

第四章 研究方法與結果討論

4.1 研究目的

以表面波探測法求得地層剪力波速之剖面具非破壞性、取樣空間大及經濟便利性等優點。表面波探測之方法大致分為 SASW 及 MASW，然相較於 SASW，MASW 具施作效率高、分析自動化容易等優點。考慮 2.3.5 節所提 MASW 尚存之問題將造成現場測線施測參數難以決定，進而降低 MASW 施測的便利性。然各項施測參數間往往存在互相牽制的現象。為了避免分析過程中會產生空間映頻效應，則受波器間距不宜過長，然震測儀之頻道數有限，因此測線展距亦受到限制。若是考慮空間資料遺漏問題，則測線展距不宜過短，此為受波器間距與測線展距互相牽制所造成施測參數難以決定。

研究流程如圖 4.1.1 所示，在 4.2 節中，考慮震源與受波器本身的差異性，將探討存在於各個受波器與震源的不穩定對於整體試驗品質的影響。在 4.3 節中，就各項空間幾何配置之施測參數進行獨立探討，並提出解決方案(包含 Pseudo section 以及最佳測線展距範圍選取)，並於各小節中呈現改良前後於各運算域中的差異。在 4.4 節中，比較不同震源施測對於整體資料品質的差異，並提出適用之原則。在 4.5 節中，將經過改良之測線佈置以及分析方法所得頻散曲線，套入既有的反算模式中求得地層剪力波速剖面，並與傳統單一炸點之 MASW 測線配置進行比較。最後將綜合第四章所討論，於 4.6 節中提出 MASW 之施測參數選擇標準以期提供後續施測者相關之依據可循，且配合改良施測方法建立 MASW 之標準施測流程。

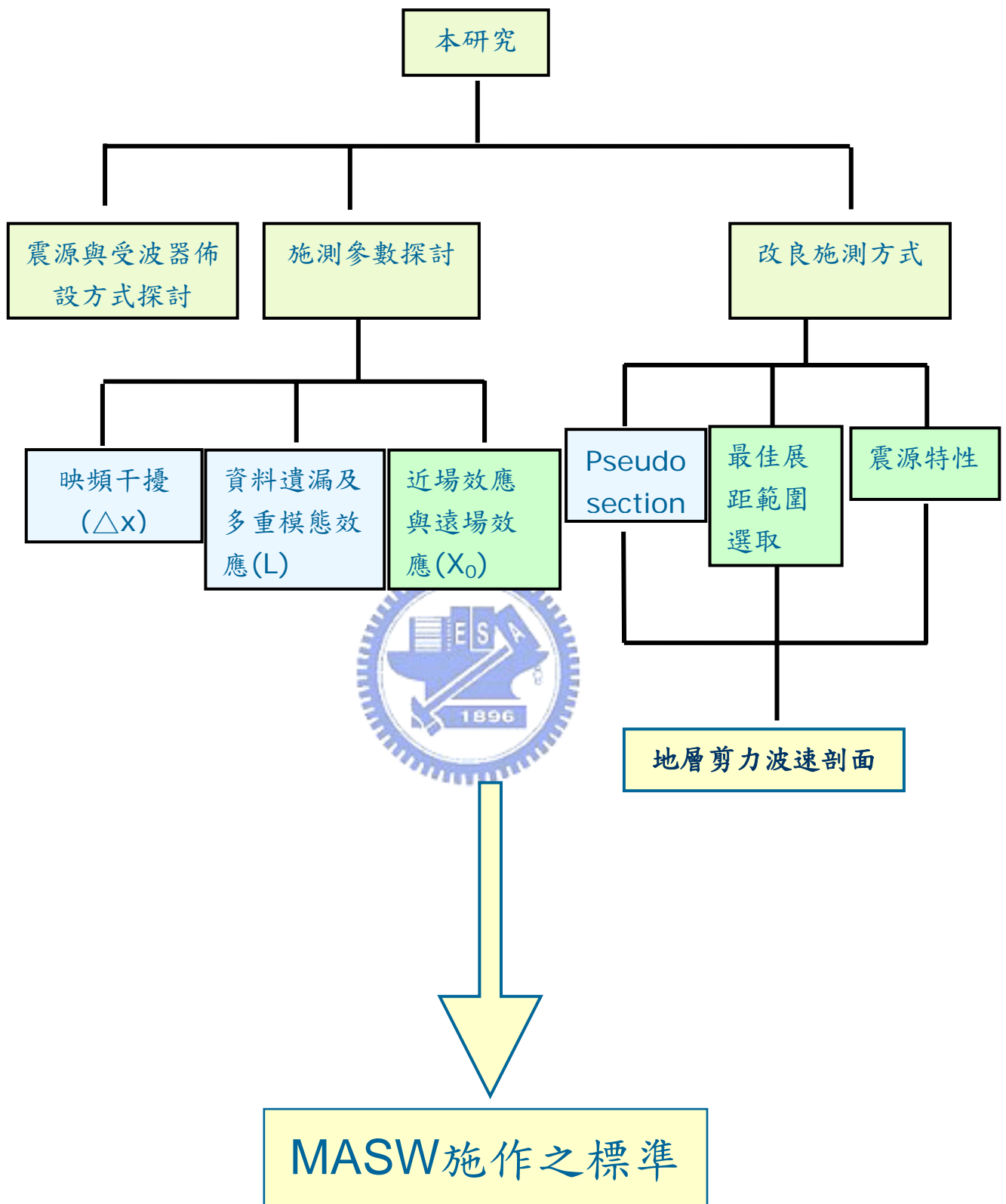


圖 4.1.1 研究流程圖

4.2 震源與受波器佈設方式

為探討震源與受波器本身的差異性，以下將針對各個受波器與震源之不穩定性對於整體試驗品質的影響進行討論。

common source 之試驗方式為固定震源，而受波器沿欲測測線範圍內移動藉以蒐集震測資料。相反地，固定受波器移動震源之試驗方式稱為 common receiver。試驗進行中，其餘測線幾何配置之參數皆固定($dx=1m$ 、 $X_0=24m$)。試驗場址為交大博愛校區，震源方式為 12 磅重鐵鎚。試驗之配置示意如圖 4.2.1。

1. t-x domain 的探討

如圖 4.2.2 所示，在固定其餘幾何配置參數後，所蒐集的資料於 t-x domain 的呈現大致上沒有太大的差異，惟在表面波(ground roll)出現之前，common source 的施作方式可明顯的看到較為一致的初達實體波；然以 common receiver 的施作方式，初達實體波的一致性較不此明顯。換言之，非實體波的隨機雜訊較為明顯。推測其原因可能為敲擊鐵板與地表之接觸互制行為，在兩種不同施測方式亦有程度上的差異。然觀察表面波(ground roll)的呈現，並不受上述因素所影響，在 t-x domain 裡，初判表面波速(ground roll)範圍大約皆為 0.1ms 到 0.2ms。

2. f-x domain 的探討

如圖 4.2.3 與 4.2.4 左側所示，common source 施作方式在主要頻率分部的呈現大致為 20-50hz，而 common receiver 施作方式，其主要頻率分布於 20-45hz。common receiver 施作方式，於較高頻的資料不如 common source 施作方式，主要原因可能為震源頻率特性較不穩定。common receiver 的多次敲擊炸點施作並不能提供一致的主要頻率分布，如果敲擊方式改為自動而非人為敲擊，頻率主要分布應較能一致。另外，試驗施作時間亦為不確定因素之一。本次所進行的試驗，common

source 的施作方式只有一個炸點，其施作時間大約為 common receiver 施作方式的 1/24，隨著施作時間增加，整體震測訊號對於隨機性的雜訊比值(R^2)會降低，如圖 4.2.3 與 4.2.4 的右側所示。

在 MSASW 分析過程中，沿時間軸做快速傅立葉轉換(FFT)，震測資料會成為複數形式。此時取相位角並做摺開的動作來觀察兩種施作方式的差異，如圖 4.2.5 所示，分別取頻率 25Hz、45Hz、47Hz 及 50Hz 的資料來做比較，摺開相位角的斜率在頻率為 25Hz 以及 45Hz 雖有些許差異，但整體而言非常一致。而 47Hz 與 50Hz 資料顯示，common receiver 施作方式出現較難以判斷的斜率，尤以 50Hz 更為明顯。

3. f-v domain 的探討

若將兩筆震測資料轉換至 f-v domain 觀察，如圖 4.2.6 所示，無論以 MSASW(藍圈)或 MWTSW(紅點)進行運算，common receiver 施作方式皆造成頻散曲線於 45Hz 以上之頻率呈現散亂的現象，而 common source 施作方式直到 55Hz 以上才有此現象。觀察頻散曲線之可信頻寬範圍，再次說明 common source 施作方式優於 common receiver 施作方式。

上述試驗考慮敲擊鐵板與地表互置行為，可能造成 common source 與 common receiver 震源所能產生頻寬範圍之差異。若排除鐵板與地表複雜的互制行為進行試驗則得圖 4.2.8 至圖 4.2.11。探討方式亦從 t-x domain、f-x domain 以及 f-v domain 進行比較。相較於交大博愛校區之試驗場址地表狀況為草地，圖 4.2.8 至圖 4.2.11 全部試驗測線接配置於柏油路面，因此於各敲擊點不論接觸面材料參數或接觸狀況都較為一致。觀察各計算域可發現在柏油路進行兩種不同試驗所呈現之結果差異顯現極為有限，並且不會產生明顯的頻寬範圍之差別。

綜合以上各節在不同的運算域探討所得到的結果，測線佈置於草地則

以 common source 施作所得到的分析結果會優於 common receiver。換言之，震源的不穩定性對於實驗品質的影響高於受波器的不穩定性。但若能克服人為誤差所產生一些影響，如敲擊力道統一、敲擊地點之選擇等，則 common source 與 common receiver 的施作方式所得之頻散曲線應為一致。測線佈置於柏油路上則因震源與地表接觸面不穩定性降低，因此不論進行何種方式的測線佈置於各計算域所呈現的結果差異都極為有限。



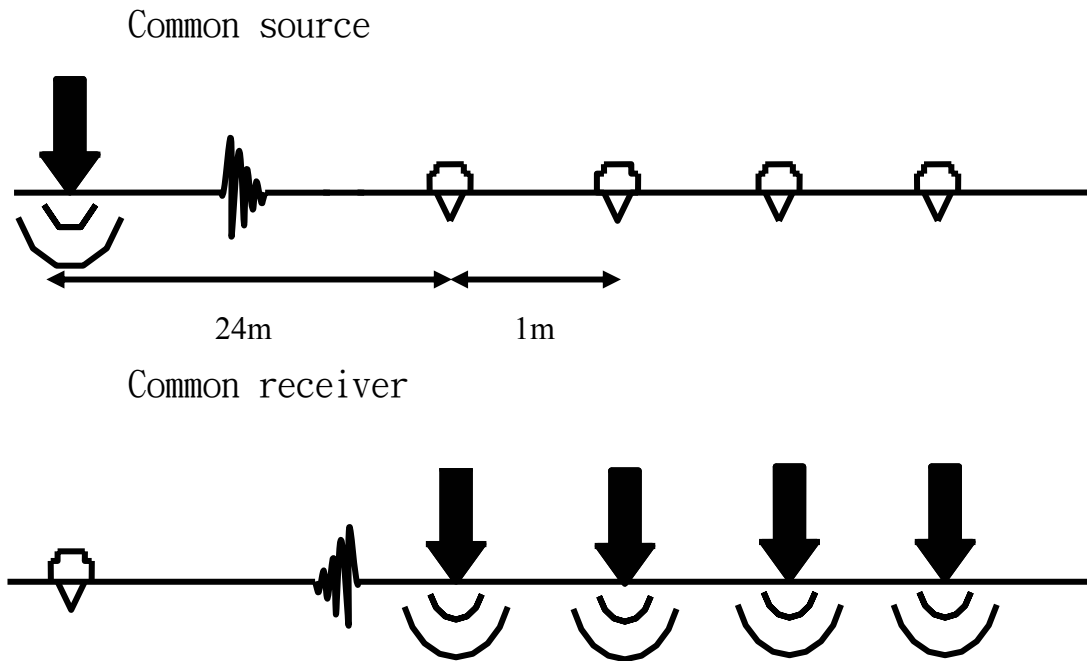


圖 4.2.1 common source 與 common receiver 施作方式

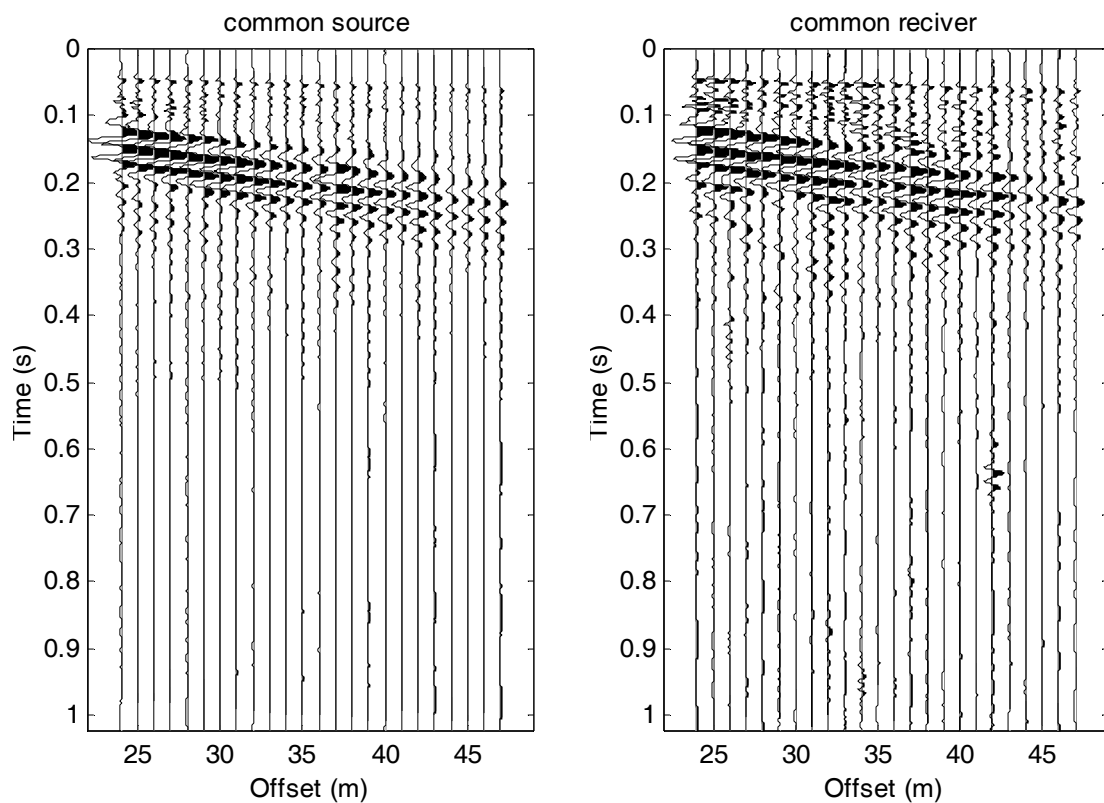


圖 4.2.2 common source 與 common receiver 不同震測方式所得之震測資料在 t-x domain 的呈現(草地)

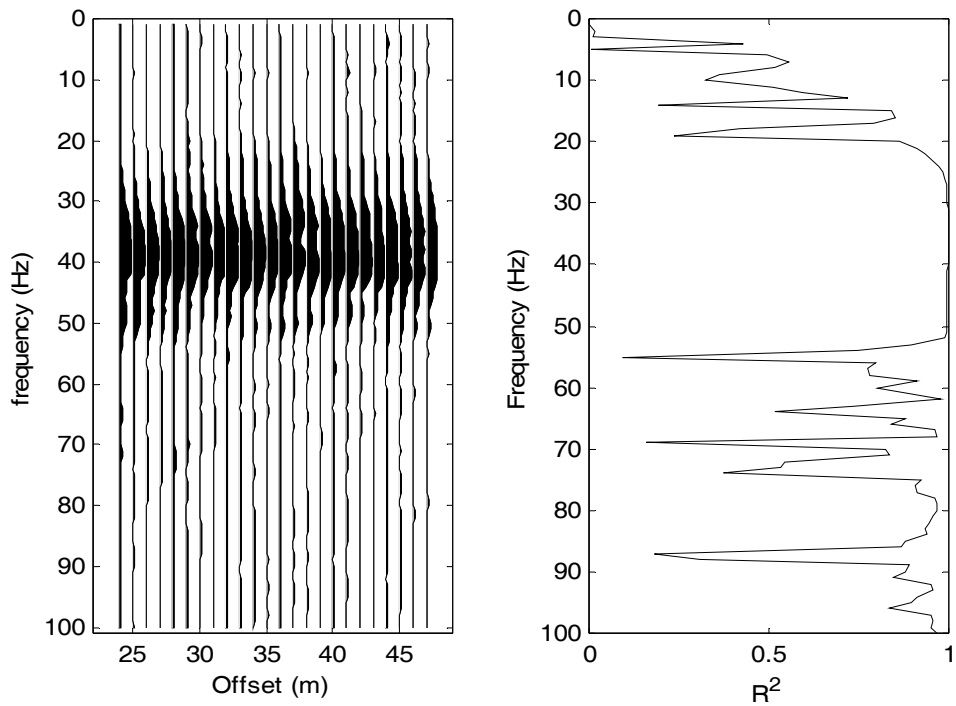


圖 4.2.3 common source 施測方式所得之震測資料在 f-x domain 的呈現

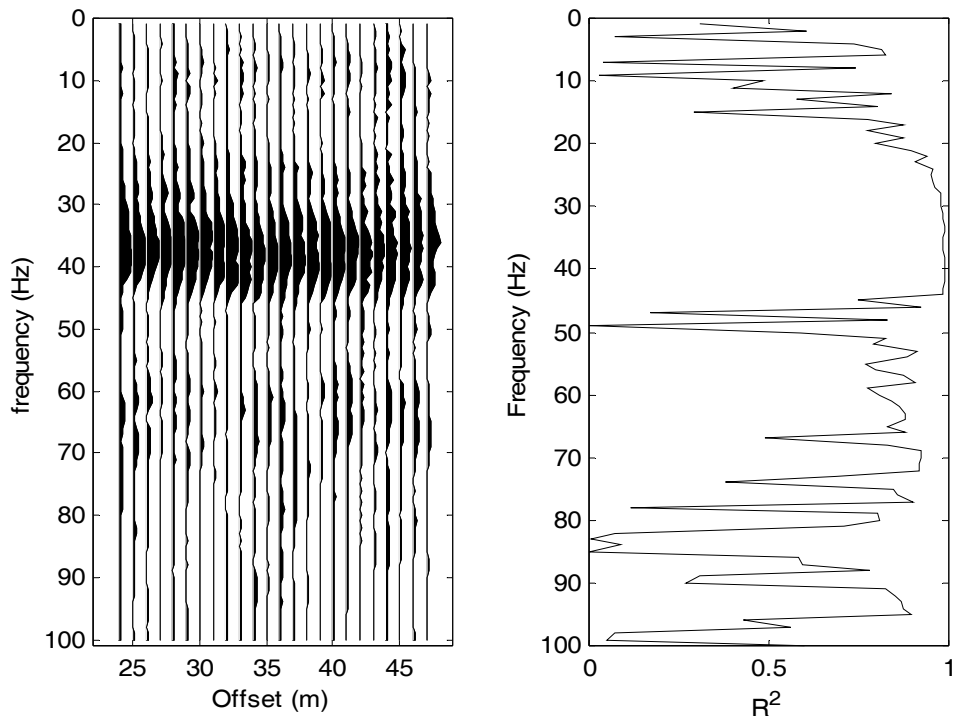


圖 4.2.4 common receiver 施測方式所得之震測資料在 f-x domain 的呈現

(草地)

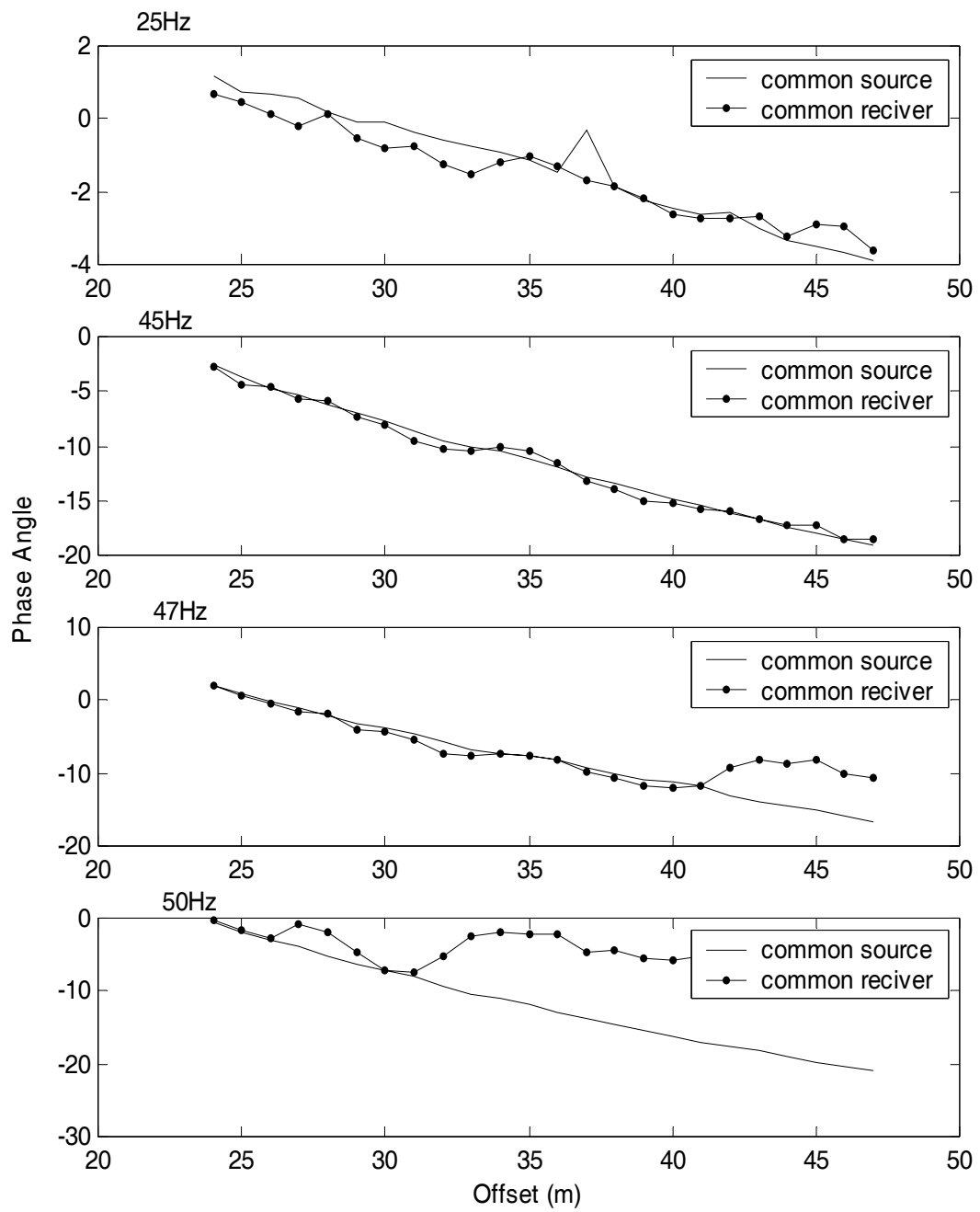


圖 4.2.5 common source 與 common receiver 在 \emptyset -x domain 的比較(草地)

