

異常震波走時與振幅之分析(III)

Anomalous travel time and amplitude for seismic waves (III)

主管單位：交通部中央氣象局

鍾仁光¹ 何美儀² 林金泉²

1. 健行科技大學通識教育中心

2. 中央氣象局地震測報中心

摘 要

本計畫主要目的是分析 CWBSN 地震資料庫中 1993~2011 年之 P、S 走時殘值。結果顯示，TWG、EAS、ECL 以及 SSD 等測站觀測到之走時殘值呈現明顯的近乎南北走向高速度傳遞的現象，而 TTN 站之結果卻顯示由東北、東方、東南方而來的震波走時相對較為快速，均與地體構造之因素有關。本計畫另提出一種新的判讀關係，即(Rs-Rp) vs. Rs。利用此關係圖之型態除了可推測測站地層特性之外，最重要的功用是可以評估整體地震定位的品質與穩定度，並可檢視波相檢拾之難易度以及正確性。

關鍵詞：走時殘值、地震定位

Abstract

The purpose of this study is to analyze the travel time residuals for P- and S-phases picked from data recorded by the CWBSN during the period of 1993~2011. The results show the propagation velocities of seismic body waves are higher along the NS-direction than the other direction, based on the observations at the stations TWG, EAS, ECL, and SSD. On the other hand, the faster waves were almost coming from the eastern region of Taitung (station TTN). These are definitely related to the tectonic structures of Taiwan. A new diagram of Rs-Rp vs. Rs was proposed in this study for taking an easy way to evaluate the quality of earthquake location in routine operation. Moreover, this diagram can be used to find the site conditions and the subsurface structure below the recording station.

Keywords: travel time residual, earthquake location

一、前言

中央氣象局地震消息基於快速發布的目的，相關地震參數必須仰賴電腦自動化判讀與計算，包括：P 波及 S 波的到達時間之自動檢拾 (*e.g.* Bose *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009)、P 波或 S 波振幅之自動量測 (*e.g.* Wu and Zhao, 2006)。有了 S-P 時間差，震源位置便可以決定出來，加上 S 波振幅的檢拾，進而推算出芮氏規模。

然而，台灣地體構造複雜，地區性地震之震波傳遞容易受到側向不均勻構造之影響而產生複雜的行為以及特定的現象，此類觀測資料對於地震觀測工作者而言可視為異常震波，亦即與理論預測值有明顯差異者，故有必要釐清其成因，而做出正確的判讀。因此，P、S 波到時及 S 波振幅在定位過程是要相當謹慎挑選的，因為在側向構造有明顯變化的區域、或者垂直方向存在強烈反射層面時、或波傳速度有明顯變化的情況下，波形即產生相當程度不同的變化，易造成辨識困難甚至誤判的現象。本年度計畫延續這個目標，針對西南外海地震之震波傳遞進行類似的分析，同時對於南部數個 CWBSN 測站之觀測資料 (P 波、S 波走時殘值) 進行分析，以歸納成因。

二、觀測資料與分析結果

(a) 西南外海與宜蘭外海地震分析

為分析走時隨距離之變化，本計畫分析的地震資料為測站密度較高的 TSMIP 強震波形紀錄，經搜尋西南外海地震後發現，規模 M_L 在 4.5 以上且至少觸發 10 個強震測站者，震源深度均分布於 40~50 公里之間，其震央分布如圖 1 所示。中央氣象局地震定位程序使用的地層模型原則上以一個 16 層一維速度模型 (NVEL) 為主，做為最適合之台灣地區平均地殼模型。在實務上，此模型所計算之理論 P 波與 S 波到時可提供為檢拾之提示值，減少失誤。經仔細挑選高屏地區強震紀錄之 P 波、S 波到時，一方面可發現 S 波非常容易辨識 (一般的深震源所具有的特性)，也未發現有其他特殊波相，此點有別於龜山島附近淺層地震之波形特徵；另一方面，比較其 S-P 走時差與 CWB 定位地殼模型之理論值發現，對絕大部分觀測資料而言，二者之差距甚小，代表定位品質相當可靠且穩定。14 個地震中只有一個地震 (July 29, 2009) 之平均觀測值比理論值多 1 秒以上 (圖 2)，建議對此地震重新定位，以釐清其成因。

