

港灣季刊

(原港灣報導季刊)

第 100 期

交通部運輸研究所

中華民國 104 年 2 月

港 灣 季 刊 第 100 期

刊期頻率：季刊

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw

電 話：(04) 26587176

總 編 輯：林志明

編輯委員：邱永芳、朱金元、林昭坤、謝明志、何良勝、簡仲璟
蘇青和、單誠基、馬維倫

出版年月：每年 2、6、10 月

創刊年月：中華民國 77 年 2 月 1 日

定 價：100 元

本次出刊：130 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

印 刷 者：悅翔數位印刷有限公司

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：2007700020 ISSN：1019-2603

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

目 錄

一、臺北港船舶碰撞風險之探討 1

謝佳玲 臺北港營運處助理技術員

二、以三維模式模擬海嘯波 對雙園大橋橋墩周圍沉積物之影響 12

劉俊志 國立中山大學海洋科學系研究助理

陳冠宇 國立中山大學海洋科學系教授

邱永芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

蘇青和 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

三、港區及碼頭潮位水深預報模式之研究 21

邱永芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

黃茂信 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員

四、圓筒式碼頭耐震性能設計之研究 31

顧承宇 國立臺灣海洋大學河海工程系副教授

張景鐘 國立臺灣海洋大學河海工程系教授

賴瑞應 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

余孟勳 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士研究生

陳明鈺 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士研究生

曾崇偉 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士研究生

蕭靖恩 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士研究生

五、近十年之臺灣周圍海水面變化速率研究 44

藍文浩 國立成功大學測量及空間資訊學系專任助理

郭重言 國立成功大學測量及空間資訊學系副教授

林立青 國立成功大學國際波動力學研究中心博士後研究員

莊文傑 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

臺北港船舶碰撞層級分析

謝佳玲 臺北港營運處航運科航安員

摘要

理論上，「船舶碰撞」是個應避免與可避免的簡單議題。本文先介紹船舶碰撞定義、碰撞發生原因、如何避免碰撞發生及海上避碰規則，再以臺北港為例，就該港港內區域、錨地及航道等，幾個可能會造成船舶間碰撞的地點及情境作討論。最後再就避免碰撞提出幾點建議，以供參考。

一、前言

船舶在大海航行時發生碰撞，將對船舶本身、船員及貨物等造成危害，更有甚者，可能因碰撞發生後，造成燃油外洩而污染了該區域的海洋。但船舶若是在港域內進出港時發生了碰撞，除了上述所提的危害，還包括了該港口的安全及營運狀況都會受到嚴重影響。故本文探討船舶在臺北港內或錨泊區可能會發生之船舶間碰撞危機及因應之道，並如何確保船舶在港內之航行安全。

二、文獻回顧

本研究主要重點為探討臺北港船舶碰撞的幾個情境及該等情況應以何

種方式處置以降低碰撞危機。在本文回顧文獻方面，將先就船舶碰撞之定義予以說明，其次將簡述其發生原因。至於如何避免碰撞的發生暨避碰規則等，亦將分別闡明。

(一)船舶碰撞定義

根據國際海事組織（IMO）的定義，所謂船舶碰撞是指一艘船舶被另一艘船舶撞擊，無論該船是在航行、錨泊或繫泊。而日本海難審判廳所出版之海難審判白皮書，則對船舶碰撞有兩項分類：

- 1、船舶碰撞：航行中的船舶與航行中或停泊中的他船發生碰撞或接觸，致使其中一船舶產生損害。
- 2、船與設施碰撞：船舶與碼頭、棧橋、燈（浮）標等設施發生碰撞或接觸，而使船舶受到損害或船舶、設施均有損害。

本文主要討論船舶碰撞，並採用國際海事組織（IMO）對碰撞所作之定義為報告基準。

(二)船舶碰撞發生原因

根據“應用層級分析法分析海難碰撞事故關鍵人因”¹研究分析顯示，船

¹ 根據廖坤靜、吳展嘉、蕭永慶所著論文“應用層級分析法分析海難碰撞事故關鍵人因”

船在海上碰撞事件之發生，有 75% 以上可歸咎於人為過失，其主要的因素有下列幾點：

- ▶ 違反避碰規則或不遵守航行規則
- ▶ 瞭望不確實或缺少瞭望
- ▶ 未依規定顯示號燈號標
- ▶ 操船技術不佳及判斷錯誤

而依日本海難審判廳的調查報告，海難碰撞事故人為疏忽因素分析比較，其中「瞭望不確實」佔 48% 及「不遵守航行規則」佔 19%，兩項為海難碰撞事故中人為因素最重要之因素。(詳圖 1)

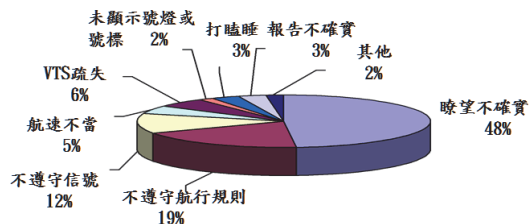


圖 1

(三)如何避免船舶碰撞之發生

而究竟要如何避免船舶碰撞的產生呢？依據“海難事故碰撞事件中人為因素分析之研究”²的歸納，至少可有以下作法：

- 1、遵守航行規則
- 2、瞭望確實
- 3、依規定顯示號燈號標
- 4、操船技術之加強
- 5、港內維持適當航速
- 6、船舶間(或領港間)確實聯繫
- 7、信號台管制人員之密切監控管制

(四)相關適用規則

在探討臺北港之船舶碰撞風險前，說明相關之國際海上避碰規則，為助於條文之認識，將以圖例作輔助。

1972 年國際海上避碰規則(International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972; 簡稱避碰規則)，其意義、用途與內容如下述：

- ▶ 意義：如同道路上之交通規則，是為確保船舶航行安全，預防和減少船舶碰撞，規定在公海和連接於公海的一切通航水域，除在港口、河流實施地方性的規則外，都應共同遵守的海上交通避碰規則。
- ▶ 用途：用以提供當值航行員於海上避碰之指示以及碰撞發生後之責任歸屬劃分。
- ▶ 內容：其內容共分為五章、共 38 條條款，包括總則、操舵與航行規則、號燈與號標、音響信號與燈光信號，以及豁免條款。

以下整理幾條與本文相關之避碰規則條文內容：

1、避碰規則第三章號燈與號標第二十、二十一條之規定

避碰規則中，基本的船舶燈號如下圖所示：



圖 2 船舶之航行燈

² 依據黃燦煌、廖坤靜、吳展嘉所著論文“海難事故碰撞事件中人為因素分析之研究”

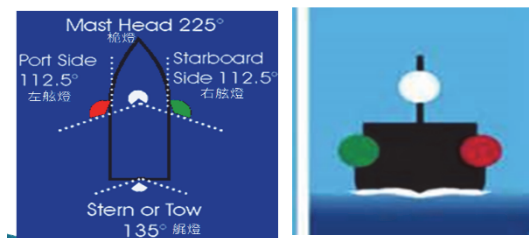


圖 3 船舶之航行燈

2、避碰規則第二章第二節船舶互見時之措施第十三至第十七條之規定

避碰規則中船舶相遇的措施如下圖所示，而根據船舶之相對位置，則可將兩艘船舶之相遇情勢分為追越(Overtaking Situation)、迎艏正遇(Head-on Situation)以及交叉相遇(Crossing Situation)三種。如圖 4、圖 5

(1) 追越(Overtaking Situation)

避碰規則第 13 條

- ▶ 追越情勢，猶如陸地上之超車行為，規定由追越船避讓被追越船。
- ▶ 船舶自他船正橫之後 22.5 度以上之方位駛近他船時，應視為追越船，

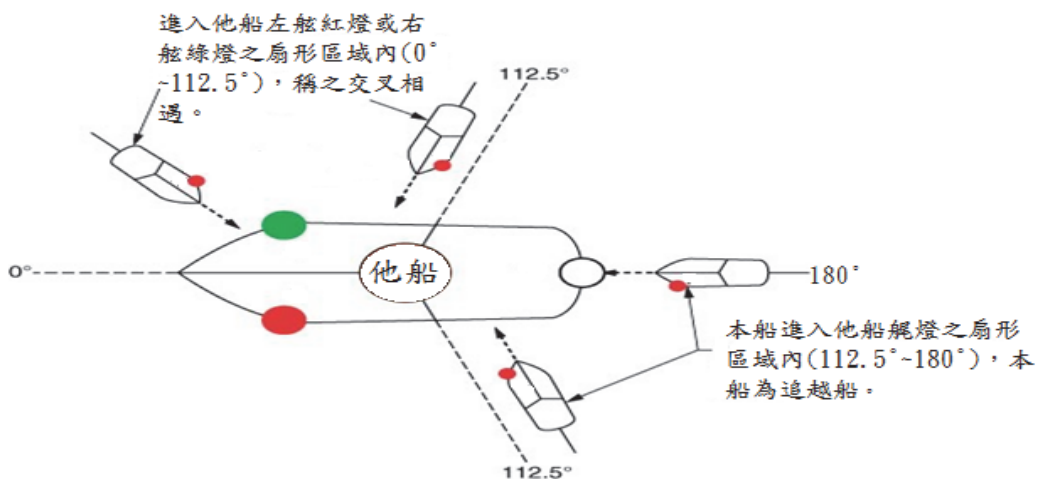


圖 4

即對被追越之相互位置而言，在夜間僅能看見他船之艏燈而不見他船之任何一舷燈。

(2) 迎艏正遇(Head-on Situation)

避碰規則第 14 條

- ▶ 迎艏正遇情勢，則如同於單行道上對向的車輛，規定兩船各自朝右轉向，俾得互在對方之左舷通過。
- ▶ 夜間可見他船之前後桅燈成一直線、或幾乎一直線、及或同時見其兩邊舷燈。

(3) 交叉相遇(Crossing Situation)

避碰規則第 15 條

- ▶ 交叉相遇情勢，則如同路地上之十字路口，見他船紅燈者(見他船在其右舷者)應朝右轉向避免碰撞。
- ▶ 在交叉相遇的情況下，兩船中有一為避讓船、一為直航船，直航船應保持其航向航速；避讓船應盡可能及早採取避讓措施。

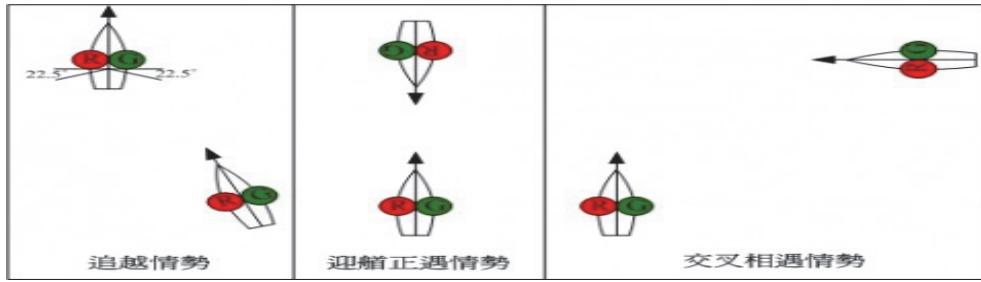


圖 5

3、避碰規則第二章第一節船舶在任何能見度情況下之措施第四至第十條規定

(1) 第四條 適用範圍

- ▶ 本節之規定，適用於任何能見度之情況。

(2) 第五條 瞭望

- ▶ 各船應經常運用視覺、聽覺及各種適合當前環境所有可使用之方法，保持正確瞭望，以期完全瞭解其處境及碰撞危機。

(3) 第六條 安全速度

- ▶ 各船應經常以安全速度航行，俾能採取適當而有效之措施，以避免碰撞，並在適合當前環境與情況之距離內，能使船舶停止前進。在決定安全速度時，應考慮下列各項：
 - A、能見度之情況。
 - B、交通密度，包括漁船或其他船舶之聚集度。
 - C、船舶之運轉能力，尤應注意當前情況下之衡止距及迴轉能力。

D、夜間現出之背景亮光，如來自岸上之燈光或本船燈光反射之散光。

E、風、浪及水流之狀況，以及航行險阻之臨近程度。

F、吃水與可航水深之關係。

(4) 第七條 碰撞危機

- ▶ 各船舶應利用各種可能適當方法，在當前環境與情況下，研判是否有碰撞危機存在，如有任何可疑之處，此項危機應視為存在。
- ▶ 切勿依據不充分之資料，尤其不充分之雷達資料，擅作假設。

(5) 第八條 避碰措施

- ▶ 採取任何避碰措施，如環境許可，應有充份時間早作明確之行動，並注意優良船藝之施展。
- ▶ 採取避免與他船碰撞之措施時，應以安全距離相互通過，並應審慎校測此項措施之實效，直至他船最後通過並分離清楚為止。
- ▶ 如必要時，為避免碰撞，或容許有更多時間以研判當前情勢，船舶應減速或用停車或倒車，以制止船舶前進。

- ▶ 凡依規則規定不得妨礙他船通過或安全通過之船舶，在情況需要時，應及早採取措施，俾有足夠之水域以供他船通過。
- ▶ 凡依規定不得妨礙他船通過或安全通過之船舶，當駛近他船而有碰撞危機時，仍不得免除此項責任，並應於取措施時，充分考慮本章各條可能要求採取之措施。
- ▶ 當兩船互相接近致有碰撞危機時，非讓路船仍應完全遵守本章各條之規定。

(6) 第九條 狹窄水道

- ▶ 船舶循狹窄水道或適航水道行駛，於安全且實際可行時，應盡量靠近本船右舷水道或適航水道之外側行駛。
- ▶ 船舶如橫越狹窄水道或適航水道，對僅能於狹窄水道或適航水道安全航行船舶之通行有妨礙時，不得橫越。
- ▶ 如情況環境許可，任何船舶應避免在狹窄水道內錨泊。

三、臺北港之船舶碰撞風險探討

為分析臺北港區可能產生船舶碰撞的風險，本節將先說明目前臺北港信號臺的作業程序，其次將可能產生碰撞的情形分為 A~G 等 7 種，並分別提出因應措施。

(一) 臺北港信號台作業程序

1、船舶到港前

經由 VTS 指引船舶依指示進入錨地拋錨或直接駛抵引水站接引水人上船。

2、引水人登輪

引水人引領船舶進港，此一階段港外之其他船舶航行狀況及當時天候狀況、風力、風向、流向、流速、能見度等，是非常重要之影響因素，所以引水人必須請船上船員密切瞭望，同時與 VTS 及其它船舶保持密切聯繫。

3、進入防波堤後

船舶必須減低船速，當船舶速度減低時，受風力的影響就加大，但流水影響降低，進港船舶對於港內其他船舶之動態，尚無法清楚辨別，此時即須靠 VTS 提供正確資訊。

4、港內航行

船舶僅能以較低速航行，並遵守港內速度限制，惟港內小型工作船進出作業頻繁，船舶在港內航行較易產生危險狀況，無法事前防範，故需靠 VTS 提供資訊以維持港內航行安全。

(二) 臺北港之船舶碰撞風險情況

臺北港信號台管制人員在值班時最常出現的幾種可能發生船舶碰撞地點做模擬分析，列出 A~G 7 種情況作討論。以下列出臺北港港區圖及信號台作業儀器-電子海圖與 AIS 電腦顯示影像模擬圖作解說（如圖 6、圖 7、圖 8、圖 9）。

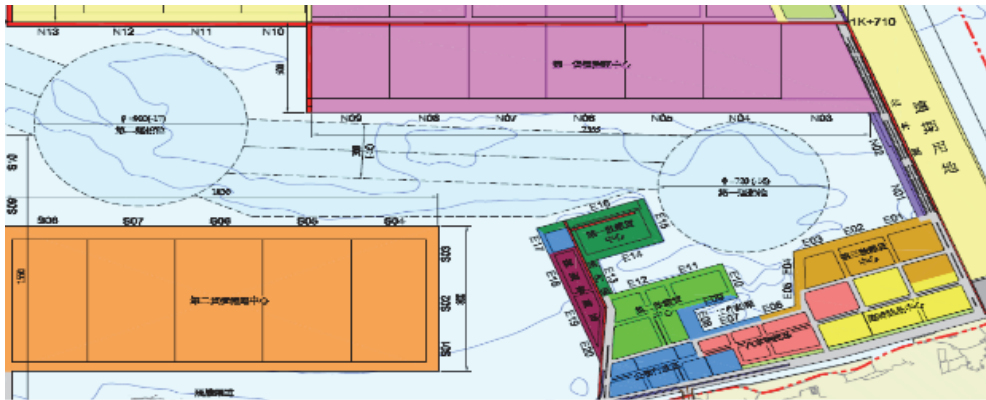


圖 6 臺北港港區圖

以下列出 A~G 七種臺北港可能發生之碰撞情況圖

1、情況 A

(1) 情況說明

● 情況 A-1

航經於 E15 碼頭之出港紅船與航經於 E16 碼頭之進港藍船交叉相遇。(此進港船將停靠 N3 碼頭)如圖 10

● 情況 A-2

航經於 E15 碼頭之出港紅船與航經於 E16 碼頭之進港藍船交叉相遇。(此進港船將停靠 E10 碼頭)如圖 10

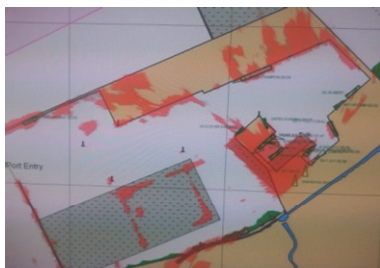


圖 7 臺北港港區內

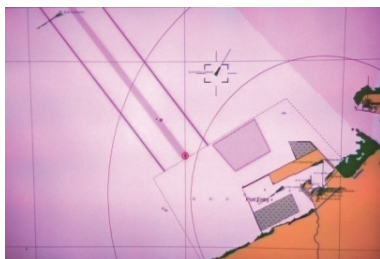


圖 8 臺北港航道



圖 9 臺北港錨地

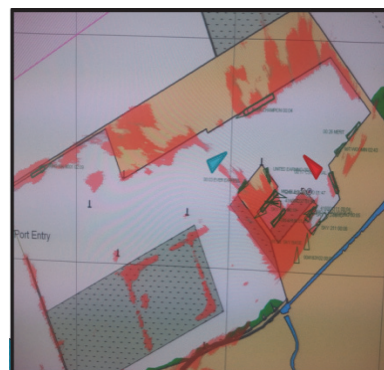


圖 10

(2) 因應措施

● 情況 A-1 因應措施

根據避碰規則第 15 條規定於交叉相遇情況，本應讓路之藍船應向右轉向避讓直航之紅船；但因在狹窄水域港內航行，且進港藍船將停靠於 N3 碼頭，根據避碰規則第 8 條規定，可依當時情況及早採取有效適宜之避讓措施，故判斷進港藍船應與出港紅船於彼此右舷會船為宜。如圖 11

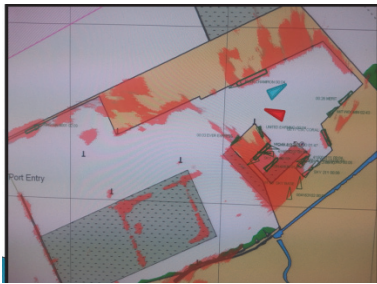


圖 11

● 情況 A-2 因應措施

根據避碰規則第 15 條規定於交叉相遇情況，讓路之進港藍船應向右轉向避讓直航之紅船，且進港藍船將停靠 E10 碼頭，故判斷進港藍船應與出港紅船於彼此左舷會船為宜。如圖 12

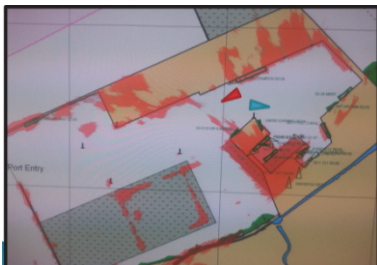


圖 12

2、情況 B

(1) 情況說明

N3 碼頭出港之藍船與 E4 碼頭出港之紅船於 E15、E16 碼頭交叉相遇。如圖 13

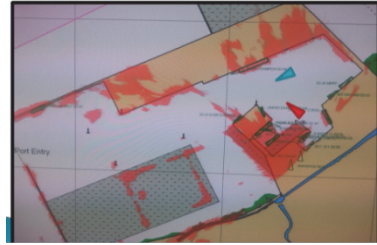


圖 13

(2) 因應措施

● 情況 B 因應措施

根據避碰規則第 15 條規定於交叉相遇情況，讓路之出港紅船應避讓直航之出港藍船，故判斷出港紅船應待出港藍船過其船艏後，跟在藍船後面保持安全距離，並依序出港。如圖 14

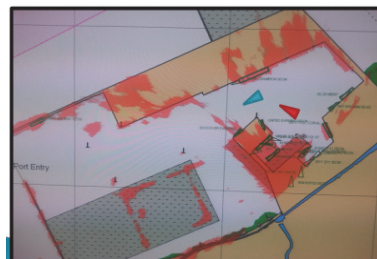


圖 14

3、情況 C

(1) 情況說明

● 出港紅船與進港藍船於港內航道迎艏正遇。如圖 15

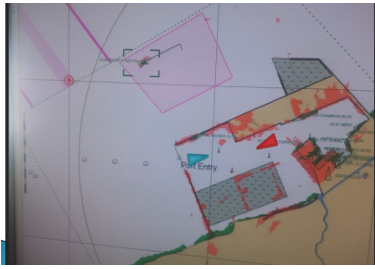


圖 15

(2)因應措施

- 根據避碰規則第 14 條規定於迎艏正遇情況，出港紅船與進港藍船於港內航道迎艏正遇時，應各自朝右轉向，互在對方之左舷通過。如圖 16



圖 16

4、情況 D

(1)情況說明

- 出港藍船與去錨地拋錨之紅船將於引水站交叉相遇。如圖 17

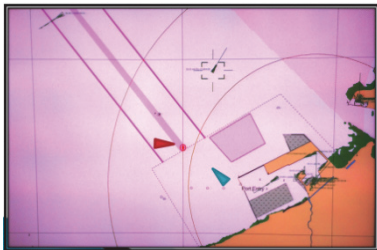


圖 17

(2)因應措施

- 根據避碰規則第 15 條規定於交叉相遇情況，讓路之下錨紅船應避讓

直航之出港藍船，故判斷下錨之紅船應待出港藍船過其船艏後，從藍船船艏通過(兩者將在彼此左舷通過)至錨地拋錨為宜。如圖 18

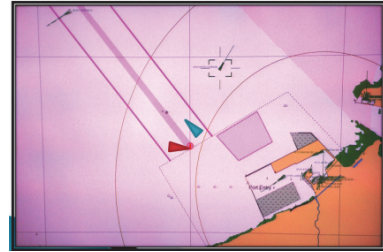


圖 18

5、情況 E

(1)情況說明

- 出港藍船與從錨地將進港之紅船交叉相遇。如圖 19

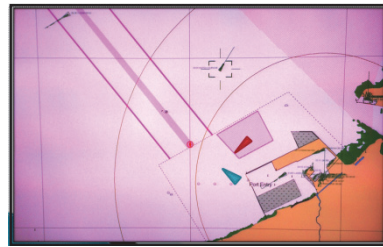


圖 19

(2)因應措施

- 根據避碰規則第 15 條規定於交叉相遇情況，本應讓路之出港藍船應避讓直航之進港紅船，但經安全評估，根據避碰規則第 8 條規定，可依當時情況及早採取有效適宜之避讓措施，故判斷進港紅船應待出港藍船過其船艏後，從出港藍船船艏通過(兩者將在彼此右舷通過)為宜。如圖 20

