

水庫船載重力精進台灣大地起伏模型之可行性研究

蕭宇伸¹、林世峰²、鄭詠升³

論文收件日期：107.03.12

論文修改日期：107.04.30

論文接受日期：107.06.05

摘 要

本文模擬曾文水庫與石門水庫區域於枯水期及豐水期之重力異常模型，並計算大地起伏模型，以評估台灣實施水庫船載重力任務之必要性。依研究區域與不同水位分成 8 個案例，並分別以向上延續法模擬各案例在不同水位之重力異常模型，再藉由球諧展開式、剩餘地型模型理論及最小二乘配置法計算其長波長、短波長與殘餘波長之大地起伏，進而整合成各案例之最終大地起伏模型。結果顯示：(1)石門水庫之水位每上升 10 公尺，重力異常平均減少約 0.2~0.3 mgal；(2)石門水庫計算之大地起伏於枯水期與豐水期之差異平均約介於 0.5~1.0 公分，部分區域可達 10 公分；(3)曾文水庫之水位每上升 20 公尺，重力異常平均減少約 0.1 mgal；(4)曾文水庫計算之大地起伏於枯水期與豐水期之差異平均約低於 0.5 公分；(5)石門水庫實施水庫船載重力測量任務之重要性高於曾文水庫。

關鍵詞：大地起伏、重力異常、船測重力

¹ 副教授，國立中興大學水土保持學系。

² 碩士生，國立中興大學水土保持學系。

³ 研究助理教授，逢甲大學水利工程與資源保育學系。

* 通訊作者，TEL: (04)22840381 轉 101，E-mail: yshsiao@nchu.edu.tw。

A feasibility Study on Enhancing Taiwan geoid model with Shipborne Gravity on Reservoirs

Yu-Shen Hsiao¹, Shih-Feng Lin², Yung-Sheng Cheng³

Abstract

We simulate the Taiwan gravity anomaly models over the Tseng-Wen and Shihmen reservoir areas during the high and low water level periods, to assess necessity of shipborne gravity campaigns in Taiwan. Eight cases are tested based on study areas and water levels. The gravity anomaly model of each case is computed with the upward continuation method. We also use the methods of the harmonic expansion, the residual terrain model, and the least squares collocation to compute the long-, short- and residual- geoid undulations, and then integrate into a final geoid model for each case. The results of this paper include: (1) The average gravity anomaly is reduced by 0.2 ~ 0.3mgal while the water level rise by 10 m in the Tseng-Wen reservoir; (2) The difference value between the geoid undulations in the Shihmen reservoir during the high and low water level periods averages about 0.5 ~ 1.0 cm, but in some areas up to 10 cm. (3) If the water level rises by 20 meters in the Tseng-Wen reservoir, the gravity anomaly is reduced by 0.1 mgal on average; (4) The difference value between the geoid undulations in the Tseng-Wen reservoir during the high and low water level periods averages about 0.5 cm; (5) The Shihmen reservoir is higher than the Tseng-Wen reservoir in necessity of shipborne gravity campaigns.

Keywords: Geoid undulation, Gravity anomaly, Shipborne gravity

¹ Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University.

² Master Student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University.

³ Research Assistant Professor, Department of Water Resources Engineering and Conservation, Feng Chia University.

* Corresponding Author, Tel: +886-4-22840381#101, E-mail: yshsiao@nchu.edu.tw.

一、前言

大地起伏之定義為橢球面與大地水準面之差異，在多個科學領域中廣受應用，例如：(1)在測地學領域中，大地水準面為正高系統的基準面，也用於提供海島國家島與島的高程基準作準確連接(黃啟訓，2013)；(2)在地球科學領域中，透過精確的大地起伏值將全球定位系統(Global Positioning System, GPS)測量及水準測量等資料，可用於研究長時間之地殼垂直運動；(3)在海洋學領域中，高精度的大地起伏值常用於精確的洋流速度、方向與海洋地形等計算。因此無論在測地、地球科學與海洋學界，大地起伏皆扮演極重要角色，而國際大地測量協會亦創建大地起伏的服務組織，目前已完成歐盟、非洲、東南亞、南美等地區的高精度大地水準面。例如美國最新的大地起伏模型是 GEOID12A 模型(Wang et al, 2012)；日本於 2005 年推出新大地起伏模型(Kuroishi and Keller, 2005)；台灣於 2014 年由內政部(黃金維等，2013)公告之大地起伏模型等。目前大地起伏在台灣主要應用有二，分別為(1)大地起伏結合 GPS 應用於高程測量，藉此取代傳統的水準測量，而此觀測法稱為高程現代化(許宏銳，2014)；(2)將航空攝影量或光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)獲得高精度之數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)或數值表面模型(Digital Surface Model, DSM)，從橢球高系統轉換為正高系統。以 LiDAR 技術獲得之高程為例，其所獲得之橢球高程精度可達 15 公分(Hodgson and Bresnahan, 2004)，但若採用大地起伏模型之精度不佳，則轉換之正高將受影響。

台灣大地起伏計算約從 90 年代開始(Tsuei, 1995)，早期僅用陸測重力結合船載重力進行計算(Hwang, 1997; 國立交通大學，2001; 國立交通大學，2003)，隨著更多陸測、船載與空載重力等資料陸續蒐集，有更多大地起伏計算的研究出現，例如國立交通大學(2005), Hwang et al. (2006), Hsiao and Hwang (2010)和 Hsiao et al. (2017)等。因此，台灣過去數十年來已蒐集了陸測、船測、空載與衛星測高等不同觀測來源的重力資料。以 Hsiao and Hwang (2010)之研究結果為例說明，該研究結合陸測、船載與空載重力異常資料計算台灣大地起伏模型，在平原區域可達公分級的精度，在山區則可達到 10~20 公分級的精度。然而空載重力無法直接獲取地表上之重力，在大地起伏計算時，必須透過向下延續法將空載觀測之重力化算至地表與陸測重力進行聯合解算，而向下延續將會降低空載重力的精度。即便台灣已擁有均勻分布的空載重力資料，在台灣山區大地起伏模型卻很難優於 10 公分以下的精度(許宏銳，2014)。

