

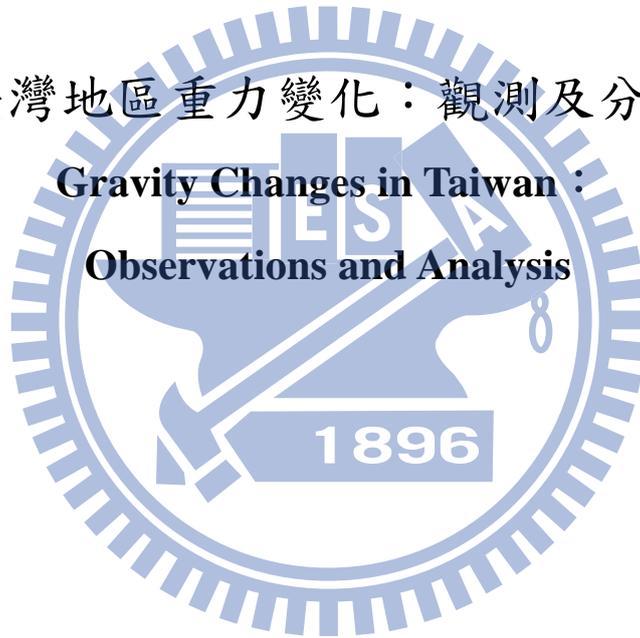
國立交通大學

土木工程學系

博士論文

臺灣地區重力變化：觀測及分析

**Gravity Changes in Taiwan :
Observations and Analysis**



研究生：程自強

指導教授：黃金維

中華民國一〇二年七月

臺灣地區重力變化：觀測及分析

Gravity Changes in Taiwan :

Observations and Analysis

研 究 生：程自強

Student : Tze-Chiang Cheng

指 導 教 授：黃金維

Advisor : Dr. Cheinway Hwang



A Dissertation

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment to the Requirements

for the Degree of Doctor

In

Civil Engineering

July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年七月

臺灣地區重力變化：觀測及分析

研究生：程自強

指導教授：黃金維

國立交通大學土木工程學系

摘要

本論文主要以臺灣地區各式地面重力觀測成果，檢視並分析各地區重力變化情形，配合高程變化等相關資訊對重力變化機制作初步分析。2003年及2007年，共進行了兩次的全臺一等水準點上重力測量，所有重力觀測量皆須經過環境改正後再行應用或做後續計算，其中本文特別針對海潮負載效應改正作較深入的探討及分析。海潮負載效應對地處西太平洋的臺灣而言，重力觀測量的影響極為顯著，本文即以適用臺灣地區的 OTL10 區域海潮模型，配合 SGOTL 程式計算求得海潮負載效應，對臺灣各地的重力觀測量作改正，並同時以 g7 及 SPOTL 程式計算所得的海潮負載效應對絕對重力觀測量做改正，其中以 SGOTL 所改正後的絕對重力值，可以得到最佳的精度表現。相對重力觀測量的標準偏差表現，主要來自於觀測時環境干擾的程度，而藉由增加重力的觀測數量，不但可重複檢核觀測量的閉合差，更可有效提升重力成果的精度。就以 2003 至 2007 年的重力變化情形來看，臺灣中央山脈北段部分重力值變化量可達 -0.085 mgal/year ，臺灣西部地區則達到 0.061 mgal/year ，經比較正高變化情形後，可以明顯研判中央山脈部分地區的造山運動仍持續進行中，而臺灣西部則有地層下陷的情形發生。於 2004 年至 2008 年期間，本文利用絕對重力及相對重力方法檢視雲林地層下陷情況，以 FG5 絕對重力儀於雲林縣同安國小觀測所得重力值變化率達到 $22.72 \text{ } \mu\text{gal/year}$ ，同時以相對重力進行六次重力網形觀測，經平差計算後求得雲林地層下陷區的重力變化值，並與該區域各地的正高變化率作比較，可初步驗證重力方法對於地層下陷監測的可行性。

Gravity Changes in Taiwan :

Observations and Analysis

Student : Tze-Chiang Cheng

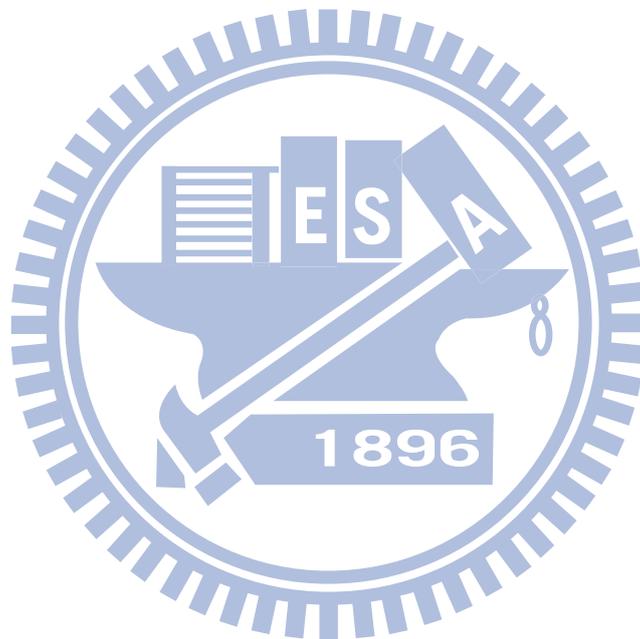
Advisor : Dr. Cheinway Hwang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

The temporal gravity changes in Taiwan are used to examine the crustal deformation in Taiwan. All gravity observations are corrected by the environmental effects, such as solid earth tide, ocean tide loading, polar motion, atmosphere and underground water. This study will put a special emphasis on ocean tide loading. Ocean tide loading(OTL) effect of gravity is large in Taiwan and around its nearby area. Three different OTL models are tested to improve the accuracy of absolute gravity around the coast of Taiwan and its islets. The model SGOTL with the latest regional ocean tide model of Taiwan is assimilated with local tide gauge records. In Taiwan, OTL10 and the high resolution DEM result in the optimum accuracy in the OTL corrections of absolute gravity measurements. It's obviously to shown the standard deviations of adjusted gravity have reduced by using mixed method of ladder and star. Two major relative network campaigns around the whole Taiwan are made from 2003 to 2007. The relative gravity observations are adjusted using the weight-constraint least-squares method. With the 4-year gravity changes, we have found that orogeny occurs on the central ridges and land subsidence occurs in southwestern Taiwan with average rates of -0.085 mgal/year and 0.061 mgal/year, respectively. A gravity network in the Yunlin County in western

Taiwan is established to determine gravity variations caused by large land subsidence. At station TAES, the gravity change rate from absolute measurements by FG5 is 22.72 $\mu\text{gal}/\text{year}$. The gravity-height admittance factor in Yunlin subsidence area is -5.25 $\mu\text{gal}/\text{cm}$, instead of -1.97 $\mu\text{gal}/\text{cm}$, due to the complicated mechanism of subsidence. This result can be a prototype method of subsidence monitoring by gravimetry.



致 謝

能夠完成這本博士論文，進一步地說能夠完成博士的學程，這些年來要感謝的人很多，首先要感謝的就是我的指導教授 黃金維老師。黃老師在做學問及研究的熱忱與執著，一直是我景仰和學習的對象，今生有幸能成為他的門生，更在他嚴謹地指導下做研究，使我的學識能夠逐漸增長。他除了指導我的學業及研究之外，也讓我有機會與國際權威級學者專家共同研習，更帶領我前往澳洲及美國等地參加國際學術發表會議，讓我能放眼世界增廣見聞。由於在我完成學分修習及通過博士資格考後，即回到工作崗位復職，又因為工作時間的不穩定，導致我無法安排較完整的時間繼續進行研究，而黃老師在那段期間總是督促我要持續地做研究，最後因為考量工作與學業無法兼顧，在獲得黃老師全力支持後，毅然離開工作回到交大，於最後一學年全力衝刺完成博士的學程。

另外要感謝當時工作單位長官的提攜與支持，也感謝工作時的夥伴甯方璽、姜震昇、高豫麒及劉榮寬四位學長的鼓勵及指點迷津，讓我不後悔地選擇進入交大；並感謝工研院量測中心的李瓊武博士及文祺，讓我與 FG5 絕對重力儀結下了不解之緣，並且能以此題材完成研究學業，更要特別感謝鄭景中博士對我在做學問及研究上的指導與幫助。

在做研究的枯燥乏味生活中，多虧了在研究室一同努力的學長姐及學弟妹們的鼓勵，而你們努力的精神與態度正是我學習的榜樣，特別是在最後一學期如無頭蒼蠅般埋首研究期間，小光(煥欽)的精神鼓勵與長儀的經驗指導，讓身陷研究泥沼中的我能夠再度邁步前進。

當然，在此衷心感激我的愛妻珮瑜，當我拋妻棄女衝刺學業的這段時間，妳毫無怨尤地獨撐家計，讓我無後顧之憂地專心完成學業及研究，近十年的博士班學業，當初兩個小女娃的宇恬及宇柔，如今已亭亭玉立並且聽話懂事，都要感謝愛妻的辛勤教養，在此我只想說~珮瑜，這輩子有妳真好！最後，我要感謝辛苦養育我的父母親，我所有努力的成果以及這一切的榮耀，都是屬於你們倆老！

目 錄

摘 要.....	I
Abstract.....	II
致 謝.....	IV
目 錄.....	V
表目錄.....	VII
圖目錄.....	VIII
一、緒論.....	1
1-1 研究目的.....	1
1-2 文獻回顧.....	2
1-3 論文架構.....	4
二、重力測量及平差方法.....	6
2-1 絕對重力測量.....	6
2-1-1 FG5 絕對重力儀.....	7
2-1-2 重力梯度及重力化算.....	9
2-1-3 絕對重力值計算.....	10
2-2 相對重力測量.....	13
2-2-1 Lacoste & Romberg G 型重力儀.....	15
2-2-2 Lacoste & Romberg Graviton-EG 型重力儀.....	17
2-2-3 Scintrex CG-5 型重力儀.....	21
2-3 重力環境改正.....	23
2-4 重力觀測量平差計算.....	24
2-4-1 自由基準平差 (datum-free adjustment).....	25
2-4-2 加權約制平差 (weighted constraint adjustment).....	27
2-4-3 顯著性測試.....	29
三、海潮負載改正.....	31
3-1 概述.....	31
3-2 牛頓引力效應.....	32
3-3 彈性效應.....	34
3-4 海潮負載格林函數.....	36
3-5 海潮負載振幅及相位.....	38
3-6 海潮模型.....	40
3-7 三種海潮負載模式於近岸及離島的比較與重力值改正.....	41

3-7-1 海潮負載重力效應計算軟體.....	42
3-7-2 絕對重力值改正成果比較分析.....	44
3-8 全臺相對重力觀測量海潮負載效應改正.....	51
3-9 雲林地區相對重力觀測量海潮負載效應改正.....	58
四、全臺 2003 年及 2007 年重力變化及分析	60
4-1 概述.....	60
4-2 觀測資料.....	60
4-3 全臺相對重力網平差成果.....	62
4-3-1 自由基準平差.....	62
4-3-2 加權約制平差.....	63
4-4 重力變化分析.....	66
4-4-1 重力變化及其原因.....	66
4-4-2 重力值精度分析.....	78
4-5 本章小結.....	83
五、以重力方法檢視地層下陷	84
5-1 概述.....	84
5-2 重力檢視地層下陷基本原理.....	86
5-3 絕對重力測量.....	87
5-4 相對重力測量.....	88
5-5 重力變化分析.....	90
5-6 本章小結.....	101
六、結論與建議	103
參考文獻.....	105
附錄 A FG5 絕對重力儀操作說明	111
附錄 B Scintrex CG-5 型重力儀操作說明	121
作者簡歷.....	131
學術著作.....	132

表目錄

表 2-1：絕對重力值觀測成果	11
表 2-2：本文臺灣西部中海拔山麓地區的相對重力觀測量	20
表 2-3：本文各式相對重力儀的諸元比較表	22
表 3-1：Farrell 的各階洛夫常數.....	36
表 3-2：G-B 地球彈性體模型海潮負載格林函數表	37
表 3-3：NAO 海潮模型.....	40
表 3-4：本文綠島絕對重力觀測量使用三組海潮負載效應改正後之成果	47
表 3-5：本文東河國小絕對重力觀測量使用三組海潮負載效應改正後之成果 ...	48
表 3-6：本文澎湖絕對重力觀測量使用三組海潮負載效應改正後之成果	49
表 3-7：本文墾丁絕對重力觀測量使用三組海潮負載效應改正後之成果	50
表 3-8：本文 2003 年全臺重力網自由基準平差重力值成果概述	53
表 3-9：本文 2007 年全臺重力網自由基準平差重力值成果概述	55
表 3-10：本文雲林重力網自由基準平差重力值各時段成果概述	59
表 4-1：本文共同觀測之絕對重力點歷次紀錄	61
表 4-2：本文 2003 年及 2007 年全臺相對重力自由基準平差成果統計概述	62
表 4-3：本文 2003 年全臺相對重力加權約制兩處平差成果統計概述	63
表 4-4：本文 2007 年全臺相對重力加權約制兩處平差成果統計概述	64
表 4-5：本文 2003 年全臺相對重力加權約制三處平差成果統計概述	64
表 4-6：本文 2007 年全臺相對重力加權約制三處平差成果統計概述	64
表 4-7：本文全臺相對重力加權約制四處平差成果統計概述	65
表 4-8：2000 至 2008 年全臺一等水準測量作業內容略表	65
表 4-9：本文 Scintrex CG-5 重力儀於各地質層重力觀測量標準偏差表現情形 ..	79
表 5-1：雲林地區 1992 年至 2002 年下陷資料統計表	85
表 5-2：本文各次相對重力網形平差重力值精度表現情形	94
表 5-3：地表沉積層各種物質孔隙率分布略表	97
表 5-4：本文各重力觀測位置地下水位變化率及其改正後重力變化率	98
表 5-5：本文以重力方法及水準測量推得之地層變化率	101

圖目錄

圖 2-1：自由落體計算重力加速度	6
圖 2-2：FG5 絕對重力儀觀測現況	8
圖 2-3：簡易重力梯度值測量方法	10
圖 2-4：嚴密重力梯度值測量方法	10
圖 2-5：相對重力觀測進行方式	13
圖 2-6：全臺重力觀測網形圖	14
圖 2-7：Lacoste & Romberg G 型重力儀	15
圖 2-8：Lacoste & Romberg G 型重力儀內部組件圖	16
圖 2-9：Lacoste & Romberg Graviton-EG 型重力儀	17
圖 2-10：Lacoste & Romberg Graviton-EG 型重力儀內部組件配置圖	18
圖 2-11：地震震波傳遞波形	19
圖 2-12：本文臺灣西部沿海地區 Graviton-EG 型重力儀相對重力觀測量 RMSError 分布直方圖(2004/12)	19
圖 2-13：本文日本京都地區 Graviton-EG 型重力儀重力觀測量 RMSError 分布直方圖(2004/11/23)	21
圖 2-14：Scintrex CG-5 重力儀	22
圖 2-15：t 分布之機率密度函數	30
圖 3-1：本文中海潮負載效應於觀測位置 p 與水體 q 之間關係	32
圖 3-2：本文中臺灣離島及本島近岸絕對重力站觀測位置	44
圖 3-3：本文中綠島絕對重力站(AG1)海潮負載效應表現	45
圖 3-4：本文中東河國小絕對重力站(AG2a)海潮負載效應表現	45
圖 3-5：本文中澎湖絕對重力站(AG9)海潮負載效應表現	46
圖 3-6：本文中墾丁絕對重力站(KDNG)海潮負載效應表現	46
圖 3-7：本文 2003 年全臺海潮負載改正前與後的重力值標準偏差分布情形	53
圖 3-8：本文 2003 年全臺海潮負載改正後的重力值標準偏差變化情形	54
圖 3-9：本文 2003 年全臺海潮負載改正後的重力值變化情形	55
圖 3-10：本文 2007 年全臺海潮負載改正前與後的重力值標準偏差分布情形	56
圖 3-11：本文 2007 年全臺海潮負載改正後的重力值標準偏差變化情形	57

圖 3-12：本文 2007 年全臺海潮負載改正後的重力值變化情形	57
圖 4-1：本文 2003 年及 2007 年全臺相對重力測量共同觀測絕對重力點分布圖	61
圖 4-2：全臺正高變化率及本文重力變化率略圖	66
圖 4-3：本文 2003 至 2007 年蘭陽平原地區重力變化及高程變化初步比較	67
圖 4-4：本文 2003 至 2007 年蘭陽平原地區重力及高程變化初步比較圖	67
圖 4-5：1992 至 2012 年宜蘭地區累積下陷量分布圖	68
圖 4-6：本文 2003 至 2007 年雲嘉平原地區重力變化及高程變化初步比較圖 ...	69
圖 4-7：本文 2003 至 2007 年雲嘉平原地區重力及高程變化初步比較圖	69
圖 4-8：本文 2003 至 2007 年中北部山脈地區省道 7 號、7 甲、8 號、21 號及 18 號公路沿線重力變化及高程變化初步比較.....	70
圖 4-9：本文 2003 至 2007 年中北部山脈地區省道 7 號、7 甲、8 號、21 號及 18 號公路沿線一等水準點重力及高程變化初步比較圖.....	71
圖 4-10：本文通過顯著性測試之 2003 至 2007 年一等水準點重力變化與相對應位 置正高變化分布略圖.....	72
圖 4-11：本文通過顯著性測試之 2003 至 2007 年中央山脈北部地區省道 7 甲及 8 號部分公路沿線一等水準點重力與正高變化情形.....	73
圖 4-12：本文通過顯著性測試之 2003 至 2007 年於中央山脈北部地區省道 7 甲及 8 號部分公路沿線一等水準點重力變化與相對應位置正高變化表現略圖.....	73
圖 4-13：青藏高原地殼增厚示意圖	75
圖 4-14：本文試以布格平板概念推算台灣中央山脈北部地區省道 7 甲及 8 號部分 公路沿線地殼厚度增厚之可能情形.....	75
圖 4-15：台灣地區的地殼厚度分布略圖	76
圖 4-16：本文 2003 至 2007 年雲林地區一等水準點重力與正高變化情形	77
圖 4-17：本文 2003 至 2007 年於雲林地區一等水準點重力變化與相對應正高變化 表現略圖.....	77
圖 4-18：本文 2007 年全臺相對重力觀測量(Scintrex CG-5)標準偏差及平差重力值 精度分布情形.....	78
圖 4-19：本文重力觀測位置於地質層分布略圖	80
圖 4-20：本文 AGTO 相對重力觀測點位示意圖	81
圖 4-21：本文 AGTO 相對重力觀測量(Scintrex CG-5)標準偏差分布情形	82
圖 4-22：本文南橫公路相對重力測量平差重力值殘差及標準偏差分布情形	82

圖 5-1：雲林地區 2002 至 2003 年年平均下陷速率圖	85
圖 5-2：本文中布格平板示意圖	86
圖 5-3：本文雲林相對重力觀測混合進行方式示意圖	89
圖 5-4：本文雲林相對重力觀測基本網形	89
圖 5-5：本文 2004 年 10 月至 2013 年 5 月同安國小絕對重力值變化情形	90
圖 5-6：本文同安國小及北港衛星追蹤站絕對重力值變化情形	91
圖 5-7：本文 EG 與 CG-5 相對重力儀觀測量標準偏差分布圖	92
圖 5-8：本文第一次(2004 年 12 月)相對重力網形殘差與標準偏差分布情形	92
圖 5-9：本文第二次(2005 年 4 月)相對重力網形殘差與標準偏差分布情形	92
圖 5-10：本文第三次(2005 年 12 月)相對重力網形殘差與標準偏差分布情形	93
圖 5-11：本文第四次(2006 年 7 月)相對重力網形殘差與標準偏差分布情形	93
圖 5-12：本文第五次(2006 年 11 月)相對重力網形殘差與標準偏差分布情形	93
圖 5-13：本文第六次(2007 年 4 月)相對重力網形殘差與標準偏差分布情形	94
圖 5-14：本文各相對重力觀測位置重力值變化情形	95
圖 5-15：本文濁水河流域地質分布略圖	97
圖 5-16：雲林地區水準測量環線分布圖	99
圖 5-17：本文雲林地層下陷區各重力觀測位置重力與正高變化比較	100
圖 5-18：濁水溪沖積扇之水文地質概念分層圖	102

一、緒論

1-1 研究目的

本文首先針對全臺一等水準點上重力測量成果進行計算。自 2001 年起，由內政部委由國立交通大學進行一等級與二等水準點上重力測量，即開啟全面及系統性重力測量工作，於 2003 年 6 月完成全臺一等水準點重力測量(內政部，2003)，另於 2006 年起，內政部委由寰宇測量公司進行並再次完成全臺一等水準點重力測量(內政部，2006)。

在所有重力觀測量中，均須經過環境改正，本文特別針對海潮負載效應改正做計算及分析比較，由於臺灣位於西太平洋邊緣，海潮負載效應所產生的重力值對重力觀測成果的影響極為顯著，此影響部分需藉由海潮負載理論模式進行觀測量改正，以期獲得較佳的重力成果。本文引用 SGOTL(Superconducting Gravity for Ocean Tide Loading; Hwang and Huang, 2012)海潮負載改正模式，對臺灣全島相對重力測量觀測量做改正，並比較海潮負載改正前後之重力值精度變化情形。海潮負載效應對於離島及近岸地區的重力觀測有明顯的影響量，由於絕對重力是以連續觀測的方式進行，因此每個觀測時間的海潮負載效應改正量均應列入考量，除了使用 FG5 絕對重力儀內建軟體 g7 計算海潮負載效應之外，本文另使用 SGOTL 與 SPOTL(Some Programs for Ocean Tide Loading; Agnew, 2013)兩種海潮負載改正模式，並對臺灣近岸及離島絕對重力觀測量做改正，最後比較三種海潮負載改正模式於重力計算後成果的差異，選取最適合的改正模式，藉此使各絕對重力值達到最佳的觀測精度。

內政部於 2003 年底陸續購進 FG5 絕對重力儀及超導重力儀，使我國可自主觀測臺灣地區絕對重力值及精確訂定重力基準，並於新竹市十八尖山設置國家重力基準站，為我國重力測量開啟重要里程碑。以 FG5 絕對重力儀所測量的觀測精度，在連續觀測 12 小時以上均可達到 1 至 2 μgal 等級的精度，而相對重力測

量的觀測標準偏差多半取決於觀測地點的安靜程度，若增加觀測量至相對重力網形中，不但可重複檢核觀測量閉合差，更可有效提升重力成果的精度達 $5.4\mu\text{gal}$ 等級。其中本文所分析比較的 Lacoste & Romberg G 型、Lacoste & Romberg Graviton-EG 型及 Scintrex CG-5 型相對重力儀，在觀測量的標準偏差與重力成果的精度表現上，均屬 Scintrex CG-5 型相對重力儀為最優。

由於臺灣地處歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，地殼變動與地震發生頻繁，菲律賓海板塊仍以 7 至 8 cm/year 速率向歐亞板塊聚合(Seno, 1977; Yu et al., 1986)，除了地表可觀測得到變化量之外，針對地表下所造成的重力變化，可由多次的重力觀測值，依照其時變結果，分析及研判臺灣各地的地層變動表現情形。臺灣地區重力變化表現，經由與正高變化情形比較後，中央山脈部分地區呈現重力值下降且正高呈現上升的趨勢，而西部平原地區重力值普遍增加且正高值呈現下降的趨勢，可明顯看出中央山脈隆起現象與西部地層下陷情形。

臺灣西部平原地區多為人口聚居及工商業廠所，另外則是農業種植及灌溉區域，雲林地區西部因為農業種植區域廣大，境內所需灌溉水源缺乏，轉而以抽取地下水方式進行灌溉或養殖，多年來已造成嚴重地層下陷，又由於臺灣高速鐵路路線行經該地層下陷區，因此對於行車安全也是項隱憂。本文利用重力測量方法檢視雲林地區地層下陷狀況，自 2004 年 12 月至 2013 年 5 月的長期觀測資料中，雲林縣同安國小(TAES)所觀測得到的絕對重力值累積變化已達到 $124.4\pm 2.7\mu\text{gal}$ ，此重力變化量所顯示的物理意義，即為是地層下陷以及其他的各種影響量的表現。

1-2 文獻回顧

臺灣地區重力測量的約制點位來自於絕對重力點，在國內未引進 FG5 絕對重力儀之前，絕對重力測量曾經由美國國家大地測量局(National Geodetic Survey)來臺做觀測，於 1991 年起，先後利用 JILLA-4 與 FG5 絕對重力儀在大溪、新竹、臺中、鳳山、綠水及太魯閣等六處進行選點及觀測(張瑞剛，1997)，2003 年內政

部購進FG5絕對重力儀後，即由國立交通大學與工研院量測技術中心合作，展開對臺灣地區的絕對重力測量，於2005年完成全臺15處絕對重力站設置與測量(內政部，2005)，並於2006年完成國家重力基準站的建置(內政部，2008)，2006年11月起，與法國合作進行AGTO(Absolute Gravity of the Taiwanese Orography)計畫，對臺灣中央山脈南部東西向一帶，進行逐年的絕對重力測量，以分析該區域的地殼變動情形(內政部，2009)，Mouyen et al.(2012)在研究臺灣南部山區侵蝕作用時，即結合絕對與相對重力測量進行地殼變動監測；Kao(2011)更對國內絕對重力與超導重力應用在重力基準、地體動力及環境變遷做相關的研究及探討。

內政部自2001年起即展開全國性的一等水準點上重力測量，並檢測國內各絕對重力點變動情形，以做為重力網形平差的約制條件，計算出全國各地重力值，另分析各式平差模式對重力成果精度的影響(Hwang et al., 2002)，另於2006年起，又再次進行全國一等水準點上重力測量作業；在水準測量部分，Yang et al.(2003)經由分析2001年全國1010個一等水準點測量成果後，重新訂定全新的臺灣垂直基準系統(TWVD2001)，後續並逐年實施一等水準測量，Chen et al.(2011)研究並分析2001年至2008年的正高成果後發現，位於臺灣西南部地表的最大下陷率為-109.4 mm/year；另有Ching et al.(2011)結合GPS與水準資料，並運用各種模式分析全臺灣地區地殼變動；Sun et al.(2009)於中國青藏高原及雲南等地以重力及GPS觀測資料研究並驗證板塊增厚。

陳南松(2003)曾探討固體潮及海潮負載效應對臺灣地區衛星追蹤站位置及重力影響的變化；在本論文中各式重力觀測資料，海潮負載重力效應對觀測量的影響不可輕忽，黃鉅富(2012)對此研究開發一套適用臺灣地區的海潮模型 OTL10，並以 SGOTL 程式計算海潮負載效應；國際上另有 Agnew(2013)所開發的 SPOTL 相關程式用以計算海潮負載效應，Zhou et al.(2013)的研究中，使用 SPOTL 計算海潮負載效應，進一步分析中國大陸東南沿岸地區重力觀測位置的絕對重力值改正情形，藉以改善絕對重力觀測精度。

監測地層下陷最準確及主要的方法為水準測量(經濟部水利署，2004)，另有

使用 GPS 連續觀測或以地陷監測井做為監測方法(經濟部水利署,2004;陳鶴欽, 2008),洪偉嘉(2009)對於大面積的監測更增加應用 InSAR(Interferometry Synthetic Aperture Radar)技術, Hung et al.(2011)並以 InSAR 應用於臺灣濁水溪沖積扇的地表變形監測, Jacob et al.(2010)於 2006 年至 2008 年期間,在法國南部以絕對重力及相對重力測量來檢視該地區水蝕石灰岩地形地下水位的變化,藉此推測出的地下水的儲量。Hwang et al.(2010)則以重力測量方法對雲林地層下陷區進行初步監測實驗,主要是以 FG5 絕對重力儀及相對重力儀觀測下陷區與週邊相關位置重力變化做比較分析。

1-3 論文架構

本論文主要分成六大章節及相關附錄,其重點內容架構如下:

- 一、「緒論」:闡明本研究之目的、文獻回顧及論文架構。
- 二、「重力測量及平差方法」:主要介紹地面重力測量理論及方法,分別闡述絕對重力測量觀測理論及方法、相對重力測量觀測理論及方法、重力環境改正與重力觀測量平差計算。
- 三、「海潮負載改正」:介紹海潮負載的原理及相關理論公式,並利用 SGTOL 程式計算海潮負載改正,計算並比較相對重力網平差成果精度。另針對近岸與離島的絕對重力觀測量,以 g7、SGOTL 與 SPOTL 三種程式進行海潮負載效應計算,並加入觀測量中進行改正,以求出最佳化的絕對重力值及觀測精度,並對各相對重力網於改正海潮負載效應前後的成果精度做比較。
- 四、「全臺 2003 年及 2007 年重力變化及分析」:闡述 2003 年與 2007 年兩次於臺灣全島一等水準點上相對重力觀測與成果,藉由比較正高變化與重力變化做初步分析,檢視全臺各地的地表變動情形。
- 五、「以重力方法檢視地層下陷」:介紹以重力測量方法觀測雲林地層下陷情形,探究其重力變化所代表的物理意義,並分析重力與地層下陷的初步相關性。
- 六、「結論與建議」:綜整本論文之研究成果及結論,並對研究中不足之處提出說

明與建議。

「附錄」：包括 FG5 絕對重力儀及 Scintrex CG-5 相對重力儀觀測操作說明。



二、重力測量及平差方法

2-1 絕對重力測量

絕對重力測量即是於某一點位置量取其重力加速度的大小。本文中所討論的絕對重力測量原理，主要是以自由落體法則來測定。假設有某一物體由一高度 h 自由落下至 h_0 ，則落下距離 $h-h_0$ 與落下時間 t 的關係式為：

$$h-h_0 = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

即為
$$h = h_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (2-1)$$

上式(2-1)中 g 為重力加速度值， h_0 表示於時間 $t=0$ 物體所在位置， h 則是時間為 t 時刻物體所在位置， v_0 表示 $t=0$ 時物體的速度。根據上式，只要量測不同落下時間 t_i 及與其對應的落下距離 h_i-h_0 ，則可求解出重力加速度值 g 。由於式(2-1)中有三個未知數(h_0 、 v_0 與 g)，因此必須測定至少三組的 h_i 及 t_i 值以組成聯立方程式求解出 g 值。本文中所討論的 FG5 絕對重力儀，即是採用如上觀測原理。

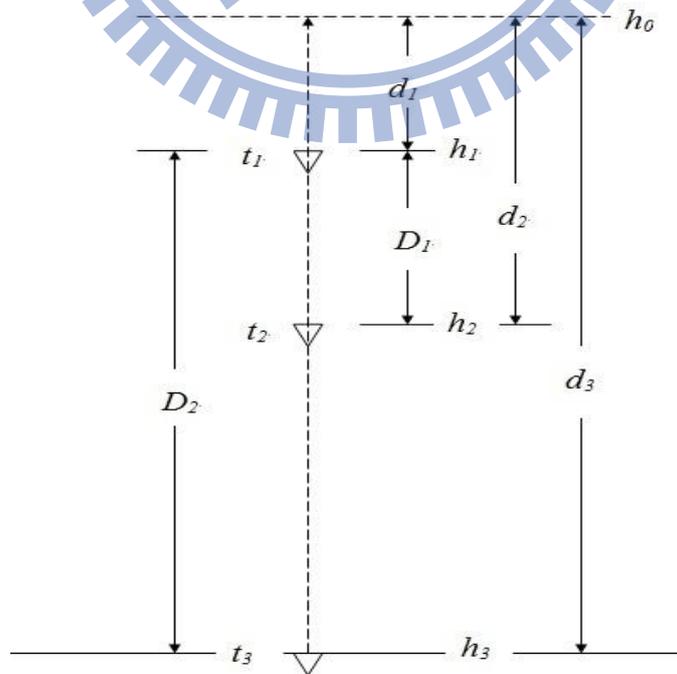


圖 2-1：自由落體計算重力加速度

如圖 2-1，自由落體在三個位置上的落下時間及距離分別為 (t_1, h_1) 、 (t_2, h_2) 及 (t_3, h_3) ，再假設

$$d_1 = h_1 - h_0$$

$$d_2 = h_2 - h_0$$

$$d_3 = h_3 - h_0$$

依據(2-1)式，可得：

$$d_1 = v_0 t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2$$

$$d_2 = v_0 t_2 + \frac{1}{2} g t_2^2$$

$$d_3 = v_0 t_3 + \frac{1}{2} g t_3^2$$

以上三式中，將第二式及第三式均減去第一式，可得：

$$(d_2 - d_1) = (t_2 - t_1) \left[v_0 + \frac{1}{2} g (t_2 + t_1) \right]$$

$$(d_3 - d_1) = (t_3 - t_1) \left[v_0 + \frac{1}{2} g (t_3 + t_1) \right]$$

令 $D_1 = d_2 - d_1$ ， $D_2 = d_3 - d_1$ ， $T_1 = t_2 - t_1$ ， $T_2 = t_3 - t_1$ ，代入上式後，消去 v_0 ，簡化後則可得

$$g = \frac{2 \times \left(\frac{D_2}{T_2} - \frac{D_1}{T_1} \right)}{(T_2 - T_1)} \quad (2-2)$$

上式中的 g 為重力加速度值，亦即是我們要測定的絕對重力值。以 FG5 絕對重力儀為例，該儀器即是以碘穩頻雷射來測定(2-2)式中的落下距離 D ，並以鈷原子鐘測定落下時間 T ，觀測精確度可達 10^{-8} ms^{-2} ，亦即 μgal 等級(Kao, 2011)。

2-1-1 FG5 絕對重力儀

FG5 絕對重力儀主要部份是一部極精準的碘穩頻雷射干涉儀，用來監測物體

自由落下的直角稜角運動情形，干涉儀所收集到的光學資料即提供了非常精確的距離觀測量系統。簡單來說，其原理就是以精密的測距系統搭配精密計時的原子鐘，精準地測定物體落下的重力加速度值，經由大量地收集落下的數據，見圖 2-2，最後以電腦軟體程式計算得出一平均加速度值，即為絕對重力值。

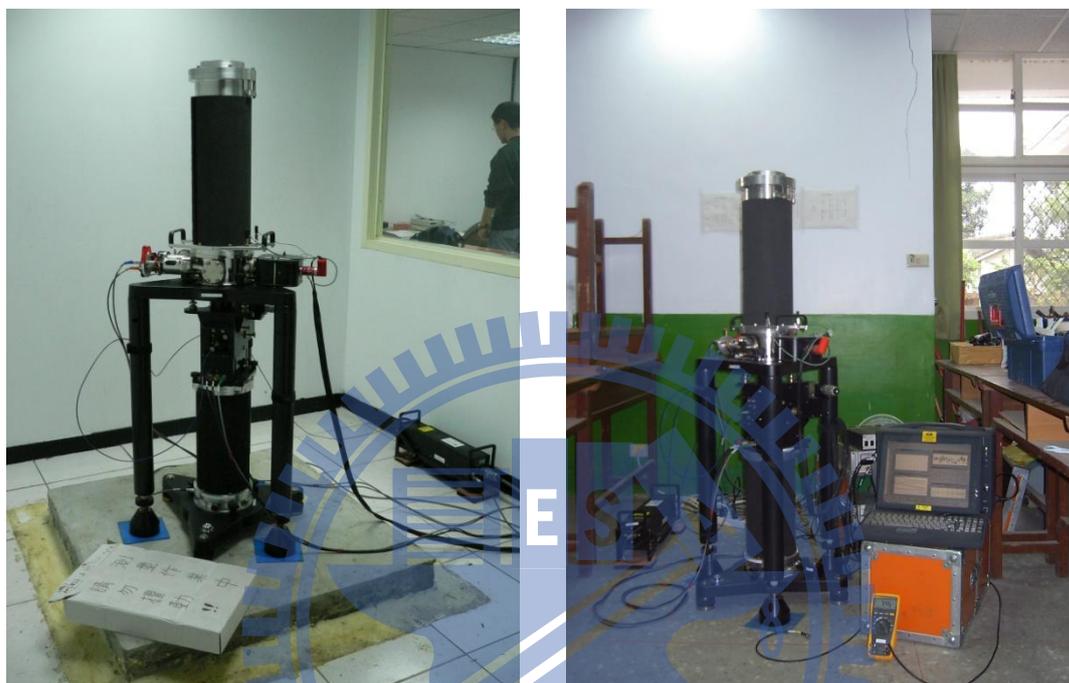


圖 2-2：FG5 絕對重力儀觀測現況

國內自 2003 年底即陸續引進兩部 Micro-g Lacoste FG5 絕對重力儀，使我國重力測量的技術可與世界同步，除可自主測定臺灣地區的絕對重力值之外，再搭配設置超導重力儀，並於新竹市十八尖山完成建立國家重力基準站(Laboratory of Geodesy and Geodynamics)。

絕對重力的觀測作業方法，主要是架設絕對重力儀於待測位置上，收集該位置的各次重力加速度值，經由統計分析原理以求定平均重力加速度值，即為所測定的絕對重力值。然而 FG5 絕對重力儀所測定重力加速度的位置，是在該儀器上半部的落體裝置，實際與待測地面仍有高度落差，FG5 儀器所訂定的此高度落差為 100 公分，亦即表示所測得的絕對重力值必須再經由化算至地面後，才是實際待測位置的絕對重力值。作者於國內剛引進 FG5 絕對重力儀時，即參與內政

部委託工研院量測技術中心接收儀器事宜，並隨該中心工程師於 Micro-g Lacoste 公司技師指導下，學習 FG5 絕對重力儀架設與測量等事務，之後除了於工研院量測技術中心實驗室內進行 FG5 絕對重力儀的測量工作外，更前往臺灣最南部及最北部的內政部墾丁(KDNM)及陽明山(YMSM)衛星追蹤站進行絕對重力觀測，此舉為國內首次自主性的絕對重力觀測實驗任務，其後又於 2005 年完成全臺 15 個絕對重力點的設置與測量(內政部，2005)，另又以絕對重力觀測應用於雲林地層下陷地區的重力監測(Hwang et al., 2010)，就重力監測地層下陷部分於第五章做深入討論。本論文並將 FG5 絕對重力儀相關作業模式與操作經驗整理後，收錄於附錄 A 做詳細說明。

2-1-2 重力梯度及重力化算

重力值所根據的高度化算，首要測定該位置的重力梯度值，以自由空間理論的重力梯度值而言為 $-3.086 \mu\text{gal}/\text{cm}$ ，然而考量各觀測重力位置的經、緯度與高度皆不同，必須於待測位置實際測定其重力梯度值。簡易觀測方法是以相對重力儀於待測位置上零高度先測定一重力值，再於待測位置上方某單位高度再測定一重力值，重複上述觀測步驟數次後，取其重力差值的平均值，再除以單位高度後，即得到該位置的重力梯度值，見圖 2-3。另外較嚴密的重力梯度值測定方法，是利用某些固定高度的支架，見圖 2-4(Kao, 2011)，依照各種不同的高度 h_2 、 h_1 ，以相對重力儀測量出上、下高度的相對重力值 g_2 、 g_1 ，重力梯度值則可如下式(2-3)表示：

$$g_{grad} = \frac{g_2 - g_1}{h_2 - h_1} \quad (2-3)$$

重複以上做法，並改以各不同高度組合施測，最後取其平均值，即得到該位置的重力梯度值。



圖 2-3：簡易重力梯度值測量方法(左：零高度測定重力值，右：單位高度測定重力值)

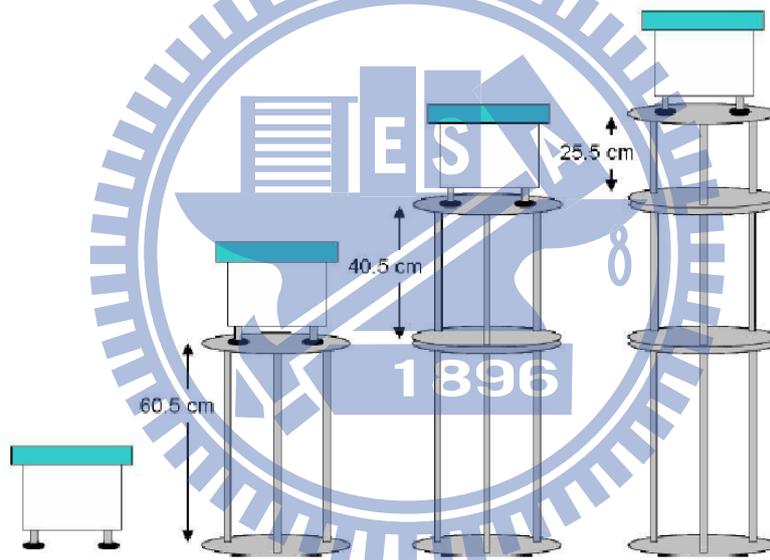


圖 2-4：嚴密重力梯度值測量方法(Kao, 2011)

2-1-3 絕對重力值計算

絕對重力的觀測可依照需求，藉由 Micro-g Lacoste 公司所開發的 g7 程式軟體(g7 User's Manual, 2006)，設定欲進行的觀測組數(set)及各組內的落下數(drop)與間隔時間，控制 FG5 絕對重力儀進行觀測作業，完成觀測後即可得到平均之絕對重力值，而其重力值的觀測精度來自於總落下數以及儀器本身的系統誤差(不確定度)。以多組數量連續觀測同一位置的平均重力值標準偏差如下：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}{n-1}} \quad (2-4)$$

上式(2-4)中， σ 為組離散度(Set scatter)， n 為重觀測組數量(Set)， g_i 為組重力平均值， \bar{g} 為平均重力值，平均重力值的精度即為：

$$\sigma_{\bar{g}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2-5)$$

FG5 在完成絕對重力觀測作業後，會由軟體 g7 計算並產生觀測成果記錄檔，觀測成果紀錄檔範例見表 2-1。

表 2-1：絕對重力值觀測成果(2005 年同安國小觀測範例)

Micro-g Solutions g Processing Report												
File Created: 12/22/05, 08:23:43												
Project Name: 1214C												
g Acquisition Version: 3.1021 g Processing Version: 4.0405												
Company/Institution:												
Operator: Cheng, Tze-Chiang												
Station Data												
Name: Tong Ann Elementary School												
Site Code: TAES												
Lat: 23.71164 Long: 120.26461 Elev: 5.00 m												
Reference Height: 13.10 cm												
Datum Height: 100.00 cm												
Gradient: -3.900 uGal/cm												
Nominal Air Pressure: 1012.65 mBar												
Barometric Admittance Factor: 0.30												
Polar Motion Coord: 0.0633 " 0.3874 "												
Earth Tide (ETGTAB) Selected												
Potential Filename: C:\Program Files\Micro-g Solutions Inc\gWavefiles\ETCOT.DAT												
Delta Factor Filename: C:\gData\OceanLoad.dff												
Delta Factors												
	Start	Stop	Amplitude	Phase Term								
	0.000000	0.002427	1.000000	0.0000 DC								
	0.002428	0.249951	1.160000	0.0000 Long								
	0.721500	0.906315	1.154250	0.0000 Q1								
	0.921941	0.974188	1.154240	0.0000 O1								
	0.989049	0.998028	1.149150	0.0000 P1								
	0.999853	1.216397	1.134890	0.0000 K1								
	1.719381	1.906462	1.161720	0.0000 N2								
	1.923766	1.976926	1.161720	0.0000 M2								
	1.991787	2.002885	1.161720	0.0000 S2								
	2.003032	2.182843	1.161720	0.0000 K2								
	2.753244	3.081254	1.07338	0.0000 M3								
	3.791964	3.937897	1.03900	0.0000 M4								
Ocean Load ON, Filename: C:\gData\OceanLoad.olf												
Waves:	M2	S2	K1	O1	N2	P1	K2	Q1	Mf	Mm	Ssa	
Amplitude (uGal):	2.000	0.650	2.352	2.088	0.683	0.778	0.251	0.468	0.000	0.000	0.000	
Phase (deg):	116.5	25.5	69.0	37.9	45.4	66.4	15.8	31.1	0.0	0.0	0.0	