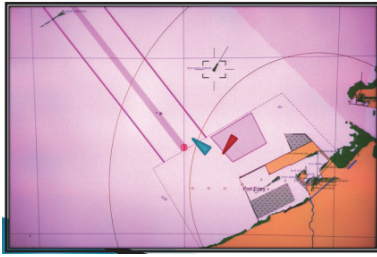


圖 20

6、情況 F

(1)情況說明

- 出港紅船與即將進港之藍船於離臺港 7 海浬之航道口交叉相遇。如圖 21

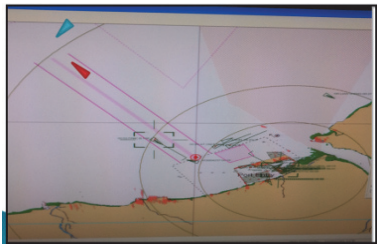


圖 21

(2)因應措施

- 情況 F 因應措施

根據避碰規則第 15 條規定於交叉相遇情況，讓路之出港紅船應避讓直航之進港藍船，故判斷出港紅船應待進港藍船過其船艙後，從進港藍船船艙通過(兩者將在彼此左舷通過)為宜。如圖 22

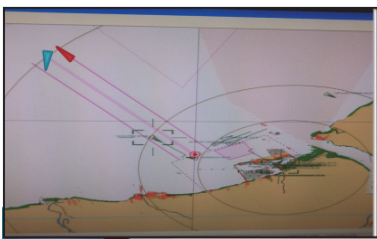


圖 22

7、情況 G

(1)情況說明

- 進港藍船與進港紅船於航道相遇。如圖 23



圖 23

(2)因應措施

- 情況 G 因應措施 1

首先確認船舶進港之優先次序，如果藍船為優先進港之船舶，VTS 管制台通報紅船應減速待藍船過其船艙後，跟隨藍船保持安全距離依序進港。如圖 24

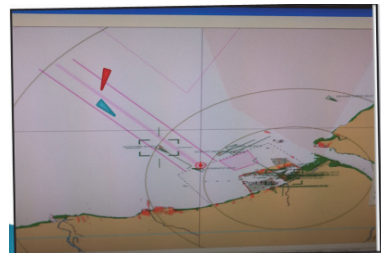


圖 24

- 情況 G 因應措施 2

首先確認船舶進港之優先次序，如果紅船為優先進港之船舶，VTS 管制台通報藍船應減速待紅船通過其船艙後，跟隨紅船保持安全距離依序進港。如圖 25

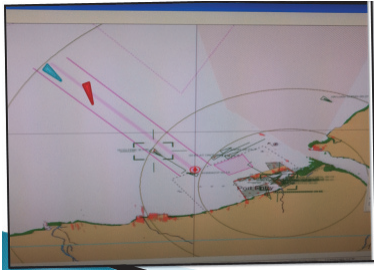


圖 25

四、結論與建議

(一)結論

1、造成船舶碰撞主要的因素在於人，除了當值船員間的守值瞭望與船舶間的聯繫外，船舶交通管制台更要時常注意船舶間的無線電通話內容有無疑問，此避讓措施是否合宜，如有危險疑慮，應及時阻止並管制交通安全。本文列出 7 種情況分別於臺北港港區內、港外錨地、航道三處容易發生碰撞危機的位置做討論。並就下列三個位置做扼要闡明如後：

(1) 於港區內船舶進出港會船時，應遵守 VTS 管制並依進出港優先次序進出港，及保持無線電暢通聯繫；VTS 管制員隨時留意船舶動態如有碰撞危機發生之虞，應及早通知船方採取緊急避讓措施。

(2) 由於錨地在出港航道右側，當船舶進出港作業時，VTS 管制員須注意由航道進入或離開錨地之船舶，對出港船造成之危險，應及早通知進出港船雙方作避讓措施。

(3) 當多艘船舶同時陸續進港時，VTS 管制員應於船舶進入航道前通知進港船舶進港優先次序，以避免船舶在航道內發生追越情況，並降低船舶於航道始端發生碰撞之危機。

2、本文列出相關之避碰規則適用條文，其中所提之規定如：避碰規則第 4~10 條、13~17 條、20 條、21 條，前述條文之規定可供 VTS 在管制港口內外的船舶交通秩序中應用。如果發生船舶碰撞事件，可依國際海上避碰規則來判定責任歸屬。

3、本文介紹了船舶相遇的幾種情況、海上避碰規則及臺北港可能發生碰撞危機的地點作研究分析後，可知建立一個安全港口，有賴船舶交通服務台的管制、引水人技術及現場的狀況處置、船舶間的暢通聯繫、船舶與引水間的良好溝通和港口設施的安全維護，缺一不可（如圖 26）。



圖 26

(二)建議

- 1、在分析可能發生碰撞危機的地點，臺北港錨地的位置值得提出討論，錨地重要的用途是船舶錨泊等待進港的區域，依照進港航道左進右出的概念，錨地應考量規劃設置於進港航道左側為宜，除了可減少船舶發生碰撞危機的可能性外，也可減少 VTS 在管制上的困難度。
- 2、臺北港港外錨泊區域範圍，無法滿足現行船舶大型化趨勢所需錨泊迴轉安全距離，易造成錨泊區域內船舶相互碰撞危險，故錨泊區域範圍宜增大，以減少危險。
- 3、臺北港港外航道長度過長，船舶為節省油量常於航道中間切入或切出，造成進出港船舶碰撞危險，故臺北港港外航道長度應縮短為宜。

參考文獻

- 1、海洋數位典藏運輸航海科技航行安全教育網站。
- 2、廖坤靜、吳展嘉、蕭永慶，應用層級分析法分析海難碰撞事故關鍵人因之研究。
- 3、周和平，“海難與事故調查”，國立台灣海洋大學海運研究中心第 129-170 頁，民國 95 年。
- 4、“日本海難審判白皮書”，日本海難審判廳，日本，第 30 頁，西元 2005 年。
- 5、黃燦煌、廖坤靜、吳展嘉，“海難事故碰撞事件中人為因素分析之研究”，航海技術，編號 136，第 1-17 頁，民國 95 年。
- 6、臺北港港區圖。
- 7、國際海上避碰規則。
- 8、臺北港船舶交通服務指南。
- 9、臺北港船舶進出港作業要點。

以三維模式模擬海嘯波對雙園大橋橋墩 周圍沉積物之影響

劉俊志 國立中山大學海洋科學系研究助理
陳冠宇 國立中山大學海洋科學系教授
邱永芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
蘇青和 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

摘要

本研究首先以二維海嘯模式 COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) 模擬周期約 20 分鐘且波高為 3、4、6 和 10 公尺的 4 種鐘形波於高屏溪外海入射。各從 4 個海嘯模擬中取出雙園大橋特定一組橋墩附近的水位時序列，並以此作為三維模式 FLUIDITY 的水位入射邊界條件。本文根據 4 種水位入射條件和 2 種初始水深進行 6 個河道的情境模擬。結果顯示所有模擬的侵蝕沉積型態類似，主要的侵蝕區域分布在西橋墩的西南區，主要的沉積區域分布在東橋墩的東方，但隨邊界條件水位的增高，東橋墩的東北和東南區的侵蝕趨勢逐漸增強。另外顯示當河道的初始水位較低時，會帶來較強的侵蝕沉積作用。

一、研究目的

海嘯傳遞至深度較淺的近岸時，受到淺化效應的影響，波高放大進而

入侵沿岸地區造成溢淹。當遇海陸交界上的河口地形時所攜帶的龐大水體除了會跨過河堤溢淹至內陸之外，也會隨著河道溯上。其溯上過程中所產生強烈水流，不僅會對河道產生沖刷與淤積的現象，同時也會對河川中的結構物之基底造成沖刷。可能因此而導致橋基裸露，影響橋樑結構的安全性。本研究主要透過水動力模式的情境模擬來探討海嘯波對雙園大橋橋墩附近沉積物產生的影響。

二、研究方法

研究方法分成兩階段，第一階段利用美國康乃爾大學發展的二維 COMCOT 模式，其主要的控制方程為淺水方程組。在接近高屏溪出海口的南方邊界以一個鐘形波入射的形式來模擬海嘯侵襲，模式的底床給予一曼寧係數 0.02。在 1.5 小時的模擬期間中，入射波挾帶的水體沿著高屏溪的河道溯上，藉以得到該情境下的雙園大橋橋墩附近的水位時序列。

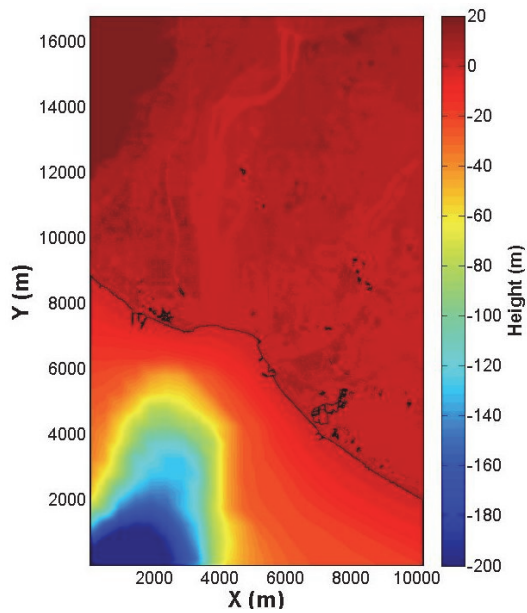


圖 1 COMCOT 模式使用的高屏溪區域地形

COMCOT 模式所使用的地形(圖 1)是採用 MOI 解析度 5 公尺的 DSM 陸地地形結合海科中心解析度 500 公尺的海洋地形。由於陸地地形並無橋墩資料，所以另於河道上設置 19 組橋墩(圖 2)。此次模式採用兩層的巢狀網格，除了大區域的解析度為 5 公尺之外，另外在各組橋墩附近設置長 60 公尺、寬 50 公尺、解析度 1 公尺的子區域。在模式的邊界設定為東、西和北邊界皆為牆，僅南邊界為鐘形波入射。使用的入射鐘形波周期約 20 分鐘，各別使用 3、4、6 和 10 公尺波高當成水位入射條件來模擬 4 種情境(圖 3)。

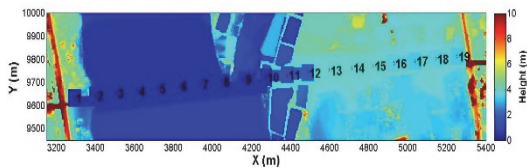


圖 2 雙園大橋附近地形及橋墩位置

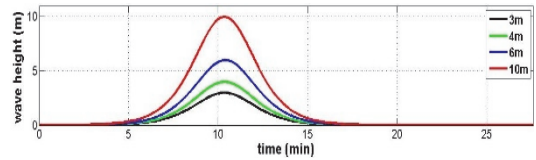


圖 3 COMCOT 模擬的 4 種鐘形波入射波高時序列

第二階段透過英國倫敦帝國大學發展的三維 FLUIDITY 模式，該模式使用三維的非結構性有限元素網格來解析流體方程式以及其附加的場方程，包括不可壓縮流體的守恆方程組和純量計算所使用的平流擴散方程式。在 FLUIDITY 模擬河道中的橋墩受到特定水位沖擊同時，亦使用其內建的沉積物模組來計算對橋墩附近的底床沉積物所造成的影響。其中的特定水位是指第一階段所得到的橋墩附近水位時序列，模擬過程中的西邊界便是以此作為水位入射的邊界條件。

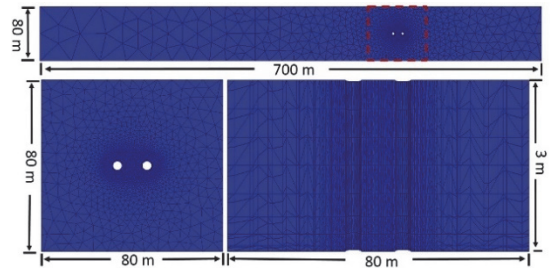


圖 4 FLUIDITY 模式區域及網格配置。上圖為模式區域的俯視圖(距離西端 700 公尺的部分)，左下和右下圖為上圖紅色框框的俯視圖和水道中間的垂直剖面圖(垂直 8 層網格)。

模式的水平區域設定為長 30.5 公里、寬 80 公尺的東西向水道。水平方向網格使用有限元素的可變解析三角網格，其解析度變化範圍在西邊界和東邊界各為 50 公尺、5000 公尺，越往橋墩方向解析度越高，距離橋墩 4.2 米範圍內的解析度約 0.5 公尺。為了避免

西邊界傳入的水位在到達東邊界後可能產生反射的干擾，橋墩與東邊界的長度距離約 30 公里。此設定在可變解析度的情況下，不至於對電腦計算量造成太大的負擔。另外在距離西邊界 500 公尺處的水道中間設置兩個圓心相距 13.2 公尺且直徑為 4.2 公尺的橋墩（圖 4）。

在垂直方向網格配置為 sigma 網格，網格解析隨著水深作等比例變化。為了比較不同水深所造成的影響，此處設定的垂直網格分成兩種。第一種為起始水深 3 米且垂直分層有 8 層，起始的解析度由表面向下各為 0.5、0.5、0.5、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 公尺。第二種為起始水深 1.5 米且垂直分層有 5 層，起始的解析度由表面向下各為 0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 公尺。

沉積物的初始條件為在圓柱的西方 200 公尺以東的底部設定 1 公尺厚度的沉積物底床載，而懸浮載的初始值設定為 0。沉積的概念為當沉積物因沉降通過底床表面時，系統會將離開區域內的沉積量移除，而移除的量則是儲存在一個與區域分離的底床載。沉積物的侵蝕則是使用 Garcia and Parker (1991) 的再懸浮公式。其侵蝕速率是受到底床的剪力速度、沉積物粒徑、以及粒徑的雷諾數等所影響。沉積物的無因次化侵蝕速率 E 以下式表示：

$$E = F \frac{AZ^5}{1-AZ^5/0.3} \quad (1)$$

$$Z = \lambda_m \frac{u^*}{u_{si}} R_p^{0.6} \left(\frac{d}{d_{50}} \right)^{0.2} \quad (2)$$

其中 F 是相關底床沉積物的體積率，

d 是沉積物的粒徑， d_{50} 是中值粒徑。 A 為常數 1.3×10^7 。另外剪力速度 u^* 和粒徑雷諾數 R_p 的定義如下：

$$u^* = \sqrt{\tau_b / \rho} \quad (3)$$

$$R_p = \sqrt{Rgd^3} / \nu \quad (4)$$

$$R = \frac{\rho_{sm} - \rho}{\rho} \quad (5)$$

其中 τ_b 為底床剪應力， ρ_{sm} 為沉積物密度、 ρ 為水的密度。藉由乘上沉降速率 u_{si} ，便可得到有因次的侵蝕通量如下：

$$E_m = u_{si} E \quad (6)$$

流速與沉積物邊界設定，及沉積物相關係數如表 1、2 所示。

表 1 FLUIDITY 邊界條件

模式邊界	流速邊界條件	懸浮沉積物邊界條件
西	Neumann	濃度 0
東	Neumann	濃度 0
南	自由滑動的牆	通量 0
北	自由滑動的牆	通量 0
表面	自由表面	通量 0
底部	橋墩西方 200 公尺以東設定曼寧係數 0.02	再懸浮
橋墩	不可滑動的牆	通量 0

表 2 水和沉積物的相關參數

水	
密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1000
動能黏滯係數 ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	1.00E-06
沉積物	
粒徑 (mm)	0.2
密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2650
自由沉降速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.022
動能黏滯係數 ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	9.00E-04
孔隙率	0.3

三、結果與討論

COMCOT 模式入射鐘形波波高 3、4、6 和 10 公尺的第 1.5 小時水位溢淹分佈如圖 5 所示。從模擬結果取出第 5 組橋墩附近的水位加以平均所得的水位時序列如圖 6。從圖 6 的水位時序列 a、b、c、d 條件下，各取 40 分鐘作為 Fluidity 的西邊界水位入射條件。

本研究利用進行 6 個不同條件的模擬，各對應於情境 1 到 6，如表 4。在此以情境 3 作為流況探討的例子。圖 7 為情境 3 在橋墩附近的水位模擬結果，時間由 0 到 300 秒期間，西橋墩西側（迎流面）的自由表面水位最大值從 0 公尺上升到約 3.7 公尺，經過 40 分鐘後下降到約 2 公尺。橋墩附近的水位差約從第 5 分鐘的 1.5 公尺下降到第 40 分鐘 0.5 公尺。

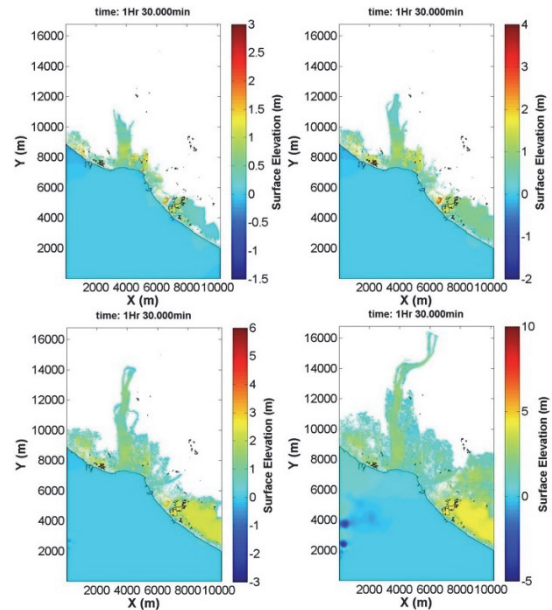


圖 5 COMCOT 模擬在 1.5 小時的水位空間分佈（陸地部分已扣除高程）。左上、右上、左下和右下圖分別為 3、4、6 和 10 公尺波高入射的模擬

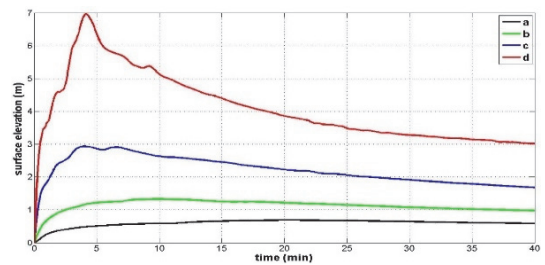


圖 6 COMCOT 模式中第 5 組橋墩附近的空間平均水位，a、b、c、d 各為入射鐘形波波高 3m、4m、6m、10m 的模擬結果

表 3 6 個模擬的條件差異

模擬情境	西邊界水位條件	起始水深 (m)
1	a	3
2	b	3
3	c	3
4	d	3
5	a	1.5
6	b	1.5

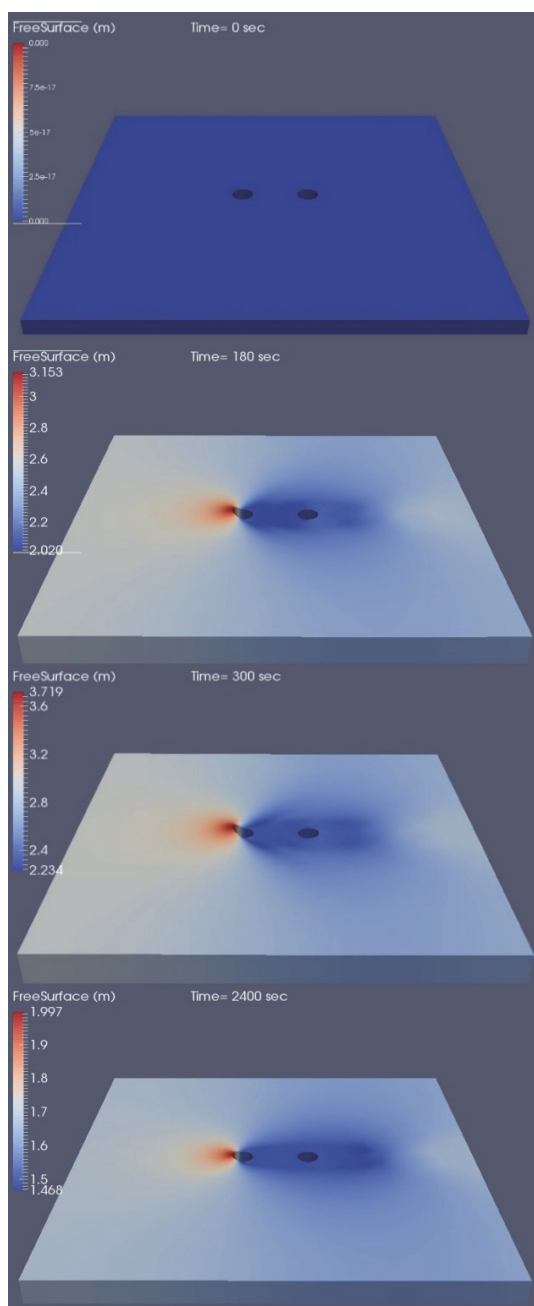


圖 7 情境 3 模擬的橋墩附近水位變化，由上到下各為第 0、3、5 和 40 分鐘的時段。

圖 8 到 11 各為情境 3 於第 5 分鐘在橋墩附近的流速、底床剪力和底床載空間分佈。圖 8 顯示橋墩的 X 分量最大流速出現在南北兩側，其表面和底部可達 5.2 m/s 和 4.4 m/s。而表面反

