台灣土地研究　民國一一一年五月
第二十五卷　第一期　第1頁至第21頁
Journal of Taiwan Land Research
Vol. 25, No.1 pp. 1~21
DOI：10.6677/JTLR.202205_25(1).0001

利用GNSS連續運行站觀測資料及震間變形模型進行地震區域控制點修正之研究*

甯方璽**　徐名洪***

論文收件日期：109年11月18日
論文修稿日期：110年05月06日
論文接受日期：110年08月25日

摘　　要

臺灣因地處歐亞板塊及菲律賓海板塊交界，地震發生的頻率非常的高，若地震產生地表變動及位移，一定會影響到控制點公告值及精度，若每次都要進行重測，會浪費大量的人力及經費，若可以經由地震影響區域內續運行參考站長期GPS觀測資料計算出速度場及形變模式進行修正公告，可節省人力及經費。因此，本研究利用2005年至2015年間臺灣地區連續運行參考站GPS觀測資料計算水平速度場，以三次樣條內插法建立臺灣地區水平速度與變形模型。臺灣地區參考站坐標解算之水平精度為2 mm-3 mm、高程精度為6 mm-10 mm，速度場之年度平均標準差在N軸為0.38 cm/yr，E軸為0.52 cm/yr，再以平均法進行同震變形修正再加上變形模型，經過改正後可以將坐標預測與真實坐標之較差回復到公分以下之精度。

關鍵詞： 板塊運動、平均法、速度場、變形模型、三次樣條內插法

* 本文承蒙匿名審查委員們惠賜寶貴意見，使本文在結構與內涵上更加嚴謹與完善，特此感謝。
** 教授，國立政治大學地政學系，TEL：(02)29393091#50741，E-mail: fsn@nccu.edu.tw。
*** 博士研究生，國立政治大學地政學系，TEL：0988132002，E-mail: 105257504@nccu.edu.tw。

Correction of Control Points based on GNSS Continuously Operating Reference Station Observations and Inter-seismic Deformation Model

Fang-Shiis Ning, Ming-Hung Hsu*****

ABSTRACT

Taiwan locates at the junction of the Eurasian Plate and the Philippine Sea Plate where the earthquake occurs frequently. If the earthquake caused surface changes and displacements, it would undoubtedly affect the control point announcement value and accuracy. It will cost a lot of human resources and funds to resurvey to maintain the accuracy of control points after the earthquake occurring. We used long-term GPS observation data of the reference station covering the earthquake-affected area to calculate the speed field and deformation mode to get a correction of control points. Therefore, the study used GPS observation data of the continuous operation of reference stations in Taiwan from 2005 to 2015 to calculate the horizontal velocity field and established the horizontal velocity and deformation model of Taiwan with cubic spline interpolation method. The horizontal accuracy of reference station solution in Taiwan is 2 mm-3 mm, the elevation accuracy is 6mm-10mm, the annual average standard deviation of the speed field is 0.38cm/yr on the N axis, the E axis is 0.52 cm/yr. Then the mean value method will add to correct the Coseismic Deformation, and cubic spline interpolation deformation model used to amend coordinates. After correction, the centimetre level accuracy between prediction coordinate and the valid coordinate will get.

Key words: plate motion, Mean Value, velocity field, deformation model, Cubic spline

** Professor, Department of Land Economics, National Chengchi University, TEL: +886-2-29393091#50741
E-mail: fsn@nccu.edu.tw

*** Ph. D. student, Department of Land Economics, National Chengchi University,
TEL: +886-988-132-002, E-mail: 105257504@nccu.edu.tw

一、前　言

自1960年代起地質學家已經得知地球的表面是由數個板塊構造組成，板塊之間保持著每年數公分的移動速度。板塊之間的交界地帶會因摩擦、碰撞等運動導致地表變形，劇烈時會引起地震或者其他地球物理現象（Pearson et al., 2009）。而板塊運動造成的地表變形或者地震，會使傳統的大地基準面臨扭曲、變形的情況，因此有了動態基準及半動態基準的概念，然而為了使坐標能夠動態調整其值以符合現實的情況，必須對於坐標移動的方向和速度有所了解。然而透過GNSS系統進行長時間的監測後，可以求得觀測站的年度速度場（Bourne et al., 1998；邱元宏，2016），在有足夠觀測數量時便可據以建立區域的地表速度模型。透過地表速度模型可以應用於一般情況下的坐標改正，而當地震發生時，因強烈的能量釋放有時會造成劇烈的地表變形，此時的坐標偏移因為具備無法預測且不規律的特性，故無法以地表速度模型改正之，因此還需要建立區域的地表變形模型以改正因地震造成的大幅度位移情形。

地表變形的主要原因為板塊間的運動、斷層錯動、地震等等，依據觀察的地表位移模式，主要透過地震循環（Earthquake cycle）加以分界，可以將其分為三個時期，分別為震間變形（Interseismic deformation）、同震變形（Coseismic deformation）及震後變形（Postseismic deformation），如圖1所示。所謂的震間變形，是指在地震與地震發生之間，板塊進行穩定的相對運動和斷層間的交互作用造成的變形量；同震變形則是因為地震而引發的突發性地表位移；震後變形則是地震發生之後，一段時間內的持續地表位移，但屬於非線性的位移故較難掌握，持續時間可能持續至一年甚至更長時間（Nur and Mavko, 1974; Thatcher, 1979, 1983; Tse and Rice, 1986; Bourne et al., 1998; Chlieh et al., 2004），而台灣的目前的地表變形分析，

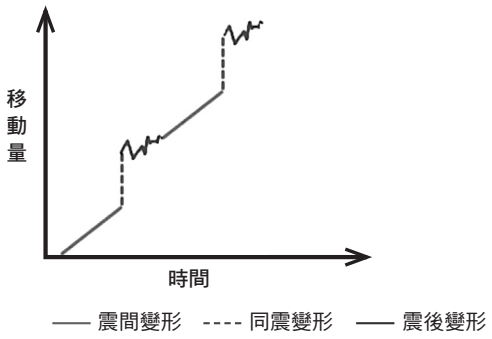

圖1　地震循環示意圖（陳國華等，2019）

台灣的震間速度場可能會因中大規模地震而改變其運動速率（陳國華等，2019）。

本研究應用甯方璽等人於2019年，利用台灣地區2005至2015年間之連續運行參考站（Continuously Operating Reference Station, CORS）（如圖2）GPS觀測資料進行推求地表速度場，再針對因地震造成明顯同震位移擬合推算震間變形位移研究。

