

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

梨山崩積層中類併構岩（板岩夾黏土）之力學行為

Mechanical behavior of Bimrock-like Material in

Li-shan Colluvial Deposits

研究生：羅文驤

指導教授：廖志中 博士

中華民國九十六年七月

梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

Mechanical behavior of Bimrock –like Mateiral in

Li-shan Colluvial Deposits

研究生：羅文驤

Student: Wen-Hsiang Lo

指導教授：廖志中 博士

Advisor: Dr. Jyh-Jong Liao

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文



A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in
Civil Engineering

July 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年七月

崩積層土-石混合材料力學行為-以梨山地層為例

學生：羅文驤

指導教授：廖志中 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

梨山崩積地層主要由破碎板岩及其風化形成的土壤所組成，後經侵蝕作用造成凹凸之緩起伏地形，此種地形、地質條件極易於豪雨或地震後產生滑動。由於崩積材料組成甚為複雜，邊坡分析、設計所需瞭解的崩積層力學行為及力學參數甚難決定。本研究視梨山崩積層之破碎岩塊夾板岩風化後的黏土為併構岩，旨在以實驗室三軸試驗探討崩積併構岩的力學行為，並提出決定力學參數的方法。

本文利用軟岩用三軸試驗系統進行一系列的三軸不排水試驗探討不同岩塊含量對應力應變曲線、破壞形式、彈性模數、三軸破壞強度等的影響。試驗結果顯示岩塊的尖峰軸差強度、及切線楊式模數皆隨著岩塊含量增加而有上昇之趨勢。而岩塊含量較少的試體在模數隨變形量折減時有較大之折減情形。由試體破壞形示發現，高含量之試體受到岩塊排列影響，破壞面呈蜿蜒曲折狀，且破壞面上岩塊與岩塊間有摩擦之情形，增加了試體破壞面的粗糙度，推測此為造成併構岩材料強度增加之原因。最後本研究並提出結合室內試驗與數值模擬進行決定併構岩力學參數之方法。

關鍵字：崩積層、併構岩、三軸試驗、岩塊含量。

Mechanical behavior of Bimrock –like Material in Li-shan Colluvial Deposits

Student : Wen-Hsiang Lo

Advisor : Dr.Jyh Jong Liao

Institute of Civil Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

The Li-shan colluvial deposits are composed of broken slate and its weathered soils. The ground surface exhibits concave-convex landforms which were formed by weathering and erosion. Thus, the terrain and geology explicit that landslide is easy to be triggered by rainfall or earthquake in the area. Due to the heterogeneity nature, the mechanical behavior and mechanical properties of colluvial deposits are difficult to be determined. Based on the nature, the broken slate with grey clay of colluvial deposits in Li-shan area can be categorized as a BIM (block in matrix) rock.

The study aims to investigate the mechanical behavior of the BIM rock. A series of undrained triaxial compression tests was performed on the BIM rocks. Based on the experimental results, it can be found that both the triaxial peak strength and tangential Young's Modulus of the BIM rock increase with the increase of block content in specimens; the degree of modulus degradation for lower-block-content specimens is more significant than that for higher-block-content specimens. After observing failed specimens, it was found that failure path of high-block

content specimens is zigzag and the blocks located on the failure surface were sheared. The fact can be explained that the larger of the block ratio of the specimen is the higher of the triaxial peak strength of the BIM rock. Finally, an approach is recommended for determining the mechanical properties of BIM rocks by laboratory trial compression test associated with numerical analysis.

Key Word : Colluvial deposit , Bimrock , Triaxial compression test , Block content.



誌謝

學生由衷感謝指導教授廖志中博士與潘以文博士在學生撰寫論文與試驗期間耐心的教導與啟發，並時常給予督促、關懷與適時的鼓勵。另外並感謝口試委員林志平教授、柳志錫研究員與劉智超研究員百忙之中抽空為我指導，費心的審核與提供建議特別致上最高謝意。

感謝在梨山上鑽探時，與我一起度過酷寒冬天與風吹雨淋的禎國與孟修同學。還有在試驗儀器架設與指導上幫我許多的盛華學長，要是沒有你這兩年來您真的教了我許多東西，讓我能排除萬難順利進行試驗。另外在我做實驗時幫我的智仁學弟，還有陪我打球、唱歌、打電動的學長、同學、學弟們。因為你們，使我的研究生涯多采多姿，也不致於孤單。

最後感謝生我育我悉心照顧我的父母與祖父母，還有我的大哥與小妹。感謝你們一直在我遇到困難或障礙時義無反顧的給予我精神上的支持，並且讓我一直感受到家庭的溫暖，讓我能茁壯成長。另外，我謹將這本論文獻給在天國的外婆，感謝您將從小體弱多病的我扶養長大。請您繼續在天上看著我並庇護我，我永遠思念著您。

目錄

中文摘要.....	ii
誌謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xiv
第一章 前言	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究流程.....	2
第二章 文獻回顧	4
2.1 梨山崩積層過去文獻整理	4
2.1.1 崩積層之定義	4
2.1.2 梨山崩積層崩塌型態	5
2.2 梨山地區崩積層材料分類	7
2.2.1 以材料特性分類.....	7
2.3 梨山崩積層物性及力學參數	11
2.3.1 既有試驗成果.....	11



2.4 土、岩混合材料特性的力學特性	22
2.5 土石混合材料三軸試驗實驗結果之影響因素	36
2.5.1 顆粒形狀、大小、及級配.....	37
2.5.2 含水量、飽和度及孔隙比.....	37
2.5.3 試體形狀及幾何.....	37
2.5.4 圍壓之影響.....	38
第三章 實驗儀器介紹	39
3.1 MTS 810 三軸與單壓試驗系統	39
3.1.1 軸壓系統.....	41
3.1.2 三軸系統.....	41
3.2.2 量測元件.....	46
第四章 樣品準備、試驗規劃、及試驗步驟	54
4.1 試驗流程圖.....	54
4.2 試驗材料取得.....	55
4.2.1 鑽探位置.....	55
4.2.2 鑽探取樣與保存.....	57
4.3 試驗規劃.....	59
4.3.1 試驗流程圖	61
4.3.2 試體準備	62



4.4 實驗步驟.....	66
4.4.1 三軸壓縮試驗.....	66
4.4.2 一般物性試驗.....	68
第五章 實驗結果與分析	69
5.1 一般物性試驗結果.....	69
5.2 三軸實驗結果.....	70
5.2.1 岩心岩塊面積比與體積百分比.....	73
5.2.2 剪力波量測結果.....	78
5.2.3 三軸不排水實驗應力應變曲線.....	78
5.2.3 孔隙水壓變化曲線.....	81
5.2.4 類併構岩三軸不排水強度.....	83
5.2.5 微應變量量測與切線楊氏模數.....	84
5.2.6 影響材料強度因子探討.....	90
5.3 利用實驗結果與數值模擬決定崩積材料剪力強度參數之建議	93
第六章 結論與建議	99
6.1 結論.....	99
6.2 建議.....	100
參考文獻.....	102

圖目錄

圖 1.1 本研究之流程圖	3
圖 2-1 崩積層的位移破壞形態分類圖 (董家鈞與楊賢德(2001))	5
圖 2-2 B-9 滑動體位置圖與 B-B'剖面示意圖(黃玉麟(2006))	6
圖 2-3 B-9 滑動體地層與劈理位態圖(黃玉麟(2006))	7
圖 2-4 典型梨山地區崩積層剖面(工業技術研究院, 1993)	8
圖 2-5 工研院梨山地區地層材料分類圖示	8
圖 2-6 岩心分類流程圖(黃玉麟(2006))	11
圖 2-7 方世傑(1990)等於台 7 甲 73 k 鑽孔、篩分析及塊狀取樣位置圖	16
圖 2-8 N-2 12 ~ 16 m 岩心圖(黃玉麟(2006))	21
圖 2-9 N-2 16 ~ 20m 岩心圖(黃玉麟(2006))	22
圖 2-10 最大粒徑與內摩擦角關係 摘自(Marachi ,1972)	24
圖 2-11 岩塊與基質在不同含量下之排列 (Montrasio , 1998)	26
圖 2-12 Montrasio 所假設的模型	27
圖 2-13 依含量比不同而相對應之應變門檻值 (Montrasio , 1998)	27
圖 2-14 單剪試驗尖峰剪力強度與含量比關係圖(Vallejo , 2000)	30
圖 2-15 不同圍壓中孔隙率與含量比曲線 (摘自 Vallejo , 2000)	32
圖 2-16 含量比變化下砂與黏土顆粒排列情形 (摘自 Vallejo , 2000)	33

圖 2-17 Vallejo(2000)乾淨砂受黏土填於孔隙中之理論模型	33
圖 2-18 併構岩體積含量比與有效摩擦角關係圖	35
圖 2-19 N-2 52 ~ 56m 岩心圖(黃玉麟(2006)).....	36
圖 2-20 N-2 68 ~ 72 m 岩心圖(黃玉麟(2006)).....	36
圖 3.1 軟岩三軸系統配置圖(摘自林智惠(2003)).....	40
圖 3.2 軟岩三軸試驗系統全景.....	41
圖 3.3 三軸室組構圖(摘錄自林智惠 2003).....	44
圖 3.4 MTS 458 控制器	45
圖 3.5 油壓機(摘錄自林智惠 2003).....	45
圖 3.6 油壓缸與真空幫浦(摘錄自林智惠 2003).....	46
圖 3.7 內置式荷重計、壓力轉換器(摘錄自林智惠 2003)	47
圖 3.8 微應變計(Proximeter)(摘錄自林智惠 2003).....	50
圖 3.9 微應變計之目標金屬物固定裝置(摘自林智惠 2003).....	51
圖 3.10 剪力波元件試驗系統示意圖(摘自林智惠 2003)	51
圖 3.11 壓電陶瓷晶片剪力波元件尺寸(摘自林智惠 2003).....	52
圖 3.12 試體頂蓋剪力波元件(發射端)嵌入示意圖(摘自林智惠 2003)	52
圖 3.13 底座剪力波元件(接收端)嵌入示意圖(摘自林智惠 2003)	53
圖 3.14 上下蓋加裝剪力波元件完成圖	53
圖 4.1 研究流程圖	54

圖 4.2 本年度鑽探孔位示意圖	56
圖 4.3 工研院(2005)於 C 滑動體鑽取之 Ah1 ~ Ah6 孔位分佈	56
圖 4.4 放置岩心之岩心箱(劉盛華 2007).....	59
圖 4.5 保護岩心方式 (劉盛華 2007)	59
圖 4.6 三軸實驗流程圖	62
圖 4.7 單刃岩心切割機.....	63
圖 4.8 岩心切割機控制旋鈕介面圖.....	64
圖 4.9 試體 360°攝影示意圖.....	64
圖 4.10 試體每 90 拍照紀錄圖(以 N2..... 18.4m ~ 18.6m 為例)	65
圖 4.11 試體 360°影像展開圖 (以 N2..... 18.4m ~ 18.6m 為例)	65
圖 4.12 不同緊密度之土壤有飽和度與 B 值之關係 (Black,1973)	67
圖 5.1 面積比與實際溼篩後體積比比較	74
圖 5.2 岩心之岩塊與現地岩石之差異	74
圖 5.3 岩心中三種種類之板岩岩塊	75
.....	77
圖 5.4 N-1 12 ~ 16 m (摘自黃玉麟, 2006).....	77
.....	77
圖 5.5 N-2 40 ~ 44 m (摘自黃玉麟, 2006).....	77
圖 5.6 6.0 kg/cm^2 有效圍壓下應力應變圖(SG-Ah102 SG-Ah106 為例)	

.....	79
圖 5.7 4.5 kg/cm ² 有效圍壓下應力應變圖(以 SG-N102 SG-Ah103 為例)	80
.....	80
圖 5.8 2.0 kg/cm ² 有效圍壓下應力應變圖(SG-N202 與 SG-Ah107 為例)	80
.....	80
圖 5.9 2.0 kg/cm ² 有效圍壓下孔隙水壓曲線圖	81
.....	81
圖 5.10 4.5 kg/cm ² 有效圍壓下孔隙水壓曲線圖	82
.....	82
圖 5.11 6.0 kg/cm ² 有效圍壓下孔隙水壓曲線圖	83
.....	83
圖 5.12 軸差強度與岩塊含量趨勢圖	84
.....	84
圖 5.13 MTS LVDT 與 Proximeter 小應力應變行為比較(SG-N202)	85
.....	85
圖 5.14 4.5 kg/cm ² 有效圍壓下之軸差強度、含量與微應變圖	86
.....	86
圖 5.15 切線楊氏模數與岩塊含量關係	87
.....	87
圖 5.16 2.0 有效圍壓下模數遞減曲線	88
.....	88
圖 5.17 4.5 有效圍壓下模數遞減曲線	89
.....	89
圖 5.18 6.0 有效圍壓下模數遞減曲線	90
.....	90
圖 5.19 破壞曲線與岩塊分佈圖(N-2 18.4 ~ 18.6m)	91
.....	91
圖 5.20 破壞曲線與岩塊分佈圖(AH-1 37.80 ~ 37.95m)	92
.....	92
圖 5.21 低含量併構岩材料破壞曲線示意圖	93
.....	93
圖 5.22 高含量併構岩材料破壞曲線示意圖	93
.....	93
圖 5.23 SG-Ah102<含量 18.96%>表面岩塊分佈圖	96
.....	96
圖 5.24 謝孟修(2007)對 SG-Ah102 分割表面模擬圖	96
.....	96

圖 5.25 圍壓 6kg/cm^2 試驗與數值模擬應力應變曲線比較.....97

圖 5.26 室內試驗與數值模擬定義力學參數流程建議.....98



表目錄

表 2-1 藤原明敏(1979)崩積地層分類基準表	9
表 2-2 岩心分類方法(黃玉麟(2006)).....	10
表 2-3 前人研究梨山結果 (摘自劉盛華, 2007.....	13
表 2-4 四號篩以下重模直接剪力試驗結果(工研院(1993))	14
表 2-5 三軸 SCU 試驗結果(工研院(1993)).....	15
表 2-6 一般物理性質試驗結果(方世傑(1990)).....	17
表 2-7 唐禎國(2007)與過去研究者對梨山崩積層歸納	20
表 2-8 卵礫石含量對粘土砂土 Φ' 及 c' 影響 (Holtz ,Willard(1961))	23
表 2-9 5 組不同含量比的砂-黏土混合試體(Vallejo,(2000))	28
表 4.1 傳統皂土穩定液與超泥漿穩定液之比較表(黃玉麟(2006)).....	58
表 4.2 本研究三軸試驗規劃與試體取樣位置.....	60
表 4.3 本研究土壤一般物性試驗規劃與取樣位置	60
表 4.4 板岩一般物性試驗規劃與取樣位置.....	61
表 5.1 板岩塊物性試驗結果	69
表 5.2 併構岩試體內土壤一般物理性質試驗	70
表 5.3 試體編號及基本資料表	71
表 5.4 試體基本物性表	72

表 5.5 N1 12 ~ 16 m 岩塊長短軸與厚度比76

表 5.6 N2 48 ~ 52 m 岩塊長短軸與厚度比76



第一章 前言

1.1 研究動機

梨山地區為一古崩塌地，地層屬於中新世廬山層，主要由板岩構成。崩塌地之主要組成材料為板岩及其風化形成的土壤，板岩岩質破碎、軟弱，風化土壤以含岩屑的黏土為主。此種地質條件極易於豪雨或地震後產生滑動，例如，民國七十九年四月於連續降雨後，崩塌地上緣之台八線梨山賓館、台汽客運梨山站，以及國民旅舍等建物均有嚴重下陷與龜裂之情形，台七甲線 73k 也發生路基邊坡破壞，因此梨山崩塌地存在甚多形成年代不同及規模不一的崩體（滑動體）。此種材料因含組成不一的岩塊及黏土，可視為併構岩材料。

由於邊坡破壞，地層受擾動，一般而言，崩積層組成均不均質且相當複雜。過去曾有研究針對梨山崩積材料做力學參數探討，然而礙於過去鑽探品質不佳，因此多利用重模試體施做室內試驗。此外，即使利用明坑之天然崩積層試體，進行直接剪力試驗，因該層組成複雜，其結果散亂。本研究採旋鑽法並搭配鋼索式取樣，以超泥漿穩定液為循環液，提高岩心提取率及品質，並利用高品質岩心於實驗室進行一系列的不排水三軸剪力試驗，利用試驗結果分別對崩積材料的力學行為與粒徑分佈或岩塊含量關係加以探討。

1.2 研究目的

本研究針對梨山崩積材料內之類併構岩，以高品質的岩心進行一連串的室內物理及力學試驗，包含：

- 1、室內三軸試驗，決定材料強度與力學行為。
- 2、黏土及板岩的一般物性試驗，探討岩心材料性質之異同及參數範圍。

並結合謝孟修(2007)數值模擬建議建立類併構岩崩積材料力學性質之流程。

1.3 研究流程

本研究首先針對梨山崩坍地過去相關研究文獻包含過去材料力學參數研究整理，並對過去國內外對土壤-岩塊混合材料研究之文獻加以探討。利用優良之鑽探品質確保取樣時得到可供試驗之岩心，並於室內試驗施做土壤之一般物性試驗與三軸壓縮試驗，本研究流程圖如圖 1.1 所示。

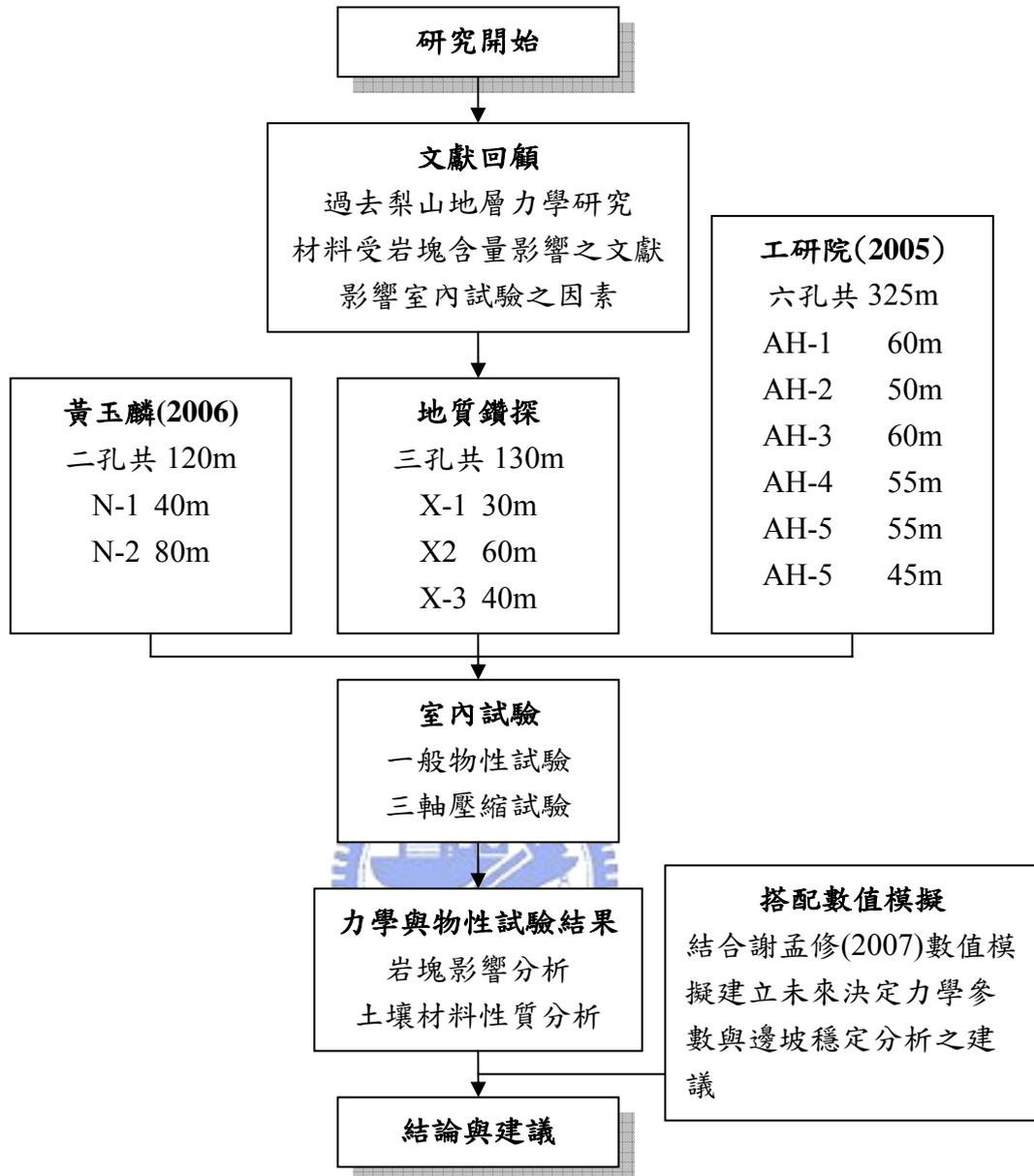


圖 1.1 本研究之流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 梨山崩積層過去文獻整理

2.1.1 崩積層之定義

邊坡往往會因為地質、地形或環境等因素，造成破壞。而邊坡破壞的規模與頻率，是由於邊坡本身條件影響而有所不同，不論是大規模、小規模或破壞頻繁的邊坡，都會在下邊坡或崖堆上形成堆積物。這些原本在邊坡上的岩石，經過物理或化學等風化程序後，經由滾動、滑動或崩塌等重力作用而向低處位移，形成無一定形狀與大小的堆積物，這些堆積物就稱為崩積土。洪如江(1979)認為在上游集水區或礦區上、下方常有崩積土，在斷層帶上或附近的地質材料較為破碎或軟弱，因此也會造成小規模的崩坍地或是崖錐堆積。

崩坍的種類也與母岩、形成年代與環境息息相關。董家均與楊賢德(2001)也將崩積層依形成時崩積材料位移破壞形態分為，岩塊堆積崩積層、土石混合堆積崩積層與岩層滑動崩積層(圖 2-1)。

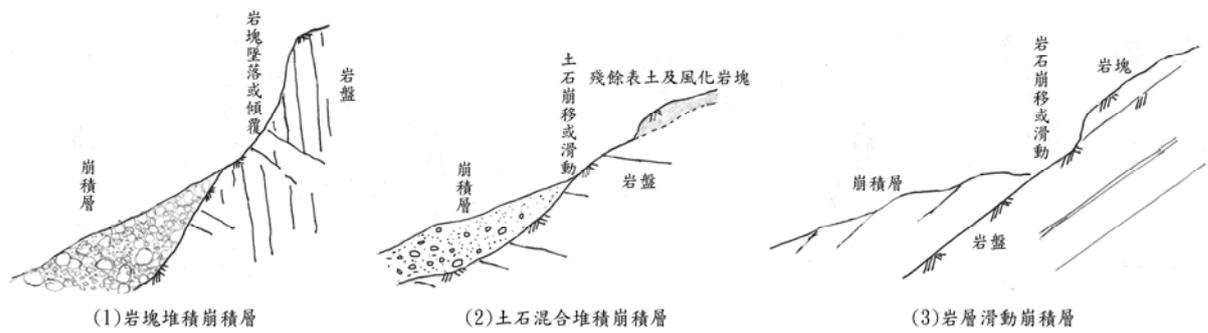


圖 2-1 崩積層的位移破壞形態分類圖（董家鈞與楊賢德(2001)）

2.1.2 梨山崩積層崩塌型態

黃玉麟(2006)針對梨山崩坍地做研究，以 B-9 滑動體(圖 2-2)為例，鑽取 N-1、N-2 孔並進行孔內造影及波速量測試驗。由梨山地區區域地質資料、排水廊道開挖地質資料，鑽探岩心及施作孔內造影綜合歸納結果，由圖 2-3 可看出邊坡向北傾斜，而劈理傾向東南，因此形成梨山崩積體的主要邊坡破壞非為順層面或劈理面的順向坡滑動。黃玉麟(2006)認為，B-9 滑動體存在二明顯滑動面，他並推測 B-9 滑動體下層滑動（最早的）的破壞方式可能屬於大規模山坡潛移作用形成剪力面滑動（地震、豪雨、或大甲溪下切引發）所形成。而後上層滑動則於原有滑動面上再度形成沿軟弱層的滑動。由鑽探結果推測上層軟弱層推測受地下水位在其分佈深度上下變動所造成；下層軟弱層評估為山坡潛移作用，岩層間相互剪動所產生。另外，新鮮岩盤介面亦有潛移作用的跡

象，但應尚未有明顯滑動，以致並無軟弱層黏土介面的生成。經梨山崩坍地 B-9 滑動體經由非順向坡的多次崩落與滑動，以及風化作用，與圖 2.1 對照研判應屬於土石混合堆積崩積層。

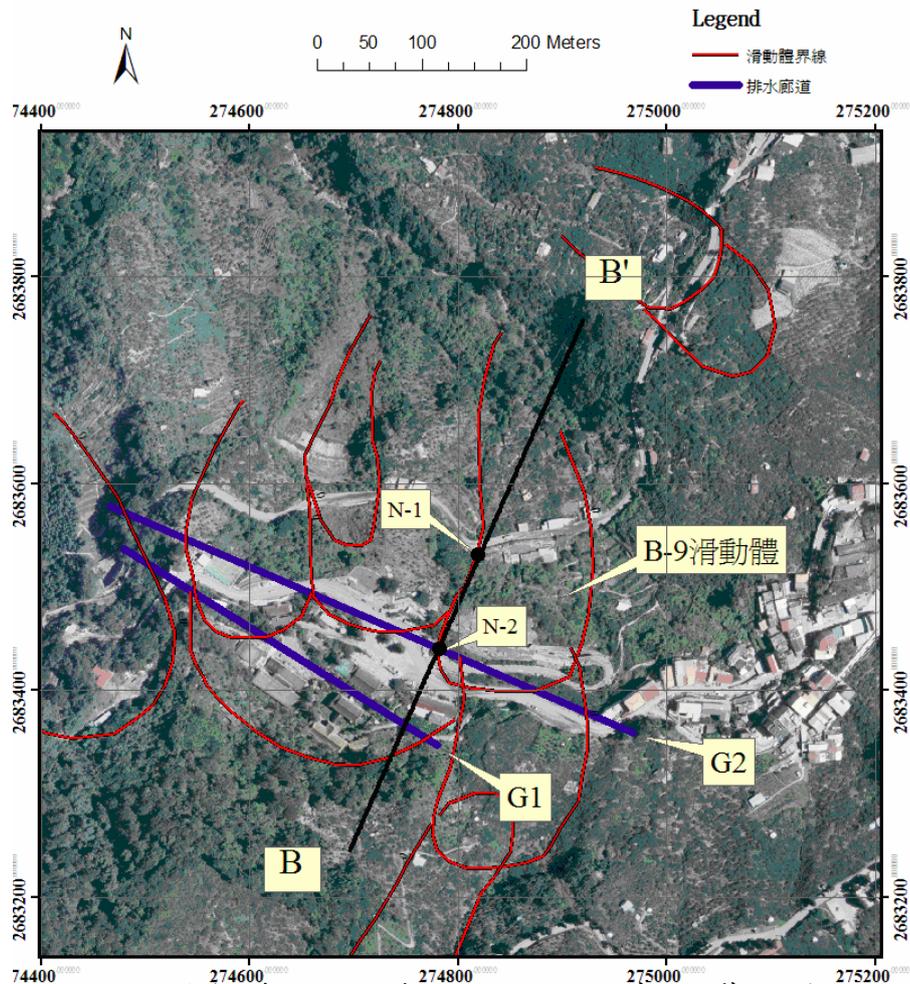


圖 2-2 B-9 滑動體位置圖與 B-B' 剖面示意圖(黃玉麟(2006))

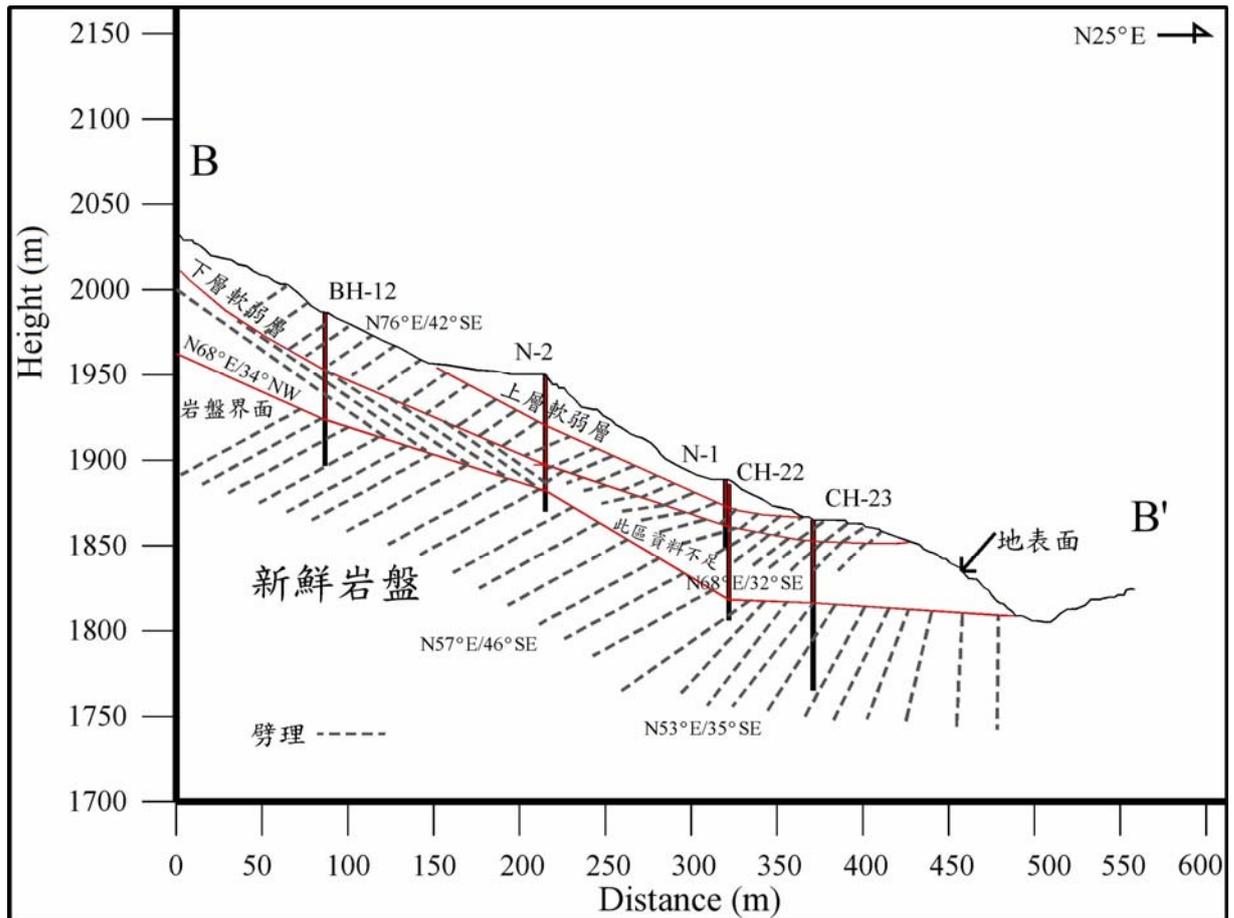


圖 2-3 B-9 滑動體地層與劈理位態圖(黃玉麟(2006))

2.2 梨山地區崩積層材料分類

2.2.1 以材料特性分類

工業技術研究院(1993)採用藤原明敏地滑地質風化程度分類標準(分類準則如表 2-1)，將梨山地區組成地層崩積土層分為五類，典型地層剖面與地層材料狀況如圖 2-4、2-5，第一層由崩積土(Dt)覆蓋，其主要包含一般表土及含礫石之土壤。下一層為風化岩層，其因風化等級不同，又可細分為兩類；中風化層(W2)與弱風化層(W3)。最下

層為新鮮岩盤(Rf)。

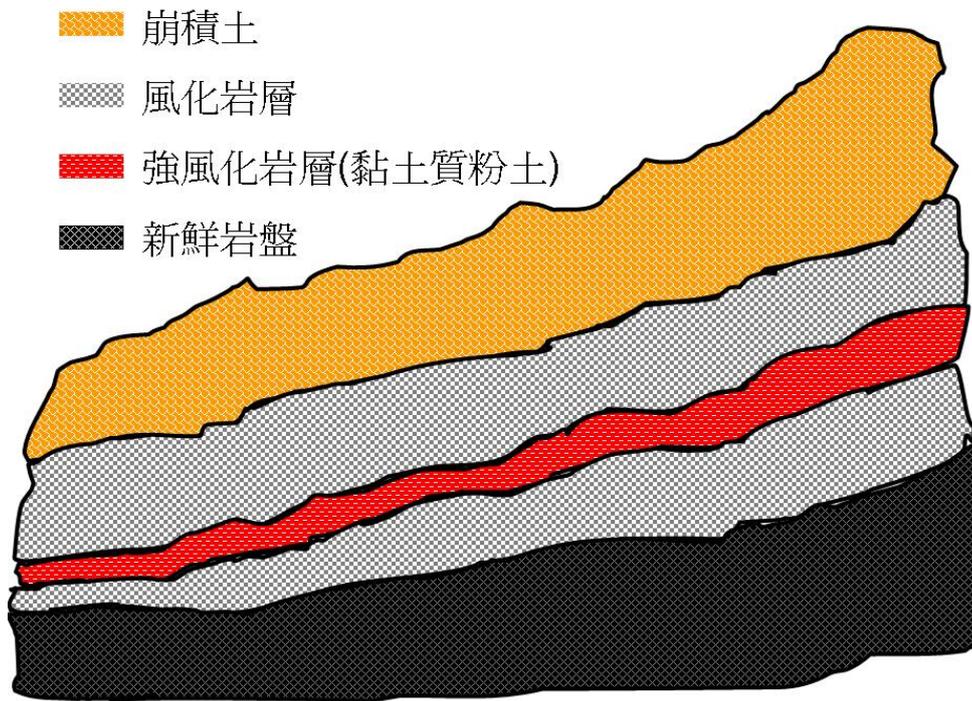


圖 2-4 典型梨山地區崩積層剖面(工業技術研究院, 1993)

圖例說明

格數	第 1 格	第 2 格	第 3 格	第 4 格	第 5 格
土壤種類	崩積土 (Dt)	強風化板岩 (W1)	中風化板岩 (W2)	弱風化板岩 (W3)	新鮮板岩 (Rf)
說明	黃棕色 / 砂質粉土，時夾破碎岩塊	黑色 / 黏土狀	黑色 / 細片狀	黑色 / 圓板狀至塊狀	黑色 / R Q D > 7 5

圖 2-5 工研院梨山地區地層材料分類圖示

表 2-1 藤原明敏(1979)崩積地層分類基準表

地滑地質符號	名稱	岩心的形狀及色調	組成地質的特徵	崩積土地滑(崩積土 黏質土)	岩盤地滑(岩盤 風化岩)
Dt	崩積土	土砂狀 褐色系	1.含一般的表土層,廣義的崩積土是夾礫的土壤,常呈褐色部分。 2.滑動面亦有可能發生於二次堆積物中。 3.老期崩積土以 Dt2 表示,岩盤中的擾亂黏土以 Dc1,細片至破片狀的擾亂部分以 Dr 表示。	移動土塊	移動土塊
W1	強風化岩	黏土狀 原岩色系	1.與原岩石呈同一色調的黏土,硬質黏土及未固結狀之粉土。 2.黏土類保持原岩石組織,砂質類呈均質土類。 3.褐色系以 W1'表示。 4.為一次堆積物。	準移動或準不動土塊	移動土塊
W2	中風化	細片 原岩色系	1.與原岩石呈同一色調且呈細片狀的岩心。 2.地表的岩層露頭富含裂隙或軟質。 3.褐色系以 W2'表示。	準不動岩盤	移動至準移動土塊
W3	弱風化岩	圓板狀至塊狀 原岩色系	1.與原岩石呈同一色調且呈圓板狀至塊狀的岩心。 2.地表呈新鮮岩層露頭。 3.褐色系以 W3'表示。	不動岩盤	準不動岩盤
Rf	基盤岩	棒狀 原色岩系	新鮮的基盤岩 岩心呈完整棒狀。	不動岩盤	不動岩盤
備註			W3 及 Rf 若位於 Dt、Dc1、Dr、W2 之上時,則應視為移動岩塊。	1.地形平緩。 2.山谷地形。 3.馬蹄狀滑落土體,地表坡面陷帶,水池及濕窪地。	1.地形較陡。 2.山脊形地形。 3.地滑頭部及兩側與線狀構造有密切關係。

藤原明敏從風化程度對崩積層材料的分類,但礙於早期台灣鑽探取得的岩心品質不良無法做更進一步的研究。圖 2-5 明顯可看出鑽探出來的岩心只能取得板岩岩塊,岩塊與岩塊間膠結的土壤均無法取樣,其分類無法反應梨山崩積地層之特性。也因此不能瞭解岩心中岩

塊細料顆粒間排列分佈情形，更無法製作試體並施做室內力學試驗。

工研院(2005)於梨山崩積層 C-1、C-2 滑動體鑽探 Ah1 ~ Ah6，黃玉麟(2006)對梨山崩積層 B-9 滑動體鑽的 N-1 孔及 N-2(見第四章)，改良方法以後，成功提高岩心提取率超過 95 % 並取得完整的岩心。並清楚的紀錄岩塊間膠結土壤之特徵，以此作更詳盡的分類(表 2-2、圖 2-6)：第一類灰色板岩夾黃色黏土(SY)，主要分佈在滑動體淺層接近地表部分；位於地水位以上，黃色黏土可能為地表細料土壤順著地表水沿裂隙下滲而膠結於板岩裂隙之間；第二類灰色板岩夾灰色黏土(SG)，其板岩所夾之灰色黏土，應為原崩積物之母岩因風化作用而生；第三類灰色完整板岩(S)則為新鮮岩盤的部分；第四類灰色黏土夾灰色板岩碎屑則為軟弱層，其他研究或稱為沉泥質黏土層，判定可能為滑動面。

