

宜蘭無尾港濕地全潮調查及陸化原因探討

Tidal Current Investigation and Relevant Reclamation Identification of the Wu-wei-kang Wetland

國立臺灣大學
森林環境暨資源學系
副教授

盧道杰

Dau-Jye Lu

國立臺灣大學
水工試驗所
副研究員

施上栗*

Shang-Shu Shih

國立臺灣大學
水工試驗所
技士

黃國文

Gwo-Wen Hwang

台灣颱風洪水研究中心
助理研究員

楊勝崎

Sheng-Chi Yang

國立臺灣大學
森林環境暨資源學系
碩士生

游紫晴

Zih-Cing You

國立臺灣大學
地理環境資源學系
副教授

蔡博文

Bor-Wen Tsai

國立臺灣大學
地理環境資源學系
博士生

鍾明光

Ming-Kuang Chung

摘要

本研究針對宜蘭無尾港濕地近年發現的濕地陸化現象進行調查及模擬分析，選定由溼地到港口大排及新城溪的六處樣點，與在地保育團體合作，以全潮測量方式調查一個完整潮週的水位及流速資料，並以 HEC-RAS 模式模擬分析六連閘門操作方式，對濕地之水位、潮流量及潮流體積的影響，除進行現況流況分析外，另模擬六連閘門全開的預案流況。研究發現，本區入流濕地之潮流量遠大於平時港口大排及上游湧泉區入流濕地的淡水流量；閘閥門全開讓潮水自由進出的方式，能維持雁鴨科水鳥喜好之水深條件，有助於緩解無尾港濕地暴露於濕地陸化的風險。現況與預案 50%浸淹機率之水深分別為 0.17 m 與 0.39 m，相差可達 0.22 m，由此可知六連閘門的啓閉方式，將直接影響無尾港濕地的水文狀態，以濕地保育的觀點而言，應儘速建立適當的水閘門操作規範。

關鍵詞：無尾港，濕地，陸化，全潮調查，水理模擬。

*通訊作者，國立臺灣大學水工試驗所副研究員，10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號(台大水工所 401B 室)；uptreesih@ntu.edu.tw

ABSTRACT

This study aims to explore the reclamation causes of the Wu-wei-kang wetland. It cooperates with a local conservation organization, and adopts the tidal current investigation to measure the water level and velocity at six points from Kang-kuo canal to the Hsing-cheng creek. The hydrodynamic model, HEC-RAS, was used to examine the scenario analysis of the operation for the water gate connecting the river and its influences. Water level, velocity, tidal current quantity and volume were simulated and calculated. The results show that the tidal current quantity flowing into the wetland is far larger than those freshwater from upstream of the Kang-kou canal and spring. It also reveals opening the gate to allow free flowing in and out for the tidal current can maintain a favorite habitat with proper water level for the wild ducks, which will help to reduce the risk of this wetland on reclamation.

Keywords: Wu-wei-kang, wetland, reclamation, tidal current investigation, hydrodynamic simulation.

一、前言

宜蘭縣無尾港濕地位於蘭陽平原最南端，原為新城溪(武荖坑溪)之出海口，1968 年因颱風淤塞，造成河流改道，加上後續幾次洪氾及海域飄沙積塞了原有的河道，導致當地每逢大雨就會發生嚴重水患，當時政府為整治新城溪，將出海口北移，原河口遂逐漸退縮淤積形成濕地水域(劉小如，1996)。至今日為止，舊河道仍維持著濕地的型態。

無尾港濕地是北臺灣主要雁鴨水鳥度冬區之一，每年 10 月至翌年 3 月有數以千計各類雁鴨科水鳥聚集棲息，1988 年國際水禽研究中心(IWRB)與國際自然資源保育聯盟(IUCN)在亞洲濕地調查報告中將無尾港列入臺灣十二大重要濕地。1993 年 9 月 24 日，宜蘭縣政府依「野生動物保育法」公告劃設為「無尾港水鳥保護區」，並以水鳥為主要保育對象。由於雁鴨科水鳥喜好一定水深的水域環境(Ma *et al.*, 2010)，濕地水位維持遂成為本保護區主要保育重點之一。

2009 年夏天，無尾港文教促進會(以下簡稱：促進會)及宜蘭縣政府觀察發現保護區水域面積減少，灘地裸露及濕地陸化情況相當嚴重，亟需儘快瞭解本區的水文狀態(宜蘭縣政府，

2010)。無尾港地區過去的調查研究與保育計畫多著重保護區的經營管理(王牧寧，2007)，與步道巡護、底棲調查、鳥類調查、夜間觀察等環境監測，較缺乏完整的水文調查。

