

國立交通大學  
土木工程學系碩士班  
碩士論文

濕噴法粉土細砂試體之製作

Preparation of reconstituted silty sand samples  
using wet spary method

研究生：黃俞傑

指導教授：黃安斌 博士

中華民國九十五年八月

濕噴法粉土細砂試體之製作

Preparation of reconstituted silty sand samples  
using wet spary method

研究生：黃俞傑

Student: Yu-Jie Huang

指導教授：黃安斌 博士

Advisor: Dr. An-Bin Huang



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

August 2006  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年八月

## 濕噴法粉土細砂試體之製作

學生：黃俞傑

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

現有之土壤行為研究均建立在重模試體的試驗上，透過重模試體大地工程界已建立許多砂土行為模式。亦有學者經由觀察現地試驗（SPT/CPT 現地剪力波速量測等）行為與抗液化強度之間關係來建立二者之間的經驗法則。現有研究指出砂土重模試體與天然試體間存在著極為顯著的差異，其中重模試體製作方法更與重模試體的土壤組構以至於所表現出的行為息息相關。一般相信以水中沉降法試體較能代表沖積土壤組構。交通大學所進行的一系列對麥寮砂的動靜態三軸試驗與 CPT 標定試驗多以濕夯法或賈落法製作。而麥寮砂及台灣中西部多數砂土為沖積土壤。根據經驗應以水中沉降法或泥漿沉積法製作試體較具代表性。但這些方法應用在重達數百公斤的大型標定試體上效率不佳且均勻性表現亦不理想。因此研發符合沖積土壤行為且能有效率的製作大型試體的方法是必須的。

濕噴法採氣流賈降水霧沾附等方式試圖對製作粉土細砂試體時常見的顆粒析離問題做出改善。所開發的試體製作程序及使用儀器在應用於製作大型試體上相對前述模擬沖積土壤行為方法簡便。經實驗證實，濕噴法所製作的試體在動/靜態三軸試驗上有著與水中沉降法試體相近的表現說明了濕噴法之土壤組構與水中沉降法相類似，能用以模擬現地沖積土壤。粉土細砂試體垂直向與水平向的篩分析結果也顯示濕噴法試體良好的細料含量均勻性。唯現有數據亦顯示試體緊密度控制上仍未臻完善。對於粉土細砂製作方式對標度槽試體的製作影響所知相當的有限。經簡易修改後的濕噴法將易於製作均勻試體以了解砂土現地行為與室內標定試驗之間關係。

# Preparation of reconstituted silty sand samples

using wet spray method

Student: Yu-Jie Huang

Advisor: Dr. An-Bin Huang

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

## **Abstract**

Fundamental investigations of soil behaviour going is based on the test results of reconstituted specimens. Though reconstituted specimens, many soil behaviour models have been build up. On the other hand, by autoptic insitu testing such as SPT/CPT/shear wave velocity measurement, empiricism linking insitu behaviour and cyclic resistance were found. Numerous studies have shown that differences in stress-strain-strength behaviour between undisturbed and reconstituted sand specimens may be dramatic. Soil behavior is highly dependent upon soil fabric produced by different reconstituted method. It's been reported that water pluviation method simulates the deposition of sand through water found in natural environments and have similar fabric and behavior. Series laboratory tests include monotonic and cyclic triaxial test and CPT calibration tests of Mai Laio Sand were performed at NCTU. Most of it were prepared by moist tamping and pluviation. Where natural silty sands found in central western taiwan like Mai Laio Sand are often associated with alluvial deposits. Base on experience, in order to represent alluvial environments, silty sand specimens should be reconstituted by water pluviation or slurry deposition method. But for calibration chamber specimens which substantially larger than those for typical triaxial tests these methods show less preparation efficiency and uniformity. It is bounden to find a method for reconstituting large specimens streamlined and also give same response as the alluvial sand.

Own developed wet spray method using air jet pluviation with moisten both sands and fines attempt to handling and minimization of soil particle segregation in silty sand specimens. Compared with preceding mention reconstituted methods, wet spray method has advantage of preparation efficiency and equipment that used. Through monotonic and cyclic triaxial test, wet spray specimen show similar behavior to water pluviation specimen simulates well the soil fabric found in alluvial environments. Grain size analysis of reconstituted specimen also shown well uniformity of fines content both for vertical and horizontal directions. Wet spray method do overcome some inherent problems of reconstituted silty specimen, yet loose to dense control of

specimen's void ratio can not be reproduced perfectly. Little is known as to how the preparation method can affect the results of CPT in a reconstituted silty sand specimen. Wet spray method can be easily modify to create homogeneous samples for fundamental studies of CPT calibration.



## 誌謝

回想起兩年多前的我，沒有想過唸研究所到底是怎麼一回事。

踏入大地組之後，在黃安斌老師的指導下，漸漸的一切開始有了方向、條理。學習上、生活上、做人處世的態度上，黃老師都對我有著比所想像更多的正面影響。也要感謝研究期間義守大學古志生老師的協助及口試委員海洋大學林三賢老師的指教。

同門的許懷後學長、黃耀道學長對研究的專業、熱情及對學弟的照顧更是不在話下。研究這條路上受黃門諸多學長的幫助提攜方能順利的抵達目標。

同學間智超、聖傑、若安相互砥礪努力不懈致力研究的情景仍歷歷在目。生活上的各種快樂回憶於提筆此時也湧上心頭。對黃門的學弟源昱、崑山、价民更有著一份難捨的情感。身為學長好像也沒教你們什麼反倒是受了不少的關照。

研究所的這段期間，讓父母擔心的程度並沒有絲毫的減少。在這裡更要感謝父母的照顧於我人生中的所有時刻都一樣的不離不棄。

得之於人者太多，出之於己者太少。要謝的人真的太多了。

回首過往，許多人參與了我這一段不算短的人生經歷。因為有你們的存在才使得我的生命完整。

有你們在，真好！

# 目錄

誌謝 .....	iv
目錄 .....	v
圖目錄 .....	viii
表目錄 .....	x
第一章 前言 .....	11
1.1 研究背景 .....	11
1.2 研究目的 .....	12
1.3 研究流程 .....	13
1.4 論文內容介紹 .....	14
第二章 文獻回顧 .....	14
2.1 非擾動取樣 – 砂土冰凍取樣 .....	14
2.1.1 土壤於冰凍過程中的擾動 .....	15
2.1.2 冰凍取樣案例 .....	15
2.1.3 冰凍試樣的品質檢核 .....	16
2.2 非擾動取樣 – 其他非擾動取樣法 .....	16
2.3 重模試體製作 .....	18
2.3.1 Moist Tamping (MT) 濕夯法 .....	18
2.3.2 Air Pluviation (AP) 氣質法 .....	18
2.3.3 Water Pluviation (WP) 水中沉降法 .....	19
2.3.4 Slurry Deposition (SD) 泥漿沉積法 .....	19
2.3.5 Slurry Consolidation (SC) 泥漿壓密法 .....	19
2.4 重模試體製作方式評估 .....	20

2.4.1	MT Samples .....	20
2.4.2	AP Samples .....	21
2.4.3	WP Samples .....	21
2.4.4	SD Samples .....	21
2.4.5	SC Samples .....	22
2.5	不同試體製作方式的影響.....	22
2.6	試驗用麥寮砂之基本性質.....	23
2.6.1	麥寮砂的來源.....	23
2.6.2	基本物理性質.....	23
第三章	試驗規劃.....	38
3.1	濕噴法試體製作系統.....	38
3.1.1	砂土實降器.....	39
3.1.2	水霧濕潤系統.....	40
3.2	定案之濕噴法試體製作流程.....	40
3.3	濕噴法試體檢核.....	42
3.4	剪力波元件試驗設備.....	43
3.4.1	剪力波元件 (Bender Element) .....	43
3.4.2	函數產生器 (Function Generator) .....	43
3.4.3	剪力波訊號擷取系統.....	43
3.5	動態三軸試驗設備.....	44
3.5.1	量測系統.....	44
3.5.2	訊號擷取系統.....	45
3.5.3	氣壓與水壓控制系統.....	45



3.5.4	反覆荷重加載系統.....	45
3.5.5	軸壓控制系統.....	46
3.6	單向載重三軸試驗設備.....	46
第四章	試驗結果與討論.....	61
4.1	濕噴法試體製作過程中沉積強度對控制變數之重複性。 ....	61
4.2	濕噴法試體之均質(勻)性.....	61
4.3	試體之重複性.....	62
4.4	三軸試驗試驗結果.....	62
4.4.1	試體製作方法對反覆動力三軸試驗之影響 .....	63
4.4.2	試體製作方法對單向載重三軸試驗之影響 .....	63
4.4.3	試體製作方式對剪力波速之影響 .....	64
第五章	結論與建議.....	84
5.1	結論.....	84
5.2	建議.....	85
參考文獻	.....	86

## 圖目錄

圖 1.1	研究流程圖	13
圖 2.1	Freezing and sampling procedure (摘自 Yoshimi et al., 1984)	27
圖 2.2	Laval sampler 示意圖 (摘自 La Rochelle et al., 1981)	28
圖 2.3	moist tamping with under-compaction ratio of 3% (摘自 Frost and Park, 2003)	29
圖 2.4	由左而右分別為 MT/AP/WP 試體均勻性經 X-ray 影像分析之結果 (摘自 Frost and Park, 2003)	30
圖 2.5	粉土質砂土以固定式實落方式所形成之粉土柱 (摘自 Lo Presti et al., 1992)	31
圖 2.6	非擾動試體 (冰凍) 與 WP 試體之不排水單剪試驗反應 (改繪自 Vaid et al., 1999)	32
圖 2.7	CPT 標定試驗結果 (泥漿壓密法, 圍壓=100 kPa, 摘自 Rahardjo, 1989)	33
圖 2.8	不排水三軸試驗反應 (改繪自 Vaid et al., 1999)	34
圖 2.9	Undrained simple shear response (改繪自 Vaid et al., 1999)	35
圖 2.10	天然麥寮粉土細砂之粒徑曲線 (摘自張嘉偉, 1997)	36
圖 2.11	麥寮砂細粒料含量與最大、最小孔隙比之關係 (摘自王統立, 2000)	37
圖 3.1	標定槽濕噴法設計概念示意圖	49
圖 3.2	砂土實降器 (實心實砂口) 設置示意圖	50
圖 3.3	實砂口形成空心錐與大氣相連	50
圖 3.4	環狀放射出砂口	51
圖 3.5	實砂口與試體鋼模之空間分佈	51
圖 3.6	底端封閉之實降器	52
圖 3.7	抬昇側壁底端開口之實落器	53
圖 3.8	阻擋用外罩與實砂口 (組立前)	54
圖 3.9	螺桿與螺絲控制噴頭與地面夾角	54
圖 3.10	填砂	55
圖 3.11	以漏斗封閉	55
圖 3.12	濕噴法系統示意圖	56
圖 3.13	濕噴法系統實際操作	57
圖 3.14	額外實出高於試體模的部分	58
圖 3.15	頂端細顆粒堆積情況	58
圖 3.16	底部 Bender 凸出透水石部分	59
圖 3.17	剪力波元件試驗系統示意圖 (摘自林靜宜, 2003)	59
圖 3.18	動態三軸試驗示意圖 (摘自林靜宜, 2003)	60
圖 4.1	濕噴法試體切片示意圖	69
圖 4.2	試體細料含量均勻性 (垂直方向)	70
圖 4.3	試體細料含量均勻性 (垂直方向)	71
圖 4.4	試體細料含量均勻性 (水平方向)	72
圖 4.5	試體細料含量均勻性 (垂直方向)	73
圖 4.6	濕噴法試體於反覆動力三軸試驗重複性	74
圖 4.7	濕噴法與水中沉降法 MLS (FC<5%) 動態三軸試驗之結果比較	75
圖 4.8	濕噴法與水中沉降法 MLS (FC=15%) 動態三軸試驗之結果比較	76
圖 4.9	濕噴法與水中沉降法 MLS (FC=30%) 動態三軸試驗之結果比較	77

圖 4.10 濕噴法與濕夯 (MT) 法 MLS (FC<5%) 單向載重三軸試驗結果比較 (有效圍壓 50kPa) .....	78
圖 4.11 濕噴法與濕夯 (MT) 法 MLS (FC<5%) 單向載重三軸試驗結果比較 (有效圍壓 100kPa) .....	79
圖 4.12 濕噴法與濕夯 (MT) 法 MLS (FC=15%) 單向載重三軸試驗結果比較 (有效圍壓 50kPa) .....	80
圖 4.13 濕噴法與濕夯 (MT) 法 MLS (FC=15%) 單向載重三軸試驗結果比較 (有效圍壓 100kPa) .....	81
圖 4.14 濕噴法 MLS (FC<5%) 單向載重三軸試驗應力路徑圖 .....	82
圖 4.15 濕噴法 MLS (FC=15%) 單向載重三軸試驗應力路徑圖 .....	83



## 表目錄

表 2.1 天然麥寮砂 (MLS)、Quiou 砂 (QuS)、Toyura 砂 (QS)、與 Ticino 砂 (TS) 的基本性質 (摘自 Almeida et al.,1991 ; Fioravante et al., 1991 ; Borden, 1991 )	25
表 2.2 麥寮砂不同細粒料含量的基本物性 (張嘉偉, 1997)	26
表 3.1 中日噴霧 J-006 規格	48
表 4.1 貫落器出砂之沉積強度測試 (試驗環境：參照 4.1 節)	65
表 4.2 試體細料含量均勻性 (垂直方向)	65
表 4.3 試體細料含量均勻性 (水平方向)	66
表 4.4 麥寮乾淨砂各層含水率資料	67
表 4.5 靜態三軸試驗列表	68
表 4.6 動態試驗列表	68
表 4.7 剪力波速量測資料比較	68



# 第一章 前言

## 1.1 研究背景

由於現地不擾動砂性土壤試體的不易取得，砂土行為的研究幾乎都根據重模試體來進行室內試驗或現場行為觀察。

根據現有砂土重模試驗，大地工程界已建立許多關於砂土行為之模式，例如砂土強度與緊密度、圍壓與細料（通過 200 號篩之材料）含量之間的關係（Seed and Idriss, 1971；Castro and Poulos, 1977；Thevanayagam, 1998；Seed et al., 1983 等）。許多學者如（Robertson and Campanella, 1985；Seed and De Alba, 1986；Stark and Olson, 1995；Shibata and Teparaksa, 1988）等根據觀察到的現場行為與經驗法則相配合提出土壤抗液化強度與現地試驗結果、圍壓與細料含量間之關係。

現有的研究已提出充分的證據顯示砂土重模試體與天然試體之間的差異。不同重模試體製作方法其結果也有所不同（Mulilis et al., 1975）。常用的試體製作方法包括氣質法（Air Pluviation, AP）、水中質落法（Water Pluviation, WP）、濕夯法（Moist Tamping, MT）、泥漿沉積法（Slurry Deposition, SD）、泥漿壓密法（Slurry Consolidation, SC）等。一般相信 WP 法所製作的試體較能反映沖積（alluvial）土壤的行為。

交通大學針對麥寮砂（MaiLiao Sand, MLS）粉土細砂進行一系列土壤

試體靜/動態試驗以及 CPT 標定試驗，先前的試體製作法以 AP、MT 為主而 MLS 及台灣中西部砂土多屬沖積土壤，依過去經驗應以 WP 與 SC 法來製作模擬現地土壤行為之試體。然而對 CPT 標定試驗而言，其試體重達數百公斤至一噸餘，以 WP、SC 法製作試體曠日費時，Rahardjo (1989) 以 SC 法製作 CPT 標定試體其研究顯示試體缺乏均勻性，其結果並不理想。

## 1.2 研究目的

由於 CPT 標定試體的體積龐大，過往對粉土細砂 CPT 標定試驗試體製作方法的研究並無太多著墨。現有的研究顯示試體製作方法對試體的行為有著顯著的影響。過去在標定試驗中仍未有兼顧符合現地土壤組構與試體製作效率的製作方法。本研究旨在研發適合製作大型而均勻粉土細砂試體之重模方法，且此方法所得試體行為應趨近於沖積土壤。

### 1.3 研究流程

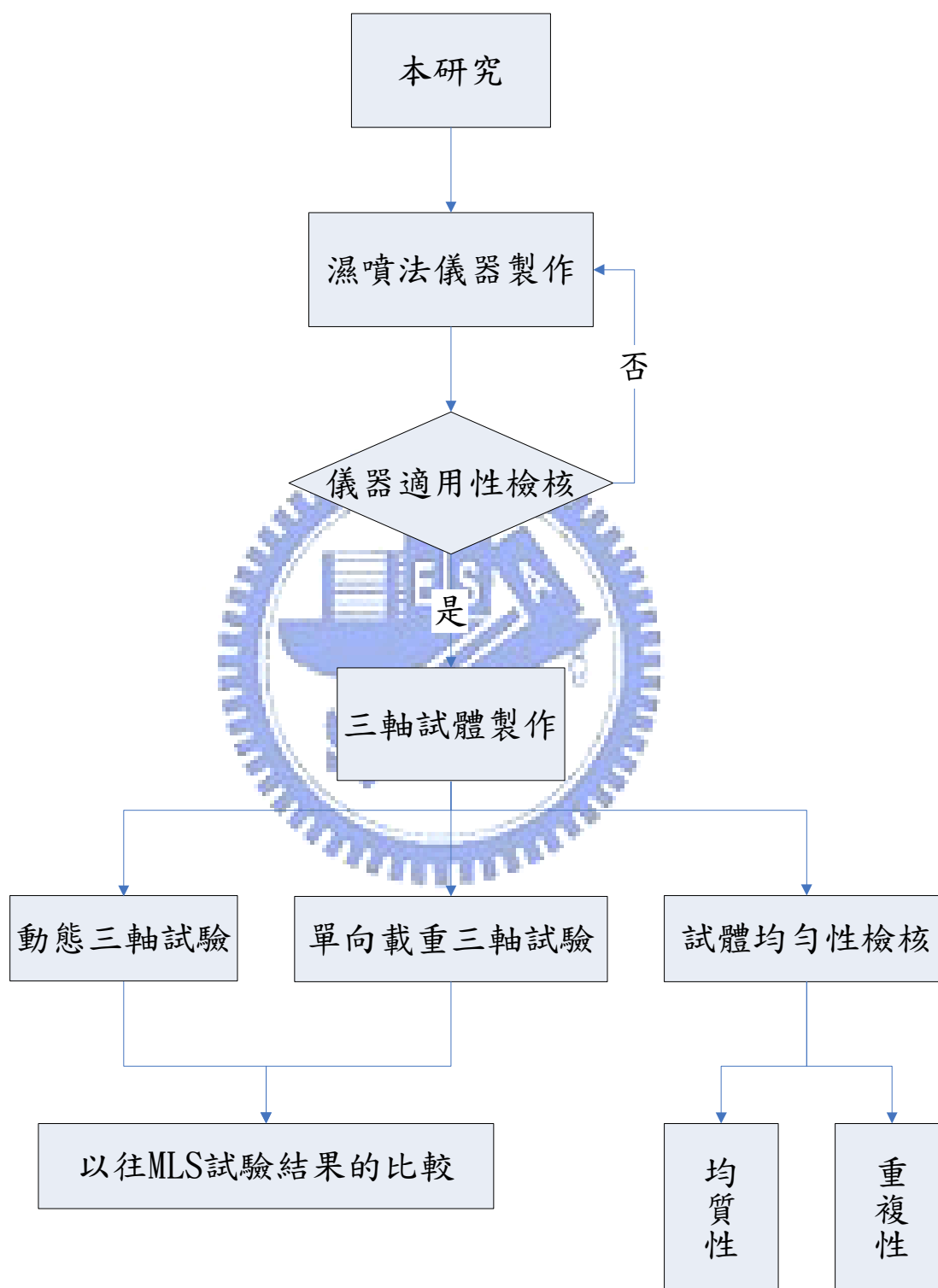


圖 1.1 研究流程圖

## 1.4 論文內容介紹

本論文共分為五章。第二章為文獻回顧，主要討論非擾動與重模試體的性質比較與研究用砂之基本性質。第三章解說濕噴法試體製作概念、所研發之儀器及靜/動態三軸儀器之介紹。第四章則為濕噴法試體之試驗結果並與不同試體製作方式麥寮砂靜/動態三軸試驗結果之比較，第五章為討論與建議。

## 第二章 文獻回顧

由於現地不擾動砂性試體的取得不易，因此室內重模砂土試體的製作顯得格外重要。不同的製作方式有其優缺點，必須依照砂土特性、儀器種類及模擬現地土樣的條件來做選擇，但不擾動試體在反映實際現地土層緊密程度與土壤組構上仍有其不可替代性。

所謂的擾動，簡單說就是對土壤結構的破壞與干擾。在取樣的過程中，土壤的體積、孔隙比、含水量、所受的應力狀態等都或多或少的有所改變。不擾動取樣就是改良取樣的方式使土壤試體在取樣的過程中仍能保持與現地情況相同。

### 2.1 非擾動取樣 - 砂土冰凍取樣

由於砂性土壤缺乏凝聚性，即使利用薄管取得砂性土壤，也會因為砂土鬆散而無法在試驗室內取出完整的土樣。此外，由於砂土的強度較高，壓縮性也較小，因此在深度較深處，利用壓力也不易將薄管壓入來取得良好的土樣。砂土的透水性高，取樣過程中也會造成水分的流



失。

地表冰凍技術應用在穩定開挖上已經行之有年，卻較少應用地表冷凍技術在獲得高品質無凝聚性土壤。美國陸軍工兵團在 Fort Peck Dam 的研究中首次報告應用地表冷凍技術在獲得非擾動試體上 (U.S. Army Corps of Engineers, 1938)，此後又有許多關於利用地表冰凍技術來獲取不擾動試體的研究如 (Bishop, 1948; Hanzawa and Matsuda, 1977; Marcuson et al., 1977) 等。

欲使用冰凍法取得砂性土壤的不擾動土樣時，必須於現地埋設冷凍管與溫度感測器，利用冷凍管將液態氮等冷卻劑導入地層循環，將周圍土壤之孔隙水冰凍固結後，以類似岩心取樣之方法取出薄管試樣。

### 2.1.1 土壤於冰凍過程中的擾動

存在土壤孔隙中的水在經歷相變化時所造成的吸力與膨脹是造成土壤結構擾動的關鍵因素。這些因素也同樣影響著受到凍融作用時的天然敏感性土壤。為了釐清這冰凍過程中必定伴隨的水的徙動問題來降低土樣的擾動，許多學者對凍融作用做了相關的研究並提出了對於冰凍的看法。Yoshimi et al. (1978) 指出滲透性與土壤級配皆無法導致冰凍過程中所造成的擾動，同時也發現對飽和砂土來說冰凍所造成的擾動會與細料含量成比例的增加。Davila et al. (1992) 在他們的研究中定義出了能以地表冰凍獲得不擾動試樣的土壤種類與特性的範圍，並確立冰凍能否不擾動土壤結構的邊界條件。

### 2.1.2 冰凍取樣案例

實際的取樣案例方面，Yoshimi et al. (1984) 所使用以液化氮為冷卻

劑的冰凍系統如圖 2.1 所取出的不擾動飽和乾淨（無小於 200 號篩之細料）砂土經冰凍解凍之後仍能保持與現地相同的密度，此法雖有僅能取得淺層試體與需要重型機具的缺點，卻也證實了地表冰凍法從現地取得高品質不擾動試樣的可行性。

然而，受鑽機的擾動、圍壓的下降、運送儲藏與製作試體的過程中的不當處置都有可能使得試樣的孔隙比及顆粒排列產生變化。這些孔隙變化可能導致試體行為由應變硬化變成截然不同的應變軟化特性。在後續的實做上，Sego et al. (1994) 在 Duncan Dam 所施做的冰凍取樣研究中詳述了冰凍系統的設計、安裝、施作及鑽探、取樣、運送、保存等細節。同時也以孔隙比的角度，比對現地實際情況與冰凍試樣對冰凍取樣的試樣品質做確認。

### 2.1.3 冰凍試樣的品質檢核

為評估冰凍法所取得的現地試樣之品質 Sego et al. (1994) 採用 compensated gamma-gamma density logging tool (Plewes et al., 1994) 來比較試樣孔隙比與現地量測數值，證實多數現地冰凍試樣即使經過冰凍、鑽探及取樣仍能維持與現地差異極小之孔隙比。亦有學者從剪力波速量測的觀點來檢核現地波速與冰凍試體之差異 (Sasitharan et al., 1992 ; Goto et al., 1992)。

## 2.2 非擾動取樣 - 其他非擾動取樣法

上述之地表冰凍法固能取得高品質不擾動土樣，但實際操作上仍有消耗大量冷卻劑與時間等待凍結區生成之缺點。

Hoeg et al. (2000) 嘗試使用直徑 50mm SGI (Swedish Geotechnical Institute) 活塞取樣器，在常溫下於天然粉土中成功的取得薄管試體。以及使用直徑 73mm，管壁厚 1mm，管長 260mm 的薄管，在地表 2.5m 下開挖孔內以手壓貫入的方法成功的取得粉土細砂礦渣試體。當企圖以直徑 95mm NGI (Norwegian Geotechnical Institute) 活塞取樣器取樣時，都無法成功取得薄管試體。即使在緊鄰地下水位面上的毛細負壓力土層中，仍無法取得試體。SGI 活塞取樣器所取得的試體在貫入取樣時，於貫切器附近會造成些許的擾動，而且試體載運回實驗室的過程，試體自薄管擠出的過程均會造成試體的緊密化，但這些擾動與重模試體的擾動情形相比較，Hoeg et al. (2000) 仍認為 SGI 活塞取樣器所取得的試體是非擾動的。

Konrad et al. (1995) 是第一位使用 Laval sampler，於常溫下將低細料含量砂土成功取樣者。Laval sampler 如圖 2.2 是 La Rochelle et al. (1981) 原先是為高靈敏性軟弱黏土取樣而設計，可取直徑 200mm、長度 500mm 之高品質非擾動試體。除了取樣，Konrad et al. (1995) 也提出了 Laval sampler 砂土試體於常溫下在地表冰凍的程序來保存試體。冰凍的過程中所激發的超額孔隙水必須在不造成體積變化的情況下排出以保持土壤結構與冰凍前初始狀態相同。詳細紀錄冰凍過程所排出水體積對冰凍時間的關係作為冰凍品質的檢核用。同時 Konrad et al. (1995) 也提到由於缺乏現地實際資料的比對 (CPT 資料依經驗公式可估計相對密度，但經驗公式是以壓縮性砂土標定出，與現地土壤不符。) 作者以分割試樣全域進行含水率分析，證實 Laval sampler 取樣在取樣管的邊角不會造成擾動及應用在細顆粒飽和砂土不擾動取樣

