

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

碾壓土壤剪力波速之行為探討

Behavior of Shear Wave Velocity of Compacted Soils



研究生:柳儒錚

指導教授:林志平 博士

中華民國九十九年七月

碾壓土壤剪力波速之行為探討

Behavior of Shear Wave Velocity of Compacted Soils

研究生：柳儒錚

Student: Ru-Zheng Liu

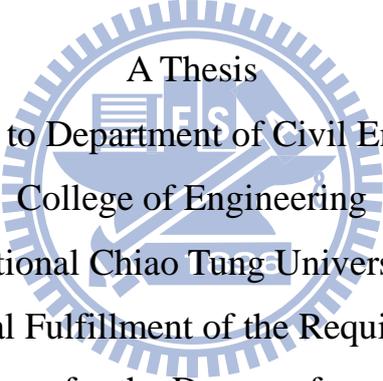
指導教授：林志平 博士

Advisor: Dr. Chih-Ping Lin

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 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

碾壓土壤剪力波速之行為探討

學生：柳儒錚

指導教授：林志平 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

土壤夯實品質對於土壤填方之土壩、土堤及擋土結構等工程之施工品質影響甚鉅，因此土壤夯實之檢測技術顯得重要不得輕忽，為發展新興之結合剪力波速與時域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)之碾壓土壤檢測技術，首要釐清碾壓土壤剪力波速之行為以評估其可行性。

本研究以彎曲元件(Bender Element)法進行土壤之剪力波速量測，試驗內容主要分成夯實土壤組構影響以及含水量與乾密度之影響兩部份，在夯實土壤組構影響上，透過在乾濕側夯實，控制相同乾密度、相同土壤以及相同量測含水量下，進行剪力波速量測，以探討乾濕側夯實造成之土壤組構對於剪力波速之影響；而在含水量與乾密度之影響試驗上，透過不同夯實含水量下夯實試體之量測含水量調整，探討在不同乾密度以及含水量下剪力波速之行為。試驗結果顯示，同一種

土壤中土壤組構達到足夠差異時確實會影響剪力波速的行為；此外，含水量及乾密度對剪力波速影響之試驗結果顯示，在飽和度 40%~90% 之間剪力波速與飽和度呈線性之關係，因所探討之土壤為碾壓土壤，故此飽和度範圍內之線性關係足以適用，最後以所得之結果驗證 Fratta et al.(2005) 之半理論模型也適用於本研究所使用之寶二土與湖山土，但由於該模型過於複雜，且剪力波速與量測含水量關係顯示剪力波速對應到之乾密度並無唯一解，因此現地應用上還需再調整含水量以求解，並不利於現地應用。

故本研究以另一角度出發，從剪力波速對新鮮碾壓土壤飽和度之關係中發現一個一對一之函數($V_s = a_s + b_s \times S^m$, 3.7 式)，並於現地應用架構上提出一初步應用之建議，利用該式於室內標定之結果，於現地透過表面波震測法結合 TDR 含水量量測，以達到無需取土便可快速進行土壤碾壓品管檢核之目標。

關鍵字：剪力波速、碾壓土壤、彎曲元件法

A Study of Behavior of Shear Wave Velocity of Compacted Soils

Student: Ru-Zheng Liu

Advisor: Dr. Chih-Ping Lin

Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Quality control of compacted soils is important in earth dam, levee, retaining wall backfill...etc. To develop a new measurement technique incorporating both electromagnetic wave based on Time domain reflectometry(TDR) and Shear wave velocity, it is necessary to first figure out the behavior of Shear wave velocity in compacted soils.

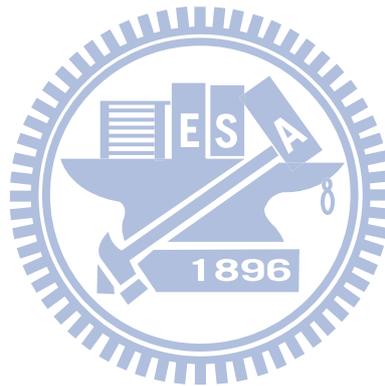
In order to measure shear wave velocity of compacted soils, bender element(BE) method is performed in laboratory, and the purpose of experiment were divided into two parts: investigating the influence soil fabric on shear wave velocity of compacted soil, and to figure out the relationship between soil phase parameters and shear wave velocity. Experimental results show that soil fabric of fine soils does affect the behavior of shear wave velocity in compacted soils under the same dry density and water content, and the shear wave velocity of the compacted soil has a linear relationship with the degree of saturation if it is between 40%~90%, the semi-theoretical model(Fratta et al. 2005) was successfully applied to analyze the data. However, it requires varying the

water content to be able to measure water content and dry density in the field.

Alternatively, an empirical formula ($V_s = a_s + b_s \times S^m$) was found to well describe the shear wave velocity in terms of degree of saturation of freshly-compacted soil. Through this function, a method combined with surface wave testing and TDR technology was proposed.

Preliminary laboratory results show that the proposed method can achieve 3% accuracy in dry density and 1% accuracy in water content.

Key words: shear wave velocity, compacted soil, bender element method



致謝

首先我要感謝林志平老師，在念研究所的這段日子，林老師讓我學習到批判性思考的重要性以及邏輯性的思維。在論文方面更是不遺餘力地指導，日常生活也常受老師照顧，很是感激。其次要感謝的是林俊宏學長的幫忙，俊宏學長總在我做研究困乏難耐之際提出非常寶貴之建議，使我論文得以順利完成。在震測的領域中，學長總是非常樂意的傾囊相授，使我於研究所這段時光學到了許多有關震測及地球物理方面的寶貴知識及經驗。可說是沒有學長的帶領就沒有現在的我。接著還要感謝防災中心的各個助理們，因為有你們在，出差再累都可欣然接受。最後感謝陪伴我一起度過這段日子的學長姐們、同學們、學弟妹們、朋友們還有許多幫助過我的人們。沒有你們，我的生活將不會有快樂；更因為有你們，生活充滿了意義。

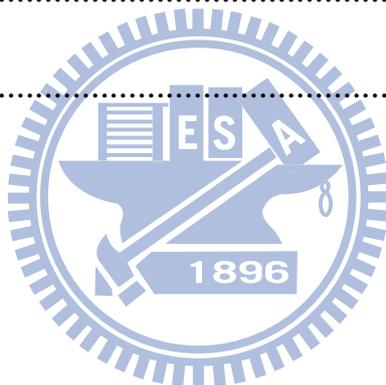
除了感謝還是感謝，謝謝大家造就了今天的我，千言萬語也道不盡這份滔滔感懷，在此向各位致上最深的謝意。

目錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	iii
致謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xii
第一章 緒論	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
第二章 文獻回顧	3
2.1 剪力波速與其影響因子	3
2.1.1 剪力波速與土壤有效應力之關係	3
2.1.2 剪力波速與物理性質之關係.....	7
2.2 物理性質描述之半理論模型	11
2.3 室內量測剪力波速之方法	15
2.3.1 共振柱試驗(Resonant column method, RC)	16
2.3.2 彎曲元件試驗(Bender element method, BE)	22

2.3.3 剪力模數量測之比較.....	23
2.4 彎曲元件介紹.....	24
2.4.1 彎曲元件之壓電特性.....	24
2.4.2 彎曲元件製作要點.....	24
2.4.3 激發型式、能量與頻率之選擇	27
2.4.4 剪力波波傳時間之判斷.....	29
第三章 研究方法與試驗規劃	32
3.1 研究方法之建立.....	33
3.1.1 研究流程.....	33
3.1.2 試驗系統之建立.....	33
3.2 試驗規劃.....	37
3.2.1 試驗儀器配置與規劃.....	37
3.2.2 彎曲元件設計影響因子探討.....	40
3.2.3 彎曲元件製作.....	43
3.2.4 試驗土樣.....	46
3.2.5 試驗步驟.....	49
第四章 結果與討論	53
4.1 剪力波速試驗之結果.....	53
4.1.1 分析方法說明.....	53

4.1.2 試驗結果.....	54
4.2 Fratta 半理論模型適用性探討與推導	64
4.3 剪力波速於現地應用初步探討	70
第五章 結論與建議	75
5.1 結論.....	75
5.2 建議.....	77
參考文獻.....	79
附錄一	84
附錄二	86



圖目錄

圖 2.1 土壤剪力波速與夯實含水量及基質吸力關係圖(Claria and Rinaldi,2007).....	7
圖 2.2 剪力波速與飽和度在不同土體中之關係圖:(a)細玻璃珠;(b)與高嶺土混合之細玻璃珠;(c)花崗岩粉末;(d)液化砂(Cho and Santamarina, 2001)	9
圖 2.3 正規化剪力波速與乾密度之關係圖(Kim et al., 2001).....	10
圖 2.4 剪力波速與夯實含水量關係圖(Claria and Rinaldi, 2007) .	11
圖 2.5 飽和度與正規化土壤剪力模數關係圖(Fratta et al., 2005) .	14
圖 2.6 剪力波速與飽和度關係圖：實驗資料(Cho and Santamarina,2001)與半理論模型(Fratta et al., 2005)	15
圖 2.7 單端自由式共振柱試驗示意圖(Al-Hunaidi et al., 1996).....	17
圖 2.8 典型單端自由式之試驗結果(Kim and Park, 1999)	19
圖 2.9 雙端自由式共振柱儀器示意圖(Stokoe et al., 1994).....	20
圖 2.10 典型雙自由端共振柱實驗結果(Kalinski and Thummaluru, 2005).....	20
圖 2.11 典型雙自由端共振柱自動能量頻譜結果(Kalinski and Thummaluru, 2005)	21
圖 2.12 彎曲元件法與共振柱試驗之剪力模數量測比較(Ferreira	

and Santos, 2006).....	23
圖 2.13 彎曲元件連接型式示意圖(Leong et al., 2005).....	25
圖 2.14 彎曲元件裝置示意圖(Santamarina et al., 2001)	26
圖 2.15 不同 R_L 影響因子之近場效應影響(Sawangsuriya et al., 2006)	28
圖 2.16 典型剪力波速之量測結果(Kawaguchi et al., 2001).....	30
圖 2.17 不同初達時間下試體長度對剪力模數(G)之影響 (Kawaguchi et al., 2001)	31
圖 3.1 研究方法流程圖.....	32
圖 3.2 壓克力夯模示意圖.....	35
圖 3.3 鋁製試體架.....	35
圖 3.4 壓電陶瓷晶片原樣.....	36
圖 3.5 訊號擷取卡及波形產生器	36
圖 3.6 剪力波速量測系統配至示意圖	37
圖 3.7 夯實曲線調整示意圖.....	40
圖 3.8 寶二砂土剪力波速量測接地測試：(a)無接地(b)有接地.....	41
圖 3.9 耦合現象之影響.....	42
圖 3.10 耦合現象降低之結果.....	42
圖 3.11 裁切後之壓電陶瓷晶片.....	44
圖 3.12 同軸線中心銅線銲接於壓電片中層金屬片	44

圖 3.13 將銲接好之壓電片上熱固膠做防水處理	45
圖 3.14 導電漆於壓電片之塗製	45
圖 3.15 彎曲元件完成圖.....	46
圖 3.16 寶二砂土粒徑分佈圖.....	47
圖 3.17 湖山砂土粒徑分佈圖.....	49
圖 4.1 激發訊號與接收訊號.....	54
圖 4.2 壓克力模夯實曲線(a)寶二砂土(b)湖山砂土	55
圖 4.3 剪力波速與量測含水量之關係(a)寶二砂土(b)湖山砂土.....	56
圖 4.4 土壤組構試驗成果比較(a)寶二砂土(b)湖山砂土	59
圖 4.5 剪力波速與飽和度之關係(a)寶二砂土(b)湖山砂土	61
圖 4.6 剪力波速與乾密度關係(a)寶二砂土(b)湖山砂土	63
圖 4.7 m 值與乾密度之關係(a)寶二砂土(b)湖山砂土.....	67
圖 4.8 G_0 值與乾密度之關係(a)寶二砂土(b)湖山砂土	68
圖 4.9 模型推導與量測數據之比較(a)寶二 13.2%(b)湖山 11.8%.	69
圖 4.10 剪力波速與飽和度之關係，(a)寶二砂土(b)湖山砂土.....	71
圖 4.11 現地初步應用構想圖	72
圖 4.12 室內試驗資料檢核現地應用法乾密度量測之結果	73
圖 4.13 夯實能量變化造成之剪力波速變化.....	74

表目錄

表 3.1 剪力波速量測試驗規劃.....	39
表 3.2 彎曲元件量測遭遇問題及解決對策整理	41
表 3.3 試驗土樣之物理性質整理	48
表 4.1 不同夯實含水量最佳化 m 值與 G_0 值反算結果.....	67



第一章 緒論

1.1 研究動機

土壤填方之含水量與密度控制了土壩、土堤及擋土結構之水密性與強度，亦為施工之品管指標，依照以往的經驗，土壤夯實的品質對於上述結構物影響甚巨，夯實不良易造成填方坍塌、堤防掏空及擋土結構破壞。因此，碾壓土壤的檢測技術顯得重要不得輕忽。為可快速且準確進行現地含水量與乾密度之量測而達到品管控制之目的，核子密度儀一度成為熱門檢測技術，但有鑒於其採用具危害之放射性物質進行量測，造成有幅射污染、人員訓練及器材管理等衍生問題，近幾年國際上積極發展非核子方法之量測技術，國內實有必要評估這些新興方法，發展實務可行的填方土壤檢測技術，希望有效取代砂錐法、烘乾法與核子方法以提昇國內大壩、土堤及擋土結構之檢驗品質及效率。在眾多新興量測技術中，時域反射法技術可快速且準確地測得現地含水量，但若欲獲得現地乾密度則須挖土取樣而造成其效率上之降低，因此考量發展一套結合剪力波速與時域反射儀(Time Domain Reflectometry, TDR)的檢測技術，而達到無需挖取現場土樣的快速檢測法，為將剪力波應用於碾壓土壤檢測上，首要進行碾壓土壤剪力波速

之行為探討，故進行本次研究。

1.2 研究目的

本研究主要目的是欲了解夯實土壤組構以及含水量與乾密度對碾壓土壤剪力波速之影響兩部份，在先行了解夯實土壤組構於碾壓土壤剪力波速中所扮演之角色後，觀察剪力波速與含水量與乾密度之行為，評估剪力波速應用於現地含水量與乾密度量測之可能性，再將所得結果測試 Fratta et al.(2005)所提之剪力波速半經驗式之適用性，而後提出一適於現地之剪力波速與含水量乾密度之關係式，以做為應用剪力波速於現地含水量與乾密度量測技術之理論基礎。



第二章 文獻回顧

剪力波速之影響因子主要分為有效應力、土壤種類、土壤物理性質如含水量、乾密度、土壤組構等，為尋求以物理性質描述剪力波速行為之模型，於 Fratta et al.(2005)的研究中發現可供參考之半理論模型。接著對於剪力波速之量測方法上，選擇以彎曲元件(Bender element)法做為本研究之量測方法。以下為詳細介紹。

2.1 剪力波速與其影響因子

2.1.1 剪力波速與土壤有效應力之關係

對於含細粒料土壤而言，影響剪力波速的因子有平均有效應力，土壤孔隙比及飽和度。在飽和狀態的土壤下，透過室內實驗將剪力波速以下列式子來進行描述(Stoke et al., 1991; Santamarina and Cascante, 1998)；

$$V_s = C \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma_r} \right)^\eta \quad (2.1)$$

其中， V_s 為剪力波速；

σ'_m 為外加平均有效應力；

σ_r 為參考壓力，一般採用 1 大氣壓；

C 為與土壤孔隙比與壓縮性(compressibility)有關之標定常數；

η 為與土壤顆粒配位數(coordination number)有關之常數。

但是(2.1)式並不適合用來描述非飽和土壤與剪力波速的行為，原因是該式並未考慮到低含水量下，基質吸力(metric suction)將成為影響剪力波速的主要因子(Alonso and Gens, 1994)。

Cho and Santamarina(2001)認為，在非飽和狀態下(2.1)式無法有效描述剪力波速之行為的原因在於未考慮基質吸力所造成之平均有效應力增量，以及土體濕密度變化所產生之影響，於是基於(2.1)式的基礎上，提出了改良式


$$V_s = C \left(\frac{\sigma'_m + \sigma'_{eq}}{\sigma_r} \right)^\eta \sqrt{\frac{e + G_s}{eS + G_s}} \quad (2.2)$$

其中， S 為飽和度；

σ'_{eq} 為土壤在 S 飽和度下，因基質吸力所造成之等值有效應力；

e 為孔隙比；

G_s 為土壤顆粒之比重。

以飽和土壤量測結果得到之 C 及 η 常數，如果可得知在 S 飽和度下之 σ'_{eq} 值，便可以預測在該 S 飽和度下土壤剪力波速之行為。至於 σ'_{eq} 值的獲得，Cho and Santamarina(2001)假設土顆粒為一球型顆粒，並提

出以簡單立方堆積(simple cubic packing, 簡稱 SC)及四面體堆積(tetrahedral packing, 簡稱 TH)兩種架構下的 σ'_{eq} 值如下

$$\text{SC } \sigma'_{eq} = \frac{\pi T_s}{4R} \left[2 - \left(\frac{8}{9} G_s w \right)^{\frac{1}{4}} \right] \quad (2.3)$$

$$\text{TH } \sigma'_{eq} = 2\sqrt{2} \frac{\pi T_s}{4R} \left[2 - \left(\frac{8}{9} G_s w \right)^{\frac{1}{4}} \right] \quad (2.4)$$

其中， T_s 為水與土顆粒接觸表面之表面張力；

R 為球狀土顆粒之半徑；

w 為土壤之重量含水量。

當中並未考慮土壤堆疊架構因基質吸力及外加有效應力而造成之變形，如欲考慮此因素，則需透過疊代方式求得(Cho and Santamarina, 2001)。

Claria and Rinaldi(2007)與 Cho and Santamarina(2001)對於基質吸力造成的影響看法不同，前者認為基質吸力與外加有效應力對於土壤剪力波速之影響程度不同，不應採用相同之 C 及 η 進行計算，因而提出適用於非飽和土壤之改良式為

$$V_s = C \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma_r} \right)^\eta + \alpha \left(\frac{\sigma'_{eq}}{\sigma_r} \right)^\beta \quad (2.5)$$

其中， α 和 β 為考量基質吸力對剪力波速影響之標定參數。

根據此式，在無外加應力之條件下，其等式右側的第一項將為零，而第二項則反應在含水量變化過程中基質吸力所造成之影響；另一方面，當外加有效應力越來越大時，因含水量變化而造成之基質吸力增加的影響便顯得較為次要。在此式中之 σ'_{eq} 雖可透過 Cho and Santamarina(2001)由物理模型所提出之建議式進行評估，但在實際的土壤中，土壤之組成顆粒極為複雜，不易於估計，因此，若能由其他土壤狀態參數對基質吸力之影響進行估計會較為容易。假設在某飽和度下之土壤剪力波速為 V_{s0} ，則(2.5)式可改寫成

$$V_s = C \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma_r} \right)^\eta + V_{s0} \quad (2.6)$$



Claria and Rinaldi(2007)透過控制試體之圍壓、夯實所形成之土壤結構、重量含水量以及夯實密度三項變數以彎曲元件(Bender element)進行土壤剪力波速以及基質吸力之量測結果，如圖 2.1 所示， V_{s0} 與土壤之基質吸力存有線性關係，則(2.6)式可再進一步改寫為

$$V_s = C \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma_r} \right)^\eta + k \times \sigma_{ms} \quad (2.7)$$

其中， σ_{ms} 為土壤基質吸力；

k 為 V_{s0} 與土壤之基質吸力之標定參數。

此參數與土壤之孔隙比以及組構有關，且由其實驗資料顯示，較大之孔隙比會有較低的 k 值。

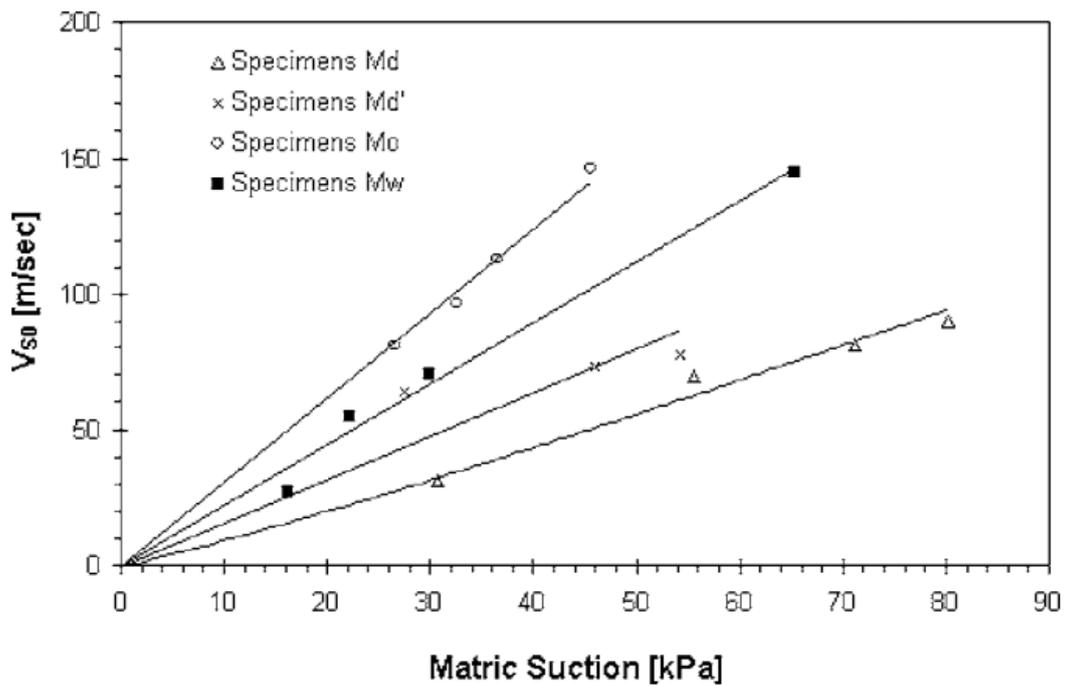


圖 2.1 土壤剪力波速與夯實含水量及基質吸力關係圖(Claria and Rinaldi,2007)

2.1.2 剪力波速與物理性質之關係

前述之經驗式雖可對土壤剪力波速行為進行描述，但其主要變數皆是以土壤所受之有效應力(包含外加有效應力與基質吸力所造成之等效有效應力)為出發點，並未以土壤物理性質(含水量、乾密度、孔隙比及粒徑分佈等)角度考量，將其對剪力波速之影響加以進行描述，

然而從多數學者(Cho and Santamarina, 2001; Kim and Park, 1999; Kim et al., 2001; Claria and Rinaldi, 2007)之研究結果中可以發現，土壤物理性質對剪力波速具有明顯影響。

Cho and Santamarina(2001)控制土壤之孔隙率，透過配製四種不同粒徑分佈之土壤試體中，對試體之飽和度與剪力波速之關係進行試驗(在固定孔隙率的狀況下，飽和度與重量含水量之間僅為一個常數的關係，故可將飽和度視為重量含水量)，試驗結果如圖 2.2 所示。當飽和度(含水量)逐漸增加時，其波速有漸漸下降的狀況，而在接近飽和的條件下，其剪力波速的變化也不如壓縮波劇烈(Stoke et al., 2004)。此外，對於含有較大粒徑的細玻璃珠土樣($D_{50}=320\mu\text{m}$)以及液化後之砂($D_{50}=360\mu\text{m}$)而言，如圖 2.2a 及圖 2.2d 所示，在飽和度介於 10% 至 80% 之間，其剪力波速降低的狀況不明顯，然而在粒徑較小之花崗岩粉末($D_{50}=89\mu\text{m}$)，如圖 2.2c 所示，其剪力波速隨飽和度的變化較為明顯，另外在圖 2.2b 中之結果是由細玻璃珠與高嶺土組成，其中高嶺土占整體比例約 20%，然而其卻控制了整個試體中剪力波速與飽和度關係的行為。

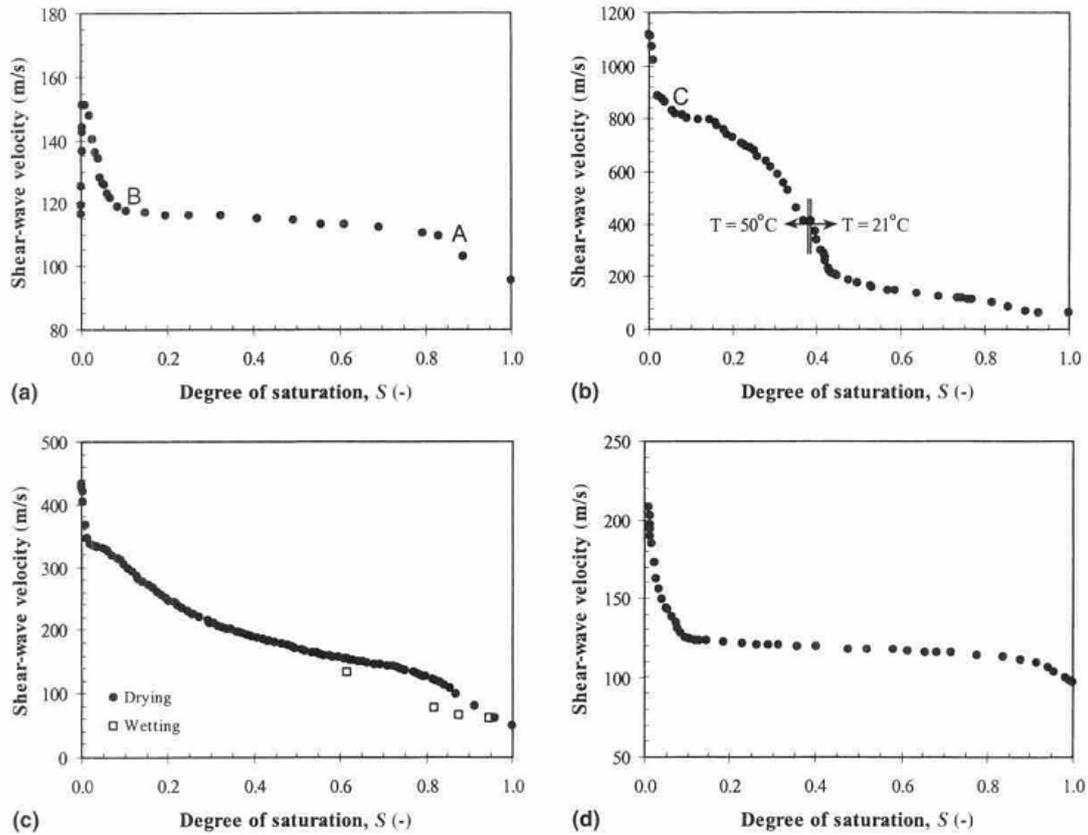


圖 2.2 剪力波速與飽和度在不同土體中之關係圖:(a)細玻璃珠;(b)與高嶺土混合之細玻璃珠;(c)花崗岩粉末;(d)液化砂(Cho and Santamarina, 2001)