相較於西南外海地震，宜蘭外海的深震源地震的深度更深，經常可達 100 公里左右。為了仍能清楚辨識波相到時，在此僅挑選震源深度 60~100 公里 (平均為 70 公里) 間的 10 個地震之強震波形資料進行波相檢拾，同樣與定位地殼模型之理論值比較，結果顯示，所有的 S-P 走時差仍然與理論值相當接近，誤差幾乎都在 1 秒以內。綜合以上結果，震源深度由 40 公里至 100 公里深之範圍，不論是東北部或西南部的觀測資料與波相檢拾，走時誤差卻能保持在很短時間內，由此可見，常用的速度模型 (NVEL) 確實可以

代表台灣地區整體之平均地殼速度構造，除了極淺層（大約最上部 1~2 公里厚）的部分，主要原因在於東北部地區最表層構造的速度差異相當大，兩個沖積平原（台北與宜蘭）之間存在最古老的岩層（雪山及中央山脈），導致一些系統性的偏差。

(b) 南部測站 P、S 走時殘值分析

震波走時與傳遞路徑上之地層特性有密切關係，同時也可能反應測站近地表的土層場址因子（黃柏壽等人，1996）。因此，若能分析品質優異且足夠數量之 P、S 走時殘值，便可以由其平均特性與測站下方淺層之速度與勁度條件之間做出適當的聯結。本計畫分析 CWBSN 地震資料庫中 1993~2011 年之 P、S 走時殘值，所分析之背景地震必須是經由至少 10 個以上測站（每測站均同時有 P 波與 S 波的到時資料）之定位結果，並且需符合以下幾項條件：

- (1)地震規模：2.5~7.0 之間；
- (2)震央距離：0~125 公里之間；
- (3)震源深度：0~40 公里；
- (4)定位品質等級：A~C。

然而，極少數測站歷年之地震觸發數量可能因所在地區、觀測設備等種種因素而未達預期，在此情況下，首先則將規模範圍擴大為 2.0~7.0 之間，若數量仍嫌不足，則再放寬定位品質等級（即所有等級）。

本計畫即針對台灣南部之 TTN（台東）、TWG（卑南）、ECL（嘉蘭）、TAW（大武）、EAS（安朔）、SCZ（春日）、KAU（高雄）、TWM1（旗山）、SGL（九如）以及 SSD（三地門）等 10 個即時站觀測到之 P、S 波走時之殘值進行分析。一般相信，根據以上搜尋條件所得之觀測值雖然僅佔歷年資料的一部份，不過應足以獲得其反應地層構造之主要特性。在此定義之走時殘值為觀測走時減去地震定位程序使用的一維速度模型（NVEL）之理論走時，因此進行資料分析之前，測站所在海拔高程造成之走時增量必須先行修正，此修正量是基於假設各測站之下高於海平面之地層參數均相同，並採用速度模型之最上層速度值（即 $V_p=3.48$ km/s、 $V_s=2.01$ km/s），使所有觀測值修正至海平面高程之假想值，以利後續分析。

首先，以時間序列來看，從 P 波走時殘值（ R_p ）以及 S 波走時殘值（ R_s ）之變化可以對定位品質進行初步探討，本研究採用每 3 個月為一時間週期，超過 10 筆資料即求取平均走時殘值與其標準偏差。以 TWG 測站的結果（圖 3）為例，長久以來的數據呈現極為平穩的狀態，平均的 R_p 大致落在 0.0~-0.2 秒之內，而 R_s 相對較大（-0.1~-0.4 秒），然而 R_s 之標準偏差達到 0.8 秒左右，顯示對於 S 波的檢拾仍有一定程度之困難。而鄰近之 TTN 測站的結果顯示於 2004 年之後不論 R_p 或 R_s 均有下降的趨勢，標準偏差亦比 TWG 者為大，這現象可進一步探討。類似 TTN 測站走時殘值之時序變化者尚有 TWM1、SGL、KAU 等測站。

