

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

夯實土壤異向性行為室內試驗探討

Laboratory study of anisotropic behavior of compacted soil



研究生：王滢郁

指導教授：林志平 博士

中華民國一〇二年七月

夯實土壤異向性行為室內試驗探討

Laboratory study of anisotropic behavior of compacted soil

研究生：王滢郁

Student : Ying-Yu Wang

指導教授：林志平 博士

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin



July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年七月

夯實土壤異向性行為室內試驗探討

學生：王澄郁

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

為提升碾壓土壤品質檢測的效率，近年來有各種應用物理量量測之非核子式檢測技術發展。柳儒錚(2010)將剪力波應用於碾壓土壤檢測，發現採用表面波震測量測所得之現地剪力波速與飽和度之關係與實驗室標定之結果存有差異，不同的夯實能量與碾壓方法皆可能是造成誤差之原因，另外，碾壓土壤之異向性亦可能為誤差原因之一。碾壓土壤之異向性程度與可能造成的波速影響程度皆不清楚，因此，本研究將透過室內試驗的方式對夯實土壤之異向性行為進行探討。本研究建立壓縮波速與剪力波速室內量測系統，以 Bender-extender element 進行夯實土壤之波速量測，藉由不同量測角度之波速來探討夯實土壤之彈性波速行為與異向性程度。由試驗結果顯示，在夯實曲線乾側，當含水量(或飽和度)逐漸降低時，垂直於橫向等向面的剪力波速會有升高、降低再提升之情形；在夯實曲線溼側，各量測方向之壓縮波速與剪力波速則會明顯下降，顯示波速受含水量(或飽和度)之影響甚大。以波速求得異向性因子來探討夯實湖山砂土之異向性程度，可觀察到當含水量接近或大於最佳含水量時，隨含水量之上升，夯實土壤試體之異向性越加明顯。

關鍵字：夯實土壤、異向性、壓縮波速、剪力波速、Bender-extender element

Laboratory study of anisotropic behavior of compacted soil

Student : Ying-Yu Wang

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

In order to increase the efficiency of quality control and assurance, several non-nuclear testing technologies have been under development in recent years. Liu (2010) applied shear wave velocity measurement for such a purpose. However, his results show that there is a significant difference between the shear wave velocities obtained in-situ by the multichannel analysis of surface wave and that obtained from bender element system in the laboratory. Compaction energy and compaction techniques may play roles in the difference. The anisotropy of the compacted soil is probably another one. However, the degree of anisotropy in compacted soil and the effect of anisotropy on wave velocities are not known. Thus, the aim of this study is to investigate the anisotropic behavior of compacted soil by laboratory experiments. A bender-extender element system was established to measure both the compression and shear wave velocity in compacted soils. Several details on assembling of the testing system were discussed and optimized. A multi-angle measurement device was designed to measure the elastic wave velocity in different angle relative to the symmetric axis of the compacted soil sample. According to the experimental results, on the wet side, the shear wave velocity parallel to the symmetric axis keeps decreasing while water content increase. On the contrary, the shear wave velocity on the dry side fluctuates as water content decreases. Furthermore, observation from the anisotropy factors reveals that the anisotropy becomes more obvious (greater or smaller than one) when water content is close to or

greater than the optimum water content. Further studies worth to be conducted were suggested.

Keywords: Compacted soil; Anisotropy; Compression wave velocity; Shear wave velocity; Bender-extender element



誌謝

感謝指導教授林志平老師忙碌之中對於本論文的悉心指導，並鼓勵學生培養獨立思考精神，啟發學生探索地球物理領域，除此之外，更教導我許多待人處事之應對進退，獲益良多。

感謝古志生委員、葛宇甯委員、柳志錫委員、劉智超委員詳細審查本論文，並於學位口試時提供寶貴的建議與指正，使本論文能改善疏漏之處。研究所求學期間，感謝潘以文老師、廖志中老師、方永壽老師、單信瑜老師、黃安斌老師以及謝旭昇老師於學業上的教導。

感謝俊宏學長對本論文提供許多想法與建議，並在研究困頓之際以專業知識為我解惑，協助研究進行。感謝實驗室學長們的幫忙與照顧，讓我在研究所學習到許多知識與實務經驗。感謝友誠、昶笙、志峯與大地組同學們在研究上互相加油打氣，也感謝震紘、泊翰及學弟妹的協助。感謝朋友們的關心和勉勵，讓我更有勇氣面對挑戰。感謝所有幫助我的人，慷慨付出一己之力。

感謝親愛的家人，不管多麼辛苦，總是支持我朝知識殿堂邁進，並教育我建立正確的價值觀。實驗過程遭遇許多挫折，感謝男友暉凱的陪伴與鼓勵，讓我重拾信心繼續努力。

一路上的辛苦與困難，都因你們而微不足道。

目錄

中文摘要	i
ABSTRACT.....	ii
誌謝	iv
目錄	v
表目錄	vii
圖目錄	viii
符號說明	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 彈性波種類與波傳原理	3
2.1.1 實體波	3
2.1.2 表面波	4
2.2 土壤之剪力波速行為	7
2.3 土壤異向性	12
2.4 彈性波速室內量測方法	18
2.4.1 剪力波速量測法	18
2.4.2 壓縮波速與剪力波速聯合量測法	20
2.4.3 Bender-extender element	23
第三章 研究方法	27

3.1 研究流程	27
3.2 異向性試驗規劃.....	28
3.2.1 試驗規劃	28
3.2.2 試驗土壤	30
3.2.3 試驗儀器	32
3.3 Bender-extender element 波速量測系統建立.....	33
3.3.1 Bender-extender element 設計與收錄 P、S 波訊號之影響因子	34
3.3.2 Bender-extender element 製作.....	38
3.3.3 既有波速量測系統之問題.....	40
3.3.4 室內波速量測系統之建立.....	42
3.3.5 試驗步驟.....	61
3.4 波速分析方法	62
第四章 試驗結果與討論	66
4.1 彈性波速分析	66
4.2 剪力波速與飽合度.....	68
4.3 夯實土壤異向性程度與彈性波速行為.....	70
第五章 結論與建議.....	73
5.1 結論.....	73
5.2 建議.....	74
參考文獻	75

表目錄

表 2.1 柏松比與半無限域地層中雷利波波速對照表(Udías, 1999).....	6
表 2.2 一般材料異向性種類與性質(阮政璋, 2010).....	12
表 3.1 異向性試驗規劃表	29
表 3.2 試驗土壤基本物理性質	31
表 3.3 實驗使用之 Bender-extender element 一覽表	37
表 3.4 波速量測系統之問題與改良方法.....	60
表 4.1 不同量測角度之壓縮波速與剪力波速.....	66
表 4.2 夯實湖山砂土之彈性常數表.....	71
表 4.3 夯實湖山砂土之異向性因子.....	71



圖目錄

圖 2.1 實體波示意圖(修改自 Bolt(1976)).....	4
圖 2.2 表面波示意圖(修改自 Bolt(1976)).....	5
圖 2.3 柏松比與半無限域雷利波速關係圖(重繪自林俊宏(2005)).....	6
圖 2.4 雷利波頻散現象(Rix, 1988).....	7
圖 2.5 正規化剪力波速與乾密度之關係圖(Kim et al., 2001).....	8
圖 2.6 不同粒徑材料之剪力波速與飽和度關係圖(a)玻璃珠(b)高嶺土混合玻璃珠(c)花崗岩粉末(d)液化湧出之砂(Cho and Santamarina, 2001).....	9
圖 2.7 不同圍壓之剪力波速與夯實含水量(Clariá and Rinaldi, 2007).....	10
圖 2.8 剪力波速與飽和度關係：實驗資料與半經驗式(Fratta et al., 2005)...	11
圖 2.9 橫向等向性材料示意圖(林雅婷，2007).....	13
圖 2.10 Notations for normal and shear stresses (Das and Ramana, 2011).....	13
圖 2.11 波傳方向垂直於對稱軸之 CdS 慢度曲線(Auld, 1990).....	16
圖 2.12 波傳方向與對稱軸夾不同角度之 CdS 慢度曲線(Auld, 1990).....	17
圖 2.13 彎曲元件示意圖(Santamarina et al., 2001).....	19
圖 2.14 剪力波速量測設備示意圖(修改自柳儒錚(2010)).....	19
圖 2.15 壓縮波速與剪力波速量測設備示意圖(Brignoli et al., 1996).....	20
圖 2.16 量測壓縮波與剪力波之壓電元件示意圖(Brignoli et al., 1996).....	21
圖 2.17 壓電元件底座設置示意圖(Brignoli et al., 1996).....	22
圖 2.18 Bender-extender element 波速量測設備(Leong et al., 2009).....	23
圖 2.19 壓電陶瓷片極化型式(Leong et al., 2009).....	24
圖 2.20 Bender/Extender element 震動原理示意圖(Leong et al., 2009).....	25
圖 2.21 波傳遞距離與波長之比值 L_w/λ 對剪力波速之影響(Leong et al., 2009)	25

圖 3.1 研究流程圖	27
圖 3.2 異向性試驗影響因子	29
圖 3.3 湖山砂土夯實曲線(以壓克力模夯實)	30
圖 3.4 湖山砂土粒徑分佈圖	31
圖 3.5 試驗壓克力夯模	32
圖 3.6 四十五度與三十度角度底座	32
圖 3.7 既有彈性波速量測系統	33
圖 3.8 不同頻率之壓縮波訊號	36
圖 3.9 不同頻率之剪力波訊號	36
圖 3.10 裁切壓電陶瓷片	38
圖 3.11 焊接單芯線於壓電陶瓷片上	39
圖 3.12 塗防水膠進行防水處理	39
圖 3.13 於壓電陶瓷片塗導電漆與夾上接地線	40
圖 3.14 Bender-extender element	40
圖 3.15 波形受串擾影響與基線飄移	41
圖 3.16 夯實曲線溼側土壤試體無法量測震動訊號	42
圖 3.17 原室內接地示意圖	43
圖 3.18 改善室內接地示意圖	43
圖 3.19 改善接地後之壓縮波波形	44
圖 3.20 改善接地後之剪力波波形	44
圖 3.21 函數產生器參數調整示意圖	45
圖 3.22 函數產生器參數調整前之波形	46
圖 3.23 函數產生器參數調整後之波形	46
圖 3.24 原室內接地之波形	47
圖 3.25 改善室內接地之波形	48

圖 3.26 戶外草地接地之波形	49
圖 3.27 焊接使用之線材(a)單芯線外包鋁箔(b)SMA 線.....	49
圖 3.28 單芯線外包鋁箔之 Bender-extender element 所收錄波形.....	50
圖 3.29 SMA 線之 Bender-extender element 所收錄波形.....	51
圖 3.30 使用 BNC 鱷魚夾線收錄之波形.....	52
圖 3.31 實驗使用之 Balun 夾線.....	52
圖 3.32 使用 Balun 夾線收錄之波形	53
圖 3.33 使用 Balun 夾線之震源波形震盪嚴重	53
圖 3.34 使用 Offline UPS 供電之波形.....	54
圖 3.35 使用 Online UPS 供電之波形	55
圖 3.36 使用蓄電池直流電轉為交流電供電之波形	55
圖 3.37 改良彈性波速室內量測系統.....	56
圖 3.38 觸發電壓 10 伏收錄之波形.....	57
圖 3.39 觸發電壓 40 伏收錄之波形.....	57
圖 3.40 觸發電壓 10 伏之波形	58
圖 3.41 觸發電壓 40 伏之波形	58
圖 3.42 不同長度夯實土壤試體之量測訊號.....	59
圖 3.43 典型之剪力波量測結果(Kawaguchi et al., 2001).....	62
圖 3.44 波形初達點位挑選(Kawaguchi et al., 2001).....	63
圖 3.45 剪力波波形與波傳時間挑選.....	64
圖 3.46 壓縮波波形與波傳時間挑選.....	64
圖 4.1 不同重量含水量之夯實湖山砂土彈性波速	68
圖 4.2 夯實湖山砂土垂直向剪力波速與飽和度	69
圖 4.3 無圍壓之土壤剪力波速與飽和度(重繪自 Clariá and Rinaldi(2007))..	69
圖 4.4 夯實湖山砂土剪力波速與飽和度(重繪自柳儒錚(2010)).....	70



符號說明

V_p 、 V_s 、 V_r	彈性波速
λ 、 μ	拉瑪彈性常數(Lamé's constants)
ρ	材料密度
ρ_w	水密度
$V_{s,n}$	正規化之剪力波速
$V_{s,m}$	在平均有效圍壓 σ'_m 下所測得之剪力波速
P_a	一大氣壓下之參考應力
G_s	土顆粒比重
n	孔隙率; 標定參數(Kim and Park, 1999、Kim et al., 2001)
S	飽和度
G_0	飽和度為 $2^{(1-m)/m}$ 時之土壤剪力模數
m	半經驗式之標定參數(Fratta et al., 2005); 剪力波速之標定參數(柳儒錚, 2010)
a_s 、 b_s	飽和度與剪力波速關係式之標定參數(柳儒錚, 2010)
σ_{ij}	表示作用在法線方向為 i 方向之平面上 j 方向的應力
σ	正向應力
τ	剪應力
ε	正向應變
γ	剪應變
C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{33} 、 C_{44} 、 C_{66}	彈性常數
E 、 E'	平行、垂直橫向等向面的楊氏係數
ν 、 ν'	應力平行、垂直作用於橫向等向面形成應變的柏松比
G'	垂直橫向等向面的剪力模數
A 、 C 、 F 、 L 、 N	Love (1927) 定義之彈性常數
φ 、 ξ 、 η	異向性因子

第一章 緒論

1.1 研究動機

碾壓土壤結構物與民生安全息息相關，如水庫之壩體、河堤或海堤之堤岸、道路之路堤、邊坡之擋土牆以及加勁擋土牆等結構物都屬於碾壓土壤結構物之類別，此類結構物主要特徵是採用土壤材料進行分層夯實、碾壓後營建而成，興建時之含水量與密度控制將影響結構物本身之水密性與強度等工程性質，當重量含水量控制不當或夯實度不足時，常造成填方塌陷、堤防淘空及擋土結構破壞等危害民生之情事，而有造成人民生命安全及財產損失之虞，因此重量含水量與乾密度是碾壓土壤營建過程中極為重要之品質管理指標。

為確保碾壓土壤結構物之碾壓品質，世界各國皆訂有相關的品質控制規範，一般國際上對於碾壓施工所訂立之規範，最重要也是最後一道品管機制即是對已完成碾壓之土壤進行重量含水量與乾密度(或夯實度)之檢測，以確保其符合目的之需求。傳統的含水量與乾密度檢測技術當中，砂錐法與烘乾法為常見的方法，操作簡單、儀器容易取得，但較為耗時，通常大壩工程有工時限制，為縮短時間與提升效率，因而發展出能夠快速獲得土壤含水量與乾密度的核子密度儀法，但核子密度儀仰賴放射線來檢測，儀器管理較為不便，且需要受過專業訓練的人員才能使用，因此近年來有各種應用物理量量測之非核子式檢測技術發展，而柳儒錚(2010)欲將剪力波應用於碾壓土壤之檢測，遂進行夯實土壤剪力波速之行為探討。

柳儒錚(2010)利用室內實驗量測所得碾壓土壤剪力波速，提出碾壓土壤飽和度與剪力波速之關係，但至現地應用時，發現採用表面波震測法量測所得現地剪力波速與飽和度之關係與實驗室標定之結果存有差異，剪力波

速的影響因子眾多，不同的夯實能量與碾壓方法皆可能是造成誤差之原因，另外，表面波震測法之應用亦可能為誤差來源之一，而造成誤差的可能原因在於表面波震測法將施測材料之性質假設為均質且均向，但實際上碾壓土壤材料具有異向性，碾壓土壤之異向性程度與可能造成的波速影響程度皆不清楚，因此，本研究將透過室內試驗之方式對夯實土壤異向性行為進行探討。

1.2 研究目的

根據本研究之研究動機，本研究之研究目的主要有以下兩點：

1. 建立 Bender-extender element 室內波速量測系統，兼具量測夯實土壤試體壓縮波速與剪力波速之功能。
2. 透過室內實驗瞭解夯實土壤之壓縮波速與剪力波速行為，並藉由壓縮波速與剪力波速量測結果，來探討夯實土壤之異向性程度。

第二章 文獻回顧

為瞭解異向性土壤之行為與波速量測方法，本章針對彈性波、夯實土壤之剪力波速行為、土壤異向性以及彈性波速室內量測方法進行文獻回顧，茲整理說明於下。

2.1 彈性波種類與波傳原理

在地層中傳遞的震波依據傳遞特性可分為兩類，經由物質內部傳遞者稱為實體波(Body wave)，而沿著物質表面傳遞者稱為表面波(Surface wave)，本節分別對實體波與表面波進行基本介紹。

2.1.1 實體波

實體波依據不同的質點運動方式可分為壓縮波(Compression wave)與剪力波(Shear wave)。在震波記錄上最先抵達者為壓縮波，因此壓縮波又稱為 Primary wave (簡稱 P 波)；而剪力波為震波記錄上第二抵達者，因此剪力波又稱為 Secondary wave (簡稱 S 波)。

壓縮波在介質中傳遞時，介質顆粒的震盪方向與波傳遞方向平行，如圖 2.1 所示，當壓縮波沿著 x 軸方向傳遞時，介質顆粒會以原來位置為中心沿著 x 軸來回震盪，使得介質顆粒排列有疏密之分，而介質顆粒在空間中兩相鄰最緊密處(或最疏鬆處)之距離為其波長。剪力波在介質中傳遞時，介質顆粒的震盪方向與波傳遞方向垂直，如圖 2.1 所示，當剪力波沿著 x 軸方向傳遞時，介質顆粒會以原來位置為中心沿著 z 軸(或 y 軸)來回震盪，使得介質顆粒排列有高低之分，而介質顆粒在空間中兩相鄰等高處之距離為其波長。

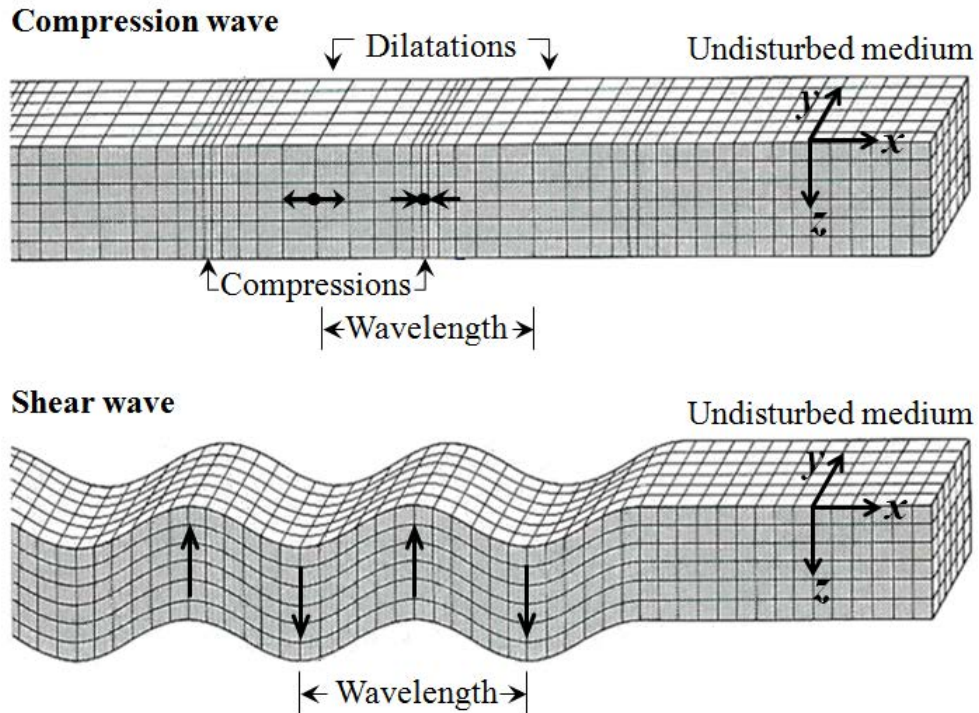


圖 2.1 實體波示意圖(修改自 Bolt(1976))

在純彈性體中，壓縮波速 V_p 以及剪力波速 V_s 之值如式(2.1)、(2.2)所示

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

其中， λ 、 μ 為拉瑪彈性常數(Lamé's constants)， ρ 為密度。由於 λ 、 μ 皆為大於零之值，因此觀察兩式可知壓縮波速較剪力波速為快。

2.1.2 表面波

表面波存在於具有自由表面的介質中，沿著自由表面傳遞，且會隨著深度增加而有能量衰減的現象。表面波依據不同的質點運動方式可分為雷利波(Rayleigh wave)以及拉夫波(Love wave)。拉夫波在震波記錄上是繼剪力波之後抵達者，接續其後為雷利波。

雷利波在介質表面傳遞時，介質顆粒的震盪方向與波傳遞方向如圖 2.2

所示，當雷利波沿著正 x 軸方向傳遞時，在介質表面之顆粒會沿著 x-z 平面形成逆時針方向橢圓旋轉之震盪，而介質顆粒在空間中兩相鄰最緊密處(或最疏鬆處)之距離為其波長。雷利波與同在 x-z 平面上傳遞的剪力波分量(以 SV 表示)及壓縮波統稱為 P-SV 波。有別於雷利波，拉夫波雖亦在介質表面傳遞，但介質顆粒的震盪方向與波傳遞方向垂直，如圖 2.2 所示，當拉夫波沿著 x 軸方向傳遞時，在介質表面之顆粒會以原來位置為中心沿著 y 軸來回震盪，而介質顆粒在 y 方向位移相同的最短距離為其波長。

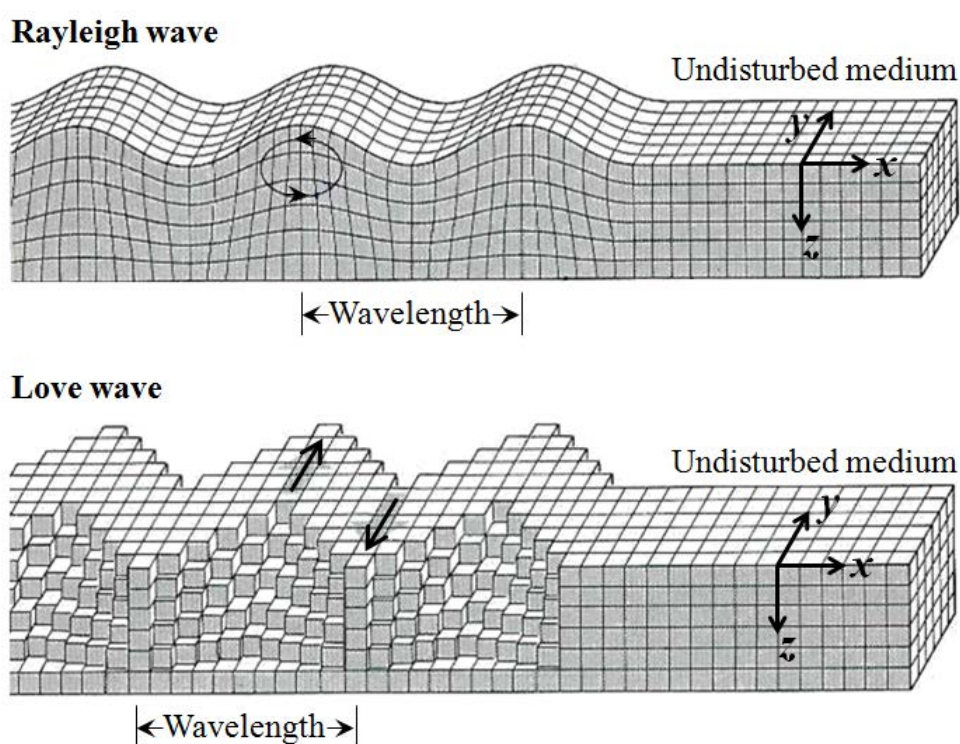


圖 2.2 表面波示意圖(修改自 Bolt(1976))

工程中所應用的表面波通常是指雷利波，在均質均向之半無限域彈性體中，雷利波的波速與地層的柏松比(Poisson's ratio)有關，令 $\alpha = (V_r/V_p)^2$ 、 $\beta = (V_r/V_s)^2$ ，其中 V_r 為雷利波速，則如圖 2.3 及表 2.1 所示， α 與柏松比有一對一之關係，可由已知柏松比找出相對應之 α 值，從而推論波速比。在可能的柏松比範圍(0 ~ 0.5)內， β 會在 0.7640 至 0.9128 之間變動，由此可得到雷利波速與剪力波速之關係。對於土壤材料而言，柏松比為 0.4，則在半

無限域空間中，雷利波與剪力波的波速比約為 0.9422 (林俊宏，2005)。

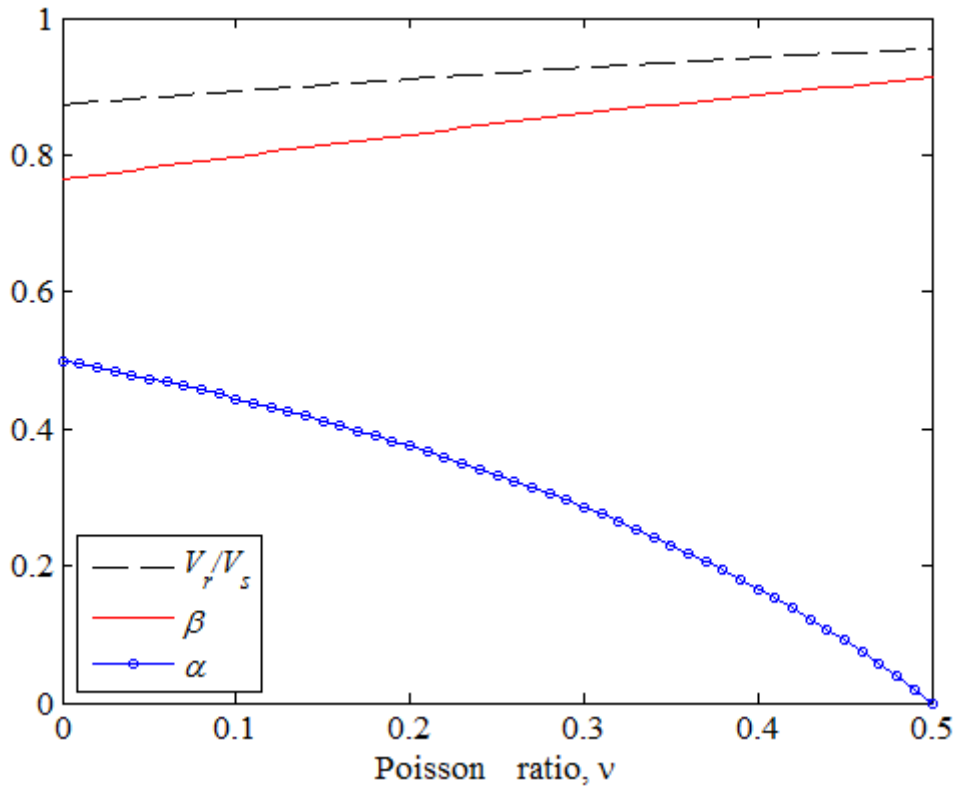


圖 2.3 柏松比與半無限域雷利波速關係圖(重繪自林俊宏(2005))

表 2.1 柏松比與半無限域地層中雷利波波速對照表(Udías, 1999)

Poisson's ratio, ν^*	α	β	Rayleigh wave velocity, V_r
0	0.5	0.7640	$0.8741V_s$
0.125	$\frac{3}{7}$	0.8059	$0.8977V_s$
0.25	$\frac{1}{3}$	0.8453	$0.9194V_s$
0.5	0	0.9128	0

$$* \nu = \frac{1-2\alpha}{2(1-\alpha)}$$

如圖 2.4 所示，表面波之波傳影響範圍大約侷限於一波長之深度內，因此表面波之影響深度會因不同的頻率而有所差異，當土層之彈性模數隨著深度而變化時，波傳速度亦隨著頻率(或波長)之不同而改變，此稱為表面波

之頻散現象，表面波速與頻率(或波長)之關係則稱為頻散曲線，而表面波震測即是採用表面波中之雷利波或拉夫波來探測地下土層，又因雷利波為地表面量測法中最容易產生且振幅亦最大之震波，故通常都採用雷利波來探測地下土層之構造，由於雷利波速與剪力波速之相關性較高，利用頻散曲線與地層波速變化之關係，可反算得到土層之剪力波速剖面。

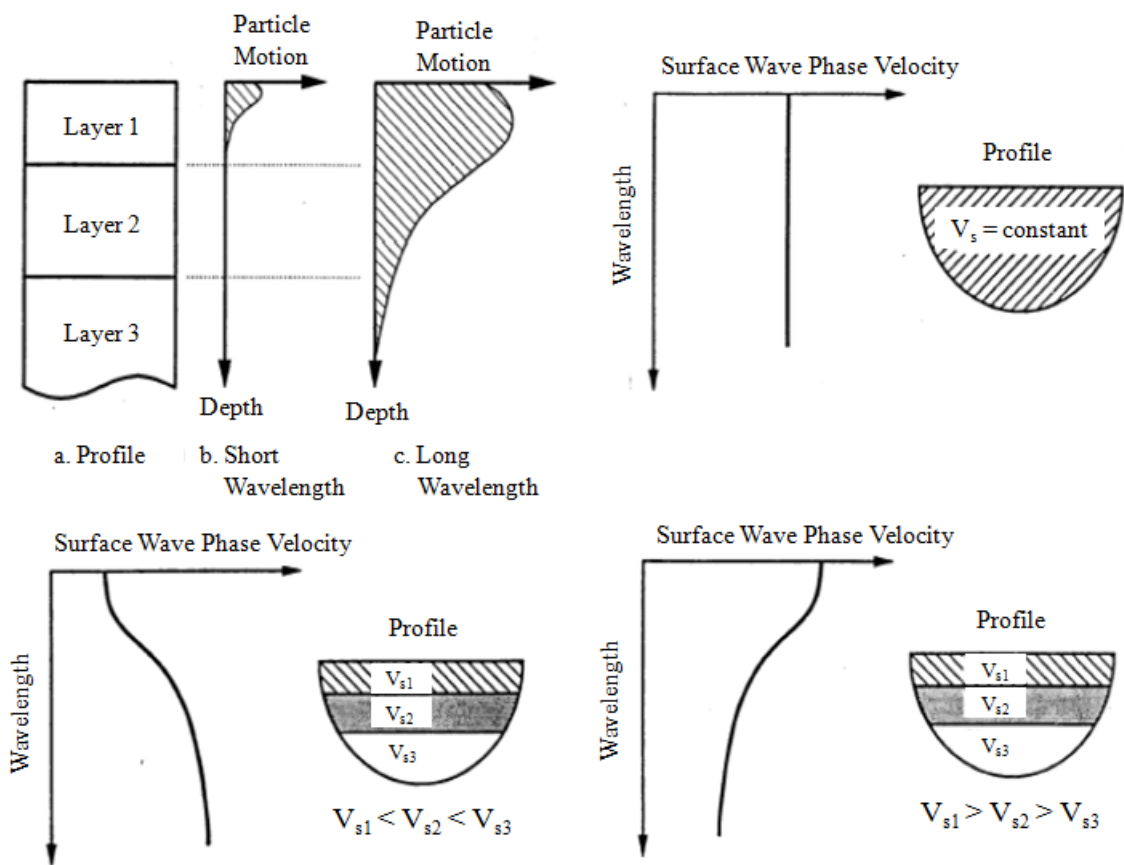


圖 2.4 雷利波頻散現象(Rix, 1988)

