

花蓮地震對e-GNSS系統營運及因應實務探討

內政部國土測繪中心

控制測量課 課長 陳鶴欽

控制測量課 技士 蕭世民

控制測量課 技士 莊峰輔

簡任技正 梁旭文

摘要

2018年2月6日晚上23點50分(UTC 15:50)，花蓮縣近海發生規模6級淺層地震，其中花蓮市最大震度達到7級，造成花蓮市附近區域多處建築物倒塌及人員傷亡，內政部國土測繪中心於107年2月7日與交通部中央氣象局等單位，蒐集建置於花蓮地區53個衛星定位基準站震前及震後資料進行檢核，計算結果顯示地表最大位移量約達45公分，因位移量過大，已對e-GNSS即時動態定位系統(以下簡稱e-GNSS系統)在花蓮地區營運造成影響，無法提供正確即時動態定位成果與精度，國土測繪中心旋即派員進行現場檢測並重新計算基準站坐標成果，於107年2月23日系統重新營運，更新基準站成果為e-GNSS[2017A]提供各界使用，協助各項救災快速建立正確空間資訊，以保障民眾財產安全。另外本次地震因屬小區域內，不規則變形，肇致純粹使用基準站所建立的三維即時轉換型不敷使用，須重新使用花蓮地區的53個基本控制點成果，方能有效表達地表變形位移情形，其轉換結果方符合原先預期的平面優於5公分，高程優於10公分的精度要求。

關鍵字

衛星測量、同震位移、控制測量、即時動態定位系統、三維即時轉換

Keyword :

Satellite Surveying, coseismic displacement, e-GNSS, TTG

一、背景及目的

臺灣位於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊交界處，為一活躍的板塊邊界的區域(Yu, et al. 1997; Yu et al. 1999; Yu and Kuo, 2001)(圖1)，地殼的應變速率約為0.1-1.0 μ strain/yr

(Bos et al., 2003; Chang et al., 2003; Hsu et al., 2009a)，在臺灣西南部旗山斷層至六甲-木屐寮斷層間有約 0.7-1.4 μ strain/yr 之最大壓縮量(Yu and Chen, 1994)，在震間時期(interseismic period)，臺灣東部地區的地表速率可達約 70 mm/yr。自有大地測量紀錄以來，臺灣因為大地震造成的同震位移量(coseismic displacement)，小則約 30 mm，如 2010 年 Mw 6.2 甲仙地震(Ching et al., 2011)，大則可達約 10 m，例如 1999 年 Mw 7.6 集集地震(Yu et al., 2001)。1999 年 Mw 7.6 的集集地震與 2003 年 Mw 6.8 的成功地震均有顯著的震後變形(Hsu et al., 2002; 2007; 2009b; 2009c; Yu et al., 2003; Chen et al., 2006; Cheng et al., 2009)。另臺灣地區地震活動十分頻繁，依據中央氣象局 2001~2015 年 15 年的觀測資料顯示，臺灣地區平均每年約發生 26,686 次地震，其中約有 965 次為有感地震(中央氣象局, 2018)，顯見地震活動對於國家坐標系統及各級控制測量的成果精度已造成嚴重影響。

臺灣地區以往曾建立的全國性國家坐標系統包含地籍坐標系統、TWD67、TWD97 及 TWD97[2010]等(陳鶴欽, 2009)，主要提供包含各項製圖、民生經濟、工程建設等使用，為因受地震、斷層活動、土石山坡滑動及人為破壞等各項因素影響，部分控制點成果已逐漸喪失原本測設時的應有精度，不符後續使用，這其中對於測量精度要求極高的地籍測量，尤為明顯。

近年來由於衛星測量及網際網路等相關新科技發展，使用虛擬參考站即時動態技術發展出來的網路化 RTK(Network RTK)系統已被應用的各項實務測量中，經驗證可達公分級精度(Lachapelle et al., 2000; Vollath et al., 2000; Landau et al., 2002)，內政部國土測繪中心(以下簡稱國土測繪中心)，於 2004 年建置電子化即時動態定位系統(以下簡稱 e-GNSS 系統)，包含分布全臺及金馬澎湖地區的 78 個基準站及資料計算中心，在數秒鐘內提供公分級定位精度，並於 2009 年正式對外營運，提供各界快速便捷的外業測量工具。從 2013 年起每 2 年更新一次基準站坐標並簡稱為 eGNSS[2013]，並同時計算國內相關約 400 個追蹤站(或基準站)在此框架內成果，目前使用坐標系統為 eGNSS[2017]，並利用基準站建立 TTG 網格修正量以轉換至法定公告坐標 TWD97、TWD97[2010](莊峰輔, 2016)，截至 2017 年年底，系統使用帳號數超過 1400 個，規費收費金額超過新臺幣 700 萬元，全年使用即時動態定位服務總時數約 40000 小時(陳鶴欽, 2015;內政部國土測繪中心, 2018)。