由於大部分個別測站（除了 KAU、SGL、TWM1）所分析的資料數量介於 2,500 至 9,500 筆之間，震央方位分布也尚屬均勻，因此可以進行震波走時殘值之方向性變化以及震央距離因素之探討。本研究以每 30° 的方位角度、25 公里的震央距離格化所有資料，每一格區裡需超過 10 筆資料始求取其平均走時殘值。以 TWG 和 TTN 兩站的分析結果為例，近距離的震波走時比較不受傳遞方位的影響，距離越遠，方位影響可能越明顯（TWG）。而且各測站呈現的結果可能有很大的差異，例如 TWG 站呈現明顯的近乎南北走向高速度傳遞的現象（圖 4），尤以 S 波最清楚，這可能與台灣地體構造的走向有密切關係。然而，比較靠海岸的 TTN 站之結果卻顯示由東北、東方、東南方而來的震波走時相對較為快速，這也可能與菲律賓海板塊具有高速介質之因素有關，至於 TTN 的場址效應在這裡到底佔了多少影響成分，則需要進一步研究。與 TWG 結果類似者尚有 EAS、ECL 以及 SSD 等三測站，從這些測站之地理分布來看，位於中央山脈南端越靠近山區之觀測越能反應出地體構造因素。

以上之分析基本上比較屬於定性結果，主要強調的是時間與空間上之變化特性，原因在於殘值資料同時包含一維速度模型與 2005 年後之混雜了三維模型的定位結果。為此，以 2005 年為時間分隔點分別統計走時殘值之後可以發現，其間的差異是明顯的。ECL 和 SSD 的殘值偏向比較明顯的負值（-0.2~-0.5 秒），而 TTN、SGL、TWM1 和 KAU 等測站的殘值則是相當明顯的正值（Rp~0.5 秒；Rs~1.0 秒），2005 年後的一維速度構造定位之殘值則相當程度地縮小，不過其他測站則無顯著變化。以三維模型定位的走時殘值則如預期般地使所有測站之數據接近零，因此，2005 年前、後之定位程序勢必因為三維速度模型的出現（選項）而有改變，如果一維定位之殘值太大，可能以三維定位結果取代，導致以上所呈現之現象。至於波相走時在定位程序中所設定的權重往往是一種測站特性的指標，然而，權重可以依定位人員主觀認定而有差異，亦可能做出適度調整，皆使其數據降低了參考價值。如果使用一維模型無法使震源收斂，微調權重是一種作法，若最後決定改用三維模型，建議權重應該維持最初設定，較能符合其精神。雖然過去的權重可能經過調整，不過從大量累積的數據統計結果仍能看出測站特性，一如預期，TTN、SGL、TWM1 和 KAU 等測站的 P 波走時權重數約達 2.8 左右、S 波權重數則達 3.4 左右，遠大於其他測站之平均值至少 1 以上，而且與使用的定位模型種類無關，顯示這些測站觀測到的波相確實比較不明確，多數權重非 3 即 4，可能與測站下的地層相對鬆軟或者破碎之構造導致震波進入後產生額外的多重反射及頻率變化有關。

P 波和 S 波的走時殘值決定於地層實際之速度與勁度和理論模型之間的差異，因此，分析此二走時殘值之關係可以推論測站附近的地層特性，歸納其測站參數。因此，本研究提出一種新的判讀關係，即(Rs-Rp) vs. Rs。以圖 5 所示之結果為例，SSD 測站大部分之 Rp 和 Rs 均為負值，代表其附近地層 P 波與 S 波的傳遞速度比理論模型者快，地層勁度因此偏硬（帕森比偏小）；反之，TTN 測站大部分之 Rp 以及 Rs 均為正值，代表波傳速度比理論值慢，地層勁度則屬偏軟（帕森比偏大）。然而此結果混雜了不同速度模型之定位結果，去除了三維資料後即可獲得比較正確的分布型態，進而取得合理的關連性。圖 6 為各測站之平均值分布，可以明顯看出 TTN、SGL、TWM1 和 KAU 等測

站之地層特性偏軟，而 SSD、ECL、EAS 和 TWG 測站之地層特性則偏硬，SCZ 和 TAW 則比較接近一維理論模型。利用(Rs-Rp) vs. Rs 的關係圖型態除了可推測地層特性之外，最重要的功用是可以評估整體地震定位的品質與穩定度，並可檢視波相檢拾之難易度以及正確性。

