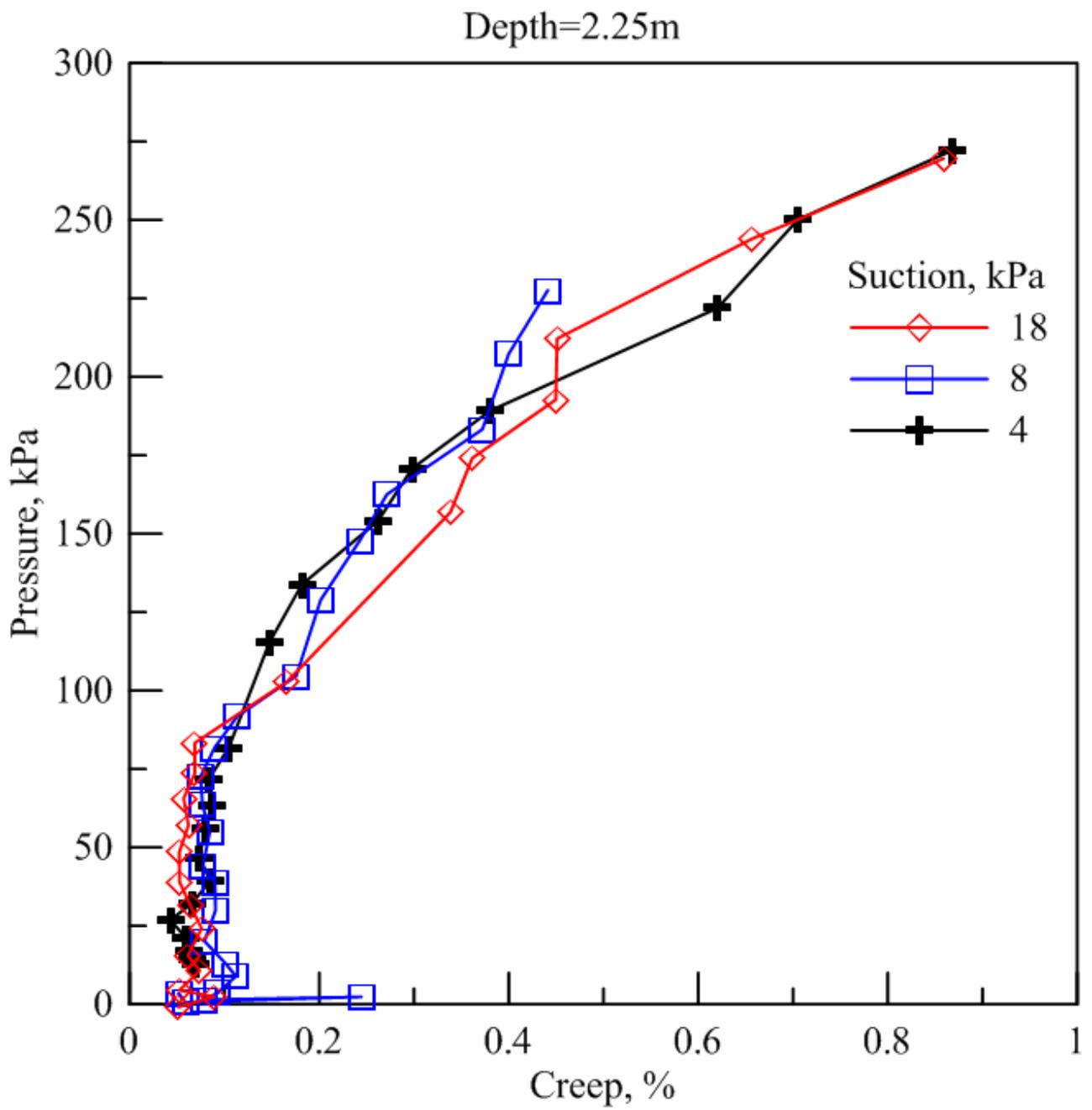


圖 5.6 試驗深度 2.25m 潛變曲線

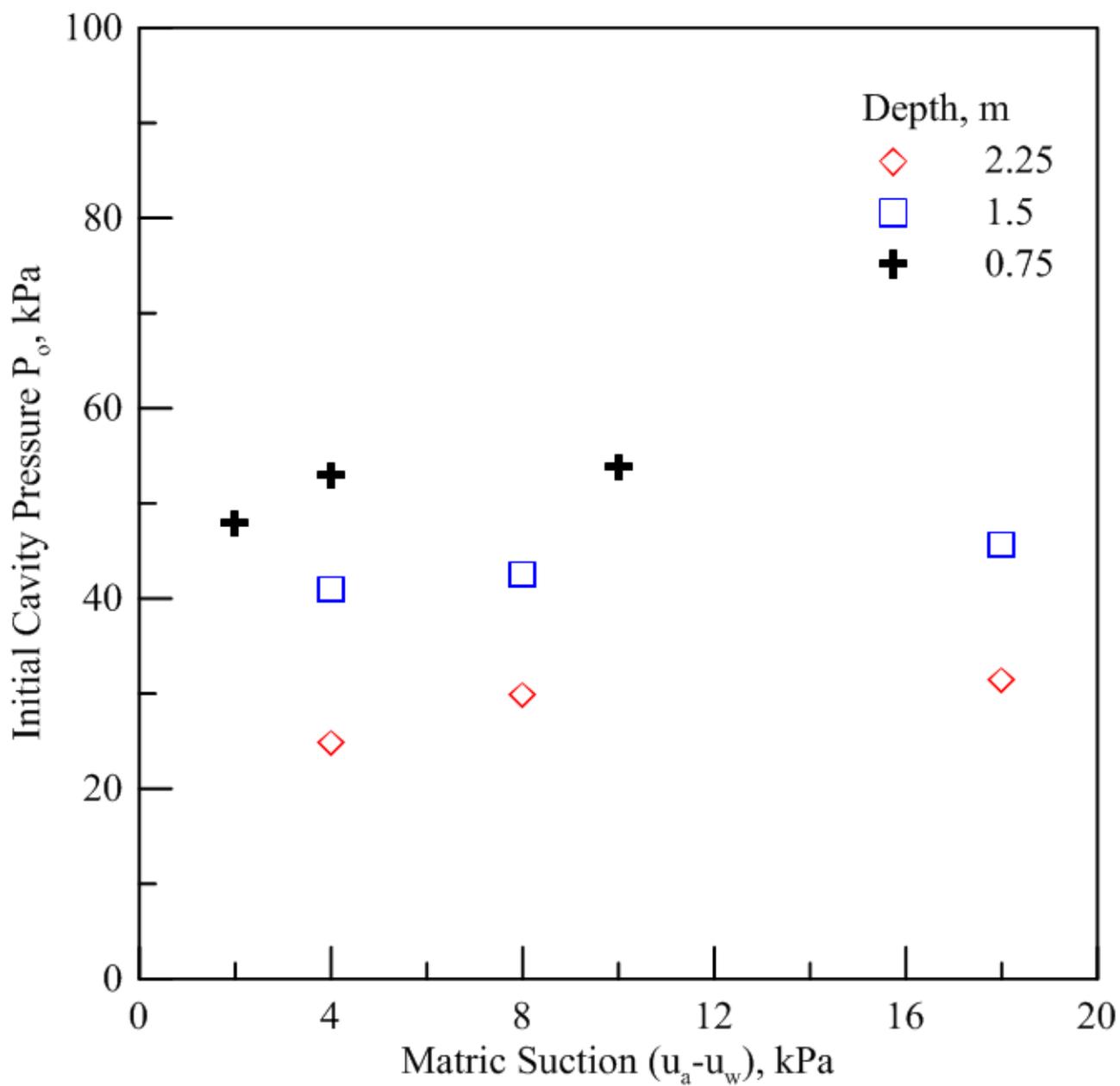


圖 5.7 基質吸力與初始孔內壓力關係圖

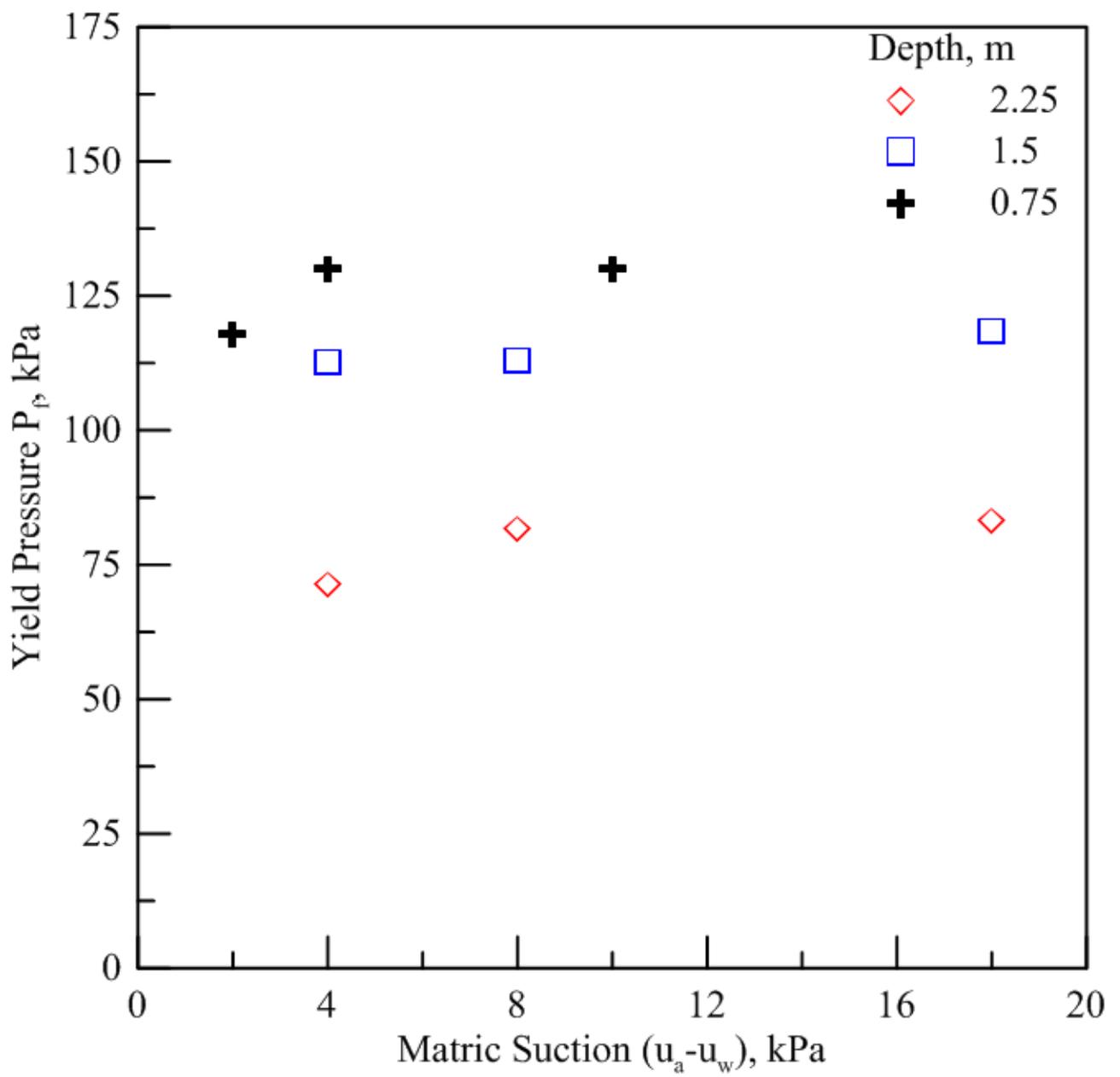


圖 5.8 基質吸力與降伏壓力關係圖

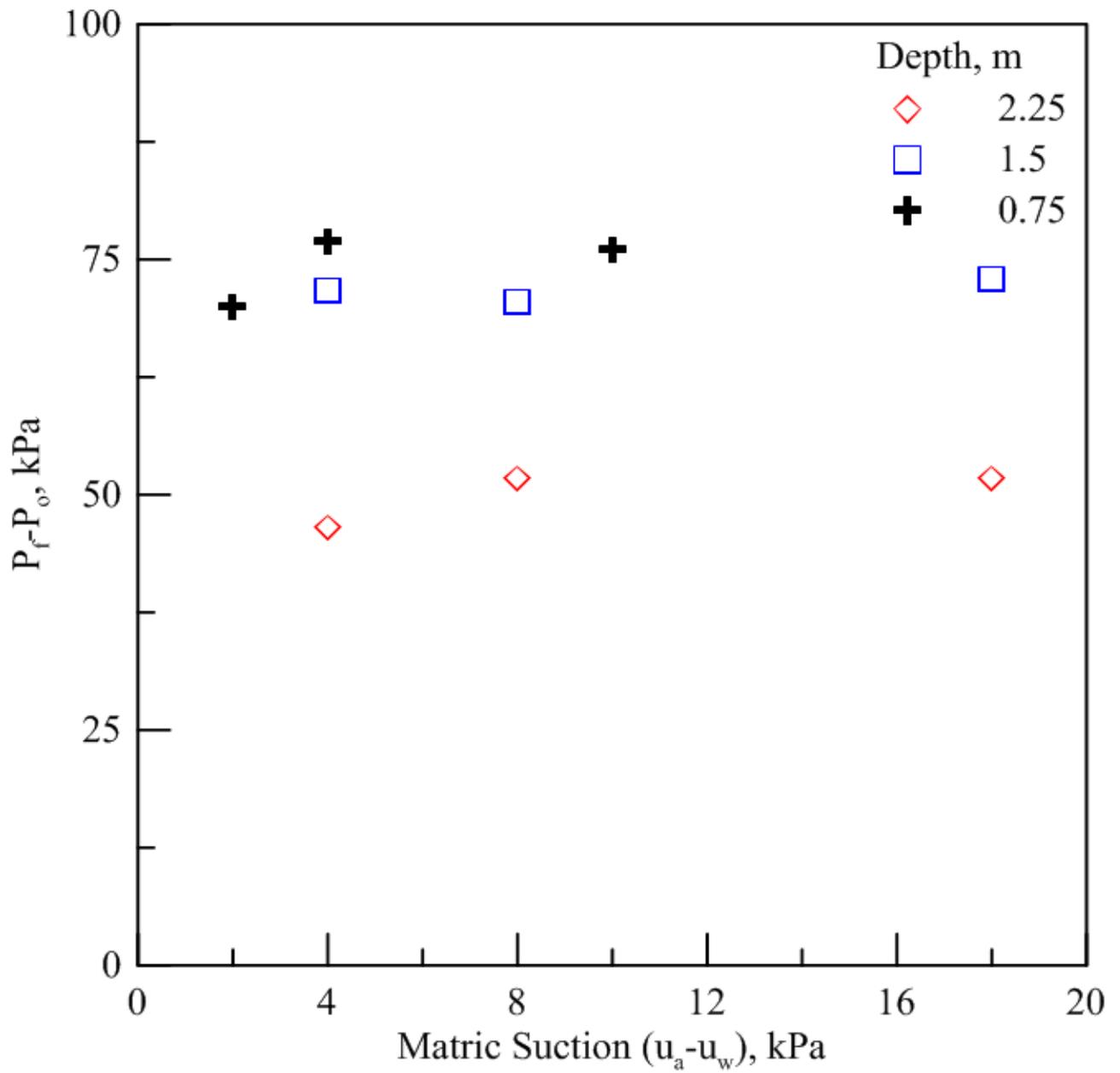


圖 5.9 基質吸力與 $P_f - P_o$ 關係圖

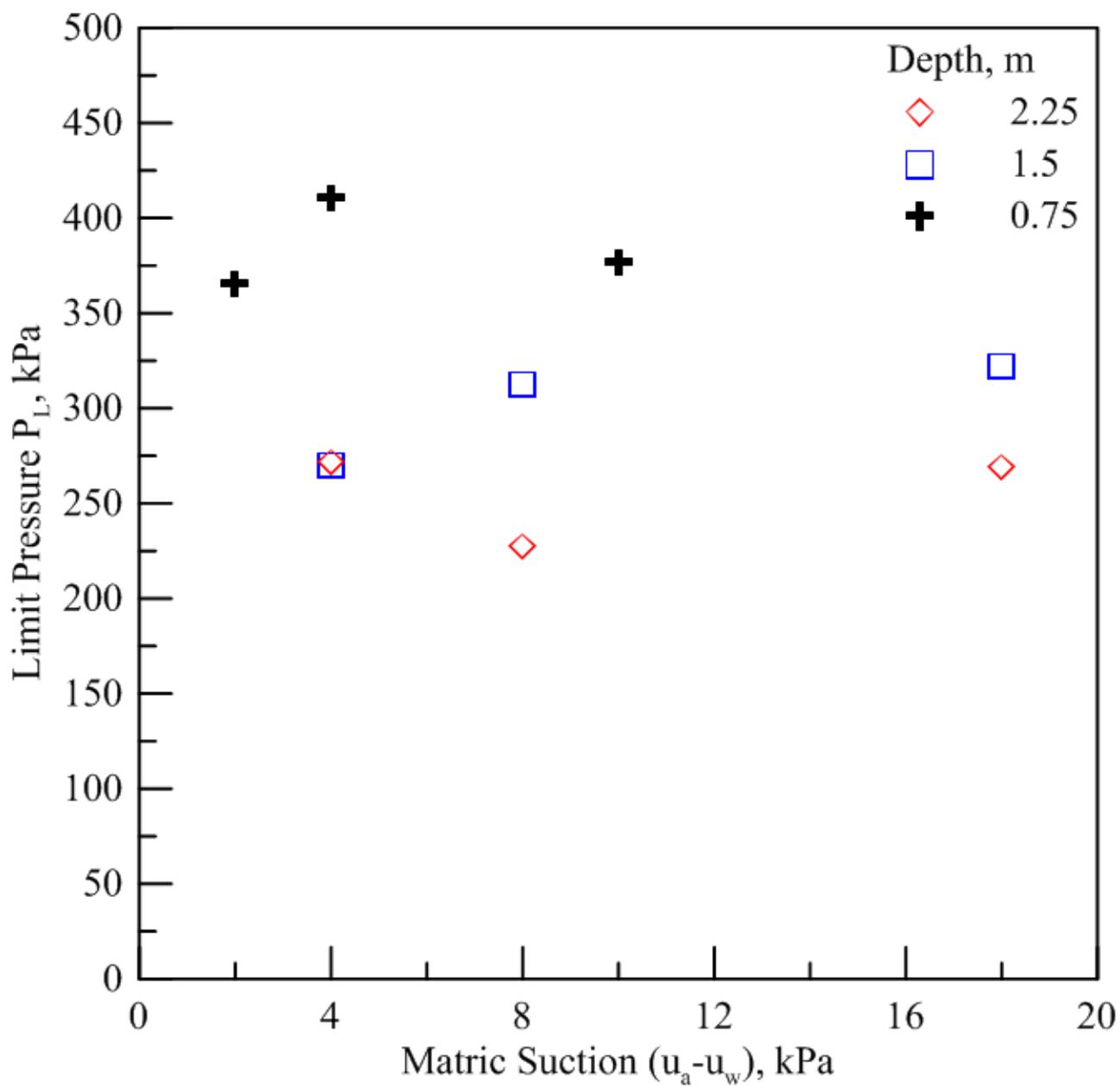


圖 5.10 基質吸力與極限壓力關係圖

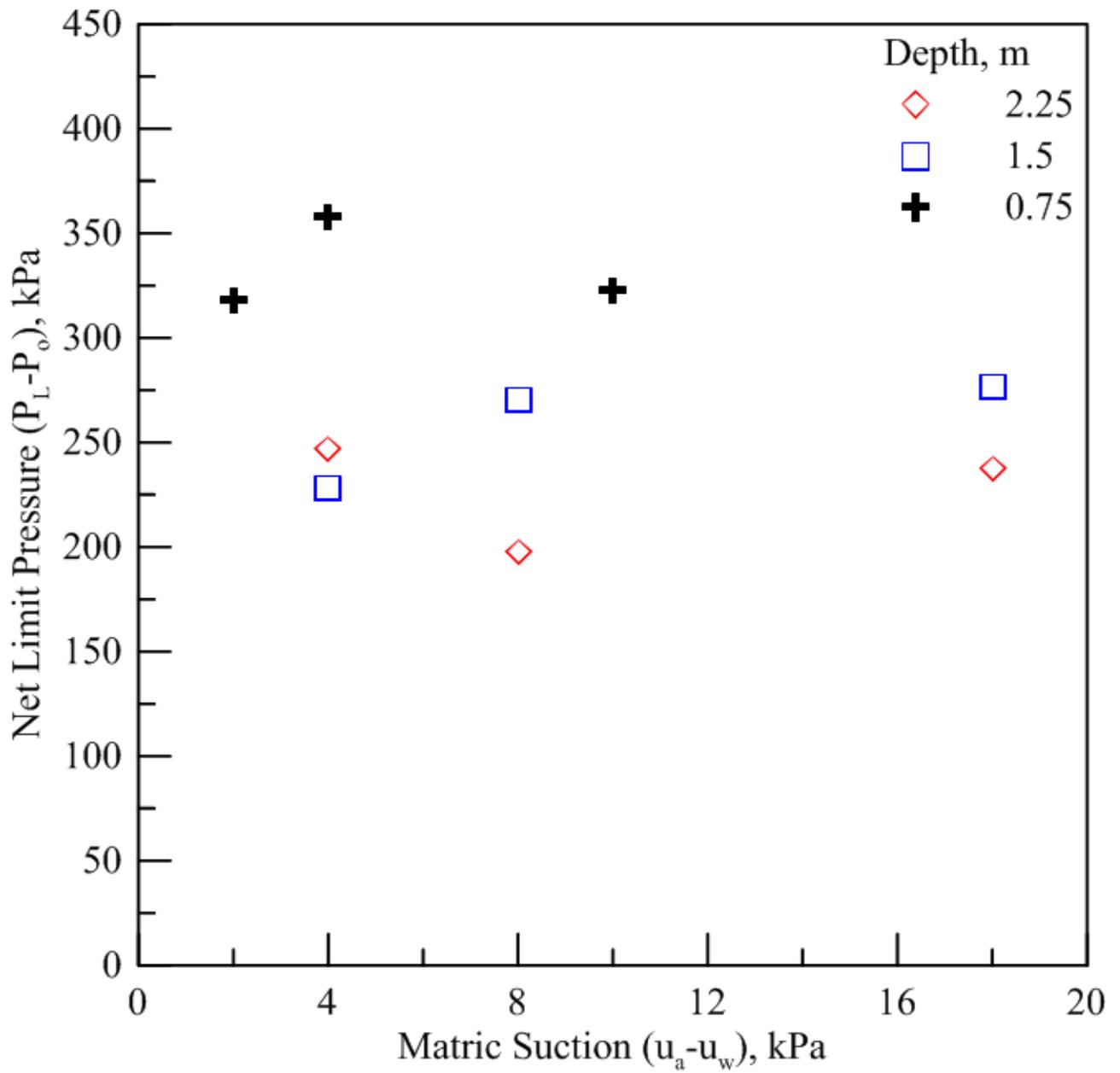


圖 5.11 基質吸力與淨極限壓力關係圖