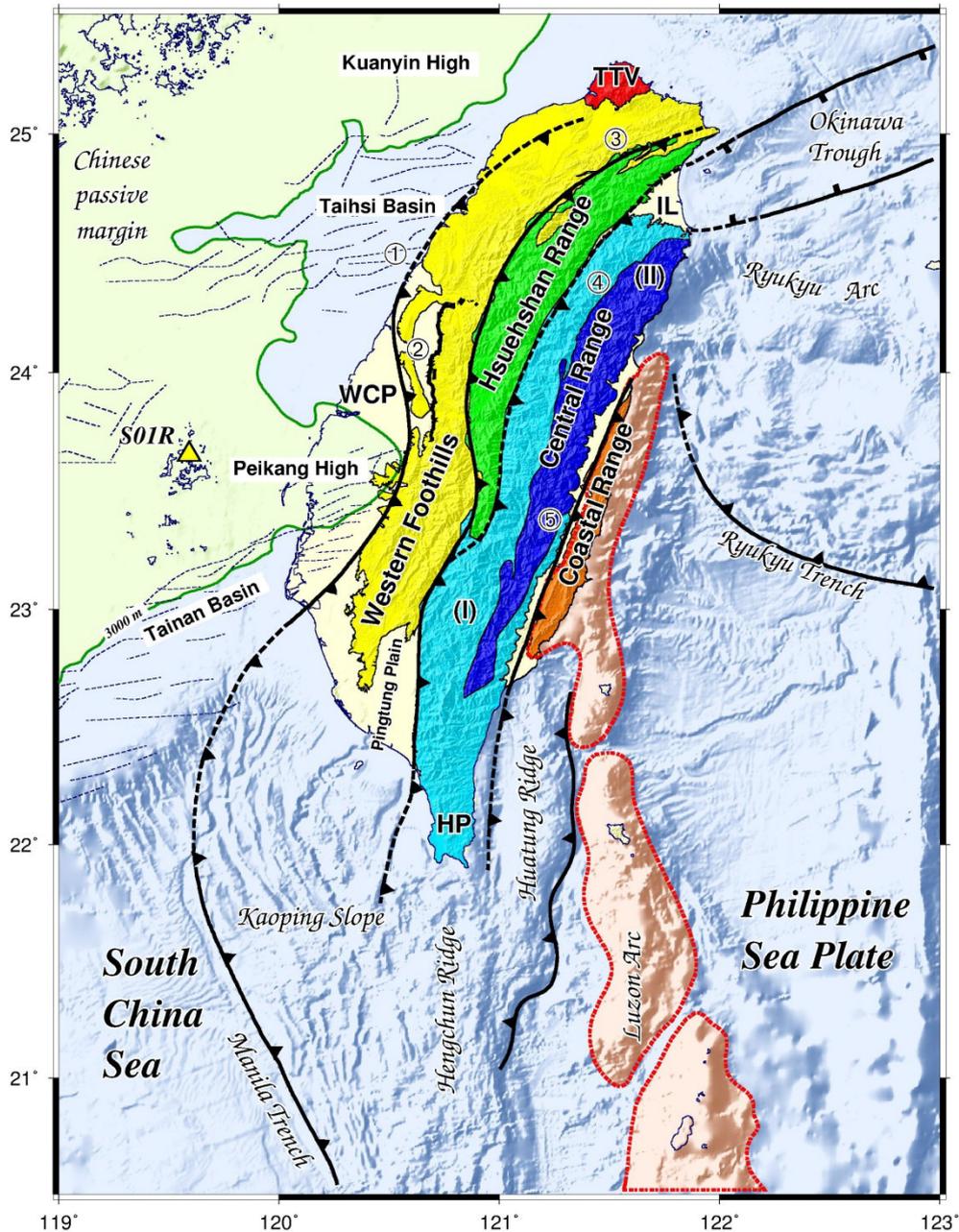


圖 1 臺灣大地構造框架(景國恩等, 2017)

說明：綠色的大陸邊緣區域為先第三系基盤高區的位置(Lin et al., 2003)。虛線為碰撞造山前所發育之正斷層。WCP 為西部海岸平原；TTV 為大屯火山；HP 為恆春半島；IL 為宜蘭平原。數字 1-5 分別代表變形前緣、車籠埔斷層、屈尺斷層、梨山斷層及縱谷斷層。I-II 分別代表中央山脈西翼板岩區及中央山脈東翼變質雜岩區。

二、 衛星基準站成果資料處理

2018年2月6日晚上23點50分(UTC 15:50)，花蓮縣近海發生規模6級淺層地震，其中花蓮市最大震度達到7級，造成花蓮市附近區域多處建築物倒塌及人員傷亡，國土測繪中心於2018年2月7日聯繫中央研究院地球科學研究所、交通部中央氣象局、經濟部中央地質調查所及成功大學等單位，研擬檢測範圍及資料處理原則，初步建議資料處理範圍為南宜蘭縣、花蓮縣及北臺東縣，西側以新竹尖石泰安站(THAI)及玉山北峰站(YUSN)連線範圍內，共處理53站連續追蹤站資料。觀測資料計算時間以主震前16小時及震後8小時等2個時間段為主，計算基準站受地震影響之位移量，所有成果以約制在金門追蹤站(KMNM)為主，成果顯示，最大位移量為花蓮氣象站(HUAL)，往東北北方向位移約45公分(dN:0.426m,dE:0.148m)，位移量過1公分者有11個基準站成果如附圖2及表1。因位移量過大，已對國土測繪中心e-GNSS系統定位精度造成影響，國土測繪中心已派員於該地區進行已知控制點檢測，並評估是否須更新基準站坐標。

