

以類神經網路觀察近斷層地震波方向性

研 究 生：莊效丞

指導教授：林美聆

摘要

在過去的研究中發現，地震波而會在某些特定的條件或因素下，地震波會呈現明顯的方向性，如：當地剪力波速的異質性(Bonamassa & Vidale, 1991)、山脊方向的放大現象(Spudich et al., 1996)、地層破裂帶的折射反應(Xu et al., 1996)和斷層附近震波的偏震現象(Lombardo, 2008)，這些造成地震波有方向性的因素對設定地震參數(GMPE, Ground Motion Prediction Equation)有深遠的影響，並間接影響到一般建築物耐震設計規範，現行的建築物耐震設計規範對近斷層效應只考慮垂直於斷層方向的 Forward Directivity 以及 Fling Step，而過去的研究發現地震波的方向並不會完全平行於斷層的垂直方向，因此規範對此現象還沒有完整的考量，本研究將針對近斷層場址內的測站進行地震波方向性的分析。

本研究目前蒐集了全臺灣 104 場地震事件以及基本之地質資料，並根據過去文獻所提出之地震波方向性之因素選取影響因子。造成近斷層地震波產生方向性的原因主要可以分成三類：震波偏振、剪力波速下降以及向破裂前進方向效應(forward directivity)，另外地震的來源也有可能影響地震波的方向性，根據這些因素選出地震、斷層和測站相關之因子，並利用統計以及類神經網路的方法探討各因子對地震波方向性之影響。本研究採用愛氏強度(Arias Intensity)來評估地震波之方向性，並嘗試利用類神經網路來預測在各種近斷層條件下的愛氏強度分佈情形。

總結統計方法的結果，對於地震波是否會產生方向性，主要的影響因子包括場址和震央之距離、地震震源深度、隱沒帶地震類別、場址地層主頻。在類神經網路訓練階段將重要因子一一抽離，確實會造成類神經網路的表現受到影響。而由類神經網路之權重的結果發現，現地應力狀態、斷層走向以及斷層滑動機制皆為重要之影響因子，這些因子也將會在本研究中有詳細的探討。

關鍵字：愛氏強度、向前破裂前進方向效應、地震波偏振現象、深度學習、Stress Inversion

一、前言

在過去國內外對地震的研究都有發現地震波會隨特定方向有放大的現象，這種現象被稱為隨方向變化的放大效應(Azimuth-Dependent Amplification)，此現象可以透過各測站蒐集到的加速度紀錄計算愛氏強度(Arias Intensity)來觀察，愛氏強度是用來評估地震波在各方向上累積能量

的大小。本研究主要討論位於斷層區域震波的方向性，而根據過去的研究(Pischiutta et al., 2011)，區域震波主要震盪的方向會和斷層結構以及現地應力的方向會有一定的關係，本研究採用之現地應力是由 Stress Inversion 所得到，最常使用的 Stress Inversion 是由 Michael (1984)所提出，我們可以藉由斷層結構的情況來判斷岩石破壞的情形再進一步推估現地主應力情況，所以再複雜的斷層結構也會有其相對應的主應力狀態。震源機制解是用地球物理的方法判別地震發震機制和斷層類型的一種方法。地震發生之後，藉由不同地震站所接收到的地震波訊號進行幾何分析，即可求出其震源機制解，因此我們可以利用震源機制解來解釋斷層面的方向，進而再求得現地主應力的方向。

在做現地主應力反算(Stress Inversion)時，理論上只有一組震源機制解即可以求得區域內的現地主應力方向，但區域內的震源機制解愈多通常得到的現地主應力方向會愈穩定，愈趨近真實的情況。Wu et al. (2008) 在計算臺灣地區現地主應力方向時也指出類似的觀點，他認為小區域內的震源機制解有一定數量以上所求得的現地主應力方向才會比較符合真實情況，因此在本研究中也會限制小區域內的震源機制數目，當區域內的震源機制解不足 5 筆時，便不予採用。

