

淺層地底構造探勘： 用「光的折射」原理透視地下世界

陳達毅

臺北市立大學地球環境暨生物資源學系兼任助理教授

提到我們腳下土地的構造，多數人腦中浮現的往往是交疊的岩石與泥土。然而，在未開挖地表前，我們很難得知地底究竟埋藏著堅硬岩盤、巨大孔洞、珍貴礦脈，或是沉睡千年的古文明遺跡。若想在破壞地表的前提下精準「透視」地底，地震波探測便是一項兼具經濟效益與非破壞性的科學利器。這種探測方法的核心，源自我們熟悉的物理現象：就像筷子斜插入水杯時，會因光線在不同介質間傳遞時的速度差異而產生「折射」，看起來在水面處彎折了一樣。同樣地，地震波在穿透地層時，行為也與光線相似，會在不同性質的岩層界面產生複雜的折射與反射。在實務操作上，科學家透過人工方式製造震源（如重錘敲擊或引爆炸藥）將地震波送入地底，再利用地面上的地震儀陣列捕捉來自地下的訊號，藉此分析地震波在不同地層間的傳遞速度。透過這項技術，我們得以在不破壞地表的情況下，精確掌握地下數公尺深處的地層資訊。

地殼內部通常呈現明顯的層狀結構，各層由密度與硬度差異顯著的岩石或土壤所組成。當我們在地面以重錘敲擊鐵板時，所釋放的能量便轉化為地震波，向地底深處傳播。在同一岩層中，地震波會以穩定的速度沿直線前進。一旦遇到岩層性質明顯改變的界面時，就像光線從空氣斜射入水面一樣，震波會發生折射而改變傳播路徑，繼續向更深處前進。同時，在介面處也會產生波的「分流」：部分能量穿透界面繼續向下傳遞，其餘則自界面返回地表。探勘人員預先在地表沿著一條直線布設地震儀陣列，捕捉這些從地底返回的微弱震波，並精確記錄各觀測點的接收時刻。隨後，結合每個地震儀與震源（重錘敲擊鐵板的位置）之間的距離，與震波自產生（敲擊鐵板）到地震儀接收的「旅行時間」，繪製成後續將詳細介紹的「走時曲線圖」。透過分析這張關係圖，我們便能反推地底各層的震波速度與岩層厚度，如同為地殼進行了一次精密的「超音波檢查」。

斯乃耳定律與「臨界折射波」：地底探勘的物理鑰匙

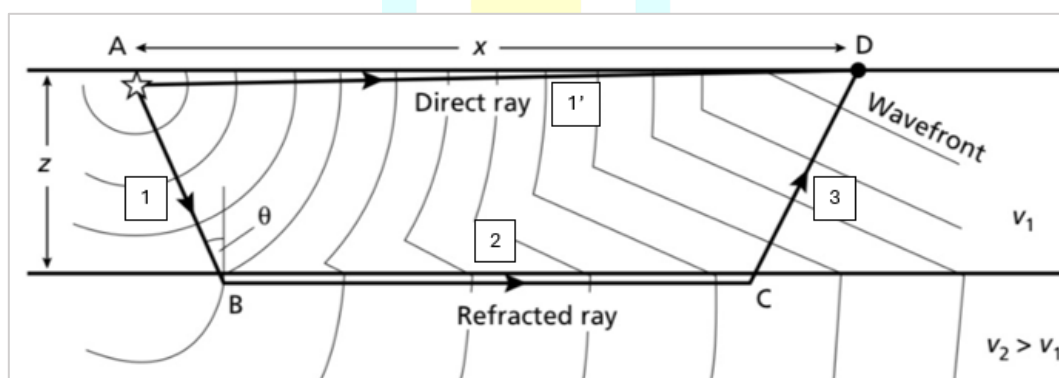
既然地震波的折射行為與光波如此相似，自然也遵守經典的斯乃爾定律（Snell's law）(Halliday et al., 1997, p. 856)。假設地下有上、下兩層地層，上層波速 V_1 ，下層波速 V_2 ，且由於深層岩石長期承受較大的壓力，因此質地更堅硬，通常滿足 $V_2 > V_1$ 的條件。當震波入射到上、下層的界面時，因下層速度較快，折射角會大於入射角（一如光線從水中射入空氣）。斯乃爾定律用數學語言表達就是：入射角的正弦值與折射角

