

臺灣本島與離島之高程連測

The Connection Survey of Height System between Taiwan and Offshore Islands

曾耀賢¹

朱金水²

劉正倫³

林燕山⁴

Tseng, Yao-Hsien

Chu, Chin-Shui

Liu, Jeng-Lun

Lin, Yen-Shan

摘要

地籍測量旨在紀錄管理土地、建物之座落、煙界、面積，原係以平面測量為主之型態，隨著近年地理資訊系統及三維建物管理概念的發展，地籍測量成果也逐漸與地形圖等圖資結合分析運用，高程資訊與地籍管理開始產生關連。測量基準的維護，多將平面與高程分別管理，臺灣地區的高程系統是以基隆平均海水面為起算點，訂定 TWVD2001 高程基準，但其周圍的外島則又是以當地平均海水面為高程起算點，均屬各自獨立的區域高程系統。

臺灣地區自 2006 年起開始辦理本島與離島之間高程系統連測，主要採用大地測量法，藉由高密度重力測量精算大地水準面模型(Geoid Model)，計算連測點大地起伏、以及以 GPS 衛星定位測量連測點的橢球高，得到連測二島之海面地形差(ΔSST)，並計算離島一等水準點之 TWVD2001 高程。本文即是以完成連測的小琉球與臺灣本島連測作業結果與精度作一分析討論。

關鍵字：大地起伏、大地水準面、橢球高、正高

Abstract

The purposes of cadastral survey which is a traditional plane surveying have been to record the location, boundary and area of lands and buildings for administration. With the development of GIS and 3D-building management technology, results of the cadastral survey have been used in combination with other map information, such as topographic maps, and thereby the relation between the height information of lands and cadastral management has been formed. Generally, the maintenance of plane survey datum and vertical datum has been managed separately. The vertical datum of Taiwan Island is defined by the mean sea level of Keelung port, and is named TWVD2001. Offshore islands have their own independent height systems defined by their local mean sea level as well.

In 2006, Taiwan commenced to conduct the height system connection survey between Taiwan and its offshore islands using Geodetic method. High density accuracy gravity survey was conducted to refine the Geoid Model, and the undulation of connection points was obtained accurately. After a GPS observation for over 48 hours, the ellipsoid height was obtained, then we were able to calculate the difference of the sea surface topography(SST) between the connecting islands, and transform the height of first grade bench marks of the offshore islands

¹ 臺灣內政部國土測繪中心課長 / Section Chief, National Land Surveying and Mapping Center M.O.I.

² 臺灣內政部國土測繪中心簡任技正 / Senior Specialist, National Land Surveying and Mapping Center M.O.I.

³ 臺灣內政部國土測繪中心副主任 / Deputy Director, National Land Surveying and Mapping Center M.O.I.

⁴ 臺灣內政部國土測繪中心主任 / Director, National Land Surveying and Mapping Center M.O.I.

to TWVD2001 height. This paper is a brief discussion and analysis of the results and accuracy of the height connection survey between Liouciou Island and Taiwan Island, a surveying project completed in 2007.

Keywords : undulation, Geoid, ellipsoid height, ortho height

一、前言

臺灣地區除了臺灣本島以外，其周圍尚有許多小島，澎湖群島是最大的島群，位於東南方的蘭嶼、綠島，以及西南方的小琉球都是以發展觀光為主的小島。另外，就實際統治管理，尚有靠近大陸的金門與馬祖群島。

在國家基礎建設上，臺灣於 2000 年訂定 TWD97(TaiWan Datum 1997)大地基準，並於 2001 年訂定 TWVD2001(TaiWan Vertical Datum 2001)高程基準，作為國土測繪之基準。其中 TWVD2001 高程基準是以基隆潮位站 19 年潮位觀測計算之平均海水面(MSL, Mean Sea Level)起算，僅適用於臺灣本島。其餘離島則於 2004 年依據各島之潮位站計算區域平均海水面高程(LMSL)，完成各離島主要島嶼之一等水準網，作為建設的依據。各離島位置如圖 1。