因此要獲取優於 10 公分精度等級之台灣山區大地起伏模型，最佳的方法為透過山區陸測重力來獲取密集之山區陸測重力異常值。然而台灣山區之地形崎嶇，往往很難獲取完整之山區陸測重力。即便可獲得，但此方法仍然有限制，舉例來說，在水庫區域就無法獲取陸測重力值，除非於水庫採用船載重力觀測方式。然而因台灣降雨季節集中在夏季，即便透過船載方式觀測水庫區域之重力資料，隨著水庫之水位在汛期與旱期將有不同之水位，以曾文水庫為例，豐水期(每年 9 月)與枯水期(每年 3 月)之水位差可達 40 公尺以上。因此，本研究將模擬曾文水庫與石門水庫於

水庫豐水期與枯水期之重力異常值與大地起伏值，來評估未來台灣於重要水庫實施船載重力測量之必要性。

二、研究資料

本文在曾文水庫與石門水庫採用的最低水位面重力異常值來自 Hwang et al. (2014)計算之重力異常模型，此重力異常模型之資料來源包括目前台灣擁有的陸測、船測、空載重力異常值與衛星測高反演之重力異常值所組成。資料來源分述如下：

(一) 陸測重力異常資料包含中央研究院地球科學研究所於 1980-1987 年間選擇 603 個測量基準點進行重力站異常觀測(Yen et al., 1990; Yen et al., 1995)；中國測量學會於 1986-1988 年間蒐集 276 筆之重力異常資料(黃金維等，1998)；中國測量學會於 1997-1999 年間蒐集 747 筆之重力異常資料(黃金維等，1998)；內政部於 2000-2001 年間辦理的 1010 個一等一級水準點觀測之重力異常資料(國立交通大學，2001)；內政部於 2002-2003 年間辦理的 1189 個一等二級水準點觀測之重力異常資料(國立交通大學，2003)；內政部於 2004~2006 年間辦理的 4500 點一、二等重力測量工作(中興測量公司，2006)。

(二) 船測重力異常資料包含美國國家海洋與大氣機構(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的資料；Hsu et al. (1998)蒐集的資料；內政部於 2006~2008 年辦理針對台灣離島(和平島、龜山島、小琉球、蘭嶼與綠島等)周邊海域實施船載重力測量資料(國立交通大學，2008b)；內政部國土測繪中心於 2011-2013 年辦理針對台灣近岸海域蒐集之船載重力資料(國立交通大學，2014)。

(三) 空載重力異常資料包含內政部辦理的台灣「空載重力測量工作」重力資料(國立交通大學，2005)；內政部 2006-2008 年續辦理「低航高空載重力測量工作」重力資料(國立交通大學，2008a)；內政部 2008-2009 年所辦理「西部及東沙海域空載重力測量工作」重力資料(國立交通大學，2009)。

(四) 衛星測高資料包含 Geosat/GM、ERS-1/GM、Jason-1/GM、Topex/Poseidon 及 Cryosat-2 等任務。

上述不同來源資料除衛星測高資料外，皆為重力觀測數據，而測高衛星原始之觀測數據為海水面高，Hwang et al. (2014)採用 Inverse Vening Meinesz 方法將測高衛星觀測之海水面反演成海洋重力異常，以利後續大地起伏之計算。

三、研究方法

因水庫水面位置之重力異常值隨著不同水位高低而有不同。故本文利用 Hwang et al. (2014)計算之重力異常模型為基礎，假設此模型為研究區域最低水位面之重力異常模型。因此重力異常模型空間解析度僅 30 弧秒，需先利用 GMT 軟體重新取樣成空間解析度 3.6 秒(0.001 度)網格，再利用向上延續法(Buttkus, 2000)來推估不同水位面之重力異常值，最後用以計算大地起伏值。本文計算步驟介紹如下：

(一) Step 1：去除回復法

本研究透過去除回復法，其原理如圖 1 所示，分別將重力異常 Δg 與大地起伏 N 分為長波長(低頻)、短波長(中頻)與殘餘波長(高頻)：

$$\Delta g = \Delta g_{long} + \Delta g_{short} + \Delta g_{res} \quad (1)$$

$$N = N_{long} + N_{short} + N_{res} \quad (2)$$

式中， Δg_{long} 與 N_{long} 、 Δg_{short} 與 N_{short} 、 Δg_{res} 與 N_{res} 分別為長波長重力異常值與長波長大起伏值、短波長重力異常值與短波長大起伏值、殘餘重力異常值與殘餘大地起伏值。

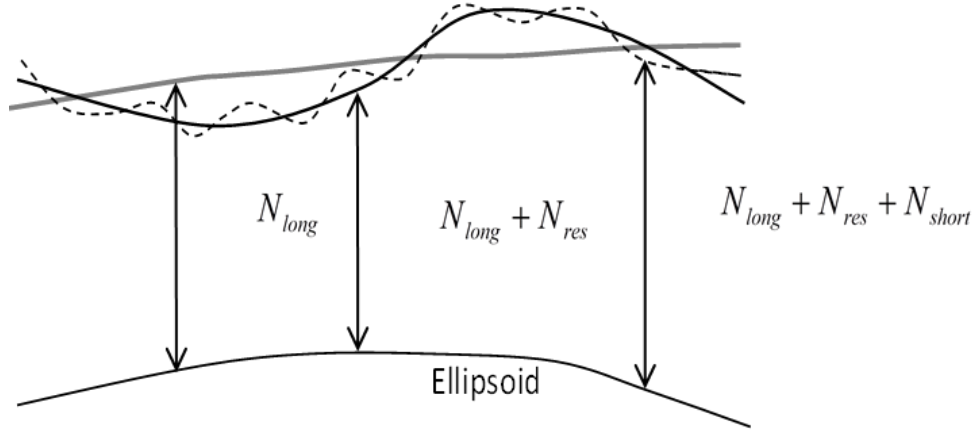


圖 1 長波長大起伏值、短波長大起伏值與殘餘大地起伏值示意圖

(二) Step 2：球諧係數展開式

本研究利用 EGM2008 模型(Pavlis et al., 2008)展開至 360 階計算長波長重力異常值與長波長大起伏值，其球諧係數展開式(Heiskanen and Moritz, 1967)如下：

$$\Delta g_{long} = \frac{GM}{a^2} \sum_{n=2}^N (n-1) \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi) \quad (3)$$

$$N_{long} = \frac{GM}{a\gamma} \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi) \quad (4)$$

