

淺層反射震波測勘法之原理及應用

——震波測勘之新趨勢

鄭 懌

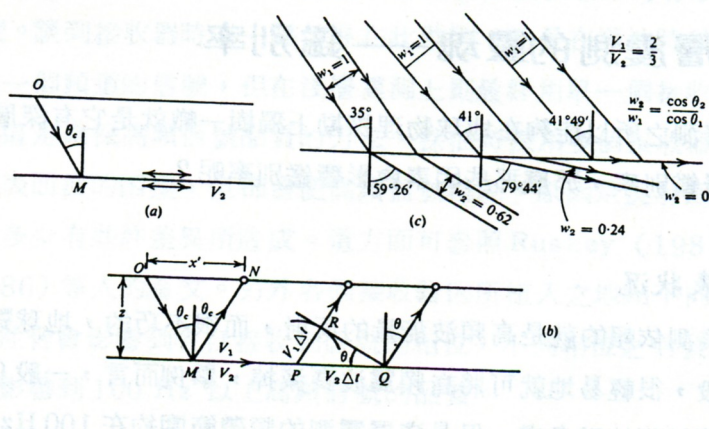
國立臺灣師範大學地球科學系

前 言

震波測勘在地球物理探勘上一直是吸引最多地球物理學家投身其中的一種測勘法。從四、五十年前只有地球物理學家獨挑大樑的年代，演變到今天震波測勘已是綜合地質、地球物理、數學、電腦、以及電子、電機工程等高科技的一門學問。其分工之精細，進步之快速，令人嘆為觀止。早先震波測勘主要是用在油氣之探勘，到了六〇年代隨著電腦的發展，數位磁帶紀錄法的使用，電子儀器的進步，使震波測勘法如虎添翼，不只在探油工業上舉足輕重，同時也逐漸被應用到其他方面，如：醫學工程上對人體腔內器官之探測診斷，以及工程地質、土木工程上相關問題的研究。到了最近十年，儀器精度的提高，已能夠使震波測勘之解析度高到能夠處理地表附近淺層細微的地層構造。而這其實也是源自人類對石油之不斷需求，必須竭盡所能的尋找油源，因此許多油公司對淺層地層蘊藏石油的可能性進行調查。在震波理論上，淺層反射波是屬高頻波，一般而言，主頻帶高過 100 Hz 之反射波在震測上就屬於高頻反射波，而這些反射數據多發生在淺層之細微構造上，所以也稱為“高解析度”數據。至於深層、淺層如何界定可說是眾說紛云，大略說來數十至數百公尺以內算淺層。當然，有人堅持三十公尺或六十公尺深之內才算淺層，有這麼大之出入主要是因為以前探油時，動輒數千公尺深所得結果受到儀器、震源以及野外方法的影響不大，但是對數十公尺深的目標而言，除了儀器之性能、震源之種類會影響結果外，甚至野外工作人員的工作方法、觀念以及工地四周的環境對施測結果皆有決定性的影響，因此某一震測隊能夠取得之解析度不一定是另一震測隊以同樣之設備所能取得。

早期在工程、地下水、採礦上所使用之震測法為簡易之震波折射法。此法只記錄折

射波到達各接收器之初動 (first arrival) 時間，數據的量很少，因此不需要將信號數位化，也不必依靠電腦來處理數據。所使用之震測儀價格便宜。在估計岩盤 (bedrock) 的深度或表層各層之速度及界限上，折射法不失為一簡易可行且經濟之測勘法。但是折射法的使用必須假定震波之波速隨深度而增大，原因是折射法中我們使用的是在地層界面以臨界角折射的波 (圖一)。這樣的折射波稱為頭波 (head wave)。



圖一 頭波。(a)以臨界角入射之P波以 V_2 之速度沿著界面之下傳播，界面之上的介質也被迫以 V_2 運動。(b)以臨界角折射之波前 (wavefront)，每一點皆為一新點波源。(c)折射後之波束寬 (beam width) 變化。(Telford et al., 1976)

另外折射法對深度超出 20 或 30 公尺的地層界面必須要使用相當大的能量為震源以造成所期望的頭波。在精度要求上折射法也有其致命傷，就是它無法測出地層界面之細微變化。而反射法可克服上述之困難，因為只要地層有不連續，就會有反射波能量傳回地表之接收器。再者對同深度之界面而言，反射波之振幅遠大於折射波。所以反射法可使用較小，或沒破壞性之震源達到折射法無法達到之深度。而最吸引人的就是反射法可提供詳細之地下構造變化，例如起伏不定的岩盤界面或小的凹陷構造等。