2.2 土壤之剪力波速行為

Kim and Park (1999)以及 Kim et al. (2001)進行共振柱(Resonant column)試驗，利用下列數學式對剪力波速進行正規化

$$V_{s,n} = V_{s,m} \left(\frac{P_a}{\sigma_m} \right)^n \quad (2.3)$$

其中， $V_{s,n}$ ：正規化之剪力波速

$V_{s,m}$ ：為在平均有效圍壓 σ'_m 下所測得之剪力波速

P_a ：一大氣壓下之參考應力

n ：標定參數

該正規化後之剪力波速與乾密度之關係如圖 2.5 所示，正規化後之剪力波速與乾密度有良好的線性關係，當乾密度增加時，剪力波速亦將隨之提升。

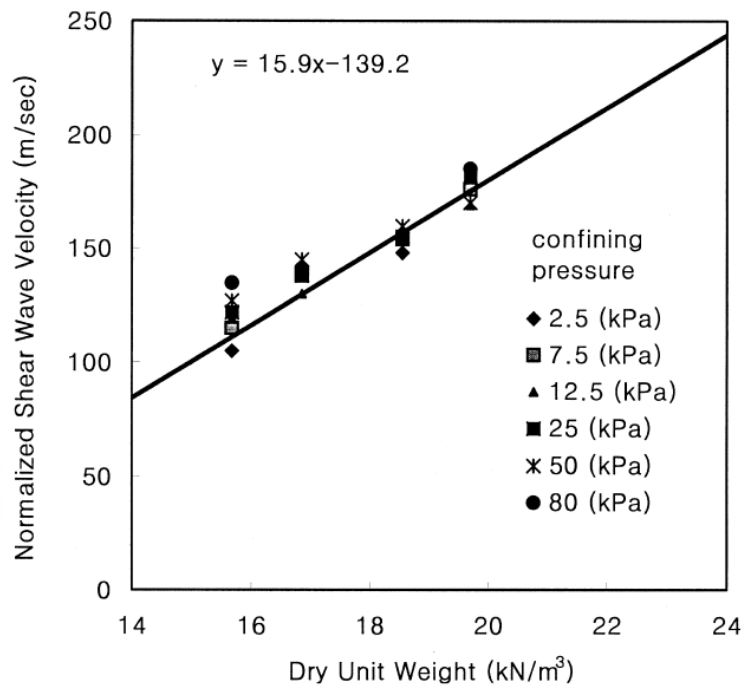


圖 2.5 正規化剪力波速與乾密度之關係圖(Kim et al., 2001)

不過非飽和碾壓土壤之剪力波速並非僅受到乾密度所影響，Cho and Santamarina (2001)控制土壤材料的孔隙率，以四種不同粒徑分佈之土壤材料進行試驗，得到各土壤之飽和度與剪力波速之關係(當孔隙率固定時，飽和度與重量含水量之間僅為一常數關係，因此亦可將飽和度視為重量含水量)，試驗結果如圖 2.6 所示，剪力波速會隨著飽和度(或重量含水量)的增加而逐漸下降，當材料趨近飽和時，剪力波速之變化也不如壓縮波速般劇烈(Stokoe et al., 2004)。

對於粒徑較大的玻璃珠($D_{50} = 320 \mu\text{m}$)與液化後湧出之砂($D_{50} = 360 \mu\text{m}$)而言(如圖 2.6(a)及圖 2.6(d)所示)，在飽和度為 10 % 至 80 % 之區間，兩者之

剪力波速下降幅度並不明顯。對於粒徑較小的花崗岩粉末($D_{50} = 89 \mu\text{m}$)(如圖 2.6(c))，飽和度之增加會使得剪力波速明顯降低。由玻璃珠與高嶺土所組成之材料(如圖 2.6(b))，高嶺土($D_{50} = 5\mu\text{m}$)雖僅佔整體之 20%，卻在飽和度變化過程中控制了土壤材料之剪力波速行為，由此可見，土壤材料的細粒料含量對剪力波速之影響相當顯著。

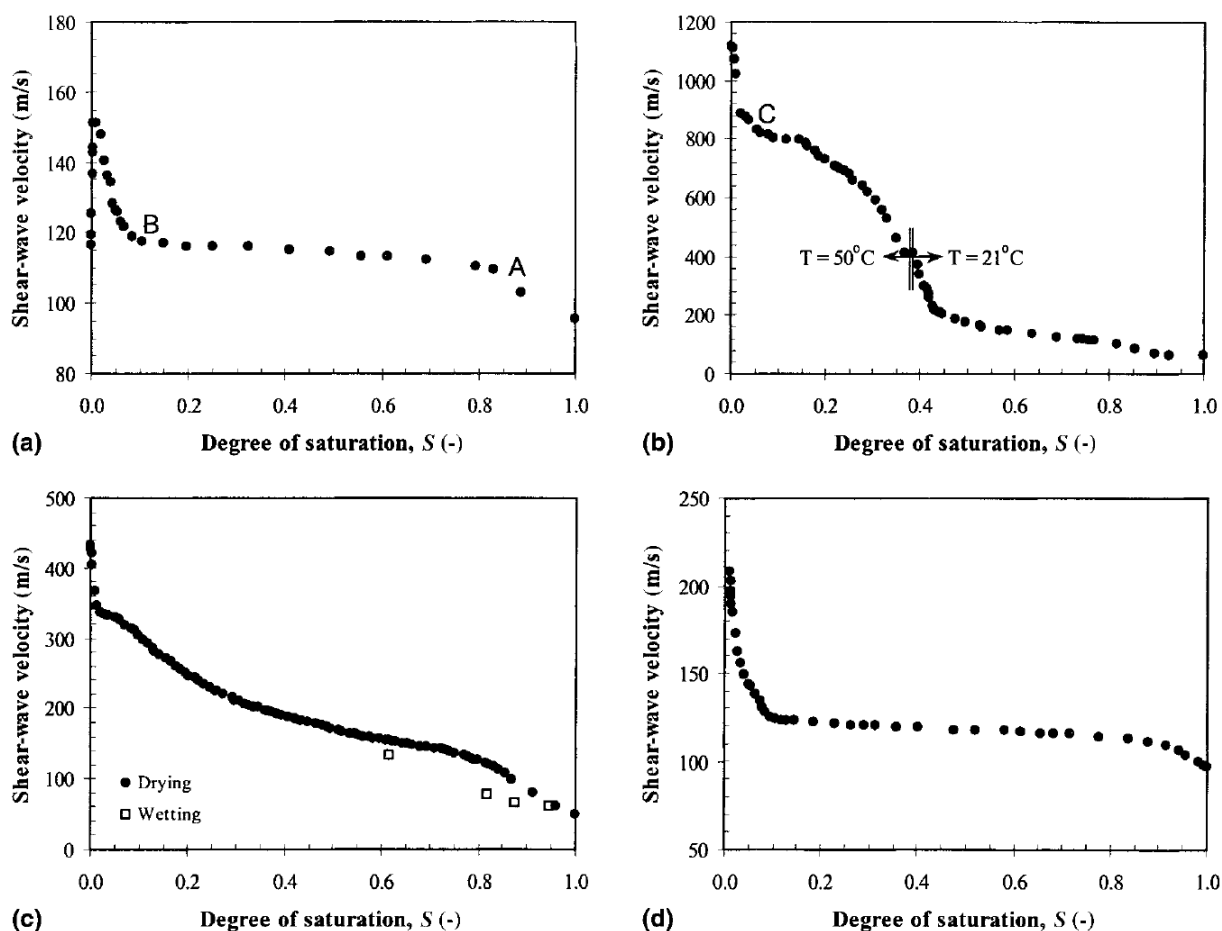


圖 2.6 不同粒徑材料之剪力波速與飽和度關係圖(a)玻璃珠(b)高嶺土混合玻璃珠(c)花崗岩粉末(d)液化湧出之砂(Cho and Santamarina, 2001)

Cho and Santamarina (2001)試驗所得剪力波速行為，是由單純僅有含水量變化之土壤材料而得，並未探討土壤材料經過夯實後的剪力波速變化情形。Clariá and Rinaldi (2007)設計了一系列的剪力波速量測試驗，針對以不同含水量(橫跨最佳含水量兩側)夯實之土壤試體進行剪力波速量測，結果如圖 2.7 所示。觀察圖中無圍壓之試驗結果，在夯實曲線溼側，含水量為 23.5%

之土壤試體，其乾密度為 1.56 g/cm^3 略小於最大乾密度 1.58 g/cm^3 ，但剪力波速僅約最大乾密度試體的三分之一；而在夯實曲線乾側，含水量為 15.8% 之土壤試體乾密度雖僅為 1.47 g/cm^3 ，但所得之剪力波速為 80.8 m/s ，與最大乾密度試體之波速極為接近。此試驗結果之乾密度與剪力波速並無明顯關係，因此應用剪力波來量測土壤密度，須納入土壤含水量此一參數，才有機會獲得較為準確之結果(Clariá and Rinaldi, 2007)。

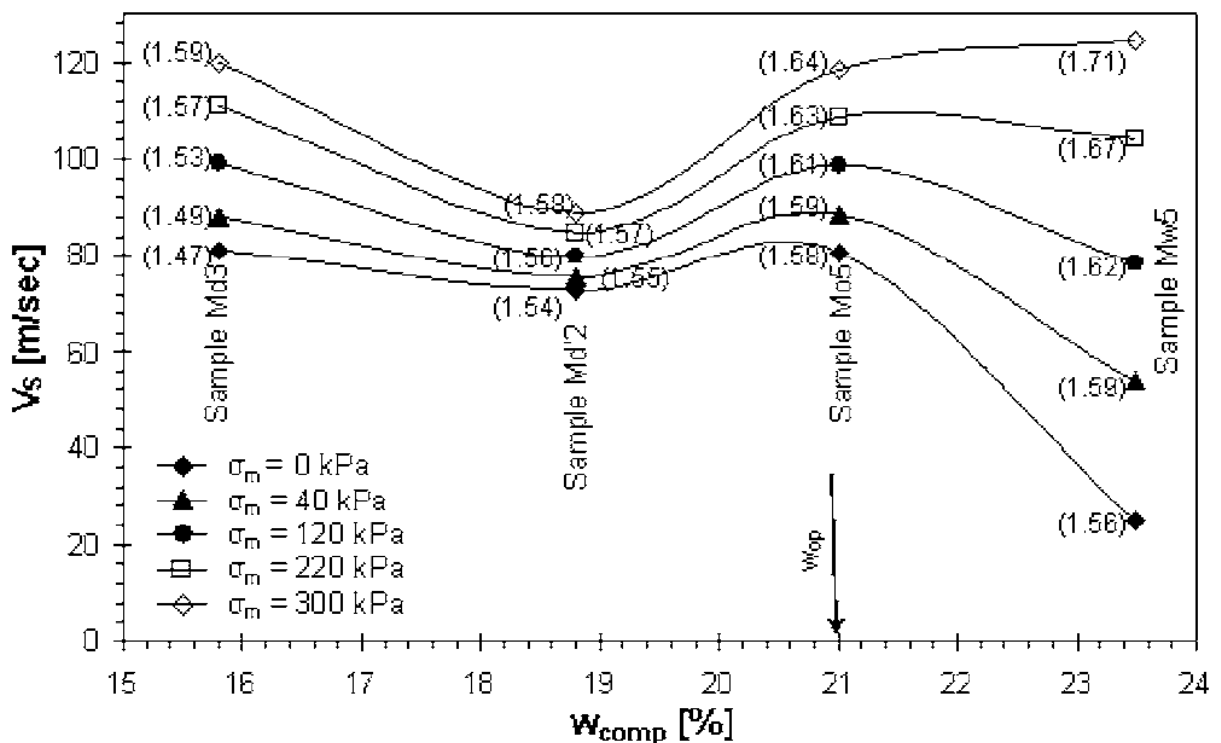


圖 2.7 不同圍壓之剪力波速與夯實含水量(Clariá and Rinaldi, 2007)

土壤物理性質與剪力波速間之關係相當複雜，並不易由經驗式中尋找一恰當之描述方式。Fratta et al. (2005)嘗試以半經驗式對土壤物理性質與剪力波速進行描述，提出土壤試體之剪力波速如下式表示：

$$V_s = \sqrt{\frac{G_0 \left(S^{\frac{m}{1-m}} - 1 \right)^{\frac{1}{m}}}{\rho_w G_s (1-n) + \rho_w n S}} \quad (2.4)$$

其中， S ：飽和度

m ：標定參數

ρ_w : 水密度

G_s : 土顆粒比重

n : 孔隙率

G_0 : 飽和度為 $2^{(1-m)/m}$ 時之剪力模數(該飽和度通常極小, 可視為土體乾燥時之剪力模數)

Fratta et al. (2005)利用式(2.4)對 Cho and Santamarina (2001)在不同粒徑材料中所得之飽和度與剪力波速關係進行驗證, 如圖 2.8 所示, 在飽和度為 10% ~ 90% 時, 此半經驗式可良好描述土壤之剪力波速行為。雖然在趨近乾燥與趨近飽和時之預測行為與實驗資料有所差距, 但已可滿足大部分之情況。只是如前所述, Cho and Santamarina (2001)之試驗是針對土壤結構不改變的情況下所得到的剪力波速變化, 因此 Fratta et al. (2007)所提出之半經驗公式亦只能適用於此情況, 對於以不同含水量夯實的土壤試體並不適用。

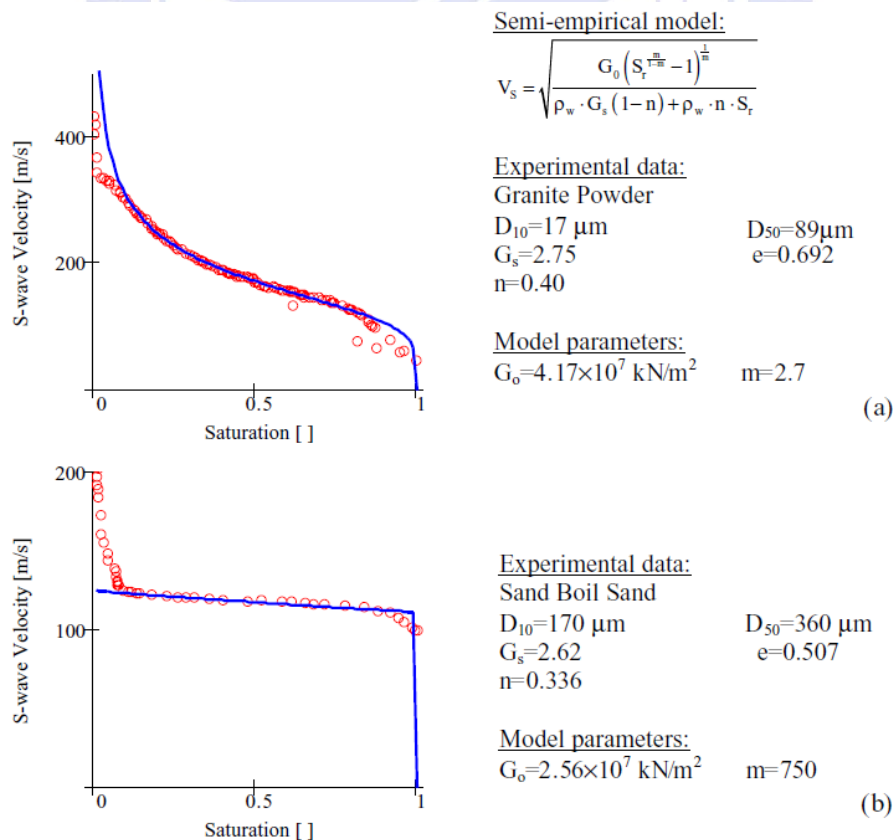


圖 2.8 剪力波速與飽和度關係：實驗資料與半經驗式(Fratta et al., 2005)

柳儒錚(2010)針對碾壓土壤的剪力波速行為進行探討，並提出飽和度與剪力波速之經驗式

$$V_s = a_s + b_s S^m \quad (2.5)$$

其中， V_s ：剪力波速

S ：飽和度

a_s 、 b_s 、 m ：標定參數

此經驗式對於碾壓土壤之剪力波速行為提供了良好描述，然而並未考慮不同夯實能量之影響，亦未考慮碾壓土壤為異向性材料一事，在應用上土壤的異向性可能會對波速造成影響。

2.3 土壤異向性

自然界中的材料可分為均向性(Isotropy)與異向性(Anisotropy)，異向性材料又可分為一般異向性(General anisotropy)、正交性(Orthogonality)以及橫向等向性(Transversely isotropy)，如表 2.2 所列。

表 2.2 一般材料異向性種類與性質(阮政璋，2010)

材料種類	性質描述
一般異向性材料	指在不同方向具有不同行為之性質，亦即其行為與方向性有關。
橫向等向性材料	僅有一旋轉對稱軸，垂直於此軸的平面具有均向性之性質。
正交性材料	有三個互相垂直的彈性對稱面，沿此三軸之各點力學性質不變。
均向性材料	不具有方向性，在任何方向上的力學性質都是一致的。

一般而言，夯實土壤可視為橫向等向性材料，如圖 2.9 所示，橫向等向性材料具有一旋轉對稱軸，垂直於對稱軸的平面稱為橫向等向面，在橫向等向面上的行為具有均向性之性質。

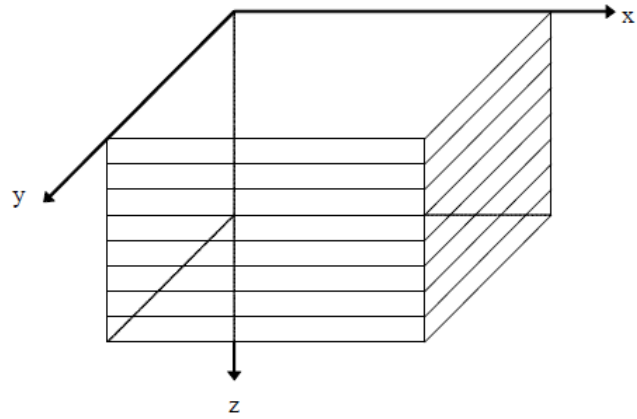


圖 2.9 橫向等向性材料示意圖(林雅婷，2007)

依據廣義虎克定律(Generalized Hooke's law)，材料的應力－應變關係為：

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2.6)$$

其中， σ_{ij} ：表示作用在法線方向為*i*方向之平面上*j*方向的應力(如圖2.10所示)，且 $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$

c：彈性係數

ε ：應變

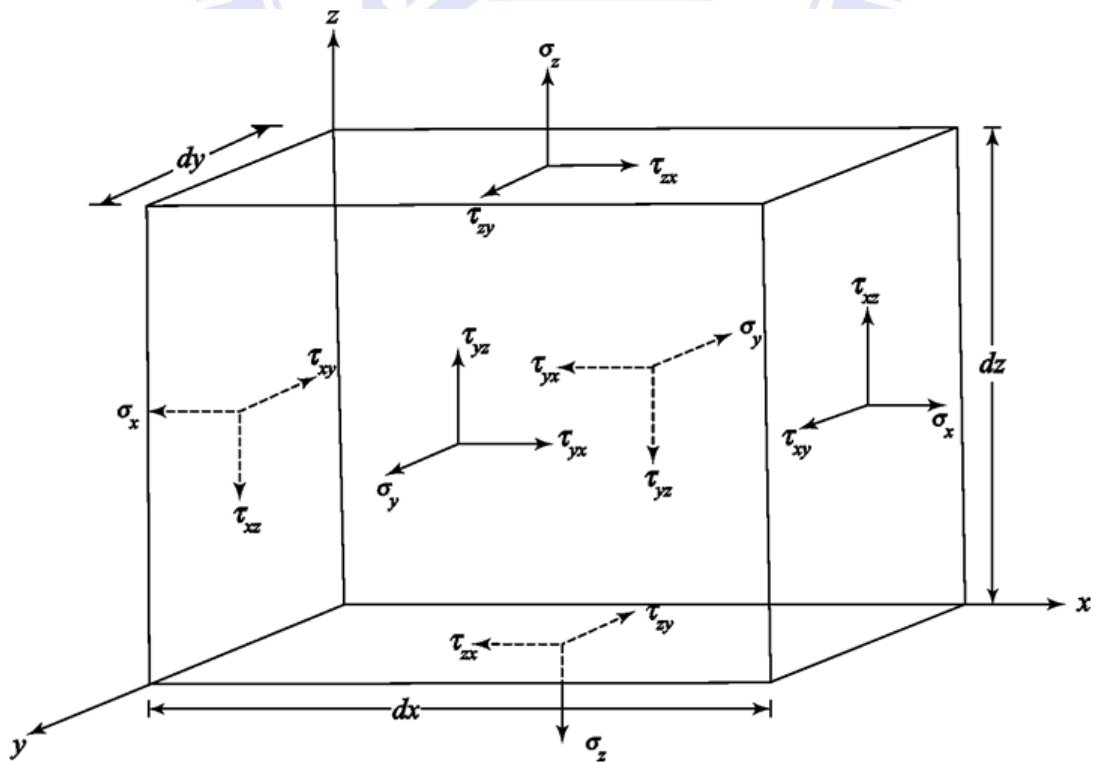


圖 2.10 Notations for normal and shear stresses (Das and Ramana, 2011)

基於虎克定律，橫向等向性材料應力－應變行為可表示為：

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

其中， σ ：正向應力

τ ：剪應力

ε ：正向應變

γ ：剪應變

C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{33} 、 C_{44} 、 C_{66} ：彈性常數(Bekhterev, 1926)

又 $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$ ，因此僅需要五個彈性常數 C_{11} 、 C_{13} 、 C_{33} 、 C_{44} 、 C_{66} 即可描述此橫向等向性材料的應力－應變關係。而上述五參數可以楊氏係數(Young's modulus)、柏松比(Poisson's ratio)與剪力模數(Shear modulus)來表示：

$$C_{11} = \frac{E(1 - \frac{E}{E'}\nu'^2)}{(1 + \nu)(1 - \nu - \frac{2E}{E'}\nu'^2)} \quad (2.8)$$

$$C_{13} = \frac{E\nu'}{1 - \nu - \frac{2E}{E'}\nu'^2} \quad (2.9)$$

$$C_{33} = \frac{E'}{1 - \nu - \frac{2E}{E'}\nu'^2} \quad (2.10)$$

$$C_{44} = G' \quad (2.11)$$

$$C_{66} = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.12)$$

其中， E 、 E' ：平行、垂直橫向等向面(x-y 平面)的楊氏係數

ν 、 ν' ：應力平行、垂直作用於橫向等向面形成應變的柏松比

G' ：垂直橫向等向面的剪力模數

Love (1927)提出以 A 、 C 、 F 、 L 、 N 五個參數(Love notation)所組成的矩陣式：

$$(C_{ij}) = \begin{bmatrix} A & A-2N & F & 0 & 0 & 0 \\ A-2N & A & F & 0 & 0 & 0 \\ F & F & C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

此一矩陣代表橫向等向性材料的彈性常數，且與彈性波速有以下之關係：

水平向之 P 波波速 $V_{PH} = \sqrt{\frac{A}{\rho}}$ (2.14)

垂直向之 P 波波速 $V_{PV} = \sqrt{\frac{C}{\rho}}$ (2.15)

與對稱軸夾一角度之 P 波波速 $V_{PF} = \sqrt{\frac{F}{\rho}}$ (2.16)

水平向之 S 波波速 $V_{SH} = \sqrt{\frac{N}{\rho}}$ (2.17)

垂直向之 S 波波速 $V_{SV} = \sqrt{\frac{L}{\rho}}$ (2.18)

若為均向性材料，則 A 、 C 、 F 、 L 、 N 可以拉瑪常數(Lamé's constants) λ 、 μ 表示為：

$$A = C = \lambda + 2\mu \quad (2.19)$$

$$F = \lambda \quad (2.20)$$

$$L = N = \mu \quad (2.21)$$

Auld (1990)整理出彈性波速與五個彈性常數之間的關係

$$C_{11} = \rho V_{PH}^2 \quad (2.22)$$

$$C_{33} = \rho V_{PV}^2 \quad (2.23)$$

$$C_{44} = \rho V_{SV}^2 \quad (2.24)$$

$$C_{66} = \rho V_{SH}^2 \quad (2.25)$$

$$C_{13} = \frac{\sqrt{(4\rho V_{PF}^2 - C_{11} - C_{33} - 2C_{44})^2 - (C_{11} - C_{33})^2}}{2} - C_{44} \quad (2.26)$$

對於異向性材料而言，在橫向等向面上之各點具有均向性的性質，因此在此平面上各點的波傳速度相同，例如與夯實土壤同為六方晶系 (Hexagonal crystal classes) 的 CdS(硫化鎘)，其壓縮波與剪力波之波傳慢度曲線如圖 2.11 所示；而與對稱軸夾不同角度的波傳速度將隨夾角而改變，其壓縮波與剪力波之波傳慢度曲線如圖 2.12 所示。

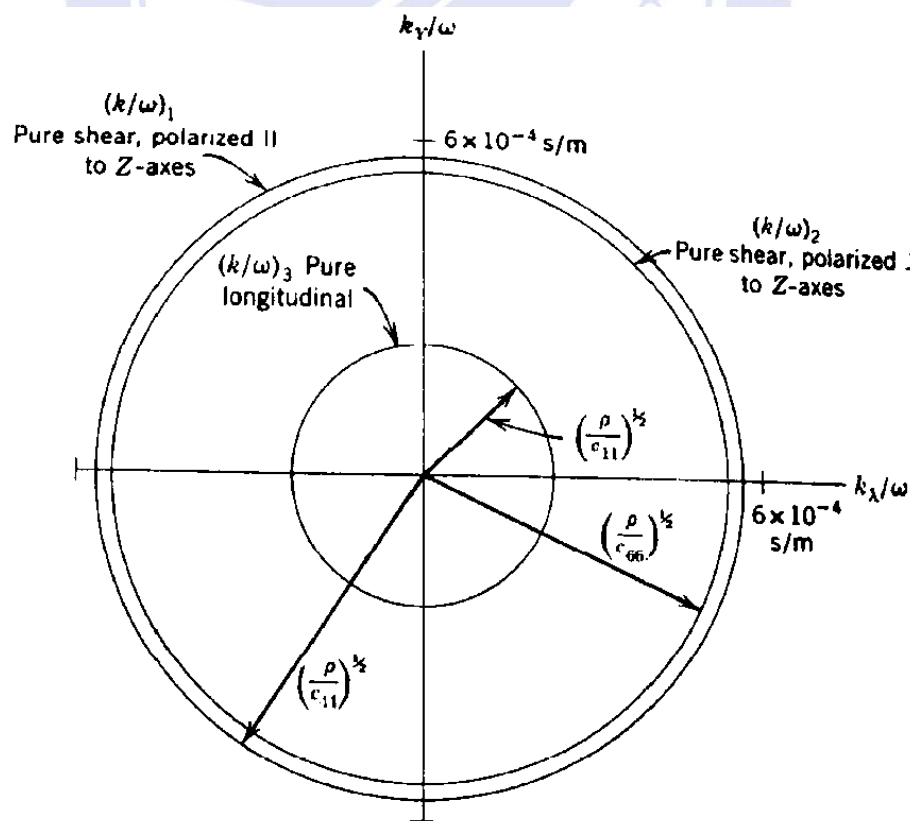
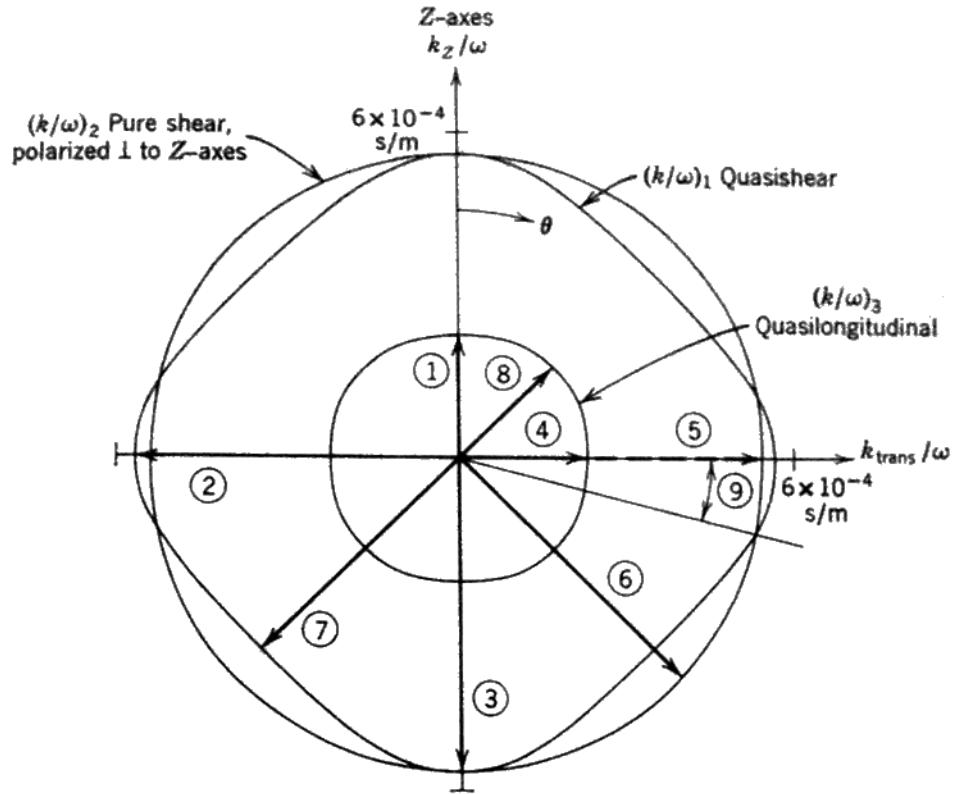


