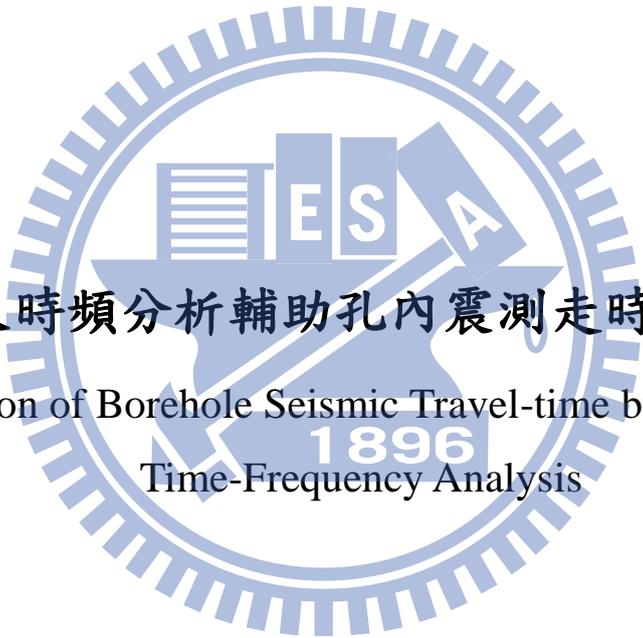


國立交通大學

土木工程學系

碩士論文



以頻域及時頻分析輔助孔內震測走時分析自動化

Automation of Borehole Seismic Travel-time by Spectral and
Time-Frequency Analysis

研究生：胡成泓

指導教授：林志平 博士

中華民國一百零一年七月

以頻域及時頻分析輔助孔內震測走時分析自動化

Automation of Borehole Seismic Travel-time by Spectral and Time-Frequency
Analysis

研究生：胡成泓

Student : Cheng-Hung Hu

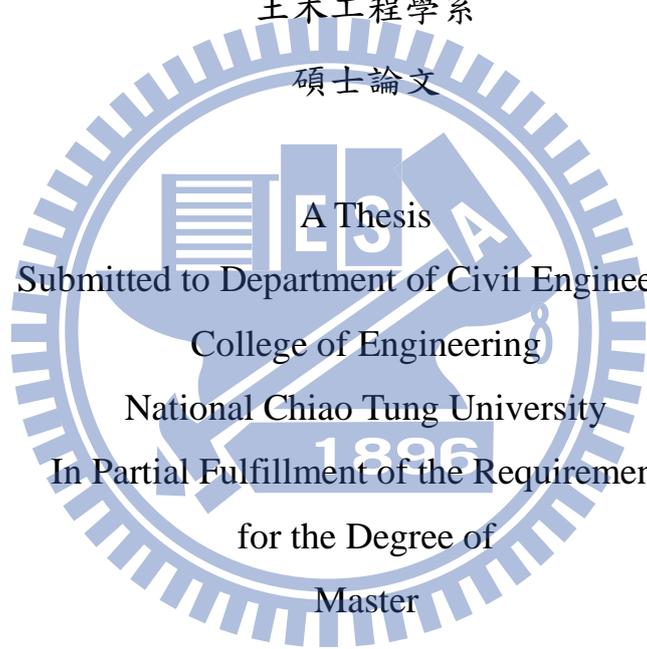
指導教授：林志平 博士

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem with a gear-like outer border. Inside the circle, there is a stylized building and the year '1896'. The text 'A Thesis' is written across the center of the logo.

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 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年七月

以頻域及時頻分析輔助孔內震測走時分析自動化

學生：胡成泓

指導教授：林志平 博士

國立交通大學土木工程學系

中文摘要

現有的孔內震測方法多採用以人工手動挑取初達波的走時分析方法，然而手動挑波結果往往因分析人員的經驗、訊號品質優劣而有差異，當資料量多繁雜時，相當費時費工；而當震波訊號的訊雜比較低時，判讀上的困難將使其難保正確性；此外，手動挑取之初達時間往往只在時間域上判釋，並無法得知其所得速度之頻率範圍。雖然陸續一直有學者進行初達波自動化選取之相關研究，但所提出之方法基本上皆是基於時間域之分析，且常常是有條件限制之適用性，對於訊號品質較差的資料易有判讀錯誤的情形。故本研究從訊號分析的角度，利用頻率域及時間—頻率域之訊號分析方法，透過有效的濾波，一方面由不同場域觀察震波訊號之特性，另一方面藉以訂定出半自動挑波法，並透過現地資料之應用探討不同孔內震測技術之適用性。

本研究在頻率域下採用頻譜分析法，透過簡化之均質均向土層假設，利用各頻率下之相位角差斜率以獲得相位速度；而在時間—頻率域上採用多重濾波法及小波轉換繪製時頻譜，並提出在時頻譜上利用振幅起伏起始點之自動挑取方法獲得頻帶波相平均初達時間，進而計算該頻帶下之初達波速。經現地資料測試，頻率域之簡化頻譜分析法較適用於震源穩定且有兩個接受器之孔內懸盪式震測法，此分析可同時提供剪力波速並可有額外之頻率訊息，可提供工程師據以進行進一步之動態分析，雖然此方法具有自動化分析之高度潛力，但其對於訊雜比低之訊號結果誤差較大，需進一步進行分析探討；而採用時頻分析法所訂定出之半自動挑法，無論採用多重

濾波法或小波轉換法於現地懸盪式震測及下孔震測之資料驗證，皆有良好的表現，整體波速趨勢與手動挑波結果一致，且相對穩定，並具有良好的抗雜訊能力，然而此時頻譜半自動挑波方法受限於時頻譜分析技術之時頻域間的解析度限制，針對不同震源類型的孔內震測試驗須調整分析參數達到最佳化，以便半自動挑波法能正確判釋波相初達時間，本研究根據現地試驗資料針對孔內懸盪式震測法以及下孔式震測法分別提出建議之使用參數。

綜合成果顯示，頻譜分析法較適合應用於震源穩定且高頻的懸盪式震測法，惟對訊雜比低之訊號需後續進一步探討；而時頻分析法對於各項孔內震測皆可良好應用成效，且有良好之抗雜訊能力，可廣為推廣應用。

關鍵字：孔內震測方法、走時分析、初達波、自動挑波法、時頻分析



Automation of Borehole Seismic Travel-time by Spectral and Time-Frequency Analysis

Student : Cheng-Hung Hu

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

The data reduction of existing borehole seismic methods are currently based on travel-time analysis in which first-arrival times of the seismogram are manually picked. However, manual picking is not efficient and depends heavily on the data quality and analyst's experience. Besides the difficulty of picking first arrivals in the time domain, no information is obtained regarding the effective frequency of the analysis. Several automatic picking methods were proposed to increase the efficiency of data processing. But most of them are based on time-domain analysis and work well only on some specific conditions. Data reduction methods based on the frequency domain and time-frequency domain were proposed in the study. The aim of the study was to observe the behavior of the borehole seismic waves from different domains (i.e. frequency and time-frequency domain) and propose a semi-automatic procedure for more objective first-arrival time picking. Field data from PS-Log testing and down-hole testing were used to evaluate the feasibility of the proposed procedure, in particular for the shear wave velocity.

In the frequency domain, the phase velocity can be calculated from the phase shift of two receiving stations in each frequency. To avoid the difficulty of unwrapping phase angles in lack of low frequency components, the formation around the borehole is assumed homogeneous and isotropic such that the phase velocity can be calculated from the slope of the phase difference versus frequency at certain frequency range. A better understanding of the seismic

signal can be achieved by time-frequency analysis, such as multi-filter analysis or wavelet transform. In the time-frequency domain, a semi-automatic procedure was proposed to determine the first arrival times from the envelope of the time-frequency spectrum at specific frequency range.

Evaluation using field data shows that the spectral analysis method is suitable for PS-Log testing with stable source and two simultaneous recording channels. The method is easy to be automated and yields V_s and the corresponding effective frequency. However, more study should be conducted to overcome occasional failure in low S/N data. The semi-automatic time-frequency spectrum analysis, either based on multi-filter analysis or Morlet wavelet transformation, works well both in PS-Log testing and down-hole testing. The picked first arrival times from the proposed method agree well with the manually-picked results in high quality data. The procedure is stable and yields reasonable results in data with low S/N. But it should be noted that the method inherit the tradeoff between frequency and time resolution from the time-domain analysis. The parameters used in the time-frequency analysis should be optimized for different source types. The parameters for PS-Log testing and down-hole testing were suggested respectively in the study and verified by the field data.

Keywords : borehole seismic method, travel time analysis, first-arrival time, automatic first-arrival picking, time-frequency analysis

致謝

本文得以順利完成，首要感謝指導教授 林志平博士於研究所兩年來的悉心教誨，給予學生在論文研究以及專業知識上的諸多指導，使學生得以突破研究瓶頸並獲得學識上的精進。此外，於求學態度與待人處世方面亦給予學生許多啟發，尤其對於邏輯思考及簡報表達的能力，更是大大提升。很慶幸能夠進入林老師門下，在此致上最誠摯的謝意。

求學期間，承蒙廖志中教授、潘以文教授、單信瑜教授、方永壽教授、黃安斌教授於學識上的指導，在此致上萬分謝意。而口試期間，良受馮正一教授、余騰鐸教授、葛宇甯教授、張宗盛博士給予本論文許多寶貴的意見與建議，使得本論文更加完善，在此表示由衷感謝。

研究期間承蒙俊宏、志忠、柏林、瑋晉等學長兩年的照顧與協助。尤其感謝俊宏學長總是幫我解決很多研究上的問題，指導我的簡報與論文。感謝王凱、士輝、逸倫學長帶我度過充實歡樂的碩一生涯。感謝同門志昇兩年來的共患難，以及其他同甘共苦的大地組同學們。也感謝友誠、昶笙、滢郁等學弟妹的幫忙，讓我的碩二生涯能專心致力於論文研究。

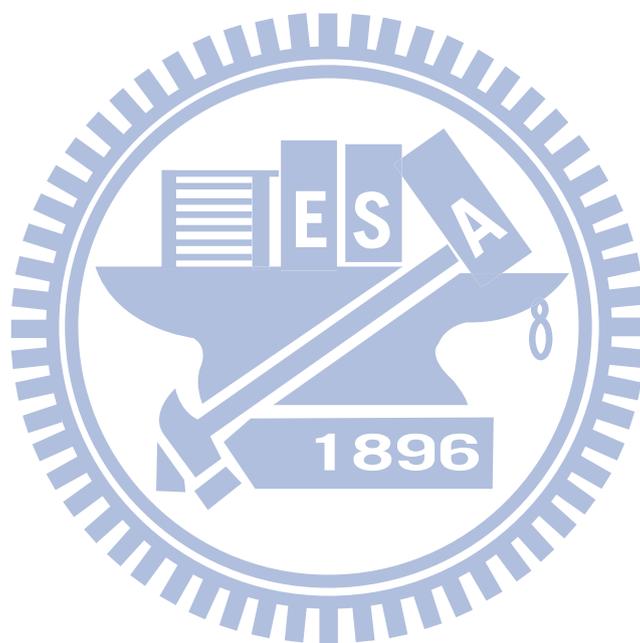
最後，感謝家人們對我的支持與栽培，這二十幾年來如果沒有您們包容與教誨便沒有今天的我，謝謝您們。此外特別感謝五年來一直陪在我身邊的女友郁珊，妳的陪伴與鼓勵是我一直以來努力的泉源。僅以此文獻給我親愛的家人與女友郁珊。

目錄

中文摘要.....	I
Abstract	III
致謝.....	V
目錄.....	VI
圖目錄.....	IX
表目錄.....	XV
第一章 前言	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	5
1.3 研究流程與論文架構.....	6
第二章 文獻回顧	8
2.1 孔內震測方法.....	8
2.1.1 下孔式震測法.....	9
2.1.2 跨孔式震測法.....	16
2.1.3 懸盪式震測法.....	19
2.2 走時分析方法與評析.....	22
2.3 自動挑波方法與評析.....	25
2.3.1 STA/LTA 方法.....	25
2.3.2 AIC 方法.....	27
2.3.3 類神經網路.....	29
2.3.4 能量比值法.....	32
2.4 訊號分析方法.....	35
2.4.1 時間域濾波分析.....	35
2.4.2 頻率域濾波分析.....	38

2.4.3 時頻譜濾波分析.....	40
第三章 研究方法.....	52
3.1 研究方法流程說明.....	53
3.2 速度分析方法.....	54
3.2.1 時間域速度分析法.....	54
3.2.2 頻率域相位速度分析法.....	55
3.2.3 時間—頻率域速度分析法.....	60
3.3 振幅起伏起始點挑取自動化分析法.....	62
3.4 試驗資料.....	64
3.4.1 半自動化挑波程序訂定測試資料.....	64
3.4.2 半自動化挑波程序驗證用資料.....	69
第四章 試驗結果與討論.....	72
4.1 半自動化挑波流程訂定.....	72
4.1.1 頻率域分析法.....	72
4.1.2 時間—頻率域分析法.....	79
4.1.3 時窗函數前處理影響.....	101
4.1.4 分析方法比較.....	104
4.1.5 半自動化挑波分析法流程.....	107
4.2 半自動化挑波法驗證.....	107
4.2.1 懸盪式震測資料.....	107
4.2.2 下孔式震測資料.....	119
4.2.3 綜合比較.....	125
第五章 結論與建議.....	126
5.1 結論.....	126
5.2 建議.....	126

參考文獻..... 128
附錄(一)..... 132



圖目錄

圖 1.1 結合 SPT 與上孔震測,以 SPT 的敲擊作為震源,在孔旁設置受波器。	2
圖 1.2 下孔震測 Test-01 資料及走時軌跡.....	3
圖 1.3 下孔震測 Test-02 資料及走時軌跡.....	4
圖 1.4 Test-01、Test-02 走時軌跡比較.....	4
圖 1.5 研究流程圖.....	6
圖 2.1 孔內震測法示意圖(Seismic Shear Wave Studies).....	9
圖 2.2 非破壞性地表震測法示意圖(Seismic Shear Wave Studies).....	9
圖 2.3 下孔式震測法配置圖(D7400-08, 2008).....	10
圖 2.4 直接法 (direct method)示意圖(Kim et al., 2004).....	13
圖 2.5 間距法 (interval method)示意圖(Kim et al., 2004).....	13
圖 2.6 修正間距法 (modified-interval method) 示意圖(Kim et al., 2004)....	14
圖 2.7 逆推法 (inversion method) (Kim et al., 2004).....	14
圖 2.8 下孔震測利用左敲、右敲輔助凸顯剪力波的對稱性(D7400-08, 2008)	15
圖 2.9 跨孔式震測法配置圖(D4428/D4428M-07, 2004).....	17
圖 2.10 利用跨孔式震測法施作斷層剖面速度影像方法(Angioni et al., 2003)	18
圖 2.11 懸盪式波速量測系統配置圖(OYO corporation).....	20
圖 2.12 震源原理示意圖(OYO suspension PS logger Manual).....	20
圖 2.13 懸盪式震測法訊號波形(國家地震工程研究中心).....	21
圖 2.14 不同選點方式的正規化波速比較(Stokoe and Hoar, 1978).....	23
圖 2.15 P 波中 SV 波的近場效應(Sánchez-Salineró, 1987).....	24
圖 2.16 SV 波中 P 波的近場效應(Sánchez-Salineró, 1987).....	24

圖 2.17 STA/LTA 方法示意圖(Han et al., 2010)	26
圖 2.18 AIC 方法判讀兩種波相到時示意圖(Zhang et al., 2003)	27
圖 2.19 長、中、短三個時窗判斷器，並以一並聯判斷器取其交集判斷(Zhao and Takano, 1999)	30
圖 2.20 長、中、短三個時窗判斷器示意圖(Zhao and Takano, 1999)	31
圖 2.21 固定時窗(罗进华 et al., 2008)	33
圖 2.22 滑動時窗示意圖 (徐钰 et al., 2012)	33
圖 2.23 修正能量比值法(MER)示意圖	34
圖 2.24 闡述非週期訊號取樣時造成遺漏的原因(CRYSTAL instruments)...	36
圖 2.25 由於資料截斷造成頻譜能量遺漏(测试技术实验指导).....	36
圖 2.26 SASW 頻譜分析(相位差-頻率圖)(林俊宏, 2005).....	39
圖 2.27 多重濾波法案例。(賴雅娟, 2009).....	43
圖 2.28 傅立葉轉換、短時傅立葉轉換、小波轉換解析度比較(Chun-Lin, 2010)	45
圖 2.29 小波函數的尺度變化(李立愷, 2005).....	47
圖 2.30 小波函數的平移變化(李立愷, 2005).....	47
圖 2.31 各種母小波函數；(a)Haar (b)Mexican hat (c)Meyer (d)Morlet (e)Dauvechies(db6)	49
圖 2.32 Morlet 小波的實部(實線)、虛部(虛線)及其傅立葉轉換頻譜	50
圖 3.1 本研究之試驗階段流程.....	53
圖 3.2 時間域訊號波形及手動挑取初波達時間點.....	55
圖 3.3 兩時間訊號之相位差(Joh, 1996)	56
圖 3.4 懸盪式震測法及表面波譜法之設置比較.....	56
圖 3.5 頻譜分析於懸盪式震測資料之應用步驟.....	59
圖 3.6 訊號經時頻分析方法轉換成時頻譜.....	60
圖 3.7 訊號各頻率下之波形及其包絡線.....	61

圖 3.8 振幅起伏起始點挑取自動化方法.....	63
圖 3.9 受波器與震源.....	65
圖 3.10 控制監測裝置.....	65
圖 3.11 絞盤.....	65
圖 3.12 #008 訊號波形及初波達時間點.....	66
圖 3.13 #009 訊號波形及初波達時間點.....	67
圖 3.14 #010 訊號波形及初波達時間點.....	67
圖 3.15 #082 訊號波形及初波達時間點.....	68
圖 3.16 #083 訊號波形及初波達時間點.....	68
圖 3.17 #084 訊號波形及初波達時間點.....	69
圖 3.18 交通大學博愛校區下孔震測鑽孔位置.....	70
圖 3.19 下孔震測施測設備示意圖(鄒和翰, 2005).....	71
圖 3.20 震測儀與孔內受波器.....	71
圖 4.1 #008 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜.....	73
圖 4.2 #009 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜.....	74
圖 4.3 #010 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜.....	75
圖 4.4 #082 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜.....	76
圖 4.5 #083 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜.....	77
圖 4.6 #084 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜.....	78
圖 4.7 多重濾波法參數設置比較.....	80
圖 4.8 多重濾波法於測試資料#008 之應用(受波器 H1 資料).....	81
圖 4.9 多重濾波法於測試資料#008 之應用(受波器 H2 資料).....	82
圖 4.10 多重濾波法於測試資料#008 之應用結果.....	82
圖 4.11 多重濾波法於測試資料#009 之應用(受波器 H1 資料).....	83
圖 4.12 多重濾波法於測試資料#009 之應用(受波器 H2 資料).....	83

圖 4.13 多重濾波法於測試資料#009 之應用結果.....	84
圖 4.14 多重濾波法於測試資料#010 之應用(受波器 H1 資料).....	84
圖 4.15 多重濾波法於測試資料#010 之應用(受波器 H2 資料).....	85
圖 4.16 多重濾波法於測試資料#010 之應用結果.....	85
圖 4.17 多重濾波法於測試資料#082 之應用(受波器 H1 資料).....	86
圖 4.18 多重濾波法於測試資料#082 之應用(受波器 H2 資料).....	86
圖 4.19 多重濾波法於測試資料#082 之應用結果.....	87
圖 4.20 多重濾波法於測試資料#083 之應用(受波器 H1 資料).....	87
圖 4.21 多重濾波法於測試資料#083 之應用(受波器 H2 資料).....	88
圖 4.22 多重濾波法於測試資料#083 之應用結果.....	88
圖 4.23 多重濾波法於測試資料#084 之應用(受波器 H1 資料).....	89
圖 4.24 多重濾波法於測試資料#084 之應用(受波器 H2 資料).....	89
圖 4.25 多重濾波法於測試資料#084 之應用結果.....	90
圖 4.26 小波轉換法於測試資料#008 之應用(受波器 H1 資料).....	92
圖 4.27 小波轉換法於測試資料#008 之應用(受波器 H2 資料).....	92
圖 4.28 小波轉換法於測試資料#008 之應用結果.....	93
圖 4.29 小波轉換法於測試資料#009 之應用(受波器 H1 資料).....	93
圖 4.30 小波轉換法於測試資料#009 之應用(受波器 H2 資料).....	94
圖 4.31 小波轉換法於測試資料#009 之應用結果.....	94
圖 4.32 小波轉換法於測試資料#010 之應用(受波器 H1 資料).....	95
圖 4.33 小波轉換法於測試資料#010 之應用(受波器 H2 資料).....	95
圖 4.34 小波轉換法於測試資料#010 之應用結果.....	96
圖 4.35 小波轉換法於測試資料#082 之應用(受波器 H1 資料).....	96
圖 4.36 小波轉換法於測試資料#082 之應用(受波器 H2 資料).....	97
圖 4.37 小波轉換法於測試資料#082 之應用結果.....	97

圖 4.38 小波轉換法於測試資料#083 之應用(受波器 H1 資料).....	98
圖 4.39 小波轉換法於測試資料#083 之應用(受波器 H2 資料).....	98
圖 4.40 小波轉換法於測試資料#083 之應用結果.....	99
圖 4.41 小波轉換法於測試資料#084 之應用(受波器 H1 資料).....	99
圖 4.42 小波轉換法於測試資料#084 之應用(受波器 H2 資料).....	100
圖 4.43 小波轉換法於測試資料#084 之應用結果.....	100
圖 4.44 Tukey Window 在時間域及頻率域之波形	102
圖 4.45 套用時窗函數至訊號做前處理.....	103
圖 4.46 時窗函數前處理影響於頻譜分析法之比較.....	103
圖 4.47 時窗函數前處理影響於時頻分析法之比較.....	104
圖 4.48 訊雜比高之測試資料於各分析法波速比較圖.....	105
圖 4.49 訊雜比低之測試資料於各分析法波速比較表.....	106
圖 4.50 半自動挑波法以多重濾波法作時頻譜，應用於懸盪式震測資料之走 時曲線比較.....	108
圖 4.51 (a)半自動挑波法以多重濾波法作時頻譜，應用於懸盪式震測資料之 剪力波速剖面比較; (b)頻帶波速剖面對應之頻率範圍.....	109
圖 4.52 半自動挑波法以小波轉換作時頻譜，應用於懸盪式震測資料之走時 曲線比較.....	110
圖 4.53 (a)半自動挑波法以小波轉換作時頻譜，應用於懸盪式震測資料之剪 力波速剖面比較; (b)頻帶波速剖面對應之頻率範圍.....	111
圖 4.54 懸盪式震測資料#069 波形及手動挑取剪力波初達時間	112
圖 4.55 懸盪式震測資料#069 套用時窗函數及其時頻譜	113
圖 4.56 懸盪式震測資料#069 半自動挑取頻帶下剪力波初達時間	113
圖 4.57 懸盪式震測資料#070 波形及手動挑取剪力波初達時間	114
圖 4.58 懸盪式震測資料#070 套用時窗函數及其時頻譜	114

圖 4.59 懸盪式震測資料#070 半自動挑取頻帶下剪力波初達時間	115
圖 4.60 懸盪式震測資料#071 波形及手動挑取剪力波初達時間	115
圖 4.61 懸盪式震測資料#071 套用時窗函數及其時頻譜	116
圖 4.62 懸盪式震測資料#071 半自動挑取頻帶下剪力波初達時間	116
圖 4.63 懸盪式震測資料#151 波形及手動挑取剪力波初達時間	117
圖 4.64 懸盪式震測資料#151 套用時窗函數及其時頻譜	118
圖 4.65 懸盪式震測資料#151 半自動挑取頻帶下剪力波初達時間	118
圖 4.66 下孔式震測資料於手動挑波法及半自動挑波法之走時曲線比較(以 多重濾波法作時頻譜)	119
圖 4.67 下孔式震測資料於手動挑波法及半自動挑波法之剪力波速剖面(以 多重濾波法作時頻譜)	120
圖 4.68 下孔式震測驗證資料於半自動挑波法之頻帶波速剖面對應之頻率範 圍(以多重濾波法作時頻譜)	120
圖 4.69 下孔式震測資料於手動挑波法及半自動挑波法之走時曲線比較(以 小波轉換作時頻譜)	121
圖 4.70 下孔式震測資料於手動挑波法及半自動挑波法之剪力波速剖面(以 小波轉換作時頻譜)	121
圖 4.71 下孔式震測驗證資料於半自動挑波法之頻帶波速剖面對應之頻率範 圍(以小波轉換作時頻譜)	122
圖 4.72 小波參數 WinLen 於下孔式震測資料之時頻譜比較	123
圖 4.73 小波參數 WinLen 於下孔式震測資料之半自動挑波比較	124
圖 4.74 因小波參數 WinLen 異同造成走時曲線偏移	124

表目錄

表 2.1 小波轉換三大類比較.....	46
表 3.1 半自動化挑波程序訂定測試資料於時間域初達波分析剪力波速資料	69
表 4.1 測試資料於頻率域頻譜分析相位波速資料.....	79
表 4.2 測試資料於多重濾波法分析頻帶初達波速資料.....	90
表 4.3 測試資料於小波轉換法分析頻帶初達波速資料.....	101
表 4.4 訊雜比高之測試資料於各分析法波速比較表.....	105
表 4.5 訊雜比低之測試資料於各分析法波速比較表.....	106
表 4.6 波速特異資料之手動挑波與半自動挑波比較表.....	117



第一章 前言

1.1 研究背景與動機

土層動態參數在地震工程中扮演極重要的角色，其用途包括地震危害度分析、土壤液化潛能分析、邊坡與土壩之動態穩定分析、及土壤結構動態之互制行為之研究、震動基礎設計分析等有關土壤動態行為方面的研究一直是被受矚目，因此求得正確土層動態參數，在大地工程動態分析與設計評估上為很重要的一環。

為了求得土層剪力波速，現地震波量測方式大致可分為孔內震測及非破壞性地表震測兩類。孔內震測(Borehole Seismics)是利用機械方法或技術入侵材料之中，探測材料的各種特性，其方法包括上孔法、下孔法、跨孔法及懸盪式波速量測法等。非破壞性地表震測(Non-Destructive Surface Seismics)是利用物理、機械方法(或技術)，在不破壞材料的情況下，檢測材料是否產生缺陷，或是探測材料物理、機械性質等檢測技術，其方法包括折射震測法、反射震測法、表面波震測法等。另一方面，標準貫入試驗 N 值(Standard Penetration Test N Value, SPT-N)在大地工程之地質鑽探中，係用於研判地層之軟弱或緊密程度，可說是應用最廣、資料最豐富且最為經濟之調查手段之一。自(Terzaghi and Peck, 1948) 提出 N 值與砂性土壤之相對密度、容許承载力；N 值與黏土強度、容許承载力等間之關係以來，已累積相當多的資料可供大地工程設計之參考。(林士誠, 1999)

既然土層剪力波速及標準貫入試驗 N 值對於大地工程都是如此重要的一個環節，若能結合兩種試驗方法，不論在經濟效益、時間考量或是工程的需求上都有相當程度的提升。而在土層剪力波速之獲得上，由於孔內震測法在理論及計算上遠較無鑽孔探測法簡單，且可與標準貫入試驗同時施作，如圖 1.1 所示，以上孔震測法的配置方式，可以以標準貫入試驗之夯垂敲擊作為震源，配合標準貫入試驗在現地預定深度的鑽孔進行檢測，同

時獲取各深度的 SPT-N 值及剪力波速。

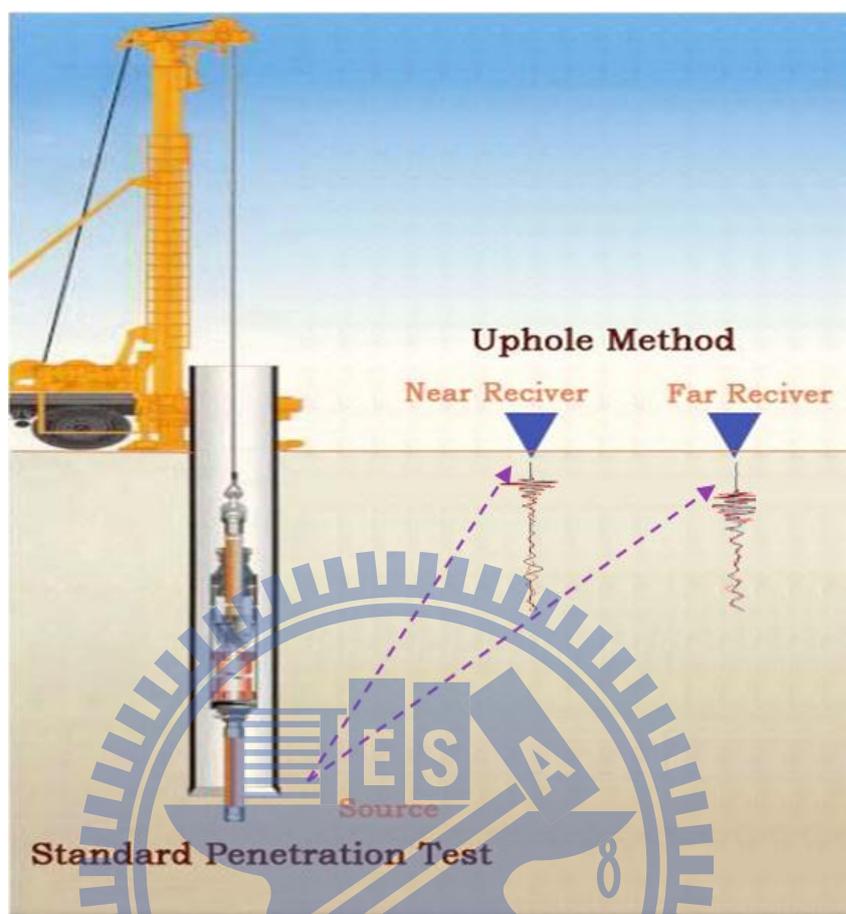


圖 1.1 結合 SPT 與上孔震測，以 SPT 的敲擊作為震源，在孔旁設置受波器。

然而現有的孔內震測法多採用以人工手動挑取初達波的走時分析方法，相當費時費工、當震波訊號的訊雜比較低時，也有判讀的困難，故若想結合標準貫入試驗及孔內震測，解決上述問題才是關鍵。舉例來說，圖 1.2、圖 1.3 為在交通大學博愛校區一鑽孔所施測之下孔震測資料，並在同一鑽孔施測兩次，命名為 Test-01、Test-02，很明顯可以看出 Test-02 資料淺層部分由於高頻雜訊影響大，降低訊號品質，難以判斷出剪力波相之初達時間，尤其以圖左之 H1 方向分量最為明顯。圖 1.4 為兩次試驗之走時軌跡比較圖，明顯顯示出淺層軌跡之偏差確實較大。同理，若在其他試驗測得如 Test-02 資料資料品質較差的狀況，又沒有品質良好之對照組，便難以用人工手動挑波方法判斷出一致的初達時間。

故發展自動化挑波技術對於地震工程及震測方法等相關研究中是十分重要的議題，雖然陸續一直有學者 (Allen, 1978; Coppens, 1985; Han et al., 2010; Leonard, 2000; Zhang et al., 2003)在進行相關研究，但所提出的方法常常是有條件的適用性限制，對於訊雜比較低的資料也易有分析錯誤的情形。除此之外，波速常有受阻尼衰變的現象，若只是單純針對時間域挑取初達波，對於挑取的波形只能知道其時間域的訊息，並無法其所表示之頻率為何，物理意義含量較少。

所以本研究希望從訊號分析的角度，透過時間域、頻率域、及時頻分析進行有效的濾波，一方面觀察震波訊號在這些分析狀況下的情形，一方面探討其作為自動化挑波方法之可行性。

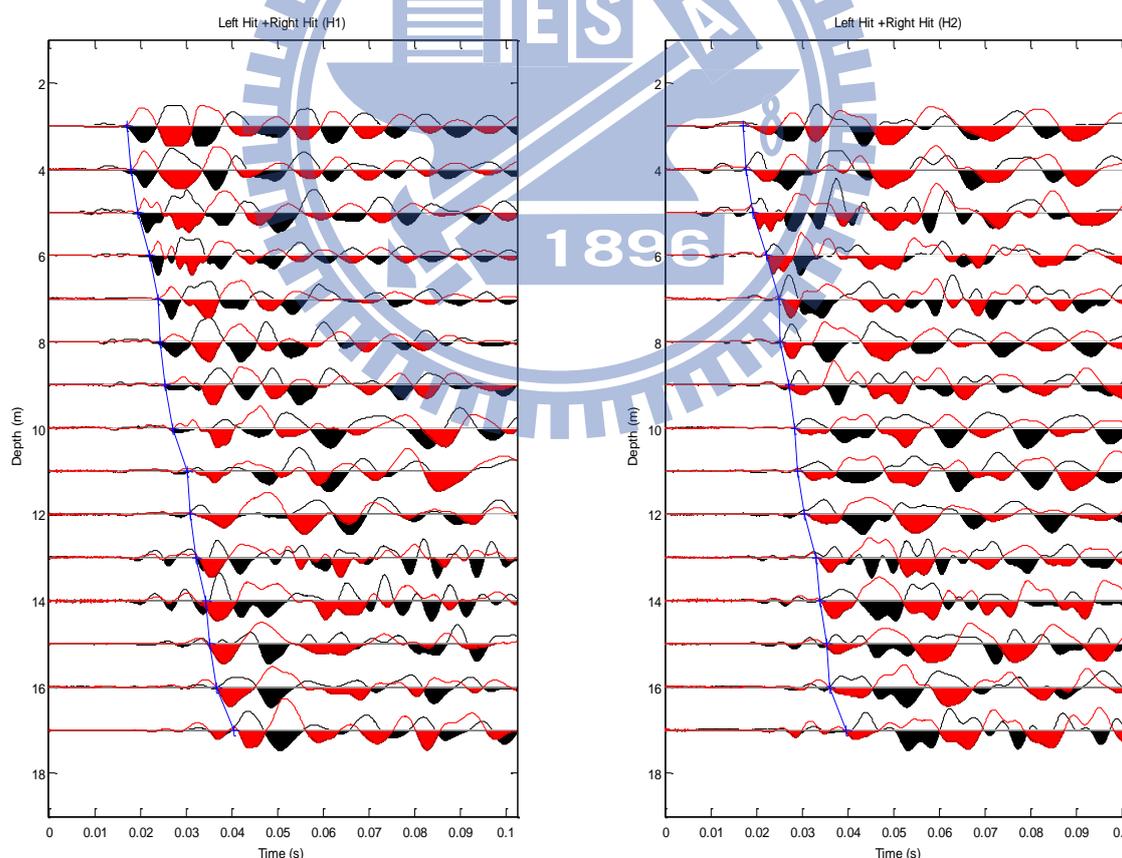


圖 1.2 下孔震測 Test-01 資料及走時軌跡

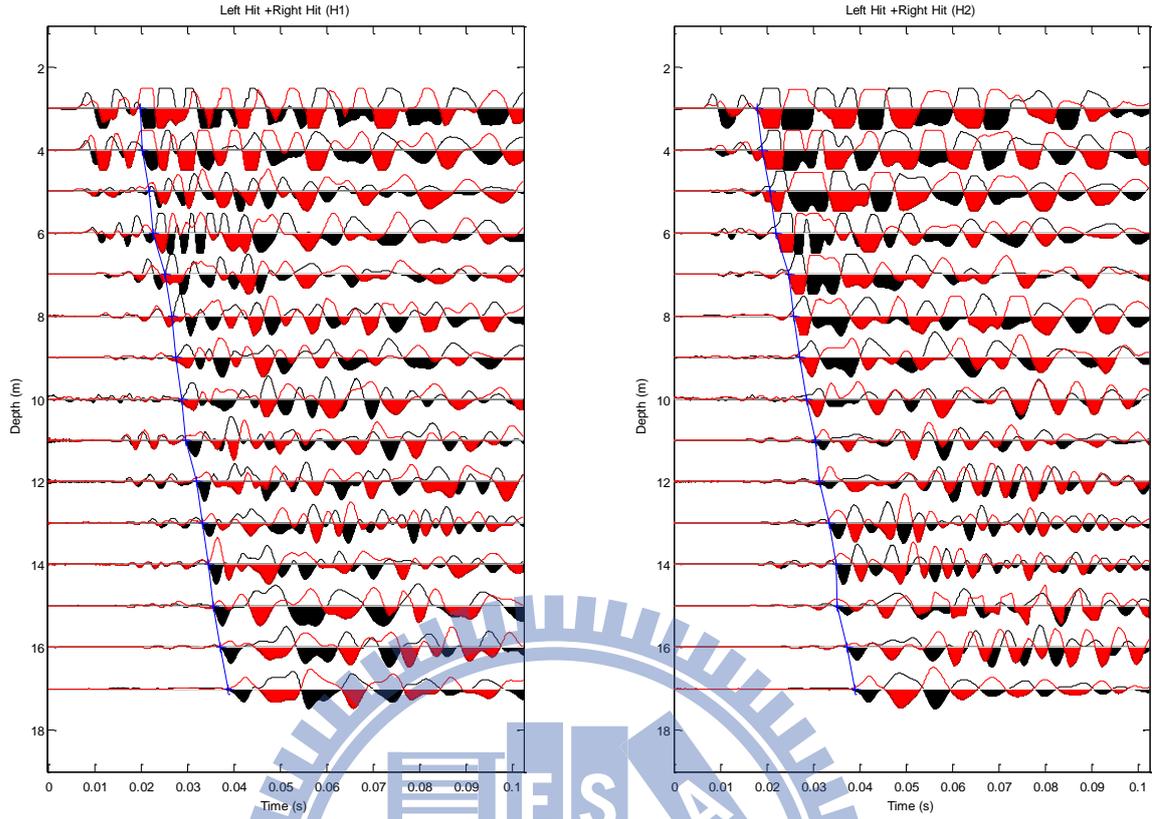


圖 1.3 下孔震測 Test-02 資料及走時軌跡

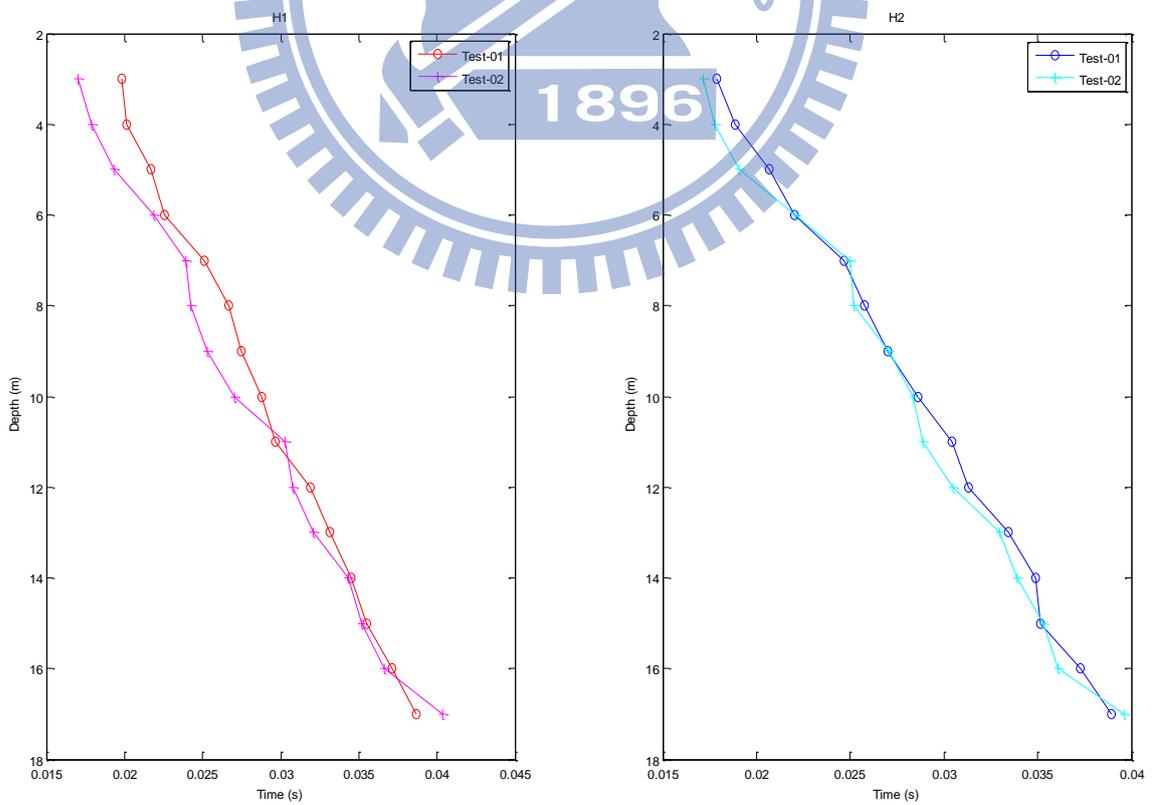
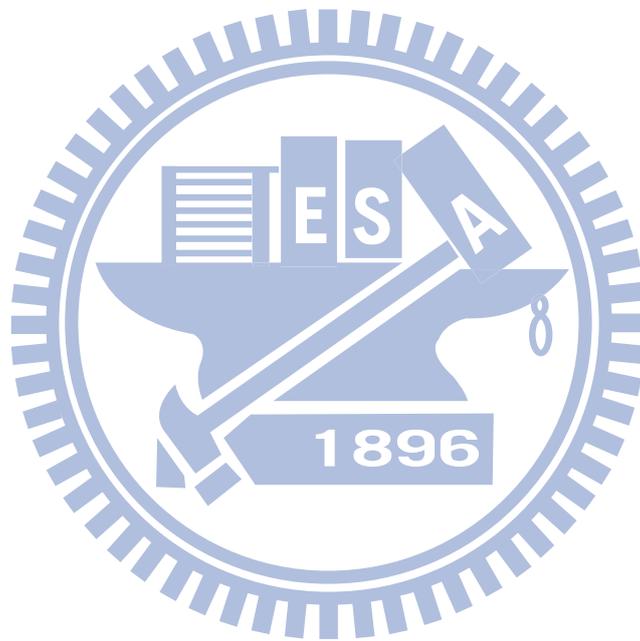


圖 1.4 Test-01、Test-02 走時軌跡比較

1.2 研究目的

1. 透過時間域、頻率域與時頻域觀察孔內震測波形之行為，並據以訂定自動化/半自動化波速分析流程。
2. 比較自動化/半自動化波速分析流程於不同孔內震測資料的適用性差異。



1.3 研究流程與論文架構

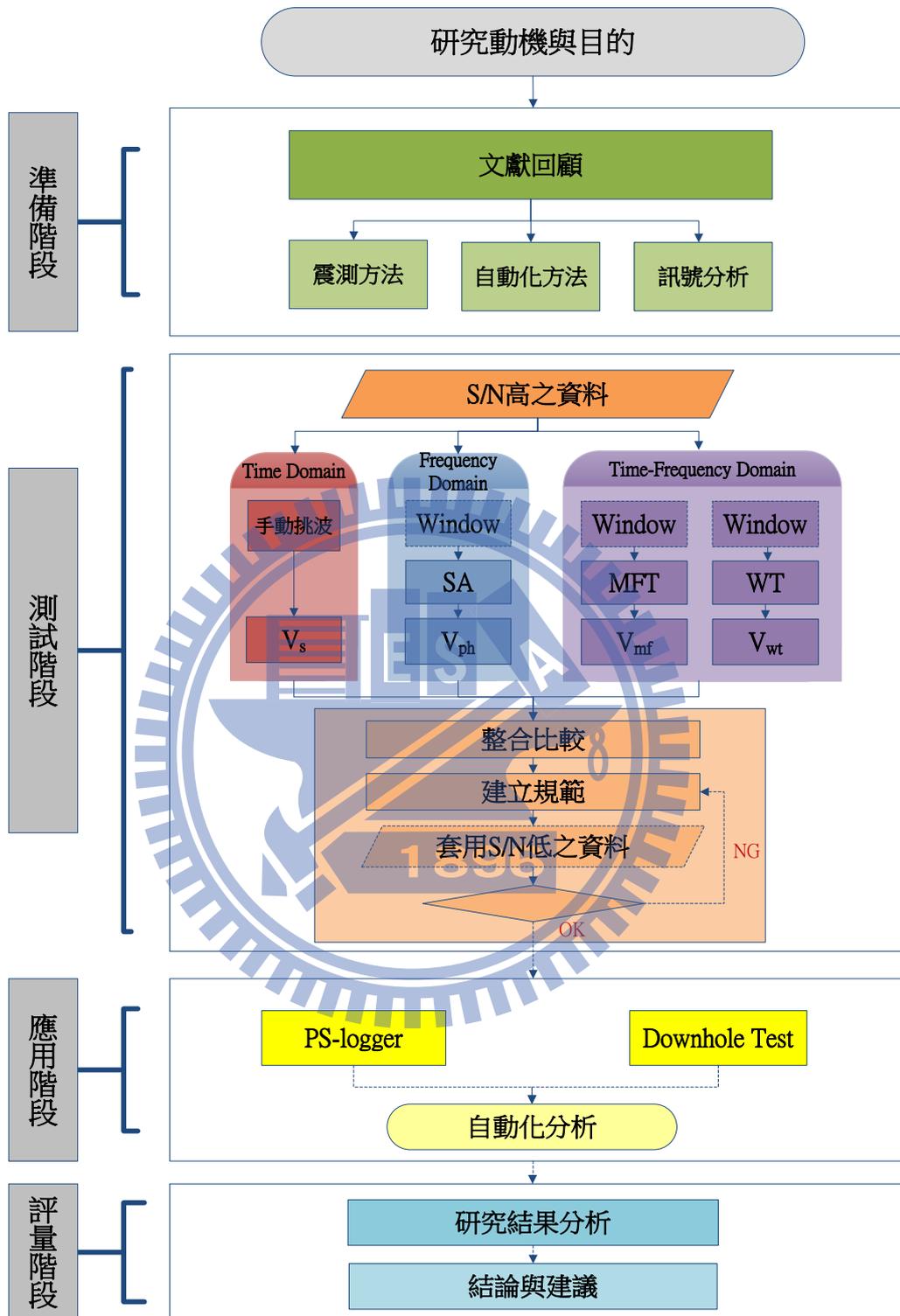


圖 1.5 研究流程圖

圖 1.5 為本研究之流程，分為五個階段：研究動機與目的、準備階段、試驗階段、應用階段及評量階段。這五大階段分別對應於本論文一至五章，論文架構如下：

第一章為本研究之背景、動機與目的，還有簡單的研究方法與流程介紹。

第二章即是準備階段，為相關研究的文獻回顧部分：

- (1) 介紹各種初達波分析式震測方法之原理及分析概念。
- (2) 回顧現有初達波自動化挑取方法及其優劣性。
- (3) 回顧時域、頻域及時—頻域常用的訊號分析方法。

第三章闡述本研究之方法，分為三大部分—分別說明以時域、頻域及時頻域定義計算波速的方法及步驟，並說明半自動化挑取程序，以及試驗規劃說明。

第四章則為試驗階段，包含了圖 1.5 的測試階段及應用階段：

- (1) 測試階段分別挑選出三組訊雜比較高及訊雜比較低之懸盪式震測資料作為初步測試，並從第三章的各個分析方法中規劃出半自動化挑波程序。
- (2) 應用階段則是為了驗證測試階段所規劃出的半自動化挑波程序，而將其分別應用在懸盪式及下孔式震測資料。

第五章為最後的評量階段，就本研究之試驗提出適用性評估及結果討論，並提出自動化分析之可行性及相關建議。



第二章 文獻回顧

本章是研究相關的文獻回顧，內容包含從現有的初達波分析式震測方法介紹，及目前採用人工手動挑波的走時分析方式，到各學者針對這種初達波分析提出的自動化方法，以及本研究在第三章希望利用其來輔助探討的各種訊號方式。

2.1 孔內震測方法

現今量測地層剪力波速的方法主要以利用震波之性質及原理進行試驗為主，故通稱為震測法；並可被分為破壞性之孔內震測法及非破壞性之地表震測法。孔內震測法根據震源與受波器相對位置的不同，可區分為跨孔式震測法(crosshole seismic)、上孔式震測(uphole seismic)、下孔式震測法(downhole seismic)以及懸盪式震測法(suspension PS logging)等，如圖 2.1。有鑽孔之震測法單價較高，但可以量測到比較精確之剪力波速度剖面。而非破壞性方法則如折射波震測法(refraction seismic)、反射波震測法(reflection seismic)、表面波震測法(surface seismic)等，如圖 2.2。

然而上述的震測方法，目前除了表面波震測法採用頻率域分析以外，其餘皆採用初達波分析，藉由手動挑選震波的初達時間 (first arrival time) 來進行波速的計算。本研究主要針對鑽孔內震測法作探討，故以下分別對下孔式震測法、跨孔式震測法、以及懸盪式震測法做簡單的概念性介紹。

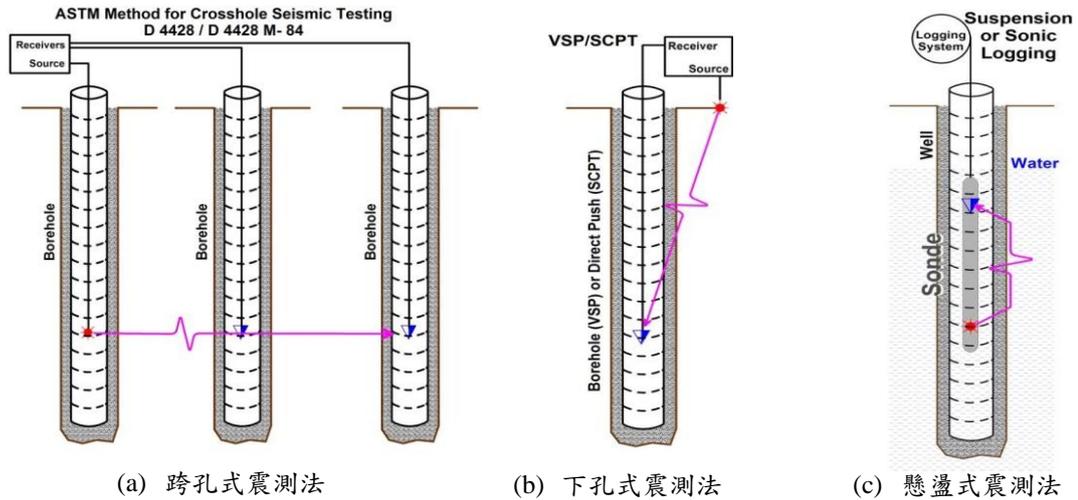


圖 2.1 孔內震測法示意圖(Seismic Shear Wave Studies)

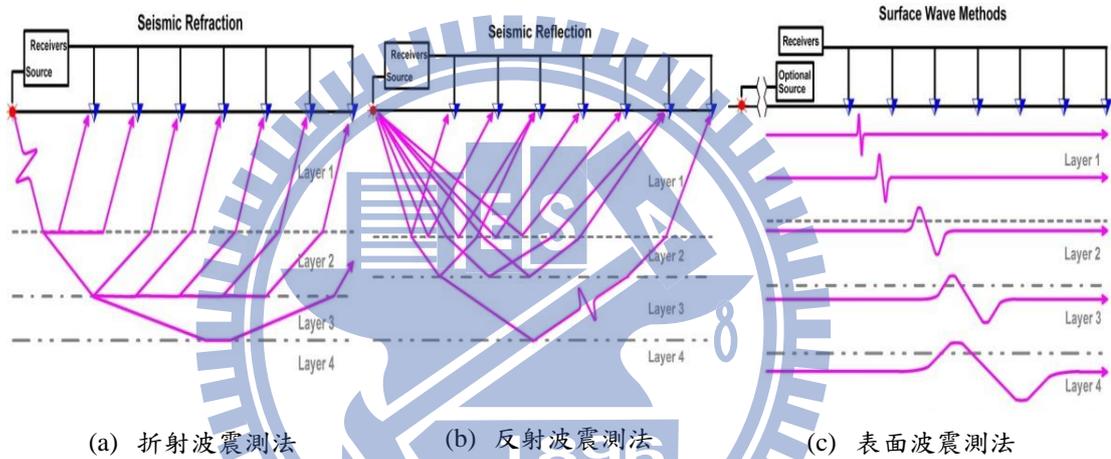


圖 2.2 非破壞性地表震測法示意圖(Seismic Shear Wave Studies)

2.1.1 下孔式震測法

下孔式震測法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，如圖 2.3 所示。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。震源位置通常距離孔口約 3m，以降低管波之影響。

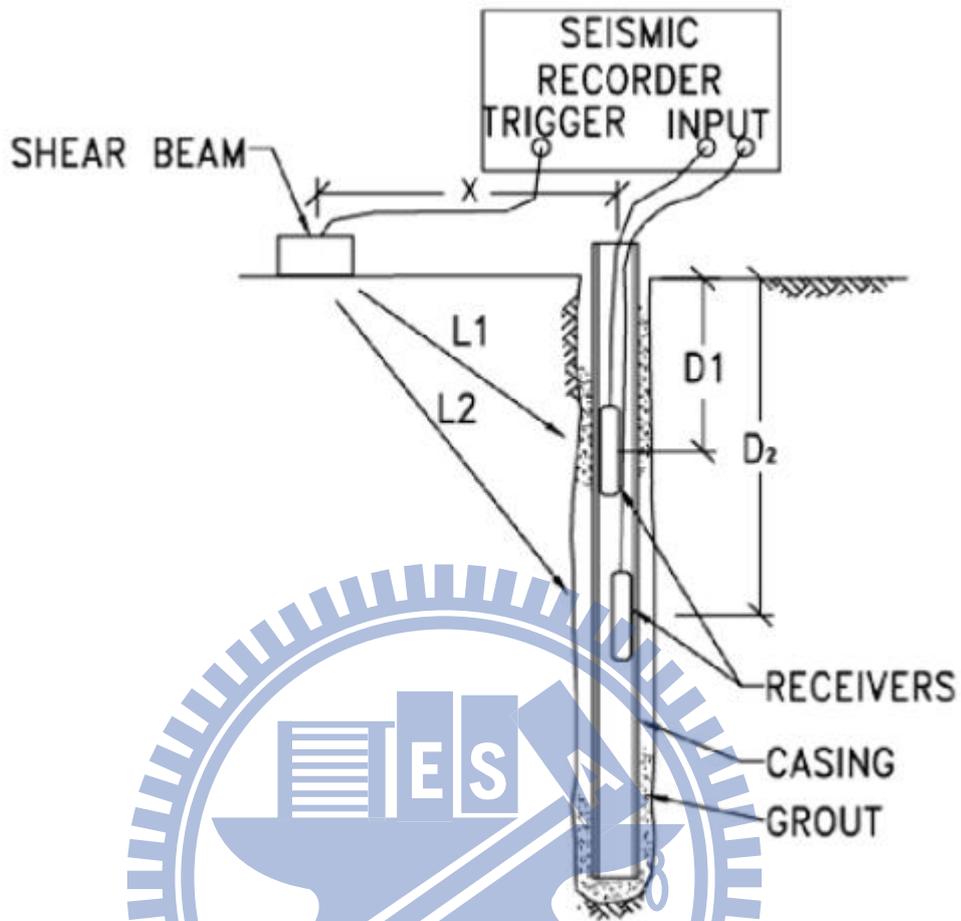


圖 2.3 下孔式震測法配置圖(D7400-08, 2008)

至於波傳距離與波傳時間的決定上，由於分析方法的不同，在時間與距離的取捨上也會有所差異，以下是下孔式震測法常用的幾種分析方法(Kim et al., 2004)；

(1) 直接法 (direct method)

以直接法計算剪力波速為目前應用最普遍的方式，傳統上乃先將波傳時間(t)與波傳距離(R)的關係轉換成波傳時間(t_c)與土層深度(D)的關係(如圖 2.4 所示)關係式如下：

$$t_c = D \frac{t}{R} \quad (2-1)$$

$$V_d = \frac{\Delta D}{\Delta t_c} \quad (2-2)$$

D：受波器深度； R：震源與受波器距離； t_c ：直接傳遞之波傳時間
 t ：量得之波傳時間 V_d 為各深度區間平均波速

由深度與波傳時間關係之走時曲線圖，依其變化取線性迴歸得一相連折線，求各直線段斜率之倒數，即為該相對土層之剪力波速值，如(2-2)式。

(2) 間距法 (interval method)

剪力波速值係以鑽孔中兩組受波器之波傳距離差與波傳時間相除而得(如圖 2.5 所示)，關係式如下：

$$V = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} \quad (2-3)$$

R_1 ：震源與上受波器之距離； R_2 ：震源與下受波器之距離；

t_1 、 t_2 ：震源至上、下受波器之波傳時間

由於是兩組受波器接收同一震源產生之震波，所以精度上較其他兩法要高，但土層變化時，將受波器間距與兩受波器間連繫桿件型式之影響。

(3) 擬間距法 (pseudo-interval method)

關係式同間距法，但僅有一組受波器， R_1 、 R_2 與 t_1 、 t_2 分別為不同次敲擊時之深度與波傳時間，以此法可得較多剖面之剪力波速值，但相較於間距法由於前後兩次敲擊能量未必相同，因此以此法得土層剪力波速顯得較具爭議。(Patel, 1981)

(4) 修正間距法 (modified-interval method)

施作方法同間距法，但假設現地為水平層狀地層，故震波在各分層會有不同的波傳速度(圖 2.6)，關係式如下：

$$T_{i,u} = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{L_{ij,u}}{V_j} = \frac{L_{i1,u}}{V_1} + \frac{L_{i2,u}}{V_2} + \dots + \frac{L_{i(i-1),u}}{V_{i-1}} \quad (2-4)$$

$$T_{i,l} = \sum_{j=1}^i \frac{L_{ij,l}}{V_j} = \frac{L_{i1,l}}{V_1} + \frac{L_{i2,l}}{V_2} + \dots + \frac{L_{ii,l}}{V_i} \quad (2-5)$$

$$T_{i,l} = DT_i + T_{i,u} \quad (2-6)$$

$$L_{ij,l} = \frac{R_{i,l}}{D_{i,l}} \times Z_j \quad (2-7)$$

$$V_i = \frac{L_{ii,l}}{T_{i,l} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{L_{ij,l}}{V_j}} \quad (2-8)$$

此法雖然比間距法多考慮了波傳路徑上有不同的分層速度，但卻假設為直線路徑。

(5) 逆推法 (inversion method)