表 2-2 岩心分類方法(黃玉麟(2006))

類別	代碼	岩心描述	說明
第一類	SY	灰色板岩夾黃色黏土	板岩顆粒排列整齊為 SY 板岩顆粒排列不整齊為 SY'
第二類	SG	灰色板岩夾灰色黏土	板岩顆粒排列整齊為 SG 板岩顆粒排列不整齊為 SG'
第三類	S	灰色板岩	完整板岩塊為 S 含節理面分佈則為 SJ
第四類	C	灰色黏土夾灰色板岩碎屑	
第五類	BF	回填土	

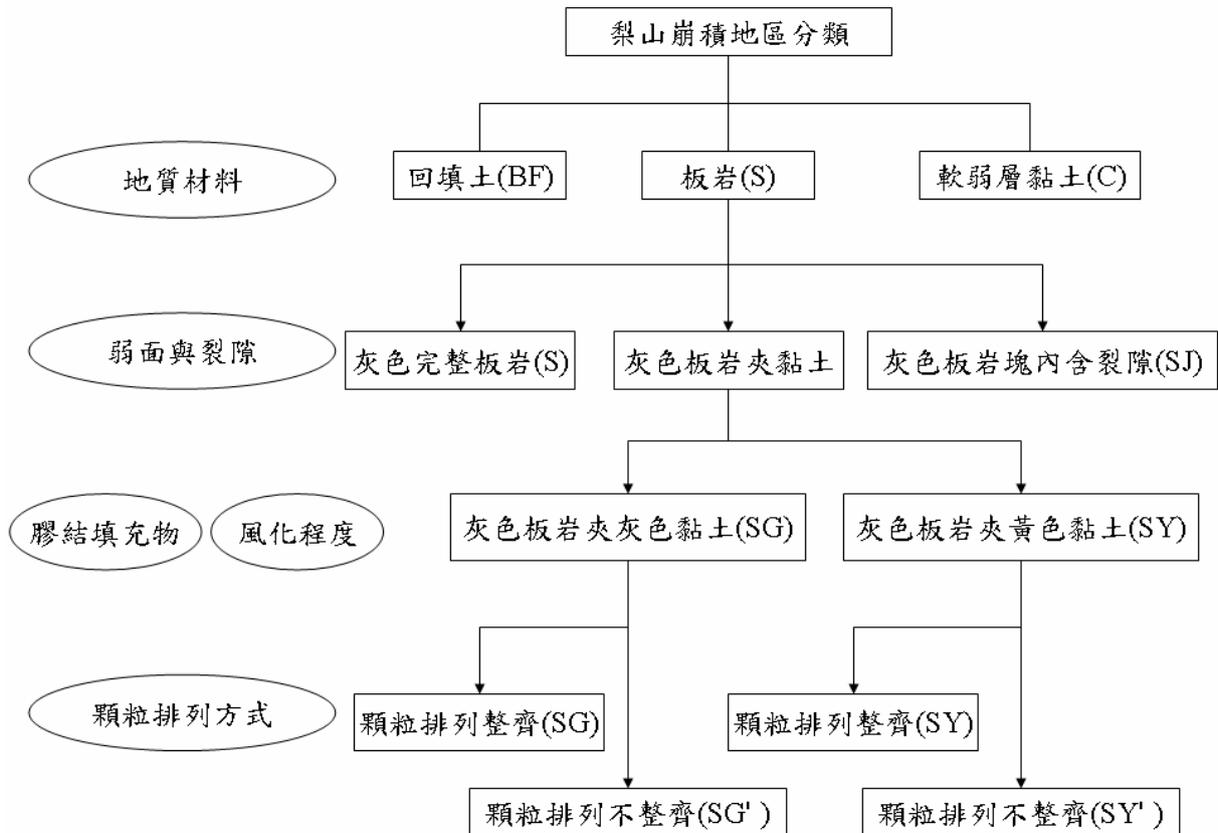


圖 2-6 岩心分類流程圖(黃玉麟(2006))

2.3 梨山崩積層物性及力學參數

2.3.1 既有試驗成果

過去因工程或研究計畫的執行，有甚多學者及工程單位探討梨山崩積材料的力學性質者（蘇苗彬，1990、亞新顧問，1990、林柄森，1991、蔡光榮，1987、工研院，1993）。依藤原明敏的分類，梨山崩積層可分為崩積土層、風化岩層、軟弱粉砂質黏土層、及岩盤等，其強度及膠結性不一，新鮮岩盤處常帶有劈理及節理，取得完整試體不

易。因此早期多用重模試體或明坑開挖得到之崩積土壤進行試驗。劉盛華(2007)將過去前人研究所得的力學性質整理如表 2-3，分別討論各類材料在重模以及自然試體下強度參數，對崩積土層材料而言， c 值並未有太大不同，重模試體摩擦角除了工研院範圍差異較大外，其餘得到的 Φ' 大多在 $29 \sim 35^\circ$ 間。中華工程(1996)與林炳森(1991)的天然試體，摩擦角則有 $6^\circ \sim 10^\circ$ 的差距，大致上略低於重模強度。滑動面的碎屑黏土方面，重模後 Φ' 的範圍 $9^\circ \sim 23^\circ$ ，天然試體 $18^\circ \sim 45^\circ$ ，該摩擦角範圍偏差值過大，因此本研究將重新規劃試驗探討。



表 2-3 前人研究梨山結果 (摘自劉盛華, 2007)

資料來源 地層參數 地層種類	蘇苗彬(1990)		亞新顧問(1990)		林柄森(1991)		蔡光榮(1987)		工研院(1993)		中華工程(1996)	
	c (t/m ²)	Φ (°)	c (t/m ²)	Φ (°)	c (t/m ²)	Φ (°)	c (t/m ²)	Φ(°)	c (t/m ²)	Φ (°)	c (t/m ²)	Φ (°)
崩積土	0	35	0	29.0-34.5	0.17-1.6	33.0-38.0	19.0-3.90	33.5-35.0	0.1-2.2	15-45	0.04-1.97	27.1-27.5
強至中度風 化板岩									2.0-6.0	36-39		
弱風化至新 鮮板岩												
滑 動 面	崩積土											
	強至中 度風化 板岩										0.5-1.1	28.7-30.9
	弱風化 至新鮮 板岩	2.1-3.8	9.0-16.0			1.3-2.9	18.2-18.5	1.8-4.0	25-45	0-2.0	20-23	0.3-1.8
備註	皆以重模試體為主				自然試體(NX)		崩積層(重模) 板岩屑黏土層(現地 薄管取樣)		重模		天然試體	

工業技術研究院能源資源研究所(1993)調查梨山地層滑動，對此處地層材料做相關的室內試驗，其中直接剪力試驗採用四號篩以下之顆粒重模試體進行六組試驗；三軸試驗則以取自滑動面附近土樣，以自然沉降重模所得試體進行試驗。試驗結果如表 2-4、2-5。表 2-5 顯示以自然沈降法所得的重模土樣，主要由黏土、粉土或黏土質粉土所組成，重模後三軸試驗所得的凝聚力與抗剪角偏低，性質如同土壤，剪力試驗的抗剪角則較三軸試驗結果高出很多，可能是重模的夯實能量不同，且材料也不盡相同所致。

表 2-4 四號篩以下重模直接剪力試驗結果(工研院(1993))

項目	C'	ϕ'	備註
1	0.6	36	預壓 6(kg/cm ²)
2	0.2	39	預壓 3(kg/cm ³)
3	0.2	23	
4	0	23	
5	0.05	20	
6	0.3	38	

表 2-5 三軸 SCU 試驗結果(工研院(1993))

項目	1	2	3	4	5
抗剪角 (deg)	10	19	14	19	13
凝聚力 (kg/cm ²)	0.07	0	0.04	0	0
有效抗剪角 (deg)	20	34	15	45	28
有效凝聚力 (kg/cm ²)	0.1	0.08	0.22	0.02	0.01
土樣分類	SC	SP-SC	SC	SP-SM	SM

註：土樣分類乃利用統一土壤分類規範所區分 S 為砂土，C 為黏土，M 為粉土。P 代表土壤材料為貧級配。

方世傑(1990)、楊東賢(1990)、黃信璋(1991)於梨山中橫公路台 7 甲 73k 處做鑽孔及塊狀試體取樣，鑽孔分佈於 B-1、B-4 滑動體上，見圖 2-7。圖中 BH1~BH6 為方世傑等人所佈鑽孔位置。N1、N2 為黃玉麟(2006)於 B-9 滑動體鑽探孔位。

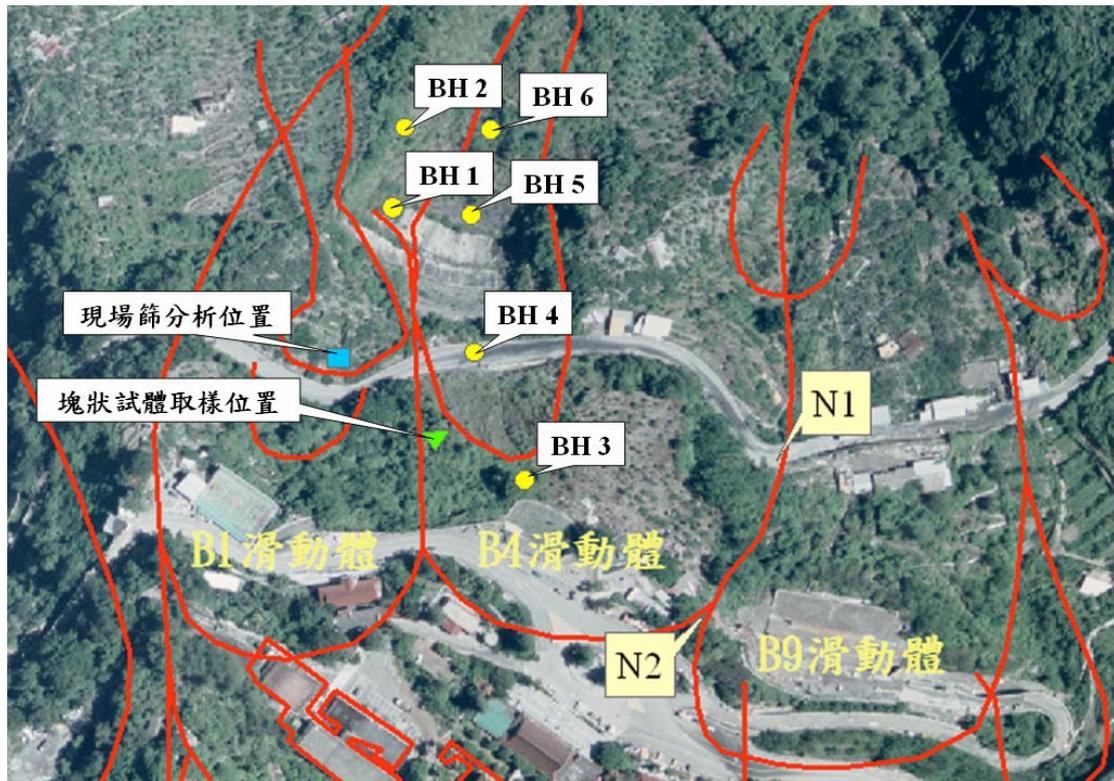


圖 2-7 方世傑(1990)等於台 7 甲 73 k 鑽孔、篩分析及塊狀取樣位置圖

方世傑(1990)研究中橫公路附近崩積土坡地力學特性，表 2-6 為一般物理性質結果；表 2-6 顯示崩積土在現地含水量狀況下其膠結性不良；現地取得塊狀土體進行大型直接剪力試驗結果，凝聚力介於 $0.017\sim 0.25\text{kg/cm}^2$ 之間，摩擦角在 $31.9^\circ\sim 38^\circ$ 之間；利用鑽探在滑動面處的沉泥質黏土的土樣，其直接剪力試驗結果為凝聚力 0.13 kg/cm^2 ，摩擦角 18.2° ，而三軸試驗(三段式飽和壓密不排水)到得到結果為，凝聚力 0.29 kg/cm^2 ，摩擦角 18.5° ，方世傑推估此沉泥質黏土為造成滑動的主因；崩積土的壓縮性：壓縮指數 $0.15\sim 0.16$ ，再壓縮指數為

0.014~0.018，預壓密壓力 0.3~0.5 kg/cm²，此預壓密壓力推估為覆土層因滑動而造成解壓；而岩石的耐久性試驗則被歸納為中高耐久性之岩石。

表 2-6 一般物理性質試驗結果(方世傑(1990))

材料 取得 方式	土層材料	一般物理性質						
		濕密度 (g/cm ³)	比重	孔隙比	含水量 (%)	液性 限度 (%)	塑性 限度 (%)	液性 指數 (%)
明坑 開挖	崩積土	2.14	2.7	0.49	18.07	42	28	14
鑽探 bh-1	崩積土	2.02	2.75	0.42	3.83	NP	NP	NP
	灰色板岩碎屑	2.17	2.75	0.44	10.59	NP	NP	NP
	沉泥質黏土	2.29	2.82	0.42	15.15	25	18	7
鑽探 bh-2	崩積土	1.94	2.67	0.6	16.19	NP	NP	NP
	灰色板岩碎屑	2.42	2.74	0.23	8.51	32	21	11

註：分類法與黃玉麟(2006)做比較，崩積土同(SY'或 SY)；灰色板岩碎屑類似(SG)，沉泥質粘土稱為軟弱帶(C)

楊東賢(1990)使用台 7 甲 73k 邊坡之鑽探岩心(NX 尺寸)，進行一

系列消散性耐久試驗、超音波試驗、單壓試驗與點載重試驗。研究成果將地層材料分為崩積土、破碎板岩崩積層、沉泥質黏土層、新鮮岩盤。試驗結果顯示崩積土風乾含水量 0.12%、密度 2.7g/cm^3 、比重 2.70、吸水率 0.32%，沉泥質黏土層風乾含水量 0.26%、密度 2.67g/cm^3 、比重 2.69、吸水率 0.57%。黏土礦物經由 X 光繞射分析得到主要成份為雲母。另外於利用反覆泡水、烘乾模擬不同風化循環中，測得與超音波速以及單壓強度，結果發現風化循環次數愈高其超音波速愈低，單壓強度也愈低。

黃信璋(1991)研究台 7 甲 73k 滑動層沉泥質黏土層力學特性，結果為沉泥質黏土含水量 9.6%~14.5%，平均單位重 2.315t/m^2 ，三軸不排水壓縮強度試驗有效凝聚力 $0.13\sim 0.29\text{kg/cm}^2$ ，有效摩擦角 $18.2\sim 18.5^\circ$ ，標準貫入值因孔位不同約在 10~14 與 4~6，屬於軟弱至中等硬度之黏土，單向度壓密曲線 $C_c=0.088\sim 0.092$ 、 $C_r=0.023\sim 0.024$ 。

由上述梨山地區崩積土層的相關研究，方世傑(1990)等人將梨山地區地層組成由地表向下區分為崩積土層、風化板岩層、新鮮岩盤，粉土質黏土層則夾於各層之間。粉土質黏土層含水量在 15%~18%之間、抗剪角 9~16 度，被判定為地層滑動主要層面；崩積土的抗剪角大約在 35~40 度之間，凝聚力偏低，可能是與材料形成方式有關，板岩顆粒隨機的分佈在地層內，顆粒大小不一，造成膠結性不良，剪力

強度可能受到顆粒大小所控制；板岩主要組成礦物為雲母，因此容易受到風化作用，而依照風化程度的差異也反映在板岩顆粒的形狀上，在模擬風化作用，風化循環次數愈高其超音波速愈低，單壓強度也愈低。

中興大學與工研院所做的梨山崩坍地材料力學試驗，大多在研究軟弱的粉土質黏土的力學行為，對於崩積土層與風化板岩層僅以直剪試驗定義力學參數，但其組成相較於粉土質黏土更複雜且顆粒大小不一。

各類研究都對崩積層分類有不同的定義，為避免混淆，於下列表做比較、本研究接下來則統一採用唐禎國(2007)的分類，見表 2-7



表 2-7 唐禎國(2007)與過去研究者對梨山崩積層歸納

研究者(年代)	崩積層分類				
藤原明敏 (1979)	崩積土	風化破碎岩 或弱風化岩	強風化岩	基盤岩	回填土
方世杰 (1990)	崩積土	風化板岩層	粉土質黏土層	新鮮岩 盤	回填土
唐禎國 (2007)	灰色板岩 夾黃色黏土	灰色板岩 夾灰色黏土	灰色黏土 夾灰色板岩碎屑	完整板 岩	回填土
註：唐禎國(2007)解釋，當板岩岩塊含量超過 50%，則以灰色板岩在前。當黏土含量較多，則以灰色黏土或黃色板岩在前					

由於試驗用岩心試體取得不容易，因此研究此地層組成材料的力學性質與材料參數，多以重模試體進行試驗。但即使為天然取得之試體，其力學參數也存在著一個相當大的矛盾：以黃玉麟(2006)鑽探所取得之岩心為例，圖 2-8 為黃玉麟(2006)所定義灰色板岩夾黃色黏土(SY)，位於 N-2 12~16m。圖中明顯看出即使在相同分層中，取樣位置稍許差異，則可能造成試體組成不同導致實驗結果偏差，以此結果決定該層力學參數則略嫌粗糙。應分別考慮各層岩石與土壤組成差異、岩塊含量，並利用試驗得到該含量下強度參數。此外其崩積土或、沉泥質黏土或風化板岩等材料，材料強度低，崩積土膠結性差，似乎不適合做消散耐久性試驗來瞭解材料本身的風化耐久性。



圖 2-8 N-2 12~16 m 岩心圖(黃玉麟(2006))

2.4 土、岩混合材料特性的力學特性

本研究旨在探討灰色板岩夾黏土層的力學行為，如圖 2-9 所示，此類地質材料可視為併構岩，其材料組成亦與土岩混合材料（築壩材料等）相近。圖 2-9 為黃玉麟(2006)N-2 鑽探孔 16-20 公尺的岩心照片，其中 16~17.6 m 依黃玉麟對梨山地層分類，定義為灰色板岩夾黃色黏土層，17.6 m~20m 則稱為灰色板岩夾灰色黏土層。



圖 2-9 N-2 16~20m 岩心圖(黃玉麟(2006))

Holtz 及 Willard (1961)曾探討土壤礫石混合物力學參數的變化，他們分別於粘土(摩擦角 Φ' 24~26°)及砂土(摩擦角 Φ' 35°~37°)中加入礫石施作試驗，發現礫石含量增加時，有效摩擦角相對增加，而凝聚力 c' 卻降低，如表 2-8。除此之外，不同的土壤加入等比例的礫石之後，其 c' 及 Φ' 之改變量也有所不同。

表 2-8 卵礫石含量對粘土砂土 Φ' 及 c' 影響 (Holtz, Willard(1961))

Gravel content (%)	Clayey matrix		Sandy matrix	
	ϕ' (°)	c' (psi)	ϕ' (°)	c'^* (psi)
0	24	8.7	35.7	3.7
20	25.6	7.0	37	6.6
35	25.1	8.3		
50	32.2	4.5	41.3	5.5
60	34.2	5.0	42	5.0

* apparent cohesion

Marachi (1972)研究土石堆填壩材料(Rockfill)的力學性質，利用三種不同壩體的材料並依照現地粒徑分佈曲線平移製作直徑 2.8 in, 12 in, 36 in 的圓柱試體，分別在 30 psi, 140 psi, 420psi, 及 650psi 的圍壓下進行大型三軸試驗，結果發現：

1)當最大顆粒尺寸增大時，其內摩擦角呈現降低之趨勢，並不受材料不同而改變，如圖 2-10。本文研判可能為試體含大顆粒岩塊時，影響到試體之孔隙比，較大顆岩塊導致孔隙比較低，間接造成摩擦角降低的結果。

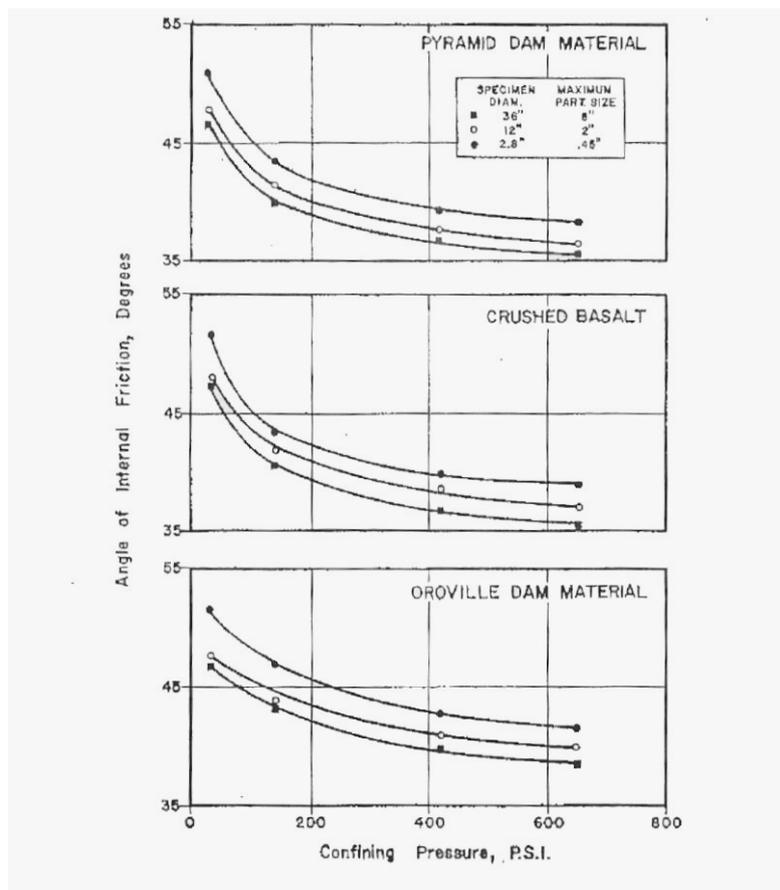


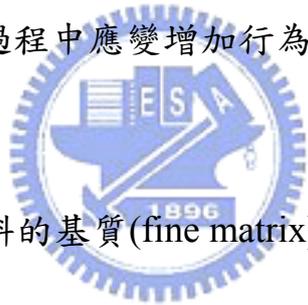
圖 2-10 最大粒徑與內摩擦角關係 摘自(Marachi,1972)

2) Marachi 並提出，材料之形狀、配比接近且相似，即使粗顆粒材料強度不同，最後表現出來的應力應變行為和抗剪強度相當接近；並且顆粒形狀愈接近圓形，強度愈高。如 Pyramid 壩材為厚層泥岩，材料本身具高度異向性且易破碎。而破碎玄武岩(Crushed Basalt)本身為等向性，不易用榔頭敲碎。但兩者顆粒形狀皆為角狀，所表現之行為十分類似。而顆粒形狀為圓形的 Oroville 壩材主要顆粒由角閃岩組成，則比上述兩者之摩擦角高約 $3 \sim 4^\circ$ 。

洪如江(1984)描述崩積土之行為，建議將此類含有岩石及土壤之

崩積土稱為複合土，此種崩積土力學模式受粒徑分佈影響大。當粗顆粒岩石重量百分比占 75 % 以上，則粗粒料顆粒間得以相互接觸，此時細料只填充於岩石孔隙間，此時複合土性質由粗粒料間摩擦阻抗提供強度。相反的，當土壤含量占 30 % 以上時，粗粒料間無法相互接觸，因此複合土表現的類似土壤本身強度，但此推論無實驗數據佐證。

Montrasio(1998)研究義大利帕爾瑪(Parma)附近山崩所滑落的崩積土，其組成包含了黏土、粉土以及破碎岩塊。Montrasio 將山崩滑落的崩積土稱為複雜土(complex soil)，並認為複雜土的力學行為受岩塊含量影響，包括受剪過程中應變增加行為也會改變。他以一簡單的數學模式探討此行為：



先將複雜土分為細料的基質(fine matrix)及粗顆粒(inclusions)，其比例如下：

$$p = \frac{V_G}{V} \dots \dots \dots (2.1)$$

P : 岩塊體積含量比

V : 複雜土基質加岩塊體積含量

V_G : 複雜土中岩塊的體積含量

圖 2-11 說明不同岩塊含量 p，岩塊與基質的排列情形：

- a) 沒有任何的大顆粒，簡言之視同一般土壤。
- b) 含量 p 大到使得粗顆粒間互相接觸，由大顆粒控制，而土壤

基質僅存在於岩塊顆粒間的空隙中，提供次要之行為。

c) 大顆粒存在於基質中，稱為懸浮(floating)，初期大顆粒皆沒有接觸，但在剪動時受到應變量增加，造成原本懸浮的粗顆粒漸漸接觸，直到通過應變門檻值。岩塊完全接觸，便成為圖 2-11 b)情形。

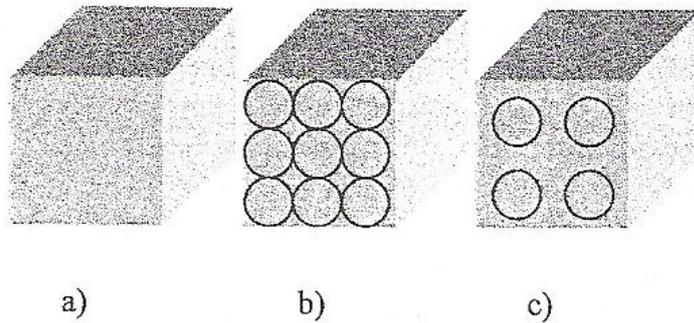


圖 2-11 岩塊與基質在不同含量下之排列 (Montrasio, 1998)

因此，應變門檻值對試體應力應變行為相當重要，Montrasio 利用一個簡單的模型做解釋，圖 2-12 將一個試體分成為許多立方元素所組成之群體，元素的邊長為 Li ，元素中有半徑為 Ri 之礫石，假設礫石不可壓縮，便可得到應變門檻值 ϵ_{max} 與岩塊含量 p 的關係；

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{max} &= \frac{Li - 2Ri}{Li} \\
 &= 1 - 2 \frac{Ri}{Li} \\
 &= 1 - 2 \left(\frac{\sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} V_G}}{\sqrt[3]{V}} \right) \\
 &= 1 - 2 \sqrt[3]{\frac{3p}{4\pi}} \dots\dots\dots(\text{公式 2.2})
 \end{aligned}$$

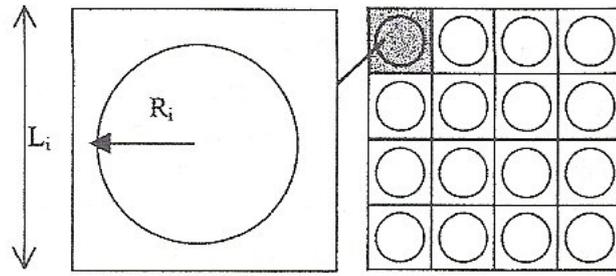


圖 2-12 Montrasio 所假設的模型

圖 2-13 為利用式 2.2 作圖，得到的岩塊含量與應變門檻關係，圖中顯示當岩塊含量在 30% 以下時，即使達到 20% 應變岩塊也不會接觸到。此時試體的破壞為沿著岩塊周圍的基質滑動。當含量超過 50% 後，代表在剪動前岩塊已完全接觸，因此試體的剪力強度極可能由岩塊相互的摩擦所提供。

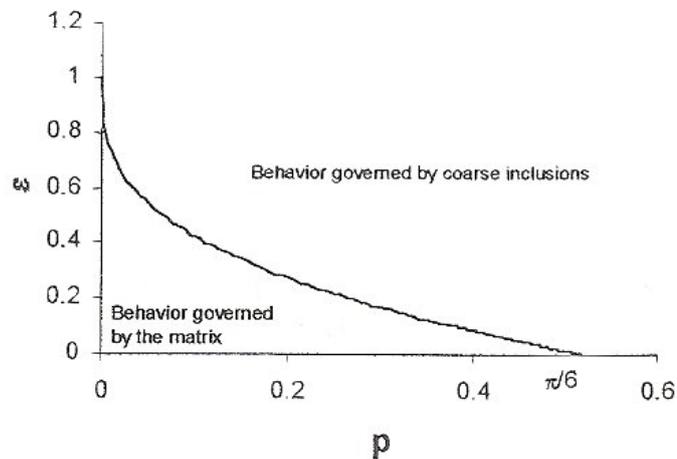


圖 2-13 依含量比不同而相對應之應變門檻值 (Montrasio, 1998)

然而 Montrasio 的理論模型仍然過度理想化，畢竟天然試體內部的岩塊絕非大小相同的球體且排列整齊。在尺寸不同的岩塊、不均勻分佈於試體內情況下，即便含量低也可能已有岩塊接觸，因此造成岩塊含量與應變量所對應的接觸型態未必完全符合圖 2-13 的情形，實

際情形岩塊完全接觸或完全分離的臨界含量也更難定義。Vallejo 及 Mawby(2000)認為孔隙率可作為評判粗顆粒接觸型態之指標。他們利用靜態夯實法製作 5 組不同含量比例的砂-黏土混合試體(表 2-9)，並分別以 54.2 kPa、102.1 kPa、150 kPa 等正向力做單剪試驗。

表 2-9 5 組不同含量比的砂-黏土混合試體(Vallejo,(2000))

Test No.	Sample composition		Normal stress (kPa)	Porosity n_{mix} (%)	Percentage by weight of sand in mixture, w_s (%)
	Sand (N)	Clay (N)			
1	3	0	54.2	37	100
2	3	0	102.1	36	
3	3	0	150.0	35	
4	3	1	54.2	32	75
5	3	1	102.1	30	
6	3	1	150.0	25	
7	2	3	54.2	36	40
8	2	3	102.1	35	
9	2	3	150.0	35	
10	1	3	54.2	41	25
11	1	3	102.1	39	
12	1	3	150.0	39	
13	0	3	54.2	56	0
14	0	3	102.1	48	
15	0	3	150.0	50	

表 2-9 中的 n_{mix} 為砂與黏土混合後，經過靜態夯實之後得到的孔隙率。可用下面公式表示：

$$n_{mix} = \frac{V_0 - [(W_s/\gamma_s) + (W_c/\gamma_c)]}{V_0} \dots\dots\dots(2.3)$$

其中

n_{mix} : 砂與黏土混合物之孔隙率

W_s : 砂子重量

W_c : 黏土重量

γ_s : 砂子單位重

γ_c : 黏土單位重

V_0 : 靜態夯實 24 小時後的試體體積

單剪試驗所得之結果如下圖 2-14，圖中可看出砂子含量在 40% 以下時，尖峰剪力強度受砂含量減少而有增加之情形。當超過 40% 後開始降低，直到砂子含量達到約 75 % 時，尖峰強度又逐漸增加。並受到正向力變大而有增加的趨勢。Vallejo 及 Mawby 根據尖峰剪力強度變化量推斷：

- 1、 當砂土含量比低於約 40 % 時，可解釋為黏土完全控制力學行為
- 2、 而砂土含量介於 75 % ~ 40 % 間，推論為砂土與黏土各提供部分強度。
- 3、 直到砂土含量超過 75 % 時，斷定砂土顆粒完全接觸，而黏土只存在於砂土中孔隙，因此力學情形則轉由砂土控制。



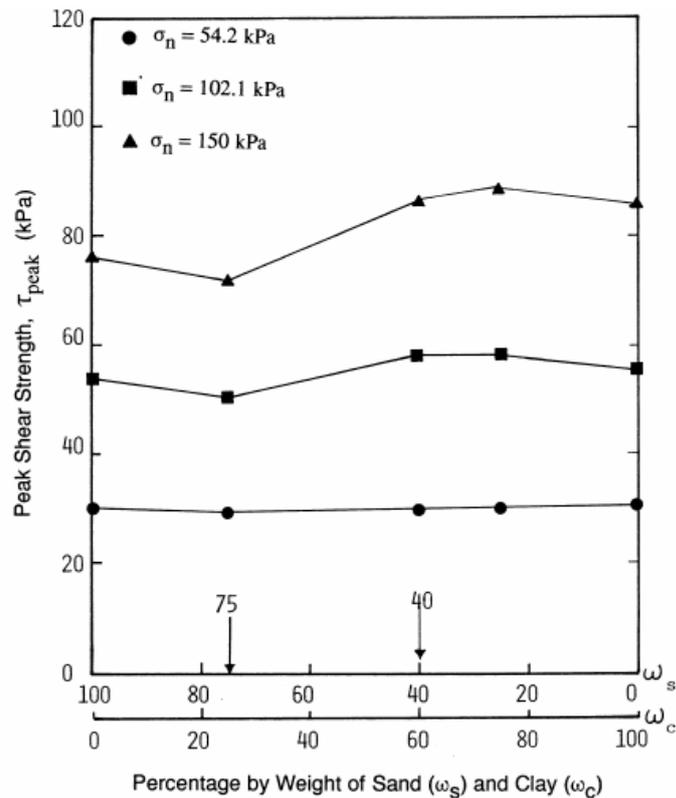


圖 2-14 單剪試驗尖峰剪力強度與含量比關係圖(Vallejo, 2000)

同時，Vallejo 及 Mawby 整理孔隙率隨砂、黏土含量比分佈改變曲線發現，孔隙率/含量改變曲線，能更確切區分材料含量比的臨界值（圖 2-15）。圖 2-15 中虛線代表試驗中實際量測計算得到的孔隙率改變曲線，利用公式 2.4 求得。而實線段為理論孔隙率改變直線，茲以圖 2-15、圖 2-16、圖 2-17 說明如何得到理論孔隙率。圖 2-17(A)

表示乾淨砂的孔隙率，因此乾淨砂的孔隙率 n_s 可表為：

$$n_s = \frac{V_{VS}}{V_T} = V_{VS} \dots\dots\dots(2.4)$$

n_s ：砂的孔隙率

V_{VS} ：乾淨砂孔隙體積

V_T ：砂總體積，在此假設 $V_T = 1$

因此，當乾淨砂加入黏土時，如圖 2-16(A)~(C)情形下，黏土等於填充於砂子間孔隙中。此時砂土與黏土混合物孔隙率因黏土填充於其中而會有下降的情形，如圖 2-15 中實線 C → B 線段。當黏土完全填於乾淨砂孔隙中時，乾淨砂土中的孔隙由黏土與黏土孔隙組成。圖 2-17(C)為砂土完全被黏土取代，因此孔隙只存在於黏土中。

$$n_s = V_{vs} = V_{vc} + V_c \dots\dots\dots(2.5)$$

$$n_c = \frac{V_{vc}}{V_{vc} + V_c} \dots\dots\dots(2.6)$$

V_{vs} ：乾淨砂中孔隙體積

V_c ：乾淨砂填入的黏土體積

V_{vc} ：黏土中孔隙體積

n_c ：黏土的孔隙率



由公式 2.5 與 2.6 整理得到公式 2.7 的砂與黏土最緊密的孔隙率：

$$n_c = \frac{V_{vc}}{V_{vc} + V_c} = \frac{V_{vc}}{n_s}$$

$$V_{vc} = n_s n_c$$

$$n_{mix-min} = \frac{V_{vc}}{V_T} = n_s n_c \dots\dots\dots(2.7)$$

$n_{mix-min}$ ：砂與黏土混合物所能達到最低的孔隙率

而此時所對應之最小砂土含量為 ω_{s-min} ，如公式 2.8：

$$\begin{aligned}
 \omega_{s-\min} &= \frac{W_s}{W_s + W_c} \\
 &= \frac{\gamma_s V_s}{\gamma_s V_s + \gamma_c V_c} \\
 &= \frac{\gamma_s (V_T - V_{VS})}{\gamma_s (V_T - V_{VS}) + \gamma_c (V_{VS} - V_{VC})} \\
 &= \frac{\gamma_s (1 - n_s)}{\gamma_s (1 - n_s) + \gamma_c (1 - n_c) \cdot n_s} \dots \dots \dots (2.8)
 \end{aligned}$$

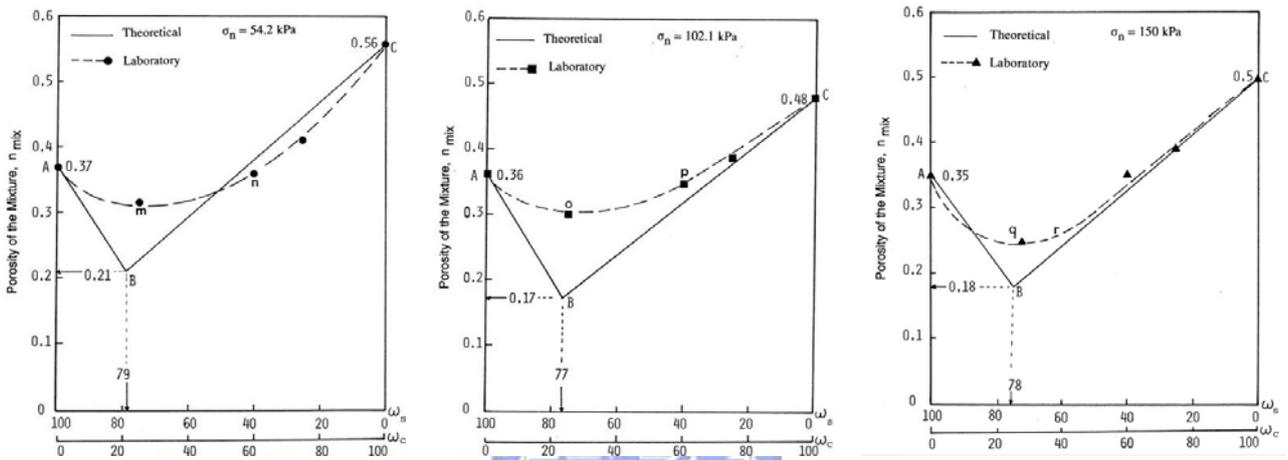


圖 2-15 不同圍壓中孔隙率與含量比曲線 (摘自 Vallejo, 2000)