在工程建設應用上主要多著重於各結構物之高程差，以及相對於海水面之高度，各離島高程系統各自獨立對大多數的工程設計並不會有困擾。然而就國家測量基準的一致性則有些缺憾，透過跨海高程連測，建立全國一致的高程系統後，尚可利用便利的 GPS 觀測橢球高轉換為正高。

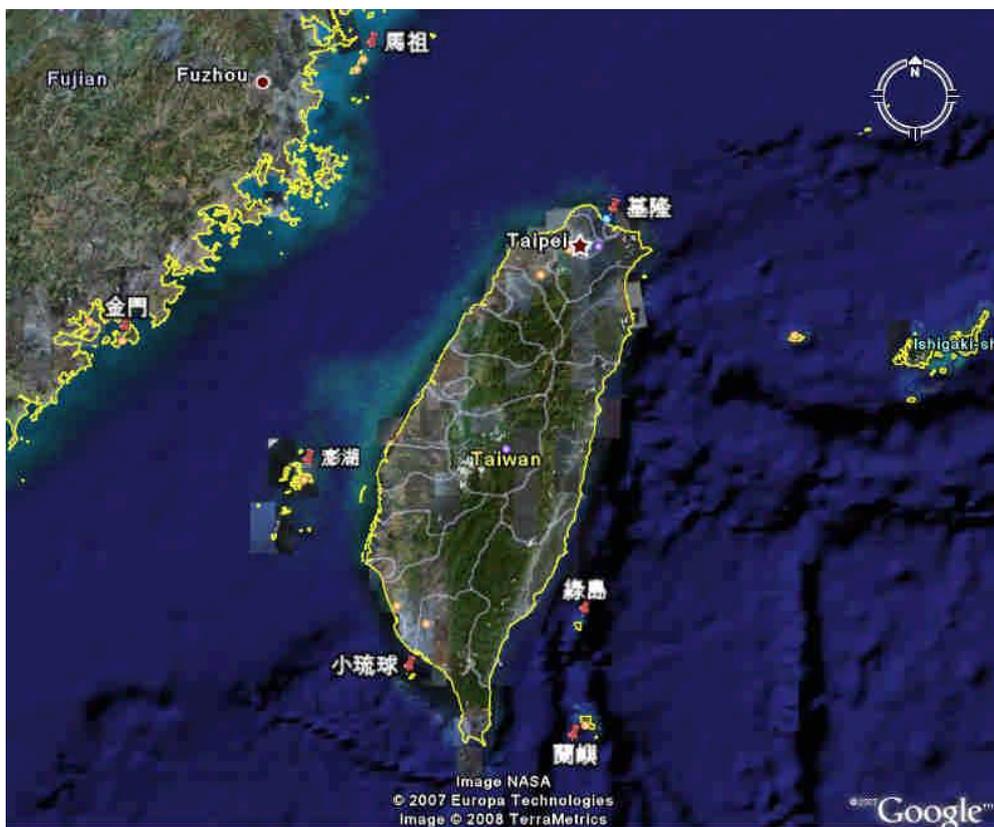


圖 1 臺灣本島與各離島位置圖

二、基本原理

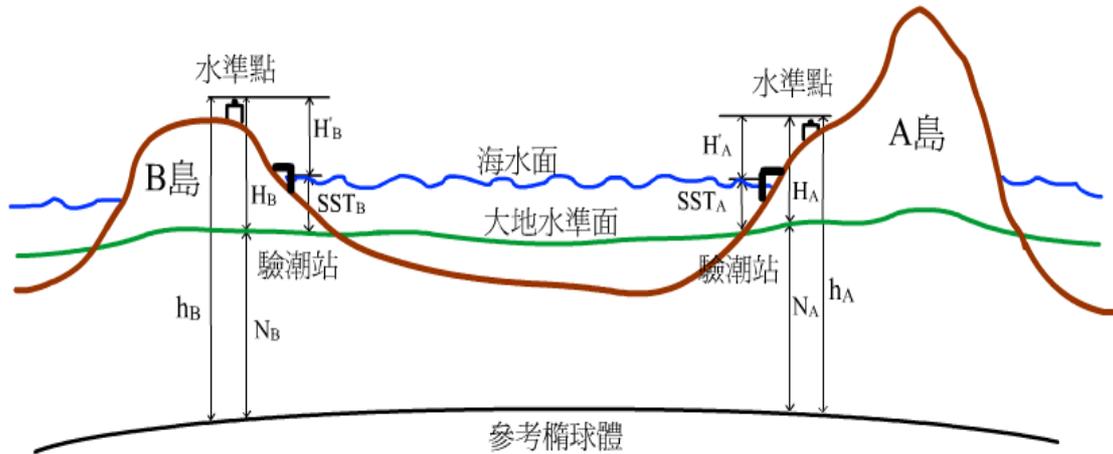


圖 2 跨海高程系統關係圖

有關高程之表示，一般以 H 表示正高，係指從大地水準面(Geoid)至點位之高程；另一般以 h 表示橢球高，係指從參考橢球體(Ellipsoid)起算至點位之高程，由於正高高程的起算點大地水準面的位置無法精確找到，實務上多係以潮位觀測所得之平均海水面為起算點。至參考橢球體至大地水準面之間的量一般以 N 表示稱為大地起伏(Undulation)。以如圖 2 所示 A 代表臺灣本島、 B 代表某一離島， A 、 B 二島各選一水準點作為高程連測點，分別稱之為 A 點、 B 點， A 點自大地水準面起算之正高高程 H_A 並無法測得，而係以其與基隆平均海水面之正高差（應用上即視其為正高） H'_A ，其與 H_A 之差值稱為 A 點之海面地形（自大地水準面起算至平均海水面之高度） SST_A 。 