

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文



多頻道表面波震測法
施測改良與案例分析

Field Improvement and Case Study
of MASW Method

研究生：鄒和翰

指導教授：林志平 博士

中華民國九十四年七月

多頻道表面波震測法施測改良與案例分析

Field Improvement and Case Study of MASW Method

研究生：鄒和翰

Student： He-Han Chou

指導教授：林志平 博士

Advisor： Dr. Chih-Ping Lin

國立交通大學
土木工程系碩士班
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 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年七月

多頻道表面波震測法施測改良與案例分析

研究生：鄒和翰

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

多頻道表面波震測法可以非破壞性的方式評估地層剪力波速剖面，並持續朝二維剪力波速剖面影像分析之應用的趨勢發展。然而多頻道表面波震測法在目前現地施做程序下，常遭遇到幾個問題：傳統插入式受波器(Plant geophone) 轉換測線通常都需要耗費相當之時間與人力；表面波之探測深度取決於震波頻率、測線展距與震源支距，且需要足夠低頻的訊號與震源能量，才能獲得足夠的探測深度，目前常用的震源常有能量不足或移動性不佳等問題。

因應上述施測不便，本研究目的為 (1) 研發一套兼顧經濟性與效率性的新式受波器系統(Land streamer)並與傳統插入式受波器比對其資料可性度與適用性；(2) 藉由人工震源改良，組裝一操作便利的落槌系統，改善能量不足所帶來對訊號的影響；(3)配合震源觀察不同墊片所產生之低頻波的品質，以使收錄之寬頻訊號更為完整。

研究結果顯示，新式受波器於平滑路面之表現良好，在瀝青路面與砂性土壤表面使用的成效已得到印證，可以有效的提升表面波震測的施測效率；新研發之自由落錘系統，其震波訊號波長範圍約可達30m，有效的改善空間探測深度的能力；另外，以橡皮墊作為錘墊的

確可以改善低頻訊號品質，但成效並不明顯。案例研究選擇一場趾展示不同非破壞性技術之成果與 MASW 的二維探測成效。

關鍵字: MASW、頻散曲線、震源、landstreamer



Field Improvement and Case Study of MASW Method

Student: He-Han-Chou

Advisor: Dr. Chin-Ping Lin

Department of Civil Engineering
National Chaio Tung University

Abstract

MASW can be used to investigate the shear velocity profile of stratum via non destructive tests and has been extended to perform 2-D Vs tomography. However, several inconveniences are encountered via current test procedures. Switching the survey line is quite time and man-power consuming when planting geophones are deployed; the explored depth depend on the quality of lower-frequency part of signal which is affected by the survey line length, source offsets and characteristics of source energy. Commonly-used seismic sources usually have insufficient mobility or energy.

To improve those inconveniences, this study aims at there aspects. First, a new acquisition system, land streamer, is developed under the consideration of efficiency. Its reliability and performance are also verified by comparing the data from traditional planting geophones. Secondly, a handy seismic source made of weight-drop system is developed to improve seismic energy while maintaining mobility. Thirdly, to widen the frequency bandwidth and improve the quality of signal, the performance of different rubber pads with corresponding seismic source are evaluated.

The results show that the new receiver system has a good performance on the smooth surface (asphalt and sandy ground). The workability and efficiency of MASW are effectively increased when applying the land streamer. The weight-drop source enlarges the wavelength bandwidth signal up to 30 meters which increases the spatial measuring capacity on depth. The rubber pads make only slight improvement on the quality of lower frequency part of signal. A case study is also presented for demonstrating the results of different NDT techniques and the effectiveness of MASW 2-D tomography.

Key words: MASW, dispersion curve, seismic source, landstreamer

誌謝

承蒙指導教授 林志平博士於研究所求學期間悉心指導，使本論文得以順利完成，除在論文研究、專業知識上的教誨與指導，幫助學生突破研究的瓶頸與指示的成長外，在思考邏輯與待人處世的態度也給予學生有很大的啟發，讓學生得以在研究所求學外獲得更寶貴的收穫，學生未來將繼續督促自己茁壯，不辜負老師為教導學生所付出的心力，在此致上最誠摯的敬意。

求學期間，承蒙系上廖志中教授、潘以文教授、黃安斌教授、方永壽教授與單信瑜教授在學業上的指導，在此致上萬分敬意。

在學研究期間，承蒙宗盛、志忠、士弘、瑛鈞等博士班學長給予諸多協助，其中，宗盛與志忠學長對小弟的照顧，小弟永遠銘記在心。育嘉、仁弘學弟及同窗好友南成、証傑、俊宏、又仁等諸多同學給予研究上的協助與經驗分享，小弟感激不盡。

野外試驗承蒙所有曾參與的同學、學弟幫忙使一切工作得以順利進行，大家都辛苦了。當然，仁弘學弟對實驗的熱誠，學長感激不盡。

最後，感謝家人對我的栽培，希望你們都看到了。當然，一路上女朋友的陪伴與建議是我莫大的動力。最後僅以此文來獻給我最愛的家人。

目錄

中文摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
誌謝.....	IV
目錄.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	X
第一章 序論.....	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 彈性波基本概念與應用.....	4
2.2 表面波震測法.....	7
2.2.1 表面波基本性質.....	8
2.2.2 穩態震動法(SSRW).....	9
2.2.3 表面波譜分析法(SASW).....	11
2.2.4 多頻道表面波量測法(MASW).....	14
2.2.4.1 MSASW.....	14
2.2.4.2 MWTSW.....	16
2.2.5 表面波方法之比較.....	17
2.2.6 施測參數之影響.....	20
2.3 表面波震測施測設備.....	23
第三章 研究方法.....	49
3.1 表面波特性和分析	49
3.1.1 時間-空間域(t-x domain)	49
3.1.2 頻率-空間域振幅頻譜(f-A-x domain)	50
3.1.3 頻率空間域實部頻譜(f(R)-x).....	52
3.1.4 頻率-速度能量頻譜(f-v energy spectrum)	52
3.1.5 頻率波長能量頻譜(f- λ energy spectrum)	53
3.2 震測設備特性探討.....	54
3.2.1 震源規格.....	55
3.2.2 受波器改良設計.....	57
3.2.3 試驗規劃.....	57

第四章 震源與受波器之特性	64
4.1 震源特性	64
4.1.1 震源.....	64
4.2 受波器特性	71
4.2.1 瀝青鋪面.....	72
4.2.2 軟弱地面.....	75
第五章 案例分析.....	90
5.1 交通大學博愛校區區域地質	90
5.2 不同地物量測法於博愛校區之應用	91
5.2.1 地電阻探測.....	91
5.2.1.1 測線位置與施測參數.....	92
5.2.1.2 試驗結果.....	93
5.2.2 折射震測.....	93
5.2.2.1 試驗原理.....	94
5.2.2.2 測線位置與施測參數.....	94
5.2.2.3 試驗結果.....	95
5.2.3 孔內波速量測.....	95
5.2.3.1 試驗原理.....	96
5.2.3.2 下孔震測施做參數設定.....	96
5.2.3.3 試驗結果.....	97
5.3 多頻道表面波震測	97
5.3.1 測線位置與施測參數.....	97
5.3.2 試驗結果.....	98
第六章 結論與建議.....	112
6.1 結論	112
6.2 建議	113
<u>附錄(一)</u>.....	118
<u>附錄(二)</u>.....	119

圖目錄

圖 2.1 彈性波運動方式(Bolt,1976).....	31
圖 2.2 波傳行式與路徑(KGS,2000).....	32
圖 2.3 波傳遞攜帶之能量 (Woods 1968).....	32
圖 2.4 彈性半無限域波傳速度與泊松比(Poisson ratio)之關係(Richart 1962).....	33
圖 2.5 表面波震測法(C.P.Lin 2000).....	33
圖 2.6 表面波之頻散現象.....	34
圖 2.7 穩態表面波震動法(Rix,1988).....	34
圖 2.8 受波器距離與波數(Number of cycles)之關係圖(Richart,1970).....	35
圖 2.9 穩態震動法之簡易反算法.....	35
圖 2.10 表面波譜法現地配置圖.....	36
圖 2.11 固定受波器中點法.....	36
圖 2.12 固定震源法.....	37
圖 2.14 相位角摺開之過程.....	38
圖 2.15 MWT SW 分析流程，圖上之黑色區域即能量之顛峰值.....	39
圖 2.16 f-v domain 測線展距對資料遺漏之影響.....	39
圖 2.17 近場、遠廠效應影響.....	40
圖 2.18 震源-正弦震盪器.....	40
圖 2.19 震源-炸藥.....	40
圖 2.20 震源-各式錘頭重之鐵槌.....	40
圖 2.21 震源-加速度落錘.....	40
圖 2.22 震源墊片頻譜.....	41
圖 2.23 4.5Hz 電磁式速度受波器.....	44
圖 2.23 ETH Landstreamer(Van deer Veen 1998).....	45
圖 2.24 (a)插入式受波器(左側)與 L.....	45
圖 2.26 KGS Landstreamer (2000).....	46
圖 2.27 Tyren Landstreamer.....	47
圖 2.28 2-D Vs-profile by Tyren.....	47
圖 2.29(a) Gimbal geophone 與 spike geophone.....	47
圖 2.29(b) Gimbal geophone 內部構造.....	48
圖 3.1 時間域之震波資料與波速範圍.....	50
圖 3.2 能量頻譜.....	51
圖 3.3 單一受波器能量頻譜.....	51
圖 3.4 震波實部頻譜.....	52
圖 3.5 震波之頻散曲線.....	53
圖 3.6 震波之 f- λ 剖面.....	54
圖 3.7 錘頭重 12lb 支大鐵錘.....	60

圖 3.8 新式落槌系統.....	61
圖 3.9 震源墊片之鐵板.....	61
圖 3.10 震源墊片之橡皮墊.....	61
圖 3.11 新式受波器底座.....	62
圖 3.12 新式受波器.....	62
圖 4.1 不同震源對訊號頻譜之影響(1)(震源:BH).....	78
圖 4.2 不同震源對訊號頻譜之影響(2)(震源:AF).....	79
圖 4.3 不同震源對訊號頻譜之影響(3)(震源:WD).....	80
圖 4.4 套疊不同種類震源之頻散曲線.....	81
圖 4.5 不同種類震源之頻率波長曲線(由左至右: BH、AF、WD).....	82
圖 4.6 不同墊片於頻率空間域之能量頻譜(Asphalt,BH,Ip(left),Rb1(right)).....	83
圖 4.7 不同墊片於頻率空間域之能量頻譜(Asphalt,BH,Ip(left),Rb1(right)).....	83
圖 4.8 不同墊片於頻率空間域之能量頻譜(Asphalt,BH,Ip(left),Rb1(right)).....	83
圖 4.9 單一受波器振幅能量頻譜(BH-ip & Rb1-38m).....	84
圖 4.10 新式受波器(左)與插入式受波器(左)的震動歷時(Asphalt,BH,Ip).....	85
圖 4.11 新式受波器(左)與插入式受波器(右)的能量頻譜(Asphalt,BH,Ip).....	85
圖 4.12 新式受波器(左)與插入式受波器(右)的 f-v 頻散曲線(Asphalt,BH,Ip).....	85
圖 4.13 新式受波器(左)與插入式受波器(右)的 f- λ 頻散曲線曲線(Asphalt,BH,Ip).....	86
圖 4.14 新式受波器與插入式受波器的震動歷時(Asphalt,WD,Ip).....	86
圖 4.15 新式受波器與插入式受波器的能量頻譜(Asphalt,WD,Ip).....	86
圖 4.16 新式受波器與插入式受波器的 f-v 頻散曲線(Asphalt,WD,Ip).....	87
圖 4.17 新式受波器與插入式受波器的 f- λ 頻散曲線(Asphalt,WD,Ip).....	87
圖 4.18 左側與右側分別為新式受波器與插入式受波器的震動歷時.....	88
圖 4.19 左側與右側分別為新式受波器與插入式受波器的能量頻譜.....	88
圖 4.20 左側與右側分別為新式受波器與插入式受波器的頻散曲線.....	88
圖 4.21 套疊新式受波器與插入式受波器的頻散曲線.....	89
圖 5.1 交大博愛校區區域地質圖(中央地質調查所-地質資料整合查詢系統)....	103
圖 5.2 交通大學博愛校區施測實驗測線與鑽孔位置配置圖.....	103
圖 5.3 常見地地表施測電極排列法.....	104
圖 5.4 測線 1-1 之電阻值剖面.....	105
圖 5.5 折射震測二維波速剖面.....	106
圖 5.6 下孔震測方法示意圖.....	107
圖 5.7 下孔震測施測設備示意圖.....	107
圖 5.8 下孔震測現場配置圖.....	108
圖 5.9 垂直敲擊.....	108
圖 5.10 左側敲擊.....	108
圖 5.11 右側敲擊.....	108

圖 5.12 相對位置..... 108
圖 5.13 表面波震測二維剪力波速剖面..... 109
圖 5.14 初達波時間點比較..... 110
圖 5.15 表面波震測 Tomography 111



表目錄

表 2.1 震波探測法分類.....	6
表 2.2 表面波震測法.....	19
表 2.3 試驗之震源.....	42
表 2.4 測區地質與結果.....	43
表 3.1 實驗參數配置.....	60
表 5.1 交大博愛校區測線 1 施測參數.....	92
表 5.2 折射震測施測參數.....	95
表 5.4 測線施測參數.....	98



第一章 序論

1.1 研究動機

傳統工址調查常需藉助地質鑽探、取樣及室內試驗以了解地層之物理性質及力學特性，但這種試驗往往耗時、耗費、取樣空間小，且試體擾動後之代表性常有受質疑之處而無法正確的描述現地狀況。地球物理探測法以提供快速、經濟、非破壞性的方式作為傳統之輔助調查；其中多頻道表面波震測法利用先進之二维訊號識別計算頻散曲線，再由頻散曲線透過反算方法求得地層之剪力波速，進而接合量測範圍下方之剪力波速，形成二維之影像，可以清楚”看到”量測範圍地層之波速分層與趨勢；然而多頻道表面波震測法在目前現地施做程序下，遭遇到幾個問題；傳統插入式受波器(Plant-geophone)轉換測線通常都需要耗費相當之時間與人力，為了不使表面波震測，此項有效之震波探測法轉換測線所耗費之時間與人力成本，製作一快速移動之新式受波器系統，並兼顧收錄之品質與其適用性，將可提高表面波震測之使用性並增加研究方面之應用。再則，目前多頻道表面波震測(MASW)乃同時佈設多各受波器收錄單一震源所產生之震態，在本研究中，並假設施測區域地層無側向變化，對同一測線接合多炸點所產生之震波訊號，以模擬一長測線展距所收錄之震波資料，這一施測流程稱之為 Walkaway;Walk-awayg 施作方法需要不同展距之炸點，遠炸

點提供較大波長之低頻波收錄，然而在目前使用之震源所產生之訊號，鐵鎚與砲車所提供的訊號能量尚不足以抵銷雜波對訊號之影響，因此如何改善震源產生足夠的能量，並搭配不同種類墊片改善低頻波訊號之產生，兼顧移動快速、使用性之要求，組裝一有效之落槌系統，以改善遭遇之問題。

1.2 研究目的

總結以上所述，遭遇之問題如下所列：

- (1)採 Walkaway 施測時，遠炸點震源產生的震波能量不足，所產生的訊號雜訊比不佳。
- (2)低頻波訊號效果不佳，影響空間解析度的能力。
- (3)轉換測線時，移動傳統插入式受波器需耗費相當多的時間。

為改善遭遇之問題，本研究提出以下改善的方向。

- (1)新式受波器研發：如何增快資料擷取的速度使施做流程更有效率，應著眼在改善受波器於測線的佈設，傳統插入式受波器(planting geophone)於試驗使用耗時不便，尤其當試驗場址為瀝青或混凝土鋪面時，測線轉換須耗費相當多的時間本研究參考國內外獻自行製作以一方便之受波器(Landstreamer)系統，並討論其在不同場址的適用性與資料之可性度。
- (2)藉由人工震源改良，組裝一操作便利的落槌系統，改善能量不足所

帶來對訊號的影響。

(3)配合震源觀察不同墊片所產生之低頻波的品質，以使收錄之寬頻訊號更為完整。



第二章 文獻回顧

2.1 彈性波基本概念與應用

在均質(homogeneous)、等向性(isotropic)彈性無限域中之應力波因無限空間域無邊界存在，故由擾動所產生波動行為只會有實體波(Body Wave)產生，其中波速較快稱壓力波(Compression Wave、P 波)，如圖 2.1(a)所示，運動方向與波傳前進方向平行稱為縱波。波速較慢的剪力波(Shear Wave)，如圖 2.1(b)所示，運動方向與波傳前進方向垂直，其中剪力波於水平面上震動 稱為水平向剪力波(SH 波);剪力波於垂直面上震動稱為垂直向剪力波(SV 波)。在均質(homogeneous)、均向(isotropic)彈性半無限域中之應力波，因邊界之存在，為滿足力學之平衡條件，除產生實體波以外，亦會產生沿著邊界前進之表面波(Surface Wave)，又稱為雷利波(Rayleigh Wave、R 波)或地面波(Ground Roll)。如圖 2.1(c)所示，其質點運動方向顯示雷利波在水平向以及垂直向均有分量，呈橢圓形狀平面之軌跡運動。洛夫波(Love Wave、L 波)為另一種在層狀界面傳遞之表面波，如圖 2.1(d)所示，此種波發生在表面層是低速層之介質內，質點運動沿著水平面與波傳前進方向垂直(倪勝火,2001)。

在均質(homogeneous)、均向(isotropic)的環境下，任一 x 方向，量測時間 t 之垂直運動 $u(x,t)$ ，就某一角頻率 $\omega(2\pi f)$ 而言，任一種波傳

之運動方程式皆可表成:

$$\begin{aligned}
 u(x,t) &= U_0(\omega)A(\alpha, x)e^{-jkx}e^{j\omega t} \\
 &= U_0(\omega)A(\alpha, x)e^{j\omega\left[t - \frac{x}{v}\right]} \dots\dots\dots(2-1)
 \end{aligned}$$

其中 U_0 為初始振幅大小，與震源之能量有關， A 為振幅隨時間改變之因子，與介質之材料阻尼 (α) 有關， k 為空間頻率 (wavenumber)，其倒數 $\lambda (= 2\pi/k)$ 即波長大小。式(2-1)可顯示波傳之主要行為，包括波之衰減與傳遞之速度。波傳之速度 (v) 可定義為時間頻率 (ω) 與空間頻率 (k) 之比值:

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

式(2-2)亦可表為頻率 (f) 與波長 (λ) 之乘積:

$$v = f\lambda \dots\dots\dots(2-3)$$

波速度與材料之彈性模數有其相關性，故壓力波速 (v_p) 與剪力波速 (v_s) 根據彈性波傳理論可表為:

$$v_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \dots\dots\dots(2-4)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots\dots\dots(2-5)$$

其中， G (Shear Modulus) 為土壤之剪力模數， M 為土壤之束制模數 (Constrain Modulus)， ρ 為土壤之質量密度。如圖 2.4 雷利波波速和剪力波波速相似，但波速度之比值能需是土壤之柏松比 (ν) 大小而決定。如圖 2.4 所示。

當震源或其他的擾動在空間域產生波動時，如圖 2.2，各種擾動產生之行為將以各種彈性波之運動模式向各方向傳遞，經由地層內部或表面傳遞，產生各種形式上的波動，如圖 2.3 所示，就其所攜帶能量而言 P 波、S 波、R 波、分別各佔約 7%、26%、67%，如圖 2.3 所示，雷利波能量遠大於 P 波與 S 波、且 R 波衰減速度較 P 波、S 波慢。

利用應力波所衍生之震波探測法，依施測方式不同，可分為兩各項目。(一)破壞性試驗(二)非破壞性試驗，如表 2.1。

表 2.1 震波探測法分類

破壞性		非破壞性	
方法	應用	方法	應用
下孔震測	P、S 波速量測	反射法	地下結構描繪
跨孔震測	P、S 波速量測	折射法	P 波或 S 波速量測
Ps-log	P、S 波速量測	表面波	剪力波速量測

所謂破壞性試驗，需要破壞地表或地下土層以利於實驗進行已達其目的，大致可分為鑽孔式(Bore-hole)探測與貫入(Penetration)式探測。非破壞性震測檢測，不需要對測區進行鑽孔的工作，可降低施測成本與提高施測效率。在非破壞檢測中，利用實體波(P 波、S 波)作為依據的探測法，常見的有折射震測、反射震測。折射震測是利用挑選初達波走時曲線(Travel Time Curve)，求取土層之壓力波速(P 波)剖面，可有效應用於斷層破碎帶及表土覆蓋層之探測上，但折射波無法

反應高速層下方之低速層，限制該法應用。反射震測法，接收波速度在不連續面或地層介面產生之反射訊號；同時利用同中點法(CMP)，重合同反射點但不同炸點之震波歷時，並將側向走時移除(Normal Moveout Correction, NMP)，使不規則雜波訊號消除，提高震波訊號強度，以繪出淺部地下土層的結構圖像。藉由所收錄到的震波訊號之波形，反映出明顯地質變化之區域。但缺點是資料處理過程複雜、施測耗時且花費昂貴。且無法準確獲得土層之波速剖面。

折射震測與反射震測在淺層地層波速剖面與深層地質構造之研究與應用已廣為學界與業界所接受，但一般以 P 波施測，無法獲得與土層動態行為息息相關的剪力波波速值。



2.2 表面波震測法

表面波震測(Seismic Surface Wave)法乃採用表面波中之雷利波或洛夫波來探測地下地層，因雷利波是利用地表擾動所產生的震波法中量測到最容易產生且震幅最大的波(表面波約佔 70%、P 波、S 波合佔 30%)。表面波之深度影響範圍約侷限於一個波長大小，當表面波在地層內傳遞時，表面波受到不同深度地層剪力模數改變，不同頻率(或波長)的波會對應不同的相位速度，稱之為頻散現象，其相對應的相位速度與頻率之關係曲線稱為頻散曲線，經反算後可獲得地下結構剪力波波速分層。表面波震測法在最終獲得剪力波速剖面(勁度剖面)之

過程，主要分為三個不同驟：現地試驗、頻散曲線頻估及反算分析。

如圖 2.5。

式(2-1)可表示表面波在單一模態下傳遞與衰減的行為。嚴格來講，表面波在傳遞時，為多種震態的疊加，可表示為：

$$u(x,t) = \sum_m S_m(w,x) e^{-j(\omega t - k_m x)} \dots\dots\dots(2-6)$$

m 為震態數，S 為振幅因子，包含震源、受波器、幾何阻尼及材料阻尼之影響。式(2-4)可改寫成：

$$u(x,t) = U_0(w) A(\alpha, x, w) e^{-j(\omega t - \phi(x,w))} \dots\dots\dots(2-7)$$

其中振幅因子，A 受到材料阻尼(α)之影響，為頻率之函數。 $\phi(x, w)$ 為複合之相位函數，表示相位角隨空間變化所呈現之波傳現象。簡諧波任一特徵點可表示為：



$$\omega t - \phi(x, w) = const \dots\dots\dots(2-8)$$

因此，上式對時間微分，某特徵點的區域性相位速度(local phase velocity)可表示為：

$$v(x) = \frac{\omega}{\frac{\partial \phi(x, w)}{\partial x}} \dots\dots\dots(2-9)$$

依上式所呈現，雷利波之波速不但是頻率之函數和受波器與震源之距離也相關，是一區域性的物理量。

2.2.1 表面波基本性質

表面波震測法乃利用表面波獨特之頻散特性做為探測之依據，其

波傳影響範圍約一個波長之深度之內，因此表面波之探測深度會隨著震源產生之頻域特性不同而有所差異。當土層之剪力模數(G)隨著深度而改變時，波傳速度會隨著頻率或波長之不同而改變，稱之為表面波之頻散現象，其相位波速和頻率或是波長之關係曲線稱之為頻散曲線(Dispersion Curve，簡稱 DC)。如圖 2.6(a)，長波長穿透地層之深度會比短波長深(Barbuska V, Cara M 1991)。如圖 2.6(b)，當地層之波速為常數(材料性質不變)，地層並不會有頻散之現象。如圖 2.6(c)、(d)，當地層波速不同，隨深度漸減或漸增時，透過地層，不同大小之波長就會對應到不同層面的相位速度，結果就會反映在頻散曲線上，其頻率(波速)在不同地層參數影響所對應之相位速度，稱之為表面波之頻散現象。根據式(2-3)之關係，即可獲的地層之波速度之剖面。

表面波震測按其施測與分析方法的不同，可分為單頻道的 SSRW、雙頻道的 SASW 及多頻道的 MASW。以下將就這些方法做進一步的介紹。

2.2.2 穩態震動法(SSRW)

穩態震動表面波法(SSRW)，由 Jones(1958)提出，並由美國水陸試驗所所採用(Waterways Experimental Station, USA)。首先採用高頻之震源(Ultrasonics)用以檢測混凝土板之厚度與變形之行為，隨後進一步使用低頻之震源用以評估土層之性質。如圖 2.7 所示，SSRW 係利

用一垂直震動之正弦波震盪器，產生單一頻率 f 之震波，藉由一垂直受波器收錄表面波訊號，並持續調整受波器之位置，直至受波器收錄之波形與前面某一個位置震盪一致。受波器間移動之距離即為該震盪頻率所對應之波長，持續以不同之頻率震盪，重覆上述步驟，獲得多個頻率對應之波長，利用式(2-3)，計算各頻率對應之表面波相位速度 (V_R)，藉以繪製頻散曲線($f-\lambda$ or $V_R-\lambda$)。一般為提高量測準確度，通常受波器會移動數個波長距離，由受波器量測位置與波數(Number of cycles)之關係，回歸分析波長，如圖 2.8 所示。

此外，土壤之動態參數-勁度(Stiffness)與表面波波速(V_R)相關，其剪力波波速約為 1.1 倍之表面波波速(Richert,1962)。但無法以明確的公式來描述，因此，由 SSRW 所繪製的頻散曲線，利用一簡易反算法來推估地層之勁度剖面(stiffness profile)。簡易反算法考慮地下每一土層的權重關係，由 SSRW 所計算之剪力波波速對應之深度約等同 $1/2\sim 1/3 \lambda_R$ ，此對應之過程，由圖 2.9 所示，重覆此一過程，則可獲得土層之勁度剖面。當 SSRW 提出簡易反算法時，簡易反算法缺乏詳盡的數值模擬，因此有相當多的限制。該法有效的使用在地層勁度隨土層深度增加的區域，若上方地層勁度大於下方地層，則會造成相當大的錯誤;但對於初步評估勁度剖面，做為進一步反算分析之初始值，則有相當大的貢獻。此外，穩態震動法在施測程序上，需使用不同頻

率與不斷移動受波器間距，直到獲得相同之相位，施測相當耗時與不便，且簡易反算法不適用在地層波速變化大的情形。

2.2.3 表面波譜分析法(SASW)

表面波譜法(SASW)於 80 年代由 Heisey(1982)、Narzarrian and Stokoe(1984,1988)提出，根據穩態震動法(SSRM)的理念，藉由新式的數位震波擷取儀器與強大的計算工具，使現場的施作效率獲得改善，反算的過程更為精確，針對土壤特性的評估能力大為提升，截至今日，表面波譜法已廣泛的應用在現地調查的範疇上，對於表面波震測的改善功不可沒。

表面波譜法施測上，使用一衝擊式震源於地表產生一暫態訊號之擾動，藉由兩個佈設於測線上之低頻受波器收錄表面波之訊號，如圖 2.10 所示，由於近場與遠場效應，每一施測幾何只能準確獲得某一頻率寬帶內之資料，因此必須改變不同的施測幾何以增加資料頻率寬帶。其中，小受波器間距使用小鐵槌產生高頻的訊號，大受波器間距使用大鐵鎚甚至炸藥等震源以提高低頻資料的品質。

表面波譜法測線配置主要有(1)固定受波器中點法(Common Receiver midpoint Method)，(2)固定震源法，依試驗之要求與場址之地質條件而採用不同之儀器佈設方法。

(一)固定受波器中點法

固定受波器中點法，如圖 2.11，佈設一等受波器間距之測線，沿著兩受波器之中點往兩側展延，兩受波器間距一般為 0.5、1、2、4、8、16、32、64 公尺，震源與受波器之近站支距一般等同於施測時之受波器間距。該施測方式並於線外兩側設置一正向與反向之炸點，改變不同之施測幾何使測線長度涵蓋到欲探測之土層深度為止，一般只需施作 1、4、16、64 公尺之受波器展距，即可獲得足夠之資料。

(二)固定震源法

固定震源法，如圖 2.12，佈設一等受波器間距之測線，通常兩相鄰受波器之間距為 0.5、1、2、4、8、16、32、64 公尺，震源與受波器之近站支距一般等同於施測時之受波器間距。該施測方式於線外兩側設置一正向或反向之炸點，並於該處產生一震波訊號，此後，保持該炸點之位置，往遠離炸點之方向依次增加受波器間距，以逐步進行正向或反向震測試驗，直到測線之展距涵蓋欲探測之地層深度為止。

一般表面波譜法施測以採用固定受波器中點法為主，該法對同一測線施以正反向之資料擷取，可以有效的印證資料的可信度，並減少土層局部不連續與側向變化對訊號產生之干擾。

表面波之頻散曲線，最重要的即是決定相位速度與頻率的關係。

表面波譜分析法利用頻譜分析計算不同頻率的相位速度之流程如下:

兩受波器的資料經一次快速富利葉變換，兩受波器之相位角差等同於

相位角之平均互能頻譜(Average Cross-Spectral Density)的相位角:

$$\Delta\phi(\omega) = \phi_2(\omega) - \phi_1(\omega) = \text{Angle}[CSD(u_1(t), u_2(t))] \dots\dots\dots(2-10)$$

根據式(2-9)及(2-10)，不同頻率之視相位速度(apparent phase velocity)可定義為:

$$v_a(\omega) = \frac{\omega}{\frac{\Delta\phi(\omega)}{\Delta x}} \dots\dots\dots(2-11)$$

其中， Δx 是受波器間距。真實的相位角差變化隨著頻率增加而增加，但互能頻譜的相位角差僅能在正 π 與負 π 震盪隨時間震盪。互能頻譜之相位角須先摺開(un-wrap)，才能呈現實際相位角差，並套用在(2-11)，計算該頻率之相位速度。此外，為求得高頻之相位差，必須先求得可靠之低頻相位差，以避免摺開時產生錯誤，然而，由於震源訊號有一定之頻率範圍 (band-limited)，因此非常低頻與非常高頻之訊號雜訊比不佳，因此在低頻處之相位角摺開容易出現錯誤，尤其當受波器間距較大時，相位角差隨頻率之變化較大，此一步驟使得表面波譜法之自動化不易且容易產生錯誤。因此，通常表面波譜法需要極低頻之震源及受波器以收錄較可靠之低頻訊號。由於近場與遠場效應，每一施測幾何(如震源及兩受波器之相對位置)僅能得到某一頻率範圍內之資料，因此必須改變不同的受波器間距重複施測，此外，

為增加頻譜分析之準確性並評估訊號雜訊比（或相關函數），每一施測幾何必須重複施測以得到多筆訊號資料，施測方法繁瑣費時。此外，當地層之變化複雜時，所量測到之頻散曲線為基態與高次模組疊加而成之有效頻散曲線，如式(2-9)所示，有效相位速度為區域性之物理量，不同受波器間距所量測到之頻散曲線不同，如何將不同施測幾何所得到之資料整合起來以得到單一整合頻散曲線，常需要繁瑣的人為判斷以維持資料之合理性。表面波譜法對於表面波應用於地質調查之推廣扮演舉足輕重之角色，但其施測方式與分析方法並非最佳，表面波譜法亦可採用可控式簡諧震源，可提高各頻率之訊號品質，但無法解決上述之問題。以下將探討多頻道表面波震測法以改善表面波譜法以改進表面波譜法的不足。



2.2.4 多頻道表面波量測法(MASW)

由於電子技術進步，多頻道震測儀器逐漸普遍，利用多頻道的同時多點的震波量測，配合多頻道的分析方法，可以改進單頻道(SSRW)與雙頻道(SASW)的缺點。多頻道表面波震測之現地施測方式如圖 2.13 所示，包含一個震源及數個受波器，因不同之解析方法可分為多頻道表面波譜法及多頻道波譜轉換法。

2.2.4.1 MSASW

表面波譜法僅利用空間上兩點之資料求得 $\phi-x$ 之斜率（即 $\Delta \phi /$

Δx)，再利用式(2-9)求得有效相位速度，多頻道表面波波譜法則採用數個受波器，在空間上增加其取樣數目以提高相位速度估計之準確度，其分析原理與表面波譜法雷同，首先將時間空間訊號 $u(t, x)$ 沿時域作傅立葉轉換為頻率空間訊號(f-x domain)，如下式：

$$U(f_i, x_n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} u(t_m, x_n) \exp(-j2\pi f_i t_m) \dots\dots\dots(2-12)$$

式中 $j = \sqrt{-1}, t_m = m\Delta t, x_n = n\Delta x, f_i = i\Delta f = \frac{i}{[(M-1)\Delta t]}$

m、n 分別代表時間和空間中第 m 及第 n 各取樣點，M 為時間軸之取樣總點數， Δt 與 Δx 分別代表時間之取樣率(sample rate)和空間取點間隔(受波器間距)。由(2-11)可獲得在頻率域下空間軸上每一點受波器之相位角 $[(\phi(x))]$ ，經頻譜分析，空間軸上每一點相位角只在 π 至 $-\pi$ 間震盪，因為具有多點之資料，可以在空間域，將連續收錄之相位角 $[(\phi(x))]$ 摺開，利用線性迴歸求取 $\phi-x$ 之斜率，根據(2.11)求得某頻率對應之相位速度。相位角摺開之過程如圖 2.14。

多頻道表面波譜法同樣地面臨相位角摺開之問題，當頻率增加時，相位角隨空間之變化較大，使得相位角摺開之自動化較不易且可能產生錯誤，因此必須使用較小之受波器間距以避免高頻相位角摺開之錯誤。雖然相位角之摺開步驟仍然無可避免，但由於多點之線性迴歸分析可降低因摺開錯誤所產生之誤差；此外，多點之迴歸分析可以得到單一較為平滑之頻散曲線，而無須將不同施測幾何之頻散曲線經