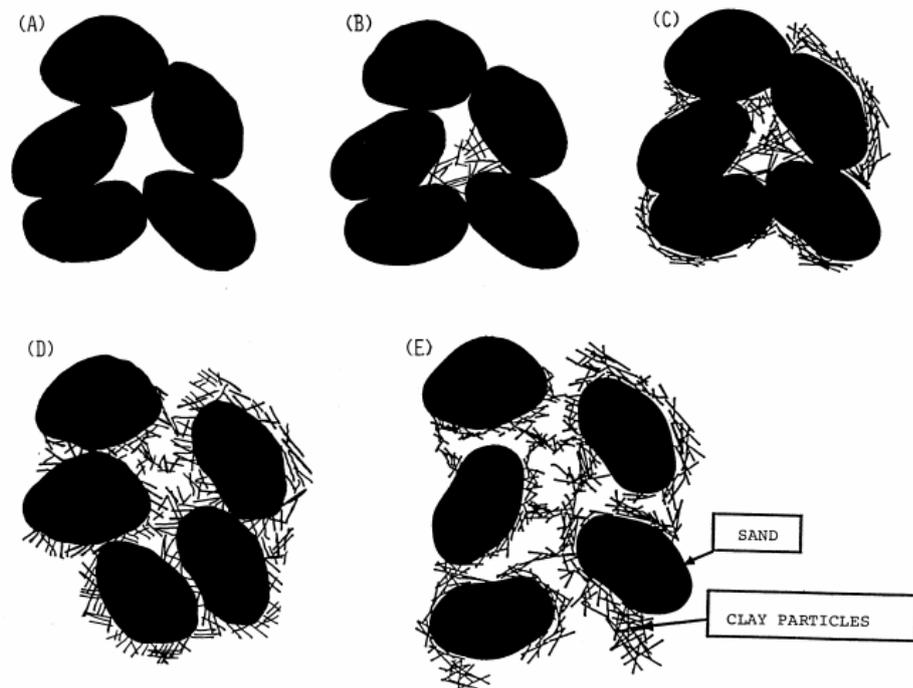


圖 2-16 含量比變化下砂與黏土顆粒排列情形 (摘自 Vallejo, 2000)

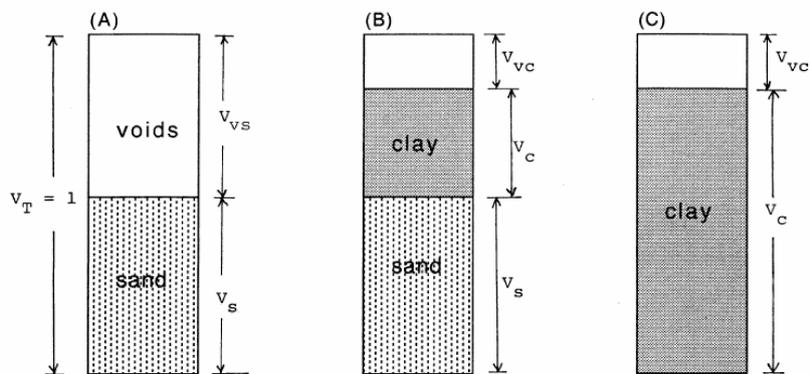


圖 2-17 Vallejo(2000)乾淨砂受黏土填於孔隙中之理論模型

圖 2-15 與圖 2-14 相互比對後，更清楚由孔隙率區分出砂黏土含量不同下所反應之力學行為，然而砂子與土壤混合試體與本研究的風化板岩夾黏土有以下的差距：

- 1、砂子與黏土間顆粒差異大，風化板岩與基質間差異沒這麼明顯，是否風化板岩夾黏土層的孔隙率變化如同圖 2-15 所表現有待研究。
- 2、砂子與黏土的強度差異亦不如板岩與黏土間明顯，因此本研究之材料是否力學行為等同砂土混合物也待實驗結果加以探討。

Medley(2001)研究北加州一帶的土壤與岩石複合物，該篇研究將剪裂帶，崩積土，類似土壤與岩石混合之材料稱為併構岩。Medley 認為併構岩為較強的岩塊與相對軟弱的土壤混複合材料，兩者間的強度需有某種程度差距。例如摩擦角比，(岩塊 $\tan\Phi$ /基質 $\tan\Phi$)，達 1.5 ~ 2.0 的差值，此乃稱為併構岩之充要條件。併構岩的力學行為受岩塊的影響相當深遠，若兩者強度比低於該值，剪裂面或破壞面有較高的趨勢發生於穿過岩塊而非沿著岩塊間破壞。

Medley 認為岩塊的分佈與含量深深的影響著併構岩的力學行為。較高含量的岩塊導致了破壞的路徑較蜿蜒，破裂沿著岩塊發展，較長的破裂路徑直接造成材料的摩擦阻抗增加。他利用室內三軸試驗對當地的併構岩做實驗得到圖 2-18 的結果，雖然實驗組數多集中在岩塊含量 0 ~ 40 % 的地方，而高含量僅 80 % 一個，但是仍然可看出岩塊含量增加使有效摩擦角提升，同時驗證了岩塊在併構岩中的影響是相當可觀的。

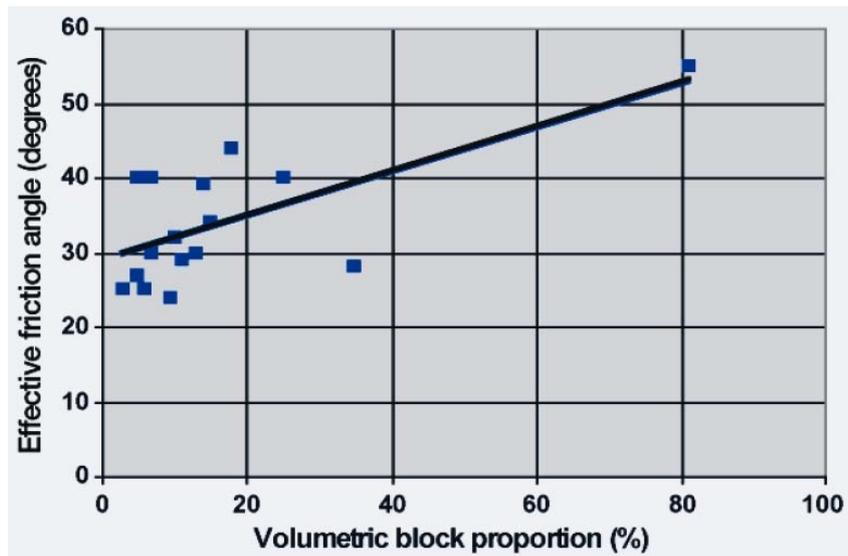


圖 2-18 併構岩體積含量比與有效摩擦角關係圖

本研究由鑽探岩心觀察得到，梨山崩積地層內灰色板岩夾黏土層的組成，包含了輕度風化的板岩塊，其大於#4 之比例約佔 30%~60% 不等。粗粒料大小多為 2~4 cm，而亦有大到接近鑽孔直徑之尺寸。細料也因深度不同而存在風化後殘留之灰色黏土或上層表土填充於其中之黃色粉土質黏土。本材料所含岩塊及細料的比例變化亦大，因此這類地質材料之工程行為僅依靠少數的室內試驗將很難加以確定。灰色黏土夾板岩碎屑段如圖 2-19 中 54~56 m 岩心，岩塊含量相較於 SY、SG 有較少之趨勢，一般含量比低於 20 % 左右，且岩塊顆粒也較小，因此力學行為應類似一般黏土或粉土。



圖 2-19 N-2 52 ~ 56m 岩心圖(黃玉麟(2006))

新鮮板岩即黃玉麟(2006)定義的代號 S 段，如圖 2-20。新鮮板岩可能為完整板岩或含有一至多面裂面之節理板岩，但是裂面中沒有含泥，因此可判斷應當未滑動之岩體。若為無節理面的板岩，則可視為完整岩石。而當含有多組裂面時，則得視為破碎岩體。。

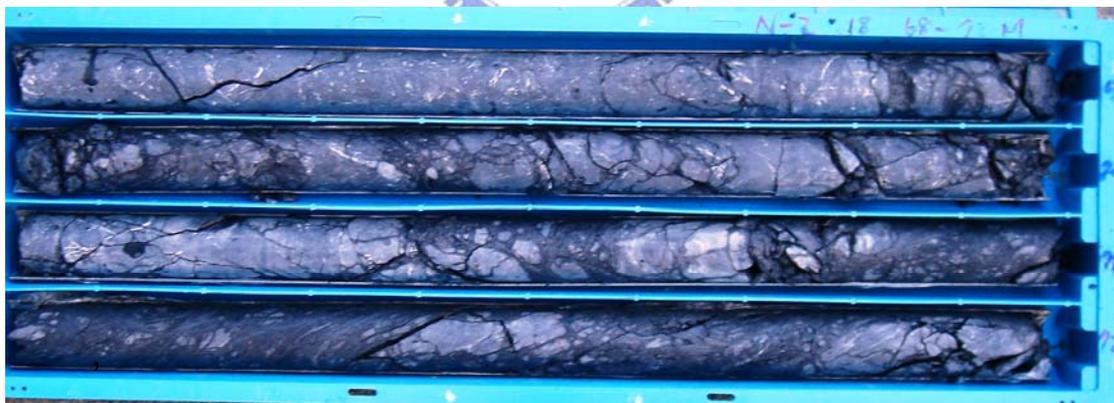


圖 2-20 N-2 68 ~ 72 m 岩心圖(黃玉麟(2006))

2.5 土石混合材料三軸試驗實驗結果之影響因素

欲使實驗具代表性，必定需考慮各種影響試驗結果之因數，並詳

加列出討論。

2.5.1 顆粒形狀、大小、及級配

Marachi (1972)在作壩體材料之三軸試驗中提到，內摩擦角隨試體最大粒徑增加而降低，如本文圖 2-10，且當粗顆粒形狀接近圓形者，反應的強度愈高。

同時 Marachi(1972)也提到級配優良之試體，顆粒間互鎖效應良好，反應的剪力強度也較大。

2.5.2 含水量、飽和度及孔隙比



Zeller(1964)發現含水量與飽和度對試體實驗結果會有所影響，試體含水量較高時，即濕潤的狀態下，顆粒間受到潤滑作用，使得試體抗剪強度降低，因此乾燥試體的強度會比飽和試體高。同時，在三軸試驗相同圍壓下，內摩擦角與凝聚力則會因含水量增加而降低。

2.5.3 試體形狀及幾何

ISRM 建議單三軸試驗下，岩石試體長細比需達到 2.5 ~ 3.0，以有效克服端版效應。

2.5.4 圍壓之影響

三軸條件下，圍壓增加會使壓縮強度、剪力強度、軸差應力增加。此外，圍壓也會影響破壞形式，Robinson (1959)分析石灰岩在高圍壓條件下剪動，發現剪裂面會隨圍壓及軸差應力升高而增加。Serdengecti 及 Boozer (1961)提出高溫高圍壓下為延性破壞，而低溫低圍壓則呈現脆性破壞。。



第三章 實驗儀器介紹

本研究利用室內三軸試驗進行類併構岩材料力學行為的探討，本章針對本文採用之三軸試驗系統加以說明。

3.1 MTS 810 三軸與單壓試驗系統

本研究利用 MTS-810 材料試驗機，及交大自行研發改良的軟岩三軸系統，針對併構岩材料，進行三軸壓縮試驗。在實驗過程中，首先進行飽和後並壓密，待壓密階段完成後利用剪力波元件進行波速量測。且在剪動中，除了利用儀器內建的 LVDT 量測較大的軸向變形量外，並加裝量測小應變用的微應變計，紀錄材料在受剪初期及受剪過程中的變形量。以下分別針對 MTS810、三軸系統、量測元件與資料擷取系統加以說明：

MTS 810 為 MTS 公司所製造，三軸系統則經柳政男(1998)、黃惠儀(1999)、林景民(2001)、洪任賢(2002)及葉季霖(2003)以及劉盛華(2007)等長期改良，使 MTS810 結合三軸系統可進行三軸試驗，透過電腦與完整的量測元件來進行電腦伺服控制，有效控制軸壓和圍壓系統。圍壓系統則利用電磁比例壓力控制閥油壓機及加壓器，分別控制實驗過程中之軸向力與圍壓，精確掌控試驗中應力變化行為。系統配置如圖 3.1 與圖 3.2 所示，三軸室架構圖見圖 3.3。

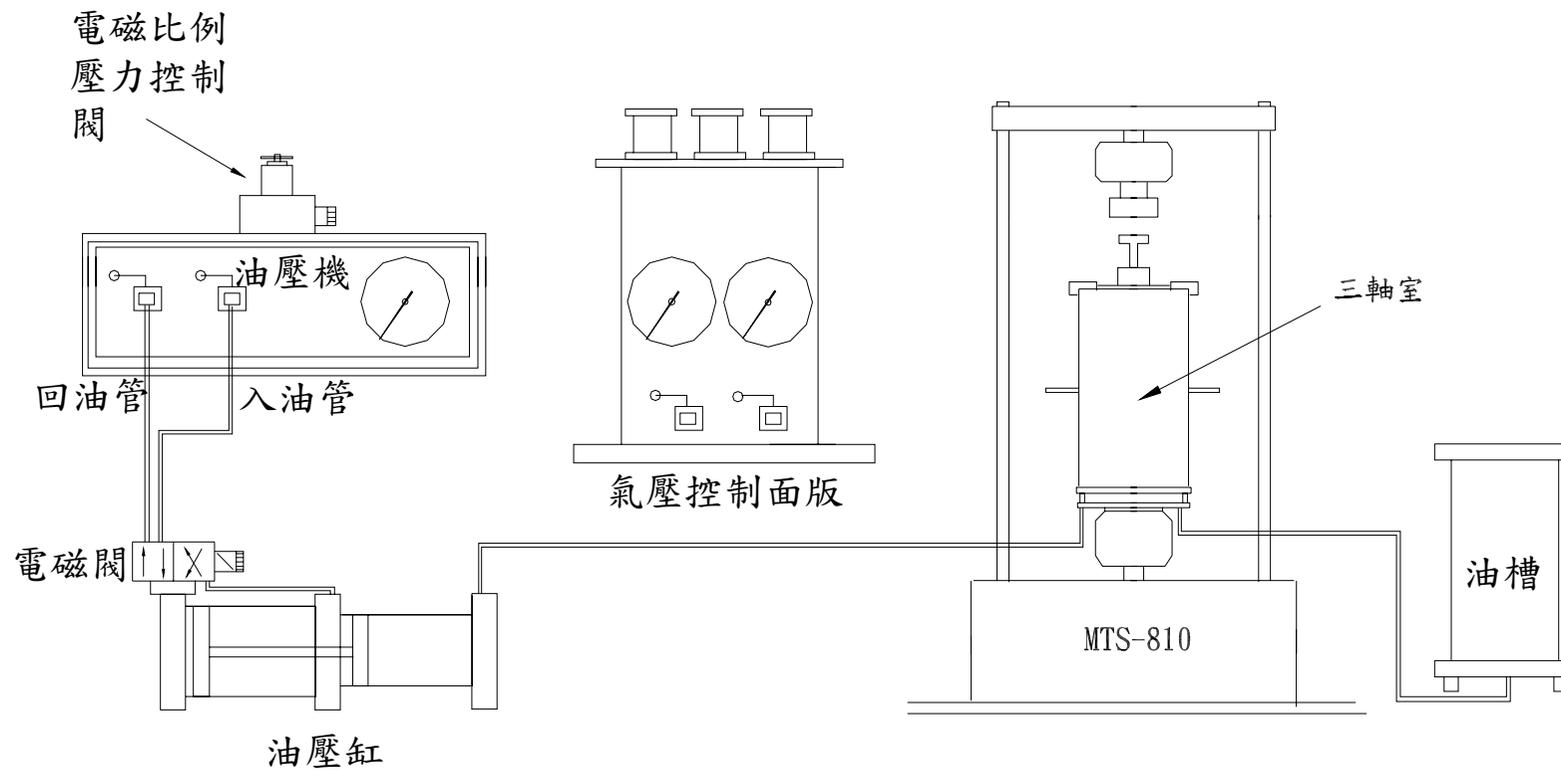


圖 3.1 軟岩三軸系統配置圖(摘自林智惠(2003))



圖 3.2 軟岩三軸試驗系統全景

3.1.1 軸壓系統

軸壓系統所採用的 MTS 810 材料試驗機，本身具有自動回饋功能，可進行應變或應力控制之試驗，且配置有讀取並記錄加載量的資料擷取系統。主要載重設備包括載重架、荷重感應器、加壓桿、伺服閥、油壓方向控制器、油壓供應器以及冷卻系統。

3.1.2 三軸系統

岩石三軸室相較於一般土壤三軸設備，往往需要較高的圍壓，因

此材料通常以金屬居多，並且有較高的安全係數。一般而言，三軸室管壁與底座只有一個接合面，此種接合之形式稱為凸緣接合，搭配 U 型圈作為油封，輔以 O-Ring 來彌補 U 型圈在小圍壓時油封不足的缺點。

普通土壤三軸室設計能承受最大 15 MPa 之壓力，然而一般岩石強度可能不止於此，故本三軸室採用降伏強度超過 300 MPa 的不鏽鋼 (沃斯田鐵系不鏽鋼 304)。為方便架設，在設計上參考土壤三軸結構設計理念，基本儀器設備組成如下：

1. 三軸室管壁：三軸室管壁為不鏽鋼 (沃斯田鐵系不鏽鋼 304，降伏強度超過 300 MPa) 所鑄成，長度為 50 公分，厚為 0.9 公分，可承受最大室壓為 15 MPa，大約 150 kg/cm^2 。
2. 三軸室支撐構架：頂盤由四根支柱垂直通過三軸室內與底盤連接，並利用底座上螺絲固定頂盤與底盤，四根支柱採用鎳鉻合金鋼以強化並降低變形量。實驗前後，僅利用鈎鈎上下抬昇三軸室管壁，試體架設或更換試體完成後，將套環圈於頂盤外圍以螺絲固定，維持三軸室氣密性。
3. 頂盤：加壓桿與軸承固定於頂盤上。上有調節閥，注油時用以排出氣泡，油滿後關閉調節閥保持三軸室完全與外界隔離。
4. 內部配件：三軸室內有內置式荷重盒固定於底盤，置於底盤可消

除受到加壓桿摩擦阻力產生的誤差。試體的頂蓋和加壓桿連結，底蓋利用插銷固定在內置式荷重盒。頂蓋與底蓋皆有透水石並預留孔洞，可經水管進水注入試體內部，進行試體飽和、壓密或排水試驗。三軸室內亦設有剪力波元件連外接頭，可進行波速測量。

5. 底盤：底盤上設有 4 個進出水孔可進行排水或壓密；一個連接圍壓壓力轉換器的孔洞；12 個提供內置式荷重盒和局部應變計使用的電壓傳訊棒，可將內置式荷重盒和局部應變計之電壓值傳出三軸室連接至資料擷取系統，但仍然保持三軸室的密封性。

軸壓的控制可利用 MTS 458 控制器上旋鈕 (見圖 3.4)，控制三軸室軸向壓力，經由劉盛華(2007)改良後，搭配個人電腦的 NI PCI-6035E 擷取卡，並使用 Labview 軟體控制剪動的應變速率。

圍壓供應系統可分成油壓和氣壓，氣壓通常可在低於 1 MPa 時，供應穩定的圍壓。當圍壓超過 1 MPa，空壓機提供的壓力無法達到供給要求，則轉換為油壓系統供應。以下分別介紹其功能：在較低壓力時，使用氣壓控制面板 (圖 3.1) 和空壓機控制提供圍壓及協助飽和所需的反水壓；油壓系統由具備電磁比例壓力控制閥的油壓機 (見圖 3.5) 及一加壓器 (如圖 3.6) 提供，具備兩個比例控制閥，電磁比例壓力控制閥與電磁比例流量控制閥，可輸入電流值控制油壓機輸出的流量或壓力或使用手動旋鈕控制其流量與壓力，液壓油為中油出品 R-68

型。

加壓器的功能除可放大油壓機給予之壓力外；並可平衡油壓機初始脈衝壓力避免因試驗後油質受到試體碎屑污染損害油壓機，三軸室與油壓機之間以高壓軟管連接。透過 NI PCI-6035E 擷取卡，經由電腦伺服控制與電磁比例流量控制閥控制油壓，可有效的控制油壓大小。

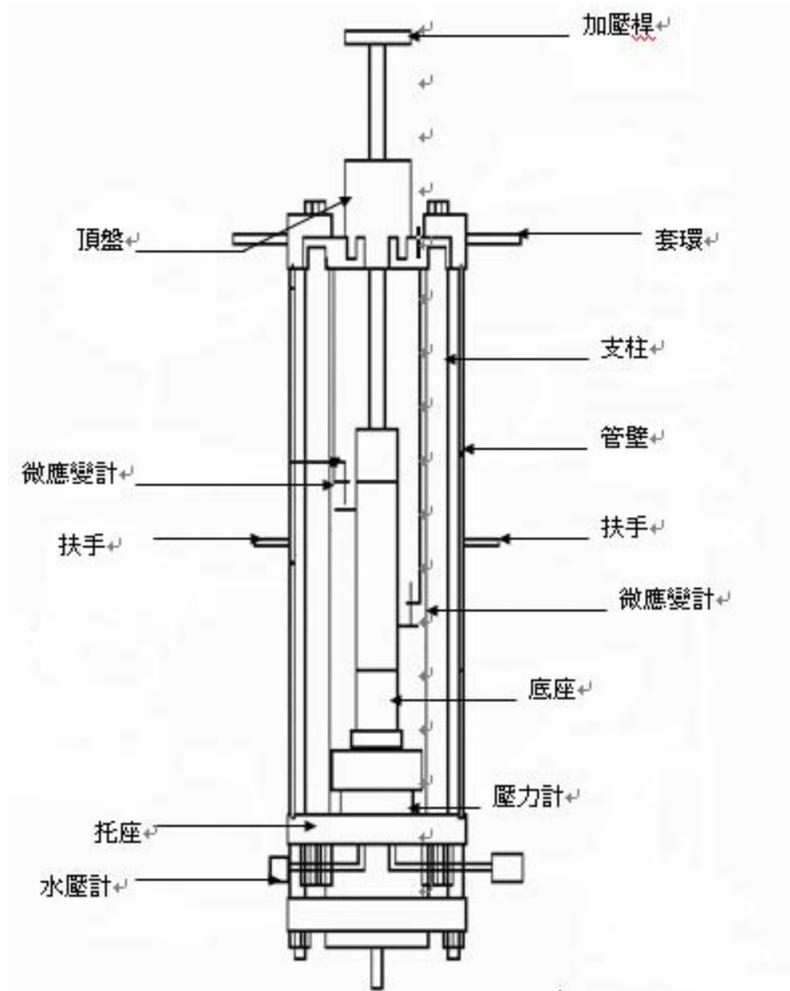


圖 3.3 三軸室組構圖(摘錄自林智惠 2003)



圖 3.4 MTS 458 控制器

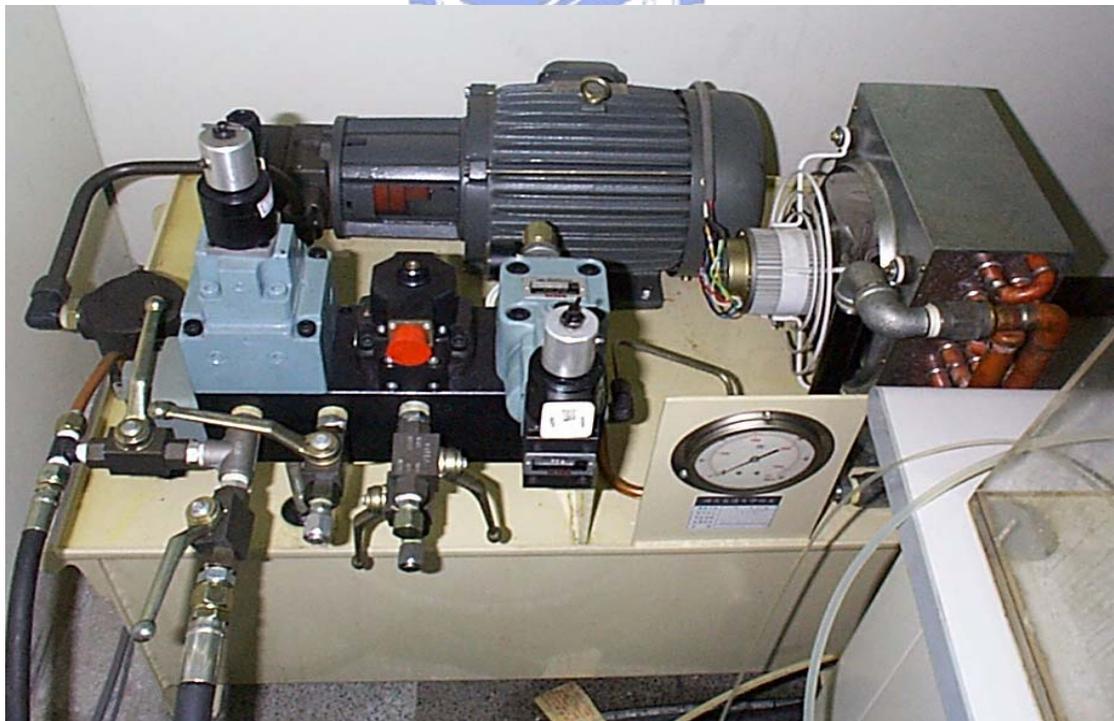


圖 3.5 油壓機(摘錄自林智惠 2003)

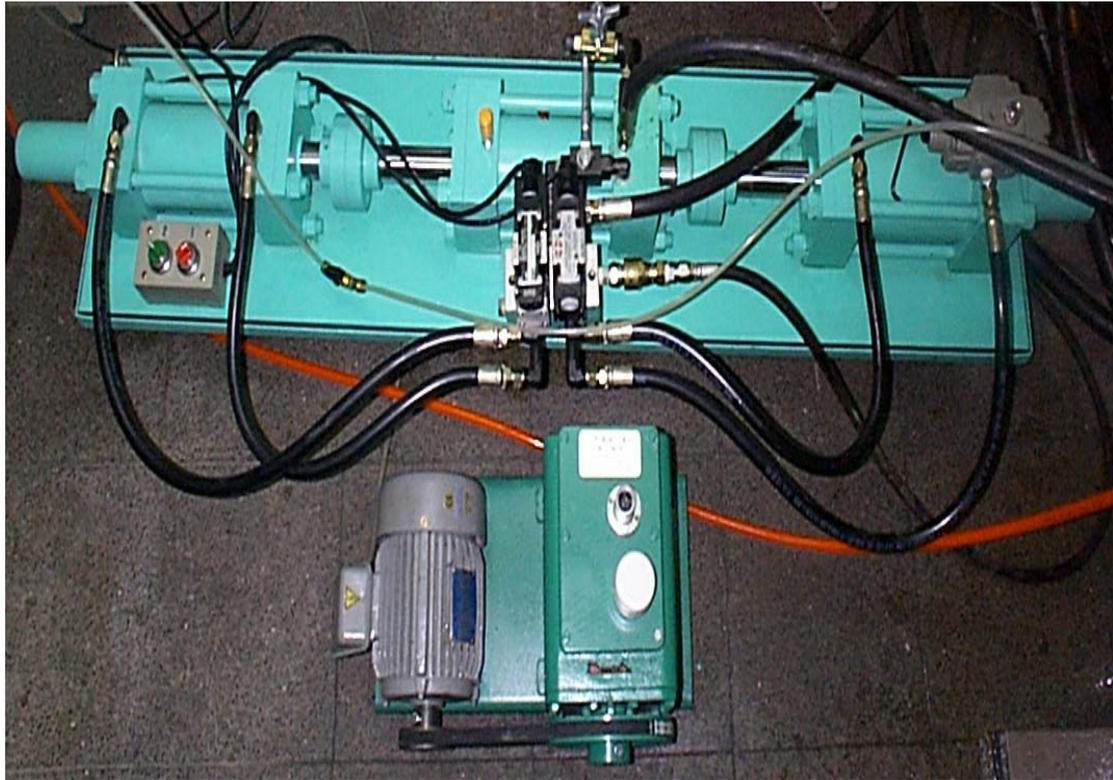


圖 3.6 油壓缸與真空幫浦(摘錄自林智惠 2003)

3.2.2 量測元件

量測儀器如圖 3.7 所示。軸差應力由 Applied Measurement Limited 製造的內置式荷重計量測，可於油壓狀態下使用，極限荷重為 50 kN。



圖 3.7 內置式荷重計、壓力轉換器(摘錄自林智惠 2003)

圍壓與孔隙水壓量測使用壓力轉換器，圍壓壓力轉換器由 TML 公司製造，型號為 PW-20 MPa，最大壓力範圍為 20 MPa，激發電壓為 10V；孔隙水壓壓力轉換器之最大壓力範圍則為 3.5 MPa。

軸向應變可分成微應變的量測和大應變之量測，微應變(圖 3.8)之量測由裝設試體中段的二個微應變計；由美國廠商 BENTLY NEVADA 生產，型號為 3300 XL，量測位移範圍在 2 mm 內。此系統輸出電壓極限為 0~23 V，而在 5V~20V 下為線性段。試驗中通常配置於試體下方或上方三分之一處，由兩鋼片固定為不動端，剪動中量測鋼片間極小位移量得到微應變量。本試驗系統採用鋼片材質為 AISI 4140 steel，以 RTV-1160 速乾膠接著於試體熱縮膜上，鋼片上並打孔，以大頭針插入試體內，使其量測到為試體本身之位移，設備如

圖 3.9 所示。

大應變由 MTS 810 內置之 LVDT 量測，其精度可達 0.001 mm，最大位移量可達±50mm，對應之電壓為±10V。

試驗進行中可利用剪力波元件求得試體的波速變化以探討剪力模數及楊氏模數的變化，所以在三軸試體上下蓋加裝剪力波元件，本研究使用之設備為交通大學自行組裝之剪力波速量測系統，圖 3.10 為剪力波量測系統之示意圖，各項元件之功能及規格如下。

1. 壓電陶瓷晶片：土壤中剪力波速的傳送與接收研究，最早由美國德州大學所發明，利用剪力片與土壤產生共振進行試驗，以石英或壓電水晶為主要元件，目前則是利用壓電陶瓷材料所組成之剪力波元件逐漸取代石英剪力片；本研究使用之壓電陶瓷晶片為構自 PIEZO SISTEM 公司，型號 PSI-5H-S4，尺寸大小為 14.5×12×1mm，極化電壓為 10V，尺寸如圖 3.11 所示，將剪力波元件嵌入三軸室試體上下頂蓋中，並使用 Araldite 環氧樹脂（AB 膠）固定於三軸室上下頂蓋中，透水石部分則以矽膠填塞。試體上下蓋設計示意圖如圖 3.12 及圖 3.13 所示，完成後之試驗設備如圖 3.14。目前國外試驗所使用之剪力波元件（Bender Element）其材料多以聚水晶陶瓷（Polycrystalline Ceramics）代替傳統所使用之天然水晶體，除了具天然壓電晶體之壓電特性之外，亦可製作成任何所需要之尺寸，並且較不易受含水量及

大氣狀況所影響。壓電特性指當材料受到一機械外力作用時，將會產生相對於機械力大小之電壓；同樣地，當材料受到一電壓作用時，會產生相對於此電壓大小的形狀改變。因此可知，壓電現象產生的原因為壓電材料受到電壓作用會產生膨脹或收縮的行為，而壓電陶瓷晶片在淬煉時的極化方向決定了未來受一特定電壓方向作用下的變形方向，壓電陶瓷晶片可在不同方向上表現出壓電特性，故可表現出各種振動模式。

2. 壓電陶瓷晶片可分為串聯與並聯兩種連接方式，不同的連接方式會有不同的壓電特性，串聯時機械能轉換為電能之功率是並聯的兩倍，反之，並聯時電能轉換為機械能的功率是串聯的兩倍，故利用壓電陶瓷晶片剪力波元件量測剪力波速時，上端以並聯型式作為激發端，並以函數產生器調制激發波形，由試體底端以串聯型式作為接收端，並以示波器或是其他設備擷取波形，可達到傳送及接收訊號的良好效果。

3. 函數產生器：主要功能在於產生單一脈衝正弦波，函數產生器輸出電壓予上蓋剪力波元件後將電能轉換為動能，透過土體傳遞剪力波。

4. 訊號擷取系統：當上蓋觸發一正弦波後，便採用示波器或電腦接收訊號，並記錄之，並在電腦上判斷剪力波到達時間；訊號接收系統

應至少具有一個接收通道及一個觸發同步信號通道，若使用示波器可透過 RS232 或 GPIB 介面將訊號輸出或直接將結果列印，而本試驗利用電腦配合訊號處理卡及信號輸入盒（功能類似於一般訊號量測之 terminal board）接收試體底座剪力波元件所激發之電壓波形，並且利用軟體同時進行訊號平均運算等功能，最大接收訊號頻率為 25kHz。



圖 3.8 微應變計(Proximeter)(摘錄自林智惠 2003)



圖 3.9 微應變計之目標金屬物固定裝置(摘自林智惠 2003)

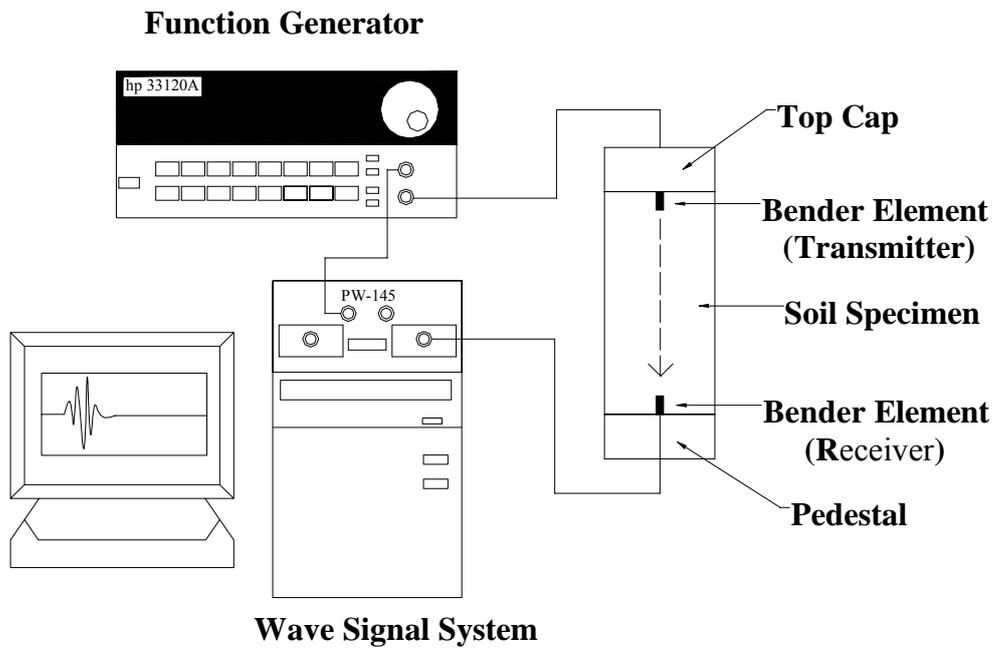


圖 3.10 剪力波元件試驗系統示意圖(摘自林智惠 2003)

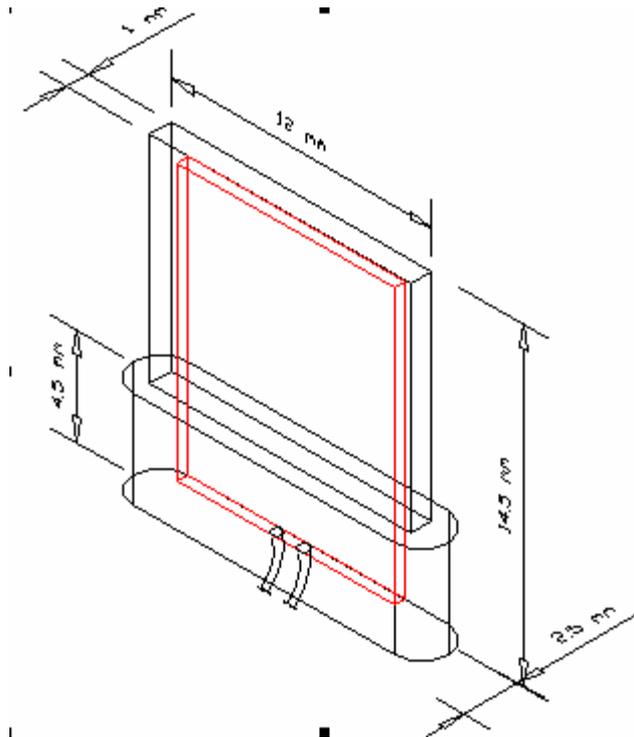


圖 3.11 壓電陶瓷晶片剪力波元件尺寸(摘自林智惠 2003)

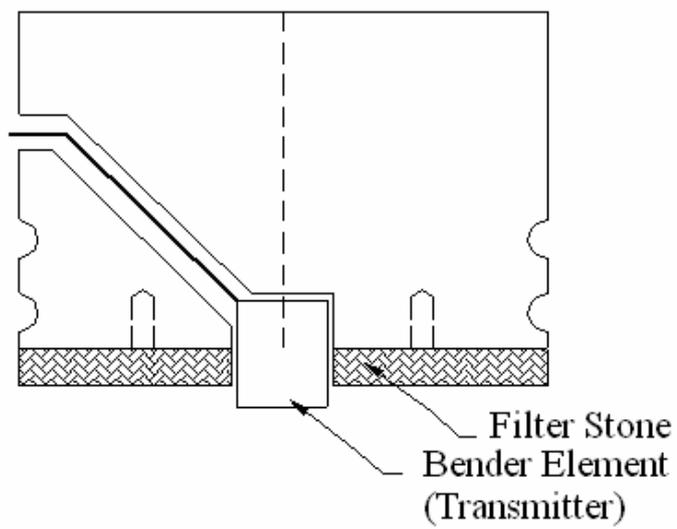


圖 3.12 試體頂蓋剪力波元件(發射端)嵌入示意圖(摘自林智惠 2003)