Kim and Park(1999)以及 Kim et al.(2001)利用共振柱試驗(resonant column)以下式對剪力波速進行正規化

$$V_{s,n} = V_{s,m} \left(\frac{P_a}{\bar{\sigma}_m} \right)^n \quad (2.8)$$

其中， $V_{s,m}$ 為平均有效應力 $\bar{\sigma}_m$ 下之剪力波速；

P_a 為一大氣壓下之參考應力；

n 為依剪力波速所標定之勁度參數。

正規化後之剪力波速與乾密度之間的關係如圖 2.3 所示，由其結果可以發現正規化後之剪力波速與乾密度有良好之線性關係，當乾密度增加時，剪力波速也隨之提升。

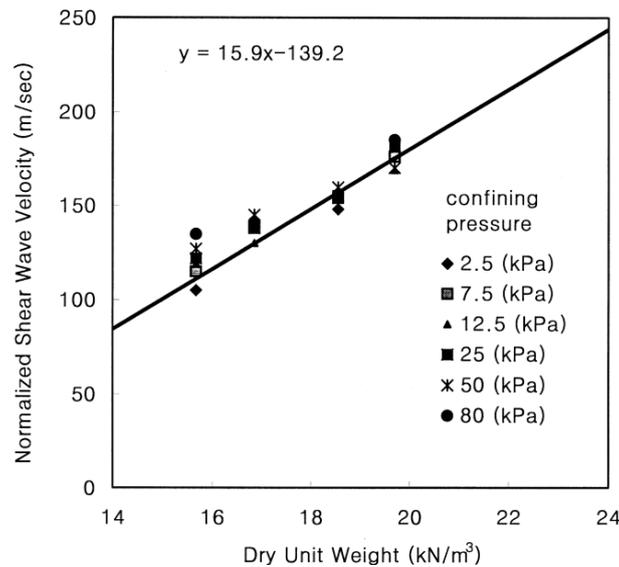


圖 2.3 正規化剪力波速與乾密度之關係圖(Kim et al., 2001)

Claria and Rinaldi(2007)透過控制圍壓在不同夯實含水量下之土壤進行剪力波速量測(當中包括在乾側夯實及濕側夯實之試體)，其結果如圖 2.4 所示。該土壤之最佳含水量為 21%，在乾側無圍壓的實驗結果中，即使其乾密度僅有 1.47g/cm^3 (最大乾密度為 1.58g/cm^3)，但其實驗所得之剪力波速與最大乾密度所得之剪力波速相近，而在濕側段，其乾密度達至 1.56g/cm^3 ，但其剪力波速僅為最大乾密度時的三分之一，可以在此發現乾密度對於剪力波速並無明顯關係。Claria and

Rinaldi 原本預計其實驗結果應與標準夯實曲線呈現一類似均部分佈之曲線，但是在乾側段的結果顯示土壤有受到基質吸力之影響導致剪力波速之提升，因基質吸力與土壤含水量有關，因此在剪力波速於土壤密度之量測上，至少還需考慮土壤含水量才有機會獲的較為準確之結果(Claria and Rinaldi, 2007)。

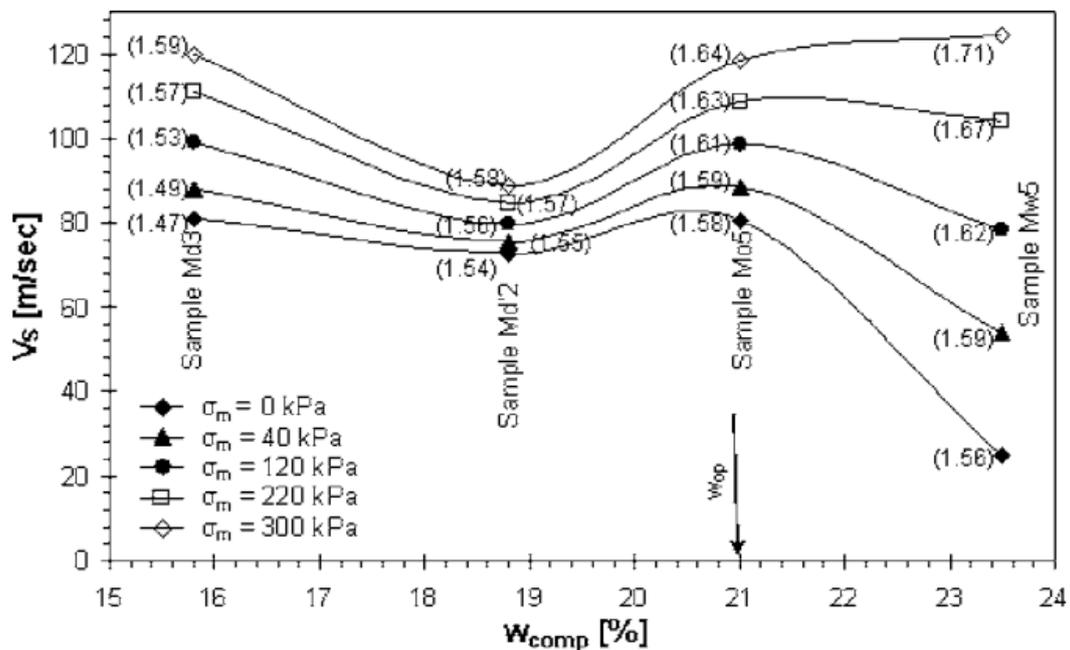


圖 2.4 剪力波速與夯實含水量關係圖(Claria and Rinaldi, 2007)

2.2 物理性質描述之半理論模型

土壤物理性質與剪力波速之關係極為複雜，並不容易使用一經驗式做有效之描述，為尋求一個可以透過物理性質角度去描述剪力波速

行為之理論模型，Fratta et al.(2005)嘗試以半理論模型之方式進行土壤物理性質與剪力波速之描述。

以完全彈性條件為基礎，土體中之剪力波速可以下式表示：

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{soil}}{\rho_m}} \quad (2.9)$$

其中， G_{soil} 為土體之剪力模數(shear modulus)；

ρ_m 為土體濕密度。

假定土體為三相體(空氣、水、土顆粒)組成，其濕密度可表示為

$$\rho_m = \rho_w G_s \cdot (1 - n) + \rho_w n S + \rho_a n \cdot (1 - S) \quad (2.10)$$

其中， ρ_w 為水密度；

G_s 為土顆粒比重；

n 為孔隙率；

S 為飽和度；

ρ_a 為空氣密度。

而 G_{soil} 會受到外加有效應力以及基質吸力的不同而有所變化，對於考量碾壓土壤為條件下，碾壓土壤主要位於地表下 50 公分內，其覆土壓力極小，可忽略不計，如此 G_{soil} 可假設僅與基質吸力有關，而

由實驗結果觀察可知，基質吸力大小與飽和度相關，因此 G_{soil} 可視為與飽和度有關之函數。Fratta et al.(2005)對其與飽和度之關係提出一簡單數學模型。

$$G_{soil} = G_0 \left(S^{\frac{m}{m-1}} - 1 \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.11)$$

其中， m 為標定參數；

G_0 為飽和度為 $2^{\frac{1-m}{m}}$ 時之剪力模數，該飽和度通常極小，可視為在乾燥狀態下之土體剪力模數。

此關係式所描述之剪力模數與飽和度之行為如圖 2.5 所示，隨飽和度的降低其剪力模數將隨之上升，而在飽和土壤中，其土壤剪力模數將降為 0，此外， m 參數在不同飽和度下會影響剪力模數之變動，在較高的 m 值下，除了在接近飽和及接近乾燥的飽和度下，剪力模數較不受飽和度之影響；反之，在 m 值較小的狀況下，其土壤剪力模數變動也較大。將(2.10)式及(2.11)式代入(2.9)式，可得

$$V_s = \sqrt{\frac{G_0 \left(S^{\frac{m}{m-1}} - 1 \right)^{\frac{1}{m}}}{\rho_w G_s \cdot (1-n) + \rho_w n S}} \quad (2.12)$$

其中， ρ_a 因為極小故可忽略。

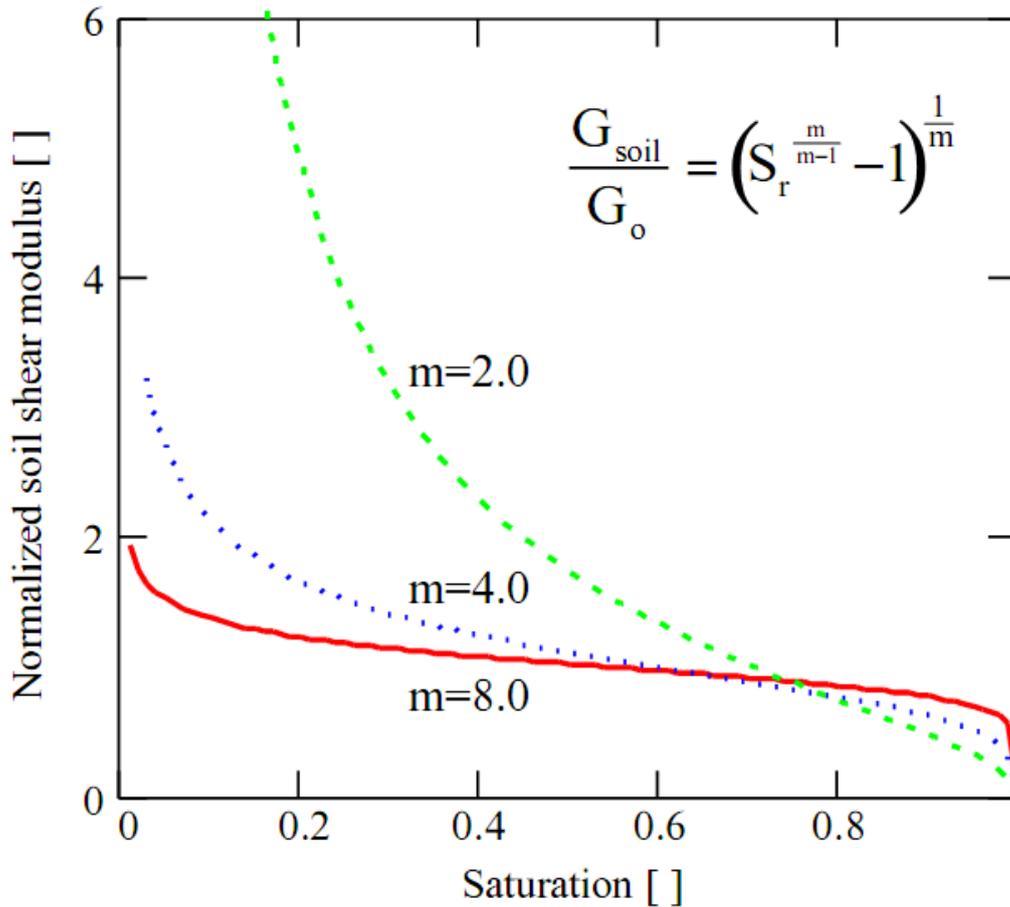


圖 2.5 飽和度與正規化土壤剪力模數關係圖(Fratta et al., 2005)

Fratta et al.(2005)利用(2.12)式對 Cho and Santamarina(2001)利用彎曲元件在不同土壤中所得之飽和度與剪力波速之關係進行驗證，如圖 2.6 所示。在此半理論式中可良好模擬飽和度在 10%-90%之剪力波速行為，雖在接近飽和以及接近乾燥時之預測行為與實驗資料有所差距，但對碾壓土壤之飽和度適用範圍(通常是在 50%-80%)應已足夠。

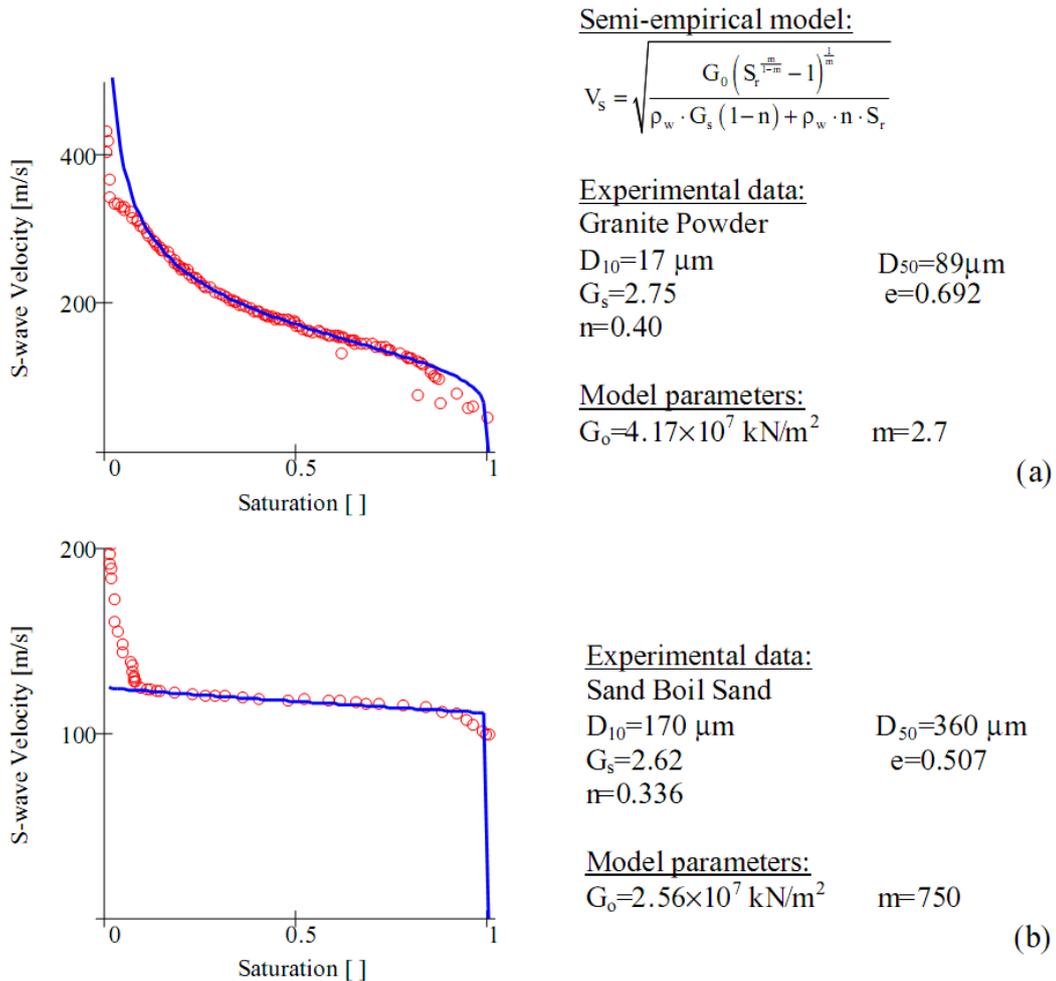


圖 2.6 剪力波速與飽和度關係圖：實驗資料(Cho and Santamarina,2001)與半理論模型(Fratta et al., 2005)

2.3 室內量測剪力波速之方法

目前室內量測剪力波速之方法主要有兩種，可分為間接量測之共振柱(resonant column)量測法與直接量測之壓電材料(piezoelectric material)量測法。其中，壓電材料量測法因所採用之壓電材料之不同型式(包含極化方向與形狀)，可再區分為剪力片法(shear-plate method)

以及彎曲元件法(bendr-element method)兩種。然而，自 Lawrence(1963)提出剪力片法之應用後，便少有學者延用；反而是 Shirley and Anderson(1975)所提出之彎曲元件法受到較多學者重視。(Cho and Santamarina, 2001; Lee and Santamarina, 2005; Leong et al., 2005; Claria et al., 2007; Yang et al., 2008)，其主要原因可能在於彎曲元件可透過較小電壓驅動進而產生較大變形量，因此有助於量測；而共振柱法中，依據固定土樣兩端之限制可分為雙端固定式(Fixes-Fixed)、單端自由式(Fixed-Free)以及雙端自由式(Free-Free)三種，文獻中主要以單端固定式(Kim and Stokoe, 1992; Santamarina and Cascante, 1996; Kim and Park, 1999; Cascante et al., 2005; Youn et al., 2008)以及雙端自由式(Kim et al., 1997; Kim et al., 2001; Kalinski and Thummaluru, 2005)為主，因此，在 2.3.1 及 2.3.2 兩小節將會對共振柱法(單端固定式、雙端自由式)及彎曲元件法做一初步介紹。

2.3.1 共振柱試驗(Resonant column method, RC)

從 1937 開始至今共振柱發展大約有七十年的歷史，是一種利用彈性波在柱狀體中傳遞所產生之共振型式，藉由彈性理論、黏彈性理論進行推導，計算剪力波速、剪力模數以及阻尼比的試驗方法。根據試體不同之邊界狀態，可分為雙端固定式(Fixed-Fixed)、單端自由式

(Fixed-Free)以及雙端自由式(Free-Free)。邊界固定之意是表示邊界無位移產生，而邊界自由則表示邊界可任意運動不受限。

單端自由式共振柱試驗之示意如圖 2.7 所示，此型共振柱儀器將試體一端固定於基座上，而另一端採不受限之自由運動，在其自由端部分有一具由磁力驅動之馬達與試體連接，透過控制軟體驅使馬達轉動產生扭轉，在另一端接收端部分設有兩個加速度規以記錄試體受扭轉時所產生之運動反應。

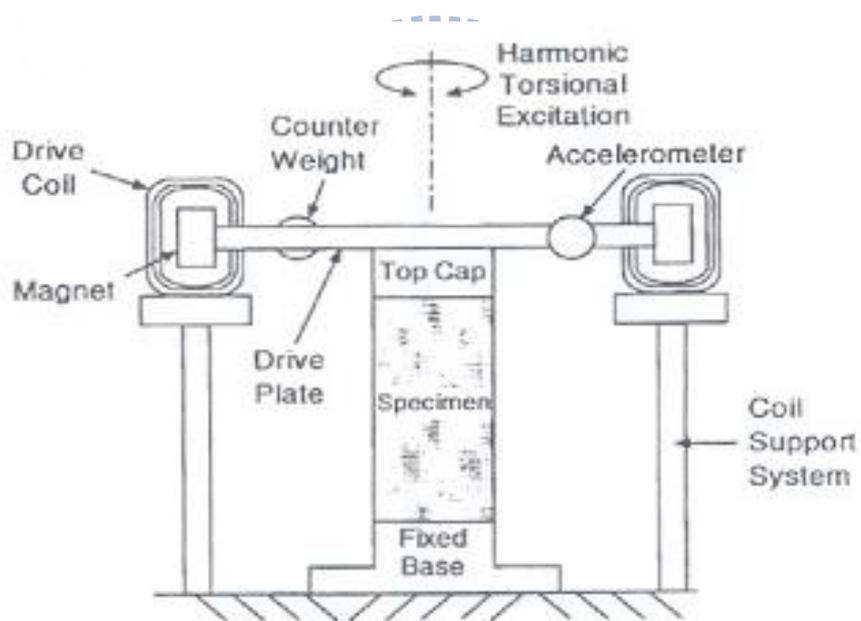


圖 2.7 單端自由式共振柱試驗示意圖(Al-Hunaidi et al., 1996)

實驗時，將試體一端固定於基座上，另一端透過磁力馬達送出一正弦波扭矩訊號，由加速度規記錄下不同頻率下所產生之反應，取其頻率之最大值，如圖 2.8 所示，此為共振頻率，利用下式計算剪力波速：

$$V_s = \frac{2\pi L f_n}{\alpha_{RC}} \quad (2.13)$$

其中，L 為試體長度；

f_n 為共振頻率(Hz)；

α_{RC} 為試驗系統參數；

α_{RC} 可由下式計算所得：

$$\frac{I}{I_0} = \alpha_{RC} \tan \alpha_{RC} \quad (2.14)$$

其中， I 為試體之極性轉動慣量(mass polar moment of inertia)；

I_0 為外加於試體上之物體之極性轉動慣量。



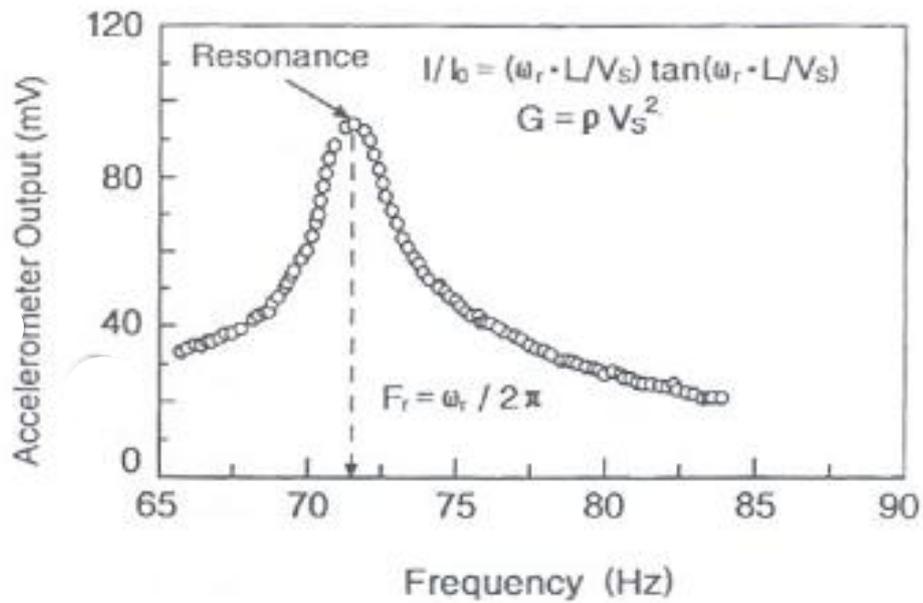


圖 2.8 典型單端自由式之試驗結果(Kim and Park, 1999)

雙端自由式共振柱試驗之示意圖如圖 2.9 所示，此型共振柱儀器跟單端自由式不同處在於，其試體採用懸掛方式，使其兩端皆處於可自由運動之狀態，因而可產生扭轉及軸向之振動，在其中一端架設裝有十字片剪刀狀之扭力振源，另一端裝設兩加速度規，實驗時，使十字片震源產生一衝擊波傳遞至另一端，記錄下波形即可，如圖 2.10 所示。因雙端自由式共振柱試驗所採用之震源為衝擊式，含有較寬之頻率，因此無須如單端自由式施作時需改變頻率以求得共振頻率。

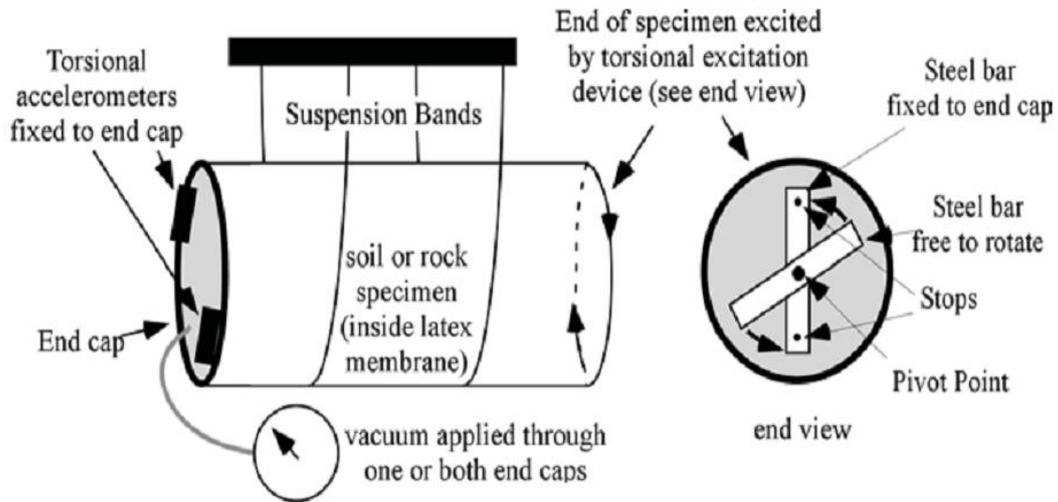


圖 2.9 雙端自由式共振柱儀器示意圖(Stokoe et al., 1994)

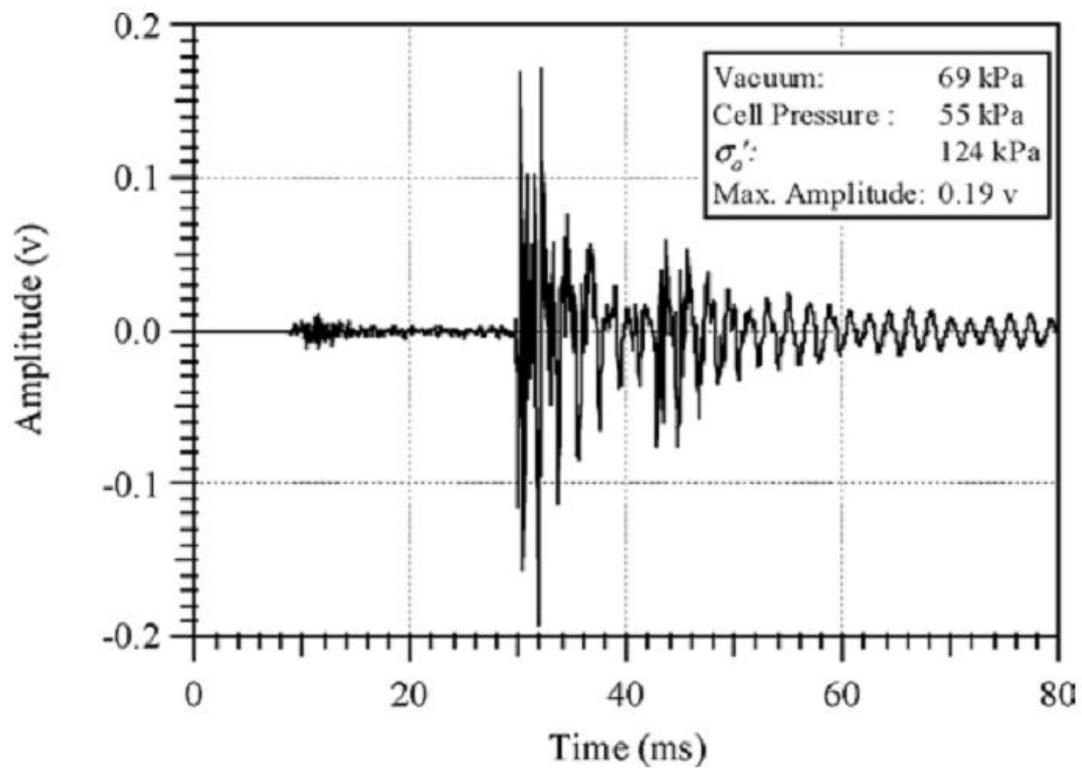


圖 2.10 典型雙自由端共振柱實驗結果(Kalinski and Thummaluru, 2005)