當某個測站所觀測到的 P 波與 S 波走時殘值以(Rs-Rp) vs. Rs 的關係圖呈現時，可以估算實際地層參數與理論地層模型之間的差異性，這可以從其定義試算出特定構造之理論殘值。假設某一地層厚度為 h ，此地層之理論（模型）P 波與 S 波速度分別為 V_{P0} 和 V_{S0} ，若實際地層之 P、S 波速度分別為 V_P 和 V_S ，且令：

$$c = \frac{V_P}{V_{P0}}$$

$$z = \frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2-2\sigma}{1-2\sigma}}$$

$$t_{SP0} = t_{S0} - t_{P0} = \frac{h}{V_{S0}} - \frac{h}{V_{P0}} = \frac{h}{V_{S0}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$$

$$t_{SP} = t_S - t_P = \frac{zh}{cV_{P0}} - \frac{h}{cV_{P0}} = \frac{h}{c\sqrt{3}V_{S0}} (z-1)$$

此處 σ 為實際地層之帕森比（Poisson's ratio），則可得出以下兩關係式：

$$R_S = t_S - t_{S0} = \frac{h}{V_{S0}} \left(\frac{z}{c\sqrt{3}} - 1 \right)$$

$$\frac{R_S - R_P}{R_S} = \frac{(t_S - t_{S0}) - (t_P - t_{P0})}{t_S - t_{S0}} = \frac{t_{SP} - t_{SP0}}{t_S - t_{S0}} = 1 - \frac{1-c}{z - c\sqrt{3}}$$

以單一覆蓋層（ $h=2$ 公里）為例，其 P 波速度越低，Rs 與 Rp 就越大。另一方面，地層帕森比增加也會使 Rs 與 Rp 增加。

震波走時殘值主要是波傳路徑效應與測站下方地層效應二者之合成，因此，若將觀測的資料限縮在測站下方附近，使波傳路徑效應極小化，便可利用走時殘值推估測站近地表地層的特性。本研究從原始篩選的資料中，僅取用震央距離 0~15 公里、震源深度 15~40 公里之地震（亦即測站下方地震（earthquake below station），本文稱之為 EBS）的走時殘值進行分析。並且假設所有測站下方 15 公里深以下的速度構造與一維理論速度模型無異，地震定位的誤差可以忽略的情況下，該測站觀測之走時殘值就僅是反應 15 公里以上地層之特性了。此等資料的數量除 KAU 與 TWM1 之外均有 100~300 筆，其統計數據仍具有參考價值。結果是，包括 ECL、EAS、TAW、TWG 和 SSD 等測站之走時殘值和所有一維定位之平均殘值（圖 6）相差很小，代表較遠距離以及不同方位而來的震波走時至這些測站的結果符合理論一維速度模型，其偏小（0.3 秒以內）且小於零的走時殘值顯示測站淺層平均速度應該略高於理論速度。同時其標準偏差小，顯示對於測

站正下方往上傳遞之震波具有穩定易辨的波形特徵。但是針對 SGL 和 TWM1 這二測站，同樣具有 0.7~1.0 秒範圍的 S 波殘值，不過近距離正下方地震之結果卻似乎傾向使 P 波殘值收斂至零秒附近（亦即 P 波走時符合理論值），這樣的結果可能顯示這二測站附近的淺層構造並不單純，需要進一步探討。KAU 和 SCZ 的結果顯示出更怪異的現象，S 波殘值大幅度縮小加上 P 波殘值由正值轉變為負值，由於二者均位於西南沿海，最上部表層的效應可能不大，而是比較深層構造以及陸地與海面間的差異所造成。不過這些測站殘值的標準偏差大多落在 0.5~1.0 秒之間，波相走時的權重也偏低（權重數偏大），可見波相檢拾的難度較高，目前的結果比較無法獲得肯定的結論。

