

101-139-7649

MOTC-IOT-100-H2EB001a

船舶進出臺北港引發的興波作用 之研究



交通部運輸研究所

中華民國 101 年 11 月

101-139-7649

MOTC-IOT-100-H2EB001a

船舶進出臺北港引發的興波作用 之研究

著者：廖慶堂、羅德章、楊德良、陳力民、吳姿瀾、何良勝

交通部運輸研究所

中華民國 101 年 11 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

船舶進出臺北港引發的興波作用之研究/廖慶堂等著

. --初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，民 101.11

面；公分

ISBN 978-986-03-4250-5 (平裝)

1.航運管理 2.船舶

557

101022009

船舶進出臺北港引發的興波作用之研究

著者：廖慶堂、羅德章、楊德良、陳力民、吳姿瀾、何良勝

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 (中文版>中心出版品)

電話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 101 年 11 月

印刷者：

版(刷)次冊數：初版一刷 80 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

定價：250 元

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：1010102449

ISBN：978-986-03-4250-5 (平裝)

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。

101

船舶進出臺北港引發的興波作用之研究

交通部運輸研究所

GPN : 1010102449

定價 250 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

| | | | |
|---|--|----------------------------|--|
| 出版品名稱：船舶進出臺北港引發的興波作用之研究 | | | |
| 國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-986-03-4250-5(平裝) | 政府出版品統一編號 1010102449 | 運輸研究所出版品編號 101-139-7649 | 計畫編號 100-H2EB001a |
| 本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：何良勝 研究人員：廖慶堂 聯絡電話：04-26587124 傳真號碼：04-26560661 | 合作研究單位：國立高雄海洋科技大學 計畫主持人：羅德章 研究人員：楊德良、陳力民、吳姿瀨、鄭宇祈 地址：80543 高雄市旗津區中洲三路 482 號 聯絡電話：07-8100888 #5306 | | 研究期間 自 100 年 9 月 至 100 年 11 月 |
| 關鍵詞：計算流體動力學、船舶水動力學、岸壁效應、船舶追越、興波 | | | |
| <p>摘要：</p> <p>本研究應用計算流體力學（CFD）軟體研究船舶航行於臺北港引發興波效應的影響。貨櫃船模使用電腦輔助設計（CAD）工具來製作。為了驗證模式的可行性，首先模擬小船沿 x 軸航行時受到的阻力，結果與文獻比較，得到很好的預測。岸壁效應對於船舶操縱影響重大，因此必須正確解析，以確保船隻通過限制水道時的安全。因此，本研究進行了一系列船舶岸壁效應的模擬，包含船模速度、船岸距離及航行時間等參數，並比較船舶航行時，與岸壁作用產生時變性的橫移力與偏航矩。然後，研究模擬兩船追越與對遇相互作用的現象。最後，船舶航行於臺北港也將於本文探討，產生的船跡波並經由力學的討論分析。本文預計建立船舶水動力相互作用的關係圖，作為船舶航行於限制水域所引發的複雜流體動力學，能有更深入的瞭解。</p> <p>成果效益方面，本研究發現船舶興波作用的主要與船舶大小、船速、水深有關，由結果顯示航行在臺北港之船舶，由於船舶四周壓力變化作用於水面交界處，產生一系列的表面波，主要成分包含艏波與橫波。本計畫成果可提供政府部門與學術單位之參酌，作為未來問題對策的研擬以及施政設計之參據，亦可作為學術單位學術發展研究之參考。</p> | | | |
| 出版日期 | 頁數 | 定價 | 本 出 版 品 取 得 方 式 |
| 101 年 11 月 | 210 | 250 | 凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。 |
| <p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>密 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>（解密條件：<input type="checkbox"/> 年 月 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密，<input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密）</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>普通</p> | | | |
| 備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。 | | | |

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

| | | | |
|--|---|--|---|
| TITLE: Generation of wake wash by a container ship at Taipei Harbor | | | |
| ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-03-4250-5 (pbk) | GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010102449 | IOT SERIAL NUMBER 101-139-7649 | PROJECT NUMBER 100-H2EB001a |
| DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu, Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: He, Liang-sheng PROJECT STAFF: Liao, Cing-tang PHONE: (04) 26587124 FAX: (04) 26560661 | | | PROJECT PERIOD FROM September 2011 TO November 2011 |
| RESEARCH AGENCY: NATIONAL KAOHSIUNG MARINE UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lo, De-Chang PROJECT STAFF: Young, Der-Liang, Chern, Lee-Min, Wu, Zih-Huei, Cheng, Yu-Chi ADDRESS: No.482, Zhongzhou 3rd Rd., Cijin District, Kaohsiung City 80543, Taiwan, R.O.C. PHONE: (07) 8100888 # 5306 | | | |
| KEY WORDS: Computational fluid dynamics, Ship hydrodynamic, Bank effect, Overtaking and head-on encounter, Wake waves | | | |
| ABSTRACT: <p>The purpose of present work is to investigate the generation of wake wash by a ship on the water at Taipei harbor using a computational fluid dynamics (CFD) package. The container ship model used in this study was established through a computer aided design (CAD) tool. The model feasibility is demonstrated by first simulating the hydrodynamic resistance acting on a small boat as it travels along the x-axis in restricted water. The hydrodynamic resistance computed for the small boat case shows excellent agreement with the results published in the literature. The bank effect has a major impact on the maneuvering properties of the ship and must therefore be properly understood to ensure the safe passage of the ship through the restricted waterway. Accordingly, this study performs a series of simulations using CFD and container ship model to examine the effects of the ship speed and distance to bank on the magnitude and time-based variation of the yaw angle and sway force. Then, we simulate the hydrodynamic interactions of two ships for the overtaking and head-on encounter phenomena. The prediction of wake waves by a container ship on the water at Taipei harbor is investigated. The effect of wake wash is analyzed by discussing the mechanics of wave generation from ship motion in restricted water. A relationship diagram of the ship hydrodynamic interaction is consequently established to serve as a reference in maritime research regarding the complex fluid dynamics that occurs when ships are sailed in restricted water.</p> <p>Outcome benefits, the study on the phenomena of ship wake waves were affected by the size and velocity of ship, as well as the depth of channel. Accordingly, the present considered on a container ship sailing on the water at Taipei harbor, the pressure variations at the water-air interface produce a series of waves including bow wave and transverse following wave. The analysis of present model provides a basis to the government units and academic research organizations for sailing simulation, navigational safety and harbors construction planning of reference.</p> | | | |
| DATE OF PUBLICATION November 2012 | NUMBER OF PAGES 210 | PRICE 250 | CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED |
| The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications. | | | |

船舶進出臺北港引發的興波作用之研究

目 錄

| | |
|----------------------------------|------|
| 中文摘要 | I |
| 英文摘要 | II |
| 目錄 | IV |
| 表目錄 | VII |
| 圖目錄 | VIII |
| 第一章 緒論 | 1-1 |
| 1.1 前言 .. | 1-1 |
| 1.2 研究動機 | 1-1 |
| 1.3 船舶航行於港口時常見之情況 | 1-2 |
| 1.3.1 岸壁效應現象 | 1-2 |
| 1.3.2 船舶對遇與追越現象 | 1-3 |
| 1.3.3 船舶航行之興波現象 | 1-3 |
| 1.4 臺北港簡介 | 1-4 |
| 1.5 研究項目 | 1-4 |
| 第二章 數值模式 | 2-1 |
| 2.1 模擬軟體簡介 | 2-1 |
| 2.2 理論簡介 | 2-2 |
| 2.2.1 Navier-Stokes 之控制方程式 | 2-2 |
| 2.2.2 自由液面處理方法—流體體積法 | 2-4 |

| | |
|------------------------------------|------|
| 2.2.3 船體六個自由度..... | 2-6 |
| 2.3 模式驗證..... | 2-8 |
| 2.3.1 KCS 3600TEU 貨櫃船模驗證..... | 2-8 |
| 2.3.2 船舶阻力計算驗證..... | 2-10 |
| 第三章 模式進行步驟..... | 3-1 |
| 3.1 研究流程..... | 3-1 |
| 3.2 船模建製..... | 3-2 |
| 3.2.1 船模試驗的相似概念..... | 3-2 |
| 3.2.2 原比例與縮小比例之船模實體建製 | 3-5 |
| 3.2.3 建立船型表..... | 3-7 |
| 3.2.4 繪製橫剖面線..... | 3-8 |
| 3.3 水深高程地形建製..... | 3-9 |
| 3.3.1 利用 GIS 轉出數據化的地形 | 3-9 |
| 3.3.2 利用 3D 軟體製作受測模型..... | 3-14 |
| 3.4 模擬案例介紹..... | 3-18 |
| 3.4.1 規則港區模擬（縮小比例 31.5994 倍） | 3-18 |
| 3.4.2 臺北港港內模擬（依照原型比例尺 1：1 建製）..... | 3-20 |
| 3.5 邊界條件與網格設定..... | 3-22 |
| 第四章 船舶航行於限制性水域之模擬與分析..... | 4-1 |
| 4.1 船舶於限制性水域的航行..... | 4-1 |
| 4.2 船舶於限制性水域航行的岸壁效應..... | 4-6 |
| 4.3 兩船於限制性水域航行的對遇..... | 4-13 |
| 4.4 兩船於限制性水域航行的追越..... | 4-23 |

| | |
|--------------------------|-------|
| 第五章 船舶航行於臺北港之模擬與分析 | 5-1 |
| 5.1 船舶於臺北港航行 | 5-2 |
| 5.2 船舶於臺北港航行的岸壁效應 | 5-45 |
| 5.3 兩船於臺北港航行的對遇 | 5-65 |
| 第六章 結論與建議 | 6-1 |
| 6.1 結論 | 6-1 |
| 6.2 建議 | 6-2 |
| 6.3 成果效益及後續應用情形 | 6-4 |
| 參考文獻 | 參-1 |
| 附錄一 簡報資料 | 附 1-1 |
| 附錄二 期末審查意見及辦理情形說明表 | 附 2-1 |

表 目 錄

| | |
|--|------|
| 表 2.1 測量阻力表 | 2-10 |
| 表 3.1 KCS 船模與實船之幾何數據表 | 3-6 |
| 表 3.2 貨櫃船 KCS 位於 station 236.9 之船型表 | 3-7 |
| 表 3.3 貨櫃船 KCS(縮小 λ 倍的船模)位於 station 7.50 之船型表 | 3-8 |
| 表 3.4 臺北港模擬案例表 | 3-21 |

圖 目 錄

| | |
|--|------|
| 圖 1.1 臺北港港口與碼頭..... | 1-5 |
| 圖 1.2 船舶於臺北港進港情況..... | 1-5 |
| 圖 1.3 船舶於臺北港出港情況..... | 1-5 |
| 圖 2.1 FLOW-3D® V9.3.1 程式介面 | 2-1 |
| 圖 2.2 二維正交網格面積和體積比例係數計算示意圖..... | 2-5 |
| 圖 2.3 數值航道示意圖..... | 2-6 |
| 圖 2.4 船模相對於原點而產生六個自由度的運動..... | 2-6 |
| 圖 2.5 循環水道 PIV 實驗設備與系統概要圖 | 2-9 |
| 圖 2.6 船模船艙橫剖面船底截面之渦流分布情況..... | 2-9 |
| 圖 2.7 小艇實船求解船舶阻力之模擬過程($V = 7.98\text{m/s}$, $t=0\sim 4\text{s}$)...2-11 | |
| 圖 3.1 模擬研究之流程圖 | 3-1 |
| 圖 3.2 實船與船模及流體質點之對應..... | 3-2 |
| 圖 3.3 實船與船模在對應點上的作用力其方向相同大小成比例 | 3-3 |
| 圖 3.4 KCS 同船型貨櫃船 | 3-5 |
| 圖 3.5 船模橫剖面線..... | 3-9 |
| 圖 3.6 KCS 船模船體模型 | 3-9 |
| 圖 3.7 1/20000 的繪圖檔案進入 GIS 所呈現的網格與行船軌跡..... | 3-10 |
| 圖 3.8 將比例網格取消 | 3-10 |
| 圖 3.9 GIS 進行高程轉換的介面 | 3-11 |
| 圖 3.10 高度色塊圖層 | 3-11 |
| 圖 3.11 轉換等高線指令介面..... | 3-12 |

| | |
|---|------|
| 圖 3.12 完成轉換等高線圖層 | 3-12 |
| 圖 3.13 等高線轉換成的高度色差圖 | 3-13 |
| 圖 3.14 在 GIS 裡面產生的地形模型 | 3-13 |
| 圖 3.15 向量工程圖 | 3-14 |
| 圖 3.16 臺北港內港點對點描繪線稿 | 3-14 |
| 圖 3.17 實體化臺北港模型 | 3-15 |
| 圖 3.18 3D 臺北港水深高程模型線稿 | 3-16 |
| 圖 3.19 實體化臺北港水深高程模型 | 3-16 |
| 圖 3.20 重疊臺北港水深高程模型 | 3-17 |
| 圖 3.21 臺北港水深高程模型受測區域 | 3-17 |
| 圖 3.22 單一船舶於規則港區之示意圖 | 3-18 |
| 圖 3.23 船舶航行於規則港區岸壁效應之示意圖 | 3-19 |
| 圖 3.24 船舶對遇於規則港區之示意圖 | 3-20 |
| 圖 3.25 船舶追越於規則港區之示意圖 | 3-20 |
| 圖 3.26 船舶航行於臺北港之興波效應觀測點示意圖 | 3-22 |
| 圖 4.1 船舶航行於狹窄水道船速 0.27 m/s 與 0.55 m/s 之橫移力比較圖 | 4-3 |
| 圖 4.2 船舶航行於狹窄水道船速 0.27 m/s 與 0.55 m/s 之阻力比較圖 | 4-3 |
| 圖 4.3 船速 0.27 m/s 壓力速度向量分布圖 | 4-4 |
| 圖 4.4 船速 0.55 m/s 壓力速度向量分布圖 | 4-5 |
| 圖 4.5 不同岸壁距離、船速 0.27 m/s 之橫移力比較圖（船舶航行於狹 窄水道） | 4-8 |

| | |
|--|------|
| 圖 4.6 不同岸壁距離、船速 0.55 m/s 之橫移力比較圖（船舶航行於狹窄水道） | 4-8 |
| 圖 4.7 岸壁距離、航速與橫移力相關圖 | 4-9 |
| 圖 4.8 不同岸壁距離、船速 0.27 m/s 之偏航角比較圖（船舶航行於狹窄水道） | 4-9 |
| 圖 4.9 不同岸壁距離、船速 0.55 m/s 之偏航角比較圖（船舶航行於狹窄水道） | 4-10 |
| 圖 4.10 岸壁距離、航速與偏航角度相關圖 | 4-10 |
| 圖 4.11 船速 0.27 m/s，船寬 0.5B 壓力速度向量分布圖 | 4-11 |
| 圖 4.12 船速 0.55 m/s，船寬 0.5B 壓力速度向量分布圖 | 4-12 |
| 圖 4.13 兩船之不同船距、船舶 1 之橫移力比較圖（船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s）：對遇 | 4-15 |
| 圖 4.14 兩船之不同船距、船舶 2 之橫移力比較圖（船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s）：對遇 | 4-15 |
| 圖 4.15 兩船之不同船距、船舶 1 之橫移力比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s）：對遇 | 4-16 |
| 圖 4.16 兩船之不同船距、船舶 2 之橫移力比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s）：對遇 | 4-16 |
| 圖 4.17 兩船之不同船距、船舶 1 之偏航角比較圖（船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s）：對遇 | 4-17 |
| 圖 4.18 兩船之不同船距、船舶 2 之偏航角比較圖（船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s）：對遇 | 4-17 |
| 圖 4.19 兩船之不同船距、船舶 1 之偏航角比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s）：對遇 | 4-18 |

| | |
|---|---------------|
| 圖 4.20 兩船之不同船距、船舶 2 之偏航角比較圖 (船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s) : 對遇..... | 4-18 |
| 圖 4.21 兩船之不同船距、船舶 1 之質心偏移量比較圖(船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s) : 對遇..... | 4-錯誤! 尚未定義書籤。 |
| 圖 4.22 兩船之不同船距、船舶 2 之質心偏移量比較圖(船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s) : 對遇..... | 4-19 |
| 圖 4.23 兩船之不同船距、船舶 1 之質心偏移量比較圖(船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s) : 對遇..... | 4-20 |
| 圖 4.24 兩船之不同船距、船舶 2 之質心偏移量比較圖(船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s) : 對遇..... | 4-20 |
| 圖 4.25 船舶對遇, 船速 0.27 m/s 對 0.27 m/s, 船寬 0.5B | 4-21 |
| 圖 4.26 船舶對遇, 船速 0.55 m/s 對 0.27 m/s, 船寬 0.5B | 4-22 |
| 圖 4.27 兩船之不同船距、船舶 1 之橫移力比較圖 (船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s) : 追越..... | 4-25 |
| 圖 4.28 兩船之不同船距、船舶 2 之橫移力比較圖 (船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s) : 追越..... | 4-25 |
| 圖 4.29 兩船之不同船距、船舶 1 之偏航角比較圖 (船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s) : 追越..... | 4-26 |
| 圖 4.30 兩船之不同船距、船舶 2 之偏航角比較圖 (船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s) : 追越..... | 4-26 |
| 圖 4.31 船舶追越, 船速 0.55 m/s 對 0.18 m/s, 船寬 0.5B | 4-27 |
| 圖 5.1 船舶航行於臺北港船速 3 節之橫移力比較圖 (Case1 VS. Case5, 進出港) | 5-5 |
| 圖 5.2 船舶航行於臺北港船速 6 節之橫移力比較圖 (Case2 VS. Case6, 進出港) | 5-5 |

| | |
|---|------|
| 圖 5.3 船舶航行於臺北港船速 3 節之橫移力比較圖 (Case1 VS. Case3 , 原航道與原航道偏航 10 度) | 5-6 |
| 圖 5.4 船舶航行於臺北港船速 6 節之橫移力比較圖 (Case2 VS. Case4 , 原航道與原航道偏航 10 度) | 5-6 |
| 圖 5.5 船舶航行於臺北港船速 3 節之興波變化比較圖 (置於不同觀測 點) | 5-7 |
| 圖 5.6 船舶航行於臺北港船速 6 節之興波變化比較圖 (置於不同觀測 點) | 5-8 |
| 圖 5.7 船舶進港, 船速 3 節, 壓力速度向量圖 | 5-9 |
| 圖 5.8 船舶進港, 船速 6 節, 壓力速度向量圖 | 5-12 |
| 圖 5.9 船舶進港, 船速 3 節, 偏航 10 度, 壓力速度向量圖 | 5-15 |
| 圖 5.10 船舶進港, 船速 6 節, 偏航 10 度, 壓力速度向量圖 | 5-18 |
| 圖 5.11 船舶出港, 船速 3 節, 壓力速度向量圖 | 5-21 |
| 圖 5.12 船舶出港, 船速 6 節, 壓力速度向量圖 | 5-24 |
| 圖 5.13 船舶進港 3D 圖, 船速 3 節 | 5-27 |
| 圖 5.14 船舶進港 3D 圖, 船速 6 節 | 5-30 |
| 圖 5.15 船舶進港 3D 圖, 船速 3 節, 偏航 10 度 | 5-33 |
| 圖 5.16 船舶進港 3D 圖, 船速 6 節, 偏航 10 度 | 5-36 |
| 圖 5.17 船舶出港 3D 圖, 船速 3 節 | 5-39 |
| 圖 5.18 船舶出港 3D 圖, 船速 6 節 | 5-42 |
| 圖 5.19 船舶航行於臺北港船速 3 節之橫移力比較圖 | 5-47 |
| 圖 5.20 船舶航行於臺北港船速 6 節之橫移力比較圖 | 5-47 |
| 圖 5.21 船舶航行於臺北港船速 3 節之偏航角比較圖 | 5-48 |

| | |
|---|------|
| 圖 5.22 船舶航行於臺北港船速 6 節之偏航角比較圖 | 5-48 |
| 圖 5.23 船舶進港之岸壁效應，船速 3 節，船寬 0.5B，壓力速度向量圖 | 5-49 |
| 圖 5.24 船舶進港之岸壁效應，船速 6 節，船寬 0.5B，壓力速度向量圖 | 5-51 |
| 圖 5.25 船舶進港之岸壁效應，船速 3 節，船寬 1.0B，壓力速度向量圖 | 5-53 |
| 圖 5.26 船舶進港之岸壁效應，船速 6 節，船寬 1.0B，壓力速度向量圖 | 5-55 |
| 圖 5.27 船舶進港之岸壁效應，船速 3 節，船寬 2.0B，壓力速度向量圖 | 5-57 |
| 圖 5.28 船舶進港之岸壁效應，船速 6 節，船寬 2.0B，壓力速度向量圖 | 5-59 |
| 圖 5.29 船舶岸壁效應 3D 圖，船速 3 節，船距 0.5B | 5-61 |
| 圖 5.30 船舶岸壁效應 3D 圖，船速 6 節，船距 0.5B | 5-63 |
| 圖 5.31 兩船之不同船距、船舶 1 之橫移力比較圖(船速 3 節 VS. 6 節): 對遇 | 5-67 |
| 圖 5.32 兩船之不同船距、船舶 2 之橫移力比較圖(船速 3 節 VS. 6 節): 對遇 | 5-67 |
| 圖 5.33 兩船之不同船距、船舶 1 之偏航角比較圖(船速 3 節 VS. 6 節): 對遇 | 5-68 |
| 圖 5.34 兩船之不同船距、船舶 2 之偏航角比較圖(船速 3 節 VS. 6 節): 對遇 | 5-68 |
| 圖 5.35 兩船之船距 0.25B、船舶 1 與船舶 2 之質心偏移量比較圖 (船 速 3 節 VS. 6 節)：對遇 | 5-69 |

| | |
|--|------|
| 圖 5.36 兩船之船距 $0.5B$ 、船舶 1 與船舶 2 之質心偏移量比較圖（船速 3 節 VS. 6 節）：對遇 | 5-69 |
| 圖 5.37 兩船之船距 $1B$ 、船舶 1 與船舶 2 之質心偏移量比較圖（船速 3 節 VS. 6 節）：對遇..... | 5-69 |
| 圖 5.38 船舶對遇壓力速度向量圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.25B$.. | 5-70 |
| 圖 5.39 船舶對遇壓力速度向量圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.5B$... | 5-72 |
| 圖 5.40 船舶對遇壓力速度向量圖，船速 3 節對 6 節，船距 $1B$ | 5-74 |
| 圖 5.41 船舶對遇 3D 圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.25B$ | 5-76 |
| 圖 5.42 船舶對遇 3D 圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.5B$ | 5-78 |
| 圖 5.43 船舶對遇 3D 圖，船速 3 節對 6 節，船距 $1B$ | 5-80 |

第一章 緒論

1.1 前言

臺灣四面環海，貿易的進出口大多仰賴海運，航行安全尤其重要。船舶進出港過程所引的興波作用，會造成海面波動，引起其他船隻航行安全，船舶停靠碼頭，以及船舶裝載、卸貨時，船舶纜繩係因水面波動起伏過大，會引發纜繩與船舶之間的拉扯，會導致纜繩的拉力增加。而良好的港灣工程設計，可減低船舶進出港產生的興波，以確保航運航行安全，為海洋國家之工作與使命，而模擬船舶進出港的興波狀況，其分析成果則為從事海洋環境及港灣工程者重要之依據。

1.2 研究動機

有關港灣或海岸工程規劃設計所需之設計船舶興波資料須由數值模擬或水工模型試驗來輔助設計。然而水工模型試驗需耗費的成本較大，因此數值模擬船舶進出港所引的興波作用，就顯得相對成本低。藉由模擬的分析，可取得港內波高時間序列，流場、壓力場分佈狀況，並可搭配動畫之呈現，讓模擬結果可供港灣設計者重要參考之數據，以減低船舶興波作用造成的波動。

船舶在狹窄水道航行，和其他船舶對遇或追越而必須偏離航道中線，這時不對稱流將產生於船舶與船岸之間，船舶航向的穩定性受到干擾，產生的興波將傳遞至岸邊，造成港灣內的海水面波動增加劇烈。船舶航向的穩定性受到干擾，產生的興波將傳遞至岸邊，造成港灣內的海水面動增加劇烈。船舶前進於狹窄水道時，會受到岸推力與岸吸力之岸壁效應（Bank effect）作用，船舶航行於規則水道的岸壁效應也將在本研究模擬分析，以釐清船舶航行與岸壁之間的作用、兩船對遇追越於限制水域的相互作用。再者，臺北港灣海底地形與邊界建置，載入 3D 船模並配合黏性水動力模式，可真實的呈現船舶進出臺北港的

興波作用。對於港內各區域的波高分析、船體六個自由度的變化、船舶與波浪相互作用的力分析、水域內壓力場與流場分析、以嚴謹學術方法模擬分析船舶興波作用，並評估船舶航行臺北港所引發的興波效應，是否會對航行安全造成影響。

1.3 船舶航行於港口時常見之情況

1.3.1 岸壁效應現象

當船舶或船岸之間產生不對稱流，導致船艏偏離近岸側，在航海上稱為船舶岸壁效應。根據船舶吃水與可用水深與寬度的關係，船舶的航行可分為開闊水域航行和限制水域航行，限制水域是指對於所操縱的船舶而言，水深較淺的水域和寬度較窄的水道。當船舶航行於運河或狹水道等寬度受限制的水域時，船體周圍的水流變化趨於激烈，使船舶的操縱受到顯著的影響。船舶碰撞事故經常發生於河川、沿海等地交通密集度較大之區域，然而狹窄水道間船舶航行碰撞機率相當高，根據 71 年至 80 年間我國各港港內海難類別統計出的資料中，船舶碰撞事件占總數之 47.9% 為最高，為此蘇（1993）採用系統分析與歸納法，再經實際的研判解析出船舶碰撞發生過程及造成之因素，因此船舶航行於狹窄水道之情況實為值得探討。當船舶航行於水道的中央時，作用於船體的力，理論上是左右相互對稱的。但當船舶的航線偏於航道的一側時，船體將受到貼近岸一側的橫移力，同時還受到反向的偏航力矩作用，一般把這個橫移力稱為岸吸，把偏航力矩稱為岸推，岸吸、岸推統稱岸壁效應（徐，2006）。而模型試驗和實船試驗表明，岸壁效應與下列因素有關：（1）距岸壁越近、偏離航道中心越遠，岸壁效應越激烈。（2）水道寬度越窄，岸壁效應越激烈。（3）航速越高，岸壁效應越激烈。（4）船型越肥大，岸壁效應越明顯。（5）水深越淺，岸壁效應越明顯。

1.3.2 船舶對遇與追越現象

船舶於近距離航行，進行船舶追越或船舶對遇時，兩船相互會對它船產生像岸壁效應相似的作用行為，因為兩船運動可視為移動中的物體，船體運動的速度、兩船的橫距與兩船的大小皆會產生不一樣作用力與偏航。在兩船之間產生之流場與壓力場變化作用，而使船舶受到左右不平衡之力或迴轉力矩，而使偏離其航向或使其迴轉。像這種因兩船同時產生之流體作用對於船舶操縱之影響，稱為兩船間之相互作用（蔡，1989）（趙，2000），而船舶航行時所激起波浪，形成船艏、船舯、船艉，三處壓力差，會產生吸引排斥作用，影響兩船間之相互作用之大小：（1）兩船橫距越小，相互作用越大。（2）船速越快，則興波越激烈。（3）兩船航向相同比航向相反作用時間長，相互作用也較大。（4）大小不同之兩船，小型船之一方所受之影響較大。（5）限制水域中之相互作用較開放水域，更為激烈。

1.3.3 船舶航行之興波現象

在一般天候條件下，船舶航行於海上，受到風壓及海水等阻力影響，而後者占總阻力的大部分。海水阻力是由摩擦阻力及興波阻力兩大主要項目所組成，當船艇在慢速航行時，摩擦阻力幾乎占總阻力的80～90%，但當航速逐漸升高時，船舶興波阻力所占的比例會大幅增加。在有限馬力下，假如想使高性能船舶仍能高速航行，而有效降低船舶興波阻力是必須克服的課題，前人相關研究有 Wei (2006) 三維碎波在岸邊造成高速船航行之分析及 Tarmo (2007) 利用非線性探討船跡波相關研究。當船體質量愈大，在相同水域及水深航行所產生造成之興波效應及面積愈大，相同質量之船體在同一條件下的水域航行，速度較快所造成之興波效應與速度平方成正比，而本文藉由此計畫探討船舶在不同船速、平均水深狀態於臺北港航行的興波效應及港內的波動。並探討船舶航行於臺北港所產生的船跡波。

1.4 臺北港簡介

臺北港外地形水深因淡水河口屬河口沖積地形，受河川輸砂影響顯著，依據 96 年 10 月海域地形測量資料，港址海床平均坡度約在 1/100~1/200 之間；臺北港內地形水深於臺北港貨櫃碼頭 BOT 案中，貨櫃碼頭公司為配合造地取土及基港局要求，於民國 94 年 1 月 10 日完成航道拓寬至 200m、加深至-12m、迴船池直徑 500m、水深-12m 之第一階段港池浚挖工程，基港局已發佈航船佈告。而臺北港貨櫃碼頭公司預計於 97 年 10 月以前，將繼續完成拓寬航道至 300m~400m、加深至-16.0m~-14.5m，迴船池擴大直徑為 720m，加深至-14.5m 之二期水域設施規模。另於雙方興建暨營運契約中規定，未來若到港貨櫃船隻吃水加大，基港局同意配合因應航運發展，將航道及迴船池浚深至 CD.-16.0m (陳，2008)，圖 1.1 為臺北港港口與碼頭之今形態。

基港局在臺北港整體規劃及未來發展計畫 (96~100 年) 中，為因應未來船舶大型化趨勢修訂最大進港船型，研提「臺北港航道、迴船池水域加深工程計畫」，以完成設計進港船舶提升至 1.0 萬 TEU 級貨櫃輪之目標，近程內航道水深為-18m。

船速設限位置為避免靠泊港內碼頭裝卸作業船隻免受浪擊傷害 (Wash Damage)，港內速度設限之標準必須依港口環境、港口水深、船舶大小為依據。依國際商港港務管理規則第 9 條規定：「五百總噸以上船舶在港內航行，其航行時速不得超過五節」。如要求進港船舶滿足此條規定，不僅臺北港大型船舶無法進港，其他各國際商港之大型船舶皆無法進港，圖 1.2 與圖 1.3 分別為船舶進出臺北港之情況。

1.5 研究項目

本研究項目主要包含：船舶 3D 建模、臺北港港區海底地形與陸地上邊界的建製及數值計算。數值模擬研究分為船舶於限制水域內的興波分析與岸壁效應、船舶對遇、船舶追越等現象以及船舶航行於臺

北港港內進出港的興波作用、兩船對遇與岸壁效應。



圖 1.1 臺北港港口與碼頭



圖 1.2 船舶於臺北港進港情況



圖 1.3 船舶於臺北港出港情況

第二章 數值模式

2.1 模擬軟體簡介

1980 年，Dr. Hirt 創辦了 Flow Science Inc.，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) 及其流體靜力。1985 年，正式推出 FLOW-3D 流體分析軟體，介面如圖 2.1 所示。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) 。

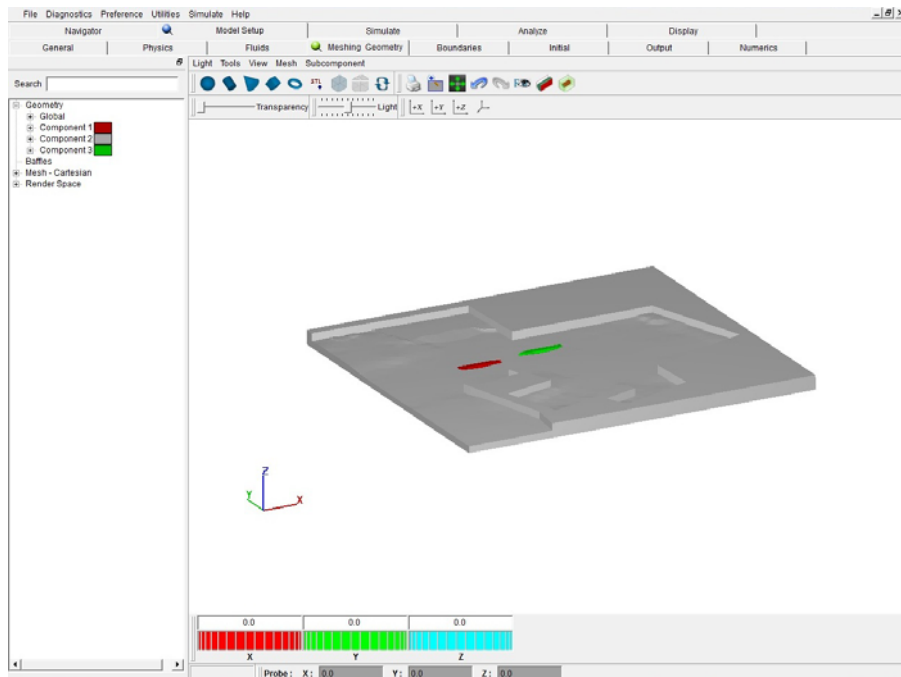


圖 2.1 FLOW-3D® V9.3.1 程式介面

FLOW-3D 是一套具通用性與高精準度的計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 軟體。它採用數值模擬技術來求解出流體在三維或多維多物理量的耦合運動，使用者可以選擇各種不同的物理參數和數值模擬方式來計算不同的三維流體流動現象，對於流體運動方程式，使用離散的方式定義出流體參數、設置邊界條件

與求得數值解。FLOW-3D 計算的方式將流體空間分割為矩形儲存格，因為實際的物理參數在空間中是連續性的，網格中在節點與節點間取得適當的距離將可得到有代表性的結果來描述真實的情況。

在 FLOW-3D 中，可對模擬增加自由液面項。因為流體參數如密度、速度和壓力，和材料的特性，因此在任何的計算環境下模擬自由液面都是個挑戰。為了模擬自由液面，在 FLOW-3D 中採用流體體積法 (Volume of Fluid, VOF)，它主要包括三個部分；流體體積函數的定義、解決流體體積傳輸方程式以及在自由液面上設定邊界條件。

2-2 理論簡介

FLOW-3D 的理論基礎在於質量守恆方程式、動量方程式以及能量不減方程式等，因此它可以應用在絕大部分的、任何型態的流體流動。針對本文所研究的物理現象，乃為流體流動力學問題，其所遵行的數學模式為 Navier-Stokes 方程式。因現今之解析法仍未能完全解析此偏微分方程式，故本文研究乃採用數值方法來模擬此一流場，詳細的操作使用請參閱 FLOW 3D 使用手冊 (2007) 下面即分項描述此數學模式的架構。

2.2.1 Navier-Stokes 之控制方程式

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，連續方程式及動量方程式在直角座標系的形式為：

(一) 質量連續方程式 (Mass Continuity Equation)

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2.1)$$

上式中 V_F 是流體體積比， ρ 是流體密度， R_{DIF} 是紊流擴散項， R_{SOR} 是質量源項， (u, v, w) 是 (x, y, z) 座標方向的速度， A_x, A_y, A_z 分別是 x, y, z 方向流動的通量面積比。

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_p A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_p A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_p A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v_p A_x}{x} \quad (2.2)$$

上式中係數 v_p 等於 $c_p \mu / \rho$ ， μ 是動量分佈的係數（如黏度）， c_p 是參照紊流施密特數（turbulent Schmidt number）倒數的常數項。

$$R_{SOR} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) + \xi \frac{u A_x}{x} \right) \quad (2.3)$$

（二）動量方程式（Momentum Equations）

以卡笛爾座標的形式將 Navier-Stokes Equation 展開可得 (x, y, z) 三個方向的流體速度 (u, v, w) ：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \quad (2.6)$$

上式中 $U_w = (u_w, v_w, w_w)$ 是船模速度， (G_x, G_y, G_z) 是船模加速度， (b_x, b_y, b_z) 是通過多孔介質或閘板時減少的流動， $U_s = (u_s, v_s, w_s)$ 是流體表面速度， (f_x, f_y, f_z) 為 x, y, z 三個方向的黏滯項，即

$$\rho V_F f_x = w s x - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\} \quad (2.7)$$

$$\rho V_F f_y = w s y - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\} \quad (2.8)$$

$$\rho V_F f_z = w s_z - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\} \quad (2.9)$$

$w s_x, w s_y, w s_z$ 是在 x, y, z 軸上的壁面應力，上式中 τ_{ij} 代表液體剪應力，第一下標為作用面，第二下標為作用方向：

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{yy} &= -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{xy} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \\ \tau_{xz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\ \tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.2.2 自由液面處理方法 — 流體體積法

以數值方法處理自由液面 (Free Surface) 變化相當不容易，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：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \nabla (F \vec{u} A_f) = 0 \quad (2.11)$$

上式中 V_f 是體積比， A_f 是面積比， \vec{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（True VOF），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。

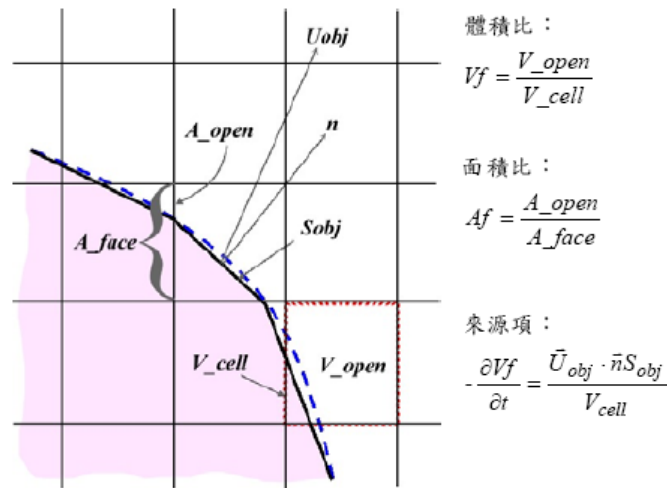


圖 2.2 二維正交網格面積和體積比例係數計算示意圖

如圖 2.2 所示，虛線表示船模切網格前未失真之形狀， A_f 和 V_f 表示船模在計算網格所佔之比例(著色區)， S_{obj} 表示表面積， \vec{n} 表示表面向量， U_{obj} 表示船模在網格間移動之速度， V_{cell} 表示每一立方網格之總體積。

2.2.3 船體六個自由度

本研究中船模的運動包括相對於船體座標系的旋轉與相對於數值航道的移動，數值航道設定笛卡兒直角座標系統，如圖 2.3，而定義船模質心為原點 ($x=y=z=0$) 為船模在數值航道水域裡運動的參考點，船模相對於質心而產生分別為縱移（沿 x 軸位移）、橫移（沿 y 軸位移）、起伏（沿 z 軸位移）及橫搖（繞 x 軸旋轉）、縱搖（繞 y 軸旋轉）、平擺（繞 z 軸旋轉），六個自由度（6 Degrees of freedom, 6DOF）的運動，如圖 2.4。

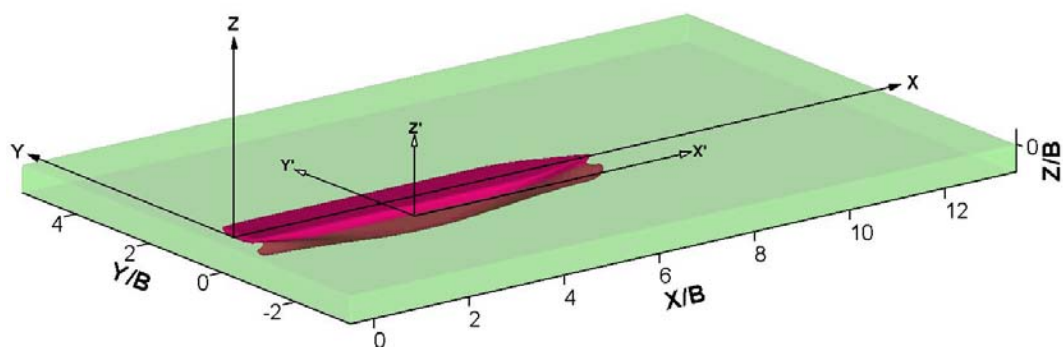


圖 2.3 數值航道示意圖

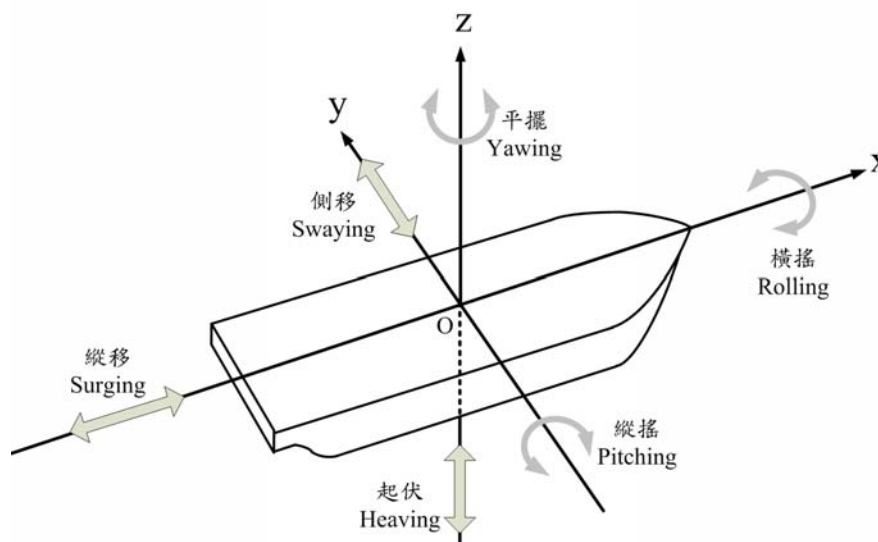


圖 2.4 船模相對於原點而產生六個自由度的運動

本研究主要解船舶耦合運動方程，採用二個直角座標系統來描述，即船體座標系（body system）與數值航道座標系（space system），或稱 Body-Fixed 與 Earth-Fixed（2000），以下定義船舶為船體座標系，相對於數值航道移動，數值航道為數值航道座標系，其 (x, y, z) 之原點在空中固定不動，而船舶 (x', y', z') $t=0$ 時的座標軸相對平行數值航道座標軸。因船舶具有 6 DOF 運動，船舶的原點設定於質心 G ， G 點相對於船舶固定不動 $(u = v = w = \dot{u} = \dot{v} = \dot{w} = 0)$ 。

根據運動學，剛體的一般運動可以劃分成位移運動和旋轉運動。由於繞著原點旋轉，剛體上任一點的速度相等於所選擇原點的速度，因此可以選擇物體質心為 6-DOF 運動的原點。令 P 為物體上之一點，它的速度相對於質心速度 \vec{V}_G 及角速度 $\vec{\omega}$ ：

$$\vec{V}_P = \vec{V}_G + \vec{\omega} \times \vec{r}_{P/G} \quad (2.12)$$

式中， $\vec{r}_{P/G}$ 為 G 到 P 的距離向量，在方程式(2.12)右邊第一項代表質心的位移，第 2 項是質心的旋轉。注意 $\vec{\omega}$ 是運動物體的屬性，是原點的獨立選擇。運動方程式支配兩個分離的運動：

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{U}_G}{dt} \quad (2.13)$$

$$\vec{T}_G = [J] \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times ([J] \cdot \vec{\omega}) \quad (2.14)$$

式中， G 表質心， \vec{F} 是總力， m 是剛體的質量， \vec{T}_G 是 G 的總轉矩， \vec{U} 是 G 的速度， $\vec{\omega}$ 是 G 的角速度， $[J]$ 是船舶 G 的慣性張量轉矩。

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

對角矩陣 $[J]$ 的元素是慣性矩和其他元素的慣性積，以下式表示：

$$J_{11} = \int (y'^2 + z'^2) dm, \quad J_{22} = \int (x'^2 + z'^2) dm, \quad J_{33} = \int (x'^2 + y'^2) dm \quad (2.16)$$

$$J_{12}=J_{21}=-\int x'y'dm, \quad J_{13}=J_{31}=-\int x'z'dm, \quad J_{23}=J_{32}=-\int y'z'dm \quad (2.17)$$

如果 x' , y' 及 z' 和物體的主軸一致，就不會產生慣性積。簡化計算，方程式(2.13)和(2.14)分別解算空間和船舶。組成部分方程式(2.14)在船舶 x' , y' 和 z' 方向為：

$$\begin{aligned} T_{G1} &= J_{11}\dot{\omega}_1 + J_{12}\dot{\omega}_2 + J_{13}\dot{\omega}_3 + \omega_2(J_{31}\omega_1 + J_{32}\omega_2 + J_{33}\omega_3) - \omega_3(J_{21}\omega_1 + J_{22}\omega_2 + J_{23}\omega_3) \\ T_{G2} &= J_{21}\dot{\omega}_1 + J_{22}\dot{\omega}_2 + J_{23}\dot{\omega}_3 + \omega_3(J_{11}\omega_1 + J_{12}\omega_2 + J_{13}\omega_3) - \omega_1(J_{31}\omega_1 + J_{32}\omega_2 + J_{33}\omega_3) \\ T_{G3} &= J_{31}\dot{\omega}_1 + J_{32}\dot{\omega}_2 + J_{33}\dot{\omega}_3 + \omega_1(J_{21}\omega_1 + J_{22}\omega_2 + J_{23}\omega_3) - \omega_2(J_{11}\omega_1 + J_{12}\omega_2 + J_{13}\omega_3) \end{aligned} \quad (2.18)$$

ω_i 及 $\dot{\omega}_i$ ($i=1,2,3$) 分別表示沿著船舶原點座標軸 x' 、 y' 及 z' 的角速度與角加速度。通常總力可以被分成幾個淨值：

$$\vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_h + \vec{F}_c + \vec{F}_{ni} \quad (2.19)$$