的正弦值之比，恰好等於兩層介質波速之比：

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{V_1}{V_2}$$

如圖 1 所示，隨著入射角逐漸增大，折射角也隨之增加。當折射角恰好達到 90 度時，此時的入射角即稱為「臨界角」。在這種特殊情況下，折射波不再穿透進入下層，而是貼著兩層介面高速滑行，形成所謂的「臨界折射波」。根據惠更斯原理 (Huygens' principle) (Halliday et al., 1997, p. 902)，在介面上高速滑行的波前，每一點都會化為次級波源，不斷向地表輻射能量。這些能量以相同於入射波臨界角的角度重新折射回地面，最終被地震儀陣列捕捉。這條由「下傳、沿介面傳遞、再折返上傳」所構成的「三段式」路徑，正是折射震測法運作的物理基礎。只要能精確記錄這些折射波抵達地面的時間，我們就握有了透視地底構造的鑰匙。

圖 1
地震波折射探測示意圖



註：

本圖展示了震波在地層中的傳播情形。圖中震源 (星號) 位於 A 點，地震儀位於 D 點。震波傳播主要分為兩種路徑：一是僅在上層介質 (波速 V_1) 中直線傳播的「直達波」(路徑 A-D)；二是當下層波速大於上層 ($V_2 > V_1$) 時產生的「臨界折射波」。臨界折射波的行進可分為三段：第 1 段 (路徑 A-B) 以臨界角 θ_c 向下入射至交界面，第 2 段 (路徑 B-C) 沿著交界面以較快的速度 V_2 高速滑行，最後第 3 段 (路徑 C-D) 再向上折射回地表。這條利用深層高速介質傳遞的路徑，正是折射震測法用來推算地層波速與深度的物理基礎。

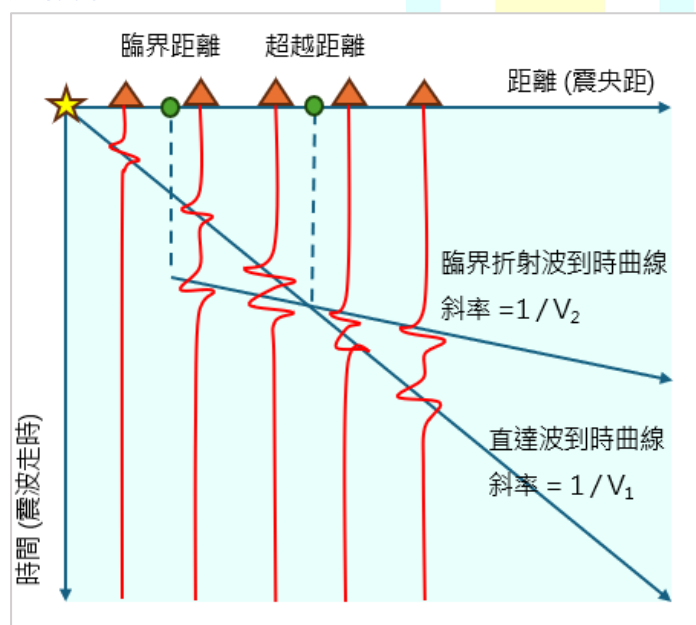
資料來源：臺北市立大學震測實驗報告

什麼是「走時曲線圖」？：地底探勘最核心的分析工具

在折射震測實務中，我們於地面沿著一條直線等間距布設地震儀陣列，並在測線一端以重鎚擊地激發震波。隨後，各觀測點將依序記錄震波抵達的時刻。離震源愈近，接收訊號愈早；反之則愈遲。然而，這項探測技術真正的價值，並不在於單純的接收先後，而是隱藏在「距離」與「時間」之間精確的數學連動關係中。

如圖 2 所示，「走時曲線圖」(travel-time curve) 就是把每個地震儀收集到的地震波形資料，依其與震源的距離在坐標軸上的展開。橫軸 (X 軸) 代表地震儀與震源 (重鎚敲擊鐵板的位置) 間的水平距離，縱軸 (Y 軸) 則標記震波從激發瞬間 (敲擊鐵板) 到抵達地震儀所耗費的時間 (稱為「走時」)。將不同地震儀所接收到的震波訊號連線後，便構成了走時曲線。如果地下只有一層均質的介質，走時曲線會是一條從原點出發的直線。距離愈遠、時間愈久，斜率就是波速的倒數 ($1/V_1$)。然而，真正讓這張圖展現威力的關鍵，在於當地底存在第二層波速更快的介質時，圖面上會轉折並延伸出第二條直線。