二、研究區域以及資料庫內容

2.1 基本資料

為了解地震波方向性相關因子，本研究針對地震波方向性影響因素所收集的基本數值資料，其資料內容包含地質圖資料、地震資料、全台之微地動測站資料以及震源機制解，詳細內容列於表 1。

表 1. 本研究之基本資料

資料類型	內容	資料提供單位
五萬分之一地質圖	斷層資料 地質資料	中央地質調查所
地震資料	地震加速度紀錄 自由場測站資料	中央氣象局
微地動測站資料	微地動測站座標 各場址之地層主頻	中央大學
震源機制解	震源座標 節裡面(nodal plane)滑動方向	中央研究院

2.2 資料選取

本研究主要探討近斷層區域之地震波方向性，因此選取研究資料的方法主要可以分成兩個部份來檢視，包括斷層位置以及地震測站，以下分別闡述：

(1) 斷層位置：

根據第前言 Stress Inversion 限制的說明，本研究中也會限制小區域內的震源機制數目，當區域內的震源機制解超過 5 筆時，才會採用此區域的大地現地應力狀態，因此選取的斷層位置都會集中在這些區域內，共選擇了 55 條斷層，其中所採用的斷層類型主要以逆斷層的滑動型態居多。

(2) 地震測站:

在現行的耐震設計規範中，對於近斷層區域內建築採取較保守安全係數的設計，針對各活動斷層一定距離內的區域提出近斷層地震力的修正因子，而兩公里內或五公里內的修正因子都較大，考量此因素下，本研究主要觀察距離斷層 5 公里內的近斷層區當作研究區域。

2.3 影響因子

造成近斷層地震波產生方向性的原因主要可以分成三類:震波偏振、剪力波速下降以及向破裂前進方向效應(forward directivity)。而這三種原因皆有各自的影響因素，另外，地震的來源也有可能影響地震波的方向性，以下將針對以上四點的內容加以歸納和總結其影響因素。

- (1) 波的偏振是肇因於震波受狹縫或者裂隙的影響，因此波的震動方向和當地的斷層結構有密切的相關性，根據過去的觀察，地震波主要的震動方向會大致平行於斷層的走向。
- (2) 斷層錯動的過程會使得土壤或岩石材料破碎，進而導致現地土壤的剪力模數會隨著主要斷層的走向產生方向性(stiffness anisotropy)，因此震波在斷層區內傳遞時，會在特定方向產生放大現象，了解場址特性，包括剪力模數、剪力波速以及地盤分類有助於了解地震波的方向性。而斷層結構的走向會影響剪力波速下降的方向，而走向主要是由現地應力的狀態以及當地斷層滑動方向所決定，因此現地應狀態以及斷層滑動方向都是需要被評估的因子。
- (3) 向破裂前進方向效應(forward directivity)主要是由當地斷層錯動並造成地震所造成的現象，屬於一近域地震之現象，而此現象往往只有坐落在斷層區內的場址才會觀察到此近斷層效應，由此可知場址和震央距離以及場址和斷層間的距離也會是影響因素。另外，位在活動斷層上盤區的場址通常會因為此向破裂前進方向效應而觀察到較大的最大地表加速度，因此場址位在上盤區或下盤區也會是其中的影響因子。
- (4) 不同的地震來源通常會有不同的地震發生機制，而不同地震的發生機制會影響地震波的特性，地震波的方向性就是其中被影響的特性之一，隱沒帶地震的震源深度通常比斷層地震的震源深度還深，以致於隱沒帶地震對於近地表應力狀態的改變影響較低，因此較不會造成地表震波的方向性。地震屬於遠域地震或者近域地震也會影地震波之方向性，理論上場址和震央位置愈接近，地震對場址的大地應力影響愈大，因此愈有可能影響場址震波的方向性。