其研究所建立之台灣地區速度模型精度，參考站水平坐標精度為2 mm-3 mm，水平速度場之標準差平均約在5 mm左右，臺灣北部及西部地區以每年20 mm-40 mm向東偏南方移動；西南部地區則以每年20 mm-30 mm向西南方移動；花東縱谷以東的地區以每年40 mm-50 mm向西北方向移動。所獲得臺灣地區速度場之年度平均標準差在N軸為0.38 cm/yr，E軸為0.52cm/yr（如圖3）。另在在水平速度模型推求中，以內插法中的三次樣條內插法（Cubic Spline）有最佳的模型精度（甯方璽等，2019），因此本研究之速度場模型則以三次樣條內插法進行推求。

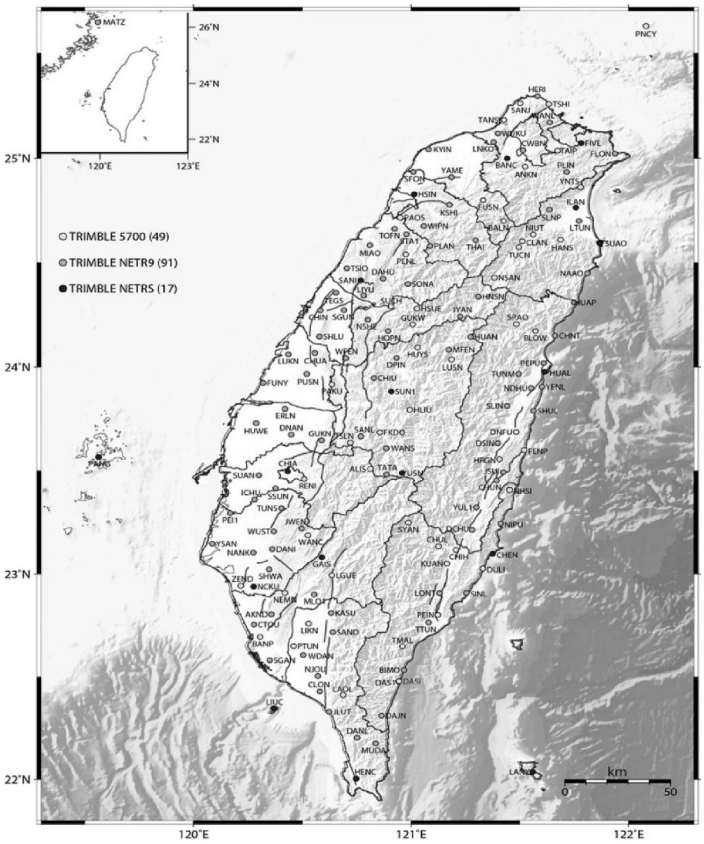

圖2　測站分布圖

資料來源：交通部中央氣象局，2016。

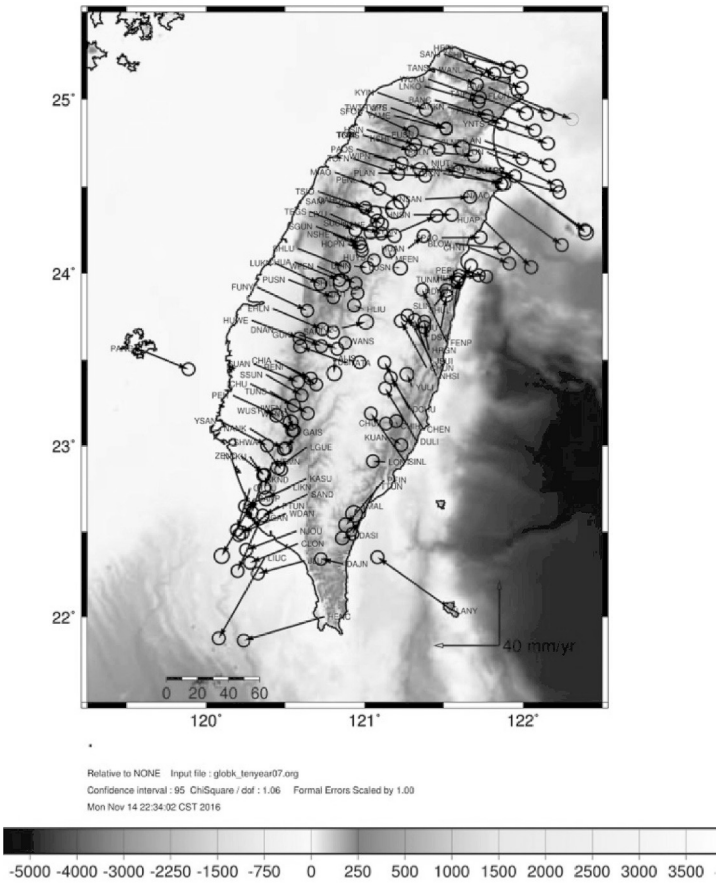

圖3　臺灣地區參考站水平速度場（甯方璽等，2019）

二、各國之速度場及變形模型

由於地震循環的三個時期所造成的地表變形特性各有不同，使建置模型變得複雜許多，因此必須依照其位移特性分別討論；同震變形與震後變形皆起因於地震的發生，也因此這兩種變形的變形量屬於較難預測的類型。同震變形乃因為地震而直接導致的地表變形量，會因為每個地震的規模、深度、地質構造等等眾多因素影響而有所不同，故無法以線性的函數關係加以預測，但因為其屬於短時間的大幅度位移，所以其校正方法較震間及震後變形來的簡易，只須於事件發生之後，直接觀測點位的坐標並與事件發生前的點位坐標進行比對，即可得到因為地震造成的同震位移量，並可依此位移量建立區域性的變形改正模型。震後變形乃是因為地震之後斷層的緩慢滑動所造成的，但不同於同震位移，震後變形可能會持續數月甚至一年以

上，且其屬於非線性無規律的一種變形模式，因此往往需要長時間的觀察才能夠確定其規則，且其位移量較同震及震間來的小許多，因此在建立變形模式時常將其忽略。震間變形是因斷層之間處於鎖定狀態，因下部地殼受到穩定力量驅使而滑動，透過地殼傳播到的表面引起的長期速度場，此類變形可以透過對地表的長期觀測以確定其速度，因屬於線性的變形而容易追蹤（Savage, 1980; Okada, 1985; McCaffrey et al., 2007; Pearson et al., 2009; Pearson and Snay, 2013）。