逆推法是建立在修正間距法的基礎上，除了考慮到分層速度不同以外，更考慮到震波在水平層狀地層的傳遞路徑會遵守司乃爾定律 (Snell's law)，在不同介質下產生折射(圖 2.7)，關係式如下：

$$\frac{\sin \theta_{i1}}{V_1} = \frac{\sin \theta_{i2}}{V_2} = \dots = \frac{\sin \theta_{ij}}{V_j} = \dots = \frac{\sin \theta_{ii}}{V_i} \quad (2-9)$$

$$Z_1 \tan \theta_{i1} + \dots + Z_j \tan \theta_{ij} + \dots + Z_i \tan \theta_{ii} = S \quad (2-10)$$

$$L_{ij} = \frac{Z_j}{\cos \theta_{ij}} \quad (2-11)$$

只有最上層的波傳採用直線路徑，以下的地層則採用司乃爾定律折射，並利用迭代的方法對各層波速進行反算，直到反算前後速度誤差小於 0.01%。

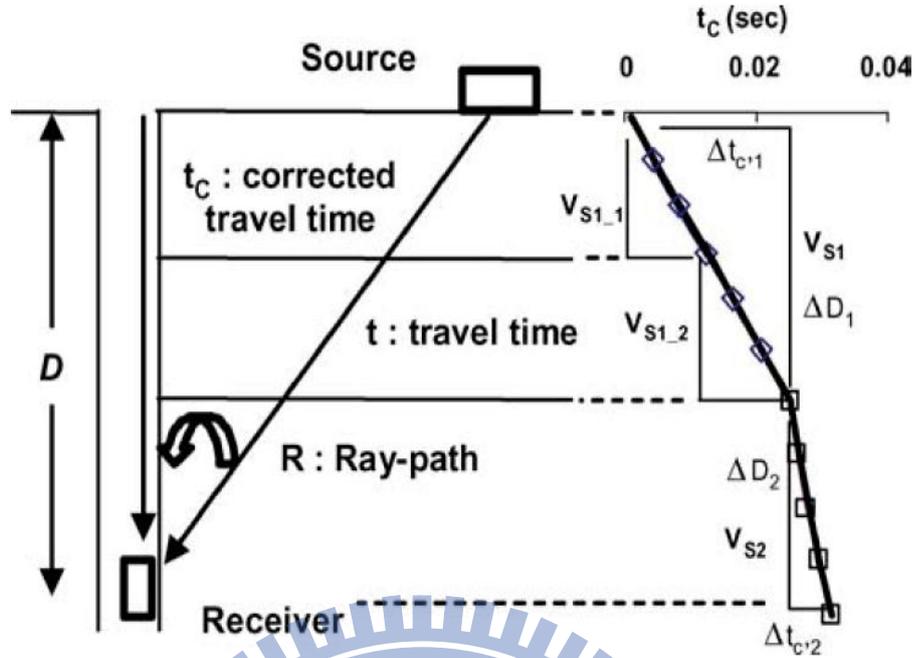


圖 2.4 直接法 (direct method) 示意圖 (Kim et al., 2004)

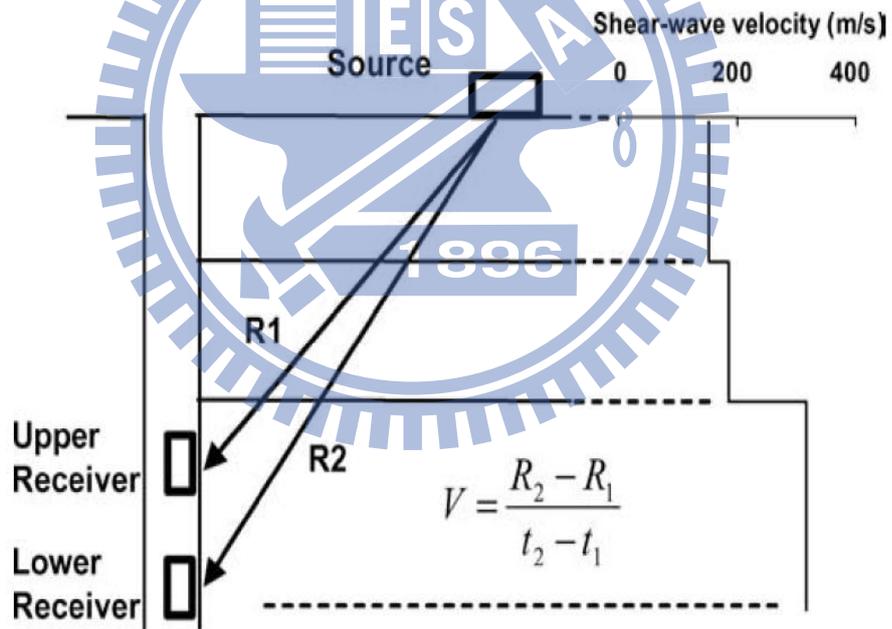


圖 2.5 間距法 (interval method) 示意圖 (Kim et al., 2004)

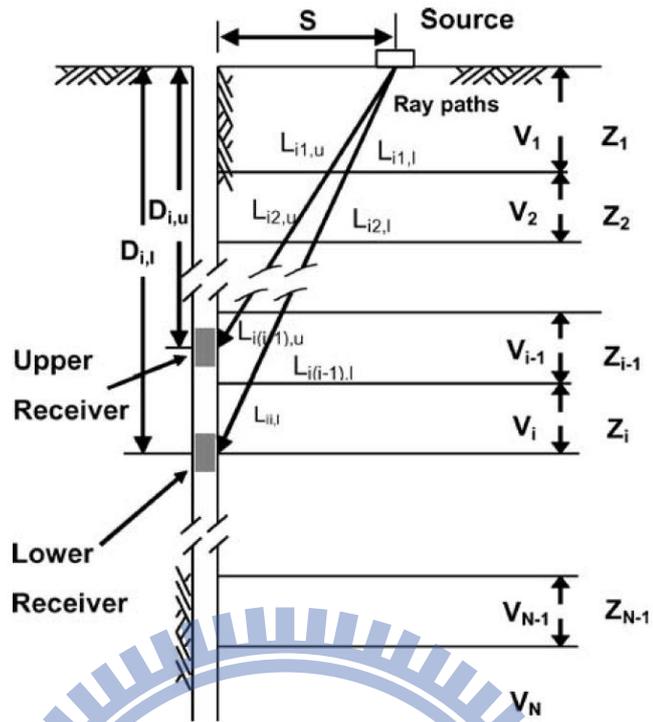


圖 2.6 修正間距法 (modified-interval method) 示意圖(Kim et al., 2004)

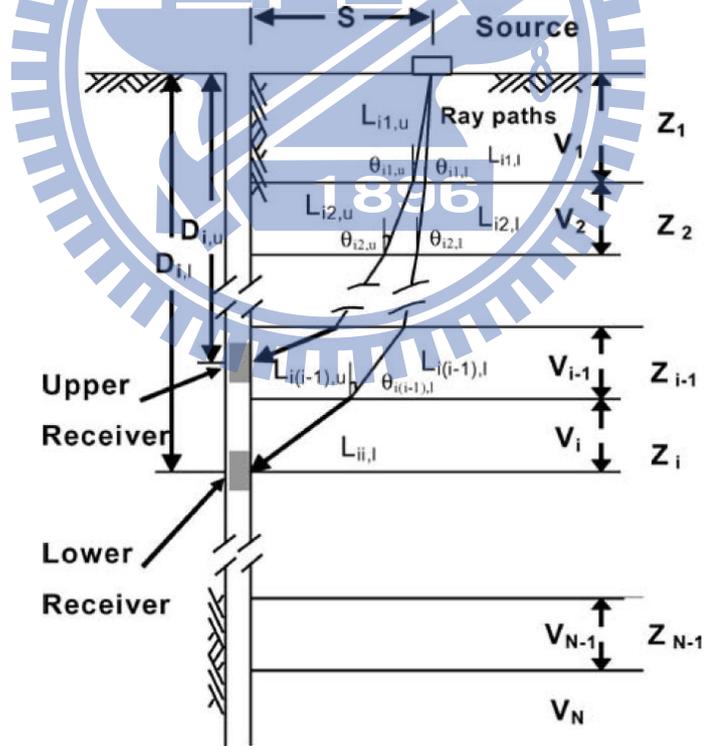


圖 2.7 逆推法 (inversion method) (Kim et al., 2004)

而下孔震測在施作時，通常會製造一左一右方向的水平敲擊，對受波器來說即是受到正反向的水平震波，由於剪力波的特性會使得正反向震波振幅對稱，故藉由這樣的敲擊方法幫助區別出剪力波初達時間，如圖 2.8。

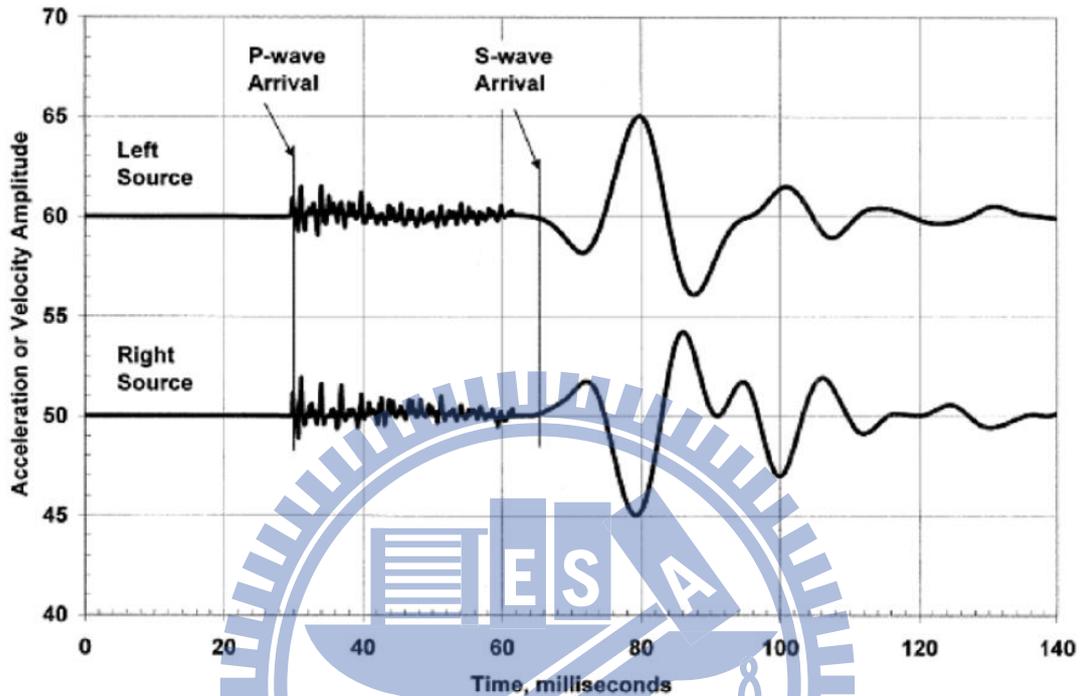


圖 2.8 下孔震測利用左敲、右敲輔助凸顯剪力波的對稱性(D7400-08, 2008)

2.1.2 跨孔式震測法

跨孔式震測法乃地球物理探勘於土層內部構造的應用之一，震源以及受波器皆配置於地表以下。且至少需要兩個垂直地表面的鑽孔，以三個鑽孔為最佳，在其中一個鑽孔設置震源，而剩下的鑽孔則設置受波器。根據 ASTM D4428/D4428M-07 (2004)之規範，受波器以及震源需保持平行，亦即兩者必須維持等深度(如圖 2.9 所示)，以接受震源所發出的壓力波和垂直向剪力波訊號，同時依據相鄰兩鑽孔之間距及波傳走時，計算兩鑽孔間土層之平均波傳速度。並藉由改變 0.5 或 1 公尺的垂直間距以探測鑽孔深度範圍內之土層之波速剖面。

跨孔之水平間距不宜過長，以避免受波器收到之初達波為折射波而非剪力波，例如在夾於兩高速地層中之低速層，便會因折射現象造成波傳以最短路徑通過高速層，而高估了低速層之速度。

Roblee et al. (1994)曾指出跨孔法相對其他震測法有以下優勢：

- (1) 只要震源和接收器的距離固定，量測的精度和深度無關，
- (2) 每次量測的結果不會互相干擾，可視為獨立的，
- (3) 可確認測孔間的土壤是未受擾動的，
- (4) 各種類型的波都會被量測到，
- (5) 可以變化接收路徑的角度，進行跨孔震測法。

除此之外，跨孔式震測法的一個特點是可以藉由分別移動震源及受波器的位置，進行孔間的斷層剖面速度影像化，見圖 2.10。

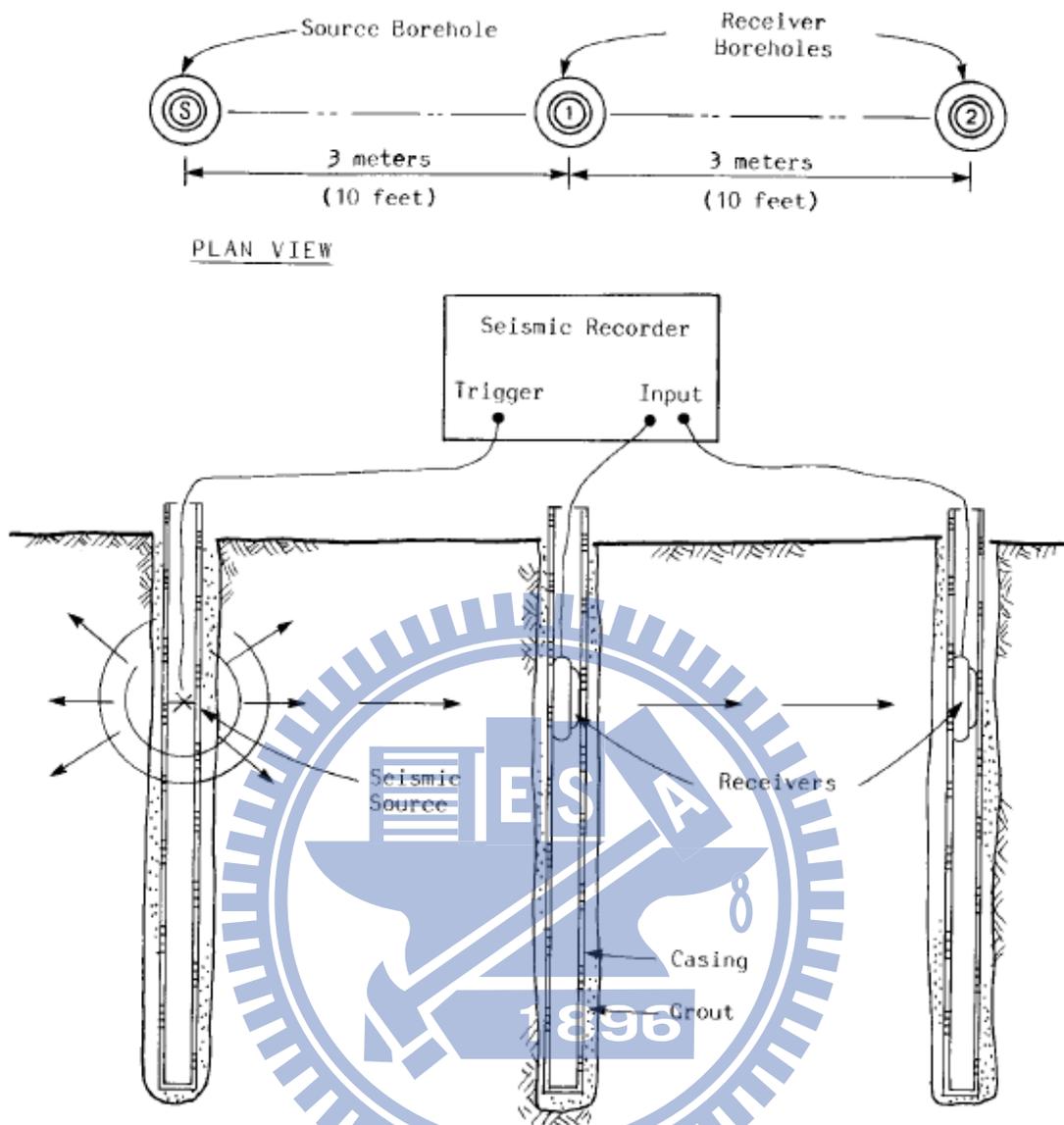


圖 2.9 跨孔式震測法配置圖(D4428/D4428M-07, 2004)

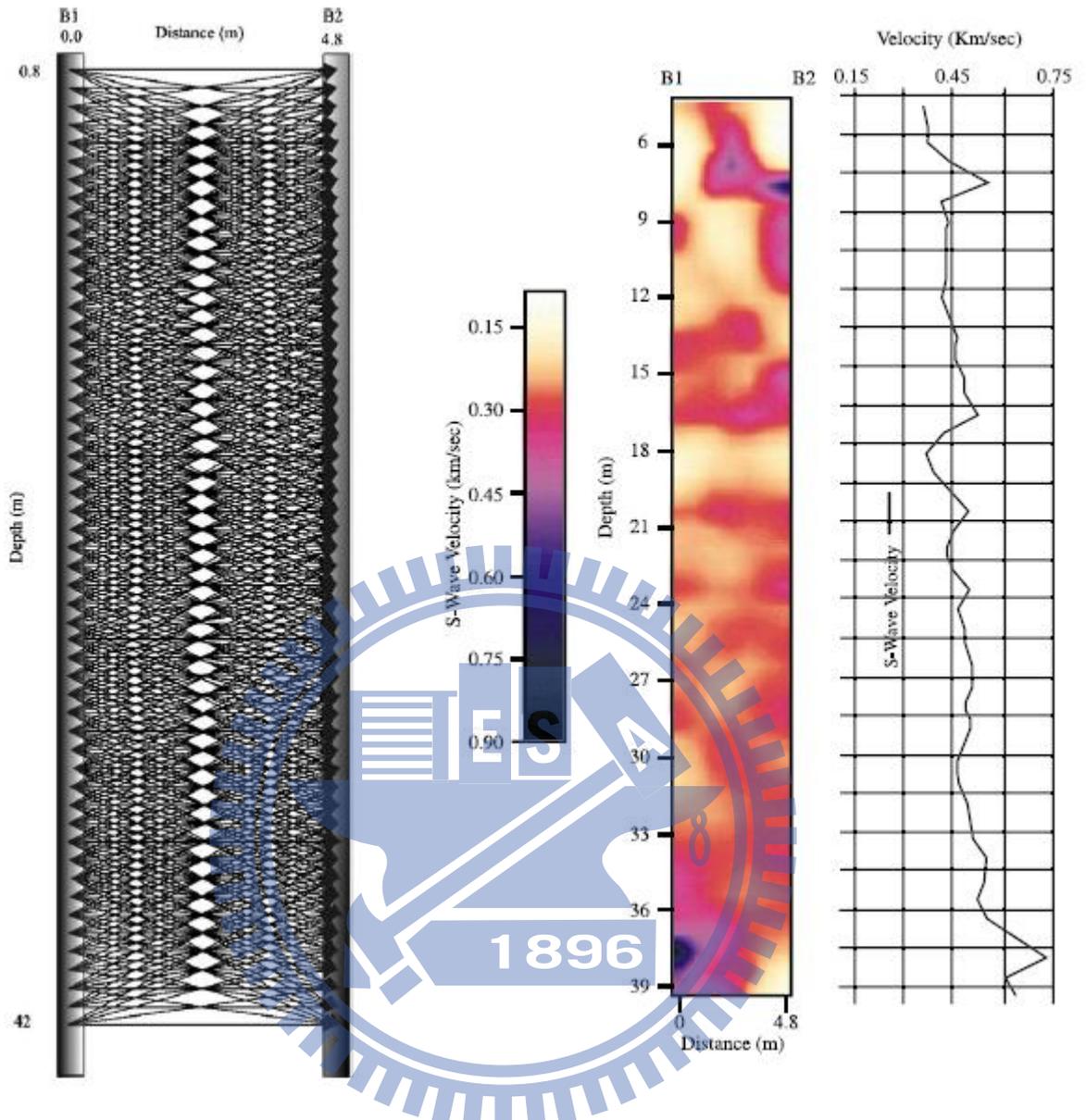


圖 2.10 利用跨孔式震測法施作斷層剖面速度影像方法(Angioni et al., 2003)

2.1.3 懸盪式震測法

上述之孔內震測方法基本上其震源與受波器為各自獨立的單元。而日本 OYO 公司所研發的懸盪式波速量測系統(suspension PS logger)，將震源與受波器結合為一體。震源與受波器間距離固定而不因深度不同而改變，且保持緊密相連，可作連續性之量測。因震源與受波器距離相近，震源能量不會因距離過大而消散不辨識；且不易受地層變化影響，深層量測時所得之訊號解析度較傳統量測方式清晰，準確性佳。(蔡璧嫻, 2007)

懸盪式波速量測系統之完整架構圖如圖 2.11 所示，包括控制監控裝置(suspension PS logger)、絞盤(winch)以及經由訊號傳輸電纜所連接、懸吊於固定支架上之探測管(suspension probe)。探測管由上而下可再分為放大器(head reducer)、上/下受波器(upper and lower receiver)、濾波軟管(filter tube)、震源(source)、震源驅動器(source driver)、及呆重(weight)等單元。

此探測管這種一體化的創新設計，可直接懸吊於孔內水中量測 P 波和 S 波速度，而不需將受波器緊靠於孔壁。兩組受波器的間距是 1 米，其可同時量測 P 波和 S 波的傳遞時間。又此種懸吊式受波器的構造幾乎和水的密度相等，故即使在水中亦可有效量測 S 波。而震源是使用間接振動型來產生 S 波，利用水當介質。它的原理如圖 2.12 所示是利用水平螺線線圈及擊槌在孔內液體中產生一壓力波，然後經過孔壁轉換成實體波採放射狀的傳播到岩體。當此實體波傳遞到每一個感應器所相對應之孔壁時，在孔內液體中先轉換成壓力波，再透過受波器接收訊號。

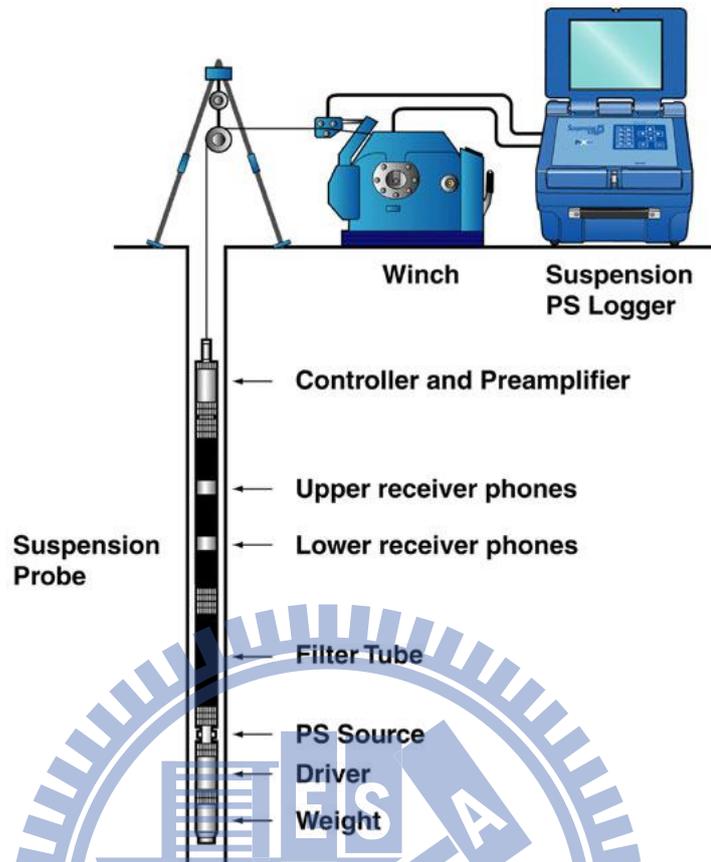


圖 2.11 懸盪式波速量測系統配置圖(OYO corporation)

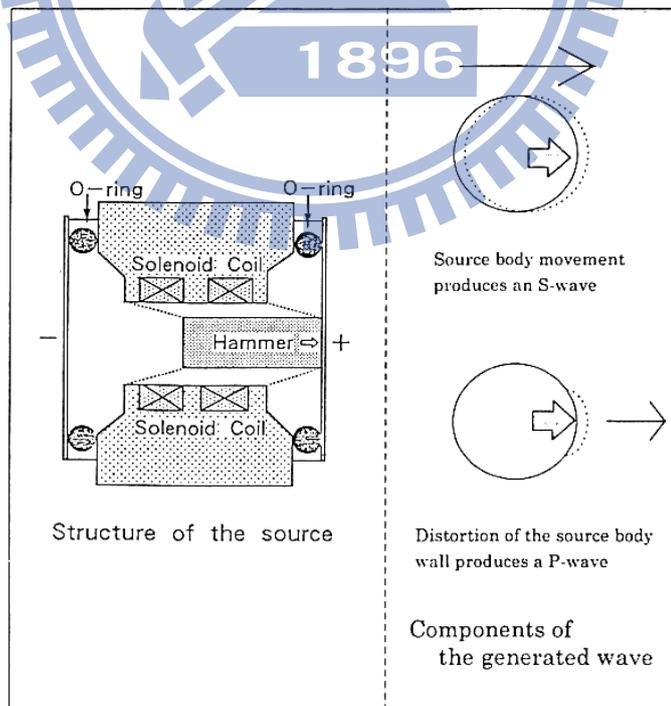


圖 2.12 震源原理示意圖(OYO suspension PS logger Manual)

由於上/下受波器與震源距離不同，在不同時間接受到震波訊號，此訊號經由探測管上端的放大器放大後回傳於控制監控裝置中，記錄的訊號經由走時分析，判讀上/下受波器收錄震波之時間間隔，即可計算上/下受波器間所在之土層的波速度資料。

由於壓力波與剪力波組成之頻率範圍不同，每一組受波器由壓電式地震檢波器(hydrophone)以及兩個磁電式地震檢波器(geophone)組成，其中壓電式地震檢波器收錄壓力波，另兩組磁電式地震檢波器則以反向配置，其目地在收錄剪力波並檢核其正確性，同時亦做為剪力波初達位置之研判使用。

將訊號依時間序列可繪成如圖 2.13 之訊號波形，橫座標為時間軸（單位為毫秒 ms）。下接收器(H2、/H2)距離震源較近，較早接收到訊號，上接收器(H1、/H1)接收到訊號時間較慢；只要判讀出受波器記錄之初達時間，上下接收器之初達時間差即為震波經過上下接收器間土層之時間間隔，進而計算波速。

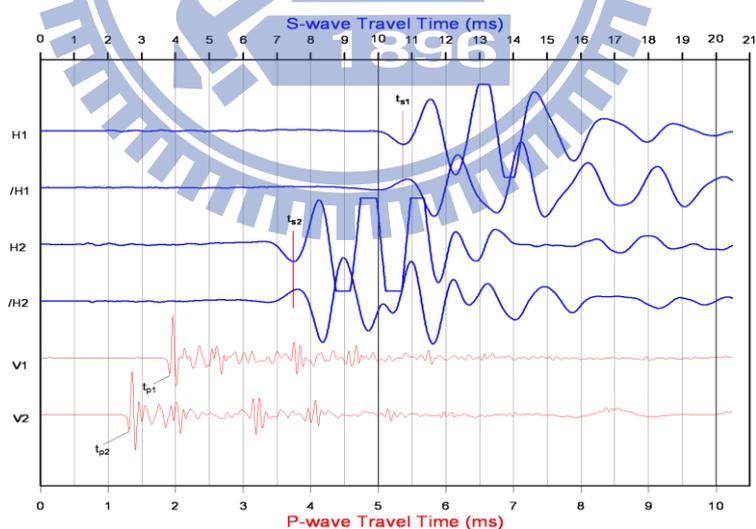


圖 2.13 懸盪式震測法訊號波形(國家地震工程研究中心)

懸盪式波速量測系統之基本理念為利用遠近受波器間之時間差以求取該段距離之地層波速，若其中一接收器之訊號太差而無法反應初達波位置，可藉由震源到另一接收器之初達時間做為依據，協助判定波速。且一般會

藉由深度序列資料加以輔助判讀初達波。所得的結果也可利用上述方法進行交叉驗證以定出真實波速度值。

2.2 走時分析方法與評析

以上所提的震測方法皆屬於走時分析的方式，也是所謂初達波式分析方法。需先經人為判定其初達波到時，才能進一步計算剪力波速度，而初達波是一種特殊類型波，具有起跳時間最早、能量較強的特性；在震波資料處理上，精確且有效率地挑取初達時間對於其後續處理有著重要的意義。然而，當鑽孔條件不良、鑽井井壁與套管間存在縫隙、受到特定管波干擾、或是任何可能影響剪力波訊號的因素發生，若擷取到剪力波訊號雜亂或受到干擾而不易判別，無法精準的定出初達波到時，則影響剪力波速度結果的正確性。(蔡璧孺, 2007)

因此，初達時間的判釋結果影響計算出的波傳速度的正確性。為獲得準確的初達波位置，有下列幾個要點：

- (1) 判別初達波到達位置需觀察同一受波器之正向剪力波及反向剪力波訊號是否確實反向對稱。
- (2) 判別初達波到達位置需確認其受波頻率屬地層材料之剪力波無誤。
- (3) 近地表地層處波形常受到管波(tube wave)影響，在真實初達波到達之前已有管波序列存在，造成該處之波速分析易產生誤判。此時可借助較深處之波速分析結果加以推算淺層處之初達波位置，再自估算之初達波之後找尋對應波序。
- (4) 上/下受波器之剪力波資料有主控頻率衰變現象，並且兩受波器之衰變情形彼此相異，故以上/下受波器對應之波序決定波速時應儘量找尋初達位置附近者。

當波形訊號內容符合下列條件時，可被認定為品質良好之資料，所得之剪力波速度也較可信賴：

- (1) 剪力波形良好，無雜訊干擾。
- (2) 同一受波器之正向剪力波及反向剪力波訊號確實反向對稱。
- (3) 初達波明確可辨。

目前的走時分析大多由人工手動挑波為主，雖說有上述的挑波概念可以參考，但也承如上述所言，實際資料常受到雜訊干擾，使得挑波不易，相較之下，挑波的經驗成為關鍵，每個人所挑的初達時間也不盡相同，常見問題如下：

Stokoe 等學者(Hoar and Stokoe, 1981; Stokoe and Hoar, 1978; Stokoe and Woods, 1972)利用跨孔式震測法量測剪力波速，其文獻顯示初達時間分析方式的差異會產生不同的剪力波速，如圖 2.14。在相同的間距下使用不同的選點方式計算剪力波速，將波速正規化之結果比較，顯示選點方式的差異就會造成求得的波速不同。(曾志瑋, 2009)

Interval Distance (ft.)	Normalized Interval Shear Wave Velocity, v_g / v_{SIA}^*			
	Reference Point on Waveform			
	Initial Arrival	First Trough	First Cross-over Point	First Peak
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
7.4	1.00	0.95	0.92	0.92
15.7	1.00	0.94	0.92	0.87
23.7	0.99	0.95	0.93	0.88
31.9	1.00	0.96	0.92	0.88
AVERAGE =	1.00	0.95	0.92	0.89

* v_{SIA} = average of all initial-arrival interval shear wave velocities

圖 2.14 不同選點方式的正規化波速比較(Stokoe and Hoar, 1978)

而 Sánchez-Salineró (1987)的研究中也發現，在二維的模型中，在 $d/\lambda < 2$ (d ：震源至接收處的距離； λ ：波長)、無阻尼、柏松比為 0.25 的條件

下，會產生近場效應，如圖 2.15，即為同平面縱向運動的 P 波受到同平面橫向運動 SV 波干擾的情形；圖 2.16 則是同平面橫向運動 SV 波受到同平面縱向運動 P 波干擾的情形。

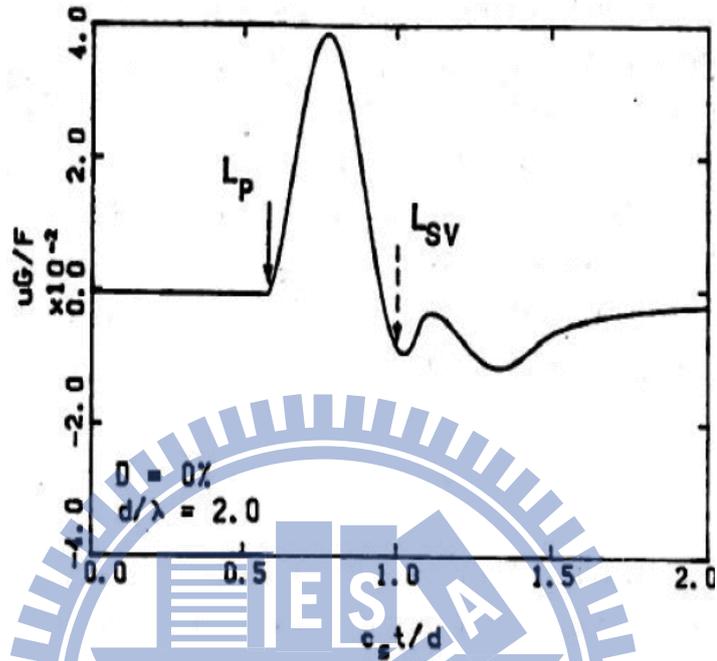


圖 2.15 P 波中 SV 波的近場效應(Sánchez-Salineró, 1987)

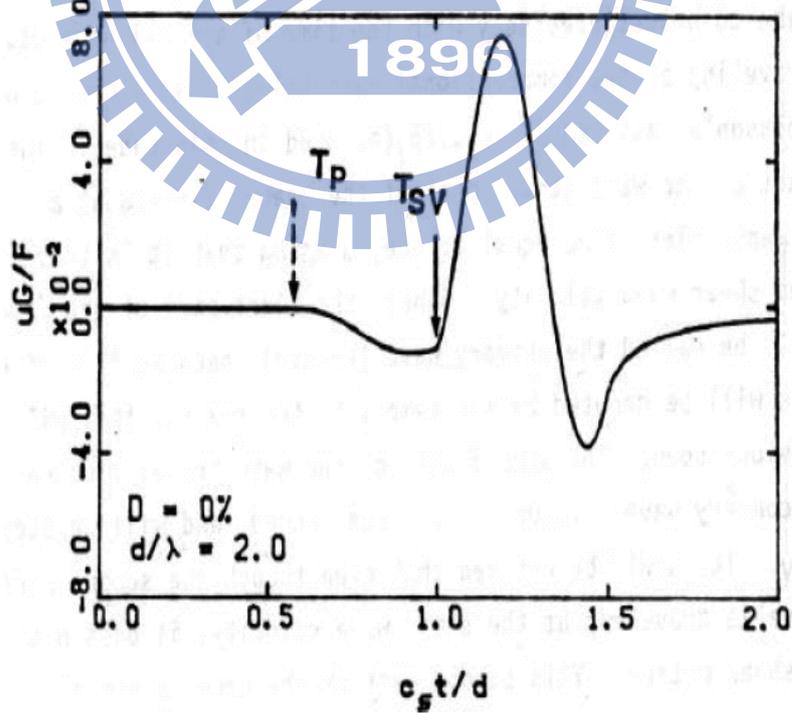


圖 2.16 SV 波中 P 波的近場效應(Sánchez-Salineró, 1987)

以上兩種情形皆是手動挑波方法常見的問題，使得挑波準則不一。除此之外，通常震波資料分析工作量大，以三向度的受波器來說，上百筆至上千筆的資料皆有可能，如此，初達波的挑取即變成一項費時、費工、十分繁雜的工作。因此也一直有學者想發展出一套自動化的挑波方法，不論在地震預警、或是震測分析上都有學者陸續提出新方法。

2.3 自動挑波方法與評析

如上小節所述，不論是在地震警示、或是震測分析上都有學者陸續提出新的自動挑初達波方法，從最早開始也最普遍應用的 STA/LTA 方法、利用統計模型準則的 AIC 方法、或用類神經網路訓練判讀波相到時、以及近年來發展出的能量比值法及其修正方法。但是目前為止並沒有一種單一的方法可以辨識所有的震相，而且每種方法都有一定的侷限性和其應用範圍，必須用綜合分析的方式才能在一定程度上彌補其缺點，利用多種方法聯合辨識，綜合其辨識結果，才能得出各個震相比較精確的到時。

2.3.1 STA/LTA 方法

STA/LTA 方法是目前地震預警系統中常用的 P 波判斷方法之一，由於地震訊號和背景雜訊在震幅特徵和頻率組成有很大不同，地震訊號特徵大多有明顯初達波、高頻且衰減快；而背景雜訊則可由低振幅、低頻的特徵來區分，故藉由定義 STA/LTA 的特徵函數(CF)，來表示所提取的訊號與背景雜訊的特徵不同來自動判讀波相。其中 STA 即為「短時窗訊號平均值」，可衡量地震訊號的變化，用來監測地震，變化較快；而 LTA 為「長時窗訊號平均值」，用來衡量背景雜訊，變化較緩慢。當地震波到達時，STA/LTA 比值會遽變，當超過設定的觸發門檻值(THR)時，則辨識為 P 波到達。其中，特徵函數的選取直接影響了波相挑取的精度，選取方法有很多種，包括 Ambuter and Solomon (1974)、Anderson (1978)、McEvelly and Majer (1982) 等利用地震紀錄的振幅絕對值 $|x_i|$ 作為特徵函數；Swindell and Snell (1977)

則利用振幅的平方值 x^2 作為特徵函數；Earle and Shearer (1994)利用 $E(t) = \sqrt{x(t)^2 + \bar{x}(t)^2}$ 作為特徵函數，其中 $x(t)$ 是地震紀錄， $\bar{x}(t)$ 是其 Hilbert 轉換；而 Allen (1978)則是利用 $E(t) = x(t)^2 + x'(t)^2 + C_2$ 作為特徵函數，其中 $x(t)$ 為地震訊號， $x'(t)$ 則為其一階微分。藉由這些特徵函數可以在時間序列的移動計算 STA 和 LTA，並根據場址的背景雜訊來調整對雜訊的敏感度。

STA/LTA 具體算法如下：

$$STA(i) = \frac{1}{ns} \sum_{j=i}^{i-ns} CF_j \quad (2-12)$$

$$LTA(i) = \frac{1}{nl} \sum_{j=i}^{i-nl} CF_j \quad (2-13)$$

$$STA/LTA(i) = \frac{STA(i)}{LTA(i)} \quad (2-14)$$

上式中， $STA(i)$ 和 $LTA(i)$ 分別代表在 i 時刻的短時窗訊號平均值和長時窗訊號平均值； CF 為在 i 時刻的特徵函數取值； ns 及 nl 分別為短時窗和長時窗內的資料點數，如圖 2.17。

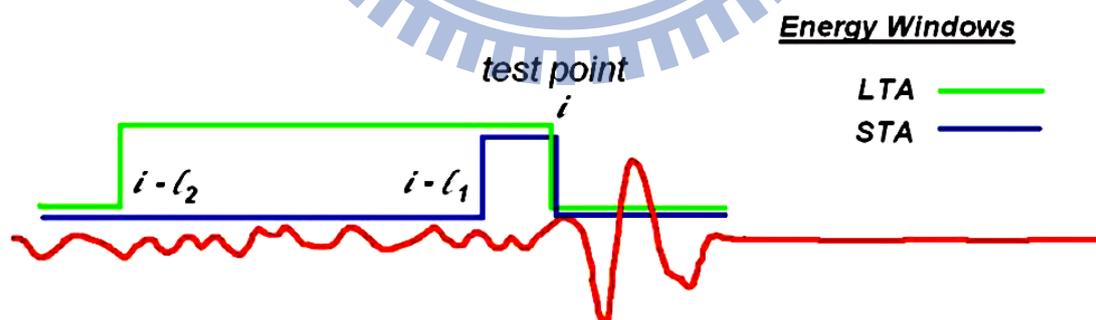


圖 2.17 STA/LTA 方法示意圖(Han et al., 2010)

此法的優點是計算方便、費時短，適合即時處理；然而也存在一些缺點，當訊雜比較低、或者初達波不明顯時判讀效果不好。例如，如果在 P 波初達前存在一些脈衝雜訊及訊號異常跳動引起的振動，STA 值將變大後又迅

速變小，因此 STA/LTA 比值將超過觸發門檻值，又突然降下，因而造成誤判。除此之外，短時窗長度相對於長時窗長度越小，STA/LTA 判讀敏感度越高，設置門檻值(THR)應該大一些；短時窗長度相對於長時窗長度越大，則敏感度下降，設置門檻值(THR)則應小一些。因此如何選取 STA、LTA、THR 無疑對判讀初達波精度有重要影響。

2.3.2 AIC 方法

AIC (Akaike's Information Criterion)為赤池資訊準則的縮寫，是一種衡量統計模型擬合優良性的標準，由日本統計學家赤池弘次(Akaike, H.)創立與發展。赤池資訊準則建立在熵(Entropy)的概念基礎上，可以權衡所估計模型的複雜度和此模型擬合數據的優良性。(Akaike, 1974)

而 AIC 在震相辨識的應用上，即是求解背景雜訊及地震訊號最佳劃分點的過程，此點與 AIC 曲線極小值點相對應，故 AIC 曲線的極小值即為震相到時點，如圖 2.18。

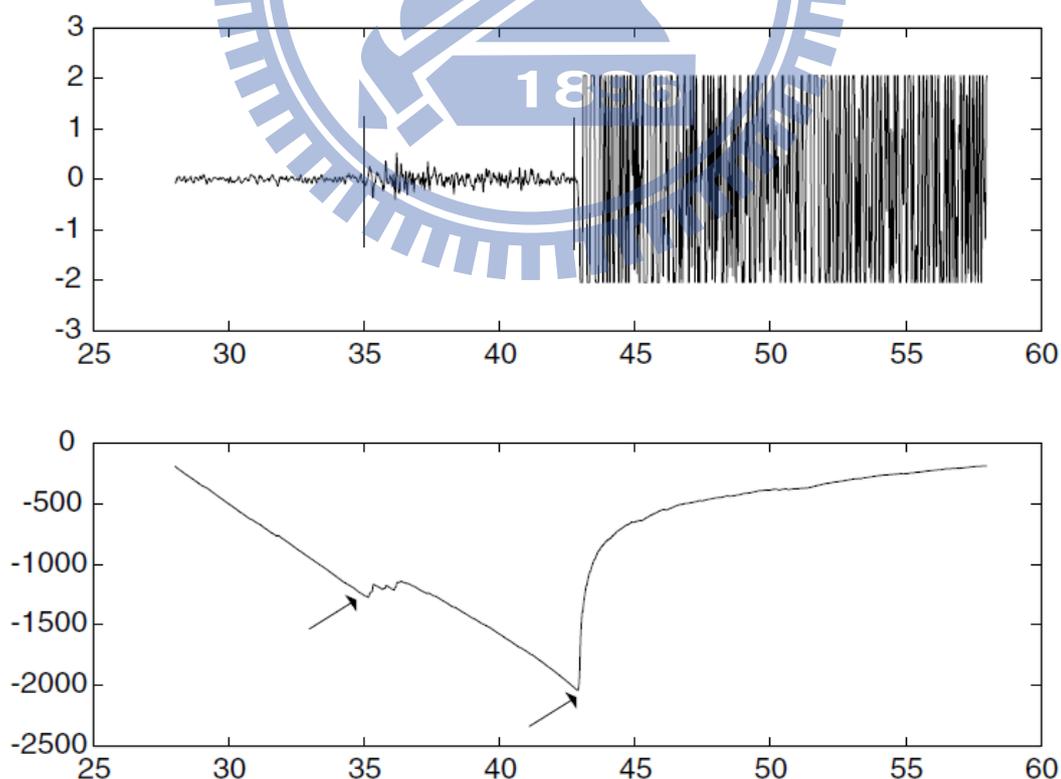


圖 2.18 AIC 方法判讀兩種波相到時示意圖(Zhang et al., 2003)

常用的 AIC 方法有：AR-AIC 方法、基於類神經網路的 AIC 方法、及基於小波轉換的 AIC 方法等。AIC 一般計算式如下：

$$AIC = 2k - 2 \ln L \quad (2-15)$$

k 是模型參數的數量， L 是模型的最大概似函數。

AR-AIC 方法(Leonard, 2000; Leonard and Kennett, 1999; Sleeman and van Eck, 1999)是先假設可以把地震紀錄分成兩個平穩過程，在每個部分分別建立自回歸模型，這兩個 AR 模型是完全不同的，即一個只包含背景雜訊而另一個只包含地震訊號。當 AIC 取最小值時，AR 模型取最優的階數，此時 AR 模型與地震紀錄這個時間序列最相符，也就是雜訊與地震訊號的最優劃分點，即為波相到時點，計算式如下：

$$AIC(k) = -(k - 1) \log V_F^2 - (n - k + 1) \log V_B^2 + 2(m_F + m_B) \quad (2-16)$$

V_F^2 為雜訊模型的變異數； V_B^2 為訊號模型的變異數； m_F 為雜訊 AR 模型係數的個數， m_B 為訊號 AR 模型係數的個數。以上做法是假設地震紀錄中的背景雜訊和地震訊號是平穩的，而實際是非平穩的，所以對於低訊雜比且初達波較隱沒的地震訊號，所估計的初達時間誤差較大。此外兩端的 AR 模型係數還必須用試誤法(try and error)才能決定，相當麻煩。

而 Maeda (1985)提出了不同於 AR-AIC 算法，其做法是直接從地震記錄圖中計算 AIC 值，而不取 AR 係數。其計算式為：

$$AIC(k) = k \log(\text{Variance}(x[1, k])) + (n - k + 1) \log(\text{Variance}(x[k + 1, n])) \quad (2-17)$$

然後在選定的時窗內對 k 逐點搜索，AIC 極小值的點即為 P 波到時點。但是對於訊雜比低時且初達波隱沒的訊號也是表現不佳，除此之外，AIC 方法如何能挑選到合理的初達時間點受到時窗的選取影響很大。

Zhang (2001)則採用 Maeda (1985)的計算公式，分別結合了多層感知器類神經網路(Multilayer Perceptron Neural Network)，成為 MLP-AIC 方法、以及

結合小波轉換 Zhang et al. (2003)的 W-AIC 方法來進行波相辨識，藉此改進受時窗選取影響的問題。但是這些方法都只能針對 P 波震進行辨識，還不能用於 S 波震相辨識。

2.3.3 類神經網路

然而不論是何種地震研究，精確的判讀出地震波的到時永遠是最基礎、也是最耗時的工作之一。傳統上利用電腦判讀地震波到時的方法有許多種，其中最廣為流傳的是所謂 STA/LTA 運算程序(Allen, 1978; Baer and Kradolfer, 1987)，即 2.3.1 所述。此運算程序根據地震儀的特徵週期來設計其長、短時窗的時間長度，因此用於傳統窄頻地震儀（如長週期或短週期地震儀）所得之地震記錄波形時，可以得到非常好的結果。然而若應用於寬頻地震波形資料時，卻有誤判的可能(Zhao and Takano, 1999)。由於寬頻地震波形記錄的頻率範圍較寬，因此傳統的 STA/LTA 運算程序無法找出一個適當的長、短時窗的時間長度，藉以判斷地震波的到時。因此，發展一個適當的運算程序，能夠從寬頻地震波形資料中讀取正確的到時，成為一項必要的工作。

為了達到上述目的，日本東京大學的研究人員發展了一套類神經網路的寬頻地震資料之波相到時判讀程序(Zhao and Takano, 1999)。整個判斷程序的核心是由倒傳遞類神經網路（Backpropagation Neural Networks, BPNNs）所組成，而這種類似的波相到時判讀器在過去也曾應用於短週期地震資料(Dai and MacBeth, 1995; Murat and Rudman, 1992; Wang and Teng, 1995)，並且相當成功。但用於寬頻地震資料方面，則必須加以修改。

而這個程序是對同一組輸入信號，同時設置長、中、短三個時間長度不同的波相到時判斷器，希望同時利用短時窗能準確決定波相到達時間之特性及長時窗能準確判斷是否有波相到達的優點。並同時利用數組判斷標準來加以檢視，再將數個判斷結果以一個並聯判斷器連接，在最少誤判的情況下，藉以決定是否有地震波相到達，及其正確的到達時間，見圖 2.19、

圖 2.20。然而該研究亦指出，此種類神經網路的判讀程序其成功關鍵在於適當的學習過程，特別是針對資料的特性，應有不同數目的判斷標準及相關的參數，而這些數目及參數的設定則必須經由實驗得到，並無一定的規定，故對於不同地區的寬頻地震資料會有不同的參數結果。

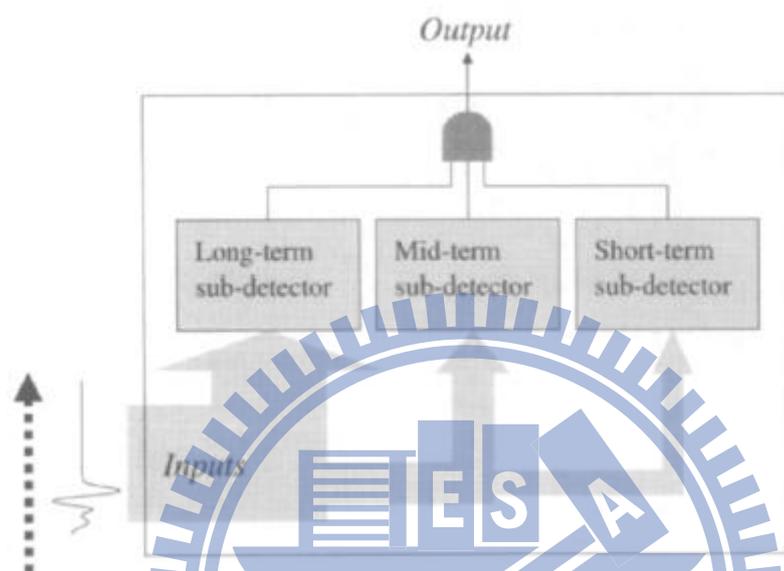


圖 2.19 長、中、短三個時窗判斷器，並以一並聯判斷器取其交集判斷 (Zhao and Takano, 1999)

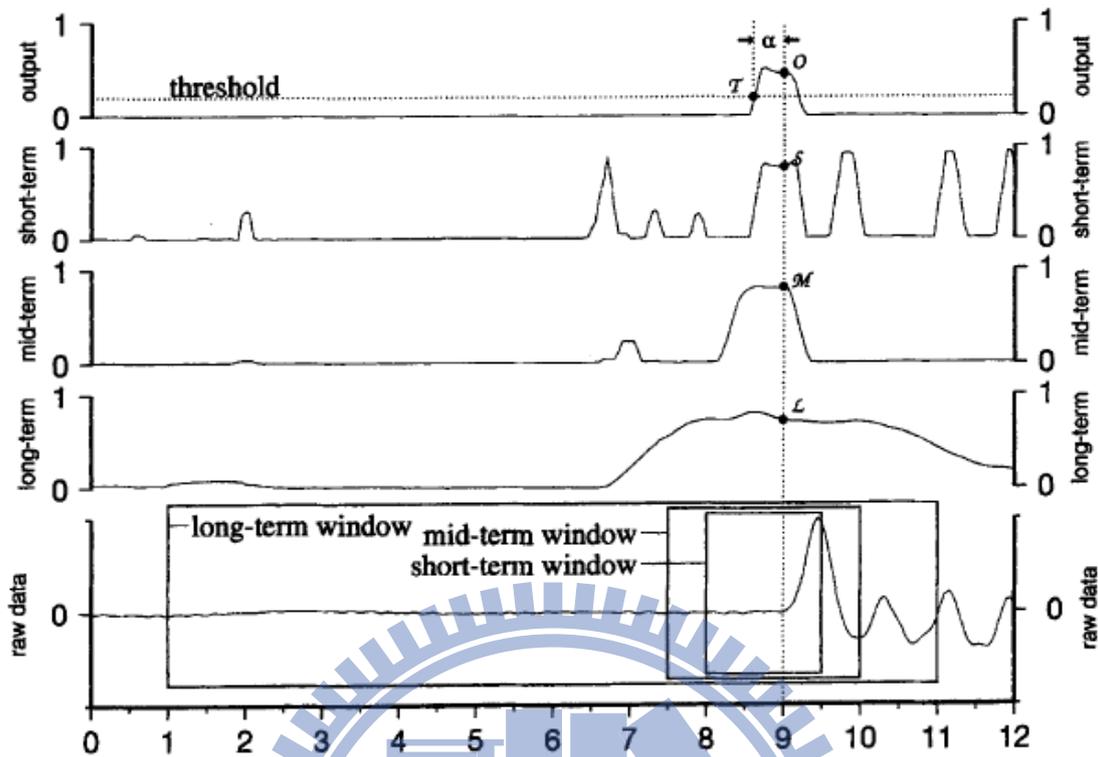


圖 2.20 長、中、短三個時窗判斷器示意圖(Zhao and Takano, 1999)

而高弘 (2001)也嘗試利用此法,希望發展一套適用於台灣地區寬頻地震資料的類神經網路波相到時判讀程序,並將這套程序實際應用於現有的 BATS(Broadband Array in Taiwan for Seismology)寬頻地震資料,驗證其未來全面使用的可行性。但究其結果卻不盡理想,因此提出以下結論:

- (1) 類神經網路技術確實能達到判別地震波相的目的,但是利用單一時窗的判讀器則會產生許多誤判的情形。這個情況可以長、中、短三個時窗同時判讀後取其交集而獲得顯著改進。
- (2) 類神經網路波相到時判讀器必須經過相當程度的訓練,而訓練資料的準備及其是否具有足夠的資訊提供類神經網路學習,以便能於實際應用時達到預期的表現,則是這個技術是否成功的關鍵之一,必須特別加以注意。
- (3) 將受過相當訓練的類神經網路波相到時判讀器應用於 BATS 所紀錄到的寬頻地震波形,可以得到滿意的結果。但因類神經網路本身的計算較

為複雜，不利於用來處理即時資料，因此這部分的應用技術仍有待突破。
(高弘, 2001)

2.3.4 能量比值法

在地震紀錄上，初達波是一個很特殊類型的波，具有跳起時間最早，能量強的特性；而在初達時間點之前的地震有效訊號為零，存在的只是雜訊，而在它之後是非常重要的地震訊號。因此初達時間點前後的能量特徵有非常大的差異，故 Coppens (1985)提出了能量比值法(Energy Ratio)，其定義為一個週期內的訊號能量與總時窗能量的比值，即：

$$R(\tau) = \frac{\int_{r-L}^r x^2(t)dt}{\int_0^r x^2(t)dt} \quad (2-18)$$

式中， $R(\tau)$ 為能量比值函數， $x(t)$ 為記錄訊號， L 為視週期的長度。離散後的公式為：

$$A_i = \frac{\sum_{t=T_0}^{T_2} x^2(t)}{\sum_{t=T_1}^{T_0} x^2(t)} \quad (2-19)$$

式中，對資料 $x(t)$ 沿時間方向取兩個時窗：設 T_1 為前一時窗起點， T_0 為前一時窗終點，亦即為後一時窗起點， T_2 為後一時窗終點。依照上述公式，傳統的計算上，時窗從頭到尾是被固定劃分成多個能量搜索窗，窗口大小由使用者自己定義，各個時窗長度相同，通過比較某一時窗與其前面時窗能量大小的比值，來求取地震紀錄的初達時間。但這種固定時窗的方法，若時窗長度選取不當或首個時窗的起始點處於特殊位置及雜訊較大時，都會對準確度造成影響，如圖 2.21。

故有多位學者對此提出了改進方法，其中最常用的滑動時窗能量比值法(左国平 et al., 2004)，滑動時窗是為了克服固定時窗的缺點提出的，其主要原理是，時窗並不是固定不變的，而是從訊號時間序列的頭到尾，如圖 2.22 所示。 Δx 為每次移動的擷取間隔，並根據實際情況進行調整。時窗每移動

一次，就計算一次前後能量大小的比值，然後從這些能量比值中找出最大值，再從對應的後時窗找出振幅最大的資料點，所對應的時間即為初達時間。

但滑動時窗法也存在著缺點，例如時窗大小的選擇直接影響了挑取時間的準確性，不同時窗長度挑取的結果往往差別很大，這也正確選取時窗長度增加了困難度。因此张伟 et al. (2009)提出了變換時窗長度統計法來克服以上兩種方法的缺點。它利用改變不同長度的時窗來計算一系列的初達時間，用統計的方法選擇初達最集中的那個時間來做真正的初達時間。這樣的方法相較之下有效地提升了挑取精度，使時窗長度設置不當等人為因素引起的誤差變小了。

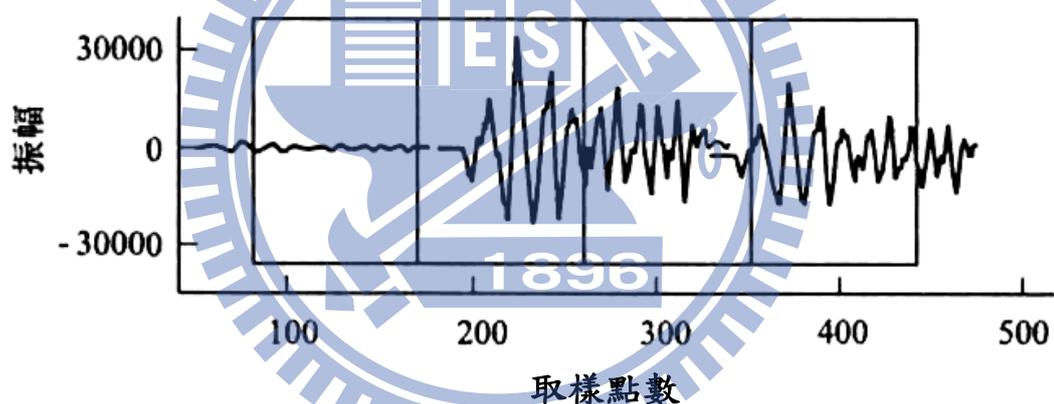


圖 2.21 固定時窗(罗进华 et al., 2008)

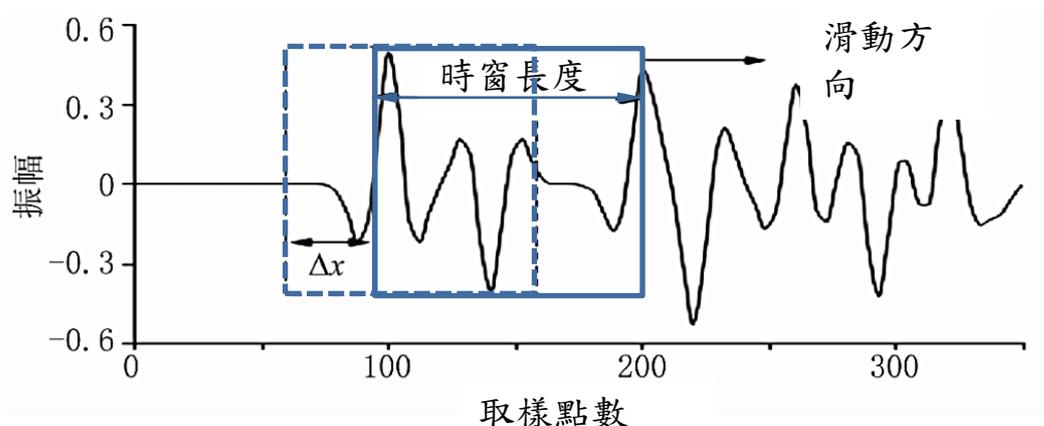


圖 2.22 滑動時窗示意圖 (徐钰 et al., 2012)

以上方法主要針對能量比值法的擷取時窗造成的問題提出修正，另一方面 Wong et al. (2009)則針對 Coppens (1985)所提出的式子做修正，採用了修正的能量比值法(Modified Energy Ratio)，簡稱 MER。以能量比值法的概念來說，假設 x_i 代表時間序列 $i = 1, 2 \dots N$ 上對應的資料點，時窗內的資料點數為 L ，則在時間序列 i 時，其前後時窗內資料的能量比值為：

$$er = \frac{\sum_{j=i}^{i+L} x_j^2}{\sum_{j=i-L}^i x_j^2} \quad , \quad (\text{Energy Ratio}) \quad (2-20)$$

