

國立交通大學  
土木工程學系碩士班

碩士論文

表面波震測於含改良柱體地層之改良成效評估

Assessment of Ground Improvement with Improved  
Columns by Surface Wave Testing

研究生：戴永政

指導教授：林志平 博士

中華民國九十八年七月

# 表面波震測於含改良柱體地層之改良成效評估

Assessment of Ground Improvement with Improved Columns by Surface  
Wave Testing

研究生：戴永政

Student: Yung-Zheng Dai

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 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

# 表面波震測於含改良柱體地層之改良成效評估

學生：戴永政

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

軟弱地盤經過地盤改良後可達增加土壤剪力強度、承載力等目的，但在檢核地盤改良成效時，於地中形成改良柱體之場址會突顯既有檢核方法如標準貫入試驗、鑽探取樣與室內試驗等取樣範圍小、費時且昂貴又不具代表性的缺點，因此尋求可反應整體改良效果之檢核方法有其必要性。本研究嘗試以表面波震測法取樣範圍大、快速且經濟的優點作為檢核方法，以輔助並提供更具代表性的檢核資訊。

表面波震測法取得剪力波速剖面，透過剪力波速能確實的反應土體勁度及強度的特性，本研究探討表面波震測在異質性地層之均質化反應，並透過通過與未通過改良柱體之測線，探討表面波震測之側向取樣空間；在不同改良率之工程案例，比較改良前後表面波震測剪力波速之提升率與場址處之工程性質(如改良率、SPT-N 值、複合剪力強度等)，以期找出此提升率所能提供之工程訊息。

關鍵字：表面波震測、剪力波速、地盤改良

# Assessment of Ground Improvement with Improved Columns by Surface Wave Testing

Student : Yung-Zheng Dai

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract

Soft ground can be improved to increase the shear strength and bearing capacity by methods such as jet grouting and stone column which may result in heterogeneous ground with improved columns. Experimental methods (Standard Penetration Test, Sampling, Laboratory testing, etc.) used to assess such ground improvement are subjected to several limitations such as small sampling volume, time-consuming, and cost ineffectiveness. Current homogenization equations based on improvement ratio may not be representative. The objective of this study is to investigate the seismic surface wave method as a non-invasive and direct method for assessing the overall quality of the ground improvement, which is characterized by large sampling volume, efficiency, and cost effectiveness.

The surface wave test is can be used to determine the shear-wave velocity depth profile which reflects the stiffness and strength of the geotechnical materials. This study investigated the homogenization of surface wave testing in heterogeneous improved ground with improved columns. The lateral sampling space of the surface wave testing was also investigated by field testings of different survey line locations relative to the improved columns. From case studies with different improvement ratio, the difference in shear wave velocity before and after ground improvement is compared with various site characteristics such as improvement rate, SPT-N, and the complex shear strength. The engineering information that can be extracted from the improvement rate of shear wave velocity obtained by surface wave testing is discussed.

*Key words* : Surface wave method, shear wave velocity, ground improvement

## 誌謝

本論文得以順利完成，首要感謝吾師 林志平教授的指導與提攜，讓我不論在學業或為人處事上都有莫大的成長並且更了解如何發現問題，解決問題，浩蕩師恩，在此獻上萬分謝意。

在學期間承蒙 方永壽教授、潘以文教授、廖志中教授、黃安斌教授與 單信瑜教授在課業、研究與生涯規劃上的指導與建議，使得學生更有信心與能力面對未來的挑戰，在此致上萬分感謝。

論文口試期間，承蒙成功大學土木工程學系 李德河教授、中興大學土木工程學系 蘇苗彬教授、成功大學資源工程學系 余騰鐸教授與三力工程技術顧問公司董事長 謝旭昇博士對於本論文提供諸多寶貴意見與建議，使得本論文更臻完善，在此由衷的感謝。

論文研究過程中特別感謝簡志榮技師提供兩處地盤改良場址做為研究課題，並從過程中學習到更多書本上所沒有的，讓我獲益匪淺，感謝余敏隆經理在現地試驗中給於我很多的幫助。在研究所求學期間幸蒙志忠、俊宏、育嘉、文欽、岳勳、瑋晉與浚昇等學長在論文與專業知識提供意見與協助，其中特別感謝俊宏學長不遺餘力的指導論文試驗與寫作；同時感謝研究室成員智棟、哲毅在生活上的照料與幫忙以及學弟如錚、子奕學妹玉紋在論文研究上與試驗上的協助；此

外感謝大地組的同學們佩錚、俊文、炳宏、奕蓁、聖峯、意婷、瑞陽、  
彥琅、柏碩與曾經幫助過我的人，在此一併致上最深的謝意。

最後感謝我的父母對我的支持與栽培，哥哥與弟弟平時給我的鼓  
勵，讓我可以無後顧之憂順利完成研究所的學業，將此論文獻給所有  
支持我、關心我的家人與朋友們，願你們與我共同分享這份成果及喜  
悅。



戴永政 謹誌 2009 年 7 月

# 目次

中文摘要.....	I
<b>Abstract</b> .....	II
致謝.....	III
目次.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XI
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.....	4
2.1 地盤改良工法簡介.....	4
2.1.1 地盤改良之目的.....	4
2.1.2 地盤改良工法之分類.....	5
2.1.3 地盤改良之檢核方法與設計原則.....	13
2.1.4 改良成效檢核之問題探討.....	17
2.2 土壤剪力波特性和於地盤改良的應用.....	19
2.2.1 土壤動態剪力波特性和.....	19
2.2.2 剪力波法於量測方法.....	22

2.3 表面波基本波傳原理 .....	31
2.3.1 多頻道表面波施測法 .....	34
2.3.2 多頻道表面波分析法-多頻道波場轉換法 .....	35
2.4 剪力波於地盤改良成效的應用 .....	40
第三章 研究方法 .....	43
3.1 試驗規劃與流程說明 .....	45
3.2 試驗儀器簡介 .....	46
3.3 表面波於地盤改良成效應用-案例施作 .....	48
3.2.1 高壓灌漿改良場址 .....	48
3.2.2 擠壓砂樁改良場址 .....	61
第四章 試驗結果與討論 .....	68
4.1 高壓噴射灌漿改良場址試驗結果說明 .....	68
4.2 高壓噴射灌漿改良結果探討 .....	77
4.3 擠壓砂樁改良場址試驗結果說明 .....	89
第五章 結論與建議 .....	102
5.1 結論 .....	102
5.2 建議 .....	104
參考文獻 .....	105

## 圖目錄

圖 2.1 Selection flow of deep ground improvement technique. ....	8
圖 2.2 固結體鑽孔取樣位置示意圖 .....	19
圖 2.3 土壤之應力應變行為.....	21
圖 2.4 骨幹曲線.....	21
圖 2.5 剪力模數遞減曲線.....	22
圖 2.6 剪力波元件試驗.....	24
圖 2.7 共振柱型式示意圖.....	25
圖 2.8 常見之現地剪力波量測方法 .....	28
圖 2.9 柏松比與波速度之關係.....	29
圖 2.10 表面波震測技術流程圖.....	30
圖 2.11 有效之波速度範圍.....	37
圖 2.12 波場轉換分析法之 $f$ - $v$ 頻譜 .....	38
圖 2.13 波場轉換法(MWTSW)試驗配置與分析流程.....	38
圖 3.1 研究流程圖 .....	44
圖 3.2 表面波震測儀器 .....	48
圖 3.3 高壓噴射工法施工順序圖 .....	49
圖 3.4 基地位置圖 .....	50
圖 3.5 鑽孔平面位置圖 .....	51

圖 3.6 BH01_BH02_BH03 地層剖面圖.....	52
圖 3.7 BH04_BH05_BH06 剖面.....	53
圖 3.8 改良樁成效檢驗取樣位置圖.....	56
圖 3.9 地盤改良樁改位置及檢核位置平面圖.....	57
圖 3.10 表面波震測與跨孔震測試驗配置圖.....	60
圖 3.11 工址相關位置.....	63
圖 3.12 試驗區域及附近既有鑽孔位置.....	63
圖 3.13 試驗區附近既有鑽探柱狀圖.....	65
圖 3.14 擠壓砂樁試驗區域A配置圖.....	66
圖 3.15 擠壓砂樁試驗區域B配置圖.....	67
圖 3.16 擠壓砂樁跨孔震測現場試驗配置圖.....	67
圖 4.1 地盤改良前後表面波震測L1 及L2 測線t-x域波場資料.....	69
圖 4.2 地盤改良前後表面波震測L3 及L4 測線t-x域波場資料.....	69
圖 4.3 地盤改良前後表面波震測L1 測線f-v頻譜.....	71
圖 4.4 地盤改良前後表面波震測L2 測線f-v頻譜.....	71
圖 4.5 地盤改良前後表面波震測L3 測線f-v幅譜.....	72
圖 4.6 地盤改良前後表面波震測L4 測線f-v頻譜.....	72
圖 4.7 改良前後剪力波速剖面圖.....	73
圖 4.8 C1-C2 跨孔震測孔內歷時.....	74

圖 4.9 C3-C2 跨孔震測孔內歷時.....	75
圖 4.10 C4-C6 跨孔震測孔內歷時.....	75
圖 4.11 C5-C6 跨孔震測孔內歷時.....	76
圖 4.12 跨孔震測剪力波波速剖面 .....	77
圖 4.13 高壓噴射灌漿改良場址表面波震測頻散曲線比較 .....	78
圖 4.14 高壓噴射灌漿改良場址表面波震測相位速度-波長比較.....	78
圖 4.15 高壓噴射灌漿改良表面波震測波長-改良率 .....	79
圖 4.16 高壓噴射灌漿改良表面波震測剪力波波速與改良率圖 .....	80
圖 4.17 高壓噴射改良場址深度-剪力模數與改良率 .....	81
圖 4.18 高壓噴射灌漿改良場址檢核點選取比較區域 .....	82
圖 4.19 高壓噴射改良場址SPT-N改良前後結果與改良率 .....	84
圖 4.20 高壓噴射灌漿改良複合土層剪力強度-深度與其改良率.....	87
圖 4.21 擠壓砂樁改良後表面波震測L1 及L2 測線t-x域波場資料...90	
圖 4.22 擠壓砂樁改良後表面波震測L1 及L2 測線f-v域波場資料與頻 散曲線.....	91
圖 4.23 擠壓砂樁改良後表面波震測L4 及L5 測線時間-空間域波場資 料.....	92
圖 4.24 擠壓砂樁改良後表面波震測L4 及L5 測線f-v域波場資料與頻 散曲線.....	93

圖 4.25 擠壓砂樁改良後 3 個月表面波震測 L1 及 L2 測線 t-x 域波場資料.....	94
圖 4.26 擠壓砂樁改良後 3 個月表面波震測 L1 及 L2 測線 f-v 域波場資料與頻散曲線 .....	95
圖 4.27 擠壓砂樁改良各表面波測線反算結果 .....	96
圖 4.28 擠壓砂樁改良前跨孔震測震波歷時 .....	97
圖 4.29 擠壓砂樁改良後跨孔震測震波歷時 .....	98
圖 4.30 擠壓砂樁跨孔震測剪力波波速剖面 .....	99
圖 4.31 擠壓砂樁改良場址表面波震測相位速度-波長比較.....	100
圖 4.32 擠壓砂樁震波探測結果 .....	101



## 表目錄

表 2. 1 Applicability of ground improvement for different soil types.....	8
表 2. 2 地盤改良工法分類(I) .....	9
表 2. 3 地盤改良技術分類(II) .....	10
表 2. 4 地盤改良工法分類(3).....	12
表 2. 5 台灣常用之檢核方法 .....	15
表 2. 6 攪拌工法之成效檢核方法 .....	16
表 3. 1 土層簡化參數表 .....	54
表 3. 2 跨孔震測配置表 .....	59
表 3. 3 試驗區域簡化地層參數(PA1~PA4).....	64
表 4. 1 高壓噴射灌漿改良場址前後SPT-N值比較 .....	83
表 4. 2 高壓噴射灌漿改良樁體單壓試驗結果 .....	85

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

台灣地狹人稠、土地資源有限，又因地質多變，因此面臨承载力不足與壓縮量過大之軟弱地盤的機會漸增，地盤改良技術成為大地工程師處理問題的利器之一。地盤改良之工法隨著目的的不同而有所不同，一般而言，主要是為提高現地土壤之強度與勁度，或控制現地土壤的透水性等目的進行改良。改良工法因場址的特性而不同可有不同選擇，改良完成後之成效檢核方式也隨之有所差異，基本上，改良效果之檢核以針對改良目的進行現場或室內檢驗為主，以符合設計要求為標的。

在地盤改良方法中以增加土壤剪力強度以及承载力為目標之改良方法如高壓噴射攪拌工法、機械攪拌工法、擠壓砂樁等工法，施作後將會在地中形成改良柱體，該柱體的存在造成改良完成之土體具有高度的不均質性，然而，就目的而言，以改良目地為主的檢核方法卻無法有效的代表整體改良效果。

近年來表面波震測法技術研究日趨成熟，透過對其所得之剪力波速剖面之解析，以成功應用於地層比對、鋪面厚度檢測、土壤改良成效檢測、地下孔洞探測、液化潛能分析以及隧道襯砌與被填灌漿之品

質管制等土工與環境問題解決上。表面波震測法係利用人為方式在地表產生表面波，於地表傳遞時，因在不同波長下之影響深度不同，可將地層不同深度內之地層物性反應於波速上。表面波震測的施做是先於試驗場址佈設受波器後，製造人為震原產生擾動，將此地表垂直位移訊號收錄後，對其進行訊號分析而獲得面波頻散曲線，再透過反算技巧對此頻散曲線進行反算分析便可得到現地一維地層剪力波速剖面。故表面波施作上不需鑽孔破壞地表土層，具有容易、快速又經濟的優點，且其最大特點在於所得為測線下方土層之綜合表現，其取樣體積遠大於傳統之試驗方法，因此更能代表改良土體整體之改良效果，具有應用地盤改良成效檢驗之潛力。

然而，表面波震測所得之剪力波速的提升對於地盤改良成效之意義以及該如何量化應用此剪力波速成果於改良成效之中尚未有明確之方法指出，本研究將透過進行案例分析之方法，對此問題進行初步探討。

## 1.2 研究目的

能在地中形成改良樁體之改良工法，不但能增加地盤承载力也對軟弱土壤具有加勁的效果，也能降低液化的潛能，但是此類型的工法施工品質管控不易，突顯了成效檢驗的重要，而目前常用的檢驗方式

不外乎鑽孔取樣與現場試驗等直接檢驗的方式，但卻有著取樣空間小不足以代表整體改良效果，大量檢驗又不經濟且費時費工的缺點存在。

本研究透過表面波震測法取得地層剪力波波速剖面，又透過剪力波波速能確實的反應土體勁度及強度的特性，取得更具代表性之改良成效。因此本研究目的在於初步利用案例分析，以表面波震測法取得改良土體前後之剪力波波速差異，建立其與地盤改良設計參數之關係，例如單壓強度、標準貫入試驗、複合剪力強度、設計改良率等，期望透過表面波震測法的優點提供另一種更具代表性地盤改良成效檢核的工具。



## 第二章 文獻回顧

### 2.1 地盤改良工法簡介

地盤改良技術的發展就是為解決在土木與建築工程中遭遇到不良之基礎地層或軟弱土壤的情況 (陳逸駿等, 2003), 改良目的在於提高現地土壤強度與勁度, 以及控制現地土壤的透水性等, 為達改良目的所能使用的工法眾多, 其原理及施工方法各有不同, 因此其成效檢核方法也有所差異。本節介紹地盤改良目的、施做工法分類以及現有檢核的方法。

#### 2.1.1 地盤改良之目的

地盤改良的目的其實就在於提高土壤的緊密性與剪力強度, 再達到增加穩定性、減少壓縮性以及影響滲流, 進而控制地下水流、增加壓密速率及阻水 (Moseley & Kirsch, 2004)。一般而言, 地盤改良之目的可分成：

- (1) 改善剪力特性(防止剪力破壞, 防止剪力變形, 減輕土壓力)。
- (2) 改善壓縮性(防止壓密沉陷等)。
- (3) 改善透水性(防止漏水, 遮水等)。
- (4) 改善動態特性(防止液化、減輕震動等)。

地盤對剪力破壞與土壓力之穩定性是憑藉於土壤之剪力強度，因此為達成改善剪力特性基本上應增加土壤之剪力強度，再者以改善土壤壓縮性為目的是在於防止壓密沉陷，因此須採用某些適當的方法促使地盤成不壓縮性，或加速壓密作用進行。改善土壤透水性為目的是在於處理土壤內水之移動所造成的問題(湧水、砂湧、管湧等)，其處置方法是如如何促使地盤成不透水性以及如何減輕水壓力之作用。最後以改善土壤動態性質為目的。鬆散砂質地盤受地震作用易形成液化現象，同時地震、車輛荷重等動態應力所致成之地盤震動亦會使構造物產生各種不良之影響，為解決此類動態問題，其處置方法就是如何防止地盤液化或如何改善震動性質等促使地盤耐震化(林耀煌，1984)。

### 2.1.2 地盤改良工法之分類

地盤改良工法的選擇是依改良目的、地質條件及環境因素等有所不同，Bergado等人(1993)將改良工法區分成加勁(Reinforcement)、灌漿(grouting)、夯實(Compaction)以及排水(Dewatering)，在依不同的土壤做適用性分類，如表 2.1 所示。也有依不同環境、地質條件等情況做選擇，透過Yes/No的方式將問題釐清，建議適用的改良方法如圖 2.1。在基礎工程施工規範與解說(1998)中及余明山等人(2004)將台灣能見之地盤改良方法做分類，經整理後分別為表 2.2 及表 2.3。在表

2.2中將改良工法依改良原理區分成夯實、壓密、固結與置換四種，夯實僅適用於砂性土壤，而壓密則適用於黏性土壤，固結與置換不論何種土壤皆可適用，在現場依地質條件、改良範圍、經濟效益與施工方便性做為選擇依據。另外余明山等人(2004)同樣將地盤改良技術依施工原理分類，但隨著經驗的累積與技術的演進，改良工法種類更加多樣性，因此區分成深層攪拌工法、灌漿工法、排水預壓工法、震動擠壓工法以及其他技術等如表 2.3。深層攪拌工法係利用機具攪拌土壤在注入硬化劑，使地中形成土壤固結體，增加土壤承载力、剪力強度等達改良目的，台灣最常使用之工法為高壓噴射灌漿工法，該工法係利用高壓幫浦將漿液(或水)及空氣注入具有特殊構造與小口徑噴嘴裝置之灌漿管使產生高壓噴射流，並藉在預定土層深度之灌漿管旋轉及提升，以高壓噴射流切削周圍土壤，以達到改良特定範圍內地層知強化及止水效果之目的(廖惠生等，2006)；灌漿工法以一定壓力向地中填入水泥漿、水泥砂漿、藥液或此等混合液，填充孔隙增加土壤剪力強度，改善支承力、變形性及阻水性，其中水泥灌漿是國內最早使用的地層灌漿工法，大多用於壩基、隧道、橋墩、提防護岸和路基等之空洞回填，以及岩盤裂縫之灌注；排水預壓工法主要是用於飽和黏土，透過靜置載重或加速黏土層排水使土壤沉陷能於構造物施做前以及大部分先行發生，以期達到減少沉陷量及不均勻沉陷等問題，此

工法同時利用預載工法增加土體應力增加量，以達預壓密的效果，再配合垂直排水工法以增加孔隙水壓消散路徑或縮短排水距離，使壓密時間縮短可更迅速有效地縮短工期、增加土壤強度且獲得預期之壓密沉陷量；震動擠壓工法是利用機具將重物自由落下夯擊鬆散砂土或配合天然砂石材料擠壓震動灌入鬆散土層，使改良土趨於緊密，達到提高土壤承载力，減低地層壓縮性與提高抗液化能力，其中擠壓砂樁工法為台灣使用最久的震動夯實改良工法，此工法是利用震動機及高壓空氣的輔助，將中空鋼套管(一般為40cm直徑)貫入擬改良之地層中，於達預定改良深度後，再將回填砂礫由施工機械上部之填料斗投入，經由鋼管的上下反覆拉拔及貫入，將回填砂料擠壓並夯實成一直徑約60cm~70cm的堅實柱體，使砂樁周圍土壤受到擠壓及震動趨於緊密，達到增加地層密度及剪力強度之目的，同時由於夯實砂樁本身具有依定之強度與良好之透水性，將可分擔並減低地層受震時之剪應力，並可使地震時產生之超額孔隙水壓迅速排除；最後將特殊情況下使用之地盤改良方法分於此類，此類方法通常用於既有方法無法施做時採用，例如冰凍工法可暫時將地下水凍結，解決產生管湧等問題，增加地盤穩定性及施工安全性但費用過於昂貴，於實用之地盤改良方法無法滿足工程需求時採用。

表 2.1 Applicability of ground improvement for different soil types.

Improvement mechanism	Reinforcement	Admixtures or grouting	Compaction	Dewatering
Improving period	Depending on the life of inclusion	Relatively short-term	Long-term	Long-term
Organic soil	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
Volcanic clay soil				
Highly plastic clay				
Lowly plastic clay				
Silty soil				
Sandy soil				
Gravel soil	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
Improved state of soil				

(Bergado et al., 1994)

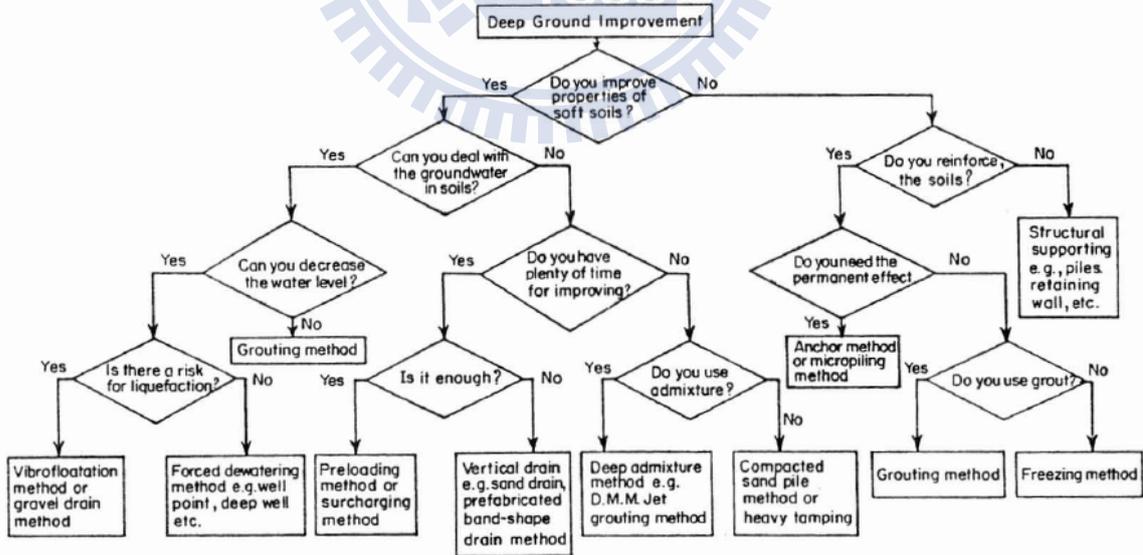


圖 2.1 Selection flow of deep ground improvement technique.

(Bergado et al., 1994)

表 2.2 地盤改良工法分類(I)

分類	改良原理	改良目的	適用土層	工法
夯實	以物理或機器方法擠壓地層，增加其密度	防止液化 減少沉陷 增加基礎水平支承力	砂性土	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 動力壓密</li> <li>➤ 震動揚實法</li> <li>➤ 擠壓工法</li> </ul>
壓密	強制排除地層孔隙水促進土體壓密沉陷	增加承载力 減少沉陷 增加基樁水平支承力	黏性土	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 排水壓密</li> <li>➤ 垂直排水帶</li> <li>➤ 砂樁排水</li> </ul>
固結	將水泥、石灰等材料混入土層中增加土粒間化學結合力	增加承载力 減少沉陷 防止液化	砂性土 黏性土	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 攪拌工法</li> <li>➤ 灌漿工法</li> </ul>
置換	將原地中之軟弱土層以良質土置換	增加承载力 減少沉陷	砂質土 黏性土	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 挖除置換</li> <li>➤ 強制置換</li> </ul>

(基礎工程施工規範與解說，1998)



表 2.3 地盤改良技術分類(II)

類別	施工方法名稱	說明
深層攪拌工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 機械攪拌工法</li> <li>➢ 高壓噴射灌漿工法</li> <li>➢ 攪拌、噴射並用工法</li> </ul>	於地層中利用機具攪拌土壤同時注入硬化劑，將土壤與硬化劑膠結混合為固結體。
灌漿工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 水泥灌漿工法</li> <li>➢ LW 灌漿工法</li> <li>➢ 藥液灌漿工法</li> <li>➢ 擠壓灌漿工法</li> </ul>	此工法系將水泥漿、水泥砂漿、藥液等混合液灌入地層中，以改善其支承力、變形性及阻水性。
排水預壓工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 排水系統                             <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 排水砂礫樁</li> <li>2. 袋裝砂礫樁</li> <li>3. 排水帶</li> </ol> </li> <li>➢ 預載系統                             <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 堆壓法</li> <li>2. 真空法</li> <li>3. 降低地下水法</li> </ol> </li> </ul>	軟弱飽和黏土之排水預壓工法，係利用由施加暫時性之靜載重，使土壤沉陷能於構造物施行前已大部分先行發生，以減少構造物施築後黏土層之沉陷量和不均勻沉陷量。
震動擠壓工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 夯實砂樁法</li> <li>➢ 動力夯實工法</li> <li>➢ 礫石樁工法</li> <li>➢ 打擊式大位移群樁工法</li> </ul>	利用動力能量或配合天然砂石材料，以震動或擠壓的方式將疏鬆之砂質土層強制夯實，改善土壤之工程性質，達到提高土壤承载力，減低地層壓縮性與提升砂質地層抗液化能力之目的。
其他地盤改良技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 地層冰凍工法</li> <li>➢ 炸震夯實工法</li> <li>➢ 熱瀝青灌漿工法</li> <li>➢ 電滲透化學灌漿</li> </ul>	遇到特殊之地下施工問題，基於安全、經濟面的考量，現行之地改技術無法滿足時使用。

(整理自余明山等，2004)

大多的分類方法都是以改良技術使用之機具、材料及改良原理做為分類依據，提供施工時選擇時的參考。然而在改良後規劃設計時，

是針對改良後土體之剪力強度、滲透性與壓縮性做為設計參數，改良後由高強度改良柱體與未改良軟弱土壤組成高度不均質性改良土體，會造成分析上的困擾。將表 2.3 重新以改良後土體均質性做為分類如表 2.4，一般而言低壓灌漿工法、預壓密排水工法與震動夯實工法在施作後改良區域內整體土壤都受有改良效果，後續成效檢驗及分析上較單純。另一類會形成複合改良土體之工法如深層攪拌工法(機器攪拌、高壓噴射等)、夯實砂樁工法、礫石樁工法等，此類工法改良後會在地中形成柱體，具有加勁或排水的效果，亦可提高剪力強度與承載力，達到地盤改良目的，但改良後呈複合土體，在成果檢驗上著重於改良區域影響範圍及強度的確認，分析設計時考量改良區及未改良區域之相互比例關係。

表 2.4 地盤改良工法分類(3)

類別		施工方法名稱	說 名
均質	膠結	水泥灌漿工法 LW 灌漿工法 藥液灌漿工法	透過改良工法的施作使得改良土體更趨於緊密，可利用藥液填充孔隙使之膠結或排水預壓密以及機具夯錘土體等手段達到目的，土壤緊密化或膠結後使得剪力強度、承载力大大提升，壓縮性減小或加速發生，抗液化潛能降地，達到地盤改良目的。此類地盤改良工法的特色為改良後整體土壤較為均質，後續分析及成效檢驗上單純許多。
	非膠結	排水系統 1. 排水砂礫樁 2. 袋裝砂礫樁 3. 排水帶 預載系統 1. 堆壓法 2. 真空法 3. 降低地下水法 動力夯實工法	
非均質	膠結	機械攪拌工法* 高壓噴射灌漿工法*	通常以機械貫入改良深度透過攪拌或高壓噴射的方式將硬化劑與土壤拌合成柱體，或灌入砂礫石並夯實擠壓成柱體，可形成改良樁體，在地中有加勁的效果，藉此提高剪強度與承载力，達到地盤改良目的，但改良後呈複合土體，分析設計時考量改良區及未改良區域之相互比例關係。
	非膠結	夯實砂樁工法 礫石樁工法 打擊式大位移群樁工法	

### 2.1.3 地盤改良之檢核方法與設計原則

根據建築物基礎構造設計規範修訂之研究-地層改良(2004)指出地層經改良後均應針對改良目的，以詳細、有效之現場或室內檢驗方式檢核改良後地層之工程性質，以確認施工品質及改良效果，若改良效果未能符合設計要求時，應予補強改良，或就改良後現況，選取適當之土壤參數，修正原基礎或構造物之設計，其檢核之原則如下：

1. 灌漿或混合攪拌處理方式之改良，宜以現場試驗檢核，必要時，得以現場取樣進行試驗，以檢討其成效。其改良範圍，得以挖掘試坑或其他適當方法檢核之。
2. 表層夯實之檢核，宜以平鈹載重試驗或相對夯實度等檢驗方式。
3. 深層加密或防止液化為目的改良，應以現場貫入試驗為主，試驗時間宜待夯實一週後進行。
4. 以預壓或排水固結法之改良，應定期監測土壤行為之變化，如孔隙水壓與沉陷等，並藉工程學理研判改良之成效。

由以上的原則可得知規範內無硬性規定成效檢核方法之選定，其原因就在於影響地盤改良之因素多且複雜，且大部分的情況均非單學理能完全推估其成效，建議針對改良之目標選其適當之檢驗方法，不論是直接或間接之方式均可。余明山等(2004)將台灣常用之地盤改良技術

匯集整理，將以上敘述整理自表 2.3，其對應的檢核方法如表 2.5，深層攪拌工法與灌漿工法同樣是將硬化材柱入土壤中，而兩者的差別在於有無利用機械於地層中攪拌土壤形成改良樁體，因此兩者成效檢驗方式較為相似，同樣是依目的的不同要求檢驗土壤之強度、透水性、密度及耐久性，透過開挖、取樣、貫入試驗等方式檢核而深層攪拌工法還要求檢核成樁率、樁體連續性及樁徑等，細節參考表 2.6。排水預壓工法成效檢驗著重於沉陷量的觀測以及改良前後剪力強度、壓縮性等變化。震動擠壓工法改良之土壤，其強度有隨時間增長而逐漸提高之特性，應靜置依一段時間後再進行效果檢驗。改良效果檢驗要點是改良目的而定，一般以強度為主，變形性為輔。檢驗方式包括現地試驗與試內試驗兩項，現地常以標準貫入試驗及圓錐貫入試驗較為常用。

地盤改良之設計原則考量改良效果時效性及材料之耐久性、可能之破壞模式或壓縮性，設計參數則需考量改良效果之不均勻性，做適當且保守之選擇。另外也需考量地盤改良過程中對鄰近建物之影響以及可能造成的環境汙染，其中若改良後之地層為複合地層，其受力作用之力學機制將與未改良之機制不同，分析時應適度考慮改良土體與未改良土體之互制作用，以合理之模式進行設計。