流出現在西橋墩以東的迎流面後方(最大值約-2.5m/s)，在底部反流則是出現在西橋墩西側，其最大值約 -1.6m/s。從圖 9 上圖顯示西橋墩西側的反流只存在最底部。Z 分量流向在靠近西橋墩西側的上層流向往上，而中、下層流向往下(圖 9 下圖)，另外在靠近西橋墩西半部離底部 20 公分的流向為向下(圖 10 下圖)。

圖 11 上圖為底床剪應力分佈，較大的值主要分布在西橋墩西南西方以及東橋墩的東北和東南方，因為底床剪應力為底床侵蝕動力，所以底床侵蝕區和較大的底床剪應力分布類似，主要的沉積區在東橋墩的東方(圖 11 下圖)。

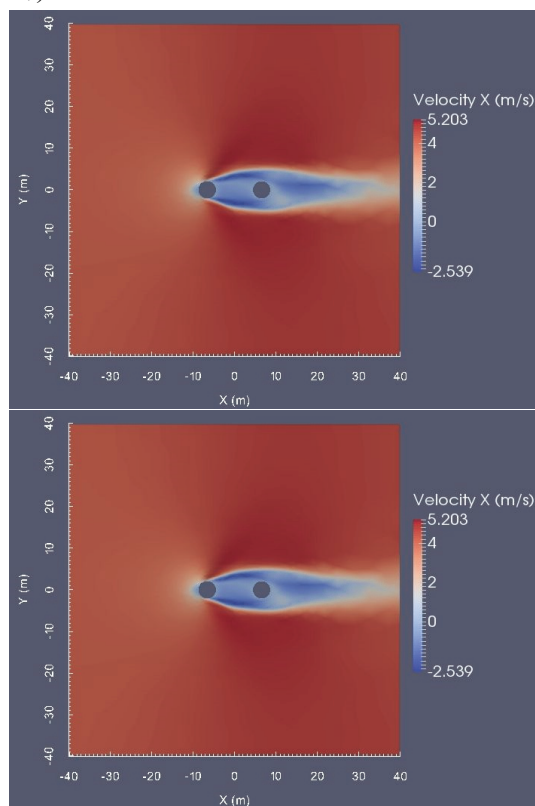


圖 8 情境 3 在第 5 分鐘時，橋墩附近的表面 X 分量流速 (上)以及底部 X 流速的水平剖面 (下)

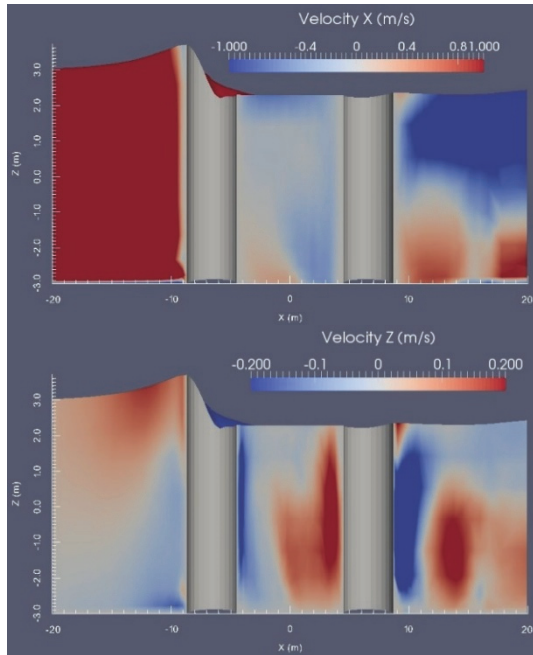


圖 9 情境 3 在第 5 分鐘時，橋墩附近的表面 X、Z 分量流速沿水道中央的垂直剖面(上、下)

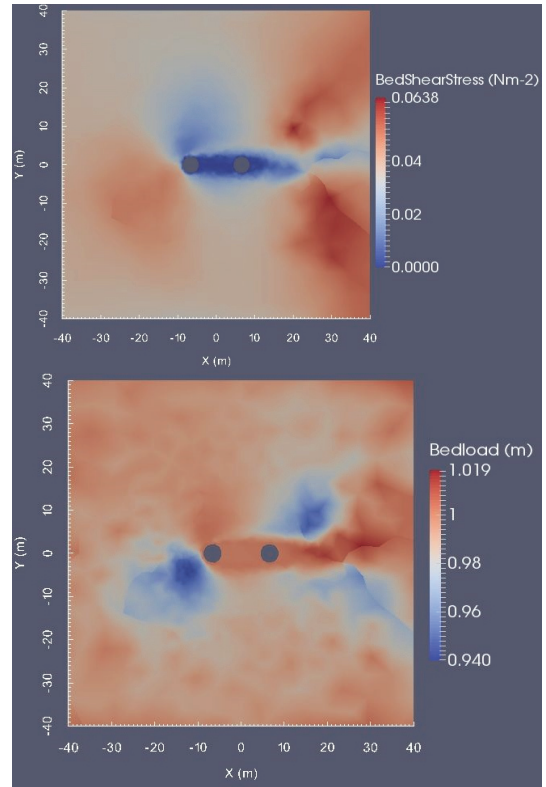


圖 11 情境 3 在第 5 分鐘的底部剪應力(上)和底床載(下)分佈。

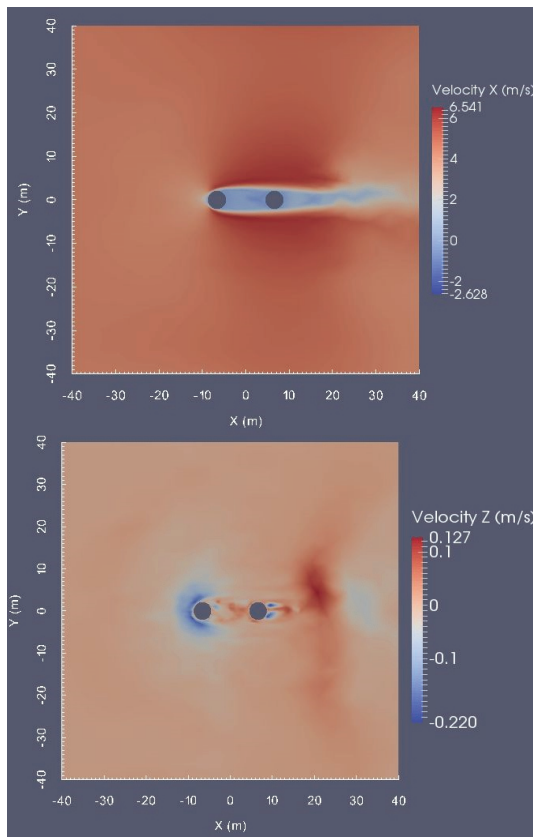


圖 10 情境 3 在第 5 分鐘時，離底部 0.2 公尺的 X、Z 分量流速水平剖面(上、下)

以 6 種情境所得的最後結果在橋墩附近底床厚度如圖 12 到 17，6 種結果的侵蝕沉積型態類似，大致上的差異只在侵蝕和沉積的厚度有所不同。主要的侵蝕區域分布在西橋墩的西南區，但隨邊界條件水位的增高，東橋墩的東北和東南區亦有侵蝕增強的趨勢。主要的沉積區域分布在東橋墩的東方。

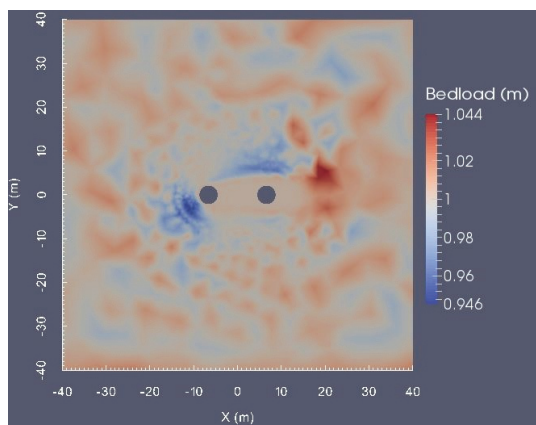


圖 12 情境 1 第 40 分鐘的底床載分佈

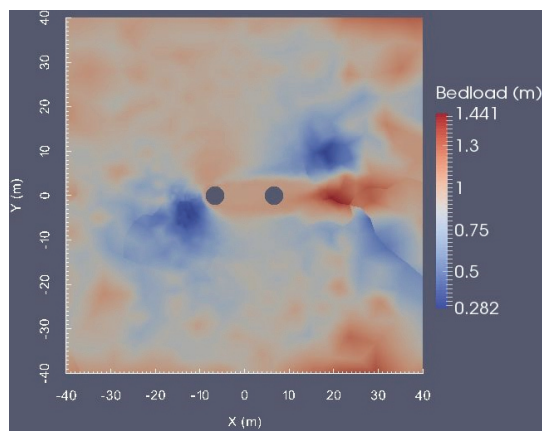


圖 15 情境 4 第 40 分鐘的底床載分佈

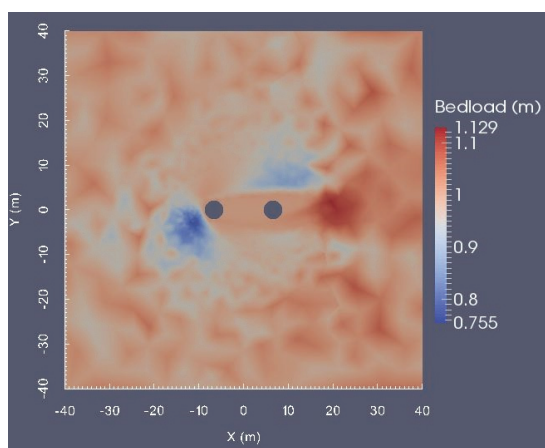


圖 13 情境 2 第 40 分鐘的底床載分佈

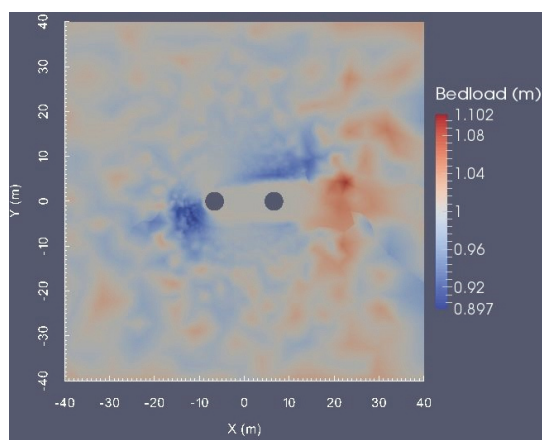


圖 16 情境 5 第 40 分鐘的底床載分佈

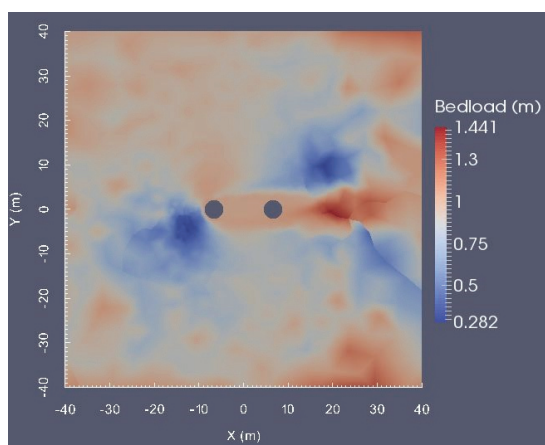


圖 14 情境 3 第 40 分鐘的底床載分佈

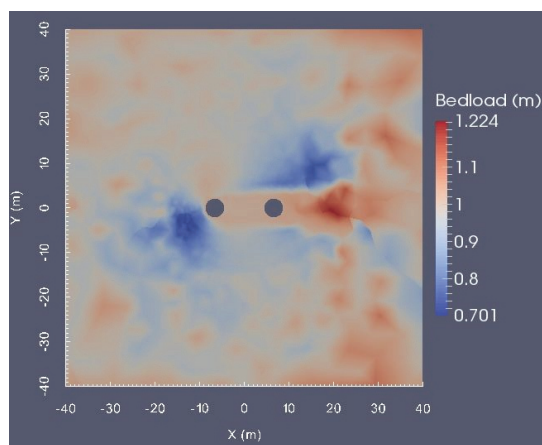


圖 17 情境 6 第 40 分鐘的底床載分佈

表 4 列出西橋墩的西南區最大侵蝕值，以及東橋墩東區的最大沉積值，另外最大值發生點位的 40 分鐘底床厚度變化時序列如圖 18 到 21。在情境 1 到 4 的最大侵蝕值為 0.054、0.234、0.718 和 1 公尺，最大沉積值為 0.044、0.129、0.437 和 0.163 公尺，大致上隨著邊界傳入的水位條件越高所造成的侵蝕和沉積亦越大，除了情境 4 之外。由於情境 4 在 X 座標 20 公尺以東的區域的底床載厚度為 0 公尺(圖 15)，顯示有較大的侵蝕作用，該作用降低了東橋墩東區的最大沉積值，另可從圖 19 得知東橋墩東區的底床載於接近 40 分鐘時，原本 1 公尺厚度被完全侵蝕，其沉積區約在第 13 分鐘以前主要為侵蝕作用，之後才轉為沉積作用。

當河道初始水位為 1.5 公尺時，情境 5 和 6 的最大侵蝕各為 0.103、0.285 公尺，最大沉積各為 0.091、0.219 公尺，其值皆大於初始水位 3 公尺的情境 1 和 2(表 4)。表示當河道的初始水位較低時，可能會帶來更強的侵蝕和沉積作用。

表 4 橋墩附近特定區域的最大侵蝕與沉積厚度

模擬情境	西橋墩西南區最大侵蝕厚度(m)	東橋墩東區最大沉積厚度(m)
1	0.054	0.044
2	0.234	0.129
3	0.718	0.437
4	1.000	0.163
5	0.103	0.091
6	0.285	0.219

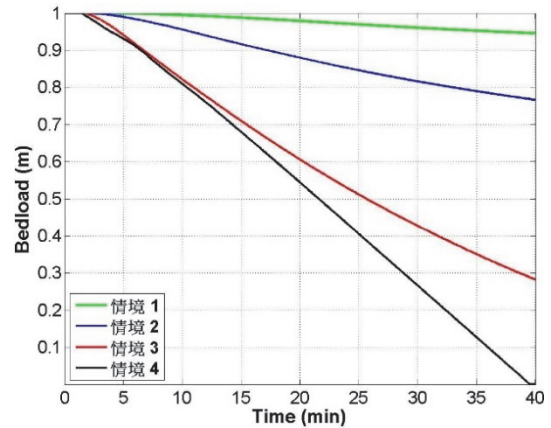


圖 18 情境 1、2、3、4 取西橋墩西南區的底床載變化最大點位的時序列。

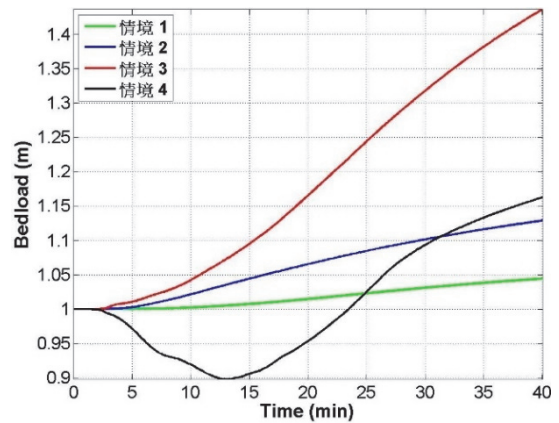


圖 19 情境 1、2、3、4 取東橋墩東區(右)的底床載變化最大點位的時序列。

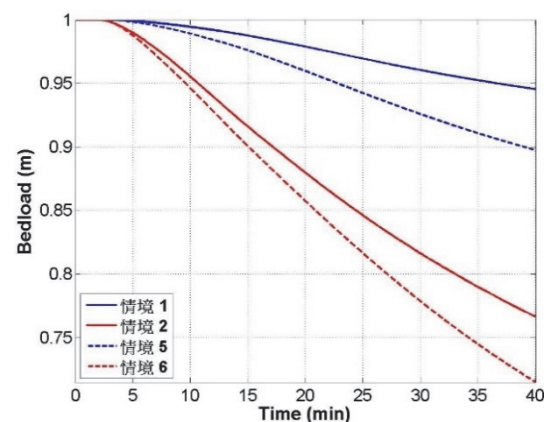


圖 20 情境 1、2、5、6 取西橋墩西南區的底床載變化最大點位的時序列。

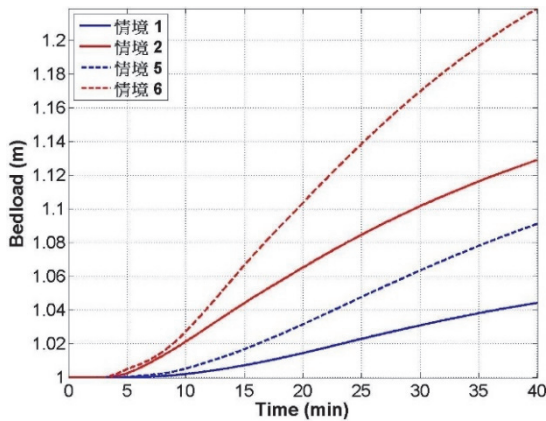


圖 21 情境 1、2、5、6 取東橋墩東區的底床載變化最大點位的時序序列。

四、結論

在 6 個條件下的模擬大致呈現類似的侵蝕沉積趨勢。基本上，較嚴重的侵蝕區發在西橋墩的西南區，而較嚴重的沉積區出現在東橋墩的東方。但隨邊界條件水位的增高，東橋墩以東

的侵蝕趨勢會逐漸增強。另外當河道的初始水位較低時，可能帶來較強烈侵蝕沉積作用。

參考文獻

1. Garcia, M. and Parker, G. (1991) Entrainment of bed sediment into suspension. *J. Hydraul. Engrg., ASCE*, 117(4), 414-435.
2. Department of Earth Science and Engineering, South Kensington Campus Imperial College London. (2013) *fluidity manual version 4.1.11 RELEASE*.
3. Wang, X. M. and Liu, P. L.-F. (2007) *Cornell Multigrid Coupled Tsunami model (COMCOT) User Manual*, Cornell University.

港區多碼頭水位水深預報模式之研究

邱永芳 交通部運輸研究所基隆港航運研究中心主任

黃茂信 交通部運輸研究所基隆港航運研究中心副研究員

一、前言

商港的營運績效除了與港埠之規劃、設計及設施的完備與否息息相關以外，對於能否即時掌握航道及港內的水深狀況及提供船隻航行的安全保證水深更是重要課題。研究的主要目的在確實掌握基隆港、臺北港與蘇澳港等三大港港內和碼頭之水深及潮位資訊，期望能夠提高船舶進出港之航行安全性，並且增加港區營運的吃水量及載貨量。

為了維護基隆港、蘇澳港、臺北港等三大港口之航行安全，提昇碼頭營運績效，並掌握港區高程資料及預報港內船席水深資訊，建立港域及陸域一致之高程系統，擬在三大港口的港區範圍內檢核現有已設置之水準控制點(可能沉陷或產生位移之港區則補設位移控制點)，經聯測至全國一致之高程系統(TWVD 2001)，藉以監控港區沉陷情況。另外，在三大港口港區內適當地點(選擇依據為潮位具全港代表性且不影響碼頭作業之位置)各建立1座潮位站，以一等水準測量來聯測至全國一致之高程系統(TWVD 2001)；並藉由過去各港區之潮位記錄來進行調合分析，進一步探討三大港之最低

低潮位面與 TWVD 2001 高程系統間的系統常值，且可以得出各港的潮位預報資料。經由前述之調合分析可得出各港最低低潮位面與 TWVD 2001 高程系統間的關係後，再以多音束測深系統測量來更新與檢核現有各港的水深測量資料，建置一套港區及碼頭即時水深預報系統；如此，將可以提供三大港口在港區營運規劃、船舶吃水深度判別、船席靠泊與潮位研判，碼頭設施施工等的重要參考依據。。

主要工作項目包含以下：(一)港區水準點檢核及位移控制點補設。(二)港區潮位站高程與水準網聯測。(三)航道及港內多音束水深測量及碼頭聯測。(四)潮位資料調合分析及潮位預報系統建置。(五)壓力式潮位站設置及網路傳輸設備建置。(六)即時船席水深資訊系統軟硬體建置等6大項工作。

二、研究方法

為了掌握基隆港、蘇澳港、臺北港等三港區高程資料及預報港內船席水深資訊，首先需建立港域及陸域一致之高程系統，並檢核現有環港水準點及位移控制點，並經聯測至全國一致之 TWVD 2001 一等水準高程系統，藉以監控港區沉陷情況。另外，在三

大港區選擇港區內適當地點各建置1座潮位站，藉以觀測即時水位。透過潮位站的即時潮位資料與利用往昔潮位資料調合分析後的預報結果進行比對，來預測基隆港、臺北港及蘇澳港等三大港區船席與航道的潮位與水深，最後再同時結合港區衛星影像圖，建置各港區之船席與航道的地理資訊系統，完整呈現港區各船席的潮位及水深資訊，提供給各港務單位與一般民眾使用，未來相關資料亦可作為船隻進出港口、碼頭停靠作業及港灣疏濬等決策的輔助參考依據。

控制測量之平面及高程坐標系統，依據中央主管機關公告之測量基準與參考系統實施，現行國家坐標系統為一九九七坐標系統(TWD97)，高程系統為 TWVD2001，內政部公告之一等水準高程系統，並聯測各港區築港高程系統。控制點之坐標高程並列二種高程系統，而相關地形圖、DEM 數值高程模型及即時船席水深狀況資訊系統等成果，則以各港區之築港高程系統為主，以符合各港區之使用需求。

針對基隆港及臺北港港區現有水準點及位移控制點須進行水準檢測(蘇澳港因才於 99 年度建置完成港區位移控制點，故本次不納入補設範圍)，在基隆港區施測位移控制點有 433 點(包含既有控制點 401 點及新設點 32 點)，臺北港區施測位移控制點有 262 點(包含既有控制點 152 點及新設點 110 點)，新設控制點埋設情況詳圖 2.1。