B 點情形亦類似，係由該島區域平均海水面(LMSL)起算之 H'_B 來表示 B 點之正高，與自大地水準面起算之正高高程 H_B 之間亦存在 B 點之海面地形 SST_B 。而各地之海面地形實際上係受海水溫度、鹽度、水流、風場…等諸多因素影響有所差異，本作業即是要測量各島 SST 與本島（基隆） SST 之差值 ΔSST 。

圖 2 中所標示各個量之間是有些關係存在的，如 $H = h - N$ ； $H = H' + SST$ ，這理面由於 MSL 無法明確找到，所以 H 與 SST 均無法直接量測，而 H' 係精密水準測量的成果、 h 可以 GPS 觀測得到，因此若能算得 N ，則上述相關量即都可計算而得。

大地水準面(Geoid)是個不規則形狀的等位面，在參考橢球體表面上每一個點往法線方向延伸 N 的量即形成 Geoid 面，稱為 Geoid model。大地測量法即是以重力測量資料，依據萬有引力之理論與球諧函數等技術，來推算 Geoid model，精度則受重力資料之量測精度與資料密度影響。

本作業以臺灣本島基隆附近之水準點與小琉球之潮位站水準點作為連測點，主要工作是利用小型船舶為重力儀載台，在連測點方圓 50km 範圍內實施高精度高密度重力測量，以分別推算連測點的大地起伏值 N ，即可分別算出基隆與小琉球潮位站之海面地形 SST ，並可據此將離島之水準點全部改算為以基隆平均海水面起算之 TWVD2001 高程。

