

# 港灣季刊

(原港灣報導季刊)

第99期

交通部運輸研究所

中華民國103年10月

## 港 灣 季 刊 第 99 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](http://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港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、沉箱式碼頭震動台液化模型試驗與資料分析..... 1

張文忠 國立成功大學土木工程學系 副教授

陳志芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

盧又彥 國立成功大學土木工程學系 研究生

## 二、動力分析應用於板樁式碼頭之耐震性能設計之研究 ..... 17

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

曾韋籛 國立臺灣海洋大學河海工程系 專任助理

陳明鈺 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士 研究生

余孟勳 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士 研究生

## 三、淡水河河口段之河床水理特性及沙嘴變遷研究... 28

周憲德 國立中央大學土木系教授

林柏青 交通部運研所港灣技術中心研究員

何良勝 交通部運研所港灣技術中心科長

李璟芳 中興顧問社防災中心副研究員

陳沛蓉 國立中央大學土木系研究所碩士班研究生

鄭年佑 國立中央大學土木系研究所碩士班研究生

**四、以 Flow-3D 模擬船舶航行於臺北港的興波特性的研究 ..... 42**

羅德章 國立高雄海洋科技大學海事資訊科技系教授  
何良勝 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員  
廖慶堂 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員  
蘇東濤 國立高雄海洋科技大學航運技術系副教授  
陳力民 國立高雄海洋科技大學航運技術系助理教授

**五、臺北港平面流況分佈特性的研究 ..... 53**

蕭松山 國立臺灣海洋大學河海工程學系教授  
方惠民 國立臺灣海洋大學河海工程學系助理研究員  
王星宇 國立臺灣海洋大學河海工程學系博士班研究生  
何良勝 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長  
徐如娟 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

# 沉箱式碼頭震動台液化模型試驗與資料分析

張文忠 國立成功大學土木工程學系 副教授

陳志芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

盧又彥 國立成功大學土木工程學系 研究生

## 一、前言

台灣西部多屬沙岸地形，港區地質多屬疏鬆軟弱之沖積土層及海埔新生地，且台灣港區多以水力抽砂回填施工，土層類型皆為容易發生土壤液化（liquefaction）之土層，建造於此類地質上之港灣及臨海結構物因發生液化而產生的災害類型有承载力破壞（bearing capacity failure）、地表沉陷（subsurface settlement）、側潰（lateral spreading）及沉箱基礎位移（deformation of caisson quay wall）等災害。相關之案例包括有 1995 年日本阪神地震後港區液化與 921 地震後的台中港區液化等。由於國際間對於液化過程與液化後碼頭結構物與液化土層間之互制反應研究相對缺乏，這方面近期主要研究可總結於 2009 年 Technical Committee of Lifeline Earthquake Engineering, ASCE 之相關文章，故探討液化土層中土壤-碼頭支撐結構互制行為之研究，實為近年來大地地震工程領域的必要課題之一。

碼頭受震反應與破壞型態隨土壤狀況、施工方式、基礎類型與結構配置不同而表現不一，現有港區碼頭結

構設計方法多以靜力或擬靜態（pseudo static）方法設計，交通部運研所於 2005 年頒布「港灣構造物設計基準修訂」，其中建議之耐震設計以擬靜態分析為主。由於碼頭結構物屬於非鋼性結構物，具有幾何形狀、質量分佈與勁度變化不規則之特性，且土壤為高度非線性材料，其動態特性受剪應變振幅與有效應力而改變，此外碼頭受震行為受港區地質組成、地震特性及碼頭形式與配置有所不同，以靜力分析方法難以反應結構物受震時之動態反應，需以動力分析方法設計。動力分析方法包括動態數值模擬（dynamic numerical analysis）及動態模型試驗（dynamic modeling test），其中動態數值模擬雖因可模擬不同邊界條件、地震狀況、土層變異及結構模型等，其可靠度隨著數值分析所採用之網格模型及材料組構參數（constitutive parameters）之複雜化而提高。

進行液化土層碼頭支撐系統與土壤互制行為研究之主流為大型模型試驗配合數值模擬，利用土壤-支撐系統動態有效應力數值分析程序可決定相關實驗配置、決定主要影響因子及減少實驗數量，而高品質實體模型觀測

結果可用以驗證並改善數值分析程序，以進一步應用於複雜邊界與系統，二者可相輔相成，整合數值分析與實體模型結果可發展簡易可靠之分析與設計程序，便於實務應用。

本研究以重力沉箱式碼頭為研究對象，典型沉箱式碼頭之配置如圖1沉箱式碼頭斷面圖（資料來源：「港灣工程專有名詞」）所示，其基本組成包括沉箱本體結構、背填礫石、背填砂、拋石基礎，整體坐落於海床上。選擇沉箱式碼頭做分析之原因有三：(1)沉箱式碼頭具有堅固且耐久的優點，為碼頭整建常用之碼頭型式，沉箱式碼

頭在地震時需考慮土壤-沉箱之互制行為，而相關研究國內較為少見，現有沉箱式碼頭之抗液化強度分析均有待補正；(2)沉箱式碼頭在做為耐震結構時，與沉箱牆體重量成比例之地震力會作用於牆體，形成不利之條件，且考慮土壤非線性動態性質，以靜力分析方法難以反應結構物於地震時之動態反應，須以動力分析方法分析設計；(3)沉箱式碼頭之破壞經常由碼頭位移控制，以極限平衡法無法計算位移量。而發展考慮土壤-沉箱系統於液化前後之動態互制分析為進行相關結構設計、安全性評估及研擬防制對策之要件。

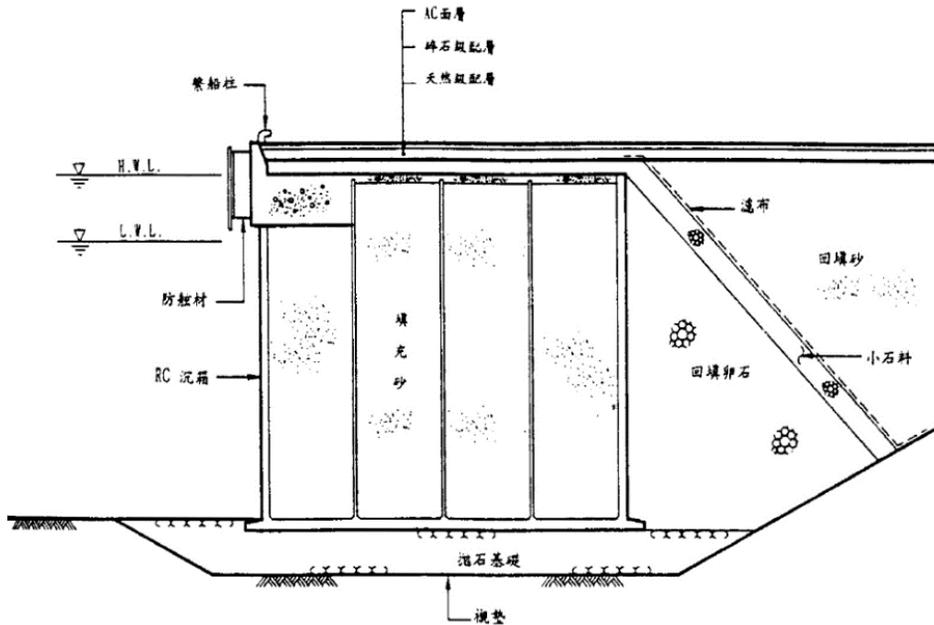


圖1 沉箱重力式碼頭斷面圖（資料來源：「港灣工程專有名詞」）

本文將介紹於國家地震工程研究中心所進行之沉箱碼頭振動台模型液化試驗流程與相關考量、資料處理程序及底部拋石對沉箱穩定性影響，主

要著眼於(1)土壤結構動態互制行為研究及(2)監測液化對沉箱碼頭之影響及受震液化之破壞模式。

## 二、沉箱碼頭動態行為相關研究

### 2.1 沉箱碼頭破壞案例

黃國祥（2002）蒐集 1923 至 1995 年間地震災害相關文獻，至少有超過 20 個破壞案例於文獻記載，地震規模皆大於 6 且災情嚴重者，皆有液化現象發生。發生於 1995 年之日本 Kobe 地震導致 Rokko Island 沉箱式碼頭位移達五公尺以上 (Iai et al. 1998)，圖 2 為此沉箱式碼頭之變形剖面。1999 年台灣集集地震，台中港區#1~4 沉箱式碼頭因後方發生土壤液化導致沉箱向海側位移 0.5~1.7 公尺，且碼頭岸肩與後

線高程差達 0.1 公尺(運研所，1999)，如圖 3 所示。2011 年發生於日本東北之 311 大地震引致海嘯發生，多處港口構造物損毀，其中多處為沉箱式碼頭，主要破壞有：沉箱碼頭前緣沉陷，後方差異沉陷，沉箱滑動等，如表 1 所列 (Kazama, 2012)。

Yamaguchi et al. (2012) 彙整東北大地震所造成之液化現象，Onahama 港為日本重要港口之一，屬填海造地之人工碼頭，Yamaguchi 等人於地震發生後發現多處砂湧及差異沉陷，其中最深處達 40cm，液化範圍皆為人工填海區，且根據鑽孔資料顯示，在深度 4m 處 SPT-N 值僅 10，為可能液化區。

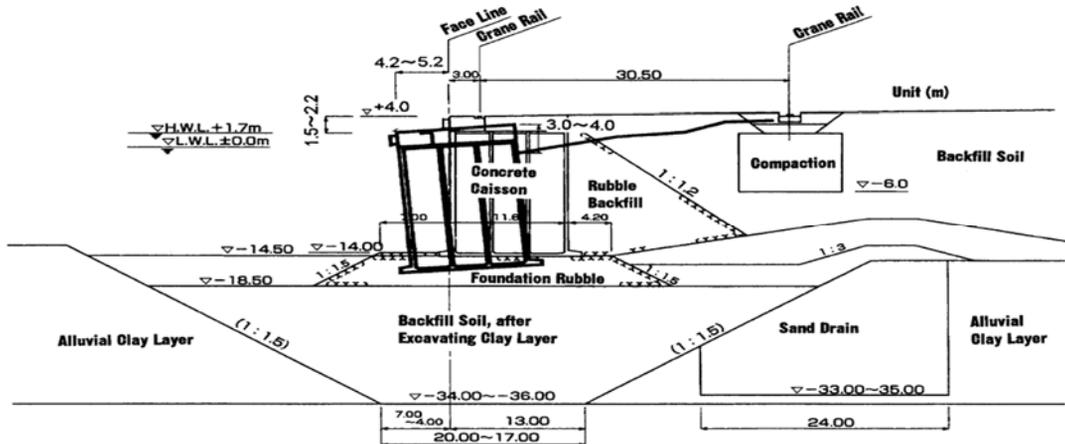


圖 2 RC-5 Rokko Island 沉箱式碼頭於 1995 Kobe 地震震後變形剖面 (Iai et al. 1998)



圖 3 台中港#1~4 沉箱式碼頭於 921 震後碼頭岸肩與後線高程差側視圖（運研所，2007）

表 1 日本東北大地震港灣構造物損壞概要（改自 Kazama, 2012）

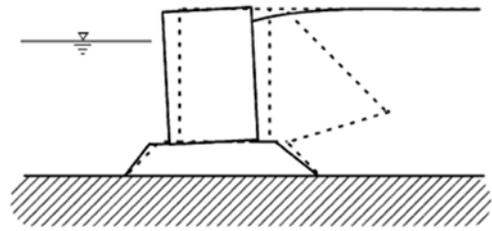
港口	區域	設施	主要破壞
Miyako	Fujiwara	13m 沉箱式擋土牆	碼頭前緣沉陷及開裂
		防波堤	沉箱滑動及潰堤*
Kamaishi	港口	港口防波堤	沉箱滑動及潰堤*
Oofunato	Nagahama, Nonoda	13m 沉箱式擋土牆	擋土牆破壞及海岸後方差異沉陷
	港口	防波堤	沉箱滑動及潰堤*
Ishinomaki	Hibarinocho	中央碼頭沉箱式擋土牆	碼頭前緣沉陷及開裂
Sendaikamaishi	Nakano, Koyo	12m 沉箱式擋土牆	碼頭前緣沉陷及開裂，地平線隆起
Onahama	5-6 wharf	14m 沉箱式擋土牆	碼頭前緣鋪面損壞、塔基損壞
	Fujiwara 碼頭	12m 沉箱式擋土牆	碼頭前緣鋪面及防沖面層損壞
	No. 3 碼頭	沉箱式擋土牆	碼頭前緣、塔機損壞及板樁隆起
	No. 4 碼頭	沉箱式擋土牆	碼頭前緣鋪面及防沖面層損壞
	No. 7 碼頭	13m 沉箱式擋土牆	沉箱滑動破壞

\*海嘯造成

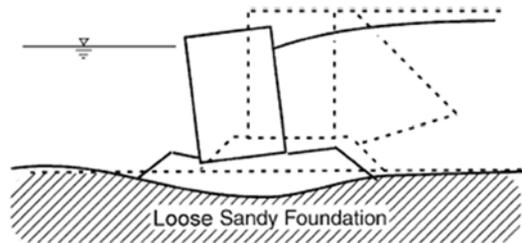
## 2.2 液化土層沉箱式碼頭破壞機制

重力式碼頭為由壁體與背填料所組成之結構，所受到之水平力比垂直力影響來的大，Iai and Sugano (2000) 歸納沉箱碼頭常見之破壞型式為：向海側之位移、沉陷或傾倒。當基礎底層堅硬時通常發生向海側之位移或傾倒，當基礎較軟弱時，容易發生因承

載力不足而導致的沉陷或傾倒破壞，如圖 4 所示。



(a) 基礎地層較堅硬時



(b) 基礎地層較軟弱時

圖 4 沉箱重力式碼頭之破壞模式 (Iai and Sugano, 2000)

沉箱式碼頭的破壞通常不是來自於結構本體的倒塌破壞，而是來自於背填土或基底土壤大的變形量所造成的功能喪失，因此沉箱式碼頭的耐震性能多以位移定義。國際航海協會 (INA) 所頒布之港灣結構物耐震設計中，利用壁體變位參數來做為沉箱構造物之設計指標，以確保基礎具有足夠之承载力，避免土壤的液化潛能過高，並保持構造物在被填土壓與水壓下、抗傾覆與抗滑動之穩定性，如圖 5 所示，壁體相關參數分別為：壁體向海側之水平位移與正規化水平位移、壁體向海側的傾斜角、岸肩之不均勻沉陷量或沉陷量差、岸肩與後線陸地之沉陷差及岸肩向海側之傾斜角。

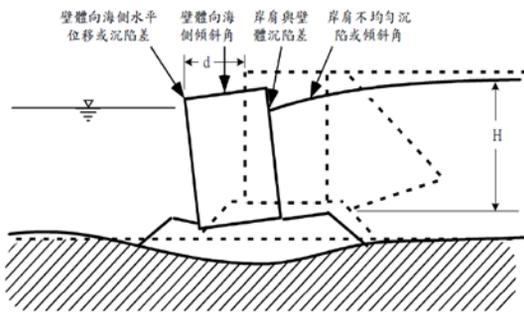


圖 5 沉箱重力式碼頭之性能參數 (INA, 2001)

國際航海協會將碼頭依照重要性對應不同的性能等級，依照分析所得之結構物反應檢核其是否符合標準值，如表 2 所列 (INA, 2001)，等級 I 之性能等級多用於檢核碼頭之使用性，在中小型地震發生時仍能正常運作，等級 II 及等級 III 之性能等級分別需要進行短時間及長時間的修復才能恢復運作，而等級 IV 的性能等級則代表碼頭結構物完全喪失運作能力。

表 2 重力式碼頭性能可接受標準 (INA, 2001)

參數		性能等級				
		第 I 級	第 II 級	第 III 級	第 IV 級	
殘餘變位	壁體	正規化水平位移 $d/H$ (%)	<1.5% 或 $d < 30\text{cm}$	1.5%~5%	5%~10%	>10%
		向海側傾斜角	<3°	3°~5°	5°~8°	>8°
	不均勻沉陷量	3~10cm	N/A	N/A	N/A	
岸肩	岸肩與後線陸地之沉陷差	30~70 cm	N/A	N/A	N/A	
	向海側傾斜角	<2°~3°	N/A	N/A	N/A	

註：d 為壁體的殘餘水平變位。

N/A 為「Not Applicable」，設計時不予檢核。

### 2.3 沉箱式碼頭動態模型試驗之研究

現有動態模型試驗包含離心機試驗 (centrifuge test) 及震動台試驗

(shaking table test) 兩種，動態模型試驗有以下優點：(1) 能夠設定地震參數 (如加速度、頻率及延時) 以模擬土壤與結構物在受震時之狀態；(2) 可於試體內部架設不同類型且高密度監測儀器，以了解不同相對位置之受震行為及差異；(3) 可直接觀察到土壤液化對於結構物之影響和土壤與結構物間的相互關係，但其缺點包含試體尺寸效應及試驗資料分析及適體準備較複雜。

離心機試驗利用旋轉產生人造重力場，進行 1/N 的縮尺模型試驗，並且經過縮尺模型與原尺寸模型間的幾何和材料性質轉換，模擬現地的情形，許多動態模型試驗皆是經由離心機試驗來模擬現地監測之不足，並且將離心機試驗結果進行與數值模擬模型的驗證。Mito et al. (1996) 以離心機震動台試驗模擬 1995 年日本 Hyogoken-Nanbu 地震下港島沉箱破壞的案例，將試驗結果與現地量測結果進行比對，確認其液化與變位的結果有一定的吻合性。

Iai and Sugano (2000) 以 1/17 縮尺模型進行重力式碼頭震動台模型試驗，量測其砂土試體分別在背填土與基底之加速度、位移量與超額孔隙水壓的時間歷史，試驗配置圖如圖 6 (a) 所示。由試驗結果可得以下結論：

- (1) 比較超額孔隙水壓力與有效覆土壓力的關係，顯示背填土受震所激發的超額孔隙水壓力較接近其有效覆土壓力，而基底土壤受到上方沉箱的載重影響，受震激發之超額孔隙

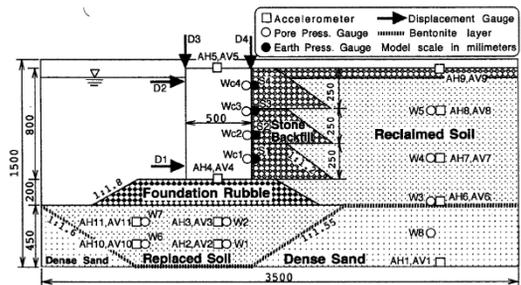
水壓力約只有有效覆土壓力之 50%，並不會發生土壤液化現象，如圖 6 (b) 所示。

- (2) 沉箱底部土壤的厚度會影響沉箱式碼頭的位移量，對於建立在軟弱基礎上方的沉箱，其破壞模式將會是整體的基礎破壞，而不單單只有傳統簡化分析中的滑動破壞，因此對基底的土壤進行改良也能減少沉箱的位移量，如圖 6(c)。
- (3) 比較超額孔隙水壓激發與造成之位移量之關係，發現基底土壤之超額孔隙水壓力與背填土壤之超額孔隙水壓力造成之位移量為 2：1，因此基底土壤的超額孔隙水壓力激發會對整體位移造成較大的影響。

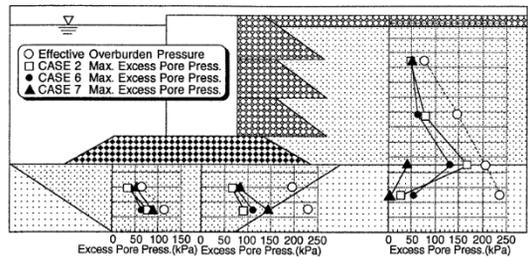
Miura et al. (2000) 以震動台進行沉箱動態模型試驗，並且量測其砂土試體在震動期間的土壓力時間歷史，比對其土壓力與沉箱慣性力的關係，發現在背填土未液化的情況下，其土壓力的施力方向與沉箱的慣性力方向相反，而在背填土液化的情況下，土壓力的運動方向與沉箱慣性力方向相同。因此在背填土液化的情況下，其地震對沉箱所造成的推力會大於未液化的情況，此情形也可以解釋背填土液化對沉箱破壞所造成的影響。

Kim et al. (2004) 同樣以震動台進行沉箱模型的液化試驗並比較液化前後背填土壓力與沉箱慣性力之間的關係，結果與 Miura et al. (2000) 相同，

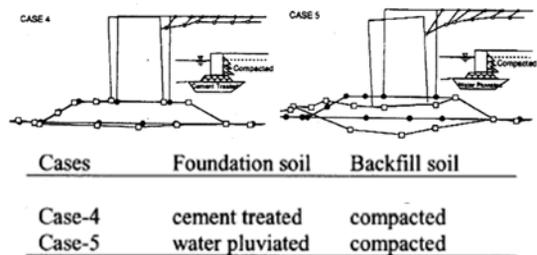
在超額孔隙水壓比尚未達到 1.0 前，兩者相位相反，並漸漸趨於相同，而在液化後兩者相位一致。Kim et al. (2004) 並比較累積背填土壓與超額孔隙水壓比，發現兩者有高度線性關係，由此便可在沉箱受震前推估地震後沉箱將會受到的最大推力，用以預測沉箱之破壞模式及位移量等，如圖 7 所示。



(a) 實驗配置



(b) 超額孔隙水壓與初始有效應力分布



(c) 基底改良與變形量之關係

圖 6 重力式碼頭振動台試驗結果 (Iai and Sugano 2000)

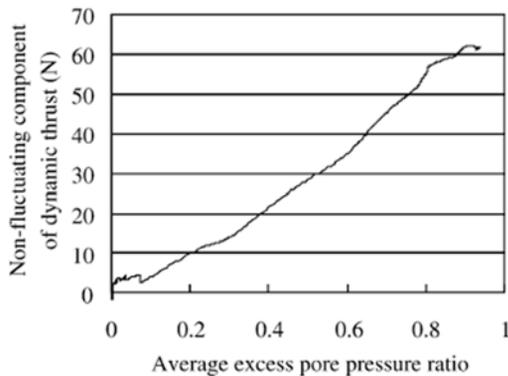


圖 7 背填土壓與超額孔隙水壓比關係  
(Kim et al., 2004)

### 三、沉箱式碼頭模型震動台液化試驗

#### 3.1 模型配置與量測系統規劃

本研究之目的為考慮土壤-結構互制反應之動態有效應力震動台模型試驗，並配合沉箱模型之數值模擬，以探討沉箱碼頭受震後之反應。沉箱基礎對沉箱的穩定性有很大的影響，因此實驗準備兩組沉箱，一為在沉箱底部鋪設 10cm 厚之礫石層，另一組底部則無礫石層與海床直接接觸，並在相同加速度條件下進行動態試驗，可比較基礎拋石對沉箱的穩定性之影響。

本研究使用大型雙軸向層狀剪力試驗盒(翁作新等, 2001)模擬沉箱模型於半無限空間土層中之受震行為。此剪力試驗盒由十五層內外複合框架組合而成，在試驗過程中雖然單一框架本身因具有相當之剛性而無法產生變形，但各框架間可存在水平向的相對運動，因此層狀剪力盒中之砂土試體在縱剖面上可隨地震波作用而變形。剪力試驗盒內框尺寸長寬高分別為

188cm、188cm 及 152cm，外框尺寸長寬高分別為 194cm、234cm 及 152cm。在外框之外有鋼性外牆以供支撐。試驗中為維持剪力試驗盒內砂土試體之水密性，以模擬飽和砂土試體在受震液化過程中超額孔隙水壓的激發情形，本試驗採用厚度為 3mm 的矽膠膜做為防水材料，固定於內框上。

依據林德洪(2013)所進行之一系列簡化分析、簡化動力分析及數值模擬成果，規劃之沉箱模型其配置如圖 8 所示。本實驗規劃兩組沉箱除互為備份外，其下方基礎一為有 10cm 厚之礫石層(CASE01)，另一組與海床直接接觸(CASE02)，其目的為比較沉箱基礎下方之拋石對沉箱穩定性之影響。兩組沉箱間預留約 10 cm 之間距，以避免其互相影響，沉箱之間空隙並以橡膠墊阻隔背填砂土及礫石。而在邊界的部分，沉箱側邊與剪力盒留有 10cm 之間距，且以厚橡膠墊阻隔背填材料。圖 8(a)為沉箱模型於剪力盒之中之側視圖，而背填礫石分為三層以三角形分佈，每層厚度約 15cm。沉箱模型之背填及底部使用乾淨之越南砂回填。而兩組沉箱背填及 CASE01 底部鋪設之礫石層使用天然六分石。圖 8(b)為沉箱模型上視圖，其中 CASE02 之位置較 CASE01 後退 10 公分是由於模型準備時所產生，但不影響後續實驗進行。