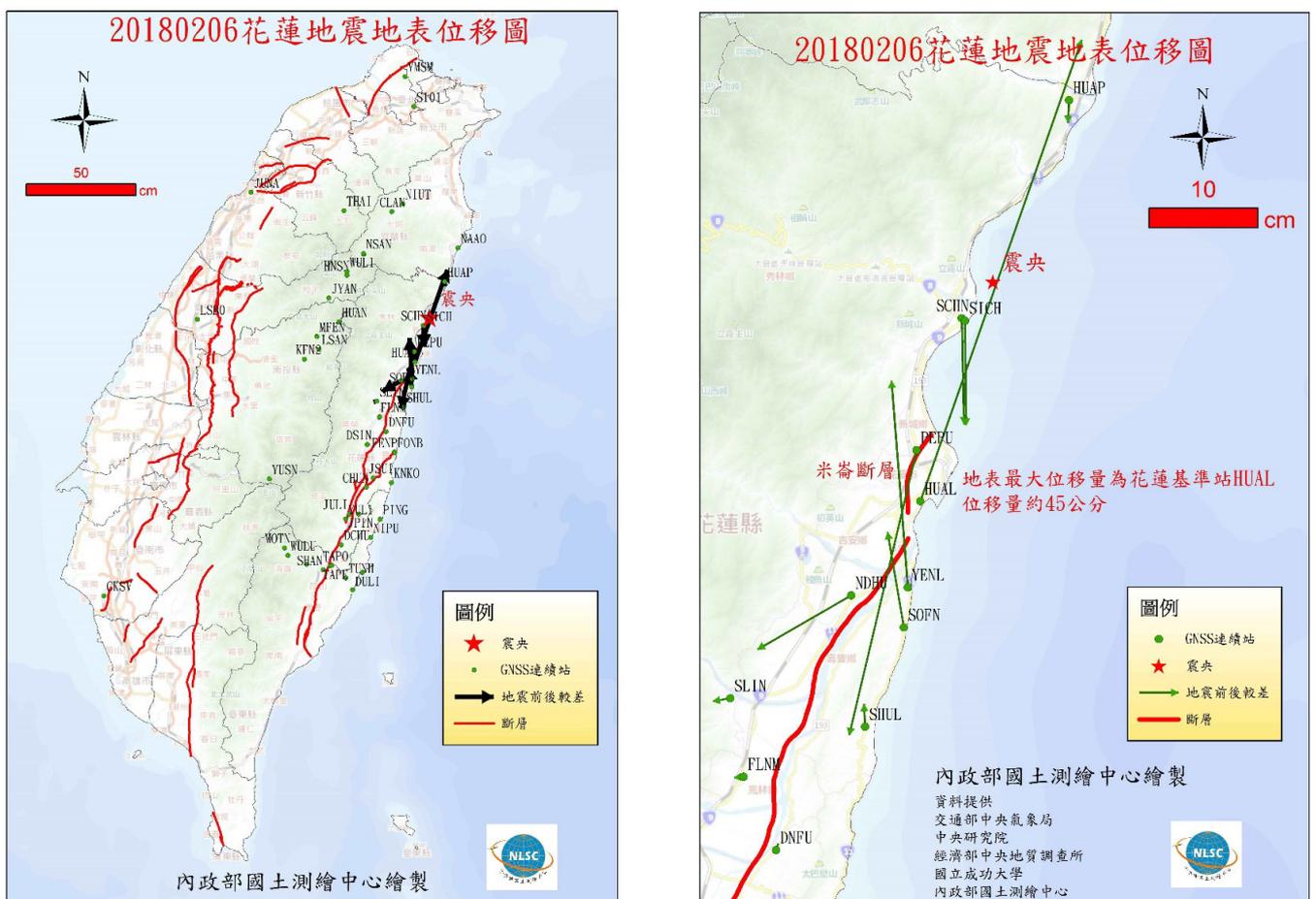


圖 2 : 0206 花蓮地震地表位移圖

表 1：0206 花蓮地震基準站地震前後坐標較差表

20180206 花蓮地震前後坐標較差						單位：公尺
點號	dN	dE	dh	S	站名	單位
HUAL	0.426	0.148	0.063	0.451	花蓮氣象站	氣象局
HUAP	-0.021	-0.001	0.025	0.021	和平	氣象局
NDHU	-0.050	-0.086	0.043	0.099	東華大學	氣象局
NSAN	-0.012	0.002	0.025	0.012	南山	氣象局
PEPU	-0.263	-0.062	0.101	0.270	北埔	氣象局
SCHN	-0.098	0.002	-0.001	0.098	新城	中研院
SHUL	0.021	-0.001	0.005	0.021	水璉國中	氣象局
SICH	-0.097	0.001	-0.005	0.097	新城	測繪中心
SLIN	-0.003	-0.016	0.024	0.016	西林	氣象局
SOFN	0.088	-0.015	0.000	0.089	壽豐	測繪中心
YENL	0.191	-0.015	-0.033	0.192	東管處	氣象局

說明：

1. 資料處理範圍為南宜蘭、花蓮及北台東，西側以新竹尖石泰崗站及玉山北峰站連線範圍內，共處理53站連續追蹤站資料。
2. 觀測資料計算時間以107/2/6 00:00 至15:50(UTC) 及 107/2/6 16:00至24:00(UTC) 等2個時間段為主(主震時間為15:53(UTC)，臺灣時間23:53)。
3. 所有成果約制在金門追蹤站(KMNM)。