總結上述地震波方向性之成因的描述，可以歸納出幾個因素來當作地震波的方向性影響因子，包括地震的類型(震央與場址之距離、震波入射場址方向、斷層誘發或是隱沒帶誘發地震、地震規模、震源深度)、場址與斷層的關係(上盤區或下盤區，場址和斷層的距離、當地斷層的走向、斷層滑動方向)、斷層的類型(走向滑動或傾向滑動、活動斷層之分類、掩覆斷層)、現地應力狀態(現地主應力的方向)以及場址之地質條件(地層主頻分佈、地盤分類、地質分區)等。

2.4 方向性判定

本研究之類神經網路之輸出值結果是愛氏強度(Arias Intensity)於各方向角上之分佈，並使用愛氏強度當作判斷地震波方向性的依據。Del Gaudio (2015) 將愛氏強度簡化到二維平面上，在二維平面上，可以將愛氏強度用方向角來描述特定場址在不同方向震波能量累積的情形。

$$I_{\alpha} = I_{ee} \cdot \sin^2 \alpha + I_{nn} \cdot \cos^2 \alpha + I_{en} \cdot \sin 2\alpha \quad (1)$$

Del Gaudio (2015) 在探討場址震波的方向時，同樣也採用了愛氏強度的方法，他在研究中定義了 Isotropic Index 這個參數，此參數最主要就是要檢驗震波愛氏強度是否具有明顯的方向性，公式如下：

$$I_i = I_{am}/I_{aM} \quad (2)$$

Isotropic Index 的值愈小就代表震波的方向性是顯著的。Del Gaudio 認為 Isotropic Index 小於等於 0.5 時，即代表該筆地震紀錄具有明顯方向性。

三、 資料庫統計分析結果

本研究以深度類神經網路探討近斷層區域水平向地震波之方向性，在執行類神經網路的運算之前，本研究先以簡單的統計方法對資料庫進行分析，包括⁽¹⁾檢視資料庫內的因子是否獨立，避免採用到相依因子。⁽²⁾檢驗訓練資料和驗證資料各參數的分佈特性是否一致，盡量降低偏差的發生。⁽³⁾使用相關係數以及卡方檢定各因子之影響性，來篩選合適的影響因子。

由參數獨立性檢定，本研究所採取的參數大部分屬於互相獨立之參數，部份參數如隱沒帶地震分類和震源深度以及走向滑移、傾向滑移和正逆右移左移斷層的分類屬於相依的因子，訓練過程中走向和傾向滑移之分類不納入訓練。

由 Bray-Curtis 相似性指標可以發現，在訓練資料以及驗證資料之參數分佈幾乎都是一致的，兩者的參數特性是相符的。因此類神經網路之驗證結果不會受到參數特性不一致所影響。

由 Pearson 和 Spearman 相關係數發現，地震波方向性之重要因子大部分都跟地震本身的特性有關，而非斷層相關因子，另外場址之地層主頻也和地震波方向性相關。而由卡方檢定的結果看到，活動斷層之分類屬於相對低影響因子，正逆右移左移斷層的分類比走向傾向滑動之分類還具有影響，因此正逆右移左移斷層的分類是屬於較有效的輸入參數。

四、 類神經網路之建構

本研究中的類神經網路模型將預測角度的問題當作多元分類(multi-class classification)的問題來處理，也就是說將預測角度範圍 0° 到 180° 折成每 10° 一個區間，共 18 個區間也就是分成 18 個類別來進行分類，並採用監督式學習的方法進行訓練。

在輸出資料標籤(label)的部分採用平滑標籤(smooth-label)來代表輸出成果，並在輸出層使用規一化指數函數(Softmax Function)當作激勵函數來進行多元分類，輸出資料為愛氏強度在各角