表 2.5 台灣常用之檢核方法

分類	施工方法名稱	檢核方法
深層攪拌工法	機械攪拌工法 高壓噴射灌漿工法 攪拌、噴射並用工法	試坑開挖、鑽孔取樣、貫入試驗及室內試驗，檢驗固結體之成樁率、樁徑、深度、連續性及強度。透過目視法、現場取樣、藥液滲透分析。
灌漿工法	水泥灌漿工法 LW 灌漿工法 藥液灌漿工法 擠壓灌漿工法	
排水預壓工法	排水系統 1.排水砂礫樁 2.袋裝砂礫樁 3.排水帶 預載系統' 1.堆壓法 2.真空法 3.降低地下水法	設置沉陷監測點與水壓計進行監測。 一般物性試驗、直接剪力、三軸試驗、單軸壓密試驗、標準貫入試驗與圓錐貫入試驗
震動擠壓工法	夯實砂樁工法 礫石樁工法 動力夯實工法 打擊式大位移群樁工法	標準貫入試驗、圓錐貫入試驗、平鈹膨脹試驗以及側向載重現場試驗、速度井測、指數性質試驗、室內強度試驗

(整理自建築物基礎構造設計規範修訂之研究-地層改良，2004；張吉佐等，2000)

表 2.6 攪拌工法之成效檢核方法

	項目	作法	優點	缺點
樁徑確認	鑽心取樣	於設計樁徑圓周處進行鑽心取樣	直接了解改良改良品質與鑽心方位處之樁徑	取樣成果完整性與代表性常受鑽心取樣技術影響
	測音管檢測方法	於設計樁徑附近埋設 3-4 支測音管，利用噴射到達音驗證是否達要求	灌漿完成時即確認樁徑	無法保證測音管半徑內土壤有效被切削及拌合；成果仰賴測音管埋設之垂直精度
	超音波檢測方法	於施灌時以比重 1.03~1.05 之皂土漿液取代，完成後以超音波檢測儀進行確認	可快速量測得不同方向之切削樁徑	檢驗成果為皂土漿噴射切削之樁徑，與正式施工之漿液比重不同，需修正
灌漿成效檢驗	鑽心取樣及強度試驗	取樣數量一般為改良樁數 3% 以上，並取改良深度之上中下各一個試體進行單壓試驗	直接得到改良體強度	數量少且受人為指定影響
	取樣率及 RQD 判定	以鑽探工程上定義之取樣率判斷或使用岩石品質指標(RQD)判斷鑽心強度	可直接看到漿液滲透狀況	一般規範對取樣率未定義或定義不清；RQD 為強岩石強度指標，有適用性問題
	透水試驗	現地變水頭試驗	得到改良後現地滲透係數	適用於均值且等向性地層
液化	貫入試驗	在三支改良樁之中心施作標準貫入試驗	結果可評估抗液化潛能	僅代表樁間土壤 N 值之變化

(整理自廖惠生等，2006；基礎工程施工規範與解說，1995)

## 2.1.4 改良成效檢核之問題探討

若土壤在改良後形成不均質體之複合土體如攪拌灌漿工法、擠壓砂樁工法等(參考表 2.4)方法會突顯既有檢核方法(鑽孔取樣、單壓試驗及標準貫入試驗等)數量少易受人為指定之影響、取樣範圍小、成本較高與耗時等缺點。

以高壓噴射灌漿改良為例，因改良後地中形成柱型改良土體以達到改良特定範圍內地層之強化等目的(游明泰，2006)，既有檢核方法著重於改良柱體之成樁率、樁徑、深度、連續性、滲透性及強度之檢核，使用方法不外乎鑽探取樣(參考圖 2.2)及室內試驗，其成效檢核方法如表 2.6。一般在檢核複合改良土體時由甲方選定檢核改良樁位置，檢核數量約為改良總數的 3%，鑽取的位置如圖 2.2，目的為檢核成樁樁徑，鑽探取樣後檢核其鑽心提取率(一般要求 80%以上)及 RQD 判定。之後再取改良深度範圍之上、中、下各一組試驗，送至試驗室進行單壓強度試驗，以確認強度是否符合設計要求。改良目的為止水需求者，則於現場進行現地透水試驗，以檢驗改良體之透水性能否滿足設計需求(一般要求透水係數需低於  $1 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ ) (廖惠生等，2006)。

設計方法以複合土體強度設計(林宏達等，1999)為例，公式如下：

## 1. 砂性土層

$$C_m = (1-I_r) * C + \alpha * I_r * q_u / 2$$

(2-1)

$$\phi_m = \phi$$

(2-2)

## 2. 黏性土層

$$S_{um} = (1-I_r) * S_u + \alpha * I_r * q_u / 2$$

(2-3)

其中：

$C_m$ 、 $\phi_m$ 、 $S_{um}$  = 複合土壤剪力強度(T/m<sup>2</sup>)

$C$ 、 $\phi$ 、 $S_u$  = 未改良土壤剪力強度(T/m<sup>2</sup>)

$I_r$  = 改良率 = 改良樁總截面積 / 改良區域總面積

$q_u$  = 改良樁無圍壓縮強度(T/m<sup>2</sup>)

$\alpha$  = 改良樁強度折減係數，依般取 0.5

此複合土體之剪力強度依改良面積比率加權平均計算之，以代表改良後土體之剪力強度並進行分析，但以往的檢驗方法只著重改良樁體檢核，較無考量樁間未改良土體的影響，因此補強原有檢核方法的缺點並取得一個代表整個改良體改良效果的方法極為重要。

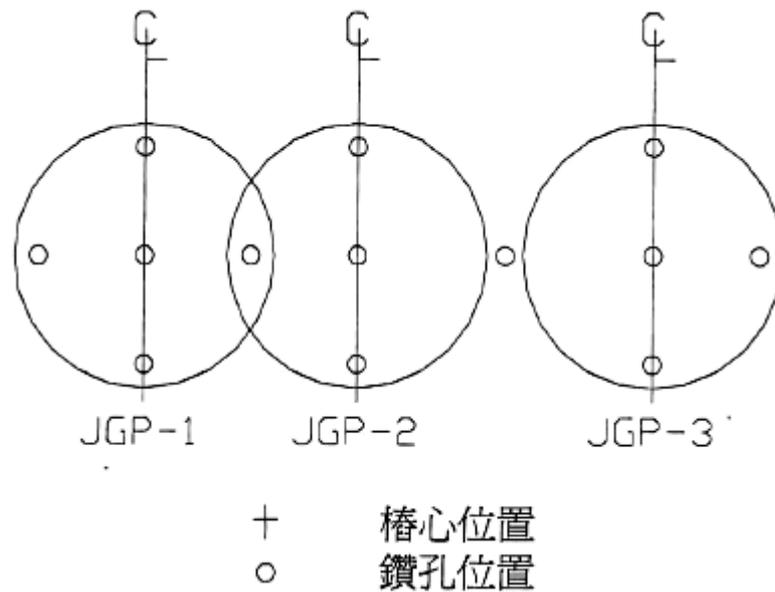


圖 2.2 固結體鑽孔取樣位置示意圖(基礎工程施工規範與解說，1998)

## 2.2 土壤剪力波特性和於地盤改良的應用

地層剪力波速資料與土壤之勁度與密度有直接關係，藉由過得地層剪力波速之訊息可將其應用於地層辨識、基礎動靜態性值評估、土壤液化潛能分析與土壤改良成效檢驗等問題。

### 2.2.1 土壤動態剪力波特性和

土壤剪力波特性和與土壤動態性質有關係，根據彈性力學所推導出的公式：

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2-4)$$

其中：

$\rho$  = 土壤密度

$V_s$  = 剪力波速

$G_{\max}$  = 剪力模數

土壤再經由反覆載重產生剪力應變形為如圖 2.3，由圖中可知單一試驗下，土壤剪應力與應變關係呈現阻滯圈(Hysteresis Loop)的形式。在不同反覆試驗下所得到阻滯圈端點軌跡線稱為骨幹曲線(Backbone Curve)如圖 2.4，其中通過原點(反覆剪應變振幅為 0)之正割剪力模數即為最大剪力模數( $G_{\max}$ )，因此任何 $G/G_{\max}$ 均會小於 1。因此完整之剪力模數與剪應變之關係，及不同模數比與剪應變之關係曲線，稱之為剪力模數遞減曲線(Modulus Reduction Curve)如圖 2.5，此曲線由室內試驗求得，即由骨幹曲線中推求出剪力模數遞減曲線，其中模數比均小於等於 1 且隨著剪應變之增加而減少，故可由剪應變之範圍中求得等值線性之剪力模數大小。

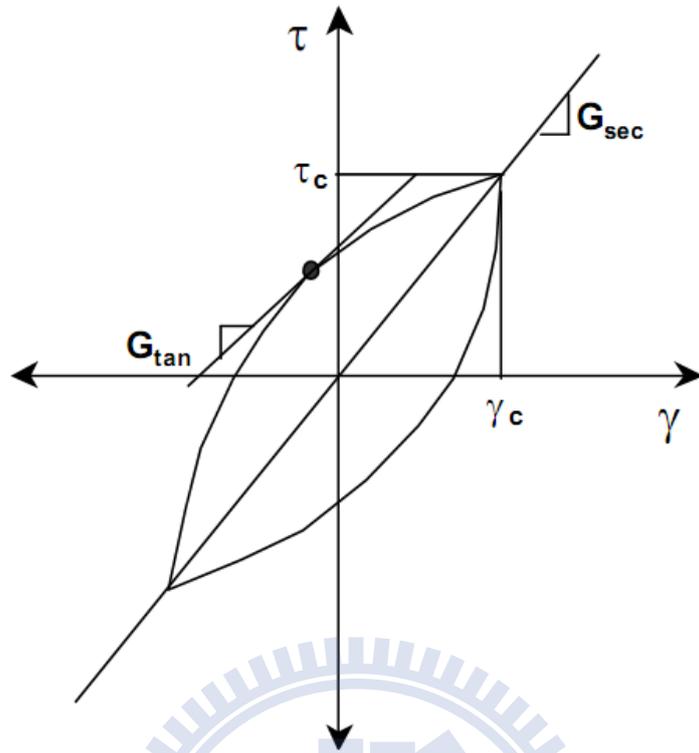


圖 2.3 土壤之應力應變行為(Luna and Judi,2000)

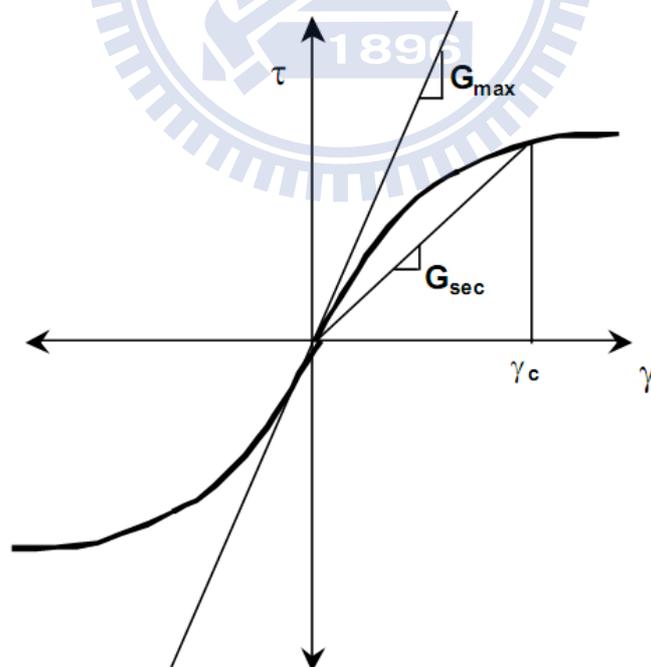


圖 2.4 骨幹曲線(Luna and Judi, 2000)

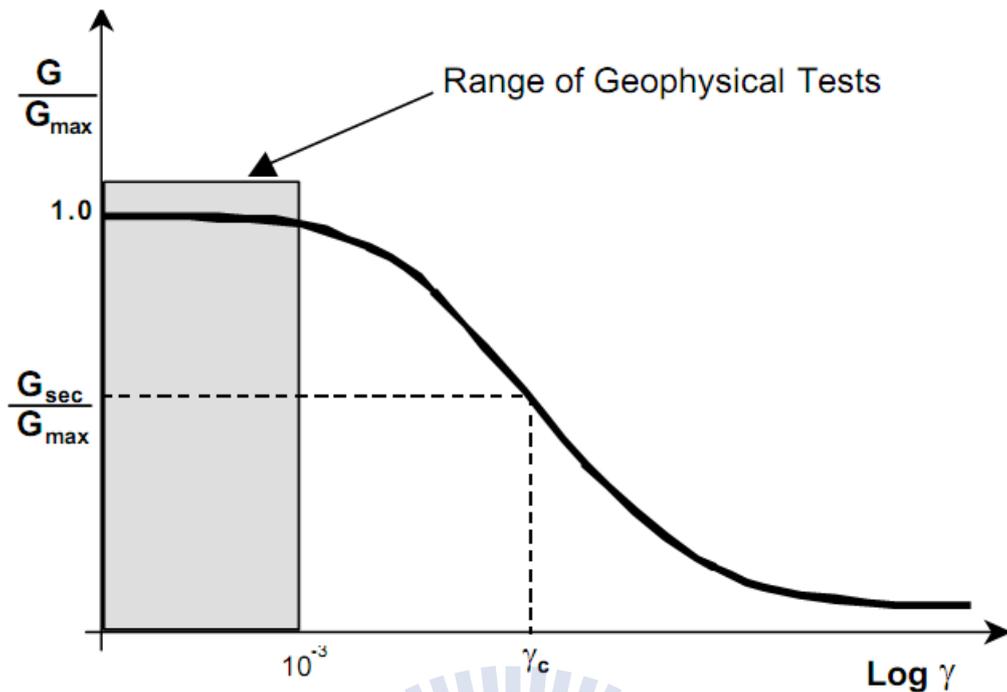


圖 2.5 剪力模數遞減曲線(Luna & Judi, 2000)

## 2.2.2 剪力波法於量測方法

由上述可知剪力波可反應地盤改良土壤勁度的改變，因此將用於地盤改良成效評估中所使用之量測剪力波速方法逐一介紹。

### 1. 剪力波元件試驗(Bender Element Test)

土壤中剪力波速的傳送與接收室內試驗早期由美國德州大學(University of Texas at Austin)所發明，利用剪力片(Shear Plate) (Shirley, 1978)進行試驗，以石英或壓電水晶為主要元件，目前以壓電陶瓷材料所組成之剪力波元件(Bender Element)逐漸取代剪力片，所以目前關於剪力波速室內量測方法多採用一組剪力波元件(Bender Element)進

行剪力波速的量測；壓電陶瓷可分為串聯與並聯兩種連接方式，不同的連接方式會有不同的壓電特性，串聯時機械能轉換為電能之功率是並聯的兩倍；反之，並聯時電能轉換為機械能的功率是串聯的兩倍，故利用壓電陶瓷剪力波元件量測剪力波速時，一端以函數產生器激發剪力波，另一端接收剪力波並由示波器上判斷剪力波初達時間，便可推算剪力波速。剪力波元件試驗最大的剪應變約等於或小於  $10^{-3}\%$  (Dyvik & Madshus, 1985)，因此試驗在微應變下便可決定初始剪力模數( $G_{\max}$ )。

剪力波試驗流程如圖 2.6 所示，由剪力波元件試驗資料判斷初達時間並計算剪力波速後，便可依下式計算初始剪力模數( $G_{\max}$ )。

$$G_{\max} = \rho v_s^2 = \frac{\rho}{L/t} \quad (2-5)$$

其中：

$\rho$  = 試體質量密度

$L$  = 有效長度，試體長度扣除剪力波元件凸出上下頂蓋的長度

$T$  = 傳波時間

因此利用室內試驗之剪力波元件試驗可建立土壤之剪力波速值，亦可建立地盤改良前後土壤之剪力波速關係。

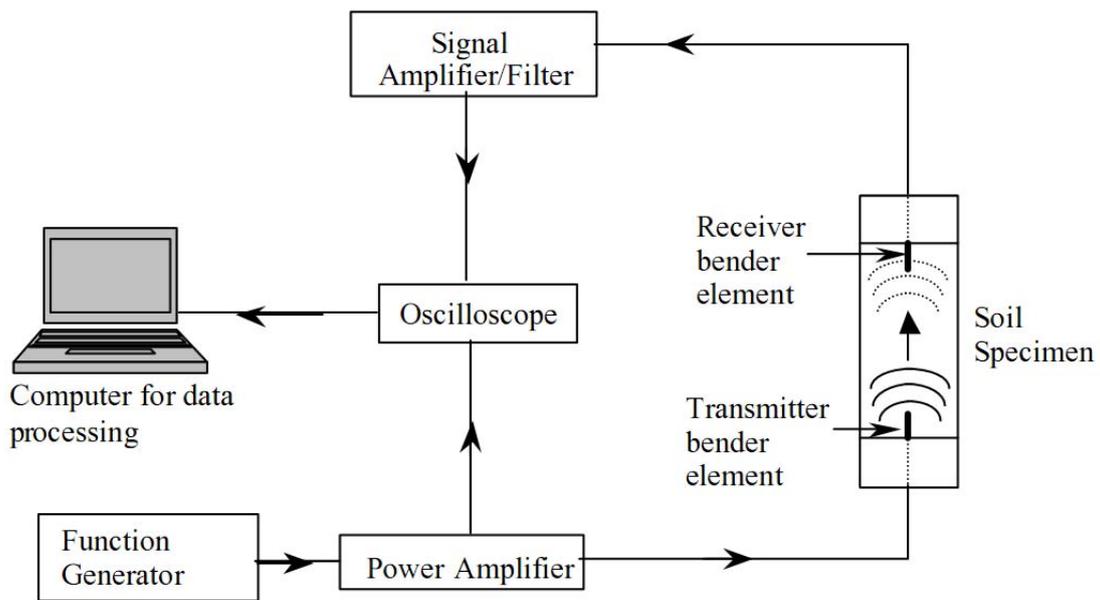


圖 2.6 剪力波元件試驗(Bender Element Test) (Leong et al., 2005)

## 2. 共振柱試驗(Resonant Column Test)

此試驗之基本原理是對試體驅動輸入不同頻率的剪力震動(垂直或扭轉)，再由加速度計計讀訊號以求得試體的頻率反應頻譜，進而得到共振頻率以及試體動態性質。共振柱試驗常見的形式有固定-自由型共振柱及自由-自由型共振柱如圖 2.7。利用共振柱試驗可建立土壤剪力波波速、土壤有效應力及乾密度之關係 (Kim & Park, 1999)。

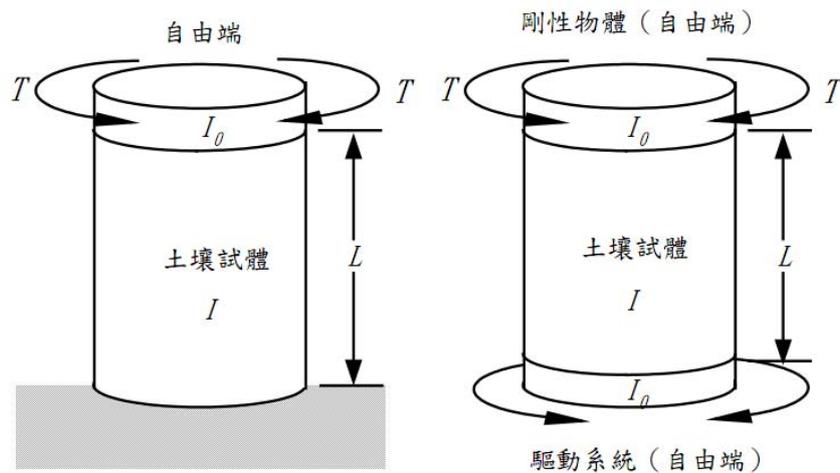


圖 2.7 共振柱型式示意圖 (摘自徐瑞旻，2002)

### 3. 跨孔式震測法(Crosshole Method)

跨孔式震測法，如圖 2.8-a 所示，至少需要兩個垂直地表面的鑽孔，通常以三個鑽孔為最佳，相鄰兩鑽孔之間距約為 2~3 公尺，其中在某個鑽孔中設置震源，分別在另外兩個鑽孔中與震源同一深度處設置受波器，以接收震源所發出之壓力波及垂直向剪力波訊號，同時依據相鄰兩鑽孔之間距及波傳之時間，計算兩鑽孔間土層之平均波傳速度；另外由於震源與受波器可以同時在鑽孔內自由上下移動，通常每隔 0.5 或 1 公尺移動一次，因此可以求取整個鑽孔深度範圍內土層之波速度剖面圖。此方法以最直接的方式量測鑽孔間土層波速，但若兩鑽孔間之距離太大時，則在層狀之地下土層構造中，便會因折射現象造成波傳將以最短路徑通過高速度地層，無法探測到兩高速度地層間之低速度夾層。

#### 4. 下孔式震測法(Downhole Method)

下孔式震測法，如圖 2.8-b 所示，只需要一個垂直地表面的鑽孔，在地表面設置震源，而在鑽孔內設置速度受波器，以接收震源所發出之壓力波及水平向剪力波訊號，同時依據震源離受波器之距離及波傳之時間，計算量測範圍內土層之平均波傳速度；此外受波器每隔 0.5 或 1 公尺往下移動一次，直至整個鑽孔深度施行完畢為止，以求取整個量測範圍內土層之波速度剖面圖；但震波之訊號品質會隨著探測深度之增加而減少，且不能使用於雜訊較大之區域，使得適用範圍縮小。

#### 5. 懸垂式 P-S 波探測法(P-S logger)

懸垂式 P-S 波探測法，如圖 2.8-c 所示，只需要一個垂直地表面的鑽孔，主要裝置是一含有兩組受波器及一個震源之電磁式探測管，兩組受波器之間距為 1 公尺，而震源位於受波器下方，施作時將電磁式探測管伸入含有地下水或鑽孔液之鑽孔中，而由震源依次產生水平向剪力波、相反極性水平向剪力波及壓力波三種訊號，由兩組受波器分別接收震波訊號，同時依據兩受波器之間距及波傳之時間，計算鑽孔深度範圍內土層之壓力波速度及剪力波速度；此外電磁式探測管每隔 0.5 或 1 公尺往上移動一次，直至地下水位或鑽孔液深度為止，以求取整個鑽孔量測周圍土層之波速度剖面圖；但缺點是鑽孔中必須充

滿地下水或鑽孔液，以提供波傳所需之介質，同時兩組受波器之間距離僅 1 公尺，使得波傳之路徑太短，導致初達時間之誤差較大，容易造成判定上之人為誤差。

## 6. 貫入式探測法

貫入式探測法目前常用的有震測式圓錐貫入法(Seismic Cone Penetration Test，簡稱SCPT)，如圖 2.8-d 所示，主要是採用剪力波來探測地下土層之波速，是由北威爾斯大學(University College of Wales)所發展。在地表處設置震源，並設置兩個間距為 1m 之速度受波器，固定在一電磁式水壓圓錐上 (Robertson et al.,1986)，用以施作貫入試驗及震測試驗，並進行土壤之取樣及接收震源所發出之剪力波訊號，同時依據震原離受波器之距離及波傳時間計算量測範圍內土層之剪力波速；施作方式與下孔試探測法類似，每次往下貫入 0.5 或 1 公尺，直至要求之試驗深度，並記錄剪力波訊號之歷時資料，以隨著電磁式水壓圓錐貫入之深度，求取整個鑽孔周圍土層之波速度剖面圖；其缺點是無法在噪音大的環境下施做，這將會使得敲擊訊號與雜訊之比例降低，造成初達時間難以判斷。此外貫入式探測法並不適用於較堅硬土層如含礫石層或岩層。

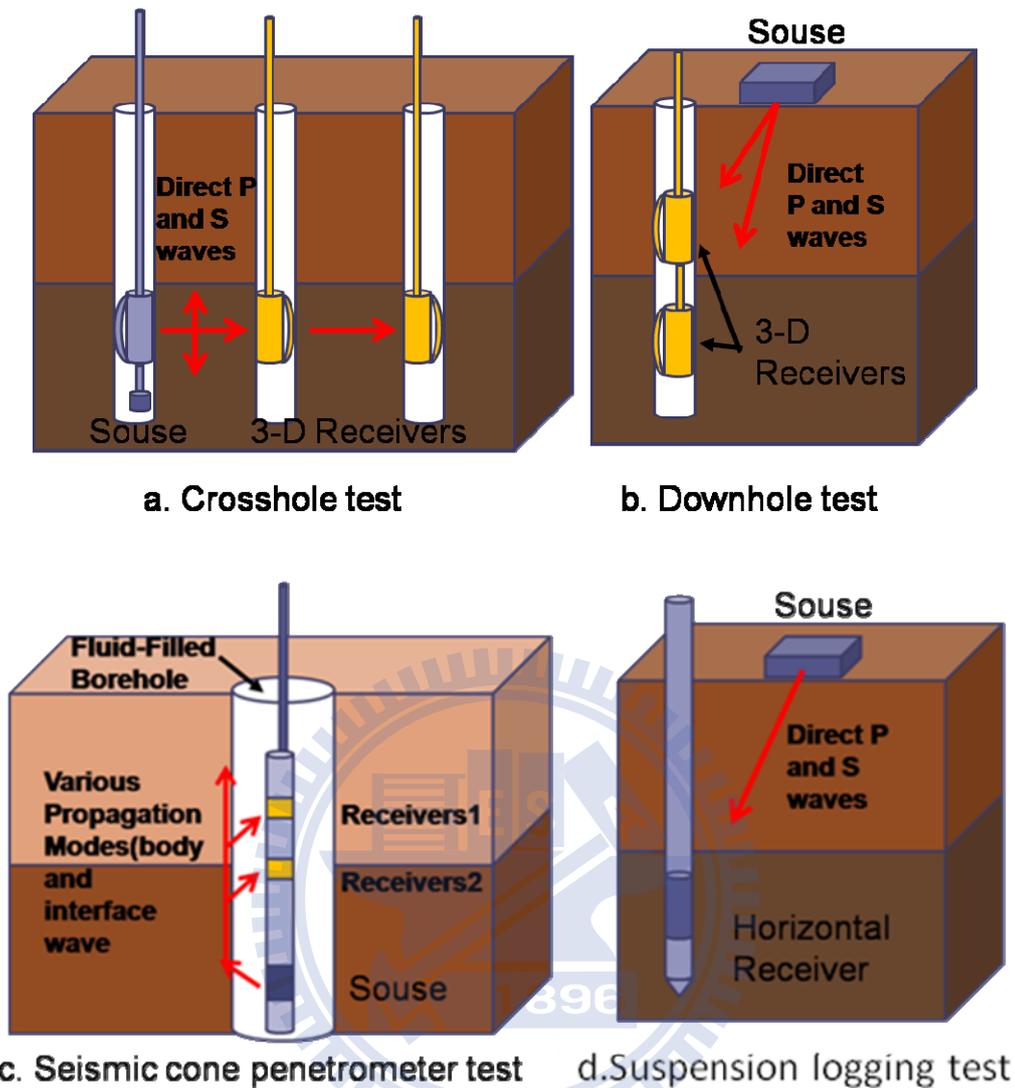


圖 2.8 常見之現地剪力波量測方法 (Stokoe & Santamarina, 2000)

## 7. 表面波震測法

表面波震測(Seismic Surface Wave)法，主要是利用表面波中之雷力波(Rayleigh wave)及洛夫波(love wave)來探測地下土層，又因為雷力波為地表面量測法中最容易產生且振幅亦最大之震波，一般都是採用雷力波來探測地下土層之構造，而表面波之波傳影響範圍大約侷限

於一個波長之深度內，因此表面波之影響深度會隨著頻率之不同而有所差異，當土層之剪力模數隨著深度而變化時，造成波傳速度亦隨著頻率(或波長)之不同而變化，稱之為表面波之頻散現象，波速度與頻率(或波長)之關係稱之為頻散曲線，由於雷利波速度與剪力波速度相近(參考圖 2.9) (Richart et al., 1970)，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度剖面，如圖 2.10。

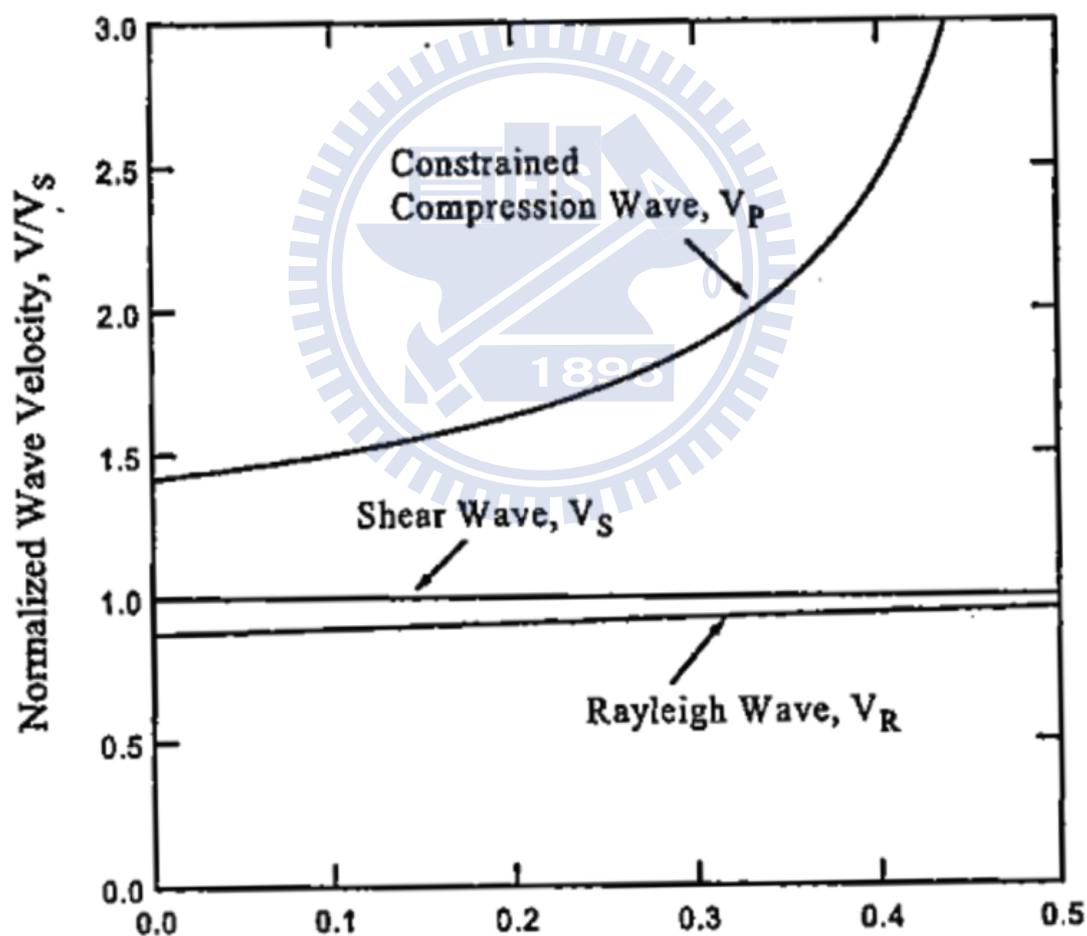


圖 2.9 柏松比與波速度之關係(摘自 Richart et al.,1970)