上的可信度。

## 2.3 重模試體製作

Kuerbis and Vaid (1988) 提到重模試體製作技術必須能滿足以下條件：1)該方法必須能製作出由疏鬆到緊密不同密度的試體來符合現地土壤的堆積組成；2)所製造出的試體整體具有均勻的孔隙比；3)對不排水試驗的試體來說，必須能充分的飽和；4)無論試體級配情況與細粒料含量如何，試體必須充分的混合而無顆粒析離的情況；5)試體製作必須模擬現地的土壤堆積模式。依試體製作過程中的乾/濕、沉降堆積/洒砂、震動或其他方法搗實的變化而有不同的重模試體製作方法。以下就現有重模試體製作方法做介紹。

### 2.3.1 Moist Tamping (MT) 濕夯法

已知最早的試體製作方法是將濕潤或乾燥的土壤分層夯實 (Lambe, 1951)。該法是連貫的將土壤按特定的厚度分層以特定力量、頻率夯實整平至要求的緊密度，將各層在試體模中重組。能製作出相當廣的試體緊密度範圍。濕夯法原本是開發用來模擬經輾壓的填土組構。Ladd (1978) 以 undercompaction 的概念修正了原本的濕夯法，使濕夯法在土壤含細粒料的情況下能製作出相當均勻的試體。如圖 2.3

### 2.3.2 Air Pluviation (AP) 氣貫法

將乾的砂土置於下端開口容器內，容器底部與試體模中砂土頂層保持特定相同高度，利用顆粒掉落的高度與堆積速率來控制砂土試體緊密度。較高的顆粒掉落高度帶有較高的能量能緊實砂土。亦有學者透過

限制賈落高度來製作出非常疏鬆的試體。賈落法在模擬淘選良好砂土的風成堆積土上為最佳的選擇。另與氣賈法相似者還有 Dry Deposition (DD) 乾置法，兩者的差異在於乾置法所使用的賈落器開口始終與試體模中砂土頂層保持接觸並透過敲擊模具來達到所要的緊密度。

### 2.3.3 Water Pluviation (WP) 水中沉降法

水中沉降法與賈落法相當類似。主要差異在以除氣水代替空氣作為砂土賈落過程的媒介，也確保了試體的飽和。由於以水作為賈落介質，砂土沉積過程的終端速度會小於賈落法，試體的相對密度也會較賈落法試體來的小。水中沉降法模擬自然界中砂土的沉積與水力填土的堆積情況。

### 2.3.4 Slurry Deposition (SD) 泥漿沉積法

為了解決前述試體製作方法所既有如顆粒析離等的問題 Kuerbis and Vaid (1988) 開發了 SD 法。此法是預先將土壤與粉砂/黏土等細粒料分別於水中加熱除氣而得的泥漿在混合管中預混。預混 20 分鐘後連同混合管置於三軸室底座上，於其外側另行裝置試體橡皮模與分裂模作為組立用外模。移除混合管，使混合後的泥漿於組立用外模內沉積後放置頂蓋於其上即完成疏鬆試體。試體的緊密程度則以施加壓力於頂蓋上或軟槌敲擊震動底部來達成。

### 2.3.5 Slurry Consolidation (SC) 泥漿壓密法

Rahardjo (1989) 使用 SC 法製作標定槽粉土質砂土之大型試體。此



方法是將粉土質砂土與水混合後，以手或是配合由兩人操作之混凝土攪拌器（concrete mixer），經過 8 小時的攪拌過程，並以目視方式決定其攪拌是否已經達到均勻之程度，然後靜置 24 至 48 小時，以其自重完成初期試體之壓密。然後再組裝標定槽上蓋盤，以逐步施加圍壓之方式進行等向壓密，最終達到圓錐貫入試驗前所設定之圍壓狀態。

## 2.4 重模試體製作方式評估

不同的試體製作方法由於其製作過程的差異造成試體土壤組構上有所不同，也連帶著影響土壤的力學行為。

### 2.4.1 MT Samples

Kuerbis (1989) 主張在濕夯過程中毛細現象所引致的張力使 MT 試體較洒砂法（pluviation method）更為疏鬆。Vaid et al. (1999) 以 Syncrude sand 分別製作 MT、AP、WP 試體。其中濕夯試體初始相對密度可達 -20% 甚至比 ASTM 最大孔隙比  $e_{max}$  更加疏鬆。試體的壓縮性也較 AP、WP 試體來的高許多。並將此特性歸因於 MT 過程產生潛在的可倒塌（collapsible）組構。試體的均勻性方面經 Ladd 以 undercompaction 概念改良的 MT 法被 Vucetic and Dodry (1988) 認為是建立均勻含細粒料土壤試體的良好程序。大量的應用在含細粒料土壤試體的液化研究上。Frost and Park (2003) 以 X-ray 對試體均勻性的研究顯示 WP/AP 試體較 MT 試體均勻，如圖 2.4 所示。MT 試體中相對密度之標準差約 6%（ $D_r=50\%$ 、 $75\%$  皆然），較相同相對密度之 AP 試體標準差 3% 來的大。

## 2.4.2 AP Samples

Vaid and Negussey (1984) 對試驗材料為含細粒料砂土時於室壓下賈落垂直向顆粒析離情況的解釋是因為反向的氣流而發生。但 Lo Presti et al. (1992) 提到垂直向顆粒析離情況是可以忽略的。同時也提到水平向的顆粒析離情形會在容器開口下方試體中央產生細粒料聚集的粉土柱如圖 2.5。

## 2.4.3 WP Samples

Oda et al. (1978) 的研究指出 WP 法製作的試體在土壤組構及行為上都與自然沖積土極為相似。Vaid et al. (1999) 比較 MT/AP/WP 法與現地地表冰凍非擾動試體於靜態三軸與單剪試驗中之力學表現也呈現相同結論，即 WP 法與現地試體行為較為相似。如圖 2.6

Vaid and Negussey (1984) 提到 WP 法在面對貧級配的砂土時能製作出相當均勻的試體。但與 AP 法相同，對良好級配或粉土細砂時顆粒析離的情況就會成為問題。同時 WP 試體在壓密過程中，由於較高的徑向可壓縮土壤結構，致使比 MT 試體更具可壓縮性。

## 2.4.4 SD Samples

Kuerbis and Vaid (1988) 提出 SD 法時檢驗試體無論是在級配上或孔隙比上都具有極高的均勻性且土壤組構亦與天然沉積狀態相似。Hoeg et al. (2000) 比較 SD 試體與非擾動試體認為 SD 法仍未能製作出與現地非擾動土樣具有相類似應力-應變-強度行為之試體。此外其複雜的程序亦不利應用於大型試體製作。

## 2.4.5 SC Samples

SC 法製作試體主要的缺點在於其製作試體之時間冗長，前期以自重壓縮約需 2 天。後期等向壓密以典型的 70kPa-100kPa-140kPa 逐階上升亦須 10 至 16 天。CPT 測試的結果如圖 2.7 顯示試體之均勻性並不理想。

## 2.5 不同試體製作方式的影響

Mulilis et al. (1977) 與 Ladd (1974, 1977) 研究證實不同試體製作方法所構成的不同土壤組構會對土壤的行為產生深切的影響。

一般說來，MT 法被用來製作極疏鬆的試體。而 MT 內含的疏鬆易倒塌土壤組構使的試體有著收縮與應變軟化的反應。與 MT 試體相反，被認為符合現地土壤組構的 WP 試體則呈現膨脹性與應變硬化反應。

如圖 2.8

Tatsuoka et al., (1986) 提到試體為增加多餘的 (2% to 10%) DA axial strain (同一反覆震動週期內，試體於受壓或受拉階段兩者之最大應變量之和) 所受到的 load cycles 數 (NC) 與試體製作方法所造成的影響無關。僅與試體壓密後的孔隙比  $e_c$  有關。也就是說，試體製作方法對動態不排水的應力應變特性的影響於試體受小應變(3%)時較大，隨著動態應變的逐漸增加，試體製作方法的影響將趨向於無。

Vaid et al. (1999) 比較了 WT、AP、WP 等製作法及現地冰凍法取得的不擾動試體對單剪和三軸壓縮試驗的差異。提出即便在相同的土樣材料與初始狀態下，不同試體製作方法於不排水情況下的反應仍有著明顯的差異。WP 應變硬化與延展性使得強度超越尖峰強度後仍能持



續上升。反之 MT 的脆性與應變軟化使強度超越尖峰強度之後急速下降至極低的殘餘強度。如圖 2.9。

Amini and Qi (2000) 提出以 MT 法代表排列均勻的試體 WP 法代表分層排列的試體。對抗液化強度而言，均勻與分層試體差異並不大。Mulilis et al. (1975, 1977) 對不同試體製作方法的研究的總結是：對試體製作方法影響試體抗液化強度的程度主要是取決於土壤種類。

## 2.6 試驗用麥寮砂之基本性質

本章內容主要摘自張嘉偉(1997)、王統立(2000)及蔡明道(2002)、郭毓真(2004)之研究並做一整理。

### 2.6.1 麥寮砂的來源

當中央山脈受雨水沖刷而於海岸沉積，在沖刷過程中，會夾帶台灣西部地區含量豐富屬較軟弱破碎之黑色頁岩及泥岩，導致台灣西海岸地區之細顆粒粉土或細砂多呈灰黑色，成為台灣西部地區砂土重要之特性。而本研究主要使用之砂土取自於台灣西海岸雲林麥寮台塑六輕氣電一區工地之麥寮砂 (Mai Liao Sand, MLS)，其主要來自於附近的海床，採用水利填土方式填築，再以動力夯實之。

### 2.6.2 基本物理性質

張嘉偉 (1997) 以取自現地之麥寮砂 (細料含量 fine content, FC 為 15%) 所進行之基本物性試驗包括：比重、粒徑分析及不同細粒料含量下之最大與小乾密度和 X 光繞射分析等。本研究之細粒料定義為通過 200 號篩 (孔徑 0.074mm) 之材料。天然麥寮砂之塑性指數 (PI

值) 小於 5，屬於非塑性，歸類為粉土 (silty sand)。

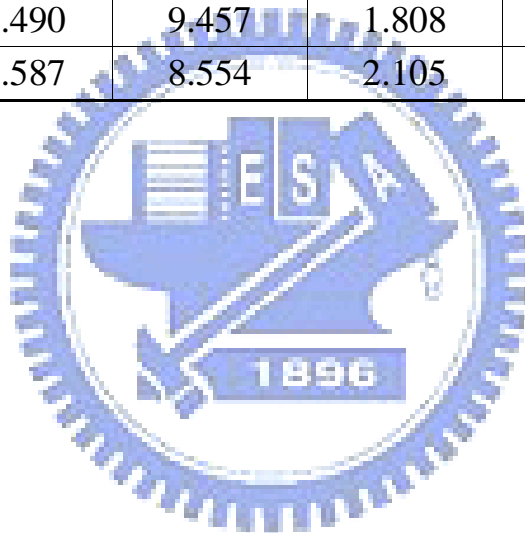
比重與粒徑分析皆依據 ASTM 之標準程序進行試驗，天然麥寮砂之比重為 2.69，麥寮乾淨砂 (FC<5%) 之比重為 2.61；圖 2.10 顯示天然麥寮砂之粒徑分佈曲線，根據土壤統一分類法 (USCS) 可分類為 SM 或 SP。電子顯微照片顯示天然麥寮砂之顆粒形狀多為次角形 (sub-angular) 與薄片形 (platy)。X 光繞射分析結果顯示麥寮砂之礦物成分除石英 (quartz) 外還有白雲母 (muscovite) 和綠泥石 (chlorite)。表 2.1 是麥寮砂 (MLS)、Quiou 砂 (QuS)、Toyoura 砂 (QS)、與 Ticino 砂 (TS) 的基本性質之比較。表 2.2 是不同細粒料含量的比重、最大乾密度與最小乾密度及最大孔隙比與最小孔隙比之表格。圖 2.11 是不同細粒料含量之最大孔隙比與最小孔隙比的關係圖。砂土之  $e_{max}$  和  $e_{min}$  受土壤顆粒之級配和形狀所影響，也受試驗方法之不同產生誤差 (Tavenas and La Rochelle, 1972)，因為細粒料含量之影響，使得 MLS、QuS 的  $e_{max}$  和  $e_{min}$  較 QS、TS 略大，又 MLS 之級配較 QuS 為佳，故其  $e_{max}$  和  $e_{min}$  較 QuS 小。

表 2.1 天然麥寮砂 (MLS)、Quiou 砂 (QuS)、Toyura 砂 (QS)、與 Ticino 砂 (TS) 的基本性質 (摘自 Almeida et al.,1991 ; Fioravante et al., 1991 ; Borden, 1991)

性質	麥寮砂 (MLS)	Quiou 砂 (QuS)	Toyura 砂 (QS)	Ticino 砂 (TS)
組成礦物	白雲母 (muscovite) 綠泥石 (chlorite) 石英 (quartz)	碳酸鈣 (CaCO <sub>3</sub> ) 石英 (quartz)	長石 (feldspar) 石英 (quartz)	矽(silica) 石英 (quartz)
D <sub>50</sub> , mm	0.125	0.72	0.16	0.53
D <sub>10</sub> , mm	0.065	0.14	0.13	0.36
C <sub>u</sub>	2.15	3	1.46	1.58
細料含量, %	15	4~20	0	0
G <sub>s</sub>	2.69	2.71	2.64	2.69
顆粒形狀	次角形 (sub-angular) 薄片形 (platy)	次角形 (sub-angular)	次角形 (sub-angular)	次角形 (sub-angular) 角形 (angular)
e <sub>max</sub>	1.058	1.281	0.977	0.931
e <sub>min</sub>	0.589	0.831	0.605	0.579
φ <sub>crit</sub> '	31.6°	-	-	-

表 2.2 麥寮砂不同細粒料含量的基本物性 (張嘉偉, 1997)

細料含量 , %	最大乾單位 重, $\text{kN/m}^3$	最小乾單位 重, $\text{kN/m}^3$	最大孔隙 比, $e_{\max}$	最小孔隙 比, $e_{\min}$	$G_s$
0	15.559	12.047	1.123	0.644	2.61
6.3	16.128	12.106	1.169	0.628	2.68
15	16.608	12.822	1.056	0.587	2.69
20	16.353	12.547	1.085	0.600	2.67
22.5	16.412	12.243	1.121	0.582	2.65
30	16.480	11.968	1.211	0.606	2.70
40	16.883	11.772	1.256	0.573	2.71
50	17.001	11.517	1.306	0.562	2.71
60	15.490	9.457	1.808	0.715	---
80	14.587	8.554	2.105	0.823	---



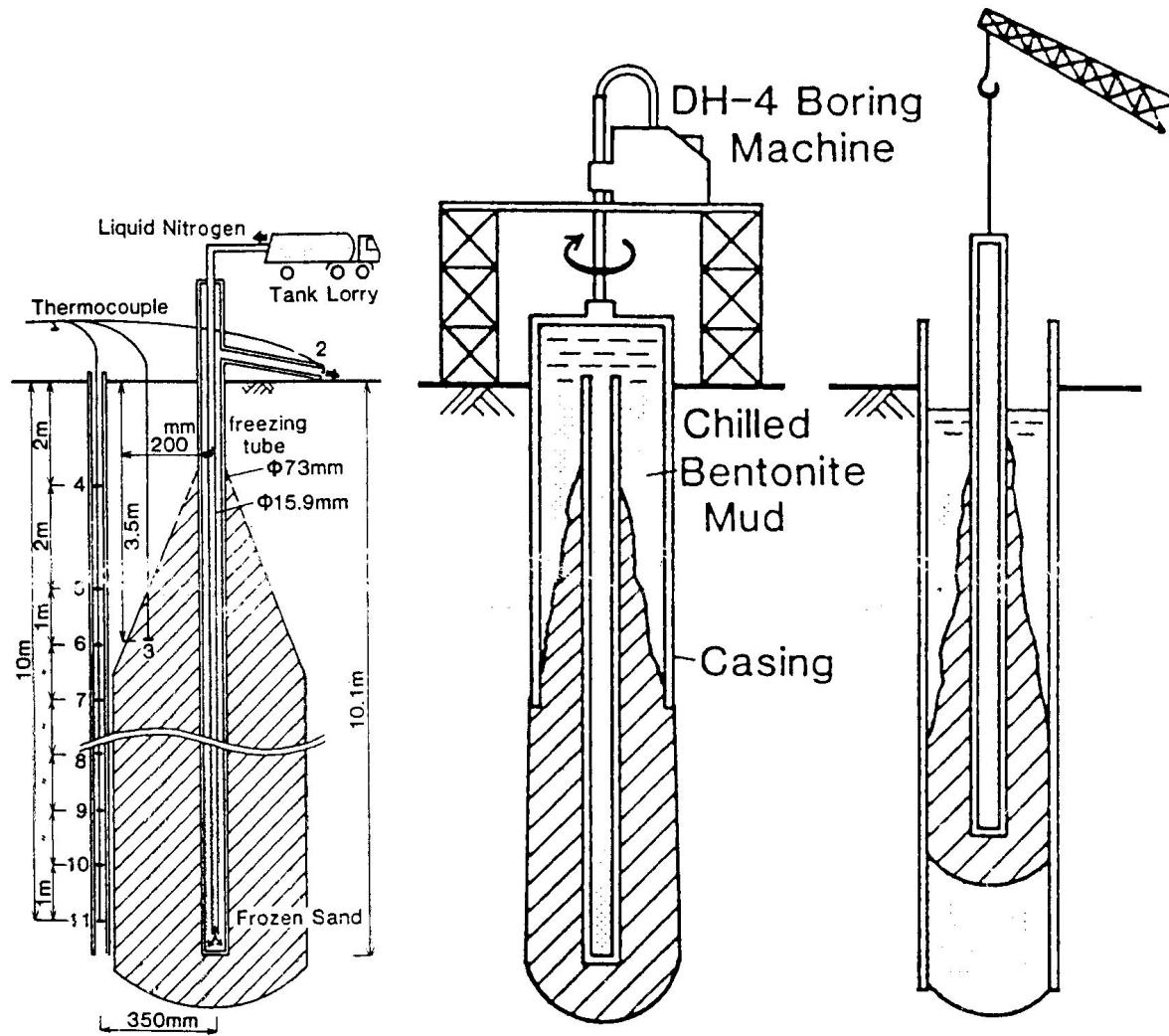


圖 2.1 Freezing and sampling procedure (摘自 Yoshimi et al., 1984)

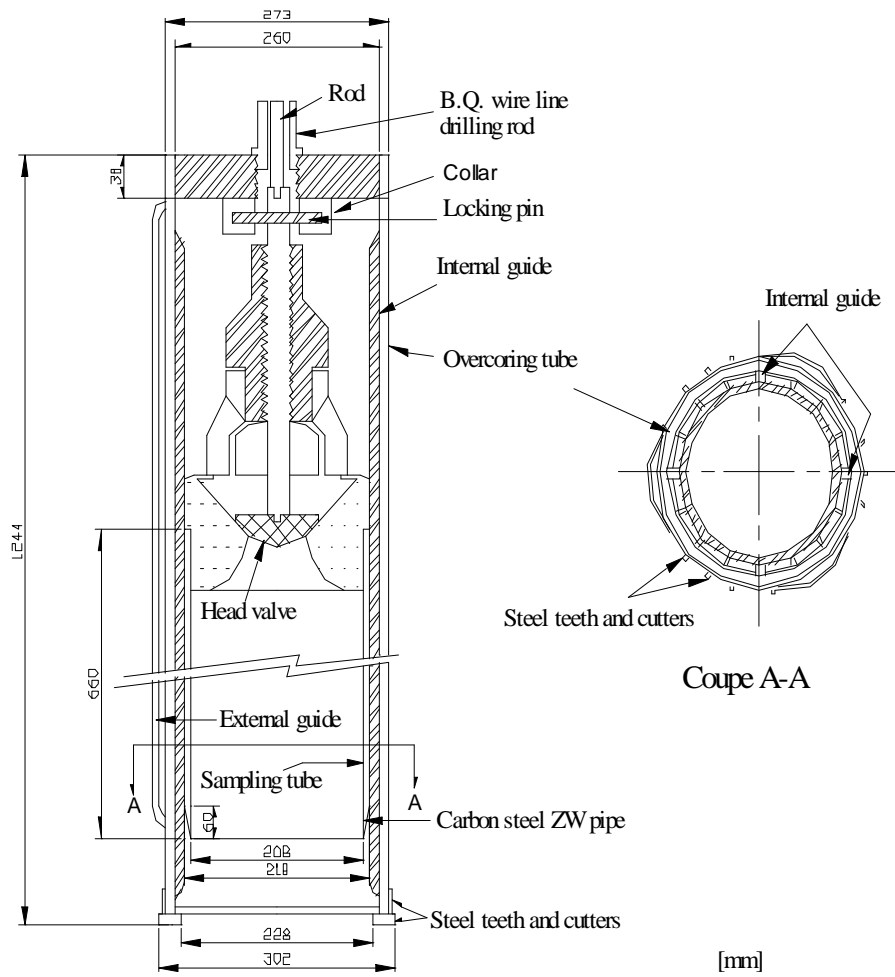


圖 2.2 Laval sampler 示意圖 (摘自 La Rochelle et al., 1981)

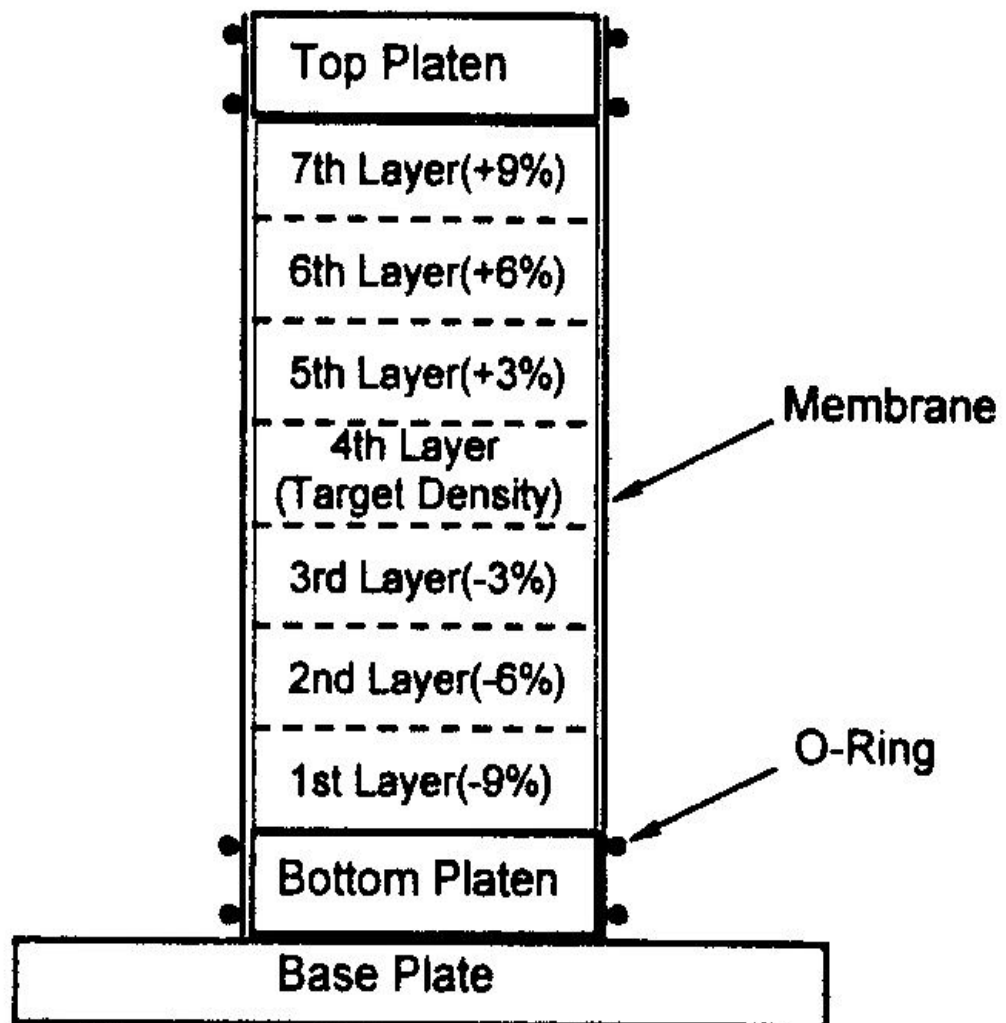


圖 2.3 moist tamping with under-compaction ratio of 3% (摘自 Frost and Park, 2003)