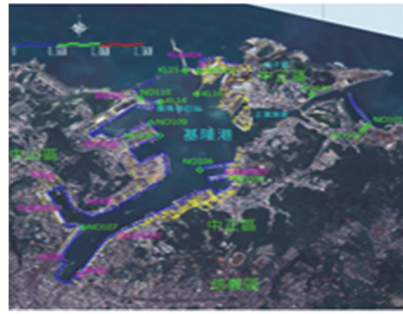


圖 2.1 新設控制點埋設情況詳圖

依據 97 年度基隆港及臺北港 TWD97 坐標系統複測案之控制測量成果，先針對港區主控制點及部分導線點之 TWD97 坐標進行檢測，檢測時各港區需一併聯測 4 點(含)以上一至三等衛星控制點，經檢測無誤後，再以檢測合格之主控制點及導線點進行港區碼頭岸肩及防波堤位移控制點複測，並與港務單位原有資料進行坐標位移比較。

在港區位移控制點坐標高程檢核放面，依檢測合格之主控制點及導線點進行導線測量，再以導線點為主站，採支距法逐一檢測各位移控制點之坐標，施測時於位移控制點上架設稜鏡三角支架觀測，每個點位至少以正倒鏡觀測求取平均值。

為了維護基隆港、蘇澳港、臺北港等三大港口之航行安全，提昇碼頭營運績效，更新港區水深地形資料，以多音束測深系統來測量港區航道、迴船池及碼頭之水深地形，並建置于港區及碼頭即時水深預報系統中；如此，將可以提供三大港口在港區營運規劃、船舶吃水深度判別、船席靠泊與潮位研判，碼頭設施施工或浚渫規

劃等的重要參考依據。

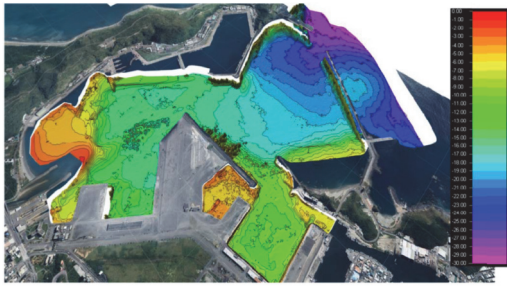


圖 2.2 蘇澳港區三維水深地形成果展示

為了掌握基隆港、蘇澳港、臺北港等三大港區高程資料及預報港內船席水深資訊，需建立港域及陸域一致之高程系統，在三大港區範圍內檢核現有環港水準點及位移控制點，經聯測至全國一致之 TWVD 2001 一等水準高程系統，藉以監控港區沉陷情況。另外，在三大港口港區內適當地點各建置 1 座潮位站，亦需以一等水準測量方式聯測至 TWVD 2001 一等水準高程系統上。透過潮位站的即時潮位資料與利用往昔潮位資料調合分析後的預報結果進行比對，來預測基隆港、臺北港及蘇澳港等三大港區船席與航道的潮位與水深，最後再同時結合港區衛星影像圖，建置各港區之船席與航道的地理資訊系統，完整呈現港區各船席的潮位及水深資訊，提供給各港務單位與一般民眾使用，未來相關資料亦可作為船隻進出港口、碼頭停靠作業及港灣疏濬等決策的輔助參考依據。

三、初步結果

有關三大港區位移控制點偏移量

檢測比較，利用三港區位移控制點之坐標高程測量成果，分別與 97 年度基隆港與臺北港測量成果、99 年度蘇澳港測量成果比較，詳細比較結果請參閱測量成果附件 8. 位移控制點坐標高程比較表。各港區位移控制點之坐標偏移及高程變化情況，分別說明如下：

(一) **基隆港區**：與 97 年測量成果比較，共計比較 371 個點位，平面坐標偏移量介於 0.00cm ~ 3.89cm，平均偏移量為 1.15cm；在高程變化上，高程變化量介於 +0.73 ~ -4.32cm 之間（+值為隆起，-值為沉陷），高程平均變化量為 -0.98cm，其中以西碎波堤之沉陷情況最為顯著，沉陷量約在 1.8 ~ 4.3cm 之間，另有幾個區段之沉陷量較為顯著，包含西防波堤沉陷量約在 0.4 ~ 1.8cm、西 33 號碼頭沉陷量約在 1.7 ~ 2.2cm、東 1 至東 7 碼頭之沉陷量約在 0.8 ~ 2.4cm 間，其餘碼頭之高程變化量多在 1cm 以內。基隆港區位移控制點之偏移量變化圖。

(二) **臺北港區**：與 97 年測量成果比較，共計比較 149 個點位，平面坐標偏移量介於 0.14cm ~ 6.54cm，平均偏移量為 1.88cm；在高程變化上，高程變化量介於 +0.24 ~ -13.76cm 之間（+值為隆起，-值為沉陷），高程平均變化量為 -2.91cm，其中以北防波堤之沉陷情況最為顯著，沉陷量約在 2.8 ~ 13.8cm 之間，另有幾個區段之沉陷量較為顯著，包含北 1 ~ 北 2 碼頭沉陷量約在 1.4 ~ 2.0cm、東 14 碼頭沉陷量約在 1.0 ~ 8.2cm、東 17 至東 19 碼頭(施工中)之

(三) **蘇澳港區**：針對蘇澳港區位移控制點只進行水準網聯測工作，包含位移控制點之高程檢測而不包含平面坐標位移監測，本次成果與 99 年測量成果比較，共計比較 108 個點位，高程變化量介於 +0.41 ~ -3.74cm 之間(正值為隆起，-值為沉陷)，高程平均變化量為 -0.15cm，其中只有 3 個零星點位(分別座落於 #6、#7、#11 號碼頭)之高程沉陷量大於 1cm，其餘碼頭及防波堤之高程變化量皆在 1cm 以內，且大多小於 0.5cm。蘇澳港區位移控制點之偏移量變化圖。

基隆港、臺北港及蘇澳港進行潮位分析，首先評估各潮位站資料品質並進行基本分析以初步了解各港潮位特性。另計算各潮位定義上的基準面與潮差等標準值，再探討最低低潮位面與TWVD2001 高程系統間的系統常值，此結果除了可用來連結周邊潮位站資料並可分析水位在空間上的變化，對於未來新設置潮位站與往昔潮位資料的整合，此舉有助於進行長期潮位資料分析，以因應未來氣候造成水位變化的可能影響。此外，繪製各潮位站的水位與日潮差的時序列變化來評估各潮位站的資料特性，水位及日潮差等資料可提供計算精確的船席水深，對船隻停泊與港內航運是很重要的參考資訊。頻譜分析可將潮位資料轉為頻域的能譜以分析水位變化的週期特性，並可在頻域進行低通濾波處理，以去除儀器在取樣資料中所獲得較不必要的水位雜訊變化。透過往昔潮位紀錄來進行調和分析，獲得不同分潮的振幅與相位後可進行港區內的潮汐預報，其結果可供港區及碼頭即時水深預報系統做呈現，預報結果對於港務管理或相關期程規劃有很大的貢獻。

潮位為海岸工程結構物設計的重要參數。一般在海岸地區或港口設有檢潮站，以記錄潮汐水位，資料收集時間越長其代表性越佳。對同一地點而言，不同年份分析結果雖大致相近，但偏差亦可能達數十公分，故應取數

年或更長期之統計平均值來代表潮位。

潮位基準因應用目的不同而有不同基準系統，一般有二種基準系統。海岸結構物多採潮位基準與陸地大地高程的中潮系統，乃以潮汐的平均水位為零點。對航運而言，為確定船舶通行所需最小水深，遂以該地長年統計之平均海水位減去影響前四大的分潮水位為準，此值與最低低潮位約略相等，稱為低潮系統。此外探討最低低潮面與 TWVD2001 高程系統的系統常值可提供該潮位站與不同時空的潮位資料做連結，亦可與往昔潮位資料做整合，使資料在同一高程基準上可進行长期的水位分析。除最低低潮為面的分析外，並針對各站統計以下潮位特性：各月最高潮位、最低潮位、每月朔望時之最高及最低潮位、月平均潮位、及每日最高與最低潮位之月平均。

潮汐現象依其組成分潮之不同，大致可分為：太陰潮(lunar tides)、太陽潮(solar tides)、日月潮(lunisolar tides)、倍潮(over tides)、複合潮(compound tides)及氣象潮(meteorological tides)等。若依週期來分，有長週期潮、全日潮(diurnal tides)、半日潮(semi-diurnal tides)、1/3 日潮、1/4 日潮等。由太陰引潮力而發生的潮汐稱之太陰潮；太陽潮則是由太陽引潮力而發生的潮汐。當潮汐自深海傳向海岸過程中，會受到地形水深影響而產生倍潮及複合潮，使得潮汐運動的組成分量複雜。倍潮之角頻率為主要引潮力 M2 及 S2 分潮

角頻率的整數倍，如 M4、M6、S4、S6 等分潮，而複合潮的角頻率為兩個以上主要分潮的和或差。引潮力之中，源自太陽及月亮(太陰)對地球表面水體的作用最顯著，其中以 M2(主太陰半日週期)、S2(主太陽半日週期)、K1(日月合成日週期)及 O1(主太陰日週期)等為四個主要分潮，因此潮汐現象與月亮的朔望盈虧有密切關係，例如潮汐之半日潮週期約為 12.5 小時，潮波波長相當於半個地球週長，在同一地點之潮位漲落平均每日約延遲 50 分鐘。

利用潮位資料分析最廣泛使用的調和分析法(harmonic analysis method)來進行潮位資料的分析及預測。潮汐的變化是種週期函數，理論上可以將潮汐觀測資料分解成無數個不同振幅和週期的分潮，分潮的產生係由於地球周圍的行星與地球之間的相互吸引力，而使海面產生一種週期性的變化，每一個分潮則為簡單的時間調和函數，將這些分潮再重新組合就可以對潮汐進行預測。

調和分析法乃應用牛頓所提之平衡潮(equilibrium tide)理論為基礎。如圖 3.2 所示之某分潮曲線可表示如下之函數：

$$y(t) = f \cdot H \cdot \cos(\omega t + (V_0 + u) - k)$$

其中， $y(t)$ 為分潮之潮高， f 為修正係數； H 為分潮振幅； ω 為分潮角速度； $(V_0 + u)$ 為平衡引數； k 為遲角，意指圖 3.2 中相當於平衡潮理論推算與實際發生時間之間隔。其中振幅與遲角稱為調和常數，二者之大小隨地點

而易，需由當地之潮汐觀測紀錄分析來決定，而修正係數、角速度及平衡引數等則與天體運動有關，可查表或計算得之。

假設某地任一時間的潮汐水位 $Y(t)$ 為各分潮潮高 $y(t)$ 之總合，表示如下：

$$Y(t) = H_0 + \sum_{i=1}^M y_i(t) = H_0 + \sum_{i=1}^M f_i H_i \cos(\omega_i t + (V_0 + u)_i - k_i)$$

H_0 為觀測資料期間之平均海水面，本研究以平均海水面為基準，故將 H_0 設為 0； M 為分潮個數； t 為時間，單位為小時。利用三角函數關係可轉換如下：

$$Y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^M (a_i \cos \omega_i t - b_i \sin \omega_i t)$$

$$a_0 = H_0, a_i = f_i \cdot H_i \cdot \cos[(V_0 + u)_i - k_i],$$

$$b_i = f_i \cdot H_i \cdot \sin[(V_0 + u)_i - k_i], \text{ 單位均為公分。}$$

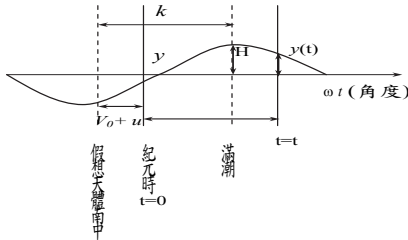


圖 3.2 分潮曲線示意圖

由調和分析可提供各分潮之調和常數，包括各分潮之振幅及相位角等。潮汐分析應基於長期且連續之觀測記錄，除可加強分析結果的可靠性外，尚可應用至未來的預測。由於潮汐可視為多種分潮的組成，因此對於某一地區之潮型可用分潮振幅比值 $(K1+O1)/(M2+S2)$ 來代表(法國制)。當比值小於 0.5 者，視為半日潮型，大於 1.25 者為全日潮型，介兩者之間為混

合潮型。亦有採用 $(K1+O1)/M2$ 之比值來代表(美國制)，若該值小於 0.5 者為半日潮型，若該值大於 2.0 者則歸類為全日潮型。

調和分析理論包括很多的分潮，但應用上可用數個主要分潮來進行分析。分潮的選用主要決定於資料長度、取樣間隔(sampling interval)及分潮頻率等三個原則(見 Emery and Thomson, 2001)。第一為最低頻率分潮的週期需小於或等於資料長度，即 $T_{\max} \leq N\Delta t$ ，其中 $T_{\max}$ 為分潮的最長週期， N 為資料數， Δt 為取樣間隔。第二為最高頻率分潮的週期需大於或等於兩倍的取樣間隔，即 $T_{\min} \geq 2\Delta t$ 。第三為相近兩分潮的角頻率差應大於 $360^\circ/2T_{\max}$ 。在國際常使用的 37 分潮(見表 7-1)，其中最低角頻率分潮(S_a)的週期為 365.24 天，因此以上述第一個限制條件，若選用此分潮，資料長度則需大於 365.24 天以上，方能推算正確的結果。最高頻率分潮(M_8)之週期為 3.1 小時，因此選用資料取樣間隔需小於 1.55 小時。37 分潮中角頻率最相近的為 S_2 及 T_2 ，其角頻率相差 0.041，故資料總長度至少須半年以上。考量以上原則視資料監測與採樣特性來進行分潮選擇，本計畫採用 37 分潮進行分析。

潮位資料調合分析及潮位預報系統建置方面，以各港往昔的潮位資料調合分析結果，基隆港各分潮權重如表 1 所示。臺北港各分潮權重如表 2 所示。蘇澳港各分潮權重如表 3 所示。利用各港調合分析結果將可推估各港的

時序潮位變化值，作為潮位預報的系統的參考數據。

表 1 基隆港各分潮成分

排名	分潮名稱	週期 (hour)	權重(%)
1	M ₂	12.42	20.23
2	K ₁	23.93	16.03
3	SA	8765.82	13.89
4	O ₁	25.82	13.15
5	P ₁	24.07	5.31
6	N ₂	12.66	5.18
7	S ₂	12.00	4.98
8	Q ₁	26.87	2.67
9	MU ₂	12.87	2.00
10	M ₁	24.83	1.28

表 2 臺北港各分潮成分

排名	分潮名稱	週期 (hour)	權重(%)
1	M ₂	12.42	39.81
2	S ₂	12.00	11.26
3	N ₂	12.66	7.84
4	K ₁	23.93	7.64
5	SA	8765.82	6.73
6	O ₁	25.82	6.29
7	K ₂	11.97	2.92
8	P ₁	24.07	2.48
9	L ₂	12.19	2.20
10	NU ₂	12.63	1.93

表 3 蘇澳港各分潮成分

排名	分潮名稱	週期 (hour)	權重(%)
1	M ₂	12.42	28.49
2	K ₁	23.93	13.09
3	S ₂	12.00	12.19
4	O ₁	25.82	11.40
5	SA	8765.82	8.49
6	N ₂	12.66	5.65
7	P ₁	24.07	4.29
8	K ₂	11.97	3.29
9	Q ₁	26.87	2.31
10	MU ₂	12.87	1.12

潮位基準因應用目的不同而有不同基準系統，一般有二種基準。海岸結構物多採潮位基準與陸地大地高程的中潮系統，乃以潮汐的平均水位為零點。另外在港灣工程與管理上，為考量航運等因素，為確定船舶通行所需最小水深，海圖中對於水深的基準面則採用低潮系統，此系統基準面採用該地長年統計之平均海水位減去調和分析後四個主要分潮之振幅和之水位為準。

由於分析資料的長度與品質會影響基準值的正確性與適用性，目前收集中央氣象局監測基隆港、臺北港與蘇澳港 99 至 101 三個年度的資料，雖然資料長度有些微不同，但各港皆以符合調和分析法 37 個分潮所需的標準。本計畫採用調和分析法計算各港各分潮之振幅值，再以長年統計的平均水位面扣除影響各港的前四大分潮來計算天文潮最低低潮位，此值可設定為低潮系統的基準面，其結果列於表 4。

表 4、三港平均水位及其最低低潮面

基區	潮位	平均潮位 (cm)	天文潮 最低低潮位 (cm)	往昔記錄 最低低潮位 (cm)
基隆港		7.2	-67.3	-99.1
臺北港		29.8	-155.1	-190.0
蘇澳港		9.0	-88.2	-109.4

分析的資料皆以 TWVD2001 基準為 0cm，三個港在 TWVD2001 的基準下可對其水位做基本的比較，由表 4 顯示基隆港與蘇澳港兩港的平均水位接近，但臺北港的水位則較高。以平均日潮差來看基隆港、臺北港及蘇澳港分別為 82.1cm、261.4cm 及 123.6cm，

顯示臺北港潮差最大，蘇澳港次之，基隆港最小。表 4 中顯示現有基隆港測站的平均水位基準略高於 TWVD2001 基準面，差距有 7.2cm，臺北港平均水位基準略高於 TWVD2001 基準面 29.8cm，蘇澳港狀況與基隆港相近，其平均水位基準略高於 TWVD2001 基準面 9.0cm。另外本計畫由往昔測站資料統計出記錄中最低低潮位於表 4 中，說明水位極端值低於低潮系統基準面的狀況，基隆港為 31.8cm，臺北港為 34.9cm，蘇澳港 21.2cm。整體而言歷史資料記錄中的最低潮位平均約低於各港低潮系統面 30cm，這些極端值記錄可能是受天文潮以外的氣象因素影響。

在三個港中，臺北港位於臺灣本島北端偏西側，基隆港則位於北端偏東側，蘇澳港則位於臺灣東北部。臺北港與基隆港距離約 38km，而基隆港與蘇澳港約相距 62km。雖然都位於臺灣北部但由於位置與地形的關係在潮位的表現上會有差異。圖 3.3 由上而下分別為基隆港、臺北港及蘇澳港於 2011 年 2 月至 4 月的潮位時序列圖。

圖中三個港區由於地理位置不同，基隆港的潮型屬於混合潮，臺北港在美國制公式下為半日潮，法國制公式下為混合潮，蘇澳港則為混合潮。故時序列變化差異也較大。此外若以潮差來做比較可發現臺北港最大，其大潮差約為 311.7cm；蘇澳港次之，其大潮差為 164.5cm。基隆港潮差最小，其大潮差約為 101.6cm。

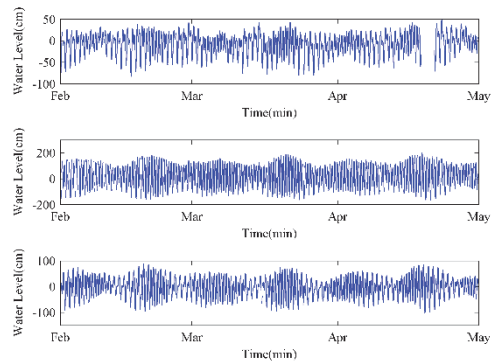


圖 3.3、三港 2011 年 2 月至 4 月的潮位時序列圖

為分析三個港間的潮時與潮差，故選用 2011 年 4 月 13 日至 4 月 18 日間的潮位資料進行分析。將三個港潮位資料之平均水位平移至各港零水位後其時序列及相對應局部峰值如圖 3.4 所示。圖中各顏色實線為各港潮位高資料，藍色代表基隆港，綠色為臺北港，紅色為蘇澳港。圖中各色星號分別代表各港潮位變化中的局部極值。針對這些峰值的發生時間進行分析其結果顯示蘇澳港的局部極值較早發生，較基隆港及值發生時間早了九小時，基隆港與臺北港間極值發生時間則相差約一小時，此現象與各港地理位置有關。

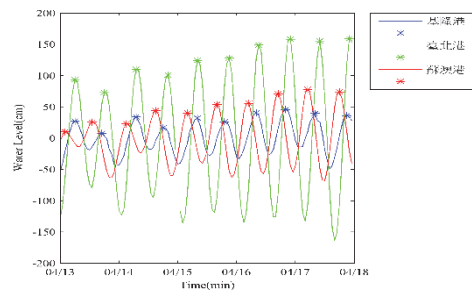


圖 3.4 三港區 2011 年 4 月 13 日至 18 日的潮位時序列圖

3.2 即時船席水深資訊系統軟硬體建置

Figure 1 illustrates the network architecture of the water level monitoring system. It features a central Windows Server 2003 Server connected to four base stations (基地台). Each base station is linked to a mobile phone (行動式 GPS) and a water level monitoring station (水位監測站). The stations are categorized into four groups: 1. 即時水位水深 (Real-time water level and depth) using Windows Browser (IE/Chrome); 2. 即時水位水深 (Real-time water level and depth) using Windows Browser (IE/Chrome); 3. 即時水位水深 (Real-time water level and depth) using Windows Browser (IE/Chrome); 4. 即時水位水深 (Real-time water level and depth) using Windows Browser (IE/Chrome).

