

第四章 大地起伏成果分析

本文中運用不同地球重力模型，以探討大地起伏模式的精度，是否可僅由地球重力模型內差出來之長波長大地起伏之成果，決定何者最適合區域性重力大地起伏使用。並展示中波長、短波長及經去除計算回復法之重力大地起伏模型、以及 GPS/水準資料修正區域性重力大地起伏模型獲得之台灣大地起伏模型。

4-1 檢核路線

內政部於 2003 年委託中興測量公司、內政部土地測量局測量四條檢核路線，該路線分佈於台灣之北部濱海路線、台 9 線花東路線、中橫路線、南橫路線，於各路線進行 24 小時的 GPS 定位測量獲得高精度橢球高，及水準量測所得正高資料，共計有 39 個檢核點，包含 38 個一等一級水準點、1 個二等衛星控制點(此點沒有用作檢核)。各檢核點位之分佈圖及大地起伏值如圖 4-1，各點之點位經、緯度座標及橢球高、正高資料，請見呂誌強 (2004)。

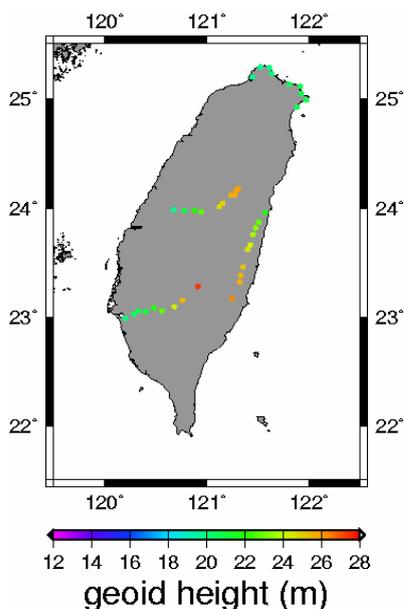


圖 4-1、四條檢核路線上檢核點之分佈及其大地起伏值

4-2 長波長大地起伏

為探討全球大地位模式與台灣區域性大地起伏模型的關係，分成兩部分分析，第一種方法僅採長波長大地起伏值與檢核點相比較，第二種方法採用本文之大地起伏計算流程配合相關資料計算獲得之大地起伏值與檢核點相比較，目的在探討是否可僅由長波長模型之精度，決定最合適作為區域大地起伏模型計算之全球大地位模式來源。本節進行第一種方法比較。

首先內差地球重力模型之長波長大地起伏值，與獨立檢核點之大地起伏值相比較，所獲得之成果如下。各模式之長波長大地起伏分佈情形如圖 4-2（解析度 $5' \times 5'$ ），統計值如表 4-1~表 4-6。

圖 4-2 各模型大地起伏值分佈趨勢大致相近，其中 GGM02S 結合 EGM96 模型在台灣海峽分佈形狀較特殊，且在宜蘭花蓮外海大地起伏值較其他 5 個模式遞減程度多達 2 公尺，在中部山區較其他 5 個模式遞增超過 1 公尺數量級，此模式明顯不同其他模式；GGM01C 結合 EGM96 模型模式在中南部山區較 GGM02S 結合 EGM96 模型以外 4 個模型大地起伏值減少 1 公尺數量級。

針對分佈形狀，CG01C 成果在新竹外海等值線 17 公尺大地起伏之為閉合形狀，非常特別。並發現 GGM01S 結合 EGM96 模型與 GGM02C 結合 EGM96 模型的相似度極高，不論在分佈趨勢之形狀、大小、地理位置，經比對表 4-2 與表 4-6 統計值，發現兩成果最大相差 16 公分，最小相差 1 公分（均在北路濱海路線）。

單只用全球大地位模式所獲得之大地起伏值，以全部檢核結果平均而言，最佳者為 GGM01C 結合 EGM96 高階項次，標準偏差僅 56.6 公分；次佳者為 CG01C，標準偏差 62.4 公分及 GGM02C 結合 EGM96 高階項次，標準偏差 65.8 公分；其次為 EGM96 模型，標準偏差為 70.3 公分及 GGM01S 結合 EGM96 高階項次，標準偏差為 70.7 公分；最差的是 GGM02S 結合 EGM96 高階項次，標準偏差 147.1 公分。其中前五個模型精度差異不甚大，而 GGM02S 結合 EGM96 高階像次模型成果明顯降低許多。