由於溼地的陸化多與水文狀態相關，無尾港濕地又屬感潮地區，潮流量為最重要的水文量之一，釐清濕地感潮水域之水文收支情況，或為探究與因應陸化的關鍵，而系統性量測感潮系統一個潮汐週期內之水文量變化情形的全潮測量(Kjerfve and Proehl, 1979; Mariotti and Fagherazzi, 2011; Elgar and Raubenheimer, 2011)至為必要。本研究旨在整合在地社區志工力量，進行全潮測量，收集完整之潮位、潮流速、潮流量等重要水文量，建置數值模式，並以其設定不同的預案(Scenario)進行模擬、比對及分析，藉以釐清本濕地之陸化原因。

二、研究方法與材料

2.1 研究區域

無尾港濕地位處宜蘭縣蘇澳鎮，為蘭陽平原最南端，澳仔角以北、新城溪以南，是以海岸防風林內湖泊沼澤為中心的感潮濱海濕地(劉小如，1996)。本濕地屬新城溪流域，上游無河道入流，下游連接港口大排，主要水體來源為降雨時



圖 1 無尾港濕地位置圖

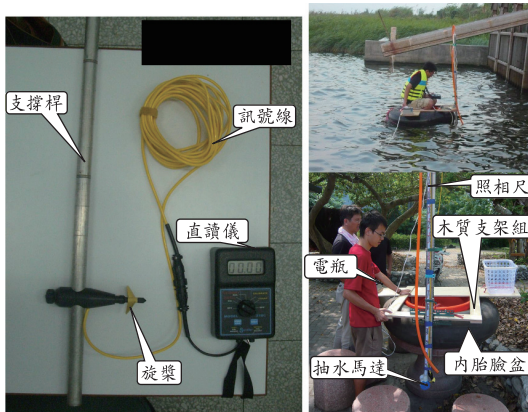


圖 2 全潮測量載具及儀器設備

濕地周圍之地表逕流，平時上游湧泉出流量甚小，港口大排影響濕地水文變化大(盧道杰，2010)。港口大排於匯入新城溪處設有一座六連閘門，主要由下游側 8 道逆止閘門及上游側 4 道直

立式閘門組成(圖 1)。其外閘內閘之設計，是為防止平常大潮或颱風時期海水倒灌之用。港口大排河寬介於 20-25 公尺，全長約 1,350 公尺；無尾港濕地水域寬介於 10-100 公尺，全長約 1,250 公尺。港口大排及無尾港濕地合成之水域系統，本文稱之為「無尾港濕地水系」。

2.2 全潮測量

在促進會志工的協助下，本研究自行組裝完成全潮調查所需的量測載具(圖 2)。載具搭載流速儀及量尺，每一小時量測一次水深及流速，本研究全潮調查日期為 2010 年 9 月 25 日(農曆 8 月 18 日；屬大潮)，全潮測量開始施測時間為 7 時至 19 時。水深以水尺量測，精度為 cm；流速是以一維旋槳式流速儀量測，精度為 cm/s。量測位置等資訊說明如表 1 及圖 4。

以代表流速法量測施測斷面之流速，再以代

表 1 無尾港濕地全潮調查樣站資料表

樣站名稱	斷面寬(公尺)	位置	備註
閘門外	25	六連閘門下游側	無尾港濕地水系之下游邊界
閘門內	25	六連閘門上游側	港口大排之流況代表
存仁路橋	25	存仁路橋上游側	港口大排之流況代表
港口橋	25	港口橋下游側	港口大排之上游邊界
濕地內	35	濕地中游附近	濕地內之流況代表
舊閘門	50	濕地接近湧泉區之舊閘門下游側	濕地之上游邊界

註：全潮調查日期為 2010 年 9 月 25 日(農曆 8 月 18 日)，屬大潮。

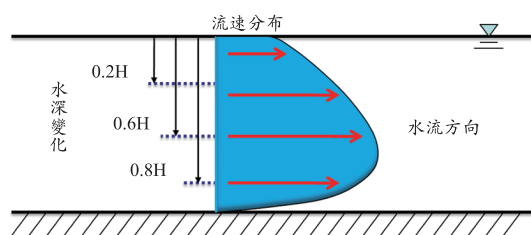


圖 3 河道之流速分布及水深變化示意圖

表流速乘以通水面積，即可計算流量(Chow, 1959)。本研究以 2 點法計算代表流速，即於每處位置量測 2 點不同水深之流速(如圖 3)，再於橫斷面方向取 2 處代表位置，並以(1)~(4)式計算潮流量及潮流體積。

$$V_L \text{ 或 } V_R = (V_{0.8H} + V_{0.2H})/2 \dots\dots\dots(1)$$

$$V_{\text{average}} = (V_L + V_R)/2 \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_i = A_i \times V_{\text{average}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\nabla_1 = \Sigma(L_i \times A_i) \dots\dots\dots(4)$$