圖 2.11 波傳方向垂直於對稱軸之 CdS 慢度曲線(Auld, 1990)



① $(\rho/c_{33})^{1/2}$	⑦ $\frac{(4\rho)^{1/2}}{\{c_{11} + c_{33} + 2c_{44} - \sqrt{(c_{11} - c_{33})^2 + 4(c_{13} + c_{44})^2}\}^{1/2}}$
② $(\rho/c_{44})^{1/2}$	⑧ $\frac{(4\rho)^{1/2}}{\{c_{11} + c_{33} + 2c_{44} + \sqrt{(c_{11} - c_{33})^2 + 4(c_{13} + c_{44})^2}\}^{1/2}}$
③ $(\rho/c_{44})^{1/2}$	⑨ $\cot^{-1} \sqrt{\frac{(c_{13} + c_{44})^2 - (c_{11} - c_{66})(c_{33} - c_{44})}{(c_{44} - c_{66})(c_{11} - c_{66})}}$
④ $(\rho/c_{11})^{1/2}$	
⑤ $(\rho/c_{66})^{1/2}$	
⑥ $\left(\frac{2\rho}{c_{66} + c_{44}}\right)^{1/2}$	

圖 2.12 波傳方向與對稱軸夾不同角度之 CdS 慢度曲線(Auld, 1990)

與對稱軸夾某一角度傳遞的 Quasi-shear wave，其慢度為

$$(2\rho)^{1/2} \left\{ c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta + c_{44} - \sqrt{[(c_{11} - c_{44}) \sin^2 \theta + (c_{44} - c_{33}) \cos^2 \theta]^2 + (c_{13} + c_{44})^2 \sin^2 2\theta} \right\}^{-1/2} \quad (2.27)$$

與對稱軸夾某一同角度傳遞的 Quasi-longitudinal wave，其慢度為

$$(2\rho)^{1/2} \left\{ c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta + c_{44} + \sqrt{[(c_{11} - c_{44}) \sin^2 \theta + (c_{44} - c_{33}) \cos^2 \theta]^2 + (c_{13} + c_{44})^2 \sin^2 2\theta} \right\}^{-1/2} \quad (2.28)$$

因此，利用五個彈性常數 C_{11} 、 C_{13} 、 C_{33} 、 C_{44} 、 C_{66} 與材料密度 ρ ，即可求得橫向等向性材料任一 θ 角度之壓縮波速與剪力波速解。

為探討材料之異向性，Anderson (1961) 提出異向性因子 (Anisotropy factors) 如下：

$$\varphi = \frac{C_{33}}{C_{11}} \quad (2.29)$$

$$\xi = \frac{C_{11} - C_{12}}{2C_{44}} \quad (2.30)$$

$$\eta = \frac{C_{11} - 2C_{44}}{C_{13}} \quad (2.31)$$

又 $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$ ，因此式(2.30)可表示為

$$\xi = \frac{C_{66}}{C_{44}} \quad (2.32)$$

其中 φ 為垂直向、水平向壓縮波速之比值平方； ξ 為水平向、垂直向剪力波速之比值平方；而 η 則與垂直向、水平向、夾四十五度角之壓縮波速以及垂直向剪力波速有關。均向性材料之 $\varphi = \xi = \eta = 1$ ，當異相性材料 φ 、 ξ 與 η 之值越趨近 1 代表異向性程度越小，因此可以透過這些異向性因子來瞭解一材料的異向性程度。

2.4 彈性波速室內量測方法

2.4.1 剪力波速量測法

目前室內量測剪力波速的方法主要有共振柱 (Resonant column) 法與壓電材料 (Piezoelectric material) 法，其中壓電材料法又以彎曲元件 (Bender element) 法較受歡迎。彎曲元件法乃是根據壓電材料的壓電特性而加以利用，當材料受一應力作用導致變形時，將會產生相對於此應力大小之電壓；而當材料受一電壓作用時，則會產生相對於此電壓大小之變形。所謂壓電現象即為壓電材料受到電壓作用而造成之膨脹或收縮行為。

壓電陶瓷片是由中心金屬片與兩側包覆之壓電陶瓷所構成(如圖 2.13 所示)，而彎曲元件製作方法是先焊接所需之導線，之後將整片壓電陶瓷片與焊接線路處塗上一層聚氨酯(polyurethane)進行防水，待其乾燥後，再於壓電陶瓷片表面塗上導電漆作為屏蔽層，以避免觸發端之電磁波於接收端產生訊號上之耦合(coupling)現象干擾，最後再次塗上聚氨酯做為防水層，並使用環氧樹脂(epoxy)將壓電陶瓷片固定於試驗儀器上即可(柳儒錚，2010)。

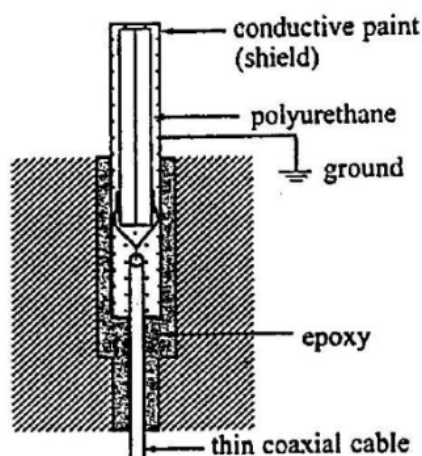


圖 2.13 彎曲元件示意圖(Santamarina et al., 2001)

柳儒錚(2010)使用自製 Bender element 量測夯實土壤試體的剪力波速，成效良好，其試驗設備如圖 2.14 所示，因此本研究將採用壓電元件來量測夯實土壤的壓縮波速與剪力波速。

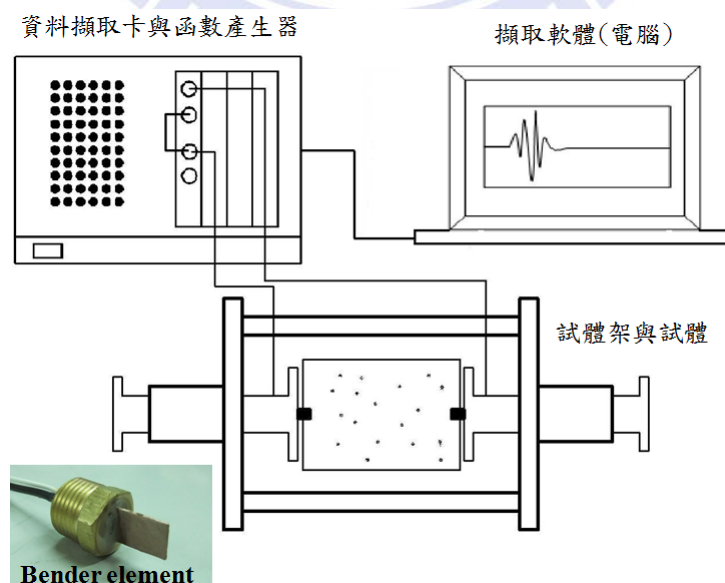


圖 2.14 剪力波速量測設備示意圖(修改自柳儒錚(2010))

2.4.2 壓縮波速與剪力波速聯合量測法

Brignoli et al. (1996)提出一可量測土壤試體壓縮波速與剪力波速的方法，而使用的試驗設備如圖 2.15 所示。

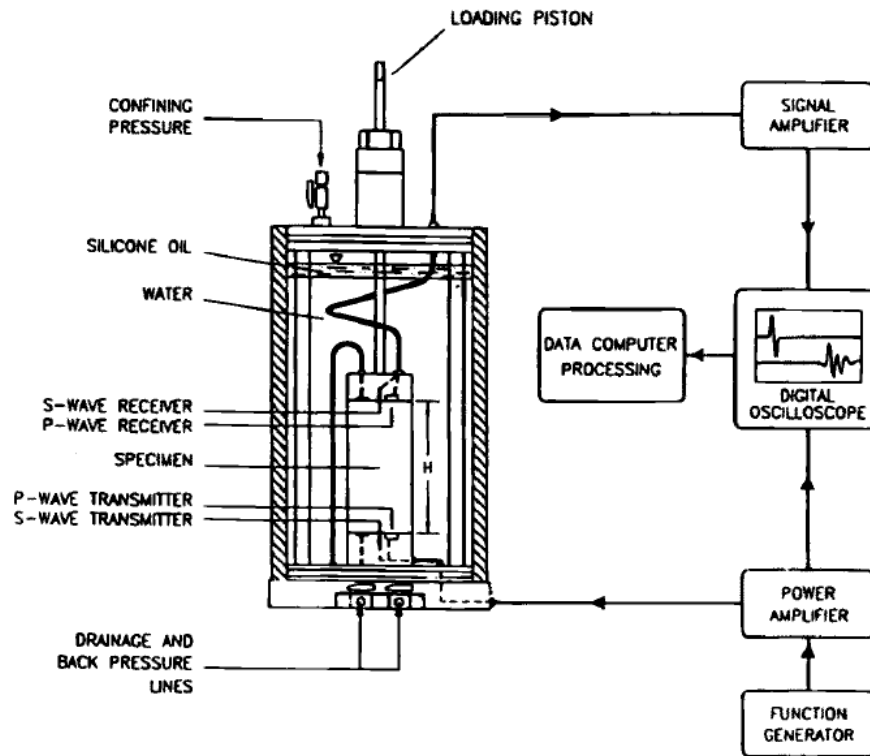


圖 2.15 壓縮波速與剪力波速量測設備示意圖(Brignoli et al., 1996)

此一方法使用了三種不同規格與震動方向的壓電元件，包含有量測壓縮波速所使用之 Compression transducer (直徑 8mm、厚度 2mm)，以及量測剪力波速所使用之 Bender transducer (長 20 mm、寬 10 mm、厚度 0.5 mm)、Shear-plate transducer (長 12.7 mm、寬 12.7 mm、厚度 6.3 mm)，各壓電元件之細部構造如圖 2.16 所示。

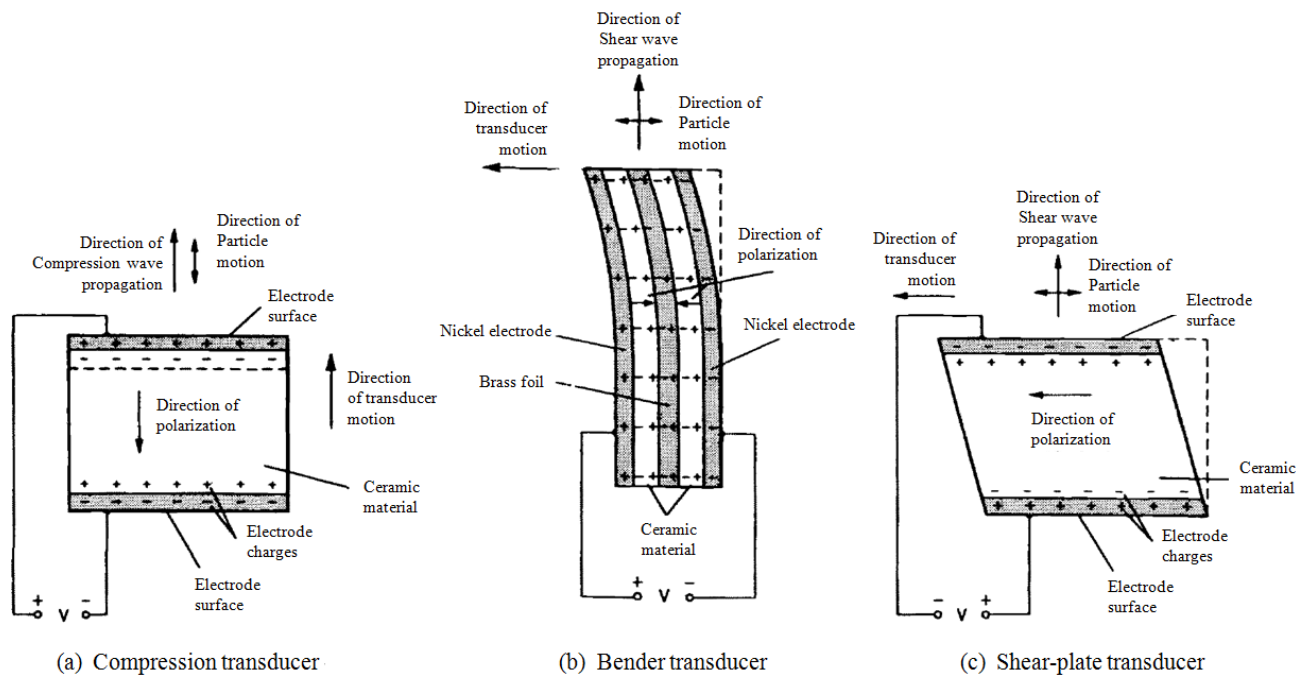
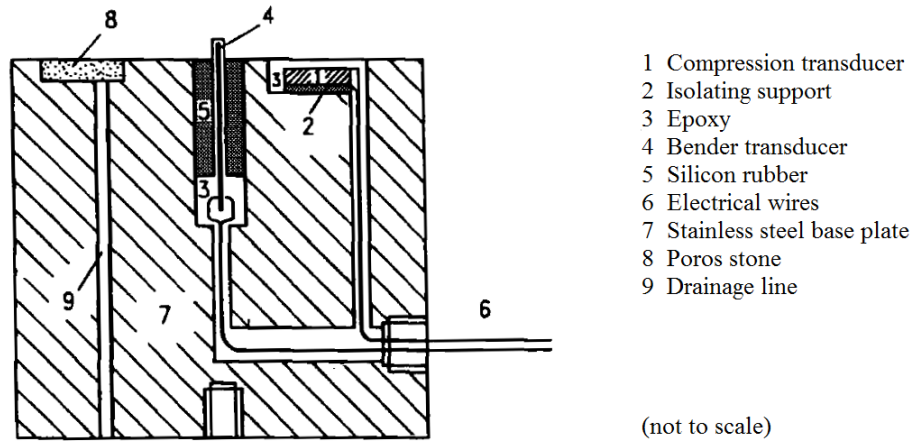
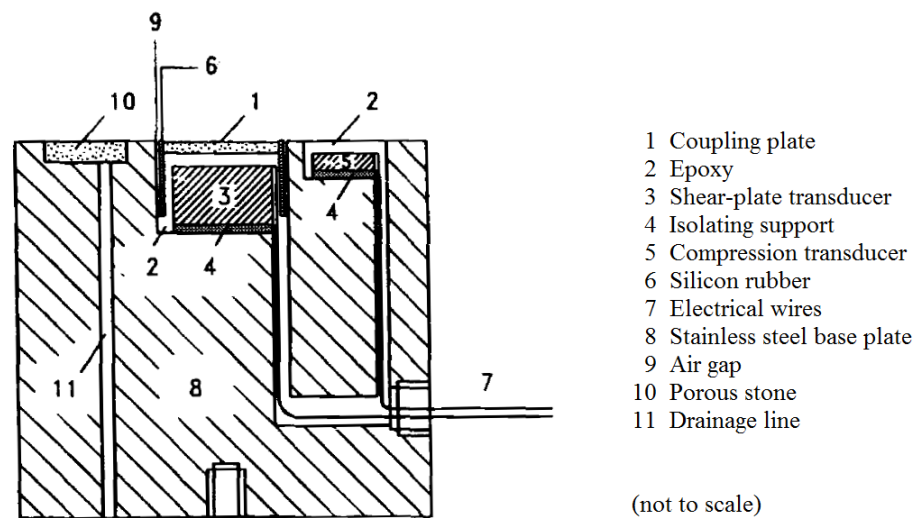


圖 2.16 量測壓縮波與剪力波之壓電元件示意圖(Brignoli et al., 1996)

Brignoli et al. (1996)所提出之方法，量測剪力波與壓縮波的壓電元件需分別安裝於改良的金屬底座(如圖 2.17 所示)，利用環氧樹脂將壓電元件固定於金屬底座並兼具防水功能。量測時，Bender transducer 直接貫入土壤試體中，貫入深度為試體長度的 1.5 %，而 Shear-plate transducer 與土壤試體之間則是隔著一片耦合元件，並未直接接觸試體。依據此方法，量測時需有一對伸縮元件與一對彎曲元件，才能量測壓縮波與剪力波。



(a) Base pedestal with compression and bender transducers



(b) Base pedestal with compression and shear-plate transducers

圖 2.17 壓電元件底座設置示意圖 (Brignoli et al., 1996)

在量測土壤試體之壓縮波速與剪力波速時，需將成對之壓電元件分別安裝於試體的上、下兩端，由函數產生器從底端的 transmitter 觸發單一頻率正弦脈衝波，因壓電元件震動而產生的震波經由試體傳遞至頂端被 receiver 接收。受限於壓電陶瓷片的極化電壓，壓電元件之驅動電壓必須小於極化電壓以避免壓電陶瓷片去極化，且去極化電壓與壓電陶瓷片厚度有關，因此 Bender transducer 使用 20V 的驅動電壓，而 Shear-plate 與 Compression transducer 則使用 130V。在觸發頻率方面，剪力波量測使用 1 ~ 20 kHz；壓縮波在乾燥土壤使用 40 ~ 80 kHz，在趨近飽和的土壤則使用 100 kHz。

2.4.3 Bender-extender element

Leong et al. (2009)提出一種可用來量測壓縮波速及剪力波速之方法，為 Bender-extender element 法，此方法僅使用一對壓電元件即兼具量測壓縮波速與剪力波速之功能，可免去實驗中為了量測壓縮波與剪力波而必須將成對之彎曲元件與伸縮元件分別安裝於金屬底座之麻煩。其試驗設備如圖 2.18 所示。

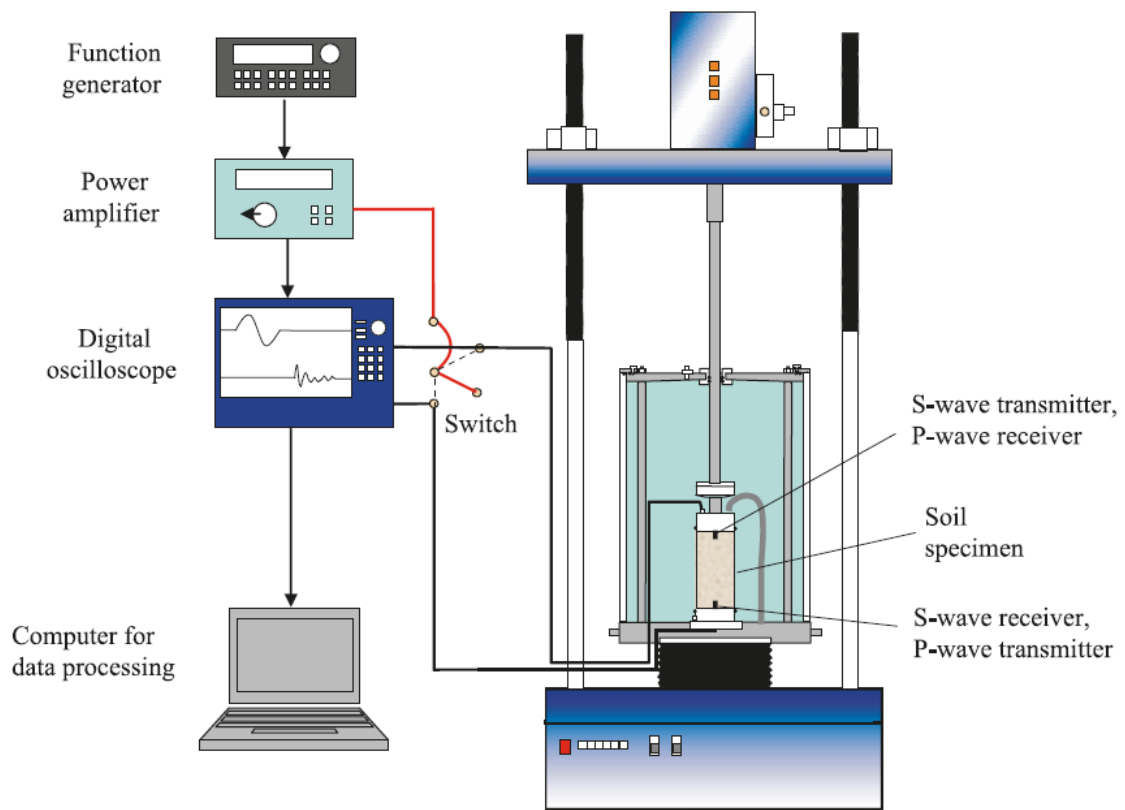


圖 2.18 Bender-extender element 波速量測設備(Leong et al., 2009)

壓電陶瓷片的極化方向可分為 x-poled 與 y-poled 兩種，兩側陶瓷片極化方向不同者為 x-poled (如圖 2.19(a)所示)，而兩側陶瓷片極化方向相同者為 y-poled (如圖 2.19(b)所示)。依據此方法之原理，當電流流向與壓電陶瓷片極化方向不同，會使得壓電元件向側面彎曲或向兩端伸縮藉以產生震波。壓電陶瓷片其中一側的極化方向與電流流向不同之時，會使得元件往側向

擺動(如圖 2.20(a)、(b))，此為 Bender element；而當壓電陶瓷片兩側的極化方向與電流流向皆不同之時，會使得元件朝兩端伸縮(如圖 2.20(c)、(d))，此為 Extender element。

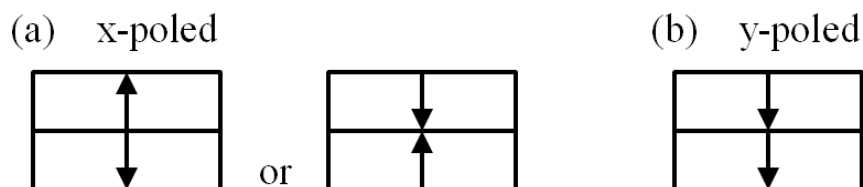


圖 2.19 壓電陶瓷片極化型式(Leong et al., 2009)

壓電陶瓷片之接線方式分為並聯(parallel)與串聯(series)兩種(如圖 2.20 所示)，並聯時電能轉換為機械能之功率是串聯時的兩倍；串聯時機械能轉換為電能之功率是並聯時的兩倍。一般在使用壓電元件量測時，會採用觸發端(transmitter)為並聯型式，接收端(receiver)為串聯型式，以效能較佳之方式進行量測。如圖 2.20 所示，將極化方向為 x-poled 之壓電陶瓷片以串聯方式連接，即成為剪力波之 receiver (如圖 2.20(a))，改以並聯方式連接則成為壓縮波之 transmitter (如圖 2.20(c))。相同地，將極化方向為 y-poled 之壓電陶瓷片以並聯方式連接，即成為剪力波之 transmitter (如圖 2.20(b))，改以串聯方式連接即成為壓縮波之 receiver (如圖 2.20(d))。Leong et al. (2009)提出此方法，只要變換並、串聯之接線方式來改變電流流向，使觸發端轉為接收端、接收端轉為觸發端，即可分別觸發壓縮波與剪力波進行量測。

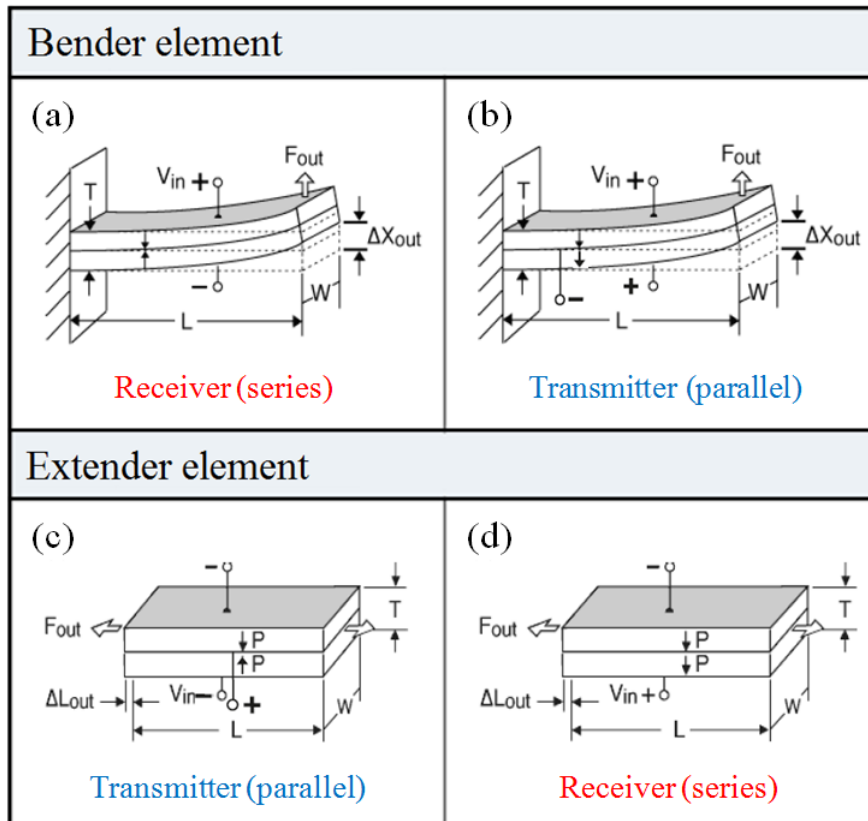


圖 2.20 Bender/Extender element 震動原理示意圖(Leong et al., 2009)

Leong et al. (2009)亦指出，當輸入的觸發頻率增加時，剪力波訊號的近場效應將會減小。當波傳遞距離與波長之比值 $L_u/\lambda \geq 3.33$ 時，能消除近場效應對剪力波的影響(如圖 2.21 所示);而壓縮波抵達時間不受觸發頻率影響。

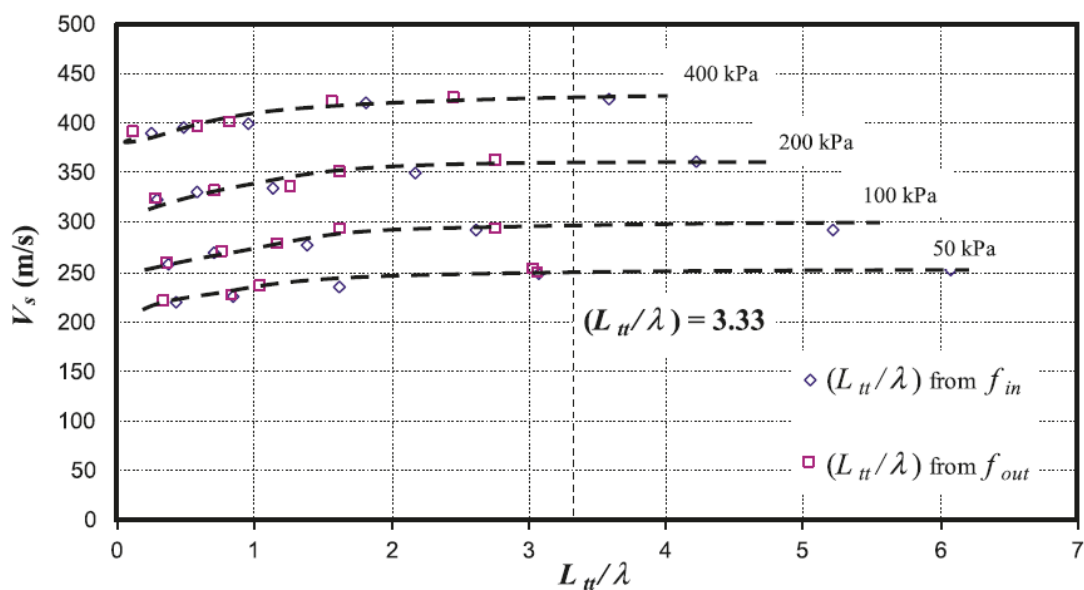


圖 2.21 波傳遞距離與波長之比值 L_u/λ 對剪力波速之影響(Leong et al., 2009)

綜合以上文獻回顧，將以此作為室內實驗規劃的參考與依據。雖然 Brignoli et al. (1996)所提出的方法可量測壓縮波與剪力波，但因量測時需使用不同的壓電元件以分別觸發壓縮波與剪力波，並不利於本研究多角度之量測；而 Leong et al. (2009)提出之方法僅需一對壓電元件即具備量測壓縮波與剪力波之功能，因此本研究將參考 Leong et al. (2009)所提出之方法，製作室內試驗所需之 Bender-extender element 來量測壓縮波與剪力波波速，再以實驗分析所得不同角度之彈性波速，求得 Anderson (1961)提出之異向性因子，以探討夯實土壤之異向性對彈性波速的影響程度。



第三章 研究方法

3.1 研究流程

本研究之流程如圖 3.1 所示。首先進行與研究相關的文獻回顧，藉由前人研究成果來規劃室內之土壤異向性試驗以及彈性波速影響因子，並選擇適合的儀器設備與分析工具，而後製做實驗所需土壤試體進行彈性波速量測與資料分析，最後由實驗結果探討土壤之異向性程度與彈性波速行為。

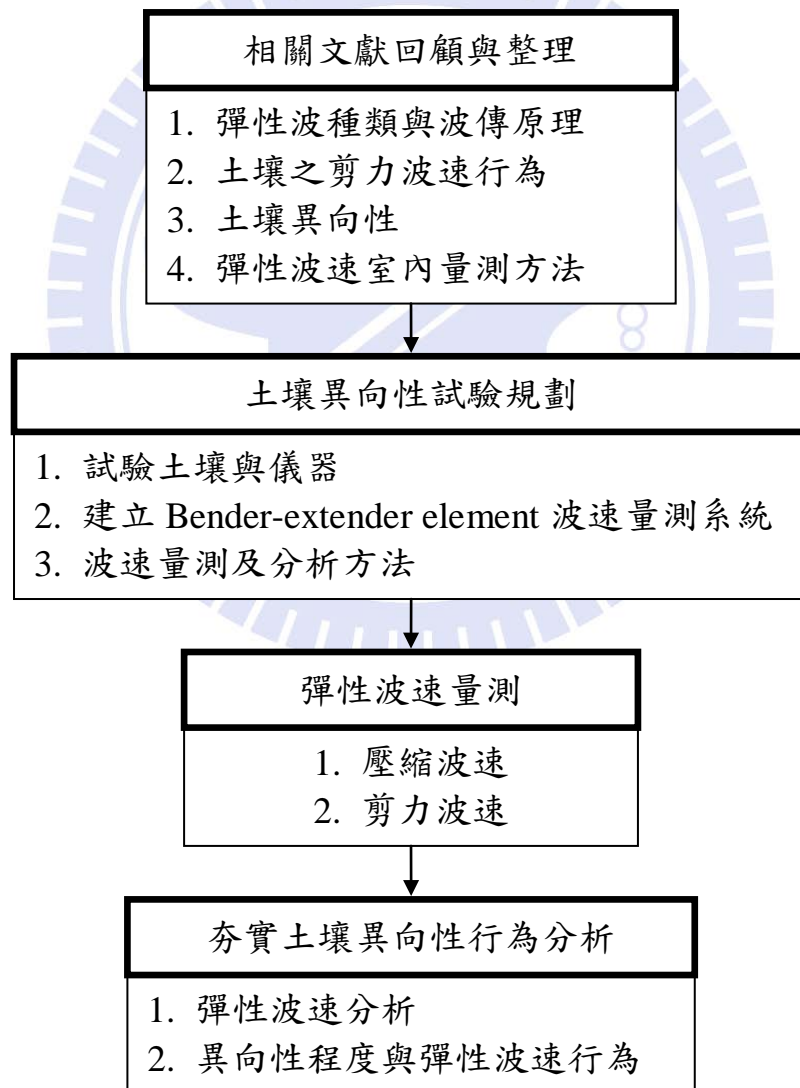


圖 3.1 研究流程圖

3.2 異向性試驗規劃

3.2.1 試驗規劃

為探討不同影響因子(如圖 3.2 所示)對夯實土壤彈性波速之影響，遂針對以下兩點規劃室內試驗：

1. 夯實含水量

採用至少五種含水量，以橫跨最佳含水量(Optimum Moisture Content，簡稱 OMC)兩側，作為土壤試體夯實之含水量，試驗土壤試體規劃如表 3.1 所列。