為了讓能量比值法對於訊雜比低的資料能夠更凸顯，進行了以下修正項：

$$mer_i = [er * abs(x_i)]^3 \quad , \quad (\text{Modified Energy Ratio}) \quad (2-21)$$

MER 方法示意如圖 2.23：

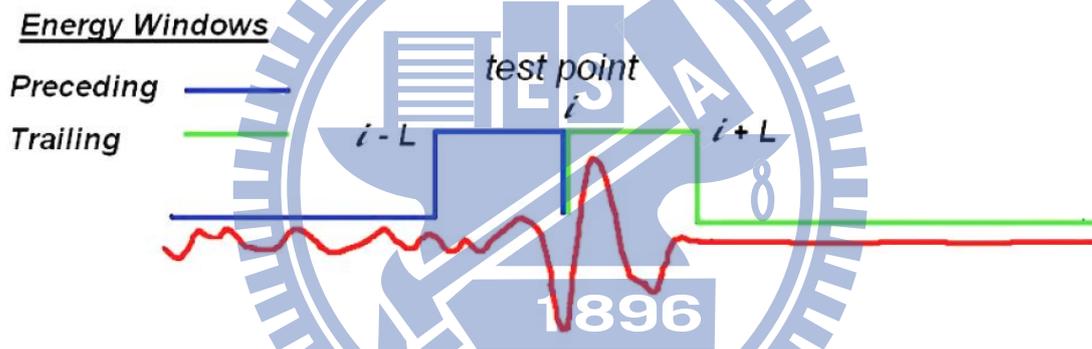


圖 2.23 修正能量比值法(MER)示意圖

Han et al. (2010)亦利用此法跟 2.3.1 所提到的 STA/LTA 方法做比較，顯示在訊雜比低時($SNR = 3.5$)，MER 能判讀出較精確的初達時間，但當訊雜比更低時($SNR = 1.5$)，則必須依靠中值濾波器、套用時窗、或是重複挑取的方式輔助，以獲得較精確的初達時間。

2.4 訊號分析方法

由上一小節我們可以得知，其實現有的自動化分析方法並不能適用於所有的情況，也沒有一個單一的方法可以完整解決，甚至訊雜比較低時也會有判斷錯誤的情形。為此，本研究希望透過現有的訊號分析的方法，進一步詳觀震波訊號的特性，分別從時間域濾波的濾波、頻率域的濾波方法、以及時頻的濾波分析方法來探討挑取初達波的概念，推演到自動化挑波的可行性。故以下大致分成三大類進行回顧。

2.4.1 時間域濾波分析

窗函數(Window Function)是頻譜分析中一個重要的部分。在訊號處理中，窗函數是一種除了在給定區間之外取值均為0的實函數。例如：在給定區間內為常數而在區間外為0的窗函數即稱矩形窗。任何函數與窗函數的積仍為窗函數，所以相乘的結果就像透過窗口「看」其他函數一樣。用於修正訊號的非週期性及因訊號遺漏造成的不準確。

訊號處理的主要數學工具是傅立葉轉換(Fourier Transform)，它是研究整個時間域和頻率域的關係。然而，當運用電腦實現訊號處理時，不可能對無限長的訊號進行測量和運算，而是取其有限的時間片段進行分析，故當輸入波形是採樣信號而非連續信號時，傅立葉分析通常對訊號擷取並用離散傅立葉變換。做法是從訊號中截取一個時間片段，這個區段就叫時窗(Time Window)，將每段的序列當成一個固定的訊號，並進行週期延拓處理，得到虛擬的無限長的信號，然後就可以對信號進行傅立葉轉換、相關分析等數學處理。但由於擷取出來的時窗不易為訊號週期的整數倍，故在時窗間的接點處會有不連續的情況發生，造成遺漏(Leakage)效應。如圖 2.24 所示：

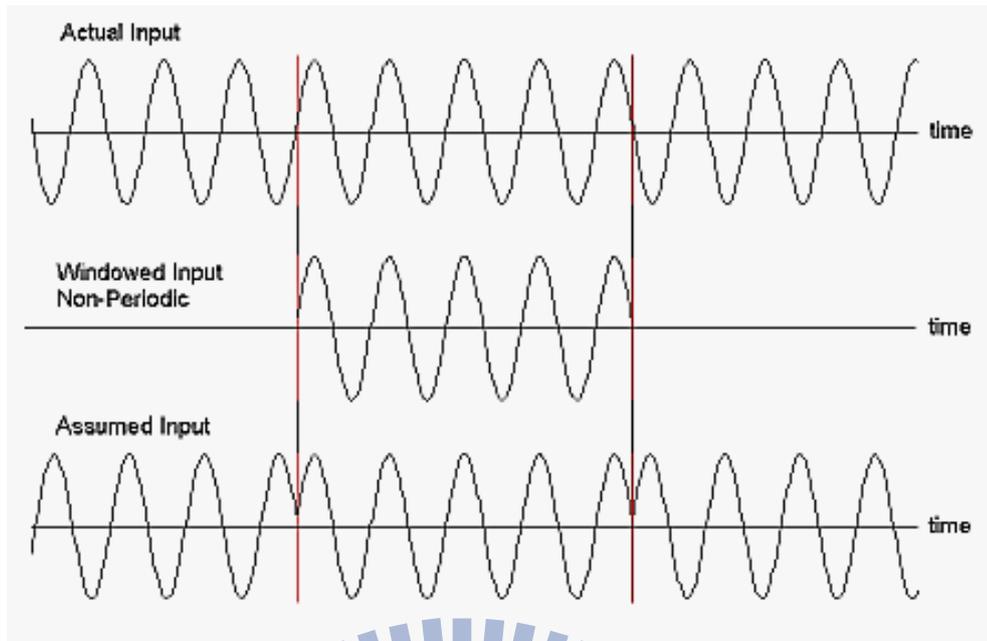


圖 2.24 闡述非週期訊號取樣時造成遺漏的原因(CRYSTAL instruments)

圖中可以看到時域上明顯沒有按週期截斷，才造成頻率域上的能量遺漏。無限長的訊號被截斷後，其頻譜發生改變，原本集中在 f_0 處的能量被分散到兩個較寬的頻帶中去了，這種現象稱為頻譜能量遺漏(Proakis and Manolakis, 1992)。

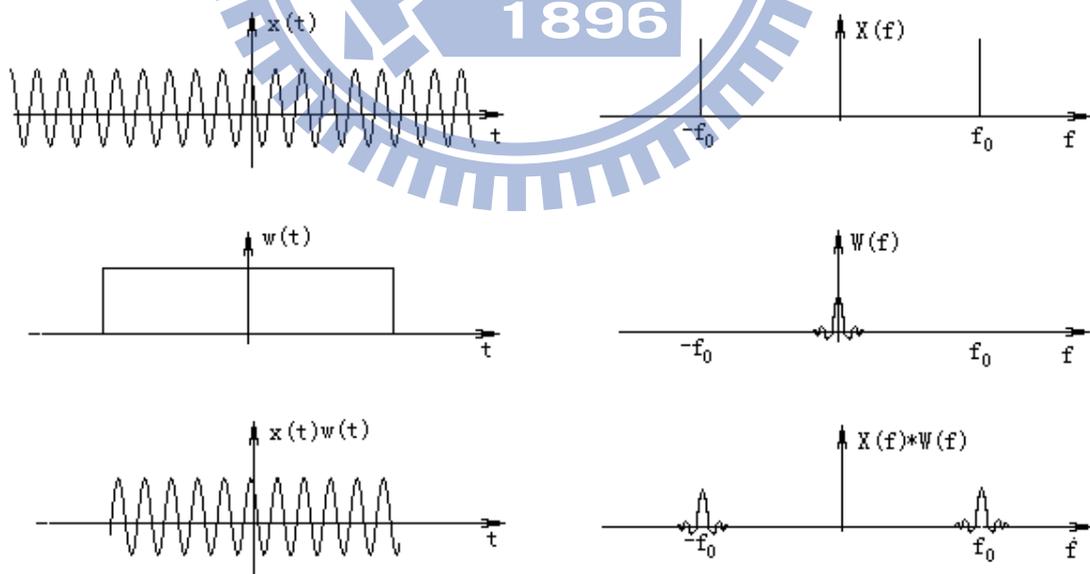
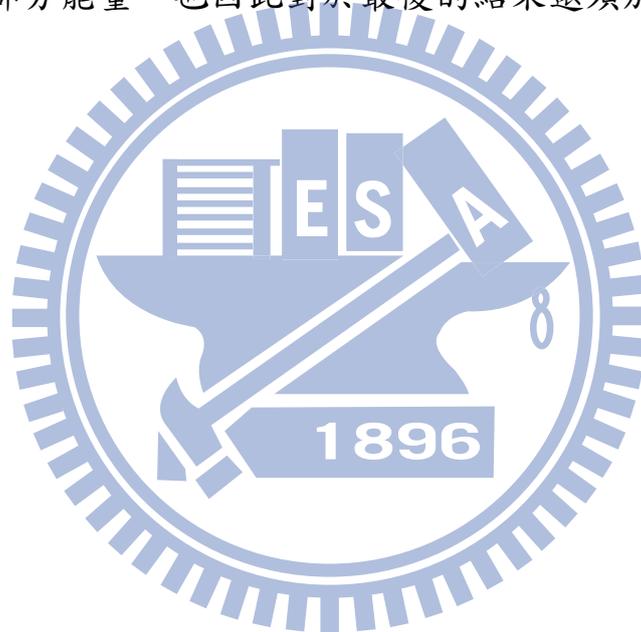


圖 2.25 由於資料截斷造成頻譜能量遺漏(测试技术实验指导)

為了克服時窗的不連續，傳統方法中是對訊號乘上一個窗函數(Window

Fuction)，使時窗的接點可以更加平滑且有連續性。而訊號截斷的作法也就相當把訊號乘上一個矩形窗 $w(t)$ ，如圖 2.25。遺漏和窗函數頻譜的兩側旁瓣有關，若兩側半的高度趨於零，而使能量相對集中在主瓣，就可以較接近真實的頻譜，因此可在時間域採用不同的窗函數來截斷訊號。

而加窗在時域上採用點乘，在頻率域則為摺積。摺積可被看成是一個平滑的過程。此平滑過程可視為是由一組具有特定函數形狀的濾波器，因此，原始訊號中在某一頻率點上的能量會結合濾波器的形狀表現出來，進而減少遺漏，基於這個原理，故通常直接在時域加窗。但由於加窗計算中衰減了原始訊號的部分能量，也因此對於最後的結果還須加上修正係數



2.4.2 頻率域濾波分析

頻譜是指一個時域的信號在頻率域下表示方式，可以針對信號進行傅立葉轉換而得，所得的結果會是以分別以振幅及相位為縱軸，頻率為橫軸的兩張圖，不過有時也會省略相位的資訊，只有不同頻率下對應振幅的資料。有時也以「振幅頻譜」表示振幅隨頻率變化的情形，「相位頻譜」表示相位隨頻率變化的情形。簡單來說，頻譜可以表示一個訊號是由哪些頻率的弦波所組成，也可以看出各頻率弦波的大小及相位等資訊。

故在頻率域下，我們採用頻譜分析(Spectral Analysis)，是一種將複雜訊號分解為較簡單訊號的技術。許多物理訊號均可以表示為許多不同頻率簡單訊號的和，而找出一個訊號在不同頻率下的資訊（可能是振幅、功率、強度或相位等）的作法就是頻譜分析。

頻譜分析可以對整個訊號進行。不過有時也會將訊號分割成幾段，再針對各段的訊號進行頻譜分析。週期函數最適合只考慮一個週期的訊號來進行頻譜分析；而傅立葉轉換中有許多分析非週期函數時需要的數學工具。

一個函數的傅立葉轉換包括了原始訊號中的所有資訊，只是表示的型式不同，因此可以用反傅立葉變換重組原始的訊號。若要完整的重組原始訊號，需要有每個頻率下的振幅及其相位，這些資訊可以用二維向量、複數、或是極座標下的大小及角度來表示。在訊號處理中常常考慮振幅的平方，也就是功率，所得的就是功率譜密度(power spectral density, PSD)。

實際上，大部份的儀器及軟體都用快速傅立葉變換(FFT)來產生頻譜的訊號。快速傅立葉變換是一種針對取樣訊號計算離散傅里葉變換的數學工具，可以近似傅立葉變換的結果。

而表面波震測的分析方式也採用了頻譜分析法，亦即表面波譜法(Spectral Analysis of Surface Wave, SASW)，其施測方式主要由一衝擊式震源及兩個受波器所組成(Nazarian et al., 1983; Stokoe et al., 1994)，假設受波器

訊號可表示為位置與時間的函數 $u_1(x_1, t)$ ， $u_2(x_2, t)$ 。透過傅立葉轉換可得到此二函數在頻率域的函數 $U_1(x_1, \omega)$ ， $U_2(x_2, \omega)$ 以及各頻率在 x_1 ， x_2 處的相位角。根據相位速度的計算式：

$$V_{ph}(\omega) = \frac{\omega}{\frac{\Delta\phi(\omega)}{\Delta x}} \quad (2-22)$$

其中 $V_{ph}(\omega)$ 代表不同頻率時的雷利波波速； $\Delta\phi(\omega)$ 表示不同頻率時在 x_1 ， x_2 處的相位角差值； Δx 表示 $x_2 - x_1$ 。

計算過程上兩受波器各頻率之相位角差($\Delta\phi(\omega) = \phi_2(\omega) - \phi_1(\omega)$)可由互能頻譜(Cross Spectral Density, CSD)之相位角獲得，即

$$\Delta\phi(\omega) = \text{Angle} \left(\text{CSD} \left(u_1(x_1, t), u_2(x_2, t) \right) \right) \quad (2-23)$$

如圖 2.26 虛線所示，兩受波器之相位角差，一般隨頻率增加而增加，但由於頻譜分析所得之相位角差僅侷限於 $-\pi \sim \pi$ 之間，因此在計算(2-22)式之前必須先將相位角差 $\Delta\phi(\omega)$ 摺開(unwrap)，以得各頻率真正的相位角差，如圖 2.26 實線的結果。

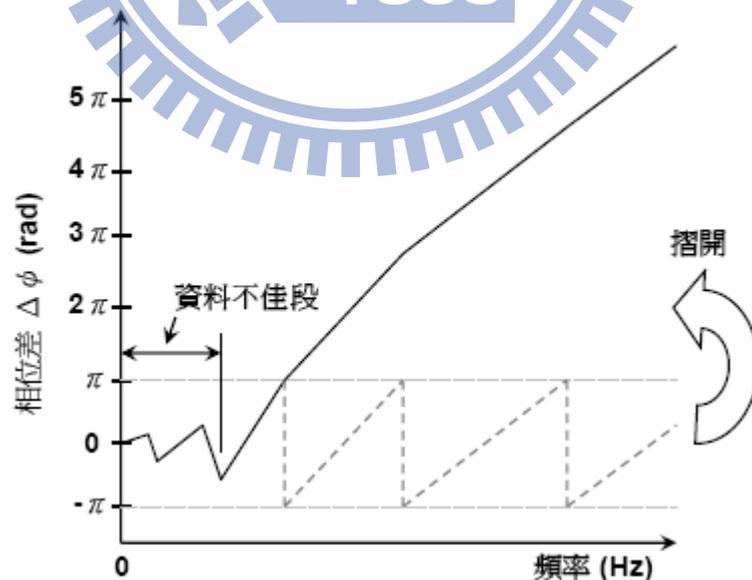


圖 2.26 SASW 頻譜分析(相位差-頻率圖)(林俊宏, 2005)

表面波譜法對於表面波應用於地質調查之推廣扮演了舉足輕重的地位，但以現有的技術看來，其施測方式與分析方式並非最佳。然而其利用頻譜分析的方式可以自動將訊號轉至頻率域，進而計算出頻散曲線，這點對於本論文的目標是一致的，概念上也有很大幫助及啟發，尤其對於同為單一震源、兩個受波器的配置，更有異曲同工之妙；對於這部分的應用在第三章會有更詳細的介紹。

2.4.3 時頻譜濾波分析

頻率為時間訊號的重要特徵，傳統用傅立葉轉換進行頻譜分析，來了解一段時間內頻譜的分佈，但有時我們更有興趣的是頻率隨時間變化的情形，分析各種不同頻率隨時間變化的情形稱為時頻分析。時頻分析相較於頻譜分析多了頻率對時間的解析，利用時頻分析可以看出頻率隨著時間變化的情形，甚至在每個時間中可以看出訊號在一定頻率附近的能量聚集狀況。其主要研究非穩態訊號或時變訊號，為當今訊號處理研究極為重視的一個領域，特別是在二十世紀的 80 年代以後有著突破性的發展，各種時頻聯合分析方法得到了廣泛的研究及運用，逐漸形成了一套獨特的理論體系。

故在本小節回顧了應用於表面波震測頻散現象的多重濾波法(Multiple Filter Technique)、及目前廣為應用的小波轉換方法(Wavelet Transform)，藉此作為第三章研究的應用。

2.4.3.1 多重濾波法

多重濾波法(Multiple Filter Technique, MFT)為 Dziewonski et al. (1969)提出，應用於群速分析，能有效且快速地分析複雜的頻散訊號，因此在對頻散分析的研究中廣受學者使用。此方法主要利用傅立葉轉換(Fourier Transform)觀念，在頻率域中利用一帶通濾波器(filter)取得各頻率下的訊號，求得在時間域中各訊號的包絡線，並以其包絡線最大振幅之到時得到該頻率下之群速度(group velocity)，進一步得到訊號之頻率與群速的關係，亦即所謂的頻散曲線。

為將時間域和頻率域解析度互補關係(complement relation)降到最小，故多重濾波方法採用高斯濾波器(Gaussian Filter)在頻率域進行乘法運算，其方程式如下：

$$G_n(\omega) = \begin{cases} 0, & \omega < (1 - BAND)\omega_n \\ \exp\left\{-\alpha\left(\frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}\right)^2\right\}, & (1 - BAND)\omega_n \leq \omega \leq (1 + BAND)\omega_n \\ 0, & \omega > (1 + BAND)\omega_n \end{cases} \quad (2-24)$$

式中， ω_n 為濾波函數的中心頻率； $BAND$ 為相對的頻寬參數；濾波參數 α 則控制濾波器的頻寬及兩翼衰變的情形，數值越大表示濾波器越窄，可以用 $BAND$ 和參數 β 表示：

$$\alpha = \frac{\beta}{BAND^2} \quad (2-25)$$

根據 Herrmann (1973)所做的理論測試中， $BAND = 0.25$ 、 $\alpha = 16\pi$ 之結果較合理且穩定。

實作步驟簡述如下(葉仁傑, 2011)：

- (1) 利用傅立葉轉換將震波訊號 $f(t)$ 轉至頻率域得 $F(\omega)$ 。
- (2) 選定中心頻率 ω_n 後，將 $F(\omega)$ 做高斯濾波，即(2-24)式，得到 $H_n(\omega)$ 。

$$H_n(\omega) = F(\omega)G_n(\omega) = F(\omega)\exp\left\{-\alpha\left(\frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}\right)^2\right\} \quad (2-26)$$

(3) 將濾出的各頻率訊號 $H_n(\omega)$ 以傅立葉逆轉換(Inverse Fourier Transform)，從頻率域轉回時間域，得 $h_n(t)$ 。

(4) 時間訊號 $h_n(t)$ 之包絡線主要由希爾伯特轉換(Hilbert Transform)求得， $h_n(t)$ 的希爾伯特轉換式在時間域公式與 $1/\pi t$ 作摺積(convolution)：

$$\hat{h}_n(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h_n(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2-27)$$

相當於將 $h_n(t)$ 在頻率域中相位轉移了 $\pi/2$ ，其複數函數表示為：

$$h_{cn}(t) = h_n(t) - i\hat{h}_n(t) = A_n(t) \cdot e^{i\phi_n(t)} \quad (2-28)$$

即包含了包絡線的振幅 $A_n(t)$ 和相位 $\phi_n(t)$ ，其中振幅可由下式求得：

$$A_n(t) = \sqrt{h_n^2(t) + \hat{h}_n^2(t)} \quad (2-29)$$

(5) 若震波的行徑路徑為 Δ ，則以包絡線最大振幅之走時 $T_{n(max)}$ 表示該頻率下之走時，套用下式即可獲得此訊號的群速度。

$$V_g = \frac{\Delta}{T_{n(max)}} \quad (2-30)$$

(6) 不斷更換中心頻率 ω_n ，並重複步驟(2)~(5)，即可獲得整個頻率範圍下，不同頻率訊號的群速度，如圖 2.27。

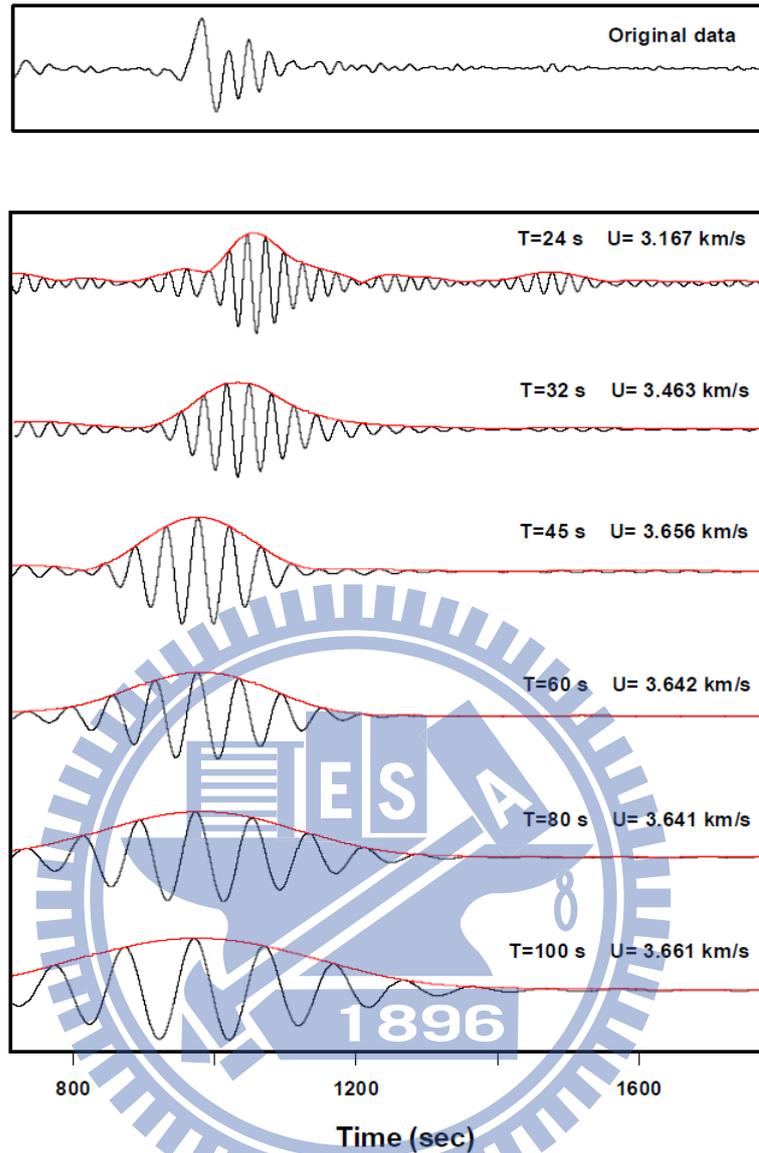


圖 2.27 多重濾波法案例。(賴雅娟, 2009)

圖 2.27 上方為原始波形；下方為不同中心頻率下的濾波訊號及其包絡線；T 為包絡線最大振幅之走時；U 為相對應頻率(週期)下的群速度。

本論文將在第四章中，藉由此方法畫出震波的時頻譜，以觀察震波訊號在時間域及頻率域之分布情形，透過找出適當的規範，進而快速挑取出相對應之剪力波初達時間。

2.4.3.2 小波轉換

就小波轉換(Wavelet Transform)的發展來看，過去訊號分析常採用傅立葉轉換(Fourier Transform)來取得訊號的頻譜和振幅並據以分析；傅立葉分析對於平穩訊號(stationary signal)，不會有任何的缺陷，但對於非平穩訊號(non-stationary signal)，需要區分各種頻率成分，而且需要某一時刻附近的頻率成分，那麼傅立葉轉換就無能為力。為此，人們提出了窗函數的概念，即提出一個靈活可變的時間—頻率窗，使得在這個窗內能夠體現頻率的訊息，而窗和窗之間則反映的是頻率隨時間的變化。短時傅立葉轉換(Short Time Fourier Transform, STFT)即是在原本的傅立葉轉換中加入固定時窗函數的時頻分析法，可將局部訊號對應至一個以時間與頻率為基底的二維函數。不過由於其時窗大小固定，所以無法兼顧高頻與低頻之解析度需求，即是說選定窄時窗則頻率解析度低；寬時窗則時間解析度低。如何選擇適當時窗寬度就變得很困難，故傅立葉轉換無法兼顧時域和頻率域的解析度，欠缺了自適應性。

為了克服短時傅立葉轉換的缺點，學者提出了小波函數的概念，最早的小波函數由 Haar (1910) 提出，但 Wavelet 這個名詞最早是由法國學者 Grossmann and Morlet (1984) 在進行震波分析時所提出的，其提供了以時間為變數的訊號函數之頻率分析，稱之小波轉換理論(Wavelet Transform Theorem)，其以可變大小的觀念來對低頻與高頻訊號分別採用較寬及較窄的時窗，使得低頻有高頻率解析度，而高頻有高時間解析度。由圖 2.28 的比較可看出這三者對於時間、頻率解析度的關係。

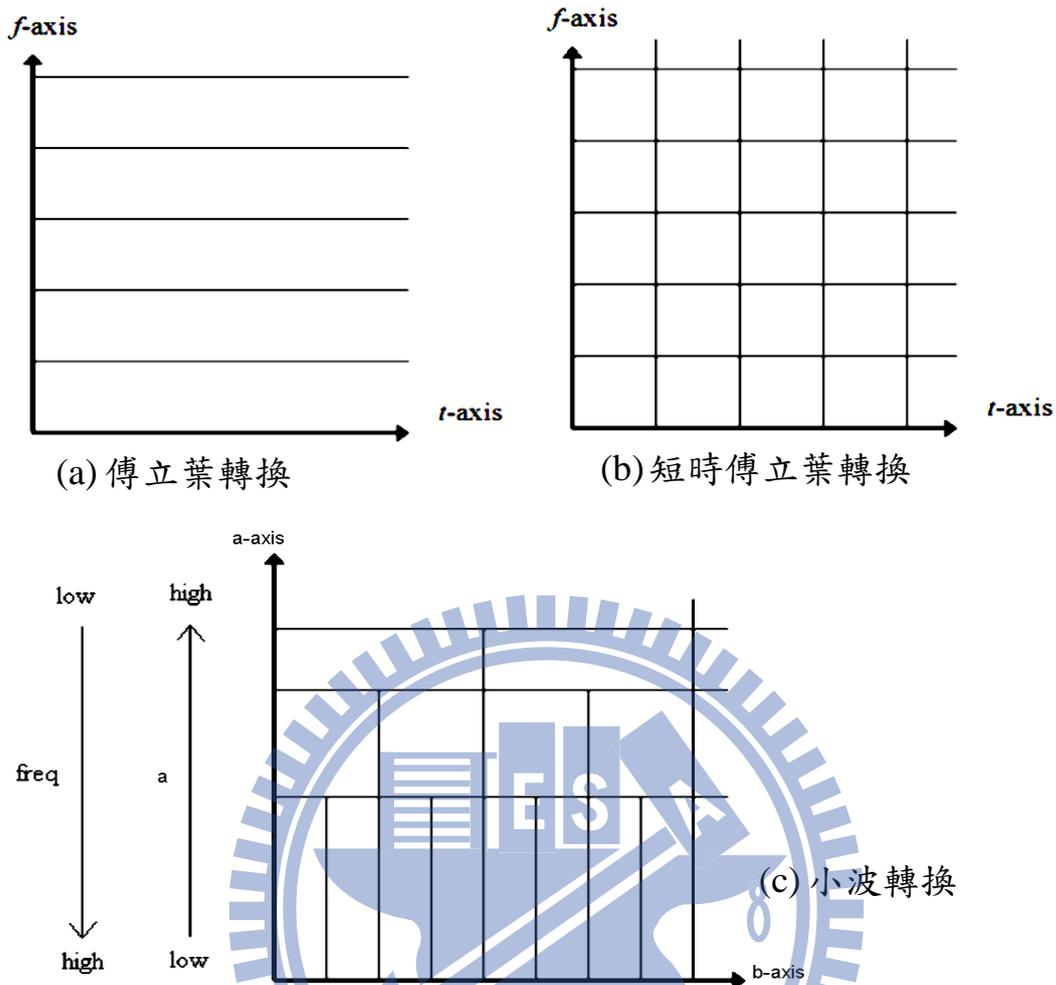


圖 2.28 傅立葉轉換、短時傅立葉轉換、小波轉換解析度比較(Chun-Lin, 2010)

一般而言，由於訊號的頻率與其週期長度成正比，對於高頻訊號，時間間隔要相對小，才能有更好的精度而對於低頻訊號，時間間隔要相對寬以保持訊號的完整性。故由圖 2.28 可得知，跟傅立葉轉換，短時傅立葉轉換相比，小波轉換正符合這樣的需求，其多解析度特性在分析上非常實用。

Grossmann and Morlet (1984) 隨後也提出連續小波的數學架構，而為使訊號表達、分析更容易及有效率，Mallat (1989)則提出離散小波轉換(discrete wavelet transform, DWT)，並統整小波轉換理論架構。故依據訊號輸出輸入的特性，小波轉換可大致分為以下三類，整理如下表：

Class	Input	Output
連續小波轉換(Continuous Wavelet Transform)	Continuous	Continuous
離散係數連續小波轉換(Continuous Wavelet Transform with Discrete Coefficients)	Continuous	Discrete
離散小波轉換(Discrete Wavelet Transform)	Discrete	Discrete

表 2.1 小波轉換三大類比較

在本研究中，選定連續小波轉換(CWT)作為分析工具，就數學分析而言，對一個時間訊號 $x(t)$ 進行連續小波轉換乃是將其與一系列的小波函數進行摺積運算，依據 Morlet(1984)之定義，假設選定一母小波函數(mother wavelet) $\psi(t)$ ，則根據伸縮(dilatation)與平移(translation)可由其產生一系列的小波函數 $\psi_{a,b}(t)$ ：

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > 0, b \in \mathbb{R} \quad (2-31)$$

其中 a 為尺度因子(scaling factor)，控制函數的縮放大小，如圖 2.29 所示； b 是平移參數(translating factor)，平移可視為訊號在時間軸的延遲，如圖 2.30 所示。所謂連續小波轉換的概念，乃是利用這一系列小波函數將原始訊號 $x(t)$ 分解成各個小波係數 $WT_x(a,b)$ 。而這些小波係數便是 $x(t)$ 的小波轉換，其定義為如下的摺積：

$$WT_x(a,b) = \langle x(t), \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2-32)$$

$$\forall a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$$

上式即為連續小波轉換之基本型。其中 $\psi^*(t)$ 是母函數 $\psi(t)$ 的共軛複數。由式(2-31)、式(2-32)清楚顯示，此項常數積乃是訊號 $x(t)$ 在 $t=b$ 時於尺度 a 下的一個變化度量。改變母小波尺度因子 a 的值相當於將其波形伸展或壓縮，不同尺度因子之母波，其中心頻率和頻寬皆不相同。由於母小波具有帶通性，因此在某個尺度因子下進行連續小波轉換時，只有頻率在母小波頻寬

內之訊號頻率成分才對轉換結果有貢獻，所以調整a的值具有調整小波轉換之時頻域解析度的效果。尺度取小時，於頻域解析上表現訊號的高頻成分，但同時降低訊號的時域解析度；反之，若尺度取大，在頻域上可表現出訊號的低頻成分，而訊號的時域解析度也隨著提高。另外，藉著時間平移因子b移動母小波在時間軸上之位置，便可針對任意時刻的訊號進行小波轉換，精確掌握不同時間點的變化。

綜合言之，製造這一系列伸縮與平移的小波函數乃是為了提供解構原始訊號的基底，亦即小波轉換 $WT_x(a,b)$ 可視為在每一個固定尺度a之下沿著不同時間點b的函數。因此，小波轉換足以提供原始訊號在不同層次解析度及時間點的資訊，也就是一項對訊號 $x(t)$ 同時兼顧時間與頻率描述的表示法，可參照圖 2.28 (c)之軸表示。

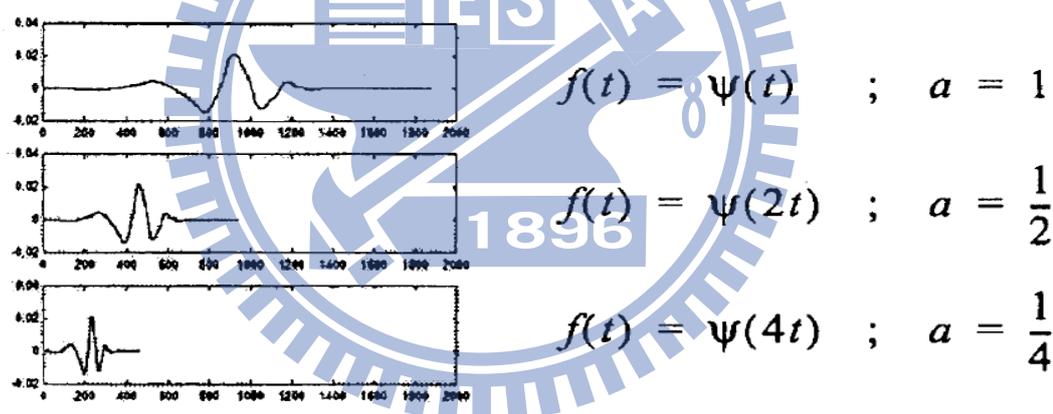


圖 2.29 小波函數的尺度變化(李立愷, 2005)

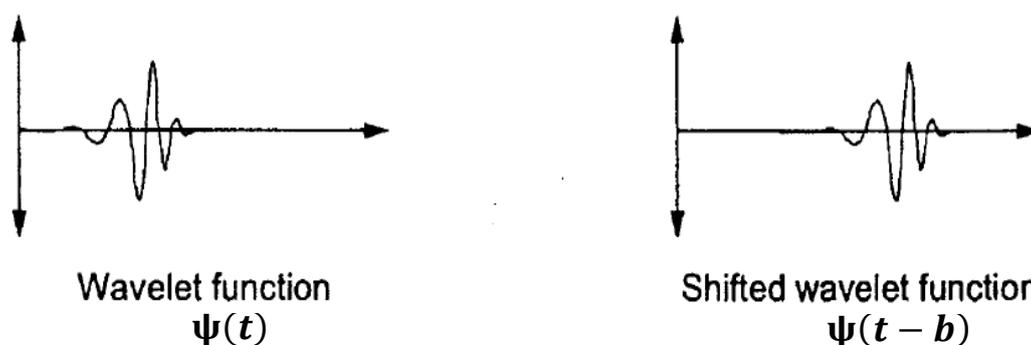


圖 2.30 小波函數的平移變化(李立愷, 2005)

而為了用來局部化時間域的資訊，母小波函數必須滿足快速衰減至零、來回震盪性及積分必須為零，特別是必須滿足容許條件(admissibility condition)：

$$C_{\Psi}(t) = \int_0^{\infty} |\Psi(\omega)|^2 \frac{d\omega}{\omega} dt < \infty \quad (2-33)$$

容許條件中的 C_{Ψ} 稱為容許常數， $\Psi(\omega)$ 為 $\psi(t)$ 之傅立葉轉換，滿足容許條件的函數即為小波轉換的合格母波。並將連帶地符合以下三個條件其中：

- (1) $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1$ ，即 $\psi \in L^2(\mathbb{R})$ ，意味母波能量有限，且式中隱含 $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)| dt < \infty$ ，此說明了母波具有衰減特性。
- (2) $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$ ，左式對所有時間的積分值為零，意味著母波具有正負交替之震盪波形，使其平均值為零。
- (3) $\Psi_{a,b}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}(t) e^{-i\omega t} dt$ ，由(2)可知當 $\omega = 0$ 時， $\Psi_{a,b}(\omega) = 0$ ，此證明母小波在頻率上為有限帶寬，因此小波轉換具有對訊號濾波的能力。

“wavelet”的名詞便是根據以上特性而定。由於滿足容許條件的函數都能當作小波轉換的母小波，因此母小波函數的選擇並非唯一，而具有多樣性，如圖 2.31。於進行訊號之連續小波轉換時，為了使轉換結果能明顯地表現出原訊號瞬時的特徵，故通常會採用振幅集中且隨時間快速衰減，同時頻域上為窄帶(narrow band)的時頻窗函數作為母小波。

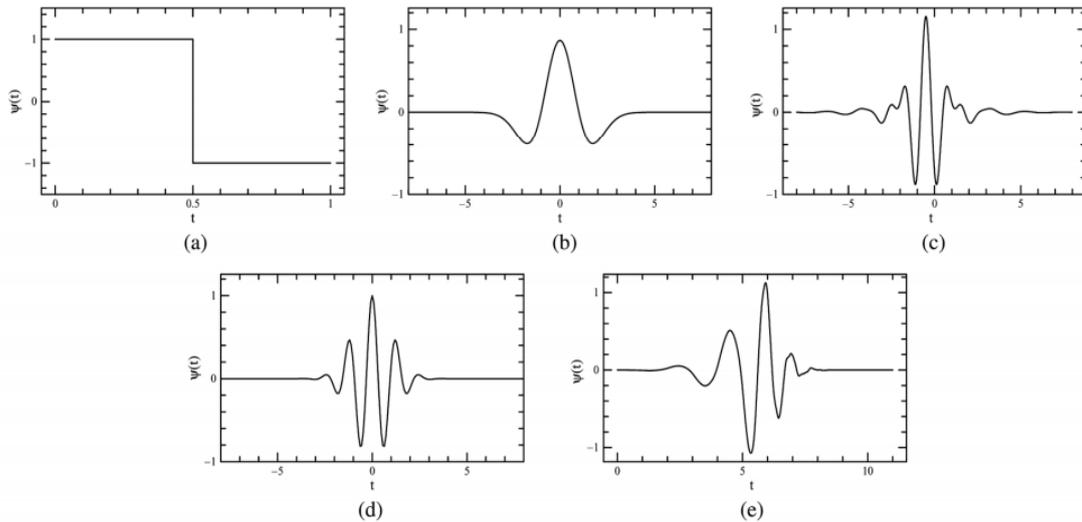


圖 2.31 各種母小波函數；(a)Haar (b)Mexican hat (c)Meyer
(d)Morlet (e)Daubechies(db6)

本研究對訊號進行連續小波轉換時，採用的母波為 Lardies and Gouttebroze (2002)發表之以 Morlet 小波為基底之改良型小波，亦即複數 Morlet 小波(complex Morlet wavelet)，其在表現訊號的瞬時時頻特性方面具有良好的效果，且複數型態之實部與虛部相位相差 2π ，消除了實數形式小波在變換過程中振幅的震盪，並可從小波係數中分離出幅值跟相位，見圖 2.32。

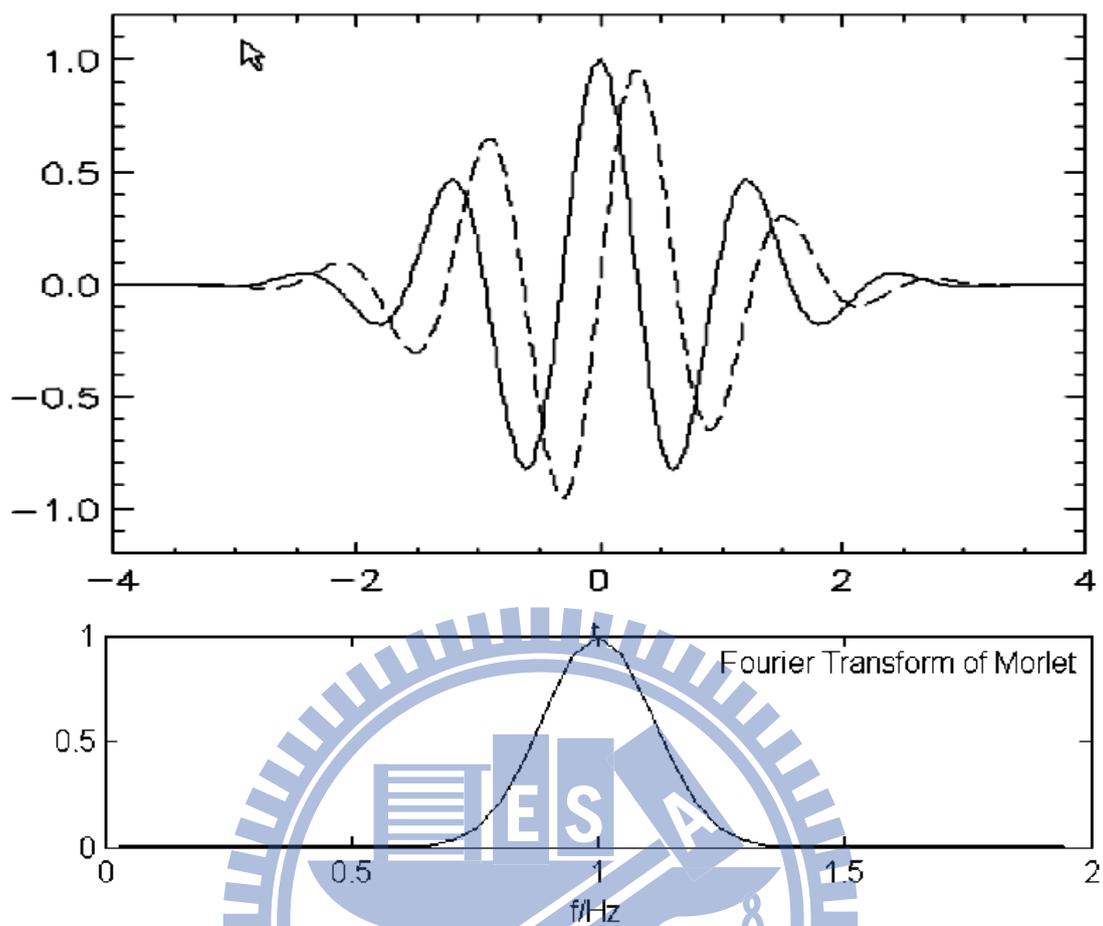


圖 2.32 複數 Morlet 小波的實部(實線)、虛部(虛線)及其傅立葉轉換頻譜而傳統的 Morlet 小波是高斯包絡下的單頻複正弦函數，其數學形式為：

$$\psi_{a,b}(t) = e^{-\frac{1}{2}(t)^2} (e^{ifct} - e^{-2(\pi f_c)^2}) \quad (2-34)$$

將右式經傅立葉轉換可得其頻域表示式為：

$$\Psi_{a,b}(f) = \sqrt{2\pi} (e^{-2\pi(f-f_c)} - e^{-2\pi(f^2+f_c^2)}) \quad (2-35)$$

，其中 f_c 是 Morlet 小波的中心頻率，單位為赫茲(Hz)，可跟角頻率 ω (rad/sec) 相互換算，即 $\omega_0 = 2\pi f_c$ 。

數學上，Morlet 小波並不滿足(2-33)式的容許條件，然而現實應用上只要取 $\omega_0 \geq 5$ (rad / sec)，Morlet 小波便能近似地滿足容許條件，此時原式中 $e^{-2(\pi f_c)^2}$ 可被忽略，故可表示成：

$$\psi_{a,b}(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} e^{i\omega_0 t} \quad (2-36)$$

經傅立葉轉換可得等效頻域表示式

$$\Psi_{a,b}(\omega) = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{(a\omega_d - \omega_0)^2}{2}} \quad (2-37)$$

當 $a\omega_d = \omega_0$ 時(2-37)式有極大值，此時 Morlet 小波是以 ω_d 為中心，且只對那些在其頻寬內的訊號頻率成分作特徵表現。根據 $a\omega_d = \omega_0$ ，可得 Morlet 小波之頻率與尺度的對應關係為：

$$a = \frac{\omega_0}{\omega_d} \quad (2-38)$$

一般使用傳統 Morlet 小波的連續小波轉換，若訊號中含有相近模態時，則時頻譜上往往無法區分出這些相近模態。故法國學者 Lardies and Gouttebroze (2002)藉由調變傳統 Morlet 小波的參數來改變母波的形狀，母波的形狀改變連帶地改變了母波的時頻解析能力，並透過實驗證明此新作法能有效提升頻域解析度並辨別出系統的相近模態。此改良 Morlet 小波的數學表示式為：

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-\frac{t^2}{f_b}} e^{i\omega_0 t} = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-\frac{t^2}{f_b}} e^{i2\pi f_c t} \quad (2-39)$$

對應之傅立葉轉換為：

$$\Psi_{a,b}(\omega) = \sqrt{\pi f_b} e^{-\frac{f_b(a\omega_d - \omega_0)^2}{4}} \quad (2-40)$$

其中 f_b 為帶寬參數， $f_b > 0$ ；而 $f_c = \omega_0/2\pi$ 則為單位為 Hz 之中心頻率；，此改良 Morlet 母小波於時域上的持續時間(duration)為 $\sqrt{f_b}/2$ ，同時頻域的頻寬(bandwidth)為 $1/\sqrt{f_b}$ 。在時間域中，若 f_b 越大表示其衰減速度越慢；反之，在頻率域中， f_b 越大則頻寬變更狹窄，因此適當地選擇參數 f_b 的值，使母小波頻寬狹窄，可以提升小波轉換的解析能力，然而增加 f_b 值的同時會降低小波轉換時域的解析度，因此 f_b 值的選擇須在訊號的時頻解析度上做一協調。而中心頻率 f_c 則直接影響系統振態頻率所在之 a 值。

第三章 研究方法

對於本研究之流程圖在 1.3 節已做初步介紹，而在本章則針對試驗階段之研究方法做詳盡介紹。從第二章之文獻回顧中顯現，現有的自動化挑波方法有一定的限制與適用性，並不能完美適用於所有的初達波資料。此外，這些方法大多利用時域波形特徵來判讀波相到達時間，但對於受到阻尼影像造成主控頻率衰變之訊號並無法得知其頻率範圍，亦即無法得知此初達波所對應之頻率，相對缺乏了其物理意義，只知道其為在時間軸上一個能量起伏之特徵點。故本研究藉由頻率域及時間—頻率域之訊號分析方法，判讀出特定頻率範圍下之初達時間。



3.1 研究方法流程說明

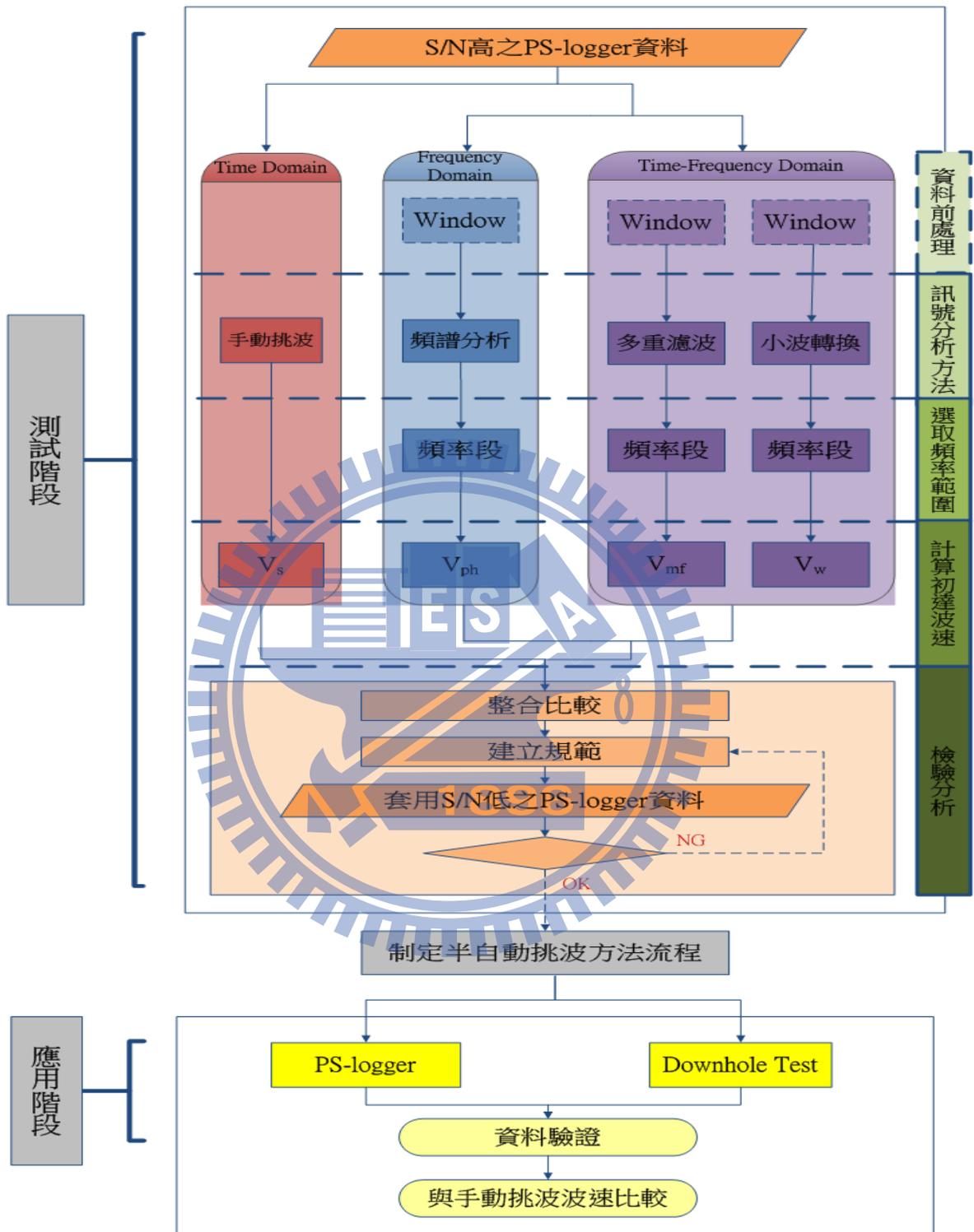


圖 3.1 本研究之試驗階段流程

本研究方法之試驗流程如圖 3.1 所示，分為測試階段與應用階段兩部分。在測試階段中，選定三組訊雜比較高之懸盪式震測資料作為試驗初步測試資料，並以時間域手動挑波的方式，決定初達時間並計算初達波速 V_s ，作為待驗證之參考值。由於欲進一步考慮初達波與頻率之關係，再分別以頻譜分析及時頻分析之訊號分析方法，藉由挑選頻率範圍以取得各方法下之初達波速；並將每種方法整合比較，建立標準流程。

再者，選定三組訊雜比較低之資料作為基準比對資料，觀察以相同規範標準下，對於資料品質較差的資料，是否依然能得到具物理意義之初達波速。此外，考慮到時窗函數濾波的影響性，本研究以時窗函數做為選擇性的資料前處理過程，可以加強資料分析的準確性，為一建議之步驟。

而在應用階段則以測試階段所訂定之半自動化挑波程序分別應用至懸盪式震測及下孔式震測之現地資料作為驗證，並進行綜合比較與成果討論。

3.2 速度分析方法

由於本研究採用了頻率域及時頻之分析方法，故在此小節將分別介紹各方法下所定義之波速。

3.2.1 時間域速度分析法

時間域速度即為以傳統方式進行手動挑取波達時間所計算出之速度。以懸盪式震測資料#009 為例，根據 2.1.3 節介紹之原理，傳統手動挑初達波方式係分別對上、下受波器接收之訊號(H_1 、 H_2)挑取初達時間，如圖 3.2 所示，剪力波初達特徵為正反相訊號對稱，並有明顯之振幅起伏之位置，詳細說明可參見 2.2 節；有了初達時間則可以式(3-1)計算剪力波速(V_s)，

$$V_s = \frac{L}{tH_1 - tH_2} \quad (3-1)$$

其中， V_s 為上、下受波器所在深度間之平均剪力波速； L 為兩受波器間距，固定為 1m； tH_1 、 tH_2 分別為上、下受波器訊號(H_1 、 H_2)所挑取的初達時間。

本研究將以此時間域速度做為試驗方法之參考基準值。

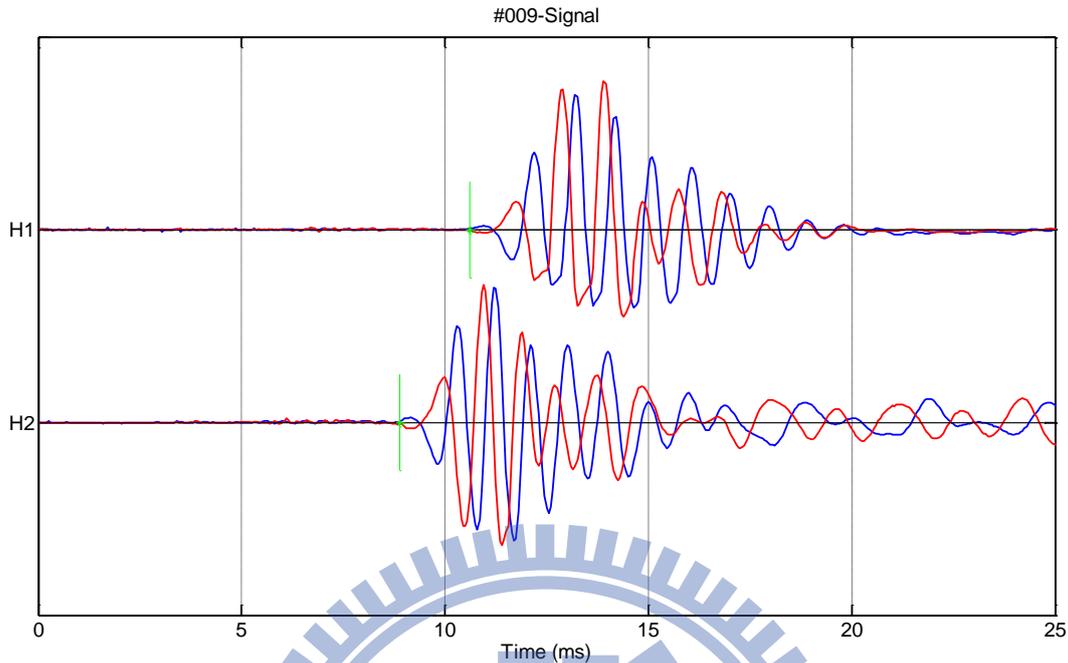


圖 3.2 時間域訊號波形及手動挑取初波達時間點

3.2.2 頻率域相位速度分析法

在 3.1 節提到因時間域之初達波挑取方式無法得知頻率範圍，故引用了應用於表面波震測的表面波譜法(Spectral Analysis of Surface Wave, SASW)概念，此方法係利用頻譜分析(Spectral Analysis)方式，透過兩受波器所接受的訊號在不同時間點之各頻率相位差，如圖 3.3。藉此計算各頻率之相位波速，亦即相位波速之頻散曲線，可以看出波速隨頻率之變化，原理詳見 2.4.2 節。此法不論在自動化程序或是頻散曲線之物理意義，皆符合本研究目的。除此之外，就懸盪式震測法的儀器設置及資料結構和表面波譜法皆極為相似，皆是由一組兩個距離不一的收波器，在不同時間接收同一震源激發之訊號，如圖 3.4 比較。

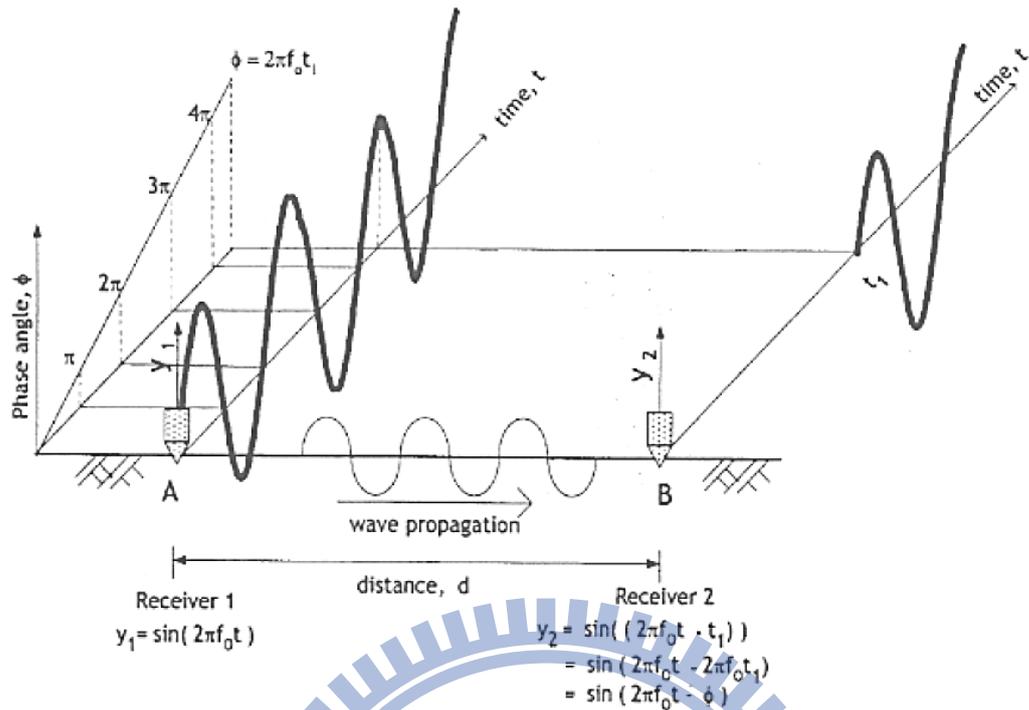


圖 3.3 兩時間訊號之相位差(Joh, 1996)