式中， V_L 為左岸流速、 V_R 為右岸流速、 $V_{0.2H}$ 為 0.2 水深位置之流速、 $V_{0.8H}$ 為 0.8 水深位置之流速、 V_{average} 為平均流速、 Q_i 為 i 時刻某斷面之流量、 i 時刻某斷面之通水面積 $A_i = H_i \times B_i$ ， H_i 為 i 時刻某斷面之水深、 B_i 為 i 時刻某斷面之河道寬度、 ∇_1 為 i 時刻下游邊界至某斷面之潮流體積。 $L_i = (L_1 + L_2)/2$ 為控制長度， L_1 ：該斷面至上游次一斷面之河心距離， L_2 ：該斷面至下游次一斷面之河心距離。

另以韋伯法(Weibull method)分析各水位值

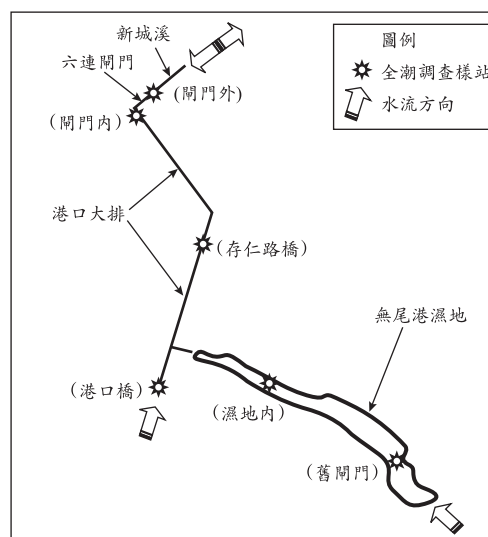


圖 4 無尾港濕地全潮調查樣站位置示意圖

的發生機率(Chow, 1988)，將所有水位值依大小排序，以韋伯法計算超越機率 (exceeding probability)：

$$P(\%) = m/(N + 1) \times 100 \dots\dots\dots(5)$$

其中， P 為第 m 筆水位之超越機率、 m 為該筆水位之資料序位， N 為全部水位之資料總數。

2.3 數值模式

水理模擬之數值模式採用 HEC-RAS 模式，該模式是美國陸軍工程師團水文工程中心所發展之河川分析系統(River Analysis System) (Brunner, G. W. and CEIWR-HEC, 2010)。可進行定量流、變量流及輸砂演算。HEC-RAS 模式以標準步推法求解能量方程式並計算水面線：