過特殊之處理合而為一。當地層之變化複雜時，在某些頻率（通常為高頻）高次模組之貢獻不能忽略，而造成 $\phi-x$ 理論上並非成線性關係（ $\phi-x$ 沿主要模態之線性關係上下震盪），則線性回歸所得到之頻散曲線仍為有效頻散曲線。但若測線展距夠長，則其線性回歸可得到各頻率之主要模態之相位速度，因此多頻道表面波譜法所得到之頻散曲線可能為包含不同模態頻散曲線之不連續曲線，亦即在某些頻率可能由某一模態跳至另一模態，因此在反算分析時必須考慮其波傳模式所求得之頻散曲線與量測得到之頻散曲線之相容性。現場測線的佈置方式如圖 2.14，現場施測人員也能有效率的執行資料收集減少施測的時間。



2.2.4.2 MWTSW

多頻道波場轉換法常見於地球物理領域之濾波處理，包括頻率波數轉換法 (Frequency-Wavenumber Transform, $f-k$ Transform) 及慢度頻率轉換法 (Slowness-Frequency Transform, $p-w$ Transform)，用以區隔表面波與實體波，本研究使用多頻道波場轉換法(MWTSW)之頻率波數轉換法($f-k$ Transform)，作為震波資料影像分析。來求取表面波之頻散曲線。

多頻道震波資料 $U(t,x)$ 經由快速富麗葉轉換(FFT)，轉換至頻率-空間域($f-x$ domain)如式(2-12)，在經離散空間域富麗葉變換(DSFT)，

轉換至頻率-波數域(f-k domain)如式(2-13)。快速傅麗葉變換(FFT)和離散空間傅立葉變換(DSFT)不同，因空間域的資料點數(受波器數目，N)遠少於時間域取樣點數(M)，經由離散空間傅立葉變換(DSFT)，使波數[k(f)]維持連續，波速軸之解析度不因空間取樣點數少而喪失。

$$Y(f_i, k) = \sum_{n=0}^{N-1} U(f_i, x_n) \exp(-jkx_n) \dots\dots\dots(2-13)$$

$$j = \sqrt{-1}$$

$$t_m = m\Delta t, x_n = n\Delta x$$

$$f_i = i\Delta f = \frac{i}{[(M-1)\Delta t]}$$

如圖 2.15 顯示 DSFT 對 $U(f_i, x_n)$ 在空間域的波數變換，圖上黑色影像區即為該震盪訊號頻譜的尖峰值；尖峰值的曲線即為現地頻散曲線(Dispersion Curve)。



2.2.5 表面波方法之比較

利用表面波頻散特性作為資料分析的依據，主要分為上述幾種方法。最早使用的穩態震動法(SSRW),利用一受波器與一正弦振盪器，收錄某單一頻率下所對應的波長，完成一寬頻波段所對應的表面波波速頻散曲線。此沒有複雜的訊號分析過程，雖然施測過程複雜，但已提出了一新的概念，帶給了往後研究的無限可能。Stoke 提出一新的表面波施測的方法以及訊號分析的流程,稱為表面波譜法(SASW),使用一對受波器以及一脈衝式震源，提升了表面波施測的效率與便利

性，但是，SASW 每一施測幾何只能得到一部分頻率範圍的訊號，仍需改變受波器間距以收錄寬頻的訊號，彙整每一施測幾何所得到的頻散曲線，組合成一寬頻的頻散曲線再予以進行地層剪力波速反算。此外，表面波譜法存在著實體波感染，無法有效區分實體波對表面波的影響，尤其在低頻的訊號部份，內業處理過程，低頻訊號的錯誤會影響在高頻訊號的計算，影響頻散曲線的組成。SASW 另一項限制是，當地層變化複雜(如夾弱層)時，將有多重模態控制，SASW 並沒有處理多重模態的機制。隨著震測儀器的進步，多頻道震測儀的使用漸為廣泛。開啟了進一步改善表面波震測的契機，藉由同一炸點收錄多點的訊號，配合 2 維波譜轉換分析，可以有效的區隔實體波的影響、提高訊號品質以及區分基態與高次模組訊號。各種表面波震測方法的特性與限制，整理如表 2.2，該表之比較可知，多頻道表面波震測是分析頻散曲線最佳的方法，本研究將進一步針對多頻道表面波震測進行施測上的改良。

表 2.2 表面波震測法

表面波震測法 (Surface Wave Method)	穩態震動法 (SSRW)	表面波譜法 (SASW)	多頻道表面波譜法 (MSASW)	表面波多頻道分析 (MASW)
震源種類 (Sources)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 震盪器(Vibrator) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 震盪器(Vibrator) ➤ 衝擊式震源 (Impulsive or Explosive) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 震盪器(Vibrator) ➤ 衝擊式震源 (Impulsive or Explosive) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 震盪器(Vibrator) ➤ 衝擊式震源 (Impact or Explosive)
受波器數目/種類 (Receiver No/items)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 1 個/低頻受波器 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2 個/非常低頻受波器 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2 個以上/低頻受波器 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2 個以上/低頻受波器
分析域/方法限制 (Analysis domain/Limitation)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ λ_{R-x} for each frequency ➤ 施測繁瑣 ➤ 不容易進行訊號控制 ➤ 無法處理多重模態的情形 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $\Delta \phi - f$ for a few fixed Δx ➤ 容易產生相位角摺開錯誤 ➤ 不易進行雜訊控制 ➤ 無法處理多重模態的情形 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $\phi - x$ for each f ➤ 小波長仍有折開錯誤的可能 ➤ 無法處理多重模態的行為 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ f-k, f-p, 或 f-v 頻譜

2.2.6 施測參數之影響

多頻道表面波震測在野外施測時，單一測線直線展開如圖 2.13 所示，為了要提高訊號雜訊比，同一個炸點可反覆疊加，用以消除隨機雜訊突顯表面波訊號。為得到地層之側向變化，必須沿施測方向移動測線展開，每次測線展開移動之距離視側向解析度之需求而定，測線總長度等於第一測線展開到最後一個測線展開之距離。

影響現地收錄訊號品質的因素除了測線周遭之背景雜訊與環境之影響外，在空間解析度與與探測深度的要求下，測線展距($n\Delta x$)、受波器間距(Δx)與等施測參數的配置，對訊號在頻譜分析的過程中；在空間域上的離散化(decretization)與截斷(truncation)將會對波數域上產生資料映頻(Aliasing)與資料遺漏(Leakage)；近站支距(x_0)的設定將會造成近、遠場效應(Near field、Far field effect)等影響。以下將分別對這些影響與施測參數的選擇做進一步的說明。

(1) 映頻干擾(Aliasing)

● 時域(Temporal domain)

進行 Fourier 轉換資料時，根據取樣理論，準確表示頻譜的頻率範圍是 $1/2\Delta t$ ，稱為 Nyquist frequency。因此 Δt 的倒數將必須大於 2 倍訊號量測之最大頻率(f_{\max})，如式(2.14)所示；為避免映頻干擾造成頻譜失真的影響，此一部分已可由現代

化震測儀選用夠小之 Δt 與反映頻率波設備解決。

$$\frac{1}{\Delta t} > 2f_{\max} \dots\dots\dots (2-14)$$

● 空間域(Spatial domain)

當進行 MSASW 分析時，空間域受波器間距(Δx)不夠小可能導致某些波長在進行 $x-\phi$ 摺開時產生錯誤，因此受波器間距 Δx 必須小於 0.5 倍欲探測之最小波長(λ_{\min} , 最小空間解析度)式(2-15)，使小波長之相位角摺開之過程不產生錯誤，提高頻散曲線之正確性。

$$\Delta x < \frac{\lambda_{\min}}{2} \dots\dots\dots (2-15)$$

進行 MWTSSW 分析資料時，受波器間距 Δx 不夠小，在 $f-x$ domain 轉換至 $f-k$ domain 時，將對波數 (k , wave number) 產生映頻影響，造成在 $f-k$ domain 錯誤的能量頻譜分布，導致錯誤的尖峰值挑選。滿足(2-15)可避免因離散造成的能量頻譜分布。

(2) 資料遺漏(Leakage)

● 時間域

當收錄時間 T 式(2-16)，大於衝擊式震源產之震波延時 $(M-1)\Delta t$ (duration) 大於訊號長度，將不會發生頻率域上資料遺漏。若對一穩態簡諧訊號，頻率域上資料遺漏可以降至一可接受範圍，如果 $(M-1)\Delta t$ 使用以下準則：

$$(M-1)\Delta t > \frac{1}{f_{\min}} \dots\dots\dots (2-16)$$

其中， f_{\min} 為震源所能產生之最低頻頻率。

以現行使用之資料擷取系統而言，其取樣率及取樣點數大多可避免映頻與資料遺漏的問題。

● 空間域

當以波場轉換法(如 f-k 分析法)分析頻散曲線時，因為計算相位速度震波資料之空間展距(測線長度)無法無限延伸，有限的展距相當於空間域的截斷(truncation)，使得轉換後的頻

譜產生頻譜遺漏的現象，因此測線長度必須滿足下式(2-17)

避免資料遺漏發生。

$$L = (N-1)\Delta x > \lambda_{\max} \dots\dots\dots (2-17)$$

其中，L 為測線長度， λ_{\max} 為最大波長亦即最大探測深度。

頻率波數頻譜分析法能對震態訊號做有效的區分，尤其當

訊號由多重模態所組成，然而限制是需要足夠的側線展距

(2-17)與鄰近兩震態之波數須滿足式(2-18)才能使模態辨別

解析度提高(Lin and Chang,2004)。

$$L > \frac{2\pi}{k} \dots\dots\dots (2-18)$$

其中， $k = k_0 - k_1$ ， k_0 與 k_1 為鄰近之兩震態波數，若無法足(2-17)與(2-18)

是，將影響f-k之顛峰值挑選，造成之f-k頻譜失真，於f-v domain 頻

譜影像成暈開的現象，使多重震態不易區分。如圖2.16， $dx = 4\text{ m}$ ，測線展距分別為256 m 及60 m，若測線之展距夠長，在 $f-v$ 頻譜可以分辨不同振態之頻散曲線。

(3) 近場、遠場效應(Near-Far field effect)

如圖 2-17，因近場效應的干擾，雷利波在傳離震源某一距離後，方能將其視為平面波(Plane Wave)。在多數的情況下，表面波之平面波傳僅在近站之距大於二分之一最大欲求波長時發生。近站之距越大則收錄資料之低頻部份品質越佳，亦即可量測的頻率越低。雖然表面波的能量遠大於實體波，但高頻波(小波長)傳導於衰減效應顯著的表面層，使長支距所收錄的訊號遭受到實體波干擾，稱之為遠場效應。

2.3 表面波震測施測設備

現地量測設備主要分為三部份:震測儀、震源與受波器。經過不斷地技術改進，震測儀的功能越益強大，使資料之收錄更加完備。新式之震測儀更可將訊號分析軟體整合於儀器之上，可立即對現場收錄之訊號加以評估，免除因訊號效果不佳而造成後續判讀之困難。根據試驗要求以及施測區域環境之影響，不同形式之震源產生之脈衝波訊號有不同之頻譜特性，因此優先選用一合適之震源於測線施測相當重要(Richard 1992,1994)。震源產生之擾動經由地層傳遞後，攜帶之資

訊在地表由受波器接收。根據不同之震測法，受波器的選用，要求亦不相同。表面波震測之探測深度取決於是否可得到足夠低頻之訊號，一般使用低共振頻率之速度型受波器於資料收錄，避免低頻訊號失真。

本研究將對低頻訊號之產生與施測程序加以改善，以下將對著眼之震源與受波器加以介紹：

(1) 震源：

震波能量的產生方式，有一般之手持式榔頭、炸藥、自由落槌(類似 SPT 落槌)、空氣槍及可控式之震盪器(Vibrator)產生，了解每一種震源產生之能量頻率範圍之頻譜特性與整個可用頻寬帶的範圍，有助於在不同地質條件與施測要求下，選擇合適的設備，作良好的施測與資料擷取，以獲得清晰的資料品質(Richard D.Miller 1992,1994)。一般正弦震盪器如圖 2.18，可以逐一針對單一頻率進行資料收錄，訊號重複性高，可反覆檢核以獲得良好的訊號品質，但所耗費的量測時間將較長。炸藥如圖 2.19 所示，和其他震源比較，具有最佳的穿透能力，但施測時須先預鑽炸藥孔，炸射後會對炸點位置產生破壞，使用上，若操作不當，必定造成相當之危險性。此外，使用炸藥當震源，是一項耗費昂貴的項目，故常用於深層震測試驗上。不同錘頭重量的鐵錘，如圖 2.20 所示，是淺層震測作業中最常使用的震源，具有便

利性高耗費低且可以不斷疊加訊號的能量，提高訊號雜訊比，但較缺乏足夠的低頻能量穿透地層。加速度落槌系統如圖 2.21 則可以產生比鐵槌大、但較炸藥小的能量傳遞，但兼顧了時效性與減少對環境的傷害，此外亦可疊加訊號，直到要求之訊號雜訊比。

為了解不同種類震源的適用性與其特性，學者(Richard 1992,1994)以法反射震測為主要探討的標的，對當時反射震測法所常用之多種震源表 2.3 於三個不同地質條件之區域做了一系列震源之研究。並對該測區提供適合施測之震源建議，如表 2.4 顯示地下水位高，膠結良好細粒料地質適合以孔內震源施測。中等顆粒不良膠結之地質適合以鐵鎚或落槌施測。細顆粒膠結尚可之地質條件適合以孔內震源施測。根據 Richard(1992,1994)與 Miller(1986)的研究指出：地層水位高之地質適合以孔內震源或鐵鎚施測，若地表情況乾燥且堅硬使用落槌或是投射式震源將可獲得較佳的資料。

執行表面波震測，選擇一適當之震源形式及了解其擾動所傳達的頻譜特性，是現地施測重要的一環。本研究所目前所使用的震源設備有小鐵槌(3lb)、大鐵鎚(12lb)與彈力加速度重槌(EWG)。配合 Walkaway 施測，在不同近站支距選用不同之震源產生震波供受波器收錄已獲得較寬之頻寬帶。一般小鐵槌提供較高頻的頻寬訊號，大鐵鎚與彈力加速度重槌提供中高頻之訊號。此外搭配不同震源種類分析其整合後的

訊號，可獲得比單一震源產生之訊號，得到好的分析結果 (Richardson,1998)。

表面波震測藉以分析的是其特有的頻散現象，若收錄之訊號分析後之頻率範圍在高低頻有高可信度的訊號資料產生，將有助於提升淺層之空間解析度與探測深度。雖然可以震盪器來產生各頻率的訊號，但此法耗費時間不具效益。戴源昱(2003)以橡皮墊作為衝擊式震源與地面接觸之界面物產生擾動，與沒有墊片產生之擾動，結果比對，顯示前者在低頻之延伸比後者之結果佳。因此，選擇一項適當的震源配合合適的墊片，可提高頻寬帶的呈現，如圖 2.22 所示。

能量大的震波可避免遠場效應所造成之高頻訊號衰減的現象，亦可延伸近站支距增加收錄長波長之低頻訊號。炸藥可以產生大能量的震波，震波所穿透的深度深，但使用上卻會對使用之區域產生嚴重之破壞，亦對超作人員造成嚴重安全影響，此外，本島使用炸藥做為震源所受之管制相當嚴苛，因此擁有一項移動快速、輕便且能產生大能量訊號之震源將有助於提升頻寬帶的組成。

(2) 受波器

表面波為一低頻、低速之震波，使用高自然頻率之受波器不易接收到表面波之訊號，本研究使用 OYO Geospace 公司出產之 GS-11D 型電磁式速度受波器，如圖 2.23 所示。其自然頻率為 4.5HZ，震波頻

率低於受波器之自然頻率則該型受波器不易接收震此低頻部份之訊號，類同一低切率頻。該型受波器尾端為一圓錐鋼釘(具磁性)，長 6 公分，用以插入並固定於地表，受波器尾端有一正負極接頭用以連接震測纜線。

傳統之多頻道表面波震測施測，是將長釘式電磁式速度受波器插在地表，如圖 2.23 所示，以獲得與地面良好的束制行為。當測線位置是在道路鋪面上，受波器位置需先以電鑽在地面上鑽洞後插入。因此此在測線施測之前的前置鑽洞作業與測線展移的程序將耗費相當多的時間。Steeple et al(1997)指出：減少震波探測所耗費之時間，受波器佈設在測線上需更為快速，因此，設計具有移動性與收錄高品質訊號資料之新式受波器系統，將有助於改善施測之效率使試驗程序更加完善，並減少震波探測所耗費之金額與時效性。以下將介紹一些新式受波器形式，將有效減少耗費的金錢與人力，並改善施測之效率。

Land streamer 為將多個受波器束制在皮帶上，拖著移動來擷取震波資料。Streamer 名稱的由來，源自於施作海洋震測時將 hydrophone 拖曳在船尾，稱為 marine streamer，以接收大量的震波資訊，如此施作的效率及判讀之結果，就海洋震測應用具有良好價值。Marine streamer 良好的施做效率，及其方便的特性施做模式，經過發展而有 land streamer 的出現。目前 land streamer 已有諸多研究，設計

上也有不同樣本，應用上，可使用於震波探測法中的反射法、折射法和表面波震測上。(Geomatrix,2000)

陸地上使用的 streamer 需要面對地質構造複雜、地形崎嶇、背景雜訊大擾亂資料收集等限制。早期極地震測使用 snowstreamer 在多方的改革下 land streamer 應用在一般地質調查的廣度能見度也相對增加，針對 landstreamern 所做得資料擷取判讀和傳統使用 spike 接收器接收的震測資料的研究也愈益成熟。

目前 Land streamer 已有多種創新的製作模式(Geometrics 2003)，新式受波器系統和傳統的插入式受波器資料之可靠度與系統適用性已漸成熟(Van der veen 1998，Geoprofiles 2003)，landstreamer 現地施測也以廣泛應用至折射與反射震測之震波探測上(Van der veen 1998,2001)。land streamer 適用在多種方面，在施作震測上，是一種”可行又經濟的調查方式，相較於大量工作而昂貴的傳統的施測程序”是為一更好的選擇(Geometrics 2003)。以下將介紹由不同研究單位與商業機構所製作之 Land streamer 與資料比對。

(1) ETH,Switzerland

Van der Veen et al(1998,2001)，針對 land streamer 與傳統之插入式受波器(spike geophone)所收錄之震波資料做了一完整的研究報告。該研究所使用之 Land streamer，如圖 2.24。將多個 self-orienting gimbal

geophone(定位式平衡環受波器)，束制在橡皮帶上，藉由橡皮帶本身之自重提供 gimbal geophone 良好的正向力與地表接觸，並避免訊號纜線拖曳所造成之摩擦。(Krohn,1976 研究指出，插入式受波器與地表束制之情況，將影響高頻波之遞減與訊號品質，未插入地表之受波器可藉由增加受波器之重量加強與地面之接觸，減少束制不佳造成之訊號減弱)。該研究將傳統式插入式受波器與 Land streamer 比對在不同之地面環境所收錄之震波資料(草地、柏油路、砂礫石路面)，結果顯示，可藉由增加受波器之重量或挖掘一小型溝槽放置受波器提高與地面之接觸，改善震波資料品質，也證實該新式受波器系統有效的收錄地下結構所傳遞出之訊息，與傳統插入式之受波器所收錄之資料只有些微的差別，如圖 2.25 所示。



(2) KGS(Kansas Geological Survey)

KGS 所研發之 Landstreamer 和 Van der Veen et al 所使用之系統不同，如圖 2.26，將插入式之受波器與類似雞爪釘之三角鑄鐵盤(Weight cutter)焊在一起，藉由該設計，可以在鬆軟之砂礫石或植被表面上的到比較好的地面接觸，整組受波器乃束制在消防水管內，並於管內放置鐵鍊，以增加受波器與地表之接觸與穩定性，消防管可減少因拖曳對儀器所形成之破壞。

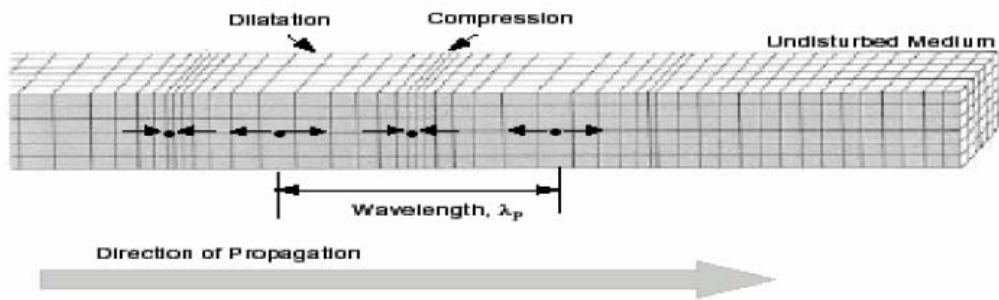
(3) Tyrens,Sweden

使用由 OYO 出產之 4.5Hz 受波器固定在 4kg 重之鐵板上，藉以

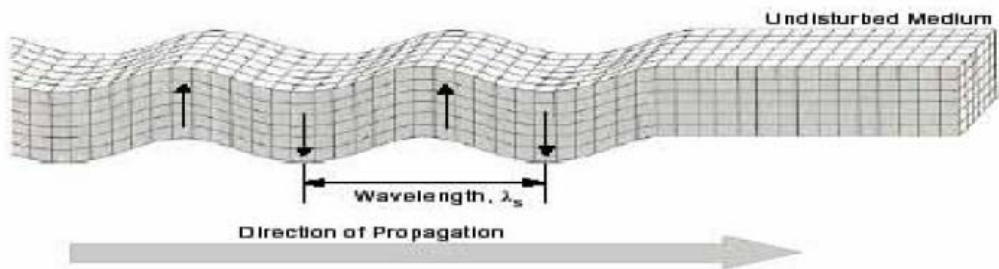
增加正向力與地面接觸，如圖 2.27 所示。圖 2.28 為該機構使用其 Landstreamer 施作 MASW 所描繪之 2-D 地下剪力波速剖面。

上述新式受波器設備，都藉由增加重量來改善受波器與地面之束制行為，提高資料收錄的完整性。設備主要之差異在於受波器形式的不同如圖 2.29(a)所示。Gimbal geophone 內具有傳統插入式受波器內之速度感測器(三向度)，並放置在一黏滯性流體內(viscous fluid) 如圖 2.30(b)，減少雜訊對震波資料收錄的影響。並藉由流體的流動維持感測器與地面的垂直度，該受波器亦可由施測者於實驗進行中，將位在黏滯性流體之感測器固定，因此得以減少雜訊對震波的影響。

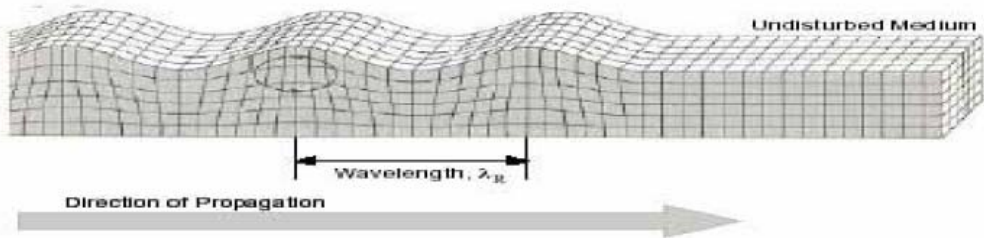
表面波能量遠大於實體波，使用 land streamer 收錄表面波訊號是非常適合的，對於淺層地層探測的需要及解析度的要求，測線的長度以及受波器的間距都很小，傳統插入式接收器作業上需耗費相當大的時間和人力，因而限制了震波探測的適用性，使用 land streamer 可以使震波探測法更有效率使其更人性化。



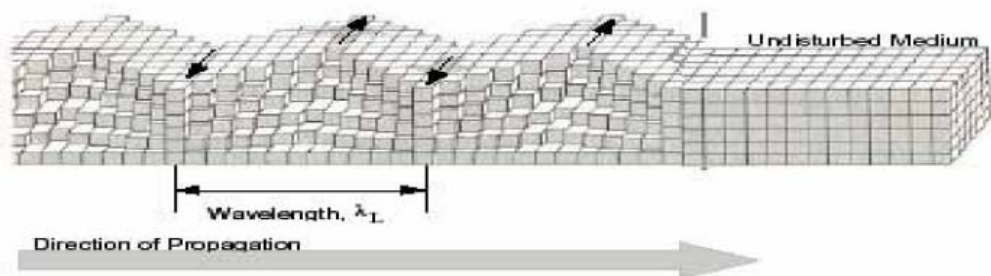
(a) Compression (P-) wave



(b) Shear (S-) wave



(c) Rayleigh (R-) wave



(d) Love (L-) wave

圖 2.1 彈性波運動方式(Bolt,1976)

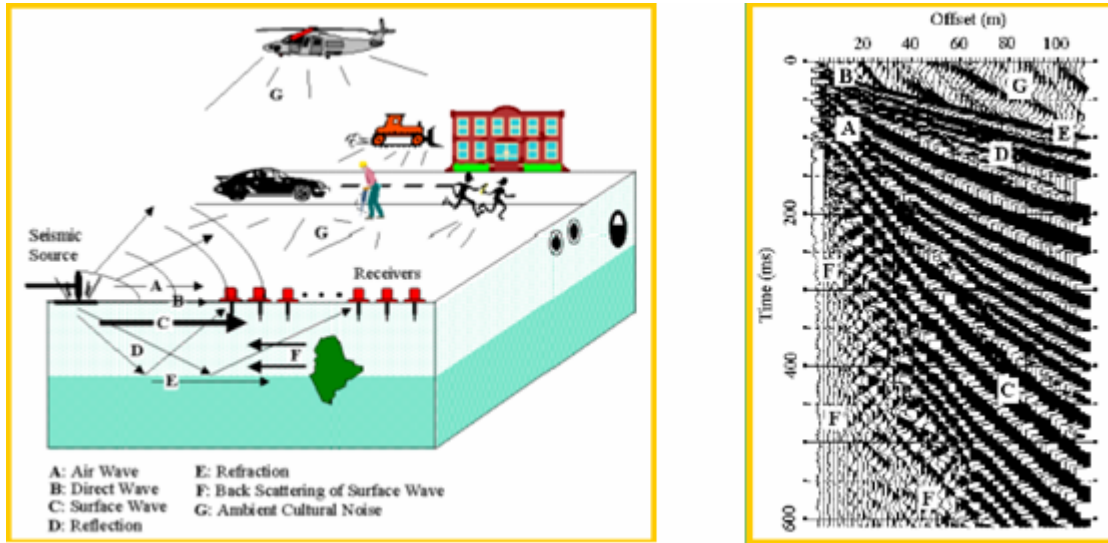


圖 2.2 波傳行式與路徑(KGS,2000)

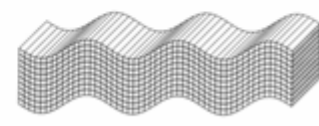
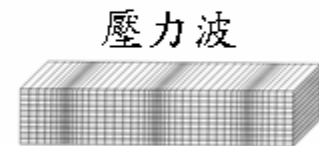
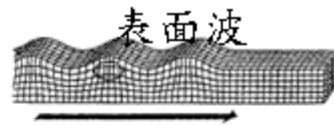
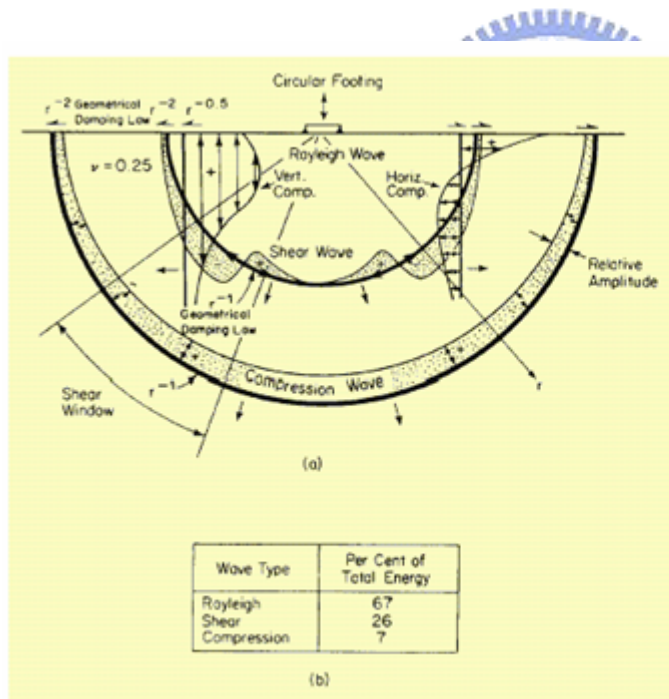


圖 2.3 波傳遞攜帶之能量 (Woods 1968)

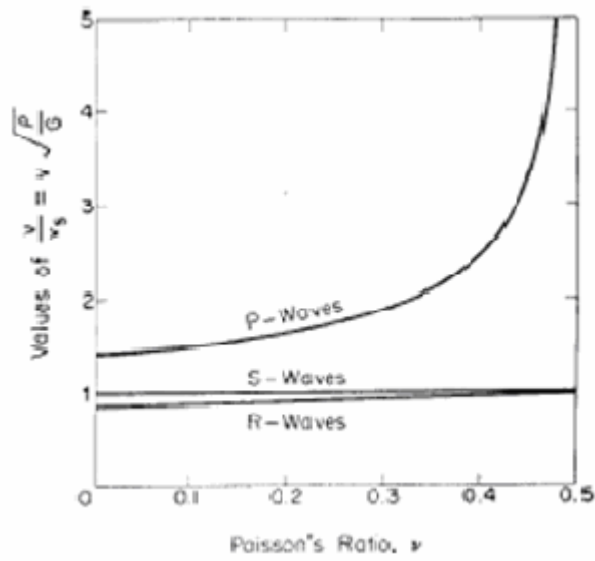


圖 2.4 彈性半無限域波傳速度與伯松比(Poisson ratio)之關係(Richart 1962)

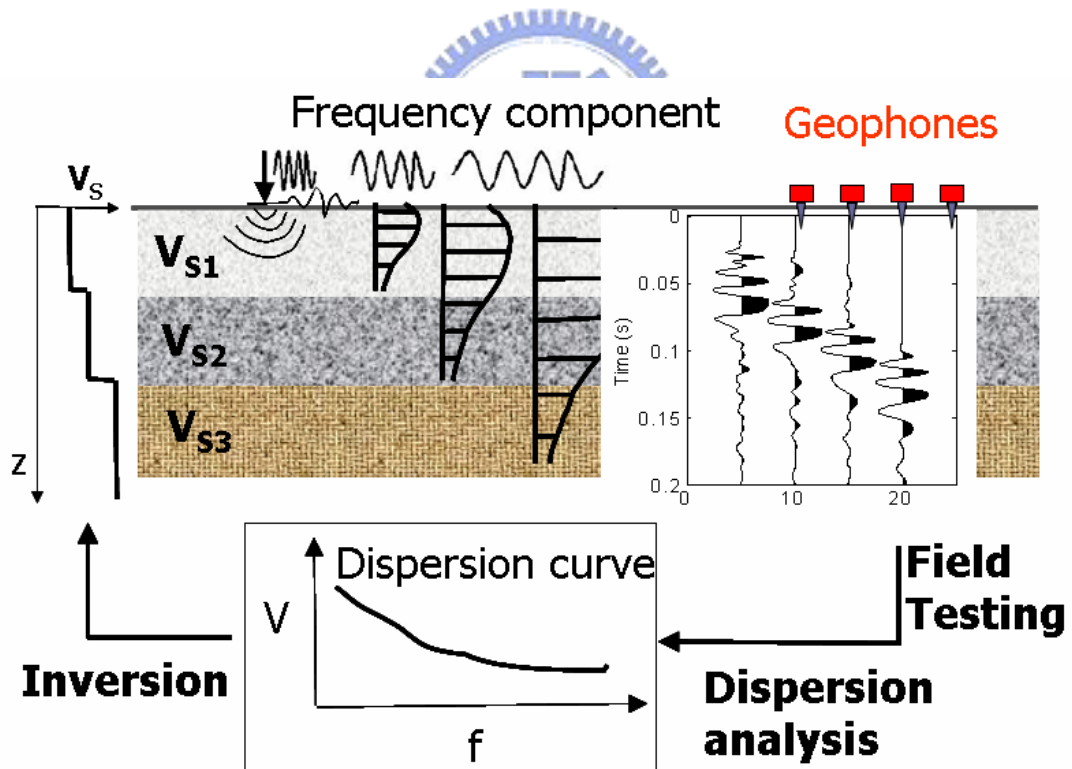


圖 2.5 表面波震測法(C.P.Lin 2000)