待記錄下波形之後，將波形資料以快速傅立葉轉換獲得該訊號之頻譜能量圖，如圖 2.11 所示。則頻譜中能量最大處之頻率即為共振頻率。其剪力波速之計算可採用(2.13)式，但該式之試驗系統參數 α_{RC} 則需改以下式計算：

$$\tan \alpha_{RC} = \frac{\left(\frac{I_1}{I} + \frac{I_2}{I}\right) \alpha_{RC}}{\frac{I_1 I_2}{I^2} \alpha_{RC}^2 - 1} \quad (2.15)$$

其中， I_1, I_2 為附加於試體兩端物體之極性轉動慣量。

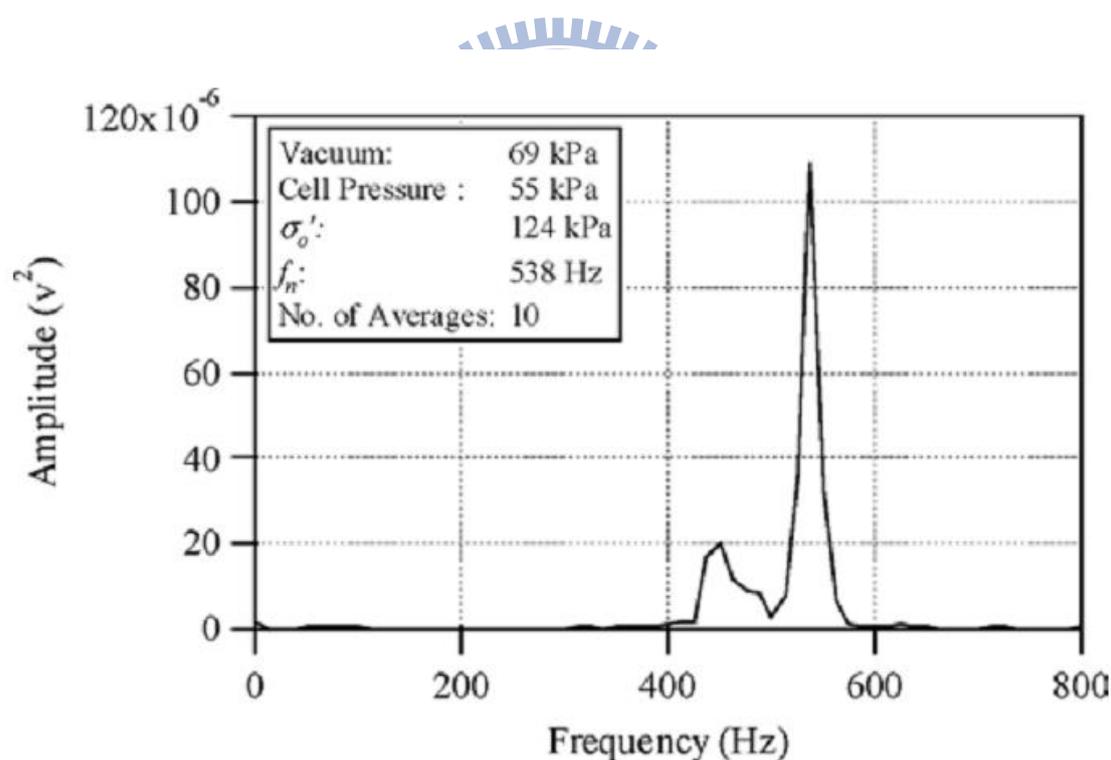


圖 2.11 典型雙自由端共振柱自動能量頻譜結果(Kalinski and Thummaluru, 2005)

2.3.2 彎曲元件試驗(Bender element method, BE)

彎曲元件法最先由 Shirley and Anderson(1975)所提出，已在國外發展二十多年，最初是利用具有壓電性質之水晶體做為試驗元件，目前國外試驗所採用之彎曲元件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外，亦可製做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。

目前關於彎曲元件室內剪力波速量測方法多採用一組彎曲元件(bender element)進行量測，實驗時，一端以波形產生器(Function generator)激發剪力波，另一端接收剪力波並由示波器(oscilloscope)或是電腦上判斷剪力波初達時間，藉由已知之波傳距離，利用下式推算出剪力波速。

$$V_s = \frac{L_b}{\Delta t} \quad (2.16)$$

其中， V_s 為剪力波速；

L_b 為剪力波傳遞距離；

Δt 為剪力波走時。

關於彎曲元件將在 2.4 節做詳細之介紹。

2.3.3 剪力模數量測之比較

Ferreira and Santos(2006)針對彎曲元件法與共振柱實驗法做了剪力模數量測上之比較，其比較結果如圖 2.12 所示。透過同時量測同一試體之剪力波速，以時間域(Time domain, TD)及頻率域(Frequency domain, FD)兩種方式所求得出之剪力模數結果顯示跟以共振柱試驗所得剪力模數之誤差分別為 2% 及 1%，而與共振柱試驗所得之剪力模數比在 TD 下，兩者剪力模數比值之最低限度為 58%，最高達 110%；在 FD 下，剪力模數比值最低限度為 58%，最高至 125%。基於以上比較結果，可指出彎曲元件提供了可靠之量測結果。加上彎曲元件體積小、價格便宜、使用方便以及對試體所造成之應變極小，故本研究將採用彎曲元件作為實驗方法，其製作過程及裝設將於第三章詳細說明。

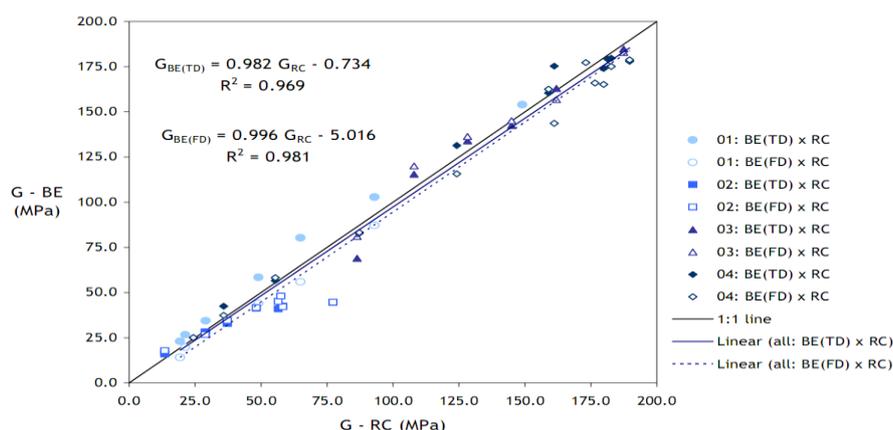


圖 2.12 彎曲元件法與共振柱試驗之剪力模數量測比較(Ferreira and Santos, 2006)

2.4 彎曲元件介紹

2.4.1 彎曲元件之壓電特性

彎曲元件係由壓電陶瓷晶片所組成，其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之型狀改變，由此可知壓電現象產生的原因為壓電材料受到電壓作用所產生之膨脹或收縮之行為，而壓電陶瓷晶片在製作時之極化方向決定了未來受一特定電壓方向作用下之變形方向，壓電陶瓷晶片可在不同方向上表現出其壓電特性。

壓電陶瓷晶片之特性通常由 4 個參數來描述， d 和 g 兩個壓電常數代表著陶瓷晶片在接收品質上之力學與電能間之函數關係， k 代表偶和係數(coupling coefficient)，為力學能與電能間轉換效率之指標，而 Q_m 常數表示力學能之損失程度，在選用彎曲元件上應儘量採用高 d, g, k 值且低 Q_m 值之壓電陶瓷材料(Brignoli et al., 1996)。

2.4.2 彎曲元件製作要點

如圖 2.13 所示，彎曲元件主要是由中間一片金屬片外面包夾兩片壓電陶瓷晶片所製成，而在壓電陶瓷之外側一端會有金屬覆蓋物做線

路銲接使用，根據線路連接的方式又可分為串聯式(series connected，如圖 2.13a 所示)與並聯式(parallel connected，如圖 2.13b 所示)兩種，依據不同之連接方式會有不同之壓電特性，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之功率是串聯的兩倍。故一般在利用彎曲元件量測剪力波速時，會採用激發端為並聯式，接收端為串聯式，但是由於會產生串擾(crosstalk)的現象進而造成分析時的困難。因此也有人採用激發端，接收端皆是並聯之型式，藉此消除串擾的影響(Brignoli et al., 1996；Lee and Santamarina, 2005)。

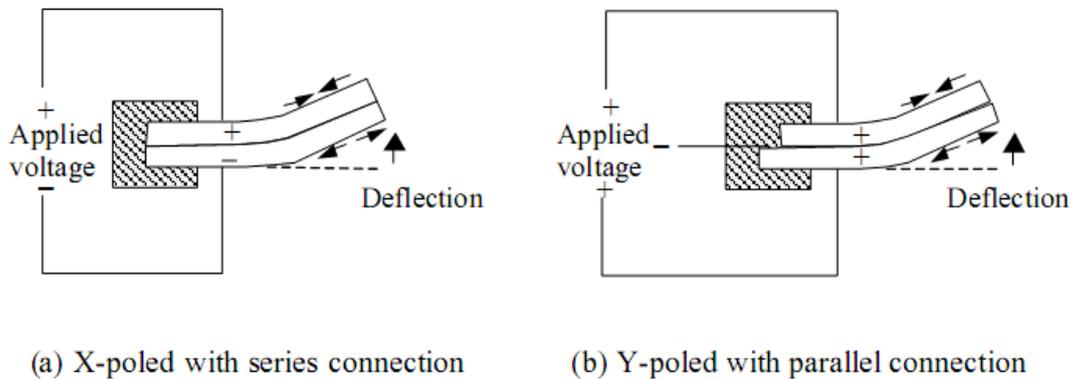


圖 2.13 彎曲元件連接型式示意圖(Leong et al., 2005)

就目前而言，對於彎曲元件法之彎曲元件裝置、量測及分析法尚未有標準化流程。因此對於製作彎曲元件只能以幾項基本要點作為依據 (Santamarina et al., 2001)，首先是採用的尺寸，彎曲元件之

長度以及寬度將影響其受力或受電壓後之反應，文獻中所採用之長度有從 6mm 至 32mm，寬度自 6mm 至 15mm，而厚度約在 0.6mm。選用適用之尺寸後，依照需求使用並聯或串聯之接線法進行接線，採用之電線應以較細之同軸線為佳，在銲接線路時，應盡量降低銲槍與壓電陶瓷晶片之接觸時間，以避免壓電陶瓷片因高溫而去極化，而後，如圖 2.14 所示，將整片壓電陶瓷片及銲接線路處塗上一層聚氨酯 (polyurethane) 等防水塗料進行防水，待其乾燥後，再於其表面漆上導電漆做為屏蔽，以避免激發端之電磁波於接收端產生訊號上之耦合 (coupling) 現象干擾，最後，使用環氧樹脂將完成之彎曲元件固定於試驗儀器上即可。

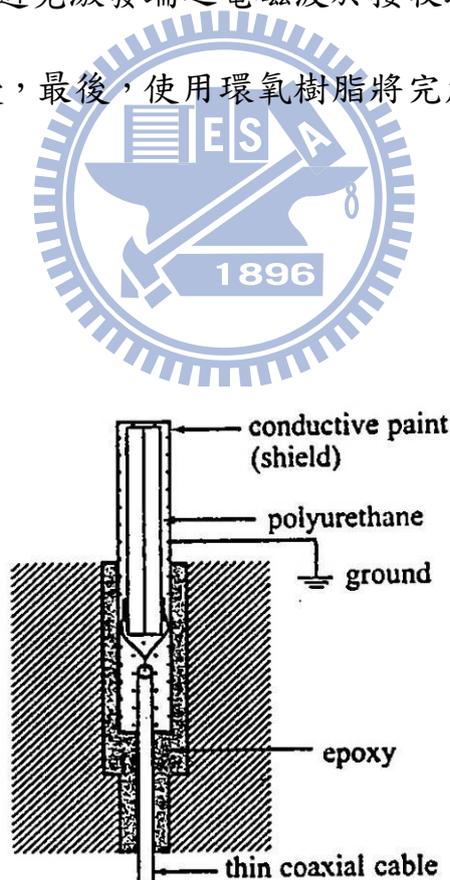


圖 2.14 彎曲元件裝置示意圖(Santamarina et al., 2001)

2.4.3 激發型式、能量與頻率之選擇

室內進行彎曲元件試驗一般多採用單一週期波型做為激發型式，激發型式一般有兩種選擇，一為方波，另一者為正弦波，兩者的波傳時間判斷方式也有所差異。激發波為方波時，由於方波為正弦波與餘弦波不同頻率之組合，在判斷波傳時間通常以接收波型之第一反折點為基準，因此容易受到近場效應(near field effect)影響，而正弦波在判斷波傳時間是由接收波形之波峰間之時間差來判別較不易受到近場效應影響。關於近場效應，Sanches-Salineró et al., (1986)發展出在無限域等彈性介質中，由一源點產生橫斷面正弦波波型脈衝，在時間域引發一觀測點位移變化之解析解，其衰減情形可由 R_L 試驗條件因子來控制觀測點所收到的波型形狀：

$$R_L = \frac{L}{\lambda} = \frac{Lf}{V_s} \quad (2.17)$$

其中， L 為波傳遞距離；

λ 為激發波長；

f 為激發頻率；

V_s 為材料剪力波速。

當土壤試體較短即波傳距離 L 較小，激發頻率 f 小且試體之剪力

波速甚大時，即表示 R_L 因子較小，接收波形在初達時，會在簡立波未到達前有偏移之現象；因壓縮波速大於剪力波速，故會產生在剪力波到達之前一干擾現象，此現象稱為近場效應。

R_L 影響因子，如圖 2.15 所示，分別以 $R_L=1$ 至 $R_L=8$ 不同狀況下比較，當 R_L 較小時，近場效應相當明顯，反之，當 R_L 相對較大時，近場效應之影響較小，因此可知在相同試體高度及相同激發頻率下，若試體之勁度越大，波傳速度越快近場效應之影響亦越大。

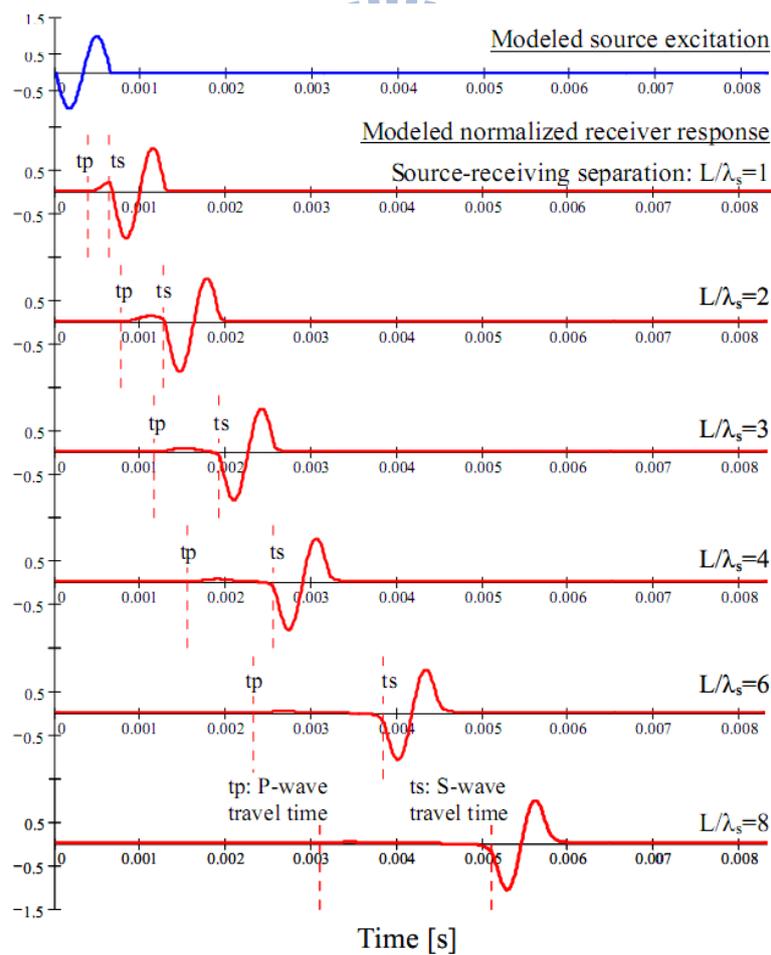


圖 2.15 不同 R_L 影響因子之近場效應影響(Sawangsuriya et al., 2006)

在激發能量選擇方面，壓電陶瓷晶片在製造過程中經過極化 (poling) 的步驟，極化電壓之大小及方向決定壓電材料之特性，Viggiani and Atkinson(1995)指出土壤彎曲元件所使用之激發電壓單一振幅不宜超過該壓電材料之極化電壓，一般而言，土壤剪力波試驗所使用彎曲元件之極化電壓以 10 伏特為主，因此試驗時激發電壓不宜超過 10 伏特，否則將會重新極化壓電材料而改變其特性。

此外，在激發頻率選擇上，Dyvik and Madshus(1985)提出剪力波激發頻率之改變會影響接收波形之振幅大小，當彎曲元件之激發頻率與土壤達到共振時，其接收波形將產生最大振幅，此時的激發頻率可視為最佳激發頻率，但因試驗土樣、試體條件狀況不同，故試驗時需不斷調整激發頻率，以得到土壤試體之最佳激發頻率。而 Viggiani and Atkinson(1995)建議若使用正弦波時，頻率應介於 1kHz~10kHz 之間，可降低近場效應之影響。

2.4.4 剪力波波傳時間之判斷

圖 2.16 為典型剪力波量測之結果，其結果分析法上，依據(2.16)式，判斷出試驗土體之剪力波速。在距離的挑選上，Kawaguchi et al., (2001)以不同長度之試體進行試驗，其結果如圖 2.17a 所示，圖上 A、B、C 及 D 點為不同之判斷時間初達點，由圖 2.17b 可以發現若以 C

點為初達時間點之判斷，則試體由波速所換算之剪力模數不會受試體長度之影響。

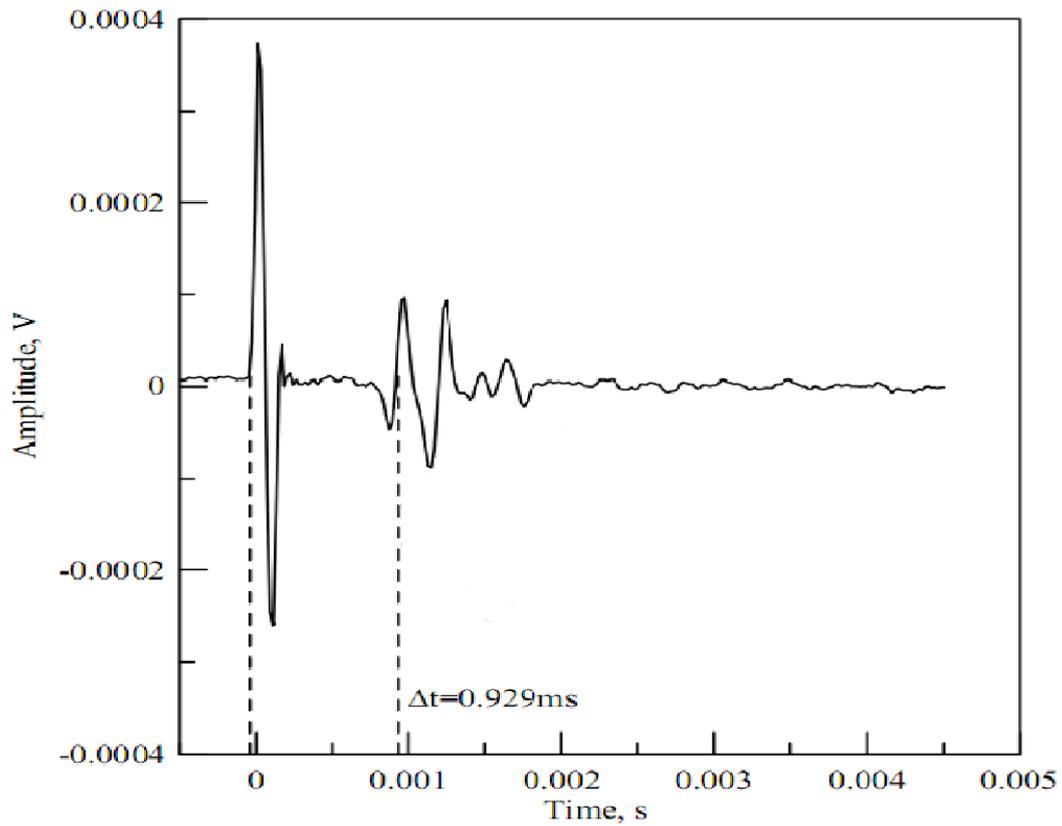


圖 2.16 典型剪力波速之量測結果(Kawaguchi et al., 2001)

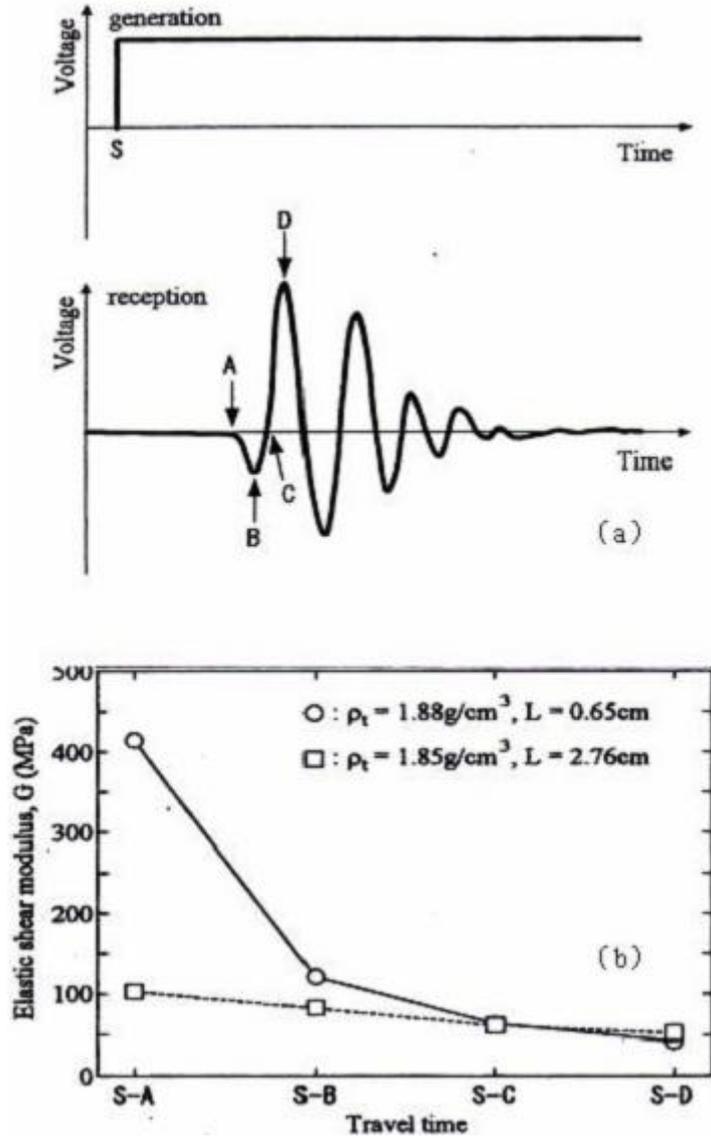


圖 2.17 不同初達時間下試體長度對剪力模數(G)之影響(Kawaguchi et al., 2001)

第三章 研究方法與試驗規劃

本章節將對於本研究之方法流程做一概述介紹，其流程圖如圖 3.1 所示，並說明試驗系統之建立，最後針對探討碾壓土壤組構與剪力波速關係之試驗規劃作一詳細說明，說明內容包括彎曲元件製作，試驗土樣，試體製作以及整個試驗流程步驟。

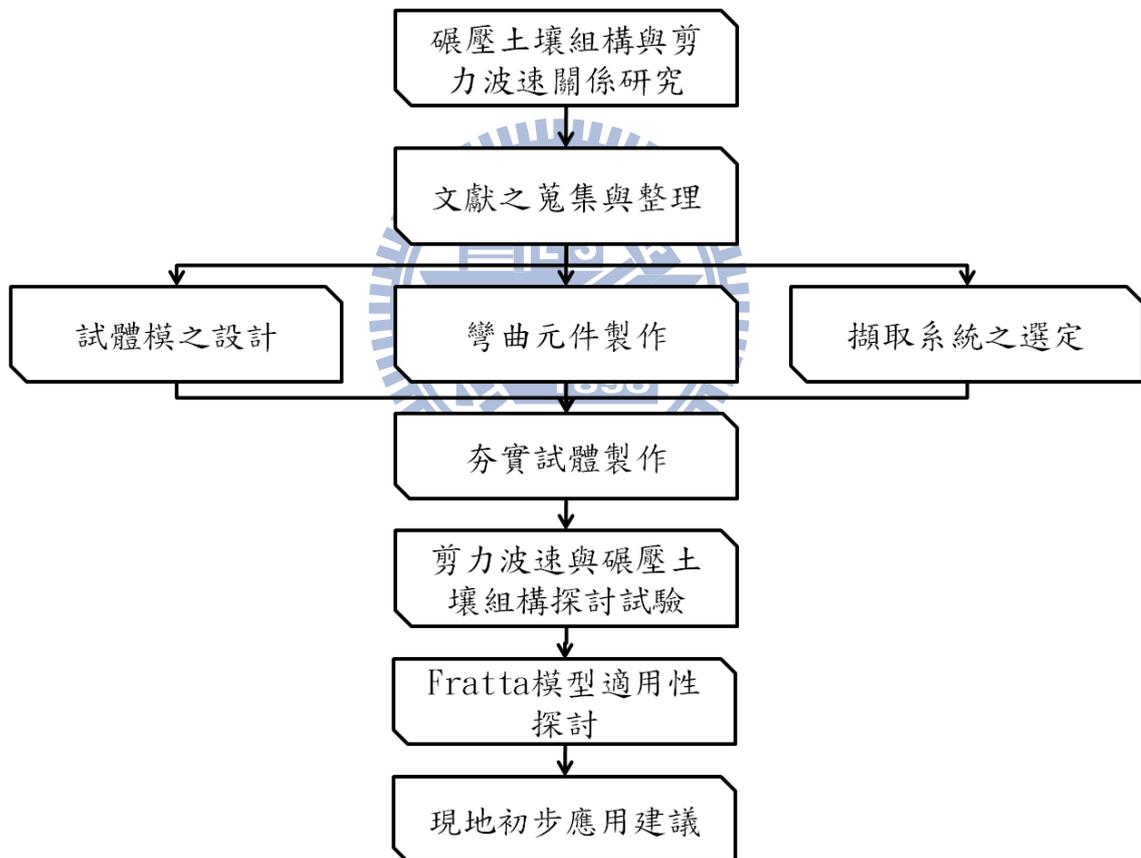


圖 3.1 研究方法流程圖

3.1 研究方法之建立

3.1.1 研究流程

本研究流程先進行相關文獻之搜集，歸納出前人對於土壤組構與剪力波速之關係尚未有明確探討之盲點，接著透過彎曲原件相關文獻設計出符合本研究需求之彎曲元件量測系統，進而進行碾壓土壤組構對剪力波速影響試驗與含水量，乾密度等影響因子之探討，依據探討結果，透過 Fratta et al.(2005)所提出之半理論模型驗證本研究結果與探討該模型之現地適用性，最後提出一初步應用於現地量測之建議架構。