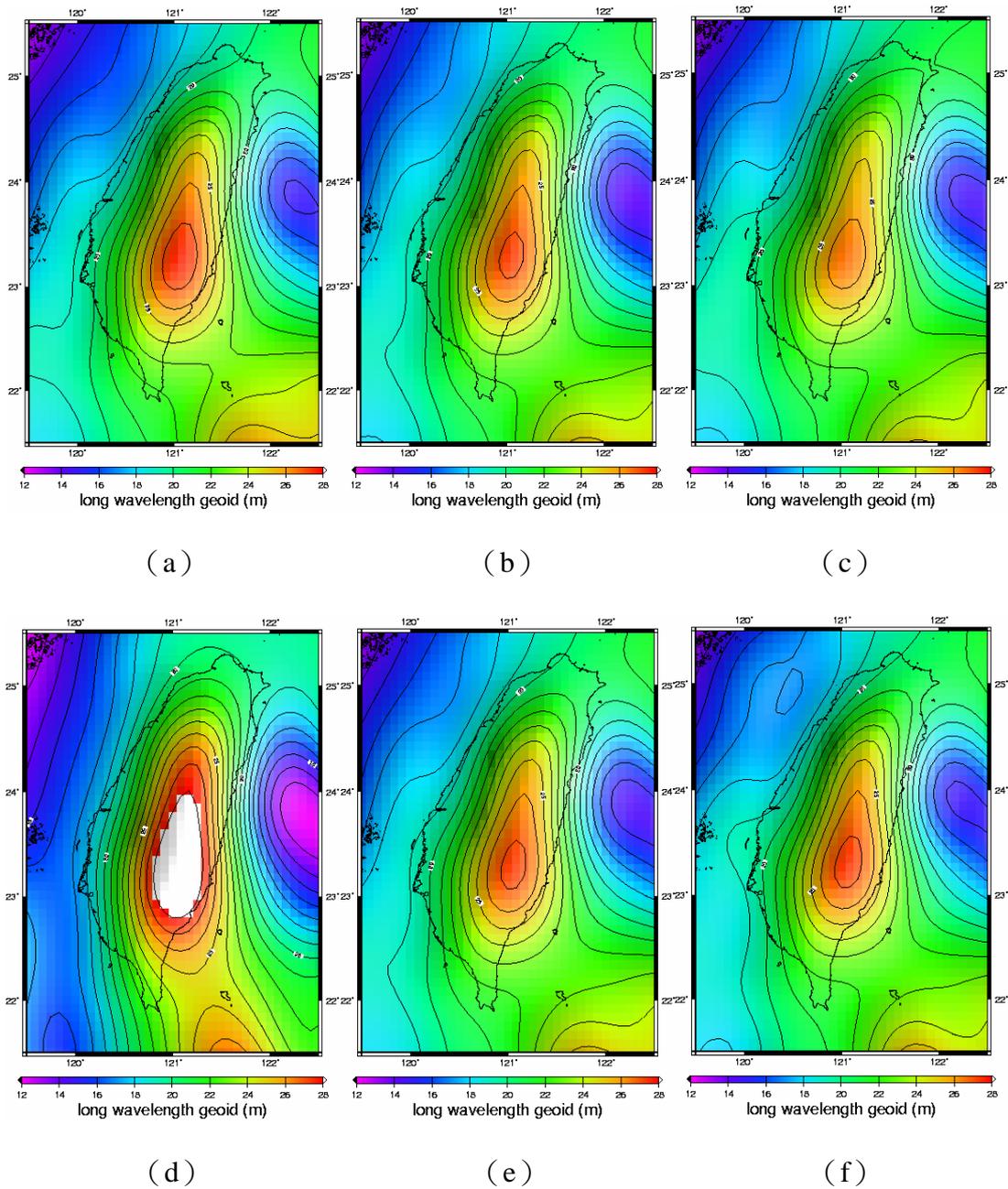


圖 4-2、長波長大地起伏，等值線間隔：1 公尺，等值線範圍 12 公尺~28 公尺，(a) EGM96 模型、(b) GGM01S 結合 EGM96 模型、(c) GGM01C 結合 EGM96 模型、(d) GGM02S 結合 EGM96 模型、(e) GGM02C 結合 EGM96 模型、(f) CG01C 模型