美、日、紐三國因為國土範圍皆跨越兩個或以上的板塊，所以都面臨的大地基準因地表變形而扭曲的情形，而目前常用的速度模型建立方法大致分為兩類，第一類為考慮地區地質背景，運用塊體模擬地殼運動的塊體模型，例如美國運用HTDP（Horizontal Time-Dependent Positioning）軟體模擬板塊建立之速度模型；第二類為直接以密集的GPS觀測站所得之速度場以內插的方式建立之模型，如日本、紐西蘭皆屬於此類。以下針對美、日、紐三國建立變形模型的方法與特性說明。

（一）美國之動態坐標預測軟體HTDP（Horizontal Time-Dependent Positioning）

美國國家大地測量局（National Geodetic Survey, NGS）於1992年公布了動態坐標預測軟體HTDP，提供使用者預測因為板塊運動造成之坐標偏移量的計算功能，HTDP主要提供之功能有：（1）預測點位之年移動速度；（2）更新點位坐標或基線向量、距離、方位等觀測量至特定時刻；（3）參考框架間點位坐標與速度的轉換。直至2021年，NGS已經發布第3.3.0版的HTDP，持續提供動態坐標的服務給使用者。

而在HTDP當中主要是由兩部分的程序來進行坐標的動態估計，第一個部分是由McCaffrey在1995年推出的塊體運動模擬軟體DEFNODE，可以用來模擬斷層的旋轉、應變力以及同震滑移等等（Mccaffrey, 1995），DEFNODE將美國西半部劃分為數個塊體，並將多條活動斷層列入考量，共採用6,292個水平速度向量、170個斷層滑移速率及258個斷層滑移方位角建立塊體運動的速度模型，其塊體示意圖如圖4所示。

透過推估出的點位水平移動速度，將其網格化之後成連續的面資料之後，使用者可以透過網格內插獲取任意點的速度值，然而塊體劃分的結果複雜，依據速度的方向趨勢和不同的精度需求，可以將速度場模型分區塊，採用不同大小的網格計算。（Pearson et al., 2009; Pearson and Snay, 2013）。

HTDP透過塊體模型DEFNODE（McCaffery, 2002; McCaffery, 2013；景國恩等，2013；陳國華等，2019），進行水平速度場的推估，並透過其改正震間變

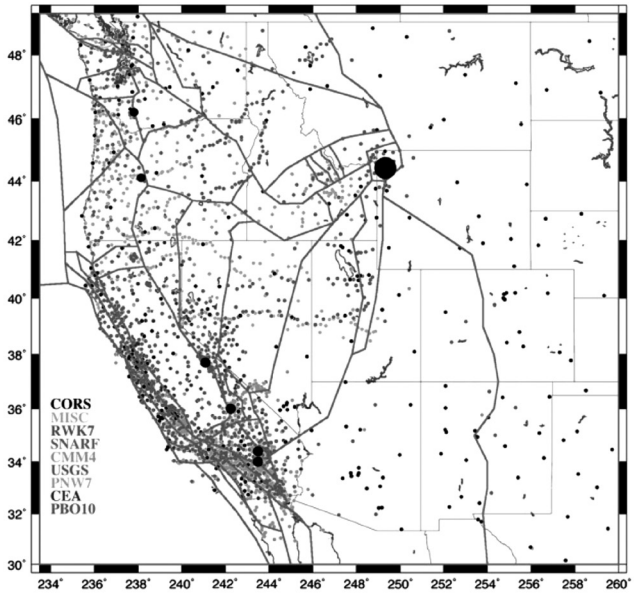

圖4　HTDP 3.1塊體劃分及速度資料示意圖（Pearson and Snay, 2013）

形對地表坐標造成的位移量，至於同震位移的改正方面，HTDP採用斷層錯位理論（Dislocation theory）來建立模型，透過假定具有均向性（isotropic）及均質性（homogeneous）的塊體，將數個矩形鑲嵌於其中已表示斷層中的嵌塊（patch），每一個錯位表示一個矩形嵌塊沿著斷層面兩側滑移，如圖5表示（Okada, 1985; Pearson et al., 2009; Pearson and Snay, 2013; Savage, 1980; Snay, 1999；景國恩與孔冠傑，2014）。

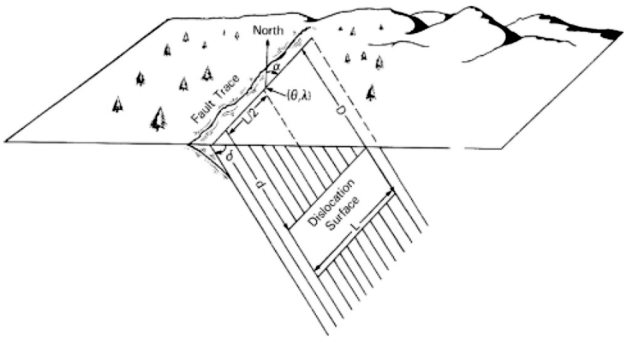

圖5　錯位模型示意圖

註：矩形平面為錯位面，（θ, λ）表示斷層中心的經緯度，α為走向，δ為傾斜角，L為錯位面的長度，d為到錯位面頂部的深度，D為到錯位面底部的深度（Pearson et al., 2009）

在HTDP中並沒有針對震後變形的模型建置，原因在於震後變形的影響量相較於震間與同震變形來的小，且其規律較難以掌握，但在最新版HTDP 3.3.0當中，已有將此部分震後變形量新增2002年11月3日在阿拉斯加中部發生的M7.9 Denali地震的震後錯動模型，令同震變形與震後變形造成的地表位移同時被估計（Pearson and Snay, 2013; Snay et al., 2021）。

（二）日本之速度場模型

日本自1990年代起開始建立密集的GPS觀測網絡，透過高密度的站點分佈以達到監測地表變形的目的，其中包括GEONET遍布日本各地的1,200個CORS觀測網，GSI還於2,400餘個一、二等三角點進行GPS靜態觀測，一次觀測時間為6小時，平均5到10年觀測一次，在積極地觀測網布設作業下，在日本國土範圍內站點分布密度已經可以達到平均10公里就有一點GPS觀測站，如圖6所示。