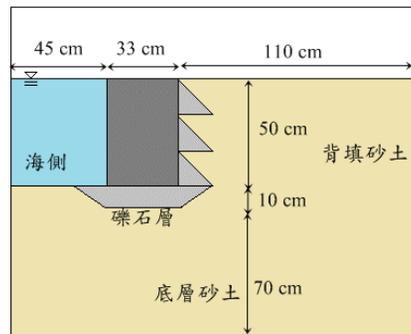
一般沉箱式碼頭多以鋼筋混凝土施作，並分為預鑄或場鑄，屬於剛性結構，但由於實驗之限制，無法以鋼筋混凝土施作，因此本實驗以角鋼做

為骨架，3.1mm 厚之鋁版包覆，並以礫石填充，符合沉箱之剛性結構要求，實體模型如圖 9 所示。

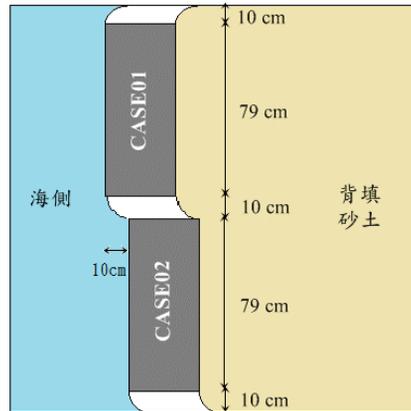
本實驗使用六種量測儀器分別架設於沉箱表面、砂土內部、剪力盒外部與震動台，圖 10 為量測儀器配置圖，本實驗規劃於海側、近岸與自由場分別監測水壓 15 處，編號為 WP1~WP15。試體質點加速度計架設位置與水壓計相同，且另外分別於兩組沉箱背各架設一顆，共計 17 顆，編號為 PCB1~PCB17。而為監測沉箱與土壤之接觸界面土壓，於沉箱背及沉箱底部分別架設土壓計共 16 顆，本實驗使用兩種土壓計架設於同一點位做為對照，分別為 KYOWA 之鈕扣式土壓計 8 顆，編號為 PG1~PG8，及 Tekscan 之 Tactile sensor (薄膜式感測器) 8 片，其編號為 TS1~TS8。

為監測沉箱模型於各次實驗中之運動量，於兩組沉箱背各架設一支 Shape Accelerometer Array (SAA)，共計 2 支，其編號為 SAA1 及 SAA2。SAA 為一長型帶狀之量測儀器，於頂底並中間段等間距設定節點，節點與節點中間有感測子可量測該點位之質點加速度及轉角，再經過 SAA 中內建之微處理器對加速度及轉角資料進行積分而得到質點變位，因此可了解受測試體之變位情形。本次試驗所使用

之 SAA 分為 8 段共 9 個節點，因此可得到 8 個點位的加速度記錄，及 9 點位的位移記錄。SAA 縱向裝設測得受測試體質點之側向變位，或水平向裝設得到質點垂直變位，本研究採用前種裝設方式，如此測得沉箱受震後之側向變位。此外，框架之運動量使用框架位移計做監測，架設於第 3 層至第 13 層，共計 11 支，其編號為 DX3~DX13。



(a) 沉箱模型側視圖



(b) 沉箱模型上視圖

圖 8 沉箱模型於剪力盒中之配置圖



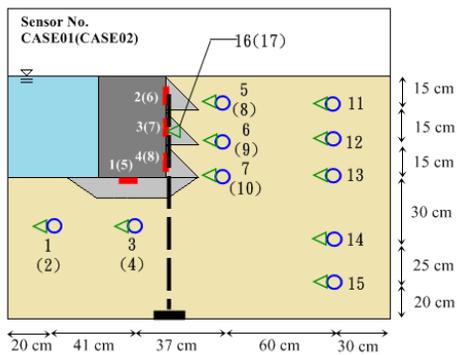
(a) 以角鋼做為骨架



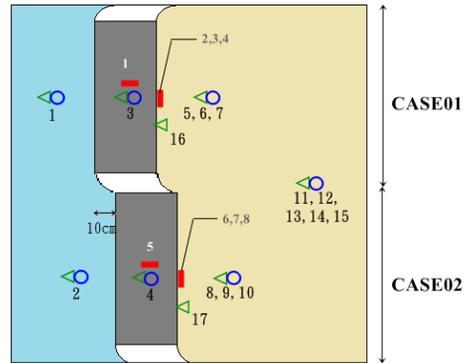
(b) 以鋁板做為外殼包覆

圖 9 沉箱模型實體

○ Piezometer (WP)	■ Pressure gauge (PG) + Tactile sensor (TS)	SAA
◁ Accelerometer (PCB)		



(a) 量測儀器配置高程圖



(b) 量測儀器配置上視圖

圖 10 各量測儀器於剪力盒中之配置圖

### 3.2 試體準備與試驗步驟

本實驗之試體準備步驟依序為：

- (1) 架設量測儀器；
- (2) 注水至所需高程，並實降沉箱底部之越南砂；
- (3) 於 CASE01 沉箱位置挖除表面約 10cm 之越南砂，並鋪設 10cm 厚之礫石層；
- (4) 吊掛沉箱至預定位置；
- (5) 再次分層注水，並分為三層人工回填沉箱背之礫石及砂土層。詳細內容於下方依各小節分別描述。

#### 3.2.1 量測儀器架設

砂土試體內部之量測儀器包含加速度計與水壓計，其設置步驟如下：

- (1) 以釣魚線依照預綁設量測儀器之座標拉出經緯線，並固定於剪力盒外牆。並按照所需要之座標拉出垂直向之釣魚線以掛勾固定於剪力盒底部；
- (2) 於垂直向之釣魚線上標記出量測儀器所在之高程；
- (3) 將水壓計以膠帶按設計高程固定於釣魚線上，並注意水壓計上方之透水石應露出，以達到監測效果；
- (4) 依照相同方法將加速度

計固定於釣魚線上，須注意由於加速度計有方向性之考量，綁設時需再三確定加速度計之方向正確。為減少釣魚線於實驗震動中對量測儀器之束制，於實驗進行前釣魚線將全數剪斷，使量測儀器在震動時可隨著砂土試體自由震動。

### 3.2.2 沉箱模型架設與砂土回填

本實驗之沉箱模型由角鋼及鋁板所構成，沉箱表面之量測儀器包含土壓計、加速度計及 SAA。沉箱模型之架設步驟條列如下。

1. 於沉箱表面標記出量測儀器之點位。
2. 於沉箱兩側分別固定厚橡膠墊，兩組沉箱之間固定薄橡膠墊。
3. 將量測儀器包含土壓計 16 個、加速度計 2 個固定於沉箱上。
4. 將沉箱吊放置預先實降完成之砂土上且內部填充礫石。

圖 11 為沉箱架設完成圖，圖中右方沉箱為 CASE01，基礎為 10cm 厚之礫石層，圖中左方沉箱為 CASE02，基礎為砂土。然而在安置沉箱時發現 CASE02 之 SAA 已歪斜，為了將沉箱與 SAA 貼合，所以將 CASE02 之沉箱模型向岸側後退約 10 公分。沉箱前方塑膠桿為非固定之臨時支撐，用於防止在岸側進行人工回填時沉箱受到背填砂土及礫石之側向土壓力而發生位移。

因沉箱碼頭模型之面海側及回填側砂面高程不同，且需人工回填礫石，

含基礎礫石及背填土礫石，無法全程使用實落裝置進行砂土試體準備。本研究之砂土試體準備主要分為以下階段：



圖 11 沉箱吊放完成

1. 注水入至剪力試驗盒中。
2. 使用實落箱實落越南砂至剪力盒內。
3. CASE01 基礎挖除 10 公分，以人工回填礫石。
4. 以天車吊掛沉箱至選定位置並將內部填滿礫石。
5. 背填砂土及礫石分為三層以人工回填。

依照試驗規劃，第一階段在剪力試驗盒內注入足夠高度的水，使實落完成後水面高度仍高於砂面高度。注水量與落砂量之控制，可依從前使用濕實降法所得的試體孔隙比經驗概略估算。第二階段以實落箱實落砂土至挖泥線高程，第三階段將 CASE01 底部以人工挖除 10 公分深度的砂土，並回填礫石。第四階段將兩組沉箱以天車吊掛至規劃之位置，並將內部填滿礫石。第五階段分為三層依序注水及人工回填背填礫石以及砂土。回填完成後，靜置試體約 24 小時，待砂土完全沉澱後即完成試體準備(如圖 12 所示)。



圖 12 試體準備完成

#### 四、震動台模型試驗資料分析與結果

實驗時先以小震幅白噪訊 (White noise) 進行系統完整性測試，隨後以正弦波進行試驗。因地震災害中造成大規模破壞之地震其頻率大多接近 1Hz，且為配合擬靜態與數值模擬，本研究主要採用最大加速度由 0.03g 至 0.2g 依序增加之頻率為 1Hz，延時為 15 秒之正弦波進行試驗，直到沉箱模型明顯地位移破壞，本文主要呈現加速度震幅為 0.075g 且未液化 (Test 5) 及加速度震幅 0.2g 產生液化 (Test 7) 之成果。

模型試驗所使用之量測儀器包括架設於剪力盒外部之加速度計及位移計，砂土試體內之加速度計及水壓計，以及沉箱模型之土壓計、加速度計及 SAA，各量測儀器資料處理流程及資料間相互關係如圖 13 所示。分析前將所有歷時資料扣除該項資料之初始值，初始值之計算為取每次試驗前 0 秒至 0.1 秒內之數據平均值。為除去試驗進行中量測之雜訊，使用低通濾波 (low pass filter, LP) 或帶通濾波 (band pass filter, BP) 將雜訊濾除，以觀察受震期

間之主要動態行為，結合孔隙水壓與剪應變歷時，可得剪應變與超額孔隙水壓之耦合反應，而沉箱加速度與接觸界面應力，可了解沉箱與土壤互制行為。

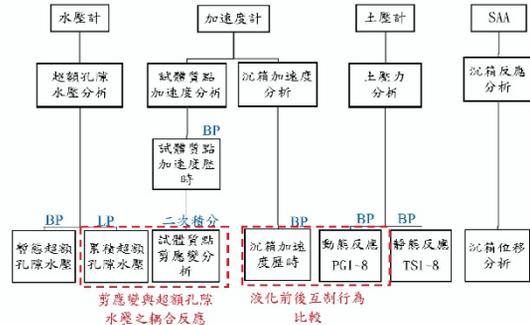


圖 13 資料處理架構

#### 4.1 加速度計資料分析

本研究於砂土試體內部埋設了 15 個加速度計 (PCB1~PCB15)，用以觀測砂土試體質點之受震反應，所擷取之資料皆以帶通濾波 (頻帶 0.25Hz~4Hz) 濾除雜訊，可得到砂土受震之加速度歷時，圖 14 為 Test 7 (液化) 之加速度歷時。除了直接比較砂土內部之加速度，並可將加速度資料二次積分得到位移歷時，進而求取砂土內部之剪應變量。土壤的液化為剪應變及累積超額孔隙水壓的耦合反應，砂土試體內部之剪應變可由式(1)計算：

$$\gamma_{ij} = \frac{u_{yi} - u_{yj}}{z_j - z_i} \quad (1)$$

式中， $\gamma_{ij}$  為點 i 與點 j 兩點間剪應變， $u_{yi}$  為點 i 水平位移， $z_i$  為點 i 深度。

架設於沉箱背之加速度計共計 2 顆 (PCB16~PCB17)，以帶通濾波 (頻帶

0.25Hz~4Hz) 濾除雜訊後，可比較 CASE01 與 CASE02 沉箱模型之加速度歷時，並可與沉箱背填土壓力比較相位在受震期間之變化，Miura et al. (2000) 及 Kim et. al (2004) 觀察沉箱在受震時沉箱本身慣性加速度與背填土壓之相位變化，在液化前兩者相位相反但逐漸趨於一致，當兩者相位一致表示背填土壤已達液化。

## 4.2 水壓計資料分析

所測得之水壓包括為靜水壓力 (pore pressure) 與超額孔隙水壓力 (excess pore pressure)，超額孔隙水壓力為土壤受剪動時所激發，而當土壤持續受震使超額孔隙水壓力不斷上升直到等同於土壤之初始有效應力時，土壤將失去懸浮於水中並失去剪力強度如同液體般，此即為土壤液化現象，因此超額孔隙水壓力為分析土壤液化行為之重點。超額孔隙水壓力分為暫態超額孔隙水壓力 (transient excess pore pressure) 及累積超額孔隙水壓力 (accumulated excess pore pressure)，暫態超額孔隙水壓力為地震波穿過土壤時，土壤產生暫時且可回復之剪應變時所激發之超額孔隙水壓，故暫態超額孔隙水壓只存在於土壤受震期間，且震動頻率及相角相同於輸入地震，可用帶通濾波濾出；累積超額孔隙水

壓力則於土壤受震期間或緩慢或快速地累積，並在震動期間或震動完成後漸漸消散。

本研究將水壓計資料皆扣除初始值(0~0.1 秒資料平均)，以得到超額孔隙水壓力歷時總超額孔隙水壓力以低通濾波濾除雜訊，其切段(cut-off)頻率為 4Hz；暫態超額孔隙水壓以帶通濾波 (0.5Hz~4Hz) 濾出；累積超額孔隙水壓以切斷頻率為 0.5Hz 之低通濾波濾出，累積超額孔隙水壓比 ( $r_u$ ) 為累積超額孔隙水壓力與該點初始垂直有效應力之比值，當  $r_u$  值達到 1.0 時即達到初始液化(initial liquefaction)，圖 15 為 Test 7 各質點累積超額孔隙水壓比 ( $r_u$ ) 歷時。

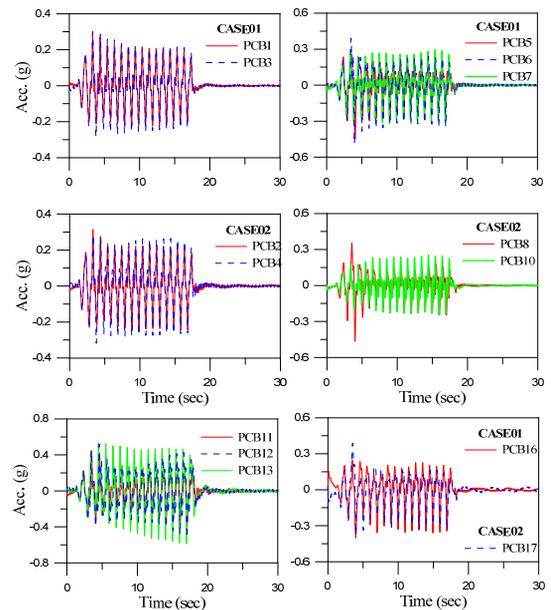


圖 14 Test 7 各質點加速度歷時

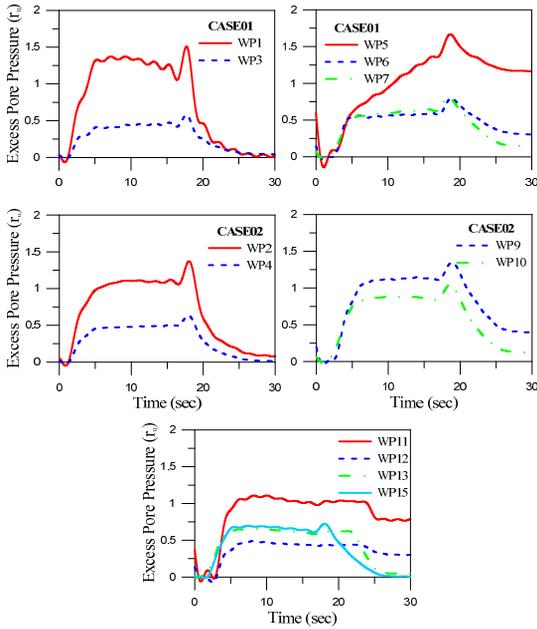
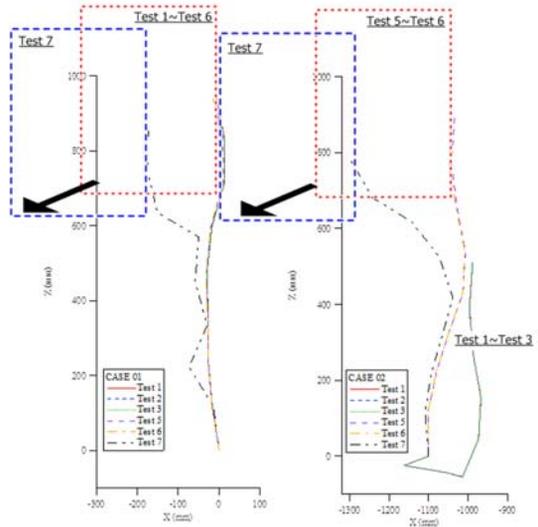


圖 15 Test 7 各質點超額孔隙水壓比歷時

### 4.3 SAA 資料分析

本實驗將兩支 Shape Accelerometer Array (SAA) 分別架設於 CASE01 及 CASE02 沉箱背中心線位置，由底部至頂部縱向裝設。SAA 所得到之數據包含各節點之加速度歷時、轉角歷時及位移歷時，本研究擷取各 Test 震動結束後之側向位移紀錄，可比較不同加速度震幅下沉箱之位移量。圖 16 為兩組模型於 Test 1 至 Test 7 沉箱之位移紀錄，由圖(a)可看出 CASE01 之 Test 1 至 Test 6 沉箱皆無明顯位移，Test 7 沉箱有明顯向海側位移且向下沉陷的現象；圖(b)為 CASE02 之位移記錄，Test 1 至 Test 3 SAA 因試體準備時前端下沉，在 Test 5 SAA 向上彈起，Test 5~Test 6 無明顯位移，至 Test 7 沉箱有明顯向海側位移並下沉。結果顯示在 Test 6 (加速度 0.1g) 之前，沉箱所受到之加速度都

不足以使沉箱產生破壞滑動。由此可得知此模型配置下其臨界降伏加速度為 0.15g。



(a) CASE01

(b) CASE02

圖 16 Test 1 至 Test 7 SAA 紀錄

### 4.4 土壓計資料分析

沉箱受震後破壞的原因之一為地震產生之動態主動土壓力大於靜止時之主動土壓力，增加的側向推力將導致沉箱位移破壞，因此本研究將兩組土壓計分別裝設於兩組沉箱臨近中心線之底部及沉箱背部不同高程共計 16 顆，本次實驗分別於同一點位裝設兩顆不同型式之土壓計，分別為 PG1~PG8 及 TS1~TS8，可加以驗證比較。實驗完成後發現薄膜式感測器 (TS) 之動態反應不如預期，所以將 TS 之土壓力值用以觀測靜態土壓，鈕扣式土壓計 (PG) 用以觀測動態土壓反應。圖 17 為液化時 (Test 7) 沉箱土壓力歷時。

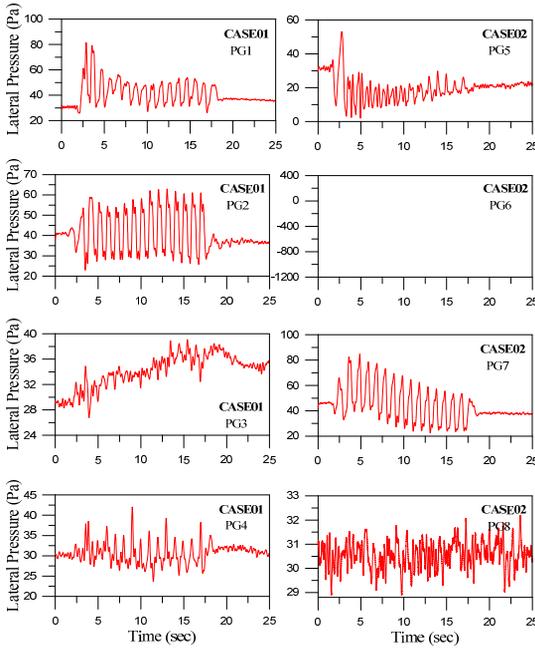


圖 17 Test 7 沉箱土壓力歷時

#### 4.5 沉箱破壞模式

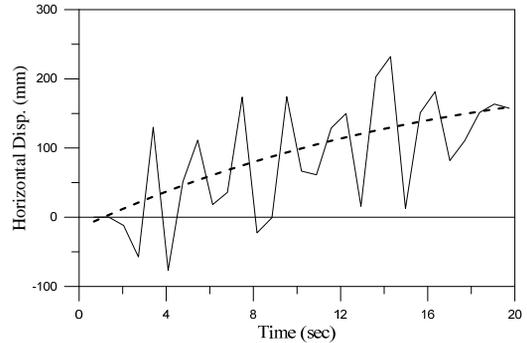
沉箱碼頭的破壞模式主要由位移控制，且基底的穩定性會影響沉箱整體的位移量及滑動量，在 Test 5 未液化之案例中，模型試驗 CASE01 之位移量約為 3.5mm，正規化水平位移  $d/H$  (%) 小於 1.5%，在 INA (2011) 重力式碼頭性能可接受標準中(表 2)屬於第 I 級，在中小型地震後仍能正常運作。而在基底無礫石層的情況下(CASE02)位移量為 58mm，雖相對 CASE01 較大但仍第 I 級範圍內，結果顯示雖然基底缺乏礫石會導致沉箱與基底間摩擦力不足而位移量增加，但在中小型地震中仍然能保持系統整體的穩定性。在背填沉陷量的部分，兩者差異不大。

由 Test 5 之位移結果可得知沉箱之破壞時之位移量與基底材料有很大的相關性。圖 18 為數值模擬與模型試驗

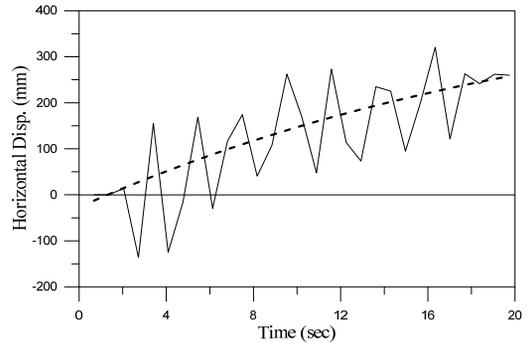
之位移量比較，在震動結束後 CASE01 之模型試驗為 157mm 而 CASE02 為 257mm，顯示基底之礫石層有助抵抗受震後沉箱之滑動。表 3 彙整 Test 7 液化後之沉箱頂部水平及垂直位移量，整體而言 CASE02 因基底無礫石砂土與沉箱間摩擦力較小且基底砂土變形量較大導致整體變形量較大。

表 3 Test 7 液化後沉箱水平及垂直位移量比較

沉箱頂部位移量 (mm)	CASE01		CASE02	
	水平位移	垂直位移	水平位移	垂直位移
模型試驗	157	34.5	257	49.5



(a) Test7-CASE01 模型試驗



(b) Test7-CASE02 模型試驗

圖 18 Test 7 不同基底材料模型試驗沉箱水平位移量比較

## 五、結論

本研究以沉箱碼頭模型震動台液

化試驗，探討沉箱式碼頭在受震與背填材料液化時之反應，規劃兩組沉箱模型（基底有、無礫石層），比較（1）有無基底礫石對沉箱受震反應的影響；（2）在液化或未液化土層中沉箱碼頭模型之破壞模式、超額孔隙水壓激發、剪應變與超額孔隙水壓激發之耦合反應及土壓力分布等。以飽和乾淨砂回填進行單向水平震動，並成功達到土壤液化且沉箱碼頭產生明顯的水平位移及垂直向下沉陷，結果顯示實驗程序、試體準備方式、沉箱模型及監測系統配置達到原規劃目標，並建立相關資料處理程序並完成初步資料分析。結果顯示沉箱基底礫石層有助沉箱在受震時抵抗滑動及減少沉箱位移量。

## 誌謝

本研究模型試驗部分承蒙國家地震工程研究中心借用振動台、層狀剪力盒及量測設備，助理研究員陳家漢先生全程大力協助實驗進行，僅此致謝。

## 參考文獻：

- 交通部運研所（1996），“港灣工程專有名詞”，ISBN13：9788016210781。
- 交通部運研所（1999），“臺中港 1 至 4A 碼頭 921 地震液化災損初步調查研究”，專刊 172。
- 交通部運研所（2013），“港區碼頭構造物動態模型試驗與數值模擬之研究(3/4)”，ISBN：978-986-04-0451-7。
- 林德洪（2013），“沉箱式碼頭動態模型試驗之數值模擬及模型設計”，國立成功大學土木工程學系研究所，碩士論文。
- 陳正興等（2004）“土壤液化對交通結構物之影響及液化潛能評估方法與災害分析模式之研究（1/2）”，交通部運輸研究所，中華民國九十三年十二月。
- 翁作新、王明輝、陳銘鴻、何文欽（2001），“大型振動台剪力盒土壤液化試驗(I) —大型二維剪力盒之研發”，報告編號：NCREE-01-011。
- Iai, S., Ichii, K., Liu, H., and Morita, T. (1998), “Effective Stress Analyses of Port Structures,” *Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake*, (2), pp.97-114.
- Iai, S., and Sugano, T. (2000). “Shake table testing on seismic performance of gravity quay walls.” *Proceedings of 12th World Conf. on Earthquake Engineering (WCEE) CD-ROM, No. 2680*
- International Navigation Association, INA (2001), “Seismic Design Guidelines for port structures.” ISBN 90-265-1818-8.
- Kazama, M. and Noda, T. (2012). “Damage statistics (Summary of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake damage)” *Soils and Foundations, Vol. 52, No. 5, pp. 780-792*.
- Kim, S. R., Kwon, O. S., Kim, M. M. (2004), “Evaluation of force components acting on gravity type quay walls during earthquakes,” *Soil*

Dynamics and Earthquake Engineering, ELSEVIER, Vol. 24, pp. 853-866.