式中， R 為地球半徑； ϕ 與 λ 分別為欲計算點之經緯度； C_{nm} 與 S_{nm} 即為在第 n 與 m 階之球諧係數值。

(三) Step 3：剩餘地形模型效應

本研究以剩餘地形模型(Residual Terrain Model, RTM)理論來計算短波長重力異常與短波長大地起伏效應，所謂 RTM 效應為真實地形面與參考地形面之差值。而短波長重力異常($\Delta g_{short}(x_p, y_p)$)與短波長大地起伏($N_{short}(x_p, y_p)$)在某計算點 P 之效應分別為(Forsberg, 1984)：

$$\Delta g_{short}(x_p, y_p) = 2\pi G \rho_1 (\bar{h} - \bar{h}_r) - c(x_p, y_p) \quad (5)$$

$$N_{short}(x_p, y_p) = \frac{G}{\gamma} \int_E \frac{\rho(x, y)(h(x, y) - h_r(x, y))}{\sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}} dx dy$$

$$= \frac{G}{\gamma} [\rho(h - h_r)] * \frac{1}{r} = \frac{G}{\gamma} \rho_1 \left[[\bar{h} - \bar{h}_r] * \frac{1}{r} \right], \quad (6)$$

式中， ρ_1 是岩石之地質密度 2.67 g cm^{-3} ； ρ_2 是海洋之地質密度 1.03 g cm^{-3} ； γ 為正常重力異常； h 及 h_r 分別為真實地形高程與參考地形高程； $c(x_p, y_p)$ 為計算點 P 位置之地形改正值。

無論短波長重力異常值或大地起伏值，均採用快速複利葉轉換計算。本計算所使用的真實地形模型為 9 弧秒空間解析度之 DEM，而參考地形模型則為 6 弧分空間解析度之 DEM，所有 DEM 資料皆從農航所提供之 40 公尺空間解析度 DEM 重新取樣獲得。

(四) Step 4：計算殘餘重力異常

本研究計算出長與短波長的重力異常後，利用下式計算殘餘重力異常 Δg_{res} 為：

$$\Delta g_{res} = \Delta g - \Delta g_{long} - \Delta g_{short} \quad (7)$$

式中， Δg_{res} 為殘餘重力異常； Δg 為不同水位之水面重力異常； Δg_{long} 為利用球諧展開式得到之長波長重力異常； Δg_{short} 為利用 RTM 方法得到之短波長重力異常。

(五) Step 5：最小二乘配置法

本研究以最小二乘配置法(least squares collocation, LSC)計算殘餘大地起伏 N_{res} ，公式如下：

$$N_{res} = C_{ng} [C_{gg} + D]^{-1} \Delta g_{res} \quad (8)$$

式中， C_{gg} and C_{ng} 分別為殘餘重力異常(Δg_{res})與殘餘重力異常(Δg_{res})之間的協變方矩陣、與殘餘大地起伏(N_{res})與殘餘重力異常(Δg_{res})之間的協變方矩陣； D 為觀測量的雜訊矩陣(noise matrix)。各量之間的協變方矩陣以 EGM2008 參考場係數誤差與 Tscherning and Rapp (1974)誤差模型來計算。

(六) Step 6：計算大地起伏模型

最後將式 4、式 6 與式 8 分別得到之長波長大地起伏值、短波長大地起伏值、

殘餘波長大地起伏值進行加總，即可得到大地起伏模型。本文任何測試案例的大地起伏模型，皆比照此六個步驟流程進行計算。

四、研究成果

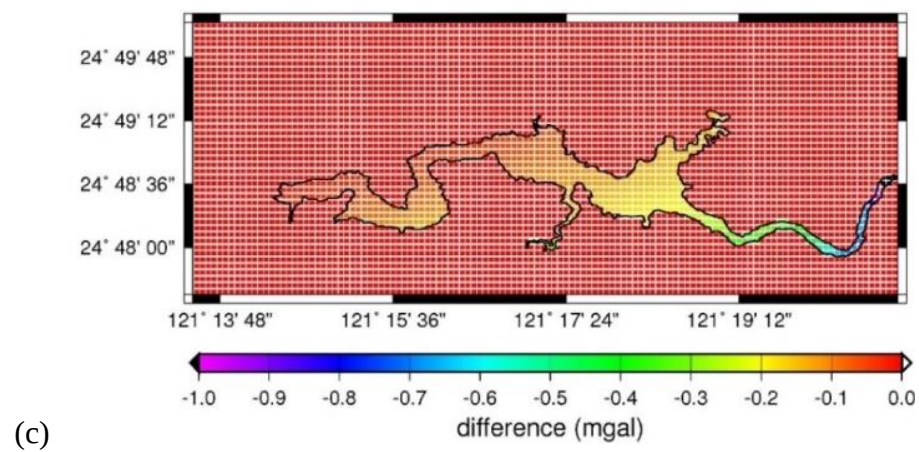
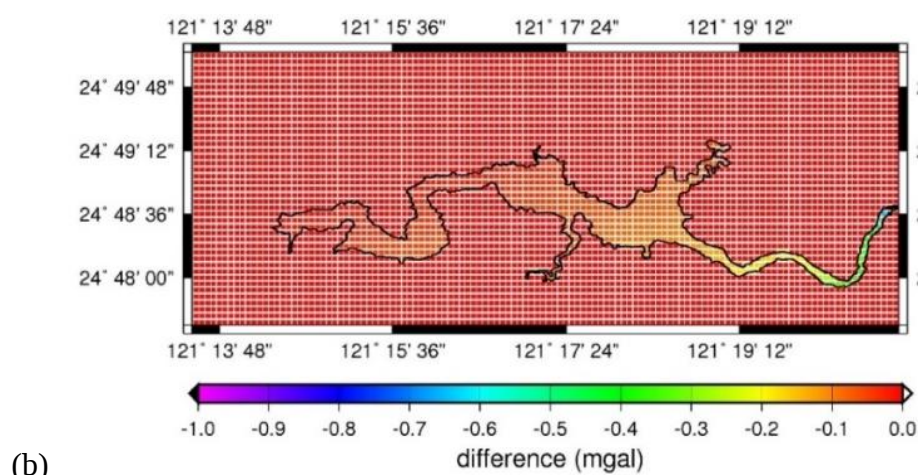
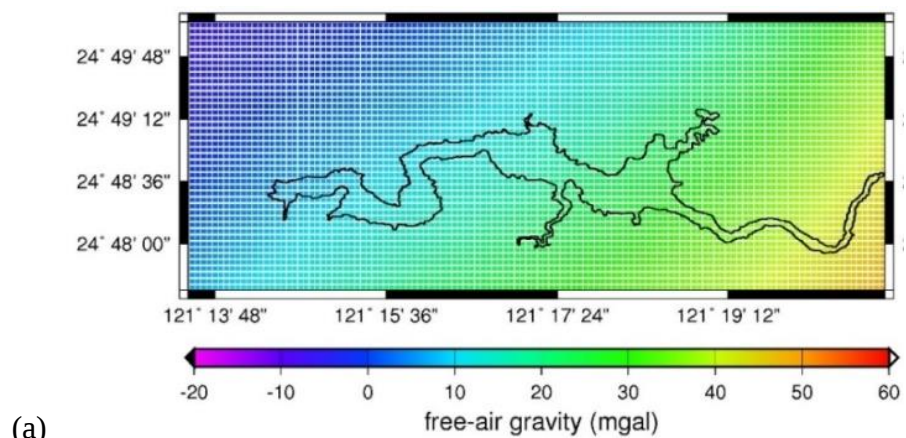
本文根據研究區域不同，分為三個部分進行討論，依序為石門水庫、曾文水庫及綜合討論。