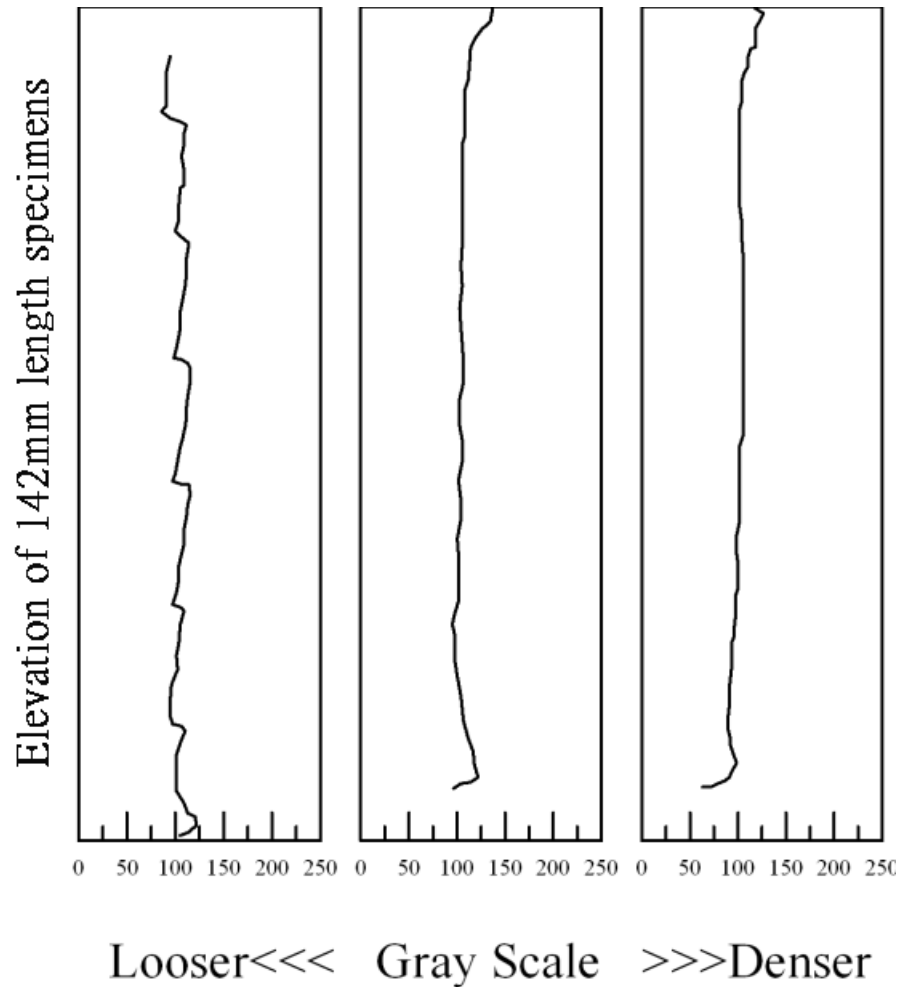


圖 2.4 由左而右分別為 MT/AP/WP 試體均勻性經 X-ray 影像分析之結果  
 (摘自 Frost and Park, 2003)



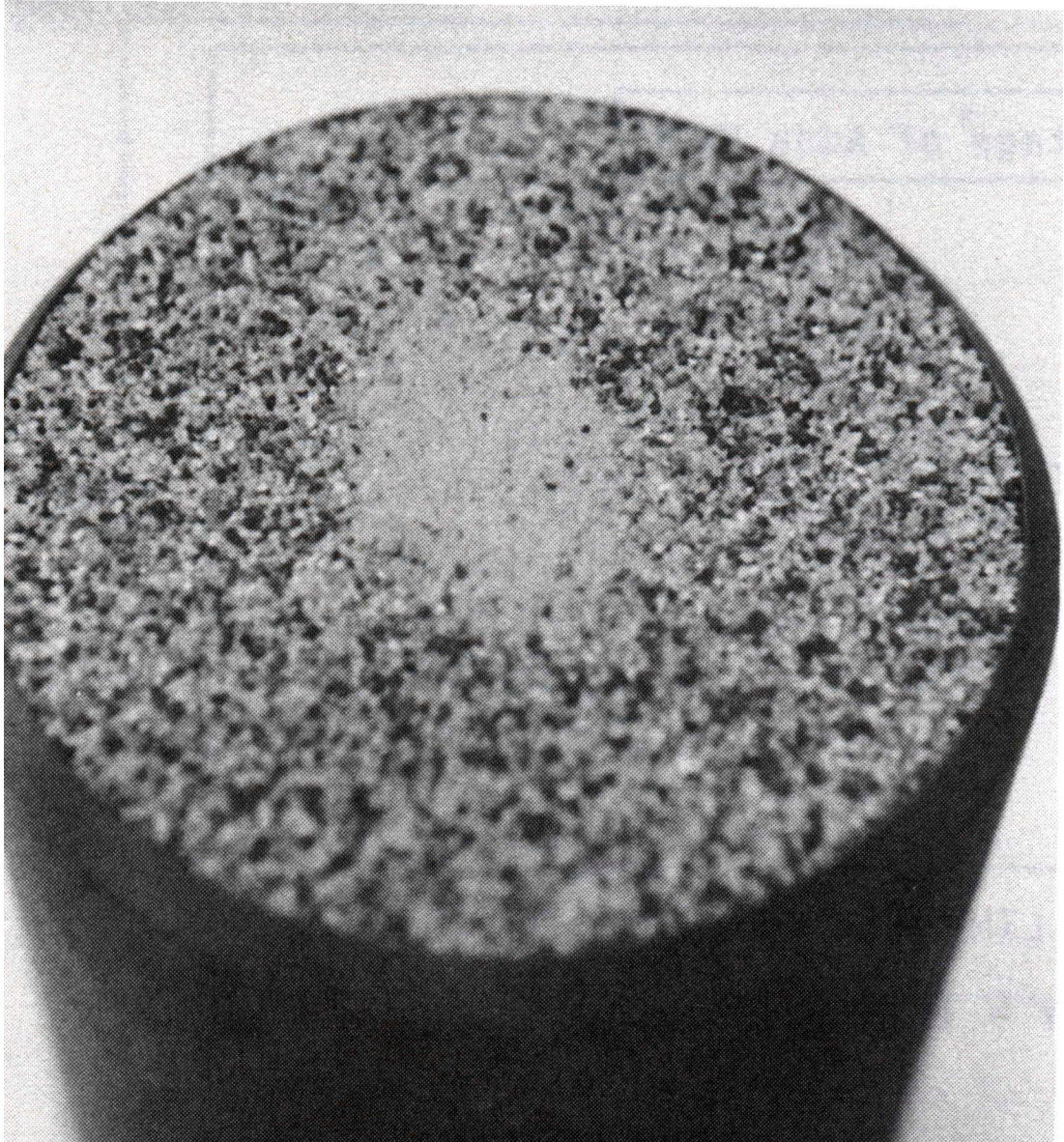


圖 2.5 粉土質砂土以固定式貫落方式所形成之粉土柱 (摘自 Lo Presti et al., 1992)

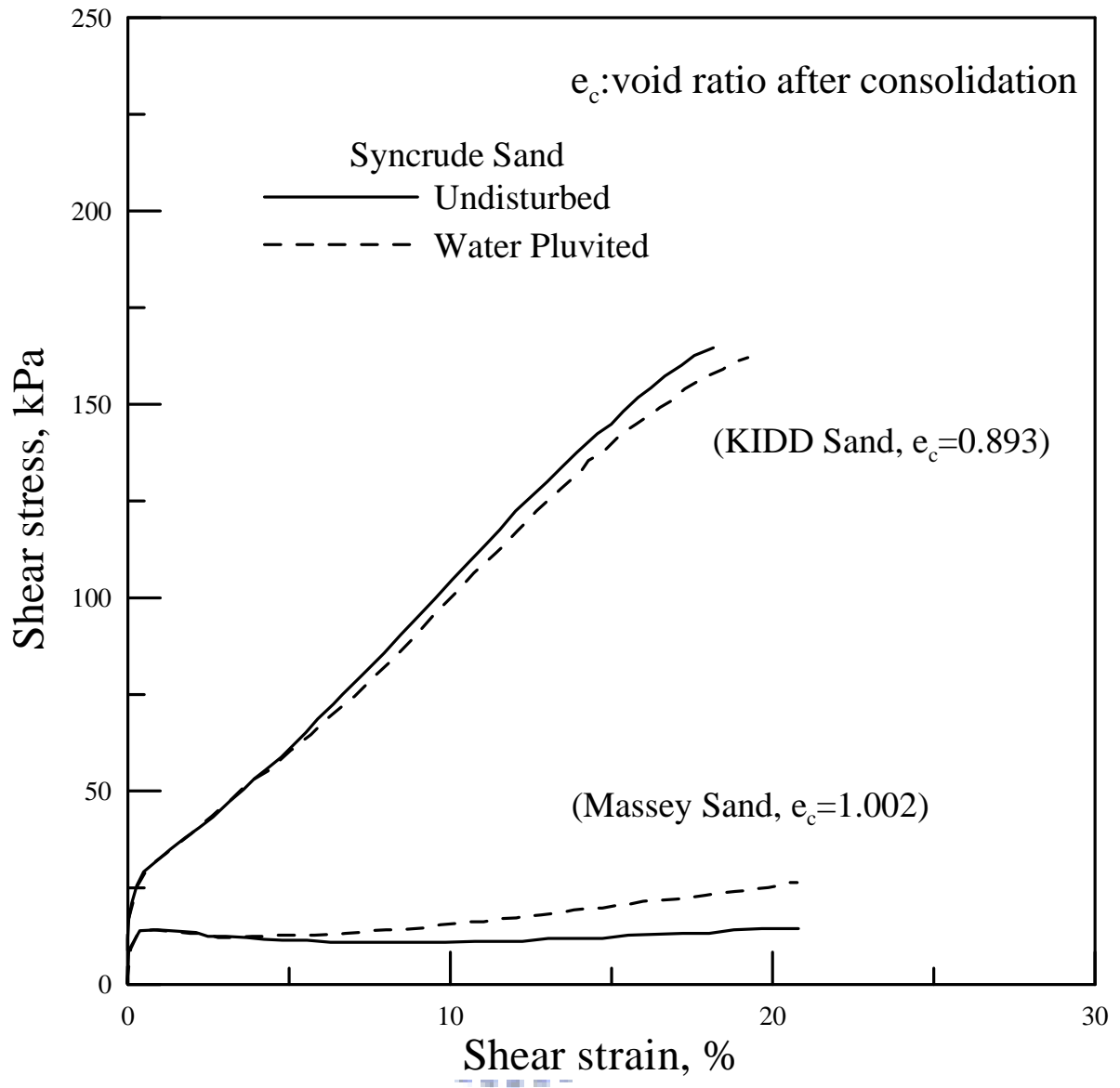


圖 2.6 非擾動試體（冰凍）與 WP 試體之不排水單剪試驗反應（改繪自 Vaid et al., 1999）

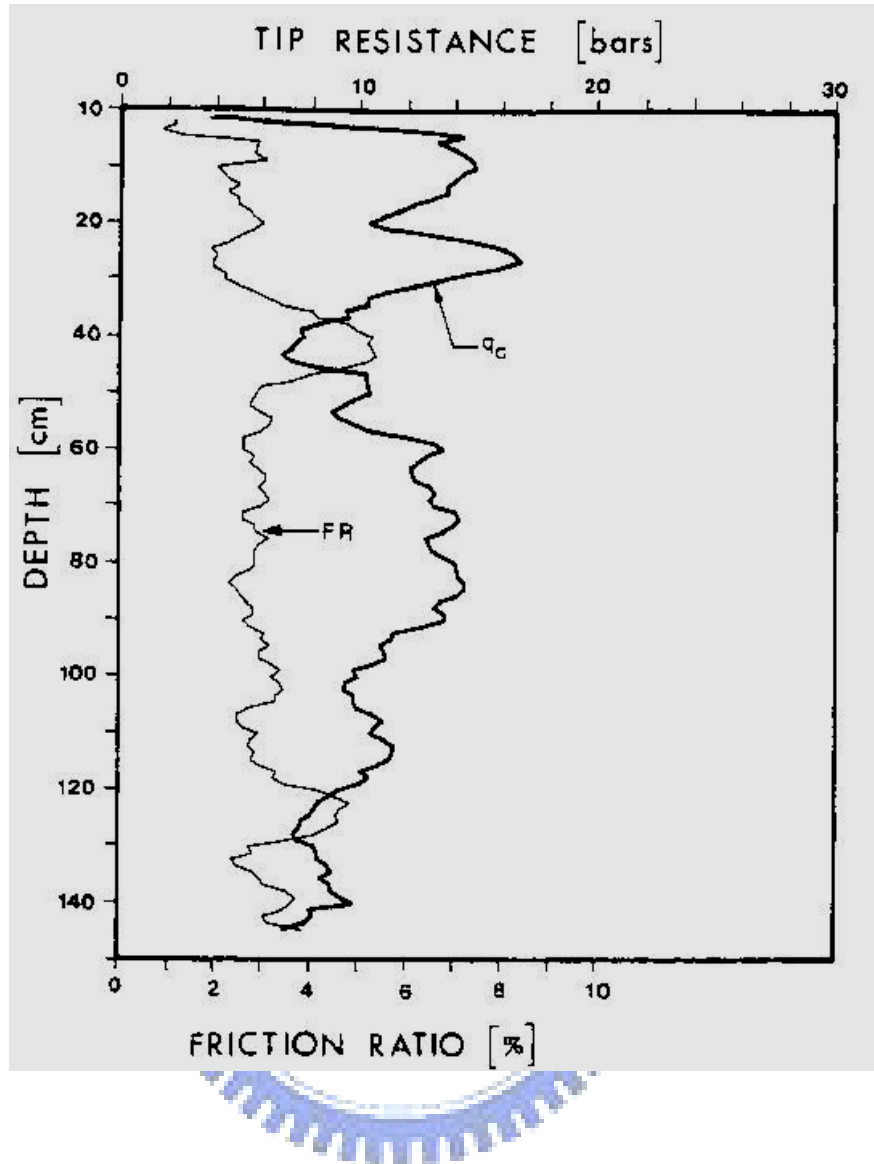


圖 2.7 CPT 標定試驗結果（泥漿壓密法，圍壓= 100 kPa，摘自 Rahardjo，1989）

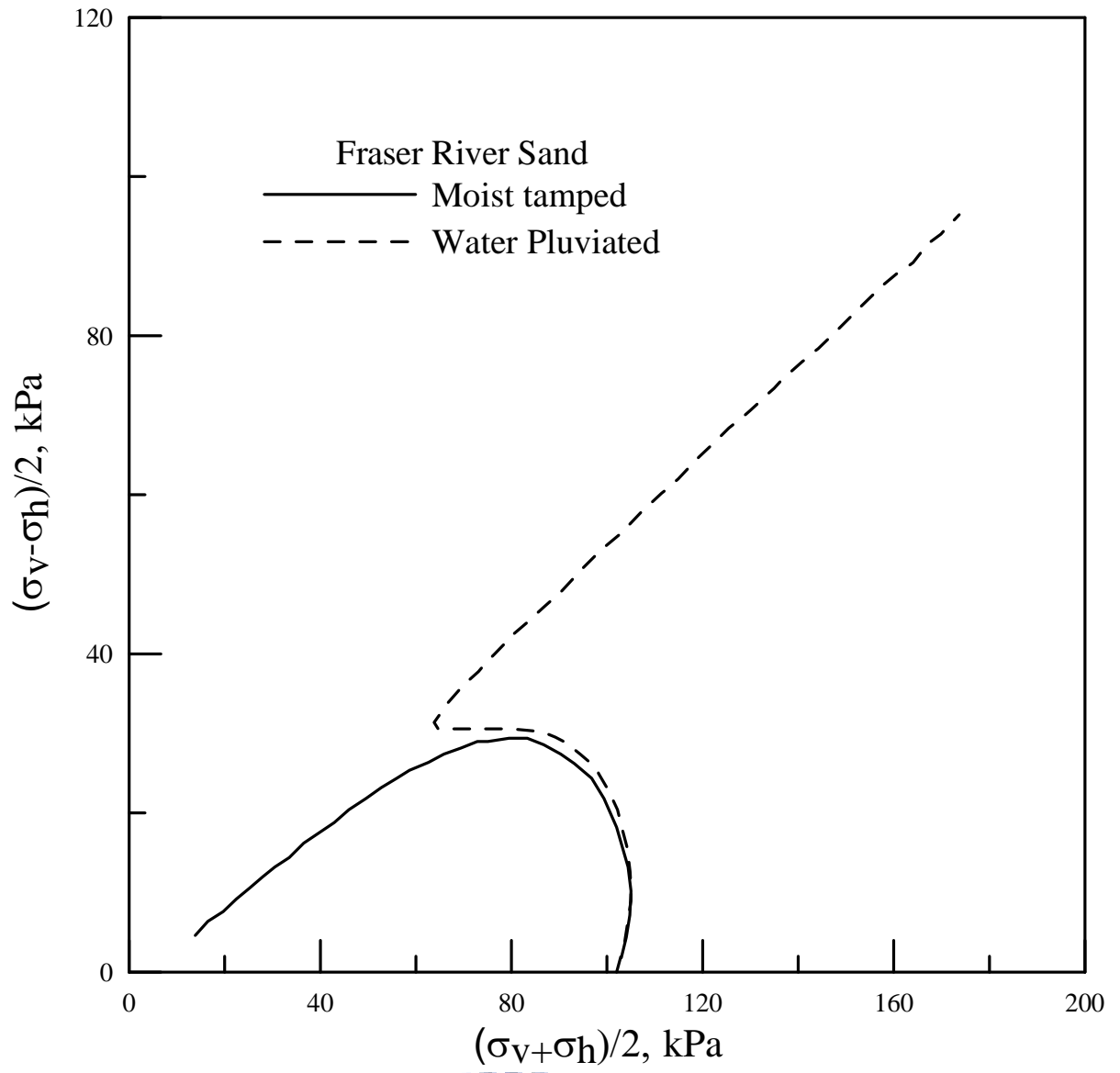


圖 2.8 不排水三軸試驗反應 (改繪自 Vaid et al., 1999)

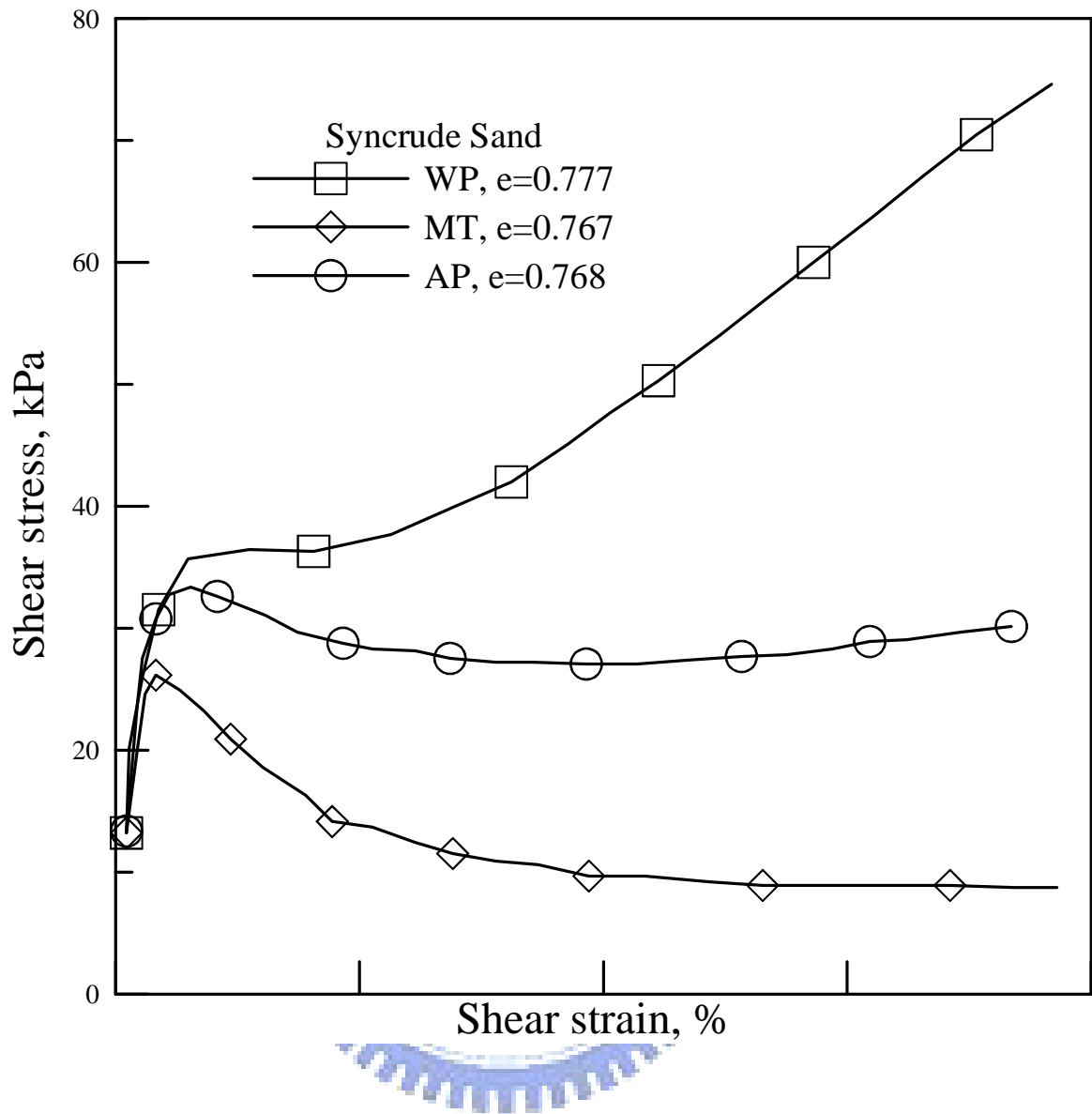


圖 2.9 Undrained simple shear response (改繪自 Vaid et al., 1999)

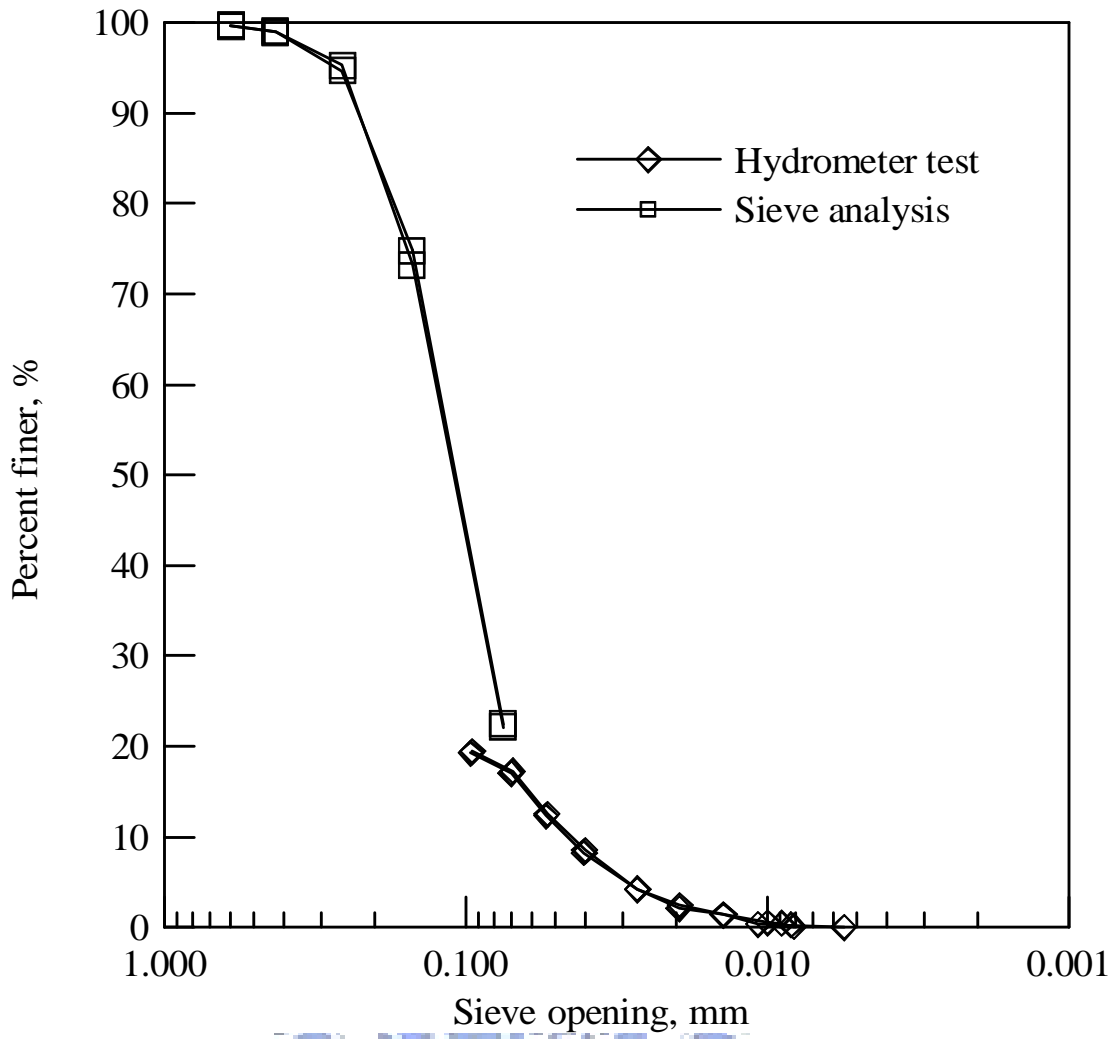


圖 2.10 天然麥寮粉土細砂之粒徑曲線 (摘自張嘉偉, 1997)