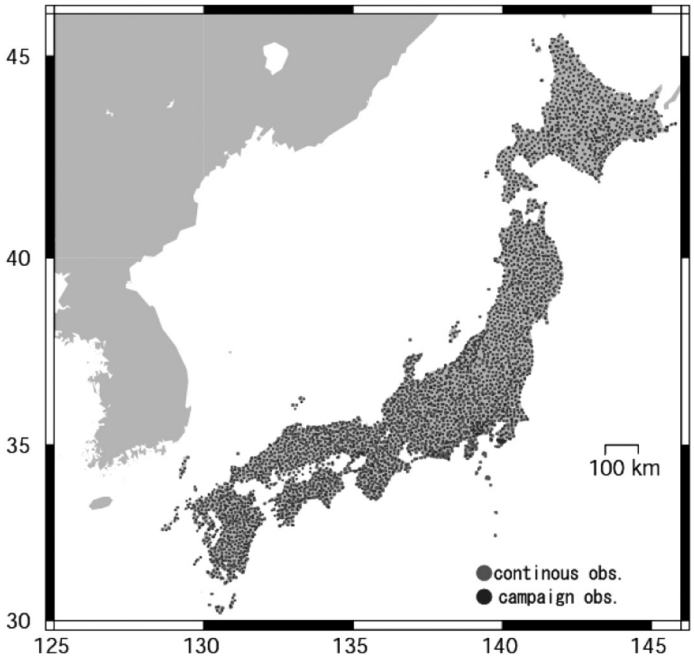

圖6　日本GPS觀測站分布圖

資料來源：Hatanaka et al., 2007。

在改正震間變形方面，日本採取與美國不同的方式，後者是利用帶入物理特性板塊模型配合GPS觀測解算而得的水平速度場建構變形模型，前者則是直接以分

布密集的GPS控制網解算而得的水平速度場，透過Kriging內插法製成規則的網格模型，再帶入欲求取的點位坐標經雙線性內插法得到點位的移動速度，然而為了使實務應用更順利，日本採取半動態基準的方式，即是在得出點位移動速度後回推參考時刻下的坐標位移量（Hatanaka et al., 2003; Hatanaka et al., 2007）。

由於日本有密度相當高的GPS觀測網，因此在建立同震變形的改正模型，可以用較直觀的方式進行，透過比較地震發生前後坐標的差異可以求得同震位移量，只要有足夠的觀測量則同樣可以Kriging內插成規則的網格，再以雙線性內插方法獲取任意點位的同震位移量，但是GSI當局並沒有將震後變形的影響納入考量。

（三）紐西蘭之國家變形模型 NDM

紐西蘭自1998年公布了新的大地基準NZGD2000，透過分布紐西蘭各地超過300餘個GPS觀測站長時間觀測解算所得之點位水平速度場來建立國家速度模型（National Velocity Model, NVM），其模型建立方式與日本相同，先取得點位的水平速度之後透過雙立方內插（bicubic spline）成規則網格之後，再以雙線性內插求取任意點位之點位速度，NVM主要用來改正因震間變形造成的坐標位移量（Grant et al., 1999），如圖7所示。

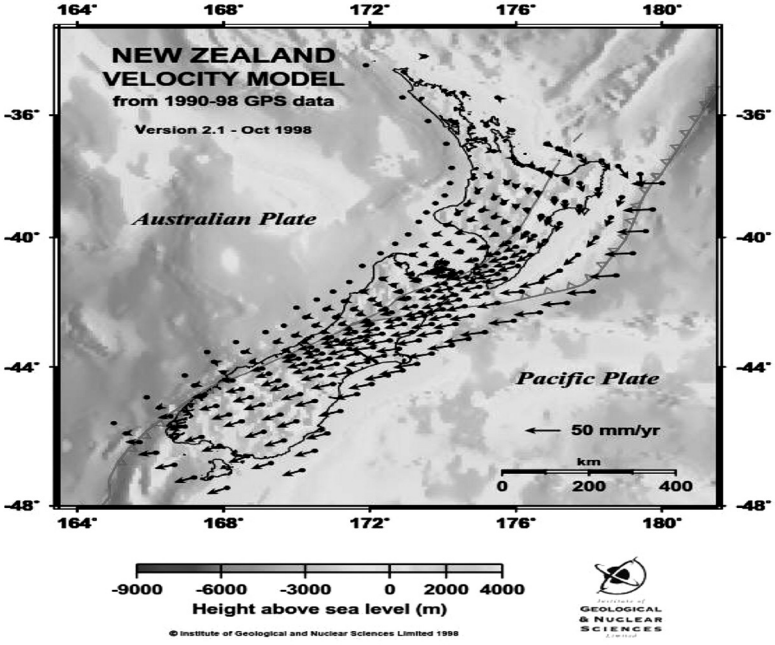

圖7　NVM示意圖

資料來源：Grant et al., 1999。

自2003年之後，紐西蘭土地資訊局（Land Information New Zealand, LINZ）正式將原國家速度模型NVM更名為國家變形模型（National Deformation Model, NDM）（Blick et al., 2005），主要原因是僅靠速度場模型並無法應付如地震此類特殊的事件造成之影響，因此LINZ提出在原有的NVM之上加入區域變形模型（Localized Deformation Model, LDM）進行特殊事件的位移改正，NDM可以由一個NVM加上數個LDM組成，結構示意圖如圖8所示。其中LDM可以包含同震變形及震後變形的影響，而LDM的建立與HTDP相似，同為斷層錯位理論的體現，但值得注意的是LDM是將點位的位移量內插成不規則三角網的形式，與NVM的規則網格不同，示意如圖9（Jordan et al., 2007）。

本研究針對美、日、紐三國之速度場模型進行相關方法、特性與文獻加以整理，再依據內政部國土測繪中心「108年度精進現代化TWD97國家坐標系統變位模式採購案」工作總報告（陳國華等，2019）整理比較分析（如表1），發現台灣現行作業模式以參考日本模型較為符合。