(一) 石門水庫

研究中以 Hwang et al. (2014)提供於石門水庫中水面之重力異常假設為該水庫最低水位(case 1:220 公尺)之重力異常值，並利用向上延續法分別計算不同水位(case 2:230 公尺、case 3:240 公尺與 case 4:250 公尺)之重力異常值。在計算過程中，僅水庫水位變化位置處會被計算，而水庫周邊非水面位置則與 case 1 之重力異常值相同。各 case 重力異常值之差值統計如表 1 所示，由表中可發現，水面變化每上升 10 公尺，重力異常平均差值僅減少 0.01 mgal，然而此為整個石門水庫與周邊地形之平均結果。圖 2 為各 case 相關比較結果，各 case 均儲存為 3.6 弧秒空間解析度之網格，其中圖 2 (a)顯示石門水庫之重力異常值約介於-20~50 mgal 之間，且大致由西北向東南漸增；圖 2 (b)則顯示如果僅參考水庫水面位置，則重力異常值平均約減少 0.2~0.3 mgal。雖然表 1 僅顯示重力異常差值平均約 0.02 mgal，但從圖 2 (c)與圖 2 (d)可發現水面位置之重力異常差值均在 0.2 mgal 以上，若比較石門水庫最高水位(case 4)與最低水位(case 1)之計算結果，可發現在水庫右半邊上游集水區域均在 0.6 mgal 以上，甚至從表 2 中亦顯示兩 case 之重力異常最大差值可達 8 mgal (case 4-case 1)。

表 1 石門水庫各 case 重力異常模型之差值統計表(單位：mgal)

	最大值	最小值	平均值	標準偏差	均方根誤差
case2-case1	0.00	-2.96	-0.01	0.05	0.06
case 3- case 1	0.00	-5.70	-0.02	0.11	0.11
case 4- case 1	0.00	-8.08	-0.02	0.16	0.16



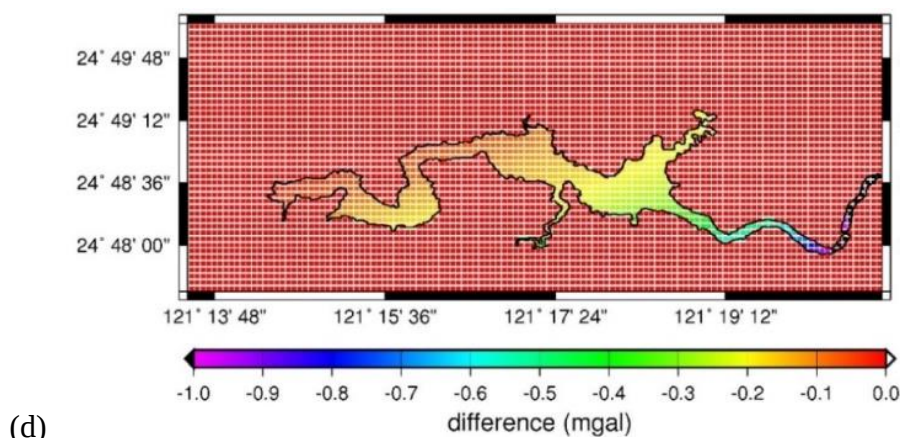
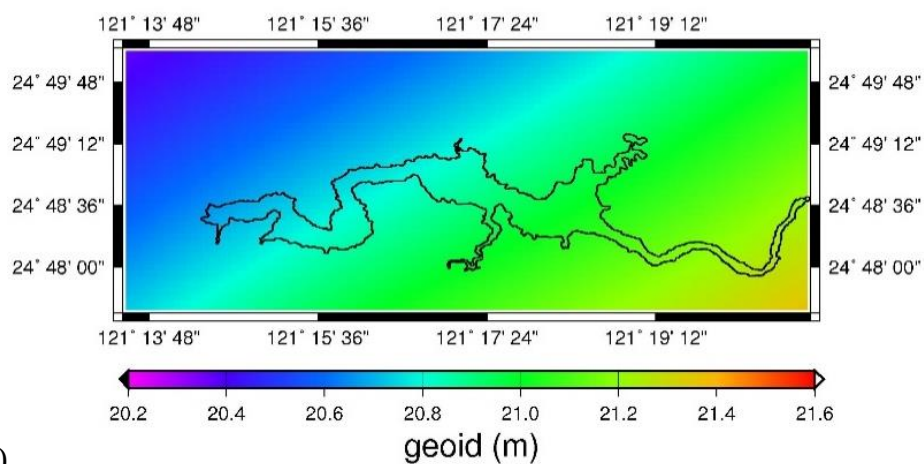