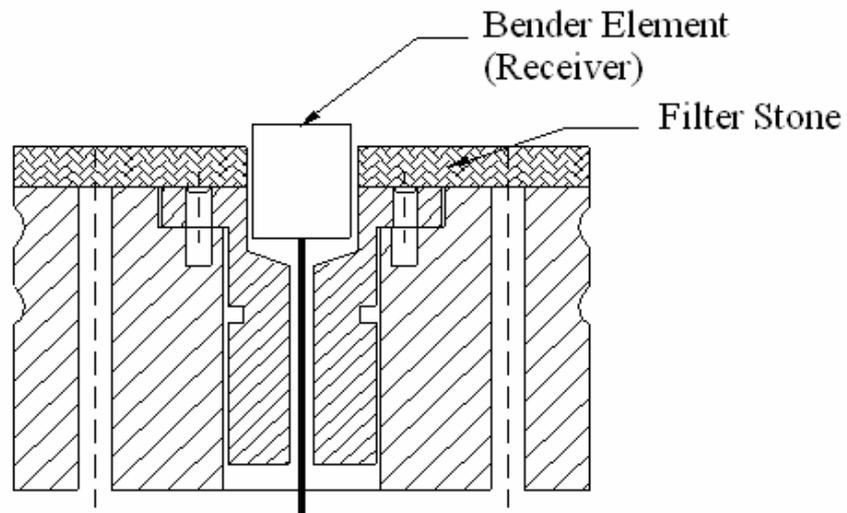


圖 3.13 底座剪力波元件（接收端）嵌入示意圖(摘自林智惠 2003)



圖 3.14 上下蓋加裝剪力波元件完成圖

第四章 樣品準備、試驗規劃、及試驗步驟

4.1 試驗流程圖

本文為探討類併構岩的力學行為，進行一系列的物性與力學實驗，流程圖如圖 4.1 所示。

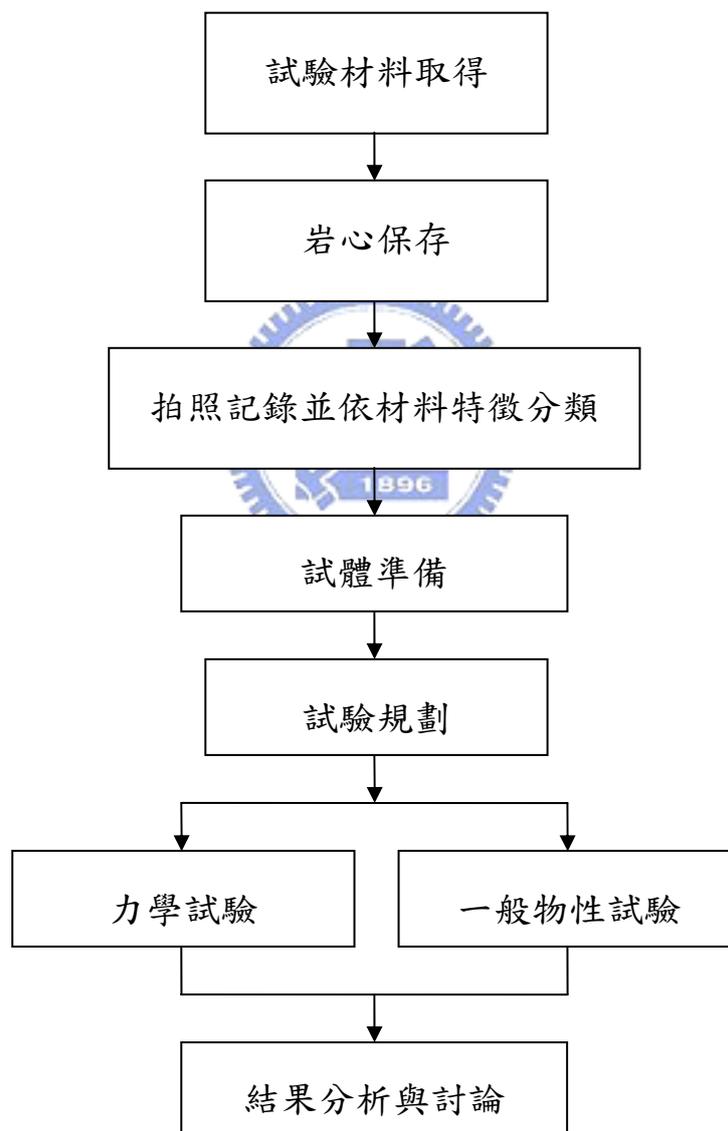


圖 4.1 研究流程圖

4.2 試驗材料取得

本研究首先於梨山崩坍地進行地質鑽探，取得岩心。

4.2.1 鑽探位置

本研究於台中縣和平鄉梨山村崩坍區進行地質鑽探，由文獻可知崩積層本身膠結不良，且地水位變化大，致使崩積層材料風化作用大，因此造成鑽探取樣不易。本文採用黃玉麟(2006)之方法，利用旋轉式鑽探，配合鋼索取岩方法，並利用超泥漿作為穩定液，鑽掘 HQ(直徑 6.2 cm)之岩心，旨在取得提取率 95%之可供試驗之岩心。

本研究主要鑽探地點有三，位於滑動體 B-9、B-1、及 B-4(圖 4.2)滑動體，另外並利用工研院(2005)於梨山段 C(圖 4.3)滑動體已鑽探之 AH-1 ~ AH-6 之岩心進行試驗。



圖 4.2 本年度鑽探孔位示意圖

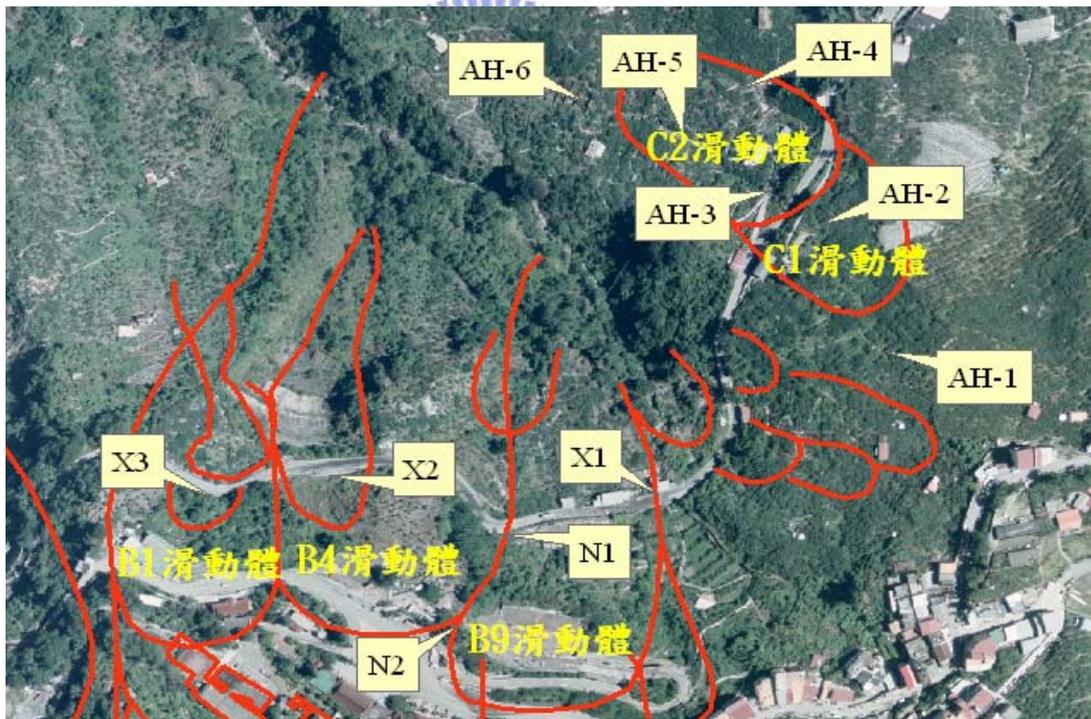


圖 4.3 工研院(2005)於 C 滑動體鑽取之 Ah1 ~ Ah6 孔位分佈

4.2.2 鑽探取樣與保存

本文採用黃玉麟(2006)之鑽探方式，即鋼索取樣並以超泥漿做穩定液進行鑽探。鋼索取岩心法主要改善起鑽方式，岩心管內管組合連接處有一爪狀的矛頭，取樣時只需將鑽進軸最上方鑽桿卸下，由管口放入連接鋼索與拋射桿組合，利用捲揚器就可以吊出岩心之內管組合。此法不但省去拆組鑽桿，同時因泥漿水持續迴流，也可保護孔壁。然而，在鑽探程中，轉速越快，鑽頭壓力越大，鑽入速度雖然增快，但相對的孔底內因鑽進所產生的岩屑亦愈多，而岩屑間接導致鑽頭與岩石介面接觸面積減少、鑽進速率減少，因此，需利用循環水將岩屑排出孔外，且迴水之流速及黏滯性對孔壁穩定有加分之作用。(劉武志 1995,謝敬義，1990)

一般而言，對於特殊地區鑽探，欲穩定鑽孔孔壁，迴水常利用造壁性佳之皂土液作為穩定液，然而其對環境造成之影響不容忽視，因此近年來改用比重、造壁性較佳之超泥漿代替。超泥漿與皂土之比較性如表 4.1

表 4.1 傳統皂土穩定液與超泥漿穩定液之比較表(黃玉麟(2006))

比較項目	傳統式皂土穩定液	超泥漿®穩定液(Neat Vis)
礦物成分	含有蒙托土之天然礦物，呈粉末狀	含高分子量之聚丙烯醯胺及多種介面活性劑之配方所組成，為細顆粒粉末狀
使用配比	5%-8%，依地質情況而定	1:3,000，依地質情況而定
拌合時間	達其功效需拌合 24 小時	拌合後即達到功效，即拌即用
比重	具親水性，鑽掘土壤易水解於皂土穩定液中，致使比重提高	比重近於 1，鑽掘土壤不易水解於超泥漿®穩定液(Neat Vis)中，因此不易提高比重
保護性	利用皂土穩定液中之黏土膠質造壁，以達到穩定開挖壁面之效果，塵泥膜將隨濾過水增加而變厚。	利用超泥漿®穩定液(Neat Vis)中之膠質黏度將土壤顆粒縱橫膠結，以達到穩定開挖壁面之效果，無塵泥膜
場地需求	24 小時之前預先拌合膨脹，因此需設置預拌池，泥砂含於皂土穩定液中不易沈澱，必須設置沈澱池並於回收液中添加沈泥劑、分散劑，泥砂沈澱後，始能提供下次使用	可直接拌合使用，不需設置預拌池，回收液中含砂量極低，可直接置於貯存池中備用，不須設置沈澱池
循環使用	使用 3-4 次後即產生劣化現象，必須棄置	不產生劣化現象，可無限次重覆使用
棄置情形	需經處理且須運送棄置，增加運輸及處理之費用	加入硫酸鋁，將聚合物中的鏈結破壞，使其黏度消失後，即可直接噴灑於地面上或排放入下水道中棄置

鑽出之岩心，在搬運及保存過程中最容易消耗的為試體之含水量及運送中試體經碰撞造成毀損，劉盛華(2007)建議取出之岩心利用保鮮膜包裹好，兩邊利用膠帶封底，保存岩心溼度。並放入長度約與岩心相等之 PVC 管，兩側利用保鮮膜封住，置入岩心箱，多餘之空間利用海綿補充，避免岩心因搬運中碰撞(圖 4.5)。此外，岩心箱外層利用大型海綿包裹，減輕岩心箱受碰撞的阻力，盡量在運送過程中使

岩心不受損害。



圖 4.4 放置岩心之岩心箱(劉盛華 2007)



圖 4.5 保護岩心方式 (劉盛華 2007)

4.3 試驗規劃

本研究共進行 15 個併構岩試體三軸試驗，岩性皆屬於灰色板岩夾灰色黏土。試體取樣位置見表 4.2。由於併構岩強度介於黏土與硬岩之間，因此三軸試驗加壓速率介於土壤剪動速率與硬岩剪動速率之間。本研究於剪動中以 0.3 % / min 之速率進行應變控制之剪動。

表 4.2 本研究三軸試驗規劃與試體取樣位置

孔號	深度 (m)	試驗顆數
N1	18 ~ 19	1
N2	18 ~ 19	1
	44 ~ 45	1
	53 ~ 54	1
AH1	12 ~ 16	2
	17 ~ 20	3
	37 ~ 38	3
	38 ~ 40	3

併構岩由板岩與風化土壤組成，有必要分別對板岩與土壤作一般物性探討。土壤試驗乃對同岩心段之土壤基質進行試驗。而板岩塊物性試驗則取完整板岩之一般物性試驗作代表。

表 4.3 本研究土壤一般物性試驗規劃與取樣位置

孔號	深度 (m)	比重	阿太堡試驗
N1	18 ~ 19	1	1
N2	18 ~ 19	1	1
	44 ~ 45	1	1
	53 ~ 54	1	1
AH1	12 ~ 16	2	1
	17 ~ 20	2	1
	37 ~ 38	2	1
	38 ~ 40	2	2

表 4.4 板岩一般物性試驗規劃與取樣位置

孔號	深度	比重	飽和含水量	孔隙比
N-2	62 ~ 63	3	3	3
X-2	43 ~ 45	2	2	2

4.3.1 試驗流程圖

本研究主要利用 MTS-810 三軸試驗系統對梨山類併構岩岩心施做三軸壓密不排水試驗，並施做一般物性試驗用以得知該試體之物理性質。試驗流程如下圖 4.6。



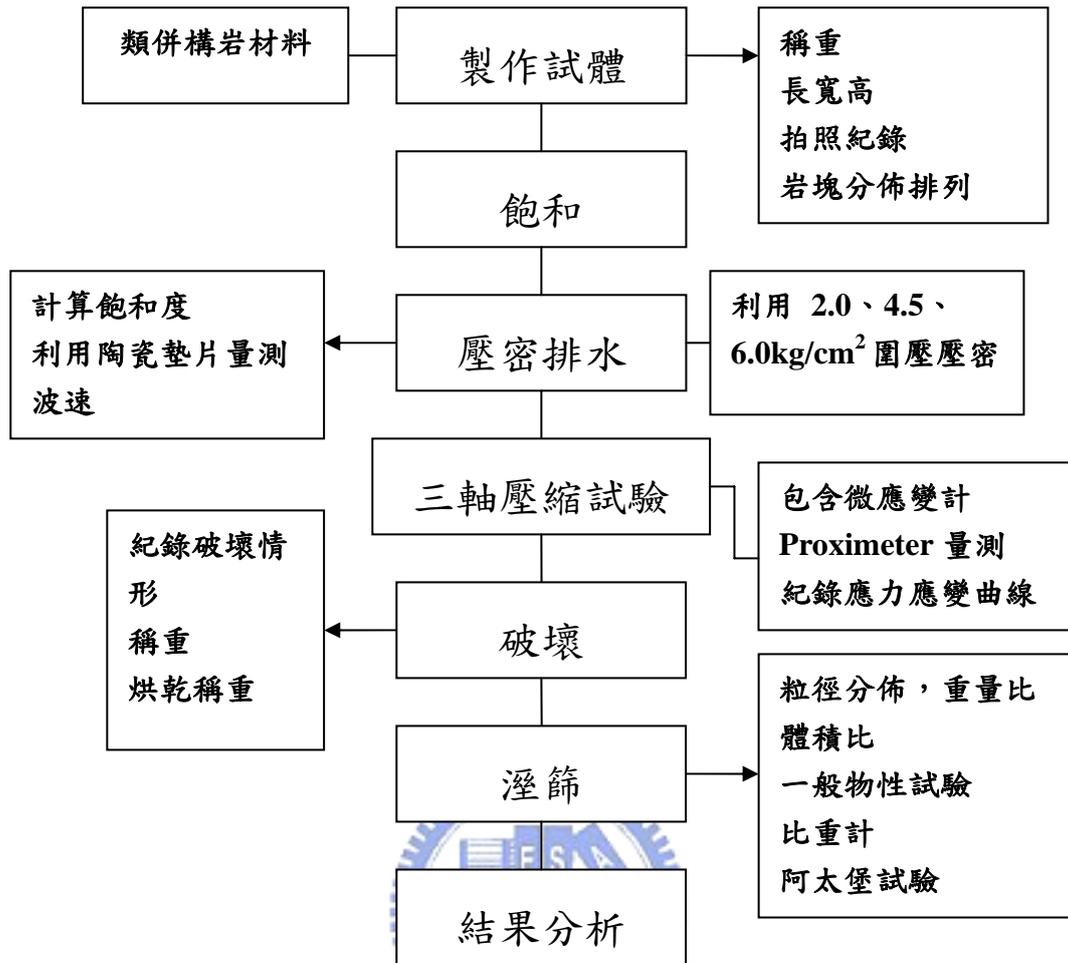


圖 4.6 三軸實驗流程圖

4.3.2 試體準備

I.S.R.M.(1979)對岩石試驗試體之規範提出幾點建議：

1. 試體形狀為圓柱體，長徑比(L/D)約 2.5~3.0，其中直徑不低於 NX 尺寸(54 mm)，另外試體之最大粒徑尺寸不能超過直徑的 1 / 10。
2. 試體表面之粗糙度小於 0.02 mm，且與試體縱軸線之垂直偏差度小於 0.001 rad 或 0.05 mm / 50 mm。
3. 試體於製作前後含水量變化在 1%以內。

然而，本研究之材料異於軟岩或硬岩者，岩心包含了較硬之板岩岩塊與較軟弱之黏土、粉土或砂土。板岩塊、黏土、砂土、粉土在強度及壓縮性上即有明顯不同，有時無可避免的在切割後造成試體末端剝落。因此在試體末端填補#200 以下細料並磨平，避免末端不平造成應力集中或端版效應影響實驗結果。然本研究所準備之併構岩試體內最大岩塊有 25mm ~ 40 mm，因此無法符合 ISRM 規定之 1/10 岩塊尺寸。因此試體可能有高度的不均質性。

本研究使用之岩心切割機為單刃岩心切割機(圖 4.7，圖 4.8)，可調節岩心受切割時前進之速率。經過多次嘗試，梨山崩積層岩心段利用前進速率 1.75 cm / min 速率切割較理想。



圖 4.7 單刃岩心切割機



圖 4.8 岩心切割機控制旋鈕介面圖

試體切割完畢後，除稱重與記錄長寬高外，拍攝試體 360° 影像，利用影像處理合成後，紀錄試體表面岩塊分佈情形，計算岩塊所佔面積比。見圖 4.9、4.10、圖 4.11。

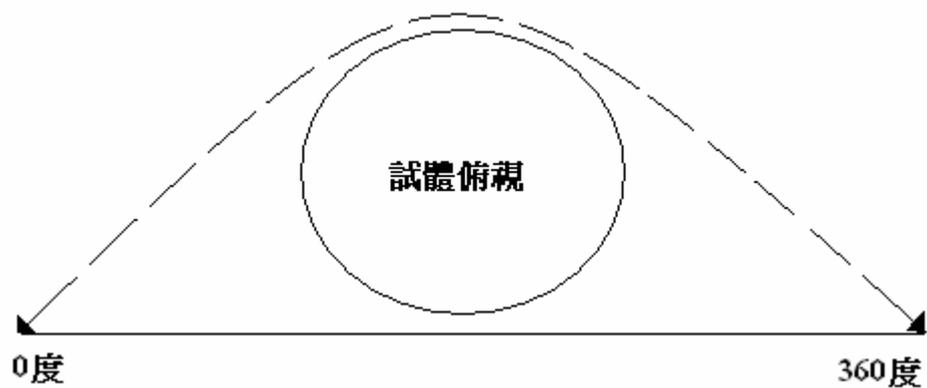


圖 4.9 試體 360° 攝影示意圖



圖 4.10 試體每 90 拍照紀錄圖(以 N2 18.4m ~ 18.6m 為例)



圖 4.11 試體 360° 影像展開圖 (以 N2 18.4m ~ 18.6m 為例)

4.4 實驗步驟

4.4.1 三軸壓縮試驗

本研究之主軸為併構岩試體於不同圍壓下的三軸壓密不排水實驗，試驗中量測試體內孔隙水壓、軸向變形、微應變、應力變化與剪力波度，探討此類材料在受剪時的孔隙水壓變化，應力應變行為及變形性。

實驗利用 MTS810，搭配個人電腦及 labview 控制軟體，剪動為應變控制，以 0.3 % / min 應變速率剪動。實驗步驟如下：

1、選取所需的岩心段，製成長徑比接近 2.5 ~ 3.0 的試體，再修整其上下面使之平整，量測試體的重量、長度及直徑，並拍照紀錄岩塊間分佈情形。



2、將試體包裹熱縮膜，架設小應變的量測裝置 proximator 的感應鋼片使之貼平於試體，為避免量測到的微應變為膜的變化量，以大頭針透過感應鋼片插入試體中。再將試體移至三軸室內，控制 proximator 在適當的感應距離，初始電壓值最好約在 5 V 左右。

3、利用氣壓將儲油槽之機油（型號 CPC-R68）注入三軸室內，上方調節閥打開排出三軸室內氣泡，待機油注滿即關閉上方調節閥，保持三軸室密封並與外界隔絕。

4、進行 flush 階段，將水注入試體內，保持圍壓與反水壓間差值不超過 0.2 kg/cm^2 。並且隨時將下管排水閥門打開，將氣泡隨著水排出。

5、當排出的水不再含氣泡之後，隨即加大圍壓及反水壓進行飽和。

兩者壓力差值依然維持不大於 0.2 kg/cm^2 。方世傑(1990)提到中橫公路附近之黏土與類併構岩材料之孔隙比約 $0.29 \sim 0.46$ 。圖 4.12 為

Black(1973)所提出土壤飽和階段中 B 值、飽和度與孔隙比的關係可

發現；當中發現當土壤孔隙比為極緊密土壤時 ($e = 0.4$)，土壤 B 值

在達到 0.75 時飽和度已趨於 99.5%。因此故當 B 值達到 75%以上至

不再上升時，即判斷達到飽和。本研究試體飽和的時間約一天到兩天。

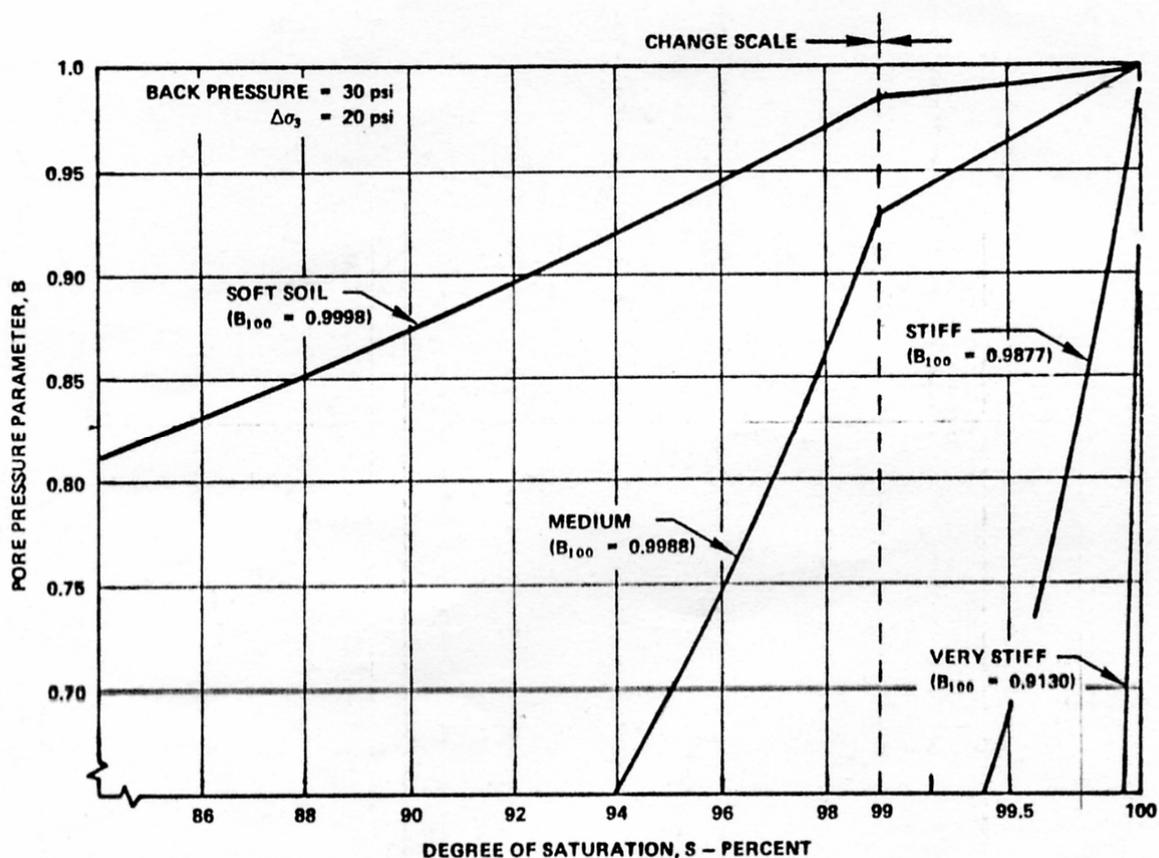


圖 4.12 不同緊密度之土壤有飽和度與 B 值之關係 (Black,1973)

6、開啟試體排水的閥門，再依照情況加圍壓進行均向壓密，紀錄試體在壓密時之體積變化。

7、壓密完成後，關閉排水的閥門，此時利用剪力波元件進行波速量測。

8、隨即利用已設定好的剪動速率，控制 $0.3\% / \text{min}$ 應變速率進行實驗。過程中同時量測軸向力、圍壓、水壓變化、軸向變形利用 Proximeter 與 LVDT 量測應變量由於 Proximeter 僅能量測至 0.2% 以下應變行為，故之後則由 MTS LVDT 紀錄，以做為實驗分析之用。

9、試驗結束後，拍照紀錄試體破壞情形。稱重，最後放入烘箱烘乾。



4.4.2 一般物性試驗

三軸試驗結束後，將已破壞的試體放入烘箱以 105°C 烘乾 24 小時後取出。由於試體內風化板岩相當破碎，若採用乾篩法可能造成岩塊在相互撞擊下磨損，可能低估最初岩塊的粒徑及含量。因此採用濕篩法，利用清水將試體洗進篩網中。本研究所採用的篩網為 #2、#4、#10、#20、#40、#60、#100、#200 號篩。一般物性試驗，包括含水量試驗，比重試驗，比重計試驗，阿太堡試驗以參照 ASTM 規範逐一施作。

第五章 實驗結果與分析

5.1 一般物性試驗結果

本研究為決定併構岩的物理性質，除需瞭解板岩塊與基質之體積含量比外，亦需掌握板岩與基質的物理性質。表 5.1 顯示板岩塊飽和含水量與乾密度試驗組數得到的數據，比重約為 2.761，飽和含水量約 0.24 %。

表 5.1 板岩塊物性試驗結果

	實驗組數	平均值	標準差
比重	5	2.761	0.023
飽和含水量(%)	5	0.24	0.027
孔隙比	5	0.0067	0.00071

至於併構岩中基質性質則利用試體內通過#4 以下的土壤，阿太堡限度則對#200 以下之土壤施作。表 5.2 為併構岩中土壤一般物性試驗結果，板岩比重略大於土壤，但依然相當接近，故判斷基質土壤應為板岩風化後的產物。阿太堡限度經由 Casagrande 塑性分類後，得到#200 以下的細料為高塑性黏土(CH)或高塑性粉土(MH)。

表 5.2 併構岩試體內土壤一般物理性質試驗

土壤物性	組數	平均值	標準差
比重	12	2.731	0.047
LL	9	41	6.10
PL	9	28	6.05
PI	9	13	5.69

5.2 三軸實驗結果

本研究施作之三軸試驗試體皆為灰色板岩夾灰色黏土，由於 X1~X3 鑽探所得到的類併構岩之岩心材料並不多，因此研究施作之試體多取自 N1、N2 與 Ah1 鑽探孔，其基本資料如表 5.3，表中試體編號依取樣位置與實驗順序加以區分。

表 5.3 試體編號及基本資料表

試體編號	孔號	深度 (m)	長度 (mm)	直徑 (mm)	h/d	面積比 (%)	體積比 (%)	重量比 (%)	有效圍壓 (kg/cm ²)	反水壓 (kg/cm ²)	B 值
SG-N101	N1	18.23~18.38	152.5	62.9	2.42	47.39	60.83	65.3	4.50	2	0.75
SG-N201	N2	18.4~18.6	152.3	60.9	2.50	28.93	25.52	30.90	4.50	2	0.81
SG-N202	N2	44.8 ~ 45.0	153.47	62.2	2.47	27.58	27.25	30.44	2.00	2	0.85
SG-N203	N2	53.4 ~ 53.6	183.125	61.15	2.98	33.13	33.79	39.38	6.00	2	0.86
SG-Ah101	Ah1	37.03~37.18	151.68	61.93	2.45	3.84	14.53	16.81	4.50	2	0.83
SG-Ah102	Ah1	37.55~37.75	153.49	61.63	2.50	16.61	17.28	18.96	6.00	2	0.75
SG-Ah103	Ah1	37.80~37.95	152.32	60.97	2.50	51.21	56.86	61.70	4.50	2	0.77
SG-Ah104	Ah1	38.70~38.85	159.49	61.19	2.60	19.41	30.11	33.91	2.00	2	0.82
SG-Ah105	Ah1	38.85~39.00	155.28	62.21	2.50	27.66	27.89	31.29	4.50	2	0.83
SG-Ah106	Ah1	39.55~39.70	150.55	60.61	2.49	19.76	17.44	20.00	6.00	2	0.76
SG-Ah107	Ah1	12.00~12.15	157.00	60.96	2.57	12.40	23.07	28.06	2.00	2	0.82
SG-Ah108	Ah1	16.80~16.95	164.92	60.24	2.72	2.70	3.89	4.80	4.50	2	0.87
SG-Ah109	Ah1	19.85~20.00	151.59	5.937	2.55	3.93	3.02	3.47	2.00	2	0.85
SG-Ah110	Ah1	17.05~17.20	169.13	6.092	2.76	2.32	5.02	6.39	2.00	2	0.89
SG-Ah111	Ah1	17.25~17.40	152.88	6.092	2.510	17.91	18.40	20.21	6.00	2	0.88

註：編號意義：SG：岩性分類，為黃玉麟(2006)所代表灰色板岩夾灰色黏土層。N1、N2、Ah1：孔號分類。

表 5.4 試體基本物性表

試體編號	孔號	飽和含水量 (%)	飽和單位重 (kN/m ³)	乾單位重 (kN/m ³)	孔隙比
SG-N101	N1	3.91	25.51	24.55	0.068
SG-N201	N2	9.77	24.88	22.66	0.163
SG-N202	N2	6.988	25.26	23.61	0.101
SG-N203	N2	7.31	24.20	22.55	0.153
SG-Ah101	Ah1	8.177	24.67	22.80	0.201
SG-Ah102	Ah1	5.838	25.53	24.12	0.096
SG-Ah103	Ah1	6.516	25.72	24.15	0.119
SG-Ah104	Ah1	7.13	25.56	23.86	0.125
SG-Ah105	Ah1	3.42	24.32	23.52	0.150
SG-Ah106	Ah1	8.23	25.03	23.12	0.148
SG-Ah107	Ah1	6.09	24.54	21.68	0.235
SG-Ah108	Ah1	9.05	23.30	21.36	0.247
SG-Ah109	Ah1	6.79	24.45	22.90	0.169
SG-Ah110	Ah1	9.14	23.58	21.61	0.238
SG-Ah111	Ah1	4.73	24.03	22.95	0.167

5.2.1 岩心岩塊面積比與體積百分比

本研究於試驗前進行試體表面拍照記錄，搭配影像軟體合成以後進行岩心表面岩塊分佈與面積比計算。於三軸試驗後對試體進行濕篩，利用板岩之單位重換算為體積比，藉此評估兩者間差異。圖 5.1 表示面積比與體積比之關係，由趨勢線得到面積比雖然可能稍微低估濕篩得到之體積比，但基本上差異性不大。因此從試體外觀初步評估岩塊之含量是可接受的。

檢視表面攝影、岩心柱狀圖、與濕篩後殘留於#4 上之岩塊，可以判斷岩心的岩塊可分為三類，如圖 5.2 及圖 5.3，並說明如下（紅色長條代表鑽機於現地取得之岩心）：

- 
- A) 鑽機直接鑽穿現地岩石，因此岩心中的鑽孔直徑完全為岩塊所佔據。(圖 5.3 A)
 - B) 現地岩石之一部份受鑽機切割，即分佈於岩心表面之岩塊。(圖 5.3 B，岩塊圓弧狀部分乃受鑽機切割所致)
 - C) 包覆於岩心中之岩石，並未受到鑽機切割，與現地大小相同之岩塊。(圖 5.3 C)

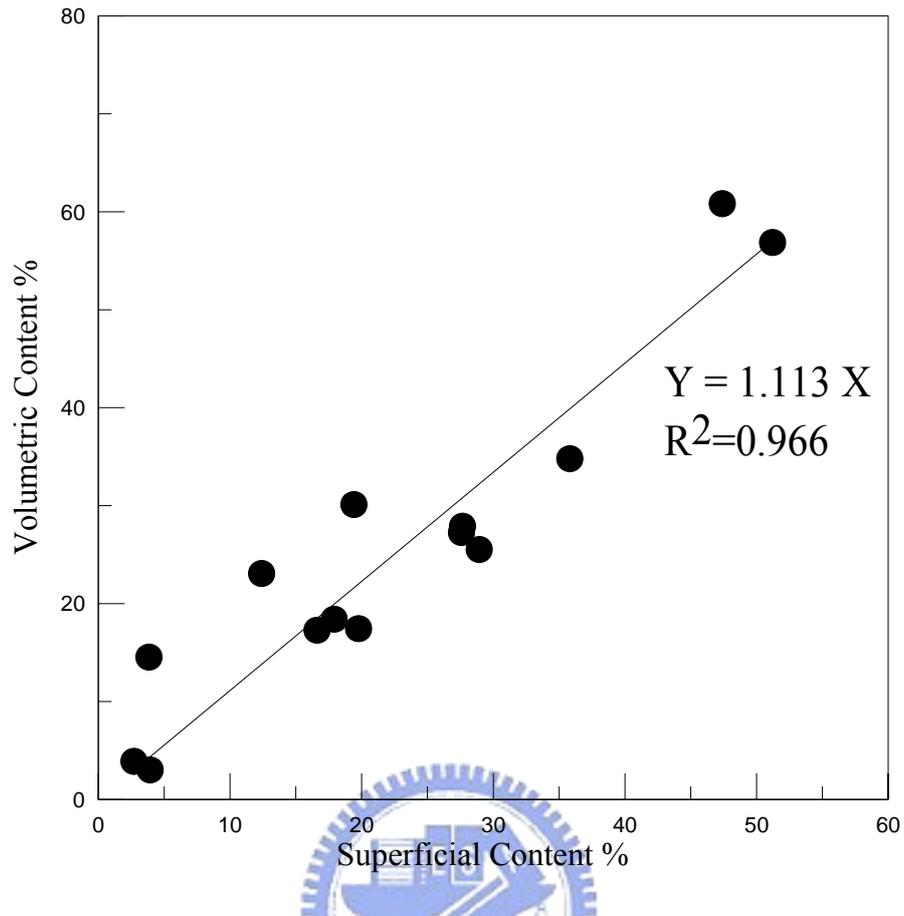


圖 5.1 面積比與實際溼篩後體積比比較

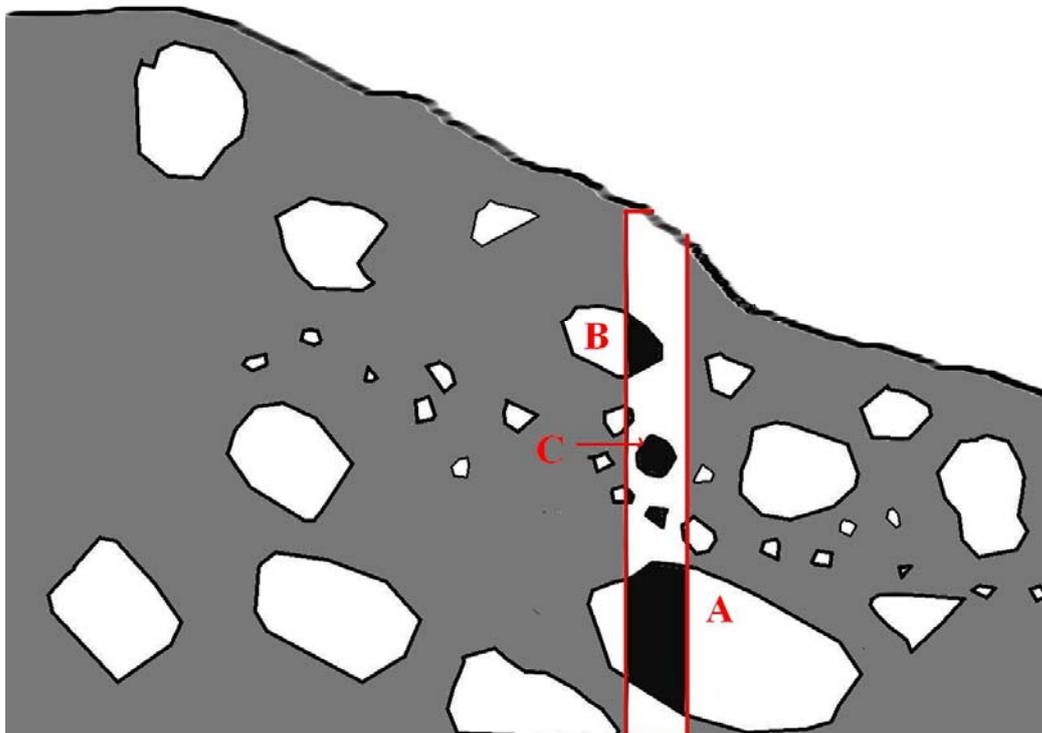


圖 5.2 岩心之岩塊與現地岩石之差異

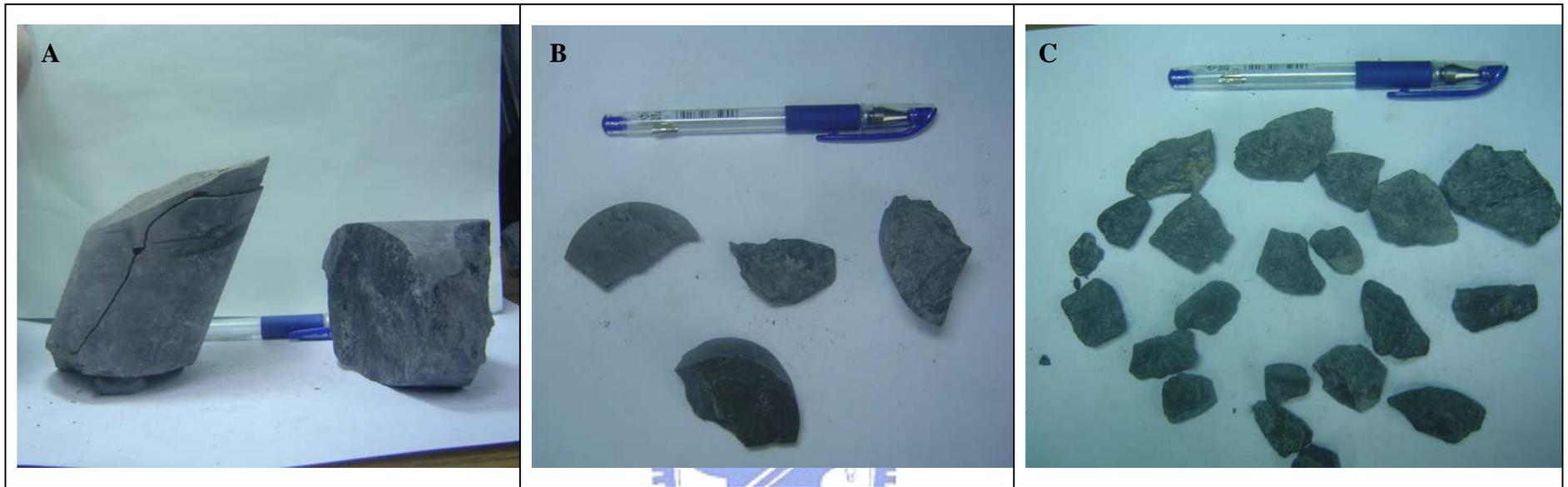


圖 5.3 岩心中三種種類之板岩岩塊

因為只有 C 類板岩塊為完整岩塊，本文假設崩積體內無論大小岩塊其形狀皆與 C 類板岩塊形狀相似。因此，首先統計歸納出 C 類板岩塊長短軸與厚度，再利用岩心中 A 類岩塊厚度推估現地岩塊最大之粒徑。表 5.5 與表 5.6 為淺層之灰色板岩夾黏土與較深層層灰色板岩夾黏土層之長短軸與厚度比，從表中可發現，深層與淺層岩塊之長短軸比大約為 1.3~1.4。而長軸與厚度比為 2.38 與 3.06，表示梨山崩坍地的板岩塊有明顯的長短軸差距，且深層之岩塊較淺層更為扁平。

