

港內外潮位分析

林演斌¹ 陳聖學¹ 滕春慈² 林燕璋²
國立成功大學近海水文中心¹ 中央氣象局海象測報中心²

摘要

國內潮位站大都設置在港內半封閉型水域之內，資料可能受地形影響，但未有實測資料佐證，而全球衛星導航系統(global navigation satellite system, GNSS)浮標能在港外的開闊海域觀測潮位與波浪，本研究收集並分析同時在小琉球與東港海域內3站的港內外潮位資料。結果顯示，港內潮位較之港外潮位，相位有延遲現象，亦即港外高、低潮位之潮時較之港內提早。其次，港內外潮位之相位差導致兩者潮位之差值呈週期性震盪，潮位差值震盪週期與港內外潮位週期相同。此外，港內與港外潮差並無明顯差異。

關鍵字：潮位、全球衛星導航系統、調和分析

一、前言

海上的實測潮位能驗證模式預測的潮位資料，提高潮位預測準確度。颱風期間河口實測潮位可反映颱風暴潮的特性，預測河口潮位對於陸地淹水具關鍵性影響，因為河口水位太高使得河川洪水宣洩不易。此外，海堤前之實測潮位為驗證溯升推估模式之重要輸入條件之一，而近岸結構物的設計亦需附近的潮位、波浪及地形水深等資料。

繪製海上資料浮標時，常需預測的外海朝夕資料，但國內的潮位站絕大多數位於港內，港內的潮位預測值並無法代表外海的潮位變化，以致潮時預測失準，影響潛水作業的時間估計，但未有數據佐證。

外海潮位隨地點而變化，Kim et al. (2018)以SELFE (Semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element)潮位模式模擬南中國海的潮汐，得出M2, K1, S2, O1, N2, P1, K2, and Q1等8個分潮的等振幅等值圖(Iso-amplitude contours)與等相位延遲等值圖(Iso-phase-lag contours)。從Kim et al. (2018)的圖可看出，M2, S2, N2, and K2等4個半日潮之振幅與相位延遲在南中國海的開闊海域中，等值線明顯較為稀疏，顯示振幅與相位之變化幅度小，而在臺灣海峽中隨著位置而變化之幅度相當大。可看出潮位受地形影響程度，然而Kim et al. (2018)的研究為大區域之模式模擬結果。

蔡(2013)運用NAO99b潮位模式模擬台灣周圍海域各網格點之潮位，將整年潮位做調和分析，進而繪製臺灣海域等潮時圖與等潮位圖，並疊合前述兩圖，建立潮位分區圖，以作為海域水深測量修正潮位之用。蔡(2013)並指出，潮位模式受地形與人為結

構物等影響而有不規律之模擬誤差。然而蔡(2013)亦為大區域之模式模擬結果。

張等人(2001)在臺灣西南海岸將軍、興達與枋寮設置臨時潮位站，並蒐集中央氣象局高雄等潮位站資料分析，結果發現，M2分潮振幅由將軍往南快速減小，至高雄最小，再往南至枋寮與後壁湖略增，振幅約為將軍的一半。潮波自南部進入臺灣海峽後向北傳遞，將軍與高雄潮時相差3-4 hr以內，興達與高雄潮時相差1-1.5 hr以內，而枋寮與高雄潮時相差0.5-1 hr以內，並指出隨日期不同，潮時差變化亦不同。然而，張等人(2001)為較大範圍海域之實測資料分析結果。

林等人(2005)在基隆港內設置3處臨時潮位站，並引用同在基隆港內且最接近出海口的驗潮站資料，指出港內水域依受到潮汐的影響機制分為感潮段與壓力平衡段，港內平均水位在不同水域並非一定值，且港內感潮段的水位變化直接受外海潮汐波傳播影響，與港外有潮時差現象。然而該研究並未引用港外潮位資料。此外，林等人(2005)以2004年11月幾天的潮位資料，分別繪製3座臨時潮位站與驗潮站每日水位變動差值比較圖，發現3條誤差曲線皆有長週期震盪，並指出此為某些水動力機制在影響感潮段與壓力平衡段之間水位的變化。