三、連測作業及成果分析

1. 臺灣本島與離島高程連測作業係分年分區辦理，由內政部國土測繪中心爭取國科會經費及規劃各年度辦理地區，採委辦方式委由學術單位與民間公司辦理實地測量與資料處理分析，使用之海上重力儀係由內政部提供使用。自 2005 年起各年度辦理情形如下：
 - (1) 2005 年委託辦理作業方法與精度評估，另內政部委託辦理試辦小載具近岸海上重力測量。
 - (2) 2006 年委託辦理臺灣(基隆)與小琉球連測作業，業於 2007 年辦竣結案。
 - (3) 2007 年委託辦理臺灣(基隆)與綠島、蘭嶼連測作業，尚在辦理中
 - (4) 2008 年將辦理臺灣(基隆)與澎湖連測作業，尚在辦理中
 - (5) 2009 年將辦理臺灣(基隆)與金門、馬祖連測作業
2. 2006 年辦理臺灣(基隆)與小琉球連測及精度分析
 - (1) 連測點：
 1. 臺灣島：基隆 BM04、
 2. 小琉球：小琉球 LC01
 - (2) GPS 測量
 1. 使用之儀器：Leica 9500 / Trimble 5700
 2. 基隆(BM04)-小琉球(LC01)-東港(G123)，同步 48 小時連測，其中 G123 係位於臺灣本島西南方，靠近小琉球之一等水準點。
 3. 以 Bernese 軟體，固定金門追蹤站解算橢球高 h
 - (3) 連測點正高 H' ：因連測點均為一等水準點，因此其正高高程均係採內政部公布之一等水準點高程。
 - (4) 海上重力測量
 1. 使用之儀器：L&R Air-Sea Gravity System II 重力儀，精度優於 0.01 mgal。
 2. 使用船隻：漁船改裝，噸數 14.95 噸，船速 12 節。
 3. 船上另裝置 GPS、測深儀、姿態感應器，岸上另裝設潮位儀，提供 RTK 船隻導航定位、重力儀平面位置計算、水深測量、姿態補償、潮位改正...等計算。
 4. 測量範圍：依據 2005 年辦理「離島高程連測作業方法與精度評估」之分析結果，並就經費與精度因素考量所做之決定。以連測點為中心，主航線採南北向，20KM 範圍內以 2' 為航線間距、50KM 範圍內以 4' 為航線間距，檢核線為東西向，約 10' 為間距。基隆總里程 1060KM、小琉球總里程 1160KM，如圖 3。