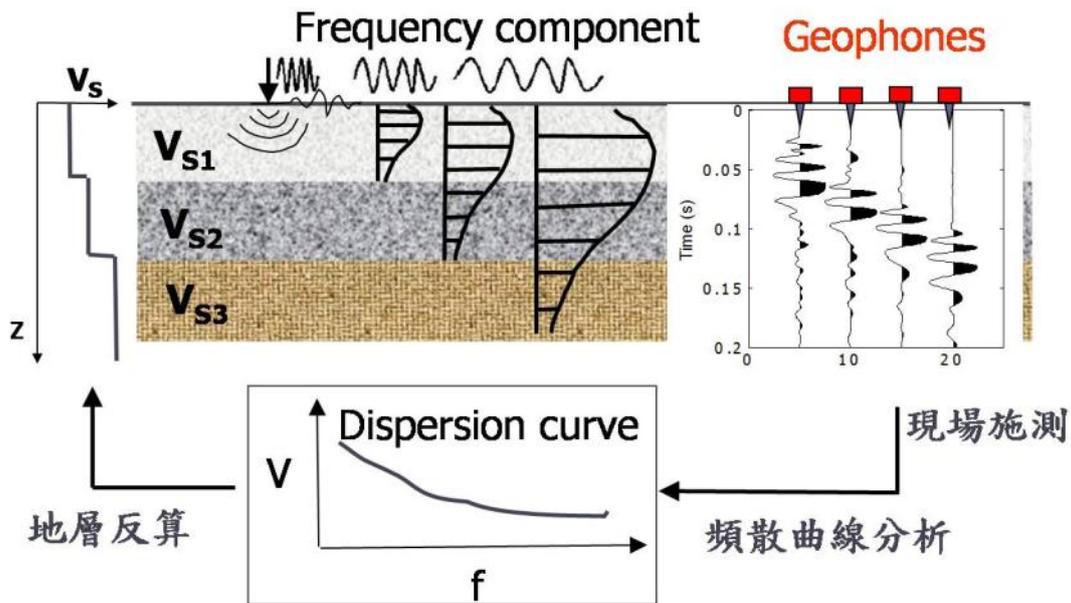


圖 2.10 表面波震測技術流程圖

表面波震測法量測剪力波速的優點在於非破壞性、取樣空間大以及不需在地表鑽孔等，因此可適用於大範圍的工址探測，又因其施測容易、快速及成本較低的優勢，雖然量測之頻散曲線須經過反算才能得到剪力波速，分析較為複雜，但其便利性及經濟性使得此方法廣泛的應用於許多大地工程及鋪面工程中如：地層比對、鋪面厚度檢測、地下孔洞探測、液化潛能分析、地盤改良成效檢測以及隧道襯砌與背填灌漿之品質管制等。下節將針對表面波之基本波傳原理及使用之多頻道表面波量測法(MASW)作介紹。

## 2.3 表面波基本波傳原理

在半無限域空間之彈性體中，由於其邊界之存在，故經由震源或其他擾亂源產生之波動，除了實體波之產生外，為了滿足力學之平衡條件，還會產生在邊界傳遞之表面波(Surface Wave)，又稱為雷力波(Rayleigh Wave)，其質點運動方向在水平及垂直向均有分量，即質點運動方向為橢圓形平面軌跡運動之波動。至於在非均質之土層中，亦可能產生另一種在層狀界面中傳遞之表面波，稱之為洛夫波(Love Wave)，此種波發生在表面層為低速層之介質內，質點運動為沿著水平面與波傳行進方向垂直。表面波之波傳影響範圍大約侷限於一個波長之深度內，因此表面波之影響深度會隨著頻率之不同而有所差異，當土層之彈性模數隨著深度而變化時，造成波傳速度亦隨著頻率(或波長)之不同而變化，稱之為表面波之頻散現象，波速度與頻率(或波長)之關係稱之為頻散曲線。表面波震測即是採用表面波中之雷利波或洛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，由於雷利波速度與剪力波速度相近，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度剖面。

假設地層為均質、均向之線彈性體，若於地表面上某一方向  $x$ ，

量測地表隨時間  $t$  之垂直運動  $u(x,t)$ ，則就某一角頻率  $\omega$  ( $= 2\pi f$ ) 而言，雷利波運動之通解可表示為：

$$u(x,t) = U_0(\omega)A(x)e^{-jkx}e^{j\omega t} = U_0(\omega)A(x)e^{j\omega[t - \frac{x}{\omega/k}]} \quad (2-6)$$

其中：

$U_0$  為初始振幅之大小，與震源型式相關

$A$  為振幅隨空間改變因子，與幾何阻尼相關

$K$  為空間頻率之大小(又稱波數，Wavenumber)

$K$  之倒數  $\lambda$  ( $= 2\pi/k$ ) 即為波長。式(2-6)中顯示波傳之主要行為，包含波傳之衰減與波動速度，其中波傳速度( $v$ )與材料之彈性模數有直接相關，且可定義為時間頻率與空間頻率之比值，如下所示：

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{k} \quad (2-7)$$

(2-7)亦可表達成頻率( $f$ )與波長( $\lambda$ )之乘積：

$$v = f \cdot \lambda \quad (2-8)$$

在均質的線彈性體中，上式之乘積為一定值，頻率較低之波長較長，而頻率較高之波長較短，亦即波傳之速度為一常數，不隨頻率之改變而改變。在均質線彈性體中，僅有單一模態之波傳，然而，一般層狀地層沿深度方向為非均質，亦即其材料之彈性模數隨深度而變化。若考慮地層之非均質性及材料阻尼，就某一角頻率  $\omega (= 2\pi f)$  而言，雷利波之通解可由振態疊加求得：

$$u(x,t) = \sum_m S_m(\omega, x) e^{-j(\omega t - k_m x)} \quad (2-9)$$

其中：

$M =$  振態數

$S =$  振幅因子，包含(震源、受波器、幾何阻尼及材料之綜合影響)

由於表面波之波傳影響範圍大約侷限於一個波長之深度內，而不同頻率震波具有不同之波長，當地層之速度隨深度而變化時，各振態之相位速度變為頻率之函數，此速度隨頻率之變化稱為頻散現象。

(2-9)可改寫成：

$$u(x,t) = U_0(\omega) A(\alpha, x, \omega) e^{-j(\omega t - \phi(x, \omega))} \quad (2-10)$$

其中  $A$  亦受到材料阻尼( $\alpha$ )之影響，且為頻率之函數， $\phi$  為一複合相位函數，描述相位隨著空間變化所產生之波傳現象。任一頻率簡諧波之特徵點(例如波峰或波谷)可以下式表示：

$$\omega t - \phi(x, \omega) = \text{const} \quad (2-11)$$

因此，將上式對時間微分可以得到有效相位速度之定義：

$$\hat{v} = \frac{\omega}{\frac{\partial \phi(x, \omega)}{\partial x}} \quad (2-12)$$

由上式可得知，多重模態波傳之有效相位速度為區域性之物理量，亦即不同位置具有不同之波傳速度。若地層為常態之速度剖面(即剪力模數隨深度增加而增加)，則通常波傳由基態所控制，而有效相位速度趨近於基態之速度(林志平等，2002)。

### 2.3.1 多頻道表面波施測法

表面波震測施測法為利用表面波之頻散特性經反算求得地層之剪力波速，主要步驟為(1)由現地試驗求得相位速度頻散曲線( $v(f)$ )；(2)再利用彈性波傳理論反算地層地層剪力波速( $v(z)$ )。目前常用之頻

散曲線量測法為表面波譜法(Spectral Analysis of Surface Wave，簡稱 SASW)及多頻道表面波法(Multi-channel Analysis of Surface Wave Method，簡稱 MASW)，本研究採用多頻道表面波法做為現場之施作。

多頻道式表面波量測法係由地球物理領域之學者提出 (McMechan and Yedlin, 1981; Gabriels et al., 1987; Park et al., 1999)，並可避免上述表面波譜法之限制，其野外試驗之施測方式，一般採用 1~2 公尺之受波器間距，並設置 12 個以上之受波器於同一直線上，以接收震源所發出之震波訊號，其中以收錄表面波之訊號為主；以 24 個受波器為例，在第一個受波器之線外設置 1 個炸點，並反覆在同一炸點處施作疊加震測以消除雜訊之影響，直至收錄到清晰之表面波訊號為止，再利用先進之二維訊號識別技術以分析多頻道震測資料，以求得訊號品質優良之頻散關係曲線，最後經過反算分析便可得到淺層地層之剪力波速度剖面，而較常使用之分析方法有多頻道表面波譜法 (MSASW)及多頻道波譜轉換法(MWTSW)，於此僅介紹波場轉換法。

### 2.3.2 多頻道表面波分析法-多頻道波場轉換法

所謂波場轉換法(MWTSW)，亦稱為泛音分析法(Overtone Analysis)，其中包含兩個重要之分析步驟，即富利葉轉換法(Fourier transform)及積分轉換法(Integral Transformation)；首先確定震測資料

之波速範圍，如圖 2.11 所示，並利用富利葉轉換法，將各個受波器之震波資料，由空間時間 $(x,t)$ 域轉換至空間頻率域 $(x,\omega)$ 中，如下所示：

$$U(x, \omega) = \int u(x, t) e^{i\omega t} dt \quad (2-13)$$

其中  $U(x, \omega)$  代表經由轉換後空間頻率域震波資料，共包含相位及振幅之頻譜資料； $u(x, t)$  則代表原始空間時間域震波資料。而後利用積分轉換法，即類似傾斜疊加法轉換，疊加對應某相位速度之頻譜資料，如下：

$$A(\omega, \beta) = \sum V(\omega, \beta) = \sum_{n=1}^N e^{j\phi_n} \left[ \frac{U(x_n, \omega)}{U(x_n, \omega)} \right] \quad (2-14)$$

其中  $V(\omega, \beta)$  代表經由積分轉換後之頻譜資料； $x_n$  代表受波器之編號； $\phi(= 2\pi f / v)$  代表空間頻率，可將上式視為某一頻率之資料，按照假設之相位速度 $(v = \omega / \phi)$  對每一個受波器位置之頻率施做相位平移後，在將每一受波器平移後之頻譜疊加； $A(\omega, v)$  代表某頻率與波數對應之能量振幅大小，利用頻率波數之關係 $v = (\omega / \phi)$  亦可表示為  $A(\omega, v)$ ，若每個受波器之相位差對應至正確之相位速度處，則疊加厚之能量振幅會有增加之效應，反之則會減少，因此在疊加後之能量

振幅極大處，其對應之相位速度及頻率即為由波場轉換法求得之頻散曲線，如圖 2.12，其中陰影處即為波場轉換法對應之能量振幅譜，而黑點處為振幅極大值之所在，其連線即為頻散曲線之位置(Park et al.,1998)，由於一般地層所量測到之有效頻散曲線大都由基態控制，目前主要利用基態頻散曲線進行反算。表面波測線配置與計算域之呈現如圖 2.13所示，圖 2.13-a為表面波震測現場配置簡圖， $X_1$  為近站支距(near offset)，為震源(星號)與第一個受波器的距離； $dx$ 為受波器間距； $N$ 為受波器的數量。圖 2.13-b為表面波震測現場試驗收錄之時間-空間域波場( $t-x$  domain)資料，圖 2.13-c則是 $t-x$  domain資料透過波場轉換後之 $f-v$ 頻譜及頻散曲線，經反算得到之剪力波速如圖 2.13-d。

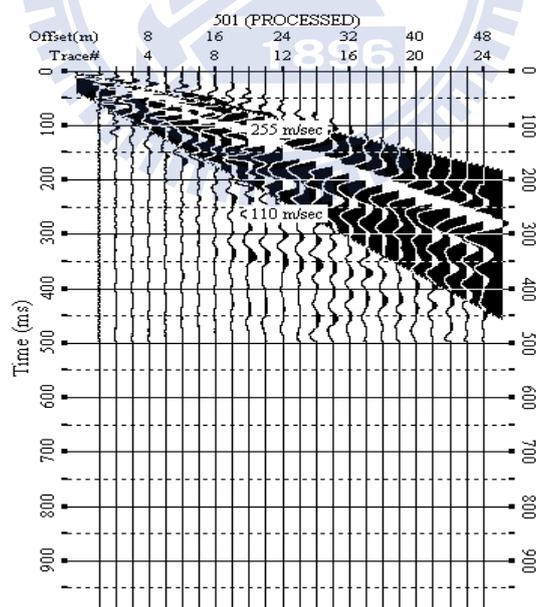


圖 2.11 有效之波速度範圍

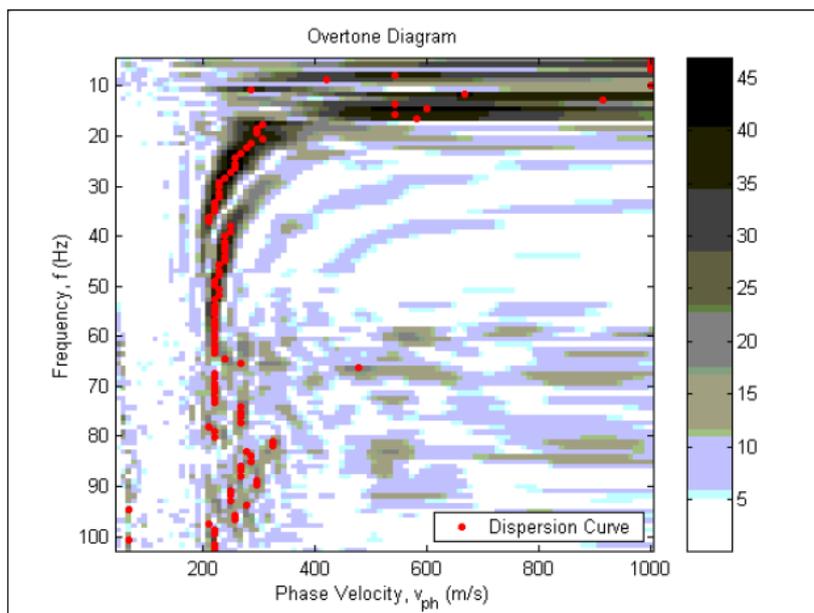


圖 2.12 波場轉換分析法之  $f$ - $v$  頻譜(張正宙, 2002)

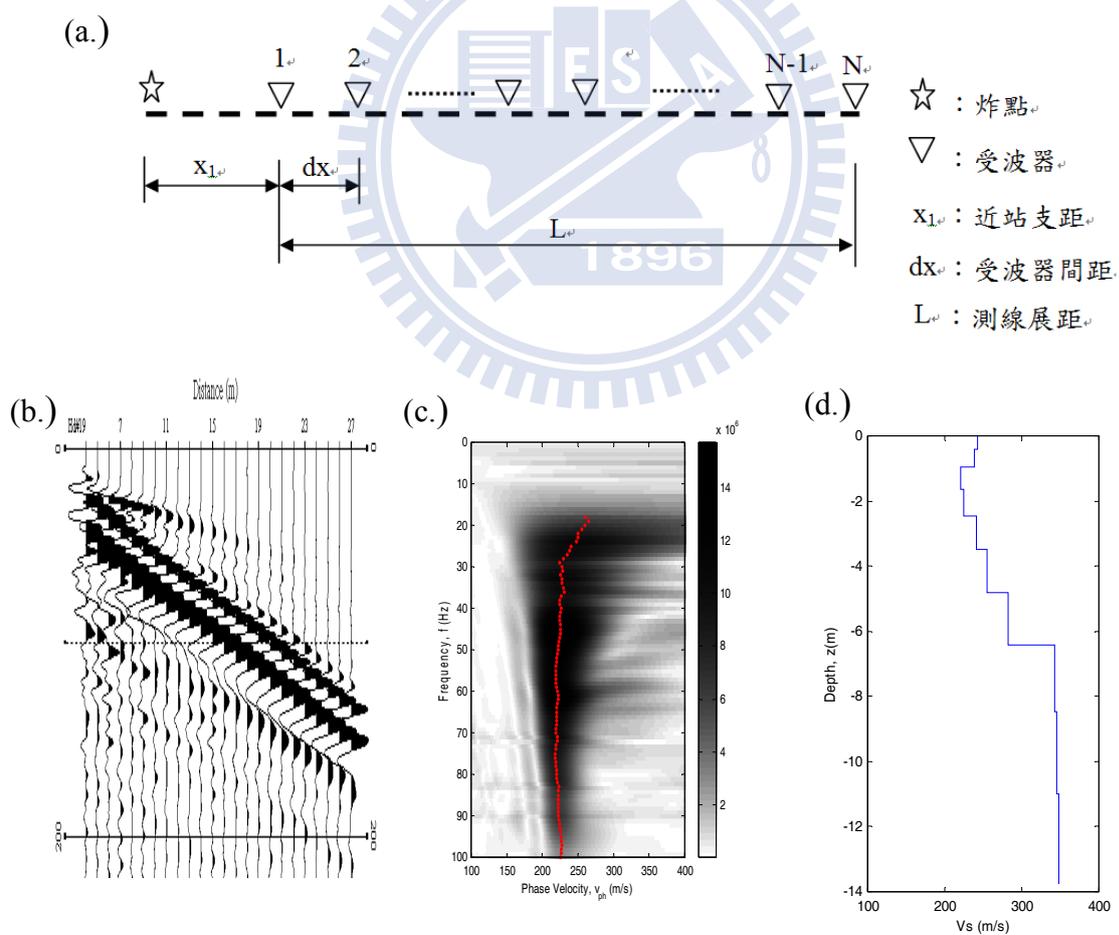


圖 2.13 波場轉換法(MWTSW)試驗配置與分析流程

多頻道波場轉換法施測時必須注意其施測因子對於波場轉換之影響，理論上，時間空間域( $t, x$ )為連續且無窮之波場，但施測過程僅能得到離散且有限之波場資料，訊號之離散化(Digitization)與截短(Truncation)將使得波場轉換產生映頻混擾(Aliasing)與洩漏(Leakage)。在時域方面，由於目前資料擷取系統之取樣率遠高於震源所能產生之最高頻率，且常設有反頻率混擾濾波器(Anti-aliasing filter)，因此可避免頻率混擾之產生，而取樣數目通常也能有足夠之時間長度涵蓋脈衝訊號以避免頻率之洩漏，若使用簡諧震動震源亦可施作時域視窗(Time-domain windowing)已降低頻率之洩漏。然而，空間上則受限於施測範圍與受波器個數而無法如時間域一般避開空間之映頻混擾及洩漏，使用較小之受波器間距可增加波數(或波長)之範圍，但若受波器之數目一定，則受波器越小，展距越小，可能造成嚴重之波數洩漏問題，空間域視窗(Space-domain windowing)雖然可降低洩漏問題，但也會降低波數之解析度。然而，由於在 $f-x$ 域裡，波場隨空間之變化為幾個簡諧函數之線性組合，因此其空間之映頻混擾在 $f-k$ 域或 $f-v$ 域所造成之峰值具有一定之規則，可與頻散曲線區別，因此對於受波器最小間距之要求可大幅放寬，一般  $dx \leq 5 \text{ m}$  即可 (林志平等，2002)。

由前一步驟所得到之頻散曲線進行剪力波速度層構造反算分

析，藉由頻散曲線的比對得到地層剪力波速剖面。反算分析是採用美國 Kansas Geological Survey 團隊所發展之 Surfseis 1.80 軟體進行。該軟體以 Xia et al.(1999)所發展之反算運算法進行剪力波速反算，此反算以猜想地層之頻散曲線理論解與代表性頻散曲線之方均根值 (root-mean-square error) 做為可靠度值，以不斷試誤之方法使此值降至最低而獲得該地層之一維剪力波速剖面。

## 2.4 剪力波於地盤改良成效的應用

過去前人應用現地或實驗室剪力波量測技術於地盤改良場址，嘗試透過改良前後剪力波速變化與傳統檢驗工具如圓錐貫入試驗、標準貫入試驗等試驗結果建立關係，或藉由剪力波速變化，提供液化潛能分析(參考表 2.5)，但傳統現地剪力波量測技術卻因量測範圍小且容易受到地表雜訊干擾，代表性常受質疑。隨著表面波震測技術的發展，有學者透過表面波震測快速與取樣範圍大的優點將此技術應用於地盤改良成效檢核上，以期能提供地盤改良成效檢核上更客觀的方法。

### 1. 剪力波速於地盤改良成效的應用

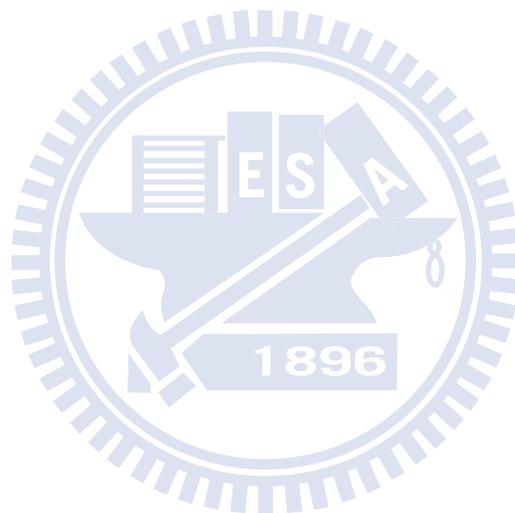
Schneider 等人(2000)於一處地盤改良場址施做震測式圓錐貫入

試驗(SCPTu)及跨孔震測試驗，該場址利用改良前後所得到之錐尖阻抗值及剪力波速計算預壓密應力，達到地盤改良品質控制；Axtell and Stark(2008)利用跨孔式震測法及共振柱試驗檢測攪拌工法(Soil Mix and Jet Grout Methods)之成樁效果與剪力模數變化，雖然室內試驗無法與現地試驗相符合，但現地試驗之結果仍能顯示剪力波速與剪力模數之提升，可做為數值模擬之參考；吉富宏紀等人(2006)在一處以抗液化為改良目的之地盤改良場址(擠壓砂樁工法)施做懸垂式 P-S 波探測法及下孔式震測法，測定結果發現樁間剪力波速約提升 6%，樁心則提升 30%。

## 2.表面波震測於地盤改良成效應用

Kim 等人(1997)利用表面波譜法(SASW)評估動力夯實改良場址之土壤緊密度，可明顯見到該場址夯實前後波速之變化，相較於以往做為評估之方法如 SPT 與 CPT，表面波震測法顯得經濟且可大範圍的評估；Kim 等人(1999)利用共振柱試驗並透過試驗建立土壤剪力波速、乾密度與有效應力之關係，再依現地表面波震測的施做得到之剪力波速剖面，轉換成土壤乾密度剖面，讓使用動力夯實工法之改良場址能更快速的確認是否達改良標的。Donohue and Long(2008)利用多頻道表面波震測法量測低壓灌漿改良工法，透過表面波震測法得到之

剪力波速可監測灌漿後膠結之情況以及剪力模數的變化，配合實驗室  
剪力波元件試驗(Bender Element test)建立波速與土壤單壓強度之關  
係，即可由現地得到之剪力波速取得大範圍改良土之膠結強度，在以  
不同時間施作表面波震測之結果，得以監測地盤改良土膠結強度之程  
度，有助於縮短工期。



### 第三章 研究方法

前人利用諸多方法量測地盤改良前後之剪力波速再透過試驗室試驗或經驗公式建立剪力波速與土壤單壓強度、標準貫入試驗與土壤乾密度等參數之關係，透過剪力波速轉換成所需之工程參數或透過公式轉換成剪力模數，以達設計及檢核目標。然而表面波震測在增加地盤緊密性之地盤改良工法上可顯示其取樣範圍大、快速、經濟且非破壞性等優點，相較於傳統現地之剪力波速量測技術更突顯其特色；前人利用表面波震測量測地盤改良成效多應用於改良後趨於均質之改良土體，然而在測向變化角為顯著之複合改良土體之表面波量測截至今日則較無應用之文獻。以往複合改良土體之檢驗著重於改良樁體之性質，未考慮整體改良土之綜合表現，所以取得大範圍改良土體之資訊有其必要性，能更客觀檢核地盤改良成效，而本研究利用表面波震測法之優點期望達成此目標，並提供成效檢核之標準。

本研究流程如圖 3.1，透過文獻蒐集，找尋地盤改良工法既有之成效檢核方式，並討論改良後形成高度不均質性改良土體既有之成效檢核方法缺點，以及表面波震測法之優點是否能確切反應地改後之勁度變化。因此選擇會形成高度不均質之地盤改良場址做為研究，首先透過蒐集地盤改良前後之試驗資料如標準灌入試驗N值、單壓試驗( $q_u$ )

或是跨孔震測試驗資料；另一方面嘗試利用表面波震測的施做，透過反算分析得到剪力波速剖面，期望能反應出地盤改良前後之差異。接著將所得之資料結果綜合比較，試圖找尋剪力波速變化與地盤改良參數變化之關係，希望能藉由表面波震測法快速且經濟的優點，迅速得知改良後之成效是否符合設計者之要求。

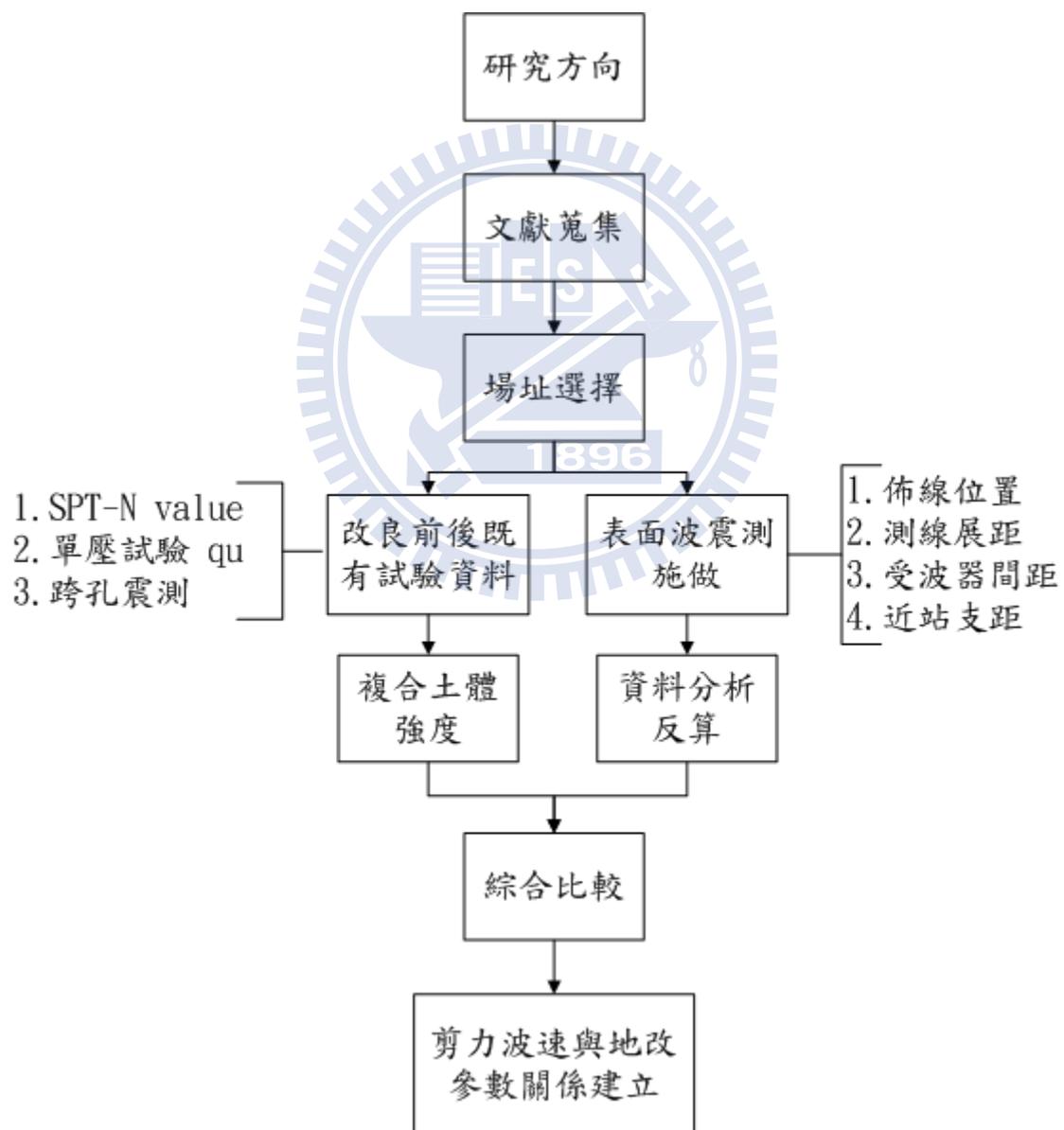


圖 3.1 研究流程圖

### 3.1 試驗規劃與流程說明

試驗目的首要在於了解表面波震測能否區別出改良前後波速之差異以及改良位置之所在，地盤改良後土壤中形成高強度之改良柱體，使之具有高度不均質的特性，因此於改良樁體上(位置)及改良樁間佈設測線以探討此問題，而施測因子的選擇是參考 Park et al(1999;2002)以避免分析上可能產生之問題；而本研究亦配合跨孔震測的試驗相互對照，以增加試驗可靠度。除此之外表面波震測是否能反應地盤整體勁度變化除了上述之施測因子外，尚有地改後之改良樁體強度、改良樁體之間距以及改良率的不同，而為了能確實反應出地改前後之差別，參考張正宙(2002)建議之多頻道表面波震測野外試驗流程，提出試驗規劃與流程。

#### 試驗流程及說明：

1. 於地盤改良前施作多頻道表面波震測，依照現場改良平面圖於預定之改良位置(樁上)及樁間佈設測線，做為改良前背景值。
2. 照改良區域現場狀況決定測線展距並考慮近站支距( $X_1$ )及接收器間距( $\Delta X$ )，用以避免近域影響(Near Field Effect)、映頻混擾以及遠域影響(Far Field Effect)，震源採用 12lb 鐵槌搭配鐵板墊片。
3. 施做之同時應避免人為噪音，以減少雜訊對震波訊號之干擾，若

該場址附近車流量或人潮太大時，則需考慮夜間施作，以降低背景噪音之影響；此外震源亦需避開人孔出入口或地下管線處，盡量避免震波之不規則傳遞。

4. 在同一炸點處反覆施做疊加震測，以提高資料訊號之雜訊比，直到儀器螢幕上可清楚辨識表面波之訊號。
5. 將各近站支距敲擊得到之資料透過波場轉換法分析比較出最清晰之能量振幅譜，得到最佳之頻散曲線做為分析依據。
6. 於改良完成後，原試驗位置再行施作，並將所得之震測資料加以分析比較前後差異。
7. 蒐集該場址之背景資料如預定改良率、鑽探、標準貫入試驗(SPT)與基本物性試驗等，以及改良後原有檢核試驗如標準貫入試驗、單壓試驗等等比較改良前後之差異，或透過複合土體設計概念轉換成土壤強度並嘗試著比較其差異，試圖找出地盤改良前後之各項參數變化與剪力波速變化之相互關係。