三、結論與建議

本計畫針對台灣南部 10 個即時站於 1993~2011 年觀測到之 P、S 波走時之殘值進行時間與空間分析，大致得出以下一些現象與結論。首先，包括 TTN、TWM1、SGL、KAU 等測站走時殘值在時序上具有較大的變化，結果顯示大約於 2004 年之後明顯正值的 R_p 以及 R_s 均呈現下降的趨勢。位於中央山脈南端靠近山區之 TWG、EAS、ECL 和 SSD 等測站之走時殘值明顯反應出震波於近乎南北走向以較高速度傳遞的現象。最後，本研究提出一種新的判讀關係，即 $(R_s - R_p)$ vs. R_s ，主要用於評估整體地震定位的品質與穩定度，並可檢視波相檢拾之難易度以及正確性。從各測站之平均走時殘值分布，可以明顯看出 TTN、SGL、TWM1 和 KAU 等測站之地層特性偏軟，而 SSD、ECL、EAS 和 TWG 測站之地層特性偏硬，SCZ 和 TAW 則比較接近一維理論模型。

參考文獻

1. Bose, M., E. Hauksson, K. Solanki, H. Kanamori, Y. M. Wu, and T. H. Heaton (2009). A new trigger criterion for improved real-time performance of on-site earthquake early warning in southern California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 897-905.
2. Hsiao, N.C., Y. M. Wu, T. C. Shin, L. Zhao, and T. L. Teng (2009). Development of earthquake early warning system in Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L00B02.
3. Wu, Y. M. and L. Zhao (2006) Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16312.
4. 黃柏壽、陳國誠、張建興（1996），台灣地區短週期地震站之測站走時殘值分析研究，中央氣象局地震技術報告彙編，第 14 卷，165-186 頁。