3.1.2 試驗系統之建立

試驗量測系統之建立分為四個部分，分別為夯實試體模、試體架、彎曲元件及擷取系統，夯實模之設計參考 Cho and Santamarina(2001)，如圖 3.2 所示，其模體採用壓克力材質製作，壓克力模之壁面分三層並均布開八個孔洞以便穿入棉線提供試體之排水路徑，目的為達到可均勻調整含水量並提升施作效率。欲降低含水量可透過風吹烘乾及燈泡加熱方式；欲提升含水量則可將其置入不超過其試體模頂部之水箱潤濕，含水量變化控制採用秤重法監測其重量變化以確認試體之含水

量。試體製作完成將其擺置於試體架上，其試體架如圖 3.3 所示，由鋁金屬製作而成，彎曲元件將裝設於試體架伸縮柱體上，方便貫入試體進行剪力波速量測，如此可提升施作效率並可控制調整彎曲元件灌入深度。彎曲元件方面選用購自科鳴股份有限公司之 SB401008 之壓電陶瓷片，如圖 3.4 所示，其原始規格為長 40mm，寬 10mm，厚度 0.6mm。依照使用需求自行裁切，所能承受之最大電壓為 150 伏特。最後在擷取系統之選定上，因本研究所需求之訊號大小需能達至 10^{-4} 伏特數，目標頻率為 10kHz，取樣頻率需至少達至 100kS/s，且考慮到往後系統可依需求修改之可能性，故選用美商國家儀器股份有限公司之型號為 NI PXI-4461 之擷取系統如圖 3.5 所示，該系統之輸入電壓範圍為 $\pm 316\text{mV} \sim 42.4\text{V}$ ，解析度達至 24bit，取樣率為 204.8kS/s。相當符合本研究之需求。

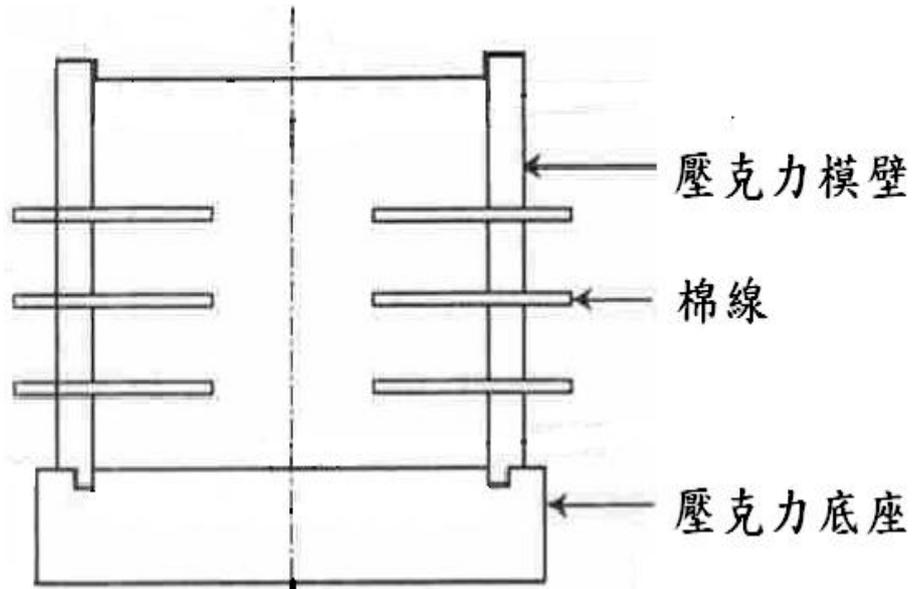


圖 3.2 壓克力夯模示意圖

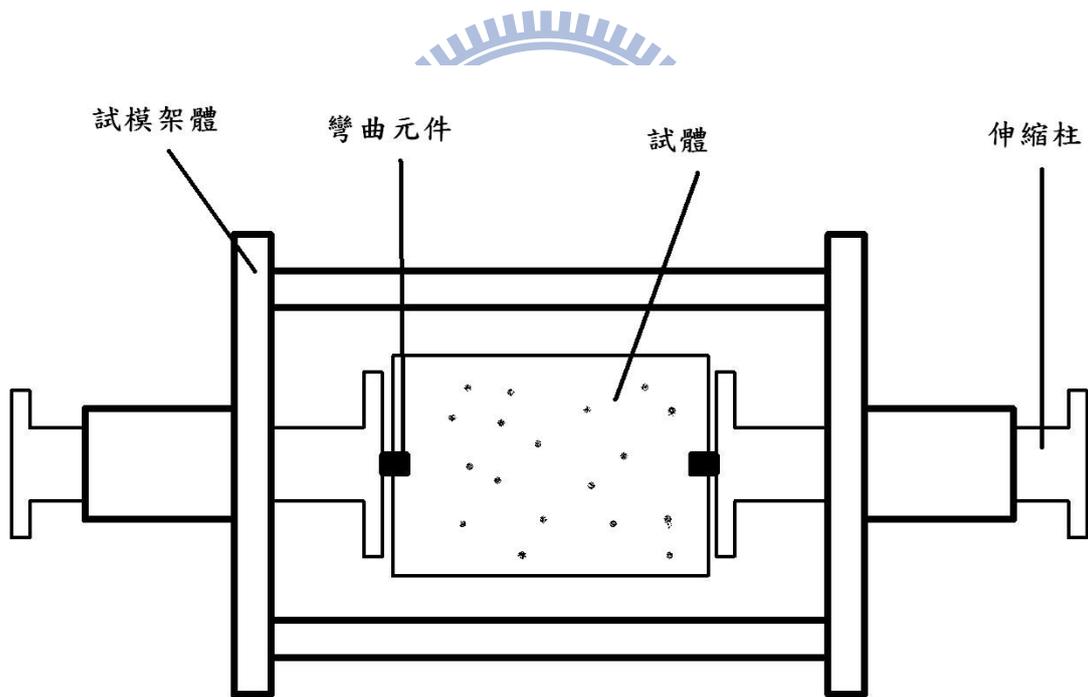


圖 3.3 鋁製試體架



圖 3.4 壓電陶瓷晶片原樣



圖 3.5 訊號擷取卡及波形產生器

3.2 試驗規劃

3.2.1 試驗儀器配置與規劃

本研究之試驗儀器配置示意如圖 3.6 所示，將夯實完成之試體擺置於試體架中，將彎曲元件調整至貫入試體中，接著透過電腦擷取軟體下達波形函數產生之指令，由一邊彎曲元件當作激發端發送波形，另一邊當接收端接收波形，進而擷取剪力波在試體中傳遞之訊號，再將其訊號經過 matlab 軟體做處理進行剪力波速分析。

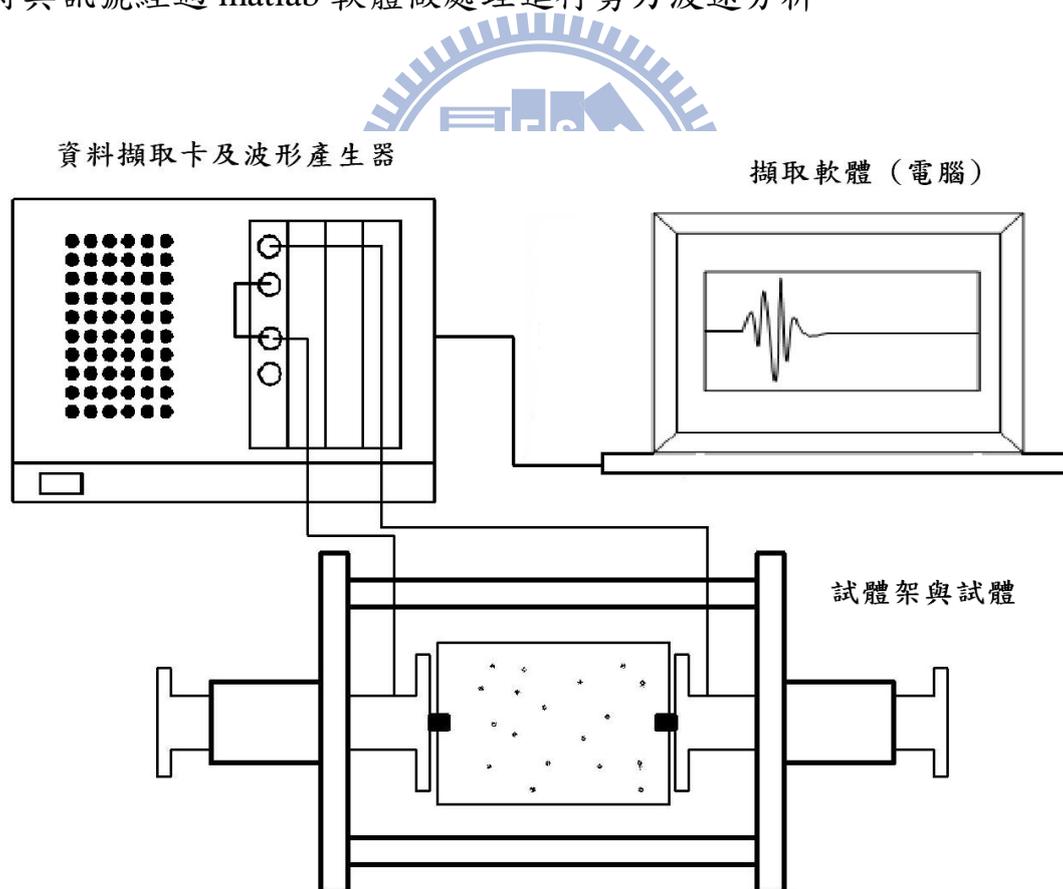


圖 3.6 剪力波速量測系統配至示意圖

而試驗規劃分為兩部分，第一部分將以夯實曲線之概念為出發點，如圖 3.7 為一土樣在壓克力夯實模之夯實曲線，在未達最佳夯實含水量之區段視為乾側段；超過最佳夯實含水量之區段視為濕側段，本研究擬先在乾側段挑選兩點夯實含水量製作試體，透過秤重法得知該試體之含水量，並計算出該試體之乾密度，而後在濕側段挑選相對於乾側段之相同乾密度之夯實含水量點位製作試體，將製作完成之試體透過風吹乾燥之方式逐步調降其含水量，直到濕側段含水量與乾側段含水量相同，在控制相同含水量、相同乾密度及相同土壤條件下，去探討剪力波速與不同夯實狀況下之土壤組構影響程度；第二部分為不同夯實含水量下之試體將進行乾燥與潤濕之程序，於乾燥過程中每下降一固定含水量進行剪力波速量測，在潤濕過程則是將試體從乾側段進行潤濕將試體內之含水量潤濕至濕側段所量測之最高含水量後，再將試體進行乾燥過程逐步量測其不同含水量下之剪力波速變化，作為後續提出剪力波速與含水量及乾密度關係之探討。其規劃施作試驗土樣將於表 3.1 所示。

表 3.1 剪力波速量測試驗規劃

代號	土壤種類	夯實含水量(%)	量測含水量(%)
B2-10	寶二砂土	10	10
B2-10.5		10.5	10.5
B2-11.5		11.5	11.5
B2-13		13	13
B2-14		14	14
B2-15.5		16	16
HS-8	湖山砂土	8	8
HS-10		10	10
HS-11		11	11
HS-13		13	13
HS-14		14	14
HS-16		16	16

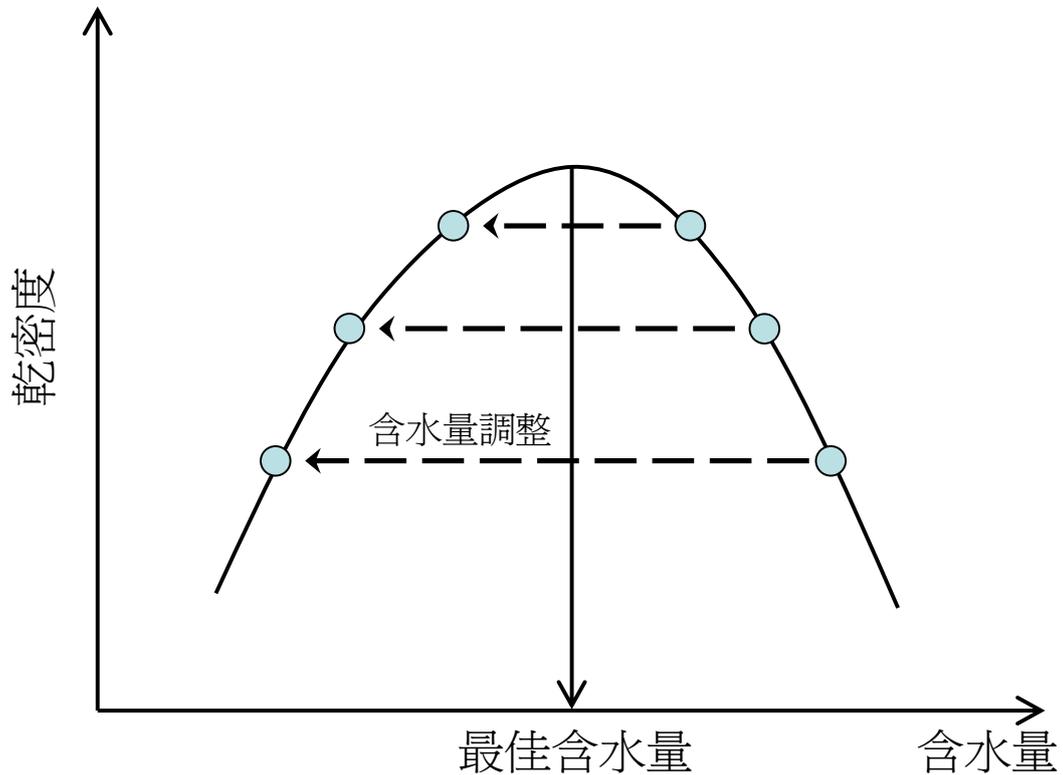


圖 3.7 夯實曲線調整示意圖

3.2.2 彎曲元件設計影響因子探討

在彎曲元件之設計型式上，本研究針對彎曲元件在實驗過程中所遭遇之問題，將其影響因子及解決對策整理如表 3.2 所示，在剪力波速之試驗過程中，於波形擷取上會發現有基線飄移之現象，也就是所接收到之波形偏斜，雖不影響接收波形之趨勢，但會使訊號被壓抑住以致判讀上不明顯，如圖 3.8(a)所示。然而透過良好的接地效果可以避免飄移的問題發生，使接收訊號清楚，如圖 3.8(b)所示。

表 3.2 彎曲元件量測遭遇問題及解決對策整理

量測問題	影響因子	解決對策
1.基線飄移	無接地、電磁波干擾	彎曲元件接地處理
2.耦合現象	線路彼此訊號干擾	使用同軸線、導電漆阻隔
3.高含水量無明顯訊號	彎曲元件與土體接觸不良、耦合現象過大	透過試體架有效控制土體與彎曲元件之接觸

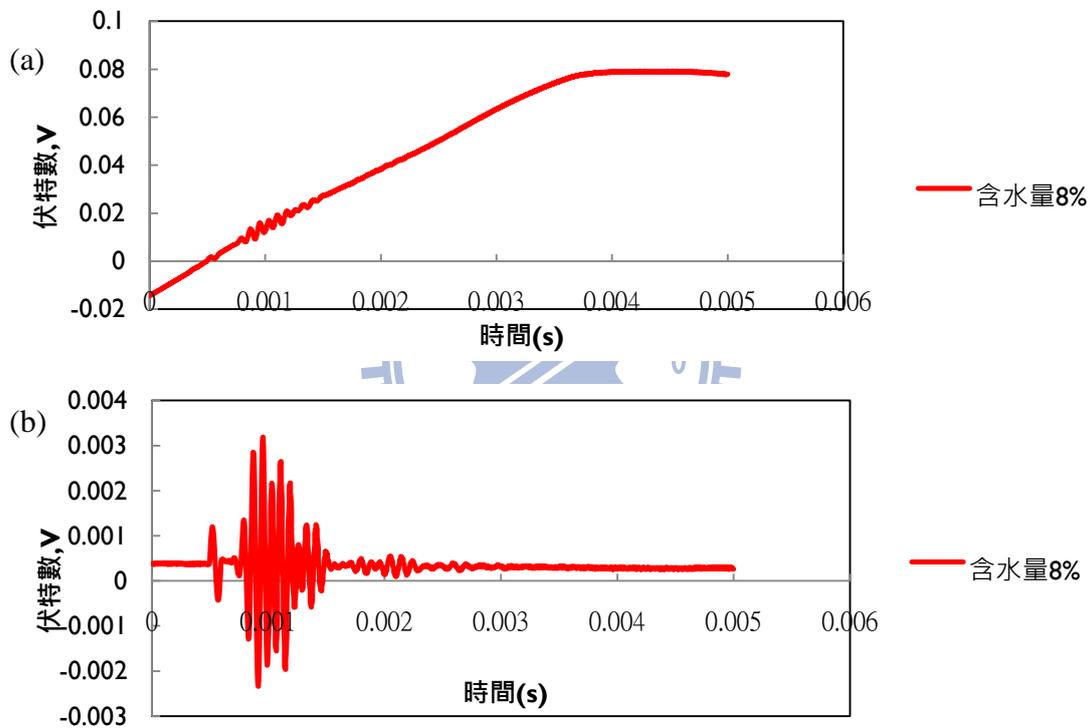


圖 3.8 實二砂土剪力波速量測接地測試：(a)無接地(b)有接地

而耦合現象為不同線路訊號互相干擾之現象，如圖 3.9 所示。在接收之訊號端上會有激發訊號的電磁波干擾導致接收訊號不明顯甚至無訊號。因此，透過去雜訊及導電漆之使用並搭配並聯式製作之彎曲元件，藉此降低耦合現象造成之影響。如圖 3.10 所示，由圖中可

以發現原本激發端對比接收訊號之過大訊號振幅降低，使接收端訊號較為明顯。

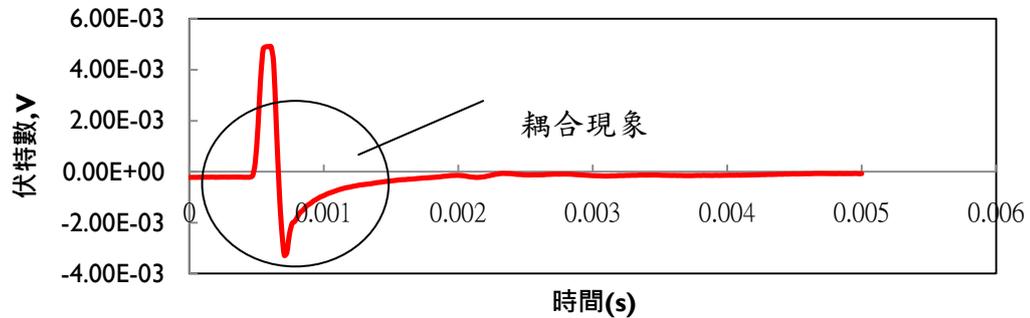


圖 3.9 耦合現象之影響

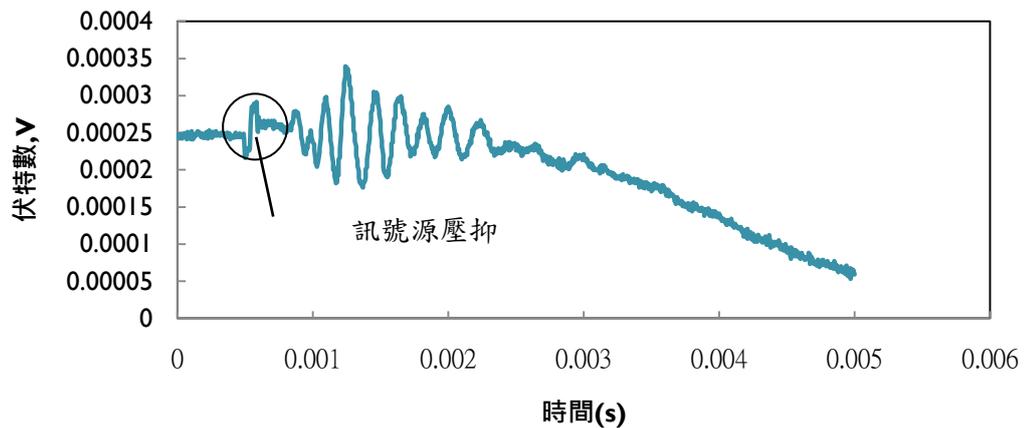


圖 3.10 耦合現象降低之結果

在高含水量無明顯訊號方面則是透過試體架之設計有效控制土體與彎曲元件之接觸，並透過降低耦合現象，以 matlab 程式所撰寫之 filter 對其訊號作一放大處理以改善之。

3.2.3 彎曲元件製作

在彎曲元件製作上，首先利用雕刻刀將壓電陶瓷晶片裁切至所需規格，本研究使用規格為長 20mm，寬 10mm，厚度 0.6mm，如圖 3.11 所示。第二步將同軸線銲接於壓電陶瓷晶片之尾端突出金屬及兩側陶瓷夾片白色處，如圖 3.12 所示，該接線型式為並聯式。注意銲槍不宜接觸壓電片時間過長以免高溫導致壓電陶瓷性質變化。第三步在外層黑色部分先行塗上導電漆作為第一層預防電磁波干擾處理，注意兩面導電漆不能接觸到以免短路，如圖 3.13 所示。第四步為防水處理，將熱固膠完整塗於壓電片表面，隔絕線路與外界與彼此間之接觸避免短路，塗製完成後放至烘箱將熱固膠烤乾。第五步在熱固膠外層塗上 2 至 3 層導電漆做第二層降低電磁波干擾處理，如圖 3.14 所示。最後將製作完成之彎曲元件以熱固膠灌入金屬閥帽並拉接地線於彎曲元件上，如圖 3.15 所示，即完成彎曲元件之製作。