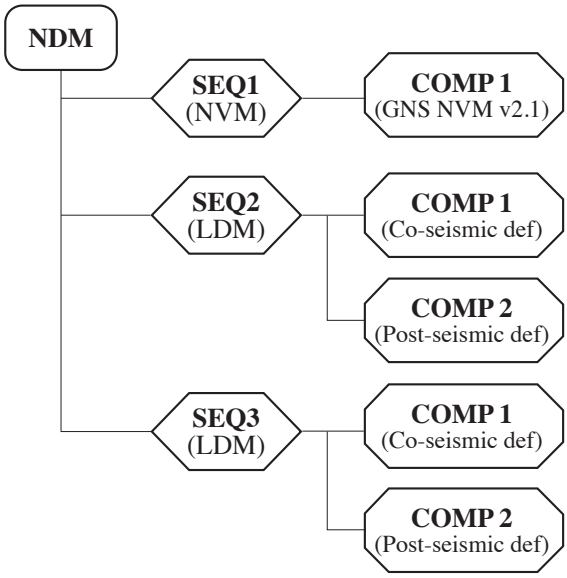

圖8　NDM結構圖

資料來源：Jordan et al., 2007

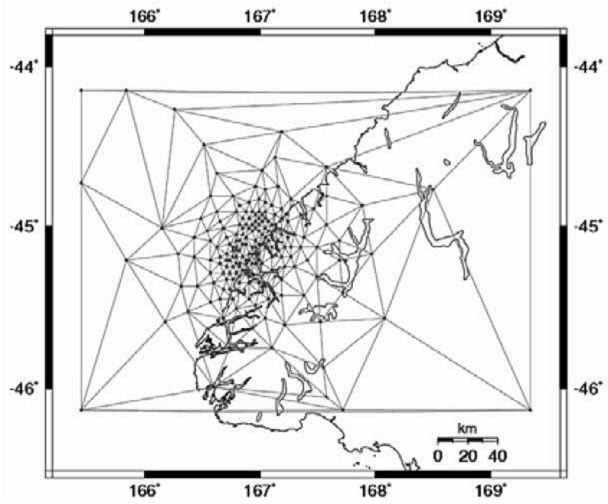

圖9　LDM示意圖

資料來源：Jordan et al., 2007

表1　各國模型比較

	震間變形模型方法	同震變形模型方法
美國	HTDP透過塊體模型DEFNODE，帶入物理特性板塊模型配合GPS觀測解算，而得的水平速度場建構變形模型。	HTDP採用斷層錯位理論（Dislocation theory）來建立模型，透過假定具有均向性（isotropic）及均質性（homogeneous）的塊體，將數個矩形鑲嵌於其中已表示斷層中的嵌塊（patch），每一個錯位表示一個矩形嵌塊沿著斷層面兩側滑移。
紐西蘭	透過分布紐西蘭各地GPS觀測站解算所得之點位水平速度場，透過雙立方內插（bicubic spline）成規則網格之後，再以雙線性內插求取任意點位之點位速度，建立國家速度模型（National Velocity Model, NVM）。	國家變形模型（National Deformation Model, NDM）：在原有的NVM之上加入區域變形模型（Localized Deformation Model, LDM）進行特殊事件的位移改正，由一個NVM加上數個LDM組成，LDM可以包含同震變形及震後變形的影響，同為斷層錯位理論的體現，並將點位的位移量內插成不規則三角網的形式。
日本	直接以分布密集的GPS控制網解算而得的水平速度場，透過克立金（Kriging）內插法製成規則的網格模型，再帶入欲求取的點位坐標經雙線性內插法得到點位的移動速度。	透過分布密集的GPS控制網，以直觀的方式進行，比較地震發生前後坐標的差異可以求得同震位移量，只要有足夠的觀測量則同樣可以克立金（Kriging）內插成規則的網格，再以雙線性內插方法獲取任意點位的同震位移量。

資料來源：1.陳國華等，2019。
2.本研究整理。

三、地震變形模型

本研究將參考日本GSI對於地震變形的校正方法，透過GPS連續觀測站的資料，以時間序列分析的方式將坐標長期的變動情形加以劃分，將地震發生之前與地震發生之後的坐標各取一平均值，兩個平均值相減即可得到同震位移量，這類方法又稱為平均值（Mean Value）法（Hatanaka et al., 2007；蔡旻倩，2013），改正方法示意圖如圖10所示。在地震發生之後，從發生時刻前一段的每日觀測資料取一平均值$\bar{A}$，在從發生時刻後取相同數量的每日觀測資料取平均值$\bar{B}$，則$\bar{B}-\bar{A}$之值則為因地震造成的同震變形量。

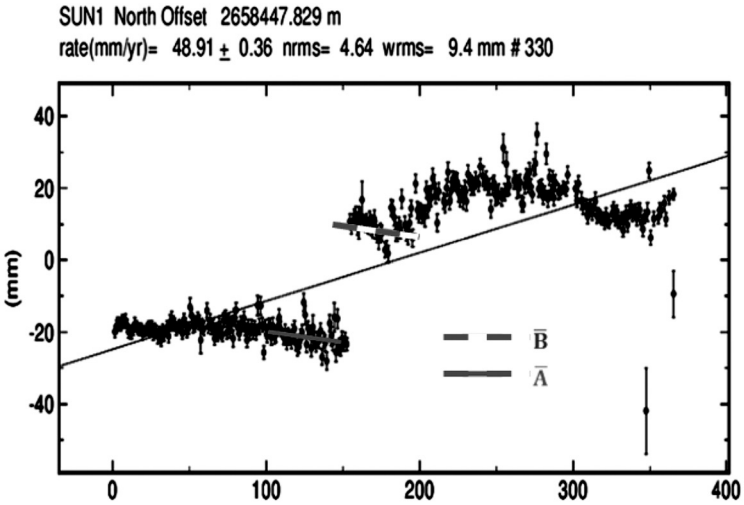

圖10　平均值法示意圖

如果要將板塊運動對坐標系統造成的影響加以模式化，除了要考量在穩定狀況下的地表速度場之外，地震造成的地表變形更是不可忽視的重要部分。然而水平速度場模型是用以估計板塊穩定運動的震間變形部分，該變形量屬於線性故具備可預測的特性。然而同震變形是伴隨著地震的發生而產生，故屬於無法預測的變形量，因此本研究講述的地震變形模型是用於地震發生後改正坐標，以延長水平速度模型之使用壽命，如圖 11、圖 12所示。

由圖11中虛線表示的為以水平速度場進行預測的測站坐標，黑色實線表示的為參考站真實的每日解結果。而地震在年積日約60時發生，由圖中可以明顯看出黑色實線於地震發生後產生的明顯位移，如果不進行地震變形的改正而仍舊以原先的測