式中， \vec{F}_g 是重力加速度， \vec{F}_h 是運動物體壁剪力和壓力引起的流體靜力， \vec{F}_c 是控制力淨值，如橫推力與軸向力控制或阻止物體運動， \vec{F}_{ni} 是非慣性力淨值，如果物體在非慣性力空間內運動。同樣的，質心總轉矩劃分為：

$$\vec{T}_G = \vec{T}_g + \vec{T}_h + \vec{T}_c + \vec{T}_{ni} \quad (2.20)$$

式中， \vec{T}_G , \vec{T}_g , \vec{T}_h , \vec{T}_c 及 \vec{T}_{ni} 分別為質心的總轉矩，重力轉矩，流體靜力轉矩，控制轉矩和非慣性轉矩，而在 6 度自由運動時 \vec{T}_g 不會產生。

2.3 模式驗證

2.3.1 KCS 3600TEU 貨櫃船模驗證

船體航行於水面四周流場極其複雜，準確的分析對於現今的船舶設計固然重要，然而最好的方式就是獲得可信賴的試驗值。SANG-JOON LEE 等人 (2003)，利用循環水道 (circulating water

channel, CWC) 與 PIV 流場測速系統, 對 KCS 3600TEU 貨櫃船模進行船體流場速度的試驗測定, 如圖 2.5 所示。循環水道長 4.5m 、寬 1.0m 、深 1.0m , 船模尺度比 λ 為 $1/153$, 循環水道流速設定 0.6m/s 。此文獻與本計畫引用相同船模, 利用 FLOW-3D 建立一相似之 CWC 進行模擬比較, 探討船舳船底截面之流場顯示渦流之情況, 如圖 2.6 所示。

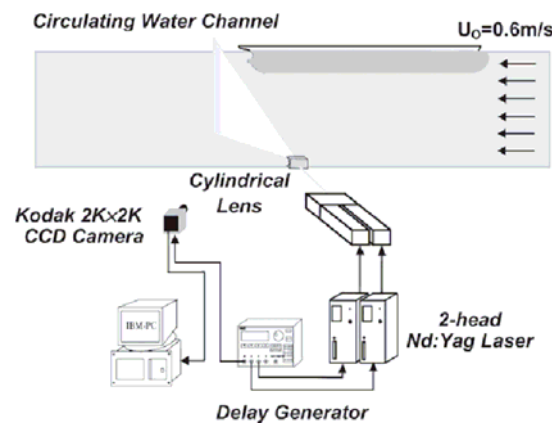


圖 2.5 循環水道 PIV 實驗設備與系統概要圖

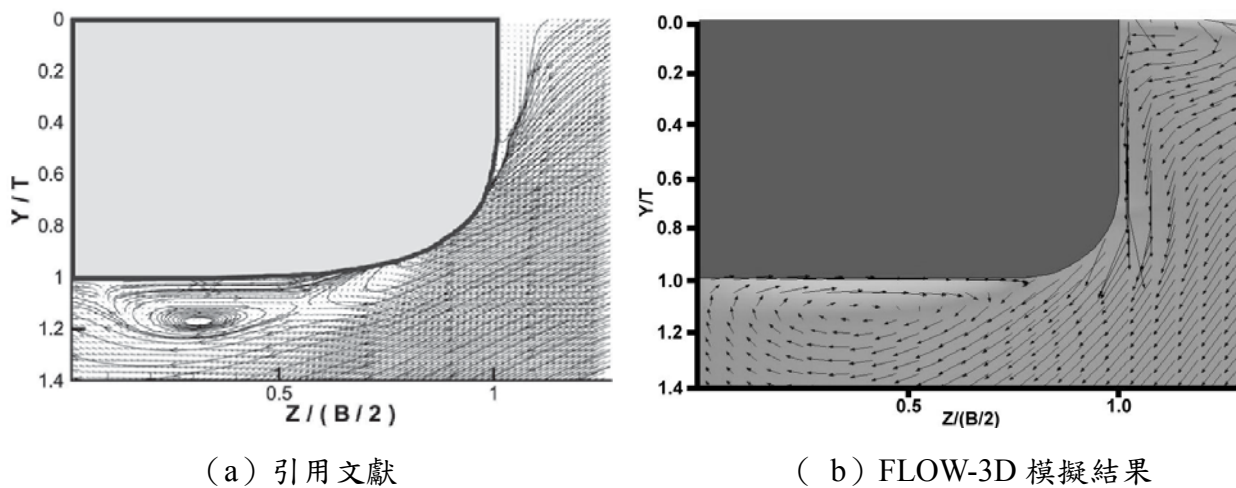


圖 2.6 船模船舳橫剖面船底截面之渦流分布情況

2.3.2 船舶阻力計算驗證

根據 Gengsheng (2006) 文獻模擬驗證，一小艇實船船長 $3.0m$ ，船寬 $0.8m$ ，吃水 $0.2m$ 。小艇排水量 $118.2kg$ ，求其 x 方向移動的船舶阻力。小艇質心慣性張量：

$$I = \begin{bmatrix} 6.7 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 93.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 96.7 \end{bmatrix} (m^2 \cdot kg) \quad (2.21)$$

其計算網格包含兩個區塊，裡面為巢狀，劃分 38400 個網格，其網格密度是外面區塊網格的二倍，外面區塊網格劃分 45000 個，總共 121,800 個固定網格，而實際為 156,388 個計算網格。採紊流 (Renormalized Group, RNG) 模式計算流場，使用通用的移動物體 (General Moving Objects, GMO) 隱性解 (implicit) 與鬆弛法 (Successive Over-Relaxation, SOR) 模式，小艇頂流速 (upstream speed) 分別為 ($5.04 m/s$, $5.88 m/s$, $6.72 m/s$, $7.98 m/s$) 等，如表 2.1。 $5.04 m/s$ 、 $5.88 m/s$ 、 $6.72 m/s$ 之計算阻力為其最後 1s 之平均值， $7.98 m/s$ 之計算阻力為其最後三個週期 ($2.2s \sim 4.0s$) 之平均值模擬時間分別設定 $t = 4s$ ，圖 2.7 為小艇實船船舶阻力之模擬過程 (測量阻力來源：Courtesy of the Azimut yacht)。

表 2.1 測量阻力表

| | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| 頂流速度 (m/s) | 5.04 | 5.88 | 6.72 | 7.98 |
| 計算阻力 (N) | 169.0 | 187.1 | 185.3 | 210.2 |
| 測量阻力 (N) | 171.4 | 178.2 | 188.2 | 217.1 |
| 誤差(%) | 1.4 | 5.0 | 1.5 | 3.2 |

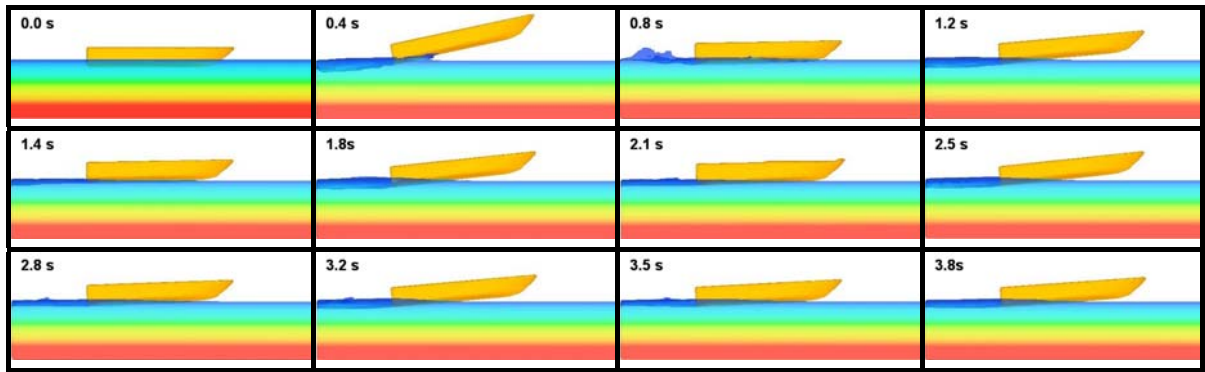


圖 2.7 小艇實船求解船舶阻力之模擬過程 ($V = 7.98m/s$, $t=0\sim4s$)

第三章 模式進行步驟

3.1 研究流程

依計畫目的，研究內容為模型前處理，包含船體及港口模型之建製船舶阻力計算之驗證；數值模擬分析不同節速、船寬等，航行於臺北港之岸壁效應、對遇及興波效應港內的波動分析研究，相關計畫流程如圖 3.1 所示。

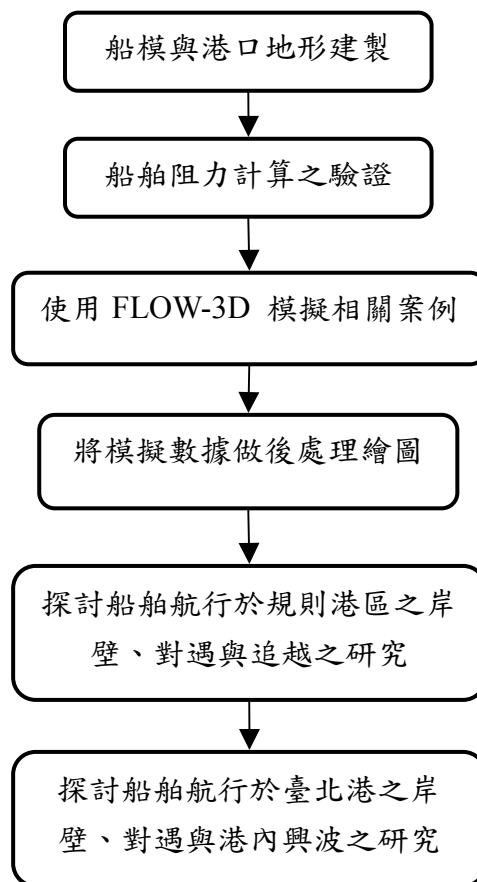


圖 3.1 模擬研究之流程圖

3.2 船模建製

本研究中使用之船模分別為航行於規則港區（使用縮小比例船模）與航行於臺北港區（使用原始比例船模）。

3.2.1 船模試驗的相似概念

利用船模試驗來研究船模的運動，須遵守力學相似律（陸，1999），即船模和實船應幾何相似、運動相似和動力相似。滿足了這些條件後，將船模試驗的結果換算到實船。本文首先利用縮小的船模，模擬船模於限制性水道的岸壁效應、船舶對遇與追越的探討。然後建製船舶與臺北港的原型，並匯置於 FLOW-3D 軟體內作各項參數的設定，船舶與臺北港依照 1：1 的比例尺，模擬船舶航行港內的興波效應。

（一）幾何相似

船模與實船幾何相似，即二者之間所對應之每一線性尺度的比例是一樣的，即

$$\frac{L_s}{L_m} = \frac{B_s}{B_m} = \frac{T_s}{T_m} = \lambda \quad (3.1)$$

上式中 L 、 B 、 T 分別表示船長、船寬、吃水，下標 s 表示實船， m 表示船模。而且，任意對應的尺度之比都等於 λ 。我們稱 λ 為尺度比，船模的全部尺度以實船的對應尺度除以 λ 而得。

（二）運動相似

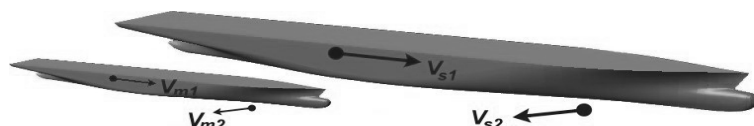


圖 3.2 實船與船模及流體質點之對應

如圖 3.2 所示，實船與船模對應點上，流體質點速度的方向相同，大小成比例，即

$$\frac{V_{s1}}{V_{m1}} = \frac{V_{s2}}{V_{m2}} = \dots = C_v \quad (3.2)$$

上式中 V_s 、 V_m 分別表示實船與船模的航速，下標 1、2、... 表示對應點與流體質點的位置。

運動相似的兩個流動系統中，對應流體質點位移對應距離所需的時間間隔成比例：

$$C_v = \frac{v_s}{v_m} = \frac{\lim_{\Delta t_s \rightarrow 0} \frac{\Delta L_s}{\Delta t_s}}{\lim_{\Delta t_m \rightarrow 0} \frac{\Delta L_m}{\Delta t_m}} = \frac{\frac{\Delta L_s}{\Delta t_s}}{\frac{\Delta L_m}{\Delta t_m}} = \frac{C_L}{C_t} \quad (3.3)$$

上式中， C_v 、 C_t 均為常數，則 C_L 也為常數，即運動相似的系統，時間也相似。運動相似必須以幾何相似為前提。 C_v 、 C_t 均為常數，則 C_a 也為常數，即運動相似的系統中，加速度也相似。運動相似的系統，對應點的加速度也相似。

$$C_a = \frac{a_s}{a_m} = \frac{\lim_{\Delta t_s \rightarrow 0} \frac{\Delta v_s}{\Delta t_s}}{\lim_{\Delta t_m \rightarrow 0} \frac{\Delta v_m}{\Delta t_m}} = \frac{\frac{\Delta v_s}{\Delta t_s}}{\frac{\Delta v_m}{\Delta t_m}} = \frac{C_v}{C_t} = \frac{C_L}{C_t^2} \quad (3.4)$$

(三) 動力相似

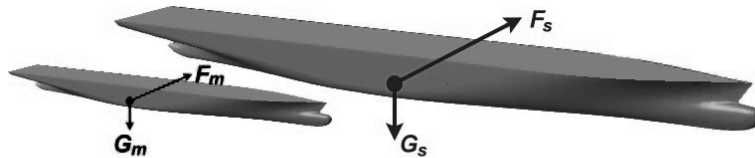


圖 3.3 實船與船模在對應點上的作用力其方向相同大小成比例

如圖 3.3 所示，在運動相似的條件下，作用在實船與船模在對應點上，對應點的方向相同，大小成比例，即

$$\frac{F_s}{F_m} = \frac{G_s}{G_m} = \dots = C_F \quad (3.5)$$

式中 F_s 、 F_m 分別表示作用在實船與船模對應點上的力，動力相似包括運動相似，而運動相似又包括幾何相似。所以動力相似包括力、時間和長度三個基本物理量相似。由此可以推導出，兩系統之間存在密度相似和流體動力（壓力、升力、慣性力、黏性力、阻力）係數相等。

本研究使用 KCS 實船之 L_{pp} 長 230m，尺度比 $\lambda = L_s/L_m = 31.5994$ ，若實船航速 $V_s = 4.63\text{m/s}$ ，則其船模試驗速度 V_m 的求解過程如下：

(一)由雷諾數(Reynolds number, Re)相似得

$$\frac{\text{慣性力}}{\text{黏性力}} = \frac{V^2/L}{\nu V/L^2} = \frac{VL}{\nu} = Re$$

V 特徵速度(m/s) L 特徵長度(m) ν 動黏度(m^2/s)

$$(Re)_m = (Re)_s \Rightarrow \left(\frac{VL}{\nu}\right)_m = \left(\frac{VL}{\nu}\right)_s \quad (3.6)$$

$$V_m = \frac{\nu_m}{\nu_s} \frac{L_s}{L_m} V_s = \frac{\nu_m}{\nu_s} \frac{230}{31.5994} V_s = 31.5994 V_s = \lambda V_s \quad (3.7)$$

由福祿數(Froude number, Fr)相似得

$$(Fr)_m = (Fr)_s \Rightarrow \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_m = \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_s \quad (3.8)$$

$$V_m = \sqrt{\frac{g_m L_m}{g_s L_s}} V_s = \sqrt{\frac{31.5994}{230}} V_s = \sqrt{\frac{1}{31.5994}} V_s = \sqrt{\frac{1}{\lambda}} V_s \quad (3.9)$$

$$\sqrt{\frac{l}{\lambda}} V_s \neq \lambda V_s$$

即 $(Fr)_M=(Fr)_S$ 以及 $(Re)_M=(Re)_S$ 無法同時滿足，在船模試驗當中，特徵雷諾數一般是在 $10^6 \sim 10^7$ ，而對實船而言，特徵雷諾數一般是在 $10^8 \sim 10^9$ ，這樣的高雷諾數，其黏性力相對於慣性力小很多，當實船與船模之福祿數及雷諾數無法分別對應相等時，可以把黏性力省略簡化，而保持福祿數相等，為較易達到的條件，即船模以較實船為小的速度來進行試驗，應較合理且可相對地減小試驗設備。對於雷諾數不相等所導致試驗誤差可從經驗上加以修正，此種因無法滿足動力相似所造成的誤差稱為尺度效應（陸，1999）。

3.2.2 原比例與縮小比例之船模實體建製

本文所使用之船模引用韓國海事與海洋工程研究所 MOERI（Maritime & Ocean Engineering Research Institute / KORDI）的 KCS 資料，此船屬於 3600TEU 的貨櫃船（如圖 3.4），其幾何數據如表 3.1 所示。



圖 3.4 KCS 同船型貨櫃船

表 3.1 KCS 船模與實船之幾何數據表

| 參數項目 | 實船 | 船模 | 單位 |
|----------------------|---------|---------|----------|
| 尺度比 λ | 1 | 31.5994 | - |
| 垂標間長 L_{PP} | 230.0 | 7.2786 | m |
| 船寬 B | 32.2 | 1.0190 | m |
| 吃水 T | 10.8 | 0.3418 | m |
| 排水量 Δ | 53330.0 | 1.6909 | $tons$ |
| 排水量體積 | 52030.0 | 1.6497 | m^3 |
| 浸水面積 S | 9424.0 | 9.4984 | m^2 |
| 肥瘦係數 C_B | 0.6508 | 0.6508 | - |
| 菱形係數 C_P | 0.6608 | 0.6608 | - |
| 定傾高度 \overline{GM} | 7.326 | 0.2318 | m |
| L_{PP}/B | 7.143 | 7.1430 | - |
| B/T | 2.981 | 2.9810 | - |
| g 重力加速度 | 9.81 | 9.8080 | m/s^2 |
| ρ 流體密度 | 1025 | 1025 | kg/m^3 |
| 質心 x | 111.6 | 3.53 | m |
| 質心 y | 0.0 | 0.0 | m |

| | | | |
|----------|----------------|---------------|---------------|
| 質心 z | 5.9 | 0.187 | m |
| I_{xx} | 5.69284304e+9 | 1.8109678e+2 | $kg\cdot m^2$ |
| I_{yy} | 7.7933131e+11 | 2.47507527e+4 | $kg\cdot m^2$ |
| I_{zz} | 7.8043431e+11 | 2.47861275e+4 | $kg\cdot m^2$ |
| I_{xy} | -3.97e+2 | 1.77e-04 | $kg\cdot m^2$ |
| I_{yz} | 1.e+2 | 3.4e-04 | $kg\cdot m^2$ |
| I_{zx} | 3.38242495e+10 | 1.0741759e+3 | $kg\cdot m^2$ |

3.2.3 建立船型表

船型表 (Offsets table) 的建立，根據相似律，將實船尺寸換算為船模尺寸，即長度方向、寬度方向與高度方向比例係數同時處理之。KCS 船模設定尺度比 $\lambda = 31.5994$ ，再將實船船型表（如表 3.2）上各水線半寬與縱剖面間距與各縱剖面高度與水線間距乘上 λ ，即可得船模之船型表（如表 3.3），實船的 *station 236.9* 即船模的 *station 7.50*。

表 3.2 貨櫃船 KCS 位於 *station 236.9* 之船型表

| x | y | Z | x | y | z | x | y | z |
|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 236.9 | 0 | 4.9580 | 236.9 | 0.4464 | 5.5978 | 236.9 | 0.4079 | 6.3728 |
| 236.9 | 0.0506 | 5.0006 | 236.9 | 0.4640 | 5.6619 | 236.9 | 0.3760 | 6.4310 |
| 236.9 | 0.1005 | 5.0439 | 236.9 | 0.4785 | 5.7266 | 236.9 | 0.3398 | 6.4868 |
| 236.9 | 0.1487 | 5.0888 | 236.9 | 0.4895 | 5.7919 | 236.9 | 0.2997 | 6.5398 |
| 236.9 | 0.1944 | 5.1359 | 236.9 | 0.4969 | 5.8576 | 236.9 | 0.2560 | 6.5899 |
| 236.9 | 0.2371 | 5.1859 | 236.9 | 0.5006 | 5.9236 | 236.9 | 0.2091 | 6.6367 |
| 236.9 | 0.2764 | 5.2387 | 236.9 | 0.5004 | 5.9896 | 236.9 | 0.1593 | 6.6800 |
| 236.9 | 0.3124 | 5.2941 | 236.9 | 0.4962 | 6.0557 | 236.9 | 0.1074 | 6.7206 |

| | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 236.9 | 0.3453 | 5.3517 | 236.9 | 0.4877 | 6.1214 | 236.9 | 0.0541 | 6.7593 |
| 236.9 | 0.3751 | 5.4112 | 236.9 | 0.4748 | 6.1863 | 236.9 | 0 | 6.7970 |
| 236.9 | 0.4019 | 5.4722 | 236.9 | 0.4574 | 6.2501 | | | |
| 236.9 | 0.4256 | 5.5345 | 236.9 | 0.4351 | 6.3124 | | | |

表 3.3 貨櫃船 KCS(縮小 λ 倍的船模)位於 station 7.50 之船型表

| x | y | Z | x | y | z | x | y | z |
|------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|
| 7.50 | 0 | 0.1569 | 7.50 | 0.0141 | 0.1771 | 7.50 | 0.0129 | 0.2017 |
| 7.50 | 0.0016 | 0.1582 | 7.50 | 0.0147 | 0.1792 | 7.50 | 0.0119 | 0.2035 |
| 7.50 | 0.0032 | 0.1596 | 7.50 | 0.0151 | 0.1812 | 7.50 | 0.0108 | 0.2053 |
| 7.50 | 0.0047 | 0.1610 | 7.50 | 0.0155 | 0.1833 | 7.50 | 0.0095 | 0.2070 |
| 7.50 | 0.0062 | 0.1625 | 7.50 | 0.0157 | 0.1854 | 7.50 | 0.0081 | 0.2085 |
| 7.50 | 0.0075 | 0.1641 | 7.50 | 0.0158 | 0.1875 | 7.50 | 0.0066 | 0.2100 |
| 7.50 | 0.0087 | 0.1658 | 7.50 | 0.0158 | 0.1895 | 7.50 | 0.0050 | 0.2114 |
| 7.50 | 0.0099 | 0.1675 | 7.50 | 0.0157 | 0.1916 | 7.50 | 0.0034 | 0.2127 |
| 7.50 | 0.0109 | 0.1694 | 7.50 | 0.0154 | 0.1937 | 7.50 | 0.0017 | 0.2139 |
| 7.50 | 0.0119 | 0.1712 | 7.50 | 0.0150 | 0.1958 | 7.50 | 0 | 0.2151 |
| 7.50 | 0.0127 | 0.1732 | 7.50 | 0.0145 | 0.1978 | | | |
| 7.50 | 0.0135 | 0.1751 | 7.50 | 0.0138 | 0.1998 | | | |

3.2.4 繪製橫剖面線

根據船型表，匯入 Rhino marine 三維 CAD 軟體來繪製船模取靜水面與船舫剖面的交線和艏垂線的交點為原點($x=y=z=0$)，船艏橫剖面線 station(-006)到船艉橫剖面線 station(236.9)，總共繪製 57 個橫剖面線，如圖 3.5 所示。將繪製的完成的船模，如圖 3.6。利用 CAD 軟體將船模轉成 FLOW-3D 所支援檔案型態，STL (stereo lithography) 格式，最後匯入 FLOW-3D 前處理器建立網格進行模擬。

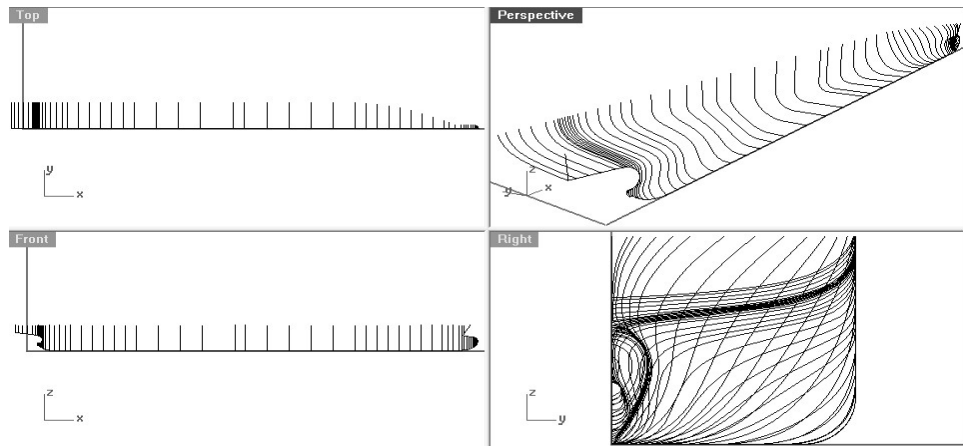


圖 3.5 船模橫剖面線

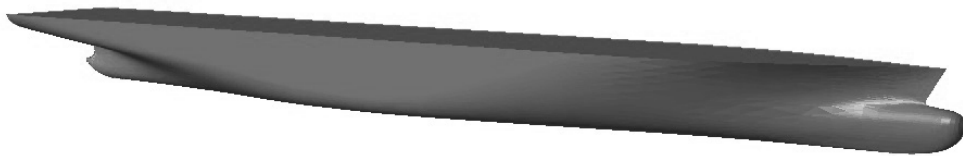


圖 3.6 KCS 船模船體模型

3.3 水深高程地形建製

3.3.1 利用 GIS 轉出數據化的地形

臺北港地形的製作方法與步驟，首先利用臺中港灣技術研究中心的水深地形資料，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，如圖 3.7 所示。為了要製作 3D 模型，所以將後面的比例網格關掉避免在製作等高線時，系統後面的網格也算進去，呈現如圖 3.8 所示。

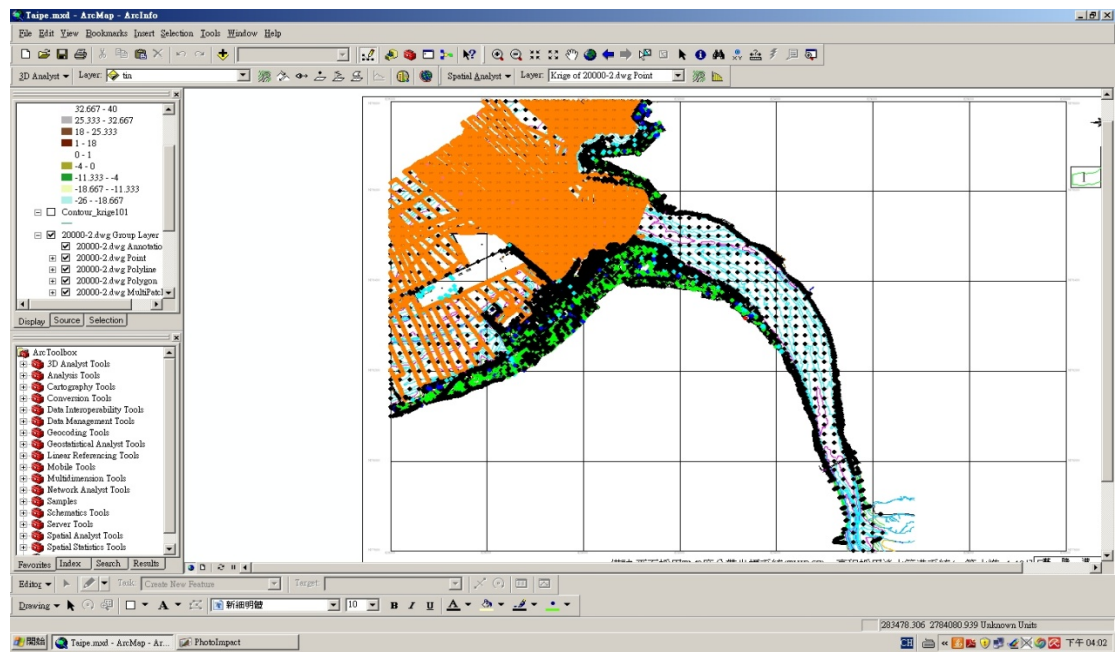


圖 3.7 1/20000 的繪圖檔案進入 GIS 所呈現的網格與行船軌跡

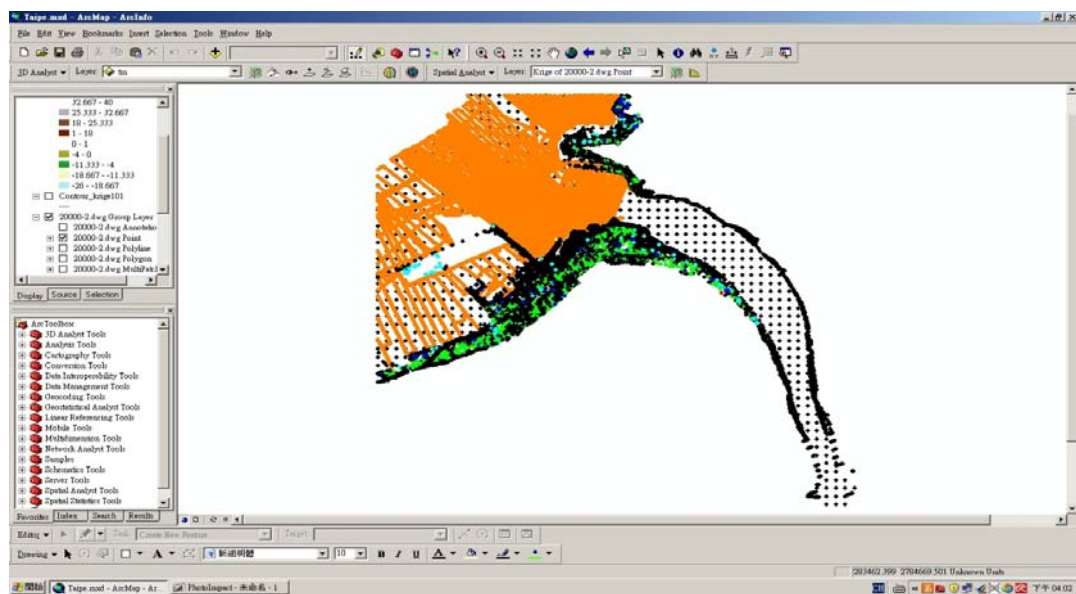


圖 3.8 將比例網格取消

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如圖 3.9 所示。而 GIS 產生模型高度所出現的高度色塊分佈圖層如圖 3.10 所示。套用上面的高度色塊分佈圖利用指令介面（如圖 3.11），轉換成等高線如圖 3.12 所示。在 GIS 裡面經由等高線圖層做最後一次高度轉換之後會完成一個高度色差圖層如圖 3.13。最後再利用 GIS 裡面的指令給予高度勾選讓圖裡面的高度數據開啟之後，如圖 3.14 顯示出該地方的深度與高度。最後將上面的檔案轉存成 WRL 檔，將檔案轉給 Maya 與 3D MAX 進行港口建置。

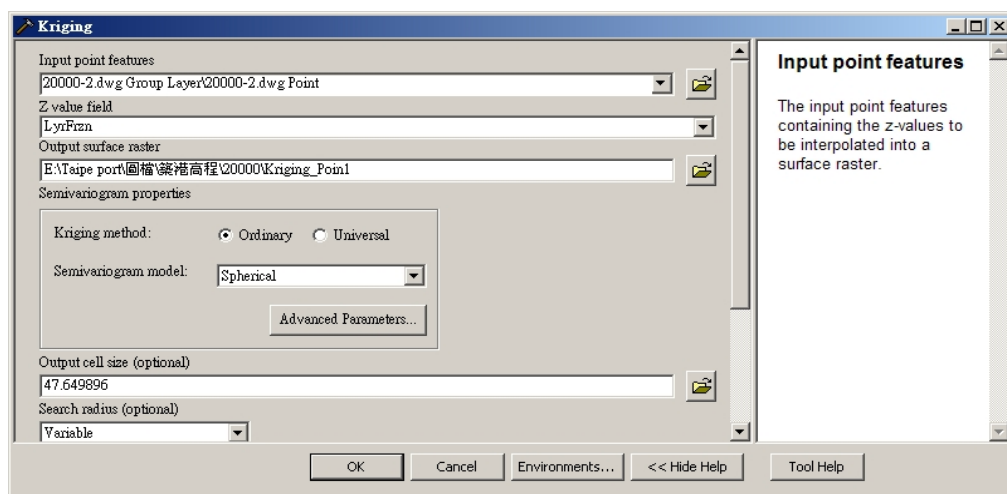


圖 3.9 GIS 進行高程轉換的介面

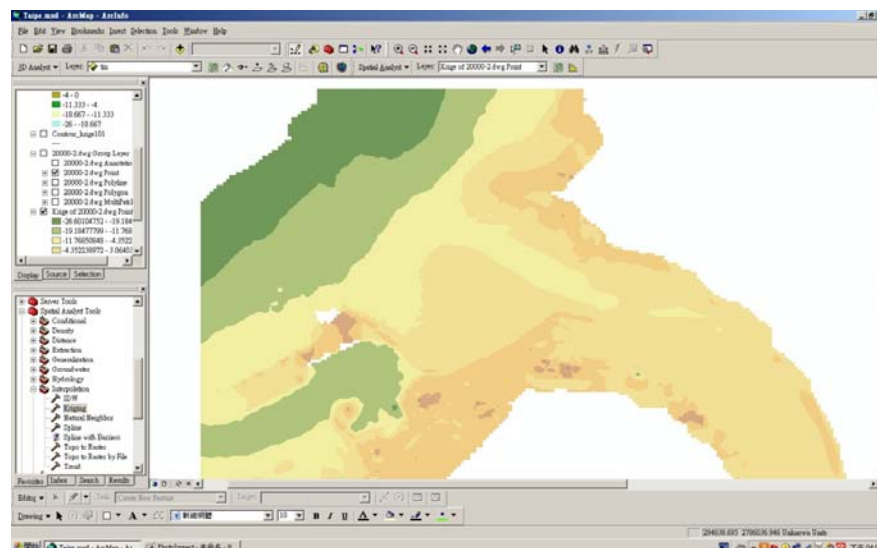


圖 3.10 高度色塊圖層

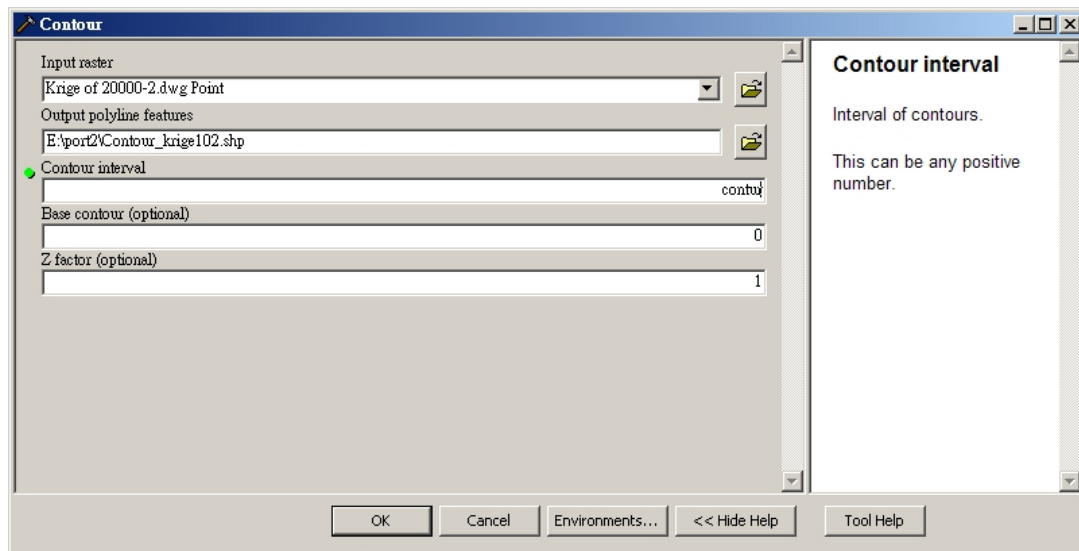


圖 3.11 轉換等高線指令介面

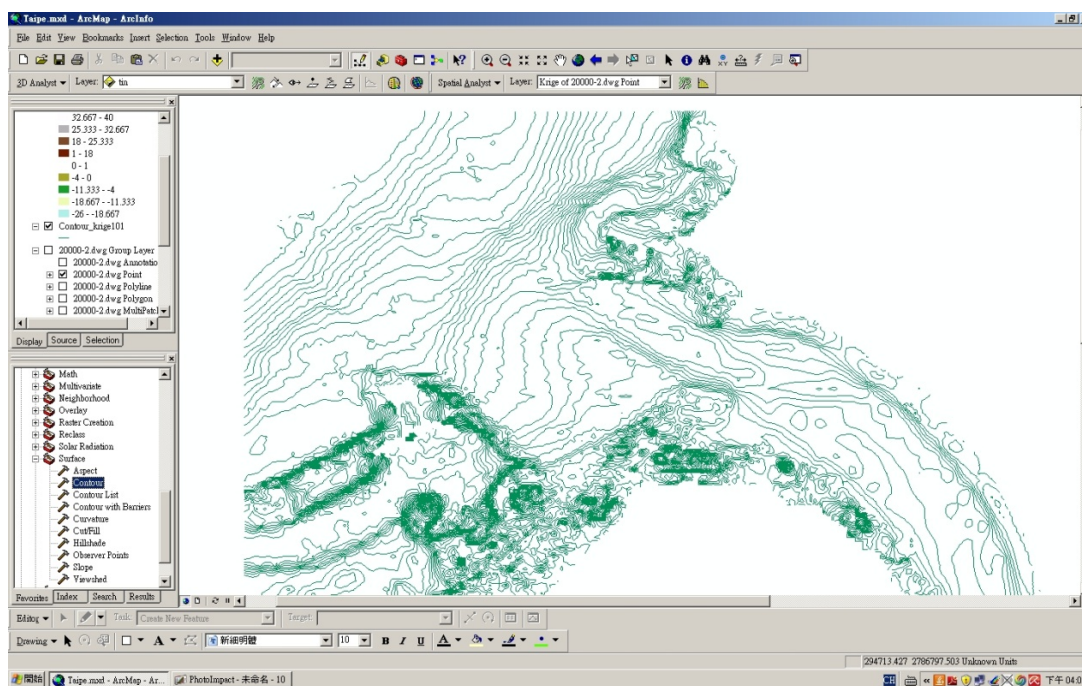


圖 3.12 完成轉換等高線圖層

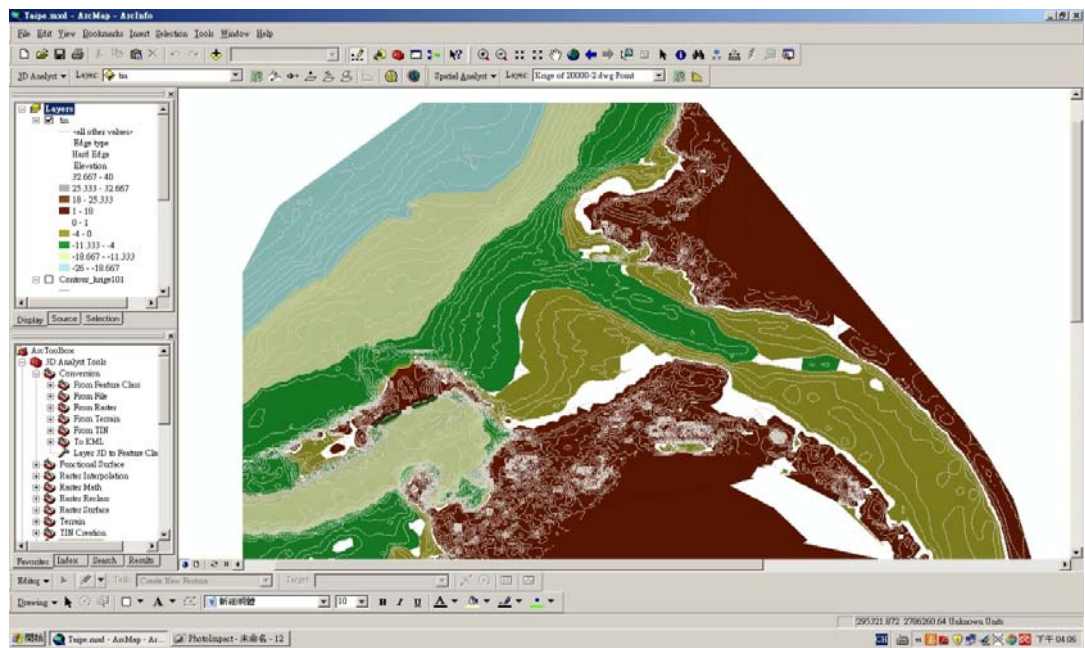


圖 3.13 等高線轉換成的高度色差圖

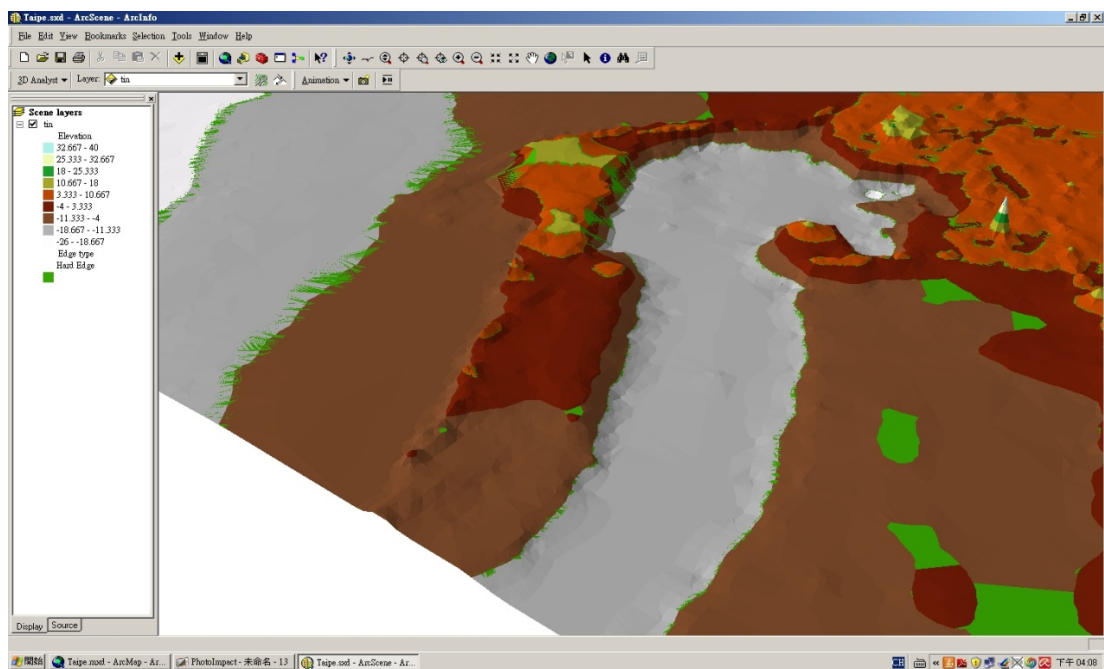


圖 3.14 在 GIS 裡面產生的地形模型

3.3.2 利用 3D 軟體製作受測模型

使用工程用的向量式港口碼頭建置圖形與高度，經過掃描如圖 3.15（資料來源：宇泰工程顧問有限公司），另外使用測量說明該份文件中測量範圍的图片，進入繪圖軟體做重疊並且跟其他相關的 dwg 檔做比對，之後將完成的圖檔匯入 3D 製圖軟體，進行點對點的描繪，以確保港口碼頭輪廓不會有位移、變形等偏差如圖 3.16，在經由 3D 軟體的指令將線稿實體化之後會如圖 3.17 所示。



圖 3.15 向量工程圖

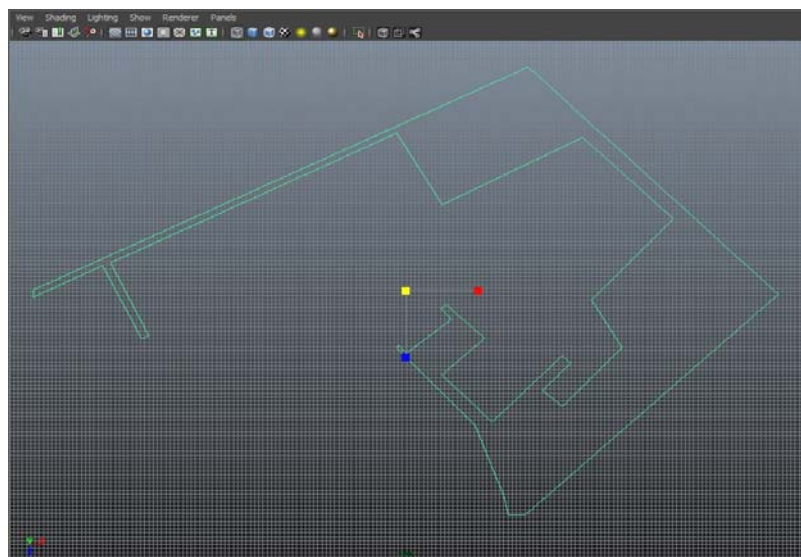


圖 3.16 臺北港內港點對點描繪線稿

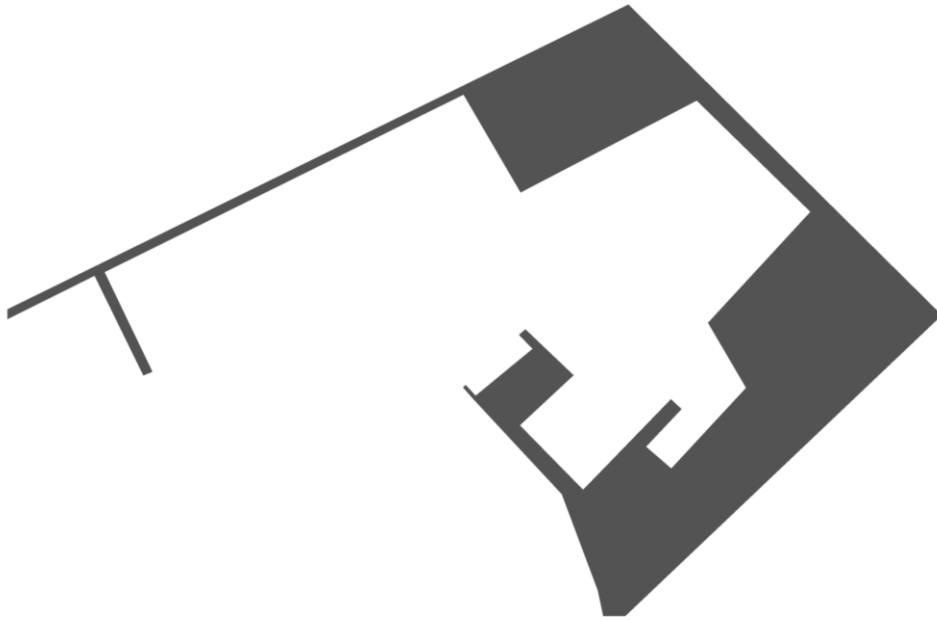


圖 3.17 實體化臺北港模型

製作完成內港口後，將 GIS 轉出的 WRL 檔匯入 3D 製圖軟體，製作成立體水深高程模型線稿如圖 3.18，並且實體化後如圖 3.19。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，並且些許切割進行受測區域的縮小，製作出圖形如圖 3.20 所示。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 3.21。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。