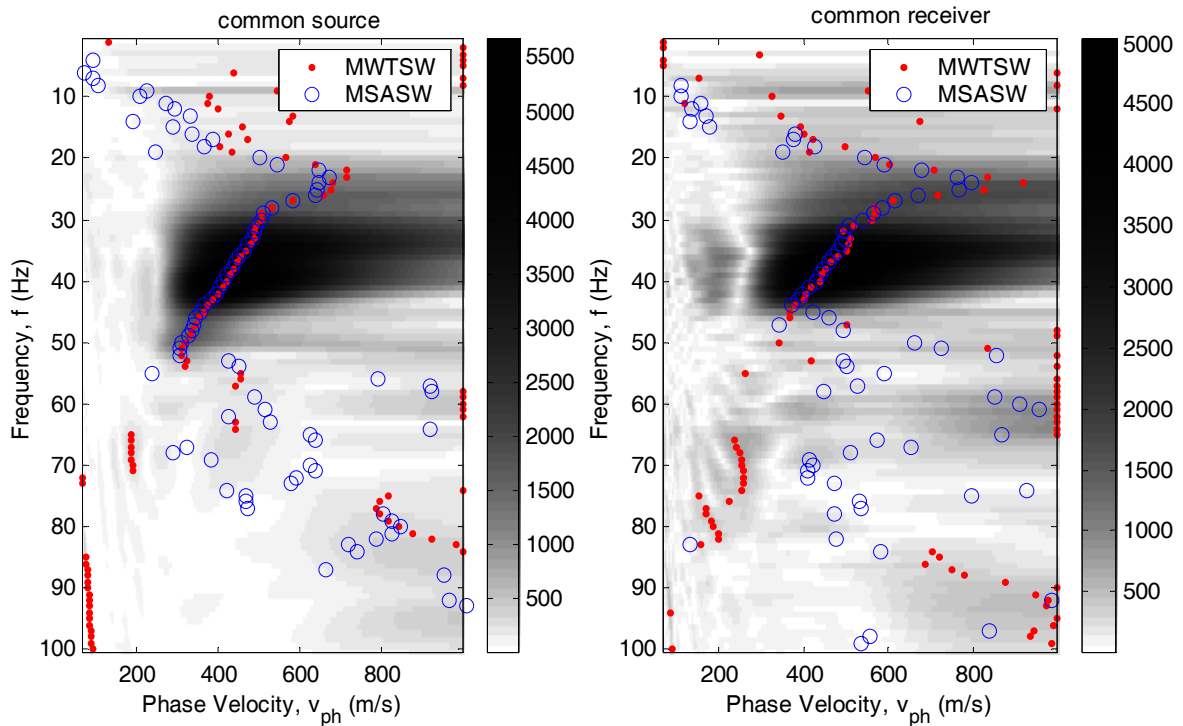


圖 4.2.6 common source 與 common receiver 不同施測方式所得之震測資料在 f-v domain 的呈現(草地)

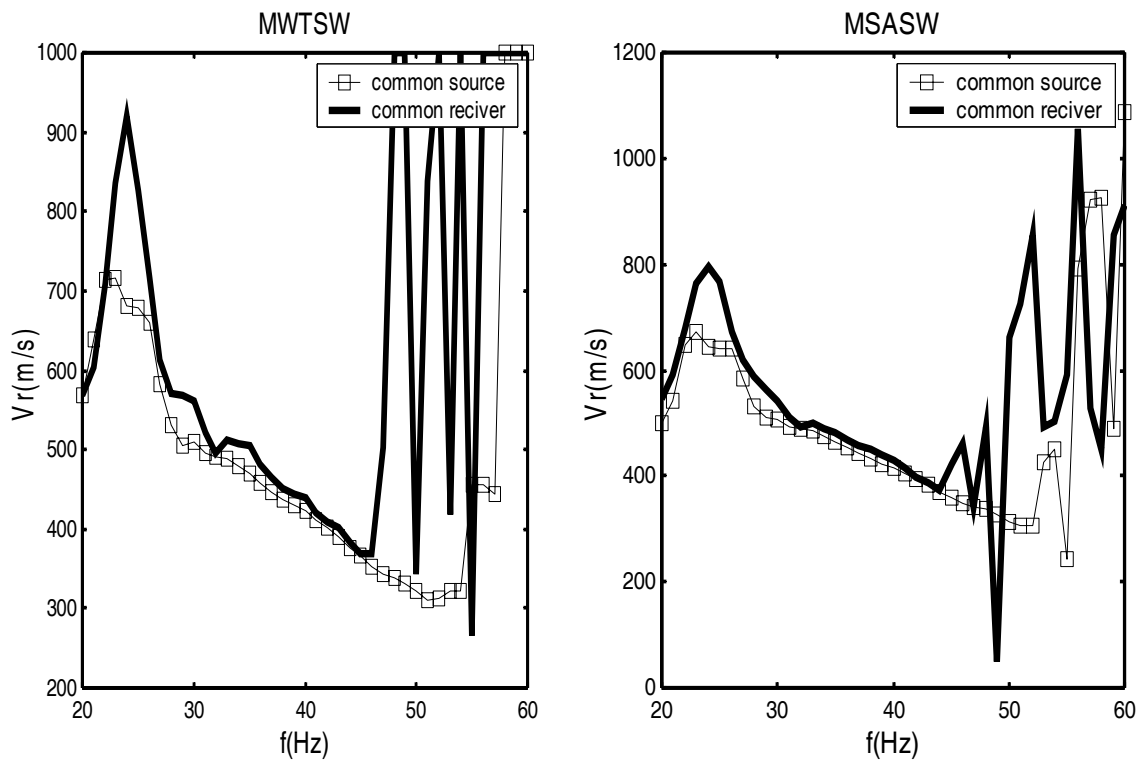


圖 4.2.7 common source 與 common receiver 不同施測方式所得之震測資料之頻散曲線(草地)

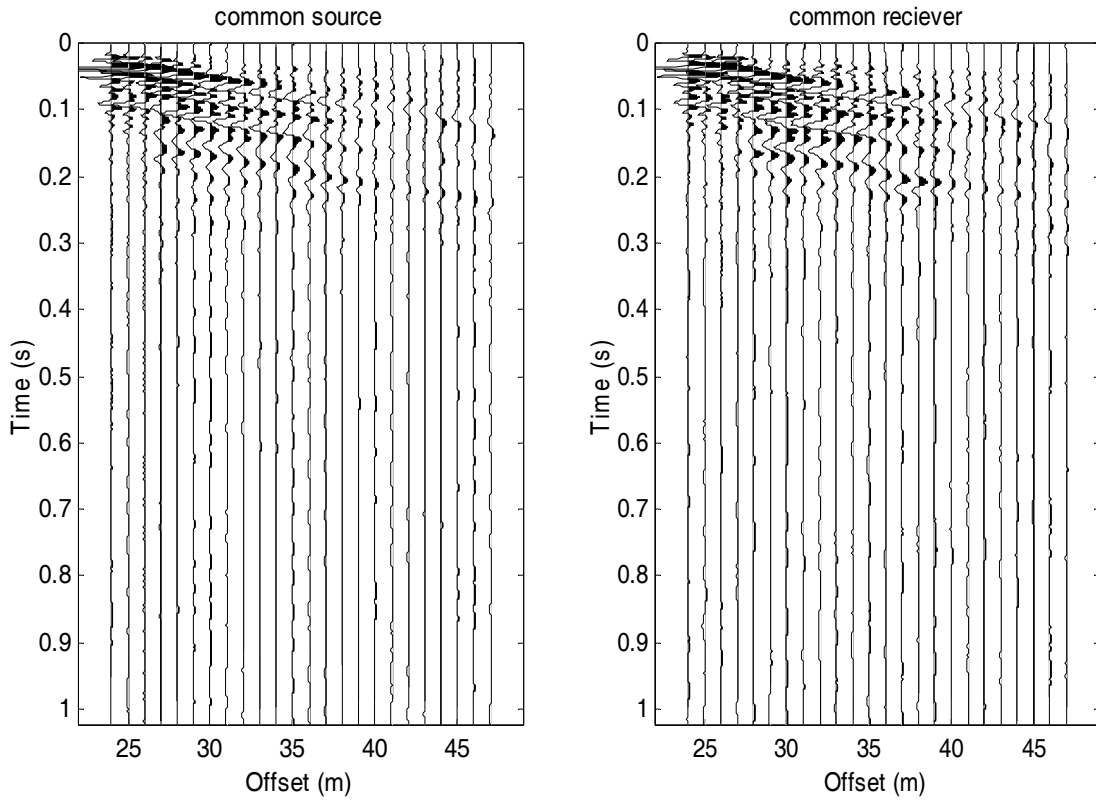


圖 4.2.8 common source 與 common receiver 不同震測方式所得之震測資料在 t-x domain 的呈現(柏油路)

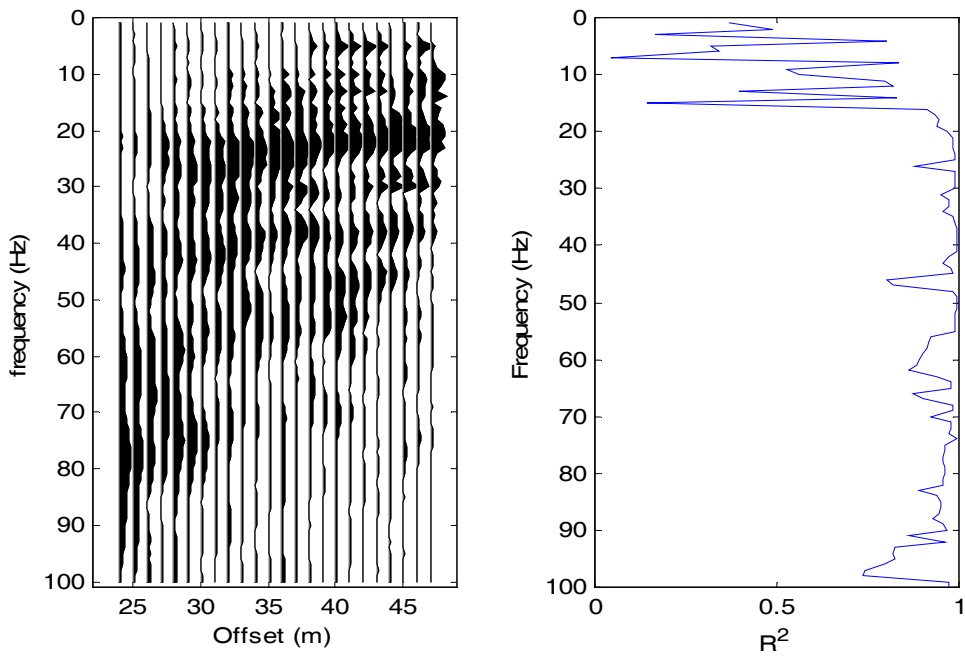


圖 4.2.9 common source 施測方式所得之震測資料在 f-x domain 的呈現(柏油路)

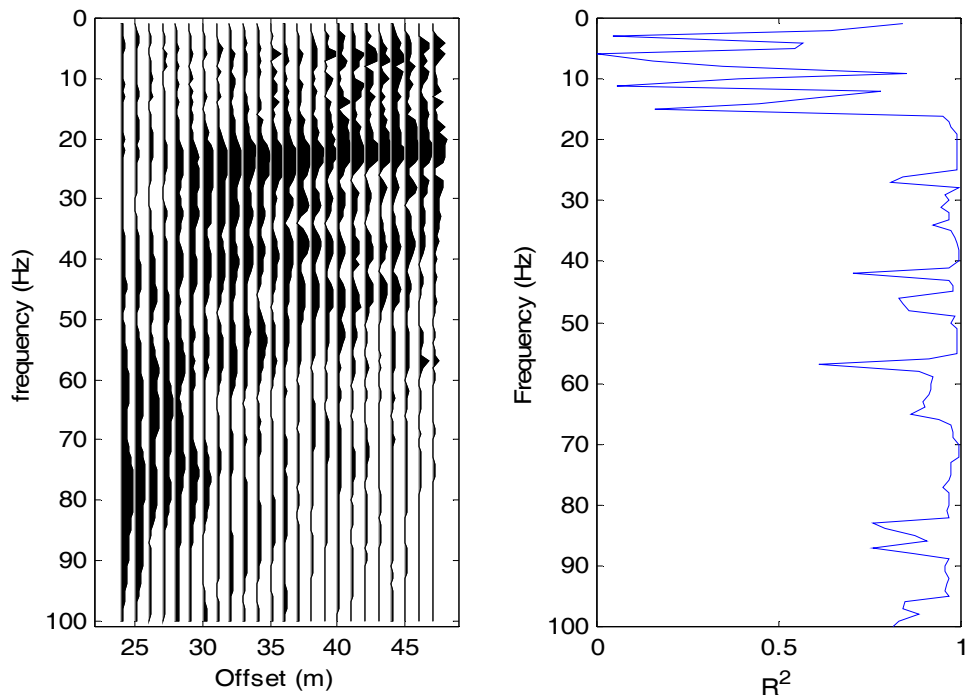


圖 4.2.10 common receiver 施測方式所得之震測資料在 f-x domain 的呈現

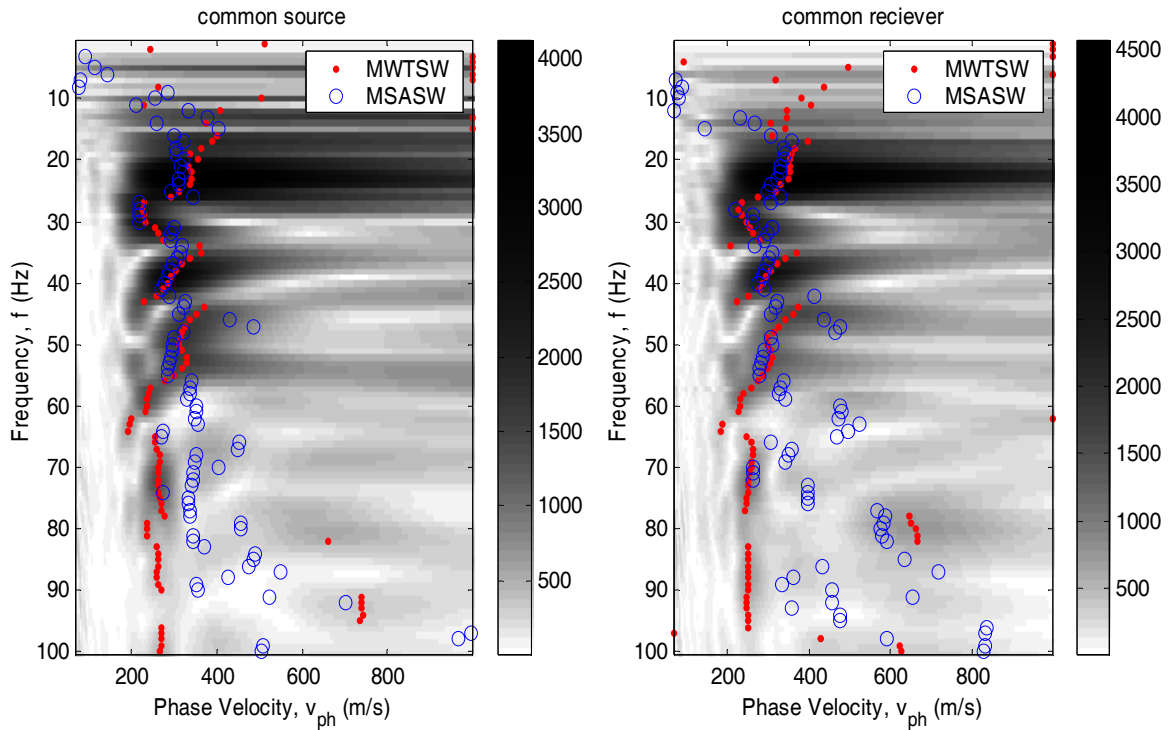


圖 4.2.11 common source 與 common receiver 不同施測方式所得之震測資料

在 f-v domain 的呈現(柏油路)

4.3 施測參數探討

於本節中，就各項空間幾何配置之施測參數進行獨立探討，並提出解決方案(包含 Pseudo-section 以及最佳測線展距範圍選取)，並於各小節中呈現改良前後於各運算域中的差異。

4.3.1 受波器間距

在頻譜分析的過程中，離散化(discretization)的步驟會產生資料映頻干擾(Aliasing)。在時間軸，由於目前資料擷取系統之取樣率遠高於震源所能產生之最高頻率，且設有反頻率混擾濾波器 (Anti-aliasing filter)，因此可避免映頻干擾產生。然於空間軸中，取樣間隔即受波器間距並非以數位化電腦截取系統決定，常因為試驗目的不同或因為施測者習慣不同而造成受波器間距過大而導致嚴重空間映頻干擾，但受波器間距控制測線展距的長度，並與測線展距成正比關係，夠小的受波器間距雖可避免映頻干擾，但卻因測線展距不足而產生資料遺漏的現象(將於 4.3.2 節介紹)。此節中，將其他施測參數固定(X_0 與 L)以單獨探討受波器間距的不同造成之資料映頻干擾的影響。

圖 4.3.1 至圖 4.3.3 為交大博愛校區進行試驗所收錄的資料。試驗測線佈設採用近站支距 47m，受波器間距 1m，受波器數目 24 個。進行資料分析時，於原始資料中的空間軸進行不同間距取樣，以 1m、2m、4m、8m 等四種不同間距取樣。如圖 4.3.3 所示，將相對高頻的資料單獨取出並在 \emptyset -x domain 觀察不同受波器間距資料，發現在經過摺開的動作後，受波器間距不同造成線性段的斜率有相當大的差別，因此造成 MSASW 分析方式計算頻散曲線的誤差。由圖 4.3.3 右側顯示，震測資料在 \emptyset -x domain 呈現類似 sin 波規律震盪型式。若受波器間距小於欲測最短波長的一半，則在任何的頻率都不會發生映頻干擾的現象：

$$\Delta x < \lambda_{\min} / 2 \quad (4.1)$$

式中 Δx 為受波器間距， λ_{\min} 為最小之雷力波波長。檢核圖 4.3.1 中以 MSASW 方式計算的頻散曲線，當受波器間距為 1m 與 2m，頻散曲線明顯錯誤的地方皆發生於頻率大約為 60Hz，此時波速大約為 350 左右，波長大約為 6m。若受波器間距大於 3m 則在以上的頻率就會產生映頻干擾，所以 1m 與 2m 的受波器間距在頻率為 60Hz 或次以下的資料點都不會產生映頻干擾。然 4m 的受波器間距在頻率約為 40Hz(波長為 10m)以上便會產生映頻干擾而導致頻散曲線計算錯誤。依此類推，受波器間距越大，若以 MSASW 方式分析，頻散曲線可信賴的頻率範圍會越小。

若採 MWTSW 分析方式，映頻干擾產生於 f-v domain 而造成單一頻率下能量頻譜的波峰值非明顯唯一，進而影響頻散曲線的正確性。於圖 4.3.1 中，隨著受波器間距的增加，f-v domain 頻譜區塊呈越來越混亂的趨勢。但 MWTSW 可以限制挑遠頻散曲線的波速範圍。以受波器間距 4m 為例，初步進行資料分析後，發現映頻干擾影響於 f-v domain 中約在波速等於 200m/s 以下，因此重新進行分析並限制 f-v domain 中挑選頻散曲線的波速範圍在 200m/s 以上，則即使有映頻干擾存在，頻散曲線的誤差亦非常有限。受波器間距對於 MWTSW 之分析方法影響比較小，但若完全不限制受波器間距如受波器間距為 8m，即以 MWTSW 分析，亦不易設定波速挑選範圍。此外，固定測線展距則受波器間距與受波器數目成反比，然受波器數目少即代表空間取樣點數少，進而影響整體之訊號雜訊比。理論上 1m 的受波器間距應可將頻散曲線延伸至最小波長等於 2m(圖中頻率應超過 100Hz)。以一般地層資料波速估計可信頻率範圍小於 100Hz，但仍受限於震源所能產生的頻率範圍。因此採用適當的受波器間距尚須配合寬頻的震源才能呈現更完整的頻散曲線。