12. Mito M, Sugano T, Inatomi T, Inagaki H. (1996), "Experimental studies on the caisson type quay wall damaged by Hyogoken-Nanbu earthquake 1995." Proceedings of 11th WCEE, 1996.
13. Yamaguchi, A., Mori, T., Kazama, M., Yoshida, N. (2012). "Liquefaction in Tohoku district during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake," Soils and Foundations, Vol. 52, No. 5, pp. 811-829.

# 動力分析應用於板樁式碼頭之耐震性能設計之研究

顏志中 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

賴琳應 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

曾青鯨 國立臺灣海洋大學河海工程系 專任助理

陳明鈺 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士 研究生

吳孟勳 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士 研究生

## 摘要

本研究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為基礎，進行板樁式碼頭之動力分析，分析程式採用二維有限差分之 FLAC 程式，分析方式為有效應力分析，並以 Mohr-Coulomb 模式來模擬土壤破壞之情況，同時考慮 Finn 模式以模擬孔隙水壓激發之現象。最後以具代表性之人造設計地震為輸入荷載，並以實際案例之參數作為選用之依據，進行非線性動力歷時數值分析，探討板樁式碼頭之性能表現，以供後續板樁式碼頭之耐震設計之參考。

## 一、前言

台灣位於環太平洋地震帶，加上海島性之氣候與海象條件，使得台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、鹽分腐蝕等之影響，因此，如何考量構造物整個壽命期之經濟性，據以提出合理的耐震設計規範，以使

所設計之構造物能滿足預期之安全度一直是目前熱門的研究課題，特別是過去之十年內，全球發生了多次強烈地震，如 1994 年美國加州北嶺地震、1995 年日本神戶地震、1999 年台灣 921 集集大地震以及 2011 年東日本大地震等，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，迫使先進國家之工程界針對現行耐震設計規範重新加以檢討，以確保構造物能之性能滿足使用、運作、安全、經濟等目標。

過去數十年來，性能設計理念已是國際工程界研訂技術規範的重要議題，發展至今，美國、歐洲與日本皆已採用其精神與內涵，納為編訂技術規範之基本架構；為符合構造物整個使用年限之綜合經濟利益考量，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。

行政院公共工程委員會自民國 97 年開始推動國內公共工程設計規範性

能設計化之研究，已於 98 年 6 月完成適用於國內之「公共工程性能設計準則」，可為未來國內公共工程相關設計規範朝性能化發展所依循。欲使港灣結構之耐震設計朝性能化發展，除重新檢討現行基準耐震設計相關內容外，亦應對耐震性能設計之架構進行完整研究，並研擬配套之設計分析方法，才能使新訂的設計基準確實可行。

故本研究依據國際航海協會(INA)於 2001 年提出之港灣構造物耐震設計準則為基礎，進行板樁式碼頭之動力分析，分析程式採用二維有限差分之 FLAC 程式，分析方式為有效應力分析，並以 Mohr-Coulomb 模式來模擬土壤破壞之情況，同時考慮 Finn 模式以模擬孔隙水壓激發之現象。最後以具代表性之人造設計地震為輸入荷載，並以實際案例之參數作為選用之依據，進行非線性動力歷時數值分析，探討板樁式碼頭之性能表現。

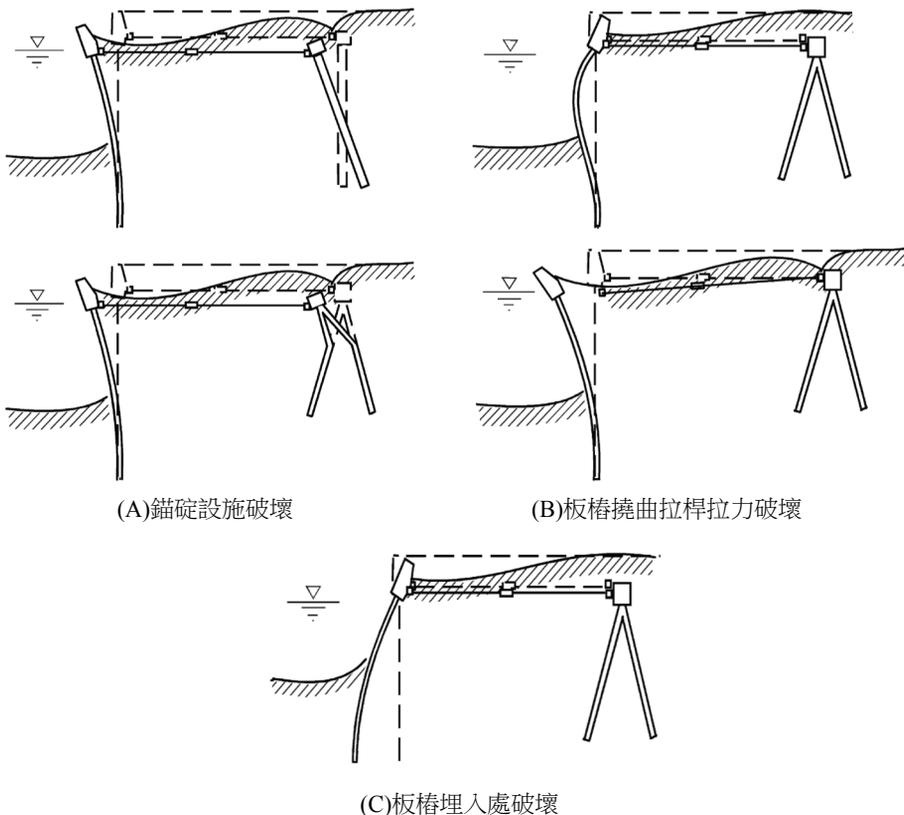
## 二、板樁式碼頭之組成與破壞機制

板樁式碼頭通常由相互連接的 RC 或鋼板樁、腰梁或圍梁、冠牆、拉桿、錨碇設施與回填料等組成，由上部之

拉桿與下部埋設於土壤來支撐，這種碼頭屬剛性結構，水平地震力的影響較垂直地震力顯著，故以水平地震力為主要考量。由過去地震災害顯示，可概略歸納出板樁式碼頭受地震力作用下可能的破壞模式，如圖 1 所示。此類碼頭破壞之可能原因為背填土較軟或液化增加了土壤及水對板樁之壓力，使得板樁所承受之彎矩過大而開裂，或拉桿拉力破壞，或使錨碇設施失去作用導致板樁與錨碇設施向海側傾倒或移動。

## 三、耐震性能設計法

耐震性能設計法是以控制構造物在地震力作用下之破壞程度為標的，該方法之基本理念在強調構造物在強烈地震力作用下之非線性變形行為，注重構造物及附屬設施之耐震性能，並以構造物整個生命週期之耐震性能和經濟性(包括設計費、建造費、維護費及可能之損失和修復費用)為主要設計目標，以保證構造物能在各種不同規模的地震力作用下，其耐震性能可滿足業主與國家社會的各種安全、經濟、文化與歷史需求，此法為現今結構耐震設計規範所遵循之方向。



(A) 錨碇設施破壞

(B) 板樁撓曲拉桿拉力破壞

(C) 板樁埋入處破壞

圖 1 板樁式碼頭之破壞模式

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。	危險品碼頭
A	<ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>2. 負有震災後復建工作之重要任務者。</li> <li>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動大損失者。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ol>	貨櫃碼頭
B	凡不屬於特定、A 級者	散雜貨碼頭

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	—	—
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

### 3.1 板樁式碼頭設計流程建立

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，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(INA, 2001)，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，其中關於板樁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板樁式碼頭的耐震能力評估，如表 4 所示。且各驗證分析法使用之時機，如表 5 所示。

表 4 板樁式碼頭結構之性能驗證分析法

		板樁式碼頭
簡化分析法		經驗公式或靜力分析法 (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	簡化圖表之參數分析法
	土壤模擬	有限元素法或 有限差分法

待結果分析出後，需將其結果依據國際航海協會所提出之板樁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。

### 3.2 板樁式碼頭之動力分析

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，以模擬「碼頭-結構」彼此間相制之行為，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，其可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數值分析，探討在所考量地震等級下，板樁式碼頭結構之性能表現是否符合性能要求，以評估其耐

震能力。

目前較典型之有限差分應用軟體為二維及三維之非線性分析軟體 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)，而較著名的有限元素法應用軟體為 FLUSH 及 PLAXIS；本研究採用 FLAC 程式進行動力分析之研究。

### 3.3 FLAC 程式簡述

FLAC 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，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以模擬材料之變形行為。

另外，FLAC 另有 Fish (FLACish) 程式可供使用者自行撰寫附加之副程式，以符合特殊材料及案例情況之需求。在進行動態分析時需考慮在有限網格之波傳行為之影響，波之傳遞除可能產生邊界折射與反射問題外，亦需考量應力波傳遞時之能量消散問題。

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

表 6 板樁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<30cm	N/A	N/A
		向海側傾斜角	<3°	N/A	N/A
	岸肩變位	岸肩沉陷量	<10 cm	N/A	N/A
		岸肩與後線陸地之沉陷差	<70 cm	N/A	N/A
		向海側傾斜角	<3°	N/A	N/A
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：針對補強板樁比補強錨碇設施容易，即板樁較錨碇設施先降伏之機制。

H 為基面以上板樁之高度。

N/A 之原文註解為「Not Applicable」，由 INA 設計例可知實際設計時不予檢核。

## 四、板樁式碼頭設計例實作

### 4.1 系統規劃

本案例以 B 級碼頭為例，採用錨碇式鋼板樁碼頭，並假設為雜貨之碼頭。碼頭規劃之標準斷面如圖 2 所示。碼頭單元靠海側為主鋼板樁，標準單元長為 22m；陸側為錨碇設施，單元長為 12m；錨碇設施與主鋼板樁之距離為 30m，錨碇拉桿(高耐索)置於碼頭表面下 1m 深度。而板樁式碼頭設計參數如表 7 所示。另由規範查得設計地震之三等級地震力如表 8 所示。

表 7 板樁式碼頭設計參數表

板樁埋入深度 Demb (m)	5.9	海側土層高程 (m)	-15
海水單位重 rw (tf/m <sup>3</sup> )	1.03	殘留水位至樁底高 Hsub (m)	21.9
板樁深度高程 (m)	-20.9	殘留水位(m)	+1.07
碼頭超載重 w(tf/m <sup>2</sup> )	1.5	板樁與土壤間之摩擦角 $\delta$ (deg)	15

表 8 板樁式碼頭設計地震力

地震等級	計算公式 (PGA)	加速度(g)
等級 I	$0.4S_{II,S} / 3.25$	0.068
等級 II	$0.4S_{II,S}$	0.22
等級 III	$0.4S_{III,S}$	0.28

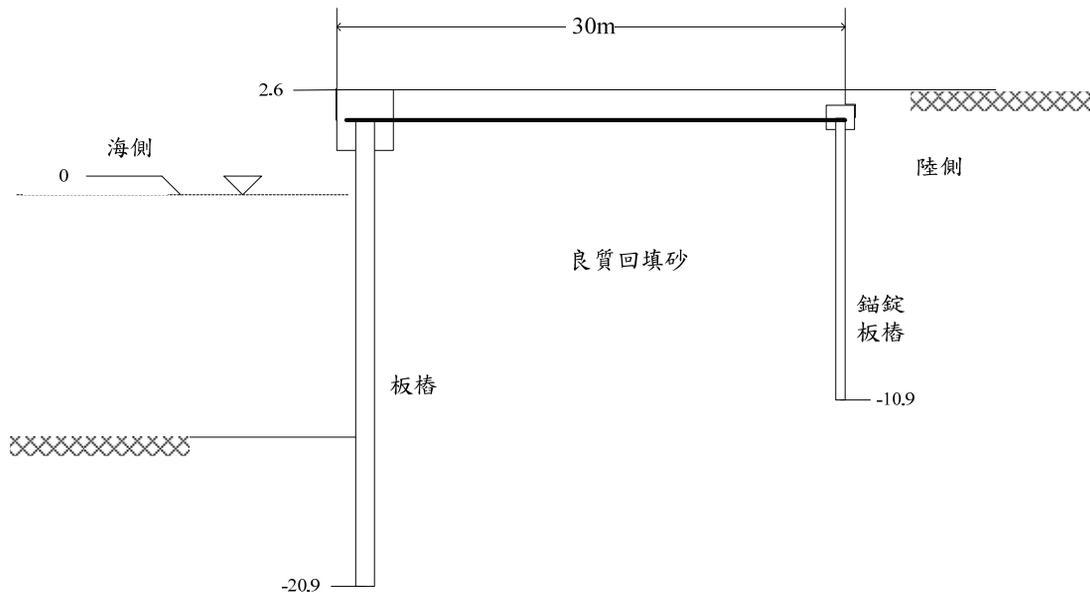


圖 2 板樁式碼頭標準斷面示意圖

### 4.2 動力分析流程

以 FLAC 進行板樁式碼頭之動態數值模擬分析主要分為十大步驟：(一)建立網格；(二) 給予材料強度參數；(三) 設定邊界條件；(四) 加入結構元素及界面元素並達重力平衡；(五) 施加海

水之側向力；(六)指定地下水位面；(七)力學平衡；(八)使用 Finn 模式；(九) 給予阻尼參數和動態邊界條件；(十)施加地震力。

本研究板樁式碼頭之分析網格尺寸，如圖 3 所示。分析斷面區有回填砂與地層等部份；本分析網格劃分為 42x

22，共計 924 個差分網格節點。

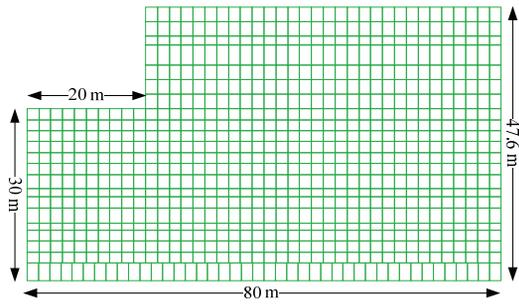


圖 3 分析網格建置

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挖除。本研究參考之鑽探資料，如圖 4 所示。

考慮地層材料特性後所建置之土層模型，如圖 5 所示，另動力分析所需之邊界條件設定亦於圖中呈現。

### 4.3 人造地震製作

本研究地表加速度歷時是依據現行規範對人造地震之規定所製作而得，符合規範彈性設計反應譜之人造地震歷時必須能反映工址之實際地震特性，因此所製作之人造地震歷時必須與工址附近測站所記錄之地震歷時波相符，而其轉換成反應譜之譜加速度亦須與設計地震等級之反應譜相符，歷時分析每一方向地動分量須至少使用三個人造地震，並取各主軸反應最大者為設計依據。本設計例工址位置係假設為高雄港，因此以港灣技術研究中心在高雄港所設測站之地震紀錄，進行人造地震製作，人造地震歷時如圖 6 所示。

地下水深度：-1.5 m 日期：																
深 度 (m)	土壤岩層說明	土壤 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 單 位 重 $\text{tm}^3$	比 重 Gs	孔 隙 比 e
0.15	回填砂石															
1.3																
1.85	灰色細砂含沉泥	SM	0	0	14	S-1	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3.5																
3.85	灰色細砂含沉泥	ML-CL	0	0	2	S-2	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5.5																
5.85	灰色沉泥質黏土	ML	0	0	2	S-3	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7.6																
7.85	灰色沉泥質黏土	SM	0	0	3	S-4	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9.85	灰色沉泥質砂	SM	0	0	15	S-5	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11.85	灰色沉泥質砂	SM	0	0	16	S-6	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13.85	灰色沉泥質砂	SM	0	0	15	S-7	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15.85	灰色沉泥質砂	SM	0	0	14	S-8	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17.85	灰色沉泥質砂	SM	0	0	18	S-9	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20.1	灰色沉泥質砂	SM	0	0	13	S-10	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21.3																
21.85	灰色黏土質細砂	SM-ML	0	0	20	S-11	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23.85	灰色泥質細砂	SM-ML	0	0	24	S-12	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25.85	灰色泥質細砂	SM-ML	0	0	26	S-13	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27.85	灰色泥質細砂	SM-ML	0	0	23	S-14	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0																
29.85	灰色泥質細砂	SM	0	0	20	S-15	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30.5																
31.85	灰色沉泥質細砂	SM-ML	0	0	34	S-16	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33.1																

圖 4 工址土層鑽探資料

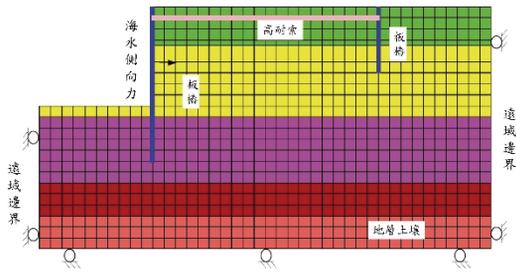


圖 5 動力分析邊界與土層模型建置

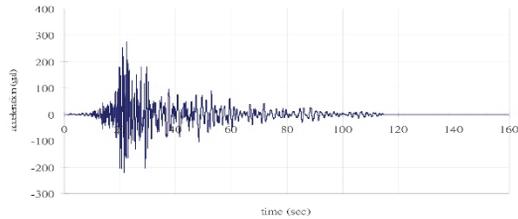


圖 6 加速度歷時反應譜

## 五、分析結果檢核

依據前一小節動力分析之步驟進行分析後可得到不同分析階段之成果。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 7 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(擷取影響最劇之加速度歷時譜之區段)並進行動力分析後，板樁式碼頭之破壞情況如圖 8 所示，鋼板樁與錨碇板樁受土壓之作用而向海側位移。

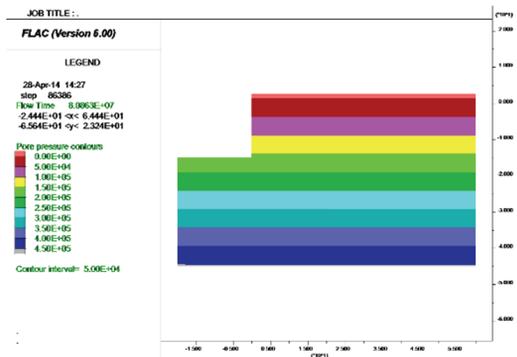


圖 7 孔隙水壓生成

而受震後土層之彈塑性行為，如圖 9 所示，大部分土層已降伏且產生剪力或張力破壞。碼頭破壞之水平位移，如圖 10 所示，由此可明顯看出楔型之破壞滑動面，且靠近板樁頂端之位置其位移量最劇，並以此位置設置水平位移之觀測，如圖 11 所示，其最大之位移量為 144 公分，而錨碇板樁之位移量亦有 166 公分。

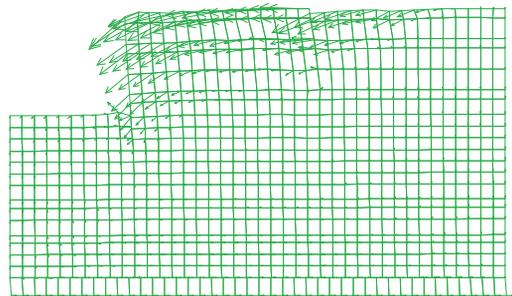


圖 8 等級 III 地震歷時分析破壞情況

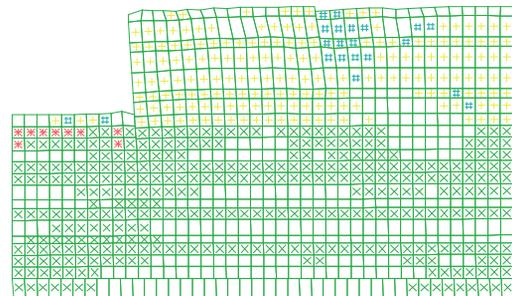


圖 9 等級 III 地震土層之彈塑性破壞結果

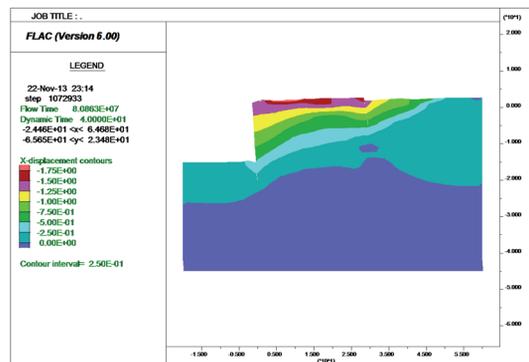


圖 10 等級 III 地震破壞水平位移圖

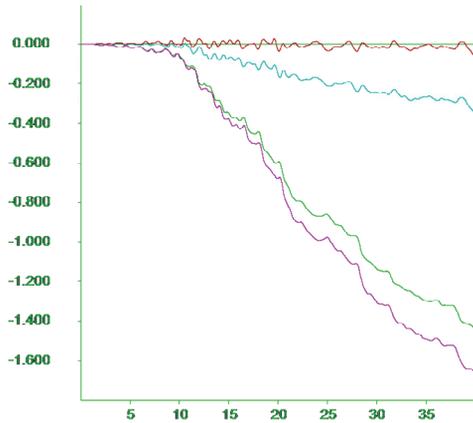


圖 11 等級Ⅲ地震樁頂之歷時分析水平位移

板樁構件之受力彎矩圖，如圖 12 所示，由此可知曉板樁最大彎矩之位置，並以此作為監測歷時-彎矩圖之位置，如圖 13 所示，其結果顯示鋼板樁最大彎矩為 3130000 牛頓-公尺大於降伏彎矩 3040710 牛頓-公尺，達塑性標準。而錨碇板樁最大彎矩為 1350000 牛頓-公尺大於降伏彎矩 816190 牛頓-公尺，已達塑性。而高耐索在地震加速度歷時 49.4 秒時有最大應力為 50.4 公噸已達容許拉力 50.4 公噸。在分析模型選取幾個觀測點以瞭解孔隙水壓激發之情況，如圖 14 所示，可看出具有液化潛能之土層孔隙水壓隨震動之時間遞增。