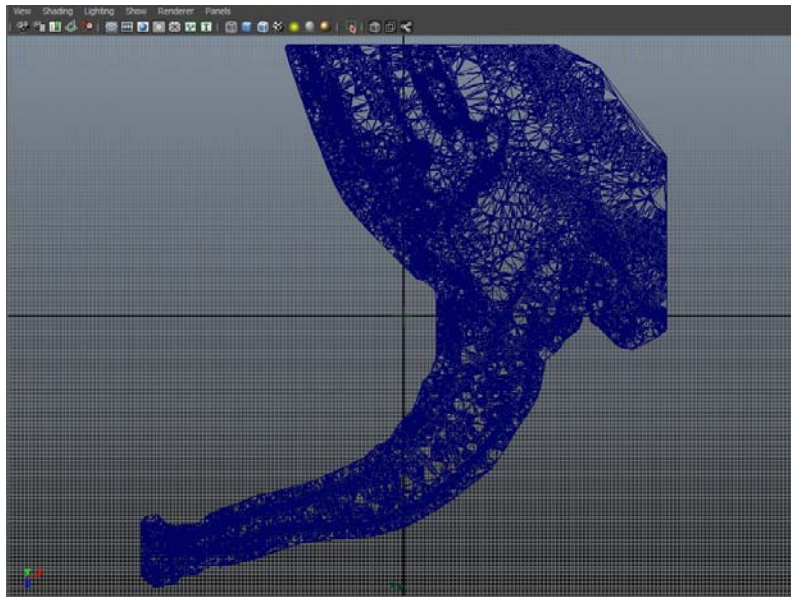


圖 3.18 3D 臺北港水深高程模型線稿

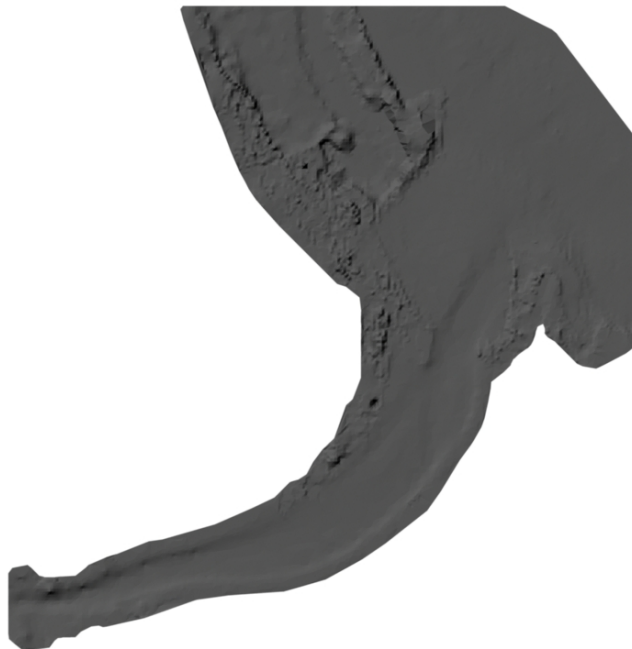


圖 3.19 實體化臺北港水深高程模型

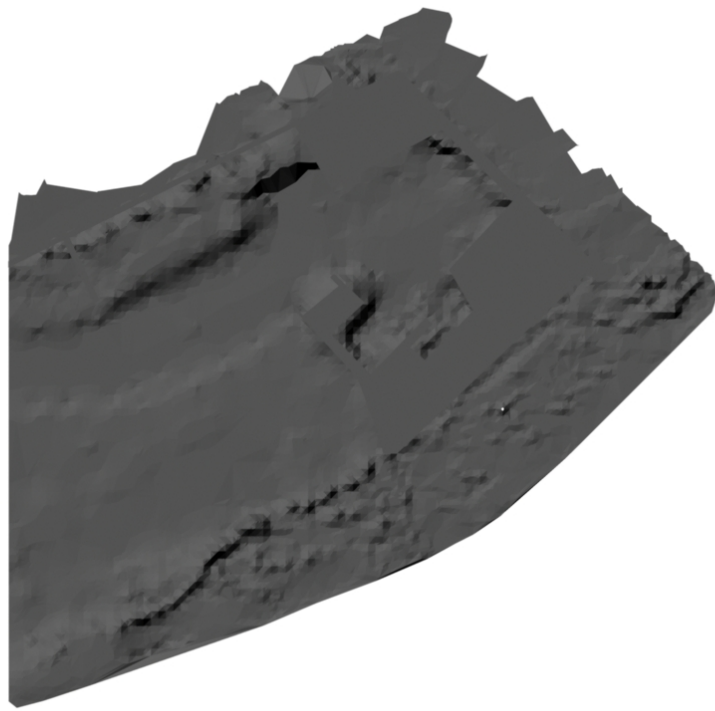


圖 3.20 重疊臺北港水深高程模型

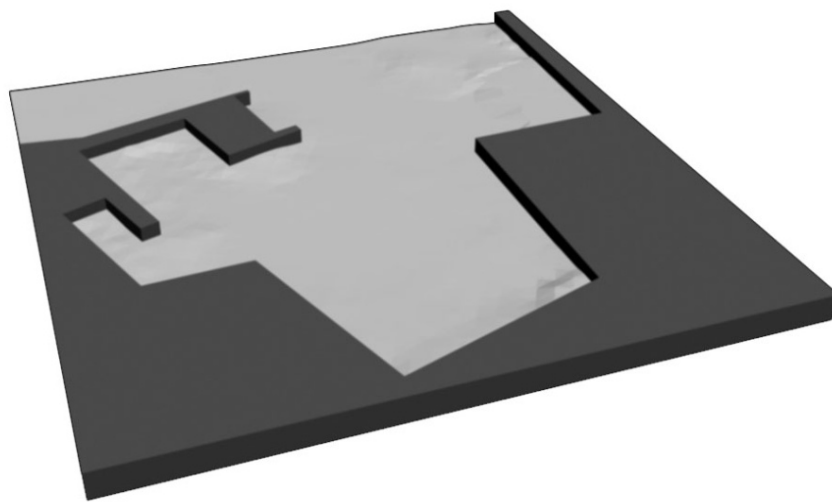


圖 3.21 臺北港水深高程模型受測區域

3.4 模擬案例介紹

本文模擬案例分為規則港區之模擬與臺北港區之模擬，其目的為比較兩者間的差異性及對船舶進出臺北港引發的興波效應、岸壁效應、船舶對遇等更進一步的探討，下列將分節介紹規則港區與臺北港港區之模擬案例。

3.4.1 規則港區模擬（縮小比例 31.5994 倍）

規則港區模擬案例分別為單一船舶以不同船速航行於規則港區、不同船岸距離之岸壁效應及船舶的對遇與追越。

（一）單一船舶航行於規則港區

單一船舶之計算區域長為 $4L$ 、寬為 $10B$ ， L 為船長（7.2786 m）、 B 為船寬（1.0190 m）、吃水 0.3418 m，船舶置於進口處的 $L/5$ ，如圖 3.22 所示，模擬船速分別為 $V_1 = 0.275 \text{ m/s}$ 及 $V_2 = 0.55 \text{ m/s}$ 。

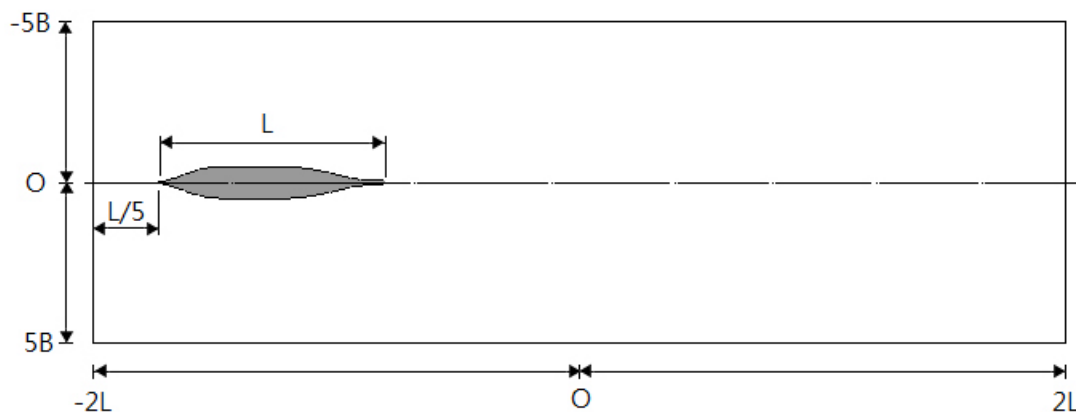


圖 3.22 單一船舶於規則港區之示意圖

(二) 船舶航行於規則港區之岸壁效應

船舶航行於規則港區岸壁效應之計算區域長為 $1.5L$ 、寬為 $9B$ ， L 為船長 (7.2786 m)、 B 為船寬 (1.0190 m)、吃水 0.3418 m ，如圖 3.23 所示。模擬船速分別為 $V_1 = 0.275\text{ m/s}$ 及 $V_2 = 0.55\text{ m/s}$ ，船與岸壁距離分別為 $0.5B$ 、 $1B$ 、 $1.5B$ 、 $2B$

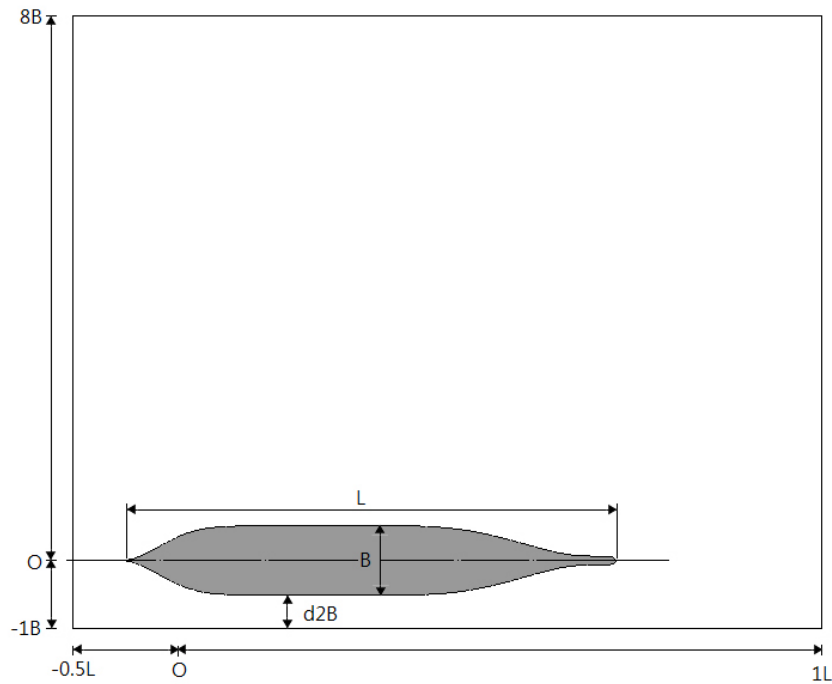


圖 3.23 船舶航行於規則港區岸壁效應之示意圖

(三) 船舶對遇航行於規則港區

船舶對遇之計算區域長為 $6L$ 、寬為 $10B$ ， L 為船長 (7.2786 m)、 B 為船寬 (1.0190 m)、吃水 0.3418 m ，船舶一 (L_1) 與船舶二 (L_2) 船頭距離為一個船長 (L)、船尾距離為三個船長 ($3L$)；而船壁距離分別為 $0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $1B$ 、 $2B$ ，如圖 3.24 所示，模擬船速分別為 $V_1 = 0.275\text{ m/s}$ 對 $V_2 = 0.55\text{ m/s}$ 與 $V_1 = 0.275\text{ m/s}$ 對 $V_2 = 0.275\text{ m/s}$ 兩組船速。

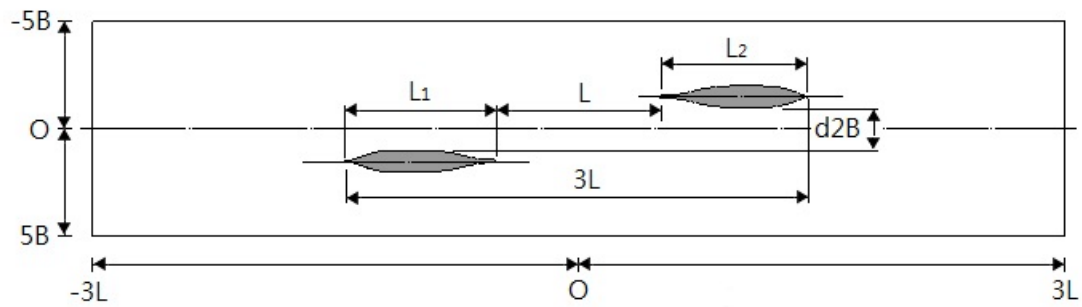


圖 3.24 船舶對遇於規則港區之示意圖

(四) 船舶追越航行於規則港區

船舶對遇之計算區域長為 $6.5L$ 、寬為 $10B$ ， L 為船長 (7.2786 m)、 B 為船寬 (1.0190 m)、吃水 0.3418 m ，船舶置於進口處的 $L/5$ 。船舶一 (L_1) 與船舶二 (L_2) 船頭與船尾距離為 $L/5$ ，而船壁距離分別為 $0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $1B$ 、 $2B$ ，如圖 3.25 所示，模擬船速分別為 $V_1 = 0.55\text{ m/s}$ 對 $V_2 = 0.18\text{ m/s}$ 。

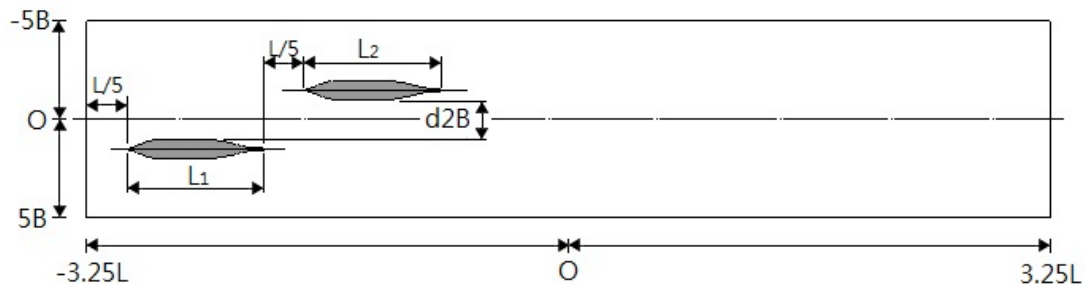


圖 3.25 船舶追越於規則港區之示意圖

3.4.2 臺北港港內模擬 (依照原型比例尺 1:1 建製)

臺北港港內模擬案例分為單一船舶以不同船速及航向，航行於臺北港內之興波效應，港內航道水深設定為平均 -18 m ，船舶吃水為 -10.8 m ，液面的水位設為 0 m 。並設定控制點觀察船舶航行於港內之興波變化，在內港中擷取了八個觀測點，如圖 3.26 所示。依不同船岸距離之模擬船舶航行於臺北港之岸壁效應及兩艘船舶以不同船壁距離之對遇情況，相關案例模擬參數如表 3.4 所示。

表 3.4 臺北港模擬案例表

| 案例 | 船舶航行情況 | 參數 | 航行時間 |
|--------|------------------|--|-------|
| Case1 | 單一船舶進港 | 船速 3 節 ($V_1=3$ Knots) | 500 秒 |
| Case2 | 單一船舶進港 | 船速 6 節 ($V_2=6$ Knots) | 300 秒 |
| Case3 | 單一船舶進港，偏航 10 度航行 | 船速 3 節 ($V_1=3$ Knots) | 500 秒 |
| Case4 | 單一船舶進港，偏航 10 度航行 | 船速 6 節 ($V_2=6$ Knots) | 300 秒 |
| Case5 | 單一船舶出港 | 船速 3 節 ($V_1=3$ Knots) | 500 秒 |
| Case6 | 單一船舶出港 | 船速 6 節 ($V_2=6$ Knots) | 500 秒 |
| Case7 | 岸壁效應分析 | 船速 3 節 ($V_1=3$ Knots) 船岸距離 ($d2b=0.5B$) | 200 秒 |
| Case8 | 岸壁效應分析 | 船速 3 節 ($V_1=3$ Knots) 船岸距離 ($d2b=1B$) | 200 秒 |
| Case9 | 岸壁效應分析 | 船速 3 節 ($V_1=3$ Knots) 船岸距離 ($d2b=2B$) | 200 秒 |
| Case10 | 岸壁效應分析 | 船速 6 節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=0.5B$) | 200 秒 |
| Case11 | 岸壁效應分析 | 船速 6 節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=1B$) | 200 秒 |
| Case12 | 岸壁效應分析 | 船速 6 節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=2B$) | 200 秒 |
| Case13 | 船舶對遇 | 船速 3 節 ($V_1=3$ Knots) 船速 6 節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=0.25B$) | 200 秒 |
| Case14 | 船舶對遇 | 船速 3 節 ($V_1=3$ Knots) 船速 6 節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=0.5B$) | 200 秒 |
| Case15 | 船舶對遇 | 船速 3 節 ($V_1=3$ Knots) 船速 6 節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=1B$) | 200 秒 |



圖 3.26 船舶航行於臺北港之興波效應觀測點示意圖

3.5 邊界條件與網格設定

臺北港港內的地形，因三面為閉口端，設定閉口端固體邊界為無滑動條件，入口處為出流邊界條件，另外底床也須滿足無滑動邊界條件。船舶則依給定的航速作設定，一般而言，船體運動設定為 6 個自由度的耦合運動。若欲設定船舶沿固定航線行駛，則船舶平擺與側移須設為零。網格設定分為規則港區模擬，每個案例設定總網格數為 2,000,000 個與臺北港港內總長為 2931m、寬度為 1842m、高度為 32m，利用 FLOW-3D 中網格自動生成方式切割計算域的網格分佈，每個案例設定總網格數為 8,000,000 個。

第四章 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

船舶航行於限制性水域，或與它船相遇，會受到船岸或它船的相互作用，船舶與流體相互作用，船舶四周的水體產生不對稱壓力場，船艏艉產生高壓區，船舦會形成相對低壓區，會引起船舶航行的穩定性，進而偏離航道。本章節擬先模擬船模於規則航道限制性水域的狀況，在第五章進行船舶進出臺北港的模擬。本章節的模擬有船舶航行產生的興波效應、船舶與岸壁作用產生的岸壁效應、兩船對遇與追越等案例。船舶具有寬度與吃水，航行時會經過水體，水向船舶兩側及下方排出，於是船四周因水體改變而產生了壓力差，施以流力，船舶也對水體產生作用力，因而造成水面波動，水體因船舶大小增加，航速增快，使單位時間內排出之水量隨之增多，船體四周產生的流力增大。

影響船舶航行於限制性水域的因素很多，包含水道的寬度，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。本章僅針對船與岸壁距離、兩船之間距、船速的參數進行考量。為了節省計算時間，本章節的模擬採用縮小船模，其他的參數，如船舶吃水、船模速度也依照幾何相似與運動相似來進行船舶與模型船之間的換算。

4.1 船舶於限制性水域的航行

本節模擬的案例有船舶沿固定航線航行，航行時船體所受到的時變性橫移力、船舶的興波效應，期間我們將利用不同時刻的壓力場與速度場來呈現船體四周水體的相關物理量的變化，以作為模擬船舶航行於臺北港所引發興波效應的參考。

1. 船舶的橫移力

船舶在海上航行，受到波浪、水流、風壓等因素、船舶產生六個自由度的變化。本節假設的條件為船舶沿固定航線行駛，船模速度為 0.27m/s 或 0.55m/s ，比較兩者間的橫移力與航行中所造成的阻力。圖 4.1 為橫移力比較，不論船模速度是 0.27m/s 或 0.55m/s ，其橫移力隨時間正負之間作擺盪。另外圖 4.2 為兩種不同船速所產生的阻力之比較。

2. 船舶的興波效應

隨著船舶因體積愈大其排開同體積的水愈大，所以大船會比小船所產生興波效應愈明顯，船速愈快產生的興波愈明顯，水深愈低，由於淺水效應，所產生的興波愈明顯。船舶在航行時，船艏處水流被船艏切開擠向兩側及下方時，水流之流速會變慢，而後被擠向兩側及下方之水流，則以較快之速度流向船舯。當水流到船舯時，再以較慢之速度在船艉附近合成。由柏努力方程式得知流體速度增加則壓力減少，在船艏與船艉處，水流流速變慢壓力增大而形成高壓區。在船舯處，水流流速相較船艏與船艉處快，使壓力降低形成低壓區。圖 4.3 為船模速度 0.27m/s ，航行於限制性水域，產生的興波效應之壓力與速度向量分佈圖。由圖可發現壓力波由船模四周往外輻射出，也有出現艉跡流，因船速由速度零瞬間加至 0.27m/s 或 0.55m/s ，之後維持等速前進，艉跡波由小慢慢變大再維持穩定大小發展。圖 4.4 為船模速度 0.55m/s 的壓力與速度向量圖，比較圖 4.3 與圖 4.4，船模速度快的興波效應愈明顯，壓力波往外散射出也愈快，艉跡波也較明顯。

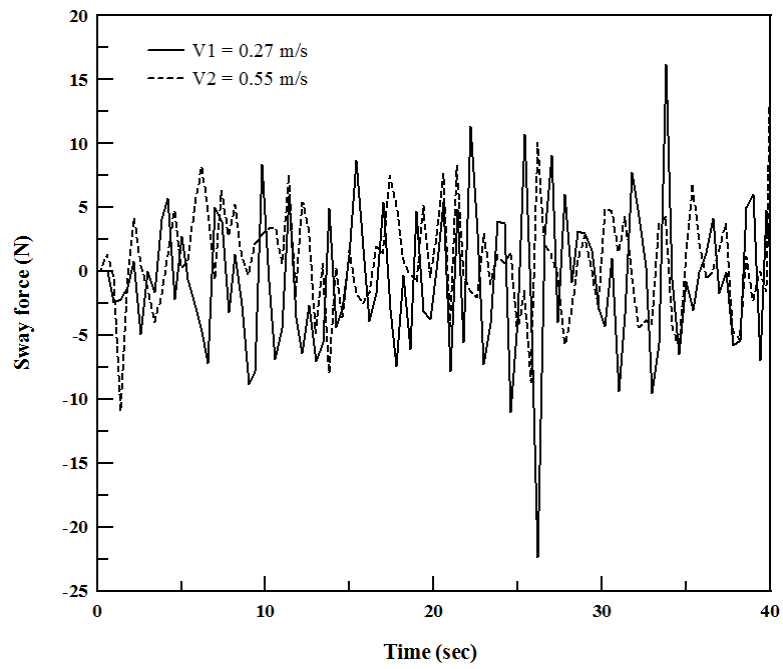


圖 4.1 船舶航行於狹窄水道船速 0.27 m/s 與 0.55 m/s 之橫移力比較圖

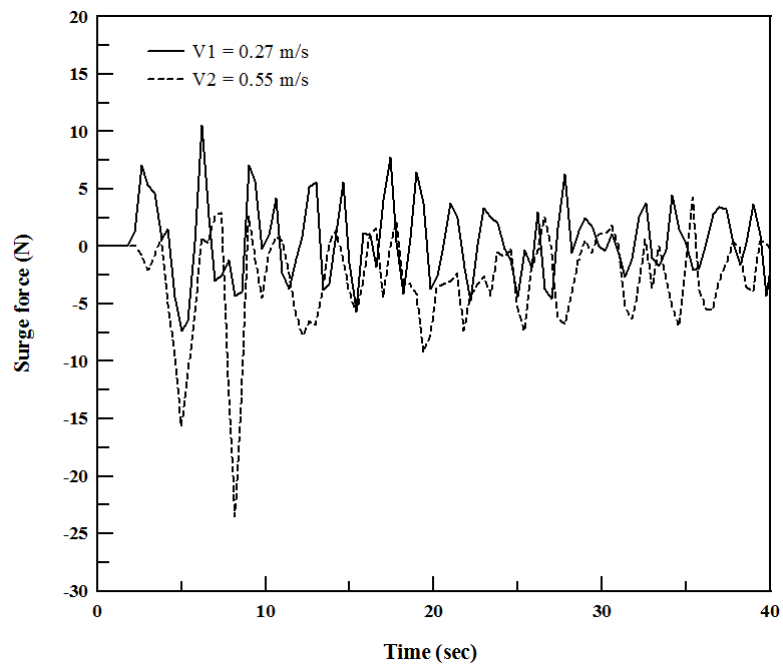


圖 4.2 船舶航行於狹窄水道船速 0.27 m/s 與 0.55 m/s 之阻力比較圖

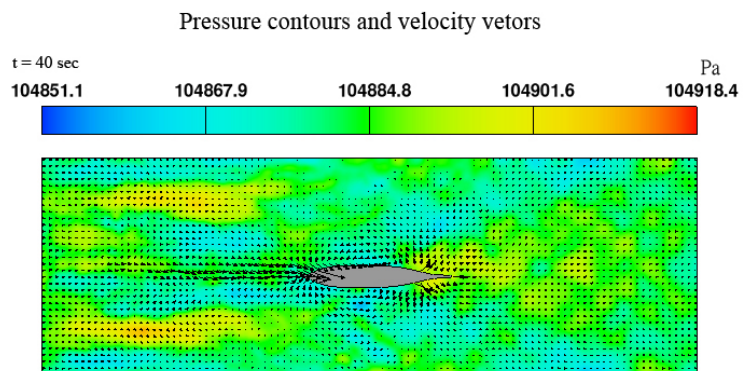
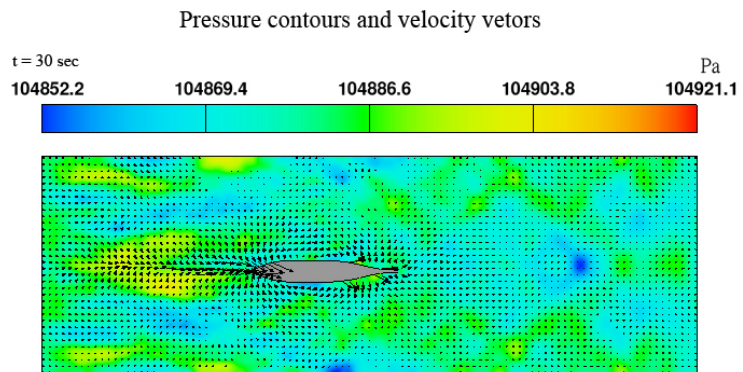
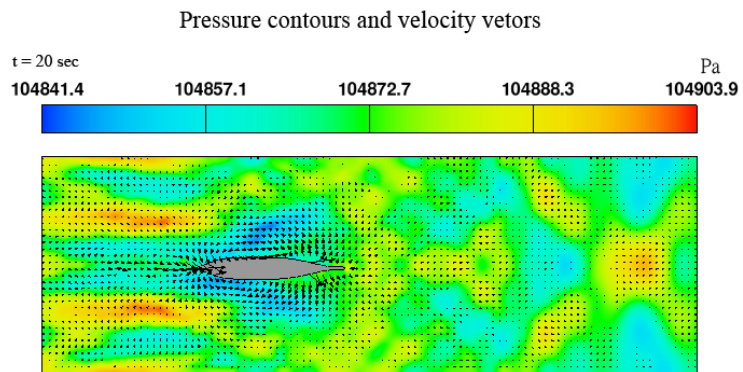
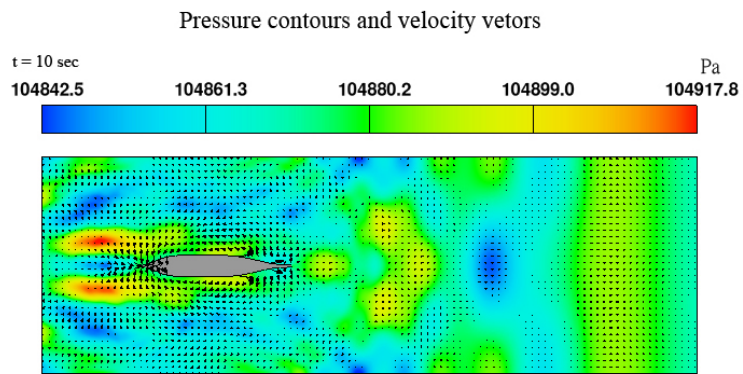


圖 4.3 船速 0.27 m/s 壓力速度向量分布圖

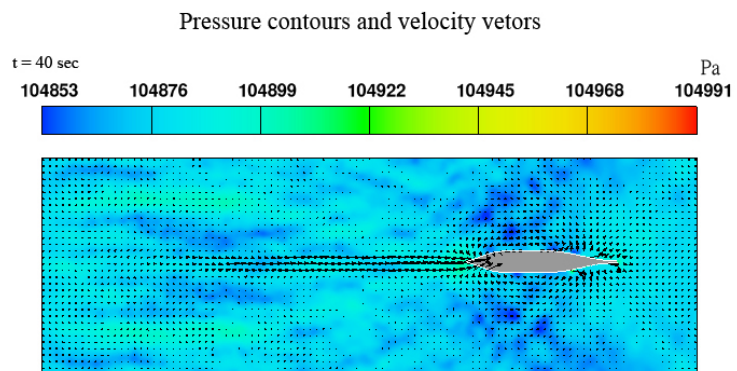
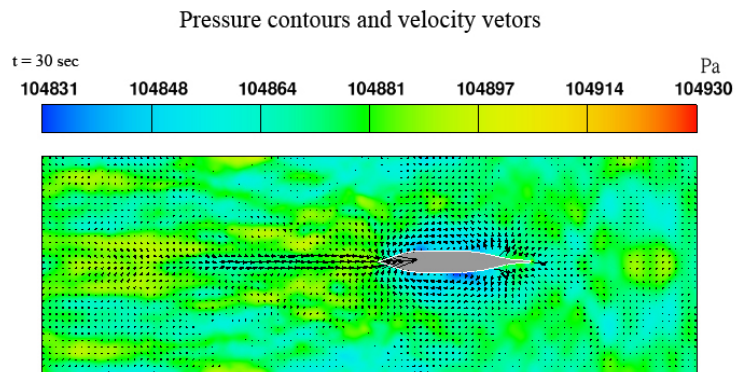
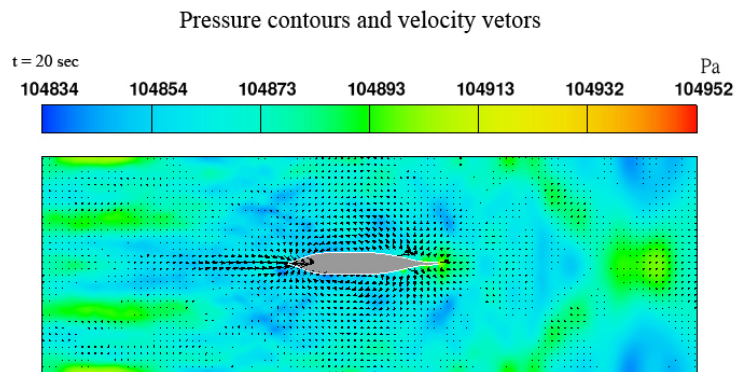
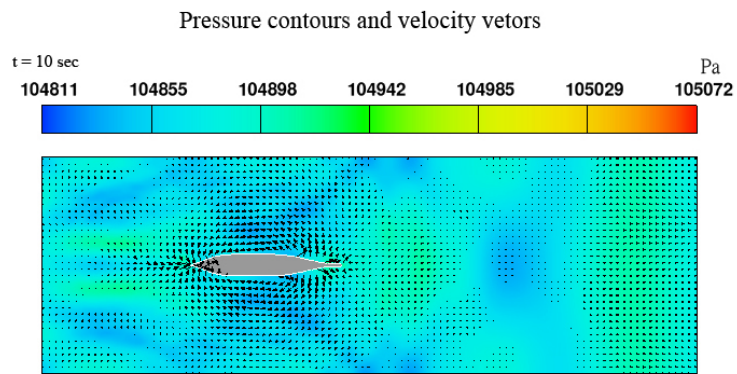


圖 4.4 船速 0.55 m/s 壓力速度向量分布圖

4.2 船舶於限制性水域航行的岸壁效應

本節模擬的案例有船舶沿不同岸壁距離航行，船岸距離分別為 $0.5B$ 、 $1.0B$ 、 $1.5B$ 、 $2.0B$ ，船速我們採用 $0.27m/s$ 與 $0.55m/s$ ，航行時間為 12 Sec。

1. 船舶的橫移力

圖 4.5 與圖 4.6 分別表示速度 $0.27m/s$ 與 $0.55m/s$ 對不同岸壁距離產生的橫移力。兩者橫移力皆隨時間擺盪，開始幾秒內橫移力隨著船岸距離減少而增加，整體而言，相同船岸距離，橫移力會隨著船速增加而增大。圖 4.7 顯示橫移力與航速正相關，和船岸距離則負相關。換言之，船速愈快、船舶離暗壁愈近，造成的暗壁效應也愈明顯。平均航行時間約 $t = 3s$ 時，橫移力反轉負值，顯示受到偏航力影響，船艏向右偏向岸壁靠攏，航海術語謂之岸吸，綜觀速度相量圖、壓力分佈圖、偏航力以及橫移力，岸壁效應產生之時間約在模擬時間 $t = 3s$ 的時候開始。

2. 船舶偏航

因為船舶的運動屬於 6DOF，當其沿 x 軸移動時，船艏向同時相對於 z 軸搖擺。根據右手法則，角速度正值表示繞 z 軸逆時鐘旋轉，結果船艏向偏左，航向減少；反之，角速度負值表示繞 z 軸順時鐘旋轉，結果船艏向偏右，航向增加。從 FLOW-3D 匯出 component 1 z.comp of GMO angular velocity in Body system 數據檔，將平均角速度對時間積分，即可轉換不同時刻船模偏航角度。設船舶的艏搖角度順時針為正，則偏航角可由下式表示：

$$\Theta(t) - \Theta(0) = \int_0^t r dt \quad (4.1)$$

圖 4.8 與圖 4.9 為偏航角之比較，偏航角隨著船岸距離的減少而增加。即使在船速很低時，船岸距離很接近時，也會增加偏航力矩，造

成船舶的偏航，尤其當船舶航行期間，船艏由於偏航力矩的影響，很容易與岸壁發生碰撞。依圖 4.10 顯示，船模的航速愈小船岸距離愈近，差異性愈小；反之，船模的航速愈大船岸距離愈遠，差異性愈大。

3. 壓力速度分佈圖

對於船舶偏離岸壁距離並無考慮螺槳推力效應，依圖 4.11 與圖 4.12 顯示，船體與岸壁之間的流速增大，形成低壓區；同時，在靠岸的一邊前面的水來不及補充，水位下降，其壓力較外舷低，推船艏向岸壁，產生岸吸現象（Bank suction）。另一方面，船舶前進時，船艏的水流向左右兩側排開，靠岸一側受岸壁阻擋，擴散不開，形成高水位；而另一側水流擴散快水位較低，造成船艏外偏現象，稱為岸推力（Bank cushion）。當兩者合為作用，船舶及產生很明顯的岸壁效應。