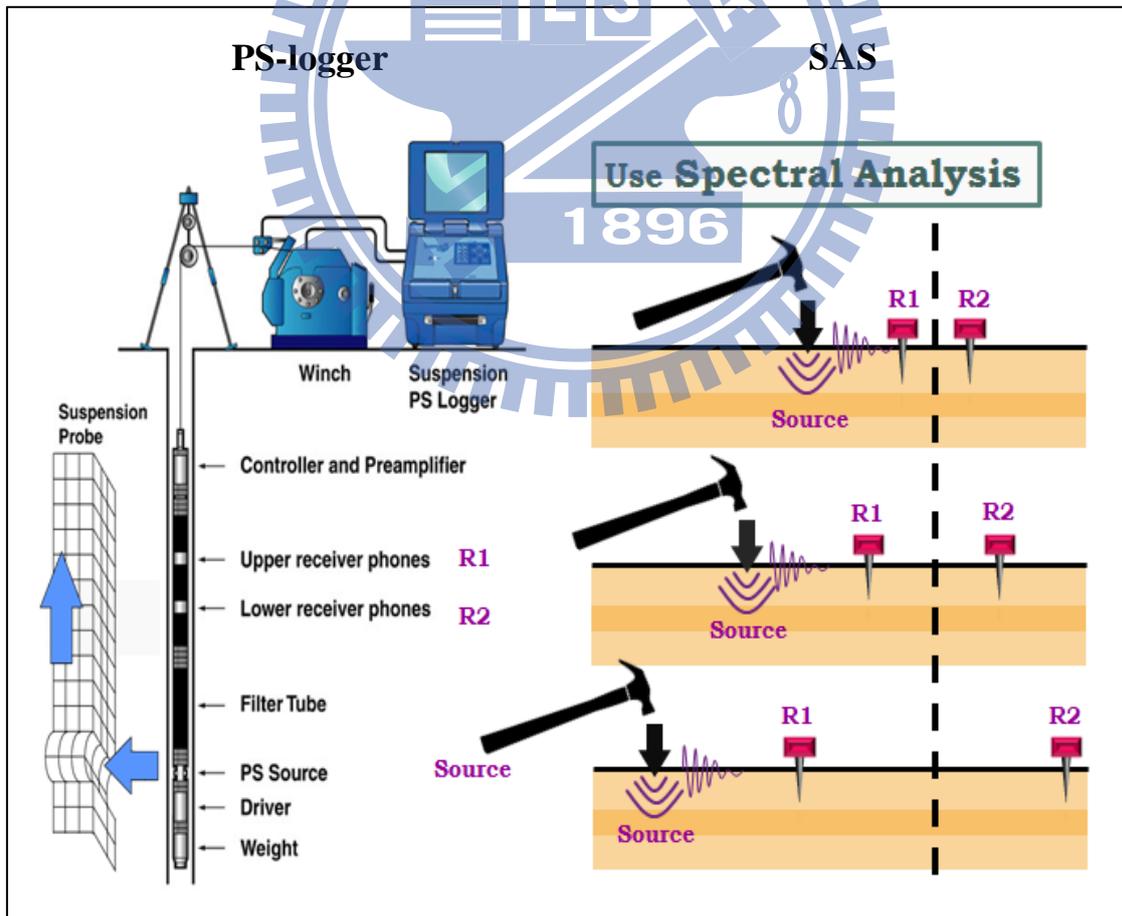


圖 3.4 懸盪式震測法及表面波譜法之設置比較

而應用於懸盪式震測資料之頻譜分析做法如下，以資料#009 為例：

- (1) 資料#009 原始波形如圖 3.5(a)，將其做快速傅立葉轉換至頻率域，得到如圖 3.5 (b)之能量譜。由圖顯示其能量分布集中於 1000Hz 附近。
- (2) 兩受波器各頻率之相位角差，可透過互能頻譜(Cross Spectral Density, CSD)之相位角獲得，即式(2-23)，並得到如圖 3.5 (c)之摺合(Wrapped)線段，一般隨頻率增加而增加，但由於頻譜分析所得之相位角差僅侷限於 $-\pi\sim\pi$ 之間，因此在計算(2-22)式之前必須先將相位角差 $\Delta\phi(\omega)$ 摺開(unwrap)，以得各頻率真正的相位角差，即圖 3.5 (c)之未摺合(Unwrapped)線段。
- (3) 就常理而言，圖 3.5 (c)之未摺合(Unwrapped)線段應當會是一條初始相位角於 $-\pi\sim\pi$ 之間且平滑的相位譜。但由摺合相位譜中顯示特定頻率區間之相位角發生不規則跳動，有時亦會出現相位角摺合不完全的問題，以上問題皆易造成相位角誤判，此外，相位角之展開是由低頻疊加至高頻，若不良區域於低頻處，將導致高頻資料之錯誤。而較特別的一點在於能量集中的頻率帶下，摺合相位譜鮮少發生不規則跳動，趨近平順。
- (4) 因為這個現象，為了解決摺合錯誤問題，在此先假設近鑽孔附近的土層為均質均向，速度不隨頻率變化，且所得震態為基態，如此未摺合相位譜會是一條初始相位角為零之斜直線，由式(2-22)改寫成下式：

$$V_{ph}(f) = \frac{2\pi f}{\frac{\Delta\phi(f)}{\Delta x}} \quad (3-2)$$

其中 Δx 為定值，因線段通過零點， V_{ph} 不頻散即為定值，故未摺合線段之斜率絕對值倒數即為相位波速 V_{ph} 。故以 3.2.1 節所計算之

剪力波速反推成未摺合線段做為參考斜率，如圖 3.5 (c)之 V_s 反推線段。

- (5) 做此假設是為了採取擷取頻率的方式，因為從能量譜的最大分布頻率對應至未摺合相位譜錯誤最少，故擷取能量分布最大頻率得到圖 3.5 (d)，將此線段取回歸成直線，並使其平移通過相位角零點，所得之斜率絕對值倒數即為此頻段內假設無頻散狀況之相位波速，

V_{ph} 。

一般而言表面波之相位波速(雷利波速)約為 0.9 倍之剪力波速，然其比值需視土壤之柏松比大小所定。根據半無限空間之雷利波推導結果 (Richart,1970)，雷利波速與剪力波速間之關係為：

$$V_{ph} = V_R \propto \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} V_s \quad (3-3)$$

式(3-3)中 V_{ph} 表相位波速； V_R 表雷利波速； ν 表柏松比； V_s 表剪力波速。但就懸盪式震測法而言，其波形之內涵較位於地表面之表面波更為複雜，其是為沿著管壁之表面波，欲發展理論解獲得轉換方式不易，因此若欲進行相位波速與波速的轉換，其轉換係數得由大量數據求取經驗轉換式，在本研究中暫且使用未轉換之相位波速作為初步測試。

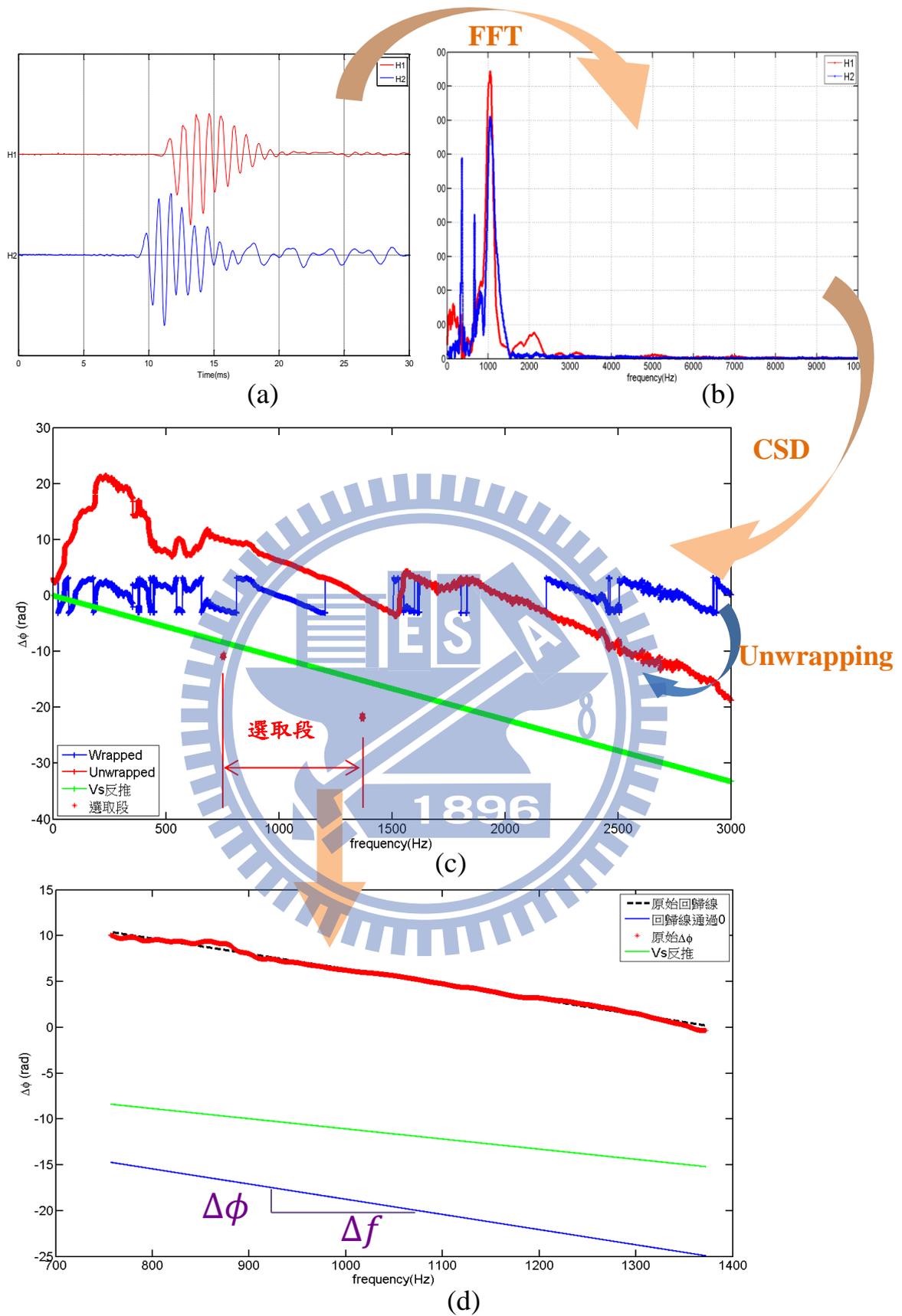


圖 3.5 頻譜分析於懸盪式震測資料之應用步驟

3.2.3 時間－頻率域速度分析法

考慮到訊號通常參雜各種頻率之波相，各頻率波相到時將隨不同頻率改變。為了能清楚觀察此變化情形，找出剪力波波相到時之頻率，本研究將採用時頻分析方法(Time Frequency Analysis)，利用在時頻譜上判斷出剪力波於特定頻率段之初達時間，進而計算頻帶初達波速，詳細說明如下：

利用各種時頻分析方法，可以將訊號從時間域轉換成時頻域，便可觀察到各頻率訊號隨時間變化之情形，即為時頻譜，如圖 3.6 所示，色階變化為訊號包絡線之振幅大小。

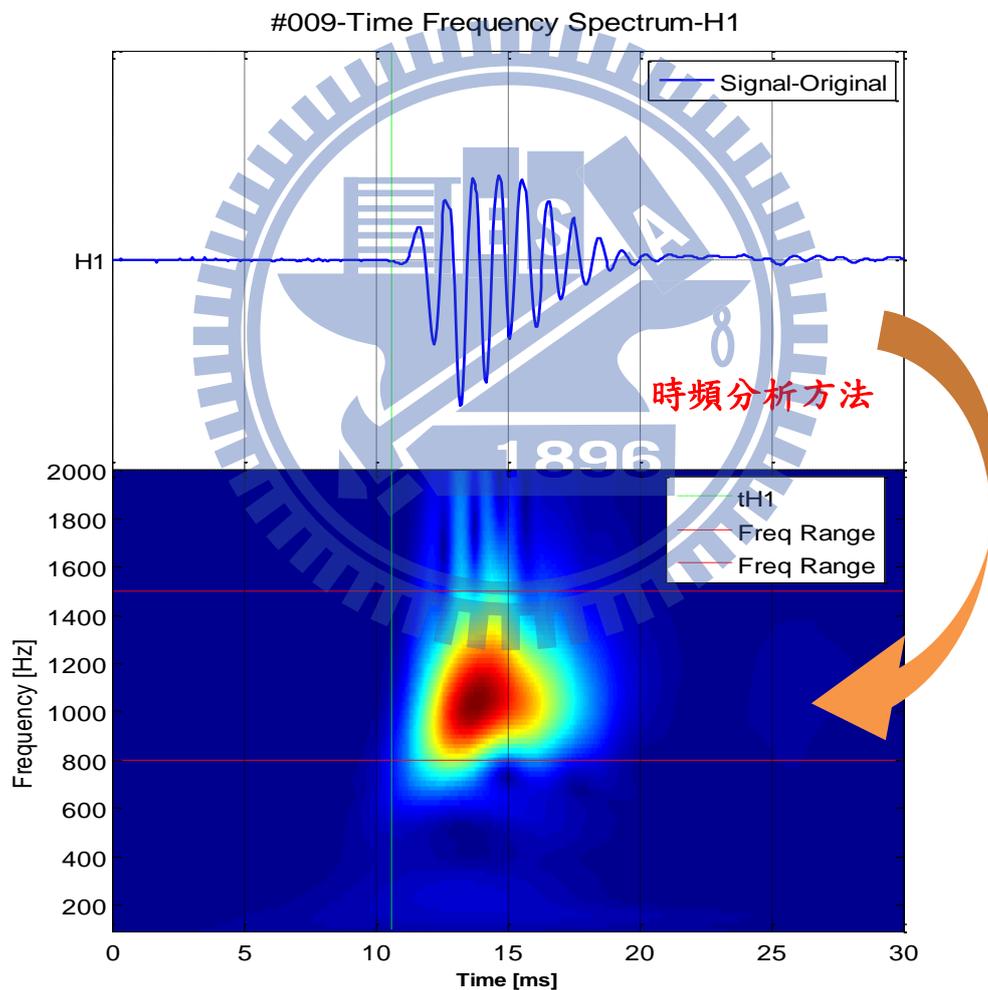


圖 3.6 訊號經時頻分析方法轉換成時頻譜

從圖 3.6 中，虛線是以手動挑波方法所挑取的初達時間，而色階集中在 800Hz~1500Hz 之範圍間，選取此頻帶範圍來觀察包絡線，可以得到如圖 3.7 之形式，以便觀察訊號個頻率下包絡線之振幅分佈，並發現此頻帶為剪力波之頻率範圍，且各頻率訊號包絡線之振幅起伏起始時間，正好相當於剪力波之初達時間。表示此能量集中之頻帶下之振幅起伏點，反映在時間域之初達波波形上，即此初達波之主控頻率即為此頻段。故在作法上，本研究挑取各頻率之振幅起伏起始時間，再取其算術平均數，將其定義為該頻帶下波相初達時間，由此頻帶方法所計算出的波速即為該頻帶下波相初達波速。

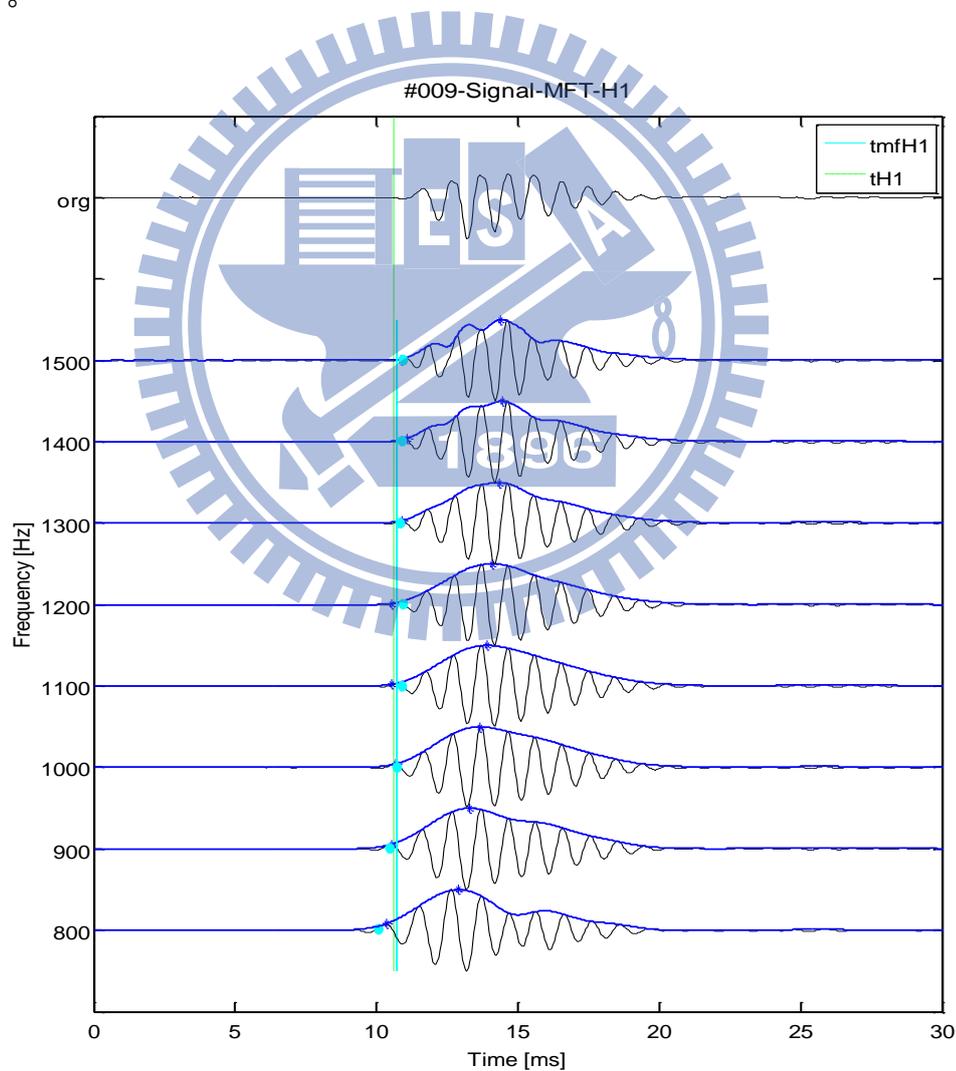


圖 3.7 訊號各頻率下之波形及其包絡線

3.3 振幅起伏起始點挑取自動化分析法

而在 3.2.3 提到可以從時頻譜上取得各頻率訊號包絡線之振幅起伏起始時間，而在時頻域上因為把不同頻率的雜訊及主訊號分開了，所以得到的訊號波形相對簡單，因此與其以人工方式對各頻率包絡線逐一挑取初達時間，本研究更希望藉由自動挑取方法，系統性的挑取包絡線振幅起伏起始點，詳細作法如下，說明圖如圖 3.8：

- (1) 對於各頻率下之訊號包絡線，如圖 3.8①所示，先挑選目視可見之起伏範圍，將挑選範圍縮小。
- (2) 將訊號微分，其微分最大值相當於斜率最大值，即為切點，並做一切線。
- (3) 以此切點與其前段之訊號作割線斜率，如圖 3.8③。
- (4) 可得到割線斜率變化曲線，表示切點至各點與其前後之變化程度。
- (5) 再將此割線斜率變化曲線微分，取微分值之最大點位置。表示此點之割線斜率與前後差異最大，且為一最佳劃分點，此點以前為平穩段；此點以後為爬升段。
- (6) 由於平穩段會有小幅度之起伏，故以此點至其前段取線性回歸，得回歸線。
- (7) 再以步驟(2)之切線與此回歸線取交點，定義其為振幅起伏起始點。
- (8) 對各頻率重複步驟(1)~(7)取算術平均值，即可視為該頻率範圍下訊號波相之初達時間點。

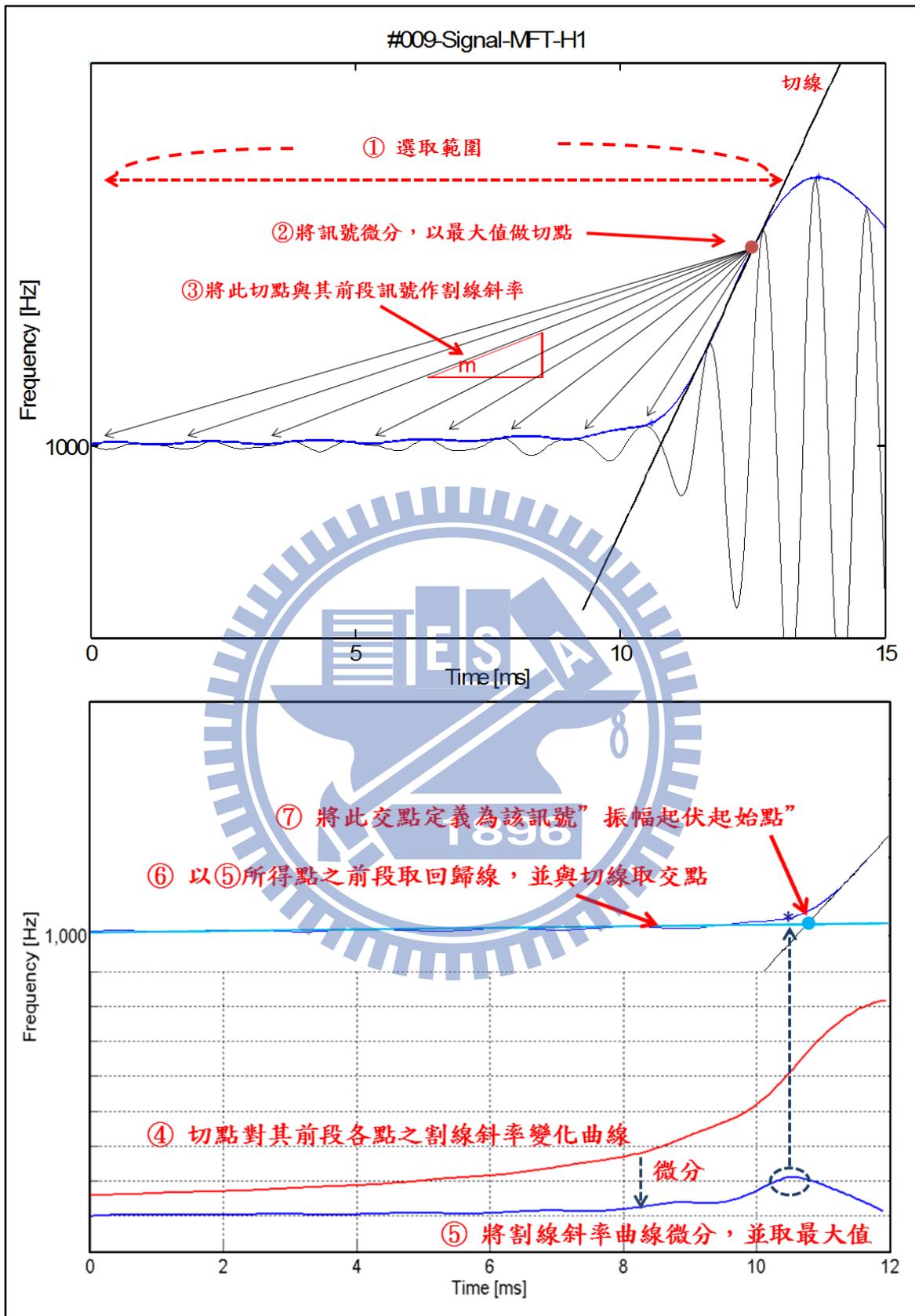


圖 3.8 振幅起伏起始點挑取自動化方法

3.4 試驗資料

為了訂定半自動化挑波之標準程序，本研究試驗分兩部分，第一部分為半自動化挑波程序之測試，從懸盪式震測資料中選取三組資料品質好及三組資料品質較差之資料做為測試之用，以便程序之訂定。而第二部分則是作為半自動化挑波程序之驗證，分別應用於懸盪式震測及下孔式震測現地資料以進行驗證，並與手動挑波方法之結果為參考基準作比較。

3.4.1 半自動化挑波程序訂定測試資料

為了訂定半自動化挑波程序，必須先作初步測試，而測試資料則從在雲林科技大學場址所實施之懸盪式震測(PS-logger)探測資料分別挑取三組訊雜比較高之資料，以及三組訊雜比低資料品質相對較差之訊號。測試資料施作環境背景概述如下：

試驗儀器部分，在此採用的懸盪式震測系統，屬於懸垂式 P-S 波量測系統，是於 1980 年代中期由日本 OYO 公司所發展出的。其主要可分為三個部份，分別為：

- (a) 含有震源及受波器之探測管(Suspension P-S logging probe)：此種螺線管震源所產生的頻率在 500~5000Hz。而受波器是一種三向度受波器，其構造為兩個可接收水平振動之電磁式感應器及一個可接收垂直振動之電磁式感應器。自然頻率為 28Hz，線圈電阻為 570 Ω ，頻率特性為 200Hz 到 5kHz(-3dB)，其尺寸為直徑 54 mm，兩個受波器連結時長度為 3000 mm，重量為 9.2 kg。
- (b) 控制震源、增強及儲存訊號之監測裝置(Suspension PS Log 170)：其取樣範圍從 2~200 μ sec，可接收的頻率帶從 5Hz~20kHz。量測波形資料顯示於螢幕並儲存於 3.5 吋，1.44 MB 磁帶。
- (c) 絞盤(Winch)：含有 4 蕊導線的鋼索其長度為 350 m，最大上升速率是每分鐘 20 m，且最大荷重為 80 kg。

分別如圖 3.9、圖 3.10、圖 3.11 所示，詳細原理請參照 2.1.3。而訊號取樣頻率為 $50\mu\text{s}$ 、擷取點數為 1024 點。



圖 3.9 受波器與震源



圖 3.10 控制監測裝置



圖 3.11 絞盤

試驗施作場址位於雲林科技大學校區內，鑽孔之探測深度為地下 7~180 m，地質情況大多以灰色細砂、粉砂、粉土、黏土為主，偶有卵礫石層。而測試資料選用訊號品質較好的資料#008、#009、#010，深度分別處於地下 173~171m，地質狀況屬於黃灰色粉土夾細砂。而另一組選用訊號品質相對較差的資料#082、#083、#084，深度分別處於地下 53~51m，地質狀況為灰色黏土夾粉砂。

其訊號波形如圖 3.12~圖 3.17 所示，表 3.1 則歸納出各訊號剪力波初達時間並計算初達波速。

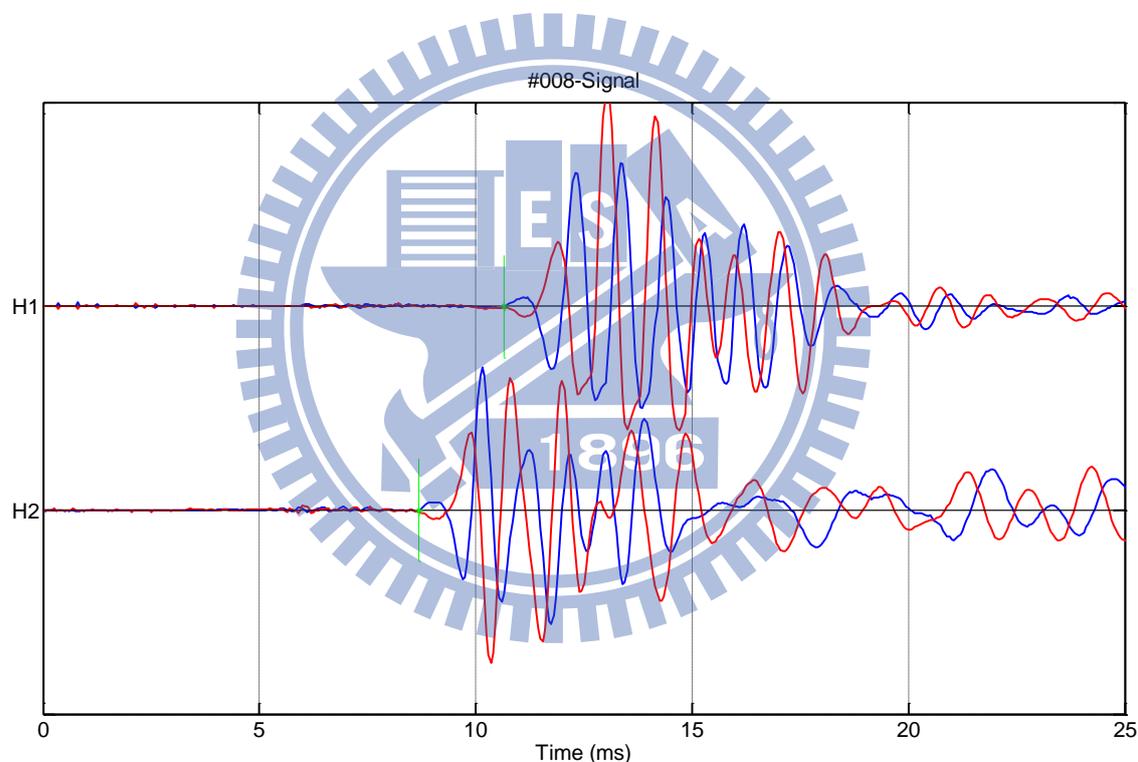


圖 3.12 #008 訊號波形及初波達時間點

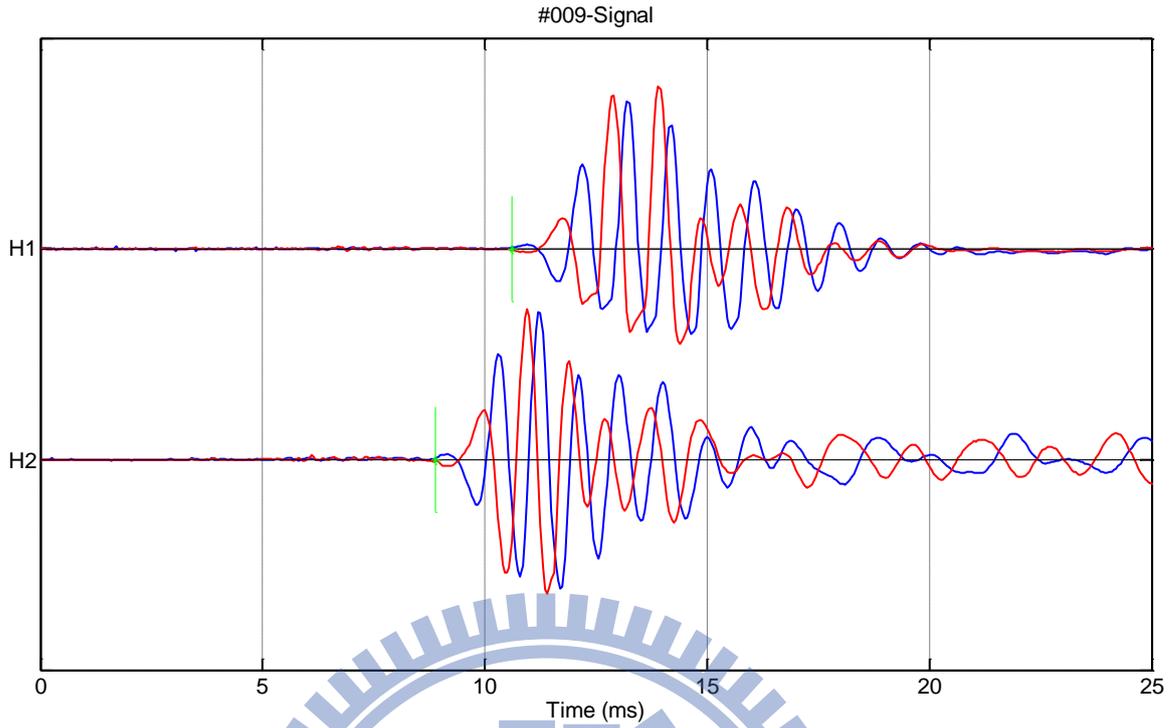


圖 3.13 #009 訊號波形及初波達時間點

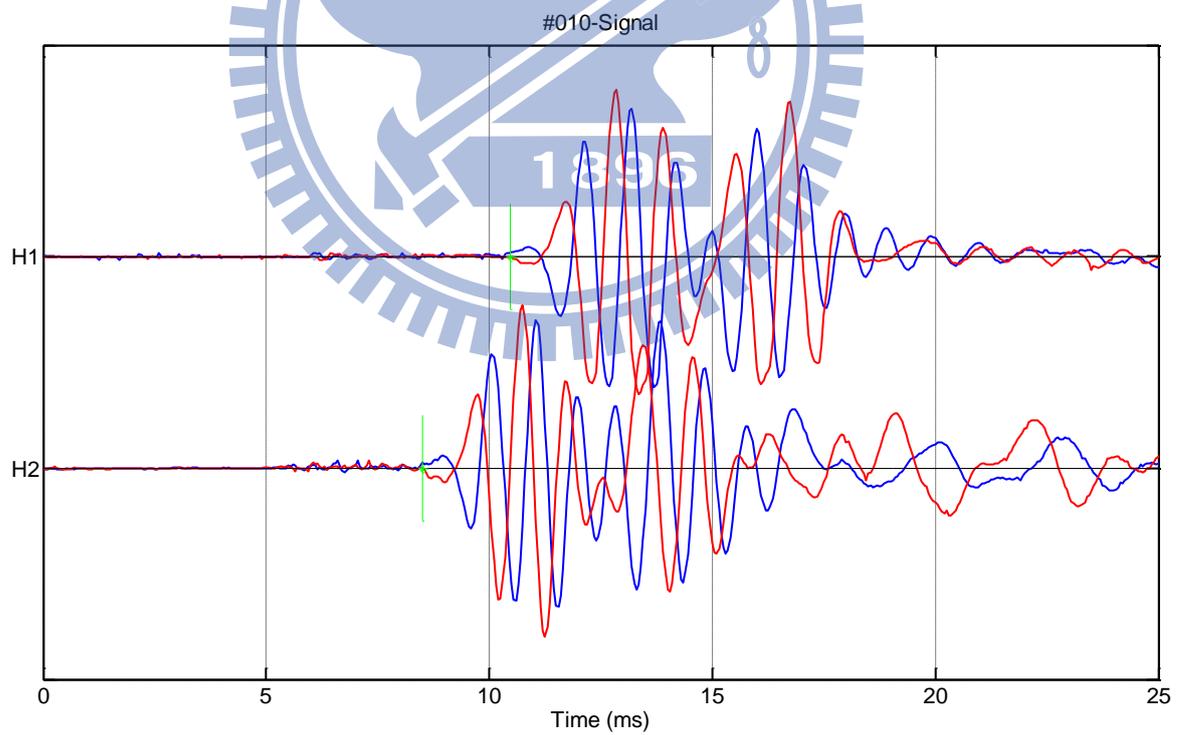


圖 3.14 #010 訊號波形及初波達時間點

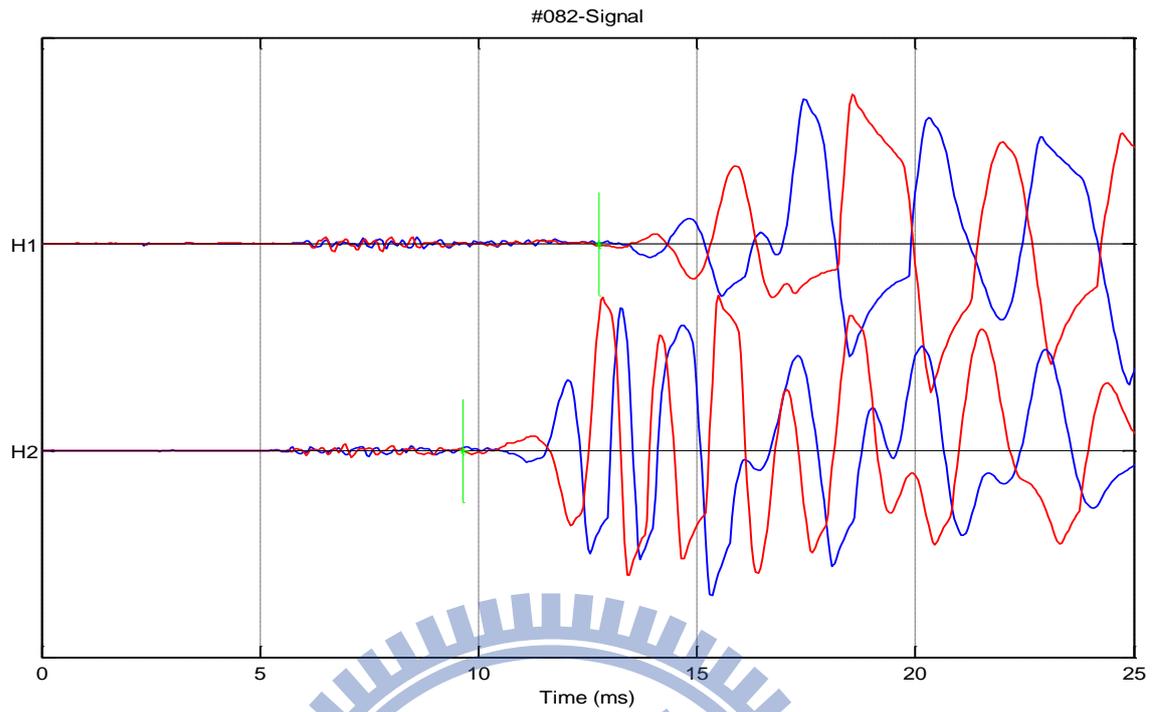


圖 3.15 #082 訊號波形及初波達時間點

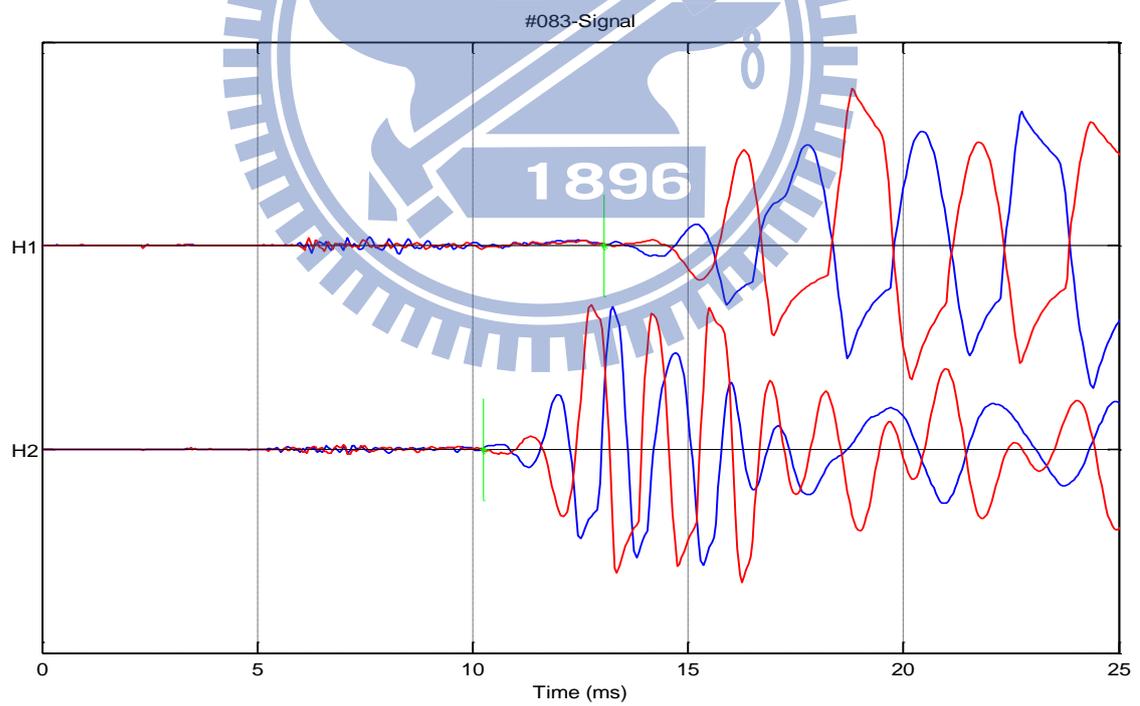


圖 3.16 #083 訊號波形及初波達時間點

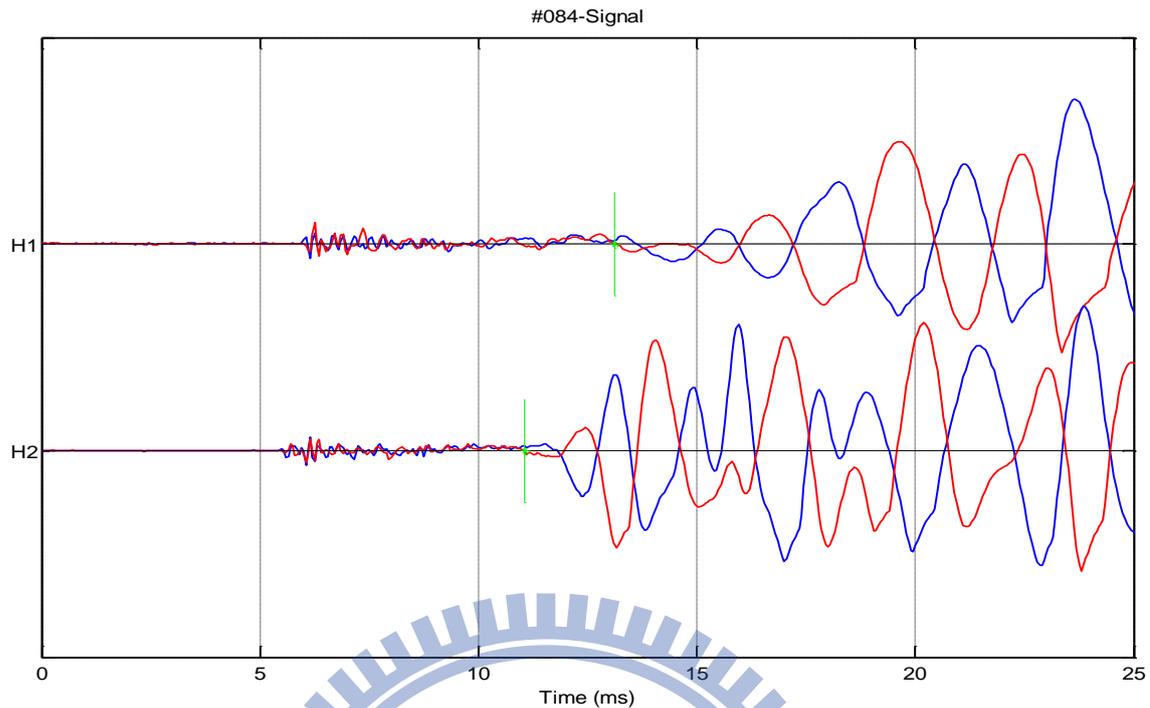


圖 3.17 #084 訊號波形及初波達時間點

資料編號	深度 (m)	t_{H_1} (ms)	t_{H_2} (ms)	剪力波速, V_s (m/s)
#008	-173	10.65	8.67	507.06
#009	-172	10.61	8.90	584.28
#010	-171	10.47	8.50	509.24
#082	-53	12.76	9.63	319.56
#083	-52	13.06	10.24	355.09
#084	-51	13.12	11.06	486.87

表 3.1 半自動化挑波程序訂定測試資料於時間域初達波分析剪力波速資料

3.4.2 半自動化挑波程序驗證用資料

半自動化挑波程序驗證用資料依照孔內量測方法分兩部分，分別是懸盪式震測資料及下孔式震測資料。

- (1) 懸盪式震測資料：同 3.4.1 所述，採用雲林科技大學校區內鑽孔施作全剖面資料，即深度為地下 7~180m，每 1m 量測一筆資料，施作之環境背景及儀器資訊等已在 3.4.1 提到，故本小節不再重複。

- (2)下孔式震測資料:採用交通大學博愛校區操場施作之下孔震測資料，位置如圖 3.18，所需之設備包括震源（鐵鎚）、孔內受波器、震測儀（資料擷取系統），其施測方式如圖 3.19 所示，設備詳細資訊如下：
- (a) 震源：6 kg 長柄鐵鎚及 H 型鋼。
 - (b) 受波器：三向度孔內受波器（Geo Space GS 20DM, one vertical, two horizontal 90 degree opposed, 28 Hz, 1000 ohm coil），圖 3.20(左)。
 - (c) 震測儀：日本 OYO 公司出品之 McSeis-SX 型 24 波道可攜式數位震測儀(圖 3.20(右))，其輸入阻抗 20k 歐姆，放大倍率達 1024 倍，頻率響應 4.5 Hz ~ 4600 Hz，備有低通與限頻前置濾波器；18 bit A/D 高解析度，取樣時距 25 至 2000 μsec ，訊號長度達 2048 字元，訊號可重複疊加；採用 3.5 吋，1.44 MB 磁帶及 2.0 GB 硬碟，10.4 英吋 640*480 點之液晶板，電源使用 12DC 伏特電瓶。



圖 3.18 交通大學博愛校區下孔震測鑽孔位置

該場址鑽孔 BH2 位於交通大學博愛校區足球場升旗台前，計深度 18.5m，於深度 0~4.3m 為棕黃色粉土質砂土；4.3~6.6m 為粉土質細砂偶夾礫石；6.6~15.8m 為砂質礫石夾卵石；15.8~18.25m 為深灰色粉砂

岩，其中深度 11.95m 以下 SPT-N 值大於 50，見附錄(一)。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。(鄒和翰, 2005)

訊號取樣頻率為 $50\mu s$ 、擷取點數為 2048 點，實際施測深度為地下 3~17m。

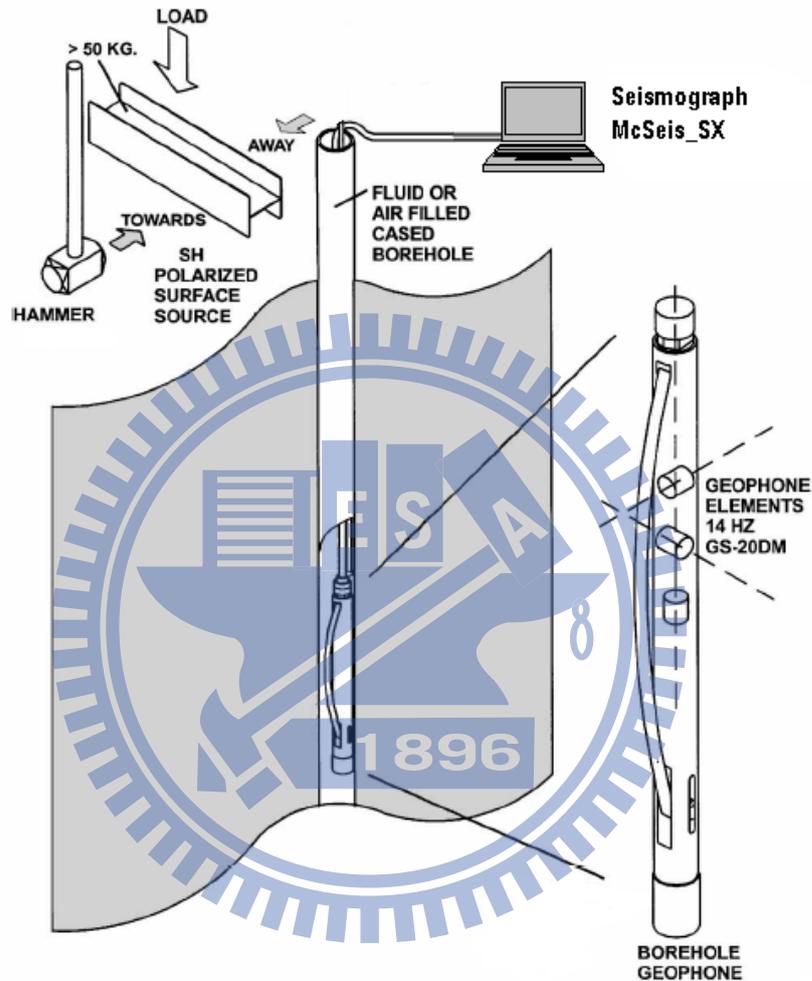


圖 3.19 下孔震測施測設備示意圖(鄒和翰, 2005)



圖 3.20 震測儀與孔內受波器

第四章 試驗結果與討論

4.1 半自動化挑波流程訂定

本節屬於試驗之測試階段，如上章所述採用資料品質較好之懸盪式震測資料#008、#009、#010，及品質相對較差之#082、#083、#084，分別以頻率域分析法及時間－頻率域分析法作測試，並考慮以時窗函數作為資料前處理步驟之影響，進行一系列比較，藉此訂定半自動化挑波流程。

4.1.1 頻率域分析法

根據 3.2.2 所說明之頻譜分析方法步驟，應用至本測試階段之資料值，其結果如圖 4.1～圖 4.6 所呈現，圖片上半部為將訊號以快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT) 之能量頻譜，而下半部則是透過互能頻譜 (Cross Spectral Density, CSD) 之相位角獲得之兩受波器各頻率之相位角差。並針對經過摺開 (unwrapping) 後之線段，根據能量集中之頻帶選取頻率段，因為此頻帶下所得之相位譜錯誤較無錯誤；最後以此頻段之和未摺合 (unwrapped) 線段取回歸線之斜率絕對值，其倒數即為此頻帶下之相位速度，見式 (3-2)。

圖中 V_s 反推線段為手動挑波所得時間域剪力波速值在假設無頻散狀況所推得之理論未摺合線段，做為參考及比較之用。最後，以頻譜分析法所得之測試資料剪力波相位波速彙整於表 4.1。