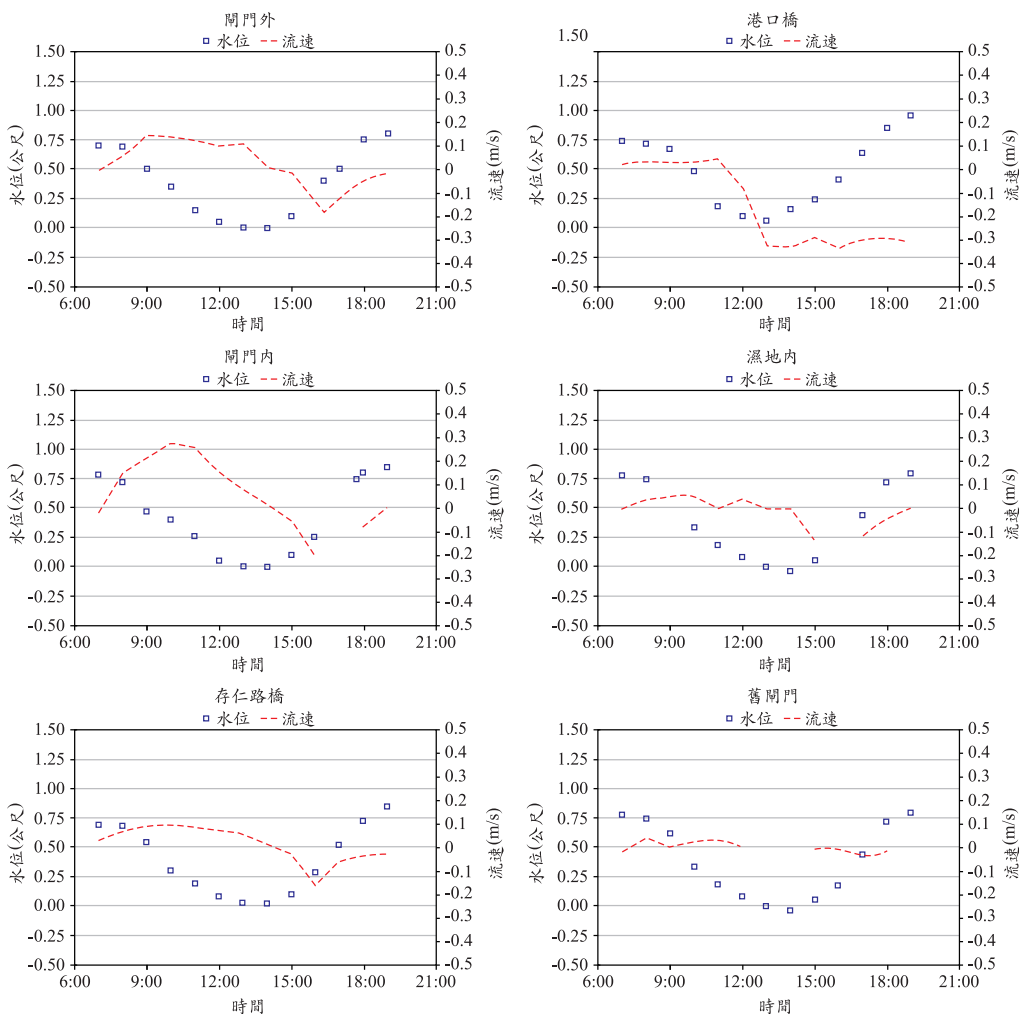


圖 5 全潮測量各樣站之水位、流速變化圖

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \dots\dots\dots (6)$$

其中， Y_2 及 Y_1 為下游及上游河道斷面水深； Z_2 及 Z_1 為下游及上游河道底床高程； V_2 及 V_1 為下游及上游斷面平均流速； α_2 及 α_1 為下游及上游動量修正係數； g 為重力加速度； h_e 為下游至上游斷面之能量損失。

能量損失方程式：

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \dots\dots\dots (7)$$

其中， L 為權重上下游斷面距離； $\bar{S}_f$ 為兩斷

面間之摩擦坡度； C 為漸闊漸縮損失係數。

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \dots\dots\dots (8)$$

其中， L_{lob} 、 L_{ch} 及 L_{rob} 為左河槽、主河道及右河槽之上下游斷面距離； $\bar{Q}_{lob}$ 、 $\bar{Q}_{ch}$ 及 $\bar{Q}_{rob}$ 為左河槽、主河道及右河槽之流量。

三、結果與討論

3.1 全潮測量成果

3.1.1 水位

各樣站之水位、流速隨時間變化情形如圖 5

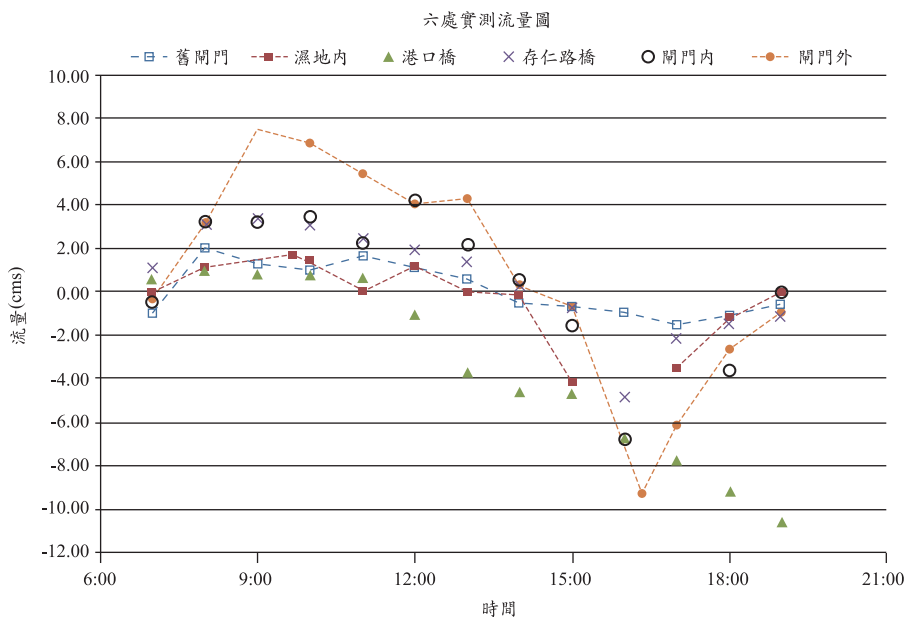


圖 6 全潮測量各樣站之潮流量變化圖

所示。從 7 時至 19 時的全潮測量中，位於保護區外之「開門外」樣站之水位於 7 時及 8 時時為最高，約為 0.70 公尺，隨後逐漸降低，13 時及 14 時降至最低，約為 0.00 公尺，而後水位逐漸升高，於 19 時達最高約 0.80 公尺。由圖 5 可知早上 7 時之水位為高潮位，13 時及 14 時為低潮位，19 時又為高潮位，與中央氣象局蘇澳站海水位變動趨勢相符。