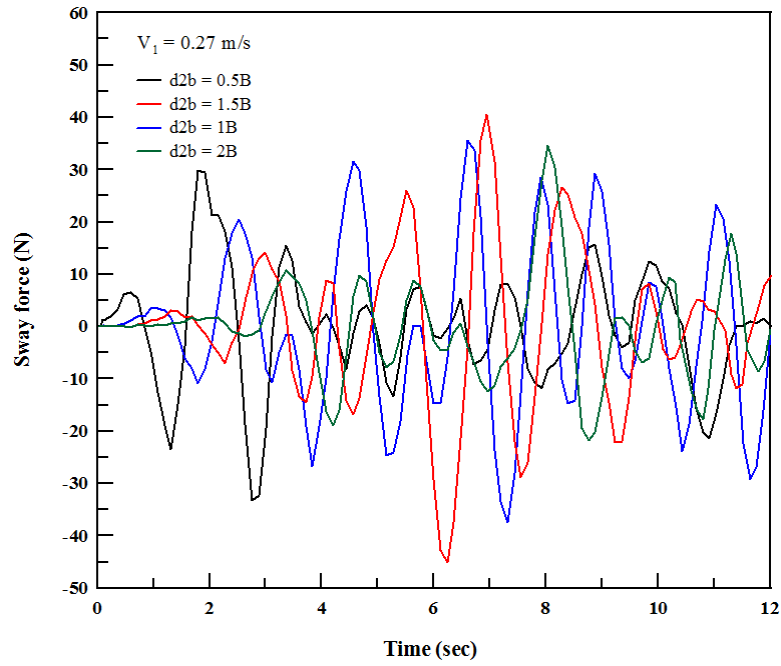


圖 4.5 不同岸壁距離、船速 0.27 m/s 之橫移力比較圖（船舶航行於狹窄水道）

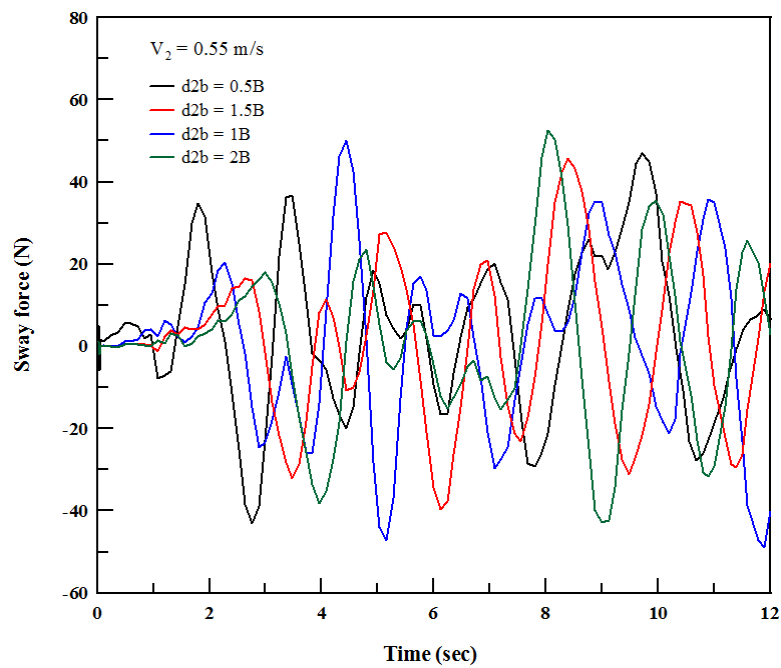


圖 4.6 不同岸壁距離、船速 0.55 m/s 之橫移力比較圖（船舶航行於狹窄水道）

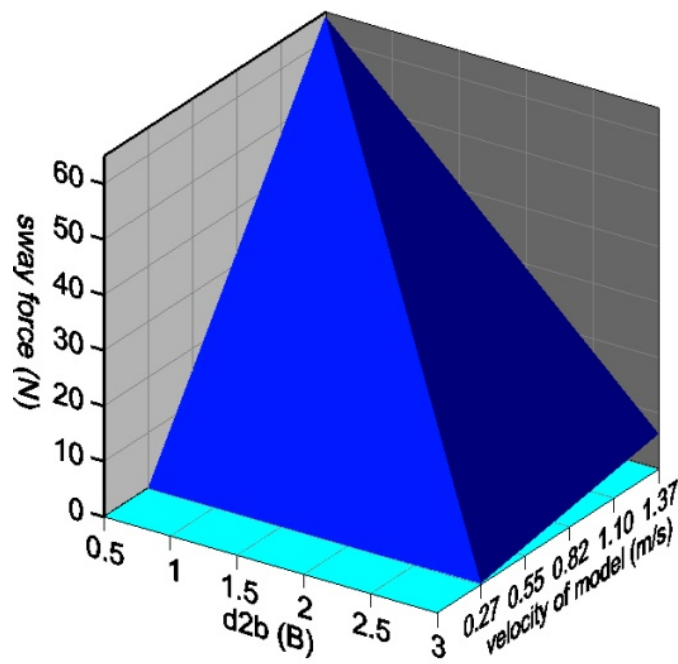


圖 4.7 岸壁距離、航速與橫移力相關圖

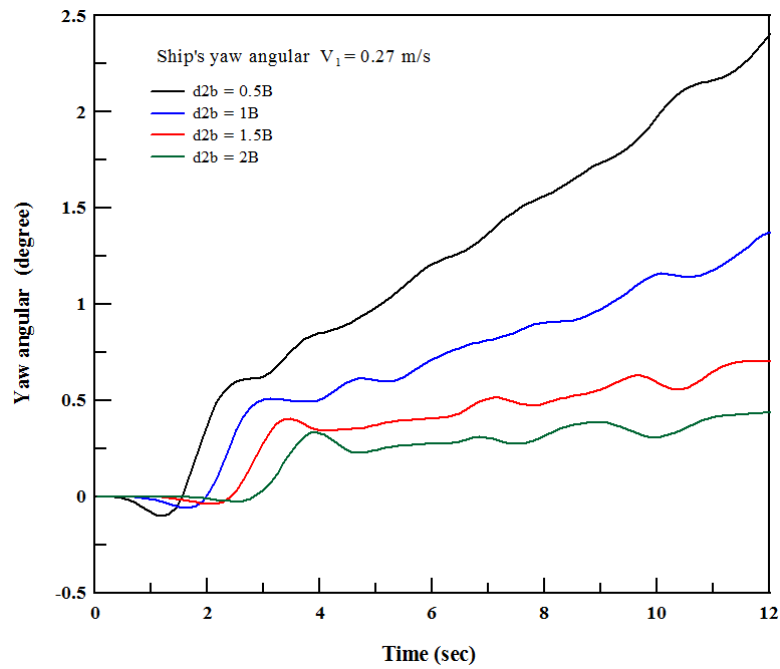


圖 4.8 不同岸壁距離、船速 0.27 m/s 之偏航角比較圖（船舶航行於狹窄水道）

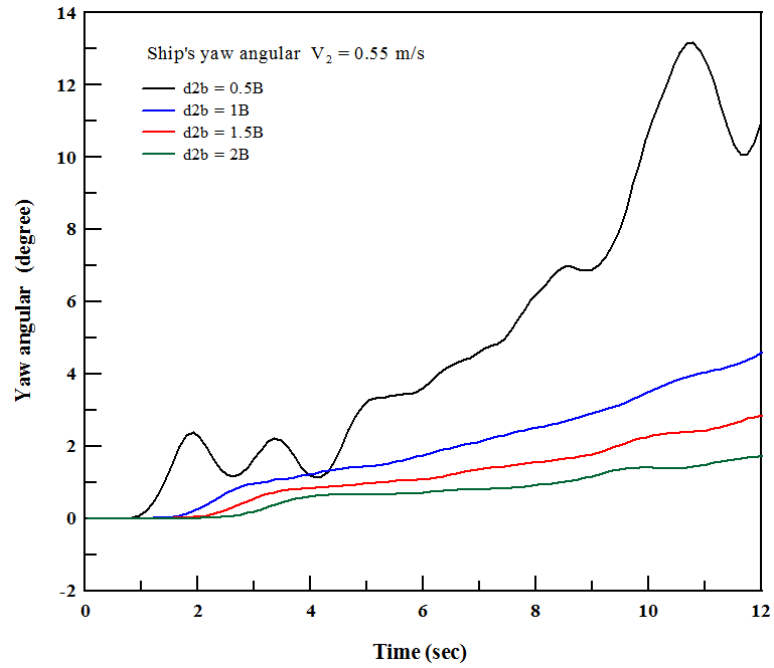


圖 4.9 不同岸壁距離、船速 0.55 m/s 之偏航角比較圖（船舶航行於狹窄水道）

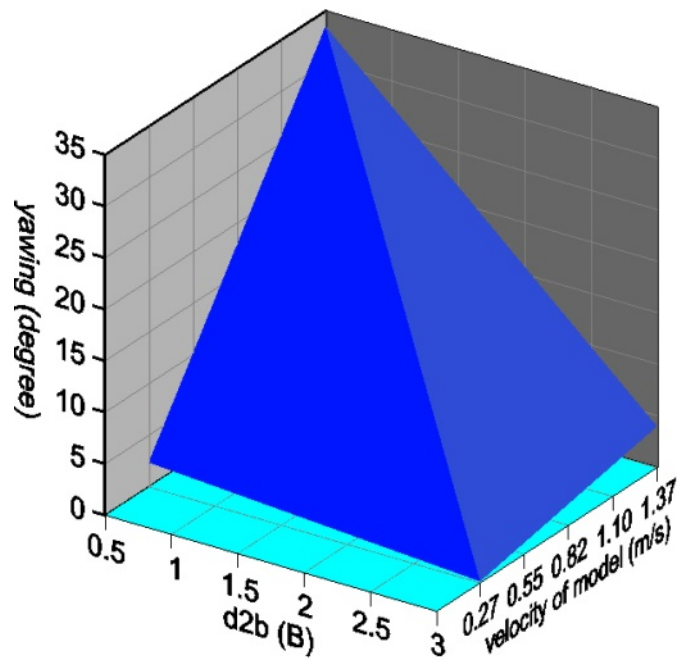


圖 4.10 岸壁距離、航速與偏航角度相關圖

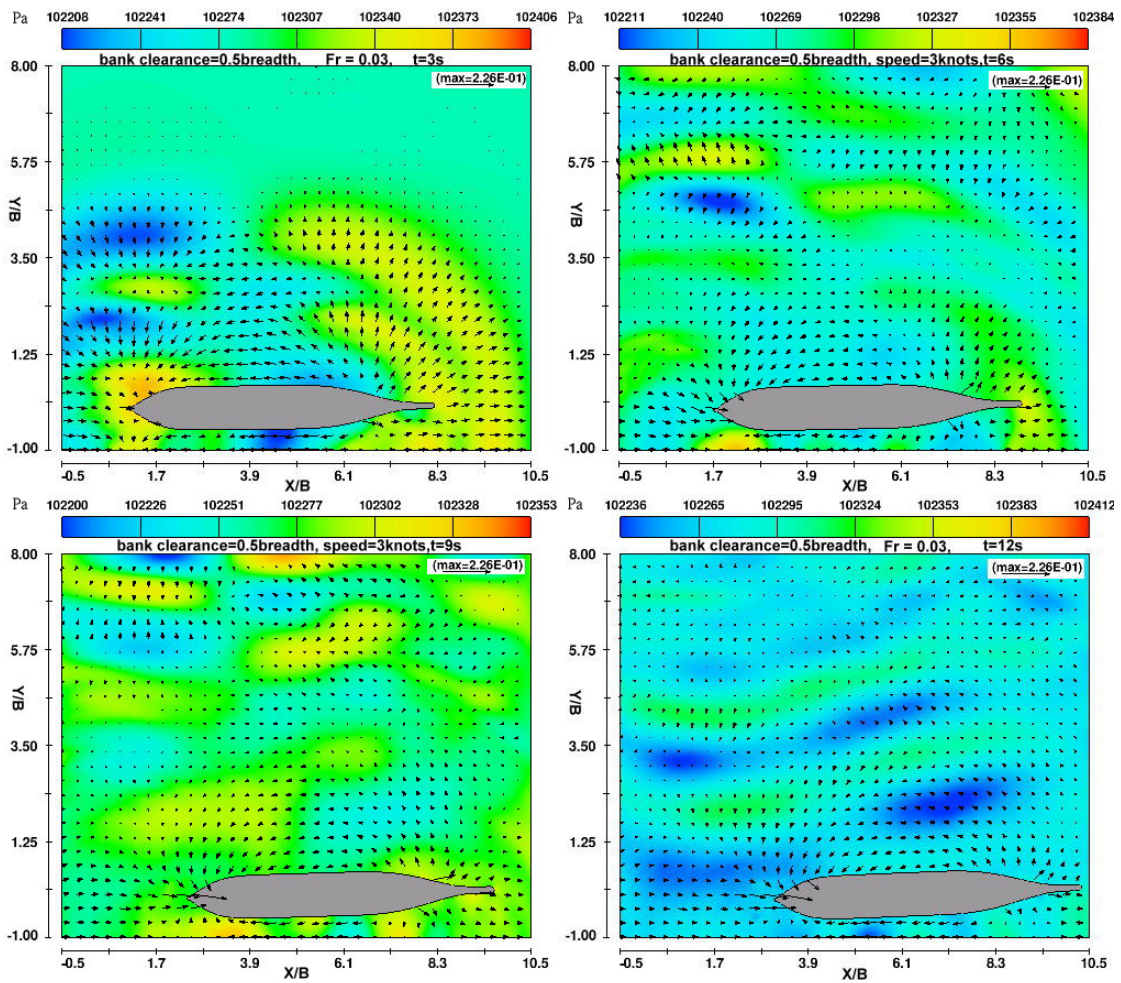


圖 4.11 船速 0.27 m/s ，船寬 $0.5B$ 壓力速度向量分布圖

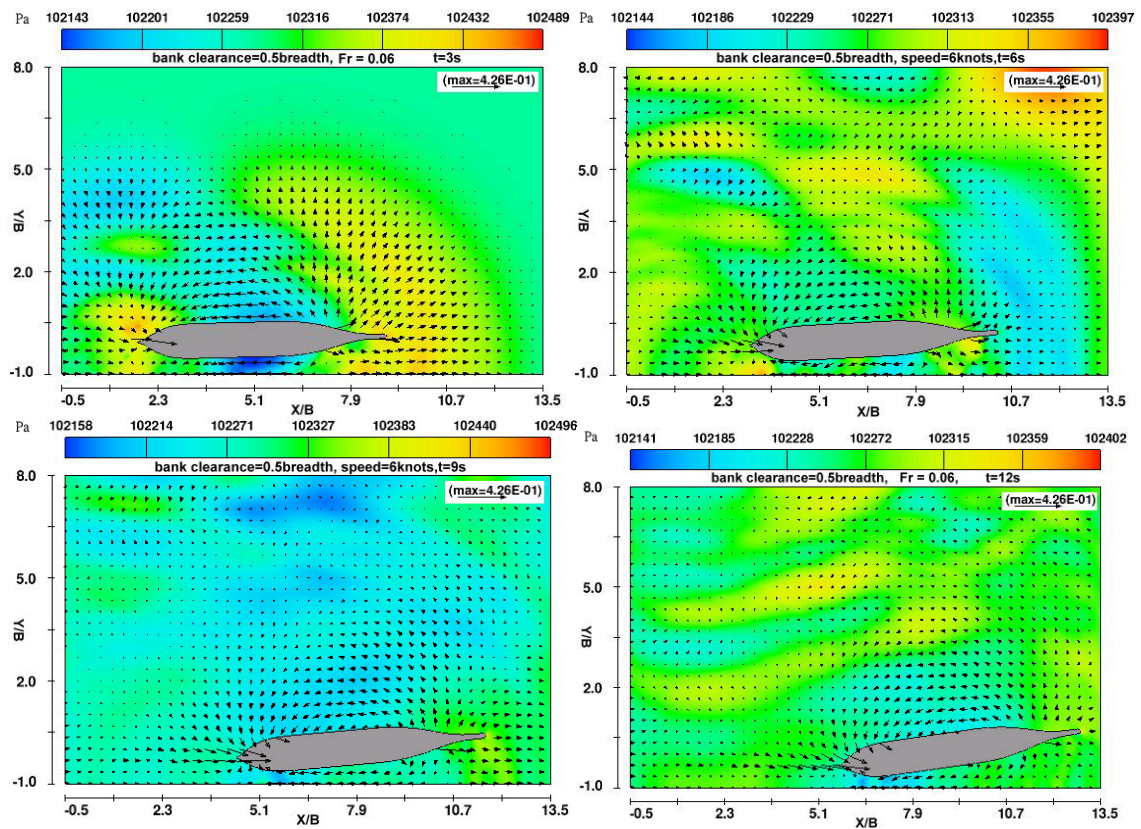


圖 4.12 船速 0.55 m/s ，船寬 $0.5B$ 壓力速度向量分布圖

4.3 兩船於限制性水域航行的對遇

本節模擬的案例有兩船對遇，兩船船距分別為 $0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $1B$ 、 $2B$ ，兩船的船速分別為 $V_1 = 0.27m/s$ VS. $V_2 = 0.27m/s$ 與 $V_1 = 0.55m/s$ VS. $V_2 = 0.27m/s$ 。

1. 船舶的橫移力

首先我們模擬兩艘船速相同的對遇船（ $V_1 = 0.27m/s$ VS. $V_2 = 0.27m/s$ ），圖 4.13 與圖 4.14 為船舶 1 與船舶 2 之時變性橫移力比較圖，我們分別比較不同兩船船距的案例，由圖可知兩船在接近時的橫移力變化較劇烈，之後兩船之間相互作用，船吸力與推力交替變換。圖 4.15 與圖 4.16 為不同船速的對遇船，船舶 1 為船速快的船（ $V_1 = 0.55m/s$ ），船 2 為船速較慢（ $V_1 = 0.27m/s$ ），兩船在接近時產生高壓，破使兩船產生右舷的慣性力矩，兩船因此相斥，當兩船平行時，此時兩船船艙皆為低壓區，兩船因此相吸。基本上，兩船相互作用受到彼此的吸力與推力，整體而言，在 $0.25B$ 時產生最大作用力，由圖發現船的最大用力為正，而船舶 2 最大作用力為負，這種現象可用作用力與反作用力來解釋此現象。

2. 船舶偏航

圖 4.17 與 4.18 為船舶 1 與船舶 2 之時變性偏航角比較圖，當其沿 x 軸移動時，船艙向同時相對於 z 軸搖擺。由圖發現兩對遇船船艙相會時其航向會轉向右舷，以船舶 1 來說會向右舷轉，隨後再向左舷轉至船 2，船 2 也會轉向船舶 1，當兩船快接近平行時，此時的舵角最不穩定，兩船會相吸，需要特別小心行駛。圖 4.19 與圖 4.20 為偏航角之比較，對遇的參數為 $V_1 = 0.55m/s$ VS. $V_2 = 0.27m/s$ ，當兩船交會時船速較快會先右轉再向左轉轉向對遇船，船速較慢的船一開始會偏離它船，之後會轉向它船。圖 4.21 與圖 4.22 為 $V_1 = 0.27m/s$ VS. $V_2 = 0.27m/s$ 船舶質心的偏移量，圖 4.23 與 4 圖 .24 為 $V_1 = 0.55m/s$ VS. $V_2 = 0.27m/s$ 船舶質心

的偏移量，由圖可發現兩船的相互作用，兩船質心隨著時間而改變。

3. 壓力速度分佈圖

圖 4.25 與圖 4.26 為兩船對遇，在兩船船距 $0.5B$ ，流場的壓力與速度向量圖，由圖顯示，當兩船接近時，由於兩船船艏間壓力大，其壓力較外舷高，推船艏偏離它船，然後由於作用力與反作用力的作用，壓力持續的變化，船艏轉向左舷，轉向它船，兩船之間持續的作用，所以作用力與壓力交替變換，當兩船船艏交會離開始，我們觀察到很明顯的尾跡流。兩船艏跡流間其流速相對於船艏跡流的流速慢，產生了相對較高的壓力，此壓力會作用於兩船的船艏使其產生偏航的力矩，但由於作用時間很短，所以危險性不如在兩船船舫接近時的作用。

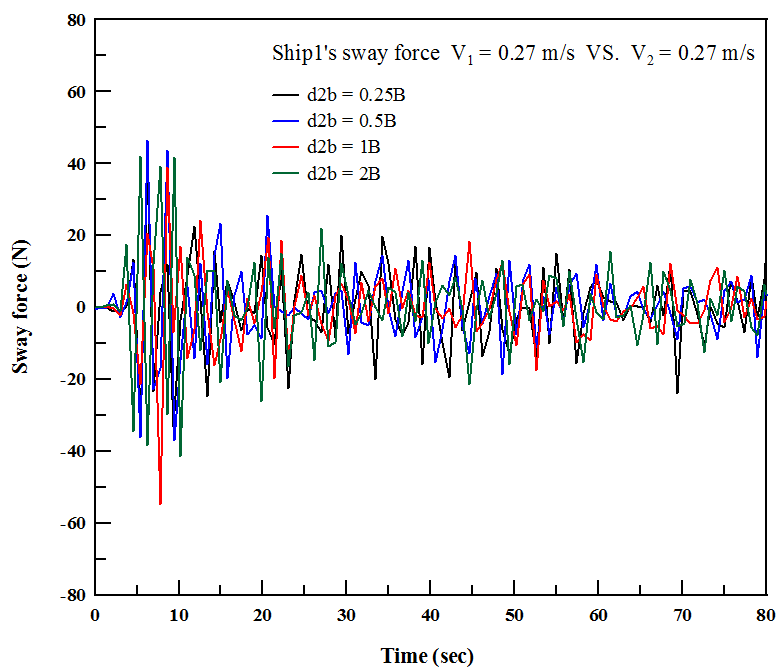


圖 4.13 兩船之不同船距、船舶 1 之橫移力比較圖（船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s ）：對遇

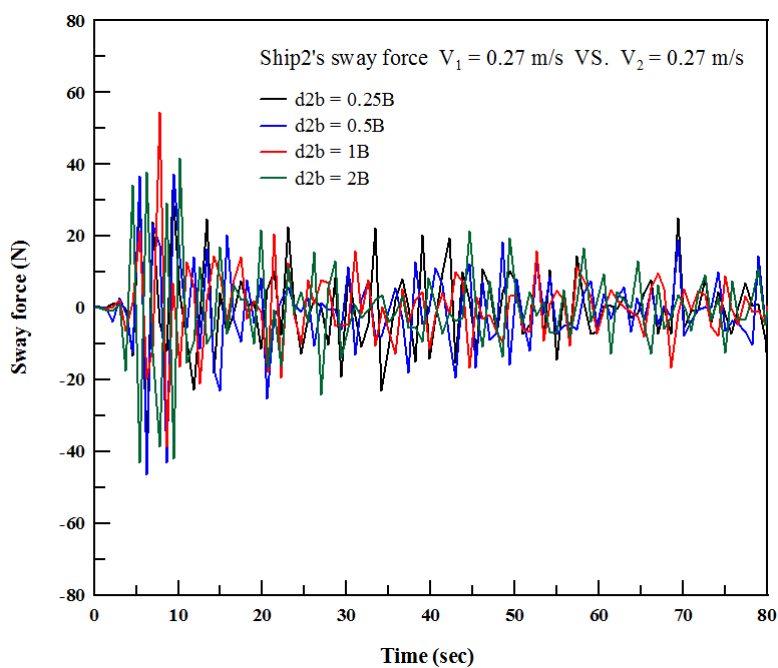


圖 4.14 兩船之不同船距、船舶 2 之橫移力比較圖（船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s ）：對遇

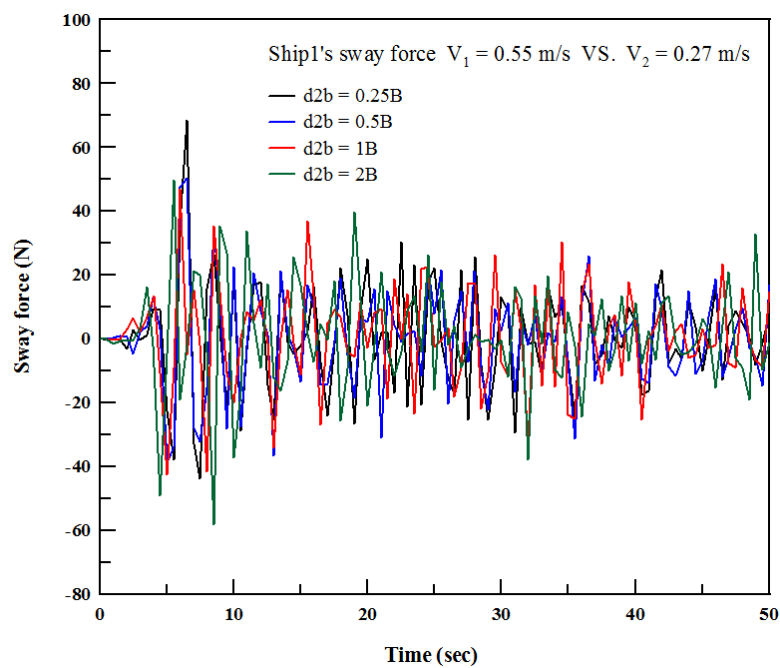


圖 4.15 兩船之不同船距、船舶 1 之橫移力比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s ）：對遇

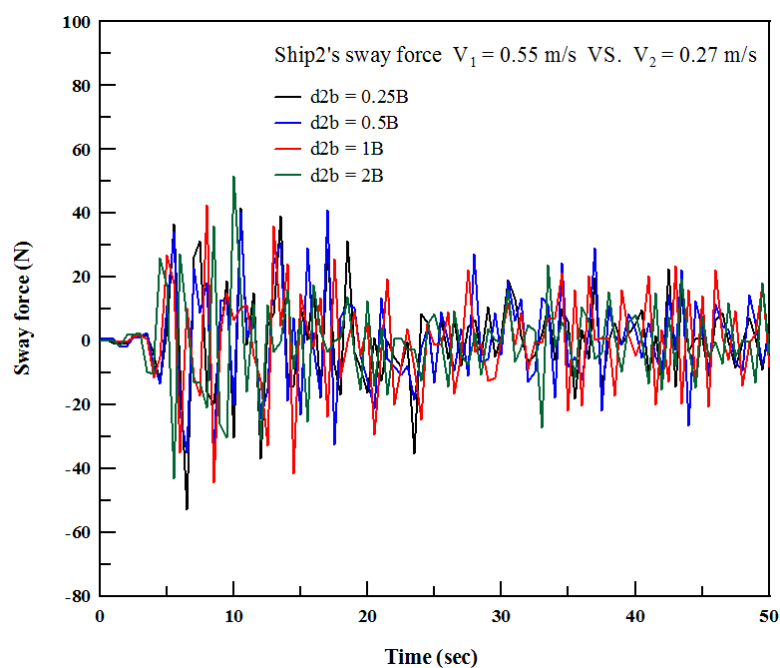


圖 4.16 兩船之不同船距、船舶 2 之橫移力比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s ）：對遇

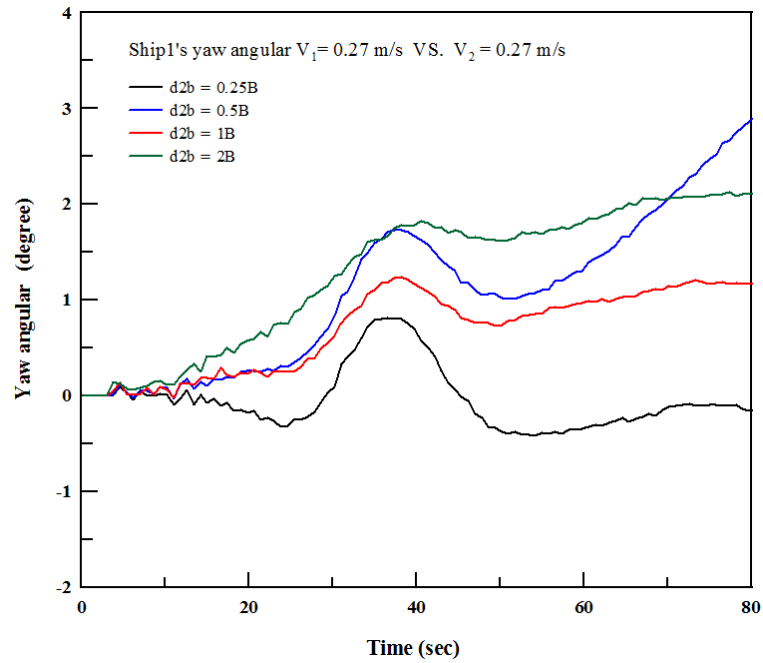


圖 4.17 兩船之不同船距、船舶 1 之偏航角比較圖（船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s ）：對遇

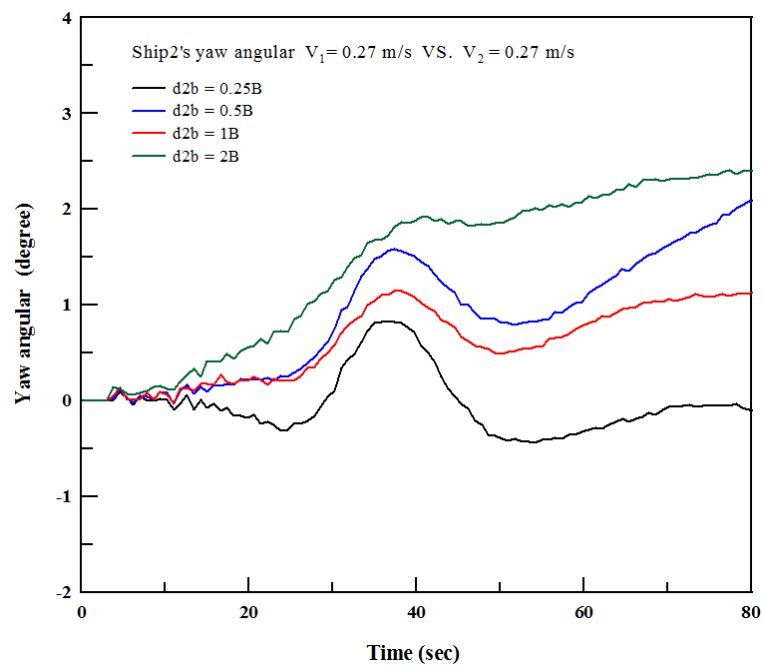


圖 4.18 兩船之不同船距、船舶 2 之偏航角比較圖（船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s ）：對遇

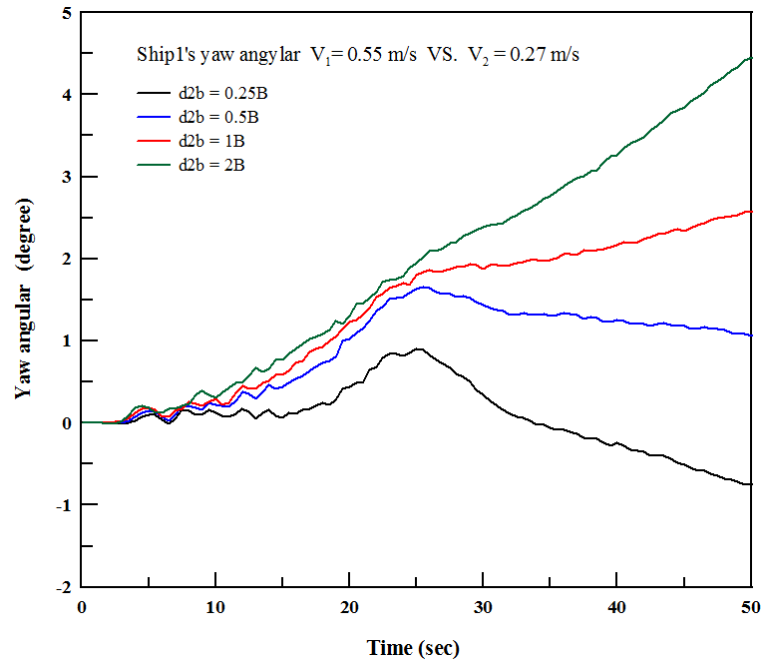


圖 4.19 兩船之不同船距、船舶 1 之偏航角比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s ）：對遇

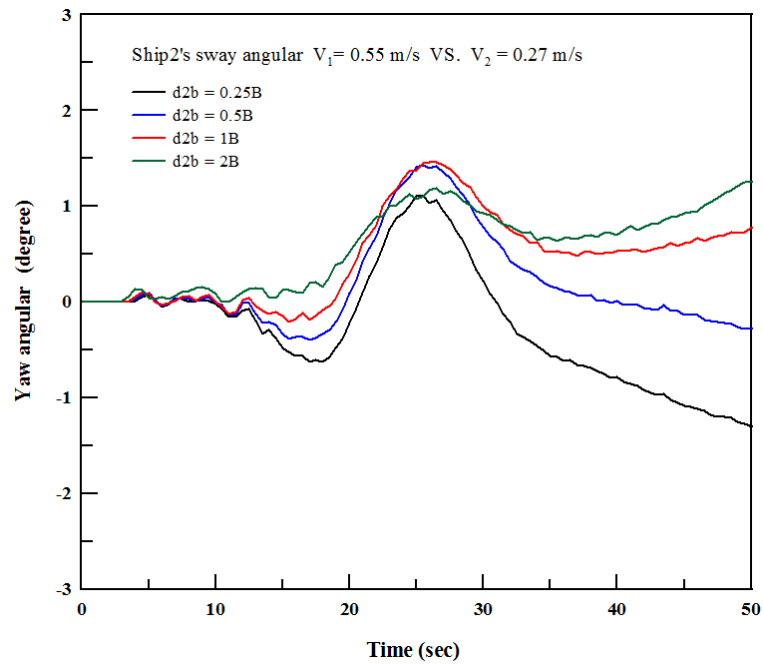


圖 4.20 兩船之不同船距、船舶 2 之偏航角比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s ）：對遇

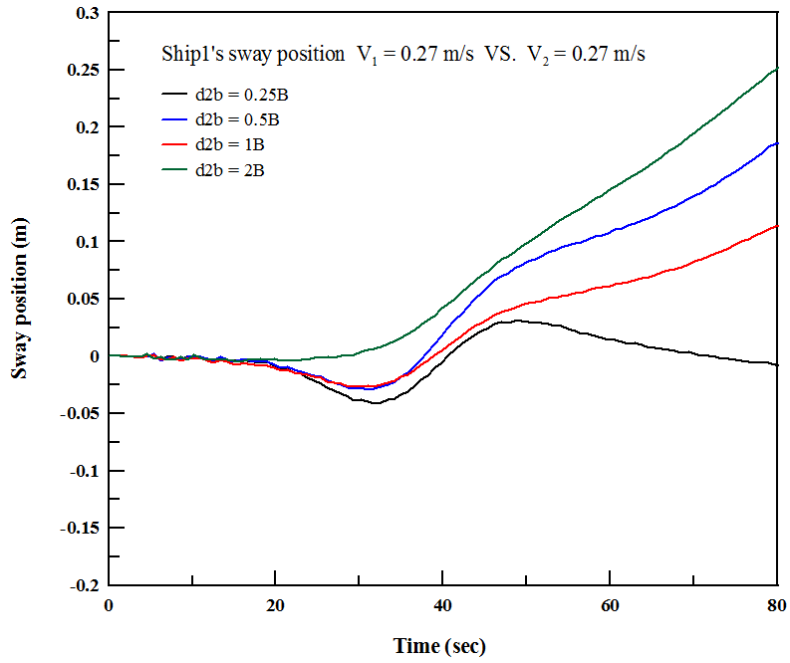


圖 4.21 兩船之不同船距、船舶 1 之質心偏移量比較圖(船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s)：對遇

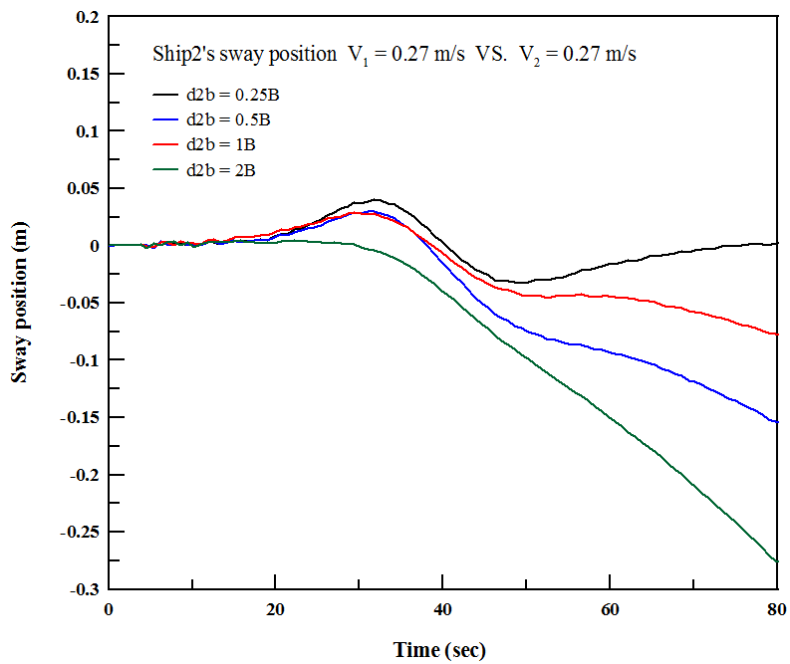


圖 4.22 兩船之不同船距、船舶 2 之質心偏移量比較圖(船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s)：對遇

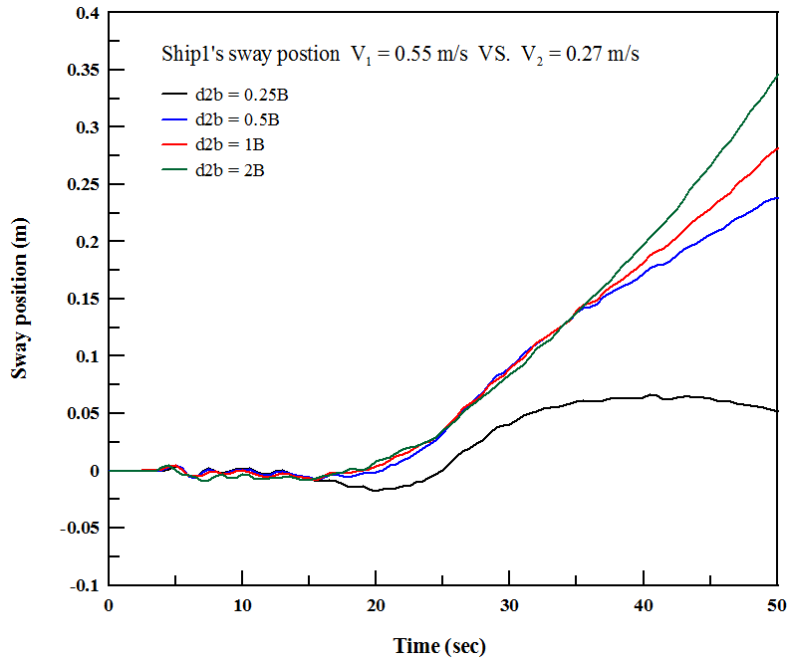


圖 4.23 兩船之不同船距、船舶 1 之質心偏移量比較圖(船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s)：對遇

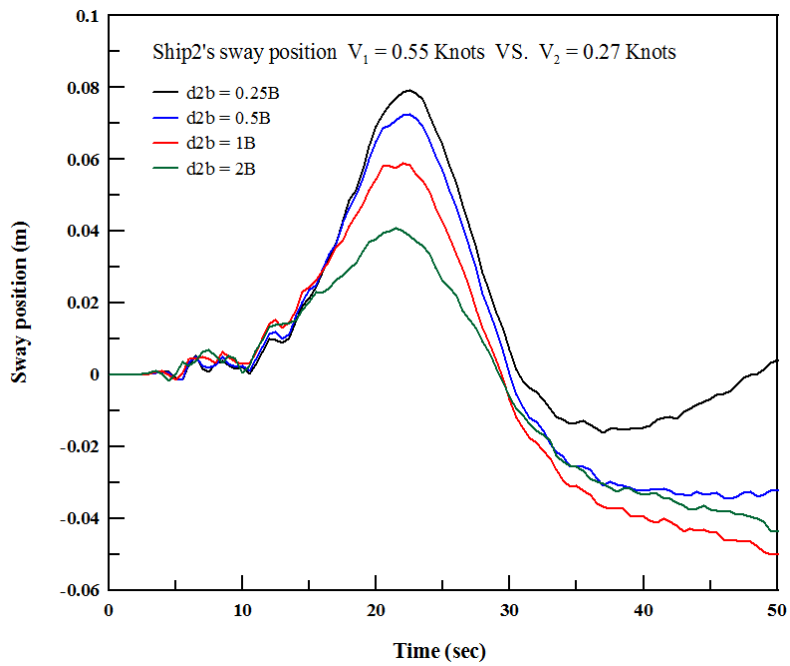


圖 4.24 兩船之不同船距、船舶 2 之質心偏移量比較圖(船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s)：對遇

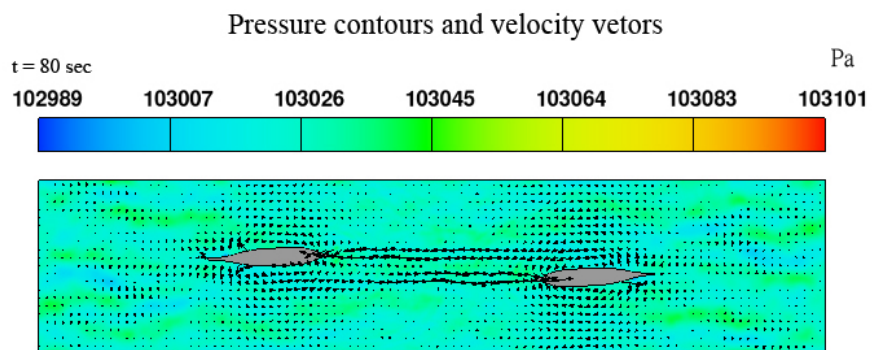
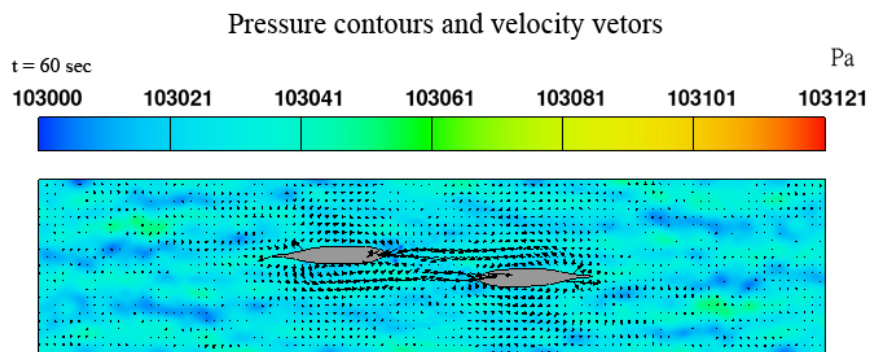
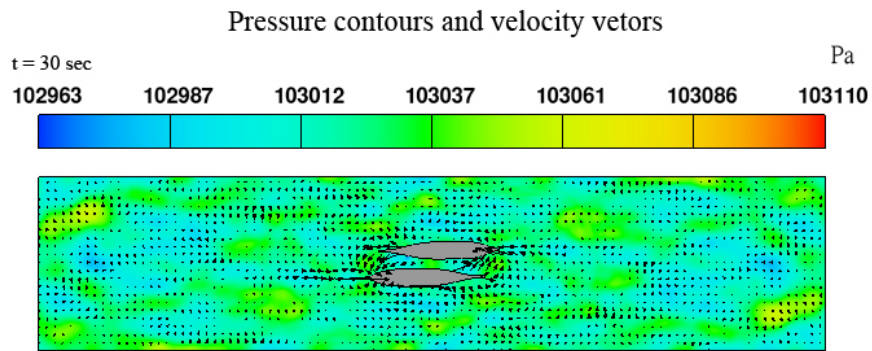
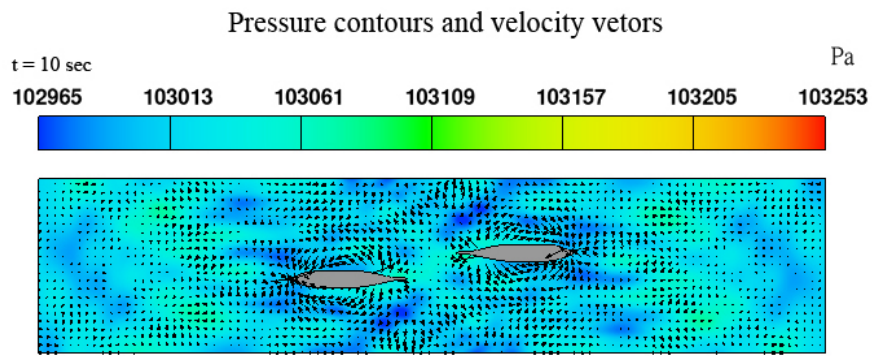


圖 4.25 船舶對遇，船速 0.27 m/s 對 0.27 m/s ，船寬 $0.5B$

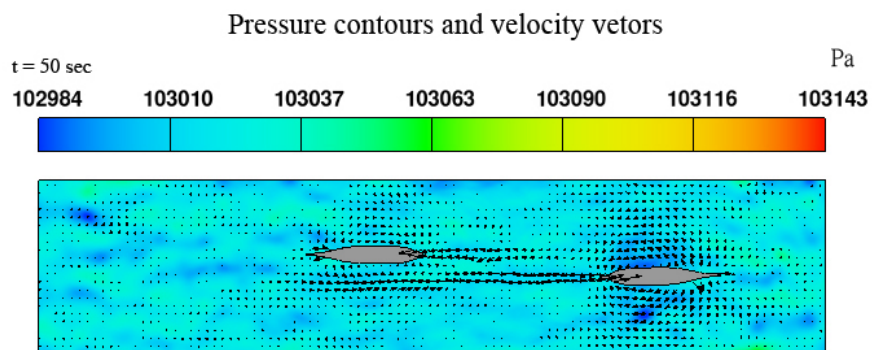
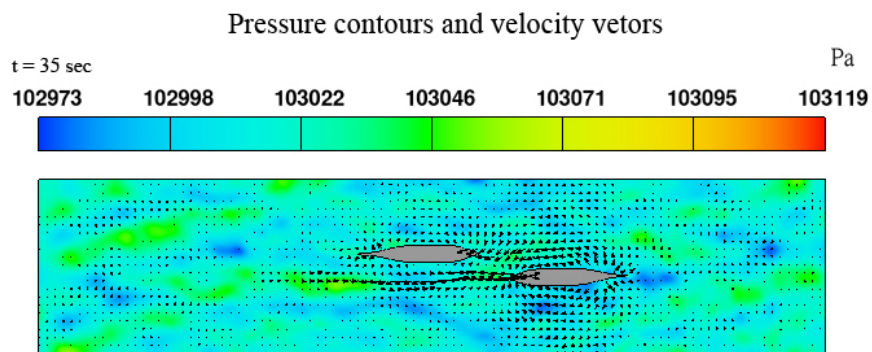
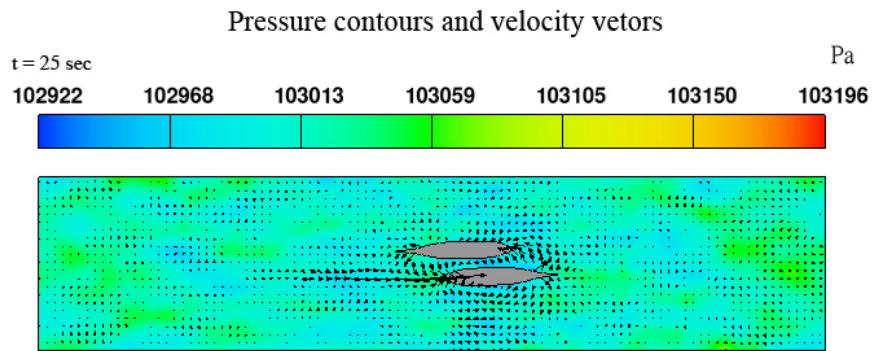
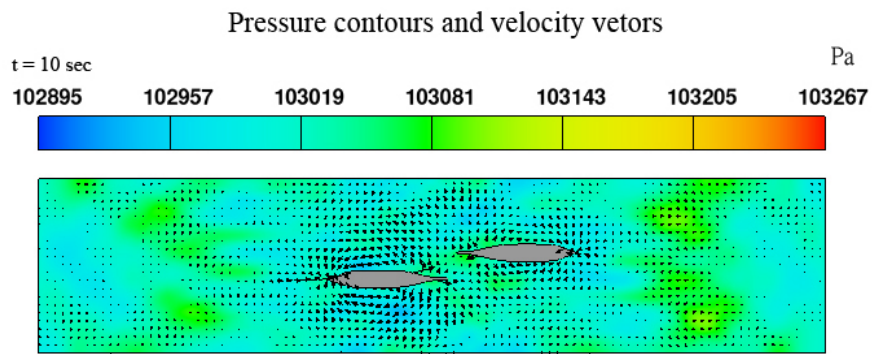


圖 4.26 船舶對遇，船速 0.55 m/s 對 0.27 m/s ，船寬 $0.5B$

4.4 兩船於限制性水域航行的追越

本節模擬的案例為追越的案例，追越的參數為 $V_1 = 0.55m/s$ VS. $V_2 = 0.18m/s$ ，並討論不同兩船間距對兩船追越的影響的時變性橫移力、偏航角與壓力速度向量圖，期間我們將利用不同時刻的壓力場與速度場來呈現船體四周水體相關物理量的變化。

1. 船舶的橫移力

我們模擬兩艘船速分別為 $V_1 = 0.55m/s$ VS. $V_2 = 0.18m/s$ ，於相同航向的追越狀況，圖 4.27 與圖 4.28 為船舶 1 與船舶 2 之時變性橫移力比較圖，我們分別比較不同兩船船距的案例，由圖可現兩船在接近時的橫移力變化較劇烈，之後兩船之間相互作用，船吸力與推力交替變換。整體而言，速度較低的其橫移力變化週期較短，由於其橫移力在正負擺盪的頻率較快，所以其船艙搖擺的次數較為頻繁。兩船間的作用由於作用力與反作用力的影響。所以橫移力是正負之間擺盪。

2. 船舶偏航與流場

圖 4.29 與圖 4.30 為船舶 1 與船舶 2 之時變性偏航角比較圖，當其沿 x 軸移動時，由圖發現較快的船船艙近較慢的船之船艙時，追越船其船艙航向會偏離它船，以船舶 1 來說會向右轉偏離船舶 2，船舶 2 此時船艙的左舷壓力較船艙右舷小，船艙會向右旋轉，此時的舵角變化大，需要特別小心行駛。船速較慢的船受到船速較快的船作用，產生彼此間的作用，此時兩船基本上也是左右搖擺，若搖擺太大，就可能會失控，進而造成碰撞的危機。

3. 壓力與速度向量

圖 4.31 為相互作用時的壓力速度向量圖，當兩船接近時，此時壓力變化劇烈，因兩者的壓力波皆以輻射狀向外傳遞，當兩船接近時，此時的壓力場就會交互作用，引起劇烈變化。船舶同向追越通過時，

因船舶間相對速度較小，致使互相通過之時間較反向對遇通過所需之時間為長，於是船舶彼此間受相互作用影響之期間亦加長，兩船追越通過時亦因其相對位置而受兩船間高低壓區影響，故船舶間發生碰撞之危險程度較大。

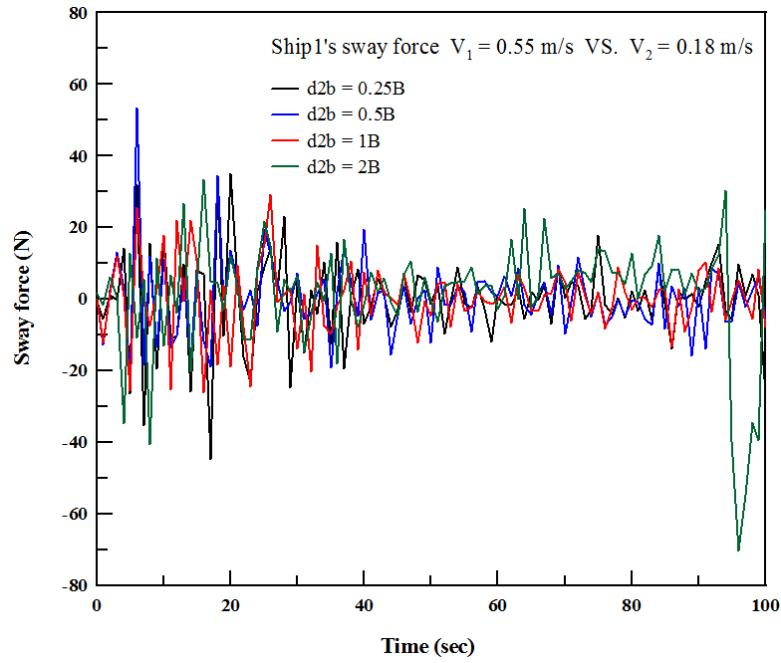


圖 4.27 兩船之不同船距、船舶 1 之橫移力比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s ）：追越

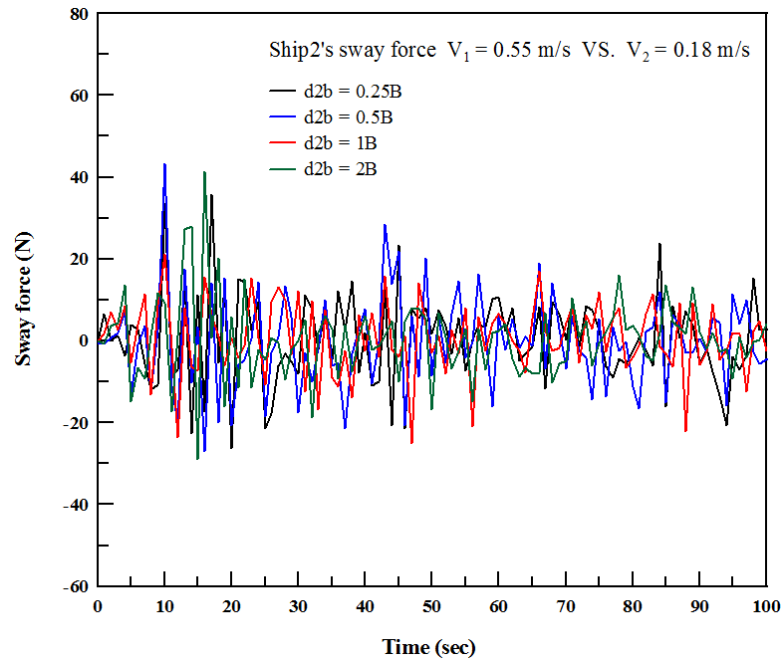


圖 4.28 兩船之不同船距、船舶 2 之橫移力比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s ）：追越