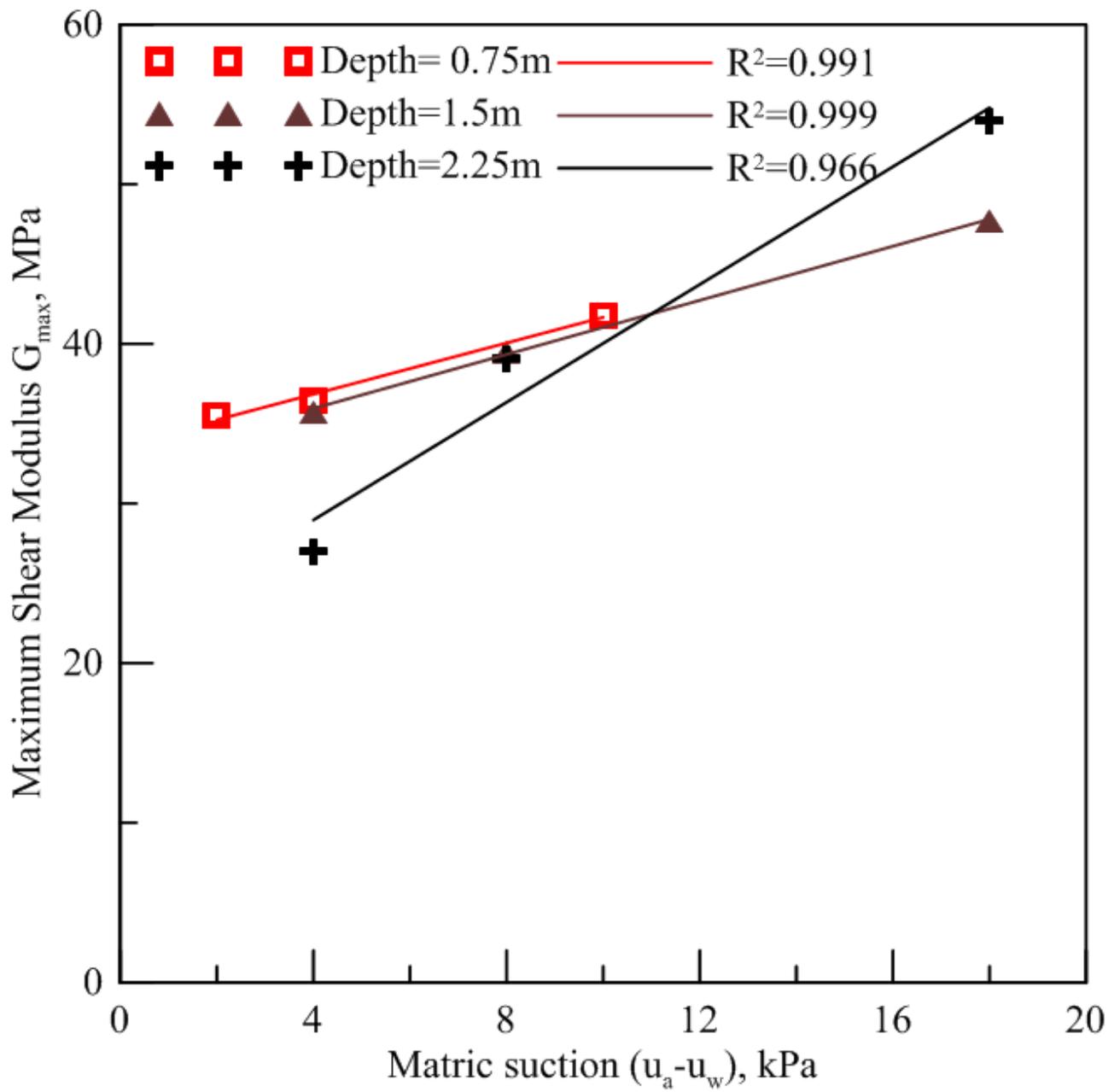


圖 5.12 最大剪力模數 G_{\max} 與基質吸力關係圖

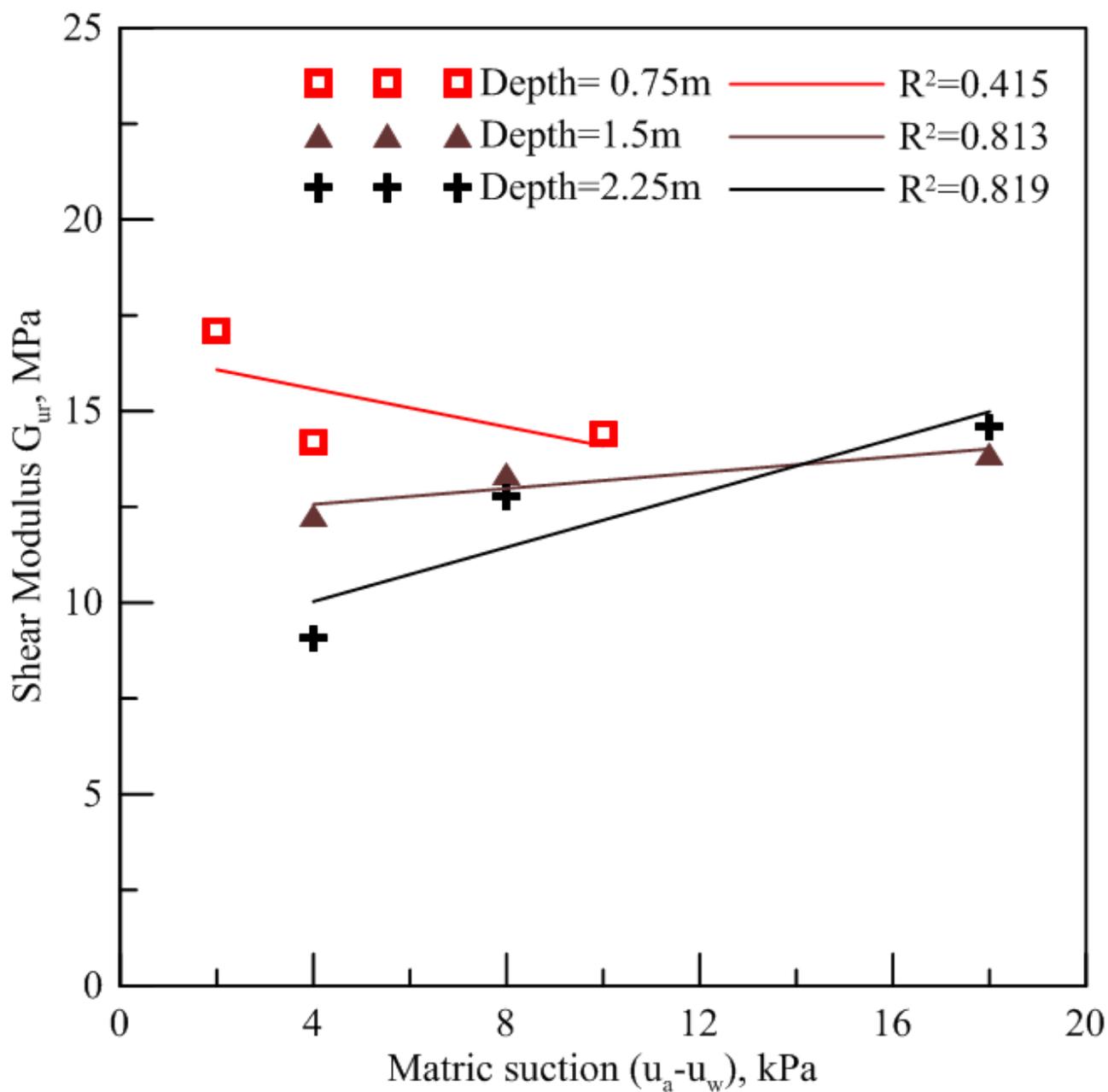


圖 5.13 傍壓儀試驗剪力模數 G_{ur} 與基質吸力的關係圖

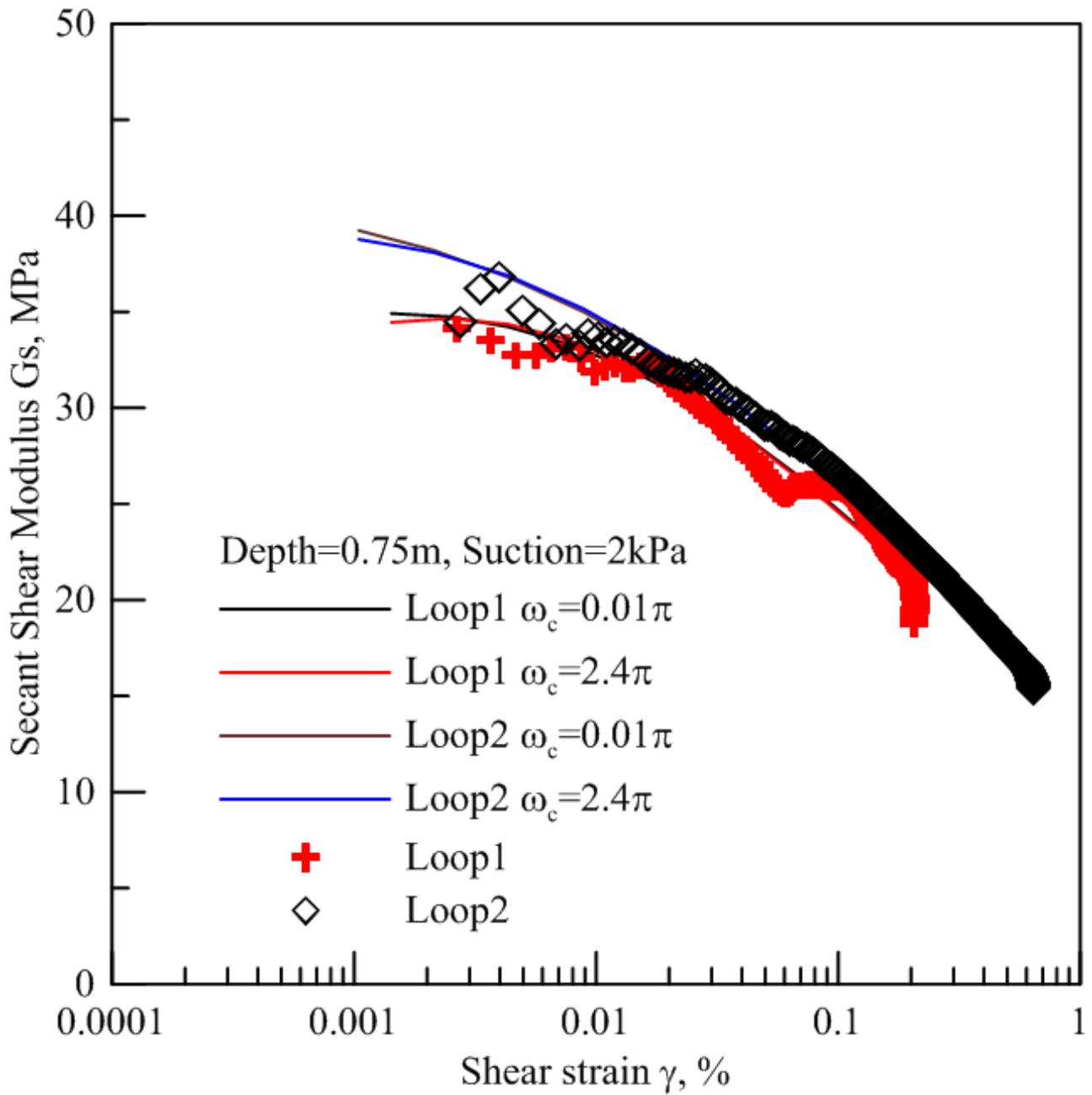


圖 5.14 $\omega_c=0.01\pi$ 與 $\omega_c=2.4\pi$ 濾波模數遞減曲線圖

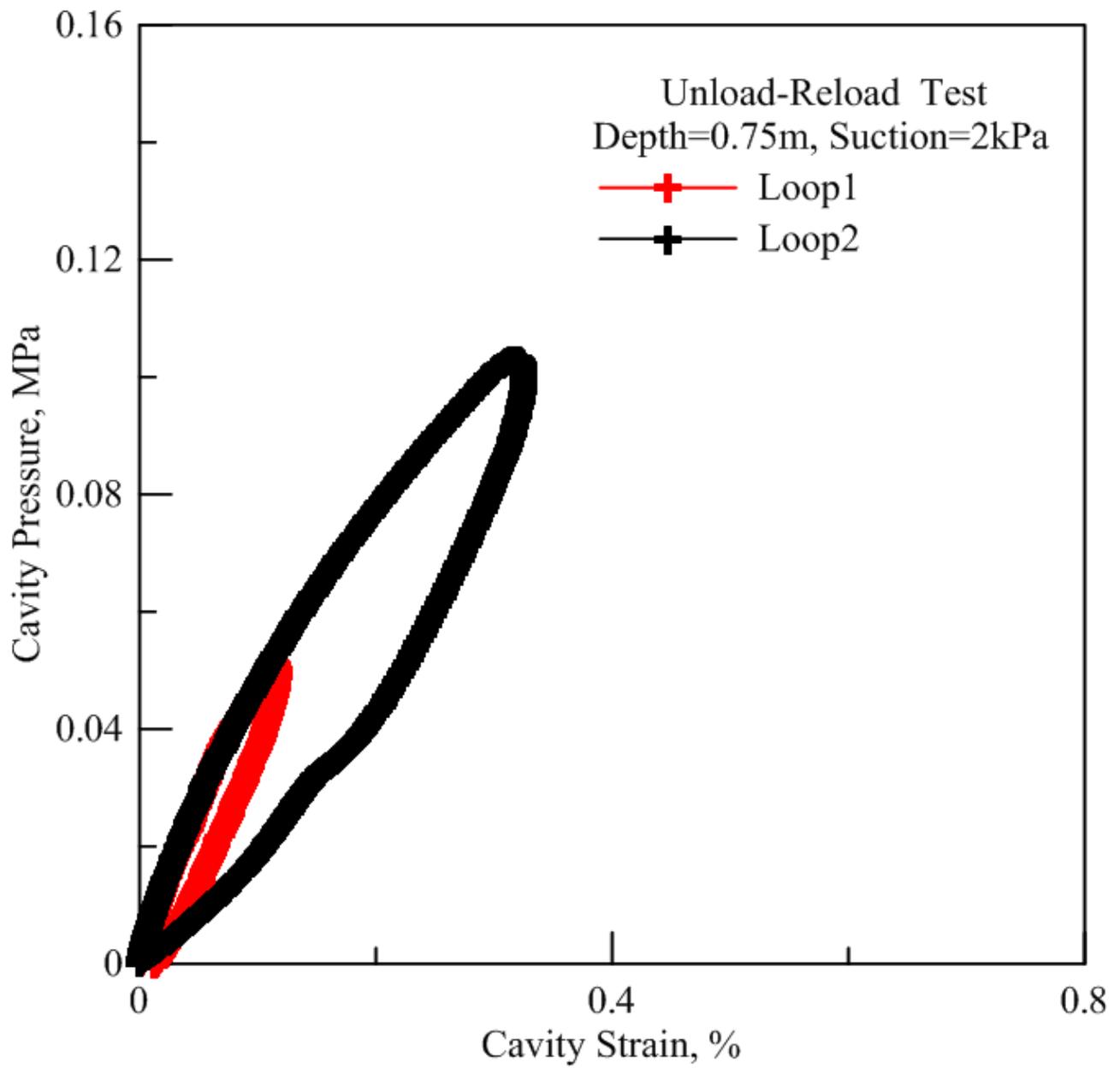


圖 5.15 試驗深度 0.75m 加壓減壓試驗結果(suction 為 2kPa)

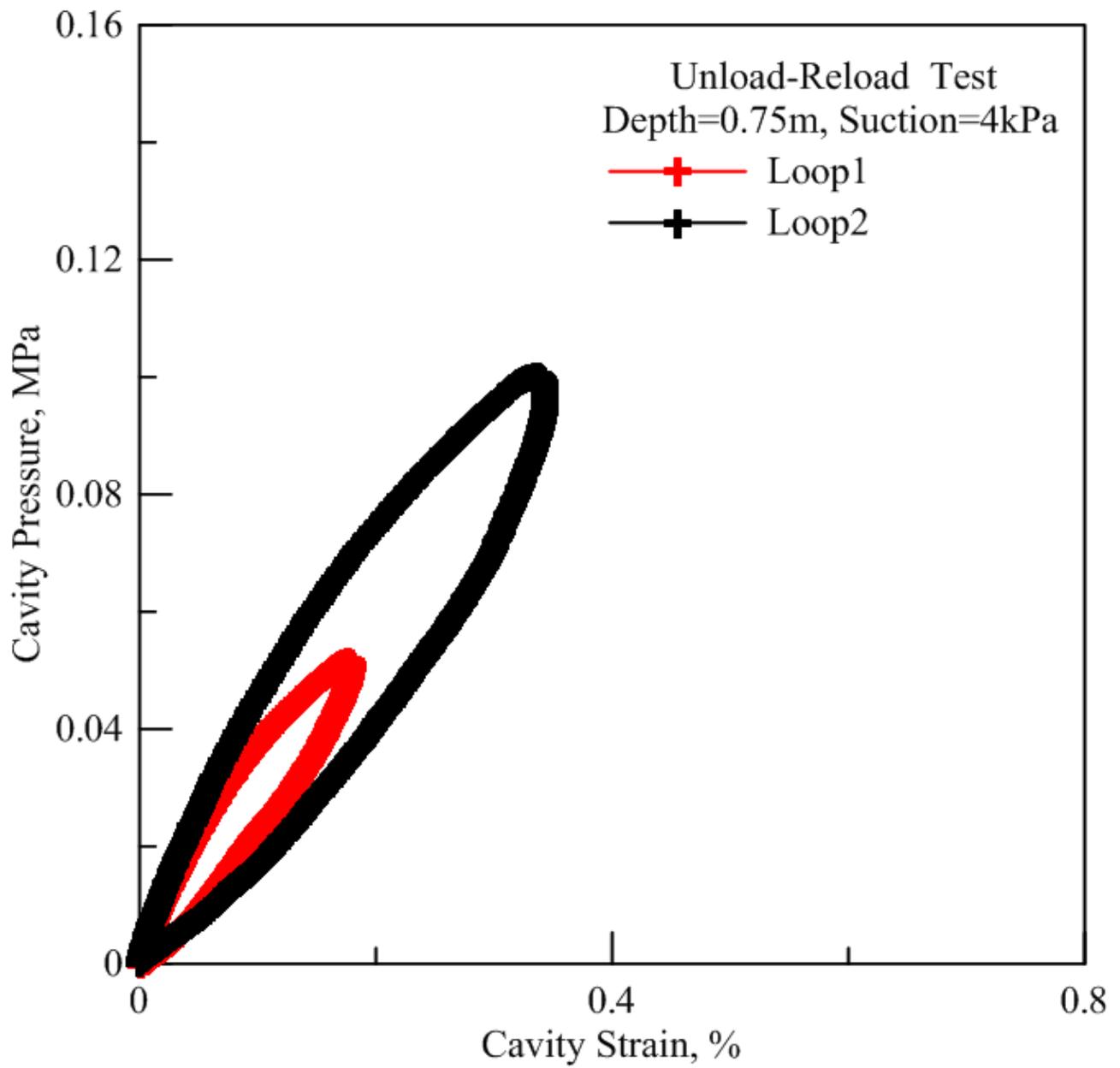


圖 5.16 試驗深度 0.75m 加壓減壓試驗結果(suction 為 4kPa)