受波器間距的採用與頻散曲線的品質好壞有絕對的關係。由於表面波的影響範圍，依保守估計約為半個波長的深度，故受波器間距的決定可依

欲探測深度範圍的上限來做決定。舉例來說，若欲探測深度範圍的上限為地表下 1m 的深度：

$$D=\lambda/2 \quad , \quad D_{\min}=\lambda_{\min}/2 \quad (4.2)$$

$$\Delta x < \lambda_{\min}/2 \quad \rightarrow \quad \Delta x < D_{\min}$$

式中 D 為欲測深度範圍， Δx 採用必須小於 1m，如此即可有效避免映頻干擾。



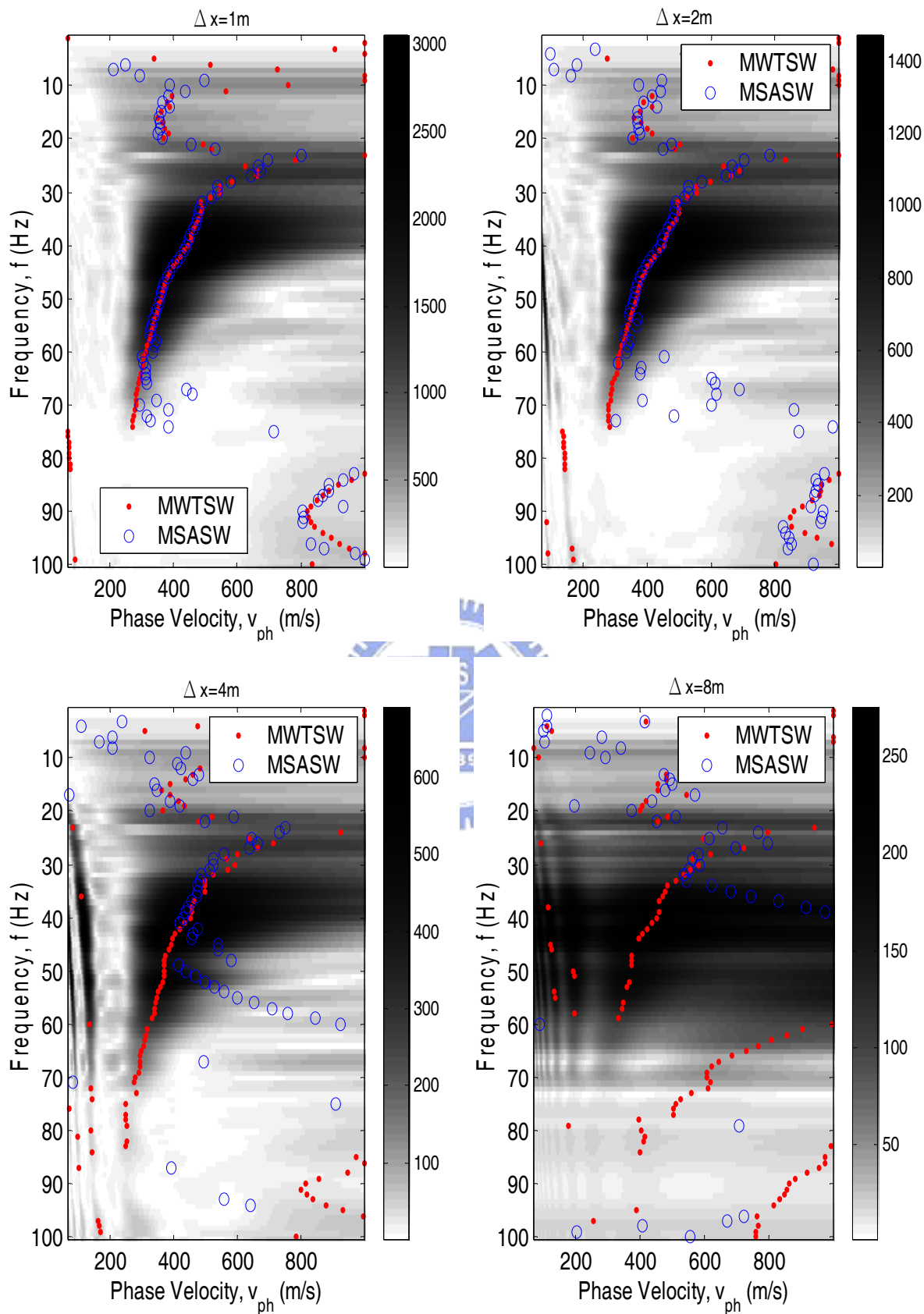


圖 4.3.1 不同受波器間距之震測資料於 f-v domain 之呈現

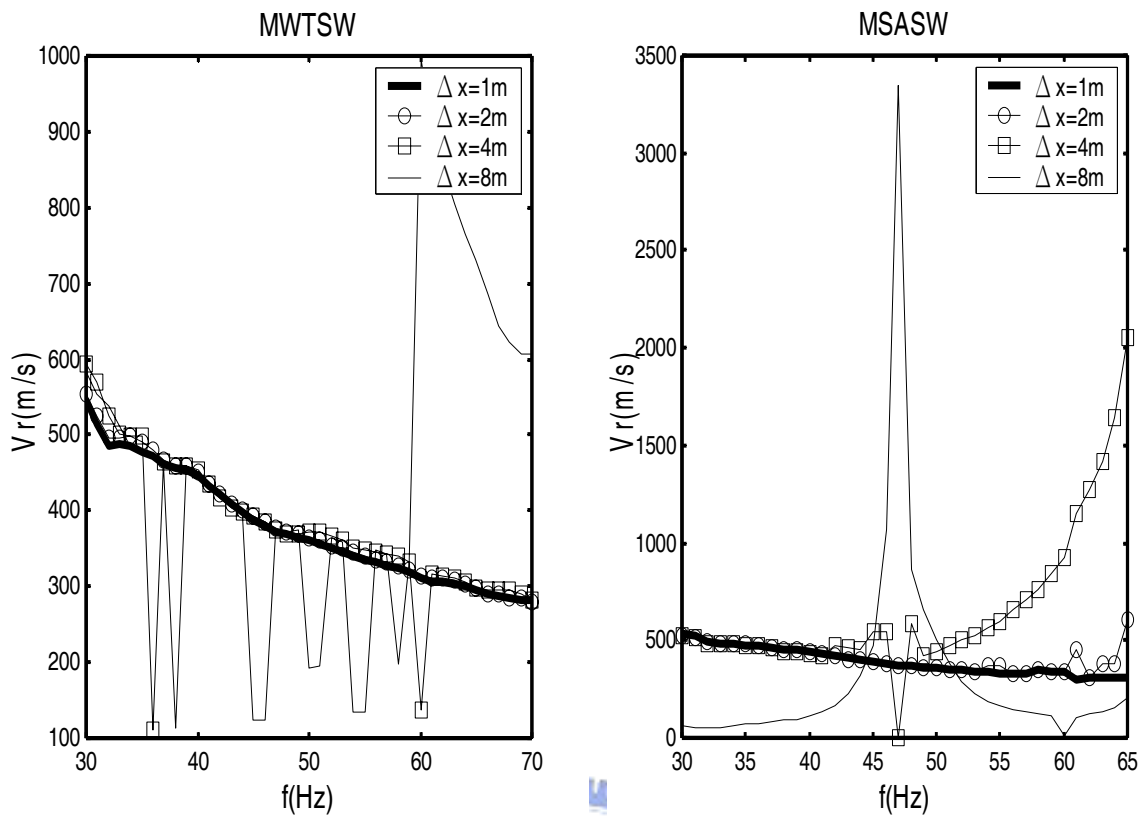


圖 4.3.2 不同受波器間距之震測資料分析所得頻散曲線

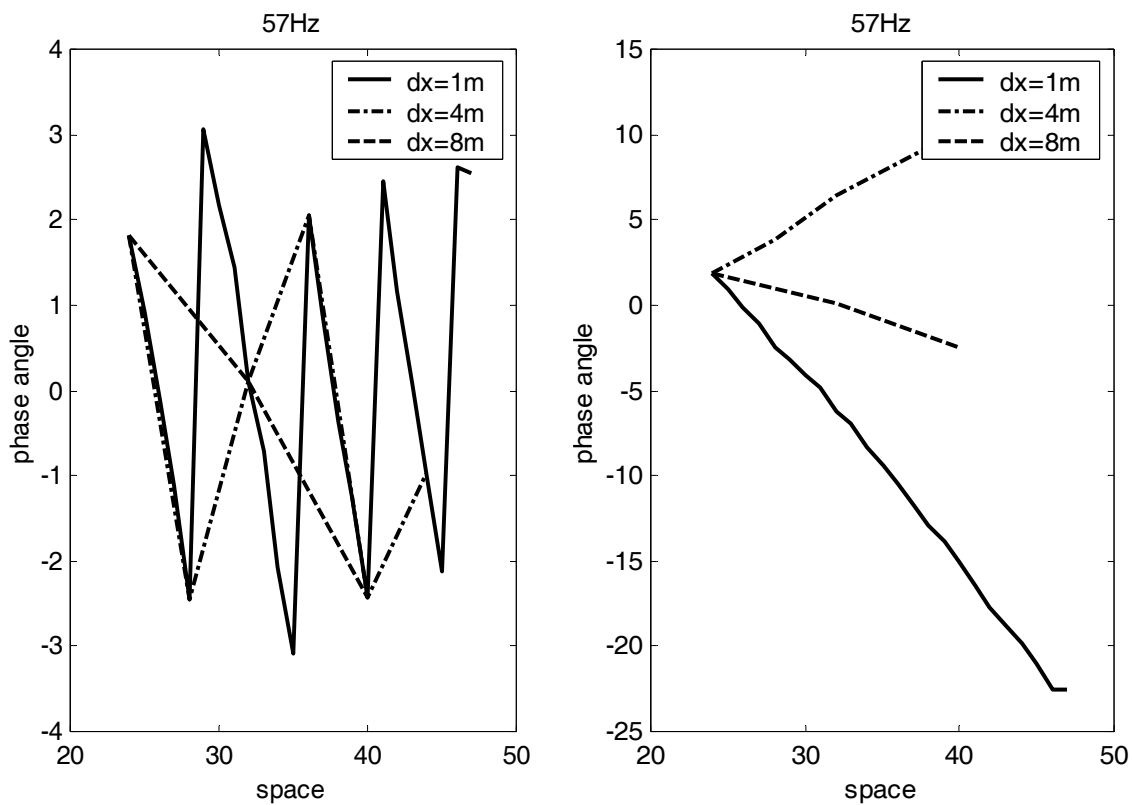


圖 4.3.3 在 $f=57\text{Hz}$ 時不同受波器間距之震測資料在 ϕ - x domain 的呈現

4.3.2 測線展距對於資料遺漏以及多重模態效應之探討

現場蒐集震測資料必須截取適當長度的資料進行分析。此長度對於時間軸而言便是設定收錄資料的時間總長即取樣率與取樣點數的乘積。對於空間軸而言，即為測線展距，也就是受波器間距與受波器個數的乘積。資料截取(Truncation)時會產生資料遺漏(leakage)的現象。

時間軸的資料擷取，由於數位擷取系統的資料點數非常足夠，以本研究採用 McSeis-SX Model-1125E 型震測儀而言，取樣點數最多可達 4096 點。故即使使用非常小的取樣率，也有足夠的取樣長度。另外配合時域視窗 (Time-domain windowing) 亦可有效降低頻率之洩漏。空間軸的資料取樣長度即測線展距受限於受波器數目以及受波器間距(如 4.3.1 所探討)，因此即使施作空間域視窗(space-domain windowing)也無法避免空間波數洩漏問題。圖 4.3.4 為交大博愛校區進行試驗所收錄的資料，該試驗佈設採用近站支距為 47m，受波器間距為 1m，受波器數目為 24 個。進行資料分析時，先於收錄原始資料中的空間軸進行不同測線展距的取樣方式，以固定的受波器間距，採用不同的受波器個數來製造不同的測線展距。圖中顯示，以 MSASW 方式所分析的頻散曲線，測線展距長短造成之差異為 30~60Hz 間頻散曲線平滑程度不同。測線展距越短代表受波器個數越少，因此進行 θ -x domain 中斜率計算時，取樣點數過少無法具體代表實際數值而造成頻散曲線平滑程度的差異。

若是 MWTSW 方式分析，如圖 4.3.4 所示，資料遺漏會造成 f-k domain 頻譜分佈的失真，於變數變換後之 f-v domain 頻譜影像造成顏色暈開的效果。並導致尖峰值(影像最黑處)會有誤判的可能。

圖 4.3.5 為中央大學所進行的試驗，測線展距的差異亦直接反應震波多重模態效應的展現。圖中顯示無論以 MSASW 或 MWTSW 方式分析，

長測線展距所分析出來的頻散曲線皆可明顯區分不同模態震波效應。若無法於頻散曲線上區分不同模態震波，則對於地層複雜之場址(無法忽略高次模態震波之影響)則可能誤判頻散曲線及地層剖面正確的分布。



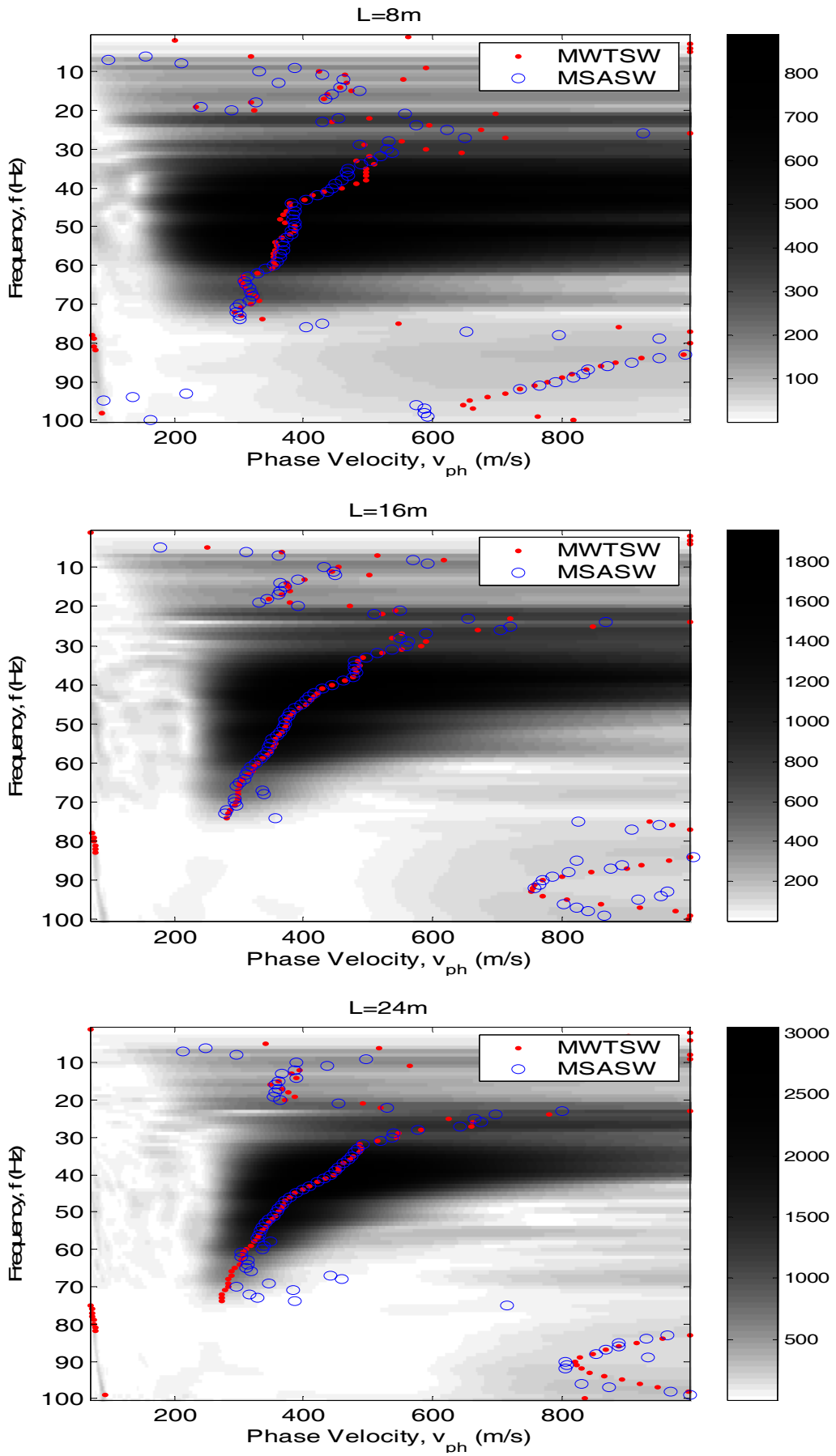


圖 4.3.4 不同測線展距之震測資料在 f-v domain 之呈現

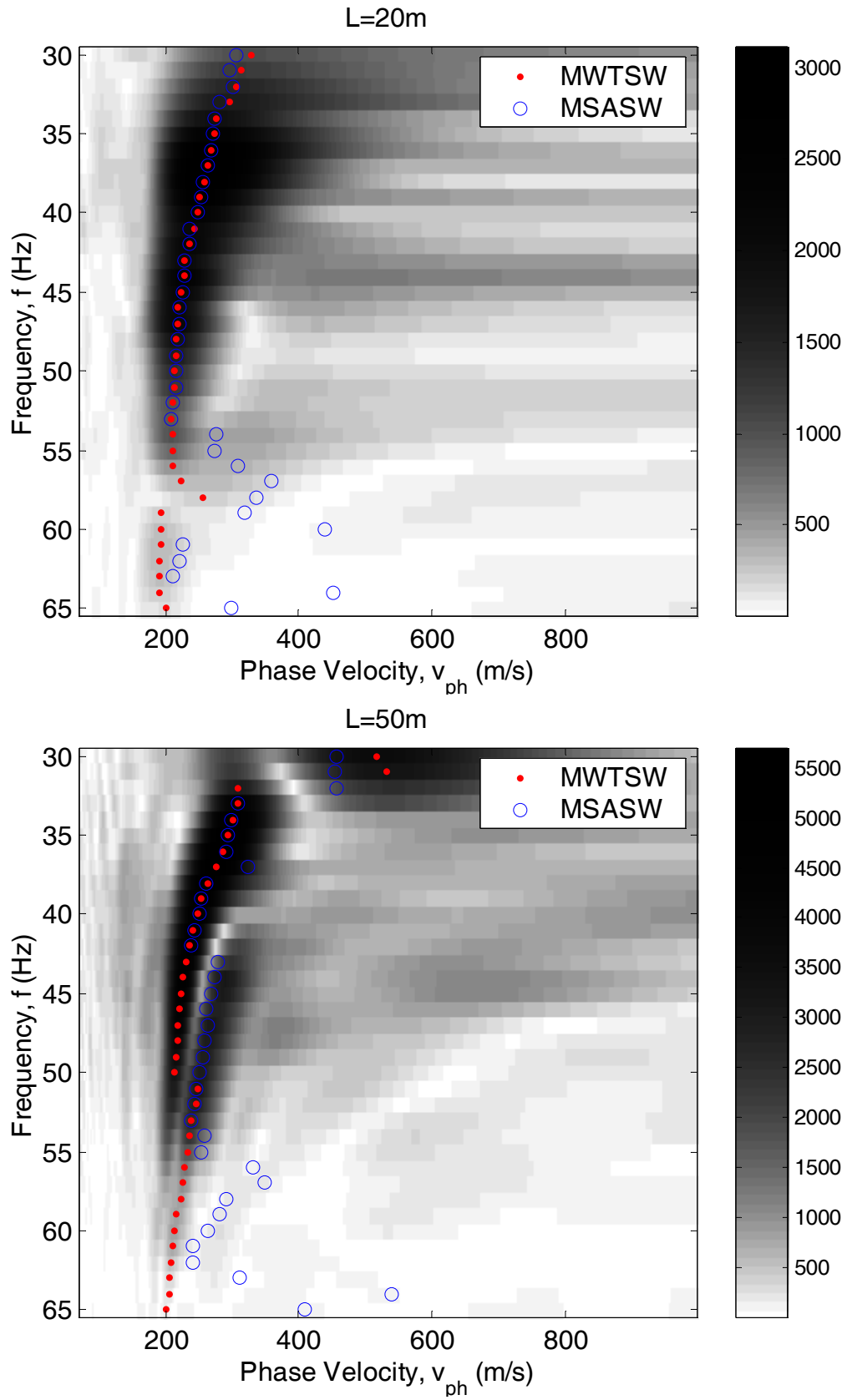


圖 4.3.5 不同測線展距對於高次模組震波之辨識度

4.3.3 “Pseudo section”

Pseudo section 的概念，即以 walk away 的方式來「擴展」夠長的測線展距。在某一測線展距保持定值時，不斷改變近站支距，即能於空間上造成模仿測線展距一直往後延伸的效果。舉例來說，相同受波器間距下($\Delta x = 1\text{m}$)，4 個受波器可以造成 3m 的測線展距，24 個受波器可以造成 23m 的測線展距。現在假設近站支距 $X_0 = 1$ ，那僅用四個受波器來進行試驗將會得到空間範圍為 1m~4m 的資料，而利用二十四個受波器來進行試驗將會得到空間範圍為 1m~24m 的資料。以四個受波器來進行 walk away test 如圖 4.3.6 所示，將炸點一次往後移動一個測線支距(3m)的距離。第一個炸點施作時可得到支距範圍 1m~4m 的資料，第二個炸點施作後可得到支距範圍 4m~7m 的資料，第三個炸點施作後可得到支距範圍 7m~10m 的資料。以此類推，進行多個炸點試驗之後則可得到足夠展距範圍的資料用以避免資料洩漏。換言之，如重複施作八個炸點後(1~4m, 4~7m, 7~10m, 10~13m, 13~16m, 16~19m, 19~22m, 22~25m)，將資料組合即可得到類似 1~25m 展距範圍資料。此種施作技巧可模擬夠長的測線展距用以避免空間軸上之資料洩漏，但所代表之取樣空間為同一處(中點處)之資料。即使擷取系統所能允許接受頻道不夠，或受波器間距過小而造成測線佈設空間有所限制，皆可利用 Pseudo section 的概念擴展所需要夠長之測線展距。

Pseudo section 可模擬多點之震測資料，因此對於存在於目前 MASW 施作方法的缺點，提供了解決的方案：

1. 由於能夠擴展足夠長的測線展距，因此可以降低資料進行頻譜分析時所產生於空間軸遺漏現象(leakage)。
2. 高次模態震波造成震測資料於 θ -x domain 上非線性段增加，影響計算的準確性。若以 MWTSW 進行資料分析，於 f-v domain 頻譜影像中，多重震波影響會產生影像互相干擾。若測線展距夠長則 k 軸上解析度增加，可將 f-k domain 上頻譜影像明顯區分成基本模態以及高次模態，則

對頻散曲線判斷亦有實質的幫助。

3.除上述兩點，Pseudo section 的主要應用於解決 MASW 測線幾何配置之施測參數互相牽制行為。為避免 4.3.1 節所提到之空間映頻干擾，受波器間距的限制亦侷限單一測線的測線展距範圍。另外，現行 MASW 測線佈設方式所得頻散曲線，其代表性為測線展距(L)底下土壤之平均值。因此單一測線配置所得側向解析度會與測線展距成反比，意即測線展距越長則側向解析度越差。於要求高解析度的工址調查，單一測線展距亦受到限制。以 Pseudo section 方式施作可提供足夠測線展距以配合受波器間距的限制以及側向空間解析度的限制。

4.3.3.1 相位角不連續所產生之靜態誤差

在 4.2.1 節中曾經探討震源的不穩定性，雖以 Pseudo section 施作方式可得到夠長的測線展距，但於資料組合的過程，因敲擊點位移誤差或地層側向變化過大等種種因素，將造成波傳初始相位角的不連續。數筆資料組合成 Pseudo section 時，初始相位角的差值將會造成誤差。由圖 4.3.7 上半部所示，每筆資料的空間重複點初始相位角的誤差可明顯地觀察；圖 4.3.7 的下半部顯示經過相位角摺開的動作後，初始相位角的不連續造成每筆單獨資料(以 f 而言)中之靜態誤差。該項誤差若是不加以修正則計算後之頻散曲線亦存在相當程度的誤差。

4.3.3.2 靜態誤差之修正

為使 Pseudo section 的概念更具合理性以及適用性，本研究試圖將前述之靜態誤差修正。由於靜態誤差可能來自於震源敲擊時人為誤差(敲擊點的位移等)或是地層本身測向變化之差異，以下分別就此兩因素分開進行探討。

1.地層無測向變化

為探討資料組合時誤差，進行在相同測線展範圍下單筆獲得與多筆組合而成的震測資料比對。進行試驗位置於新竹寶山第二水庫，配置如圖 4.3.8 所示，以移動受波器施測方式進行 walk away test。相同展距範圍可先將地層測向變化的因素先排除，而為考慮炸點佈設誤差則於製造組合資料試驗的每一次炸點故意製造 50m 左右的位移量。此試驗主要分兩個部分，第一組試驗乃直接佈設 24 個受波器，施測一次直接獲得展距範圍為 24-47m 之震測資料，使用之受波器間距為 1m 及近站支距為 24m。第二組試驗(walk away test)使用六個受波器，受波器間距以及近站支距皆與第一組試驗相同，施測五次(亦即 6 個受波器往後移動五次)，得到資料之展距範圍分別為 24~29m，29~34m，34~39m，39~44m，44~49m 五筆資料。為擴展測線展距範圍，第二組 walk away test 之震測資料分別以下兩種方式進行訊號處理：

(一) 組合(combine)：亦即每一次試驗所得到的資料(6 個點)，直接刪除最後一點由下一筆資料的第一點來進行遞補的動作。則第二組試驗中每筆震測資料之展距範圍分別為 24~28m，29~33m，34~38m，39~43m，44~49m。此種組合方式僅將資料組合起來，並未修正每一筆資料間所存在之初始相位角差。

(二) 接合(seaming)：震測資料在時域(t-x)中為一個實數所形成的矩陣，但在時間軸經過一次快速傅立葉轉換(FFT)後，則資料將會變成複數形式所組合成的矩陣。調整初始相位角即接合動作於頻率域(f-x)中進行。任何複數形式的值皆可轉換成 $Ae^{i\theta}$ 的形式。如圖 4.3.9 所示，將第一次試中展距最大的資料以及第二次試驗中展距最小的資料取出(即取出資料取樣於測線上之同一點)，並將複數形式(a+bi)轉換成 $Ae^{i\theta}$ 。兩筆資料間每個相對應的元素(即同一頻率)間存在一相位角差 $\Delta\theta$ ，將第二次試驗

資料中所有展距範圍元素均減掉其相對應 $\Delta\theta$ ，即為第一次試驗資料與第二次試驗資料初始向位角差值的修正。依此類推，完成每次試驗資料間初始向位角差值的修正，並將資料點重複值去掉(每一筆資料的第一排或是最後一排)即完成接合的動作。

圖 4.3.10 為兩種試驗方式以及不同分析方法在 f-v domain 上的差異，其中 conventional 為一次佈設 24 個受波器的資料作為比較的基礎。圖 4.3.11 顯示經由計算後，不論是以 MSASW 抑或 MWTSW 分析，在資料品質較良好的頻寬範圍，經過修正初始相位角差的資料與傳統測線所得到的資料有一致的分析結果；但經過僅以直接遞補組合 walk away 資料在頻散曲線即與傳統測線資料間出現差異。此現象尤以使用 MWTSW 分析時更為明顯。由於初始相位角的誤差，MWTSW 分析方法在經過時間軸與空間軸的兩次轉換後於 f-v domain 進行挑選波峰值可能會出現錯誤。若 MSASW 分析，雖然頻散曲線的偏差較小，但將有偏差的特定頻率資料於 θ -x domain 中加以比較，如圖 4.3.13 所示，便可明顯得知組合資料時修正相位角的重要性。圖 4.3.12 亦顯示在資料良好的頻率範圍中，不管有沒有經過修正相位角的動作所計算出來的頻散曲線並無太大差異。

2. 考慮地層測向變化

由於 walk away test 及 Pseudo section 的應用，皆強調佈線位置必須同中點，以測線中點代表每次試驗在空間的取樣。若加上考慮地層的測向變化，因為 walk away test 每次移動炸點造成每次波傳經過的土層不同。如此一來，即使受波器的中點相同，即空間取樣代表性相同，是否會因土層測向變化所造成相位角變化而擴大頻散曲線的偏差值？為探討此項因素，於各場址皆進行所謂同中點之 walk away test，並且與一次佈設多個受波器之試驗來做比較。測線配置如圖 4.3.6 所示，其中圖