本即時船席水深資訊系統軟硬體建置；透過各港潮位站之資料庫整合，本研究將全部研究成果透過網際網路，可即時將各港目前潮位值及船席水深

- 1. 水深查詢
 - 1.1. 船位站水深查詢
 - 船位站測量水深
 - 船位站預報水深
 - 地基定位
 - 1.2. 碼頭查詢
 - 碼頭預報水深
 - 地基定位
- 2. 船位資料下載
 - 2.1. 船期查詢下載
 - 2.2. 日期查詢下載
 - 2.3. 船位月報表輸出
- 3. 系統管理
 - 3.1. 使用者管理
 - 3.2. 登入紀錄查詢
 - 3.3. 資料異常警示功能
- 4. 系統資料匯入
 - 4.1. 預報船位系統資料
 - 4.2. 船位設置資料
- 5. 床底高程管理
 - 5.1. 港區選擇
 - 5.2. 船位站/碼頭：床底高程顯示
- Web & App
 - 6.1. 港區選擇
 - 6.2. 碼頭選擇
 - 6.3. 即時水深顯示
 - 6.4. 預報水深查詢顯示
 - 6.5. 船位站水深資料查詢

基隆港、蘇澳港、台北港即時潮流水深資訊系統

基隆港、蘇澳港、台北港即時潮流水深資訊系統

四、結論

29

港區衛星影像圖，建置各港區之船席水深的地理資訊系統，完整呈現港區各船席的潮位及水深資訊供港務單位使用，可作為船隻進出、碼頭停靠作業及港灣疏濬之決策輔助參考，以提升各港之國際競爭力。

參考文獻

1. 莊乾道、林文、蘇定縱、薛憲文、顏沛華、蘇達貞、蔡慶茂、張富南，1996，「水深量測技術發展與施測規範之研究」，中華民國海下技術協會，第 1~140 頁。
2. 何良勝、蘇青和等，2012，"臺灣主要港口海域長期性海象觀測及資料特性應用研究(3/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，研究報告，民國 101 年 3 月。
3. 何良勝、廖慶堂等，2014，"102 年臺灣國內商港海域海氣象觀測分析研究"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，研究報告，民國 103 年 4 月。
4. 內政部(2004)研定領海及鄰接區海域基本圖測量規範。
5. 薛憲文、于嘉順、黃明哲、王韋樺、江朕榮，「港灣及海岸之潮汐特性對水深測量影響之研究」，第 30 屆海洋工程研討會論文集，第 757-761 頁，2008。
6. 內政部國土測繪中心，「98 年度臺灣西部潮位模式建立技術發展計畫」，期末總報告書，2010。

圓筒式碼頭耐震性能設計之研究

顏正典 國立臺灣海洋大學河海工程系 副教授

張品鎮 國立臺灣海洋大學河海工程系 教授

賴瑞應 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

朱孟熙 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士 研究生

陳明鈺 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士 研究生

曾崇偉 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士 研究生

蕭靖志 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士 研究生

摘要

依據圓筒式碼頭所對應的耐震性能要求與其耐震性能等級之規定，進行圓筒式碼頭有效應力動態分析，分析程式採用二維有限差分FLAC程式，而對於孔隙水壓激發模擬則採用 Mohr-Coulomb 模式再加入 Finn 模式。利用具代表性之設計地震作為輸入荷載，同時以實際案例為參數選用之參考目標，進行非線性動力歷時數值分析，探討在考量之設計地震力等級情況下，圓筒式碼頭之性能表現能否符合性能目標，以評估其耐震能力。

一、前言

臺灣屬環太平洋地震帶，其地理位置位處歐亞與菲律賓海板塊交界，每年都發生多起不同規模之地震，加上海島性之氣候與海象條件，使得臺灣之港灣構造物在其壽命中的安全性受到地震、海潮流、波浪、海嘯、土壤液化、鹽分腐蝕等影響，因此，藉

由考量構造物壽命週期之經濟性，提出合理的耐震設計規範，使所設計之構造物能滿足預期之安全性成為重要的研究課題。過去於臺灣、日本、美國等地發生多起強烈地震，均導致人員傷亡、房屋、橋梁、道路、大壩、港口、非結構構件及設備等的倒塌與破壞，造成的經濟損失大多數來自於構造物或其附屬設施之損壞所帶來的維修、補強，以及正常營運中斷等。為符合構造物整個生命週期之綜合經濟性考量，性能設計法增加了構造物破壞控制之耐震目標，讓設計者及使用者均能瞭解構造物在遭遇不同強度的地震時之結構反應及其所具有的耐震能力。

結構物的耐震性能，是指其在各級地震作用下所產生的狀態，以及這些狀態所造成的影響或後果，包括安全性、服務性、修復性等。耐震性能設計法即是以控制結構耐震性能為標的，以符合相關安全性、服務性與修復性等需求之耐震設計方法。該方法

之基本理念主要包括：結構物於不同等級地震危害下之耐震設計要求直觀透明；設計由目標導向出發；強調結構物在強大地震作用下之非線性變形行為；注重結構物整體系統、結構構材和非結構構材以及附屬設備在整個生命週期各階段之耐震性能；確保結構物滿足設計要求具有滿意的可靠度或可接受震害之風險。

依據國際航海協會於 2001 年提出之港灣構造物耐震設計準則中圓筒式碼頭所對應的耐震性能要求與其耐震性能等級之規定，進行圓筒式碼頭有效應力分析，並利用具代表性之設計地震作為輸入荷載，同時以基隆港碼頭之地質、潮位等自然條件為參考之依據進行非線性動力分析，探討在考量之設計地震等級下，圓筒式碼頭結構之性能表現能否符合性能目標，以評估其耐震能力。

二、圓筒式碼頭之組成與破壞機制

一般圓筒式碼頭為鋼板樁圓筒式或鋼板圓筒式，係靠鋼板圓筒內填料自重及剪力強度抵抗外力之結構物。鋼板樁圓筒式碼頭之擋土機制類似於重力式碼頭，在地震力作用下，如考慮土壤未發生液化，其受力主要包括動態主動土壓力、動態被動土壓力、動態水壓力、殘留水壓力、作用於圓筒內填料之慣性力、以及作用於圓筒底面之土壤抗剪力等。碼頭型式為置放式鋼板圓筒主要是靠內填料底部的

摩擦力去抵抗碼頭慣性力及土壓力，若為埋入式圓筒則是以圓筒基面下之土壤承载力來抵抗慣性力及土壓力。而一般此類碼頭地震下的破壞模式係依圓筒的埋入及土層條件而定，如圖 1 所示。

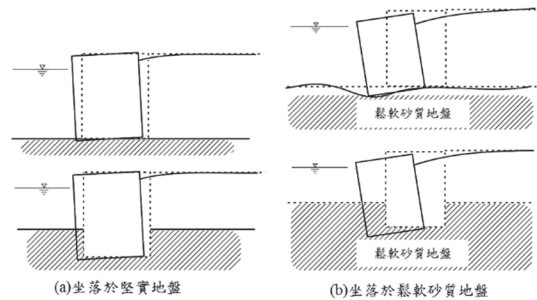


圖 1 圓筒式碼頭之破壞模式

三、碼頭耐震性能設計流程建立

圓筒式碼頭整體耐震性能設計流程包括第一階段設計與第二階段驗證，如圖 2 所示。第一階段設計首先需將結構物之性能水準定性規定及性能目標，依照各碼頭重要度予以建立。參考國際航海協會，性能水準定性規定、各碼頭重要度及性能目標，分別如表 1、表 2、表 3 所示。其次則需依場址的土壤特性，包括地質、地形、活動斷層等因素來評估場址施工之可能性，若不可行，則需經由地盤改良、變更設計基礎或場址遷移等方式進行調整，以保證場址滿足性能設計之要求。

細部尺寸之初步設計則需先確定結構物之形狀、尺寸、基礎及材料，並可依較低等級地震力作用之分析法檢核以供初步尺寸建立。而後開始進行第二階段驗證，即地震反應參數之計算與分析，其中關於圓筒式碼頭的

驗證分析法，參照碼頭所需之耐震性能目標，並依其不同地震等級與碼頭重要程度之下，選擇簡化分析、簡化動力分析及動力分析等三種方法進行圓筒式碼頭的耐震能力評估，如表4所示。而各驗證分析法使用之時機，如表5所示。

待結果分析出後，需將其結果依據國際航海協會所提出之圓筒式碼頭性能可接受標準進行檢核，如表6所示。若分析之結果滿足性能可接受標準，即耐震性能設計完成；若否，則需變更設計直至分析結果滿足耐震性能可接受標準之規定。

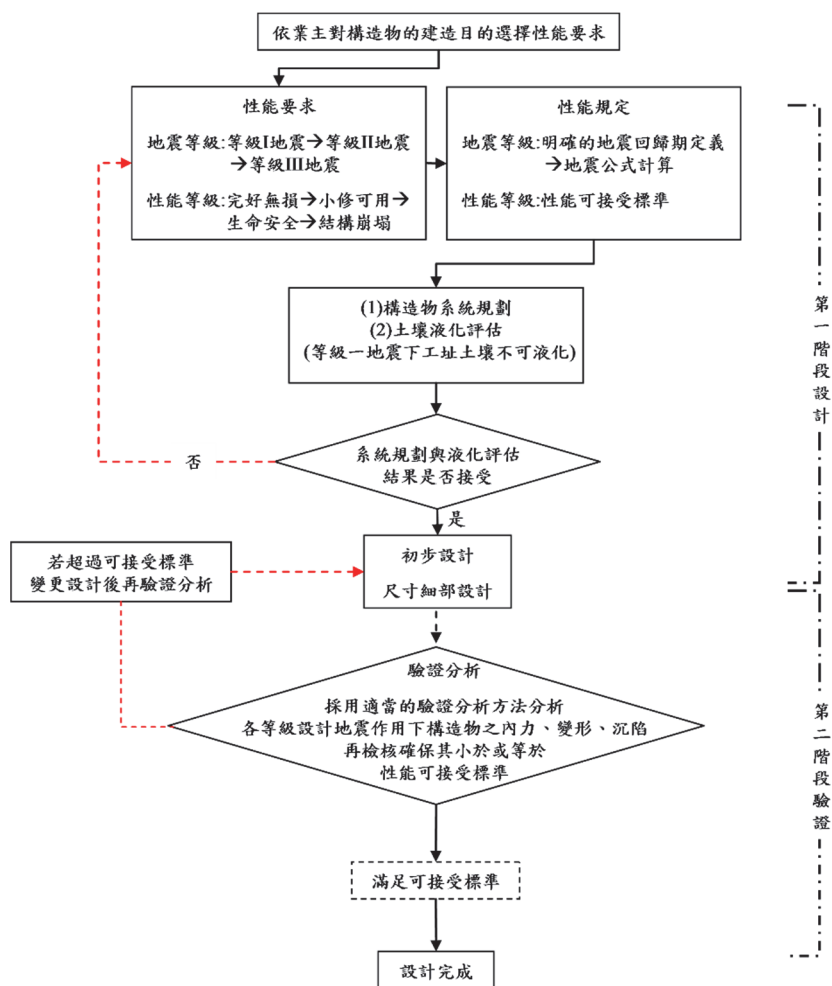


圖2 圓筒式碼頭耐震性能設計基本設計流程

表1 耐震性能水準定性規定之建議

損壞等級	使用性	修復性	安全性
第Ⅰ等級	功能正常	不需修復	結構保持彈性
第Ⅱ等級	短期功能喪失	可快速修復	損壞輕微
第Ⅲ等級	長期功能喪失	修復非常困難	結構不倒維持生命安全(未超過韌性容量)

表 2 各碼頭重要度等級之特性

等級	碼 頭 之 特 性	建議適用碼頭構造物
特定	明顯具有 A 級結構物之特性 1 至 3 項之情形者。	耐震強化碼頭
A	1. 結構物在遭受地震災害時，將有可能造成多數人命及財產之損失者。 2. 負有震災後復建工作之重要任務者。 3. 儲存有害或危險物品之結構物，在遭受地震災害時，可能造成人命或財產之重大損失者。 4. 結構物在遭受地震災害時，對於相關區域之經濟與社會活動將造成重大影響者。 5. 結構物在遭受地震災害時，其復舊作業經預測將相當困難者。	危險品碼頭
B	凡不屬於特定、A 級者	散雜貨碼頭 貨櫃碼頭
C	臨時設施	非永久性 靠泊設施

表 3 建議之碼頭所對應的耐震性能目標

性能等級 地震等級	第 I 級	第 II 級	第 III 級
等級 I (50 年回歸期地震)	A 級 B 級	C 級	—
等級 II (475 年回歸期地震)	特定級	A 級	B 級
等級 III (2500 年回歸期地震)	—	特定級	A 級

表 4 圓筒式碼頭結構之性能驗證分析法

		圓筒式碼頭
簡化分析法		靜力分析法(考量有或無土壤液化)
簡化動力分析法		滑動塊分析
動力分析法	結構模擬	有限元素法或有限差分法 線性或非線性分析 二或三維分析
	土壤模擬	有限元素法或有限差分法 線性或非線性分析 二或三維分析

表 5 各驗證分析法使用之時機

	等級 I (50 年回歸期)	等級 II (475 年回歸期)	等級 III (2500 年回歸期)
特定級	—	動力分析	動力分析
A 級	簡化分析或簡化動力 分析或動力分析	動力分析	動力分析
B 級	簡化分析或簡化動力 分析或動力分析	簡化動力分析或動力分析	簡化動力分析或動力分析
C 級	簡化分析或簡化動力 分析或動力分析	簡化分析或簡化動力 分析或動力分析	—

表 6 圓筒式碼頭性能可接受標準

參數		性能水準	第 I 級	第 II 級	第 III 級
殘餘變位	板樁變位	正規化水平位移 d/H	$<1.5\%$ 或 $d < 30\text{cm}$	$1.5\% \sim 5\%$	$5\% \sim 10\%$
		向海側傾斜角	$<3^\circ$	$3^\circ \sim 5^\circ$	$5^\circ \sim 8^\circ$
	岸肩變位	岸肩沉陷量	$<3 \sim 10\text{ cm}$	不需檢核	不需檢核
		岸肩與後線陸地之 沉陷差	$<30 \sim 70\text{ cm}$	不需檢核	不需檢核
		向海側傾斜角	$<2^\circ \sim 3^\circ$	不需檢核	不需檢核
最大反應下之應力或應變	基盤面以上板樁		彈性	塑性，不超過韌性容量或應變極限	塑性，不超過韌性容量或應變極限
	基盤面以下板樁		彈性	彈性	塑性，不超過韌性容量或應變極限
	拉桿		彈性	彈性	塑性，不超過韌性容量或應變極限
	錨碇設施		彈性	彈性	塑性，不超過韌性容量或應變極限

註：H 為基面以上板樁之高度。

四、場址土壤液化評估

本案例圓筒式碼頭之場址地層鑽探資料如圖 3 所示，遵照 Seed 土壤液化評估之經驗準則法之流程進行土壤液化評估。

建議在等級 I 地震下，工址土壤不允許發生液化，因此第一階段設計即須先進行等級 I 地震的土壤液化潛能評估。在等級 II 與等級 III 地震下，液化的機會大增，若硬性規定不得液化，土壤改良的處理費用可能將所費不貲，故規定容許液化發生。現行港灣構造物設計基準對地盤有液化潛能的重要港灣結構物耐震設計，工程師應先判斷，將不合適之軟弱土層予以挖除，

並進行土壤改良或回填之相關工作。

將鑽探資料簡化，並經過改良或回填之軟弱土層，其於三等地震下之土壤液化潛能評估結果詳圖 4，工址位置周圍並無近斷層，其有紀錄之最大地震規模為 7.3，所以土壤液化評估之地震規模設定值為 7.3，而液化潛能評估之尖峰地表加速度 PGA 設定值以三等地震之設計 PGA 作輸入，分別為等級 I 地震 $\text{PGA} = 0.4\text{SIIS} / 3.25 = 0.074\text{g}$ ，等級 II 地震 $\text{PGA} = 0.4\text{SIIS} = 0.24\text{g}$ ，等級 III 地震 $\text{PGA} = 0.4\text{SIIS} = 0.32\text{g}$ 。

由圖 4 可知在等級 I 地震作用下，工址所有土層皆不會產生液化(FL 值皆大於 1.0)，符合等級 I 地震土壤液化的

性能要求；在等級 II 及等級 III 地震作用下，深度至 20m 左右之土層 FL 小於 1.0，表示可能會發生液化，故在分析等級 II 及等級 III 地震作用下，必須考慮土層液化之影響。

五、第一階段設計

5.1 初步設計

研究案例之設計斷面碼頭單元靠海側鋼板樁，標準單元長為 21.2 m；陸側鋼板樁單元長為 19.2 m；圓筒半徑為 12.36 m，碼頭規劃之標準斷面如圖 5 所示。

圓筒式碼頭構造物在地震力作用之下，主要包括動態主動土壓力、動態被動土壓力、動態水壓力、殘留水壓力等。參考「港灣構造物設計基準-碼頭設計基準及說明」，其中所提列之耐震評估簡化分析法步驟簡述如下，結果如表 7 所示：

1. 圓筒壁體剪力變形檢核：圓筒壁體應檢討於海底面之剪力變形，及圓筒壁體於海底面之抵抗力矩，應足以抵抗於海地面之變形力矩，圓筒壁體剪力變形依下式計算且安全係數於地震時需大於 1.2：

$$F.S. = \frac{M_r}{M_d} \quad (1)$$

式中， $F.S.$ 為安全係數； M_r 為海底面之變形力矩； M_d 為海底面之抵抗力矩。

2. 板樁入土長度檢核：圓筒海測之板樁，需打設至能達到足夠承载力之深度為止，圓筒海側板樁入土長度須滿足下式，地震時安全係數需大於 1.5：

$$F.S. = \frac{R_p}{P_3} \quad (2)$$

式中， R_p 為板樁承载力； P_3 為作用於圓筒海側板樁背後，海底面上主動土壓合力之垂直分力。

3. 板樁拉力檢核：板樁斷面，依計算之板樁拉力，應小於材料容許拉力，依照規範規定日製 12.7mm 及 9.5mm 鋼板樁容許拉力分別為 200t/m 及 150t/m。作用於板樁之拉力，依下式計算：

$$T = [(\gamma \cdot H_0 + w)K_i + \gamma_w \cdot h_w]R \quad (3)$$

式中， T 為板樁拉力； K_i 為圓筒內填料之土壓係數， $K_i = 0.6$ ； γ_w 為海水單位重； h_w 為圓筒內水位與碼頭前水位差； R 為圓筒半徑； w 為上部載重。

鑽孔編號：H-20 X座標：324861.0 鑽孔傾角：90
 提供單位：基隆港務局 Y座標：2,783,033 鑽孔孔徑：0 cm
 鑽探公司：台灣探勘工程股份有限公司 埋設深度：-16.3 m 鑽孔深度：22 m
 試驗公司：台灣探勘工程股份有限公司 (1.觀測井 2.水壓計)
 鑽探日期：1967/11/26 埋設深度：0 m

地下水位深度：0 m
 日期：1967/11/26

深度 (m)	土壤岩層說明	岩石 分類	取 樣 率	RQD	N 值	採 樣 編 號	礫 石 %	砂 土 %	粉 土 %	黏 土 %	自 然 含 水 量 %	液 性 限 度 %	塑 性 指 數	總 重 量	比 重	孔 隙 比
	土	土												tm ³	G _s	e
1.85	灰色細砂及沉泥質砂	SM	0	0	9	20-1	0	81	19	0	13.30	0.0	2.71	1.87	0.64	
3.85	灰色細砂及沉泥質砂	SM	0	0	11	20-2	0	86	14	0	20.80	0.0	2.71	1.92	0.7	
5.85	灰色細砂及沉泥質砂	SM	0	0	13	20-3	0	72	28	0	20.40	0.0	2.71	2.02	0.61	
7.85	灰色細砂及沉泥質砂	SM	0	0	13	20-4	0	58	42	0	24.60	0.0	2.72	1.89	0.77	
9.85	灰色細砂	SM	0	0	18	20-5	0	63	37	0	23.10	0.0	2.7	1.93	0.72	
11.85	灰色細砂	SM	0	0	28	20-6	0	67	33	0	20.30	0.0	2.71	1.84	0.77	
13.85	灰色細砂	SM	0	0	31	20-7	0	75	25	0	21.20	0.0	2.7	1.91	0.72	
15.85	灰色沉泥質砂及細砂	SM	0	0	35	20-8	0	73	27	0	21.60	0.0	2.71	1.96	0.69	
17.85	灰色沉泥質砂及細砂	SM	0	0	39	20-9	0	70	30	0	20.40	0.0	2.71	2.04	0.59	
19.85	灰色沉泥質砂及細砂	SM	0	0	41	20-10	0	74	26	0	20.50	0.0	2.72	2.01	0.62	
21.85	灰色沉泥質砂及細砂	SM	0	0	43	20-11	0	84	16	0	20.20	0.0	2.71	1.98	0.65	
22.0																

圖 3 圓筒式碼頭場址土層鑽探資料

等級I

孔號：W24-20		地下水位=GL-2.27		地震規模=7.3		PGA=0.074										
深度 (m)	土壤 類別	γ_t (t/m ³)	σ_v (t/m ²)	σ_v (t/m ²)	N	有效 應力 C _n	地震規模 修正 MSF	α	β	N1	<#200	應力折 減係數 γ_d	CSR (1)	CRR _{7.5} (2)	CRR _M (3)	F _L (3)/(1)
5.0	SM	1.8	7.3	10.0	12	1.17	1.07	0.00	1.00	12	0.0	0.84	0.06	0.13	0.14	2.19
10.0	SM	1.8	12.3	20.0	12	0.90	1.07	0.00	1.00	10	0.0	0.68	0.07	0.12	0.12	1.74
13.0	SM	1.8	15.3	26.0	12	0.81	1.07	0.00	1.00	10	0.0	0.56	0.07	0.11	0.12	1.73
17.0	SM	1.8	19.3	34.0	14	0.72	1.07	3.61	1.08	15	20.0	0.52	0.06	0.16	0.17	2.76
20.0	SM	1.8	22.3	40.0	14	0.67	1.07	5.00	1.20	16	40.0	0.50	0.05	0.17	0.19	3.40
23.0	SM	1.8	25.3	46.0	14	0.63	1.07	5.00	1.20	16	35.0	0.48	0.05	0.17	0.18	3.52

等級II

孔號：W24-20		地下水位=GL-2.27		地震規模=7.3		PGA=0.24										
深度 (m)	土壤 類別	γ_t (t/m ³)	σ_v (t/m ²)	σ_v (t/m ²)	N	有效 土 C _n	地震規模 修正 MSF	α	β	N1	<#200	應力折 減係數 γ_d	CSR (1)	CRR _{7.5} (2)	CRR _M (3)	F _L (3)/(1)
5.0	SM	1.8	7.3	10.0	12	1.17	1.07	0.00	1.00	12	0.0	0.84	0.21	0.13	0.14	0.68
10.0	SM	1.8	12.3	20.0	12	0.90	1.07	0.00	1.00	10	0.0	0.68	0.23	0.12	0.12	0.54
13.0	SM	1.8	15.3	26.0	12	0.81	1.07	0.00	1.00	10	0.0	0.56	0.22	0.11	0.12	0.53
17.0	SM	1.8	19.3	34.0	14	0.72	1.07	3.61	1.08	15	20.0	0.52	0.19	0.16	0.17	0.85
20.0	SM	1.8	22.3	40.0	14	0.67	1.07	5.00	1.20	16	40.0	0.50	0.18	0.17	0.19	1.05
23.0	SM	1.8	25.3	46.0	14	0.63	1.07	5.00	1.20	16	35.0	0.48	0.16	0.17	0.18	1.08