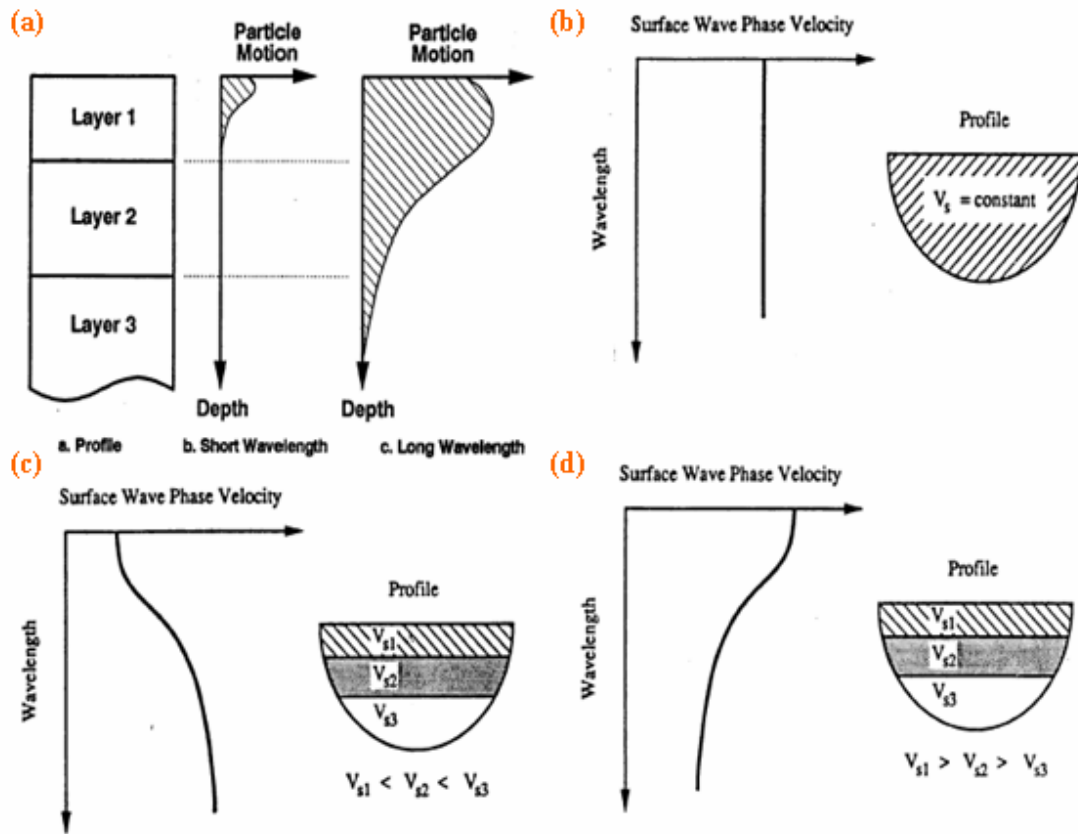


圖 2.6 表面波之頻散現象

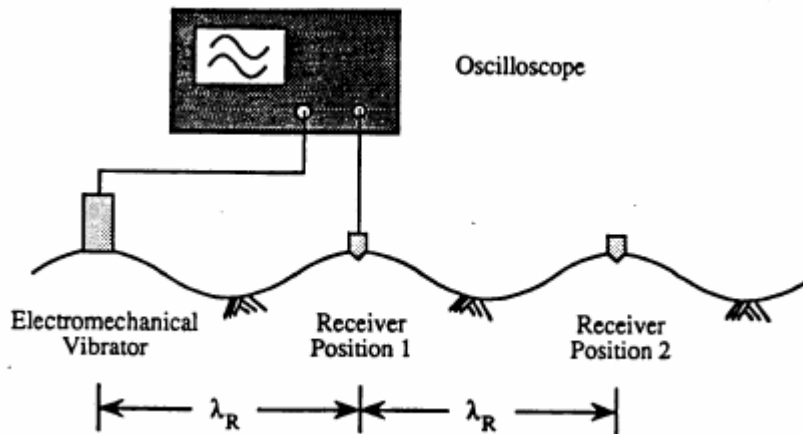


圖 2.7 穩態表面波震動法(Rix,1988)

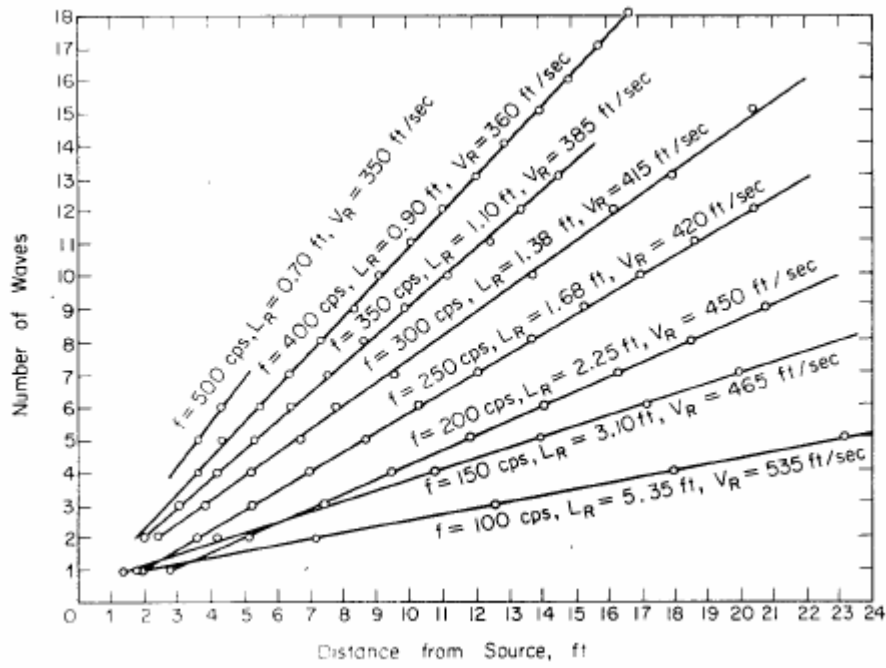


圖 2.8 受波器距離與波數(Number of cycles)之關係圖(Richart,1970)

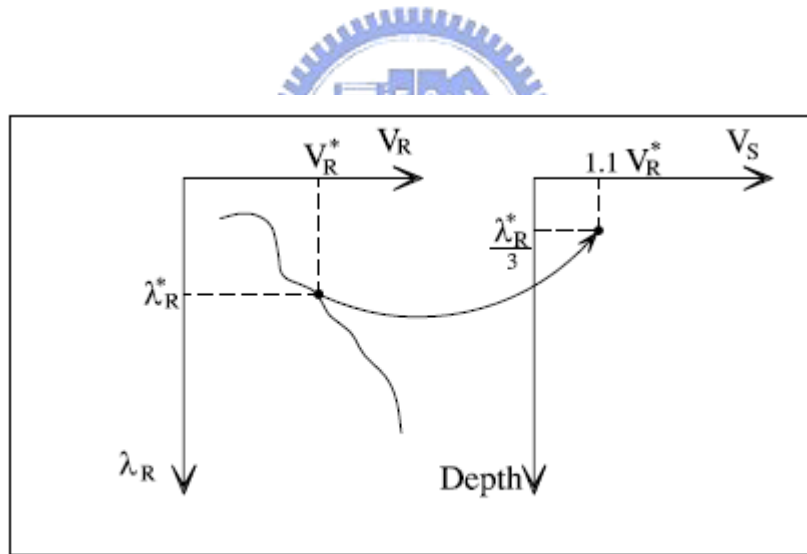


圖 2.9 穩態震動法之簡易反算法

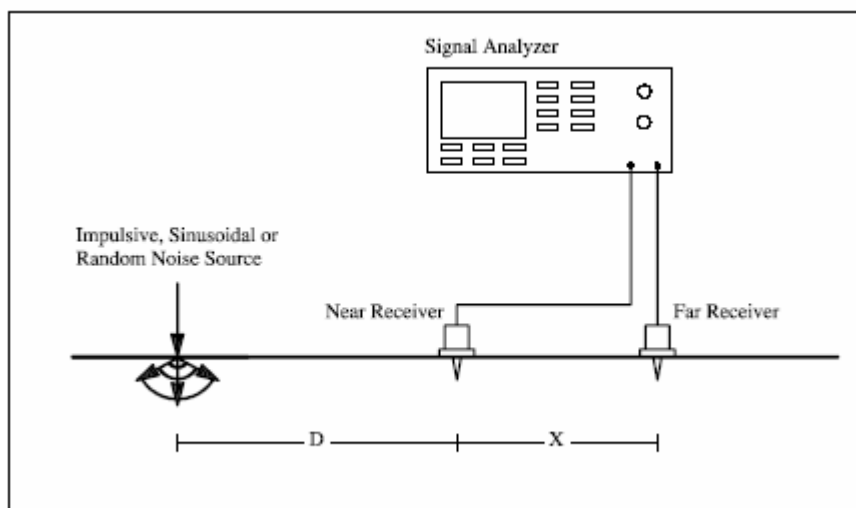


圖 2.10 表面波譜法現地配置圖

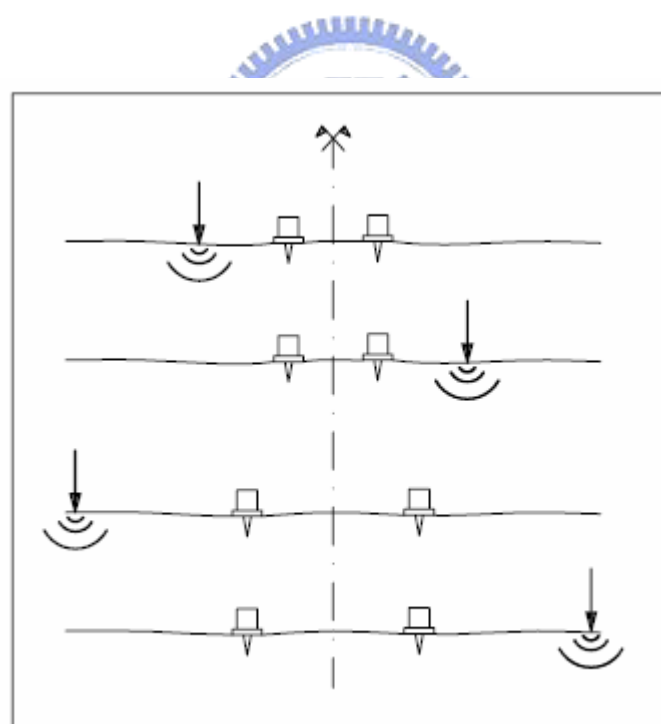


圖 2.11 固定受波器中點法

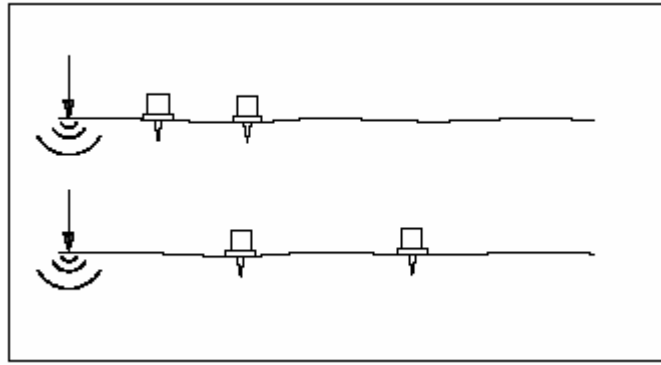


圖 2.12 固定震源法



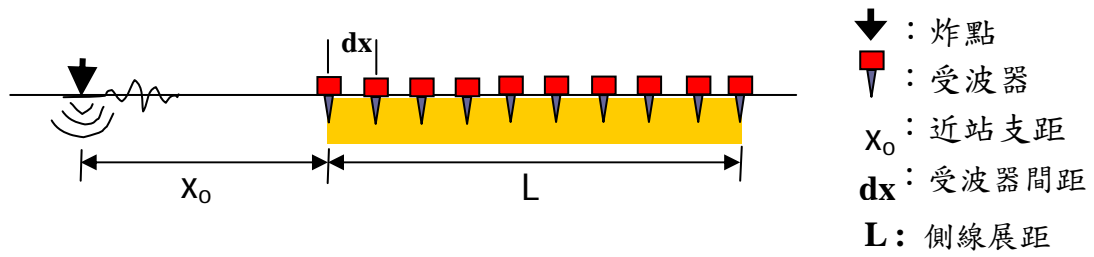


圖 2.13 MASW 現場佈線

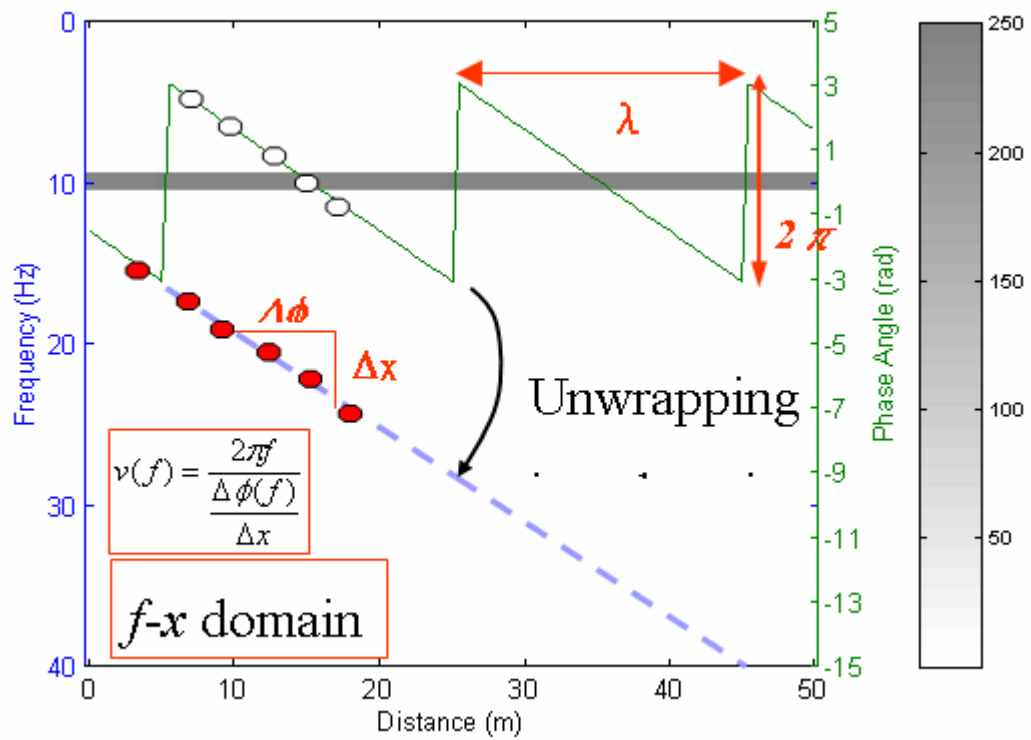


圖 2.14 相位角摺開之過程

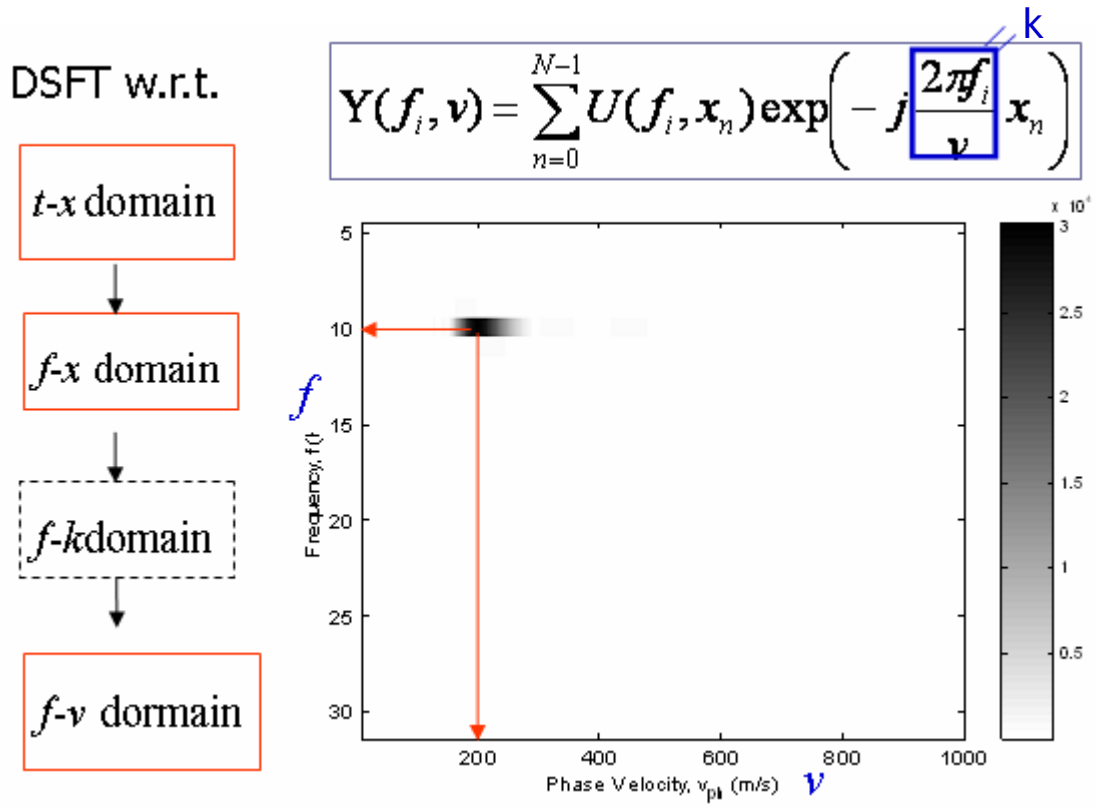


圖 2.15 MWTSW 分析流程，圖上之黑色區域即能量之顛峰值

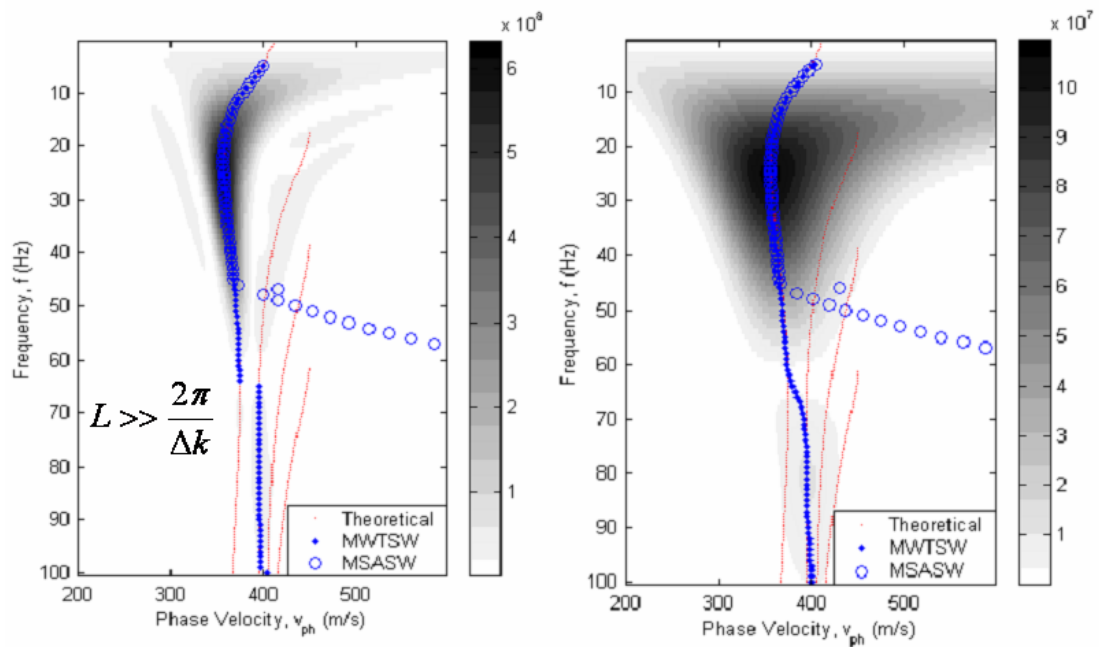


圖 2.16 f-v domain 測線展距對資料遺漏之影響

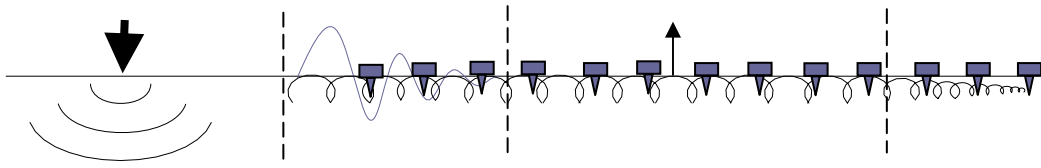


圖 2.17 近場、遠廠效應影響



圖 2.18 震源-正弦震盪器



圖 2.19 震源-炸藥



圖 2.20 震源-各式鎚頭重之鐵槌



圖 2.21 震源-加速度落鎚

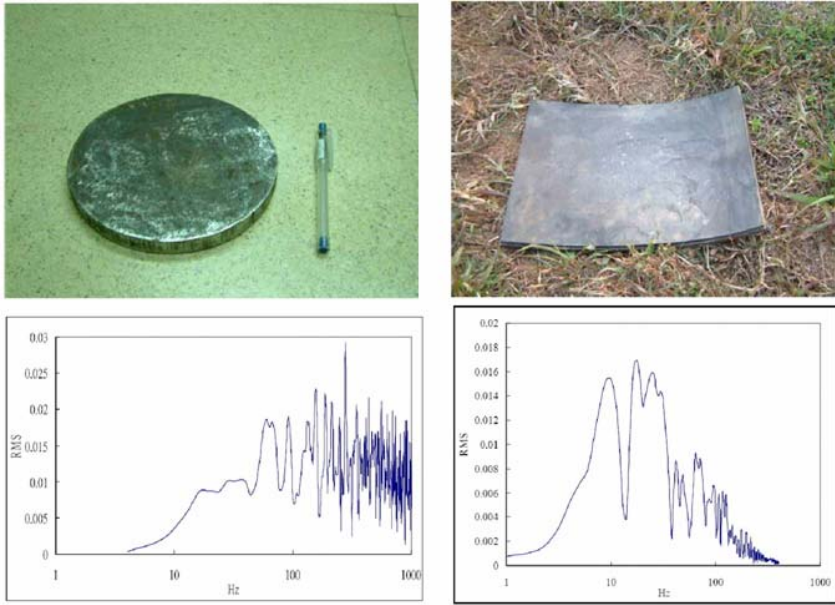


圖 2.22 震源墊片頻譜



表 2.3 試驗之震源

Table 1. Source characteristics			
Source	Variation Tested	Site Preparation	Manufacturer/Supplier Price ¹
<u>General</u>			
1) 10 kj spark pak		Dug hole 0.5-m deep and 0.3 m in dia., lined with trash bag and poured in water and salt.	Geomarine Systems \$>15,000
<u>Weight Drop</u>			
2) 7.3 kg hammer onto steel plate		Seated steel plate with several impacts.	Hardware store \$<500
3) Bison Elastic Wave Wave Generator (EWG) (accelerated weight drop)	a) full extension of rubber band before release. b) extend rubber band 0.5 m before release. c) extend rubber band 0.25 m before release.	Seated 2.6 cm steel plate with several impacts.	Bison Instruments \$5,000-\$15,000
<u>Surface Projectile</u>			
4) surface .30-06-cal. rifle, silenced	a) shot 180-gram bullet into undisturbed ground. b) shot 180-gram bullet into water-filled hole.	none	Custom, \$<500
5) Betsy Seisgun M3, 8-ga.	a) undisturbed dry area 3-oz lead slug. b) shot 3 oz into wet hole.	Poured water into bullet hole from previous shot. Fired into undisturbed ground. Poured water into hole from dry shot of Betsy.	Betsy Seisgun \$5,000-\$15,000
6) downhole .30-06-cal. rifle	shot into wet hole, 180 grain projectile.	Poked 1/3 m deep hole with 2.3 cm shaft and poured in water.	Custom, \$500-\$5,000
7) downhole .50-cal. rifle	a) dry hole b) wet hole	Auger drilled 0.05 m hole 0.66 m deep. Poured water in previous dry shot hole; placed condom on end of barrel.	Assembled by Kan. Geol. Surv. from parts manufactured by Texas Gun & Machine Co. \$500-\$5,000
<u>Downhole Gun/Explosive</u>			
8) .410 Buffalo gun/wet hole	1/5-oz lead slug FED F412-RS	Auger drilled 0.05 m hole 0.66 m deep, loaded gun in hole, poured in water; one-person secured gun.	Betsy Seisgun \$500-\$5,000
9) 12-ga. Buffalo gun/wet hole	a) 1-oz lead slug REM SP12-Mag. b) Black powder only (blank) WIN VW12BL, 165 grain. c) black powder only (blank) w/PVC liner WIN VW12BL, 165 grain.	Same as source 8.	Betsy Seisgun \$500-\$5,000
10) 8-ga. Buffalo gun/wet hole	a) powder only (blank) 250-grain REM R8BL. b) 3-oz lead slug REM 3-oz Pb. c) powder only (blank) w/PVC liner 250-grain REM R8BL.	Auger drilled 0.05 m hole 0.66 m deep, loaded gun in hole, poured in water, held in place by ATV*, compression detonation rubber mallet.	Betsy Seisgun \$500-\$5,000
11) 8-ga. Betsy Cage gun downhole	powder only (blank) 250-grain REM R8BL	Same as source 8.	Betsy Seisgun \$500-\$5,000
12) 8-ga. downhole capsules	a) 500-grain high voltage electric detonation. b) 220-grain high voltage electric detonation.	Auger drilled 0.05-m hole 0.66-m deep, loaded capsule, tamped water, and dirt on capsule.	Betsy Seisgun \$<500
13) Explosives 200 grains PETN.	1.25 m det. cord	Same as source 12.	\$<500

*All terrain vehicle (ATV).
¹Prices have been given in terms of the following ranges:
 \$<500
 \$500-\$5,000
 \$5,000-\$15,000
 \$>15,000

FED = Federal
 REM = Remington
 WIN = Winchester

表 2.4 測區地質與結果

Site Item	New Jersey	California	Texas
Water Table	0.8m	>30m	7m
Target Depth	80m clay	11m	7m/15m
General geology			
Grain size	Fine to midium	Fine to coarse	Fine
Soring	Well	Poor	Medium to well
Material Type	Sands, clays, gravels	Sand and gravel	Sands, clays, gravels
Average Velocity	1600m/s	320m/s	390-470m/s
Drilling	Firm/moist	Hard/loose	Firm/dry
Best source for Targe and condition	Downhole, high Explosive	Sledgehammer/weight Drop	Downhole/weight Drop
Primary positive Characteristic of Best source	Highest frequency And broadest bandwidth	Most coherent Reflected energy	Highest frequency Most coherence
Best atternate source	Subsurface projectile/weight drop	projectile	projectile
Worst source for Site and condition	Subsurface Projectile	Downhole explosive	Weight drop



圖 2.23 4.5Hz 電磁式速度受波器



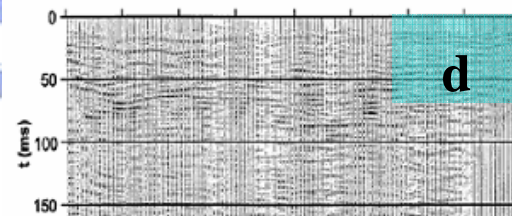
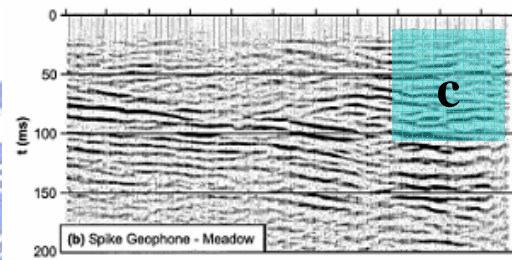
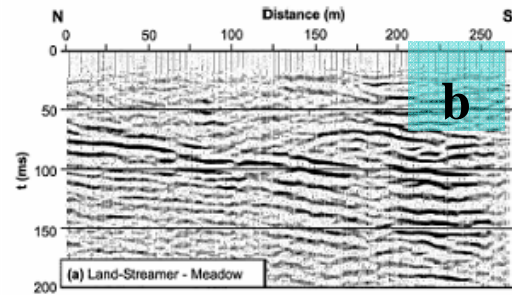
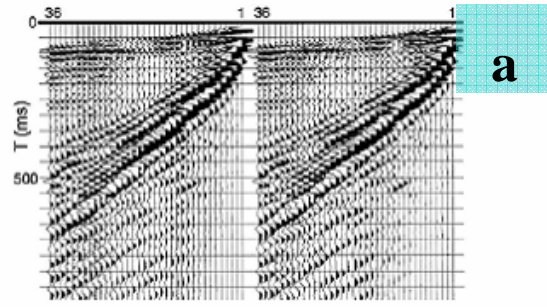
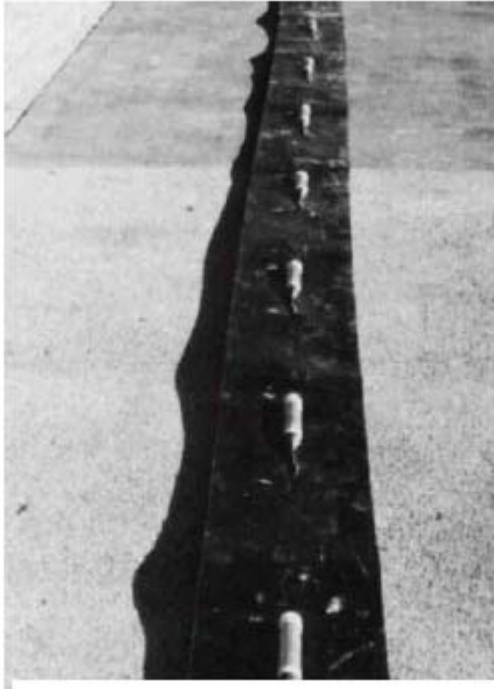


圖 2.23 ETH Landstreamer(Van der Veen 1998)

圖 2.24 (a)插入式受波器(左側)與 Landstreamer 所收錄之震波資料。(b)、(c)為經過描線處理後之剖面。(d)為兩者頗面之差異性



圖 2.26 KGS Landstreamer (2000)





圖 2.27 Tyren Landstreamer

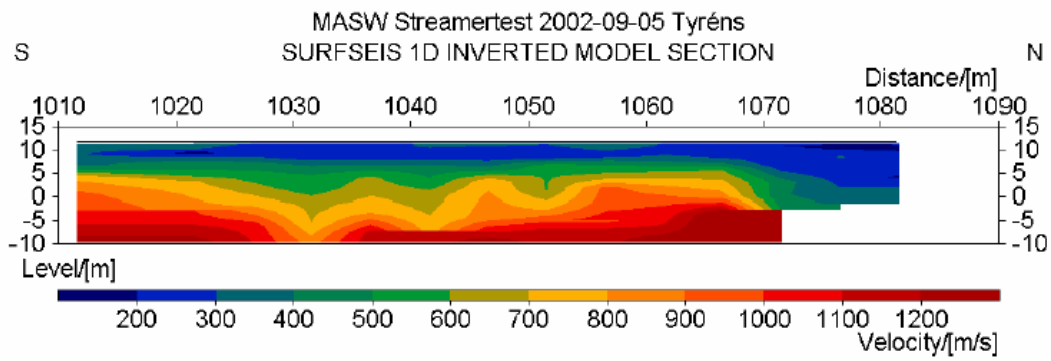


圖 2.28 2-D Vs-profile by Tyren

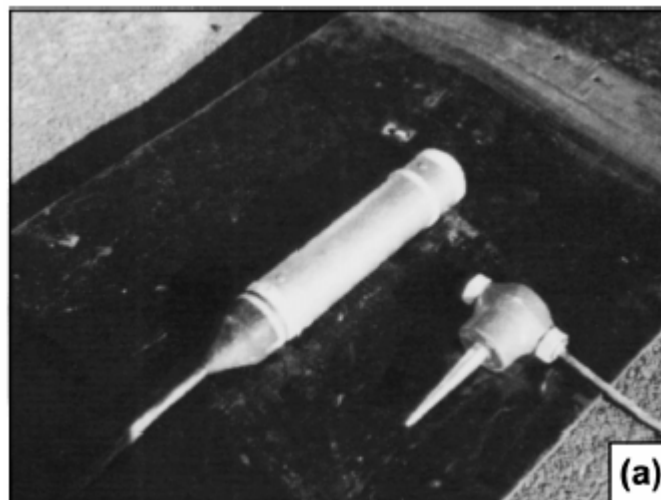


圖 2.29(a) Gimbal geophone 與 spike geophone

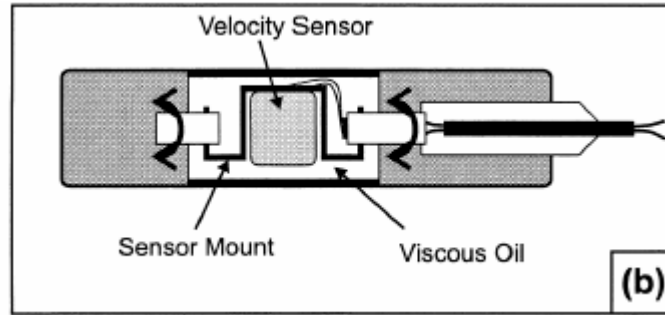


圖 2.29(b) Gimbal geophone 內部構造



第三章 研究方法

多頻道表面波震測法為一快速、有效的非破壞性地球物理探測法，經由訊號處理與反算分析，可獲得與淺層地質材料強度息息相關的剪力波速值。但多頻道表面波震測法之探測深度侷限於一個波長長度之範圍，根據波傳特性，長波長乃一低頻率的訊號，受限於地質材料與儀器的限制，低頻波訊號品質往往不佳，再則頻率範圍不夠低，影響探測之深度，本研究將探討並改善低頻波之效果，首先將探討本研究使用之震源的頻譜特性，進而搭配不同種類之鉗墊，改善低頻波訊號品質。此外，為了增加現地施測的效率性，使用新式受波器以替代傳統插入式受波器的可行性，將由一試驗組資料的比對驗證在不同場址之適用性。



此外，為校合比對新式研發之震源、採用之墊片與新式受波器系統所收錄之資料是否達到預期之需求，前人對於震源與受波器之探討主要針對反射震測，本研究將以表面波分析為主，從不同的分析域，進行資料分析與比較，以獲得最佳的資料解釋。以下將對所採用之表面波訊號分析作一系統性的介紹。

3.1 表面波特性分析

3.1.1 時間-空間域(t-x domain)

時間-空間域的訊號的資料呈現即是以震測收錄的原始波場資

料，由 t-x domain 雖然無法直接分析頻散曲線，但可初步判斷表面波訊號速度頻散的範圍，作為後續分析頻散曲線之速度範圍的參考值。

如圖 3.1

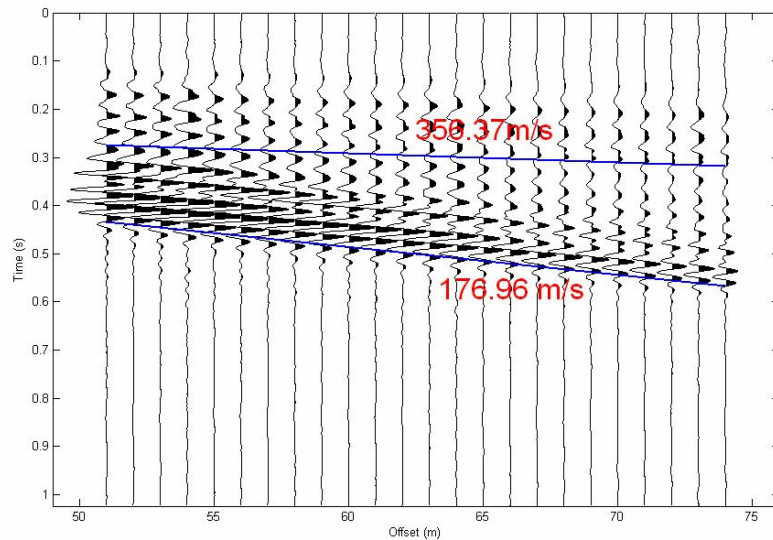


圖 3.1 時間域之震波資料與波速範圍

3.1.2 頻率-空間域振幅頻譜(f-A-x domain)