「濕地內」樣站之水位於 7 時最高，約為 0.76 公尺，隨後逐漸降低，至 14 時降至最低，約為 -0.03 公尺，而後水位逐漸升高，於 19 時達最高約 0.80 公尺。此水位變動，與「開門外」及蘇澳站水位變動趨勢接近，惟水位值及時間上，有些微差異。本次全潮測量其他樣站水位資料，也有類似情形。另外，由於「港口橋」位於港口大排上游側，有上游入流量進入，退潮水位下降時，水位仍較其他樣站高 20 公分左右，最低潮位時則差異不大。

3.1.2 流速

「開門外」之流速於早上 7 時漲至最高潮時，流速幾乎為 0.00 m/s；隨著退潮流速逐漸增加，最高為 0.15 m/s；到了最低潮 14 時時，流速

又降至 0.00 m/s；而後因為漲潮，水流往上游逆流，因此流速為負值，到 16 點達最大 -0.20 m/s；又因漲至最高潮，流速又趨緩，至 19 時時，已趨近於 0.00 m/s，實際值約為 -0.02 m/s。「濕地內」之流速於早上 7 時漲至最高潮時，流速幾乎為 0.00 m/s；隨著退潮流速逐漸增加，最高為 0.05 m/s；到了最低潮 13-14 時時，流速又降至 0.00 m/s；而後因為漲潮，水流往上游逆流，因此流速為負值，到 15 時達 -0.12 m/s。比較「開門外」及「濕地內」之流速變化，具有相同趨勢，但「濕地內」位於較上游，所以流速變化幅度較「開門外」小，表示水體交換較少，僅水位變動較劇烈。

3.1.3 潮流量

潮流量變化情形與流速幾乎一致，而潮流量大小則同時與水位及流速值有關，退潮流量約等於 0.8-7.4 cms 間，而漲潮流量則約等於 0.7-9.2 cms 間(如圖 6)；空間趨勢上，越靠近外海，其潮流量越大，與一般潮汐傳遞原理吻合(湯麟武，1989)。另外，「濕地內」樣站的潮流量受下游邊界條件影響，退潮時潮流量為正流量，於 9 時至 10 時間達到最大正流量為 1.73 cms，而後