表 5.5 N1 12~16 m 岩塊長短軸與厚度比

	長軸	短軸	厚度
平均值	2.38	1.70	1
標準差	0.64	0.58	0

(註：樣本數 24，樣本紀錄置於附錄)

表 5.6 N2 48~52 m 岩塊長短軸與厚度比

	長軸	短軸	厚度
平均值	3.06	2.37	1
標準差	1.05	0.80	0

(註：樣本數 24，樣本紀錄至於附錄)

黃玉麟(2006)提到淺層之灰色板岩夾黏土層排列較不整齊(圖 5.4)，較深層之板岩夾黏土層有沿著劈理面排列之趨勢(圖 5.5)。從圖 5.5 可看到 41 m~41.3m 為 A 類板岩塊，若假設該地層排列一致，岩心中板岩塊深度即為現地岩石之厚度。最大之岩塊預估為 90 cm x 23cm x 30 cm。至於淺層之岩塊排列較無方向性因此無法評斷最大岩塊尺寸。



圖 5.4 N-1 12 ~ 16 m (摘自黃玉麟, 2006)



圖 5.5 N-2 40 ~ 44 m (摘自黃玉麟, 2006)

5.2.2 剪力波量測結果

本研究在三軸試驗中以陶瓷墊片裝於試驗上下蓋，企圖得到試體中剪力波速以反推剪力模數。但效果並不理想，多為無法判讀之波形或沒有波形。且往往因試體無可避免的分佈著較堅硬之岩塊，而造成剪力波元件在試驗中受剪時受到岩塊壓迫造成變形或斷裂，因此本研究剪力波速量測並不理想。

5.2.3 三軸不排水實驗應力應變曲線

本研究試體荷重由內置式荷重計量得，而大應變量則由 MTS-810 內建之 LVDT 量測。本研究並定義達到 20% 應變量或應力值達到尖峰值後為試體破壞。圖 5.6、圖 5.7、圖 5.8 分別為圍壓 6.0, 4.5, 及 2.0kg/cm² 岩塊含量接近之試體的應力應變曲線。岩塊含量相近下，圖 5.6 應力應變曲線類似。然而，圖 5.7、與圖 5.8 兩者應力應變行為並不相同；圖中發現 N1 與 N2 除了 SG-N203 試體以外，往往在應變量達到 10~12% 時軸差強度有明顯之尖峰值而產生應變軟化情形。而 AH-1 除 SG-Ah102 與 SG-Ah106 試體，在試驗中即使達到 20% 應變量，強度依然未有應變軟化趨勢，筆者認定兩種岩心應力應變行為不同之原因可能為：相較於黃玉麟(2006)鑽取之梨山 N1、N2 孔，工研院(2005)的 AH-1 試體存放較久，而岩心並未封蠟保存，因此可能造

成試體含水量流失、乾縮，或材料中黏土放久而有過壓密現象造成。

其餘材料之應力應變曲線性質大多與上述雷同。

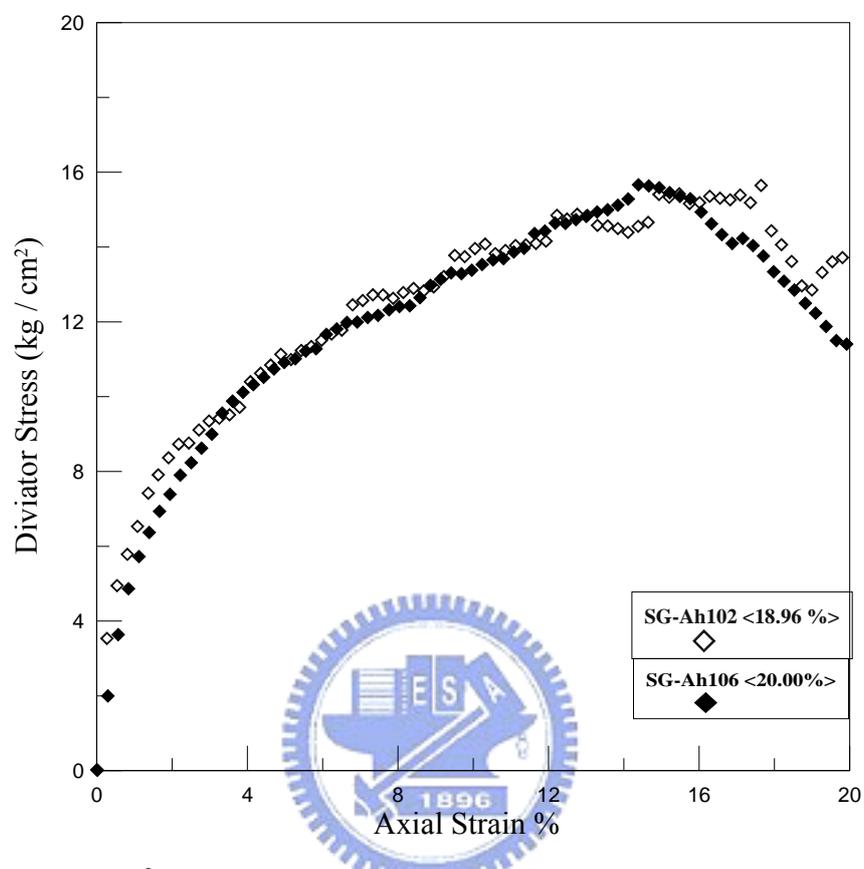


圖 5.6 6.0 kg/cm² 有效圍壓下應力應變圖(SG-Ah102 SG-Ah106 為例)

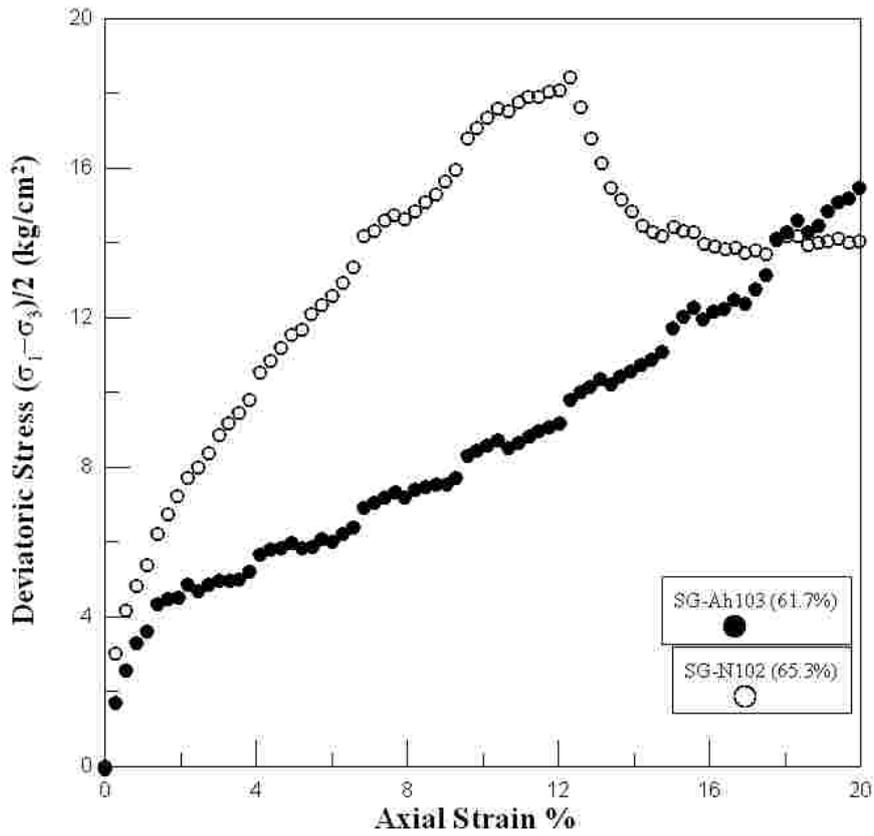


圖 5.7 4.5 kg/cm² 有效圍壓下應力應變圖(以 SG-N102 SG-Ah103 為例)

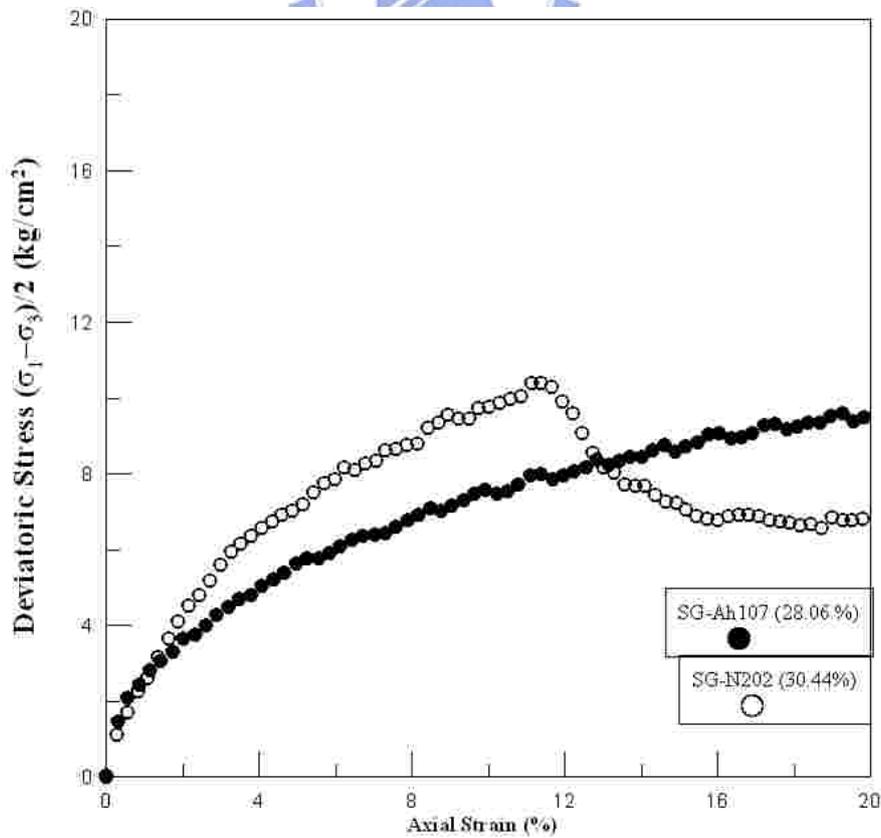


圖 5.8 2.0 kg/cm² 有效圍壓下應力應變圖(SG-N202 與 SG-Ah107 為例)

5.2.3 孔隙水壓變化曲線

圖 5.9、圖 5.10 圖 5.11 表示併構岩各圍壓下孔隙水壓曲線。比較三張圖後發現，各個圍壓下併構岩材料均於受剪初期有剪縮之反應。而觀察圖中 SG-N101、SG-N201 與 SG-N202 之試體，材料在剪縮以後開始有受剪膨脹之趨勢。對照前節之應力應變曲線，當激發至最大負孔隙水壓時，併構岩軸差應力達到尖峰，隨後應變軟化。而 AH-1 試體並未有明顯剪脹的現象，因此應力強度並無明顯之尖峰值推測可能為試體含水量流失，且產生乾縮現象，因此即使試驗中達到飽和，也無法產生剪脹的趨勢。

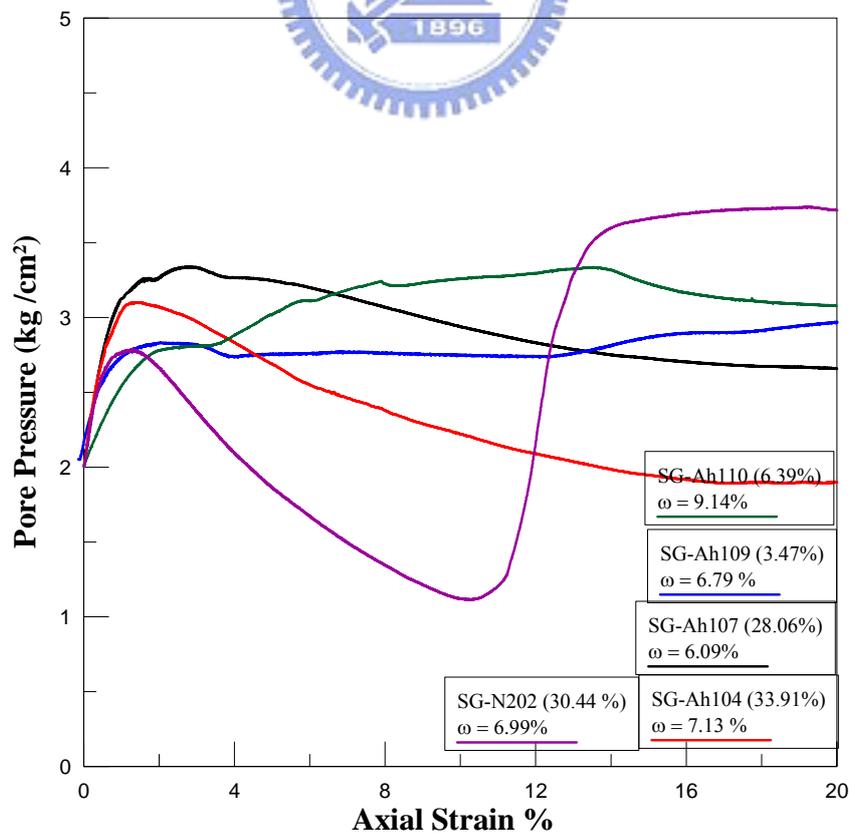


圖 5.9 2.0 kg/cm² 有效圍壓下孔隙水壓曲線圖

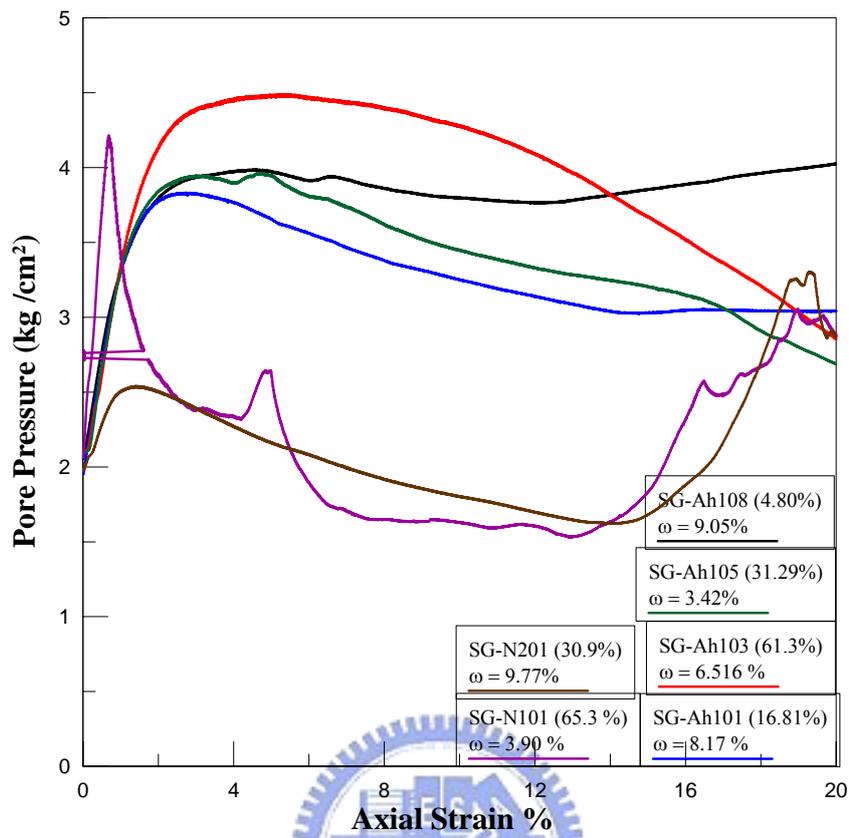


圖 5.10 4.5 kg/cm^2 有效圍壓下孔隙水壓曲線圖

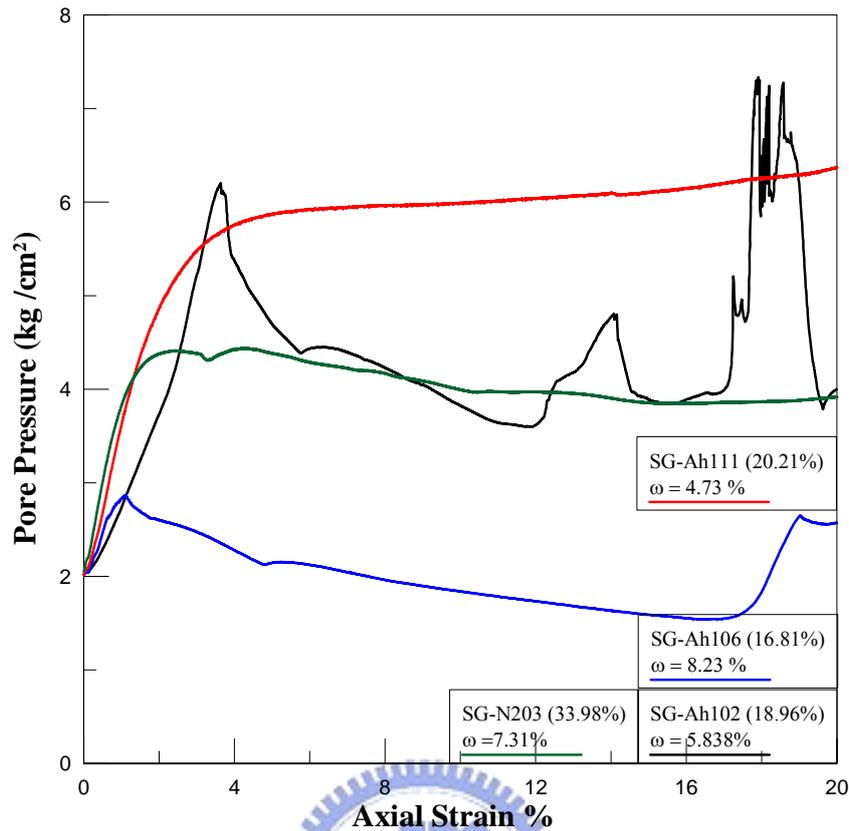


圖 5.11 6.0 kg/cm² 有效圍壓下孔隙水壓曲線圖

5.2.4 類併構岩三軸不排水強度

本文以岩塊重量百分比討論其對三軸不排水試驗之應力應變曲線中破壞軸差強度的影響，圖 5.12 可發現強度有明顯隨岩塊含量增加之趨勢。而實驗結果亦顯示當岩塊含量低於 25% 時，不同圍壓下，三軸不排水剪力強度隨岩塊增加而上升，與洪如江(1984)、Montrasio(1998) 提出之假設：“當岩塊含量低於 25% 時，岩塊間不互相接觸，因此材料行為類似土壤材料行為”不同。經試驗結果發現，岩塊含量相同之試體，即使存在於不同之取樣位置，其表現之尖峰軸差強度也相當接近。因此未來經由鑽探所取得的梨山類併構岩材料，

經由粒徑分布分析岩塊含量應可粗略的判斷其強度。

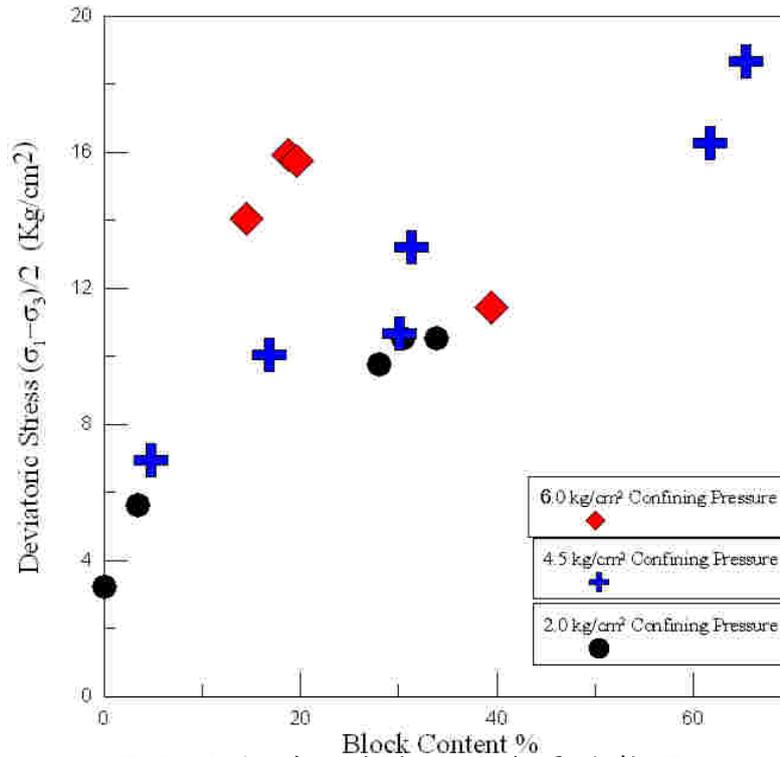


圖 5.12 軸差強度與岩塊含量趨勢圖

5.2.5 微應變量量測與切線楊氏模數

本研究為了得到試體之切線楊氏彈性模數，利用 Proximeter 微應變計紀錄應變量 0.1% 以下之應力應變行為量測。圖 5.13 為 SG-N202 於三軸試驗下 Proximeter 與 MTS-810 LVDT 量測得到的小應力應變行為之比較。由於 LVDT 為三軸室內部內建，其量測之變形量包含三軸室、加壓座之變形。故在微應變量下楊氏模數差距達 6 倍以上。若利用 MTS-810 的 LVDT 計算彈性段行為，則會低估材料小應變下的楊氏模數。

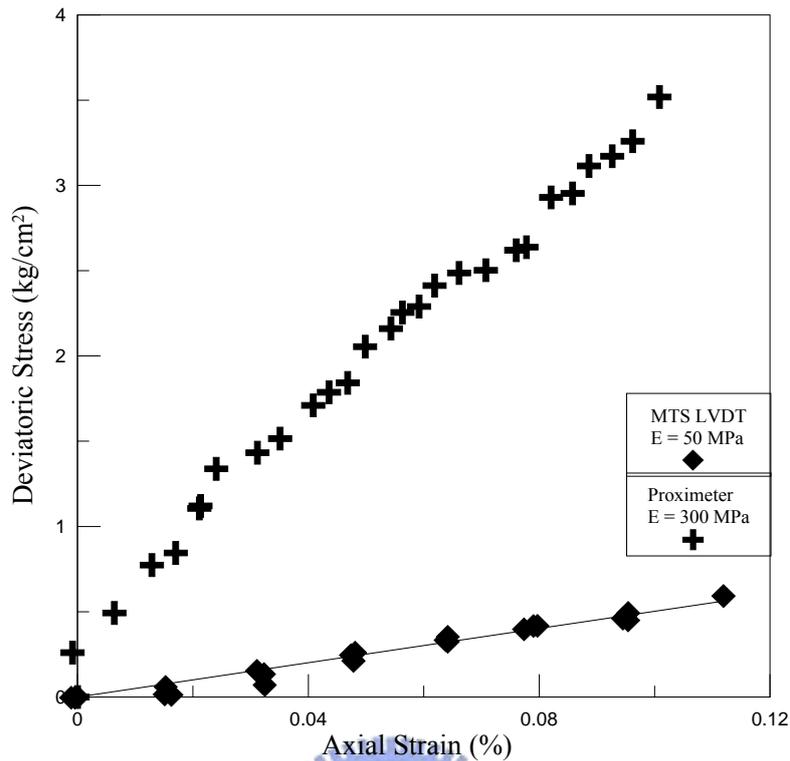


圖 5.13 MTS LVDT 與 Proximeter 小應力應變行為比較(SG-N202)

由於微應變量原理乃利用兩個微應變計為不動端，分別量測兩鋼片小位移量，利用上鋼片位移量減去下鋼片位移量除以微應變計距離得到微應變量然而因為岩塊的不均勻分佈，或岩塊內於受剪有相對位移，因此於較高岩塊含量試體下量測，上鋼片位移量會較小，導致初始微應變量為負的(圖 5.14)。

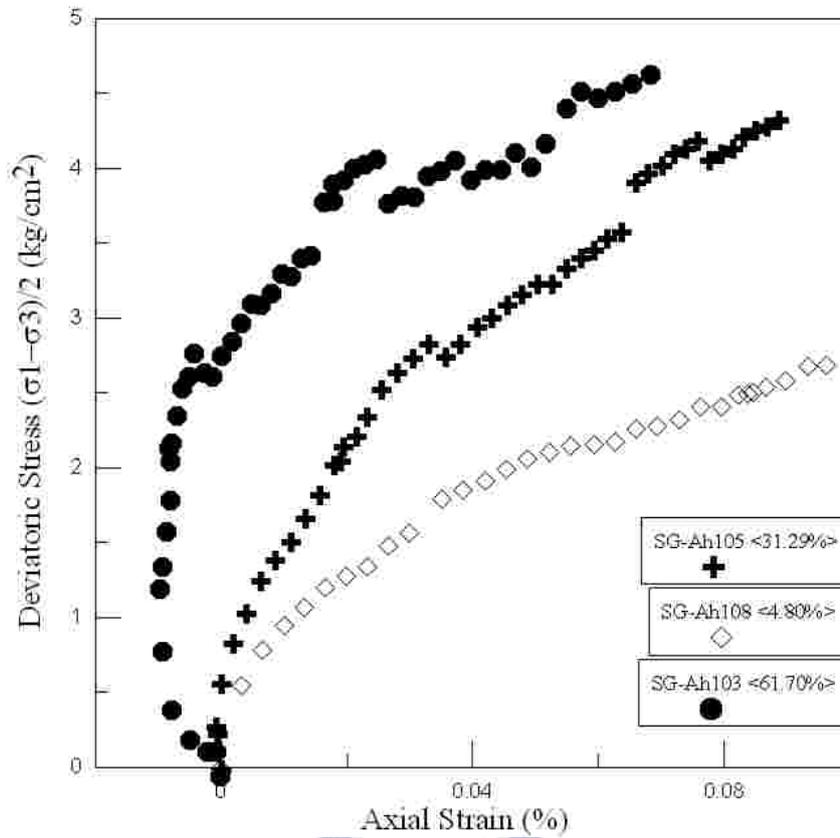


圖 5.14 4.5 kg/cm² 有效圍壓下之軸差強度、含量與微應變圖

實驗中利用微應變計量測計算所得的切線楊氏模數如下圖 5.15，圍壓較大時切線楊氏模數亦增大，此為壓密造成的結果。而顯而易見的，岩塊含量增加也使得切線楊氏模數有增加的趨勢。

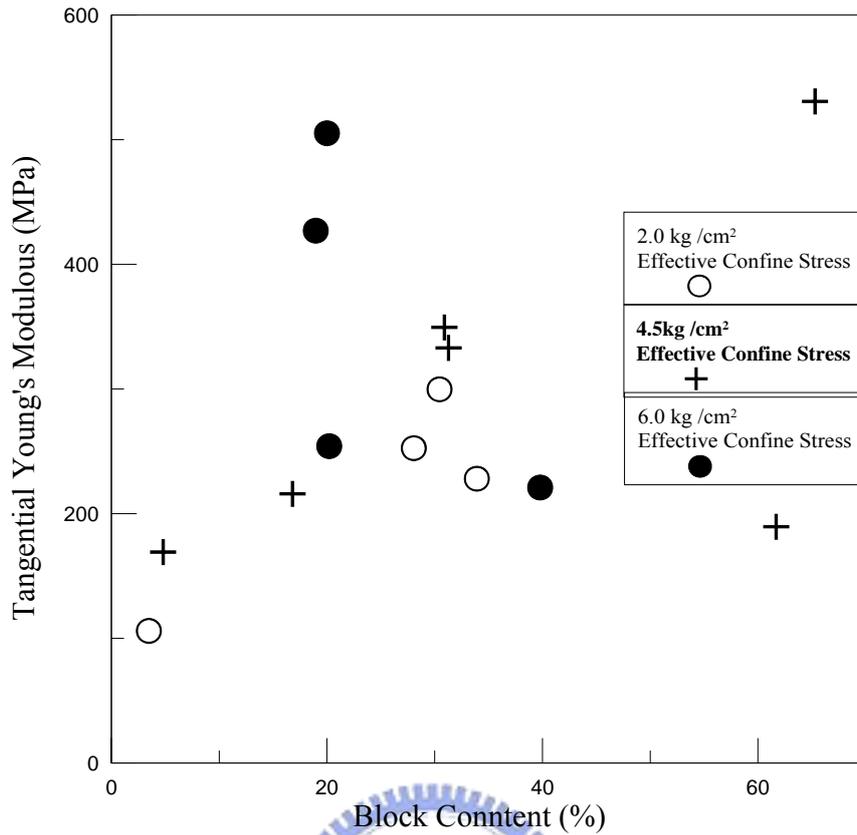


圖 5.15 切線楊氏模數與岩塊含量關係

然而，在現地條件下，梨山崩坍地在大規模滑動下，併構岩材料之變形量已超過彈性行為。因此有必要探討併構岩試體在較大變形量下的模數折減行為。利用 MTS LVDT 量測所得的變形量，計算材料在應變量 1%~20% 下的楊氏模數。圖 5.16、圖 5.17、圖 5.18 為各圍壓下併構岩試體模數隨應變增加而折減之關係，材料受壓密應力增大影響，模數遞減程度會較低。另從圖中發現，併構岩岩塊含量較少，其模數折減情形較大。

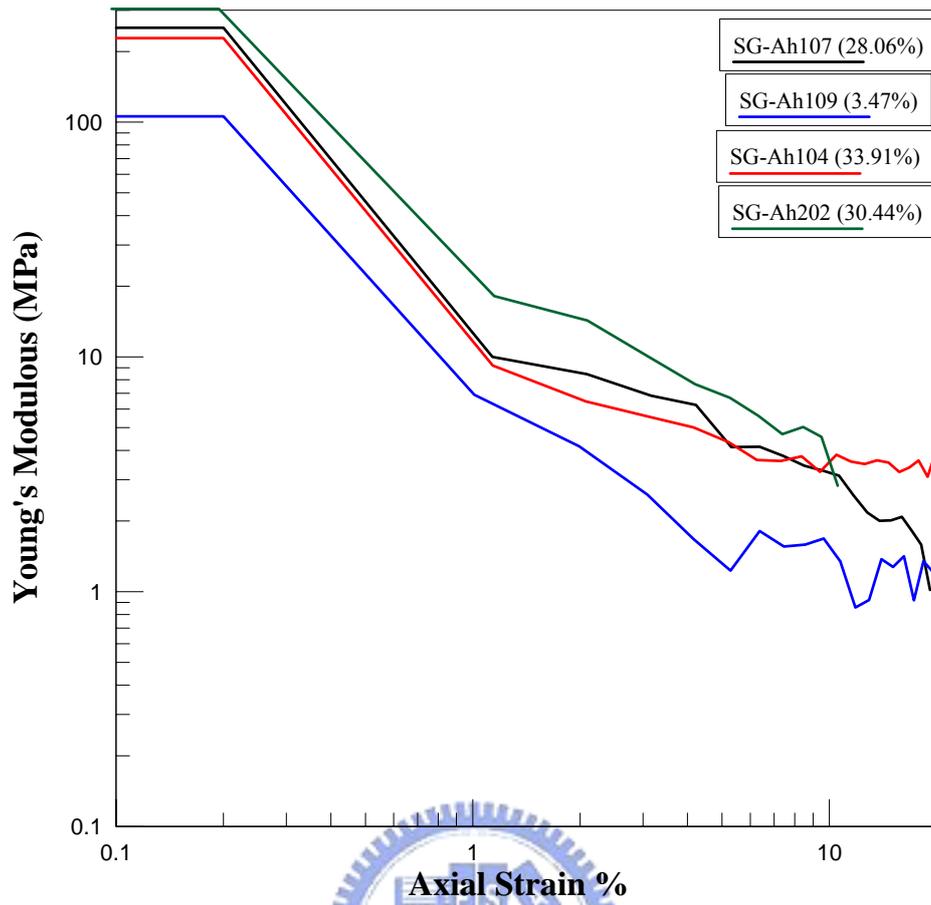


圖 5.16 2.0 有效圍壓下模數遞減曲線

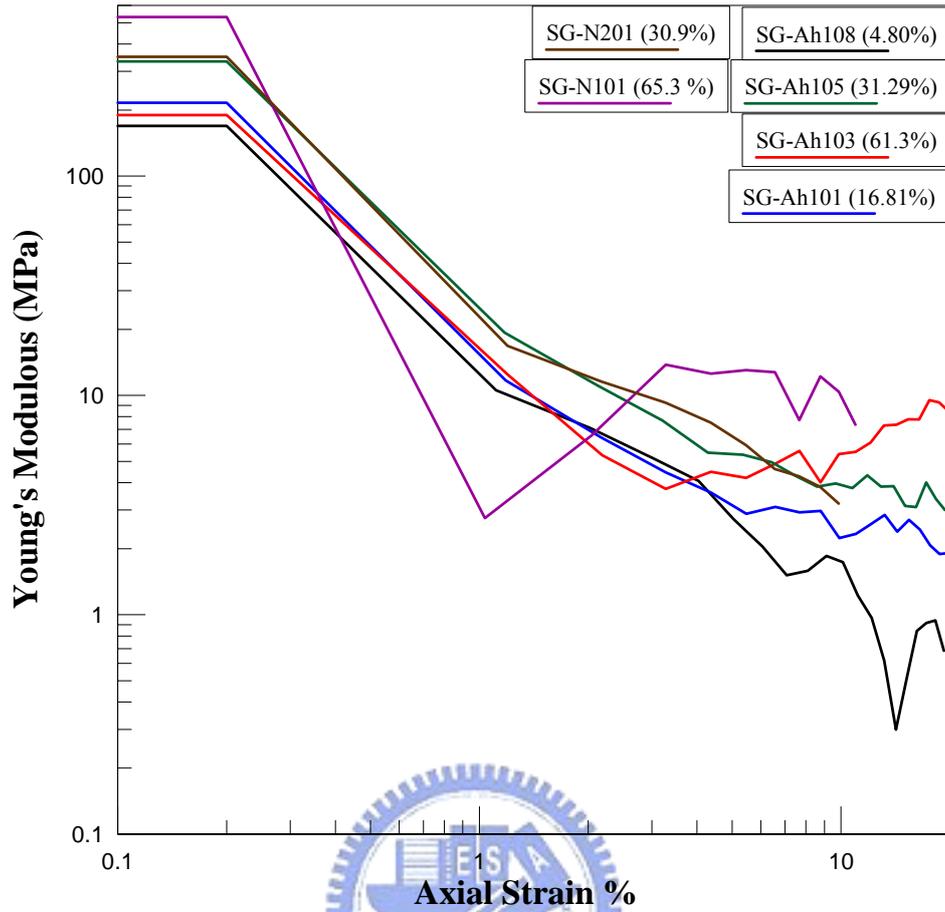


圖 5.17 4.5 有效圍壓下模數遞減曲線

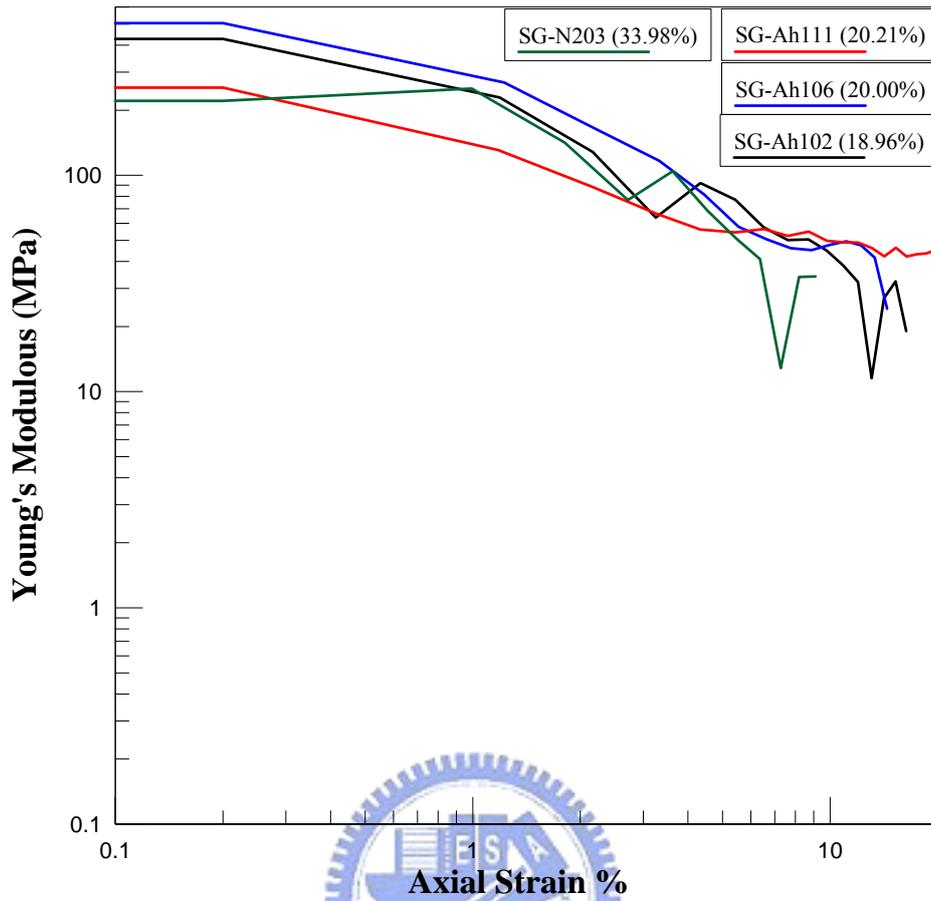


圖 5.18 6.0 有效圍壓下模數遞減曲線

5.2.6 影響材料強度因子探討

由文獻回顧可得知岩塊含量與強度與與土壤基質本身強度會影響類併構岩材料，而由於本研究所研究之併構岩材料灰色板岩夾灰色黏土中，基質基本物理性質相當接近，皆為高塑性的黏土或高塑性的粉土，且大顆粒的岩塊為板岩。因此就影響強度之因子只剩下岩塊含量之影響。