三、 即時動態定位成果分析

為了解震後未更新基準站坐標動態定位成果及相關細部資料，2 月 13 日派員進行即時動態定位測量，測試系統定位成果情形，在地震前，花蓮地區使用者通常為數秒鐘即可得固定解(FIXED)，惟本次挑選辦理花蓮地區 30 點基本控制點進行 e-GNSS 檢測(以易到達點位為主)，僅 17 個點位可獲得動態成果，位於新城鄉花蓮市吉安鄉成果不佳且成果無規則性，最大較差 U043 約 81.7 公分(dN：-0.766m, dE：-0.285m, dh：-0.099m)(如表 2、圖 3)。相關成果顯示，震後的 e-GNSS 系統部分地區成果精度已不如預期，國土測繪中心規劃派員進行檢測，並評估是否須更新基準站坐標。檢測期間，本中心建議自和平基準站至鳳林追蹤站之間區域，對於高精度定位測量作業，應避免使用本中心 e-GNSS 系統，如仍有使用本中心 e-GNSS 系統定位服務之必要時，應先至鄰近已知點進行檢核無誤後，再予辦理，並請自行評估是否可達作業目的精度，以確保測量成果之正確性，避免造成後續相關問題。

表 2：基準站坐標更新前 TTG 三維坐標轉換坐標與公告坐標成果差異表

點號	2010_N	2010_E	2010_h	2010_N(檢測)	2010_E(檢測)	2010_h(檢測)	2010_△N	2010_△E	2010_△h
E549	2642575.383	305048.164	50.774	2642575.367	305048.145	50.717	0.016	0.019	0.057
E319	2660699.038	312686.112	42.837	2660698.969	312686.069	42.738	0.069	0.043	0.099
E637	2653340.621	311879.658	27.779	2653340.471	311879.602	27.565	0.150	0.056	0.214
E970	2646891.005	311490.703	45.756	2646891.503	311490.673	45.677	-0.498	0.030	0.079
U025	2668929.011	316594.782	32.728	2668929.014	316594.762	32.633	-0.003	0.020	0.095
U027	2664174.223	312008.612	39.186	2664174.205	312008.568	39.147	0.018	0.044	0.039
U028	2661269.110	310254.430	90.411	2661269.106	310254.374	90.325	0.004	0.056	0.086
U038	2655967.516	312600.264	32.437	2655967.412	312600.183	32.426	0.104	0.081	0.011
U043	2654331.366	312921.538	77.659	2654332.132	312921.823	77.758	-0.766	-0.285	-0.099
U053	2649346.310	301570.352	160.190	2649346.217	301570.087	159.934	0.093	0.265	0.256
U064	2647087.690	304764.276	98.872	2647087.589	304764.191	98.871	0.101	0.085	0.001
U070	2644582.550	311390.053	58.975	2644582.696	311390.113	58.834	-0.146	-0.060	0.141
U083	2638649.211	310536.143	35.724	2638649.286	310536.143	35.655	-0.075	0.000	0.069
U086	2636807.677	301917.459	75.221	2636807.659	301917.461	75.162	0.018	-0.002	0.059
U224	2659282.755	313538.057	31.960	2659282.607	313538.020	31.846	0.148	0.037	0.114
U231	2638816.757	304189.544	62.817	2638816.732	304189.564	62.812	0.025	-0.020	0.005
U237	2636870.628	309845.969	41.163	2636870.679	309845.977	41.025	-0.051	-0.008	0.138



圖 3：震後使用即時動態定位測量基本控制點成果較差示意圖

為因應前述基準站位移，國土測繪中心挑選宜蘭南澳基準站（NAAO）以南，花蓮

鳳林追蹤站 (FLNM) 以北及宜蘭棲蘭基準站 (CLAN) 及南投高峰基準站 (KFN2) 之範圍內約 22 個基準站，蒐集 2 月 7 日至 2 月 13 日計 7 日，每日 24 小時之基準站衛星觀測資料，搭配 IGS 之快速精密星曆 (IGR)，約制測繪中心基準站 (LSB0)，以 Bernese 軟體重新解算基準站坐標為 e-GNSS 【2017A】，如圖 4，更新本次地震前、後位移超過 1 公分之 11 個基準站坐標，並同步更新本系統三維坐標轉換模型，相關成果並於 2 月 23 日公布使用。另規劃進行 e-GNSS 動態定位成果檢測作業及轄區內約 53 個基本控制點 6 小時靜態檢測作業。