2. 量測方向

為探討夯實土壤之異向性，採用五種不同角度進行波速量測試驗，以瞭解不同量測方向之波速差異。

- (1)與夯實土壤試體之橫向等向面垂直，簡稱為 v 方向。
- (2)與夯實土壤試體之橫向等向面平行，且壓電陶瓷片與橫向等向面垂直，簡稱為 hv 方向。
- (3)與夯實土壤試體之橫向等向面平行，且壓電陶瓷片與橫向等向面平行，簡稱為 hh 方向。
- (4)與對稱軸夾三十度，簡稱為 30° 方向。
- (5)與對稱軸夾四十五度，簡稱為 45° 方向。

上述五種量測方向如圖 3.2 所示。

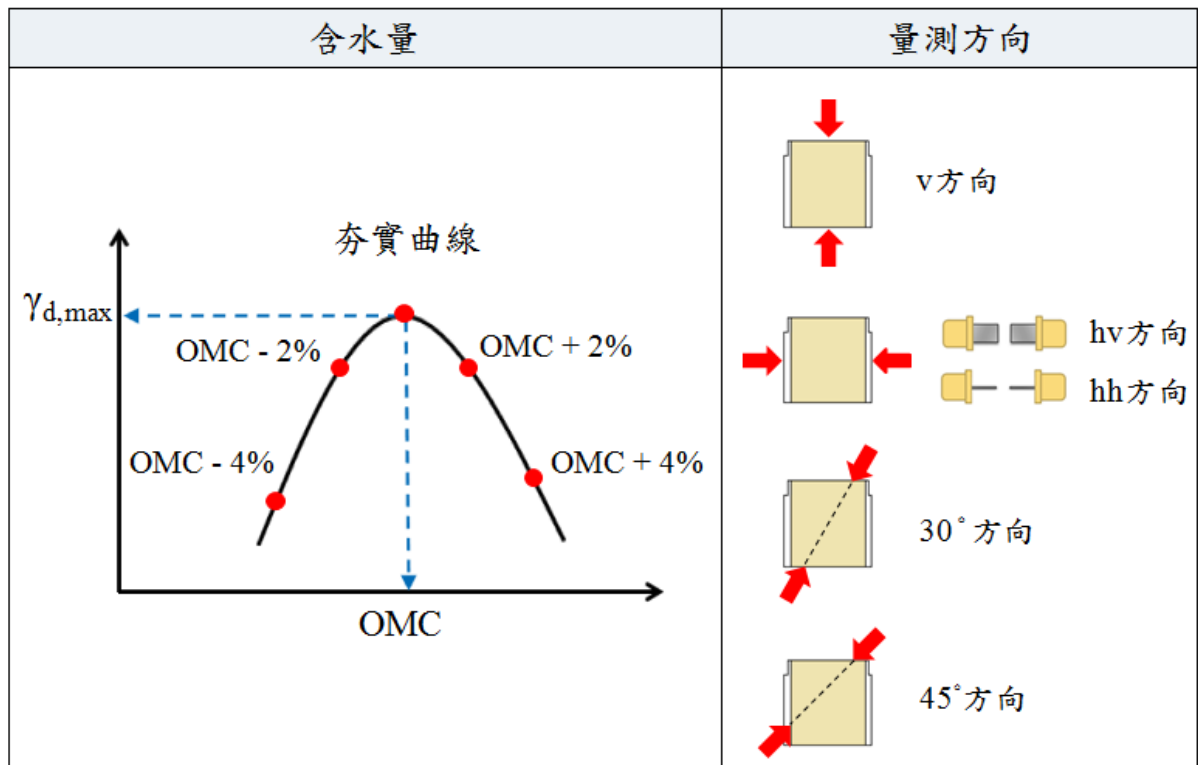


圖 3.2 異向性試驗影響因子

表 3.1 異向性試驗規劃表

土壤種類	夯實能量	夯實含水量	試體編號	量測方向
湖山砂土	標準夯實	8 %	H8	1. 垂直橫向等向面
		10 %	H10	2. 平行橫向等向面且 元件垂直橫向等向面
		12 %	H12	3. 平行橫向等向面且 元件平行橫向等向面
		14 %	H14	4. 與對稱軸夾 30 度
		16 %	H16	5. 與對稱軸夾 45 度

3.2.2 試驗土壤

本研究試驗所使用之土壤為湖山砂土，湖山砂土源自雲林縣湖山水庫，將湖山壩庫區山壁開挖之岩粒，經人工以鐵鎚擊碎而成的黏土質砂土。

以湖山砂土進行基本物理性質試驗，諸如夯實、篩分析、比重、液性限度、塑性限度等，所得試驗結果如下所描述。

以標準夯實能量($600 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$)進行夯實試驗(ASTM D698-12)得其夯實曲線如圖 3.3 所示，可知湖山砂土最大乾密度為 $1.914 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，最佳含水量為 13.30%。由篩分析試驗(ASTM D421-85)得其粒徑分佈如圖 3.4 所示，細粒料含量為 23.6%，有效粒徑為 0.035 mm，均勻係數(C_u)為 19.33，級配係數(C_c)為 0.44。由比重試驗(ASTM D854-10)求得湖山砂土比重為 2.72。由阿太堡限度試驗(ASTM D4318-10)得其液性限度(LL)為 26、塑性限度(PL)為 17、塑性指數(PI)為 9。綜合上述資料再依據統一土壤分類法(Unified Soil Classification System, USCS, ASTM D2487-11)分類，湖山砂土屬黏土質砂(SC)。

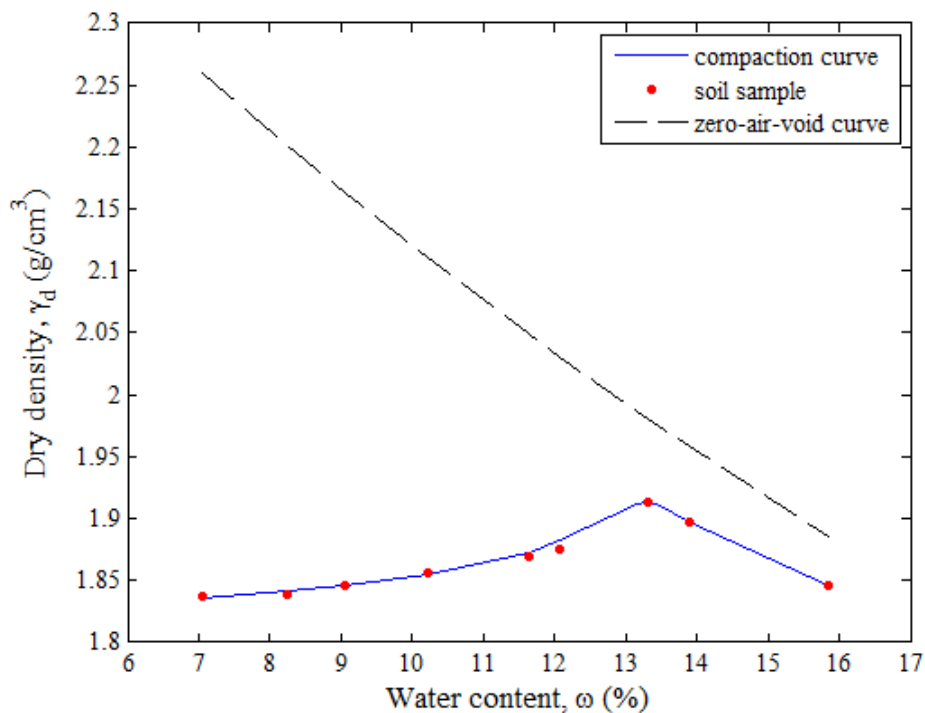


圖 3.3 湖山砂土夯實曲線(以壓克力模夯實)

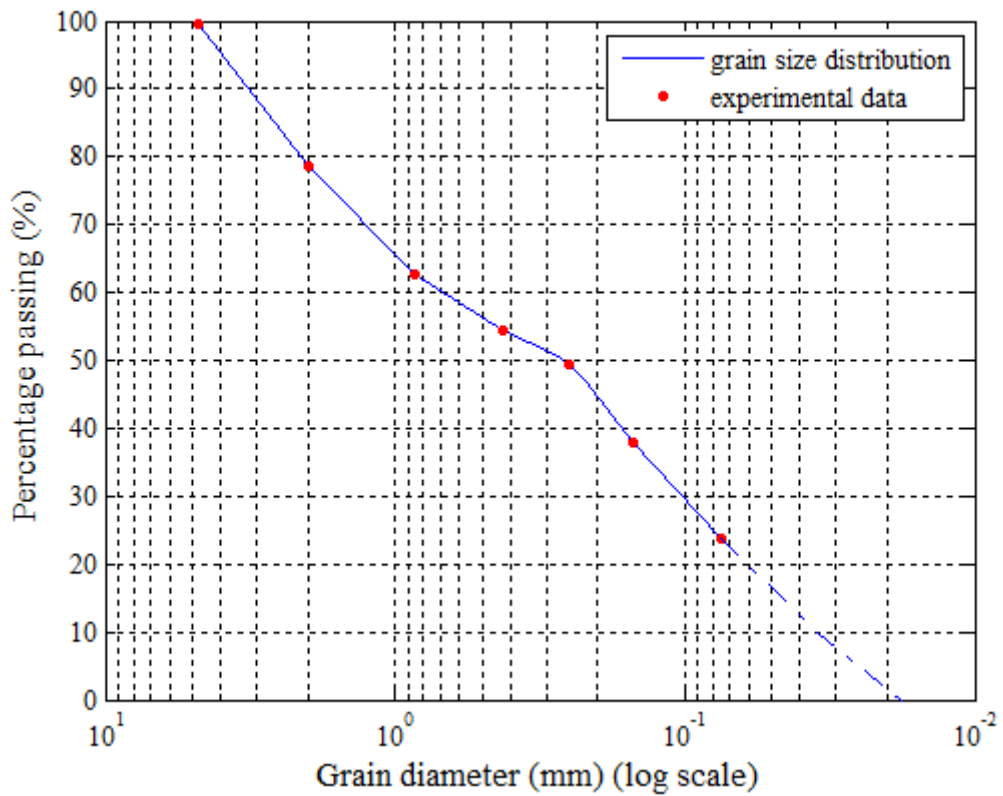


圖 3.4 湖山砂土粒徑分佈圖

依據上述物理性質試驗結果，茲將本研究試驗所用之土壤基本物理性質整理於表 3.2。

表 3.2 試驗土壤基本物理性質

土壤名稱		湖山砂土
Standard proctor compaction	OMC (%)	13.30
	$\gamma_{d,max}$ (g/cm ³)	1.914
Specific gravity, G_s		2.72
Coefficient of uniformity, C_u		19.33
Coefficient of curvature, C_c		0.44
Liquid limit, LL		26
Plastic limit, PL		17
Plastic index, PI		9
Soil classification (USCS)		SC

3.2.3 試驗儀器

柳儒錚(2010)使用金屬夯模夯實土壤並進行剪力波速量測時，發現在彎曲元件產生震波的過程中，未被轉換為震波的電磁波會在金屬模內震盪，致使無法收錄良好的震動訊號，因此採用壓克力夯模以利震動訊號之收錄。本研究設計之夯模為壓克力材質，且壓克力模容納體積與標準夯模相同(如圖 3.5 所示)，並保留三個活動塞孔，於夯實土壤時將塞孔蓋上，而量測四十五度與水平向之彈性波速時取下壓克力塞，使 Bender-extender element 能貫入夯實土壤試體。

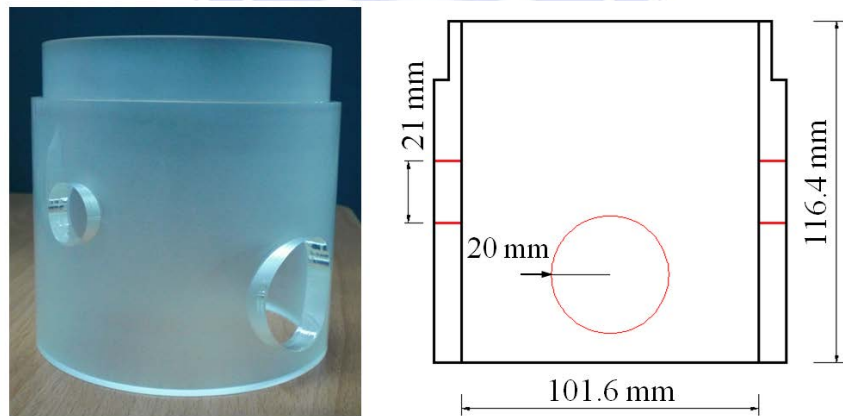


圖 3.5 試驗壓克力夯模

為配合本研究在不同角度之彈性波速量測，設計四十五度與三十度角度底座(如圖 3.6 所示)，以供量測時穩固擺放土壤試體之用，並能控制土壤試體對稱軸與 Bender-extender element 呈四十五度或三十度之夾角。

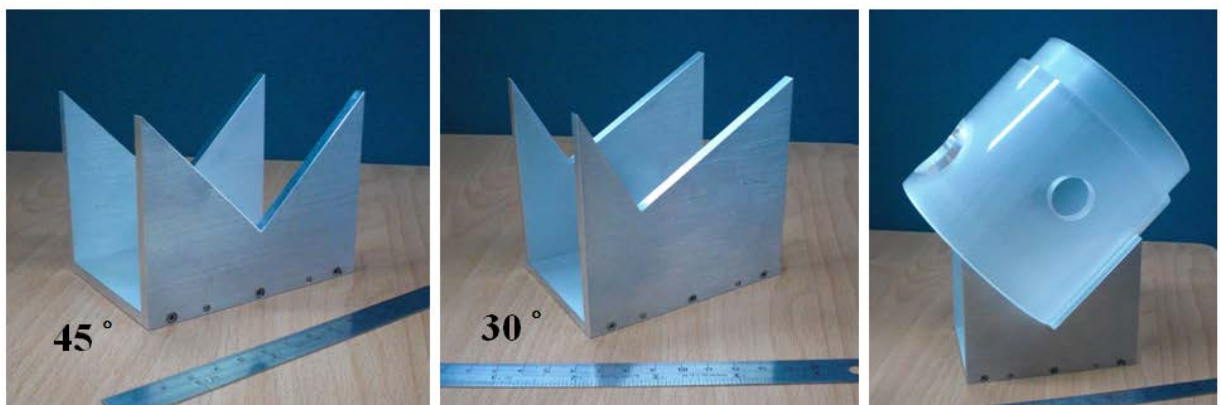


圖 3.6 四十五度與三十度角度底座

本研究使用之量測程式以 LabVIEW 撰寫，能調整合適之觸發頻率使 Bender-extender element 觸發壓縮波或剪力波，並可即時觀看觸發與收錄之波形。而收錄之波形可匯入 MATLAB 撰寫之程式進行分析以得到壓縮波速與剪力波速。既有彈性波速量測系統如圖 3.7 所示。

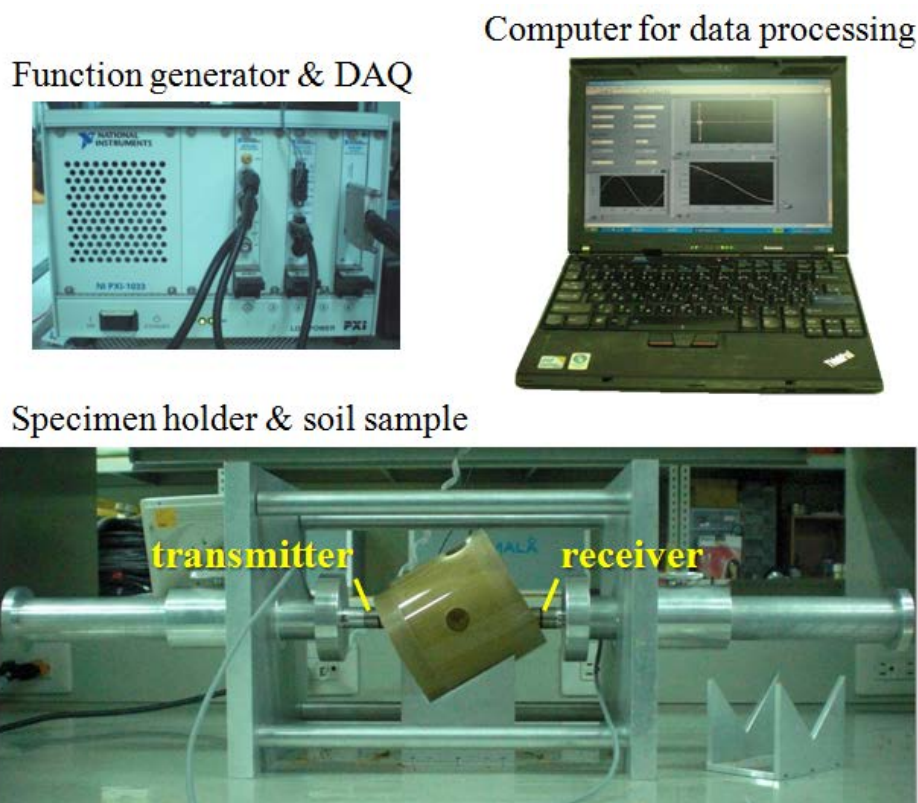


圖 3.7 既有彈性波速量測系統

3.3 Bender-extender element 波速量測系統建立

柳儒錚(2010)所用之剪力波速量測系統(如圖 2.14 所示)，硬體方面，使用取樣率為 204.8 kS/s 之資料擷取模組 NI PXI-4461，感測元件為量測剪力波之 Bender element，儀器箱與 Bender element 皆有接地；軟體方面，函數產生器參數設定以二十一點來描述一正弦波波形，採用頻率 10 kHz 來觸發剪力波，訊號取樣速率為 200 kS/s。

本研究以柳儒錚(2010)所用之剪力波速量測系統為基礎，加以改良，來建立壓縮波與剪力波波速量測系統。

3.3.1 Bender-extender element 設計與收錄 P、S 波訊號之影響因子

良好的壓縮波與剪力波初達訊號對波速分析扮演舉足輕重的角色，訊號品質的好壞將會影響後續波速分析的正確性。以下將針對 Bender-extender element 尺寸、線路並聯與串聯型式、觸發頻率以及壓電元件貫入土壤之深度等四部分進行討論。

1. Bender-extender element 尺寸

依據 Leong et al. (2009) 提出的建議，壓縮波之 transmitter (即剪力波之 receiver) 尺寸為長 15.9 mm、寬 9.5 mm、厚度 0.51 mm，剪力波之 transmitter (即壓縮波之 receiver) 尺寸為長 15.9 mm、寬 3.2 mm、厚度 0.51 mm，此種配對型式之 Bender-extender element 能收錄到良好的壓縮波與剪力波訊號。然而，參考 Leong et al. (2009) 建議之尺寸實際製作一對 Bender-extender element (參考表 3.3 中編號 PA、SA) 進行試驗，發生壓縮波訊號不易收錄之情形。其原因可能為壓縮波之 receiver (即 S-transmitter) 寬度較小，貫入土壤試體後與試體的耦合情況不佳，不易接收到壓縮波傳遞之微小震動訊號所致。

為改善 Bender-extender element 使之能收錄到良好的壓縮波訊號，本研究調整寬度為 9.5 mm 來製作 P-receiver (參考表 3.3 中編號 SB)，雖能收錄到壓縮波訊號，但訊號品質並不穩定。因此，本研究再調整厚度為 0.8 mm、寬度為 10 mm 來製作 P-receiver (參考表 3.3 中編號 SF)，始可收錄穩定之壓縮波訊號。

2. 線路並聯與串聯型式

一般接線方式分為並聯與串聯兩種，並聯時，電能轉換為機械能之功率是串聯時的兩倍；串聯時，機械能轉換為電能之功率是並聯時的兩倍。

因此，本研究分別採用並聯(如表 3.3 編號 SC)與串聯(如表 3.3 編號 SF)兩種型式製作壓縮波之 receiver，試驗結果顯示接收端以串聯方式連接，確實能收錄到振幅較大、波形較為明顯的壓縮波訊號。

3.觸發頻率

依據 Brignoli et al. (1996)提出的建議，當土壤試體長度約為 10 ~ 14cm 時，剪力波觸發頻率採用 1 ~ 20kHz；在趨近飽和之試體，壓縮波觸發頻率採用 100 kHz，在乾燥試體則採用 40 ~ 80 kHz。而 Leong et al. (2009)對觸發頻率提出的建議，壓縮波採用 30 kHz 以上，剪力波採用 10 kHz，能降低近場效應的影響。

當觸發頻率較低時，震波能量較不易衰減，可收錄到振幅較大的訊號；當觸發頻率較高時能降低近場效應影響，可收錄到初達波位置較為明確的訊號。為收錄抵達時間明確且波形明顯之初達波訊號，則必須在觸發頻率上審慎選定。

為選擇適合本研究夯實土壤試體使用之觸發頻率，以不同頻率進行試驗。分別以頻率 10、20、30、40 kHz 觸發之壓縮波訊號如圖 3.8 所示，頻率 10 kHz 以及 20 kHz 觸發之訊號頻率過低、波形不佳；而頻率 30 kHz 以及 40 kHz 觸發之訊號波形較為良好。分別以頻率 10、20 kHz 觸發之剪力波訊號如圖 3.9 所示，受近場效應影響均為較小。考量試驗結果與訊號振幅大小，壓縮波觸發頻率採用 30 kHz，剪力波觸發頻率採用 20 kHz，較能收錄到明確的初達波訊號且減少近場效應影響。

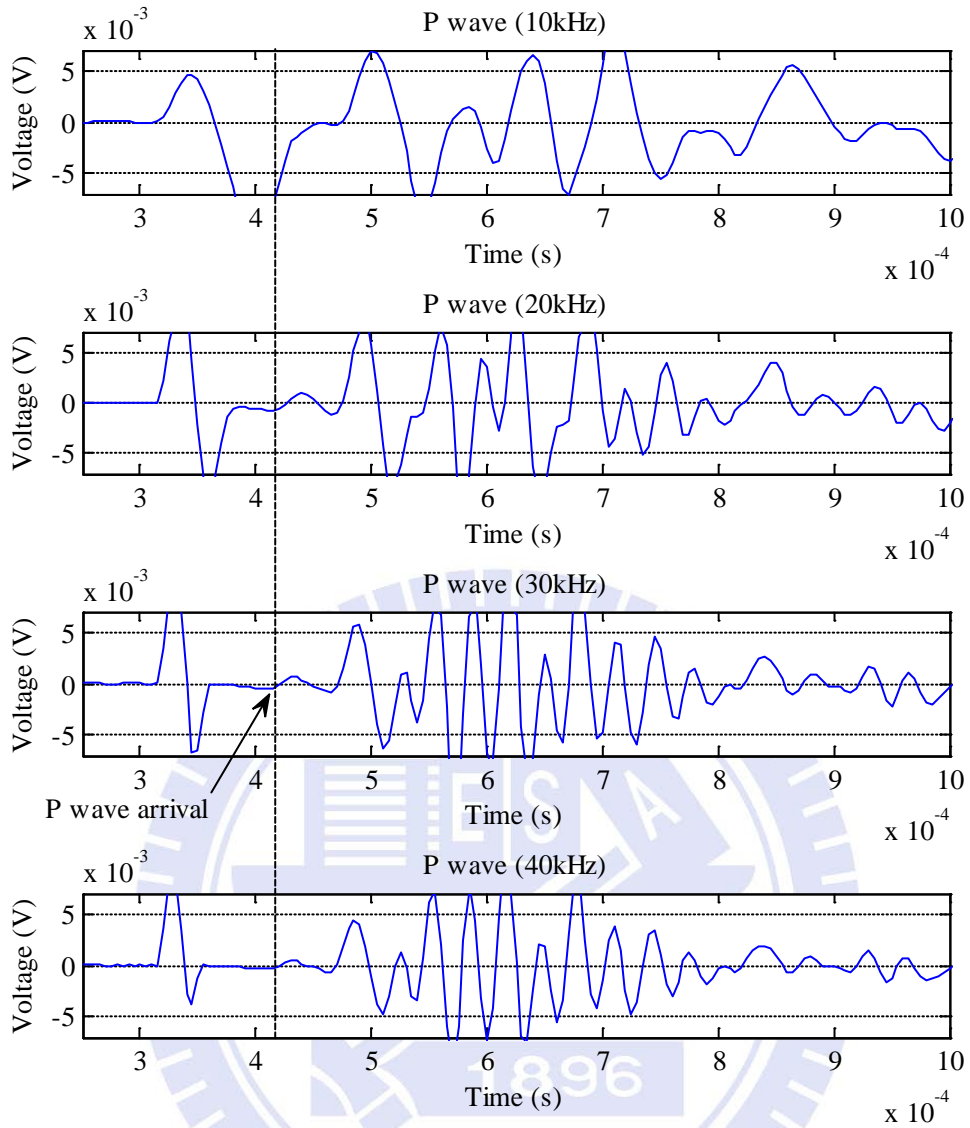


圖 3.8 不同頻率之壓縮波訊號

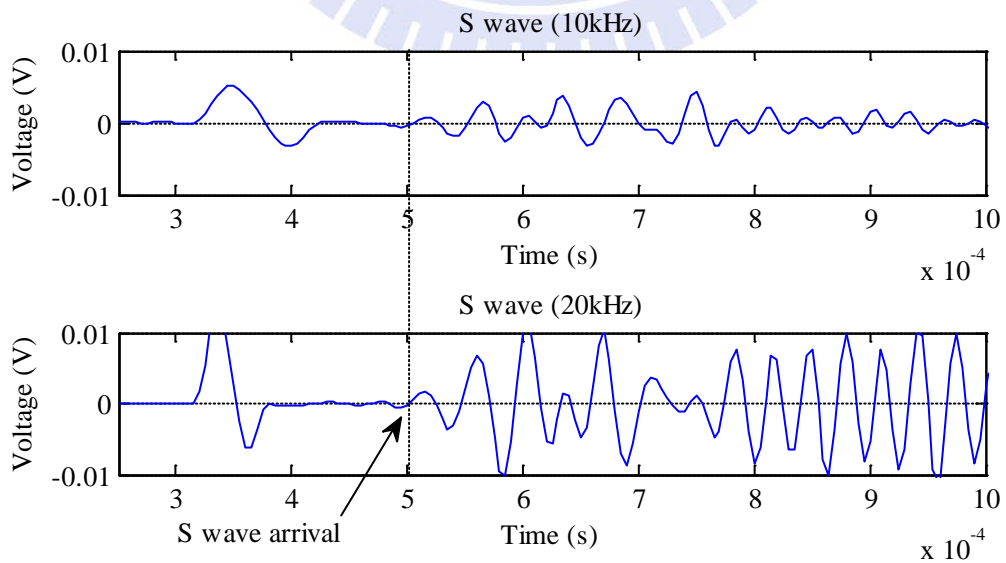


圖 3.9 不同頻率之剪力波訊號

4. 壓電元件貫入深度

Bender-extender element 貫入土壤試體的深度將影響收錄訊號之品質，貫入深度不足將使得土壤試體與壓電元件接觸不良，無法良好傳遞與接收微小震波。針對土壤試體進行不同貫入深度之試驗，當壓電元件貫入深度在 3~6 mm 間，能良好傳遞與接收震波，若貫入深度小於 3 mm 將導致壓電元件與土壤接觸不良，無法收錄良好的初達波訊號。

基於上述討論與試驗，從不同製作規格之 P-transmitter 與 S-transmitter 間選擇最佳配對，以編號 PA 與編號 SF 做為 Bender-extender element (參考表 3.3) 來進行本研究之試驗。

表 3.3 實驗使用之 Bender-extender element 一覽表

種類	編號	極化方向	壓電片型號	自由端 (mm)	寬度 (mm)	厚度 (mm)	線材
P-transmitter (S-receiver)	PA	x-poled	PZT5A T220-A4-303X	12	9.5	0.51	單芯線
	PS	x-poled	PZT5A T220-A4-303X	12	9.5	0.51	同軸線 (三極)
S-transmitter (P-receiver)	SA	y-poled	PZT5A T220-A4-103Y	12	3.2	0.51	單芯線
	SB	y-poled	PZT5A T220-A4-303Y	10	9.5	0.51	單芯線
	SC	y-poled	SB4010008	12	10	0.8	同軸線 (兩極)
	SF	y-poled	SB4010008	12	10	0.8	單芯線
	SS	y-poled	SB4010008	10	10	0.8	同軸線 (三極)

3.3.2 Bender-extender element 製作

本研究使用之 Bender-extender element 乃參考 Leong et al. (2009)與柳儒錚(2010)之做法，加以改良製作而成。

首先，依據實驗需求挑選 x-poled 與 y-poled 兩種極化方向之壓電陶瓷片，並將 x-poled 壓電陶瓷片裁切為長 15.9 mm、寬 9.5 mm、厚度 0.51 mm 之尺寸，y-poled 壓電陶瓷片裁切為長 12 mm (此長度不含末端金屬部分)、寬 10 mm、厚度 0.8 mm 之尺寸(如圖 3.10 所示)。