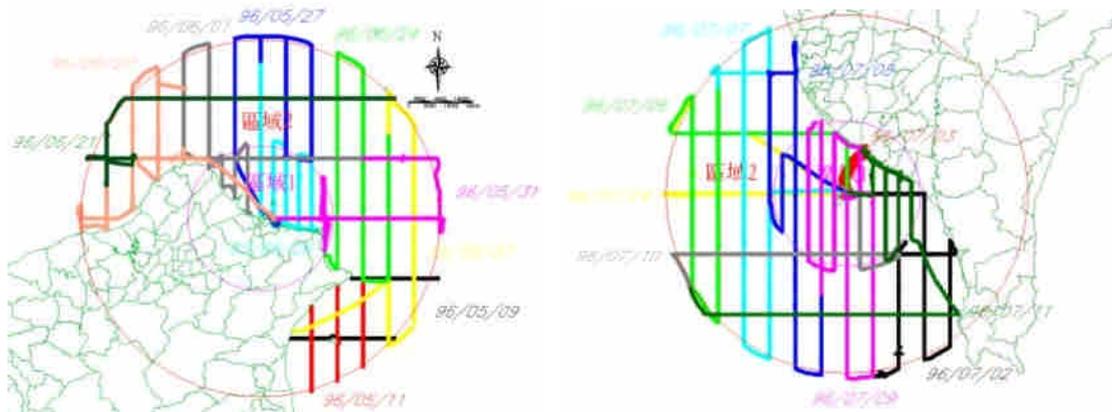


圖 3 基隆(左)、小琉球(右)海上重力測量航線圖

5. 精度評估：以檢核線與主航線交叉點差值統計評估，經去除不合理之資料後（可能 GPS 斷訊、測船搖晃過大）基隆測區有 35 點、小琉球測區有 41 點，分析均方根誤差約 1.9mgal。
6. 大地起伏模型（Geoid Model）：本作業所使用之臺灣地區 Geoid Model 係以 EIGEN-GL04C 係數，配合球諧係數展開至 360 階計算之全球參考場為基礎，採去除回覆法（remove-restore techniques）加入臺灣地區近年 2000 多個一等精密水準點之重力資料、離島一等水準點之重力資料、船載重力資料、空載重力資料、衛星重力資料等，以臺灣地區北中南東四條檢核線精度評估約 5-16cm。

(5) 成果計算

1. 依據 48 小時同步 GPS 連測結果，計算連測點基隆(BM04)、小琉球(LC01)之大地坐標(如表 1)。
2. 利用交通大學之大地起伏模型，由將船載重力測量所得連測點方圓 50 公里重力異常資料，採去除回復法，利用 3 秒解析度數值地形模型，以 FFT(Fast Fourier Transform)及 LSC(Least Squares Collocation)技術計算連測點大地起伏值 N(如表 1)。
3. 連測點原有正高值均透過查詢內政部及國土測繪中心完成之一等水準網成果，得到各點在各自基準下之正高值 H。

表 1 連測點大地坐標、橢球高、正高、大地起伏資料表

連測點	經度 λ (deg)	緯度 φ (deg)	橢球高 h(m)	正高 H(m)	大地起伏 N(m)
BM04	121.7479	25.1560	24.4917	4.30560	20.319
LC01	120.3817	22.3547	25.0864	4.33062	20.753

(註) BM04 之正高是 TWVD2001 高程；LC01 之正高係小琉球 LMSL 起算高程。

4. 推算基隆—小琉球高程基準差異 $\Delta SST = 0.1357\text{m}$ ，詳如表 2。

表 2 以基隆連測點推算基隆—小琉球高程基準差異(單位均為 m)

點位	h (橢球高)	N(大地 起伏)	Δh	ΔN	$\Delta H =$ $\Delta h - \Delta N$	H_{BM04} 正高)	$H_{LC01} =$ $\Delta H + H_{BM04}$	H'_{LC01} (內政部)
LC01	25.0864	20.753	0.5947	0.434	0.1607		4.4663	4.3306
BM04	24.4917	20.319				4.3056		
						高程基準差異 $\Delta SST = 0.1357$		

(6) 精度評估

按 $\Delta SST = H_{LC01} - H'_{LC01}$ 及 $H_{LC01} = \Delta H + H_{BM04}$ ，而 $\Delta H = \Delta h - \Delta N$ ，其中 H'_{LC01} 及 H_{BM04} 都是一等水準測量成果，其精度約在 1mm 以內，遠高於本作業之 GPS 橢球高測量與依據重力測量後精化後之 Geoid Model 所得大地起伏值精度，應可忽略不計。故本作業所推算二島海面地形差成果之精度評估，可以下式表示 $\sigma_{\Delta SST}^2 = \sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_{\Delta h}^2 + \sigma_{\Delta N}^2$ 。

上式 $\sigma_{\Delta h}$ 部分，估計 48 小時 GPS 觀測高程精度約為 1 公分，則 Δh 之中誤差為 $1 \times \sqrt{2} = \sqrt{2}$ 公分。 $\sigma_{\Delta N}$ 部分則以 G123 與 BM04 兩點之觀測結果來推估，因二點都是臺灣本島的一等水準點，依據一等水準測量之正高再考量地層下陷因素改正後之正高差，及以 GPS 連測之橢球高差 Δh 減去 Geoid Model 求得之大地起伏差 ΔN ，驗證大地起伏之精度約為 15 公分(詳如表 3)，因此 $\sigma_{\Delta N} = 15 * \sqrt{2}$ 公分。