圖 2
走時曲線圖



註：

本圖展示了折射地震法的基本原理，其中橫軸代表震央距離，縱軸則為震波到達的時間。由原點出發且斜率較陡的直線為在表層傳播的「直達波」(斜率為 $1/V_1$)，而斜率較平緩、於臨界距離後才出現的則是經深層高速界面傳遞的「臨界折射波」(斜率為 $1/V_2$)。兩條線的交點稱為「超越距離」，在此距離之後，由於下層波速較快，折射波會後來居上，比直達波更早抵達測站。圖中三角形代表由近及遠佈設的地震儀，其下方波線則為地震儀實際記錄到的震波訊號，清晰呈現了直達波與折射波隨距離變化的到時差異。

資料來源：作者繪製

圖 2 中，第一條直線代表「直達波」的走時。直達波只在地表淺層（第一層介質）中直線傳播，其走時等於傳播距離除以第一層波速 (V_1)。在走時曲線圖上，直達波表現為一條通過原點、斜率為 $1/V_1$ 的直線。這意味著距離每增加一公尺，走時便固定增加 $1/V_1$ 秒。該直線自震源起始點（距離與走時皆為零）向右無限延伸，說明無論觀測距離多遠，地震儀理論上都能接收到這股沿地表傳遞的直接能量。

第二條直線代表「臨界折射波」的走時。折射波遵循「三段式」路徑：首先以臨界角下傳至交界面，接著沿界面以 V_2 高速滑行、最後再以臨界角折射回地表。由於中間路段行經的是「高速公路」($V_2 > V_1$)，該直線的斜率為 $1/V_2$ ，顯得比直達波更為平緩。不同於直達波，折射波的走時線並不通過原點，而且在 X 軸上存在一個最小觀測距離，稱為「臨界距離」。在臨界距離之內的地震儀，於幾何上無法接收到折射波，這是因為入射角尚未達到臨界角的門檻，波無法沿界面滑行。

走時曲線圖上最引人入勝的現象，莫過於兩條直線的交會點，此距離稱為「超越距離」(crossover distance)。在此距離之前，直達波因路徑較短而率先抵達地震儀。然而，一旦超過這個關鍵距離，折射波雖然「繞了遠路」，卻憑藉在深層高速介質中飛馳的優勢後來居上，反而比直達波更早到達地表！

這就像兩個人從同一起點出發的競賽：一個選擇直行的近路（直達波），但全程行經限速較低的一般道路（速度 V_1 ），另一個則先經過一段一般道路（速度 V_1 ），再切換到速度較快的高速公路（速度 V_2 ）、最後再折返一般道路（速度 V_1 ）抵達終點。在短程比賽中，走一般道路者勝出；但隨著目的地愈來愈遠，有走高速公路的人最終會追回先前的時間落後，並一舉超越。

走時曲線圖之所以被稱為折射震測「最核心的分析工具」，是因為一旦圖表成形，地下構造的三個關鍵參數就能全部算出：第一層波速 V_1 （直達波斜率的倒數）、第二層波速 V_2 （臨界折射波斜率的倒數），以及第一層地層的厚度 h （利用超越距離搭配 V_1 、 V_2 代入公式即可）。換句話說，一張走時曲線圖，便是地底構造被攤開在紙上的密碼本。

透視地下構造：折射地震法與走時曲線的幾何秘密

為了推導直達波與臨界折射波的走時公式(Lillie, 1999, p. 62)，我們首先假設一個最基礎的「雙層水平地層模型」：表層厚度為 h ，震波傳播速度為 V_1 ；下層為無限深的高速地層，震波傳播速度為 V_2 。且滿足發生臨界折射的必要條件： $V_2 > V_1$ 。

一、直達波 (direct wave) 走時公式

直達波是從震源發出後，直接沿著地表（即第一層介質）傳播至地震儀的震波。由於其傳播路徑為直線，且完全在速度為 V_1 的表層中行進，因此當震波到達距離震源為 x 的測站時，其走時 T_1 的公式非常單純：

$$T_1 = \frac{x}{V_1}$$

在走時曲線圖上，這是一條通過原點的直線，斜率為 $1/V_1$ 。

二、臨界折射波 (head wave) 走時推導

臨界折射波的傳播路徑分為三段：向下穿透表層、沿著界面底層高速滑行、向上折射回地表。臨界角 θ_c ：根據斯乃耳定律，當折射角為 90 度時，入射的角度即稱為臨界角，公式為：