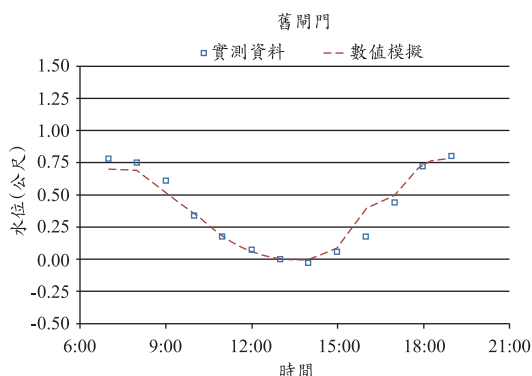


圖 7 「舊閘門」站之水位驗證成果

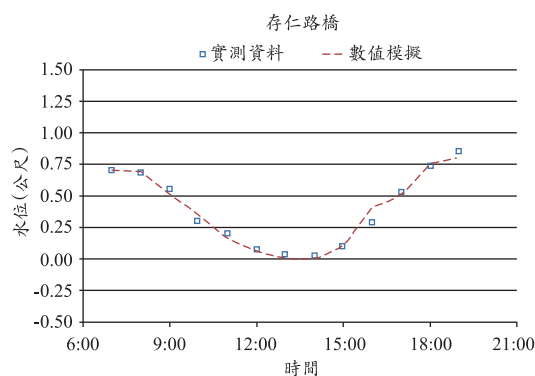


圖 9 「存仁路橋」站之水位驗證成果

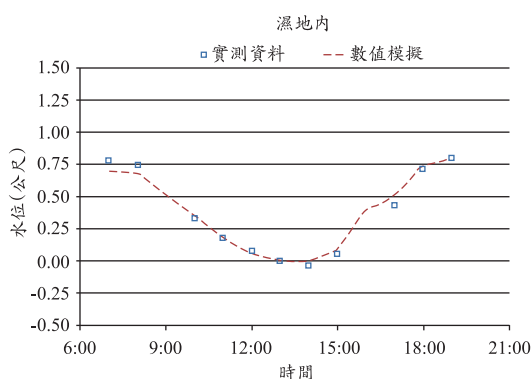


圖 8 「濕地內」站之水位驗證成果

流量逐漸縮小。漲潮後開始轉為負值，表示下游水流往上游流動，於 15 時至 17 時間達最大負流量為 -4.20 cms，隨後流量又逐漸減小。

3.2 HEC-RAS 模式驗證

根據上述全潮測量結果，輸入模式邊界條件為：港口大排上游邊界流量為全潮測量時之實測流量、濕地上游邊界流量為實際量測之流量 0.005 cms、下游邊界水位為「閘門外」樣站之實測潮水位；並調整模式參數使其與調查結果盡量吻合，以「舊閘門」、「濕地內」及「存仁路橋」三處樣站之水位值作為模式驗證對象，結果如圖 7~圖 9 所示。模擬結果與實測結果相當接近，證明 HEC-RAS 能確實掌握本濕地的潮位變動情形，可用以分析濕地內水位及流量變化，作為管理上的情境模擬之用。

3.3 現況與預案模擬結果比較

由於六連閘門平常開啟閘門，僅由逆止閘門依內外水位自動運作，讓水流只出不進（「現況」之流況）。本研究另行設計一預案，以上述經過驗證的 HEC-RAS 模式模擬此預案之流況，並與現況進行比較。

「預案」設定為：閘門及逆止閘均打開，亦即模擬潮汐自由進出濕地的情境分析。模擬時間共兩個潮週（由低潮至高潮為一潮週，約 13 小時，兩個潮週共約 26 小時），港口大排之上游邊界為全潮測量時之低潮位時的流量 1.0 cms，濕地上游邊界為實際量測之流量 0.005 cms，下游則以全潮測量的兩個潮週為邊界條件。

3.3.1 水位

由「濕地內」水位演算成果（如圖 10）可知，現況（閘門開啟及逆止閘門自動運作）模擬結果發現，一開始邊界條件（外水位）為低潮水位，而後水位逐漸上升之漲潮階段，此時逆止閘門發揮阻擋外水作用，外水無法流入。「濕地內」水位（內水位）受上游入流影響水位逐漸上升，至第 10 個小時水位達 0.37 公尺。此時，下游邊界條件已進入退潮時段，外水位開始低於內水位，逆止閘門受內外水位差而推開，水流由內往外流，「濕地內」水位也開始下降，至第一個潮週結束，水位降至與外水位相同之 0.00 公尺。「濕地內」第二個潮週之水位演算成果與第一潮週相同。

預案（閘門及逆止閘門全部開啟）模擬結果發現，「濕地內」水位與下游邊界條件幾乎相同，

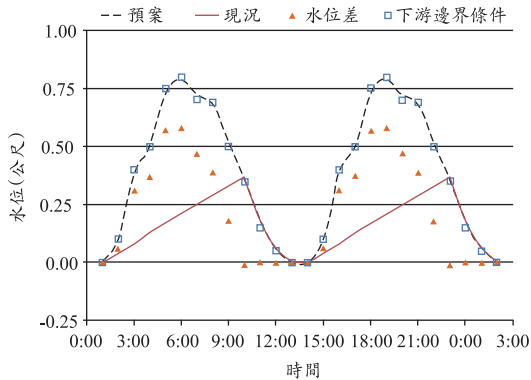


圖 10 「濕地內」現況與預案水位差異變化圖

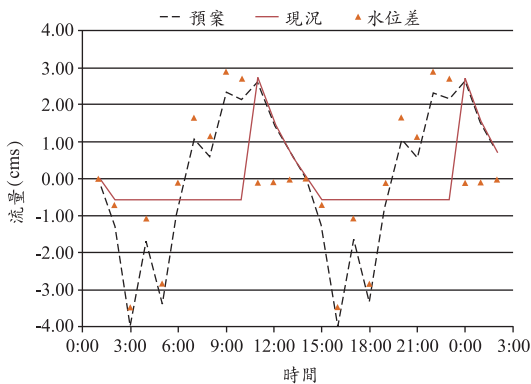


圖 11 「濕地內」現況與預案之潮流量差異變化圖

在潮週中第 6 個小時水位達最高值，較現況早 4 個小時發生。另外，現況及預案平均水位分別為 0.16 及 0.39 公尺，平均水位差 0.22 公尺，最大水位差達 0.58 公尺，顯示閘閥門全部開啓讓潮水自由進出，對濕地水位的維持相當重要，尤其在枯水期時，濕地缺乏直接入流的淡水流量，預期此水位差異現象將更明顯。