因為反射法有如此優越的功效，所以只要儀器設計能夠配合，則在探勘石油上已建立成功的整套反射技術皆可用到淺層震測上。早在五〇年代中期就有地球物理學家提倡利用反射法到淺層的工程測勘上，但是直到最近十年，淺層反射法才逐漸可行，這得歸功於近代電子儀器的進步，將數位化、信號增強以及濾波等功能加到舊式的折射震測儀上。如此一來，反射法的技巧才有可能應用到淺層的工程應用或地下水測勘等問題上。另外一點值得一提的是近年來價廉物美的個人電腦對淺層震測的發展也是功不可沒。但

是這裏所談的淺層或工程用震測儀較之石油探勘上所使用之震測儀仍是小巫見大巫，很多使用在探油上的複雜技術在淺層震測上是無法做到，但在方法原理上二者倒是類似的。由於淺層震測之蓬勃發展也是最近幾年的事，很多技術上的問題仍在摸索當中，尤其微電腦不斷改進，震測儀本身也一直在加強設計中，所以淺層震測的發展是應用地球物理的一個新方向，稱之為明日之星也不為過。

一、淺層震測的靈魂——鑑別率

淺層震測之所以能夠在地球物理探勘上獨樹一幟就是它有深層震測或傳統震測所做不到的淺層鑑別率，那麼那些因素會影響鑑別率呢？

I. 地表狀況

淺層震測依賴的就是高頻波能量的反射，而很不巧的，地球對高頻震波而言就像海綿吸水一般，很輕易地就可將高頻震波衰減掉，舉例而言，一般 0.1 Hz 到 2 Hz 間之地震波可傳播到地球各處，但是淺層震測的頻帶範圍約在 100 Hz 以上，如此的高頻波頂多傳個數百公尺即壽終正寢。在理論上來說，結構堅實的岩層較易傳送高頻波，而不幸的是淺層震測主要測勘的目標又都是地殼表層結構鬆散的風化層，因此選點的好壞往往可決定測勘工作的成敗。最適合做淺層震測的地點為土壤顆粒細且含飽和水的地層。在這種理想地區反射波的頻帶範圍可達到 300 或 500 Hz，深度可超過 30 公尺。以震波 P 波的速度在地表附近約一千五百公尺來算的話，波長約 3 到 5 公尺，如此短的波長其對表層地層之鑑別率可達到 1 公尺左右。反之若表層為粗礫石塊而又乾燥缺水的話，反射波的頻帶會降到 100 Hz 以下，如此鑑別率就只有前面的 $\frac{1}{3}$ 或 $\frac{1}{5}$ 而已了。

II. 高頻通過 (high-pass) 濾波功能

由震波接收器（一般叫 geophone）送入震測儀的信號強度範圍大約 10^{-1} Volt 到 10^{-6} Volt 之間，所以信號之動態區間（dynamic range）約是 10^5 或 100 分貝（註一）。時下一般市面上所售之工程用震測儀其類比 / 數位轉換器（A/D converters）大約是 8 到 10 個位元（bit）。但是以 100 分貝動態區間之信號而言，至少要 14 個位元才夠用（第一個位元記錄正、負號，其他的位元記錄振幅）。因此以如此狹窄之動態區間來記錄震波信號實際上就有困難。因為低頻信號之振幅往往遠大於高頻信號，而類比/