多頻道表面波時間域震波資料於時間軸做一次快速傅利葉轉換，為一複數頻譜，針對每一頻率延測線展距範圍繪制複數頻譜之振幅頻譜或能量頻譜，呈現出之影像可清楚看到不同受波器與震源之頻率內涵，對不同震源支距的波傳所能產生的訊號頻寬進行了解。頻率-空間域之振幅頻譜，如圖 3.2 所示，由 f(A)-x domain 可以清楚了解高頻訊號隨近站之遠增加而衰減的現象(亦即遠場效應)。

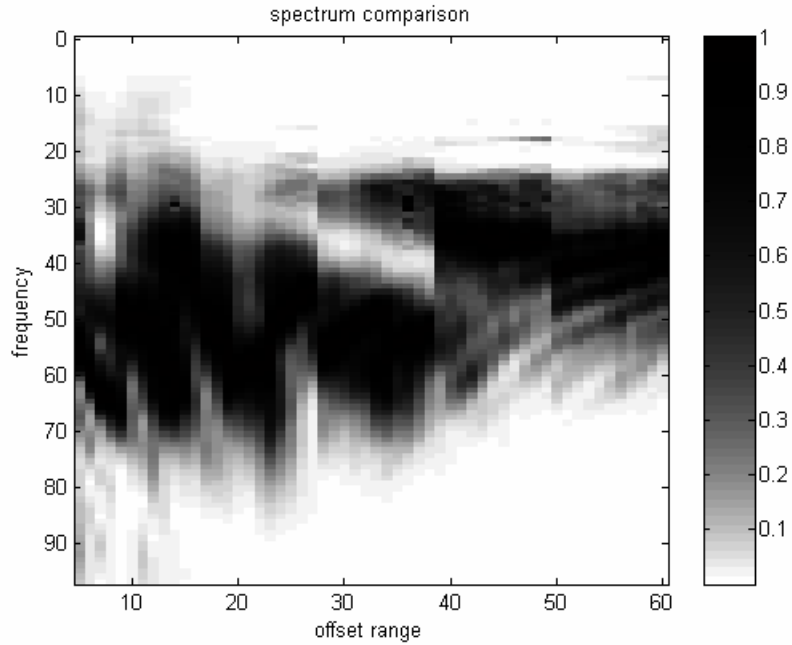


圖 3.2 能量頻譜

有時影像不易分辨能量頻譜的大小，為比較不同震源或受波器的
 頻譜特性，本研究將針對某些震源支距，受波器收錄之資料，繪制其
 能亮頻譜。如圖 3.3。

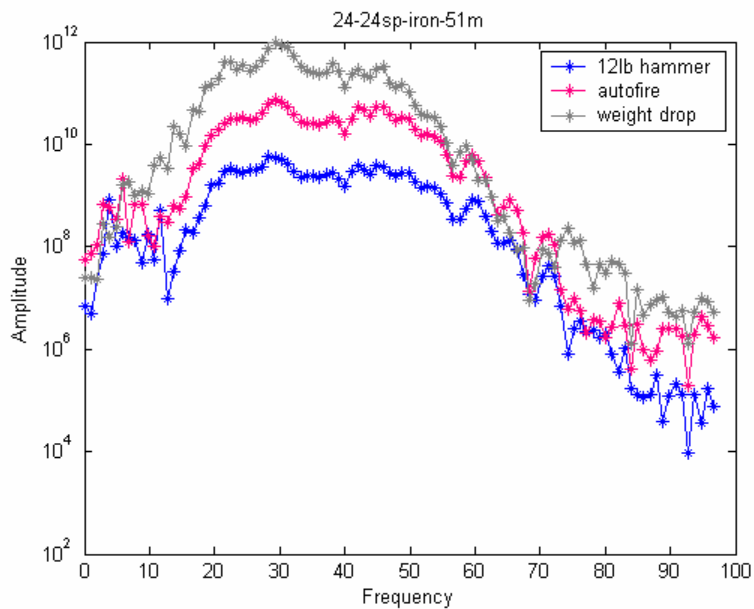


圖 3.3 單一受波器能量頻譜

3.1.3 頻率空間域實部頻譜(f(R)-x)

多頻道表面波時間域震波資料於時間軸做一次快速傅利葉變為一複數頻譜。針對每一頻率延測線展距範圍繪制複數頻譜之實部，對每一頻率可了解其呈現良好平面波行為之展距範圍，如圖 3.4 所示，由 f(R)-x 之影像，可以清楚發生近場效應與遠場效應之展距範圍。

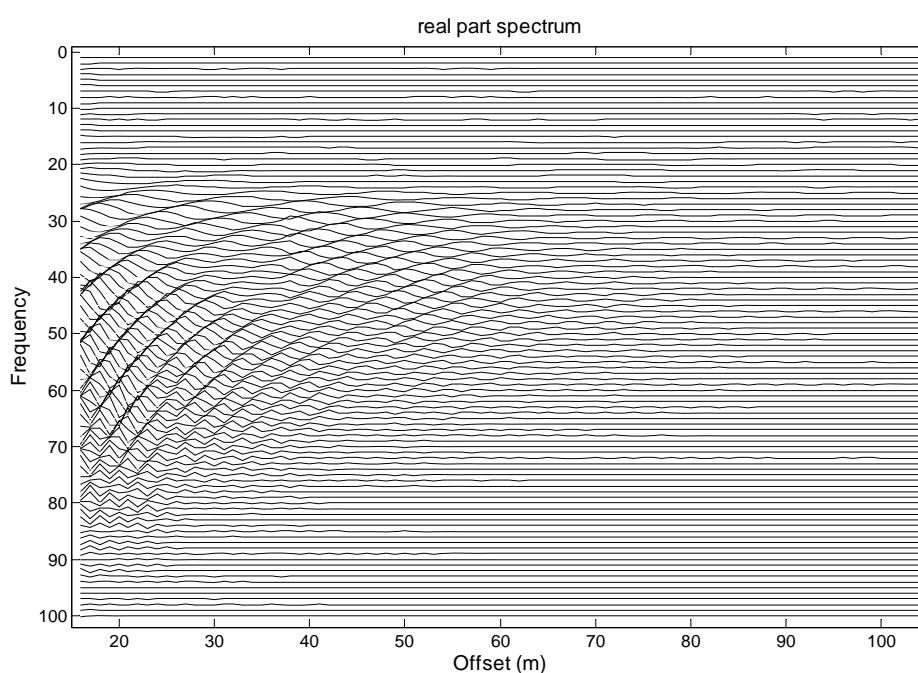


圖 3.4 震波實部頻譜

3.1.4 頻率-速度能量頻譜(f-v energy spectrum)

多頻道震波資料 $U(t,x)$ 經由快速富麗葉轉換(FFT)，轉換至頻率-空間域(f-x domain)如式(2-12)，在經離散空間域富麗葉變換(DSFT)，轉換至頻率-波數域(f-k domain)如式(2-13)。圖(3.5)上黑色影像區即為該震盪訊號頻譜的尖峰值，組合多點則為頻散曲線。圖 3.5，f-v 能量頻譜可以了解頻率與波速之頻散行為。

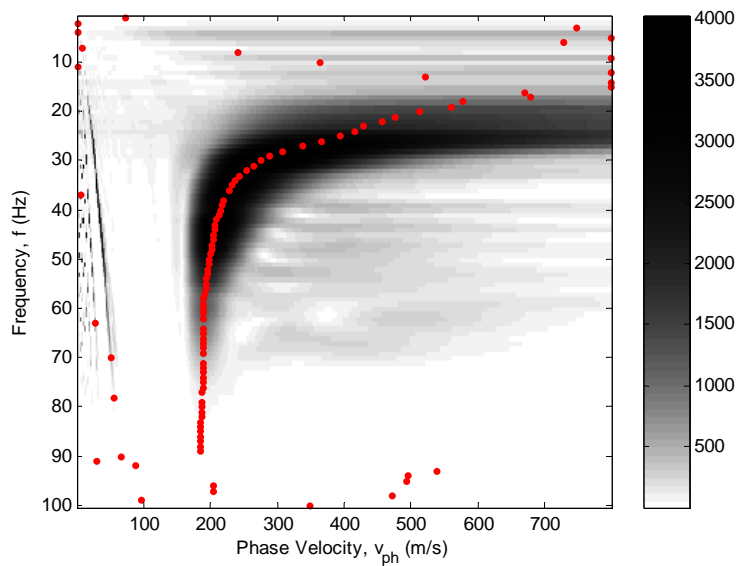


圖 3.5 震波之頻散曲線

3.1.5 頻率波長能量頻譜(f- λ energy spectrum)

表現頻散曲線的方式有很多種，例如 f-v，f-p 或 f- λ ，藉由表面波 f-v 能量頻譜，可以觀察表面波訊號的頻散行為，但與地層探測深度直接相關的波長(λ)，卻無法由 f-v 能量頻譜上直接觀察。在此，本研究亦提出表面波之 f- λ 能量頻譜，如圖 3.6 所示。呈現訊號頻率與波長對應的關係，並與前述一節之 f-v 能量頻譜互相較核比對，以更清楚表現表面波訊號頻率與波速的頻散行為。根據 2.2.1 所述，表面波的探測深度影響範圍約侷限在一個波長波長 λ ，在未經反算的訊號處理程序下，藉由 f-v 與 f- λ 能量譜的較核比對，可定性的了解地層速度的分佈，亦可以簡易反算法直接初步估計剪力波速剖面，做為進一部反算分析的初始值。

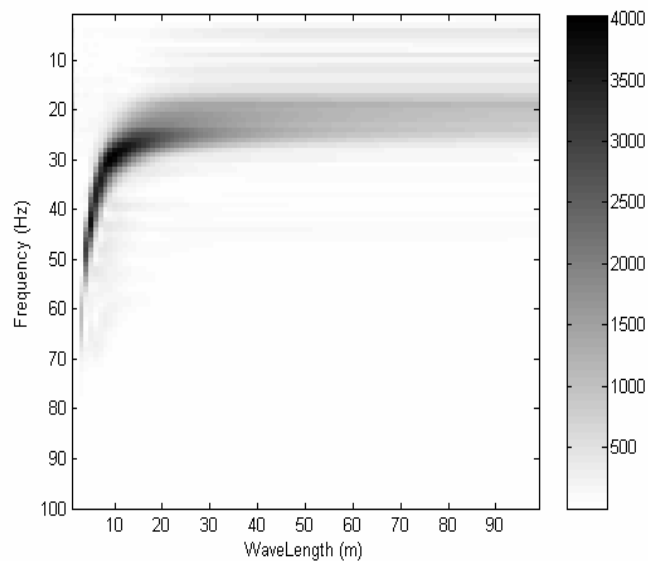


圖 3.6 震波之 f - λ 剖面

3.2 震測設備特性探討

多頻道表面波震測法現地施測時，選定合適的或不同震源種類可以產生良好的表面波訊號，供訊號分析及反算之用。因此了解試驗使用之震源本身所能產生之頻譜及其於不同的地質條件下能量集中之範圍，可定性描述在不同施測條下，適用之震源種類。此外，不良頻率訊號可再藉由不同之施測參數與儀器配置，提升資料品質，增加其應用性。

隨著多頻道震測儀的改良，訊號資料收錄的完整性與可靠度獲得有效的改善。然而，現存之現場施測方式與儀器的配置，往往耗費相當多的人力與時間。Steeple(1997)指出：隨著震測儀的進步，如何改善施測效率在於如何快速地將受波器佈置於測線上。

傳統之多頻道表面波震測施測，是將長柄式速度受波器，圖(2.22)

插在地表上，以獲得與地面良好的束制行為。當測線位置是在道路鋪面上，受波器位置需先以電鑽在地面上鑽洞後插入。因此在測線施測之前的前置鑽洞作業與測線展移的程序將耗費相當多的時間。所以設計具有移動性與資料可靠度之新式受波器系統，將有助於改善施測之效率使試驗程序更加完善。以下將對本研究所使用之震源與新式受波器及試驗規畫作一系統性描述，並於第四章對本章節所得到之試驗結果進行呈現與討論。

3.2.1 震源規格

本研究經常所使用之震源種類有：

(1) 大鎚:鎚頭重 12lb 之鐵鎚(3.7b)

(2) 彈力加速度器:Gisco 公司出產之震源系統，使用 0.5 英吋寬之橡皮帶提供作用力，重槌落距最大達 18 英吋，如圖 2.21。

經由現場試驗累積之經驗發現，目前本研究所使用之震源在遠炸點施炸有能量不足之處，雖然疊加數次炸測資料可稍微提高訊號雜訊比，但低頻訊號之能量不佳。製作一套移動便利且可產生大能量之震源系統將可增進資料品質，增加資料贅餘性，提供更多的參考資料。此外，低頻表面波訊號難以收錄，如何搭配不同震源與墊片或其他不同之方式以改善低頻波訊號，亦是本研究將探討之項目之一。

參考 SPT 落槌系統的設計，本研究所製作之自由落槌系統，相

較於大型的震源種類，更具經濟性且機動性佳。該系統包含支撐部份的三腳架，懸吊重槌的手拉式吊臂與聯接懸吊機制與落槌的安全滑扣及落槌本體。描述如下：

(1) 三腳架:連桿接合長度為 3.5 米。腳架在許可範圍下展開，中點重鎚垂直落距可達 2.5 米。改變落距，觀察其頻譜特性。

懸吊機制: 採用日本 VITAL 公司所出產之手拉式吊臂，安全荷重 500 公斤。

(2) 安全係數 1.5。安全滑扣最大荷重 500 公斤。

(3) 重鎚: 材質為碳鐵，非原生鐵，不易脆化。重鎚直徑為 30 公分之球體，重量 125 公斤，球體上部有一 U 型扣環與懸吊系統連接。



(4) 移動: 以立式推車作為移動在距，如圖 3.8(a)，機動性佳。現地組裝完成，如圖 3.8(b)。

此外，根據戴源昱(2004)研究報告指出，藉由震源配合不同鎚墊，可有效改善低頻波訊號頻率範圍，如圖 2.22。改善低頻波訊號範圍，將有效提高表面波震測探測深度。本研究使用墊片規格如下：

(1)鐵板:直徑 25 公分之圓鐵板，厚 4 公分。如圖 3.9

(2)橡膠墊片:30 公分見方之鎚墊，分別採用厚度為 0.5、1，2 公分與 3 公分之橡皮墊，如圖 3.10。

3.2.2 受波器改良設計

參考 Kansas Geological Survey(USA)與 Tyrens(Swedens)所使用之設計，本研究使用鋁合金鈹，該材料具有如下特性:質輕、高強度、高耐蝕性、易加工與環保等優點。加工處理後做為新式受波器之底座，如圖 3.11，上盤尺寸為 $16*10*0.6\text{cm}^3$;下盤尺寸為 $12*10*0.6\text{cm}^3$ ，上、下盤分別以 4 組 1/8 英吋螺帽緊扣，總重為 0.6 公斤，並以 5 公分寬之聚酯纖維皮帶連接整組受波器，作為移動該受波器系統之用。鄰近受波器間距可依施測目的做不同間距調整以配合要求。如圖 3.12。

3.2.3 試驗規劃

試驗目的在於了解本研究所使用之震源所產生震波，能量衰減之情形與不同鏈墊組合產生之訊號頻譜特性及新式受波器與傳統插入式受波器收錄資料之比對。

新式受波器系統與傳統插入式受波器所收錄之資料比較，為檢測新式受波器收錄震波資料之可靠性與不同地表面該系統之適用性，將以傳統插入式受波器收錄之資料作為真值與新式受波器系統之資料作為試驗組比對。

目前本研究所使用之受波器底座加上 4.5Hz 受波器，重量約 0.7 公斤，為了解重量參數對訊號品質的影響，尤其在軟弱地表之表現。

將以不同重量之砝碼漸次增加在本研究所使用之受波器底座上，觀察重量多寡與受波器底座與地面束制行為以及對訊號品質產生的影響。

為求證以上所提之項目，所規劃的測線參數，現地測線配置如圖 3.13。並列 12 組傳統插入式受波器與 12 組新式受波器於同一條測線上，受波器間距因試驗所需可因應調整，本試驗組採用 1m 之受波器間距，因此本測線測線展距 L 長 11m，近站之距 X_0 採用 5m 之展距。此外，本試驗組，施測採 Walk-away 方式進行，於第一炸點施測後，第二炸點往後展延一條測線之長度 L ，近站之距則為 $X_0 + L$ ，於此類推，第三炸點，近站之距為 $X_0 + 2L$ ，第 n 炸點，近站之距為 $X_0 + nL$ 。為了解鏈墊的特性，不同震源與不同鏈墊的組合將於每一炸點施作，對擷取的資料全都錄，並於第四章中對不同之目的對資料作詳細的解釋。實驗參數設計如表 3.2。表 3.2 列有本研究所常使用之震源種類以及不同施測之區域之地面條件和不同之鏈墊，藉由不同的組合對不同之測線作資料擷取的工作，進而由頻譜分析解釋不同震源的頻譜特性以及不同鏈墊對訊號頻譜的影響，尤其著重在低頻訊號的改善。此外不同測區測線接觸面對新式受波器訊號收錄的影響，施測項目一併列舉於表 3.2。本研究所考慮的地表接觸面主要有瀝青鋪面與軟弱地表面，軟弱地表面又細分一般砂礫為主的表面與草地接觸面。目前本研究所使用之受波器底座加上 4.5Hz 受波器，重量約 0.7 公斤，為

了解新式受波器重量參數對受波器於軟弱地面束制之行為以及訊號品質之影響程度，將以不同重量之砝碼漸次增加在本研究所使用之受波器底座上，藉由不同頻譜分析法觀察重量多寡對訊號品質影響程度。



表 3.1 實驗參數配置

震源		小鎚	大鎚	彈力加 速度器	自由落 槌	自由落 槌
鎚擊接觸面						
落距					1.5 米	2.5 米
瀝青	鐵板	○	○	○	○	○
	1cm 橡皮墊	○	○	○	○	○
	2cm 橡皮墊	○	○	○	○	○
軟落地表	鐵板	○	○	○	○	○
	1cm 橡皮墊	○	○	○	○	○
	2cm 橡皮墊	○	○	○	○	○



圖 3.7 鎚頭重 12lb 支大鐵鎚



圖 3.8 新式落槌系統



圖 3.9 震源墊片之鐵板

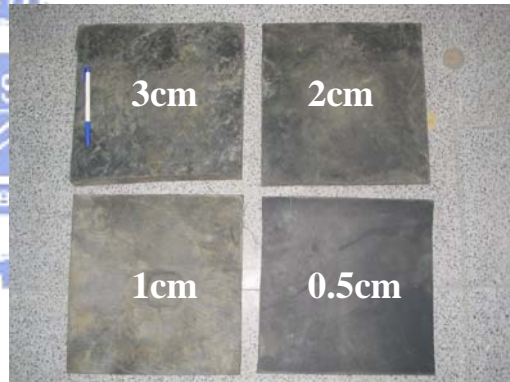


圖 3.10 震源墊片之橡皮墊

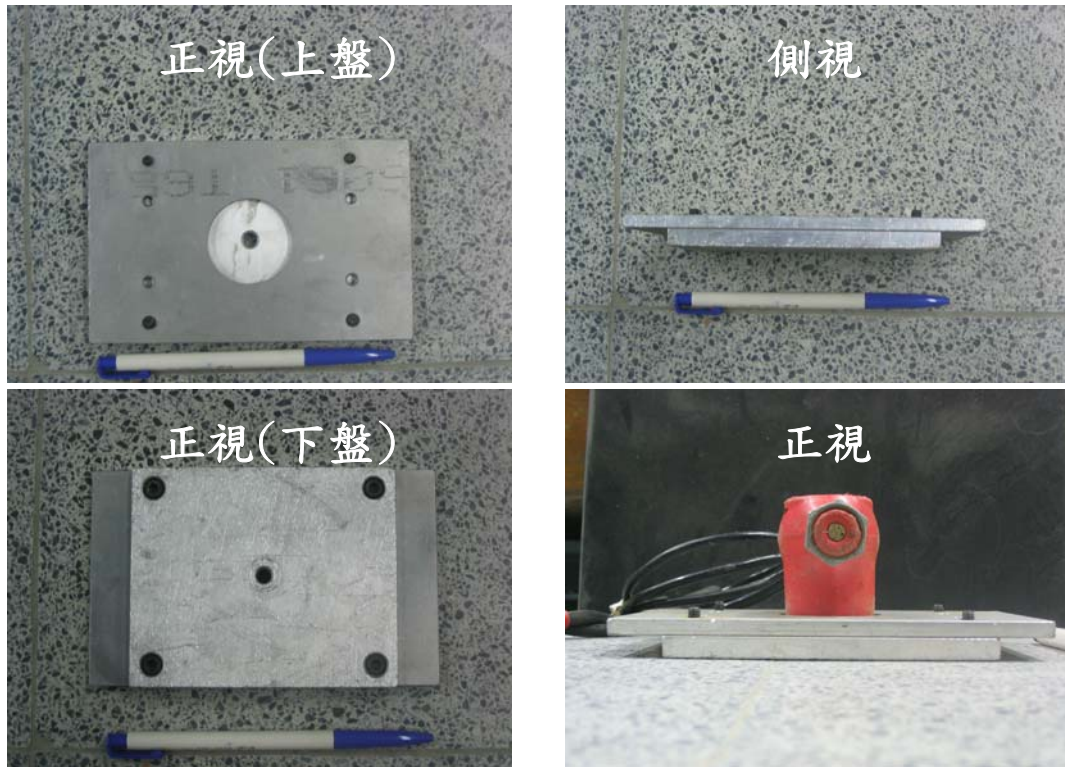


圖 3.11 新式受波器底座



圖 3.12 新式受波器

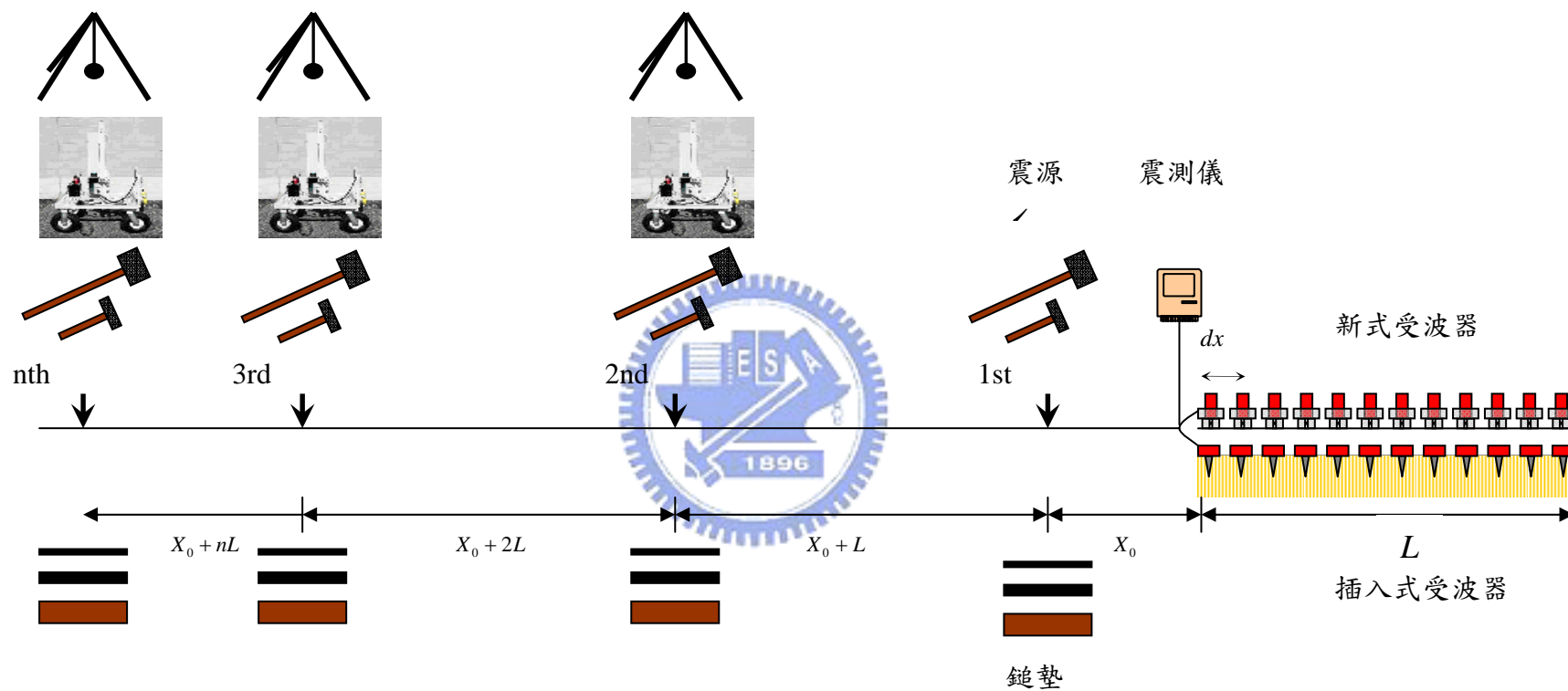


圖 3.13 現地配置圖

第四章 震源與受波器之特性

4.1 震源特性

本章節將針對目前本論文所使用的震源種類按其其能量大小、頻譜特性進行了解，再則觀察震源與不同鉗墊組合所產生的訊號頻譜，以及低頻訊號之資料品質。並藉由一系統化的震源頻譜解釋不同種類震源的特性，作為野外施測配置時，選用震源種類之參考。

4.1.1 震源

測線一位於博愛校區瀝青鋪面施測項目如表 3.1 所示，選擇三種類型的震源種類，分別為鉗頭 12 磅重之大鐵鉗(BH)、彈力加速度器(AF)及自由落槌(WD)做為施測震源；以直徑 25cm、4 公分厚之鐵板(Ip)作為墊片，採用傳統插入式受波器收錄的資料進行資料分析。

圖 3.13 現地配置圖

大鐵鉗與彈力加速度器之 Walk-Away 施測資料接合後...
展距範圍 16m~104m 的震波歷時資料；自由落槌施測資料接合後得到測線展距範圍為 38m~104m 的震波歷時資料，將接合後之的資料經由訊號分析處理後為頻率空間域(f-x)資料，繪製經沿受波器方向正規化之不同展距及所對應不同頻率的實部頻譜 (f(R)-x)、能量頻譜 f(A)-x，及頻散曲線 f-v。

震源 BH 所產生之相關訊號處理結果，如圖 4.1 所示，圖 4.2 與圖 4.3 為彈力加速度器與自由落槌所對應的資料，格式與圖 4.1 相同。以下分別就不同的分析域作討論：

1. 時間-空間域

針對震源(BH)資料而言，第一受波器起始收錄時間點(0.1s)至訊號遞減時間點($\ll 0.2s$)，震波延時約小於 0.1s。整體波傳訊號沿測線展距方向增加而遞減。當測線展距超過 70m，表面波訊號能量不足振幅變小，訊號遞減嚴重。測線展距 35m~55m，訊號的延時較長；單一受波器訊號於有效訊號收錄時間的後半段，單位時間震盪訊號波較少，其餘訊號於單位時間訊號震盪次數相當密集，訊號都分布在 0.1s 的時間延時內。

針對震源(AF)資料而言，第一受波器起始收錄起始點(0.1s)至訊號遞減時間點($< 0.2s$)，震波延時約小於 0.1s，整體波傳訊號沿測線展距方向增加而遞減，當測線展距超過 80m，表面波訊號能量不足振幅變小，訊號開始遞減。測線展距 25m~65m，訊號的延時較長，單一受波器，於有效訊號收錄時間的後半段，單位時間震盪訊號波較少，其餘訊號於單位時間訊號震盪次數相當密集，訊號都分布在 0.1s 的時間延時內。

針對震源(WD)資料而言，第一受波器起始收錄起始點(0.15s)至訊號遞減時間點(0.45s)，震波延時約 0.3s，整體波傳訊號沿測線展距方向增加而遞減，當測線展距超過 100m，表面波訊號能量變小振幅才逐漸變小，訊號開始遞減。測線展距 45m~80m 間，訊號的延時，相對其他展距的訊號之延時較長；單一受波器訊號於有效訊號收錄時間的後半段，單位時間震盪訊號波較少，其餘訊號於單位時間訊號相對前段收錄時間震盪次數較多，訊號都分布在 0.3s 的時間延時內。

比較三者的於時間-空間域的震波歷時表現，自由落錘的震波歷時(0.3s)，因其產生的震動能較大，故大於彈力加速度器與大鐵錘。在單位時間訊號反應上，大鐵錘與彈力加速度器的震盪次數較為頻繁，遠多於自由落錘。因此可初步判斷大鐵錘與彈力加速度器產生的波傳訊號，高頻波佔較大部分。自由落錘訊號以較低頻率之振動為主。

2. 頻率-空間域上之實部頻譜(f(R)-x)

震源(BH) 沿受波器展距方向，收錄資料於頻率軸實部的範圍高頻約在 80Hz，隨著展距的延展，遠支距受波器低頻訊號品質逐漸改善，低頻約在 25Hz。高頻訊號則受到遠場效應的影響，其頻率內涵不如近支距訊號所呈現出較高的訊號頻率。

震源(AF) 沿受波器展距方向，收錄資料於頻率軸實部的範圍高頻約在 70Hz，隨著展距的延展，遠端受波器低頻訊號品質逐漸改善，低頻約在 20~25Hz。高頻訊號受到遠場效應的影響，其頻率內涵則不如近支距受波器呈現出較高的訊號頻率。

震源(WD) 沿受波器展距方向，收錄資料於頻率軸實部的範圍高頻約在 50Hz，隨著展距的延展，遠端受波器低頻訊號品質足漸改善，低頻約在 15Hz。

藉由 f(R)-x 頻譜可瞭解每一測線展距收錄訊號之頻率寬帶，作為最佳展距的選取，並可清楚了解訊號受到近、遠場效應對訊號品質的影響。比較三者於 f(R)-x 的表現。震源產生之震波能量大小，對訊號之頻率內涵有顯著的影響。

3. 頻率空間域上之振幅(f(A)-x)

藉由 f(A)-x 頻譜可檢視不同震源產生能量於不同展距的分配範圍。

針對震源(BH)振幅頻譜頻率範圍分布在 20Hz~80Hz，測線展距 70m 後段之訊號，因震源能量小使其頻譜較為分散，尤其展距 93m~114m，能量頻譜無明顯的集中帶，應多為不規則的雜訊影響。

針對震源(AF)振幅頻譜頻率範圍分布在 20Hz~70Hz，測線展距 80m 後段之訊號，高頻波能量小使其頻譜較為分散，主要能量集中在 20Hz~25Hz。測線展距 93m~114m，能量不足，20Hz 以下之頻譜受到不規則背景雜訊影響，呈現一小段的能量點。

針對震源(WD)振幅頻譜頻率範圍分布在 15Hz~40Hz，40Hz 以上的高頻波訊號能量幾乎不存在，此現象應為震源本身故有之頻率特性。在遠端測線受波器，低頻訊號能量相當集中，受到雜訊的感染較大鐵鎚與彈力加速度器為小。

比較三者的 f(A)-x 頻譜與 f(R)-x 的結果，大鐵鎚能量小於彈力加速度器，彈力加速度器受實體波感染高頻波的現象略比大鐵鎚大，可由兩者的頻率範圍得知；能量傳遞上，自由落槌的能量遠大於兩者，遠支距震波呈現出的品質優於其餘兩者，此外，在本階段試驗之瀝青路面，相較於大鐵鎚與彈力加速度器，自由落槌本身產生的訊號頻率約 15Hz~45Hz；震波訊號波長範圍約可達 30m，有效的改善空間探測深度的能力。隨著支距增加，頻率內涵受到的影響較其餘兩者來的

小，且能量大都集中在較低頻的範圍，雖然高頻的訊號品質不佳，但影響高頻訊號品質的因素相當多，相對的，藉由現場施測參數的改變可改善高頻訊號的品質。對於表面波震測法而言，改善低頻訊號可有效增加空間的探測範圍。因此，在震源的選擇上，兼顧經濟性與適用性，自由落槌為一良好的施測設備，尤其在改善低頻訊號的作用上。

此外，當 $f(R)$ - x 頻譜出現歧異的現象，可由 $f(A)$ - x 得到映證，兩者的同質性很高，兩組頻譜可以對良好訊號波段訊號作最佳展距的選擇。

4. 頻散曲線(f - v)

由測線收錄不同震源的震波資料所組構的 f - v 頻散曲線特性如下。

針對震源(BH)由頻率-波速關係，頻散曲線資料良好為頻率 20Hz~80Hz，其波速為 200m/s~400m/s，故其對應波長範圍為 2.5~20。

針對震源(AF)由頻率-波速關係，頻散曲線資料良好為頻率 20Hz~70Hz，其波速為 200m/s~450m/s，其對應波長範圍為 2.8~22.5。

針對震源(WD)由頻率-波速關係，頻散曲線資料良好為頻率 18Hz~40Hz，其波速為 200m/s~500m/s，故其對應波長範圍為 5~28。

如圖 4.4 所示，以震源大鐵鎚敲擊鐵板之頻散曲線能量譜為底，套疊三種震源在同一測線展距頻率範圍 15Hz~75Hz 之頻散點構成之頻散曲線。其中，自由落槌訊號能量大提供較好的低頻解析能力，有效的改善波長之範圍，但受到高頻波訊號內涵的影響，淺層解析度不

如大鐵鎚與彈力加速度器好，但已達到改善低頻波之研究目的。自由落槌可產生較大的能量，訊號頻率於低頻範圍品質優於大鐵鎚與彈力加速度器，但高頻資料可以由大鐵鎚或彈力加速度器所提供。