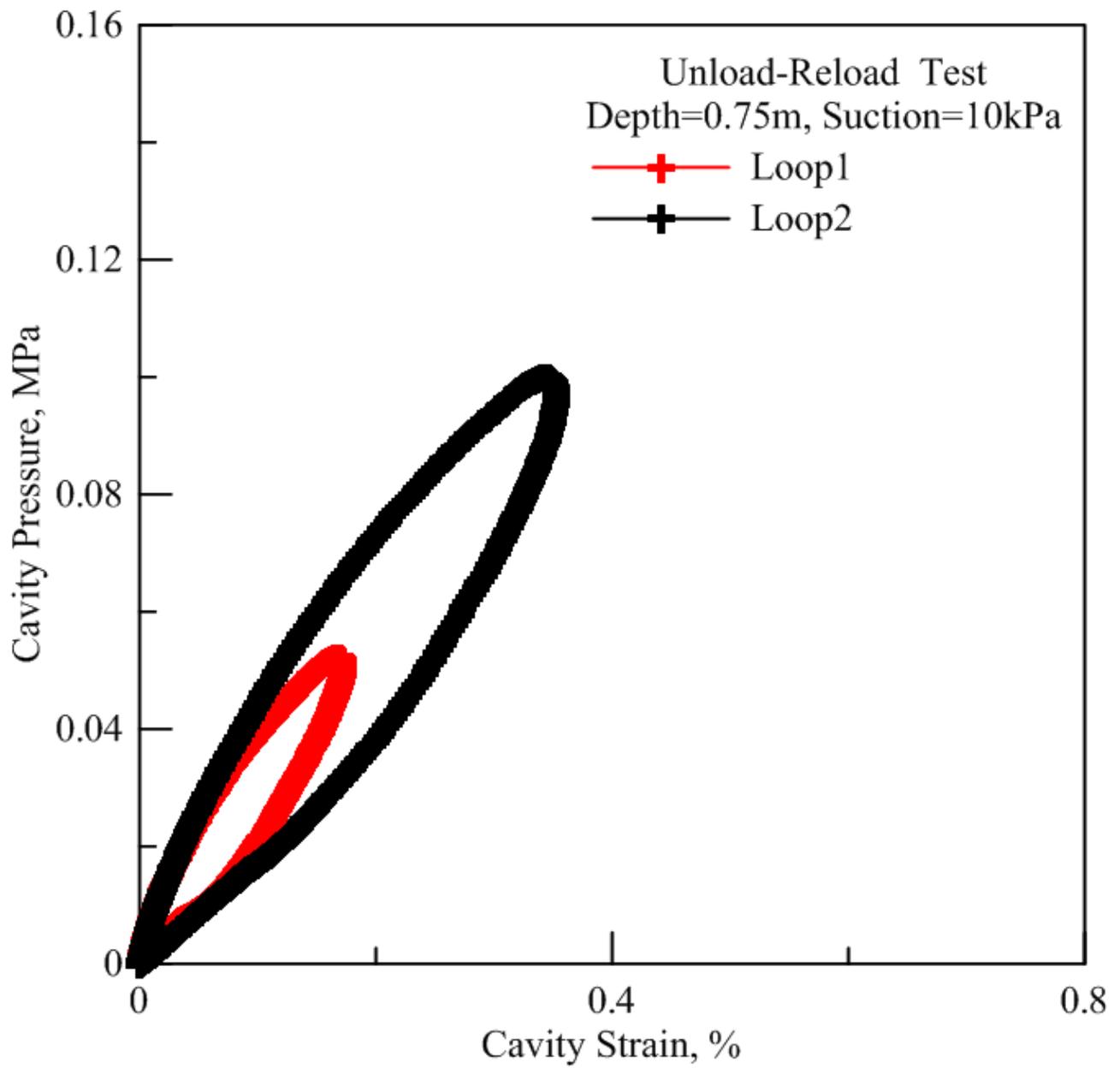


圖 5.17 試驗深度 0.75m 加壓減壓試驗結果(suction 為 10kPa)