觀察施做之試體，無論岩塊大小與含量，於試體破壞後由試體表面觀察及剝開試體檢測，發現破壞面未有直接穿越岩塊者，多為沿著

岩塊間發展，如圖 5.19 紅色曲線顯示為破裂面。本研究結果與 Medley(2001)定義併構岩之破壞形式類似。另外岩塊分佈較少的地方產生膨脹的情形，而岩塊多的區域則束制膨脹的行為。

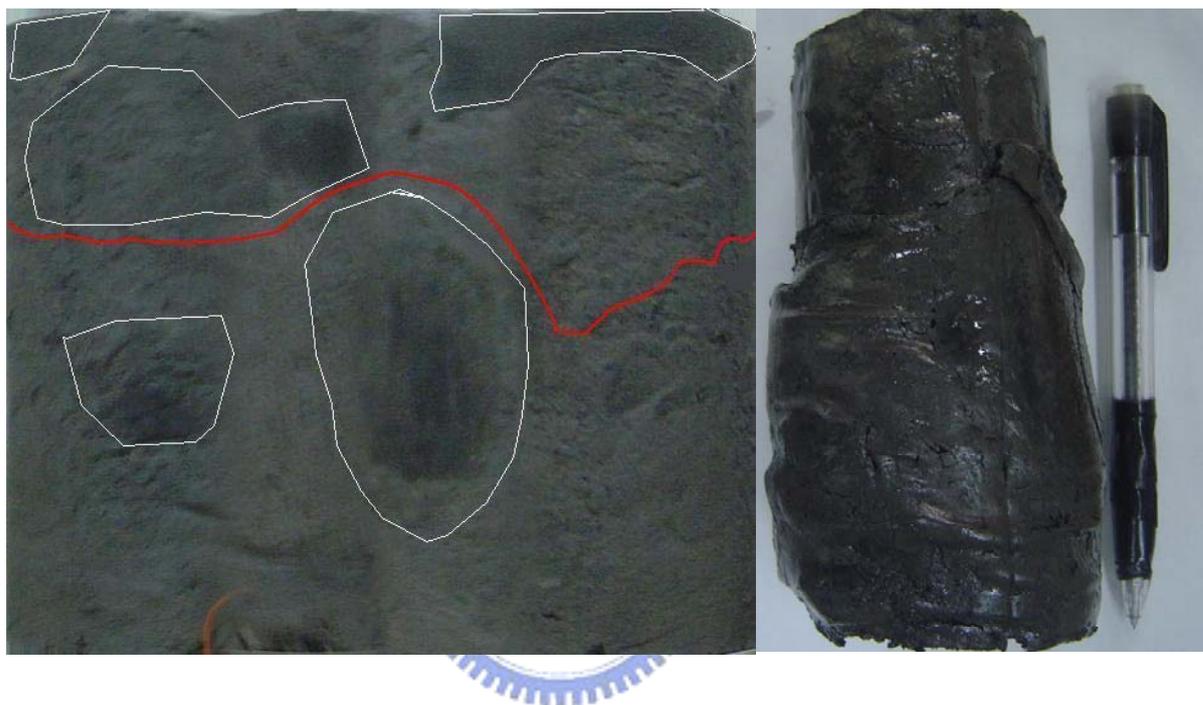


圖 5.19 破壞曲線與岩塊分佈圖(N-2 18.4 ~ 18.6m)

另外，雖然破壞面未通過岩塊，然而較高岩塊含量之試體其岩塊與岩塊間基質受到擠壓導致岩塊邊緣產生破裂的現象，推測高岩塊含量試體強度可能受岩塊間於受剪狀態下接觸摩擦而提高。圖 5.20 為岩塊含量大於 50%之試體，明顯可看出因材料岩塊含量大，受岩塊束制而膨脹效應不明顯，試驗結束後檢視發現岩塊可能有相互磨擦而產生邊緣破碎之行為。



圖 5.20 破壞曲線與岩塊分佈圖(AH-1 37.80 ~ 37.95m)

如上所述，高岩塊含量試體於破壞面兩側的岩塊有相互擠壓且摩擦的痕跡，破壞面較蜿蜒曲折，因而增加試體破壞介面之粗糙度，增強了併構岩摩擦阻抗(圖 5.22)。相對的，岩塊含量少之試體之破壞介面較平滑，破壞面兩側的岩塊岩塊與岩塊間摩擦不明顯，表現強度較弱(圖 5.21)，此與 Medley(2001)所提出之併構岩強度與岩塊含量關係符合，另外也證明了洪如江(1984)與 Montrasio(1998)年所提出當複合性材料岩塊含量高時，岩塊間磨擦而反映了較大的強度。

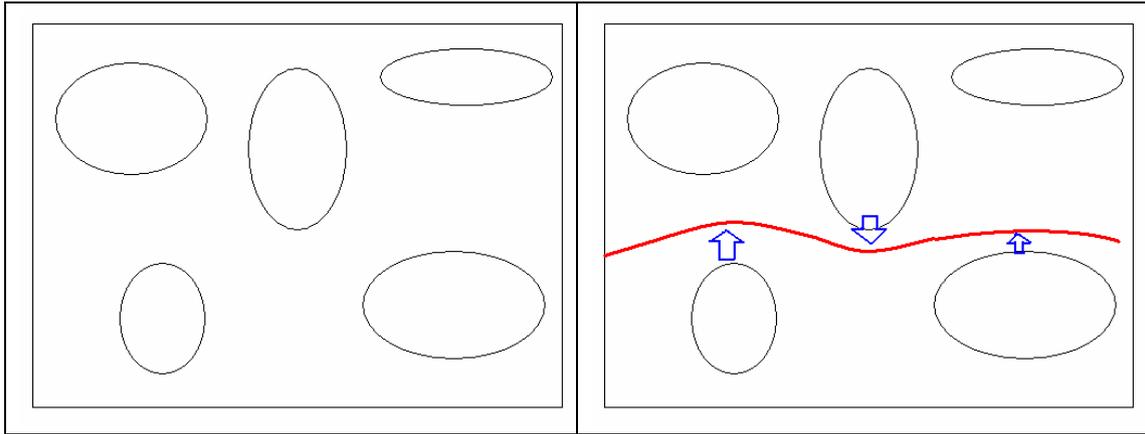


圖 5.21 低含量併構岩材料破壞曲線示意圖

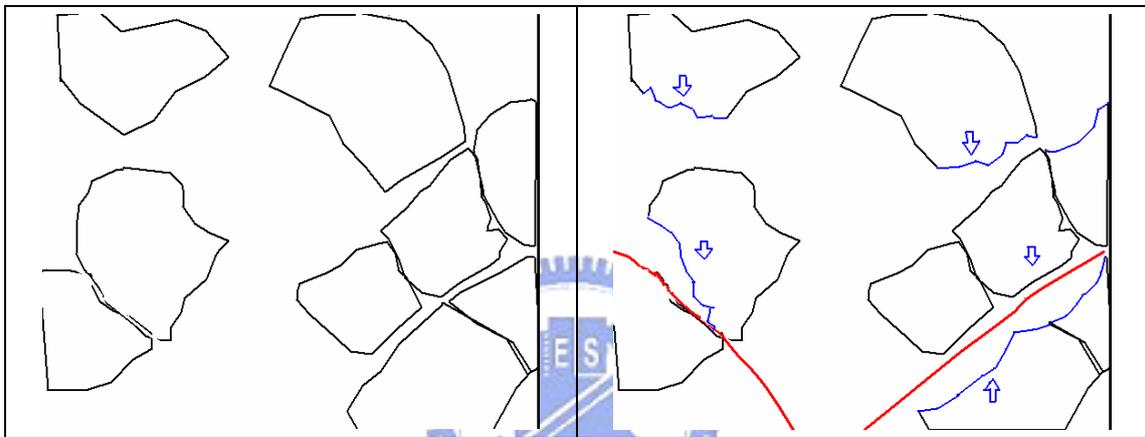


圖 5.22 高含量併構岩材料破壞曲線示意圖

5.3 利用實驗結果與數值模擬決定崩積材料剪力強度

參數之建議

由本文鑽探岩心之物性分析結果得知，本崩積材料具高度不均質性，甚難取得足夠岩性相近的試體進行三軸試驗，亦即甚難由室內試驗決定其強度參數。因此本文建議利用單一試體三軸試驗結果進行數值模擬標定，待模擬結果與實驗結果接近後，固定使用參數，再進

行不同圍壓數值模擬，最後可由模擬所得的應力應變曲線結果計算彈性模數極強度參數等。謝孟修(2007)利用 FLAC 軟體已可模擬 2-D 下類併構岩的三軸排水剪力試驗。以下找我談利用數值模擬與已施作試驗之試體相互比對，並模擬不同圍壓下之應力應變情形，企圖求得類併構岩之材料力學參數。

謝孟修(2007)數值模擬之方法為：

- 1) 在數值模擬前，首先製作數值模擬的試體。方法為將岩心試體表面展開(圖 5.23)，並切割為三各單位。成為三顆長徑比 2 之試體(圖 5.24)。
- 2) 定義板岩與土壤基質的力學參數，如凝聚力與摩擦角。
- 3) 模擬試體在圍壓 2.0 kg/cm^2 、 4 kg/cm^2 、 6 kg/cm^2 、 8 kg/cm^2 下之三軸排水剪力試驗，得到模擬試體材料之應力應變曲線並計算其力學參數。

圖 5.25 為 SG-Ah102 實驗結果與謝孟修數值模擬結果之應力應變曲線。圖中三組數值模擬對象岩塊含量稍有差距，然而應力曲線相似，皆在 3% 應變量以內達到尖峰後產生應變軟化，三者尖峰軸差應力相當接近。其模擬結果與本研究 SG-Ah102 試驗結果比較，在應力應變曲線或是強度卻有相當大的差異，推測可能原因為本研究所做三軸不排水試驗為利用飽和試體。然而謝孟修數值模擬為模擬一 2-D 乾

燥試體，因此兩者可能應力應變行為會有不同之表現。未來數值模擬在考慮 3-D 之邊界條件與孔隙水壓變化後，應更較能模擬室內試驗之結果。對此，本文對未來室內試驗與數值模擬決定力學參數之流程(圖 5.26) 作如下建議：

- 1) 對單顆併構岩試體進行三軸試驗，得到強度、應力應變曲線。
- 2) 數值模擬調整參數與邊界條件，模擬出與室內試驗接近之應力應變行為與強度。
- 3) 數值模擬進行該試體不同圍壓之三軸試驗模擬，回歸後得到併構岩強度參數 C' 、 Φ' 。
- 4) 利用篩分析或岩心判釋，決定梨山崩坍地各地層屬於何種含量之併構岩，因此可得到梨山崩坍地層之強度參數。並可提供邊坡穩定分析作為參考依據。



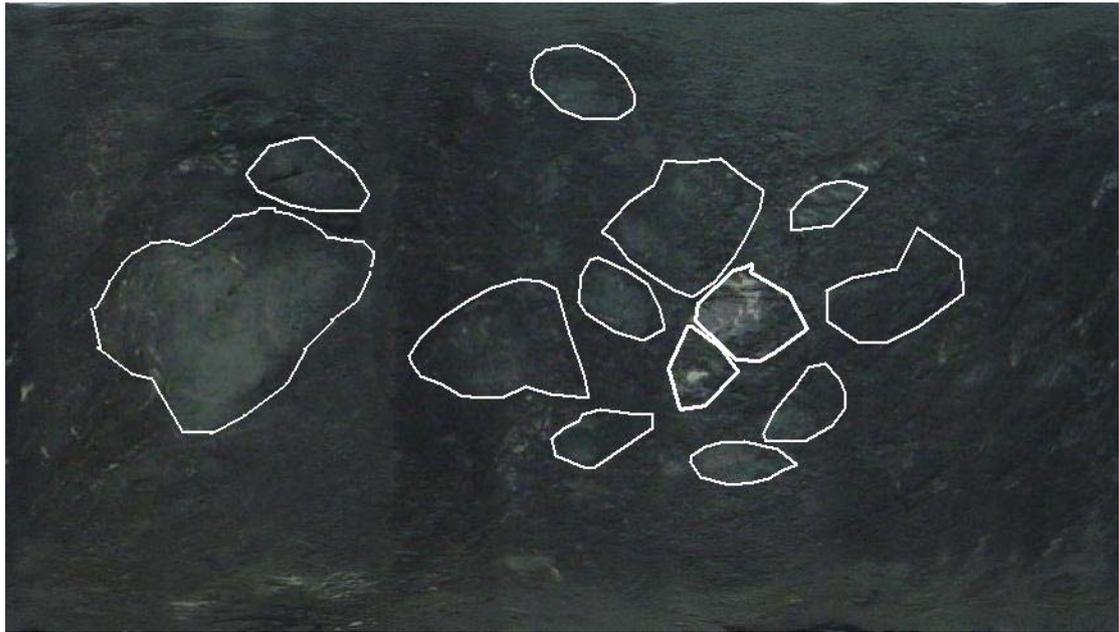


圖 5.23 SG-Ah102<含量 18.96%>表面岩塊分佈圖

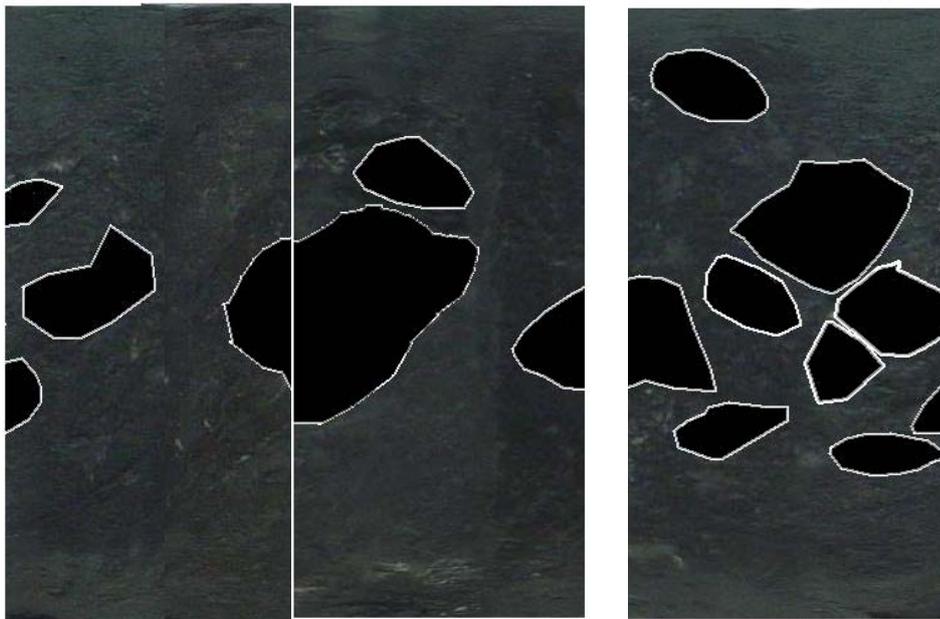


圖 5.24 謝孟修(2007)對 SG-Ah102 分割表面模擬圖

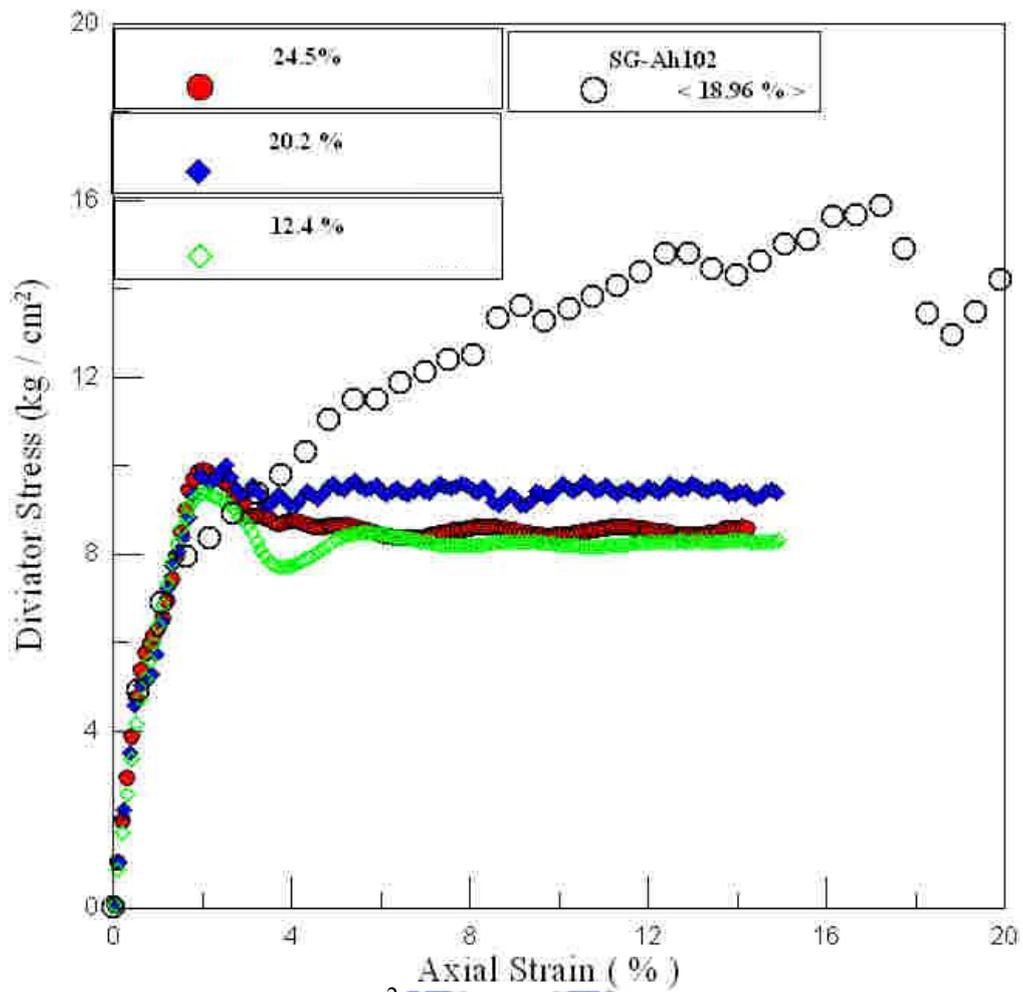


圖 5.25 圍壓 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 試驗與數值模擬應力應變曲線比較

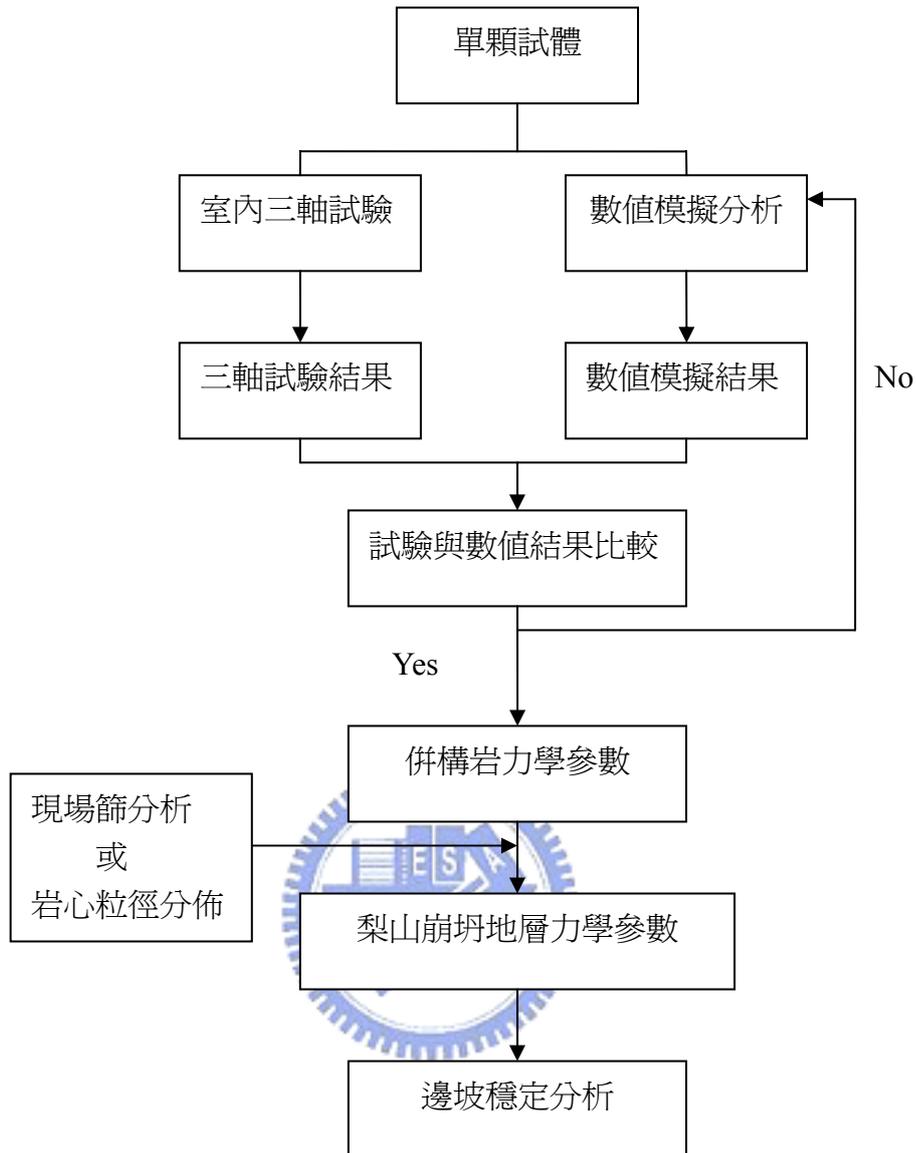


圖 5.26 室內試驗與數值模擬定義力學參數流程建議

第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究主要目的為探討梨山崩積地層內灰色板岩夾黏土層之力學行為及其與岩塊含量等之關係。由室內三軸不排水剪力試驗結果，本研究的主要結論如下：

- 1) 梨山板岩塊多為扁平狀，岩塊長短軸比約 1.3 ~ 1.4。
- 2) 由一般物理性質試驗結果顯示，類併構岩材料的基質與岩塊基本物理性質類似。而由三軸試驗結果發現，岩塊含量相同之試體，即使存在於不同之取樣位置，其表現之尖峰軸差強度也相當接近。因此未來經由鑽探所取得的梨山類併構岩材料，經由粒徑分布分析岩塊含量即可粗略的判斷其剪力強度。
- 3) 在相同圍壓下，灰色板岩夾黏土之尖峰軸差強度隨著岩塊含量增加而呈現增加之趨勢。經實驗結果發現，即使在岩塊含量低於 25% 以下，材料強度依舊有隨岩塊增加而成長的趨勢。
- 4) 併構岩材料的彈性模數隨岩塊含量增加而上升，並具隨應變量增大而遞減的趨勢。且岩塊含量較少的併構岩試體，在大應變量下模數遞減情形也較大。
- 5) 研究中施做試驗之試體，破壞曲線為沿著岩塊間發展，未有直接

剪斷岩塊者。而當岩塊含量較大時，破壞曲線亦為沿著岩塊間發展，然而於試驗後檢視試體發現，岩塊間邊緣有破碎磨損之現象，推測為岩塊含量較大時，岩塊與岩塊產生接觸而有摩擦之情形發生。

6) 觀察高含量試體破壞介面內部，岩塊表面有受摩擦的痕跡，且破壞面較蜿蜒曲折，增加試體破壞介面之粗糙度，增強了併構岩摩擦阻抗。符合 Medley 敘述”岩塊的分佈與含量深深的影響著併構岩的力學行為。較高含量的岩塊導致了破壞的路徑較蜿蜒，破裂沿著岩塊發展，較長的破裂路徑直接造成材料的摩擦阻抗增加。” 相對的，含量少之岩塊之破壞介面較平滑，岩塊摩擦痕跡不明顯，因此相對表現強度較弱。

7) 室內三軸試驗結果搭配數值模擬，應可決定類併構岩材料之力學參數。

6.2 建議

1) 本研究試圖利用壓電陶瓷墊片之剪力波元件於三軸試驗中量測波速，然而效果並不彰，可能因試體內顆粒差異大，造成波型無法判讀。另外因試體中含有較堅硬之岩塊，導致剪力波元件在試驗中受剪時受到岩塊壓迫造成變形或斷裂。因此建議未來改用非插入式剪力波系統進行波速量測。

2) 併構岩中之風化板岩與其風化產生的土壤顏色十分相近，且岩心

在鑽探出來後，往往於表面覆蓋著超泥漿穩定液，因此在拍照前往往需利用海綿或棉花棒等清洗表面。如此，試體含水量會因此改變，面岩塊分佈判釋之效果依然可能低估其真實含量。因此未來冀望能用改良後之掃瞄儀器進行試體表面掃瞄。

3) 較淺層之灰色板岩夾灰色黏土地層，由於岩塊排列較不整齊，因此無法推測其現地岩塊大小，建議利用明坑開挖判釋。

4) 研究所用之 HQ 尺寸之岩心，於製作試體後直徑約 60 ~ 63 mm。

然而試體內板岩塊往往超過試體直徑的 1/10，因此在室內試驗之結果可能受尺寸效應之結果影響。但鑽取克服尺寸效應之岩心並不易，因此建議利用數值模擬結合本研究室內試驗結果以決定梨山崩塌地類併構岩材料之力學參數。



參考文獻

1. 董家鈞，楊賢德，2001，「崩積層之分類與工程特性研究」，水土保持研究，第八卷第1期
2. 黃玉麟，2006，「崩積地層的組成及形成機制-以梨山地區為例」，國立交通大學，碩士論文
3. 工業技術研究院能源與資源研究所，1993，「梨山地區地層滑動調查與整治方案規劃 - 總報告」
4. 劉盛華，2007，「梨山崩積層內軟弱土層的力學行為」，國立交通大學，碩士論文
5. 方世傑，1990，「中橫公路崩積土坡地力學特性之初步研究」，國立中興大學，碩士論文，第43~56頁
6. 黃信璋，1991，「中橫公路沉泥質粘土層動態特性之初步研究之初步研究」，國立中興大學，碩士論文
7. 楊東賢，1990，「風化作用對中橫公路板岩強度影響之研究」，國立中興大學，碩士論文
8. 柳政男，1998，「軟岩多功能儀器研發與軟砂岩基本性質之探討」，國立交通大學，碩士論文
9. 黃慧儀，1999，「軟弱砂岩之三軸試驗」，國立交通大學，碩士論

文

10. 林景民，2001，「軟弱岩石之應力應變與屈服行為」，國立交通大學，碩士論文
11. 洪任賢，2002，「軟弱岩石之應力應變行為」，國立交通大學，碩士論文
12. 葉季霖，2003，「軟弱岩石之勁度」，國立交通大學，碩士論文
13. 林智惠，2003，「膠結不良砂岩在不同應力路徑下之力學行為」
國立交通大學，碩士論文
14. 劉武志，1995，「取岩心鑽鑿技術」，地工技術雜誌，第 49 期，
27-38 頁
15. 謝敬義，1990，「技術講座專欄 6.地質鑽探」，地工技術雜誌，第
31 期，106-123 頁
16. 謝孟修，2007，「崩積層之類併構岩材料行為與模式 - 以梨山地
滑區為例」，國立交通大學，碩士論文
17. 唐禎國，2007，「崩積層之的地形特徵與崩積層的行成- 以梨山
崩坍地為例」，國立交通大學，碩士論文
18. Boozer, G.D., Hiller, K.H., and Serdengecti, S., 1962, "Effect of Pore
Fluids on the Deformation Behaviour of Rocks Subjected to Triaxial
Compression." Proc. 5th Symp. Rock Mech., pp. 110-174
19. Holtz, W.G., 1961, "Triaxial Shear Characteristics of Clayey Gravel

- Soils”, Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol.1,pp.143-149
20. Marachi, N.D., 1972, Chan, N.C. and Seed, H.B., “Evaluation of Properties of Rockfill Materials”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, pp. 95-113.
21. Medley, E.W., 2001, ”Orderly Characterization of Chaotic Franciscan Melanges”, Eng. Geol., Felbau 19, pp.20-33
22. Montrassio, L., 1998, “Characterization of Complex Soil”, The Geotechnics of Hard Soils – Soft Rocks, pp. 702-714
23. Robinson, L.H., 1959, “The Effect of Pore and Confining Pressure on the Failure Process in Sedimentary Rock”, Proc. 3rd Symp. Rock Mech., Golden, Colo., pp. 177-199
24. Vallejo, L.E. and Mawby, R., 2000, “Porosity Influence on the Shear Strength of Granular Material-Clay Mixtures”, Eng. Geol., Vol.58, pp.125-136
25. Vutukuri, V.S., Lama, R.D. and Saluja, S.S., 1974, “Handbook on Mechanical Properties of Rocks”, Vol.1, pp.176-216

附錄 A
三軸試驗結果



試驗編號：SGN-101	岩層性質：灰色板岩夾灰色黏土	岩塊含量:65.3%
鑽孔編號：N-1	試驗深度：18.23~18.38 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

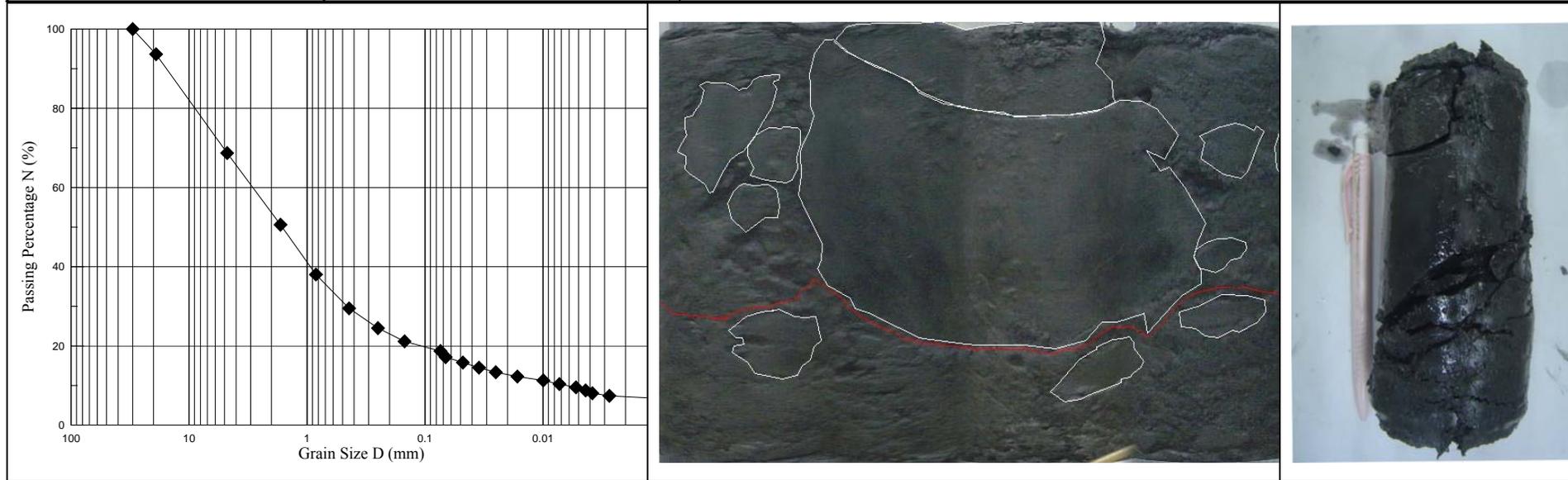


Figure No.	圖 A.1 SG-N101 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-N101		岩層性質：灰色板岩夾灰色黏土	岩塊含量:65.3%
鑽孔編號：N-1	試驗深度：18.23~18.38 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驥	

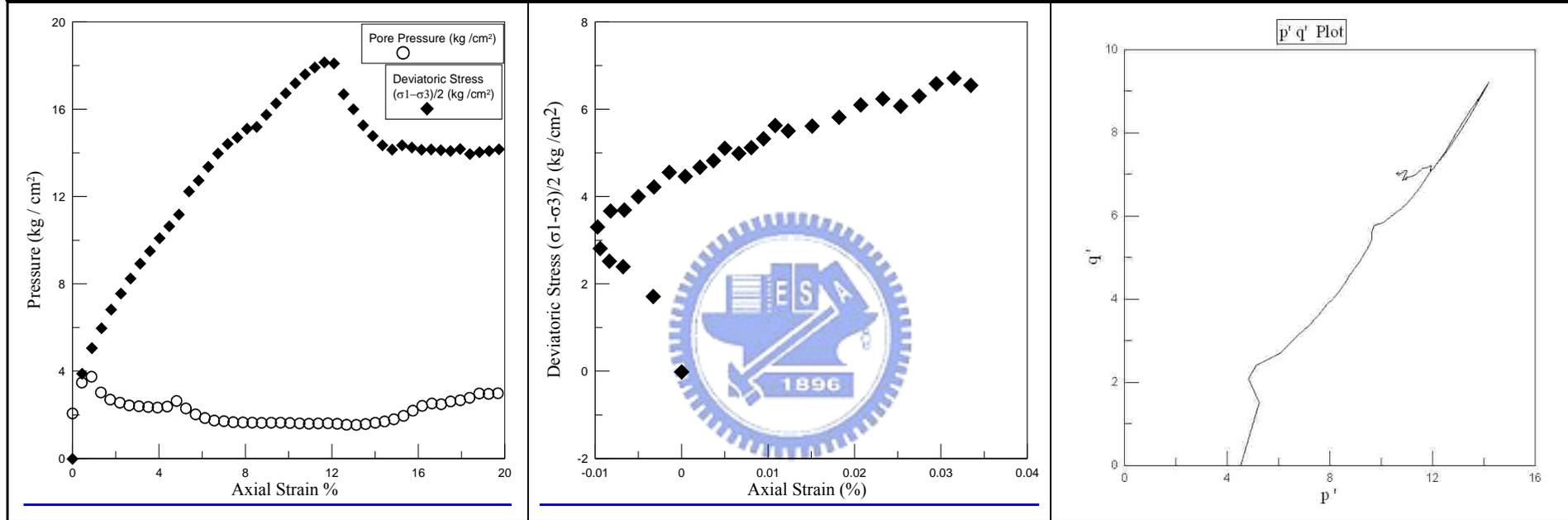
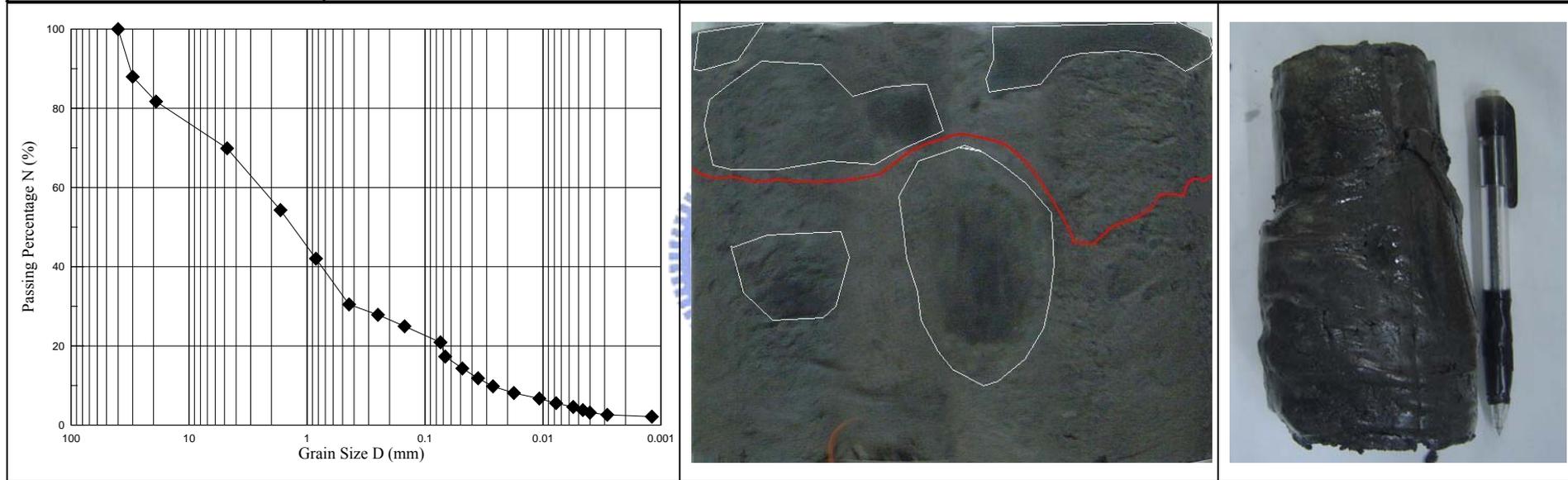