3.3.2 潮流量

潮流量模擬結果如圖 11，於現況的初始模擬階段，由於逆止閘門阻擋外水流入，「濕地內」之流量是由港口大排上游淡水入流，流量約為 -0.56 cms，前 10 個小時皆為負流量。過第 10 小時後，逆止閘門受水位差而推開，濕地內及港口大排內水往閘門外流，故出現正流量，最大達 2.64 cms，隨著退潮機制的作用，流量逐漸變小。

比較預案與現況發現，漲潮時段「濕地內」

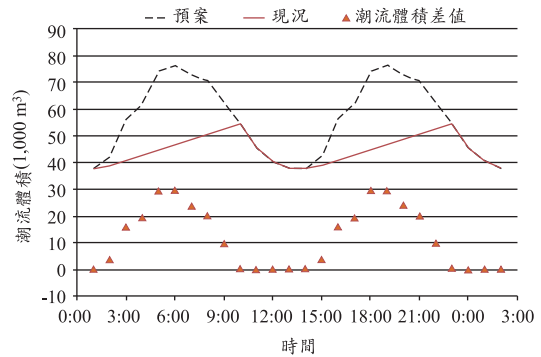


圖 12 「濕地內」現況與預案之潮流體積差異變化圖

之潮流量可相差達 3.48 cms，相當於現況時「濕地內」潮流量之 6 倍強；退潮時段第 9 小時「濕地內」之潮流量可相差達 2.91 cms，相當於現況時「濕地內」潮流量之 5.2 倍強。至第 11 小時後，下游邊界退潮至低水位時，預案與現況之潮流量即為相等。「濕地內」第二個潮週之潮流量差異與第一潮週相同。由此可知，六連閘門操作為主要影響潮流量進出濕地的控制因子。

3.3.3 潮流體積

由「濕地內」潮流體積演算成果可知，趨勢與水位演算成果類似(如圖 12)。「濕地內」潮流體積乃為由閘門起算之港口大排及至「濕地內」的水流體積。於現況時，「濕地內」潮流體積由一開始演算的 37.6×10^3 立方公尺逐漸增加至 54.5×10^3 立方公尺，過第 10 小時後，逐漸減少。於預案時，「濕地內」潮流體積則隨著外水位潮汐變化，由 37.6×10^3 立方公尺逐漸增加至 76.2×10^3 立方公尺，過第 6 小時後，逐漸減少至 37.7×10^3 立方公尺。「濕地內」第二個潮週之潮流體積演算成果與第一潮週相同。預案與現況之比較，可發現隨著漲潮機制發生，兩者之潮流體積差異逐漸加大，於第 6 小時達 29.6×10^3 立方公尺，已是現況潮流量的 58%，而後潮流體積差隨退潮逐漸縮小，到低潮時幾乎沒有差異。此差異現象主要是因為閘閥門全開時，潮流能夠自由進出，潮流量主導整體水域體積，而現況下因逆止閘門自動運作，水域體積僅剩港口大排及湧泉區進入的淡水流量。

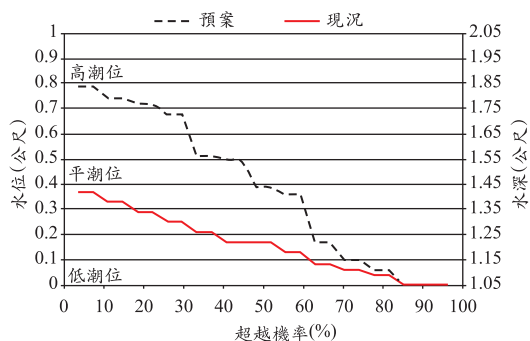


圖 13 「濕地內」現況與預案之水位超越機率圖

3.4 濕地陸化及保育策略

本研究進一步以超越機率觀察濕地內是否保有一定之水位及水深。當「濕地內」於 50%超越機率時，「預案」水位為 0.39 公尺，「現況」水位則為 0.17 公尺(如圖 13)。此表示預案情境下，「濕地內」有超過 50%的時間水位值小於 0.39 公尺；現況時，濕地內則有超過 50%的時間水位值小於 0.17 公尺，兩者相差 0.22 公尺。顯見預案情境下之潮汐營力，能讓濕地內部的高水位狀態維持較久的時間。

另以 20%的超越機率來看，「預案」時水位為 0.72 公尺，「現況」時則為 0.29 公尺，兩者相差 0.43 公尺；以 80%的超越機率來看，「預案」時水位為 0.06 公尺，「現況」時，則為 0.04 公尺，兩者相差 0.02 公尺。由此可知，「預案」於超越機率小的高水位遠大於「現況」，反之，兩者於超越機率大的低水位差異較小，代表「預案」與「現況」於小超越機率時，前者水位遠高於後者，這是因為前者受潮汐影響水位變動較大所致；而於大超越機率時，兩者水位相近，因此水位變動不大。