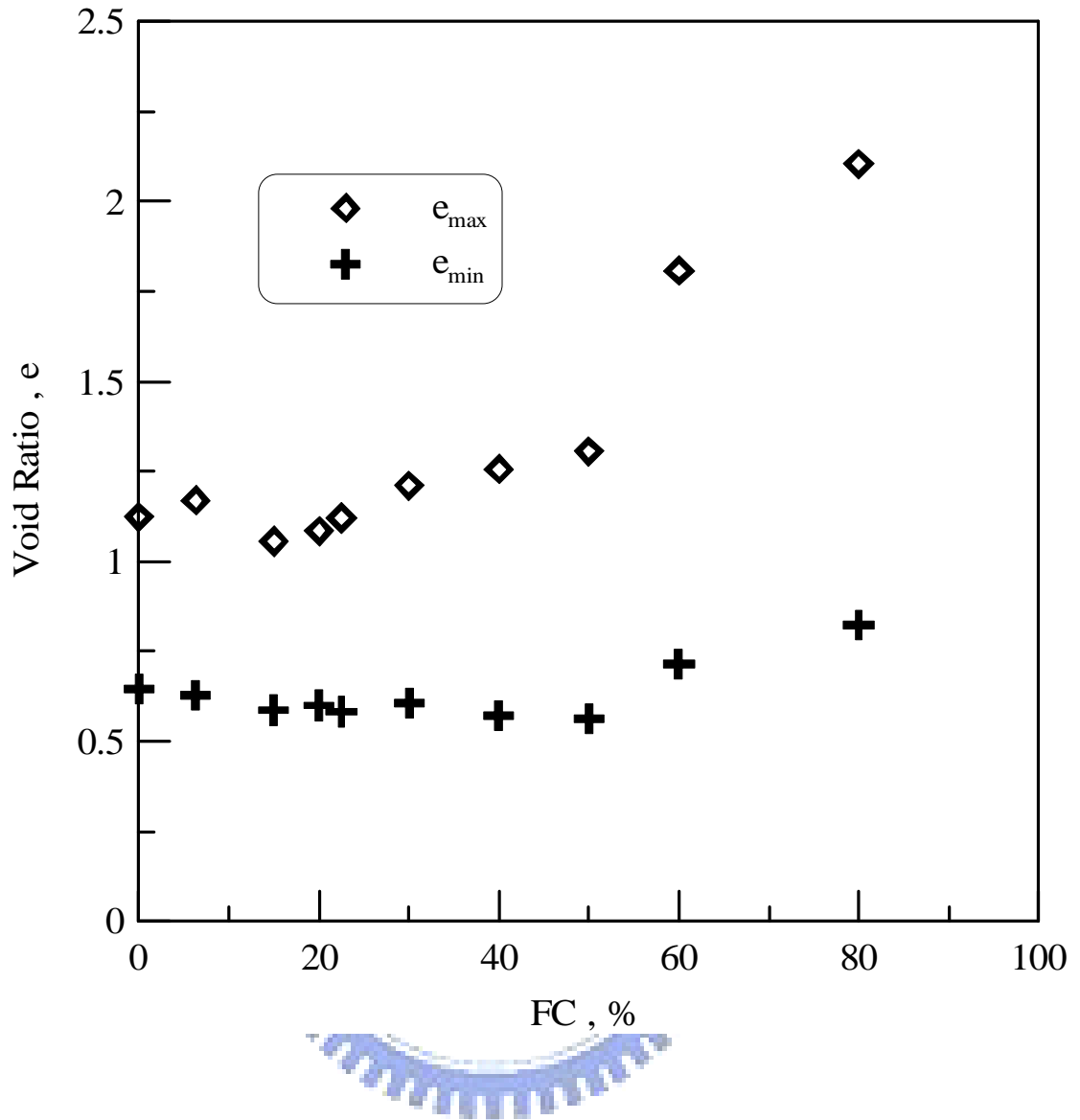


圖 2.11 麥寮砂細粒料含量與最大、最小孔隙比之關係 (摘自王統立, 2000)



## 第三章 試驗規劃

本研究之規劃是由濕噴法 (wet spray, WS<sub>P</sub>) 試體製作儀器之研發。濕噴法試體製作設計過程中需針對下列情況加以評估

1. 固定式賈落器之顆粒析離問題。
2. 乾砂賈落法之土壤組構對現地環境的模擬的適當性。
3. 水中賈落法形成層次問題。
4. 應用於大型試體製作之可行性。

以賈落法及泥漿沉積法之概念，研發濕噴法試體製作儀器與流程。檢核該法是否為具有重複性且能製作出不同相對密度之試體之均勻試體。確認可行性後，進行靜/動態三軸試驗，並將其結果與 Huang et al. (2004) 所採用之濕夯法、乾置法與水中沉降法之試驗結果進行比較。

### 3.1 濕噴法試體製作系統

本系統主要設備包括砂土賈降器及水霧濕潤系統兩部分。透過系統的結合使砂土在賈落過程中通過一個「水霧區」(water spray zone)，讓粗細顆粒經水霧濕潤後，砂水顆粒再通過一層位於沉積砂土層上方之水膜 (film of water)，沈降於試體模中。濕噴法砂土賈降器與以往賈落器之差異在於透過氣流帶動，使不同粗細顆粒砂土在賈降過程中以相近終端速度下落。水霧濕潤系統在砂土賈降過程中以均勻水霧包覆粗細顆粒使其與水霧顆粒相互沾粘形成顆粒尺寸均勻之砂水顆粒避免賈降過程中因顆粒大小不同導致下落之終端速度各異之顆粒析離情



況。濕噴法示意圖如圖 3.1

### 3.1.1 砂土實降器

在本研究開始時之砂土實降器（設計一）儲砂桶中帶動砂土概念是採用白努利定理設計（如圖 3.2）。將中間通有氣壓流動之鋼管於側壁鑽孔，此時通過鑽孔處之氣流將在鋼管內側形成一負壓區，吸引鑽孔側附近砂土顆粒帶入鋼管中並隨中心氣流實降，以加壓氣流帶動砂土的流動與補充。

經幾次試驗後，發現此設計雖在氣流帶動顆粒概念上可行，但實際操作上由於鑽孔側所形成負壓區壓力不穩定常發生於砂土槽內形成空心錐情形。隨空心錐與大氣接觸形成氣流通路如圖 3.3，減弱之負壓吸力無法將砂土帶入鋼管中心，導致吸入鑽孔內之砂土量不固定，砂土實落量有著明顯時間變異性。

改良後的實降器（設計二）仍延續氣流帶動概念，唯出砂口修正為環狀放射（如圖 3.4），消除儲砂槽內砂土停滯狀態，改善了實降過程的順暢程度。同時環狀落下的砂土顆粒有著在水平面上散佈較均勻之優點，兩者之比較如圖 3.5。對直徑 70mm 之三軸試體模來說，自內徑 50mm 環形出砂口落下之砂土顆粒較集中的單一 20mm 直徑圓形出砂口更有利於後段實降過程水霧顆粒的包覆。

砂土實降器之設計以 PVC 管作為實落器側壁頂端以同材質管帽封閉。其中心處鑽孔供中心螺桿後端氣流接頭出露。如圖 3.6、圖 3.7 所示，中心螺桿上旋有一對黃銅螺絲控制管帽/側壁可供移動之距離。當底端封閉時，此移動距離即為控制管帽/側壁抬昇上限值，同時控制了

環狀底部出砂口開口的大小。於試體製作之前調整上黃銅螺絲與管帽相距螺紋數目，藉以控制出砂口開口大小到預定的出砂量。中空螺桿內部通路設計可通入氣壓，藉以調整與砂土混合之氣流大小。於中空螺桿前端置入一六角金屬接頭與中空螺桿內接。使氣流自兩者之間之小扇形部分流入。氣流自漏斗面窄端往寬端流動並由環形開口輸出，同時帶出砂土顆粒。氣流帶動可使砂土中之粗細顆粒以一初始速度貫降而非自由落體貫落，減少可能造成的顆粒析離。由於實際貫砂開口是在側方向，貫落過程中砂土顆粒受氣流帶動方向將是平行漏斗面，因此在實際貫砂口之外圍另外加裝一內徑 55mm 之 PVC 管作為限制阻擋用。見圖 3.8。

### 3.1.2 水霧濕潤系統

本研究中所採用的水霧濕潤系統包括後端儲水槽（尺寸）、空壓機、壓力錶配合定流量噴嘴來製造出顆粒均勻之水霧。噴嘴使用中日噴霧公司所製作的 J-Type006 噴嘴。規格如表 3.1。將噴嘴鎖入鋁製接頭以螺絲與螺桿相固定亦可藉螺絲調整鋁製接頭控制噴嘴中軸與地面夾角如圖 3.9，使噴出之水霧覆蓋砂土顆粒下落之路徑。貫降砂土自貫降器出砂口脫離後即與自兩側所散佈之均勻水霧接觸，並為其所包覆成為整體的砂水混合顆粒，整體設置如圖 3.10。

## 3.2 定案之濕噴法試體製作流程

本節敘述濕噴法試體製作之操作流程

### 1.砂土貫降器之架設

調整抬昇間距後，自出砂口端填入試驗用砂與實降器內部氣流出口等高，控制各次實降時內部儲砂量相近。將漏斗窄端金屬接頭旋入六角接口使漏斗尾端與 PVC 管封閉。調整通入實降器內之氣壓大小至目標值（10kPa）並穩定後，即完成砂土實降器之準備。如圖 3.10、圖 3.11。

## 2.水霧濕潤系統之組裝

水霧濕潤系統的組成主要包括儲水槽、加壓閥、噴嘴三部分。於試體製作前，儲水槽內之儲水需先行除氣（deair）。此步驟可降低試體製作完成後之飽和度受水中所溶氣體之影響。同時，噴嘴角度調整確保各次噴洒之範圍相同（與地面夾  $60^\circ$ ）。調整加壓閥輸出氣壓大小至目標值（392kPa）並穩定，此時單一噴頭輸出流量為 80c.c/min，即完成水霧濕潤系統之準備。

## 3.三軸底座與試體鋼模準備

試體開始製作之前必須確認底部排水管路為封閉不排水狀態，且管路內充滿除氣水，並於模具中加入 30mm 厚的除氣水，預先製造出一層薄水膜作為實降之砂水混合體沉降用。

## 4.濕噴

將砂土實降器定位於三軸底座正上方圓心相互照準，開啟水霧濕潤系統噴洒水霧（儀器設置如圖 3.12），抬昇實降器側壁使實降器內呈環狀出砂口。開始實落砂土如圖 3.13，待實降器內砂樣落盡後即完成第一階段實降，檢視水膜厚度視情況關閉濕潤系統。同上所述，再次填充實降器內砂土。此時於三軸底座鋼模外側包覆透明投影片作為試體模延伸段。裝置完畢後，再次進行濕噴的程序直到試體高度高於試體

模 30mm 以上停止，如圖 3.14。所示額外製作的 30mm 試體於緊密化完成後刮除可避免實際試體頂部發生沉積土樣顆粒析離之狀況。

### 5. 試體的緊密化

開啟底部排水閥門待試體排水完畢(底部不再排出水)後關閉。圖 3.15 顯示排水完畢後砂土沉積頂端細顆粒沉積狀況。於鋼模外側逕行敲打以緊密試體。跟據 Vaid and Negussey (1988) 當試體初始沉積時為均質且疏鬆狀態，敲打激發超額孔隙水壓能均勻的調整試體整體的緊密程度。緊密化後刮除高於試體模之多餘砂土並整平試體頂面。

## 3.3 濕噴法試體檢核

檢驗旨在確認以下三項

1. 濕噴法試體製作過程中之各項反應對可控制變數之重複性。

於濕噴過程中，控制變數包括有氣流與水霧系統噴洒之壓力與開口高度/大小反應則為霽降強度與實際洒水量等針對不同變數之組合測試實際反應之重複性。

2. 試體之均質性

Kuerbis and Vaid (1988) 對 SD 法試體的均質性檢核是分別對 WP/SD 試體依高程切片分四層做孔隙比/粒徑分佈的分析。本研究中除改分五層外，另改以細粒料含量 (fines content, FC) 作為顆粒析離之檢核，同時針對水平方向的 FC 也予以測量。

3. 試體之重複性

Kuerbis and Vaid (1988) 對 SD 法試體的重複性檢核是對相同孔隙比之試體進行單向載重之三軸試驗並觀察其不排水狀態下之反應。本研

究則另行施做動態三軸試驗以相同 CRR 下之 load cycle 數 (NC) 作為評估之依據。

### 3.4 剪力波元件試驗設備

#### 3.4.1 剪力波元件 (Bender Element)

研究使用壓電陶瓷晶片剪力波元件 (piezoelectric ceramic bender element) 量測剪力波速，本研究所使用之壓電陶瓷晶片為構自 GEONOR A/S 公司，型號 A-118，極化電壓為 10V 尺寸大小為 14.5×12×1mm，將切割成合適大小的 bender element 事先覆以熱固膠作為防水之用再以 Araldite 環氧樹脂 (AB 膠) 嵌入三軸室試體上下頂蓋中，凸出透水石約 1/3 元件長 (約 4mm)。如圖 3.16

#### 3.4.2 函數產生器 (Function Generator)

主要功能在於產生單一週期正弦波，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。本試驗所使用之函數產生器是由惠普公司出產，型號為 HP33120A，函數產生器可輸出五種波形：正弦波、方波、三角波、斜波及 Random wave，可由預先定義之五種波型中任選一種使用，或自行撰寫程式設定波形，可輸出單一週期波型或輸出連續波；輸出頻率範圍為 10  $\mu$ Hz~15MHz；輸出之振幅範圍視目前所選用之波形函數和輸出端而定，本試驗使用正弦波輸出端為 50 $\Omega$ ，輸出振幅為 10Vpp。

#### 3.4.3 剪力波訊號擷取系統

當上蓋觸發一正弦波後，採用示波器或電腦接收訊號，並記錄之，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（channel）及一個觸發同步信號通道（目的在觸發時間原點），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。系統示意圖如圖 3.17

### 3.5 動態三軸試驗設備

動態三軸試驗裝置之主要功能是進行軸向應力控制之反覆荷重三軸試驗，以決定試體受反復荷重情況下之反覆阻抗比（Cyclic Resistance Ratio, CRR），本試驗採用交通大學大地工程實驗室自行研發之動態三軸試驗設備。相關設備包含三軸室、反覆荷重加載系統、軸壓控制系統、氣壓及水壓控制系統、量測設備及訊號擷取系統。

#### 3.5.1 量測系統

量測系統主要包括壓力量測、軸向應變及軸向荷重量測三系列其中壓力量測(室壓、孔隙水壓、氣囊壓力)採用可耐壓 1400kPa 水壓計（Pressure Transducer）、軸向應變之量測使用 Linear Variable Differential Transformer (LVDT)，可量測 50mm 之變形軸向荷重量測使用沉水式荷重元（Load cell），將之置於三軸室頂部此荷重元用於量測軸向荷重可達 5kN，此荷重元內部充滿除氣油，在其上方有一栓塞，當任何力量作用於荷重元，便會使栓塞向下移動並引發荷重元內

產生等量的油壓，如此荷重元將只反應軸差應力，而不受圍壓所影響。

### 3.5.2 訊號擷取系統

本試驗於進行時，主要量測 Load cell、LVDT 及 3 個 Pressure Transducer（室壓、孔隙水壓、氣囊壓力）之變化值。因此各量測元件感應器（sensor）所量測到的電壓值所輸出的類比訊號透過端子版 (PCLD-8115) 經 AD 卡 (81601) 轉換為數位訊號傳輸至電腦，配合 LabVIEW 程式，可即時處理 Load cell 所傳回之訊號做應力伺服控制，同時並記錄所有感應器之訊號。

### 3.5.3 氣壓與水壓控制系統

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

### 3.5.4 反覆荷重加載系統

反覆式應力試驗加載系統均採用一具高解析度及高扭力電磁感應驅動馬達，即俗稱之步進/伺服馬達（Dynaserv DR 1100E）。馬達重量達 26 kg，最大扭力為 100 N-m，最大軸向抗壓為 4087 kg，最大軸向抗拉為 2044kg，此馬達解析度為每轉 614400 步。可由步進的數目或伺服應力的大小控制旋轉的方向與速度乃至於試體受力之大小與變形速率，因此相當適合施做需精確控制反覆荷重之應力試驗。

進行三軸試驗時，需將步進/伺馬服達結合高精密度滾珠螺桿 (ball screw) (THK BIF 2005) 及栓槽軸 (THK LBF 25T)，使馬達的旋轉動能轉變為線性動能。其線性運動組合原理如圖 3.18 上部所示，滾珠螺桿固定於馬達圓盤上，滾珠螺桿再與栓槽軸結合，並將栓槽軸固定於馬達外罩底盤，依此順序將各元件結合，若將三軸室荷重桿與栓槽軸接合，便可進行上下反覆式三軸試驗。

### 3.5.5 軸壓控制系統

試驗垂直向反覆荷重加載主要由馬達所產生，透過撰寫 LabView 程式使馬達卡 (NI PCI-7344) 傳送數位訊號至 terminal board (NI UMI-7764)，再將訊號傳輸至馬達驅動器驅使馬達產生旋轉動能，可由程式控制馬達伺服應力及方向；進行應力回饋控制試驗時，由於馬達卡本身便具有微處理器，由電腦傳送訊息至馬達卡後，馬達卡本身便可進行回饋計算，因此若在同一台電腦同時進行馬達控制及試驗資料記錄，對於紀錄的速度並不會有何任影響。

### 3.6 單向載重三軸試驗設備

本研究中所採用之荷重加載設備與前節所述之動態三軸試驗設備僅於使用的三軸室尺寸及馬達控制上有些許差異。當進行單向載重三軸試驗時馬達每 1mm 之移動，使用步進加載系統可分成約 120945

( $614400 \times 5 / 25.4$ ) 步控制，因此有足夠之解析度在所需之應變範圍內進行試驗。本研究中所採用之不排水靜態三軸試驗剪動速率為 0.15mm/min。



訊號擷取系統採用四台 6.5 位數、22bit 具高訊號穩定度萬用數位電表 (Agilent HP 34401A)，將四個 sensor (LVDT、Load cell 及兩組 Pressure Transducer) 所輸出的類比訊號透過電表轉換為數位訊號，再將四台電表訊號並聯之後透過 GPIB 介面 (General Purpose Interface Bus) (NI GPIB-USB-B) 經電腦 USB Port 傳輸至電腦，配合 LabVIEW 程式，可即時且高精度的量測到應變控制試驗中資料的變化，進行處理和紀錄。



表 3.1 中日噴霧 J-006 規格

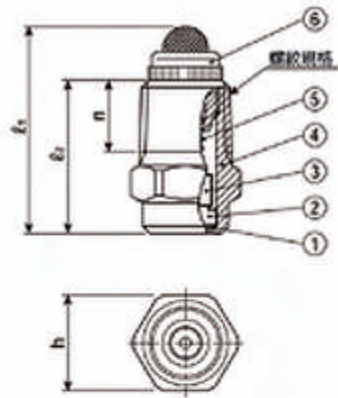
**J系列**

J系列	
構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>●噴口座及塞柱均係使用陶瓷製成。</li> <li>●各部均可分解。</li> <li>●全部形號均配備濾網</li> </ul>
材質	<ul style="list-style-type: none"> <li>●金屬部分為B(黃銅)或S303。</li> <li>選擇材質 為S316</li> </ul>

系列	螺紋規格	外形尺寸(mm)				重量(gr.)	
		ℓ1	h	n	φd	B	SUS
J	1/4M	30.4	22.5	14	10.5	18.5	17.5

(注意事項) 隨圖號與材質不同，外觀外形尺寸可能有若干差異。



①墊片(PTFE) ②陶瓷噴口 ③陶瓷塞柱 ④本體  
⑤彈簧(SUS304) ⑥濾網(SUS304)

噴量級分	螺紋規格	噴 角			噴 量(ℓ/min)									平均粒徑(μm)	異物通過徑(mm)	濾網網目
		0.1 MPa	0.2 MPa	0.5 MPa	0.1 MPa	0.15 MPa	0.2 MPa	0.3 MPa	0.5 MPa	0.7 MPa	1 MPa	1.5 MPa	2 MPa			
006	1/4M	—	—	70°	—	—	—	0.07	0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	130	0.2	200
008		—	—	70°	—	—	—	0.09	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	140	0.2	200
010		—	70°	65°	—	0.09	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.24	0.28	160	0.3	200
012		—	70°	65°	—	0.10	0.12	0.14	0.18	0.21	0.25	0.29	0.33	190	0.3	200
015		—	70°	65°	—	0.13	0.15	0.18	0.23	0.26	0.31	0.37	0.42	170	0.3	200
020		60°	70°	65°	0.14	0.17	0.20	0.24	0.30	0.35	0.41	0.49	0.56	∩	0.3	200
025		65°	70°	67°	0.18	0.22	0.25	0.30	0.38	0.44	0.51	0.61	0.70	230	0.3	200
030		67°	70°	68°	0.22	0.26	0.30	0.36	0.45	0.52	0.61	0.73	0.83	220	0.4	150
040		67°	70°	68°	0.29	0.35	0.40	0.48	0.60	0.70	0.82	0.98	1.11	∩	0.4	150
050		68°	70°	68°	0.36	0.44	0.50	0.60	0.75	0.87	1.02	1.22	1.39	290	0.5	150
060		68°	70°	68°	0.43	0.52	0.60	0.72	0.90	1.05	1.23	1.47	1.67	280	0.5	150
070		68°	70°	68°	0.51	0.61	0.70	0.84	1.05	1.22	1.43	1.71	1.95	∩	0.6	150
080		68°	70°	68°	0.58	0.70	0.80	0.95	1.19	1.38	1.61	1.92	2.18	350	0.7	150
100		68°	70°	68°	0.72	0.87	1.00	1.19	1.49	1.72	2.01	2.40	2.72	∩	0.7	100
120	68°	70°	68°	0.87	1.05	1.20	1.43	1.79	2.07	2.42	2.88	3.27	∩	0.8	50	
140	68°	70°	68°	1.01	1.22	1.40	1.67	2.09	2.41	2.82	3.36	3.81	440	0.9	50	