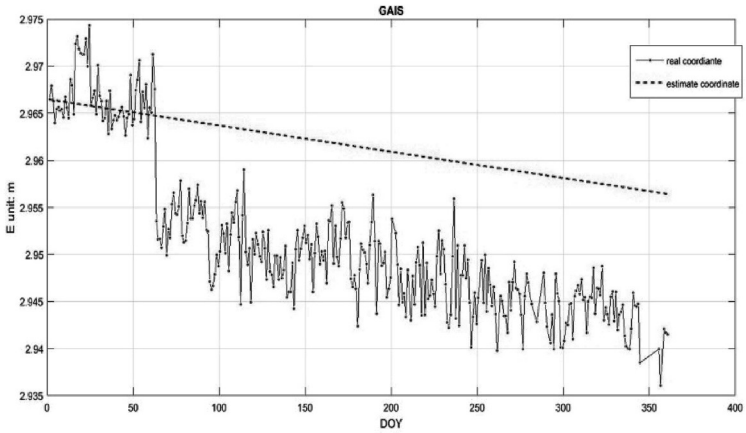

圖11　變形模型示意圖－改正前

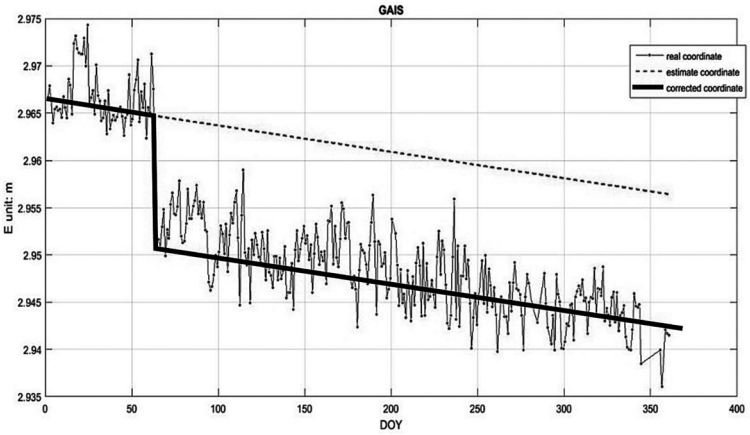

圖12　變形模型示意圖－改正後

站速度進行預測時，會使速度場模型無法發揮其原本的效用。但如果能求出因地震造成的同震變形並進行坐標校正，如圖12中黑色粗線所示，則可以將原先速度場模型拉回正常的精度水準。然而地震的發生要對地表產生顯著變形，勢必得具備相當的規模，除此之外，地震發生的震央深度也是造成地表變形的重要因素，因此本研究將選擇在觀測資料覆蓋期間具有一定規模，震央深度淺且震央位於站點密集地帶的地震案例進行研究。

有關建立臺灣地區之速度場模型，依（甯方璽等，2019）就台灣北部、中西部、西南部及東地區水平速度場內部及外部精度檢驗，其中利用內插法均有較佳的

精度。所謂的內插法是數值分析中通過已知的離散數據來求得未知數據的方法，內插法中樣條內插（spline interpolation）是利用特殊的分段多項式進行內插，可以避免因為高階多項式產生的誤差放大情況，而其中三次樣條內插法（Cubic spline）為樣條內插法改良形式，將多項式最高次數限制為三次以避免過度彎曲的情形；定義如下，對於n+1個給定點的集合，利用n段三次多項式在數據點間建構一條三次樣條線表示對函數f進行插值的樣條函數。

綜上所述，本研究利用三次樣條內插法作為水平速度場模型，並以平均值法求取地震之同震位移量進行坐標校正，選擇2010年3月4號高雄甲仙地震、2013年10月31號花蓮萬榮地震等兩個地震事件為例，進行地震變形模型之建立與分析。

（一）2010 年 3 月 4 號高雄甲仙地震

地震發生時間為當地時間的8時18分，震央大略位置位於北緯22.97°，東經120.71°的位置，地震深度為22.6公里，其芮氏規模為6.4。造成台南楠西地區、嘉義大埔地區最大震度6級，高雄甲仙、屏東三地門等地區最大震度5級。

以震央為中心，選取所有距離震央50公里之站點，利用平均值法求取同震變形量後，可將其分為N、E、U三個軸的分量。由於本研究僅探討水平之速度場與變形模型故此處不討論U分量，將N、E軸的同震變形量畫成圖，如圖13、圖14所示。

圖13及14中位移量單位為公分，星號表示震央位置，在南北方向震央以北的站點有向北移動趨勢，其中最大移動站點向北移動約2 cm，而震央發生位置則大約向南移動5 mm。在東西方向，震央以東的沒有明顯之東西向移動，震央以西則有兩個站點有明顯的位移。將速度場預測之坐標與真實坐標相減得到預測坐標之殘差，再以變形模型（三次樣條內插）改正後的改正坐標與真實坐標相減可得到改正坐標之殘差，以兩個殘差進行比較以評估變形模型之成果，各站點受影響之具體情形及改正後偏差量如表2所示。

由表2呈現出距離震央50公里之內的參考站之N及E軸，其中改正前N軸平均偏移0.56公分而E軸平均偏移0.82公分，由此可見在水平方向多數參考站之偏移量不達1公分，但其中仍然有少數站點有大幅度的位移，如GAIS、JWEN、NEMN等站點在地震發生後都有發生公分等級之偏移。然而改正前之坐標殘差絕對值減去改正後之坐標殘差絕對值所得到的值如果為正，則表示改正模型確實改正了因地震造成的同震位移量，但由表中可以看到仍有6個改正數為負，其中有3個其絕對值小於1 mm，其餘3個約在2 mm左右。