等級III

孔號: W24-20		地下水位=GL-2.27		地震規模=7.3		PGA=0.32										
深度 (m)	土壤 類別	γ^t (t/m ³)	σ^v (t/m ²)	σ^v (t/m ²)	N	有效 應力 C _n	地震規模 修正 MSF	α	β	N1	<#200	應力折 減係數 γ_d	CSR (1)	CRR _{7.5} (2)	CRR _M (3)	F _L (3)/(1)
5.0	SM	1.8	7.3	10.0	12	1.17	1.07	0.00	1.00	12	0.0	0.84	0.28	0.13	0.14	0.51
10.0	SM	1.8	12.3	20.0	12	0.90	1.07	0.00	1.00	10	0.0	0.68	0.31	0.12	0.12	0.40
13.0	SM	1.8	15.3	26.0	12	0.81	1.07	0.00	1.00	10	0.0	0.56	0.30	0.11	0.12	0.40
17.0	SM	1.8	19.3	34.0	14	0.72	1.07	3.61	1.08	15	20.0	0.52	0.26	0.16	0.17	0.64
20.0	SM	1.8	22.3	40.0	14	0.67	1.07	5.00	1.20	16	40.0	0.50	0.24	0.17	0.19	0.79
23.0	SM	1.8	25.3	46.0	14	0.63	1.07	5.00	1.20	16	35.0	0.48	0.22	0.17	0.18	0.81

圖 4 圓筒式碼頭三等級地震下土壤液化潛能評估結果

4. 圓筒壁體安定檢核：由於動態主動
土壓力與被動土壓力在地震作用下

並不會同時發揮到最大，故在此不
考慮動態被動土壓所提供之抵抗

力，僅考慮圓筒底部土壤抗剪強度提供之抵抗力，抗滑安全係數地震時需大於 1.0，抗滑動安全係數依下式計算：

$$F.S.=\frac{\mu \cdot (1-K_v)W}{K_h \cdot W+P_{AE}+P_{DW}+P_{RW}} \tag{4}$$

式中， $W(1-K_v)$ 為圓筒底部土壤

抗剪強度； $K_h W$ 為圓筒內填料之慣性地震力； P_{AE} 為動態主動土壓合力； P_{DW} 為動態水壓合力； P_{RW} 為殘留水力。

由表 7 分析結果可知圓筒式碼頭檢核之安全係數皆符合規範，故設計之圓筒斷面尺寸通過檢核，不需進行修改，可進行下一階段之驗證分析。

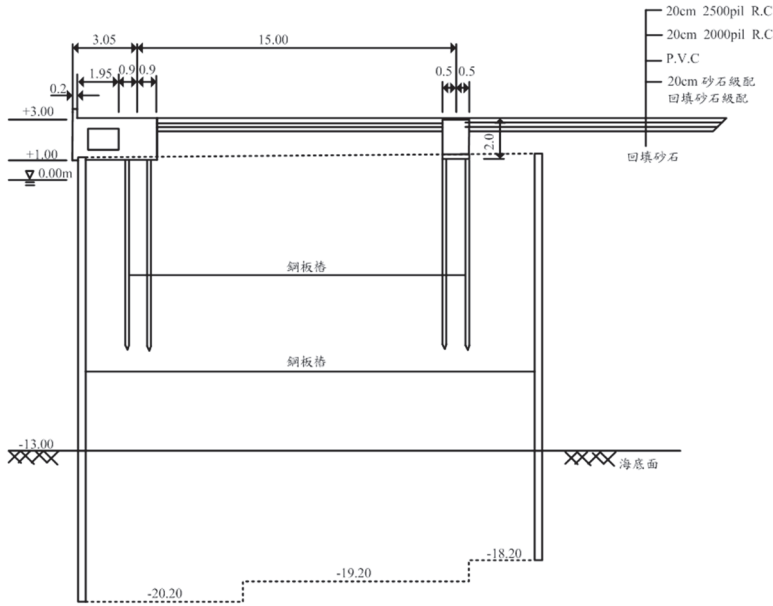


圖 5 圓筒式碼頭標準斷面示意圖

5.2 等級一地震性能驗證檢核

依照上述之分析過程，當安全係數 $F_S = 1$ 時，水平震度係數 $K_h = 0.149$ ，即為臨界震度係數 K_t 。安全係數值為 $F_S = K_t / K_e$ ，而有效震度係數 $K_e = 0.074$ ，其安全係數值計算結果大於 1。本研究案例之性能規定驗證可由安全係數大於 1 來判定所設計之碼頭的受震反應是處於穩定狀態，即無變位發生，如表 6 之檢核內容，碼頭在等級 I 地震作用下，其碼頭變位應變量皆滿足性能可接受標準與耐震性能要求。

表 7 簡化分析之分析結果

檢核	安全係數
圓筒壁體剪力變形	2.20
板樁入土長度	1.96
板樁拉力	1.31
圓筒壁體安定	1.78

六、第二階段驗證

6.1 圓筒式碼頭簡化動力分析

圓筒式碼頭之簡化動力分析原理，係運用滑動塊體法於結構之耐震能力檢核評估。滑動塊體分析法 (sliding block analysis) 的精神是將結構主體視

為可滑動之剛體，地震力為作用於結構基礎之地震加速度歷時，主要分析土工結構受地震超出抗滑能力時的反應，以及計算地震所引致總滑移量。根據 Newmark 提出的簡易滑動塊體法來分析剛性塊體在於水平地表運動過程期間所導致的總滑移量。如圖 6 所示，假設質量 m 的塊體為剛體，放置於水平表面上，而滑動面的力學行為與彈塑性模式相符合；當地震發生時，塊體之水平方向慣性力由滑動面之抗剪力來維持塊體的動態平衡，所以塊體之運動狀態與滑動面所提供的抗剪力有關。

圓筒式碼頭構造物在等級二地震力作用之下，需考慮土壤發生液化，本研究參考「港灣構造物設計基準-碼頭設計基準及說明」及「公路橋樑耐震設計規範」，計算出臨界加速度進而利用滑動塊體法求得位移量，如圖 7 所示。分析結果將參照表 6 判定所設計之碼頭的受震反應是否滿足性能可接受標準。

6.2 圓筒式碼頭之動力分析

圓筒式碼頭的動力分析法，一般可採有限元素(finite element method, FEM)或有限差分(finite difference method, FDM)等數值方法，模擬「碼頭-結構」彼此之間相互作用的行為，並考慮超額孔隙水壓激發對碼頭穩定性及變位之影響，以及土層之非彈性行為，利用具代表性之實際地震記錄作為輸入荷載，進行非線性動力歷時分析，探討在考量地震等級下，圓筒式碼頭

結構之性能表現能否符合性能要求，以評估其耐震能力。

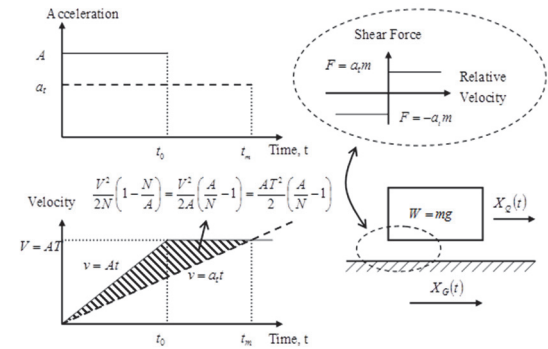


圖 6 Newmark 之滑動塊體分析法的觀念

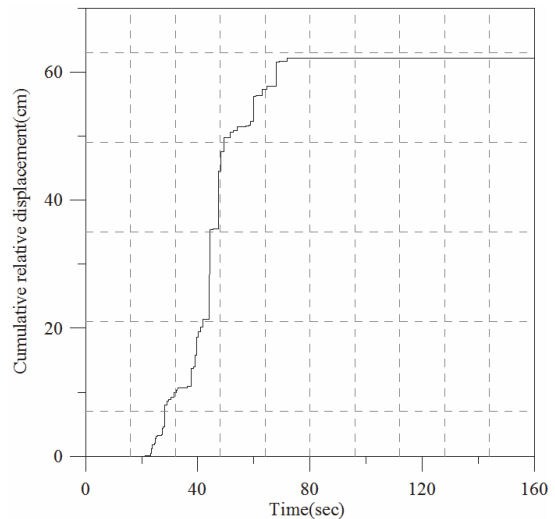


圖 7 滑動塊體永久水平位移

採用 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 程式進行動力分析之研究，以下先簡單介紹有限差分法之 FLAC 程式，FLAC 程式為美國 Itasca Consulting Group, Inc. 所發展，主要以顯示有限差分法處理二維平面應變之數值分析問題，可用來模擬土壤、岩石彈塑性或其他達降伏限度後成塑性流動的材料所組成的構造物行為，並將欲分析之物體分割成有限之網格，並決定材料之組合律及邊界條件，若

材料所遭受之應力場較大亦可能產生大變形，則需使用大應變模式模擬材料變形行為。在進行動態分析時需考慮在有限網格之波傳行為之影響，因此需加以考慮邊界折射與反射行為，且在進行模擬時也需考慮到應力波傳遞時的能量消散行為。而FLAC的動力分析亦提供了阻尼與動態邊界條件之設定。

以FLAC進行圓筒式碼頭之動力分析主要分為九大步驟：(一)建立網格；(二)輸入材料強度參數；(三)設定邊界條件；(四)加入結構元素並重力平衡；(五)施加海水之側向力；(六)指定地下水位面；(七)力學平衡；(八)設定阻尼參數和動態邊界條件；(九)施加地震力。

案例圓筒式碼頭之分析網格尺寸，如圖 8 所示。分析斷面區有回填砂與地層等部份；本分析的網格，共計使用 2142 個節點。各項材料參數之推估，以現地鑽探之標準貫入試驗 SPT-N 值為參考依據，進行分析時，可將地層稍作簡化並將不適合之極為軟弱土層予以適當處理。本研究參考之鑽探資料與材料參數，如圖 9 所示。

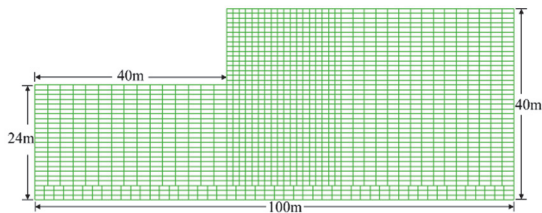


圖 8 分析網格建置

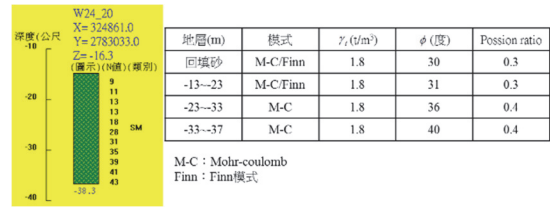


圖 9 材料參數與模式

6.3 分析結果檢核

動力分析之分析成果如圖 10 至圖 13 所示。圖 10 為考慮地層材料特性後所建置之土層模型，另動力分析所需之邊界條件設定亦於圖中顯示。經由指定地下水位面並設定地下水分析後所得到之孔隙水壓分布，如圖 11 所示。最後設定阻尼參數和動態邊界條件並給定設計地震力並進行動力分析後，所得到之變形量分析成果，如圖 12 所示。而在動力分析過程中土體之孔隙水壓可因受壓而產生孔隙水壓激發之現象，如圖 13 所示。

動力分析完成後，需將其結果依據國際航海協會所提出之圓筒式碼頭性能可接受標準進行檢核。若計算結果滿足，即耐震性能設計完成；若否，則需變更設計直至計算結果滿足耐震性能設計之規定。

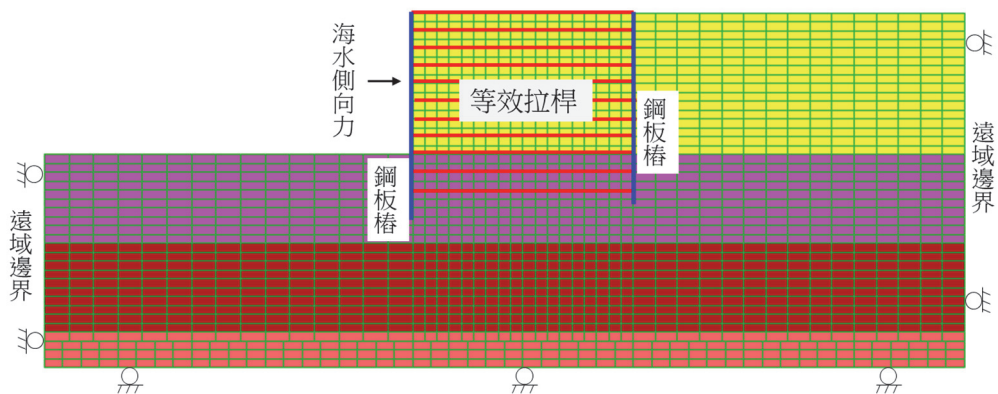


圖 10 動力分析邊界與土層模型建置



圖 11 孔隙水壓生成

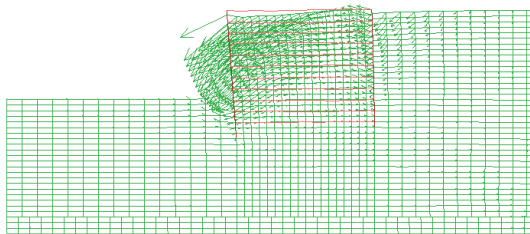


圖 12 動力分析完成後之變形量

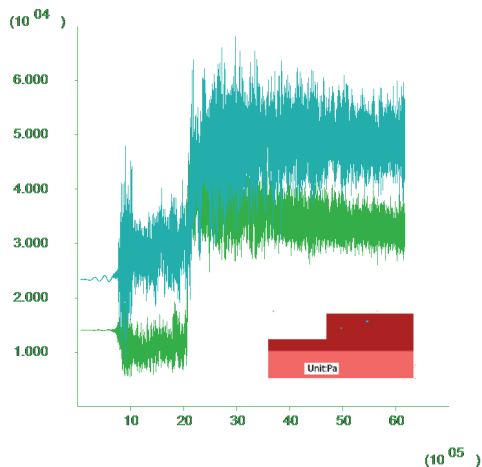


圖 13 動力分析孔隙水壓激發結果

七、結論

圓筒式碼頭耐震分析方法由簡到繁分為簡化分析、簡化動力分析以及動力分析三類，三種不同複雜與精確度等級分析方法之選用，除了與碼頭重要度等級相關以外，也與其所作用的地震力等級相關。動力分析法為上述最複雜之分析方法，其可反應較真實之現象與預測圓筒式碼頭之真實行為，在性能設計之第二階段驗證，可提供工程師依結構重要度所要求之驗證分析方法，驗證圓筒式碼頭行為是否滿足對應的性能等級要求。

分析成果顯示，以FLAC程式進行圓筒式碼頭之動力分析可適切掌握圓筒式碼頭在不同設計地震等級下，碼頭可能發生之變形與破壞機制，且檢核結果亦符合規定之性能要求，此一結果可作為後續分析研究之參考。

參考文獻

1. Newmark, N. M. (1965), Effect of Earthquake on Dam and Embankment, *Geotechnique*, Vol.15, No. 2, pp.139-159.
2. Martin, G. R., W. D. L. Finn and H. B. Seed(1975), Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading, *J. Geotech., Div. ASCE*, 101(GT5), 423-438.
3. Byrne, P.(1991), A Cyclic Shear-Volume Coup and Pore-Pressure Model for Sand, Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Paper No. 1.24, 47-55.
4. PIANC/International Navigation Association (2001), *Seismic Design Guidelines for Port Structures*, A.A Balkema Publishers.
5. Seed,et.al(2001), "Recent Advances In Soil Liquef Action Engineering And Seismic Site Response Evaluation", *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium*, California.
6. Cheng-Yu Ku, Ching-Chung Chang, Wei-Fan Tseng, Jui-Ying Lai(2014), "A Case Study of the Performance-based Seismic Design for Sheet Pile Wharf in Taiwan," *Proceedings of International Society of Offshore and Polar Engineers*, Busan Korea.
7. 交通部(2000)，*港灣構造物設計基準—碼頭設計基準及說明*。
8. 賴瑞應、曾文傑、張道光、薛強、林澤熙、鄧耀里、陳斌哲、陳正忠、陳國慶、王茂興、辛希(2004)，「碼頭結構物功能設計分析方法之研究」，交通部運輸研究所。
9. 賴瑞應、賴聖耀、謝明志(2005)，「地震引致板樁式碼頭之變位量分析」，交通部運輸研究所。
10. 日本港灣協會(2007)，*港灣の施設の技術上の基準・同解説*，運輸省港灣局監修。
11. 交通部(2009)，*公路橋梁耐震設計規範*。
12. 謝明志、陳志芳、張文忠、林炳森、黃安斌(2011)，「港灣現地碼頭結構與土壤動態互制監測之研究(2/2)」，交通部運輸研究所。
13. 賴瑞應、張權、薛強、陳正忠、徐偉誌、石豐銘(2011)，「港灣構造物耐震性能設計架構之研究(1/4)」，交通部運輸研究所，臺北。
14. 賴瑞應、張權、薛強、顧承宇、曾韋繇、徐偉誌、翁健煌、蔡勇賢(2012)，「港灣構造物耐震性能設計架構之研究(2/4)」，交通部運輸研究所。
15. 賴瑞應、顧承宇、張景鐘、曾韋繇、陳明鈺、余孟勳、蔡勇賢(2013)，「港灣構造物耐震性能設

- 計架構之研究(3/4)」，交通部運輸研究所。
16. 張權、薛強、顧承宇、曾韋繇、邱天宏、賴瑞應(2013)，「應用動力分析於板樁式碼頭之耐震性能設計之研究」，港灣報導季刊，第 96 期，第 1~18 頁。
 17. 曾韋繇、顧承宇、張權、薛強、賴瑞應(2013)，「耐震性能設計之研究-以重力式碼頭為例」，第十五屆大地工程學術研究討論會。
 18. 曾韋繇、顧承宇、賴瑞應(2013)，「動力分析於板樁式碼頭耐震性能設計研究」，第十五屆水下技術研討會暨國科會成果發表會。
 19. 顧承宇、張景鐘、賴瑞應、曾韋繇、陳明鈺、余孟勳(2014)，「應用動力分析於板樁式碼頭之耐震性能設計之研究」，港灣報導季刊，第 99 期，第 17~28 頁。
 20. 余孟勳、顧承宇(2014)，「圓筒式碼頭耐震性能設計之研究」，中華民國力學學會第三十八屆全國力學會議。
 21. 余孟勳、顧承宇、賴瑞應、謝明志(2014)，「有效應力動力分析於圓筒式碼頭性能設計之研究」，第 36 屆海洋工程研討會。

近十年之臺灣海平面變化速率研究

蘇文治 國立成功大學測量及空間資訊學系專任助理

鄭百言 國立成功大學測量及空間資訊學系副教授

林立青 國立成功大學國際海洋科學研究所、海洋研究中心協理、後研究員

莊文傑 交通部運輸研究所、臺灣技術研究中心研究員

李俊穎 交通部運輸研究所、臺灣技術研究中心研究員

摘要

臺灣為海島型國家，主要社經發展城市皆集中於沿海地區，若海水面因全球暖化而上升，相對於世界其他大陸區域臺灣受影響之程度將更為嚴重，故精確計算臺灣周圍海域海水面變化速率且了解其變化的主要原因為一相當重要課題。為了對於臺灣四周海水面變化與沿海城市的環境安全提供科學根據。一般而言，潮位與衛星測高資料為研究海水面變化之兩種主要觀測量，而前人利用潮位資料計算臺灣海水面變化之相關成果中皆未完全考慮海潮、逆氣壓、基準偏移量、測站地表垂直變動等影響，因此本研究結合近十年(2002-2011)衛星測高資料與潮位資料評估上述4種改正對於利用潮位資料計算海水面變化速率之影響，並分析臺灣周圍潮位站垂直變動情形。結果顯示測站地表垂直變動與偏移量改正之影響最為顯著，潮位站垂直變動改正的影響量平均值約 7.4 mm/yr ，而偏移量改正影響量皆在 30

mm/yr 以上，因此若應用未經偏移量和測站垂直變動改正的潮位資料進行海水面變化速率估算，將造成嚴重誤差。計算結果呈現臺灣潮位站地表大多呈現下沉情形，臺灣西南部潮位站為顯著下沉之區域，其中塭港潮位站周圍地表面下沉量最大，每年約下沉 3 cm 。

由衛星測高與潮位資料估算之臺灣周圍海域海水面變化主要呈現上升現象，上升速率由北向南遞增。衛星測高資料估算整個臺灣四周(緯度： $10^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、經度： $110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 近十年海水面變化則以 8 mm/yr 的速率正在上升。另外，經由比較整個臺灣四周近十年(2003-2011)衛星測高海水面變化、GRACE 海水質量、溫度與鹽度比容海水面變化後可知，海水面與比容海水面在年週期到多年週期訊號呈現高相關(相關係數 ≥ 0.9)，且比容海平面與海洋質量速率亦持續上升，兩者分別約占海面上升速率的 30% 與 15%，但仍約有一半的海水面變化速率無法解釋，可能為深海比容海水面變化或資料本身和模型改正不正確所致。

一、前言

全球暖化造成氣候變遷等問題在過去的數十年間有逐漸惡化之趨勢，其中海水面上升(Sea level rise)與其他生態環境變遷息息相關，例如南北極與格林蘭冰原融化和海水溫度上升，可能造成之災害已受到社會各界之強烈關注。2007 年政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第四次報告中指出，在最嚴重之推算情形下，2100 年全球海水面將上升 26-59 cm (IPCC, 2007)。2013 年政府間氣候變遷委員會提出的第五次報告中指出，海水面上升之推算值將大於第四次報告之結果，在最嚴重之推算情境下(代表濃度過程(Representative concentration pathways 8.5)，本世紀末海水面將上升約 52-98 cm [IPCC, 2013]，且本世紀末約有 95% 區域的海水面變化速率將呈現正值。由此可知，海水面上升在未來已是必須積極面對的環境災害之一。

臺灣為海島型國家，島嶼中央為高山區，平原大多位於海岸附近，因此主要發展的城市距離海岸線僅為 10-30 公里。由 Nicholls and Cazenave [2010] 利用衛星測高資料計算成果可知，全球各區域的海水上升速率並不一致，且臺灣附近海域之海水面變化速率皆呈現上升趨勢，因此精確估計臺灣附近海域海水面變化速率並了解上升的主要原因就顯得非常重要。近年來臺灣極端氣候發生頻率有顯著增加之趨勢 [陳亮全等人，2011]，而 Webster