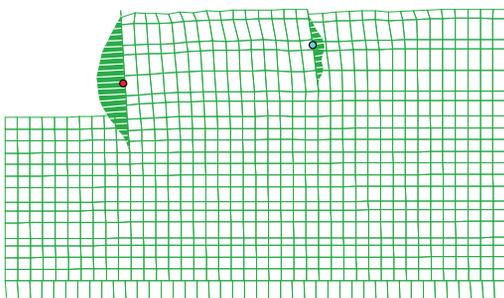


圖 12 等級Ⅲ地震板樁受力彎矩圖

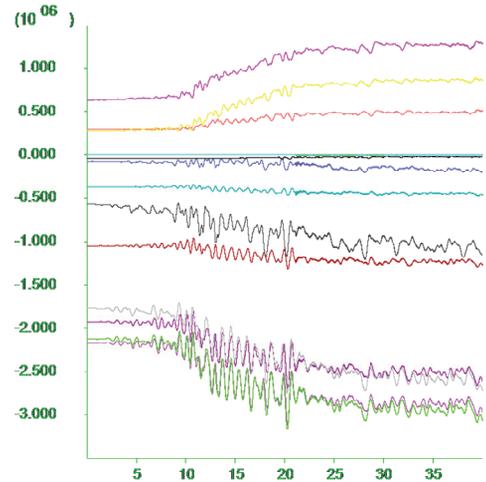


圖 13 板樁最大受力位置歷時-彎矩圖

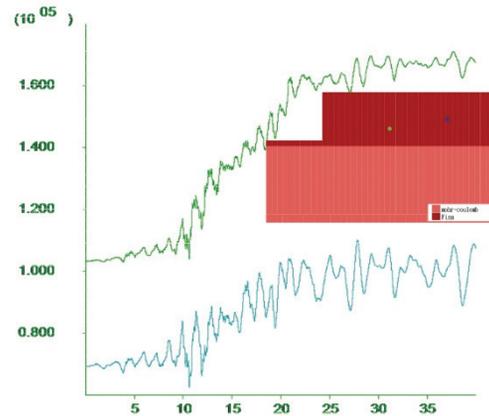


圖 14 等級Ⅲ地震第 3 組之歷時分析孔隙水壓

等級Ⅲ地震動力分析檢核結果，錨碇設施皆已達到塑性之性能要求，唯以 FLAC 之分析之限制，難以判斷其是否超過韌性容量或應變極限，但就位移量之破壞結果可發現，結構物已嚴重毀損，應無法恢復營業。

## 六、結論

碼頭之耐震分析方法由簡到繁可分為簡化分析、簡化動力分析以及動力分析三類，其不同複雜與精確度等

級分析方法之選用，除與碼頭重要度等級有關，尚與其所作用之地震力等級相關。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板樁式碼頭之真實行為。

本研究之分析成果顯示，以 FLAC 程式進行板樁式碼頭之動力分析可適切掌握板樁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. Itasca (2005), *FLAC & FLAC3D- Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, User's Guide*, Itasca Consulting Group, Inc, Minneapolis, U.S.A.
2. Newmark, N. M. (1965), *Effect of Earthquake on Dam and Embankment*, *Geotechnique*, Vol.15, No. 2, pp.139-159.
3. International Navigation Association (2001), *Seismic Design Guidelines for Port Structures*, A.A Balkema Publishers.
4. Seed, H. B. and Whitman, R.V. (1970), *Design of Earth Retaining Structures for Dynamic Loads*, ASCE Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures, Ithaca, pp. 103-147.
5. Towhata, I. And Islam, S. (1987), *Prediction of Lateral Movement of Anchored Bulkheads Induced by Seismic Liquefaction, Soils and Foundations* 27(4): 137-147.
6. Whitman, R. V. and Liao, S. (1985), *Seismic Design of Retaining Walls*, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper GL-85-1.
7. 許文豪 (2005)，「港灣碼頭結構物功能性耐震能力評估之研究」，國立臺灣海洋大學，河海工程學系，碩士論文。
8. 港灣技術研究所，港灣及海岸結構物設計基準，港灣研究所專刊 123 號，1997。
9. 交通部運輸研究所 (2005)，「港灣構造物設計基準修訂」。
10. 財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心 (2009)，「公共工程性能設計準則之研究」，行政院公共工程委員會專案研究計畫。
11. 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 15 屆水下技術研討會論文集。
12. 張荻薇、廖學瑞、丁金彪 (2011)，「2011 年東日本大震災-震後六個月-港灣及海岸」，臺灣世曦股份有限公司，臺北。
13. 日本港灣協會 (1999)，「港灣の施設の技術上の基準・同解説」，運輸省港灣局監修。
14. 日本財團法人沿岸技術研究中心 (2007)，「港灣構造物設計事例集」。
15. 邱永芳、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。
16. 賴瑞應、張權、薛強、顧承宇、曾韋繇、徐偉誌、翁健煌、蔡勇賢

(2013)，「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，臺北。

17. 賴瑞應、賴聖耀 (2004)，「地震引致板樁式碼頭之穩定性分析」，交通部運輸研究所。
18. 張權、薛強、顧承宇、曾韋繇、邱天宏、賴瑞應，(2013)，「棧橋式與重力式碼頭耐震性能設計研究」，港灣報導季刊，第 96 期，第 1~18 頁。

# 淡水河河口段之河床水理特性及沙嘴變遷研究

周憲德 國立中央大學土木工程系 教授  
林柏青 交通部運研所港灣技術研究中心 研究員  
何良勝 交通部運研所港灣技術研究中心 科長  
李璟芳 中興顧問社防災中心 副研究員  
陳沛蓉 國立中央大學土木工程系研究所碩士班 研究生  
鄭年佑 國立中央大學土木工程系研究所碩士班 研究生

## 摘要

控制淡水河河口輸砂的主要因素為潮汐、波浪、流量、河口地形及懸浮質及底床特性等。挖子尾砂嘴灘線逐年變動並有持續溯河延伸及外擴的趨勢，砂嘴內凹的淺灘瀉湖則趨淤淺。臺北港靠近北防波堤處之淺水區逐年向岸侵蝕，灘線則向海淤積。淡水河靠河口處之粒徑以中砂為主，河口內左側顆粒較細、右側顆粒較粗。淡水河砂丘存在，水流速度介於0.5-1.0 m/s屬低流速流況。在淡水河口底床最大砂丘高度約1m，河口段之砂丘長度為25-70m。沙丘砂粒往下游運動亦間接證明砂源來自淡水河上游。淡水挖子尾砂嘴地形演變及河口之河槽斷面有逐漸淤積的趨勢，應持續進行水深量測及地形監測，並考慮兼顧生態及環境保育的條件下進行人工疏濬作業的可行性。

## 一、前言

在石門水庫興建前，淡水河口及

八里地區的海岸線呈現向外擴張的現象。淡水河系提供充分的沈積物來源，使河口地區偏向於淤積作用，致使海岸線向外擴張，自淡水河口至八里段海岸以往有飛砂形成高約18公尺，長為3公里平行海岸之砂丘(許，2001)。民國53年，石門水庫完工後，攔阻大量河源泥砂，使河口地區沈積物的供需失衡，導致海岸線開始向內陸退縮。民國75年，翡翠水庫完工後，攔阻更多泥砂，使河口沖淤更加失衡。唯八里附近及其西側海岸因有臺北港北防波堤的興建，故海岸線並無退縮現象(洪，2000)。

## 二、研究目的

淡水河口在1960年前為淤積形態；1960之後在上游築壩阻砂及海岸築堤建港之影響下，河川及海岸之輸砂平衡受人為抽砂干擾而失衡，呈現海岸侵蝕後退之現象。由2000/9/23衛星影像(圖1)可知，近年來在淡水河南岸側臺北港之北堤，因其突出海岸達1.6km，幾乎與河口北側之突岬齊平，而造成

突堤效應，阻斷沿岸砂源之向南運移，造成臺北港南側防波堤海岸之侵蝕；並使河源輸砂及沿岸砂源在河口與北防波堤間沉積。



圖 1 淡水河口衛星影像及鄰近區域位置  
(Google 2013 影像)

### 三、研究方法

本研究之研究範圍為淡水河河口段，界定為從關渡隘口至挖子尾。探討河川水理特性包含河川流量與輸砂量對底床型態及砂嘴之影響，並以河口處挖子尾砂嘴及灘地到關渡橋段的底床型態為觀察重點，分析探討河口輸砂、水理及河床型態特性。研究之步驟包含：(一)現場資料收集：收集颱風期間及長期之流量、輸砂量、粒徑、河道淤積情形。(二)資料分析與探討：進行淡水河下游水理資料之季節相關性探討，依空照及河床資料分析淡水河地形變遷、主槽偏移、粒徑變化等問題，分析河道移動特性及顆粒礦物分析以判定臺北港北堤之淤砂的主要來源。(三)趨勢分析與方案探討：探討颱風期之輸砂量及漂砂對河口地形及淡水河河床型態之影響，及探討臺北港興建對淡水河輸砂及排洪能力之

影響。本年度著重 1. 淡水河下游於颱風期及平時之水理特性， 2. 淡水河下游底床砂丘特性， 3. 淡水河下游砂丘與潮流及洪水之關係。

## 四、淡水河流域水理資料分析

### 4.1 淡水河口地形變遷演變

臺北港建港前之海岸地形變遷分析中，林(1989)以 HEC-6 一維模式計算淡水河口斷面之輸砂量，若海象條件不變，則河流輸砂僅影響河口以南海岸之變化。許等(1993)使用人工岬灣理論認為淡水第二漁港之興建使河口以南七公里內之海岸退縮，退縮程度隨泥砂之供應增減。羅(1995)以單線模式模擬河口附近海岸線之變化，結果顯示河口以北海岸呈現動態平衡，河口以南海岸則為後退之趨勢。臺北港建港後近十年來，淡水河口北側海岸變化甚微；而挖子尾延伸至河口南側海岸則變動劇烈，主要原因為河源泥砂短少及臺北港北堤所致。李(1998)認為自 1994 年後，臺北港各期工程及北防波堤的興建，阻擋沿岸漂砂及淡水河之輸砂，評估建港後海岸將由侵蝕型轉為淤積型態，並使河口內側淺灘擴大，河道增長窄縮，河口範圍逐漸外移。邱等(2000)認為臺北港建後在淡水河口內側左岸將因淤積形成砂洲，且該區域之河床具季節性變化；在林口發電廠前方海域亦有砂洲形成，顯示有離岸漂砂活動。魏(2001)根據 Savage 公式及改良之 Bijker 公式計算得到：臺北港建後，全年波浪可推動 164 萬立方

公尺之漂砂量，少於淡水河系年平均輸砂量 185 萬立方公尺，故海岸應逐漸淤積。黃(2006)使用動床條件輔以擬三維河口水動力計算模式評估河口輸砂情況，同樣得到河口段淤積之推論。

## 4.2 水理資料

淡水河為臺灣北部最大之河口系統，河口段具感潮特性，典型半日潮，水流方向隨潮水往復運動。全河系早期輸砂量估算為每年 963 萬立方公尺，在石門(1964)及翡翠水庫(1987)建後則驟降至每年 185 萬立方公尺(基隆港務局，1997)。全河系乾季平均日流量為

400~500cms，雨季為 800cms，飈洪期間可達 2000cms 以上，1998 年 10 月 16 日瑞伯颱風來襲之平均日流量更高達 6281cms。

淡水河自民國 78 年後全面禁止採砂，民國 92 年起因河道淤積開始疏浚，歷年疏浚次數以基隆河為最，景美溪、內溝溪等次之，多為配合防洪工程、藍色公路附屬清淤工作及年度河道維護者。歷年單次最大清淤量為 50 萬立方公尺(南湖大橋至大直橋段)，最低清淤量為 69 立方公尺。淡水河主流部分僅於民國 93 年 3 月因航運所需實施過一次疏浚(八里部分)。

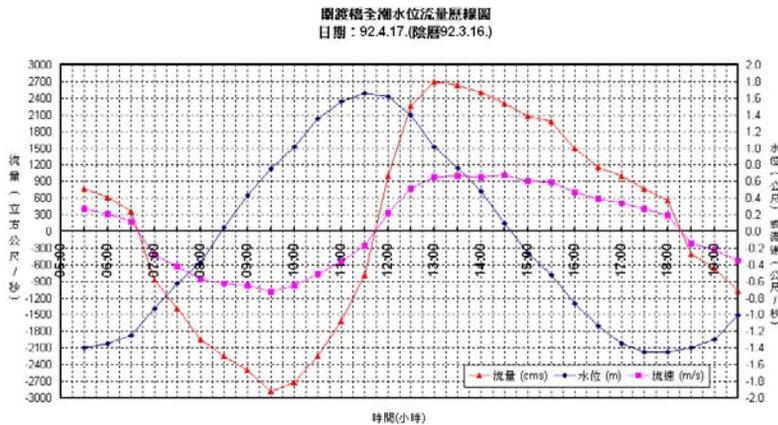


圖 2 關渡橋全潮流量觀測記錄(92/04/17)

圖 2 為 92 年 4 月 17 日流量觀測記錄，潮差 3.11 公尺，斷面最大漲(退)潮流速為每秒 0.72(0.67)公尺，最大漲潮流速略大於最大退潮流速。最大漲(退)潮流量為 2880(2703) cms，最大漲潮流量亦略大於最大退潮流量，由圖可知淡水河口之潮汐流量約 2000~3000cms，故當上游流量大於 2000 cms 時會明顯改變河道內漲退潮位。

## 4.3 地文資料

臺北盆地北方有大屯火山系，西側倚觀音火山與林口台地，東南側為加里山脈北段西麓之丘陵和山地。整體地勢由東南朝西北傾斜。北部淡水河流域內輸砂其主要礦物為紫蘇輝石、普通輝石與紅棕色角閃石，反映北部料源區屬第三紀火成岩層(黃，1995)。

分析海岸沉積物之漂流方向後，

顯示臺灣北部沿岸輸砂(淡水河)由北向南傳輸。海岸沉積物中「重礦物」來源主要受海岸侵蝕、河川輸砂與沿岸流搬運作用所控制。由於臺灣北部有兩個火山中心，導致該區岩石主要為安山岩質或石英安山岩流及岩屑構成。黃(1995)分析淡水河流域及其河口沿岸沉積物之組成礦物，如表 1。淡水河流域內輸砂以紫蘇輝石、普通輝石與紅棕色角閃石含量最高，達 83%。從為

數 30 個觀測點中有三個鄰近淡水河口之測站：白砂灣、砂崙與下罟尾亦發現其他零星礦物，如藍綠色角閃石、電器石、石榴石、鋯石、藍晶石與磷灰石等(黃，1995)。其他礦物除受河川搬運作用外，因北部(淡水河口以北至白砂灣)海岸多為岩岸、岩壁與海階，故直接受海岸侵蝕，並也有機會隨沿岸流沈積於鄰近海域。

表 1 淡水河流域及其河口沿岸沉積物所含重礦物百分比 (黃，1995)

採樣點地名	紫蘇輝石	普通輝石	紅棕色角閃石	藍綠色角閃石	電器石	石榴石	硬綠泥石	風化綠泥石	綠泥石	石
白砂灣	52.12	20.61	19.39	3.94	0	0	0	0	0	0.3
砂崙	42.48	21.24	33.01	1.63	0	0.65	0	0	0	0
下罟尾	46.88	26.56	18.44	3.75	0.94	0.94	0	0	0	0
蘆竹	46.93	26.21	16.18	1.62	0	1.29	0	0	0	3.24
竹圍	42.13	28.65	22.66	1.69	0	0.75	0	0	0.19	0
淡水河	42.43	33.83	6.82	0.3	1.78	2.67	0	0	1.78	0.59

#### 4.4 海象資料

波浪與潮汐運動直接影響河口近岸海域之水流特性，並且可由：示性波高、示性週期、波向、各分潮參數及潮位等物理量判斷影響程度。港灣技術研究中心自民國八十五年起於淡水河口南岸水深 15 公尺處設置觀測樁，水下則使用潮波流儀觀測波浪、潮位與沿岸流。淡水河口主要為半日潮。平均潮位 0.03 公尺，平均潮差 1.93 公尺，大潮之潮差為 2.89 公尺。而每日二次潮差之大小差異不大，受典型半日潮主導，其中全日潮差約為半日潮差之 1/5。漲潮之潮流為 SW 方向，退

潮之潮流則為 NE 方向(Chiao and Wang, 2004)。海域大部分流速皆小於每秒 0.8 公尺，夏季最大潮流速度約為每秒 1.19 公尺，冬季則為每秒 1.12 公尺(洪等，2000)。颱風期間及東北季風時，最大浪高達 5~6 公尺。

### 五、挖子尾地形演變

#### 5.1 淡水河河口地形特性與影響因素

影響海岸變遷重要作用的人為因素包括：流域變遷、河水利用、河流築壩、抽採河砂、突堤與防波堤、海濱保護結構物等。近 30 年來，淡水河河口及流域之工程設施如表 2 所示。

表 2 近年淡水河河口及流域之工程設施

年代	河口周圍結構物工程	流域整治與水利工程
1980	淡水第二漁港興建防波堤工程(1982-1983)	新店溪翡翠水庫完工蓄水(1987.6月) 臺北地區防洪計畫工程(1982-1996)
1990	八里汙水處理廠海洋放流管(1990-1995) 淡海新市鎮開發(1993-2001)	基隆河截彎取直工程(1990-) 基隆河治理疏浚工程(1998-2001)
1993	臺北港及北防波堤	
2000		員山子分洪工程(2002-2005) 低窪地區防洪區段工段(2004) 滯洪區建置計畫(2004)

淡水河河口北岸基本上因屬礁岩地質加上河海堤工保護，地形改變很少；南岸則因水庫攔砂及下游採砂形成侵蝕(1904 - 1993)；而臺北港興建後(1998)因北堤阻擋南向漂砂，地形改變趨勢由侵蝕轉為淤積。

因淡水河口之波浪以東北方向為主，沿岸輸砂由北向南，且冬季效應大於夏季西南向波浪。臺北港北防波堤興建後導致突堤效應，使淡水河南岸至臺北港北堤處之沿岸逐漸由侵轉淤，其中更以挖子尾地區之地形改變最為顯著。由 97-100 年交通部運輸研究所的觀測資料可看出其變化；在淡水河口左岸區域，砂嘴逐漸轉向與擴大，往河道上游延伸，且將原本砂脊區域逐漸填補，沙灘變廣。本章將著重探討挖子尾附近地形變化受自然營

力及人為工程的影響及其變化趨勢。

## 5.2 淡水河河口南岸地形演變

淡水河口自關渡以下有淡水、竹圍及挖子尾三個自然保留區，其中挖子尾自然保留區因受潮流，風浪及水流之作用力，影響因素最複雜，變化也最明顯。淡水河河口左岸為八里地區，河口南側之「挖子尾自然保留區」於民國 72 年成立，總面積約為 30 公頃，挖子尾地形及相關工程設施如圖 3 所示。挖子尾是砂嘴圍繞形成之瀉湖水域，具豐富的河口潮汐生態體系，其中有面積廣闊的紅樹林(水筆仔)泥灘及族群龐大的招潮蟹、彈塗魚等。

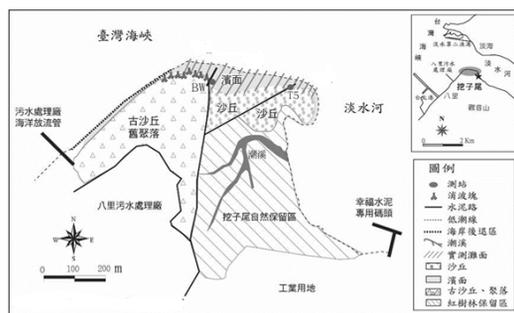


圖 3 挖子尾地形及位置 (林俊全, 2004)

淡水河河口處水流有向左流出的慣性，南岸挖子尾的堆積較具規模，形成平行海岸線方向砂嘴，砂嘴屏障海岸方向的波浪侵襲，使砂嘴後方泥砂堆積旺盛，退潮時可露出長達數百公尺的淺灘。但近 20 年來，挖子尾砂嘴出現了顯著的變動狀況，說明如下：

### (1) 季節風浪效應

淡水河口左岸挖子尾主要之波浪為東北方向，故淡水河海岸之輸砂由北向南，且冬季東北向之波高明顯高

於夏季的西南向波高，此區域侵蝕與淤積的區域，呈現東北-西南向的分佈。

### (2) 短期洪水效應

林(2003)針對挖子尾灘面做短時距地形變化研究，砂嘴在 2002 年辛樂克颱風事件後，灘面變化為侵蝕，侵蝕深度達 1.2m，堆積深度達 0.9m，而整體灘面侵蝕 10cm 左右最多；灘面堆積量為 2,955m<sup>3</sup>，侵蝕量為 15,674m<sup>3</sup>，全區總變化量為侵蝕 12,718m<sup>3</sup>，各區域灘面受人工結構物的因素，造成侵蝕差異。

### (3) 上游水庫攔砂效應

1987 年新店溪上游翡翠水庫完工並蓄水，1988 年河口左岸區域侵蝕量達 1,442,744 立方公尺。1987-1988 年是侵蝕量最多的一年。然翡翠水庫於 1987 年淤積量約 1,257,000 立方公尺，顯示除翡翠水庫外，仍有其餘因素導致河口沉積物供應減少導致河口海岸呈現侵蝕狀態。

### (4) 臺北港北堤突堤效應

1993 年臺北港興建之後，長達 1.6 公里長的北堤阻擾沿岸漂砂傳輸，造成漂砂在堤前堆積，低潮時可見整片砂洲露出。1993 年前八里汙水廠附近的海岸呈現的侵蝕狀態，已逐漸淤積。在 1998 年後，河口南側海岸則有明顯淤積趨勢，此區域之人工構造物，如離岸堤及八里海洋放流之整流堤等，所在位置皆被淤砂掩埋，形成淺灘。

## 5.3 挖子尾灘線及南岸等深線之地形演變

1978~2011 年間，以高程為 0 的等高線為灘線代表挖子尾砂嘴地形，形態變動如圖 4。挖子尾地區的砂嘴變動劇烈，其型態受波浪作用、海岸侵蝕及周圍港口的興建呈現堆積、轉向、退縮等變化。1978 年挖子尾砂嘴規模較小，緊靠紅樹林生長區。1980 年淡水第二漁港興建防波堤，而在 1994 年挖子尾砂嘴溯河拓展約 300m，但南岸淺灘則仍呈侵蝕趨勢。1999 時，臺北港北側海灘仍呈侵蝕現象，但挖子尾砂嘴仍持續溯河延伸。砂嘴內凹的淺灘潟湖部分，則略微退縮，可能與八里渡船頭堤防的興建及 2004 年後淡水河復始之清淤疏浚有顯著關連。2005 年臺北港北側海灘則轉為淤積趨勢，至 2008 年則離岸堤及放流管導流堤皆淤為淺灘，與 1978 相較挖子尾砂嘴在 30 年間溯河延伸約 400m。砂嘴與八里風帆碼頭間的潟湖也趨於淤塞淺化。從 2008-2011 期間，臺北港北側海灘與挖子尾砂嘴每年雖有季節性變化，但大致持續維持淤積趨勢。

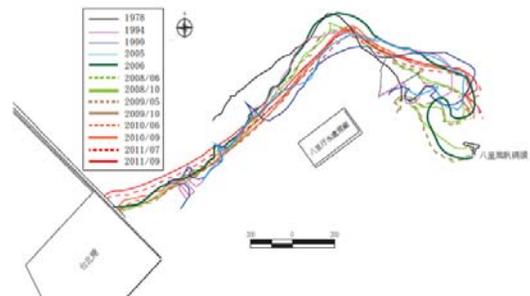


圖 4 挖子尾砂嘴之形態之歷年演變 (1978-2011)

2006 年漲退潮時海水可穿過長堤，而隨著東側沙灘淤高，除非大潮或洪水時，則海水不易進入。挖子尾砂嘴在 2008 辛樂克颱風及 2009 莫拉克颱風後，新北市府便以怪手及人力進行挖子尾砂嘴之人為整平及淨灘。

風吹砂效應在長堤西側尤為明顯，由圖 5 可知在 2009 年後，長堤西側的沙灘雖經 2008/12/03 之人為整平後逐漸淤高勝於東側，應是冬季東北季風及夏季西南風將淤砂揚起，受長堤及檢查哨阻擋而沉積於長堤西側之故。



(a) 2008/07/19



(b) 2009/11/28



(c) 2012/01/18



(d) 2013/07/05

圖 5 長堤東西側沙灘淤積演變

歷次現地勘查發現退潮流時，東北季風之風揚、風浪與高灘地退潮流互制作用，使此處灘線前緣坡度變陡。風浪於灘線前碎波後與退潮流產生沿灘線流，水流淘刷砂粒往河川上游移動。可知砂嘴邊緣之平均運動方向為