有鑑於此，本研究選取小琉球GNSS (Global navigation satellite system)浮標(位於港外)、小琉球潮位站(位於港內)與東港潮位站(位於港內)實測的潮位資料，以港外資料分別與港內的小琉球潮位資料及東港潮位資料比較，以瞭解小區域的港內與港外潮位特性差異。

二、研究方法

以往研究顯示，使用衛星高度計 (satellite altimetry) 能觀測外海潮位，然而 Dawidowicz (2014) 指出衛星高度計在近岸海域觀測水位誤差較大。在近岸海域，GNSS 浮標為一種可行的方法。

(一) GNSS 浮標觀測原理

GNSS 浮標能接收 GPS 及 GLONASS 衛星訊號，並解算天線三維坐標，包括經緯度與高度。Lin et al. (2017) 在量測時運用內政部國土測繪中心所提供之 VBS-RTK (Virtual Base Station Real-Time Kinematics) 服務，接收來自 VBS-RTK 控制中心之虛擬觀測數據，GNSS 浮標利用本身接收之雙頻觀測數據與 VBS-RTK 控制中心回饋之虛擬觀測數據，解算整數週波未定值，在收斂獲得固定解 (Fixed ambiguity) 後，即可獲得 cm 等級精度之經緯度與高度資料。

林等人 (2017) 將量測天線之橢球高 (Ellipsoidal height) 換算為以基隆平均海平面為基準之高度，且由於 GNSS 天線安裝高度超過 2 m，及 GNSS 浮標隨波晃動之故，進而以 GNSS 天線安裝高度與傾角計算，而獲得瞬時海面高度，此高度之基準為 2001 臺灣高程基準 (Taiwan Vertical Datum 2001, 簡稱 TWVD 2001)。

(二) 現場觀測位置與資料選取

本研究使用之逐時潮位資料來自小琉球 GNSS 浮標、小琉球潮位站與東港潮位站，其相對位置如圖 1，資料期間為 2017 年 11 月 - 2019 年 2 月。小琉球 GNSS 浮標位於小琉球南方海域，水深約為 100 m，距最近的岸邊約 1.0 km，為位於港外之潮位站。小琉球與東港潮位站分別位於小琉球白沙尾漁港內與東港漁港內，測站位置如圖 1。小琉球 GNSS 浮標與小琉球及東港潮位站之距離分別為 4.9 km 及 18.8 km。

小琉球 GNSS 浮標裝設有 GNSS 與傾角計，GNSS 為美國 Topcon Positioning Systems 公司製造之 MR-1，傾角計為荷蘭 Xsens Technologies B.V. 公司製造之 MTi 10 series attitude heading reference system (AHRS)。取樣頻率為 2 Hz，取樣期間為每小時的 50 min 起，共 10 min，以 54 min 之後的 6 min 原始數據計算逐時平均潮位。由於上述每個瞬間 GNSS 之解算成果未必能收斂，因此本研究從上述 6 min 之數據中，僅挑選收斂之瞬時海面高度數據進行算術平均，以計算逐時平均潮位，此資料再經過資料品管檢查，剔除不合理的逐時資料後，即作為後續分析與比較使用。

小琉球與東港潮位資料均為中央氣象局潮位站，本研究採用其每 6 min 的平均潮位資料繪製時序列圖，而在計算潮位差值時，則採用與小琉球 GNSS 浮標同樣為 54 min 之後 6 min 之平均潮位。