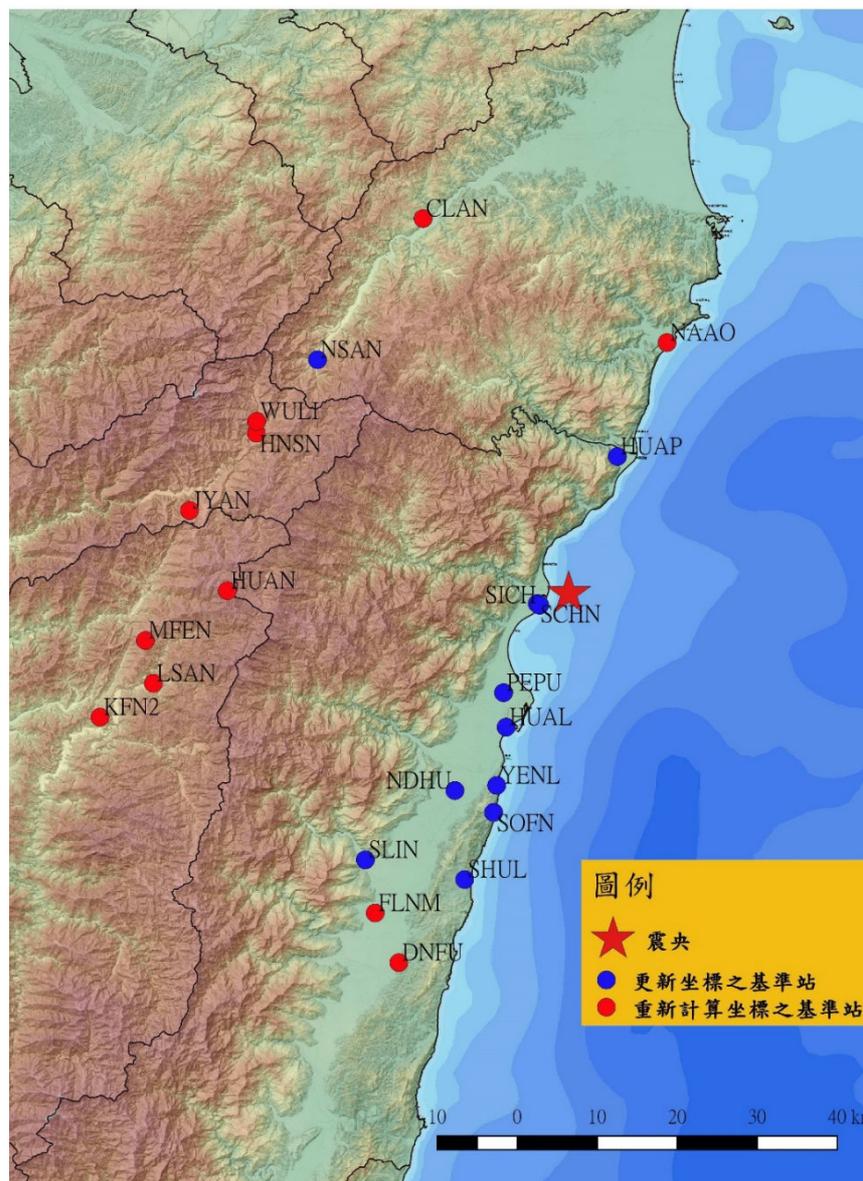


圖 4 因 0206 花蓮地震基準站坐標成果更新點位分布圖

為了解基準站坐標更新後的即時動態定位成果，國土測繪中心於 3 月 8 日使用 3 組

儀器辦理 44 點基本控制點檢測，成功解算 43 點(解算失敗為 E008 米崙山，因透空不良)，相關成果較差顯示，基準站站標修正後動態觀測成功率由 57%提高至 98%(如表 3 及圖 5)，惟 TTG 三維轉換成果仍不如預期(平面及高程分別優於 5、10 公分，如表 4)，研判基準站站標修正後進行基本控制點 TTG2010 動態觀測，在本次花蓮地震案例中，衛星基準站分布間距為數公里至數十公里不等，僅能概略顯示本次地震影響位移方向及量級，無法完整表現部分地區複雜之地表擠壓變形狀況，以致 TTG 網格修正量無法完全反映小範圍變動量，故有部分點位經本系統三維坐標轉換後，與公告坐標有較大差值，並於 3 月 21 日公布 e-GNSS 即時動態定位系統三維坐標轉換服務於花蓮縣和平基準站至鳳林追蹤站之間暫停適用。