數位轉換器之 8 到 10 個位元只優先記錄代表性大的信號，所以淺層震測所要之高頻信號因為振幅小反而被忽略了。為了避免這項困擾必須在信號在被數位化之前就先讓它通過 high-pass 類比濾波器以平衡地層的 Low-pass 特性。目前 high-pass 類比濾波器大多都隨機附設在震測儀內，範圍可切除 30 Hz 到 500 Hz 之頻之間某一特定頻率以下之信號。如此一來可免除低頻信號佔用過多的記錄空間。另外一個釜底抽薪的辦法就是使用高頻接收器。以前所使用之接收器之共振頻率大約是 14 Hz 左右，目前 50 到 100 Hz 之接收器已相當普遍。將 high-pass 類比濾波器配上高頻接收器可有效地去除 100 Hz 以下之低頻信號。談到接收器時有一點值得在此強調，就是在探油時往往喜歡用多個接收器去共同接收一個頻道的信號，但在淺層震測上則最好用單一個接收器去接收單一頻道的信號，因為這是確保高頻信號品質的方法。探油時採用多個接收器去接收同一頻道信號目的是減弱表面波的干擾，但卻會使高頻信號模糊。原因是反射回來的波因相對於接收器的入射角多少有些許差異所造成。這方面可參照 Ruskey (1981) 或 Knapp and Steeples (1986) 等人的論文。另外各個接收器因所植入之地點不同，地層厚度變化或橫向之不均勻性皆會影響到各自接收到信號的相位，不同相位之信號疊加起來時，即使差異很小，也會影響到 100 Hz 以上高頻信號的品質。

III. 震 源

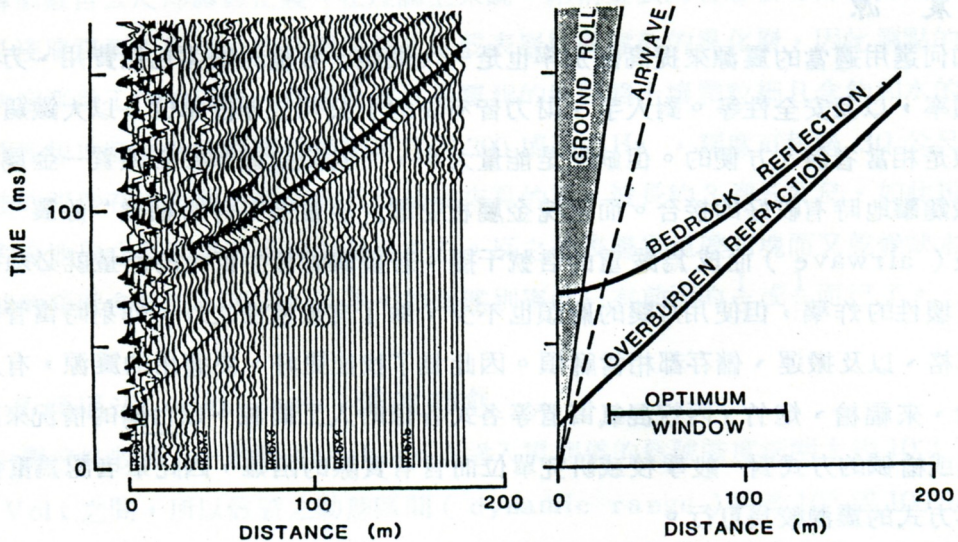
如何選用適當的震源來提高鑑別率也是一大問題，考量的因素包括費用、方便性、特性頻率，以及安全性等。對人手、財力皆有限的小公司或學校單位，以大鐵鎚敲地當作震源是相當省錢、方便的。但缺點是能量太小，而且鐵鎚敲擊點必須置一金屬板，以便使鐵鎚擊地時有較好的接合。而這塊金屬板受擊之後會有不停的細微“餘震”，造成空氣波 (airwave) 而成為嚴重的信號干擾。若要震源產生較大的能量就必須考慮使用具破壞性的炸藥，但使用炸藥的麻煩也不少，除了有破壞性之外，炸射時雷管等耗材、人員資格、以及搬運、儲存都相當麻煩。因此為了找出更好、更適用的震源，有人嘗試用步槍、來福槍、炮竹、丙烷混氧雷管等各式各樣的人工震源。以台灣的情況來說，使用炸藥或槍械的方式對一般學校或研究單位而言有實際的困難，因此筆者認為重鎚或重物掉落方式的震源較為可行。

淺層震測的開發研究，加拿大是發展最早的國家。在八〇年代初期加拿大地調所以當時新上市的數位化震測儀配上當時流行的 Apple II 個人電腦，開始從事反射法描繪地表風化層與岩盤的分界面，由於二者震波速度有很大的差異，因此相當成功。以今天