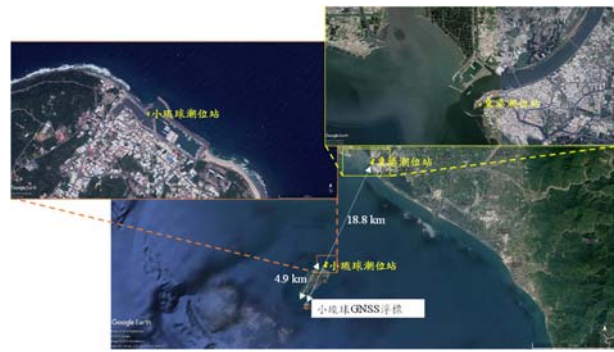


圖 1 測站位置圖

(三) 調和分析 (Harmonic analysis)

引起潮汐的原因有：天體萬有引力、地球公轉、地球自轉、氣象變化等，但最主要者為太陽及太陽的引力，使海面產生一種週期性的升降運動，這種垂直方向的運動即稱為潮汐。

調和分析法乃基於天文潮理論，將各地實測所得之週期性潮位紀錄，視為多個具單一週期且為簡諧運動之潮汐分潮所組成。理論上潮汐應包括無限多的分潮成分，但實際應用上僅就主要分潮進行分析即可達到所需目的，其主要方法係利用最小二乘法 (Least squares method) 讓實際潮位與調和潮位誤差值達到最小。當潮位由調和分析之後即可得到各分潮之調和參數 (包括各分潮之振幅及相位角等)，可據以計算各時刻之天文潮。

本研究採用 Aslak Grinsted 所發展之 Tidal fitting toolbox Matlab 程式進行分析，採用 60 個主要分潮進行計算，所得結果如後所述。

三、結果與討論

(一) 港內外潮時之差異

圖 1 為 2018 年 11 月 GNSS 浮標與小琉球潮位站潮位資料及兩者差異變化圖，由於小琉球潮位站無法進行高程引測，無法獲得以基隆平均海平面為基準的潮位資料，因此 GNSS 浮標與小琉球潮位站潮位資料均分別扣除 2017 年 11 月 - 2019 年 2 月期間之平均值，兩者差值為 GNSS 浮標減去小琉球潮位站之潮位，從圖中發現部分的 GNSS 浮標高潮位與低潮位分別較小琉球潮位站之高潮位與低潮位提早發生，以較細部之圖 2 觀察，可發現 11 月 4 - 7 日有數個高潮位時刻，GNSS 浮標較小琉球潮位站提早，亦有數個低潮位時刻，GNSS 浮標較小琉球潮位站提早。

圖 3 為 2018 年 11 月 GNSS 浮標與東港潮位站潮位資料及兩者差異變化圖，不同於 GNSS 浮標與小琉球潮位站之潮位資料，GNSS 浮標與東港潮位站潮位資料之基準均為基隆平均海平面，兩者差值為 GNSS 浮標減去東港潮位站之潮位，從圖中發現部分的 GNSS 浮標高潮位與低潮位分別較東港潮位站之高潮位與低潮位提早發生，以較細部之圖 4 觀察，可發現 11 月

5 - 7日有數個高潮位時刻，GNSS浮標較東港潮位站提早，亦有數個低潮位時刻，GNSS浮標較東港潮位站提早。

表1為3站之分潮相位角，從中亦可發現GNSS浮標與小琉球及東港潮位站之M2分潮相位角分別為 16.05° ， 22.52° 與 28.85° ，顯示位於港外之GNSS浮標M2分潮潮時分別較位於港內之小琉球及東港潮位站提早 6.47° 與 12.8° ，相當於 0.23 hr 與 0.46 hr ，此與上述時序列圖觀察結果一致，但與蔡(2013)繪製之臺灣海域等潮時圖並不一致。圖5為擷取自蔡(2013)之臺灣西南海域等潮時圖，圖中等潮時線單位為hr，從圖中等潮時線觀察，可知根據模式模擬結果，小琉球GNSS浮標較之東港，其潮時延後約 0.1 hr ，而小琉球GNSS浮標與小琉球潮位站之潮時相等。