等人[2005]提到海水面上升將導致熱帶氣旋的頻率與強度增加，因此本計畫將分析臺灣周圍近十年海水面變化速率並評估海水面上升原因，為未來的防災預警提供科學根據。

現今監測海面水位變化的兩種主要儀器為長時間紀錄之潮位站資料和衛星測高資料，由於潮位資料包含測站垂直變動訊號、潮位站分佈不平均、觀測時間長短不一致等缺點，而衛星測高技術觀測海水面變化範圍雖近乎涵蓋全球，但觀測時間較短 (~20 年)，且近岸資料較為稀少且精度低，因此本研究將結合衛星測高資料和潮位資料進行臺灣附近海域之海水面變化研究，可結合兩種資料優點，避免使用單一資料之缺點。

海水面變動主要由大氣、海洋、冰界與水界各系統間交互作用而產生，而導致海水面變化主要原因可分為兩方面：1.比容海水面(Steric sea level)變化，主要由海水溫度與鹽度變化造成的海水體積變化；2.海水質量變化，主要由於陸上、海洋、大氣各系統之間的質量交換(如冰川或冰山融化、蒸發、降雨、徑流等)所造成之變化。比容海水面變化可結合海洋各水層之溫度與鹽度資料計算得到[Gill, 1982]，而海水質量變化可由美國航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)與德國太空中心(German aerospace center)於2002年共同研發發射之重力反演和氣候實驗(Gravity Recovery and Climate Expe-

riment, GRACE) 重力衛星所觀測之全球重力場變化計算求得。

Zhan 等人 [2009] 利用 14 年衛星測高資料估計黃海、東海、南海之海水面變化速率，計算速率分別為 3.91 mm/yr 、 4.28 mm/yr 、 3.49 mm/yr ，表示臺灣附近海域之海水面主要呈現上升情形，且大於全球海水面變化速率平均值的 $3.2\pm 0.4\text{ mm/yr}$ (涵蓋時間為 1993-2009 年) [Church and White, 2011]。Tseng 等人[2009]利用 8 個潮位站和衛星測高資料估計臺灣附近海水變化，並以局部回歸 (Local regression, LOESS) [Hastie and Tibshirani, 1990]處理非線性海水面趨勢，結果顯示利用 1955-2003 和 1961-2003 年潮位資料計算之海水面速率分別為 3.5 mm/yr 和 2.4 mm/yr ，然而此結果尤其不合理之處，例如 1955-2003 之澎湖潮位資料估算之海水面速率高達約 11 mm/yr ，明顯包含其他非海水面變化訊號。此外 Tseng 等人[2009]亦利用 1993-2003 年潮位和測高資料計算求得海水面變化趨勢，分別為 5.7 mm/yr 和 5.3 mm/yr ，速率皆比全球平均海水面變化速率來的大。最後該研究中探討海水上層溫度與海水面時間序列相關係數，因無海水深層資料，故無法真正顯示海水溫度變化對海水面變化速率之貢獻。黃清哲等人[2009]利用線性迴歸分析估算臺灣周圍海水面變化速率，以衛星測高和潮位資料估算 1992-2009 海水面皆呈現上升情形，其中由衛星測高和潮位資料估算臺灣東部海水面速率分

別為 6.61 和 55.6 mm/yr ，兩者趨勢相差約 50 mm/yr ，作者認為可能臺灣東部的潮位站垂直變動較劇烈所導致。Ching 等人[2011]利用全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 連續觀測站與精密水準資料估算臺灣本島地表垂直變動速率，結果發現臺灣東南部與西南部等區域的地表垂直變動量比臺灣附近海水面變動量來的大，表示臺灣四周潮位資料中包含的地表垂直變動訊號將顯著影響潮位資料估算海水面變化速率。

本研究利用 2002-2011 年潮位與衛星測高資料計算臺灣周圍 (緯度： $10^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、經度： $110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 海水面變化速率。潮位與衛星測高資料皆進行率定及改正，由上述前人研究可知潮位資料之改正並無通用之作業程序，因此本研究中亦將分析各項改正，包含海潮(Ocean tide；或稱天文潮)改正、逆氣壓(Inverse Barometer)效應改正、偏移量(Bias)改正與測站地表垂直變動改正對於利用臺灣附近潮位資料估計海水面速率之影響。最後利用溫度與鹽度資料和 GRACE 重力衛星資料分析造成近 10 年臺灣周圍海水面上升之原因。

二、研究資料

2.1 衛星測高

使用 Topex/Poseidon、Jason-1 與 Jason-2 三顆衛星測高資料，資料可由法國衛星海洋數據存檔、驗正與解釋 (Archiving, Validation and Interpretation

of Satellite Oceanographic, AVISO) (<http://www.aviso.oceanobs.com/en/>) 資料中心取得。三顆衛星的設計參數相同，因此三個測高資料可結合使用，資料涵蓋時間為 1992/09-至今，每一秒平均之海水面高度觀測量精度可達 $\pm 4.2\text{cm}$ [AVISO and PODAAC User Handbook, 2001]。測高資料均已經進行儀器改正、介質改正（雙頻電離層改正、濕對流層改正、乾對流層改正）、地球物理改正（固體潮改正、海潮負載改正、極潮改正、海面狀態偏差改正、逆氣壓改正），後續計算皆以 AVISO 資料中心預設改正模式來進行。

由於後續衛星測高資料將配合潮位站資料使用，但衛星測高近岸資料較稀少且精度較差，而潮位站大多設置於岸邊，因此本計畫分別平均潮位站周圍經緯度 2° 、 3° 、 5° 範圍內的測高資料來進行，圖 1 為以高雄潮位站周圍經緯度 2° 為例。然而根據黃清哲等人 [2009] 利用衛星測高估算臺灣東部與西部海水面變化速率的研究成果顯示，東部與西部之海水面變化速率差異量約 4 mm/yr ，表示太平洋與臺灣海峽的海水面變化速率並不一致，因此以東經 121° （約臺灣本島之中間線）為基準，將臺灣潮位站及衛星測高資料分為東西部分，分別包含臺灣海峽及太平洋區域，位於基準線東邊的潮位站僅使用基準線以東的 2° 、 3° 、 5° 測高資料，而位於基準線西邊的潮位站則使用基準線以西的 2° 、 3° 、 5° 測高資料。

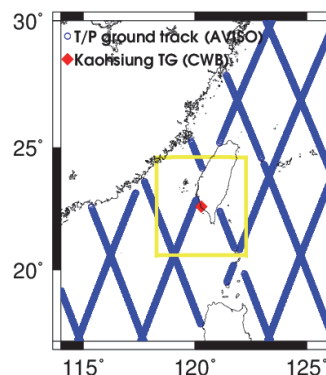


圖 1: CWB 高雄潮位站周圍經緯度 2° 之範圍與 Topex/Poseidon 測高資料之地面軌跡

2.2 潮位站資料

臺灣附近海域之潮位站資料可由下列三個單位取得：

1. 平均海平面永久服務中心 (Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL)
2. 美國夏威夷大學海水位中心 (University of Hawaii Sea Level Center, UHSLC) [<http://uhslc.soest.hawaii.edu/>]
3. 中央氣象局 (Central Weather Bureau, CWB)。

潮位站海水面資料為相對於岸邊基準點之相對觀測量，基準點可能因該區域地表垂直變動而使潮位資料包含地表垂直變動訊號。另外，潮位資料亦受到潮汐和氣壓因子以及人為因素造成資料偏移之影響，因此在利用潮位資料估算海水面變化速率時，亦需進行海潮、逆氣壓、偏移量以及測站地表垂直變動改正。

圖 2 為使用臺灣附近潮位站之分佈圖，PSMSL 潮位站資料分佈最廣，包含香港、日本與菲律賓等共 19 潮位站。UHSLC 資料包含基隆 (KL) 與高雄 (KS)

潮位站。CWB 潮位站資料主要分佈於臺灣沿岸，最遠為馬祖(MZ)潮位站，共 15 個潮位站。因為 PSMSL、UHSLC 與 CWB 三資料中心皆提供高雄(KS)潮位資料，而 PSMSL 與 UHSLC 提供亦皆提供基隆(KL)潮位資料(CWB 亦有提供基隆(KL)潮位資料，但因為涵蓋時間段較短，在本計畫中未使用)，但因不同單位資料處理方式不同，因此所提供的潮位站資料並不完全吻合，因此本研究中分別分析各中心提供之相同潮位站資料。

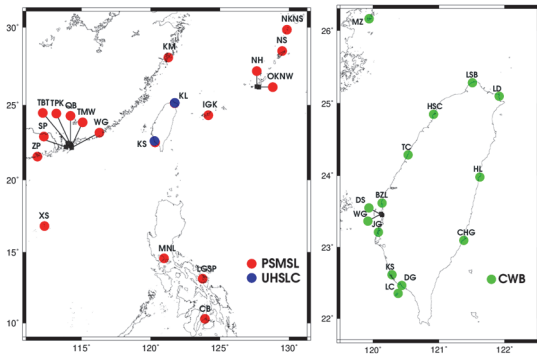


圖 2: 臺灣附近海域之潮位站分佈圖

2.3 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 重力衛星

使用 CSR (Center for Space Research, University of Texas at Austin) 提供的 GRACE 月平均重力場解數據求解海洋質量變化，該重力場解為 2-60 階正規化球諧係數，資料涵蓋時間為 2002 年 9 月至 2011 年 12 月。由於解算 GRACE 重力場時，以大氣-海洋去混疊模式 (Atmosphere-Ocean Dealiasing model, AOD) 為背景力，故計算海洋質量變化時須結合 AOD 與 GSM (GRACE

Satellite-only Model) 求得的海洋質量變動量。此外，處理步驟包含以衛星雷射測距 (Satellite Laser Ranging) 之一階項解與 C_{20} 項分別加入與取代 GSM 解的球諧係數；應用冰川均衡調整 (Glacial Isostatic Adjustment, GIA) 模型 [van der Wal *et al.*, 2011] 移除 GIA 影響；應用去相關性 (decorrelation) 濾波器降低重力場解中的球諧係數的相關性；採用半徑 300 km 的等向性高斯濾波消除高階雜訊並移除洩漏效應 (leakage effects)。

2.4 海洋溫度與鹽度資料

採用兩組海水溫度與鹽度資料來計算比容海面，分別為更新 Ishii and Kimoto [2009] 之資料 (以下簡稱 Ishii 資料) 與 Array for Real-time Geostrophic Oceanography 計畫下之日本海洋研究開發機構 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC) 資料 [Hosoda *et al.*, 2008] (JAMSTEC 資料可至 <http://www.argo.ucsd.edu/> 下載)，兩資料之詳細資訊如表 1 所示。比容海面變化可由溫度及鹽度混合效應之狀態方程 (equation of the state) 計算求得 [Gill, 1982]。

表 1：本計畫使用的溫度與鹽度資料

Data	Spatial resolution	Depth (layers)	Data period	Data sources
Ishii [Ishii and Kimoto, 2009]	1°x1°	1500m (24)	1945-2011	CTD/XBT/Argo
JAMSTEC [Hosoda <i>et al.</i> , 2008]	1°x1°	2000m (25)	2001-2012	Argo plus others

三、潮位站資料校正

3.1 海潮改正

海潮效應是由天體相對運動的引潮力所造成，海潮效應可利用調和分析(Harmonic analysis)法移除或是平均潮位資料降低海潮效應影響。本研究採用最常使用的調和分析法[Schwartz, 2005]估算各分潮之振幅，調和分析法為將潮汐視為各週期分潮的總和，公式如下：

$$TG(t) = a_0 + a_1 t + \sum_{i=1}^n [A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)] \quad (1)$$

其中 TG 為潮位站資料， n 為分潮個數(本研究 $n=37$)， t 為時間， ω_i 為分潮之頻率， a_0 、 a_1 、 A_i 、 B_i 為未知參數。其中為 a_0 與 a_1 分別為時間序列之偏移量與斜率， C_i 為各個分潮之振幅 ($C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}$)。

3.2 逆氣壓改正

往昔海水面變化的研究中並未對潮位資料進行逆氣壓效應改正，但研究發現，除了熱帶和西邊界流(western boundary current)等區域外，海洋各處皆受到大氣壓力的影響[Wunsch and Stammer, 1997]，故本研究對潮位站資料進行逆氣壓改正。一般而言，當氣壓升高 1 mbar，海水面高度約降 1.01 cm [Chelton and Enfield, 1986]。逆氣壓改正(IB；單位：公釐)公式如下所示：

$$IB = -9.948 \times (P_{atm} - P) \quad (2)$$

其中 P_{atm} 為海水表面壓力(單位為

毫巴)， P 為隨時間變化之全球海水表面平均壓力，尺度因子 9.948 為中緯度之經驗值[Wunsch, 1972]。逆氣壓效應改正所需之海水表面大氣壓力資料可由歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) [<http://www.ecmwf.int/>] 資料中心取得。

3.3 偏移量改正

潮位站在使用一段時間後因需要進行調整儀器、設備維修、更換儀器或遷站等情形，因無按照規定進行基準重新測量，造成資料基準不一致，因此使用潮位站資料需要檢查是否有基準偏移之情形。本研究為降低其他訊號影響偏移量之偵測，除了將上述已提到的海潮與逆氣壓效應自潮位站資料中移除外，還結合衛星測高資料移除潮位資料中的海水面變化，估算出包含測站地表垂直變動訊號與可能含有偏移量之訊號，公式如下：

$$u(\lambda, \varphi, t) = g(\lambda, \varphi, t) - TG(\lambda, \varphi, t) \quad (3)$$

其中 φ 緯度， λ 為經度， TG 為潮位資料， g 為測高資料。將時間序列 u 進行 Haar 小波分解(Wavelet decomposition)萃取出高頻訊號，分析高頻訊號是否在短時間內有突然跳躍的現象，若有此情形，表示該資料中可能含有偏移量，即再評估偏移點位前後固定時間段(約兩年)之資料的偏差值，評估該點是否有偏移量。圖 3 為利用 Haar 小波分解萃取出已移除海水面變化等訊

號之 PSMSL 高雄潮位站資料(raw data)的高頻訊號，由小波分解濾波出 4 個高頻訊號(d1-d4)，圖中可看出 d1-d4 層皆偵測出資料中有突然下沉之現象(綠色框)，表示該資料可能包含偏移量。之後再利用可能為偏移點位前後特定時間段資料的偏差值(紅色線條)評估該點是否為偏移點位，以圖 3 為例，可能為偏移點位前後特定時間段資料的偏差值相差超過 500 mm，表示該點應為基準不一致之點位(偏移點位)。

本計畫利用上述方式偵測出有偏移量情形的潮位站資料分別為 PSMSL、UHSLC 與 CWB 的高雄潮位資料。偏移量的校正方式為將時間序列 u 以二參數加上步階函數進行擬合並改正之。

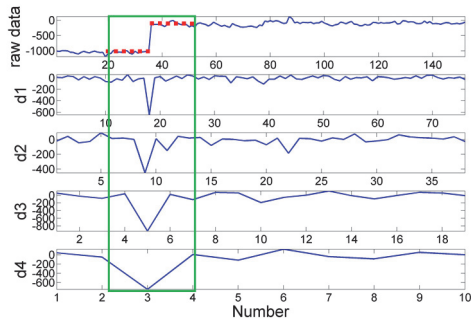


圖 3: 利用小波分解萃取 PSMSL 高雄潮位站資料(已移除海水面變化等訊號)的高頻訊號

3.4 潮位站垂直變動改正

臺灣附近潮位站大多未設置 GPS 觀測站，因此無法利用 GPS 觀測量估算潮位站垂直變動量來改正潮位資料。衛星測高資料為海水面高度之絕對量，潮位資料則為參考於基準點之相對量，因此本研究結合衛星測高與潮位資料來估算潮位站垂直變動訊號(如式(3)所示) [Kuo *et al.*, 2004, 2008; Braitenberg *et*

al., 2011; Chang *et al.*, 2012]。測站地表垂直變動速率可使用二參數擬合後自潮位資料中移除。

校正潮位站資料之步驟依序為海潮改正、逆氣壓改正、偏移量改正以及測站地表垂直變動改正，但若潮位資料中有基準不一致之情形，該潮位資料在進行海潮改正時，則在調和分析法(如式(1)所示)中加上步階函數，以避免資料偏移影響海潮改正之成果。本計畫使用的潮位資料分別由 PSMSL、UHSLC 與 CWB 資料中心取得，PSMSL 潮位資料為 1 個月平均 1 筆，UHSLC 潮位資料為 1 天平均 1 筆，而全日潮與半日潮等高頻訊號已被移除，表示 PSMSL 與 UHSLC 潮位資料的海潮效應影響皆已降低或移除，因此本計畫中不再對 PSMSL 與 UHSLC 資料進行海潮改正，而 CWB 潮位資料為 6 分鐘平均 1 筆，則以公式 (1) 進行海潮改正。

四、研究成果

4.1 潮位站垂直變動速率

在估算測站地表垂直變動速率前，潮位資料皆已進行海潮、逆氣壓與偏移量改正。由於衛星測高近岸資料較少，因此本研究中分別利用等權潮位站周圍不同範圍內的測高資料，本研究以測站地表垂直變動速率之標準偏差評估平均何種範圍內衛星測高資料 (2° 、 3° 、 5°) 較適用估算潮位站垂直變動速率。經由估算潮位站垂直變動速率之標準偏差可知，臺灣附近的潮位

資料適用 5° 衛星測高資料，其他區域潮位資料則適用 2° 衛星測高資料。因此後續的成果中臺灣附近潮位資料配合平均 5° 衛星測高資料，其他區域潮位資料則配合平均 2° 衛星測高資料。

圖 4 為各潮位站地表垂直變動速率。由圖可知，在 2002-2011 年間臺灣北部地區潮位站的地表垂直變動呈現下降情形，其中麟山鼻潮位站的地表垂直變動量最大，每年約 2cm 下沉；臺灣西

北部地區的地表垂直變動量呈現上升情形，其中馬祖潮位站地表垂直變動量每年約 5cm 上升；臺灣西南部地區主要呈現地表下沉情形，其中以塭港(WG)與箔子寮(BZL)每年分別呈現約 3cm 與 2cm 的下沉量；菲律賓地區中除馬尼拉潮位站呈現下降情形($\sim 12\text{mm/yr}$)外，其餘潮位站周圍地表皆呈現上升(6~8mm/yr)，而香港與日本附近潮位站並無明顯垂直變動情形。

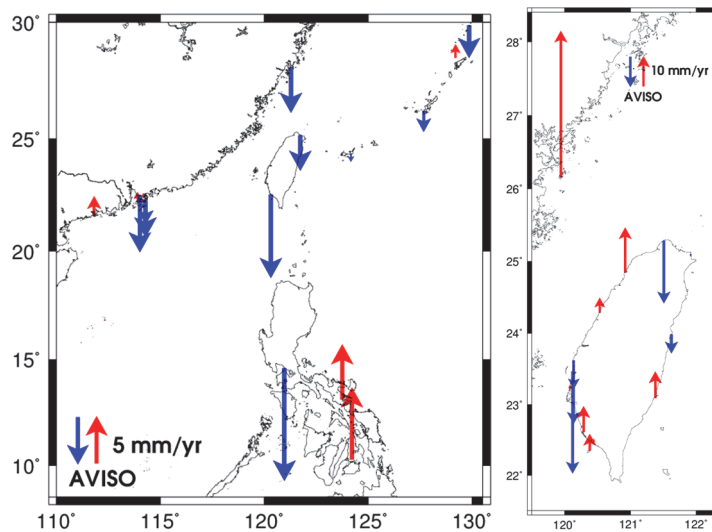


圖 4: 潮位站地表垂直變動速率圖。箭頭上與下表示速率的正與負。PSMSL 與 UHSLC 的基隆(KL)與高雄(KS)潮位站垂直變動速率差異量很小 ($< 1\text{ mm/yr}$)，因此在此圖中展示 PSMSL 基隆與高雄潮位站垂直變動速率

4.2 改正前後海水變化速率之差異

圖 5 為原始(改正前)潮位資料估算海水面變化速率以及經過各項改正後各潮位資料之海水面速率。由圖可知，改正前後部分潮位站資料估算之海水面速率變化量(或稱差值)遠大於海水面速率之標準偏差有數倍之多，顯示各項改正對於利用潮位資料估算海水面變化速率具有顯著的影響，其中以高雄(KS)、馬祖(MZ)以及塭港(WG)潮位

站資料差距較大，不同資料單位的改正前後高雄(KS)潮位站估算海水面速率差值皆約 20mm/yr 以上，由於高雄(KS)潮位站資料中含有基準不一致(偏移量)情形，偏移量改正前後造成約 30mm/yr 影響量(如圖 6 所示)。由於馬祖(MZ)與塭港(WG)潮位站地表垂直變動量較大，因此改正前後造成約 30mm/yr 影響量(如圖 6 所示)。

圖 6 顯示自然(海潮、逆氣壓、地表垂直變動)及人為因子(偏移量)對潮

位資料之影響量(影響量為各項改正前後潮位站資料估算之海水面速率差值(或稱變化量))。由圖可知，海潮因子對 CWB 資料改正前後海水面變化速率之影響約為 0~1mm/yr，主要因為海潮改正時僅移除高頻的週期訊號，因此改正後對於海水面變化速率影響較小。逆氣壓效應的影響量約為 0~2 mm/yr，顯示大氣壓力變化對於海水面變化速率精準推估仍須考慮。偏移量與測站地表垂直變動因子之影響最為顯著，不同資料提供單位之高雄潮位站資料皆含有偏移量，影響量皆在 30 mm/yr 以上，而測站地表垂直變動因子影響量平均值約 7.4 mm/yr，遠大於全球平均海水面變化速率的 3.2 ± 0.4 mm/yr (涵蓋時間為 1993-2009 年) [Church and White, 2011]。因此在臺灣附近海域，若以未經過偏移量和測站垂直變動改正之潮位站資料來估算海水面變化速率，將造成顯著的誤差。