4.3.14 及圖 4.3.15 為於中央大學所蒐集之資料，受波器間距為 1m，近站支距為 1m，分別使用六個受波器進行同中點之 walk away test 以及佈置 24 個受波器與一個炸點的測線。圖 4.3.16 為交通大學所蒐集的資料，試驗配置以及試驗參數與中央大學相同。

在加入土層側向變化此因素後，Pseudo section 得到的頻散曲線與傳統測線得到之頻散曲線間存在些許差異。但是在中央大學所進行的試驗，明顯發現 Pseudo section 所得頻散曲線在資料經過接合的動作還是與傳統測線較接近(圖 4.3.15)，不論以 MSASW 或是以 MWTSW 來分析。但以同樣的方式，在交大的試驗資料上就沒有如此明顯差別。推測其原因為交大博愛校區地形側向變化較中央大學巨所致。



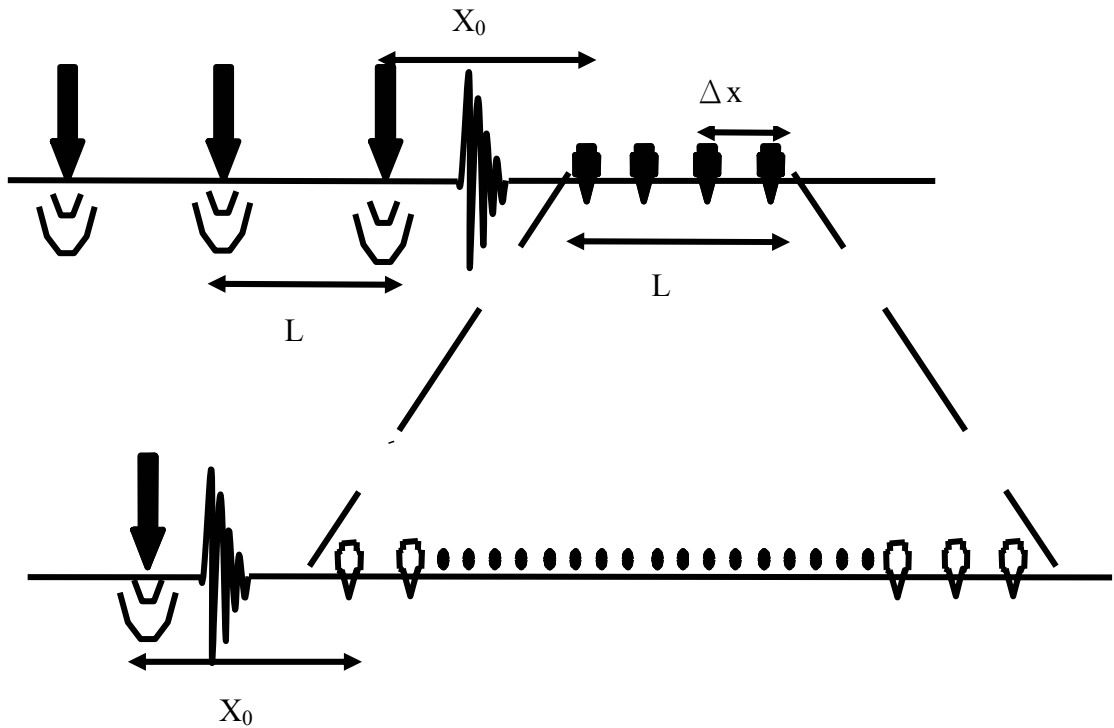


圖 4.3.6 Pseudo section 之測線佈置方式

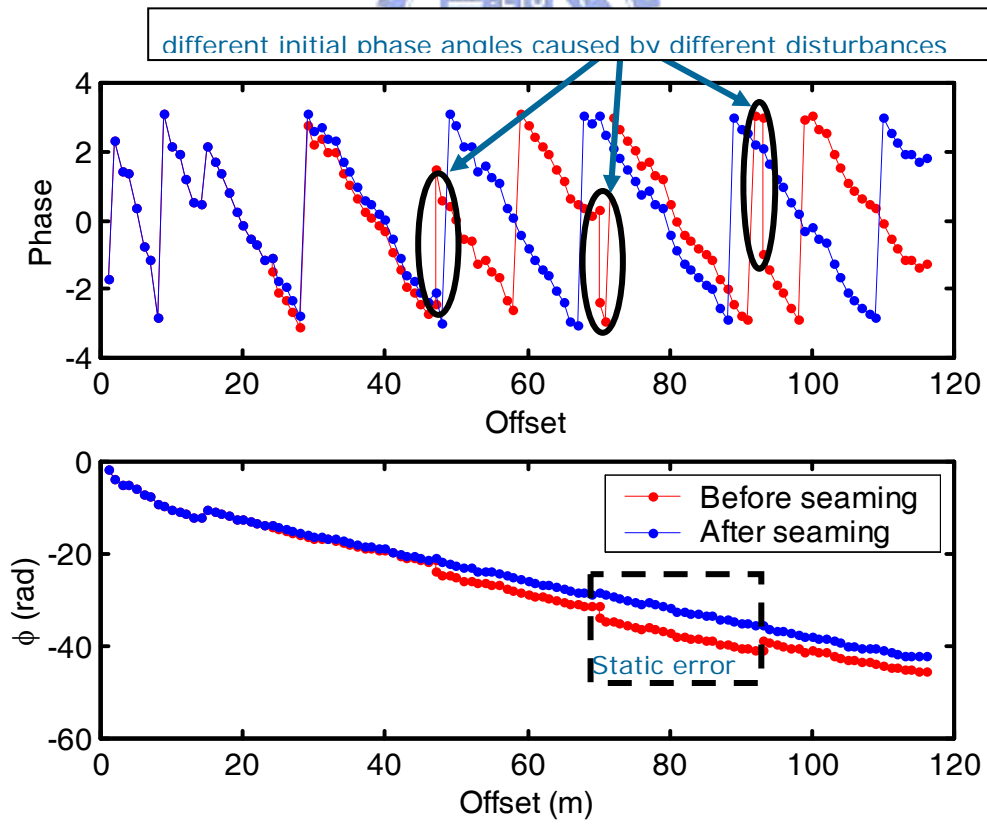


圖 4.3.7 ϕ -x domain 中靜態誤差

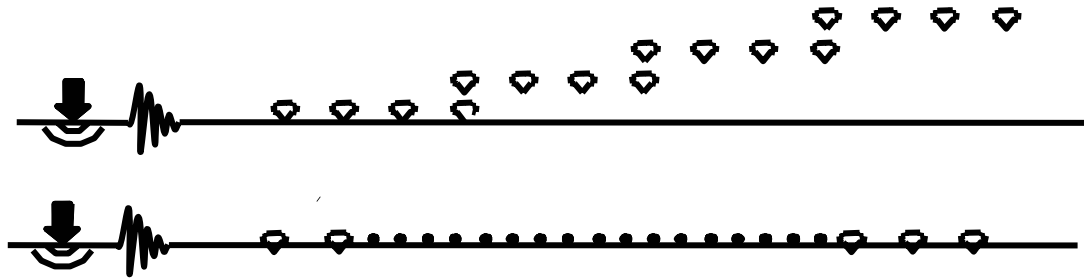


圖 4.3.8 排除地層側向變化之 walk away 佈設方式

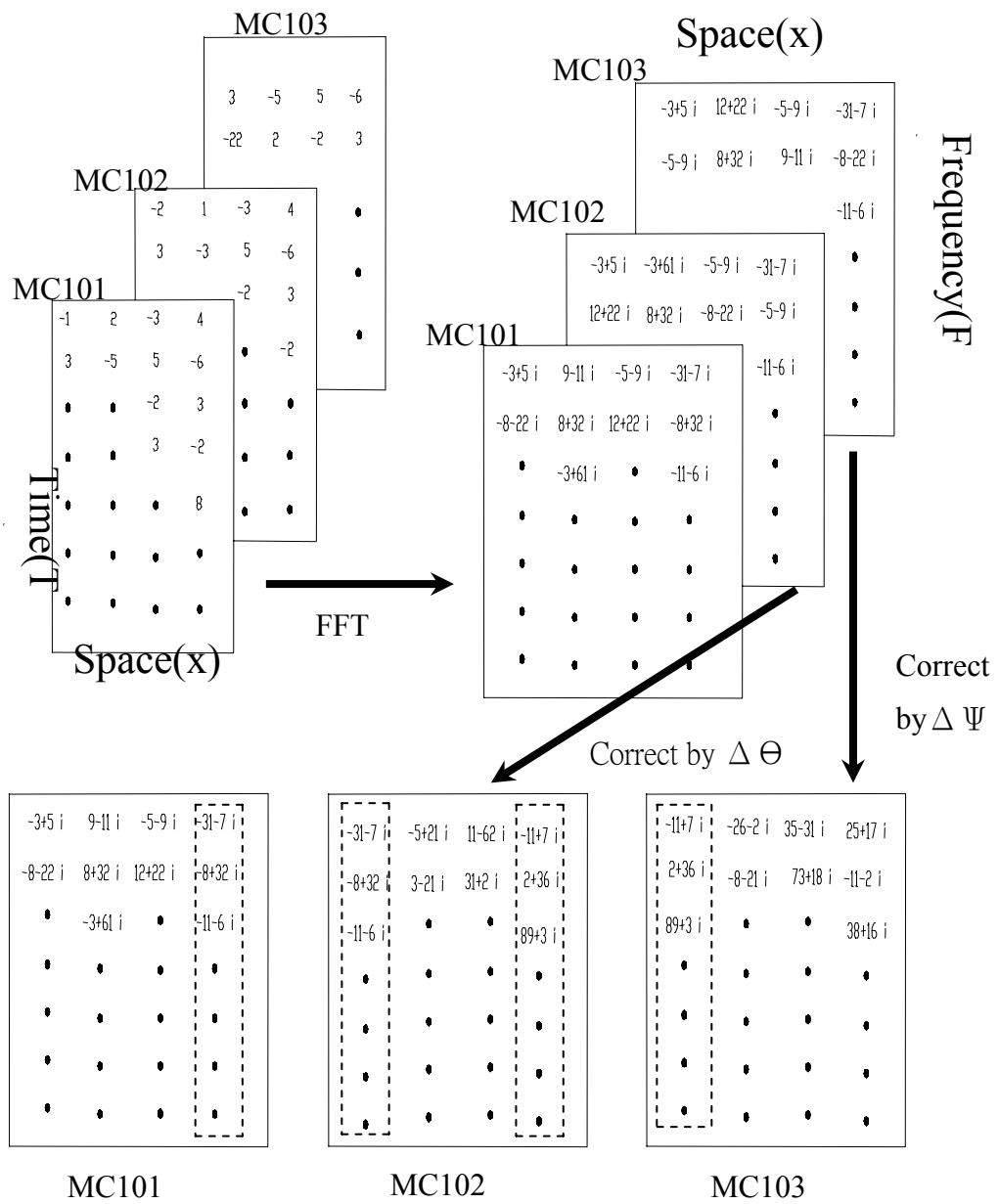


圖 4.3.9 震源靜態誤差之修正

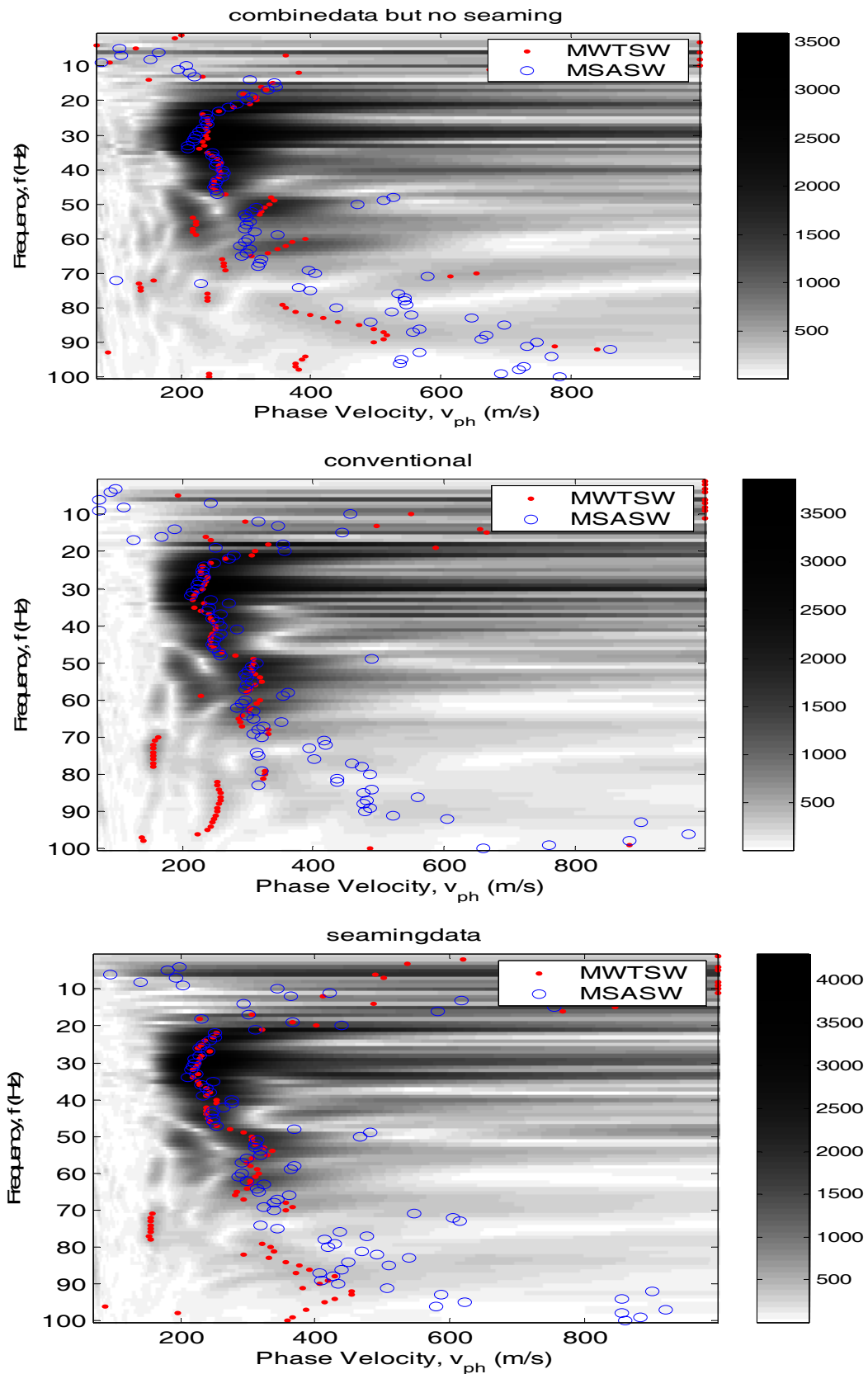


圖 4.3.10 無側向變化之 walk away 試驗在 f - v domain 之呈現(寶山)

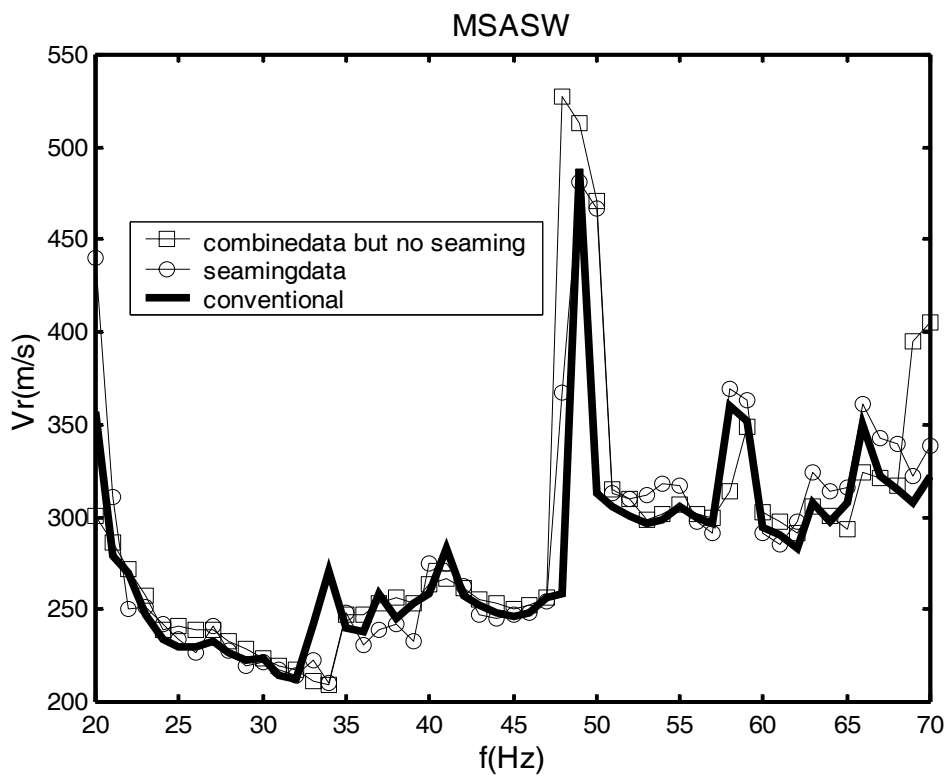
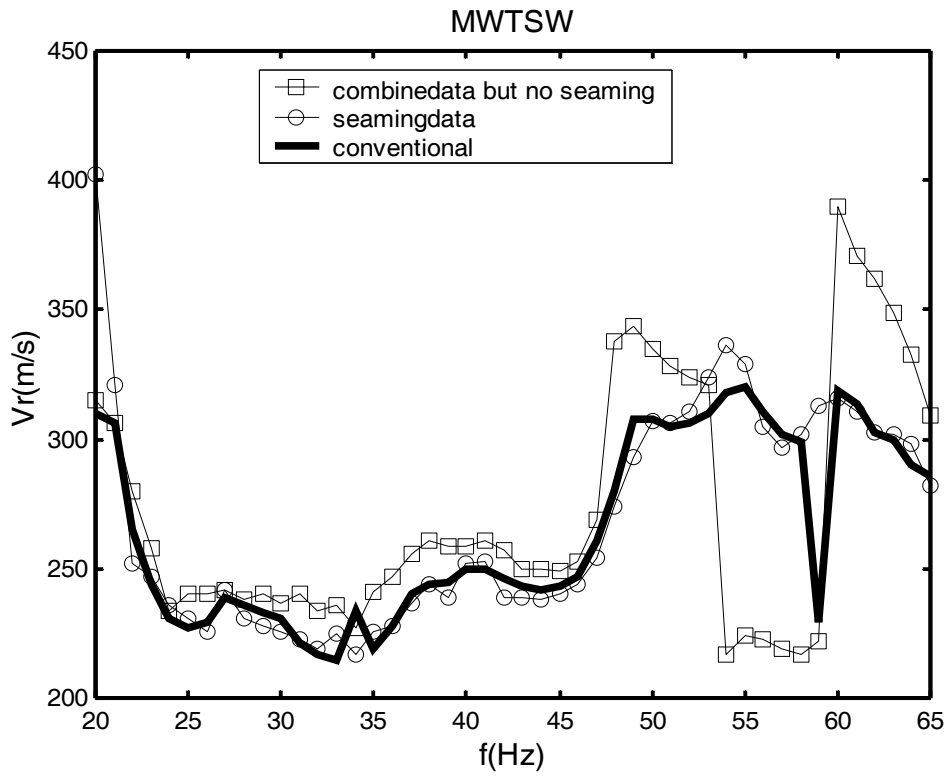


圖 4.3.11 無考慮側向變化之 walk away test 所得頻散曲線(寶山)