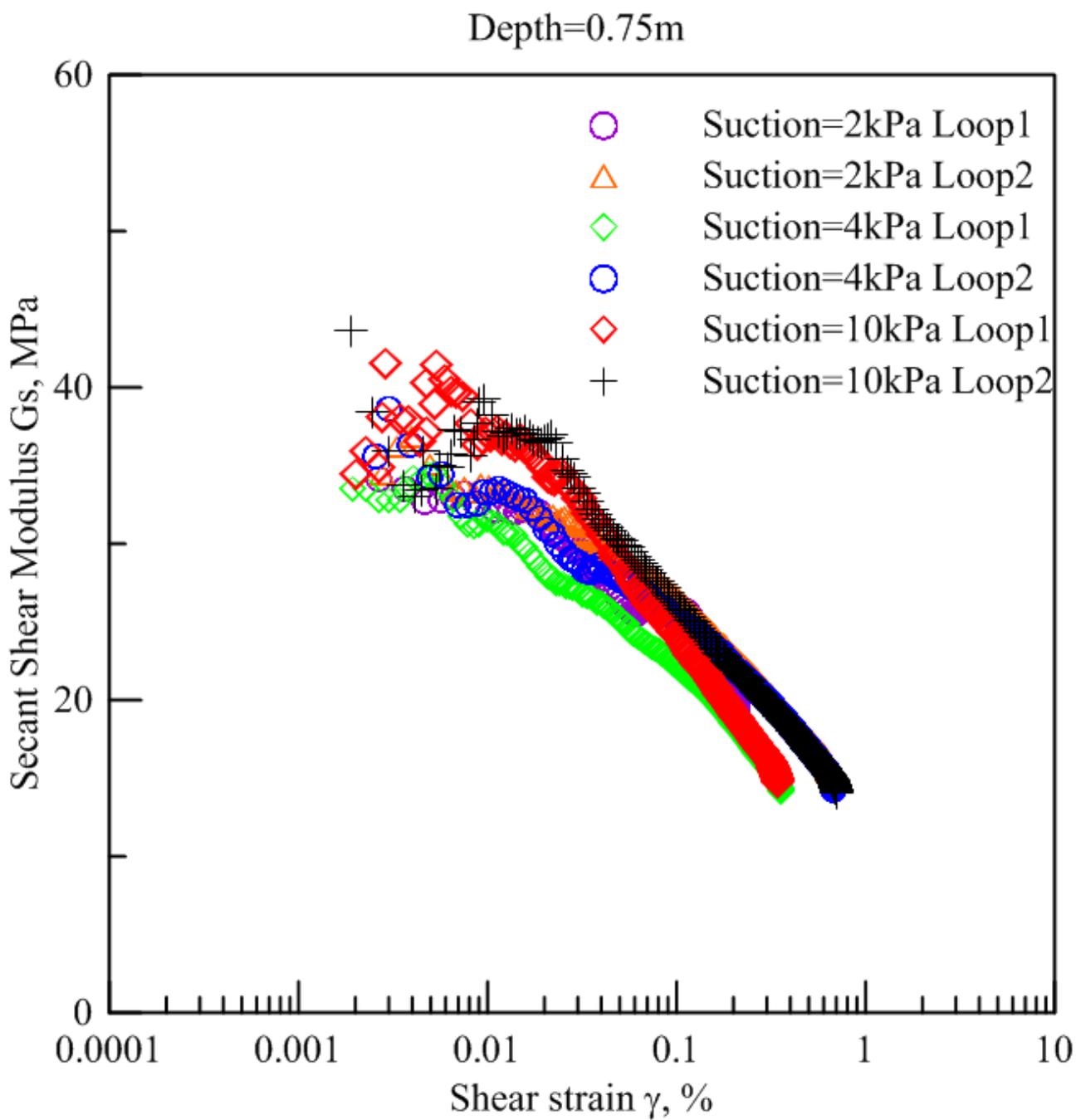


圖 5.18 試驗深度 0.75m 剪力模數遞減曲線

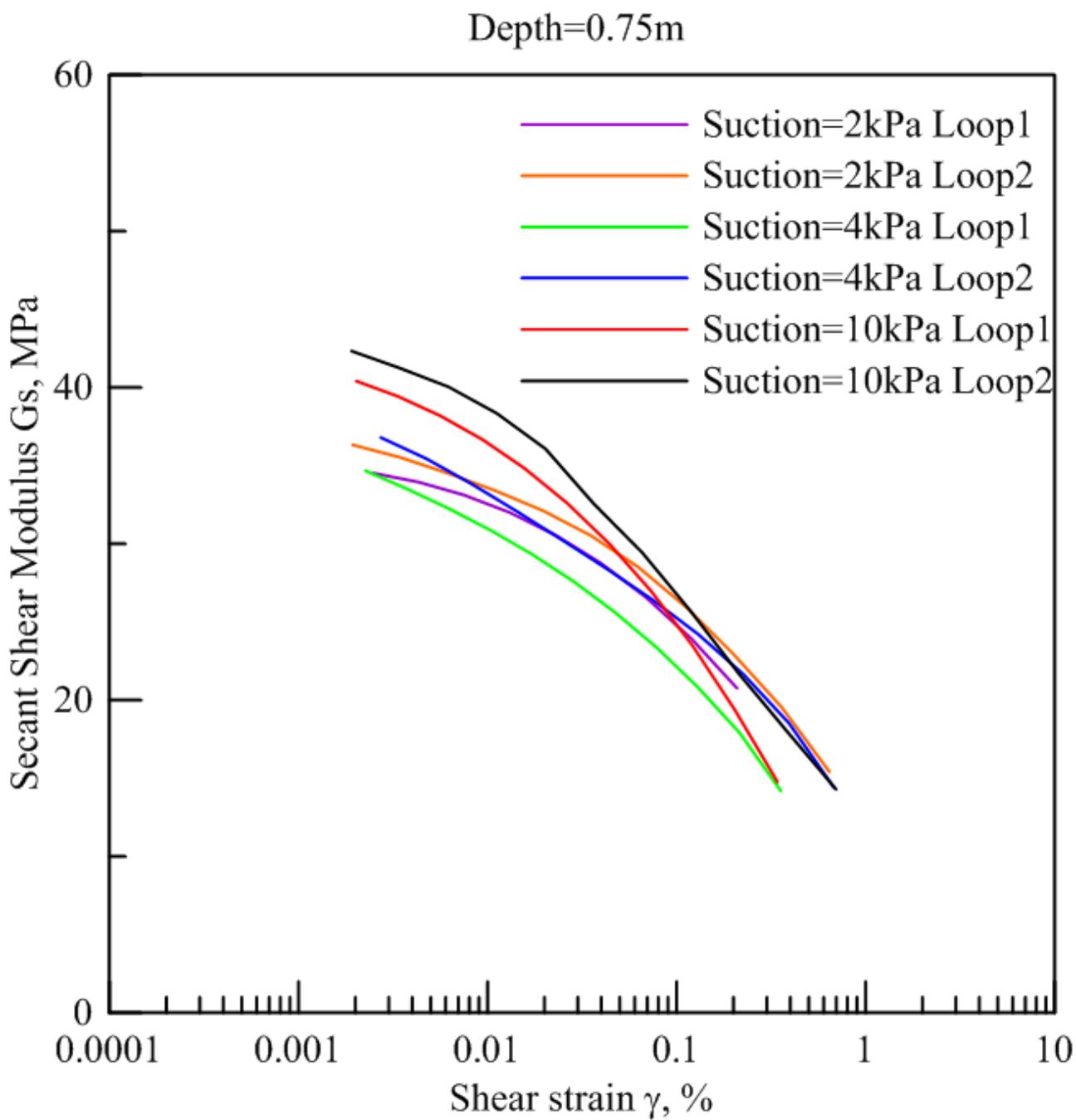


圖 5.19 試驗深度 0.75m 濾波剪力模數遞減曲線

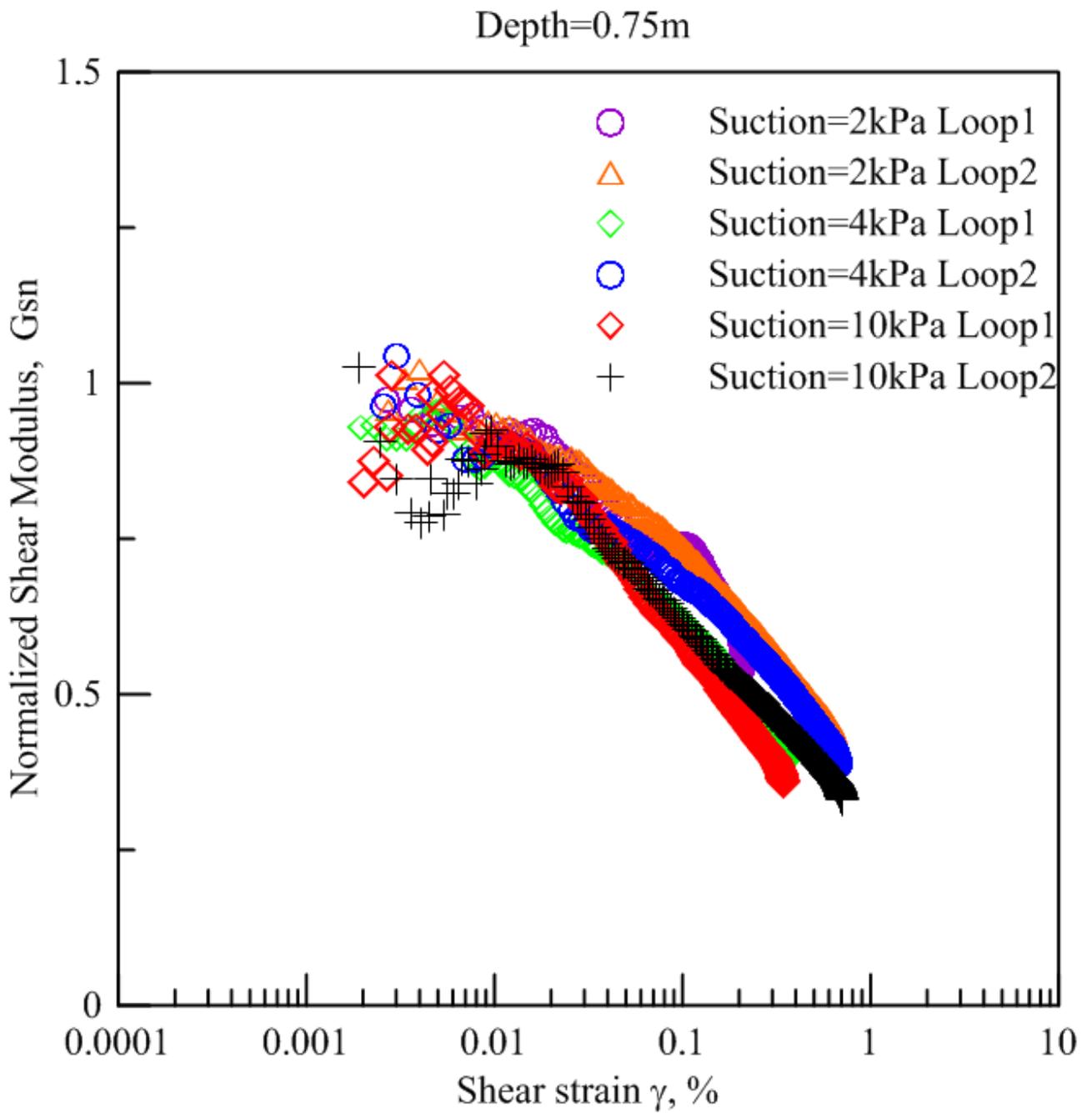


圖 5.20 試驗深度 0.75m 正規化模數遞減曲線

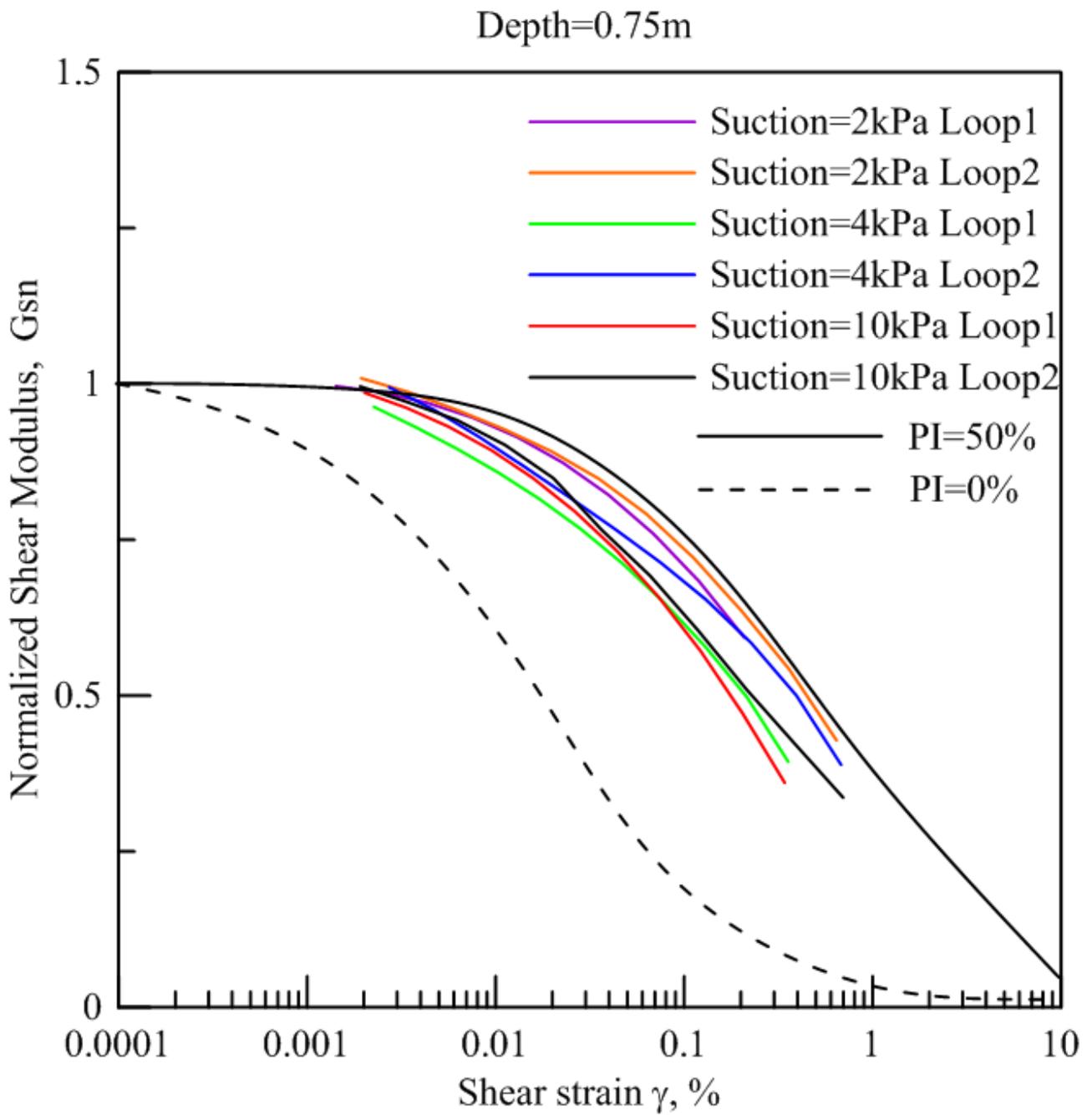


圖 5.21 試驗深度 0.75m 濾波正規化模數遞減曲線

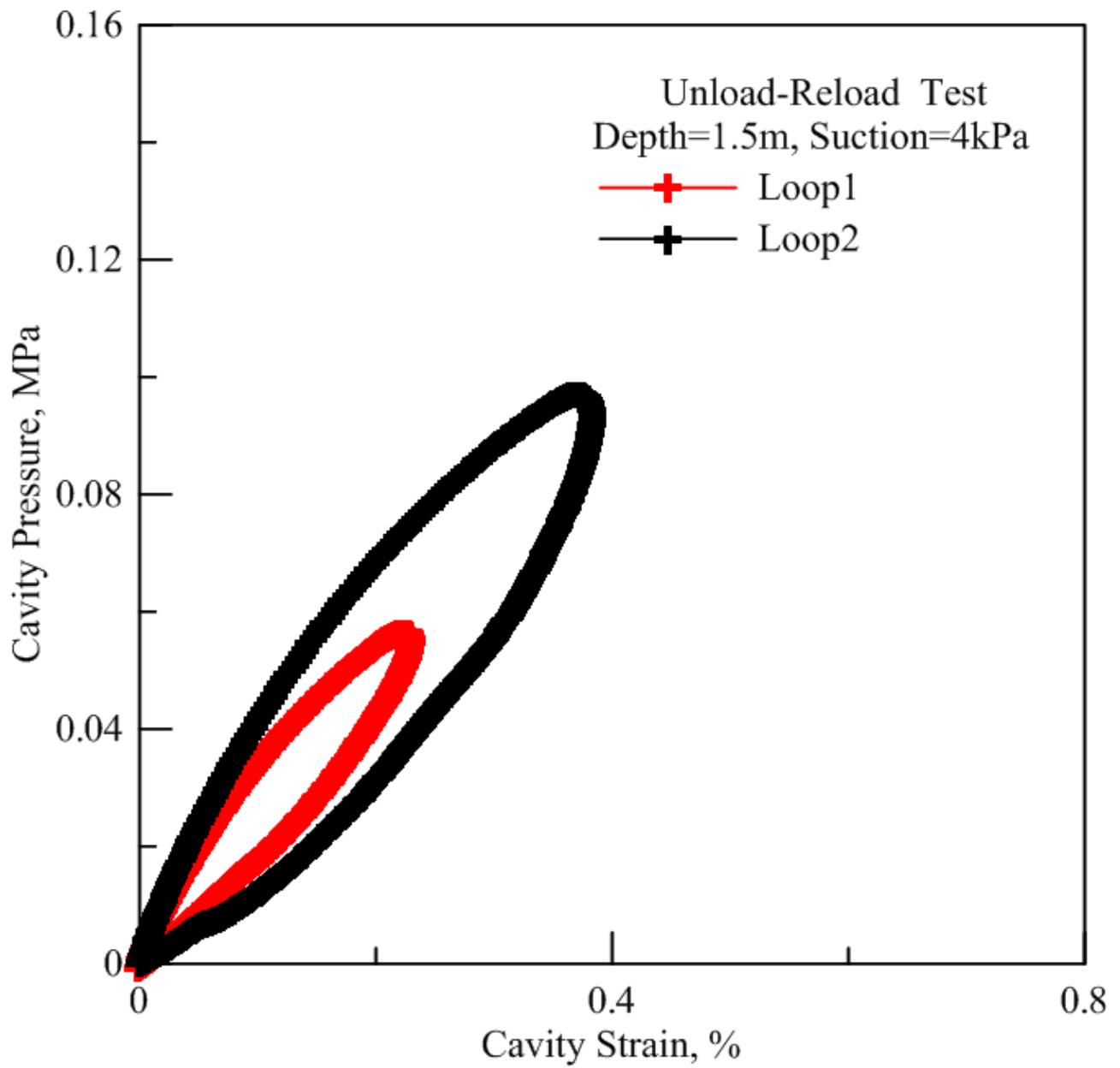


圖 5.22 試驗深度 1.5m 加壓減壓試驗結果(suction 為 4kPa)

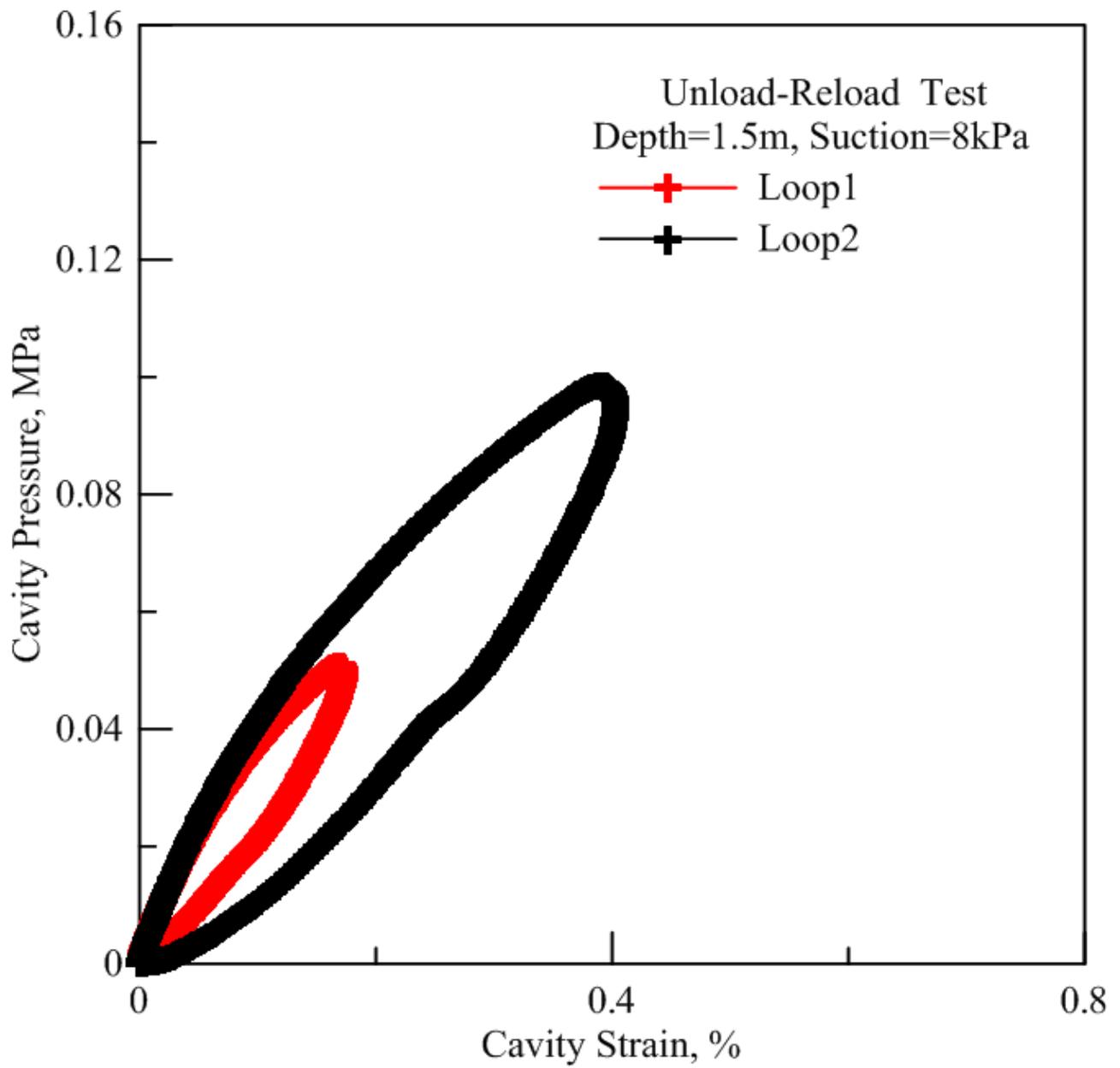


圖 5.23 試驗深度 1.5m 加壓減壓試驗結果(suction 為 8kPa)

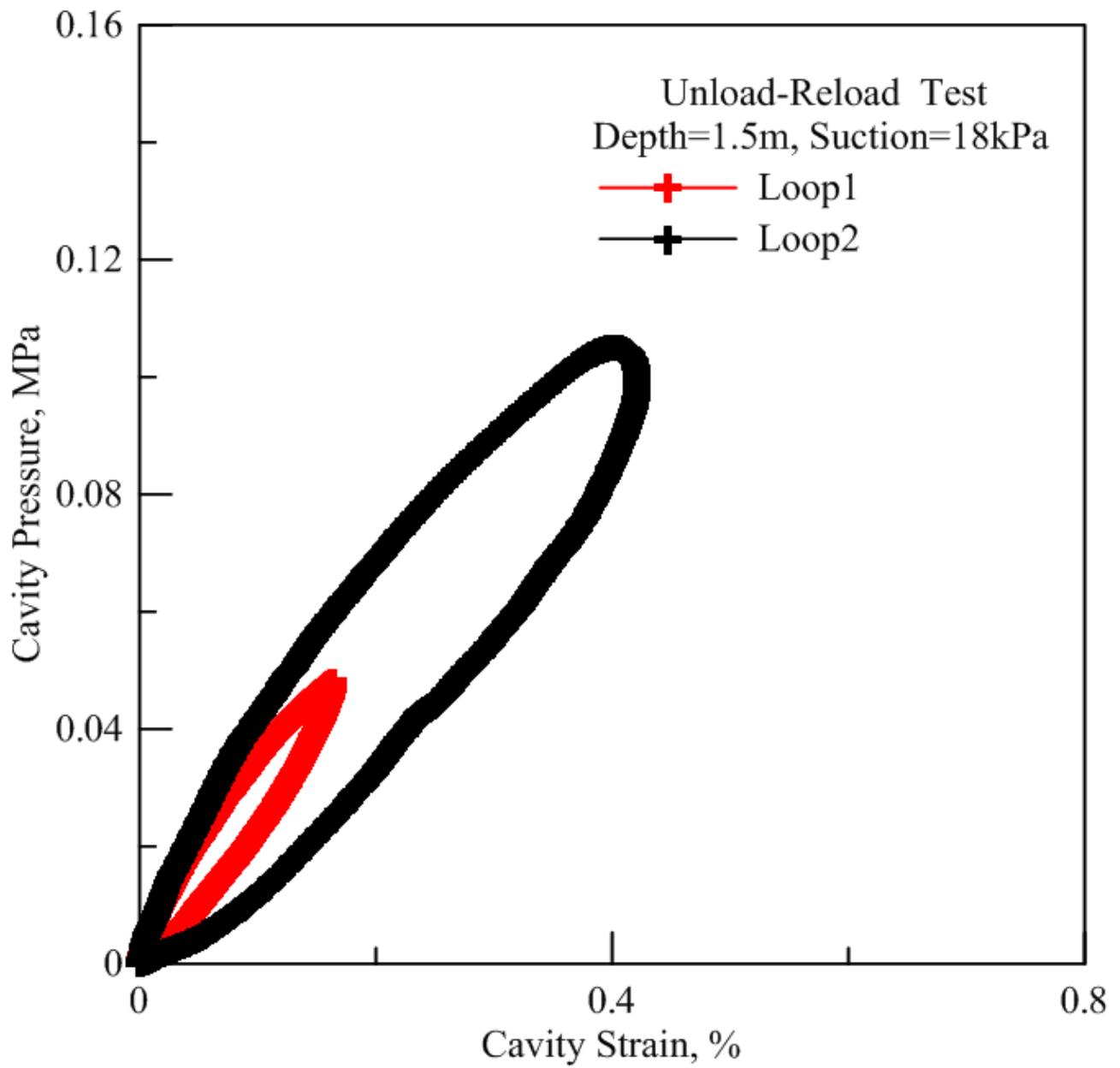


圖 5.24 試驗深度 1.5m 加壓減壓試驗結果(suction 為 18kPa)