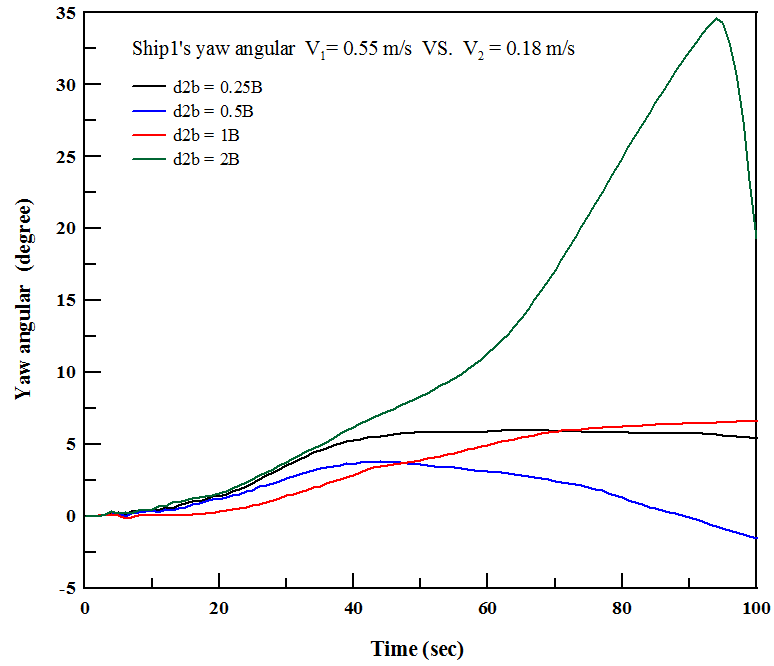


圖 4.29 兩船之不同船距、船舶 1 之偏航角比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s ）：追越

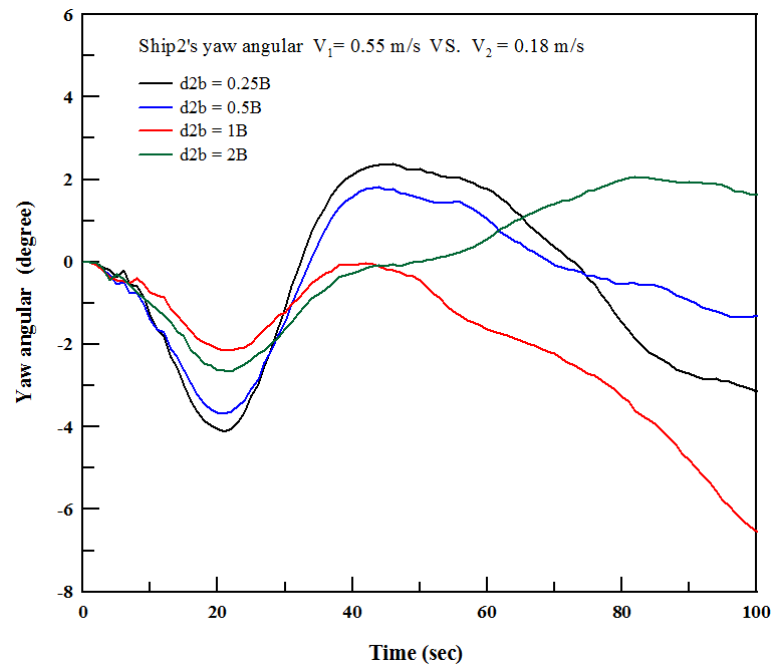


圖 4.30 兩船之不同船距、船舶 2 之偏航角比較圖（船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s ）：追越

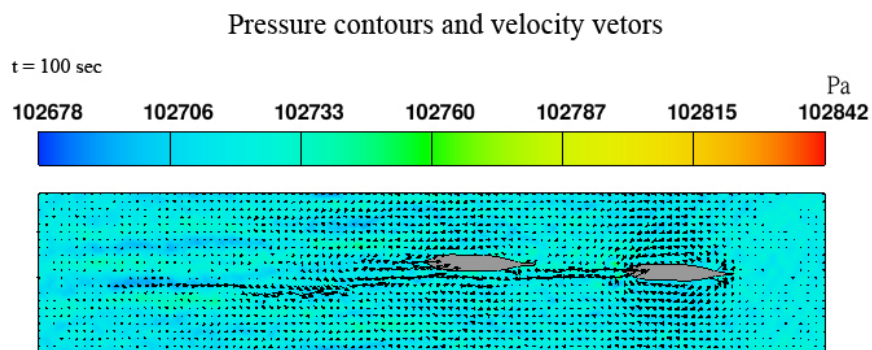
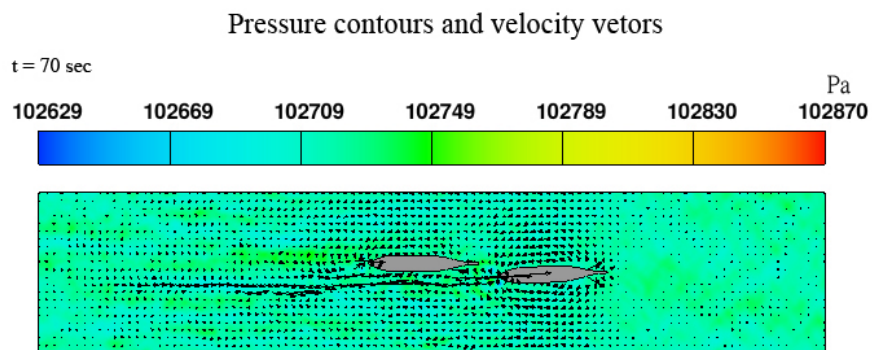
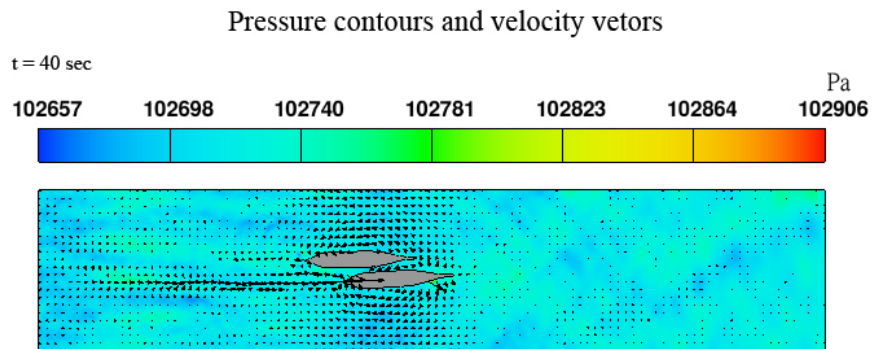
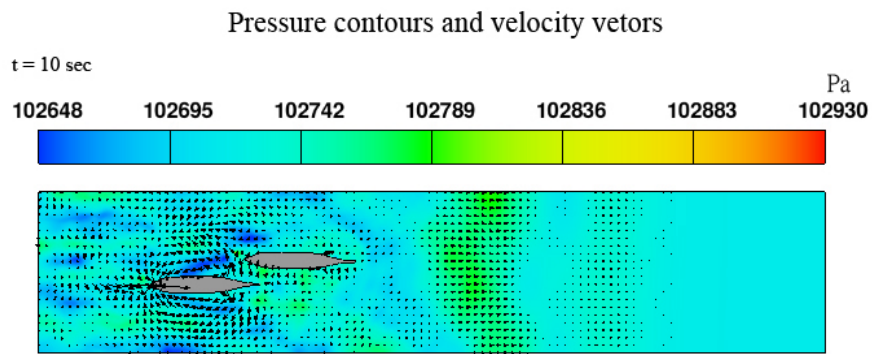


圖 4.31 船舶追越，船速 0.55 m/s 對 0.18 m/s ，船寬 $0.5B$

第五章 船舶航行於臺北港之模擬與分析

船舶在臺北港中行駛，或在一側或兩側受到岸壁作用，或與它船相遇中行駛，因船與岸壁或它船間相互作用之故，其壓力流場產生不對稱的作用，會引起各種力矩，其中船舶間不規則的作用力與反作用力使船艏偏向或橫移，又在狹窄水道中與它船平行通過時，亦會產生相同之作用，此種相互作用對船舶操縱性之影響甚為重要，航海人員不可不察。本章節模擬的有船舶進出臺北港所引發之興波效應、船舶航行於臺北港的岸壁效應模擬、兩船相遇於臺北港等案例。本節的案例，考量地形、水深、船舶模型等參數，皆使用 1:1 比例尺進行模擬，以貼近實際狀況。

影響船舶在臺北港安全航行的因素很多，包含 (i) 本船運動狀態，如船舶當時的船位，航向，航速，主機轉速等。(ii) 自然環境，如風、流、浪等情況。(iii) 航行環境，如船舶動態、大小與密度等；航道水深，可行寬度、障礙物以及助航設施等。本章除考量既有的港灣邊界、地形、水深外，改變的參數有船速、船舶進出臺北港航向、船與岸壁距離、兩船之間距等參數進行考量。其他如風流浪在此先不作考量，船舶速度設定為 3 節與 6 節，將地形船舶匯入 FLOW-3D，設定好相關參數，進行實際模擬。

船舶的實際運動很複雜，在一般情況下具有 6 個自由度。包含 3 個船體座標軸的移動和圍繞 3 個船體座標軸的轉動。前者以前進速度、橫移速度、起伏速度，後者以艏搖角速度、橫搖角速度及縱搖角速度表示。本模式一般而言採用 6 個自由度耦合運動模式，但當我們固定航向時，橫移速度與艏搖角速度必須設定為零，此時模式為 4 個自由度耦合運動，也才能確保船舶為直線航行在原本設計的航線上。因本文欲了解船舶在臺北港所造成的興波效應，所以我們可模擬船舶為直線航行，在航行過程中引起水面波動，可在臺北港區增設觀測點，以了解水面波動的時間序列。

5.1 船舶於臺北港航行

本節模擬的案例有船舶沿固定航線航行，航行時船體所受到的橫移力、船舶的興波效應，我們將利用不同時刻的壓力場與速度場來呈現船體四周水體的相關物理量變化，以了解船舶進出臺北港引發的興波效應。航行在開闊的深水水域之船舶，由於船艏高壓區作用，使其前部的水被推送向前，而在船艏的前面造成一道艏波 (bow wave)，此高壓區亦會造成另一道較小之橫波 (transverse following wave)，此波形圖在 1887 年首先由 Lord Kelvin (1976) 提出稱為 Kelvin 波形圖，此艏波向兩側發散與中央線成 $19^{\circ}28'$ 之夾角。其後 Havelock (1980) 又發現淺水效應會使航行船舶所造成之艏波夾角變大，理論上水深減小至 $V/\sqrt{gh}=0.99$ 時，其夾角會增到 78° 。然而，於臺北港航行，可視為航行於限制水域，但由於海底底床地形不規則，港區也不規則，所以上述的理論須要做修正，我們應用數值模擬來探討船舶航行於臺北港，因此在港區航行，航速也不可設定太快，造成的興波作用在此不考慮船舶的高速行駛。

1. 船舶的橫移力

本節假設的條件為船舶沿固定航線行駛，圖 5.1 為船舶以 3 節的速度進出港之比較圖，其中 Case1 為進港，Case5 為出港，比較兩者間的橫移力，不論是進出港，其橫移力隨時間正負之間作擺盪，Case1 產生正的極值，Case5 產生負的極值，船在進、出港之橫移力比較中，產生極值的原因是受臺北港地形，船舶航行的航線也會影響。圖 5.2 為 Case2 與 Case6 船速 6 節橫移力的比較，Case2 (進港) 設定在既有航道上，Case6 (出港) 則在相反的航道上，其橫移力隨時間正負之間作擺盪。圖 5.3 為 Case1 與 Case3 的橫移力之比較，此時船舶的航速為 3 節，Case1 產生正的極值，Case3 產生負的極值。圖 5.4 為 Case2 與 Case4 船速 6 節之橫移力的比較，Case4 向右偏離原有的航道 10 度，由於 Case4 設定進港的位置，其船艏右側較接近堤岸，所以當船舶興波至堤岸造成

的反射波使得船舶很大的橫移力，所以 Case4 的橫移力其極值較大於 Case2。

2. 船舶的興波效應

我們在港內設置觀測點，這些觀測點如圖 3.26 所示，當船舶航行於臺北港，因船體給定航速航行，勢必興起波浪，本節比較不同船速在固定的航道上所觀測到波高隨時間變化的時間序列，圖 5.5 為船舶航速 3 節，航行時間為 500 秒，船舶沿既定航線航行。模擬觀測點水面波動的時間序列分析，這些波動由於船體興波的影響，其水面變化隨時間震盪，P1 與 P2 的位置較接近船舶進港的位置，所以當船舶開始航行時，船舶所興起的波浪最先傳遞至 P1 與 P2 的觀測點，而隨著船舶航行其他設定的位置也接續產生震盪。圖 5.6 為船速 6 節在 8 個觀測點所造成的水面波動，船舶航行時間為 300 秒，比較圖 5.5 與圖 5.6，船速 6 節所興起的波高，基本上會大於船速 3 節的，所以高速航行的船會比低速航行的船更容易產生興波作用，故航海人員於港內需慢速行駛。

3. 壓力速度分佈圖

圖 5.7 與圖 5.8 分別為航速 3 節與 6 節，船舶進港的壓力速度向量分佈圖。當在原既有航道上向右偏航 10 度，觀察船舶興波，如圖 5.9 與圖 5.10 分別為航速 3 節與 6 節，在原航道向右偏航 10 度的壓力與速度向量分佈圖。船舶出港的流場分佈圖可參考圖 5.11 與圖 5.12。船舶瞬間啟動航行，此時船艏產生高壓區，船的兩側與船尾此時流體流速較快，壓力較低，隨著船舶持續向前，船艏的高壓往前擴散。其間，由於四周的結構物，造成水的反射與繞射現象。基本上，臺北港只有一端開口，另外三端為閉口，由圖可觀察到船舶進出港，壓力波在港內在有限時間內不容易消散，所以在閉口端壓力震盪變化劇烈。

4.3D 速度強度圖

圖 5.13 至圖 5.18 分別為航速 3 節與 6 節，船舶進出臺北港的 3D 興波圖；圖 5.13 至圖 5.14 為 Case1 與 Case2，航速別為 3 節與 6 節（進港）；圖 5.14 至圖 5.15 為 Case3 與 Case4，為原設定航向向右偏航 10 度（進港）；圖 5.16 至圖 5.17 為 Case5 與 Case6，為原設定航向的相反航向（出港）。圖 5.13 至圖 5.18 中等高線的顏色表示海表面的速度強度，由這些圖可知船舶明顯的艏跡波與水波擴散的狀況，由於只有一端開口，三端是閉口，所以造成水面劇烈變動，如果再加上天候惡劣的狀況，船舶繫於碼頭的纜繩，很可能會劇烈拉扯而造成斷裂。

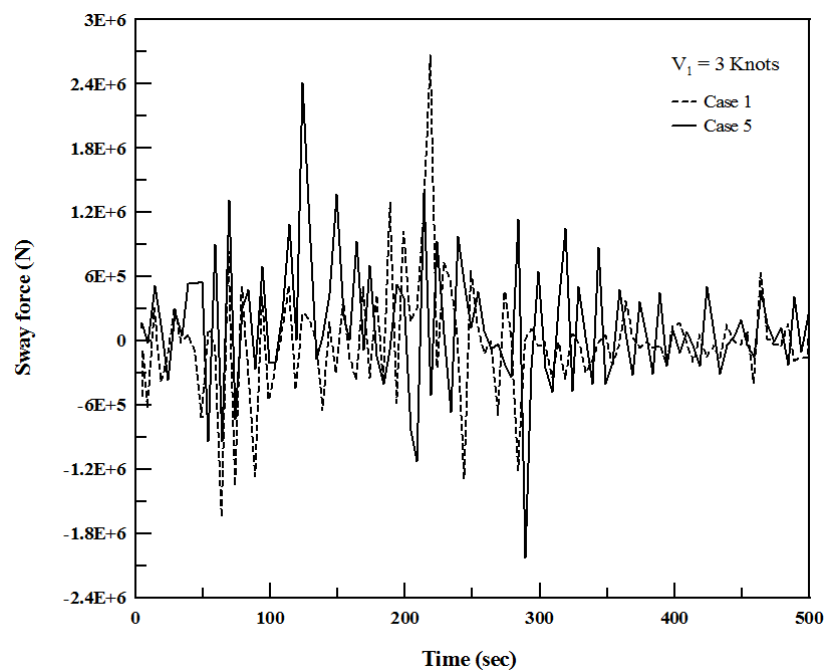


圖 5.1 船舶航行於臺北港船速 3 節之橫移力比較圖 (Case1 VS. Case5, 進出港)

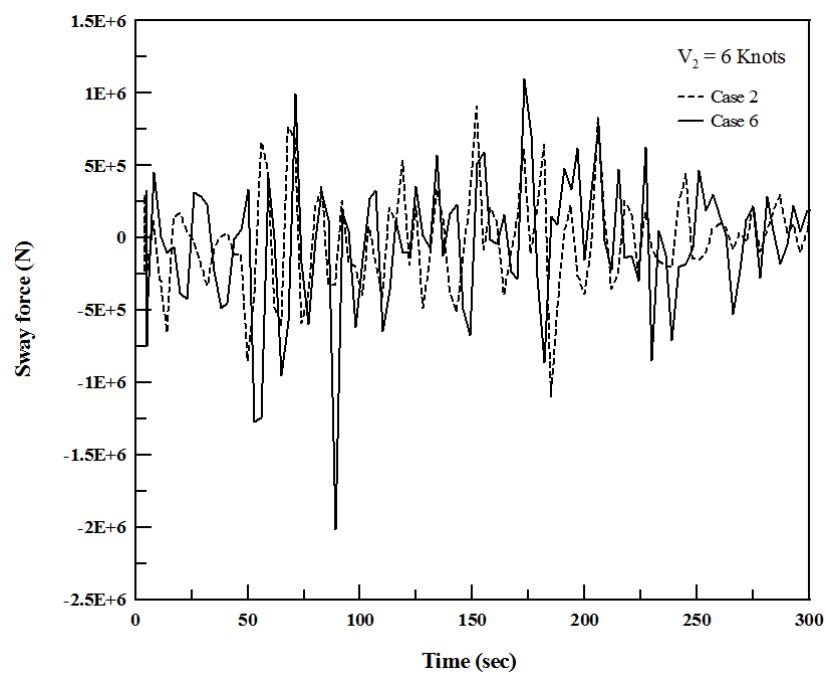


圖 5.2 船舶航行於臺北港船速 6 節之橫移力比較圖 (Case2 VS. Case6, 進出港)

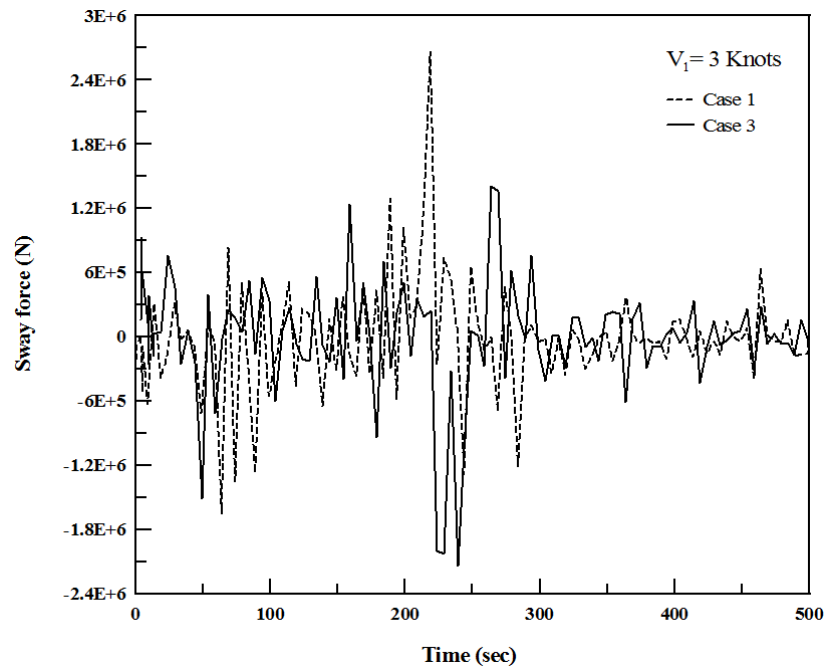


圖 5.3 船舶航行於臺北港船速 3 節之橫移力比較圖 (Case1 VS. Case3, 原航道與原航道偏航 10 度)

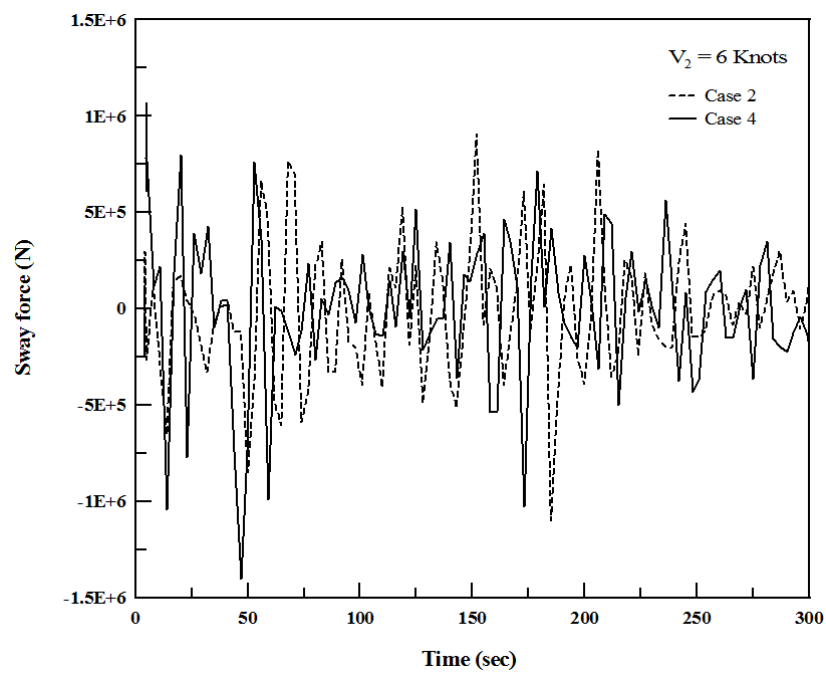


圖 5.4 船舶航行於臺北港船速 6 節之橫移力比較圖 (Case2 VS. Case4, 原航道與原航道偏航 10 度)

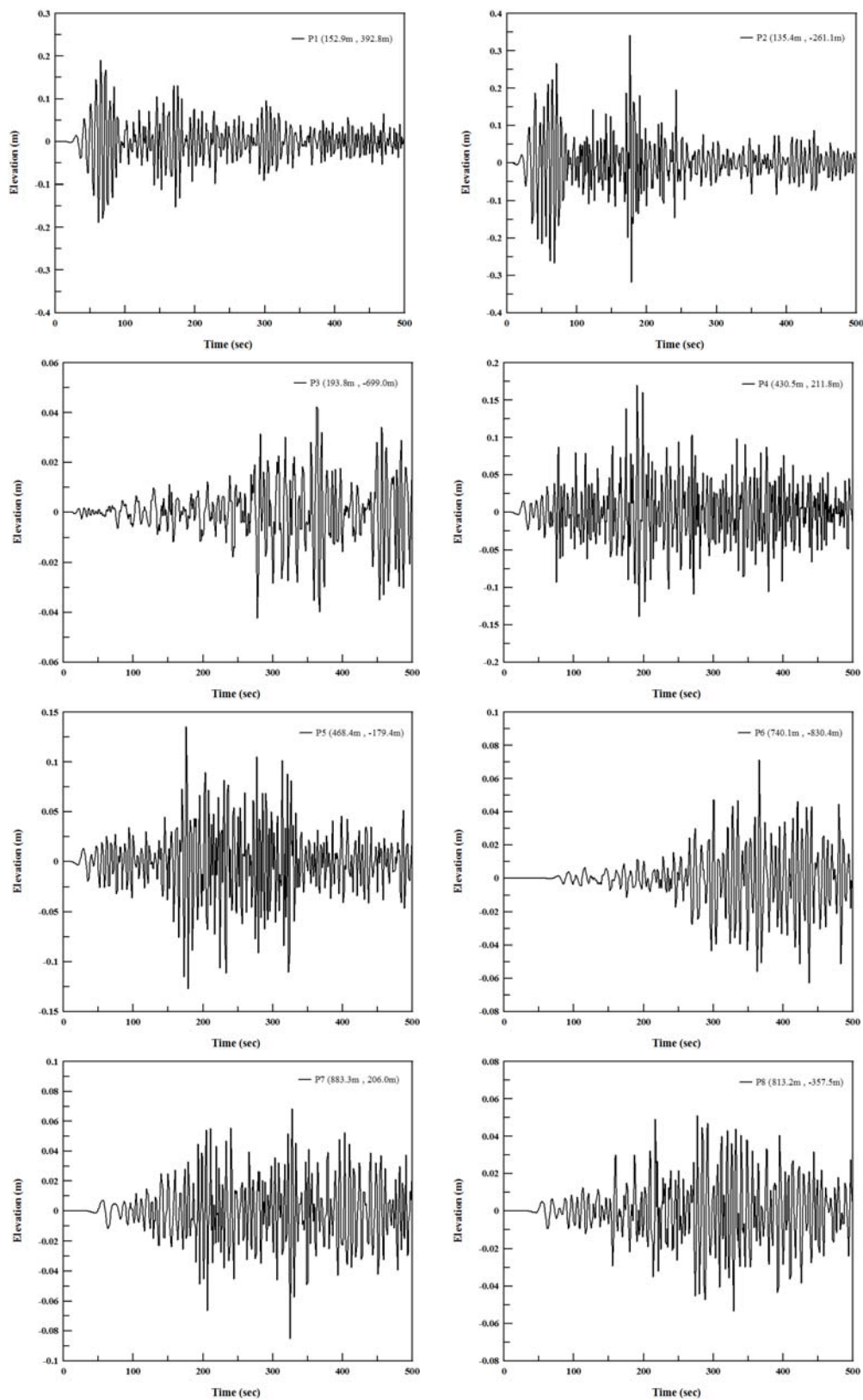


圖 5.5 船舶航行於臺北港船速 3 節之興波變化比較圖（置於不同觀測點）

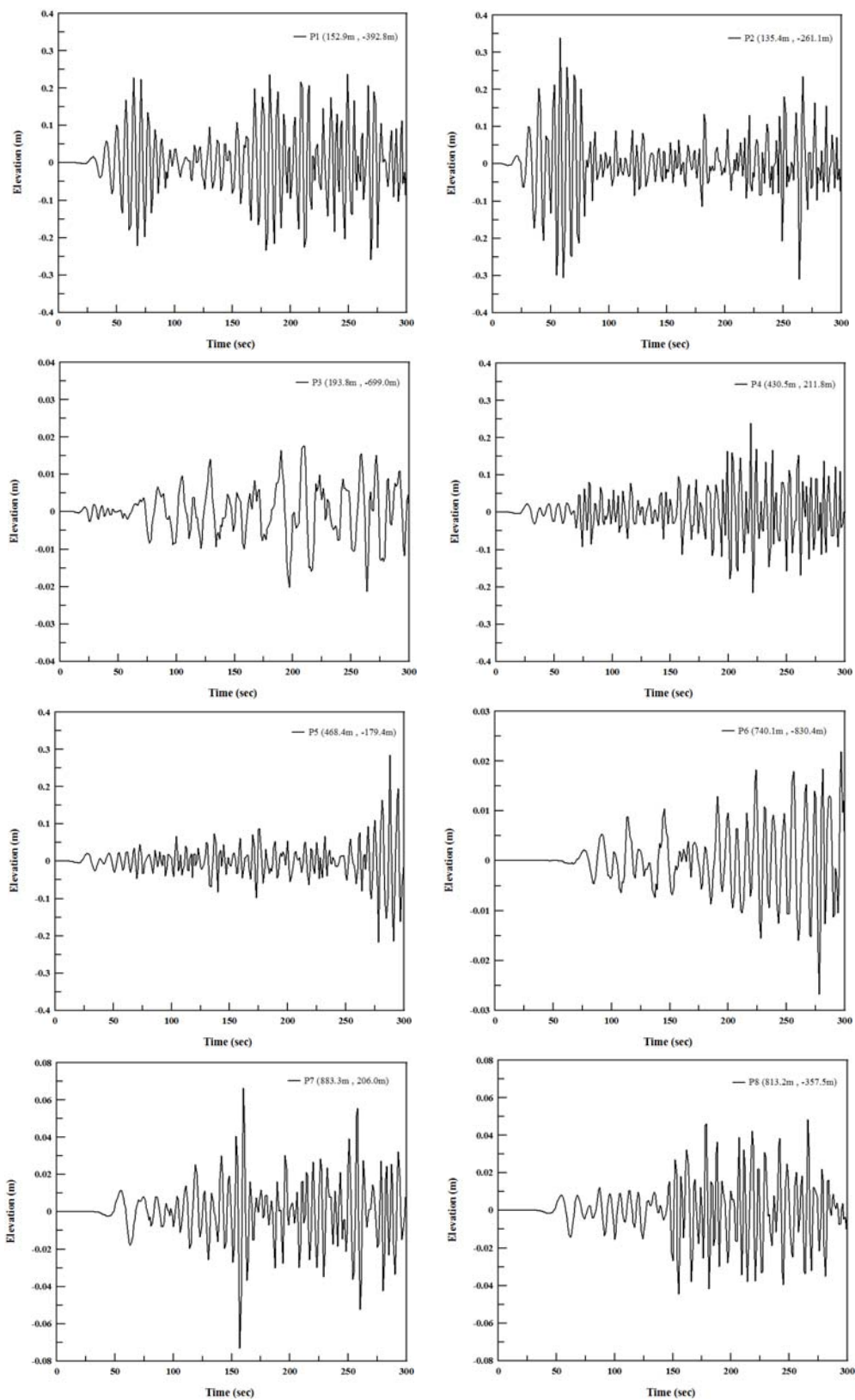


圖 5.6 船舶航行於臺北港船速 6 節之興波變化比較圖（置於不同觀測點）

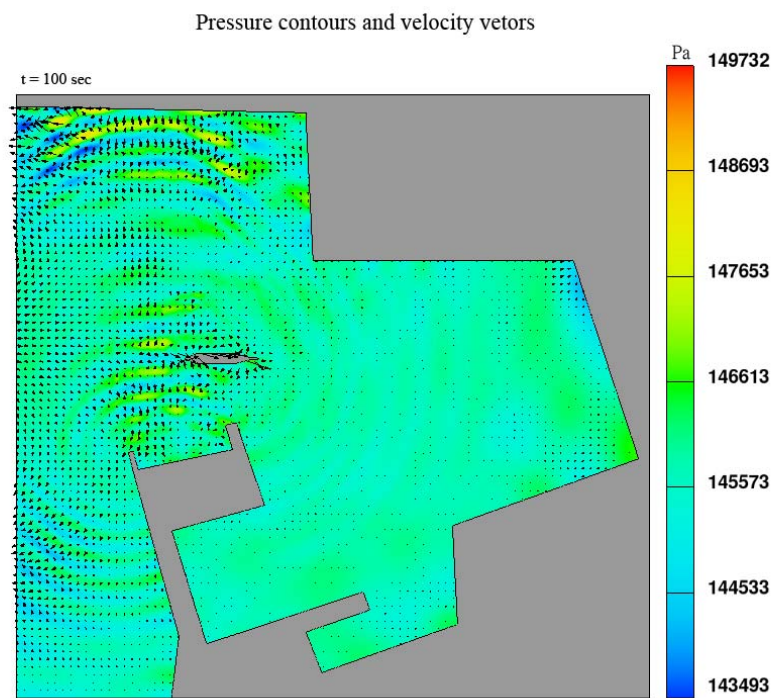
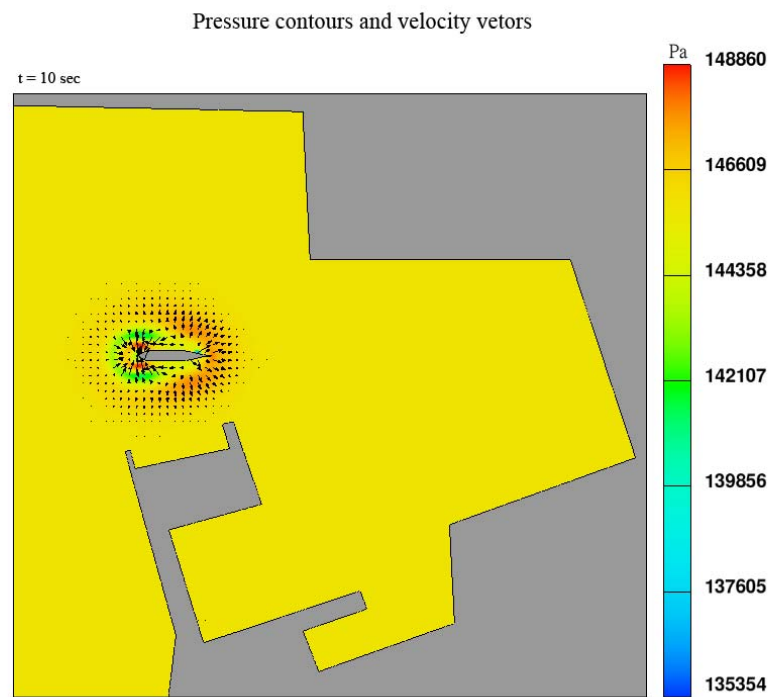


圖 5.7 船舶進港，船速 3 節，壓力速度向量圖

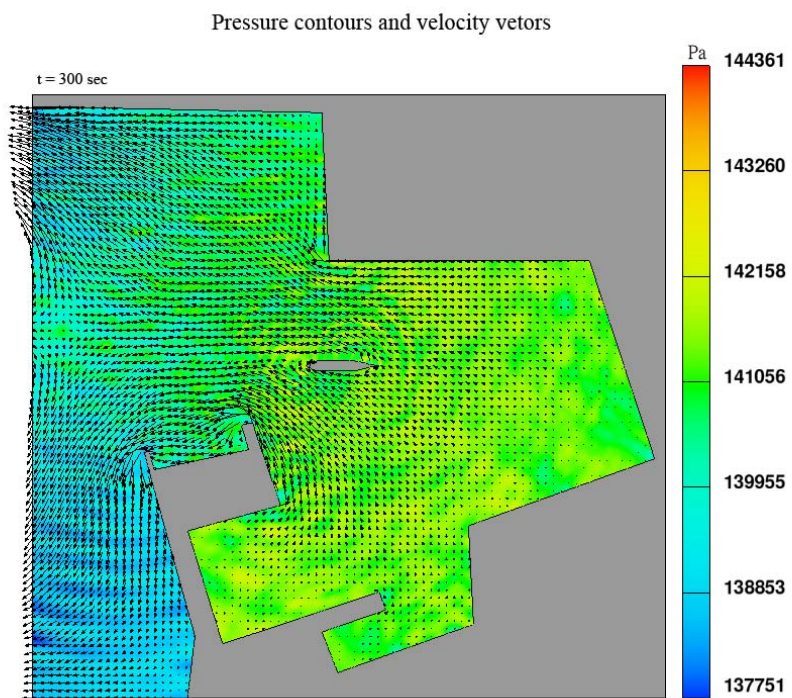
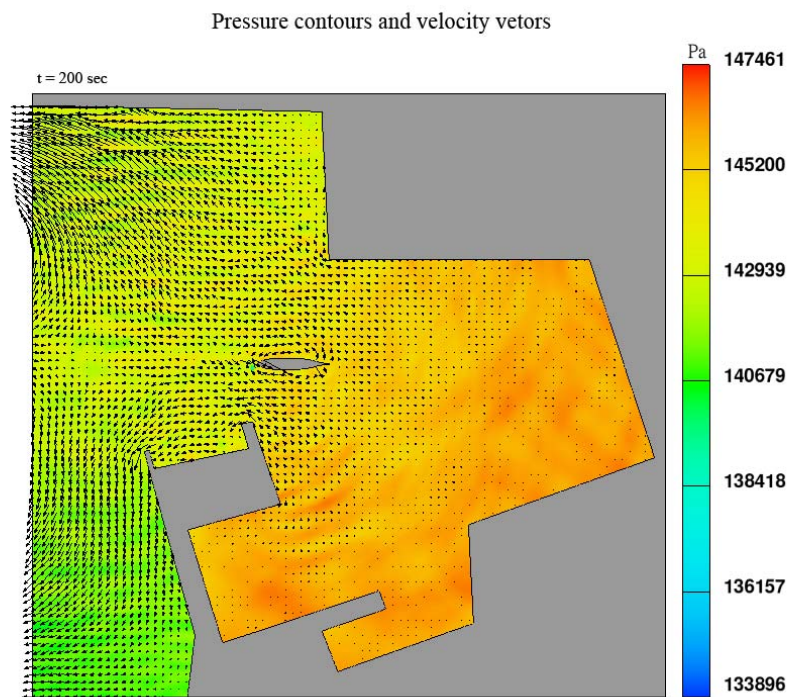


圖 5.7 船舶進港，船速 3 節，壓力速度向量圖（接續）

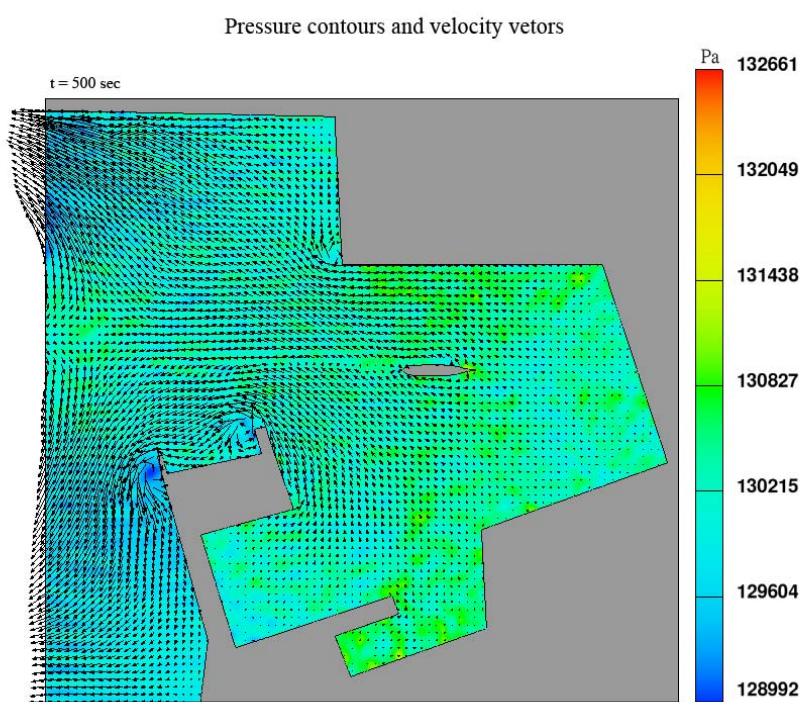
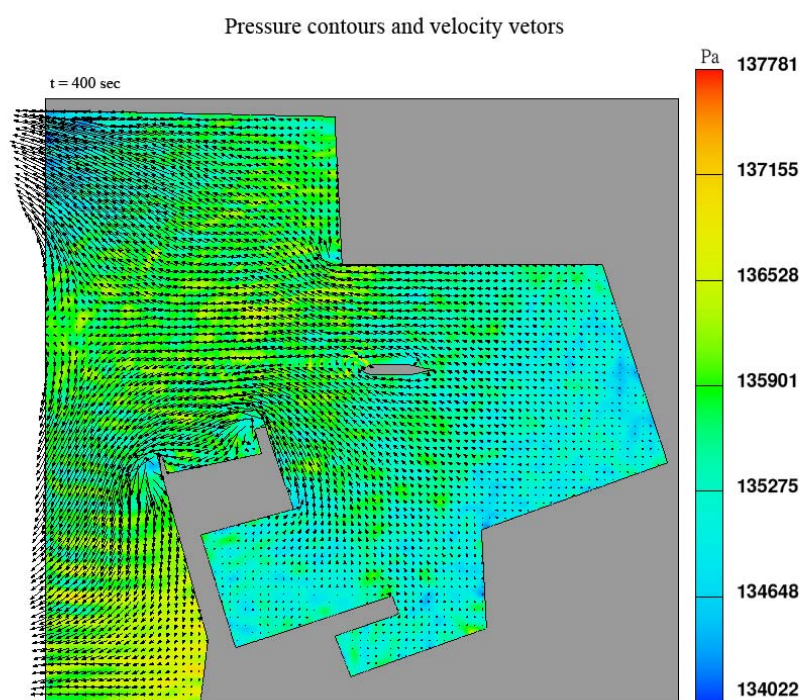


圖 5.7 船舶進港，船速 3 節，壓力速度向量圖（接續）

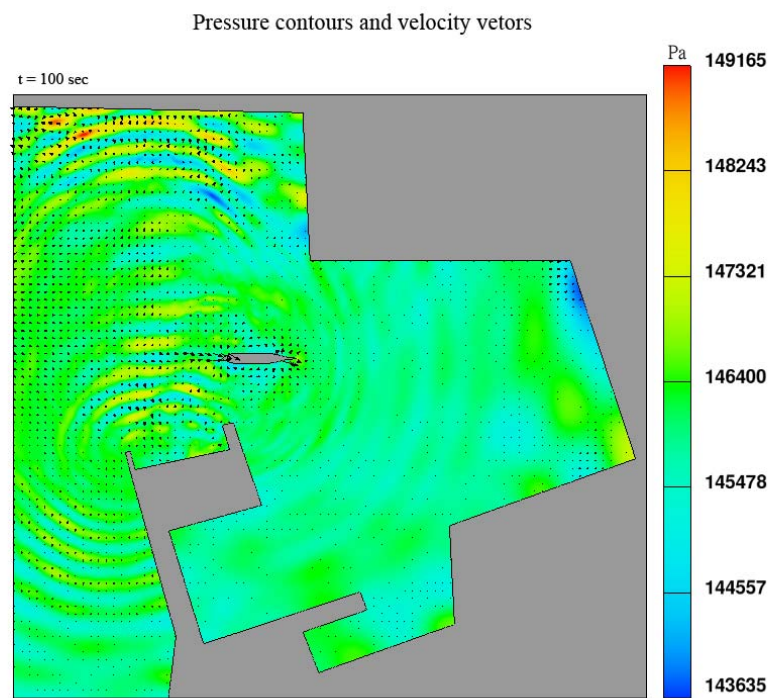
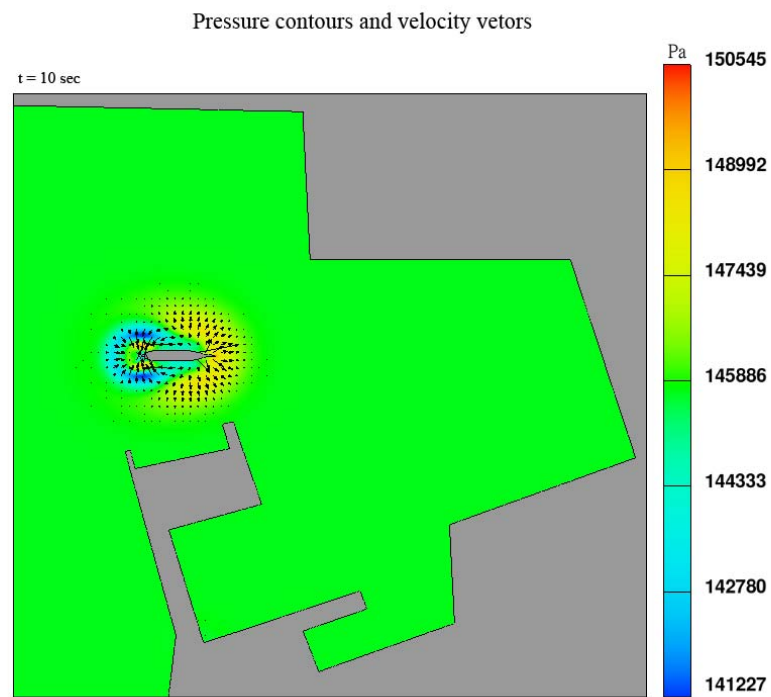


圖 5.8 船舶進港，船速 6 節，壓力速度向量圖

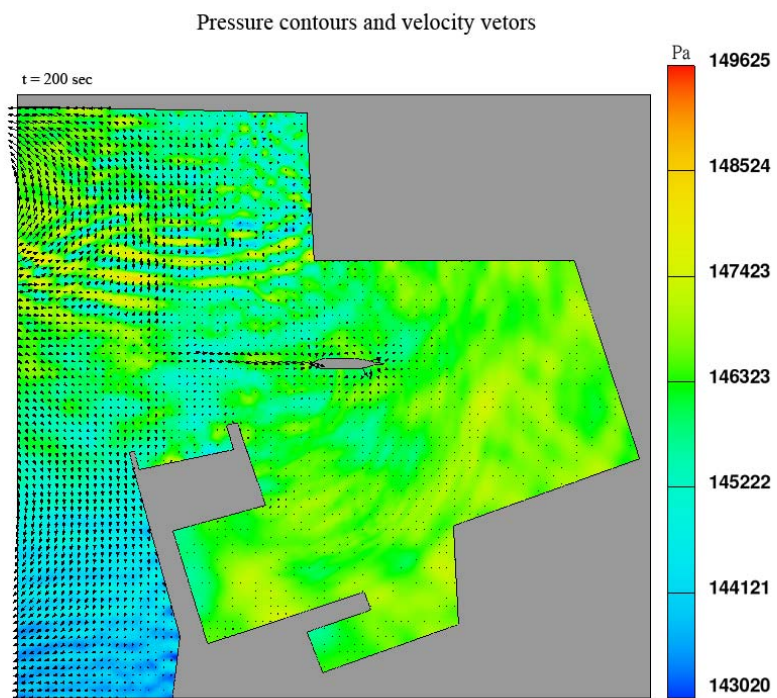
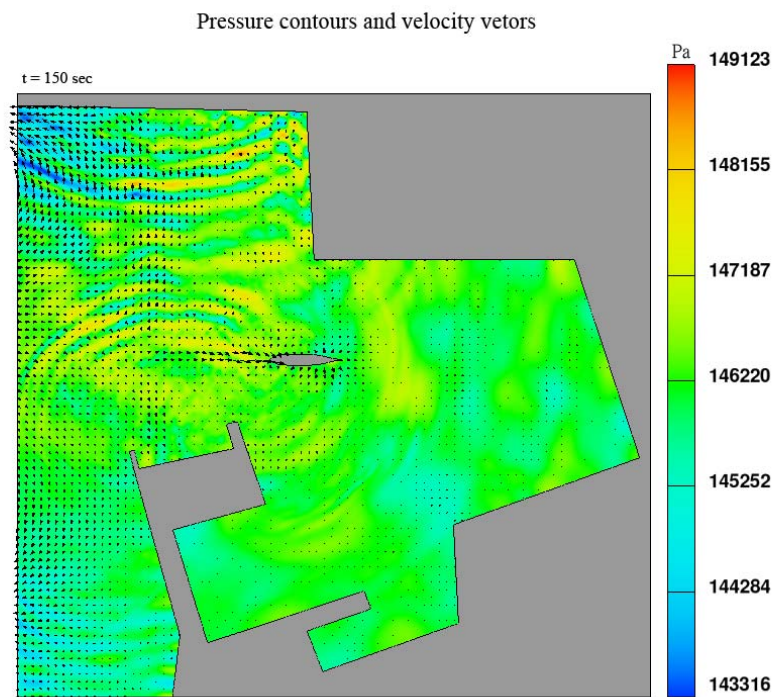