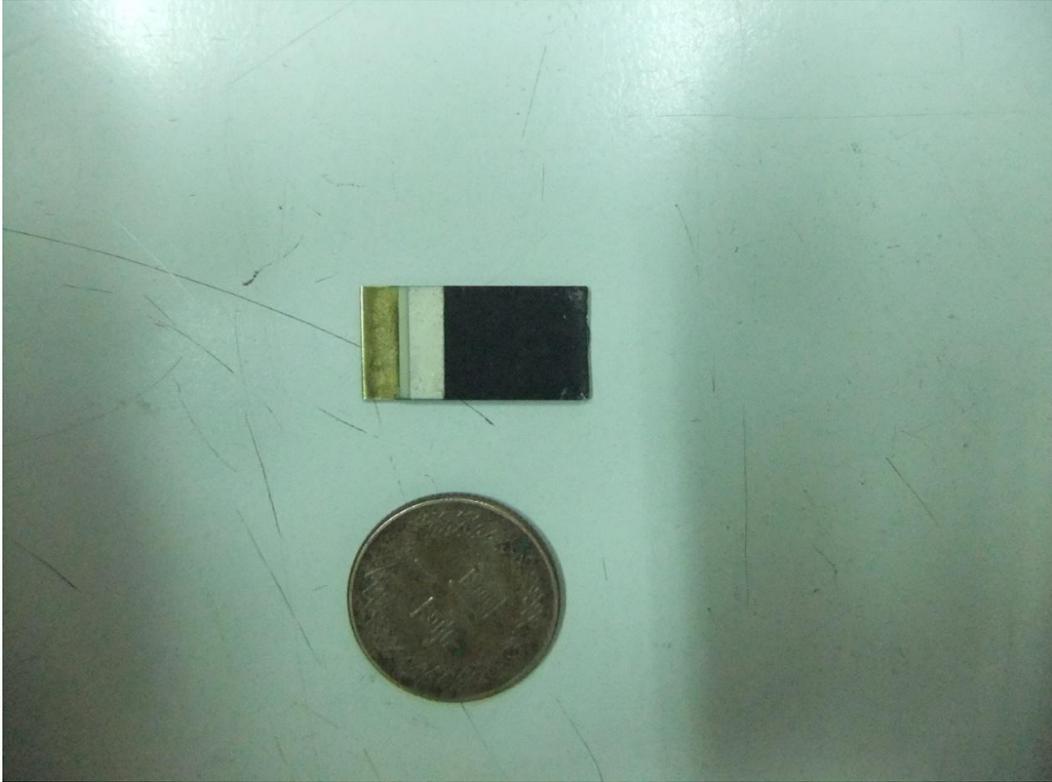


圖 3.11 裁切後之壓電陶瓷晶片



圖 3.12 同軸線中心銅線銲接於壓電片中層金屬片

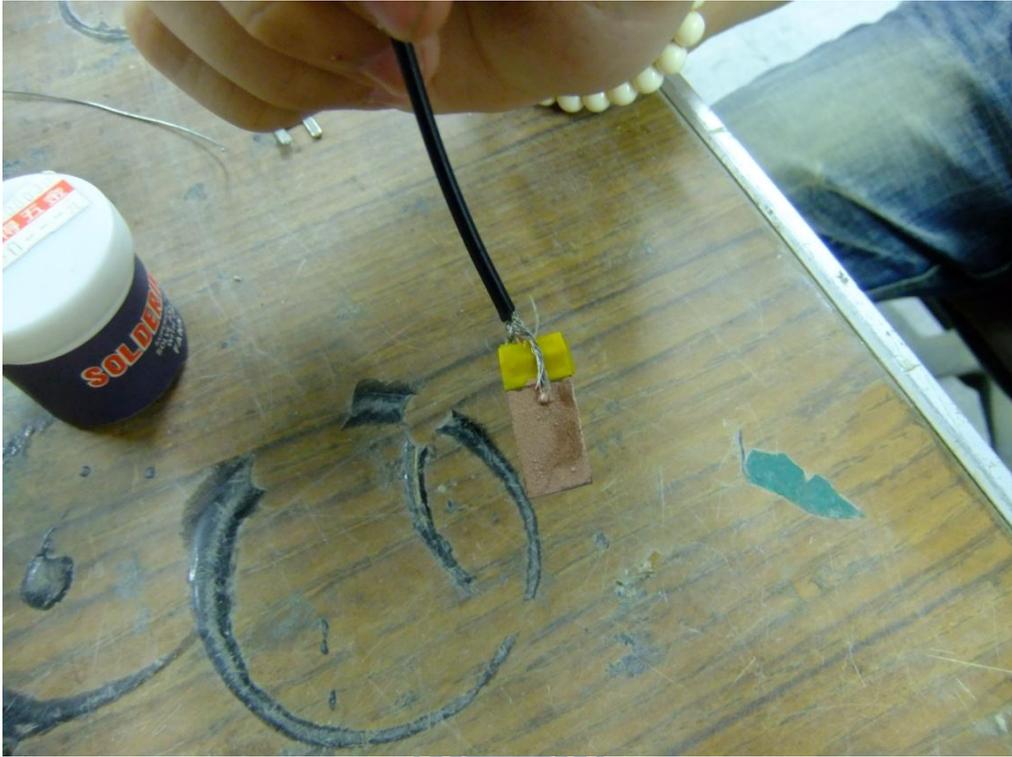


圖 3.13 塗導電漆做第一道防電磁波處理



圖 3.14 導電漆於壓電片之塗製

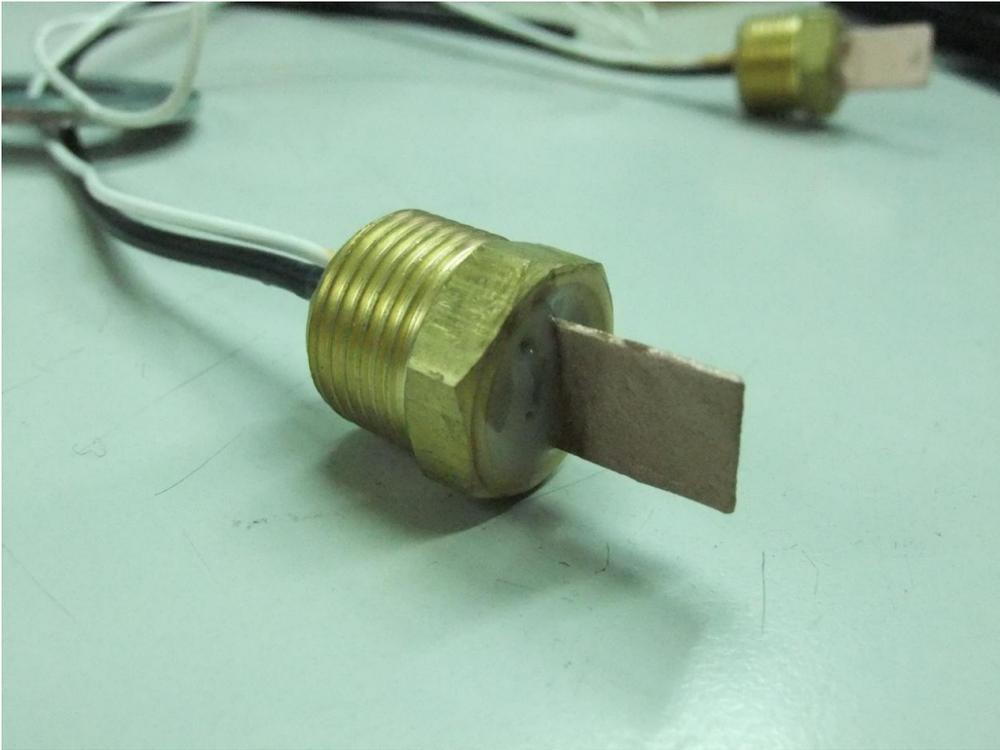


圖 3.15 彎曲元件完成圖

3.2.4 試驗土樣

為瞭解不同夯實組構下對剪力波速造成之影響差異，故擬採用試驗室現有之寶山第二水庫殼層土樣以及湖山水庫料土做為試驗土樣，其試驗土樣之物理性質及粒徑分佈將分別介紹如下。

寶山第二水庫土樣是由寶山第二水庫庫區內之砂岩碾碎成砂土(後續以寶二砂土稱之)，其粒徑分佈曲線由篩分析試驗得到其結果如圖 3.13 所示，依據其粒徑分佈曲線可得知其 200 號篩之通過百分率介於 5~12 之間， D_{10} 、 D_{30} 及 D_{60} 分別為 0.080、0.170、0.205，均勻係數 C_u 為 2.56，級配數 C_c 為 0.176，依照統一土壤分類，寶二砂土

為不良級配砂(SP)；透過比重試驗得其比重為 2.63，再透過阿太堡試驗得其液性限度(LL)、塑性限度(PL)分別為 29、23，其塑性指數(PI)為 6，基於以上結果可推論本試驗寶二砂土為統一土壤分類法中之粉土質不良級配砂(SP-SM)。

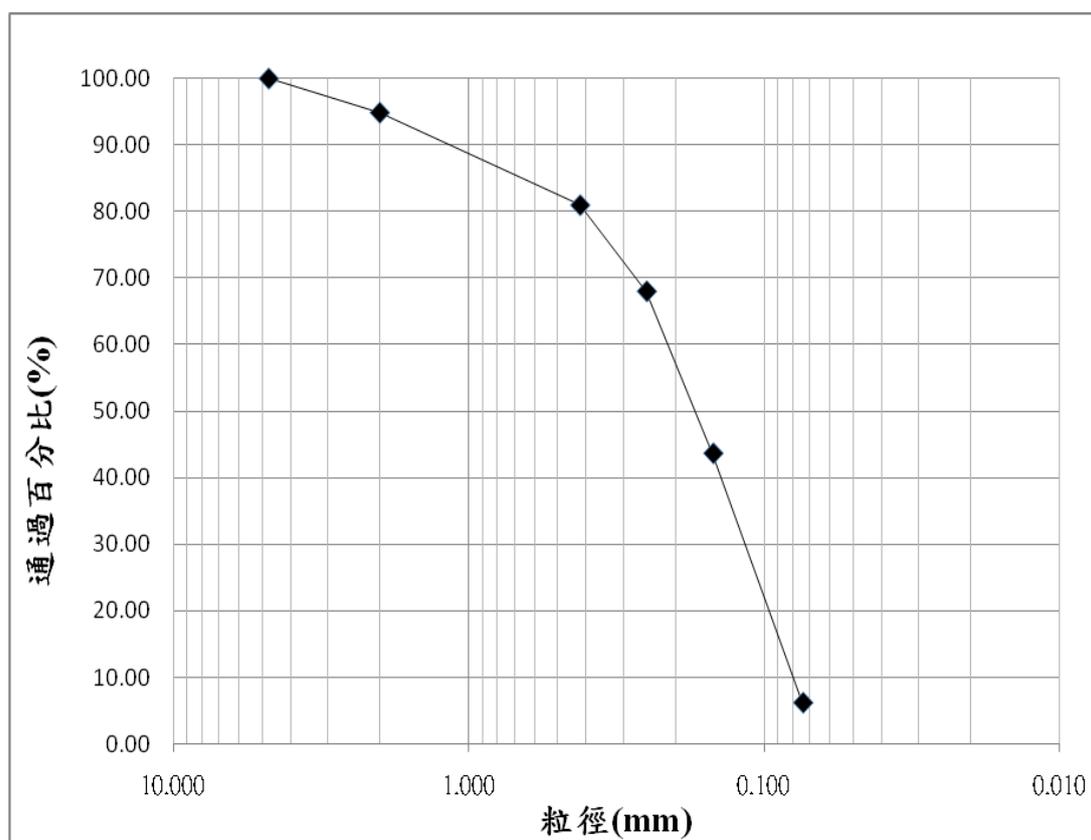


圖 3.16 寶二砂土粒徑分佈圖

湖山水庫土樣為湖山水庫庫區山壁開挖之粉質砂土(後續以湖山砂土稱之)，其粒徑分佈曲線如圖 3.14 所示，依據其粒徑分佈曲線可得知其 200 號篩通過率約在 20% 左右，D10、D30 及 D60 分別為 0.020、0.147、0.6，均勻係數 C_u 為 30，級配數 C_c 為 1.8，以統一土壤分類

來看，湖山砂土屬良好級配砂(SW)；其比重為 2.69，液性限度(LL)、塑性限度(PL)及塑性指數(PI)分別為 18、15、3，由以上試驗結果推論湖山砂土為統一土壤分類法中之粉土質良好級配砂(SW-SM)，跟寶二砂土的差異在湖山砂土之粉土含量較高。最後將兩種土樣之性質整理於表 3.2 所示。

表 3.3 試驗土樣之物理性質整理

	寶二砂土	湖山砂土
比重(Gs)	2.63	2.69
均勻係數(Cu)	2.56	30
級配數(Cc)	0.176	1.8
塑性限度(PL)	23	18
液性限度(LL)	29	15
塑性指數(PI)	6	3
統一土壤分類	粉土質不良級配砂 (SP-SM)	粉土質優良級配砂 (SW-SM)

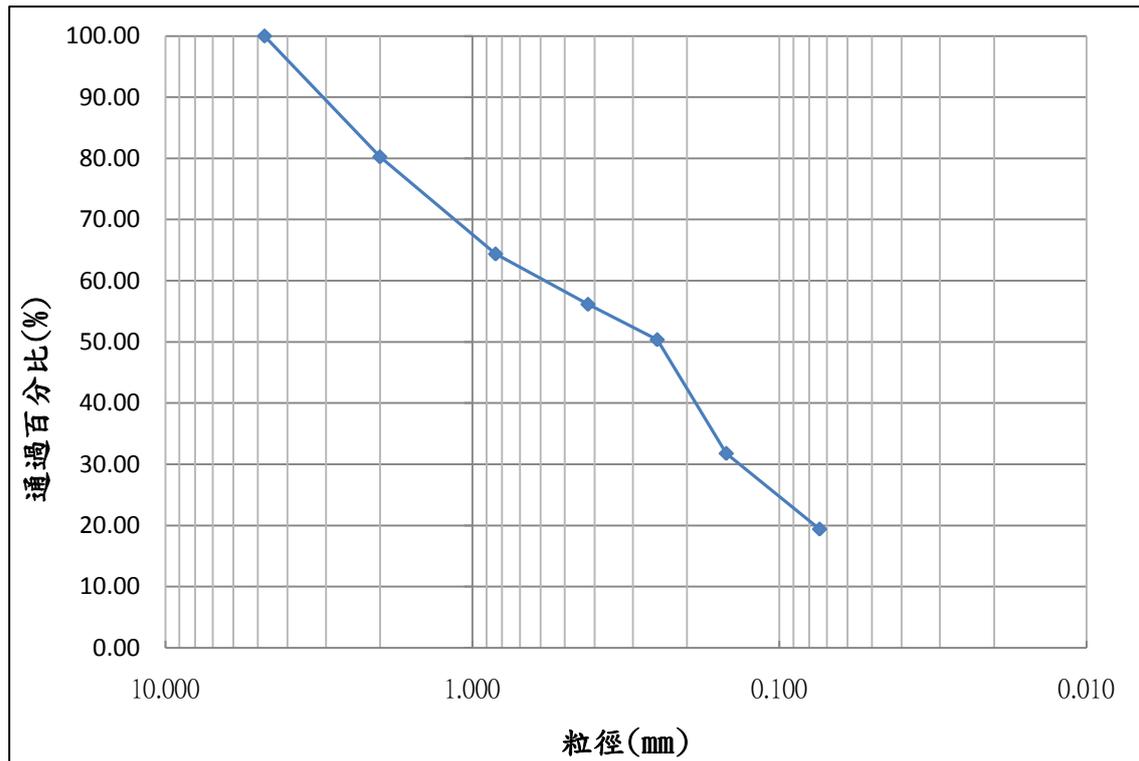


圖 3.17 湖山砂土粒徑分佈圖

3.2.5 試驗步驟

夯實試體之製作準備及詳細試驗步驟如下：

- (1) 選用試驗用土樣，將其以預計夯實之含水量拌勻後以保鮮膜將土樣封存，放置 8 小時。
- (2) 首先將透水石置於試體模底，並將所使用之棉線全數置於試體模內後秤重 W_0 。
- (3) 加入土樣至第一排棉線孔高度後，穿入棉線，再加入土樣並進行夯實，以此類推，依照標準夯實試驗分三層夯實，並控制在每次夯實後留有插設棉線之空間，待棉線鋪設完成，

繼續下一層夯實，直到完成三層夯實，秤重為 W_1 。則土樣之重量 W_t 為

$$W_t = W_1 - W_0 \quad (3.1)$$

(4) 完成之試體將其置於試體架上進行彎曲元件之剪力波速量測，統一選定左邊中間圓柱上之並聯式壓電陶瓷晶片做為激發端，將試體架右邊之並聯式壓電陶瓷晶片做為接收端，將試體壓置於支撐座上，並調整左右兩中間圓柱彎曲元件之貫入深度相同，待上述準備就緒後，開啟電腦上之擷取軟體，調整其函數產生器之設定值，激發電壓振幅為 10 伏特，頻率為 10kHz，採用單一週期之正弦波；施作剪力波試驗時，使波形產生器發送一單一週期正弦波，重複此動作 5~10 次，透過軟體判讀運算並記錄存檔，剪力波波形之初達時間判斷將依據 Kawaguchi et al.,(2001)提出之方法判釋。

(5) 量測結束後於試體頂部及底部加上透水石並加上壓克力封蓋，並將試體置於潤濕水箱中，而後將水管管口置於低於試模頂部之位置，緩慢注水使試模整體浸泡略低於水面下後停止注水，靜置 24 小時後取出試模，拿掉封蓋及透水石後稱重，即 W_p

$$W_p = 1.1 \times \left[\frac{W_t}{1+\omega_c} (1 + \omega_{max}) + W_m - W_t \right] \quad (3.2)$$

其中 ω_{max} 為預計最大量測含水量。

若其總重未達預估最大含水量之總重的 1.1 倍，則將試體模再次套上透水石及封蓋並浸泡於潤濕箱內，每隔 6 小時取出再稱重，直到總重超過其最大含水量之總重的 1.1 倍為止。

(6) 將試體取出後置於電子秤上進行重量監測，待其乾燥至預計含水量之總重 W_{mea} 時將進行剪力波速量測。

$$W_{mea} = \frac{W_t}{1+\omega_c} (1 + \omega_{mea}) + W_m - W_t \quad (3.3)$$

其中 ω_{mea} 為預計量測含水量。

(7) 重複步驟 6，進行剪力波速量測，直至 5 種量測含水量量測完成。

(8) 紀錄最後一次試模總重 W_{fc} ，以下列式子計算濕密度 ρ_{mfc} ，

$$\rho_{mfc} = \frac{W_{fc} - W_m + W_t}{V} \quad (3.4)$$

其中 V 為土樣體積。

而後將土樣分別取上中下三層中央之代表土樣，以烘乾秤重法進行含水量之量測。

(9) 該含水量為 ω_{mfc} ，則其乾密度 ρ_{dfc} 以下式計算，

$$\rho_{dfc} = \frac{\rho_{mfc}}{1 + \omega_{mfc}} \quad (3.5)$$

其餘量測含水量時該試體之乾密度與其相同，而量測含水量修正為 ω_{mcor} 以下式進行計算修正。

$$\omega_{mcor} = \frac{W_{mea} - W_m + W_t}{V \rho_{dfc}} - 1 \quad (3.6)$$

重複步驟 1~9，直至兩種土樣以及規畫之各夯實含水量之量測皆完成。



第四章 結果與討論

本章節探討出剪力波速與夯實土壤組構之關係，依據寶二土樣試驗施做結果與過往學者研究成果比較，並以 Fratta et al., (2005)提出之半理論模型推導出符合本研究需求之模型並探討其適用性。最後針對應用於現地量測技術上做初步評估。

4.1 剪力波速試驗之結果

4.1.1 分析方法說明

本研究將擷取系統所獲得之資料點位透過 matlab 程式寫出之 butterworth filter 和 high pass filter 做訊號處理使訊號更平整並過濾掉一些低頻的雜訊，將資料讀入程式後，可以同時輸出訊號激發與接收之處理後波形，如圖 4.1 所示，並以 Kawaguchi et al.,(2001)提出之挑波法進行初達波之挑選，在點位挑選完後程式會依照所挑選之點位差距計算出剪力波速，如此便完成一筆剪力波速量測之分析。本研究分析之程式碼詳見於附錄一。

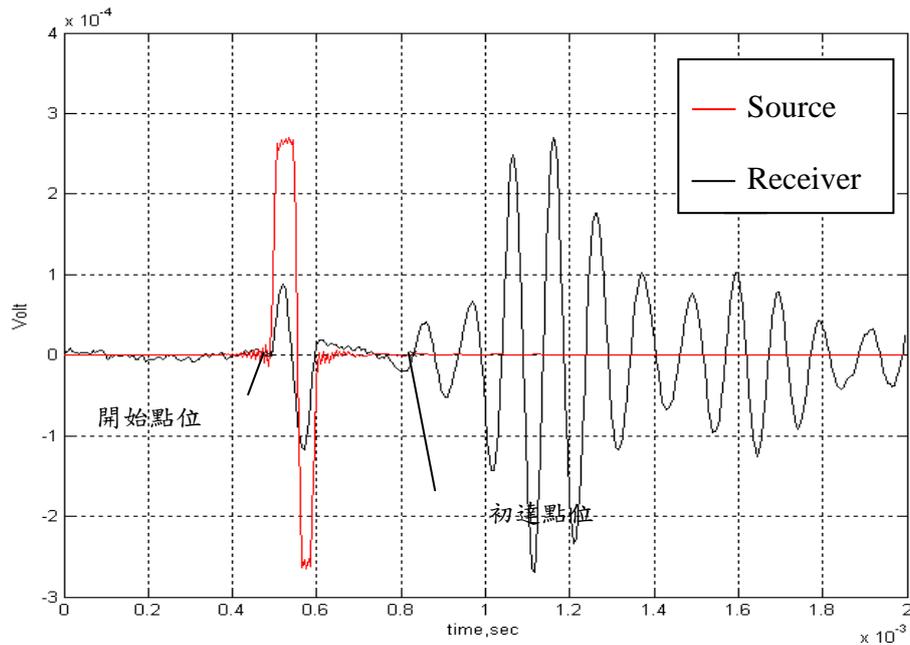


圖 4.1 激發訊號與接收訊號

4.1.2 試驗結果

本研究於寶二土樣及湖山土樣試驗各準備五種不同夯實含水量之土樣，在寶二土部分，分別為 9.8%、11.3%、12.8%、13.2%、及 16.1%，其夯實曲線如圖 4.2(a)所示，由 9.8%、16.1% 兩個相同乾密度之試體做為第一部分試驗之探討，並同時進行第二部分試驗於乾燥過程中每下降 1% 含水量進行剪力波速之量測；而湖山土準備部分，其夯實含水量分別為 7.62%、10.8%、11.8%、12.1% 及 14.6% 與 15.7%，其夯實曲線如圖 4.2(b)所示，由於湖山土在濕側段之乾燥部分有乾縮之現象，該現象會造成乾密度之變化，故第一部份試驗只考慮無體積變化之部分做說明，第二部份試驗則採用湖山土乾側段部分做為探

討。

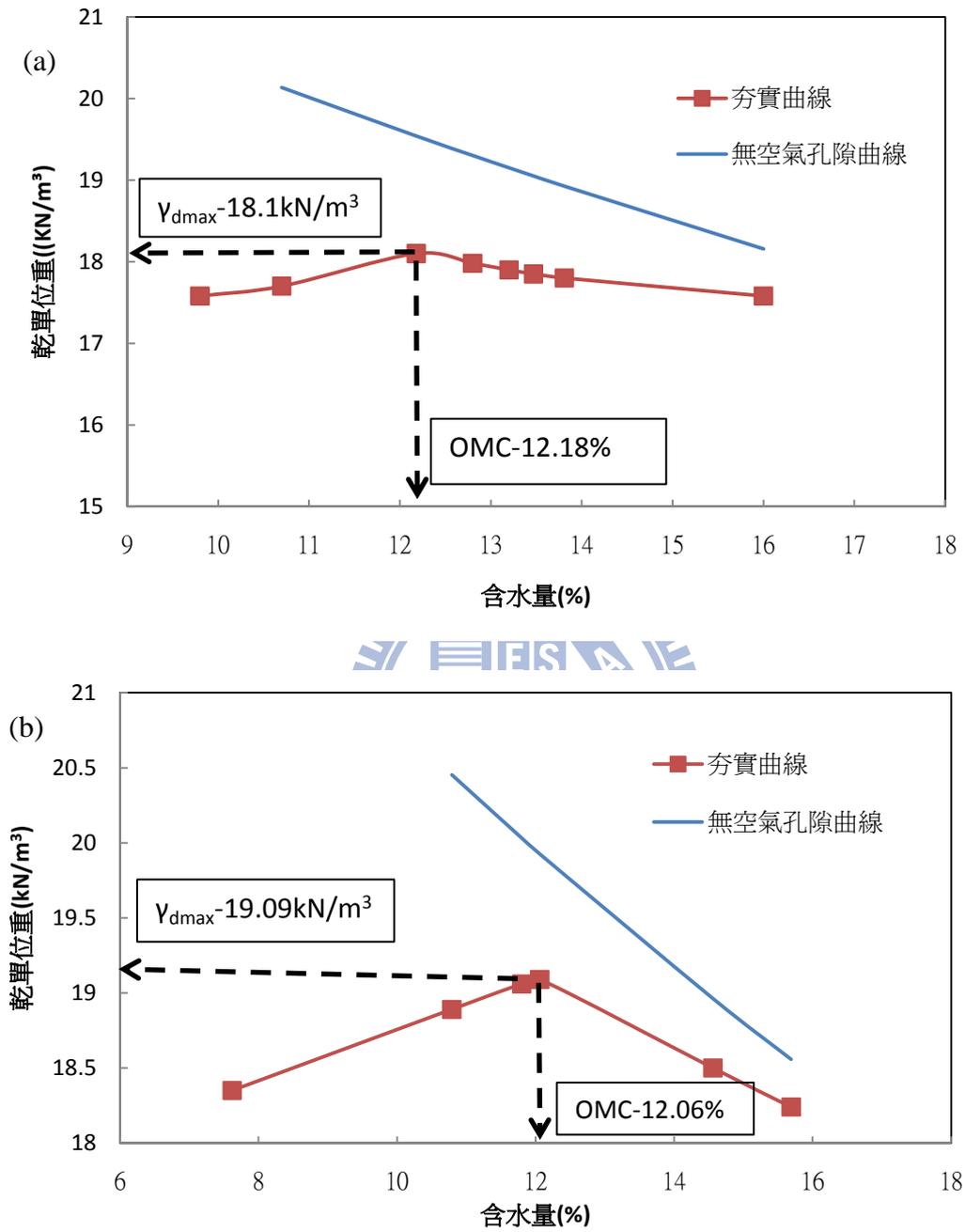


圖 4.2 壓克力模夯實曲線(a)寶二砂土(b)湖山砂土

寶二土之剪力波速量測結果經分析整理如圖 4.3(a)所示，可以發現到不同夯實含水量下之試體其剪力波速對應到量測含水量之關係都

有線性之關係；而湖山土之剪力波速量測結果如圖 4.3(b)所示，其結果也顯示與寶二土相同的線性關係，但在夯實含水量 11.8% 及 12.06% 之試體可以發現剪力波速在量測含水量 8% 時剪力波速有明顯提升的狀況，其因跟該試體於該含水量產生乾縮現象導致乾密度變化有關。