圖 2 石門水庫 cases 1 重力異常成果與不同 case 之重力異常比較成果，其中(a)為 case1 之成果；(b)case2 與 case1 相減之成果；(c)case3 與 case1 相減之成果；(d)case4 與 case1 相減之成果。

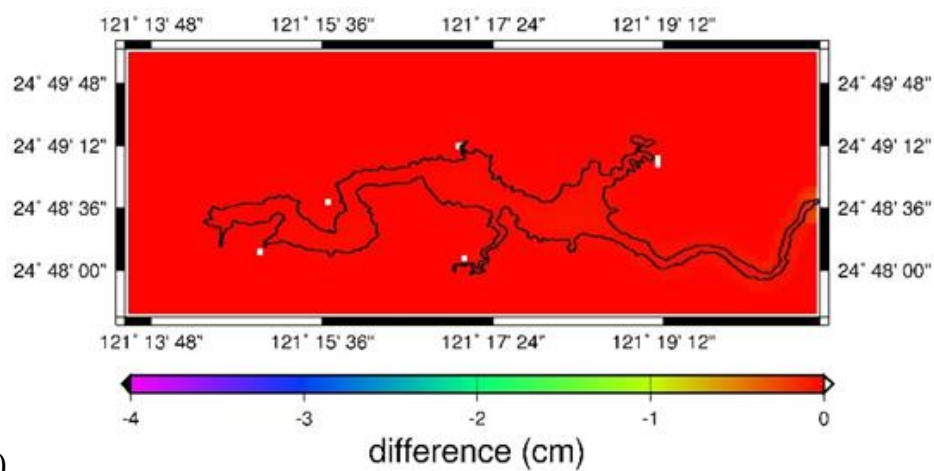
本文將 case1~4 之重力異常所計算得到之大地起伏模型進行比較，其結果如表 2 與圖 3 所示，其中圖 3 (a)為 case 1 得到之大地起伏模型，可發現石門水庫及周邊地形大地起伏值介於約 20~21.5 公尺，且大地起伏趨勢大致為由西北向東南逐漸增加，該大地起伏變化趨勢與石門水庫 case 1 之重力異常結果一致。圖 3(b)~(d)分別為「case 2 減 case 1」、「case 3 減 case 1」與「case 4 減 case 1」之大地起伏差異圖。以 case 1 減 case 2 為例，當水庫之水位上升 10 公尺，除水庫右邊上游集水區域外，其餘水面上之大地起伏變化量均小於 1 公分，僅水庫右邊部分區域達 3 公分之差值(如表 2 所示)。但若最高水位與最低水位的比較(即 case4 減 case1)，在多數水面區域大地起伏差值約 0.5~1.0 公分，最大差異於右邊上游集水區域(約 10 公分之差異量級)。此結果顯示石門水庫右邊上游集水區域的大地起伏差值於枯水期與豐水期是不可忽略的。

表 2 石門水庫各 case 大地起伏模型(單位：cm)之差值統計

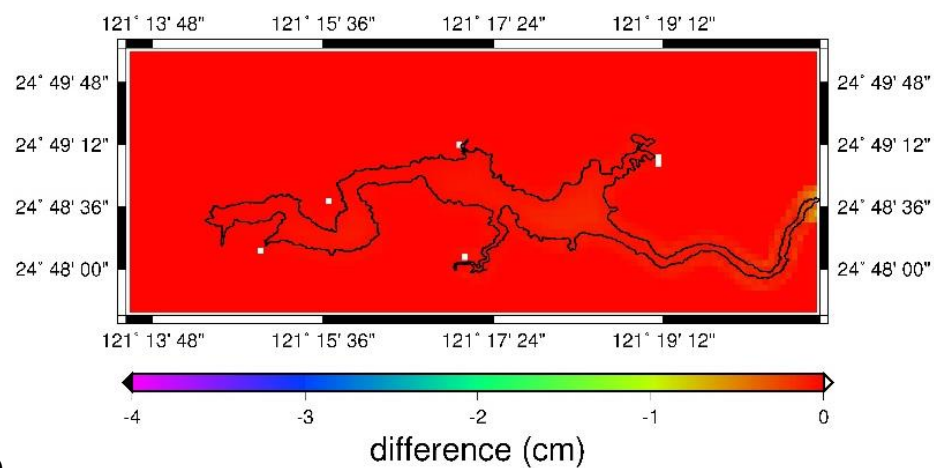
	最大值	最小值	平均值	標準偏差	均方根誤差
case2-case1	0.0	-3.5	0.0	0.0	0.0
case3-case1	0.0	-7.2	0.0	0.0	0.0
case4-case1	0.0	-10.1	0.0	0.1	0.1



(a)



(b)



(c)

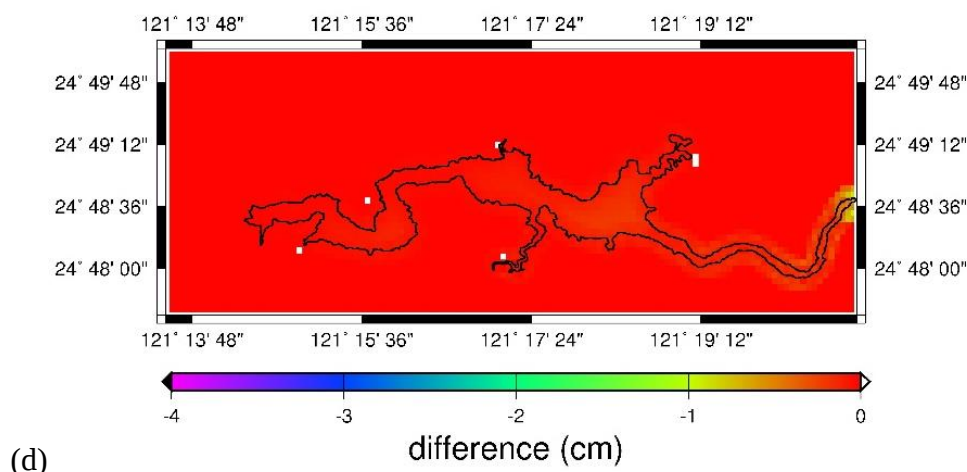


圖 3 石門水庫區域大地起伏計算結果及比較結果圖，其中(a)case 1 之大地起伏計算成果圖；(b)case 2 減 case 1 之差異圖；(c)case 3 減 case 1 之差異圖；(d)case 4 減 case 1 之差異圖。