Instrument Data

Meter Type: FG5
Meter S/N: 224
Factory Height: 116.40 cm
Rubidium Frequency: 10000000.00000 Hz
Laser: WEO (200)
ID: 632.99117754 nm (0.36 V)
IE: 632.99119473 nm (-0.09 V)
IF: 632.99121259 nm (-0.46 V)
IG: 632.99123023 nm (-0.81 V)
IH: 632.99136890 nm (-1.45 V)
II: 632.99139822 nm (-1.20 V)
IJ: 632.99142704 nm (-0.90 V)
Modulation Frequency: 8333.350 Hz

Processing Results

Date: 12/14/05 Time: 14:55:16 DOY: 348 Year: 2005

Gravity: 978867771.63 uGal

Set Scatter: 16.84 uGal

Measurement Precision: 2.54 uGal

Total Uncertainty: 37.94 uGal

Number of Sets Collected: 44

Number of Sets Processed: 44

Set #s Processed:

1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44

Number of Sets NOT Processed: 0

Set #s NOT Processed:

Number of Drops/Set: 200

Total Drops Accepted: 8673

Total Drops Rejected: 127

Total Fringes Acquired: 700

Fringe Start: 30

Processed Fringes: 650

GuideCard Multiplex: 4

GuideCard Scale Factor: 250

Gravity Corrections

Earth Tide (ETGTAB): 8.08 uGal

Ocean Load: 0.29 uGal

Polar Motion: 5.17 uGal

Barometric Pressure: 3.22 uGal

Datum Height: 115.05 uGal

Reference Xo: 0.01 uGal

Uncertainties

Earth Tide Factor: 0.500

Average Earth Tide Uncertainty: 4.04 uGal

Ocean Load Factor: 0.20

Average Ocean Load Uncertainty: 0.06 uGal

Barometric: 1.00 uGal

Polar Motion: 0.05 uGal

Laser: 0.05 uGal

Clock: 0.50 uGal

System Type: 1.10 uGal

Tidal Swell: 0.00 uGal

Water Table: 0.00 uGal

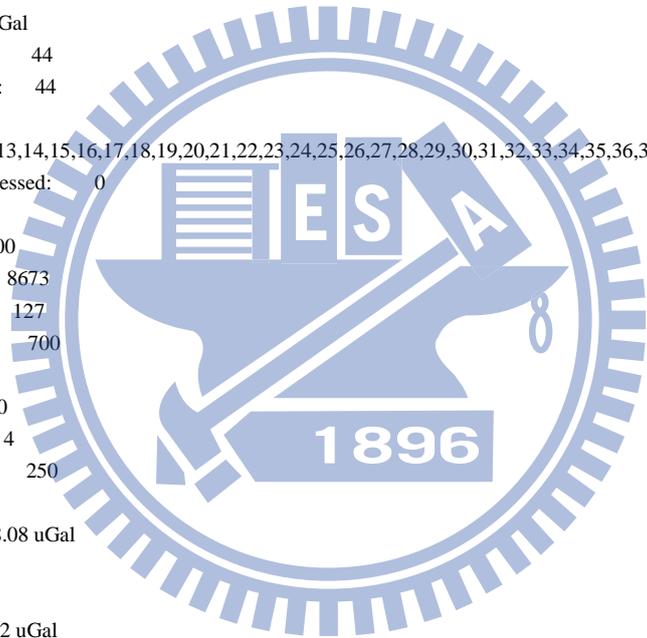
Unmodeled: 0.00 uGal

System Setup: 1.00 uGal

Gradient: 0.89 uGal (0.03 uGal/cm)

Comments

FG5 at Tong Ann Elementary school, Yung Ling, for monitoring land subsidence



2-2 相對重力測量

相對重力測量是測定兩個位置的重力差值，也就是由一已知重力點位做為基準，利用其與未知點位的重力較差求得該未知點位的重力值，此觀測原理與水準測量的做法相似，相對重力測量的作業主要採往、返測，進行方式主要以階梯式及星狀式為主，見圖 2-5。

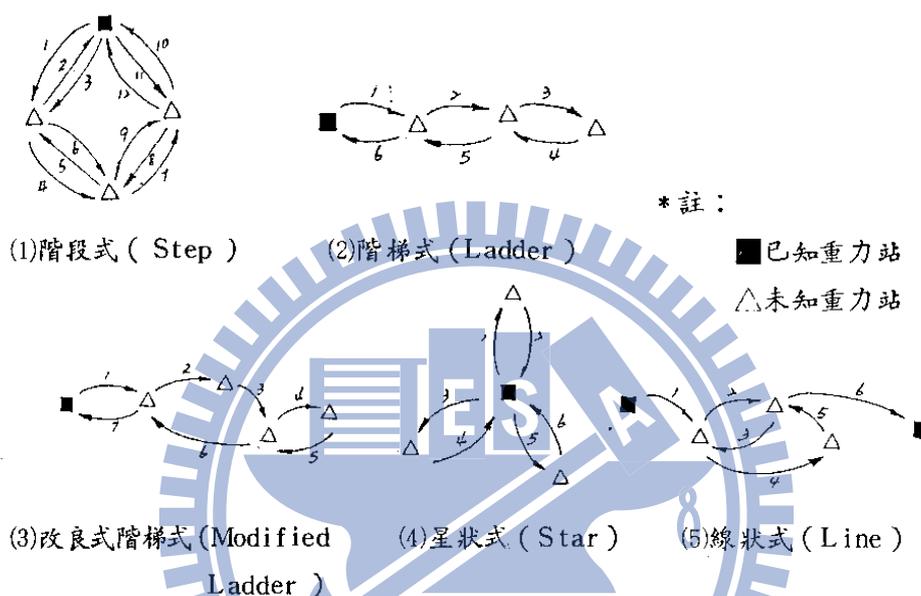


圖 2-5：相對重力觀測進行方式(聯合勤務總司令部，1983；Torge, 1989)

本論文中所討論的相對重力測量作業，主要有兩個部分，一為範圍遍及全臺灣的一等水準點上相對重力測量，觀測路線主要是沿各省、縣道公路施測，觀測位置主要為內政部一等一級與二級水準點，觀測進行方式為階梯式(Ladder)，見圖 2-5，以每一日可進行往返觀測的路程為一個觀測測段，多個觀測測段則組成測線及環線，連結全臺灣所有觀測測線及環線形成全島的相對重力觀測網，見圖 2-6；另一為雲林地區相對重力網，觀測範圍僅於雲林縣境內，觀測行進主要是以相對重力網中央位置所觀測的同安國小(TAES)絕對重力點為起迄位置，對週邊各個選定的待測重力點做相對重力觀測，進行方式是混合以星狀式(Star)及階梯式(Ladder)並連接引測網形內各重力觀測點，再對網形外圍各重力點做相對重力觀測，見圖 5-4，如此可增加觀測數，並提升網形平差後的重力值精度。

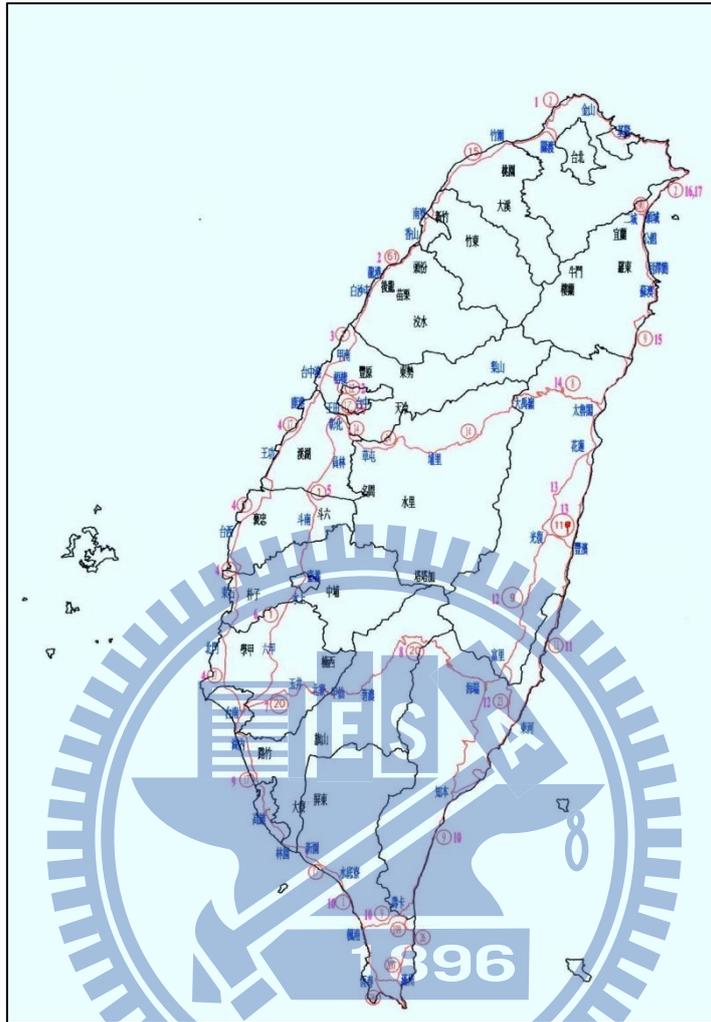


圖 2-6：全臺重力觀測網形圖(內政部，2003)

內政部於 2003 年 6 月委由國立交通大學完成全臺相對重力測量點位共計 1183 點，另又於 2007 年 6 月委由寰宇測量工程顧問有限公司完成全臺相對重力測量點位共計 2198 點，雲林地層下陷監測部分是以小區域相對重力網做觀測，來研究該區域的重力變化情形，本文將於第五章做討論。

相對重力儀使用的測量原理分為動力法 (dynamic method) 及靜力法 (static method) 兩種，現代的相對重力儀幾乎均採用靜力法原理。國內用來觀測相對重力所使的儀器，主要有 Lacoste & Romberg G 型、Graviton-EG 型及 Scintrex CG-5 重力儀等三種。本文中所收集並計算的 2003 年全臺相對重力觀測資料，即是以 Lacoste & Romberg G 型重力儀做觀測，而 2007 年全臺相對重力觀測資料，是以

Scintrex CG-5 重力儀做觀測，而雲林地區相對重力觀測網，則是使用 Lacoste & Romberg Graviton-EG 型重力儀及 Scintrex CG-5 重力儀觀測收集數據。

2-2-1 Lacoste & Romberg G 型重力儀

Lacoste & Romberg G 型(LCR G)重力儀是近四十年來，世界使用最廣泛獲取區域重力資料的標準儀器。重力儀外觀尺寸為 20×15×25 cm，重量約 4.2 kg，另外包含外箱、電池、定平底盤和充電器，總重量約為 12.3 kg，見圖 2-7(LCR G Manual, 1997)。

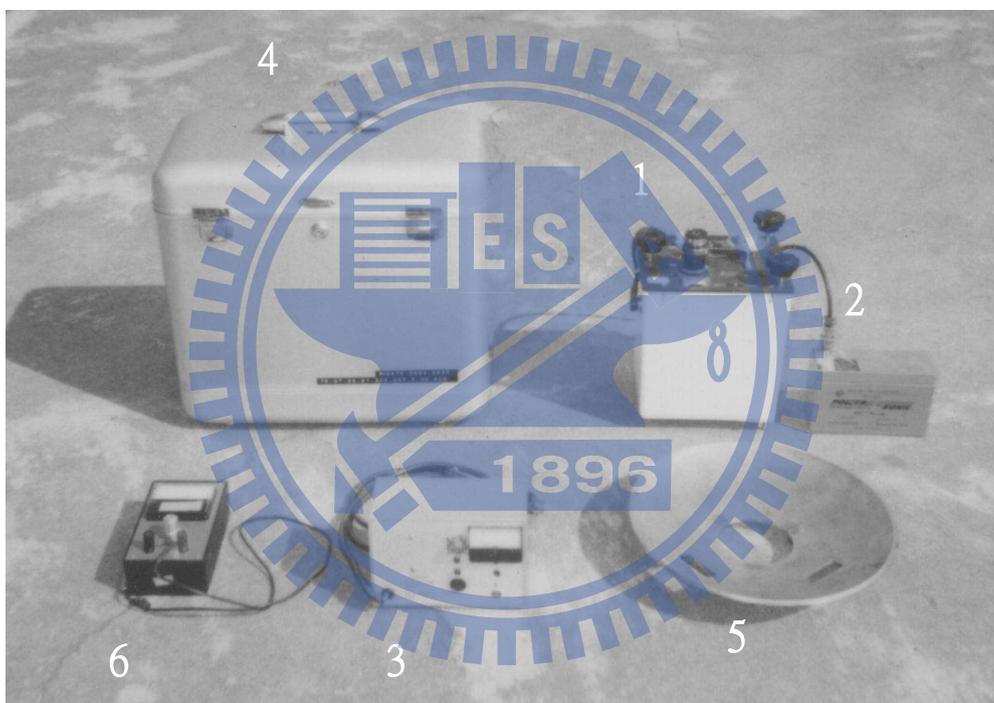


圖 2-7：Lacoste & Romberg G 型重力儀。1 為重力儀本體、2 為 12V 充電式電池、3 為電池充電器、4 為儀器外箱、5 為定平底盤、6 為安培計（聯合勤務總司令部，1983）

該儀器在設計時，主要為了讓重力儀能適應於全球重力值觀測(約 977 gal～984 gal)，LCR G 型重力儀觀測相對重力的讀數範圍為 7000mgal，而讀數精度為 0.001 mgal，儀器的每月漂移量小於 0.5 mgal。為了減低大氣壓力改變對儀器造成的影響，重力儀出廠時已完全密封，其內部並增加大氣補償以提高精度，其感應器在消磁之後密閉於防磁盒中，見圖 2-8。

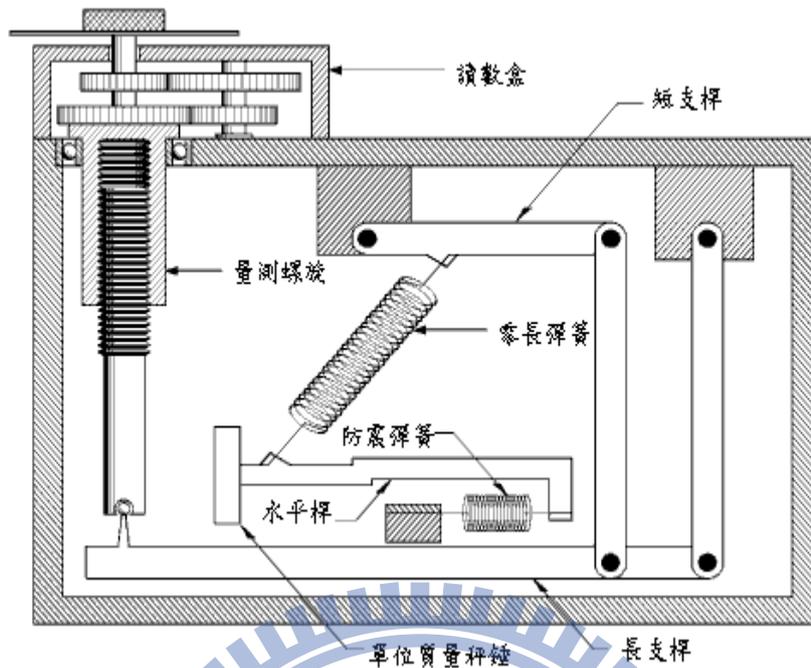


圖 2-8：Lacoste & Romberg G 型重力儀內部組件圖(聯合勤務總司令部，1983)

LCR G 型重力儀的操作原理，主要為儀器的重力感應系統及量測系統。重力感應系統的部分，包含水平桿一端的秤錘，水平桿由一防震彈簧組成浮動式支軸，用來消除觀測運動過程中的任何摩擦。由於重力感應系統完全懸掛彈簧上，必須嚴密確保儀器外殼不受到劇烈撞擊及震動，以免導致系統損壞。量測系統部分，是由槓桿系統與量測螺旋所組成，該系統須於已知的重力值之間精確校正，校正參數(重力單位換算常數)則與量測螺旋及水平桿系統的品質相關，儀器的零點漂移率為每月可小於 0.5 mgal。為了確保重力儀的保持最佳的工作狀態測量作業前及作業期間，特別是每三週或長距離搬運後，必須對重力儀進行檢定及校正。

重力儀使用時，須接上 12 伏特之電池，保持重力儀於攝氏 49 度至 51.5 度間的最佳工作溫度狀態，電池充電器與電池連接充電時，須將電池移出儀器外箱，以防電池過熱。未使用儀器時，則利用 110 伏特之交流電充電器保持儀器暖機，以維持重力儀之工作溫度(魏祥鴻，2005)。由於此型重力儀是以傳統光學目鏡讀取重力觀測數據，並記錄於觀測手簿中，另需詳細記錄觀測地點的經度、緯度、

高程及大氣壓力值，以便內業計算重力值之前，先行對重力觀測量做各式環境改正，期能較理想的觀測數據，重力相關環境改正部分，留待第 2-3 節與第三章再做討論。

2-2-2 Lacoste & Romberg Graviton-EG 型重力儀

Lacoste & Romberg Graviton-EG 型(EG)重力儀，見圖 2-9，為全功能、全自動化且自動定平的相對重力儀。該儀器藉由內建伺服馬達驅動嵌腳即可達真正水平，因此觀測的讀數已不必如其他電子重力儀需透過數值推算來補償傾斜，更不必像 LCR G 型用旋轉刻度盤做觀測及校正，並免除了換算各觀測站重力值的繁雜程序。此型儀器的優點計有：容易操作、自動定平、重量輕、全功能、高靈敏度、整合資料讀取及可擴充性等。



圖 2-9: Lacoste & Romberg Graviton-EG 型重力儀(LCR Graviton-EG Manual, 2002)

EG 型重力儀的感應器是以零長彈簧為主，此感應器與 LCR G 型相同，見圖 2-10，觀測解析度出廠前可達到 0.001 mgal 的範圍，其重複性在可控制情況下可達到 0.01 mgal，而在野外環境下則約 0.003 至 0.020 mgal，儀器漂移量每月可小

於 0.001 mgal，內建 32 MB 快閃記憶體，可以觀測記錄 100,000 站以上(LCR Graviton-EG Manual, 2002；魏祥鴻，2005)。

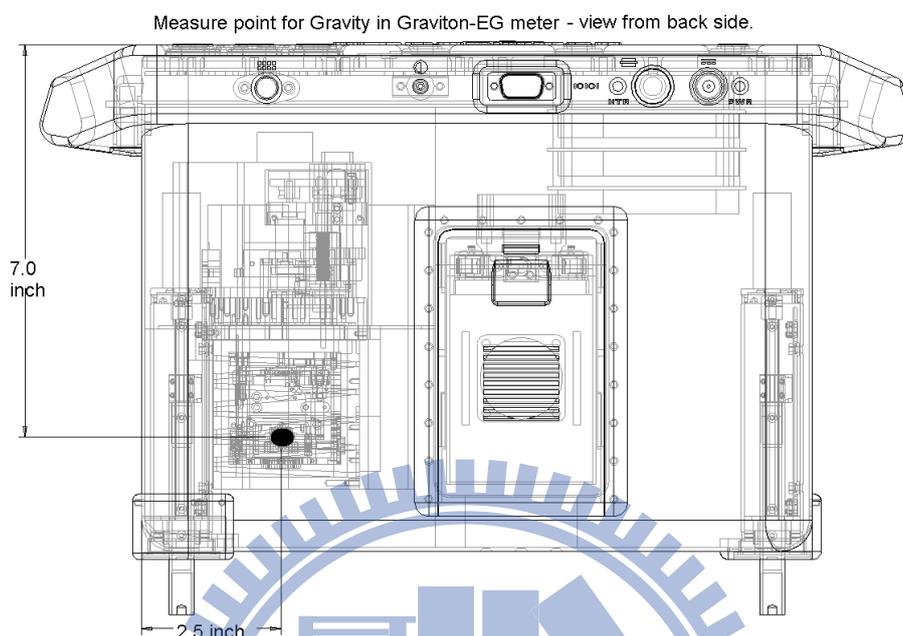


圖 2-10：Lacoste & Romberg Graviton-EG 型重力儀內部組件配置圖(LCR Graviton-EG Manual, 2002)

EG 型重力儀於觀測時，可外接 GPS 裝置或直接輸入觀測位置的坐標經、緯度及高程值，藉此儀器可計算出地球固體潮效應，直接對觀測重力值做改正，也可設定觀測時間長度，在記錄觀測資料時，更可以濾波視窗(長度設定為 1、10、30、60 或 120 秒)方式獲得最佳的觀測品質，並可顯示觀測量的標準偏差(LCR Graviton-EG Manual, 2002)。最後可將觀測數據下載至電腦，直接做為相關計算參考，可省去紀錄手簿的繁雜並可避免人為錯誤。由於此型儀器可長時間連續觀測，在每一筆設定觀測時間長度的數據中，可以檢視出該觀測時間長度所測得重力平均值及標準偏差(RMSError)，並可於觀測進行時，直接檢視觀測時間長度內各筆觀測重力的解析度(Error)。

根據實際觀測經驗，EG 型重力儀觀測所得的重力值標準偏差，可以明顯地反應觀測環境的噪聲(Noise)，當觀測重力值的 RMSError 值越大時，表示環境的震動干擾越明顯，其中不乏人為因素如交通或工業所產生的震動影響，若以自然

產生的地震來看，Yeh et al.(1982)研究中指出，當臺灣以外地區所產生地震後，其震波傳至臺灣地區時，根據相對重力儀的觀測，可產生約 50~100 μgal 之重力變化量。

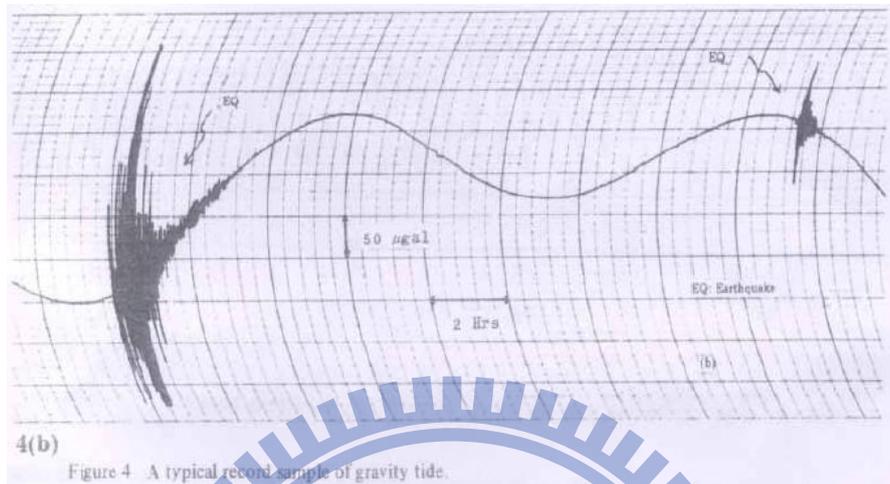


圖 2-11：地震震波傳遞波形(Yeh et al., 1982)

本文利用EG型重力儀(S/N 1184)在彰化縣大城鄉、雲林縣麥寮鄉、崙背鄉與臺西鄉等之沿海平原地區做觀測時，該地區為海拔約20至60公尺之沖積層地質帶(經濟部中央地質調查所)，重力儀觀測量RMSError介於 0.434 ~ 2.686 mgal之間不等，見圖2-12。

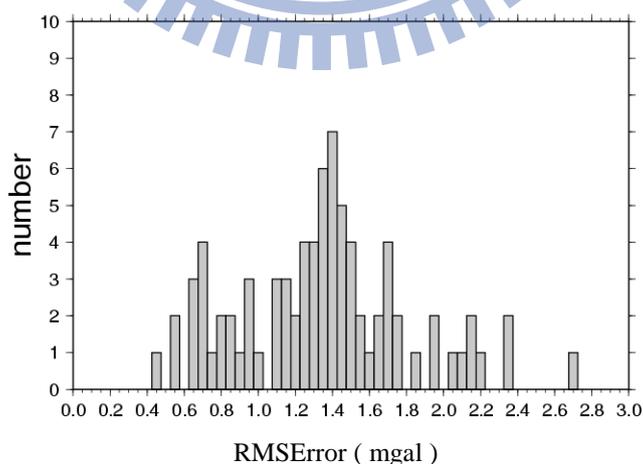


圖 2-12: 本文臺灣西部沿海地區 Gravition-EG 型重力儀相對重力觀測量 RMSError 分布直方圖(2004/12)

另於嘉義縣梅山鄉與竹崎鄉進行觀測，而該地區位於中央山脈西麓，海拔約在1100至1500公尺，地質為三峽群及其相當地層(經濟部中央地質調查所)，所得到的觀測量RMSError介於 0.037 ~ 0.061 mgal之間，見表2-2。

表 2-2：本文臺灣西部中海拔山麓地區的相對重力觀測量 (單位：mgal)

	DATE	TIME	RAW GRAV	TC GRAV	RMSERR	TIDE	LATITUDE	LONGITUDE	ELEV
S330	1-Jul-05	05:53:05	2225.248	2225.228	0.037	0.0207	23.56218	120.7101	S330A3
S690	1-Jul-05	07:11:48	2134.537	2134.499	0.04	0.0378	23.43699	120.6579	S690A2
S690	1-Jul-05	07:17:31	2134.55	2134.512	0.061	0.0381	23.43699	120.6579	S690B1
S330	1-Jul-05	08:22:28	2225.362	2225.328	0.04	0.0339	23.56218	120.7101	S330B1

以上兩組觀測數據正好代表兩種不同地質條件之重力觀測量，震波發生在沿海地區沖積層之軟質沉積地層時，會使得震波於行進時因為地質鬆軟而有共振現象發生，進而使得震波有加大的趨勢(黃有志，2003)，沿海地區人口稠密農工商業交通活動頻繁，因此易有各種微震發生，又由於靠近海岸邊，海浪衝擊岸線所造成的震波也容易在此區域發生，綜合以上所產生的微震震波，乃是造成該區域重力觀測量RMSError較大之主要因素。

相對於近中央山脈西麓地帶而言，地質為較堅硬之三峽群及其相當地層，震波於此地質區域發生時，較易被地層所吸收，進而使得震波減小，又由於此觀測區域離海岸較遠且人口較疏散，農工商業及交通活動不若西部沿海地區頻繁，因此造成環境微震的因素較少，使得該區域重力觀測量RMSError遠小於西部沿海地區。

另檢視此重力儀(S/N 1184)前往日本京都所做的觀測量表現情形，見圖 2-13，更可以明顯的看出其 RMSError 遠小於在臺灣地區約十至數百倍，根據經濟部中央地質調查所地質圖圖資顯示，臺灣西部沿海平原地質構造皆為沖積層，多為礫石、砂與黏土所構成，屬於軟質地帶，又位於主要省道與線道公路旁，交通頻繁並且常有載重車輛經過，因而使得觀測之環境噪聲過大而導致觀測量 RMSError 過高，導致 EG 型重力儀無法達到所預期觀測的 1 至 10 μ gal 等級解析度。

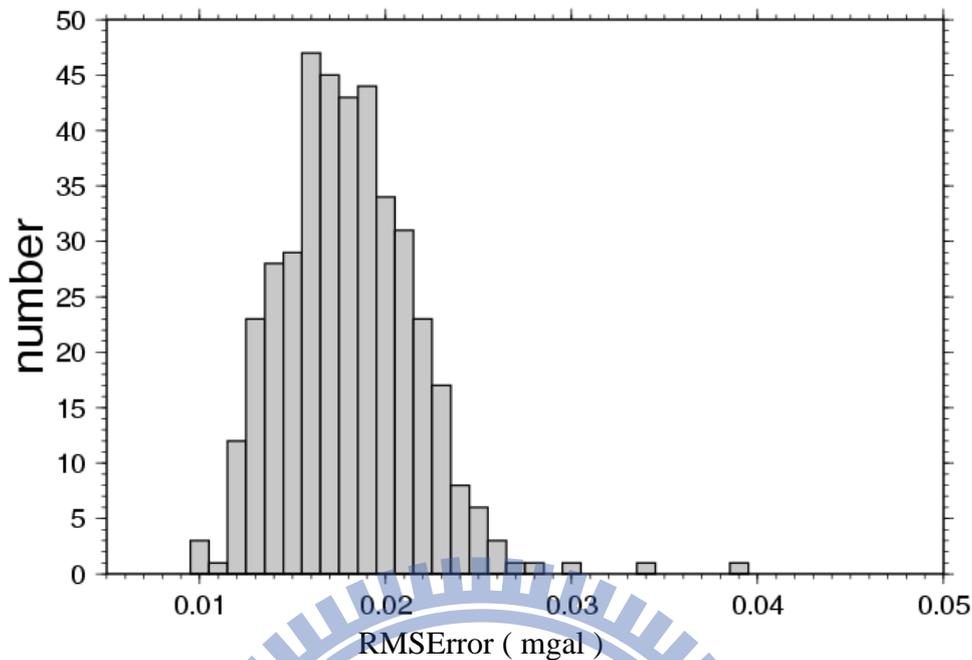


圖 2-13：本文日本京都地區 Gravition-EG 型重力儀重力觀測量 RMSE 分布直方圖 (2004/11/23)

2-2-3 Scintrex CG-5 型重力儀

Scintrex CG-5 型(CG-5)重力儀相較於其他重力測量儀器，優點是更為簡易的操作模式，且量測迅速、即時測量與統計分析等功能，可提高觀測精度與可靠度。該儀器的讀數範圍為 8000 mgal，觀測解析度於出廠前檢定可達 0.001 mgal 的範圍，其重複性在可控制情況下可達 0.005 mgal，而在野外環境下則可達約 0.005 mgal，儀器漂移量每日可小於 0.02 mgal (CG-5 Operation Manual, 2002)，見圖 2-14。該儀器於測量前，可先輸入觀測位置坐標經緯度與高程，儀器即可於觀測時自動改正由地球固體潮所造成的誤差，並即時將資料儲存於內建微電腦處理器，為一自動化的重力測量儀器。CG-5 型重力儀精度高、量測速度快，更可自動記錄讀數、自動補償傾斜、溫度、固體潮等改正，另外於觀測者在輸入測站之經緯度、高程值後，更可進一步施行地形改正以供其他相關應用。本論文將 CG-5 型重力儀相關作業模式與操作經驗整理後，收錄於附錄 B 做詳細說明。



圖 2-14：Scintrex CG-5 重力儀

表 2-3 為本節三型相對重力儀的各式諸元比較表，依作者使用 CG-5 型重力儀的經驗來看，利用此型重力儀觀測所得到的重力值標準偏差，普遍較 EG 型重力儀來得低，見圖 5-7。

表 2-3：本文各式相對重力儀的諸元比較表

儀器 項目	Lacoste & Romberg G	Lacoste & Romberg Graviton-EG	Scintrex CG-5
重複觀測精度	0.01~0.02 mgal	0.001~0.01 mgal	0.005 mgal
觀測讀數範圍	全球 7000 mgal	全球 7000 mgal	全球 8000 mgal
定平功能	手動	自動	手動
觀測值型態	乘以換算常數 後即為重力值	重力值	重力值
改正功能	無	傾斜改正 固體潮改正	傾斜改正 固體潮改正
漂移率	每月可小於 0.5 mgal	每月可小於 0.001 mgal	每日可小於 0.02 mgal

2-3 重力環境改正

由於在地球表面上任何一處的重力值會隨時間而改變，對於這些引起重力值變化的環境因素大致可分為日、月引潮力所產生的地球固體潮、海潮變化造成的海潮負載、氣壓改變、地球極移、地下水位及土壤濕度變化等。

本論文中的重力觀測量，其中就已包含了上述環境因素的重力影響量，而所謂的點位重力值，是定義在無日、月引潮力、無海潮變化（即海水面為平均海水面）、標準大氣壓、無地球極移、地下水位及土壤濕度為長時間平均值的“正常”地球狀態下。上列任何一項若非屬正常狀態，則會產生重力的變化，因此必須由重力觀測值中移除。地下水位及土壤濕度變化部分，由於觀測時間不長，各絕對重力觀測時間僅一至三日不等，而各相對重力觀測時間更只有數分鐘至數小時不等，在短時間內地下水位與土壤濕度均無明顯變化，對於各重力觀測量的改正而言，此兩項均可忽略不計。本論文中所考慮之環境引起之重力變化僅為前五項，其所使用的模式大部分可見 Melchoir (1983)，Vanicek and Krakiwsky (1986)，Moritz and Mueller (1987)，Torge (1989) 等相關文獻。本文另僅就海潮負載效應所產生的重力變化做介紹，留待第三章進行討論。

2-4 重力觀測量平差計算

開始平差計算的首先步驟，是組成相對重力測量觀測方程式，這個方程式包含環境改正後的重力值 g 、基準未知數 N_0 與漂移參數 $d(t)$ 。相對重力測量觀測方程式如下：

$$l + v = g + N_0 + d(t) \quad (2-3)$$

由相對重力的讀數，最後是以重力差值 ($\Delta l_{a,b} = l_b - l_a$) 做為觀測量，重力讀數差值所組成的相對重力觀測方程式如下：

$$\Delta l_{a,b} + v_{a,b} = g_b - g_a + [d(t_b) - d(t_a)] \quad (2-4)$$

上式(2-4)中， $v_{a,b}$ 為 $\Delta l_{a,b}$ 的殘差值， t_a 與 t_b 為觀測時間，原本(2-3)式中的基準未知數因為相減而相消除。因為觀測時間差很小，可用低階多項式來模擬漂移參數。當有 n 個相對重力觀測量時，就可以計算出重力值及漂移參數，並且採用最小二乘法來求解，並可由如下的矩陣來表式：

$$L + V = BX = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & -1 & (t_b^1 - t_a) + \cdots + (t_b^1 - t_a)^n \\ 1 & -1 & \cdots & (t_b^2 - t_a) + \cdots + (t_b^2 - t_a)^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & 1 & \cdots & (t_b^n - t_a) + \cdots + (t_b^n - t_a)^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_b \\ g_a \\ \vdots \\ d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

上式(2-5)中， L 矩陣共有 n 組觀測量， X 矩陣是待解的 u 個未知數， V 矩陣則是觀測誤差。

觀測量的權為：

$$P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \quad (2-6)$$

σ_0^2 單位權變方 ($P=1$)

相對重力網的基本觀測量是相對重力值，即為兩個重力點的重力差值，並加

上環境變化及系統誤差影響量，由於在網形中，若是基準不足或圖形缺失 (configuration defect) 造成秩虧現象 (Datum defect)，會讓法方程式產生奇異而致無法求解逆矩陣，解決的方法就是加入約制條件。

在網形中，若是任意給定一個已知點，平差後所得到的結果，即是相對於該已知點的成果；相反的，若是沒有給定已知點進行平差，法方程式矩陣 N 會是秩虧的奇異矩陣，將會造成無窮多組解。魯林成(1982)稱這類的平差問題是秩虧自由網，或簡稱自由網。為了讓自由網的平差中能有唯一解，主要能滿足改正數 V 加權平方和為最小的條件 ($V^T P V$)，Koch(1987)與 Caspary(1988)曾提出以下兩種特性：

(一) \hat{X}^+ 為未知數估計值， \hat{X}^+ 的 NORM 最小，即為：

$$(X^+)^T X^+ = \|X^+\|^2 = \text{minimum} \quad (2-7)$$

(二) 點位精度之後驗協變方矩陣的軌跡(trace)最小，即為：

$$\text{trace}(Q_x) = \text{minimum} \quad (2-8)$$

其中

$\hat{\sigma}_0^2 Q_x$ 未知數之後驗協變方矩陣

$\hat{\sigma}_0^2$ 後驗單位權變方

本論文中介紹以下兩種平差模式：自由基準平差與加權約制平差，其中引用李莉華(2001)、Hwang et al.(2004)與魏祥鴻(2005)等文獻做說明。

2-4-1 自由基準平差 (datum-free adjustment)

若組成的重力觀測方程式並未加上任何約制條件的話，且無圖形缺失的狀況，此時的秩虧度 (rank defect) 則為 1。假設重力點數有 n 個，則重力儀參數會有 $u-n$ 個，重力觀測方程式的係數矩陣 B 中的每一列前 n 個元素是由 0、-1、1 所組成，以下表示：

$$\mathbf{B}\mathbf{y} = \mathbf{0} \quad (2-9)$$

$$\mathbf{y}^T = c \left[\underbrace{1 \ 1 \ \dots \ 1}_n \ \underbrace{0 \ 0 \ \dots \ 0}_{u-n} \right] \quad (2-10)$$

上式(2-10)中， c 表任一不為零的常數，係數矩陣 \mathbf{B} 的 Null Space 有一非零元素，即表示係數矩陣 \mathbf{B} 的秩虧度為 1，若不以加權約制平差而讓法方程式有唯一解，則可加入下列基準條件 (Koch, 1987)：

$$\mathbf{S}^T \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{0} \quad (2-11)$$

且

$$\mathbf{B}\mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (2-12)$$

其中

$$\mathbf{S}^T = [1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \quad (2-13)$$

為了滿足(2-7)式解為 NORM 最小解或自由基準解 (datum-free)：

$$\hat{\mathbf{X}}^+ = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{S} \mathbf{S}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L}^b = (\mathbf{N} + \mathbf{S} \mathbf{S}^T)^{-1} \mathbf{U} \quad (2-14)$$

經由誤差傳播，可得 $\hat{\mathbf{X}}^+$ 後驗協變方矩陣為：

$$\hat{\Sigma}_{\hat{\mathbf{X}}^+} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{N} + \mathbf{S} \mathbf{S}^T)^{-1} \mathbf{N} (\mathbf{N} + \mathbf{S} \mathbf{S}^T)^{-1} = \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{N}^+ \quad (2-15)$$

後驗單位權變方為：

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{n - u + r} \quad r = 1 \quad (2-16)$$

求解得出 $\hat{\mathbf{X}}^+$ ，滿足(2-11)，故：

$$\sum_{i=1}^k \hat{g}_i = 0 \quad (2-17)$$

上式(2-17)中， \hat{g}_i 為第 i 站重力估值 (包含在向量 $\hat{\mathbf{X}}^+$ 中)，(2-16)式可解釋為所有點的重力值之平均為零。因此，由自由基準解得到的 \hat{g}_i 值並非真正之重力值，而

自由基準的改正數 \mathbf{V} 是唯一解且有意義的 (Koch, 1987)。假設：

$$\hat{\mathbf{X}}^+ = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_g \\ \hat{\mathbf{X}}_p \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_g & \mathbf{B}_p \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

其中 $\hat{\mathbf{X}}_g$ 是重力值， $\hat{\mathbf{X}}_p$ 是儀器參數，則兩點位間改正後之相對重力 Δg 為唯一解，可表示為：

$$\Delta g = \mathbf{B}_g \hat{\mathbf{X}}_g = \mathbf{V} + \mathbf{L} - \mathbf{B}_p \hat{\mathbf{X}}_p \quad (2-19)$$

因此，可經由一個已知重力值來推求重力網中所有點之重力值，此即為自由基準平差（datum-free adjustment）解法，相關重力成果詳見第 4-3-1 節。

2-4-2 加權約制平差（weighted constraint adjustment）

另一種排除重力網平差奇異的方法，就是加入未知數觀測方程式，或稱為加權約制方程式，並以此來做為約制條件。利用已知重力點的重力值及其先驗標準偏差來進行加權約制平差，其未知數觀測方程式如下：

$$\mathbf{V}_x + \mathbf{L}_x = \mathbf{B}_x \mathbf{X}, \quad \mathbf{L}_x \text{ 權矩陣} = \mathbf{P}_x \quad (2-20)$$

以 \mathbf{L} 和 \mathbf{L}_x 組成之觀測方程式如下：

$$\bar{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{V}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}_x \end{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}^a - \begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ \mathbf{L}_x \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{B}}\mathbf{X} - \bar{\mathbf{L}}, \quad \text{權矩陣} = \bar{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_x \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

令 $\bar{\mathbf{V}}^T \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{V}} =$ 最小值，利用最小二乘法求解出未知數之估值 $\hat{\mathbf{X}}^a$ ：

$$\hat{\mathbf{X}}^a = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{B}_x^T \mathbf{P}_x \mathbf{B}_x)^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} + \mathbf{B}_x^T \mathbf{P}_x \mathbf{L}_x) \quad (2-22)$$

觀測量改正數的加權平方和為：

$$\bar{\mathbf{V}}^T \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{V}} = \mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} + \mathbf{V}_x^T \mathbf{P}_x \mathbf{V}_x \quad (2-23)$$

後驗單位權變方為：

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\bar{\mathbf{V}}^T \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{V}}}{n - u + r} \quad (2-24)$$

其中

n 相對重力觀測之數目

u 未知數的個數

r 約制點之數目(未知數觀測方程式個數)

令 $\mathbf{B}_X^T \mathbf{P}_X \mathbf{B}_X = \bar{\mathbf{P}}_X$ ，則(2-22)式可寫為：

$$\hat{\mathbf{X}}^a = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} + \bar{\mathbf{P}}_X)^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} + \mathbf{B}_X^T \mathbf{P}_X \mathbf{L}_X) \quad (2-25)$$

經誤差傳播，可得未知數 $\hat{\mathbf{X}}^a$ 之變方-協變方矩陣如下：

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{X}}^a} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} + \bar{\mathbf{P}}_X)^{-1} \quad (2-26)$$

在加權約制平差的過程中，約制用控制點設計矩陣 \mathbf{B}_X 為一特殊矩陣，其行數 (columns) 和列數 (rows) 皆等於未知數個數 u ，除了相對於約制用控制點未知參數對角線元素值是+1外，其餘元素都是零的 $u \times u$ 矩陣。

\mathbf{P}_X 是約制用已知點權值所組成的 $u \times u$ 對角線矩陣，且 $\bar{\mathbf{P}}_X$ 與 $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ 皆為 $u \times u$ 矩陣。而 $\bar{\mathbf{P}}_X$ 是除了相對於約制用控制點未知參數的對角線上元素值為控制點權值之外，其餘元素都為零的 $u \times u$ 對角線矩陣。

假設只以第 2、3 點為約制點，且其先驗權分別為 P_2 和 P_3 ，則：

$$\bar{\mathbf{P}}_X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

由上式可以得知，約制點的權可以直接加入由相對重力觀測所組成的法方程矩陣 $\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}$ ，其中為相對於約制用控制點未知參數的對角線元素。當約制點的權為無限大時，平差後的值會與平差前所給的控制點值相同，相應殘差值為零，即

為固定該點，這就是加權約制平差（weighted constraint adjustment）解法。

另外，當約制點的權介於零與無限大之間時，先驗值變動的大小與權成反比。若沒有圖形缺失的問題，此平差系統中僅約制一點即可。這種只約制一點的平差做法，稱為最小約制平差（minimum constraint adjustment）解法。

2-4-3 顯著性測試

在同一個點位上，於兩個不同時間所測得兩筆該點位的重力值，首先得判定這兩筆重力值是否相異，即檢視這兩筆的差異值是否為零。若這兩筆差異值不為零，則表示此點位的重力值產生變化，或稱該變化為顯著。

由於這兩筆重力值皆為由觀測及平差計算所得，因此均內含誤差值，在此假設 g_1 、 g_2 為同一點位的前、後次觀測重力值，其標準偏差分別為 σ_1 、 σ_2 ， df_1 、 df_2 則是在計算 g_1 、 g_2 時所對應的平差自由度，則利用以下的假說來測試重力值變化是否為顯著（Koch, 1987）：

$$H_0: g_2 - g_1 = 0$$

$$H_1: g_2 - g_1 \neq 0$$

測試因子如下：

$$T = \frac{g_2 - g_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} > T_c \quad (2-28)$$

則 H_0 為拒絕，即為變化顯著。

上式 (2-28) 中， T_c 值是自由度為 $m = (df_1 + df_2)$ 及某一信心水平 $(1-\alpha)$ （如 95%）下， t 分布之 $(1-\alpha)$ 臨界值，見圖 2-13，例如，當 $(1-\alpha)=95\%$ ， $df_1 + df_2 = 10$ ，則 $T_c = 2.228$ （Mikhail, 1976）。