向陸，使砂嘴內彎。圖 4 及 5 可知，即使在洪水沖刷(如辛樂克與莫拉克颱風)過後，挖子尾觀海長堤之砂灘高程仍有增高及偏向內陸之趨勢。

#### 5.4 淡水河口南側淺水區範圍演變

目前淡水海域之等深線以 5m 為間隔，故本研究以 -5m 等高線到高程 0 的灘線代表淺水區範圍。根據港研中心 1996-2011 的量測資料，將期間春、秋兩季的淡水河口南岸淺水區之地形演變如圖 6 及 7 所示。由圖可知淡水河口南岸淺水區的地形，在靠近北防波堤處 -5 m 等高線逐年向岸侵蝕，15 年間向陸移約 400m，與該處之灘線向海淤積相反，應是此處有向岸海流將泥砂帶到灘線淤積所致。河口向外延伸之砂脊頂點亦有逐年侵蝕趨勢。在挖子尾砂嘴處之 -5m 等高線，稍向中心內移逐漸淤積的趨勢，15 年間向河心移約 80 m。夏季後之水深線較偏向河心(如 2001,2006)，應是當年洪水挾砂在河口產生淤積所致。

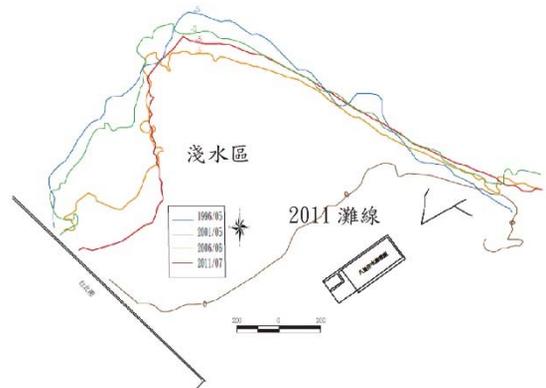


圖 6 1995-2011 春夏季淡水河口南岸淺水區之地形演變

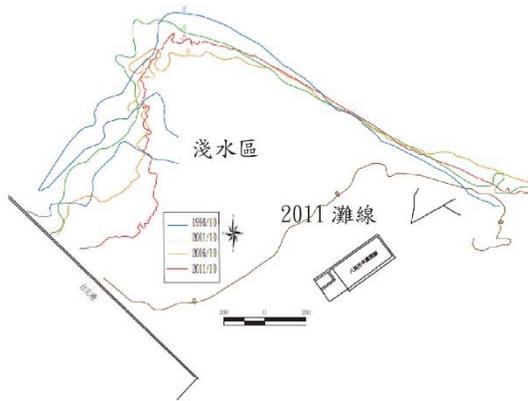


圖 7 1996-2011 秋季淡水河口南岸淺水區之地形演變

臺北港營運處依相關研究(2006)建議河口疏濬作業實施之條件為：(1)河口斷面 T00(即挖子尾砂嘴處)之通水面積受淤積減少達 7% 以上，或 (2)水利機關依 200 年回歸期洪峰值之回水演算，河口以上水位超過淡水河 200 年回歸期的警戒值時。水利署十河局於 86-97 年間，逐年量測得 T00 斷面之通水面積為 4004-5874 m<sup>2</sup>。如扣除 95 年之極端值得年平均值為 4490m<sup>2</sup>(圖中實線)，因淤積需實施疏濬作業的通水面積為 4176m<sup>2</sup>(圖中虛線)。由圖 8 可知 94 與 97 年已達需疏濬作業的條件。若對應圖 6-7 可知河口斷面之 -5 m 水深線在 1996-2011 的 15 年間向河心移約 80 m，與原約 800 m 之斷面少了 10%。

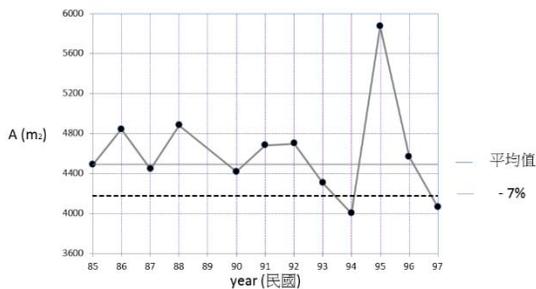


圖 8 1996-2008 淡水河口斷面 T00 之通水面積逐年變化

綜上所述，淡水河口砂嘴地形演變及水深斷面有逐漸淤積的演變趨勢，應持續進行定期水深量測及地形監測，並須考慮在兼顧生態及環境保育(因該地為生態保育區)的條件下，評估進行人工疏濬作業的可行性。

## 六、淡水河口及下游現場調查及分析

### 6.1 底床質位置與採樣分析

交通部運輸研究所港灣技術研究中心自民國 102 年 4 月 18 日，於淡水河關渡橋下游至河口間之底質採樣，採樣位置如圖 9 所示。為凸顯下游至河口之河床砂丘型態與底床粒徑的關係，取樣地點由關渡橋下游延伸至淡水河口與凸岬齊平，每一斷面側向等間距取樣約 5-6 點。取回底床樣品之分析步驟如下：首先將砂樣烘乾一天以上，再使用機械篩及比重沉降試驗作粒徑分析，並同步觀察顏色、礦物組成、雜質含量及氣味。

經由前次現場採樣可知淡水河北岸公司田溪出口之淤砂以黃褐色為主，南岸挖子尾至臺北港北堤間則以為藍黑色為主並與淡水河本流底床樣本顏色相近。此一結果與前人研究成果符合(Boggs et.al,1974)，故可初步推斷挖子尾至八里間沿岸淤砂來自淡水河本流，北岸漂砂之貢獻應可忽略。

本計畫所採砂樣經烘乾後，大部份顆粒為灰色、黑色及白色，顯示採樣時間前後流量穩定，上游無顯著異常泥砂來源，即上游無大型水文事件

發生，砂樣少有褐色出現，雜質與離散顆粒亦較河口淤砂少。



圖 9 2013 年度淡水河下游底質採樣點衛星航照圖

本計畫在同一斷面取 5-6 個採樣點，較能反映底床粒徑的空間分布。關渡橋下游竹圍(T6)至淡水渡船頭(T3)底床粒徑以細砂(0.125 - 0.25mm)為主，河心處顆粒較粗而兩岸粒徑較細，且在竹圍段(T5-5)之含泥量較高，反映附近為紅樹林生長區。靠河口處(油車口及挖子尾)之粒徑則以中砂為主(0.25 - 0.5mm)為主，河口內(油車口上游 T1 - T2)左側顆粒較細(細砂)，右側顆粒較粗(中砂)，反映主深槽因屬彎道偏向凹岸(及右岸靠淡水處)其顆粒明顯較凸岸挖子尾粒徑為粗。挖子尾附近測點接近與紅樹林棲地，故其含泥量也較高。

由平均粒徑分布與砂丘分布之關係如圖 10 所示，可知砂丘之分布範圍與中砂粒徑之分布範圍重疊性高，主要在淡水渡船頭與河口間。

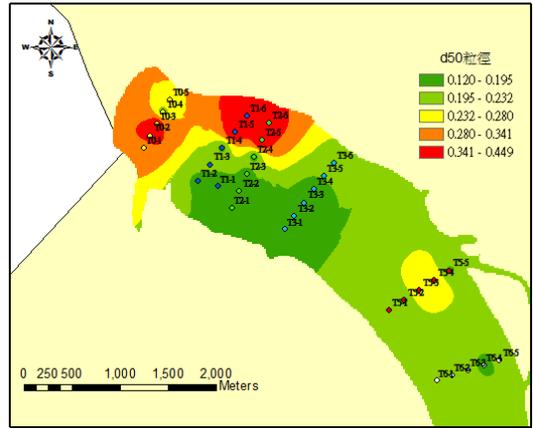


圖 10 2013/04 淡水河口底床沉積物平均粒徑分布

因取平均粒徑無法反映測點的不同粒徑分布，另以各粒徑所佔百分比來代表淡水河下游河床之粒徑分布如圖 11 所示。由圖可知較大粒徑顆粒仍來自上游斷面 (KD-09) 而非河口淤砂區。

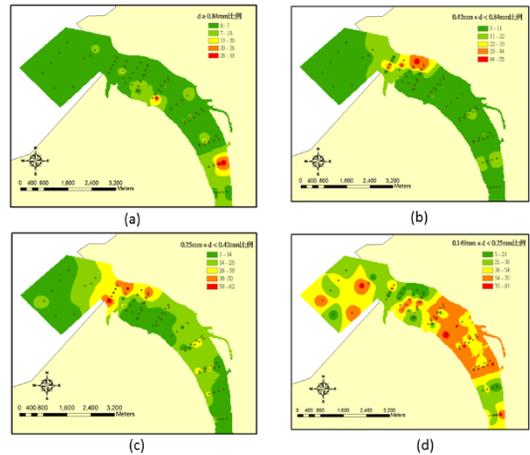


圖 11 2013/04 淡水河口底床沉積物各粒徑分布

2013 年 9 月淡水河下游至河口取河床質土樣，結果與 2013/04 採樣相近，中砂粒徑較大者位於淡水渡船頭與河口間的右岸，八里左岸則有一處有較粗顆粒。淡水河下游河床質在 9 月採樣質有較 4 月粗化的趨勢，但較粗砂粒 ( $d_{50} > 0.345 \text{ mm}$ ) 範圍反而縮小，與洪水

流量較大有關。此次採樣再以各粒徑所佔百分比來代表淡水河下游河床之粒徑分布如 12 所示。由圖可知較大粒徑顆粒 ( $d > 0.42\text{mm}$ ) 仍以來自較上游斷面而非河口淤砂區。

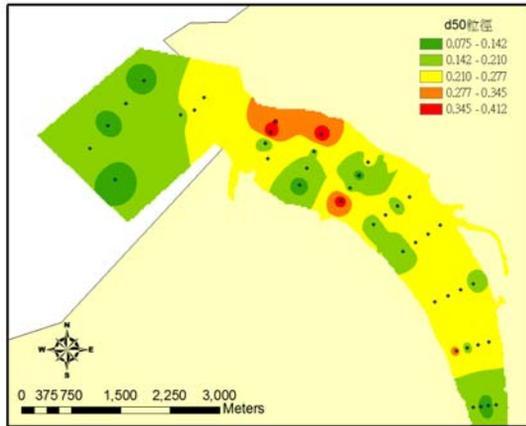


圖 12 2013/04 淡水河口底床沉積物平均粒徑分布

## 6.2 河床型態與水流關係

河口的水下底床砂丘之條件為細到中粒徑砂，且流速為每秒 0.5 到 1 公尺時(Ashley, 1990)。主要控制河口泥砂輸送的動力，為泥砂淨輸送量、河床粗糙度及潮汐。潮汐砂丘之探討，主要集中於輸送機制度和砂丘遷移率，並預測底床載輸送率。淡水河口之砂丘動力因較複雜，少有相關文獻。本計畫先從由收集河床地形，分析淡水河口之砂丘型態，以期能了解淡水河口泥砂的長期輸送特性。在自然河川中因自然營力(重力，地形，地質及水文條件)之改變及驅動下，水流、泥砂及河床邊界三者隨之產生互制作用，使得河流水深、流況及河幅寬深比隨水理環境的變遷，衍化出自我調節並趨於平衡狀態的自然法則(Regime

theories)。河床型態亦隨流況及泥砂特性而改變，不同河床型態對水流阻力、輸砂量與流路變動有極大影響。

## 6.3 砂丘型態分析

自強測量公司於 2008/10/3-11:03-15:04 以水下聲納測得淡水河下游之河床型態如圖 13，其中砂丘在淡水渡船頭到河口間(外延到淡水港)較明顯。測量軌跡線須沿流向呈往復”之”字形掃描。

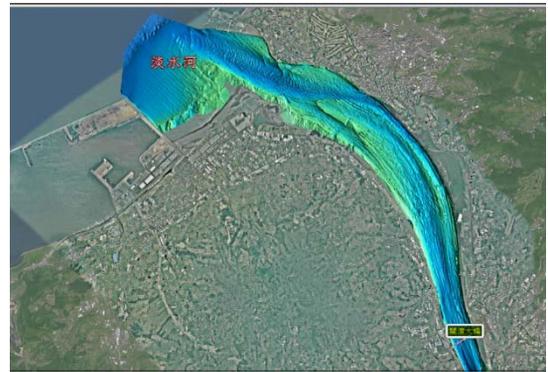


圖 13 淡水河下游之河床型態 (2008/10/03)

針對河口段之水下砂丘部份，本計畫分兩段分別就淡水港至河口為(A)，及河口至淡水渡船頭間為(B)進行分析，如圖 14。經 skyline 軟體擷圖得兩段底床砂丘剖面。



圖 14 河口段之水下砂丘分段分析

由於 A, B 二段之水深趨勢沿程變化明顯，本研究採非線性 HHT 分析其

底床型態，資料依找波數由高到低 (1/m；波長倒數)可分解成 7-8 個 IMF (經驗模組函數)如圖 15 及 16。最後的經驗模組函數(IMF7 or 8)即代表扣除砂丘效應時之平均河床剖面。而由縱軸底床之變化值大小可看出 A 段之砂丘由 IMF3-4 組成(圖 15)，而 B 段之砂丘則由 IMF2-3 組成(圖 16)。

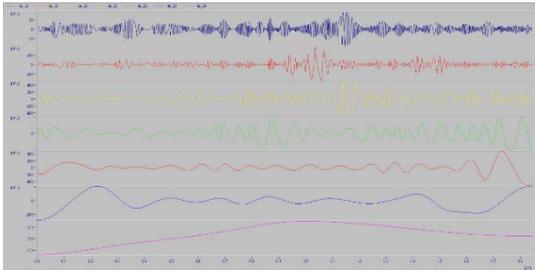


圖 15 A 段底床砂丘剖面經 HHT 之各 imf  
(x 軸：淡水漁港向上游距離(m)；y 軸：高程(m))

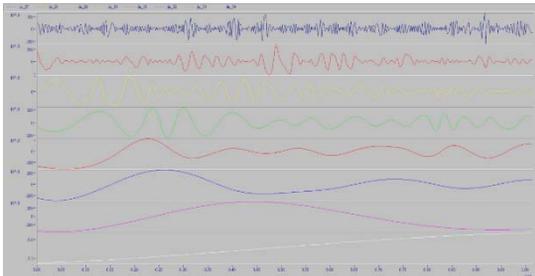


圖 16 B 段底床砂丘剖面經 HHT 之各 imf  
(x 軸：油車口向上游距離 (m)；y 軸：高程(m))

扣除 IMF6 後，A, B 二段之 HHT 歷線及頻譜如圖 17 及 18 所示。A 段之波數(1/m；波長倒數)約 0.005 - 0.05(即砂丘波長範圍介於 20 - 200m)；B 段之波數則約 0.01 - 0.06 (即砂丘波長範圍 17- 100m)。

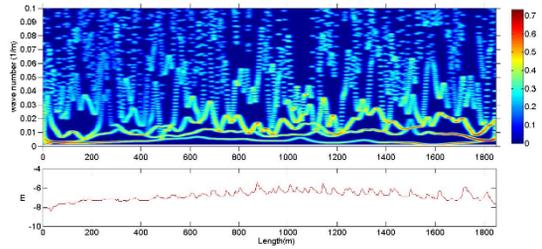


圖 17 A 段底床砂丘剖面之 HHT 歷線及頻譜  
(扣除 IMF7)

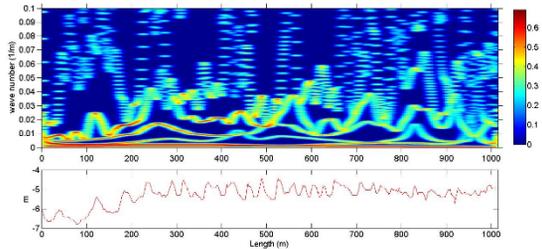


圖 18 B 段底床砂丘剖面之 HHT 歷線及頻譜  
(扣除 IMF8)

進一步分解 A、B 段各 IMF 的 FFT 頻譜(圖 19-20)。A 段之砂丘組成中 IMF3-4 的組成波數介於 0.015-0.04 (圖 19)，而 B 段之砂丘 IMF2-3 組成波數則介於 0.017-0.042 (圖 20)。即砂丘長度在 A 段為 25-67m；B 段之砂丘長度為 24-59m。若取 A, B 二段之平均水深為 7 及 5.5 m，並依 van Rijn 砂丘波長與水深之關係( $L/h = 2\pi$ )可算得 A 段之砂丘長度為 44m，B 段之砂丘長度則為 35m。淡水河口處 A, B 二段之主要砂丘長度略大於 van Rijn 所提之砂丘波長與水深關係式。依砂樣分析，淡水河砂丘存在於底床為中砂粒徑範圍，水流速度則介於 0.5 - 1.0 m/s，而淡水河口屬低水流流況(lower regime)砂丘存在，砂粒往下游運動亦間接證明砂源來自淡水河上游。

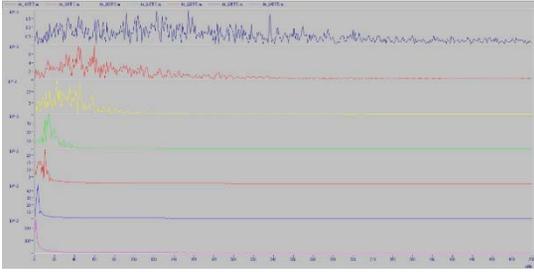


圖 19 A 段底床砂丘剖面各 IMF 分量之 FFT 頻譜

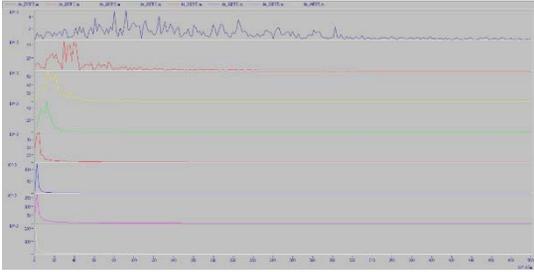


圖 20 B 段底床砂丘剖面各 IMF 分量之 FFT 頻譜

## 七、結論與建議

### 7.1 結論

1. 臺北港興建後(1993-2011)，挖子尾砂嘴灘線逐年變動，有持續溯河延伸及外擴的趨勢約 400m；砂嘴內凹的淺灘瀉湖則趨淤淺。挖子尾砂嘴長堤沙灘最大淤高達 1.5 公尺。臺北港北側海灘亦呈現淤積。淡水河口南岸淺水區，近北防坡堤處逐年向岸侵蝕約 400m；灘線則向海淤積。淡水河槽-5m 等高線則有向河心內移，即通水斷面減少。依據水利署十河局 86-97 年間河口斷面觀測，亦有通水面積減少的情形。
2. 關渡橋下游至淡水渡船頭河床以細砂 (0.125-0.25mm) 為主，河心處顆粒較粗而兩岸較細，含泥量較高處接近紅樹林生長區。河口處之粒徑則以中砂為主(0.25 - 0.5mm) 為主，河口內左

側顆粒較細為細砂，右側顆粒較粗為中砂，反映主深槽因屬彎道偏向右岸靠淡水處，其顆粒明顯較挖子尾粒徑為粗。挖子尾接近紅樹林棲地，其顆粒較細且含泥量較高。

3. 淡水河下游之河床砂丘型態於淡水渡船頭到河口間(外延到淡水港)較明顯，由粒徑分布與砂丘分布之關係可知，砂丘之分布範圍與中砂粒徑之分布範圍重疊性高。
4. A 段之水深約 6.0-8.0m，最大砂丘高度在河口約 1m，B 段之水深約 4.5-6.5m，最大砂丘高度約位於挖子尾及淡水海關間。A 段之砂丘長度為 25-67m；B 段之砂丘長度則為 24-59m。若依 van Rijn 砂丘波長與水深之關係( $L/h=2\pi$ )可算得 A 段之砂丘長度為 44m，B 段之砂丘長度則為 35m。大致而言，淡水河口處 A，B 二段之主要砂丘長度略大於 van Rijn 所提之砂丘波長與水深關係式。
5. 依現場資料及砂樣分析，淡水河砂丘存在於底床為中砂粒徑範圍，水流速度則介於 0.5-1.0m/s，而淡水河口屬低水流流況。故砂丘上砂粒往下游運動亦間接證明砂源來自淡水河上游。

### 7.2 建議

1. 淡水挖子尾砂嘴地形演變及河口之河槽斷面有逐漸淤積的演變趨勢，應持續進行定期水深量測及地形監測，並須考慮在兼顧生態及環境保育的條件下，評估進行人工疏濬作業的可行性。

2. 宜持續進行進一步不同時期及斷面，淡水河流場與砂丘運移之分析。
3. 未來挖子尾瀉湖淤積與紅樹林生態的關係應更深入之分析。
4. 淡水河下游目前仍缺乏長期性之颱風期間之實測流量及同時間之濃度資料。建議持續收集河道斷面量測資料、河床質分佈、疏浚資料及流量資料等以驗證淡水河口長期之輸砂特性。
7. 周憲德、卡艾偉、李璟芳、林煒傑，「96年淡水河河口輸砂及水理之研究」，交通部運輸研究所港灣技術研究中心辦理研究計畫，2007。
8. 林俊全、賴春婷、任家弘，「河口短時距地形變動之研究以淡水河口挖子尾為例」，地理學報第35期，pp.17~34，2004。
9. 林柏青、周憲德、江金德、蔡金吉，「淡水河流況與懸浮質調查分析」，第25屆海洋工程研討會論文集，pp.669~676，國立臺灣海洋大學，基隆市，2003。

## 參考文獻

1. 王安得，「淡水河年侵蝕率之推估」，國立台南師範學院自然科學教育學系碩士論文，台南市，2004。
2. 中華水下考古學會，「淡水河口古沉船初勘作業調查報告」，2009。
3. 宋國士、溫良碩、劉康克、劉佩琨，「淡水河口區水下地形」，臺灣海洋學刊第39期，pp. 135~159，2001。
4. 李知苙，「臺灣附近海域表層沈積物之組織、礦物與化學對比」，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，2000。
5. 李錫堤、黃俊鴻、劉進金、蔡榮君、洪國華、林書毅，「林口台地及其鄰接海岸地形變遷與地貌復原可行性探討」，公共工程委員會專案委託計畫成果報告，1998。
6. 周憲德、卡艾偉、李璟芳，「95年淡水河河口輸砂及水理之研究」，交通部運輸研究所港灣技術研究中心辦理研究計畫，2006。
10. 林雪美，「臺灣西部河口之地形學研究」，國立臺灣師範大學地理學研究所博士論文，1996。
11. 邱永芳、洪憲中、吳基、林柏青、廖慶堂、王胄、徐如娟，「八十八年八里、林口海岸漂砂調查及海氣象與地形變遷四年監測計畫報告」，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，1999。
12. 洪奕星，「臺灣北部海岸變遷研究 - 淡水河口一帶海底地形與沉積物分佈的調查研究(III)」，中央地質調查所委託計畫，2000。
13. 基隆港務局，「臺北港港址北側疏濬淤砂及港址南側設置離岸潛堤方法研究」，民國95年2月(2006)。
14. 基隆港務局，「海岸地形變遷及防護對策研究“淡水港第二期工程(含淡水港外郭防波堤興建工程)環境影響說明書”(定稿本) - 附錄三」

- 2-1~4-20、7-2~7-4，基隆港務局，基隆市，1997。
15. 張石角，「臺灣海岸之自然環境與國土資源評估」，工程環境特刊，第五號，pp.91~112，1997。
  16. 張菟文，「淡水河口地形變遷之研究」，國立臺灣大學地理環境資源研究所碩士論文，2002。
  17. 許泰文、張憲國，「永續的鑽石海岸」，經濟部水資源局出版，2001。
  18. 許硯蓀、廖學瑞、朱志誠「淡水八里海岸地形變遷研究及人工岬灣之應用」，中華技術，17：59-66，1993。
  19. 港灣研究中心，「臺北港(92~94年)海岸漂砂調查及海氣象與地形變遷監測作業 - 94年報告」，交通部運輸研究所，2005。
  20. 黃序文，「臺灣西部近岸沈積物之重礦物組成—由Q型因子分析法推測近岸沉積物傳輸方向」，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，1994。
  21. 黃良雄、楊錦川、許泰文，「臺北港設置後對淡水河口海岸地形變遷之影響」，經濟部水利署第十河川局辦理研究計畫，2006。
  22. 鄧國雄、高慶珍、許哲明、蔡佩娥，「淡水河下游河道形態與演育」，11:139~169，地理學研究，1987。
  23. 魏震，「臺北港興建對鄰近海岸地形影響之評析」，國立臺灣海洋大學河海工程系碩士論文，2001。
  24. 羅志堅，「淡水河口處海岸變遷之研究」，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，1995。
  25. Boggs, S., Jr., W. C. Wang & J. C. Chen (1974), "Textural and compositional patterns of Taiwan shelf sediment", *Acta Oceanographica Taiwanica*, 4, 13-56.
  26. Boggs, S. JR., W. C. Wang, and J. C. Chen (1979), "Sediment properties and water characteristics of the Taiwan shelf and slope." *Acta Oceanogr Taiwanica*, 10:10-49.
  27. Dadson, S.J., N. Hovius, H. Chen, W.B. Dade, M.L. Hsieh and S.D. Willet (2003), "Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen", *Nature*, Vol.426, pp.648-651.
  28. Dyer, K.R. (1994), "Estuarine sediment transport and deposition", Chap. 6 in *Sediment Transport and Depositional Processes*, ed. by K. Pye, Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
  29. Huang, Norden E. (1998), "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis", *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol.454, 903-995.
  30. L. C. van Rijn, "Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness," *J. Hydraul. Eng.* 110, 1733 (1984).