Figure No.	圖 A.2 SG-N101 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-N201	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量:30.9%
鑽孔編號：N-2	試驗深度：18.4~ 18.6 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤



試驗編號：SGN-201		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量:30.9%
鑽孔編號：N-2	試驗深度：18.4~ 18.6 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

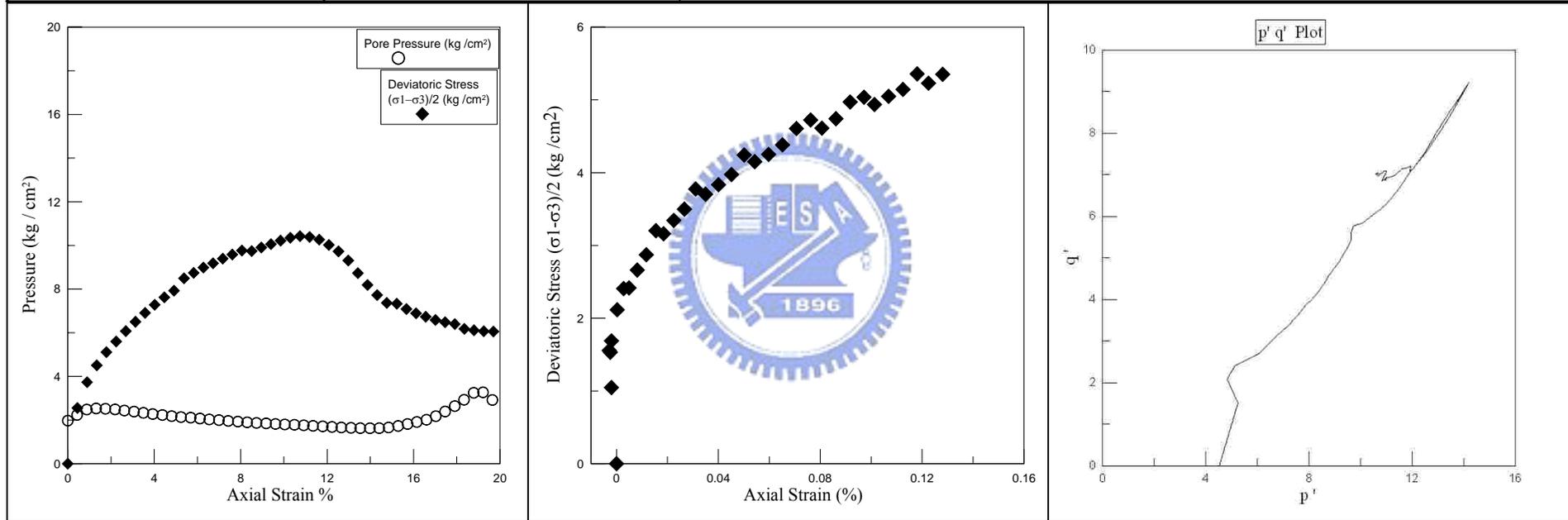


Figure No.	圖 A.4 SG-N201 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-N202		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量:30.4%
鑽孔編號：N-2	試驗深度：44.8~ 45 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

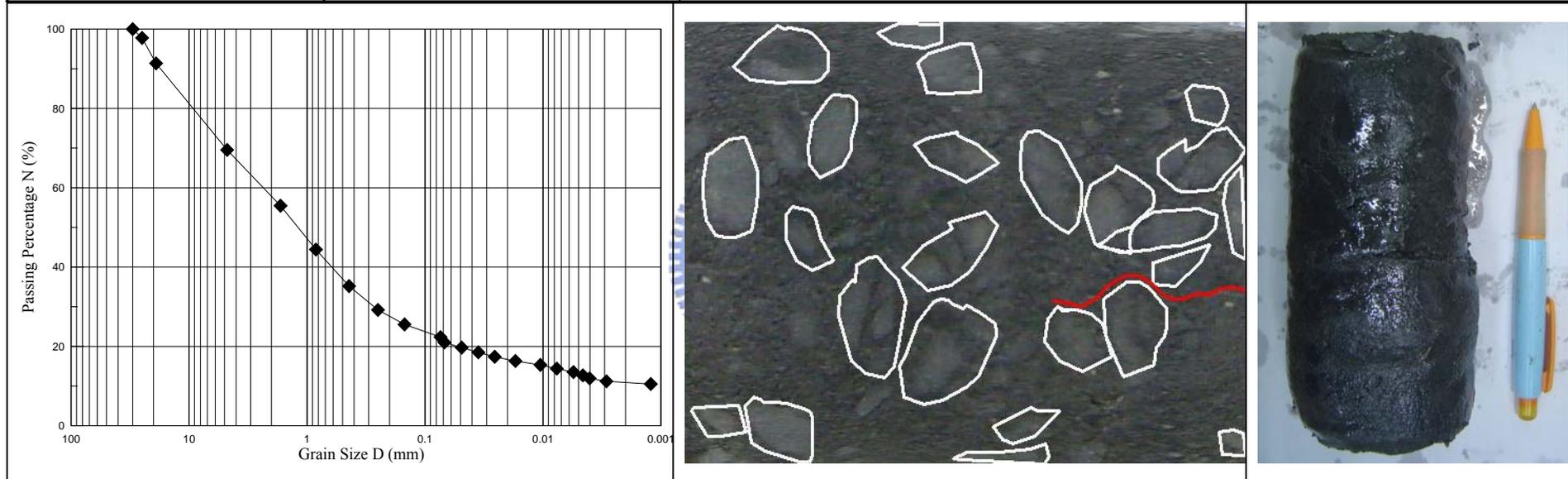


Figure No.	圖 A.5 SG-N202 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-N202		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量:30.4%
鑽孔編號：N-2	試驗深度：44.8~ 45 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

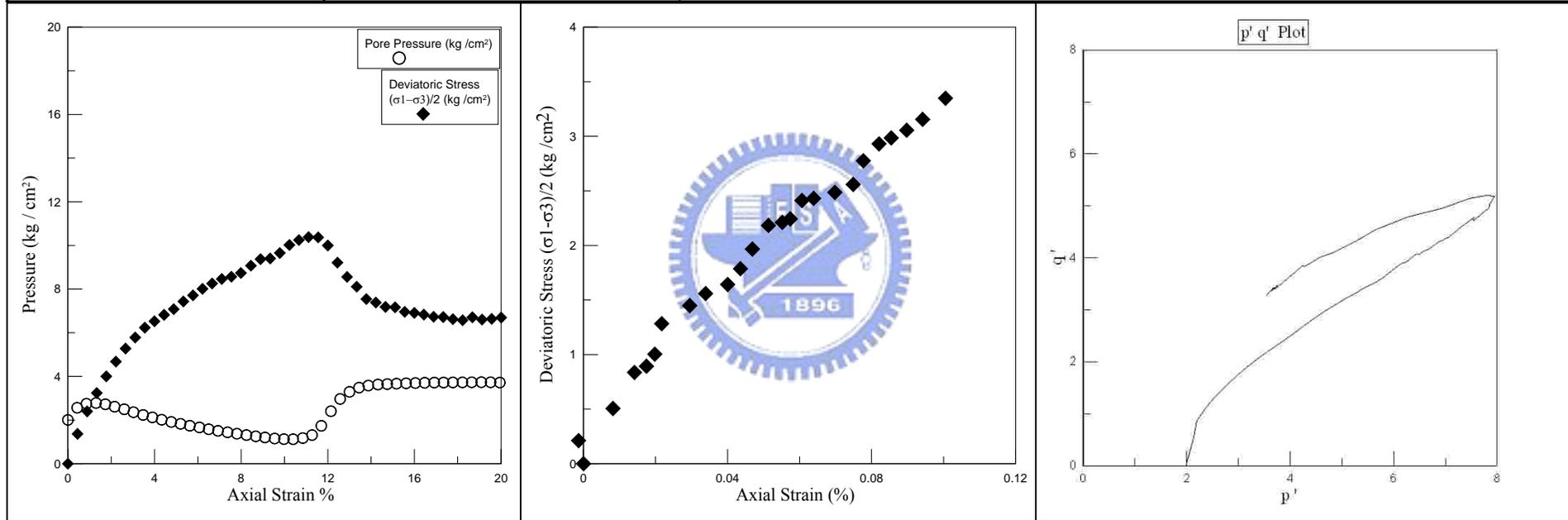


Figure No.	圖 A.6 SG-N202 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-N203	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量:39.38%
鑽孔編號：N-2	試驗深度：53.4 ~ 53.6 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

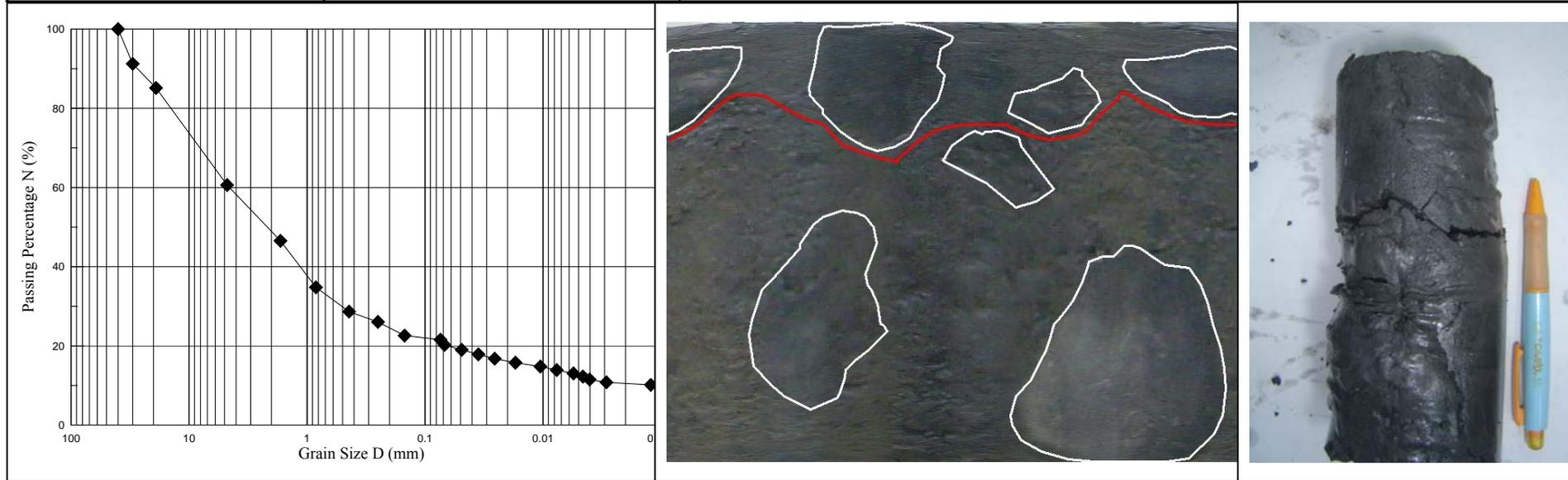


Figure No.	圖 A.7 G-N203 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-N203		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量:39.38%
鑽孔編號：N-2	試驗深度：53.4~53.6 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

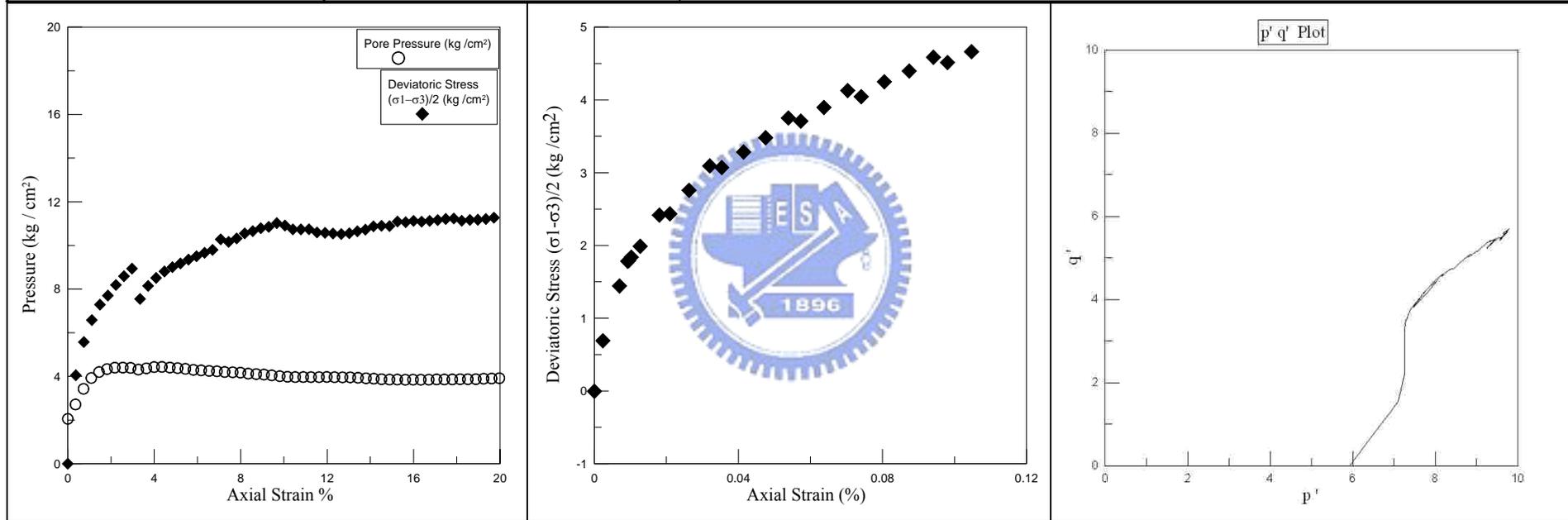
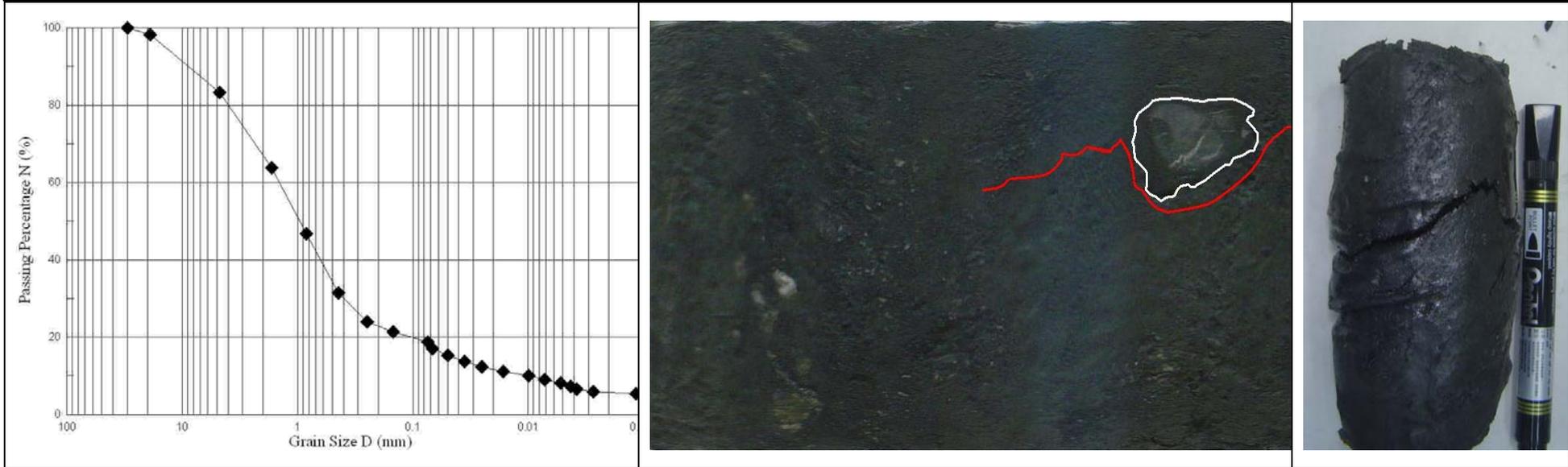


Figure No.	圖 A.8 SG-N203 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah101	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 16.81%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：37.03~37.18 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驥



試驗編號：SG-Ah101		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 16.81%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：37.03~37.18 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

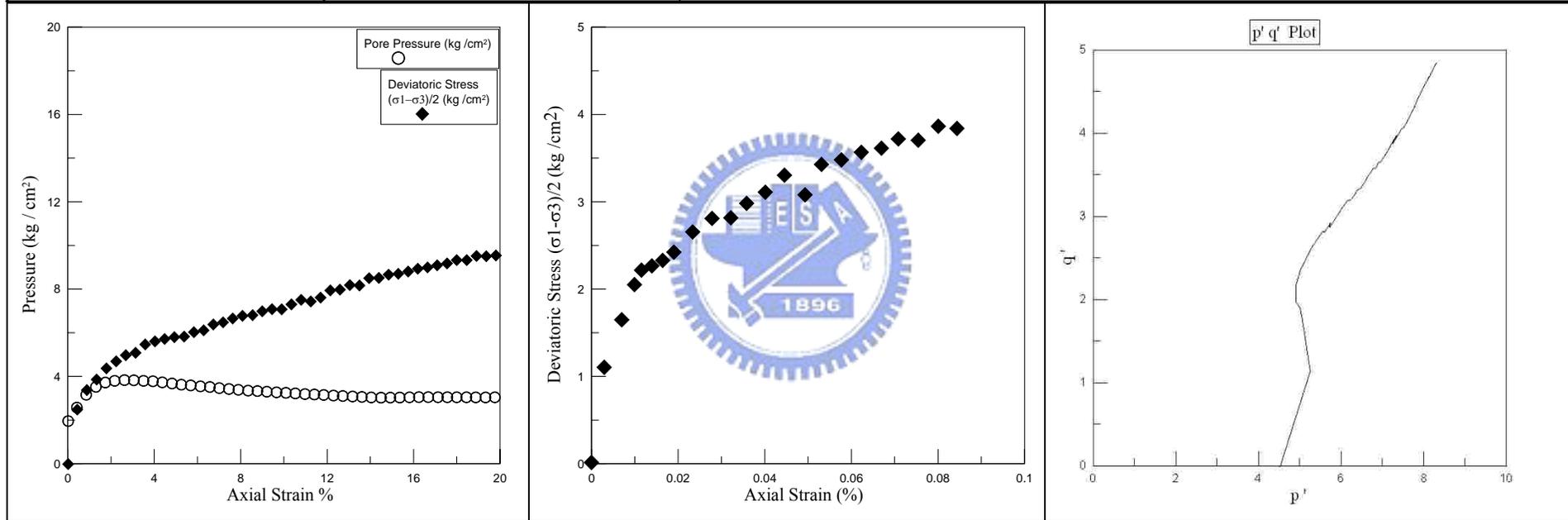


Figure No.	圖 A.10 SG-Ah101 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah102		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 18.96%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：37.55 ~ 37.75 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驥	

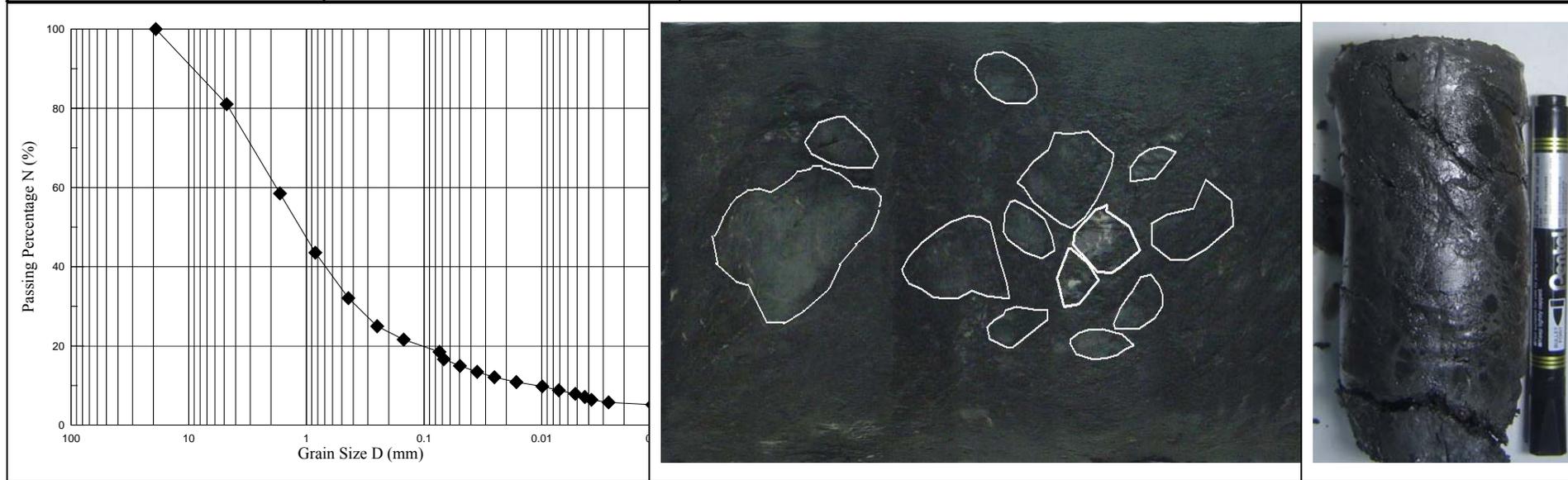


Figure No.	圖 A.11 SG-Ah102 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah102		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 18.96%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：37.55 ~ 37.75 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

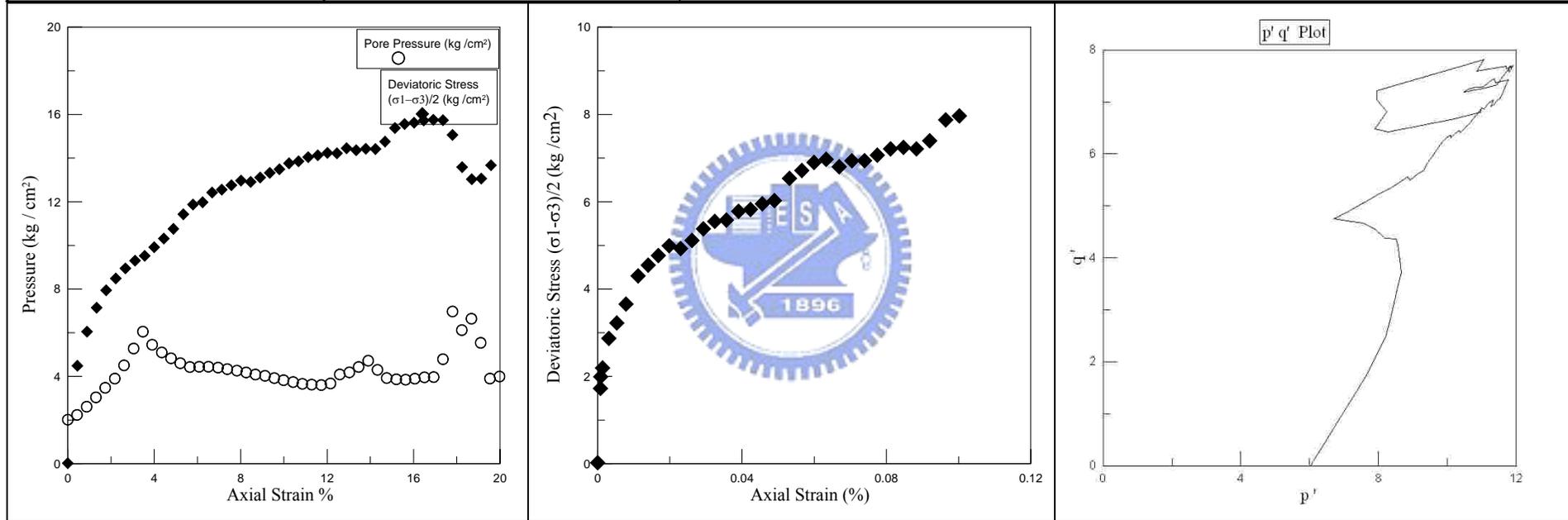


Figure No.	圖 A.12 SG-Ah102 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah103		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 61.70%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：37.80 ~ 37.95 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

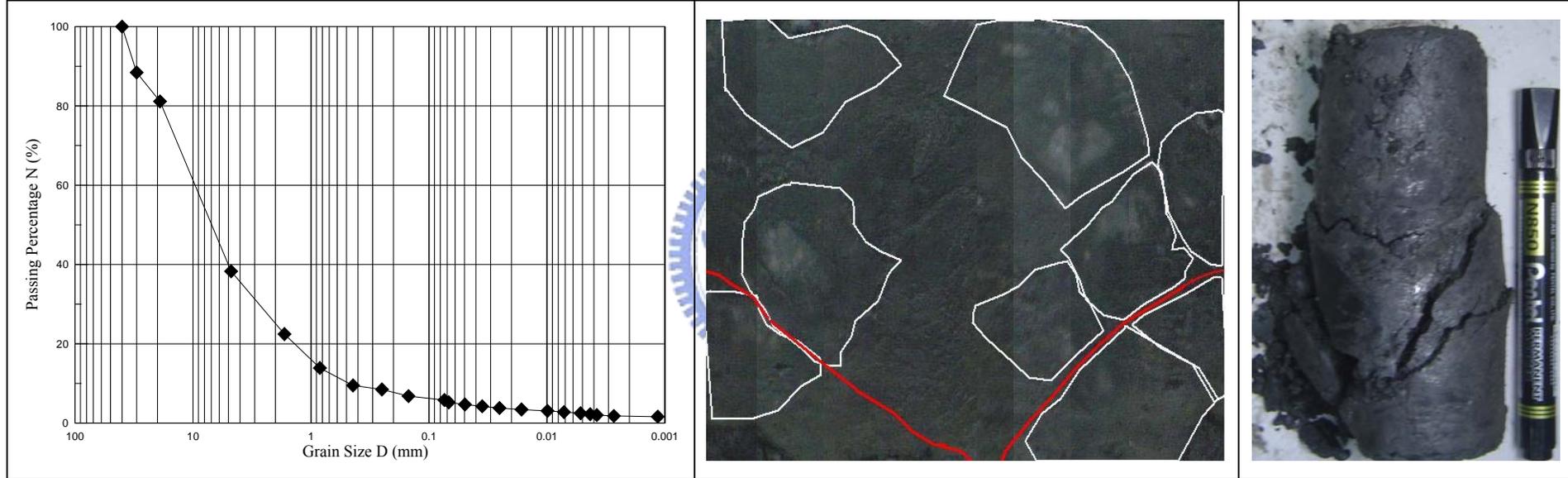


Figure No.	圖 A.13 SG-Ah103 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah103		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 61.70%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：37.80 ~ 37.95 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

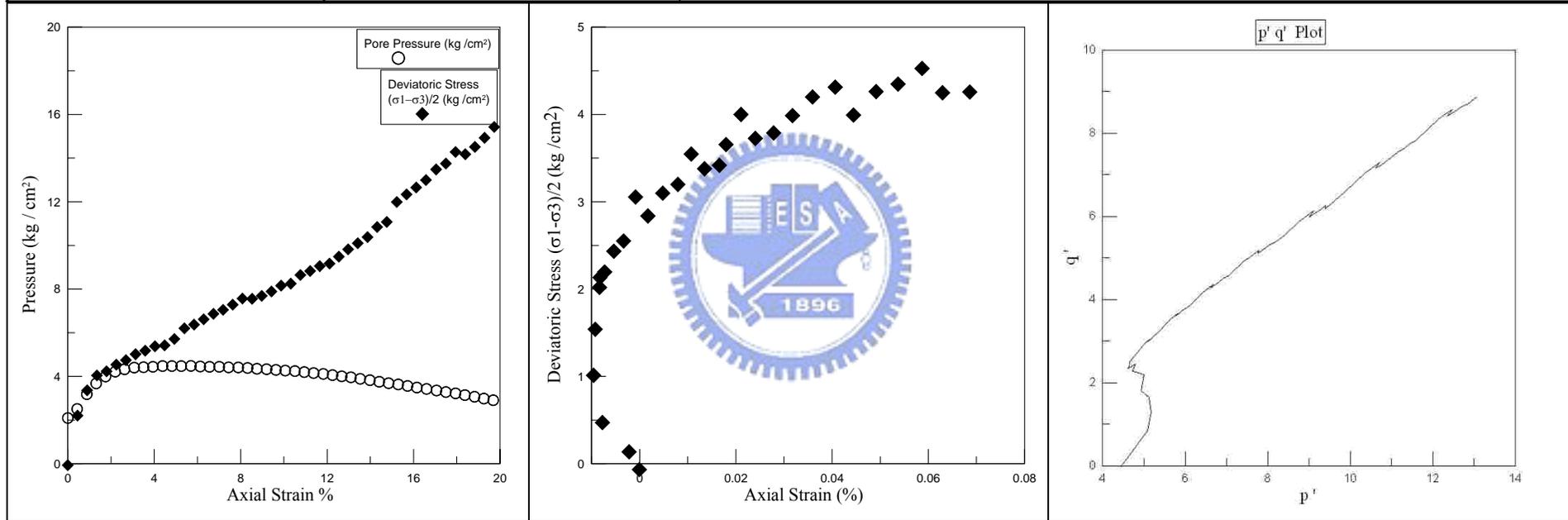


Figure No.	圖 A.14 SG-Ah103 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah104	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 33.91%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：38.70~38.85 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

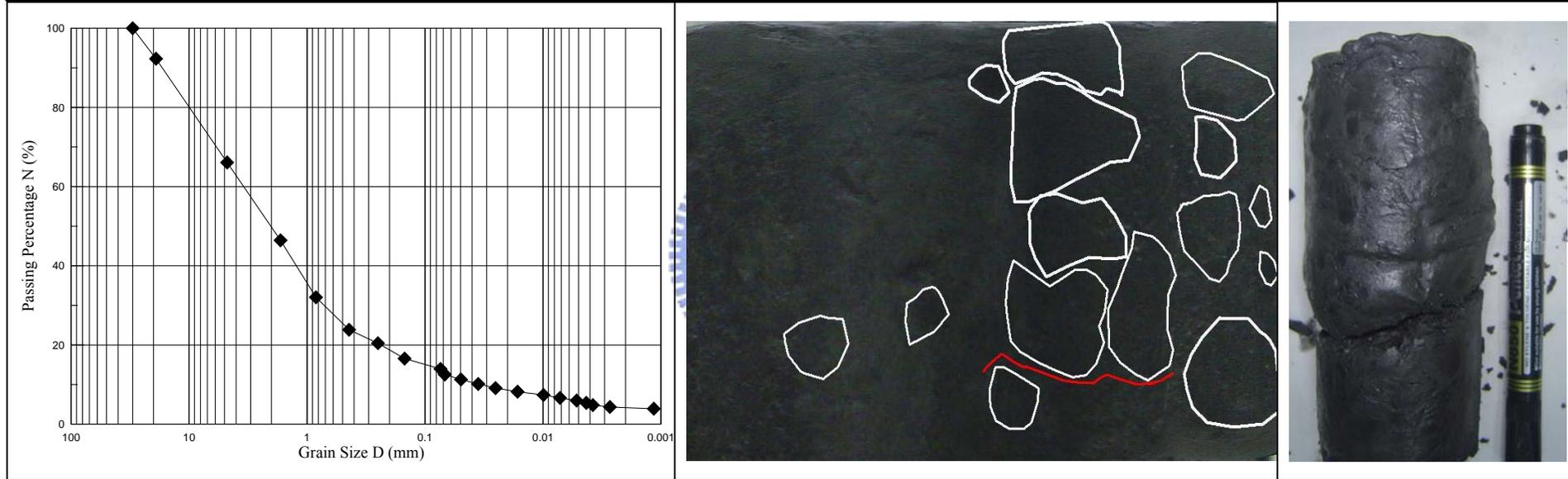


Figure No.	圖 A.15 SG-Ah104 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah104	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 33.91%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：38.70~38.85 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

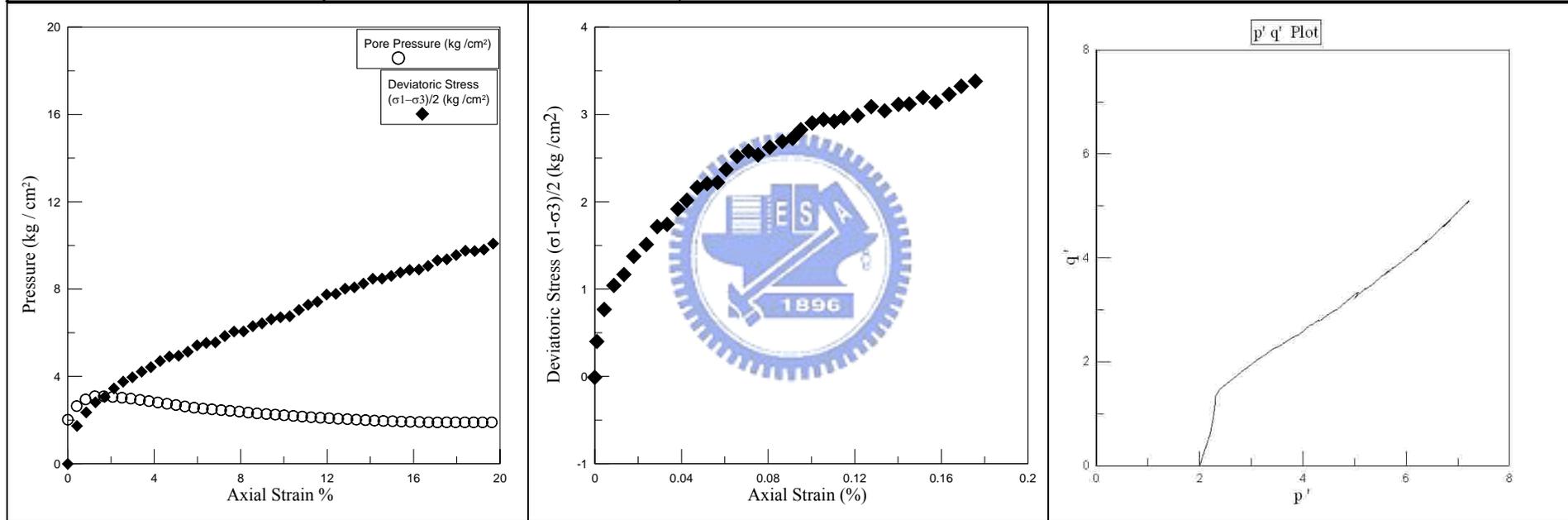


Figure No.	圖 A.16 SG-Ah104 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah105	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 31.29%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：38.85 ~ 39.00 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

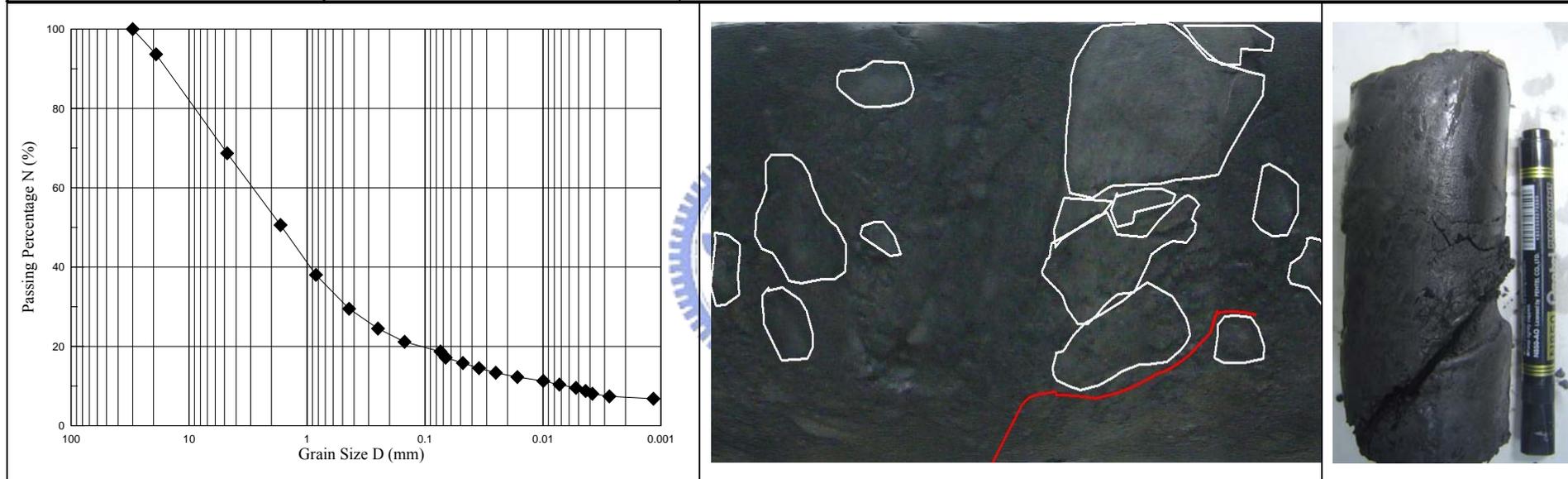


Figure No.	圖 A.17 SG-Ah105 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah105	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 31.29%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：38.85 ~ 39.00 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