若值 g_1 的標準偏差為未知，而所對應的自由度與觀測儀器皆與 g_1 相同，則

可假設 $\sigma_1 = \sigma_2$ ， $df_1 + df_2 = 2df_1$ ，若 T 及 T_c 滿足下式，則變化為顯著：

$$T = \frac{g_2 - g_1}{\sqrt{2}\sigma} > T_c \quad (2-29)$$

假設 \hat{e} ， $\hat{\sigma}_e$ 分別為平差所得的參數估值及標準偏差，以下假說可測試參數估值是否為顯著：

$$H_0: e = 0$$

$$H_1: e \neq 0$$

若測試因子 T 滿足下式：

$$T = \frac{\hat{e}}{\hat{\sigma}_e} > T_c(m) \quad (2-30)$$

則稱參數估值為顯著，其中 $T_c(m)$ 的定義與(2-28)同，而(2-30)式中 m 為平差自由度。

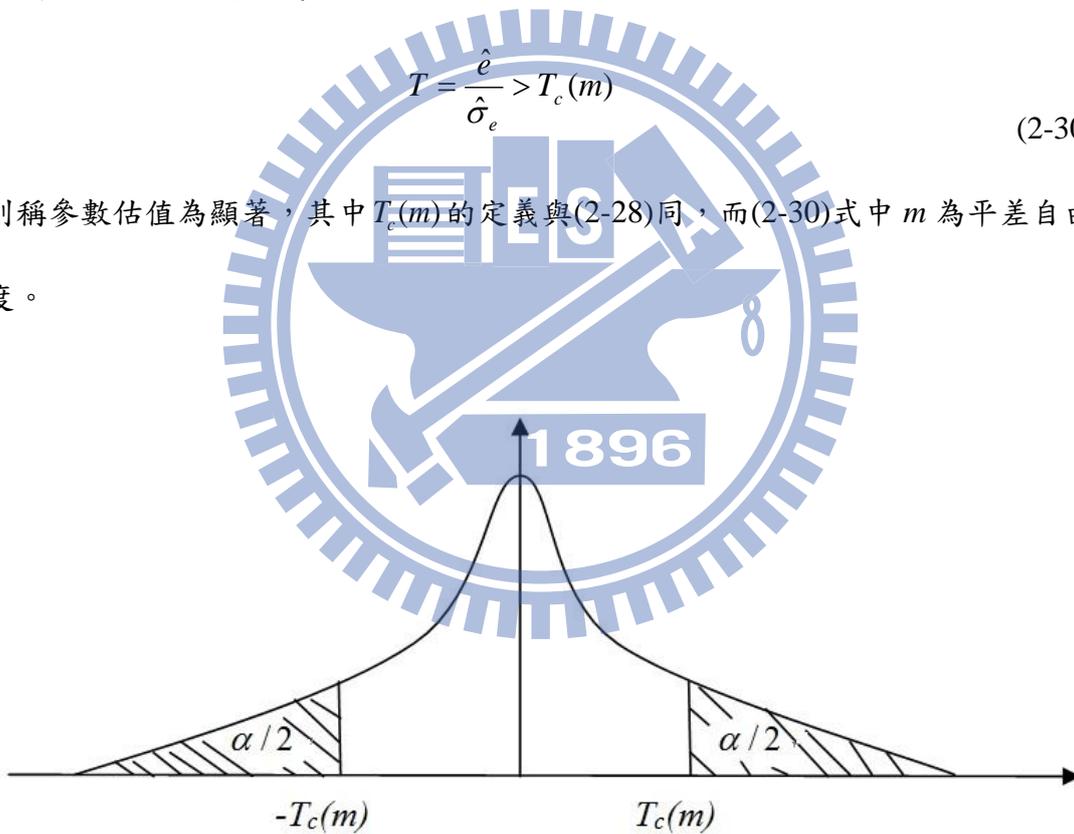


圖 2-15： t 分布之機率密度函數及 $(1-\alpha)$ 臨界值 $T_c(m)$ ， m 為自由度

三、海潮負載改正

3-1 概述

重力測量觀測量之中，海潮負載(Ocean Tide Loading, OTL)效應是僅次於地球固體潮(Solid Earth Tide)效應的週期性重力變化影響量。由於潮汐在近岸或海島觀測位置的影響較顯著，一方面由於海洋在靠近岸邊的深度開始改變，使得近岸的地殼受到海洋載重的不同而產生變位，進而影響重力的變化，另一方面則是因為海洋的質量變化造成產生對觀測位置的不同引力。因此，海潮負載效應對於重力的影響包括兩個部分：一為海潮質量吸引所產生引力影響的直接效應，稱為牛頓引力效應 (Newtonian effect); 另一為地殼受到海潮負載導致變形的間接效應，稱為彈性效應 (elastic effect) (黃鉅富，2012)。

海潮負載效應是利用平衡位概念，以格林函數形式推導出全球積分模式，來計算地表各位置的海潮負載重力效應改正量。本章所介紹計算海潮負載效應的理論公式，其中以 Farrell (1972)、Melchior (1983) 及 Agnew (1997) 等著作論述為主，並以 SGOTL 程式做為計算海潮負載效應理論的工具，對本論文中的絕對與相對重力改正後結果做初步比較與分析，以下各公式推導與相關理論，摘錄自黃鉅富(2012)論文做說明。

3-2 牛頓引力效應

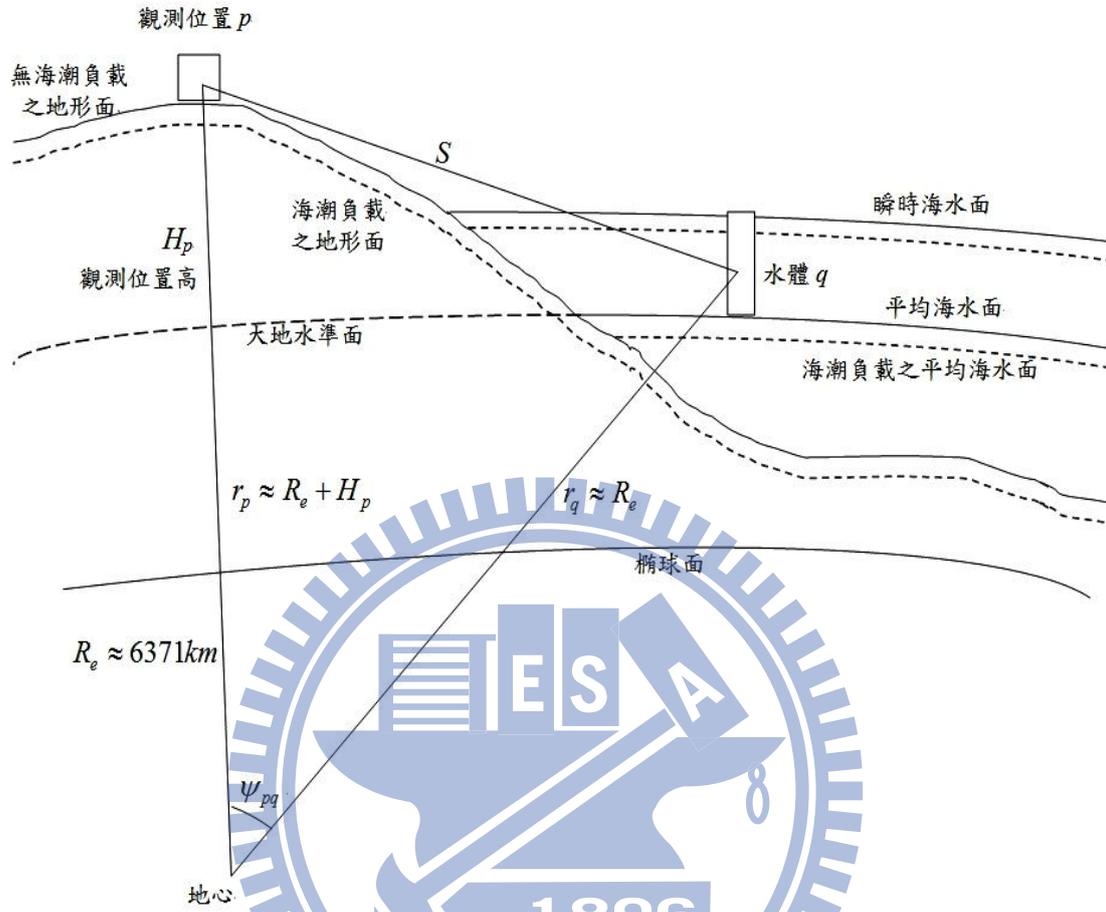


圖 3-1：本文中海潮負載效應於觀測位置 p 與水體 q 之間關係(參照 Hwang and Huang, 2012 繪製)

由於牛頓引力效應是來自海水質量的引力，根據牛頓萬有引力定律，可將觀測位置 p 以外的全球海水面上海潮質量進行引力積分，見圖 3-1，各水體 q 對觀測位置 p 產生的直接引力位 W ，公式如下：

$$W(r_p, \phi_p, \lambda_p) = \iint_C \frac{Gdm_q}{S} = G \iint_C \frac{\rho_w h_q R_e^2}{\sqrt{R_e^2 + r_p^2 - 2R_e r_p \cos \psi_{pq}}} d\sigma_q \quad (3-1)$$

其中

ψ_{pq} 水體 $q(\phi_q, \lambda_q)$ 與觀測位置 p 間的弧距角度， (ϕ_q, λ_q) 為 q 點所在緯度及經度

h_q 水體 q 於平均海水面上之潮高

ρ_w 海水平均密度 (1030 kgm⁻³)

G 牛頓萬有引力常數

R_e 觀測位置 p 點之球面半徑

C 以整個球體為範圍之球積分範圍

$d\sigma_q$ 積分單位，相當於 $d\sigma_q = \cos\phi_q dq d\lambda_q$ ，於球面上相當於 $dS = R_e^2 d\sigma_q$

r_p 觀測位置 p 點至地心間的距離，近似於 $R_e + H_p$ ； H_p 為 p 點正高

由於潮高是定義在平均海面上，上式 (3-1) 採用球面法近似平均海面進行積分，其中觀測位置 p 點所在球面半徑 R_e 是參考高斯公式進行計算(Torge, 1989)，而水體 q 至地心距離近似於其球面半徑 R_e ，觀測位置 p 點至地心距離同樣假設近似於其球面半徑及正高之和 ($R_e + H_p$)。

根據引力位與加速度的關係，對引力位 W 進行反向垂直梯度計算，牛頓引力效應於觀測位置 p 點的重力影響量 $\Delta g_{\text{Newtonian}}$ ，可見下式表示：

$$\Delta g_{\text{Newtonian}}(H_p, \phi_p, \lambda_p) = -\frac{\partial W}{\partial r_p} = -\frac{\partial W}{\partial H_p} = G\rho_w \iint_C h_q K_{\text{Newtonian}}(H_p, \psi_{pq}) d\sigma_q \quad (3-2)$$

式(3-2)中的核函數 $K_{\text{Newtonian}}(H_p, \psi_{pq})$ 是以高程相依並不考慮方向(黃鉅富，2012)，整理後可得核函數：

$$K_{\text{Newtonian}}(H_p, \psi_{pq}) = \frac{a-b}{(1+a^2-2ab)^{\frac{3}{2}}} \quad (3-3)$$

其中

$$a = \cos\psi_{pq}$$

$$b = \frac{R_e + H_p}{R_e}$$

根據黃鉅富(2012)的分析結果，近岸的觀測位置重力影響量若要達到 1 μgal

等級的精度，就應當進行此牛頓引力效應改正。

3-3 彈性效應

彈性效應 (elastic effect) 在重力的影響量上，乃是海水質量重新分布而改變引力位 (potential) 並造成地殼微幅變形，進而影響垂直方向的重力加速度，可以藉由高程相依的格林函數 (Green's function) 與海水面上海潮質量重新分布來進行積分計算，相關理論及計算公式，在 Farrell (1972)、Melchior (1983) 及 Moritz and Muller (1987) 等文獻中有介紹。

本節根據 Moritz and Muller (1987)、Guo et al. (2004) 及圖 2-1 呈現觀測位置 p 與水體 q 的相關性，介紹並推導高程相依的地球彈性重力效應理論；格林函數可由高程相依函數構成，以垂直位移 $V(H_p, \psi_{pq})$ 及引力位變化函數

$F(H_p, \psi_{pq})$ 所組成的關係式如下：

$$V(H_p, \psi_{pq}) = \frac{R_e}{M} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R_e}{R_e + H_p} \right)^{n+1} h'_n P_n(\cos \psi_{pq}) \quad (3-4)$$

$$F(H_p, \psi_{pq}) = \frac{G}{R_e} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R_e}{R_e + H_p} \right)^{n+1} k'_n P_n(\cos \psi_{pq}) \quad (3-5)$$

上式(3-4)及(3-5)中， M 為平均地球質量， h'_n 及 k'_n 為第 n 階的洛夫常數 (Love numbers)， $P_n(\cos \psi_{pq})$ 為第 n 階勒間德 (Legendre) 多項式，同樣與 p 、 q 兩處位置間弧距 ψ 相關，其餘參數定義與第 3-1 節牛頓引力效應理論公式中相關參數相同。函數 $V(H_p, \psi_{pq})$ 與 $F(H_p, \psi_{pq})$ 可分別與水體積分組成下列海潮負載

關係式如下：

$$u_r(H_p, \psi_{pq}) = R_e^2 \rho_w \iint_D h_q V(H_p, \psi_{pq}) d\sigma_q \quad (3-6)$$

$$\delta V(H_p, \psi_{pq}) = R_e^2 \rho_w \iint_D h_q F(H_p, \psi_{pq}) d\sigma_q \quad (3-7)$$

根據重力梯度近似式：

$$\frac{\partial g}{\partial H} \approx -\frac{2GM}{R_e^3} \quad (3-8)$$

結合上式(3-6)及(3-7)後，可以推導出重力影響量(Moritz and Muller, 1987)，則高程相依的地球彈性重力效應公式如下：

$$\Delta g_{OTL}(H_p, \phi_p, \lambda_p) = u_r \frac{\partial g}{\partial H_p} - \frac{\partial(\delta V)}{\partial H_p} = G\rho_w \iint_C h_q G_{OTL}(H_p, \psi_{pq}) d\sigma_q \quad (3-9)$$

上式(3-9)中的 $G_{OTL}(H_p, \psi_{pq})$ 代表影響觀測位置重力海潮負載地球彈性重力效應的格林函數，並可由以下函數 $G_L(\psi_{pq})$ 推導組成：

$$G_{OTL}(H_p, \psi_{pq}) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R_e}{R_e + H_p} \right)^{n+2} G_L(\psi_{pq}) \quad (3-10)$$

$$G_L(\psi_{pq}) = [2h'_n - (n+1)k'_n] P_n(\cos \psi_{pq}) \quad (3-11)$$

若不考慮觀測位置高度的地球彈性重力效應情況下，測站高度為零 ($H_p = 0$)，則

$\frac{R_e}{R_e + H_p} \approx 1$ ，(3-10)式可以簡化如下：

$$G_{OTL}(\psi_{pq}) = \sum_{n=0}^{\infty} [2h'_n - (n+1)k'_n] P_n(\cos \psi_{pq}) \quad (3-12)$$

海潮負載地球彈性重力效應 Δg_{OTL} ，可由式(3-9)、(3-12)與現有洛夫常數表，並根據弧距 ψ 進行積分後計算可得。根據黃鉅富(2012)論文中的分析結果，無論在近岸或不同高程的觀測位置上，地球彈性重力效應並不顯著。彈性效應另也在位移上產生影響，因海水質量吸引改變引力位而造成地表變形，相關理論及計算公式，於 Farrell (1972) 及 Yang et al. (1996) 等文獻亦有介紹，該海潮負載位移效應同樣可藉由高程相依之格林函數 (Green's function) 與海水面上波浪海潮質量重新分布進行積分計算。本論文主要討論海潮負載所產生的重力效應，並未對位移的影響量部分做討論。

3-4 海潮負載格林函數

為了要計算上節公式中海潮負載地球彈性格林函數，首先必須選擇適當的各階洛夫常數 h'_n 、 k'_n 、 l'_n ，見表 3-1，根據 G-B (Gutenberg-Bullen, Farrell, 1972) 地球模型理論中與地球內部結構有關的洛夫常數解，即可獲得 G_{OTL} 、 U 、 V 等與海潮負載重力及位移效應相關的格林函數 (Matsumoto et al., 2005)，見表 3-2。

表 3-1：Farrell(1972)的各階洛夫常數

n	h_n	nl_n	nk_n
1	-0.290	0.113	0
2	-1.001	0.059	-0.615
3	-1.052	0.223	-0.585
4	-1.053	0.247	-0.528
5	-1.088	0.243	-0.516
6	-1.147	0.245	-0.535
8	-1.291	0.269	-0.604
10	-1.433	0.303	-0.682
18	-1.893	0.452	-0.952
32	-2.379	0.680	-1.240
56	-2.753	0.878	-1.402
100	-3.058	0.973	-1.461
180	-3.474	1.023	-1.591
325	-4.107	1.212	-1.928
550	-4.629	1.460	-2.249
1000	-4.906	1.623	-2.431
1800	-4.953	1.656	-2.465
3000	-4.954	1.657	-2.468
10000	-4.956	1.657	-2.469
∞	-5.005	1.673	-2.482

表 3-2：G-B 地球彈性體模型海潮負載格林函數表

degree	U	V	G_{OTL}	degree	U	V	G_{OTL}
0.0001	-33.64	-11.25	-77.87	5	-5.237	-2.523	-11.55
0.001	-33.56	-11.25	-77.69	6	-4.66	-2.156	-10.16
0.01	-32.75	-11.24	-75.92	7	-4.272	-1.915	-9.169
0.02	-31.86	-11.21	-73.96	8	-3.999	-1.754	-8.425
0.03	-30.98	-11.16	-72.02	9	-3.798	-1.649	-7.848
0.04	-30.12	-11.09	-70.11	10	-3.64	-1.582	-7.379
0.06	-28.44	-10.9	-66.4	12	-3.392	-1.504	-6.638
0.08	-26.87	-10.65	-62.9	16	-2.999	-1.435	-5.566
0.1	-25.41	-10.36	-59.64	20	-2.619	-1.386	-4.725
0.16	-21.8	-9.368	-51.47	25	-2.103	-1.312	-3.804
0.2	-20.02	-8.723	-47.33	30	-1.53	-1.211	-2.951
0.25	-18.36	-8.024	-43.36	40	-0.292	-0.926	-1.427
0.3	-17.18	-7.467	-40.44	50	0.848	-0.592	-0.279
0.4	-15.71	-6.725	-36.61	60	1.676	-0.326	0.379
0.5	-14.91	-6.333	-34.32	70	2.083	-0.223	0.557
0.6	-14.41	-6.15	-32.78	80	2.057	-0.31	0.353
0.8	-13.69	-6.05	-30.59	90	1.643	-0.555	-0.11
1	-13.01	-5.997	-28.75	100	0.92	-0.894	-0.713
1.2	-12.31	-5.881	-27.03	110	-0.025	-1.247	-1.357
1.6	-10.95	-5.475	-23.96	120	-1.112	-1.537	-1.98
2	-9.757	-4.981	-21.38	130	-2.261	-1.706	-2.557
2.5	-8.519	-4.388	-18.74	140	-3.405	-1.713	-3.076
3	-7.533	-3.868	-16.64	150	-4.476	-1.54	-3.53
4	-6.131	-3.068	-13.59	160	-5.414	-1.182	-3.918

以 Farrell (1972) 洛夫常數為例，根據 (3-11) 式海潮負載彈性效應格林函數，必須使用全階（第 0 至 ∞ 階）洛夫常數計算，為求計算方便，可嘗試將函數 $G_{OTL}(\psi_{pq})$ 全階分段解算，並且於個別迴圈內一併累計，總和分段解算結果後，就可以得到海潮負載格林函數 $G_{OTL}(\psi_{pq})$ 的全階解，可進一步積分計算海潮負載

彈性效應各個分潮與分量。

3-5 海潮負載振幅及相位

由於海潮負載重力效應引力來自海水質量，並與海水潮高 h_q 有關，且理論上具有空間及時間分布特性，海水潮高 h_q 可以時間 t 相關的傅立葉函數 (Fourier series) 展開成為下列公式(Foreman and Henry,1979)：

$$\begin{aligned} h(\phi_q, \lambda_q, t) &= \sum_{i=1}^m \left[f_i(t) Z_i^h(\phi_q, \lambda_q) \cos(\bar{S}_i(t) - B_i^h(\phi_q, \lambda_q)) \right] \\ &= \sum_{i=1}^m \left[a_i^h(\phi_q, \lambda_q) f_i(t) \cos \bar{S}_i(t) + b_i^h(\phi_q, \lambda_q) f_i(t) \sin \bar{S}_i(t) \right] \quad (3-13) \\ &= \sum_{i=1}^m \left[a_i^h(\phi_q, \lambda_q) b_i^h(\phi_q, \lambda_q) \right] f_i(t) \begin{bmatrix} \cos \bar{S}_i(t) \\ \sin \bar{S}_i(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中

$$\begin{bmatrix} a_i^h(\phi_q, \lambda_q) \\ b_i^h(\phi_q, \lambda_q) \end{bmatrix} = Z_i^h(\phi_q, \lambda_q) \begin{bmatrix} \cos B_i^h(\phi_q, \lambda_q) \\ \sin B_i^h(\phi_q, \lambda_q) \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

上式(3-14)中 Z_i^h 、 B_i^h 是第 i 個分潮與位置相關的振幅 (amplitude) 及相位 (phase)，海水潮高係數 (振幅及相位) 可轉換為 h_q 的正弦及餘弦函數式的係數 a_i^h 及 b_i^h 。

上式(3-13)中 $f_i(t)$ 為該分潮任一時間 t 的修正係數 (nodal modulation)， $\bar{S}_i(t)$ 為天文引數 (astronomical argument)，與天體運動有關，可由相關參數計算獲得。

將以上(3-12)式中的 h_q 代入(3-8)式中，藉由係數 a_i^h 及 b_i^h 與格林函數式做全球積分，可得出與地球彈性重力效應相關係數 a_j^E 及 b_j^E ，並將此轉換為如下式：

$$\begin{aligned} \Delta g_{OTL}(H_p, \phi_p, \lambda_p, t) &= G \rho_w \iint_C h_q G_{OTL}(H_p, \psi_{pq}) d\sigma_q \\ &= G \rho_w \iint_C \sum_{i=1}^m \left[a_i^h(\phi_q, \lambda_q) b_i^h(\phi_q, \lambda_q) \right] f_i(t) \begin{bmatrix} \cos \bar{S}_i(t) \\ \sin \bar{S}_i(t) \end{bmatrix} G_{OTL}(H_p, \psi_{pq}) d\sigma_q \end{aligned}$$

$$= G\rho_w \sum_{i=1}^m \left[a_i^E(\phi_p, \lambda_p) f_i(t) \cos \bar{S}_i(t) + b_i^E(\phi_p, \lambda_p) f_i(t) \sin \bar{S}_i(t) \right] \quad (3-15)$$

其中

$$\begin{bmatrix} a_i^E(\phi_p, \lambda_p) \\ b_i^E(\phi_p, \lambda_p) \end{bmatrix} = \iint_C \begin{bmatrix} a_i^h(\phi_q, \lambda_q) \\ b_i^h(\phi_q, \lambda_q) \end{bmatrix} G_{OTL}(H_p, \psi_{pq}) d\sigma_q \quad (3-16)$$

將上式(3-16)以及式中的係數 a_i^E 及 b_i^E ，由傅立葉函數轉換為具有振幅 Z_i^G

及相位 B_i^G 的係數關係式如下：

$$\Delta g_{OTL}(H_p, \phi_p, \lambda_p, t) = G\rho_w \sum_{i=1}^m \left[f_i(t) Z_i^G(\phi_q, \lambda_q) \cos(\bar{S}_i(t) - B_i^G(\phi_p, \lambda_p)) \right] \quad (3-17)$$

上式(3-16)中的振幅 Z_i^G 及相位 B_i^G 的係數的計算式如下：

$$\begin{bmatrix} Z_i^G(\phi_p, \lambda_p) \\ B_i^G(\phi_p, \lambda_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(a_i^E(\phi_p, \lambda_p))^2 + (b_i^E(\phi_p, \lambda_p))^2} \\ \tan^{-1} \left(\frac{b_i^E(\phi_p, \lambda_p)}{a_i^E(\phi_p, \lambda_p)} \right) \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

以上所推導的地球彈性重力效應計算式，以及海水潮高 h_q 的計算式，兩式皆為傅立葉函數型態，因為有相同時間域 t ，計算時可忽略此時間因素，直接將海水潮高對應分潮的振幅及相位進行係數轉換計算。

本論文所引用計算的 SGOTL 程式中，可採用自訂的洛夫常數或格林函數數值來進行海潮負載計算，計算時僅需給定觀測位置緯度、經度及正高，再選定所需計算的海潮負載效應類別（重力或位移）及分潮後，便可將觀測位置的海潮模型分潮係數（振幅及相位）與海潮負載格林函數進行全球積分，得出該觀測位置海潮負載效應的振幅及相位。

3-6 海潮模型

海潮模型(Ocean tide model)是利用數值形式來表現海水潮高的數值化模型，大多是以經、緯度網格坐標、振幅及相位的形式儲存，依照網格範圍及解析度，又可區分為全球模型(global model)及區域模型(regional model)。目前國外既有的海潮模型為全球海潮模型 NAO99b、FES2004 及區域海潮模型 NAO99jb 等。

NAO 模型(Matsumoto et al., 2000; Takanezawa et al., 2001)是國內外進行海洋及水文相關研究時最常用到的一種海潮模型，NAO 模型之中，主要是以 16 個短週期分潮(M2、S2、K1、O1、N2、P1、K2、Q1、M1、J1、OO1、2N2、Mu2、Nu2、L2、T2)所組成的 NAO.99b 及 NAO.99jb 模型，另外也有以 5 個長週期分潮(Mtm、Mf、Mm、Ssa、Sa)所組成的 NAO.99L 模型，並可依據其網格範圍及解析度再區分為全球模型(global model)及區域模型(regional model)，見表 3-3。

NAO.99b 全球海潮模型是利用觀測 5 年以上的 TOPEX/POSEIDON (T/P) 測高資料代入海洋動力法推估計算而產生(Matsumoto et al., 2000; Takanezawa et al., 2001)，NAO.99b 區域模型也加入了各區域內的潮位站觀測資料，藉此提高網格精度；NAO.99L 全球海潮模型則並未加入 T/P 測高資料，純粹以海洋動力法推估而得。

表 3-3：NAO 海潮模型 (Matsumoto et al., 2000; Takanezawa et al., 2001)

海潮模型	網格範圍	網格間距
全球模型 (NAO.99b、NAO.99L)	Long : 0°~360° Lat : 90°S~90°N	30 分
區域模型 (NAO.99jb)	Long : 110°E~165°E Lat : 20°N~65°N	5 分

FES (Finite Element Solution) 是歐洲地區所常使用的全球海潮模型，並且有各個不同時期的模型版本，FES 各系列海潮模型中，目前最新且最適合做為

海潮負載計算的是 FES2004 模型，該模型所提供的分潮，除短週期分潮（M2、S2、K1、O1、N2、P1、K2、Q1、M1、J1、OO1、2N2、Mu2、Nu2、L2、T2）及長週期分潮（Mtm、Mf、Mm、Ssa）外，還有更高頻的淺水分潮模型（M3、M4、M6），網格間距大小為 7.5 分（Letellier and Lyard, 2004）。FG5 絕對重力儀目前所使用的 g7 程式中，即是使用 FES2004 全球海潮模型做為計算海潮負載重力效應的基礎。

本論文根據 SGOTL 程式以 NAO.99b 為所使用的全球海潮模型，與黃鉅富 (2012) 自行微調區域模型 NAO.99jb 所產生的 OTL10 區域模型，計算臺灣地區的海潮負載重力效應，並對相關重力觀測量做改正。另有同樣以 NAO 模型做為海潮模型的 SPOTL 程式，本論文並以 Zhou et al.(2013) 計算的方法來改善臺灣近岸與離島絕對重力觀測的精度，詳見第 3-7 節。

3-7 三種海潮負載模式於近岸及離島的比較與重力值改正

由於潮汐在海島或是靠近岸邊時，海洋的深度開始改變，使得近岸的地殼受到海洋載重的變異而產生變位，進而影響重力的變化，海洋的質量變化會對觀測位置的產生不同引力，因此重力海潮負載效應於靠近海岸時影響量也愈為顯著。臺灣位處西太平洋邊緣，四面環海，潮汐效應對於臺灣沿海及離島地區所產生的海水面變化清楚可見，海潮負載效應對重力觀測的影響更不可小覷。設置於上述區域的絕對重力儀在進行觀測時，必須有精確的海潮負載效應計算，方能獲得最佳的絕對重力值。

本節以臺灣西部、東部離島的澎湖(AG9)、綠島(AG1)及本島東南部南部、東河國小(AG2a)、墾丁(KDNG)等四處進行海潮負載效應改正，並對此四處的絕對重力點觀測成果及其觀測精度做初步分析。除了 FG5 絕對重力儀所使用的 g7 程式之外，另引用 SGOTL 與 SPOTL 兩套程式，據以計算臺灣地區近岸及離島的海潮負載效應，對各絕對重力觀測量進行改正，使其達到最佳觀測精度。

3-7-1 海潮負載重力效應計算軟體

(一) g7 程式

FG5 絕對重力儀所使用的 g7 程式是由 Micro-g LaCoste 公司所開發的重力資料擷取及處理軟體 (g7 User's Manual, 2006)，這套軟體內建於該公司所有絕對重力儀所配備的控制電腦。g7 程式具有完整的資料收集、處理及分析能力，並內建多項標準環境改正模式程序，其中包含海潮負載重力效應計算模式 (OceanLoad tool，以下簡稱 g7)，藉此改善原始重力觀測量，以達到 1 個 μgal 精度等級。g7 模式提供 3 種全球海潮模型 (Schwiderski、CSR3.0 及 FES2004) 可以選擇，其中 FES (Finite Element Solution) 為最常使用的全球海潮模型，並且有各個不同時期的模型版本，目前 FES 各系列海潮模型中，最新且最適合做為海潮負載計算的是 FES2004 模型，FES2004 模型為最新且空間解析較高，該模型所提供的分潮，除短週期分潮 (M2、S2、K1、O1、N2、P1、K2、Q1、M1、J1、OO1、2N2、Mu2、Nu2、L2、T2) 及長週期分潮 (Mtm、Mf、Mm、Ssa) 外，還有更高頻的淺水分潮模型 (M3、M4、M6)，網格間距大小為 7.5 分。

(二) SGOTL 程式

SGOTL 程式於計算中引用牛頓引力及地球彈性效應格林函數，並特別強調加入高程相依的特性做為運算原則(詳見第三章)。海潮模型採用全球模型 NAO.99b 與自行研訂的區域模型 OTL10(黃鉅富，2012)，外圈以 NAO.99b 作為海潮模型，網格大小為 30 分，再以觀測位置周圍直徑 30' 範圍設定為內圈，區域海潮模型以 OTL10 為主，臺灣地區海岸線資料則採用內政部所產製之數值地形模型 (DEM) 網格，藉以準確區別海洋及陸地之負載計算。

(三) SPOTL 程式

SPOTL 為美國加州大學教授 Agnew 所研發的程式，自 1981 年起根據

Goad(1980)的格林函數積分方法研發使用至今，經過不斷的補充與更新，目前已可使用 NAO99b、FES2004、GOT4.p7 與 TPXO7.2 等各種新舊全球及區域海潮模型。SPOTL 的基礎概念，同樣依據地球彈性效應在重力的影響，藉由選擇適當的洛夫常數，以格林函數積分方法做運算。

在 SPOTL 的海潮負載效應計算中，導入海水質量守恆的概念。以下引用 Agnew(1983)海水質量守恆的潮高模式做說明，首先潮高的表示如下：

$$H(\theta, \lambda, t) = A(\theta, \lambda) \cos[\omega t + \chi_0 - \phi(\theta, \lambda)] \quad (3-19)$$

上式(3-19)中， A 與 ϕ 分別為振幅與相位，藉由減去全球平均等位的海水層之後，海水質量守恆的潮高模式可由下式表示：

$$H'(\theta, \lambda, t) = H(\theta, \lambda, t) - \frac{\sum_i H_i S_i}{\sum_i b(H_i) S_i} \quad (3-20)$$

上式(3-20)中， H_i 與 S_i 為第 i 個網格內的潮高， b 為潮高方程式的位，令 $b=1$ 則表示移除均勻海水層 (Melchior et al., 1980)，而均勻海水層的高由下式表示：

$$\bar{H}(t) = \iint_s A \cos \phi \, ds \cos(\omega t + \chi_0) + \iint_s A \sin \phi \, ds \sin(\omega t + \chi_0) \quad (3-21)$$

以上的平海水層可由複雜的數學式表示，平海水層所導引出的海潮負載重力值則為 (Agnew, 1983)：

$$g(\theta, \lambda, t) = R^2 \rho \bar{H}(t) \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \mathcal{G}(\theta, \lambda) G(\psi) \sin \psi \, d\psi \, d\alpha \quad (3-22)$$

其中

R 地球半徑

ρ 海水密度

\mathcal{G} 海洋方程式(1 表示海洋，0 表示陸地)

G 格林函數式

ψ 弧距

本章採用 Zhou et al.(2013)所使用的 SPOTL 海潮負載效應運算概念及方法，

進行對台灣四處絕對重力成果的改善，主要的作法是以全球模型 NAO.99b 作為外圈，並以觀測位置周圍直徑 30' 範圍為內圈，內圈為 NAO.99jb 解析度 5'×5' 區域模型，陸地部分岸線解析度是由 3 秒解析度 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)所產生的 DEM 資料，或以 GMT(The Generic Mapping Tools)繪製地圖的岸線定義解析度，分辨別出陸地及海洋，再就觀測位置的精確坐標做為運算基準，精準運算出海潮負載效應，臺灣離島及本島四處絕對重力站位置與岸線數值模型，見圖 3-2。

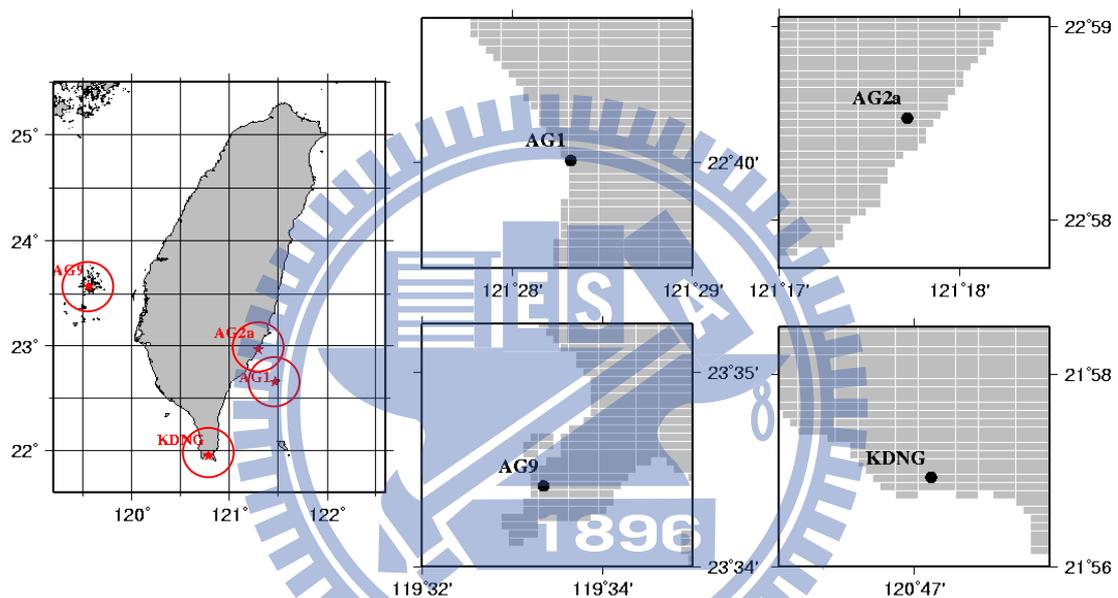


圖 3-2：本文中臺灣離島及本島近岸絕對重力站觀測位置，左圖紅圈表示 SPOTL 積分 30' 內圈範圍，右四區域圖中黑色實心圓點分別為綠島(AG1)、東河國小(AG2a)、澎湖(AG9)及墾丁(KDNG)位置，灰色部分為 3''×3'' 解析度 SRTM 岸線數值模型。

3-7-2 絕對重力值改正成果比較分析

FG5 於上述各絕對重力站進行絕對重力觀測計 4 至 5 次不等，將上一節的三種海潮負載效應(SPOTL、SGOTL 及 g7)的計算結果，見圖 3-3 至圖 3-6，代入各觀測位置的絕對重力原始數據中進行改正，即可得到三種不同的成果表現，本小節就以下四處絕對重力站分別闡述。

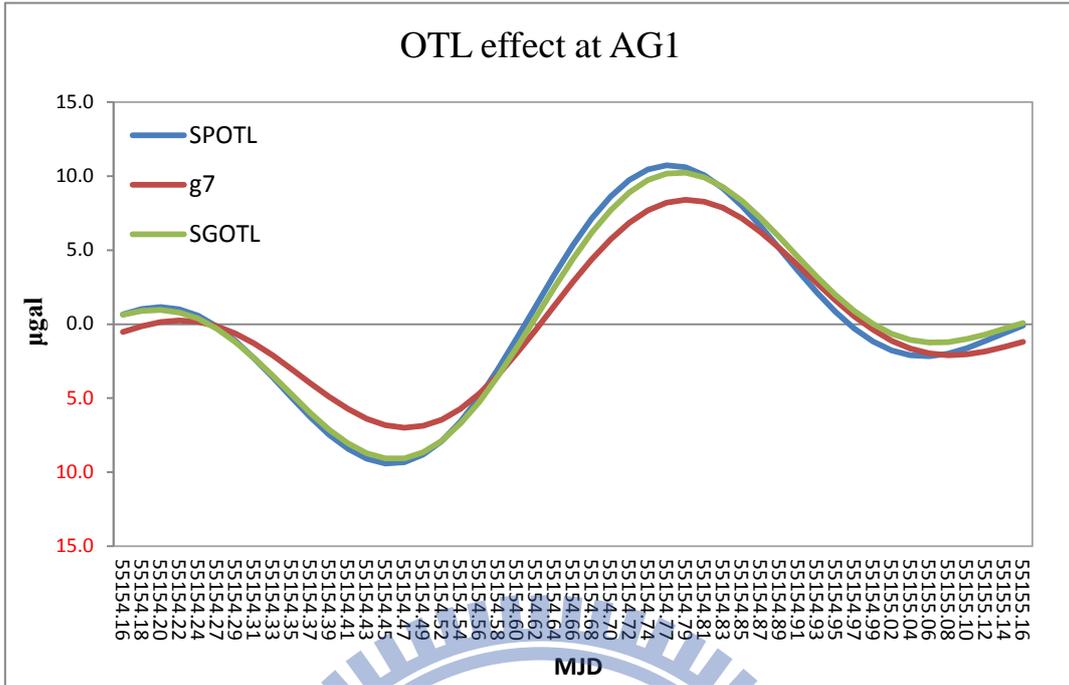


圖 3-3：本文中綠島絕對重力站(AG1)海潮負載效應表現

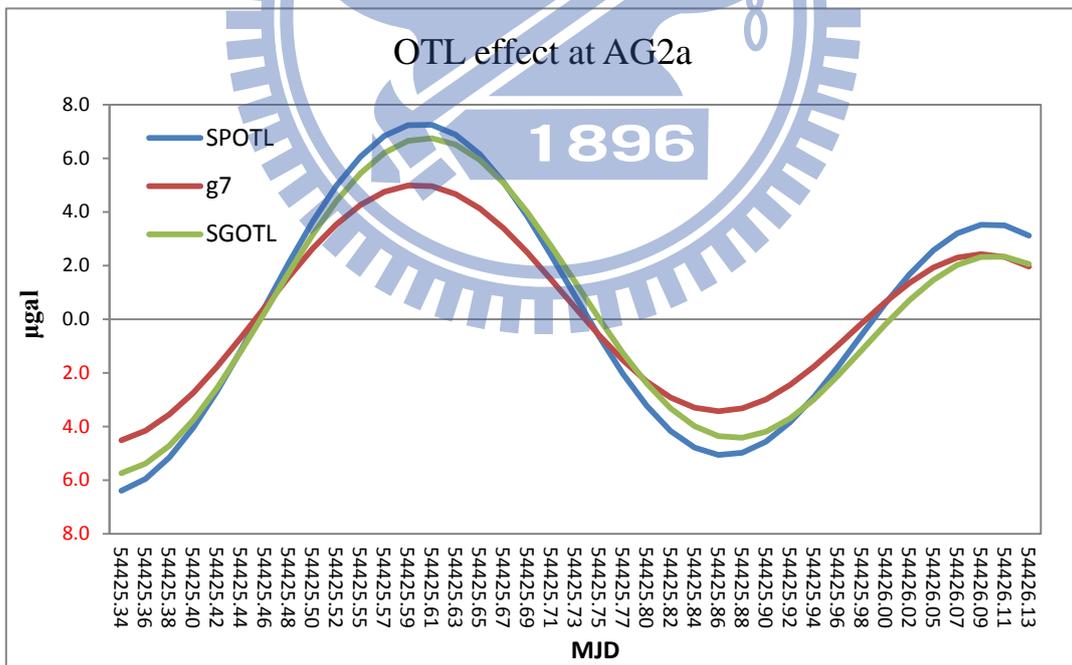


圖 3-4：本文中東河國小絕對重力站(AG2a)海潮負載效應表現

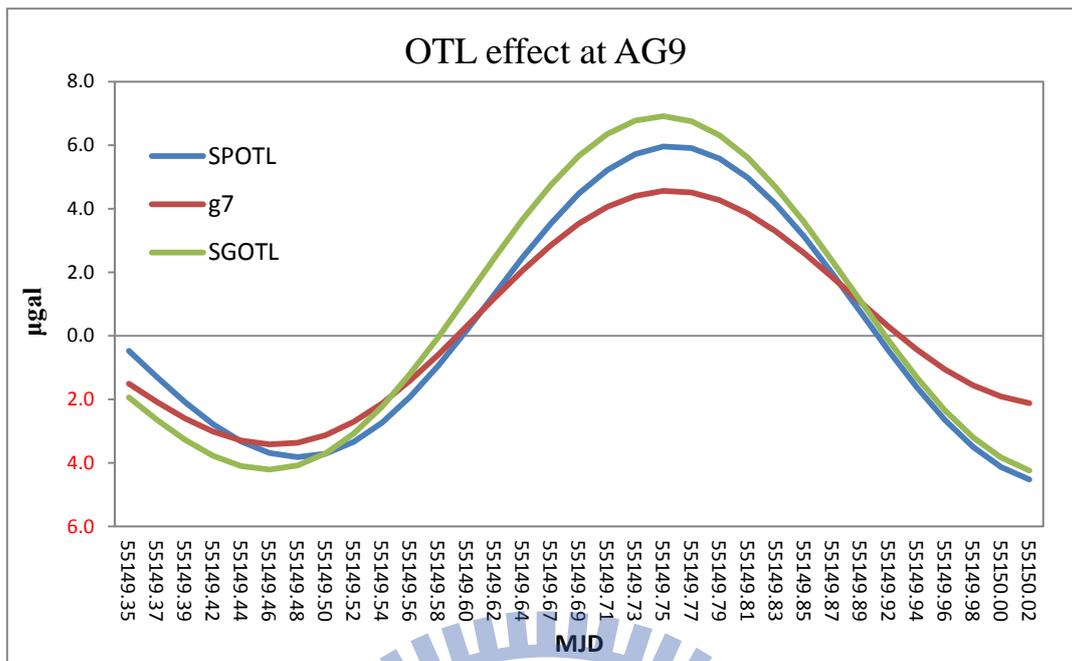


圖 3-5：本文中澎湖絕對重力站(AG9)海潮負載效應表現

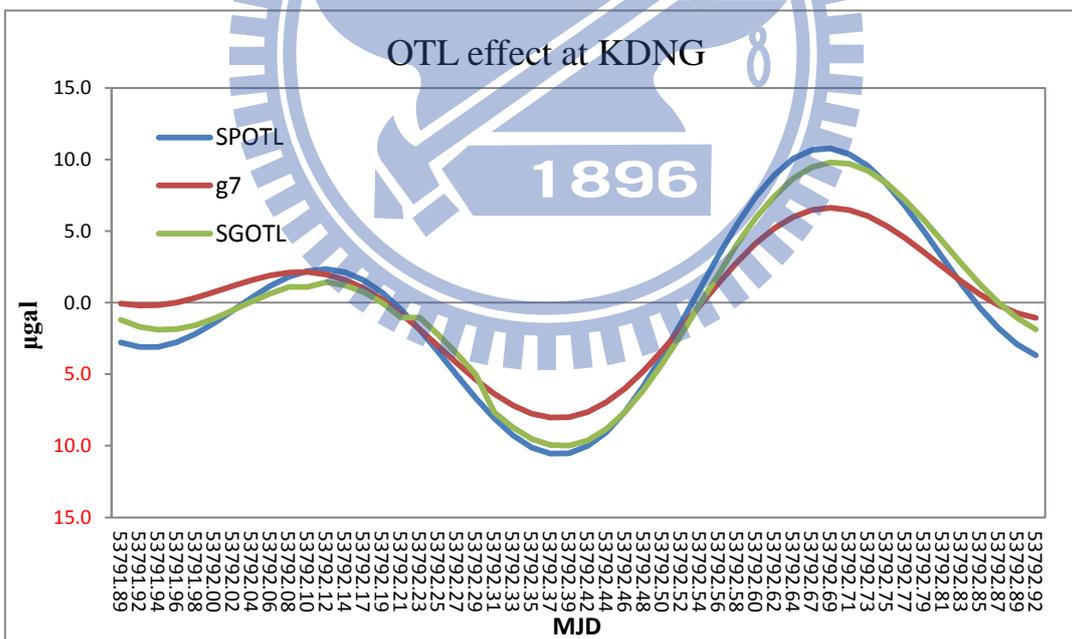


圖 3-6：本文中墾丁絕對重力站(KDNG)海潮負載效應表現

(一) 綠島絕對重力站

綠島絕對重力站設置於臺東縣綠島鄉南寮漁港漁檢站前停車場角落，材質為獨立基樁上設置鋼標點，點號為 AG1，距離海岸線約 50 公尺。比較三種海潮負載效應 g7、SPOTL 及 SGOTL 的計算結果，相位表現均相同，而在振幅方面，g7 明顯小於 SPOTL 及 SGOTL，平均量級分別為 1.57 μgal 及 1.88 μgal ，而 SGOTL 則略大於 SPOTL，平均量級為 1.16 μgal 。該站以三種海潮負載計算結果進行改正後之重力成果，見表 3-4。