表 4-1、EGM96 大地起伏檢核成果統計表（單位：公尺）

	最大值	最小值	平均	標準偏差
北部濱海路線	0.427	0.276	0.370	0.046
台 9 線花東路段	-0.326	-0.601	-0.469	0.096
中橫路段	0.754	-1.971	-0.755	1.028
南橫路段	0.259	-1.137	-0.588	0.464
全部	0.754	-1.971	-0.374	0.703

表 4-2、GGM01S 結合 EGM96 之大地起伏檢核成果統計表（單位：公尺）

	最大值	最小值	平均	標準偏差
北部濱海路線	0.382	-0.210	0.153	0.230
台 9 線花東路段	0.069	-0.116	-0.031	0.064
中橫路段	0.809	-2.032	-0.783	1.107
南橫路段	0.501	-1.004	-0.465	0.486
全部	0.809	-2.032	-0.288	0.707

表 4-3、GGM01C 結合 EGM96 之大地起伏檢核成果統計表（單位：公尺）

	最大值	最小值	平均	標準偏差
北部濱海路線	-0.229	-0.502	-0.329	0.086
台 9 線花東路段	0.417	-0.024	0.206	0.124
中橫路段	1.061	-1.218	-0.202	0.873
南橫路段	1.221	-0.702	-0.225	0.631
全部	1.221	-1.218	-0.130	0.566

表 4-4、GGM02S 結合 EGM96 之大地起伏檢核成果統計表（單位：公尺）

	最大值	最小值	平均	標準偏差
北部濱海路線	1.296	-0.713	0.487	0.750
台 9 線花東路段	-0.853	-2.330	-1.699	0.476
中橫路段	-0.947	-4.077	-2.627	1.115
南橫路段	1.428	-1.929	-0.713	1.211
全部	1.428	-4.077	-1.192	1.471

表 4-5、GGM02C 結合 EGM96 之大地起伏檢核成果統計表（單位：公尺）

	最大值	最小值	平均	標準偏差
北部濱海路線	0.226	-0.205	0.055	0.164
台 9 線花東路段	-0.084	-0.220	-0.158	0.048
中橫路段	0.748	-2.014	-0.794	1.064
南橫路段	0.508	-0.938	-0.402	0.472
全部	0.748	-2.014	-0.333	0.658

表 4-6、CG01C 之大地起伏檢核成果統計表（單位：公尺）

	最大值	最小值	平均	標準偏差
北部濱海路線	0.108	-0.105	0.019	0.064
台 9 線花東路段	0.023	-0.454	-0.280	0.158
中橫路段	0.793	-1.971	-0.739	1.035
南橫路段	0.520	-0.887	-0.360	0.468
全部	0.793	-1.971	-0.349	0.624

各模型整體誤差趨勢頗一致，均為中橫、南橫較大，北濱及花東路線較小。其中 GGM02S 結合 EGM96 高階項係數的長波長大地起伏值成果誤差趨勢亦雷同，僅其誤差值與其他五個模型相較特別大。

各全球大地位模式在中橫路線誤差的標準偏差均約 1 公尺級，僅 GGM01C 結合 EGM96 略低，GGM01S 結合 EGM96 模型、GGM02S 結合 EGM96 模型略高，可發現地形越高，造成長波長大地起伏成果精度越低；南橫路線均約標準偏差 47 公分左右，僅 GGM01C 結合 EGM96 略大 63 公分，而 GGM02S 結合 EGM96 模型成果特差，標準偏差 1.21 公尺甚至大於在中橫路線之誤差；北濱的成果相較為佳，但精度較不一致，其中以 EGM96、GGM01C 結合 EGM96、CG01C 模型最佳，標準偏差在 10 公分以下，GGM01S 結合 EGM96、GGM02C 結合 EGM96 在 20 公分左右，僅 GGM02S 結合 EGM96 模型成果很差有 75 公分；花東路線表現相較下最好，EGM96、GGM01S 結合 EGM96、GGM01C 結合 EGM96 成果標準偏差在 10 公分以下，GGM01C 結合 EGM96、CG01C 約 14 公分上下，非常特殊的為 GGM02S