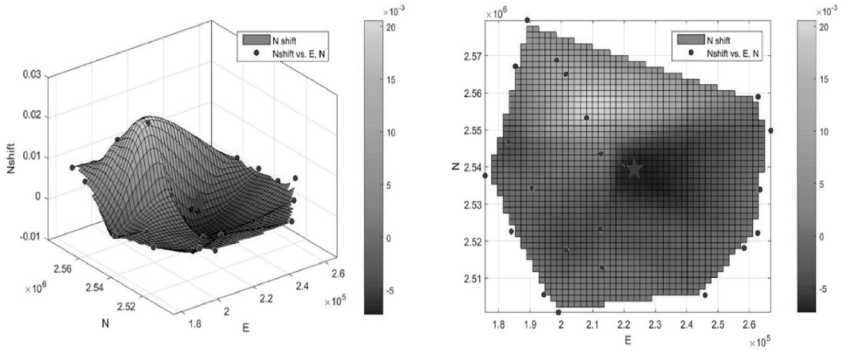

圖13　20100304甲仙地震同震變形量_N軸

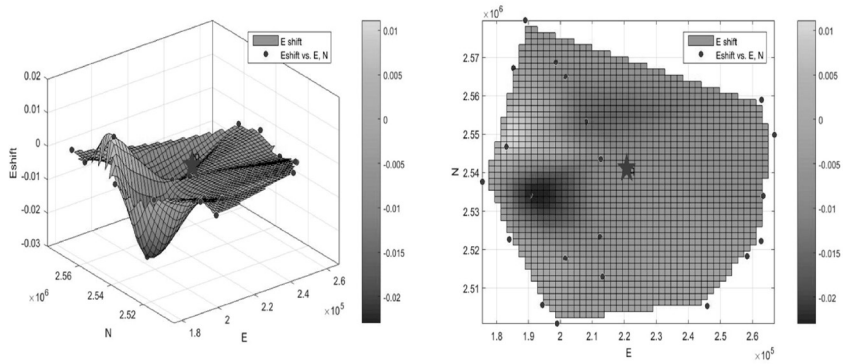

圖14　20100304甲仙地震同震變形量_E軸

表2　20100304甲仙地震改正前後比較　單位：公分cm

站點名稱	預測殘差 N	改正後殘差 N	改正前後 N	預測殘差 E	改正後殘差 E	改正前後 E
AKND	0.13	0.15	**-0.02**	1.15	1.04	0.11
CHUL	0.32	0.16	0.16	0.69	0.28	0.42
GAIS	2.37	0.39	1.98	1.49	0.09	1.40
JWEN	1.25	0.31	0.95	0.56	0.02	0.54
KASU	0.36	0.17	0.19	1.47	0.85	0.62
KUAN	0.20	0.15	0.05	0.66	0.26	0.41
LGUE	0.51	0.13	0.38	1.59	0.93	0.66
LIKN	0.15	0.09	0.06	0.74	0.41	0.33
LONT	0.33	0.17	0.16	0.45	0.23	0.22

表2　20100304甲仙地震改正前後比較　單位：公分cm（續）

站點名稱	預測殘差 N	改正後殘差 N	改正前後 N	預測殘差 E	改正後殘差 E	改正前後 E
NCKU	0.26	0.19	0.07	0.13	0.20	**-0.07**
NEMN	0.02	0.06	**-0.04**	3.12	0.84	2.28
PEIN	0.86	0.34	0.51	0.40	0.09	0.30
PTUN	0.15	0.07	0.08	0.21	0.34	**-0.13**
SAND	0.08	0.01	0.07	0.47	0.11	0.36
SHWA	0.03	0.22	**-0.19**	0.73	0.35	0.38
TMAL	0.46	0.35	0.10	0.44	0.44	0
TTUN	0.76	0.63	0.13	0.35	0.08	0.27
WANC	2.00	0.59	1.40	0.97	0.29	0.68
WDAN	0.02	0.21	**-0.19**	0.2	0.02	0.18
WUST	0.88	0.30	0.58	0.61	0.30	0.31
平均值	0.56	0.23		0.82	0.36	

（二）2013 年 10 月 31 號花蓮萬榮地震

地震發生時間為當地時間20時2分，震央大略位置位於北緯23.57°，東經121.35°的位置，地震深度為15.0公里，其芮氏規模為6.4。造成花蓮西林地區最大震度7級，花蓮市、南投合歡山、宜蘭南山等地區最大震度5級。該地震造成之N、E軸變形量如圖15、圖16所示。

花蓮萬榮地震中，N軸最大的同震變形量為4公分，E軸最大的同震變形量為2公分左右，但由圖16中可以發現由於該次地震震央週圍之測站分布不均，多半集中於震央東側，故整體圖形呈現東側之同震變形劇烈而西側平緩的趨勢。同樣透過預測坐標殘差與改正後殘差進行比較，各站點受影響之具體情形及改正後偏差量如表3所示。

其中改正前N軸平均偏移1.16公分，E軸平均偏移1.29公分，其中超過半數的站點在水平方向都有公分等級的位移，由表中可以看出東西方向的偏移在改正之後都有顯著改善，然而南北方向有6站在改正之後的殘差反而大於改正前，主要原因可能為站點受到地震影響後，雖然本身的同震變形量不大，但地震之後影響其原先的移動速率，也就是受到震後變形的影響。

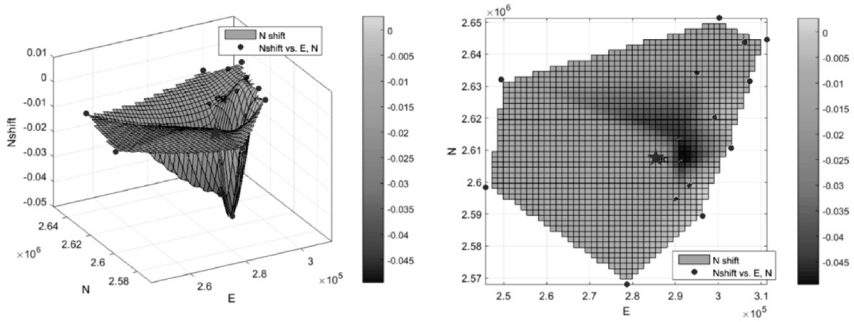

圖15　20131031萬榮地震同震變形量_N軸

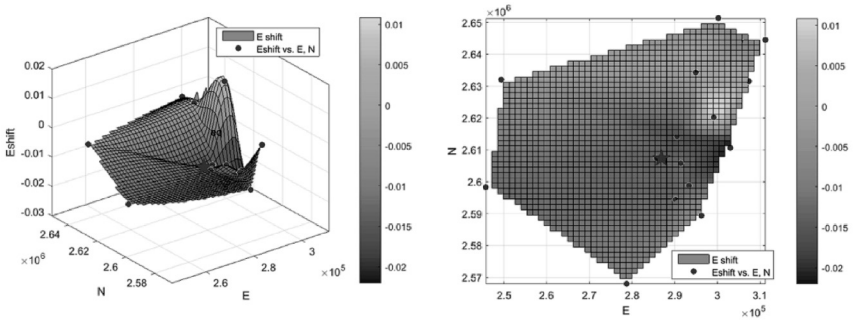

圖16　20131031萬榮地震同震變形量_E軸

表3　20131031萬榮地震改正前後比較　單位：公分cm

站點名稱	預測殘差 N	改正後殘差 N	改正前後 N	預測殘差 E	改正後殘差 E	改正前後 E
CHUN	0.26	0.59	**-0.33**	1.22	0.06	1.17
DCHU	0.50	0.06	0.45	0.64	0.06	0.58
DNFU	0.64	1.20	**-0.57**	2.30	1.30	1.00
DSIN	4.35	0.08	4.28	2.20	0.74	1.46
FENP	0.73	0.96	**-0.23**	2.64	0.40	2.24
HLIU	1.25	0.60	0.65	1.36	1.23	0.14
HRGN	4.35	0.50	3.85	0.66	0.59	0.07
JSUI	0.27	0.38	**-0.12**	1.95	0.66	1.29
NDHU	0.80	0.07	0.73	0.81	0.16	0.64
NHSI	0.36	0.08	0.28	0.56	0.34	0.22
SHUL	0.85	0.20	0.65	0.94	0.78	0.16