# 以 Flow-3D 模擬船舶航行於臺北港的興波特性研究

羅德壽 國立高雄海洋科技大學海軍資訊科技系 教授

何政瑋 交通部運輸研究所臺灣港術研究中心 研究員

廖慶生 交通部運輸研究所臺灣港術研究中心 副研究員

蘇良濤 國立高雄海洋科技大學航運技術系 副教授

顏仁仁 國立高雄海洋科技大學航運技術系 助理教授

## 摘要

本研究模擬船舶航行於臺北港所引發的興波效應，並計算船舶興波引發的水波震盪，波浪與堤岸作用所產生的反射波。首先，本文探討理想船模航行時波艏的興波夾角，得到的預測結果很接近文獻的預估值。再者利用電腦輔助設計工具來製作船模與港模，本研究設計模型有船模、港模與水深地形圖。船模有貨櫃船與拖船，港模則為臺北港模型，水深地形圖的製作是結合運輸研究所提供的水深地形資料，並結合 Google Earth 地圖上的精準空照圖繪製而成。解析船舶航行進入臺北港所引發的興波作用，本計畫的成員前往臺北港進行資料蒐集，拍攝一系列船舶進港與停泊靠岸的照片。藉由這些照片的輔助，我們模擬船舶進港停泊的過程可分為三階段：首先為拖船隨著大型船舶進港；再者當船舶到達停泊區，兩拖船協助船舶迴轉；最後為兩拖船協助船舶靠岸。這些過程引發的興波效應應用計算流體力學的技术加以模擬計算，產生的波高時序列分析於本文有詳加的探討。

## 一、前言

臺北港位於臺灣北端淡水河出海口南岸，為基隆國際商港之輔助港，船舶進出日趨大型化，其地理位置受風力、海流、波浪、潮差等海氣象環境之影響，對規劃為第六代貨櫃輪，可裝載 15,000TEU 之船型與 Cape-Size 級散貨輪，可裝載 150,000DWT 之船型，對船舶在港內因興波引起反射波的現象應予重視、探討、規劃因應。船舶進入臺北港停泊，過程中會有拖船協助安全停靠碼頭，以利裝卸貨物。而大型船舶體積大噸位重，於航行時會造成水體的擠壓，引發船舶航跡波，會有散射波與橫波等效性，造成非線性水波震盪，拖船在協助大型船舶停泊時亦會影響作業上的難度。此現象應仔細評估，作為未來港口擴建的相關依據。本研究擬模擬貨櫃船航行於臺北港與拖船於港內作業的情況，不考慮海氣象的因素(無風、無流、無入射波浪)，初步探討不同船型與船速，實際港口地形與堤岸結構物的材質，設計幾個實際船舶進港停泊與拖船在海上作業的案例，俾利了解船舶興波

的現象，作為未來加入海氣象等條件，以更符合現況。

## 二、數值方法

本研究以數值方法來模擬流場變化，並使用三維黏性模式模擬分析，數值方法採用 FLOW-3D 求解此流場的速度與壓力隨時間變化的情形。1963 年，美國國家實驗室 (Los Alamos National Laboratory, LANL) 的 Dr.C. W. Hirt 開創了幾個非常重要的流體動力學方法，如正交格網系統處理不規則邊界的技術、獨創的自由表面追蹤技術的流體體積法 (Volume of Fluid, VOF)。1980 年，Dr.Hirt 創辦了 Flow Science Inc.，Hirt 和 Nichols(1981)發表了流體體積法處理任意自由液面流動的問題，同時開發了新一代高精度的流體動力學模型，應用於工業和科學領域，在海運方面，使用 FLOW-3D 來模擬油輪貨載的晃動，也可模擬船舶耦合運動(Coupling motion)及船舶岸壁效應分析(Lo et al., 2009)、船舶對遇與追越交互作用(Lo, 2012)。1985 年，正式推出 FLOW-3D 流體分析軟體，可用於工程與科學的模擬，同時廣泛應用於工業鑄造與模流分析領域。其特有的體積分率法 (Fractional) 計算技術，能夠提供極為真實且詳盡的自由液面 (Free surface) 捕捉，如波浪與結構物交互作用，碎波模擬等。

本研究所探討之物理現象，實屬流體力學範疇，其所遵循之數學模式是利用 Navier-Stokes 方程式來求解，

但現今之解析法仍未能完全解析此偏微分方程式，FLOW-3D 的理論採用 Navier-Stokes 方程式來求解流場相關變數，可參考 Flow-3D® User Manual (2007)，其原理根據是依據質量守恆方程式、動量方程式以及能量不減方程式等，它可應用在各種科學與工程領域，廣為工業與學術上使用，下面即分項描述此數學模式的架構。

在古典力學中，物質體系所遵循的物理法則是「質量守恆」及「動量守恆」，對於三維不可壓縮黏性流體，本研究的控制方程式為連續方程式及動量方程式，同時並考慮船舶的運動與水波相互作用之影響。

數值方法處理自由液面 (Free Surface) 變化相當不容易，尤其是水波發生了碎波現象，因為自由表面非為固定而隨時間移動，而流體體積法 (Volume of Fluid, VOF) 提供了經由固定網格追蹤流體介面的方法，且能準確處理介面，換句話說，流體體積法是對自由表面或二種流體介面的一種數值處理方法。

流體體積法乃 Hirt 和 Nichols (1981) 二人所提倡，係將計算之網格點額外再定義一流體比例函數  $F(x,y,z,t)$ ， $F$  之位置與壓力變數相同，皆位於網格中心點，其值介於 0 和 1 之間，若  $F=1$  表示流體完全充填；若  $F=0$  為沒有流體；若  $F$  介於 0 和 1 之間表示部分充填，而部分充填的元素就是流體介面， $F$  函數值之控制方程式為：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \nabla(F\bar{u}A_f) = 0 \quad (1)$$

上式中  $V_f$  是體積比， $A_f$  是面積比， $\bar{u}$  是流速。

由於自由表面會隨時間而移動，因此每一網格之  $F$  值也跟著變化才能反映此表面之變動。目前大部分的 CFD 軟體，在自由液面運動的計算，多是根據此一方法進行開發。FLOW-3D 在自由液面的模擬更加完整，稱為擬真的流體體積法(TrueVOF)，可以使得網格建立容易、減少記憶體的使用量、減少電腦計算時間，也可以使得網格元素可以有效的適應一般的幾何形狀。

波浪反射可由入射波與堤岸結構物作用而產生反射波的現象，可由波高的時序列分析取得最大波高。入射的波浪傳遞至堤岸，遭遇堤岸阻擋，則產生波浪反射(wave reflection)，若波浪為全反射，則反射波浪的行進方向和原來前進的方向相反。船舶航行於臺北港，拖船會拖帶貨櫃船進港，由於船舶龐大的體積與維持在 3 至 6 節的航速，會興起波浪並與堤岸作用，產生反射波，過大的反射波會影響拖船引領貨櫃船進港，增加船舶安全進港的難度，反射現象可由波高的時序列估算，流場與壓力場的變化加以探討。在許編著的近岸動力學(2003)一書對波浪反射現象有詳加說明。另外需依照港內孔隙結構物設置加入模式中，以更符合實際情況。在方等人(2007)、邱等人(2012)皆詳加討論各種孔隙結構

物的消能情況。

### 三、模式驗證

根據計畫目標，首先驗證完成船舶航行時興波夾角之比對，同時前往臺北港實地訪查船舶進港與停靠堤岸邊的流程。然後依照訪查的結果建製船模與港模，包含兩艘拖船，一艘貨櫃船，以及臺北港模型，模型比例尺皆為 1:1。

本文模試驗證的案例為船舶航行時 Kelvin 興波的契型角度分析比對，計算區域長為 150m，寬為 50m，水深 5m，如圖 1 表示船舶航行於寬闊水域的示意圖。假設一理想船模船長 10m，船寬 2m，水深固定為 5m，改變船速，由福祿數的公式( $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ )，可求得不同流況的福祿數值。本文由低福祿數模擬到高福祿數值，如圖 2 顯示結果與理論值吻合。 $x$  方向表示福祿數， $y$  軸表示船舶興波所得到 Kelvin 契型角度的一半。根據 Tarmo-Soomere(2007)文獻有詳細解說不同福祿數值對興波夾角的影響。本次模擬一理想船模於寬闊水域航行，設定船艏處邊界為速度邊界條件作為補水來源，其餘三面為出流邊界條件，底床部分為固體無滑動邊界條件。水深固定設為 5m，船舶則依福祿數的定義給定航速。

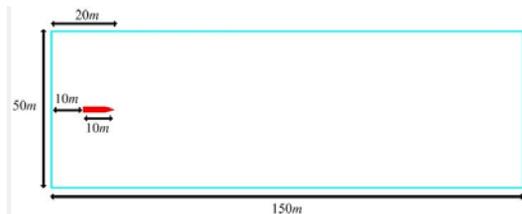


圖 1 船模航行於寬闊水域的示意圖

船舶航行於開闊的水域，由於船艏高壓區作用，使其船艏前部的水被擠壓推送向前，在船舶航跡形成尖波、發散波和橫波，此波形圖由 Lord Kelvin (1976) 提出稱為 Kelvin 船跡波形圖， $\alpha$  表示 Kelvin 契型波夾角的一半，此艏波向兩側發散與中央線成  $19.28^\circ$  之夾角。Kelvin 船跡是由船體對水面的擾動直接產生的表面波尾跡的一種，波常相對較長，半張角為  $19.28^\circ$ ，通常其一臂微亮或暗線或看不見 (Hennings et al., 1999)。圖 2 為福祿數與 Kelvin 波夾角(船艏興波夾角的一半)之驗證圖。當低福祿數時，興波夾角會接近  $19.28^\circ$ ，隨著福祿數增加至臨界流況( $Fr=1$ )，其角度趨近於  $90^\circ$ ，當福祿數超過 1 時，則興波夾角將有所減少，當高福祿數流況，其興波夾角又會趨近於  $19.28^\circ$ 。如圖 3 表示船舶興波所引發的發散波與橫波，此現象可視為一移動點源的壓力分佈產生一系列波峰的變化，包含了發散波與橫向波。由圖可知，在船後面有傳播方向與航向平行的橫波及往船左右方向傳播的發散波。Kelvin 尾跡波屬於長重力波，尾跡表面起伏的最大區域位於航線兩側  $16^\circ \sim 19.5^\circ$  的角度範圍內。其後 Havelock (1908) 又發現淺水效應會使航行船舶所造成之艏波夾角變大，理論上水深減小  $Fr=0.99$  時，其夾角會增到  $78^\circ$ 。Tarmo-Soomere (2007) 針對船舶興波產生的非線性效應有詳細的文獻回顧。

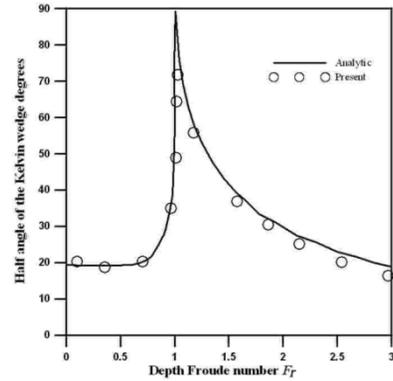


圖 2 不同福祿數對應到的 Kelvin 波夾角之驗證圖

基本上興波的大小與船舶大小噸位有關，大船其排開水體的體積愈大；可觀察波高的時間序列分析，船速愈快對水體的擾動愈大，其興波效應愈明顯；船舶航行於淺水區，由於船底與水底間之問隙減少，通過船體與船底之水流量被限制，水流會加速至船側流過，而船舶四周與水底水壓均降低，會使船體下沉量增大，結果興波效應也會大增。船舶在淺水航行時艏波之夾角會漸漸增大，會增加興波效應。本驗證採用理想船模於 FLOW-3D 進行模擬，計算網格數為 200 萬，使用通用的移動物體 (General Moving Object, GMO) 隱性解 (implicit) 模式 (Wei, 2006)，模擬時間為 20 秒。圖 4 為  $Fr=0.4$  時，興波船艏波角 (Kelvin 波夾角的兩倍) 為  $39.28^\circ$ 、圖 5 為  $Fr=0.5$  時，夾角為  $40.36^\circ$ 、圖 6 為  $Fr=0.6$  時，夾角為  $44.48^\circ$ 。基本上在較小的亞臨界流況時船艏夾角較少，在  $Fr$  介於 0.6 至 1 時，此時興波波艏夾角變化劇烈，理論上於臨界流況 ( $Fr=1$ ) 波艏夾角為  $180^\circ$ 。

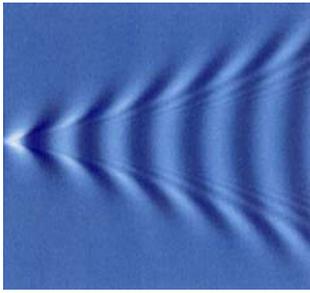


圖 3 Kelvin 波是由尖波、散射波與橫波所組成

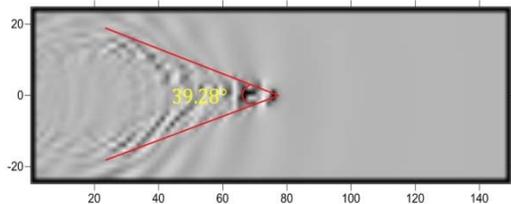


圖 4 船模於  $Fr=0.4$  時所造成之興波夾角

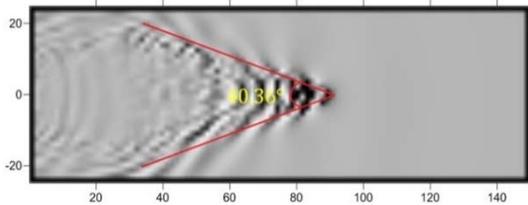


圖 5 船模於  $Fr=0.5$  時所造成之興波夾角

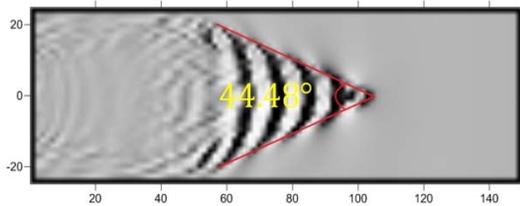


圖 6 船模於  $Fr=0.6$  時所造成之興波夾角

#### 四、模型建置與興波模擬之分析

為了使計畫成效更加完備，研究團隊至臺北港收集船舶進港停泊資料。先前往臺北港船舶交通服務中心詢問船舶進出港的情況，並觀看當時船舶進出臺北港的船跡動態，並取得船舶進港的船跡圖。

#### 4.1 船模建置

本文以 Autodesk 3Ds Max 軟體繪製船模，繪製的船模為拖船 A、拖船 B、貨櫃船。拖船 A、拖船 B、貨櫃船性如表 1：

表 1 船體特性

	拖船 A	拖船 B	貨櫃船
船長	29.5 m	26.5 m	300 m
船寬	11 m	8 m	42.8 m
吃水	3.2 m	2.8 m	14.2 m

##### (一) 拖船模型繪製

拖船 A 模型繪製過程如下：

拖船 A 船體模型可分成三大部分來建構，分別為船底(下半部)、船身(上半部)與船身配備等部分來建造船體模型，完成後的實體船模圖如圖 7。

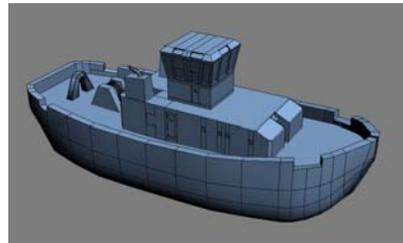


圖 7 拖船 A 船模完成

拖船 B 模型繪製過程如下：

首先匯入船拖結構圖，再將拖船分成三大部分來建構，分別為船底部、船身與船身配備等部分來建造船體模型，完成後的實體船模圖如圖 8。



圖 8 拖船 B 船模完成

## (二) 貨櫃船模型繪製

貨櫃船船型部分依照拖船的繪製作法建造出來，之後在加上貨櫃配備，就能完成貨櫃船船模繪製如圖 9。

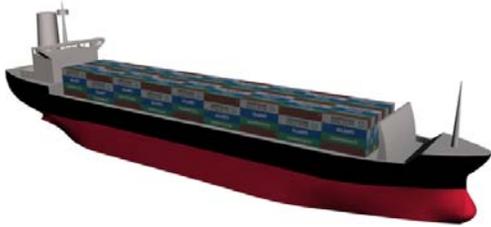


圖 9 貨櫃船船模

## 4.2 港口模型建置

本研究的港口為臺北港，故須建製臺北港的港模。首先於 Google Earth 軟體中截取港口的形狀與影像，為了讓港口模型的形狀更精準，在截取影像時，視角海拔高度需調整到 2 公里內，以得到解析度更高的影像。將整個港口的影像範圍一部分截取出來，再以影像處理軟體加以修正，並把修正後的影像合併成一張高解析度的圖檔，如圖 10 所示。



圖 10 高解析度圖檔

將高解析度圖檔匯入 3Ds Max 軟體，使用 3Ds Max 描繪港口輪廓。當港口輪廓繪製完畢，就可以將港口模

型使用 3Ds Max 的擠出功能，讓港口模型增加高度，臺北港的港口模型就建置完成了。

## (一) 利用 GIS 轉出數據化的地形

臺北港地形的製作方法與步驟，首先利用本所的水深地形資料，將水深測量資料與圖檔，匯入地理資訊系統 (Geographic Information System)，方便製作高程水深模型檔。利用一等水深裡面的 1/20000 的 dwg 資料檔案匯入 GIS 裡面後。為了要製作臺北港地形 3D 模型，所以將後面的比例網格功能關閉避免在製作等高線圖時，系統將後面的網格也算進去。

接續利用 GIS 系統中的指令介面將所有點裡面的高度進行內差計算。而 GIS 產生模型高度所出現的高度色塊分佈圖層。套用之前步驟的高度色塊分佈圖利用指令介面，轉換成等高線圖。在 GIS 裡面經由等高線圖層做最後一次高度轉換，之後 GIS 會建立出高度色差圖層。最後再利用 GIS 裡面的指令給予高度勾選，讓圖層裡面的地形高度數據開啟之後，顯示出該地方的深度與高度。最後將檔案轉存成 WRL 檔案格式，將檔案匯入 Maya 與 3Ds Max 等 3D 繪圖軟體進行與港口模型結合的步驟。

## (二) 利用 3D 軟體製作受測模型

將 GIS 轉出的 WRL 檔匯入 3D 製圖軟體，製作成 3D 立體水深高程模型線稿，並且實體化後。再將水深高程模型與港口碼頭模型的中心點與中心點的對位將高度與港口的方位完整重

疊，以讓港口模型與地形模型符合實際位置，並且些許切割進行受測區域的縮小，製作出圖形。為了節省實驗運算時間與高度複雜的面數運算處理，故將模型範圍切割至受測區域，如圖 11。這樣的切割做法在檔案匯入 FLOW-3D 進行模擬實驗時，可以避免在進行網格切割時造成模型破碎，也可減少實驗時部分未受測區域的運算。

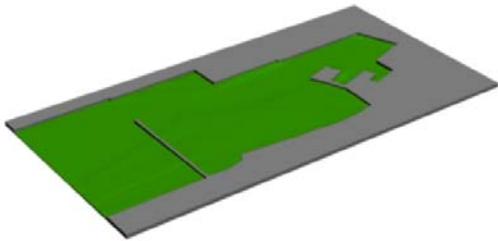


圖 11 臺北港水深高程模型受測區域

## 五、船舶航行於臺北港之模擬與分析

大型船舶於臺北港進出港時，除了避讓其他船舶外，在進出港口時，是全船人員最謹慎小心的時刻，因港內與港外的風、海流等自然環境會改變船舶運動，在此時船舶航行安全也大大增加其危險性(2011，林晉璋)。因此船舶進出港其安全性極為重要，應加以重視。本研究擬模擬拖船協助大型船舶進泊的興波效應分析，我們依照船舶進港到停泊的路徑，分三步驟完成模擬。(1)針對大型船舶進港，拖船會隨行在側或在後航行，探討大型船舶航行過程的興波效應，並評估對兩拖船造成的影響 (2)拖船協助大型船舶停泊，大型船舶兩側各一艘拖船協

助轉向 (3)當大型船舶轉向達一定角度時，拖船暫停頂船動作，拖船繞至大型船舶外側拖船再次向大型船頂船，準備靠泊。船舶在靠泊的過程，會擠壓水體、興起波浪向堤岸作用，造成水面震盪，會增加拖船作業的難度。本節探討大型船舶進泊停靠的過程，並考量拖船協助船舶靠泊的過程作完整的分析與討論。

本章節為模擬貨櫃船於臺北港模擬進港與拖船協助大型船舶進出港情形。本章節的模擬案例有貨櫃船進港時，拖船於貨櫃船兩側協助進港所產生的興波情形、拖船輔助貨櫃船進行轉向、拖船輔助貨櫃船靠岸停泊、拖船於港內快速迴旋等案例。影響船舶航行於臺北港的因素很多，包含水道的寬度、堤岸結構物材質、船舶與船岸距離、船速、船與船間的間距、地形與水深、風與水流的影響。本文針對不同船型、船速、堤岸孔隙等參數進行模擬，堤岸孔隙位置如圖 12 所示，本研究依照實際堤岸孔隙的條件下，匯入軟體進行設定。模擬的過程中於港內設置觀測點，這些觀測點位置如圖 13 所示，當船舶航行於臺北港，因船體排水體積大，因船舶航行進港，勢必興起波浪，當船速愈快時，其興波效應愈明顯，為了解析這些現象，可由港內固定觀測點測得的波高時序列分析而得之。



圖 12 臺北港現有碼頭結構型式及反射率

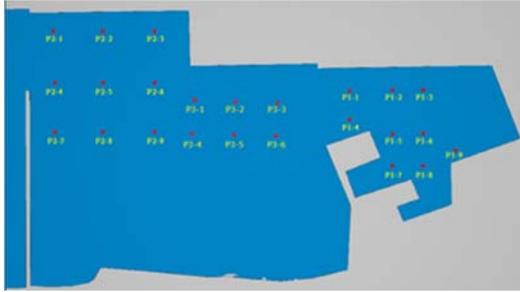


圖 13 船舶航行於臺北港之興波效應觀測點

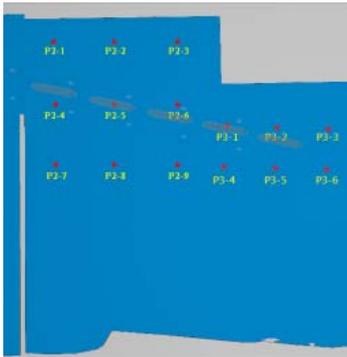


圖 14 拖船輔助貨櫃船進入臺北港航行軌跡示意圖

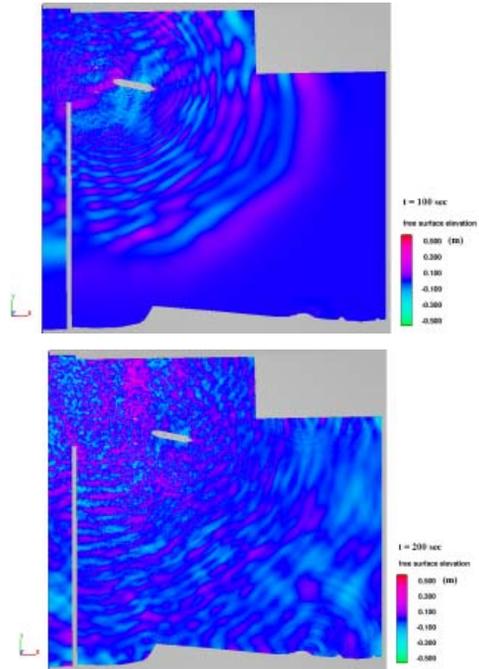


圖 15 拖船輔助貨櫃船進入臺北港，自由液面高度圖

## 5.1 拖船輔助貨櫃船進入臺北港

本節模擬案例有拖船於臺北港內輔助貨櫃船進港，討論船舶沿固定航線航行之興波效應。圖 14 表示拖船輔助貨櫃船進入臺北港航行軌跡圖，模擬條件為貨櫃船依固定航向航行，航行速度為 5 節，模擬時間為 600 秒。圖 15 表示拖船輔助貨櫃船進入臺北港，自由液面高度變化圖，因貨櫃船船體龐大，在進入臺北港時，產生明顯的艏跡波。圖 16 為本次模擬於港內不同觀測點所造成的水面波動之時間序列分析，由這些觀測點觀察到當貨櫃船進入臺北港後，個別觀測點的波高時間序列變化。