(二) 曾文水庫

比照石門水庫之作法，將 Hwang et al. (2014)提供在曾文水庫中水面之重力異常假設為該水庫最低水位(case 5：170 公尺)之重力異常值，並透過向上延續法分別計算不同水位(case 6：190 公尺、case 7：210 公尺與 case 8：230 公尺)之重力異常值。各 case 之重力異常差值統計則如表 3 所示。case 5 至 8 為各 case 重力異常值成果，如圖 4 (b)至(d)所示。藉由表 3 與圖 4 之結果可發現以下幾點結果：

1. 由圖 4 (a)顯示曾文水庫之重力異常值約介於 0~60 mgal 之間，大致由西北向東南先減少，再緩慢增加。
2. 由圖 4 (b)與表 3 之 case6 與 case5 相比結果，可知當水面每上升 20 公尺，水面之重力異常值平均減少 0.1mgal，其最大差異僅減少 0.2 mgal。

由圖 4 (d)與表 3 指出即使曾文水庫最高水位與最低水位相比(case8 與 case5 相減)，兩者重力異常平均差值也僅有 0.2~0.6 mgal，且北部區域水面之重力異常差值略大於南部水面之重力異常位置，最大僅相差達 0.6 mgal。

表 3 文水庫各 case 重力異常模型之差值(單位：mgal)統計表

	最大值	最小值	平均值	標準偏差	均方根誤差
case6- case 5	0.00	-0.20	0.00	0.02	0.02
case 7- case 5	0.00	-0.40	-0.01	0.04	0.04
case 8- case 5	0.00	-0.60	-0.01	0.06	0.06

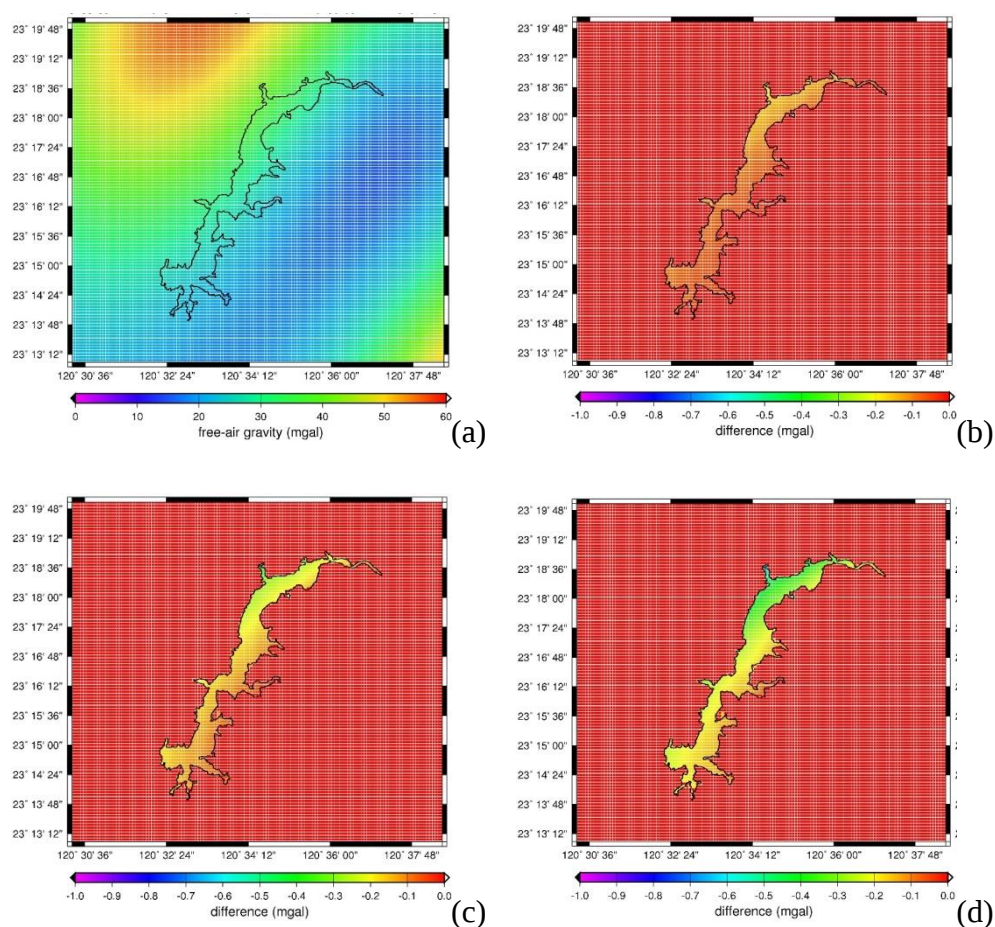


圖 4 曾文水庫在 cases 5~8 之重力異常成果圖，其中(a) case5 之成果；(b) case6 減 case5 之成果；(c) case7 減 case5 之成果；(d) case8 減 case5 之成果。

本文亦將 case 5~8 之大地起伏計算結果進行比較，其結果如表 4 與圖 5 所示，其中圖 5(a)為 case 5 得到之大地起伏模型，可發現曾文水庫及周邊地形之大地起伏值介於約 22~24 公尺，且大地起伏趨勢大致由西向東先逐漸減少，再向東南逐漸增加，該大地起伏變化趨勢與重力異常變化趨勢一致。另圖 5 (b)~(d)分別為「case 6 減 case 5」、「case 7 減 case 5」與「case 8 減 case 5」之大地起伏差異圖。比較結果顯示當水位上升時，大地起伏值變化非常小。以 case 8 與 case 5 之比較為例說明，當最低水位與最高水位相比，於水庫水面位置之大地起伏差值均小於 3 公分以內。