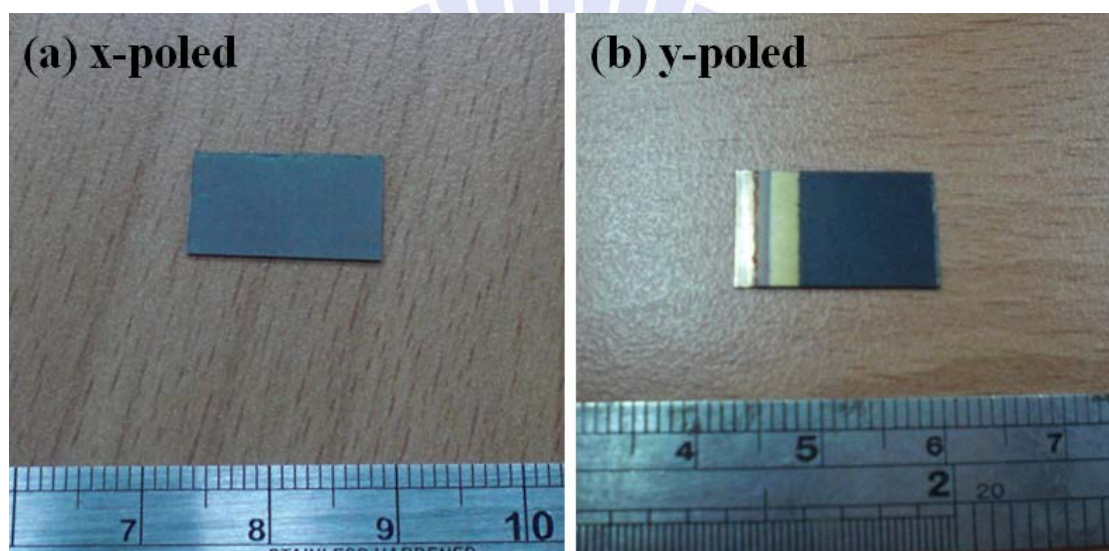


圖 3.10 裁切壓電陶瓷片

在 x-poled 壓電陶瓷片之一面尾端刮除小部分陶瓷，使中心金屬層露出，以利焊接導線；y-poled 壓電陶瓷片末端有保留中心金屬層，因此不必刮除陶瓷。

分別使用紅、黑、綠三條不同顏色之單芯線焊接於 x-poled 與 y-poled 兩壓電陶瓷片末端上(如圖 3.11 所示)。紅色單芯線焊接於正極，黑色單芯線焊接於負極，綠色單芯線焊接於更換並、串聯之一極。(參考圖 2.20 進行焊接)

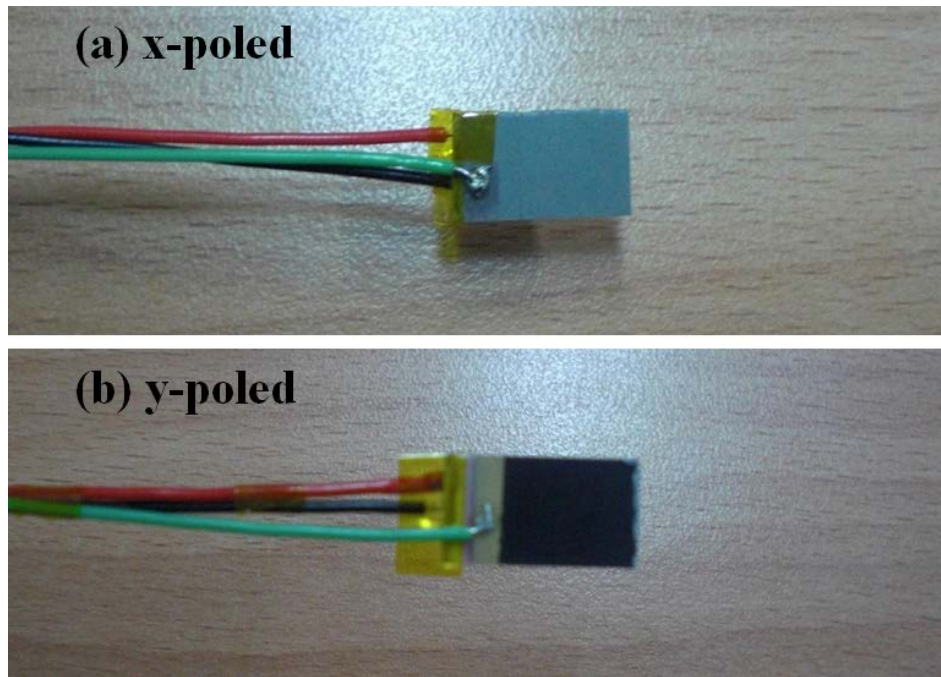


圖 3.11 焊接單芯線於壓電陶瓷片上

於焊接完成的壓電陶瓷片塗上第一層導電漆作為隔絕電磁波干擾之屏蔽。壓電陶瓷片兩側邊界與中心金屬焊接處不塗，以避免短路。

待導電漆乾燥後，於整個壓電陶瓷片(包含焊接處)塗上工業用膠，再滴少許催化劑使其快速凝固，以作為第一層防水處理(如圖 3.12 所示)。

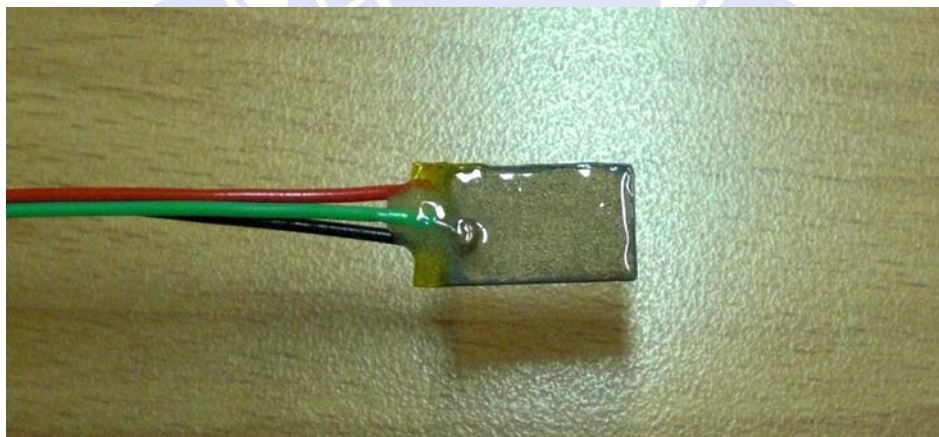


圖 3.12 塗防水膠進行防水處理

待防水膠乾燥後，於整個壓電陶瓷片塗上第二層導電漆以防止電磁波干擾，之後將白色單芯線夾上壓電陶瓷片並塗導電漆，以作為壓電元件之接地線(如圖 3.13 所示)。

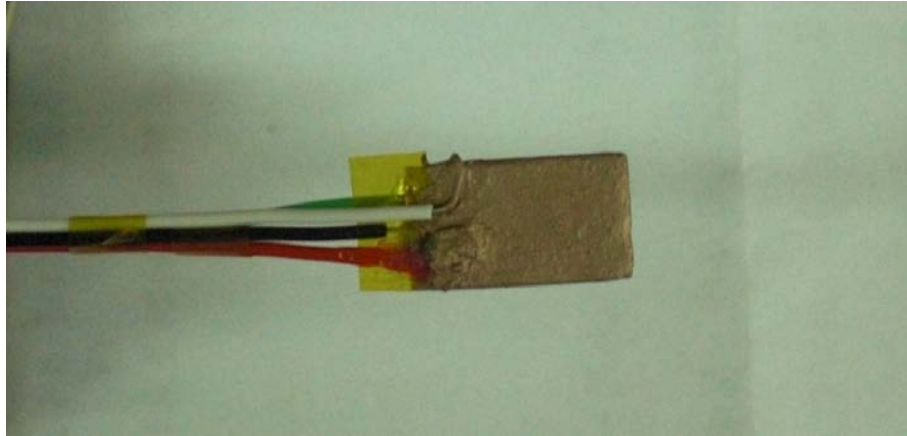


圖 3.13 於壓電陶瓷片塗導電漆與夾上接地線

將整個壓電陶瓷片塗上第二層防水膠，並使用鋁箔與熱縮套管包覆單芯線以保護線材。壓電陶瓷片頂端預留 12 mm 作為自由端，並固定於金屬螺帽中灌膠，完成後即為一對 Bender-extender element (如圖 3.14 所示)。

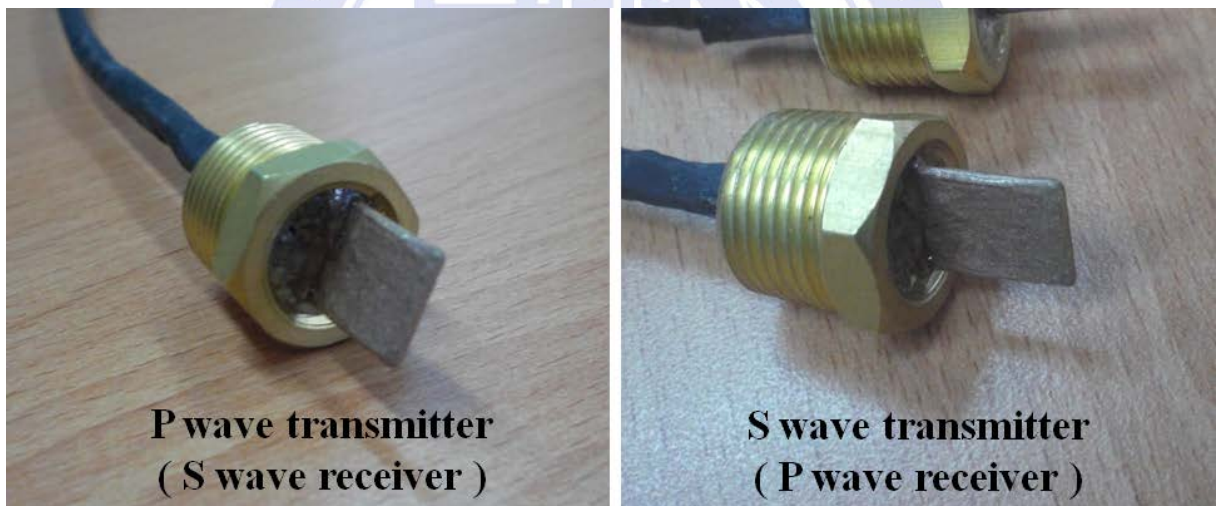


圖 3.14 Bender-extender element

3.3.3 既有波速量測系統之問題

原有波速量測系統乃參考柳儒錚(2010)之量測設備來建立，以此套系統進行波速量測，遭遇諸多問題而影響實驗結果之正確性，遂將實驗過程中所遭遇之問題說明如下：

1. 雜訊干擾

原有量測系統所收錄之震動訊號，受到雜訊(Noise)之影響，使訊號波形受到干擾且有基線飄移之情況，而影響彈性波初達時間之判斷。

干擾波速量測系統的雜訊有兩者，其中之一為串擾(Crosstalk)，會使得震源波形之振幅相對大於初達波波形，且震源波形後端有小震盪(如圖 3.15 中虛線圓圈所示)，將會影響震波初達時間判斷。另一雜訊則為一頻率 60 Hz 之弦波干擾，可能為資料擷取卡 input 端之 BNC 夾線接收實驗室內電磁波而引起，會造成收錄波形基線飄移的情形(如圖 3.15 所示)。

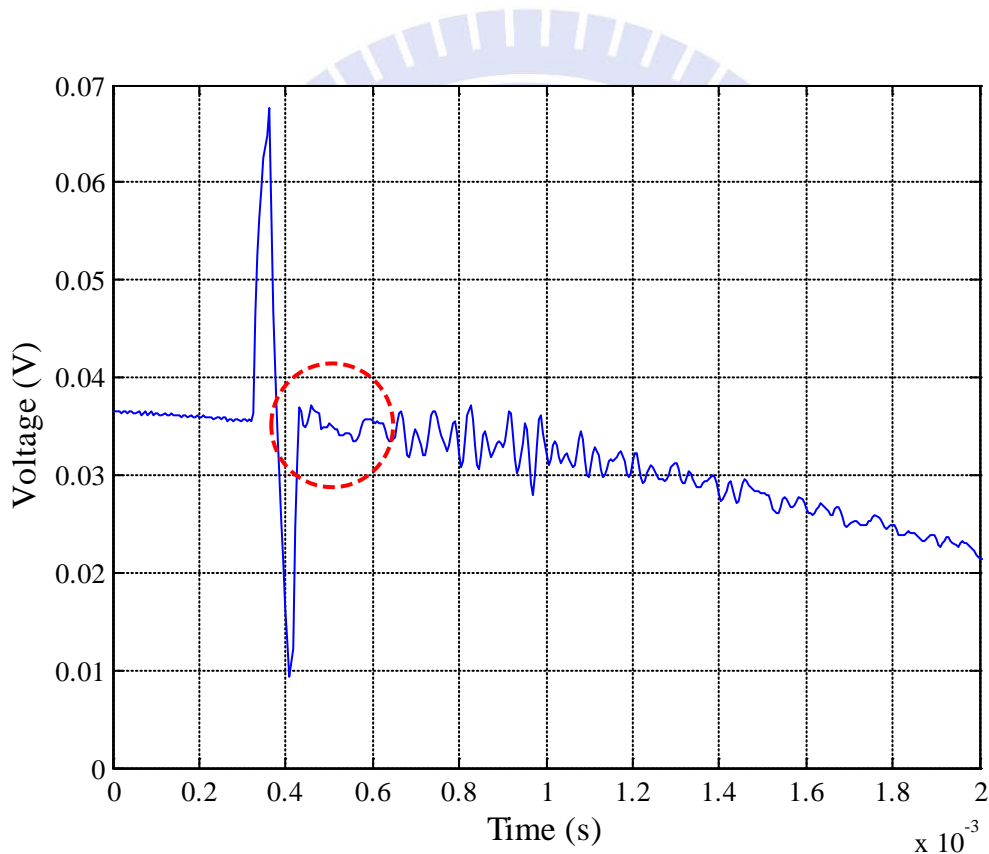


圖 3.15 波形受串擾影響與基線飄移

2. 夯實曲線溼側土壤試體無法量測震動訊號

在夯實曲線乾側之土壤試體，所量測到的震動訊號較為明確；而在夯實曲線溼側之土壤試體，則發生含水量增加將無法量測到震動訊號的情形(如圖 3.16 所示)，可能的原因為含水量提高，導致從 transmitter 觸發之震波

在傳遞過程中衰減，無法有效抵達 receiver，因而無法收錄到震動訊號。

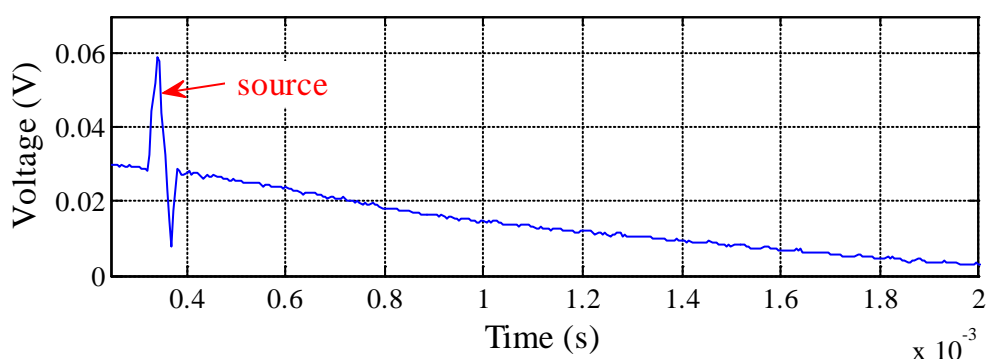


圖 3.16 夯實曲線溼側土壤試體無法量測震動訊號

3. 資料擷取模組取樣速率不足

既有之資料擷取(Data acquisition, DAQ)模組 NI PXI-4461，其取樣速率為 204.8 kS/s，符合觸發與量測 10 kHz 剪力波之需求。而為了觸發與量測頻率至少 30 kHz 之壓縮波，則必須將取樣速率提高。

3.3.4 室內波速量測系統之建立

針對原有波速量測系統之問題(參考 3.3.3 節)，提出下列方法，實際操作測試，並評估各方法的改善成效。本節改善量測系統測試使用之土壤試體為室內氣乾的夯實湖山砂土，使用之 Bender-extender element 為表 3.3 中編號 PA、SF 元件。

1. 改善訊號串擾問題

(1) 改善室內接地

原本室內接地的方式如圖 3.17 所示，是將 transmitter 與 receiver 之接地線纏繞於同一條導線上，再導入實驗室內之接地孔，而儀器箱則另外接上一條接地線導入其他的接地孔。由於 transmitter 與 receiver 共用一條接地線會相互干擾，因此提出改善室內接地的方法，讓 transmitter 與 receiver 使用

各自的接地線且分別導入不同接地孔，除了 transmitter、receiver 與儀器箱接地之外，也將鋁製試體架接上一條接地線導入其他接地孔(如圖 3.18 所示)。

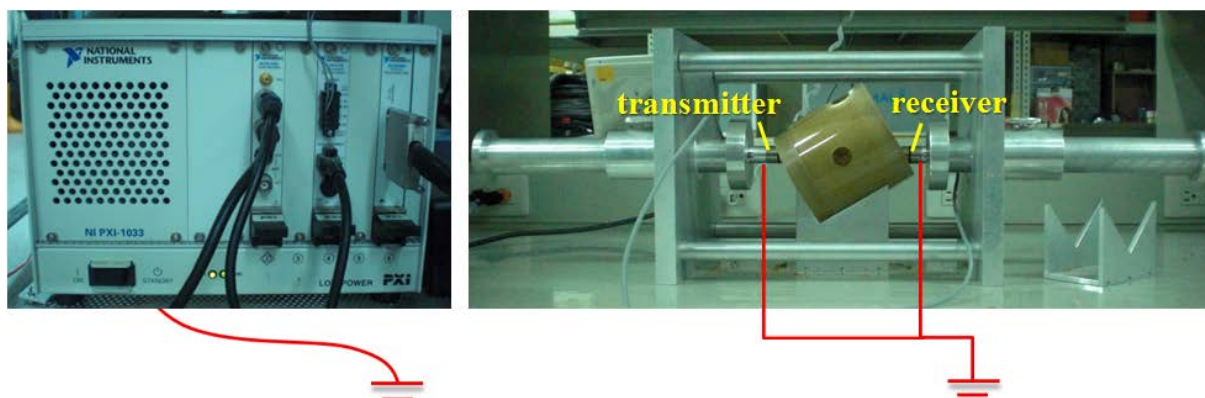


圖 3.17 原室內接地示意圖

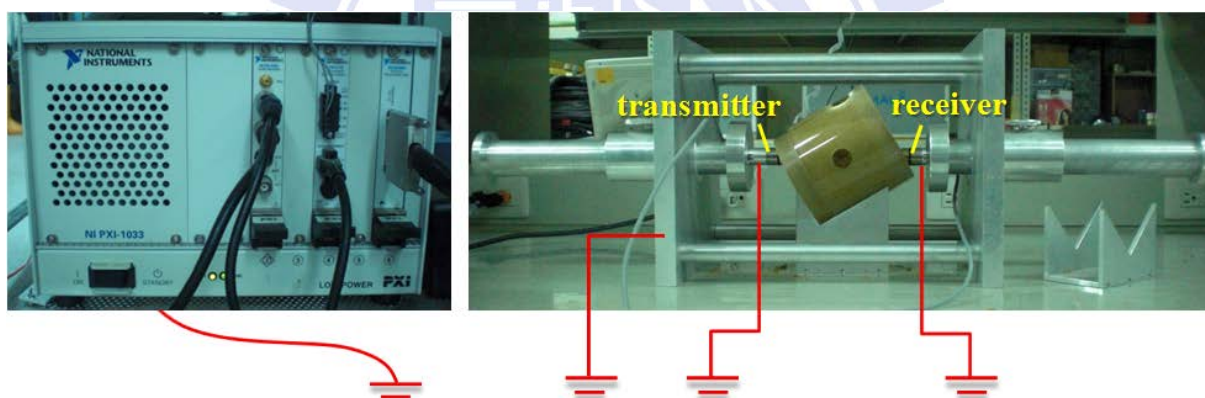


圖 3.18 改善室內接地示意圖

改善室內接地後的波形如圖 3.19 以及圖 3.20 所示，由圖 3.19 與圖 3.20 可觀察到震源波形相對大於初達波波形的情况已有改善，但震源波形後端仍有小震盪，受串擾之影響還需進一步改善。由試驗結果可知，將試體架、transmitter、receiver 以及儀器箱各自接地能改善收錄訊號之品質。

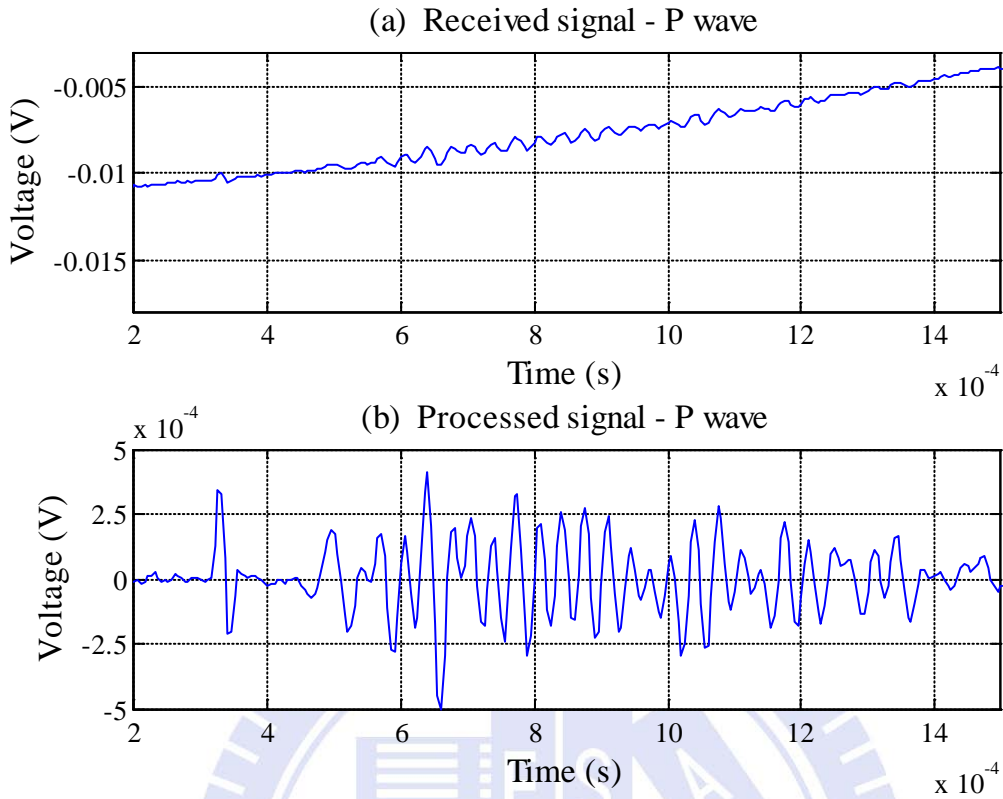


圖 3.19 改善接地後之壓縮波波形

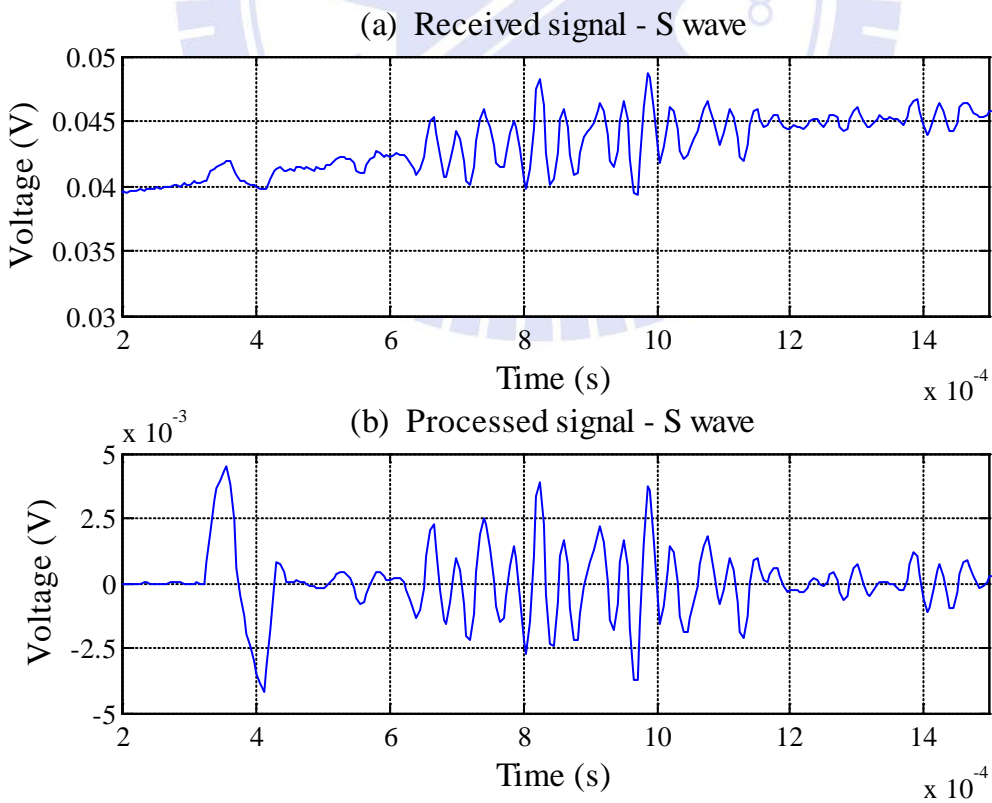


圖 3.20 改善接地後之剪力波波形

(2)調整函數產生器參數

原本函數產生器中觸發波形之參數設定，為了完整描述所觸發之正弦波波形，是以取樣頻率除以觸發頻率之值(即震源頻率之二十倍)再加上一，來作為描述波形之點數(總共二十一點)，如圖 3.21(a)所示。但上述為了波形完整而加上一點的方式，可能會使波形最後一點產生電位差，而導致震源波形後方之小震盪(如圖 3.15 所示)，並影響後續挑選初達波的抵達時間。在夯實曲線乾側的土壤試體，受震源波形後方之小震盪的影響將更為顯著，以速度較快的壓縮波而言，波傳遞的時間較短，使得初達波波形易遭到小震盪干擾，而在初達波抵達時間之判斷產生誤差。

為改善震源波形後方之小震盪，因此調整了函數產生器之參數，將原本描述觸發波形的設定(二十一點)，更改為以取樣頻率除以觸發頻率之值作為描述觸發波形之點數(總共二十點)，如圖 3.21 (b)所示。

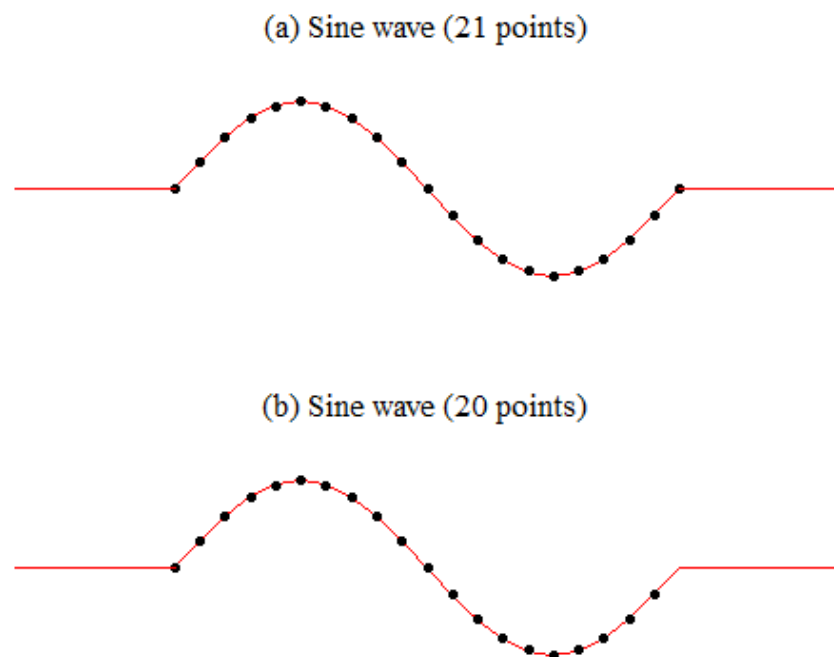


圖 3.21 函數產生器參數調整示意圖

依原本函數產生器參數之設定，實驗所得波形如圖 3.22 所示；調整參數設定後所收錄的波形則如圖 3.23 所示。比較兩者波形，可觀察到經過參

數調整後，震源後端之小震盪(圖 3.22、圖 3.23 中圓圈處)有稍加改善之情形。

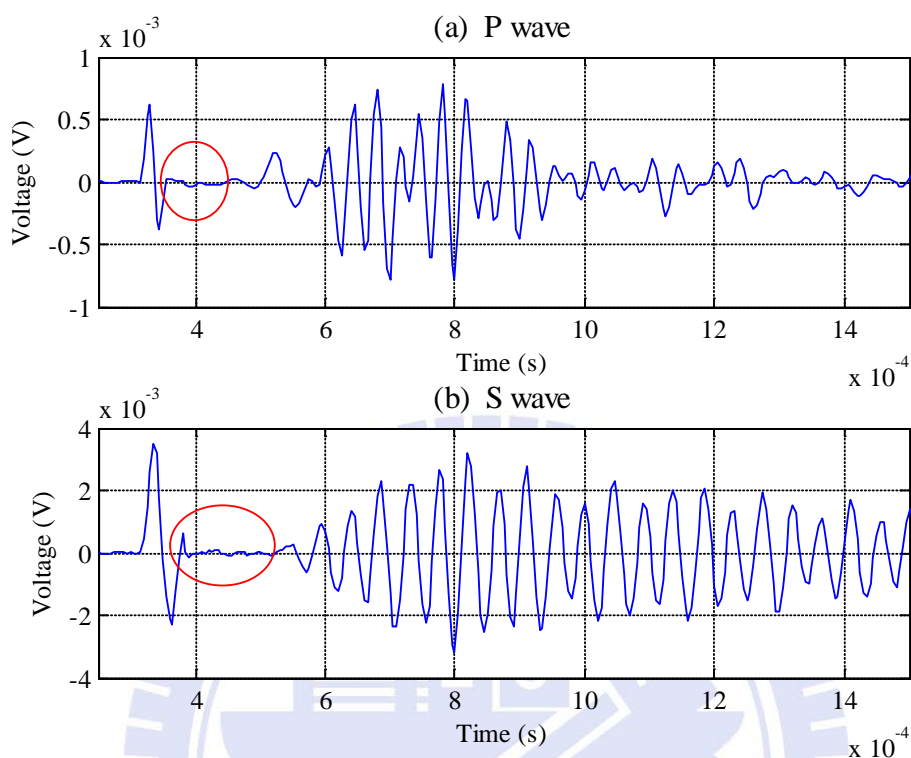


圖 3.22 函數產生器參數調整前之波形

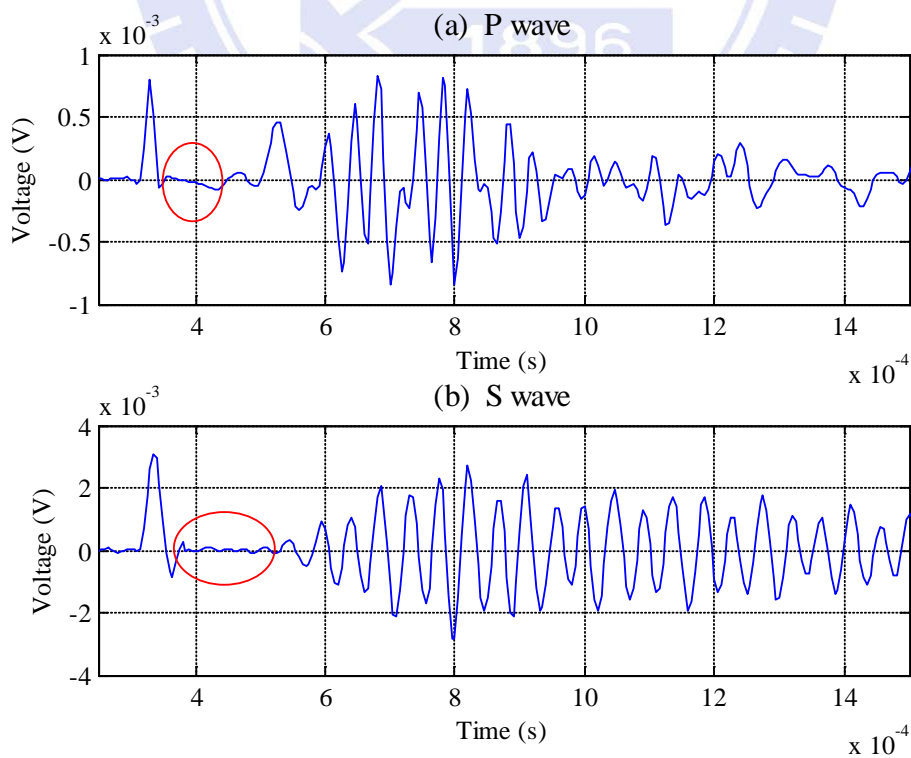


圖 3.23 函數產生器參數調整後之波形

2. 改善弦波干擾問題

(1) 改善室內接地

儀器設備採用原本室內接地之方式(參考圖 3.17)，試驗所收錄之震動訊號如圖 3.24 所示，圖 3.24(a)為收錄壓縮波時遭受到之弦波干擾，弦波振幅約為 26 毫伏；圖 3.24(b)為收錄剪力波時遭受到之弦波干擾，弦波振幅約為 83 毫伏。