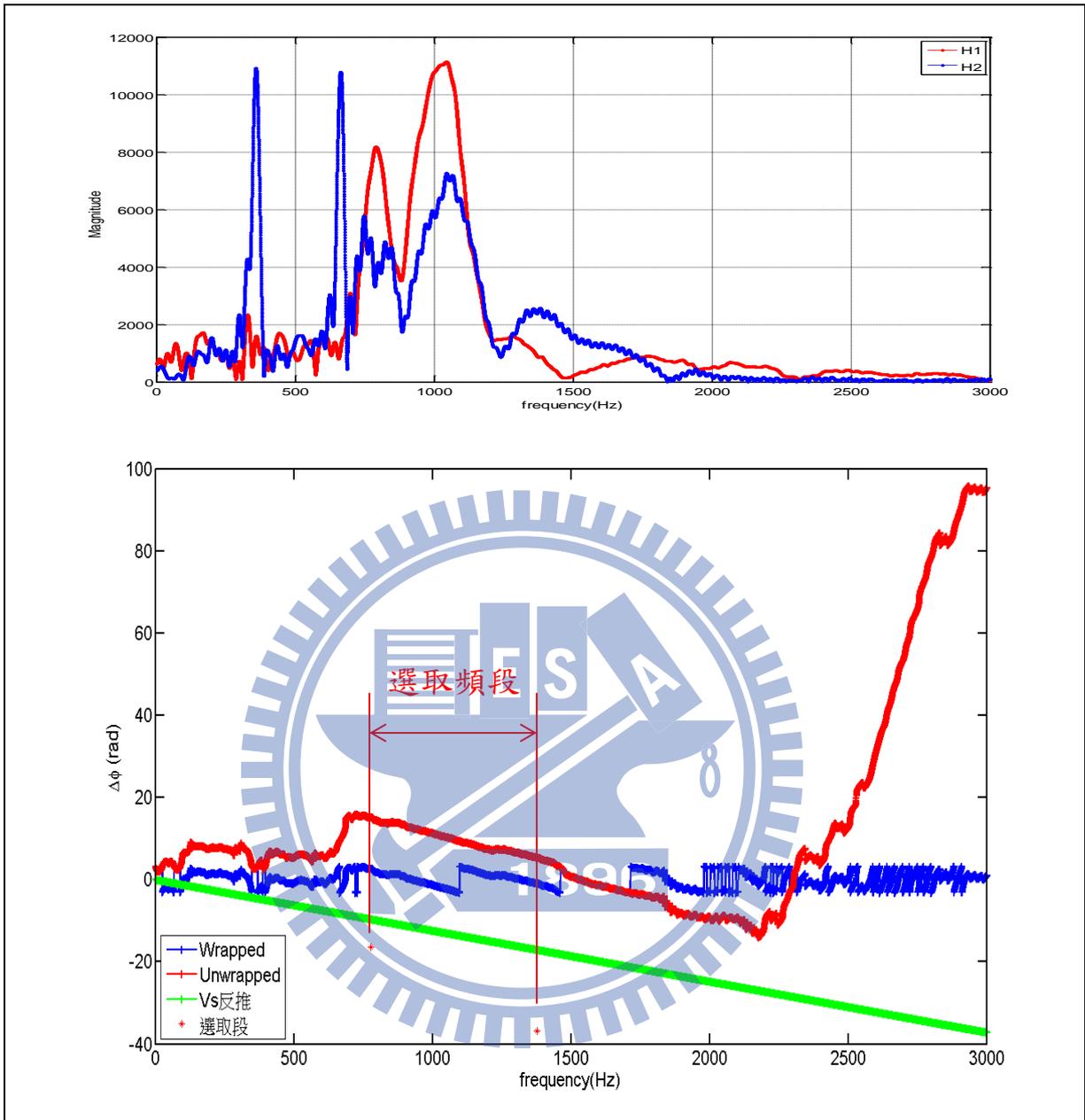


圖 4.1 #008 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜

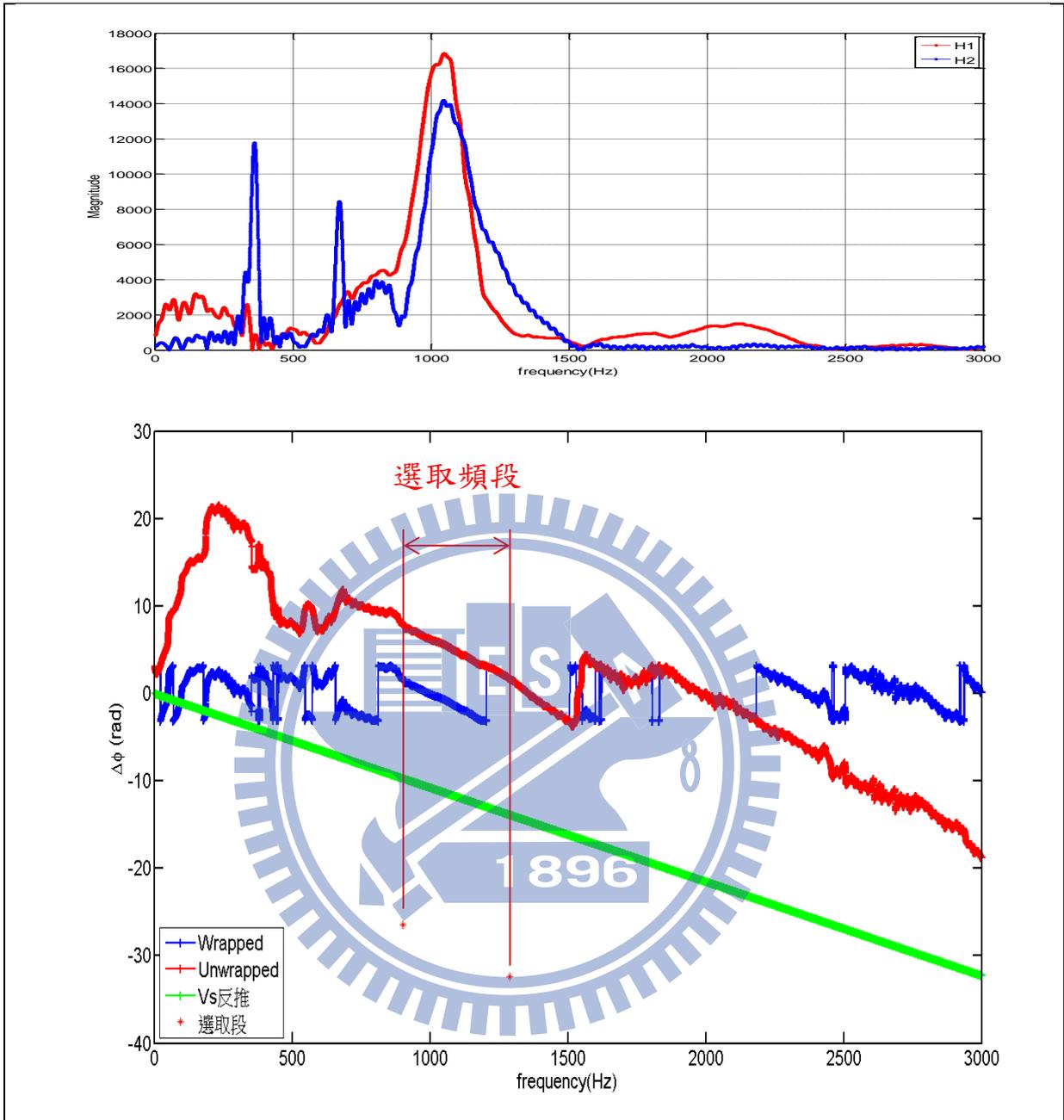


圖 4.2 #009 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜

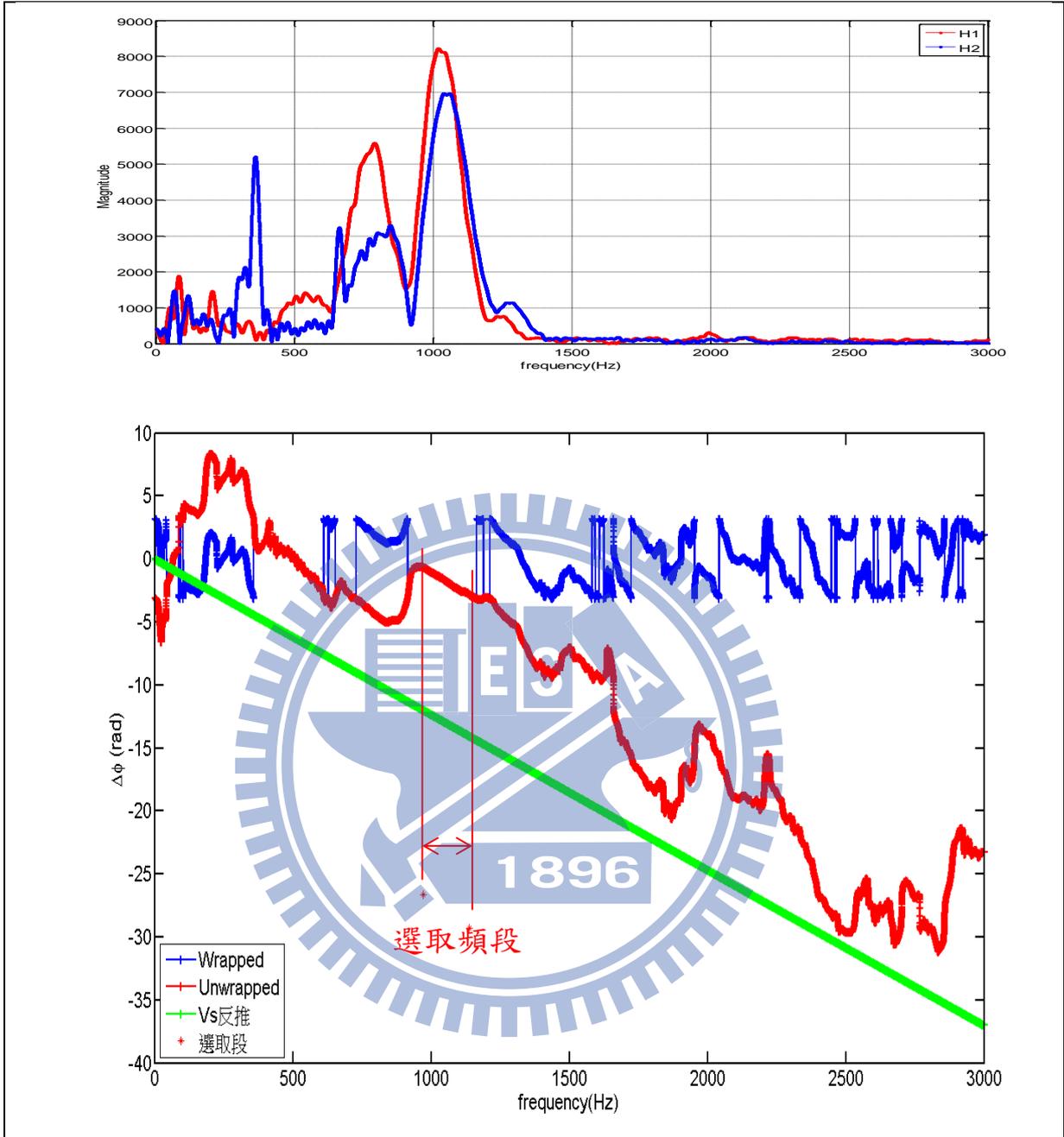


圖 4.3 #010 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜

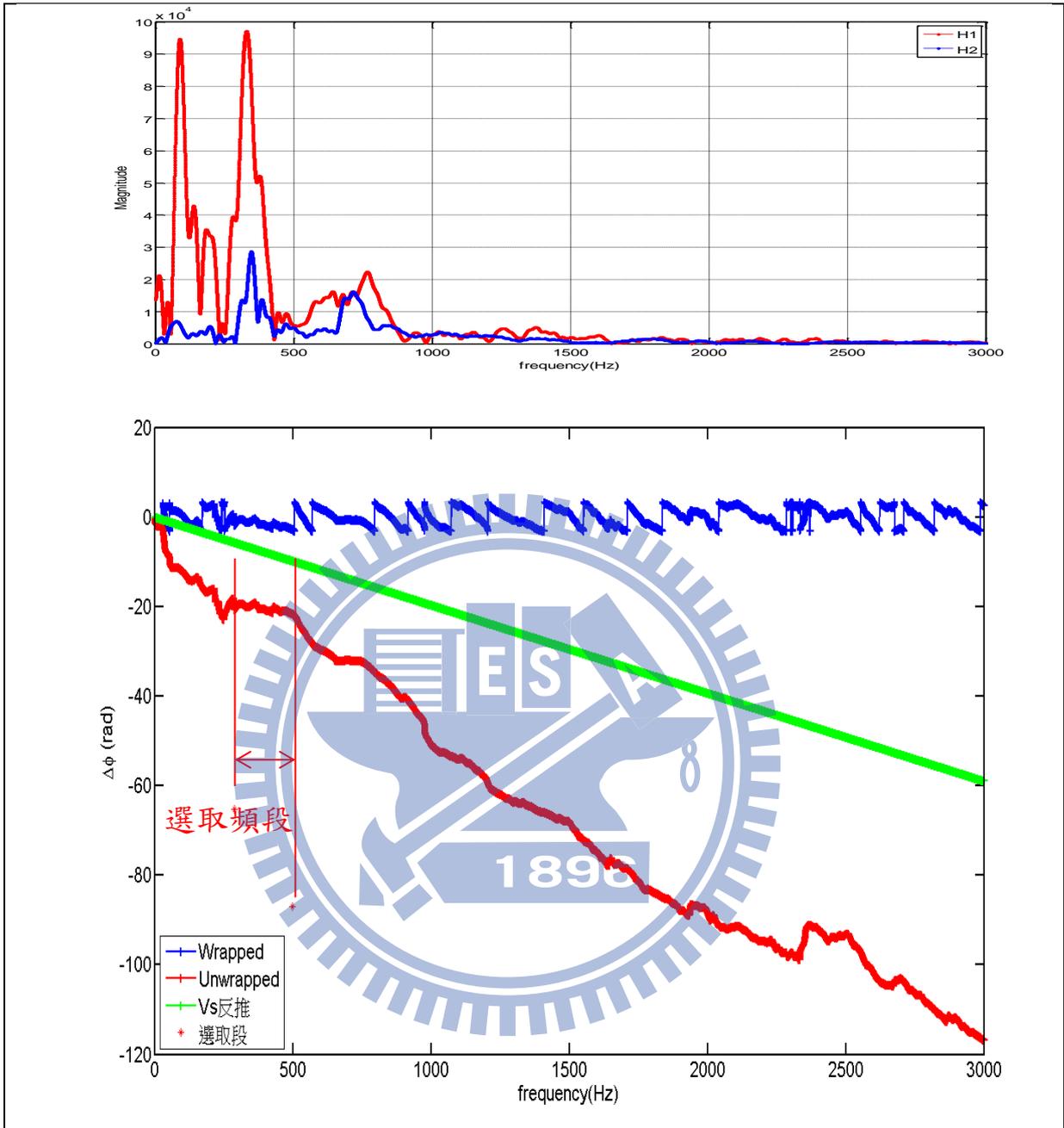


圖 4.4 #082 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜

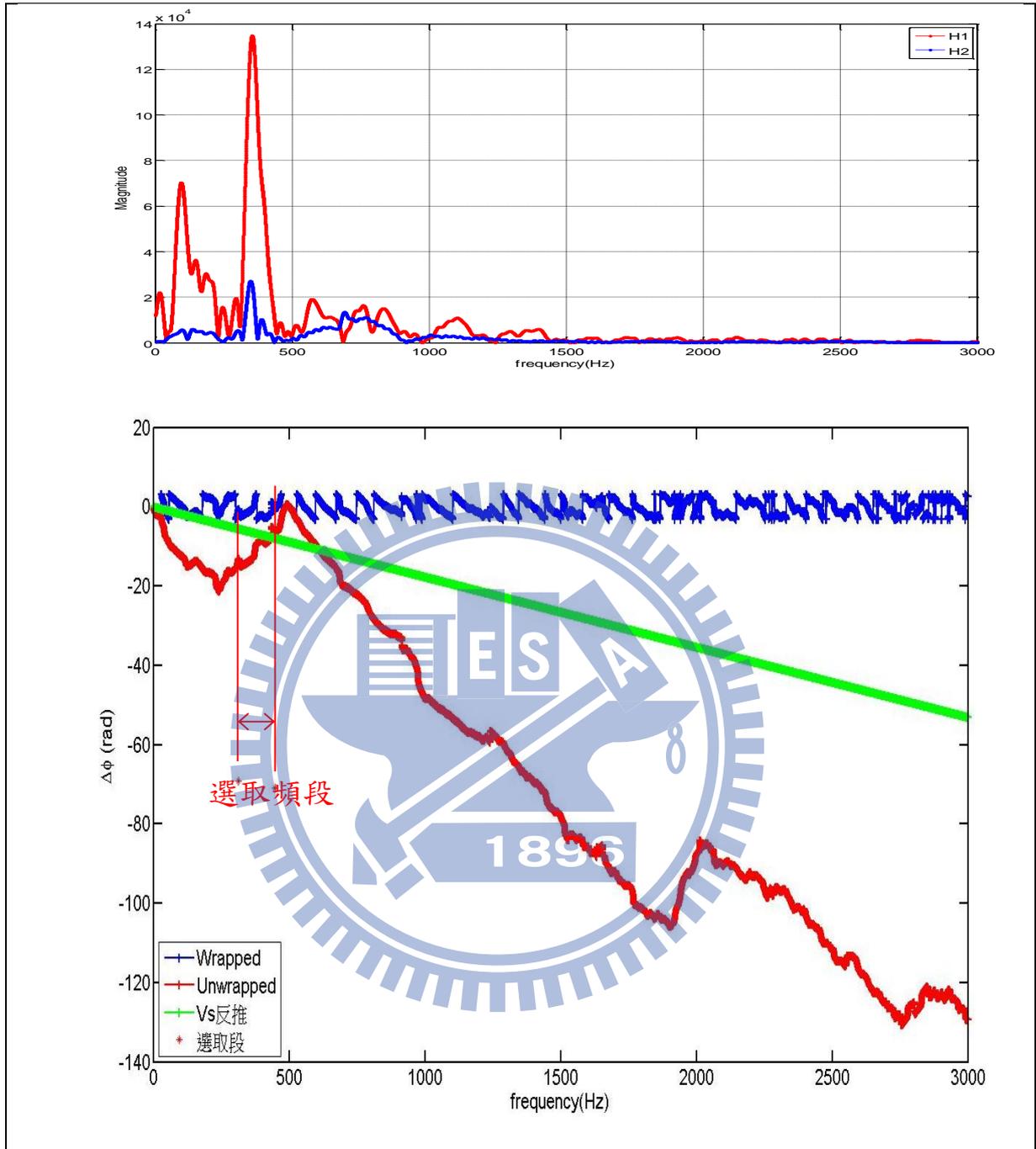


圖 4.5 #083 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜

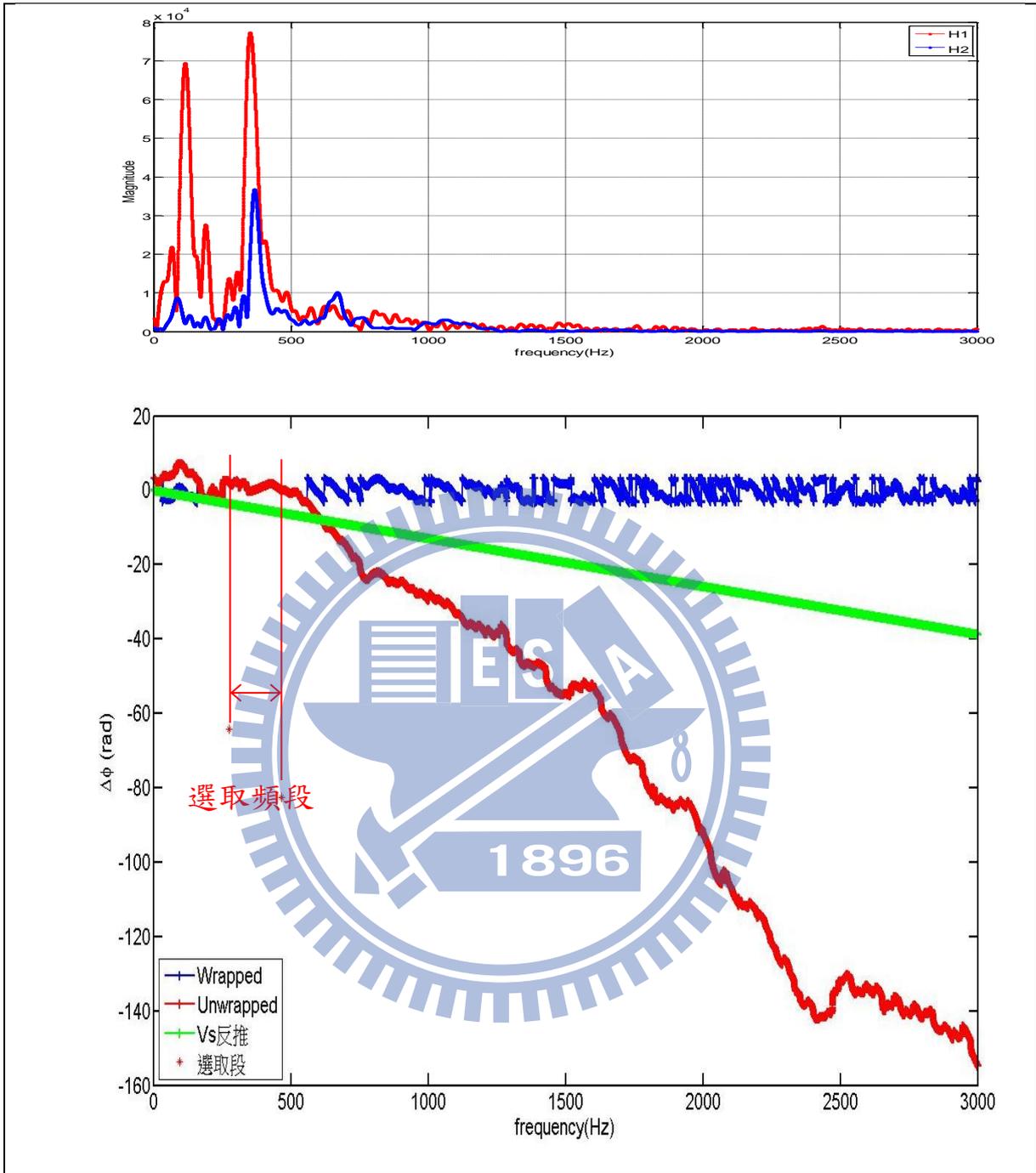


圖 4.6 #084 於頻譜分析法所得能量分佈與相位角差頻譜

資料編號	深度 (m)	相位波速, V_{ph} (m/s)	剪力波速, V_s (m/s)
#008	-173	368.05	507.06
#009	-172	359.70	584.28
#010	-171	551.86	509.24
#082	-53	718.59	319.56
#083	-52	86.34	355.09
#084	-51	1433.00	486.87

表 4.1 測試資料於頻率域頻譜分析相位波速資料

4.1.2 時間－頻率域分析法

如 3.2.3 節所定義之時間－頻率域速度，係將訊號藉由時頻分析方法轉換成時頻譜，並在時頻譜上選取頻率段，取得頻帶下各訊號包絡線，並在包絡線上挑取振幅起伏起始點，取其算術平均數，即為該頻帶下波相初達時間。而本研究所採用之時頻分析方法為多重濾波法及小波轉換法，以取得時頻譜，兩者之介紹及原理可以參見 2.4.3 節。

4.1.2.1 多重濾波法

根據 2.4.3.1 所述，多重濾波法(Multiple Filter Technique, MFT)為 Deiwonski et al.(1969)為了研究頻散現象所提出之群速分析，能有效且快速地分析複雜的頻散訊號。此方法利用傅立葉轉換，在頻率域中利用一帶通濾波器(filter)取得各頻率下的訊號，求得在時間域中各訊號的包絡線，並以其包絡線最大振幅之到時計算該頻率下之群速度(group velocity)，得到訊號之頻率與群速的關係，亦即所謂的頻散曲線。

故此法主要是找出各頻率下波相之群速度，與本研究欲取得之初達速度略有出入，因剪力波隨時間軸略有衰減，故選擇訊號包絡線波峰速度會略低於初達波速。因此本研究考慮到初達波到時之能量起伏特性，採用各頻率下訊號包絡線振幅起伏起始點，並以 3.3 節所提出之自動挑取振幅起伏

起始點之方法取得頻帶下之波相初達時間，分別取得上、下受波器之初達時間 t_{mfH_1} 、 t_{mfH_2} ，即可計算頻帶波速 V_{mf} 。

而多重濾波法之設置參數如式(2-24)、式(2-25)，根據 Herrmann (1973) 所提出的建議參數為 $BAND = 0.25$ 、 $\alpha = 16\pi$ ，亦即 $\beta = 3.15$ ；但為了增加時間域之解析度，使其能判斷較正確的初達時間，因此參數採用 $BAND = 0.5$ 、 $\beta = 3.15$ 。如圖 4.7 之比較，後者初達時間較精確。

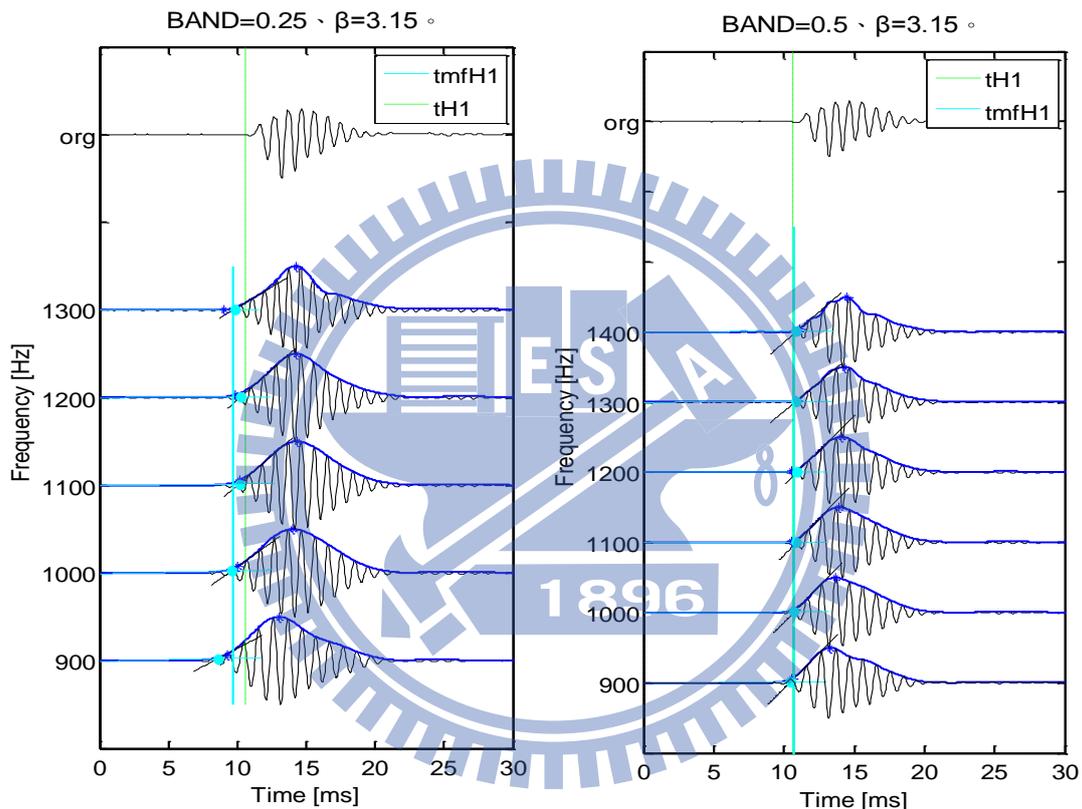


圖 4.7 多重濾波法參數設置比較

本測試階段成果如圖 4.8~圖 4.25 所示，以圖 4.8、圖 4.9、圖 4.10 表示一組資料#008 顯示為例，圖 4.8 為受波器 H1 所得訊號資訊，左下圖為訊號在時間域所式波形，右上圖則為其經過快速傅立葉轉換之能量頻譜，左上圖則是經由 2.4.3.1 提到之多重濾波法步驟所得時頻譜，色階顯示各頻率訊號包絡線能量分佈，並參考時域之訊號波形及頻域之能量譜，選取頻率段。圖 4.9 之受波器 H2 作法亦同。圖 4.10 之左圖、中圖則為 H1、

H2 選定頻帶下之訊號包絡線，並以振幅起伏起始點挑取自動化分析方法求得頻帶下平均初達時間 $t_{mf}H_1$ 、 $t_{mf}H_2$ 。圖中上方 org 標示即原始波形，以及手動挑波所得初達時間 tH_1 、 tH_2 皆作為參考比對之用。圖 4.10 之右圖則是經過計算後所得波速比較圖。最後，以多重濾波法所得之測試資料頻帶波速與剪力波速之比較彙整於表 4.2。

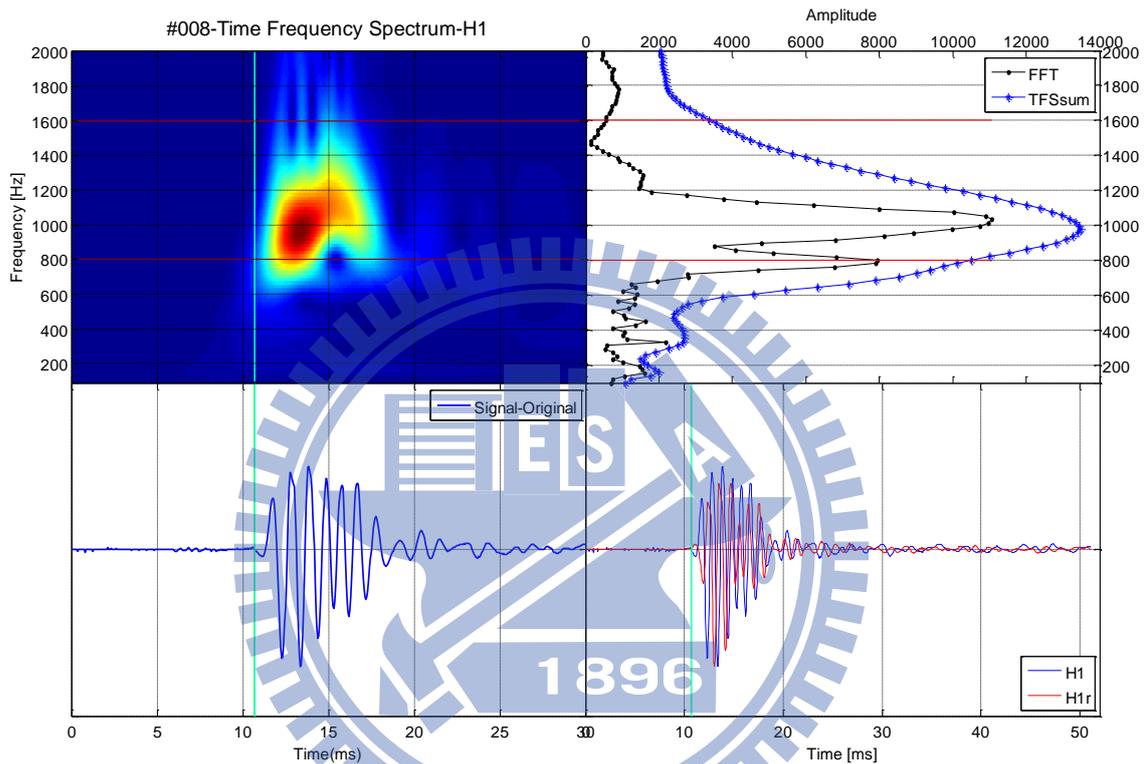


圖 4.8 多重濾波法於測試資料#008 之應用(受波器 H1 資料)

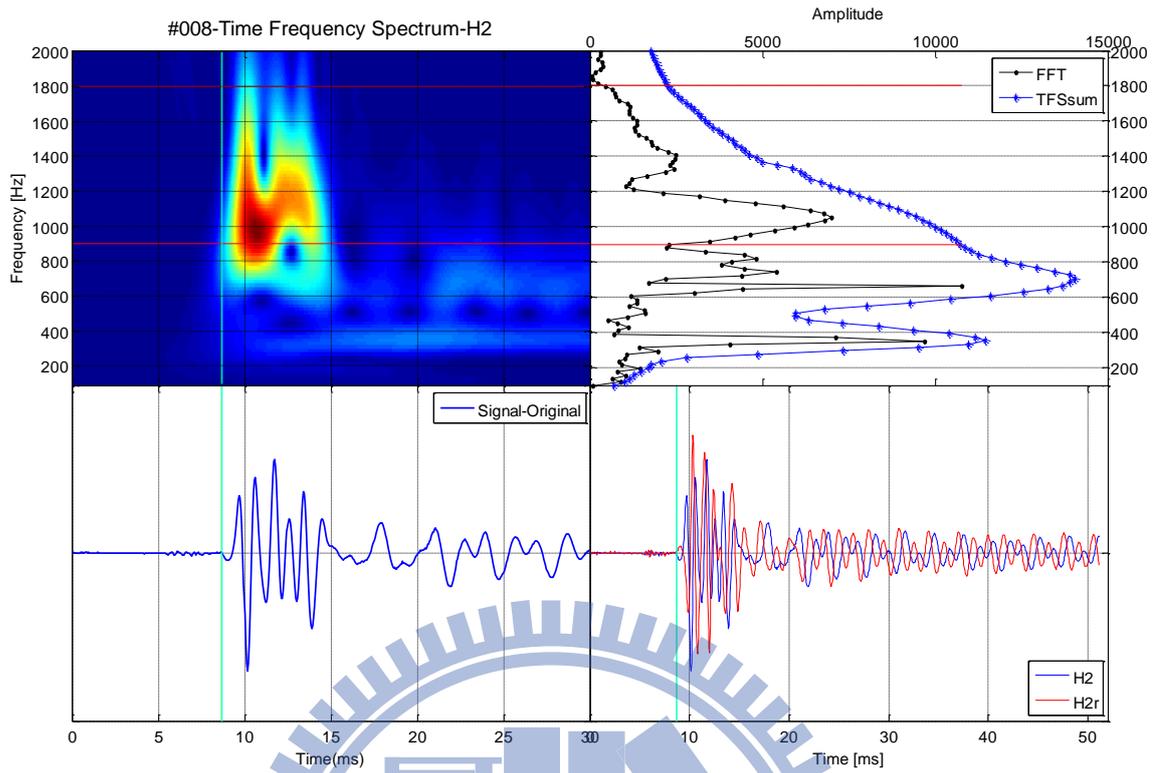


圖 4.9 多重濾波法於測試資料#008 之應用(受波器 H2 資料)

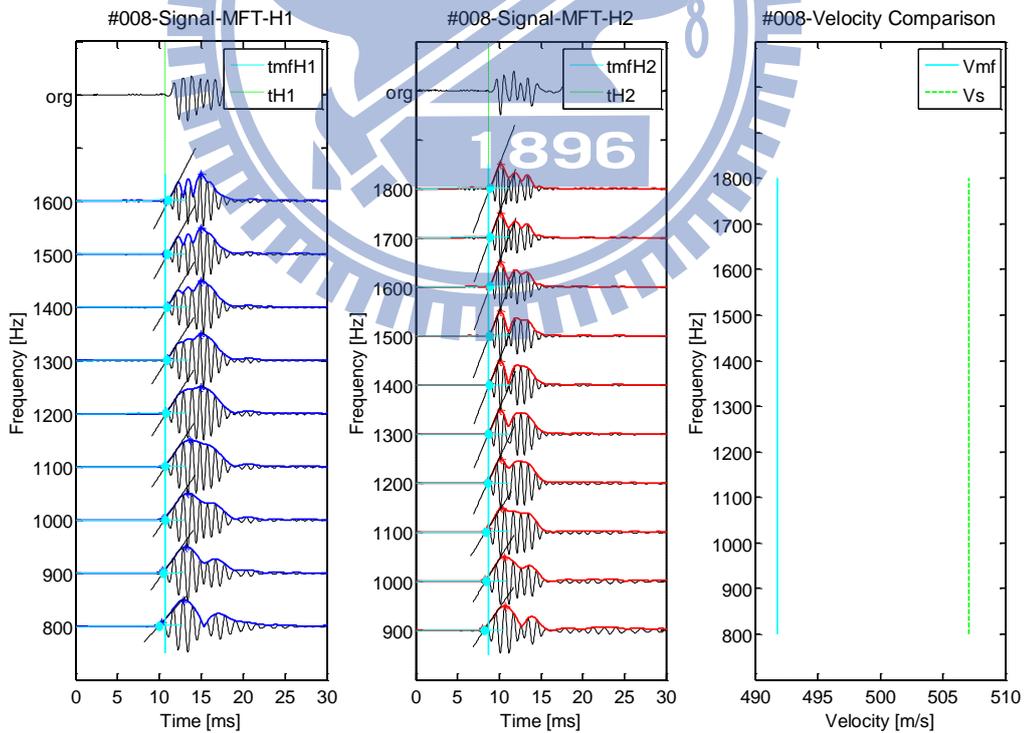


圖 4.10 多重濾波法於測試資料#008 之應用結果

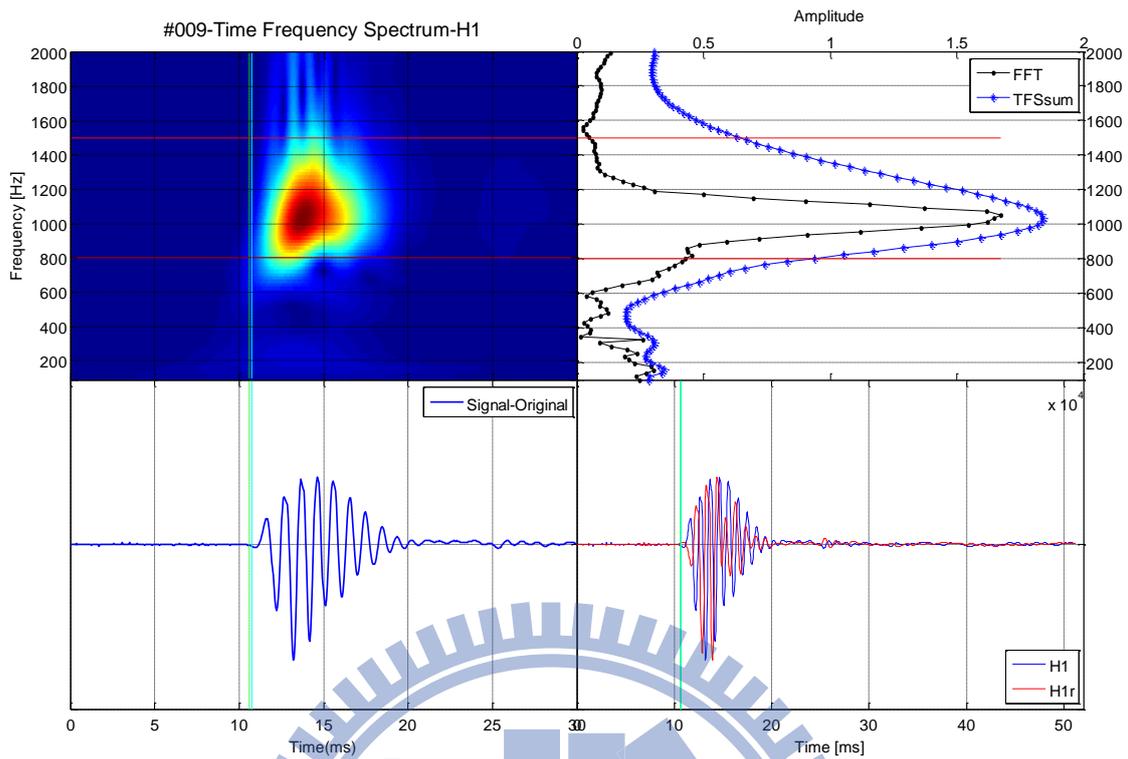


圖 4.11 多重濾波法於測試資料#009 之應用(受波器 H1 資料)

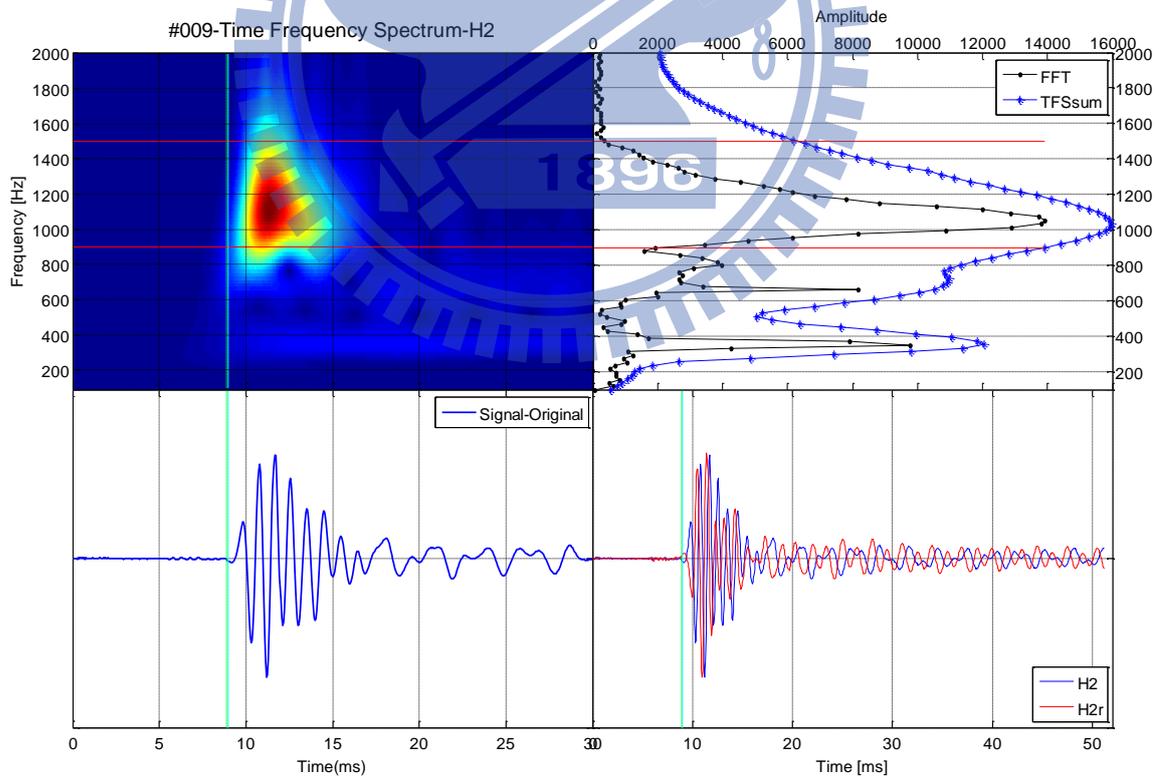


圖 4.12 多重濾波法於測試資料#009 之應用(受波器 H2 資料)

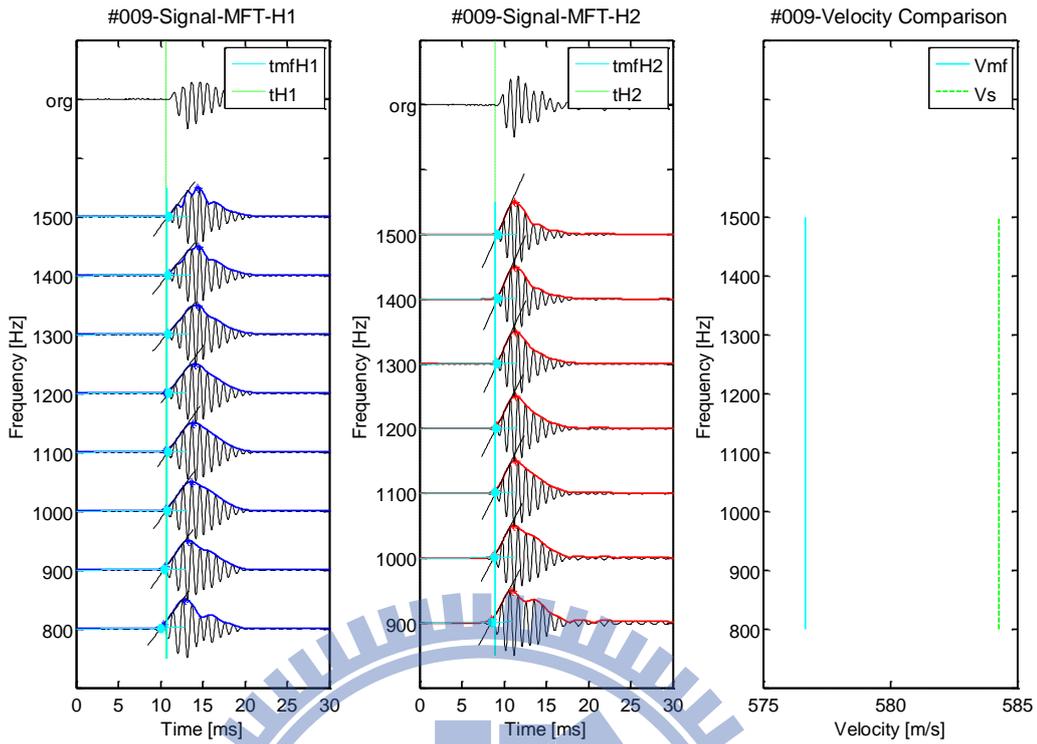


圖 4.13 多重濾波法於測試資料#009 之應用結果

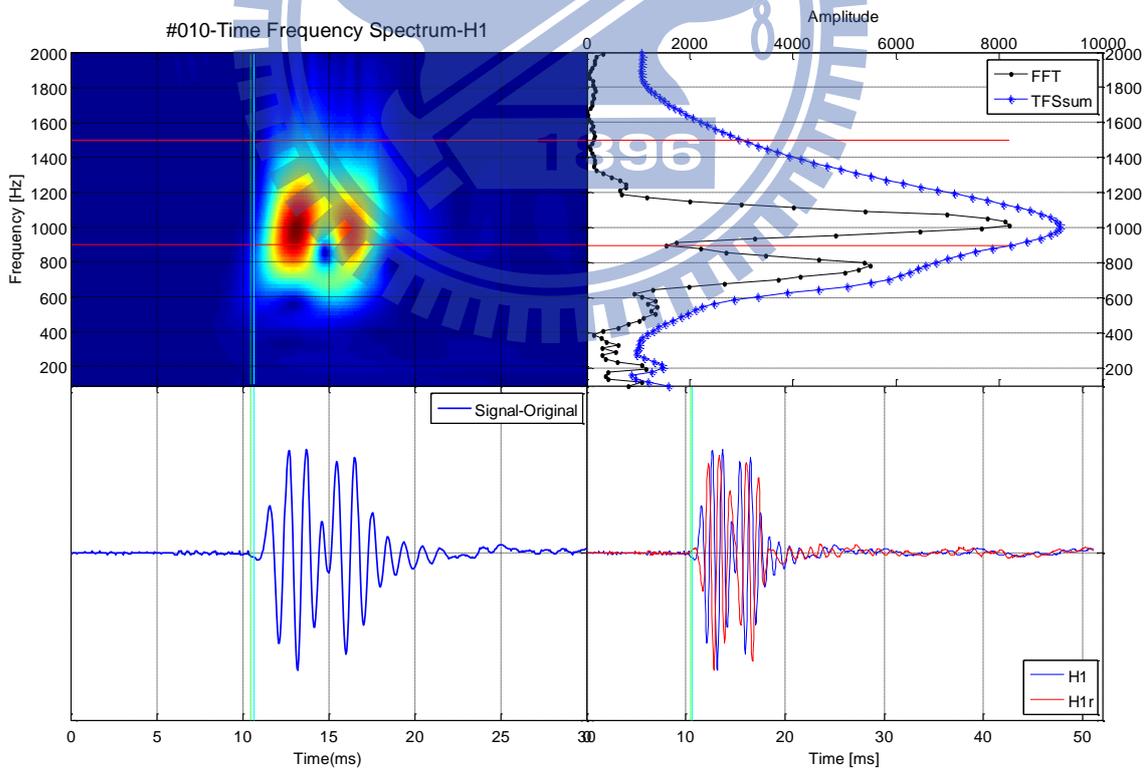


圖 4.14 多重濾波法於測試資料#010 之應用(受波器 H1 資料)

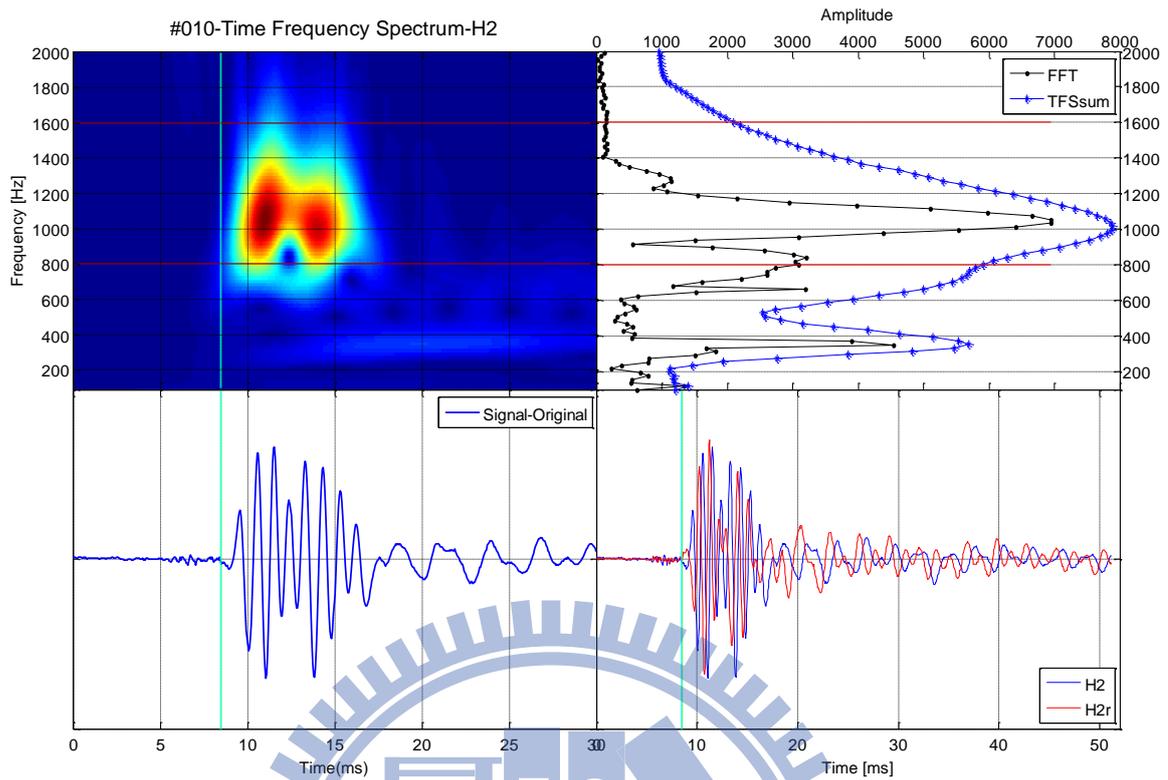


圖 4.15 多重濾波法於測試資料#010 之應用(受波器 H2 資料)

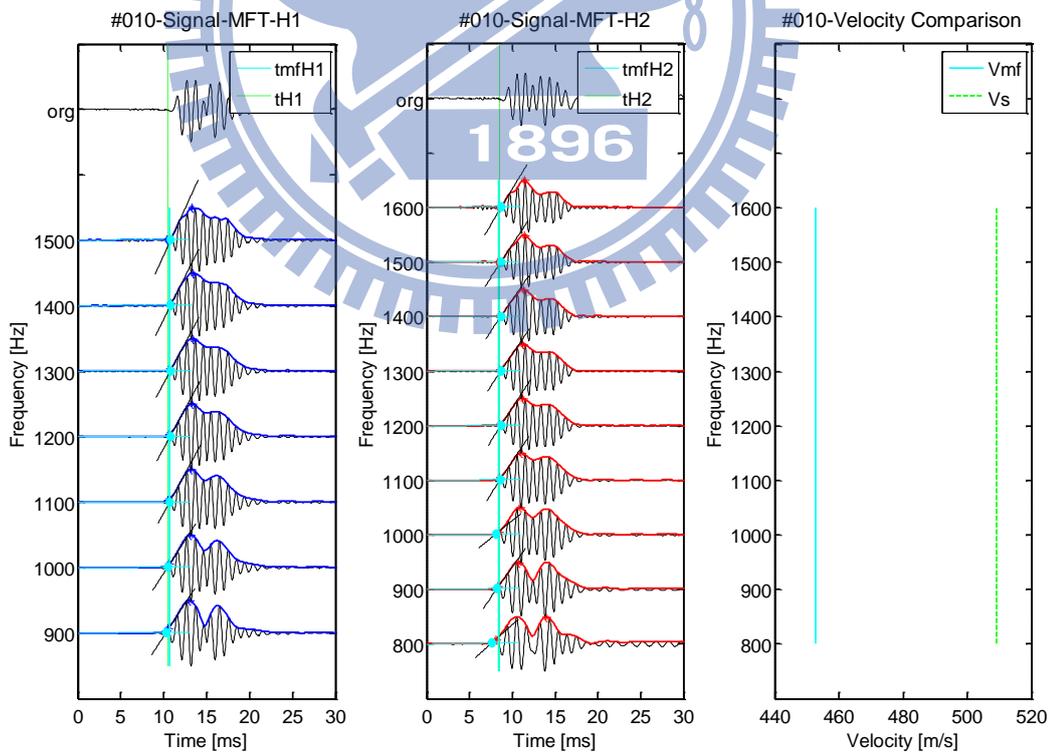


圖 4.16 多重濾波法於測試資料#010 之應用結果

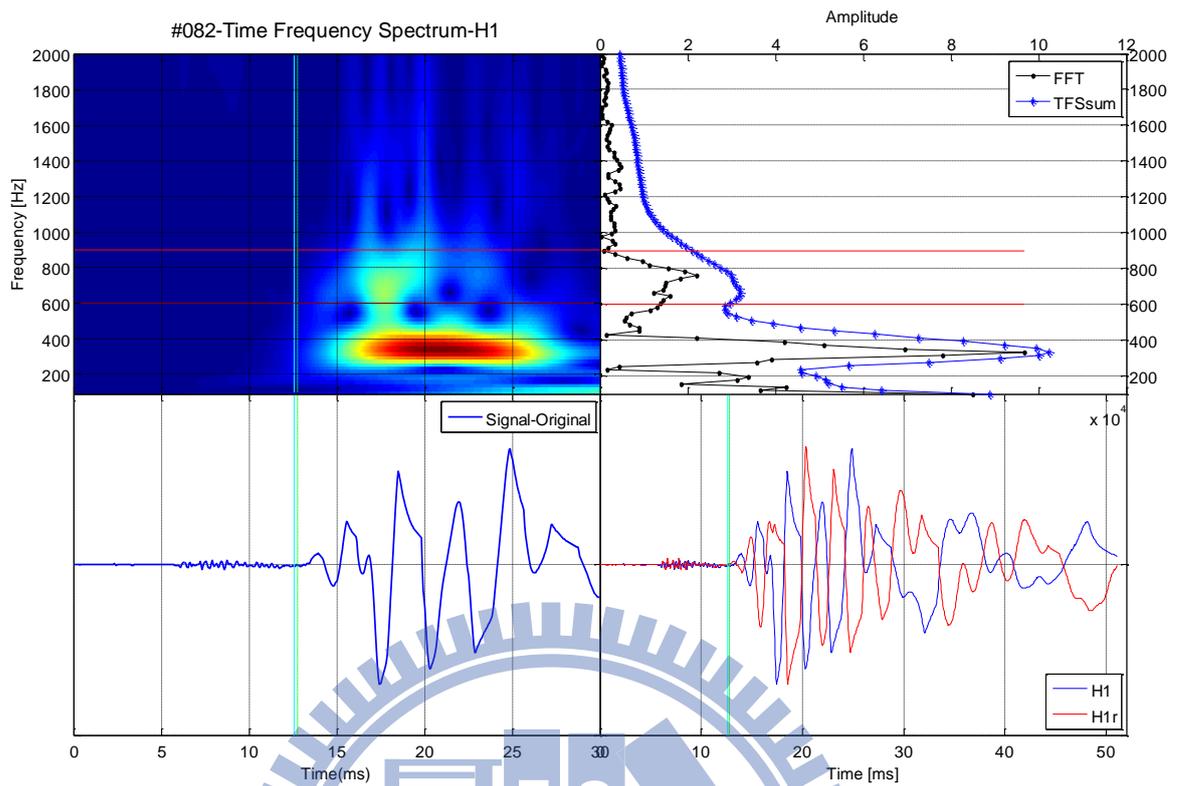


圖 4.17 多重濾波法於測試資料#082 之應用(受波器 H1 資料)

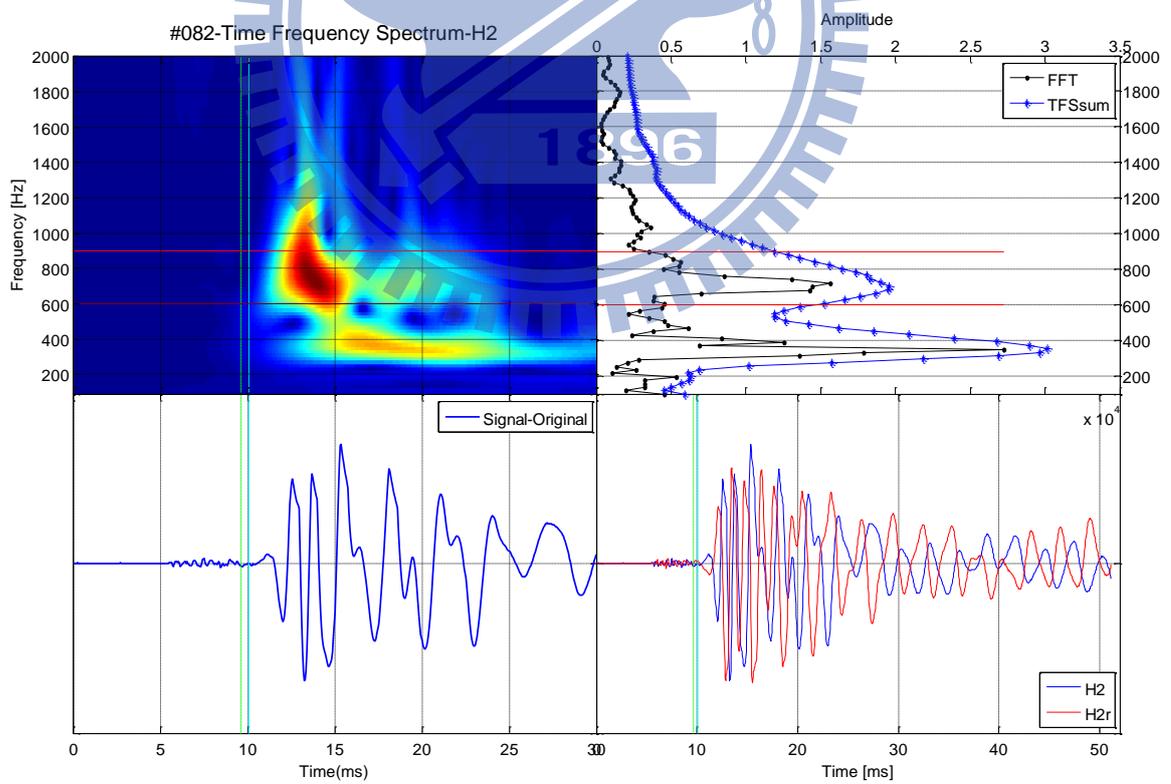


圖 4.18 多重濾波法於測試資料#082 之應用(受波器 H2 資料)

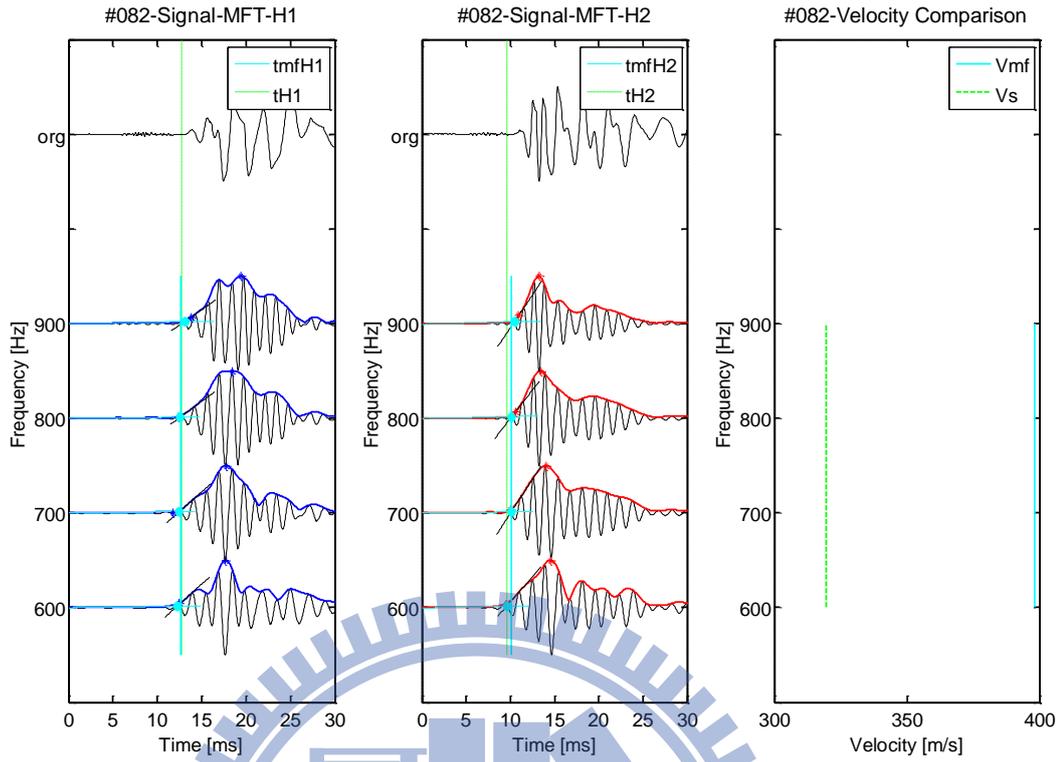


圖 4.19 多重濾波法於測試資料#082 之應用結果

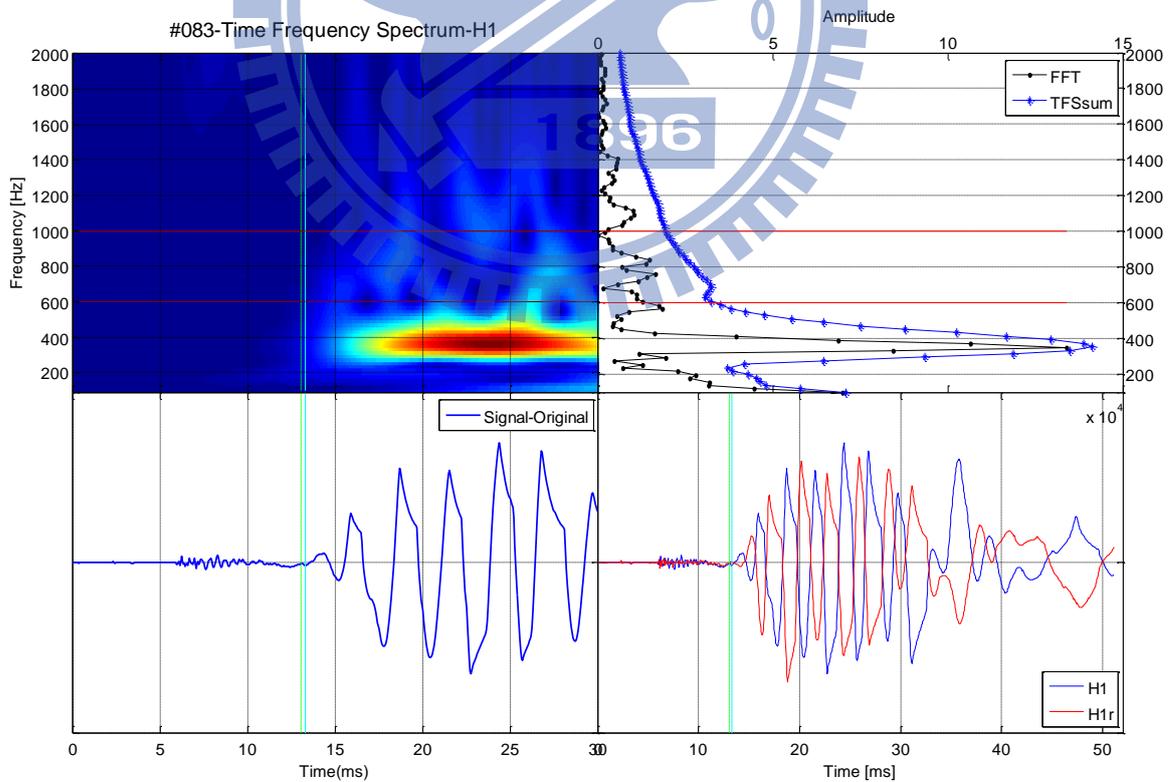


圖 4.20 多重濾波法於測試資料#083 之應用(受波器 H1 資料)

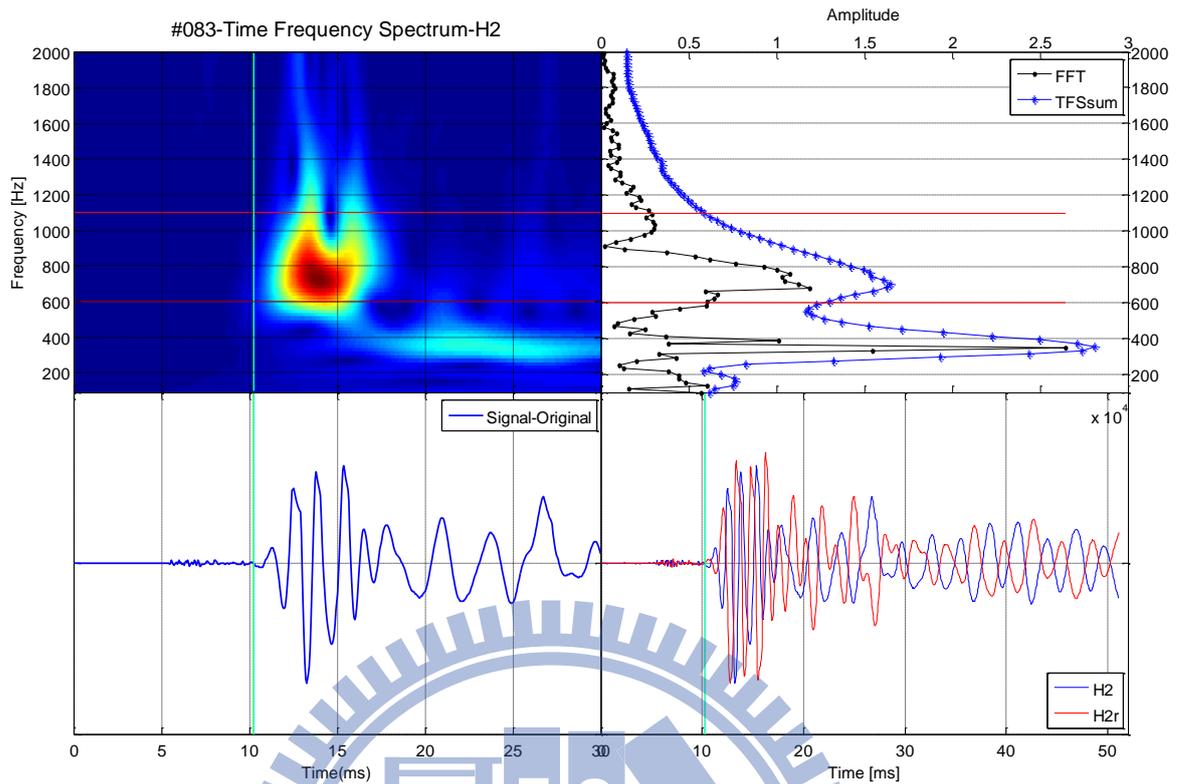


圖 4.21 多重濾波法於測試資料#083 之應用(受波器 H2 資料)