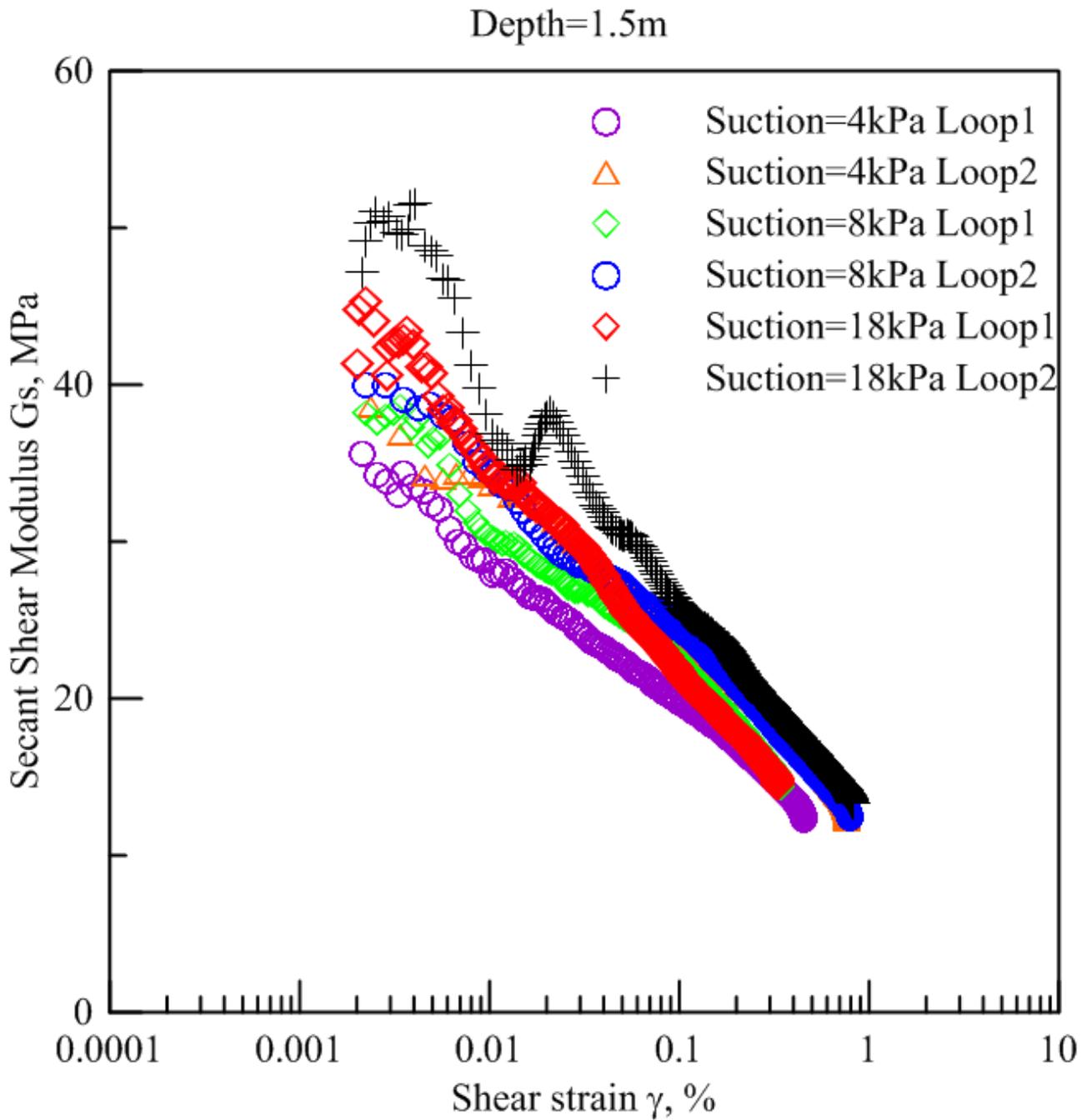


圖 5.25 試驗深度 1.5m 剪力模數遞減曲線

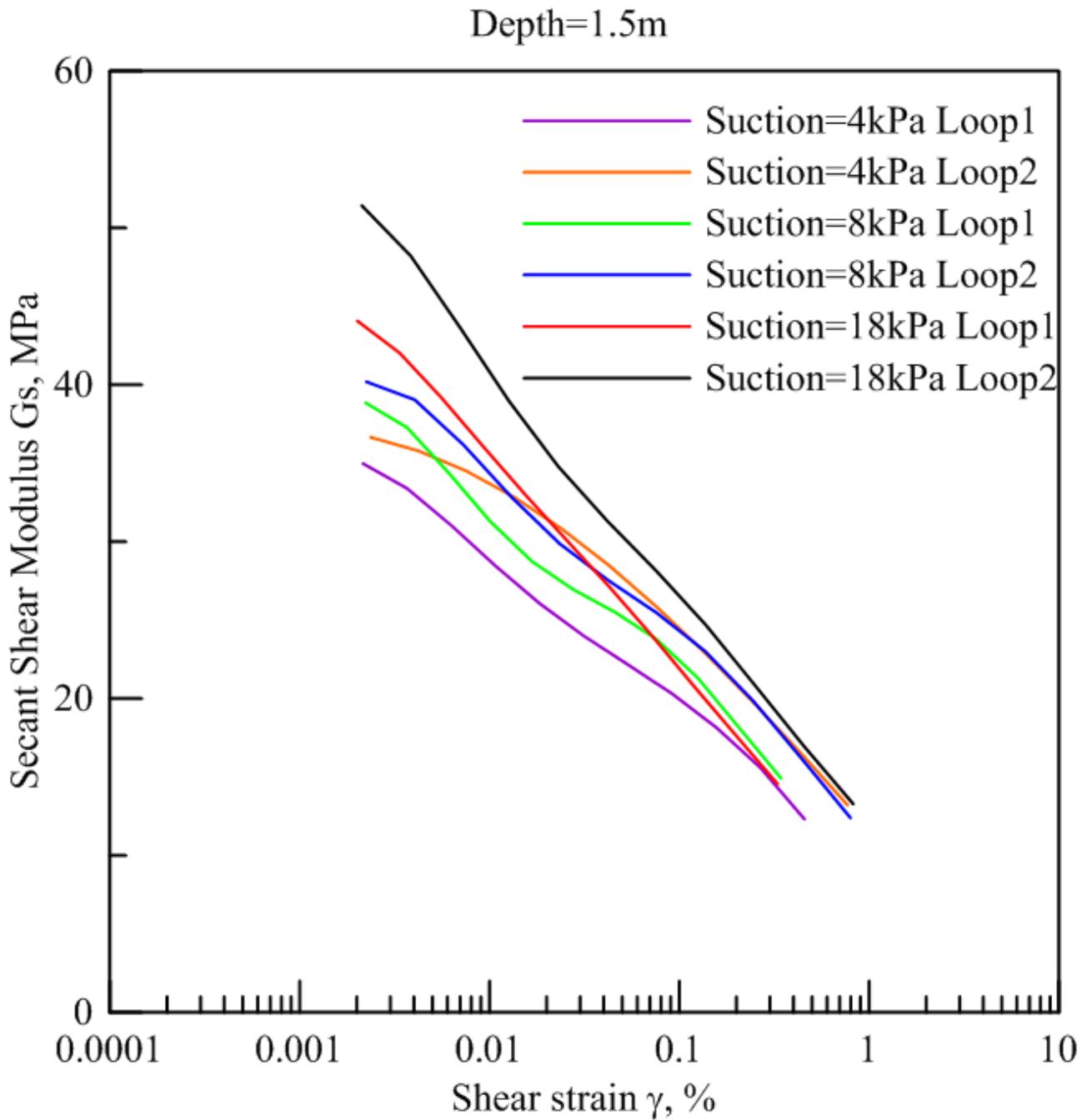


圖 5.26 試驗深度 1.5m 濾波剪力模數遞減曲線

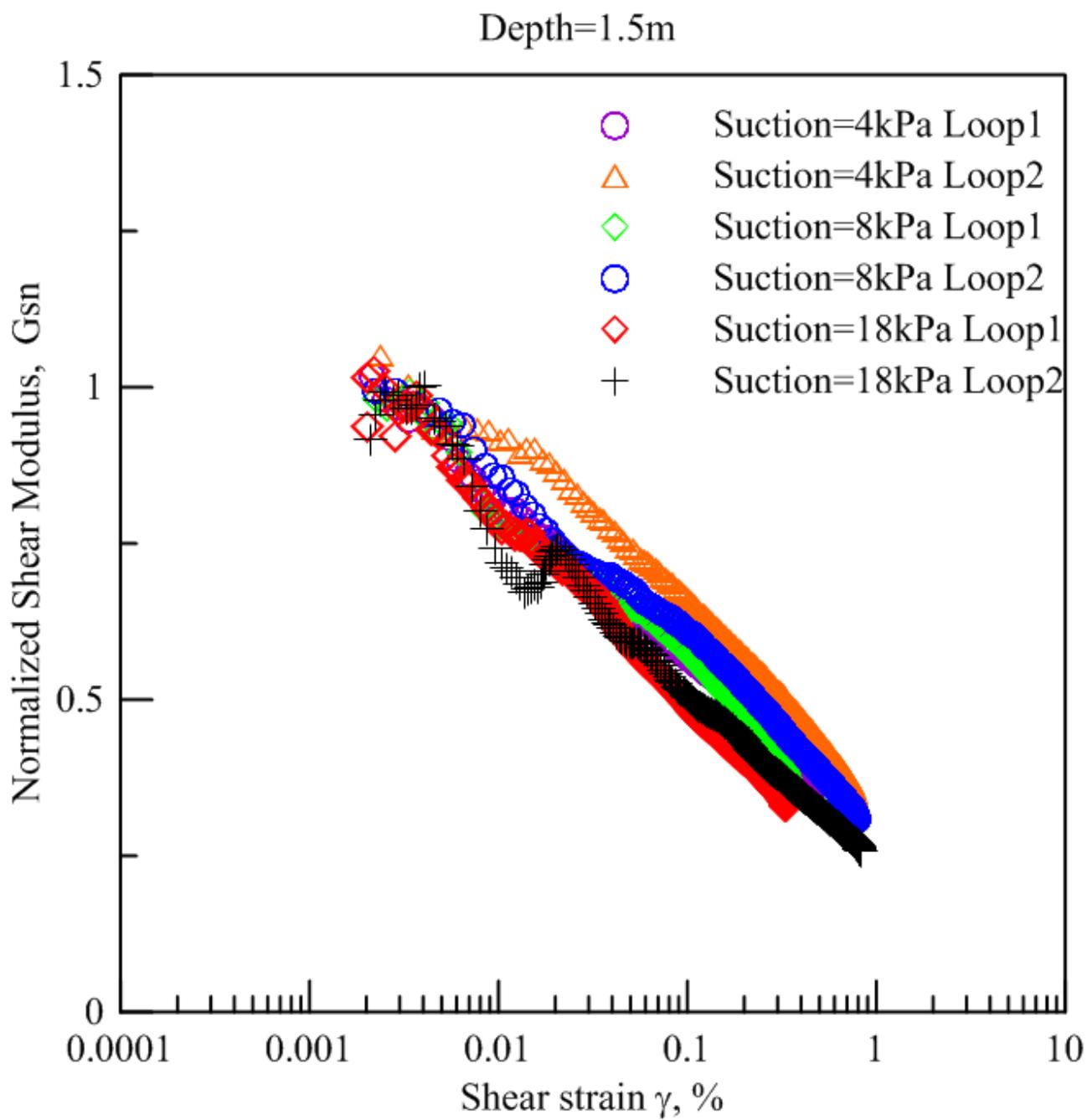


圖 5.27 深度 1.5m 正規化模數遞減曲線

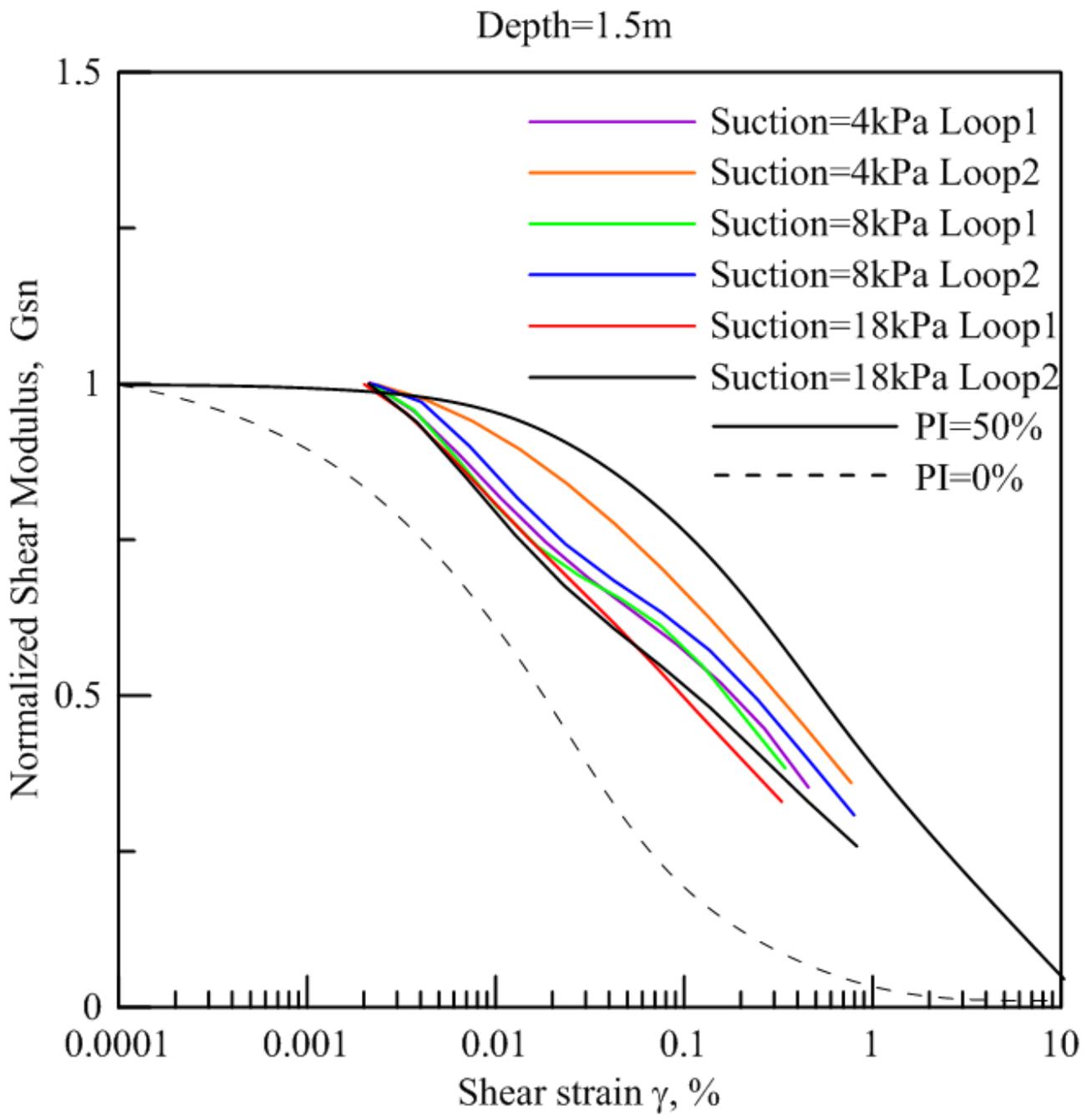


圖 5.28 深度 1.5m 濾波正規化模數遞減曲線

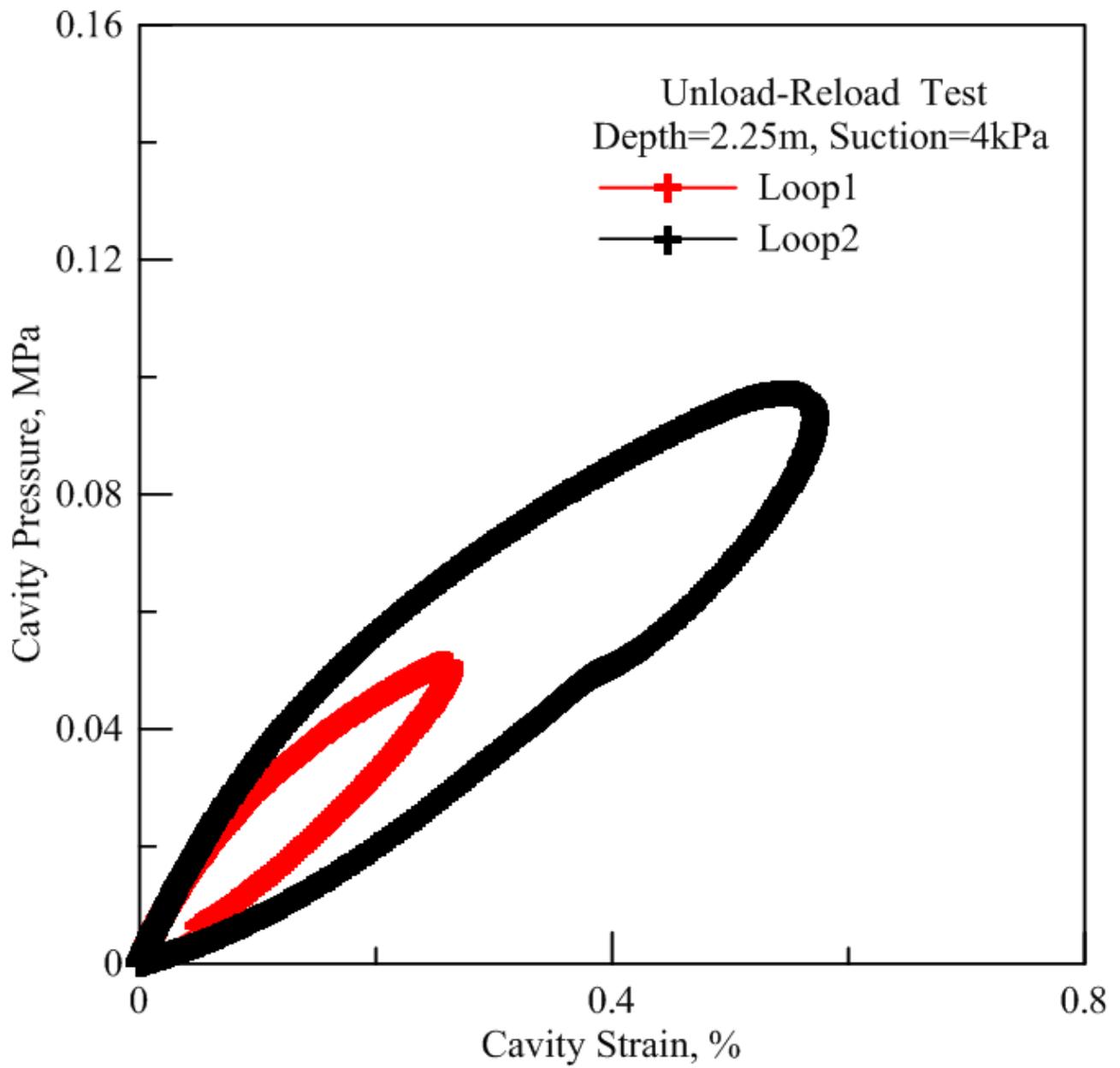


圖 5.29 試驗深度 2.25m 加壓減壓試驗結果(suction.4kPa)

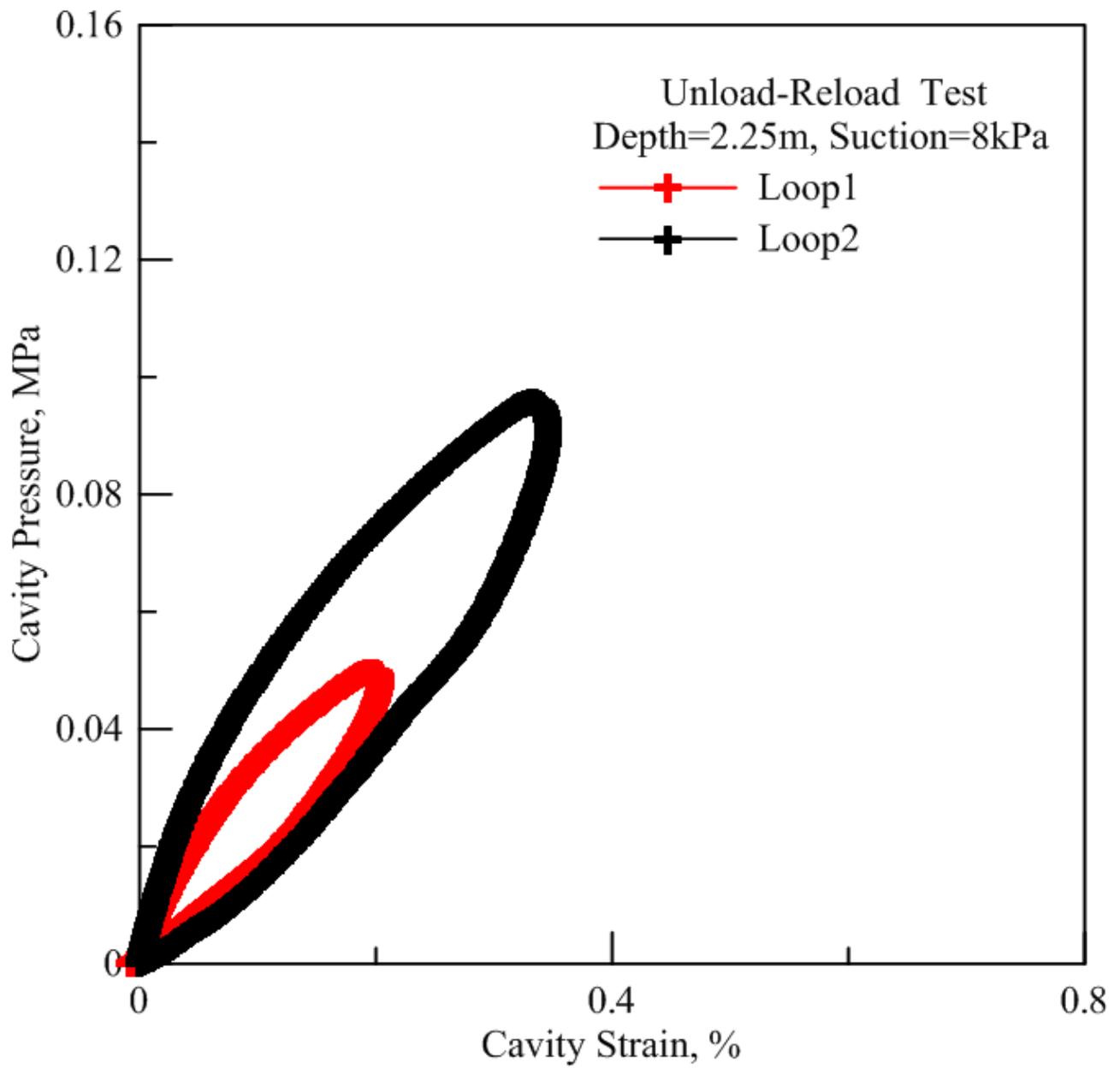


圖 5.30 試驗深度 2.25m 加壓減壓試驗結果(suction 為 8kPa)

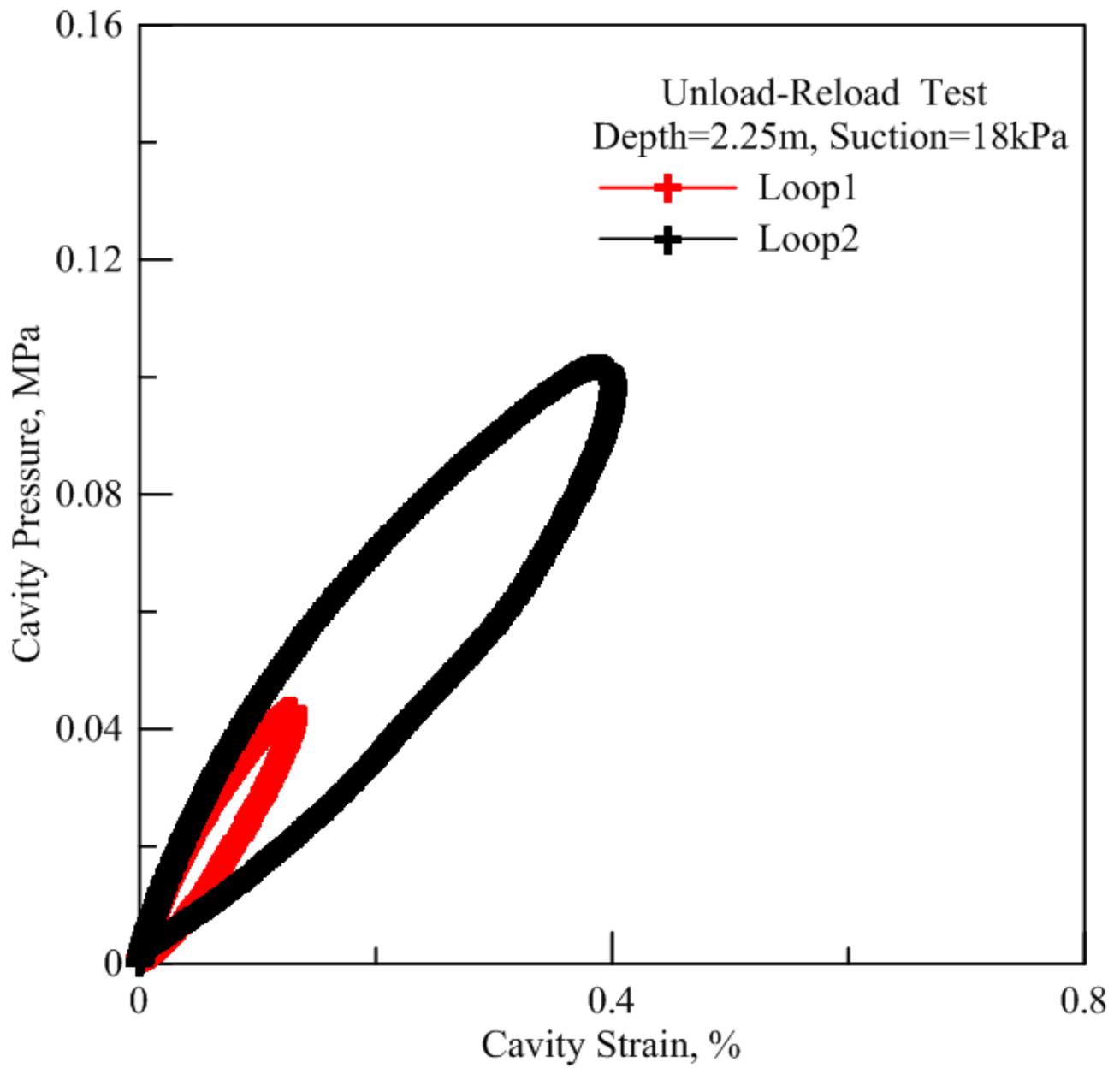


圖 5.31 試驗深度 2.25m 加壓減壓試驗結果(suction 為 18kPa)