表 3： e-GNSS 系統基準站站標更新前後檢測成果比較表

	基準站站標修正前	基準站站標修正後
規劃觀測點數	30	44
動態觀測成功點數	17	43
快速靜態解算點數	13	0
無成果點數	0	1

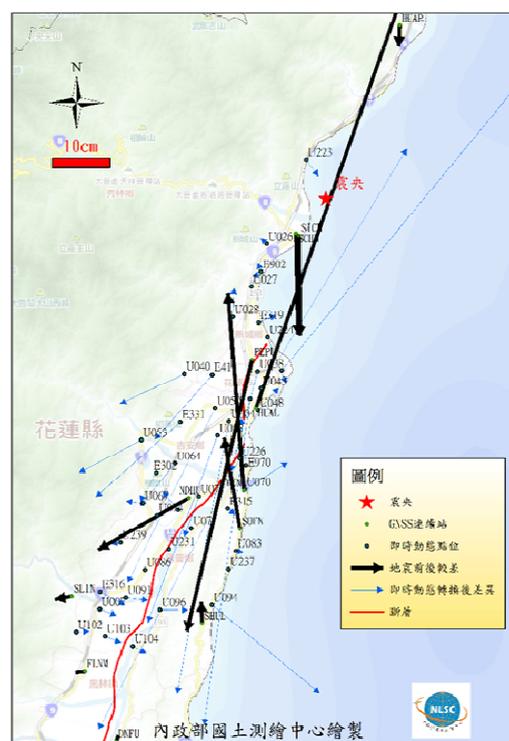


圖 5 基準站站標修正後檢測成果較差示議圖

表 4：震後 TTG 三維坐標轉換坐標與公告坐標成果差異表

點號	公告_N	公告_E	公告_h	震後檢測					
				TTG_N	TTG_E	TTG_h	△N	△E	△h
E302	2646157.476	303005.680	623.482	2646157.421	303005.649	623.436	-0.055	-0.031	-0.046
E315	2642715.337	309760.837	461.762	2642715.325	309760.851	461.709	-0.012	0.014	-0.053
E316	2634695.509	297656.181	252.646	2634695.483	297656.228	252.611	-0.026	0.047	-0.035
E319	2660699.038	312686.112	42.837	2660699.052	312686.145	42.715	0.014	0.033	-0.122
E331	2651108.339	305269.202	321.234	2651108.194	305269.042	321.218	-0.145	-0.160	-0.016
E415	2655640.485	308296.969	73.279	2655640.360	308296.860	73.348	-0.125	-0.109	0.069
E549	2642575.383	305048.164	50.774	2642575.419	305048.135	50.823	0.036	-0.029	0.049
E637	2653340.621	311879.658	27.779	2653339.991	311879.571	27.537	-0.630	-0.087	-0.242
E902	2665608.538	312922.893	32.193	2665608.555	312922.887	32.113	0.017	-0.006	-0.080
E970	2646891.005	311490.703	45.756	2646891.096	311490.694	45.641	0.091	-0.009	-0.115
U004	2651169.343	309875.810	42.834	2651168.817	309875.712	42.816	-0.526	-0.098	-0.018
U007	2632984.502	297620.309	152.464	2632984.490	297620.341	152.378	-0.012	0.032	-0.086
U026	2668294.227	313469.304	66.767	2668294.238	313469.292	66.650	0.011	-0.012	-0.117
U027	2664174.223	312008.612	39.186	2664174.252	312008.624	39.098	0.029	0.012	-0.088
U028	2661269.110	310254.430	90.411	2661269.165	310254.432	90.318	0.055	0.002	-0.093
U037	2656053.360	314877.946	31.969	2656054.322	314878.726	32.238	0.962	0.780	0.269
U038	2655967.516	312600.264	32.437	2655967.323	312600.213	32.305	-0.193	-0.051	-0.132
U040	2655727.191	305653.197	118.576	2655727.134	305653.075	118.580	-0.057	-0.122	0.004
U043	2654331.366	312921.538	77.659	2654331.829	312921.814	77.852	0.463	0.276	0.193
U048	2652244.033	312625.039	29.975	2652244.076	312625.078	29.915	0.043	0.039	-0.060
U050	2652421.188	308567.264	50.742	2652420.851	308567.098	50.721	-0.337	-0.166	-0.021
U053	2649346.310	301570.352	160.190	2649346.247	301570.234	160.186	-0.063	-0.118	-0.004
U057	2649789.678	308792.672	54.949	2649789.317	308792.540	54.912	-0.361	-0.132	-0.037
U064	2647087.690	304764.276	98.872	2647087.608	304764.210	98.834	-0.082	-0.066	-0.038
U067	2643224.190	301711.315	94.398	2643224.194	301711.283	94.328	0.004	-0.032	-0.070
U070	2644582.550	311390.053	58.975	2644582.602	311390.134	58.897	0.052	0.081	-0.078
U071	2643890.353	307030.130	52.706	2643890.275	307030.102	52.669	-0.078	-0.028	-0.037
U074	2642047.440	303073.784	66.978	2642047.430	303073.781	66.896	-0.010	-0.003	-0.082
U077	2640831.997	306301.782	56.549	2640831.994	306301.783	56.475	-0.003	0.001	-0.074
U083	2638649.211	310536.143	35.724	2638649.207	310536.158	35.673	-0.004	0.015	-0.051
U086	2636807.677	301917.459	75.221	2636807.677	301917.464	75.106	0.000	0.005	-0.115
U091	2634123.981	300106.284	121.637	2634123.976	300106.326	121.538	-0.005	0.042	-0.099
U094	2633406.014	308260.559	82.358	2633405.844	308260.763	82.070	-0.170	0.204	-0.288
U096	2632939.639	303332.420	90.766	2632939.638	303332.473	90.676	-0.001	0.053	-0.090
U102	2630760.359	295407.445	161.180	2630760.361	295407.469	161.111	0.002	0.024	-0.069
U103	2630379.040	298128.067	115.413	2630379.028	298128.097	115.332	-0.012	0.030	-0.081
U104	2629432.343	300763.201	96.726	2629432.329	300763.226	96.642	-0.014	0.025	-0.084
U223	2676434.958	317203.696	82.621	2676434.926	317203.719	82.490	-0.032	0.023	-0.131
U224	2659282.755	313538.057	31.960	2659282.666	313538.092	31.842	-0.089	0.035	-0.118
U226	2647556.603	310901.376	29.159	2647556.079	310901.108	29.223	-0.524	-0.268	0.064
U231	2638816.757	304189.544	62.817	2638816.758	304189.549	62.754	0.001	0.005	-0.063
U237	2636870.628	309845.969	41.163	2636870.632	309845.978	41.103	0.004	0.009	-0.060
U239	2639466.445	299581.182	94.259	2639466.442	299581.165	94.166	-0.003	-0.017	-0.093

四、三維即時轉換(TTG)成果探討

依據基準站坐標修正前檢測成果顯示，該區域基本控制點位移情形雜亂無章，動態

觀測差異較大的區域範圍大，經基準站坐標修正後，基本控制點位移情形較有系統性，斷層帶西邊約往西南方向位移，東邊約往東北方向位移，僅基準站位移較大附近動態觀測發生差異較大情形。惟整體成果仍不符預期，顯示在部分基準站間有不規則擠壓或伸張位移，為解決此一問題，規劃加入 6 小時靜態觀測之基本控制點解算成果，修正該區域基本控制點 TWD97[2010]公告坐標，以該區域修正後基本控制點 TWD97[2010]坐標(先行簡稱 TWD97[2010A])，重新計算轉換模型網格，使 TTG2010 動態觀測成果更接近 TWD97[2010A]的公告坐標。

惟在內政部 107 年 4 月 20 日公布 TWD97[2010A]成果之前，仍有部分人士急需使用 e-GNSS 系統辦理該區域相關測量作業，國土測繪中心茲公告因應措施如下：

(一)本系統三維坐標轉換服務 (TTG_TWD97、TTG_2010 及網頁版轉換) 於花蓮縣和平基準站 (HUAP) 至鳳林追蹤站 (FLNM) 之間暫時停止適用。使用者如於上述地區有外業需求，應使用 Taiwan 登錄點求得 e-GNSS 【2017A】坐標成果。