改善室內接地之後(參考圖 3.18)，試驗所收錄之震動訊號如圖 3.25 所示，圖 3.25(a)為收錄壓縮波時遭受到之弦波干擾，弦波振幅約為 12.7 毫伏；圖 3.25(b)為收錄剪力波時遭受到之弦波干擾，弦波振幅約為 37 毫伏。

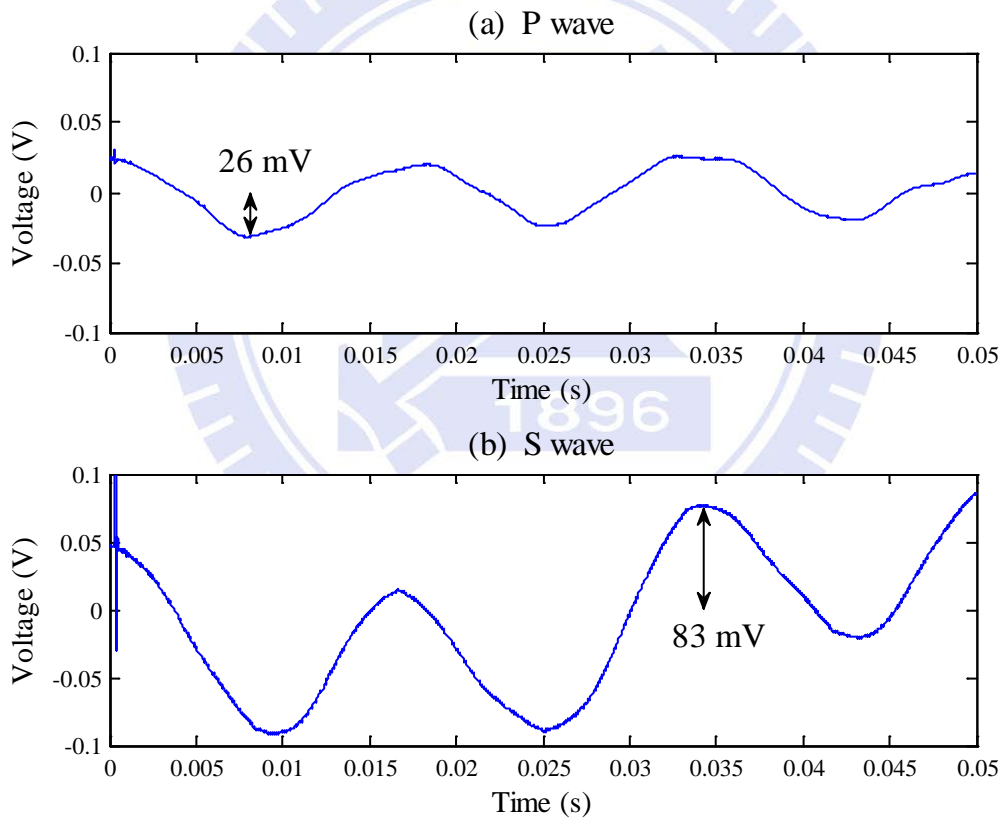


圖 3.24 原室內接地之波形

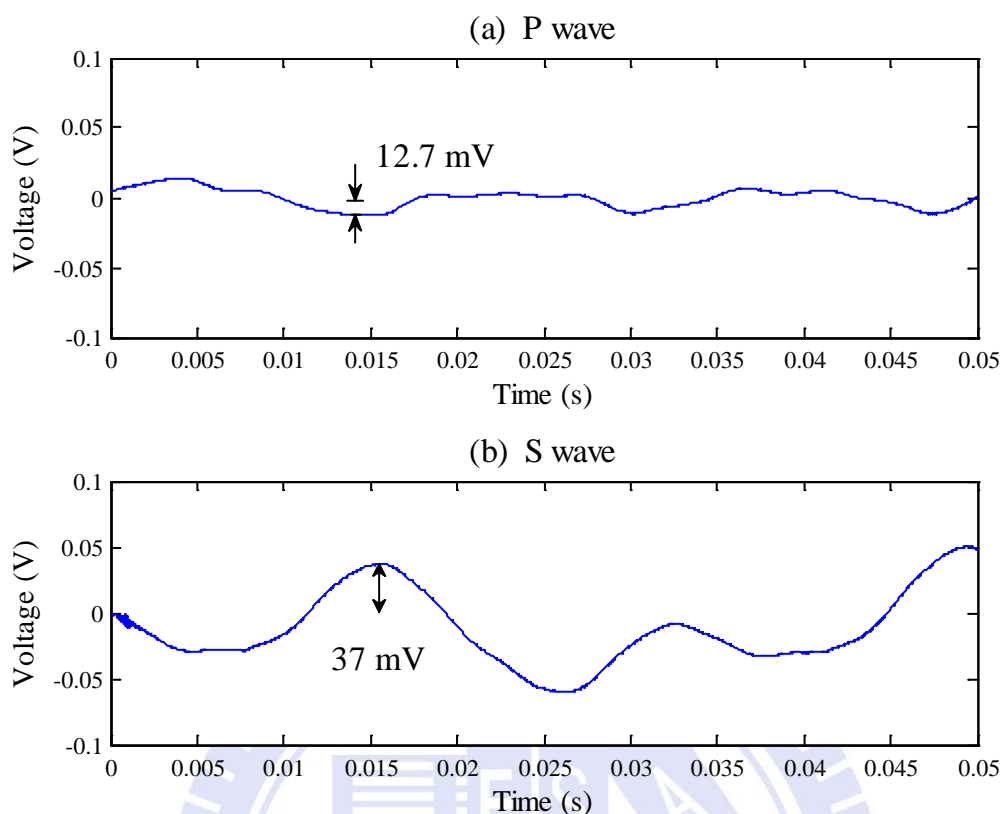


圖 3.25 改善室內接地之波形

比較改善室內接地前後的弦波干擾情形，可觀察到改善接地後的弦波振幅較小。雖然儀器箱、transmitter、receiver 以及試體架分別接地有助於改善收錄訊號品質，但效果仍然有限。

(2) 戶外草地接地

為使接地效果更佳，本研究嘗試將儀器設備移至戶外草地接地以進行實驗。為將接地線導入草地，使用直徑 1.2 公分、長度 40 公分之鋼棒釘入草地中約 30 公分深，並將鋼棒接上同軸線(型號 QR320)之內導體作為導線，而儀器箱、transmitter、receiver 以及試體架則各自接上不同條之接地線與鋼棒。

於戶外草地接地實驗所收錄的波形如圖 3.26 所示，可看到弦波振幅約為 51.1 毫伏，大於室內接地的弦波振幅，顯示戶外草地接地無法改善弦波干擾。

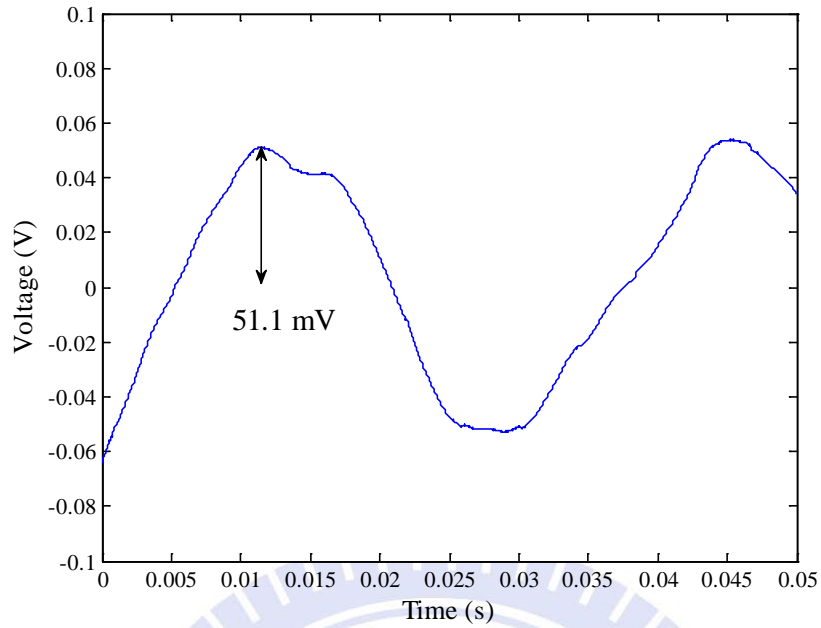


圖 3.26 戶外草地接地之波形

(3) 以同軸線製作 Bender-extender element

原本所製作之 Bender-extender element 使用單芯線為焊接線材，並在所有單芯線之外圍包覆鋁箔作為屏蔽電磁波干擾之用(如圖 3.27(a)所示)，但使用鋁箔包覆單芯線來屏蔽電磁波的效果有限，收錄訊號仍受空間中的電磁波所干擾，而使得波形受弦波影響(如圖 3.28 所示)。考量同軸線屏蔽電磁波之良好效果，因此重新以同軸線來製作 Bender-extender element，即表 3.3 中編號 PS 與編號 SS 兩壓電元件。

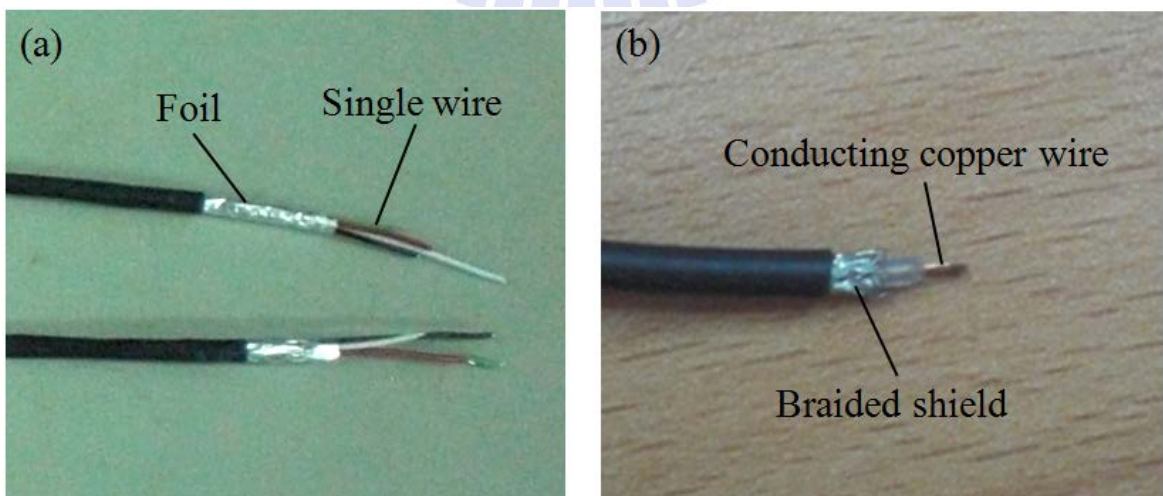


圖 3.27 焊接使用之線材(a)單芯線外包鋁箔(b)SMA 線

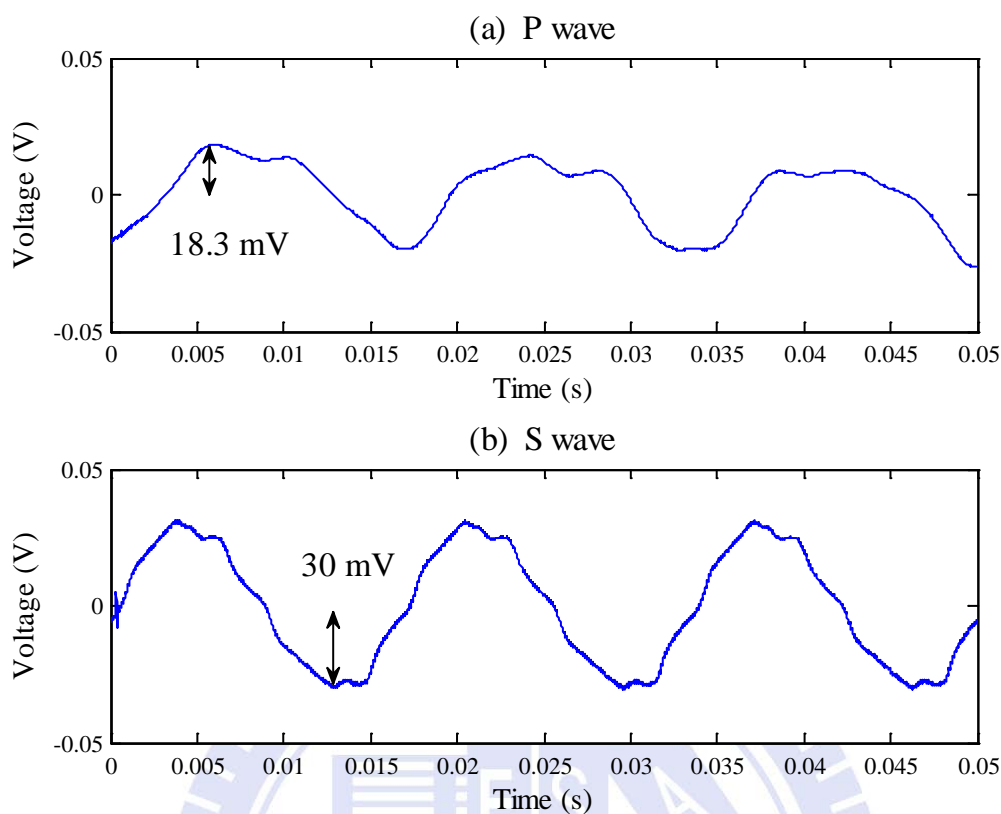


圖 3.28 單芯線外包鋁箔之 Bender-extender element 所收錄波形

製作新 Bender-extender element 所使用的同軸線材為 SMA 線(型號 RG174U)，如圖 3.27(b)所示，利用 SMA 線中心的銅線作為導體，焊接於壓電陶瓷片上，外層披覆的金屬編織網則作為屏蔽電磁波干擾之用。使用 SMA 線製作之 Bender-extender element (表 3.3 中編號 PS 與 SS)實驗收錄波形如圖 3.29 所示，由圖中可看到波形仍有弦波干擾之情形，且弦波振幅並無減小，顯示在此波速量測系統配置中，SMA 線屏蔽空間中電磁波干擾的效果仍然不足。

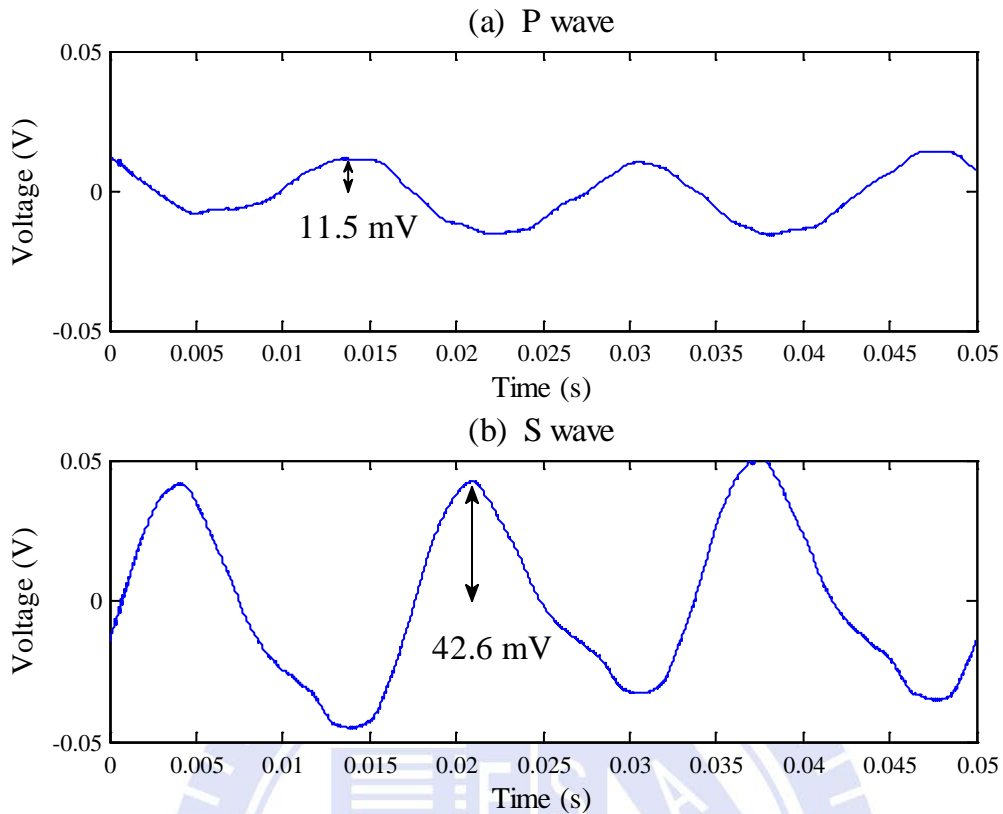


圖 3.29 SMA 線之 Bender-extender element 所收錄波形

(4) 使用 Balun 夾線

實驗使用 BNC 鱷魚夾線連結 Bender-extender element 與資料擷取系統，以方便更換 Bender-extender element 之接線方式，來觸發與收錄壓縮波或剪力波，但 BNC 鱷魚夾線末端分成正、負兩極，可能導致夾線形成天線，從而接收空間中的電磁波，對震動訊號造成弦波干擾。使用 BNC 鱷魚夾線進行實驗所收錄之波形如圖 3.30 所示，由圖中可看到波形受弦波干擾，而弦波振幅約為 6.2 毫伏。

為改善弦波之影響，因此使用 Balun 夾線取代 BNC 鱷魚夾線，Balun 一辭是指 Balance-unbalance 轉換器(又稱為換衡器)，可用來抑制電路中的雜訊，其中磁珠為常見的一種 Balun，是將導線規則地纏繞於環形鐵氧體上，可避免導線成為天線而接收外來的雜訊。

實驗使用之 Balun 夾線如圖 3.31 所示(型號為 VB-101)，將正、負極導線鎖入 Balun 夾線中，另一端 BNC 接頭則與資料擷取系統 input 端連接。

使用 Balun 夾線取代 BNC 鱷魚夾線與資料擷取系統相連結，實驗所得波形如圖 3.32 所示，由圖中可看到弦波干擾受到抑制，其振幅約為 1.5 毫伏，但觸發正弦波波形震盪嚴重(如圖 3.33 虛線圓圈處所示)，因此後續實驗仍使用 BNC 鱷魚夾線來觸發與收錄 Bender-extender element 之震動訊號。

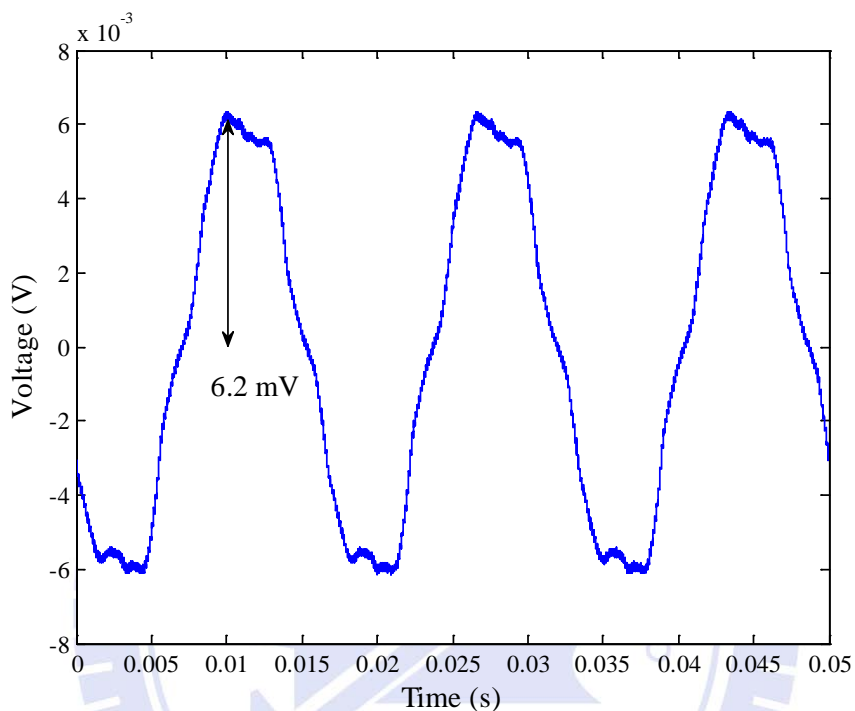


圖 3.30 使用 BNC 鱷魚夾線收錄之波形



圖 3.31 實驗使用之 Balun 夾線

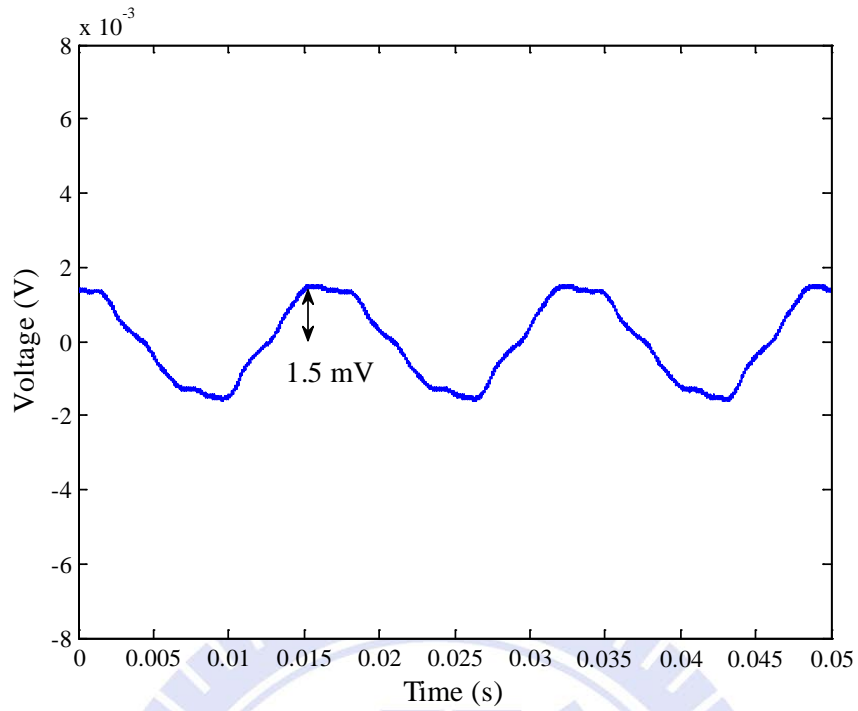


圖 3.32 使用 Balun 夾線收錄之波形

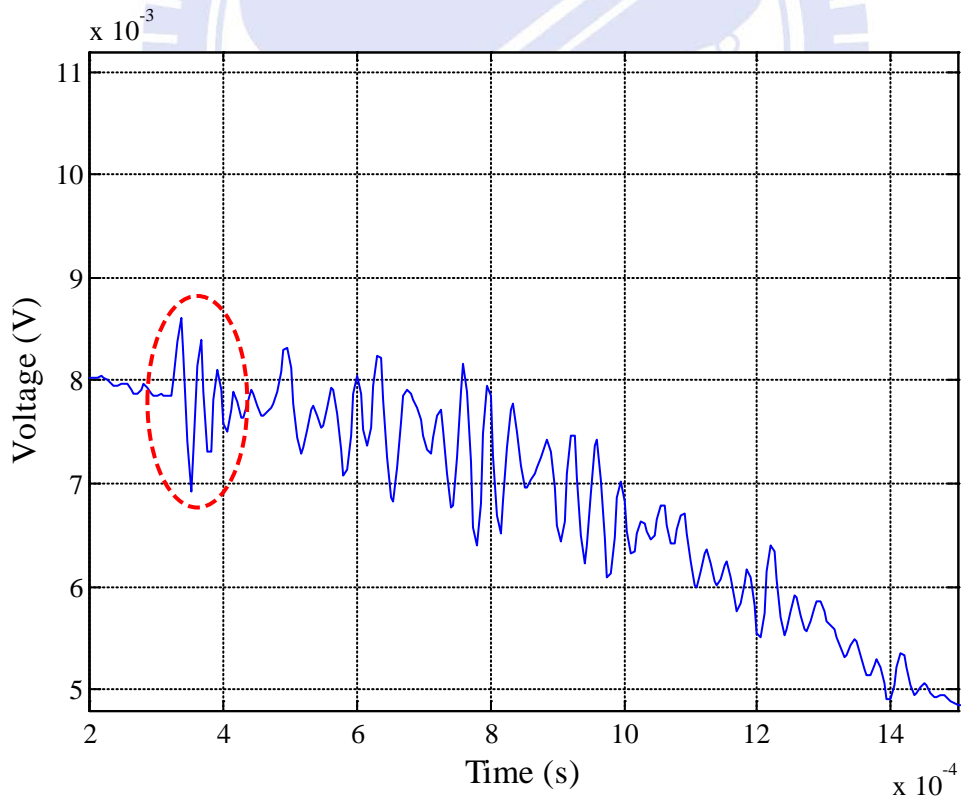


圖 3.33 使用 Balun 夾線之震源波形震盪嚴重

(5) 改變供電方式

原本實驗儀器使用之電源來自室內電源，考量採用不同供電方式可能會改善雜訊干擾問題，遂使用 UPS (Uninterruptible Power Supply，不斷電系統) 作為儀器電力來源，而 UPS 可分為 Offline UPS (離線式不斷電系統) 與 Online UPS (在線式不斷電系統)，以上兩種 UPS 均進行測試。

使用 Offline UPS 供電所收錄之波形如圖 3.34 所示，圖中可觀察到波形仍受弦波干擾，而弦波振幅約 6.7 毫伏；使用 Online UPS 供電所收錄之波形如圖 3.35 所示，雖然弦波的振幅下降至約 2.9 毫伏，但仍略大於壓縮波的振幅大小，易干擾壓縮波波形而造成初達波判斷之困擾。