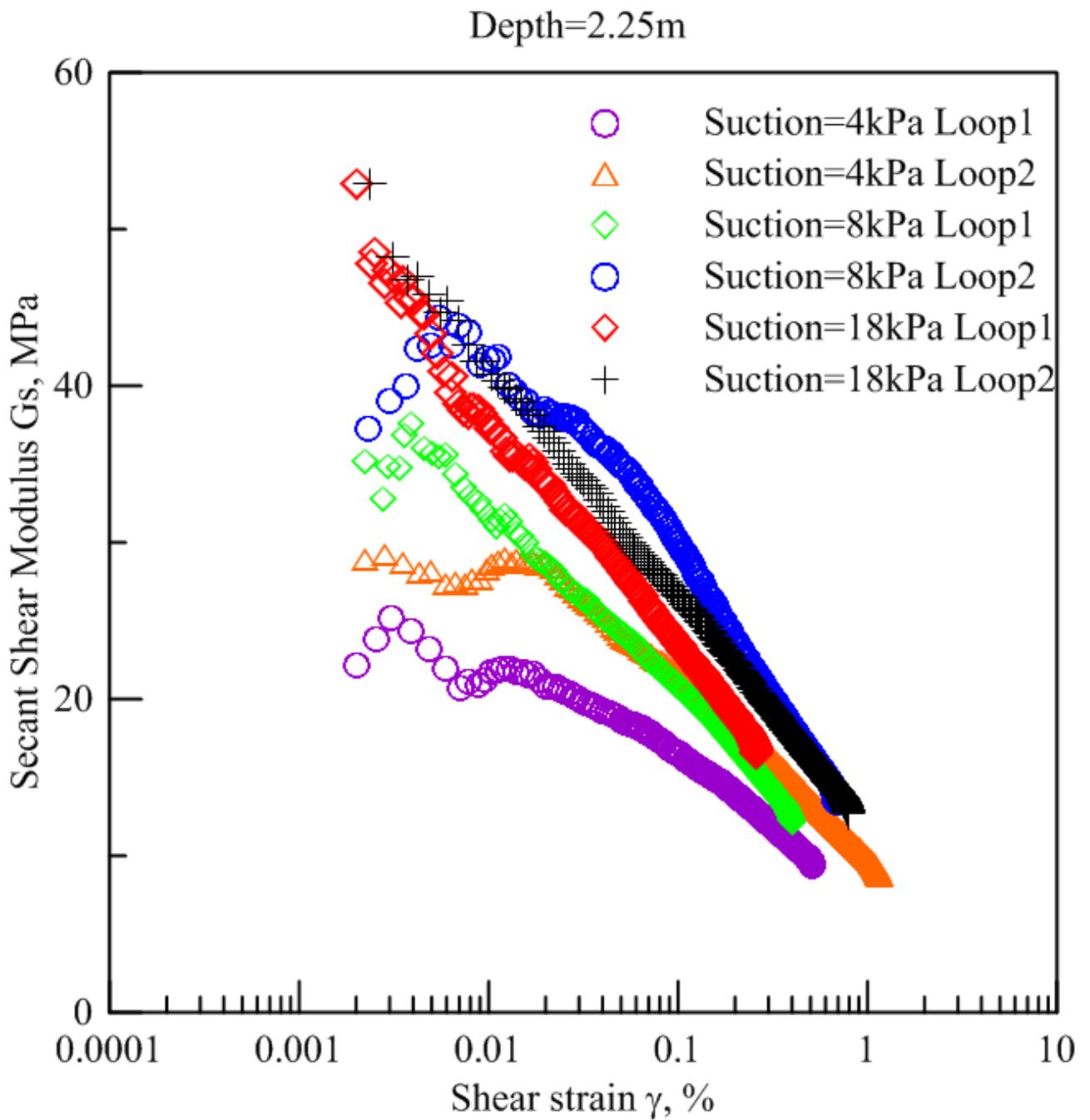


圖 5.32 試驗深度 2.25m 剪力模數遞減曲線

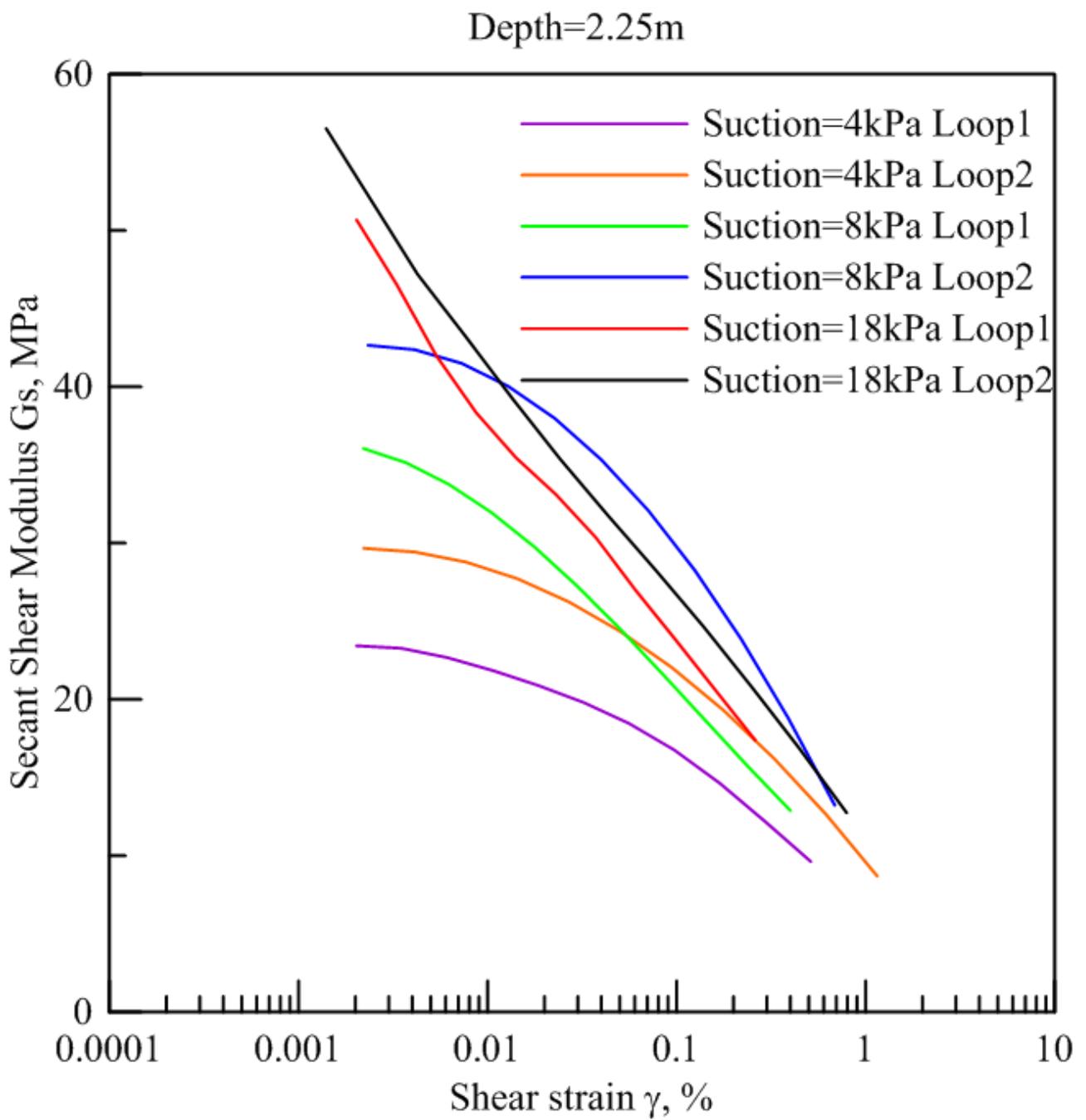


圖 5.33 試驗深度 2.25m 濾波剪力模數遞減曲線

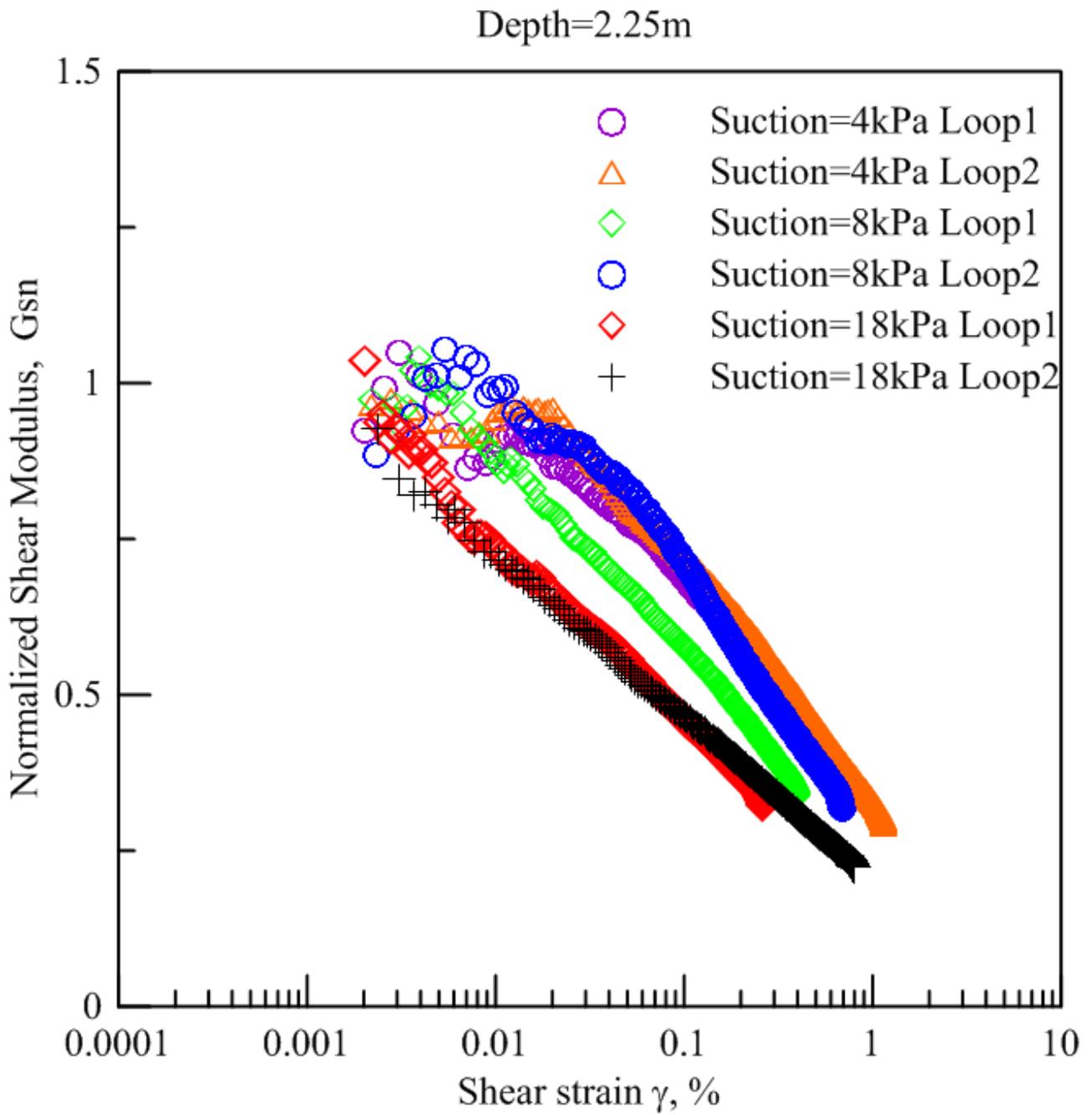


圖 5.34 試驗深度 2.25m 正規化模數遞減曲線

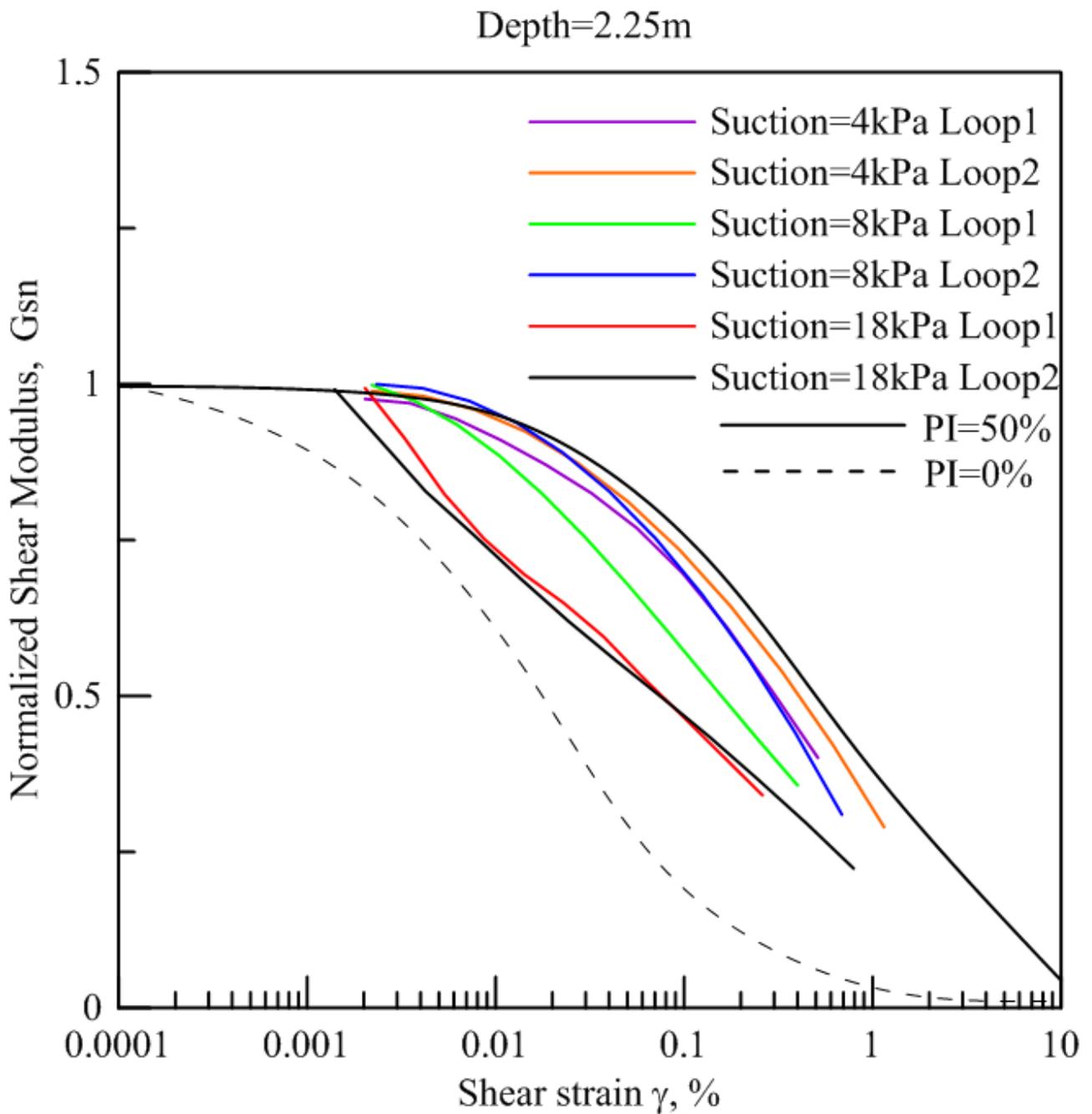


圖 5.35 基質吸力與試驗深度 2.25m 濾波正規化模數遞減曲線

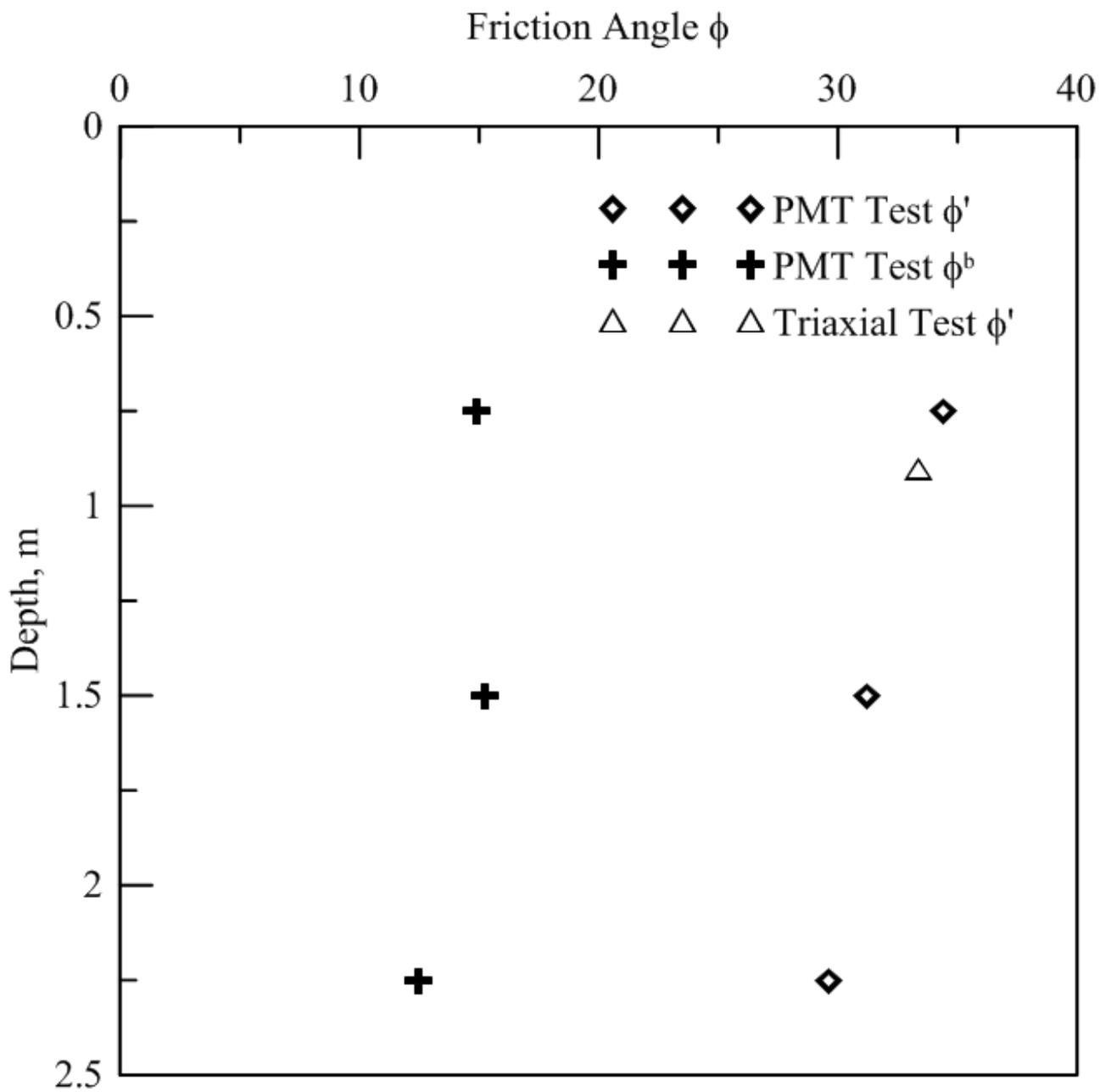


圖 5.36 試驗深度與 ϕ' 、 ϕ^b 關係圖

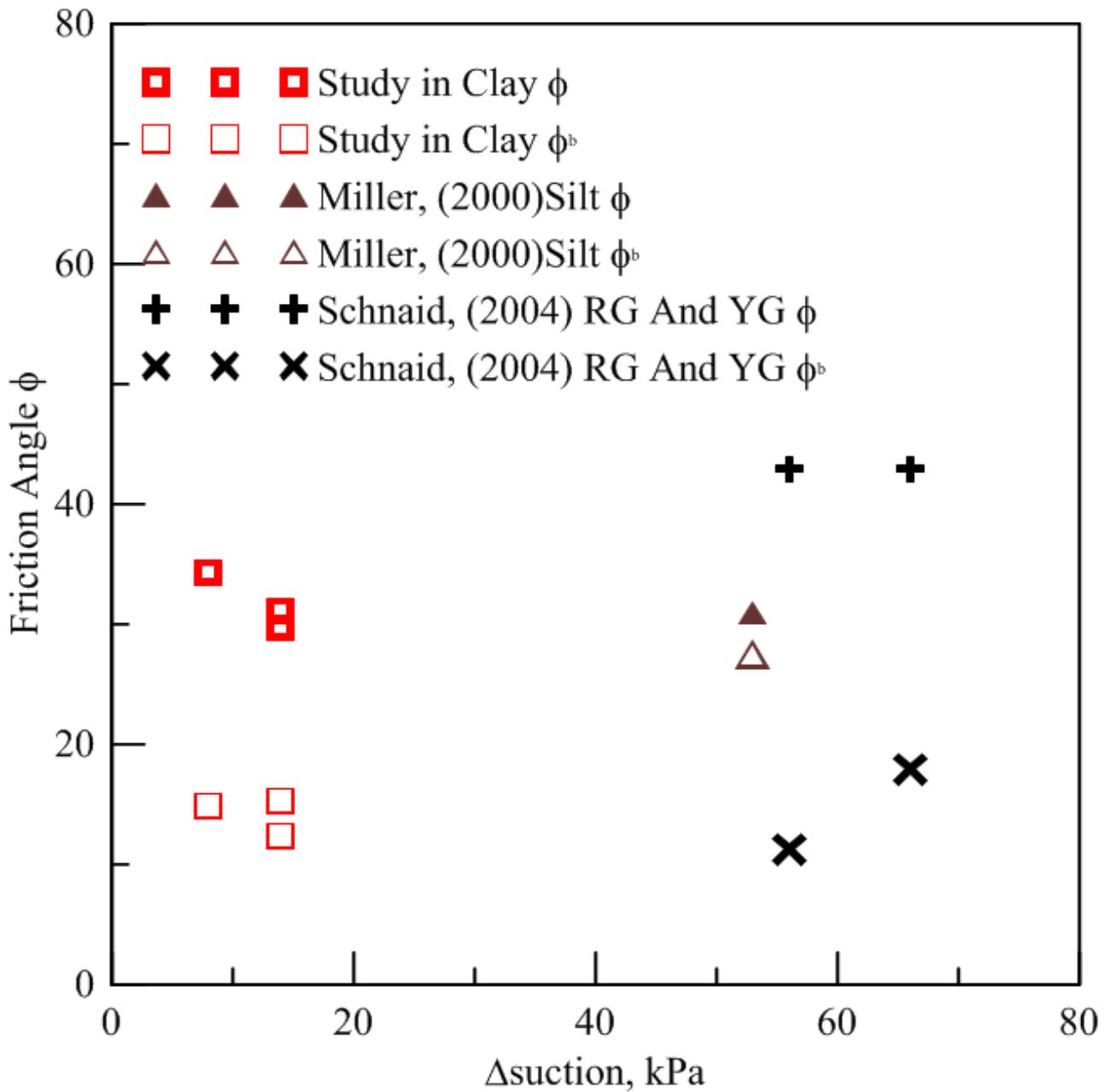


圖 5.37 非飽和土壤傍壓儀試驗比較 c' 、 ϕ' 、 ϕ^b 關係圖

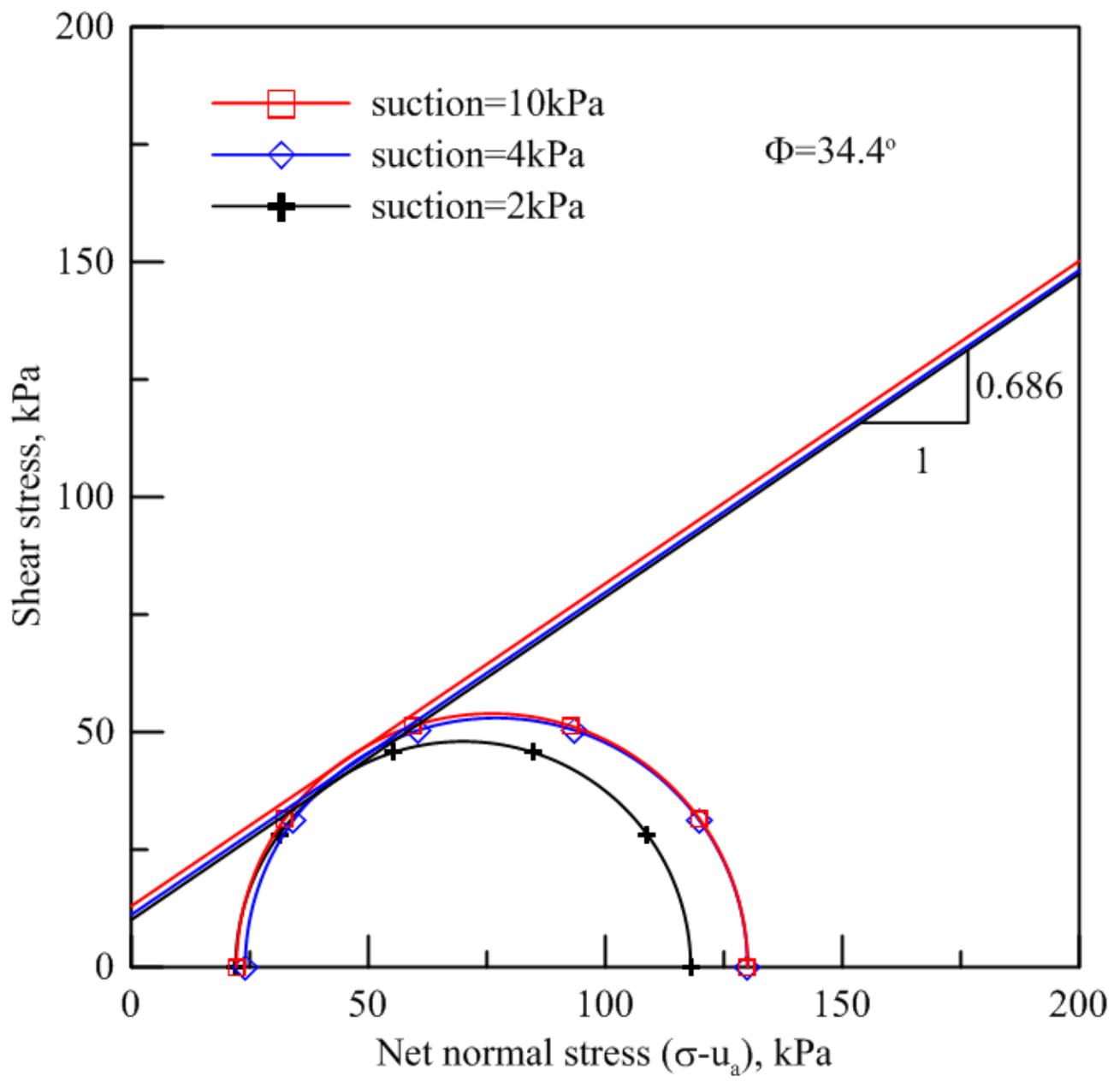


圖 5.38 試驗深度 0.75m 非飽和傍壓儀試驗破壞包絡線

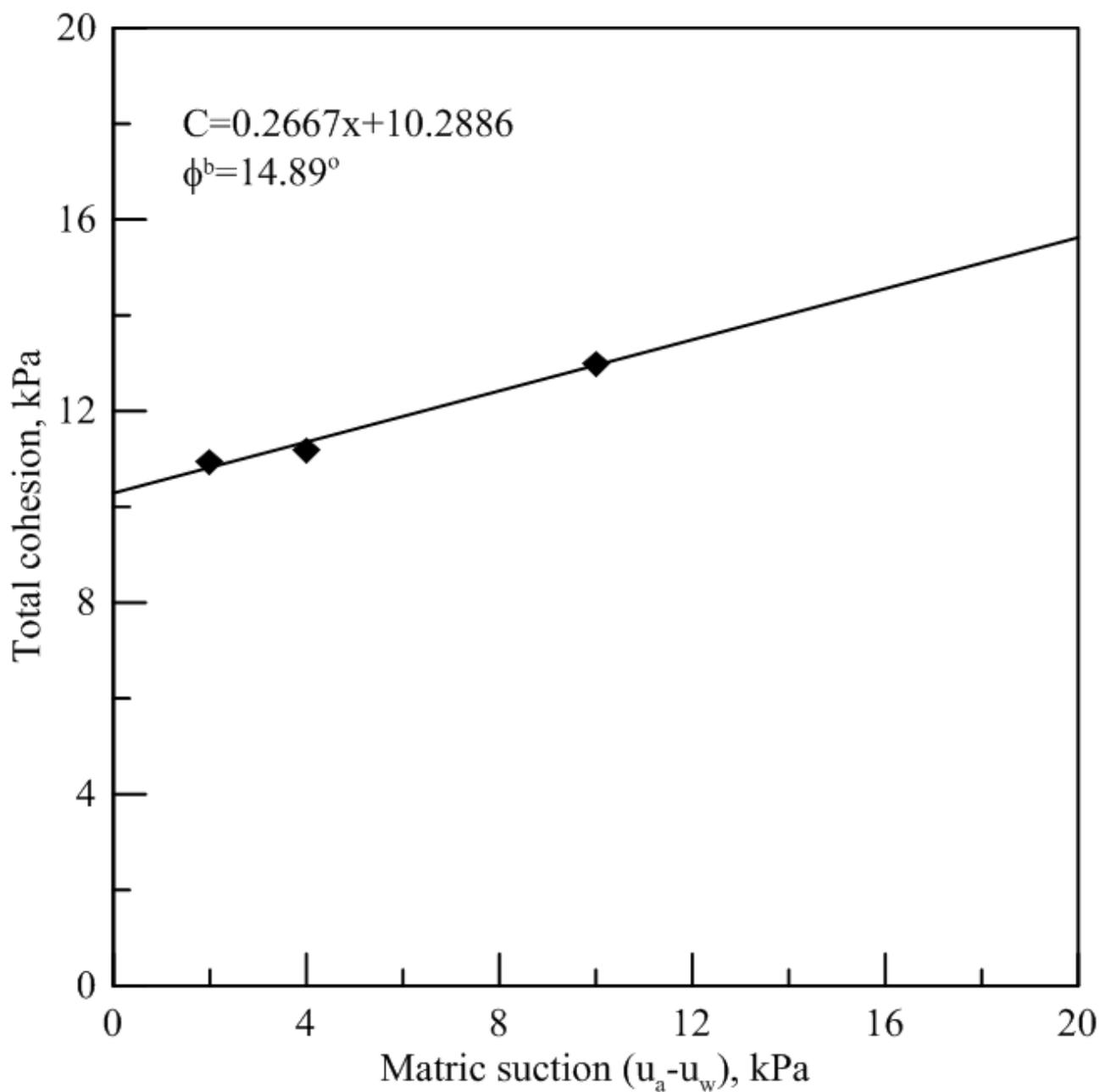


圖 5.39 試驗深度 0.75m- ϕ^b 線性回歸

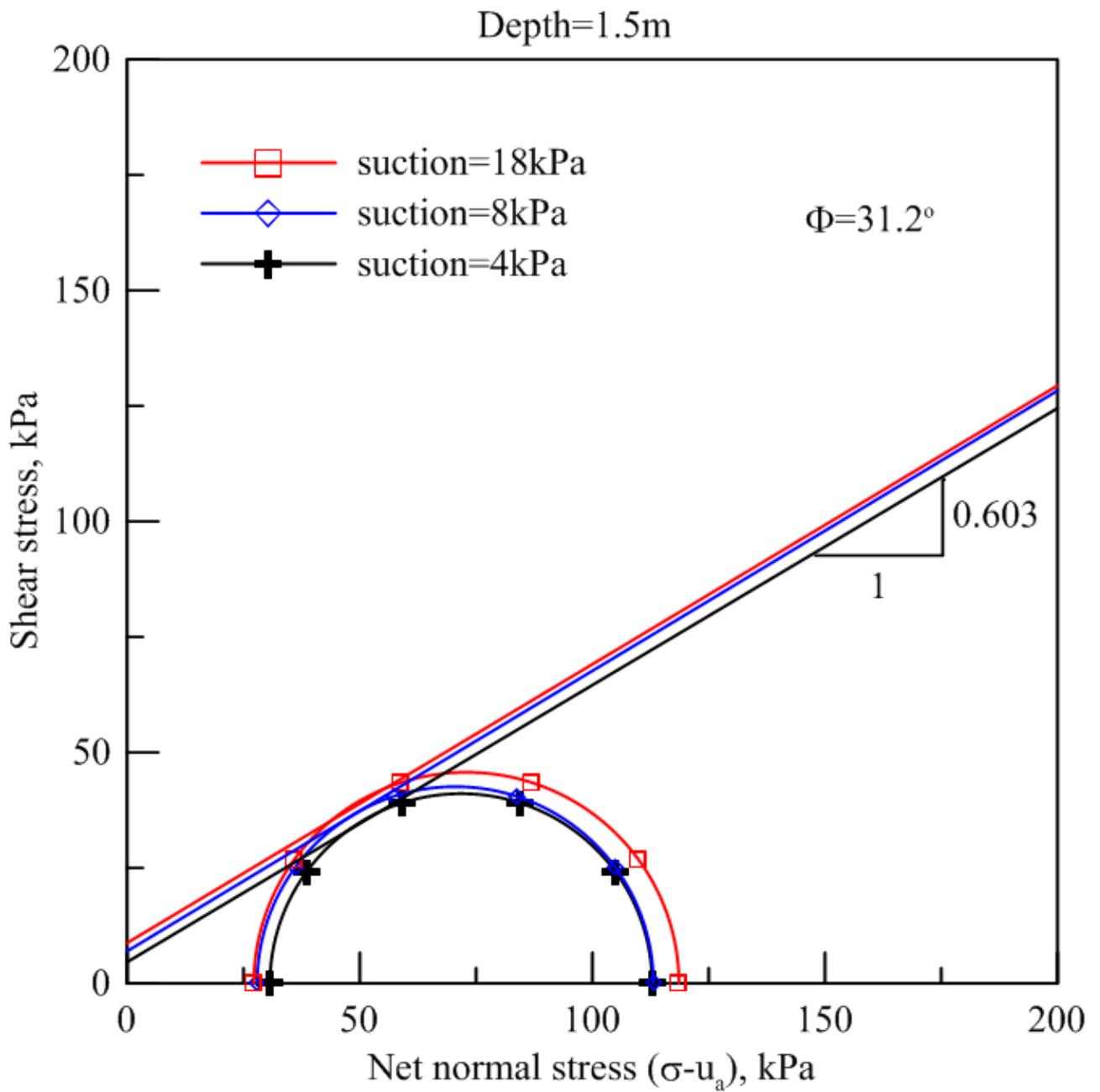


圖 5.40 試驗深度 1.5m 非飽和傍壓儀試驗破壞包絡線

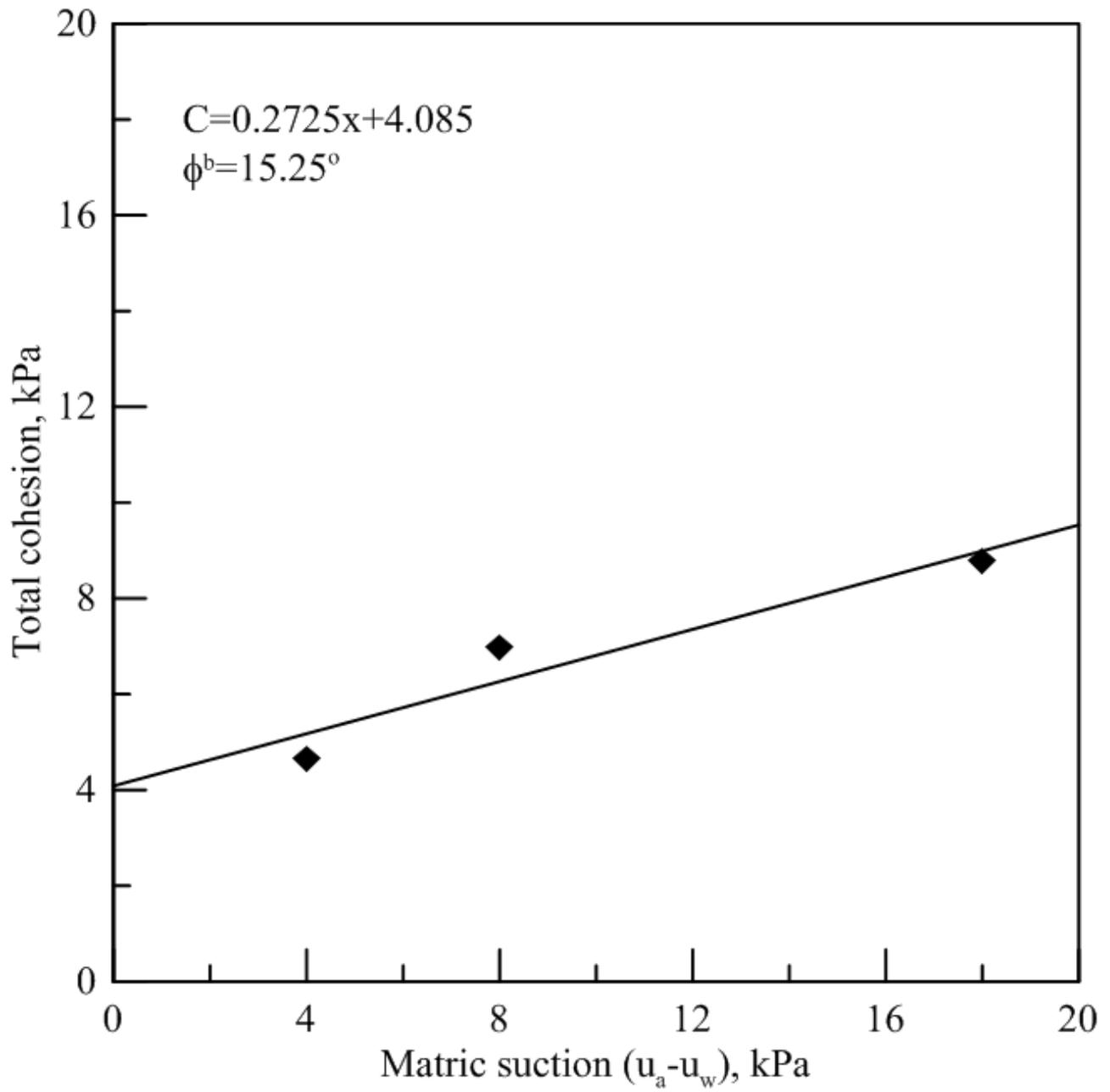


圖 5.41 試驗深度 1.5m- ϕ^b 線性回歸

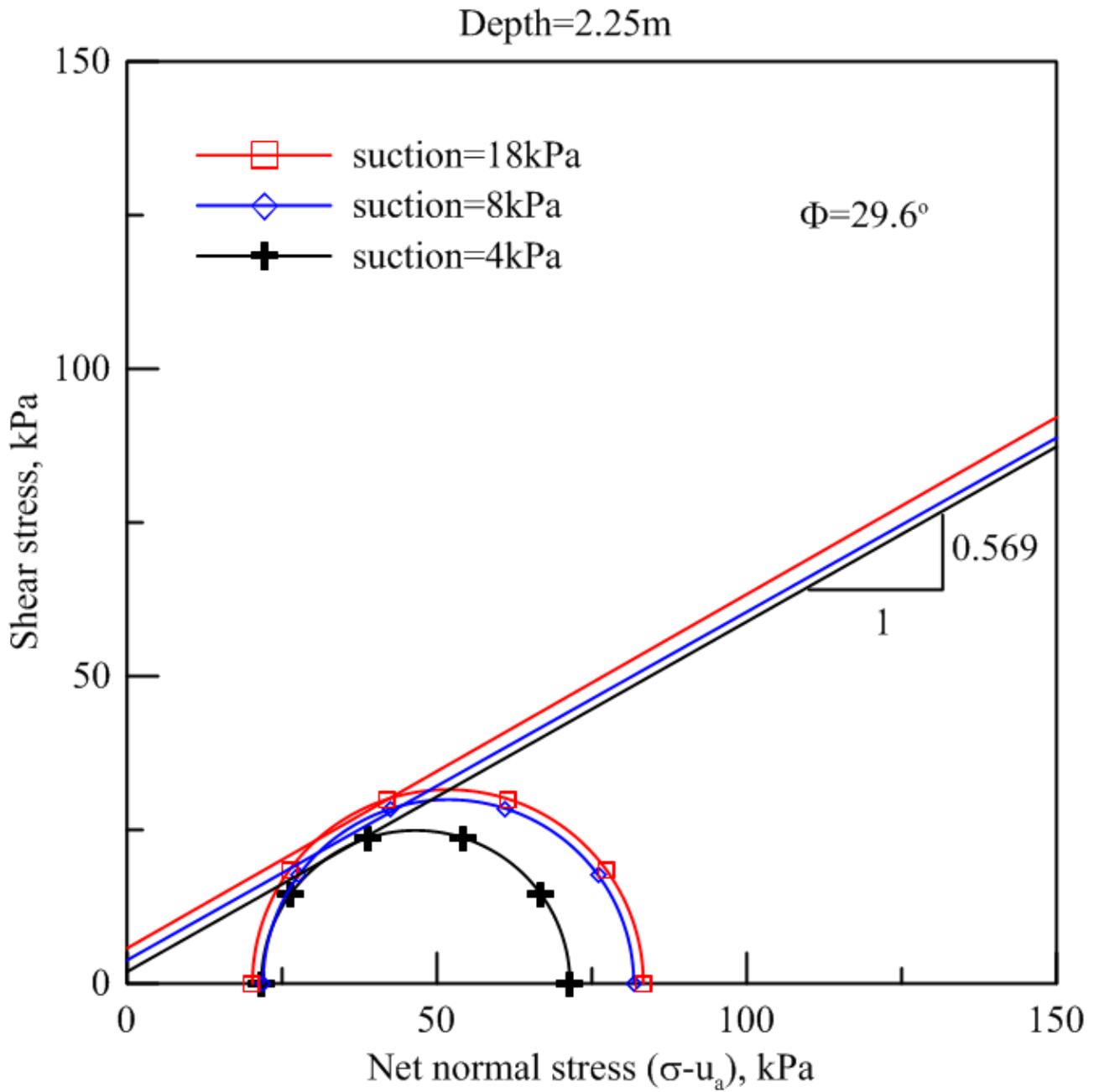


圖 5.42 深度 2.25m 非飽和傍壓儀試驗破壞包絡線

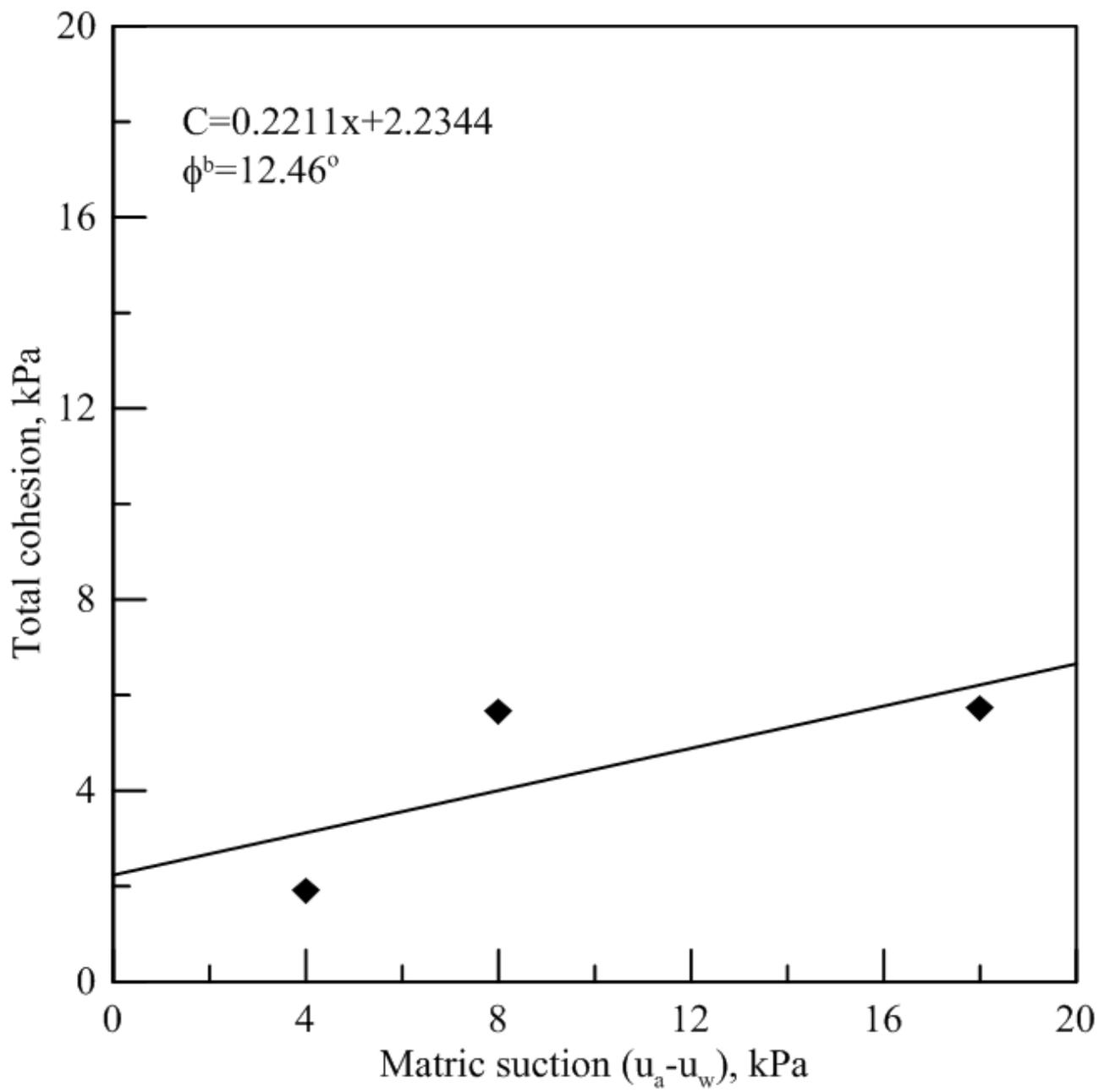


圖 5.43 試驗深度 2.25m- ϕ^b 線性回歸

第六章 結論與建議

本研究將傍壓儀電子式應變感測器改良光纖式應變感測器，並應用於現地非飽和土壤上，希望利用光纖靈敏度高、不怕水、不怕電磁波干擾等優點，發展出高解析傍壓儀在現地進行非飽和土壤傍壓儀試驗，從非飽和土壤傍壓儀試驗結果得到非飽和土壤強度參數、剪力模數、潛變曲線。以下為試驗之結論與建議：

6.1 結論

1. 改良後的光纖傍壓儀，從剪力模數遞減曲線可看出應變量測的靈敏度提高許多，可以量測到電子式傍壓儀無法準確量測的應變範圍0.001~0.01%。電子式應變感測器解析度為0.13%，光纖式應變感測器解析度為0.007%，精確度為99.9%。
2. 基質吸力大小對初始孔內壓力 P_0 與降伏壓力 P_f 有相關性，有隨著基質吸力增加慢慢上升的趨勢。極限壓力 P_L 與初始孔內壓力之差值淨極限壓力，利用Baguelin (1978)的經驗法則判斷試驗場址的土壤強度分類屬於Firm。
3. 基質吸力大小對潛變曲線的影響從試驗結果來看，在初始孔內應力 P_0 與降伏壓力 P_f 之間的擬彈性線段，基質吸力對土壤潛變量影響不大。在降伏壓力 P_f

與極限壓力 P_L 之間的塑性線段，基質吸力大小明顯影響土壤的潛變，當基質吸力越低，土壤的潛變越大。

4. 基質吸力大小會影響正規化模數 G_{sn} 遞減曲線得遞減速率，當基質吸力越小，正規化模數遞減曲線有向右發展的趨勢，代表遞減速率較慢。本試驗結果 $PI=10.2\%$ 的正規化模數 G_{sn} 遞減曲線，比較靠近Vucetic and Dobry (1991)提出黏土塑性指數 $PI=50\%$ 的曲線位置，判斷為本試驗為現地試驗得到的結果，Vucetic and Dobry (1991)的試驗為室內試驗結果，故有所差異。
5. 基質吸力對最大剪力模數 G_{max} 、正規化模數 G_{sn} 的相關性比較高；基質吸力對現地剪力模數 G_{ur} 相關性在試驗深度 $0.75m$ 的時候比較低，在試驗深度 $1.5m$ 、 $2.25m$ 的時候相關性比較高。
6. 非飽和傍壓儀試驗得到現地的土壤強度參數，深度 $0.75m$ 得到 $c'=10.29kPa$ 、 $\phi'=34.4^\circ$ 、 $\phi^b=14.8^\circ$ ；深度 $1.5m$ 得到 $c'=4.085kPa$ 、 $\phi'=31.2^\circ$ 、 $\phi^b=15.25^\circ$ ；深度 $2.25m$ 得到 $c'=2.23kPa$ 、 $\phi'=29.6^\circ$ 、 $\phi^b=12.46^\circ$ ，土壤強度參數有隨著深度增加而降低的趨勢。非飽和土壤參數 ϕ^b 遠小於有效摩擦角 ϕ' ，代表正向應力增加對土壤強度的影響，比基質吸力增加的影響還大。

6.2 建議