四、結論與建議

1. 無尾港濕地低潮位約-0.03 m、高潮位約 0.80 m，潮差約 0.83 m；流速介於-0.12 m/s~0.05 m/s，幾乎處於靜止狀態；潮流量介於-3.39 cms 至 2.64 cms 間，遠大於港口大排上游流入的 1 cms 淡水流量，及濕地上游湧泉區入流

的 0.005 cms 淡水流量，由此證明潮流量的變化與本區陸化與否有顯著關連性。

2. 由水位、潮流量、潮流體積的計算結果得知，無尾港濕地之水位及潮流量等流態(Flow regime)，幾乎由港口大排之六連閘門所控制，因此六連閘門操作方式直接影響濕地內的棲地健康程度。
3. 逆止閘正常運作情況下(現況)，水流只出不進，濕地之水量及水位僅靠中港大排及湧泉區逕流而入之清水流量維持。
4. 開閘門全開情況下(預案)，潮汐得以自由進出，對濕地水位維持有顯著正面效益，但因濕地鄰近本感潮區域的上游邊界，潮波進入濕地後受到固定邊界反射後，流速變化不大，故潮流量變化不若水位變化明顯。
5. 超越機率計算結果顯示：現況濕地內部無較高水位及較大潮流量，故易發生灘地裸露之陸化現象。另外，開閘門全開情況下，有利於降低濕地陸化風險，平潮時濕地內維持水域狀態的機率增加約 50%。
6. 本研究已分析本區之潮流特性及陸化的關鍵因素，並證明非工程手段的開閘門操作(本文之預案)可降低陸化風險，後續可再深入思考相關之工程手段，如於中興橋建置檔水閘門以維持枯水時期水位等工程，或降低濕地淤積的減淤措施。
7. 促進會在監測計畫中扮演關鍵角色，其提供的不只是全程參與監測所需的人力與時間，也參與了監測方法與流程的討論、提供六連閘門操作協調，使全潮調查計畫可順利執行，其參與開閘門的操作更對濕地保育有直接的貢獻，此作業方式及工作流程值得推廣做為濕地保育及永續經營管理的參考。
8. 本研究雖已根據全潮調查結果完成模式的驗證及預測工作，但礙於經費限制，目前之全潮調查資料僅一筆，尚不足以作為工程操作或設計的依據，後續建議持續進行長期的濕地水位監測工作，以掌握更完整的大潮、小潮、豐水期、枯水期之水文及棲地狀態。

謝 誌

本研究感謝內政部營建署、行政院農業委員會林務局、羅東林管處與宜蘭縣政府的經費支持與協助，特別感謝無尾港文教促進會研究夥伴的鼎力相助，及宜蘭大學阮忠信老師提供部分水位記錄。亦感謝研究期間許多社區志工與國立台灣大學及國立宜蘭大學的大學部及研究所學生不辭辛勞共同參與現場工作。論文審查期間，總編輯及審查委員提供的寶貴意見讓本文論述內容及價值更加明確，在此一併致謝。

參考文獻

1. 王牧寧，「宜蘭縣無尾港野生動物保護區經營管理效能評估」，國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文，2007。
2. 宜蘭縣政府，國家重要濕地生態環境調查及復育計畫，2010。
3. 湯麟武，港灣及海域工程，中國土木工程學會出版，科技圖書，台北市，1989。
4. 劉小如，宜蘭縣無尾港水鳥保護區整體規劃，宜蘭縣政府，1996。
5. 盧道杰，宜蘭縣無尾港野生動物保護區經營管理效能再評估會議資料，2010。
6. Brunner, G. W. and CEIWR-HEC, HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 4.1, US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC), CA, U.S.A., 2010.
7. Chow, V. T., Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, New York, 1959.
8. Chow, V. T., Applied hydrology. McGraw-Hill book company, Singapore, 1988.
9. Elgar, S. and Raubenheimer, B., "Currents in a small channel on a sandy tidal flat", *Continental Shelf Research*, **31**, 9-14, 2011.
10. Kjerfve, B. and Proehl, J. A., "Velocity variability in a cross-section of a Well-raised estuary", *Journal of Marine research*, **37**, 409-418, 1979.
11. Ma, Z. J., Cai, Y. T., Li, B., and Chen, J. K., "Managing Wetland Habitats for Waterbirds: An International Perspective". *Wetlands*, **30**, 15-27, 2010.
12. Mariotti, G. and Fagherazzi, S., "Asymmetric fluxes of water and sediments in a mesotidal mudflat channel", *Continental Shelf Research*, **31**, 23-36, 2011.

收稿日期：民國 101 年 2 月 21 日

修正日期：民國 101 年 3 月 20 日

接受日期：民國 101 年 3 月 22 日