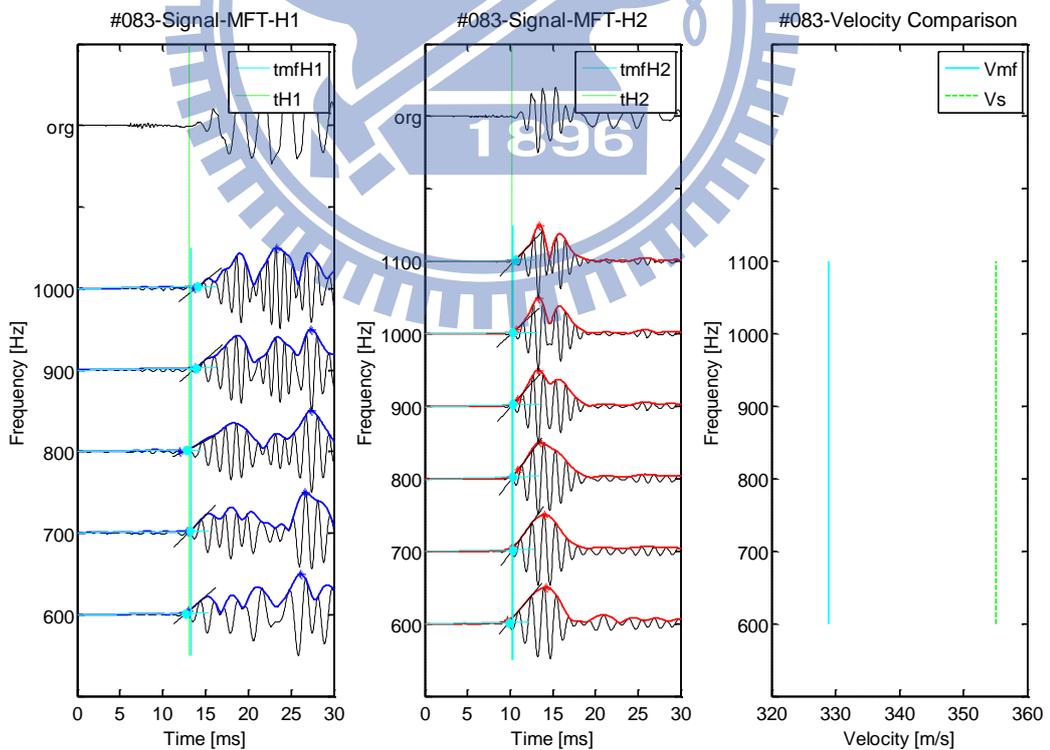


圖 4.22 多重濾波法於測試資料#083 之應用結果

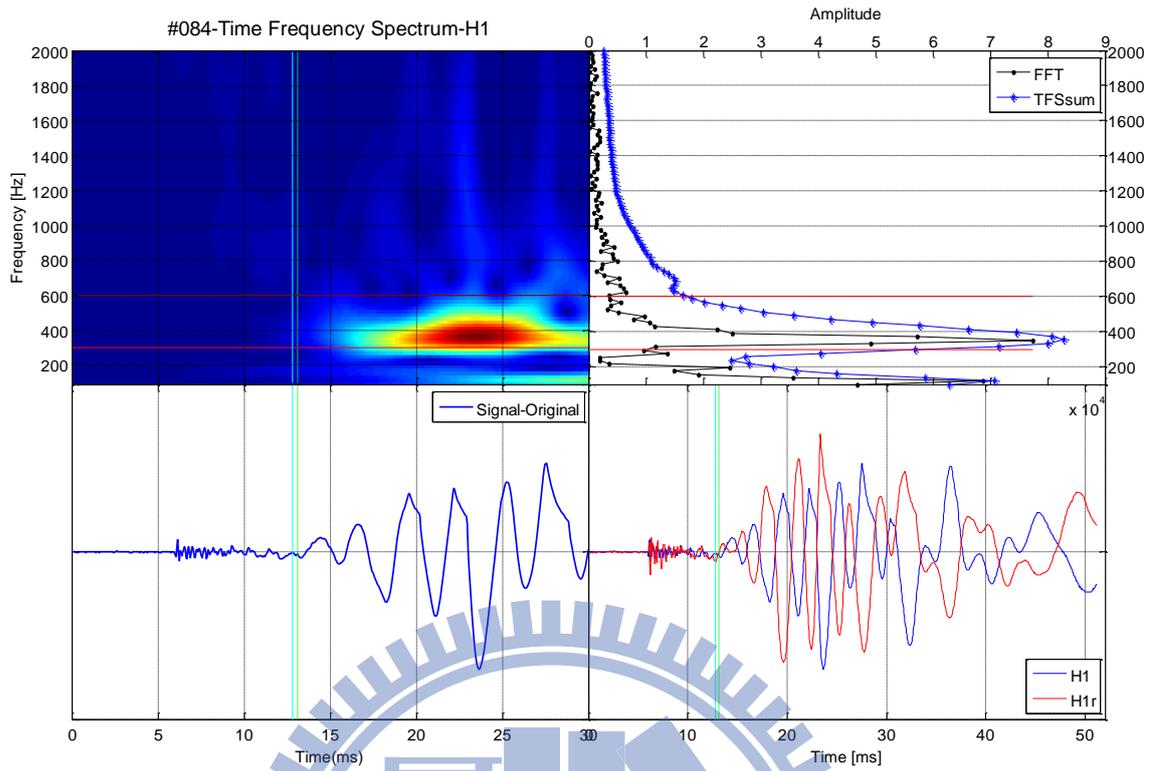


圖 4.23 多重濾波法於測試資料#084 之應用(受波器 H1 資料)

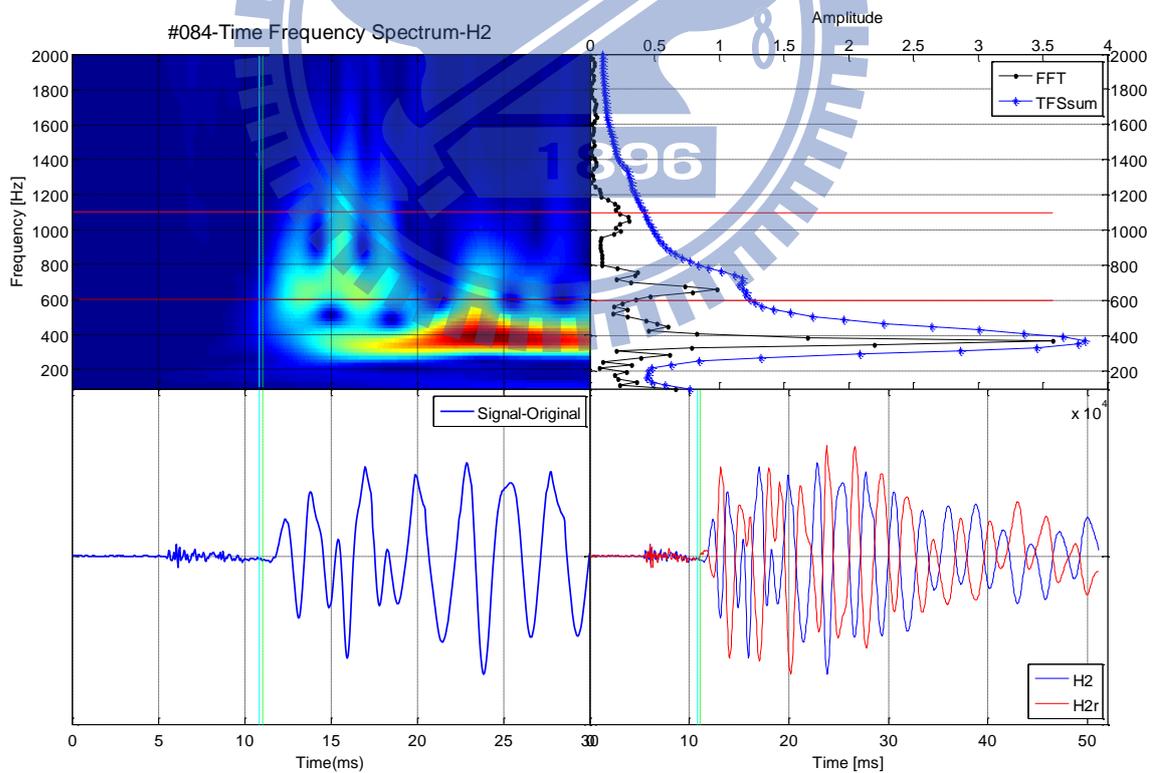


圖 4.24 多重濾波法於測試資料#084 之應用(受波器 H2 資料)

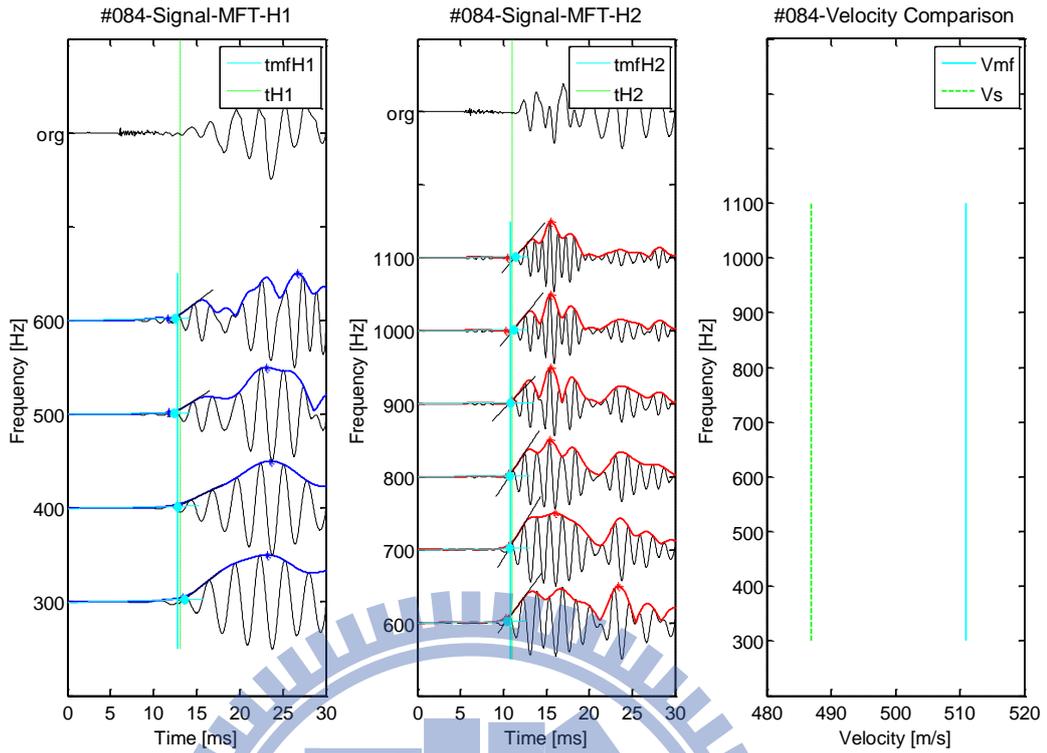


圖 4.25 多重濾波法於測試資料#084 之應用結果

資料編號	深度 (m)	$tmfH_1$ (ms)	$tmfH_2$ (ms)	頻帶波速 V_{mf} (m/s)	剪力波速 V_s (m/s)
#008	-173	10.72	8.68	491.76	507.06
#009	-172	10.72	8.99	576.66	584.28
#010	-171	10.66	8.45	452.75	509.24
#082	-53	12.60	10.08	398.08	319.56
#083	-52	13.33	10.29	328.89	355.09
#084	-51	12.83	10.87	510.97	486.87

表 4.2 測試資料於多重濾波法分析頻帶初達波速資料

4.1.2.2 小波轉換法

承如 2.4.3.2 節所述，小波轉換(Wavelet Transform)擁有高時間解析度及高頻率解析度之自適應性，並且能同時顯示訊號在頻率與時間之關係。故相對於本上小節使用多重濾波法繪製時頻譜，本小節採用 Morlet 連續小波轉換做為時頻譜幫助判斷分析，預計在時頻譜解析度上相對有更大幫助。

根據 2.4.3.2 節之原理，將時間域訊號經由小波轉換，自動調整尺度因子(scaling factor)及平移參數(shifting)得到時頻譜。而參數選擇上，首先設定母小波函數在尺度 $a = 1$ 時之長度參數WinLen，相當於帶寬參數 f_b ，長度越短表示時間域解析度越精細，經測試選擇WinLen = 4之時頻譜呈現效果最佳。

獲得時頻譜後再根據能量分佈及時域波形選擇頻率範圍，得到頻帶下各頻率訊號包絡線，並以 3.3 節所提出之自動挑取振幅起伏起始點之方法取得頻帶下之波相初達時間，分別取得上、下受波器之初達時間 $t_{wt}H_1$ 、 $t_{wt}H_2$ ，即可計算頻帶波速 V_{wt} 。其測試成果如圖 4.26~圖 4.43 所示；而以小波轉換法所得之測試資料頻帶波速與剪力波速之比較彙整於表 4.3。

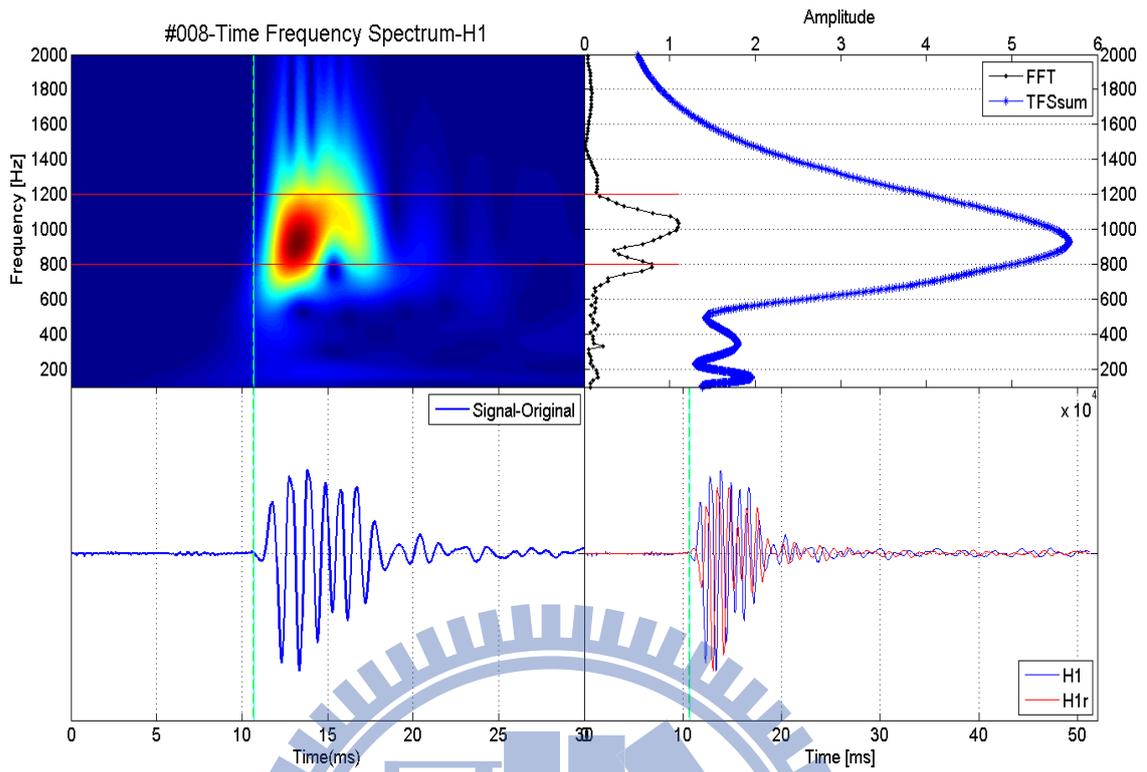


圖 4.26 小波轉換法於測試資料#008 之應用(受波器 H1 資料)

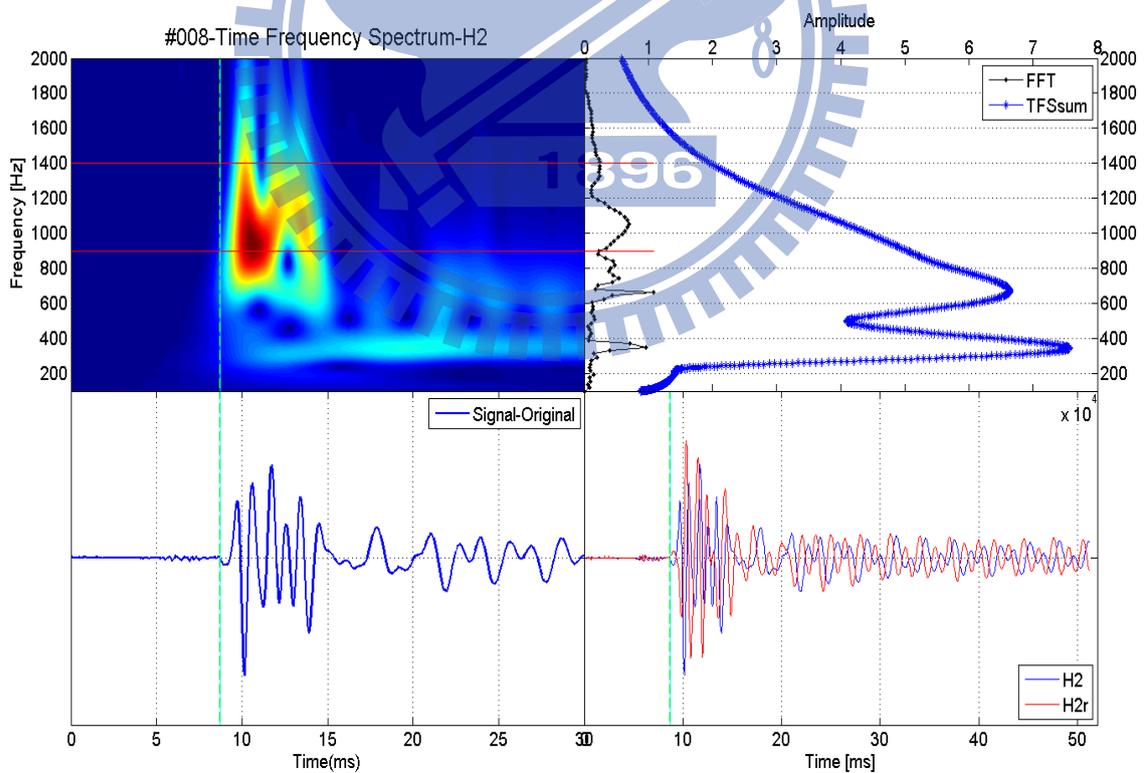


圖 4.27 小波轉換法於測試資料#008 之應用(受波器 H2 資料)

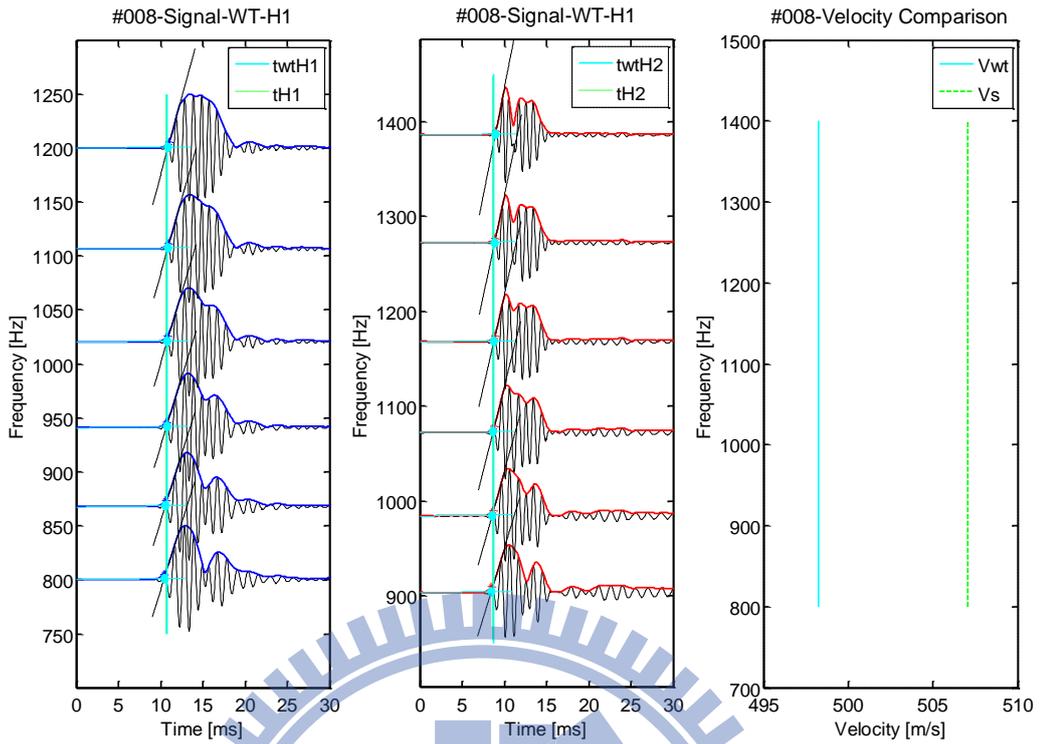


圖 4.28 小波轉換法於測試資料#008 之應用結果

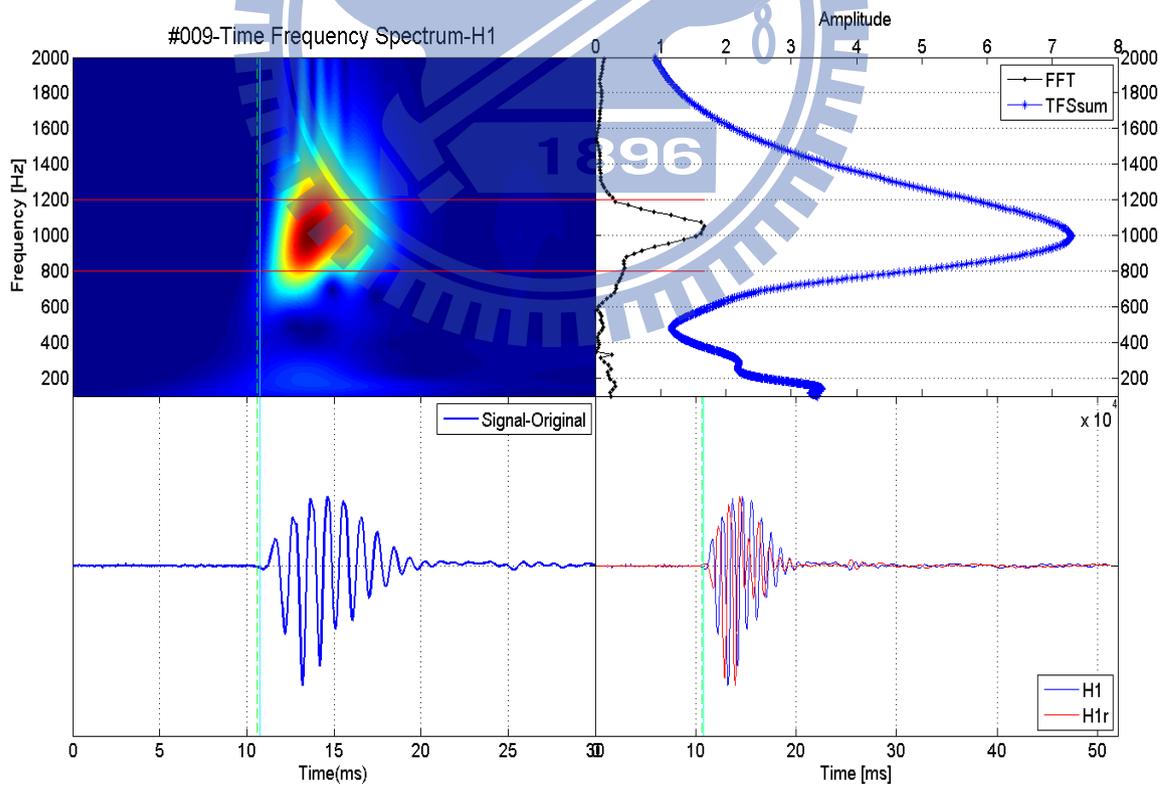


圖 4.29 小波轉換法於測試資料#009 之應用(受波器 H1 資料)

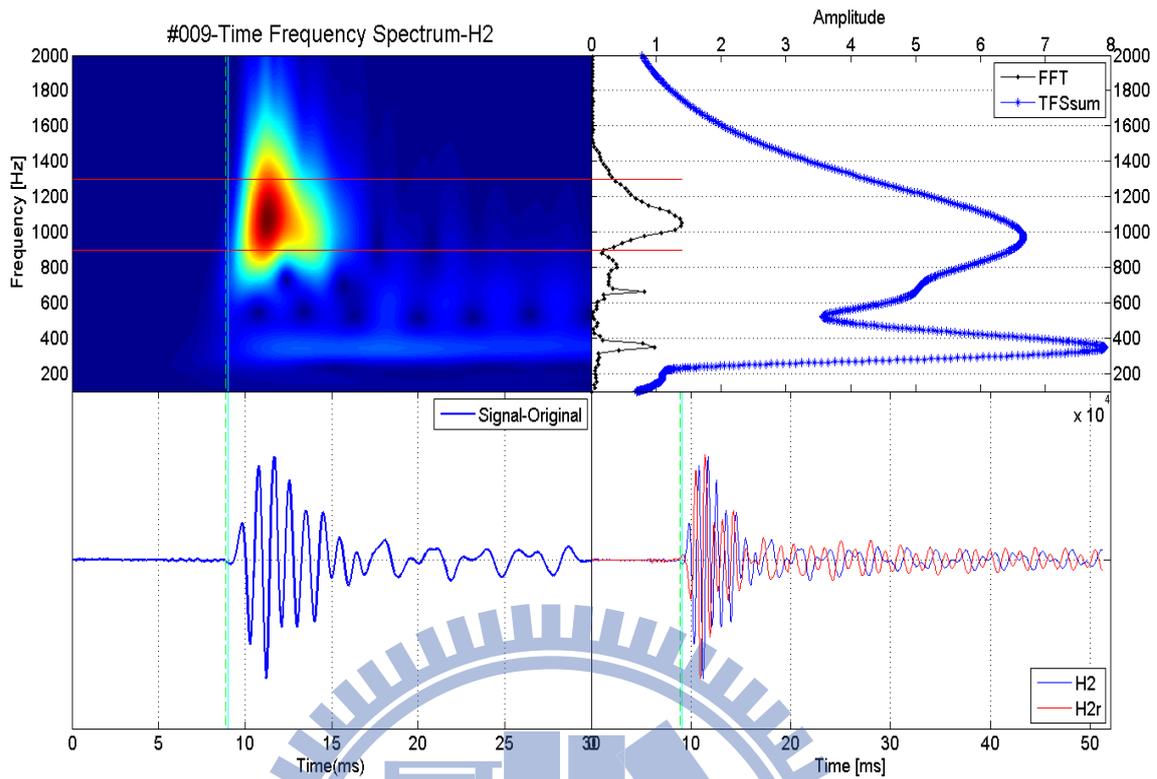


圖 4.30 小波轉換法於測試資料#009之應用(受波器 H2 資料)

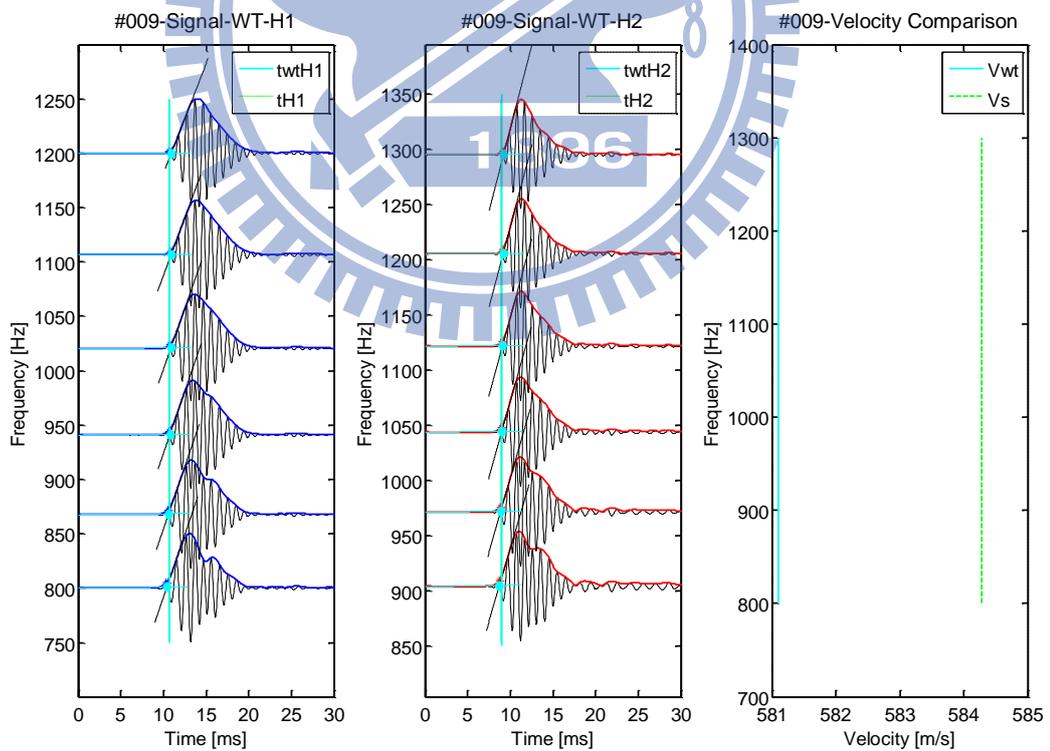


圖 4.31 小波轉換法於測試資料#009之應用結果

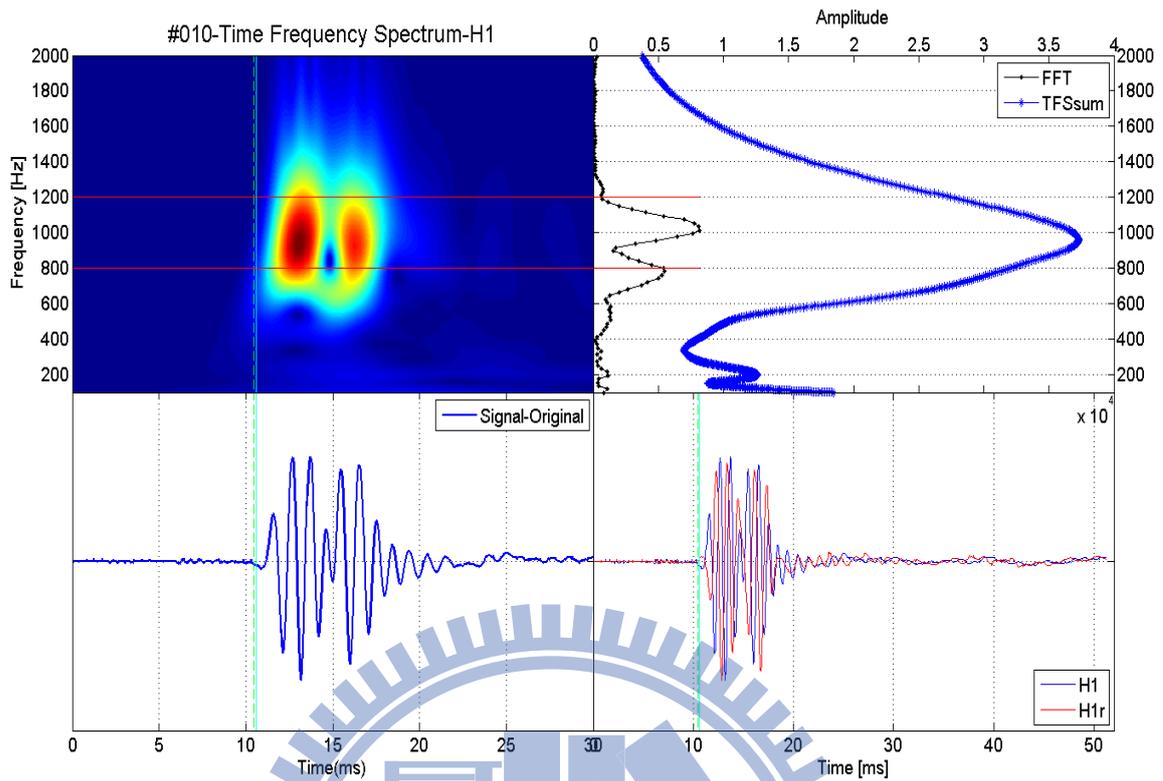


圖 4.32 小波轉換法於測試資料#010之應用(受波器 H1 資料)

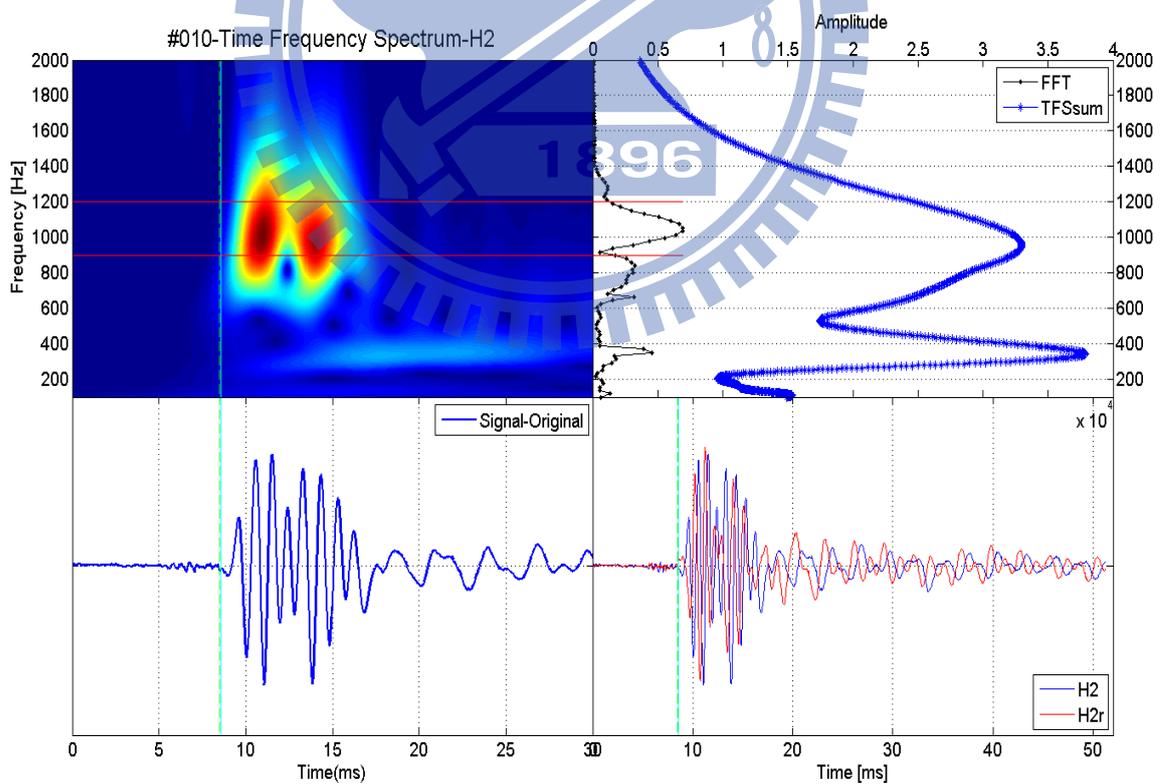


圖 4.33 小波轉換法於測試資料#010之應用(受波器 H2 資料)

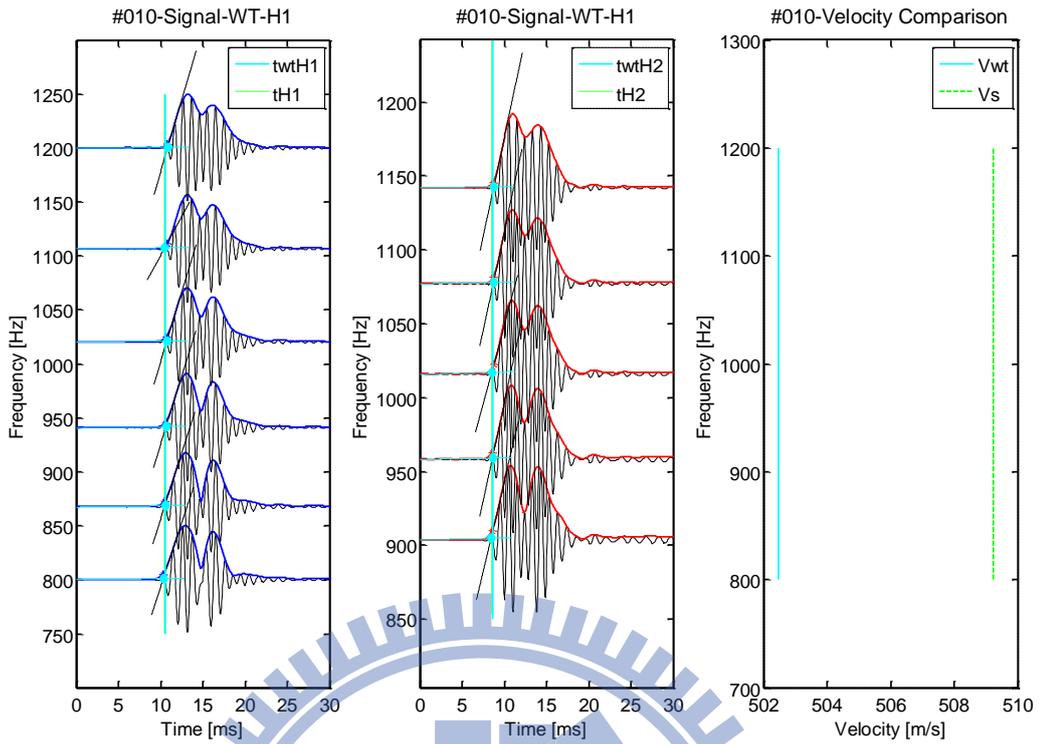


圖 4.34 小波轉換法於測試資料#010 之應用結果

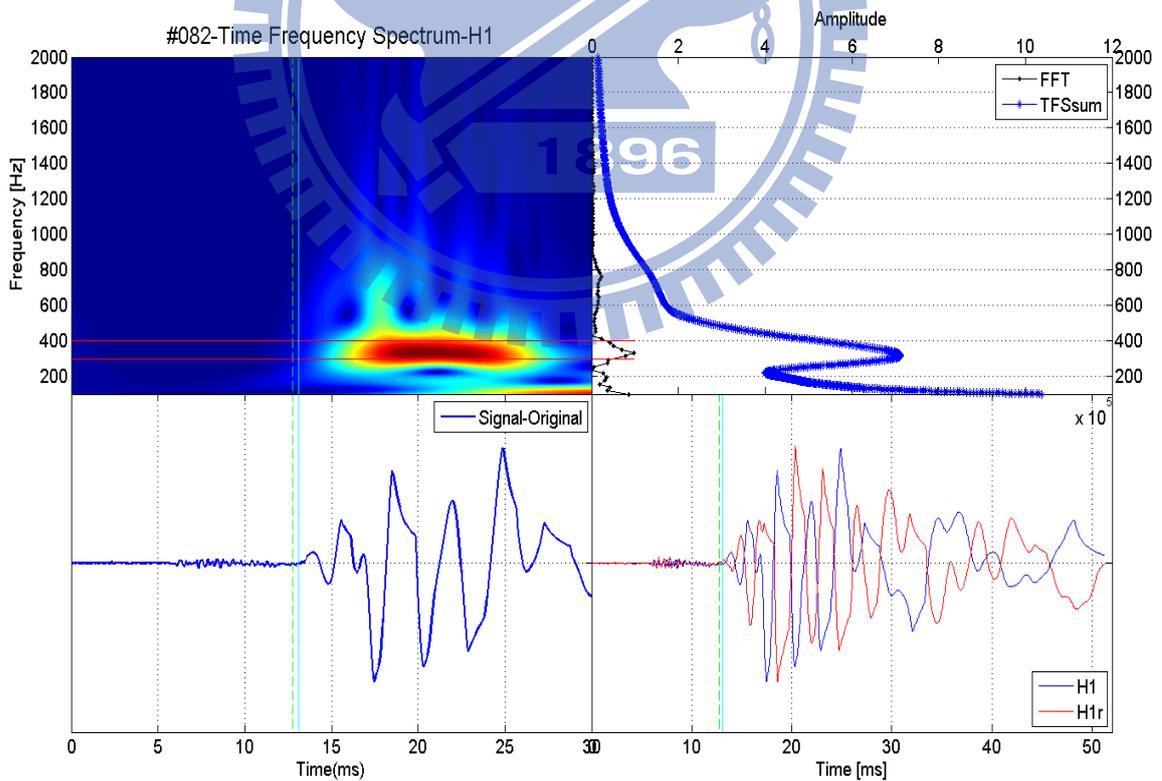


圖 4.35 小波轉換法於測試資料#082 之應用(受波器 H1 資料)

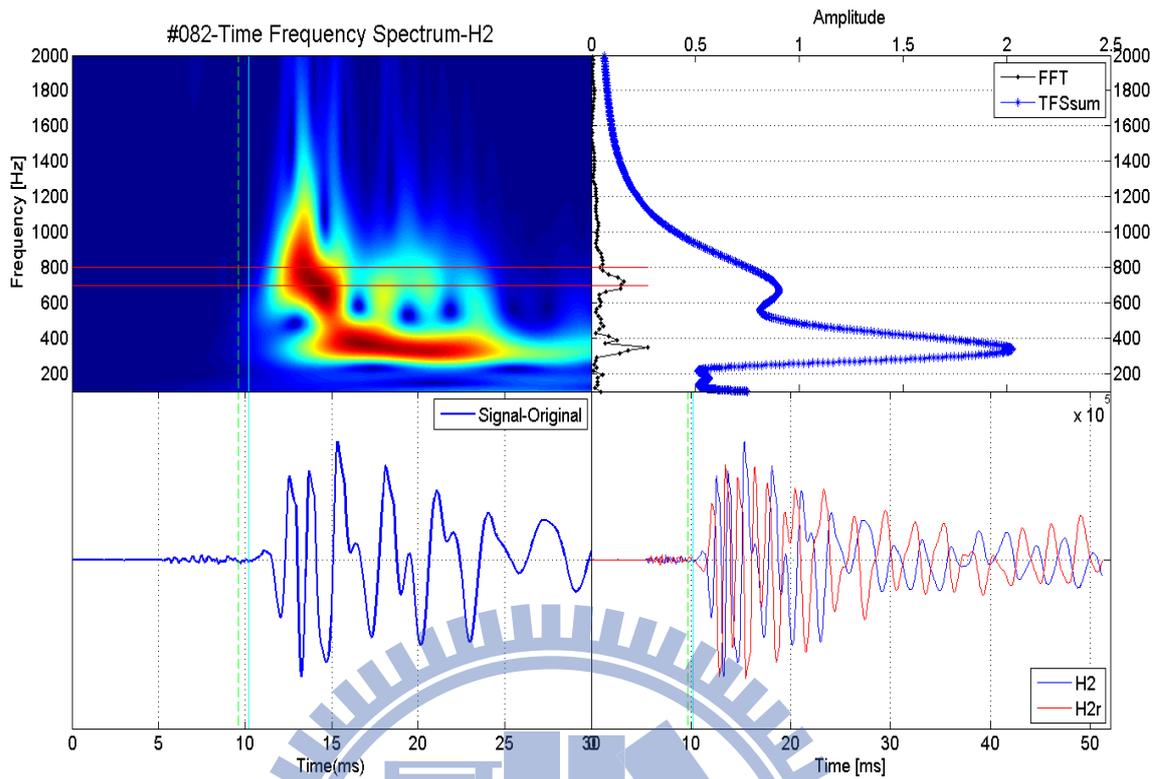


圖 4.36 小波轉換法於測試資料#082之應用(受波器 H2 資料)

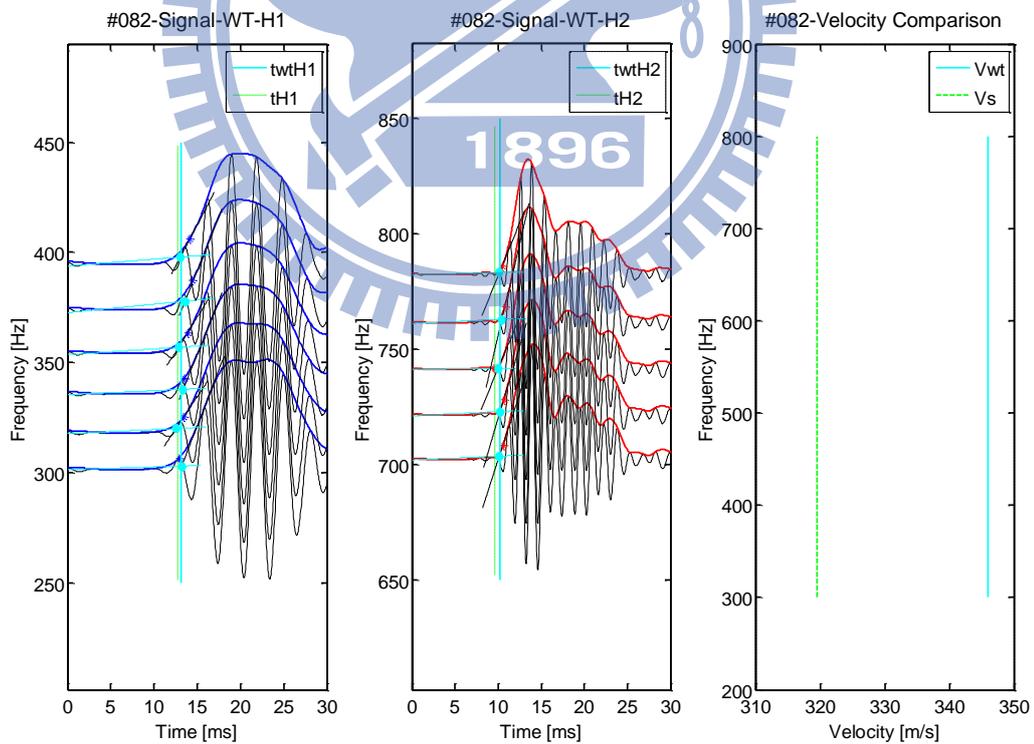


圖 4.37 小波轉換法於測試資料#082之應用結果

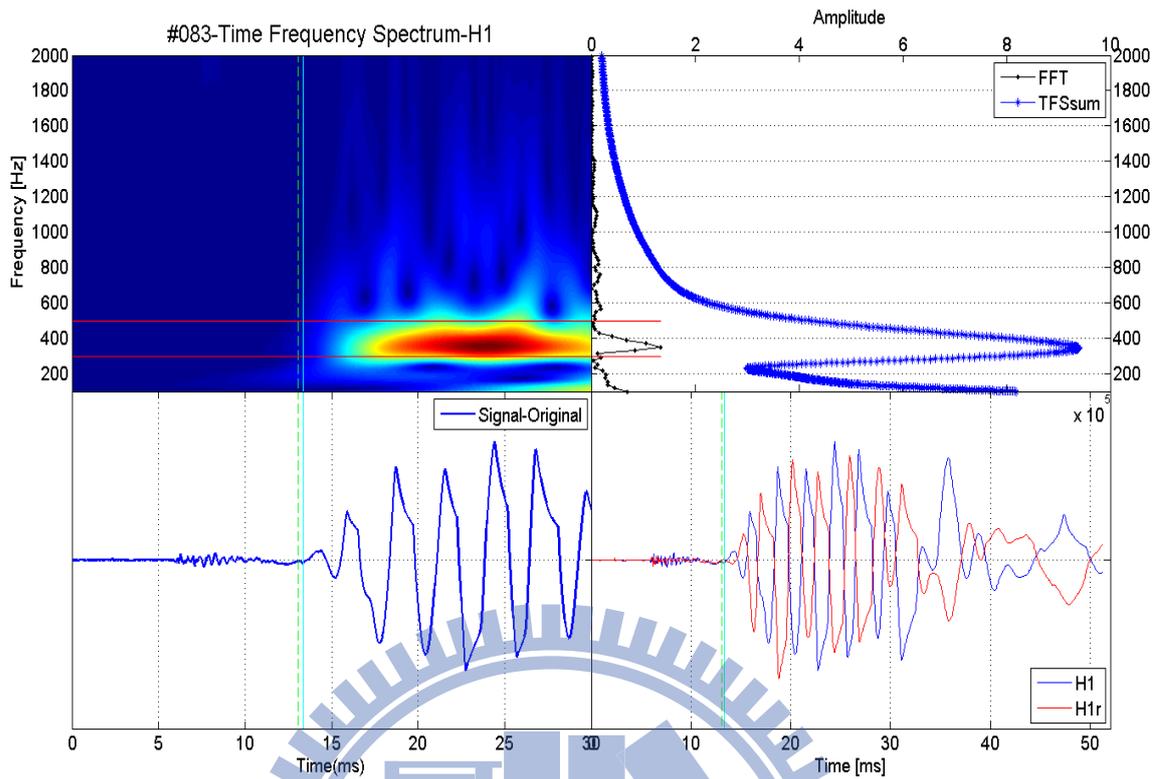


圖 4.38 小波轉換法於測試資料#083 之應用(受波器 H1 資料)

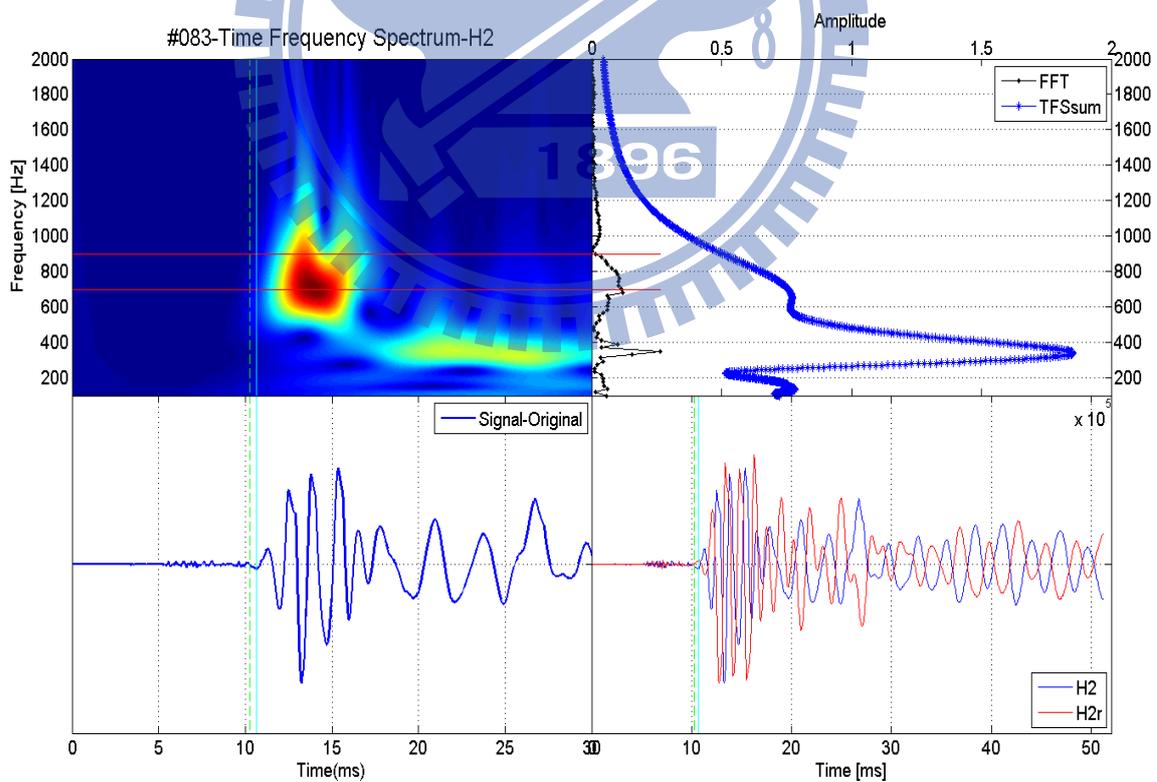


圖 4.39 小波轉換法於測試資料#083 之應用(受波器 H2 資料)

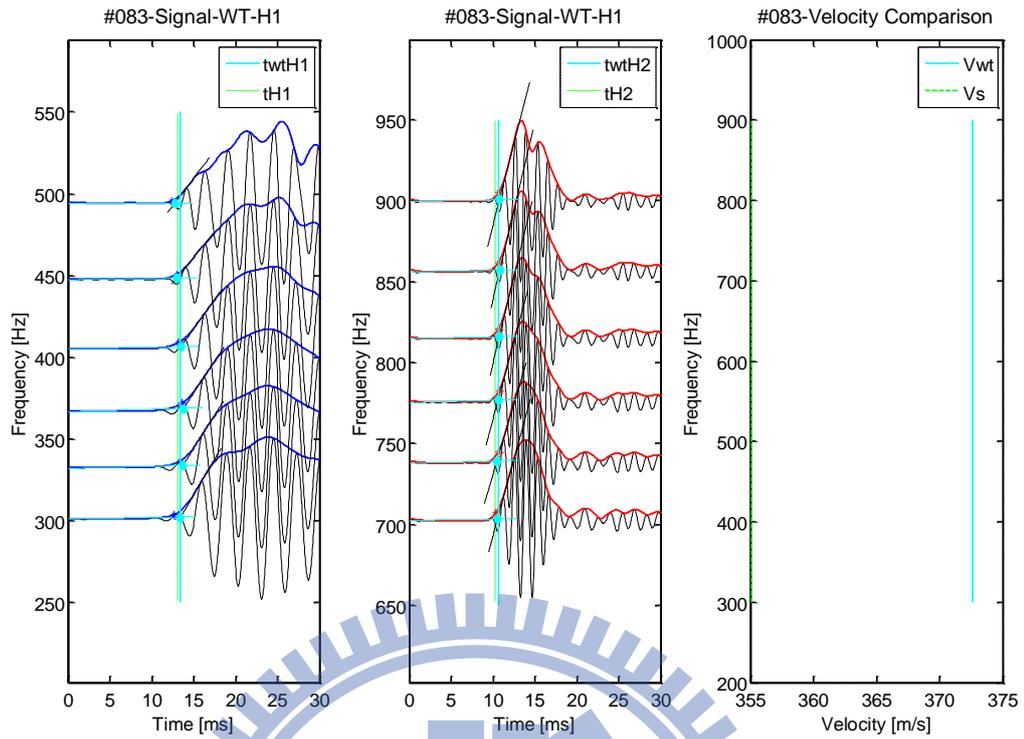


圖 4.40 小波轉換法於測試資料#083 之應用結果

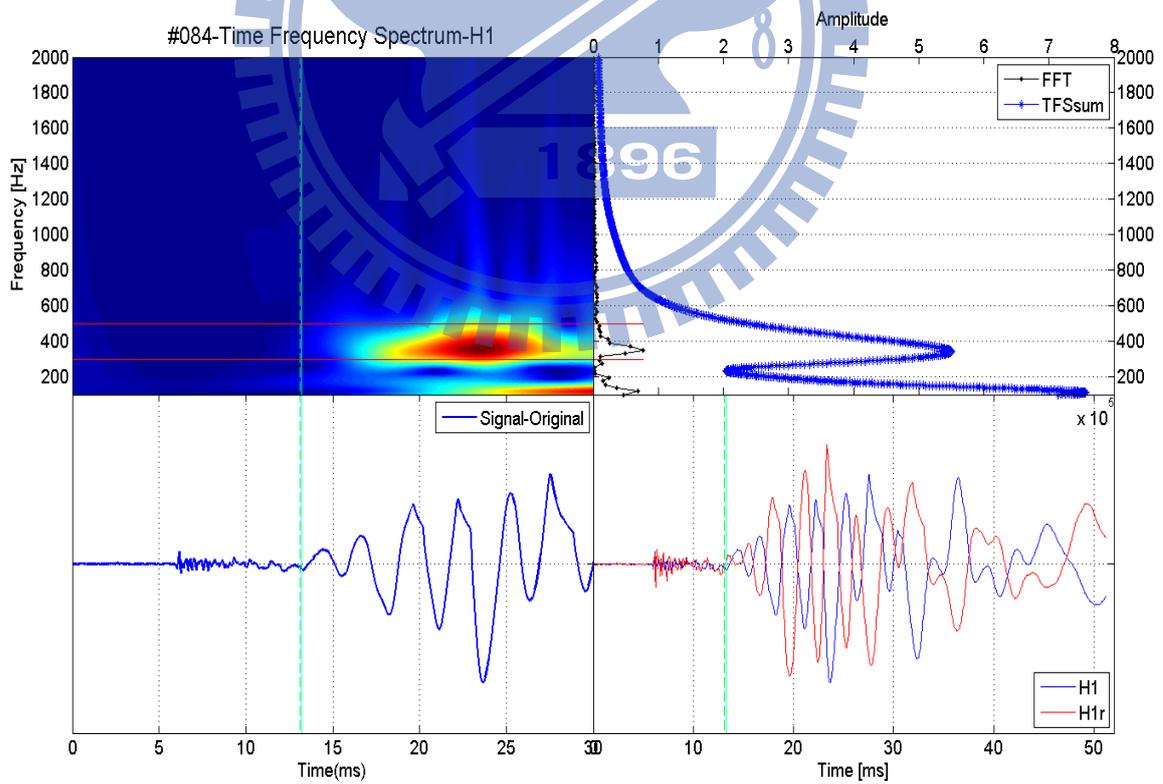


圖 4.41 小波轉換法於測試資料#084 之應用(受波器 H1 資料)

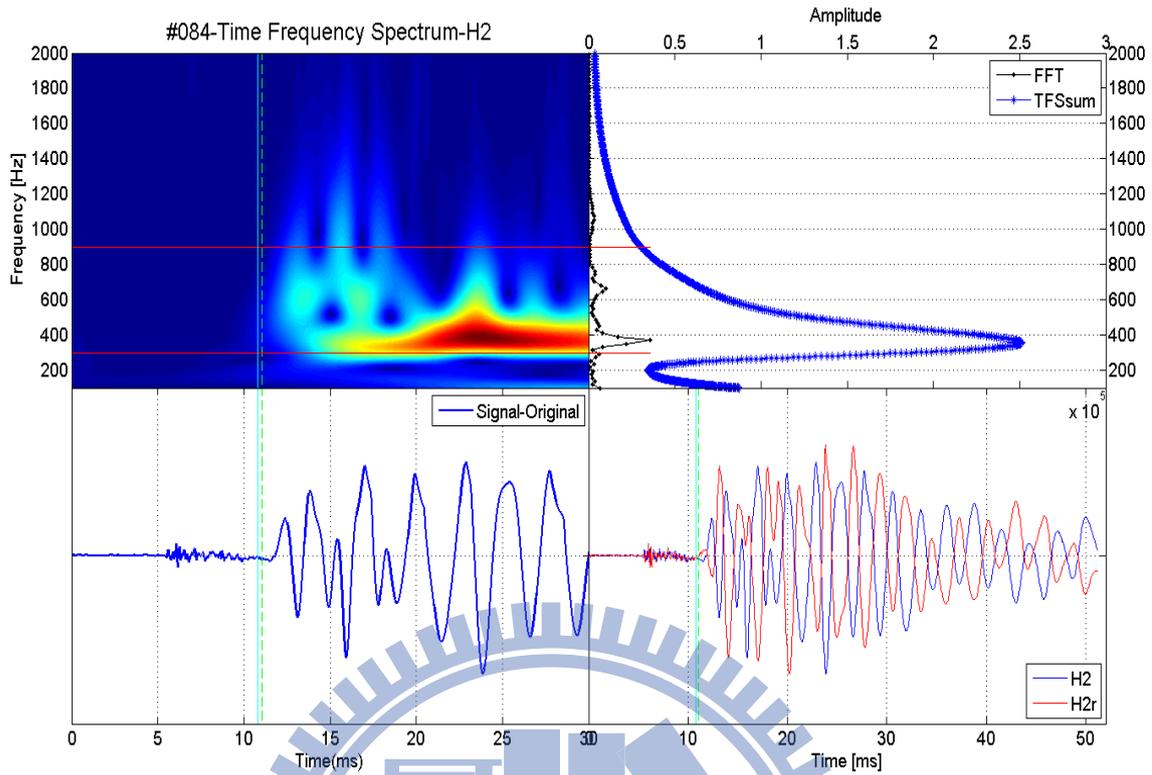


圖 4.42 小波轉換法於測試資料#084 之應用 (受波器 H2 資料)