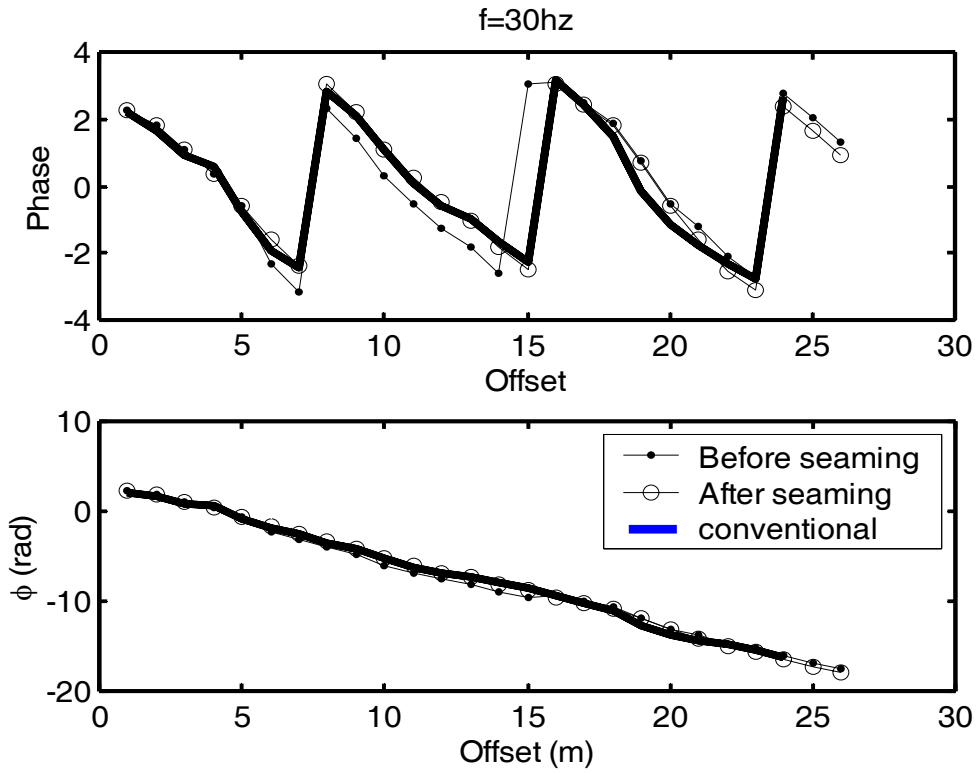


圖 4.3.12 修正誤差前後之差異於 \emptyset -x domain 之呈現

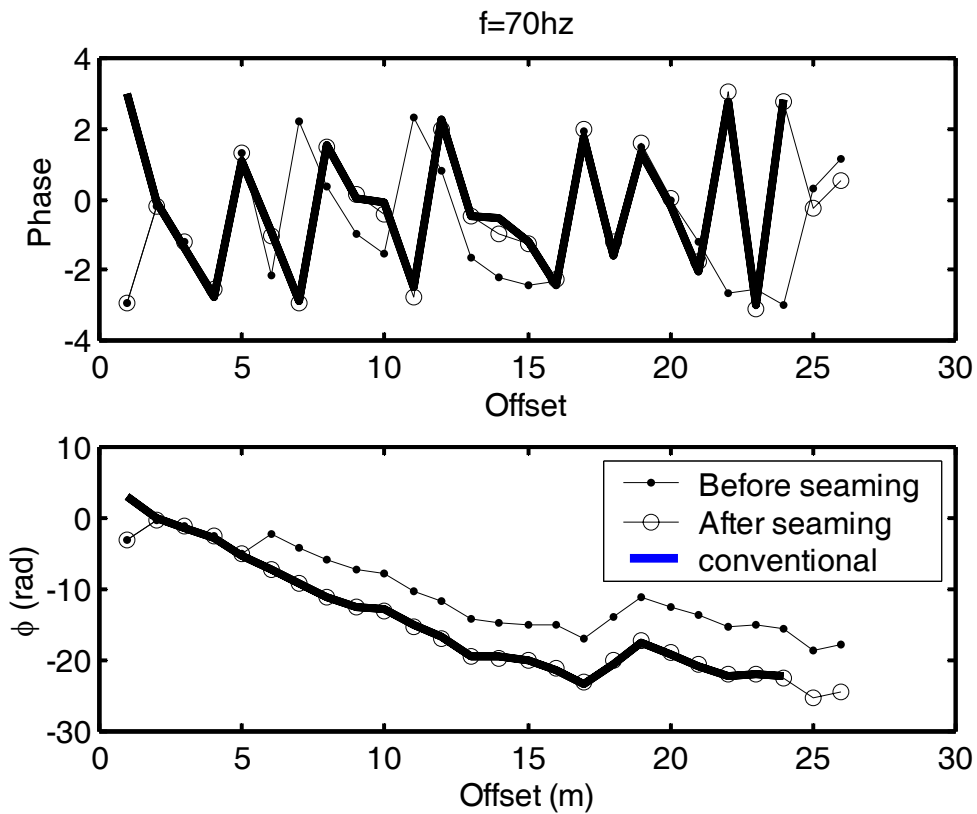


圖 4.3.13 修正誤差前後之差異於 \emptyset -x domain 之呈現

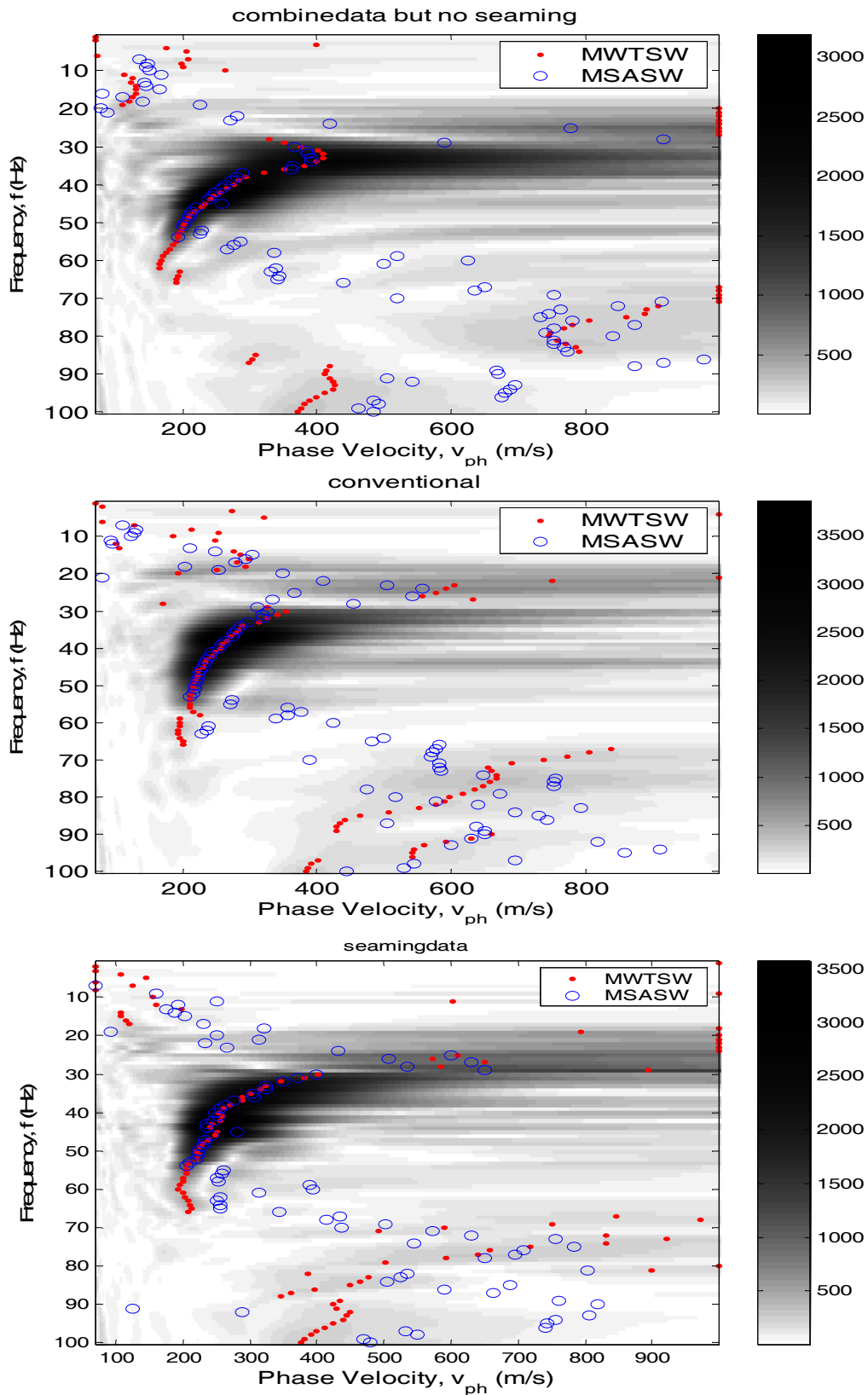


圖 4.3.14 考慮側向變化之 walk away test 於 f - v domain 之呈現(中央)

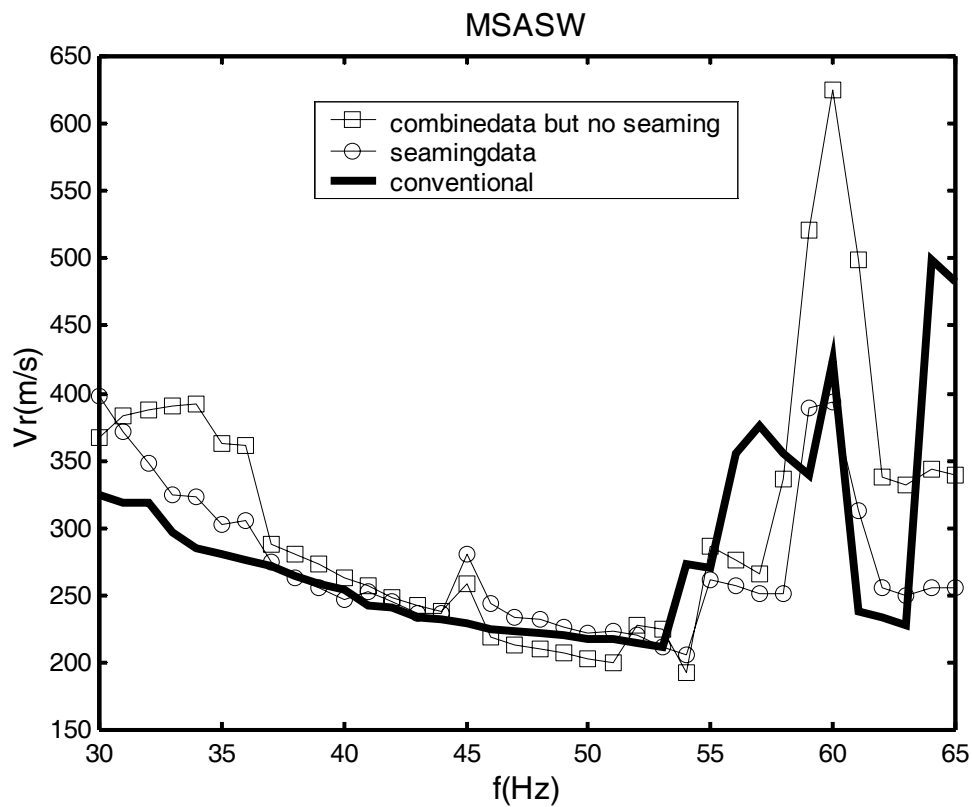
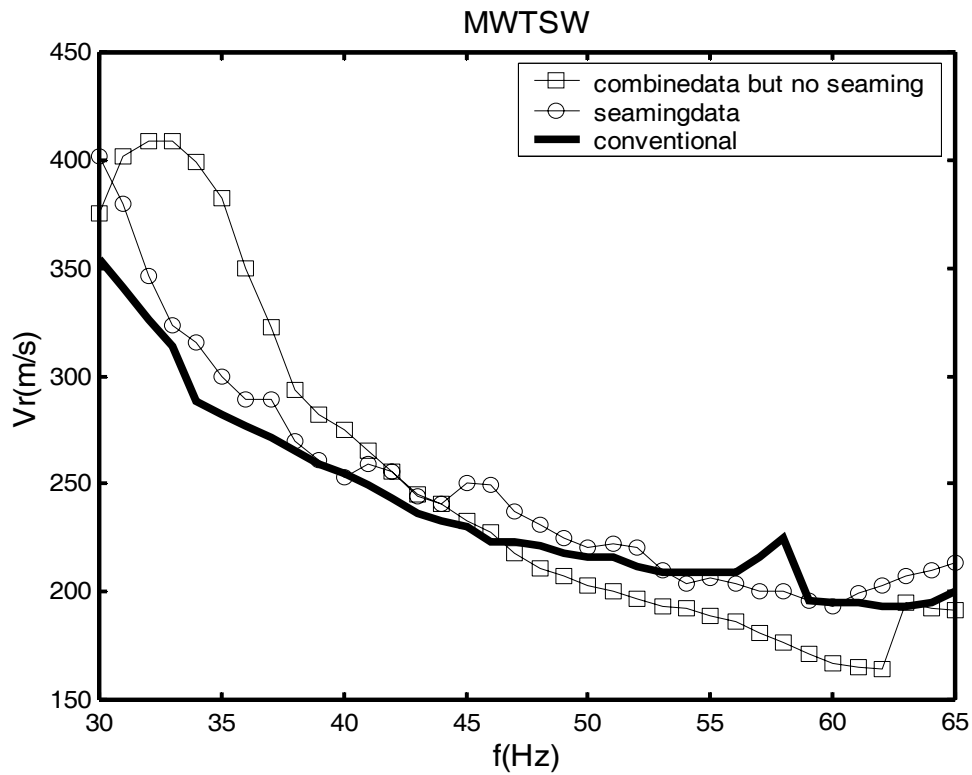


圖 4.3.15 考慮側向變化之 walk away test 所得頻散曲線(中央大學)

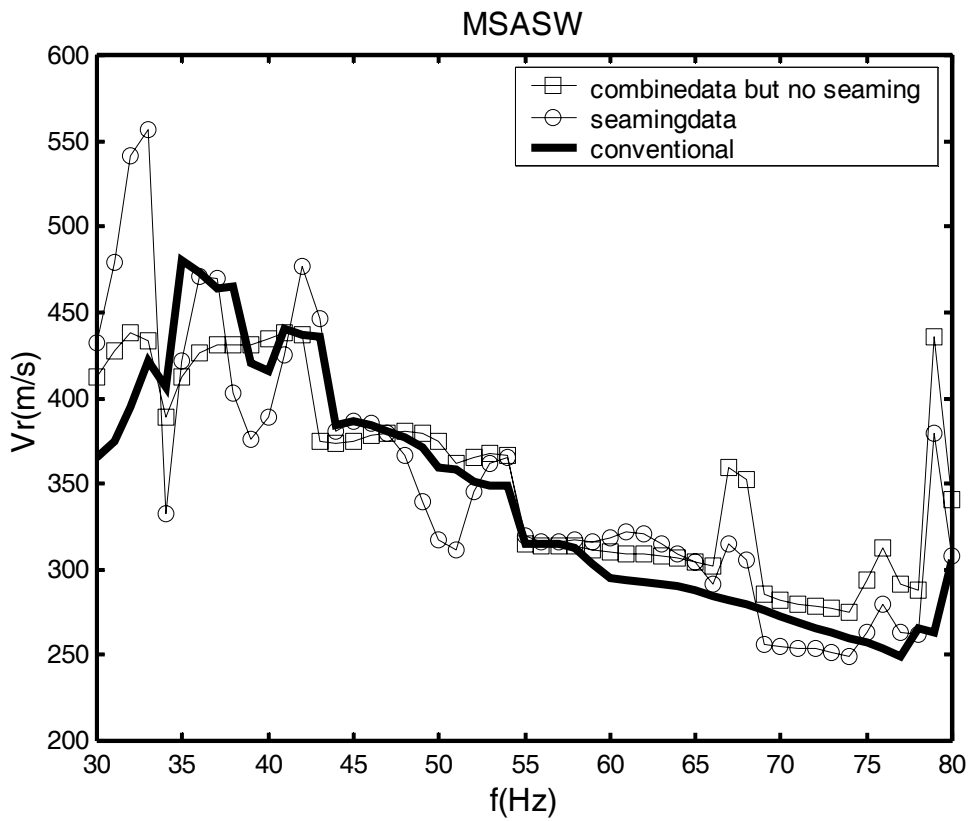
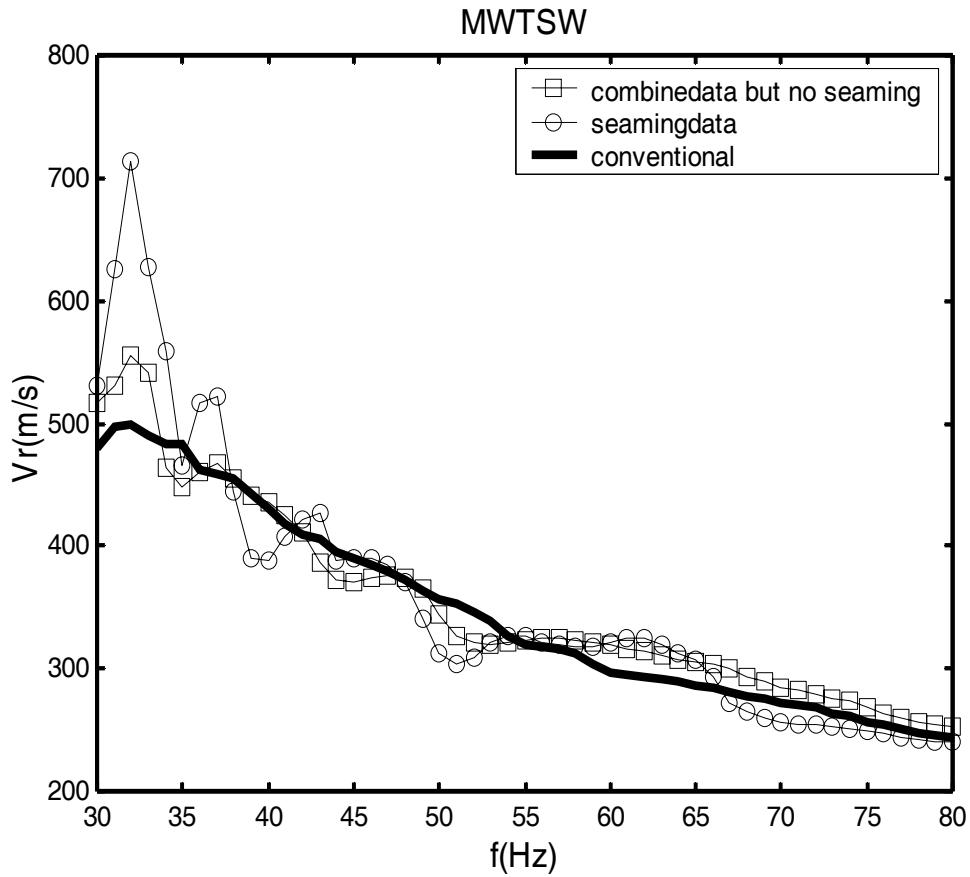


圖 4.3.16 考慮側向變化之 walk away test 所得頻散曲線(交大博愛校區)

4.3.4 近場效應與遠場效應

如 4.3.3 節所述，Pseudo section 可有效提供足夠之測線展距又可兼顧側向解析度。雖然在分析上擴展足夠的測線展距可藉以消除資料遺漏對於分析結果所造成的影響，但現場震測原始資料蒐集時，近場效應與遠場效應同時存在的問題並不會因此解決。圖 4.3.17 的震測資料乃交大博愛校區進行之試驗，利用 Pseudo section 的概念並將資料縫合之後，得到如同擁有 70 公尺長的側線展距。以 19Hz 的相位角資料為例，在 θ -x 平面做相位角摺開的動作之後，側線前端的資料因為受到近場效應的影響而成非明顯線性。以 52Hz 的相位角資料為例，受到遠場效應的影響，亦造成側線後端資料非明顯線性。MSASW 的分析過程中最重要的步驟便是計算各個頻率所對應在 θ -x domain 的相位角增加斜率($\Delta\theta / \Delta x$)。若以回歸方式計算，則非線性段資料對於整體的斜率會造成污染的效果進而造成頻散曲線計算錯誤。圖 4.3.18 是從另外一個觀點觀察近場效應與遠場效應的存在。以 x-t domain 沿時間軸作一次 FFT 之資料複數中的實數部分為 y 軸，展距範圍分佈為 x 軸繪圖，低頻波(37Hz)因為在側線前段尚未完全成型所造成的近場效應，以及高頻波(57Hz)因為在側線後段訊號衰減所造成的近場效應。若以 MWTSW 進行分析，那麼從頻率域所觀察到的近場以及遠場效應，對於最後 overtone 的影像以及波峰值的挑選會造成影響，進而造成頻散曲線的誤差。

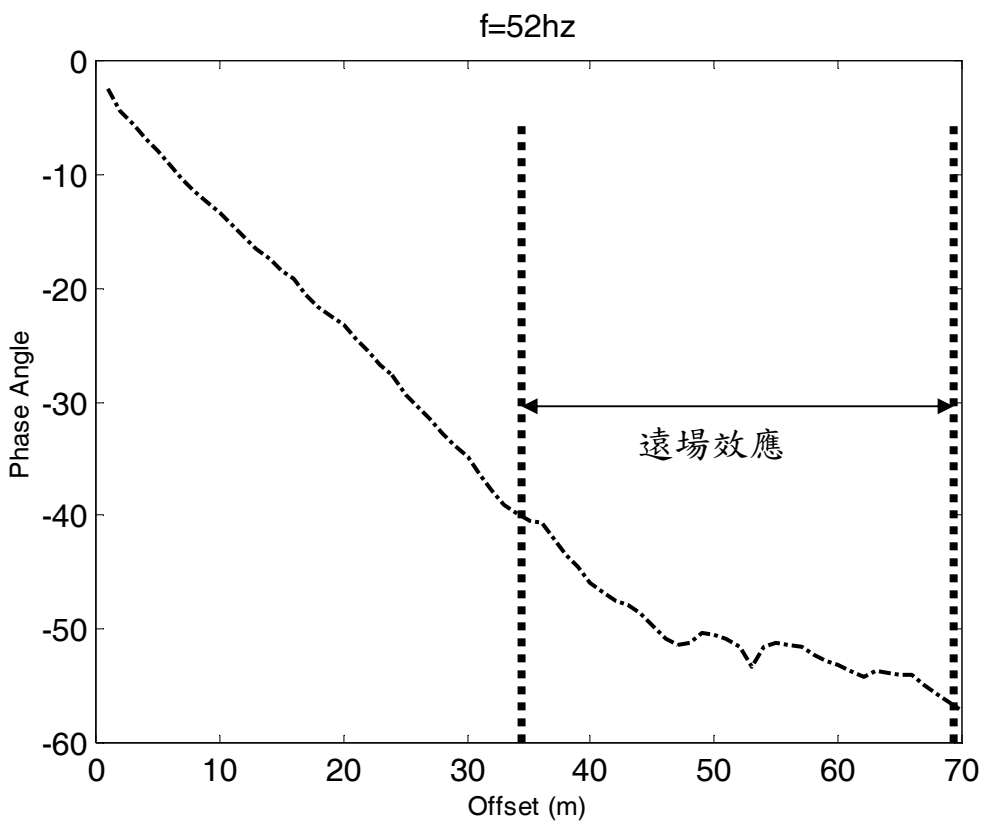
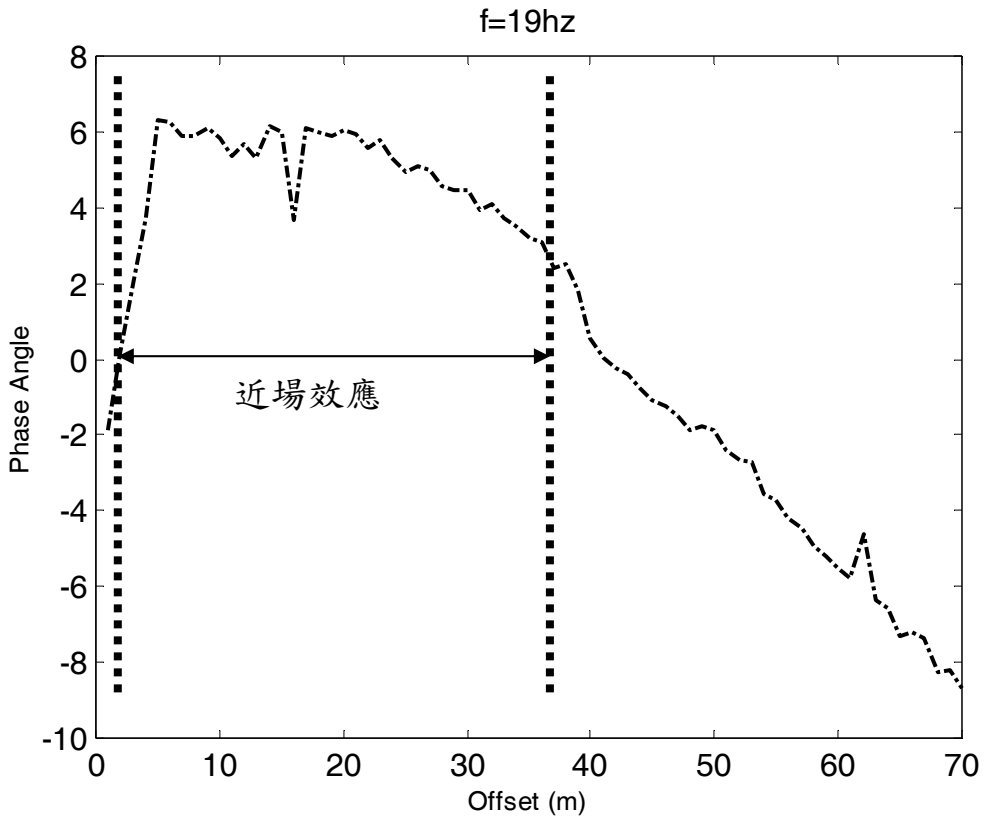