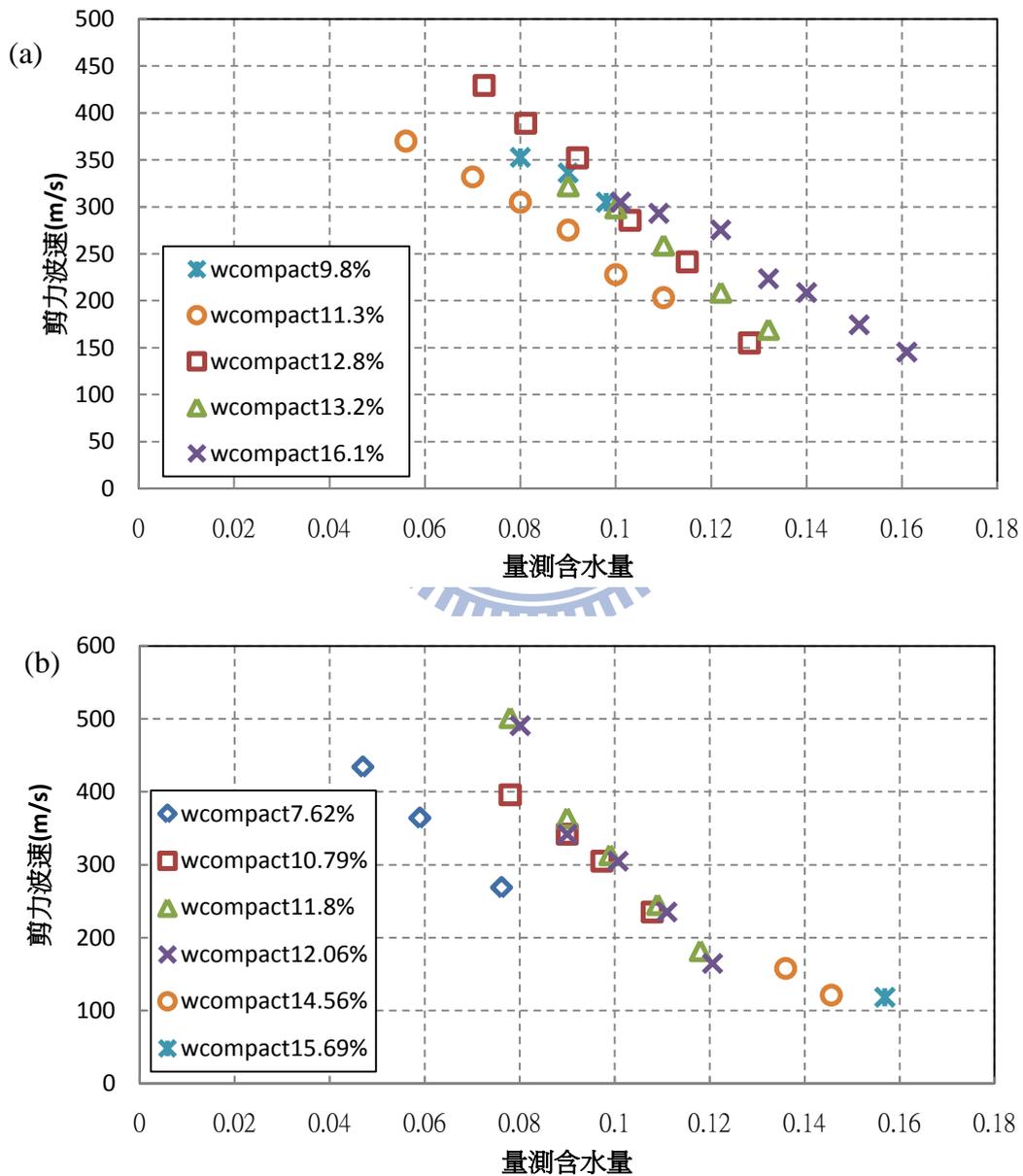


圖 4.3 剪力波速與量測含水量之關係(a)寶二砂土(b)湖山砂土

在針對第一部份之控制相同乾密度、相同量測含水量、相同土壤，但不同夯實含水量下探討夯實土壤組構與其剪力波速之影響上，寶二砂土只有一組試體分別為夯實含水量 9.8% 與 16.1% 良好控制在上述之試驗條件下，其比較結果如圖 4.4(a) 所示，由其結果可發現在濕側段夯實含水量為 16.1% 之試體在放乾至乾側段量測含水量 10% 之條件下，其剪力波速與夯實含水量 9.8% 之乾側試體在量測含水量 9.8% 時之剪力波速結果相當接近，且夯實含水量 9.8% 之試體持續放乾之剪力波速變化趨勢也與夯實含水量 16.1% 之剪力波速變化趨勢相當相似，都呈現出相當接近之線性關係，由此可推論第一部份之試驗成果對於相同乾密度、相同量測含水量、相同土壤，但不同夯實含水量下，其夯實土壤組構之影響差異並不大。而後透過濕潤之方式調整夯實含水量 9.8% 之試體至含水量 16.6%，再施行放乾程序與剪力波速量測，發現該試體之剪力波速隨含水量之變化與先前觀察之趨勢相較之下趨於緩和呈現一遲滯現象，此原因主要受到基質吸力變化之影響，該試體在潤濕過程中土壤顆粒因孔隙內的部分殘餘空氣導致該試體之體積含水比小於原先之體積含水比，將體積含水比視為基質吸力之函數則基質吸力因此產生遲滯圈的現象，剪力波速會隨含水量變化之主要原因為基質吸力變化導致土壤有效圍壓改變，因此基質吸力隨含

水量變化而產生的遲滯圈同樣對剪力波速造成影響，進而解釋此剪力波速遲滯變化的現象；而觀察湖山砂土之結果，如圖 4.4(b)所示，將湖山土分為兩組來探討，第一組為夯實含水量 11.8%及 12.06%而另一組為 7.62%及 14.56%，第一組在相同含水量下剪力波速變化狀況幾乎相同，但此結果不足以作為不受組構影響之說明，因為其夯實含水量太過接近最佳含水量；而第二組在高含水量部分僅有兩點資料，是因為湖山土細粒料較多於濕側段乾燥過程中易產生乾縮開裂之現象，故不宜繼續量測，然而其兩者剪力波速隨含水量變化之線性斜率相近且乾密度也相近(分別為 $1.87\text{g}/\text{cm}^3$ 與 $1.885\text{g}/\text{cm}^3$)，彼此只存在一個平移量的差距，此結果說明土壤組構對於其剪力波速有一定程度之影響，也就是當土壤組構有足夠差異時，即使乾密度含水量相同，剪力波速亦有差異。

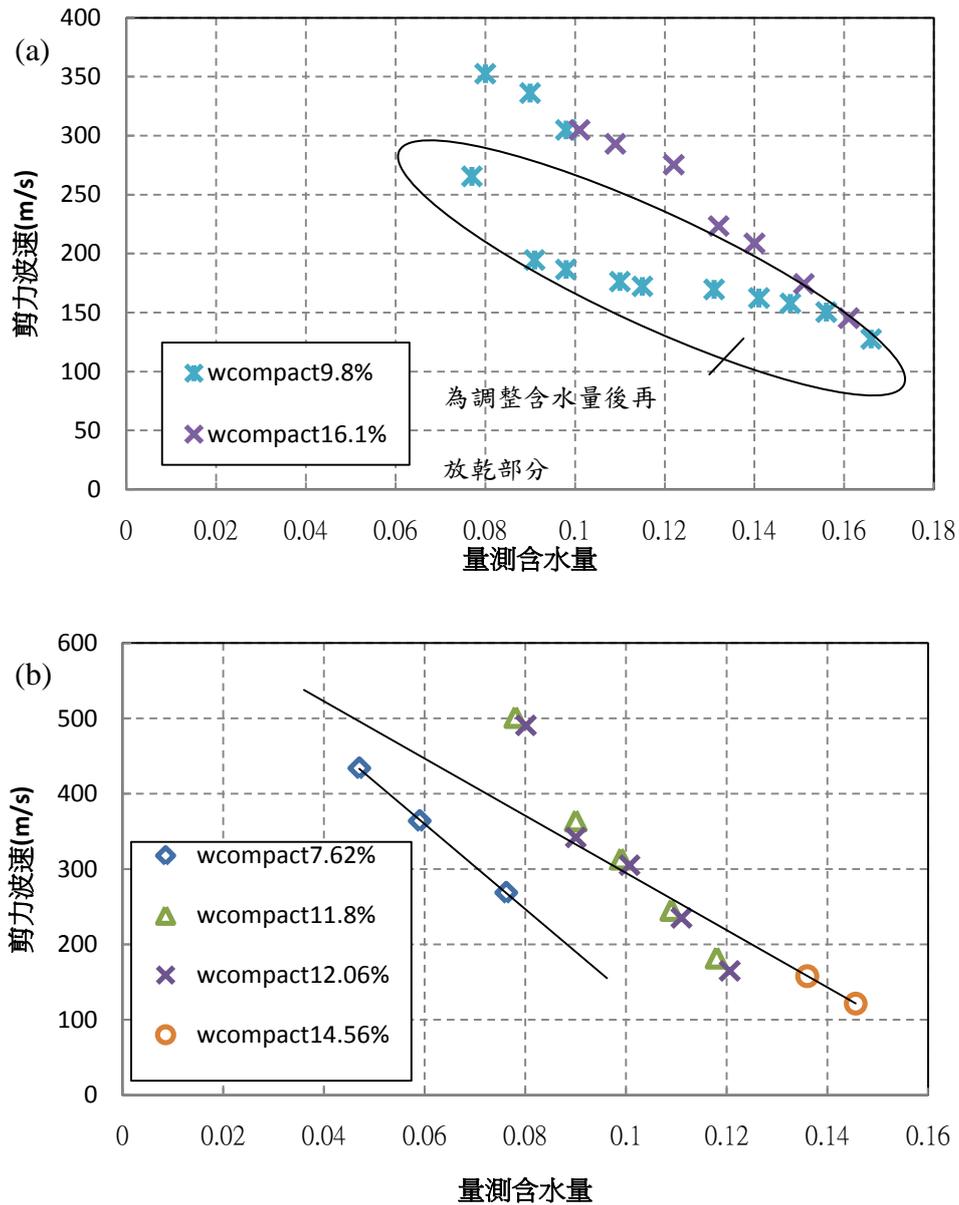


圖 4.4 土壤組構試驗成果比較(a)寶二砂土(b)湖山砂土

在第二部份探討對於每個夯實含水量乾燥過程中不同量測含水量之剪力波速對應的影響關係，為利於與 Cho and Santamarina, (2001) 之研究成果比較，故利用下式將量測含水量轉換成飽和度使圖 4.3(a) 之成果轉換成如圖 4.5(a)，圖 4.3(b)轉換成圖 4.5(b)之剪力波速與量測飽和度之關係。

$$S = \frac{w_{mcor} G_s \rho_d}{\rho_s - \rho_d} \quad (4.1)$$

其中 w_{mcor} 為以 3.6 式修正後之量測含水量；

ρ_d 為量測試體之乾密度，假設同個夯實試體乾密度為固定；

ρ_s 為土體單位重，在公制中 $G_s = \rho_s$ ；

由結果顯示寶山土與湖山土之剪力波速與飽和度關係為飽和度(含水量)越趨近飽和則剪力波速越低；反之，飽和度越趨近乾燥則剪力波速越快，且剪力波速對於量測飽和度在 40%~90% 之關係在不同夯實含水量之試體下都呈現出一線性關係，此結果與 Cho and Santamarina, (2001) 之試驗結果在飽和度 40%~90% 之間剪力波速與飽和度也幾乎呈現線性關係之趨勢吻合。

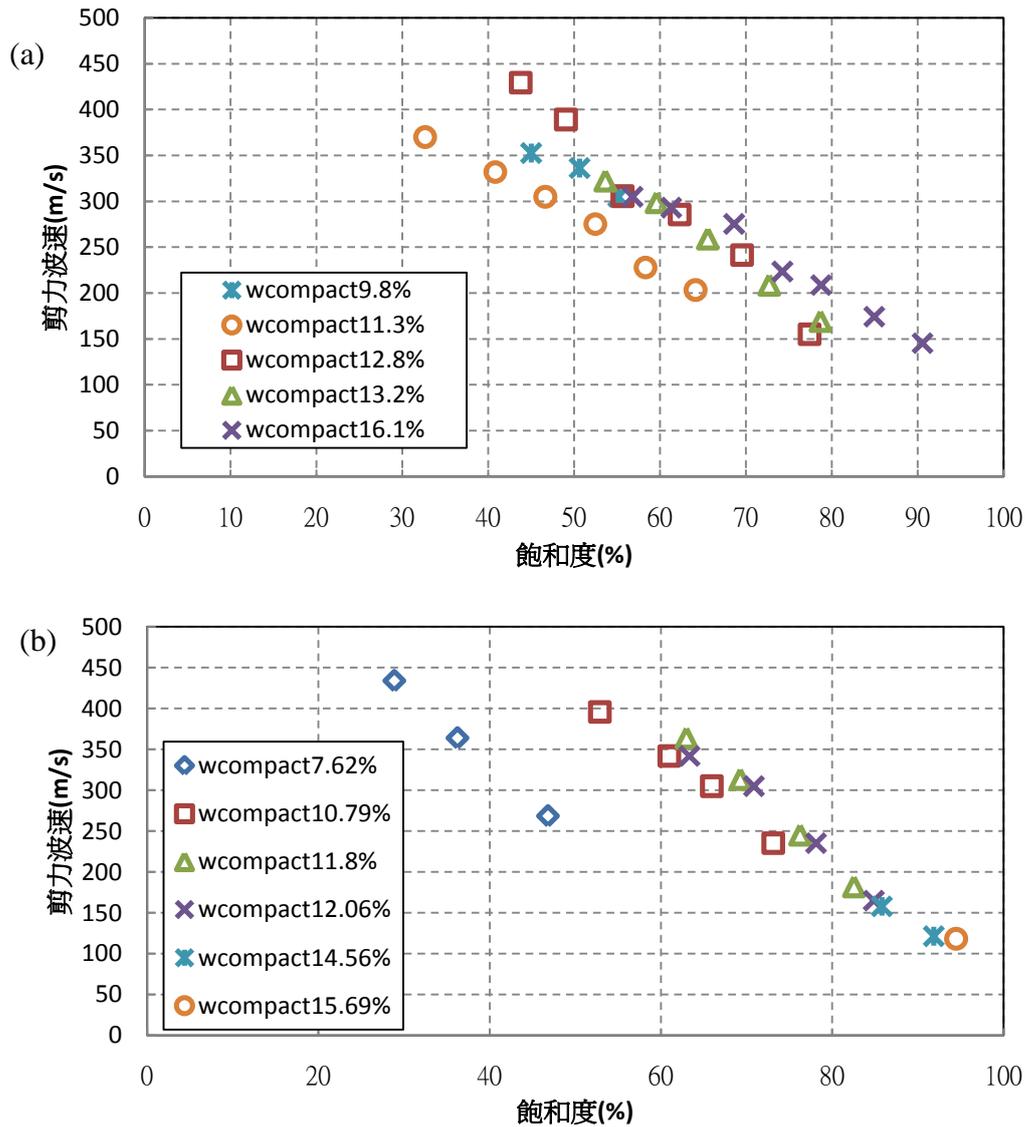


圖 4.5 剪力波速與飽和度之關係(a)寶二砂土(b)湖山砂土

此外，就乾密度對於剪力波速之影響上，本研究以固定量測含水量之方式，並透過不同乾密度試體之剪力波速與量測含水量之線性關係，補充實際量測剪力波速時未涵蓋之點位，將寶二土乾密度對應到剪力波速之結果表現如圖 4.6(a)所示，由其結果可以觀察到隨著乾密度之變化，剪力波速在相同之量測含水量下對應乾密度在量測含水量 9% 以下呈現三次曲線之關係；在量測含水量 10% 以上呈現二次曲線

關係，因此，將剪力波速對應到夯實含水量下乾密度之線性關係並不明顯；而湖山土之剪力波速與乾密度關係如圖 4.6(b)所示，在不同之量測含水量下則表現出 2 次曲線關係。此結果與 Kim and Park(1999)和 Kim et al.(2001)利用共振柱試驗並將剪力波速與有效圍壓正規化後，得到剪力波速與乾密度呈線性關係之結果不符。其因可能為 Kim 等人因施加有效圍壓使其主控剪力波速之變化，而造成基質吸力影響不明顯之緣故。



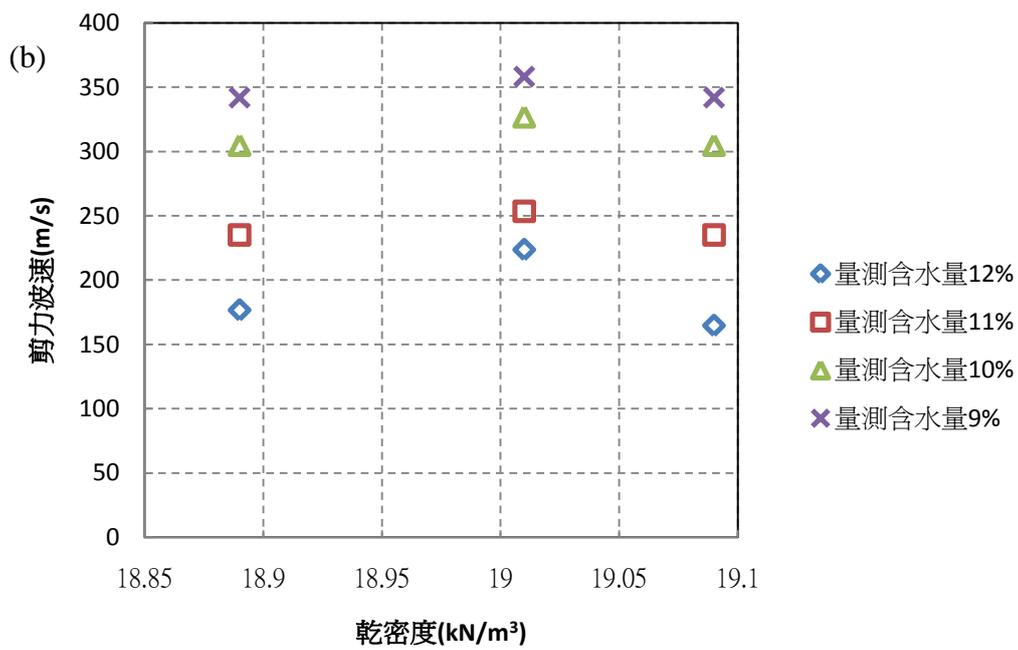
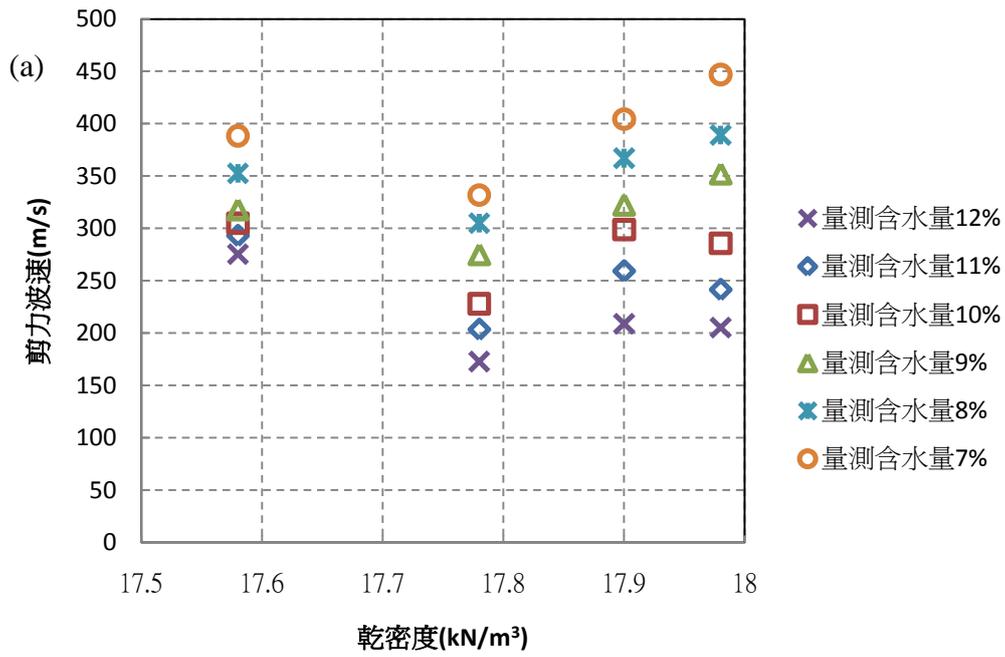


圖 4.6 剪力波速與乾密度關係(a)寶二砂土(b)湖山砂土

4.2 Fratta 半理論模型適用性探討與推導

本研究擬以 Fratta et al.,(2005)所提出之半理論模型為基礎，推導出符合本研究需求之以物理性質如含水量、乾密度及土壤組構為表達型式之理論式，除了驗證本研究剪力波速量測數據，並探討其現地應用之適用性，首先以(2.12)式為出發，將飽和度以下式表示：

$$S = \frac{\rho_d w G_s}{G_s \rho_w - \rho_d} \quad (4.2)$$

其中 ρ_w 為水單位重；

在此將土體單位重 ρ_s 以下式表示：

$$\rho_s = \rho_d(1 + e) \quad (4.3)$$

其中 e 為孔隙比；

並將(2.12)式中之分母項推導為

$$\rho_w G_s \cdot (1 - n) + \rho_w n S = \frac{\rho_s V_s (1+w)}{V} \quad (4.4)$$

其中 V 為試體總體積；

V_s 為土體不含孔隙之體積；

將(4.3)式代入(4.4)中可將分母推導成下式：

$$\rho_w G_s \cdot (1 - n) + \rho_w n S = \rho_d (1 + w) \quad (4.5)$$

將(4.2)式及(4.5)式代入(2.12)式可得到符合本研究需求之表達式

$$V_s = \sqrt{\frac{G_0 \left(\left(\frac{\rho_d w G_s}{G_s \rho_w - \rho_d} \right)^{\frac{m}{1-m}} - 1 \right)^{\frac{1}{m}}}{\rho_d (1+w)}} \quad (4.6)$$

於此將(4.6)式表達成以含水量、乾密度、剪力模數與標定參數描述之模型，透過試體不同夯實含水量下之已知之量測剪力波速、含水量及乾密度等資料代入(4.6)式最佳化反算求得 m 值與 G_0 值，將其反算結果列於表 4.1，為找出 m 值與 G_0 值之變化特性，將寶二土與湖山土之 m 值變化與乾密度之關係做比較如圖 4.7 所示，將兩種土樣之 G_0 值與乾密度之關係表現如圖 4.8 所示。由圖 4.7(a)可以發現在相同乾密度不同夯實含水量為 9.8% 及 16.1% 之 m 值存在差異，究其原因可能是夯實含水量 9.8% 試體之量測點位較少以至 m 值反算時容易高估所導致，假設不考慮夯實含水量 9.8% 之結果來看，寶二砂土之 m 值與乾密度並未顯示出一明確關係；而在圖 4.7(b)中湖山土之 m 值與乾密度則可觀察出呈現線性之關係，但由於湖山土在濕側段有乾縮膨

脹之現象，故作反算推導只取用乾側段部分，目前判斷 m 值在不同夯實條件下其值皆不同，其影響因子還需再做深入探討；至於 G_0 與乾密度之關係中，在圖 4.8(a)也發現到在夯實含水量 9.8%之 G_0 值與同樣乾密度之 16.1%夯實含水量之試體有所差距，其原因判斷跟 m 值高估之原因相同，故先不考慮 9.8%之資料點位，以剩餘資料之 G_0 值判別發現 G_0 值與乾密度有二次曲線之關係；同樣，在圖 4.8(b)中也可發現同樣趨勢，故可將 G_0 值假設成下式

$$G_0 = a\rho_d^2 - b\rho_d + c \quad (4.7)$$

其中 a 、 b 及 c 為標定參數

將(4.7)式代回(4.6)式可表達成：

$$V_s = \sqrt{\frac{(a\rho_d^2 - b\rho_d + c) \left(\left(\frac{\rho_d w G_s}{G_s \rho_w - \rho_d} \right)^{\frac{m}{1-m}} - 1 \right)^{\frac{1}{m}}}{\rho_d(1+w)}} \quad (4.8)$$

至此將 Fratta et al.(2005)所提出之半理論模型推導成(4.8)式，希望以此式做為描述寶二砂土及湖山砂土對含水量、乾密度之關係模型。

表 4.1 不同夯實含水量最佳化 m 值與 G_0 值反算結果

土壤種類	夯實含水量(%)	乾密度(kN/m^3)	m	$G_0(\text{kN}/\text{m}^2)$
寶二砂土	9.8	17.58	2.2100	915960
	11.3	17.78	1.955	484040
	12.8	17.98	1.4758	352190
	13.2	17.90	1.4309	311500
	16.1	17.58	1.6231	544320
湖山砂土	7.62	18.35	1.7668	318400
	10.79	18.89	1.382	248510
	11.8	19.06	1.243	117760
	12.06	19.09	1.258	128480

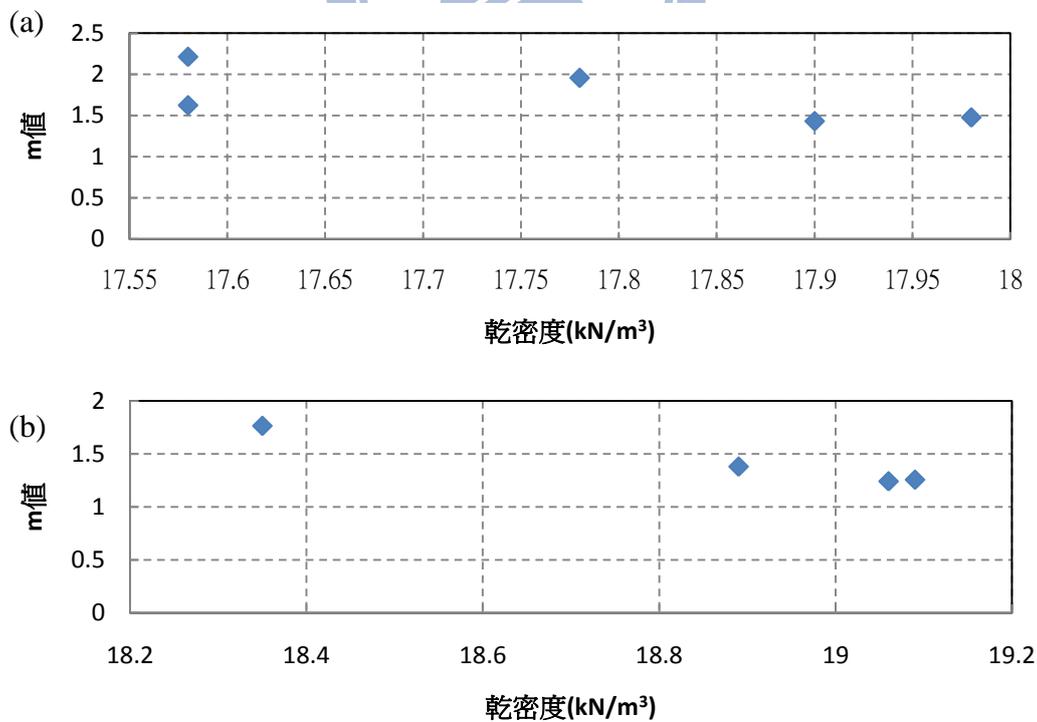


圖 4.7 m 值與乾密度之關係(a)寶二砂土(b)湖山砂土

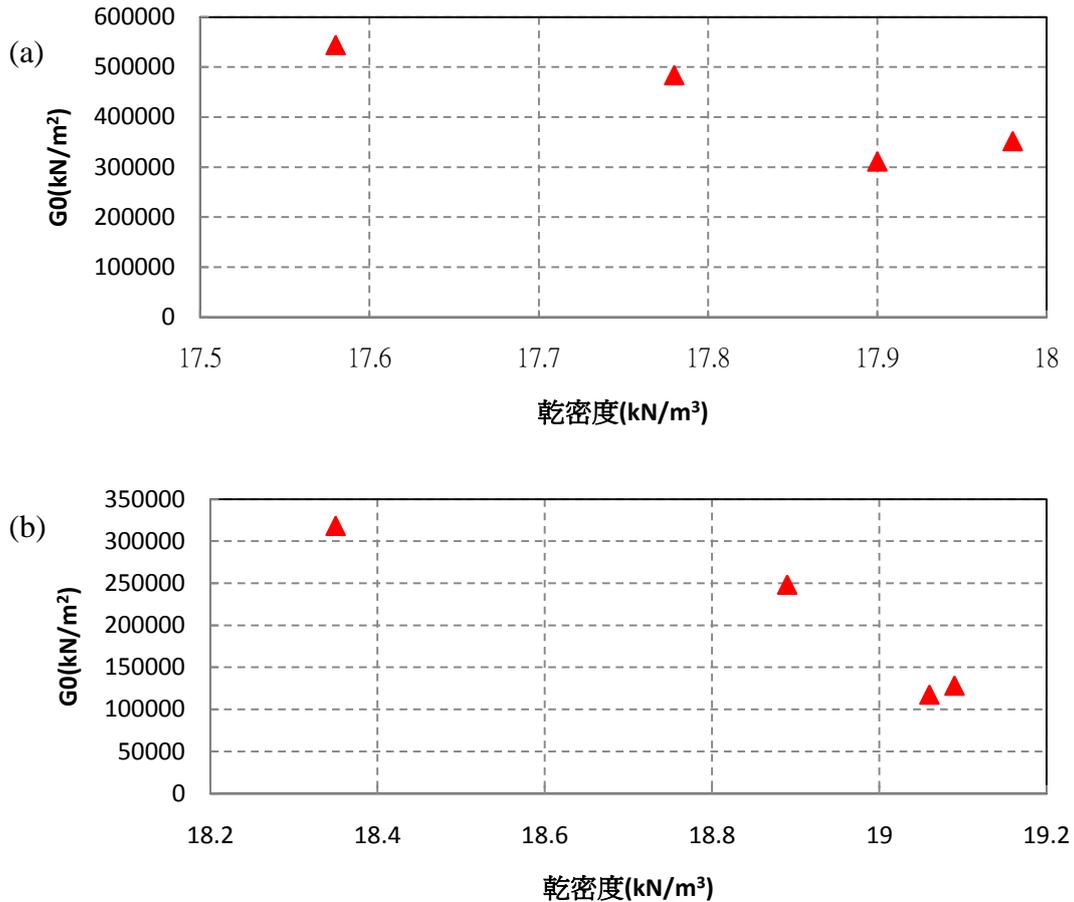


圖 4.8 G_0 值與乾密度之關係(a)寶二砂土(b)湖山砂土

最後以所反算之 m 與 G_0 值代入(4.6)式以模擬不同夯實含水量下之剪力波速變化狀況並以實際量測資料做為比較，在此將寶二砂土夯實含水量 13.2%及湖山砂土 11.8%之模擬結果做為代表，如圖 4.9 所示，其餘模擬結果將於附錄二所示，由其模擬結果可見寶二砂土與湖山砂土之剪力波速量測數據大致上符合由 Fratta et al.(2005)所推導而來之(4.6)式。驗證其半理論模型對本研究所使用之兩種土樣也適用。