結合 EGM96 模型成果仍明顯差有 48 公分。

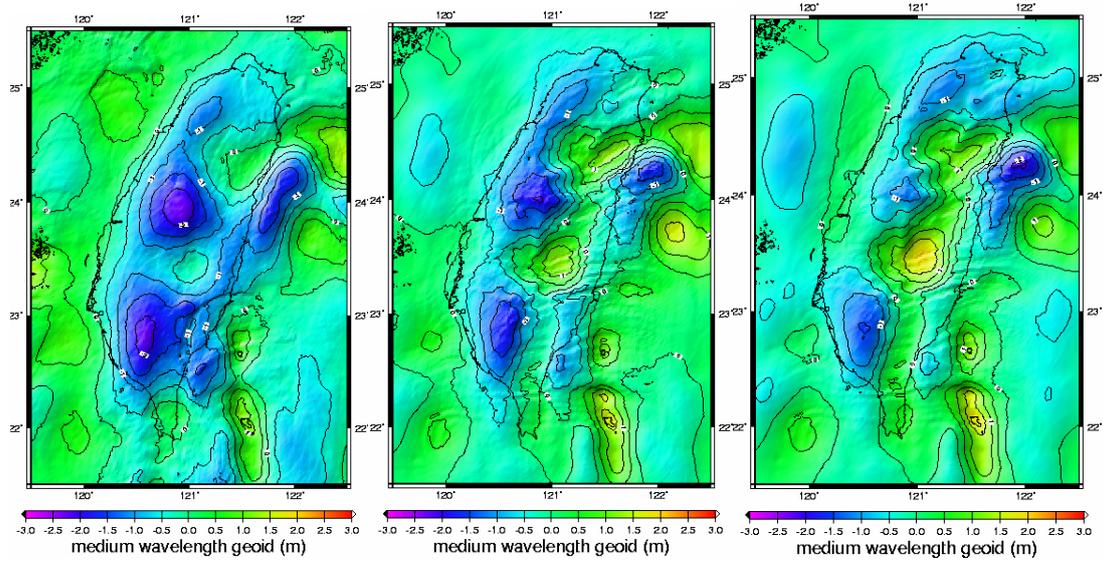
4-3 中、短波長大地起伏

中波長大地起伏乃由原始觀測重力值去除長、短波長重力值所得之殘餘重力，以最小二乘配置法計算而得，成果如圖 4-3。

除了 GGM02S 結合 EGM96 中波長大地起伏外，其他 5 個模型成果近似，均在台中南投一帶、台南高雄屏東一帶、宜蘭花蓮外海一帶之大地起伏為負值，而在宜蘭、南投高雄花蓮交界一帶大地起伏為正值。惟其中 EGM96 及 GGM02C 結合 EGM96 兩模型大地起伏值又特別相似。而 GGM02S 結合 EGM96 走勢則相當接近其在長波長大地起伏的表現。



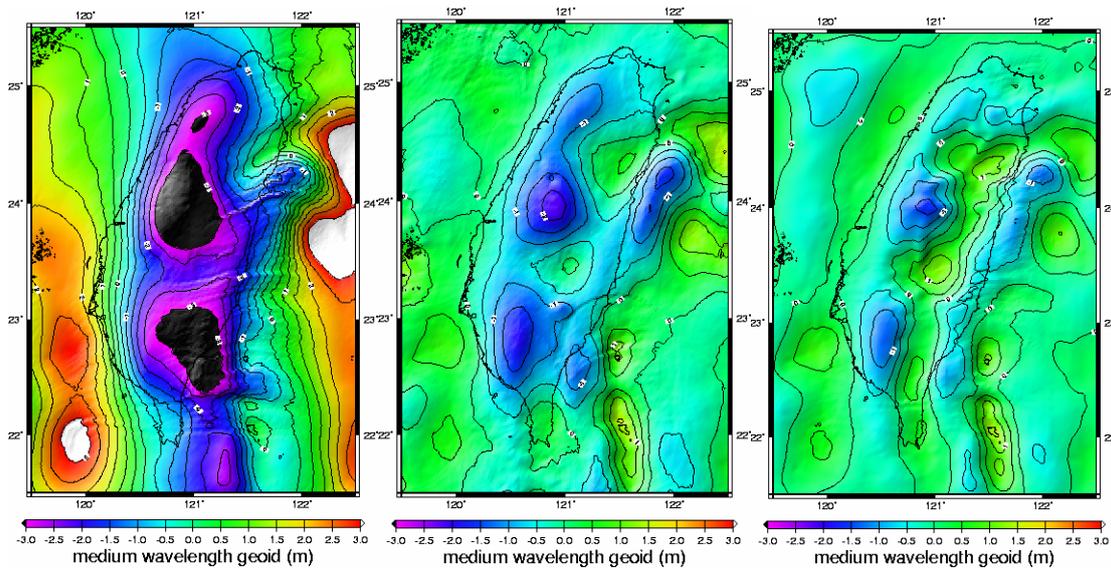
為進行中波長大地起伏計算，先自觀測重力異常減去長、短波長重力異常，此殘餘重力異常方作為最小二乘配置法之觀測值來源。針對原始重力異常、原始重力異常減去長波長重力異常、原始重力異常減去長及短波長重力異常的標準偏差，需進行檢核動作。在衛星測高部分，檢核發現原始重力異常減去長及短波長重力異常的標準偏差較原始重力異常減去長波長重力異常的標準偏差大，採用 GMT 軟體繪製短波長重力異常因為採用快速傅立葉轉換計算造成訊號躁聲大，因此利用濾波（gaussian filter, 20km）方法採用 GMT 軟體將短波長重力異常值平滑化。