上述實測與模式潮時分析結果差異之原因可能是港口附近地形水深變化複雜，且港口斷面受限，漲潮海水從港外流動至港內，與退潮海水從港內向外流動時，較之港外的開闊海域，需要更多時間流入與流出，因此造成港內潮位較之港外潮位之相位有延遲現象。而蔡(2013)著重於模擬大範圍的臺灣週邊海域潮位，採用 $5'$ 網格點計算一年潮位並調和分析，進一步計算潮時與潮差，再內插出在 $1'$ 網格點上之潮時與潮差，而繪製等潮時圖與等潮差圖，其採用之 $5'$ 網格相當於 9 km ，這樣的解析度無法精確表示港口附近複雜的地形與水深變化，因此造成在近岸海域模擬之潮時誤差較大。

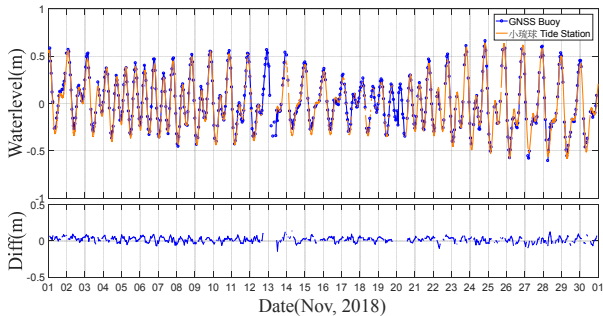


圖1 2018年11月GNSS浮標與小琉球潮位站潮位資料及兩者差值變化圖

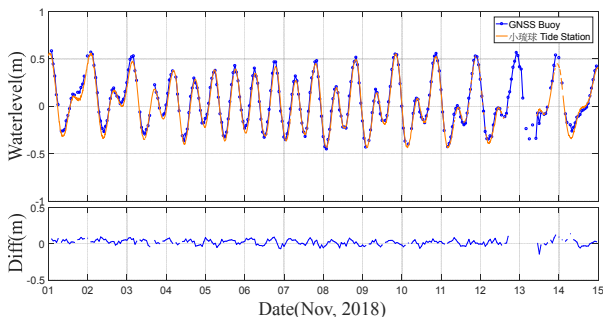


圖2 2018年11月1 - 14日GNSS浮標與小琉球潮位站潮位資料及兩者差值變化圖

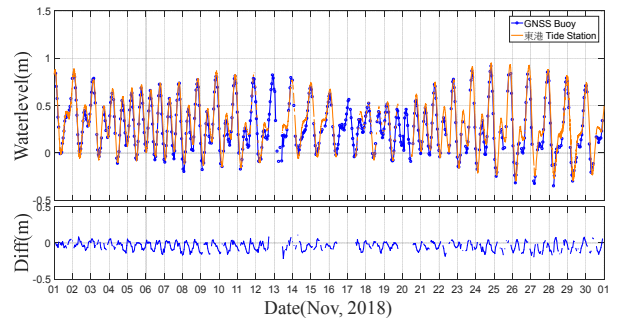


圖3 2018年11月GNSS浮標與東港潮位站潮位資料及兩者差值變化圖

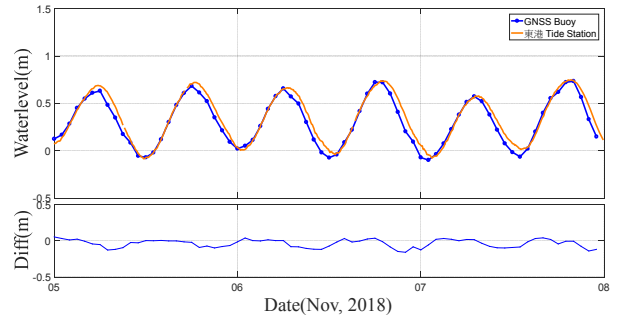


圖4 2018年11月5 - 7日GNSS浮標與東港潮位站潮位資料及兩者差值變化圖

表1 GNSS浮標與小琉球及東港潮位站分潮相位角

分潮	GNSS浮標	小琉球潮位站	東港潮位站
M2	16.05	22.52	28.85
S2	235.73	234.45	238.63
K1	290.76	288.12	290.38
O1	43.48	42.35	42.30
N2	291.77	298.61	302.70
P1	292.23	291.62	295.24
K2	26.80	57.06	62.99
Q1	315.66	312.82	311.96