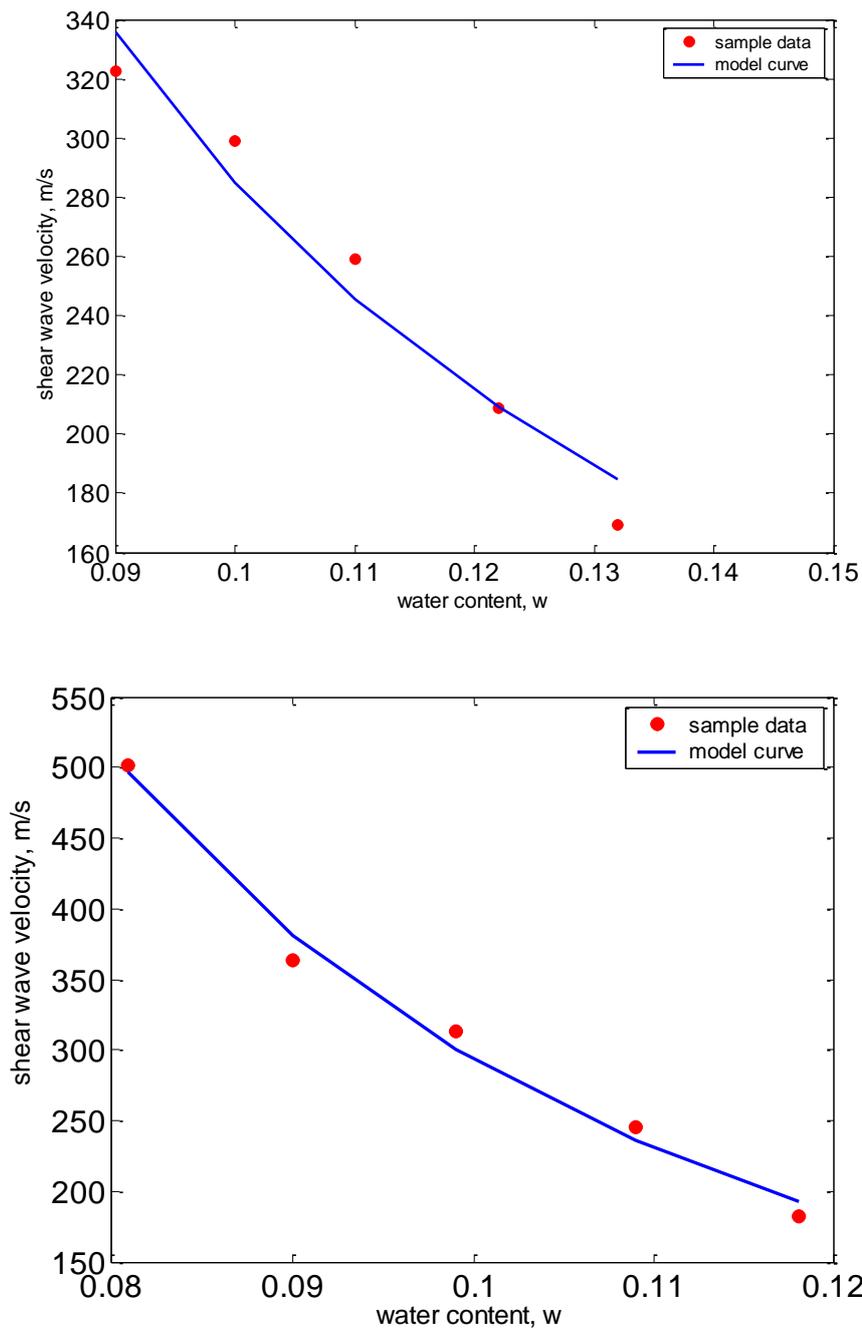


圖 4.9 模型推導與量測數據之比較(a)寶二 13.2%(b)湖山 11.8%

綜合以上成果，即便從 Fratta 模型推導出符合本研究需之關係式，但由於對 m 值之影響因子還需做深入探討，且推導出之關係式複雜不利現地方便計算，加上由於不同乾密度會影響剪力波速對量測含水

量關係之斜率，使其產生在相同量測含水量，不同乾密度狀況下，量測到相同之剪力波速，此現象若要應用於現地量測上將會產生盲點。現地量測到之剪力波速與含水量無法判別屬於哪種乾密度下之線性關係，若要由現地剪力波速與含水量量測判斷其乾密度，還需改變現地之含水量後再進行剪力波速量測以兩量測點明確判斷其乾密度，如欲採用此方式，則需注意標定與現場改變含水量之方法一致，若室內標定作業採用潤濕方式進行，則現地也需採用潤濕方式改變含水量；反之亦然。

4.3 剪力波速於現地應用初步探討

由於 Fratta et al.(2005)提出之剪力波速與含水量及乾密度之數學式複雜且不便利於現地量測使用，因此為將剪力波速方便應用於現地量測，本研究透過觀察剪力波速與其影響因子之關係，從另一個角度發現試體在剛夯實完成之狀態下，其剪力波速與飽和度之關係可以下式進行描述：

$$V_s = a_s + b_s \times S^m \quad (4.9)$$

其中 V_s 為剪力波速；

S 為飽和度

a_s 、 b_s 及 m 為標定參數

圖 4.10 說明寶二土及湖山土剪力波速對飽和度之關係及經驗式描述成果，其中我們可以發現寶山土及湖山土剪力波速變化趨勢不同，其因為剪力波速受土壤種類之影響所致，而在經驗式描述之結果也顯示出實驗數據與經驗式描述有相當程度之符合，因此初步認定可將剪力波速與飽和度之關係應用於現地量測上。

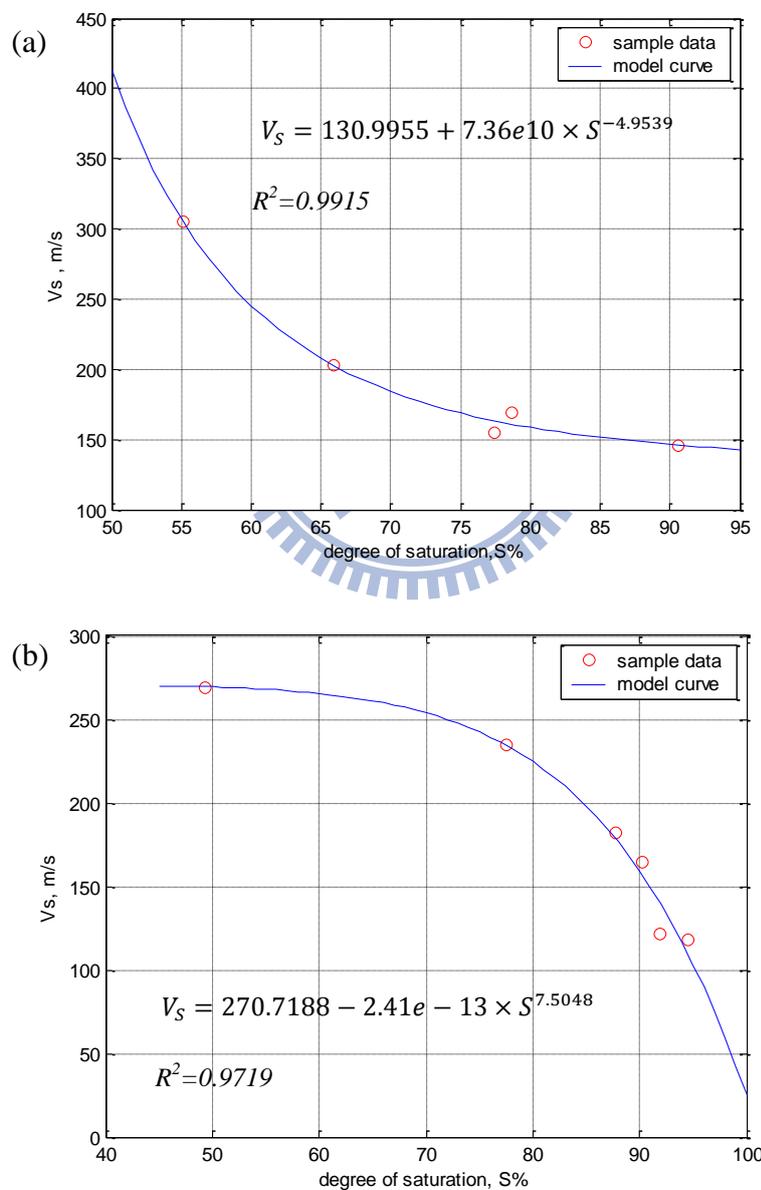


圖 4.10 剪力波速與飽和度之關係，(a)寶二砂土(b)湖山砂土

而在現地初步應用構想如圖 4.11 所示，現地量測將會結合 TDR 之含水量量測，先透過實驗室內 5 組至 6 組不同夯實含水量之試體作為剪力波速之標定，並於現地利用多頻道表面波震測法量測剪力波速，接著透過 TDR 量測現地之重量含水量，以實驗室標定之結果預測現地飽和度，透過下式反推導出現地碾壓之乾密度：

$$\omega = \left(\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \right) \frac{S}{G_s} \quad (4.10)$$

其中 ω 為重量含水量；

S 為飽和度；

ρ_s 為土粒單位重；

ρ_d 為土壤乾單位重；

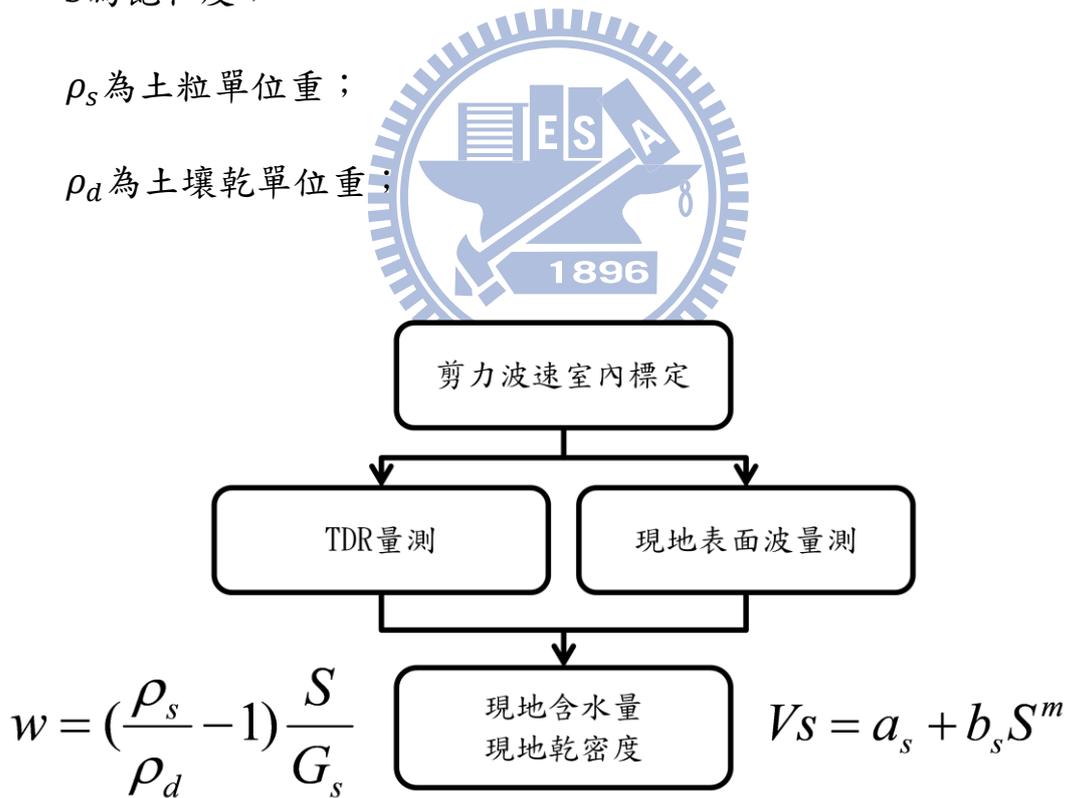


圖 4.11 現地初步應用構想圖

為了解此法可行性，將室內寶二土及湖山土之剪力波速量測結果，假設結合 TDR 技術可正確獲得現地體積含水量(TDR 量測體積含水

量之準確度可達 1% 以內)，則根據此現地應用法去反推乾密度，其準確性大部分可達 3%，如圖 4.12 所示，顯示此法極具可行性。

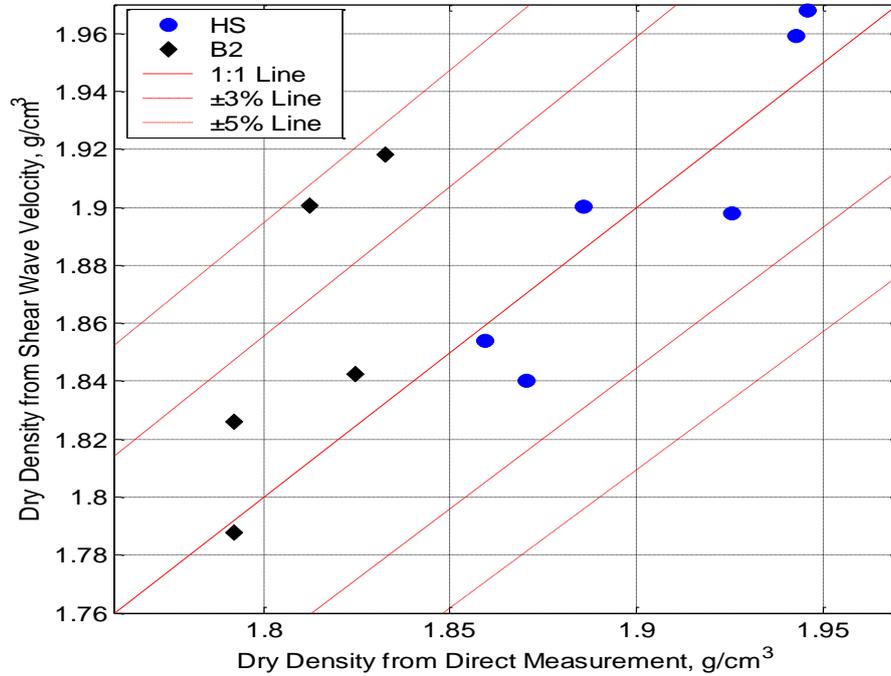


圖 4.12 室內試驗資料檢核現地應用法乾密度量測之結果

然而在現地應用上可能會遭遇到現地夯實能量變化之問題，本研究於實驗室內發現當夯實能量改變時其剪力波速行為也會改變，如圖 4.13 所示。該試驗之土樣為寶二砂土，當夯實能量由 25 下調整至 45 下其剪力波速與飽和度之關係隨著夯實能量的變化有著平移的現象，故未來還需針對夯實能量是否造成土壤組構變化進而導致剪力波速變化進行探討。

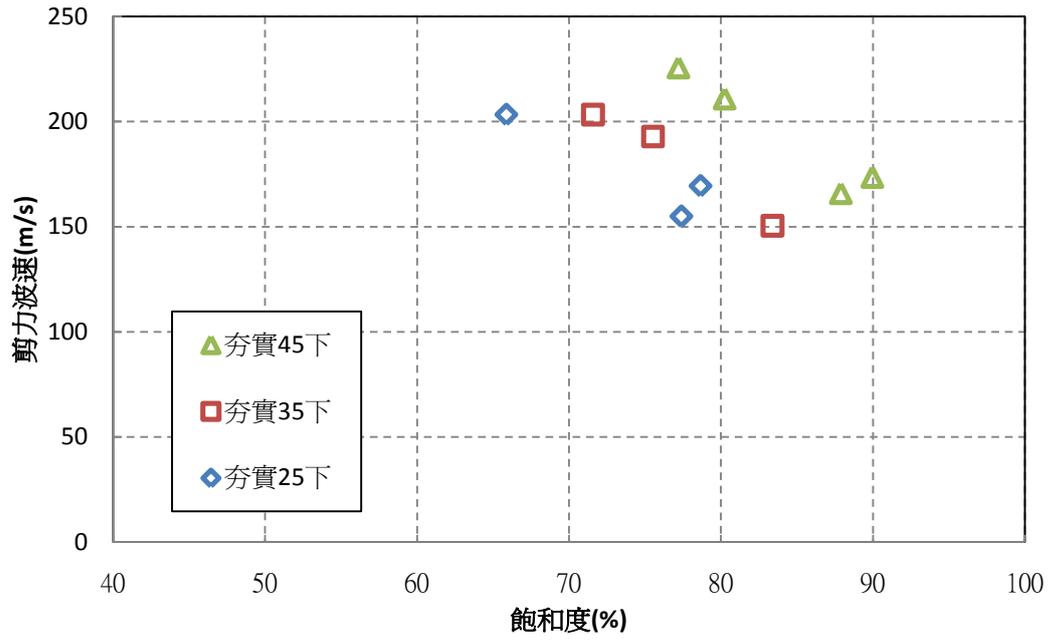
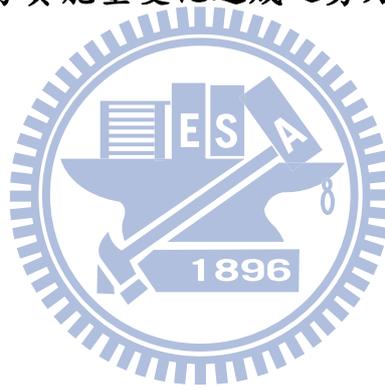


圖 4.13 夯實能量變化造成之剪力波速變化



第五章 結論與建議

本研究為碾壓土壤剪力波速之行為探討，在探討完碾壓土壤物理性質與剪力波速之關係後，設法以 Fratta et al.(2005)提出之半理論模型推導出符合本研究需求之可描述土壤剪力波速與其物理性質行為之模型。由結果得出其結論與建議如下面兩小節所述。

5.1 結論

1. 剪力波速與夯實土壤組構之關係：由相同乾密度之夯實含水量分別為 9.8% 及 16.1% 之試體在量測含水量 10% 附近，所量測到之剪力波速非常接近，且兩者在剪力波速對量測含水量之影響呈現相同之線性關係，此結果顯示寶二土夯實土壤組構對剪力波速影響不大，但由於寶二土細粒料含量較少，其在乾濕側夯實所造成之土壤組構差異可能並不明顯；因此，由湖山土的結果顯示在乾密度、含水量相同條件下，剪力波速呈現一平移現象，顯示在湖山土夯實土壤組構會對剪力波速造成影響，其結果說明同一土壤之組構達到足夠差異會影響剪力波速之行為。而在夯實含水量 9.8% 試體之調整含水量後再乾燥部分顯現剪力波速有遲滯現象，原因為剪力波速會受基質吸力影響，因此產生遲滯結果。

2. 剪力波速與飽和度關係：在控制相同乾密度下，飽和度與含水量可

視為一常數關係，寶二砂土在飽和度 40%~90%間，各夯實含水量之剪力波速與飽和度(量測含水量)呈現線性之關係；湖山土在飽和度 30%~90%間剪力波速與飽和度(量測含水量)也呈現同樣線性結果。此結果與 Cho and Santamarina,(2001)所觀察到之現象相符。而觀察剛夯實完成試體之剪力波速對飽和度之關係中，發現可以經驗式(4.9)式對剪力波速行為進行描述， R^2 值皆在 0.95 以上，應用上可在實驗室內先進行剪力波速標定，再於現地使用。

3.剪力波速與乾密度之關係:在相同量測含水量下，寶二砂土與湖山砂土之剪力波速與乾密度之關係並沒有明顯之線性關係，此結果與 Kim and Park(1999)和 Kim et al.(2001)以共振柱試驗所得到之正規化剪力波速與乾密度之結果不相符，其因為施加有效應力導致基質吸力影響不明顯。

4.Fratta 模型適用性之驗證與推導：以寶二砂土剪力波速量測結果驗證 Fratta et al.(2005)所提出之半理論模型，其結果顯示該半理論模型於寶二砂土及湖山砂土之碾壓土壤上也適用，而後，透過 m 值與 G_0 值分別對於含水量及乾密度之關係將 Fratta 之半理論建立成一以含水量及乾密度描述寶二砂土剪力波速行為之模型。但由於對 m 值影響因子還需做深入探討，加上剪力波速量測會有同樣剪力波速，不同乾密度之盲點存在，於現地應用上該推導式又顯得複雜不利計算，並不

符合未來應用之需求。

5.現地量測之初步應用評估：由於不同乾密度會影響剪力波速對量測含水量之線性斜率，在現地量測所獲得之剪力波速與含水量可能會因不同線性關係之交會點而無法確認其正確乾密度。此盲點需在改變現地含水量後，再進行剪力波速量測，以兩點線性找出其正確之乾密度。為了簡化現地量測之應用，本研究透過剛夯實完試體之剪力波速與飽和度之關係找出一經驗式如(4.9)式所示供室內標定用，於現地再結合 TDR 量測與表面波震測，藉此推導出現地含水量及現地乾密度。

5.2 建議

- 1.本研究於夯實土壤組構與剪力波速之關係探討希望藉此成果應用於未來震波量測土壤工地密度上，因此，探討室內剪力波速試驗所使用之震波頻率與現地量測之震波頻率之差異將是未來討論之課題。
2. 由於現場為碾壓土壤，因此現地應用上表面波震測法是較為適用之方法，結合 TDR 在量測體積含水量上 1% 內之準確度，並根據室內剪力波速試驗發現剪力波速與飽和度有一良好函數關係如(3.7)式所示，先透過室內標定使(3.7)式未知數剩下剪力波速與飽和度，於現地表面波震測法得到剪力波速，再由 TDR 量測到重量含水量，藉此反推現地乾密度，此法將初步實現無需取土快速進行現地碾壓土壤品管檢

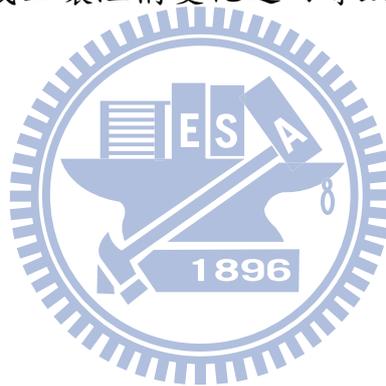


核之目標。

3. 由於本研究試驗皆屬室內試驗，缺乏現地應用上之數據佐證，故未來還需以現地表面波量測與 TDR 技術結合，透過本研究之室內標定去進行現地應用可行性之探討。

4. 在現地應用上可能會遭遇到現地夯實能量變化之問題，本研究於實驗室內發現當夯實能量改變時其剪力波速行為也會改變，剪力波速與飽和度之關係會隨著夯實能量的變化有著平移的現象，故未來還需針對夯實能量是否造成土壤組構變化進而導致剪力波速變化進行探

討。



參考文獻

- 王金山,(2004) “共振柱試驗之土壤動力性質” 國立中央大學土木工程學系,碩士論文。
- 何文傑,(2007) “砂土承受垂直振動變形之初步研究” 國立成功大學土木工程學系,碩士論文。
- 高嘉彬,(2007) “不飽和土壤邊坡基質吸力與位移之監測及滲流分析” 國立台灣科技大學營建工程系,碩士論文。
- 許家華,(2005) “前期反覆荷重對砂土液化阻抗及剪力波速之影響” 國立台灣科技大學營建工程系,碩士論文。
- 黃耀道,(2007) “台灣中西部粉土質砂土液化行為分析” 國立交通大學土木工程學系,博士論文。
- 廖志穎,(2007) “不飽和路基土壤濕化及剪力模數研究” 國立台灣科技大學營建工程系,碩士論文。
- 戴源昱,(2007) “台灣西南部粉土質細砂 CRR 與 q_c 關係之標定” 國立交通大學土木工程學系,碩士論文。
- Ai-Hunaidi, M.O., Chen, P.A., Rainer, J.H., and Tremblay, M.(1996), “Shear moduli and damping in frozen and unfrozen clay by resonant column tests” ,Canada Geotechnical Journal, No. 33, pp. 510-514.
- Alla, P.(2009), “Dynamic Behavior of Unsaturated Soil” ,S M. thesis, Jawaharlal Nehru Technological University, India.
- Brignoli, E.G.M., Gotti, M., and Stokoe, K.H., II(1996), “Measurement of shear wave in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers” ,Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 19, No. 4, pp.