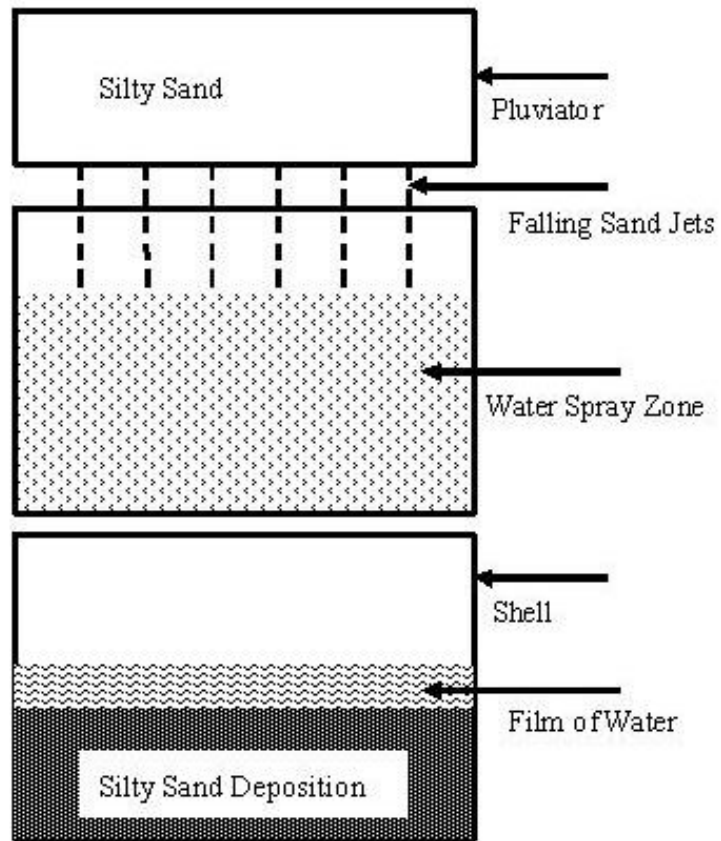


圖 3.1 標定槽濕噴法設計概念示意圖

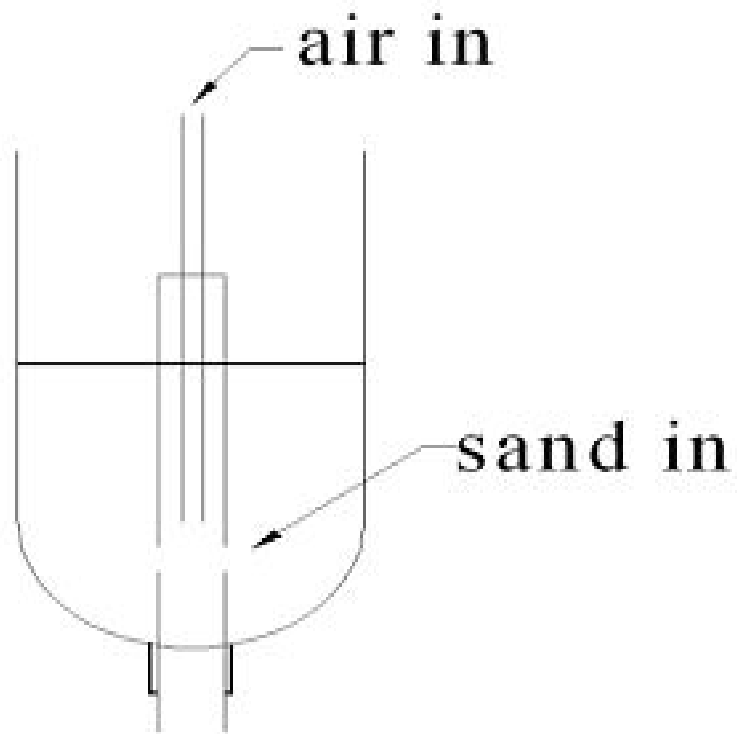


圖 3.2 砂土實降器（實心實砂口）設置示意圖



圖 3.3 實砂口形成空心錐與大氣相連



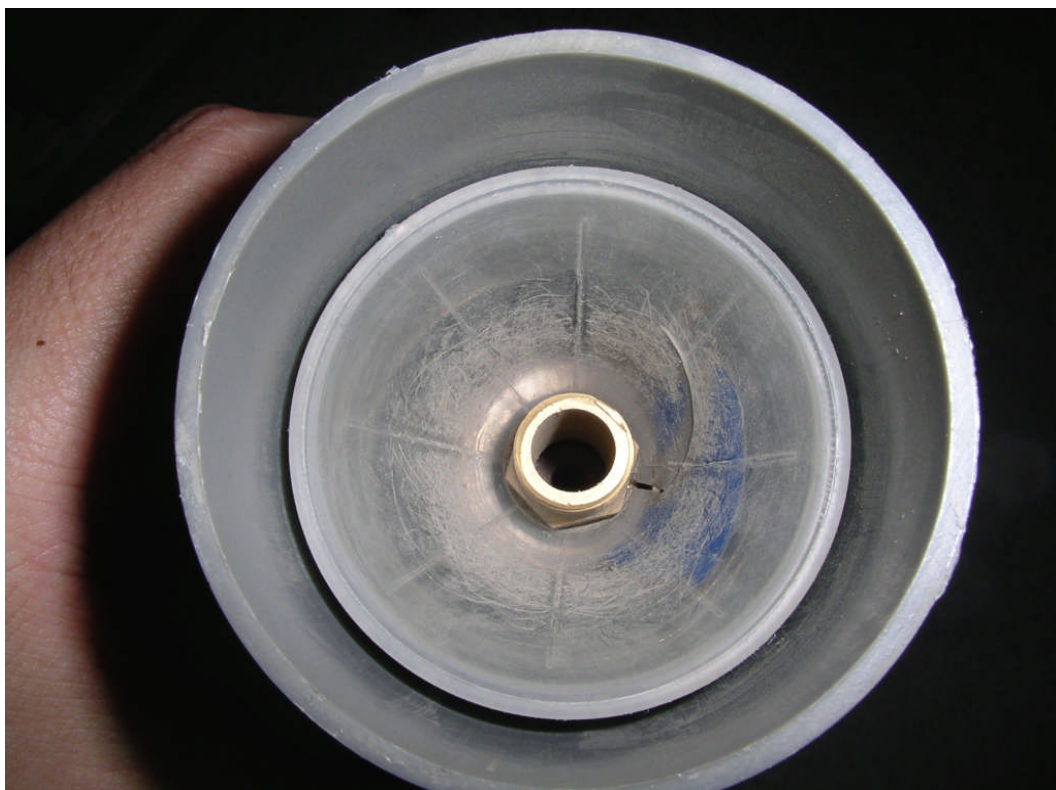


圖 3.4 環狀放射出砂口

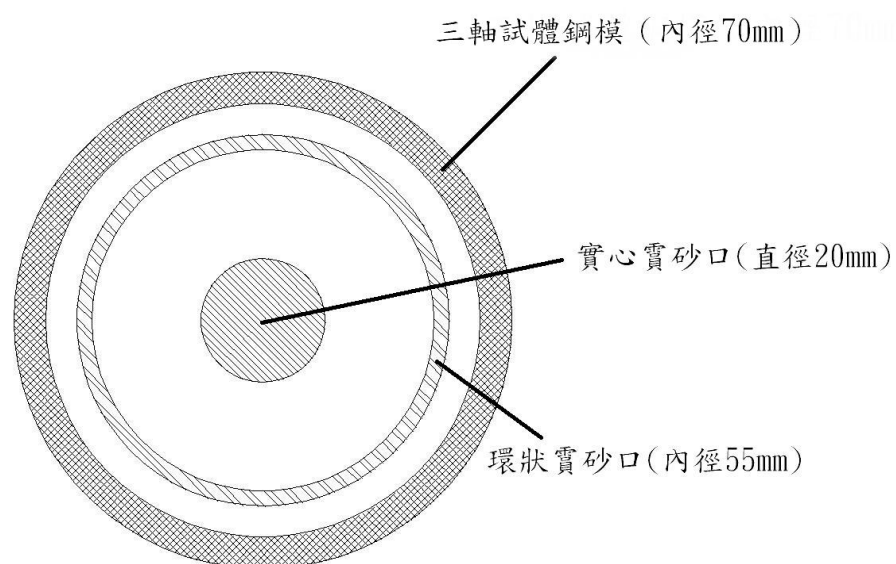


圖 3.5 實砂口與試體鋼模之空間分佈

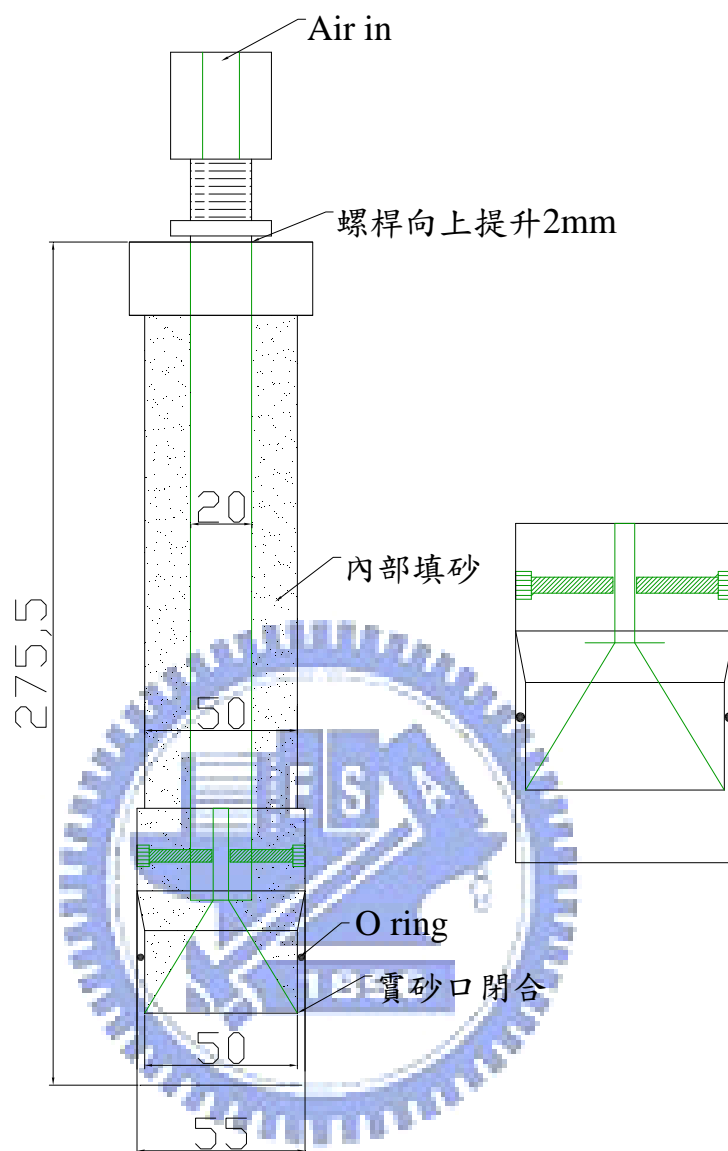


圖 3.6 底端封閉之實降器

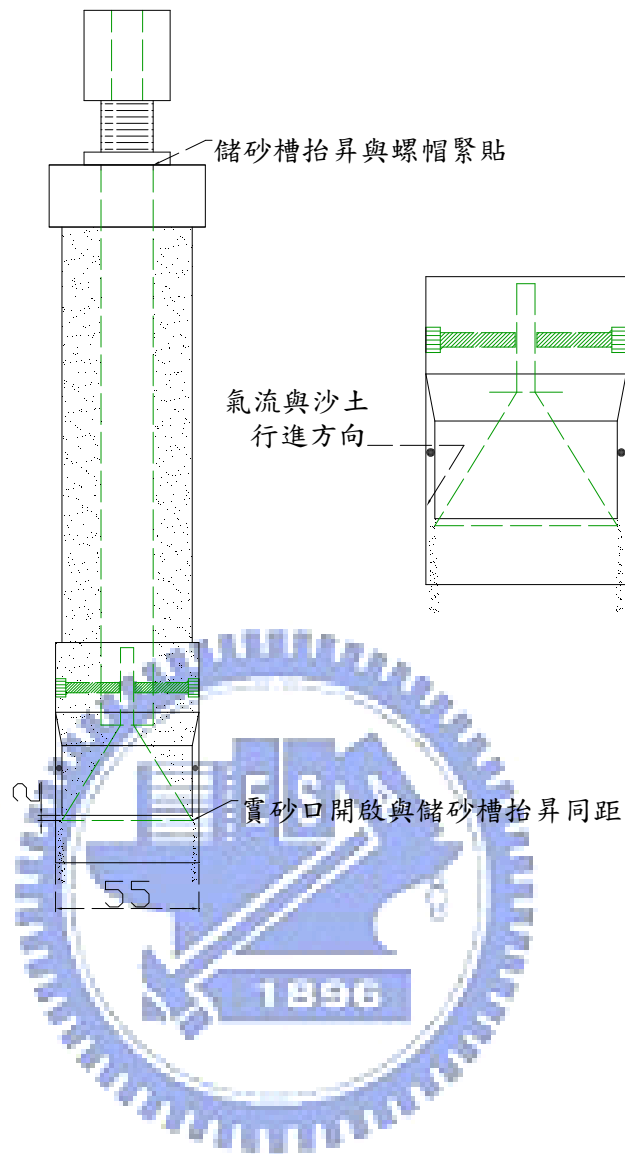


圖 3.7 抬昇側壁底端開口之實落器

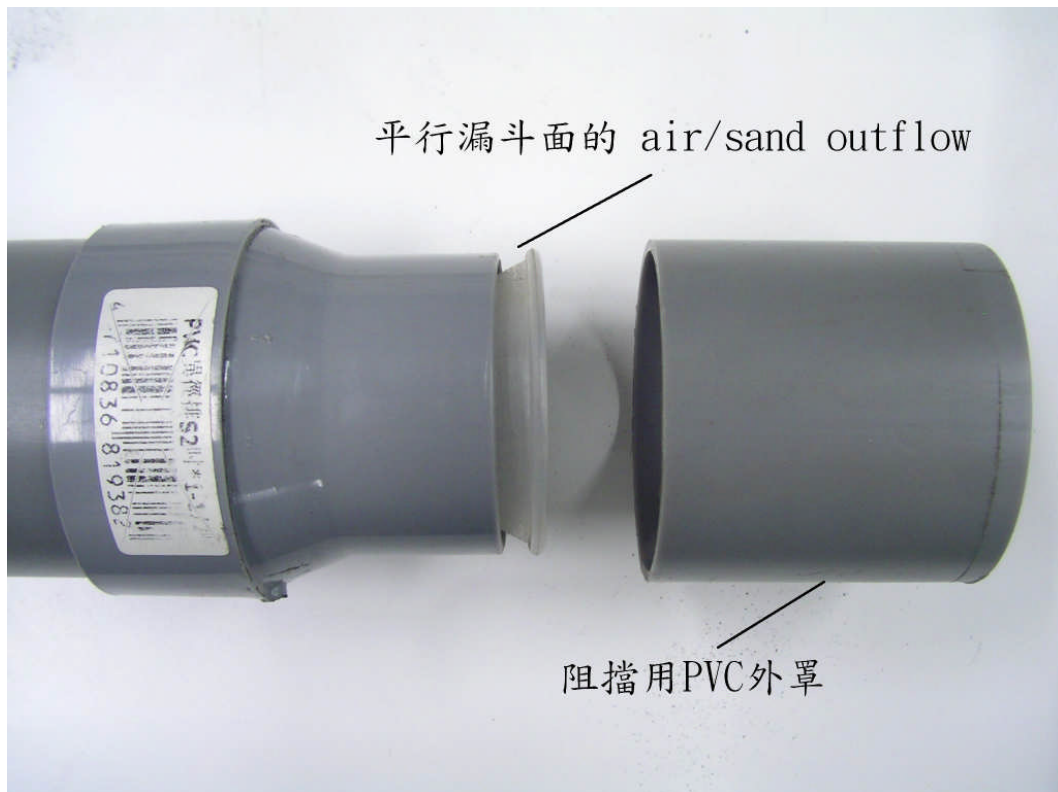


圖 3.8 阻擋用外罩與實砂口（組立前）



圖 3.9 螺桿與螺絲控制噴頭與地面夾角



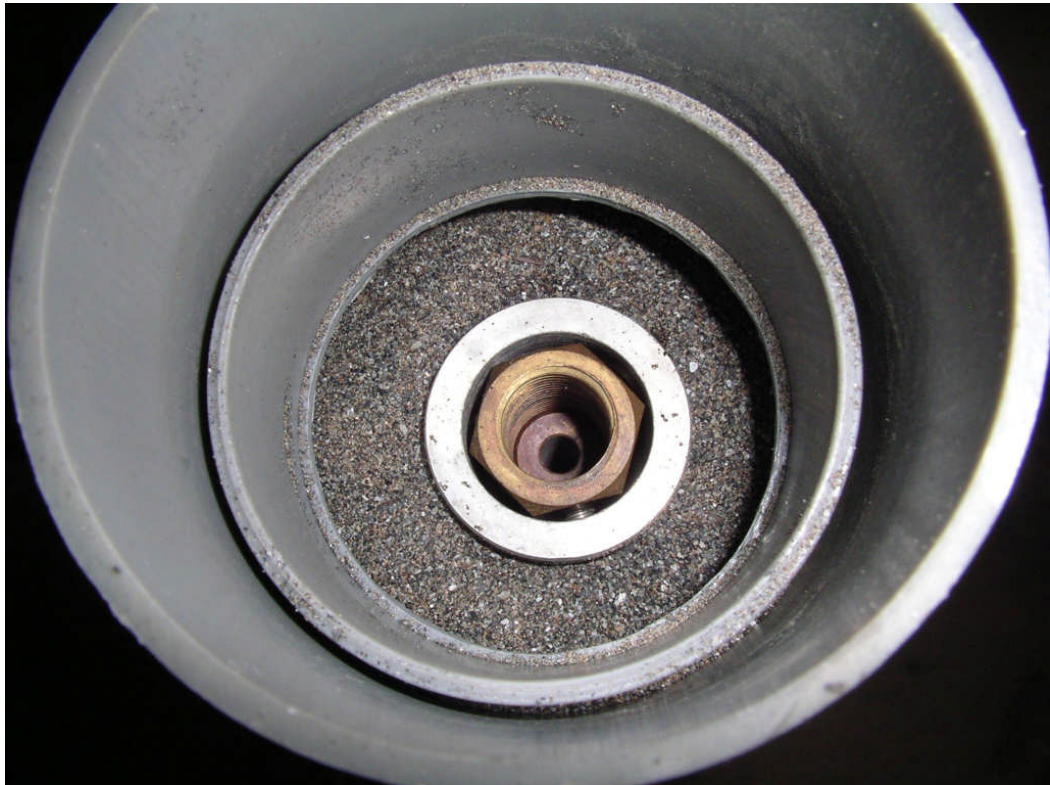


圖 3.10 填砂



圖 3.11 以漏斗封閉

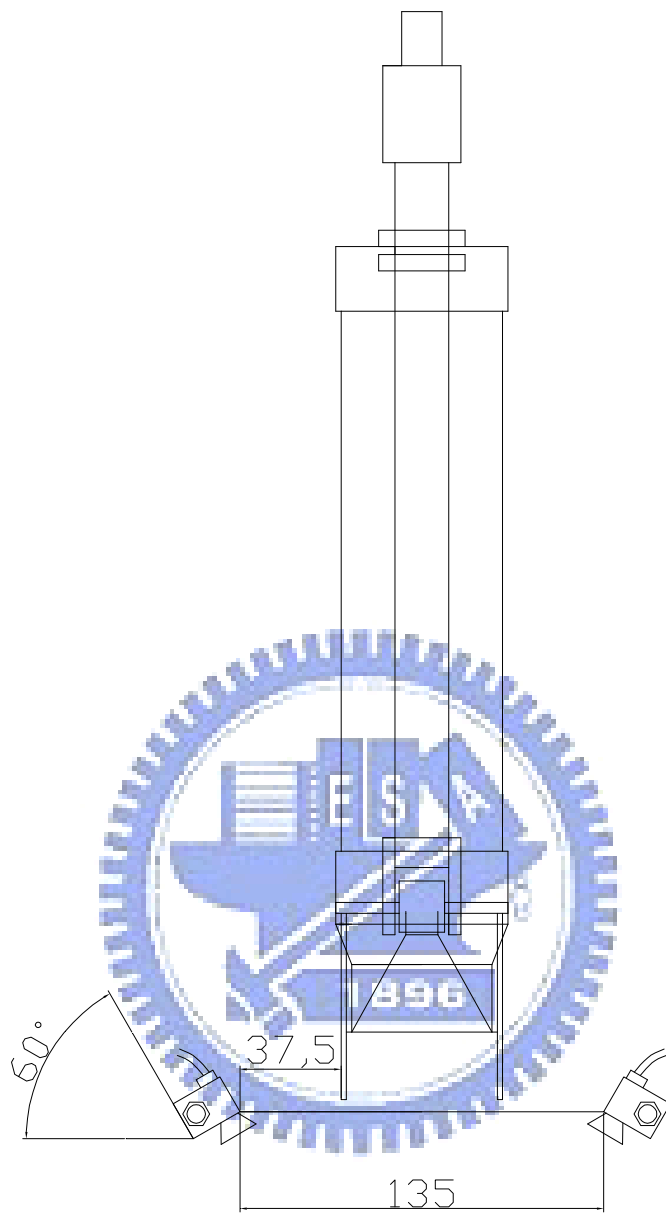


圖 3.12 濕噴法系統示意圖



圖 3.13 濕噴法系統實際操作



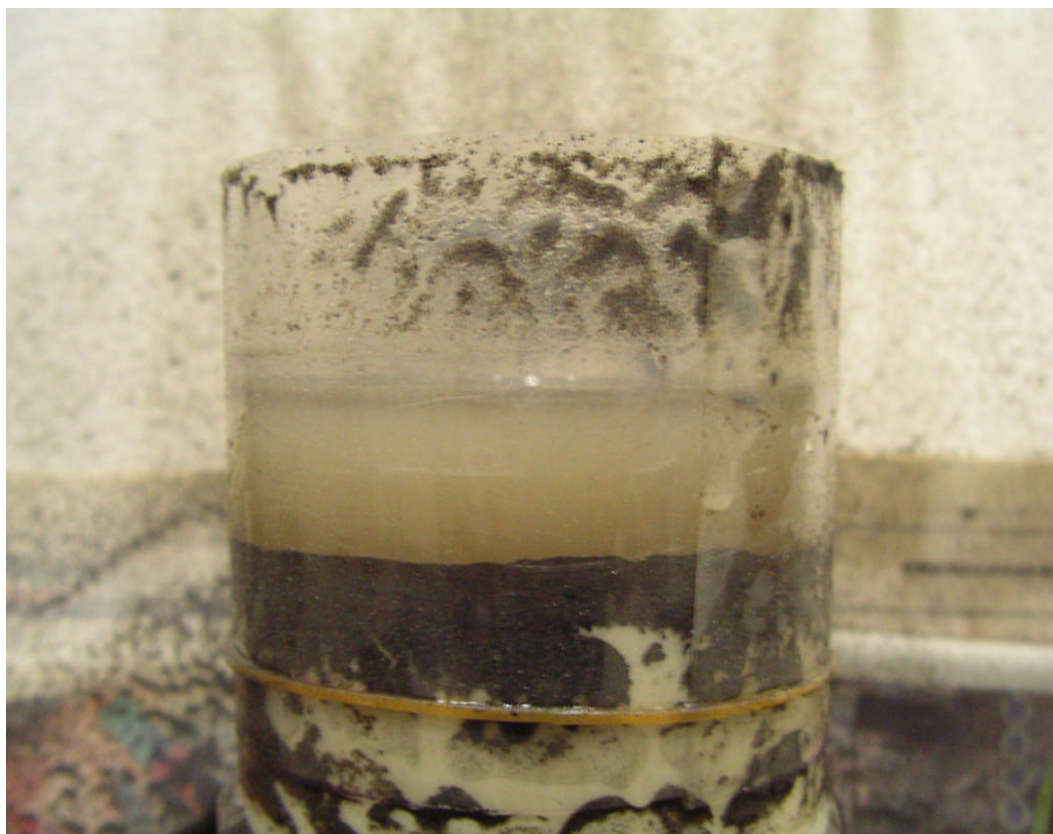


圖 3.14 額外賈出高於試體模的部分

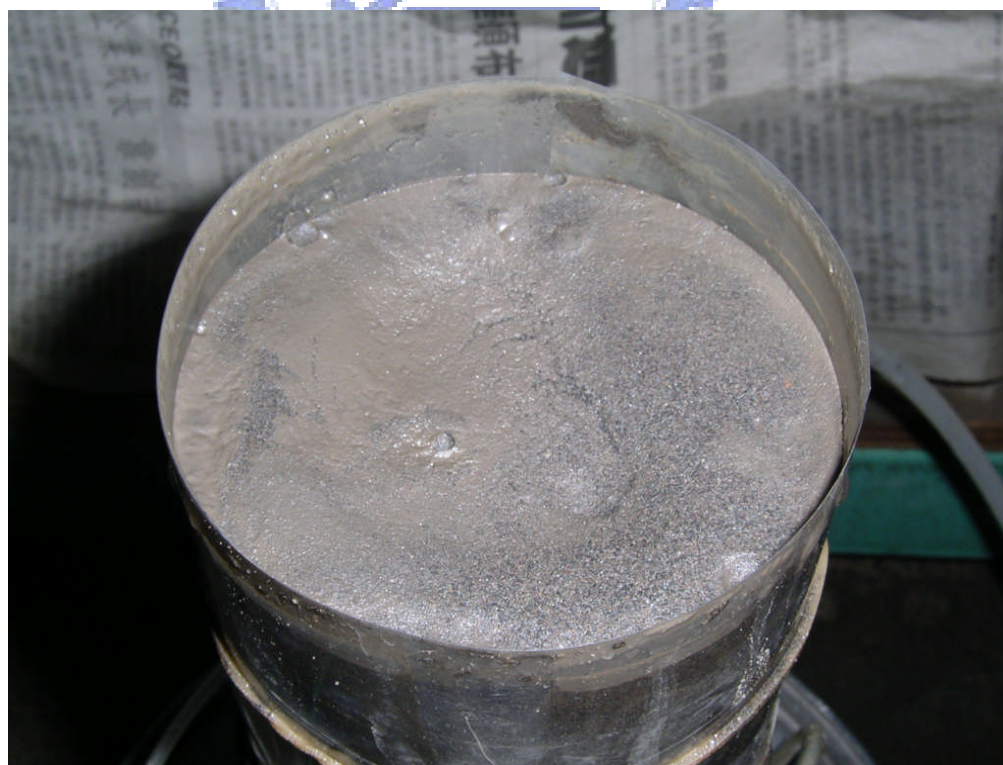


圖 3.15 頂端細顆粒堆積情況

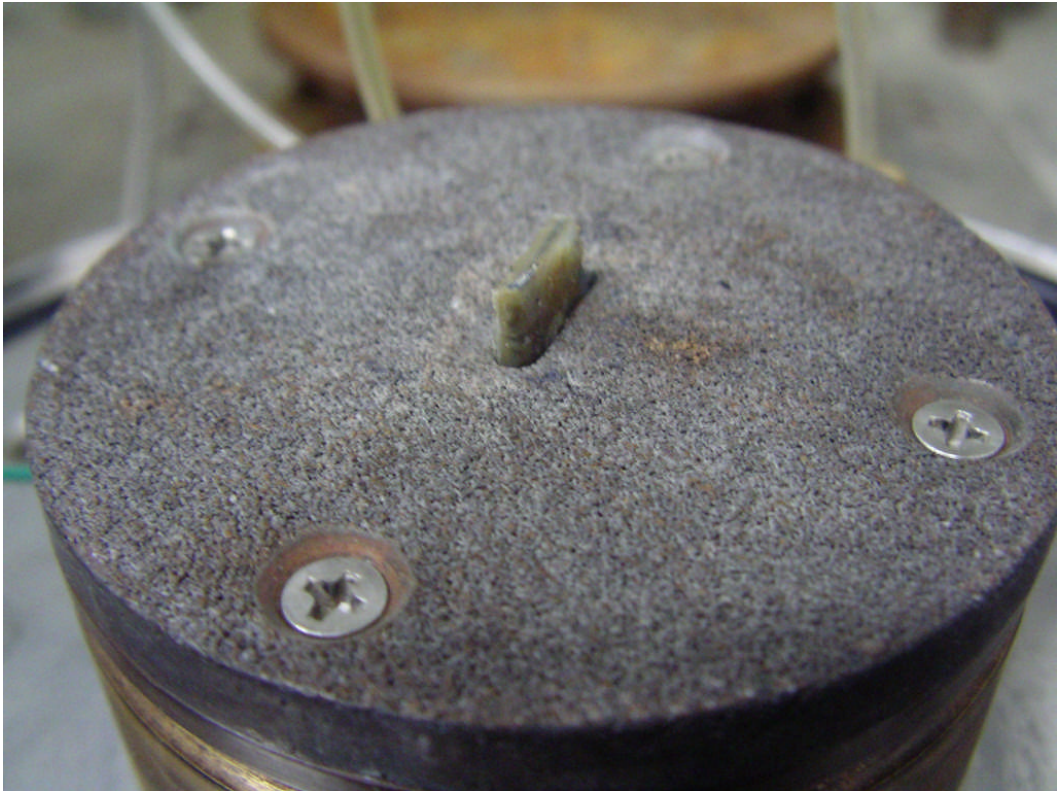


圖 3.16 底部 Bender 凸出透水石部分

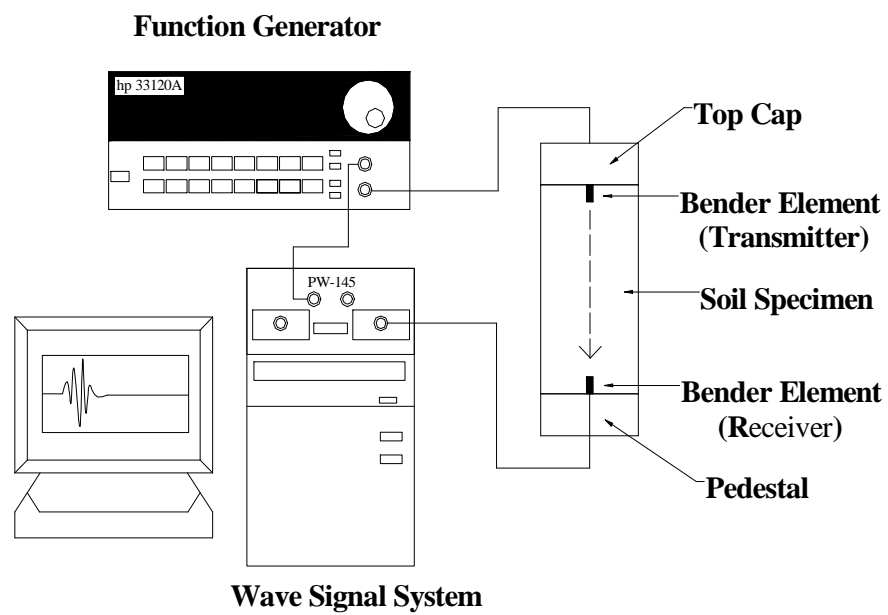


圖 3.17 剪力波元件試驗系統示意圖（摘自林靜宜, 2003）

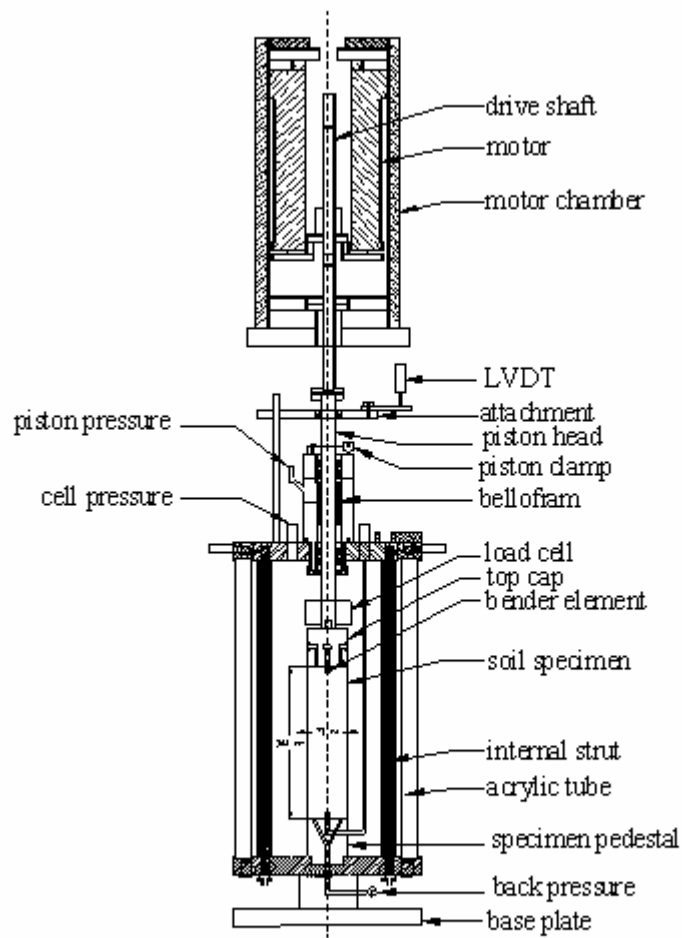


圖 3.18 動態三軸試驗示意圖 (摘自林靜宜, 2003)