表 3-4：本文綠島(AG1)絕對重力觀測量使用三組海潮負載效應改正後之成果

觀測日期	海潮負載 計算程式	海潮模型 (內圈)	重力值 觀測組數	組離 散度 (μgal)	觀測 精度 (μgal)	備 註
2006/12/2	SPOTL	NAO99jb	19	4.63	1.06	
	g7	FES2004		5.04	1.16	
	SGOTL	OTL10		4.62	1.06	最佳
2007/11/20	SPOTL	NAO99jb	11	16.61	5.01	
	g7	FES2004		16.59	5.00	
	SGOTL	OTL10		16.57	5.00	最佳
2008/11/1	SPOTL	NAO99jb	18	1.64	0.40	
	g7	FES2004		1.64	0.40	
	SGOTL	OTL10		1.48	0.36	最佳
2009/11/20	SPOTL	NAO99jb	50	2.14	0.30	
	g7	FES2004		2.78	0.39	
	SGOTL	OTL10		2.14	0.30	最佳
2010/11/20	SPOTL	NAO99jb	12	14.54	4.20	
	g7	FES2004		13.02	3.76	
	SGOTL	OTL10		10.99	3.17	最佳

(二) 東河國小絕對重力站

東河國小絕對重力站設置於臺東縣東河鄉東河國小旁鄉立圖書館前方空地，材質為獨立基樁上設置鋼標點，點號為 AG2a，距離海岸線約 200 公尺。比較三種海潮負載效應 g7、SPOTL 及 SGOTL 的計算結果，相位表現均相同，而在振幅方面，g7 明顯小於 SPOTL 及 SGOTL，平均量級分別為 1.02 μgal 及 1.24 μgal ，而 SGOTL 則略大於 SPOTL，平均量級為 0.86 μgal 。該站以三種海潮負載計算結果進行改正後之重力成果，見表 3-5。

表 3-5：本文東河國小(AG2a)絕對重力觀測量使用三組海潮負載效應改正後之成果

觀測日期	海潮負載 計算程式	海潮模型 (內圈)	重力值 觀測組數	組離 散度 (μgal)	觀測 精度 (μgal)	備 註
2006/11/20	SPOTL	NAO99jb	35	1.82	0.31	
	g7	FES2004		1.81	0.31	
	SGOTL	OTL10		1.70	0.29	最佳
2007/11/21 ~11/22	SPOTL	NAO99jb	39	5.23	0.84	
	g7	FES2004		4.89	0.78	最佳
	SGOTL	OTL10		5.10	0.82	
2008/10/31	SPOTL	NAO99jb	28	1.48	0.28	
	g7	FES2004		1.30	0.25	最佳
	SGOTL	OTL10		1.63	0.31	
2009/11/15 ~11/16	SPOTL	NAO99jb	29	3.57	0.66	
	g7	FES2004		3.31	0.62	
	SGOTL	OTL10		3.29	0.61	最佳
2010/11/15 ~11/16	SPOTL	NAO99jb	29	2.26	0.42	
	g7	FES2004		2.92	0.54	
	SGOTL	OTL10		2.23	0.41	最佳

(三) 澎湖絕對重力站

澎湖絕對重力站設置於澎湖縣馬公鎮澎湖氣象站內，材質為鋼標點，點號為AG9，距離海岸線約 300 公尺。比較三種海潮負載效應 g7、SPOTL 及 SGOTL 的計算結果，相位表現均相同，而在振幅方面，g7 明顯小於 SPOTL 及 SGOTL，平均量級分別為 1.37 μgal 及 1.33 μgal ，而 SGOTL 則略大於 SPOTL，平均量級為 0.56 μgal 。該站以三種海潮負載計算結果進行改正後之重力成果，見表 3-6。

表 3-6：本文澎湖(AG9)絕對重力觀測量使用三組海潮負載效應改正後之成果

觀測日期	海潮負載 計算程式	海潮模型 (內圈)	重力值 觀測組數	組離 散度 (μgal)	觀測 精度 (μgal)	備 註
2007/11/17 ~11/18	SPOTL	NAO99jb	34	10.21	1.75	
	g7	FES2004		10.26	1.76	
	SGOTL	OTL10		10.15	1.74	最佳
2008/11/15 ~11/16	SPOTL	NAO99jb	20	3.98	0.89	
	g7	FES2004		4.56	1.02	
	SGOTL	OTL10		3.66	0.82	最佳
2009/11/14 ~11/15	SPOTL	NAO99jb	33	1.85	0.32	最佳
	g7	FES2004		2.23	0.39	
	SGOTL	OTL10		1.89	0.33	
2010/11/15 ~11/16	SPOTL	NAO99jb	27	2.81	0.54	
	g7	FES2004		4.31	0.83	
	SGOTL	OTL10		2.75	0.53	最佳

(四) 墾丁絕對重力站

墾丁絕對重力站設置於屏東縣恆春鎮墾丁國家公園管理處內的內政部墾丁衛星追蹤站，材質為獨立基樁上設置鋼標點，點號為 KDNG，距離海岸線約 400 公尺。比較三種海潮負載效應 g7、SPOTL 及 SGOTL 的計算結果，相位表現均相同，而在振幅方面，g7 明顯小於 SPOTL 及 SGOTL，平均量級分別為 1.13 μgal 及 1.40 μgal ，而 SGOTL 則略大於 SPOTL，平均量級為 0.69 μgal 。該站以三種海潮負載計算結果進行改正後之重力成果，見表 3-7。

表 3-7：本文墾丁(KDNG)絕對重力觀測量使用三組海潮負載效應改正後之成果

觀測日期	海潮負載 計算程式	海潮模型 (內圈)	重力值 觀測組數	組離 散度 (μgal)	觀測 精度 (μgal)	備 註
2004/2/5~ 2/7	SPOTL	NAO99jb	88	5.44	0.58	最佳
	g7	FES2004		5.91	0.63	
	SGOTL	OTL10		5.49	0.58	
2005/8/26~ 8/27	SPOTL	NAO99jb	64	5.10	0.64	
	g7	FES2004		5.04	0.63	
	SGOTL	OTL10		5.04	0.63	最佳
2006/2/25~ 2/28	SPOTL	NAO99jb	160	3.07	0.24	
	g7	FES2004		3.32	0.26	
	SGOTL	OTL10		2.95	0.23	最佳
2007/2/6~ 2/8	SPOTL	NAO99jb	114	3.37	0.32	
	g7	FES2004		5.83	0.55	
	SGOTL	OTL10		2.80	0.26	最佳

以三種海潮負載計算程式 g7、SGOTL 與 SPOTL，並分別採用三種海潮模型 FES2004、OTL10 及 NAO99jb 來計算綠島(AG1)、東河國小(AG2a)、澎湖(AG9) 及墾丁(KDNG)共四處的海潮負載重力效應，以改進 2007 年至 2010 年所觀測的絕對重力值。其中，海潮負載重力效應相位表現均為一致，g7 的振幅則明顯地小於其餘二者，而 SPOTL 的振幅也略小於 SGOTL。由於 g7 所採用的 FES2004 僅為全球海潮模型，並不完全適合臺灣及週邊區域；而 SPOTL 所使用的區域海潮模型 NAO99jb 為 5' × 5' 解析度，已明顯優於 g7 的海潮模型條件；SGOTL 所採用的區域海潮模型為黃鉅富(2012)經過微調 NAO99jb 後，能完全適用臺灣地區 OTL10 海潮模型，因此可計算得出更精確的海潮負載效應量。

上述三種海潮負載效應模式，分別是以 g7 搭配 FES2004 海潮模型、SPOTL 搭配 NAO99jb 區域海潮模型及 SGOTL 採用的 OTL10 區域海潮模型，使此三種模式計算海潮負載效應可各自達到最佳化的效果；而以此三種計算結果加入四處絕對重力觀測量中進行改正後，SGOTL 的結果可令各絕對重力值的精度達到最佳化。

3-8 全臺相對重力觀測量海潮負載效應改正

臺灣地區於 2003 年與 2007 年進行了兩次全臺一等一級與二級水準點上重力測量，2003 年所完成的相對重力觀測作業，觀測使用的儀器為 Lacoste & Romberg G 型(LCR G)重力儀，外業收集觀測量共計 2752 筆；2007 年所完成的相對重力觀測作業，觀測使用的儀器為 Scintrex CG-5 型(CG-5)重力儀，外業收集觀測量共計 11068 筆。兩次全臺相對重力觀測量均是以 Hwang et al. (2002)所開發的 gravnet 重力網平差程式進行計算。

早在 2003 年全臺相對重力網平差計算時，國內並未有一套完全適用臺灣地區的海潮負載重力效應解算方法，另又考量所使用的 LCR G 型重力儀的觀測解析度約 10~20 μgal ，見表 2-3，因此未對重力量級僅數 μgal 的海潮負載部分做嚴密改正；2007 年再次進行全臺相對重力網平差計算時，雖使用的 CG-5 重力儀觀

測解析度可達 5 μgal ，但仍未有一套適用的海潮負載重力效應解算模式，因而沿用 2003 年的未改正海潮負載效應方式進行平差計算。

平差計算之前，所有觀測量均應對環境所產生的重力效應，如地球固體潮、海潮負載、地球極移與氣壓等做改正。為求得最真實正確的重力數值，本論文特此利用 SGOTL 程式計算 2003 年與 2007 年兩次全臺每筆相對重力網觀測量的海潮負載效應，經過此效應改正後的重力觀測量再重新進行平差計算，另藉此檢視海潮負載效改正前、後平差重力值的精度變化情形。

2003 年相對重力觀測量共計 2752 筆，以大溪絕對重力值(DAXI)為約制點，將未做海潮負載改正的觀測量進行自由基準平差 (datum-free adjustment)，所得重力值共 1183 點，重力值標準偏差最大值為 0.1333 mgal；另外再將已做海潮負載改正的觀測量同樣進行平差，所得重力值標準偏差最大值為 0.1606 mgal，未做海潮負載及已做海潮負載改正平差成果標準偏差分布情形，見圖 3-7，上述兩次平差成果統計情形，見表 3-8。



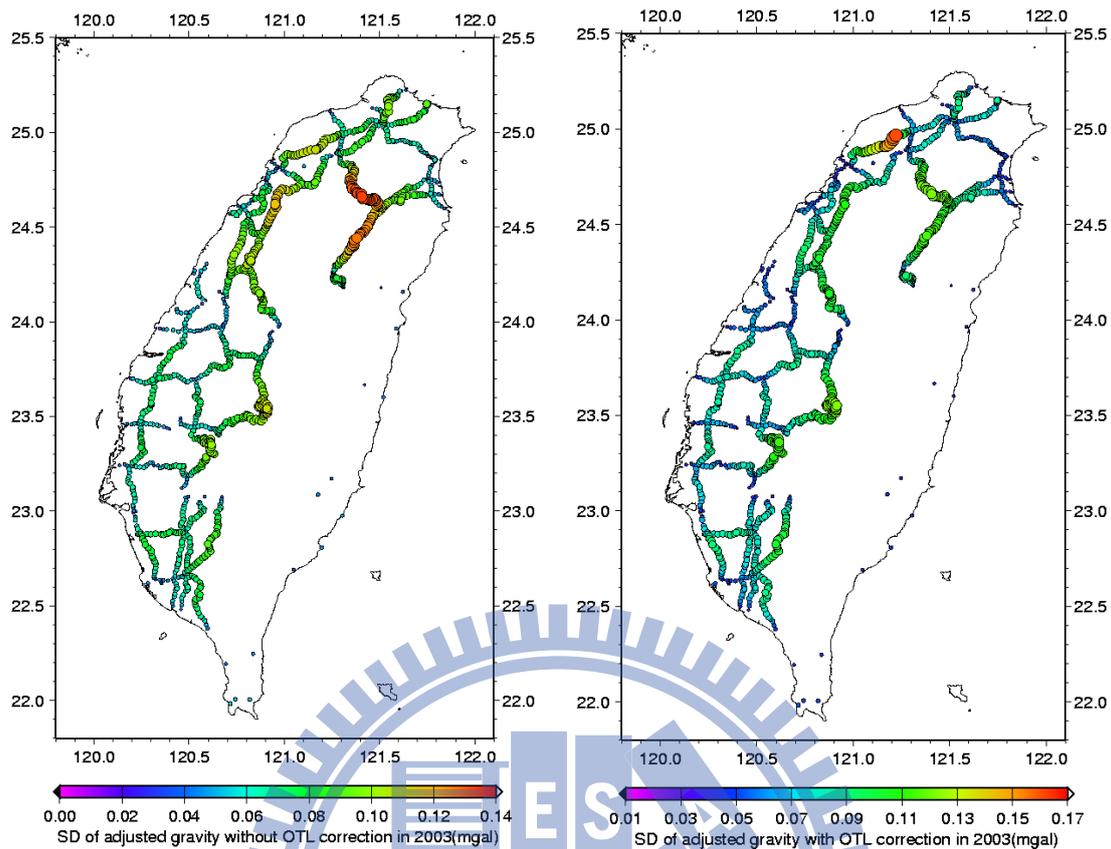


圖 3-7：本文 2003 年全臺海潮負載改正前(左)與後(右)的重力值標準偏差分布情形

表 3-8：本文 2003 年全臺重力網自由基準平差重力值成果概述(單位：mgal)

觀測量種類	最大殘差	最小殘差	最大標準偏差	平均標準偏差	標準偏差均方根
無海潮負載改正	0.152	-0.148	0.133	0.073	0.076
有海潮負載改正	0.162	-0.137	0.161	0.075	0.078

由上表 3-8 結果可以看出，有海潮負載改正重力值的最大標準偏差略大於無海潮負載改正的重力值標準偏差，若是以地區檢視兩種(無海潮負載改正與有海潮負載改正)觀測量的平差重力值標準偏差變化情形，位於臺灣西部與南部地區的標準偏差是呈現增加的情形，增加量最大為 0.058 mgal，而絕大部分北部地區

的標準偏差是呈現減低的情形，減低量最多可達 -0.012 mgal，此結果表示經過海潮負載改正後的重力值相較於未經海潮負載改正的重力值，於西部與南部地區為精度降低，而北部地區則是精度提高，重力點位分布與標準偏差變化情形，見圖 3-8。另外再比較海潮負載改正後與未經海潮負載改正的重力值變化情形，重力值減少量最大達到 0.028 mgal，而重力值增加量最大達到 0.104 mgal，見圖 3-9。

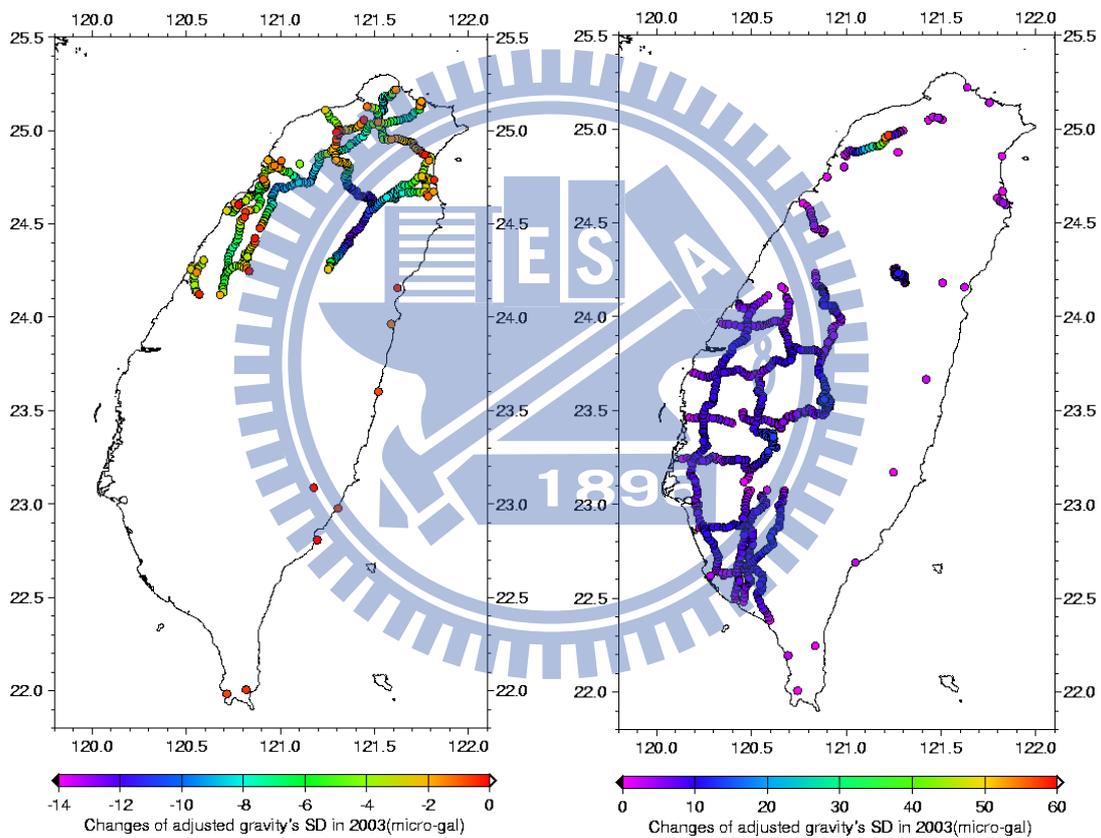


圖 3-8：本文 2003 年全臺海潮負載改正後的重力值標準偏差變化(相較於改正前)情形，左圖為精度提升(標準偏差降低)之點位，右圖為精度降低(標準偏差增大)之點位

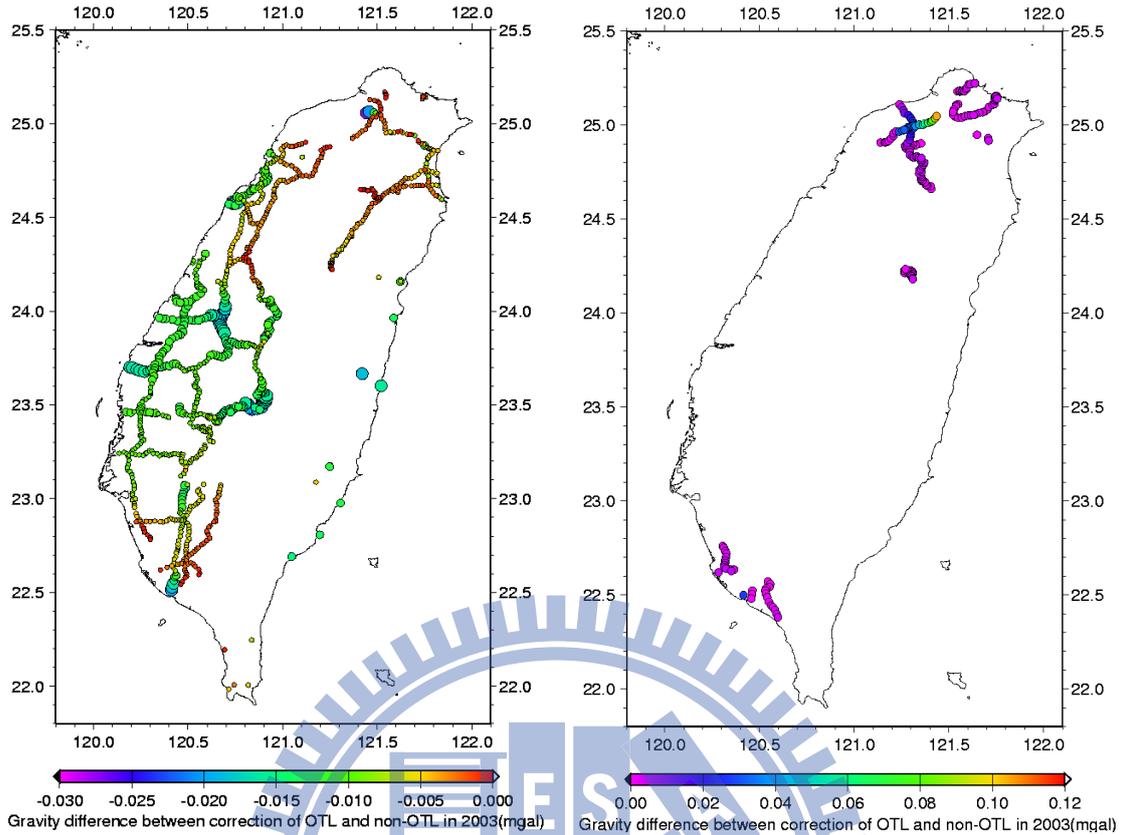


圖 3-9: 本文 2003 年全臺海潮負載改正後的重力值變化(相較於改正前)情形(左圖為重力值降低的點位，右圖為重力值增加的點位)

2007 年相對重力觀測量共計 11068 筆，同樣以大溪絕對重力值為約制點，先將未做海潮負載改正的觀測量進行自由基準平差，所得重力值共 2198 點，重力值標準偏差最大值為 0.1654 mgal；另外再將已做海潮負載改正的觀測量進行平差，所得重力值標準偏差最大值為 0.1442 mgal，兩次平差成果統計情形，見表 3-9。

表 3-9：本文 2007 年全臺重力網自由基準平差重力值成果概述(單位：mgal)

觀測量種類	最大殘差	最小殘差	最大標準偏差	平均標準偏差	標準偏差均方根
無海潮負載改正	0.018	-0.015	0.165	0.051	0.053
有海潮負載改正	0.016	-0.015	0.166	0.051	0.053

由上表 3-9 結果可以看出，有海潮負載改正的重力值標準偏差略小於無海潮負載改正的重力值標準偏差，相較兩種(無海潮負載改正與有海潮負載改正)觀測量的平差重力值標準偏差變化情形，見圖 3-10，標準偏均呈現增加現象，增加量最大僅為 0.02~0.46 μgal ，由此可見，全臺所有點位重力值精度皆較未經海潮負載改正來得降低，精度降低率平均為 0.28%，重力點位分布與標準偏差變化情形，見圖 3-11。另外再比較海潮負載改正後與未經海潮負載改正的重力值變化情形，重力值減少量最大達到 0.041 mgal，而重力值增加量最大達到 0.047 mgal，見圖 3-12。

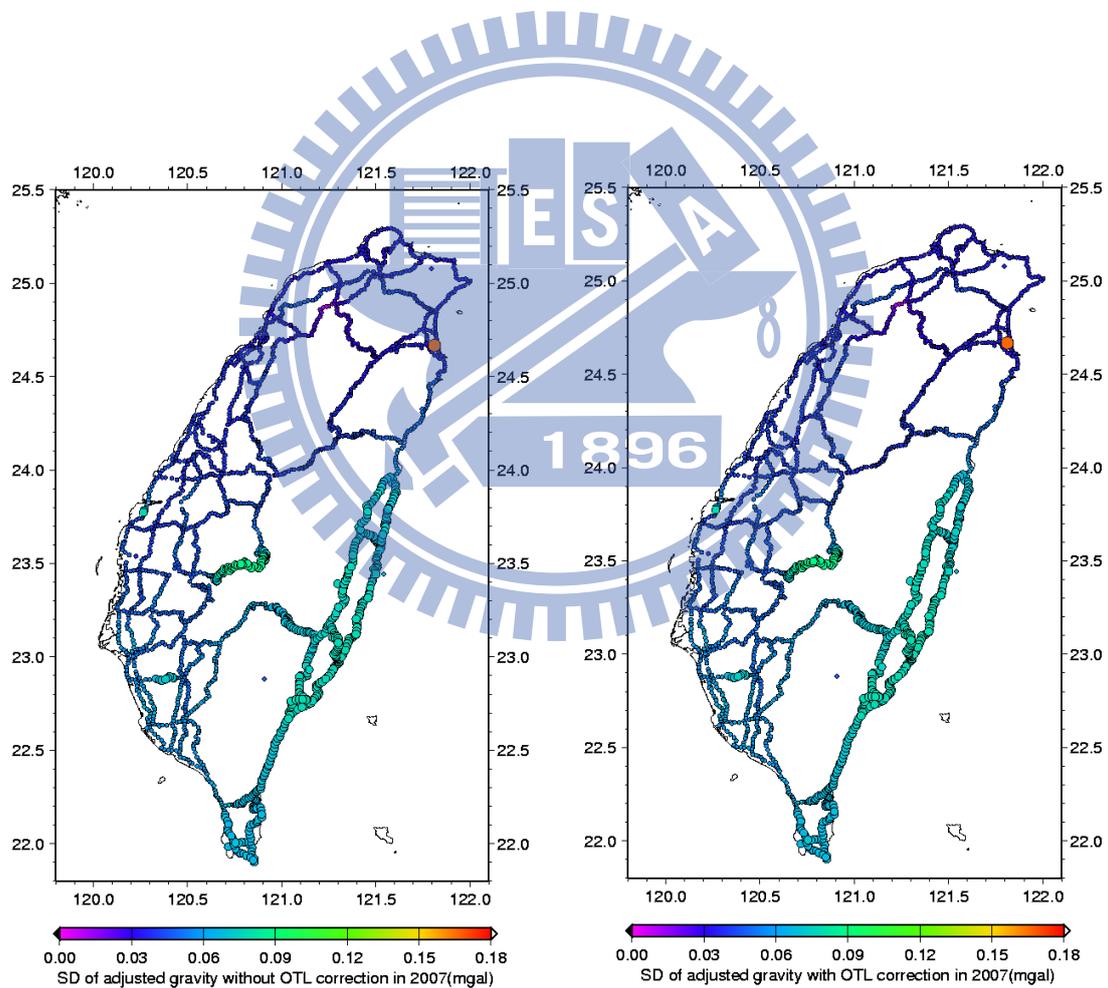


圖 3-10：本文 2007 年全臺海潮負載改正前(左)與後(右)的重力值標準偏差分布情形

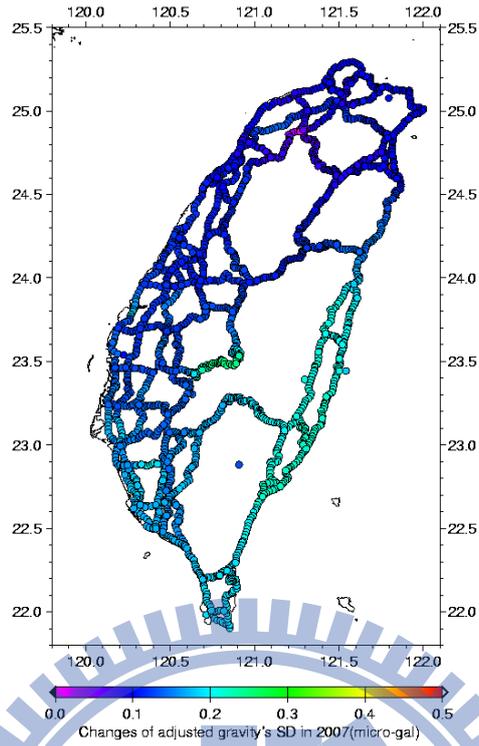


圖 3-11: 本文 2007 年全臺海潮負載改正後的重力值標準偏差變化(相較於改正前)情形

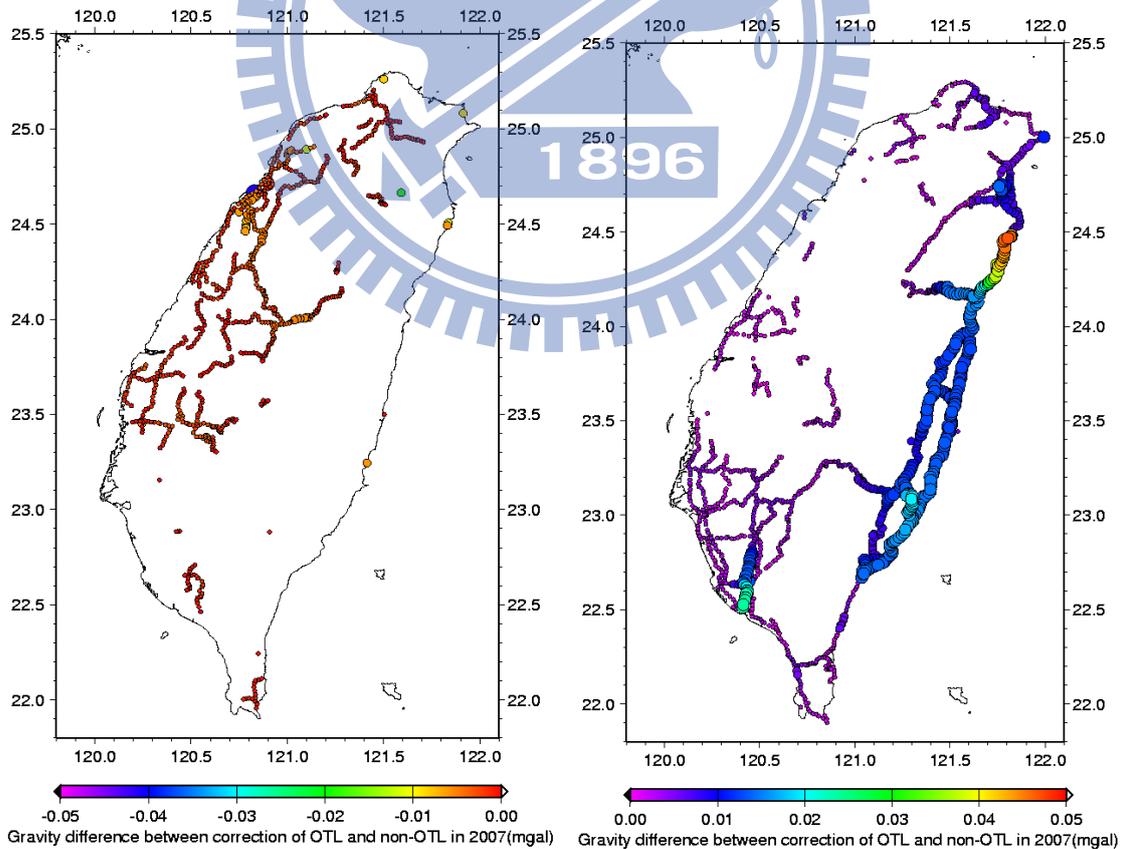


圖 3-12: 本文 2007 年全臺海潮負載改正後的重力值變化(相較於改正前)情形(左圖為重力值降低的點位, 右圖為重力值增加的點位)

以上兩次重力網形的觀測量在加入海潮負載改正後，平差計算所得到的重力值精度與原先未做海潮負載改正的部分來比較，2003 年的變化表現與 2007 年的截然不同，研判 2003 年的相對重力網形分布不如 2007 年的完整及均勻，2003 年於東部及東南部地區的觀測量明顯不足，使得在加入海潮負載效應改正後的平差重力值標準偏差，呈現出北部及西南部兩種截然不同的變化。理論上，位於沿海或近岸的重力觀測位置，平差計算後的重力值，可反應出海潮負載效應對重力值的影響及改變，然而重力觀測量標準偏差的量級均大於海潮負載效應的量級，導致無法顯著地表現出海潮負載效應改正後預期的結果。儘管在改正後的重力值精度變化有所提升或降低，亦因地區不同而變化各異，然而可以確定的，加入海潮負載改正後的平差重力值成果才是最接近理論值。

3-9 雲林地區相對重力觀測量海潮負載效應改正

雲林地區位處臺灣西部平原，因該地區地層下陷情況顯著，因此於該區域設計相對重力網形以計算重力值及其變化量，做為檢視該地區地層下陷的參考數據，詳細成果見第五章。

雲林地區相對重力網形是以 EG 型重力儀及 CG-5 重力儀做觀測，此兩型儀器觀測精度均可達到 $5\mu\text{gal}$ 等級，見表 2-3，對於海潮負載重力效應的量級是可以有效分辨，因此特別對此重力觀測量做海潮負載改正，以求得更準確的重力值。相對重力網形觀測共計六次，以下就各次觀測量中加入與未加入海潮負載改正的平差成果做比較，詳見表 3-10。

雲林六次的相對重力網平差成果中，比較觀測量加入海潮負載改正(A)與未加入海潮負載改正(B)的平差重力值標準偏差變化(A-B)的部分來看：

第一次的標準偏差提升 $0.8\sim 1.6\mu\text{gal}$ ，精度下降 $0.9\sim 2.9\%$ 。

第二次的標準偏差降低約 $0.001\mu\text{gal}$ ，精度提升約 0.002% 。

第三次的標準偏差降低 $0.9\sim 0.1\mu\text{gal}$ ，精度提升 $0.3\sim 2.1\%$ 。

第四次的標準偏差降低 $0.6\sim 0.9\mu\text{gal}$ ，精度提升約 5.6% 。

第五次的標準偏差降低 0.2~1.2 μgal ，精度提升 1.7~4.4 %。

第六次的標準偏差提升 0.005~0.01 μgal ，精度平均下降約 0.1 %。

綜合以上數據來看，各次的標準偏差(精度)變化平均低於 μgal 等級，就整體而言，A、B 兩組比較後差異極微量，表示重力值的標準偏差均在誤差範圍之內，惟加入海潮負載改正是重力觀測量環境改正中極重要的一項，即以此成果做為後續第五章的成果數據。

表 3-10：本文雲林重力網自由基準平差重力值各時段成果概述(單位：mgal)

項次	觀測量種類	最大殘差	最小殘差	最大標準偏差	平均標準偏差	標準偏差均方根
1	無海潮負載改正	0.163	-0.178	0.092	0.062	0.064
	有海潮負載改正	0.163	-0.178	0.092	0.062	0.064
2	無海潮負載改正	0.315	-0.309	0.100	0.062	0.064
	有海潮負載改正	0.315	-0.310	0.100	0.062	0.064
3	無海潮負載改正	0.115	-0.064	0.045	0.033	0.034
	有海潮負載改正	0.106	-0.062	0.044	0.032	0.033
4	無海潮負載改正	0.030	-0.042	0.016	0.011	0.012
	有海潮負載改正	0.028	-0.040	0.015	0.010	0.011
5	無海潮負載改正	0.083	-0.081	0.028	0.016	0.017
	有海潮負載改正	0.083	-0.078	0.027	0.013	0.016
6	無海潮負載改正	0.061	-0.060	0.017	0.007	0.008
	有海潮負載改正	0.060	-0.061	0.017	0.007	0.008

四、全臺 2003 年及 2007 年重力變化及分析

4-1 概述

臺灣地區於 2003 年由內政部委託國立交通大學進行全臺一等一級與二級水準點上重力測量，另於 2007 年再次委託寰宇測量公司進行全臺一等一級與二級水準點上重力測量，藉由這兩次的重力觀測結果可以檢視臺灣各地區重力變化情形。自 2000 年起，為了重新測定全國性垂直基準，即展開全臺一等水準點正高測量，並建立起臺灣地區的垂直大地測量基準 TWVD2001 (Taiwan Vertical Datum 2001)(Yang et al., 2003)，於 2000 年至 2008 年期間，內政部已進行了四次全臺一等一級與二級水準測量(Chen et al., 2011)。經由檢視水準點的正高變化，再配合重力變化情形，可進一步對臺灣各地區幾何及物理大地測量做初步分析研究。

4-2 觀測資料

2003 年 6 月所完成的第一次全臺相對重力觀測作業，觀測使用的儀器為 Lacoste & Romberg G(LCR G)型重力儀，外業收集觀測量共計 2752 筆，平差後所得重力值共計 1183 點；2007 年 6 月所完成的第二次全臺相對重力觀測作業，觀測使用的儀器為 Scintrex CG-5 (CG-5)型重力儀，外業收集觀測量共計 2259 筆，平差後所得重力值共計 2198 點。兩次(2003 年與 2007 年)於相同位置所觀測的點數共計 1023 點。

由於以上兩次的觀測路線均相同，且將近五成左右的觀測點位置相同。在進行網形平差計算重力值時，兩次全島相對重力網形均以絕對重力點做為約制，而兩次全島相對重力網形皆共同觀測的絕對重力點計有大溪、新竹、鳳山及太魯閣等四處，見圖 4-1，四處絕對重力點歷次觀測紀錄，詳見表 4-1。

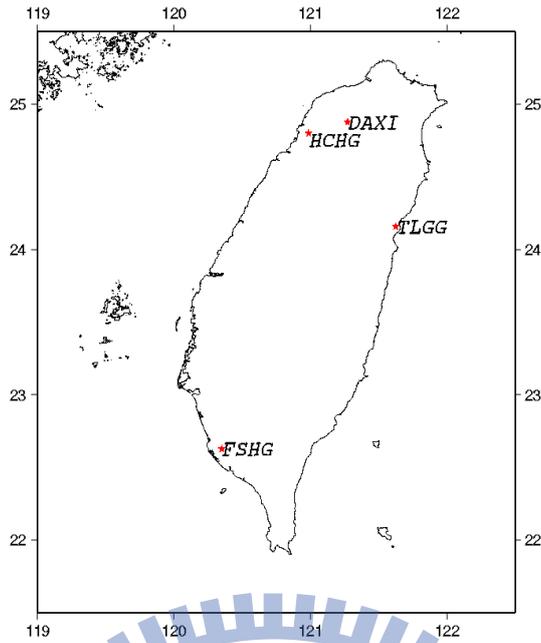


圖 4-1：本文 2003 年及 2007 年全臺相對重力測量共同觀測之絕對重力點分布圖

表 4-1：本文共同觀測之絕對重力點歷次紀錄（點位 100 cm 高處）

點名	代碼	觀測時間	觀測重力值 (μgal)	中誤差 (μgal)	重力梯度 ($\mu\text{gal}/\text{cm}$)	重力變化率 ($\mu\text{gal}/\text{year}$)
大 溪	DAXI	Oct, 1999	9*****693.4	3.0	-3.31	-1.89
	DSIG	Mar, 2005	9*****684.4	0.56	-3.31	
	DSIG	May, 2009	9*****675.6	0.37	-3.31	
新 竹	SHIN	Oct, 1999	9*****718.6	2.5	-2.60	-2.22
	CMS_B24	Nov, 2004	9*****704.0	1.43	-2.60	
	HCHG	Mar, 2005	9*****698.6	0.58	-2.60	
	CMS_B24	May, 2009	9*****697.7	0.21	-2.60	
鳳 山	FENS	Oct, 1999	9*****676.6	3.5	-2.66	-3.76
	FSHG	Jul, 2005	9*****655.0	1.69	-2.66	
太 魯 閣	HUAL	Oct, 1999	9*****587.2	3.5	-2.31	-0.58
	TLGG	Nov, 2005	9*****583.0	0.22	-2.31	
	TLGG	Oct, 2008	9*****582.0	0.23	-2.31	

由於相對重力觀測的時間與絕對重力點的觀測時間並不完全同時，為考量兩次的相對重力網形中的約制點(絕對重力點)時間可與相對重力觀測完成時間一致，遂以絕對重力點變化率推算出 2003 年 7 月及 2007 年 6 月兩次時間點的四處絕對重力值作為約制條件，本論文即以此四處絕對重力值，分別做為兩次(2003 年與 2007 年)網形平差計算的約制點。

4-3 全臺相對重力網平差成果

本論文以大溪、新竹、鳳山及太魯閣等四處絕對重力值，分別做為兩次(2003 年與 2007 年)網形平差計算的約制點，以下分別以自由基準平差與加權約制平差兩種方法的結果做比較分析。

4-3-1 自由基準平差

本小節將闡述以約制單一絕對重力點進行平差計算，以大溪絕對重力點做為兩次(2003 年與 2007 年)全臺相對重力自由基準平差中的起算點，依據表 4-1 中，就絕對重力點之重力值變化率推算至時間 2003 年 6 月及 2007 年 6 月的絕對重力值，以做為 2003 年與 2007 年兩次全臺相對重力觀測量的已知重力值，即進行最小二乘法平差計算，兩次平差結果統計見表 4-2。此種平差方法無須約制重力值，而是以某一已知重力值作為起算值來推求其他各相對觀測之重力值。

表 4-2: 本文 2003 年及 2007 年全臺相對重力自由基準平差成果統計概述(固定大溪絕對重力值，單位：mgal)

時間	最大殘差	最小殘差	最大標準偏差	平均標準偏差	標準偏差均方根
2003 年	0.162	-0.137	0.161	0.075	0.078
2007 年	0.016	-0.015	0.166	0.051	0.053

由於大溪絕對重力點的地理位置，較接近全臺相對重力網的幾何中心，且重力變化率小於新竹絕對重力點，因此本小節即選定以大溪絕對重力點做為相對重力網型自由基準平差計算的起算值，分別計算出 2003 年與 2007 年兩次的全臺自由基準平差重力值。2007 年的標準偏差平均值小於 2003 年的原因，主要為 2007 年相對重力是以 CG-5 型重力儀作觀測，2003 年是以 LCR G 型重力儀作觀測，顯見 CG-5 型觀測精度較優於 LCR G 型重力儀，其他原因如 2007 年相對重力網形完全分布於全臺各縣市公路段，而於 2003 年的分布於花蓮及台東地區明顯不足，導致網形強度不佳，因此導致 2003 年平差重力值的標準偏差平均值大於 2007 年。

4-3-2 加權約制平差

本小節將依照網形與地理的分布，分別以約制兩處、三處及四處絕對重力點進行加權約制平差，各次平差結果統計見表 4-3 至表 4-7。

表 4-3：本文 2003 年全臺相對重力加權約制兩處平差成果統計概述(單位：mgal)

約制點位 (兩處)	最大殘差	最小殘差	最大 標準偏差	平均 標準偏差	標準偏差 均方根
大溪、太魯閣	0.162	-0.138	0.161	0.075	0.077
大溪、鳳山	0.162	-0.137	0.161	0.072	0.076
新竹、太魯閣	0.162	-0.138	0.160	0.074	0.078
新竹、鳳山	0.162	-0.137	0.160	0.073	0.077
大溪、新竹	0.162	-0.137	0.160	0.075	0.078
太魯閣、鳳山	0.162	-0.137	0.163	0.074	0.078

表 4-4：本文 2007 年全臺相對重力加權約制兩處平差成果統計概述(單位：mgal)

約制點位 (兩處)	最大殘差	最小殘差	最大 標準偏差	平均 標準偏差	標準偏差 均方根
大溪、太魯閣	0.016	-0.015	0.163	0.043	0.045
大溪、鳳山	0.030	-0.014	0.168	0.039	0.041
新竹、太魯閣	0.015	-0.017	0.166	0.043	0.045
新竹、鳳山	0.016	-0.015	0.165	0.038	0.041
大溪、新竹	0.015	-0.017	0.170	0.048	0.051
太魯閣、鳳山	0.036	-0.015	0.170	0.042	0.044