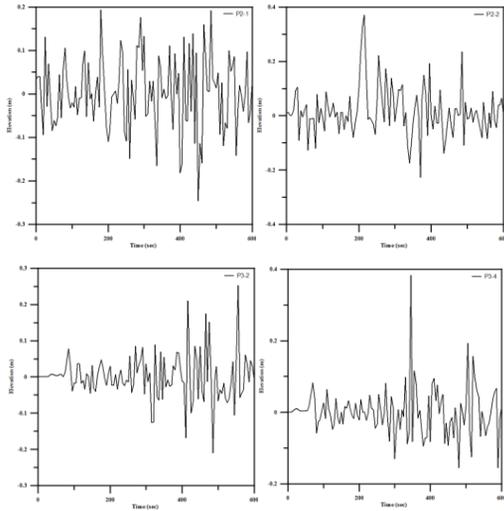


圖 16 拖船輔助貨櫃船進入臺北港，不同觀測點與波變化比較圖

## 5.2 拖船輔助貨櫃船進行船體轉向

本節模擬案例為拖船於臺北港內輔助貨櫃船進行船舶迴轉調頭，模擬的方式是根據臺北港現場船舶船艙轉向設定。圖 17 表示拖船輔助貨櫃船進行船體轉向航行軌跡示意圖，模擬時間為 157 秒，船舶轉向速度為  $V_0 = 0.02 \text{ rad/s}$ ，也就是在模擬總時間內，船舶的迴轉角度為 180 度，亦即船艙船艙位置互換。如圖 18 所示此時液面高度變化更為劇烈，液面變化上下起伏，海水朝向船舶迴轉區域四面八方散射出，波高正負交替，傳遞至堤岸。圖 19 為拖船輔助貨櫃船以角速度  $V_0 = 0.02 \text{ rad/s}$  進行船體轉向操作時，並於不同觀測點測得的海水液面波動圖。模擬結果顯示拖船輔助貨櫃船進行船體轉向時，轉向的轉速快慢對港內與波產生很大的影響。

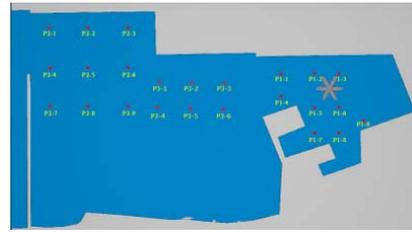


圖 17 拖船輔助貨櫃船進行船體轉向航行軌跡示意圖

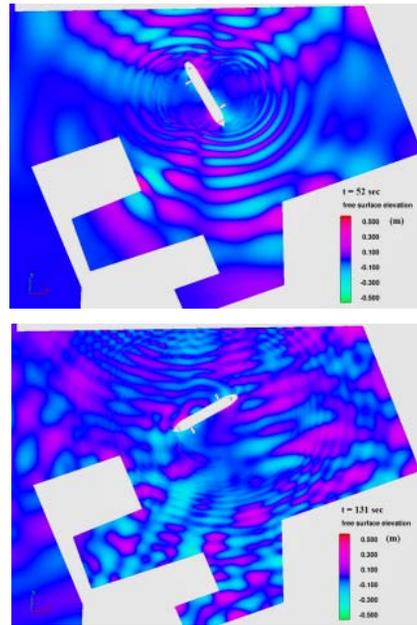


圖 18 拖船輔助貨櫃船進行船體轉向，角速度為  $V_0 = 0.02 \text{ rad/s}$ ，自由液面高度圖

## 5.3 拖船輔助貨櫃船進行靠岸停泊

本節模擬案例為拖船於臺北港內輔助貨櫃船進行船舶靠岸停泊。兩艘拖船於貨櫃船的側身，進行頂船動作，以協助貨櫃船停泊。圖 20 表示拖船輔助貨櫃船進行靠岸停泊航行軌跡示意圖，模擬時間為 829 秒，模擬推進速度為 0.75 節 (0.386 m/s)。模擬情形如圖 21 所示，表示液面變化圖，隨著推進速度增加其海面波動與速度場變化更形劇烈。圖 22 表示在不同觀測點所造成的海面波動圖。此案例顯示拖船推進

貨櫃船速前進的速度愈慢，所造成的興波越小，且當貨櫃船愈靠近堤岸，與堤岸作用所造成的興波越明顯，因船舶靠岸所產生的興波與堤岸作用，並反射到其他觀測點的位置，因此其他觀測點也隨著船舶的靠岸產生震盪。基本上船速推進的速度較快，其興波效應域明顯，引發劇烈水波震盪，船舶附近的海面其波高皆有明顯的起伏變化。

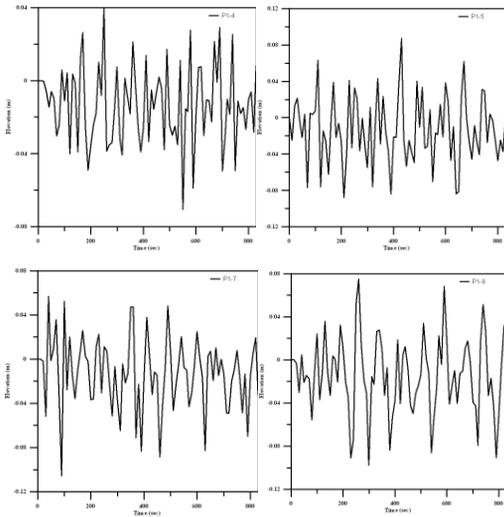


圖 22 拖船輔助貨櫃船進行靠岸，速度為 0.75 節，不同觀測點興波變化比較圖

## 六、結論

本研究使用電腦輔助設計工具來製作 3D 船舶、港灣邊界、海底地形，並依照實際地形與模型進行 1:1 比例尺建製，同時將船模與地形匯入 FLOW-3D 軟體進行模擬分析，可節省水工模型試驗所需龐大的經費與時間。

本研究模擬拖船輔助貨櫃船進入臺北港時，因貨櫃船船體龐大，故在進入臺北港時，產生明顯的艏跡波，進港時所造成的興波對堤岸有很大的

影響。模擬拖船輔助貨櫃船進行轉向時，因角速度設定為兩種不同角速度 ( $V_0 = 0.01 \text{ rad/s}$  與  $V_0 = 0.02 \text{ rad/s}$ )，轉速較高所造成的興波較轉速小的興波大，為了港內航行安全，故應以低轉速來進行迴轉，安全性較高。迴船時間冗長並非常態，除不符合經濟效益外，船舶長時間依據迴船池將影響其他船舶進出，亦自限於危險當中太久，意外事故機率升高。若欲縮短迴船泊靠時間之唯一方法是增加港勤拖船馬力及艘數。模擬拖船輔助貨櫃船靠岸時，因與堤岸的距離逐漸減少，故船舶靠岸造成的興波越來越激烈。在模擬不同航速進行靠岸時，航速越高，造成的興波劇烈增加。拖船於臺北港進行固定航向之航行與迴旋等模擬中，可觀察到在固定航向之模擬中，在第一迴船池與第二迴船池航行時，因船舶在第二迴船池航行時較接近堤岸，且堤岸無孔隙結構物消除部分波能，故發生較大的波高震盪。拖船於港內進行迴旋航行中，在船速 5 節及 10 節所造成的興波對堤岸的影響相當小。

由結果顯示，興波的大小與船舶航速快慢有關，航速快的興波較航速慢的大；由波高的時間序列分析，船速愈快對水體的擾動愈大，其興波效應愈明顯；船舶航行於淺水區，由於船底與水底間之間隙減少，通過船體與船底之水流量被限制，水流會加速至船側流過，而船舶四周與水底水壓均降低，會使船體下沉量增大，結果興波效應也會大增，故在港內船速宜

慢速行駛，尤其是大型船舶應格外小心。

未來可考慮臺北港海氣象因素(交通部運輸研究所，2011)，加入波浪入射至港內的因素，同時計算船舶航行於港內興波，以更符合實境情況。

## 參考文獻

1. Flow-3D® User Manual(2007), Flow Science Inc.
2. Havelock T. H. (1908), The Propagation of Groups of Waves in Dispersive Media, With Application to Waves on Water Produced by a Travelling Distance, Proc. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 81, pp. 398–430.
3. Hirt C. W. and Nichols B. D. (1981), Volume of Fluid (VOF) Method for Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol. 39, pp.201-225.
4. Henning I. (1999), Radar imaging of Kelvin arms of ship wakes, International Journal of Remote Sensing, Vol. 20(13), pp. 2519-2543.
5. Lo D. C., Su Dong-Taur and Chen Jan-Ming (2009), Application of Computational Fluid Dynamics Simulations to the Analysis of Bank Effects in Restricted Waters, Journal of Navigation, Volume 62, pp 477-491
6. Lo, D. C. (2012), Numerical simulation of hydrodynamic interaction produced during the overtaking and the head-on encounter process of two ships, Engineering Computations, Vol. 29, pp. 83-101.
7. Tarmo-Soomere (2007), Nonlinear Components of Ship Wake Waves, Applied Mechanics Reviews: Transactions of the ASME, Vol.60, pp. 120-138.
8. Thomson W. (Lord Kelvin) (1976), On Ship Waves, Trans. Inst. Mech. Eng.,8, pp. 409 – 433.
9. Wei Gengsheng (2006), An Implicit Method to Solve Problems of Rigid Body Motion Coupled with Fluid Flow, Flow Science Inc.
10. 方惠民，蕭松山，張武安，林雅婷 (2007)，多孔隙岸壁結構波能消散特性探討之研究，第 29 屆海洋工程研討會論文集，國立成功大學。
11. 交通部運輸研究所(2011)，臺灣海氣象地象觀測資料年報，臺北。
12. 林晉璋(2011)，計算流體力學建立流壓係數表-應用於船舶進港安全之評估模式，國立臺灣海洋大學，2011。
13. 邱永芳，林炤圭，何良勝，蔡金吉 (2012)，消能式結構物應用於臺灣港灣設施保全之研究，交通部運輸研究所。
14. 許泰文 (2003)，近岸動力學，中國土木水利工程學會。
15. 蕭松山，方惠民，林建明 (2005)，多孔隙浮碼頭及岸壁之港池水面波動探討，第二十七屆海洋工程研討會論文集，國立中山大學。

# 臺北港平面流況分佈特性研究

蕭松山 國立臺灣海洋大學河海工程學系 教授  
方惠民 國立臺灣海洋大學河海工程學系 助理研究員  
王星宇 國立臺灣海洋大學河海工程學系博士班 研究生  
何良勝 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 科長  
徐如娟 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

## 摘要

海域之水流分佈特性主要係受潮汐漲退變化及局部地形效應所影響，因此為瞭解海流在時間及空間上的分佈特性，必須進行海域現場流況觀測分析。本研究基於考量對船舶進出港口之航行安全，必須有效掌握港口航道水域平面流況分佈特性，遂藉由分析民國 94 年至民國 97 年間及 102 年，應用漂流浮標追蹤法及配合浮標流況追蹤時程所同步進行潮汐、水下定點流及陸域風速風向等觀測資料進行彙整與分析。經分析探討所得之觀測資料，除可瞭解海岸地形改變對區域流場特性的影響，亦可提供未來臺北港後續分析工程建設運用及研擬海岸地形變遷保護對策之依據。

## 一、前言

港埠乃為海域工程開發的基地，海陸運輸的樞紐。港埠工程建設主要服務對象為船舶，基於船舶通航服務的前提，如何提供船舶操船、港區水域航行及繫靠作業安全係港埠工程規

劃設計目標。海流在近岸地區的分佈特性主要受地形效應影響。本研究為瞭解臺北港附近水域近岸流況分佈特性，乃藉由蒐集民國 94 年至 97 年間及 102 年，應用漂流浮標追蹤法觀測所得之資料，探討臺北港港口海域附近之表面流況分佈特性。相關分析結果期可提供作為操船進港及後續工程用途之參考背景資料。近年來近岸流場觀測作業方法之發展，主要應用漂流浮標追蹤法進行觀測。定位方式則由工作船接近浮標以手持式 GPS 進行定位，據之繪製運動軌跡及計算流速流向。由於利用工作船接近浮標定位難以避免干擾其附近之表面流況，且在定位取樣頻率受限制情況下，恐無法完整描述浮球運動軌跡呈現的水流特性。緣之發展 GPS 浮標定位系統於海域流況觀測作業，如許及曾(1996)應用 APGOS/GPS 浮標觀測探討高雄港附近海域平面流況及擴散特性。邱等(1997)研發裝載 GPS 衛星定位儀之漂浮式流速定位系統，首先於陸上完成漂浮球定位系統測試，觀測成果證明可用於近岸平面流場觀測作業。吳(1999)基於

邱(1997)等之研究成果，改良定位系統，有效應用 DGPS(Differential Global Positioning System)平面流場量測系統於台灣西部海岸近岸流場的觀測作業。

以及，為有效探討風場效應對於觀測流況時的影響，利用陸域風速風向測站進行季節性風場觀測。王等(2005)探討風驅流對海域流況的影響，結果得知台灣北、東及中部區域近岸海域流場受冬季強勁東北季風的影響，風驅流對觀測流速的影響約為實際流速的 3~7%。宋(2007)分別於台北港海域與鹽寮海域進行定點流、漂流浮標及風場之觀測作業，透過三者之觀測結果進行比對分析，結果得知區域風場之風速 3m/s 以下時，水流受風場效應影響之流速值低於 20cm/s。

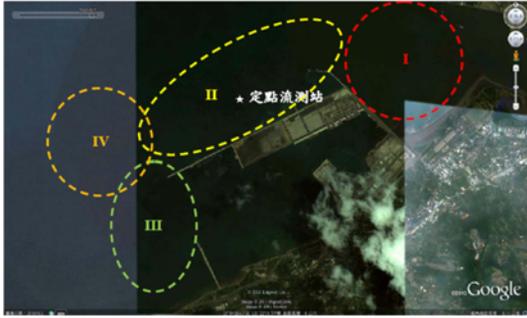
嗣後，欲探討臺北港海域附近平面流況之分佈特性，遂進行海域平面流況、水下定點流況及觀測海域附近風速風向資料等資料分析，進而歸納及掌握其分佈特性。劉(2008)以臺北港港口附近現場量測的潮位、海流及風場等資料進行分析，並配合二維水動力數值模式來探討臺北港海域流場之潮汐及海流特性。吳等(2010)亦以 1997-2009 年間所蒐集之臺北港外海現場觀測風、波、流等實測資料進行統計分析，探討臺北港海域之海氣象長期變化現象。

## 二、研究範圍及內容

### 2.1 研究區劃

近岸海域水流特性，主要反應了

潮波運動受局部地形效應的影響結果。流場觀測為能掌握區域流況的時空分佈特性及其影響測區海域流況特性的環境因素。本研究基於考量對船舶進出港口之航行安全，必須有效掌握港口航道水域流況分佈特性，遂藉由彙整及分析民國 94 年至 97 年間，利用海上漂流浮標追蹤法，及配合平面流況觀測時程所同步進行港內潮汐水位及陸域風速風向觀測等臺北港海域附近海域平面流況資料，進行分析其平面流況分佈特性。由於本研究係為探討臺北港建港時期，造成臺北港附近海域地形變化所引致之流況分佈特性，遂將臺北港測區海域概分如圖 1 所示之四個測區進行分析作業。其中測區 I 位於淡水河口海域；測區 II 北起北外堤沿著外廓防波堤堤線以迄港口堤頭，西迄 20m 等深線間海域；測區 III 及測區 IV 則分別為港口海域及外廓防波堤堤頭西側海域。迄今，臺北港之北外廓防波堤，已續建至如圖 2 所示。故為有效探討臺北港海域附近因建設工程所改變之流況分佈特性，遂於 102 年規劃如圖 3 所示之三個測區。其中，測區一大抵與歷年之測區 I 位置相符；測區二則係考量北外堤延伸後之變化，遂將歷年之測區 II 向外海處變動，以避免現場海域流況觀測作業受結構物影響；測區三係將歷年之測區 III 及測區 IV 結合，以利完整呈現港口海域暨南外堤附近之海域流況分佈特性。



資料來源：Google Earth(2010)

圖 1 民國 94 至 97 年間現場觀測區劃圖



資料來源：Google Earth(2013)

圖 2 臺北港海域附近現況圖



資料來源：Google Earth(2013)

圖 3 現今臺北港流況觀測區劃示意圖

## 2.2 研究內容

### 1. 表面流況觀測

表面流況觀測主要係將裝置有差分式全球定位系統(DGPS)的漂流浮標佈放於觀測海域，任其隨潮汐水流運動，以 1/3 Hz 取樣頻率紀錄漂流浮標的時間及空間座標資料，並利用浮球內部的資料儲存系統(IPC)自動存取座

標資料，可據之分析表面流況時空分佈特性。本研究表面流況所蒐集之資料系統架構及使用儀器圖如圖 4 及圖 5 所示，利用船筏將漂流浮標系統載至預先規劃測區海域拋放，漂流浮標動向隨潮汐水位漲退運動行進，紀錄水流在時間及空間上的變化情形。施放點以觀測海域之潮流狀況及規劃區域要求所選定，佈放期間除測區海域有海上障礙物(漁網、船舶)或者漂流浮標流出測區範圍，才需要回收漂流浮標重新進行佈放作業。表面流資料需涵括整個規劃區域，呈現該海域內實際表面流況，結果方能據以分析此測區水流特性與潮汐運動特性的關聯性。

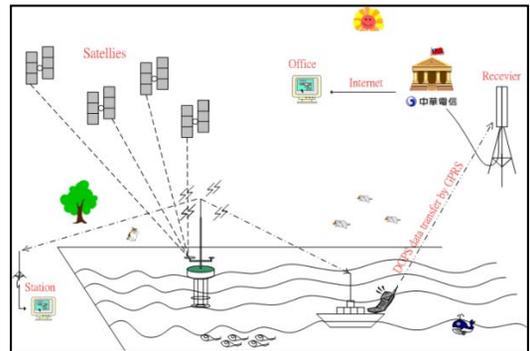


圖 4 表面流況觀測系統架構圖

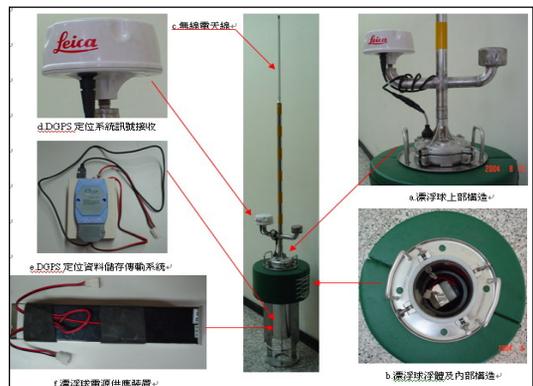


圖 5 表面流況觀測漂流浮標裝置示意圖

## 2. 水下定點流況觀測

本研究流況觀測主要係以繫留式定點水流觀測方式進行定點水流特性觀測，即是將流速儀以鋼索連接浮球、釋放器及底碇壓重之架構方式，將流速儀佈設於水下定點水深處進行水流特性觀測。流速儀佈放期間以每 10 分鐘紀錄一筆平均定點水流資料，且觀測時間配合漲退潮潮時段(連續 6 小時)，以水下 3m 繫留流速儀方式進行流況觀測，底部則利用鐵塊或鉛塊錨碇於海底，防止其受到海流作用力推移，水面則以漂浮球標示位置，以利流速儀回收及避免影響海上船舶航行安全，水下定點水流觀測儀器及佈設架構如圖 6 至 7 所示。

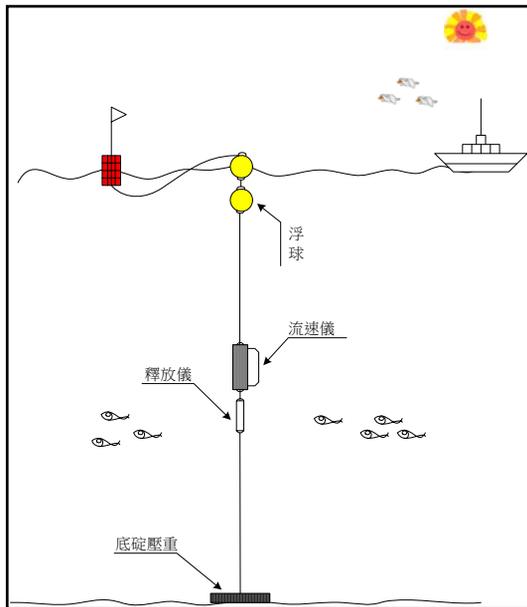


圖 6 水下定點流況觀測儀器裝置示意圖



圖 7 聲波式都普勒流速儀

## 3. 風速風向及潮位觀測

基於後續海域表面流況分佈特性分析，風趨流效應分離之需，本研究海域附近區域風場特性資料蒐集，係採用圖 8 所示美國 Young 公司所製造的 CR510 型風速風向計進行風速風向觀測，並以離地面高度約 10~15m，每 6 分鐘紀錄一筆風速風向資料的頻率進行資料蒐集。潮汐水位測站則設置於臺北港港內相對穩靜之水域，並採用圖 9 所示 Sea-Bird SBE 39 壓力式自計溫深儀，以 6 分鐘紀錄一筆潮汐水位及溫度資料的頻率進行資料蒐集，整體研究內容則如圖 10 所示。



圖 8 Young 風速風向計



圖 9 Sea-Bird 壓力式自計溫深儀



圖 10 海域平面流況觀測作業情形

#### 4. 數值模擬方法

Berkhoff(1972)提出緩坡波動方程式後，Radder(1979)曾將其作拋物線近似變形，將邊界問題轉變成初值問題。隨後 Booij(1981)將可變流效應加入緩坡波動方程式中，Kirby(1984)則進一步運用不對稱型態動力。自由表面邊界條件改善 Booij 的方程式。本研究平面波場之計算則採用 Kirby 含水流效應之緩坡波動方程式，此方程式如下：

$$\frac{D^2 \varphi}{Dt^2} + (\nabla \cdot \bar{u}) \frac{D\varphi}{Dt} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \varphi) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \varphi = 0$$

##### (1) 控制方程式及其變形

在非旋性、單一頻率線性表面波

假設下其波勢函數可表示如下：

$$\varphi(\bar{x}, \bar{y}, z, t) = f(a, h) \varphi(\bar{x}, \bar{y}, t)$$

針對波浪在單一週期性上之調和運動(harmonic-motion)式可改寫如下：

$$\varphi(x, y, t) = \text{Re} \{ a e^{is} e^{-i\omega t} \}$$

##### (2) 碎波條件

碎波帶內發生碎波的最小波高，Horikawa & Kuo (1966); Ebersole (1987)：

$$H_s = 0.42h_B$$

波高產生碎波的極限，

McCowan(1891)：

$$H_B = 0.78h_B$$

碎波帶內波高值，Weggel(1972)：

$$H_B = \frac{ah_B}{1 + (bh_B/gT^2)}$$

##### (3) 邊界條件

平面波場在進行數值計算時，採用之邊界條件有：波向角依 Snell's Law 近似求得：

$$\frac{\sin \theta}{C} = \frac{\sin \theta_0}{C_0} \rightarrow \theta = \pi - \sin^{-1} \left[ \frac{\sin(\theta_0 - \theta_c)}{C_0/C} \right] + \theta_c$$