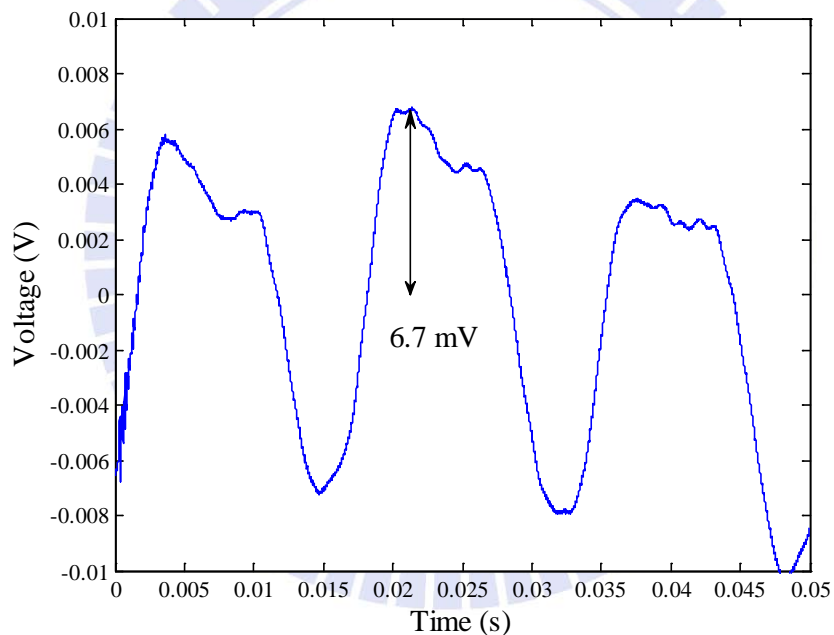


圖 3.34 使用 Offline UPS 供電之波形

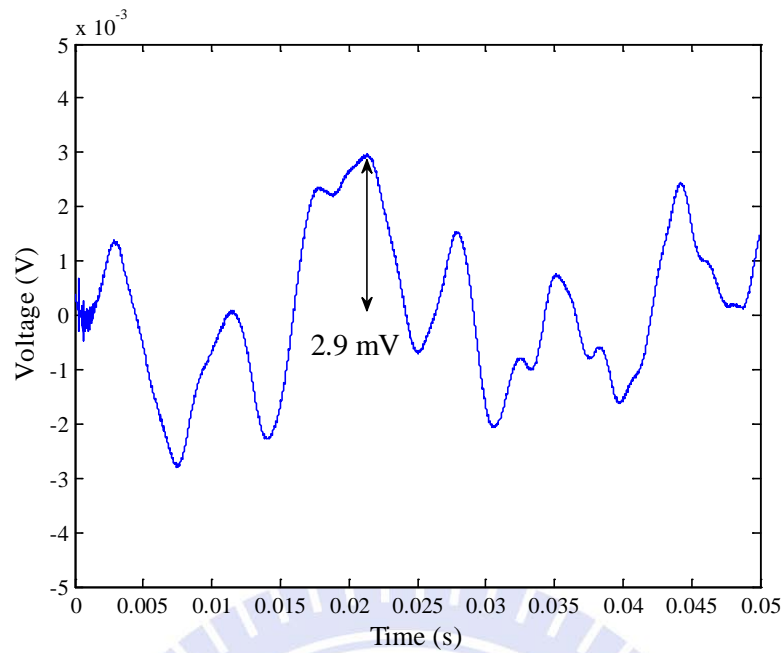


圖 3.35 使用 Online UPS 供電之波形

除了 UPS 之外，本研究亦嘗試採用另一種供電方式，作法為將蓄電池接上一台直流-交流轉換器，利用此轉換器將蓄電池直流電轉為交流電輸出並供給實驗儀器使用。以蓄電池直流電轉交流電輸出之供電方式，實驗所收錄之波形如圖 3.36 所示，可看到所收錄的波形怪異，此方法無法改善弦波干擾。

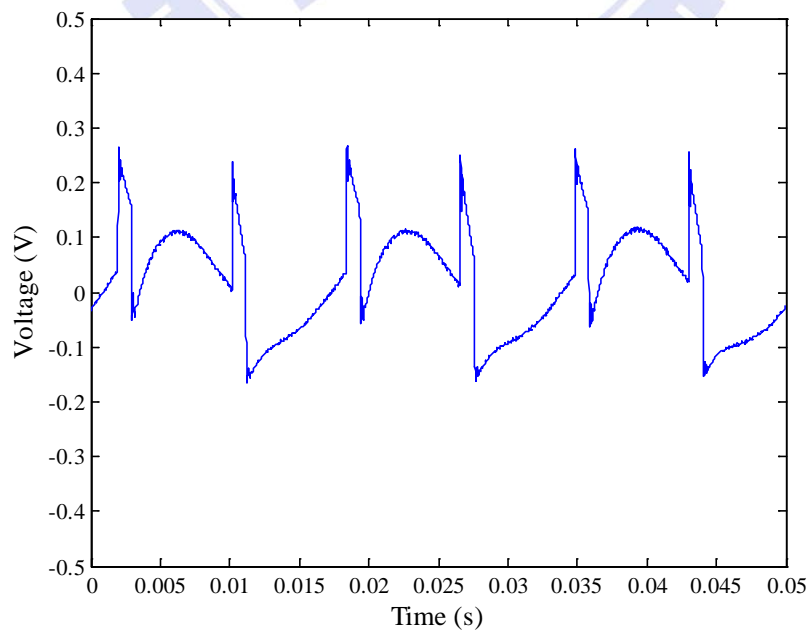


圖 3.36 使用蓄電池直流電轉為交流電供電之波形

上述的供電方式中，使用蓄電池將直流電轉為交流電輸出之方法不但無法改善弦波干擾，且所收錄的波形怪異；而使用 UPS 雖能使弦波振幅降低，但弦波的振幅仍略大於收錄的震動訊號振幅，因此改善成效有限。

(6)使用功率放大器

實驗所收錄的剪力波訊號振幅相當小，約為 3~4 毫伏，而壓縮波訊號振幅更小，僅約為 0.25~0.8 毫伏。當震動訊號與雜訊的振幅相當時，受雜訊干擾的影響則相對明顯。

原有波速量測系統中的函數產生器僅能提供觸發電壓 10 伏，為了提升震動訊號之能量進而突顯初達波波形，因此使用功率放大器來達到提升觸發電壓的目的。使用的功率放大器如圖 3.37 所示，將函數產生器 output 端與功率放大器連接，再經由放大器將電壓放大後輸出至 transmitter 觸發震動訊號；另外，函數產生器 input 端則連接 receiver，負責收錄訊號。

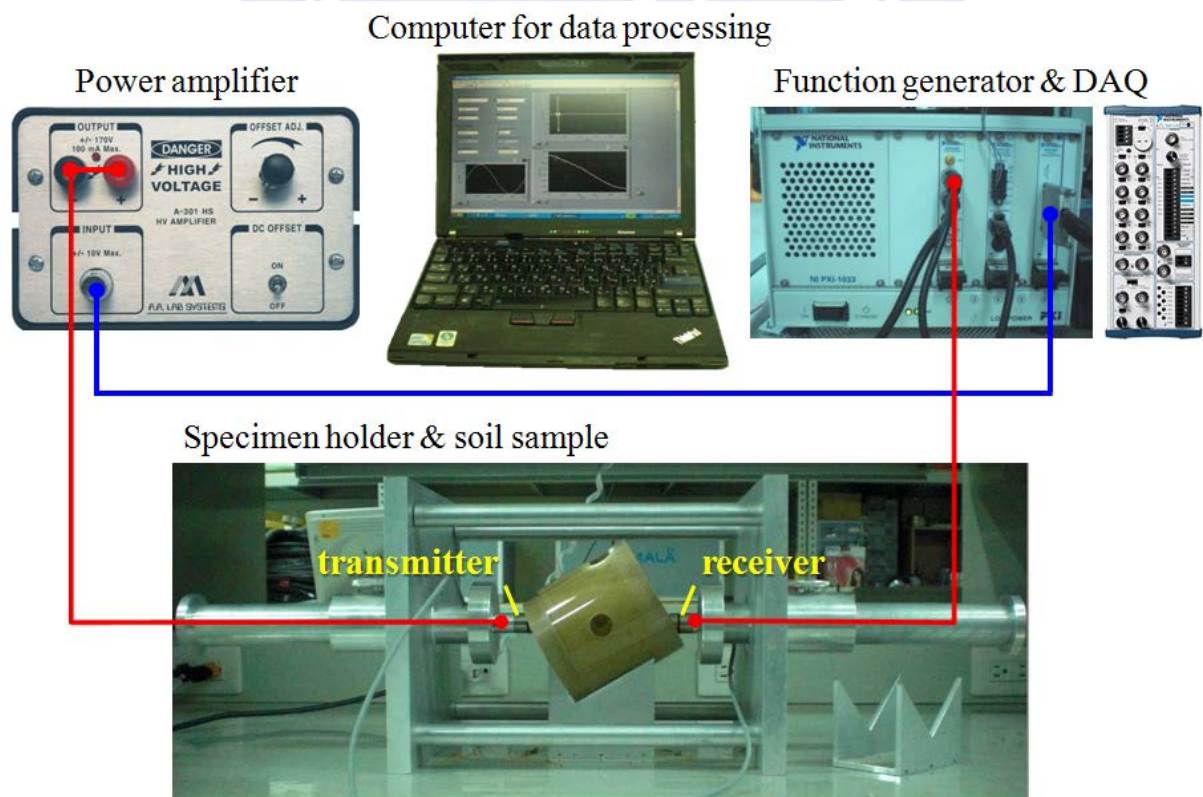


圖 3.37 改良彈性波速室內量測系統

採用 10 伏觸發電壓所收錄的訊號如圖 3.38 所示，可看到訊號能量相當小，且波形受弦波影響明顯，使得基線飄移。將觸發電壓放大至 40 伏，所收錄的訊號如圖 3.39 所示，雖訊號仍受弦波干擾，然而因初達波振幅增大，所以弦波對整體訊號的影響相較之下顯得微小，顯示使用功率放大器提升觸發電壓有助於改善弦波對訊號的干擾。

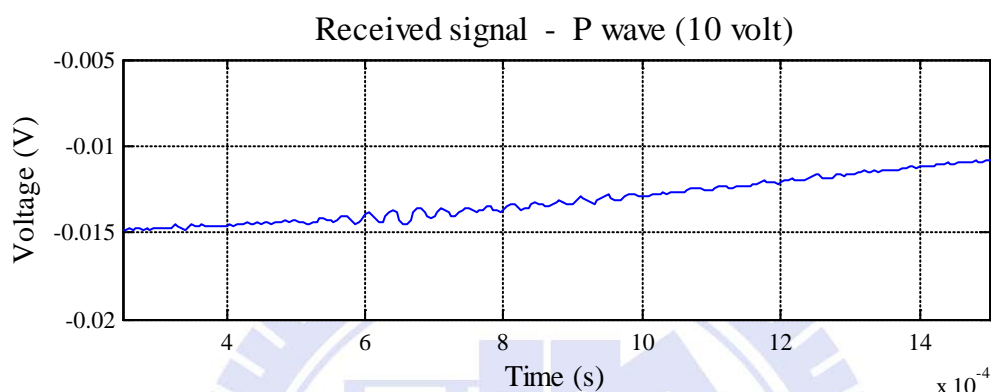


圖 3.38 觸發電壓 10 伏收錄之波形

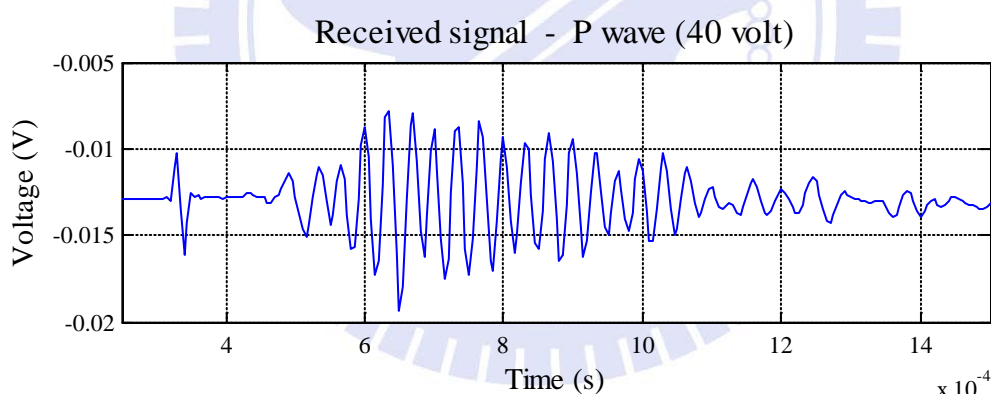


圖 3.39 觸發電壓 40 伏收錄之波形

3.改善能量衰減問題

(1)使用功率放大器

在夯實曲線溼側之土壤試體，遭遇到能量衰減嚴重的情形，使得藉由 transmitter 所觸發的震動訊號在土壤試體中無法有效地傳遞至 receiver 來接收，因而使用功率放大器來提高觸發電壓，以改善能量衰減問題。

原本實驗配置採用之觸發電壓為 10 伏，以室內氣乾之夯實土壤試體進

行試驗，接收到的訊號經過處理後之波形如圖 3.40 所示，由圖中可觀察到初達波振幅約為 0.35 毫伏。而在新的實驗配置中，使用功率放大器將觸發電壓提升至 40 伏，接收到的訊號經過處理後之波形如圖 3.41 所示，由圖中可觀察到初達波振幅約為 4 毫伏，提高觸發電壓後初達波之振幅有顯著增加。

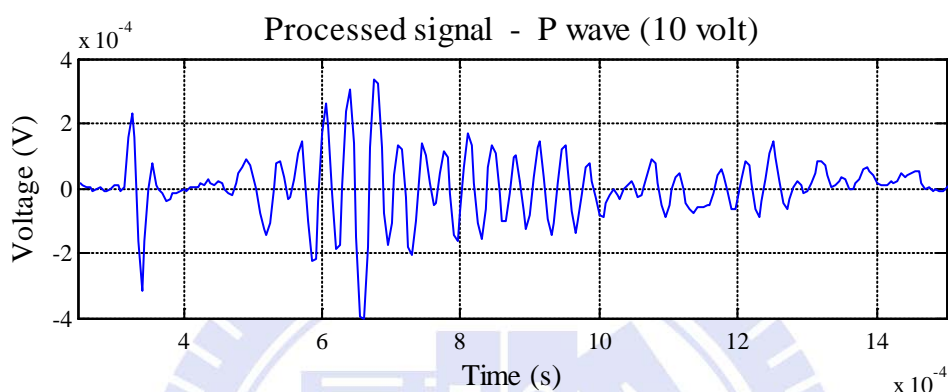


圖 3.40 觸發電壓 10 伏之波形

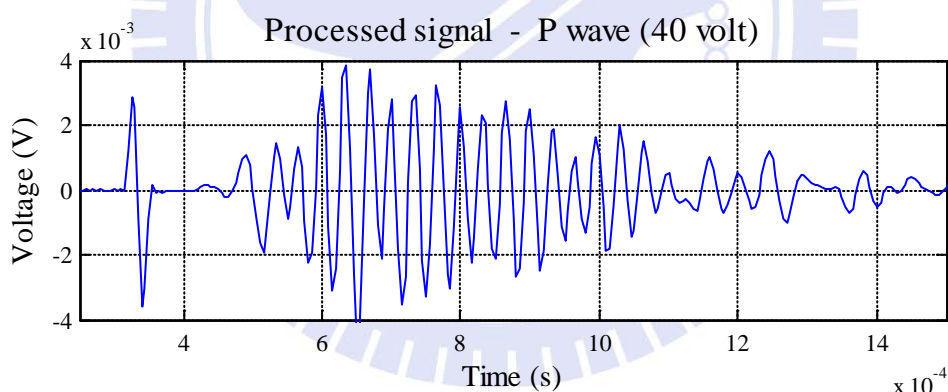


圖 3.41 觸發電壓 40 伏之波形

使用功率放大器將觸發電壓由 10 伏提升至 40 伏，對於較為乾燥之夯實土壤試體，初達波振幅明顯增加且初達時間較為明確；然而，在較高含水量(約為 14%)夯實之土壤試體仍無法收錄到震動訊號。

(2) 縮短土壤試體量測長度

夯實土壤試體之長度，若超過壓電元件產生之震波所能傳遞的距離，可能導致震波衰減而無法收錄。使用含水量約為 14% 之夯實土壤試體進行

實驗，以觸發頻率為 20 kHz 之剪力波為例，當土壤試體長度為十公分時，實驗所收錄之訊號如圖 3.42(a)所示，無初達波抵達訊號；將夯實土壤試體長度裁切為六公分時，實驗所收錄之訊號如圖 3.42(b)所示，可看到有初達波抵達之訊號。經由實驗，縮短夯實試體之量測長度，使震波傳遞的距離減少，能改善夯實曲線溼側試體的能量衰減問題；但當裁切後的土壤試體傳遞距離過短，造成土壤試體初達波訊號與震源訊號過於接近，雖有震動訊號仍無法有效辨識初達波。

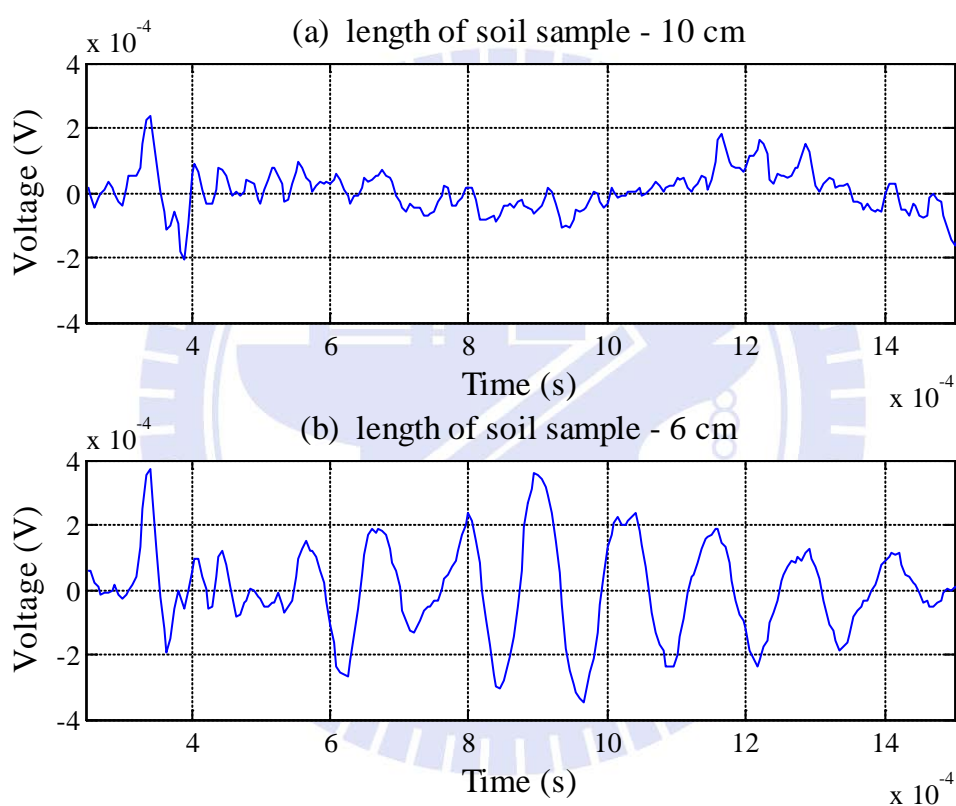


圖 3.42 不同長度夯實土壤試體之量測訊號

4.改善取樣率不足之問題

既有之資料擷取模組 NI PXI-4461，其取樣率僅為 204.8 kS/s，無法符合觸發與量測頻率為 30 kHz 的壓縮波之需求，所以必須將取樣率提高，而使用了取樣率為 1 MS/s 之資料擷取模組 NI PXI-6251 來觸發震動訊號，並配合解析度較佳之 NI PXI-4461 來接收傳遞之訊號，以達到觸發與量測頻率高於 10 kHz 震動訊號之需求。

5.波速量測系統改良結果

經由上述一系列的實驗中，找出改善既有波速量測系統問題之方法，並針對改良結果說明如下：

1. 訊號串擾可經由改善室內接地及調整函數產生器參數來改善。
2. 使用功率放大器能改善雜訊干擾，並提高震波初達時間判斷之正確性。
3. 縮短土壤試體之長度能改善夯實曲線溼側土壤試體能量衰減問題，但效果有限。

茲將波速量測系統遭遇之問題及解決方法整理於表 3.4。

表 3.4 波速量測系統之問題與改良方法

遭遇之問題		改善方法	成效	建議採用方法
雜訊干擾	串擾	(1)改善室內接地	改善	改善室內接地與調整函數產生器參數
		(2)調整函數產生器參數	改善	
	頻率 60 Hz 之弦波	(1)改善室內接地	有限	使用功率放大器提升觸發電壓
		(2)戶外草地接地	不佳	
		(3)以同軸線製作元件	不佳	
		(4)使用 Balun 夾線	不佳	
		(5)改變供電方式	不佳	
		(6)使用功率放大器	改善	
夯實曲線溼側土壤試體無法收錄震動訊號		(1)使用功率放大器	不佳	縮短土壤試體量測長度
		(2)縮短試體量測長度	有限	
資料擷取卡取樣率不足		(1)使用較高取樣率之資料擷取卡	改善	使用較高取樣率之資料擷取卡

3.3.5 試驗步驟

本研究試驗之夯實土壤試體皆遵循相同程序製作，試驗步驟說明如下：

1. 使用四號篩將湖山砂土過篩，並置入烘箱內以 110°C 烘乾，經二十四小時後取出並以保鮮膜完整包覆，靜置冷卻。
2. 加入規劃的含水量至兩公斤重烘乾土樣並拌合均勻，使用保鮮膜完整包覆，靜置一天待土壤與水均勻混合。
3. 清理壓克力夯模，秤夯模(壓克力模、塞與底座)重量並記錄。
4. 蓋上夯模之塞孔，將夯模、底座及延伸套環組裝好並固定，放置於鋼盤上。
5. 將準備好的溼土依標準夯實方法分為三層填入夯模(最後一層土壤需高於壓克力模)，每層使用標準夯錘夯實二十五下。每夯實完一層先使用刮刀刮毛再填入下一層土壤。
6. 移除延伸套環，使用刮刀刮平土壤試體表面。
7. 使用毛刷清除散落於夯模外及底座的土壤並秤重(包含溼土、壓克力夯模與底座)。
8. 取下夯模上之壓克力塞，選定量測角度，使用刮刀將土壤整平以適合 Bender-extender element 貫入土中，利用伸縮柱控制兩端壓電元件貫入深度各約 3 mm，並記錄貫入深度。
9. 將 transmitter 導線以並聯方式連接量測儀器觸發端，receiver 導線以串聯方式連接於量測儀器接收端。
10. 調整適合的觸發頻率(剪力波採用 20 kHz，壓縮波採用 30 kHz)，觸發單一週期正弦波，分別進行不同角度的彈性波觸發與收錄。
11. 每一角度量測完畢後皆記錄兩壓電元件端點之間的距離，方可抽離

Bender-extender element 進行下一角度之波速量測。

- 12.待所有角度(垂直向、水平向且壓電陶瓷片垂直橫向等向面、水平向且壓電陶瓷片平行橫向等向面、與對稱軸夾三十度角、與對稱軸夾四十五度角)量測完畢後，自夯實土壤試體挖取適量土以進行含水量試驗。
- 13.重複上述步驟，至所有規劃含水量皆試驗完畢。
- 14.將收錄之訊號匯入以 MATLAB 撰寫之程式進行訊號處理與分析，並參考 Kawaguchi et al. (2001)建議之方法挑選初達波，以得到壓縮波速與剪力波速。

3.4 波速分析方法

典型的剪力波訊號量測結果如圖 3.43 所示，訊號前端為震源波形，其後則有初達波抵達，計算兩者時間差再除以波傳距離即可獲得波速。初達波之選定，乃參考 Kawaguchi et al. (2001)之建議，以圖 3.44 中之 C 點作為初達波抵達時間。

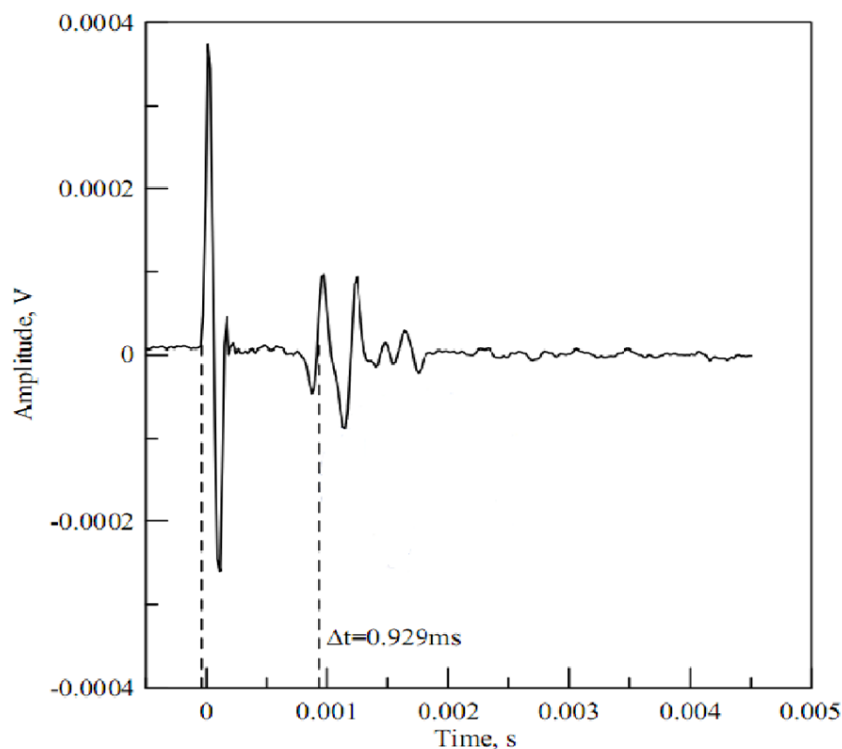


圖 3.43 典型之剪力波量測結果(Kawaguchi et al., 2001)

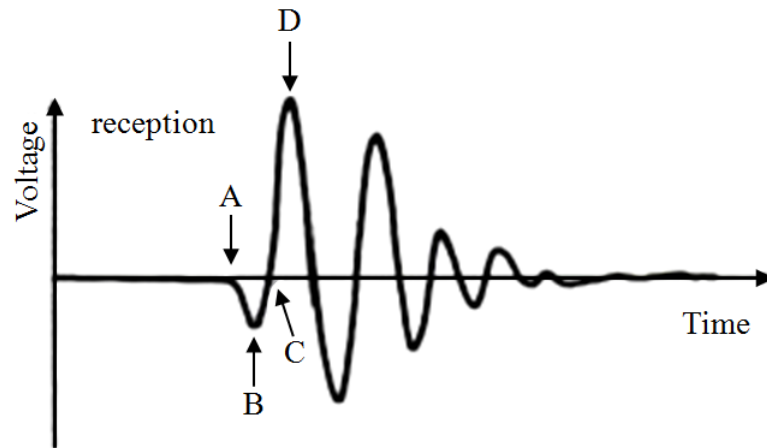


圖 3.44 波形初達點位挑選(Kawaguchi et al., 2001)

本研究資料擷取系統所收錄之剪力波與壓縮波訊號分別如圖 3.45 (a)、圖 3.46 (a)所示，未進行訊號處理之波形，雖有弦波干擾使得基線飄移，仍可清楚辨識初達波抵達時間。為改善基線飄移情形使波形更為良好，將收錄之訊號匯入以 MATLAB 撰寫之波速分析程式，進行訊號處理濾除部分雜訊。如圖 3.45(b)與圖 3.46(b)所示，訊號處理後波形更佳，且基線飄移之情形已改善。

經過訊號處理之波形，以人工方式挑選出震波觸發時間，再依據 Kawaguchi et al. (2001)所建議之挑波方法挑選初達波抵達時間(如圖 3.45(b)及圖 3.46(b)所示)，計算求得波速，即完成一筆波速分析。

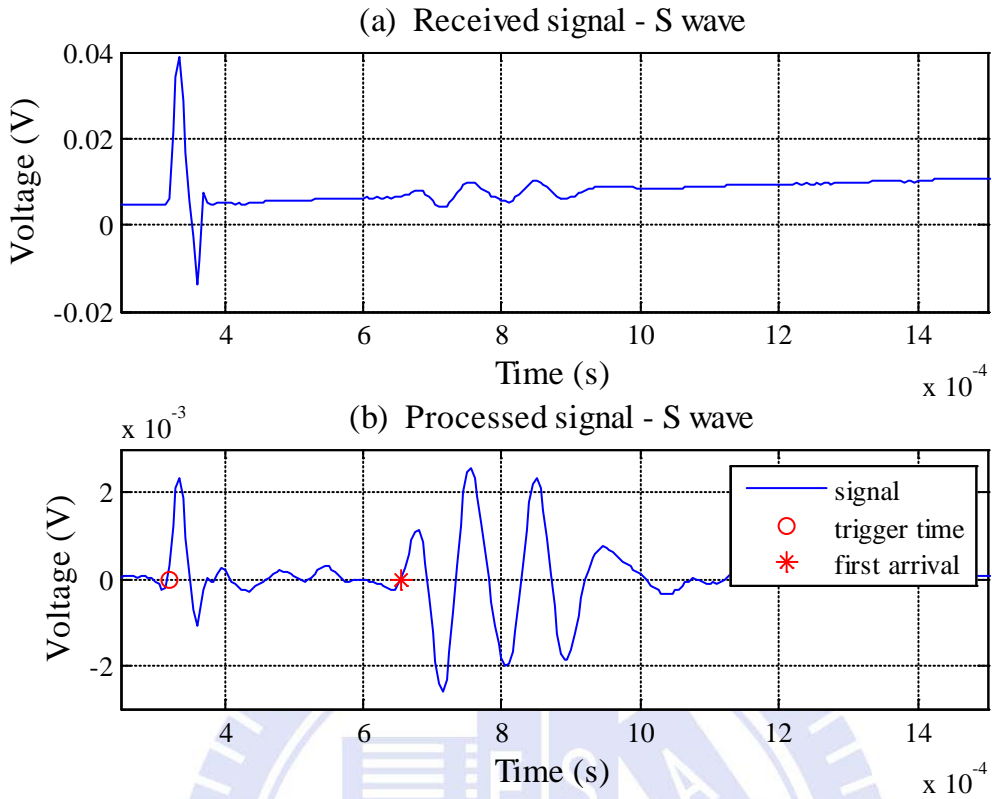


圖 3.45 剪力波波形與波傳時間挑選

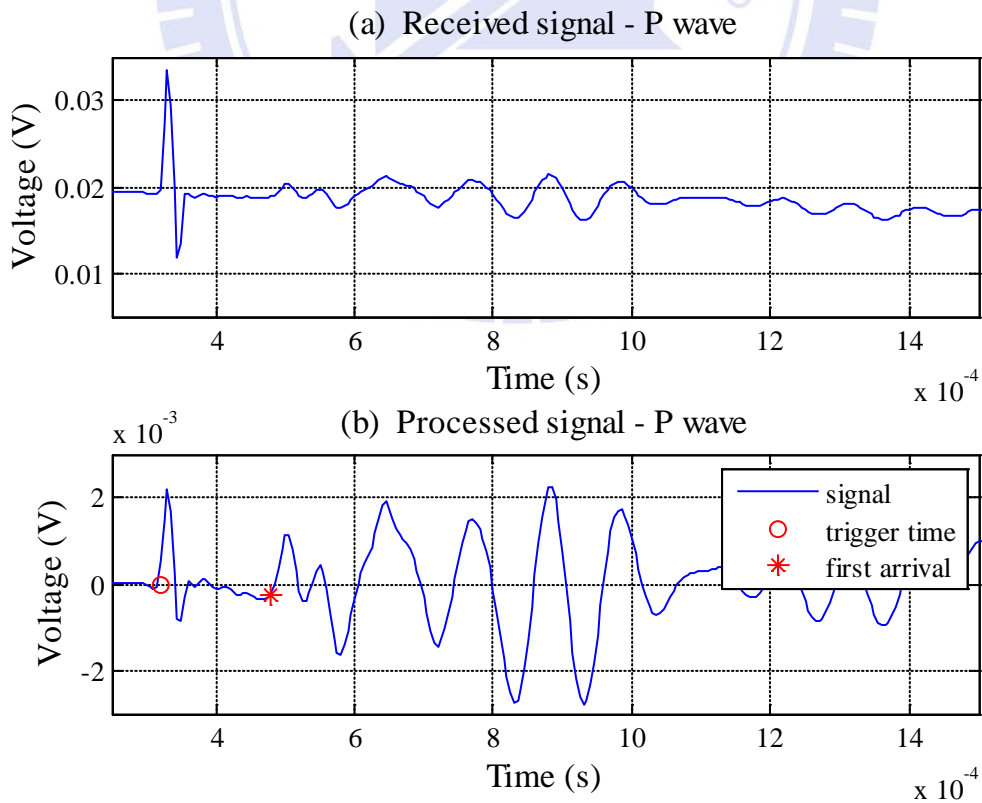


圖 3.46 壓縮波波形與波傳時間挑選

依據上述方法分析之試驗結果，將分為以下幾點進行探討：

1. 繪製不同量測方向的波速分析結果，並比較其差異程度(異向性程度)。
2. 探討垂直向與水平向彈性波速之間是否存在關聯性。
3. 將試驗結果所得之 $V_{p,v}$ 、 $V_{p,h}$ 、 $V_{s,v}$ 、 $V_{s,h}$ 、 $V_{p,45^\circ}$ ，利用 Auld (1990) 提出之式(2.22) - (2.26)以及 Anderson (1961)提出之式(2.29)、(2.31)及(2.32)，求得異向性因子 φ 、 η 、 ζ ，並探討夯實土壤之異向性程度。