的裝備與技術而言，我們當然不會只滿足於找出風化層與岩盤的分界，我們希望能探出位於風化層當中的細微構造，這方面淺層震測也被證實是相當有效、經濟的方法。目前從事淺層震測較有成就的其他研究單位有美國堪薩斯州地調所及荷蘭的 Utrecht 大學。堪薩斯地調所將探油技術上的共深點炸射法(CDP)用到淺層震測上，但共深點炸射法在數據的儲存和運算上需要較大的電腦才夠用，而且資料處理費頗高，因此如何以個人小電腦來處理CDP數據是一個關鍵(Somanas et al., 1987)。荷蘭方面的研究也是著重在引用CDP法，他們能夠做到探出淺到5公尺深處，鑑別率0.5公尺的構造，但這是在平坦的潮汐灘上測勘，佔了先天上的便宜。因為潮汐灘之沉積顆粒皆含飽和水，也沒有會衰減震減震波的地層存在，因此很容易獲得高頻波反射的能量，至於在其他地層是否可達到如此優良的成果就很難說了。另外CDP法的費用並不經濟，所以如何改進CDP法使之成為有效且經濟的淺層震測法是目前許多探勘單位努力的方向。以下將介紹幾種較簡單可行的方法。

二、最適窗(Optimum Window)探勘法

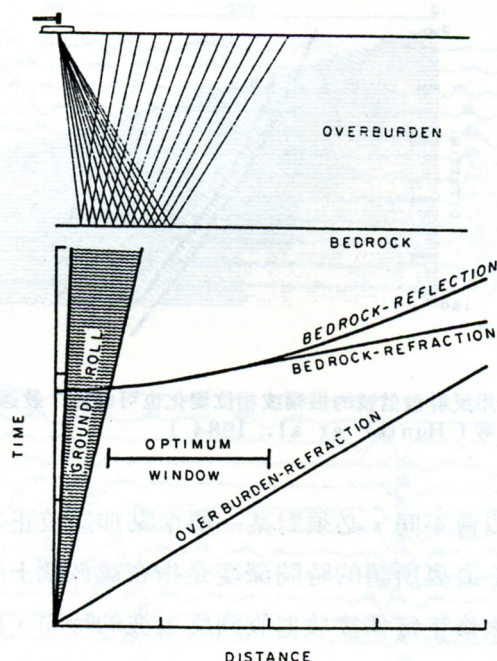
所謂“最適窗”指的是一個最佳的震源與接收器的距離，以達到最少的雜訊。圖二



圖二 淺層反射震波圖。習慣上將波峯塗黑以便連接反射層。右圖為將左圖中之各個可辨識之信號分區描述。在有地表震動波及空氣波干擾處之地層反射或折射信號就不清楚。請注意“最適窗”的位置(Hunter et al., 1988)

是在加拿大Manitoba省一個測點所取得之震波圖，該點之構造為白堊紀（距今約六千三百萬年至一億三千五百萬年之間）的頁岩（一種黏土顆粒所形成的沉積岩）為岩盤，其上為厚約 45 公尺未固結的風化層。當震源和接收器分開很小時，基盤的反射幾乎看不到。影響岩盤反射的雜訊有地表震動波（ground roll）與伴隨地表震動而產生之空氣波（air wave）。

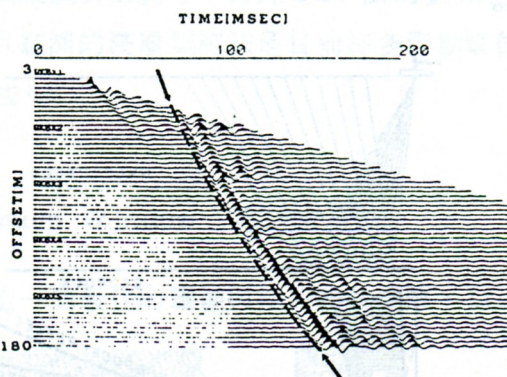
這兩種雜訊中，表面波較好處理，因為表面波為低頻波，只要用 high-pass 濾波器或高頻接收器就可消除，但空氣波的頻域寬廣，很難用濾波的方法消除之。而“最適窗”的取法既然目的是在避開接收器收到雜訊，所以“窗”的靠震源之邊要設在開始與“ground roll”分開的地方，也就是最靠近震源的接收器要放在“ground roll”影響區之外（圖三）。



圖三 以模型顯示“最適窗”的取法。接收器陣列置於地表震動區與基盤反射、折射信號開始互相干擾區之間。圖中 Optimum Window 就是放置接收器陣列的最佳區間（Hunter et al., 1984）