384-397.

Brocanelli, D., and Rinaldi, V.(1998), “Measurement of low-strain material damping and wave velocity with bender elements in the frequency domain” ,Canada Geotechnical Journal, No. 35, pp. 1032-1040.

Cho, G.C., and Santamarina, J.C., Member(2001), “Unsaturated particulate materials—particle-level studies ” ,ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 1.

Clairmont, J., Dupuis, M., Choquet, P., and Budin, R.(1999), “Lightning protection and shielding for geotechnical instruments and data acquisition systems” ,Geotechnical News.

Claria, J.J., and Rinaldi, V.A.(2007), “Shear wave velocity of a compacted clayey silt” ,Geotechnical Testing Journal, Vol. 30, No. 5.

Clayton, C.R.I., Theron, M. & Best, A.I.(2004), “The measurement of vertical shear-wave velocity using side-mounted bender elements in the triaxial apparatus” ,Geotechnique 54, No.7, pp. 495-498.

Fam, M., and Santamarina, C.(1995), “Study of geoprocesses with complementary mechanical and electromagnetic wave measurements in an oedometer” ,Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 18, No. 3, pp. 307-314.

Ferreira, C., and Fonseca, A.V.(2006), “Comparison of simultaneous bender elements and resonant column tests on Porto residual soil” ,Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and analysis, pp. 523-535.

Fratta, D., Alshibli, K.A., Tanner, W.M., and Roussel, L.(2005), “Combined TDR and p-wave velocity measurements for the determination of in situ soil density—experimental study” ,Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No. 6.

- Huang, A.B., and Huang, Y.T.(2005), “Static and cyclic behavior of a silty sand according to test on undisturbed sample” ,Department of Civil Engineering of National Chiao Tung University, Hsin Chu, Taiwan.
- Kalinski, M.E., and Thummaluru, M.S.R.(2005), “A New Free-Free Resonant Column Device for Measurement of G_{\max} and D_{\min} at Higher Confining Stresses” ,Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No. 2.
- Kim, D.S., and Park, H.C.(1999), “Evaluation of ground densification using spectral analysis of surface waves(SASW) and resonant column(RC) tests” ,Canada Geotechnical Journal, No. 36, pp. 291-299.
- Kim, D.S., Shin, M.K., and Park, H.C.(2001), “Evaluation of density in layer compaction using SASW method” ,Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No. 21, pp. 39-46.
- Lee, J.S., and Santamarina, J.C.(2005), “Bender elements: performance and signal interpretation” ,ASCE,Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 9, pp. 1063-1070.
- Lee, J.S., and Santamarina, J.C.(2006), “Discussion “Measuring shear wave velocity using bender elements” by leong, E.C., Yeo, S.H., and Rahardjo, H.” ,Geotechnical Testing Journal, Vol. 29, No. 5.
- Leong, E.C., Yeo, S.H., and Rahardjo, H.(2005), “Measuring shear wave velocity using bender elements” ,Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No. 5.
- Markowska-Lech, K.(2008), “The Determination of Shear Modulus in Overconsolidated Cohesive Soils” ,Foundations of Civil And Environmental Engineering NO. 12, Poland.
- Patel, A., and Singh, D.N.(2009), “A generalized relationship for estimating shear wave velocity in soils” ,International Journal of Geotechnical Engineering, No. 3,

pp. 343-351.

Rio, J.F.M.E.(2006), “Advances in Laboratory Geophysics Using Bender Elements” ,Ph D. thesis, Department of Civil & Environmental Engineering, University of London, London.

Sawanguriya, A., Biringen, E., Fratta, D., Bosscher, P.J. and Edil, T.B.(2006), “Dimensionless Limit for the Collection and Interpretation of Wave Propagation Data in Soil” ,ASCE ,Geotechnical Special Publication (GSP) No. 149: “Site and Geomaterial Characterization ” .pp. 160-166.

Sawanguriya, A., Fall, M., and Fratta, D.(2008), “Wave-based techniques for evaluating elastic modulus and poisson’s ratio of laboratory compacted lateritic soils” ,Geotechnical GeoEngineering, No. 26, pp. 567-578.

Theopoulos, A., Papadopoulou, A., Tika, Th., and Laopoulos Th.(2009), “An Automated System for Measurement of Shear Waves Velocity in Soil” ,XIX IMEKO World Congress, Fundamental and Applied Metrology, September 6-11, Lisbon, Portugal.

Van Genuchten, M.Th.(1980), “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils” ,Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898.

Youn, J.U., Choo, Y.W., and Kim, D.S.(2008), “Measurement of small-strain shear modulus G_{max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear test” ,Canada Geotechnical Journal, No.45, pp.1426-1438.

Yang, S.R., Lin, H.D., Kung, J.H.S., and Liao, J.Y.(2008), “Shear wave velocity and suction of unsaturated soil using bender element and filter paper method” ,Journal of GeoEngineering, Vol. 3, No. 2, pp. 67-74.

Zhou, Y.G., Chen, Y.M., Asaka, Y., and Abe, T.(2008), “Surface-mounted bender

elements for measuring horizontal shear wave velocity of soils” ,Journal of
Zhejiang University SCIENCE A, ISSN 1862-1775.



附錄一

```
clc;clear;close all

data = load('eb2-16-9-2.dat'); %讀取量測資料

dt = 5 * 10^-6; % sec

winsec = 1:90; % 零點修正

AnaEnd = 400; % 分析終點

SmoothPt = 3; % 移動平均點數

fcf = 1000; % cutoff frequency

N = 5; % filter order

Dist= 0.104 %彎曲元件間距

t = 0:dt:(AnaEnd-1)*dt;

amp = data(1:AnaEnd,1);

base = data(1:AnaEnd,2);

% zero line shift

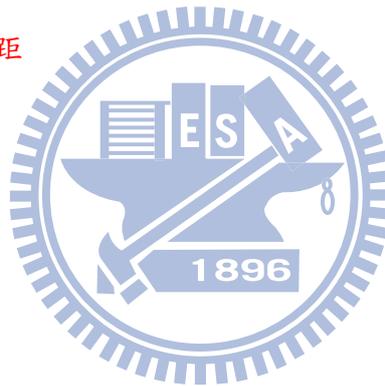
dz = mean(amp(1:winsec(1)));

amp = amp -dz;

% butter high pass filter

[b,a] = butter(N,fcf/(1/(2*dt)),'high');

yf = filter(b,a,amp);
```



```
% smoothing
```

```
amp = smooth(amp,SmoothPt);
```

```
yf = smooth(yf,SmoothPt);
```

```
base = smooth(base,SmoothPt);
```

```
scl = max(yf)
```

```
base = base/max(base) * scl;
```

```
figure
```

```
plot(t,amp,'b');
```

```
figure;hold on
```

```
plot(t,yf,'k')
```

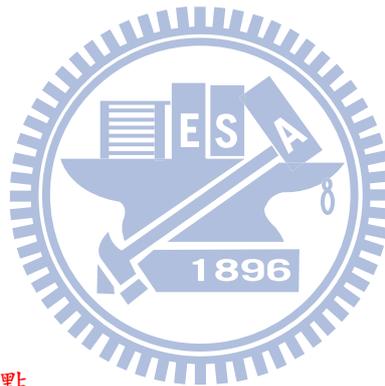
```
plot(t,base,'r')
```

```
pause
```

```
[a b] = ginput(2); %挑選兩點
```

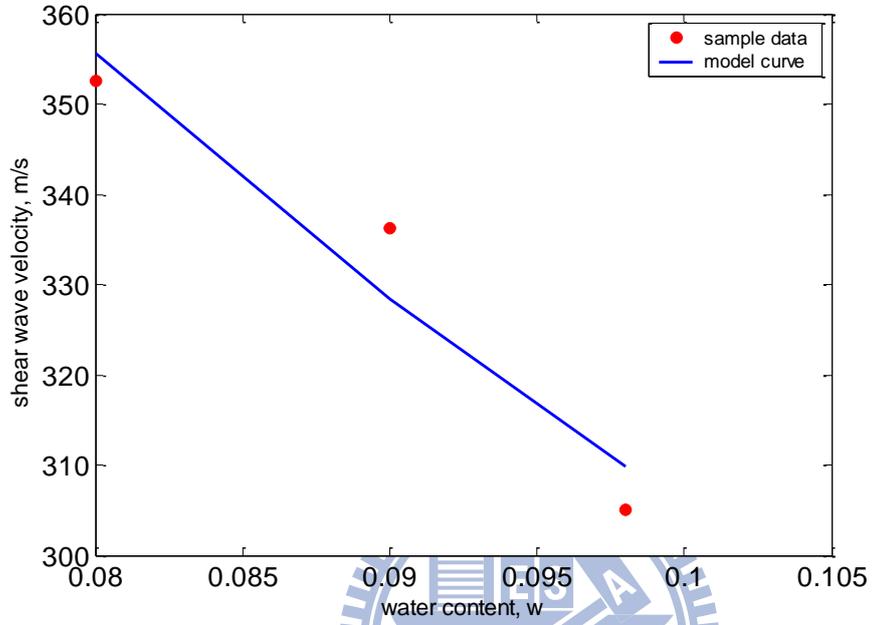
```
plot(a,b,'kx')
```

```
vs = Dist/(a(2)-a(1))
```

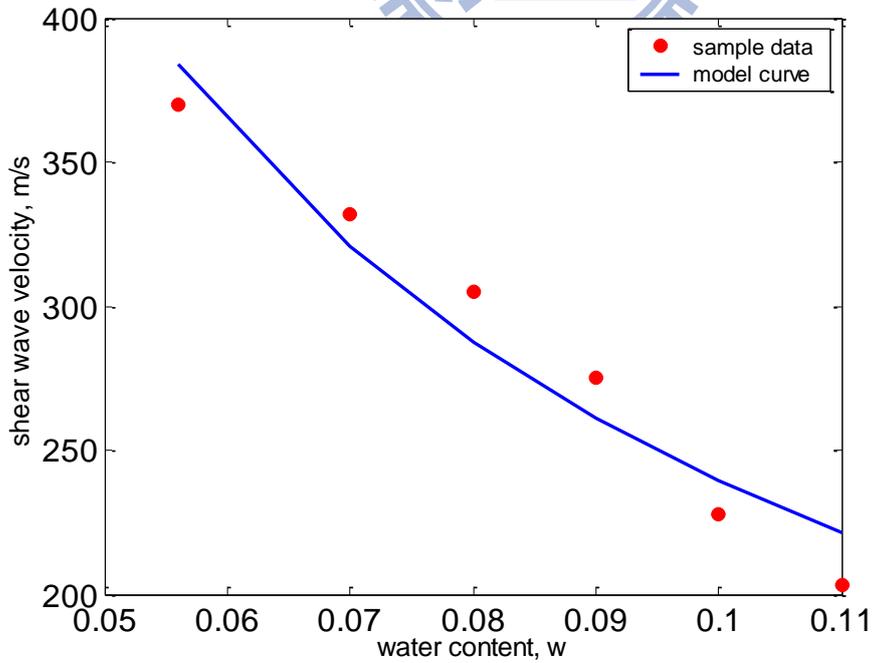


附錄二

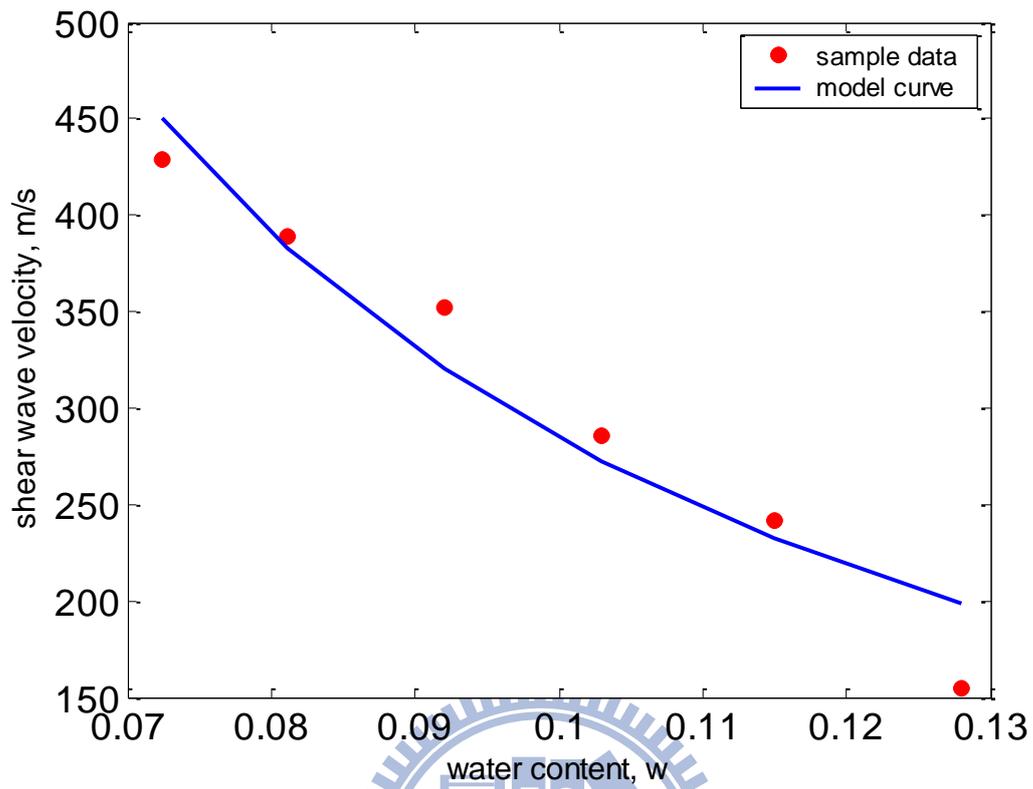
寶二砂土 Fratta 模擬結果



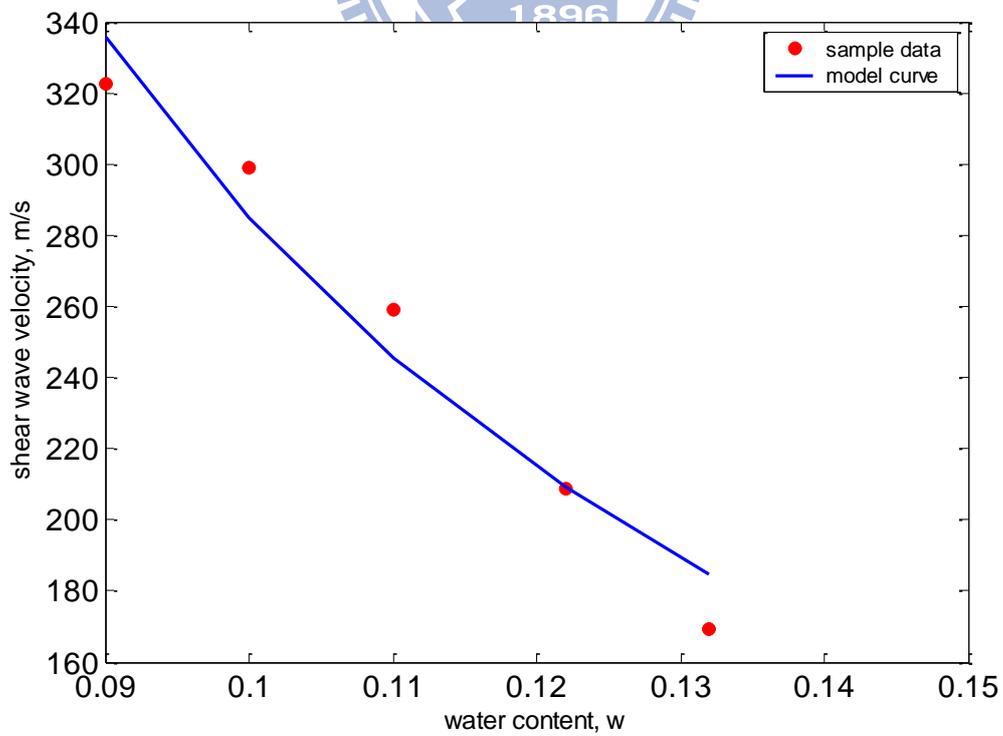
夯實含水量 9.8% 之模擬與量測值之比較



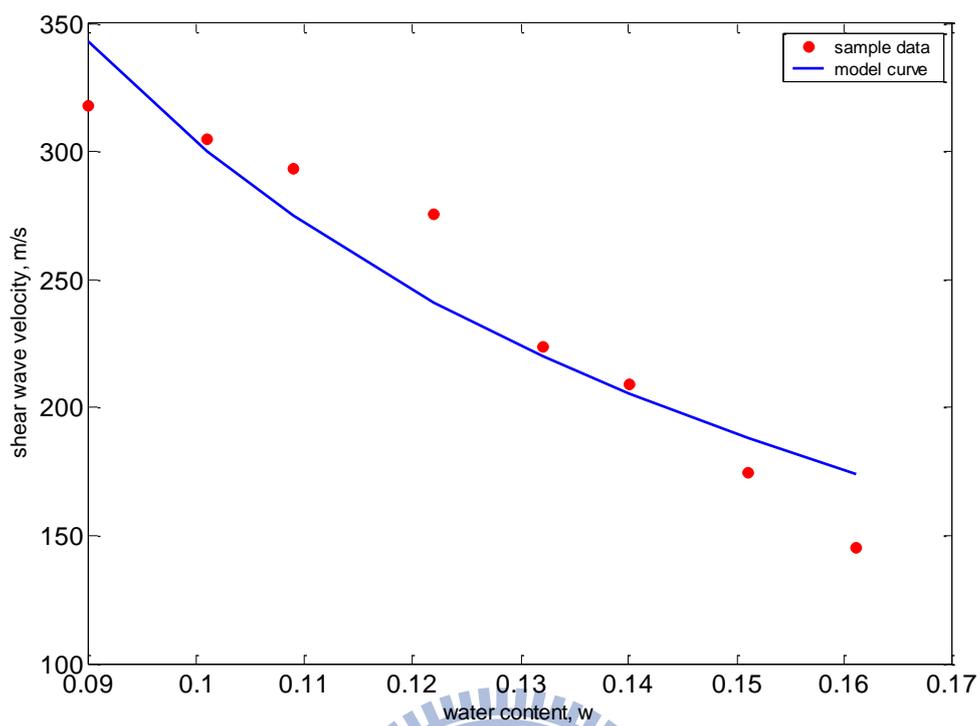
夯實含水量 11.3% 之模擬與量測值之比較



夯實含水量 12.8% 之模擬與量測值之比較



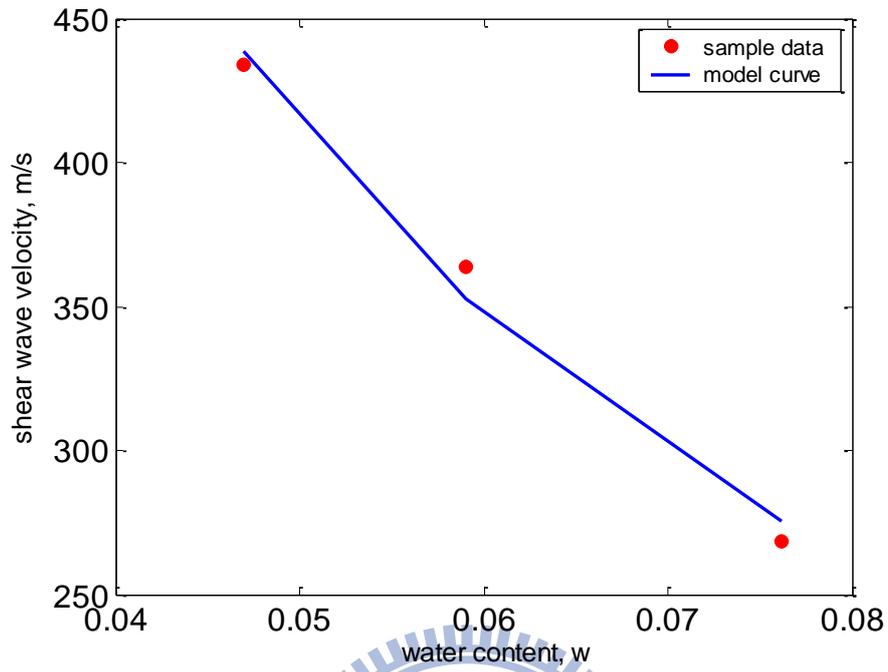
夯實含水量 13.2% 之模擬與量測值之比較



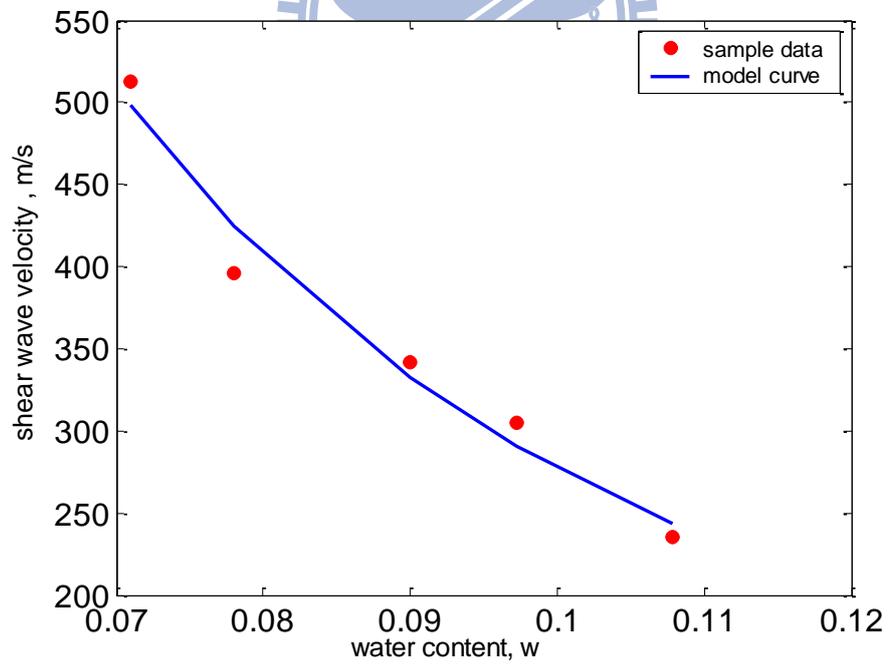
夯實含水量 16.1% 之模擬與量測值之比較



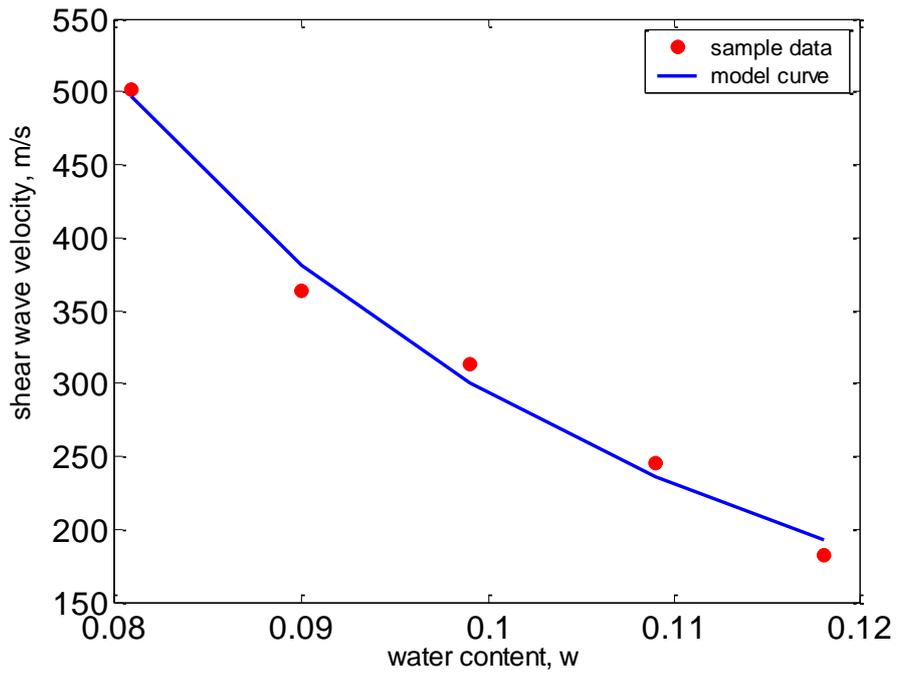
湖山砂土 Fratta 模擬結果



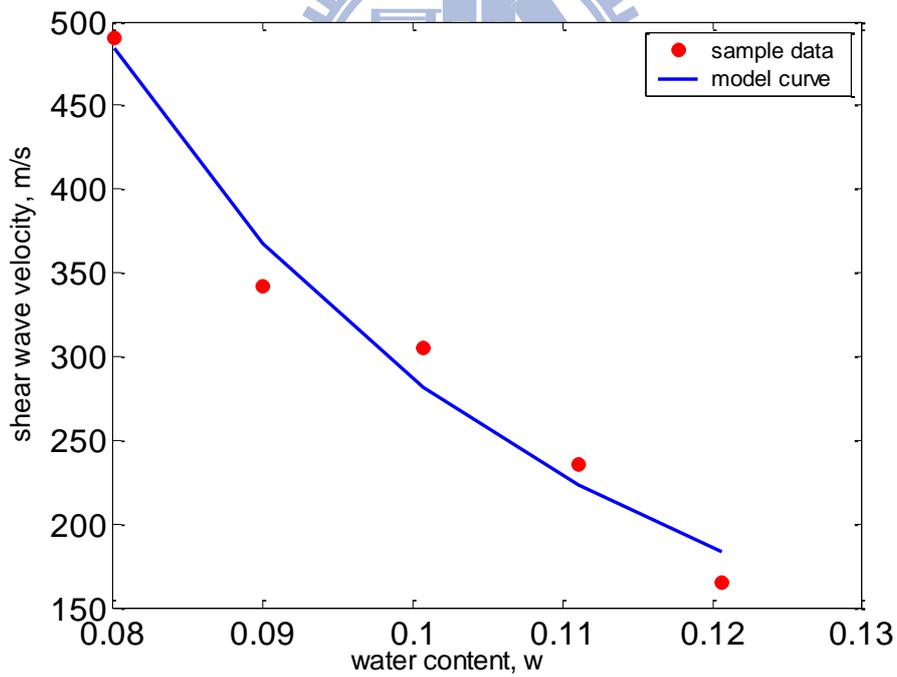
夯實含水量 7.62% 模擬與量測值比較



夯實含水量 10.79% 模擬與量測值比較



夯實含水量 11.8% 模擬與量測值比較



夯實含水量 12.06% 模擬與量測值比較