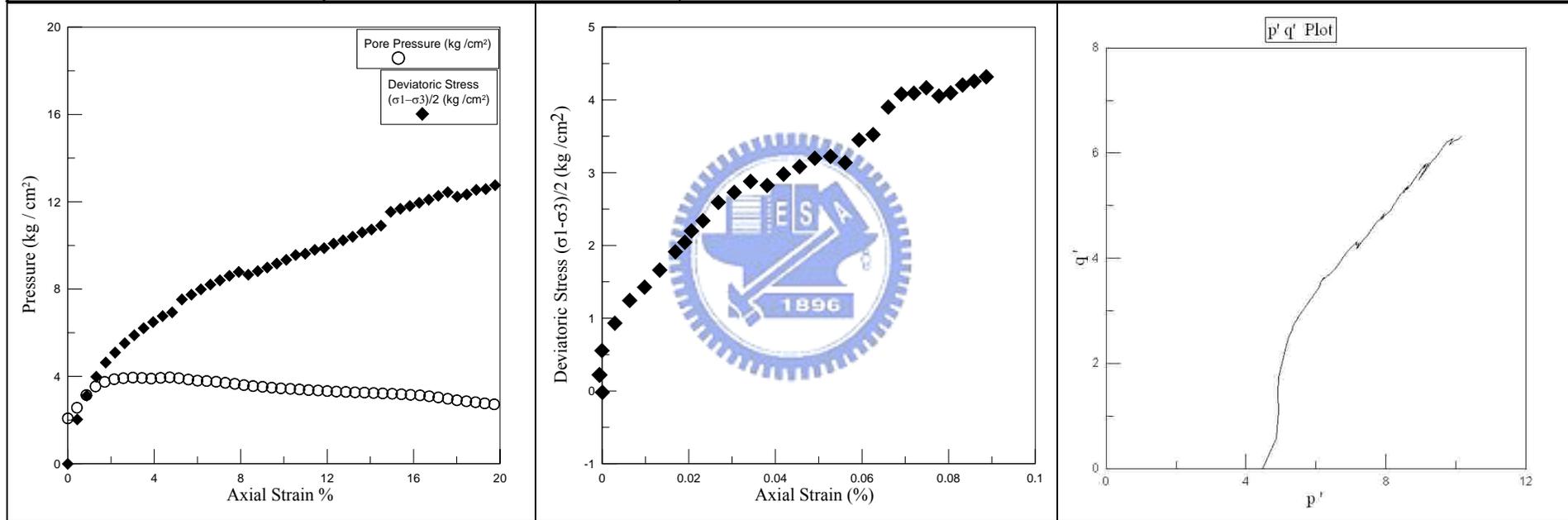


Figure No.	圖 A.18 SG-Ah105 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah106	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 20.00%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：39.55 ~ 39.70 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

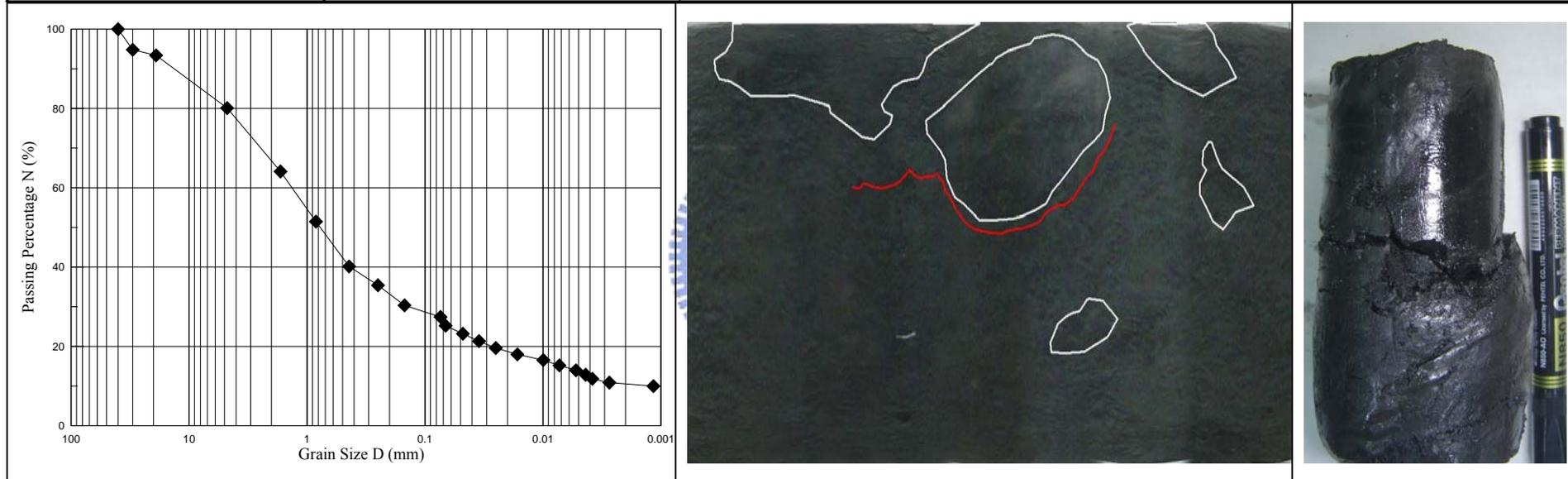


Figure No.	圖 A.19 SG-Ah106 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah106	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 20.00%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：39.55 ~ 39.70 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

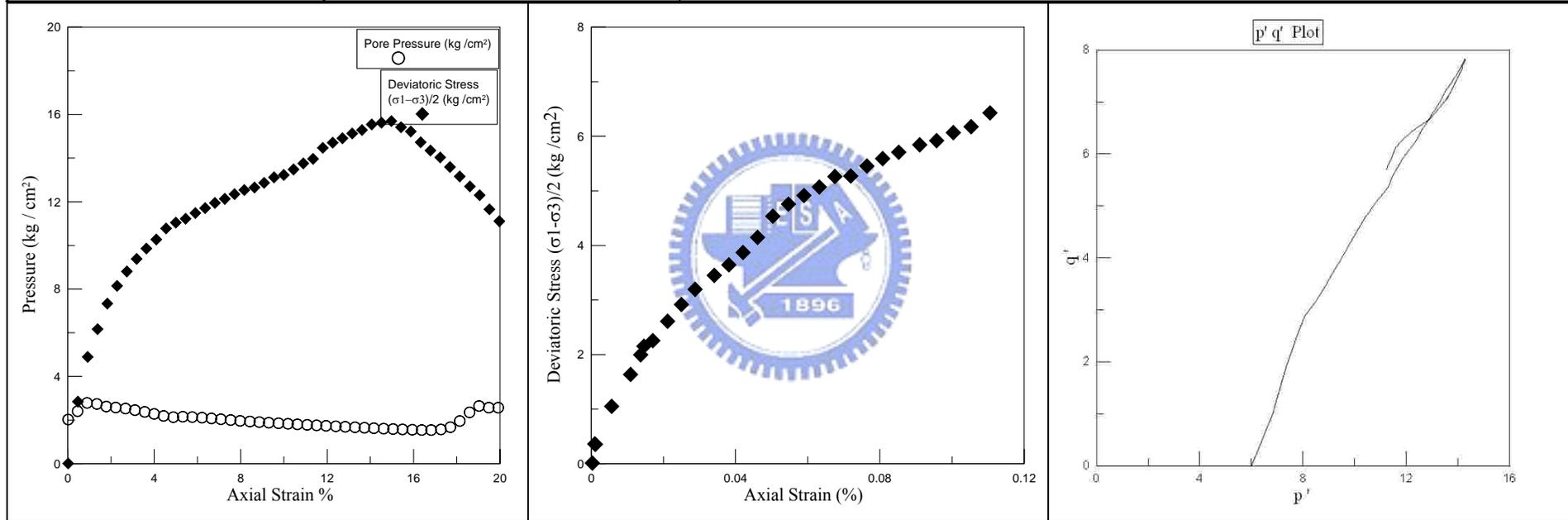


Figure No.	圖 A.20 SG-Ah106 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah107	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 28.06%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：12.00 ~ 12.15 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驥

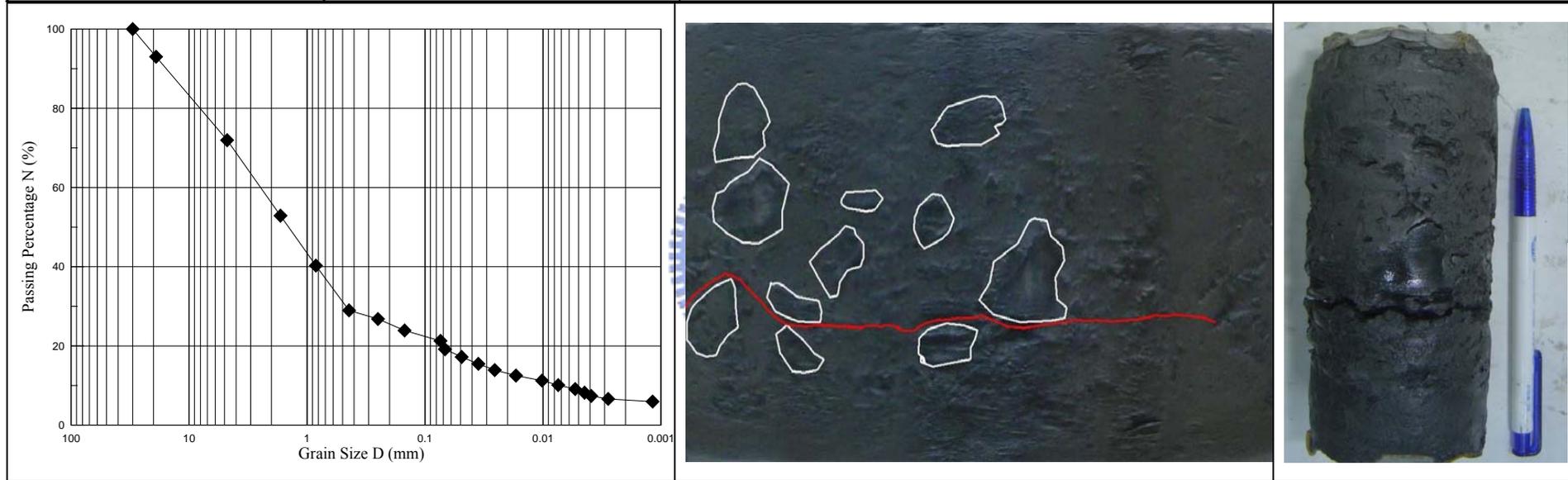


Figure No.	圖 A.21 SG-Ah107 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah107		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 28.06%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：12.00 ~ 12.15 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

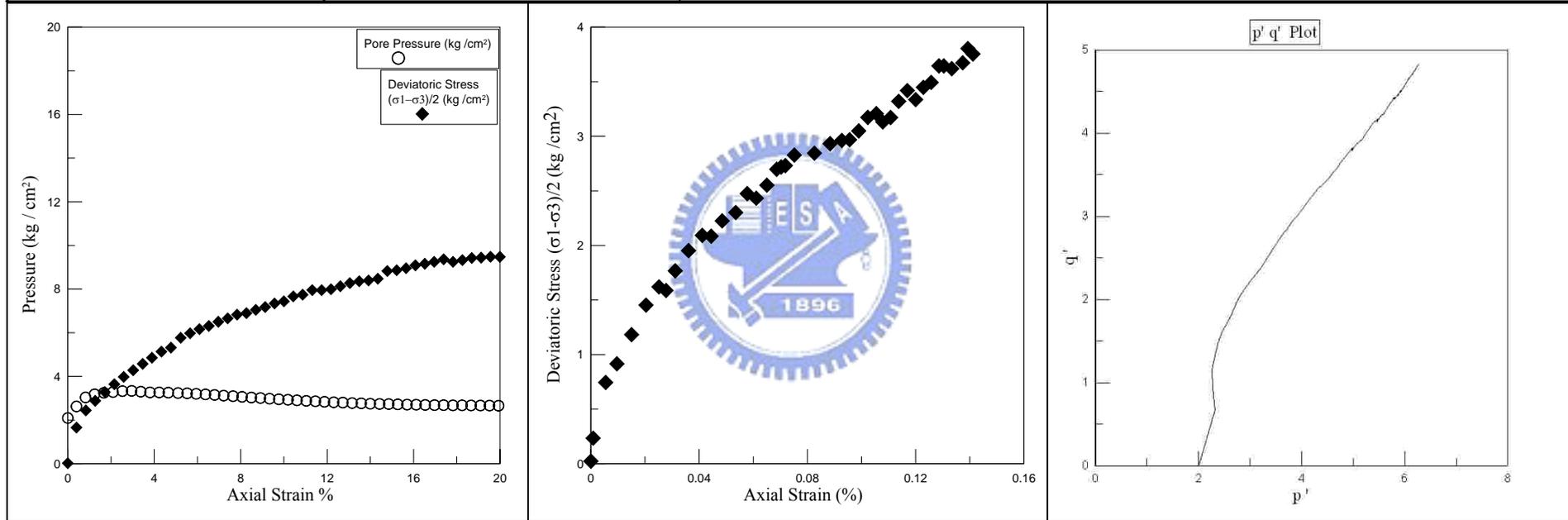


Figure No.	圖 A.22 SG-Ah107 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah108	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 4.80%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：16.80~16.95 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

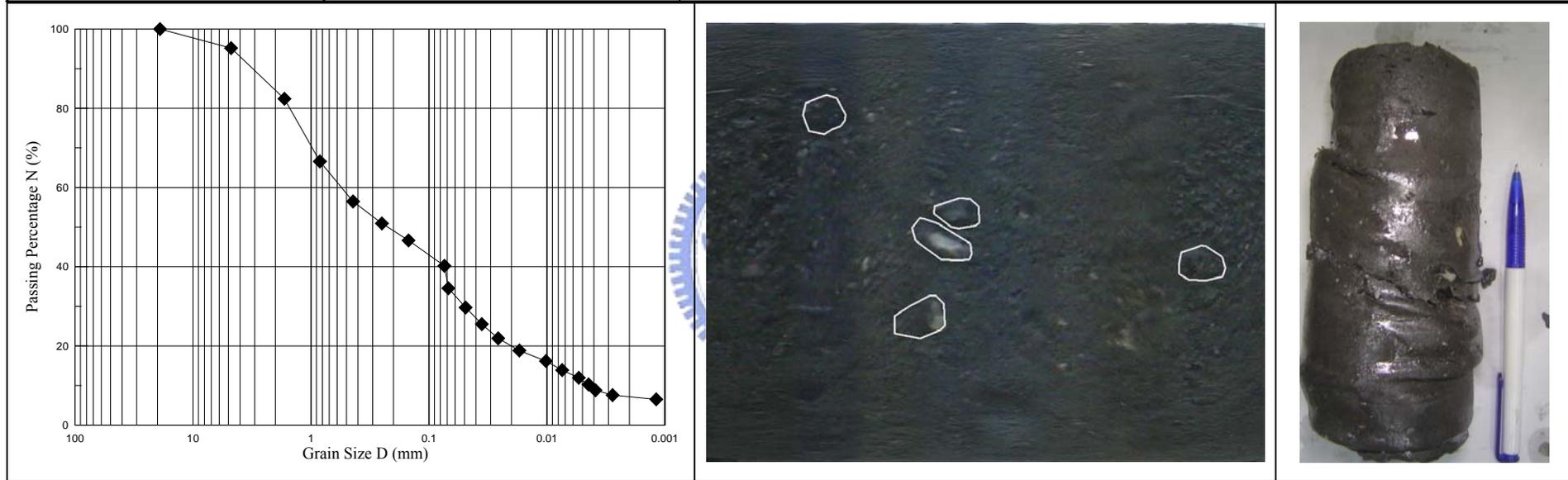


Figure No.	圖 A.23 SG-Ah108 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah108	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 4.80%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：16.80~16.95 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

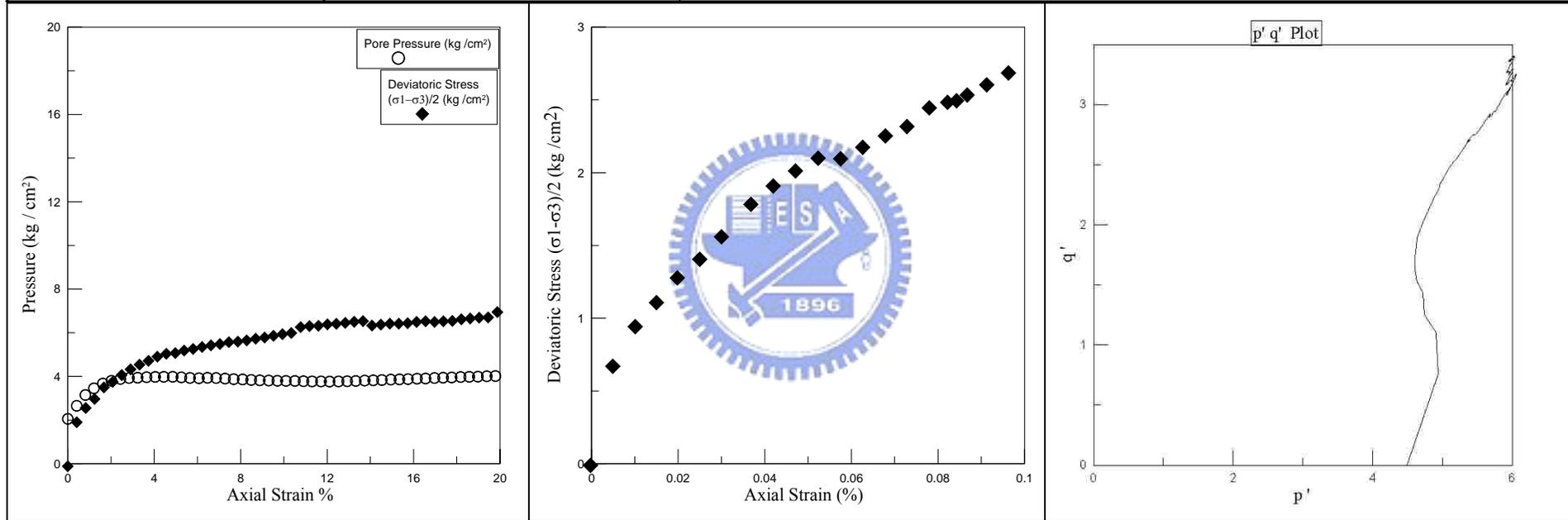


Figure No.	圖 A.24 SG-Ah108 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah109	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 3.47%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：19.85 ~ 20.0 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

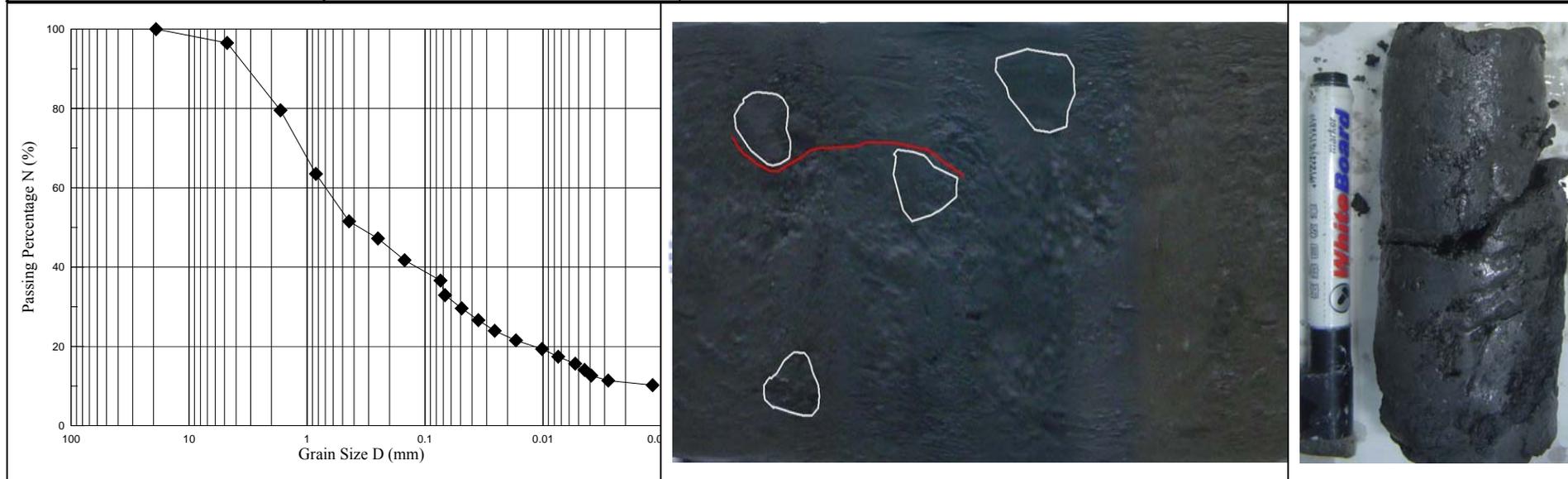


Figure No.	圖 A.25 SG-Ah109 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah109		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 3.47%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：19.85 ~ 20.0 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

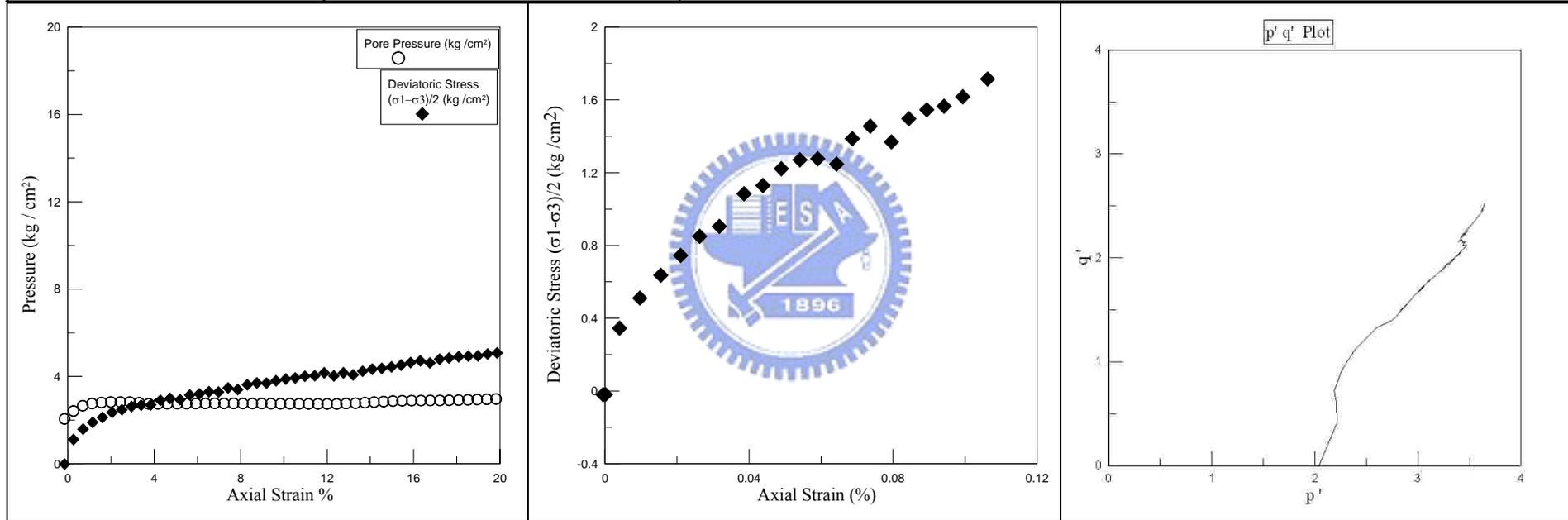


Figure No.	圖 A.26 SG-Ah109 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah110	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 6.39%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：17.05~17.20 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驥

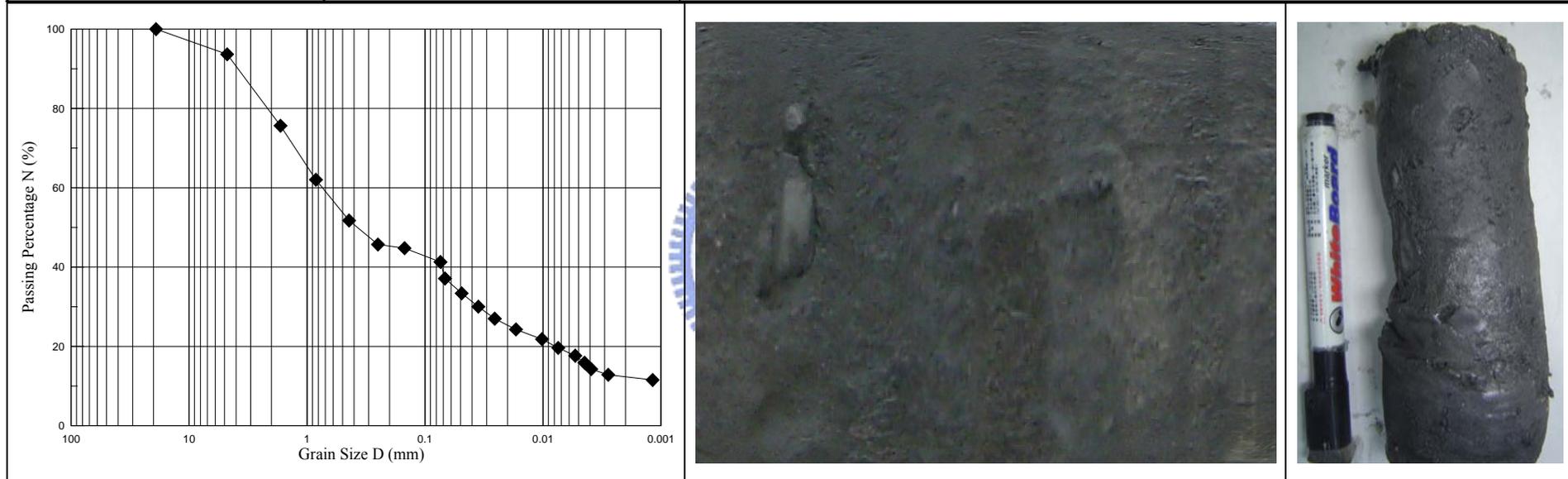
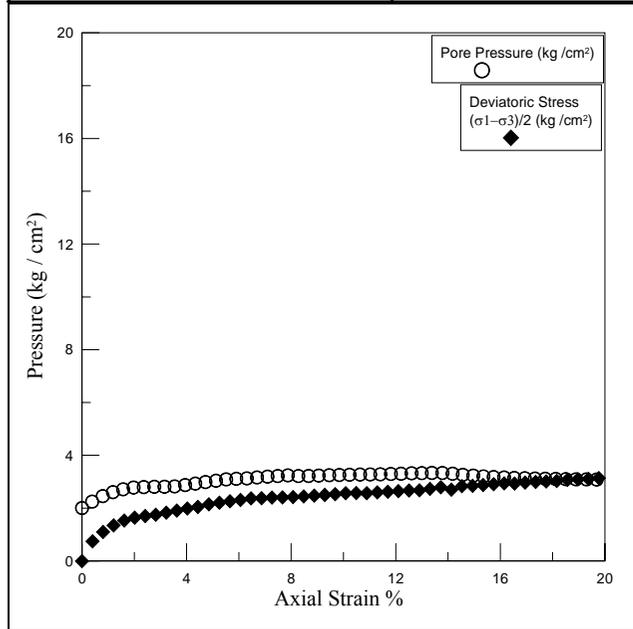


Figure No.	圖 A.27 SG-Ah110 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah110	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 6.39%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：17.05~17.20 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤



破壞面非中間，因此無法量測

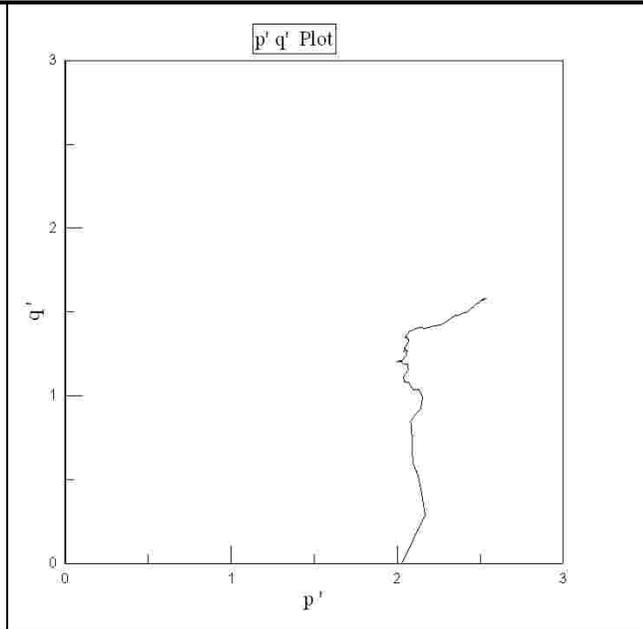


Figure No.	圖 A.27 SG-Ah110 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah111	岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 20.21%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：17.25~17.40 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤

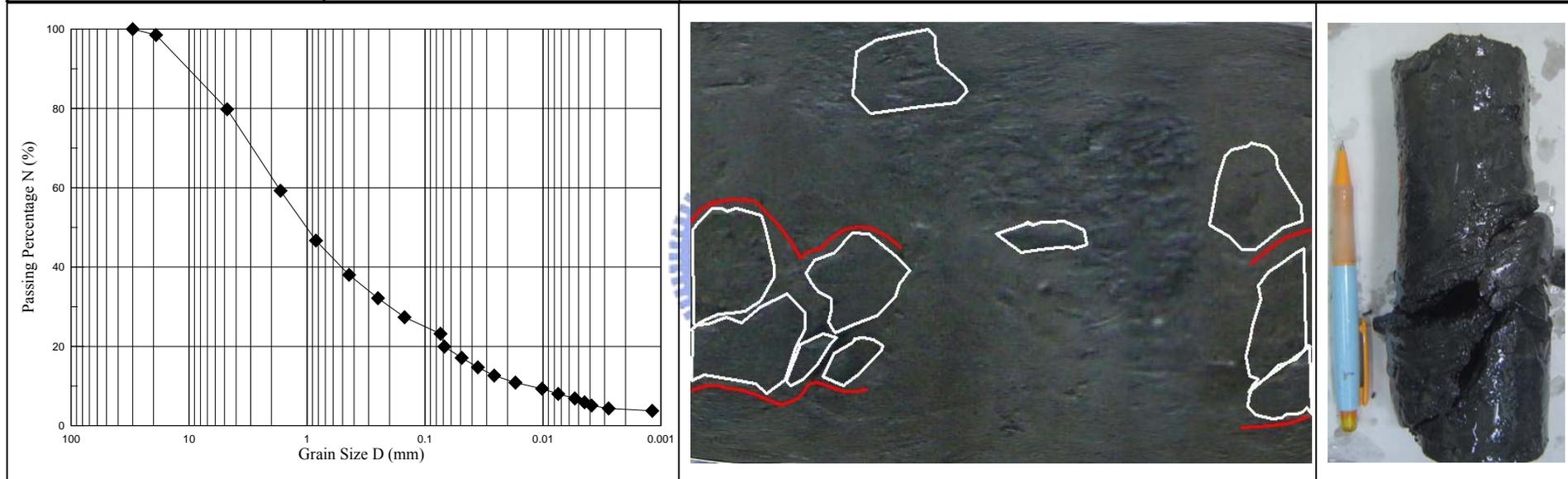


Figure No.	圖 A.29 SG-Ah111 併構岩岩塊分佈與破壞示意圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為

試驗編號：SG-Ah111		岩層性質：灰色黏土夾灰色板岩	岩塊含量 20.21%
鑽孔編號：AH-1	試驗深度：17.25~17.40 m	量測： MTS LVDT , 50KN Load Cell , Proximeter	
控制儀器：MTS 810	加壓速率：0.3% /min	試驗者：羅文驤	

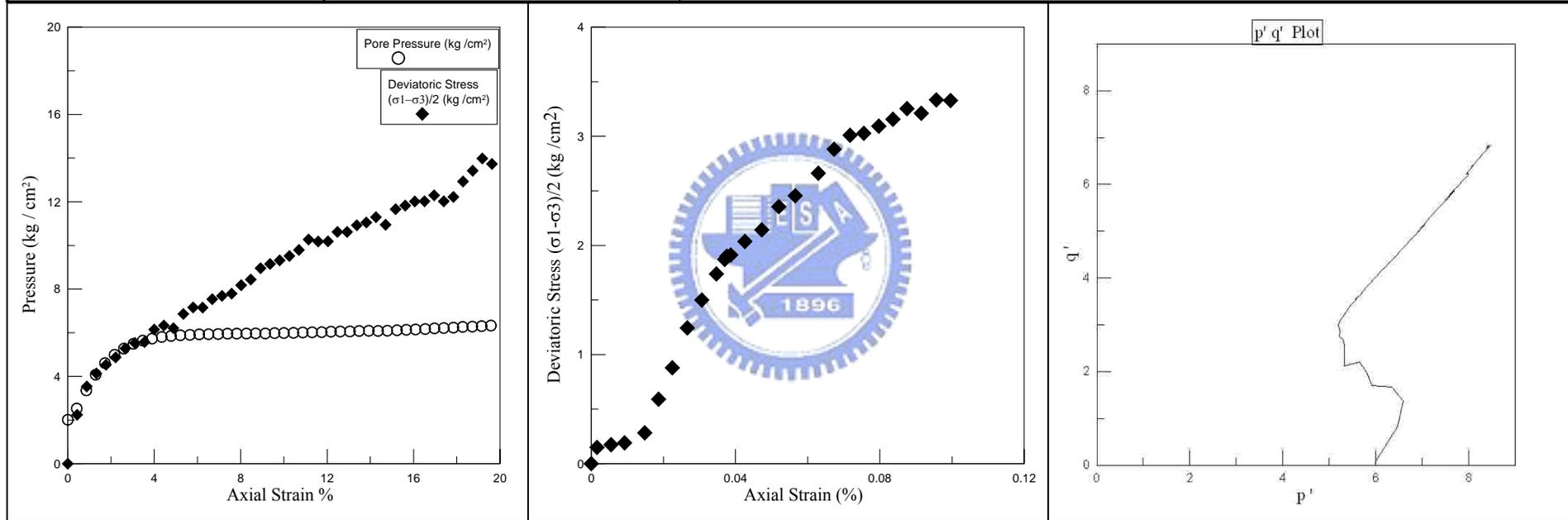


Figure No.	圖 A.30 SG-Ah111 併構岩應力應變曲線，小應變下應力行為，pq 圖
Project.No	梨山崩積層中類併構岩(板岩夾黏土)之力學行為



附錄 B 板岩與土壤一般物性試驗表

表 C.1 板岩一般物性試驗詳表

孔號	取樣位置 (m)	比重	飽和含水量 (%)	孔隙比
X-2	36.4 ~ 36.55	2.782	0.276	0.007548
	43.75 ~ 43.90	2.725	0.224	0.006023
N-2	66.56 ~ 66.7	2.751	0.226	0.006208
	62.2 ~ 62.35	2.780	0.221	0.006122
	76.2 ~ 76.4	2.763	0.272	0.007492

表 C.2 土壤一般物性試驗詳表

孔號	深度 (m)	比重	塑性限度	液性限度	塑性指標
N1	18.0 ~ 19	2.673	32	40	8
N2	18.0 ~ 19	2.697	37	42	5
	45.0 ~ 46	2.652	23	29	6
	53.0 ~ 54	2.754	28	37	9
AH1	12. ~ 14	2.735	18	30	12
	14 ~ 16	2.757			
	17 ~ 18	2.716	31	48	17
	19 ~ 20	2.708			
	37 ~ 38	2.793	25	44	19
	38 ~ 39	2.756	22	40	18
	39 ~ 40	2.697	29	43	14

表 C.3 N1 12 ~ 16 m 岩塊大小統計

長(cm)	短(cm)	厚(cm)
1.91	1.52	0.872
2	1.152	0.63
2.382	2.374	1.038
2.514	2.044	1.084
1.97	1.262	1.4
3.4	2.032	1.866
4.714	3.25	1.74
3.1	2.076	2.032
1.852	1.506	1.568
3.746	2.252	1.888
3.28	2.4	0.81
2.704	2.45	1.155
4.288	2.01	1.478
3.988	2.166	1.888
2.146	1.538	1.168
2.704	2.628	1
3.366	1.748	1.372
1.968	1.684	0.96
2.692	1.768	0.822
2.836	1.788	1.262
2.944	1.572	1.164
2.034	1.926	0.738
1.738	1.3	0.61

表 C.4 N2 44 ~ 48m 岩塊大小統計

長軸(cm)	短軸(cm)	厚(cm)
1.988	1.722	0.68
1.968	1.64	0.412
2.66	1.688	1.014
2.99	2.504	1.082
4.188	3.22	1.49
2.642	1.956	1.312
2.91	1.554	0.684
2.118	1.656	0.55
1.996	1.478	1.048
2.706	1.782	0.64
2.07	1.888	0.518
1.726	1.708	0.544
1.948	1.344	1.366
2.28	2.272	1.32
2.262	1.968	0.956
1.406	1.39	0.84
2.03	1.938	0.638
2.566	1.978	0.56
2.586	1.52	0.556
1.952	1.408	0.908
2.35	1.898	0.942
2.024	1.336	0.536