度的分布情形，通常會以最大值的愛氏強度方向當作震波的主方向，如果單純以 one-hot encoding 來表示愛氏強度的主向的話，會將各方向上的值歸為 0，就會忽略其他角度上愛氏強度的分配。smooth-label 的做法是先將愛氏強度特徵值縮放到共同的向量長度上，再經過一次正規化確保向量和為 1，詳細公式如下：

$$x' = \frac{x}{\|x\|} \quad (3)$$

$$x'' = x' / \sum_i x'_i \quad (4)$$

另外，為了減少過擬合對模型表現的影響，在類神經網路架構中會執行 dropout，在每次訓練過程會隨機關閉各隱藏層中 50% 的神經元來執行 dropout。本研究中訓練資料共有 4047 筆資料，批次的大小(mini-batch)為 32 筆資料，每一輪新的訓練都會再重新取樣建立新的批次，而愛氏強度不具有方向性的震波資料比有方向性的震波資料還要來得多，由這樣的樣本訓練類神經網路會導致訓練結果會產生偏差，在設定批次的時候就會從有方向性的資料和沒有方向性的資料各取 16 筆資料組成新的 32 筆資料批次再執行訓練。

五、類神經網路輸出結果

5.1 準確度

愛氏強度會在各角度區間呈現一個分佈的情況，因此在觀察震波愛氏強度是否具有方向性時，也可以使用統計的方法來判定愛氏強度散佈情形，再藉由散佈的情形設定預測正確的區間，如果預測出來的愛氏主方向落在這個區間內就算是預測正確。Isotropic Index 是用來判定震波的方向性，Del Gaudio et al. (2015)認為當 Isotropic Index 小於等於 0.5 時，就代表此地震波是具有明顯方向性的。

類神經網路預測結果會對無方向性資料產生偏差，大部分結果都會猜到無方向性的那一側，因此還有分別計算出有方向性資料和無方向性資料的準確度，才能確定類神經網路預測的結果是否夠精確。

方向性預測正確後，才會進入下個階段來檢視有方向資料內所預測之主方向是否落在原始愛氏強度主方向的變異性範圍內。訓練標標籤中，愛氏強度方向角的平均值是用來當作震波的主方向，根據這個方向衍生出一倍標準差的角度內，都算是震波主方向本身變異性的範圍，因此預測主方向如果落在這個範圍內都算是預測正確。

5.2 輸出結果

由類神經網路預測的結果可以發現，雖然在訓練階段是使用有方向性和無方向性資料為等比例的訓練資料，但驗證的結果還是會有預測偏差的現象，預測結果內無方向性資料占多數，且無方向性資料的準確度也比方向性資料的準確度還要來得高，這雖然有反映出真實資料的情

形，但有方向性資料的準確度不夠也說明了目前選用的影響參數還無法來完整描述地震波的方向性，輸出準確度結果如表 2。

表 2. 類神經網路輸出結果之準確度

	訓練資料	驗證資料
整體準確度	82.92 %	82.80 %
無方向性資料準確度	98.46 %	86.73 %
有方向性資料準確度	67.38 %	43.85 %
主方向準確度	97.56%	83.98%

5.3 類神經網路權重值

本研究取出輸入神經層和第一層隱藏層之間的權重值，輸入層內有 45 個輸入神經元，隱藏層內有 500 個運算神經元，因此這些權重值共同構成了一個 45 乘 500 的權重矩陣，矩陣的每一列分別對應到一個輸入神經元，因此每一列的權重值就可以代表不同因子對類神經網路的影響程度。對於同一列的權重值取平均值來代表此列的權重大小。其中，權重值較大的因子包括三個現地主應力之傾角(plunge)、斷層走向、斷層滑動型式以及隱沒帶地震之分類(Interplate、Intraplate)。