(二)使用者於該區域之觀測成果若需符合公告坐標成果，作法如下：

1. 檢測測區外圍已知控制點，以可包覆測區為原則。

2. 比較轉換後坐標與已知坐標較差量級與方向性：

(1)較差量級與方向性一致，表示轉換成果與已知成果僅存在系統差，可將測區內測量成果轉換後直接平移(加上較差量)，獲得法定坐標系統測量成果。

(2)較差量級與方向性不一致，表示轉換成果與已知成果除了存在系統差，可能還有已知控制點位移量，應採用坐標轉換與最小二乘配置之方法，先將有問題的已知控制點找出來並剔除後，再進行坐標轉換與套合，獲得獲得法定坐標系統測量成果。

經使用內政部新公告花蓮地區基本控制點成果顯示，在納入基本控制點成果前有 34 點為平面較差超過 5 公分，2 個點位高程較差超過 10 公分，更新模型後，全數點位平面較差均小於 5 公分，僅 1 個點位高程較差大於 10 公分(0.103m)，顯示成果已符合預

期(平面優於 5 公分，高程優於 10 公分)，可提供各界轉換使用。

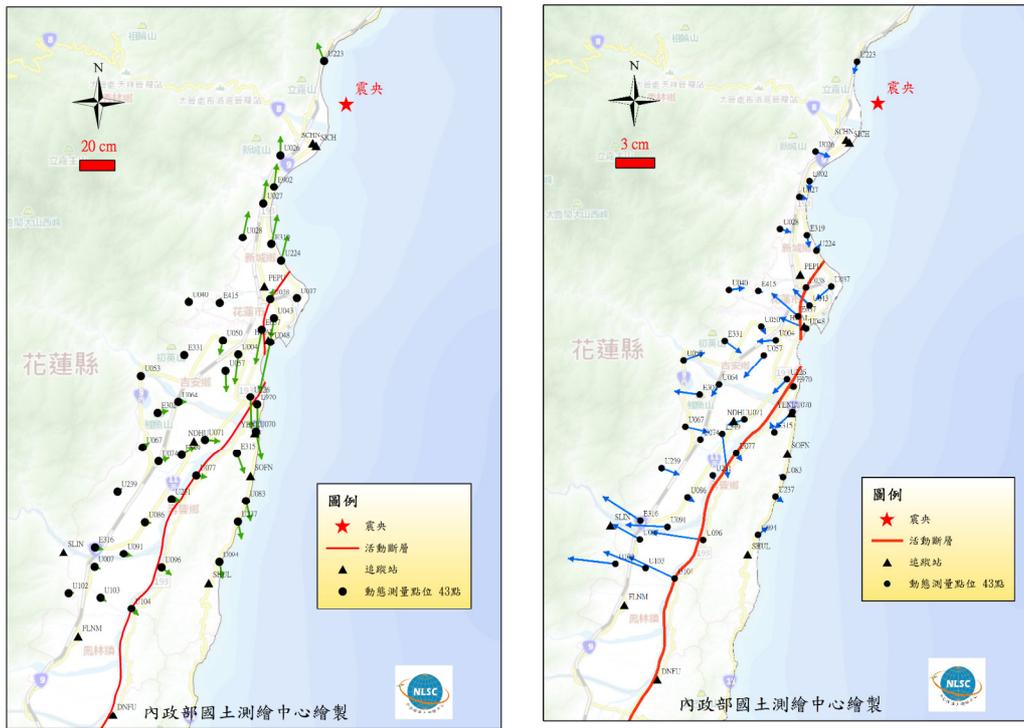


圖 5：e-GNSS[2017A]轉換至 TWD97[2010A]模型未含基本控制點(左)模型含基本控制點(右)成果圖

表 5 納入基本控制點建模型前較差表 單位：公尺

分量	N	E	h
最大值	0.253	0.129	0.107
最小值	-0.423	-0.095	-0.099
中誤差	0.155	0.047	0.046
平均值	-0.031	0.033	0.012

表 6 納入基本控制點建模型後較差表 單位：公尺

分量	N	E	h
最大值	0.022	0.021	0.064
最小值	-0.040	-0.047	-0.101
中誤差	0.012	0.018	0.031
平均值	-0.001	-0.007	-0.004

五、 結論與建議

在 0206 地震後，由 e-GNSS 系統內花東地區 53 個基準站資料計算發現，本次最大同震位移在花蓮氣象站(HUAL)，地表位移約 45 公分，已對該地區 e-GNSS 基準站及基本控制點造成影響，點位相對成果精度已不符原規劃精度要求。

透過快速精密星曆及 7 天的觀測量所建立的基準站成果雖可滿足 e-GNSS 系統營運精度需求，但是僅可在遭遇重大災害時使用，長期使用仍需依常規計算高精度基準站坐標成果並定期更新，以符合系統需求。

在花蓮地震的成果得知，經由更新基準站正確成果確可提升 e-GNSS 系統外業操作的便利性及正確性，在本次作業成果較差顯示，基準站坐標修正後動態觀測成功率由 57%提高至 98%。

在地震後原 e-GNSS 系統所提供之三維即時轉換功能也因基準站間產生相對位移而喪失原本設計精度，經由重新計算基準站坐標、並加密轉換模型點位數量，方可達到原本平面優於 5 公分，高程優於 10 公分的轉換精度要求。