單位： $^\circ$

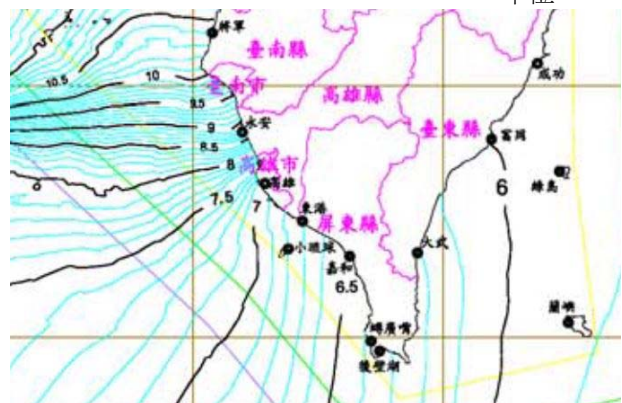


圖5 臺灣西南海域等潮時圖(蔡, 2013)

(二) 水位變動差值之長週期震盪

為探討差值週期震盪現象，給定一正弦波，為時間 t 之函數，以 $\sin(t)$ 表示，再給定另一相位相差 10 s之正弦波，以 $\sin(t+10)$ 表示，計算兩者差值，繪如圖6，橫軸為 t ，單位為s，可看出兩正弦波差值亦呈現週期震盪，且其震盪週期與正弦波週期相同，其極值發生於高、低潮位之間。

觀察圖2上圖，11月4-7日GNSS浮標較小琉球潮位之相位提早，而從圖2下圖可發現，兩者差值之特性與圖6中差值之特性吻合。觀察圖4上圖，GNSS浮標較東港潮位之相位提早，並從圖4下圖發現兩者差值之特性與圖6中差值之特性吻合。綜合上述GNSS浮標vs.小琉球潮位站與GNSS浮標vs.東港潮位站比較結果可知，兩潮位站潮位之間的相位差導致潮位差值呈週期性震盪，潮位差值之震盪週期與潮位週期相同，且其極值發生於高、低潮位之間。

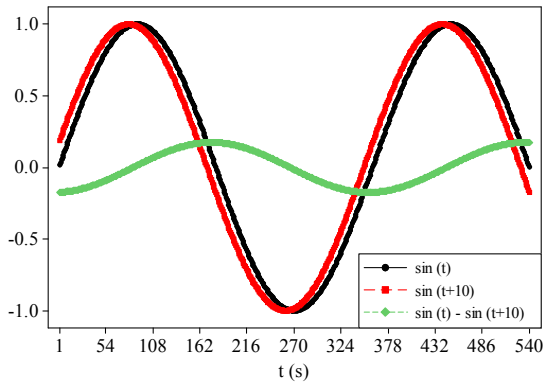


圖6 兩正弦波與差值變化圖

(三) 港內外潮差之差異

從圖2可發現小琉球GNSS浮標相對於小琉球潮位站，其潮差有時較大，有時較小。從圖4亦發現小琉球GNSS浮標相對於東港潮位站，其潮差亦有時較大，有時較小，可知在港內外之間，平均潮差應未有明顯差異。從表2 GNSS浮標與小琉球及東港潮位站分潮振幅可發現，3站的分潮振幅之間差異微小，最大僅相差2 cm，係為GNSS浮標與東港潮位站之S2分潮振幅差異。另一方面，依據擷取自蔡(2013)模擬分析之臺灣西南海域等潮位圖(圖7)，圖中等潮差線之單位為m，觀察東港與小琉球之位置，可知兩處位於同一條等潮差線上，亦即兩處3站之潮差相等，此與實測資料分析結果一致。由此可知局部區域內，港內與港外潮位站之潮差並無明顯差異。