圖 4.3.17 近場、遠場效應於 \emptyset -x domain 之呈現

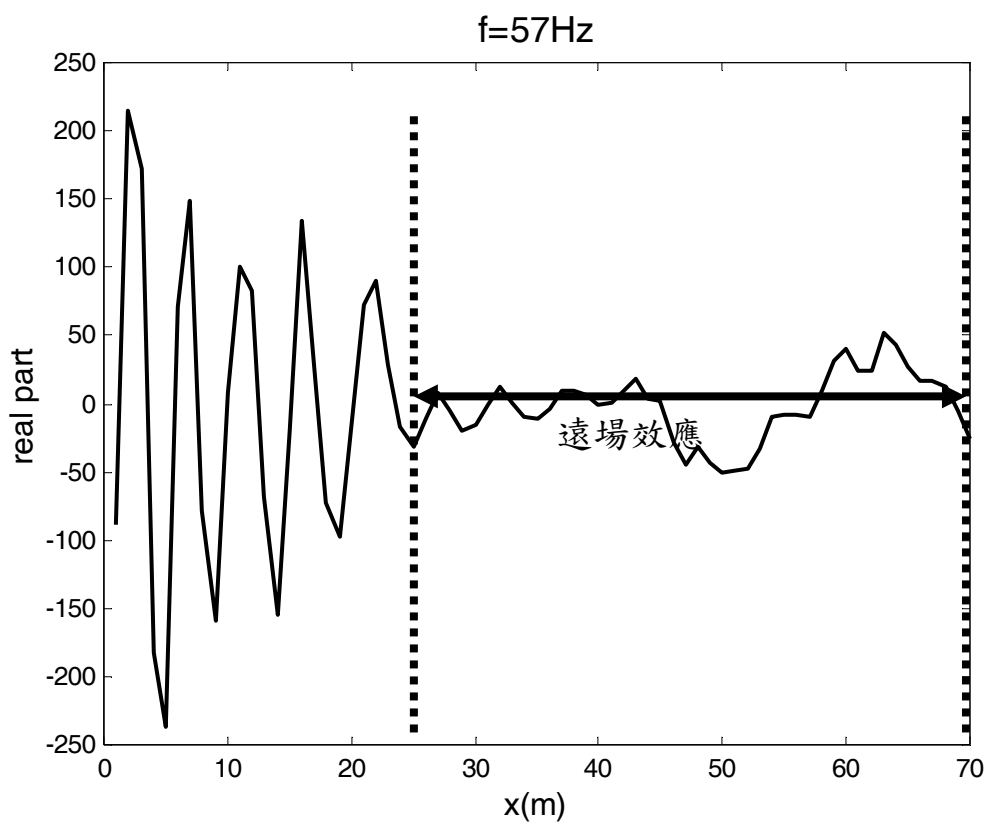
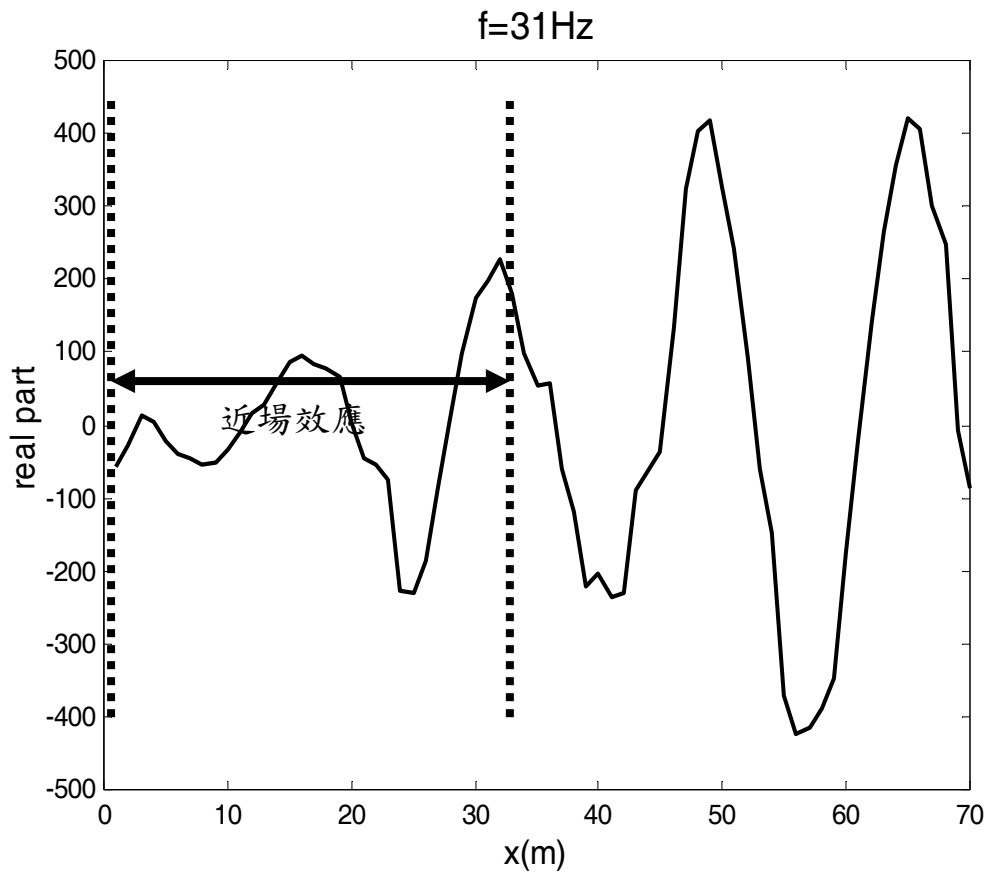


圖 4.3.18 近場、遠場效應於震測資料實數部分之呈現

4.3.5 最佳展距範圍選取(optimum offset range selection)

由於雷力波在大地材料中的傳遞行為受到先天的限制，如低頻波成型慢以及高頻波衰減快，因此沒有辦法完全消除近場與遠場效應的衝突。採用的近站支距過長會有嚴重的遠場效應而採用的近站支距過短又會有嚴重的近場效應。然隨著各試驗場址的大地材料的差異，若要避開近場效應與遠場效應，勢必須以試誤法不斷嘗試以得到某一近站支距能包含最佳之空間範圍來避開近場與遠場效應。若以 walk away test 施測方式製造 Pseudo section，將所需展距範圍的資料蒐集齊全分析時再進行最佳展距範圍選取。則現地施測作業可以提高效率並於分析過程中將受到近場效應以及遠場效應污染的資料剔除以提高頻散曲線的準確性。

進行 MSASW 分析時，針對每一特定頻率觀察其相位角沿空間距離增加的斜率變化過程中，即可於 ϕ -x domain 發現，若其相位角於某一展距範圍內呈線性變化，則該展距範圍即為最佳展距範圍(如圖 4.3.17 之線性段)。而進行 MWTSW 分析時，觀察第一次沿時間軸之 FFT 轉換後資料之實數部分，若在某一特定頻率下，其資料之振幅較高(能量較大)並集中於某一展距範圍內，則該展距範圍即為最佳展距範圍(如圖 4.3.18 波型明顯處)。圖 4.3.19 乃不同頻率下之震測資料之實部，可根據此圖進行最佳展距範圍的挑選，如圖 4.3.20 所示。圖 4.3.21 顯示經過最佳展距範圍挑選之後，以 MWTSW 之分析方式所得頻散曲線並無太大差異。推測原因是頻率分佈於高頻(60Hz 以上)及低頻(25Hz 以下)之資料並無明顯振幅集中的情況，故即使經過最佳展距範圍之挑選也不易展現其頻散曲線之差異。

圖 4.3.22 顯示以 MSASW 進行分析其誤差的靈敏度會遠高於 MWTSW。由於 MSASW 的分析方式計算 $\Delta\phi/\Delta x$ 是以回歸方式計算其斜率，若將受過污染的資料一起回歸，則計算結果會有相當大的誤差存在。若以 MWTSW 方式分析，即使將經過污染的資料進行第二次的 DSFT 積

分轉換，對於挑選尖峰值的影響亦有限，也因此造成圖 4.3.22 其中 MSASW 未經過最佳展距範圍選取所得頻散曲線與其他三者差異較明顯。

在寶二水庫所進行的試驗如圖 4.3.23 至 4.3.25 所示。在 $f-x$ domain 中進行檢驗(圖 4.3.23)，隨著頻率降低主要能量往測線後端的空間範圍移動的趨勢並不像交大博愛校區如此明顯。但經過最佳展距範圍的挑選後，以 MWTSW 進行分析可明顯觀察到不論是 $f-v$ 頻譜影像清晰度或挑點趨勢的一致性都較未經選取最佳展距範圍的資料好(圖 4.3.25)。圖 4.3.25 亦顯示經挑選最佳展距範圍之資料再進行分析，最後所得到的頻散曲線依舊存在跳動的現象，但各個不同模組震波(higher mode)所產生的頻散曲線延伸趨勢仍可推估。然未經過選取最佳展距範圍的資料直接進行分析，以寶二水庫資料為例，高次模組所產生頻散曲線的趨勢並不易加以估計。在經過最佳展距範圍選取之後(圖 4.3.26)，嘉義太保鄉所進行的試驗(圖 4.3.27)亦存在上述現象。

Pseudo section 提供夠長的測線展距，但如於不同的場址進行試驗則難免會有不同的地層效應以致影響震測資料。例如波傳行為在均質性高的土層與均質性較低的土層就不盡相同，更遑論異向性的存在。趨勢明顯且頻寬範圍又足夠的頻散曲線為進行地層反算時唯一之重要依據，則最佳展距範圍選取的過程，無論於進行 MSASW 抑或 MWTSW 都是不可忽略的重要程序之一。

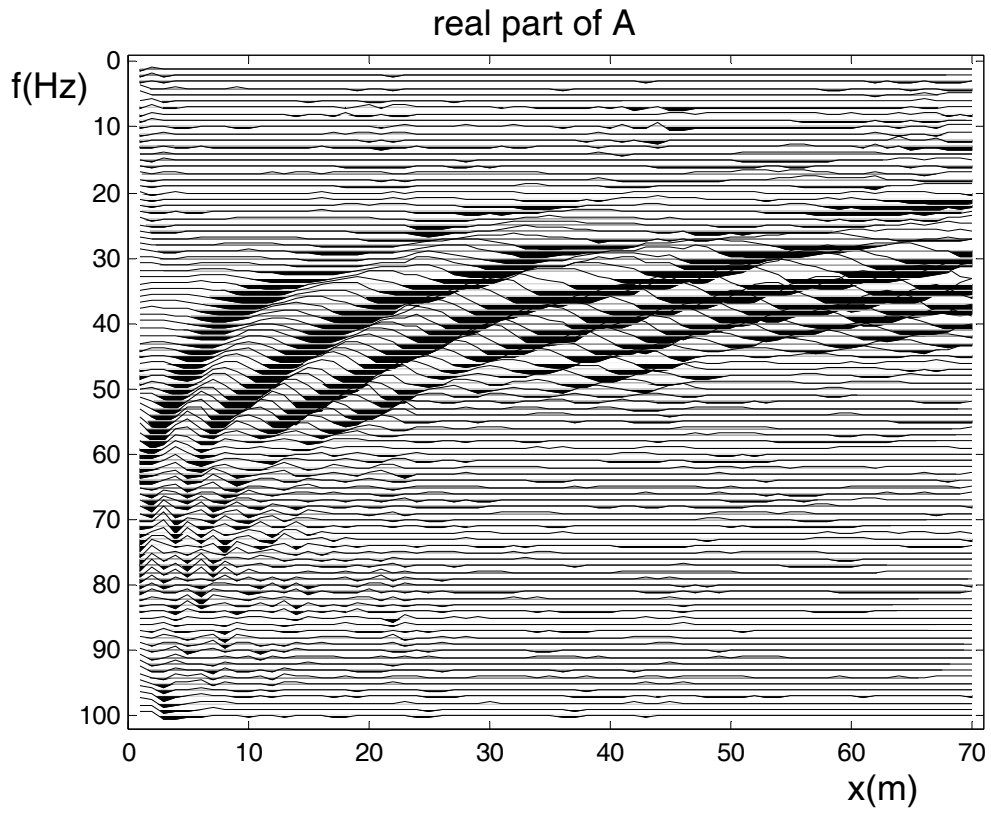


圖 4.3.19 震測資料實數部分於 f-x domain 之呈現(交大博愛)

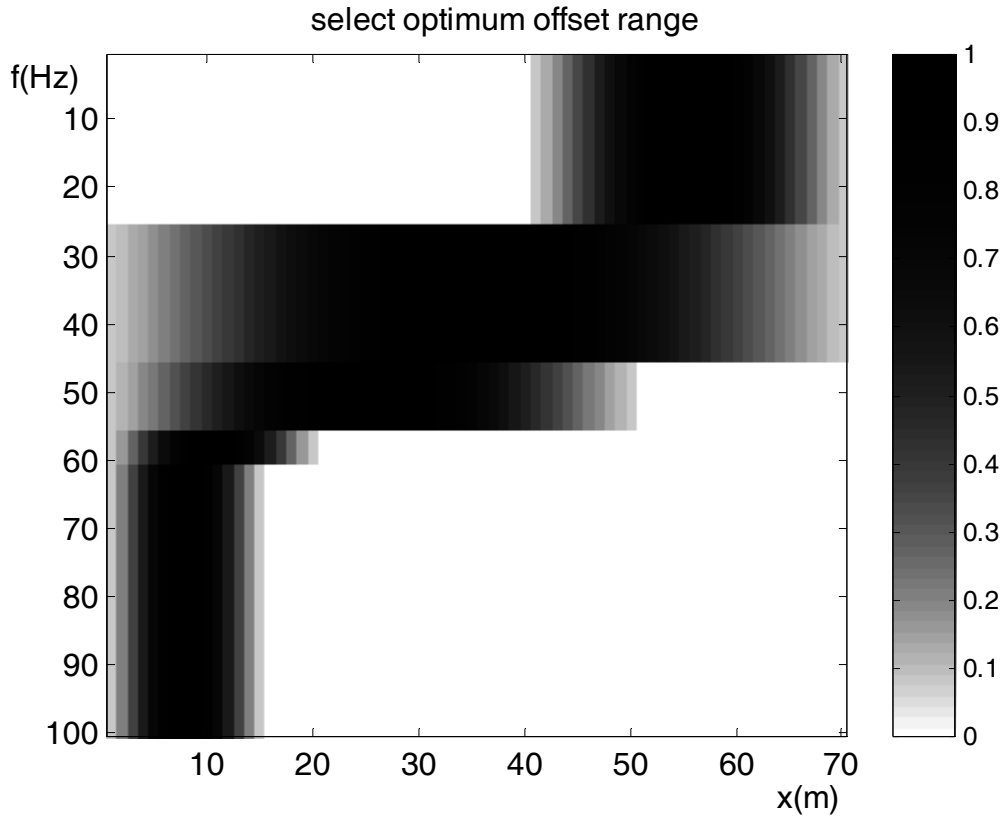


圖 4.3.20 最佳展距範圍選取(交大博愛)

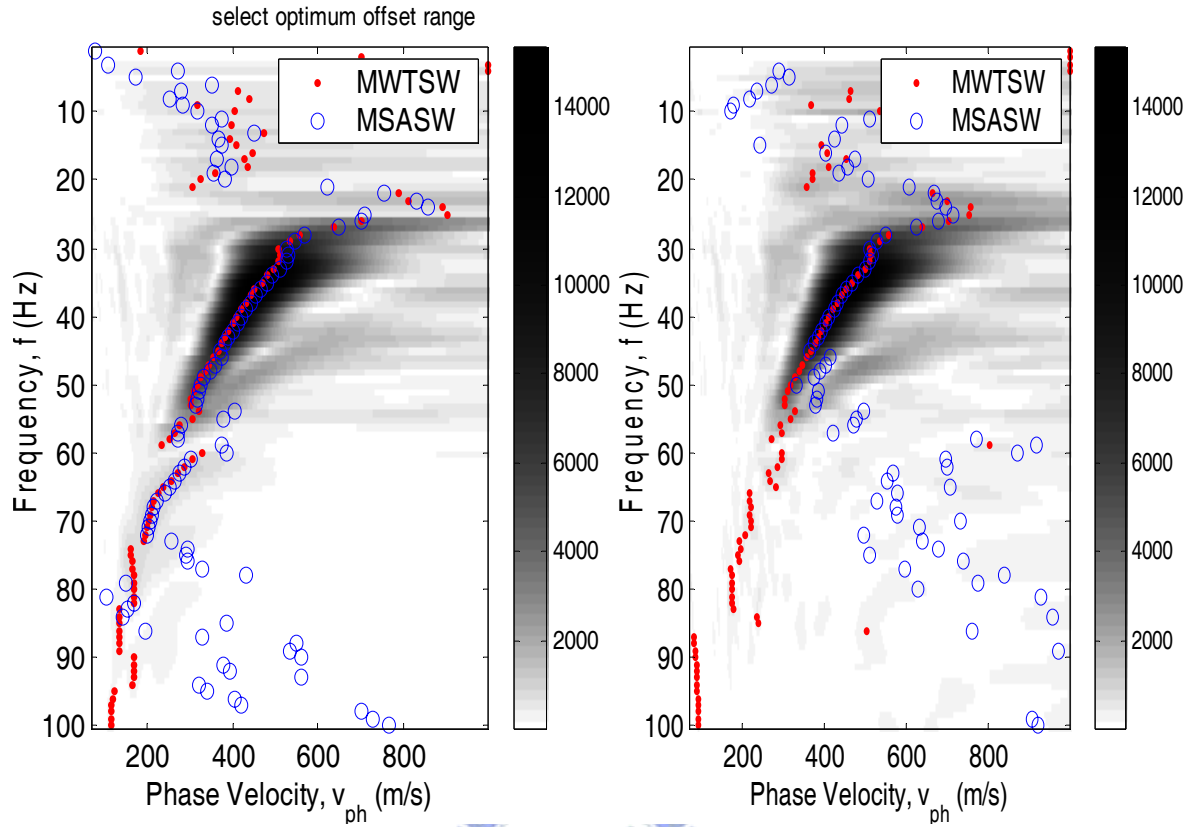


圖 4.3.21 最佳展距範圍選取於 f - v domain 之差異(交大博愛)

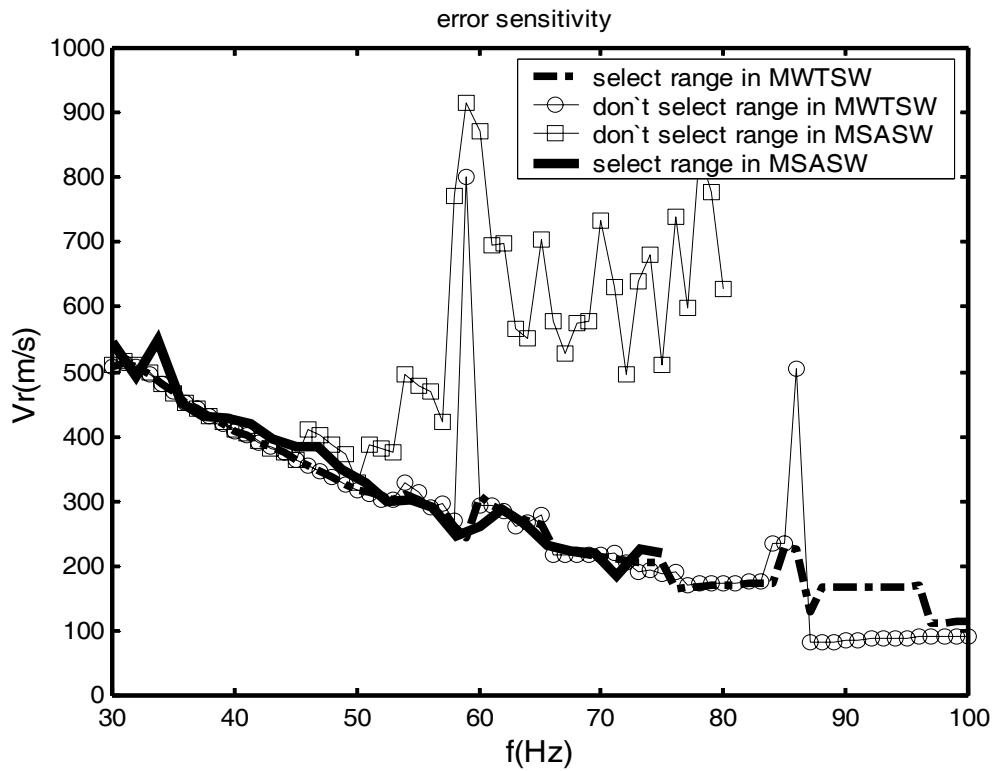


圖 4.3.22 最佳展距範圍選取於頻散曲線之差異(交大博愛)

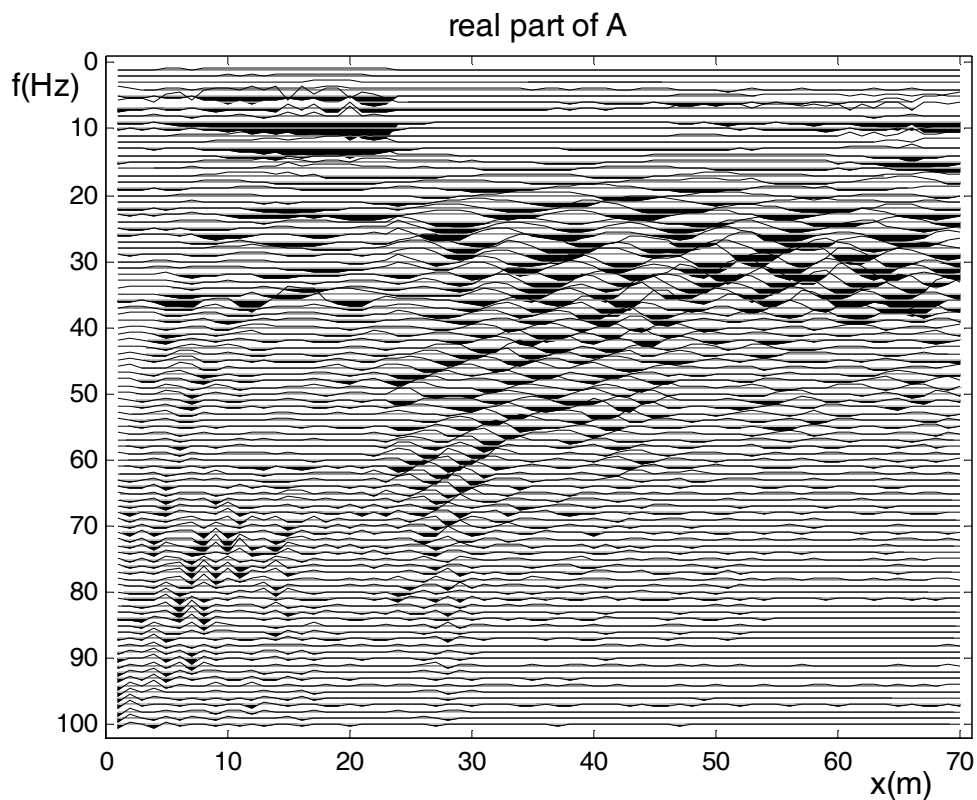


圖 4.3.23 震測資料實數部分於 f-x domain 之呈現(寶二水庫)

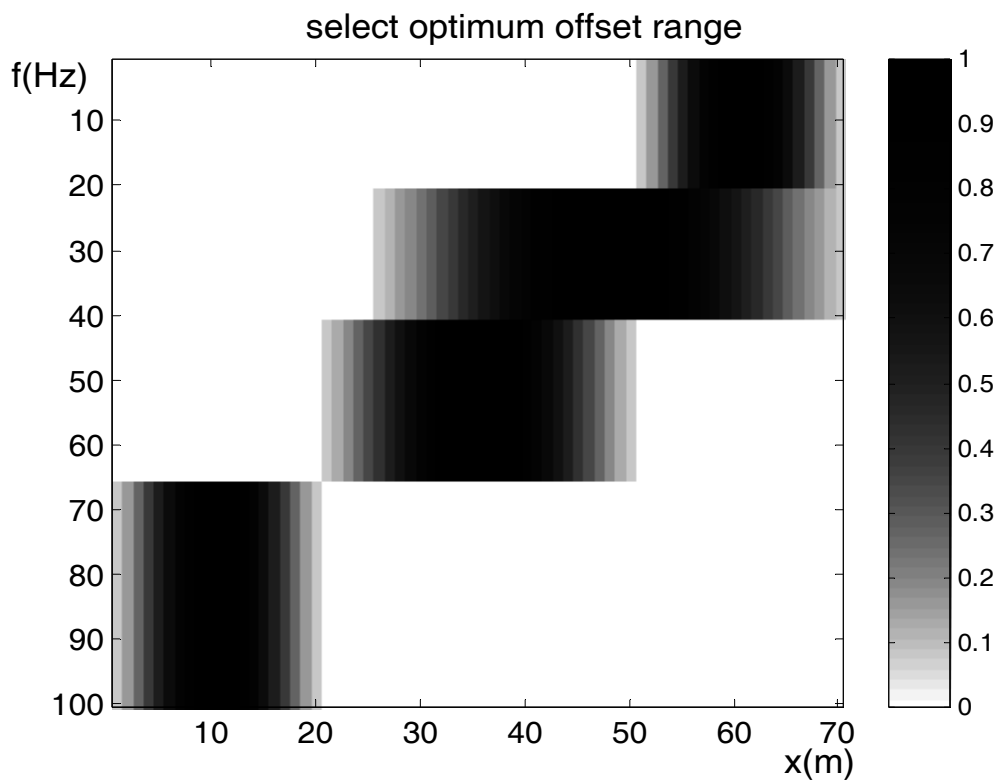


圖 4.3.24 最佳展距範圍選取(寶二水庫)