1. 建議如有後續研究可以提高現場基質吸力的改變量，觀察非飽和土壤參數 ϕ^b 是否會發生改變，會變得比原來數值更高或更低，還是幾乎不會發生改

變。

2. 基質吸力與剪力模數 G_{ur} 是否有相關性，從本試驗結果來看尚不能肯定，建議如有後續研究可以補充試驗得到的剪力模數 G_{ur} 樣本數，則可準確判斷基質吸力與剪力模數 G_{ur} 的相關性。
3. 傍壓儀試驗結果好壞與試驗操作者的施作經驗有關，不同的試驗操作者在同樣的土壤條件下進行傍壓儀試驗，會得到不同的試驗結果，建議傍壓儀試驗操作者在正式試驗進行前依據傍壓儀試驗規範反覆練習，觀察自己的試驗結果是否有重複性與合理性，才能得到完美的試驗結果。
4. 傍壓儀本體上之四個應變量測主體，因為涉及光纖走線的問題只有中間部分有裝設，而鄭孟雄研製之高壓傍壓儀在上、中、下裝設應變感測主體，希望改良使傍壓儀本體在上、中、下裝設應變感測主體，上中下不同層次及方向的試驗結果都能擷取。

參考文獻

林文森(1998)， “軟弱岩石中之傍壓儀試驗” ， 碩士論文， 國立文通大學土木工程系。

鄭孟雄(1999)， “軟岩用高壓傍壓儀研製” ， 碩士論文， 國立交通大學土木工程系。

蘇志鐘(2000)， “軟弱岩層之現地力學與水利性質” ， 碩士論文， 國立交通大學土木工程系。

簡旭君(2003)， “光纖光柵應變管之研發” ， 碩士論文， 國立交通大學土木工程系。

林靜怡(2003)， “細粒料對粉土細砂小應變勁度之影響” ， 碩士論文， 國立文通大學土木工程系。

高聖傑(2006)， “光纖光柵壓力感測器之研發” ， 碩士論文， 國立交通大學土木工程研究所。

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” ， 碩士論文， 國立文通大學土木工程系。

古景宇 (2011)， “非飽和土壤多點式基質吸力之量測” ， 碩士論文， 國立文通大學土木工程系。

Baguelin, F., Jezequel, J. F. & Shields, D. H., 1978, "The Pressuremeter and Foundation Engineering," Aedermannsdorf, Trans Tech Publications, 617.

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.

Buckingham, 1907, "Studies of The Movement of Soil Moisture," U.S.D.A. Bur. Of Soils, Bulletin No. 38.

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.

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.

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.

Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R., 1978, "Stress State Variable for Unsaturated Soils," J. of Geotechnical Engineering, Geotechnical Division, GT11, ASCE pp. 1415-1416.

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.

Hecht, E., 1987, "Optics," second edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc.

Li, X. S., Yang, J., and Liu, H. L., 1986 "Differentiation of noisy experimental data for interpretation of nonlinear stress-strain behavior," J. Eng. Mech. 124(7), pp.705~712

Luna, R. and Jadi, H., 2000, "Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods" , Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure - Geophysics 2000, Federal Highway Administration, Saint Louis, MO, Paper No. 3-1.

Menard, L., 1957, "An apparatus for measuring the strength of soil in place," Thesis, University of Illinois.