### 3.2 試驗儀器簡介

表面波震測系統主要包括震源、受波器、震測儀等如圖 3.2 所示，分別說明如下：

**震源：**用以製造人造震動，有長柄鐵鎚、落錘、振動器、或炸藥等不同能量的選擇，視欲探測深度、地質條件、及環境噪音而定。本研究以 12lb 長柄鐵槌為震源。

**受波器：**用以接收震源所產生的地表震動。本試驗中使用 OYO Geospace 公司出品之速度式受波器，其可收錄最低頻率至 4.5Hz。受波器上部為塑膠殼，內部含有電磁式感應線圈，用以感應並接收震波訊號，而其下部為圓錐鋼釘，長約 7 公分左右，用以垂直插入固定於地表土層。

**震測儀：**用以紀錄受波器所接收到的地表震動訊號。本試驗採用美國 Geometrics 公司出品之 StrataVisor NZ 型震測儀，屬於多波道可攜帶式數位震測儀，基本型最多可同時收錄 24 個受波器之資料，另可藉由擴充內部界面卡以及外接擴充器 Geode 兩種方式增加頻道數至 240 頻道以上。其取樣率在 20~16000  $\mu$ sec 之間，取樣時間最長可達 256 sec，允許震波訊號重覆疊加。此外，使用日本 OYO Geospace 公司出品之多頻道式震測電纜用以連接震測儀，每一震測電纜最多可同時連接 12 個受波器，相鄰兩連接頭之間距約為 7.5 公尺，可延伸長度約為 9.6 公尺，單一震測電纜之總長約為 92 公尺。



圖 3.2 表面波震測儀器

### 3.3 表面波於地盤改良成效應用-案例施作

本研究選擇兩處地盤改良工址，分別是施做高壓噴射灌漿改良與擠壓砂樁改良，期望透過兩處場址的研究，能初步觀察其間之關連性。兩處場址施作地盤改良之目的在於增加地盤穩定性、承載力以及增加抗液化潛能，以下就兩處場址分別介紹其背景資訊及試驗相關配置。

#### 3.2.1 高壓灌漿改良場址

高壓噴射灌漿工法(High pressure jet grouting)亦有稱為高壓噴流注入工法，為地質改良灌漿工法中之一種。此工法係以高泵將硬化材

料灌入套管中，並經由一特製小口徑的噴嘴由地下水平噴出，產生高壓噴射攪拌流以切削地盤，同時旋轉及提升鑽桿，使硬化材料與土壤充分拌合，待其硬化後造成樁型固結物(王劍虹，1985)。施工順序如圖 3.3 所示，首先將鑽桿置入預定改良深度，再由高壓幫浦將水泥漿液與空氣噴射並切削週圍土壤，直到提升至預定改良深度。

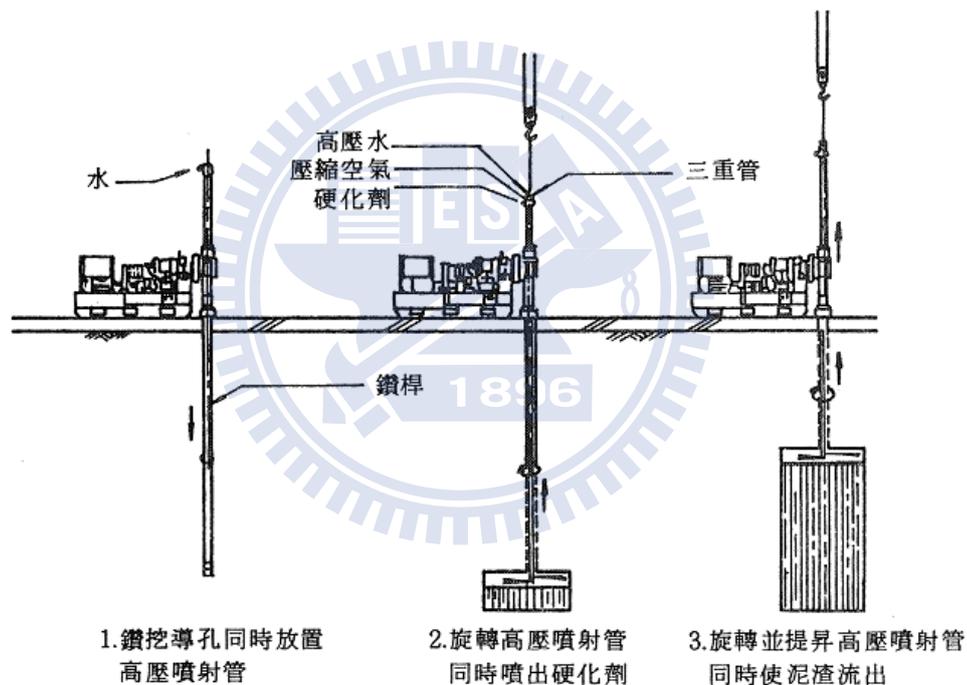


圖 3.3 高壓噴射工法施工順序圖 (王劍虹，1984)

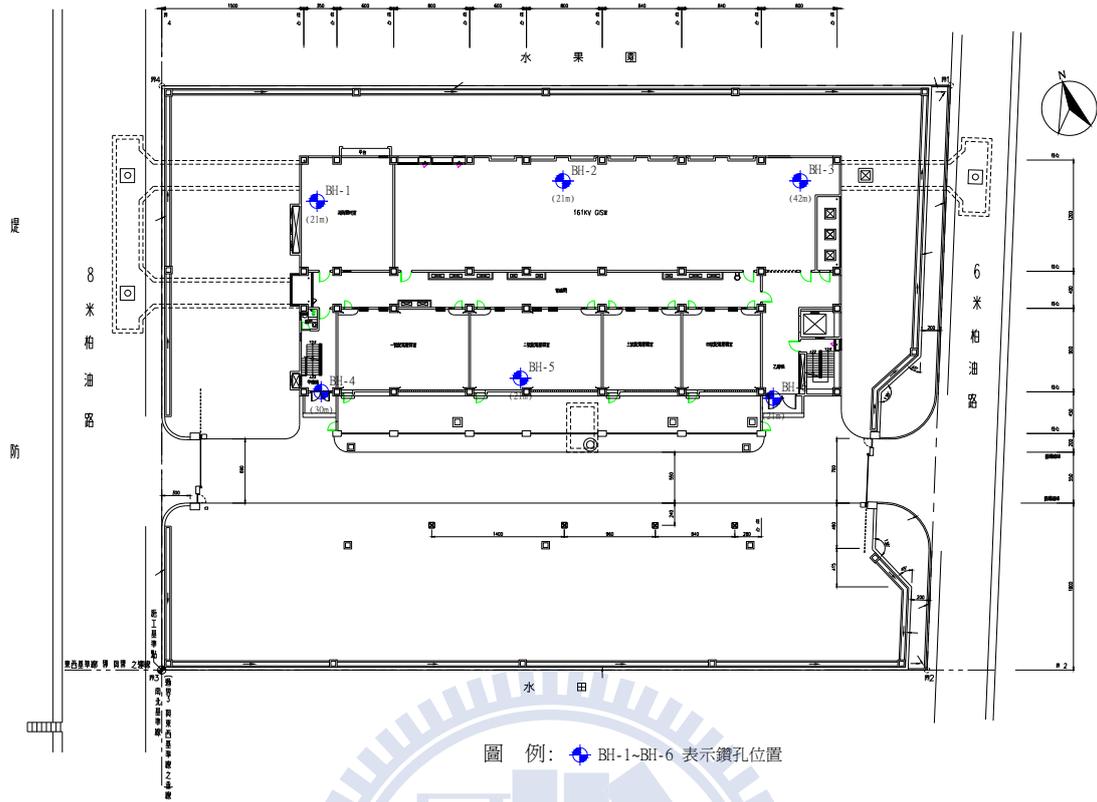
## 1. 場址簡介

本場址位於宜蘭縣冬山鄉與羅東鎮交界處往羅東運動公園之宜26線附近變電所用地內(參考圖 3.4)，基地鑽孔平面位置示意圖，詳

圖 3.5 所示。依據地質調查結果，本基地地層在鑽探最大深度(42 公尺)內，由上而下約可概分為八個層次，即：(1)表土回填層(2)灰色粗中細砂層(3)灰色粘質粉土層(4)灰色粉質粗中細砂層(5)灰色粗中細砂層(6)灰色粘質粉土層(7)灰色粉質細砂層(8)灰色礫石層，詳細之剖面如圖 3.6 與圖 3.7。簡化基地地表面下 0~42m 範圍內之簡化地層之分類及參數建議如表 3.1。



圖 3.4 基地位置圖



圖例：● BH-1~BH-6 表示鑽孔位置

圖 3.5 鑽孔平面位置圖

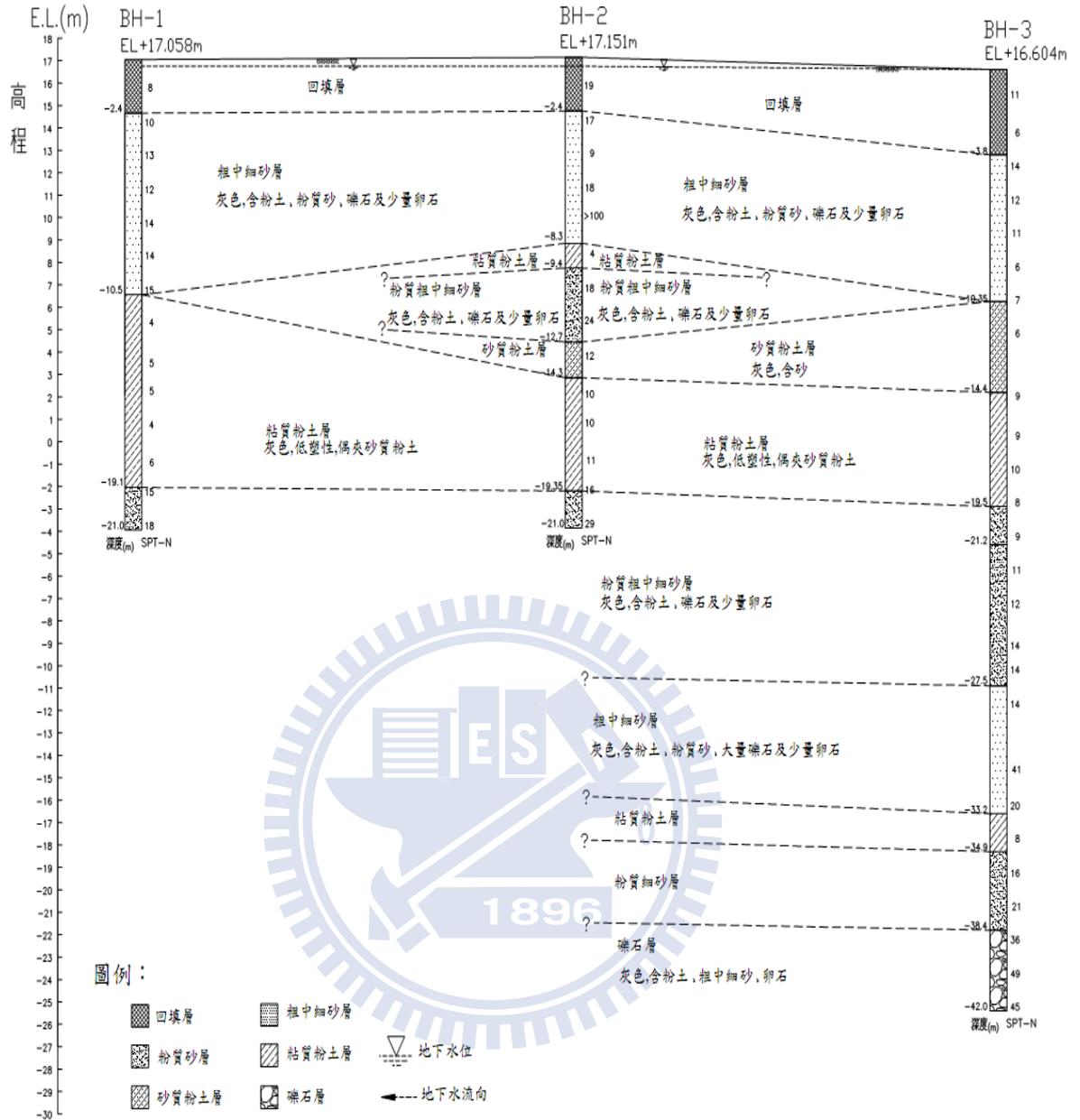


圖 3. 6 BH01\_BH02\_BH03 地層剖面圖

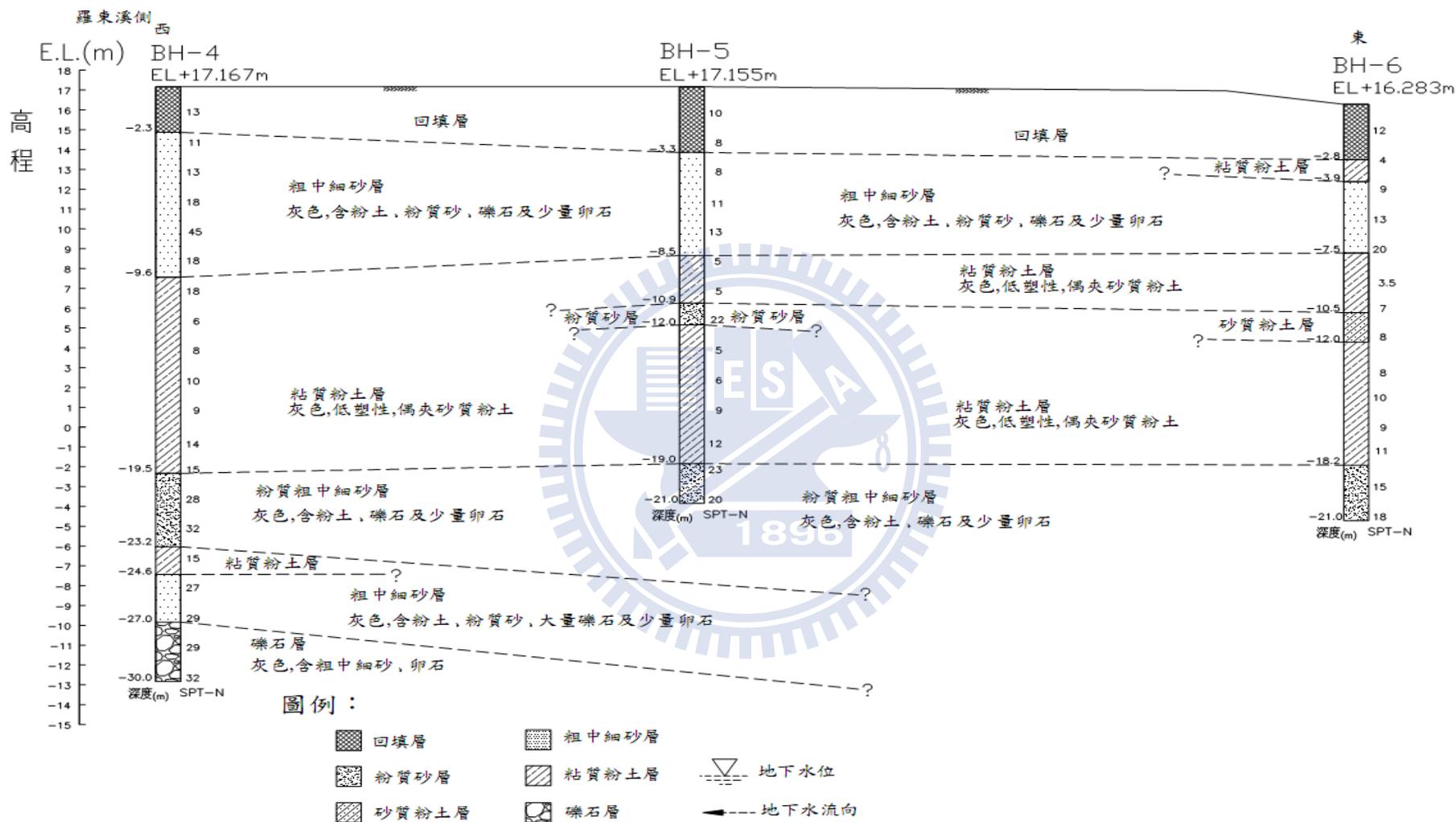


圖 3.7 BH04\_BH05\_BH06 剖面

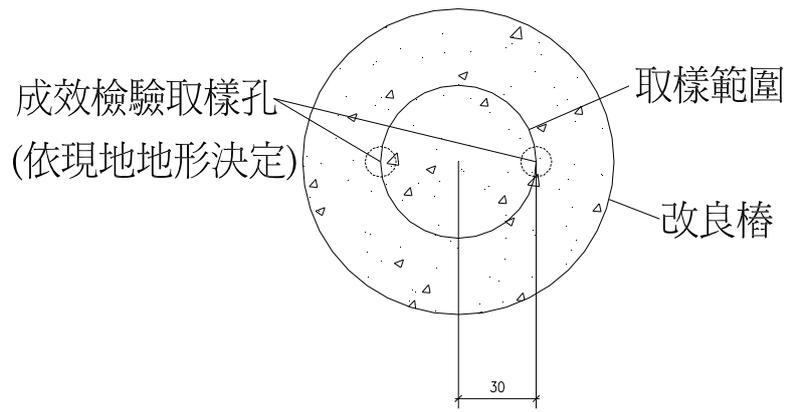
表 3.1 土層簡化參數表

層次	分類	土層描述	層底深度 (GL.-M)	N 值	單位重 (T/M <sup>3</sup> )	Cc/Cs	Su (T/M <sup>2</sup> )	C' (T/M <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)
1	SF	表土回填層	3.0	12	2.04	--	--	0	30.6
2	SW-SM/SP-SM/SM/GW/GP/GPGM/SP/GW-GM	灰色粗中細砂層;含粉土、粉質砂、礫石及少量卵石	10.0	14	2.05	--	--	0	35.1
3	ML	灰色粘質粉土層;低塑性,偶夾砂質粉土	19.0	8	1.89	0.253/0.023	2.0	0	31
4	SM	灰色粉質粗中細砂層;含粉土,礫石及少量卵石	27.5	19	2.04	--	--	0	32.8
5	SP-SM/SM	灰色粗中細砂層;含粉土、粉質砂、大量礫石及部分卵石	33.2	30	2.02	--	--	0	36
6	ML	灰色粘質粉土層;低塑性	34.9	8	1.93	--	5.0	0	31
7	SM	灰色粉質細砂層	38.4	19	1.99	--	--	0	32.7
8	GP-GM/SW-SM	灰色礫石層;級配不良,含粉土、粗中細砂、卵石	42	43	2.13	--	--	0	39.9

本工址採用高壓噴射灌漿改良工法，詳細施做位置如圖 3.9，施工方法如下：

1. 本工程地盤改良樁樁徑為  $\phi$  120cm，樁距為 2.8m。
2. 灌漿機具進場組裝完成後，需會同監造單位進行現場流量及噴射壓力測試。

3. 機具設備就樁位前需將場地整平及點位放樣。
4. 全面施作之建築物區：整地前地表下 5.5m~20.0m(L=14.5m)，電纜涵洞區：整地前地表下 5.5m~20.0m(L=14.5m)，冷卻器及集油池區：整地前地表 1.0m~20.0m(L=19.0m)。
5. 整體設計改良率為 14.43%
6. 成效檢驗如下：
  - (1) 全面施作區鑽心取樣：於整地前地表面(現地地表)下 5.5 公尺至 20.0 公尺(建築物區、電纜涵洞區)，於整地前地表面(現地地表)下 1.0 公尺至 20.0 公尺(冷卻器及集油池區)，以NX套管鑽心採取土樣共計 14 孔，每孔各取一組試體(上、中、下，共 3 個)， $q_{u需} \geq 10\text{kg/cm}^2$ (黏土層)， $q_{u需} \geq 35\text{kg/cm}^2$ (砂土層)。取樣位置如圖 3.8 所示。
  - (2) 全面施作區標準貫入試驗：於三支改良樁所構成三角形之中心點，進行標準貫入試驗，共計 14 處，試驗深度為整地前地表面(現地地表)下 5.5 公尺至 20.0 公尺，每隔 1.5M 進行乙次，GL-5.5M~GL-10.5M 標準貫入試驗 N 值需  $\geq 10$ ，GL-10.5M~GL-20.0M 標準貫入試驗 N 值需  $\geq 8$ 。實際檢核位置由甲方決定，本場址選定檢核位置參考圖 3.9。



改良樁取樣位置平面示意圖

圖 3.8 改良樁成效檢驗取樣位置圖



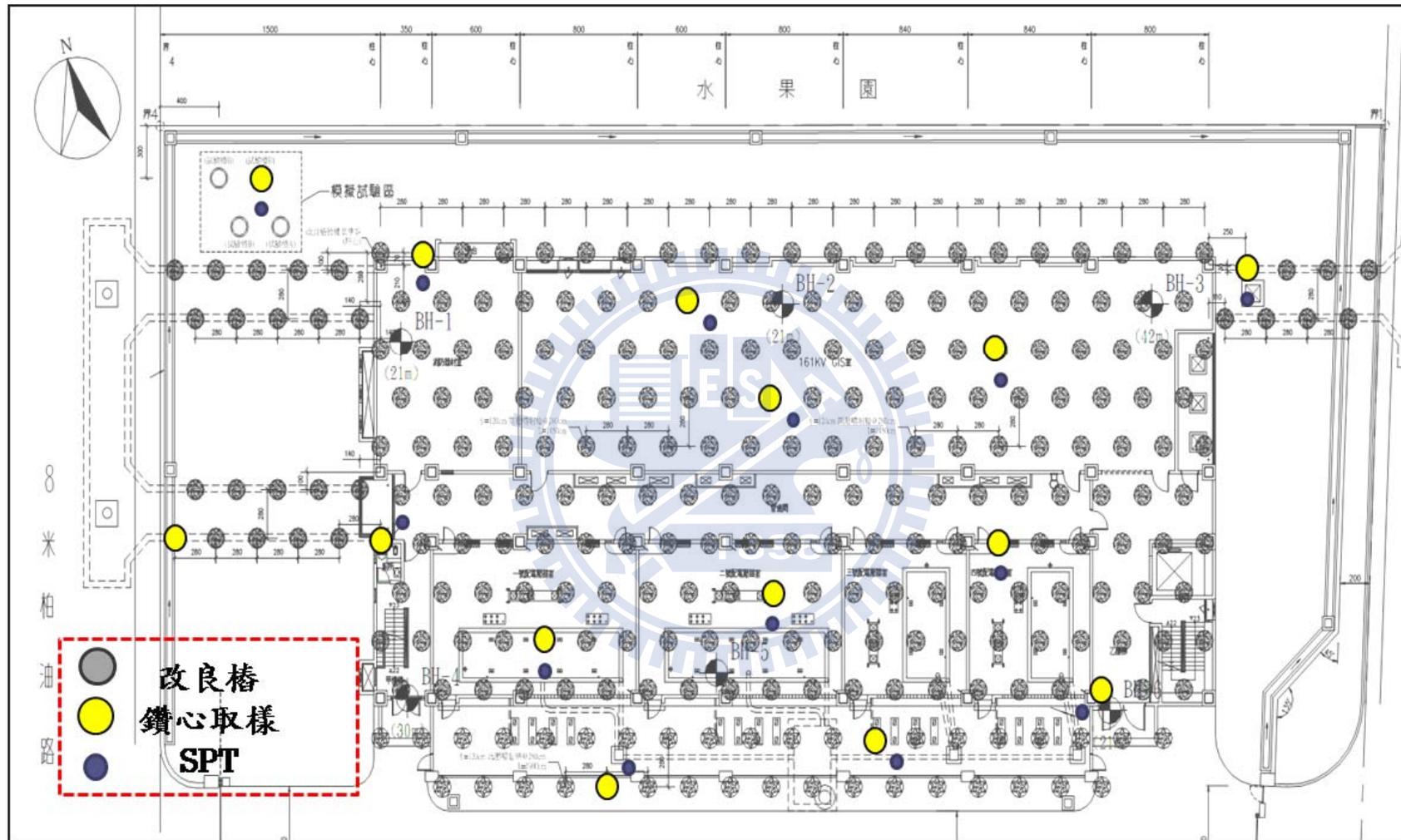


圖 3.9 地盤改良樁改位置及檢核位置平面圖

## 2.表面波震測施測配置

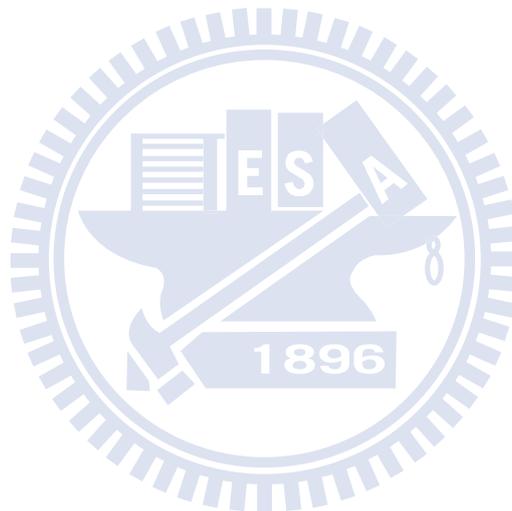
表面波震測佈線位及相關檢驗置如圖 3.10 所示，由前可知最大改良深度於改良前地平面往下 5.5 至 20 公尺處，考量淺層有未改良區及有效探測深度情況下，受波器間距( $\Delta X$ )為 2 公尺，使用 24 個受波器，構成 46 公尺之展距，測線 L1 靠近鑽探孔 BH02，測線 L4 位於 BH05 孔附近，方便與兩孔鑽探及相關試驗資料相互比對；L1、L4 測線在樁心，L2、L3 測線佈於樁間，兩測線相距 1m，用以探討表面波震測能否反應分改良區域及未改良區域，本試驗將場址分成 L1、L2 及 L3、L4 兩組試驗加以對照；採用 12lb 鐵錘搭配鐵板墊片做為震源，近站支距採 20m 每次遞減 2m 至第一個受波器，以測試出最佳收錄結果。

## 3.對照試驗-跨孔試驗

現場相關位置如圖 3.10 所示，現場鑽有 C1~C6 共六孔，試驗規畫如表 3.2，配合表面波震測之配置，震源設置於 C2 及 C6 孔，分成 case1 對照 L1、L2 測線與 case2 對照 L3、L4 測線，再分成過改良樁以及樁間之配置，期望與表面波震測之結果相互印證。

表 3.2 跨孔震測配置表

	Source	Receive	Distance (m)(前)	Distance (m)(後)
Case1	C2	C1(過樁)	5.58	5.62
		C3(未過樁)	5.6	5.4
Case2	C6	C5(過樁)	5.65	5.58
		C4(未過樁)	5.65	5.76



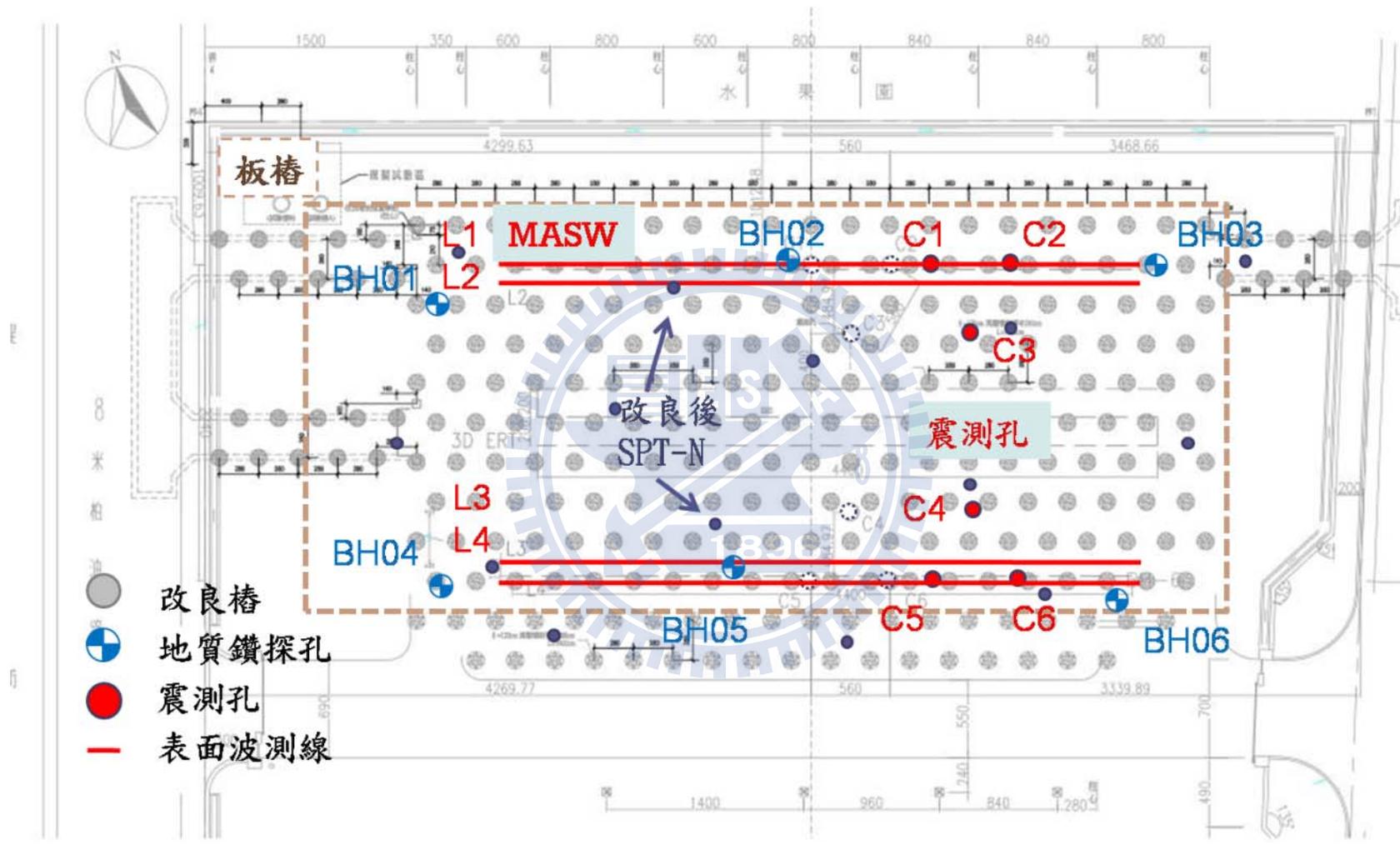


圖 3.10 表面波震測與跨孔震測試驗配置圖

### 3.2.2 擠壓砂樁改良場址

擠壓砂樁工法其原理係利用一鋼套管打入土中由震動效果使鋼管周圍土壤擠壓緊密，在鋼管拔出時以空氣壓力等方法將回填料壓入鋼管底端，進入孔底，反覆擠壓後，達成改良效果(歐晉德等，1984)。

#### 1 場址簡介

選定由台 17 線沿典寶溪堤外便道進入北護岸及岸壁式內港碼頭#1 及#2 附近之預定位置作為施工場地，工址位置詳圖 3.11。另配合附近鑽孔選定試驗砂樁施作位置，以便成效驗證比對，試驗區位附近鑽孔如圖 3.12。

由本試驗區位附近鑽孔顯示，本區高程約在 EL.+1.64m～EL.+2.1m 之間，鑽探最大深度約為 35m，概分為三個層次：

1. 第一層次為粉土質粘土層，平均厚度約 12.2m，主要係由粉土質粘土夾細砂質粉土所組成，色呈灰色，其 SPT-N 值約在 1～4 之間。本層次之統一土壤分類為 CH、CL。為具中至高塑性極軟弱至軟弱程度之土層。
2. 第二層次為粉土質細砂層，平均厚度約 19.8m，主要係由粉土質細砂，細砂夾薄層粘土所組成，色呈灰色，其 SPT-N 值約在 11～27 之間，為無塑性中等緊密程度砂層，統一土壤分類為 SM、

SP。

3. 第三層次為粉土質細砂層，本區鑽探深度落於此層次，研判厚度大於 3.2m 以上，主要亦係由粉土質細砂、細砂質粉土、細砂夾薄層粘土等所組成之地層，色呈灰色。其 SPT-N 值約在 13~20，為無塑性中等緊密程度砂層，統一土壤分類為 SM。

本試驗區位之土層分佈及土壤性質經鑽探成果整體研判其變異性不大，且具本工區之代表性。本試驗區位附近既有鑽探柱狀圖如圖 3.13 所示，簡化土層分佈及參數詳表 3.3。

本場址規劃地盤改良工法將採擠壓砂樁一併改良深度約 12m 內之軟弱黏土及深度約 12m~20m 間之 SPT-N 值較小之軟弱砂土層。改良區域有兩處：

- (1) 區域A之改良樁徑為 0.7m，改良樁距 6m，改良位置如圖 3.