六、 結論與建議

以相關係數和卡方檢定的結果來看，地震波是否會產生方向性主要還是受到地震波的來源所影響，主要影響的因子包括地震之震源深度、場址到震央之距離、隱沒帶地震之分類(Interplate 以及 Intraplate)，而地震波愛氏強度之主方向則會因為近斷層的關係，而會受到斷層的滑動型式以及斷層主要的滑動方向所影響。在 Pischiutta et al.(2013)的研究中有提到，斷層主要滑動型式以及方向會控制斷層區內地質材料破裂方向，而這個破裂方向會改變剪力模數下降的方向，進而間接影響到地震波之主方向。

本研究現地主應力是由 Stress Inversion 的方法得到的，而 Stress Inversion 是藉由震源機制解(focal mechanisms)去推估現地主應力。震源機制解可以說明當地斷層面的位態，所以 Stress Inversion 的結果可以代表當地斷層的主應力狀態。由類神經網路之權重可知，三個現地主應力之傾角皆為重要之影響因子，Pischiutta et al. (2011)所指出地震波是否具有方向性是由現地應力狀態所控制，與目前所看到的結果是一致的。

根據現行的耐震設計規範，針對近斷層區域修正其設計地震力，提高其水平向頻譜之加速

度係數，規範中針對獅潭斷層、車籠埔斷層、梅山斷層以及其他第一類活動斷層提出不同的修正因子，但並未考慮其震波之方向性。根據本研究的結果顯示，耐震設計規範所提出的斷層，在其近斷層場址內，大部分資料的震波的方向性未必較顯著。但斷層的滑動類型以及斷層活動方向是會影響地震波主方向，且部分場址如中部的彰化斷層、車籠埔斷層以及雙冬斷層，其方向性皆十分顯著，斷層的逆衝現象導致震波方向約略呈現東西向，以車籠埔斷層附近測站TCU075來說，本研究收集到的9場地震事件，其愛氏強度主方向都在方向角 90° 到 110° 之間，規範應對此區域的震波方向性需特別注意。

符號說明：

I_{α} 為在方向角 α 上所表現出的愛氏強度； α 為方向角(正北為 0° 度，順時針為正)； I_i 即 Isotropic Index； I_{\min} ：愛氏強度最小值； I_{\max} ：愛氏強度最大值； \mathbf{x}' ：經向量長度縮放後的輸入向量； \mathbf{x}'' ：再經過一次正規化的輸入向量

參考文獻

- [1] Arias, A. (1970). MEASURE OF EARTHQUAKE INTENSITY. Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge. Univ. of Chile, Santiago de Chile.
- [2] Cultrera, G., Rovelli, A., Mele, G., Azzara, R., Caserta, A., & Marra, F. (2003). Azimuth-dependent amplification of weak and strong ground motions within a fault zone (Nocera Umbra, central Italy). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B3).
- [3] Del Gaudio, V., Pierri, P., & Rajabi, A. M. (2015). An Approach to Identify Site Response Directivity of Accelerometer Sites and Application to the Iranian Area. *Pure and Applied Geophysics*, 172(6), 1471-1490.
- [4] Pischiutta, M., Salvini, F., Fletcher, J., Rovelli, A., & Ben-Zion, Y. (2012). Horizontal polarization of ground motion in the Hayward fault zone at Fremont, California: dominant fault-high-angle polarization and fault-induced cracks. *Geophysical Journal International*, 188(3), 1255-1272.
- [5] Rigano, R., Cara, F., Lombardo, G., & Rovelli, A. (2008). Evidence for ground motion polarization on fault zones of Mount Etna volcano. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B10).
- [6] 林信亨. (2000). 地理資訊系統應用於土石流危險溪流危險度判定之研究 (Doctoral dissertation, National Taiwan University Department of Civil Engineering).
- [7] 林裕翔. (2008). 土石流發生潛勢-區別分析的擬合與預測. 臺灣大學土木工程學研究所學位論文, 1-152.
- [8] 黃雋彥. (2009). 利用微地動量測探討台灣地區之場址效應, 國立中央大學地球物理研究所碩士論文.