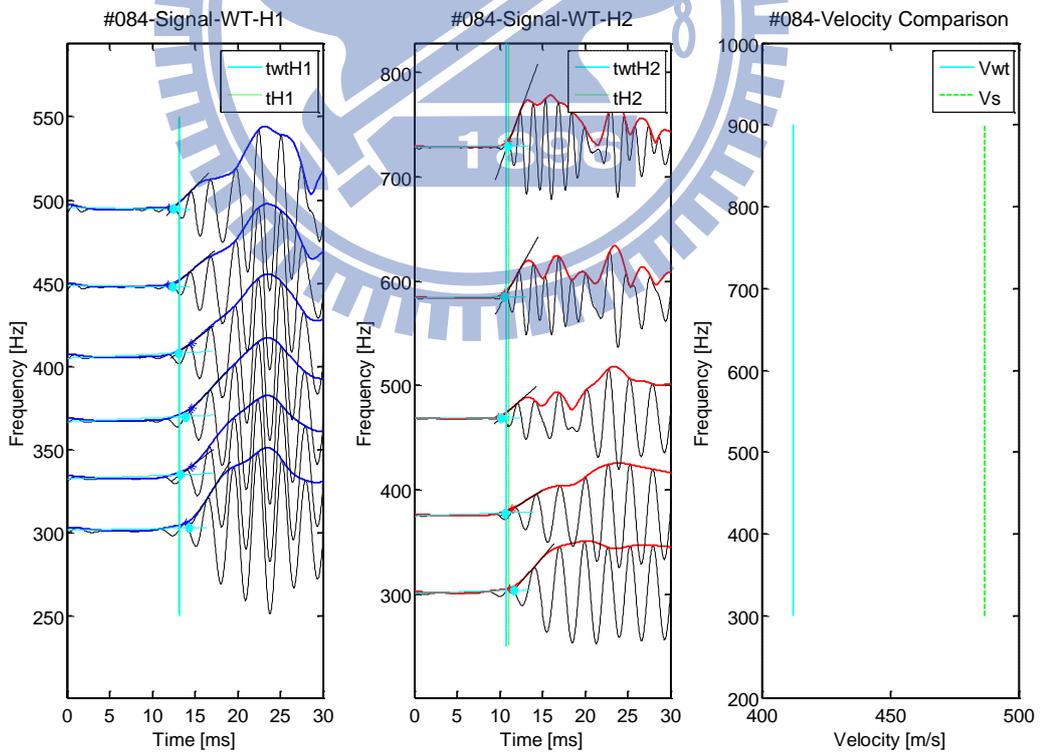


圖 4.43 小波轉換法於測試資料#084 之應用結果

資料編號	深度 (m)	$tmfH_1$ (ms)	$tmfH_2$ (ms)	頻帶波速 V_{mf} (m/s)	剪力波速 V_s (m/s)
#008	-173	10.72	8.71	498.24	507.06
#009	-172	10.76	9.04	581.09	584.28
#010	-171	10.59	8.60	502.46	509.24
#082	-53	13.09	10.20	345.97	319.56
#083	-52	13.35	10.66	372.64	355.09
#084	-51	13.23	10.80	412.19	486.87

表 4.3 測試資料於小波轉換法分析頻帶初達波速資料

4.1.3 時窗函數前處理影響

從時頻圖上可以發現，一個訊號的組成通常包含了不同的頻帶訊號，而這些頻帶能量到時也不一定相同。所以當雜訊跟主訊號頻段不同時，只要選對頻段，即可判斷出波相到時；反之，若雜訊之頻率與主訊號相近，則會影響判斷。因此在這一小節提出加入時窗函數前處理的概念，在實行上述各種分析方法前，先在可能判斷出達波位置前後套用時窗函數，凸顯出初達波之能量變化，壓抑掉非主訊號能量。窗函數之原理請參見 2.4.1 節。作法如下：

- (1) 先對原訊號做前處理，給定一可能包含初達時間點之範圍，並套用時窗函數，在此本研究採用 Tukey Window(Tukey, 1967)，此窗函數是由一方波與餘弦波所組成，方程式如下：

$$w(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} [x - r/2] \right) \right\} & 0 \leq x < \frac{r}{2} \\ 1 & \frac{r}{2} \leq x < 1 - \frac{r}{2} \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} [x - 1 + r/2] \right) \right\} & 1 - \frac{r}{2} \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (4-1)$$

在此係數 r 使用 0.5，表示此窗函數中間 50%是方波，最大值為 1，這範圍內的訊號不受影響，而前後各 25%之兩翼則以餘弦波之形式

壓抑兩端訊號波形使之在端點將降為零，波形如圖 4.44 所示。之所以採用此窗函數及其參數係因為能保留住方波段的原始能量不受衰減，而且快速壓抑兩旁能量，如此才能將預計的初達波位置凸顯出來。

(2)如圖 4.45，對原始訊號給定一窗函數範圍，其包含預計之初達波位置，除此範圍內，其餘訊號皆壓抑為零。並以原始訊號在時間域以點乘方法套用至此窗函數，得到新的波形。

以時窗函數前處理後之波形，即可個別針對頻譜分析法及時頻分析法進行波速計算，以圖 4.46 為例，將其應用於頻譜分析法後，可以發現低頻及高頻處摺合相位角差錯誤減少了，而未摺合線段相對呈線性，表示經過時窗函數的前處理後，對於相位波速的結果之穩定性及正確性有改善情形。而圖 4.47 則說明了時窗函數前處理對於時頻譜而言，時窗選取位置控制了時頻譜所著重之位置，因此在時間域預先濾除非剪力波相之波段，即可將剪力波相初達到時之能量差異凸顯出來。

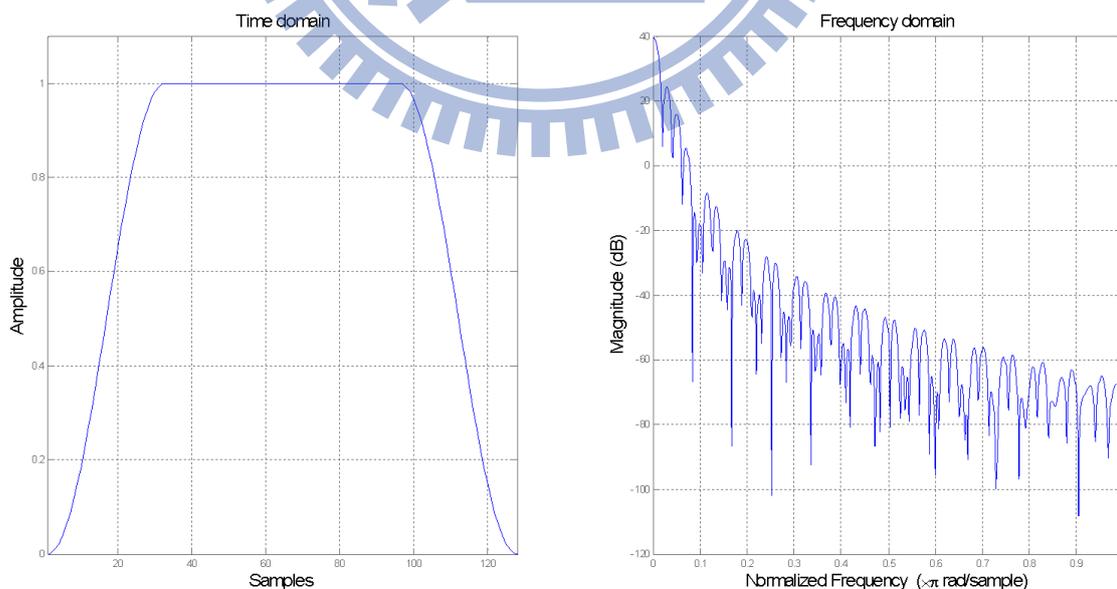


圖 4.44 Tukey Window 在時間域及頻率域之波形

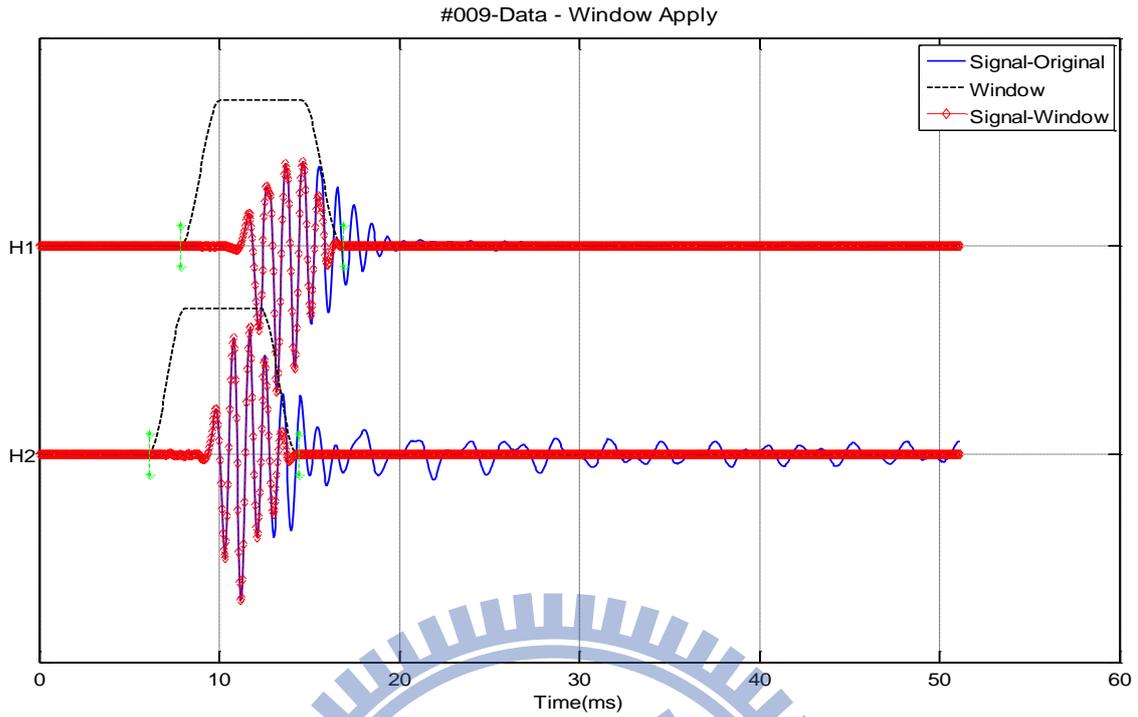


圖 4.45 套用時窗函數至訊號做前處理

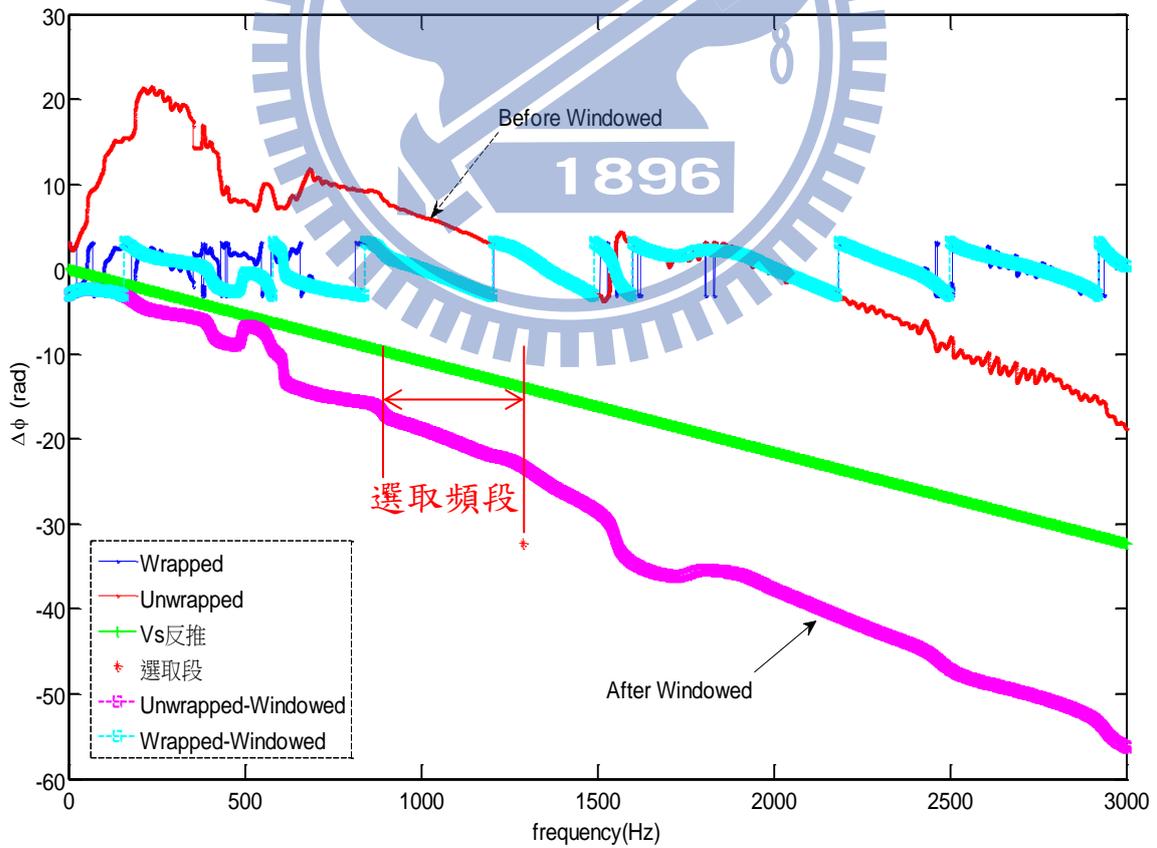


圖 4.46 時窗函數前處理影響於頻譜分析法之比較

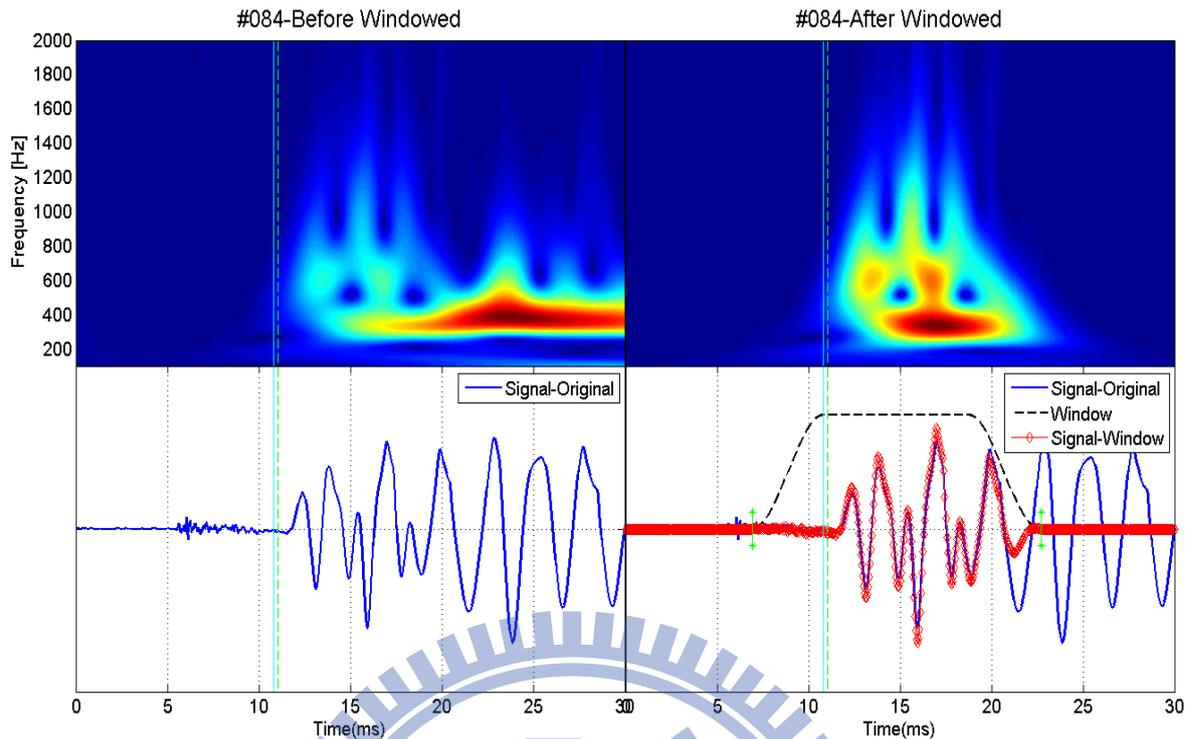


圖 4.47 時窗函數前處理影響於時頻分析法之比較

4.1.4 分析方法比較

本小節即針對 4.1.1 ~ 4.1.3 之資料測試作統計整理，分別以前處理與否之訊號波形，應用於頻譜分析法及時頻分析法求得波速，並以時域手動挑波之剪力波為基準值做比較。請參照表 4.4、表 4.5。而將其畫成圖表比較則參照圖 4.48 和圖 4.49。

從圖表中可發現，暫且不論前處理的效果如何，相位波速 V_{ph} 跟手動挑波 V_s 的結果差異很大，雖然經過窗函數前處理濾掉不屬於主訊號頻帶的雜訊而使結果有所改善，但相較於利用時頻分析的挑波方法結果還是不盡理想。除此之外，雖然頻譜分析的方式是最容易達成自動化程序的方法，但由於現場施作配置及資料形式有條件限制，必須是以一震源、一對受波器的傳遞方式才符合，故現場配置上只有懸盪式震測法符合；而下孔資料必須以不同深度之受波器接收訊號的走時差來計算；跨孔則必須在三鑽孔的場址才能用頻譜分析方式。因此，基於初步測試的結果及其適用性，本研究後續驗證不採用頻譜分析方法。而時頻分析的部分，其測試結果屬合理範圍，

多重濾波法的好處是電腦運算較快速，小波轉換則是結果較穩定；至於時窗函數前處理與否，本文將其作為一選用的步驟，其好處是能輔助在時頻譜凸顯出初達波位置，以便選定頻帶範圍，雖然對於波速的改進能力有限，卻能在時頻譜上消除非初達波相的干擾。

資料編號	深度 (m)	相位波速 V_{ph} (m/s)	頻帶波速 V_{mf} (m/s)	頻帶波速 V_{wt} (m/s)	剪力波速 V_s (m/s)
#008	-173	368.05	491.76	498.24	507.06
#009	-172	359.70	576.66	581.09	584.28
#010	-171	551.86	452.75	502.46	509.24
#008-Windowed	-173	424.66	478.60	478.73	507.06
#009-Windowed	-172	410.45	579.76	553.39	584.28
#010-Windowed	-171	501.08	514.79	512.00	509.24

表 4.4 訊雜比高之測試資料於各分析法波速比較表

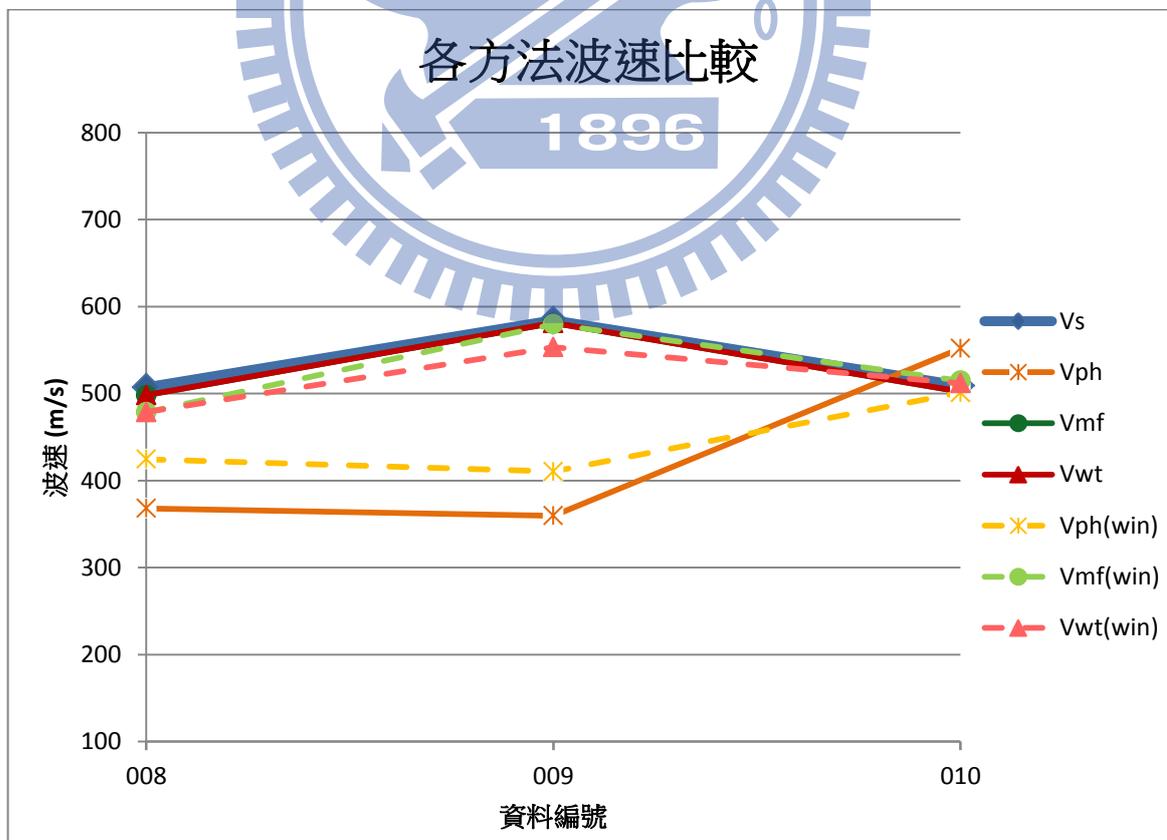


圖 4.48 訊雜比高之測試資料於各分析法波速比較圖

資料編號	深度 (m)	相位波速 V_{ph} (m/s)	頻帶波速 V_{mf} (m/s)	頻帶波速 V_{wt} (m/s)	剪力波速 V_s (m/s)
#082	-53	718.59	398.08	345.97	319.56
#083	-52	86.34	328.89	372.64	355.09
#084	-51	1433.00	510.97	412.19	486.87
#082-Windowed	-53	235.17	418.24	338.08	319.56
#083-Windowed	-52	298.88	353.38	360.37	355.09
#084-Windowed	-51	397.06	524.96	410.61	486.87

表 4.5 訊雜比低之測試資料於各分析法波速比較表

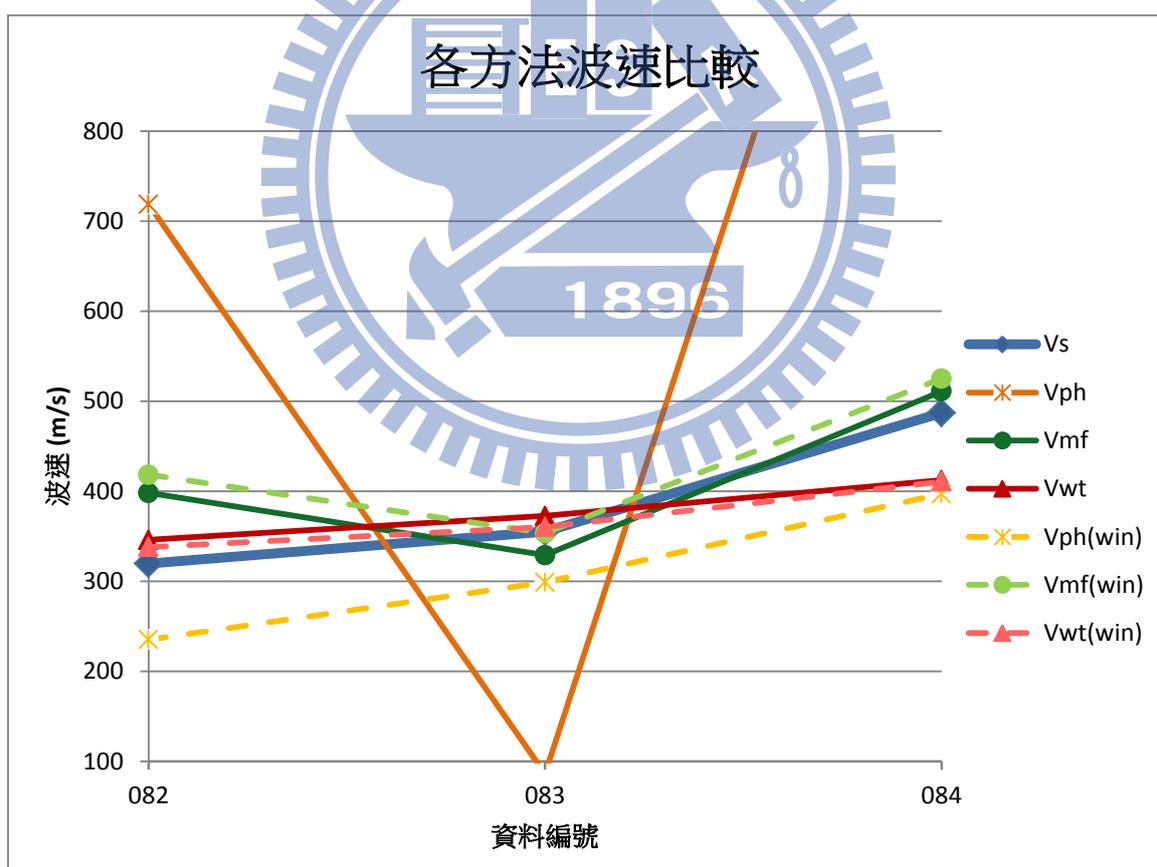


圖 4.49 訊雜比低之測試資料於各分析法波速比較表

4.1.5 半自動化挑波分析法流程

綜合上小節對於本研究測試階段所觀察到的初步結論，本研究之半自動化挑波分析法流程，將分別採用多重濾波法及小波轉換呈現時頻譜，從中根據能量頻譜分布及時域訊號波相，選取頻帶範圍，再以振幅起伏起始點挑取自動化分析法進行各受波器在選定頻帶下之初達時間平均值，進而計算頻帶波速。而考慮到套用時窗函數能輔助時頻譜之判釋，故本研究之驗證階段將其列入前處理步驟。

4.2 半自動化挑波法驗證

此階段屬於本研究試驗之應用階段，目的在於驗證本研究提出之半自動化挑波法是否對於各類孔內震測資料都能達到提升手動挑波效率之功效，故將其應用於 3.4.2 所提出各類孔內震測資料並與手動挑波結果比較，並探討其應用之優劣與適用性。

4.2.1 懸盪式震測資料

本研究根據 3.4.2 提出之位於雲林科技大學校區施測之懸盪式震測資料，進行半自動挑波法，並分別以多重濾波法及小波轉換繪製時頻譜，故分兩組。應用結果如圖 4.50、圖 4.51 及圖 4.52、圖 4.53 所示，並與手動挑波結果之剪力波速剖面比較，圖 4.50、圖 4.52 將手動挑波與半自動挑波的初達走時曲線繪製到時間域波形剖面一起比較，可以看出挑選的趨勢一致，而圖 4.51、圖 4.53(a)則為兩者所計算出之剪力波速剖面，並顯示半自動挑波法所獲得之剪力波速剖面與手動挑波結果之趨勢一致，地下 140m 以前波速約集中在 200m/s~400m/s 之間，地下 140m 之後波速稍微提升至 400m/s~600m/s。除此之外，圖 4.53(b)係由時頻譜挑選頻帶區段所得到頻帶波速剖面所對應之頻率範圍，可以得知該地層之剪力波速剖面大多落在 600Hz~1400Hz 之間，故以半自動挑波方法除了能決定波速以外，則更為其添增了物理意義。

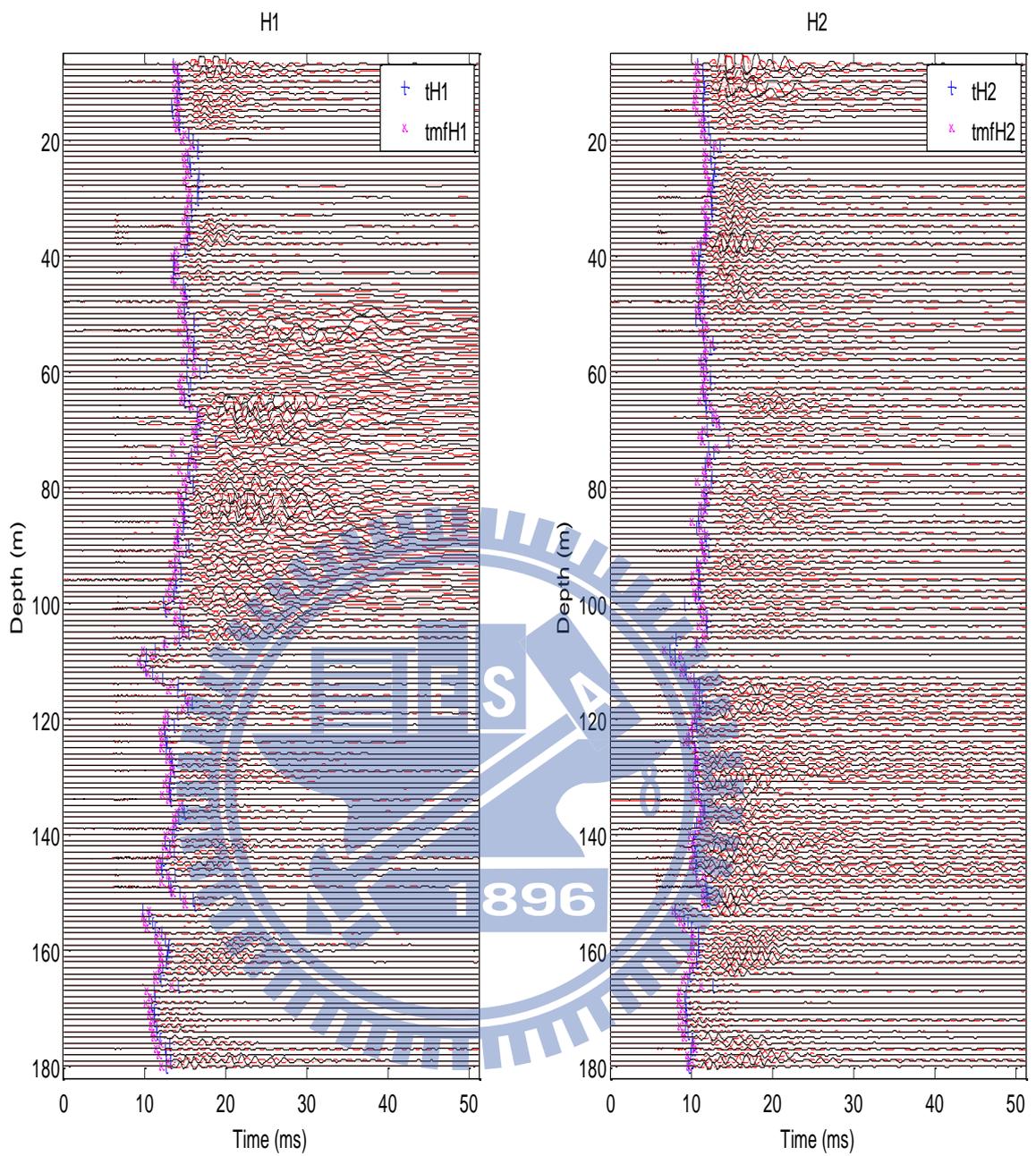


圖 4.50 半自動挑波法以多重濾波法作時頻譜，應用於懸盪式震測資料之走時曲線比較

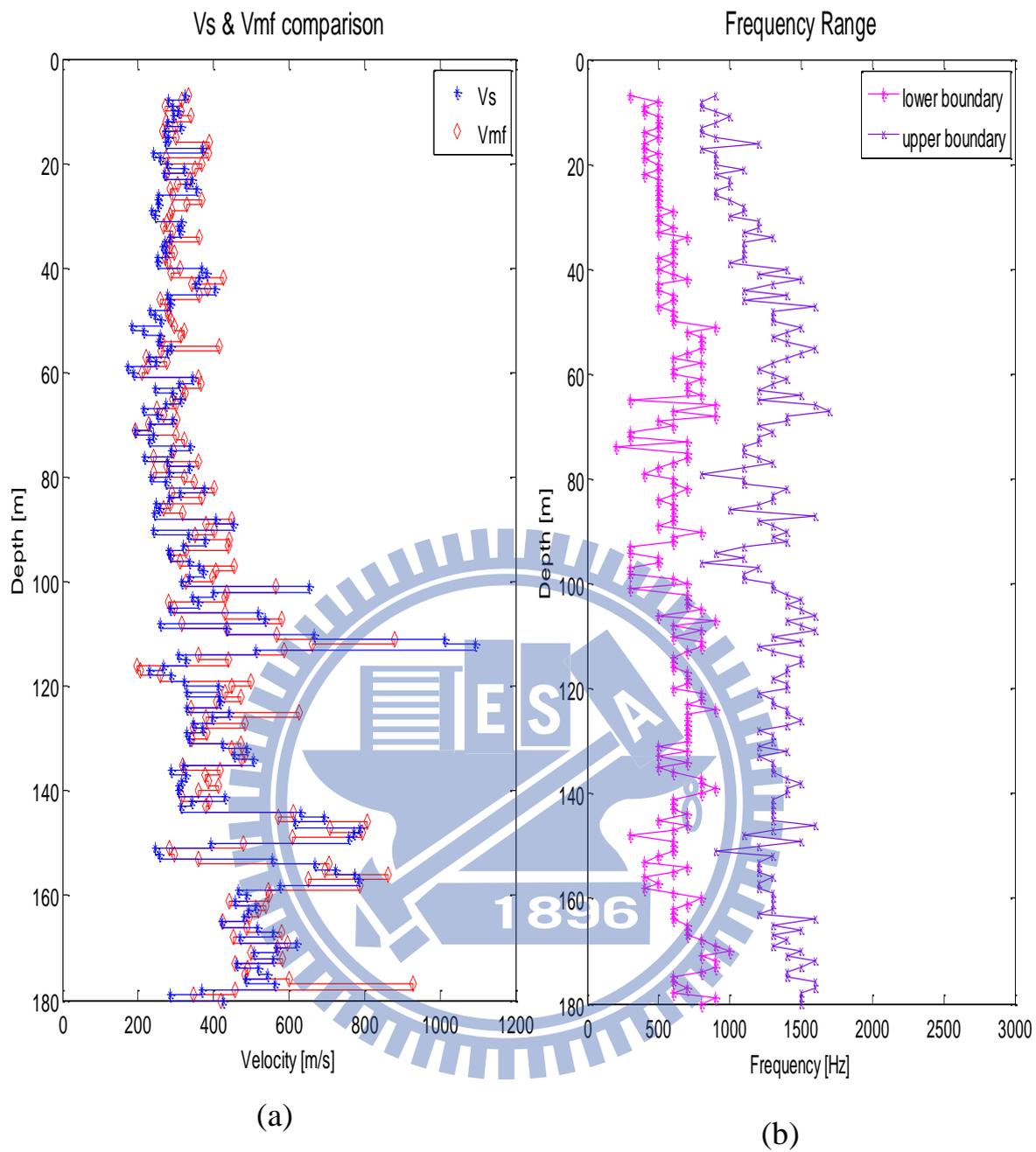


圖 4.51 (a)半自動挑波法以多重濾波法作時頻譜，應用於懸盪式震測資料之剪力波速剖面比較；(b)頻帶波速剖面對應之頻率範圍

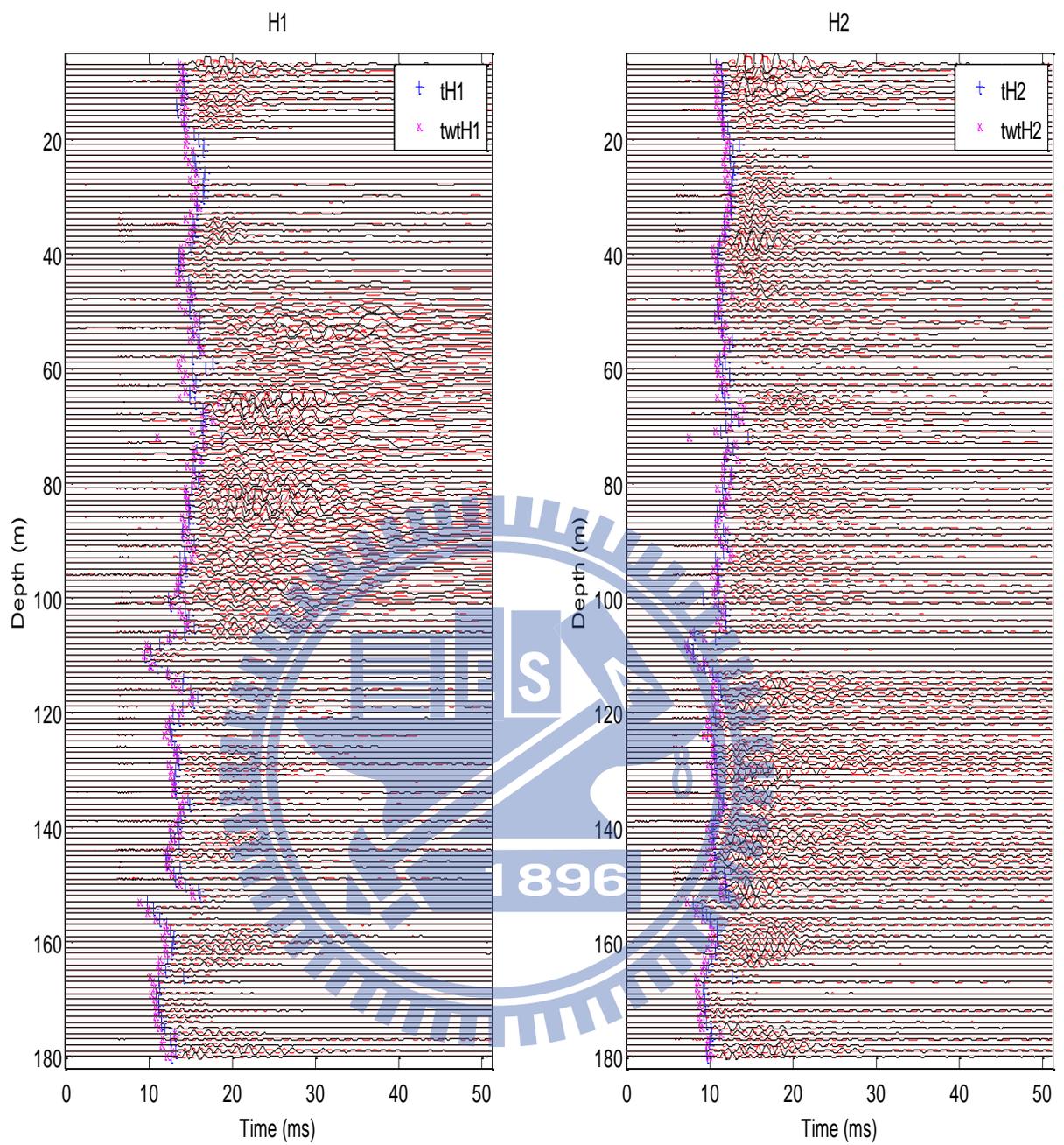


圖 4.52 半自動挑波法以小波轉換作時頻譜，應用於懸盪式震測資料之走時
曲線比較

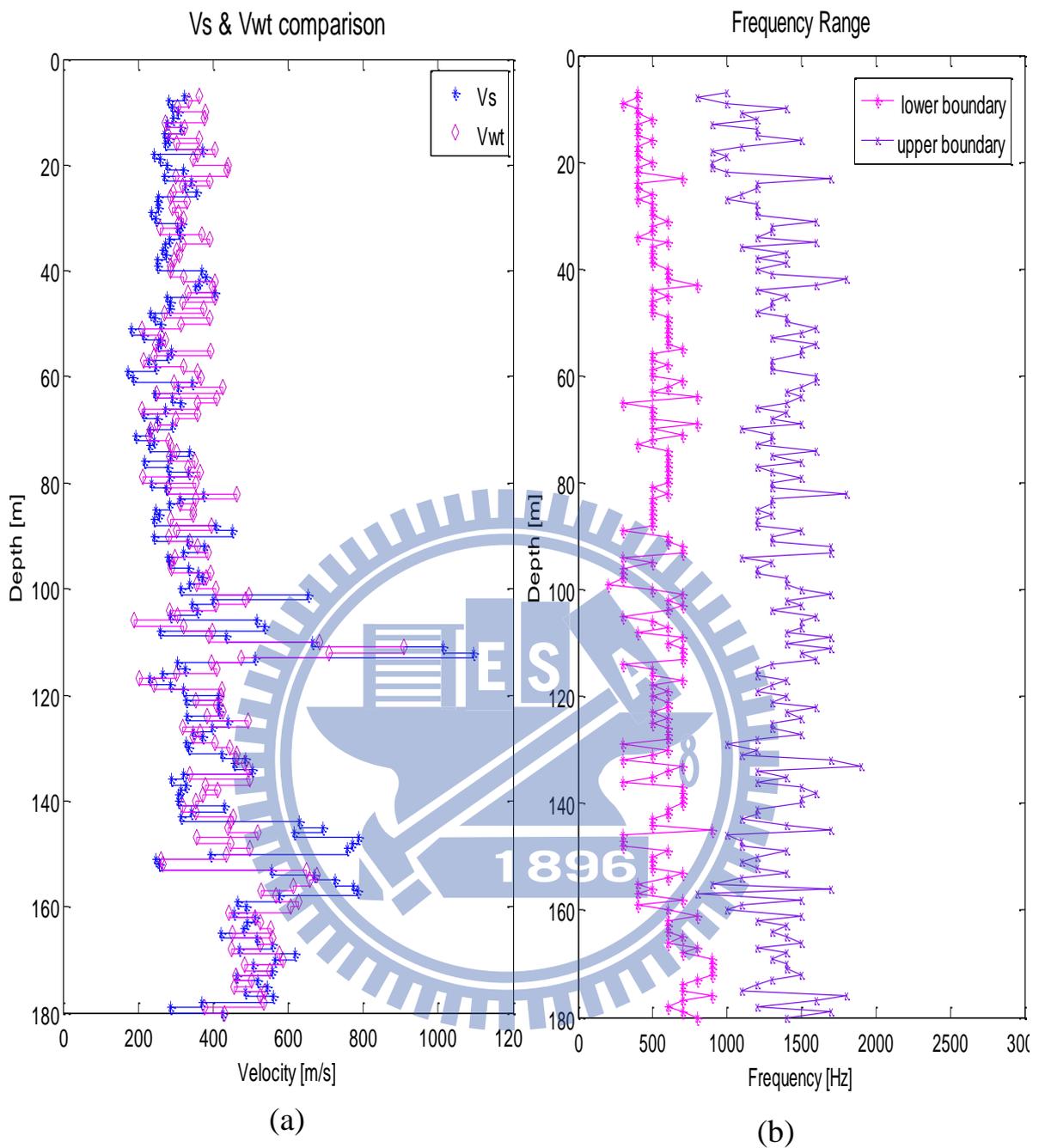


圖 4.53 (a)半自動挑波法以小波轉換作時頻譜，應用於懸盪式震測資料之剪力波速剖面比較；(b)頻帶波速剖面對應之頻率範圍

其中有些深度存在速度趨勢不一致之特異點，例如地下 110m~112m 之位置，不論是手動挑波結果或是半自動挑波結果都顯示波速偏高許多。因此將這幾筆資料波形提出來探討觀察，其對應資料為#069、#070、#071，以小波轉換之結果為例，其呈現結果如圖 4.54~圖 4.62，比較表見表 4.6。從時間域波形來看，這三筆資料之訊號品質並不高，尤其前段可能受到 P 波之影響，使得高低頻訊號於時間軸位置相互干擾，但將其以時頻譜方式呈現，即能明顯區分高低頻訊號之差異，只要選對頻率範圍，即能清楚獲得該波相到時。因此這三筆資料雖然跟附近地層波速存在特異，但手動挑波之判釋以及從時頻分布看來確實情況是如此。

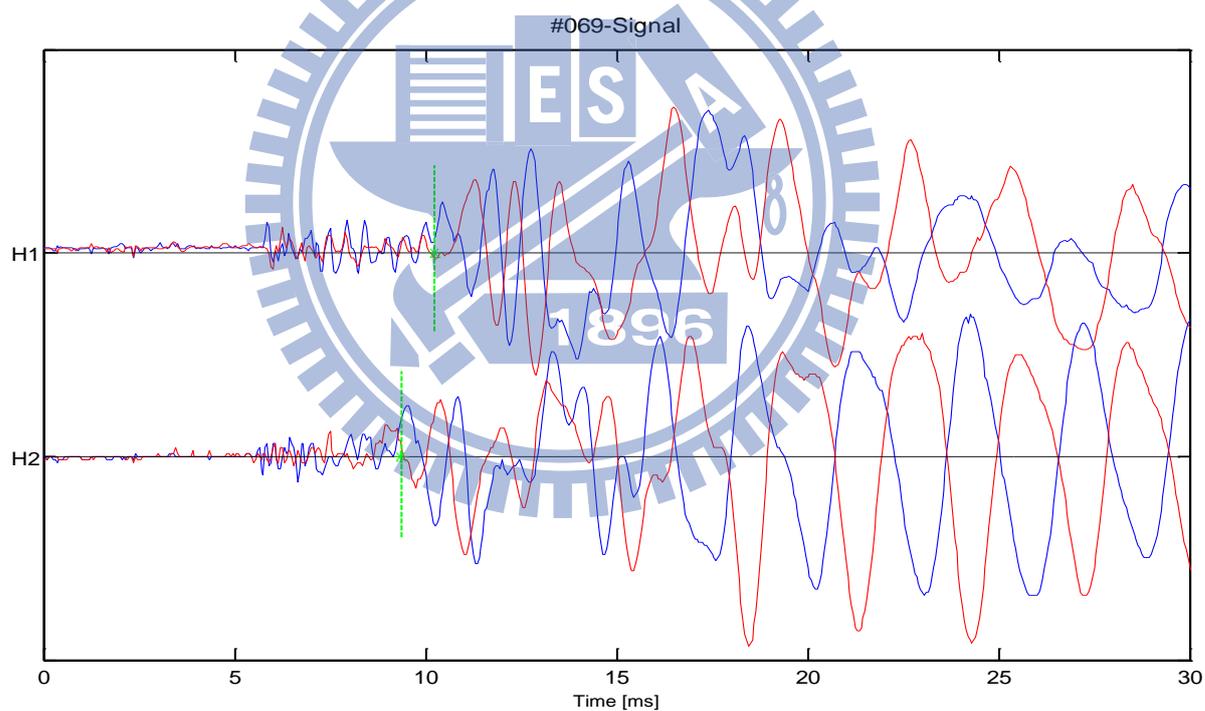


圖 4.54 懸盪式震測資料#069 波形及手動挑取剪力波初達時間

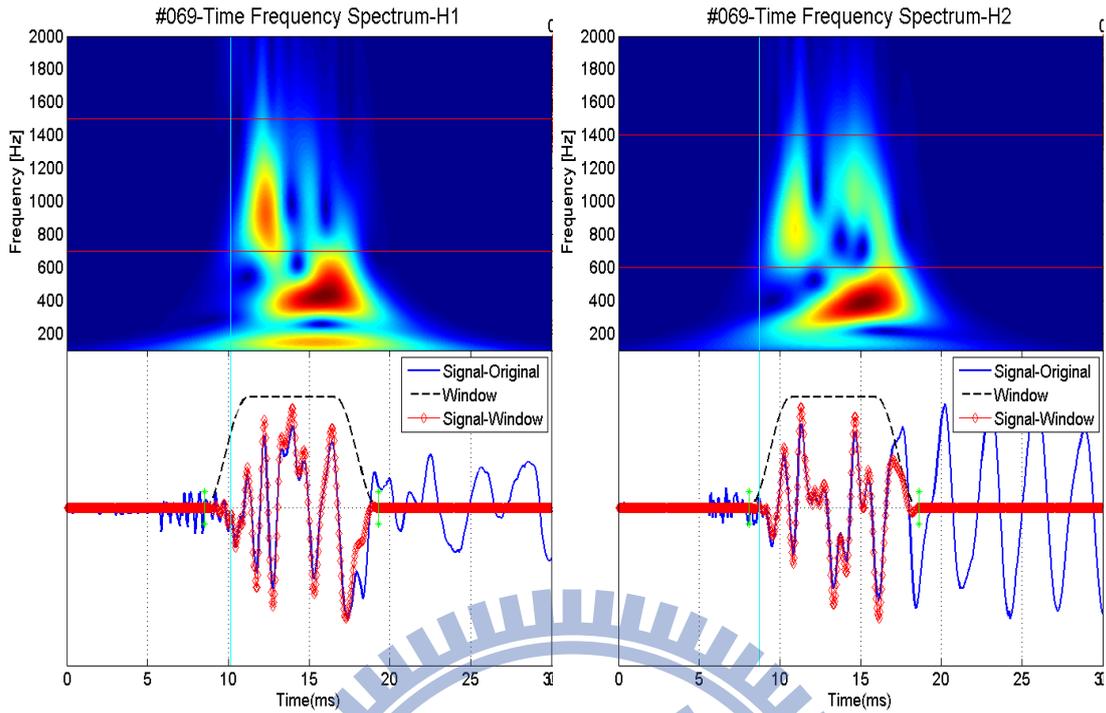


圖 4.55 懸盪式震測資料#069 套用時窗函數及其時頻譜

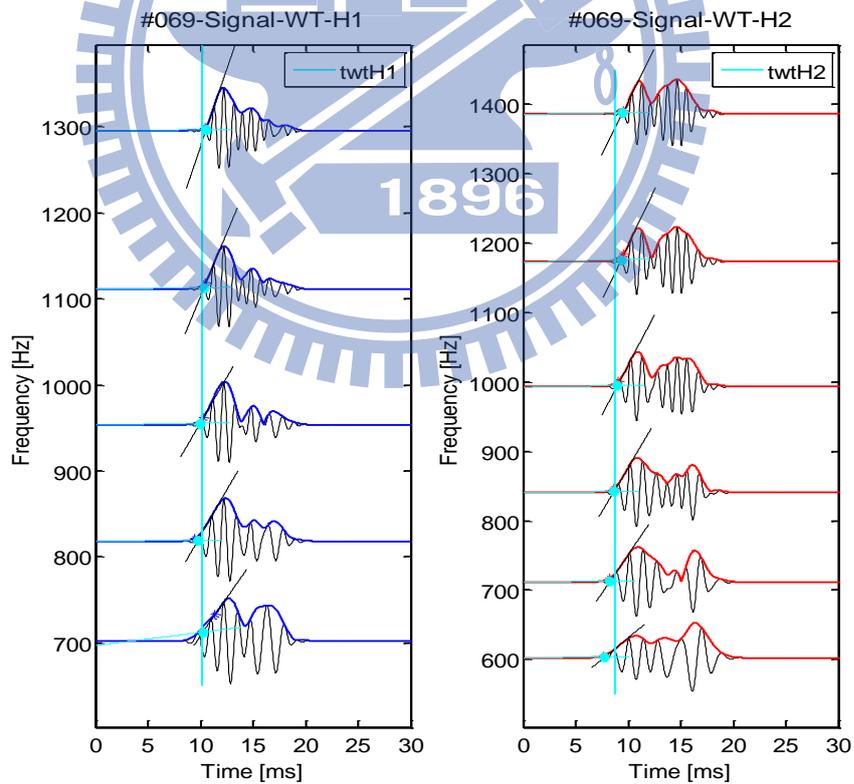


圖 4.56 懸盪式震測資料#069 半自動挑取頻帶下剪力波初達時間

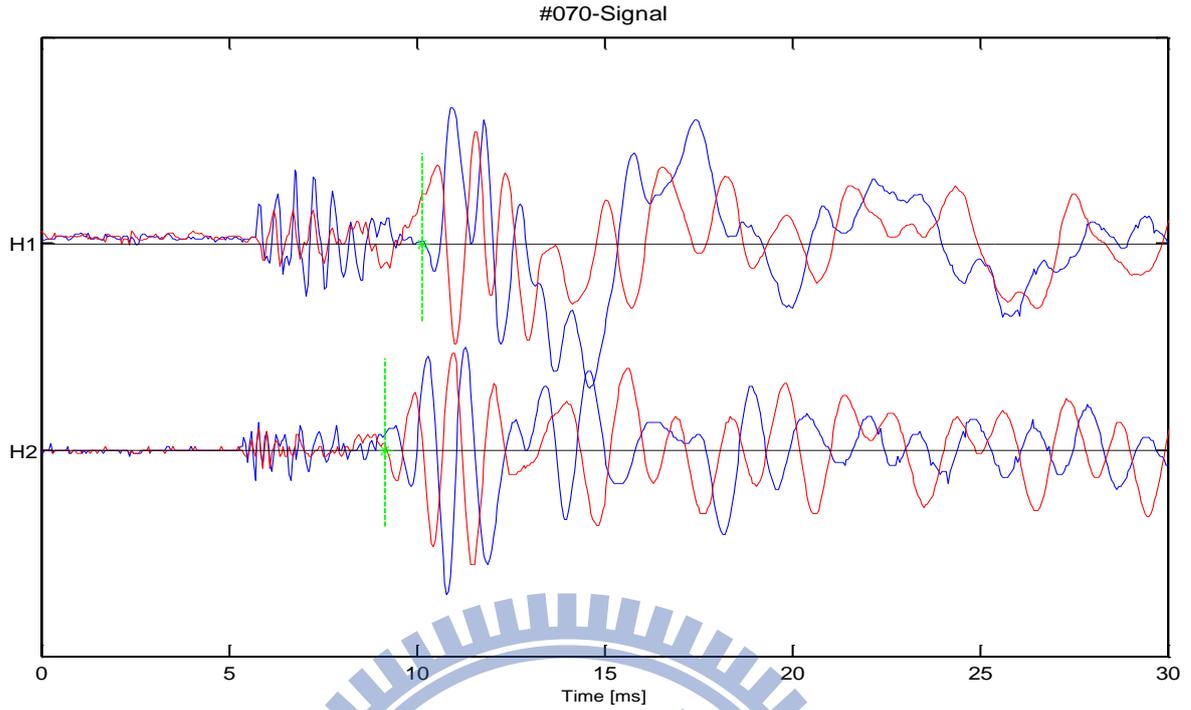


圖 4.57 懸盪式震測資料#070 波形及手動挑取剪力波初達時間

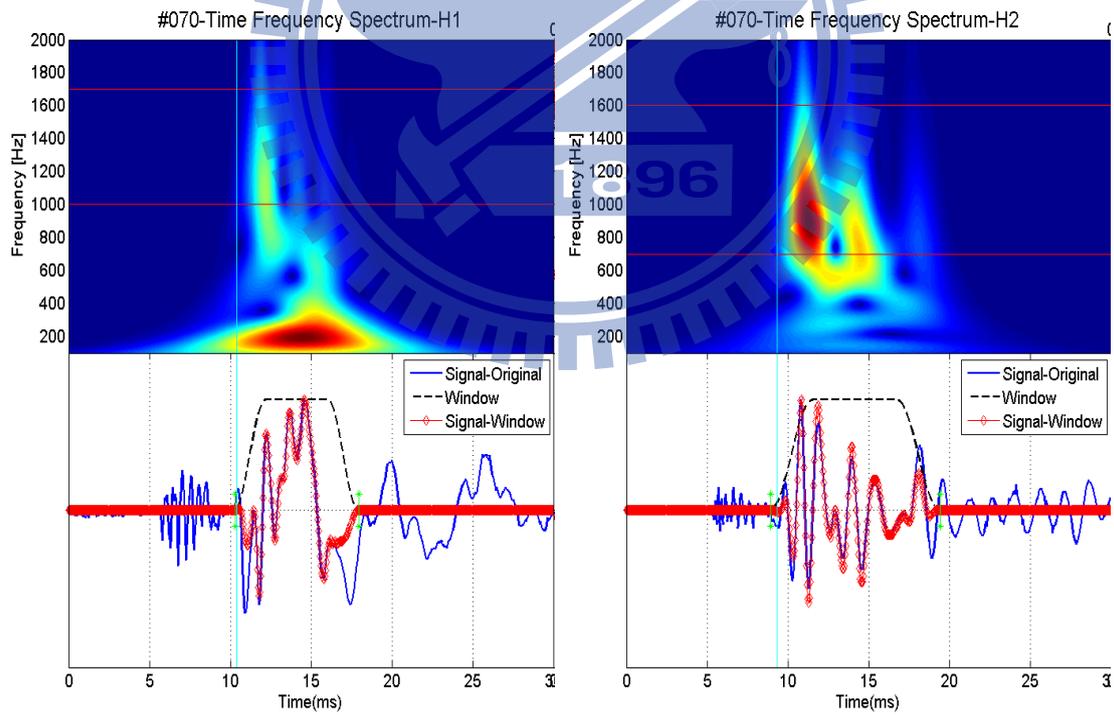


圖 4.58 懸盪式震測資料#070 套用時窗函數及其時頻譜

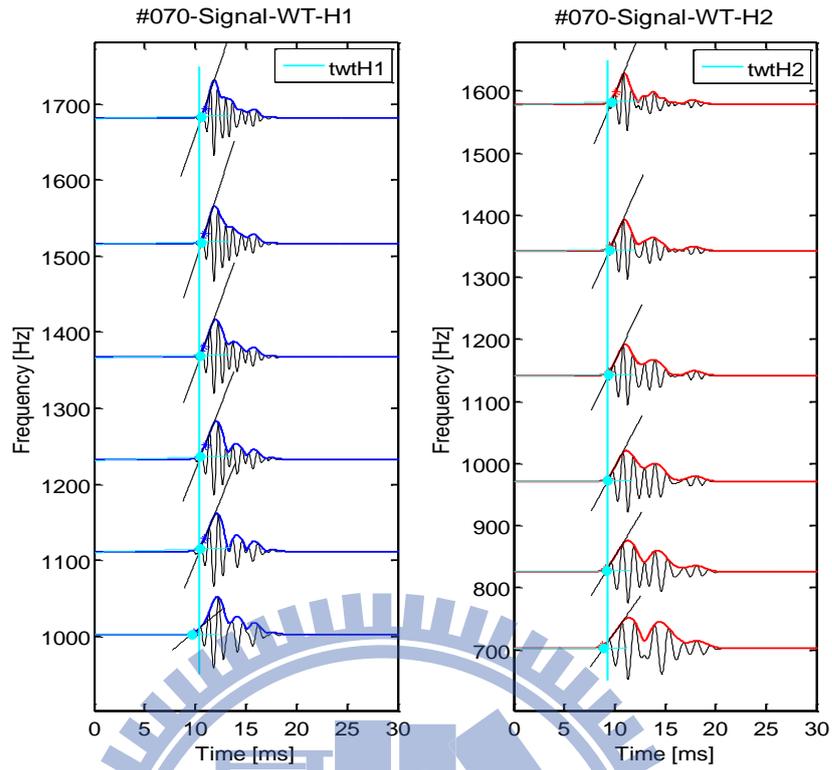


圖 4.59 懸盪式震測資料#070 半自動挑取頻帶下剪力波初達時間

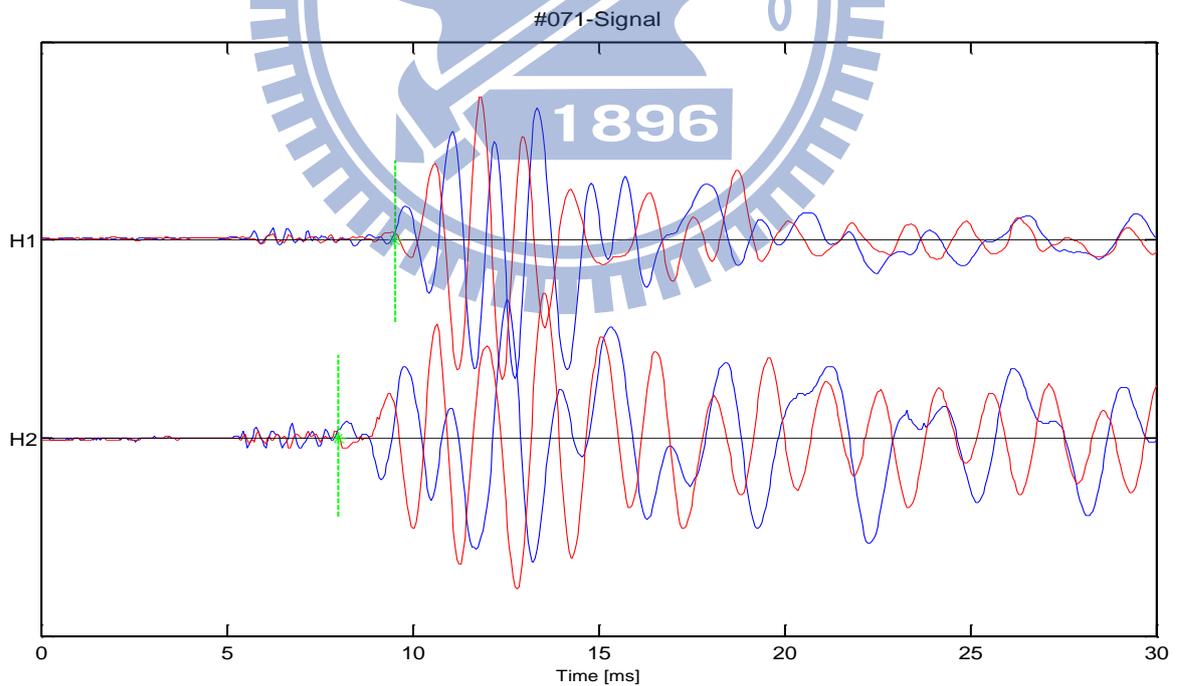


圖 4.60 懸盪式震測資料#071 波形及手動挑取剪力波初達時間

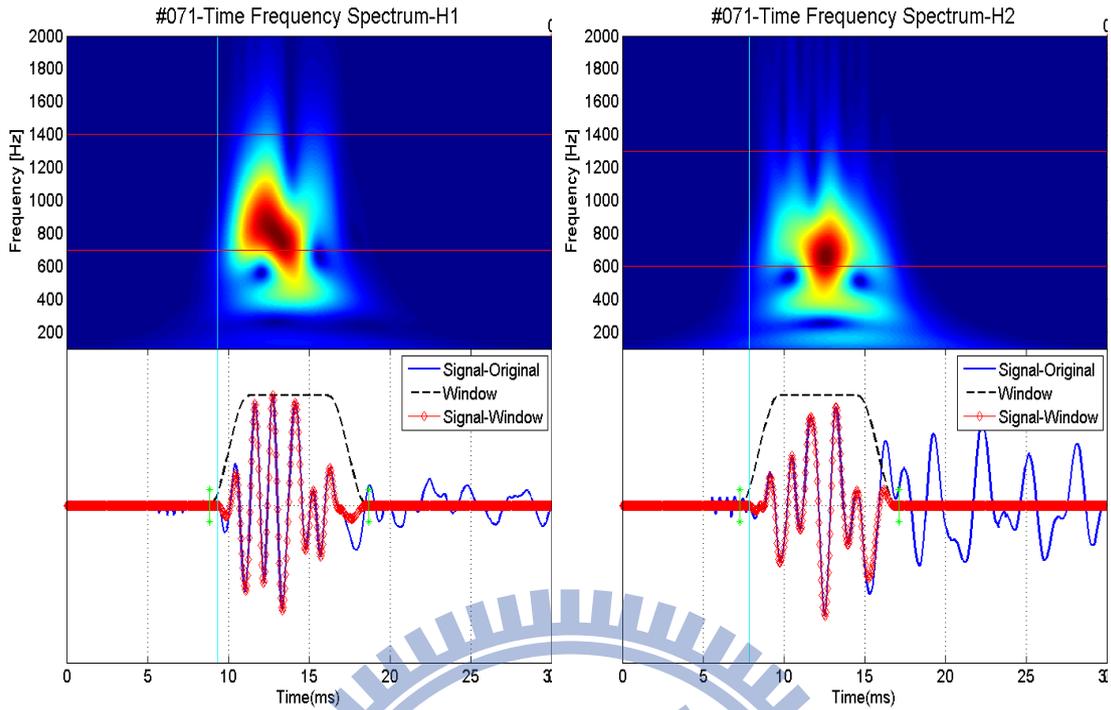


圖 4.61 懸盪式震測資料#071 套用時窗函數及其時頻譜

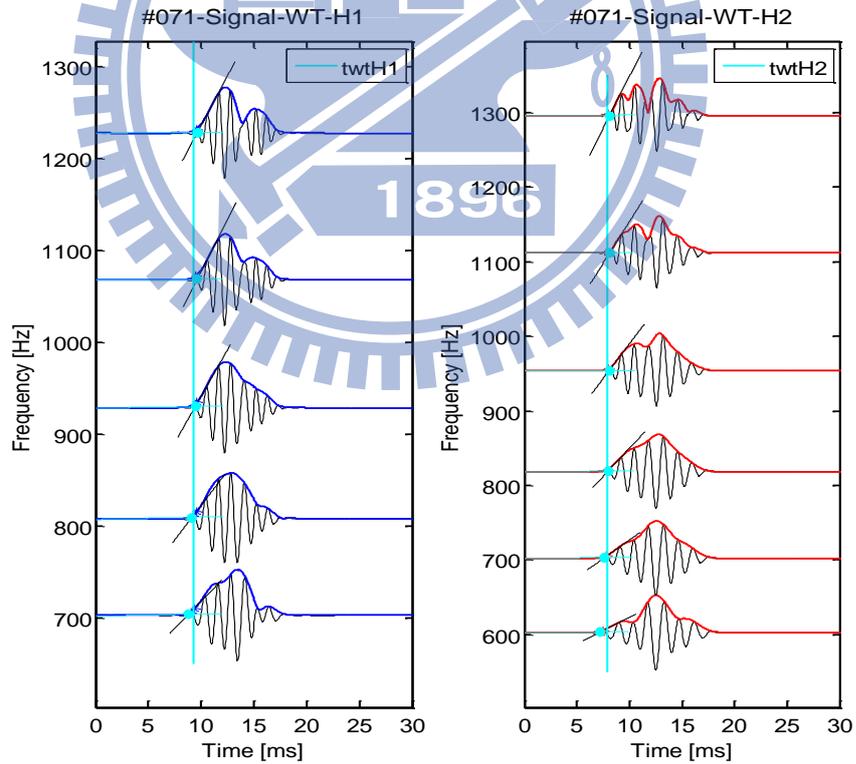


圖 4.62 懸盪式震測資料#071 半自動挑取頻帶下剪力波初達時間

資料編號	深度 (m)	$twtH_1$ (ms)	$twtH_2$ (ms)	頻帶波速 V_{wt} (m/s)	tH_1 (ms)	tH_2 (ms)	剪力波速 V_s (m/s)
#069	-112	10.15	8.74	708.89	10.24	9.33	1094.10
#070	-111	10.42	9.32	908.51	10.14	9.15	1012.00
#071	-110	9.33	7.87	684.25	9.50	7.99	665.57