大鐵鎚(BH)是一項相當良好的震測震源，由於其施測便利性，該震源，常在各種測區選擇使用，但如需考慮空間解析度與探測深度，則需搭配大型震源於測線資料收錄，以改善低頻波之解析度。

5. 頻散曲線($f-\lambda$)

一般頻散曲線分析，都只展現頻率與速度所對應之頻散關係，無法直接看到與探測範圍息息相關的參數”波長”大小，藉由圖 4.5， $f-\lambda$ 的圖示，並配合 $f-v$ 頻散曲線，可快速了解頻率、波速與波長之間的關係。在現地施測時，利用兩者所傳達的訊息，可初步對現場訊號作揖概略的了解，以選擇最佳的施測參數配置與收錄良好的訊號品質。

由圖 4.5 所示，大鐵鎚(BH)所反應的最大波長約 20、彈力加速度器之最大波長約 25 而自由落槌則可達 30。由圖上可以很清楚的分辨不同種類產生之震波所反應之波長大小；影像深淺則表示該訊號的能量強度。綜合波長大小與能量強度的觀點，更清楚顯示自由落槌所產生之波長大於其餘兩種的震源；其低頻之訊號能量也遠遠高於大鐵鎚與彈力加速度器，相對上，自由落槌之深層解析度優於本次試驗之他種震源。

4.1.2 墊片對頻譜之影響

根據 4.1.1 節的研究成果，能量大的震波可以提高低頻的解析

度，在此節將針對不同墊片對於震波頻譜是否有不同的影響進行了
解。

根據測線一於博愛校區瀝青鋪面施測資料，如表 3.1，選擇鎚頭
12 磅重大鐵鎚(BH)做為施測震源，敲擊 Rb1(1cm 厚橡皮墊)與 Ip(鐵
板)作為墊片、傳統插入式受波器收錄之震波資料，了解低頻訊號受
不同墊片的影響為何。

圖 4.6 未經能量正規化之大鐵鎚敲擊鐵板所產生沿震源-受波器
測線展距方向之能量頻譜，測線展距 16m~60m、訊號頻率範圍分布
在 20Hz~80Hz;圖 4.6 為大鐵鎚敲擊 30 公分見方一公分厚之橡皮墊
(Rb1)所產生沿震波-受波器測線展距方向之能量頻譜，測線展距
5m~60m、訊號頻率分布在 10Hz~75Hz。圖 4.6 左圖因第一條測線原
始資料遺漏，所以在測線展距上和圖 4.6 右側圖不一致。無法比對第
一條測線訊號之頻率範圍，但整體的頻率趨勢差異不大。

圖 4.7 顯示未經正規化之彈力加速度器敲擊鐵板所產生沿震源-
受波器測線展距方向之能量頻譜，測線展距 16m~65m，訊號頻率分
布在 20Hz~70Hz 的範圍;圖 4.7 顯示彈力加速度器敲擊橡皮墊所產生
沿震源-受波器測線展距方向之能量頻譜，測線展距 16m~65m，訊號
頻率分布在 20Hz~70Hz 間，兩著差異在於，彈力加速度器落鎚敲擊
橡皮墊的能量頻譜，在測線展距 16m~27m 有多個區域的能量集中區
塊，研判是因為現地施做時，落鎚敲擊橡皮墊、落鎚重覆敲擊所致。

圖 4.8 顯示未經正規化之自由落鎚敲擊鐵板所產生沿震源-受波

器測線展距方向之能量頻譜，測線展距 38m~93m，訊號分佈在 20Hz~35Hz; 圖 4.8 顯示未經正規化之自由落錘敲擊橡皮墊所產生沿震源-受波器測線展距方向之能量頻譜，測線展距 38m~93m，訊號分佈在 20Hz~35Hz。

由三種震源敲擊不同墊片所呈現的能量頻譜結果上了解，使用鐵板與 1 公分厚之橡皮墊所收錄之訊號，其低頻訊號在頻率的改善上並非特別明顯，而且受到能量頻譜色階的影響，使得辨別低頻訊號的頻寬，更顯的困難。因此根據單一顆受波器收錄資料的能量頻譜 $f(A)-f$ ，探試不同墊片所造成之影響。如圖 4.9 顯示，為大鐵錘敲擊鐵板與橡皮墊，在近站之鉅 38m 處，該測線最後一顆受波器的能量頻譜，可以發現，敲擊橡皮墊低頻約在 15Hz 就有訊號，雖然不大，相對上，敲擊鐵板的訊號，無此行為，直到 18Hz 附近，敲擊橡皮墊的訊號突增，敲擊鐵板有開始有較明顯能量出現。在比對多組震測資料發現，敲擊橡皮墊是可以改善低頻波的效果，但改善多少以及可以到多低的訊號，其影響因素相當多，除了地層與震源固有的特性影響，受波器的種類也影響相當大，若要加以定性描述墊片產生的差異性，則可以在不同的測區地質收錄震波資料加以比對，亦可以地性描述不同測區，區域地質傳遞之震波的頻率性質。此外，由 WD 的能量頻譜發現，當震源能量越大，震波受墊片的影響愈小。

4.2 受波器特性

本研究研發一組可快速移動之新式受波器，為清楚瞭解傳統插入

式受波器與新式受波器的資料收錄的差異性，以及新式受波器的適用性，本節中將敘述之各比較試驗，將以傳統插入式(planting)資料作為真值與新式受波器(streamer)收錄資料進行處理比對。藉由 3.1 節所述之不同訊號域分析探討新式受波器於不同之施測表面上所收錄資料之可信度及適用性。

4.2.1 瀝青鋪面

測線一於博愛校區瀝青鋪面施測資料，如表 3.1，選擇以鎚頭 12 磅重之大鐵鎚(B.H)與自由落鎚(WD)做為震源，直徑 25cm，厚 4cm 之鐵板(Ip)作為墊片，8 各炸點的震波歷時資料接合後之測線展距為 16m~93m。將接合後之測線資料分別用時間-空間域(t-x)的震動歷時、頻率空間域之振幅(f(A-x))、頻率-速度能量頻譜(f-v energy spectrum)及新提出之頻率-波長能量頻譜(f- λ)頻散曲線，比對新式受波器與傳統插入式受波器資料之差異。

1. 時間-空間域(t-x)

如圖 4.10 所示，兩種受波器於時域收錄的資料有一致性的行為，經由內業將每一受波器頻道的震動歷時互相疊合在一起，發現當震源-受波器支距小於 16m，新式受波器與插入式受波器受到震源能量的影響，兩種受波器系統測線前端的受波器受到大能量脈衝波的衝擊，初達時間較不一致，當近站之距拉長表面波能量漸趨穩態，兩種受波器的震動歷時相當一致。

2. 頻率-空間域之能量頻譜(f(A)-x)

將接合後的震波資料於時間軸做一次傅立葉變換為頻率域資料，繪製沿受波器方向不同震源-受波器之距經能量正規化 (energy balancing) 後的能量頻譜，如圖 4.11。圖上新式受波器的訊號頻寬分佈在 20Hz~70Hz，測線前端之受波器，訊號能量較為分散。整條測線展距受波器收錄之震波訊號能量頻譜集中帶分為兩個區域，第一集中帶分佈在測線展距 16m~49m，頻率範圍 35Hz~70Hz，第二集中帶分佈在測線展距 16m~93m，頻率範圍 20Hz~60Hz。插入式受波器訊號頻寬分佈在 20Hz~80Hz，測線展距受波器收錄之震波訊號能量頻譜集中帶分為兩個區域。第一集中帶分佈在測線展距 16m~49m，頻率範圍 35Hz~80Hz，第二集中帶分佈在測線展距 16m~93m，頻率範圍 20Hz~60Hz。新式受波器系統藉由受波器底座與地面接觸與傳統插入式受波器與地表面直接束制的不同，使得新式受波器對於高頻訊號的傳遞受到影響。此外，遠端的炸點受到震源能量不足的影響以及背景雜訊影響大，兩種受波器所展現的能量頻譜較為分散。

3. f-v 頻散曲線

圖 4.12 為新式受波器與插入式受波器收錄的震波資料所組構的頻散曲線，兩者在中低頻的頻散點對應很一致，兩者頻率寬帶分布在 20Hz~65Hz，波速範圍在 500m/s~200m/s，空間的探測範圍約深度 3m~25m。新式受波器的 f-v 頻譜在高頻(>70Hz)有些許跳動，但與插入式受波器的資料點比對，差異不大。

4. f- λ 頻散曲線

圖 4.13 為新提出的 $f-\lambda$ 頻譜影像，兩種受波器的 $f-\lambda$ 能量頻譜具有良好的一致性，其波長解析能力也具有相當的可判讀性。

為了探討不同震源對於 streamer 的影響，由測線一於博愛校區瀝青鋪面施測資料，如表 3.1，另選擇以自由落槌(WD)做為震源，直徑 25cm，厚 4cm 之鐵板(Ip)作為墊片，接合 7 各炸點的震波歷時資料後，測線展距 38m~104m 的震測資料。

1. 時間-空間域(t-x)

圖 4.14 顯示 WD 在時間-空間域的震波歷時。新式受波器與傳統插入式受波器在瀝青鋪面所收錄震波資料之震動歷時趨勢具有一致性，新式受波器與傳統插入式受波器受並不因為震源能量不同而有太大差異。

2. 頻率-空間域之能量頻譜(f(A)-x)

圖 4.15 顯示 WD 之 $f(A)-x$ 能量頻譜，兩者訊號能量集中在頻率 20Hz~40Hz 範圍。高頻波受到近場效應與受波器束制行為的影響，兩種受波器之高頻訊號衰減一致。

3. f-v 頻散曲線

圖 4.16 顯示 WD 之頻率-波速能量頻譜。頻率範圍約在 20Hz~40Hz，波速分佈在 200m/s~500m/s，空間探測深度約 5m~25m，淺層的解析度不如大鐵鎚良好，

新式受波器在瀝青鋪面上施測，可以作為傳統插入式受波器外的另一種選擇，使測線轉換更為順暢，有效的改善野外試驗所耗費的時

間與人力。

4. f- λ 頻散曲線

圖 4.17 為新提出的 f- λ 頻譜影像，兩種受波器的 f- λ 能量頻譜具有良好的一致性，其波長解析能力也具有相當的可判讀性。

綜合以上所述，發現在瀝青鋪面上比較兩種形式的受波器系統，新式受波器所收錄的資料經訊號分析後，與傳統插入式的資料的變異性不大，尤其在頻散曲線的比對上，具有良好的相關性。如圖 4.16 WD 的頻散曲線，新式受波器的頻散曲線的低頻頻散點，具參考價值的資料遠比傳統式來的好，當然，這可能受到某些隨機變因的影響。總觀新式受波器於瀝青鋪面的成效，使用上不但有效的改善測線的施測效率，資料適用性與插入式受波器比對，亦達到一定的水準。未來在瀝青鋪面施測上，在相同的品質要求下，新式受波器系統可提供比傳統插入式受波器更好的施測速率。

4.2.2 軟弱地面

測線二於博愛校區操場施測，博愛校區位在頭嵙山層和沖積層交界附近，地質主要由礫石、泥沙組成，其中以砂、泥所佔比例較高。測線施測參數及設備的選用如表 3.1，選擇以鎚頭 12 磅重之大鐵鎚 (B.H) 做為震源，長寬各為 30cm 見方、厚 2cm 的橡皮墊 (Ru2) 作為墊片，接合收錄之測線資料，並分別以時間-空間域 (t-x) 的震動歷時、頻率空間域之振幅 (f(A-x))、頻率-速度能量頻譜 (f-v energy spectrum) 比對新式受波器與傳統插入式受波器資料之差異。

1. 時間-空間域(t-x)

圖 4.18 為時間域資料的震動歷時，新式受波器與傳統插入式受波器在時間軸所呈現之訊號震態延時及在空間軸上，支距隨展距增加受波器訊號強度遞減的現象，由人工判釋其結果，在空間軸與時間軸的差異性並不大；此外，本次試驗，新式受波器受地表束制(coupling)不良行為之影響，在圖 4.18 上也無明顯變化處，究其原因，應是環境等外在因素影響不大，使新式受波器在無直接埋設在土裡情形下，訊號遭受微震動之影響程度小，使時間域之震盪歷時有近似插入式收波器的真實表現。

2. 頻率-空間域之能量頻譜(f-A-X)

圖 4.19 為接合 3 組炸點，測線展距共 34m 之震測資料經訊號分析後，延測線延伸方向繪制之不同頻率的能量頻譜。如圖所示，新式受波器與傳統插入式受波器之高頻訊號能量隨測線展距延伸逐漸遞減，低頻訊號則有隨測線展距增加而有所改善。觀察兩者整體訊號能量言空間軸分布的範圍：新式受波器高頻訊號分布在 45Hz~80Hz，傳統插入式亦雷同；新式受波器低頻訊號分布在 25Hz~30Hz，傳統插入式與新式受波器差異性亦不大。

3. 頻散曲線(f-v)

圖 4.20 為兩組受波器系統收錄之資料經訊號分析後，所得之頻散曲線。新式受波器的範圍；傳統插入式之能量譜亦分布在頻率

30Hz~45Hz、波速 300m/s~700m/s，其資料的相關性良好。圖 4.21 為套疊兩種受波器能量極大值的頻散點，觀察 30Hz~40Hz 能量集中範圍之頻散點，新式受波器(Streamer)與插入式(Planting)受波器挑選之頻散點位置，就結果而言，具有良好的參考價值。

綜合本小節所述，新式受波器在軟弱地面的分析資料與傳統插入式受波器呈現的資料，具有良好的相關性，映證該組新式受波器系統可適用於軟弱地面上施測。其頻散曲線的解析能力與傳統插入式受波器反應之頻散曲線相較，亦具備良好的相似性。本次試驗之軟弱地面乃於細顆粒砂土壤上施測，並非泛指所有的軟弱地面，例如草地。試驗過程中，需要小心檢核新式受波器與地表的接觸，以完整的呈現震波訊號。軟弱地表受地面束制的行為的影響遠大於瀝青路面，進一步改善新式受波器系統的束制能力，將可更真實反映震測的結果。

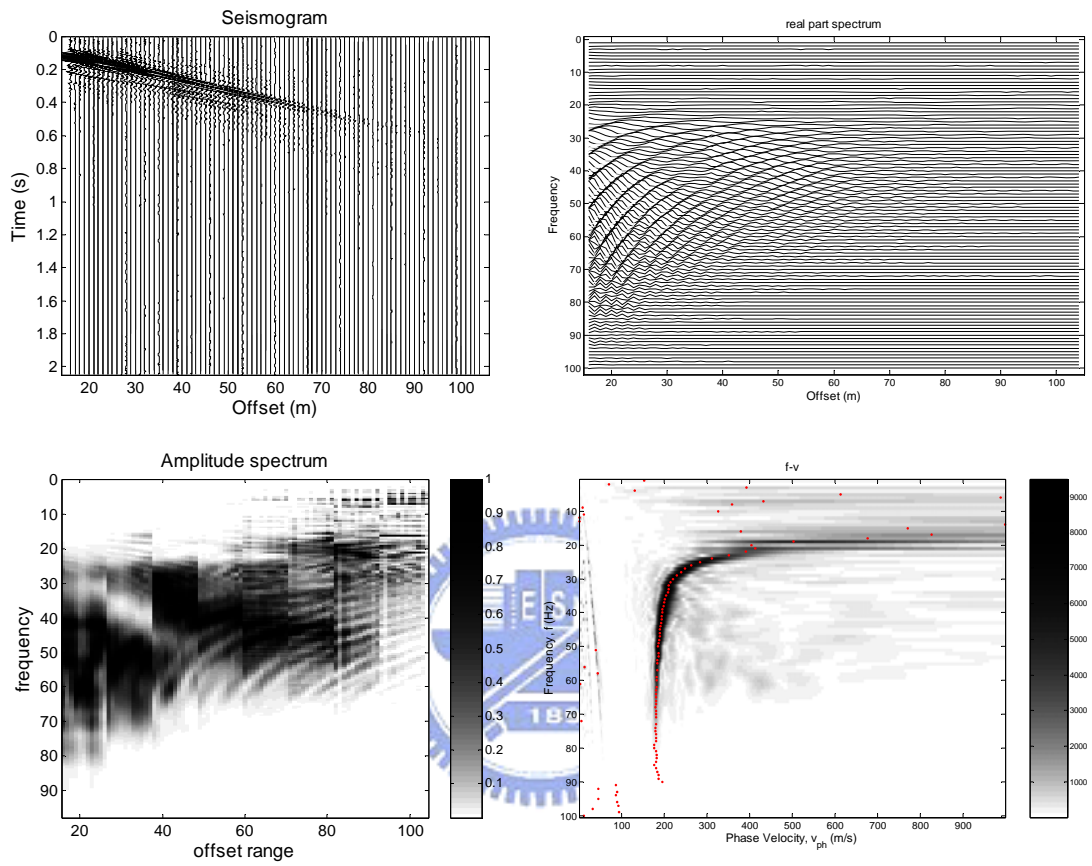


圖 4.1 不同震源對訊號頻譜之影響(1)(震源: BH)

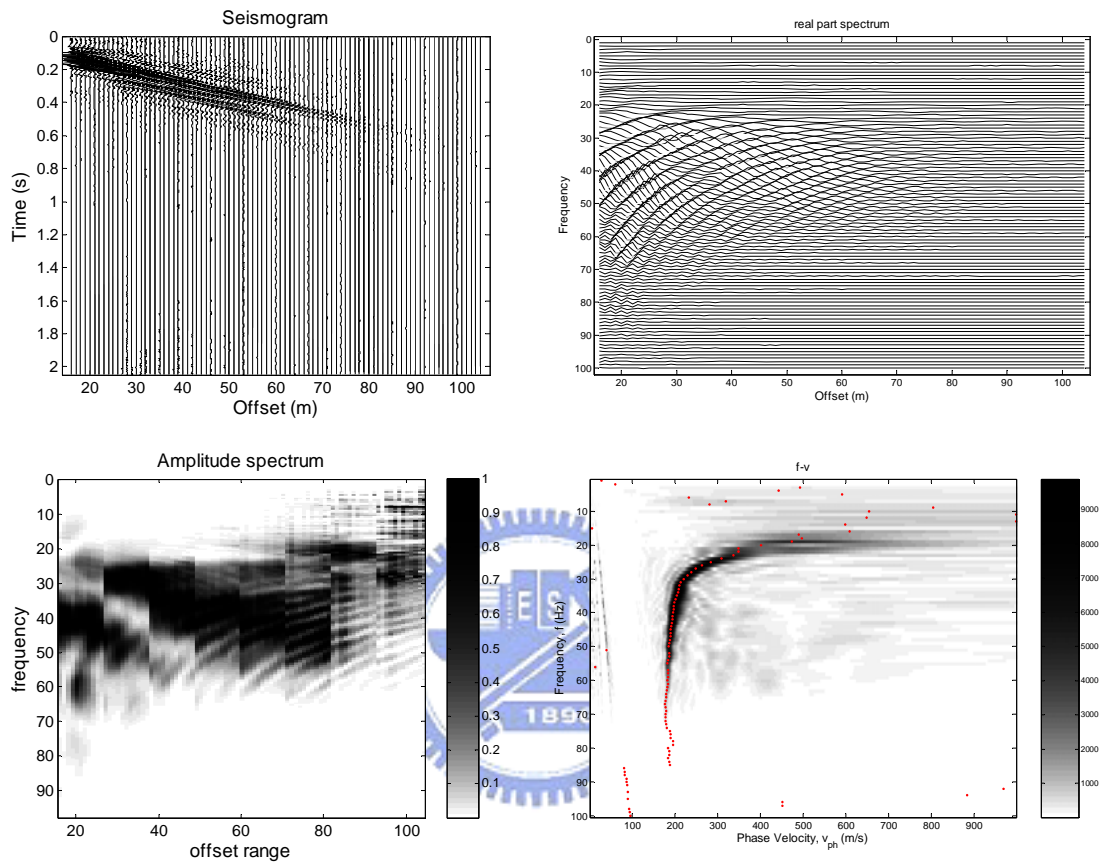


圖 4.2 不同震源對訊號頻譜之影響(2)(震源:AF)

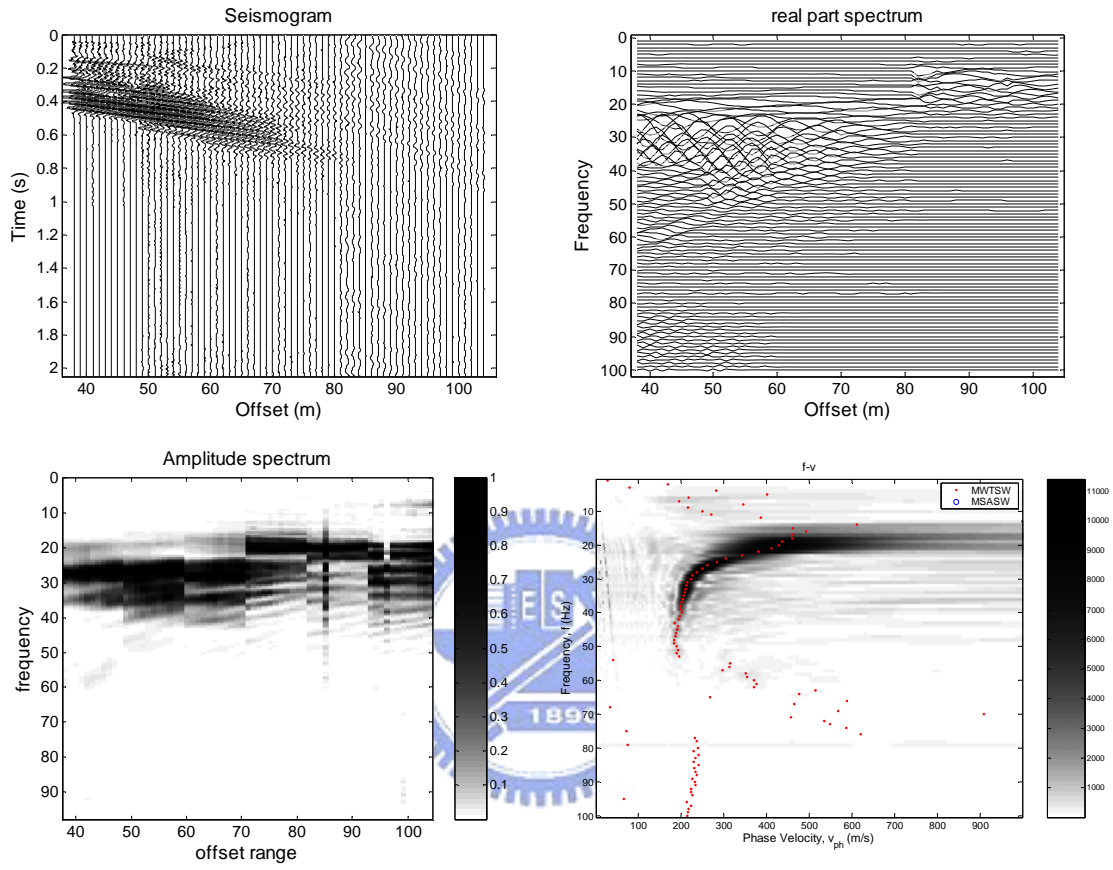


圖 4.3 不同震源對訊號頻譜之影響(3)(震源:WD)

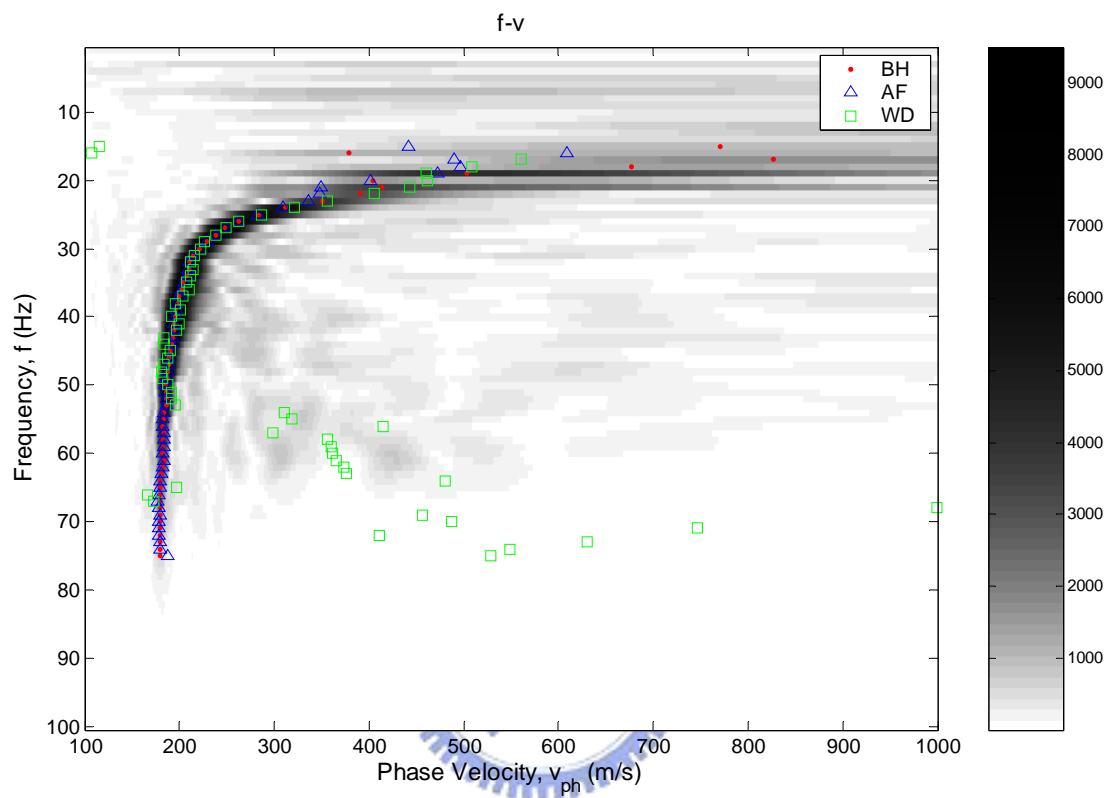


圖 4.4 套疊不同種類震源之頻散曲線

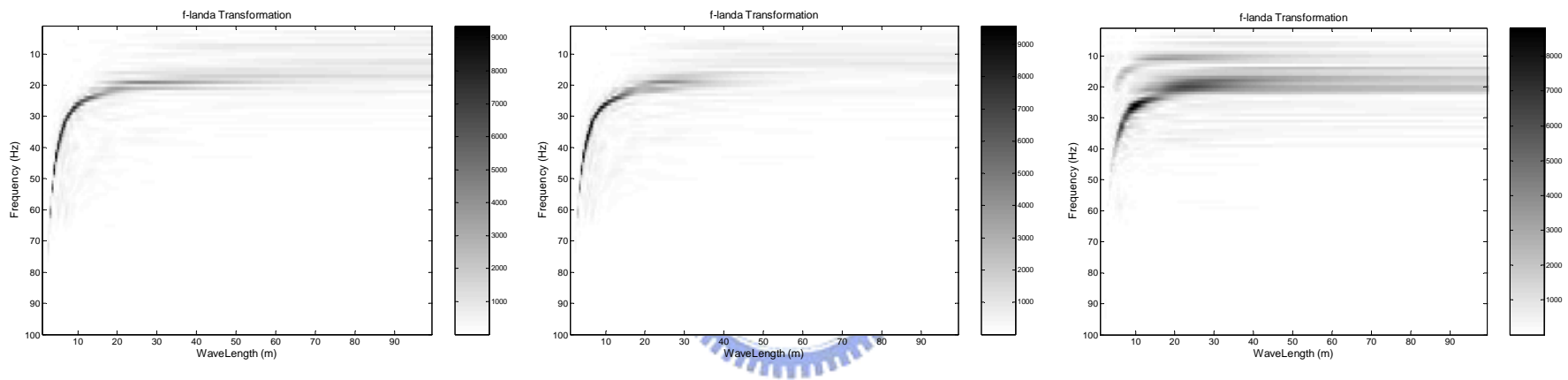


圖 4.5 不同種類震源之頻率波長曲線(由左至右: BH、AF、WD)

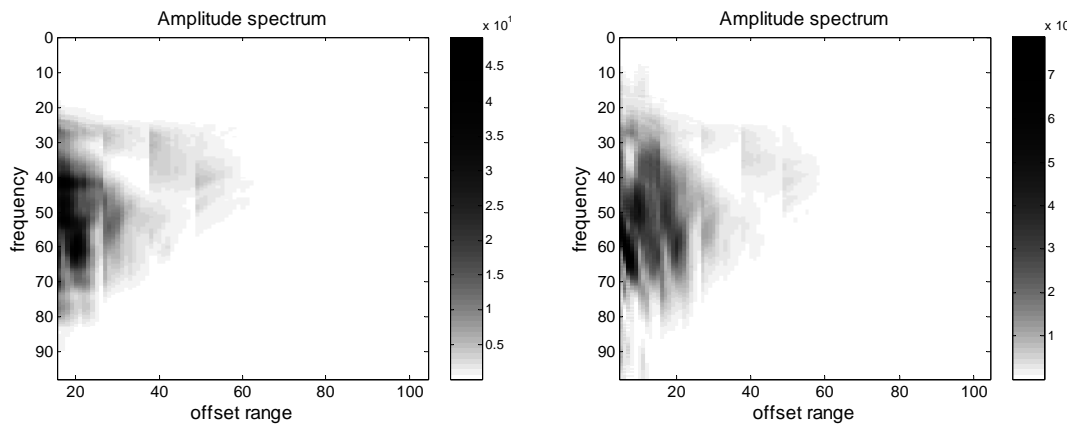


圖 4.6 不同墊片於頻率空間域之能量頻譜(Asphalt,BH,Ip(left),Rb1(right))

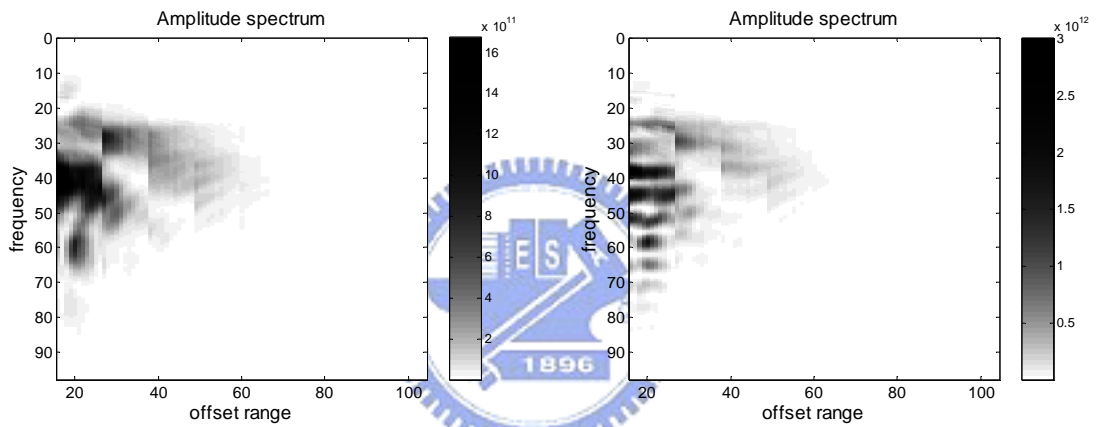


圖 4.7 不同墊片於頻率空間域之能量頻譜(Asphalt,BH,Ip(left),Rb1(right))

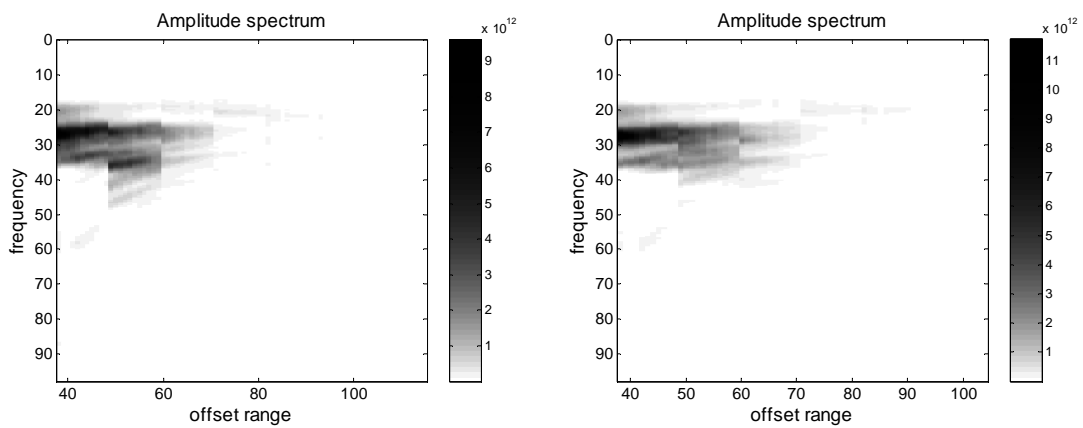


圖 4.8 不同墊片於頻率空間域之能量頻譜(Asphalt,BH,Ip(left),Rb1(right))