表 4-5：本文 2003 年全臺相對重力加權約制三處平差成果統計概述(單位：mgal)

約制點位 (三處)	最大殘差	最小殘差	最大 標準偏差	平均 標準偏差	標準偏差 均方根
大溪、新竹 、太魯閣	0.162	-0.138	0.160	0.073	0.077
大溪、新竹 、鳳山	0.162	-0.137	0.160	0.072	0.076
大溪、太魯閣 、鳳山	0.162	-0.138	0.161	0.072	0.076
新竹、太魯閣 、鳳山	0.162	-0.138	0.160	0.072	0.076

表 4-6：本文 2007 年全臺相對重力加權約制三處平差成果統計概述(單位：mgal)

約制點位 (三處)	最大殘差	最小殘差	最大 標準偏差	平均 標準偏差	標準偏差 均方根
大溪、新竹 、太魯閣	0.015	-0.017	0.168	0.042	0.045
大溪、新竹 、鳳山	0.024	-0.016	0.169	0.038	0.040
大溪、太魯閣 、鳳山	0.040	-0.015	0.167	0.036	0.039
新竹、太魯閣 、鳳山	0.032	-0.015	0.168	0.036	0.038

表 4-7：本文全臺相對重力加權約制四處(大溪、新竹、太魯閣、鳳山)平差成果
統計概述

時間	最大殘差	最小殘差	最大標準偏差	平均標準偏差	標準偏差均方根
2003 年	0.162	-0.138	0.160	0.072	0.076
2007 年	0.035	-0.016	0.170	0.035	0.038

(單位：mgal)

綜合以上加權約制平差的各項結果來看，2003 年所有平差結果中殘差最大為 0.162 mgal，最小為-0.137 mgal，最大標準偏差為 0.166 mgal，平均標準偏差為 0.072mgal，標準偏差均方根為 0.076 mgal，其中又以加權約制四處絕對重力點的平差成果為最佳；2007 年所有平差結果中殘差最大為 0.015 mgal，最小為 -0.017 mgal，最大標準偏差為 0.171mgal，平均標準偏差為 0.035 mgal，標準偏差均方根為 0.038 mgal，其中同樣以加權約制四處絕對重力點的平差成果為最佳，因此本小節即採選定四處絕對重力點做為相對重力網型加權約制平差計算的約制點，分別計算出 2003 年與 2007 年兩次的全臺加權約制平差重力值。

為配合重力值變化分析及比對，另收集並檢視全臺正高資料以輔助研究，內政部於 2000 年至 2008 年共計進行四次的全臺一等水準點測量作業，見表 4-8，Chen et al. (2011)以此四次正高成果做分析，推算出全臺各地正高變化率，其標準偏差介於 0.41 至 2.47 mm/year 不等，平均標準偏差為 1.64 mm/year，2000 年至 2008 年的正高變化率(垂直速度場)分布情形，見圖 4-2。

表 4-8：2000 至 2008 年全臺一等水準測量作業內容略表(Chen et al., 2011)

觀測時段	觀測水準點數量	水準測線總里程(km)
2000/12~2001/8	1010	2052
2002/6~2002/12	1137	2201
2005/12~2006/8	704	1504
2007/4~2008/5	1872	4287

4-4 重力變化分析

4-4-1 重力變化及其原因

重力與高程有明顯相關性，因此引用正高變化資料做為比較及分析，經整理出位於相同位置水準點的兩次(2003 年與 2007 年)重力變化及正高變化點位共計 1001 點，於展繪出 2003 年至 2007 年的重力變化率分布情形後，見圖 4-2，可見臺灣中央山脈北段及雪山山脈附近、阿里山及玉山附近，有明顯的重力值下降趨勢，反觀重力值上升趨勢的地區，主要分布於臺灣西部彰化及雲林平原地帶，少部分發生在北部及東北部海岸附近。

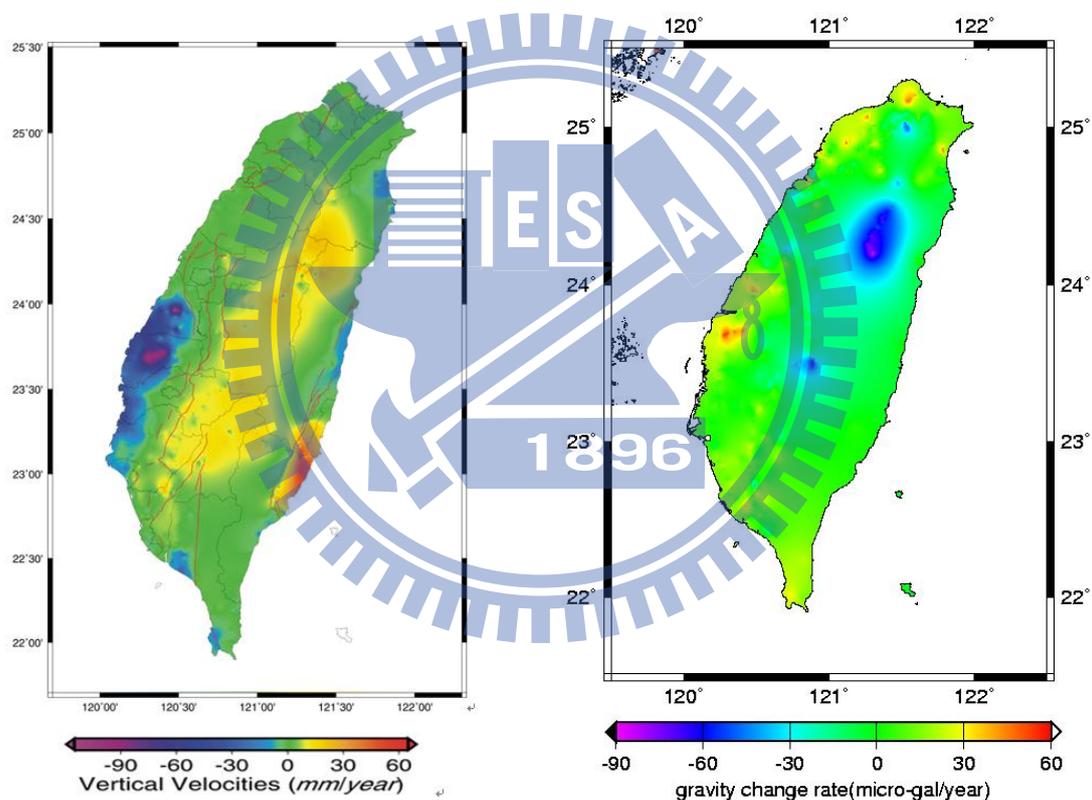


圖 4-2：全臺正高變化率(紅線為斷層線；Chen et al., 2011)及本文重力變化率略圖

檢視及比對全臺各地的正高變化率後，部分地區可明顯看出重力變化與正高變化呈現負相關性表現，表現情形及初步分析如下：

(一) 蘭陽平原地區：

以臺灣東北部蘭陽平原地區一等水準點的資料來看，自 2003 年至 2007 年的累積重力變化量為 0.005 至 0.074 mgal 不等，其標準偏差介於 0.055 至 0.092

mgal 不等，而同時期所累積正高變化量為 -0.038 至 -0.011 m 不等，該地區重力及正高變化的負相關性顯著，見圖 4-3 及圖 4-4。根據經濟部水利署(2012) 監測宜蘭地區 1992 年至 2012 年的累積下陷情形，下陷區集中於蘭陽溪出海口兩側，其中五結鄉與壯圍鄉累積下陷量超過 30 cm(經濟部，2012)，見圖 4-5。本文觀測資料初步分析蘭陽平原的地殼變動情形，重力變化率為 0.001 至 0.019 mgal/year 不等，高程變化率為 -0.95 至 -0.22 cm/year 不等，下陷較顯著的地區同樣為接近蘭陽溪出海口附近，試比較該區域重力變化與高程變化的關係，介於 -30.0 至 -3.3 $\mu\text{gal}/\text{cm}$ 不等，平均值為 -17.8 $\mu\text{gal}/\text{cm}$ ，而非理論值的 -1.9 $\mu\text{gal}/\text{cm}$ (Heiskanen and Moritz, 1993)。

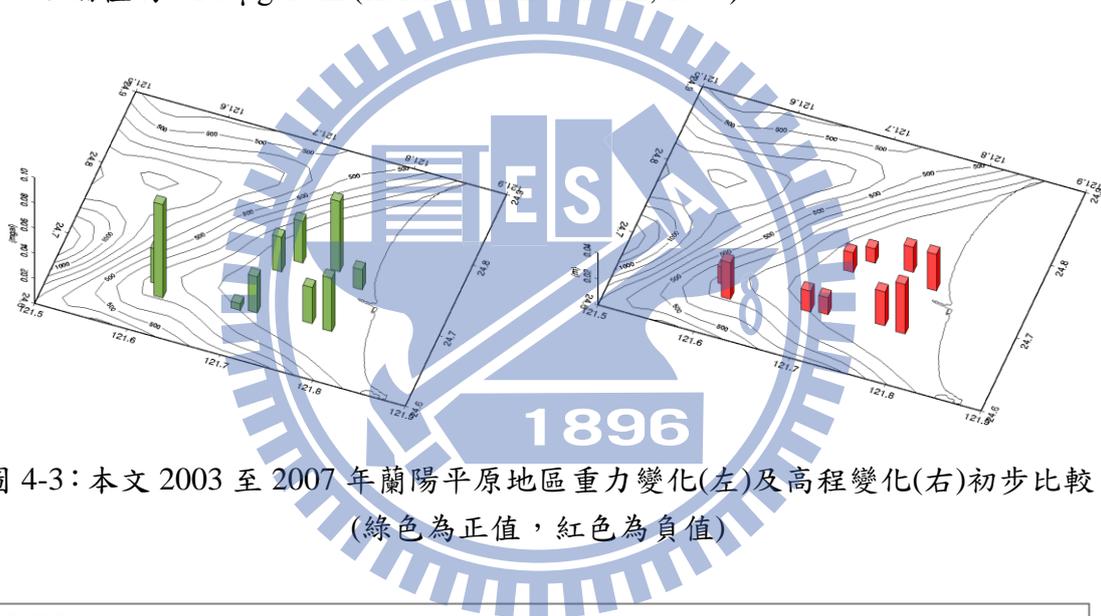


圖 4-3：本文 2003 至 2007 年蘭陽平原地區重力變化(左)及高程變化(右)初步比較 (綠色為正值，紅色為負值)

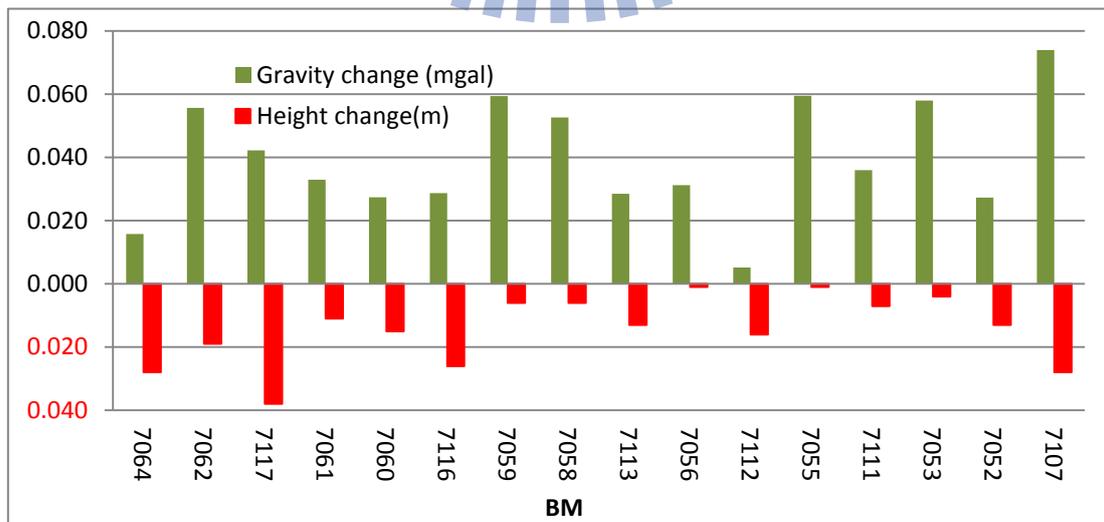


圖 4-4：本文 2003 至 2007 年蘭陽平原地區重力及高程變化初步比較圖

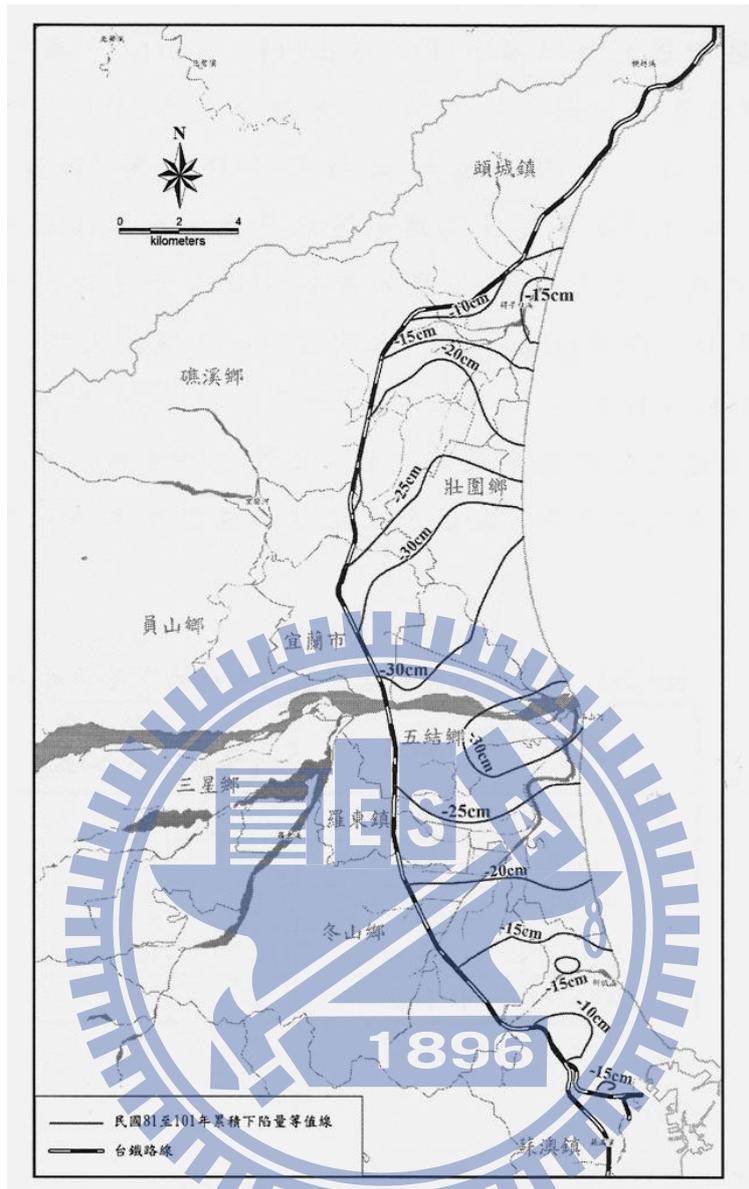


圖 4-5：1992 至 2012 年宜蘭地區累積下陷量分布圖(經濟部，2012)

(二)雲嘉平原地區：

位於臺灣西部雲嘉平原地區的一等水準點，自 2003 年至 2007 年的累積重力變化量為 0.021 至 0.237 mgal 不等，其標準偏差介於 0.063 至 0.096 mgal 不等，而同時期所累積正高變化量為 -0.341 至 -0.024 m 不等，該地區重力及正高變化的負相關性表現情形，見圖 4-6 及圖 4-7。試比較該區域重力變化與高程變化的關係，介於 -21.1 至 -1.3 $\mu\text{gal}/\text{cm}$ 不等，平均值為 -8.0 $\mu\text{gal}/\text{cm}$ 。

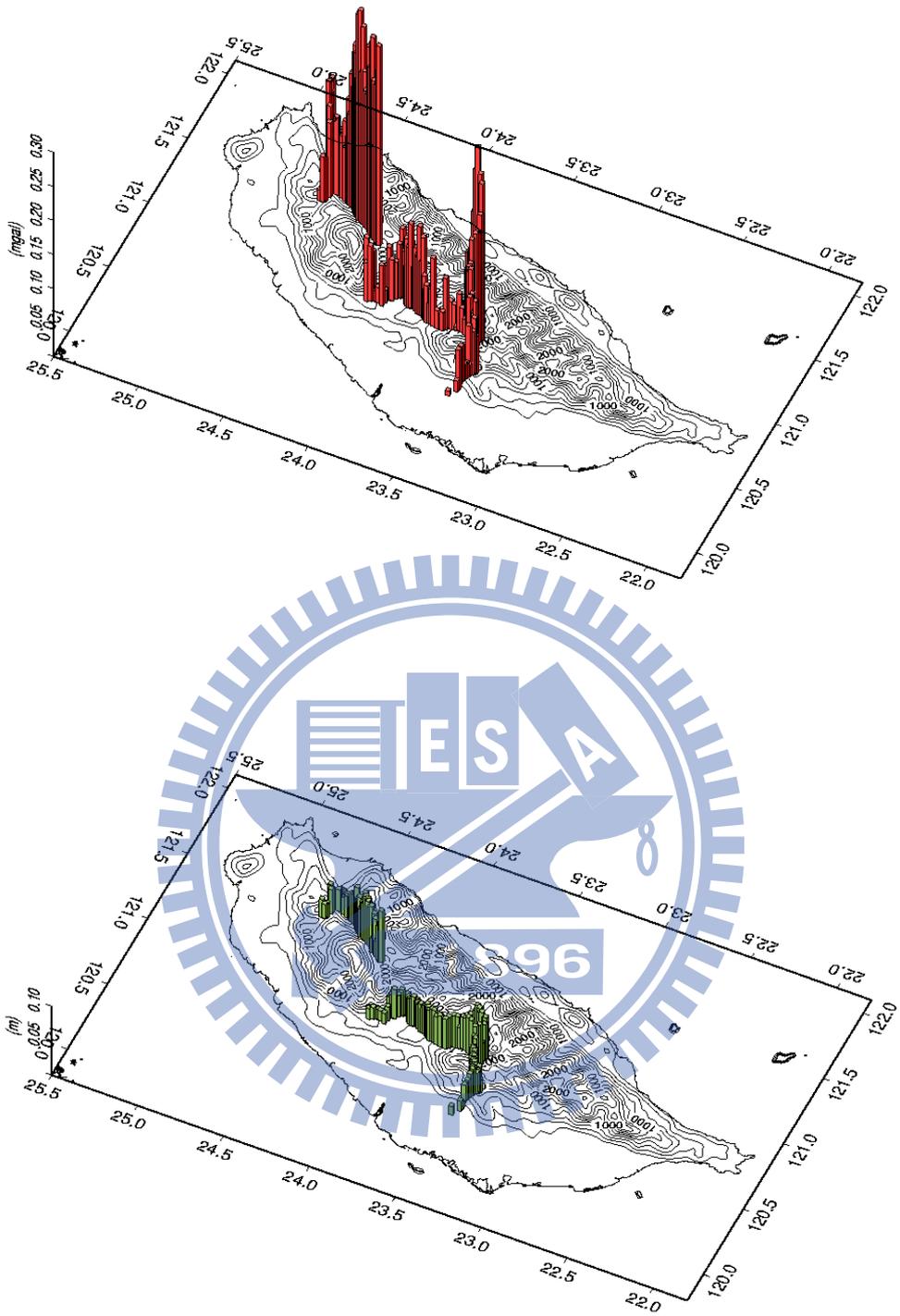


圖 4-8：本文 2003 至 2007 年中北部山脈地區省道 7 號、7 甲、8 號、21 號及 18 號公路沿線重力變化(上)及高程變化(下)初步比較(綠色為正值，紅色為負值)

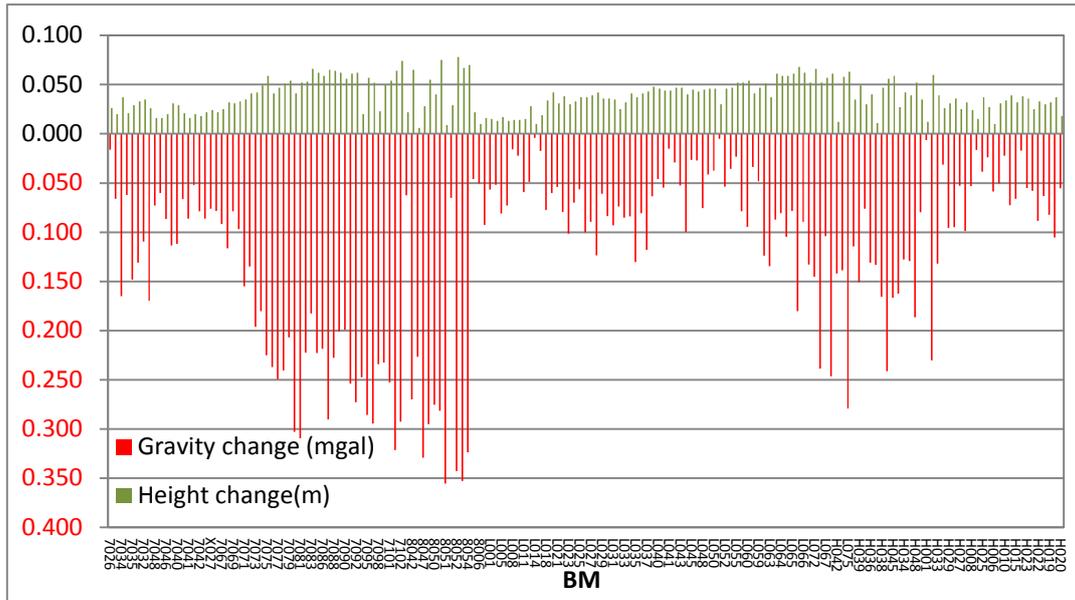


圖 4-9：本文 2003 至 2007 年中北部山脈地區省道 7 號、7 甲、8 號、21 號及 18 號公路沿線一等水準點重力及高程變化初步比較圖

綜合以上各地區的重力及正高表現情形來看，兩者呈現負相關趨勢與重力自由空間及布格平板效應理論(Heiskanen and Moritz, 1993)相同，而重力變化量的標準偏差部分，蘭陽平原地區介於 0.055 至 0.092 mgal、彰化及雲林平原地區介於 0.063 至 0.096 mgal、中央山脈地區介於 0.053 至 0.144 mgal，均普遍大於布格平板效應理論的每下陷一公分(cm)使重力增加約 1.9 μ gal 的量級，若直接應用分析上述重力變化量並不客觀，因此必須先將各重力值以統計測試方法進行顯著性測試(第 2-4-3 節)，再進一步作分析比較。

經顯著性測試過後，前述所有點位可供合理檢視重力變化的共計 139 點，大致分布於北部大屯山地區、西部平原及雪山山脈附近，少部分位於北部、東北部、西南部沿海及中央山脈地帶；重力值增加的點位主要分布於沿岸地層下陷地區，重力值減少的點位則集中高山地區，詳見圖 4-10。

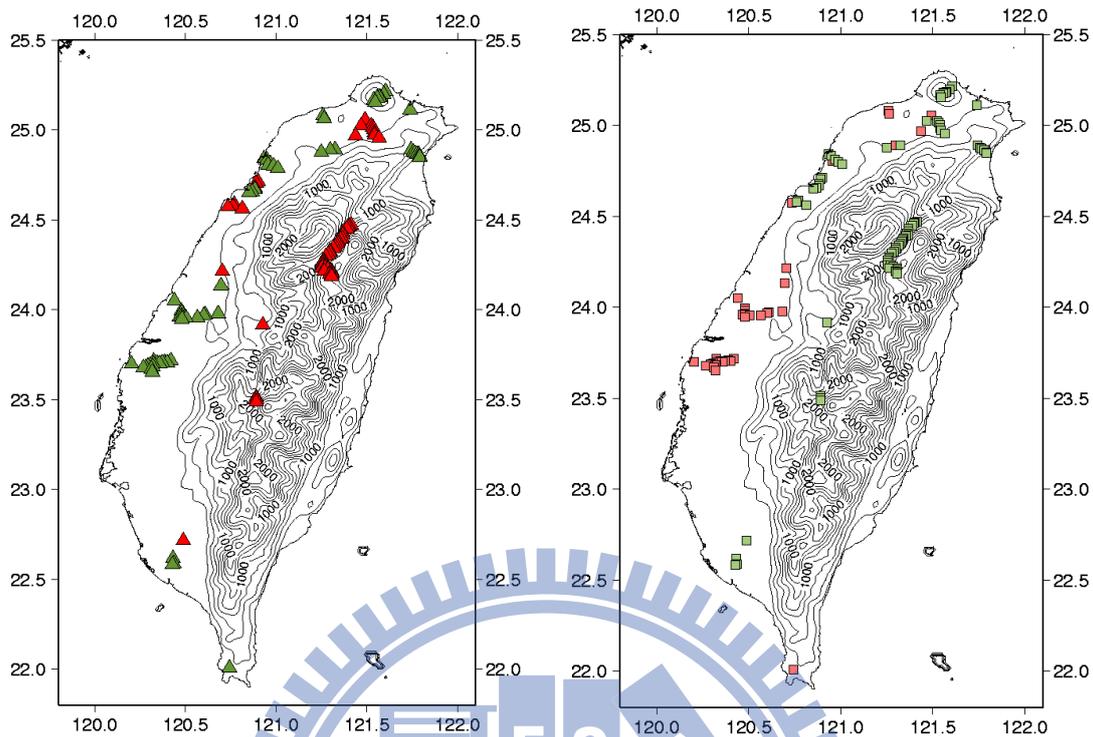


圖 4-10：本文通過顯著性測試之 2003 至 2007 年一等水準點重力變化(左)與相對應位置正高變化(右)分布略圖(綠色表示數值增加，紅色表示數值減少)

以重力及正高變化負相關性表現來看，以位於中央山脈北部地區與西部平原的雲林沿海地區最為明顯。自 2003 至 2007 年期間，根據沿省道 7 甲號及 8 號公路路段的一等水準點觀測資料來看，中央山脈北部地區於接近雪山山脈附近的重力值有明顯減少的現象，重力值變化量為 -0.339 至 -0.187 mgal 不等，標準偏差介於 0.057 至 0.120 mgal，比較相對應位置的正高變化情形，該區域的正高變化則有增加的現象，增加量為 0.006 至 0.078 m 不等，標準偏差介於 1.8 至 2.1 mm。試比較該區域重力變化與高程變化的關係，介於 -376.1 至 -30.5 $\mu\text{gal}/\text{cm}$ 不等，平均值為 -70.0 $\mu\text{gal}/\text{cm}$ 。

根據臺灣的地質和板塊構造學說(何春蓀，1975)，東側的菲律賓海板塊朝向西側的歐亞大陸板塊推擠，造成臺灣中央隆起現象，時間約從六百萬年前開始，至今仍在進行中，也是最近期的臺灣造山運動，此謂上新更新世造山運動，又稱蓬萊運動(何春蓀，1982)。根據於該區域的一等水準點上重力及正高變化數據來

看，可初步研判此類型造山運動仍在進行中，見圖 4-11 及圖 4-12。

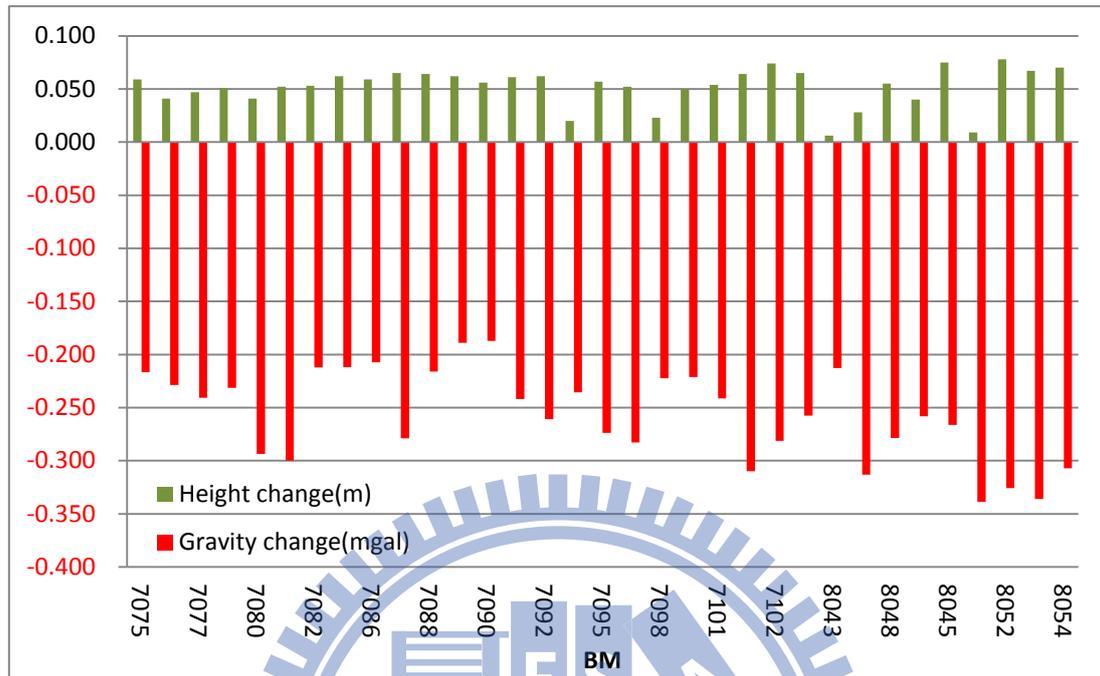


圖 4-11：本文通過顯著性測試之 2003 至 2007 年中央山脈北部地區省道 7 甲及 8 號部分公路沿線一等水準點重力與正高變化情形

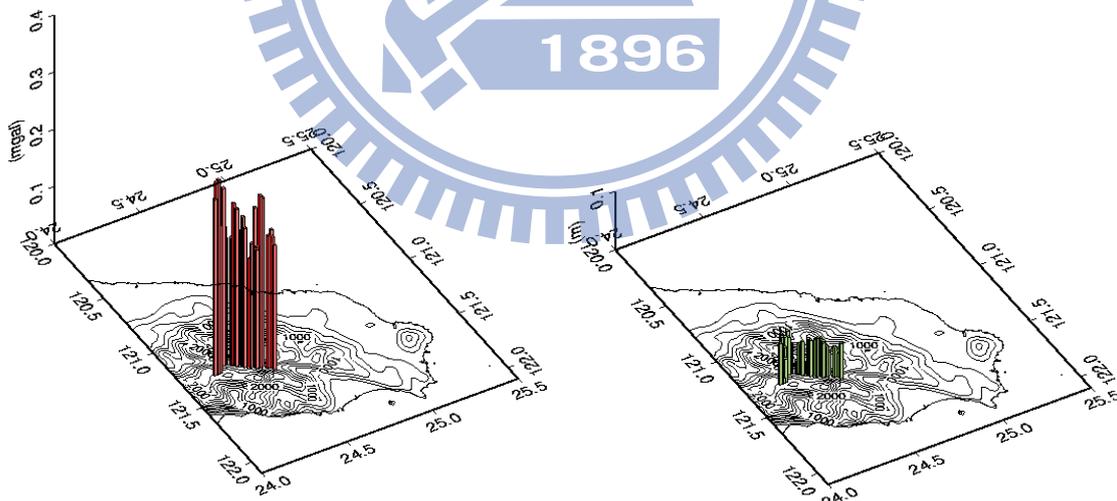


圖 4-12：本文通過顯著性測試之 2003 至 2007 年於中央山脈北部地區省道 7 甲及 8 號部分公路沿線一等水準點重力變化(左)與相對應位置正高變化(右)表現略圖 (綠色表示數值增加，紅色表示數值減少)

中國大陸青藏高原大約自五千五百萬年前起即受到印度板塊以每年 3.8 mm

向北推擠，Sun et al.(2009)於中國青藏高原及雲南等地，利用絕對重力儀與 GPS，長期連續觀測該地區地殼變動近 20 年，觀測資料顯示該地區抬升約 1.2 mm/year，重力值變化量則是約 -0.78 $\mu\text{gal}/\text{year}$ ，Sun et al. (2009)利用此觀測資料數據，以布格平板概念推導出厚度約 70 公里的青藏高原地殼下方增厚約 2.3 cm/year，見圖 4-13。由於前述現象與本節臺灣中央山脈北部地區重力與高程變化趨勢相似，本文試以 Sun et al. (2009)所採用的概念計算台灣中央山脈北部的地殼增厚情況，列出下式：

$$\Delta g = 2\pi G\Delta\rho h \quad (4-1)$$

可得

$$h = \frac{\Delta g}{2\pi G\Delta\rho} \quad (4-2)$$

其中

Δg 重力變化量(μgal)

G 萬有引力常數($6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$)

$\Delta\rho$ 密度變化量 ($3.4 - 2.6 = 0.8 \text{ g cm}^{-3}$ ，地幔 ρ_m 與地殼 ρ_c 的密度差)

h 地殼增厚量(cm)

利用上式(4-2)，將中央山脈北部地區省道 7 甲及 8 號公路沿線位置一等水準點重力變化值代入計算，得出該位置地殼增厚情形介於 131.4 至 251.0 cm/year 不等，標準偏差介於 18.6 至 39.0 cm，見圖 4-14，地殼平均增厚約 $183.8 \pm 31.8 \text{ cm/year}$ ；台灣中央山脈北部地區地殼厚度約為 35 公里，見圖 4-15，相較與青藏高原地殼厚度約為 70 公里，菲律賓海板塊以每年約 70 至 80 mm 向西推擠歐亞大陸板塊 (Yu et al., 1986)，印度板塊以每年 3.8mm 向北推擠青藏高原 (Sun et al., 2009)，臺灣地區地質年代約六百萬年(何春蓀, 1982)，青藏高原地質約五千五百萬年 (Sun et al., 2009)，根據以上比較情形，研判台灣中央山脈的地殼增厚幅度將可大於青藏高原，而試算結果約為青藏高原的 90 倍，初步研判，兩個地區的性質相異不能相提並論，惟此量級過大可能來自於重力觀測值的誤差累積所致，但仍有進一步

研究的可能性。由於此中央山脈北部區域距海岸較遠、無明顯水文效應如地下水影響、鮮少地層剝落或土石流等現象，因此重力值的精度表現情況均能優於全臺其他各地，本文建議可於此中央山脈北部公路沿線以 FG5 絕對重力儀進行長期觀測，根據觀測數據可推測出更為精確的重力變化量，並可做為地球物理現象的相關推測與研判參考。

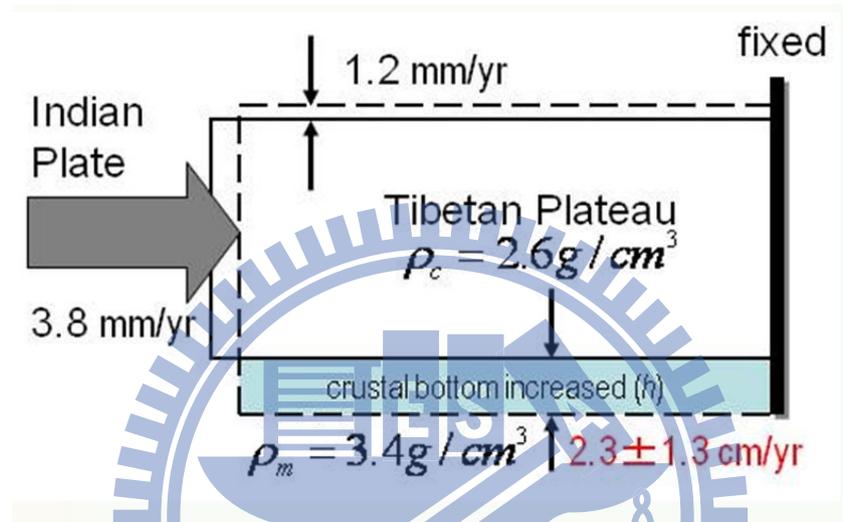


圖 4-13：青藏高原地殼增厚示意圖(Sun et al., 2009)

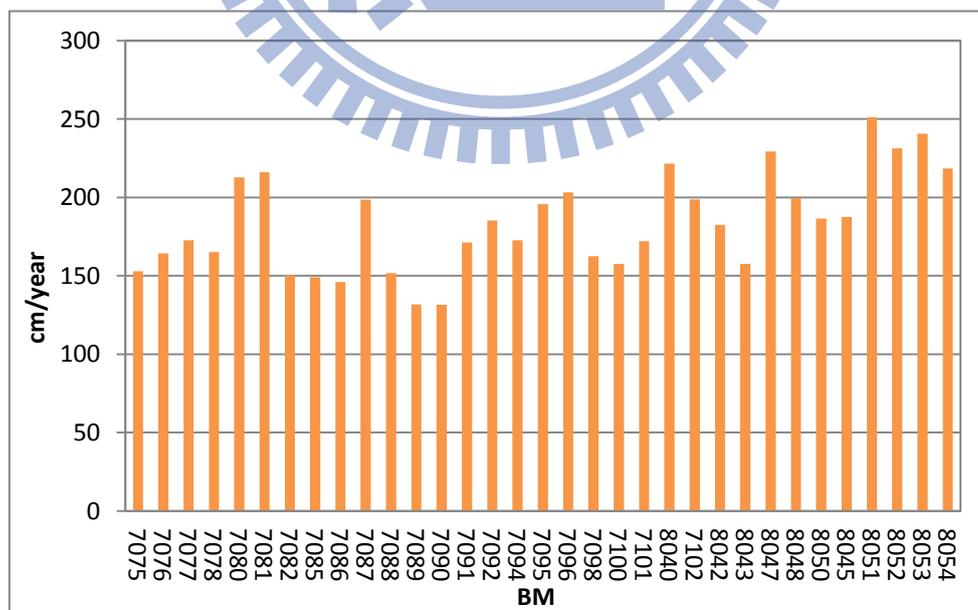


圖 4-14：本文試以布格平板概念推算台灣中央山脈北部地區省道 7 甲及 8 號部分公路沿線地殼厚度增厚之可能情形

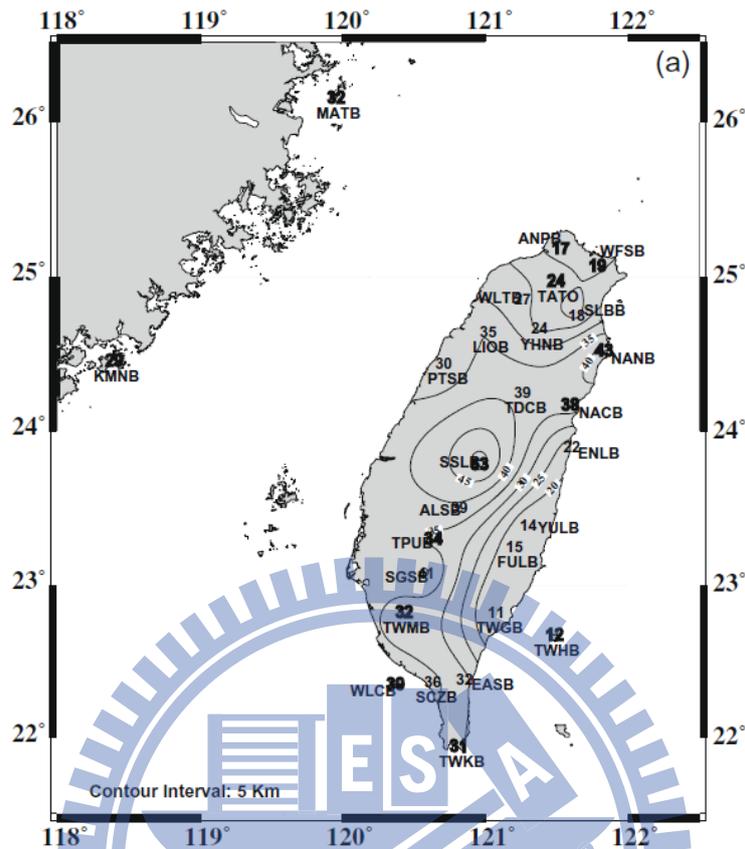


圖 4-15：台灣地區的地殼厚度分布略圖(Wang et al., 2010)

臺灣西部的雲林沿海地區於 2003 至 2007 年期間，重力值均呈現增加現象，增加量為 0.114 至 0.244 mgal 不等，標準偏差介於 0.058 至 0.091 mgal，相對應位置的正高值均呈現減少現象，減少量為 -0.341 至 -0.116 m 不等，標準偏差介於 2.4 至 3.3 mm，見圖 4-16 及圖 4-17，Chen et al. (2011) 分析出該區域的正高變化率達 -109.4 mm/year，證明臺灣西部確有明顯的下陷情形，此證可以合理推斷該區域有地層下陷的現象。試比較該區域重力變化與高程變化的關係，介於 -9.8 至 -4.4 $\mu\text{gal}/\text{cm}$ 不等，平均值為 -6.1 $\mu\text{gal}/\text{cm}$ 。

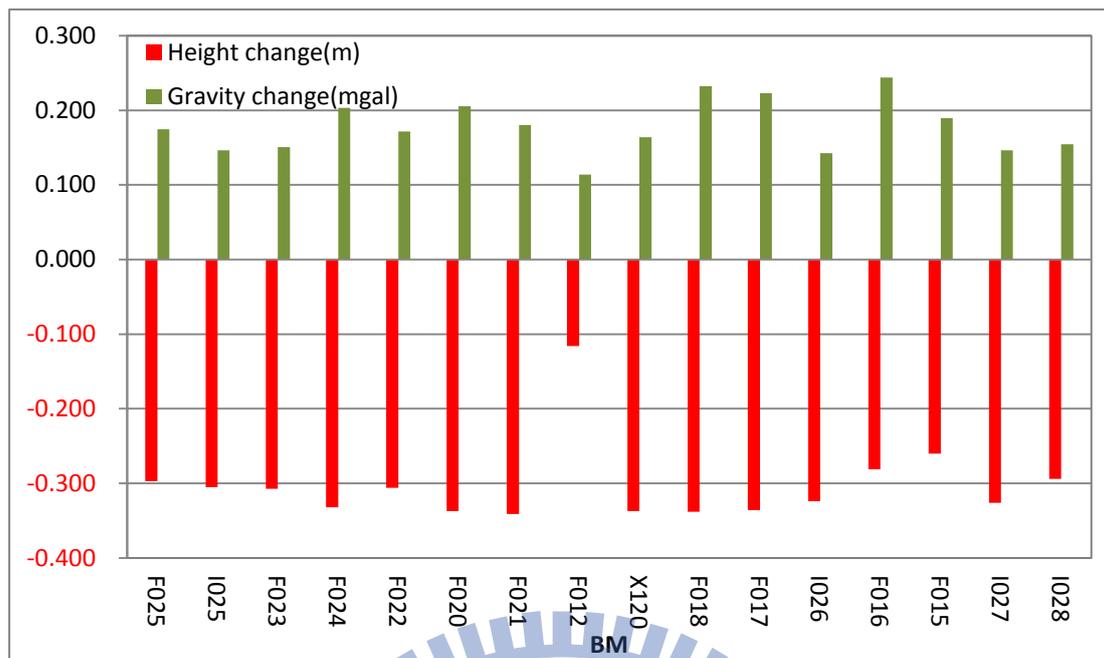


圖 4-16：本文 2003 至 2007 年雲林地區一等水準點重力與正高變化情形

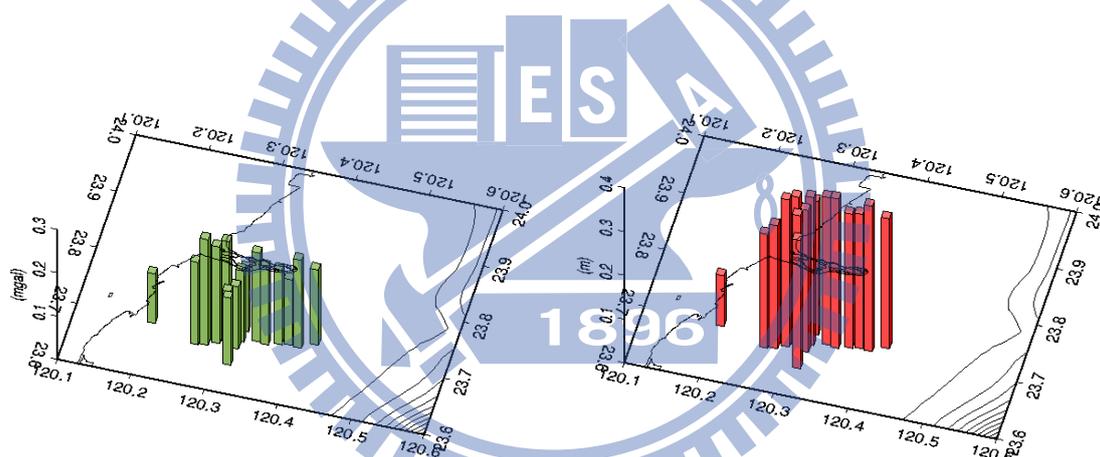


圖 4-17：本文 2003 至 2007 年於雲林地區一等水準點重力變化(左)與相對應正高變化(右)表現略圖(綠色表示數值增加，紅色表示數值減少)