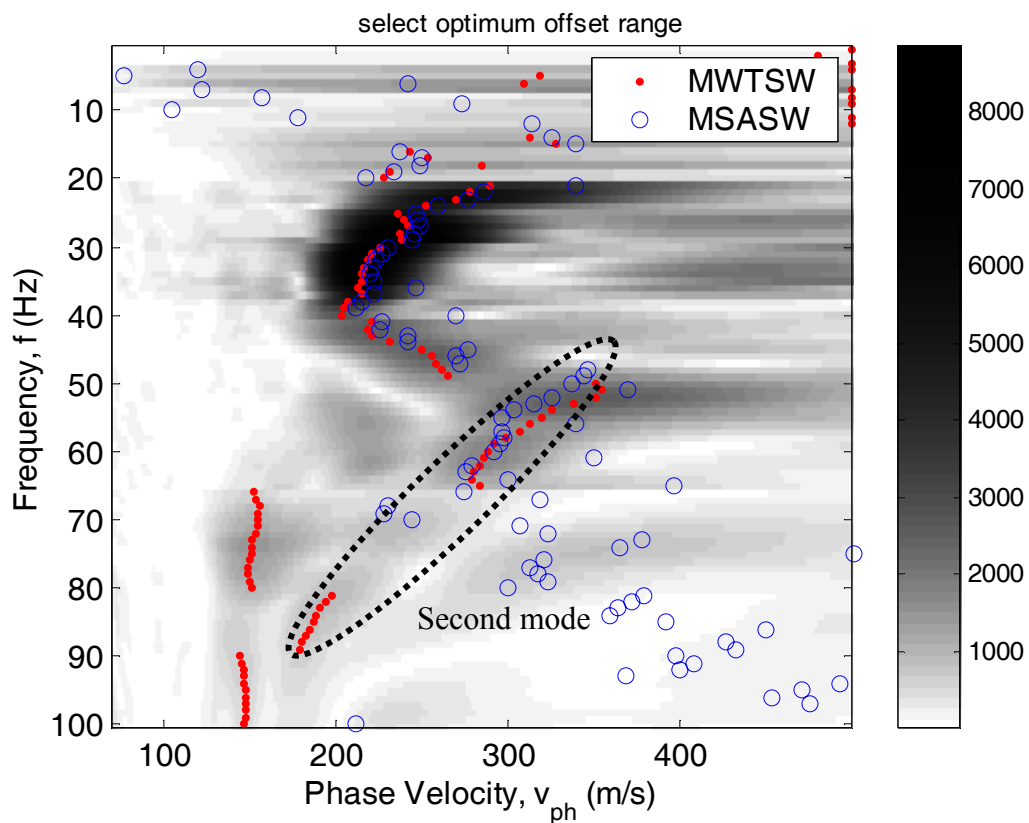
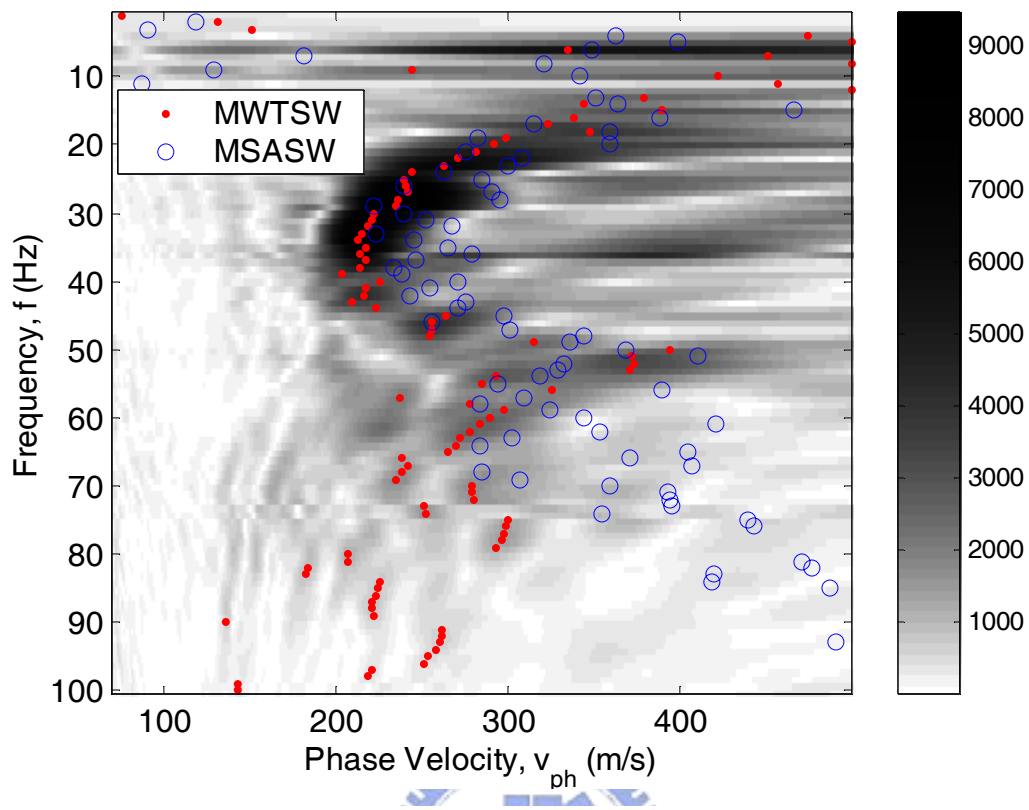


圖 4.3.25 最佳展距範圍選取於 f - v domain 之差異(寶二水庫)

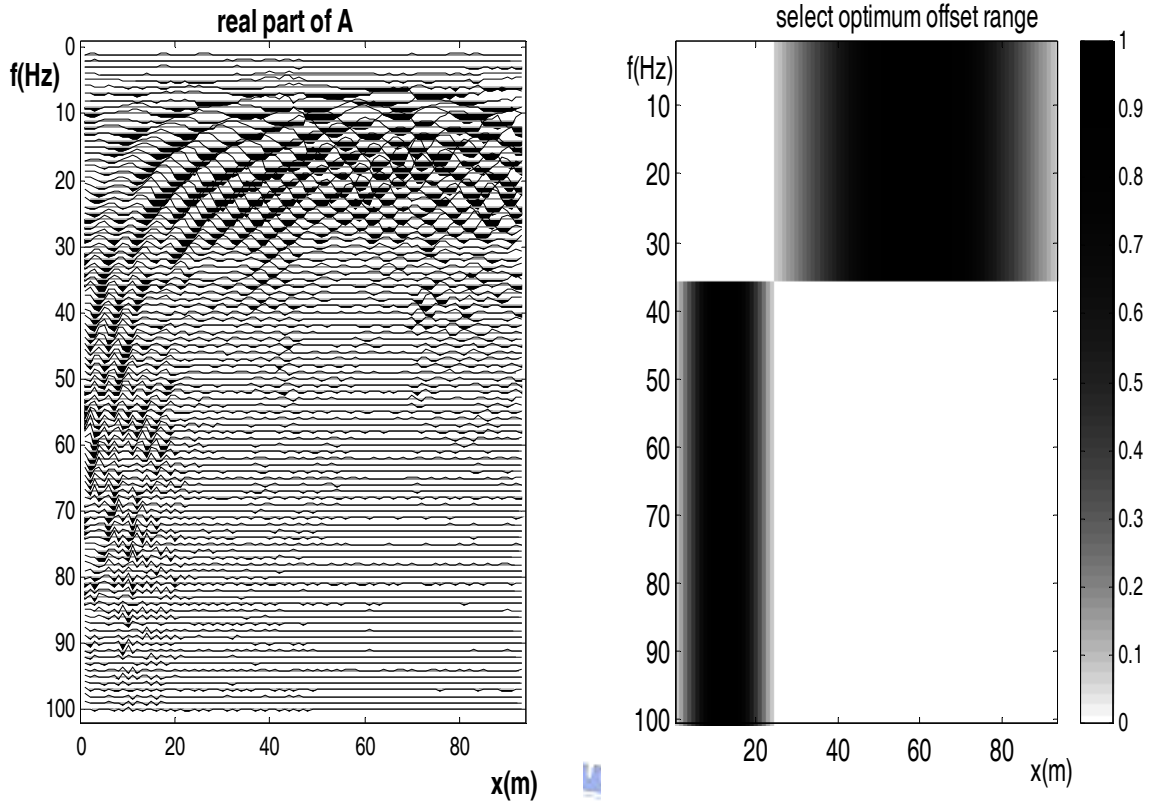


圖 4.3.26 最佳展距範圍選取(嘉義太保)

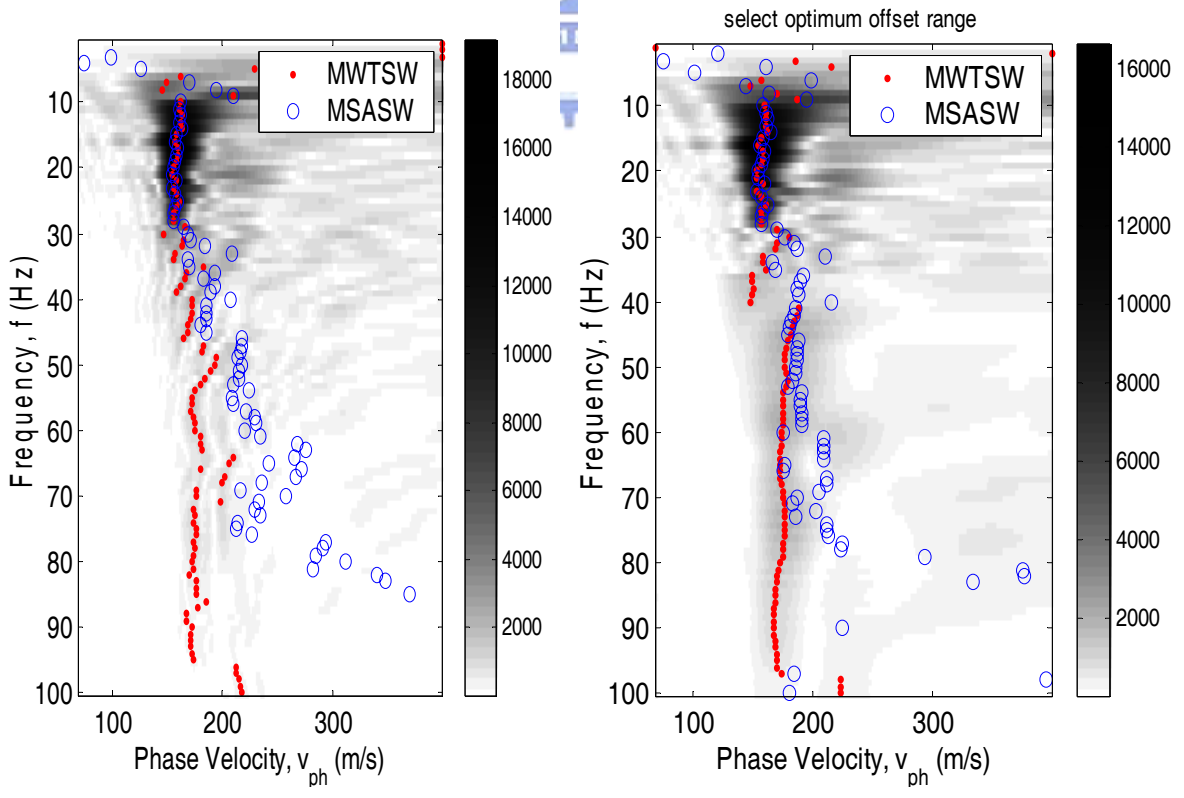


圖 4.3.27 最佳展距範圍選取於 f-v domain 之差異(嘉義太保)

4.4 震源特性的比較

在 4.3.5 節中，本研究試圖探討於頻散曲線分析的過程中加入最佳展距範圍選取的程序，則可將過濾部份受到近場效應與遠場效應干擾的資料，配合進行震源篩選的嘗試則期望能於收錄震測資料的同時控制資料品質良好頻寬分佈。由於最佳展距範圍之選取通常在測線展距範圍前端挑選高頻波(避免遠場效應)以及測線展距範圍後端挑選低頻波(避免近場效應)。故若能分別於測線展距範圍不同區段內製造其約略對應頻寬之波傳，將有助於進行最佳展距範圍選取的程序。以下便將探討以相同施測參數為前提，進行不同震源敲擊方式所展現之頻率特性。

本試驗在交大博愛校區進行，試驗參數採用近站之距 1m，24 個受波器，受波器間距為 1m。圖 4.4.1 之震源方式分別為 900 公克重，落距約為 30 公分之地質鎚以及 60 公斤重，落距約為 1.5m 的自由落鎚(weight drop)，觀察其前五個受波器所收錄之頻譜資料。發現震源產生之主要能量分佈於頻寬分別大約為 45~100Hz(地質鎚)以及 45~65Hz(weight drop)，圖 4.4.3 所示，同樣在頻寬範圍為 20~90Hz 間，震源方式為地質鎚收錄到訊號雜訊比(R^2)較高的資料。推測原因應該是自由落鎚能量較大導致實體波近場效應較巨。另將近站支距改變為 47m 施作試驗，圖 4.4.2 之震源方式分別為與前次相同之地質鎚以及自由落鎚(weight drop)，觀察後五個受波器所收錄之頻譜資料。以地質鎚為震源方式則產生頻寬範圍不集中的能量分佈。由於能量不足，地質鎚所能傳遞的波傳會迅速衰減。因此收錄的震測資料中頻率低的雜訊波比例會增加，能量大的自由落鎚並無此現象。圖 4.4.4 所示，頻寬範圍為 25~50Hz 間，震源方式為自由落鎚收錄訊號雜訊比(R^2)較高的資料。

將收錄之資料分別進行分析得 f-v domain 如圖 4.4.5~4.4.6 所示。圖 4.4.5 顯示，當近站支距等於 1m 時，震源方式為地質鎚所得到的頻散曲線

不論整體品質(近場效應)以及頻寬範圍都比震源方式為自由落錘佳。圖 4.4.6 則顯示相反的結果，然產生低頻波的能力差異並不明顯。

震源所產生之頻寬範圍受限於震源本身之重量或是產生之能量。觀察前試驗結果，能量小(或是重量小)的震源方式比較容易產生高頻波。雖然兩種震源產生低頻波的能力差異不大，然由於近站支距增大，能量小的震源方式會產生波傳的嚴重衰減以致於雜訊嚴重干擾震測資料。因此當以 Pseudo section 的概念佈設多個炸點時，近站支距最短者宜採用能量小之震源以製造好的高頻波及避免嚴重的近場效應。而隨著近站支距的增加，必須提升震源能量如重量重的鐵錘或是砲車等。在使用不同震源而組合 Pseudo section 之震測資料，如圖 4.4.7 所示，頻散曲線之品質獲得提升。



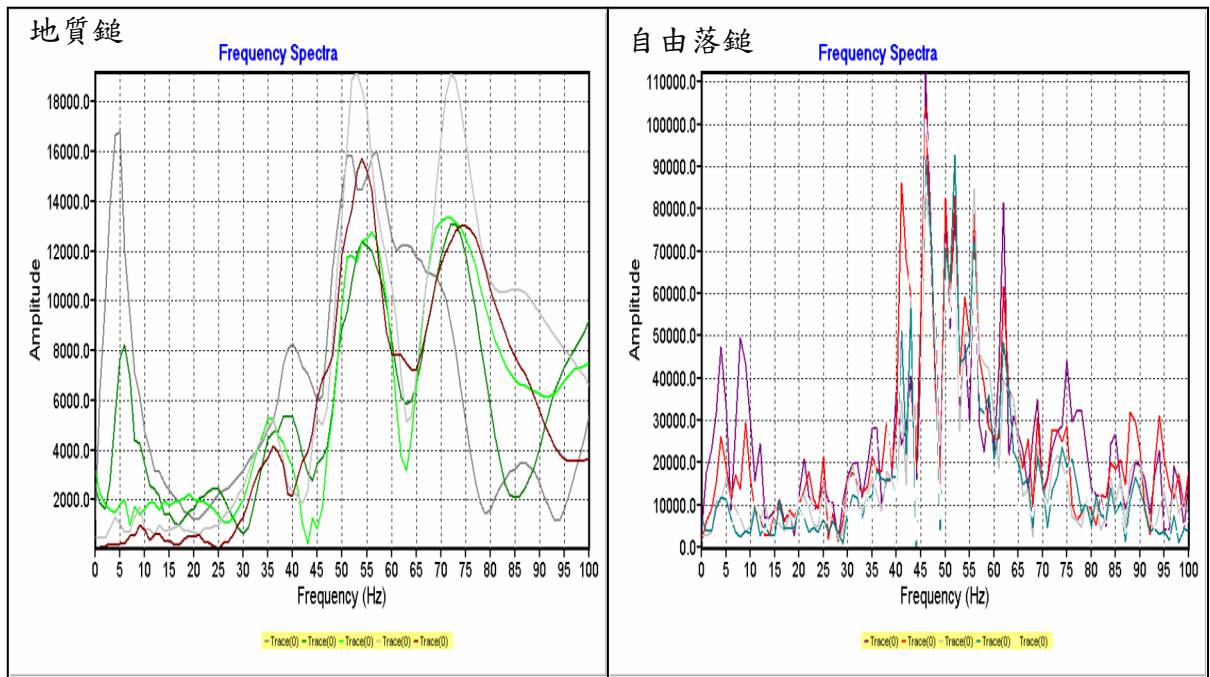


圖 4.4.1 不同震源方式敲擊造成不同的頻譜分佈($X_0=1m$)

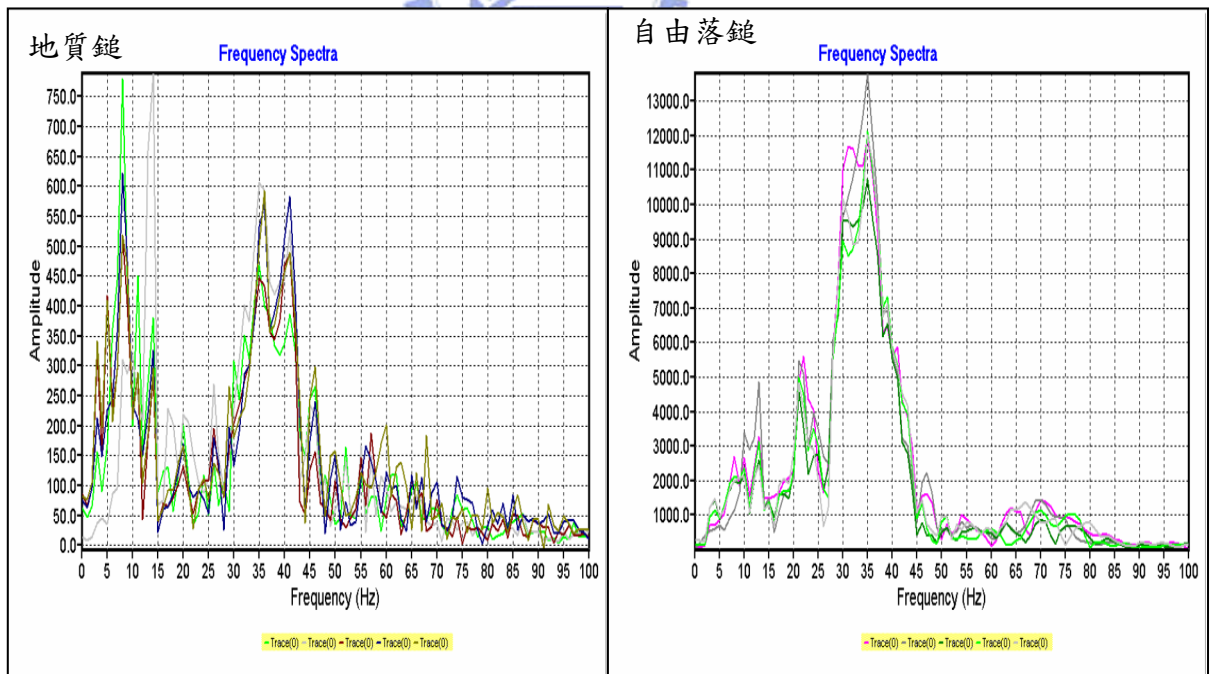


圖 4.4.2 不同震源方式敲擊造成不同的頻譜分佈($X_0=47m$)

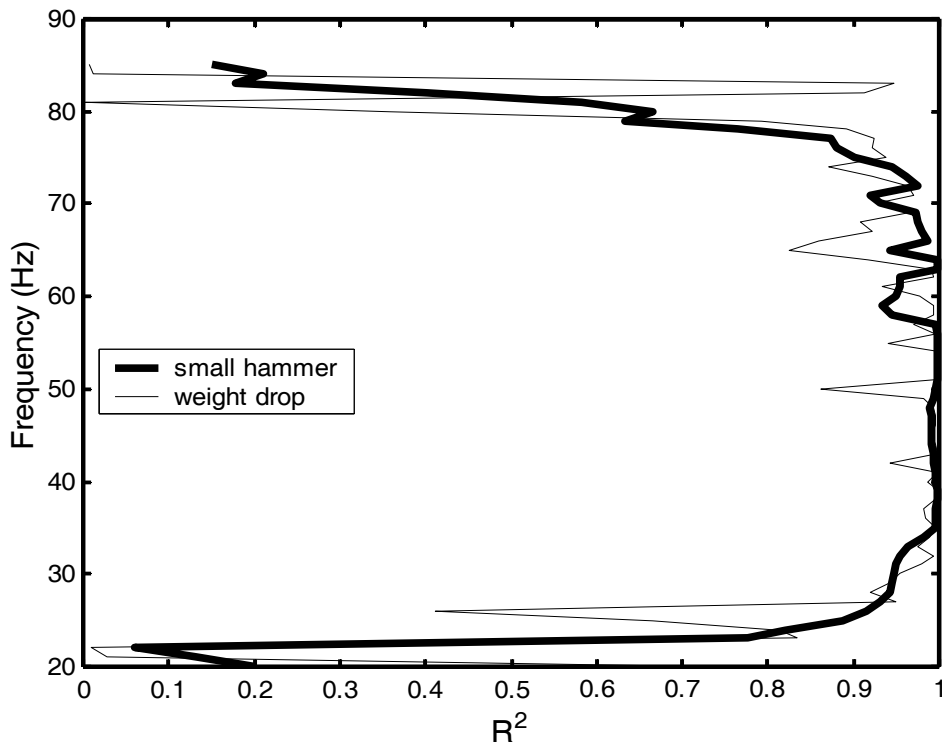


圖 4.4.3 不同震源訊號雜訊比($X_0=1m$)

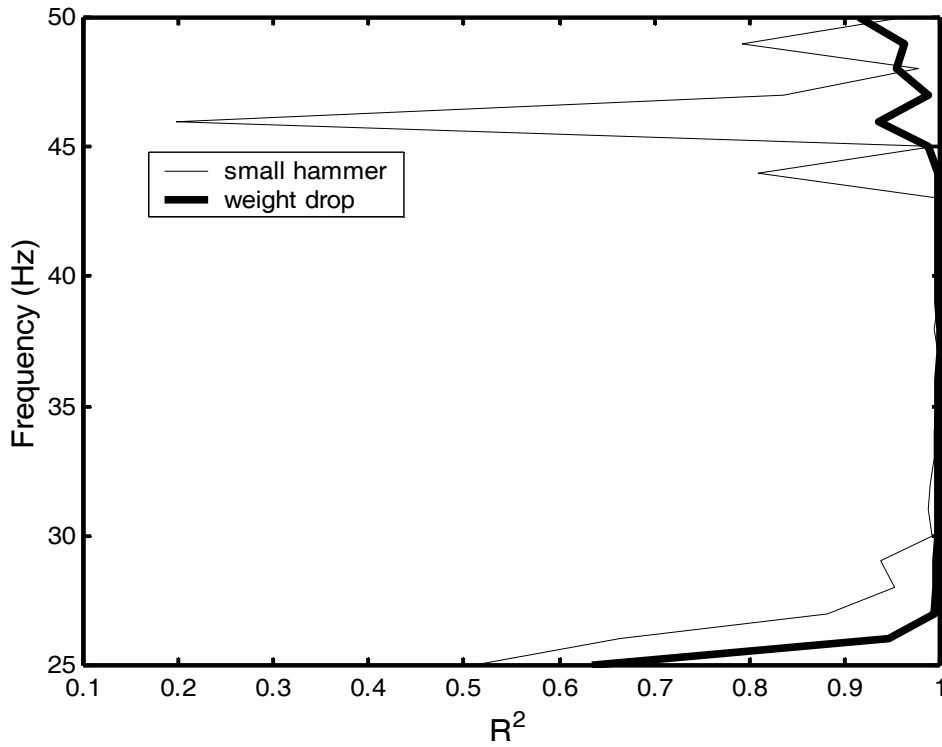


圖 4.4.4 不同震源訊號雜訊比($X_0=47m$)