14，改良率為 1.1%，另外擠壓砂樁四周有設置鑽孔以利跨孔震測的施做。

- (2) 區域B之改良樁徑為 0.7m，改良樁距為 0.94m，形成高密度之群樁改良區域，改良位置圖如圖 3.15，改良率為 50%。



圖 3.11 工址相關位置

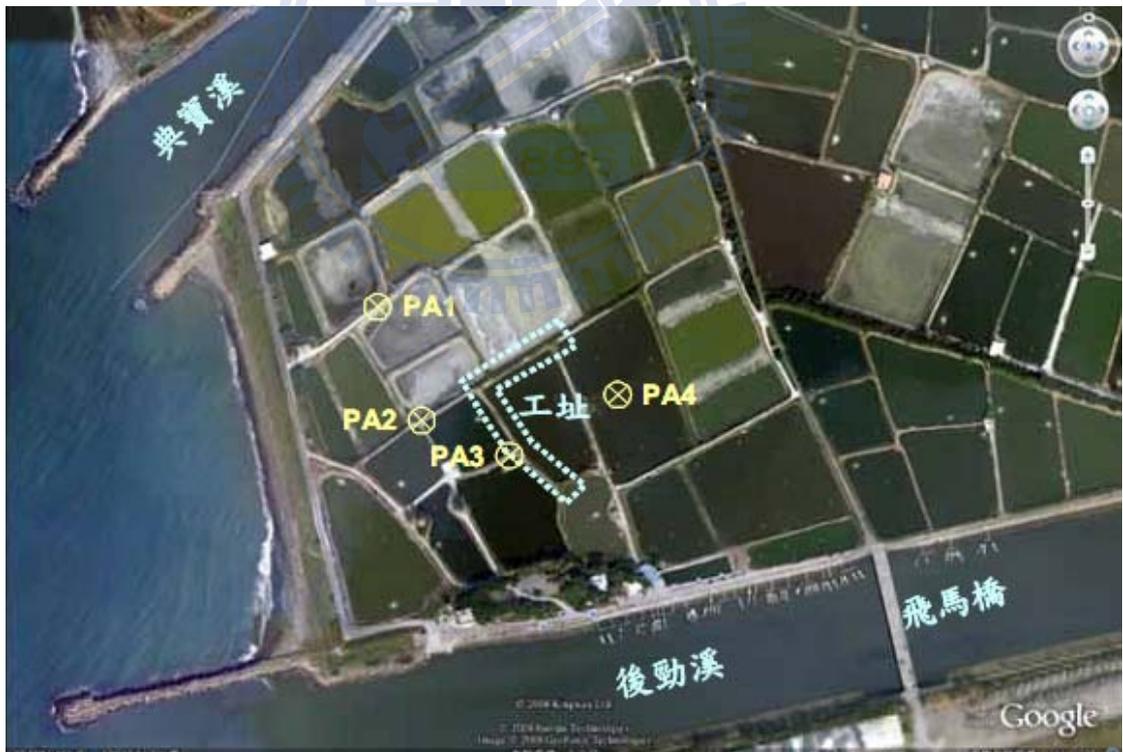
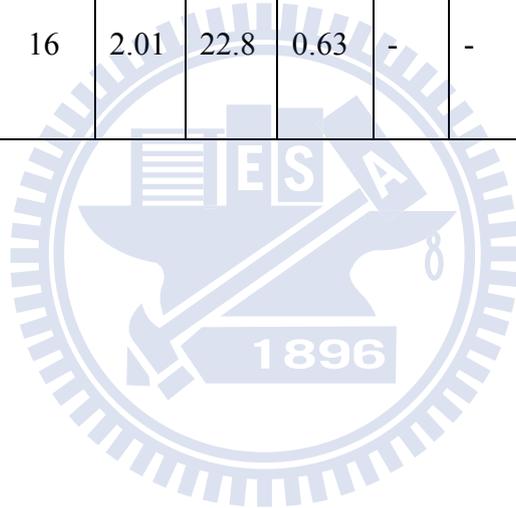


圖 3.12 試驗區域及附近既有鑽孔位置

表 3.3 試驗區域簡化地層參數(PA1~PA4)

層次	地層狀況	平均厚度	平均 N 值	$\gamma_t$ t/m <sup>3</sup>	$\omega\%$	e	LL	PI	$C_c/C_s$	Su(t/m <sup>2</sup> )	$C'(t/m^2)$	$\Phi'$
一	灰色粘土夾薄層粉土質細砂與貝屑(CL)	12.15 m	2	18.41	28.1	0.89	40	20	0.27/0.027	70	0	30.5
二	灰色粉土質細砂夾貝屑(SM、SP)	19.8m	19	2.00	21.47	0.66	-	-	-	-	0	30.2
三	灰色粉土質細砂夾粘土薄層(SM)	3.2m 以上	16	2.01	22.8	0.63	-	-	-	-	0	30.4





## 2 表面波施測配置

試驗配置如圖 3.14 及圖 3.15 所示，區域 A 改良深度為 0 至 20m，考量探測深度、近站支距及測線涵蓋範圍，採用 24 個受波器，間距為 0.8m，構成 18.4m 之測線，震源同樣採用 12lb 鐵錘搭配鐵板墊片，最大近站支距為 8m，每次遞減 1.6m 至第一個受波器。

區域 B 為高密度之群樁改良區，改良深度為 13m，考量探測深度以及改良區域之範圍，採用 24 個受波器，間距為 0.5m，構成 11.5m 之測線，震源為 12lb 鐵錘搭配鐵板墊片，最大近站支距為 5m，每次遞減 1m 至第一個受波器。

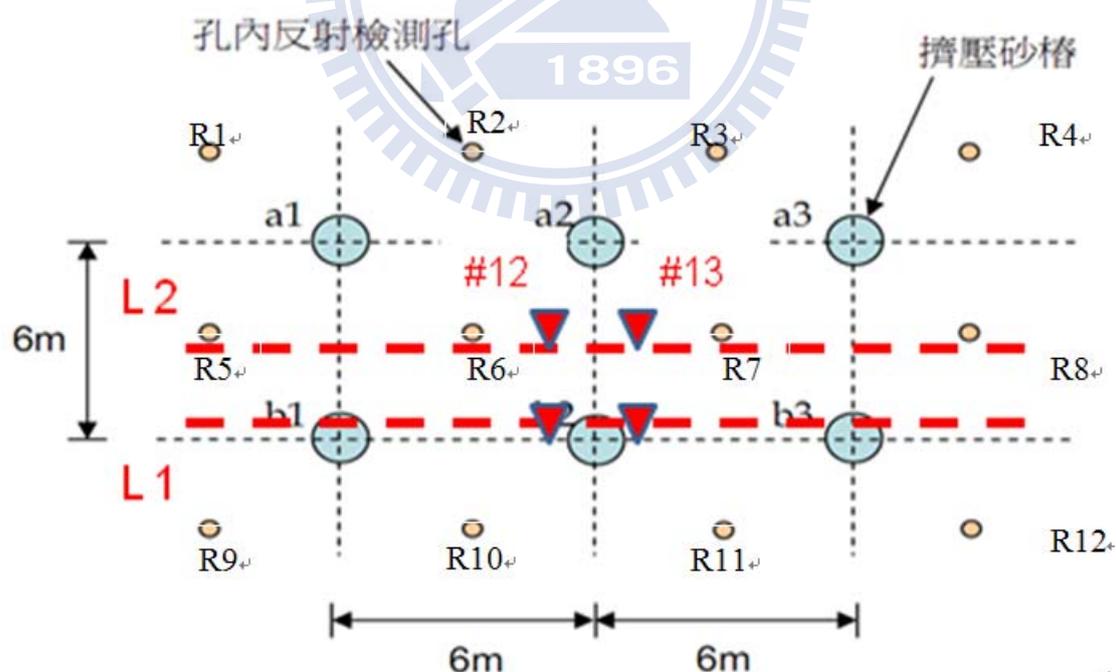


圖 3.14 擠壓砂樁試驗區域 A 配置圖

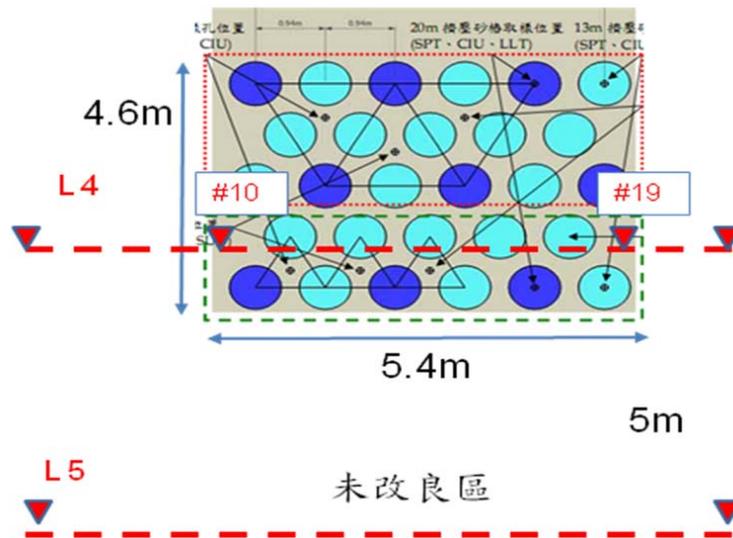


圖 3.15 擠壓砂樁試驗區域 B 配置圖

### 3. 跨孔震測施測配置

以跨孔震測結果與表面波震測相互對照，現場配置如圖 3.16，改良前以 R10 孔放置震源，R05 及 R09 放置受波器；改良後由擠壓砂樁樁心鑽孔 FA2 放置震源，R05 及 R10 放置受波器。改良前 R09-R10 可視為背景值，FA2-R05 及 FA2-R10 可以做為改良後之試驗成果。

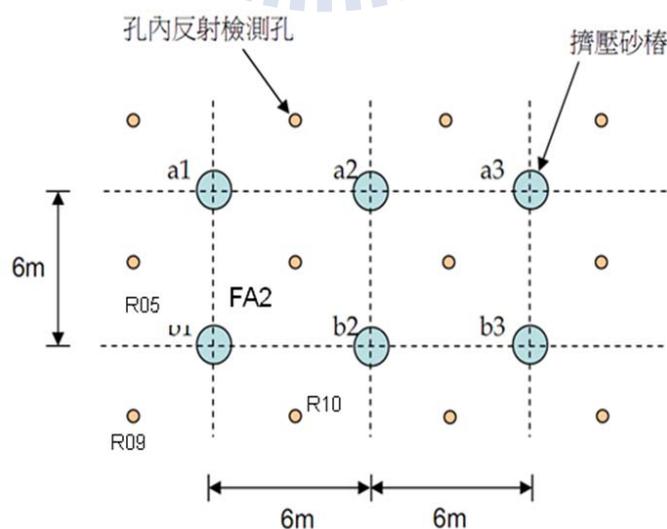


圖 3.16 擠壓砂樁跨孔震測現場試驗配置圖

## 第四章 試驗結果與討論

本章節內容包含高壓噴射灌漿改良場址與擠壓砂樁改良場址表面波震測以及跨孔震測試驗結果。改良前之震波試驗結果與現場鑽探結果做為場址背景值，將其與改良後分別經過改良樁體與樁間之表面波震測結果比較，用以探討表面波震測於測向上之取樣空間，再來利用表面波震測結果配合原改良成效檢核方法，探討可能的相互關係。

### 4.1 高壓噴射灌漿改良場址試驗結果說明

本試驗場址同時進行震波探測項目有表面波震測與跨孔震測，分別有改良前與改良後之資料可進行比對。在結果之比較上除進行建立波速剖面之比對外，針對表面波震測之多頻道特性，將比較其(1)時間空間域資料(2)能量頻譜與頻散曲線圖。詳細試驗結果如下所示。

#### 1. 表面波速測試結果

經測試後最佳近站支距採用 1m。首先觀察L1-L4(佈線位置如圖 3.10所示)表面波震測施作之t-x domain結果如圖 4.1與圖 4.2所示，縱軸為時間，橫軸為震源至受波器之距離，由圖中可觀察到改良前表面波主能量帶在 0 至 0.35 秒間，改良後表面波主能量帶則在 0 至 0.3 秒間，顯示整體地盤波傳速度已有提升的效果，比較改良後時間-空

間圖也可發現回波現象十分明顯，顯示地盤改良後地中形成許多“固結物”使得波傳過程中不斷有回波產生。

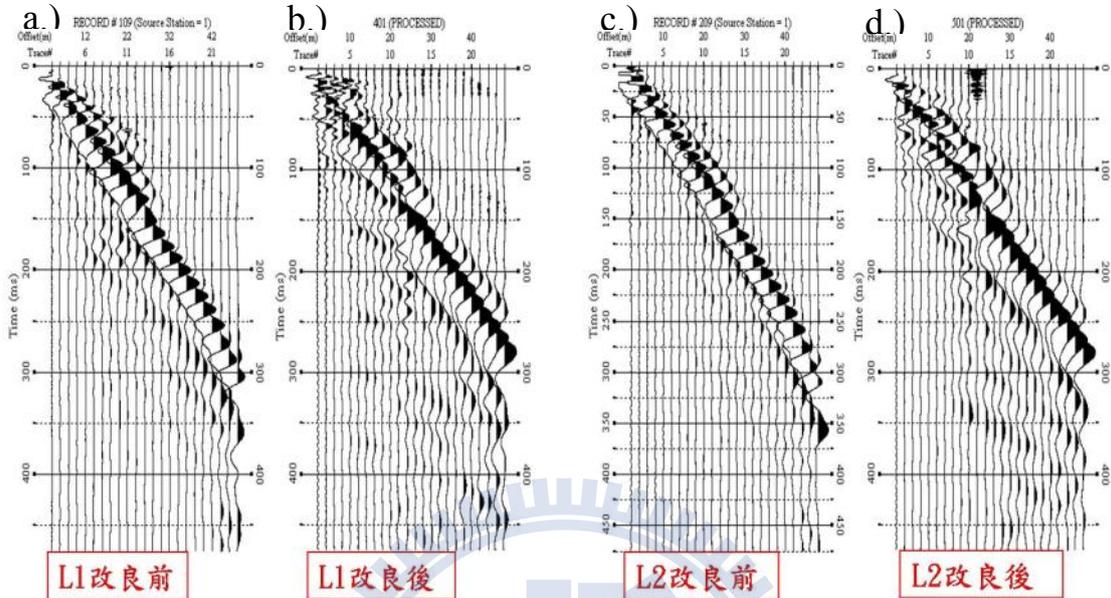


圖 4.1 地盤改良前後表面波震測 L1 及 L2 測線 t-x 域波場資料

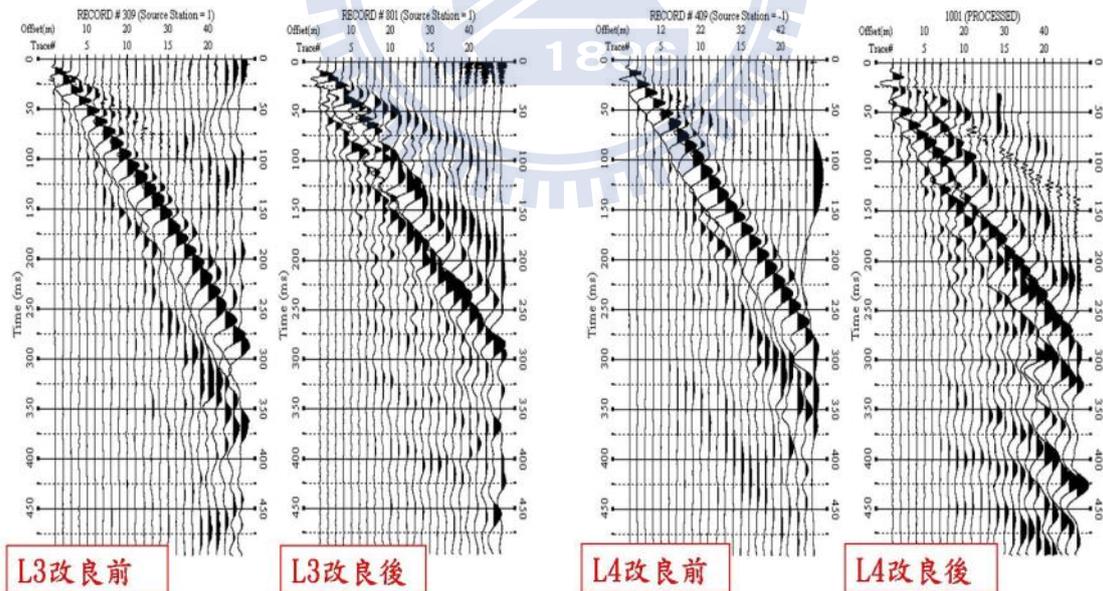


圖 4.2 地盤改良前後表面波震測 L3 及 L4 測線 t-x 域波場資料

將此時域資料透過頻率-波數轉換法得到 $f$ - $v$ 頻譜並進行頻散曲線

分析，L1 至L4 之 $f$ - $v$ 幅譜與頻散曲線分析結果分別如圖 4.3、圖 4.4、圖 4.5與圖 4.6所示，縱軸為頻率，橫軸為相位速度(phase velocity)，圖中深色部分為能量集中處，標記線表示相位速度 200m/s的位置，圖中可觀察到改良前各測線相位速度約在 150~165m/s之間，頻率範圍在 6~35Hz；改良後頻散曲線提升至 175~200m/s左右，且頻率範圍在 5~25Hz之間，僅依頻散曲線結果，約有 15%的提升率。

將上述所得之頻散曲線使用 Surfseis 1.80 軟體進行反算分析，為避免過度解讀，採用 7 層土層進行分析，得地層剪力波速，如圖 4.7 所示，所有結果之RMS值都在 3%以下。(一般而言，3%以下表示反算結果良好)，探測深度達 20 公尺。將改良前後L1、L2 與L3、L4 反算結果分別繪製於圖 4.7-a與圖 4.7-b。比較位於樁上的L1、L4 測線結果與佈設於樁間的L2、L3 測線結果相近，顯示表面波震測在設計樁徑 1.2m、樁距 2.8m之高壓噴射灌漿改良場址無法區別出樁體與樁間的差異，原因在於表面波震測影響範圍同時涵蓋樁體區域與樁間區域，使得量測結果為灌漿後土體之整體綜合表現。

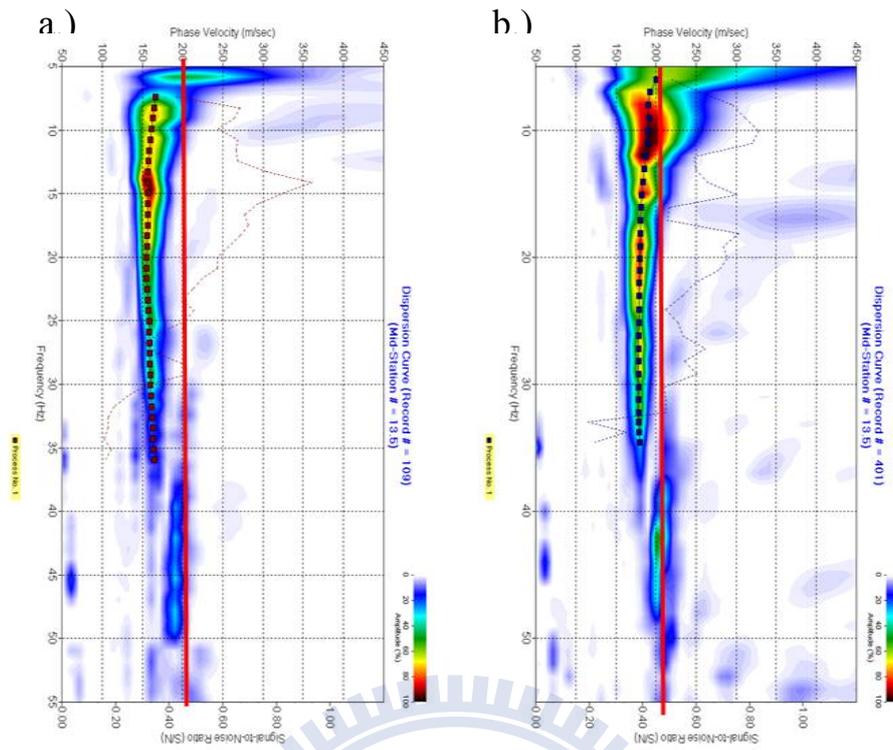


圖 4.3 地盤改良前後表面波震測 L1 測線  $f-v$  頻譜

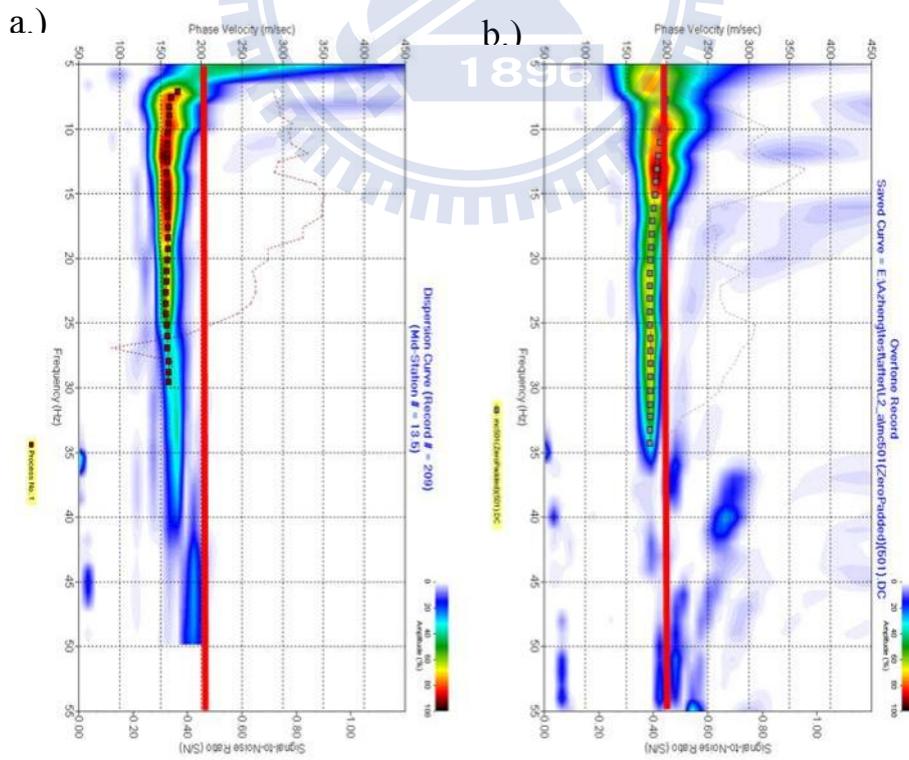


圖 4.4 地盤改良前後表面波震測 L2 測線  $f-v$  頻譜

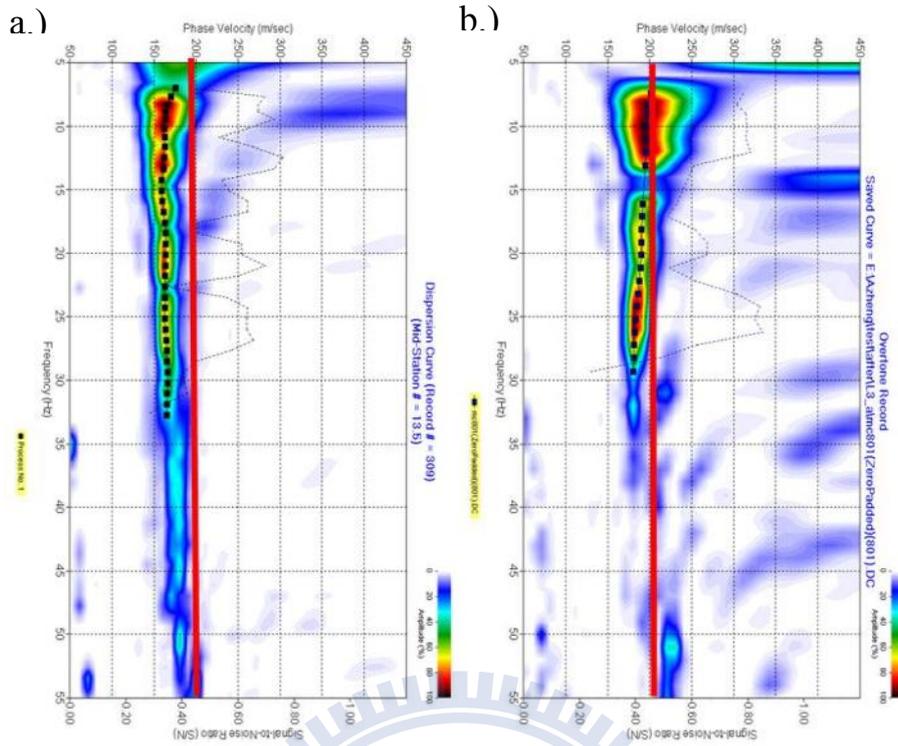


圖 4.5 地盤改良前後表面波震測 L3 測線  $f$ - $v$  幅譜

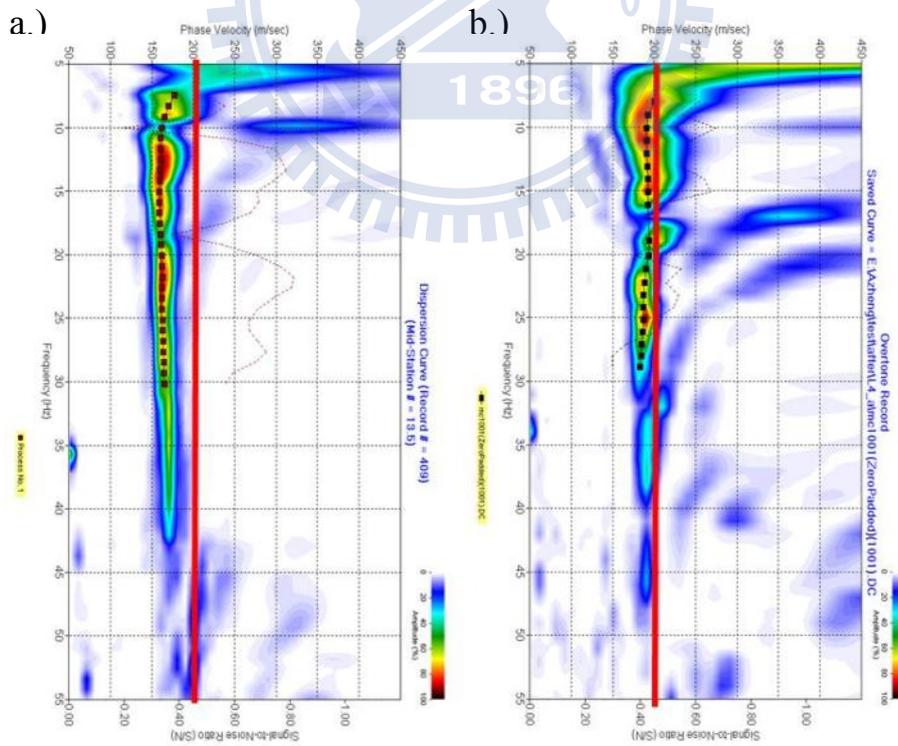


圖 4.6 地盤改良前後表面波震測 L4 測線  $f$ - $v$  頻譜

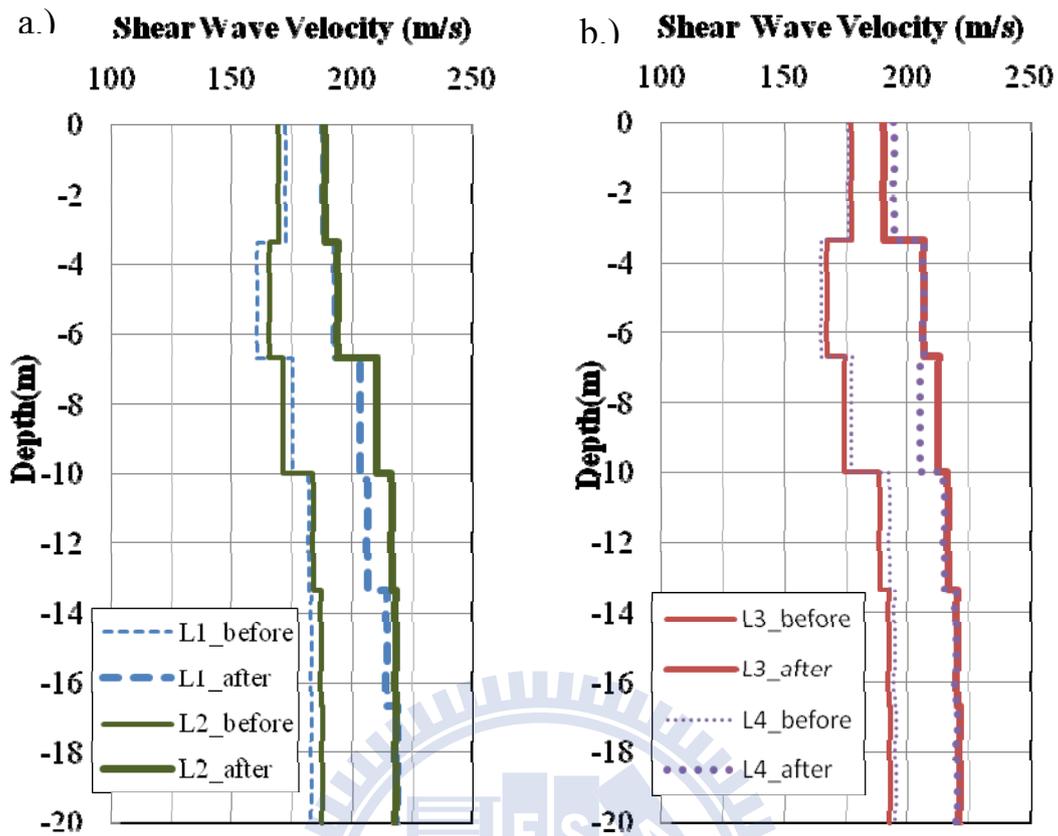


圖 4.7 改良前後剪力波速剖面圖

## 2. 跨孔震測試驗結果

跨孔震測試驗結果可區分成過改良樁體與過樁間兩種，依試驗配置圖 3.10 所示，C2 及 C6 孔為震源端，C1、C5 置有受波器使得震波通過樁體，C3 與 C4 放置受波器使震波未通過樁體，施測所得之孔內震動歷時如圖 4.8、圖 4.11，為容易判別具有相位反相性質的剪力波，由震源製造不同方向的震波，再將兩個歷時結果分別繪製於同張圖中。由圖中可以觀察到改良前後波傳時間大多座落於 0.02~0.04 秒間，改良前後差異性不十分明顯，壓力波於深度 4m 至 9m 處以及 15m