至於“最適窗”的另外一邊要放在何處呢？一般是放在開始有其他信號影響到岩盤反射信號的地方。由圖三可看出，“最適窗”最遠一邊是放在岩盤的折射和反射信號開始分開的地方，往往因為風化層內的其他較淺處的反射事件也會造成干擾而使“最適窗”的

寬度改變。當然此處所謂的干擾是指這些較淺處的反射事件碰巧與岩盤的反射或我們所欲探得之目標反射重合在一起時才會造成干擾，這與反射波之頻率有很大的關係。另外一個設定“最適窗”遠邊的方法是利用反射波信號的振幅變化或相位變化來設定。圖四所示之震波圖箭頭所指的斷線區可看出岩盤反射信號的振幅逐漸加大，相位也逐漸改變。這種現象發生在廣角反射（即接收器遠離震源）時若風化層與岩盤之震波速度差別不大的情況。但是一般只要震源和接收器的距離不超過岩盤深度的話就沒有這種困擾。“最適窗”的好處是野外工作較省時省力（相對於CDP炸射而言），但是不可諱言的，其缺點也不少。主要是在數據處理上要做垂直移出修正（normal moveout correction）簡稱NMO修正。NMO修正是因為每個接收器距離炸點遠近不同對同一深度的

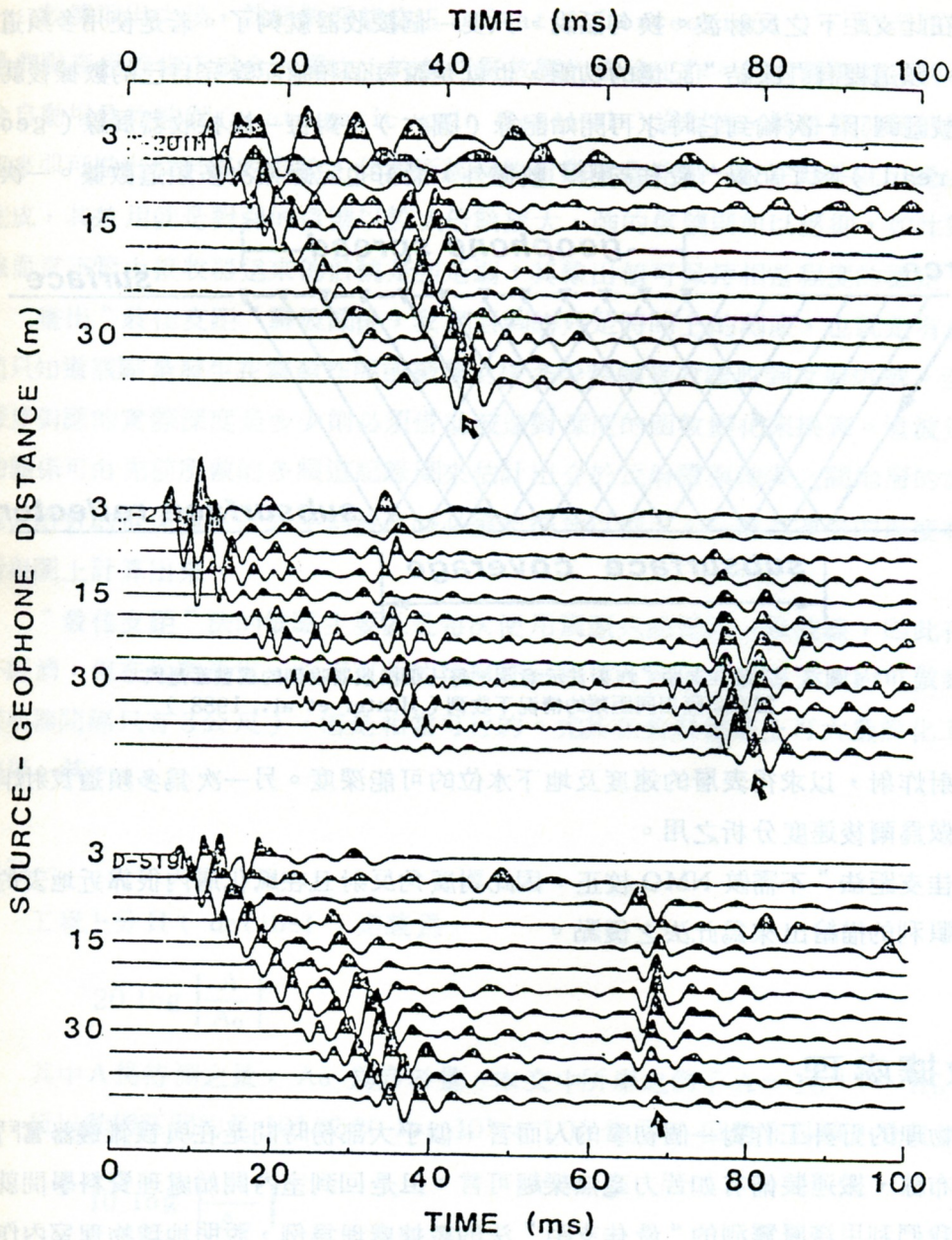


圖四 利用反射波信號的振幅或相位變化也可做為“最適窗”設定的參考（Hunter et al., 1984）

反射體其反射波到達時間會不同，必須對某一標準點加以校正之後才是真正在該接收器之下的反射體時間深度（這裏所謂的時間深度是指在震波圖上的時間軸即代表深度）。若以炸點位置為參考點來修正每個接收器收到反射波的時間，就叫做NMO修正。而“最適窗”的數據經過NMO修正後常常會使反射層連接不起來。

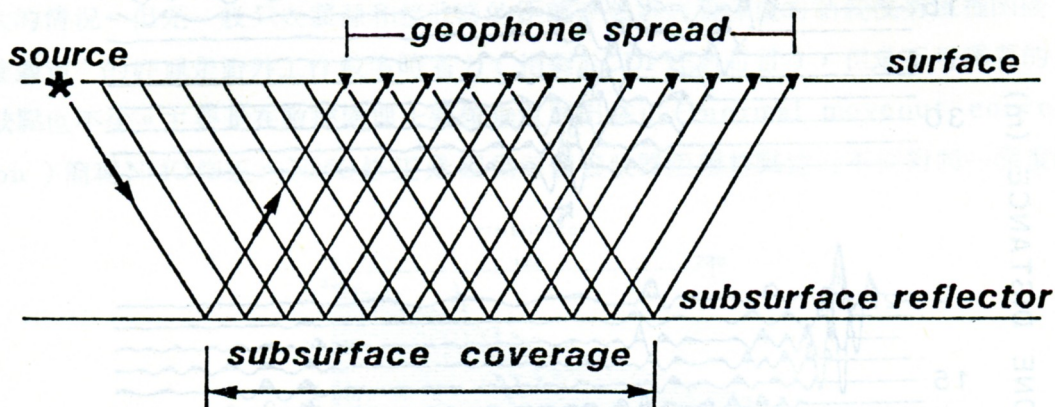