圖 5.8 船舶進港，船速 6 節，壓力速度向量圖（接續）

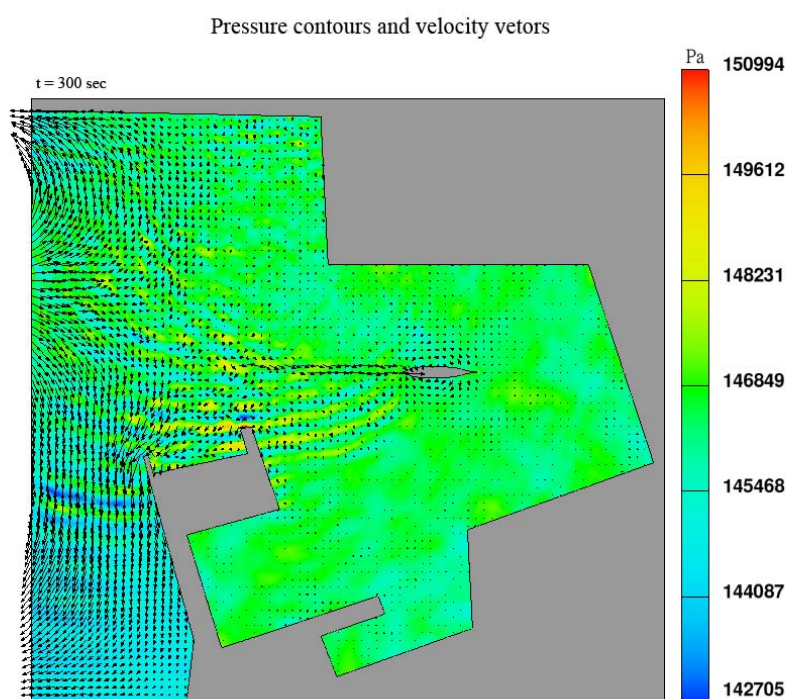
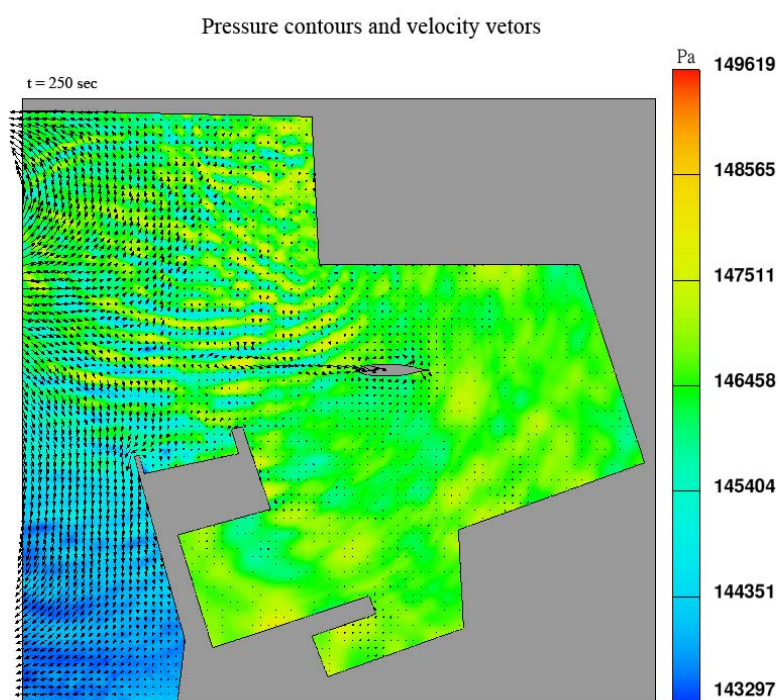


圖 5.8 船舶進港，船速 6 節，壓力速度向量圖（接續）

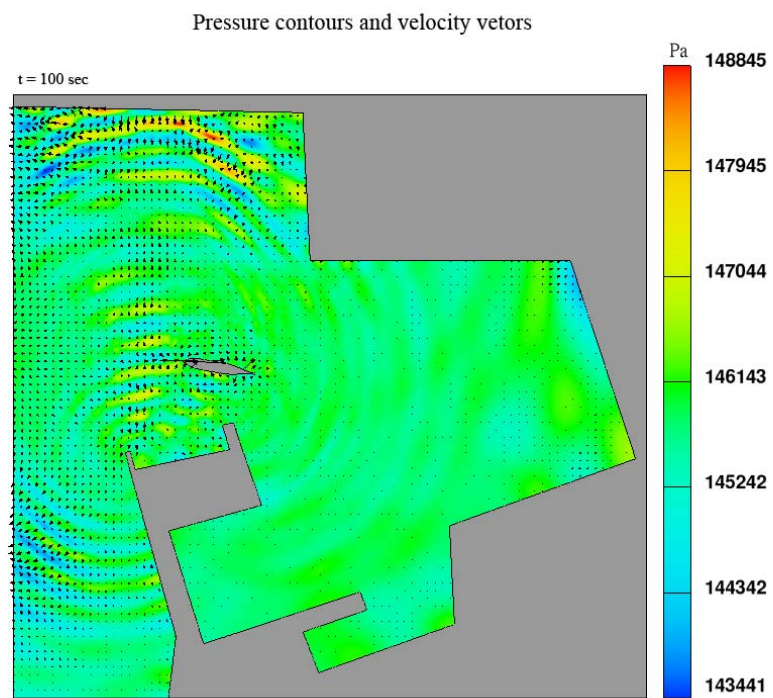
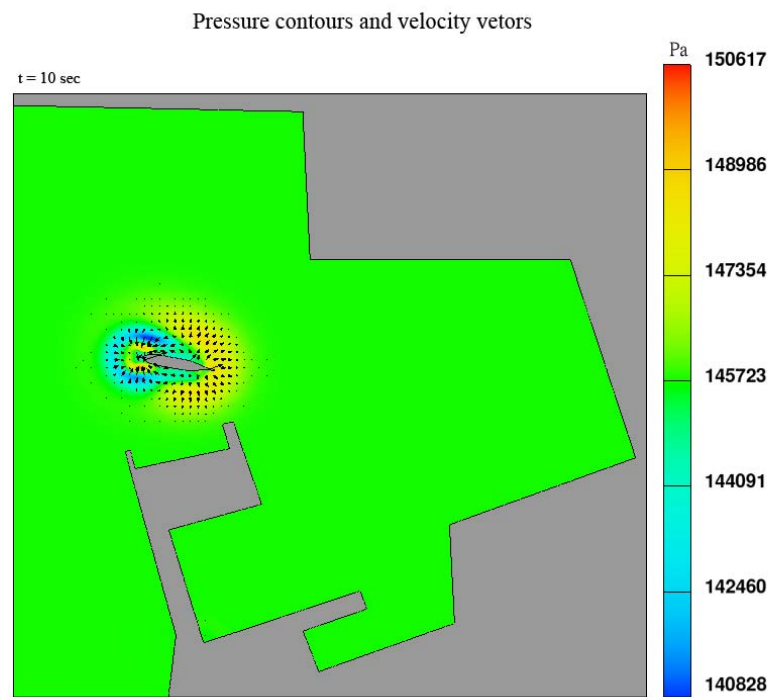


圖 5.9 船舶進港，船速 3 節，偏航 10 度，壓力速度向量圖

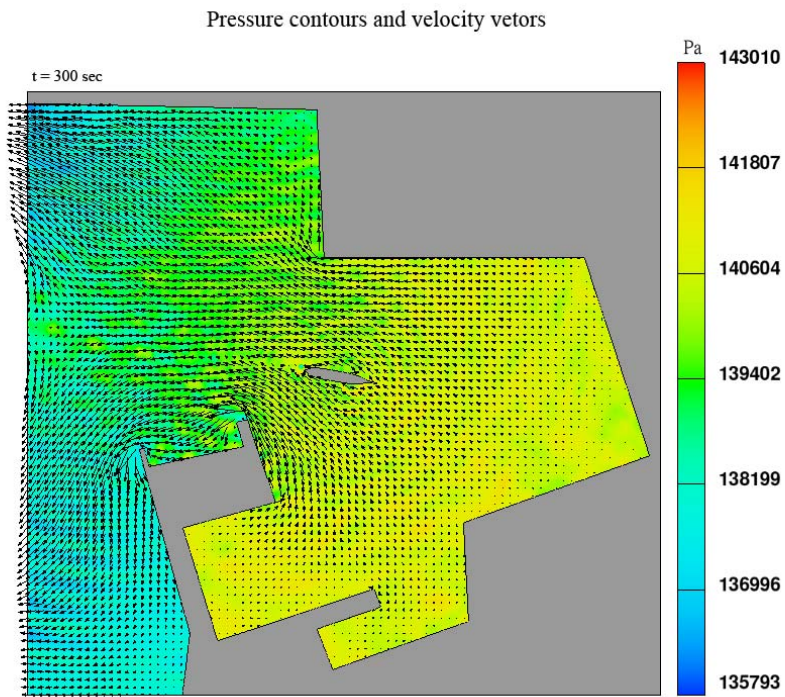
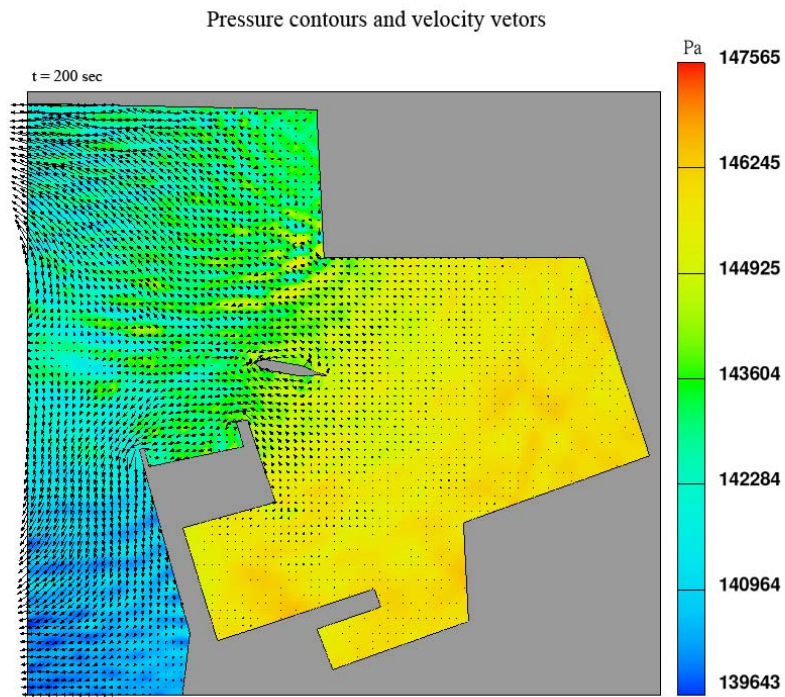


圖 5.9 船舶進港，船速 3 節，偏航 10 度，壓力速度向量圖（接續）

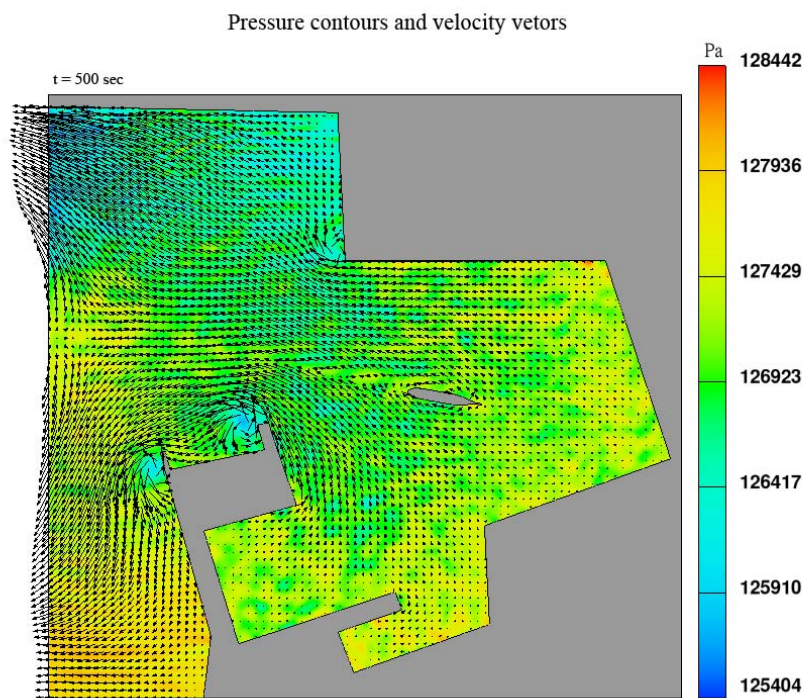
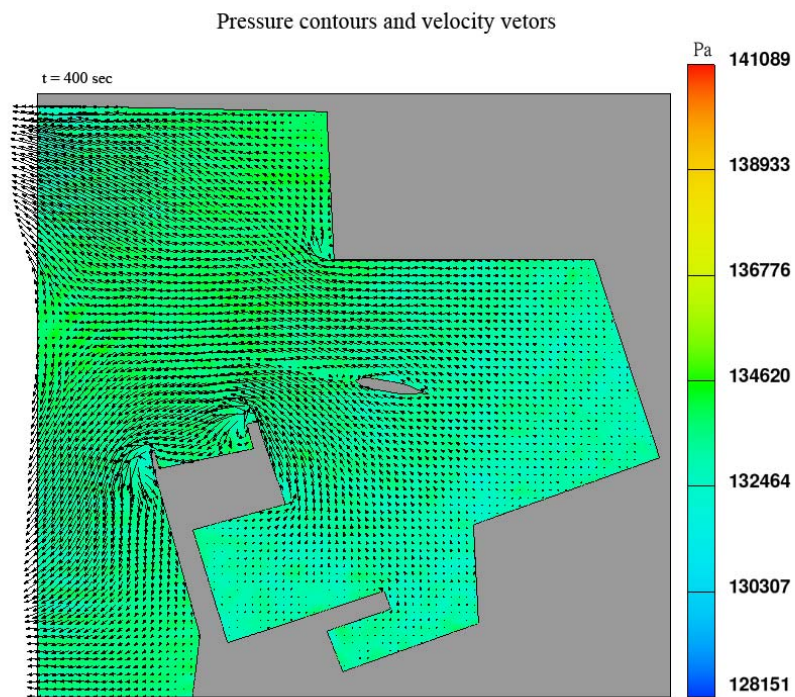


圖 5.9 船舶進港，船速 3 節，偏航 10 度，壓力速度向量圖（接續）

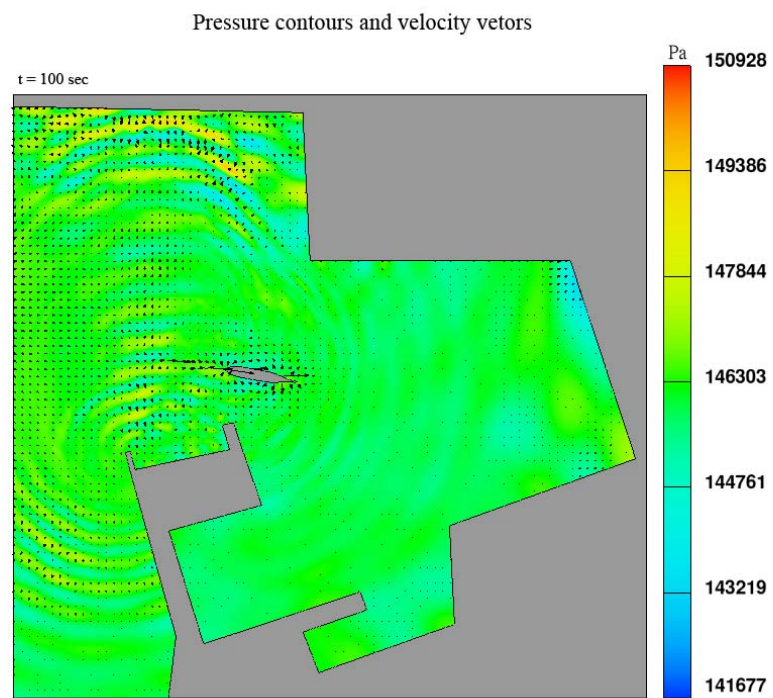
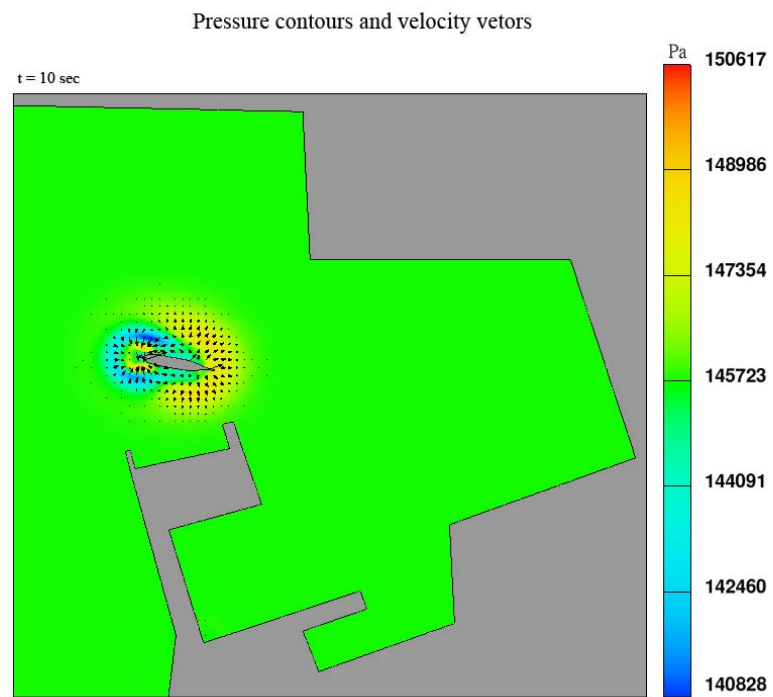


圖 5.10 船舶進港，船速 6 節，偏航 10 度，壓力速度向量圖

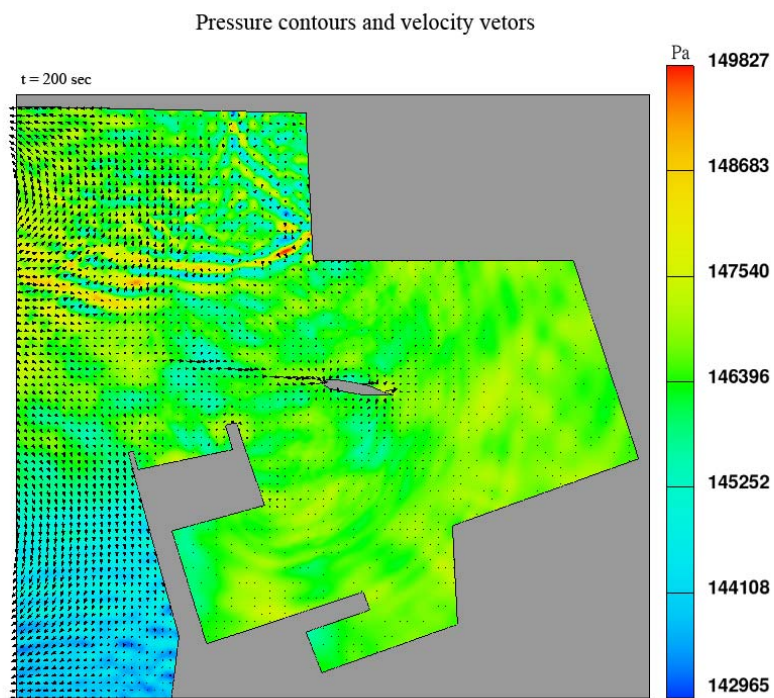
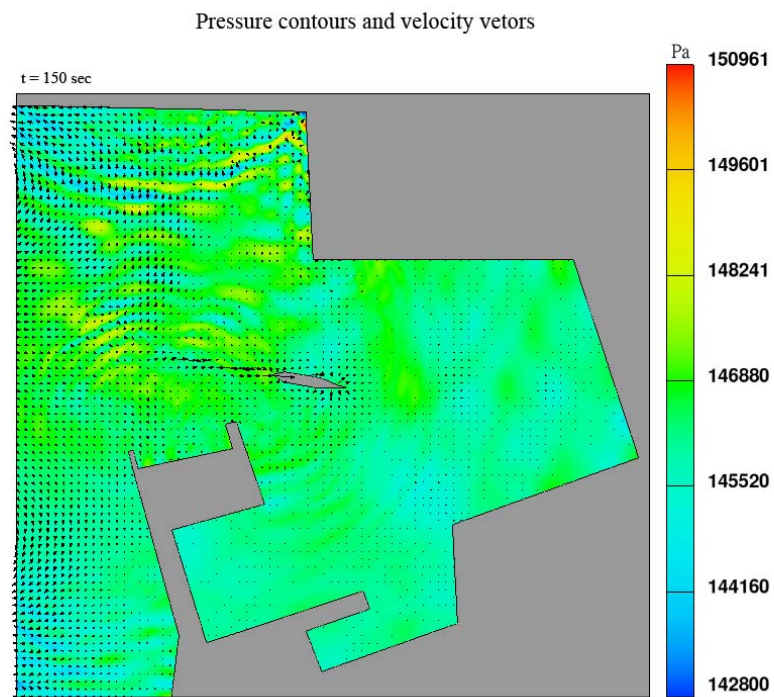


圖 5.10 船舶進港，船速 6 節，偏航 10 度，壓力速度向量圖（接續）

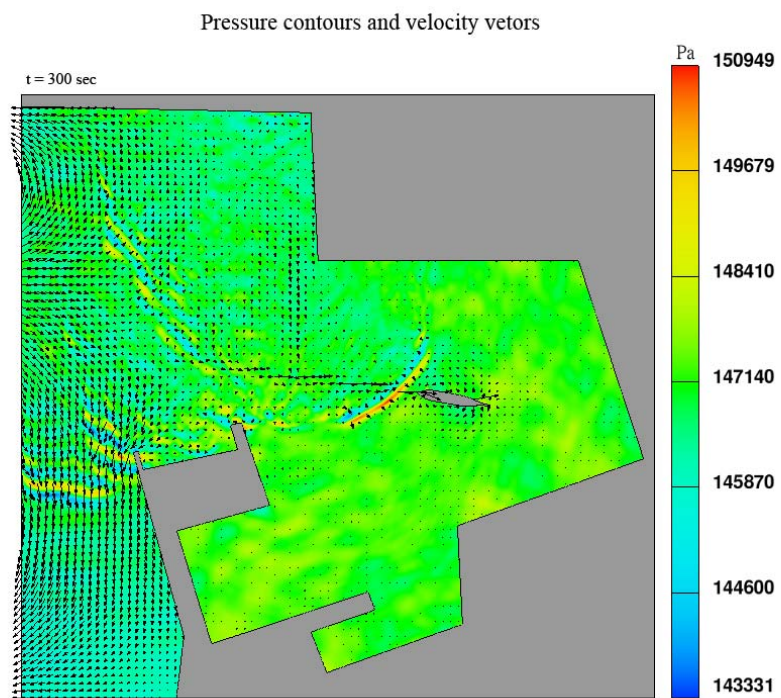
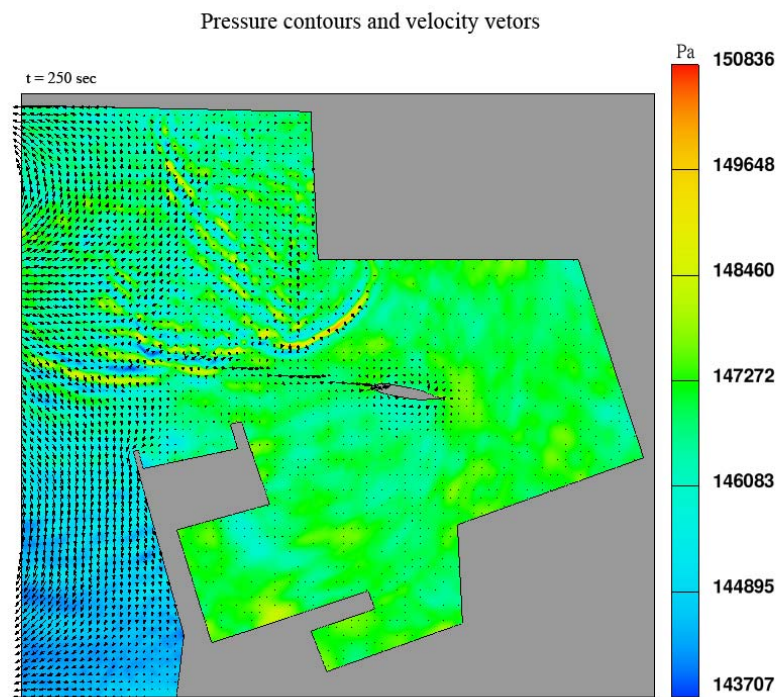


圖 5.10 船舶進港，船速 6 節，偏航 10 度，壓力速度向量圖（接續）

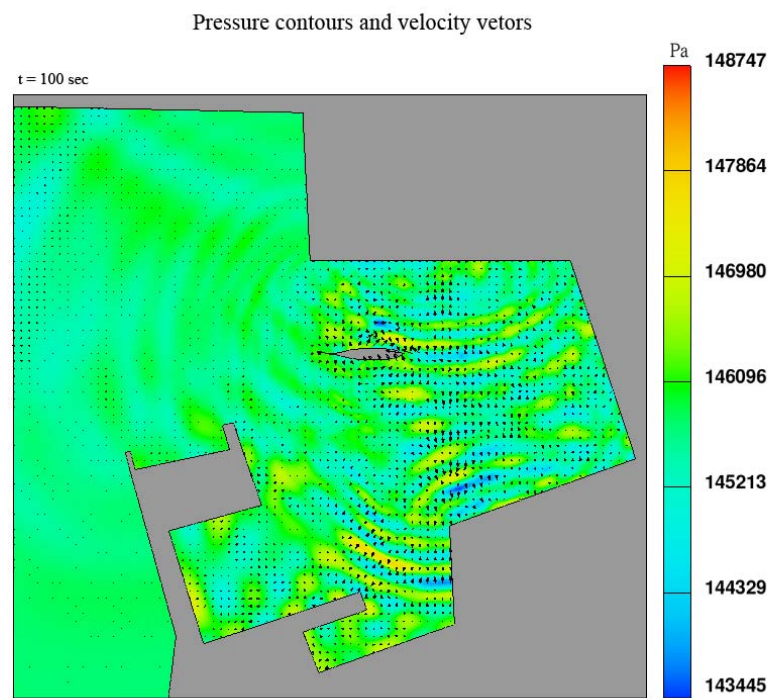
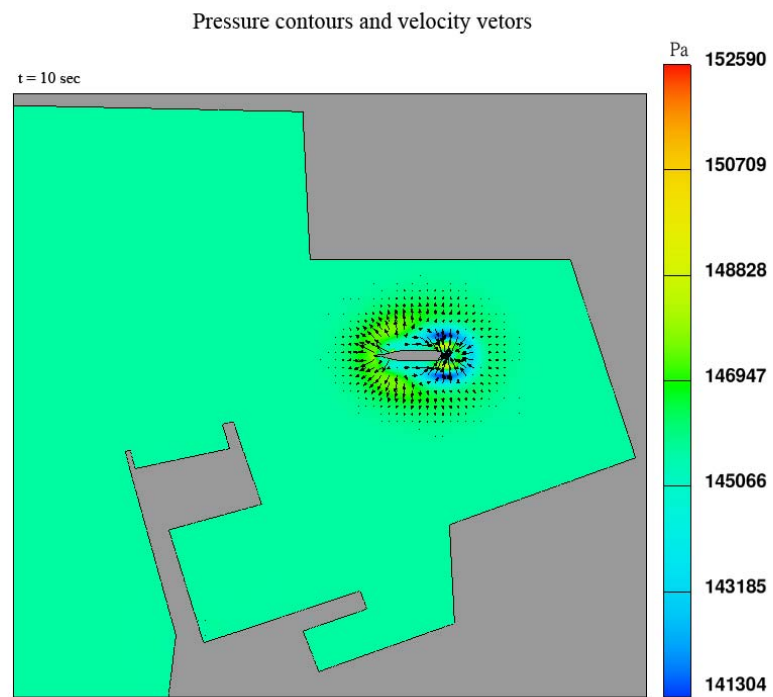


圖 5.11 船舶出港，船速 3 節，壓力速度向量圖

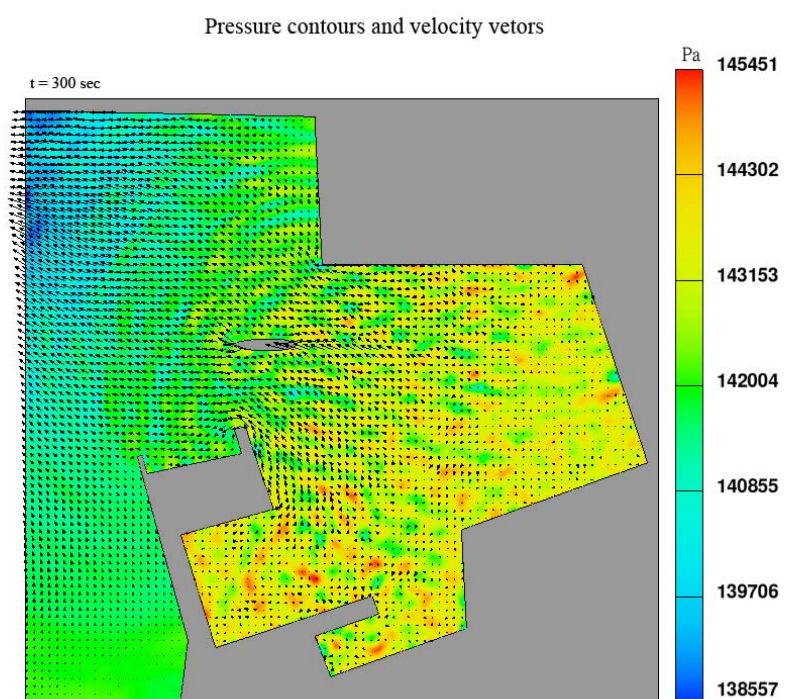
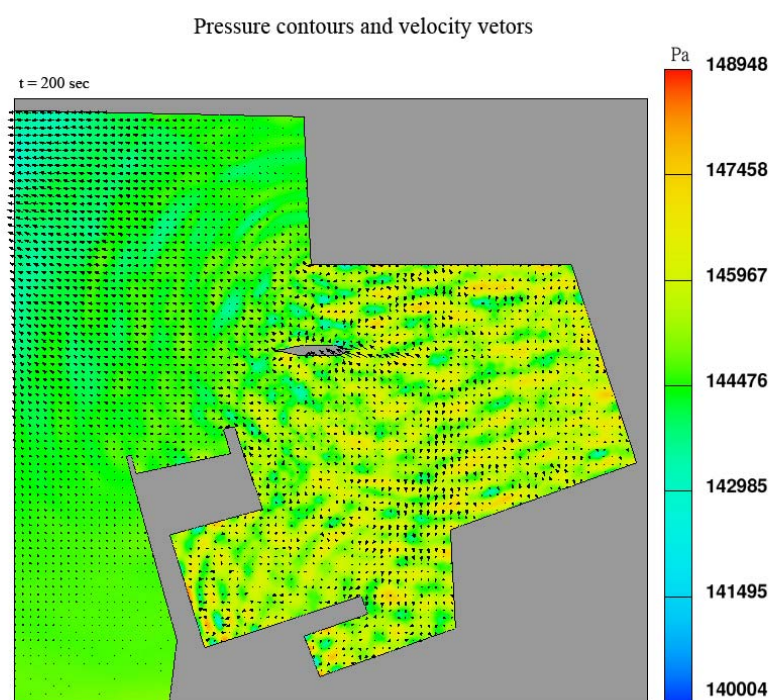


圖 5.11 船舶出港，船速 3 節，壓力速度向量圖（接續）

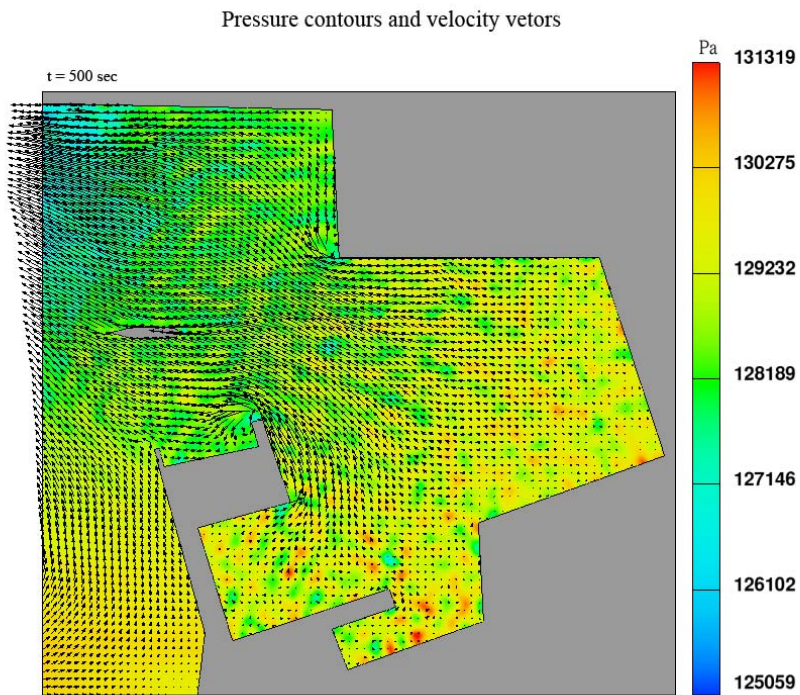
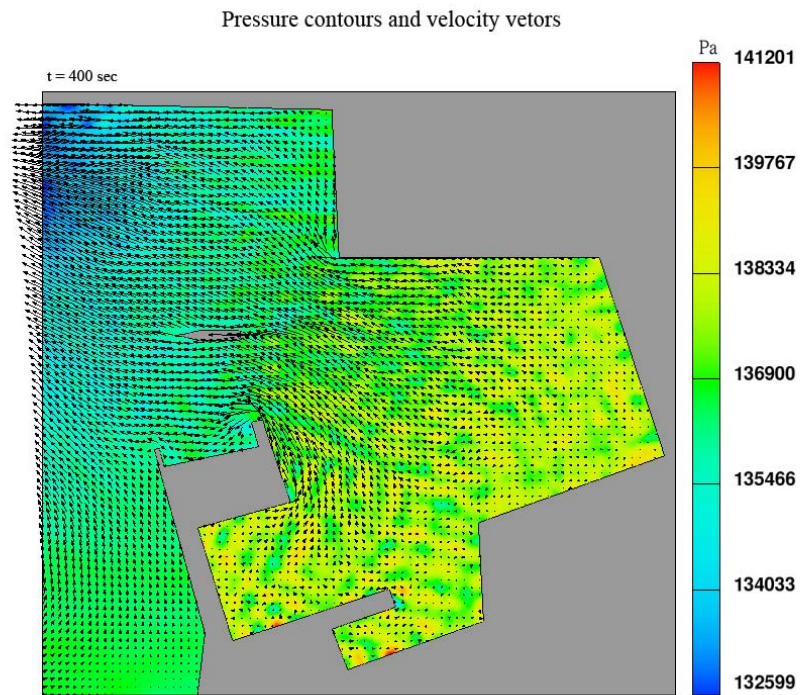


圖 5.11 船舶出港，船速 3 節，壓力速度向量圖（接續）

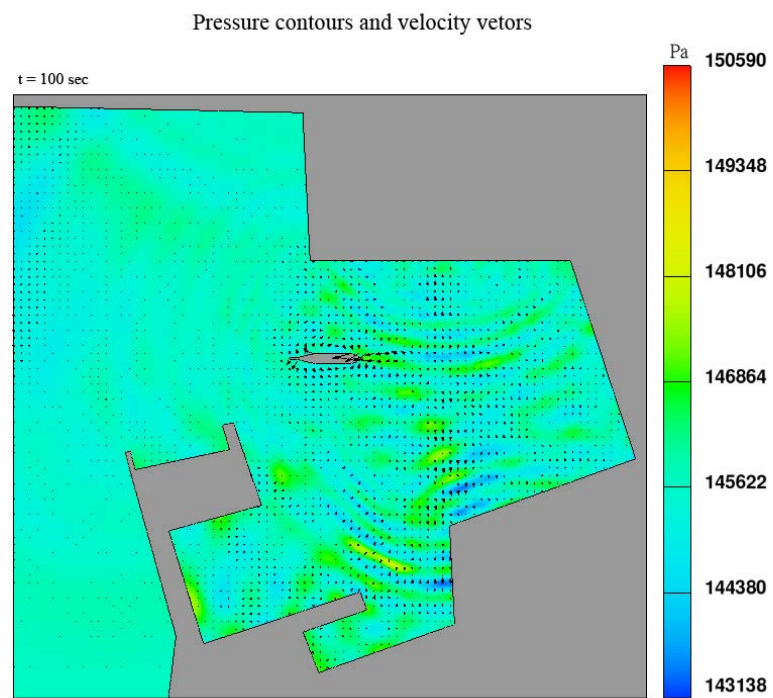
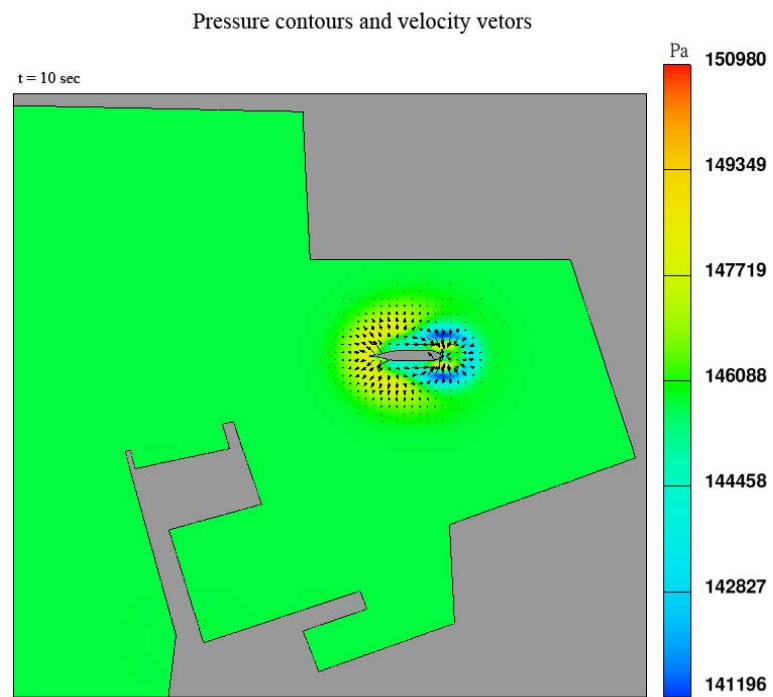


圖 5.12 船舶出港，船速 6 節，壓力速度向量圖

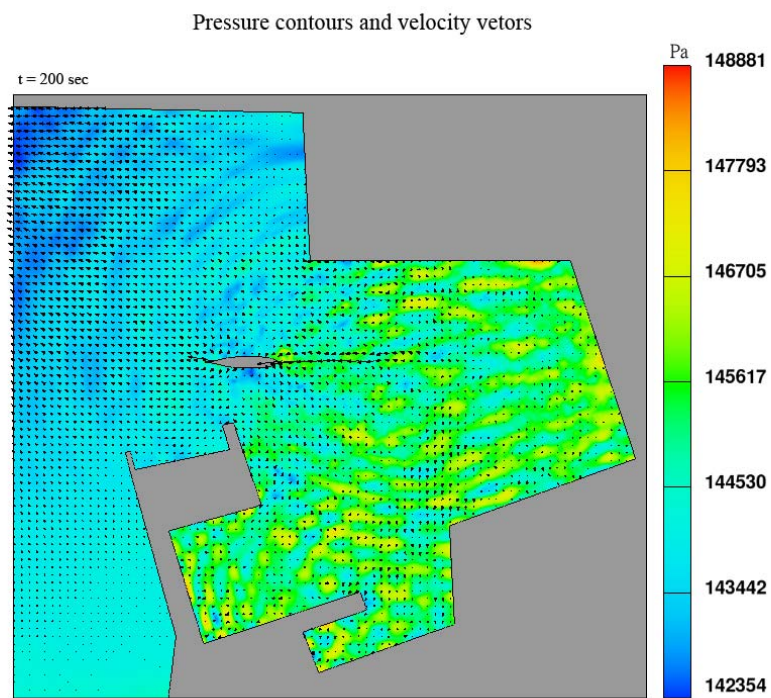
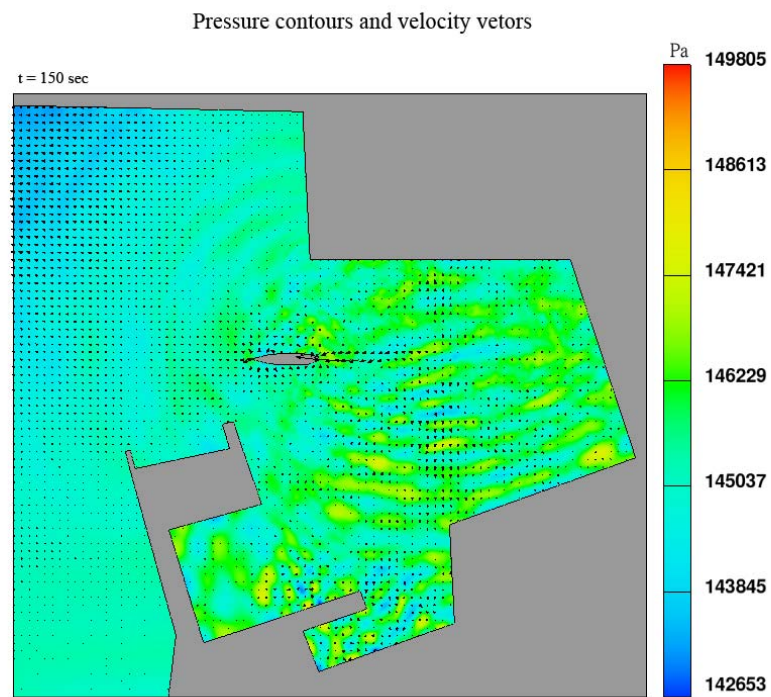


圖 5.12 船舶出港，船速 6 節，壓力速度向量圖（接續）

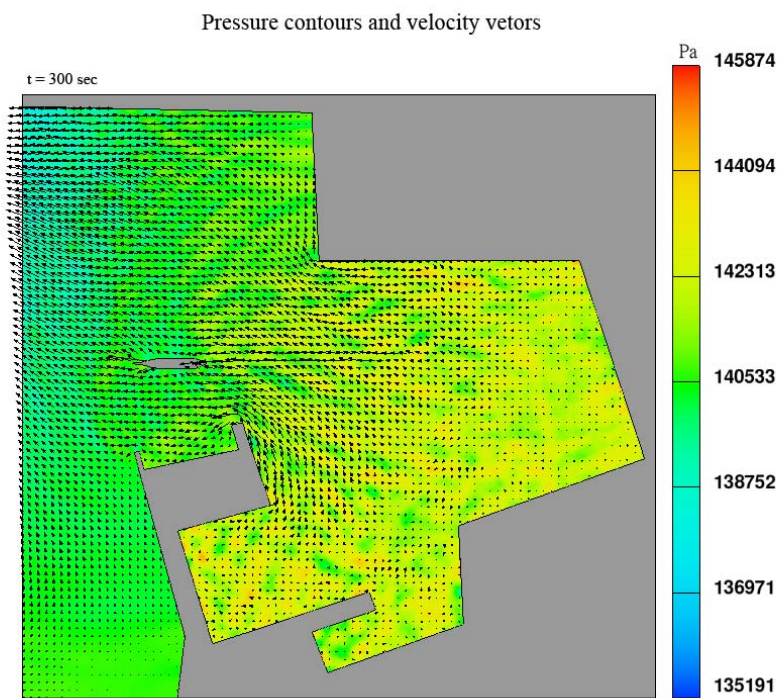
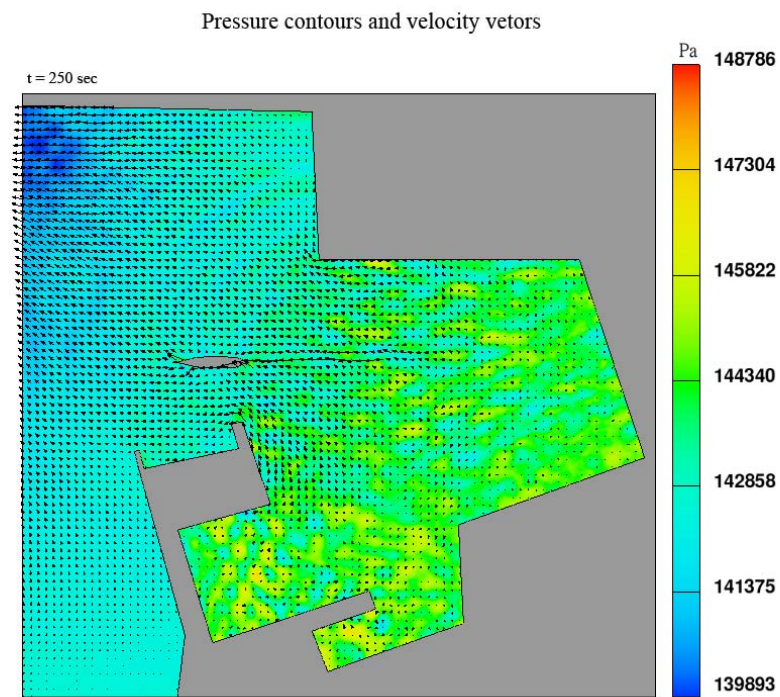