## 第四章 試驗結果與討論

### 4.1 濕噴法試體製作過程中沉積強度對控制變數之重複性。

為了解濕噴法程序之可行性，於實際製作三軸試體之前，進行控制變數之重複性試驗。分別採用天然級配麥寮砂（FC=15%）與麥寮乾淨砂（FC<5%）以控制固定開口高度/大小進行實砂測試，測試環境比照實際實驗條件開口高度設定為 2mm 氣流壓力 10kPa 進入噴頭水壓 400kPa。實際製作三軸試體大小（直徑 7cm, 高 14cm）試樣檢核沉積強度是否具有時間一致性。沉積強度的定義為單位時間單位面積所實落的總砂量，此處以單位時間之落砂重量做基準比較。試驗結果如表 4.1。麥寮砂於實落時其沉積強度明顯受細料含量影響。

### 4.2 濕噴法試體之均質(勻)性

為了解濕噴法試體之均質性，對進行完動態三軸試驗後的濕噴法試體做細料含量的分析。首先對試體施以有效圍壓 500kPa 進行排水以利後續工作的進行。拆除試體之後將試體依總試體高分做五等份切片烘乾。烘乾後的每塊分層砂土依與圓心之間的距離分成試體內/外兩份（內一直徑 50mm 之實心圓；外—內徑 50mm 外徑 70mm 之空心環），如圖 4.1。此種分法將各分層切片土樣依體積比分做相近的兩份（體積比 24：25）主要考慮土樣總重約略相等於後續對兩份進行濕篩時較具有代表性。進行濕篩法分析檢視水平方向上（試體內外圈）細

料含量分佈是否有顆離析離之情形發生。垂直方向上（試體高程）之細料分布情況也可由上述資料中一並得到。

上述程序是針對含有細料之麥寮砂進行。對於麥寮乾淨砂

（ $FC < 5\%$ ），烘乾的切片試體則用來計算各層之含水率比較各層之間孔隙比是否具有一致性。

由於動態試驗過程會造成細粒料之遷移情況因此也另行對僅經歷飽和壓密之濕噴法試體做上述均質性分析的比較。結果如表 4.2、表 4.3、表 4.4 所示並另行繪於圖 4.2、圖 4.3、圖 4.4、圖 4.5。試體在細料含量方面的均質性表現良好，在試驗的兩種細料含量（ $FC = 15, 30\%$ ）下顆粒析離的情況均不明顯。麥寮乾淨砂方面，含水率量測結果顯示各高程土樣之間之標準差甚小。

### 4.3 試體之重複性

試體重複性試驗乃對相同孔隙比試體之力學行為做確認。分別以動/靜態三軸試驗做比較。以相同軸向應力對相同有效圍壓壓密之同孔隙比試體進行反覆荷重三軸試驗。當試體初始液化時，比對所得之 Load cycles 數(NC)，並觀察其不排水狀態下與所激發超額孔隙水壓之情況。如圖 4.6

### 4.4 三軸試驗試驗結果

表 4.5、表 4.6 為麥寮砂受單向載重三軸試驗與反負荷重三軸試驗的基本參數列表。試體所受之等向壓密圍壓於單向載重三軸試驗為 50、100、150kPa，於反負荷重為 100kPa，細料含量分  $FC < 5\%$ 、 $FC = 15\%$ 、



FC=30%。試體緊密度則考慮受等向壓密後之  $e_c$ 。

#### 4.4.1 試體製作方法對反覆動力三軸試驗之影響

由國外學者的研究得知，不同的重模試體製作方式，其抗液化強度會略有不同，主要原因是不同的重模試體製作方式所製作出的試體之土壤組構並不相同。同時，試體製作方式所造成的差異程度因土壤種類而異。郭毓真(2004)以細料含量 30%之麥寮砂作為試驗材料，試體製作方法對動態行為所造成的影響的研究中發現，在相同的孔隙比下，不同試體製作方法中以 MT 法之試體抗液化強度最高，WP 法次之，與 AP 法相類似的乾置法(DD)最低。

以濕噴法所製作的麥寮砂試體在相近孔隙比下抗液化強度與郭毓真(2004)(圖例：Kuo)中 WP 法試體具有相同的趨勢，顯示濕噴法土壤組構應與 WP 法製作者相類似。圖 4.7、圖 4.8、圖 4.9 分別表示麥寮砂不同細料含量試體之試驗結果與比較。

#### 4.4.2 試體製作方法對單向載重三軸試驗之影響

許多前人的研究都提到，由現地取得之不擾動試體與室內重模試體相比較在靜態不排水的行為上呈延展性與受剪膨脹之行為，而重模試體則呈現脆性與壓縮性。同時，SD/WP 法所製作之試體又與 MT 試體不同表現出應變硬化情況。蔡明道(2002) (圖例：Tsai)對不同細料含量之麥寮砂不排水行為之研究中，採 MT 法製作三軸試體進行靜態三軸試驗(CIU)，其試驗結果比較如圖 4.10、圖 4.11、圖 4.12、圖 4.13。顯示以濕噴法所製作之試體明顯表現出應變硬化的現象，與 MT 法試體多在應變量 10% 以內便出現極限強度後呈現應變軟化的情況大不相同。

依照試驗結果所繪製出的應力路徑圖如圖 4.14、4.15 所示。由應力路徑圖斜率換算摩擦角，應變硬化的試體所發揮的摩擦角約在 40.9~41.9 度，較過往研究中所得 30.2~30.9 度差異甚大。

#### 4.4.3 試體製作方式對剪力波速之影響

於前述之反覆動力三軸試驗中壓密完成之試體在進行動態試驗前，會施做剪力波速的量測並與郭毓真(2004)中 WP 法試體量測之剪力波速值做比較。試驗成果如表 4.7。



表 4.1 貫落器出砂之沉積強度測試 (試驗環境：參照 4.1 節)

試驗編號	第一階段 貫降強度, g/sec	第二階段 貫降強度, g/sec	FC, %	Avg, g/sec	總貫降重量, g
#1	36.03	33.48	0	34.76	1023.65
#2	28.36	28.16	0	28.26	972.42
#3	33.48	28.32	0	30.90	1004.08
#4	14.39	11.02	15	12.71	968.52
#5	10.62	13.46	15	12.04	964.20
#6	13.85	13.21	15	13.53	1030.93

表 4.2 試體細料含量均勻性 (垂直方向)

取樣位置	FC = 15%				*1	*2	**
試驗編號	No.01	No.02	No.03	No.04	No.05	No.06	
#1(Top)	13.9	15.4	17.5	17.1	14.28	17.27	19.09
#2	14.3	14.4	16.9	18.7	15.53	17.46	18.37
#3	14.6	14.1	17.2	18.1	13.94	18.39	19.57
#4	14.4	14.3	17.7	18.3	15.12	17.43	18.58
#5(Bottom)	14.3	14.5	17.5	18.1	13.45	16.57	11.03
Avg, %	14.3	14.54	17.36	18.06	14.46	17.42	17.32
S, %	0.254	0.502	0.313	0.589	0.850	0.649	3.551
取樣位置	FC = 30%				*3	*4	
試驗編號	No.01	No.02	No.03	No.04	No.05	No.06	
#1(Top)	29.9	31	30.8	31.4	31.8	31.40	
#2	31.2	32.4	32.8	31.7	31.2	31.70	
#3	29.8	31.6	32	30.1	32.4	30.10	
#4	31.3	31.6	33.4	31.2	31.9	31.20	
#5(Bottom)	27.6	28.3	27.7	29.8	28.665	29.80	
Avg, %	29.96	30.98	31.34	30.84	31.193	30.84	
S, %	1.494	1.578	2.25	0.838	1.476	0.838	

S：標準差；\*：內外圈分開計算的總和；\*\*：未經過動態試驗的試體

表 4.3 試體細料含量均勻性 (水平方向)

試體編號	*1		試體編號	*2	
取樣位置	Inner FC, %	Outer FC, %	取樣位置	Inner FC, %	Outer FC, %
#1(Top)	31.67	31.90	#1(Top)	31.33	30.96
#2	31.28	31.14	#2	29.74	30.15
#3	32.17	32.74	#3	30.45	31.54
#4	31.13	32.71	#4	31.56	31.20
#5(Bottom)	29.39	28.89	#5(Bottom)	29.33	28.76
試體編號	*3		試體編號	*4	
取樣位置	Inner FC, %	Outer FC, %	取樣位置	Inner FC, %	Outer FC, %
#1(Top)	14.39	14.17	#1(Top)	17.08	17.46
#2	15.98	15.07	#2	17.20	17.72
#3	13.85	14.03	#3	18.10	18.67
#4	14.89	15.34	#4	17.32	17.53
#5(Bottom)	13.12	13.77	#5(Bottom)	16.90	16.23



表 4.4 麥寮乾淨砂各層含水率資料

試體(1)位置	乾重, g	water content, $\omega$
#1(Top)	234.08	0.276
#2	240.68	0.285
#3	230.98	0.286
#4	212.88	0.284
#5(Bottom)	241.34	0.294
Avg	231.99	0.28
S	11.55	0.01
試體(2)位置	乾重, g	water content, $\omega$
#1(Top)	148.66	0.303
#2	156.54	0.306
#3	137.99	0.302
#4	145.15	0.305
#5(Bottom)	167.04	0.309
Avg	151.08	0.31
S	11.15	0.00
試體(3)位置	乾重, g	water content, $\omega$
#1(Top)	152.48	0.274
#2	156.10	0.262
#3	156.56	0.273
#4	146.73	0.278
#5(Bottom)	174.18	0.288
Avg	157.21	0.27
S	10.27	0.01

表 4.5 靜態三軸試驗列表

試驗編號	試驗方式	FC, %	$\sigma'_c$ , kPa	$e_c$	軸向應變量, %
No.1	CIU	<5%	50	0.91	18.88
No.2	CIU	<5%	100	0.86	19.55
No.3	CIU	<5%	150	0.83	19.1
No.4	CIU	15%	50	0.79	18.81
No.5	CIU	15%	100	0.80	18.41
No.6	CIU	15%	100	0.68	19.39
No.7	CIU	15%	150	0.76	19.11

表 4.6 動態試驗列表

試驗日期	FC, %	$\sigma'_c$ , kPa	$\sigma'_d$ , kPa	$e_c$	$N_c$
0725	<5%	100	50	0.89	6
0712	<5%	100	40	0.87	21
0711	<5%	100	30	0.90	180
0913	15%	100	50	0.77	3
1126	15%	100	40	0.75	20
1020	15%	100	30	0.74	30
0705	30%	100	40	0.73	5
0630	30%	100	30	0.72	22
0704	30%	100	20	0.70	369

表 4.7 剪力波速量測資料比較

WP specimens FC=30% (Kuo, 2004)	Void Ratio, e	$V_s$ , m/sec	WSp specimens FC=30%	Void Ratio, e	$V_s$ , m/sec
試體編號-1	0.723	135.36	試體編號-1	0.698	168.89
試體標號-2	0.725	135.93	試體標號-2	0.719	159.79
試體編號-3	0.727	134.93	試體編號-3	0.726	157.37
Average	0.725	135.41	Average	0.714	162.02

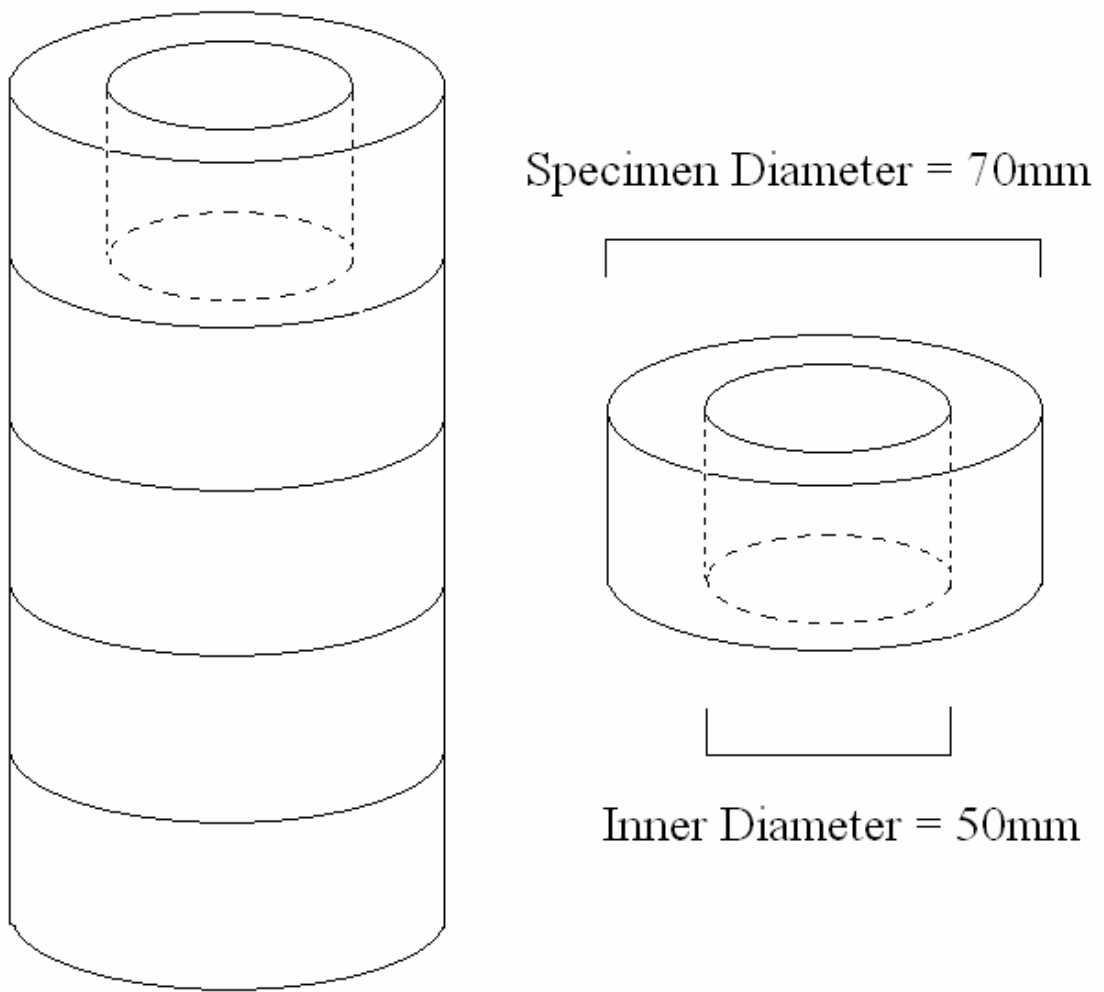


圖 4.1 濕噴法試體切片示意圖

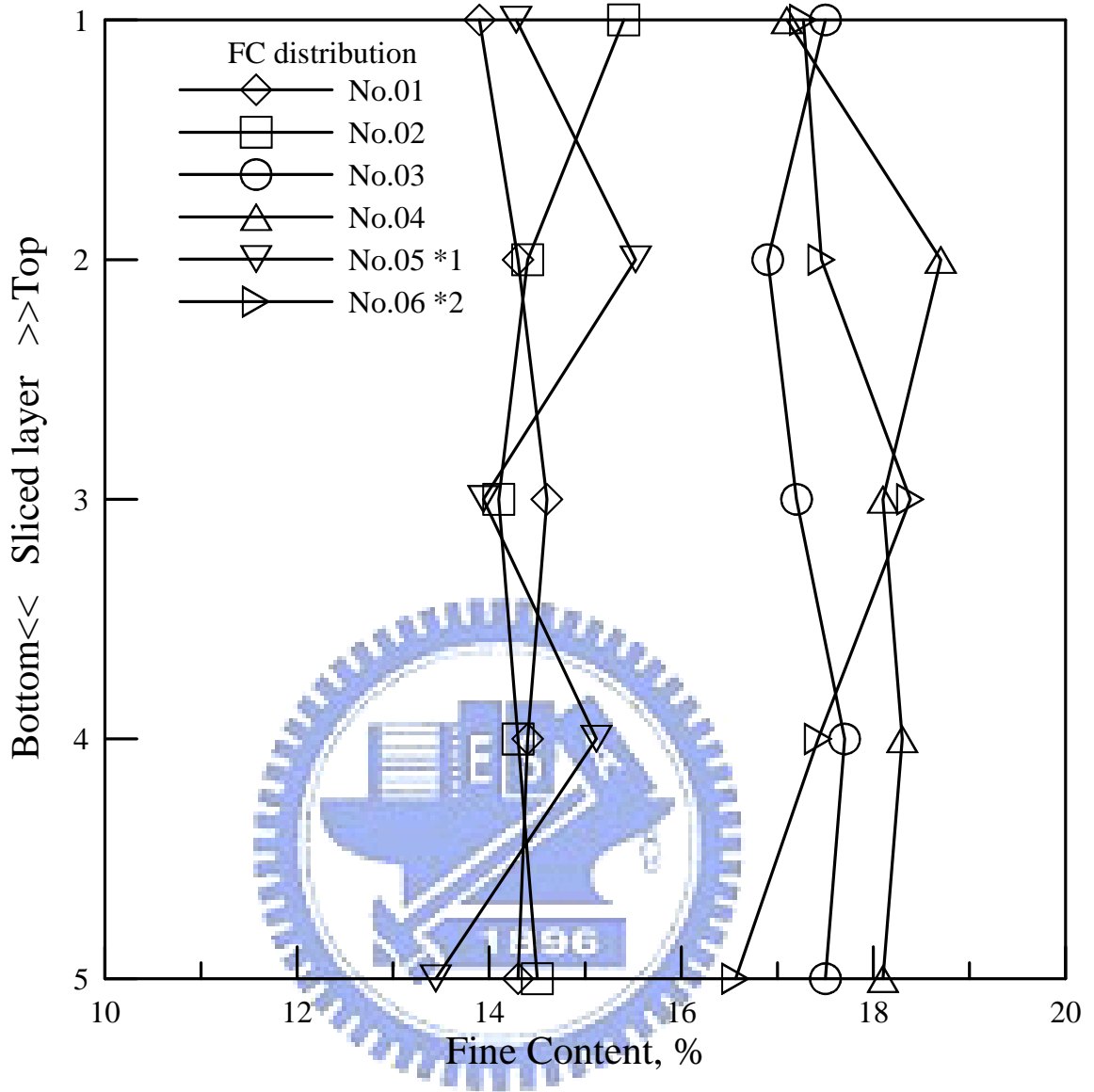


圖 4.2 試體細料含量均勻性 (垂直方向)



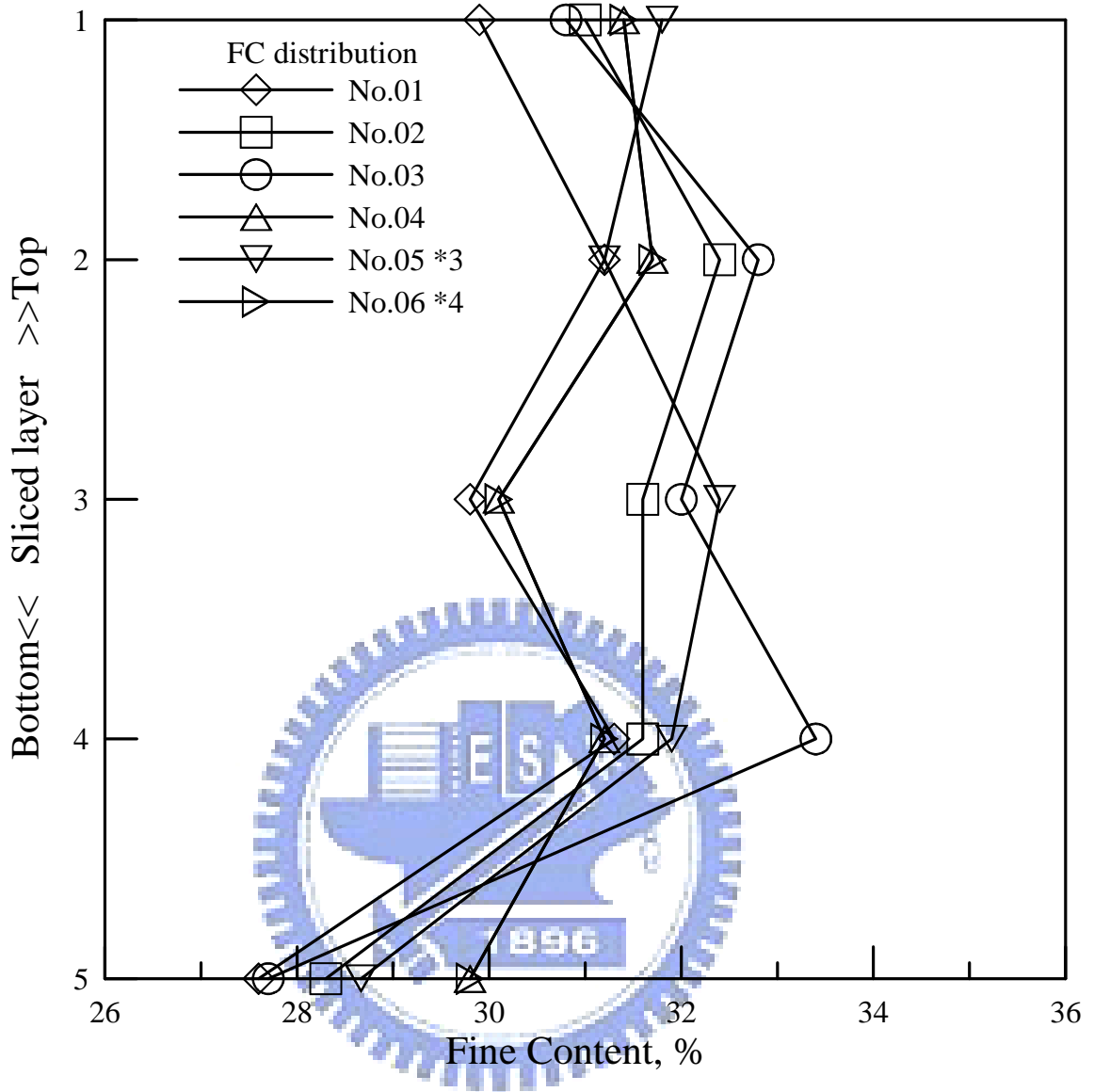


圖 4.3 試體細料含量均勻性 (垂直方向)

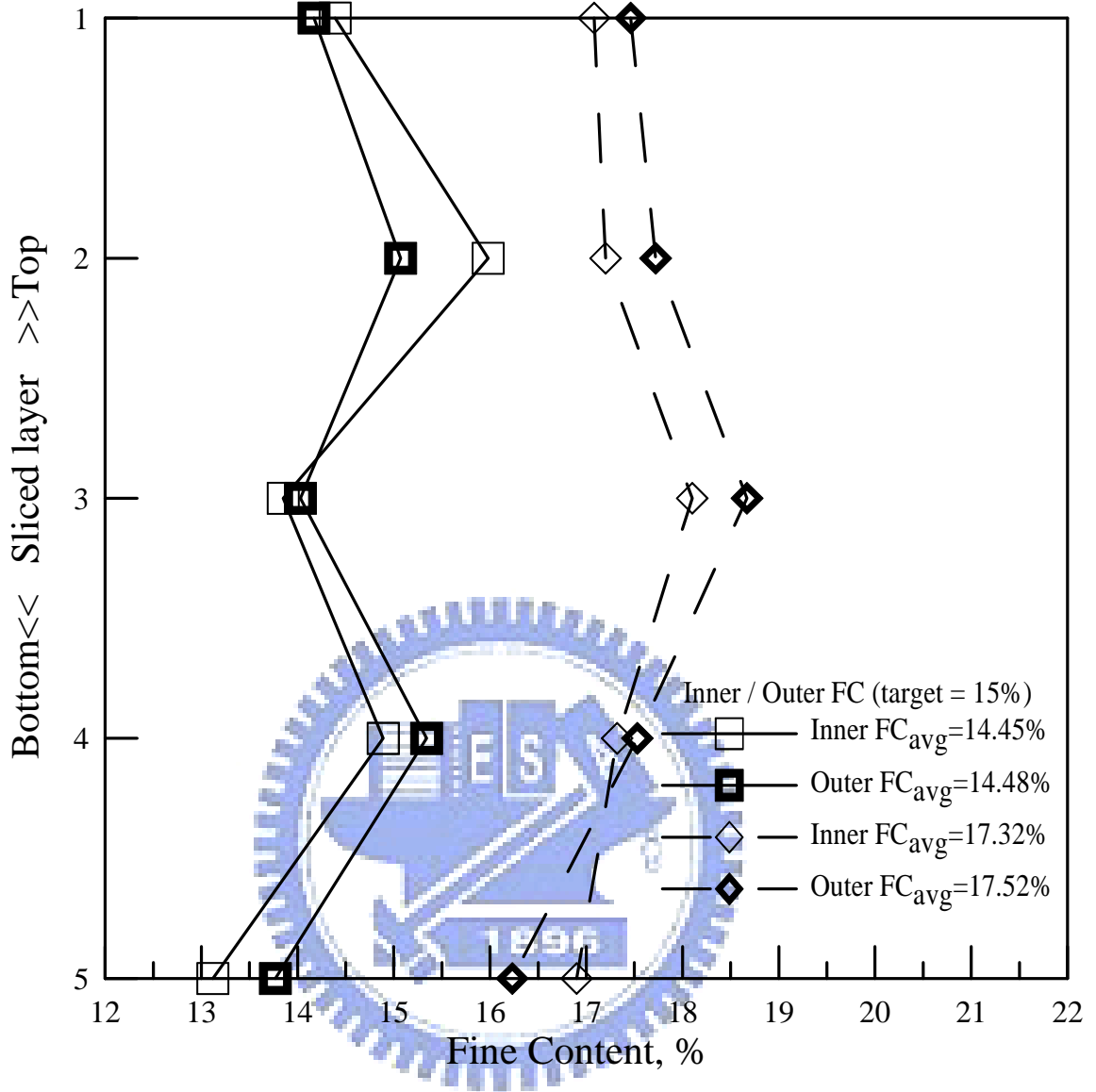


圖 4.4 試體細料含量均勻性 (水平方向)