至 19m 處，不論在改良前後都出現巨大的能量，可能是裝設套管時未還填完全造成空洞所影響。此外還可注意到改良前剪力波明顯且較容易挑選，改良後受到改良樁體的影響，且此高壓噴射灌漿改良方法產生之改良樁體之樁徑受固結液滲透情況的影響，使得震波中增加許多高頻雜訊，剪力波到達時間的挑選顯得困難許多，顯示出在此高壓噴射灌漿改良場址施做跨孔震測需要面對此些雜訊的影響，而造成的可能誤差。

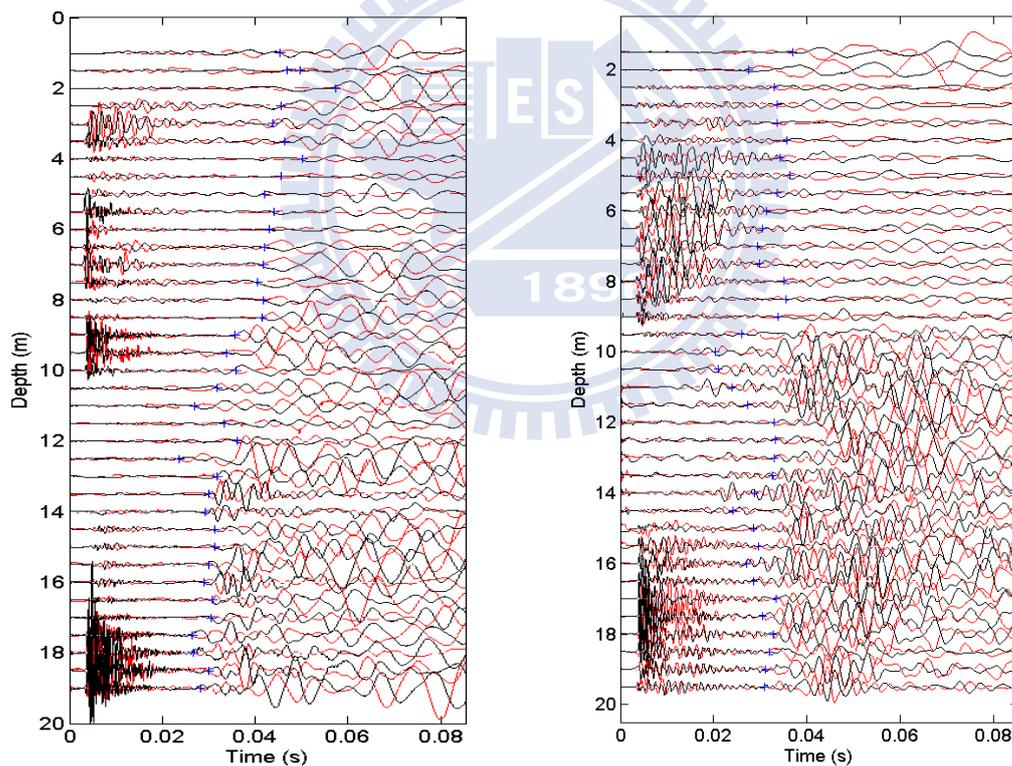


圖 4.8 C1-C2 跨孔震測孔內歷時

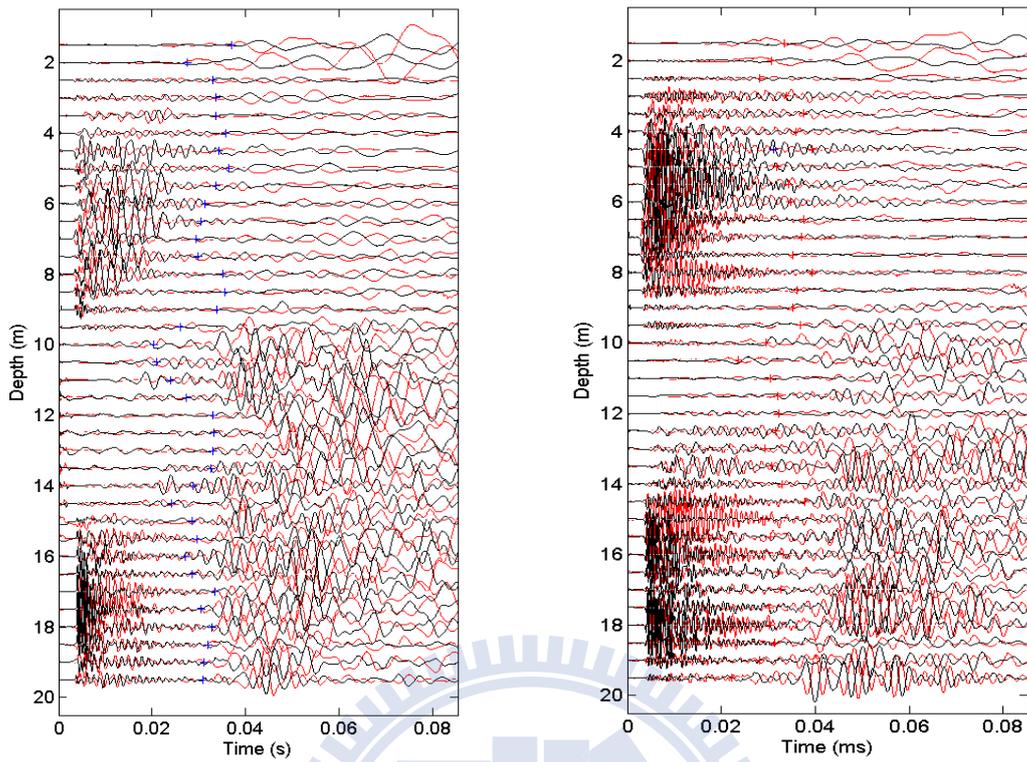


圖 4.9 C3-C2 跨孔震測孔內歷時

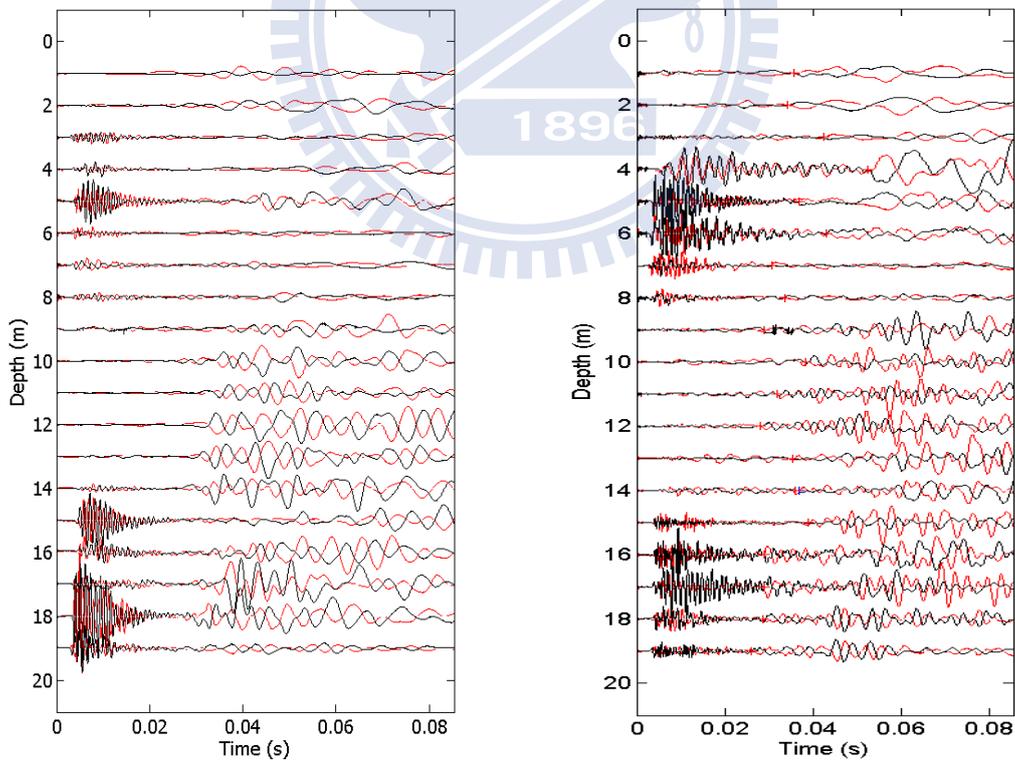


圖 4.10 C4-C6 跨孔震測孔內歷時

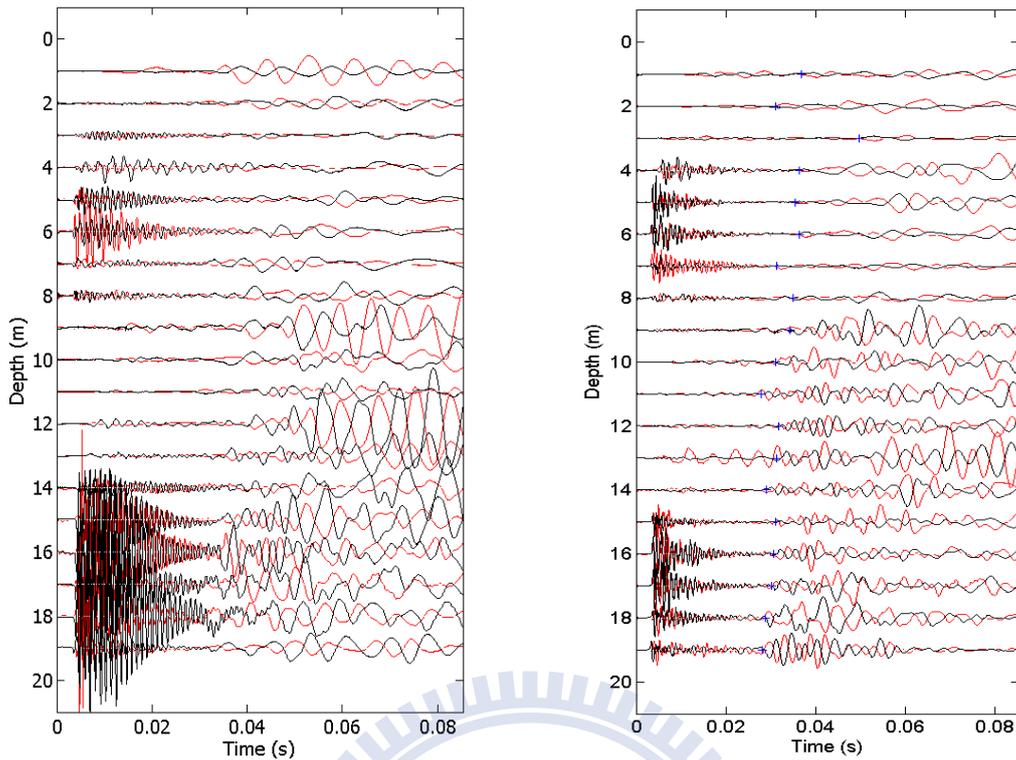


圖 4.11 C5-C6 跨孔震測孔內歷時

剪力波初達時間經挑選後，透過波傳距離可計算出剪力波速結果如圖 4.12，由圖中可分辨出改良前後之差異，改良前剪力波速在 1~8m 深度約在 100~150m/s，8~20 深度波速約在 150m/s 以上，改良後平均剪力波速約提升 15~20m/s，然而在深度 14m 以下改良前後波速反應並不明顯，其中可以發現過樁與未過樁試驗結果頗為相似，可能是假定波傳路徑通過樁間之試驗(C3, C4)，其樁間土壤受到灌漿液的滲入，造成單樁樁徑並非原先設計之 1.2m，使得波傳的過程中通過固結區域，而使波速相對提升，因此該試驗無法顯示出過樁與未過樁之差別。總體而言，該處進行地改後剪力波波速有所提升。

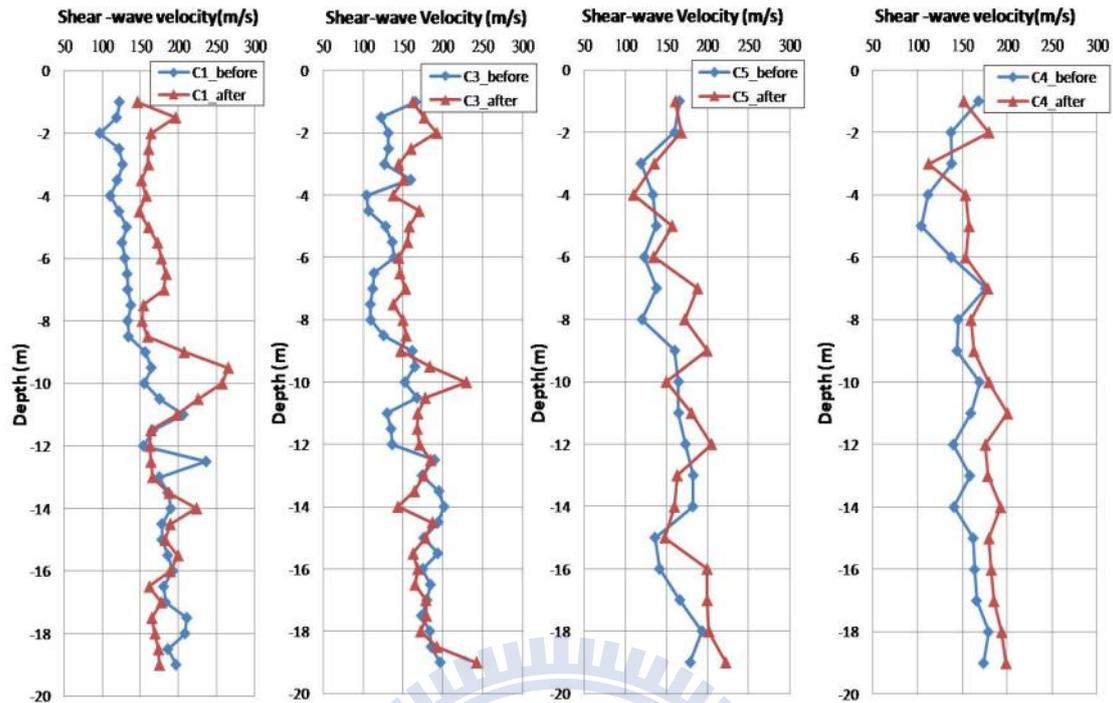


圖 4.12 跨孔震測剪力波波速剖面

## 4.2 高壓噴射灌漿改良結果探討

### 1. 表面波震測結果分析討論

首先將表面波所得之頻散曲線整理如圖 4.13，整體來看改良前頻散曲線相位速度約在 155~175m/s 頻率在 6~36Hz，改良後相位速度提升為 175~200m/s，頻率在 5~35Hz，若將頻率轉換至波長可得圖 4.14，圖中橫軸為波長(m)，縱軸為相位速度，波長可視為表面波影響深度，最小波長可視為表面波震測影響範圍，因此可注意到最小波長在 6m 的情況下，表面波影響範圍含蓋改良樁與未灌漿區域，所以過樁與未過樁試驗配置無法反應出差異。將相位速度-波長圖計算其改

良率(如圖 4.15)，各深度改良率在 10%至 22%之間，整體而言，平均改良率約在 15%-17%。

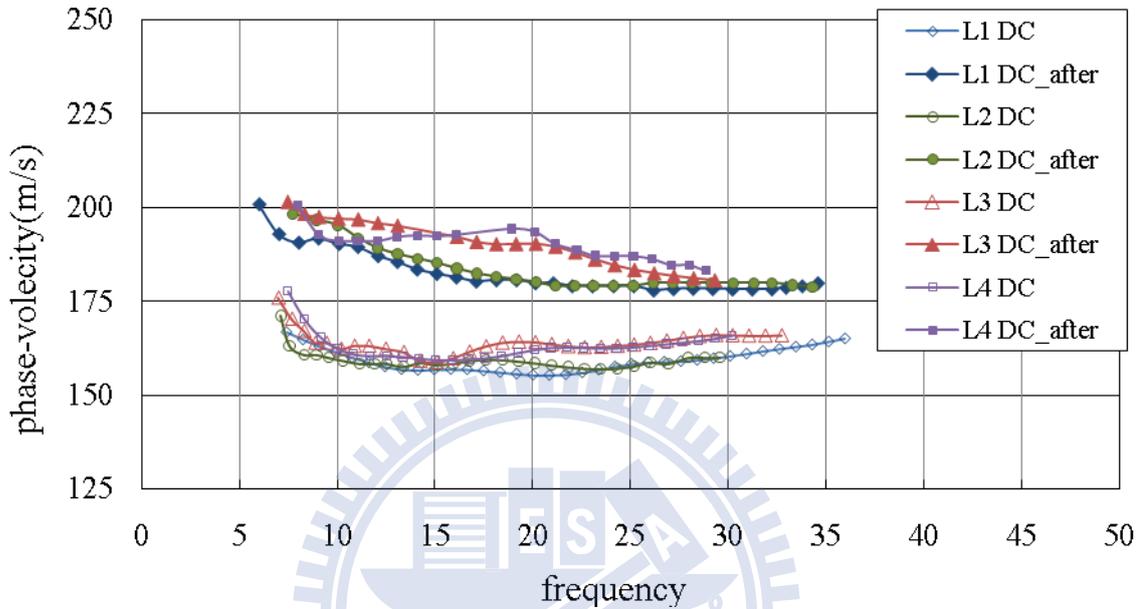


圖 4.13 高壓噴射灌漿改良場址表面波震測頻散曲線比較

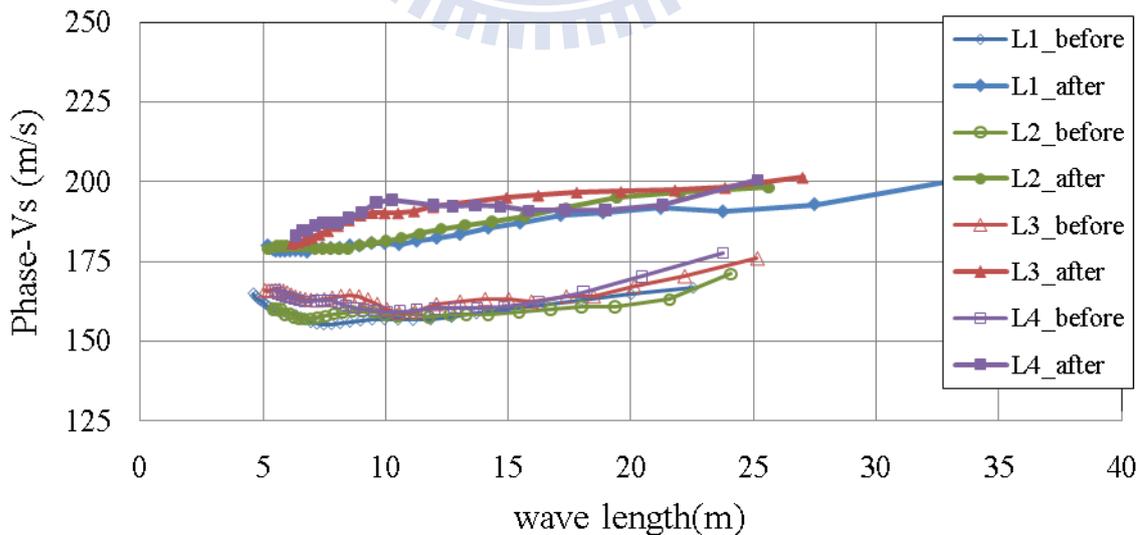


圖 4.14 高壓噴射灌漿改良場址表面波震測相位速度-波長比較

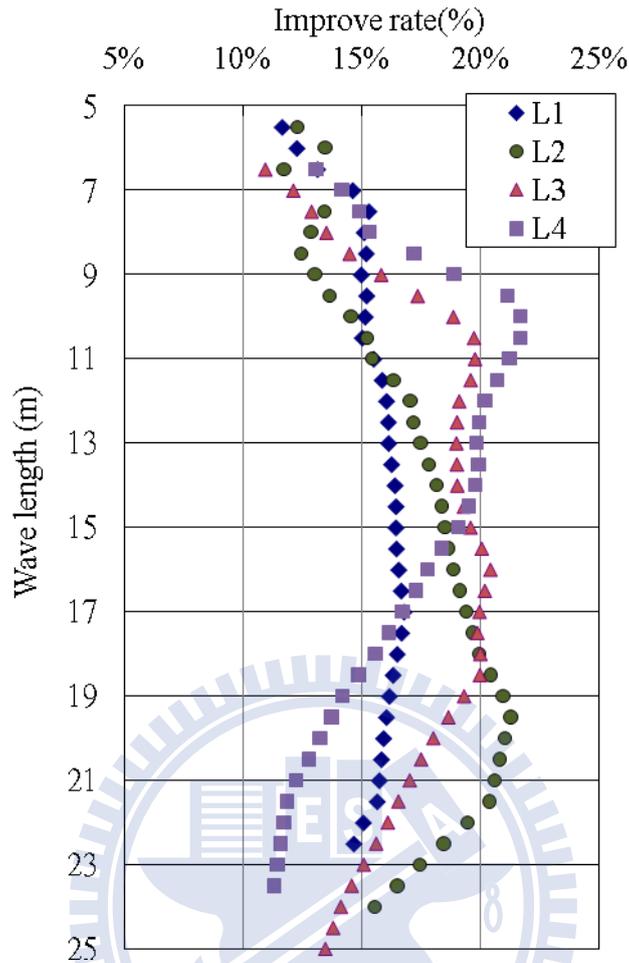


圖 4.15 高壓噴射灌漿改良表面波震測波長-改良率

由頻散曲線反算之剪力波速結果整理如圖 4.16-a，圖中可明顯後區分成改良前與改良後的波速群，計算改良率後(圖 4.16-b)，約在深度 6m 處出現較佳的改良效果，淺層改良率約在 10%，深度 12 至 20m 改良率約在 12~20%，總體而言平均改良率約在 14~17%，與波長改良率相當。

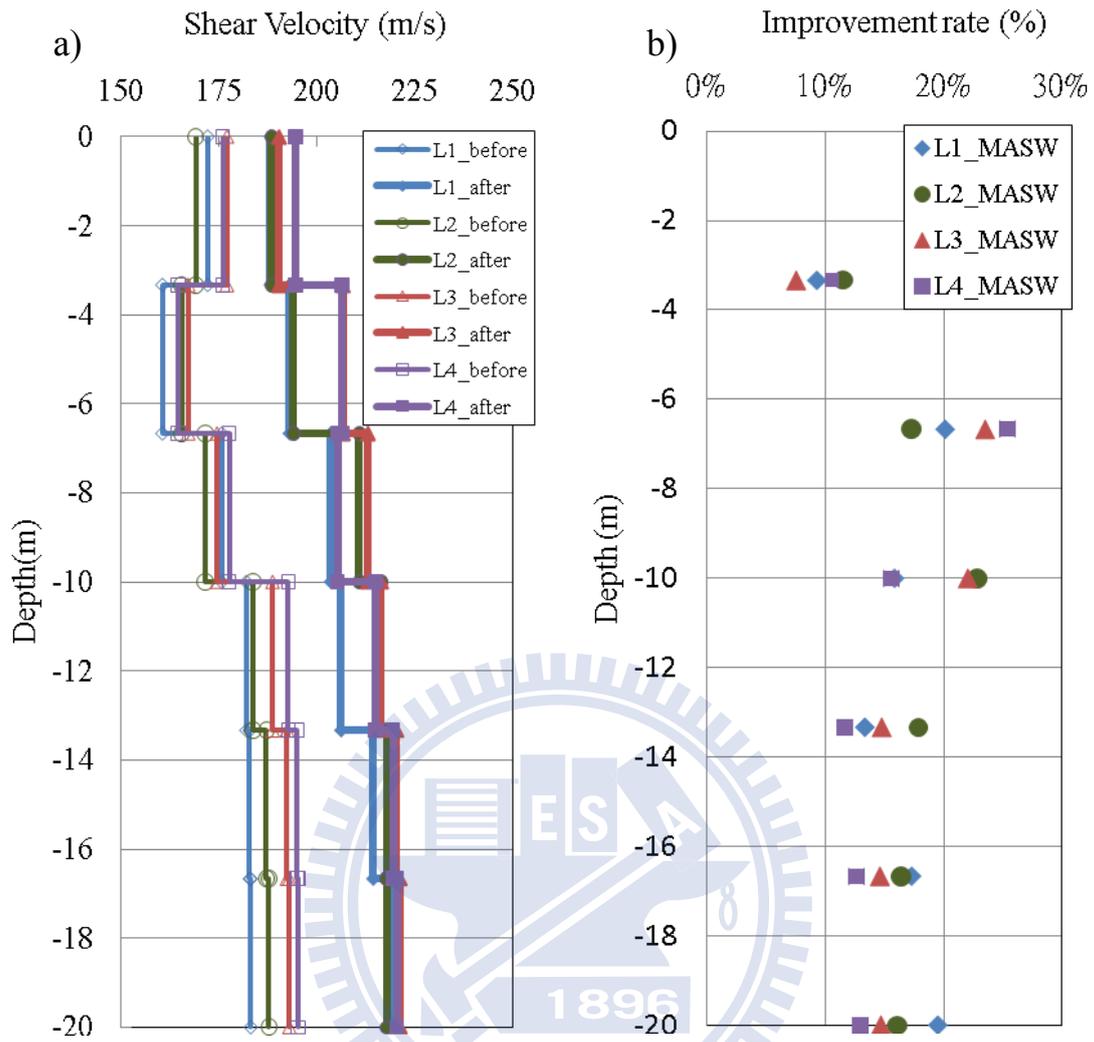


圖 4.16 高壓噴射灌漿改良表面波震測剪力波速與改良率圖

再來將剪力波波速透過(2-4)式轉換成剪力模數(如圖 4.17-a)，改良前 10m 深度內  $G_{\max}$  值約在 50~60MPa，10m 以下深度  $G_{\max}$  值則在 65~70MPa，改良後約提升了 30%(如圖 4.17-b 所示)，約為剪力波速改良率的兩倍。

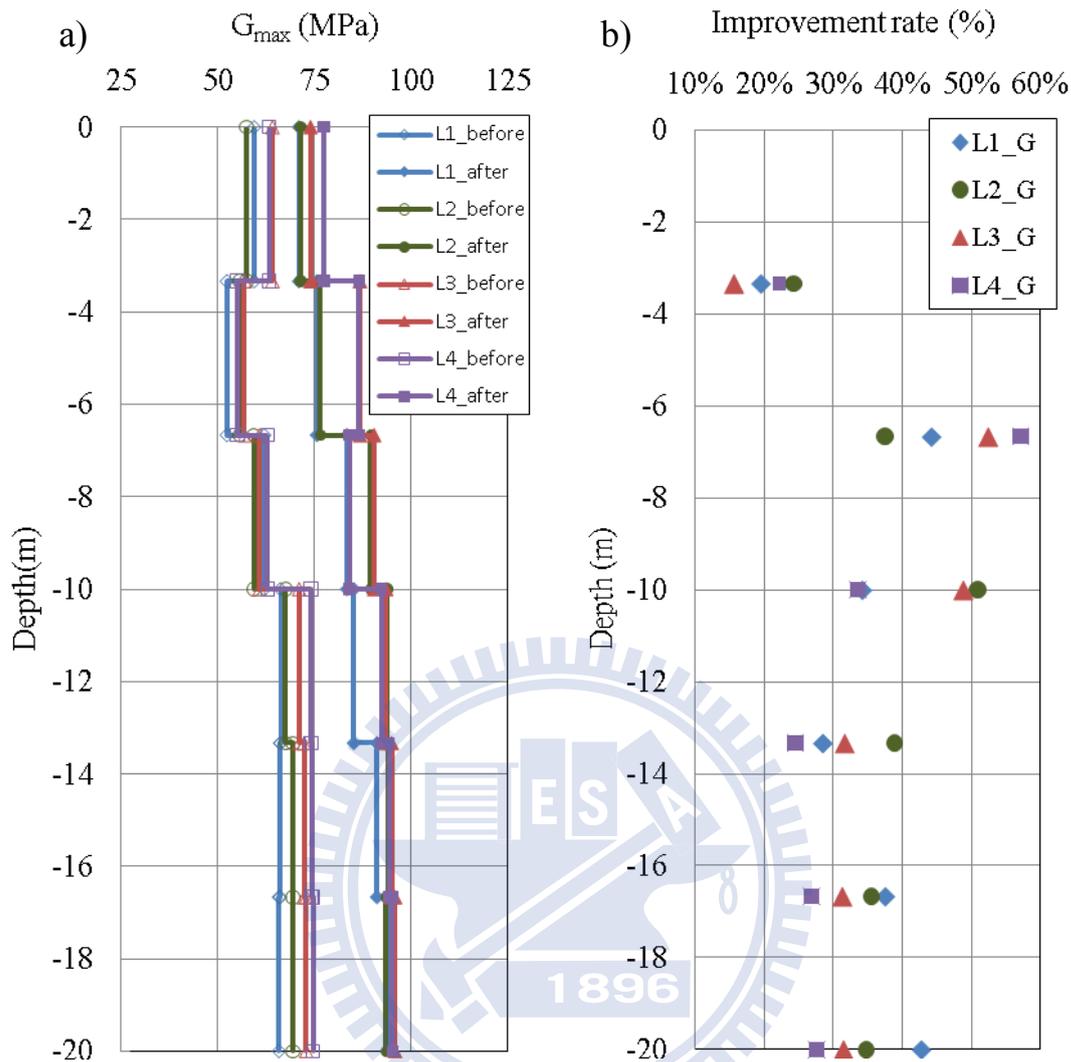


圖 4.17 高壓噴射改良場址深度-剪力模數與改良率

## 2.地盤改良前後波速與標準貫入試驗、複合土體強度關係

為進一步了解剪力波速提升所可提供的工程訊息，將高壓噴射灌漿改良場址試驗表面波震測資料與場址原有檢核方法(樁間SPT-N與改良樁單壓強度試驗)做比較(參考表 2.6與 3.2.1 節)，試圖找尋出其中的關係。如圖 4.18，BH02、BH05 兩孔鑽探資料以及震波探測之