$$\sin(\theta_c) = \frac{V_1}{V_2}$$

向下與向上路徑：震波在表層向下及向上的路徑長度皆為（在這些路徑上皆以 V_1 的速度傳播）

$$\frac{h}{\cos(\theta_c)}$$

界面滑行路徑：震波在界面上以 V_2 的速度傳播，其滑行的水平距離為總距離 x 扣除兩端在表層水平投影的距離，即：

$$x - 2h \tan(\theta_c)$$

將這三段走時相加，可得到臨界折射波的總走時 T_2 ：（圖 1 中的第 1 段走時+第 2 段走時+第 3 段走時）

$$T_2 = \frac{h}{V_1 \cos(\theta_c)} + \frac{x - 2h \tan(\theta_c)}{V_2} + \frac{h}{V_1 \cos(\theta_c)}$$

經由整理可得：

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2h\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2}$$

三、由於在超越距離 (Xc) 時直達波與臨界折射波的走時相同，經公式推導可計算地層厚度 (h)

$$T_1 = T_2$$

可得：

$$\frac{x}{V_1} = \frac{x}{V_2} + \frac{2h\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1V_2}$$

經由整理可得：

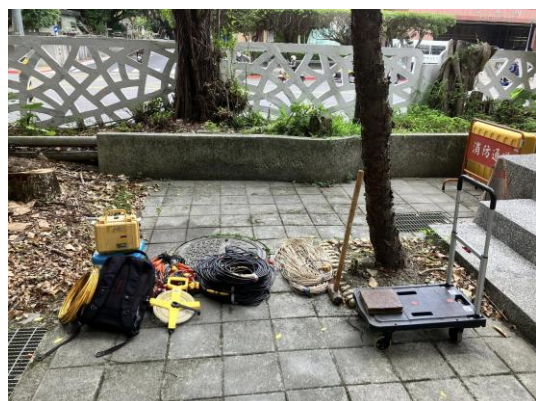
$$h = \frac{x_c\sqrt{V_2 - V_1}}{2\sqrt{V_2 + V_1}}$$

地質學家在完成野外實驗後，可以藉由走時曲線圖的交點得知超越距離 (Xc)，以及 V1 與 V2 的速度 (從兩條直線的斜率得知)，再透過這個最終公式，就能精準計算出地下表層地層的厚度 (h)。

從教室走向實驗場：臺北市立大學的實地探勘

2025 年 9 月 24 日，於臺北市立大學圖書館後方進行了一場完整的野外折射震測實驗 (圖 3 為實驗所使用之相關儀器與設備)。首先進行場地評估與測線規劃，在地勢平坦區域以皮尺布設全長 48 公尺的測線，每隔 2 公尺精確設置一個觀測點，共計 24 處觀測點，詳見圖 4。同時，於測線兩端及中央位置預先規劃「震源點」(即重鎚敲擊鐵板的位置)，以確保折射波能從多個方向完整覆蓋地下結構。接著進行地震儀佈設，此步驟為確保資料品質的關鍵。學生們須將 24 支地震儀垂直且穩固地植入土壤中，若遇石塊阻礙則適度調整位置，以確保地震儀與地面之間具備良好的「耦合」效果。正式施測時 (如圖 5 所示)，負責製造人工震源的學生需敏銳觀察周遭環境，避開鄰近馬路的车流雜訊，在相對安靜的時機精準敲擊鐵板，以獲得清晰的震動訊號。為提升訊號品質，各震源點皆進行多次重複敲擊，並透過電腦進行訊號的「疊加」(stacking) 處理，能有效抑制隨機雜訊並強化來自地下的反射與折射訊號。隨後，再依序移動震源位置完成所有測點之資料採集，待確認各測站波形品質清晰、走時資料完整後，即進行儀器回收與清點，完成野外震測作業。