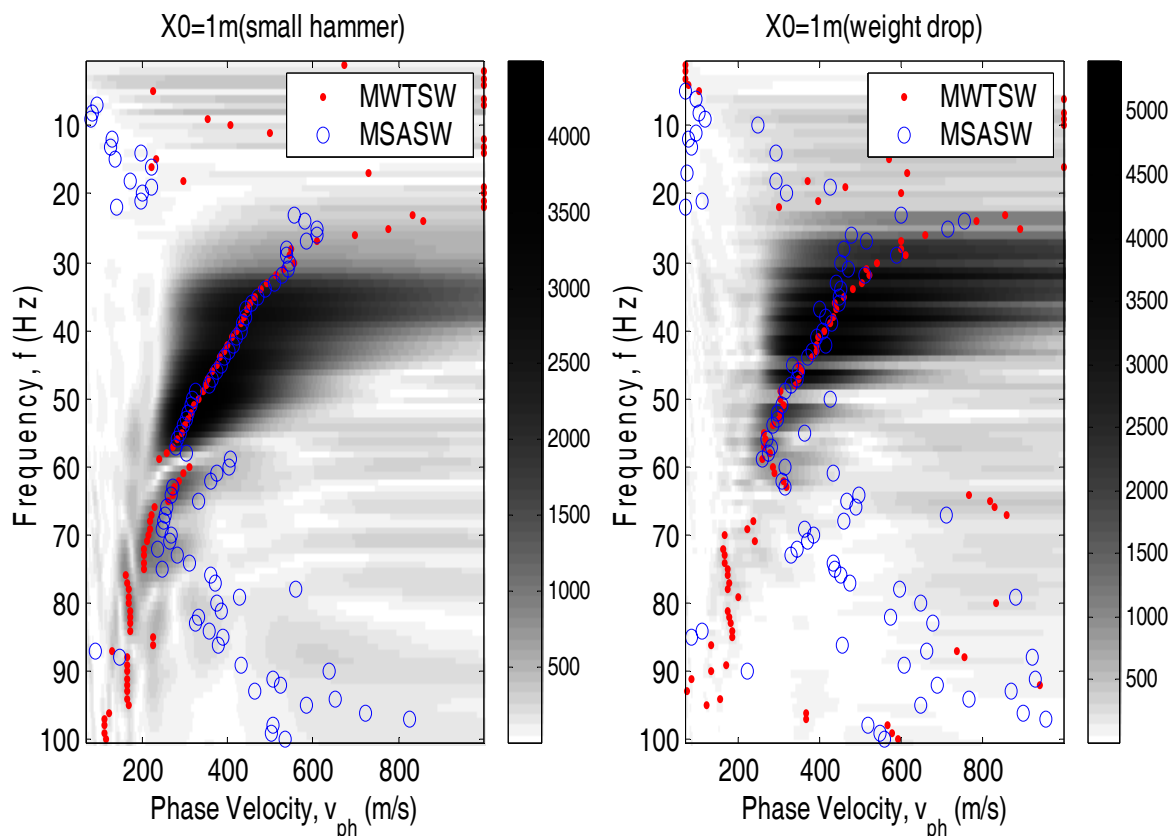


圖 4.4.5 不同震源在 f - v domain 的差異($X_0=1\text{m}$)

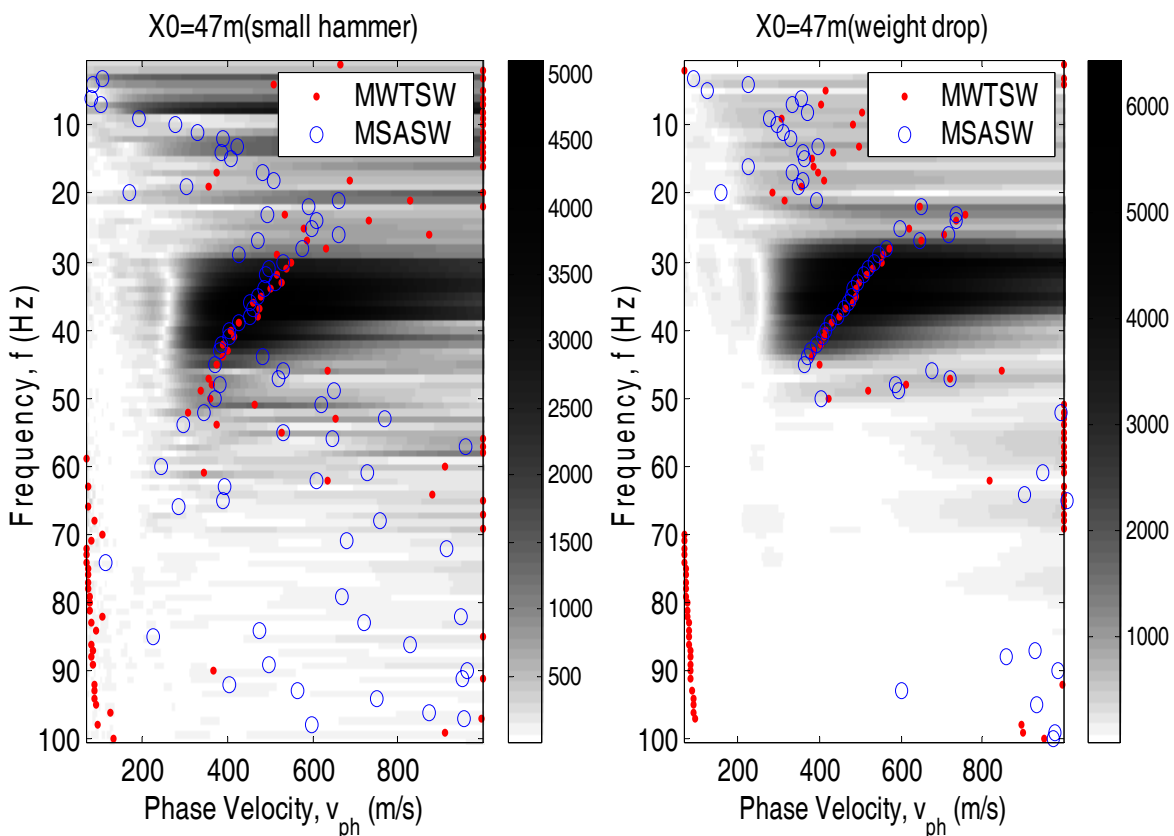


圖 4.4.6 不同震源在 f - v domain 的差異($X_0=47\text{m}$)

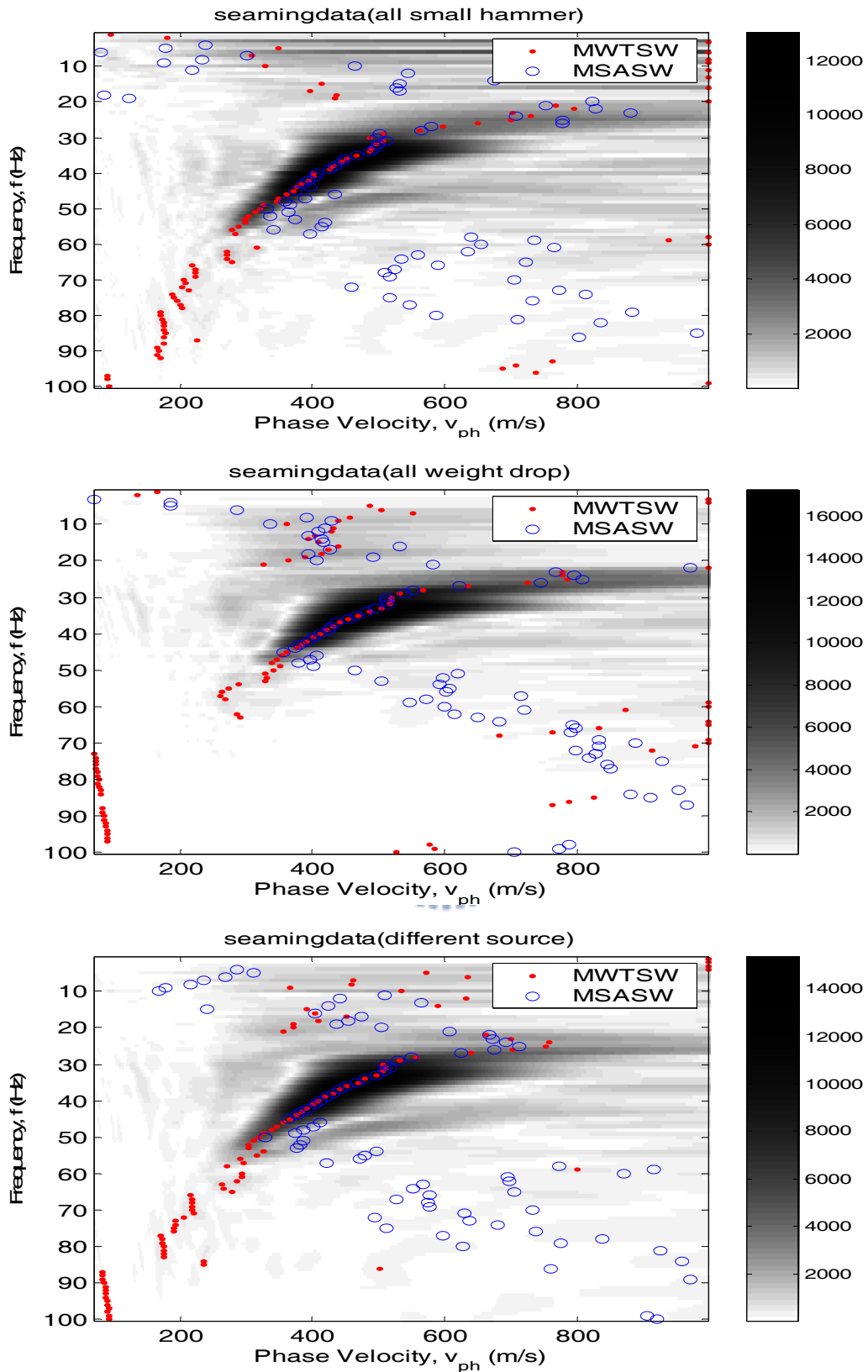


圖 4.4.7 不同組合震源於 f - v domain 的差異(展距範圍皆為 1~70m 之 Pseudo section)

4.5 反算後剪力波速剖面之比較(V_s)

經過頻譜分析過程後將頻散曲線套入反算模式中以完成地層深度與剪力波速剖面，這是判斷頻散曲線優良與否最直接的方法。本研究採用 Choon B.park 等人(Kansas Geological Survey)於 2001 年出版的 SurfSeis 商用軟體中的反算系統。在此反算分析流程中，最重要的就是假設測線之土層模型，其中土層模型需假設之材料參數包括：壓力波速度(V_p)、剪力波速度(V_s)、土層深度(z)、土層厚度(h)、土壤質量密度(ρ)及土壤柏松比(ν)，茲分別介紹如下：

1. 假設土層模型之壓力波速度及剪力波速度，與土壤之柏松比有關；若改變假設之壓力波速度值，則連帶會改變到假設之土壤柏松比；而在某假設之土壤柏松比下，若改變假設之剪力波速度值，則連帶會改變到假設之壓力波速度值；一般來說，土壤柏松比之大小介於 0~0.5 之間，而剪力波速度通常介於 100~1000 m/s 之間，而壓力波速度通常介於 300~2000 m/s 之間。
2. 假設土層模型之土層深度及土層厚度，與表面波之最大波長有關；其中假設之土層深度值，代表地表面至土層底部之距離，通常土層深度最深可達二分之一最大波長；若改變假設之土層深度值，則連帶會改變到假設之土層厚度。
3. 假設土層模型之土壤質量密度，代表土壤每單位體積中之質量；若改變假設之土壤質量密度，並不會改變到任何假設之材料參數，故對於反算結果之影響較小；一般來說，土壤質量密度之大小介於 1.6~2.2 g/cm³ 之間。

依照上述假設土層模型之材料參數，可求得理論之頻散關係曲線(Xia et al., 1999)，而先前經由資料分析求得之頻散關係曲線，則稱之為試驗之

頻散關係曲線；利用手動或自動化之試誤(Trial-and-Error)法，反覆計算土層模型之材料參數，直到理論與試驗頻散關係曲線之間的根均方誤差(Root-Mean-Square Error)值達到最小為止，即兩頻散關係曲線間有相互吻合之頻散趨勢。此時之理論頻散關係曲線，其對應之剪力波速度剖面，即為多頻道式表面波量測法之反算結果。

圖 4.5.1 乃嘉義太保所進行表面波試驗所得頻散曲線，圖中 seaming and optimum DC 乃 MASW 在經過 Pseudo section 的應用及最佳展距範圍選取分析程序所得頻散曲線。Conventional DC 為單一炸點以及僅佈設 24 個受波器之測線且分析過程沒有經過最佳化空間選取所求得頻散曲線。選取頻散曲線可信度高之頻寬後(非跳動的高態模組頻散曲線)進行剪力波速反算得圖 4.5.2，其中包含懸垂式 P-S 波探測法以及多頻道表面波試驗(MASW)所求得剪力波速。圖中 seaming and optimum DC 乃 MASW 在經過 Pseudo section 的應用及最佳展距範圍選取分析程序之後，由頻散曲線反算所得之剪力波速值。Conventional DC 為單一炸點以及僅佈設 24 個受波器之測線且頻散曲線分析過程沒有經過最佳化空間選取所求得之反算剪力波速值。圖中之觀察重點分別為剪力波速值的範圍以及趨勢。試驗場地屬於沙土沉積地質，由孔內波速試驗所求得之剪力波速大致分布在 160~260m/s 之間，並且有隨著深度遞增之趨勢， $V_s(\text{seaming and optimum DC})$ 無論在剪力波速值的範圍以及趨勢都比 $V_s(\text{Conventional DC})$ 接近 $V_s(\text{ps-log})$ ，甚至有少數幾個波速值幾乎與同深度的 $V_s(\text{ps-log})$ 相同。

由於反算參數皆固定，換言之在排除反算的不確定性之後，以上述試驗場址而言，MASW 在經過本研究之改良過程後，所求得之頻散曲線的確可以提供更精準的反算結果，也直接驗證了 Pseudo section 以及最佳化空間範圍選取對於 MASW 的重要性。

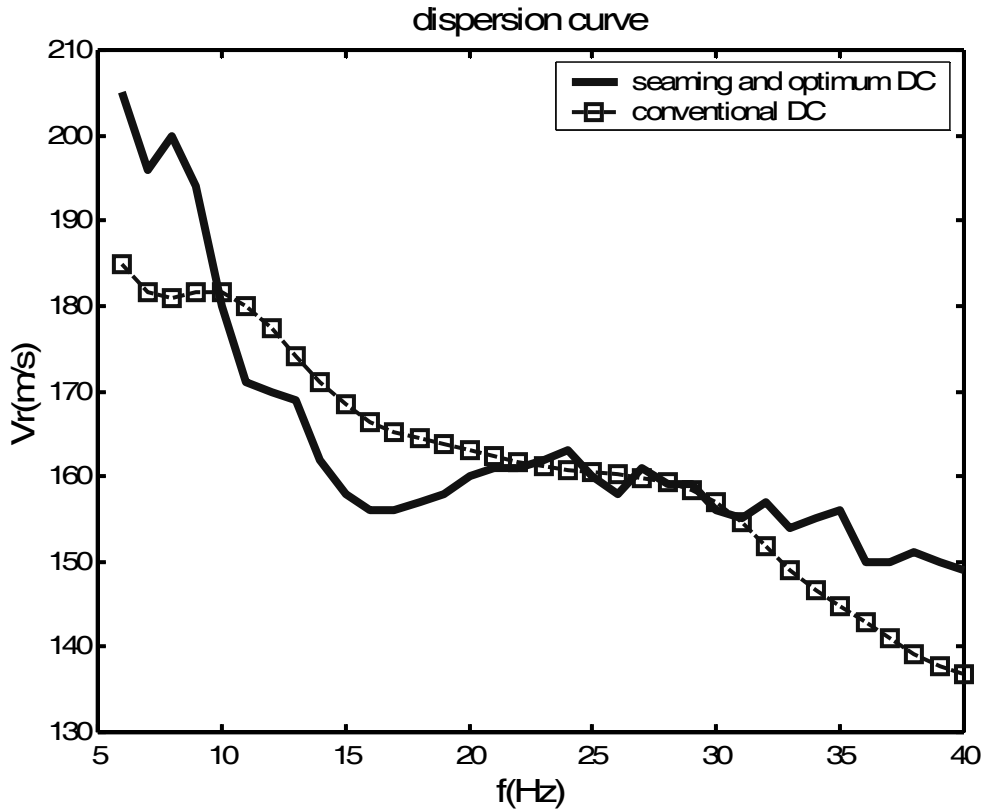


圖 4.5.1 頻散曲線差異(嘉義太保)

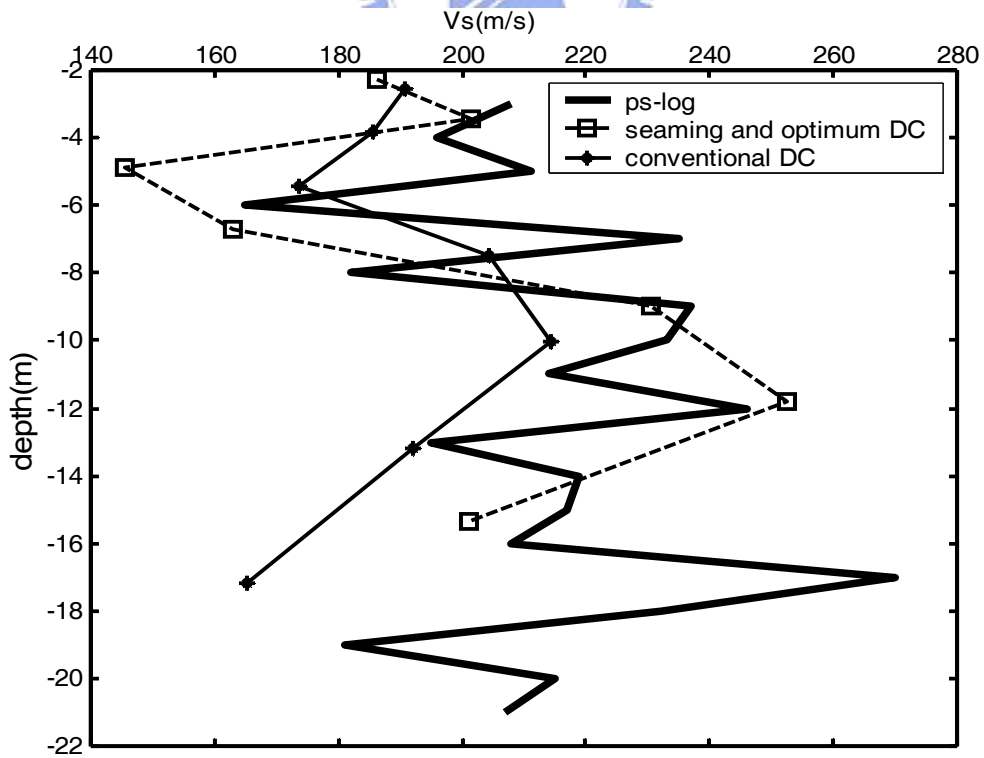


圖 4.5.2 頻散曲線套入反算分析之結果(嘉義太保)

4.6 MASW 之標準施測程序

MASW 施作程序主要包含測線配置及震源敲擊，故若欲建立標準化之施測流程必分別考慮此兩部分所衍生問題。測線配置所採用之參數主要受限於資料進行頻譜分析時會產生資料遺漏、印頻干擾及空間側向解析度。而震源敲擊則考慮震源產生之頻寬範圍以及近場、遠場效應之干擾。測線配置之各項參數，於本研究之探討以可進行定量選擇。然配合 Pseudo section 於各敲擊點適當震源之選擇僅做定性之描述，本研究並無建立震源選擇之標準，主因乃無法預期不同震源所能產生之良好頻寬範圍，若使用可控式簡諧震源製造各敲擊點需對應之頻寬範圍便可解決此問題。綜合第四章之探討，建立以下施作程序：

1. 首先於地質及地形圖上，確定可能之施測地點，而後再進行現場踏勘及地質調查作業，尋找適當之測線位置，並考慮附近是否有鑽孔資料可供參考，以利於比對震測結果之正確性；此外在規劃測線時，應儘量避免測線橫跨經過落差或間隔過大之溝渠或土堤處，使測線不致於產生不連續配置之情形；而且測線不能太靠近有根基之結構物或樹根蔓延之地方，以避免側向反射波及雜訊之干擾；同時地表面以愈平坦愈堅硬且有些潮濕者愈佳，儘量避免地表面為鬆軟的回填土層，使得反算分析結果不致於被表面土層所影響。
2. 測線配置之參數選擇依照試驗之需求，考慮雷力波影響深度 D 大約等於雷力波波長之半以及避免映頻干擾，受波器間距(Δx)必須小於預測深度範圍上限值(D_{min})。考慮雷力波影響深度 D 大約等於雷利波波長之半以及避免資料遺漏，配合 Pseudo section 的應用需將測線展距擴展(nL)至大於兩倍預測深度範圍下限值($2D_{max}$)，而最小近站支距(X_0)等於預測深度範圍上限值(D_{min})，受波器數目(n)則決定於空間側向解析度之要求。如圖 4.6.1 所示，某次試驗的空間解析度要求為 4m，需探測

深度範圍(D)為地表下 1m~25m，則 $\Delta x < 1\text{m}$ ， $nL > 50\text{m}$ ， $X_0 = 1\text{m}$ ， $n = 5$ 。

3. 依照決定之各參數配置測線完畢即進行震源敲擊。依照本研究所提之定性原則選擇適當敲擊方式。近站支距小的炸點設置處宜適用重量小的敲擊震源以期製造良好的高頻波並避免近場效應干擾。隨著近站支距逐漸增加，震源的重量也隨著增加以避免遠場效應。於各敲擊點亦可重複敲擊並疊加所收錄之震測資料以期提高單筆震測資料品質。
4. 由於 Pseudo section 須經多筆敲擊資料組合，故於收錄各筆震測資料的同時需詳細紀錄各炸點位置所對應的檔案編號以避免後續資料分析之困擾。

依上述最佳施測參數以及震源選擇施作 Pseudo section 可避免考慮 MASW 現存問題造成施測參數互制的疑慮，並於分析程序加入最佳展距範圍的選取以期最佳化頻散曲線的呈現。

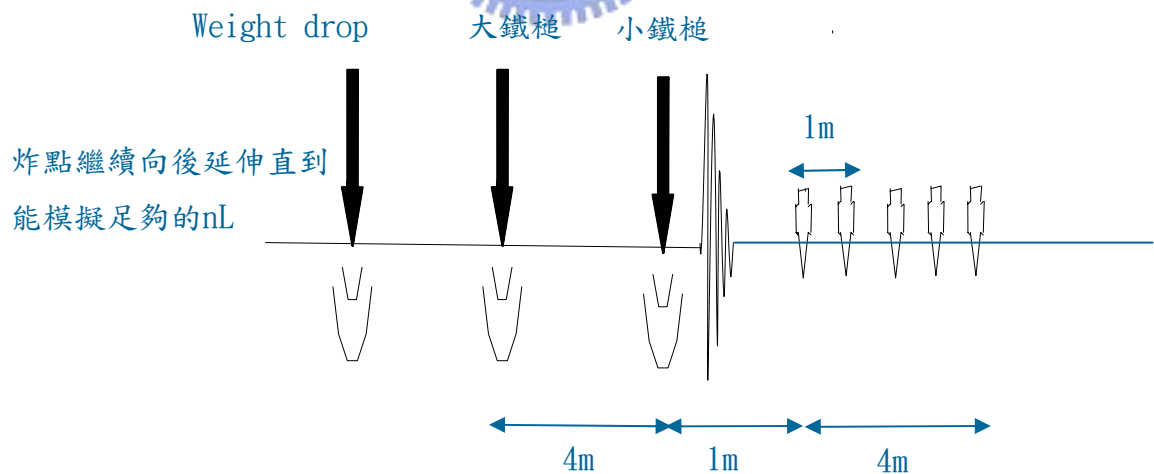


圖 4.6.1 MASW 測線佈置之實際案例