圖 5.12 船舶出港，船速 6 節，壓力速度向量圖（接續）

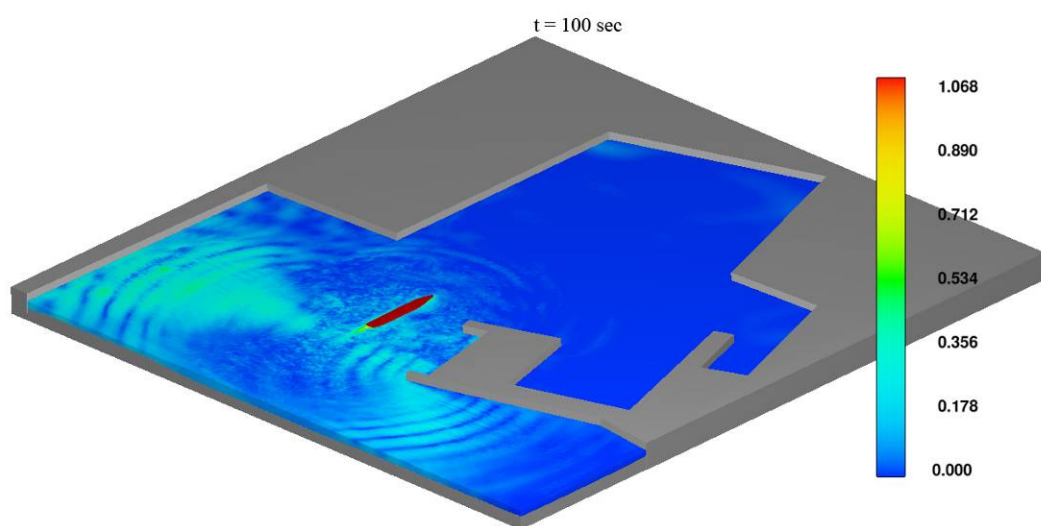
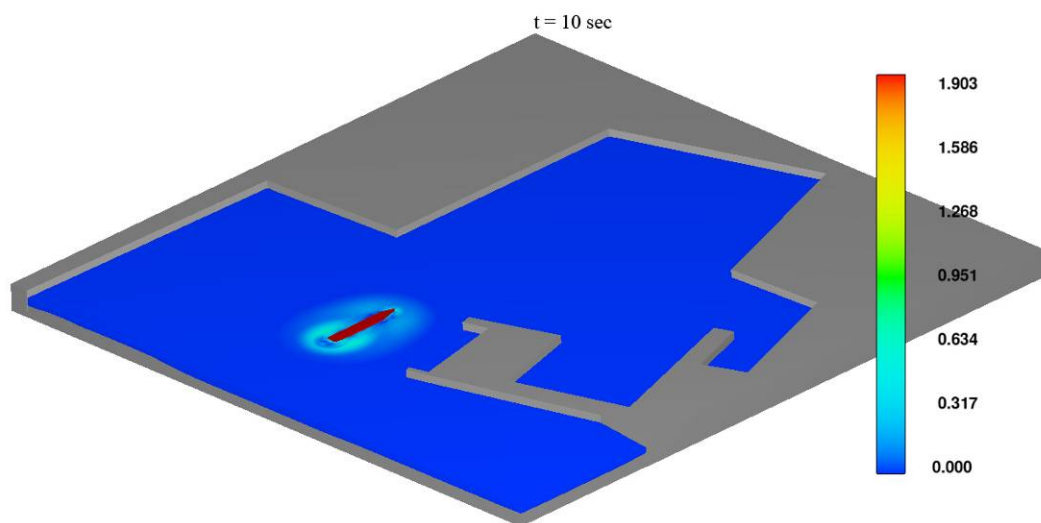


圖 5.13 船舶進港 3D 圖，船速 3 節

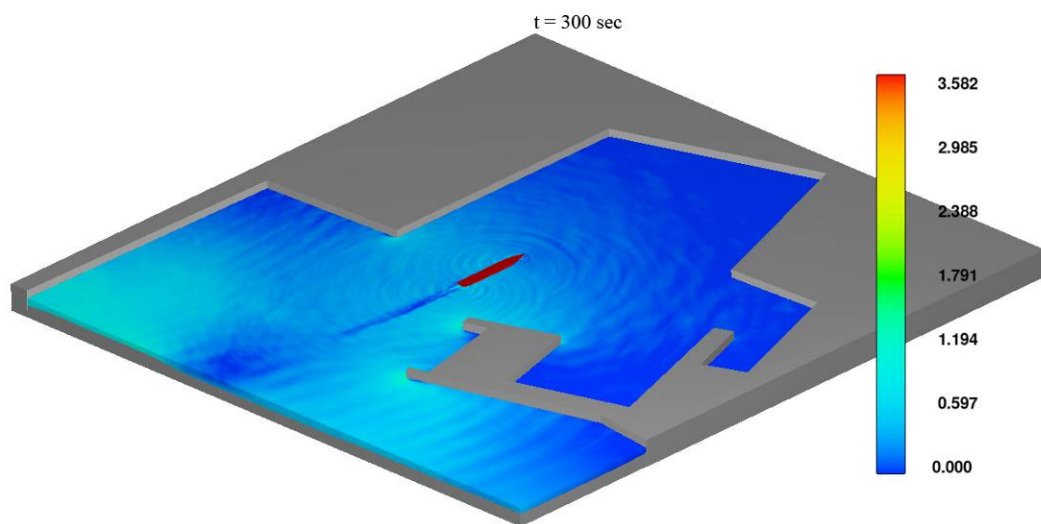
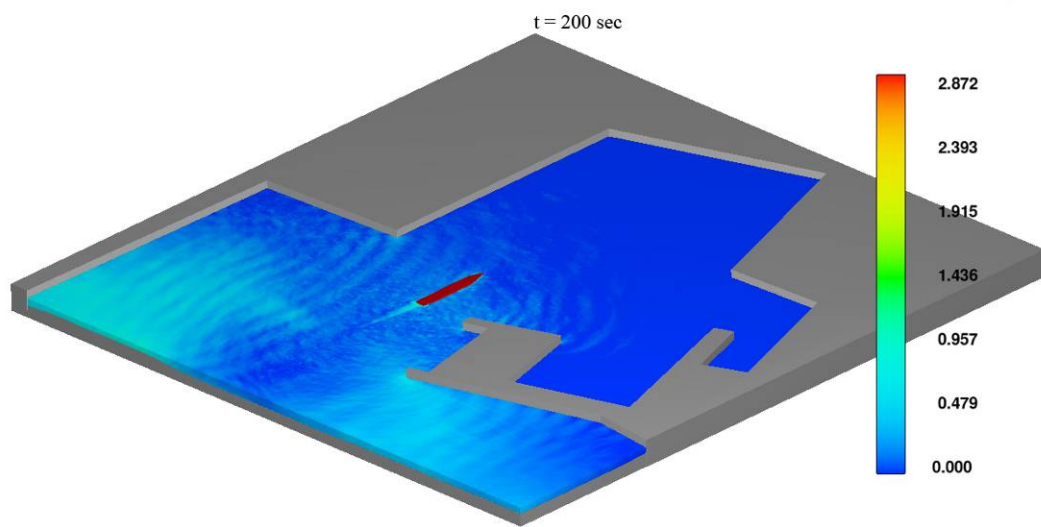


圖 5.13 船舶進港 3D 圖，船速 3 節（接續）

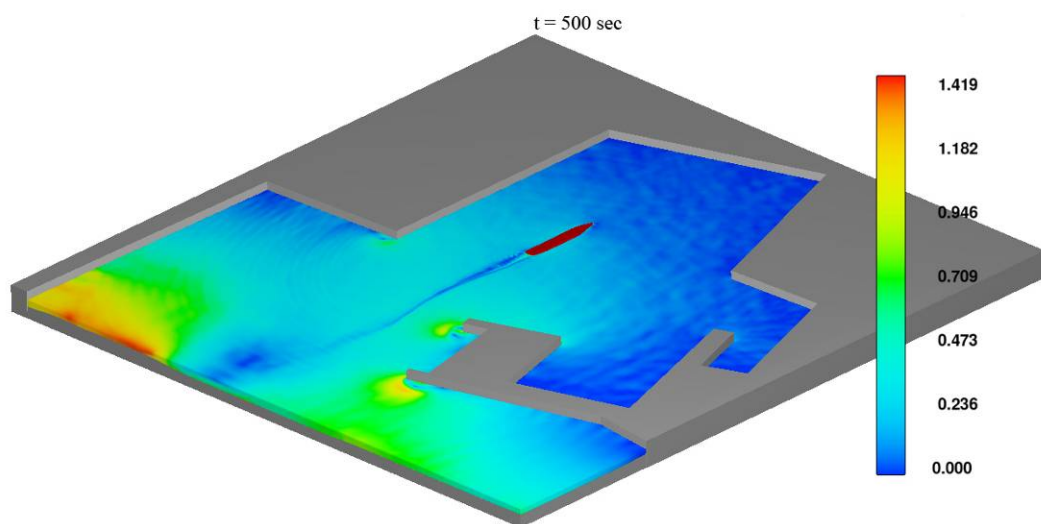
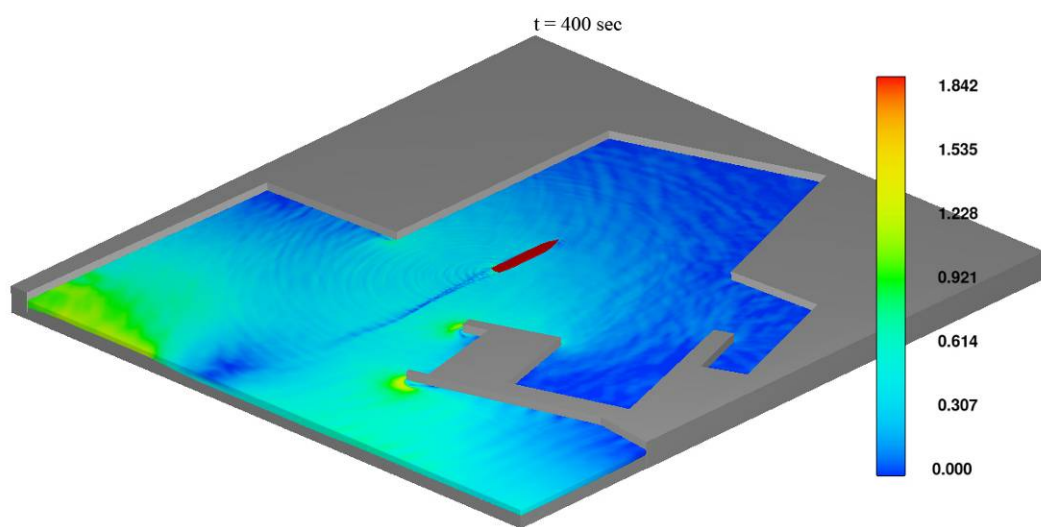


圖 5.13 船舶進港 3D 圖，船速 3 節（接續）

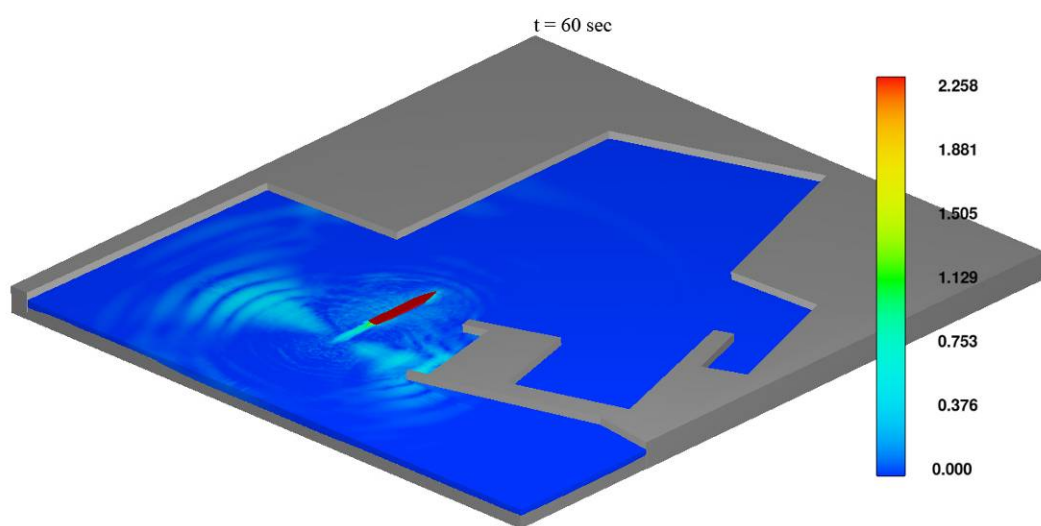
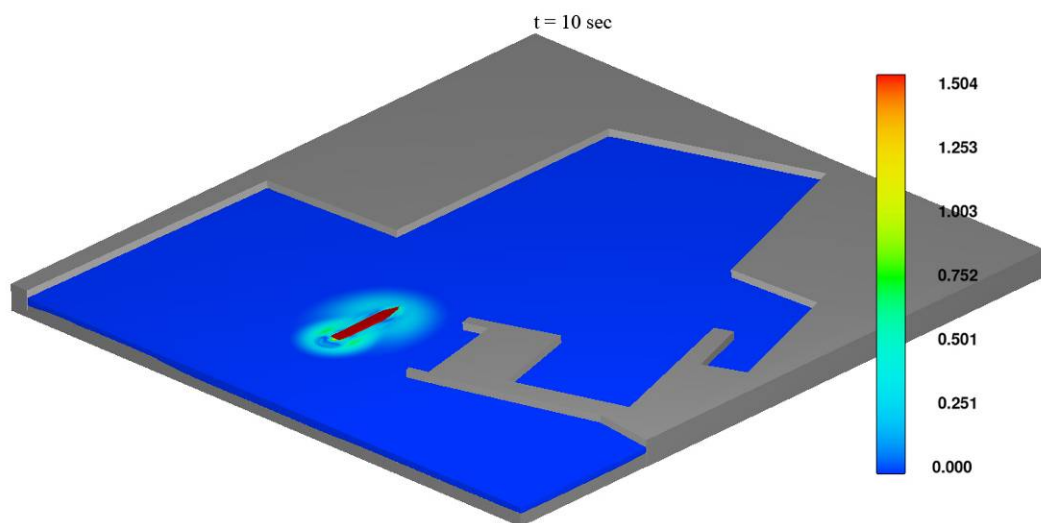


圖 5.14 船舶進港 3D 圖，船速 6 節

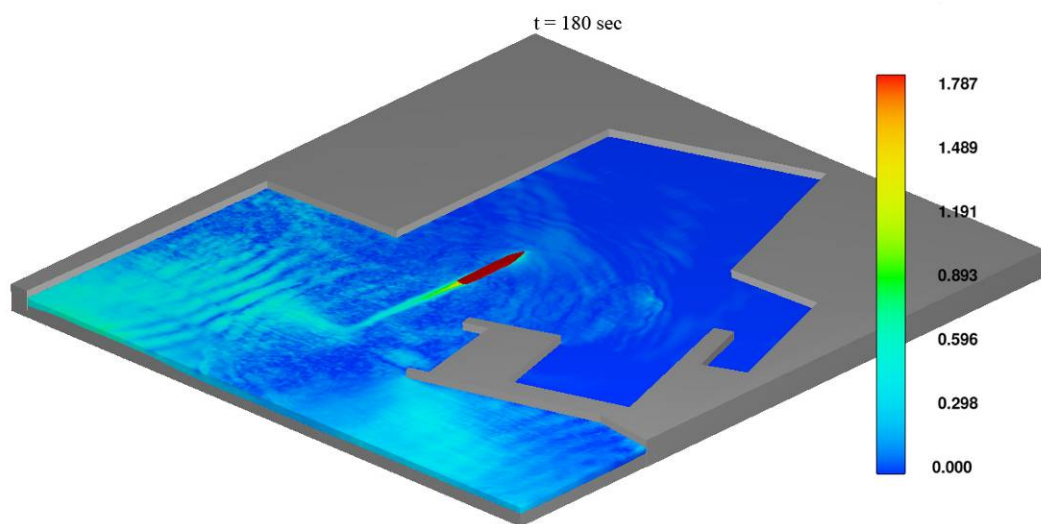
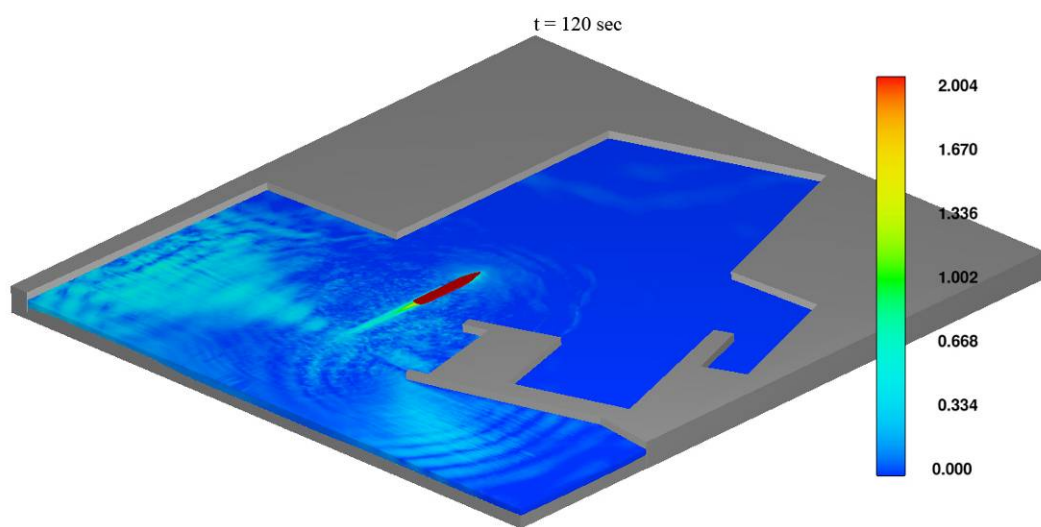


圖 5.14 船舶進港 3D 圖，船速 6 節（接續）

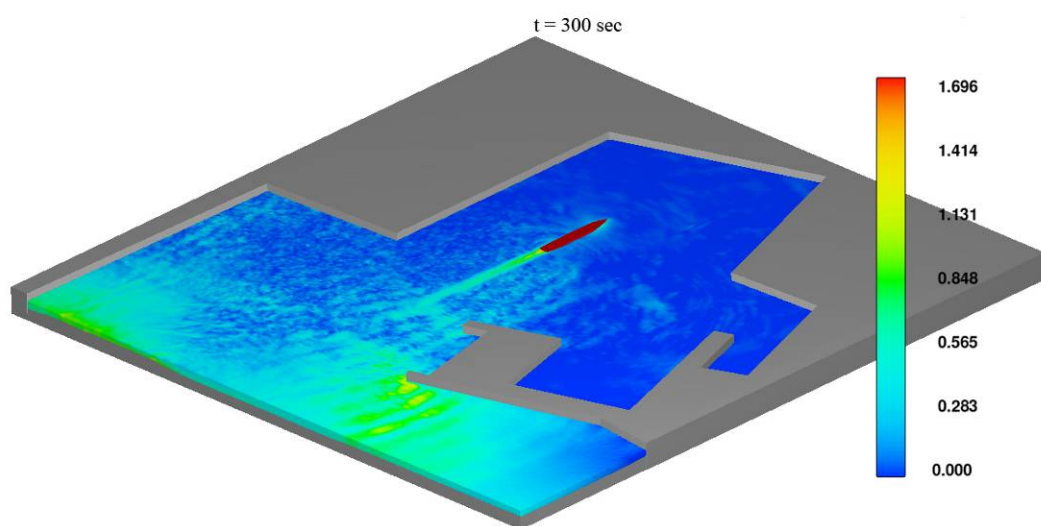
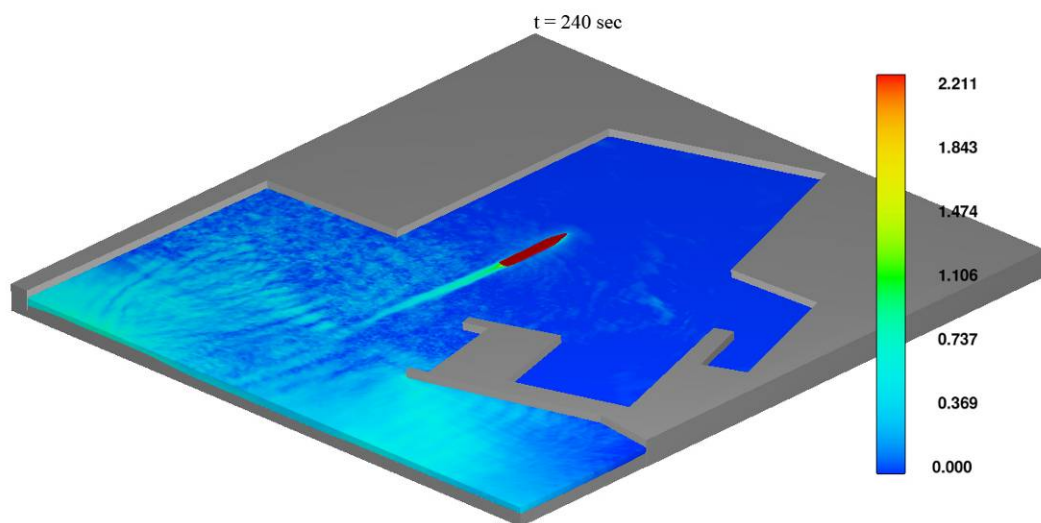


圖 5.14 船舶進港 3D 圖，船速 6 節（接續）

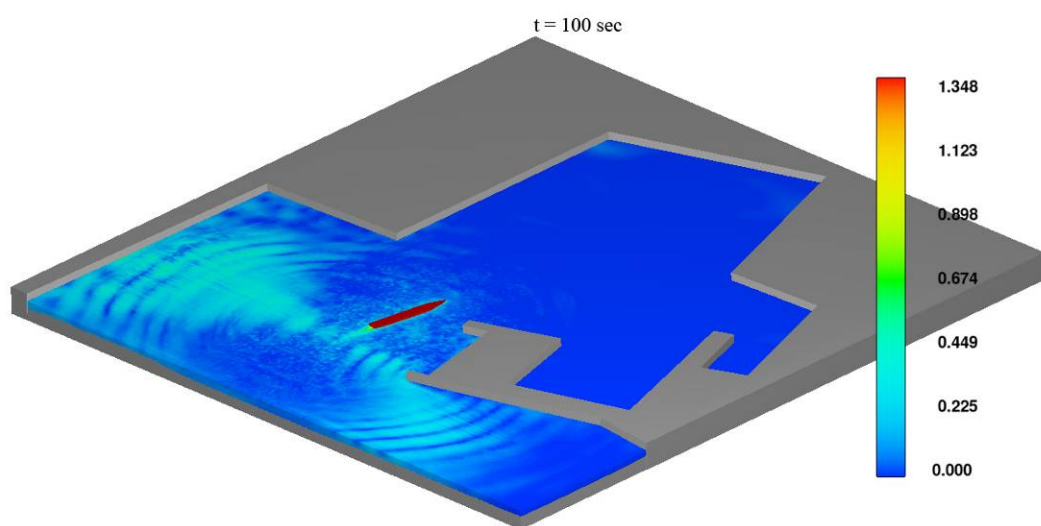
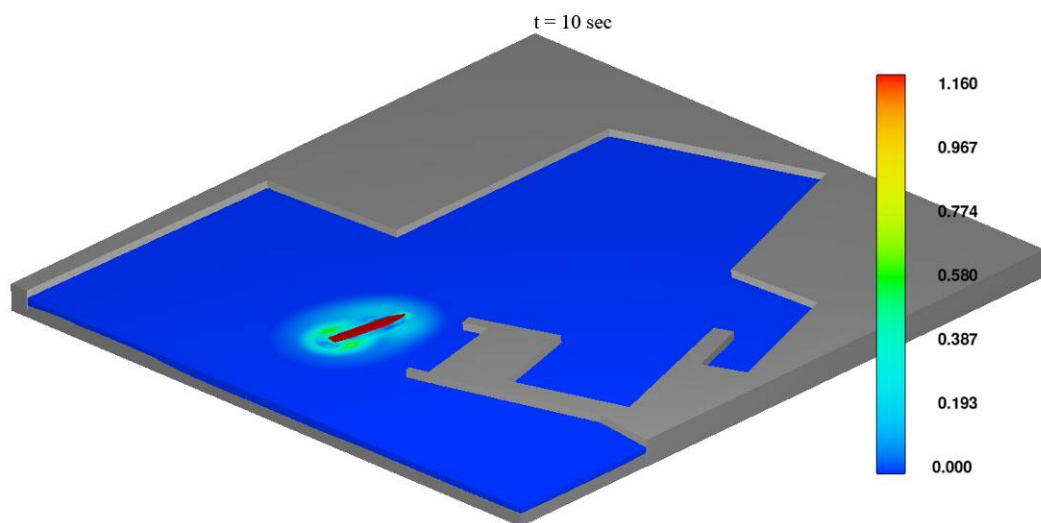


圖 5.15 船舶進港 3D 圖，船速 3 節，偏航 10 度

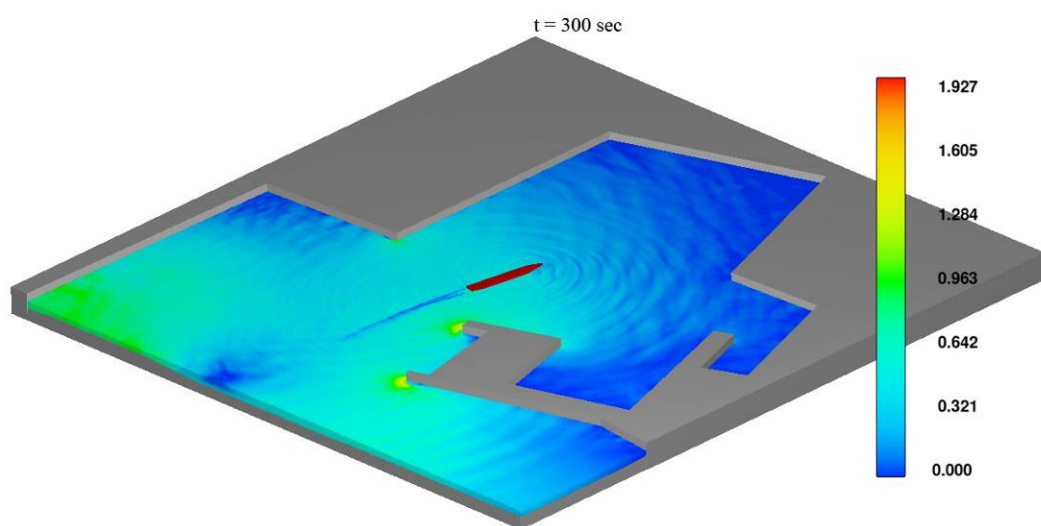
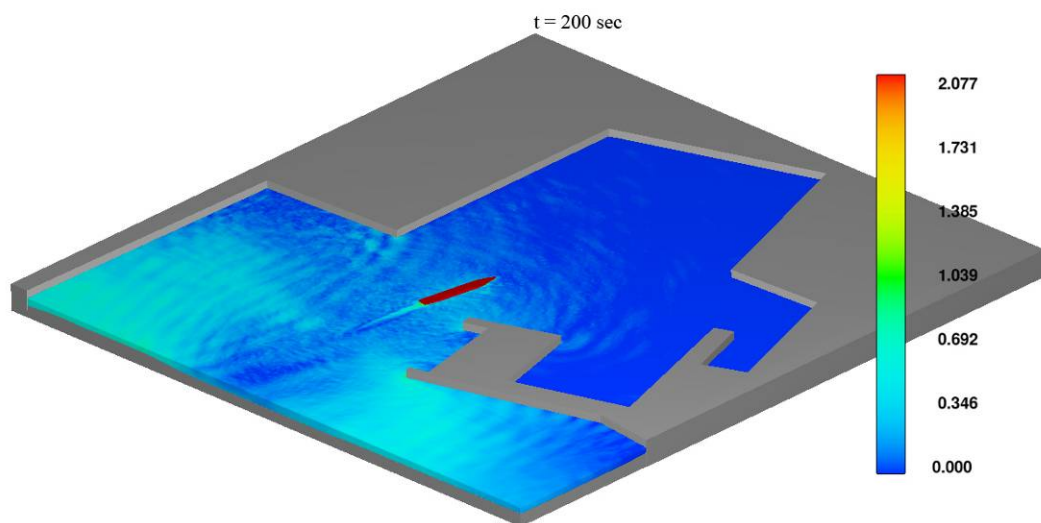


圖 5.15 船舶進港 3D 圖，船速 3 節，偏航 10 度（接續）

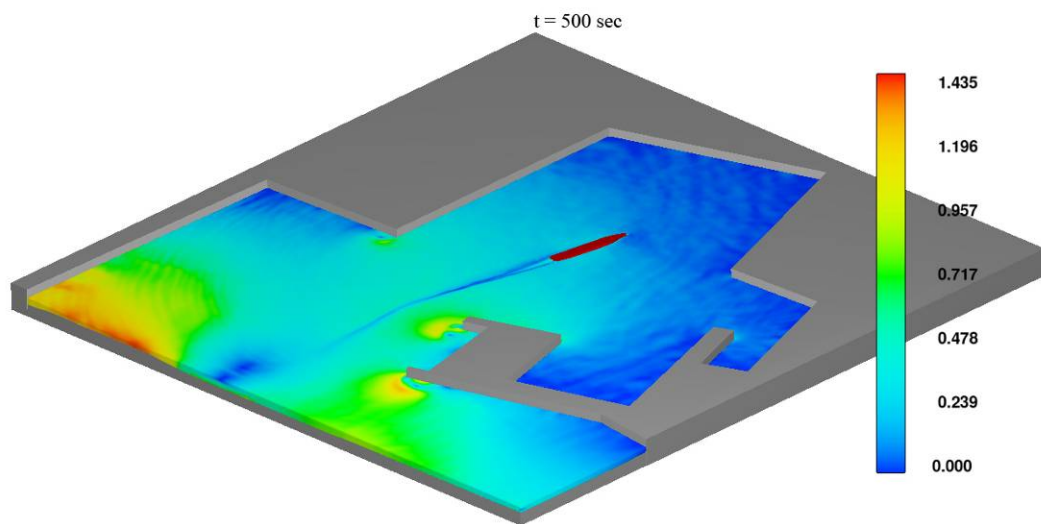
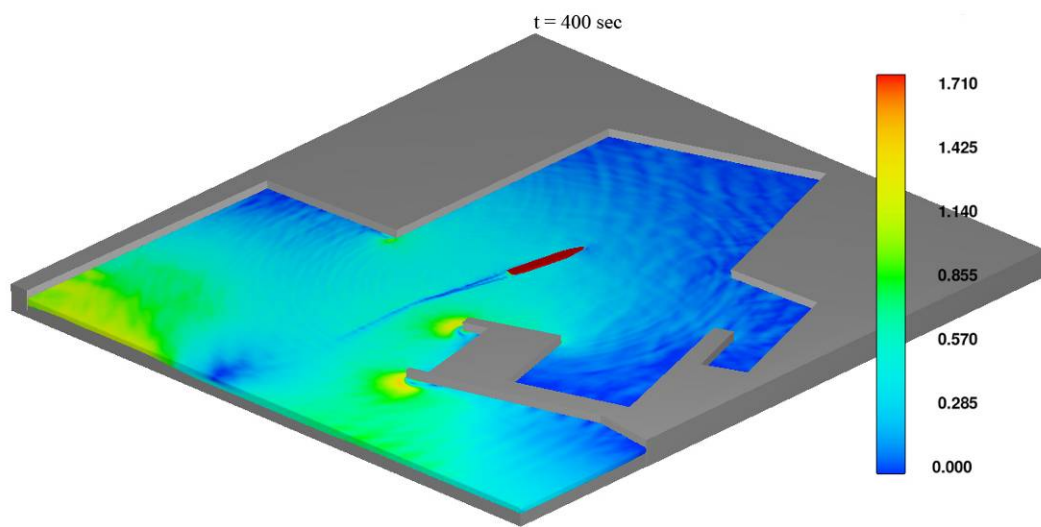


圖 5.15 船舶進港 3D 圖，船速 3 節，偏航 10 度（接續）

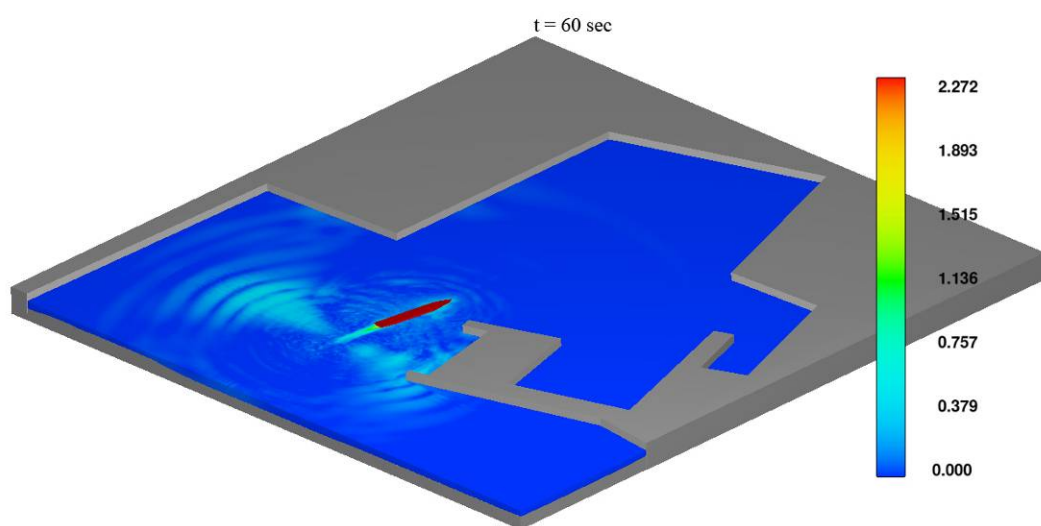
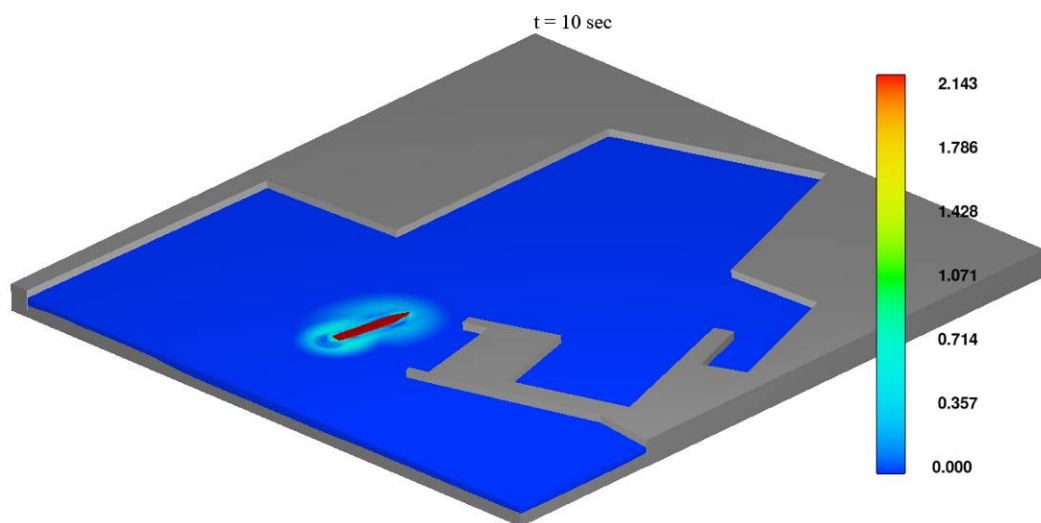


圖 5.16 船舶進港 3D 圖，船速 6 節，偏航 10 度

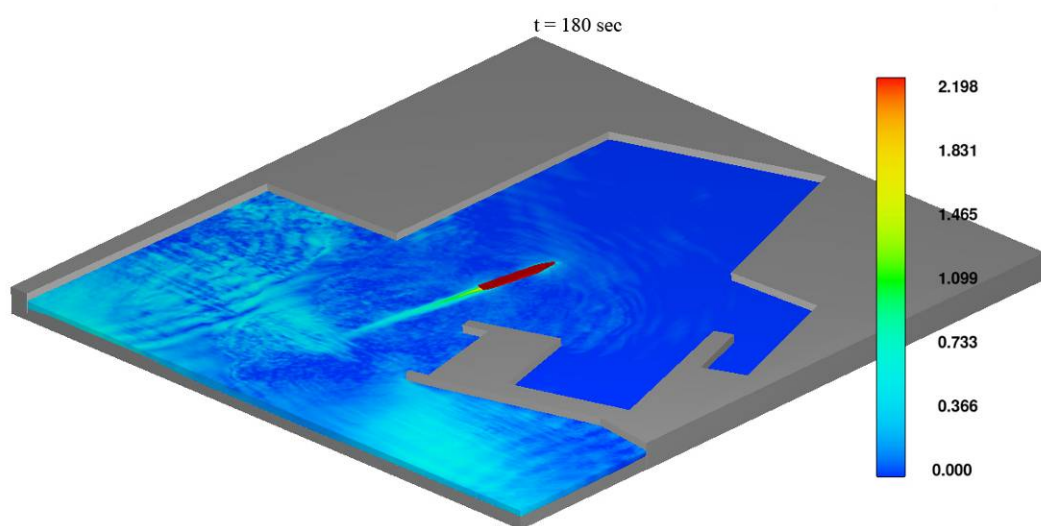
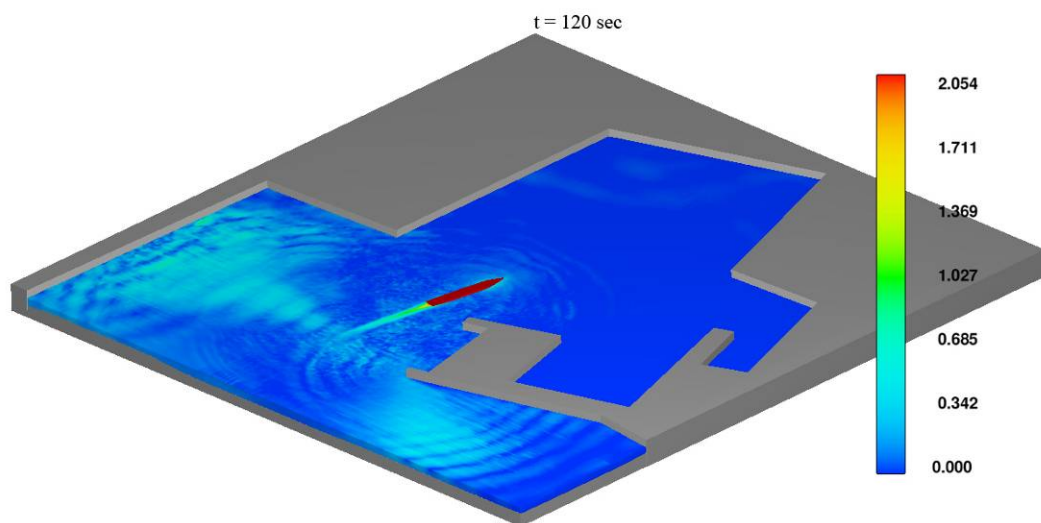


圖 5.16 船舶進港 3D 圖，船速 6 節，偏航 10 度（接續）

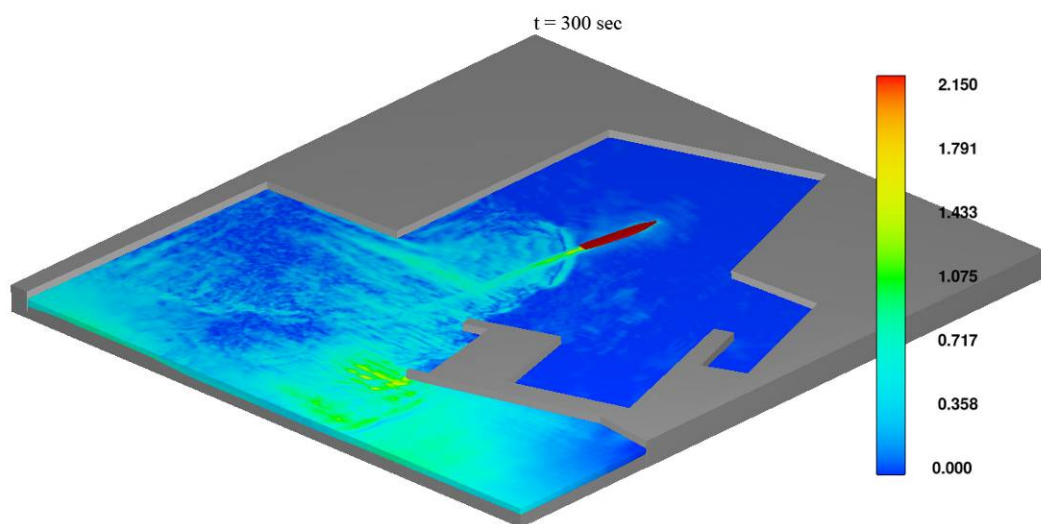
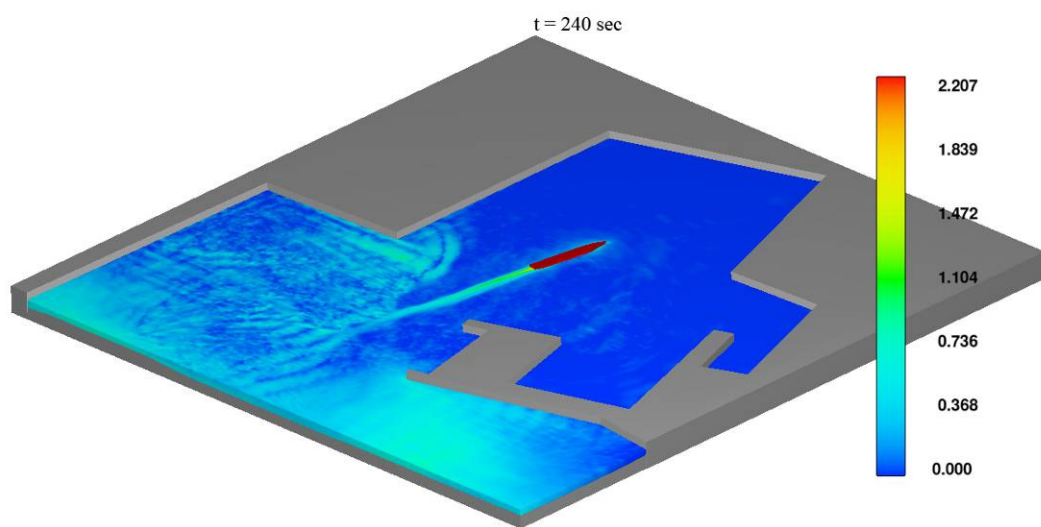