本文利用重力變化來檢視地層下陷現象的相關實驗與研究(Hwang et al., 2010)，主要是以絕對重力與相對重力觀測所組成的小區域相對重力網，經由多次的觀測結果，來探討重力變化與地層下陷的相關研究，詳細內容可見第五章。

4-4-2 重力值精度分析

根據第二章所介紹的三型相對重力儀來看，以各儀器原廠公布的標準偏差可達 0.01 至 0.001 mgal 不等，見表 2-3，其中 LCR G 型重力儀礙於各觀測位置僅記錄觀測值 1 至 3 次，無法有效分析其觀測量標準偏差，而 EG 型及 CG-5 型重力儀均採自動連續觀測紀錄方式，並可根據統計方式得出觀測量的標準偏差。本小節將針對 CG-5 重力儀之觀測量標準偏差及平差計算後所得重力值之精度作分析，探討其標準偏差與精度量級的表現及成因。

2007 年 6 月利用 CG-5 重力儀完成全臺一等水準點上相對重力測量，其觀測量標準偏差為 0.0042 至 2.0630 mgal 不等，觀測量再經由平差模式計算出各個一等水準點重力值，其標準偏差最大為 0.1699 mgal，分布情形見圖 4-18。由於全臺各地的地理及地質條件有所不同，CG-5 重力儀觀測量標準偏差於各地區的表現也各異，就以觀測位置地質分類情形來檢視各標準偏差的表現情形，見表 4-9 及圖 4-19。

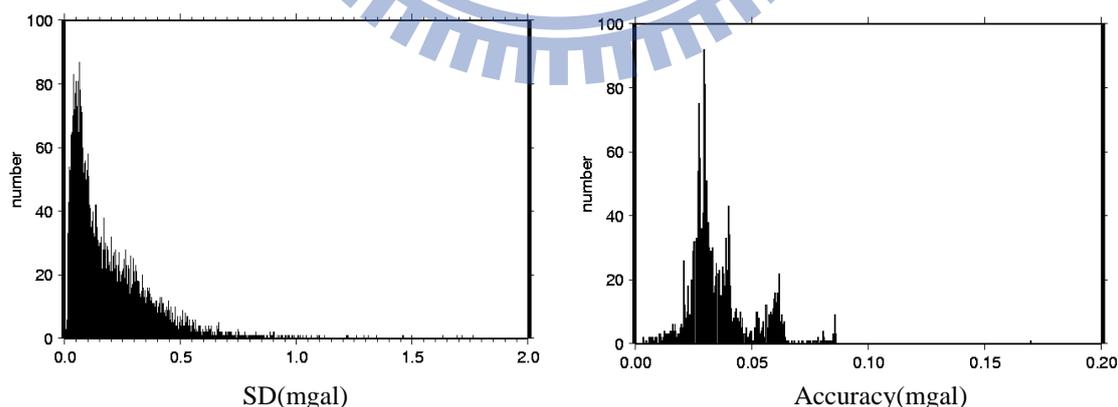


圖 4-18：本文 2007 年全臺相對重力觀測量(Scintrex CG-5)標準偏差(左)及平差重力值精度(右)分布情形

表 4-9：本文 Scintrex CG-5 重力儀於各地質層重力觀測量標準偏差表現情形(經濟部中央地質調查所)(單位：mgal)

圖例	地質層	標準偏差 (平均值)	圖例	地質層	標準偏差 (平均值)
	三峽群及其相當地層	0.0053~1.7630 (0.087)		恆春石灰岩	0.0338~0.2070 (0.105)
	大南澳片岩	0.0083~0.1780 (0.031)		紅土臺地堆積	0.0377~1.6338 (0.238)
	大南灣層 米崙層	0.0165~0.8925 (0.243)		乾溝層	0.0078~0.1830 (0.050)
	大桶山層	0.0101~0.2715 (0.052)		蛇紋岩及 基性火成岩	0.0207~0.0404 (0.032)
	大港口層 奇美層	0.0086~0.3150 (0.054)		都巒山層	0.0088~0.2050 (0.063)
	四稜砂岩	0.0170~0.2882 (0.060)		野柳群及其相當地層	0.0138~0.2975 (0.089)
	安山岩	0.0175~0.7430 (0.106)		隆起珊瑚礁	0.0223~0.2780 (0.090)
	安山岩質 碎屑岩	0.0230~1.0059 (0.243)		瑞芳群及其相當地層	0.0113~0.8929 (0.077)
	西村層 新高層	0.0042~0.1690 (0.034)		臺地堆積	0.0048~1.2600 (0.109)
	利吉層 墾丁層	0.0135~0.2991 (0.072)		澳底層	0.0138~0.1100 (0.040)
	沖積層	0.0062~2.0630 (0.194)		錦水頁岩及其 相當地層	0.0170~0.4280 (0.067)
	卓蘭層及其相當地層	0.0125~0.5210 (0.107)		頭嵙山層及其相當地層	0.0183~0.8233 (0.160)
	卑南山礫岩	0.0187~0.1030 (0.039)		廬山層	0.0055~0.0201 (0.037)

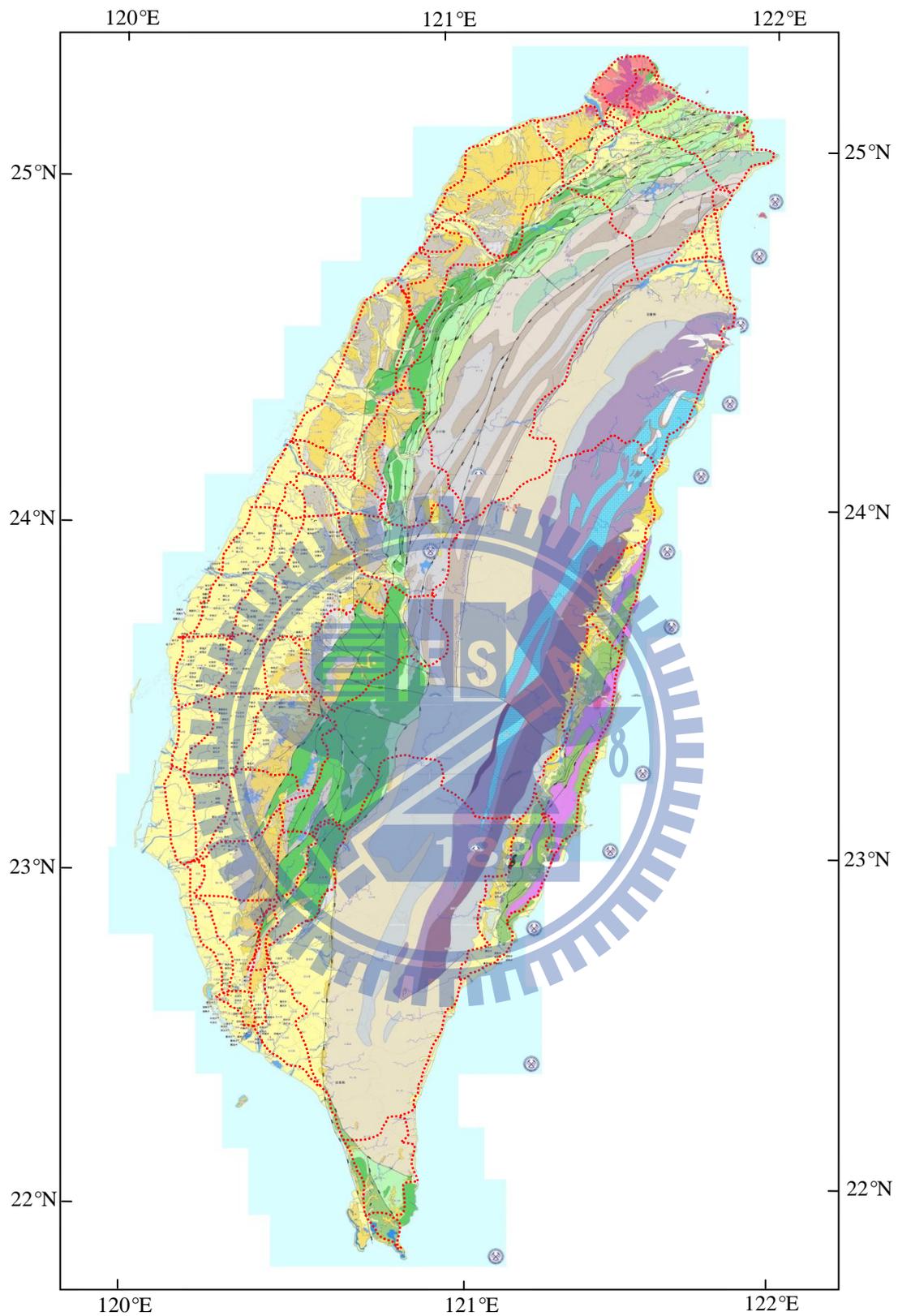


圖 4-19：本文重力觀測位置(紅點)於地質層分布略圖，圖例參考表 4-9(全圖依據經濟部中央地質調查所廿五萬分之一地質圖各分幅拼接)

本文另以 CG-5 型重力儀於 2006 年 11 月進行南橫公路沿線相對重力測量，觀測東起臺東縣東河國小(AG2a)絕對重力點，經臺 23 線省道、臺 9 線省道及臺 20 線省道西抵臺南市成功大學(AG8) 絕對重力點，沿途觀測 12 處一等水準點及 AGTO(Absolute Gravity of the Taiwanese Orogen)絕對重力點之相對重力值，該測段主要行經南橫公路路段，由於地處偏僻之中央山脈南段，人煙及交通干擾稀少，地質條件主要以廬山層、西村層、大南澳片岩、三峽群及其相當地層、臺地堆積及沖積層等，見圖 4-20，雖然重力觀測路段的地質條件各異，各觀測位置甚少人為干擾或其他噪聲影響觀測，因此各觀測位置的重力觀測量標準偏差均較其他觀測地區為低，重力觀測量標準偏差介於 0.007 至 0.143 mgal 之間，標準偏差平均為 0.040 mgal，見圖 4-21。

此段相對重力觀測主要以階梯式(Ladder)進行，經由最小二乘法平差計算成果顯示，各觀測位置重力值標準偏差介於 0.0087 至 0.0165 之間，標準偏差平均為 0.0127 mgal，重力值殘差及標準偏差分布，見圖 4-22，此等精度表現明顯優於 2007 年全臺相對重力觀測重力值精度，由於此測段約制 AG2a 及 AG8 兩處絕對重力點，絕對點重力值標準偏差均在 0.001 mgal 以下，使得平差計算後重力值標準偏差得以顯著降低。

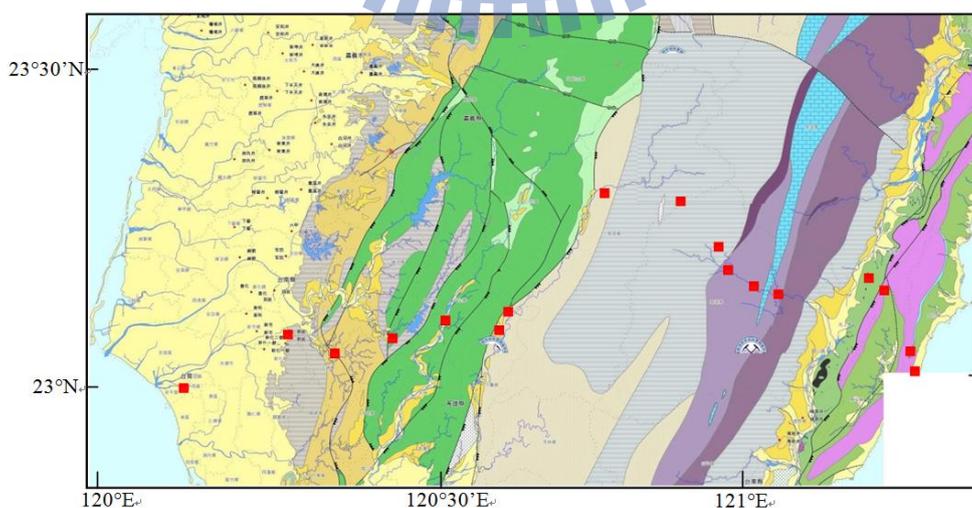


圖 4-20：本文 AGTO 相對重力觀測點位(紅色方塊)示意圖，圖例參照表 4-10(依據經濟部中央地質調查所廿五萬分之一地質圖拼接)

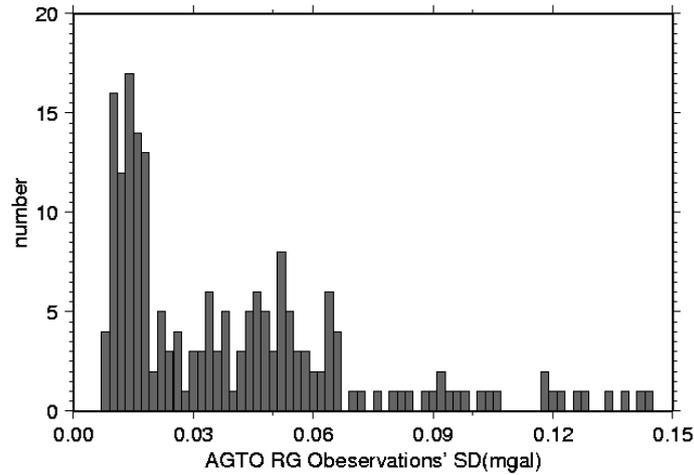


圖 4-21：本文 AGTO 相對重力觀測量(Scintrex CG-5)標準偏差分布情形

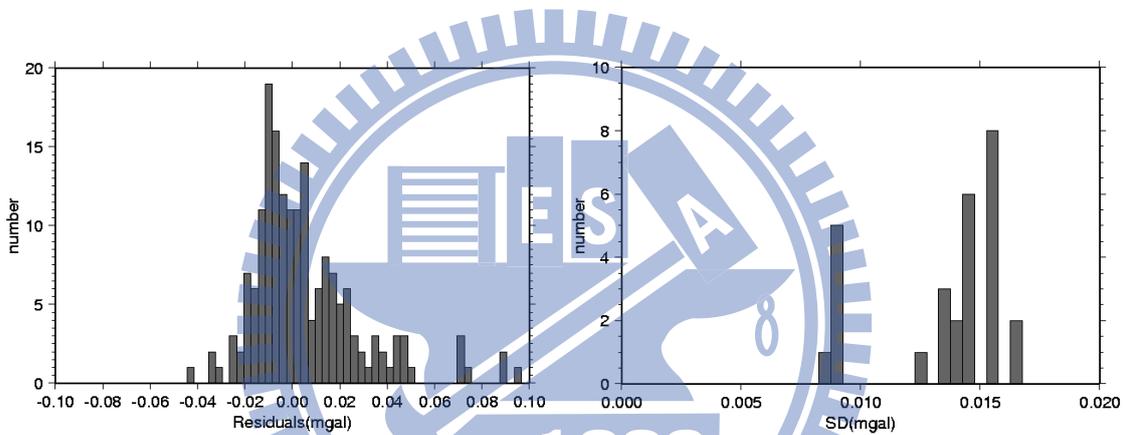


圖 4-22：本文南橫公路相對重力測量平差重力值殘差(左)及標準偏差(右)分布情形

其他有關於以 EG 及 CG-5 相對重力儀於雲林地區進行相對重力測量部分，由於是以兩種型式儀器在相同地點進行六次觀測，其中前三次是以 EG 進行觀測，而後三次是以 CG-5 進行觀測，又前三次觀測進行方式為階梯式，後三次觀測進行方式為混合星狀式及階梯式，因此可以明顯比較出 EG 及 CG-5 兩種相對重力儀的觀測量及重力成果的精度表現，詳細內容見第 5-5 節。

4-5 本章小結

藉由 2003 年與 2007 年兩次的全臺相對重力測量成果，可以推定出臺灣地區的重力速度場，再配合正高系統的垂直速度場，可以明確地檢視臺灣各地區的時變情形。利用重力與高程變化負相關的條件來看，臺灣地區較大範圍的重力明顯變化為中央山脈北部與雲林地區，臺灣持續進行的造山運動，可由中央山脈的部分重力與正高變化獲得初步驗證，而西部地區雲林部分鄉鎮的地層下陷現象，也能獲得明顯的驗證，東部地區可分析重力變化的數據不足，有待持續觀測並加密東部地區甚至中央山脈深山地帶的重力測量，除了能更有效地分析臺灣地殼變動情形之外，更可有效提升臺灣地區大地水準面的精確度。

中央山脈中北部山區公路沿線重力值精度普遍大於其他地區，研判本文山區相對重力觀測進行方式測線長度過長，其中並無鄰近分支測線做為交互約制，致使平差計算後因誤差累積造成重力值精度降低，建議於此情況之長測線中，加入已知重力值或觀測絕對重力值做為計算約制，以期能改進過長測線部分的重力值精度表現。

相對重力觀測量在組成觀測網形之後，可視狀況增加觀測量以增強網形強度，另可由原先單純以階梯式再混合星狀式進行，將觀測網形中的已知點位或重力觀測量標準偏差最小的點位，做為星狀式觀測進行的出發點，以增加多餘觀測量，可重複檢核重力觀測量的閉合差，並達到提升觀測品質的效果，使相對重力儀的觀測成果精度可達到 μgal 等級。由於台灣地區地形及地質分區複雜，造成重力觀測量的精度因地而異，建議可將重力觀測位置依照地形及地質條件做分類，分區進行平差計算各重力值。

五、以重力方法檢視地層下陷

5-1 概述

由上一章第 4-4 節中，已可明顯地檢視出雲林地區重力變化量呈現增加的趨勢，Chen et al.(2011)也利用 2000 年至 2008 年的正高變化，分析出臺灣西部雲林地區的正高變化率達-109.4 mm/year，以上數據均證實該地區長期以來所造成的地層下陷情況。經濟部水利署與國立成功大學所組成之地層下陷防治服務團隊，長期監測全國各地區地層下陷情形，由所公布的資料得知，雲林縣是全臺地層下陷面積最大的縣市，同樣由經濟部水利署與財團法人工業技術研究院所作的臺灣地區地層下陷之監測、調查及分析中，說明雲林地區的地層下陷量及歷年下陷情形，本文綜合由以上的報告結果，來作為重力實驗區域選定的依據，本章所選定的雲林地區下陷區觀測範圍，最北至濁水溪南岸，最南至北港溪北岸，東鄰國道中山高速公路以西，西抵沿海地區。

由雲林地區歷年水準點下陷資料來看，於 1992 年以後，較大的下陷速率分別發生在麥寮中山(1992 至 1994 年為 16 cm/year、1994 至 1996 年為 8 cm/year)、麥寮橋頭(1996 至 1998 年為 8 cm/year)、元長鄉(1998 至 1999 年為 7 cm/year)及土庫鎮(1999 至 2002 年為 9.5 cm/year)，最大下陷速率逐漸趨緩，但有轉往靠內陸區域下陷之情形，見圖 5-1。雲林地區以元長鄉累積下陷量最大，1992 年 8 月至 2004 年 4 月期間平均下陷量為 7.5 cm/year。在持續下陷面積(每年平均下陷超過 3 cm)方面，依觀測期距先後分別為 783 km²、745 km²、392 km²、366 km²、610 km²，見表 5-1，下陷面積雖在 1996 至 1998 年間有趨緩現象，但近年以來下陷面積的擴大又與土庫鎮及元長鄉日趨嚴重之下陷有關，近十年來下陷中心位置已由早期的麥寮鄉附近移轉至後期之元長鄉及土庫鎮一帶(經濟部，2004)。

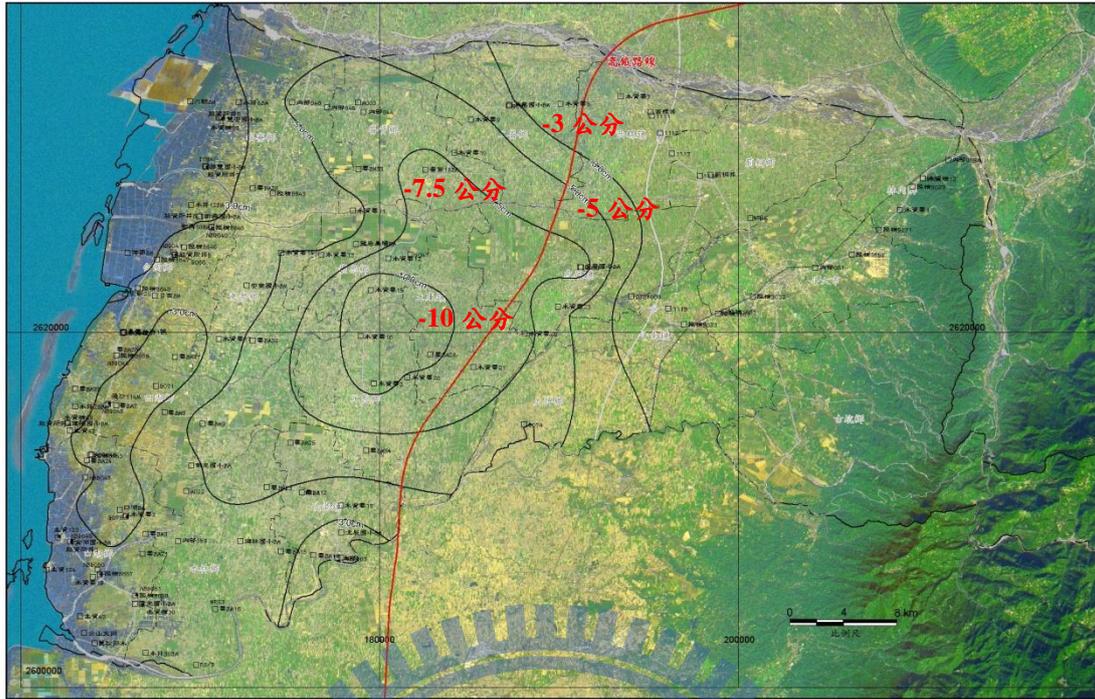


圖 5-1：雲林地區 2002 至 2003 年年平均下陷速率圖(cm/year)(經濟部，2004)

表 5-1：雲林地區 1992 年至 2002 年下陷資料統計表(經濟部，2004)

觀測期距	1992/8~1994/10	1994/10~1996/10	1996/10~1998/02	1998/2~1999/11	1999/11~2002/4
最大下陷速率 (cm/year)	16	8	8	7	9.5
最大下陷速率 發生鄉鎮	麥寮鄉中山	麥寮鄉中山	麥寮鄉橋頭	元長鄉	土庫鎮
下陷速率超過 (3 cm/year) 面積 (km ²)	782.64	745.72	391.99	366.06	610.4

本章的重力測量部分計有絕對重力與相對重力觀測兩種，絕對重力部分是以 FG5 絕對重力儀做觀測，選定雲林縣東勢鄉同安國小(TAES)及北港衛星追蹤站(PKBD)進行觀測，相對重力部分則是分別以 Lacoste & Romberg Graviton-EG(EG)型與 Scintrex CG-5(CG-5)型相對重力儀，對實驗區內所選定的觀測位置，如一等水準點或自選位置進行相對重力觀測，並以同安國小(TAES)絕對重力值做為相對重力網形平差計算時的約制點。

重力觀測結果必須對環境所引起的地球固體潮、海潮、極移與氣壓等做改正，相對重力觀測量再以絕對重力值做約制進行平差計算，得到各時段的重力值後，

再來將重力變化對地層下陷的現象做比較分析。

本章旨在利用重力測量技術對臺灣西部沿海地層下陷量急劇之區域作監測實驗，藉由連續的重力觀測結果，可獲得地層下陷區域隨時間變化的資訊，研究地層下陷與重力變化的相關性，並嘗試以重力變化與高程變異關係 (Heiskanen and Moritz, 1993)來解釋並定義變動量，而實際結果的表現則明顯大於理論值。

5-2 重力檢視地層下陷基本原理

首先以下圖 5-2 簡單敘述重力變化與地殼垂直變動的關係：

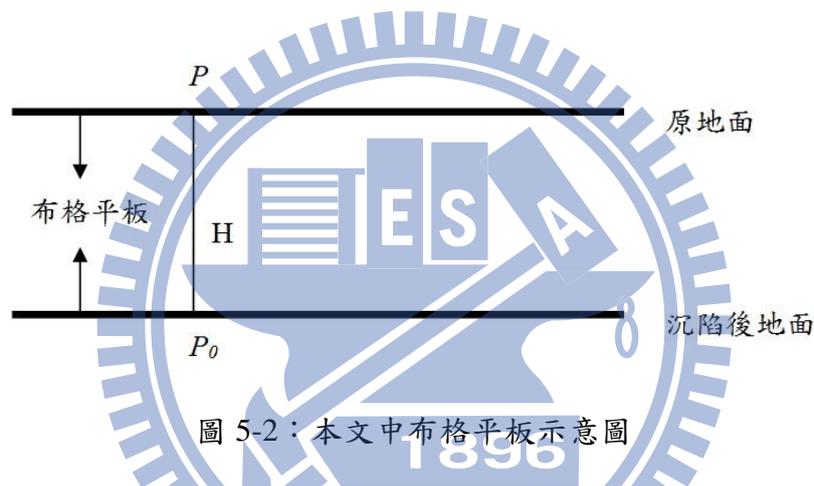


圖 5-2：本文中布格平板示意圖

如上圖 5-2 所示，假設在重力點 P 之布格平板厚度為 H ， P 與 P_0 間之密度為 ρ ，萬有引力常數為 G ，則布格片所產生的重力為 A_B ：

$$A_B = 2\pi G\rho H \quad (5-1)$$

假設地殼平均密度 $\rho=2.67\text{g/cm}^3$ ，上式(5-1)可變化為：

$$A_B = 0.1119 H \text{ mgal}$$

將重力點 P 從原地面降低至 P_0 位置，其梯度為：

$$F = -\frac{\partial g}{\partial H} H \cong -0.3086H \text{ mgal} \quad (5-2)$$

因此由地表 P 至 P_0 點重力將增加：

$$g_{P_0} = g_P - A_B + F \quad (5-3)$$

上式(5-3)可由數值表示：

重力點 P 的觀測重力值	g_p	
減去布格片	$-0.1119 H$	
加上自由空間梯度	$+0.3086 H$	
<hr/>		
P_0 點的布格重力值	$g_{P_0} = g_p + 0.1967 H$	(mgal) (5-4)

由上式(5-3)可得，理論上每一公尺的沉陷將使重力增加 0.1967 mgal，即每下陷一公分(cm)將使重力增加約 1.9 μ gal。地層下陷所相對應的重力變化應不包含環境引起的重力變化，故若要以重力方法監測地層下陷的關鍵在於能否精確模式化環境引起之重力變化。

5-3 絕對重力測量

自 2004 年起至 2013 年止，即以 FG5 絕對重力儀設置於雲林縣同安國小 (TAES) 進行絕對重力觀測，共計完成七次觀測，第一次為 2004 年 10 月 28 日至 10 月 29 日共 12 小時，資料收集共計 24 組，每組觀測時間為 30 分鐘，每組共收集 150 次自由落體之重力觀測值；第二次為 2005 年 4 月 11 日至 14 日共 60.5 小時，資料收集共計 121 組，每組觀測時間為 30 分鐘，每組共收集 100 次自由落體之重力觀測值；第三次為 2005 年 12 月 14 日至 15 日共 25 小時，資料收集共計 50 組，每組觀測時間為 30 分鐘，每組共收集 200 次自由落體之重力觀測值；第四次為 2007 年 4 月 10 日至 13 日共 64.5 小時，資料收集共計 129 組，每組觀測時間為 30 分鐘，每組共收集 100 次自由落體之重力觀測值；第五次為 2008 年 3 月 31 日至 4 月 1 日共 23 小時，資料收集共計 46 組，每組觀測時間為 30 分鐘，每組共收集 150 次自由落體之重力觀測值；第六次為 2009 年 2 月 22 日至 23 日共 17.5 小時，資料收集共計 35 組，每組觀測時間為 30 分鐘，每組共收集 150 次自由落體之重力觀測值；第七次為 2013 年 3 月 31 日至 4 月 1 日共 24 小時，資料收集共計 48 組，每組觀測時間為 20 分鐘，每組共收集 100 次自由落體

之重力觀測值。以上共七次的絕對重力觀測作業中，2004 年至 2008 年的前五次觀測，主要配合相對重力測量的時間並作為約制點使用，之後的兩次僅為檢視同安國小(TAES)後續的長時間重力值變化情況。

於完成 FG5 重力儀架設後，即使用 g7 軟體接收並計算重力儀的自由落體加速度數據，在開始觀測與接收觀測數據前，先輸入測站經緯度、高程值、重力梯度值、參考儀器高、地球極移修正 XY 分量與雷射各頻率參考電壓值等參數，並設定加入各項改正量計算，如固體潮與海潮改正、氣壓改正、地球極移改正與參考儀器高度改正等，之後即進行 FG5 重力儀觀測的運作，並由此計算出觀測所得的絕對重力值，同安國小(TAES)共有七次絕對重力觀測值；另於 2006 年 1 月至 2007 年 8 月期間，同樣以 FG5 絕對重力儀於北港衛星追蹤站(PKBD)共進行四次觀測。

5-4 相對重力測量

相對重力測量部分是以 EG 型與 CG-5 型相對重力儀對實驗區所選定的一等水準點或自選位置進行相對重力觀測，自 2004 年 12 月起至 2006 年 11 月止，共計有六次相對重力網形進行觀測。

第一次至第三次(2004 年 12 月、2005 年 4 月與 2005 年 12 月)的相對重力觀測是由 EG 型相對重力儀以階梯式(Ladder)進行測量，每個點位觀測 10 分鐘並記錄重力資料 600 筆，在利用儀器內建濾波視窗軟體(30 秒)處理後得到相對重力值；第四次至第六次(2006 年 7 月、2006 年 11 月與 2007 年 4 月)則是以 CG-5 型相對重力儀混合星狀式(Star)及階梯式(Ladder)進行觀測，見圖 5-3，連接引測網形內各重力點，再對網形外圍各重力點做相對重力觀測，如此可增加觀測數量，每個點位觀測 2 分鐘紀錄重力資料 120 筆，並以儀器內建濾波視窗軟體(4 個標準偏差為門檻值)處理後得到相對重力值，雲林相對重力觀測基本網形見圖 5-4。

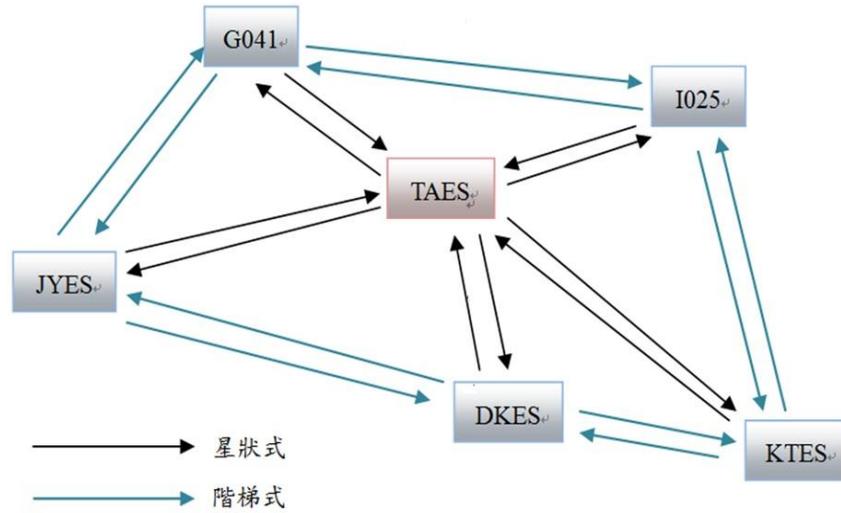


圖 5-3：本文雲林相對重力觀測混合進行方式示意圖(範例)

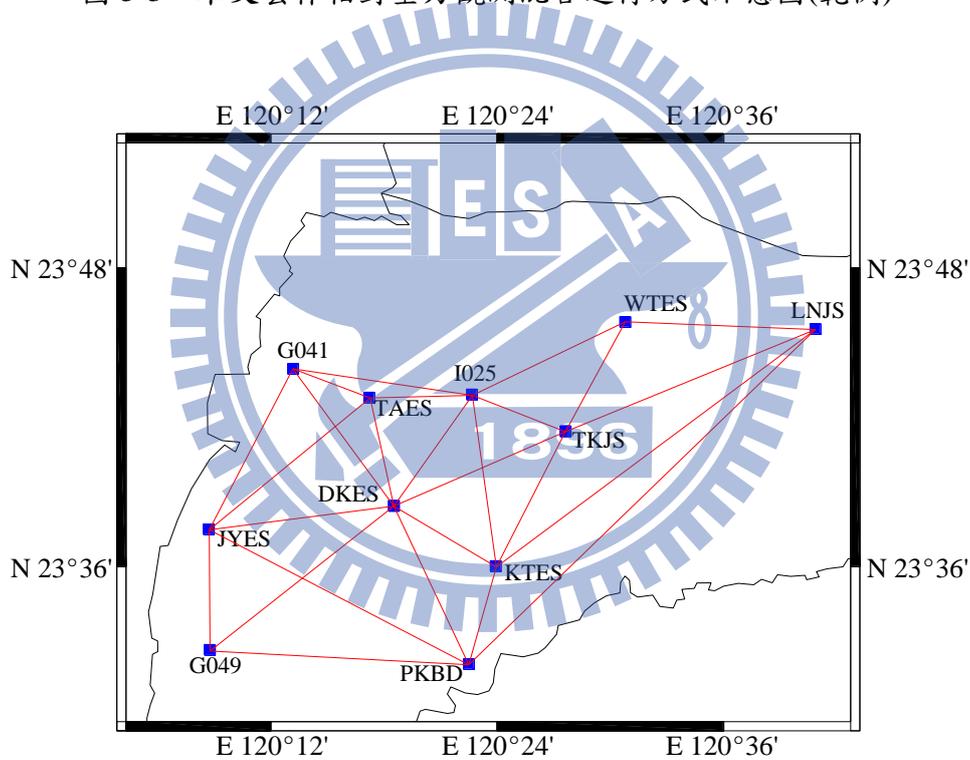


圖 5-4：本文雲林相對重力觀測基本網形

本章實驗區內所有重力觀測位置各距海岸約 5~20 公里不等，海潮負載效應於近岸區域造成的影響較顯著，因此各重力觀測量均需對海潮負載效應做嚴密改正，本實驗以 SGOTL 程式(詳見第三章)進行海潮負載效應計算並做重力改正，改正後之重力觀測量再以 TAES 絕對重力值為約制點，經由平差計算後得到共六次的各觀測位置重力值。

5-5 重力變化分析

絕對重力部分，以 TAES 絕對重力觀測的各次成果來看，該處絕對重力值變化趨勢明顯地呈現增加，自 2004 年 4 月起至 2013 年 5 月止，TAES 的重力累積變化量已達 124.4 μgal ，重力年變化率則為 $12.78 \pm 2.7 \mu\text{gal}/\text{year}$ ，見圖 5-5；另配合該地區相對重力觀測時間，自 2004 年 12 月至 2006 年 11 月止，TAES 的重力年變化率為 $21.61 \pm 2.7 \mu\text{gal}/\text{year}$ ；2006 年 1 月至 2007 年 8 月止，PKBD 的重力年變化率為 $27.78 \pm 2.4 \mu\text{gal}/\text{year}$ ，見圖 5-6。

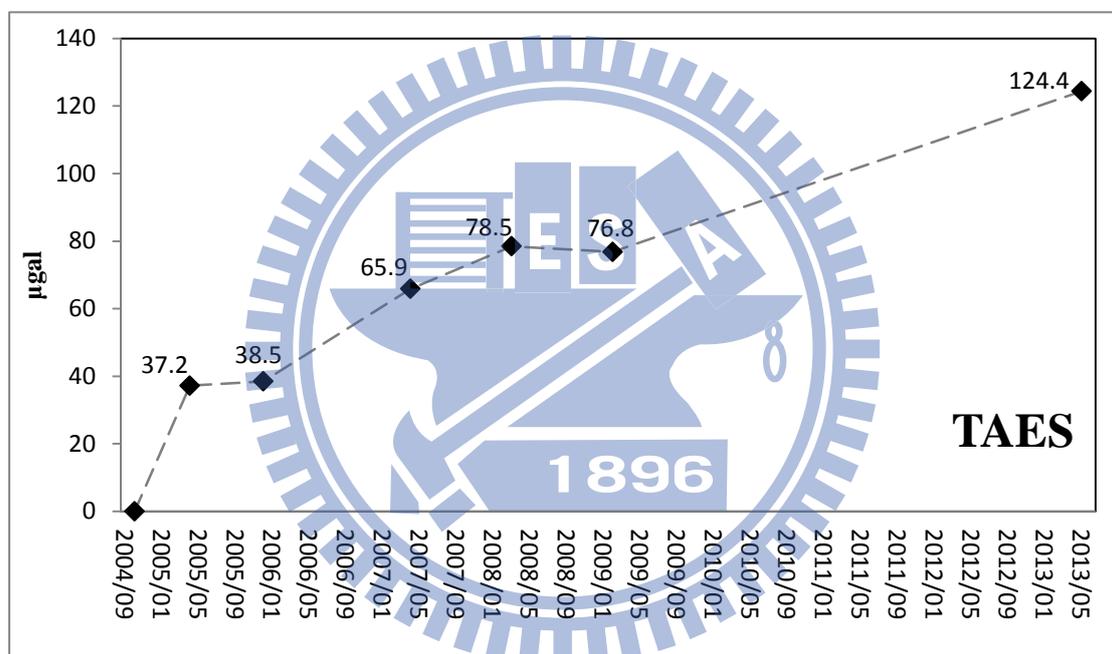


圖 5-5：本文 2004 年 10 月至 2013 年 5 月同安國小(TAES)絕對重力值變化情形

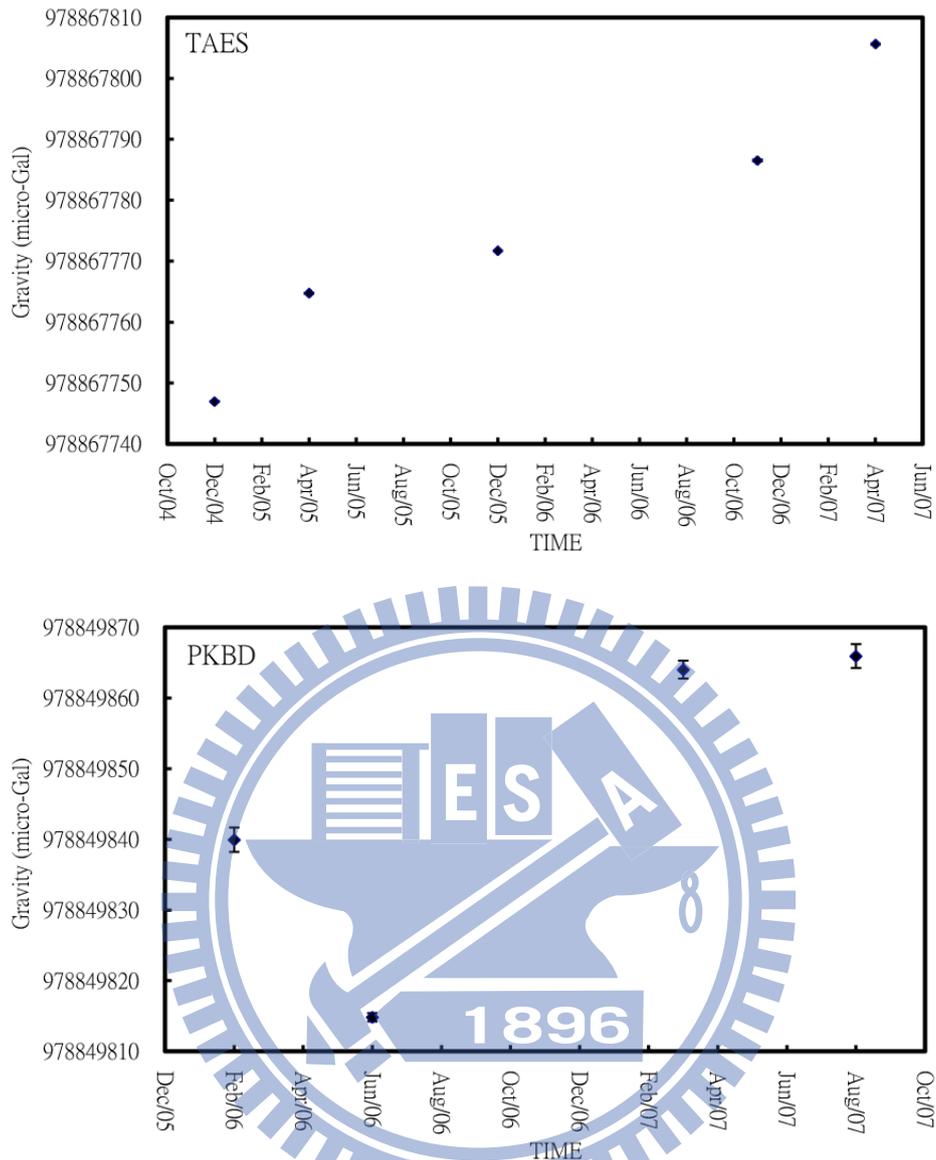


圖 5-6：本文同安國小(TAES)及北港衛星追蹤站(PKBD)絕對重力值變化情形

相對重力部分，六次的相對重力網形中，其中前三次(2004 年 12 月、2005 年 4 月與 2005 年 12 月)所觀測使用儀器為 EG 型相對重力儀，後三次(2006 年 7 月、2006 年 11 月與 2007 年 4 月)所觀測使用儀器則為 CG-5 型相對重力儀，綜整並檢視前三次及後三次平差前重力觀測量標準偏差後，前三次標準偏差介於 0.141~2.850 mgal，而後三次標準偏差則介於 0.104~0.610 mgal，見圖 5-7，由此可見，CG-5 型相對重力儀的觀測解析度優於 EG 型相對重力儀。

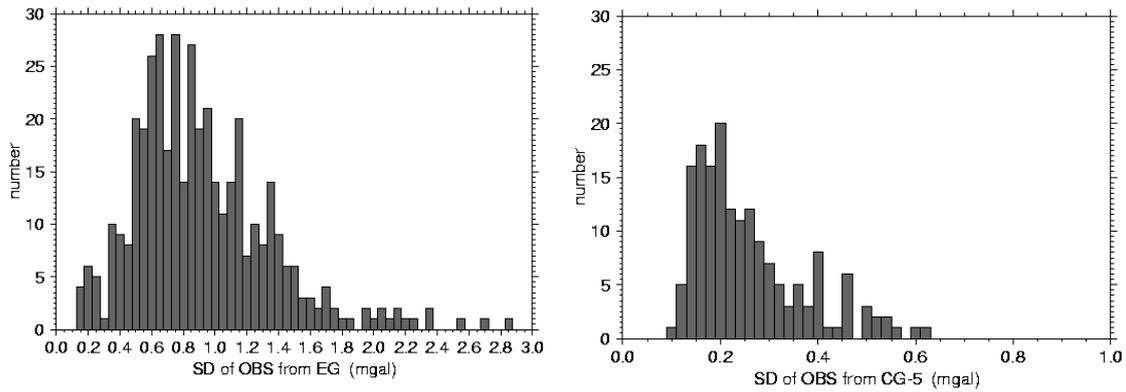


圖 5-7：本文 EG (左)與 CG-5(右)相對重力儀觀測量標準偏差分布圖

共計六次的相對重力網形均以 TAES 絕對重力點為約制，在經過平差計算後，得到各次各點的重力值，而六次的平差計算成果表現情形各異，見圖 5-8 至 5-13，其中前三次的重力值標準偏差均普遍大於後三次的重力值標準偏差。