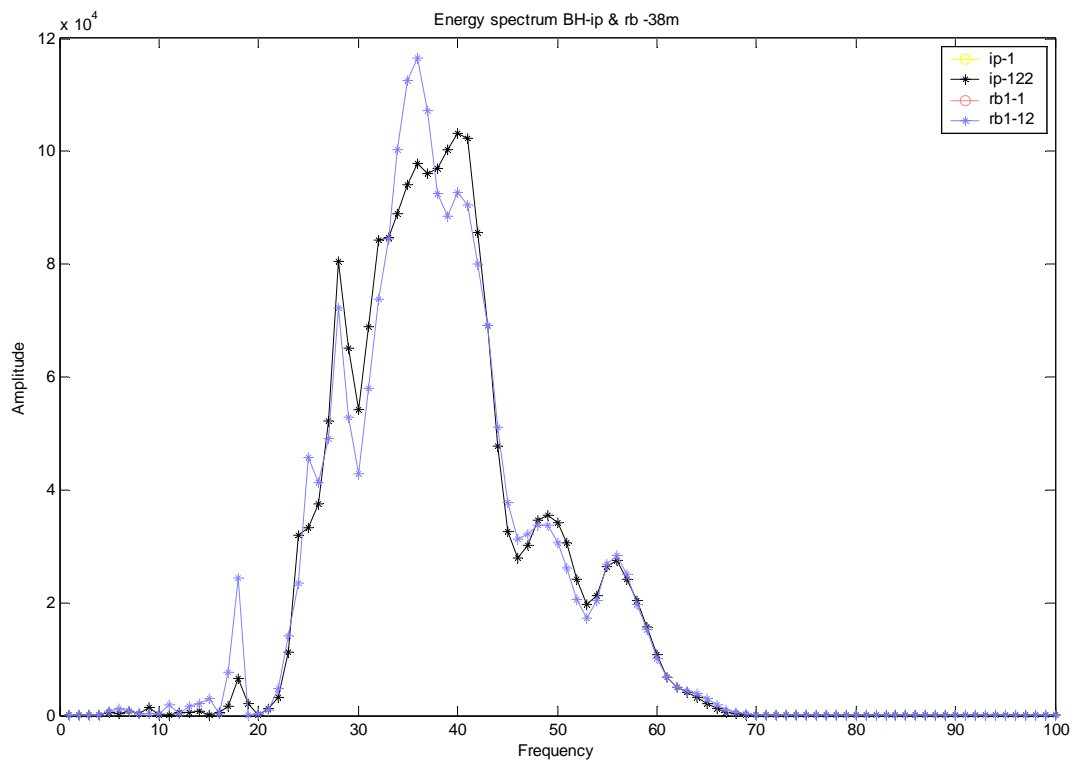


圖 4.9 單一受波器振幅能量頻譜(BH-ip & Rb1-38m)

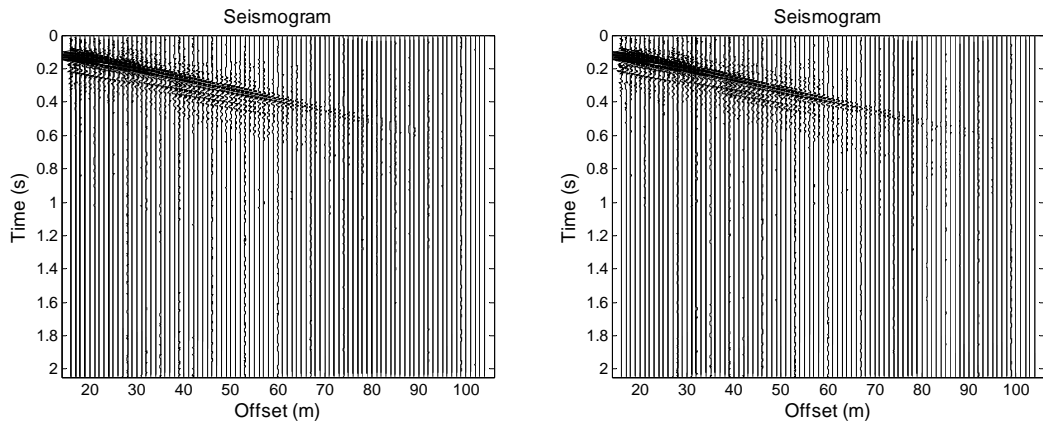


圖 4.10 新式受波器(左)與插入式受波器(左)的震動歷時(Asphalt,BH,Ip)

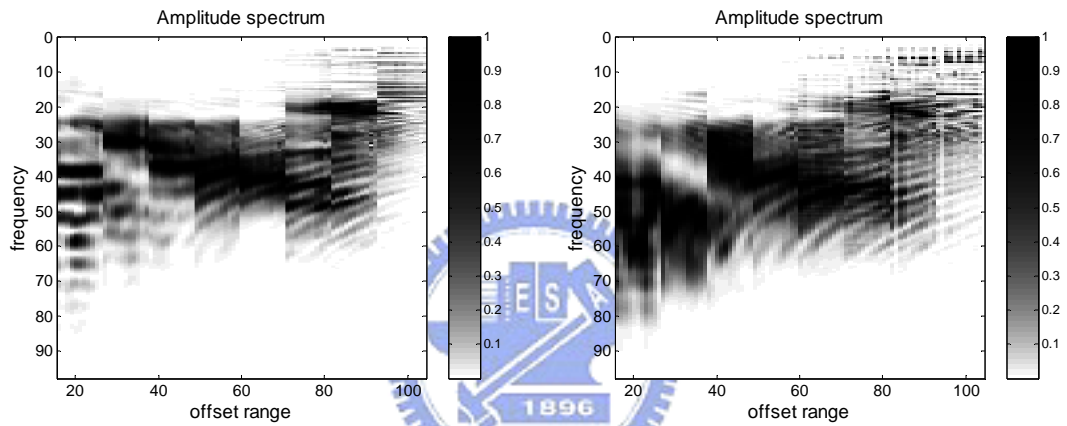


圖 4.11 新式受波器(左)與插入式受波器(右)的能量頻譜(Asphalt,BH,Ip)

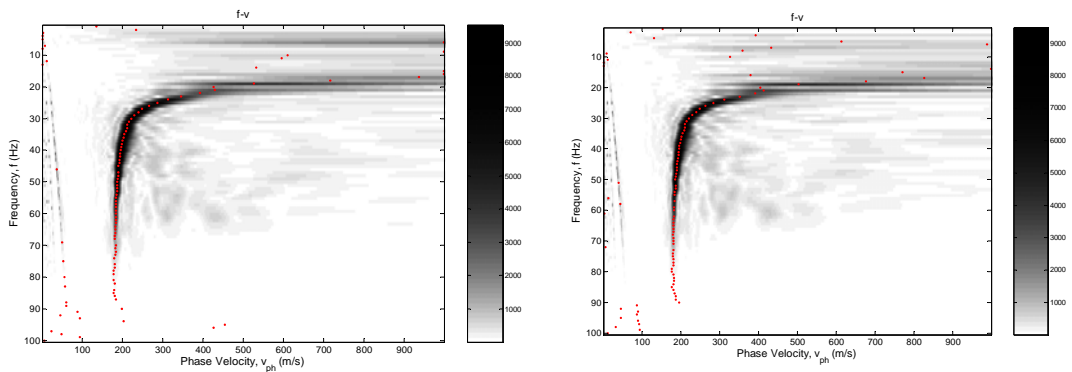


圖 4.12 新式受波器(左)與插入式受波器(右)的 f-v 頻散曲線(Asphalt,BH,Ip)

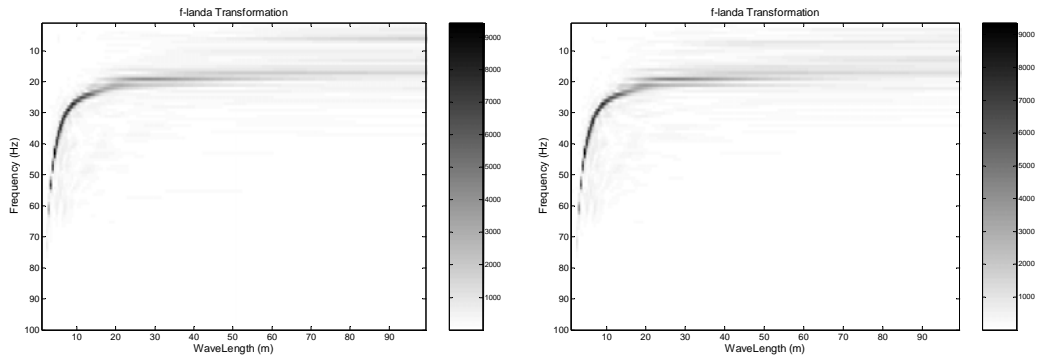


圖 4.13 新式受波器(左)與插入式受波器(右)的 f - λ 頻散曲線曲線(Asphalt, BH, Ip)

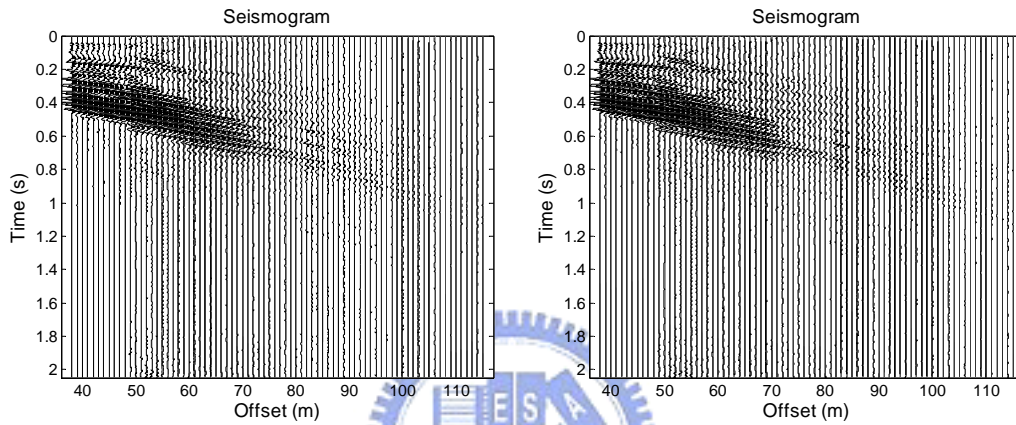


圖 4.14 新式受波器與插入式受波器的震動歷時(Asphalt, WD, Ip)

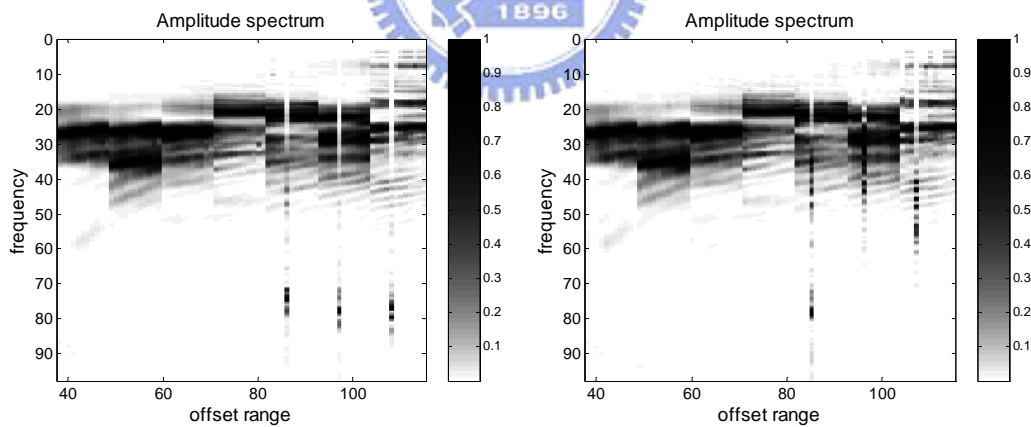


圖 4.15 新式受波器與插入式受波器的能量頻譜(Asphalt, WD, Ip)

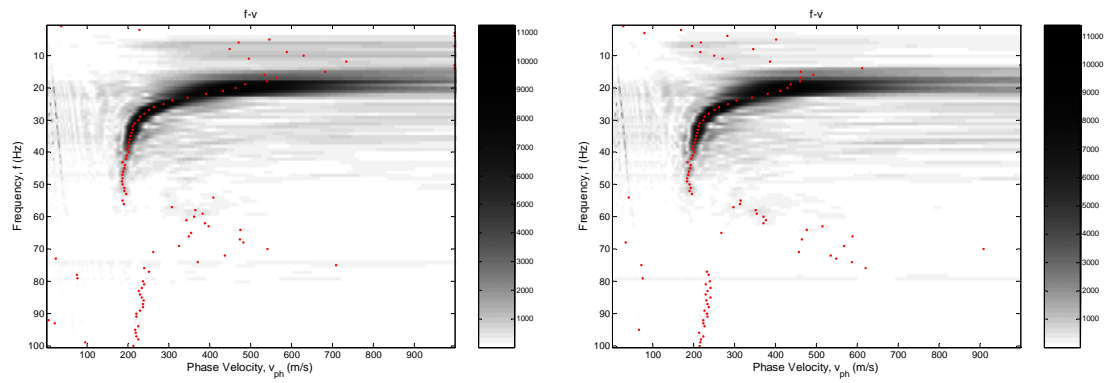


圖 4.16 新式受波器與插入式受波器的 f-v 頻散曲線(Asphalt,WD,Ip)

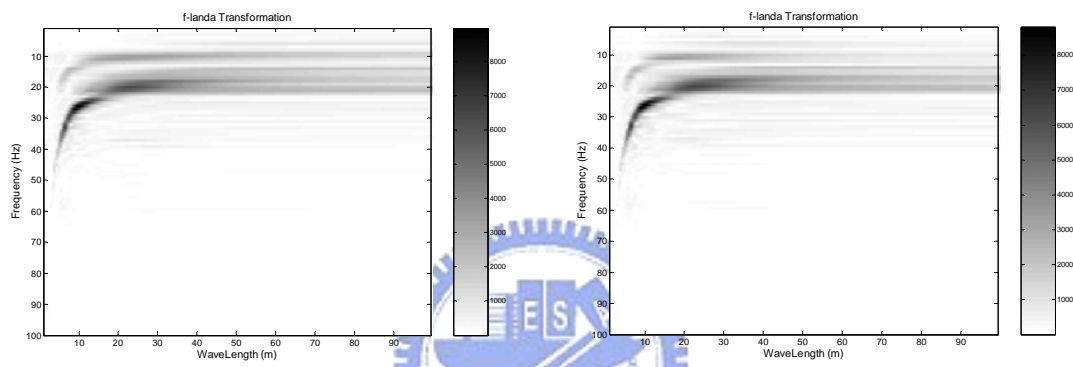


圖 4.17 新式受波器與插入式受波器的 f- λ 頻散曲線(Asphalt,WD,Ip)

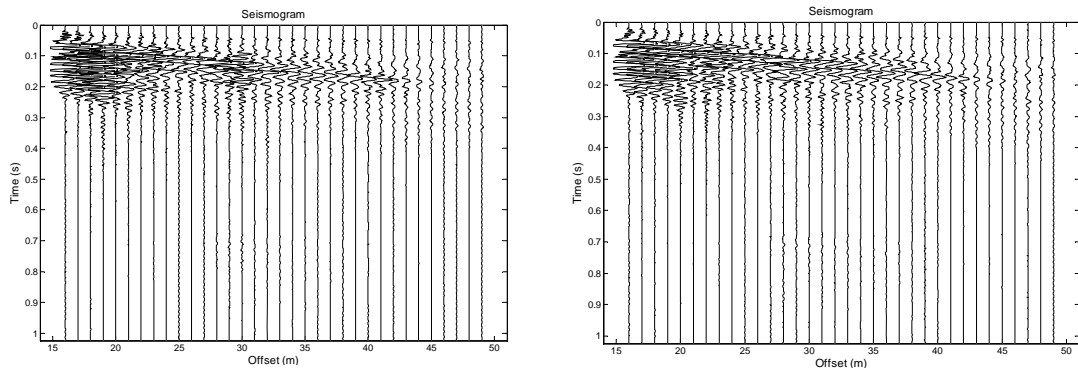


圖 4.18 左側與右側分別為新式受波器與插入式受波器的震動歷時

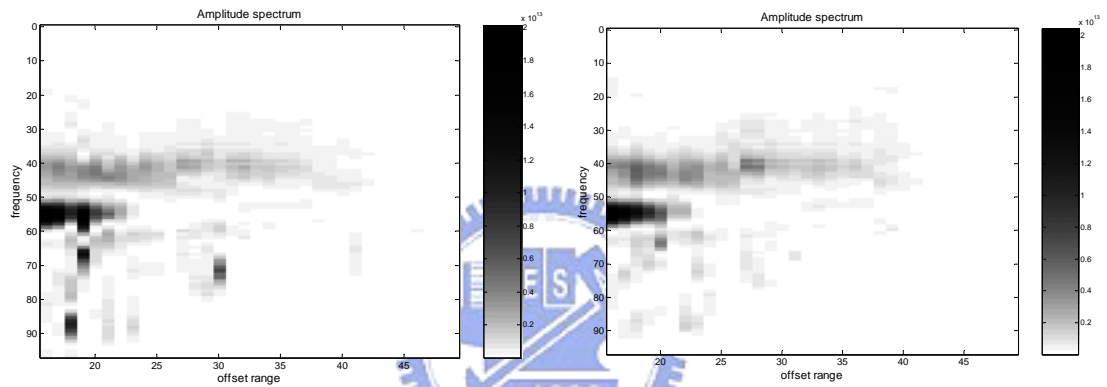


圖 4.19 左側與右側分別為新式受波器與插入式受波器的能量頻譜

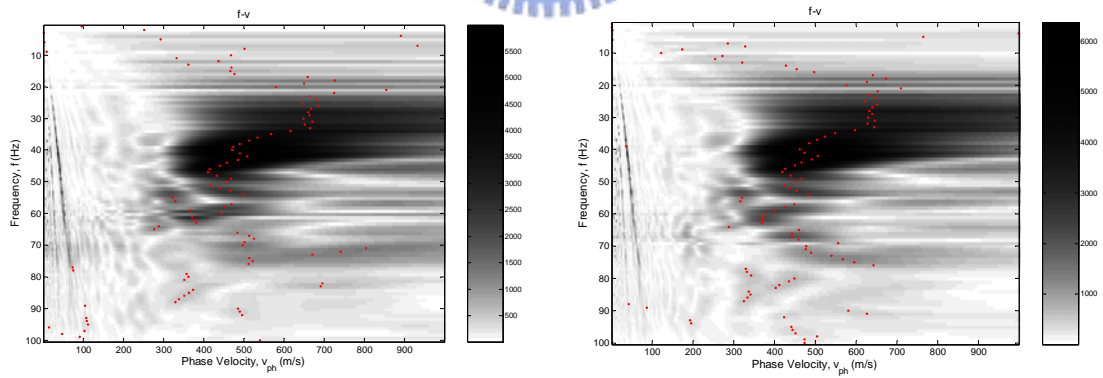


圖 4.20 左側與右側分別為新式受波器與插入式受波器的頻散曲線

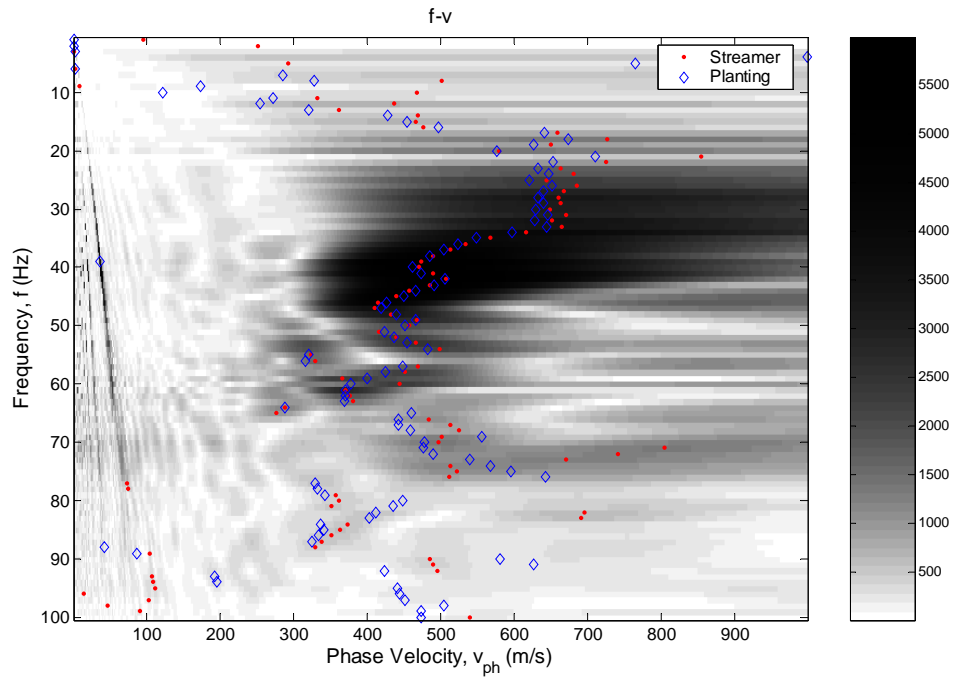


圖 4.21 套疊新式受波器與插入式受波器的頻散曲線



第五章 案例分析

選定交通大學博愛校區作為案例分析之施測廠址，並使用地電阻探測法、折射震測法、下孔震測法(孔內波速量測)等其他地球物理方法，了解地層狀況，提供與先進多頻道表面波震測法比較之基礎，以探討現行 MASW 的表現與空間解析能力。

5.1 交通大學博愛校區區域地質

(1) 區域地質背景介紹

交通大學博愛校區位在新竹市博愛街，由中央地質調查所五萬分之一數位地質圖資料顯示校區附近出露岩層性質為沖積層、崙山層、店子湖層，見圖 5.1。

沖積層主要由礫石、泥砂所組成，其中以砂、泥所占比例較多。

崙山層(張麗旭，1948，1955)分為兩相，較為下部以砂頁岩為主者稱為香山相，較為上部以礫岩為主者稱為火炎山相。本區屬於香山相或頭崙山層香山砂岩(烏居敬造、吉田要，1931)，砂岩呈淡灰色或黃棕色，顆粒為細粒至中粒，膠結相當疏鬆，膠結物主要為黏土；少數礫石薄層偶夾在砂岩和泥岩之中。

店子湖層(林朝榮，1963)主要由下部礫石和上部紅土所組成，礫石組成主要為白色石英岩、深灰色砂質砂岩、深青色至黃棕色之鈣質砂岩及含少量的玄武岩和輝綠岩，礫徑在 10 到 20 公分之間，礫石層厚度從數公尺到 5、60 公尺不等，與上部覆蓋紅土成漸移關係；紅土層厚度在 1 至 2 公尺之間。

店子湖層與下伏崙山層成不整合接觸。崙山層整合覆蓋在卓蘭層之上，與其上覆之沖積物為不整合接觸。

(2) 鑽探資料

在博愛校區，該試驗場只有兩個鑽孔，鑽孔位置見圖 5.2。BH1 鑽孔位於校區大門東側，計深度 5.9 公尺，0~2.55 公尺為黃棕色砂質粘土，夾雜紅色灰色粉土；2.5~5.9 公尺為黃棕色砂質泥岩，其中深度 5.9 公尺處 SPT N 值大於 50，見附錄(一)。BH2 鑽孔位在交通大學博愛校區足球場升旗台前，計深度 18.5 公尺，於深度 0~4.3 公尺為棕黃色粉土質砂土；4.3~6.6 公尺為粉土質細砂偶夾礫石；6.6~15.8 公尺為砂質礫石偶夾卵石；15.8~18.25 公尺為深灰色粉砂岩，其中深度 11.95 公尺以下 SPT N 值大於 50，見附錄(二)。依岩性判斷，6.6 公尺以上屬於沖積層，以下屬崙山層香山相。

鑽孔資料顯示兩孔位之間承載層(N 值大於 50)高程差達 10 公尺；本區域內依中央地質調查所-新竹斷層研究報告，校區南側疑似為新竹斷層通過位置，見圖 5.1 中虛線位置。

5.2 不同地物量測法於博愛校區之應用

為能夠得到試驗場址的地質性質，作為頻估表面波震測結果的基礎，本研究採用鑽探及常用的地球物理方法進行地層探測，以下將介紹於博愛校區所執行之不同地球物理及其結果。

5.2.1 地電阻探測

地電阻探測主要施測原理在於給予一探測物質外部電流極電

壓，利用佈設電位極接收電流流動過程中某些點位的電勢能差值，由此電勢能差值及輸入電流可以計算地質之視電阻率 (apparent resistivity)，若為均質材料，則為真實電阻率，若否則代表某種影響深度內之權重平均值。施測時按不同的空間解析目的可以不同電極排列方法進行並在同一種電極排列方法，改變電極間距施測，可以得到不同影響深度的視電阻率 (apparent resistivity)，資料需透過反算分析得到代表非均質材料地質的電阻率及厚度分布 (Koefoed, 1979)，依施測時電極之佈設方式可分為以下幾類：(1) Dipole-Dipole；(2) Pole-Dipole；(3) Pole-Pole；(4) Wenner；(5) Wenner-Schlumberger。見圖 5.3。

5.2.1.1 測線位置與施測參數

測線 1-1 位於交大博愛校區操場升旗台前，展距長 220 公尺，其中鑽孔位於測線 77.5 公尺。Wenner 於測線 1-1 進行施測，最小單位電極間距 a 等於 5 公尺，測深參數設為 1~10 用於瞭解深度小於 30 公尺以上電阻率分佈性質；測線 1-1 的起點在東南側；終點在西北側靠近校區圍牆。表 3.4 交大博愛校區測線 1-1 施測參數

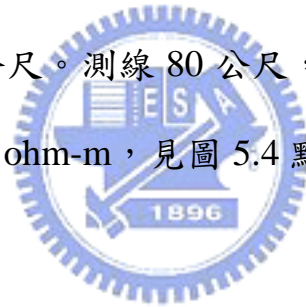
表 5.1 交大博愛校區測線 1 施測參數

測線名稱	測線 1-1
測線方向	N30°W
電極間距, m	5
電極數目	45
測線展距, m	220
施測方式	Wenner

測線(起/終 點)座標	(248101, 2743360)
	(247971, 2743540)

5.2.1.2 試驗結果

於測線 77.5 公尺處，深度 6 公尺以上，電阻率值等於 50 ohm-m，6~28 公尺電阻率值等於 100 ohm-m 以上，80~120 公尺電阻率界面有稍微往下傾斜趨勢，測線 120 公尺電阻率界面出現急劇降低。測線東南方，深度 6~13.5 公尺之處，影像剖面顯示高電阻率區域 90 ohm-m~150 ohm-m，見圖 5.4 虛線方框；高電阻率區往西北方向厚度明顯向下增加達 20 公尺；其中於測線 120 公尺位置，接近地表之電阻率界面深度降至 12 公尺。測線 80 公尺，深度 28 公尺以下，深度愈深，電阻率減少至 50 ohm-m，見圖 5.4 點線位置。



5.2.2 折射震測

折測震測法係藉由爆炸或衝擊產生人造震波，波傳至地下地層，因地層間速度不同，震波於層面處，依司涅爾(Snell)定律發生折射現象返回地表，經埋設於地表之受波器接收，折射波在震波記錄上表現為初達波。初達波因係第一個訊號，其到達時間很容易挑取，根據其時間距離關係（通稱走時曲線），以求出地層之構造。

根據於交通大學博愛校區的鑽探資料初判，博愛校區下方承載層於 BH1 和 BH2 間有一明顯的高度落差。藉由折射震測描繪地下不連續面的能力及提供地層實體波波速特性，本論文於交通大學博愛校區配置兩條折射測線，如圖 5.2 所示。並彙整兩條測線的二維波速影像

剖面，觀察高速帶與低速帶的分布，並與本論文他種施測之方法所呈現的資料進行互相較合，

5.2.2.1 試驗原理

折射法是用以探測岩盤深度的方法之一，尤其當岩盤深度少於 30 米的地層。該法需要一震源：鐵鎚是用在岩盤深度少於 15 米的區域，重錘或是炸藥使用在深度達 30 米之區域。震源產生的震波穿透承載層並沿著岩盤界面前進，並持續地散射振波回傳至地表面由受波器收錄訊號。折射法分別利用實體波之壓縮(P-wave)和剪力波(S-wave)作為施測的依據，其中以壓縮波折射法最常被採用，但其施測的主要限制是無法辨別高速層下方之低速層。

5.2.2.2 測線位置與施測參數

本研究於交大博愛校區配置兩條側線，如圖 5.2 所示，測線一起點從校區東側圍牆(E90W)延伸至校區操場上，測線總長度 345m。鑽孔 BH2 位於本測線起點側邊 10m 處，由附錄(一)所提供的鑽探資料，BH2 的承載層的深度約 5.9m 深。測線二起點從操場之東南側延伸至操場之西北側，測線總長 115m。鑽孔 BH1 位於本測線中點位置，鑽孔位置距離測線 2m 處。如圖 5.2。由附錄(二)所提供的鑽探資料，BH1 的承載層(SPT N Value>50)的深度約在 15.8m，該孔的地下水位約地下 14m 處。藉由鑽探資料的初判，兩孔間下方承載層有一高達 6m 的落差，欲藉由折射震測對波速不連續面位置作一判釋，並與他種地物試驗的成果相互較和，以提供一完整的博愛校區下方之地質波速結構

剖面。測線之施測參數與儀器配置如表 5.2

表 5.2 折射震測施測參數

測線名稱	測線一	測線二
測線方向	EW	N30W
受波器間距/個數	5m/24	5m/24
測線長度	115m	115m
測線數目/總長度	3/345m	1/115m
炸點位置	11 點法	9 點法

5.2.2.3 試驗結果

接合測線一與測線二之折射震測資料，所繪製的二维 P 波波速剖面，見圖 5.5。該波速剖面顯示，測線一下方地層波速 1500m/s，約在深度 10m 的位置；測線二下方地層波速 1500m/s，約在深度 16m 的位置；根據測線一往測線二方向延伸之波速分層的結果，下方高速層深度落差達 6m，有一傾向下的地層分布。配合地質鑽探資料，BH2 的承載層約位於地下 15.8m 的位置，與折射震測資料相比；有一相似的趨勢；測線一下方高速層約在 10m 的位置，BH1 的地質鑽探資料比對具有其誤差，應是受到地層解析度不佳的影響，其空間解析度與受波器間距有關，本研究目前所使用之受波器間距為 5m，若要提高測線依之解析度，必須調整受波器間距。

5.2.3 孔內波速量測

於交大博愛校區生科所前方升旗台旁施作下孔震測以獲的孔內的剪力速剖面，與現地施測非破壞性的表面波震測法所獲的地剪力波速作為互相參考的資料，以了解地下土層波速的分布，並和鑽探資料比對，更清了解地下分層及地球物理方法的準確性。

5.2.3.1 試驗原理

下孔式震測試驗(孔內波速量測)所需之設備包括震源、孔內受波器、震測儀，將孔內受波器置於不同深度位置並固定於孔壁，由震源在鑽孔上方激發一震波，並啟動震測儀紀錄受波器之震波訊號，由各深度受波器之震波訊號可分析震波由震源孔傳達至受波器孔之走時，據以決定地層之波速變化，震源位置通常距離孔口約 3m~5m，以降低管波之影響。如圖 5.6 示。孔內受波器包含 3 各向度(X-Y-Z 軸)方向地音接收器，2 個正交的水平向地音接收器接收到達的剪力波(S-Wave)，垂直向的地音接收器接收大達的壓縮波(P-Wave)，見圖 5.7，在量測的每一個階段都需要和孔壁束制良好使得受波器和孔壁接合在一起，以獲的良好的震波資料。除了震源至受波器之直達波，若地層存在阻抗不連續面，受波器亦可記錄其反射波，由反射訊號可決定阻抗不連續面之位置。

5.2.3.2 下孔震測施做參數設定

博愛校區生科所前方升旗台右側鑽孔 BH2 於不同方位，共施作 3 組下孔孔內波速量測，施測參數如表 5.3,測區現場配置簡圖如圖 5.8，敲擊方式如圖 5.9、5.10、5.11、5.12。

表 5.3 下孔震測施測參數

組別	施作深度	施作間距	炸點與鑽孔距離	取樣時間	震源方位
6 series	-1 ~ -17m	0.5m	3m	50 μ s	NW30°
7 series	-1 ~ -17m	0.5m	3m	25 μ s	SW60°
8 series	-1 ~ -17m	0.5m	3m	25 μ s	NW30°

5.2.3.3 試驗結果

見附錄三，附錄內包含三組不同方位之震測資料；疊合左右敲擊後之初達波選取圖與波速剖面；其中圖上 H1、H2 表示兩水平向感測器所收錄的震波歷時，V 表示垂直向受波器收錄之震波歷時。

震源從地表產生震波值達到接收器的時間會因土層的彈性模數不同而改變波速的快慢，而該初達波的時間是由震源直達接收器所收錄的時間，需將直達波的走時修正成平行管壁的走時，再做剪力波速的回歸分析以得該孔周圍小範圍的垂直向剪力波速剖面。

見附錄三，不同方位之 H1 與 H2 之剪力波速度剖面圖，兩者間存在著相當大的差異性，初步判斷是受到初達波選取時間點之錯誤；當震波訊號品質不佳，左右敲擊後之重疊波型沒有出現正反向之現象，就難以有效的挑選初達波；此外，受波器取樣間距很小(0.5m)，當上下兩點的初達波時間選取發生錯誤，時間點的細微差異就造成波速分析產生很大的影響，形成不佳的波速剖面分析。為了了解下孔震測所挑選之初達波時間的可靠性，將以表面波震測佈設在孔位附近之測線所反算之一維剪力波速，當作下孔震測所獲得的波速剖面，以反推震波之初達時間，與人工挑選之時間點比對，並比較其差異性。詳細見 5.3.2。

5.3 多頻道表面波震測

5.3.1 測線位置與施測參數

見圖(5.2)，本研究於交通大學博愛校區佈設一表面波測線，測線起點 0m 從博愛校區西南側圍牆，往東北方展延 167m，共七條測線展距，每一測線展距 24m，受波器間距 1m，並配合 Walk Away 施做方式，配置 3 個炸點，第一炸點使用鎚頭 12 磅重之鐵槌，第二、三炸點使用彈力加速度器作為人工震源。為了與下孔震測資料比較，故將表面波測線佈設之位置，靠近該施測孔位，該孔的位置位於測線 6；第四個受波器與第五個受波器中點，約略於 138m 處，與 BH2 孔位的間距為 1m。相關測線施測參數配置如表 5.4。

表 5.4 測線施測參數

震源個數/位置	3 個
接收器數目/間距	24/1m
測線長/總長/位置	23m*7+6/167m
測線走向	N30°W
鑽孔位置	≒138m(側線 6, Ch4、Ch5 間)

5.3.2 試驗結果

見圖 5.13，從測線西南方(0m)起點往東北方測線終點(167m)之測線範圍內，測線下方土層之剪力波速分層，深度 0m~5m 波速分佈在 200m/s~500m/s，5m~25m 範圍內的波速 500m/s~1000m/s 層面，則沿西南方往東北方有一往上增加的趨勢。此外，鑽孔 BH2 的位置，大約位在測線 138m 處，根據附錄(二)地質鑽探剖面所示，0m~4m 材料為棕黃色粉土質沙土；4.3m~6.6m 為粉土質砂且偶含礫