三、最適支距法（Optimum offset）

此法主要是用來克服“最適窗”法的缺點。雖然在野外施測上較“最適窗”法麻煩，但在資料處理上則省事得多。在施測之前先得在測點週圍試炸一番，找出“最適窗”的範圍。由此定出震源與接收器之最佳距離以保證目標的反射波不受到任何干擾（圖五）。



圖五 圖中為一連串試炸的記錄，箭頭指處為基盤反射波。“最佳支距”可選在 15 公尺處 (Pullan and Hunter, 1988)

然後整條測線由始至終都保持同樣的支距（即震源與第一個接收器的距離）。每個接收器只記錄在此支距下之反射波。換句話說，只要一個接收器就夠了。若是使用多頻道震測儀則每一頻道要有“凍結”記憶的功能，也就是說每個頻道記錄完自己的數據後就停止接受信號直到下一次輪到它時才再開始記錄（圖六）。對每一條接收器展線（geophone spread）除了記錄“最佳支距”數據外，最好也記錄兩次多頻道數據。一次為



圖六 “最佳支距”炸射法示意圖，每一個接收器收到的信號都是與震源間隔相同距離的情況下收到（Hunter et al., 1988）

普通的折射炸射，以求得表層的速度及地下水位的可能深度。另一次為多頻道反射炸射，這些都是做為爾後速度分析之用。

“最佳支距法”不需做 NMO 校正，因此對廣角反射且在風化層內很靠近地表的反射體皆能順利的描繪出來為此法之優點。

四、數據處理

地球物理的野外工作對一個初學的人而言，似乎大部份時間是在與複雜儀器奮鬥，在豔陽下布線、搬運裝備有如苦力毫無樂趣可言。但是回到室內開始處理資料學問就大了。在此我們利用淺層震測的“最佳支距”法的數據處理為例，說明地球物理室內作業的情形。