結果未於方框中，將以該區域資料進行比較。

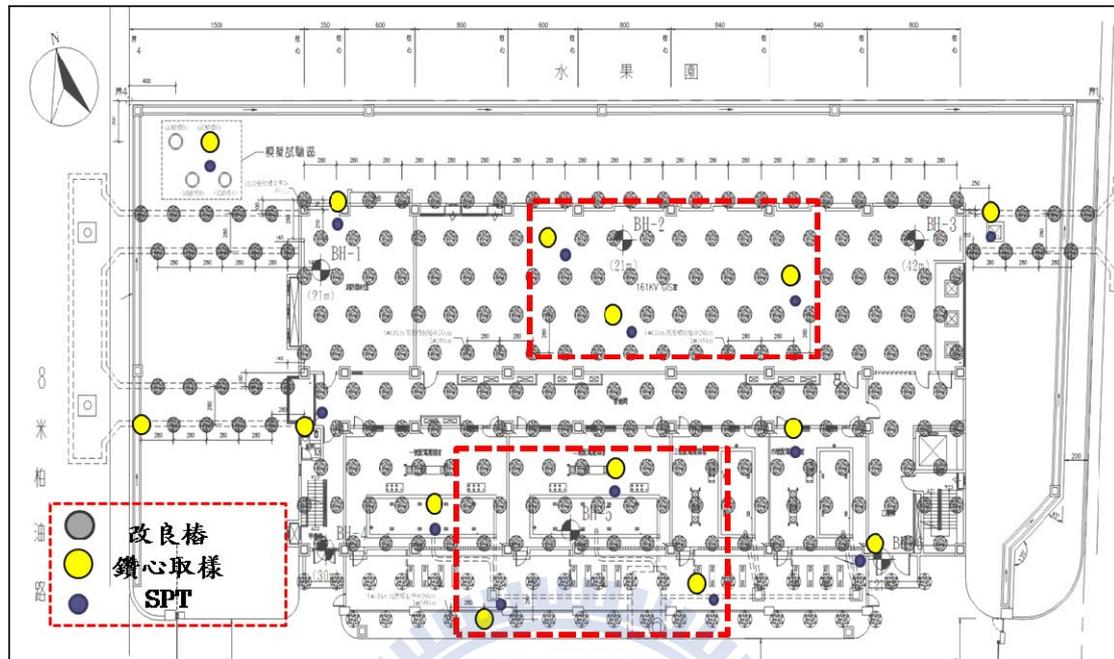


圖 4.18 高壓噴射灌漿改良場址檢核點選取比較區域

將圖 4.18 方框中之檢核點與鑽探孔BH02 及BH05 的SPT-N值整理至表 4.1，表中改良前N值受到該層含礫石的影響有造成N值偏高的情況，改良後N值為方框中選取點之平均，可以觀察到高壓噴射灌漿改良後樁間土壤SPT-N值普遍提升，符合原有檢核標的，其提升的原因是受到固結漿液的影響而有擠壓效果。

表 4.1 高壓噴射灌漿改良場址前後 SPT-N 值比較

Depth	BH02			BH05		
	土壤分類	改良前 N	改良後 N	土壤分類	改良前 N	改良後 N
1.5	SM	19	-	GM	10	18.5
3	SM	17	-	GM	8	21.0
4.5	SM	9	-	SW-SM	8	14.5
6	GW	18	18.0	SW-SW	11	17.7
7.5	SP	50	26.7	SM	13	19.0
9	ML	4	21.7	SW-SM	5	16.7
10.5	SM	18	22.7	ML	5	12.3
12	SW-SM	24	18.0	ML	22	21.7
13.7	ML	12	12.7	ML	5	16.0
15	ML	10	16.3	ML	6	10.3
16.5	ML	10	12.7	ML	9	17.7
18.2	ML	11	15.0	ML	12	18.7
19.5	SP	16	24.0	SM	23	27.3

將表 4.1 之 SPT-N 資料繪出如圖 4.19-a 所示，圖中可以注意到除了深度 10~12m 處 SPT-N 值變化不明顯，可能原因是該層含有砂礫石，使得原有 N 值偏高，造成達到強度要求但改良效果不明顯的狀況。整體而言，除了深度 10~12m 以外，樁間土壤 SPT-N 值都有提升，表示高壓噴射灌漿改良工法在施作的同時，樁間土壤會受到固結漿液擠壓或滲透使得改良影響範圍變大而有變緊密的效果，此結果與林士誠 (2006) 案例研究結果相似。圖 4.19-b 為 SPT-N 值於改良前後之改良率，變異性甚大，與先前剪力波速改良率之結果比較則關連性較低。

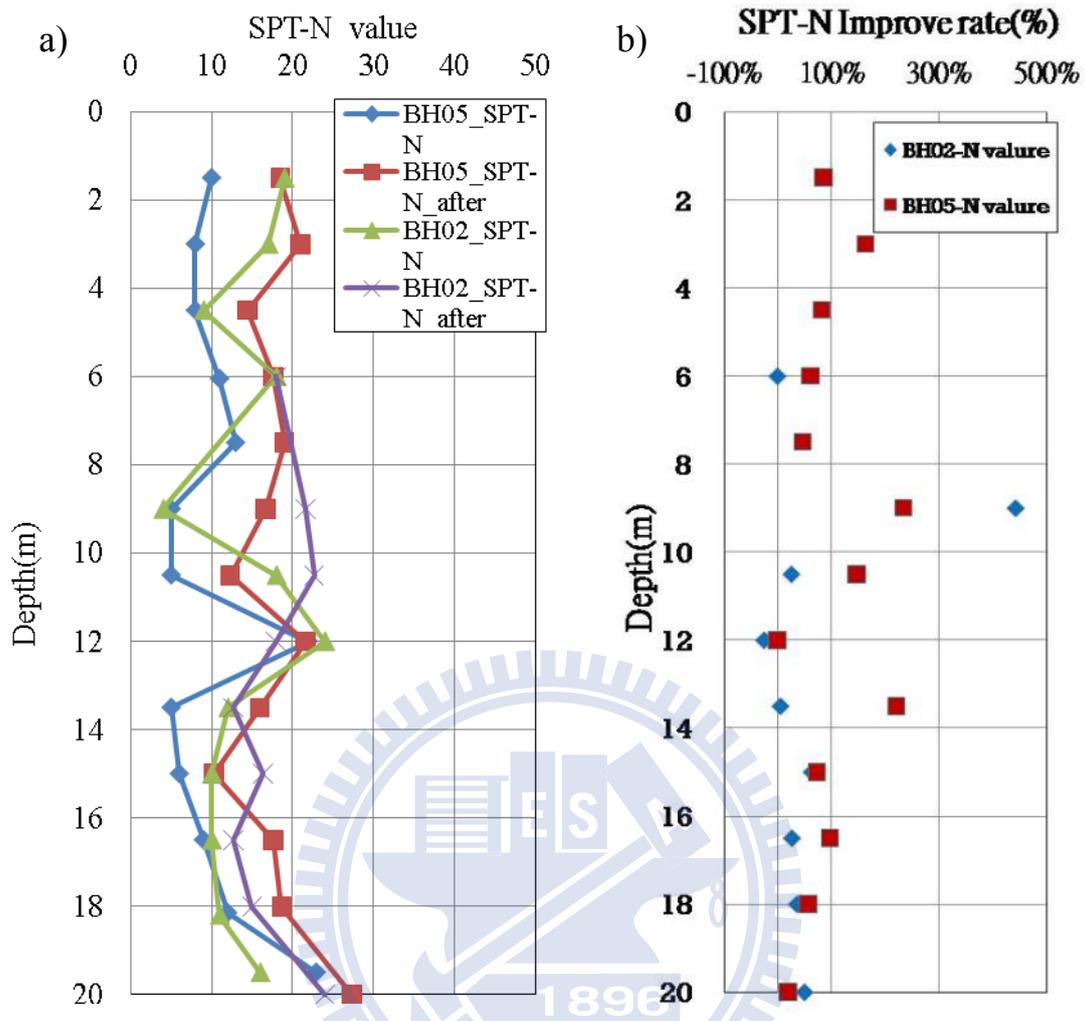


圖 4.19 高壓噴射改良場址 SPT-N 改良前後結果與改良率

BH02 與BH05 附近改良樁心鑽孔取樣施做單壓試驗檢核結果如表 4.2，表中分BH02 區域內(樁號 42、75、90)以及BH05 區域內(樁號 181、245、257)各三處檢核位置，依取樣深度排列其改良後單壓強度。

表 4.2 高壓噴射灌漿改良樁體單壓試驗結果

取樣深度(BH02)	試體編號	$q_u(kgf/cm^2)$	取樣深度(BH05)	試體編號	$q_u(kgf/cm^2)$
-5.7~-5.85	(42-上)	82	-3.7~-4	(257-上)	82
-8.3~-8.5	(90-上)	201	-4~-7.65	(245-上)	82
-9.85~-10	(75-上)	67	-8.2~-8.5	(257-中)	117
-11.6~-11.9	(42-中)	74	-9.7~-10	(181-上)	38
-12.5~-12.7	(90-中)	118	-11~-11.3	(245-中)	48
-14.8~-15	(75-中)	62	-13~-13.2	(181-中)	87
-17.4~-17.6	(90-下)	75	-15~-15.2	(257-下)	49
-19.5~-19.75	(42-下)	102	-17~-17.2	(245-下)	77
-19.7~-20	(75-下)	72	-19~-19.5	(181-下)	80

自

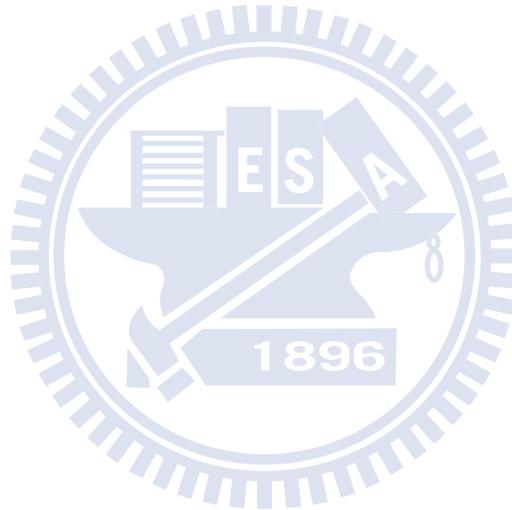


表 4.2 得到單壓強度透過複合改良土體設計概念(參考 2.1.4 節)，將單壓強度與高壓噴射灌漿改良設計改良率( $I_r\%$ )計算得到複合土壤剪力強度參數  $C_m$  與  $\Phi_m$ ，透過這兩個參數計算該深度剪力強度如圖 4.

20-a，圖中可見到以 BH02 與 BH05 為分類的兩組數據，因該場址為無凝聚力之砂礫石與粉土組成，所以改良前(before)剪力強度多由覆土深度與摩擦角控制(如表 3.1)，在將該場址設計改良強度(Design)(砂土  $q_u \geq 10 \text{ kg/cm}^2$ ；粉土黏土  $q_u \geq 10 \text{ kg/cm}^2$ )與實際檢核之單壓強度(after)計算複合土壤剪力強度，由圖中得知膠結的過程中使得凝聚力增加，讓改良後或設計複合土壤剪力強度大大提升，使得改良後之複合土壤剪力強度由取樣之單壓強度控制整體強度表現。圖 4.20-b 為改良前 BH02 孔及 BH05 孔計算之剪力強度與實際計算之複合土壤剪力強度之改良率，由圖中可知單壓強度的提升可以讓剪力強度達 2~6 倍的成長。

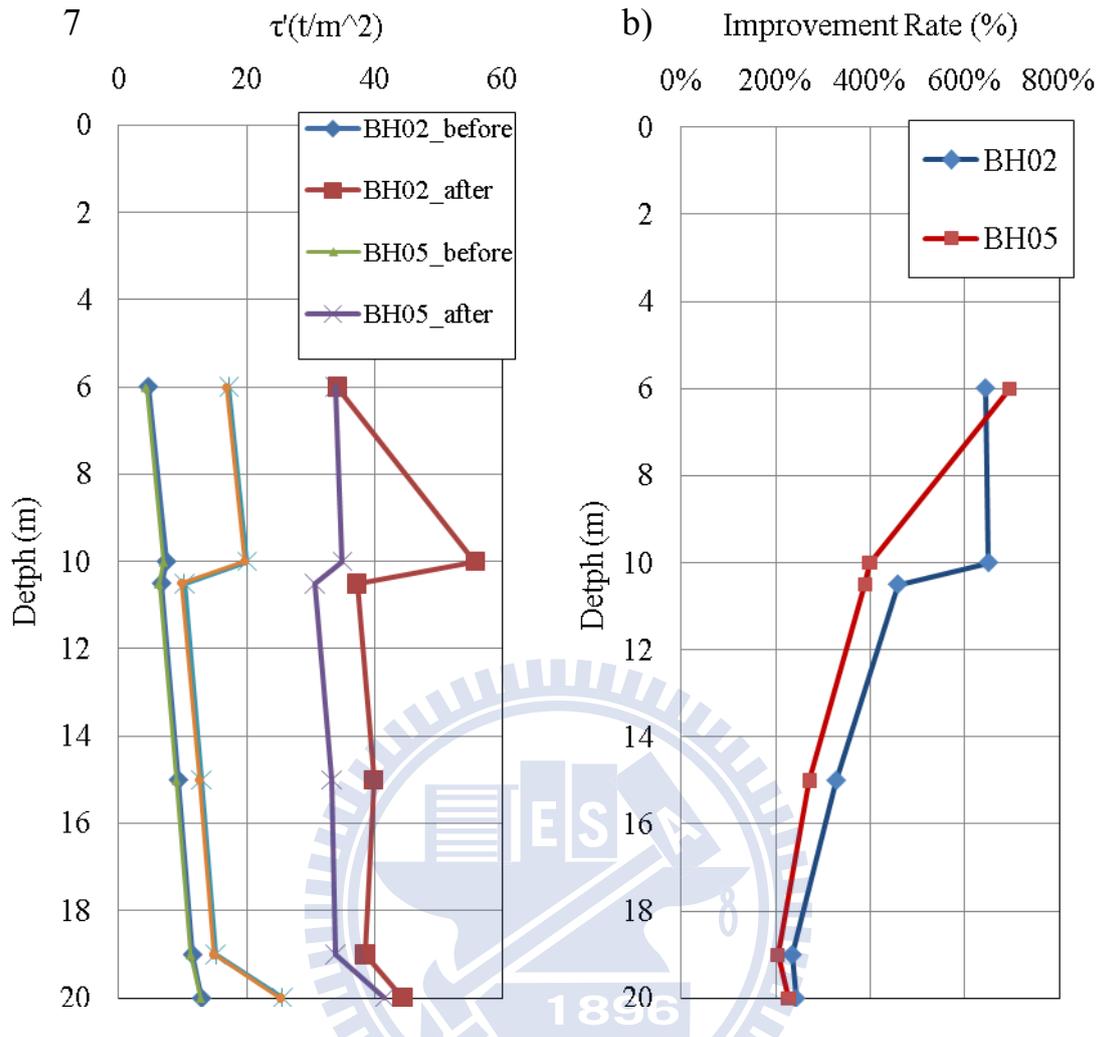


圖 4.20 高壓噴射灌漿改良複合土層剪力強度-深度與其改良率

### 3. 成效評估探討

高壓噴射灌漿場址於改良後在改良樁間或樁上施做SPT-N試驗或單壓試驗都無法代表複合土體改良前後差異，由表 4.1 中發現標準貫入試驗容易受到礫石影響或異物影響其結果，跨孔震測於高密度改良區域施做會使得波傳受改良樁影響產生許多雜訊，剪力波初達時間難以挑選，造成結果的誤差。另外，在利用取樣試體單壓強度結果計

算複合改良土體強度參數，幾乎由單壓強度控制計算結果，因此若鑽探偏心或取樣技巧不佳時，檢核即受影響；另一方面若透過增加單樁改良面積與強度，使之具有相同改良率( $I_r\%$ )與高單壓強度，可形成相同的複合剪力強度，則該場址是否能以此做為設計依據，實有可進一步討論的空間。

根據前述之分析，初步結果顯示在此場址之複合土體剪力強度提升率上與剪力波速提升率無明顯相關，而由表面波震測結果顯示該場址剪力波速提升 14-17%，與設計改良率( $I_r=14.43\%$ )相仿。

初步假定，在採用高壓噴射灌漿改良工法進行土壤改良時，由表面波震測所獲得之剪力波速提升率所反應設計改良率，又震測結果不論過樁與未過樁結果都相似，顯示震波影響範圍涵蓋複合土體整體，可反應複合改良土體之整體改良效果。

### 4.3 擠壓砂樁改良場址試驗結果說明

在擠壓砂樁改良場址所進行之震波探測，其項目包含表面波震測與跨孔震測，將由擠壓砂樁改良完成後兩星期施作。表面波震測測線佈設分成改良A區過樁與樁間(如圖 3. 14)以及改良B區過群樁與未改良區域(如圖 3. 15)，於結果分析中，將由(1)時間空間域資料(2)能量振幅譜與頻散曲線圖(3)剪力波速反算結果。分別討論表面波震測之結果，並以之與跨孔震測所得之剪力波速剖面進行比較。詳細試驗結果如下所示。

#### 1.表面波速測試結果

在改良區A中，經測試表面波震測結果採用近站支距 8m之資料表面波測線L1(通過改良樁體)與測線L2(通過改良樁間)之時間-空間域資料分別如圖 4. 21-a及圖 4. 21-b所示，由兩者比較可發現L1 之歷時資料雜訊較多且回波現象明顯，L1 測線表面波主能量帶在 0.075 至 0.3 秒間，L2 測線表面波能量帶則落在 0.05 至 0.325 秒間，因此可以推測L1 測線波傳速度將大於L2 測線。之後將所得時間-空間域資料進行頻率-波數轉換，各頻率能量最大處為頻散曲線的位置，其結果如圖 4. 22，圖中標記處為基態頻散曲線，L1 測線圖 4. 22-a，其頻率

範圍在 5~22Hz，且相位速度在 100~140m/s 之間；L2 測線如圖 4.22-b，  
 頻率範圍較 L1 窄在 4~12Hz 之間，相位速度則在 72~78m/s 之間，較  
 L1 為低。

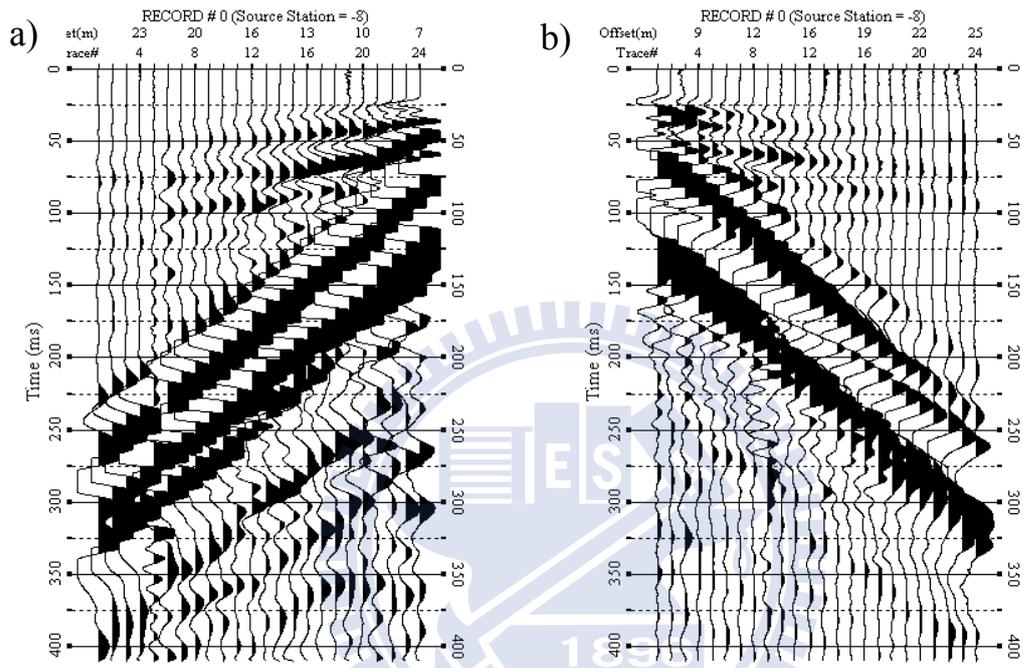


圖 4.21 擠壓砂樁改良後表面波震測 L1 及 L2 測線 t-x 域波場資料

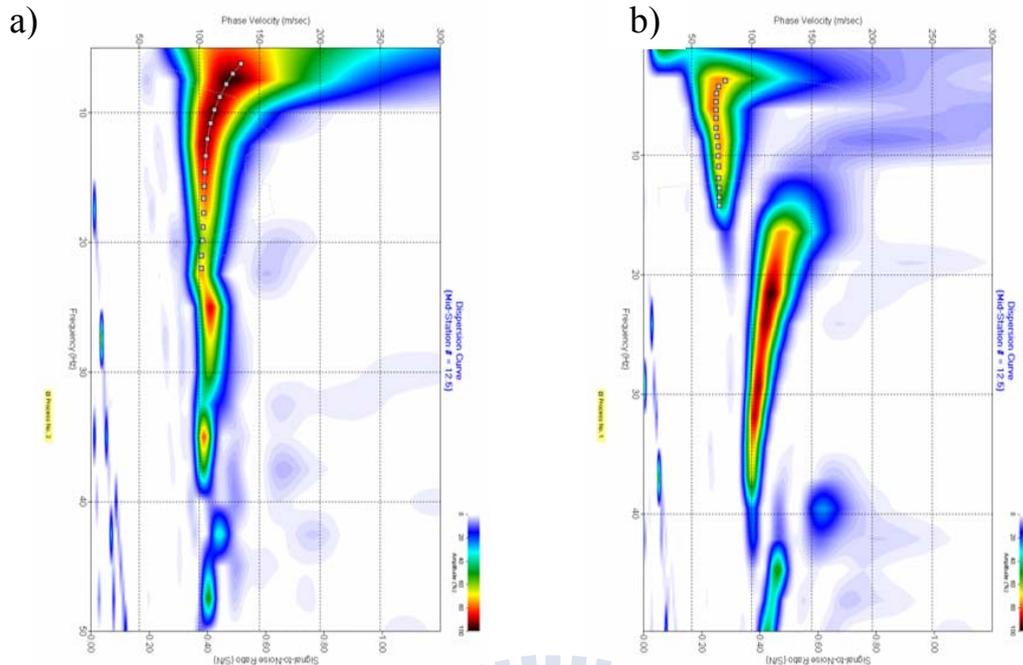


圖 4.22 擠壓砂樁改良後表面波震測 L1 及 L2 測線  $f$ - $v$  域波場資料與  
頻散曲線

改良區域 B 是高密度改良砂樁組成之群樁，佈線考量探測深度，L4 測線佈設 24 個受波器間距 0.5m，構成展距 11.5m 的測線，但其中只有 12 個受波器位於改良群樁上，在距改良群樁 5m 處未改良區域佈設另一測線 L5 做為背景值。經測試，表面波震測測試結果採用近站支距 5m。

圖 4.23 為 L4 及 L5 測線時間-空間域波場資料，其中可以觀察到兩者表面波主能量帶都在 0.1 至 0.2 秒間，但在圖 4.23-a 第 9 個(Trace=9)受波器至第 24 個(Trace=24)受波器之震波資料有明顯反射波現象(橢圓框線中)，表示波傳過程中遭遇改良樁體產生反射現象。將得到之

時間-空間域波場資料透過頻率-波數轉換後得到 $f$ - $v$ 域波場資料如圖 4.

24，圖中標記處為基態頻散曲線的位置，圖 4. 24-a為L1 測線的頻散曲線，頻率在 6~22Hz，相位速度則在 100~135m/s間；L2 測線之頻散曲線頻率較L1 窄在 3~8Hz之間，相位速度則在 60~70m/s，較L1 低。

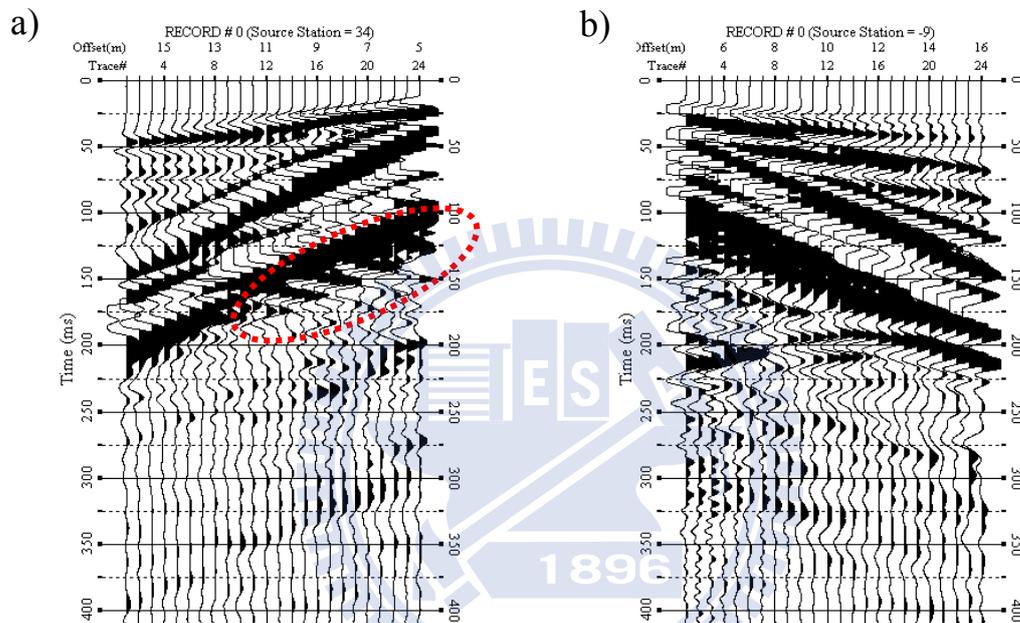


圖 4. 23 擠壓砂樁改良後表面波震測 L4 及 L5 測線時間-空間域波場資料

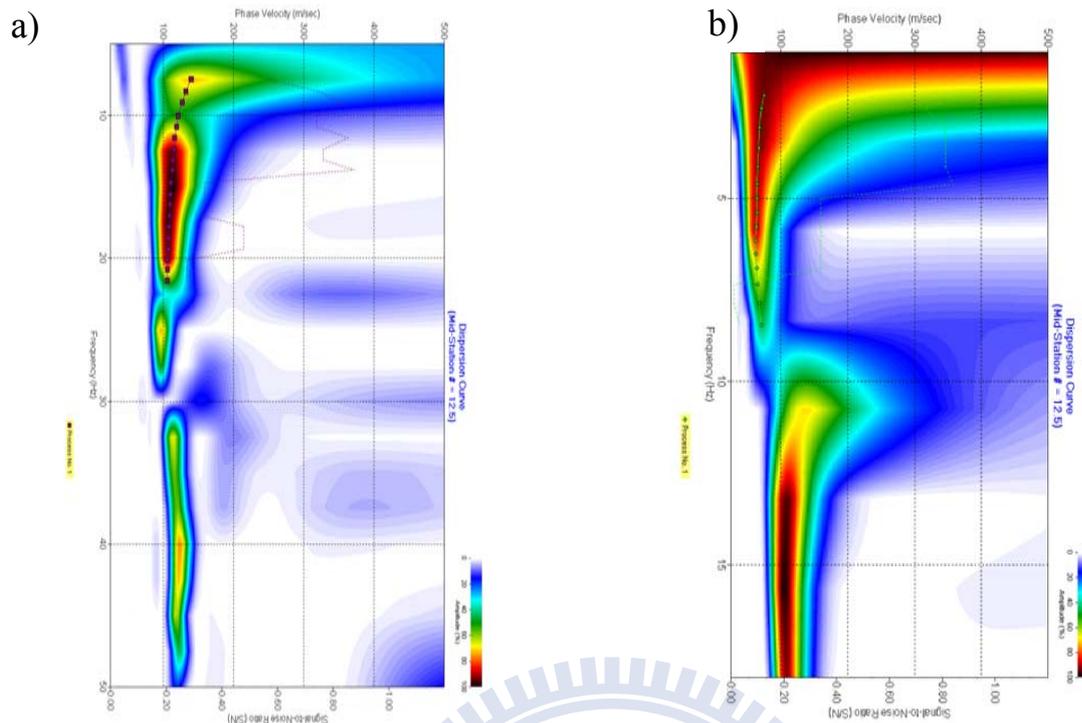


圖 4.24 擠壓砂樁改良後表面波震測 L4 及 L5 測線  $f$ - $v$  域波場資料與  
頻散曲線

圖 4.25 為擠壓砂樁改良後 3 個月再改良 A 區施作表面波震測之時間-空間域波場資料，L1 測線表面波主能量帶在 0.075 至 0.3 秒間，與先前施做結果類似，L2 測線表面波能量帶在 0.05 至 0.3 秒間，波傳時間比先前施做結果(圖 4.21-b)快，顯示波傳速度有所提升。將所得時間-空間域波場資料透過頻率-波數轉換，其結果如圖 4.26，其中可以觀察到 L1 測線與先前施測結果(圖 4.22-a)相似，相位速度都在 100~140m/s 之間。L2 在經過 3 個月的時間後，頻散曲線提升至 105 至 145m/s 之間，與 L1 測線相當，顯示在經過一段時間後，波傳速度