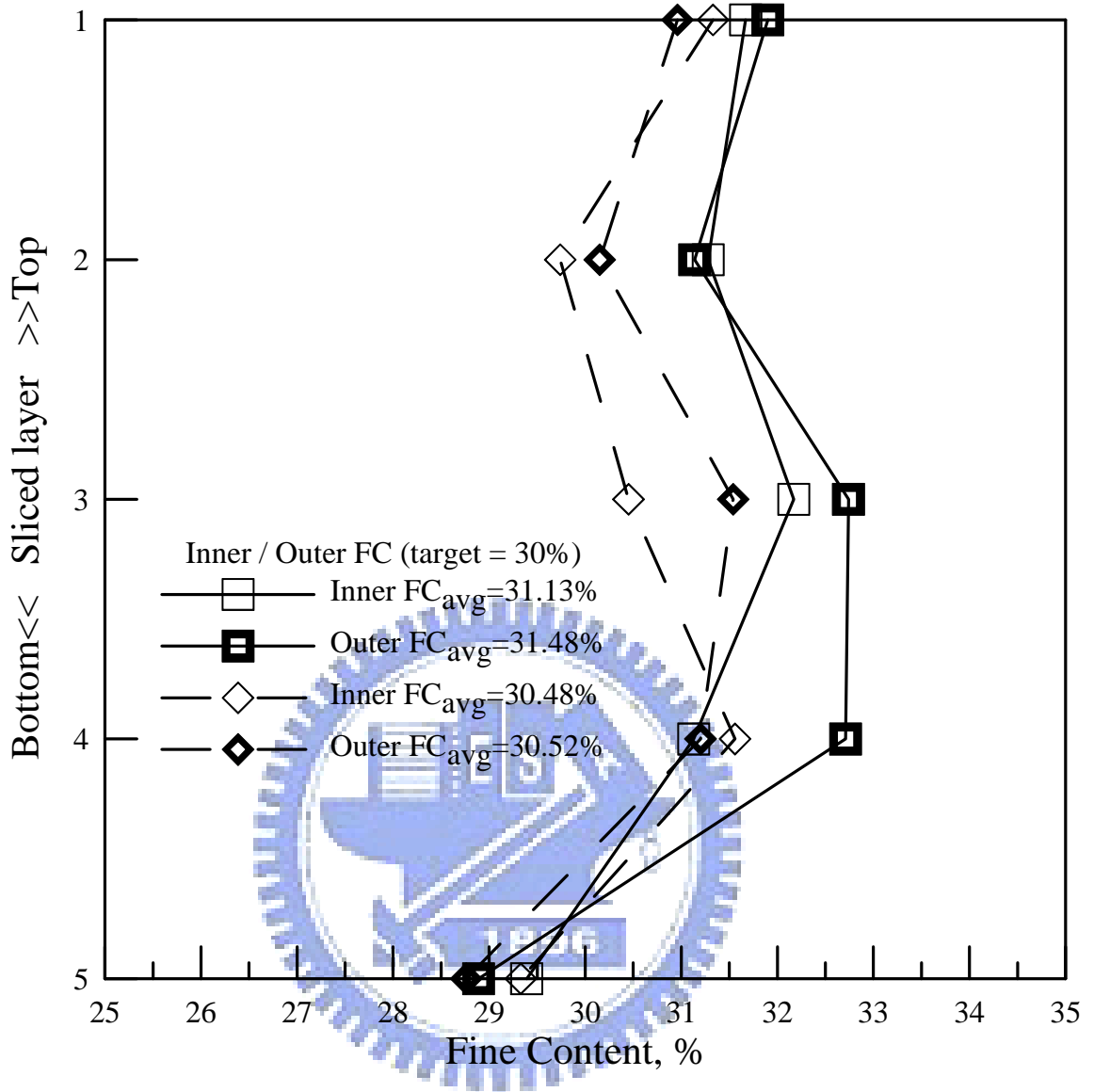


圖 4.5 試體細料含量均勻性 (垂直方向)

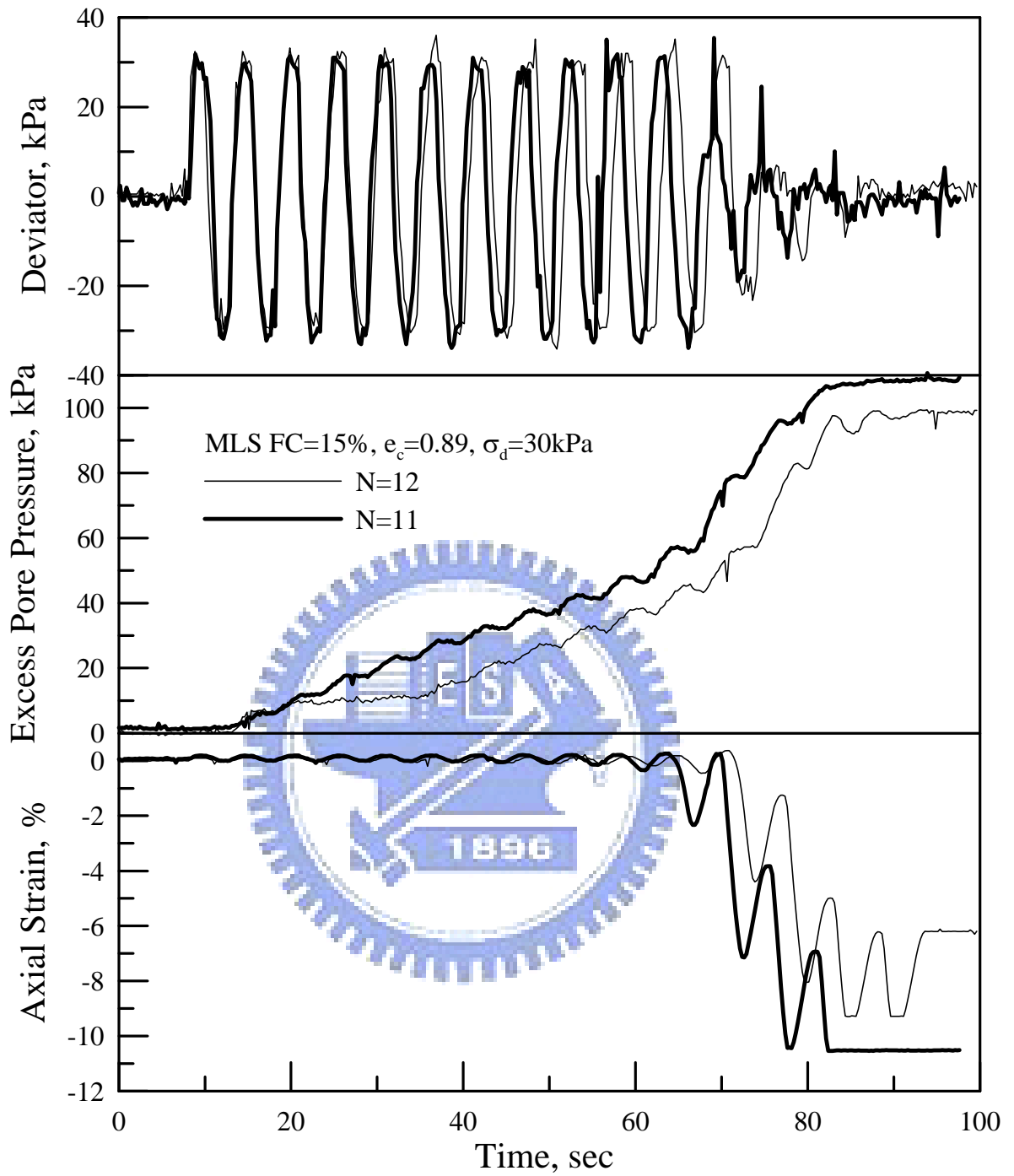


圖 4.6 濕噴法試體於反覆動力三軸試驗重複性

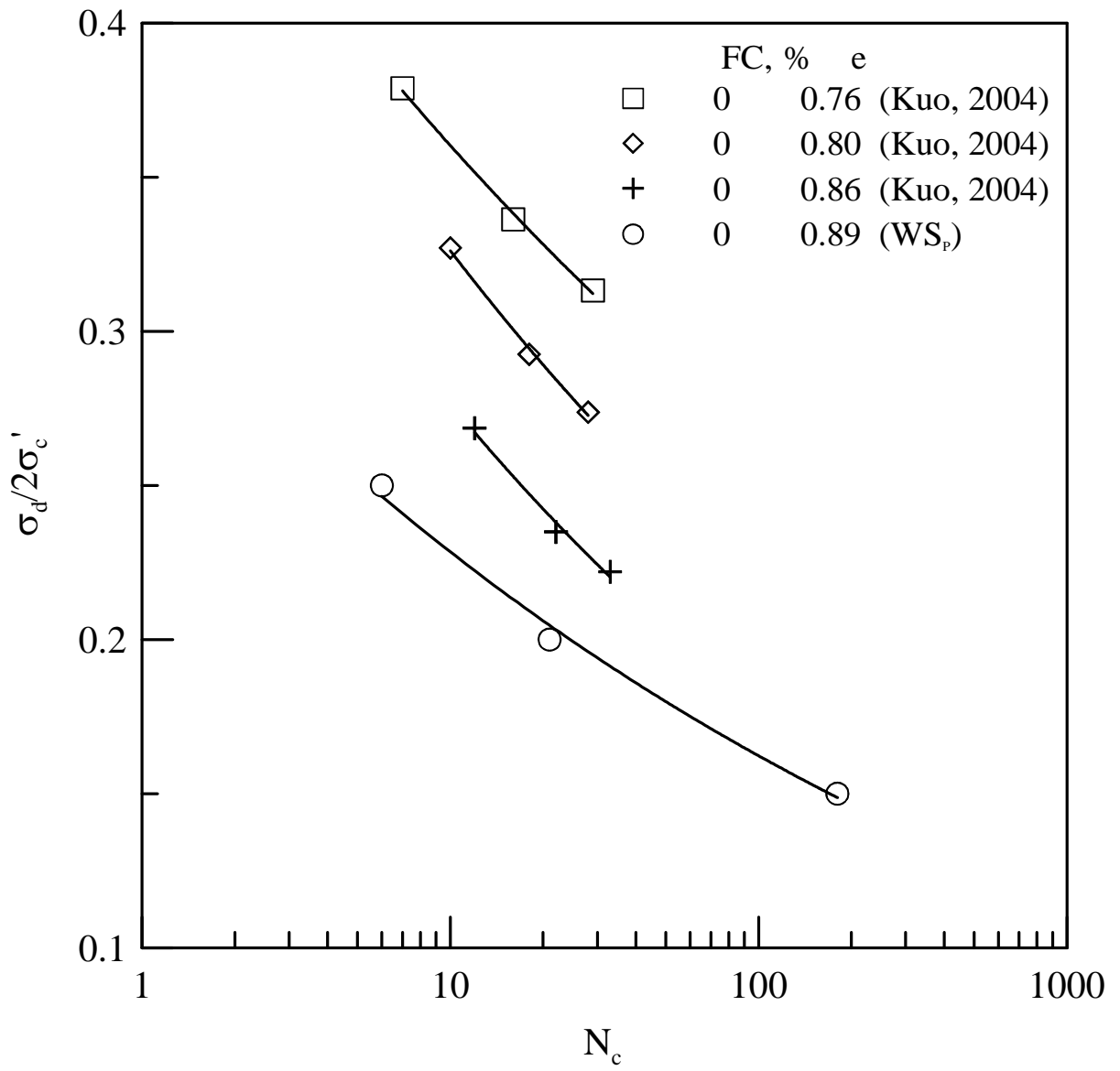


圖 4.7 濕噴法與水中沉降法法 MLS (FC<5%) 動態三軸試驗之結果比較

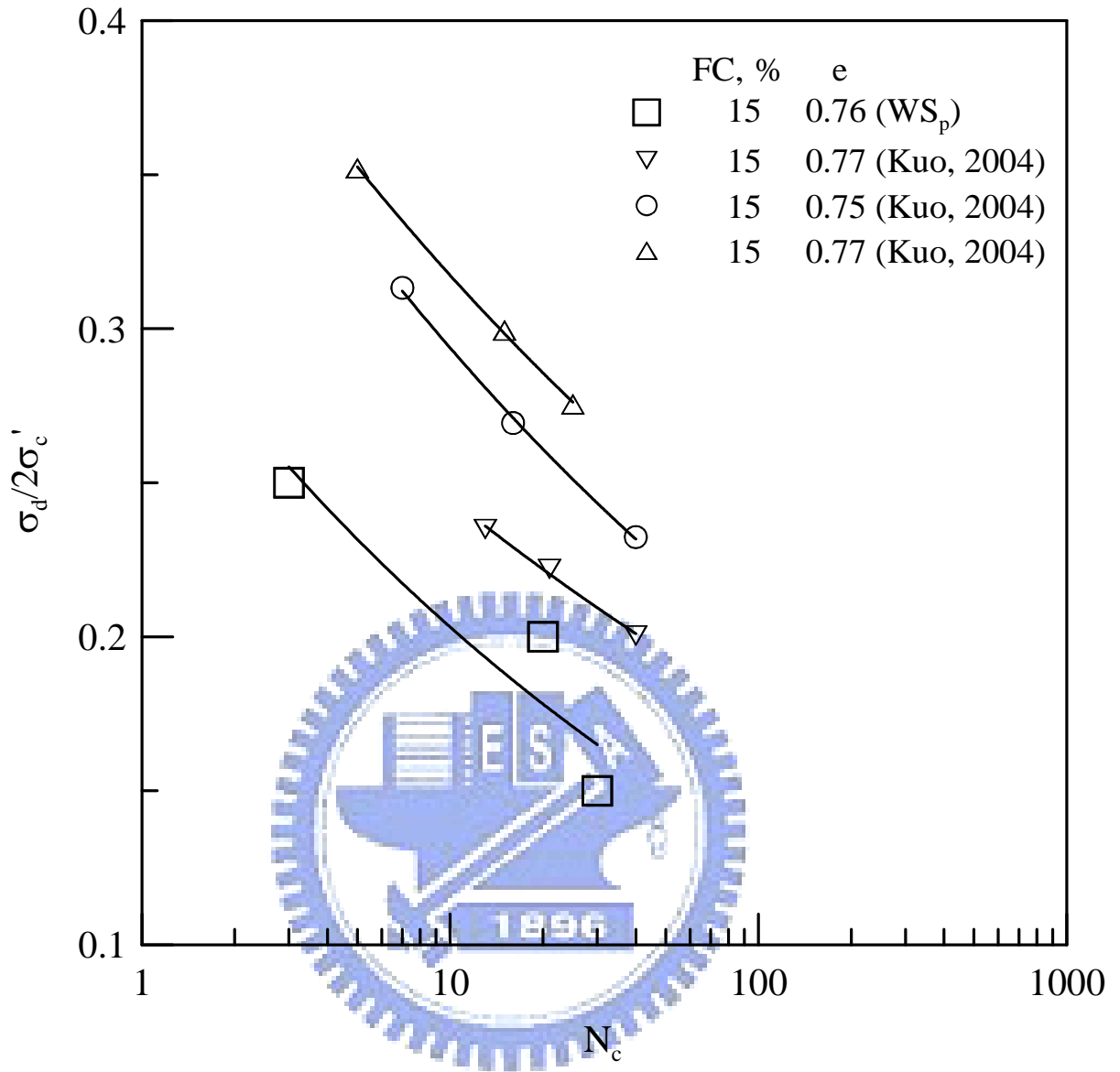


圖 4.8 濕噴法與水中沉降法 MLS (FC=15%) 動態三軸試驗之結果比較

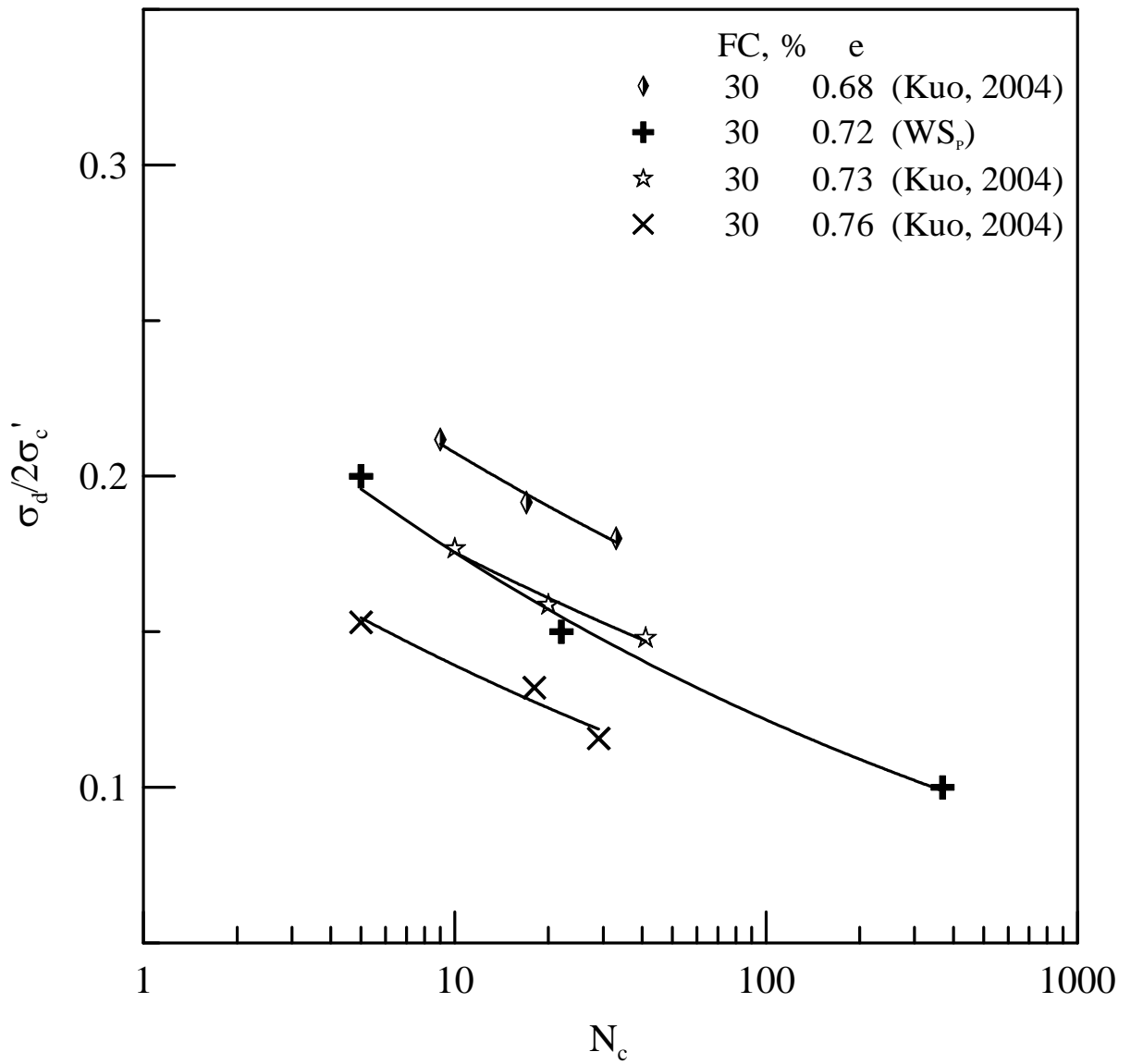


圖 4.9 濕噴法與水中沉降法 MLS (FC=30%) 動態三軸試驗之結果比較



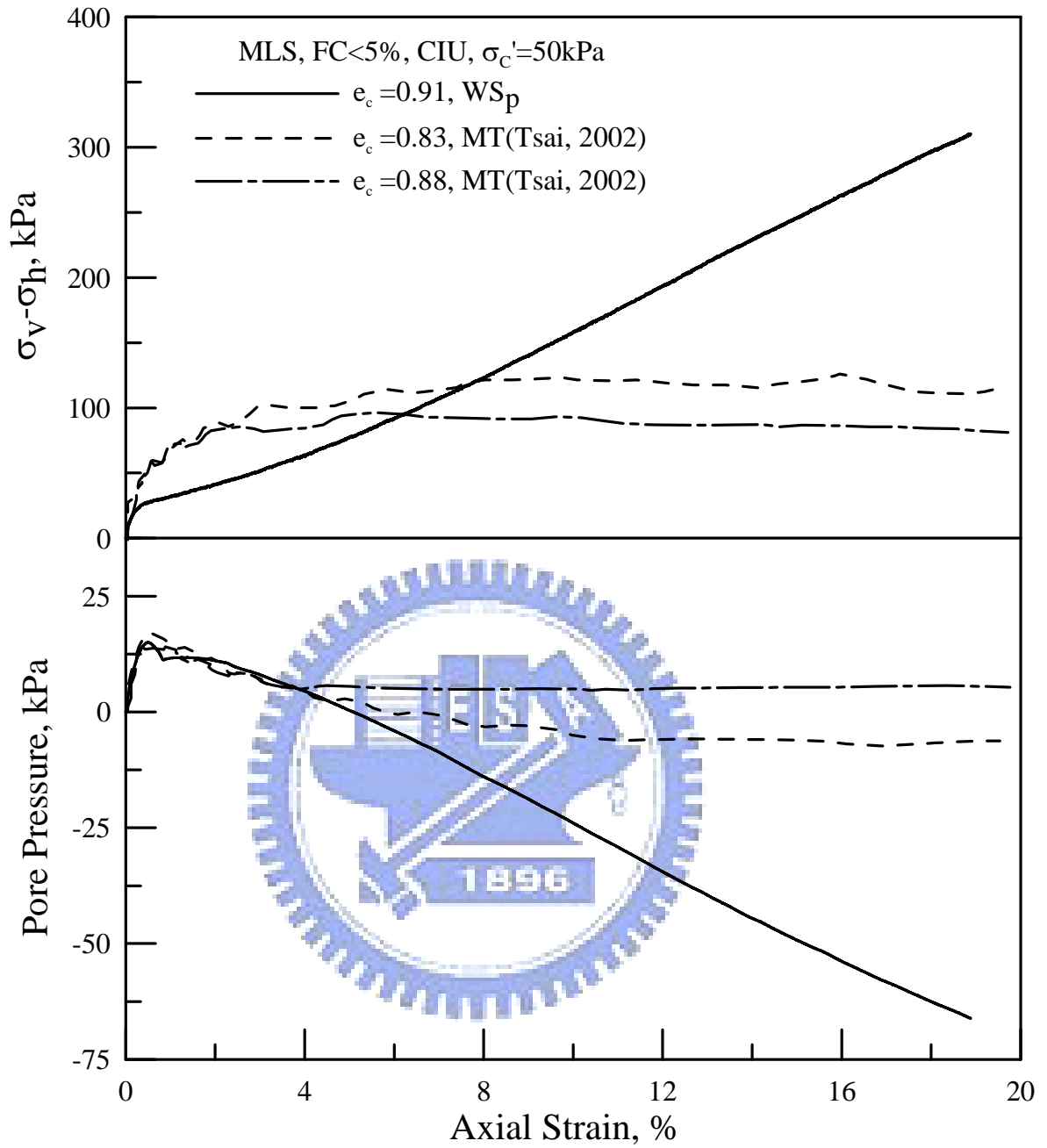


圖 4.10 濕噴法與濕夯 (MT) 法 MLS (FC<5%) 單向載重三軸試驗結果比較 (有效圍壓 50kPa)