Mair, R.J. and Wood, D.M., 1987, "Pressuremeter Testing: Methods and Interpretation," CIRIA Ground Engineering Report, London, England, Butterworths, 160p

Miller, G.A. and Muraleetharan, K.K., 2000, "Interpretation of pressuremeter tests in unsaturated soil," in Advances in Unsaturated Soils, Geotechnical Special Publication No. 99, Reston: American Society of Civil Engineers, pp. 40-53.

Mancuso, C., Vassallo, R. and d'Onofrio, A., 2002, "Small strain behavior of a silty sand in controlled-suction resonant column- torsional shear tests". Canadian Geotechnical Journal, Vol. No. 39. pp. 22-31.

Ridley, A.M. and Wray, W.K., 1995, "Suction measurement: a review of current theory and practices," Proc. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, Alonso and Delage eds, Balkema, Rotterdam, pp.1293~1322.

Schnaid, F., de Oliveira, L. A. K., and Gehling, W. Y. Y., 2004, "Unsaturated constitutive surfaces from pressuremeter tests." J. Geotech. Geoenviron. Eng. 130(2), 174–185.

Timoshenko, S. P. and Goodier, J.N., 1934, "Theory of Elasticity," McGraw-Hill, New York.

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 .

Vucetic, M. and Dobrt, R., 1991, "Effect of Soils Plasticity on Cyclic Response," Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 117 (1), pp. 89-107 .

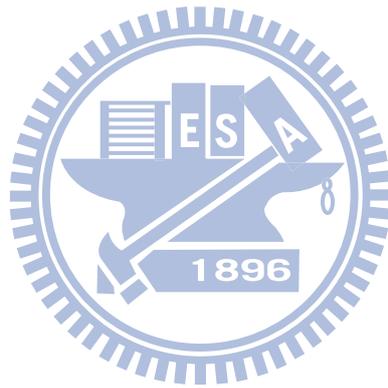
Woods, R. D., 1977, "Parameters affecting elastic properties." Dynamic method on Soil and Rock Mechanics, Vol. 1, Karlsruhe, Germany, 37-60.

Worth, C. P., 1982, "British experience with the self-boring Pressuremeter." Proc. Symp. Pressuremeter and its Marine Applications" pp 143-164.

Yu Wang, and Thomas O.R., 2007, "Interpretation of Secant Shear Modulus Degradation Characteristics from Pressuremeter Tests," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 12, pp. 1556-1566.

附錄 A

傍壓儀標定紀錄



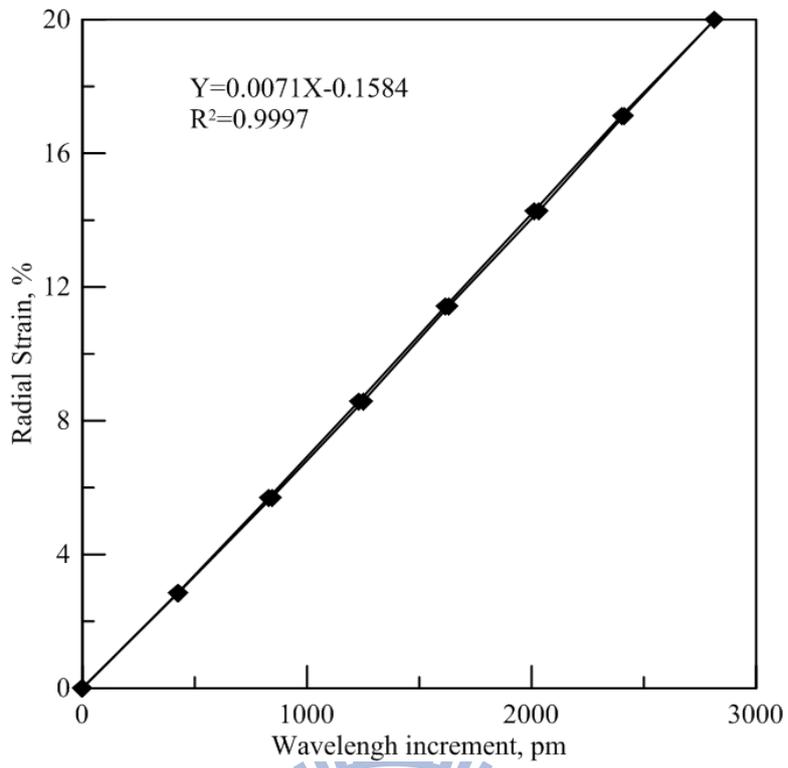


圖 A-1 一號簧片標定結果圖

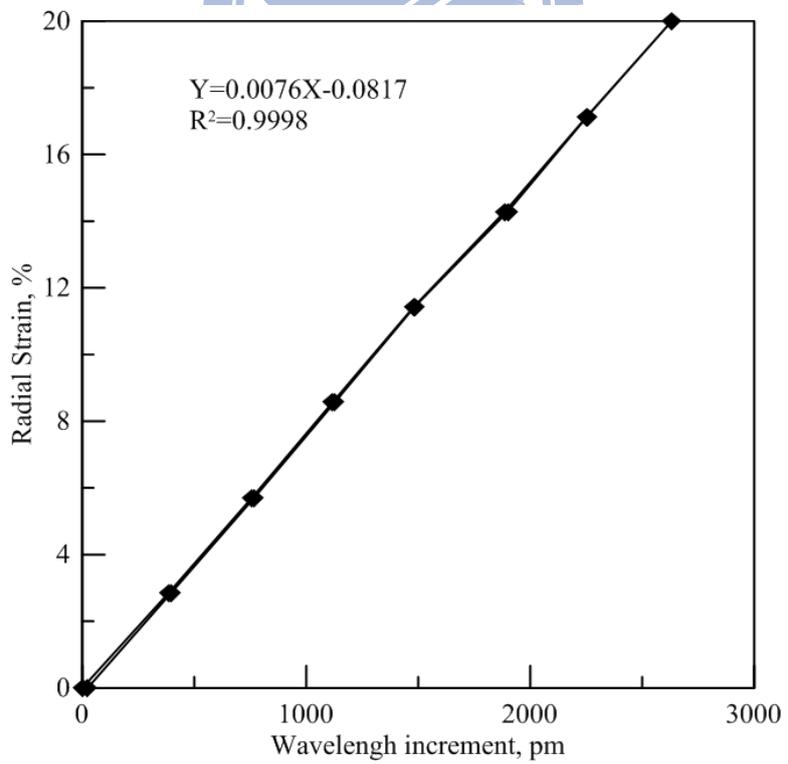


圖 A-2 二號簧片標定結果圖

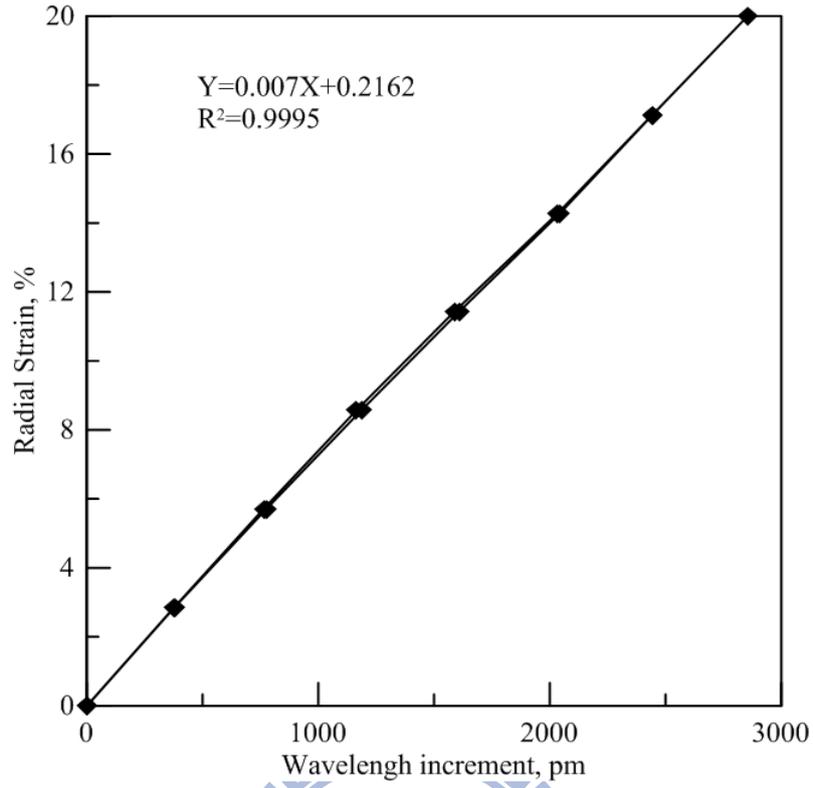


圖 A-3 三號簧片標定結果圖

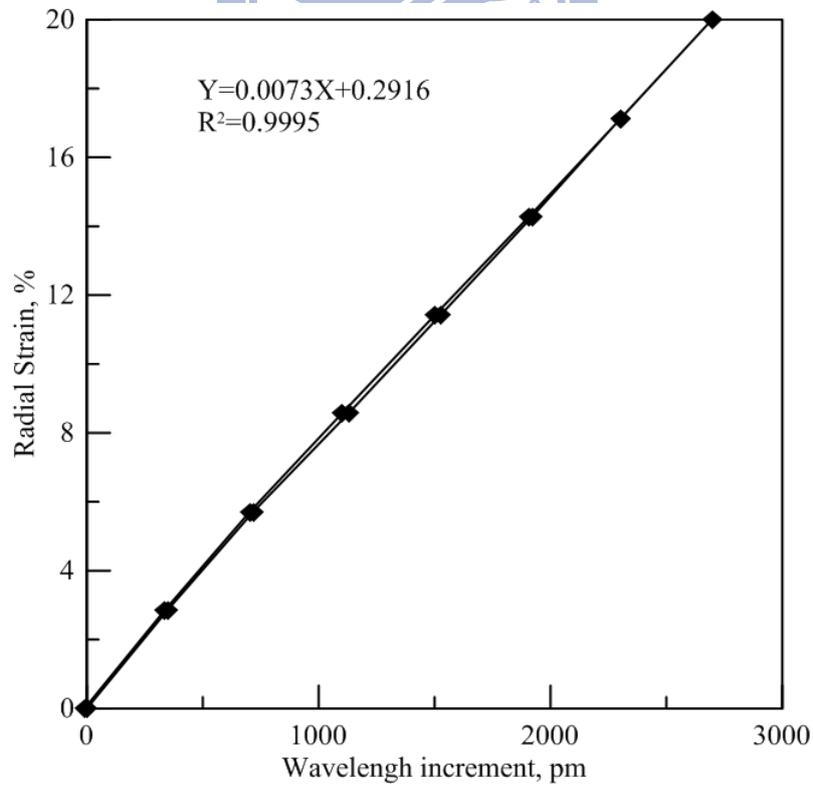


圖 A-4 四號簧片標定結果圖