表3　20131031萬榮地震改正前後比較　單位：公分cm（續）

站點名稱	預測殘差 N	改正後殘差 N	改正前後 N	預測殘差 E	改正後殘差 E	改正前後 E
SLIN	0.54	0.94	**-0.40**	1.55	1.53	0.02
TUNM	1.05	0.14	0.91	0.52	0.11	0.41
YENL	0.27	0.34	**-0.07**	0.72	0.31	0.40
平均值	1.16	0.44		1.29	0.59	

四、結　論

台灣地區位於太平洋地震帶，地震的發生是無法避免的，且由於控制點的坐標是經過公告有其法律效率，所以當地震發生後能利用坐標水平速度場及模式求取修正量，可免去重新測量之龐大工程，並可快速的進行震後災區之復健工作，本研究採用平均值法求取地震之同震位移量後用以改正參考站坐標，在兩個案例中皆能有效改善因同震位移造成的坐標預測失真的情形，經過改正後可以將坐標預測與真實坐標之較差回復到公分以下之精度。然而在萬榮地震案例中，有些許站點在改正後之殘差反而大於改正前，原因推測是因為站點因地震之後改變了其原先的移動速率，也就是受到震後變形影響，可於往後的研究中將震後變形納入觀測驗證。

參考文獻

邱元宏，2016，時變基準於臺灣基本測量與地籍測量影響探討，國立交通大學土木工程學系博士論文。

陳國華、景國恩、楊名，2019，108 年度精進現代化 TWD97 國家坐標系統變位模式採購案工作總報告，內政部國土測繪中心。

景國恩、許書琴、孔冠傑、陳芊如、趙荃敏，2013，台灣地區動態坐標框架立之先期研究－台灣現今之地殼變形模式，國土測繪與空間資訊，第 1 卷，第 2 期，頁 17-35。

景國恩、孔冠傑，2014，台灣西南部半動態基準之建立，國土測繪與空間資訊，第 2 卷，第 2 期，頁 85-105。

蔡旻倩，2013，臺灣西南部地殼變形與地震活動相關性研究，國立中央大學地球科學學系博士論文。

甯方璽、李宜珊、熊育賢，2019，台灣地區水平速度場與模型之研究，中正嶺學報，第 48 卷，第 2 期，頁 23-42。

交通部中央氣象局，2022，地球物理觀測資料展示平台，網址：https://scweb.cwb.gov.tw/geophysics/GPSMap.aspx?lan=tw。瀏覽日期 2021.06.20。

Blick, G., Crook, C., Grant, D., and Beavan, J., 2005, Implementation of a semi-dynamic datum for New Zealand, A Window on the Future of Geodesy, Springer, Berlin:Heidelberg, pp. 38-43.

Bourne, S. J., England, P. C., and Parsons, B., 1998, The motion of crustal blocks driven by flow of the lower lithosphere and implications for slip rates of continental strike-slip faults, Nature, 391(6668), pp. 655-659.

Chlieh, M., De Chabalier, J. B., Ruegg, J. C., Armijo, R., Dmowska, R., Campos, J., and Feigl, K. L., 2004, “Crustal deformation and fault slip during the seismic cycle in the North Chile subduction zone, from GPS and InSAR observations.”, Geophysical Journal International, 158(2): 695-711.

Grant, D. B., Blick, G. H., Pearse, M. B., Beavan, R. J., and Morgan, P. J., 1999, The development and implementation of New Zealand Geodetic Datum 2000, IUGG99 General Assembly: Birmingham UK, pp 18-30.

Hatanaka, Y., Iizuka, T., Sawada, M., Yamagiwa, A., Kikuta, Y., Johnson, J. M., and Rocken, C., 2003, Improvement of the analysis strategy of GEONET, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 49, pp. 11-37.

Hatanaka, Y., Tobita, M., Kuroishi, Y., and Imakiire, T., 2007, Efficient Maintenance of the Japanese Geodetic Datum 2000 Using Crustal Deformation Models-PatchJGD & Semi-Dynamic Datum, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 54, pp. 49-59.

Jordan, A., Denys, P., and Blick, G., 2007, Implementing localised deformation models into a semi-dynamic datum, in Dynamic Planet, Paul T., Berlin:Springer, pp. 631-637.

McCaffrey, R., 1995, DEFNODE users' guide, NewYork: Rensselaer Polytechnic Institute.

McCaffrey, R., 2002, "Crustal block rotations and plate coupling." Plate Boundary Zones, Geodynamics Series, 30: 101-122.

McCaffrey, R., Qamar, A., King, R., Wells, R., Khazaradze, G., Williams, C., Stevens, C., Vollick, J., and Zwick, P., 2007, Fault locking, block rotation and crustal deformation in the Pacific Northwest.", Geophysical Journal International, 169(3), pp. 1315-1340.

McCaffrey, R., King, R. W., Payne, S. J., & Lancaster, M., 2013, "Active tectonics of northwestern US inferred from GPS-derived surface velocities.", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(2): 709-723.

McCarthy, D., and Petit, G., 2004, IERS conventions (2003), DTIC Document.

Nur, A., and Mavko, G., 1974, Postseismic viscoelastic rebound, Science, 183(4121), pp. 204-206.

Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the seismological society of America., 75(4), pp. 1135-1154.

Pearse, M. B., 1998, A modern geodetic reference system for New Zealand, UNISURV S, (52).

Pearson, C., McCaffrey, R., Elliott, J. L., and Snay, R., 2009, HTDP 3.0: Software for coping with the coordinate changes associated with crustal motion, Journal of Surveying Engineering, 136(2), pp. 80-90.

Pearson, C., and Snay, R., 2013, Introducing HTDP 3.1 to transform coordinates across time and spatial reference frames, GPS solutions, 17(1), pp. 1-15.

Savage, J. C., 1980, Dislocations in seismology., Dislocations in solids, 3, pp. 251-339.

Snay, R. A., 1999, Using the HTDP software to transform spatial coordinates across time and between reference frames, Surveying and Land Information Systems, 59(1), pp. 15-25.

Snay, R., Pearson, C. Saleh, J. and Dennis, M., 2021, HTDP User Guide (Software Version 3.3.0), https://geodesy.noaa.gov/TOOLS/Htdp/Htdp.shtml, 2021.01.15.

Thatcher, W., 1979, Systematic inversion of geodetic data in central California, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 84(B5), pp. 2283-2295.

Thatcher, W., 1983, “Nonlinear Strain Buildup and the Earthquake Cycle.” J. geophys. Res, 88: 5893-5902.

Tse, S. T., and Rice, J. R., 1986, Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties, J. geophys. Res, 91(9), pp. 452-459, 472.