石;6.6m~15.8m 為砂質礫石且偶夾卵石，15.8m 遇岩盤，土層大致可劃分為三個不同地質材料的分層，其土層的地層材料剖面，強度隨深度增加。比對表面波震測所提供的二維剪力波速剖面影像，發現鑽孔之地層分層與波速度分層具有其相似性，尤其在深度約 16m 處有一明顯的速度分層與鑽探資料所對應之岩盤位置，兩者相當接近。表面波所提供之波速度分層具有相當高的參考價值。

此外，根據地電阻探測之電阻率分佈，WN 推測東南往西北方向，其沖積層之粉土質細砂堆積愈厚；根據折射震測測線一往測線二方向延伸之波速分層的結果，下方高速層深度落差達 6m，有一沿東南往西北，向下傾斜的 P 波波速地層分布；根據表面波二維的剪力波速影像剖面，該測線下方地層之波速度分層，也有沿東南往西北向下傾斜的趨勢；配合地質鑽探的結果，表面波測線下方土層，沖積層的厚度沿東南方往西北方逐漸增厚，地層之承載層傾向沿東南往西北，承載層逐漸變深。比對三種非破壞性之檢測技術於博愛校區施測所獲得之結果，雖然地電阻探測獲得的是土層之電阻率沿空間的分布，折射震測與表面波震測提供地層之壓縮(P)波與剪力波(S)波速度的分層，但對於測線下方地層的推測都有其相似的共同點，及該測線下方之地層之承載層走向初判為東北西南向，傾向為東南西北向；且由表面波震測法所獲得的二維剪力波速剖面辨別出於測線 138m 的位置下方 16m 處有一明顯的波速為 800m/s 的界面與 BH2 鑽探資料所呈現之岩盤界面的深度位置，相當一致。未來將於博愛校區東西向佈設測

線，使博愛校區的地下波速分層做更詳細的測繪。

此外，為了判斷下孔震測所選取之初達波時間點是否正確；試以多頻道表面波震測所反算之剪力波波速作為孔內量測之波速值而反推之初達波時間點，與人工挑選之時間點進行比較，觀察其差異性，並嘗試整理其波速剖面之相關性。由圖 5.14 所示，iterVs 表示從表面波震測所反推之初達波時間，其餘六者分別為不同方位之試驗選取 H1、H2 受波器震波資料之初達波時間。以下將以初達波之時間與波速剖面，來描述資料之差異與同質性。

(1) 地下深度 1m~4m，人工選取之初達波與反推之初達波時間些許不一致，並比對附錄(三)的震波資料，發現淺層的震動歷時受到地表雜訊的影響較大；地下深度 4m~8m，疊合左側與右側敲擊的震動歷時，兩者的初達時間較為一致，很明顯，可以做精準的挑選；地下 8m~17m，左右向敲擊之 H1、H2 之震動歷時重合點，相當不明顯，無法做有效的判別，只能依據經驗與上一段的趨勢，加以選取時間點，因此產生相當大的誤差，人因的介入也是成分之一。所以當訊號品質如地下 4m~8m 的狀況，初達時間將具有相當良好的一致性行為。

(2) 地下 0m~4m，表面波震測之速度範圍約在 200m/s~400m/s，地下 4m~8m 速度範圍約在 400m/s~600m/s，地下 8m~17m 速度範圍約 600m/s~900m/s，雖然與三組試驗的波速趨勢並非很一致，但仍具有參考價值；尤其在地下 4m~8m，該範圍內的波速值有不錯的相似度。隨著深度增加，波速一同增加，下孔震測最大波速約在 1000m/s，

與反算之波速最大值 900m/s，相對誤差約 10%；兩者最大誤差約 150m/s，約侷限在 15% 的誤差範圍。

經由 MASW 反算之剪力波速推估孔內波速量測的初達波時間，如圖 5.14 所示，和不同方位之孔內波速量測的初達波時間比對，兩者的趨勢大體上是具有一致性的；淺層所量測到的孔內初達波時間，受到雜訊以及敲擊能量的影響，時間點相當不一致，但由附錄(三)可清楚看到，當左、右敲擊訊號資料疊合良好，選取的初達時間和 MASW 所推估的時間具有相當高的準確性。雖然，MASW 需要經由反算的程序來獲取最佳化的剪力波速剖面，所受到的參數影響遠比孔內震測多，但孔內波速量受到錯誤初達波時間點選取，造成波速高估或低估的影響相當大；比較 MASW 與下孔震測所獲得的波速剖面發現，兩者最大誤差約 150m/s，約侷限在 <15% 的誤差範圍；此外，利用 MASW 量測波速，是不需要鑽孔，並可以提供大範圍的波速平均值，而非局部的物理量；進一步並可分析表面波之高次模態訊號，來提升波速的解析度。

(1) 空間解析度

多頻道表面波震測法所反算出之剪力波速值，以測線中點位置表示側線下方所涵蓋地層之均勻表現值，如圖 5.15，在此過程中便已有將地層平滑化的行為，因此整合不同測線的移動平均值所繪製之二维剪力波速剖面會有較平滑化的現象，因此就其側向解析度而言，側線移動平均值間的資料點，受到平滑化的影響，無法表現側向上劇烈波

速變化的區域。如圖 5.5 所示，折射震測之 Tomography 波速剖面，其反算的機制是為有限差分或有限元素法繪製網格，因其對每一格點進行反算各個格點值作為代表，所以表現波速劇烈變化的能力是較佳的。但就其適用經驗而言，網格大小約略為 1/2 的測線受波器間距大小，若受波器間距與網格大小比例太大，也會因網格資料點不足而造成過度臆測的反算值，本研究中之表面波震測法其反算所提供的波速是為測線平均值，但目前也可以 Tomography 的反算方式，加以改善其側向解析能力。



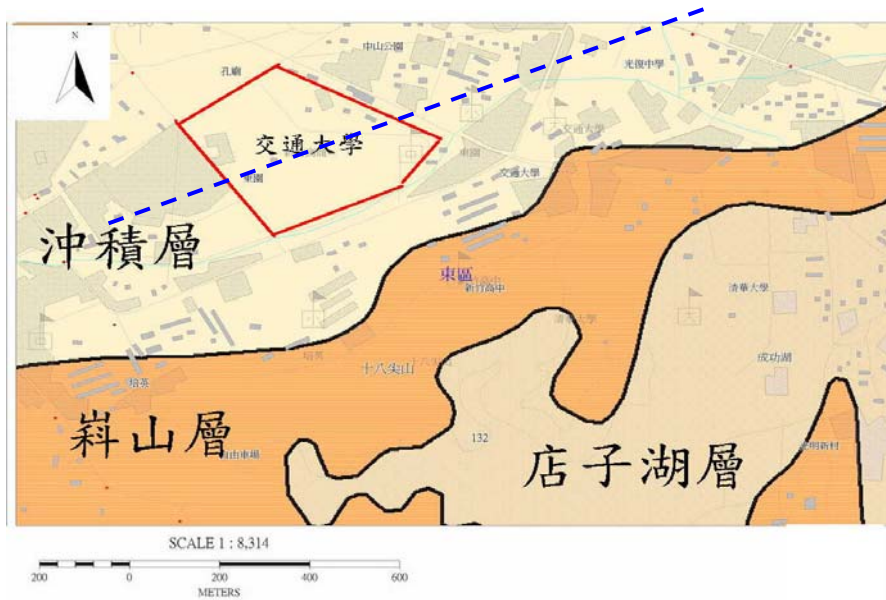
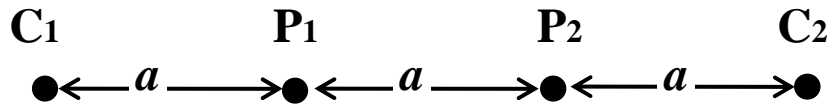


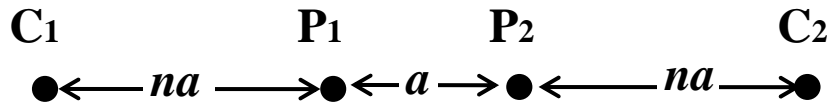
圖 5.1 交大博愛校區區域地質圖(中央地質調查所-地質資料整合查詢系統)



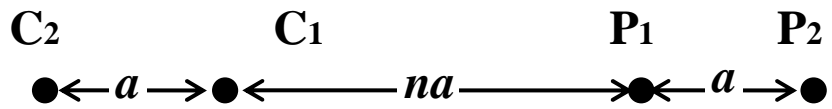
圖 5.2 交通大學博愛校區施測實驗測線與鑽孔位置配置圖



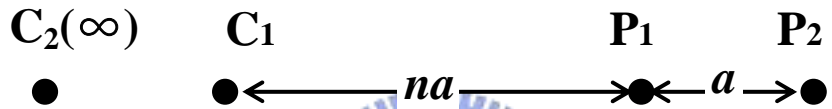
(a) Wenner Alpha Array



(b) Wenner-Schlumberger Array



(c) Dipole-Dipole Array



(d) Pole-Dipole Array



(e) Pole-Pole Array

圖 5.3 常見地地表施測電極排列法

E30N

W30N

BoAi足球場_Wenner

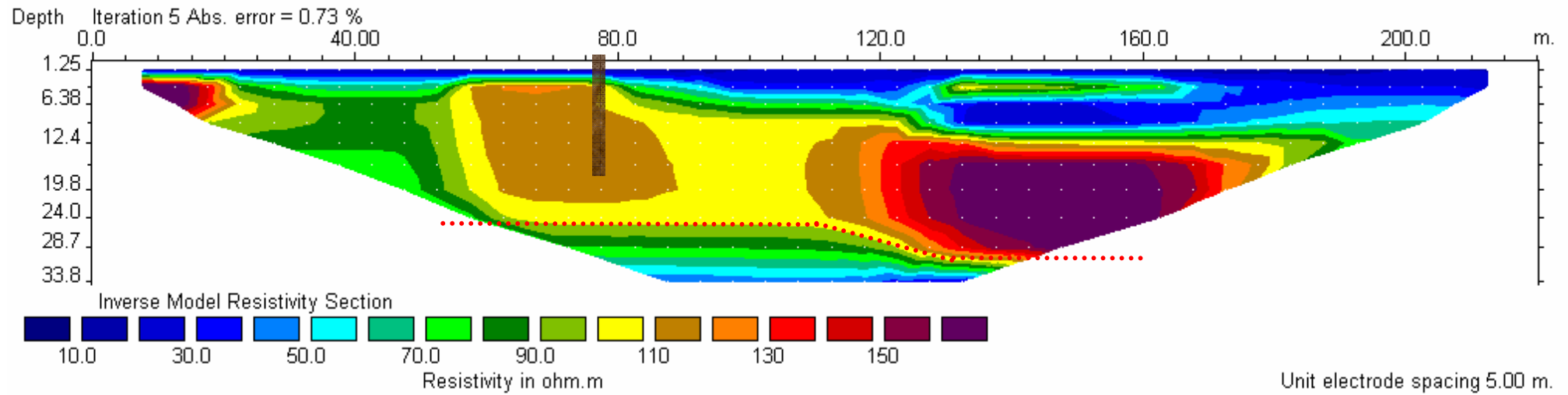


圖 5.4 測線 1-1 之電阻值剖面

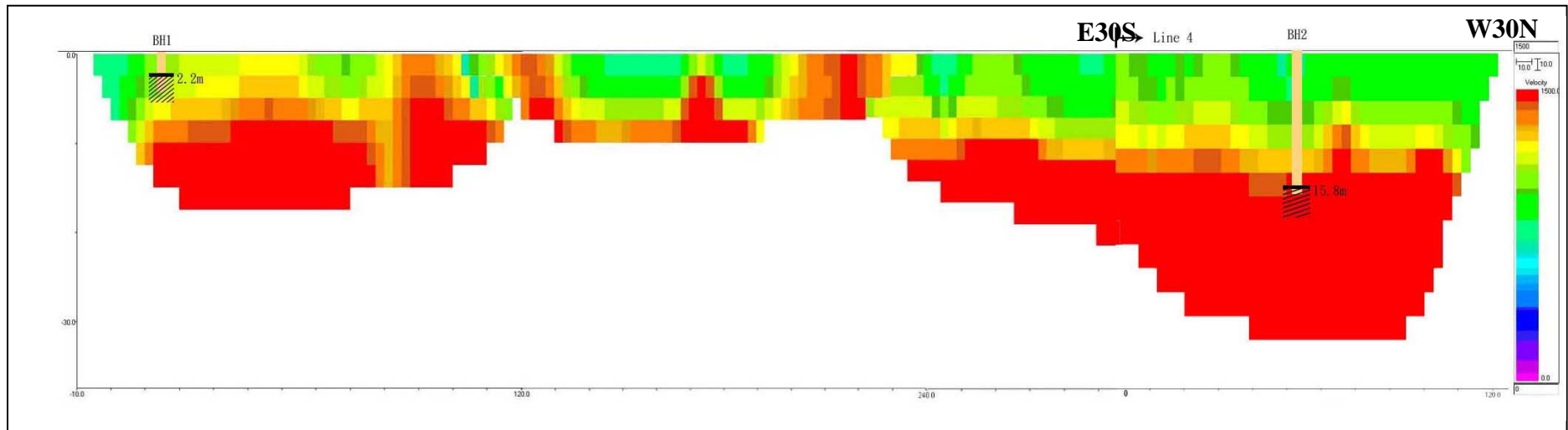


圖 5.5 折射震測二維波速剖面



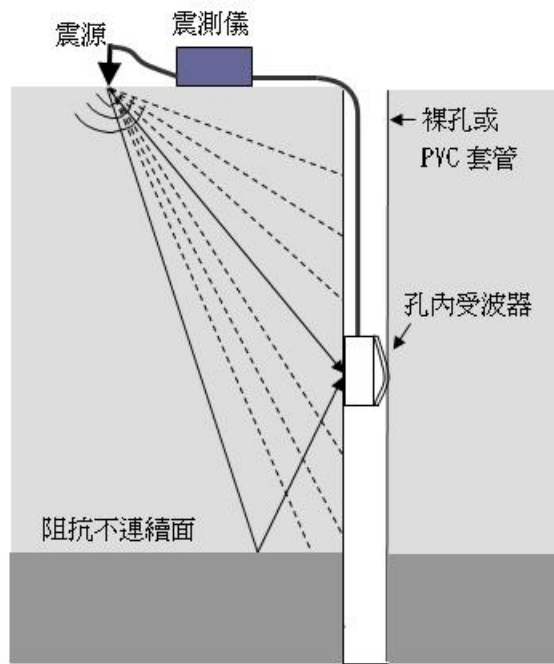


圖 5.6 下孔震測方法示意圖

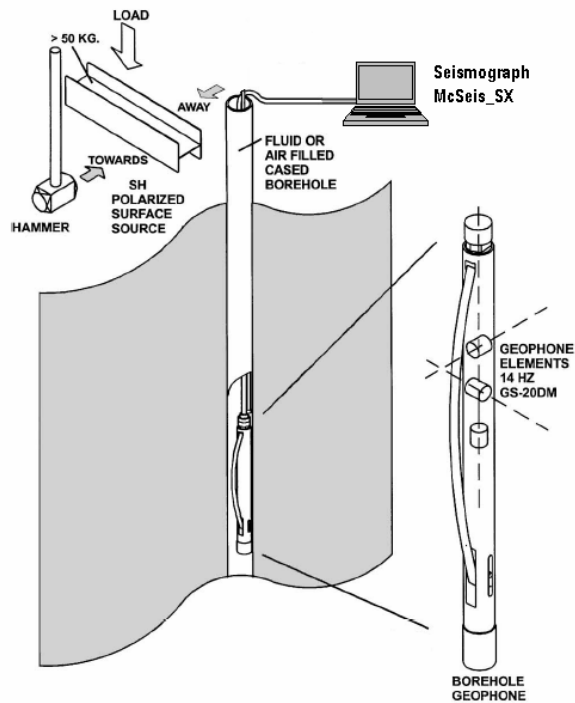


圖 5.7 下孔震測施測設備示意圖

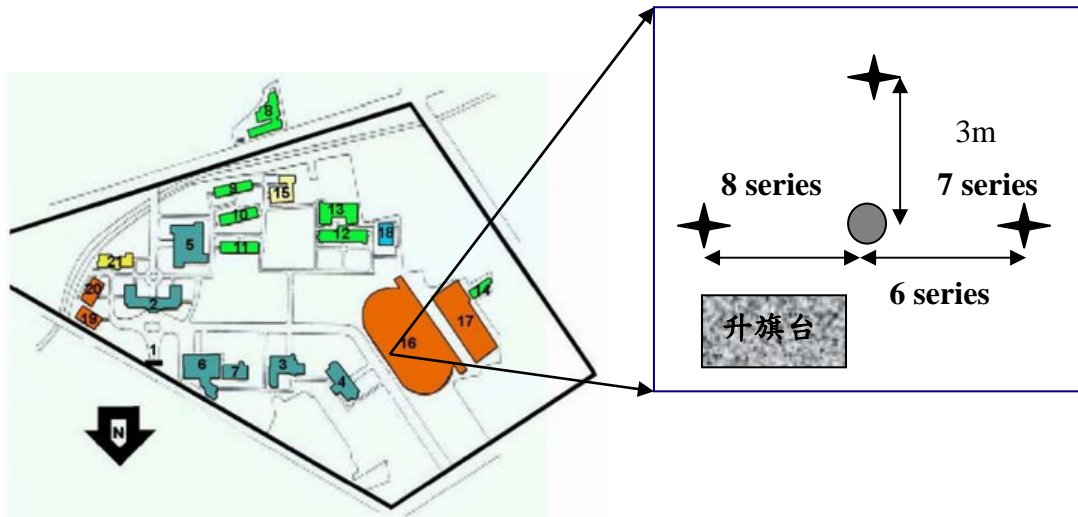


圖 5.8 下孔震測現場配置圖



圖 5.9 垂直敲擊



圖 5.10 左側敲擊



圖 5.11 右側敲擊



圖 5.12 相對位置

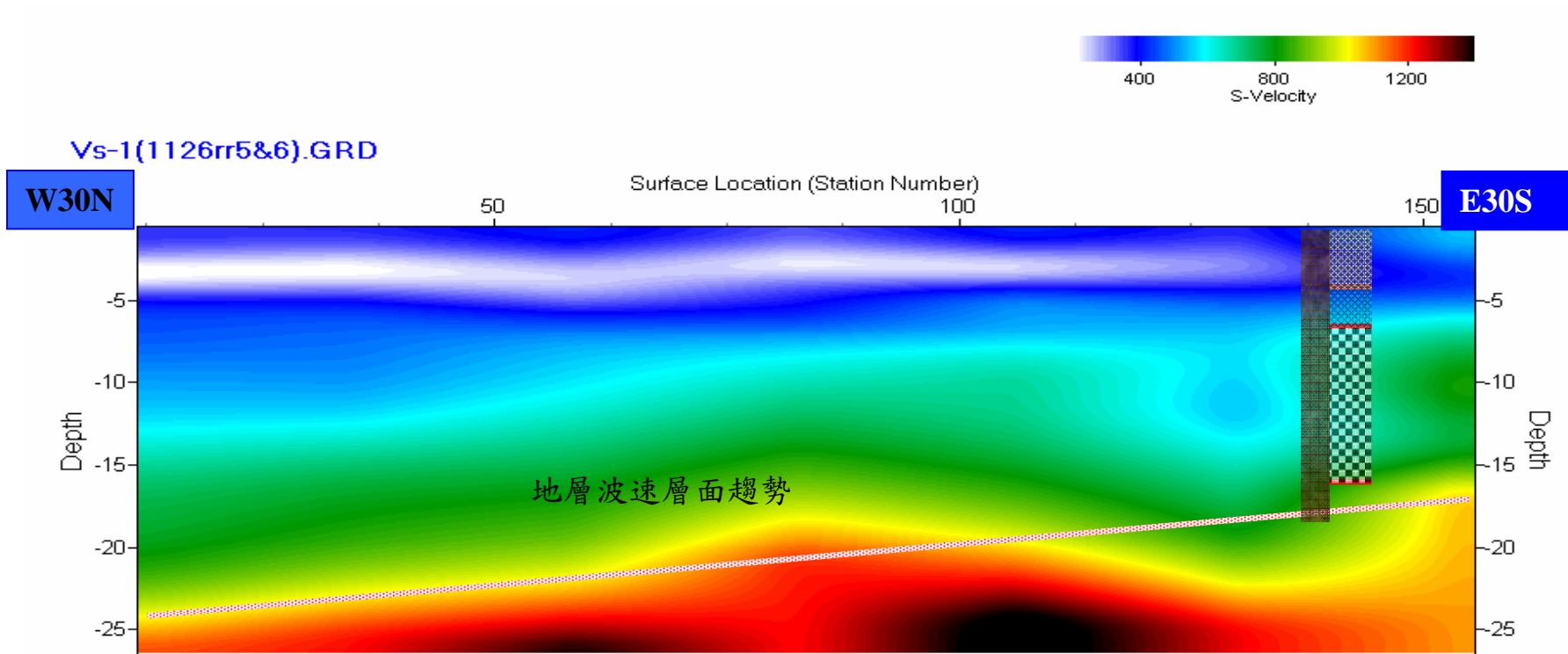


圖 5.13 表面波震測二維剪力波速剖面

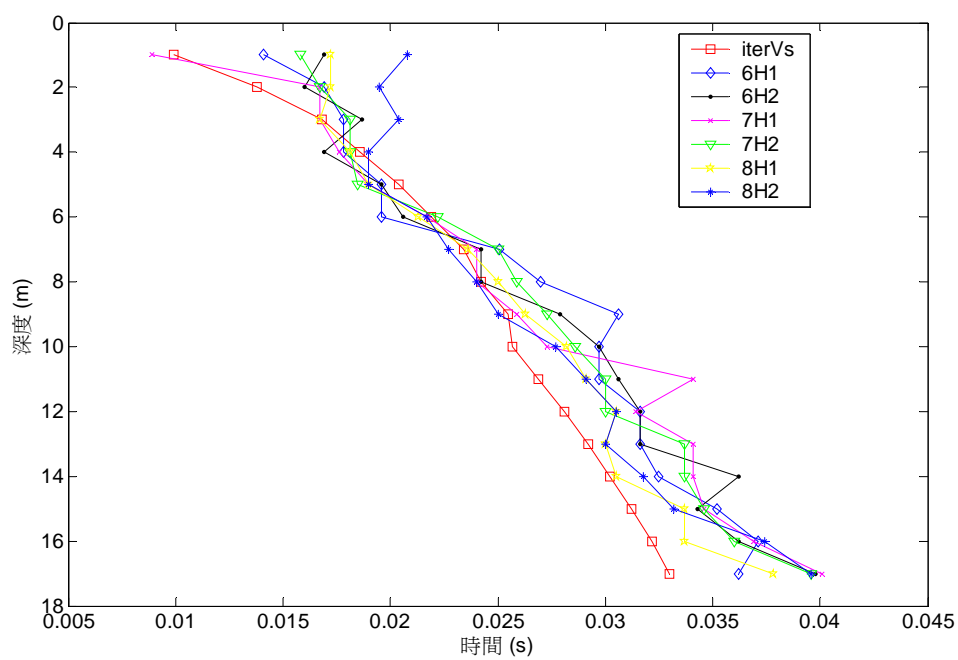


圖 5.14 初達波時間點比較



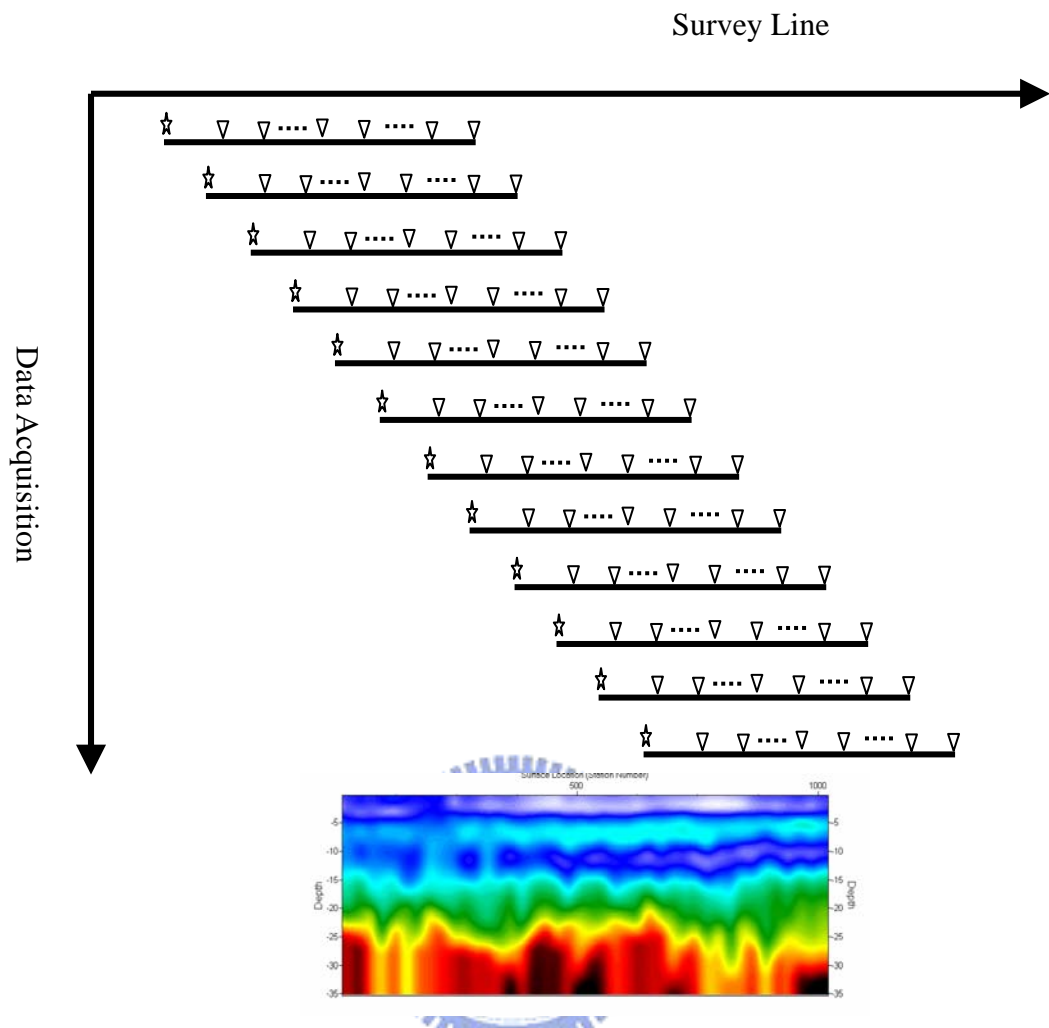


圖 5.15 表面波震測 Tomography

第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究著重在改善多頻道表面波震測法於現地試驗與資料收錄的程序部分。改良主要分為(1)震源(2)墊片對於訊號頻率的影響(3)新式受波器的製作與其適用性的探討。最後，並以交通大學博愛校區試驗場址的作為實際案例探討，作為頻估表面波震測結果的基礎，本研究採用鑽探及地球物理方法進行地層探測，以其所得之地質剖面與表面波震測結果相較並頻估所應用之各種方法之解析能力。本研究所得的結論如下各點：

1. 震源

由施測之三種震源的比對發現，鐵鎚是一項相當好用的震源，使用方便又可兼顧到資料的可靠性，但其能量較小且訊號頻率大多集中在較高頻部份。若需要改善空間探測深度，能夠產生低頻率寬帶訊號之較大能量震源系統則為較好的選擇。其中，本研究所使用的自由落鎚系統，其震波訊號波長範圍約可達 30m，有效的改善空間探測深度的能力。

2. 墊片對訊號頻率的影響

本研究中使用鐵板與橡膠墊作為震源敲擊的鎚墊。以一系列之實驗觀察震波是否會因鎚擊面的差異產生較低頻的訊號頻率進而改善可運用之頻率資料增加表面波震測法的空間解析能力。分析結果顯示，以橡皮墊作為鎚墊，的確可以改善低頻訊號的品質，但成效並不

明顯。

3. 新式受波器的製作與探討

目前新式受波器在瀝青路面使用上的成效已得到印證，可以有效的提升震測所耗費之時間並可兼顧到資料的解析能力。新式受波器在軟弱地面的分析資料與傳統插入式受波器呈現的資料，具有良好的相關性，映證該組新式受波器系統亦可適用於軟弱地面上施測。

4. 案例分析

由博愛校區的鑽探結果顯示，BH1~BH2 下方地層存在自 BH1(N90E)往 BH2(N60W)傾斜的趨勢，兩孔間之承載層有 10m 落差；地電組影像探測法在測線 1-1 探測出測線下方土層的每一層地層電阻率沿 S60E 往 N60W 逐漸變大、深度逐漸變厚，合乎鑽探結果呈現之趨勢；折射震測探測指出於地下-13m 處有一明顯 P 波波速分層，與 BH2 鑽孔資料顯示在約-15.8m 處有一明顯的承載層，頗為吻合；由表面波分析反算出之剪力波速剖面，與 BH2 的介面相當吻合；孔內波速量測時，量測由時間域的震波資料發現 7series 之垂直敲擊的震波走時，在約-16m 有一明顯的不連續面反射。雖然該法波速分析易因波動初達時間挑選產生人為錯誤，但如利用表面波震測所反算之剪力波速剖面，推估其下孔震測資料初達時間點，則兩者趨勢具有其相似性。

6.2 建議

(1) 野外施測時，震源與墊片配合可一下列原則配置：短近站支距

(<20m)使用鐵槌做為震源並搭配橡皮墊;中等近站支距
(20m<x₀<50m 使選用鐵槌或砲車做為震源，鐵板作為錘墊;遠炸
點(>50m)則採用自由落錘。

(2)目前使用中的自由落錘，重槌落下一個循環，需耗費
3~5mins，如何改善目前使用中的自由落槌機制，使其更為方便操作
並且快速，勢在必行。

(3)墊片之厚度與尺寸效應對於本研究中並未討論完善，若於相
同材質但厚度尺寸不同之墊片施測，低頻訊號或能加以改善。

(4)新式受波器亦可以使用不同濾波效果之受波器加以製造以符
合多種施測表面所需;較為柔性的基座及些許加載或能改善受波器與
地表間接觸之互制行為。



参考文献

1. B.W.Hootman, and Douglas I.Hart, "The realities of processing mixed-source seismic surveys", Western Geophysical, Denver, Colorado
2. C.B.Park, R.D.Miller, and Hidetoshi Miura, "Optimal Field Parameters of an MASW Survey" Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, USA
3. Design and application of a towed land-streamer system for cost-effective 2-D and pseudo 3-D shallow seismic data acquisition Van der Veen, M., and Green, A.G., Geophysics, v66, n2,(2001) p482~500
4. Dr.Crutis Link . Montana Tech technical report . "A rapid -deployment 3-D seismic reflection system" (2002)
5. Gang Tian, Don W.Steeple, Jianghai Xia, R.D.Miller, Kyle T.Spikes, matthew D.Ralston, "Multichannel analysis of surface wave method with the autojuggie", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23,2003,p243~p247
6. Geometrics, "Landstreamer survey",2003
7. Gimbal lock system for seismic sensors-US Patent 6061302
8. Jianghai Xia, R.D.Miller, Choon.B.Park, James.A.Hunter, James B.Harris, Julian Ivanov, "Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22(2002) p181-190.
9. Jianghi Xia, R.D.Miller, and Coon B.Park, Estimate of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh Waves", Geophysics, vol3,p691~p700
10. Julian Ivanov, C.B.Park, R.D.Miller, and Jianghai Xia, "Modal separation before dispersion curve extraction by MASW method ", Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, Randy Overton, ELM Consulting LLC, Olathe, Kansas
11. Krohn.C.E. "Geophone ground coupling", geophysics, v49 (1984) p722~731
12. M.van der veen, R.Spitzer, A.G.Green, and pullan Wild., "Design and application of a towed landstreamer system for cost -effective 2-D and pseudo- 3-D Shallow seismic data acquisition", Geophysics, vol 66, no.2(MARCH-APRIL), P482~P500
13. Miller, R.D., Pullan, S.E., Steeples, D.W., and Hunter, J.A., "Fields comparison of shallow seismic sources near Chino, Canafornia", Geophysics, VOL.57, p693-709, 1992
14. Park CB, Miller RD, Xia J, Multi-channel analysis of surface waves using vibroseis(MASWV). Expanded abstracts of technical program with Biographies, SEG 66st Annual meeting , DENVER, CO, 1996. p68~71
15. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J.(1999) "Multichannel analysis of surface wave", geophysics v64, n3, p800~808
16. Pressurized lead-in for a seismic streamer cable-US Patent 6069841
17. R.D.Miller, S.E.Pullan, D.W.Steeple, and James A.Hunter, "Field comparison of

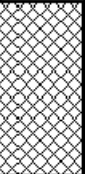



- shallow p-wave seismic sources near Houston,Texas” , Geophysics,VOL 59, NO.11;1994,p1713-p1728.
18. R.D.Miller, S.E.Pullan,J.S., and Haeni, F.P., 1986, ”Field comparison of shallow seismic sources”, Geophysics, vol 51,p2067-p2092
 19. R.D.Miller, Xia, J “Using MASW to map the bedrock in Olathe Kansas”, KGS Open-file Report 1999
 20. Sebastiano Foti, ”Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Wave”,2000
 21. Steeples, Don W., Backer, Gregory S.; Chris Schmerissner;” Geophones on a board”, Geophysics.vol.64.no.3, 1999,p 809-814
 22. Stoke II KH, Nazarians.” Effectiveness of ground improvement from spectral analysis of surface waves.Proceeding of the eighth European conference on soil mechanics and foundation engineering, Helsinki,finland”, 1983
 23. Tomio Lnazaki, ”High-resolution seismic reflection surveying at paved areas using an S-wave type land streamer”, Exploration Geophysics(2004) vol 35, p1-p6
 24. V.Singh, Baban Jee, A.KSrivastava & Gautam Sen, Oil and Natural Gas Corporation Limited,India, ”Geophone Ground coupling effect on reservoir mapping” , SEG Explanded Abstracts, 1998
 25. Van der Veen, M. and Green,A. G., “Land streamer for shallow seismic data acquisition Evaluation of gimbal-mounted geophones. Geophysics, v63 , p1408~p1413,1999
 26. Van der Veen, M., Wild, P., Spitzer, R., and Green, A., “Design characteristics of seismic land streamer for shallow data acquisition. EAGE 61st Conference and Technical Exhibition, 1999
 27. Van der Ven, M. and Green A. G. “design and application of a towed streamer system for cost effective 2-D and pseudo 3-D shallow seismic data acquisition” Geophysics v66 n2,2001, p482~500
 28. Xia, Jianghai.Miller, Richard D, Park,choon B, Hunter,James A. “Comparing shear wave velocity profile inverted from multichannel surface wave with borehole measurement”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v22, n3, 2002, p181~190
 29. Xia,J,Miller,R.D,and Park,C.B. “Estimation of near surface shear wave velocity by inversion of Rayleigh waves”,Geophysics,v64,n3,1999,p691~700
 30. 林志平,張正宙,鄭孟雄”以多頻道表面波量測地層之剪力波速”,岩盤工程研討會論文,新竹,(2002)
 31. 張正宙/多頻道表面波震測之研究及其在大地工程之應用/碩士論文/國立交通大學土木工程研究所(2002)
 32. 陳逸龍/多頻道表面波試驗程序標準化研究/碩士論文/國立交通大學土木工