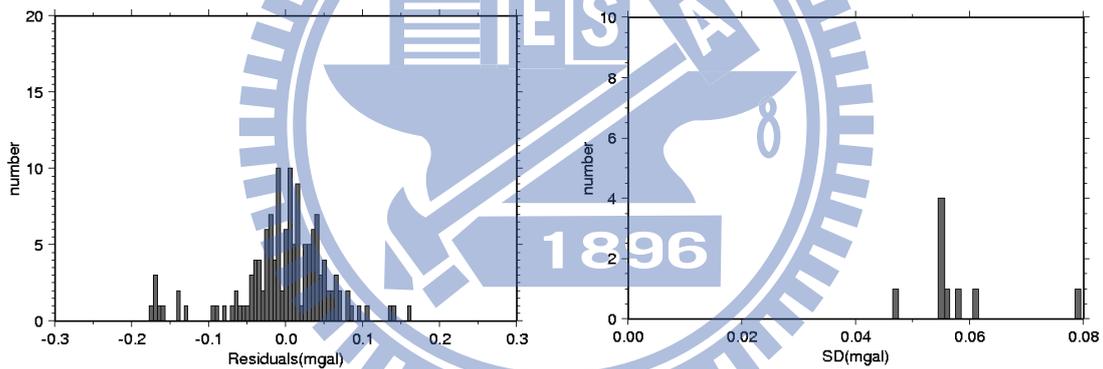


圖 5-8：本文第一次(2004 年 12 月)相對重力網形殘差(左)與標準偏差(右)分布情形

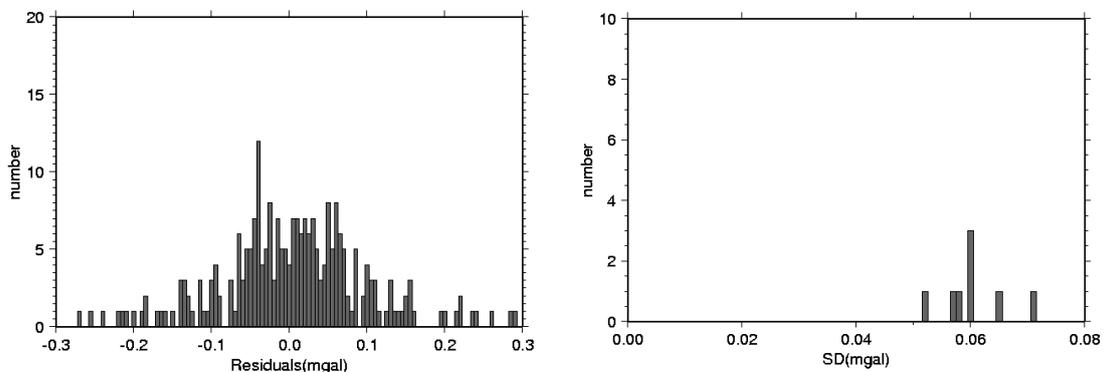


圖 5-9：本文第二次(2005 年 4 月)相對重力網形殘差(左)與標準偏差(右)分布情形

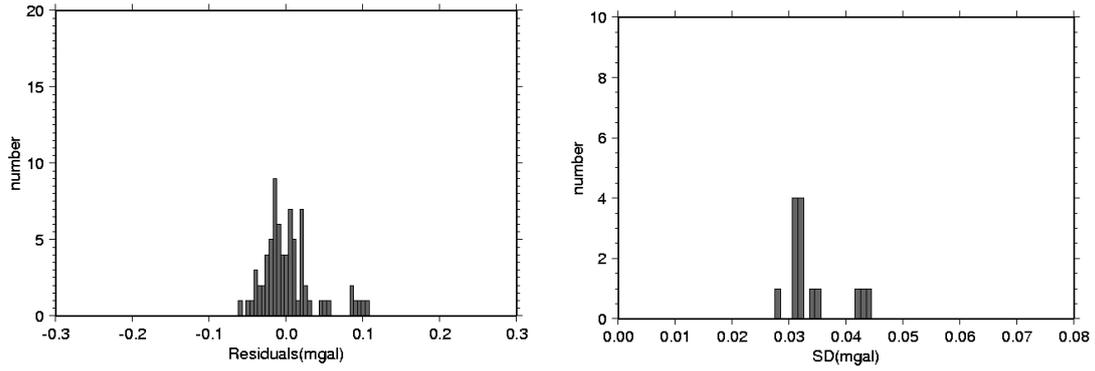


圖 5-10：本文第三次(2005 年 12 月)相對重力網形殘差(左)與標準偏差(右)分布情形

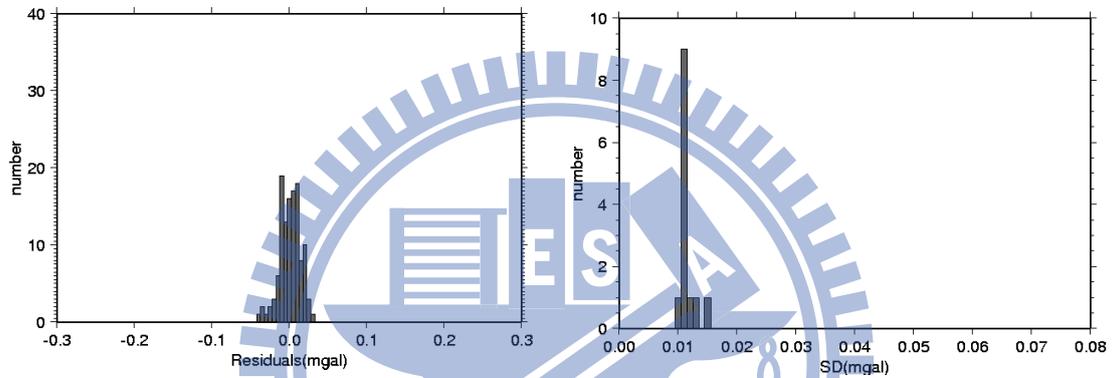


圖 5-11：本文第四次(2006 年 7 月)相對重力網形殘差(左)與標準偏差(右)分布情形

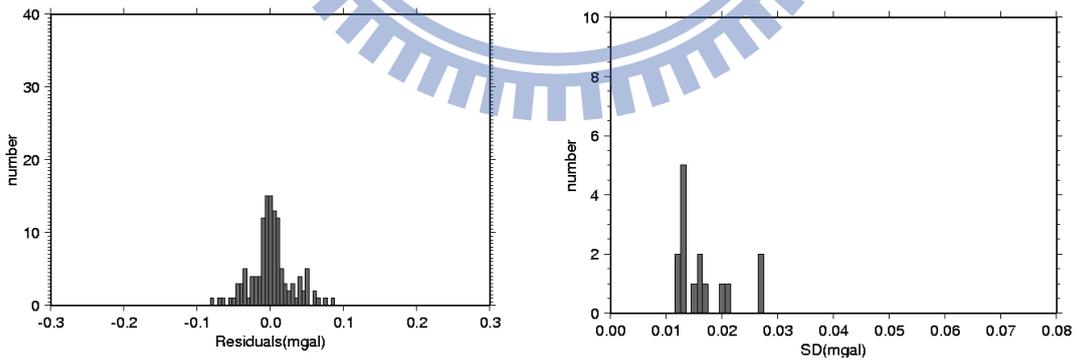


圖 5-12：本文第五次(2006 年 11 月)相對重力網形殘差(左)與標準偏差(右)分布情形

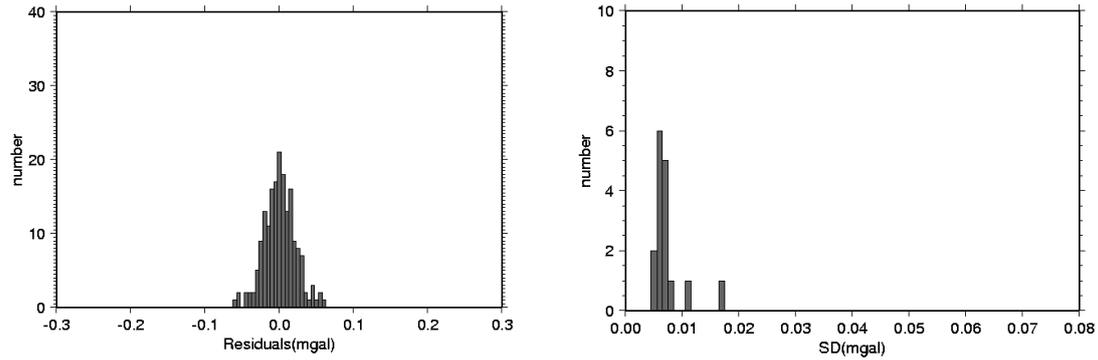


圖 5-13：本文第六次(2007 年 4 月)相對重力網形殘差(左)與標準偏差(右)分布情形

經檢視各次重力值的標準偏差值後發現，前三次時段(2004 年 12 月、2005 年 4 月與 2005 年 12 月)重力值的標準偏差介於 31.2~70.7 μ gal，後三次時段(2006 年 7 月、2006 年 11 月與 2007 年 4 月)重力值的標準偏差則介於 5.4~21.3 μ gal，並綜整出各次相對重力觀測點的標準偏差，詳見表 5-2。

表 5-2：本文各次相對重力網形平差重力值精度表現情形(μ gal)

項次	點位 時間	G041	JYES	G049	DKES	I025	WTES	KTES	TKJS	LNJS
		1	2004/12	56.2	56.0	56.0	61.9	56.3	57.9	N/A
2	2005/04	60.3	64.6	70.7	60.4	59.9	58.4	N/A	N/A	N/A
3	2005/12	31.4	31.7	31.4	34.9	31.2	31.7	31.3	N/A	N/A
4	2006/07	11.7	10.6	10.8	10.9	10.8	11.0	10.6	N/A	N/A
5	2006/11	13.3	13.2	13.2	13.5	11.8	21.3	15.1	15.9	15.9
6	2007/04	5.9	6.1	6.1	6.4	6.9	6.6	5.4	7.0	6.2

相對重力所觀測的各個位置，見圖 5-6，其中 G041、JYES 與 G049 分布於臨海地帶，距海岸僅約 1 公里，DKES 及 I025 則位處雲林縣境正中位置，距海岸約 12 公里，WTES、KTES 及 PKBD 則位於臺灣高速鐵路沿線，距海岸約 16 至 25 公里不等；而 TKJS 及 LNJS 僅觀測兩次，數據明顯不足，在此本文不做討論，各觀測位置相對重力平差計算所得成果及其變化情形，見圖 5-14。

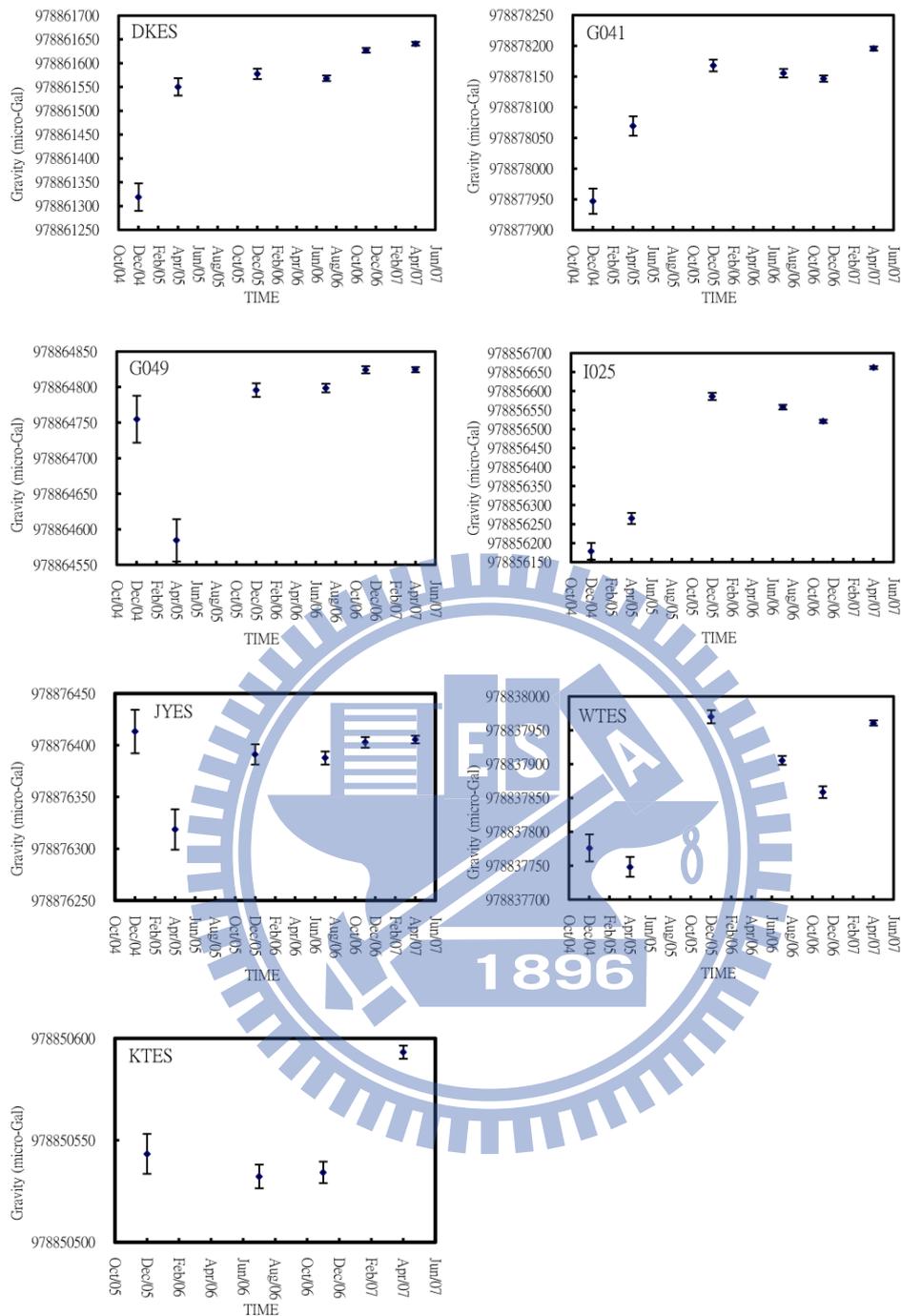


圖 5-14：本文各相對重力觀測位置重力值變化情形

本實驗區域內導致地層下陷的因素，主要是超抽地下水，因為地下水使用量大，引發非拘限含水層地下水水位面下降及拘限含水層的勢能面下降，含水層中的水壓力降低，進而導致上方地層的重量原本部分是由水壓力承受的，卻轉而由地層結構承受，當承受這些額外的壓力時，即導致了土壤的壓縮，因此造成了地表

的沉陷(經濟部, 2004)。由於影響小區域重力變化量的原因, 主要以當地降雨量、氣壓、地下水、地震等無法具體模式化的環境效應為主, 本實驗區以布格平板概念計算地下水位變化所產生的重力變化影響量, 初步分析其重力影響量, 所使用計算之公式(Torge, 1989)如下:

$$\Delta g_{GW} = 2\pi G \rho_w P \Delta H_{GW} \quad (5-5)$$

其中

Δg_{GW} 地下水所產生的重力變化量(μgal)

G 萬有引力常數($6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$)

ρ_w 水的密度 (1000 kg m^{-3})

P 地層土壤孔隙率(%)

ΔH_{GW} 地下水位變化量(m)

本章實驗區位處濁水河流域, 地質層主要為沖積層(經濟部地質調查所地質資料整合查詢網), 見圖 5-15, 地質沉積成分多半是以土壤、細砂及礫石等為主, 其物質的孔隙率分布介於 30~60 % 不等(經濟部水利署地下水觀測網), 見表 5-3, 本實驗即假設該區域平均孔隙率為 35 %, 以 $P=35$ 代入公式(5-5)計算。



圖 5-15: 本文濁水河流域地質分布略圖(紅點表示重力觀測位置)(經濟部地質調查所地質資料整合查詢網)

表 5-3: 地表沉積層各種物質孔隙率分布略表(經濟部水利署地下水觀測網)

沉積層物質	孔隙率%
土壤(soils)	56~60
黏土(clay)	45~55
淤沙(silt)	40~50
中砂至粗砂(medium to coarse mixed sand)	35~40
均勻細砂(uniform sand)	30~40
細砂至中砂(fine to medium mixed sand)	30~35
卵石(gravel)	30~40
卵石及砂(gravel and sand)	20~35
砂石(sandstone)	10~20
岩板(shale)	1~10
石灰石(limestone)	1~10

表 5-4 為各重力觀測位置或其附近地下水監測井於觀測時間起迄的水位變化率，由於地下水層位於地層下深度約數十至百餘公尺不等，且因各式地質條件造成許多的不連續面，分布情形相當複雜，本論文僅就以觀測位置附近的水位變化，藉由布格平板(5-1)的觀念以公式(5-5)來計算地下水位變化對重力值的影響量。

表 5-4：本文各重力觀測位置地下水位變化率及其改正後重力變化率

點名	地下水位變化率 (m/year)	地下水位改正後 重力變化率 ($\mu\text{gal}/\text{year}$)
TAES	-0.168	22.72
PKBD	1.080	11.99
G041	0.187	20.68
JYES	0.187	10.82
G049	0.107	21.63
DKES	-0.223	47.45
I025	-0.168	56.75
WTES	0.394	21.00
KTES	-0.223	32.25

由於台灣高鐵(Taiwan High Speed Rail)於 2007 年 3 月起正式全線通車營運，該路線通過雲林縣境內(圖 5-1 中紅色實線)，為考量地層下陷將造成高鐵路線墩柱沉陷問題，政府已針對該地區公有合法地下水井封移，並擬定封填或停用計畫，2005 年奉行政院核定後已於 2005 至 2008 年間實施，以暫解高鐵通過雲林地區地層下陷的潛在問題(經濟部水利署新聞稿，2006/02/16)。檢視實驗區內各重力觀測位置，可由第一次至第二次觀測數據中明顯看出重力變化程度均較之後各次顯著，並且自 2006 年以後的重力變化已明顯趨緩，研判該地區地下水停止超抽或地下水位變化趨緩，已明顯反應在重力觀測數據上。

監測地層下陷最為有效及可靠的作業方式即是水準測量，雲林地區水準測量共計有六個環線，見圖 5-16，由經過檢測無沉陷並呈穩定狀態之”水資檢 12”水準點做為雲林縣全境水準環線一至六的測量基樁，全境水準路線總長約 375 公里，

各環線的閉合差觀測精度皆在允許誤差 $\pm 5 \text{ mm} \sqrt{K}$ 內(經濟部，2004)。收集各水準環線中觀測所得的 2004 至 2008 年正高值，將內政部 G041 水準點(G041)、建陽國小 BM(JYES)、內政部 G049 水準點(G049)、東光國小 BM(DKES)、內政部 I025 水準點(I025)、吳厝國小 BM(WTES)、WRA01(KTES)及北辰國小 BM(PKBD)等正高值做為與重力變化比較之參考數據。惟同安國小(TAES)絕對重力觀測位置無直接水準測量所得之正高數據，經由比較鄰近西側安南國小 BM 與北側”水資雲 14”水準點歷次正高變化情形，發現此兩處正高變化率完全一致，即以安南國小 BM 正高變化率做為同安國小(TAES)之正高變化數據，各重力觀測位置重力與正高變化比較，見圖 5-17。

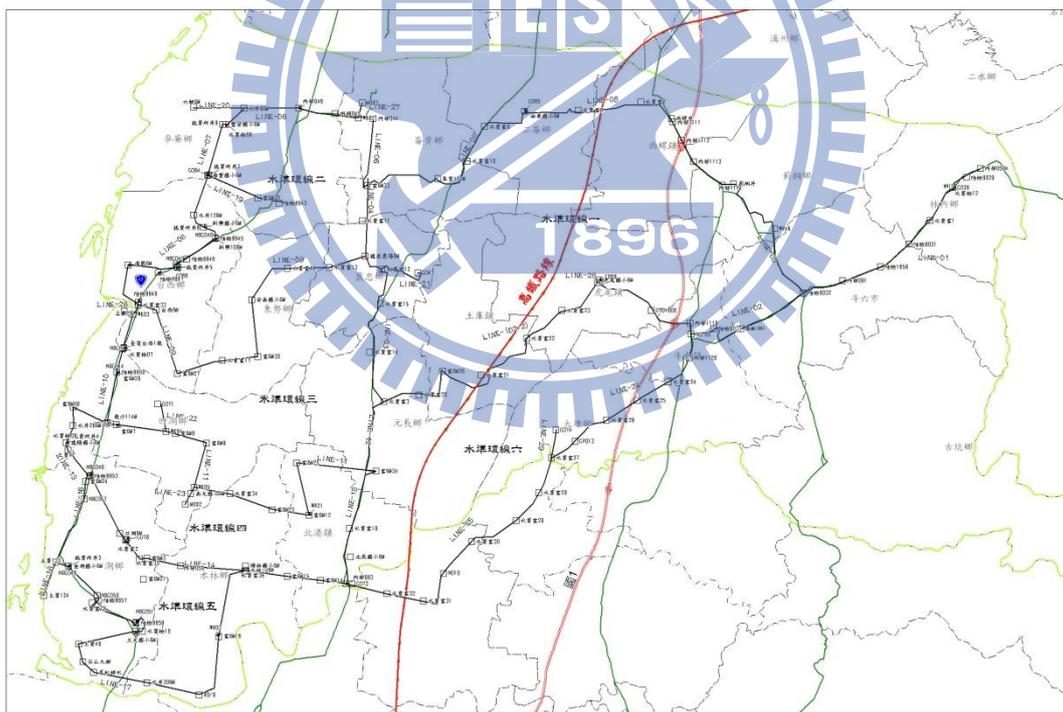


圖 5-16：雲林地區水準測量環線分布圖(經濟部，2004)

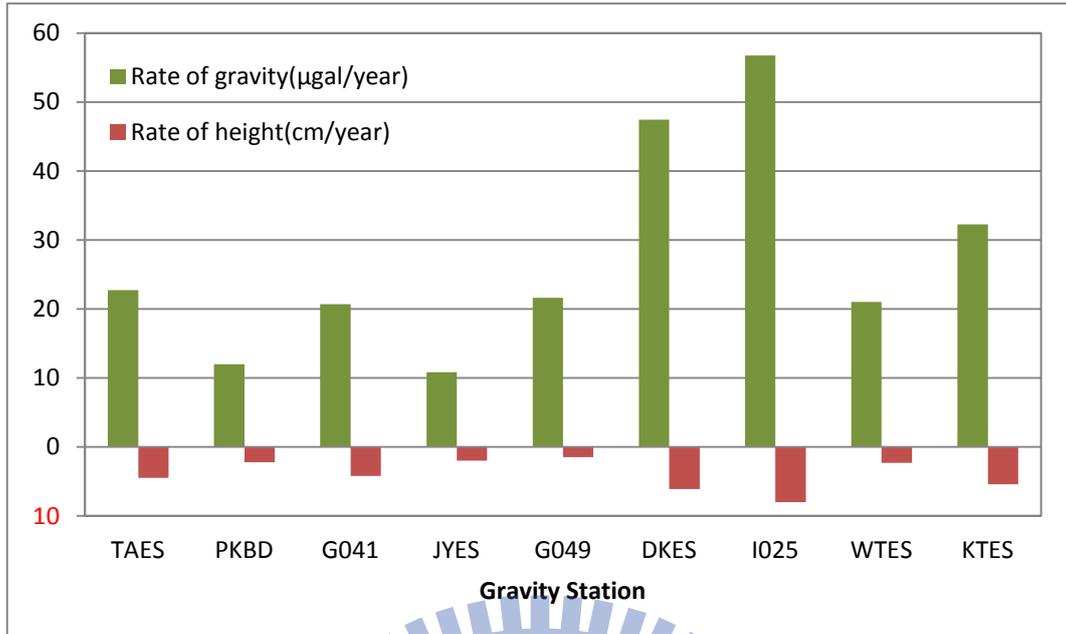


圖 5-17：本文雲林地層下陷區各重力觀測位置重力與正高變化比較

由圖 5-17 可明顯看出重力與正高變化的負相關性，根據正高的變化趨勢則可明顯判定該區域確定有地層下陷的情況發生，重力變化的部分，在經過初步的改正之後，各觀測位置所呈現的重力變化情形趨勢約略相似。而以重力精度來看，由於相對重力觀測所計算得出重力值，其精度最高僅達 5.4 µgal，並無法達到 1.9µgal 的解析度，但是對於以 CG-5 型相對重力儀所觀測得到的重力值精度來看，已經是非常理想的表現；FG5 絕對重力儀於同安國小(TAES)及北港衛星追蹤站(PKBD)所觀測的各次重力值精度均已可達 µgal 以下，可合理地偵測出本文中所提及的高程與重力變化轉換 -1.9 µgal/cm 的量級，在此僅建議以絕對重力測量方式來進行地層下陷監測。

最後就以絕對重力觀測成果來探討該地區重力變化與高程變化之間的相關性。假設重力變化 Δg 與高程變化 ΔH 為一個線性相關的方程式，如下式：

$$\Delta g = C\Delta H \quad (5-7)$$

上式(5-7)中的 C 為重力變化轉換至正高變化的常數。由於以重力變化檢視地層下陷的實驗結果與預期差距甚大，在此的轉換常數 C 不符合前述的 -1.9 µgal/cm，

而於 TAES 及 PKBD 實際測量所得到的重力梯度值為 -2.868 及 $-2.720 \mu\text{gal}/\text{cm}$ (觀測做法請見第 2-1 節)，亦非 $-3.086 \mu\text{gal}/\text{cm}$ ，因此分別將 TAES 及 PKBD 兩處以 FG5 觀測的重力變化率 22.72 及 $11.99 \mu\text{gal}/\text{year}$ 與 TAES 及 PKBD 高程變化率 -4.5 及 $-2.2 \text{ cm}/\text{year}$ 代入(5-7)式中，可得 TAES 及 PKBD 兩處重力變化轉換正高變化的常數 C 分別為 -5.04 及 $-5.45 \mu\text{gal}/\text{cm}$ ，本文以經驗法則將兩處之常數 C 作平均，得到 $-5.25 \mu\text{gal}/\text{cm}$ ，即以此視為雲林地層下陷區的重力變化轉換正高變化的常數值，另外將各觀測位置以重力及水準方法推得之地層變化率，見表 5-5，其中位於各地的重力變化表現各異而趨勢相同，因此在與水準測量的變化情形做比較時，量級表現上則無法與之完全近似。

表 5-5：本文以重力方法及水準測量推得之地層變化率

點名	重力方法 (cm/year)	水準測量 (cm/year)
TAES	-4.3	-4.5
PKBD	-2.3	-2.2
G041	-3.9	-4.2
JYES	-2.1	-2.0
G049	-4.1	-1.5
DKES	-9.0	-6.1
I025	-10.8	-8.0
WTES	-4.0	-2.3
KTES	-5.3	-5.4

5-6 本章小結

本章實驗的設計是藉以重力測量方法的經濟性與便利性來監測地層下陷，進而取代曠日廢時及高成本的 GPS 及水準測量。重力測量應用於地層下陷監測，主要是觀測該區域的物理性質，絕對重力測量在觀測精度可達到 1 個 μgal 甚至以下的精度等級，已可滿足布格平板效應的重力梯度變化量級。

由於雲林地層下陷導因於超抽地下水，該地區地下水層位於地層下深度

約數十至百餘公尺不等之各含水層，其中並交疊穿插著阻水層，各式地質條件造成許多不連續面，分布情形相當複雜，見圖 5-18(經濟部，2004)，含水層又可分為自由含水層(非拘限含水層，unconfined aquifer)與受壓含水層(拘限含水層，confined aquifer)，此兩種類型含水層對地下水位變化的機制也不相同，自由含水層的水位變化為實際地下水面的升降，而受壓含水層的水位變化為其水頭的升降並非地下水質量增減(何哲豪，2004)，因此僅自由含水層部分符合本節公式(5-5)所計算之重力變化值，本章實驗區內各重力觀測位置含水層性質皆不相同，導致地下水位變化情形與重力變化無明確相關性，見表 5-5。若再深入研究地下水對重力值的影響量時，建議詳細調查觀測位置的含水層種類，並以一套嚴密的模式計算地下水位變化對重力值的影響量。

本實驗試以高程變化率與重力變化率，推導出該區域的重力高程轉換常數為 $-5.25 \mu\text{gal}/\text{cm}$ ，此數值與我們所熟悉的 $-1.96 \mu\text{gal}/\text{cm}$ 有所不同，主要在於地質與地層等環境條件因地而異，沖積層的土壤密度及地下水變化等相關條件，在後續研究中必須審慎考量。經本實驗研究後發現，若以重力方法監測地層下陷，仍有許多條件必須加強及改進，而重力變化的表現在地層下陷方面仍佔有極重要的物理意義。

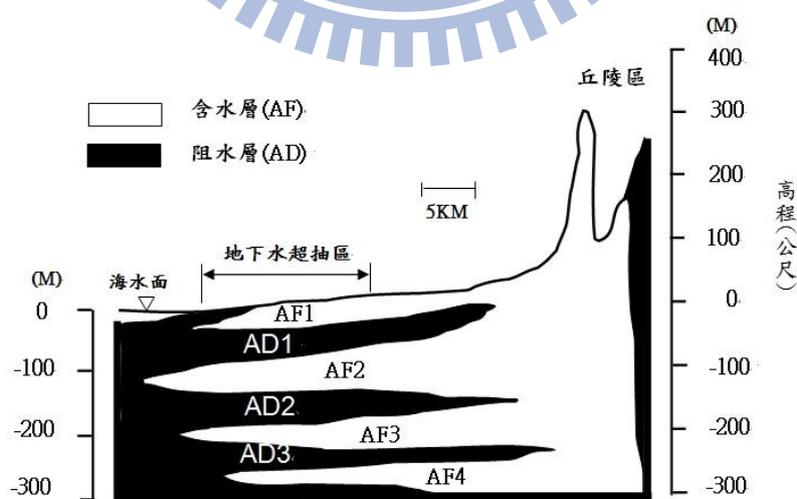


圖 5-18：濁水溪沖積扇之水文地質概念分層圖(經濟部，2004)

六、結論與建議

經由比較 g7、SPOTL 與 SGOTL 三種海潮負載效應模式後，分別是以 g7 搭配 FES2004 海潮模型、SPOTL 搭配 NAO99jb 區域海潮模型及 SGOTL 採用的 OTL10 區域海潮模型，使此三種模式計算海潮負載效應可各自達到最佳化的效果；而以此三種計算結果加入絕對重力觀測量中進行改正後，SGOTL 的結果可使絕對重力值的精度達到最佳化。

在全臺相對重力網形的觀測量加入海潮負載改正後，平差計算所得到的重力值精度與原先未做海潮負載改正的部分來比較，2003 年的變化表現與 2007 年的不盡相同，研判 2003 年與 2007 年兩次相對重力觀測使用儀器不相同所致；儘管兩次相對重力網形在海潮負載改正後的精度變化有所提升或降低，或因地區不同而變化各異，而加入海潮負載改正後的平差重力值才是最接近理論值的重力成果。

根據重力時變現象與高程變化負相關的條件檢視臺灣地區的地表變動情形，西部地區雲林部分鄉鎮的地層下陷現象，可由該區域重力與正高變化獲得初步驗證，而中央山脈持續進行的造山運動，而也能獲得明顯的驗證，建議可利用 FG5 絕對重力儀於該區域進行長時間觀測，預期經由高精度的觀測資料，期使得到更為客觀與準確的重力變化量。

由於台灣地形及地質分區複雜，因此造成重力觀測量的標準偏差因地而異，建議可將重力觀測位置依照地形及地質條件做分類，先檢視所有觀測量的標準偏差，因為這項資訊除了是觀測量品質的良莠之外，也可能是環境噪聲影響的訊息，再將各觀測位置做分類，可以地理條件或地質條件做分類，最後以人口、工商業交通活動地帶做條件區分，採取分區分類平差計算，並由各分類地區觀測一絕對重力點做為平差約制點，藉此可減少誤差傳播的影響。另一種增加相對重力成果精度的做法，即是增加觀測量，可由原先單純以階梯式再混合星狀式進行，可由觀測網形中的已知點位或重力觀測量標準偏差最小的點位，做為星狀式觀測進行

的出發點，更可另外再進行重複觀測，此做法除可增加多餘觀測量外，更可重複檢核重力觀測量的閉合差，並達到提升觀測品質的效果，以使相對重力儀的觀測成果精度可達到 μgal 等級。

本文試以高程變化率與重力變化率，於蘭陽、雲嘉平原、中北部山脈、中央山脈北部及雲林地區推求出重力高程轉換常數分別為 -17.8 、 -8.0 、 -36.5 、 -70.0 及 $-6.1 \mu\text{gal}/\text{cm}$ ，高程與重力的負相關性趨勢正確，而轉換常數的比例過大與理論值的 $-1.96 \mu\text{gal}/\text{cm}$ 有所不同，主要在於地質與地層等環境條件因地而異，本文另以絕對重力於雲林觀測並推求出重力高程轉換常數為 $-5.25 \mu\text{gal}/\text{cm}$ ，藉由重力測量方法來監測地層下陷，以物理大地測量輔助 GPS 及水準測量，以此重力方法來檢視地層下陷的做法，除了須有高精度的重力觀測量外，地層下陷區的地下水及複雜地層條件，是重力觀測中環境影響量的關鍵因素，若再深入研究地下水對重力值的影響量時，建議詳細調查觀測位置的含水層種類，並以一套嚴密的模式計算地下水位變化對重力值的影響量。若於後續研究可再引用地層下陷監測井資料，將地層下陷所造成的地質層壓縮量加入考量，則可進一步地合理解釋重力變化。儘管重力變化值並無法完全有效地解釋出環境中的各式影響量，而重力變化的表現在地層下陷方面仍佔有極重要的物理意義。

參考文獻

- 內政部，2003，九十一年度一等水準點上實施重力測量工作報告書。
- 內政部，2005，臺灣本島絕對重力測量總報告書。
- 內政部土地測量局，2007，九十六年度一等水準點上重力測量檢測工作報告書。
- 內政部，2008，國土測繪法規。
- 內政部，2008，97年度重力基準維護及測量整合服務工作期末報告。
- 內政部，2009，98年度重力基準維護及測量整合服務工作總報告。
- 何春蓀，1975，臺灣地質概論，經濟部中央地質調查所。
- 何春蓀，1982，臺灣地體構造的演變，經濟部中央地質調查所。
- 何哲豪，2004，由地下水位隨氣壓變化估算儲水係數之可行性研究，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文。
- 李莉華，2001，重力及GPS基線網之自由基準及加權約制平差，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 李傳煒，2008，濁水溪沖積扇地區地下水之探討與預測研究，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
- 洪偉嘉，2009，應用多重感應器監測雲林地區三維變形，國立交通大學土木工程學系博士論文。
- 陳南松，2003，地球固體潮與海潮負載對臺灣地區衛星追蹤站坐標與重力之影響，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 陳鶴欽、饒瑞鈞、黃偉城、曾耀賢，2008，運用GPS 衛星定位監測彰化沿海地區地層下陷之研究，地籍測量，第廿七卷第3期，第46-60頁。
- 張瑞剛、周皓雲、阮德昌、管麗琴，1997，臺灣地區絕對重力測量值測定之研究，第十六屆測量學術及應用研討會，第27-37頁。
- 黃有志，2003，蘭陽平原場址效應及淺層S波速度構造，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。

黃鉅富，2012，高解析且高程相依之海潮負載效應於近岸超導重力站及衛星追蹤站之研究：重力與位移變量之模式、驗證及改正，國立交通大學土木工程學系博士論文。

經濟部水利署，2004，臺灣地區地層下陷之監測、調查及分析(4/4)。

經濟部水利署，2012，101年度多元化監測及整合技術應用於宜蘭、苗栗、臺中、嘉義及屏東地區地層下陷監測期末報告。

經濟部地質調查所地質資料整合查詢網，<http://gis.moeacgs.gov.tw>

經濟部水利署地下水觀測網，<http://pc183.hy.ntu.edu.tw/index.php>

魯林成、於宗壽，1982，測量平差基礎，測繪出版社，第二版。

聯合勤務總司令部，1983，重力測量操作手冊。

魏祥鴻，2005，增益相對重力測量精度之研究，國立交通大學土木工程學系碩士論文。

Agnew D C., Conservation of mass in tidal loading computations. Geophys. J. R. astr. Soc., 1983, 72: 321-325.

Agnew, D.C., 1997. NLOADF: A program for computing ocean-tide loading, J. Geophys. Res., 102, 5109-5110.

Agnew, D.C., 2013. SPOTL: Some programs for ocean-tide loading, SIO Ref. Ser., 96-8, 35, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA.

Caspary, W. F., 1988, Concepts of Network and Deformation Analysis, monograph 11, school of surveying, University of New South Walse, Australia.

Chen, K. H., Yang, M., Huang, Y. T., Ching, K.-E., Rau, R. J., Vertical Displacement Rate Field of Taiwan From Geodetic Levelling Data 2000-2008, 2011, Survey Review, 43, 321, 296-302.

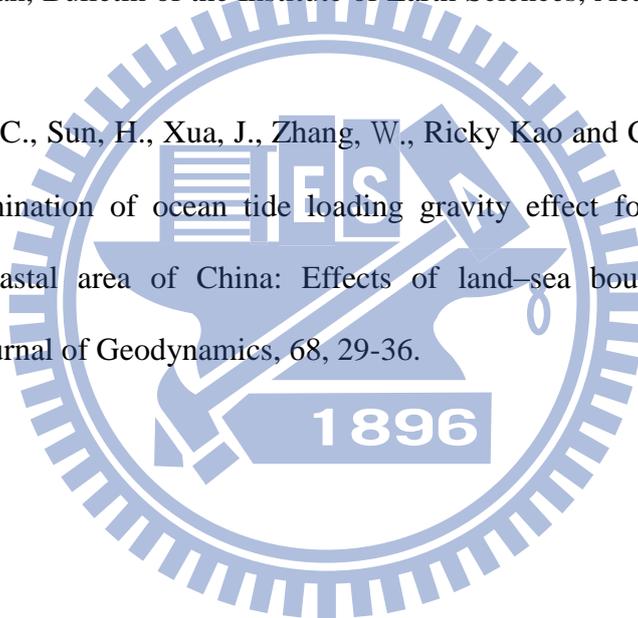
Ching, K. E., Hsieh, M. L., Johnson, Kaj M., Chen, K.-H., Rau, R. J. and Yang, M., 2011, Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008. Journal of

- Geophysical Research, 116.
- Farrell, W.E., 1972. Deformation of the earth by surface loads, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 10, 761-797.
- Foreman, M.G.G., Henry, R.F., Walters, R.A., Ballantyne, V. A., 1993. A finite element model for tides and resonance along the north coast of British Columbia, *J. Geophys. Res.*, 98, 2509-2531.
- FG5 Absolute Gravimeter User's Manual, December 2006.
<http://www.microglacoste.com/>
- Goad, C. C., 1980, Gravimetric tidal loading computed from integrated Green's functions, *Journal of Geophysical Research*, 85, 2679-2683.
- g7 User's Manual, March 2006. <http://www.microglacoste.com/>
- Heiskanen, W. A., H. Moritz, *Physical Geodesy*, Institute of Physical Geodesy Technical University, Graz, Austria, 1993.
- Hwang, C., Wang, C. G., Lee, L. H., 2002. Adjustment of relative gravity measurements using weighted and datum-free constraints, *Computers & Geosciences*, 28, 1005-1015.
- Hwang, C., Lee, L. H., Yu, S. B. and Chen, H. Y., 2004, Single and multi-epoch analyses of GPS baseline network: Application to coordinate and velocity determinations in central Taiwan, *Journal of Surveying Engineering*, 130, 2, 86-94.
- Hwang, C., Cheng, T. C., Cheng, C. C. and Hung, W. C., 2010, Land Subsidence using absolute and relative gravimetry: A case study in central Taiwan. *Survey Review*, 42, 315, 27-39.
- Hung, W. C., Hwang, C., Chen, Y. A., Chang, C. P., Yen, J. Y., Hooper, Andrew and Yang, C. Y., 2011, Surface deformation from persistent scatters SAR interferometry and fusion with leveling data: A case study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan. *Remote Sensing of Environment*, 115, 957-967.

- Hwang, C., Huang, J. F., 2012, SGOTL: A Computer Program for Modeling High-Resolution, Height-Dependent Gravity Effect of Ocean Tide Loading. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 23, 219-229, doi: 10.3319/TAO.2011.10.06.02(Oc)
- Jacob, T., R. Bayer, J. Chery, and N. Le Moigne (2010), Time - lapse microgravity surveys reveal water storage heterogeneity of a karst aquifer, *J. Geophys. Res.*, 115, B06402, doi:10.1029/2009JB006616.
- Koch, K. R., 1987, *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*, Spring, New York.
- Kao, R. C., 2011. Superconducting and absolute gravity observations in Taiwan: applications to gravity datum, geodynamics and environmental change, Thesis of Department of Civil Engineering, NCTU, Taiwan.
- Lacoste & Romberg Instruction Manual for Model G & D Gravity Meters, 1997.
<http://www.microglacoste.com/>
- Lacoste & Romberg Graviton-EG User's Manual, 2002.
<http://www.microglacoste.com/>
- Letellier, T., Lyard, F., 2004. The new global tidal solution: FES2004, at: http://www.joss.ucar.edu/joss_psg/meetings/archived/TOPEX2004/abstracts/D/Letellier.htm.
- Lyard, F., Lefèvre, F., Letellier, T., Francis, O., 2006. Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004, *Ocean Dyn.*, 56, 394-415.
- Melchior P, Moens M, Ducarme B. computation of tidal gravity loading and attraction effects. *Obs. R. Belgique, Bull. Obser. Mares Terrestres*, 1980, 4(5):95-133.
- Melchior, P., 1983. *The Tides of the Planet Earth*, 2nd ed., Pergamon Press Ltd, Oxford.
- Moritz, H., Mueller, I.I., 1987. *Earth Rotation: Theory and Observation*, Unger Publ. Co., New York.

- Matsumoto, K., Takanezawa, T., Ooe, M., 2000. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, *J. Oceanogr.*, 56, 567-581.
- Matsumoto, K., Sato, T., Takanezawa, T., Ooe, M., 2005. GOTIC2: A Program for computation of oceanic tidal loading effect, *J. Geod. Soc. Jpn.*, 47, 243-248.
- M. Mouyen, F. Masson, C. Hwang, C. C. Cheng, N. Le Moigne, C. W. Lee, R. Kao and W. C. Hsieh, 2013. Erosion effects assessed by repeated gravity measurements in southern Taiwan, *Geophys. J. Int.*, 192, 113–136.
- Seno, T., 1977, The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea plate relative to the Euroasian plate. *Tectonophysics*, 42, 209-226.
- Scintrex CG-5 Autograv System Operation Manual, 2002.
<http://www.microglacoste.com/>
- Sun, W., Q. Wang, H. Li, Y. Wang, S. Okubo, D. Shao, D. Liu, and G. Fu (2009), Gravity and GPS measurements reveal mass loss beneath the Tibetan Plateau: Geodetic evidence of increasing crustal thickness, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02303, doi:10.1029/2008GL036512.
- Torge, W., 1989. *Gravimetry*. De Gruyter, Berlin.
- Takanezawa, T., K. Matsumoto, M. Ooe, I. Naito, 2001. Effects of the Long-period Ocean Tide on Earth Rotation, Gravity and Crustal Deformation Predicted by Global Barotropic Model -periods from Mtm to Sa-, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 545-550.
- Vanicek, P., E. J. Krakiwsky, *Geodesy: The Concepts*, Elsevier Sci. publ. Com., Amsterdam, 1986.
- Wang, H. L., Zhu, L., Chen, H. W., 2010, Moho depth variation in Taiwan from teleseismic receiver functions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37, 286–291.
- Yu, S.B. and Lee, C., 1986, Geodetic measurement of horizontal crustal deformation

- in eastern Taiwan. *Tectonophysics*, 125, 73-85.
- Yang, Z., Manabe, S., Yokoyama, K., Yike, T., Heki, K., 1996. Comprehensive ocean loading parameters of sites in East Asia with spherical harmonic method, in *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, International Association of Geodesy Symposia, Tokyo, 117, 9343-350.
- Yang, M., Chen, K. H., Shiao, S. W., 2003. A new height reference network in Taiwan, *Survey Review*, 37, 290, 260-268.
- Yeh, Y.H., Tsai, Y. B. and Wang, M.C., 1982. A Study of Tidal Variation of Gravity in Northern Taiwan, *Bulletin of the Institute of Earth Sciences, Academia Sinica*, Vol. 2, pp.75-90.
- Zhou, J., Hwang, C., Sun, H., Xua, J., Zhang, W., Ricky Kao and Cheng, T. C., 2013, Precise determination of ocean tide loading gravity effect for absolute gravity stations in coastal area of China: Effects of land–sea boundary and station coordinate, *Journal of Geodynamics*, 68, 29-36.