表 4 曾文水庫各 case 大地起伏模型(單位：cm)之差值統計

	最大值	最小值	平均值	標準偏差	均方根誤差
case6- case 5	0.0	-1.0	0.0	0.0	0.0
case 7- case 5	0.0	-2.1	0.0	0.0	0.0
case 8- case 5	0.0	-3.1	0.0	0.0	0.0

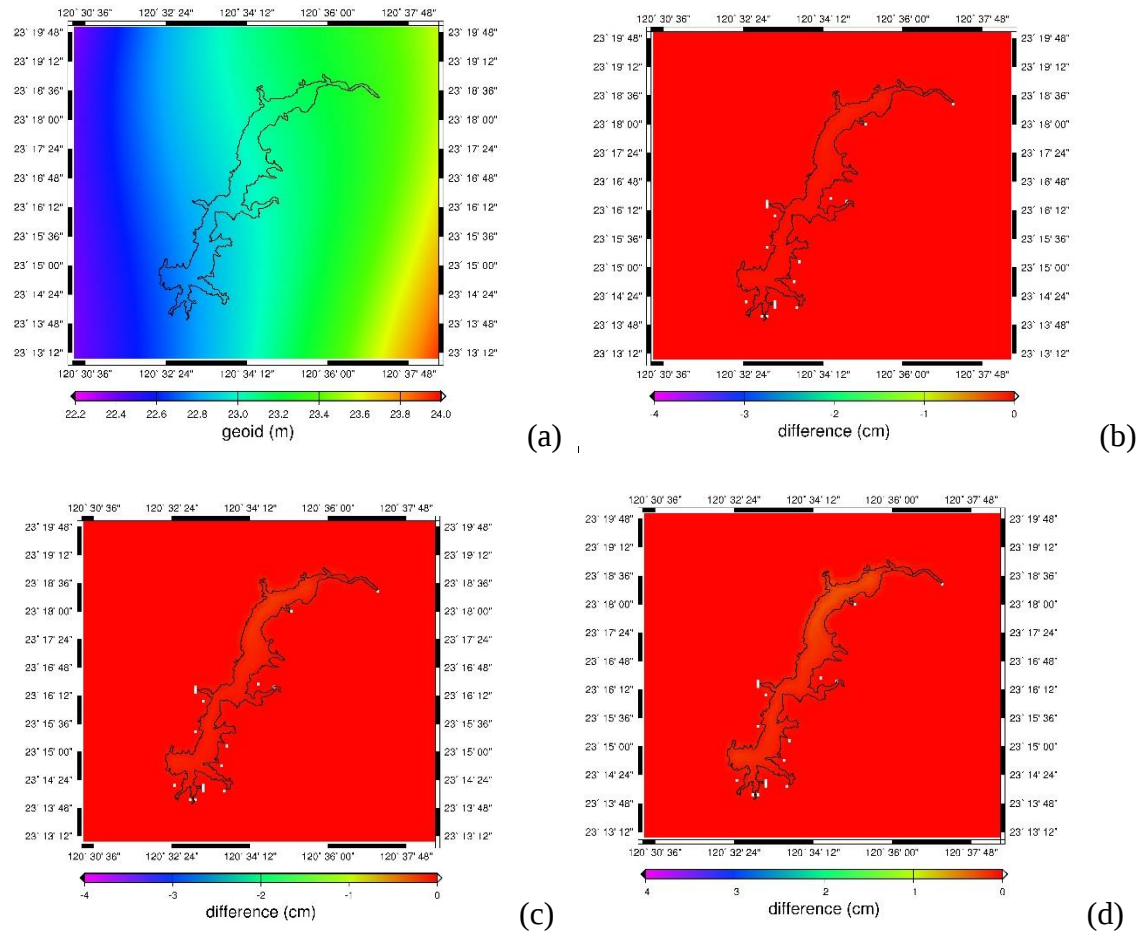


圖 5 曾文水庫區域大地起伏計算結果及比較結果圖，其中(a)為 case 5 之大地起伏計算成果圖；(b)case 6 減 case 5 之差異圖；(c)case 7 減 case 6 之差異圖；(d)case 8 減 case 7 之差異圖。

(三) 綜合討論

本文針對向上延續法得到兩個水庫的重力異常共八個 case 之比較結果(詳見表 2 與表 4)提出下列結論：

1. 石門水庫區域之重力異常變化會隨水位升降有較大變化，而曾文水庫水面重力異常雖亦隨水面升降而變化，但差異幅度明顯小於石門水庫。
2. 從兩個水庫之枯水期與豐水期相比，石門水庫顯示平均有 $0.2 \sim 8 \text{ mgal}$ 之重力異常變化量，而曾文水庫雖擁有較大之水位變化量，但在豐水期與枯水期時的重力異常之差異僅有 $0.2 \sim 0.6 \text{ mgal}$ 之變化，此變化量級甚至低於船載重力異常測量的誤差。石門水庫不同水位重力異常值變化較大的原因，是由於石門水庫區域本身重力異常之變化較大(極端值較大)之因素。
3. 石門水庫研究區較曾文水庫研究區擁有較大之大地起伏變化值，特別是在豐水期與枯水期的比較，右邊某部分區域差異量有將近 10 公分之變化量。
4. 曾文水庫研究區雖比石門水庫擁有較大之水位變化量，然曾文水庫全區大地起伏變化值也僅不到 1 公分之變化量，即使將豐水期與枯水期相比，其差異變化量亦不到 1 公分，其變化幅度較石門水庫小甚多。