由本次花蓮地震的檢測成果發現，不規則的地表變形及過大的變形量將造成 e-GNSS 系統的營運困難，影響動態定位成果及精度，國土測繪中心透過本次經驗，應建立一個遭遇突發事件因應措施及作為，以提供各界更優質穩定的定位服務。

六、 致謝

本文感謝花蓮縣政府、花蓮地政事務所協助國土測繪中心北區第一測量隊辦理各項外業測量工作，另中央研究院地球科學研究所、交通部中央氣象局及經濟部中央地質調查所提供相關基準站資料，臺北大學陳國華教授、成功大學景國恩教授協助處理基準站資料及意見。

七、 參考文獻

內政部國土測繪中心，2018，106 年度 e-GNSS 營運報告，<http://www.nlsc.gov.tw/>，前次查閱 2018/6/30。

交通部中央氣象局，<http://www.cwb.gov.tw/>，前次查閱 2018/6/30。

莊峰輔、湯凱佩、王敏雄、劉正倫，三維即時坐標轉換輔助 VBS-RTK 定位技術獲得法定坐標系統測量成果之研究，國土測繪與空間資訊，第四卷第 1 期，pp41-62，2014。

陳鶴欽，2009，結合低價單頻 GPS 接收儀與虛擬參考站定位精度之研究，成功大學博士論文，台南。

陳鶴欽、蕭世民、莊峰輔、梁旭文，2015，e-GNSS[2015]坐標更換及營運實務探討，2015 年台灣地理學會年會暨學術研討會，臺中，逢甲大學。

Bos, A. G., W. Spakman, and M. C. J. Nyst (2003), Surface deformation and tectonic setting of Taiwan inferred from a GPS velocity field, *J. Geophys. Res.*, 108, 2458, doi:10.1028/2002JB002336.

Chang, C.-P., T.-Y. Chang, J. Angelier, H. Kao, J.-C. Lee, and S.-B. Yu (2003), Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: Constraints from GPS observations and tectonic data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214, 115-127.

Chen H.-Y., S.-B. Yu, L.-C. Kuo, and C.-C. Liu (2006), Coseismic and postseismic displacements of the 10 December 2003 (MW 6.5) Chengkung, eastern Taiwan, earthquake, *Earth Planets Space*, 58, 5-21.

Cheng, L.-W., J.-C. Lee, J.-C. Hu, and H.-Y. Chen (2009), Coseismic and postseismic slip distribution of the 2003 Mw = 6.5 Chengkung earthquake in eastern Taiwan: Elastic modeling from inversion of GPS data, *Tectonophysics*, 466, 335-343.

Ching, K.-E., K. M. Johnson, R.-J. Rau, R. Y. Chuang, L.-C. Kuo, and P.-L. Leu (2011), Inferred fault geometry and slip distribution of the 2010 Jiashian, Taiwan, earthquake is consistent with a thick-skinned deformation model, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 301, 78-86.

Hsu, Y.-J., S.-B. Yu, M. Simons, L.-C. Kuo, and H.-Y. Chen (2009a), Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, 479, 4-18.

Hsu, Y.-J., N. Bechor, P. Segall, S.-B. Yu, L.-C. Kuo, and K.-F. Ma (2002), Rapid afterslip following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 29,

10.1029/2002GL014967.

Hsu, Y.-J., P. Segall, S.-B. Yu, L.-C. Kuo, and C. A. Williams (2007), Temporal and spatial variations of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Geophys. J. Int.*, 169, 367-379.

Hsu, Y.-J., S.-B. Yu, and H.-Y. Chen (2009c), Coseismic and postseismic deformation associated with the 2003 Chengkung, Taiwan earthquake, *Geophys. J. Int.*, 176, 420-430.

Hsu, Y.-J., S.-B. Yu, M. Simons, L.-C. Kuo, and H.-Y. Chen (2009a), Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, 479, 4-18.

Lachapelle, G., Alves, P., Fortes, L. P., Cannon, M. E., DGPS RTK Positioning Using a Reference Network, *Proceedings of ION GPS 2000*, Salt Lake City, Utah, 1165-1171, 2000.

Landau, H., Vollath, U., Chen, X., Virtual Reference Station System, *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 1, No. 2, 137-143, 2002.

Vollath, U., Deking A., Landau, H. Pagels, C., Wagner, B., Long Range RTK using Virtual Reference Stations, *Proceedings of the international Symposium on Kinematic system in Geodesy, Geomatics and Navigation*, Banff, Canada, June 2001

Yu, S.-B., and H.-Y. Chen (1994), Global positioning system measurements of crustal deformation in the Taiwan arc-continent collision zone, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 5, 477-498.

Yu, S.-B., and L.-C. Kuo (2001), Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 333, 199-217.

Yu, S.-B., H.-Y. Chen, and L.-C. Kuo (1997), Velocity field of GPS Stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, 274, 41-59.

Yu, S.-B., L.-C. Kuo, R.-S. Punongbayan, and E.-G. Ramos (1999), GPS observation of crustal motion in the Taiwan-Luzon region, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 923-926.

Yu, S.-B., L.-C. Kuo, Y.-J. Hsu, H.-H. Su, C.-C. Liu, C.-S. Hou, J.-F. Lee, T.-C. Lai, C.-C. Liu, C.-L. Liu, T.-F. Tseng, C.-S. Tsai, and T.-C. Shin (2001), Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 995-1012.

Yu, S.-B., Y.-J. Hsu, L.-C. Kuo, H.-Y. Chen, and C.-C. Liu (2003), GPS measurement of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 108, 10.1029/2003JB002396.