其中，下標 0 表示外海入射值， $\theta_c$  為海岸線與 y 軸之夾角(逆時針為正)，並結合波高折射及淺化公式，求邊界上波高之變化，而：

$$H_{b,c} = H_0 \left\{ \sqrt{\frac{1C_0}{2C_g}} \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}} \right\}$$

另，針對流場計算模式需考量波浪作用力、潮汐水位變化、風、地球自轉柯氏力及海底底床摩擦等因素，其主要控制流場之連續方程式及動量方程式如下：

連續方程式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [U(h+\eta)] + \frac{\partial}{\partial y} [V(h+\eta)] = 0$$

動量方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = fV - g \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho(h+\eta)} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) \\ - \frac{1}{\rho(h+\eta)} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = fV - g \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho(h+\eta)} (\tau_{sy} - \tau_{by}) \\ - \frac{1}{\rho(h+\eta)} \left( \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

由於本模式中所包含因地形變化所產生之折射、淺化、區域風場、底床能量損失及碎波效應等條件，藉由考慮潮流與風所造成的水位變化，亦能為計算波浪的幅射應力來做為流場計算的一部分。

### 三、區域流況特性分析討論

為有效探討臺北港海域附近流況分佈特性，本研究除針對102年於現場所觀測之資料進行比對分析外，亦彙整民國94至97年間，以表1所示臺北港建港時期所觀測之現場資料進行討論。

表1 歷年各測區表面流況觀測時程表

年度	94		95	
測期	1	2	1	2
測區一	-	-	-	09/22
測區二	06/06	08/22	06/12	-

		11/03		
測區三	07/07	-	07/12	11/06
年度	96		97	
測期	1	2	1	2
測區一	-	09/11	-	-
測區二	06/16	-	09/02	-
測區三	07/26	10/28	-	10/14
年度	102			
測期	1	2	3	
測區一	-	-	04/09	
測區二	06/10	-	-	
測區三	-	10/08	-	

### 3.1 風速風向分佈特性

本研究分將夏季測期、秋季測期及冬季測期之風速風向資料以漲退潮時區分，並繪製如圖11至圖13所示之風速風向玫瑰圖，其中夏季測期漲潮時段區域風速以2.0~3.0 m/s間為主，最多風向則為NNE向，退潮時段區域風速約介於2.0~3.0 m/s間為多，風向分佈以SSW向最多，其次為SW向；秋季測期之漲潮時段區域風速以介於3.0~4.0 m/s間為多，最多風向以E向為主，其次為NNE向，退潮時段區域風速大抵與漲潮時段相符，約介於3.0~4.0 m/s之間，其中風向分佈大抵集中於NE~E向間；冬季測期之漲潮時段區域風速以3.5~4.0 m/s間為主，最多風向則為NNE向，退潮時段區域風速約介於5.6~6.0 m/s間為多，風向主要NE向。將近岸海域風速風向觀測資料與民國94~102年間臺北港海上觀測樁所紀錄之風速風向資料，呈現大致相同的趨勢。其中現場觀測期間之夏季風向多變且風速變化差異性較大，如民國94年6月於現場觀測所得之平均

風速約為 9.14 m/s，較餘同測期(夏季)之平均風速差異較大。

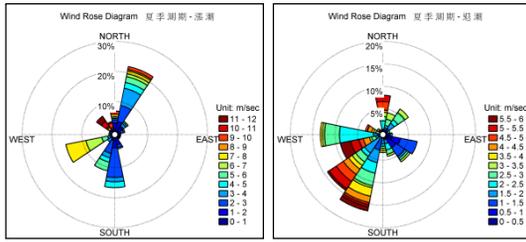


圖 11 夏季測期風速風向玫瑰圖

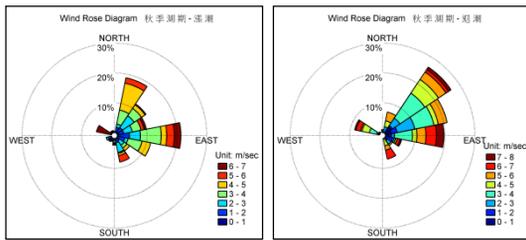


圖 12 秋季測期風速風向玫瑰圖

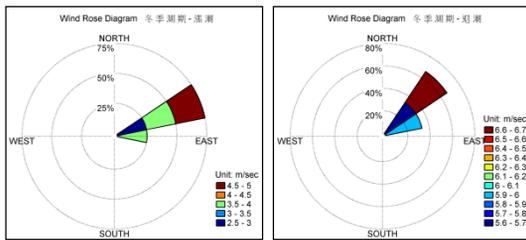


圖 13 冬季測期風速風向玫瑰圖

### 3.2 定點流況分佈特性

本研究根據民國 94~97 年及 102 年度於臺北港外廓防波堤外約 20 m 等深線水域附近之定點流測站觀測資料以漲退潮時區分後統計分析如圖 14 至圖 16 之流速流向玫瑰圖顯示，夏季測期漲潮時段之平均定點流速約介於 0.28~0.44 m/s 間，流向分佈大抵介於 SW~WSW 向間；退潮時段之平均定點流速約介於 0.23~0.58 m/s 間，流向分佈大抵呈 NE~ENE 向間。秋季測期漲潮時段之平均定點流速約介於 0.33~0.74 m/s 間，流向分佈以

SW~WSW 向為主；退潮時段之平均定點流速約介於 0.27~0.74 m/s 間，流向分佈大抵集中於 NE~ENE 向間。冬季測期漲潮時段之平均定點流速約為 0.30 m/s，流向分佈大抵以 SW 向為主；退潮時段之平均定點流速約為 0.66 m/s，主要流向為 NE 向。由整體資料顯示漲潮時水流主流向為大抵為 SW 向，退潮主流向則為 NE 向，漲退潮流向大抵平行於海岸線。然部分退潮時段有流向紊亂的現象，研判係受局部地形效應影響所致。

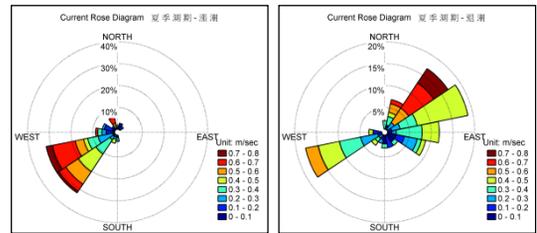


圖 14 夏季測期流速流向玫瑰圖

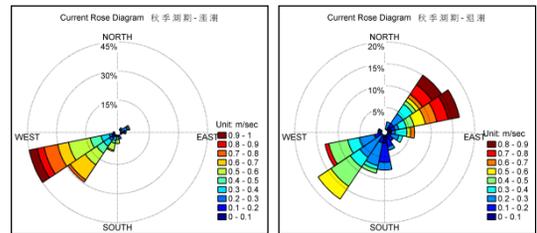


圖 15 秋季測期流速流向玫瑰圖

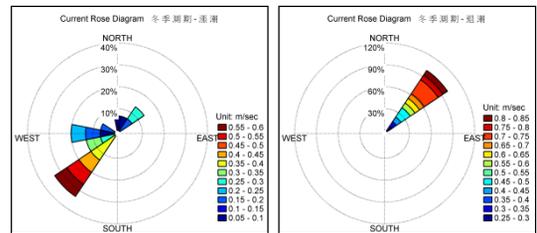


圖 16 冬季測期流速流向玫瑰圖

### 3.3 表面流況分佈特性

本研究分將民國 94~97 及 102 年度於臺北港海域附近觀測所得之表面流

況資料分別彙整如圖 17 至圖 22 所示。其中夏季漲潮時段之表面流況分佈如圖 17 所示，平均流速約為 0.50 m/s，外廓防波堤區域表面流向大抵呈 WSW 向，臺北港港口區域表面流向大抵呈 NNW~NNE 向；退潮時段之表面流況分佈如圖 18 所示，平均流速為 0.50 m/s，外廓防波堤區域表面流向大抵呈 NE~SW 向，臺北港港口區域表面流向大抵呈 NNW~NNE 向。秋季漲潮時段之表面流況分佈如圖 19 所示，平均流速為 0.65 m/s，淡水河口區域表面流向大抵呈 SE 向，外廓防波堤區域表面流向大抵呈 WSW~W 向，臺北港港口區域表面流向大抵呈 SW~NNE 向；退潮時段之表面流況分佈如圖 20 所示，平均流速為 0.47 m/s，外廓防波堤區域表面流向大抵呈 WSW~W 向，臺北港港口區域表面流向大抵呈 WSW~NNE 向。冬季漲潮時段之表面流況分佈如圖 21 所示，平均流速為 0.28 m/s，臺北港港口區域表面流向大抵呈 E~SSE 向；退潮時段之表面流況分佈如圖 22 所示，平均流速為 0.46 m/s，外廓防波堤區域表面流向大抵呈 NE~ENE 向。



圖 18 夏季退潮時段表面流況分佈圖



圖 19 秋季漲潮時段表面流況分佈圖

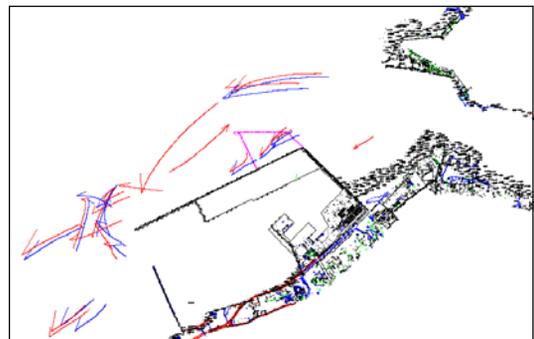


圖 20 秋季退潮時段表面流況分佈圖

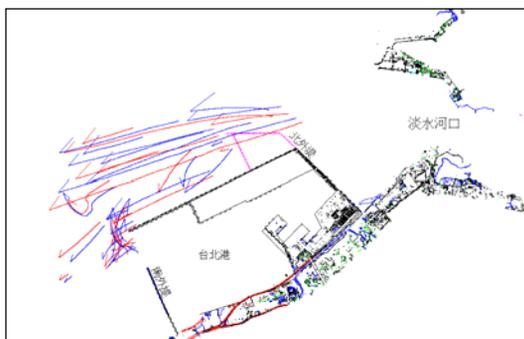


圖 17 歷年夏季漲潮時段表面流況分佈圖



圖 21 冬季漲潮時段表面流況分佈圖

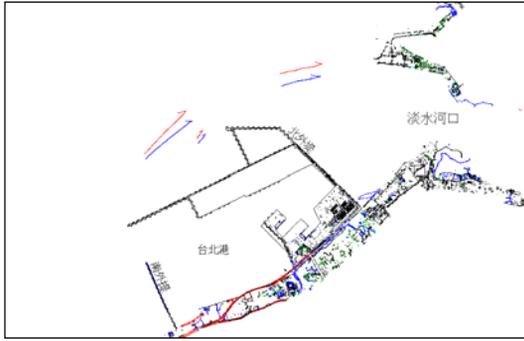


圖 22 冬季退潮時段表面流況分佈圖

#### 四、模式建立及結果討論

由於海岸水動力機制複雜，且受潮汐影響大，本研究數值計算流程如圖 23 所示，以採用配合潮汐周期平均計算的水動力模式，並配合現場觀測資料模擬臺北港附近海域流場分佈特性。

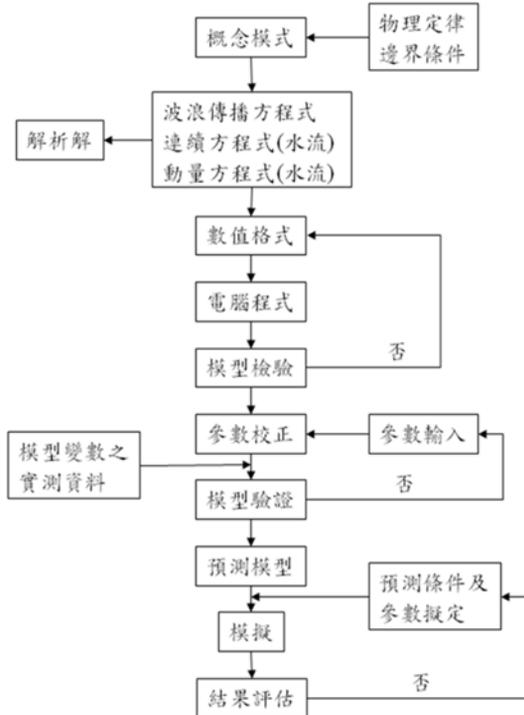


圖 23 模式模擬流程示意圖

#### 4.1 模式條件設定及驗證

針對現場海象分析結果，並將於前述數值模擬方法所需之相關輸入條件彙整如表 2 所示。因本數值模式可同時模擬潮汐及波浪造成之近岸流共同作用結果，故以相關模擬成果分與現場實測潮位及平均流速流向進行校核分析。經與本研究於臺北港海域所設立之潮位站進行比對結果如圖 24 所示，確認模式之設定參數後，即將現場實測流速流向與模擬結果進行比較如圖 25 所示。經比對結果顯示，本研究數值模擬結果與實測結果大抵吻合，待相關參數設定合理遂進行相關模式計算成果比較分析作業。

表 2 數值條件表

輸入條件	輸入模式	輸入資料
空間網格	平面波場	$\Delta X = \Delta Y = 25\text{m}$
	近岸流場	$\Delta X = \Delta Y = 50\text{m}$
時間網格	近岸流場	$\Delta t = 2\text{sec}$
河口流速	近岸流場	季風 0.0 m/sec
潮位系統	各模式	季風—平均潮位

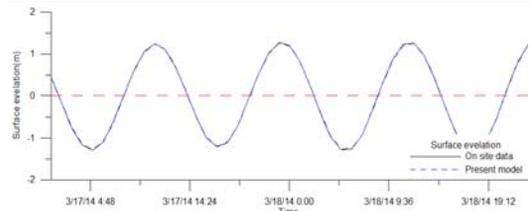


圖 24 數值模擬水位及實測結果比較圖

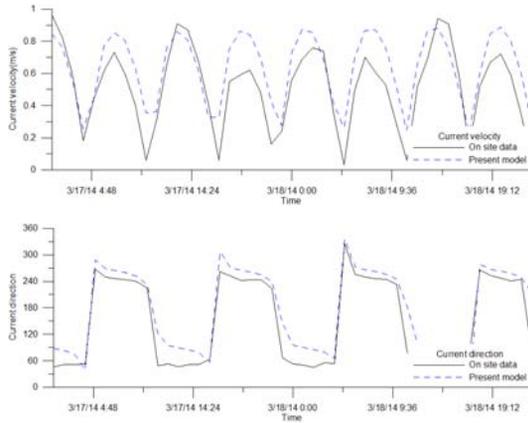


圖 25 數值模擬流速流向結果比較圖

## 4.2 模式計算成果

本模式分別計算 102 年三次現場觀測作業時程，計算結果如圖 26 至圖 27 所示，經與現場實際觀測所得之定點流速比較如表 3 所示，現場觀測所得春冬季節期間(04/09)之平均流速約為 0.42 m/s，夏季測期(06/10)平均流速約為 0.51 m/s，秋季測期(10/08)平均流速則約為 0.52 m/s；而模式計算結果春冬季節期間(04/09)之平均流速約為 0.50 m/s，夏季測期(06/10)平均流速約為 0.59 m/s，秋季測期(10/08)平均流速則約為 0.61 m/s，流速雖然略有差異，但流向模擬結果相差不大，模式計算結果與實測觀測值大抵相符。另，本研究亦將本模式計算結果選擇實測紀錄區域一至三區之漂流浮標位置，以觀測時段內之結果，分別進行比較如表 4 至表 6 所示，其中流速部分差異約介於 0.2 m/s 間，而流向部分以淡水河口處差異較大，如以現場實測結果進行檢視，以臺北港與淡水河口海域而言，顯示河口入流對海域流況的影響。

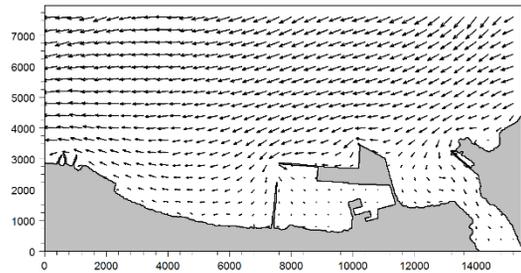


圖 26 漲潮時段平面流場模擬結果

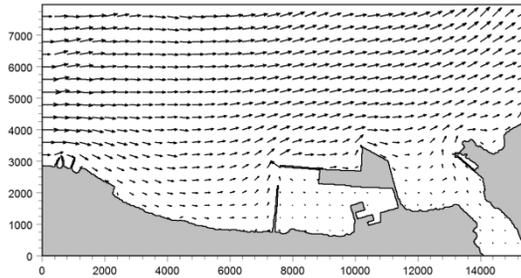


圖 27 退潮時段平面流場模擬結果

表 3 定點流速流向驗證結果統計表

項目		日期		
		04/09	06/10	10/08
定點 流況	平均流速 (m/s)	0.42	0.51	0.52
	最多流向 (Dir)	NE 、SW	NE 、SW	NE 、SW
模擬 結果	平均流速 (m/s)	0.50	0.59	0.61
	最多流向 (Dir)	NE 、SW	NE 、SW	NE 、SW

表 4 測區一漂流浮標驗證結果統計表

日期	潮時	現場觀測		數值模擬	
		平均 流速 (m/s)	流向 (dir)	平均 流速 (m/s)	流向 (dir)
04/09	漲潮	0.28	E	0.27	SW
04/09	退潮	0.36	ENE	0.54	NE
10/08	漲潮	0.51	ENE	0.57	SW
		0.57	SW	0.55	SW
	0.22	SW	0.24	SW	
	退潮	0.25	ENE	0.46	NE

表 5 測區二漂流浮標驗證結果統計表

日期	潮時	現場觀測		數值模擬	
		平均流速 (m/s)	流向 (dir)	平均流速 (m/s)	流向 (dir)
04/09	退潮	0.44	NE	0.29	NE
		0.66	NE	0.54	NE
06/10	漲潮	0.51	ENE	0.55	SW
	退潮	0.67	ENE	0.51	NE
10/08	漲潮	0.73	NE	0.48	SW
	退潮	0.97	NE	0.71	NE

表 6 測區三漂流浮標驗證結果統計表

日期	潮時	現場觀測		數值模擬	
		平均流速 (m/s)	流向 (dir)	平均流速 (m/s)	流向 (dir)
06/10	漲潮	0.57	SW	0.52	SW
	退潮	0.22	SW	0.37	SW
	漲潮	0.32	NE	0.46	NE
	退潮	0.25	ENE	0.36	NE

## 五、結論

1. 根據臺北港附近陸域風速風向測站觀測資料結果顯示，夏季(5~7月)測期區域平均風速大抵介於 1.1~9.1 m/s，風向由北至西南西方向皆有發生；秋季(9~12月)測期區域平均風速大抵介於 1.9~5.5 m/s，風向分佈大抵介於東北~南南東向間。由比較結果顯示，臺北港海域附近夏季測期海域風向較為紊亂，而秋季則較夏季集中。
2. 經比較佈設於臺北港外廓防波堤外 20m 等深線水域附近之下定點流測

站資料顯示，夏季(5~7月)測期漲潮時段流速分佈介於 0.21~0.65 m/s，流向大抵介於西~西南向；退潮時段流速分佈介於 0.19~0.47 m/s，流向大抵介於東北~東南向。秋季(9~12月)測期漲潮時段流速分佈介於 0.36~0.88 m/s，流向大抵介於西南~南南西向；退潮時段流速分佈介於 0.23~0.62 m/s，流向大抵介於東北~東向。由比較結果顯示，臺北港海域附近之流速分佈多呈退潮流速大於漲潮流速，且流向分佈係以漲潮主流向為 SW 向，退潮為 NE 向為主，符合區域潮係漲退之水體運動現象。

3. 由現場觀測所得之表面流況資料顯示，夏季(5~7月)測期漲潮時段流速分佈介於 0.28~0.96 m/s，流向大抵介於西~西南向；退潮時段流速分佈介於 0.38~0.58 m/s，流向大抵介於北~東北向。秋季(9~12月)測期漲潮時段流速分佈介於 0.51~1.18 m/s，流向大抵為西南向；退潮時段流速分佈介於 0.39~0.56 m/s，流向大抵為西南向。根據各區之流況觀測結果顯示，淡水河口區水流特性受河川入流及地形影響；港口海域流況因受局部海岸及港口地形效應影響，漲潮水體運動受岸線邊界及港口突堤阻擋改變流向。流況觀測位置離海岸及防波堤岸壁邊界越遠，流況特性較不受地形效應影響，漲退潮流呈現平行岸線走向，呈現

SW-NE 向運動，區域水流速度多小於 1 m/s。

4. 本研究數值計算以採用配合潮汐周期平均計算的水動力模式，並配合現場觀測資料模擬臺北港附近海域流場分佈特性。該數值模式主要數值計算參數及輸出入資料格式，係配合現場實測資料及臺北港海域附近觀測所得之區域參數進行計算。將模擬計算結果與實測資料進行比較顯示，流速部分差異約介於 0.2 m/s 間，而流向部分以淡水河口處差異較大，如以現場實測結果進行檢視，以臺北港與淡水河口海域而言，顯示河口處受水流向河口內運移對海域流況的影響。

## 參考文獻

1. 許國榮、曾若玄(1996)「利用 ARGOS/GPS 浮標觀測沿岸流況與水平擴散」，第 18 屆海洋工程研討會論文集，第 417-427 頁。
2. 邱永芳、翁文凱、蕭松山、蘇志文(1997)「GPS 應用於近岸流場量測之初步探討」，第 19 屆海洋工程研討會論文集，第 496-503 頁。
3. 柳文成、許銘熙、郭義雄、郭振泰(1998)，「淡水河河口環流特性之研究」，臺灣水利第 46 卷第 1 期。
4. 吳帥賢(1999)「DGPS 應用於近岸海域流場量測之研究」，國立臺灣海洋大學河海工程研究所碩士學位論文。
5. 林銘崇、丁肇隆、江允智、鄭凱仁(2001)，「波浪作用下沙漣附近邊界層流場之觀測」，第 23 屆海洋工程研討會論文集，第 501-507。
6. 張林氏(2002)，「近岸平面流場量測系統之探討」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
7. 王志成、陳森河、江允智(2005)「海洋資料於港灣及海事工程之應用」，海洋資訊應用研討會論文集編，103-112 頁。
8. 丁肇隆、林銘崇、許泰文、蕭松山(2006)，「95 年台北港水理海岸地形變遷數值監測模式研究」，交通部運輸研究所。
9. 廖慶堂、蕭松山、林銘崇、許泰文、何良勝(2007)，「96 年臺北港水理海岸地形變遷數值監測模式研究」，交通部運輸研究所港灣技術研究中心。
10. 宋建毅(2007)「區域性風場與流場關聯性之分析探討」，國立臺灣海洋大學河海工程研究所碩士學位論文。
11. 蕭松山、林銘崇、許泰文、許朝敏、江允智、方惠民(2008)，「97 年臺北港水理海岸地形變遷數值監測模式研究」，交通部運輸研究所委託研究計畫成果報告。
12. 江允智、蕭松山、方惠民、謝宜辰(2008)，「淡水河口南岸至臺北港北防波堤間短期海岸地形變遷數值模擬」，第 30 屆海洋工程研討會論文集，第 469-474 頁。
13. 林銘崇、江允智、許朝敏(2009)，「擬三維近岸流之數值模擬」，第 31 屆海洋工程研討會論文集，第 231-236 頁。
14. 吳基、林受勳、徐如娟、何良勝(2010)「臺北港海域 1997-2009 年海象觀測資料統計特性及時間變化」，第 32 屆海洋工程研討會論文集，第 635-640 頁。

15. A. F. Blumberg and G. L. Mellor (1987), "A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model," Coastal and Estuarine Sciences, Vol. 4, PP. 1-16.
16. Deigaard R. (1993), "A Note on the Three-Dimensional Shear Stress Distribution in a Surf Zone," Coastal Engineering, Vol. 20, 1-2, pp. 157-171.
17. Hsiao, S.-S., H.-M. Fang, L.-M. Chern, H.-Y. Wang, C.-L. Ting(2011), "Characteristics of the Current Pattern Near the Entrance of Keelung Harbor," Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 943-948.

## 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