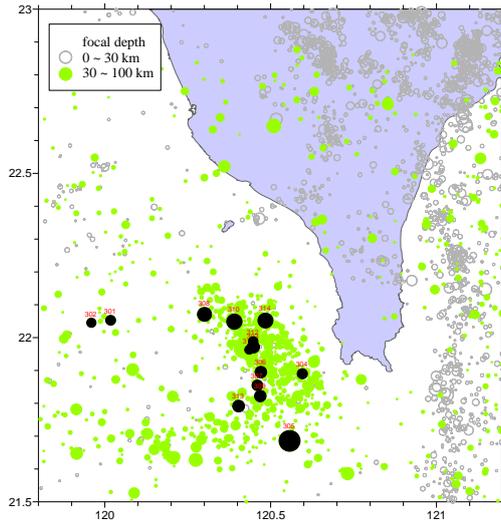


圖 1、本計畫分析之西南外海地震震央分布（黑圓點）與背景地震活動。

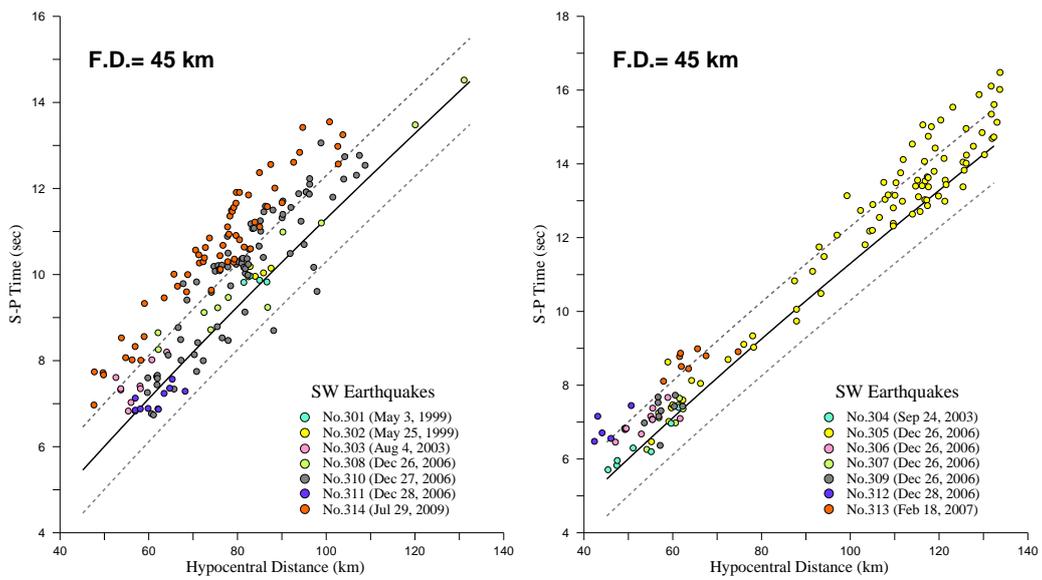


圖 2、西南外海地震之 S-P 走時差（不同顏色圓點）隨震源距離變化與 45 公里震源深度之理論 S-P 走時曲線之比較情形。

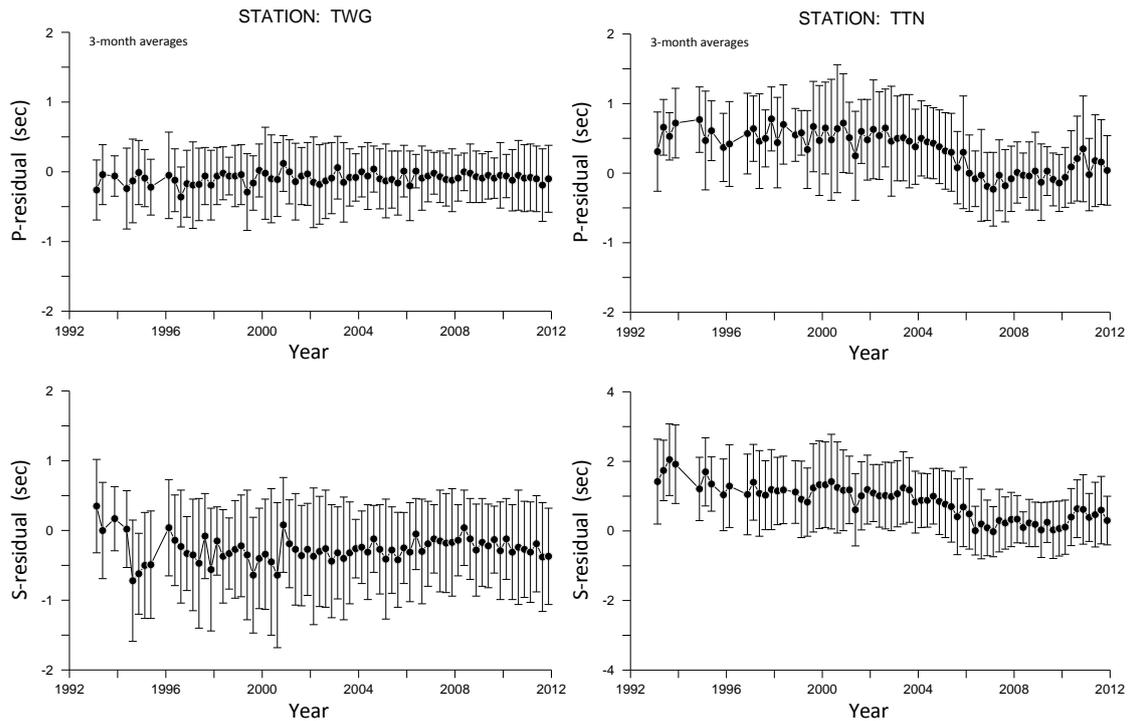


圖 3、TWG (左) 與 TTN (右) 測站在時間序列上的平均走時殘值之比較。