第四章 試驗結果與討論

本章將針對試驗結果進行分析，從不同量測角度討論彈性波速之變化，且依據 Anderson (1961)所提出之異向性關係式求出芬實湖山砂土的異向性因子，以探討其異向性程度與彈性波速行為。

4.1 彈性波速分析

各含水量之芬實土壤試體，不同量測角度(分別為垂直向、與對稱軸夾三十度角、與對稱軸夾四十五度角、水平向且壓電陶瓷片垂直橫向等向面、水平向且壓電陶瓷片平行橫向等向面)之波速如表 4.1 所列。實驗結果，壓縮波速與剪力波速之比值大部分約為 1.8 ~ 3.8，少部分不在此範圍，應為實驗誤差所致。將壓縮波速與剪力波速比值以 Udias (1999)之理論換算可得柏松比約為 0.3 ~ 0.45 之間，大致符合土壤材料之範圍。

表 4.1 不同量測角度之壓縮波速與剪力波速

ω (%)	ρ_d (g/cm ³)	$V_{p,v}$ (m/s)	$V_{p,30^\circ}$ (m/s)	$V_{p,45^\circ}$ (m/s)	$V_{p,hv}$ (m/s)	$V_{p,hh}$ (m/s)	$V_{s,v}$ (m/s)	$V_{s,30^\circ}$ (m/s)	$V_{s,45^\circ}$ (m/s)	$V_{s,hv}$ (m/s)	$V_{s,hh}$ (m/s)
7.06	1.838	595	598	584	598	602	335	317	405	272	422
8.25	1.839	592	596	602	593	615	249	252	254	257	262
9.06	1.846	594	622	577	597	604	307	395	326	325	326
10.22	1.857	605	618	611	604	604	292	330	303	287	315
11.64	1.869	642	645	642	609	609	256	219	293	294	351
12.08	1.876	674	664	685	587	586	284	381	306	216	302
13.89	1.897	488	467	530	533	523	194	123	123	93	107

夯實湖山砂土彈性波速與重量含水量之關係如圖 4.1 所示，圖中顯示各量測方向的彈性波速隨著重量含水量的改變，會有不同的情況發生，例如在重量含水量 9.06 % 時，剪力波速高低排序為 $V_{s,30^\circ} > V_{s,45^\circ} = V_{s,hh} > V_{s,hv} > V_{s,v}$ ，壓縮波速高低排序為 $V_{p,30^\circ} > V_{p,hh} > V_{p,hv} > V_{p,v} > V_{p,45^\circ}$ ；而在鄰近的重量含水量 10.22 % 時，剪力波速高低排序為 $V_{s,30^\circ} > V_{s,hh} > V_{s,45^\circ} > V_{s,v} > V_{s,hv}$ ，壓縮波速高低排序為 $V_{p,30^\circ} > V_{p,45^\circ} > V_{p,v} > V_{p,hv} = V_{p,hh}$ 。而各方向之間的波速並無明顯關聯性。

在夯實乾側低含水量(7.06 % ~ 10.22 %)時，垂直向與水平向之壓縮波速差異較小，而在最佳含水量附近(11.64 % ~ 13.89 %)時，垂直向與水平向之壓縮波速差異才增大；剪力波速雖亦有此現象，但在含水量 7.06 % 時垂直向與水平向之波速差異卻增大。

在夯實曲線乾側，重量含水量為 7.06 % ~ 10.22 % 之區間，各量測方向間的壓縮波速差異不大，當趨近最佳含水量時，垂直向、夾 30° 角以及夾 45° 角之壓縮波速會逐漸上升；而水平向之 $V_{p,hv}$ 與 $V_{p,hh}$ 趨近最佳含水量時波速則會逐漸下降。

不同於壓縮波，剪力波速無論在夯實曲線乾側或溼側，各量測方向間的波速皆有較大的差異。在夯實乾側含水量為 8.25 % ~ 12.08 % 之間， $V_{s,v}$ 、 $V_{s,45^\circ}$ 、 $V_{s,hv}$ 以及 $V_{s,hh}$ 會隨含水量降低而有波速先上升後下降之趨勢，且在含水量 7.06 % 時 $V_{s,v}$ 、 $V_{s,45^\circ}$ 以及 $V_{s,hh}$ 等剪力波速明顯提升。

由整體壓縮波速以及剪力波速之行為可發現，過了最佳含水量 13.30 % 後，夯實曲線溼側含水量為 13.89 % 時之壓縮波速與剪力波速皆明顯下降，顯示波速受含水量之影響甚大。

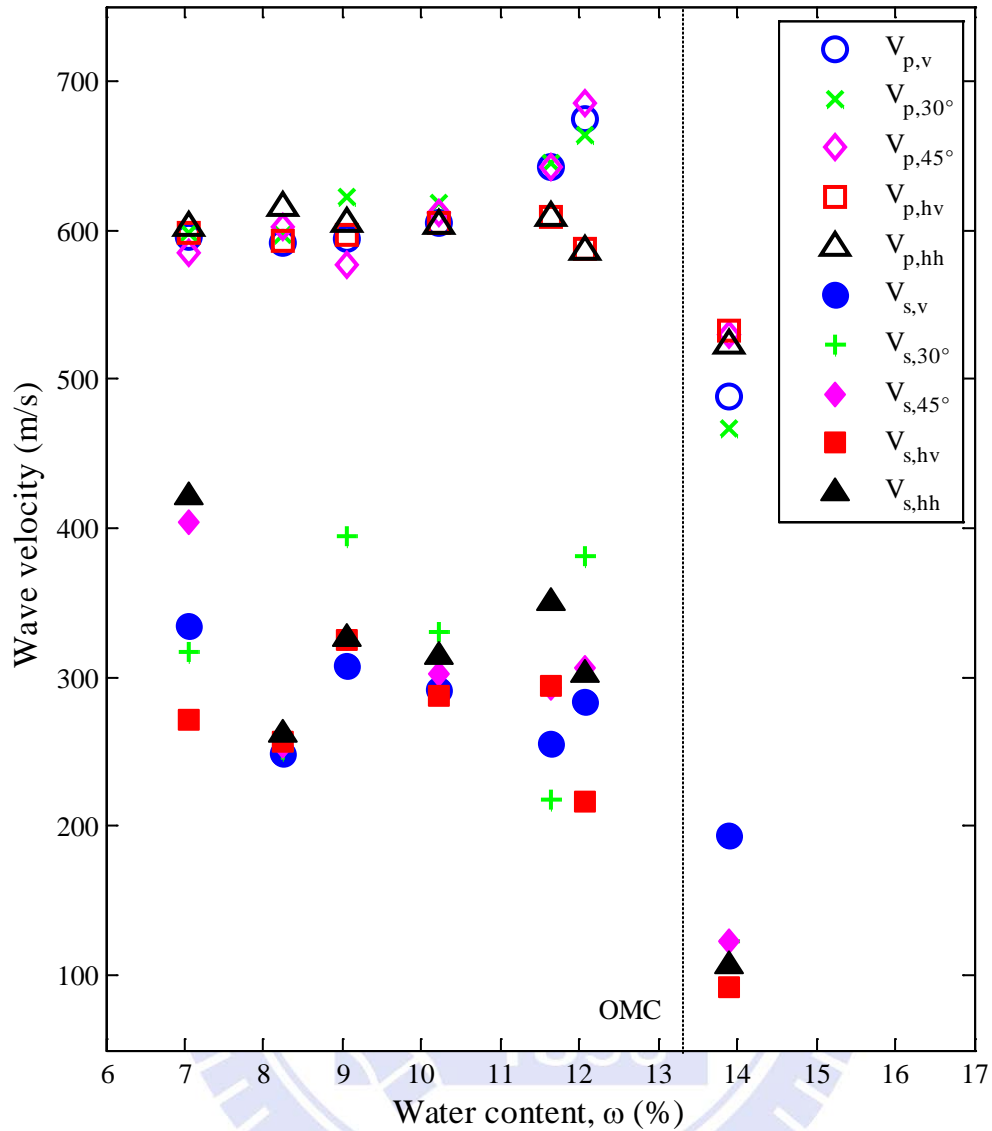


圖 4.1 不同重量含水量之芬實湖山砂土彈性波速

4.2 剪力波速與飽合度

觀察圖 4.2 中垂直向剪力波速之行為，飽和度由 90.33 % 降低至 53.93 % 時剪力波速有逐漸升高之趨勢，在飽和度 48.45 % 時波速降低，在相對低飽和度 41.48 % 時波速又大幅提升，此一剪力波速隨飽和度(或含水量)變化之行為與 Clariá and Rinaldi (2007) 之剪力波速實驗結果(參考圖 2.7、圖 4.3)相符合。

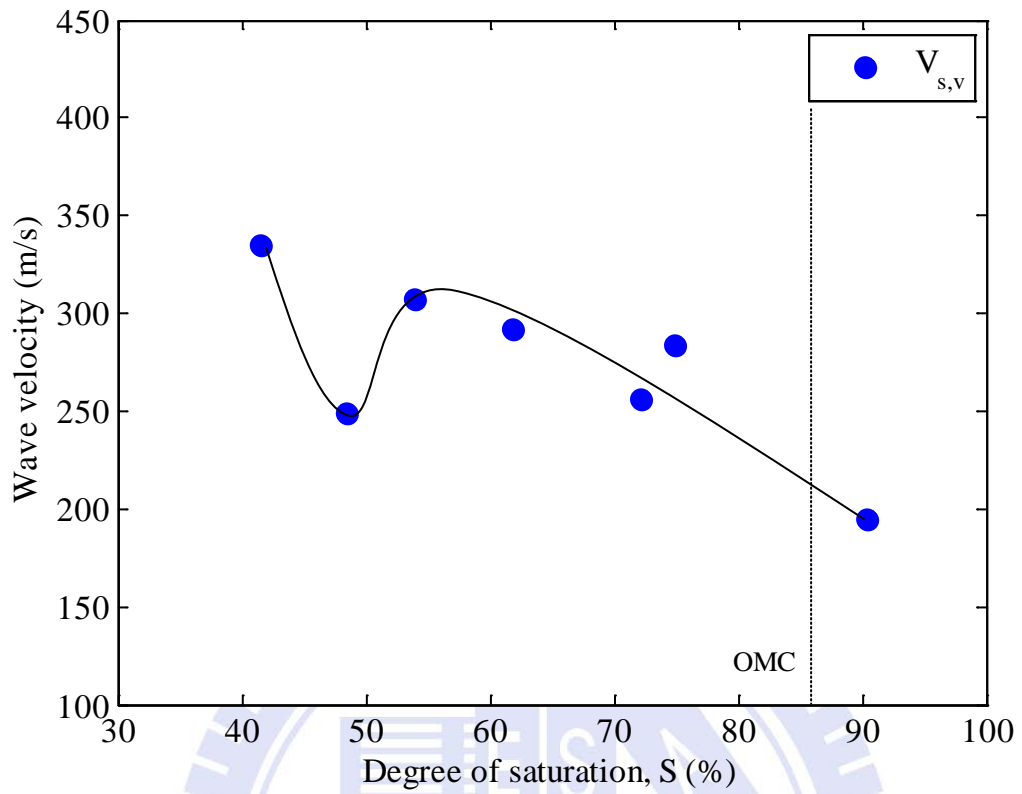


圖 4.2 芬實湖山砂土垂直向剪力波速與飽和度

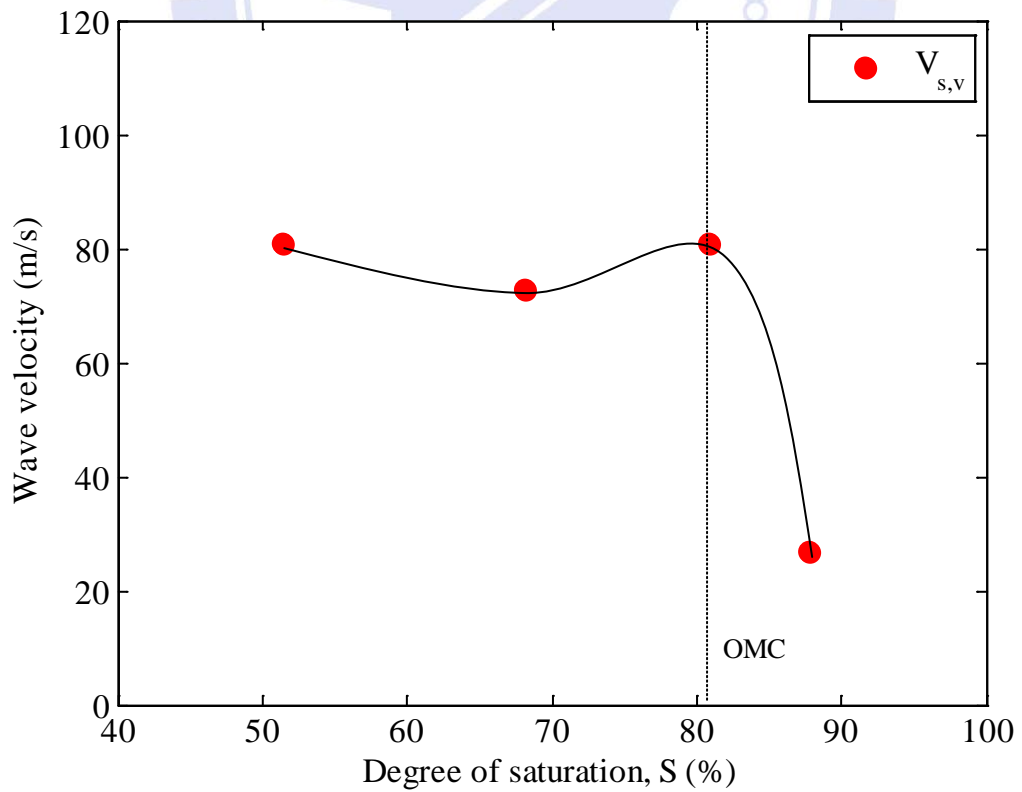


圖 4.3 無圍壓之土壤剪力波速與飽和度(重繪自 Clariá and Rinaldi(2007))

而柳儒錚(2010)以夯實湖山砂土進行垂直向剪力波速量測，在不同飽和度時所得的剪力波速如圖 4.4 所示，柳儒錚(2010)依此試驗結果提出飽和度與剪力波速關係式(2.5)。

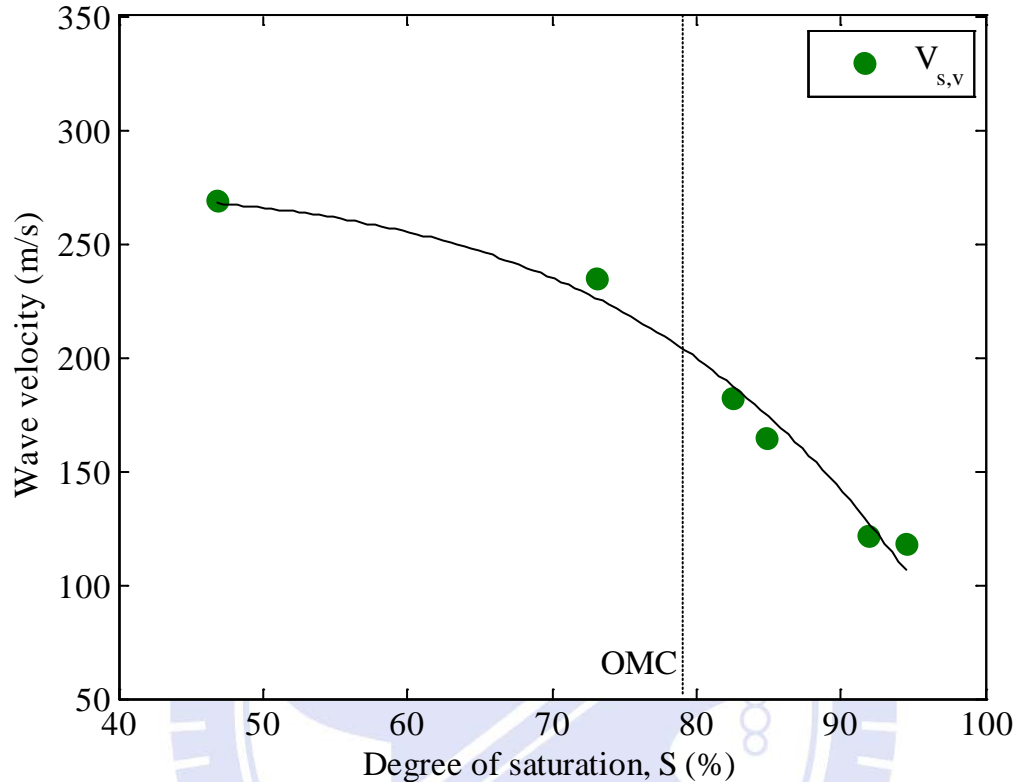


圖 4.4 夯實湖山砂土剪力波速與飽和度(重繪自柳儒錚(2010))

由圖 4.4 中可看到剪力波速隨飽和度之降低而增加，在夯實曲線乾側並無波速下降後又升高之行為，應是柳儒錚(2010)在飽和度 50% ~ 70% 區間的試驗資料樣本不足而遺漏夯實乾側波速下降之資料點，或其試驗土樣之特性所致。因此，柳儒錚(2010)所提出之飽和度與剪力波速關係式並不適合用於描述所有夯實土壤之剪力波速行為。

4.3 夯實土壤異向性程度與彈性波速行為

為進一步瞭解不同含水量之夯實湖山砂土的異向性程度，將分析所得各量測方向之彈性波速 $V_{p,hv}$ 、 $V_{p,v}$ 、 $V_{s,v}$ 、 $V_{s,hv}$ 、 $V_{p,45^\circ}$ 分別代入式(2.22)、(2.23)、(2.24)、(2.25)、(2.26)，可求得夯實湖山砂土之彈性常數如表 4.2 所列。

表 4.2 夯實湖山砂土之彈性常數表

Water content (%)	ρ_m (g/cm ³)	C_{11} (t/m-s ²)	C_{33} (t/m-s ²)	C_{44} (t/m-s ²)	C_{66} (t/m-s ²)	C_{13} (t/m-s ²)
7.06	1.968	703068	696289	220444	145574	202264
8.25	1.990	699028	696727	123079	131004	497053
9.06	2.014	717031	710183	190325	213323	245827
10.22	2.046	747703	748113	174379	168714	433488
11.65	2.087	773487	859023	136810	180931	630392
12.08	2.102	724047	955503	169300	98388	784699
13.89	2.160	613040	513815	81460	18592	482825

將夯實湖山砂土之彈性常數代入 Anderson (1961) 提出之關係式(2.29)、(2.31)與(2.32)，求出夯實湖山砂土的異向性因子 ϕ 、 η 、 ξ (如表 4.3 所列)，異相性因子可顯示出土壤的非均向程度，當異相性因子皆為 1 時，表示該土壤為均向性材料。

表 4.3 夯實湖山砂土之異向性因子

Water content (%)	Degree of saturation (%)	ϕ	ξ	η
7.06	41.48	0.990358	0.660368	1.296223
8.25	48.45	0.996709	1.064383	0.911107
9.06	53.93	0.990449	1.120834	1.368367
10.22	61.91	1.000549	0.967516	0.920316
11.65	72.15	1.110585	1.322503	0.792949
12.08	74.84	1.319670	0.581147	0.491203
13.89	90.33	0.838143	0.228233	0.932261

異向性因子與重量含水量之關係如圖 4.5 所示，由圖中可觀察到，在夯實曲線乾側(7.06 % ~ 10.22 %)時異向性因子 ϕ 相當接近 1，而在最佳含水量附近(11.65 % ~ 13.89 %)時 ϕ 值則較為偏離 1，代表異相性程度較乾側時為高。異向性因子 ξ 在最佳含水量附近以及 7.06 % 時也較為偏離 1。異向性因子 η 包含有剪力波速與壓縮波速之行為，變動程度則較大。

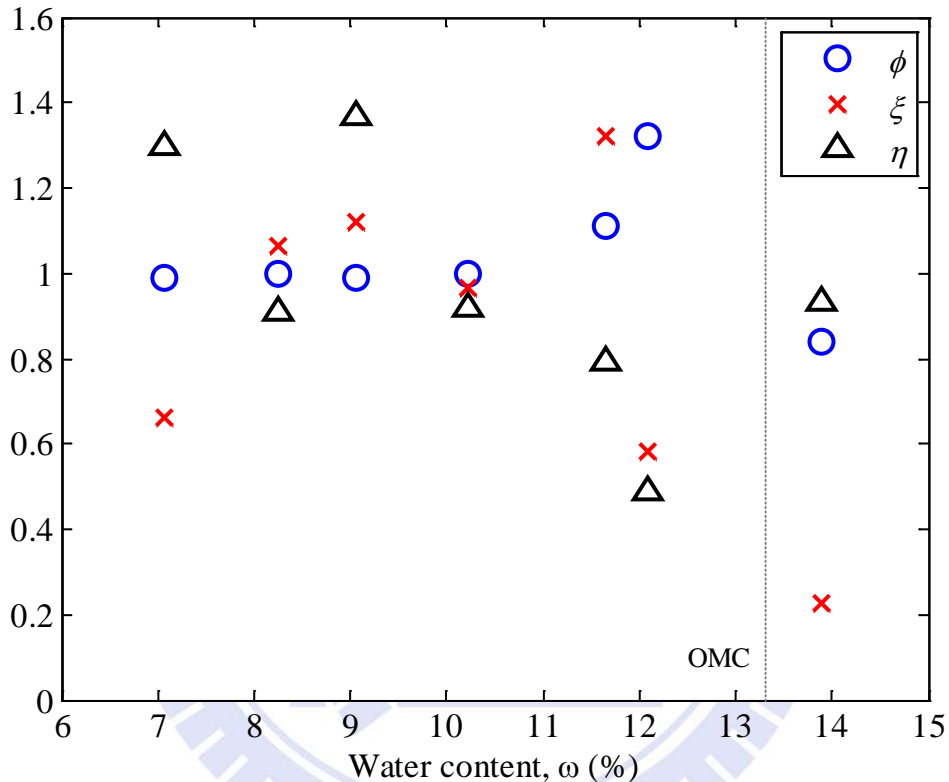


圖 4.5 異向性因子與重量含水量

此外，觀察圖 4.1 可發現一項較為特殊的行為，水平向之剪力波速 $V_{s,hv}$ 與 $V_{s,hh}$ 雖然傳遞路徑相同，但因剪力波的位移震盪方向不同而使得兩者間量測到的波速會有所差異；而水平向之壓縮波速 $V_{p,hv}$ 與 $V_{p,hh}$ 在傳遞路徑以及位移震盪方向皆相同，因此可以觀察到兩者間量測到的波速極為相近。造成此差異之原因，應是受 Bender-extender element 本身尺寸造成的影響，於未來的應用中，應注意 Bender-extender element 尺寸對於不同方向量測之剪力波速可能造成的影響。

第五章 結論與建議

本研究透過室內壓縮波速與剪力波速量測來探討夯實土壤之異向性行為，由試驗結果得出結論與建議如下所述。

5.1 結論

- 1. 室內波速量測系統建立：**本研究將柳儒錚(2010)之剪力波速量測系統進行改良，製作可一併量測壓縮波速與剪力波速之 Bender-extender element 壓電感測元件，並提升資料擷取系統取樣率；改善雜訊干擾與增加感測元件觸發能量，提高訊雜比；將僅能量測單一角度之硬體設備改良，使之增加為多角度量測，令波速量測系統更為便利。
- 2. 剪力波速與飽和度：**在夯實曲線乾側，當飽和度(或含水量)逐漸降低時，垂直於橫向等向面的剪力波速會有升高、降低再提升之情形，此行為與 Clariá and Rinaldi (2007)之剪力波速實驗結果相符合。而柳儒錚(2010)的試驗資料可能因樣本不足或受試驗土壤之特性影響，在夯實曲線乾側剪力波速並無上述之行為，因此柳儒錚(2010)提出之飽和度與剪力波速關係式並不適合用來描述所有夯實土壤之剪力波速行為。
- 3. 夯實土壤異向性程度與彈性波速行為：**以波速換算異向性因子來探討夯實湖山砂土之異向性程度，可觀察到隨含水量之上升，異向性因子 φ 與 ξ 之值越偏離 1，代表高含水量時夯實土壤之異相性程度較高。而異向性因子 η 變動程度則較大。另外，在具有異向性之夯實土壤中，受到傳感器尺寸效應，剪力波的位移震盪方向不同，會導致兩震盪方向間的波速有所差異；而壓縮波僅一種位移震盪方向，所以無此情形。

5.2 建議

1. 本研究以室內實驗結果來探討夯實土壤之彈性波速行為與異向性程度，建議可依據試驗結果合理假設土壤材料參數，以理論計算或數值模擬之方式進行表面波震測之分析，並探討橫向等向性材料特性對表面波震測結果之影響。
2. 依據本論文及文獻之室內試驗結果，在夯實曲線乾側，隨著飽和度逐漸降低，剪力波速會有升高、下降再提升之行為，建議可進一步探討造成剪力波速跳動的原因，以利未來建構可良好描述之數學模型。
3. 本研究試驗採用 Bender-extender element 來量測夯實土壤之壓縮波速與剪力波速，在較高含水量(或飽和度)時，因震波強度降低導致收錄震動訊號困難，尤以剪力波受含水量影響甚大，雖提升 Bender-extender element 觸發震波之能量與縮短土壤試體長度，改善效果仍有限，在含水量約 14 % 之夯實土壤試體已無法有效量測到震動訊號。為使在較高含水量的情況下，亦能觸發與收錄良好之剪力波震動訊號，以提升收錄訊號之品質及提高剪力波速分析之正確性，此一問題背後之原因值得進一步探討，以期獲得改善之方法。

參考文獻

- Anderson, D.L. (1961). "Elastic wave propagation in layered anisotropic media," *Journal of geophysical research*, Vol. 66, No. 9, pp. 2953-2963.
- ASTM Standard D421–85 (2007). "Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants," ASTM International.
- ASTM Standard D698–12 (2012). "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)," ASTM International.
- ASTM Standard D854–10 (2010). "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer," ASTM International.
- ASTM Standard D2487–11 (2011). "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)," ASTM International.
- ASTM Standard D4318–10 (2010). "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils," ASTM International.
- Auld, B.A. (1990). *Acoustic fields and waves in solids*, 2nd edition, R.E. Krieger, Florida, Vol. 2, pp. 396-399.
- Bekhterev, P. (1926). "Analytic investigation of the generalized Hooke's law," *Zh. Russk. Fiz.-khim, Obschestva*, Vol. 58, No. 3, pp. 415-446.
- Bolt, B.A. (1976). *Nuclear explosions and earthquakes: The Parted Veil*, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Brignoli, E.G.M., Gotti, M., and Stokoe, K. H., II. (1996). "Measurement of Shear Waves in Laboratory Specimens by Means of Piezoelectric Transducers," *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 19, No. 4, pp. 384–397.

- Cho, G.C., and Santamarina, J.C. (2001). “Unsaturated particulate materials—particle-level studies,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 1, pp. 84–96.
- Clariá, J.J., and Rinaldi, V.A. (2007). “Shear wave velocity of a compacted clayey silt,” *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 30, No. 5.
- Das, B.M., and Ramana, G.V. (2011). *Principles of Soil Dynamics*, 2nd edition, Cengage Learning, Connecticut, USA.
- Leong, E.C., Cahyadi, J., and Rahardjo, H. (2009). “Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender–extender elements,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.46: 792–812.
- 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.
- Kawaguchi, T., Mitachi, T., and Shibuya, S. (2001). “Evaluation of Shear Wave Travel Time in Laboratory Bender Element Test,” *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Vol.1, pp. 155-158.
- Kim, D.S., and Park, H.C. (1999). “Evaluation of ground densification using spectral analysis of surface waves(SASW) and resonant column(RC) tests,” *Canadian 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 Dynamic and Earthquake Engineering*, Vol. 21, pp. 39–46.
- Love, A. E. H. (1927). *A treatise on the mathematical theory of elasticity*, 4th ed., Dover Publications, New York, 1944.
- Rix, G.J. (1988). “Experimental Study of Factors Affecting the Spectral Analysis of Surface Waves Method”, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.

- Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001). *Soils and Waves—Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, John Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 217–299.
- Stokoe, K.H. II, Joh, S.H., and Woods, R. D., (2004), “Some contributions of in situ measurements to solving geotechnical engineering problems”, *Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, Viana da Fonseca & Mayne(eds.), Millpress, Rotterdam, pp. 97–132.
- Udías, A. (1999). *Principles of seismology*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 阮政瑋(2010)，「非均質且橫向等向性介質之Rayleigh波傳問題之研究」，碩士論文，國立聯合大學土木與防災工程學系。
- 林俊宏(2005)，「Pseudo-Section概念於表面波震測應用之數值模擬探討」，碩士論文，國立交通大學土木工程學系。
- 林雅婷(2007)，「非均質且橫向等向性介質波傳問題之研究」，碩士論文，國立聯合大學土木與防災工程學系。
- 柳儒錚(2010)，「碾壓土壤剪力波速之行為探討」，碩士論文，國立交通大學土木工程學系。