圖 3
野外折射震測器材總覽



註：
器材含黃色資料擷取主機、皮尺、橘色主電纜線、白色震源觸發線、鐵鎚與鐵板（右側手推車），以及各類連接電纜。
攝於臺北市立大學實驗現場。

圖 4
學生沿約 48 公尺測線



註：
每隔 2 公尺以皮尺定位後插入一支地震儀，並沿地面鋪設主電纜，逐步完成 24 通道的量測陣列布設。
攝於臺北市立大學圖書館後方。

圖 5
學生舉起大鐵鎚由肩膀高度向下敲擊鐵板，產生人工地震波



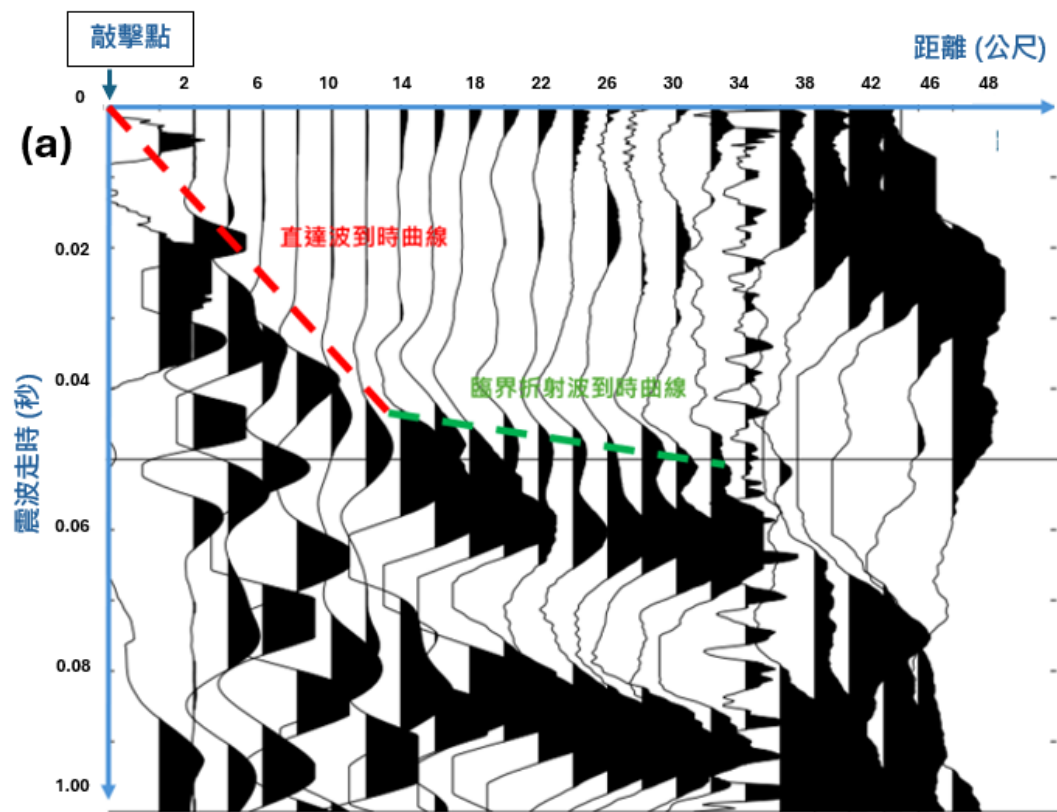
註：
被敲擊的鐵板旁邊有一個觸發感測器，當敲擊時資料擷取主機會同步記錄觸發時間，並立即接收 24 個通道的波形。
攝於臺北市立大學實驗現場。