表2 GNSS浮標與小琉球及東港潮位站分潮振幅

分潮	GNSS浮標	小琉球潮位站	東港潮位站
M2	0.23	0.23	0.23
S2	0.09	0.08	0.07
K1	0.19	0.18	0.18

O1	0.16	0.15	0.15
N2	0.05	0.05	0.05
P1	0.06	0.06	0.06
K2	0.02	0.02	0.02
Q1	0.03	0.03	0.03

單位：m

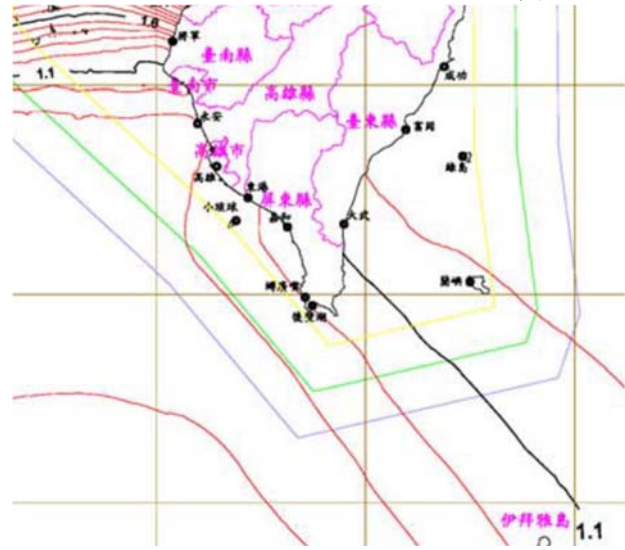


圖7 臺灣西南海域等潮位圖(蔡, 2013)

四、結論與建議

從以上試驗與分析，獲致以下結論與建議：首先，局部區域內之港內潮位較之港外潮位之相位有延遲現象，亦即港外高、低潮位之潮時較之港內提早。其次，港內外兩潮位站潮位之間的相位差導致潮位差值呈週期性震盪，潮位差值之震盪週期與潮位週期相同，且其極值發生於高、低潮位之間。此外，局部區域內，港內與港外潮位站之潮差並無明顯差異。惟前述結論為小琉球與東港局部海域之研究結果，建議未來收集他處海域之港內外潮位資料分析。

謝誌

感謝交通部中央氣象局購買GNSS及資料擷取設備，提供小琉球浮標作為試驗平台，並提供小琉球與東港潮位站資料，使本研究能順利進行。

參考文獻

1. 林昭圭、林玉峰、戴益寶, 2005: “基隆港及花蓮港的水位觀測研究”, 第27屆海洋工程研討會論文集, 949-956
2. 林寅斌、黃清哲、董東璟、高家俊, 2017: “近岸海域潮位與皮浪觀測用GNSS浮標效能之研究”, 海洋工程學刊, 第17卷, 第3期, 175-196
3. 張國棟、何崇華、沈建全、陳昭憲, 2001: “臺灣西南海域潮汐特

性分析’，第23屆海洋工程研討會論文集, 112-119

4. 蔡宗旻, 2013: “臺灣海域網格化潮位分區及視窗化潮位加值模式從事水深測量之潮高修正”, 國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文, 263 pp
5. Dawidowicz, K., 2014: “Sea level changes monitoring using GNSS technology – a review of recent efforts”, *Acta Adriatica* 55(2), pp. 145-161
6. Kim, K.O., Choi, B.H., Lee, H.S., and Yuk, J.-H., 2018: “Regional realtime ocean tide and storm-surge simulation for the South China Sea”, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* 30(2), pp. 69-83
7. Lin, Y.-P., Huang, C.-J., Chen, S.-H., Doong, D.-J., and Kao, C. C., 2017: “Development of a GNSS buoy for monitoring water surface elevations in estuaries and coastal areas”, *Sensors* 17(172), doi:10.3390/s17010172