附錄 A FG5 絕對重力儀操作說明

FG5 絕對重力儀組成的主要部件包含：落體容器(Dropping Chamber)、雷射干涉儀(LASER Interferometer)、超彈簧(Superspring)、電子控制箱(Electronics)設備等，必須正確地組裝才能使儀器正常運作，見圖 A-1。作者依個人操作觀測 FG5 絕對重力儀(S/N 224)的實務經驗，概述該重力儀的架設、操作及拆卸等做法與說明，而架設儀器前，務必請詳閱 FG5 絕對重力儀操作手冊(Micro-g Solution, Operator's Manual of FG5 Absolute Gravimeter)來設定與安裝儀器，而該儀器的硬體與相關理論部分，請自行參閱相關文件及操作說明書，以下僅列出儀器各部件的設置步驟與注意事項。



圖 A-1：FG5 絕對重力儀的架設

A-1 儀器架設前置作業部分

- (1) 將儀器載運抵達觀測位置後，首先將電子控制箱(Electronics)置於離施測位置約 1 公尺附近之位置，見圖 A-1。
- (2) 將所有 FG5 絕對重力儀所使用的電源均接上不斷電系統並完成電源接地，以避免臨時斷電及靜電對儀器觀測所造成的干擾。
- (3) 將雷射干涉儀(LASER Interferometer)連接電子控制箱後啟動後方 AC 及 DC 電源，並啟動前方雷射主電源及 HV 電源(鑰匙轉至垂直)，此步驟是先讓雷射暖機，宜暖機兩個小時以上或是讓雷射達到穩定的工作溫度，見圖 A-2。
- (4) 由於落體容器(Dropping Chamber)所連接的離子泵電源供應器(Ion Pump Power Supply)是以其內部電池電力來維持落體容器的真空度，維持時間僅 2~3 小時，若是電力流失則將導致落體容器的真空度不足，以致無法正常觀測絕對重力，因此於搬運期間應將離子泵電源供應器再連接其他電源，如貨車載運時使用車上電源，當抵達觀測地點後，應隨即接上交流電源以避免落體容器的真空度流失，見圖 A-3。



圖 A-2：雷射暖機作業中



圖 A-3：離子泵電源供應器連接電源

A-2 超彈簧及雷射干涉儀架設部分

- (1) 將超彈簧底座(Superspring Tripod)置於待測點位上方定平，底座中心的圓孔對準待測點位的中心位置，並將底座上圓水準氣泡面對南方以減少科氏力效應

對落體的影響。

- (2) 量取下部參考高度(Lower reference height)，見圖 A-4，並記錄於觀測手簿後，再將超彈簧 (Superspring)置於超彈簧底座上，固定並取下上方保護蓋。
- (3) 將雷射干涉儀置於超彈簧上，固定並取下上方保護蓋，見圖 A-5。



圖 A-4：量取下部參考高度



圖 A-5：將雷射干涉儀置於超彈簧上

A-3 落體容器架設部分

- (1) 將完成組裝的落體容器三腳架(Dropping Chamber Tripod)，見圖 A-6，置於雷射干涉儀正上方，以落體容器三腳架底座盤面下方三個凸腳對準雷射干涉儀正上方三個支撐凹點位置。
- (2) 再將落體容器(Dropping Chamber)置於落體容器三腳架上，將三座圓錐旋腳底座放在落體容器三腳架底部，並將藍色膠墊置於圓錐底座旋腳底下，腳架底部的白色尼龍圓球對準圓錐旋腳底座上方正中心，順時針旋轉圓錐旋腳底座，直到與圓柱腳架底部之白色尼龍圓球接觸即可，見圖 A-7。
- (3) 依照標籤或顏色指示完成連接各式電纜線與訊號線。
- (4) 連接電腦及其所有電纜線與訊號線。
- (5) 以逆時針旋轉落體容器腳架底部三個圓錐旋腳底座進行落體容器抬升及定平，可利用圓錐旋腳底座上之白色箭頭做參考，依序每次增加半圈，待總計逆時

針旋轉三圈後，使落體容器底座與雷射干涉儀頂部產生分離並不相接觸，(以一張紙可以平順穿過為原則)，見圖 A-8，之後即定平落體容器上方的長水準氣泡。

(6) 量取上部參考高度(Upper reference height)，見圖 A-9，並記錄於觀測手簿後。



圖 A-6：落體容器三腳架



圖 A-7：圓錐旋腳底座

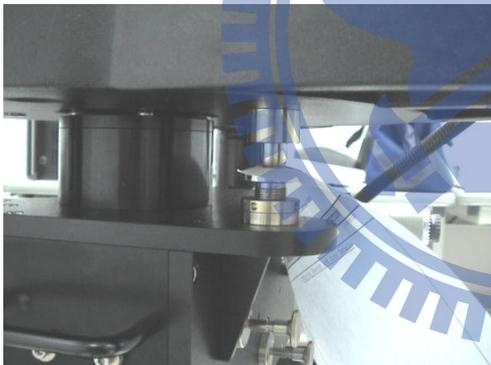


圖 A-8：落體容器與雷射干涉儀分離

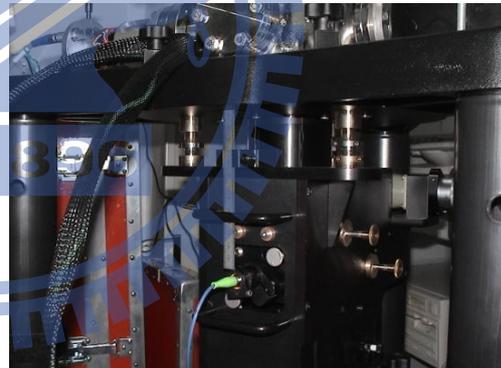


圖 A-9：量取上部參考高度

A-4 雷射光束調整部分

- (1) 將雷射干涉儀之側滑門鬆開並打開，放入盛有酒精之容器直推至頂住為止，此舉確保雷射光束可達酒精容器池中心位置。
- (2) 將望遠鏡鏡蓋取下並將白色卡或白色拭鏡紙置於望遠鏡物鏡前來調整十字絲焦距。
- (3) 將干涉儀的兩個光束阻擋閥銅頭拉出，由望遠鏡中所見兩個光束點的重合情

- 形來交互調整測試光束(Test Beam)與參考光束(Reference Beam)，見圖 A-10。
- (4) 以光纖接頭處的兩個(斜對角)螺旋來調整兩個光束至重合，見圖 A-11。
 - (5) 利用望遠鏡物鏡前的鏡子，見圖 A-12，調整參考光束及測試光束於望遠鏡十字絲的中央，方便操作者調整光路。此調整並不會直接影響干涉儀的調整。
 - (6) 以兩個光束阻擋閥來查驗兩個光點是否重疊一致，此時兩光束即已經平行。
 - (7) 將 ANALOG output 訊號線連結至示波器，見圖 A-13，並將示波器調整為 Scale = 50 mV/div，Sweep = 2 μ sec/div，AC coupled input。
 - (8) 以六角扳手配合提起上方銅頭旋轉 90 度，將鎖定的落體容器滑車解鎖，見圖 A-14。
 - (9) 確認此時雷射頻率已經鎖定至 E 頻，並設定電子控制箱轉至 OSC 模式，此時落體容器滑車會自動地緩慢上下移動，示波器上並會產生干涉條紋，將干涉儀內上方鏡子以左右調整方式直到示波器的干涉訊號最強，見圖 A-15。
 - (10) 正常的雷射干涉條紋訊號強度應為 280-360 mV 之間，干涉訊號調整完成後將示波器上的數值記錄於觀測手簿上。
 - (11) 按下控制面板上的 TRIG 鍵以終止 OSC 模式，此時落車將會回到最低點，並將模式切換到 RESET 至待機觀測狀況。

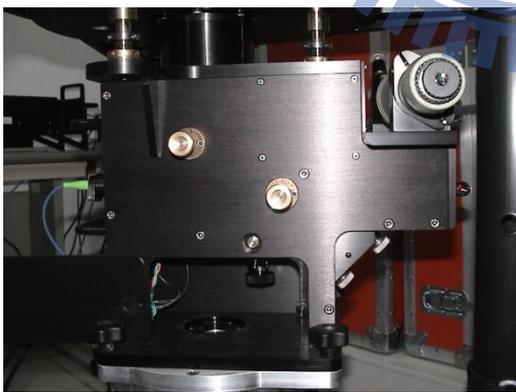


圖 A-10：開啟雷射干涉儀側滑門



圖 A-11：調整兩個光束至重合



圖 A-12：調整光束於望遠鏡十字絲



圖 A-13：連結至示波器

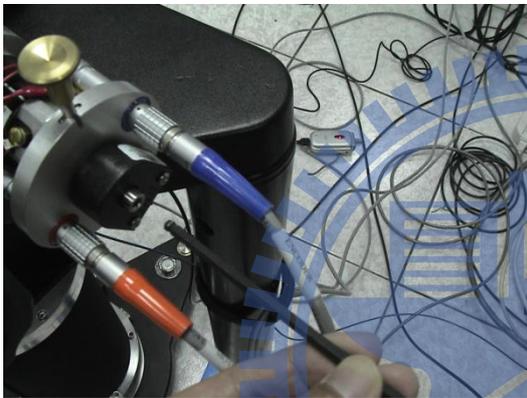


圖 A-14：解鎖落體容器內滑車

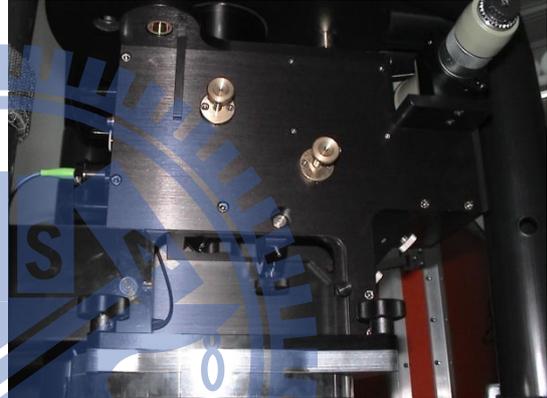


圖 A-15：調整干涉儀內上方鏡子

A-5 超彈簧零點位置設定部分

(1) 定平超彈簧底座之長水準氣泡，完成後將鎖鈕轉朝上(朝上為解除彈簧鎖定並可進行觀測，不可搬運；朝下則為鎖定彈簧無法正常觀測並可進行搬運)，

圖 A-16。

(2) 若以電子控制箱設定超彈簧零點位置，在設定超彈簧之零點位置前，須先讓超彈簧自行靜置至少兩分鐘以上。

(3) 利用電子控制箱面板的 MOTOR 將超彈簧內部支撐結構移動到主彈簧的頂部，零點位置會由超彈簧控制器面板 SPHERE OUT 來顯示於三用電表，可利用手動 MANUAL 調整 UP 或 DOWN，或以自動 AUTO 方式使其達到 $\pm 20\text{mV}$ ，圖

A-17。

- (4) 當超彈簧已達到所需零點位置後(SPHERE OUT 值在 $\pm 20\text{mV}$ 內)，將面板之旋鈕轉至 OFF，使馬達停止運作，將超彈簧零點位置電壓值記錄於觀測手簿上。此時再將超彈簧靜置約兩分鐘以上，然後再將 COIL 設定至 ON，使超彈簧之主線圈迴路正常運作，圖 A-18。
- (5) 檢視並記錄離子泵電源供應器上電壓值於觀測手簿上，圖 A-19。

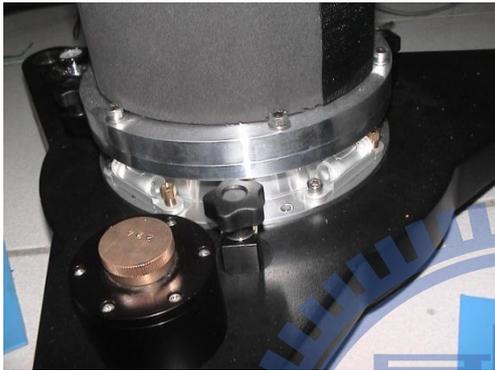


圖 A-16：定平超彈簧底座



圖 A-17：調整超彈簧零點位置



圖 A-18：將 COIL 設定至 ON



圖 A-19：記錄離子泵電壓值

A-6 雷射頻率與強度部分

- (1) 將電子控制箱面板的 METER SELECT 轉至 1F 位置，SERVO CONTROL 轉至 AUTO 位置，並將 SWEEP 分別轉至 D、E、F、G 並記錄其電壓值於觀測手簿上，完成後將 SWEEP 轉至 E 處，見圖 A-20。
- (2) METER SELECT 轉至 DC 位置，記錄其電壓值於觀測手簿上，完成轉回 1F 位置，見圖 A-21。



圖 A-20：記錄雷射各頻率電壓值



圖 A-21：記錄雷射 DC 電壓值

A-7 電腦軟體設定及觀測啟動部分

- (1) 啟動電腦並開啟 g7 程式，建立 New Project 準備進行觀測。
- (2) 點選 Setup 後，於 Information 處輸入站名、經度、緯度及高程等資料。
- (3) Setup Height 處輸入上部及下部參考高度的總和。
- (4) Polar 地球極移 X-Y 分量弧秒值，可於 <http://maia.usno.navy.mil/bulletin-a.html> 或是 <http://www.microglacoste.com> 網頁中查詢後輸入。
- (5) 於 System 處 Laser Setup 輸入 D、E、F、G 記錄電壓值。
- (6) 於 Acquisition 處輸入觀測組數(Set)、每組落下數(Drop)及每組時間(Set Interval) 等參數。
- (7) 於 Control 處 Laser 勾選 Auto Peak Detection-WEO 100 E。
- (8) 完成所有 Setup 後，按 OK。
- (9) 再次檢查雷射光束垂直、平行及強度。
- (10) 點選 GO 後，即開始進行觀測。

A-8 故障排除部分

FG5 絕對重力儀架設完成後，啟動 g7 軟體開始 GO 觀測後，立即或是未於設定觀測時間內完成前異常停止，主要原因有：

- (1) 雷射強度不足造成無法觀測，首先檢視雷射 DC 電壓值，至少大於 5V，達到

7V 以上為最理想；或以示波器檢視雷射干涉條紋訊號強度，至少應大於 250 mV。改善方法為調整干涉儀內上方鏡子直到示波器的干涉訊號最強，或是以內六角起子調整雷射出光口強度，以提升觀測雷射強度。

- (2) 水平狀態產生偏移，例如落體容器水平狀態走位，超彈簧底座水平狀態造成偏差，以上均會造成垂直度不良，導致雷射無法正常工作而停止觀測。解決方法為重新完成定平狀態。
- (3) 落體容器底座與雷射干涉儀頂部抬升分離後，卻產生縱向或橫向位移，如此會使雷射光束平行偏移，造成雷射無法正常工作而停止觀測。解決方法為將落體容器底座完全降下後，再重新進行抬升及定平。
- (4) 環境溫度變化太大或是溫度太高，均會使雷射強度及頻率不穩定，致使無法進行正常觀測。解決方法為加強環境通風以降低環境溫度，或是於室內以空調控制室溫。

以上為 FG5 觀測時所常見的異常停止狀況，在進行調整時，請務必參閱相關操作手冊，或由有經驗的操作人員協助或指導進行。

A-9 儀器拆卸搬運部分

- (1) 於 g7 軟體完成觀測作業後，可先檢視觀測成果資料檔，無誤後即可對 FG5 絕對重力儀進行拆卸裝箱工作。
- (2) 首先將電子控制箱面板的按下 RESET 後，設定落體容器滑車降至最下處，並以六角扳手鎖定落體容器滑車。
- (3) 將電子控制箱面板的 COIL 設定至 OFF，並將超彈簧鎖鈕順時針轉向下以鎖定超彈簧。
- (4) 拆除所有連接之電纜線與訊號線。
- (5) 電腦關機並拆除與電子控制箱及儀器的所有連接。
- (6) 關閉電子控制箱面板前方 HV 電源(鑰匙轉至水平) 及雷射主電源，並將電子控制箱後方 AC 及 DC 電源關閉。

- (7) 將電子控制箱收整裝箱後，再將 FG5 重力儀依序由上而下，拆卸落體容器、落體容器腳架、雷射干涉儀、超彈簧及超彈簧底座。
- (8) 落體容器裝箱時應當將離子泵電源供應器面板的 AC 轉至 ON 後，與落體容器一同收整，暫不封箱。
- (9) 落體容器腳架拆除三隻腳柱後收整裝箱。
- (10) 將雷射干涉儀正上方保護蓋蓋上，自超彈簧上卸下裝箱，並將雷射一同收整裝箱，注意光纖勿造成折損，可將干涉儀上的雷射頭取下，整理光纖後收整裝箱。
- (11) 超彈簧自底座取下後直接裝箱。
- (12) 超彈簧底座裝箱前，先將三隻旋腳轉置中間高度位置，並將圓錐旋腳底座及藍色膠墊一併收整裝箱。
- (13) 最後將各大箱的儀器部件裝入貨車，超彈簧、雷射干涉儀及落體容器三箱不得傾倒放置，將車用電源裝置接上落體容器箱中的離子泵電源供應器再封箱，以維持落體容器真空度。
- (14) 搬運及載送過程中，注意勿造成儀器劇烈碰撞。

附錄 B Scintrex CG-5 型重力儀操作說明

B-1 測量規劃

(1) 測量儀器與設備準備：

除了 Scintrex CG-5 型重力儀主機之外，附屬必備配件為定平底座、備用電池及充電器(電源供應器)，其他輔助觀測紀錄的設備計有：

- a. 手持式 GPS
- b. 氣壓計
- c. 溫度計
- d. 量尺
- e. 觀測手簿
- f. 測傘
- g. 筆記型電腦

(2) 測量點位選定：

重力觀測點位的選定，首先以既有的控制點為主，如水準點、三角點、衛星控制點及重力點等，若必須自選位置觀測時，必須掌握以下幾項要點：

- a. 以堅實穩固的地面為主
- b. 勿選於交通繁忙或有振動干擾之地點
- c. 勿選於建物頂
- d. 宜盡可能選定貼近地表面位置。

(3) 測量路線與網形規劃：

重力觀測方式原則是與水準測量相同，以往測與返測進行並求其閉合差。重力測線以線狀進行為主，線狀路線以組成多邊形方式設計進行，將各多邊形測線組成區域重力網形，再連接各網形節點以組成中、大網形，見圖 B-1。

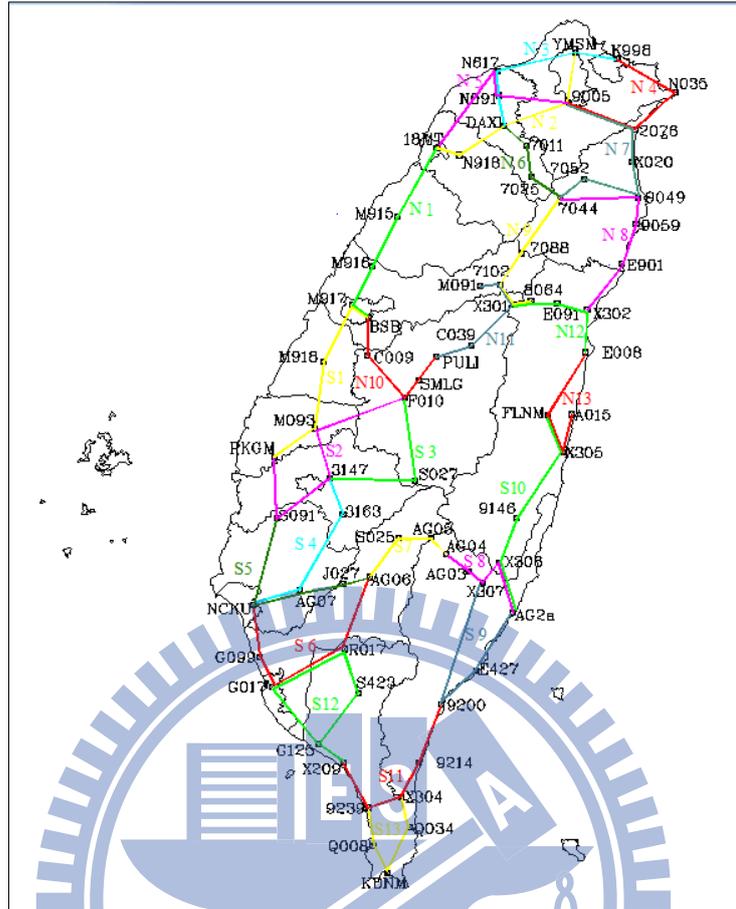


圖 B-1：重力測量路線及網形規劃

B-2 重力儀基本操作

(1) 操作前準備工作

CG-5 重力儀必須隨時以電源供應保持其工作溫度，未施測或儲放時必須連接電源供應器供電，並且同時對電池進行充電。若 CG-5 重力儀斷電超過 48 小時，必須依照以下步驟操作：

- a. 裝上電池，並連接電源供應器。
- b. 接上電源後，需要 4 小時方可達操作溫度。
- c. 充電 48 小時方可達儀器穩定狀態。
- d. 重力儀內部裝置兩個電池，每個電池約須耗時 4 小時方可充滿，亦可取下另行於充電器充電，每個電池約須充電 3 小時方可充足。

- e. 不論是否進行觀測，電池不可完全耗盡，必須在電池完全消耗前即進行充電。

(2) 儀器架設與環境檢視

- a. 將重力儀設置於點位正上方，依點位狀況增設圓鐵盤於點位上，再將重力儀設置於其上。
- b. 若點位正上方無法設置重力儀，可設置點位旁約 50 公分範圍內相同高程之堅硬平坦地面。
- c. 重力觀測期間應避免周邊有交通或施工震動，以免造成不佳之觀測量。

(3) 操作設定

- a. 開啟 CG-5 重力儀，按「ESC」鍵，進入主「SETUP MENU」設定畫面。
- b. 依序設定操作「Survey」及「Autograv」，「Options」。
- c. 點選「Survey」後，依序輸入：
 - i. Survey ID：通常以日期(YYYYMMDD)為設定，用意在於區分出每一個檔案的名稱。
 - ii. Customer & Operator：依操作者自行設定之。
 - iii. Longitude：輸入經度坐標 121E（臺灣地區）。
 - iv. Latitude：輸入緯度坐標 23N（臺灣地區）。
 - v. GTM Diff.：輸入臺灣地區時間 -8。
- d. 點選「Autograv」後，各參數設定如下：
 - i. Tide Correct.：選取 YES。
 - ii. Cont Tilt Corr：選取 YES。
 - iii. Auto Rejct：選取 YES；自動剔除超過 4 個 Standard Deviations 高頻雜訊。
 - iv. Terrain Corr：選取 NO。
 - v. Seismic Filter：選取 YES；震動濾波可消除背景震動或地震等低頻雜訊。

- vi. Save Raw：選取 YES；儲存未經處理的原始資料。
- vii. 參數編輯完畢後，按 F5 鍵「RECORD」儲存。
- e. 點選「Options」後，各參數設定如下：
 - i. Read Time：記錄資料間隔時間為 120 秒（1 to 256 秒）。
 - ii. Cycle Time：基站量測模式 130 秒（或為 Read Time 時間加 10 秒）。
 - iii. # of Cycle：自動重覆量測次數 0（0~99999 次）。
 - iv. Start Delay：延遲記錄時間 5 秒（0~999 秒）。
 - v. Line separation：（略過）測線間距（公尺）。
 - vi. Station separation：（略過）測站間距（公尺）。
 - vii. Auto station Inc：選取 NO；測站編號是否自動疊加。
 - viii. Measurement：量測顯示資訊方式；選取 Numeric。
 - ix. 參數編輯完畢後，按 F5 鍵「OK」儲存。
- f. 設定完參數並且儲存之後，按「MEASUR」鍵進入坐標參數輸入畫面，依序輸入：
 - i. Longitude：輸入經度坐標（單位：度、分、秒）。
 - ii. Latitude：輸入緯度坐標（單位：度、分、秒）。
 - iii. Elevation：輸入高程值（單位：公尺）。
 - iv. Station ID：輸入測回編號；####.N（往測）或####.S（返測）。
 - v. 輸入完畢後，按 ESC，再按 F5「Level」。
- g. 此型重力儀為手動定平，因此於此步驟完成定作業後，按 F5 鍵「READ GRAV」即開始測量。
- h. 重力開始測量後，會依照設定的觀測時間長度進行，測量完畢後按 F5 鍵「FINAL DATA」，將「Current」欄之 Grav.、S.D.、Time 記錄於重力觀測手簿，再將測站經度、緯度、高程、氣溫、溼度及大氣壓力記錄於重力觀測手簿，最後按 F5「RECORD」記錄資料。

- i. 利用筆記型電腦連線重力儀後，下載觀測資料做後續計算，資料格式範例，見圖 B-2。

```

CG-5 SURVEY
Survey name: 0629
Instrument S/N: 136
Client: BSB
Operator: CTC
Date: 2006/ 6/28
Time: 21:35:34
LONG: 121.0000000 E
LAT: 23.0000000 N
ZONE: 0
GHT DIFF.: -8.0

CG-5 SETUP PARAMETERS
Gref: 0.000
Gcall: 8513.620
TiltXS: 617.219
TiltYS: 639.074
TiltXO: -38.929
TiltYO: -22.330
Tempco: -0.128
Drift: 2.568
DriftTime Start: 07:35:33
DriftDate Start: 2006/06/29

CG-5 OPTIONS
Tide Correction: YES
Cont. Tilt: YES
Auto Rejection: YES
Terrain Corr.: NO
Seismic Filter: YES
Raw Data: YES

Line
1.000N
/-----LAT-----LONG-----ALT-----GRAV-----SD-----TILTXX--TILTY--TEMP---TIDE---DUR-REJ---TIME---DEC.TIME+DATE--TERRAIN---DATE
23.7160282 120.3255005 5.0000 3045.4624 0.2091 -19.3 -13.5 -0.93 -0.059 120 9 07:37:08 2319.31695 0.0000 2006/06/29
23.7160282 120.3255005 5.0000 3045.4624 0.1415 -11.8 -12.7 -0.97 -0.059 120 0 07:40:20 2319.31916 0.0000 2006/06/29
Line
2.000N
/-----LAT-----LONG-----ALT-----GRAV-----SD-----TILTXX--TILTY--TEMP---TIDE---DUR-REJ---TIME---DEC.TIME+DATE--TERRAIN---DATE
23.6285839 120.3345032 5.0000 3039.4360 0.2199 8.9 -1.9 -0.92 -0.055 120 5 08:01:47 2319.33404 0.0000 2006/06/29
Line
3.000N
/-----LAT-----LONG-----ALT-----GRAV-----SD-----TILTXX--TILTY--TEMP---TIDE---DUR-REJ---TIME---DEC.TIME+DATE--TERRAIN---DATE
23.6860008 120.3883057 5.0000 3032.2986 0.2103 -23.9 57.3 -0.97 -0.044 120 11 08:34:19 2319.35659 0.0000 2006/06/29
23.6860008 120.3883057 5.0000 3032.2798 0.1993 -22.0 36.1 -1.04 -0.042 120 3 08:37:51 2319.35904 0.0000 2006/06/29
23.6860008 120.3883057 5.0000 3032.2566 0.1254 -4.9 17.5 -1.11 -0.041 120 0 08:41:38 2319.36167 0.0000 2006/06/29
Line
4.000N
/-----LAT-----LONG-----ALT-----GRAV-----SD-----TILTXX--TILTY--TEMP---TIDE---DUR-REJ---TIME---DEC.TIME+DATE--TERRAIN---DATE
23.7160282 120.3255005 5.0000 3045.4719 0.2699 1.4 -3.5 -1.02 -0.031 120 10 09:00:56 2319.37505 0.0000 2006/06/29
Line
4.000S
/-----LAT-----LONG-----ALT-----GRAV-----SD-----TILTXX--TILTY--TEMP---TIDE---DUR-REJ---TIME---DEC.TIME+DATE--TERRAIN---DATE
23.7160282 120.3255005 5.0000 3045.4534 0.1763 4.3 -4.6 -1.03 -0.030 120 2 09:03:48 2319.37703 0.0000 2006/06/29
23.7160282 120.3255005 5.0000 3045.4236 0.1475 -6.4 -7.0 -1.07 -0.028 120 15 09:06:39 2319.37901 0.0000 2006/06/29
23.7160282 120.3255005 5.0000 3045.4363 0.2765 -5.2 -7.8 -1.12 -0.026 120 25 09:09:41 2319.38111 0.0000 2006/06/29

```

圖 B-2：Scintrex CG-5 型重力儀觀測紀錄資料格式範例

B-3 重力儀校正

此型重力儀於外業觀測後，難免產生儀器誤差，因此必須進行校正，此小節介紹儀器漂移改正、傾斜改正與傾斜靈敏度改正。

(1) 漂移改正(Drift Corrections)：

- a. 將儀器設置於環境安靜無震動干擾之處所並接上交流電源。
- b. 開啟 CG-5 重力儀，進入主設定畫面「SETUP MENU」，以游標移動鍵選擇「Service」。
- c. 至 Calibration：後以 ENTER 鍵按下數次選擇 Drift 再按 F5。
- d. 按「MEASUR」鍵後再按 F5「Level」進入重力觀測畫面，長時間持續觀測 24 小時以上。

- e. 持續觀測 24 小時以上之後，按 F5「STOP」可見「Old」與「New」兩組 Drift 漂移量，檢視其間差異值，若差異量大於 $\pm 2\text{mgal}$ ，則重新再做此項改正，若差異量小於 $\pm 2\text{mgal}$ ，則選擇「Accept」重新存入新的漂移量數值。
- f. 此項 Drift 改正施行為每四個月一次。

(2) 傾斜改正 (Tilt Corrections)：

- a. 於 Service 選項中，以游標移動鍵至 Calibration，ENTER 鍵按下數次選擇 XYOFFSET 再按 F5。
- b. 按「MEASUR」鍵後再按 F5「Level」進入如圖 B-3 畫面。
- c. 依照畫面右上方第一格「X axis」轉動定平底座之踵定螺旋至「X=150」與「Y=0」後，按 F1 即開始觀測。
- d. 觀測停止後按 F5，可見如圖 B-4 畫面。
- e. 記錄 X1 與 R1 數值後按 F1，再按 F5 後再進入如圖 B-5 畫面。
- f. 依照畫面右上方第二格「X axis」轉動定平底座之踵定螺旋至「X=-150」與「Y=0」後，按 F2 即開始觀測。
- g. 觀測停止後按 F5，可見如圖 B-6 畫面。
- h. 記錄 X2 與 R2 數值後，並檢視儀器自動計算所得之「Old X offset」與「New X offset」數值，兩數值差異若小於 20，則可接受並儲存，若大於 20，則重新做「X axis」改正。
- i. 接續進行「Y axis」改正作業，施作方法同「X axis」改正。
- j. 此項 XYOFFSET 改正施行為每二個月一次。

(3) 傾靈敏度改正：(Adjusting Tilt Sensor Sensitivity)

- a. 於 Service 選項中，以游標移動鍵至 Calibration：後以 ENTER 鍵按下數次選擇 XYSENS 再按 F5。
- b. 施作步驟與傾斜改正相同，記錄各次各軸改正數據以供查核。
- c. 此項 XYSENS 改正施行為每四個月一次。

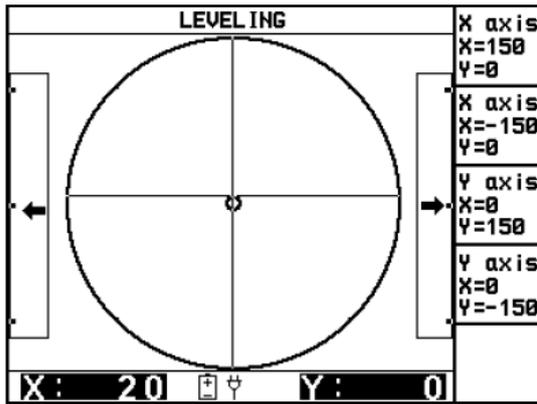


圖 B-3

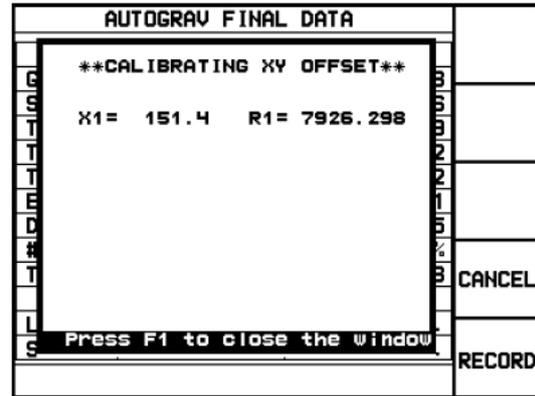


圖 B-4

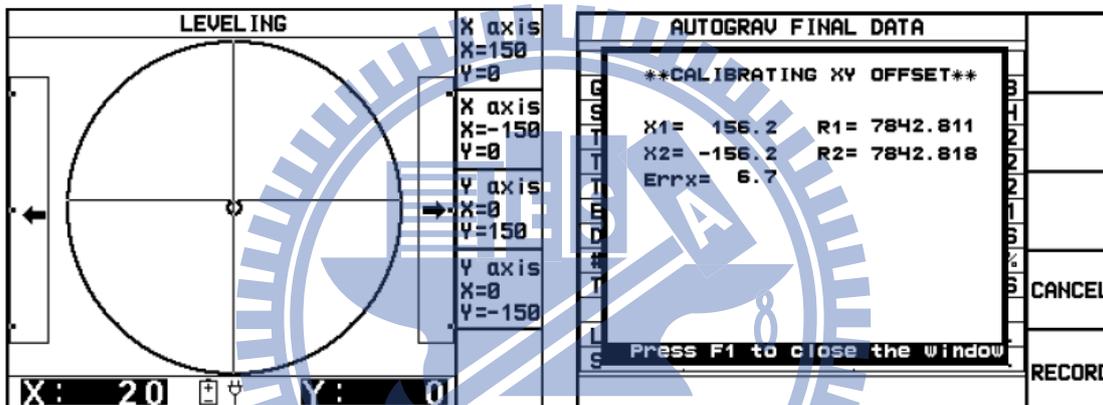


圖 B-5

圖 B-6

B-3 其他注意事項

- (1) 於重力儀架設與觀測期間，宜用測傘等遮陽裝置遮擋直射之陽光，再視狀況增設其他遮蔽強風之裝置，見圖 B-7。
- (2) 儀器長途搬運時，將重力儀置於專用防震箱內，置於車輛座椅上並避免嚴重搖晃。
- (3) 重力觀測單次時間為 120 秒，每個測站需觀測兩次以上，而其中兩次觀測量之差值需小於 0.01mGal。
- (4) 各重力測段往測與返測之閉合差之規範，依照國土測繪法規(內政部，2008)

訂定標準，見表 B-1 及表 B-2。

- (5) 重力觀測結果須詳實記錄於重力觀測手簿，並記錄氣溫、溼度、氣壓與儀器高。
- (6) 施測完畢後，需要量測儀器垂直於點位的高度。因為並無專屬丈量器具，故以 5m 鋼捲尺量測，或以 60cm 鋼尺量測，量測儀器高度以儀器頂面至觀測點位（標石、鋼標或鋼棒）頂面之間距離為儀器高，見圖 B-8。
- (7) 所有儀器操作方法請參閱 CG-5 Operation Manual。

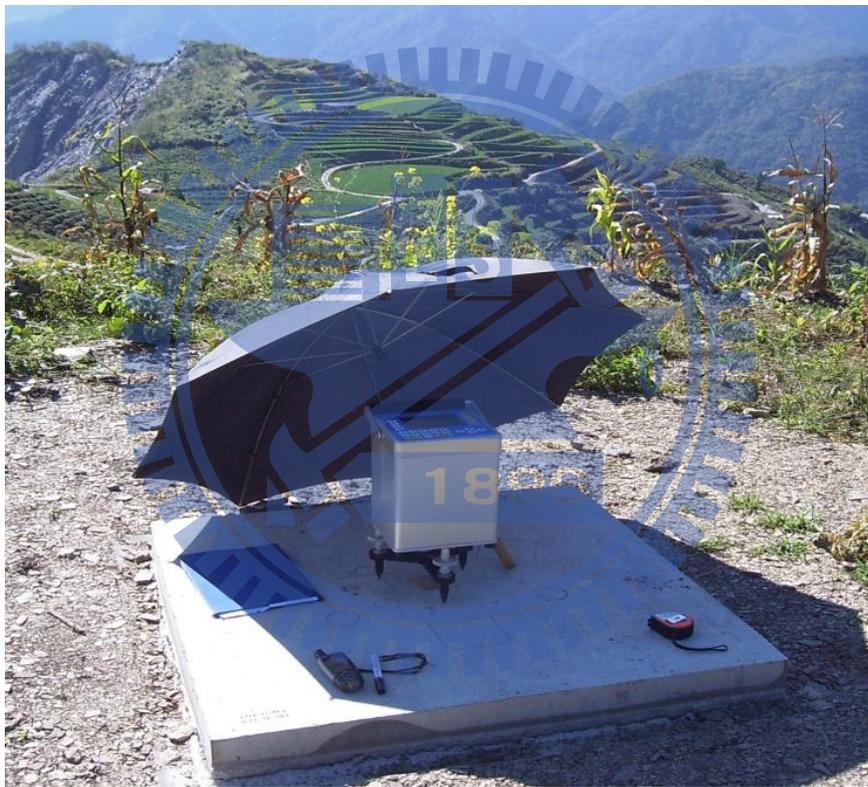


圖 B-7：Scintrex CG-5 型重力儀觀測實況

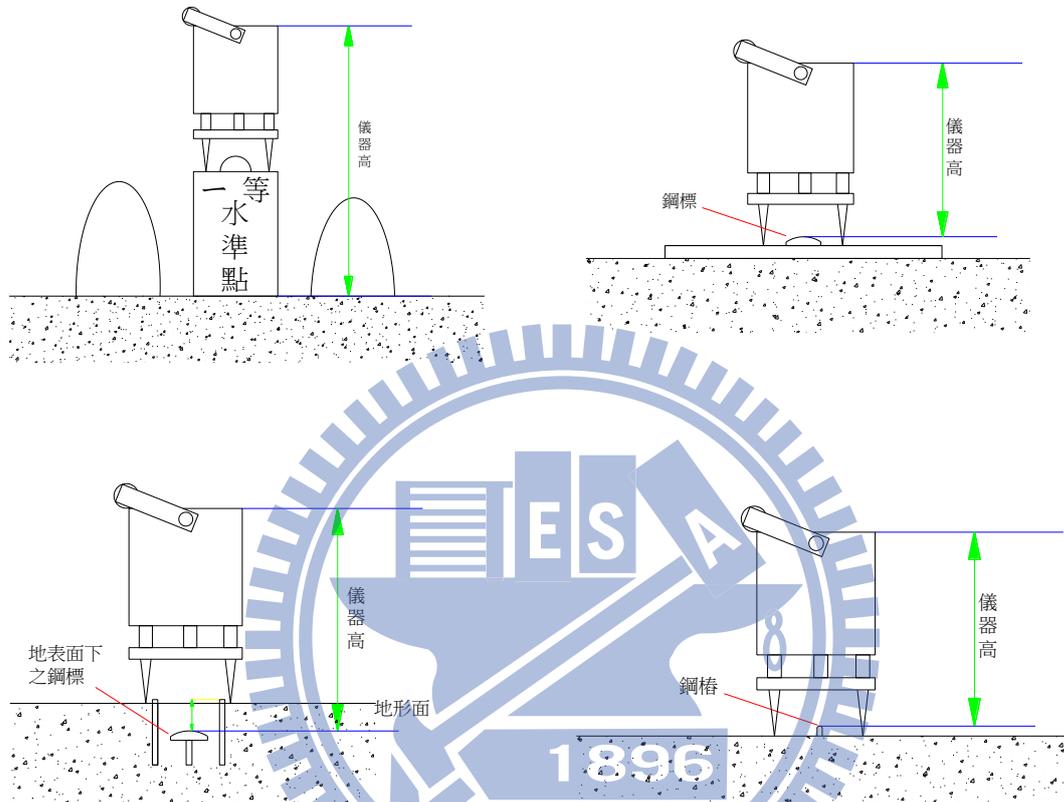


圖 B-8：於各種形式點位量測儀器高度方法示意圖

表 B-1：以重力測量方法實施一、二等基本控制測量之精度規範(內政部，2008)

項 目 \ 等 級	一 等	二 等
系統誤差改正後每測段往返最大閉合差(單位：毫伽, mgal)	0.15	0.20
系統誤差改正後閉合重力環線最大閉合差(單位：毫伽, mgal)	0.80	1.00
成果精度	一、權單位中誤差須通過 95% 信心區間的卡方測試。 二、觀測量粗差偵錯須通過 95% 信心區間的 Tau 測試。	

表 B-2：以重力測量方法實施加密控制測量之精度規範(內政部，2008)

系統誤差改正後每測段往返最大閉合差(單位：毫伽, mgal)	0.30
系統誤差改正後閉合重力環線最大閉合差(單位：毫伽, mgal)	1.50
成果精度	一、權單位中誤差須通過 95% 信心區間的卡方測試。 二、觀測量粗差偵錯須通過 95% 信心區間的 Tau 測試。

作者簡歷

作者：程自強(Cheng, Tze-Chiang)

出生地：新北市

生日：1970年9月6日

地址：臺中市北屯區雷中街71號

E-mail：ctcjohnny@hotmail.com

chengtzechiang@gmail.com

學歷：

私立徐匯高級中學畢業

中正理工學院測繪工程學系畢業

國立中興大學土木工程學系測量資訊工程組碩士班畢業

國立交通大學土木工程學系測量及空間資訊組博士班

經歷：

聯勤測量隊測量官、工程官

國防部軍備局生產製造中心測量隊分隊長、區隊長

國防部軍備局生產製造中心第四〇一廠研發設計室主任

學術著作

Journal papers

Hwang, C., **Cheng, T. C.**, Cheng, C. C. and Hung, W. C., 2010, Land Subsidence using absolute and relative gravimetry: A case study in central Taiwan. Survey Review, 42, 315, 27-39.

Zhou, J., Hwang, C., Sun, H., Xua, J., Zhang, W., Ricky Kao and **Cheng, T. C.**, 2013, Precise determination of ocean tide loading gravity effect for absolute gravity stations in coastal area of China: Effects of land–sea boundary and station coordinate, Journal of Geodynamics, 68, 29-36.

Conference paper

Hwang, C., Wang, C. G., Hsiao, Y. S., **Cheng, T. C.**, Wei, H. H., Lee, C. W., Yu, H. C., Forsberg, G. and Olesen, A. V., 2004, Absolute gravimetry and airborne gravimetry in Taiwan. Gravity, Geoid and Space Mission – GGSM2004, Porto, Portugal, Aug. 30-Sep. 3.

程自強，黃金維，結合絕對重力與相對重力測量網檢視沿海地層下陷狀況，第二十五屆測量學術及應用研討會，清雲科技大學，中壢，2006。