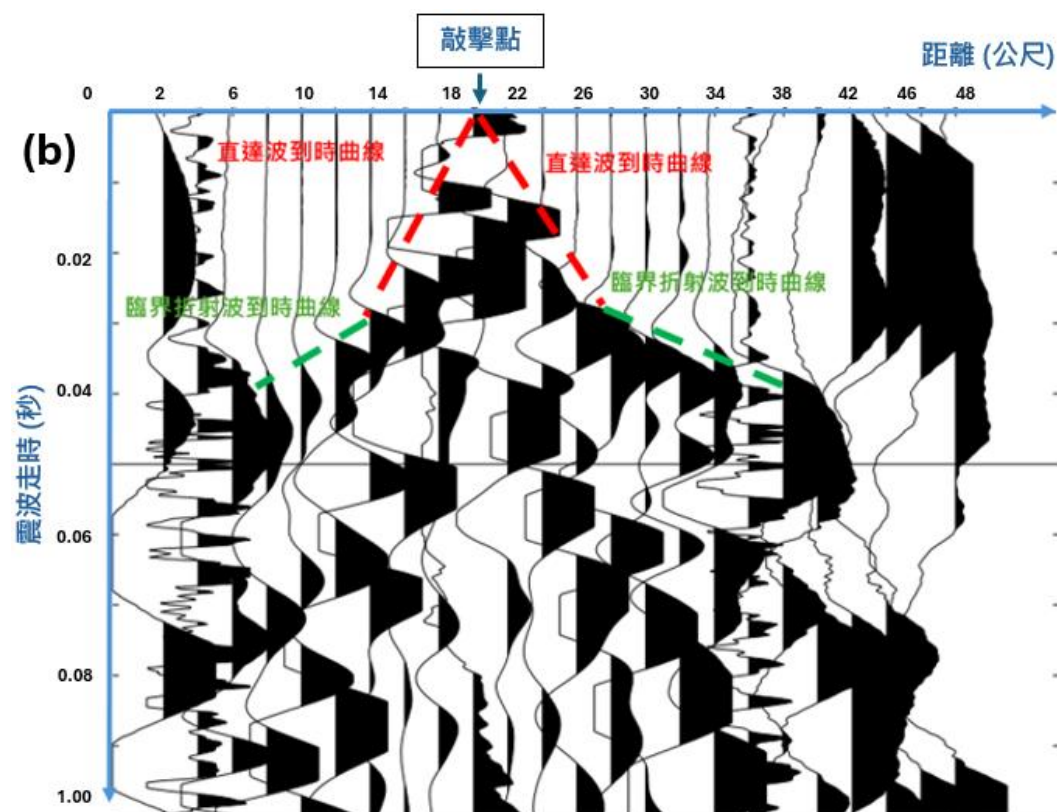
校園地下三公尺的秘密

將野外收集到的波形資料帶回後，首先需逐一判讀每條紀錄上的初動時間，並以距離為橫軸、走時為縱軸，繪製出關鍵的「走時曲線圖」。以圖 6 (a)與(b)為例，透過直線擬合，由斜率的倒數即可精確換算出波速：圖中的紅色擬合線代表直達波 (V_1 約為 500 m/s)、綠色線則代表臨界折射波 (V_2 約為 1000 m/s)。綜合多組數據後，實驗呈現出

清晰的地層圖像：第一層（表土）波速 V_1 約落在 300–480 m/s 之間，具備鬆散表土或人工回填土的特徵，與圖書館後方林地的地貌觀測完全吻合。第二層波速 V_2 則由 600 m/s 延伸至超過 1700 m/s，揭示了地下岩性顯著的非均質性：較低速區段可能為壓密黏土或風化軟岩；而 1500 m/s 以上較高速區段則強烈暗示震波觸及了飽和含水層（水中聲速約 1500 m/s）或質地較完整的岩盤介面。再經公式推算，立即可以得知地層厚度約 2.5 至 4.5 公尺。換言之，在不挖開一鏟土的前提下，學生們僅憑一把鐵鎚及一排地震儀所獲得的走時曲線圖，便成功「看見」了腳底下約三公尺處一個物理性質劇變的地層交界面。

圖 6
折射地震法震波紀錄剖面圖





註：

1. 本圖展示了兩種不同的布線施測方式：圖 (a) 為震源 (標示 0 的敲擊點) 位於測線端點的單邊施測，圖 (b) 則是震源位於測線中段的中央施測。圖中橫軸代表震央距離，呈現 24 條接收波線的空間排列；縱軸為震波走時。在複雜的波紋訊號中，紅色虛線描繪出在表層傳播、斜率較陡的「直達波到時曲線」，而綠色虛線則標示出經深部界面傳遞、斜率較平緩且在遠距離處領先到達的「臨界折射波到時曲線」。
2. 資料來源：臺北市立大學實驗報告。

折射震測實驗跳脫了課堂筆記與純粹計算的框架，讓學生們親身參與「從地面讀取地底資訊」的完整過程。在揮汗實作的現場，學生們也分享了實驗過程中的心得：「震測實驗比我想像中有趣好多！尤其是親自拿起鐵鎚後的那份悸動，更加深了我對地震學的興趣。結果發現鐵鎚真的超級重，但幸好還是有成功敲下去。」、「最印象深刻的是電腦立刻跑出波形的那一刻，波形一層一層疊加，慢慢可以看見完整的折點，非常神奇，透過這張圖我們就可以判斷地下的結構！」

這就是地震波折射探勘的魅力所在，整個方法的精髓來自於一張走時曲線圖裡：兩條斜率不同的直線交織，便能解析出地層波速與厚度的全部資訊。臺北市立大學的這場實驗，讓課本上的斯乃爾定律從紙面躍入泥土，透過理論與雙手的結合，產出了真實可參考的地質剖面。而這一切科學旅程最迷人的起點，就是那句你我都學過的「光從一種介質進入另一種介質時，會改變行進的方向。」

參考文獻

- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (1997). *Fundamentals of physics* (5th ed.). Wiley.
- Lillie, R. J. (1999). *Whole earth geophysics: An introductory textbook for geologists and geophysicists*. Prentice Hall.