5. 整體而言，就水庫船載重力任務之必要性而言，石門水庫較曾文水庫高，特別是石門水庫較上游區域。

五、結論與建議

曾文水庫與石門水庫為台灣前兩大水庫，本文藉計算二者不同水位時之重力異常值與大地起伏值，評估水庫是否進行船載重力異常量測相關任務之必要性。由研究成果得知，石門水庫計算之重力異常值，水位每上升 10 公尺，其重力異常平均減少約 0.2~0.3 mgal；曾文水庫計算之重力異常值，水位每上升 20 公尺，其重力異常平均減少約 0.1 mgal。無論石門水庫或曾文水庫，重力異常變化較大地區均在水庫靠近上游區域。在大地起伏值差異方面，石門水庫於枯水期與豐水期之平均差值約介於 0.5~1.0 公分，但其右邊上游部分區域差異可達 10 公分；曾文水庫之平均差值約低於 0.5 公分，但其右邊上游部分區域差異可達 3 公分。本研究綜合重力異常計算與大地起伏成果評定，認為於石門水庫進行水庫船載重力異常測量任務之重要性較曾文水庫來的高。

目前若要獲取台灣水庫重力異常資料，僅能透過利用空載重力與全球重力異常模型(例如：EGM2008)，然而上述方法所獲得之重力空間解度可能較不足，將造成此區域之大地起伏精度較不佳，因此於台灣重要水庫進行船載重力任務有其必要，不僅對台灣新一代大地起伏模型能有所貢獻，對於其他科學應用上亦具有價值。

參考文獻

- Buttkus, B., 2000, *Spectral Analysis and Filter Theory in Applied Geophysics*, Berlin: Springer-Verlag.
- Forsberg, R., 1984, A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modelling, Report 355, *Department of Geodetic Science and Surveying*, The Ohio State University, Columbus.
- Heiskanen, W. A. and H. Moritz, 1967, *Physical geodesy*, San Francisco: W. H. Freeman and company.
- Hodgson, M. E. and P. Bresnahan, 2004, Accuracy of airborne lidar-derived elevation: empirical assessment and error budget, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3), pp.331–339.
- Hsiao, Y. S. and C. Hwang, 2010, Topography-assisted downward continuation of airborne gravity: an application for geoid determination in Taiwan, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*, 21(4), pp.627-637.
- Hsiao, Y. S., C. Hwang, M. L. Wu and J. C. Chang, 2017, Improved geoid modeling using observed and modeled gravity gradients in Taiwan, *Journal of Surveying Engineering*, 143(2), pp.04016027-1-04016027-12.
- Hsu, S. K., C. S. Liu, C. T. Shyu, S. Y. Liu, J. C. Sibuet, S. Lallemand, C. Wang and D. Reed, 1998, New gravity and magnetic anomaly maps in the Taiwan-Luzon region

- and their preliminary interpretation, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*, 9(3), pp.509-532.
- Hwang, C., H. J. Hsu, E. T. Y. Chang., W. E. Featherstone, R. Tenzer, T. Lien, Y. S. Hsiao, H. C. Shih and P. H. Jai, 2014, New free-air and Bouguer gravity fields of Taiwan from multiple platforms and sensors, *Tectonophysics*, 611, pp.83-93.
- Hwang, C., 1997, Analysis of some systematic errors affecting altimeter-derived sea surface gradient with application to geoid determination over Taiwan, *Journal of Geodesy*, 71(2), pp.113-130.
- Hwang, C., Y. S. Hsiao and H. C. Shih, 2006, Data reduction in scalar airborne gravimetry: theory, computer package and case study in Taiwan, *Computers & Geosciences*, 32(10), pp.1573-1584.
- Kuroishi, Y. and W. Keller, 2005, Wavelet approach to improvement of gravity field-geoid modeling for Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110, B03402.
- Pavlis, N. K., S. A. Holmes, S. C. Kenyon and J. K. Factor, 2008, An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008, *EGU General Assembly 2008*, Vienna, 13-18 April.
- Tscherning, C. C. and R. H. Rapp, 1974, Closed covariance expressions for gravity anomalies, geoid undulations, and the deflections of the vertical implied by anomaly degree-variance models, Report 208, *Department of Geodetic Science and Surveying*, The Ohio State University, Columbus.
- Tsuei, G.C., 1995, *The investigation of digital geoid model over Taiwan*, Thesis (Ph.D.), Department of Earth Sciences and Institute of Geophysics, National Central University, Taiwan. (in Chinese)
- Wang, Y. M., J. Saleh, X. Li, and D. R. Roman, 2012, The US Gravimetric Geoid of 2009 (USGG2009): model development and evaluation, *Journal of Geodesy*, 86(3), pp.165-180.
- Yen, H. Y., Y. H. Yeh, C. H. Lin, G. K. Yu and Y. B. Tsai, 1990, Free-air gravity map of Taiwan and its applications, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*, 1(2), pp.143-155.
- Yen, H. Y., Y. H. Yeh, C. H. Lin, K. J. Chen and Y. B. Tsai, 1995, Gravity survey of Taiwan, *Journal of Physics of the Earth*, 43(6), pp.685-696.
- 國立交通大學, 2001, 《一等一級水準點上實施重力測量工作報告書》, 內政部編印。
- 國立交通大學, 2003, 《一等二級水準點上實施重力測量工作報告書》, 內政部編印。
- 國立交通大學, 2005, 《空載重力測量工作期末報告》, 內政部編印。
- 中興測量有限公司, 2006, 《九十三年度一、二等重力測量工作報告書》, 內政部編印。
- 國立交通大學, 2008a, 《低航高空載重力測量工作案期末報告》, 內政部編印。
- 國立交通大學, 2008b, 《臺灣本島與離島高程連測計畫 97 年度連測作業期末報告》, 內政部編印。

- 國立交通大學，2009，《西部及東沙海域空載重力測量工作期末報告》，內政部編印。
- 國立交通大學，2014，《臺灣本島近岸船載重力異常測量作業總報告》，內政部國土測繪中心編印。
- 許宏銳，2014，《最佳化重力資料處理及整合以建構公分級台灣大地起伏模式》，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 黃金維、許宏銳、黃啟訓，2013，新一代台灣大地水準面模式：防災、監測、高程現代化之應用，《國土測繪與空間資訊》，第一卷，第一期，頁 57-81。
- 黃金維、郭重言、儲慶美、甯方璽，1998，台灣重力異常網平差及重力異常資料整合，《測量工程》，第四十卷第三期，頁 71-82。
- 黃啟訓，2013，《台灣本島與離島之高程基準連結》，國立交通大學土木工程學系碩士論文。