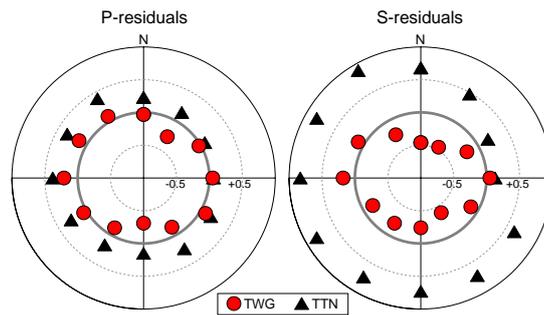


圖 4、TTN 站 (三角形) 與 TWG 站 (圓點) 之平均 P 波走時和 S 波走時殘值之方位變化關係。

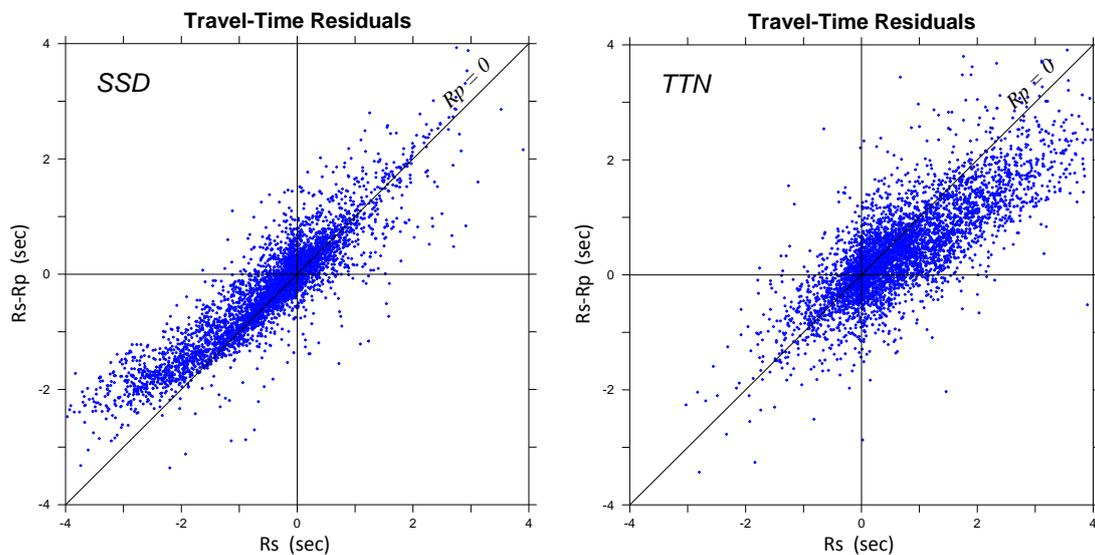


圖 5、SSD 站與 TTN 站的走時殘值分布。

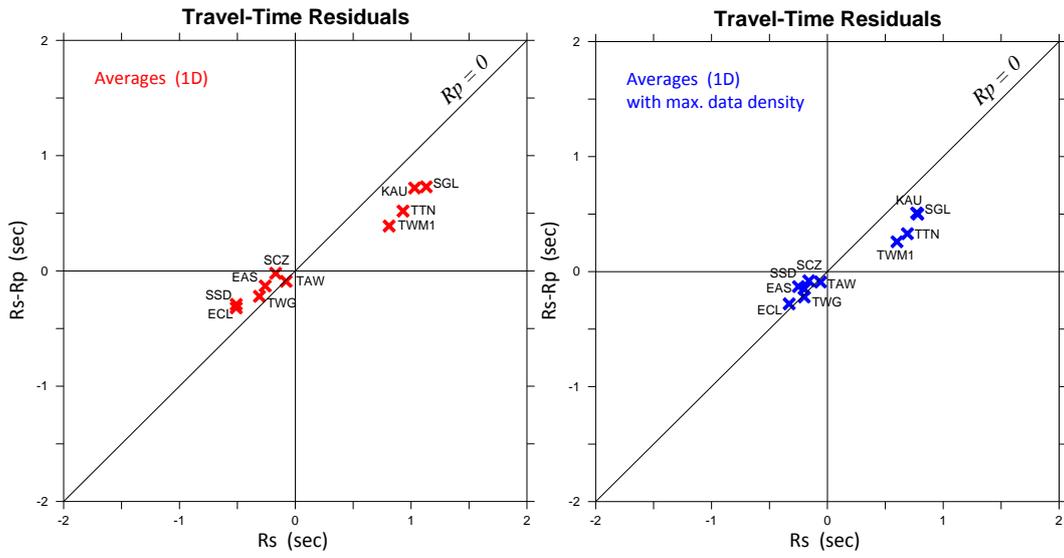


圖 6、各測站基於一維速度模型定位之平均走時殘值。左圖為觀測值之算術平均；右圖則取最大觀測密度為其平均值。