故 $\sigma_{\Delta SST}^2 = \sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_{\Delta h}^2 + \sigma_{\Delta N}^2 = 2 + 225 * 2 = 452$ ， $\sigma_{\Delta SST} = 21.26$ 公分。

表 3 利用 G123 與 BM04 兩水準點估算大地起伏模式精度

點位	H(正高)	h(幾何高)	N(大地起伏)	ΔH^{level}	Δh	ΔN	ΔH^{GPS}	$\Delta H^{level} - \Delta H^{GPS}$
G123	1.8052	22.7945	20.970	-2.5004	-1.6972	0.651	-2.3482	-0.1522
BM04	4.3056	24.4917	20.319					

四、結論與建議

1. 本案連測結果小琉球與基隆(臺灣本島)之海面地形差(ΔSST)約為 14 公分，連測成果之精度估計約 21 公分，其主要誤差來源在大地起伏精度 $\sigma_{\Delta N} = 15 * \sqrt{2}$ 公分。本作業在連測點方圓 50 公里範圍內辦理高密度海上重力測量，應有助於提升大地起伏精度，方圓 50 公里範圍內的陸地部分，原期待臺灣本島一、二等重力測量完成後，可提供相當密度之陸上重力資料予本連測作業，但該項計畫因故未完成，未來該陸上重力資料完成後，連測成果將予以重新計算評估。
2. 藉由本島與離島高程連測，可以將各離島水準點高程，改算為 TWVD2001 系統高程，達到全國一致的高程系統。
3. 執行離島高程連測作業所施測之重力資料，有助提升臺灣地區大地起伏模型之

精度。

4. 建立全國一致的高程系統，可提供海水面監測的比較基準。
5. 連測成果可得到臺灣地區附近海域長距離海面坡度資料，提供氣象研究之重要資訊。
6. 全國一致的高程系統，提供在離島地區，可以利用便利的 GPS 高程測量所得橢球高，再以大地起伏模型化算為正高，高程連測作業也幫助提升此化算之精度。

五、參考文獻

1. 內政部國土測繪中心 臺灣本島與離島高程連測作業方法與精度評估期末報告，2006,05
2. 中華空間資訊學會 近岸船載重力測量、船測資料分析及資料庫建置工作案，工作總報告，2006,12
3. 內政部國土測繪中心 臺灣本島與離島高程連測計畫 95 年度連測作業期末報告，2007,11
4. 施宜昶 空載重力觀測系統 碩士論文，2004,06
5. 內政部 臺灣地區大地水準面模式更新計算及教育推廣案工作報告，2007,11
6. Liu,C.-C.,1989. Impact of crustal deformation on tide gauge records, Proc. Geol. Soc. China, Vol. 32,No. 4,321-338

作者簡歷

曾耀賢

國籍：臺灣

現職：內政部國土測繪中心企劃課課長
中華民國地籍測量學會秘書

通訊資料：台中市南屯區黎明路二段 497 號 4F

TEL：+886-4-2252-9381

M-phone：+886-911-685829

E-mail：21024@mail.nlsc.gov.tw

朱金水

國籍：臺灣

現職：內政部國土測繪中心簡任技正
中華民國地籍測量學會常務監事

通訊資料：台中市南屯區黎明路二段 497 號 4F

TEL：+886-4-2251-0259

M-phone：+886-928-312190

E-mail : 04002@mail.nlsc.gov.tw

劉正倫

國籍：臺灣

現職：內政部國土測繪中心副主任

通訊資料：台中市南屯區黎明路二段 497 號 4F

TEL：+886-4-22528211

M-phone：+886-928-312950

E-mail : 10003@mail.nlsc.gov.tw

林燕山

國籍：臺灣

現職：內政部國土測繪中心主任

通訊資料：台中市南屯區黎明路二段 497 號 4F

TEL：+886-4-22512153

M-phone：+886-936-207936

E-mail : master@mail.nlsc.gov.tw