程系研究所(2004)


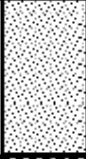
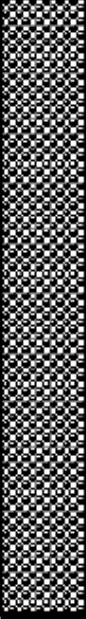

33. 黃俊豪/應用表面波譜法調查土層剪力波速之研究/碩士論文/成功大學
(2004)
34. 戴源昱/表面波波法與卵礫石剪力波速量測之研究/行政院國家科學委員會
專題研究計畫成果報告(2003)



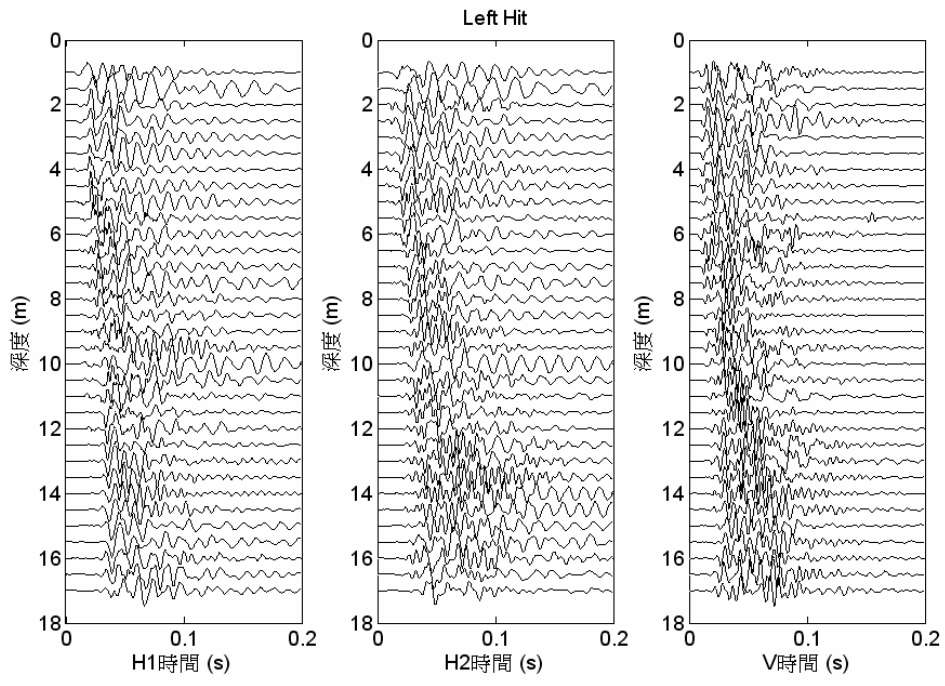
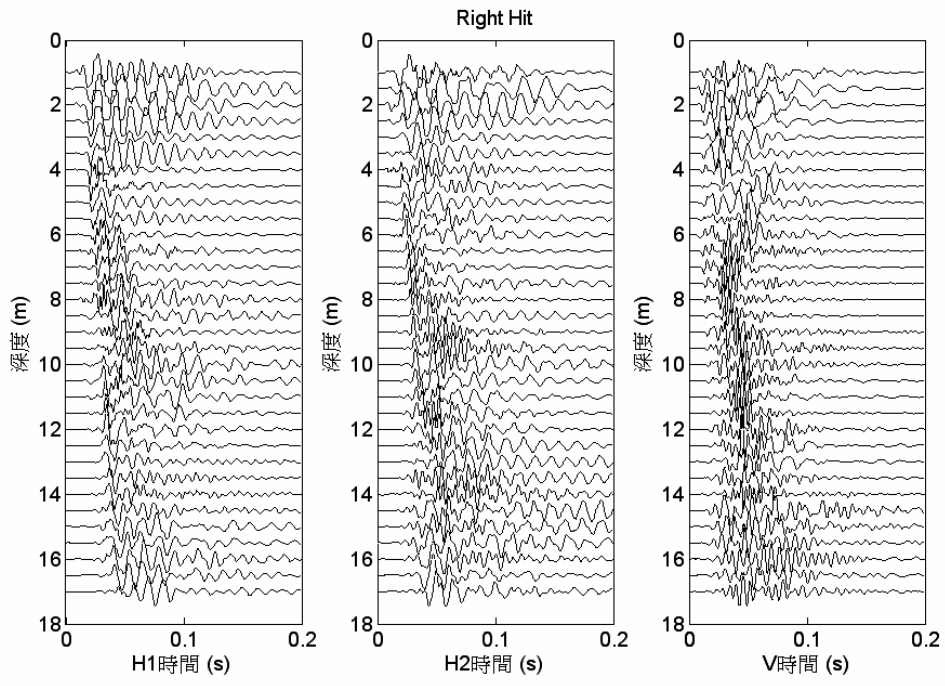
附錄(一)

鑽探地點：新竹市交通大學博愛校區大門左側球場旁樹下		孔 深：5.9 m	
孔 號：BH1		方 法：水洗/標準貫入試驗(劈管取樣)	
開始日期：93.10.24		傾 角：90°	
完成日期：93.10.24		座 標：E：247537/ N：2743573	
		頁 次： 1	
深度 (m)	SPT N 值	柱 狀 圖	地 層 描 述
1	(1.5m) 13.5		0.00m~2.55m 黃棕色砂質粘土，夾紅、灰色粉土
2	(3.0m) 21		2.55m~5.9m 黃棕色砂質泥岩
3	(4.5m) 18		2.55m~2.8m 灰色泥岩
4	(5.9m) 56/24cm		
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

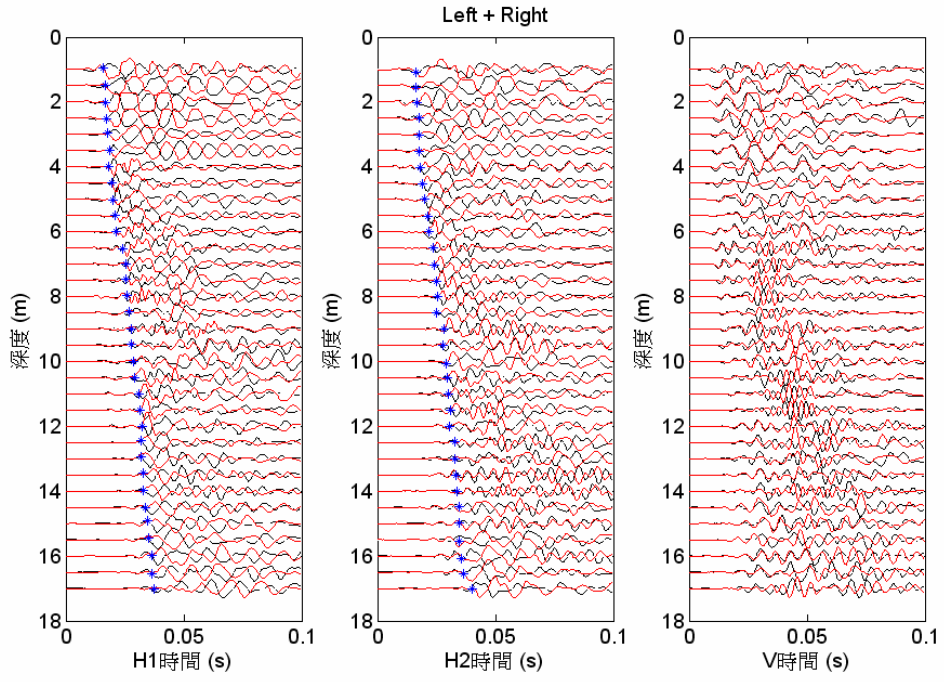
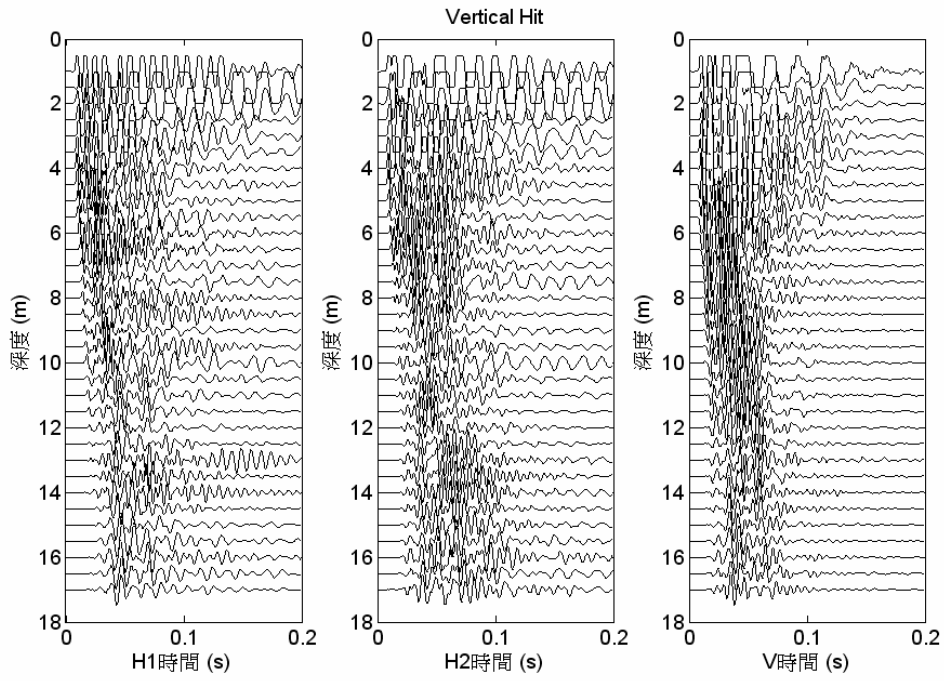
附錄(二)

鑽探地點：新竹市交通大學博愛校區操場升旗台前			孔 深：18.25 m
孔 號：BH2	方 法：鑽堡/標準貫入試驗(發管取樣)		地面高程：45m
開始日期：93.10.18	傾 角：90°		地下水位：14 m 左右
完成日期：93.10.19	座 標：E：247225 / N：2743637		頁 次： 1
深度 (m)	SPT N 值	柱 狀 圖	地 層 描 述
1			0.00m~4.3m 棕黃色粉土質砂土 約 3m 處土層為棕紅色至棕黃色
2			
3	(3.95m) 36		
4			
5			4.3m~6.6m 棕黃色粉土質細砂、偶夾微量礫石
6	(5.95m) 20		
7			6.6m~15.8m 棕黃色砂質礫石、偶夾卵石
8	(7.95m) 19		11.4m~12.25m 夾卵石
9			
10	(9.95m) 33		
11	(11.95m) 50/14cm		
12			
13			15.8m~18.25m 深灰色粉砂岩(岩盤)
14	(13.6m) 50/10cm		
15			
16			
17			
18			
19			
20			

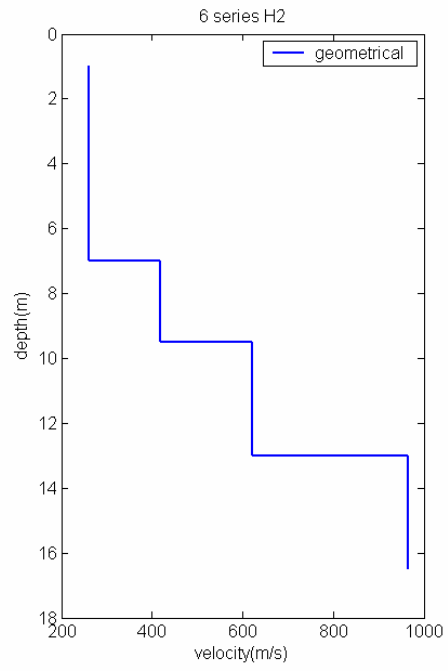
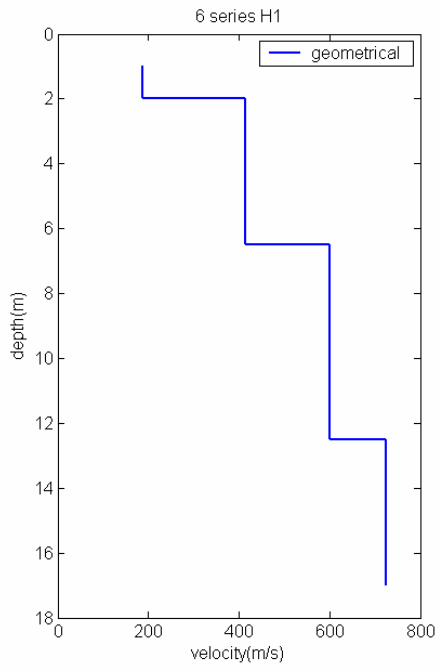
附錄(三)



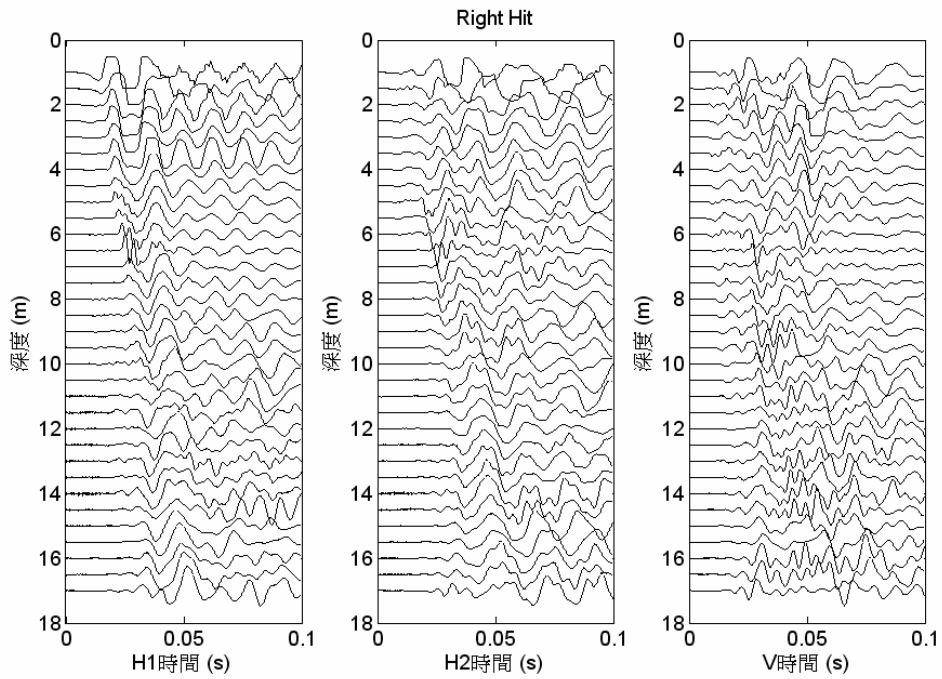
6series 左側敲擊



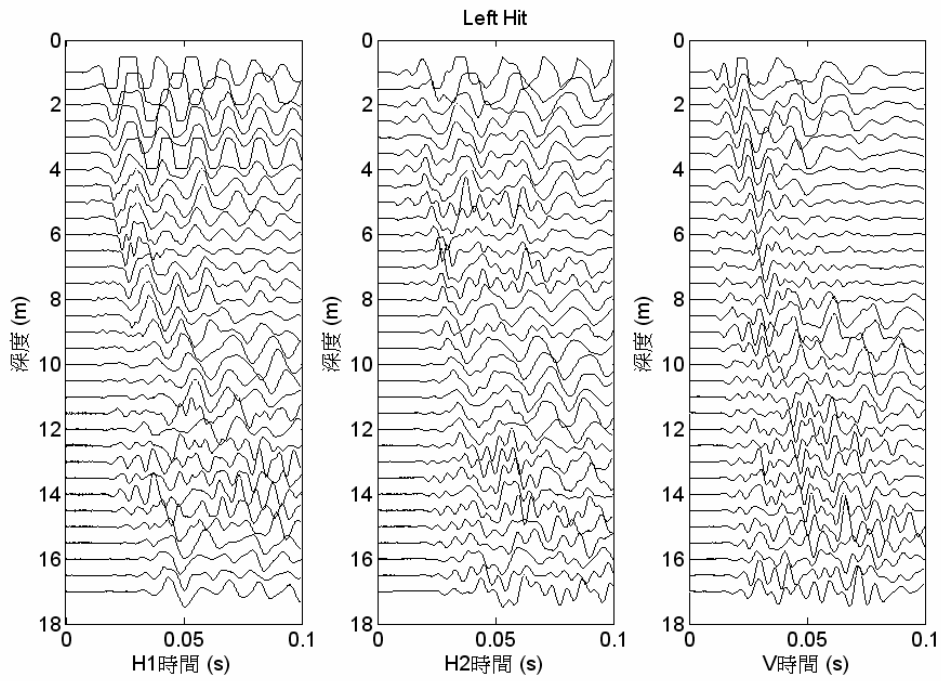
6series 初達波選取



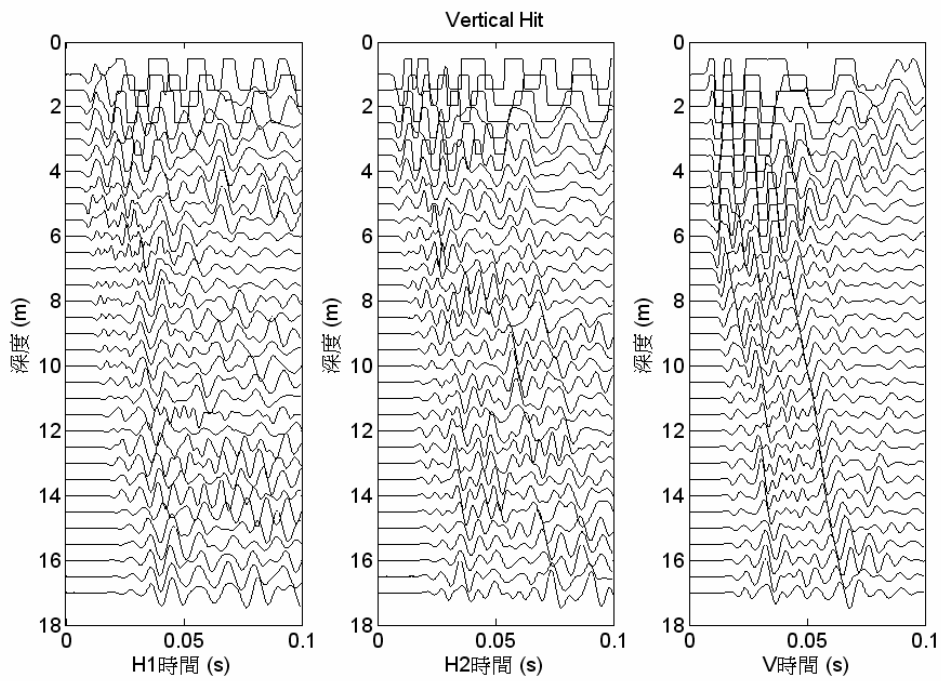
6series 波速剖面



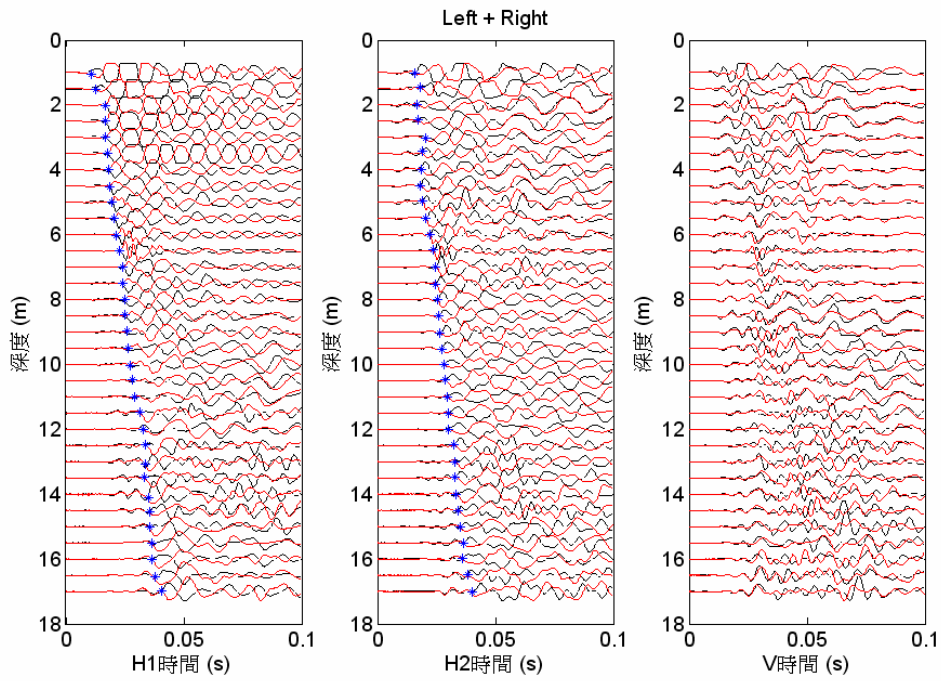
7series 右側敲擊



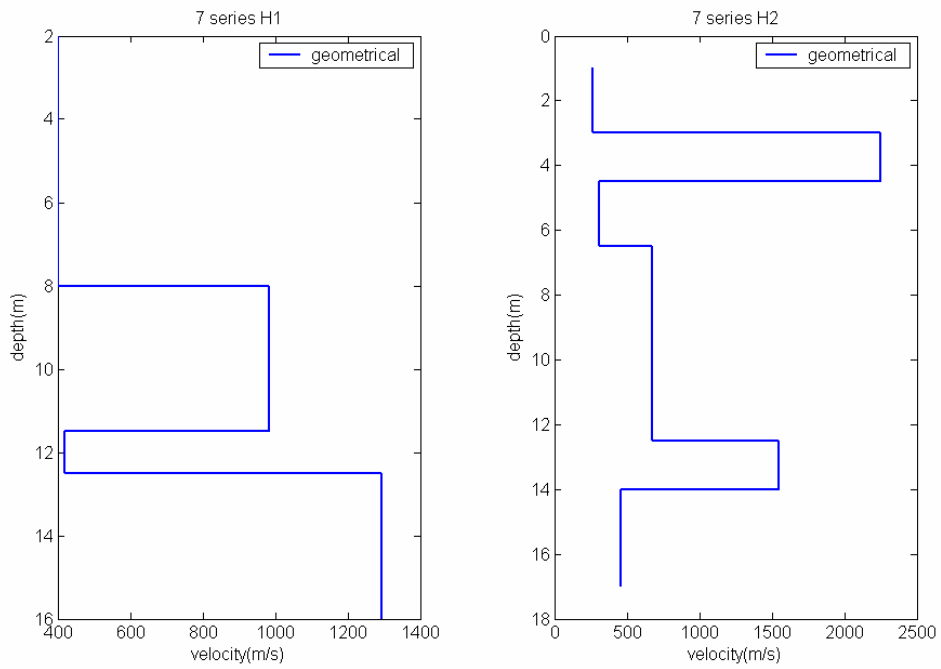
7series 左側敲擊



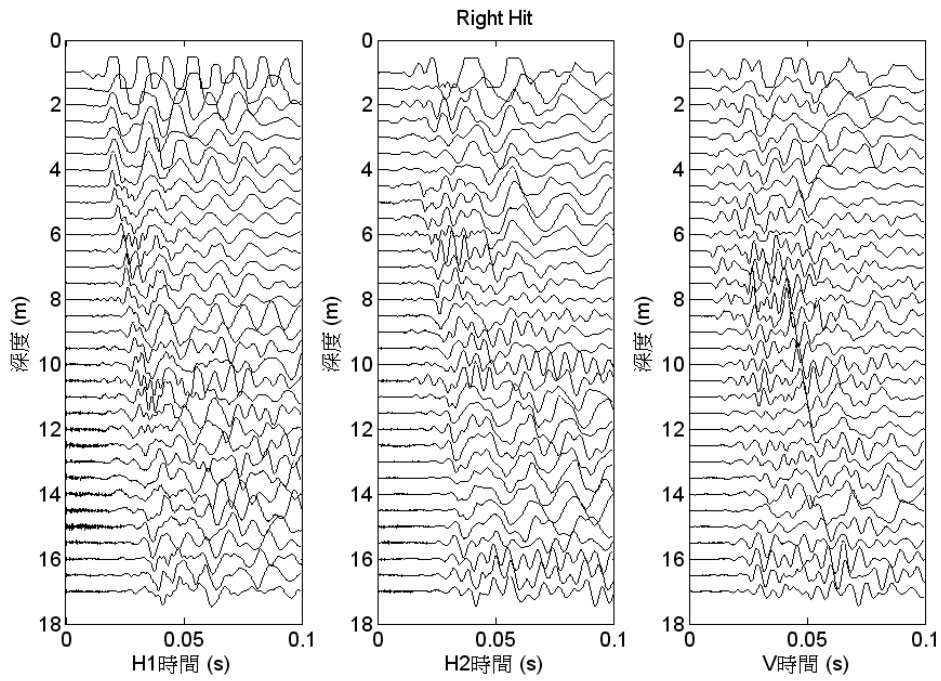
7series 垂直敲擊



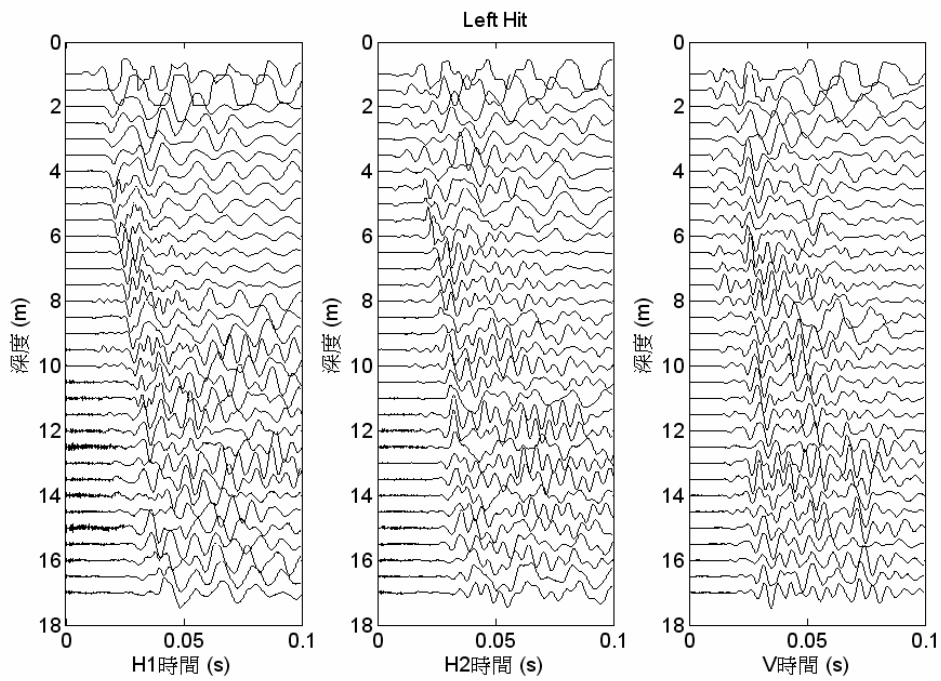
7series 初達波選取



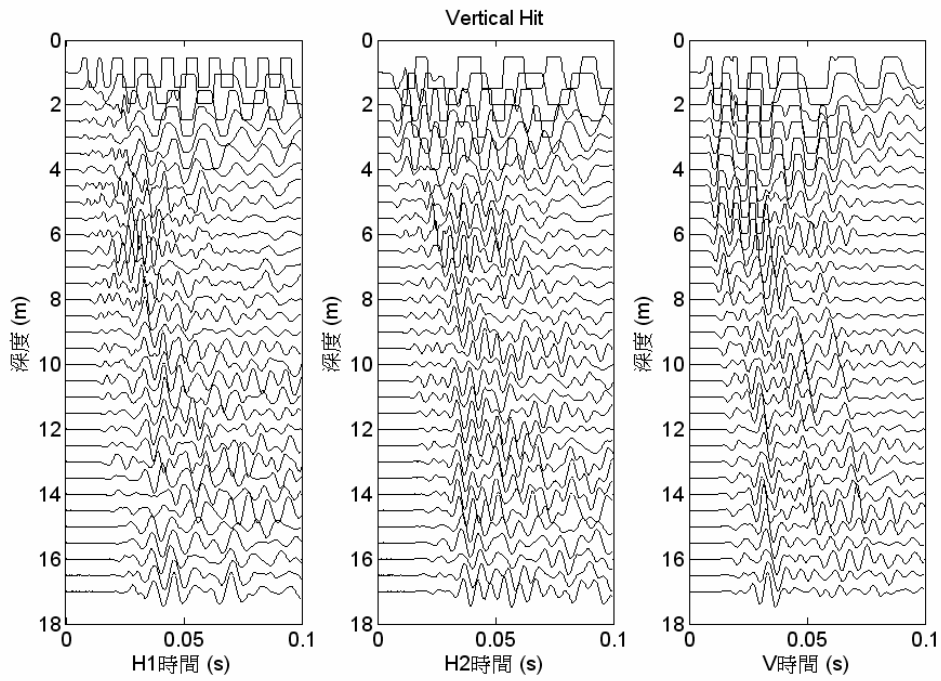
7series 波速剖面



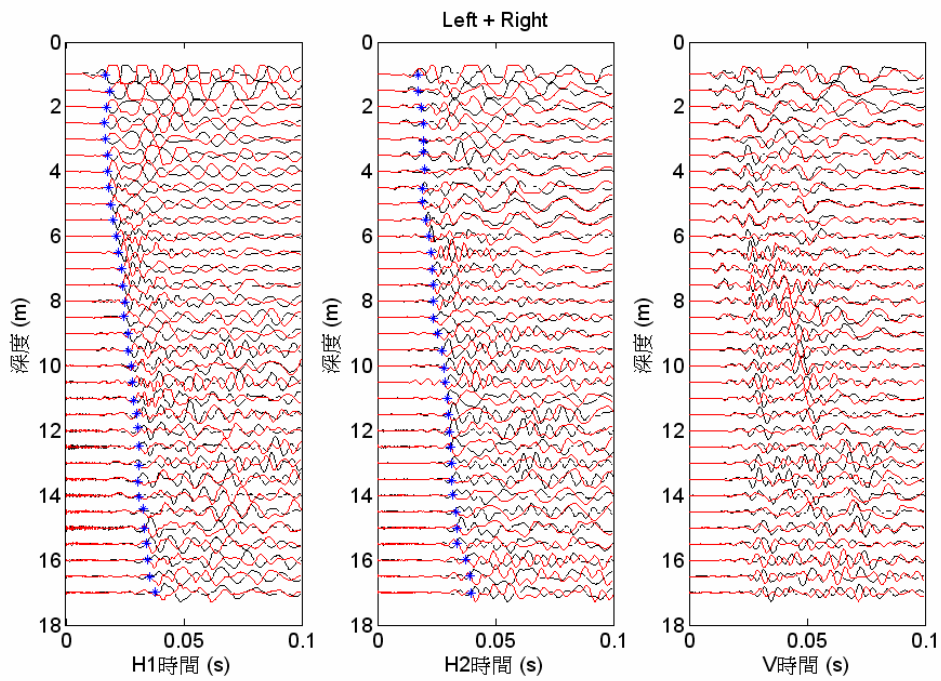
8series 右側敲擊



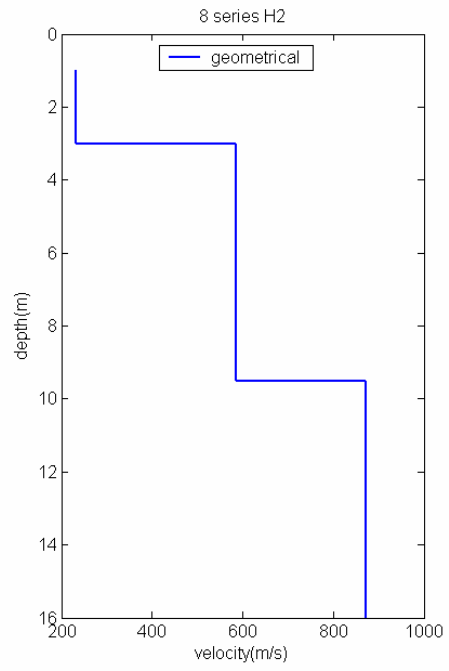
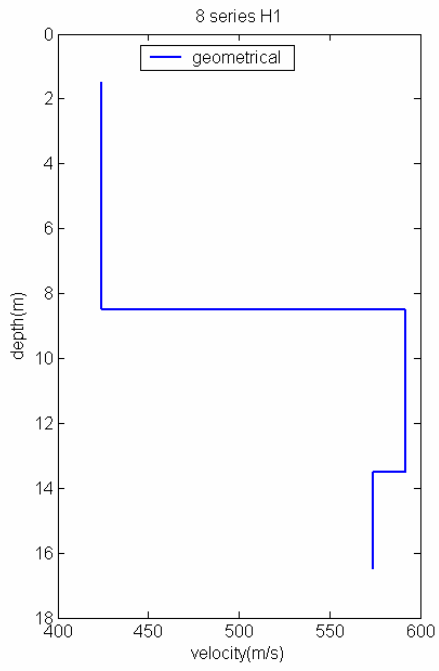
8series 左側敲擊



8series 垂直敲擊



8series 初達波選取



8series 波速剖面