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

圖 4-3、中波長大地起伏，等值線間隔：0.5 公尺，等值線範圍-3 公尺~3 公尺，(a) EGM96 模型、(b) GGM01S 結合 EGM96 模型、(c) GGM01C 結合 EGM96 模型、(d) GGM02S 結合 EGM96 模型、(e) GGM02C 結合 EGM96 模型、(f) CG01C 模型

利用數值地形資料與參考數值地形資料配合剩餘地形模型理論，計算之短波長大地起伏，如圖 4-4 (解析度 $3'' \times 3''$)。短波長大地起伏成果由於周圍海域地形之解析度為 $3' \times 3'$ ，僅將其取樣為 $3'' \times 3''$ ，其走勢相對平滑，因此在剩餘地形效應理論中將原始數值高程模型減去參考數值高程模型後，台灣周圍海域高程近似為零，因此短波長大地起伏在海域值亦近似為零。

4-4 改正項

地形效應改正為本文對於高程起伏較大區域有顯著改善之重要改正，本改正，在假設地球密度為 2.67 g/cm^3 時，與高程平方成正比，正常重力成反比。本改正的影響可由比較 EGM96 模式在呂誌強 (2004) 配合 $3'' \times 3''$ 台灣數值模型製作之重力大地起伏檢核成果與本文採用 EGM96 模式配合 $3'' \times 3''$ 台灣數值模型製作之重力大地起伏模式檢核 (本章第 4-5 節) 成果，北濱路線檢核點之差異統計的標準偏差值降低 0.9 公分，花東路線降低標準偏差 1 公分、中橫路線降低標準偏差 19 公分、南橫路線降低標準偏差 11.公分，對於目前大地起伏模型之高精度要求下，台灣大地起伏模型因此向前邁進一大步。

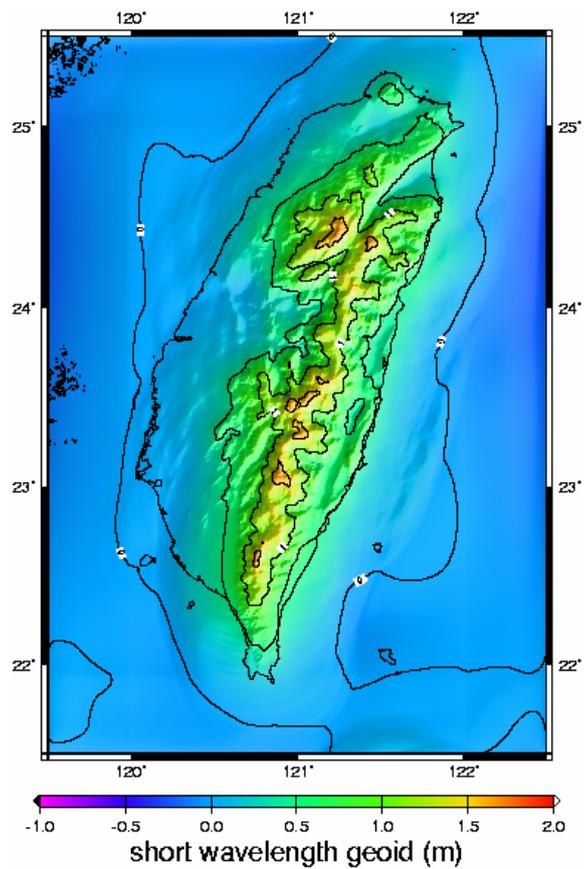


圖 4-4、短波長大地起伏值 (單位：公尺)