已提升與過樁結果類似，推測其原因主要是因為該地層中之黏土層，於砂樁施作過程中孔隙水壓受到激發造成強度弱化，當一段時間孔隙水壓消散後，強度變有所回升。

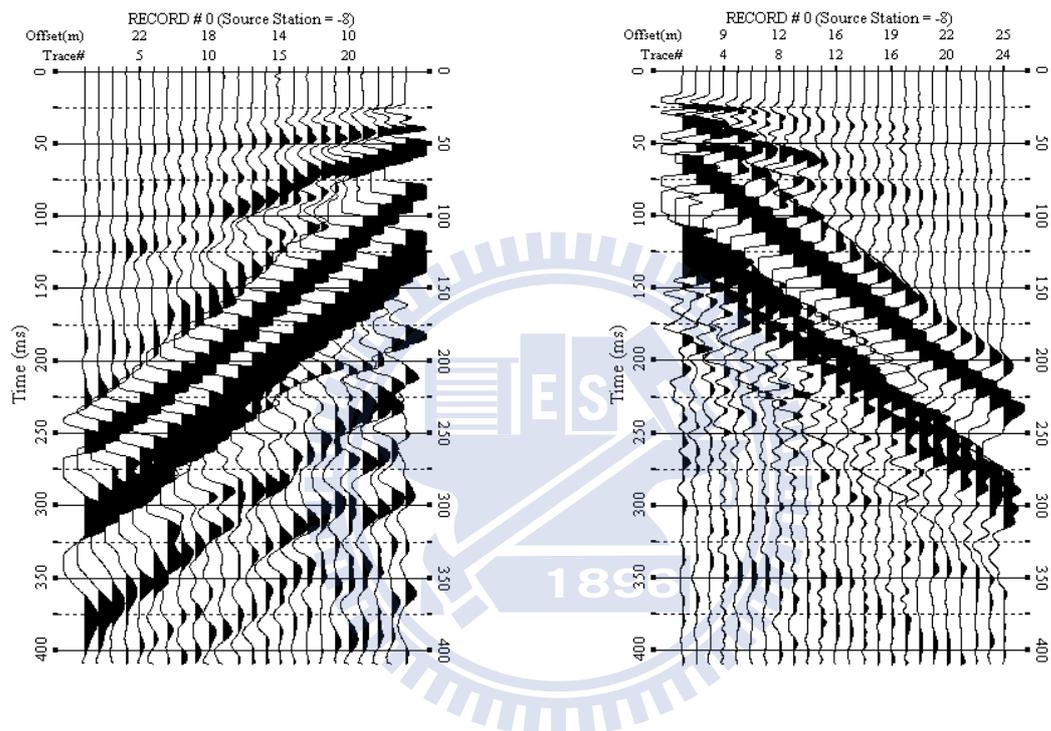


圖 4.25 擠壓砂樁改良後 3 個月表面波震測 L1 及 L2 測線 t-x 域波場

資料

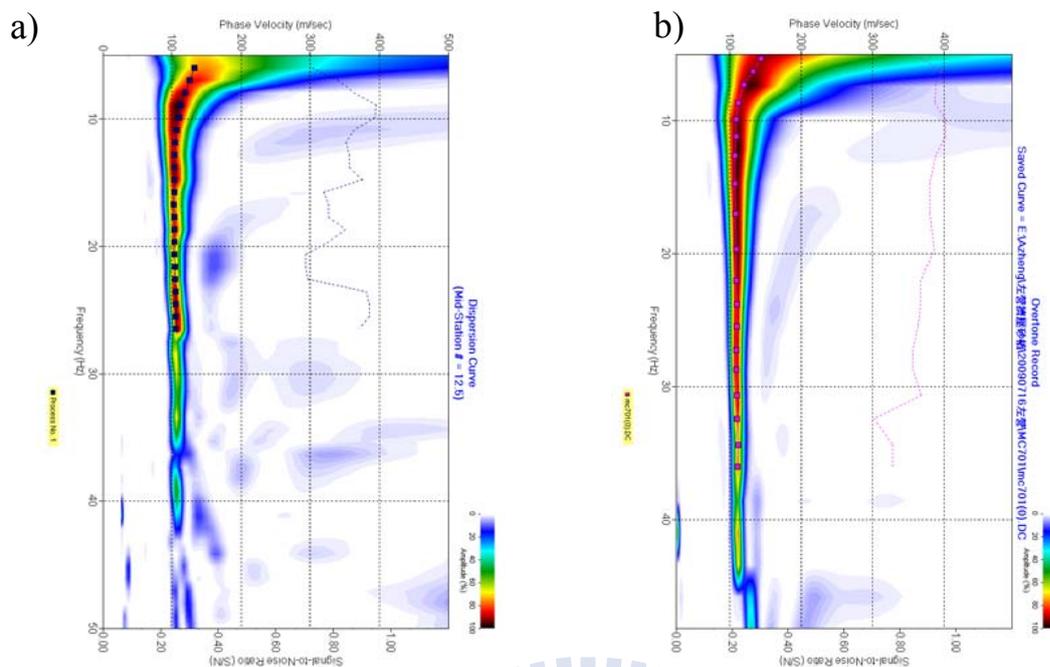


圖 4.26 擠壓砂樁改良後 3 個月表面波震測 L1 及 L2 測線  $f$ - $v$  域波場

資料與頻散曲線

將以上所得之頻散曲線進行反算分析如圖 4.27。圖 4.27 中未經過樁體之 L2 及 L5 測線剪力波速明顯偏低，在深度 10m 內波速約在 50~75m/s，過樁 L1 測線與其經 3 個月後施做結果相同，深度 10m 內波速在 100~150m/s，L2 測線於 3 個月後施做結果與 L1 相似，深度 10m 內之波速同樣是在 100~150m。其中 L4 測線雖然僅一部分受波器佈於改良群樁，但其剪力波波速仍為 6 條測線中表現最佳，波速在 100~180m/s 間。

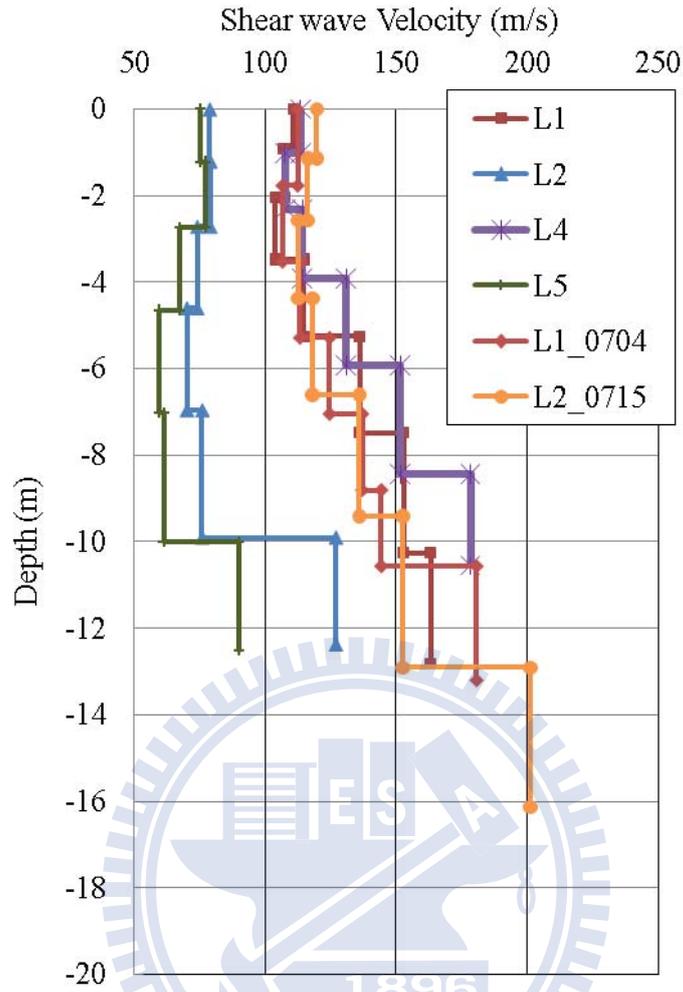


圖 4.27 擠壓砂樁改良各表面波測線反算結果

## 2. 跨孔震測結果

圖 4.28-a 為 R10-R09 震波歷時圖，圖 4.28-b 為 R10-R05 震波歷時，剪力波初達時間明顯。圖 4.29 為改良後 FA2-R5 與 FA2-R10 震波歷時圖，將剪力波初達時間分析後繪製於圖 4.30，由圖中可觀察到改良前後差異性不是十分明顯，其原因為波傳經過改良砂樁與周圍受震動弱化土壤所致。

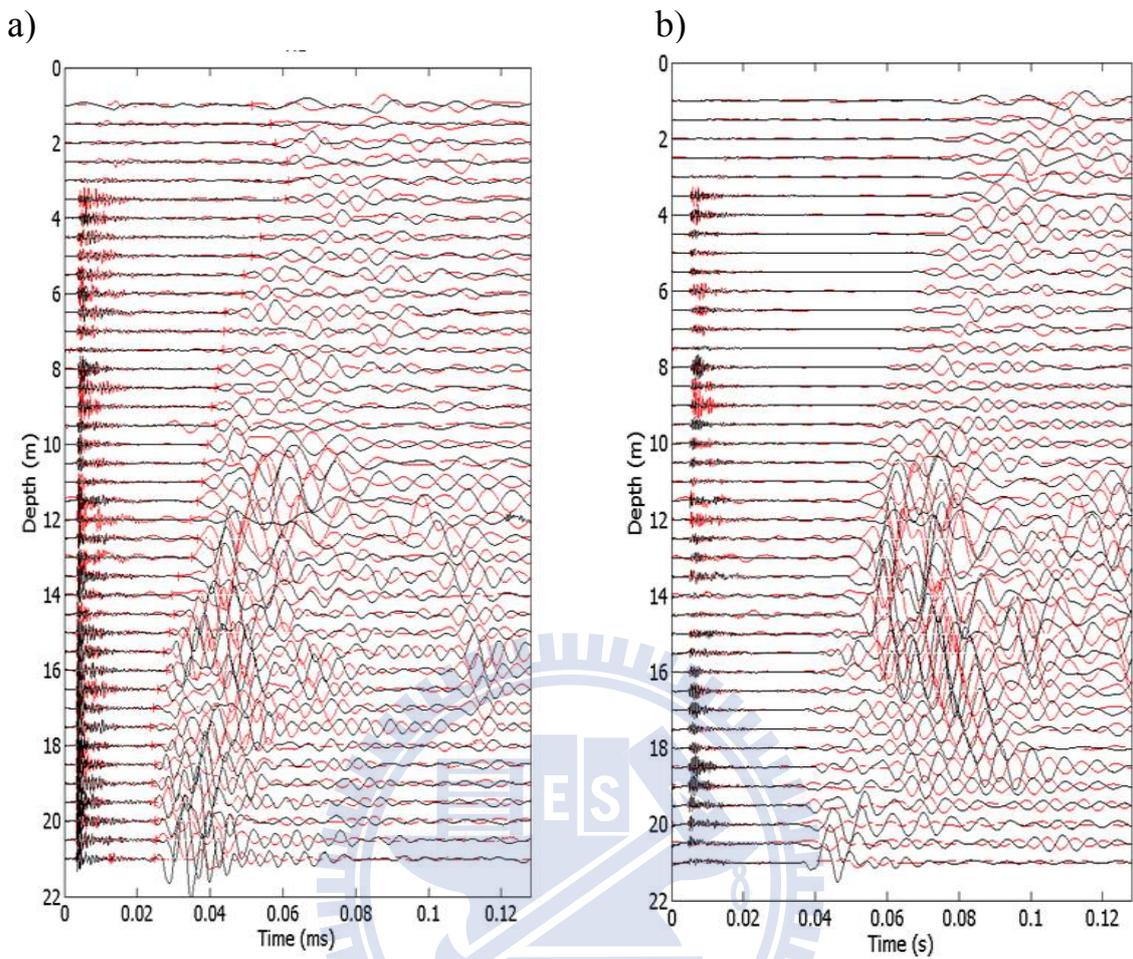


圖 4.28 擠壓砂樁改良前跨孔震測震波歷時

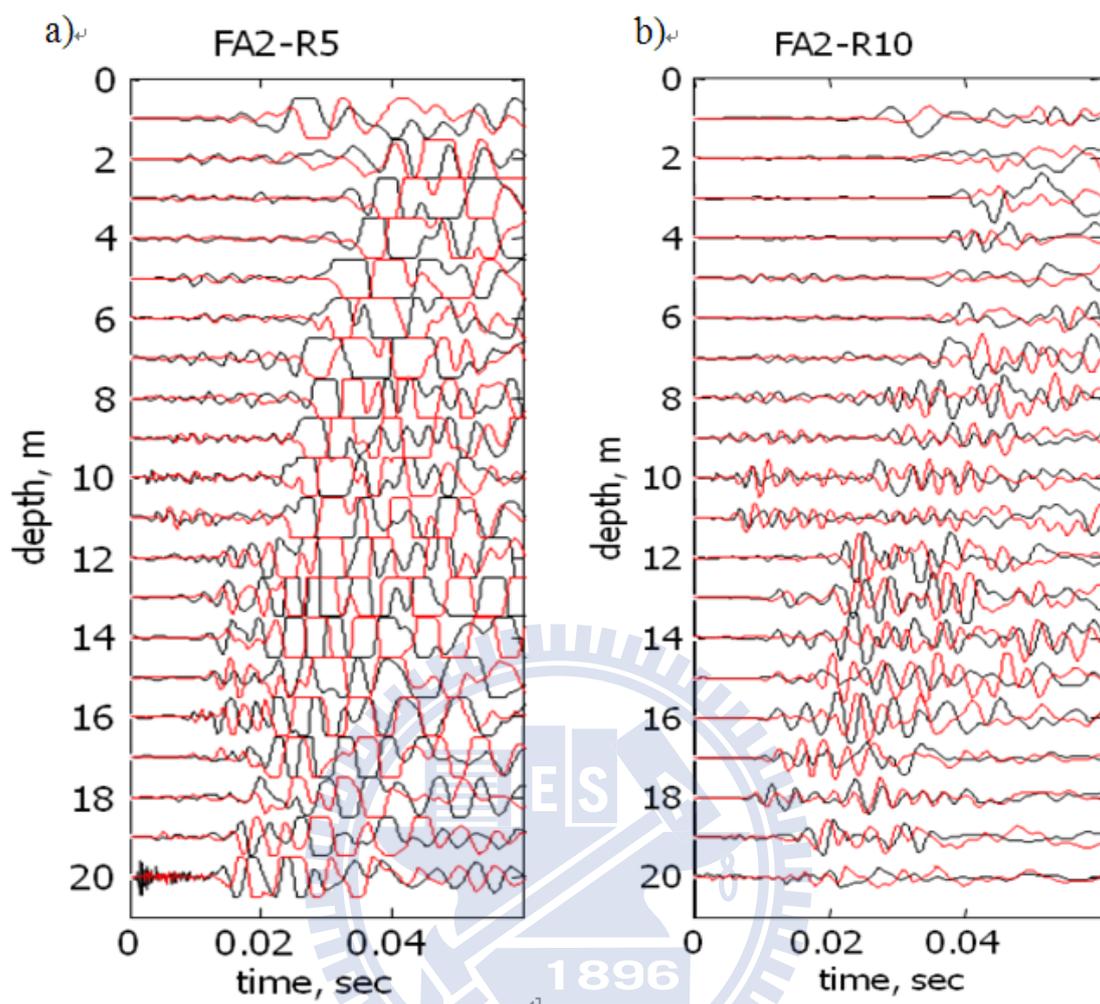


圖 4.29 擠壓砂樁改良後跨孔震測震波歷時

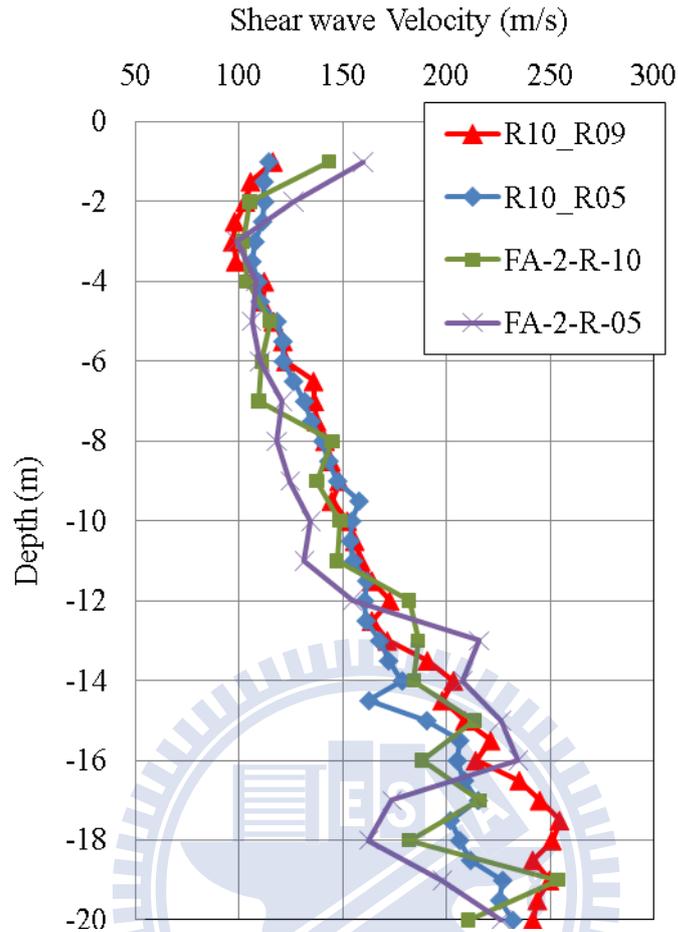


圖 4.30 擠壓砂樁跨孔震測剪力波波速剖面

### 3.綜合比較結果

將表面波震測所得之頻散曲線透過頻率轉換至波長可得圖 4.

31，考慮最小波長 5m 的情況，比較 L1 與 L2 測線結果反應出表面波震測在間距 6m 的場址可區分出差異性，相較於高壓噴射灌漿改良場址之實驗配置，顯示當改良柱體間距大於最小波長時，表面波震測取樣空間將無法代表場址剪力波速之綜合表現。

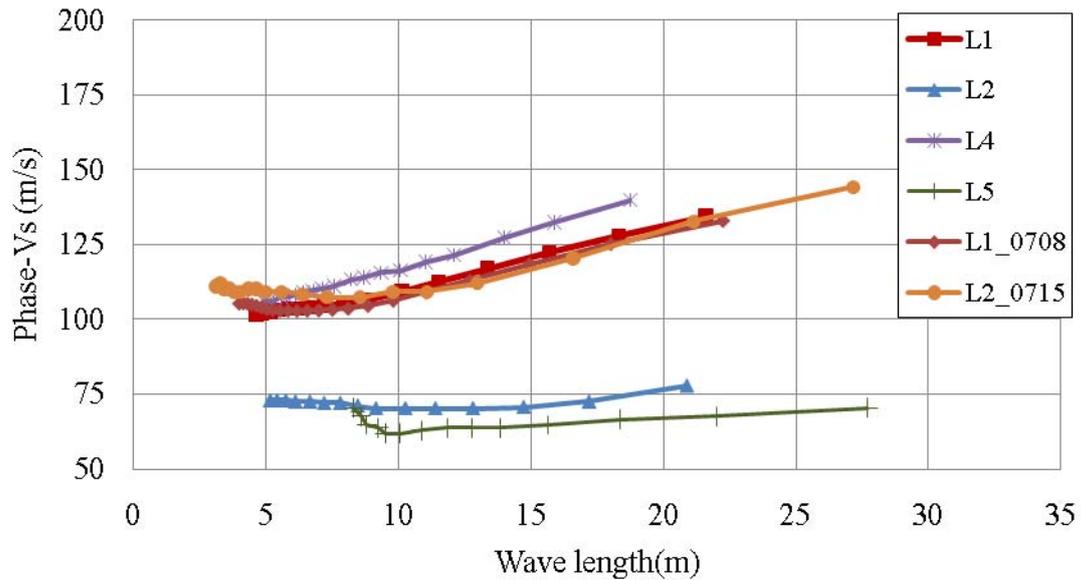


圖 4.31 擠壓砂樁改良場址表面波震測相位速度-波長比較

將擠壓砂樁改良場址施做震波探測結果整理於圖 4.32，圖中可看到表面波震測之結果與改良前跨孔震測類似，L2 測線(樁間)與L5 測線(群樁改良區旁)於改良後的量測結果顯示較過樁體的L1 以及過群樁之L4 為低，由此顯示，於此低改良率的場址中，其樁距已超過表面波震測的取樣空間。在經 3 個月時間後L1、L2 表面波波速結果與原L1 結果相似，研判是擠壓砂樁在施作過程中震動激發了黏土層中的超額孔隙水壓使得黏土軟化，使得剪力波速下降，L1 測線因位於擠壓砂樁上，孔隙水壓消散速度佳，使得土壤強度回升。改良A區中擠壓砂樁樁徑為 0.7m，改良後施做跨孔震測結果無明顯增加，顯示擠壓砂樁施作後周圍土壤弱化使得剪力波速於改良前後差異不明顯。

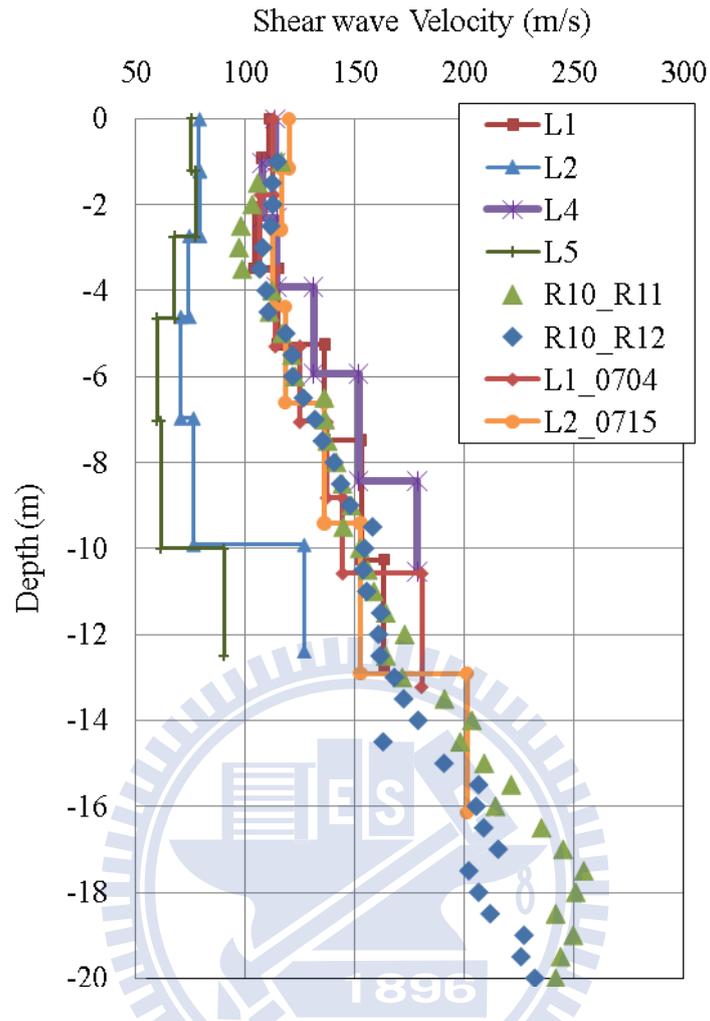


圖 4.32 擠壓砂樁震波探測結果

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

本研究將表面波震測應用於複合改良土體，期望透過表面波震測法快速、經濟、取樣範圍大的優點提供剪力波速變化以利複合改良土體成效檢核上的參考。本文以高壓噴射灌漿改良場址與擠壓砂樁改良場址為例，初步探討表面波震測在非均質改良複合土體之均質化反應及其側向取樣空間，以及改良前後波速變化所代表的工程意義。本研究獲得的結論如下各點：

1. 表面波震測所得之剪力波速剖面為其影響範圍內波傳通過地層之平均反應，由兩個場址不同改良樁徑、改良間距、改良率( $I_r\%$ )做為測試，其結果顯示表面波震測在高壓噴射灌漿改良場址改良樁徑 1.2m 樁距 2.8m(震測結果最小波長為 6m)的情況下是無法區分改良樁與樁間的差異，因此可視為整體改良區剪力波速的綜合表現；然而在改良樁徑 0.7m 樁距 6m(震測結果最小波長為 5m)之擠壓砂樁場址施做結果顯示表面波震測通過改良樁體與樁間波速有所差異，表示當改良柱體之間距大於最小波長時，施測結果受到測線位置之影響，表面波震測施測之取樣空間將不足以代

表場址區域剪力波速之綜合表現。

2. 由高壓噴射灌漿改良場址得到試驗結果，表面波震測得到之剪力波速改良率在 15~17%，與設計改良率 14.43%相近，初步認為在高壓噴射灌漿改良工法中，表面波震測所得之剪力波速提升率與應能反應實際改良率( $I_r\%$ )。相較下，跨孔震測在密度較高之改良場址容易受到改良後改良樁體的影響使得剪力波初達時間較難分辨，容易造成試驗誤差較大的情況。
3. 在擠壓砂樁改良場址上，由改良完成後三週施做震波探測結果顯示擠壓砂樁在施作過程中會擾動高靈敏性黏土，激發超額孔隙水壓，造成黏土層波速降低的現象，位於擠壓砂樁上之測線因孔隙水壓消散速度快，使之具有較高的強度，而擠壓砂樁間黏土孔隙水壓消散速度慢，波速明顯偏低。在改良完成 3 個月施做表面波震測結果顯示樁間孔隙水壓消散後強度有所回升，另外突顯表面波震測法具有監測受擾動土層強度回復情形。

## 5.2 建議

本研究嘗試以表面波震測於複合改良土體改良前後之測試，已有初步之研究成果，尚有後續研究發展的空間，將本研究流程中求得之後續建議，分別說明如下：

1. 後續研究應於更多不同改良率之複合改良土體場址進行試驗，提供更多試驗結果以印證表面波震測所得剪力波速提升率與改良場址改良率之關係。
2. 應可透過理論數值分析，模擬現場案例並進行參數分析，進一步探討表面波震測對於土體波速均質化行為及驗證波速改良率與土壤改良率之關係；以提供未來在地盤改良區域中施測及資料判釋之參考。

## 參考文獻

- [1] Axtell, P. J., & Stark, T. D. (2008, 11). Increase in Shear Modulus by Soil Mix and Jet Grout Methods. *DFI journal* , Vol.2, pp. 11-21.
- [2] Bergado D.T., Chai J.C., Alfaro M.C., & Balasubramaniam A.S. (1993). Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment. A.A.Balkema, Rotterdam.
- [3] Donohue, S., & Long, M. (2008). Ground improvement assessment of glacial till using shear wave velocity. In A. Hung, & P. W. Mayne (Ed.), *Geotechnical and Geophysical Site Characterization* (pp. 825-830). Teipei: Taylor&Francis Group.
- [4] Dyvik, R., & Madshus, C. (1985). Laboratory measurement of Gmax using bender element. *Advance in the Art of Testing Soil under Cyclic Conditions, ASCE* , No.161, pp. 186-196.
- [5] Gabriels, P., Snieder, R., & Nolet, G. (1987). In situ Measurements of Shear Wave Velocity in Sediments with Higher-mode Rayleigh Waves. *Geophysical Prospecting* (35), pp. 187-196.
- [6] Kim, D., & Park, H. (1999, 4 1). Evaluation of ground densification using spectral analysis of surface waves (SASW) and resonant column(RC) tests. *Canadian Geotechnical Journal* , Vol.36, pp. 291-299.
- [7] Kim, D., & Park, H. (1999). Evaluation of ground densification using spectral analysis of surface waves(SASW) and resonant column(RC)test. *Canadian Geotechnical journal* (36), pp. 291-299.
- [8] Kim, S. I., Kim, D. S., Park, H. C., & Kweon, G. C. (1997). SASW

- Method for the Evaluation of Ground Densification BY Dynamic Compaction. In M. Davies, & F. Schlosser, *Ground Improvement Geosystems* (pp. 142-147). Seoul: Thomas Telford.
- [9] Leong, E., Yeo, S., & Rahardjo, H. (2005). Measuring Shear Wave Velocity Using Bender Elements. *Geotechnical Testing Journal* , No.5 (28).
- [10]Luna, R., & Judi, H. (2000, December 15). Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods. *Geophysics* 2000 .
- [11]McMechan, G., & Yedlin, M. (1981). Analysis of Dispersive Waves by Wave Field Transformation. *Geophysics* , No.6 (46), pp. 869-874.
- [12]Moseley, M. P., & Kirsch, K. (2004). *Ground Improvement*. Spon Press.
- [13]Park, C., Miller, R., & Miura, H. (2002, May). Optimum Field Parameters of an MASW Survey. *Soc. Explor Geophys-Japan* , pp. 22-23.
- [14]Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1998). Imaging Dispersion Curves of Surface Waves on Multi-channel Record. *68th Annual International Meeting* (pp. 1377-1380). SEG Expanded Abstracts.
- [15]Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1999). Multichannel Analysis of Surface Waves. *Geophysics* , No.3 (64), pp. 800-808.
- [16]Richart, E., Jr., H. J., & Woods, R. (1970). *Vibrations of Soil and Foundation*. New Jersey: Englewood Cliffs.
- [17]Robertson, P., Campanella, R., Gillespie, D., & Rice, A. (1986, August). Seismic CPT to Measure in situ Shear Wave Velocity.

- Journal of Geotechnical Engineering* (112), pp. 791-803.
- [18] Santamarina J.C., & Frattta D. (2000). Discrete Signals and Inverse Problems. ASCE.
- [19] Schneider, J. A., Mayne, P. W., & Rix, G. J. (2000). Ground Improvement Assessment Using SCPTu and Crosshole Data. In P. W. Mayne, & R. Hryciw, *Innovations and Applications in Geotechnical Site Characterization* (pp. 169-180). Colorado: ASCE.
- [20] Shirley, D. (1978). An improved Shear Wave Transducer. *Acoustical Society of American*, NO.5 (63), pp. 1643-1645.
- [21] Stokoe, K., & Santamarina, J. (2000). Seismic wave base testing in geotechnical engineering. *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering* (pp. 1490-1536). Australia: GeoEng 2000.
- [22] 中國土木水利工程學會. (1998). 基礎工程施工規範與解說. 台北: 科技圖書股份有限公司.
- [23] 內政部建築研究所. (2004). 建築物基礎構造設計規範修訂之研究 --地層改良. 內政部建築研究所協同研究報告.
- [24] 王劍虹. (1984). 淺談高壓噴射灌漿工法. *土工技術*(8), 88-93.
- [25] 吉富宏紀, 大戶太郎, 田代靖彦, 加登美喜子, 八重樫光, 掘井宏謙, ほか. (2006). 静的締固め砂杭工法により改良された地盤の S 波および P 波速度の評価. *日本建築學會大會學術研講論文集*, (ページ: 587-588). 關東.

- [26] 余明山, 何泰源, 林英堂, 陳駿逸, 廖洪鈞. (2004). 台灣地區地盤改良技術發展之回顧與展望. 土工技術雜誌(100), 41-62.
- [27] 林士誠, 林宏達, 郭晉榮. (2006). 噴射貫將對鄰近土壤及連續壁變位之影響案例探討. 土工技術 (108), 41-52.
- [28] 林宏達, 賴慶和, 歐章煜, 黃欽樑, 謝旭昇. (1999). 深開挖工程設計與施工實務. (林宏達, 編輯), 科技圖書股份有限公司.
- [29] 林志平, 張正宙, 鄭孟雄. (2002). 以多頻道表面波量測地層之剪力波速度. 岩盤工程研討會論文集, (頁 N.21-22). 新竹.
- [30] 林耀煌. (1984). 地盤改良工法. 土工技術 (8), 16-25.
- [31] 徐瑞旻. (2002). 共振柱試驗程式視窗化之研究. 碩士論文, 成功大學, 土木工程所, 台南.
- [32] 張正宙. (2002). 多頻道表面波震測之研究. 碩士論文, 國立交通大學, 土木工程所, 新竹.
- [33] 張吉佐, 洪明瑞, 張崇義, 張惠文. (2000). 台灣地區地盤改良技術之應用現況. 土工技術(78), 5-18.
- [34] 陳逸龍. (2004). 多頻道表面波試驗程序標準化之研究. 碩士論文, 國立交通大學, 土木工程所, 新竹.
- [35] 陳逸駿, 李先宜, 胡耀華, 連偉智, 陳思宏, 江國良. (2003). 鬆軟地盤改良作業之評估、設計、與檢驗方法. 財團法人中興工程顧

問社.

- [36]游明泰. (2006). 高壓噴射灌漿工法應用於粉質黏土與細砂互層地盤之研究. 碩士論文, 國立中央大學, 土木工程所, 桃園.
- [37]鄒和翰. (2005). 多頻道表面波震測法施測改良與案例分析. 碩士論文, 國立交通大學, 土木工程學系, 新竹.
- [38]廖惠生, 余明山, 陳敏雄, 劉明欽. (2006). 超高壓噴射灌漿工法設計及施工要項探討. 地工技術 (108), 5-18.
- [39]歐晉德, 余偉光, 林永光. (1984). 壓實砂樁改良地質案例探討. 地工技術(8), 37-43.