野外的數據有時都是暫存在震測儀中，新的儀器如 EG&E-2401 震測儀系列已可將數據直接在野外記錄在磁碟片或磁帶上。若你的震測儀沒有此項裝備則回到實驗室後第一件事情就是先將數據傳輸到個人電腦上，再轉錄到磁片。這些都有商用的轉換程式

供你選購。

數據取出之後，就要做靜態修正 (Static Corrections)，所謂靜態修正指的是測點高程差修正或含水層之上的低速層效應的去除工作。經過靜態修正的波線記錄配合自動增益的控制 (automatic gain Control) 過程後，將每條波線的反射點連接起來即可描出反射體的形貌。此處所談到的自動增益控制一般在野外就已經由硬體線路完成，其效用就是對弱的信號以較大倍數放大，強的信號則加以壓抑，如此對同一條波線而言不管由接收器送來的信號是強是弱，其輸出值可保持相當程度的穩定。

畫出“最佳支距”震波圖後，我們看到的只是時間上的刻度，也就是有反射的點我們只知道該點是發生在震源炸開或敲擊之後多少秒鐘接收器收到反射信號。至於該時間深度對應的實際深度是多少則必須借助波速對深度的函數變化來換算。這波速——深度的關係可由先前所做的多頻道記錄圖來估計出介於反射體與地表之間地層的波速。當然地表附近的低速層在計算平均波速時必須記得加以校正。一般低速層的厚度和波速可由折射圖上計算出來。

“最佳支距”法的缺點主要就是每次使用震源只能記錄一條波線，因此在時間上頗不經濟，但在地勢平坦，有車可用的情形下，以三、四個人力每天大約可做到500公尺(接收器間隔只有3公尺)，這是相當可行的。尤其在資料處理上可大量簡化工作量更是值得一試。

附註一

工程上分貝 (decibel) 定義為

$$20 \log \left| \frac{A}{A_0} \right|$$

其中A為待測之量， A_0 為參考量。本文中所舉之例子 $A = 10^{-1} V$ ， $A_0 = 10^{-6} V$ 所以動態區間約是 10^5 或 $20 \log 10^5 = 100$ 分貝。但是在科學上分貝的定義為

$$10 \log \left| \frac{A}{A_0} \right|$$

如此的話就只有50分貝了。總之分貝只是一個相對的比值，不必太拘泥於定義。工程上用20為係數乃是方便於能量的比較，因為能量與振幅的平方有正比關係，所以若以能量來取分貝值時

$$10 \log \left| \frac{E}{E_0} \right| = 10 \log \left| \frac{A}{A_0} \right|^2 = 20 \log \left| \frac{A}{A_0} \right|$$

此為工程上定義分貝的由來，並未違反原先科學上的定義。

參考資料

1. Hunter, J.A., Pullan, S.E., Burns, R.A., Gagné, R.M., and Good, R.L., 1988, Applications of a shallow seismic reflection method to ground water and engineering Studies, Geometrics Shore Course on Shallow Seismic Reflection for Engineering and Geotechnical Studies, June 7th - 10th, 1988, Sunnyvale, California, U.S.A.
2. Knapp, R.W. and Steeples, D.W., 1986, High-resolution Common depth-point seismic reflection profiling: Instrumentation, Geophysics, V.51, P.276-282.
3. Pullan, S.E. and Hunter, J.A., 1988, Delineation of buried bedrock valleys using the "Optimum offset" shallow seismic reflection technique, Geometrics Short Course on Shallow Seismic Reflection for Engineering and Geotechnical Studies, June 7th - 10th, 1988, Sunnyvale, California, U.S.A.
4. Ruskey, F., 1981, High-resolution seismic methods for hard-rock mining. in Premining investigations for hardrock mines. Proceedings: Bureau of Mines Technology Transfer Seminar, Sept. 25, 1981, Denver, Colorado, U.S.A.
5. Somanas, C.D., Bennet, B.C., and Chung, Y.-J., 1987, In-field seismic CDP Processing with a microcomputer, Geophysics: The Leading Edge of Exploration, V.6, NO.7, P.24-27.
6. Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., and Keys, D.A., 1976, Applied Geophysics, Cambridge University Press, 860 PP.