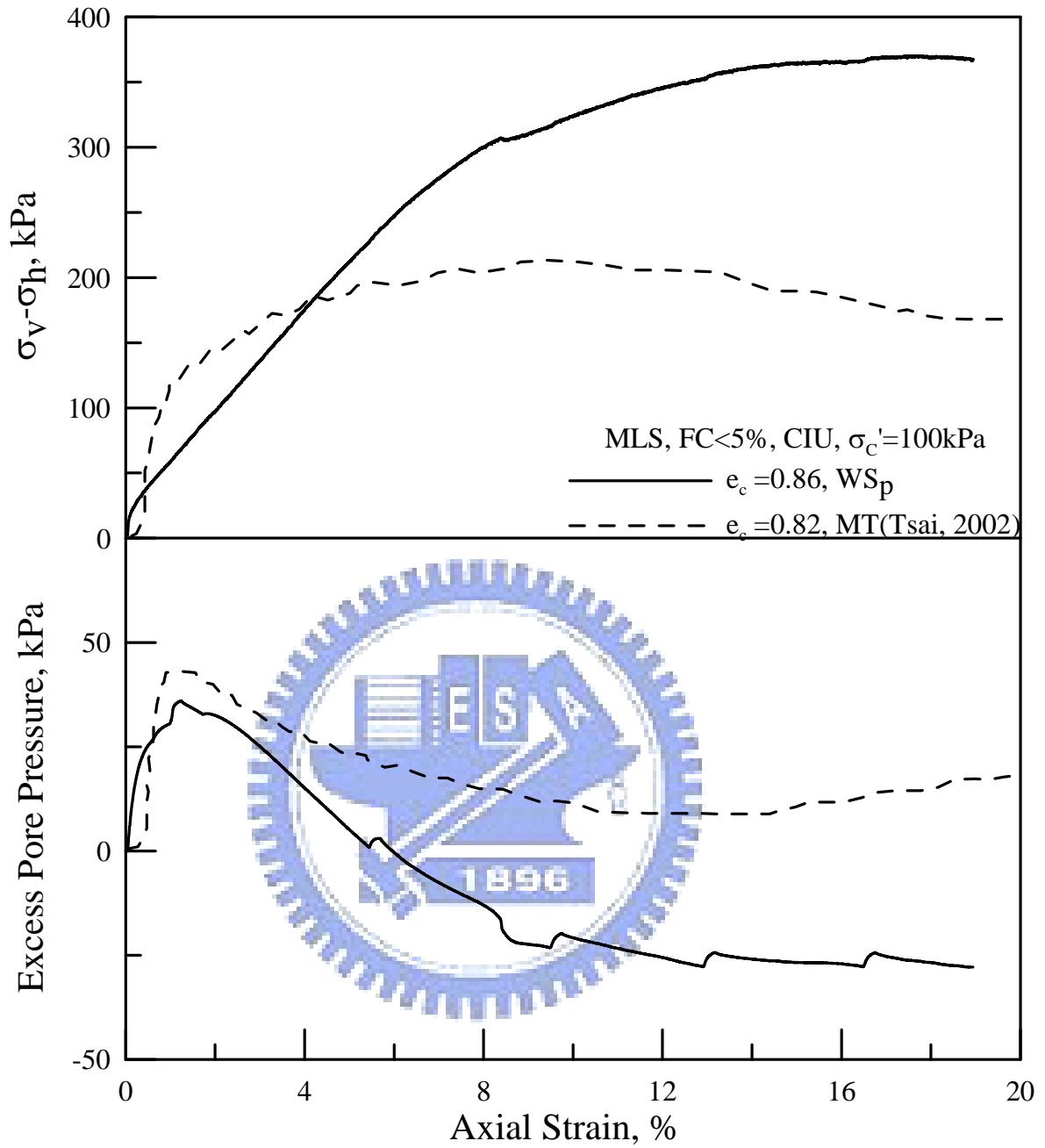


圖 4.11 濕噴法與濕夯 (MT) 法 MLS (FC < 5%) 單向載重三軸試驗結果比較 (有效圍壓 100kPa)

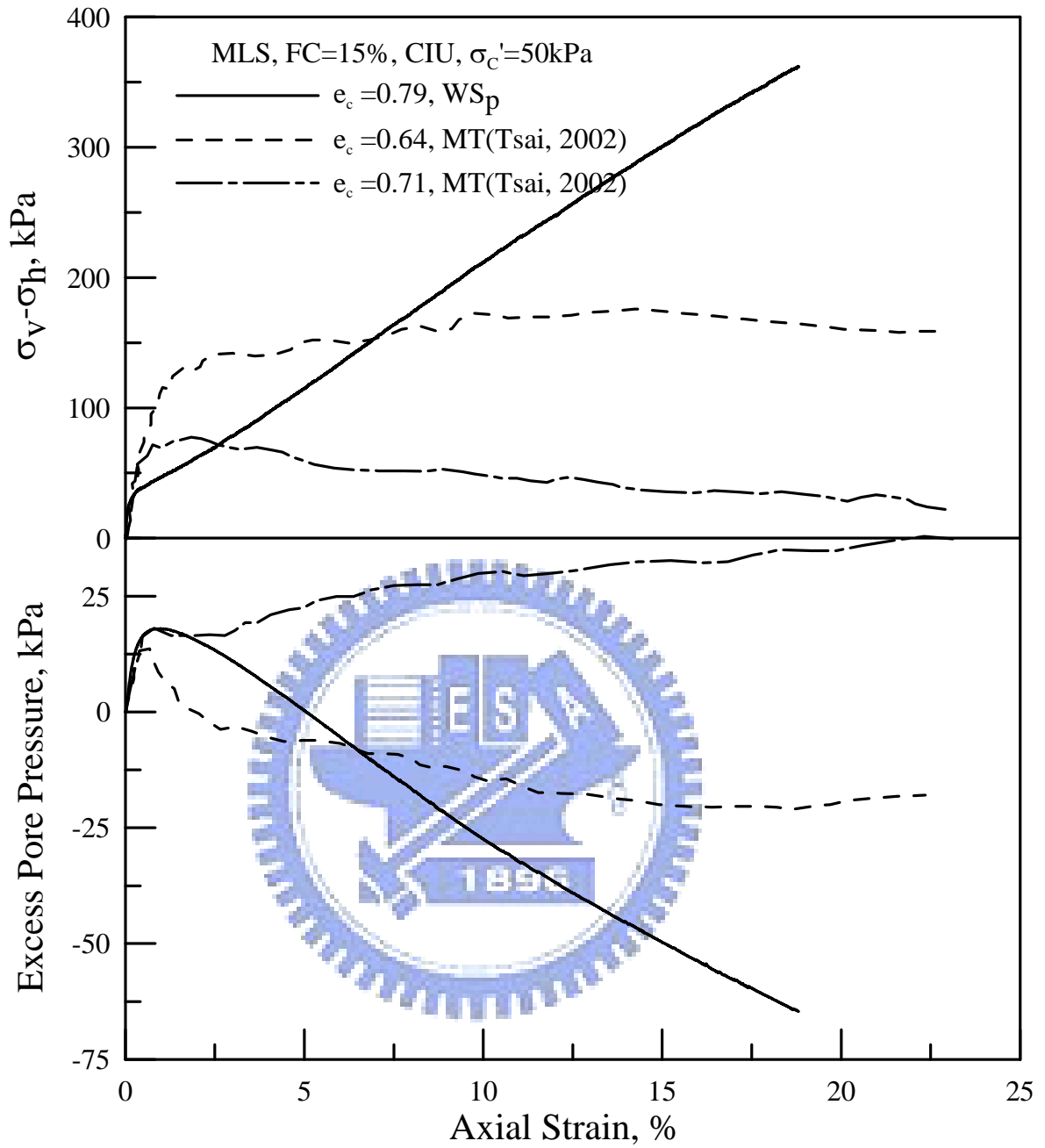


圖 4.12 濕噴法與濕夯 (MT) 法 MLS (FC=15%) 單向載重三軸試驗結果比較 (有效圍壓 50kPa)

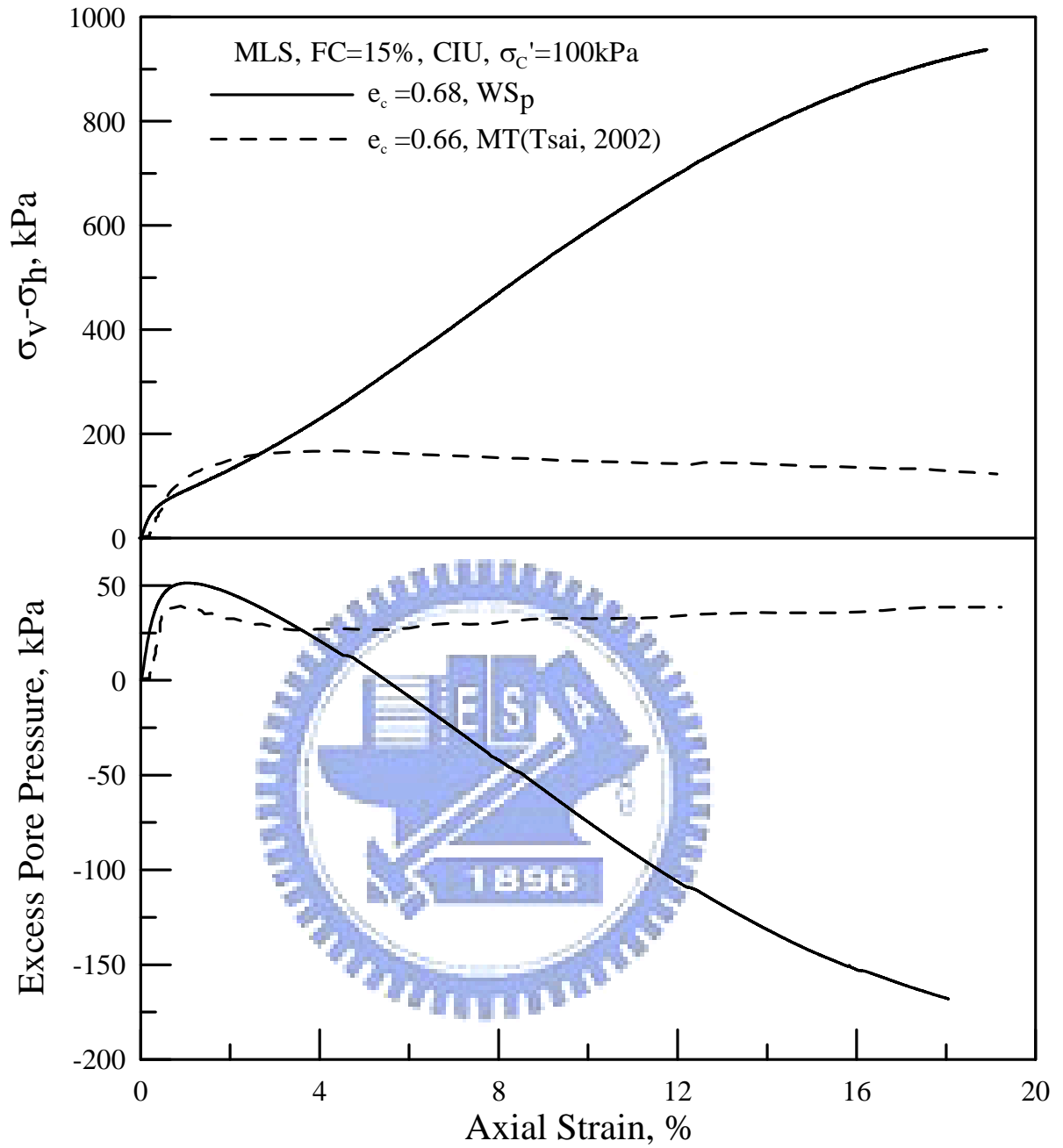


圖 4.13 濕噴法與濕夯 (MT) 法 MLS (FC=15%) 單向載重三軸試驗結果比較 (有效圍壓 100kPa)

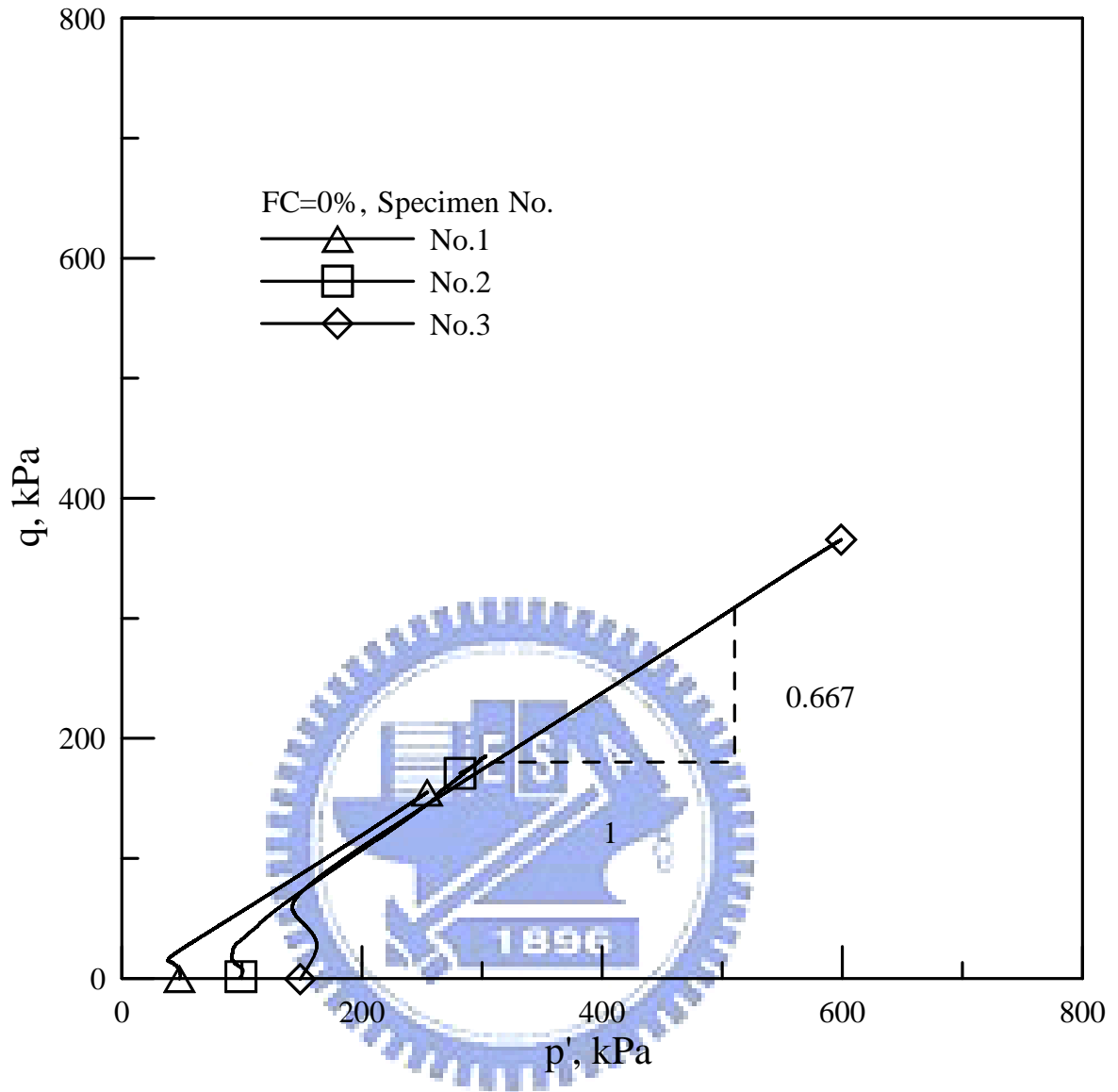


圖 4.14 濕噴法 MLS (FC<5%) 單向載重三軸試驗應力路徑圖

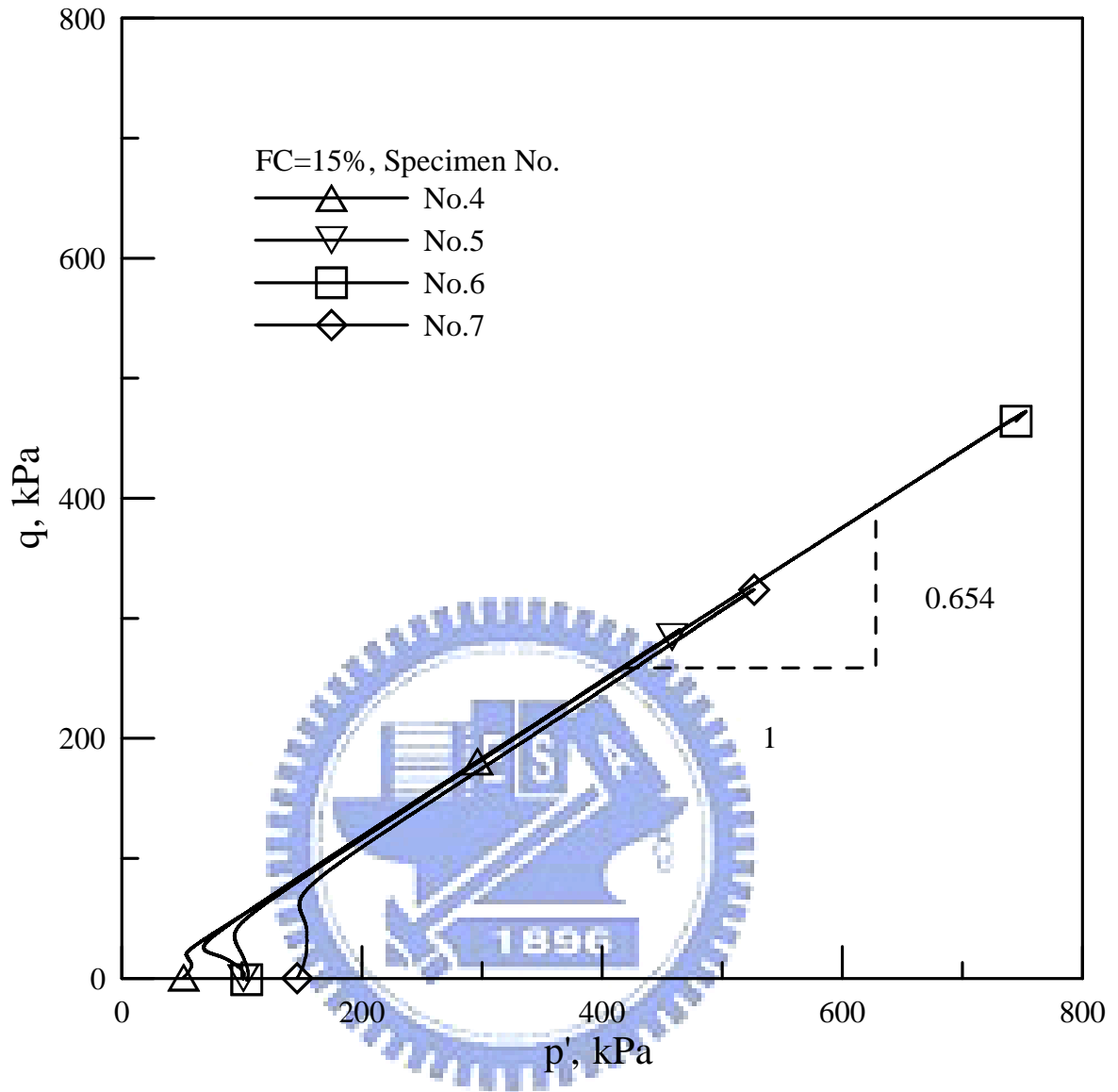


圖 4.15 濕噴法 MLS (FC=15%) 單向載重三軸試驗應力路徑圖

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

可分為下面幾點：

(1) 就試體製作方法而言，本研究所開發的濕噴法所製作出的試體於賈落完成尚未進行緊密化之前是處於一相對疏鬆的狀態即便經過緊密化試體之孔隙比仍不易製作出緊密的試體（依實做經驗，很少製作出  $e_c < 0.7$  試體），同時在試體的緊密化上，目前濕噴法的製作流程無法隨心所欲的控制整體試體的孔隙比。相同的緊密化程序所製作出的試體於壓密後孔隙比不盡相同。(2) 其次在顆粒析離上，試驗結果顯示濕噴法雖採固定賈落方法但無論在水平方向或垂直方向上其顆粒析離情況並不明顯。濕噴法在控制顆粒析離情況所做的努力確能發揮功效。在麥寮乾淨砂的孔隙比的均勻性上，現有的試驗結果顯示各層試體間存在著乾密度的落差，但乾密度較前人最大乾密度數據為大，是否是實驗有誤所導致的錯誤結論仍有待後續試驗的驗證。(3) 同樣以麥寮砂作為試驗材料，在動態三軸試驗當中，濕噴法所製作的試體其表現與郭毓真（2004）以水中沉降法所製作之三軸試體相近，顯示兩者之間土壤組構相似。在傳遞剪力波速上濕噴法試體較水中沉降試體來的快些。而在靜態三軸試驗中，濕噴法試體與蔡明道（2002）以濕夯法所製作之試體有著截然不同的表現。過往對試體製作方法的研究顯示，MT 試體總是傾向收縮與應變軟化。相反的，與現地土壤組構相似之三軸試體（非擾動取樣、WP、SD）則是表現出明顯的受



剪膨脹與應變硬化。濕噴法結果亦與前述研究成果相同。實驗室內慣以 MT 法製作三軸試體，藉以評估現地土壤性質，以試體製作方法對麥寮砂試驗結果影響甚巨的角度來看，過去對台灣砂土的研究（變形性與穩定性分析等），可能與現地實際情況不符，可能因此而對實際情況有了錯誤的判斷。

## 5.2 建議

從試驗結果當中可以了解，濕噴法目前最大的缺點在於控制試體緊密度。目前可預見而有助於控制緊密度的後續研究可以從濕振法（Wet Vibration）的緊密法開始著手。如 Tatsuoka et al. (1986) 所做，首先必須先量化（標準化）敲擊的能量接著以足夠多的試驗量來釐清孔隙比的減少與敲擊的數（能）量之間的關係。如此一來或可對緊密化有更近一步的認識，以利濕噴法的完備。

其次，數據雖然顯示出一些正向的結果，如濕噴法試體細料分布之均勻性。但濕噴法本意是應用在大型標度槽試體的製作方法，在孔隙比上的均勻性是否不佳等情況仍有待後續大型試驗來驗證；於緊密程度與細料分布上都應具備一定水準才算是合適的製作法。得到再確認的濕噴法於操作概念/儀器上應用於大型試體的製作具有相當的發展空間。

## 參考文獻

1. Amini, F., and Qi, G.Z. (2000). "Liquefaction testing of stratified silty sands." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 126, No. 3, pp. 208-217.
2. Davila, R.S., Segoo, D.C., and Robertson, P.K. (1992). Undisturbed sampling of sandy soils by freezing. In *Proceedings of the 45th Canadian Geotechnical Conference, 26-28 October, Toronto*, pp.13A-1-13A-10.
3. Frost, J.D., and Park, J.-Y. (2003). A critical assessment of the moist tamping technique. *ASTM, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, 26(1): 57-70.
4. Huang, Y.T., Huang, A.B., Kuo, Y.C., and Tsai, M.D. (2004). "A laboratory study on the undrained strength of a silty sand from Central Western Taiwan." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.24, No.9-10, pp.733-743.
5. Konrad, J.M., St-Laurent, S., Gilbert, F., and Leroueil, S. (1995). Sand sampling below the water table using the 200 mm diameter Laval sampler. *Canadian Geotechnical Journal*, 32: 1079-1086.
6. Kuerbis, R., and Vaid, V.P. (1988). Sand sample preparation - the slurry deposition method. *Soil and Foundations* 28(4): 107-118.
7. Ladd, R.S. (1974). Specimens preparation and liquefaction of sands. *J.Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 100(10): 1180-1184.

8. Ladd, R.S. (1977). Specimens preparation and cyclic stability of sands. J.Geotech. Engrg. Div., ASCE, 103(6): 535-547.
9. Ladd, R.S. (1978). Preparing specimens using undercompaction. ASTM, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 1(1): 16-23
10. Lambe, T.W. (1951). Soil testing for engineers, John Willy & Sons, Inc., Newyork.
11. La Rochelle, P., Sarraih, J., Tavenas, F., Roy, M., and Leroueil, S.(1981). "Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils" Canadian Geotechnical Journal, 18(1): 52-66.
12. Lo Presti D., Pedroni S., and Crippa V. (1992). "Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: a comparative study." Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 15, No. 2, pp. 180-189.
13. Mulilis, J.P., Chan, C.K., and Seed, H.B. (1975). The effects of method of sample preparation on the cyclic stress-strain behavior of sands. EERC Rep. 75-18, Coll. of Engrg., University of California, Berkley, Calif.
14. Mulilis, J.P., Seed, H.B., Chan, C.K., Mitchell, J.K., and Arulanandan, K. (1977). Effects of sample preparation on sand liquefaction. J.Geotech. Engrg., ASCE, 103(2): 91-108.
15. Plewes, H.D., Pilli, V.S., Morgan, M.R., and Kilpatrick, B.L. (1994). In situ sampling, density measurements and testing of foundation soils at Duncan dam. Canadian Geotechnical Journal, 31: 927-938.

16. Poet Aglietto, M. L., (1989). "Maximum dry density of cohesionless soils by pluviations. " M. Sc. thesis, Department of Structural Engineering, Technical University of Torino, Italy.
17. Rahardjo, P.P., Brandon, T.L., and Clough, G.W. (1995). "Study of Cone Penetration Resistance of Silty Sand in the Calibration Chamber." Proceedings, the International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT '95, Swedish Geotechnical Society, Vol.2, pp.577-582.
18. Sasitharan, S.,Robertson, P.K., and Sego, D.C. (1992). Sample disturbance from shear wave velocity measurements. In Proceedings of the 45th Canadian Geotechnical Conference, 26-28 October , Toronto, pp. 23:1-23:7.
19. Sego, D.C., and Robertson, P.K. (1994). Ground freezing and sampling of foundation soils at Duncan Dam. Canadian Geotechnical Journal, 31: 939-950.
20. Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S., and Okamoto, M. (1986)."Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods."Soils and Foundations, Vol. 26, No. 3, pp. 23-41.
21. Vaid, Y.P., and Negussey, D. (1984). Relative density of pluviated sand samples. Soil and Foundations 24(2): 101-105.
22. Vaid, Y.P., and Negussey, D. (1988). Preparation of reconstituted sand specimens. Advanced triaxial testing of soil and rock, ASTM STP 977, ASTM, Philadelphia, pp.405-417.

23. Vaid, Y.P., Sivathayalan, S., and Stedman, D. (1999). Influence of specimen-reconstituting method on the undrained response of sand. *ASTM, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, 22(3): 187-195.
24. Vucetic, M., and Dodry, R. (1988). Cyclic triaxial strain-controlled testing of liquefiable sands. *Advanced triaxial testing of soil and rock*, R. T. Doaghe, R. C. Chaney, and M. L. Silver, eds., ASTM, West Conshohocken, Pa., 475-485.
25. Yoshimi, Y., Hatanaka, M., and Oh-oka, H. (1978). Undisturbed sampling of saturated sands by freezing. *Soil and Foundations* 18(3): 59-71.
26. Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O., and Makihara, Y. (1984). Undrained cyclic shear strength of a dense Nigata sand. *Soil and Foundations* 24(4): 131-145.
27. 張嘉偉 (1997) “圓錐貫入試驗在粉砂中之標定”國立交通大學土木工程系，碩士論文。
28. 王統立 (2000) “高細料含量粉土細砂中 CPT 之標定試驗”國立交通大學土木工程系，碩士論文。
29. 蔡明道 (2002) “細粒料含量對粉土細砂不排水強度之影響”國立交通大學土木工程系，碩士論文。
30. 林靜怡 (2003) “細粒料對粉土細砂小應變勁度之影響”國立交通大學土木工程系，碩士論文。
31. 郭毓真 (2004) “細粒料含量對麥寮砂動態行為之影響”國立交通大學土木工程系，碩士論文。