表 4.6 波速特異資料之手動挑波與半自動挑波比較表

此外，針對上述時頻譜區分高低頻訊號的特性，本研究在此取一明顯案例作說明，以資料#151 為例，見圖 4.63~圖 4.65，在時間域波形明顯發現 H1 分量有一低頻干擾，使得波形扭曲，但是在時頻譜上卻能將兩者區分開，只要在時頻譜上挑選適當的頻率段濾除此低頻干擾，則能明確地計算出頻帶波速。因此這樣的呈現效果也造就了此法獨特的優點。

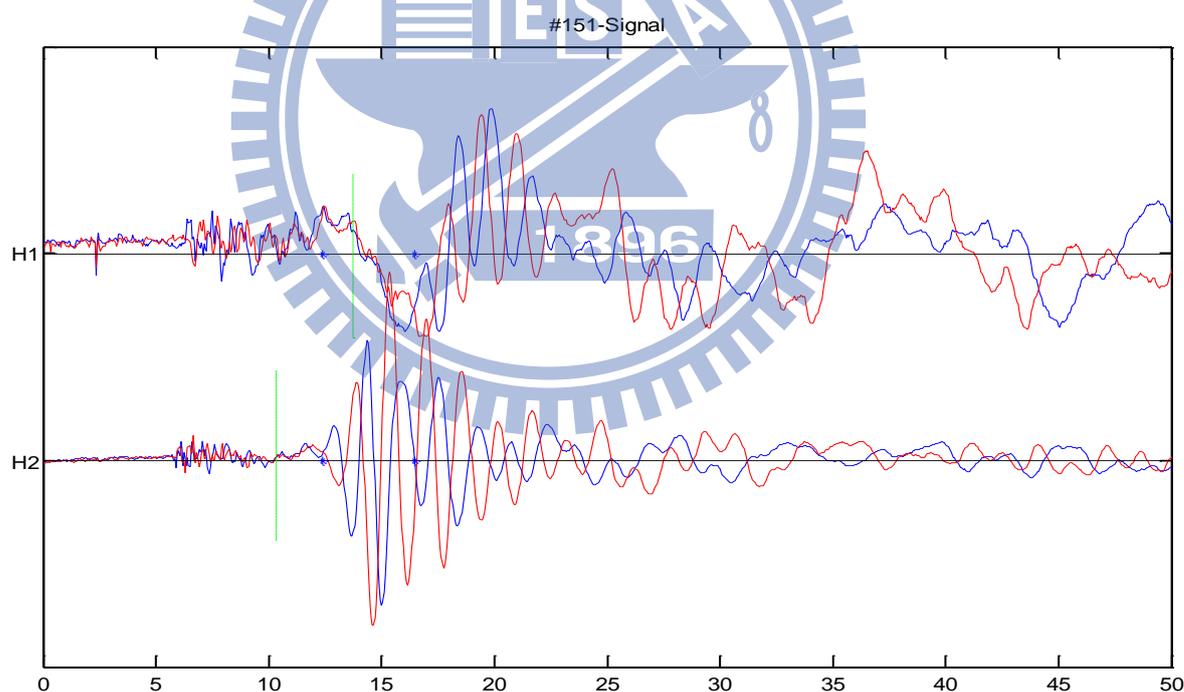


圖 4.63 懸盪式震測資料#151 波形及手動挑取剪力波初達時間

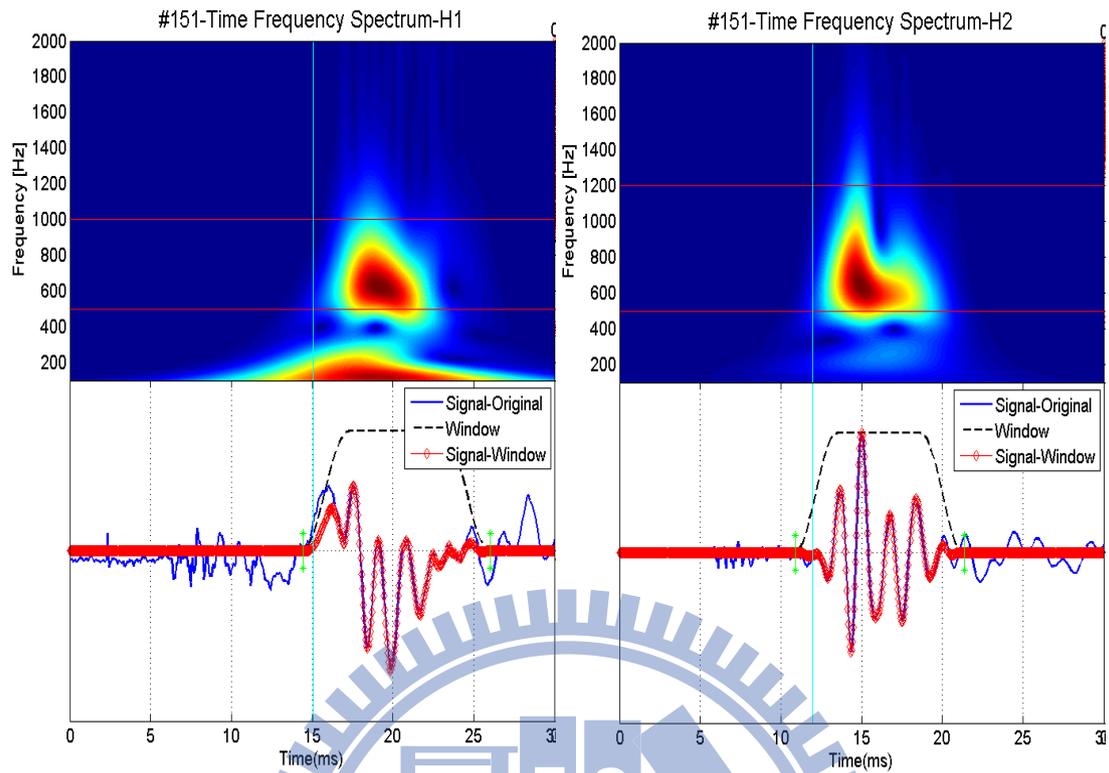


圖 4.64 懸盪式震測資料#151 套用時窗函數及其時頻譜

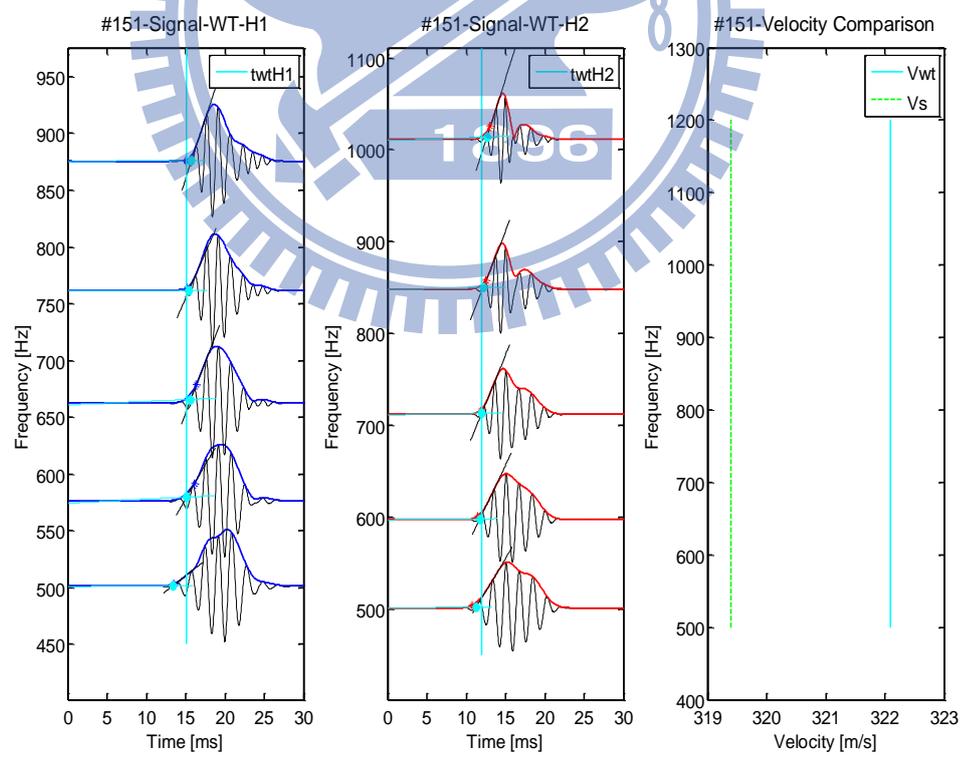


圖 4.65 懸盪式震測資料#151 半自動挑取頻帶下剪力波初達時間

4.2.2 下孔式震測資料

本研究根據 3.4.2 提出之位於交通大學博愛校區施測之下孔式震測資料，進行半自動挑波法，並分別以多重濾波法及小波轉換繪製時頻譜以供挑選頻率範圍，應用結果分別如圖 4.66~圖 4.68 及圖 4.69~圖 4.71 所示。並與手動挑波結果之剪力波速剖面比較，波速計算方式採用 2.1.1 所提到之間距法 (interval method)。圖 4.66、圖 4.69 皆顯示半自動挑波法所獲得之走時曲線與手動挑波結果之趨勢一致，而圖 4.67、圖 4.70 則是對應之剪力波速，範圍集中在 200m/s~400m/s 之間，速度隨深度逐漸增加。並可以發現以多重濾波法繪製時頻譜的自動挑波波速與手動挑波結果偏差較大，較不穩定；而小波轉換對應結果則較穩定。整體而言，下孔式震測所得初達剪力波速所在頻率範圍較低，從時頻譜上看來大多落在 100Hz~300Hz 之間，並可以發現在 50Hz 附近則有一極大能量之雜訊存在，故此低頻雜訊會在時域影響整體波形趨勢。

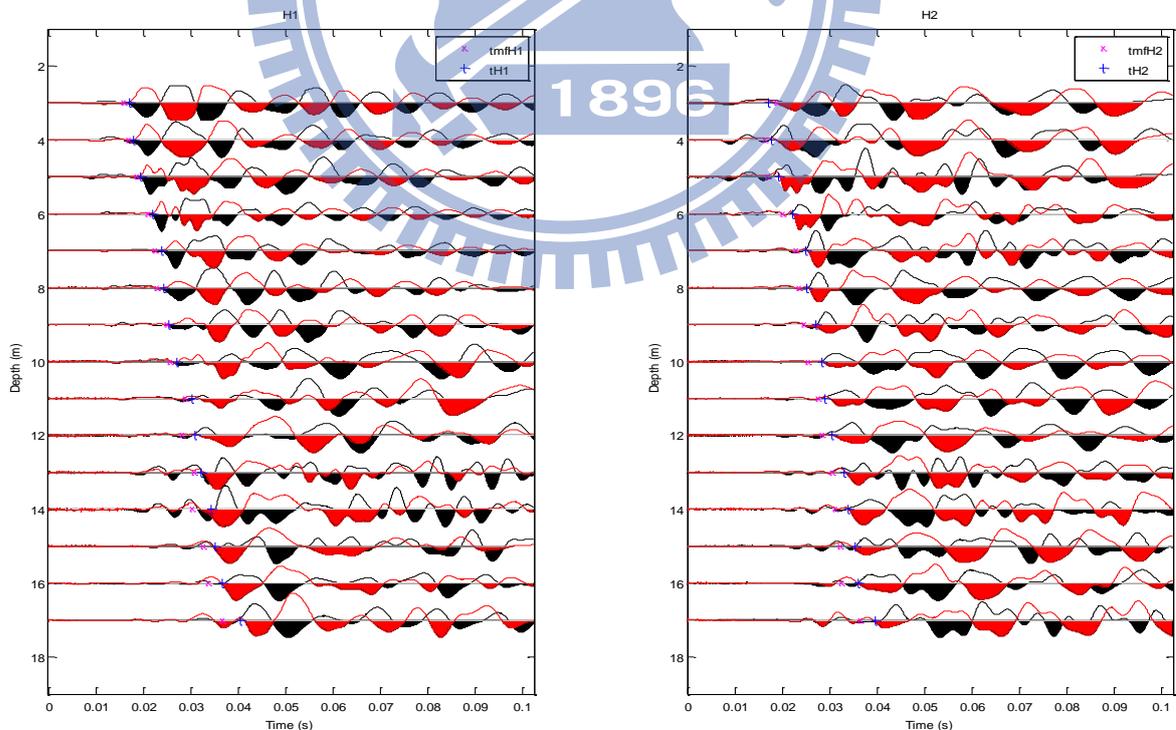


圖 4.66 下孔式震測資料於手動挑波法及半自動挑波法之走時曲線比較(以多重濾波法作時頻譜)

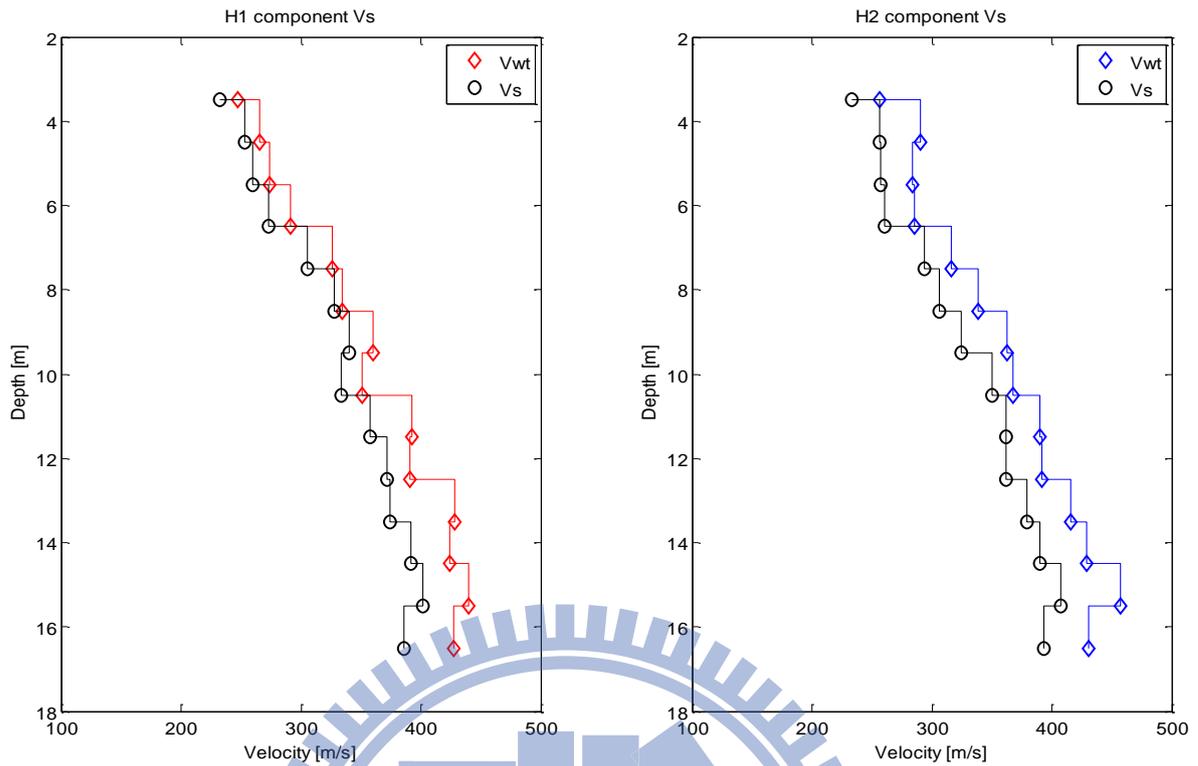


圖 4.67 下孔式震測資料於手動挑波法及半自動挑波法之剪力波速剖面(以多重濾波法作時頻譜)

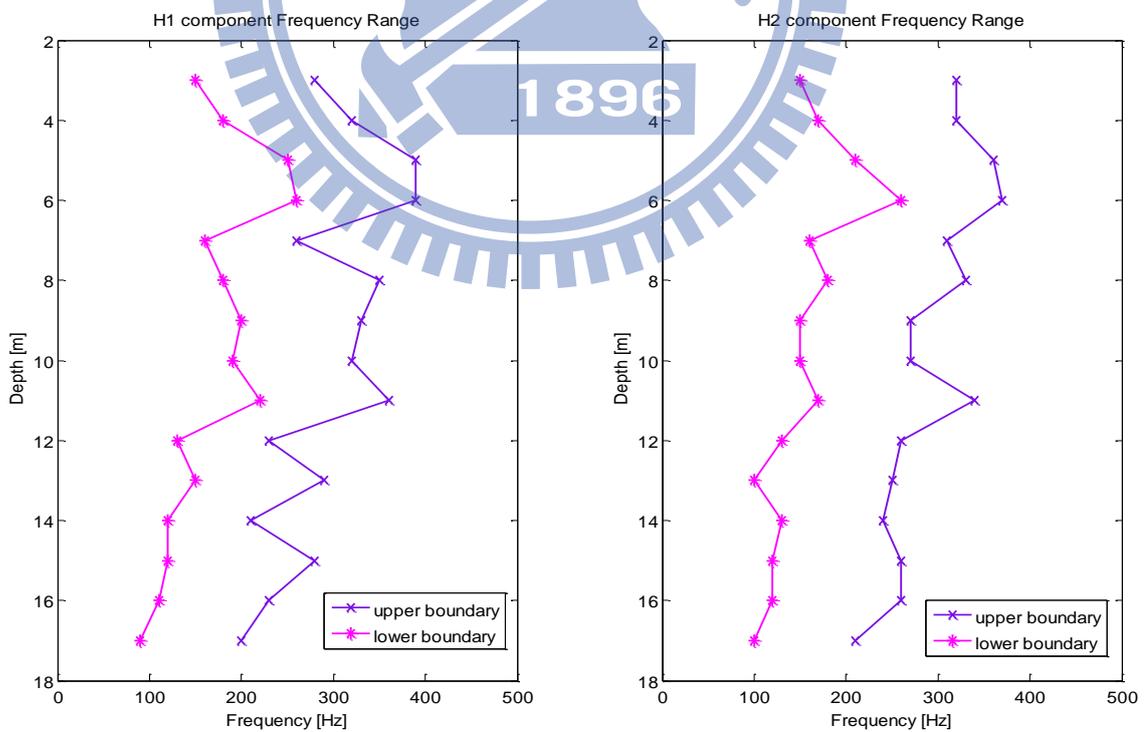


圖 4.68 下孔式震測驗證資料於半自動挑波法之頻帶波速剖面對應之頻率範圍(以多重濾波法作時頻譜)

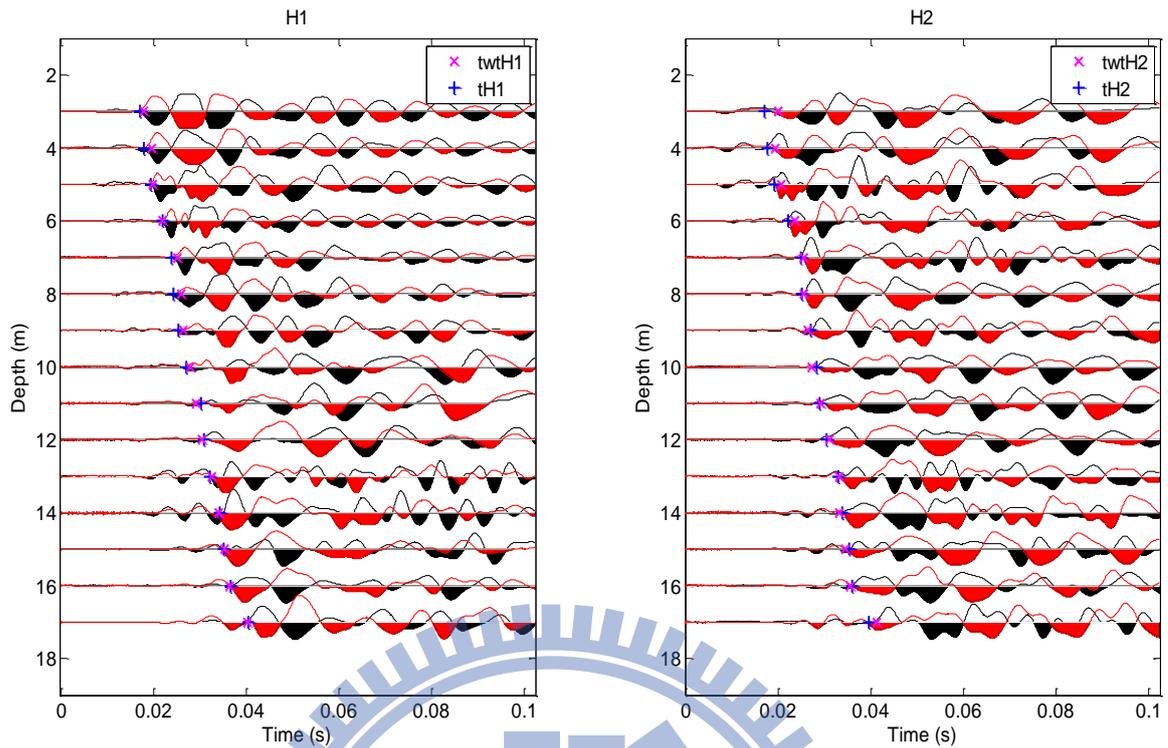


圖 4.69 下孔式震測資料於手動挑波法及半自動挑波法之走時曲線比較(以小波轉換作時頻譜)

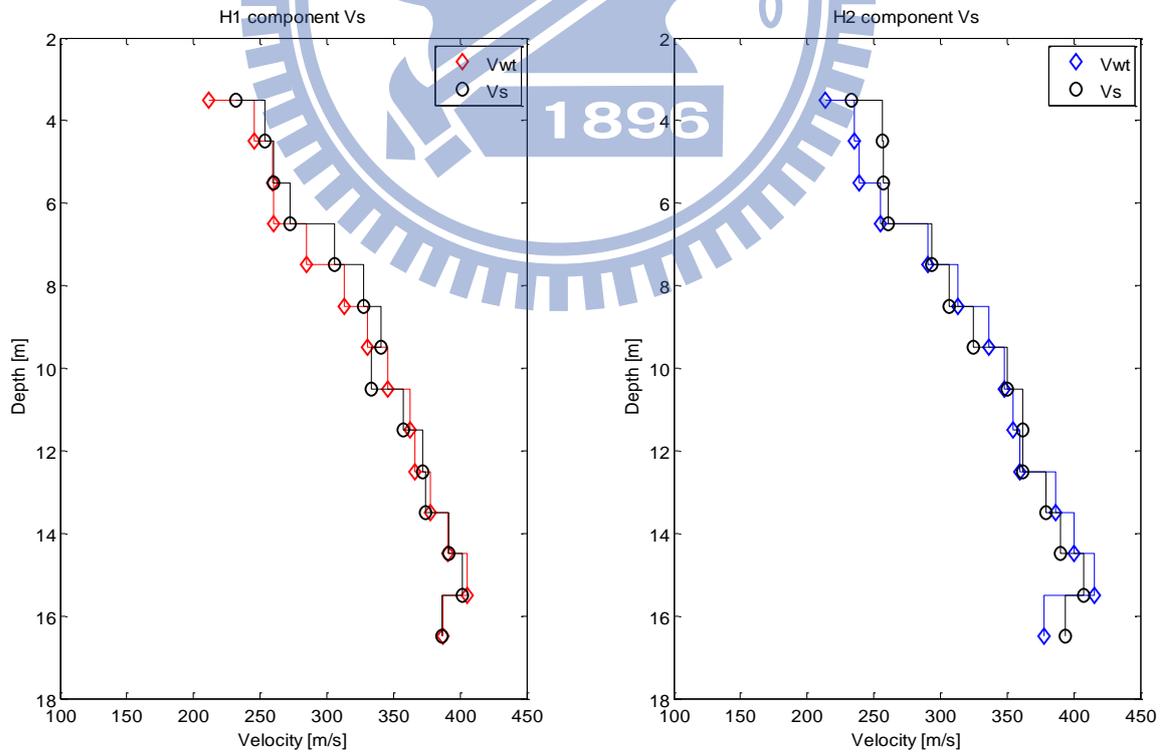


圖 4.70 下孔式震測資料於手動挑波法及半自動挑波法之剪力波速剖面(以小波轉換作時頻譜)

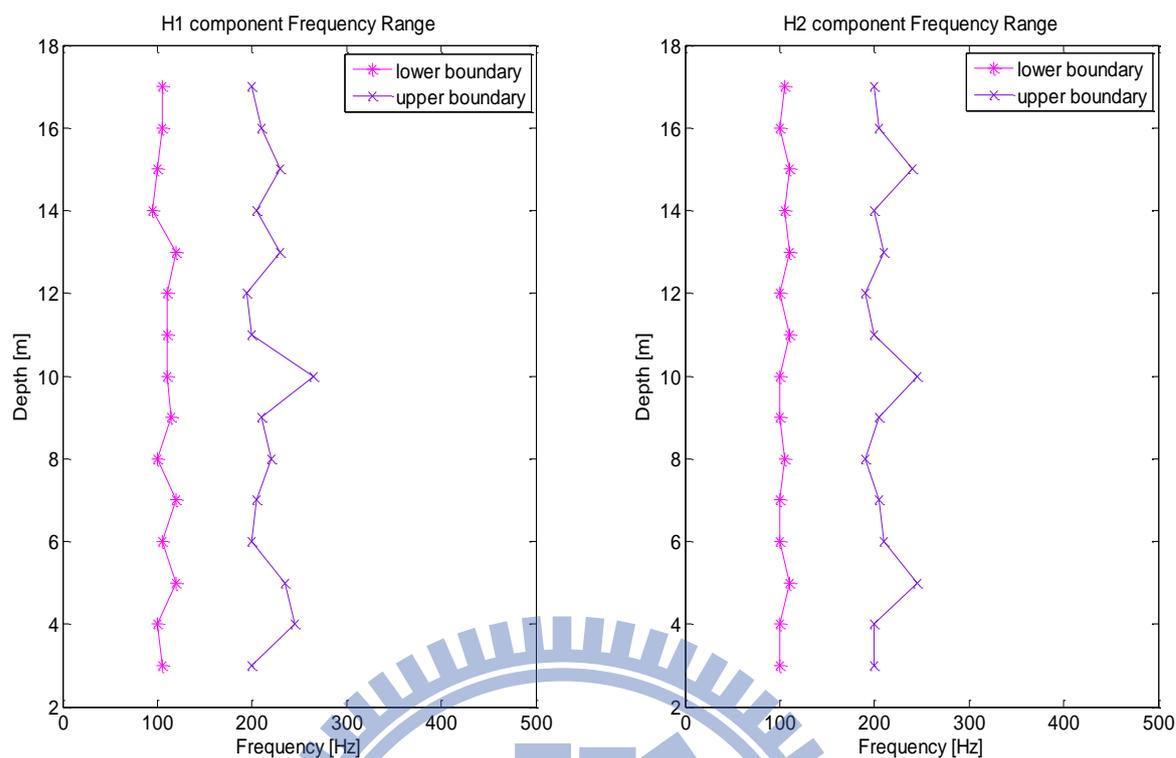


圖 4.71 下孔式震測驗證資料於半自動挑波法之頻帶波速剖面對應之頻率範圍(以小波轉換作時頻譜)

然而，在驗證的過程中發現，不論是以多重濾波法或是小波轉換繪製時頻譜，都必須調整其參數。多重濾波法的帶寬參數從原本的 $BAND = 0.5$ 改成 $BAND = 0.85$ ；而小波轉換之帶寬參數則調整為 $WinLen = 1$ ，與測試階段使用懸盪式震測資料時選擇 $WinLen = 4$ 不同。因這兩者在時頻譜特性相近，其為了在低頻保有頻率域解析度，所以犧牲了時間域解析度，意即從低頻的特性上來看波相到時可能會產生提前的錯誤跡象。以小波轉換之 #031 為例，由圖 4.72、圖 4.73 顯示，該筆資料初達波到時對應頻率大約在 $100\text{Hz} \sim 300\text{Hz}$ 之間，然而以不同參數所挑選出的到時卻不同，圖 4.72(左)明顯保留了時間域的解析度，使得時頻譜上能量分布沿著頻率軸拖移，表示頻率域的解析度變小了。而圖 4.72(右)則是因小波轉換本身特性使得低頻的時間解析度下降而往兩旁時間軸擴散，因此波相到時產生了偏移，若以 $WinLen = 4$ 之參數設定則產生如圖 4.74 之走時曲線，造成誤判。

因此解析度參數對於分析訊號之頻率範圍必須適當選擇，處於低頻卻想保有時間解析度時則應適當調整參數。而以參數調整的複雜度而言，影響多重濾波法之時頻譜繪製參數有二：BAND 和 β ，而此種改良 Morlet 小波轉換僅有 WinLen，故在參數調整上應是以小波轉換繪製時頻譜較方便。

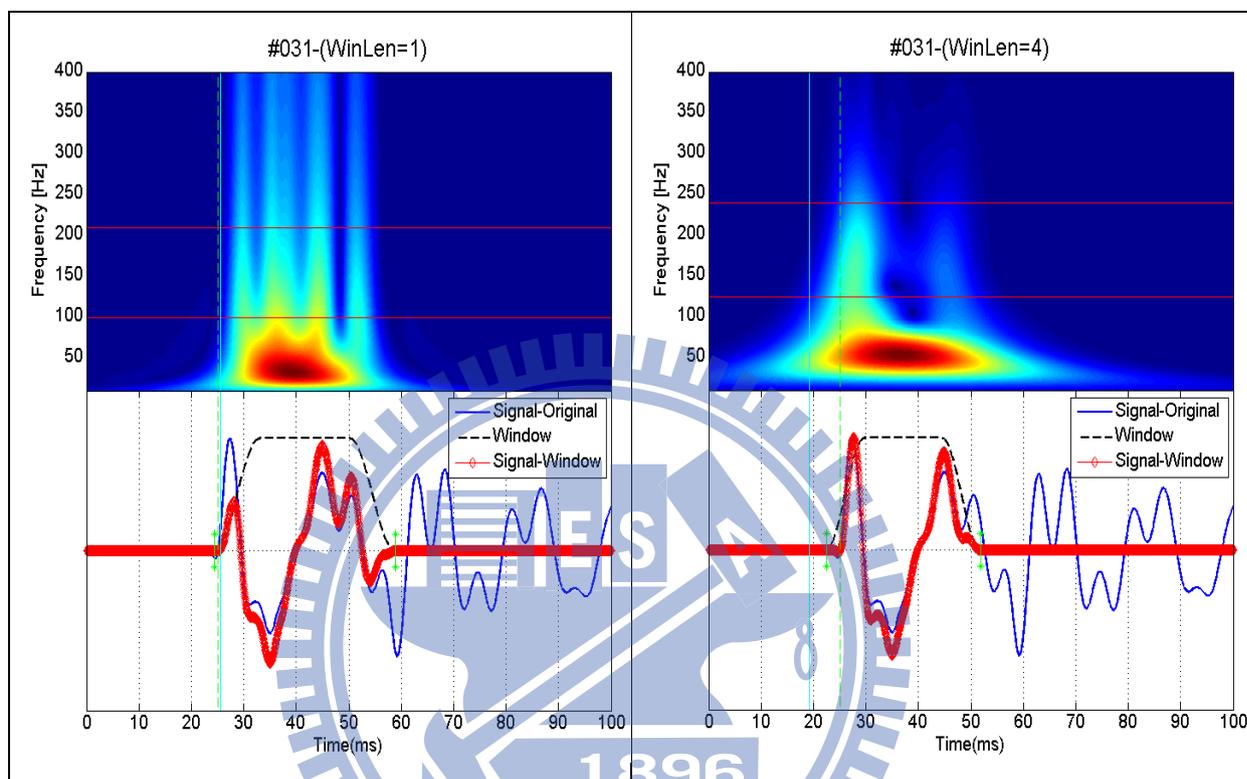


圖 4.72 小波參數 WinLen 於下孔式震測資料之時頻譜比較

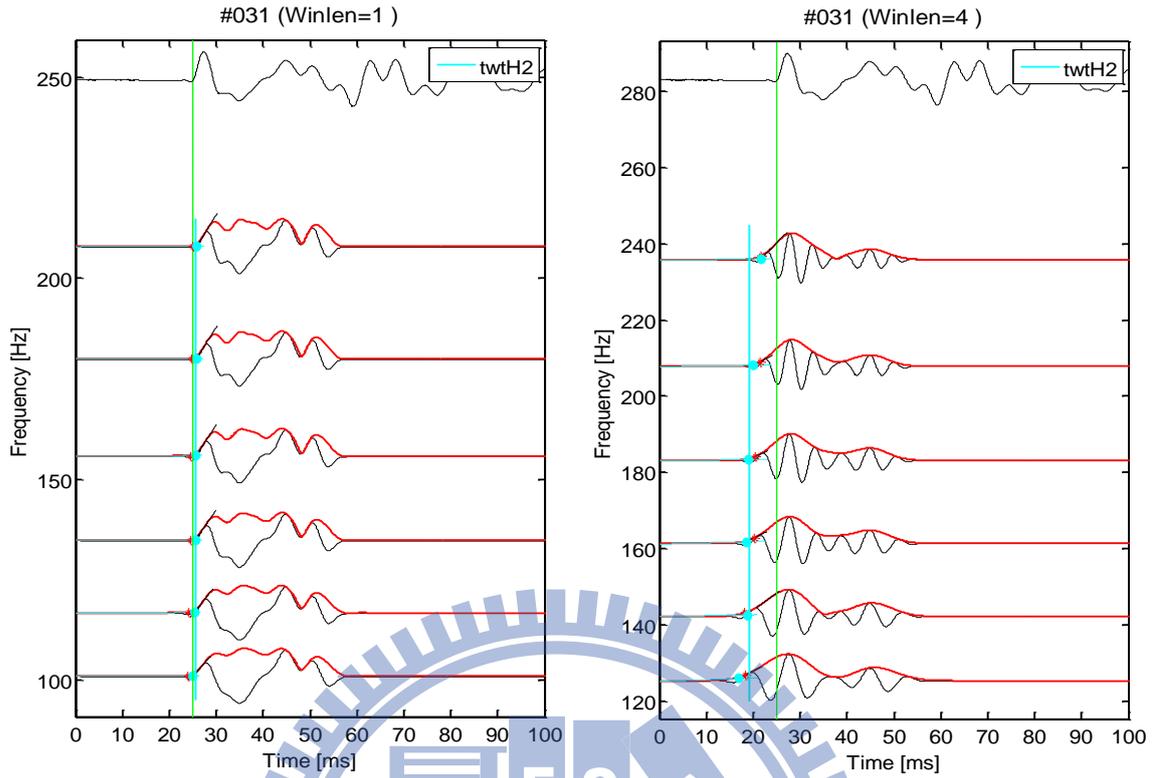


圖 4.73 小波參數 WinLen 於下孔式震測資料之半自動挑波比較

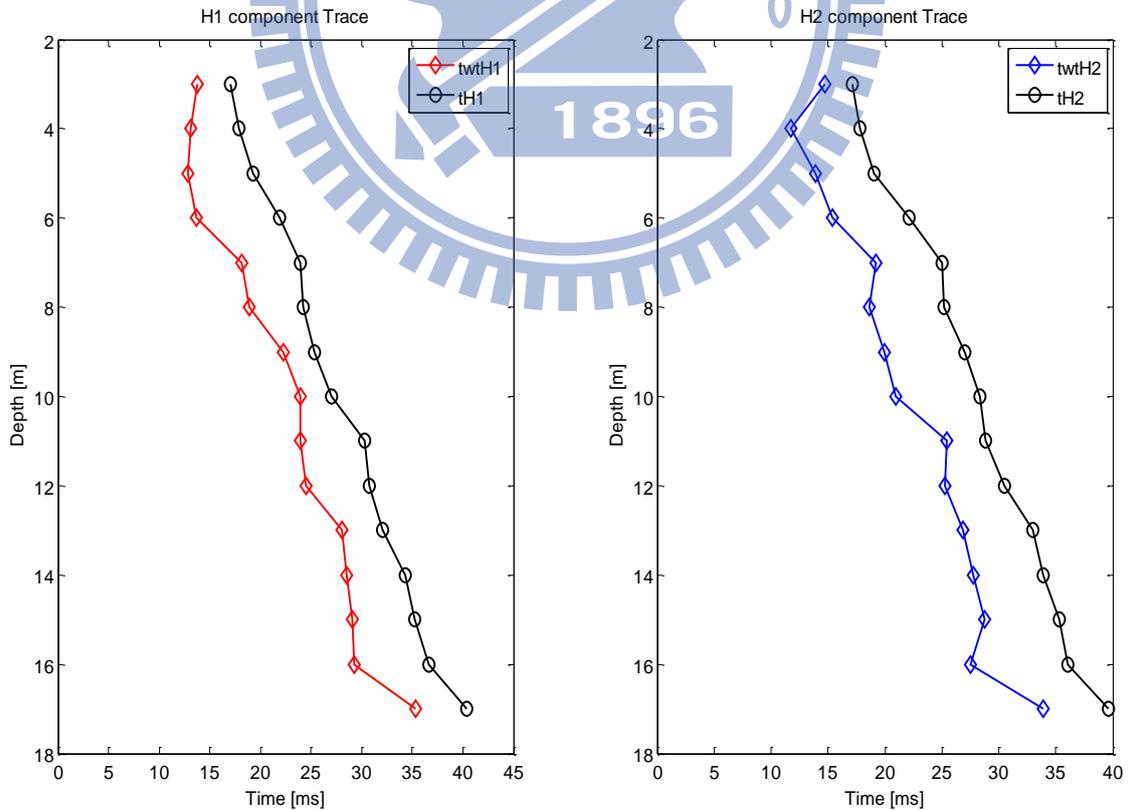


圖 4.74 因小波參數 WinLen 異同造成走時曲線偏移

4.2.3 綜合比較

經過本研究之驗證階段，整體而言，以半自動挑波方法確實能在選定頻帶下取得適當之波相初達時間，究其原因在於剪力波之初達振幅特徵明顯。而此方法某種程度上可以視作一帶通濾波器，相對將非必要波相頻率濾除；但並非每筆資料之頻率分布都一樣，故本研究利用時頻譜的呈現能同時觀察出訊號所包含之頻率特徵，進而選取頻率範圍，此法比起固定頻帶的帶通濾波器而無法確定其範圍之正確性來說更加有效率。除此之外，選定頻率範圍後，對單一頻率訊號挑波比起在時間域挑波來得簡單明瞭。

然而另一方面，由於此半自動挑波法是以時頻譜為基礎，故此方法對於時頻譜之解析度的則有很強的依賴性。因為現有的時頻分析方法皆受限於測不準原理，亦即欲有高頻率解析度則必須犧牲時間解析度，而欲有高時間解析度則必須犧牲頻率解析度。而通常時頻分析會因為高頻訊號震動快所以需要高時間解析度，而低頻訊號因週期長故需高頻率解析度，雖說這樣的解析度分布符合大眾採用時頻分析的需求，但對於本研究之低頻訊號卻有錯誤的波相到時，因為低頻之時間解析度被犧牲了。

例如懸盪式震測資料之頻率集中在 1000Hz 前後，而下孔式震測資料則相對低頻，多在 300Hz 以下。此時若以懸盪式震測資料之時頻譜參數，在 1000Hz 能得到最佳之時頻解析度比例，同樣參數若套用至下孔震測資料則有可能因低頻而使時間解析度降低，造成初達時間判讀錯誤。因此對於本研究，訊號對於時頻譜的轉換參數必須因資料整體之主控頻率範圍作調整，以達到最佳自動判讀波相到時之效能。

第五章 結論與建議

5.1 結論

1. 本研究所提之頻譜分析方法，因其施測配置及資料結構較適合懸盪式震測法應用，因此採用懸盪式震測法進行適用性測試，測試結果顯示其雖具有自動化之潛力，但目前對於訊雜比較低之訊號所得之分析結果差強人意，尚須進一步進行應用探討以獲得穩定之成效。
2. 本研究另提之時頻譜繪製方法採用多重濾波法及小波轉換法，兩者經由現地資料驗證皆有良好表現，整體波速趨勢皆跟手動挑波結果一致，且能獲得各深度波速對應之頻率範圍，加強其物理意義。然而，此半自動挑波方法受限於時頻分析方法之解析度分布，對於不同震源之施測方法因其頻率特性不同而須針對各方法進行參數最佳化，提升主能量帶之解析度，以便能正確判釋波相初達時間。考慮參數調整的便利性，改良 Morlet 小波轉換法僅需調整單一參數，較推薦使用。
3. 綜合成果顯示，頻譜分析法較適合應用於震源穩定且高頻的懸盪式震測法，而時頻分析法對於各項孔內震測皆可有良好應用成效，且有良好之抗雜訊能力，可廣為推廣應用。

5.2 建議

1. 本研究顯示在將訊號轉換至時頻譜上能明顯發現其各頻率訊號能量隨時間變化情形，例如 P 波頻率較高，到時較早，S 波次之，頻率也相對較低，而施測資料也可能受到水波或管波之雜訊影響，即可以在低頻處看到大範圍之時間影響。因為有時頻譜如此清楚的變化情形，藉由時窗函數前處理的輔助，選定適當之頻率範圍，未來也能朝向 P 波之初達到時判釋方向邁進。
2. 本研究提出之半自動化挑波方法對於時頻譜解析度之依賴性高，雖然透過時頻分析法的參數調整即可解決，但治根的辦法還是需要同時獲取高

頻率與高時間解析度。故未來建議嘗試以希爾伯特-黃轉換(Hilbert Huang Transform)利用經驗模態分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法將訊號分解為本質模態函數(Intrinsic Mode Functions, IMF)，然後將 IMF 作希爾伯特轉換(Hilbert Transform)，正確地獲得資料的瞬時頻率，以繪製高頻率、高時間解析度之時頻譜(Huang et al., 1998)並以此時頻譜作為半自動化挑波方法之判釋基礎。

3. 從時間演進回顧所提出的自動化挑波方法可以發現，其自動化方法越來越多元，並沒有一種單一方法適用所有訊號，往往結合不同面向之評判標準或分析方法。同樣概念，未來建議本研究提出的半自動方法能結合其他現有的挑波機制，以期達到擁有多適應性之全自動化挑波方法。



參考文獻

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *Automatic Control, IEEE Transactions on* **19**, 716-723.
- Allen, R. V. (1978). Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of the Seismological Society of America* **68**, 1521-1532.
- Ambuter, B. P., and Solomon, S. C. (1974). An event-recording system for monitoring small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* **64**, 1181-1188.
- Anderson, K. R. (1978). Automatic processing of local earthquake data. Ph.D, Cambridge, Massachusetts.
- Angioni, T., Rechten, R. D., Cardimona, S. J., and Luna, R. (2003). Crosshole seismic tomography and borehole logging for engineering site characterization in Sikeston, MO, USA. *Tectonophysics* **368**, 119-137.
- Baer, M., and Kradolfer, U. (1987). An automatic phase picker for local and teleseismic events. *Bulletin of the Seismological Society of America* **77**, 1437-1445.
- Chun-Lin, L. (2010). A Tutorial of the Wavelet Transform. NTUEE, Taiwan.
- Coppens, F. (1985). First Arrival Picking on Common-Offset Trace Collections for Automatic Estimation of Static Corrections*. *Geophysical prospecting* **33**, 1212-1231.
- D4428/D4428M-07 (2004). "Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing". *ASTM Int.*
- D7400-08 (2008). "Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing". *ASTM Int.*
- Dai, H., and MacBeth, C. (1995). Automatic picking of seismic arrivals in local earthquake data using an artificial neural network. *Geophysical journal international* **120**, 758-774.
- Dziewonski, A., Bloch, S., and Landisman, M. (1969). A technique for the analysis of transient seismic signals. *Bulletin of the Seismological Society of America* **59**, 427-444.
- Earle, P. S., and Shearer, P. M. (1994). Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America* **84**, 366-376.
- Grossmann, A., and Morlet, J. (1984). Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape. *SIAM journal on mathematical analysis* **15**, 723-736.
- Haar, A. (1910). Zur theorie der orthogonalen funktionensysteme. *Mathematische Annalen* **69**, 331-371.
- Han, L., Wong, J., and Bancroft, J. (2010). Time picking on noisy microseismograms. *GeoCanada*.
- Herrmann, R. B. (1973). Some aspects of band-pass filtering of surface waves.

- Bulletin of the Seismological Society of America* **63**, 663-671.
- Hoar, R. J., and Stokoe, K. H., II (1981). Crosshole Measurement and Analysis of Shear Waves. In "Proc. of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", Vol. 3, pp. 223-226.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., and Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **454**, 903-995.
- Joh, S. H. (1996). Advances in Interpretation and Analysis Techniques of the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Method. Ph.D, Univ. of Texas at Austin, Texas, USA.
- Kim, D. S., Bang, E. S., and Kim, W. C. (2004). Evaluation of various downhole data reduction methods for obtaining reliable VS profiles. *ASTM geotechnical testing journal* **27**, 585-597.
- Lardies, J., and Gouttebroze, S. (2002). Identification of modal parameters using the wavelet transform. *International Journal of Mechanical Sciences* **44**, 2263-2283.
- Leonard, M. (2000). Comparison of manual and automatic onset time picking. *Bulletin of the Seismological Society of America* **90**, 1384-1390.
- Leonard, M., and Kennett, B. (1999). Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms. *Physics of the earth and planetary interiors* **113**, 247-263.
- Maeda, N. (1985). A Method for Reading and Checking Phase Time in Auto-Processing System of Seismic Wave Data. *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd ser.)* **38**, 365-379.
- Mallat, S. G. (1989). Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on* **37**, 2091-2110.
- McEvelly, T., and Majer, E. (1982). ASP: An automated seismic processor for microearthquake networks. *Bulletin of the Seismological Society of America* **72**, 303-325.
- Murat, M. E., and Rudman, A. J. (1992). Automated First Arrival Picking: a Neural Network APPROACH1. *Geophysical prospecting* **40**, 587-604.
- Nazarian, S., Stokoe, I., and Hudson, W. R. (1983). Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. *Transportation Research Record*.
- Patel, N. S. (1981). "Generation and Attenuation of Seismic Waves in Downhole Testing," University of Texas at Austin.
- Proakis, J., and Manolakis, D. (1992). Digital Signal Processing Macmillan Publishing Company. USA.
- Roblee, C. J., Stokoe, K., Fuhrman, M. D., and Nelson, P. P. (1994). Crosshole SW-Wave Measurements in Rock and Soil. *ASTM SPECIAL TECHNICAL*

PUBLICATION 1213, 58-58.

- Sánchez-Salineró, I. (1987). "Analytical Investigation of Seismic Methods Used for Engineering Applications," University of Texas at Austin.
- Sleeman, R., and van Eck, T. (1999). Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings. *Physics of the earth and planetary interiors* **113**, 265-275.
- Stokoe, K. H., II, and Hoar, R. J. (1978). Variables Affecting In Situ Seismic Measurements. In "Proceedings of the Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics", Vol. 2, pp. 919-939. ASCE Geotechnical Engineering Division, Pasadena, California.
- Stokoe, K. H., II, and Woods, R. D. (1972). In situ shear wave velocity by cross-hole method. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* **98**, 443-460.
- Stokoe, K. H., II, Wright, S. G., Bay, J. A., and Roesset, J. M. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method. *Geophysical characterization of sites*, 15-25.
- Swindell, W., and Snell, N. (1977). Station processor automatic signal detection system, phase I: Final report, station processor software development. *Texas Instruments Report No. ALEX (01)-FR-77-01, AFTAC Contract Number FO8606-76-C-0025, Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas.*
- Terzaghi, K., and Peck, R. (1948). Soil mechanics in engineering practice.
- Tukey, J. W. (1967). An introduction to the calculations of numerical spectrum analysis. *Spectral Analysis of Time Series*, 25-46.
- Wang, J., and Teng, T. L. (1995). Artificial neural network-based seismic detector. *Bulletin of the Seismological Society of America* **85**, 308-319.
- Wong, J., Han, L., Stewart, R. R., Bentley, L. R., and Bancroft, J. C. (2009). Geophysical Well Logs from a Shallow Test Well and Automatic Determination of Formation Velocities from Full-Waveform Sonic Logs. *CSEG RECORDER*.
- Zhang, H. (2001). Application of Multilayer Perceptron (MLP) Neural Network in Identification and Picking P-wave arrival. *ECE539 Project Report, Department of Geology and Geophysics, University of Wisconsin-Madison.*
- Zhang, H., Thurber, C., and Rowe, C. (2003). Automatic P-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America* **93**, 1904-1912.
- Zhao, Y., and Takano, K. (1999). An artificial neural network approach for broadband seismic phase picking. *Bulletin of the Seismological Society of America* **89**, 670-680.

- 左国平, 王彦春, and 隋荣亮 (2004). 利用能量比法拾取地震初至的一种改进方法. *石油物探* **43**, 345-348.
- 李立愷 (2005). 小波分析法應用於土層層序及內涵物之檢測研究.
- 林士誠 (1999). 標準貫入試驗 N 值應用之彙整 (一). *技師報* **654**.
- 林俊宏 (2005). Pseudo-section 概念於表面波震測應用之數值模擬探討.
- 罗进华, 丁维凤, and 潘国富 (2008). 改进的滚动时窗法实现海底浅地层剖面反射层位自动拾取的研究. *物探化探计算技术* **30**, 363-367.
- 徐钰, 曾维辉, 宋建国, 徐维秀, and 陈楠 (2012). 浅层折射波勘探中初至自动拾取新算法. *石油地球物理勘探* **47**, 218-224.
- 高弘 (2001). 使用類神經網路自動判別寬頻地震資料之波相到時. *中央氣象局地震技術報告彙編* **30**, 103-120.
- 曾志瑋 (2009). 現地跨孔波速檢測軟體之開發, 朝陽科技大學, 台中縣.
- 葉仁傑 (2011). 利用表面波頻散分析探討馬尼拉海溝側向速度變化, 國立中央大學, 桃園縣.
- 鄒和翰 (2005). 多頻道表面波震測法施測改良與案例分析, 國立交通大學, 新竹市.
- 蔡璧嫻 (2007). 臺灣自由場強震站場址分類之進一步研究, 國立中央大學, 桃園縣.
- 賴雅娟 (2009). 利用表面波探討造山帶地區的非均向性構造: 以台灣及西藏高原為例, 國立中央大學, 桃園縣.
- 张伟, 王彦春, 李洪臣, 譚昌勇, 王连山, 赵贵菊, and 秦亚玲 (2009). 地震道瞬时强度比法拾取初至波. *地球物理学进展* **24**.
- Seismic Shear Wave Studies, 孔內震測法及非破壞性地表震測法示意圖.

Retrieved from :

http://www.enviroscan.com/html/seismic_shear_wave_studies.html

OYO corporation, 懸盪式波速量測系統配置圖. Retrieved from :

http://www.oyo.jp/other/30-english/08-borehole/01-suspension_ps_logger.htm

OYO suspension PS logger Manual, PS logger 震源原理. Retrieved from :

http://www.oyo.jp/other/30-english/08-borehole/01-suspension_ps_logger.htm

國家地震工程研究中心, 懸盪式震測法訊號波形. Retrieved from :

<http://egdt.ncree.org.tw/PSLogger.htm>

CRYSTAL instruments, 非週期訊號遺漏. Retrieved from :

<http://www.go-ci.com/Highlights/index.asp?id=10>

测试技术实验指导, 頻譜能量遺漏. Retrieved from :

http://jpkc.whut.edu.cn/csjs/course/Top_Bar/ShiYan/xunishiyan/6.htm

附錄(一)

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(劈管取樣)		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	(9.95m) 33		
10			
11	(11.95m) 50/14cm		
12			
13	(13.6m) 50/10cm		
14			
15			
16			15.8m~18.25m 深灰色粉砂岩(岩盤)
17			
18			
19			
20			