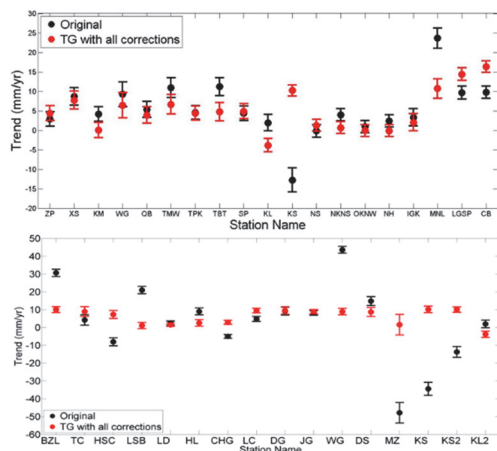


圖 5：原始與改正後 PSMSL(上圖)、UHSLC(下圖)與 CWB(下圖) 潮位資料估算之海水面變化速率。UHSLC 基隆與高雄潮位站以 KL2 與 KS2 表示

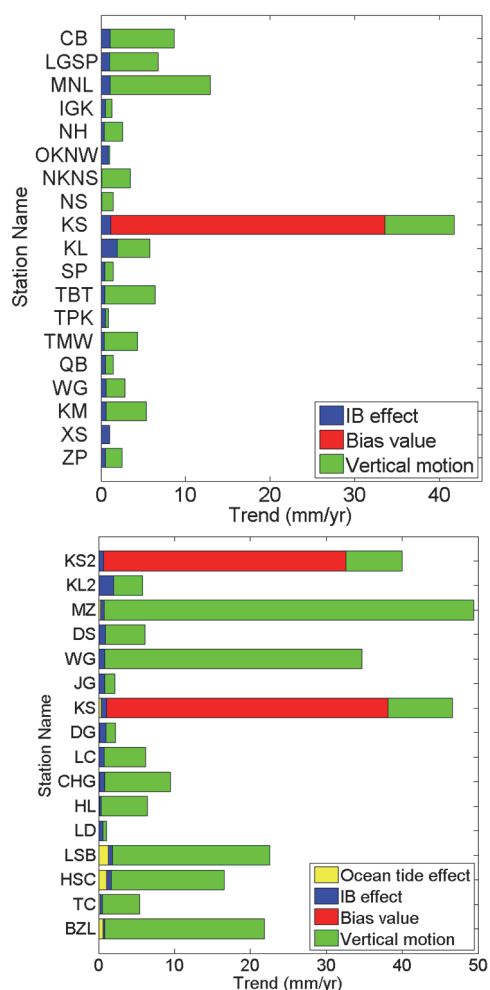


圖 6：各項改正對於潮位資料估海水面變化速率之影響量。上圖：PSMSL 資料，下圖：UHSLC 與 CWB 資料(其中 UHSLC 基隆與高雄潮位站以 KL2 與 KS2 表示)。Ocean tide effect、IB effect、Bias value 與 Vertical motion 分別為海潮、逆氣壓效應、偏移量、與測站地表垂直變動改正對於海水面變化速率影響量

4.3 2002-2011 年海水面變動速率

利用衛星測高與潮位資料估算臺灣周圍海域之海水面變化速率，結果顯示海水面變化趨勢相當一致，因此本節中僅展示以潮位資料估算臺灣周圍海水面變化速率之成果(如圖 7 所示)。由圖 7 可知，臺灣附近海水面變化大部

分呈現上升，尤其在北緯 25° 以南，海水面皆呈現上升情形，而且上升速率由北往南逐漸加快，例如坎門(KM)、麟山鼻(LSB)、小琉球(LC)與黎牙實比

(LGSP)為例，坎門、麟山鼻測站海域之海水面速率分別為 0 mm/yr 和 1 mm/yr，小琉球潮位站速率可達 9 mm/yr，黎牙實比為 14 mm/yr。

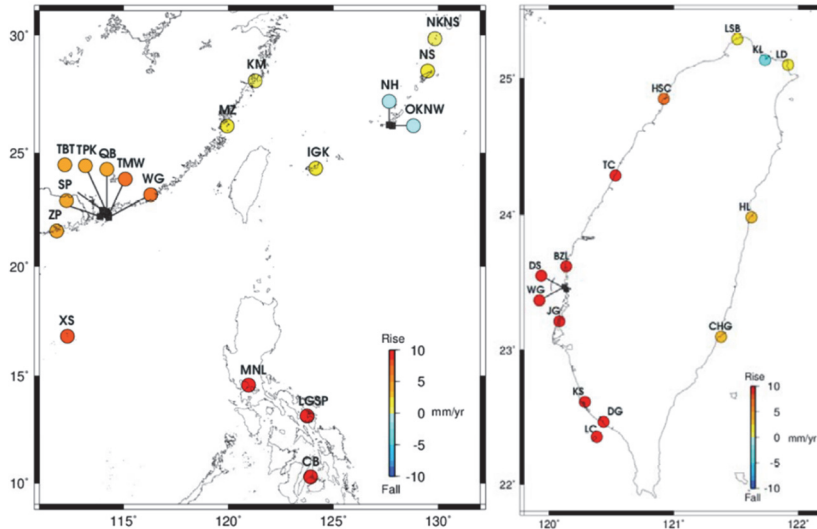


圖 7: 潮位站資料估算之臺灣周圍海水面變化速率。PSMSL 與 UHSLC 的基隆(KL)潮位站，以及 PSMSL、UHSLC 與 CWB 的高雄(KS)潮位站為重複之潮位資料，由於各資料中心估算的基隆(KL)與高雄(KS)潮位資料的海水面速率之差值皆低於 0.1 mm/yr，因此此圖高雄潮位站海水面變化速率以 CWB 成果表示，而基隆潮位站海水面變化速率以 PSMSL 成果表示

本研究亦利用衛星測高與潮位站資料分析 2002-2011 年臺灣周圍各區域內的海水面變化速率，分區方式依圖 8 所示。臺灣附近各海域的海水面變化速率結果如表 2 所示，由表可知，測高與潮位資料估算的整體區域趨勢非常一致，臺灣北部(區域 I)的海水面變化速率約 2 mm/yr，臺灣南部(區域 II)的海水面速率約 6~8 mm/yr，菲律賓地區(區域 III)的海水面速率為 11~14 mm/yr，表示臺灣周圍海域海水面速率越往南上升越快，而且臺灣西方海域(香港地區-區域 IV)的海水面速率(5~8 mm/yr)皆較臺灣東方海域(日本地區-區域 V)的海水面速率(~1mm/yr)快。然而因潮位

站位置分佈不平均，導致臺灣南部、菲律賓與香港區域的潮位站海水面速率和衛星測高成果有 2~3 mm/yr 差異，但整體而言，潮位站與測高資料估算臺灣周圍海水面變化的趨勢相同。由衛星測高資料估算整個研究區域(緯度：10°N~30°N、經度：110°E~130°E)的海水面變化速率為 8 mm/yr。

綜合上述海水面計算成果可知，臺灣周圍海水面變化主要呈現上升趨勢，此結果與前人利用衛星測高估算海水面速率成果一致[黃清哲等人，2009; Tseng *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2012]。相對於風浪等週期較短之災害，海水面上升可能造成海岸淹沒、土地

流失、生態環境改變、侵蝕海岸速率加快、地下水與土壤鹽化等不可逆之影響，將會對於臺灣社會與經濟造成極大的衝擊，然而臺灣西南部地區潮位站卻主要呈現地表下沉情形，其中塭港潮位站每年可呈現約 3 cm 的下沉區之一，而由本計劃利用衛星測高與潮位資料估算臺灣南部海水面上升速率約為 6~8 mm/yr，且海水面上升速率正由北往南逐漸加快，在考慮海水面變化與測站地表垂直變動此兩種因素影響下，臺灣西南區域在未來政府在制訂防災機制時需列為首先考慮的地區之一。

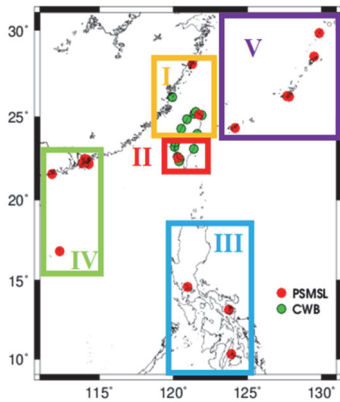


圖 8: 臺灣附近海域潮位站之分佈與分區圖

表 2： 臺灣附近各海域的海水面變化速率

Region	Trend (mm/yr)	
	AVISO	Tide gauge
Northern Taiwan (I)	2.30±1.11	2.38±0.94
Southern Taiwan (II)	5.50±1.31	7.91±0.58
Philippine (III)	11.27±1.60	13.81±1.11
Hong Kong (IV)	7.96±1.10	5.40±0.82
Japan (V)	1.04±0.95	0.76±0.75
Total regions (I-V)	5.07±0.79	5.51±0.37
All study areas	7.79±0.87	5.51±0.37

4.4 臺灣周圍海域海水面上升之原因

分別利用海水溫度與鹽度資料(資料來源：Ishii 與 JAMSTEC)、GRACE

重力衛星資料與衛星測高資料估算臺灣周圍海域(緯度：10°N~30°N、經度：110°E~130°E)比容海水面變化、海水質量變化與海水面變化，成果如表 3 與圖 9 所示。由圖 9 可知，Ishii 與 JAMSTEC 資料估算的比容海水面變化之時間序列與測高資料估算海水面變化的時間序列皆非常一致，相關係數約 0.86~0.92；海水質量變化的時間序列則與測高估算海水面變化的時間序列皆呈現反方向震盪，相關係數為-0.19；而 Ishii 與 JAMSTEC 資料估算的比容海水面變化分別和海水質量變化相加後的時間序列與測高海水面變化則更加一致，相關係數約 0.88~0.94。2003-2011 年臺灣周圍海水面變化速率、比容海水面變化速率與海洋質量變化速率分別為 8.68 mm/yr、2.48~2.66 mm/yr 與 1.10 mm/yr，表示近 10 年臺灣周圍海水面正呈現上升情形，比容海水面變化與海洋質量變化分別約占測高海水面變化的 30%與 15%。

由上述結果可知，近 10 年比容海水面變化為目前海水面上升的主要因素，雖然三者資料(衛星測高、溫度和鹽度資料以及重力衛星 GRACE)間約有 50%的不確定量，而 Leuliette and Miller [2009]利用 ARGO 溫度和鹽度資料、GRACE 重力衛星資料與衛星測高資料估算 2004-2007 全球海水面變化，三者資料間的不確定量約 1 mm/yr，表示海水面變化結果仍然存有一定的不確定量，除了資料本身的誤差外，其中部份因素可能是由於冰川均衡調整

模型不正確與缺少深海比容海水面變化所造成[Boe' *et al.*, 2009]。因重力衛星 GRACE 測得的重力場變化訊號中包含冰川均衡調整訊號，冰川均衡調整訊號相對於海水質量變化訊號來說影響很大，若要利用 GRACE 解計算海水質量變化，必須將冰川均衡調整訊號自 GRACE 重力場解中移除，然而若以

水厚度表示不同冰川均衡調整模型，其差值約可達 1 mm/yr [Chambers *et al.*, 2010]，表示現今冰川均衡調整改正模型存有很大的差異量。另外，因本研究使用的溫度與鹽度資料僅包含水深至 2000 公尺，因此部分不確定量可能由深海比容海水面變化所引起 [Boe' *et al.*, 2009]。

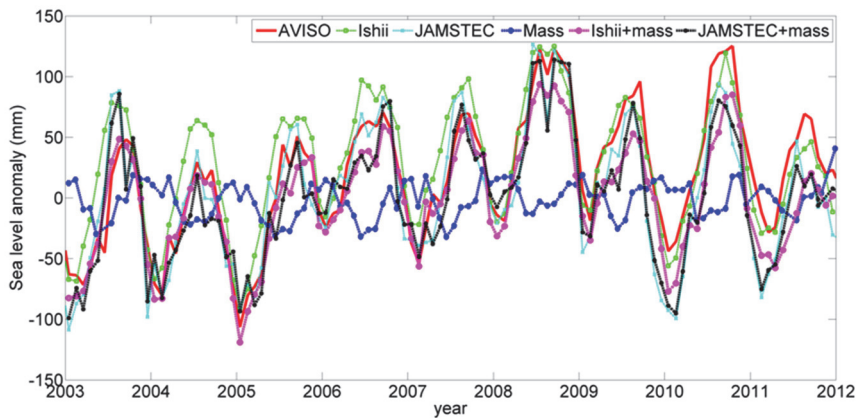


圖 9：臺灣周圍海域之比容海水面變化、海水質量變化與海水面變化 (2003-2011 年)

表 3：臺灣附近海域比容海水面變化、海水質量變化與海水面變化速率 (2003-2011 年)

Data	Trend (mm/yr)	Corr. with AVISO
AVISO	8.68±1.05	x
Ishii	2.48±1.04	0.92
JAMSTEC	2.66±1.33	0.86
Mass	1.10±0.32	-0.19
Ishii+mass	3.80±1.13	0.94
JAMSTEC+mass	3.73±1.46	0.88

五、結論

利用 2002-2011 年潮位站資料與衛星測高資料估算臺灣附近海域近十年海水面變化速率和潮位站地表垂直變動速率，以下歸納出幾點結論：

本研究結合 2002-2011 年衛星測高與潮位站資料估算測站地表垂直變動速率，成果顯示整個研究區域大多呈

現下沉情形，例如臺灣北部潮位站垂直變動呈現下降情形，其中麟山鼻潮位站的地表垂直變動量最大，每年約 2 cm 下沉量；臺灣西北部地區則呈現上升情形，其中馬祖潮位站的地表垂直變動量每年約 5 cm 上升；臺灣西南部地區主要呈現地表下沉情形，其中以塭港每年呈現約 3 cm 下沉量，塭港為研究區域中下沉量最大之潮位站；菲律

賓潮位站中除馬尼拉潮位站呈現下降情形(~ 12 mm/yr)外，其餘潮位站周圍地表呈現上升情形($6\sim 8$ mm/yr)，而香港與日本附近潮位站周圍的地表無明顯變化情形。

利用改正後潮位站資料來估算海水面變化速率與利用原始潮位站資料有顯著的不同，其中海潮與逆氣壓改正對海水面速率變化之估算影響量分別為 $0\sim 1$ mm/yr 與 $0\sim 2$ mm/yr，而偏移量與測站地表垂直變動改正之影響較為顯著，偏移量影響量皆在 30 mm/yr 以上，測站地表垂直變動改正的影響量平均值約 7.4 mm/yr，遠大於全球平均海水面速率 3.2 ± 0.4 mm/yr (涵蓋時間為 1993-2009 年) [Church and White, 2011]。因此在臺灣附近區域，若以未經偏移量和測站地表垂直變動改正之潮位資料來進行海水面變化速率估算，將造成嚴重誤差。

臺灣附近海水面主要呈現上升現象，而海水面上升速率由北向南加快，表示臺灣南方海域海水面速率較臺灣北部快。由衛星測高資料估算 2002-2011 年整個臺灣四周海水面變化速率為 8 mm/yr。

臺灣西南部地區潮位站呈現較明顯的地表面下沉情形，其中塭港潮位站每年可呈現約 3 cm 的下沉量，而臺灣南部海水面速率為 $6\sim 8$ mm/yr。在考慮海水面變化與地表垂直變動的兩種因素影響下，未來政府在制訂防災機制時，臺灣西南區域應為首要考慮的地區之一。

利用溫度與鹽度資料、重力衛星資料與衛星測高資料估算近 10 年 (2003-2011 年)臺灣周圍海域比容海水面變化、海水質量變化與海水面變化。比容海水面變化與海水面變化的相關性非常一致，相關係數可達 0.9。海水面變化速率、比容海水面變化速率與海洋質量變化速率分別為 8.68 mm/yr、 $2.48\sim 2.66$ mm/yr 與 1.10 mm/yr，表示影響海水面變化的比容海水面變化與海洋質量變化皆呈現上升現象，兩者分別約占海水面速率的 30% 與 15%，表示臺灣附近海域的海水面變化約有 50 % 不確定量。除了資料本身的誤差外，其他可能因素是由模型改正不正確 [Chambers *et al.*, 2010]與深海比容海水面變化所造成 [Boe' *et al.*, 2009]。

參考文獻

1. Braitenberg, C., P. Mariani, L. Tunini, B. Grillo, and I. Nagy (2011), Vertical crustal motions from differential tide gauge observations and satellite altimetry in southern Italy, *Journal of Geodynamics*, 51, 4, 233-244, doi: 10.1016/j.jog.2010.09.003.
2. Boe', J., A. Hall, and X. Qu (2009), Deep ocean heat uptake as a major source of spread in transient climate change simulations, *Geophysical Research Letters*, 36, doi: 10.1029/2009gl040845.
3. Chambers, D.P., J. Wahr, M.E. Tamisiea, and R.S. Nerem (2010), Ocean mass from GRACE and Glacial Isostatic Adjustment, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*,

- 115, doi: 10.1029/2010jb007530.
4. Chang, T.Y., B.F. Chao, C.-C. Chiang, and C. Hwang (2012), Vertical crustal motion of active plate convergence in Taiwan derived from tide gauge, altimetry, and GPS data, *Tectonophysics*, 578, 98-106.
5. Chelton, D.B., and D.B. Enfield (1986), Ocean signals in tide gauge records, *Journal of Geophysical Research*, 91, 9081-9086.
6. Ching, K.E., M.L. Hsieh, K.M. Johnson, K.H. Chen, R.J. Rau, and M. Ying (2011), Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000-2008, *Journal of Geophysical Research*, 116, B08406, doi: 10.1029/2011JB008242.
7. Church, J., and N.J. White (2011), Sea-level rise from the late 19th to the Early 21st Century, *Surveys in Geophysics*, doi: 10.1007/s10712-011-9119-1.
8. Gill, A. E. (1982), *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, New York.
9. Hastie, T., and R. Tibshirani (1990), Exploring the nature of covariate effects in the proportional hazards model, *Biometrics*, 46, 1005-1016.
10. Hosoda, S., T. Ohira, and T. Nakamura (2008), A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations, *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, 8, 47-59.
11. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
12. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Summary for Policymakers, edited by L. Alexander et al.; Retrieved 2014/07/18 from http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf.
13. Ishii, M., and M. Kimoto (2009), Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections, *Journal of Oceanography*, 65, 287-299, doi: 10.1007/s10872-009-0027-7.
14. Kuo C. Y., C.K. Shum, A. Braun, and J.X. Mitrovica (2004), Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauge data in Fennoscandia, *Geophysical Research Letters*, 31, 1, 4-7, doi: 10.1029/2003GL0191064.
15. Kuo C. Y., C.K. Shum, A. Braun, K.C. Cheng, and Y. Yi (2008), Vertical Motion determined using Satellite Altimetry and tide Gauges, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19, 1-2, 21-35, doi: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.21(SA)1.21.
16. Leuliette, E. W., and L. Miller (2009), Closing the sea level rise budget with altimetry, Argo, and GRACE, *Geophysical Research Letters*, 36, doi: 10.1029/2008GL036010.

17. Nicholls, R.J., and A. Cazenave (2010), Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones, *Science*, 328, 1517-1520.
18. Schwartz, M. L. (2005), Encyclopedia of Coastal Science, Dordrecht, The Netherlands: Springer, 1-1086.
19. Tseng, Y.H., C.L. Breaker, and T.Y. Chang (2010), Sea level variations in the regional seas around Taiwan, *Journal of Oceanography*, 66, 27-39.
20. van der Wal, W., E. Kurtenback, J. Kusche, and B. Vermeersen (2011), Radial and tangential gravity rates from GRACE in areas of glacial isostatic adjustment, *Geophysical Journal International*, 187, 797-812, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05206.x.
21. Webster, P.J., G.J. Holland, and J.A. Curry (2005), Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, *Science*, 309, 844-846.
22. Wunsch, C. (1972), Bermuda sea level in relation to tides, weather and baroclinic fluctuations, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10, 1-49.
23. Wunsch, C., and D. Stammer (1997), Atmospheric loading and the oceanic "inverted barometer" effect, *Reviews of Geophysics*, 35, 79-107.
24. Zhan, J.G., Y. Wang, and Y.S. Cheng (2009), The analysis of China sea level change, *Chinese Journal of Geophysics*, 52, 7, 1725-1733. (in Chinese)
25. 陳亮全、林李耀、陳永明、張志新、陳韻如、江申、于宜強、周仲島、游保杉，2011，氣候變遷與災害衝擊，載於許晃雄、陳正達、盧孟明、陳永明、周佳、吳宜昭(主編)，*臺灣氣候變遷科學報告*，311-358，台北：行政院國家科學委員會
26. 黃清哲、許泰文、吳立中，2010，運用潮位與衛星資料推估海平面變遷量技術之研發(2/2)，經濟部水利署出版，台北市

港灣季刊徵稿簡章

1. 本刊為提供國內港灣工程界同仁交換工作經驗與心得之園地，歡迎工程、學術界之同仁提供港灣工程相關之工程動態、實務、工程新聞、技術新知、地工技術、工程材料、營運規劃及其他有關之工程簡介或推動中之計畫等的報告、論著或譯述。
2. 投稿者應保證所投稿件無侵害他人著作權情事，如有違反，願就侵害他人著作權情勢負損害賠償責任，並對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）因此肇致之損害負賠償責任。
3. 來稿經本刊接受刊登後，作者應附具著作授權同意書，同意非專屬授權予本刊做下述利用：
 - (1)以紙本或是數位方式出版。
 - (2)進行數位化典藏、重製、透過網路公開傳輸、授權用戶下載、列印、瀏覽等資料庫銷售或提供服務之行為。
 - (3)再授權國家圖書館或其他資料庫業者將本論文納入資料庫中提供服務。
 - (4)為符合各資料庫之系統需求，並得進行格式之變更。
4. 作者應保證稿件為其所自行創作，有權為前項授權，且授權著作未侵害任何第三人之智慧財產權。
5. 稿件每篇以八頁（含圖）（4000~5000字）以內為原則，稿酬從優；請附磁片或 E-mail，並請加註身分證字號及戶籍地址（含鄰、里）。
6. 本刊每年刊行 3 期，分別於 2 月、6 月、10 月出版。如蒙惠稿請於每期出版前 30 日寄交本刊。
7. 聯絡電話：(04)2658-7139 馬維倫
傳真電話：(04)2656-4415
E-mail：elisa@mail.ihmt.gov.tw
8. 歡迎賜稿，來稿請寄：
43542 臺中市梧棲區中橫十路 2 號
交通部運輸研究所港灣技術研究中心「港灣季刊編輯委員會」收