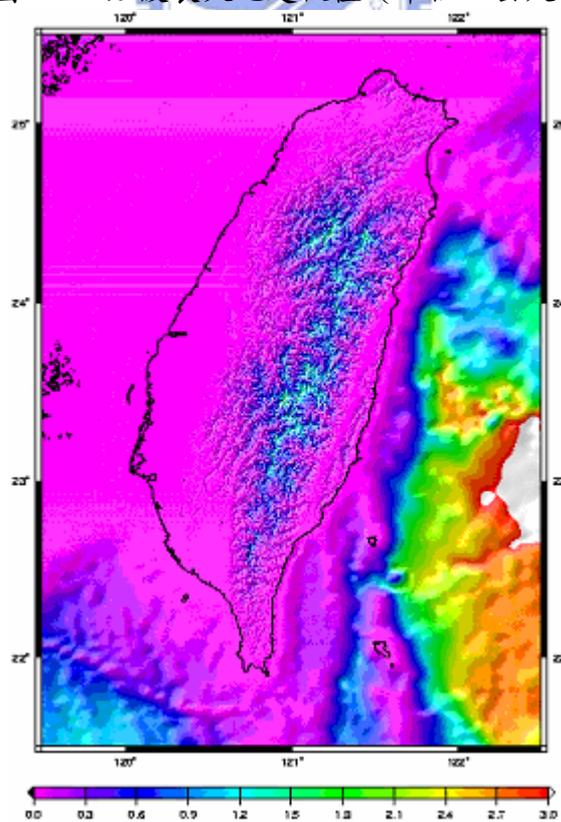


圖 4-5、改正項 (單位：公尺)

4-5 台灣重力大地起伏模型

本文利用不同長波長模型，以本文第 2 章資料(EGM96、GGM02C 結合 EGM96 模型採用陸測、船測及交通大學衛星測高資料；GGM01S 結合 EGM96、GGM01C 結合 EGM96、GGM02S 結合 EGM96、CG01C 採用陸測、船測及丹麥 KMS02 衛星測高資料)及第 3-6 節之前理論，所產生之重力大地起伏模型如圖 4-6。並內差出各模型在四條檢核路線上之大地起伏值，成果如表 4-7~表 4-12。

各模型誤差趨勢頗不一致。GGM01S 結合 EGM96 模型、GGM01C 結合 EGM96 模型、CG01C 模式均南橫路段誤差高達標準偏差 30 公分左右，GGM02S 結合 EGM96 模型僅 20 公分，而 EGM96 與 GGM02C 結合 EGM96 則在 7.2 公分以下。且 GGM02S 結合 EGM96 模型卻是花東路線誤差近 30 公分，GGM01S 結合 EGM96 模型亦近 20 公分誤差，其餘 4 個模型約在 10 公分左右或以下。各模式在北濱路線表現均亮眼，除 GGM02S 結合 EGM96 模型誤差大，其餘 5 個模式標準偏差僅在 6.3 公分以下。成果最一致的為中橫路段，誤差最大的為 GGM01C 結合 EGM96 模型 15.6 公分，最小的為 GGM02C 結合 EGM96 模型 9.3 公分，但整體而言，6 個模式都在 10 多公分數量級。

經本文之大地起伏計算後之大地起伏檢核值，可發現成果最佳的組合為 GGM02C 結合 EGM96 模型，次佳的為 EGM96 模型，檢核成果均相當好，尤其 GGM02C 結合 EGM96 模型各線段檢核精度均在標準偏差 10 公分之內，EGM96 模型亦僅中橫路段標準偏差 12.6 公分，其餘三條路線均在標準偏差 8 公分之內。成果其次為 GGM01C 結合 EGM96 模型與 CG01C 模式成果相當，在北濱、花東路段成果均佳，中橫約標準偏差 10 幾公分，但是在南橫路段成果很差，約標準偏差 20 幾公分。GGM02S 結合 EGM96 模型，誤差趨勢亦顯特別，誤差最大的為花東路段 28 公分，其次為南橫路段 20 公分，看不出此誤差趨勢與地形關係，並且各路線之誤差均偏大；GGM01S 結合 EGM96 模型成果亦偏差，僅北濱、中橫路段較佳，花東路線達 20 公分，南橫路線更達到 34 公分。