圖 5.16 船舶進港 3D 圖，船速 6 節，偏航 10 度（接續）

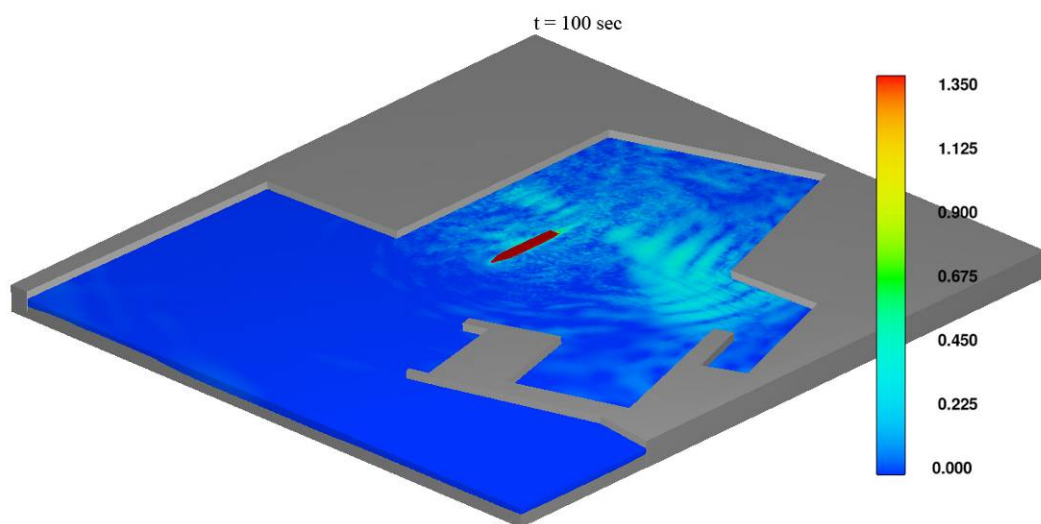
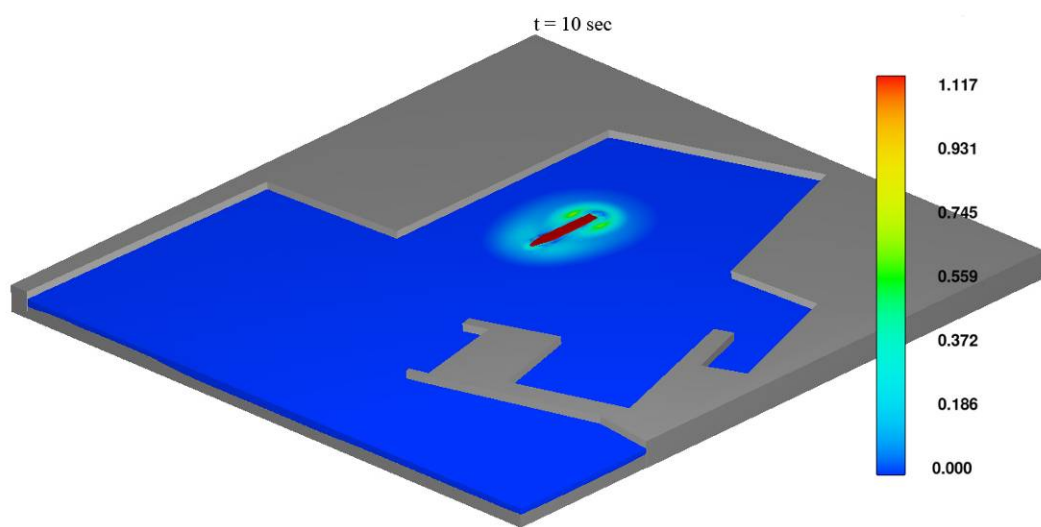


圖 5.17 船舶出港 3D 圖，船速 3 節

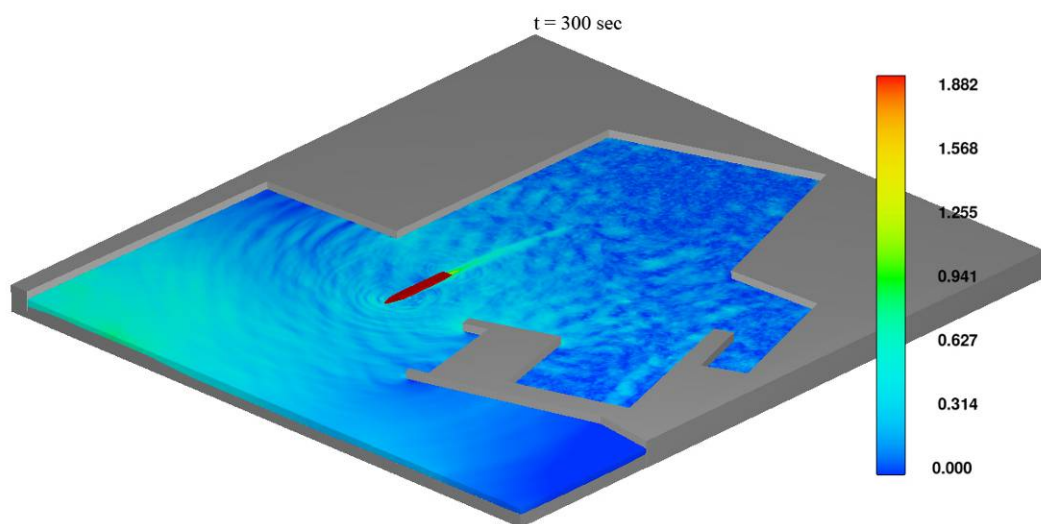
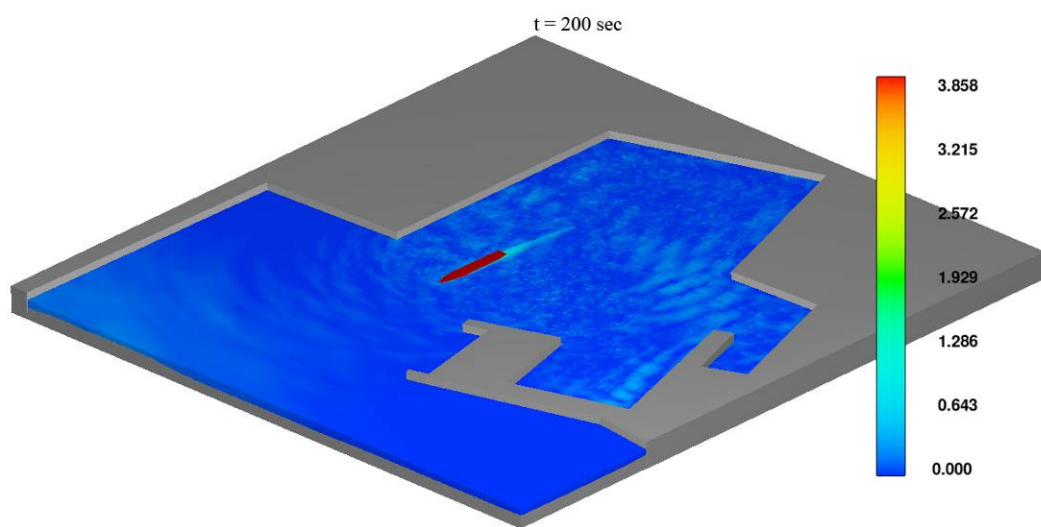


圖 5.17 船舶出港 3D 圖，船速 3 節（接續）

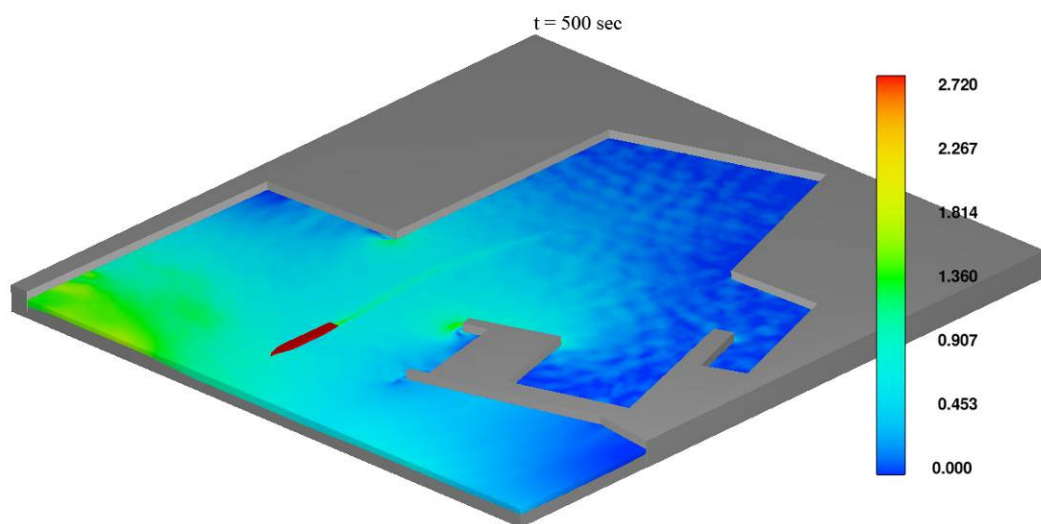
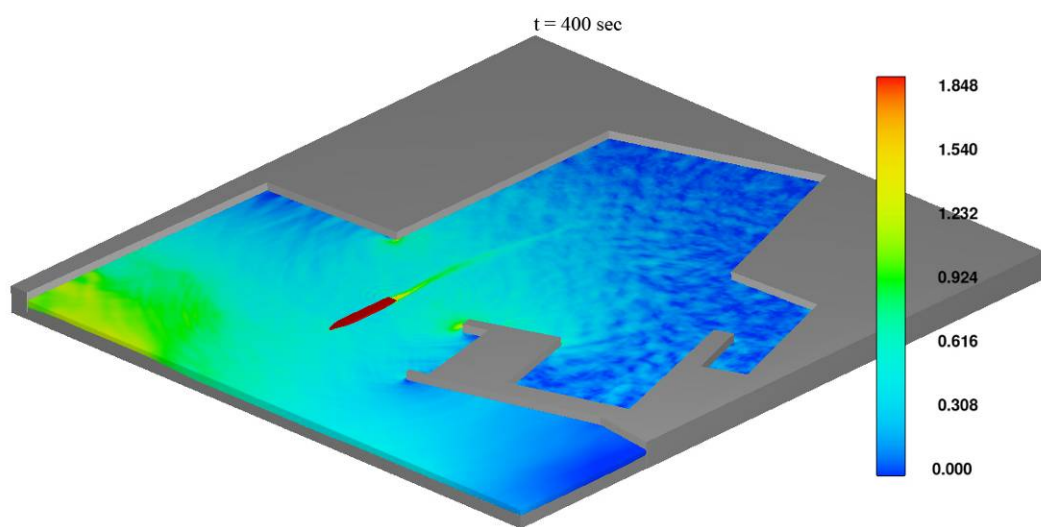


圖 5.17 船舶出港 3D 圖，船速 3 節（接續）

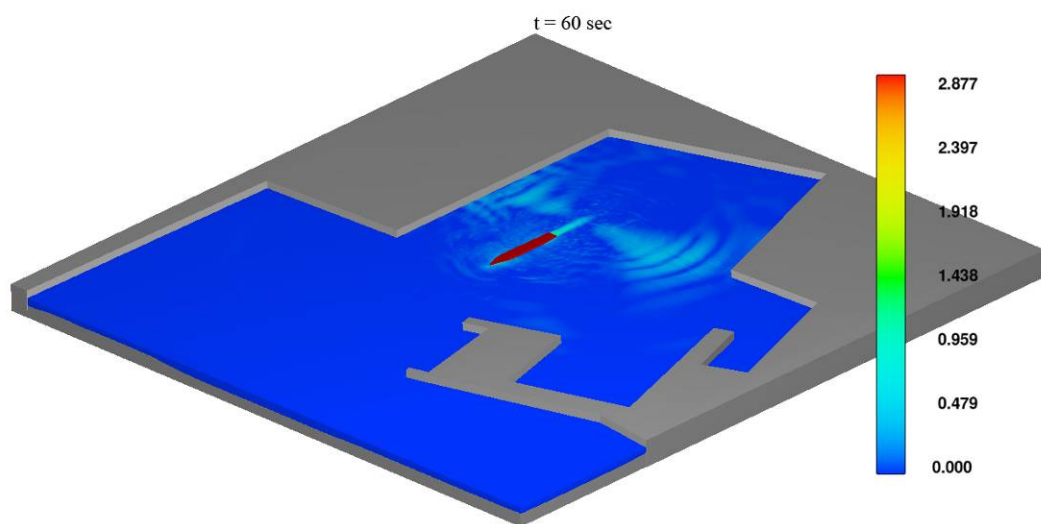
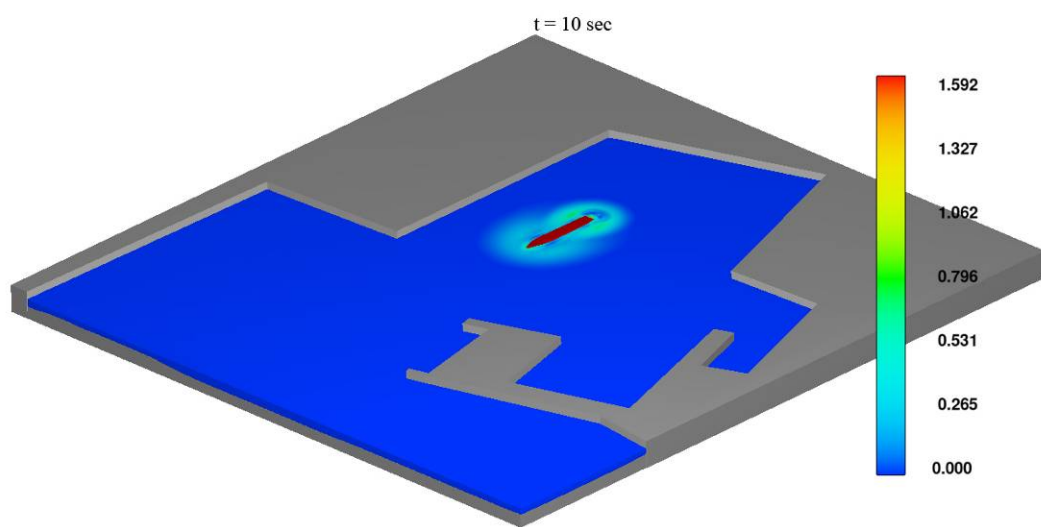


圖 5.18 船舶出港 3D 圖，船速 6 節

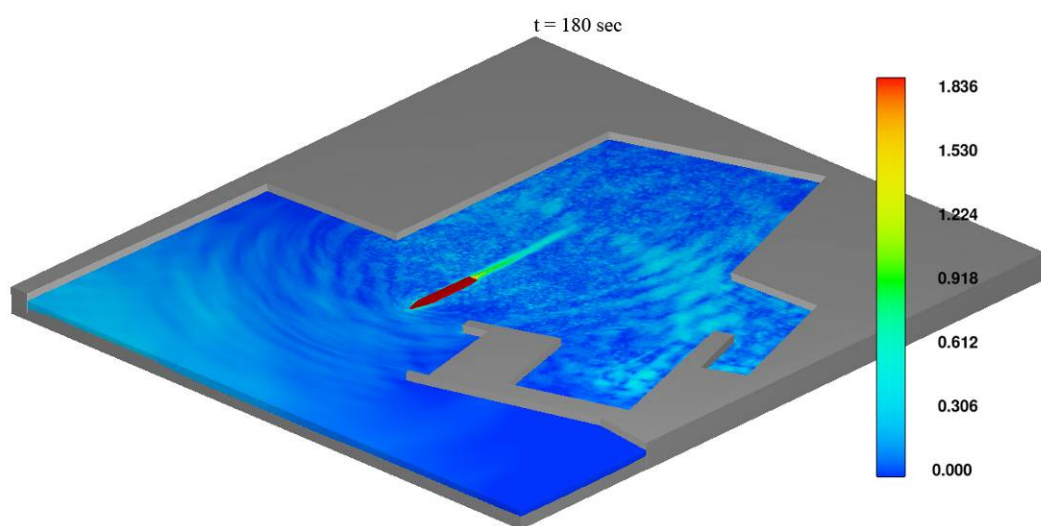
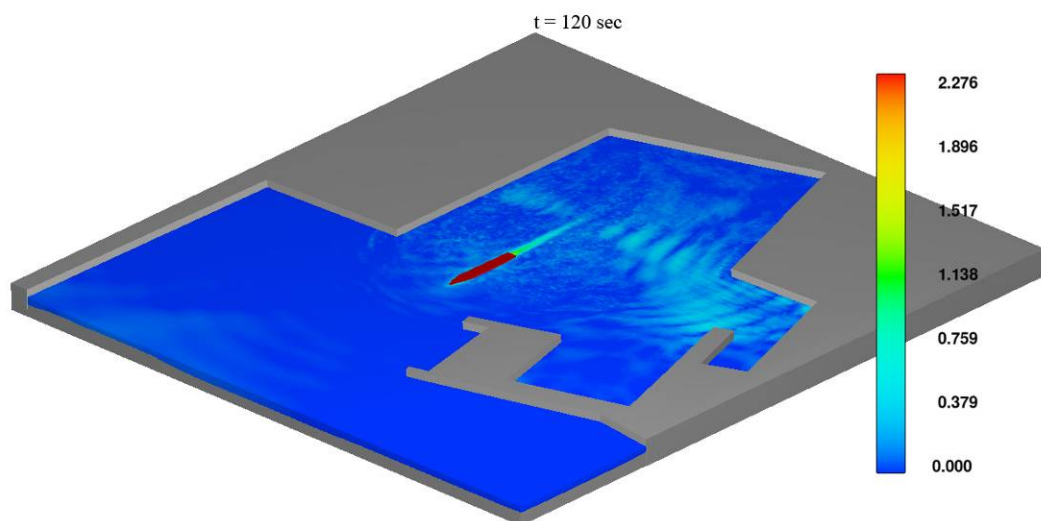


圖 5.18 船舶出港 3D 圖，船速 6 節（接續）

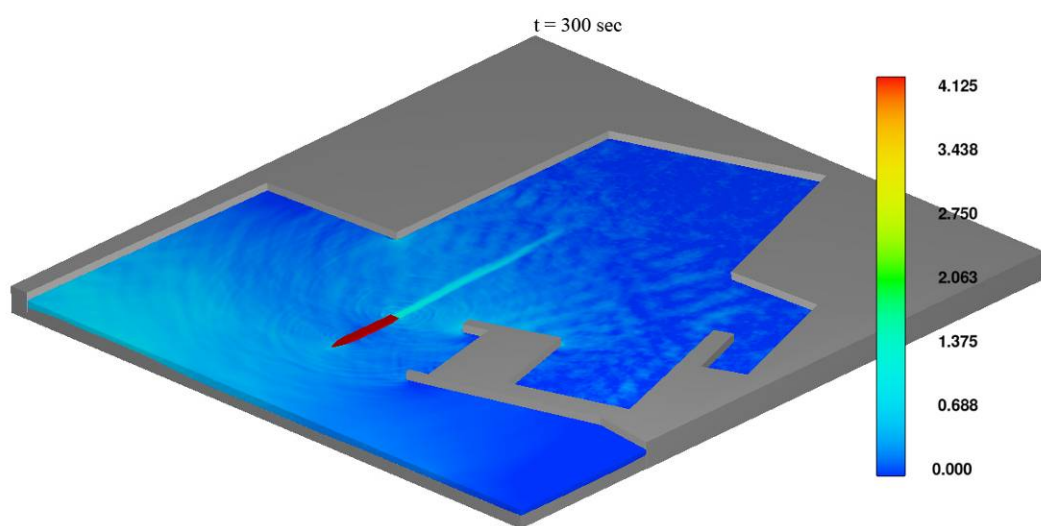
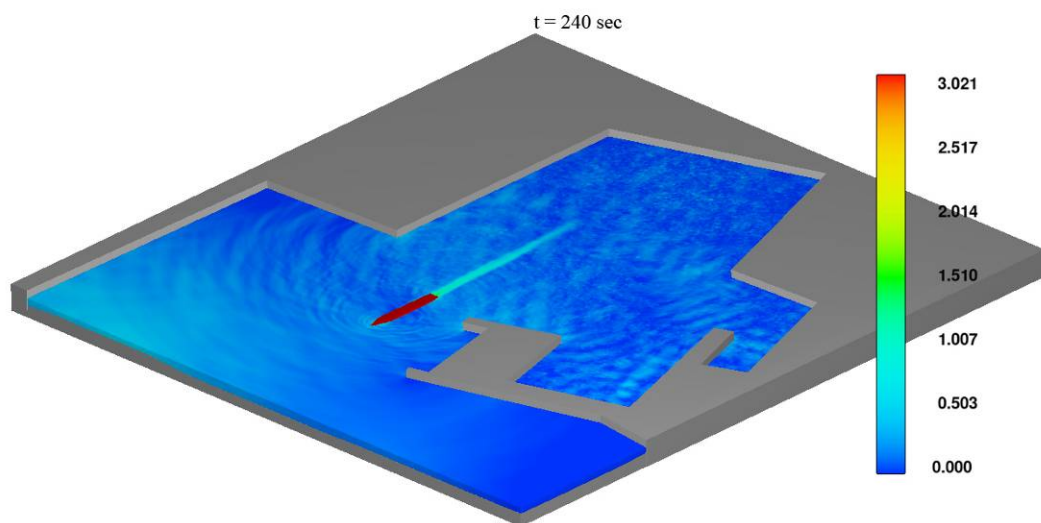


圖 5.18 船舶出港 3D 圖，船速 6 節（接續）

5.2 船舶於臺北港航行的岸壁效應

本節模擬的案例有船舶沿不同岸壁距離航行，船岸距離分別為 $0.5B$ 、 $1.0B$ 、 $2.0B$ ，船速我們採用 3 節與 6 節，航行時間為 100 sec。

1. 船舶的橫移力

圖 5.19 與圖 5.20 分別表示速度 3 節與 6 節對不同岸壁距離產生的橫移力。兩者橫移力皆隨時間擺盪，開始幾秒內橫移力隨著船岸距離減少而增加，離船岸近的船會較早受到岸壁之影響，整體而言，相同船岸距離，橫移力會隨著船速增加而增大。

2. 船舶偏航

圖 5.21 與圖 5.22 為偏航角之比較，偏航角隨著船岸距離的減少而增加。即使在船速很低時，船岸距離很接近時，也會增加偏航力矩，造成船舶的偏航，尤其當船舶航行期間，船艏由於偏航力矩的影響，很容易與岸壁發生碰撞。由結果顯示船舶的航速愈小船岸距離愈近，差異性愈小；反之，船舶的航速愈大船岸距離愈遠，差異性愈大。

3. 壓力速度分佈圖

圖 5.23 至圖 5.28 表示船舶航行於臺北港，產生的瞬時壓力場與速度向量圖。船舶與岸壁作用時，船與岸壁間產生了壓力變化，船艏與岸壁間為高壓區，船艏右舷為低壓區，使船航向偏向右側，而船艉與岸壁間為低壓區，使船艉向岸壁接近。由測試結果顯示，當船岸距離為 $0.5B$ 時，不論是 3 節或 6 節航速，皆會發生碰撞。但速度快的發生碰撞時間較早，所以當船舶要靠碼頭需要特別小心處理。

4. 3D 速度強度圖

圖 5.29 至圖 5.30 為船寬 $0.5B$ ，航速 3 節與 6 節，船舶岸壁效應的 3D 興波圖。等高線的顏色表示海表面的速度強度，由這些圖可知船舶航行臺北港，會有明顯的岸壁效應，應該要小心行駛。由圖發現船舶在與岸壁的一側，因水流受限制而產生較低之低壓，另一面在開闊之側水流未受限制壓力降低較小，兩者的壓差，會迫使船舶往岸壁靠，此稱為吸力現象(bank suction)。船體周圍與水底均形成由船艏向船艉漸加厚之界面層，使船艏附近之水體壓力增加較船艉處大，此船艏艉間之壓力差，與船艏高壓區所造成之艏波共同產生一偏向力矩，使船艏偏離岸壁或傾斜水底側，此現象稱之為岸推效應 (cushion effect)，兩者的效應合為岸壁效應 (bank effect)，由船舶在限制性水域或臺北港航行，都有岸壁效應產生，航海人員宜特別小心航行，確保航行安全。

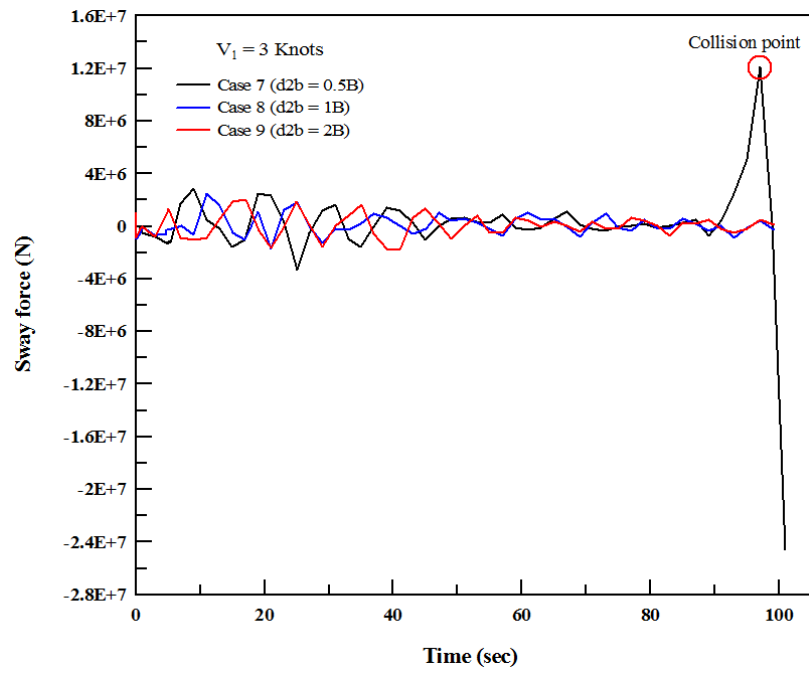


圖 5.19 船舶航行於臺北港船速 3 節之橫移力比較圖

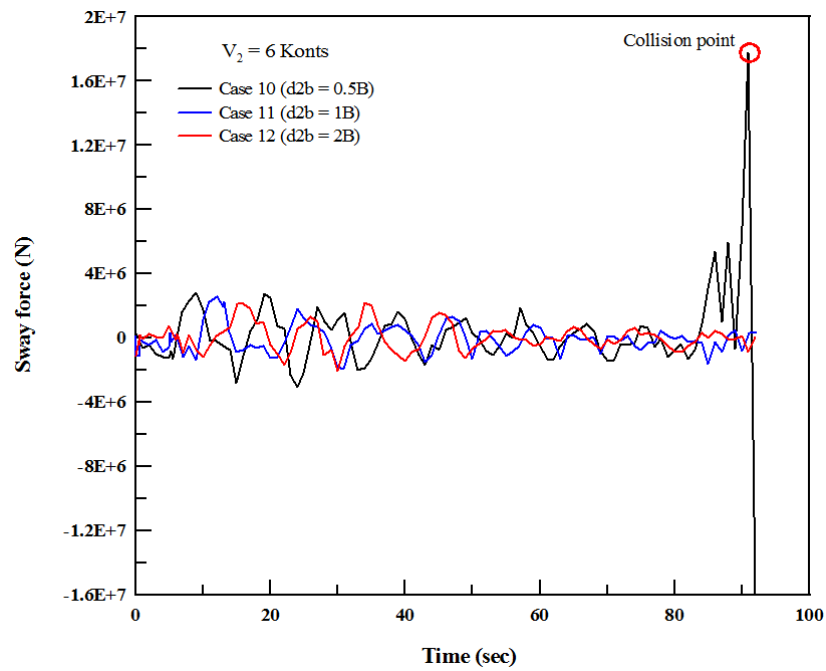


圖 5.20 船舶航行於臺北港船速 6 節之橫移力比較圖

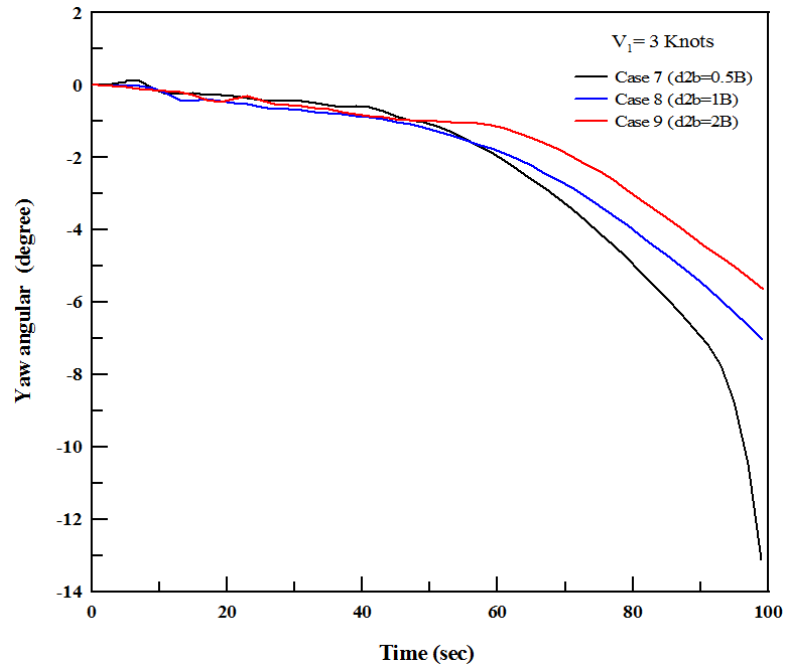


圖 5.21 船舶航行於臺北港船速 3 節之偏航角比較圖

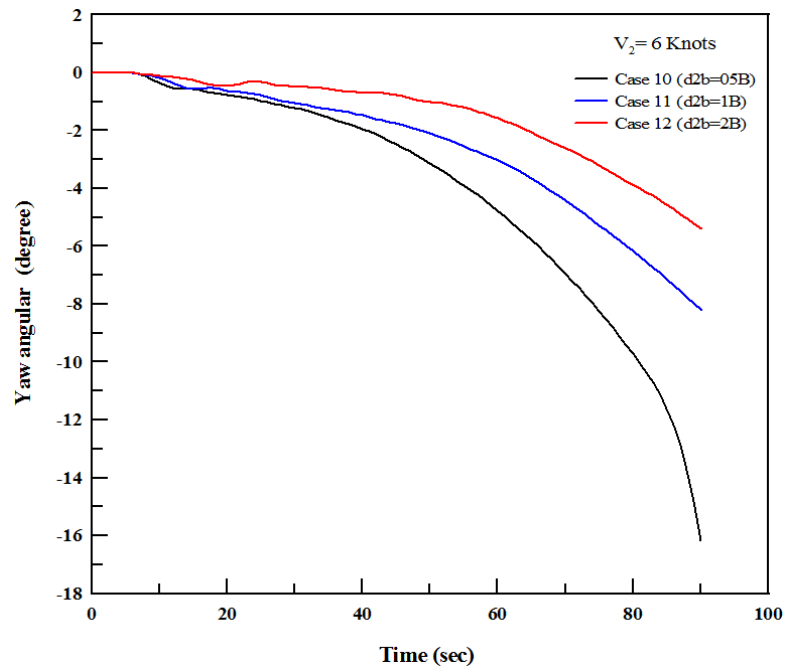


圖 5.22 船舶航行於臺北港船速 6 節之偏航角比較圖

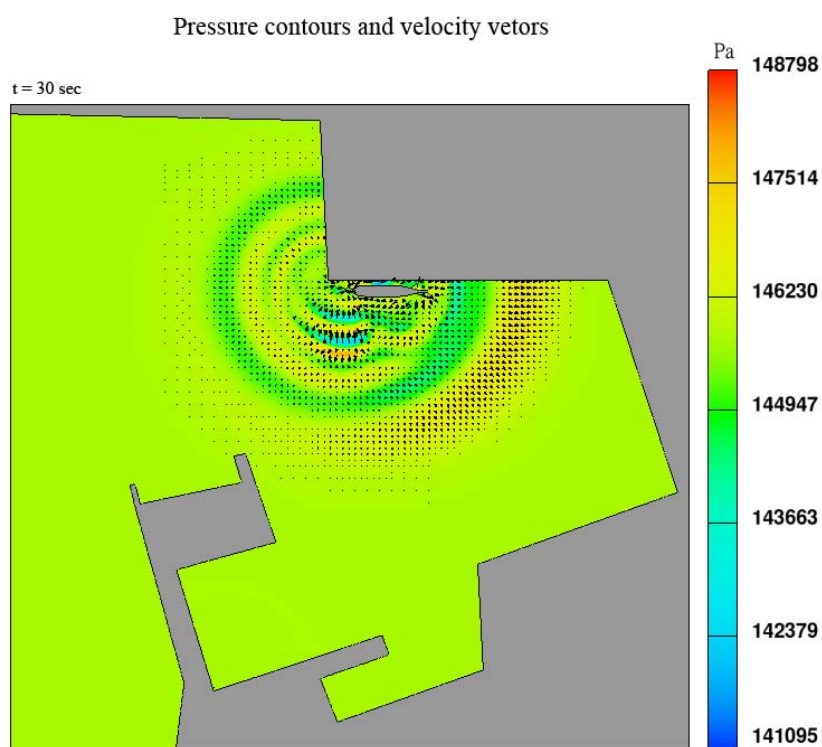
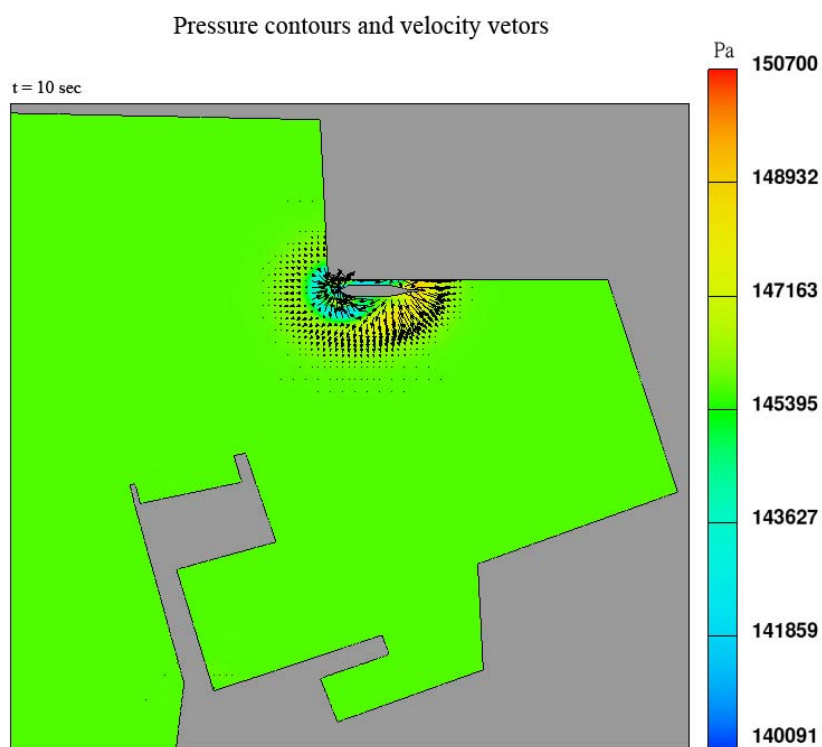


圖 5.23 船舶進港之岸壁效應，船速 3 節，船寬 $0.5B$ ，壓力速度向量圖

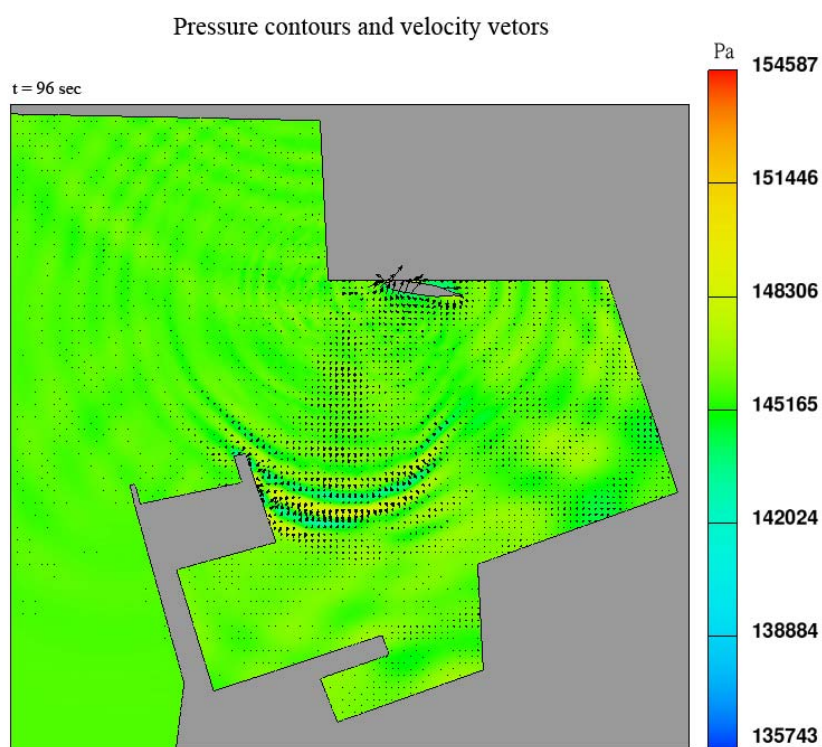
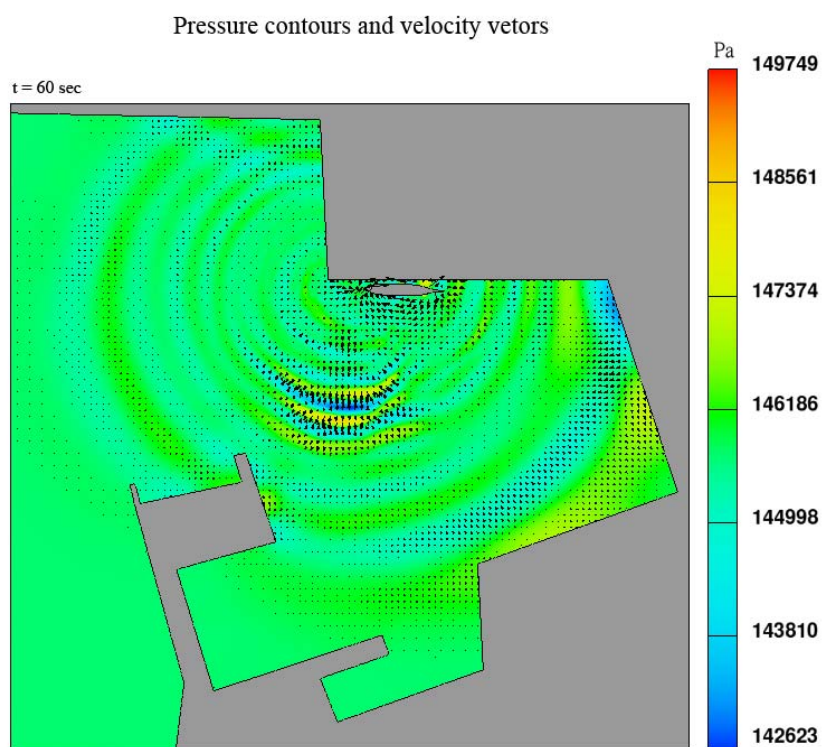


圖 5.23 船舶進港之岸壁效應，船速 3 節，船寬 $0.5B$ ，壓力速度向量圖
(接續)

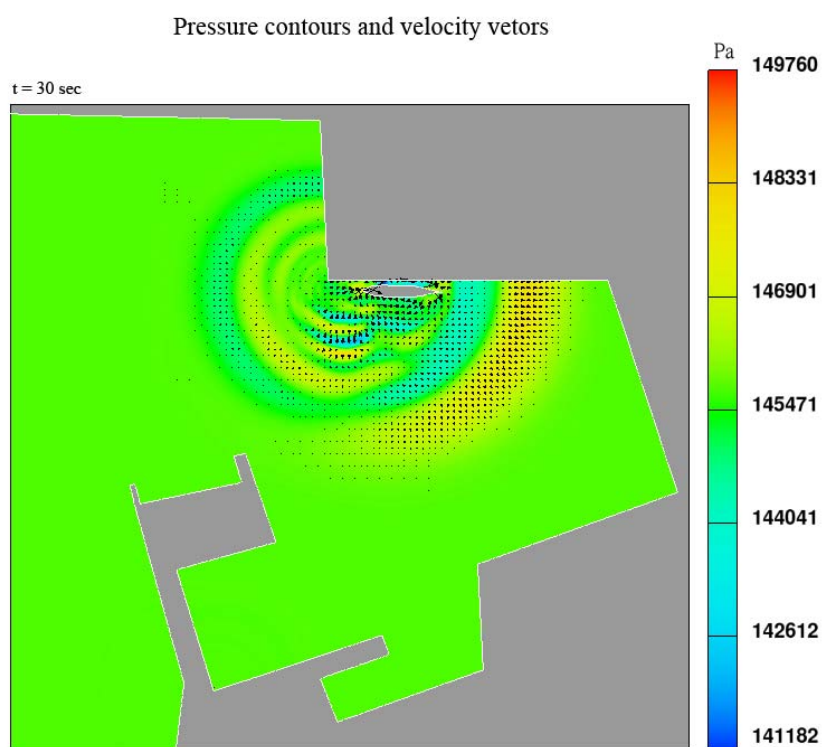
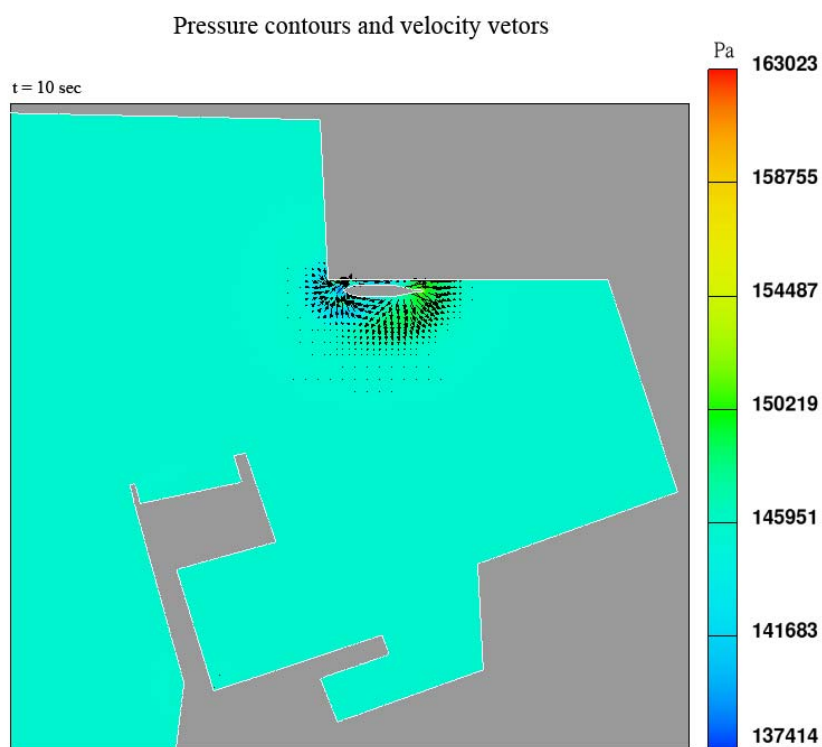


圖 5.24 船舶進港之岸壁效應，船速 6 節，船寬 $0.5B$ ，壓力速度向量圖

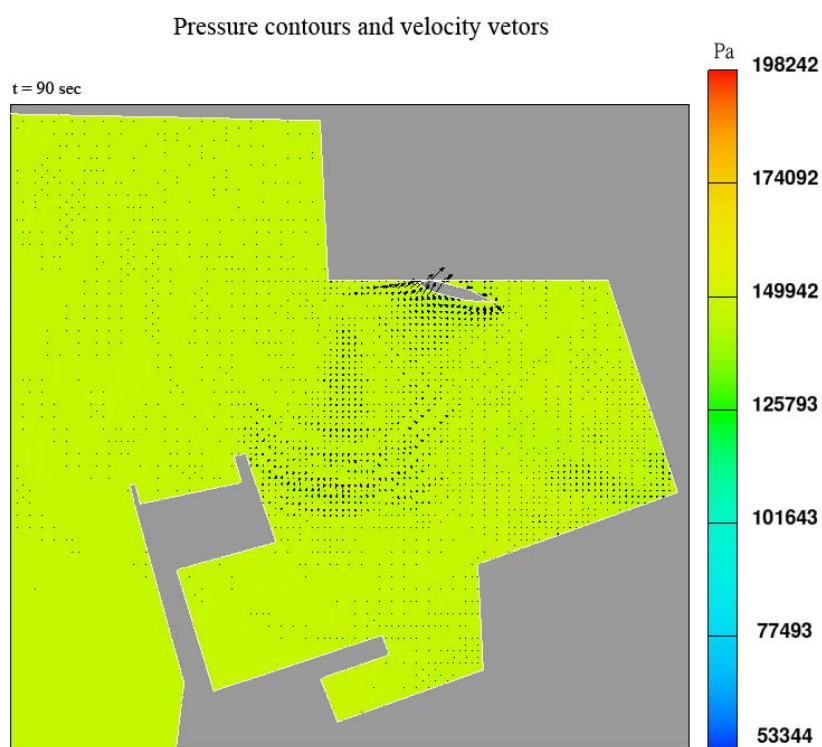
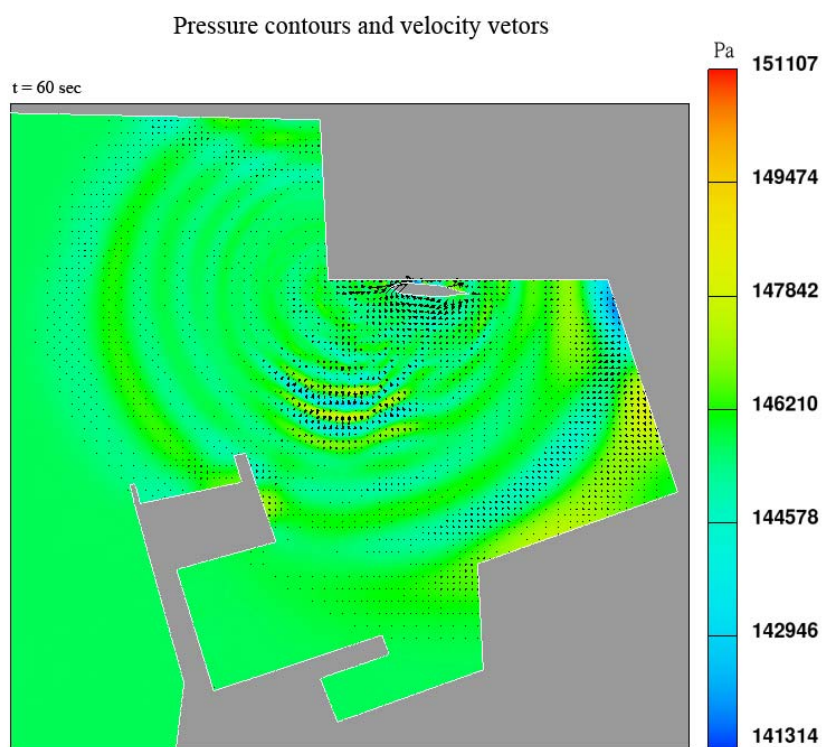


圖 5.24 船舶進港之岸壁效應，船速 6 節，船寬 $0.5B$ ，壓力速度向量圖
(接續)

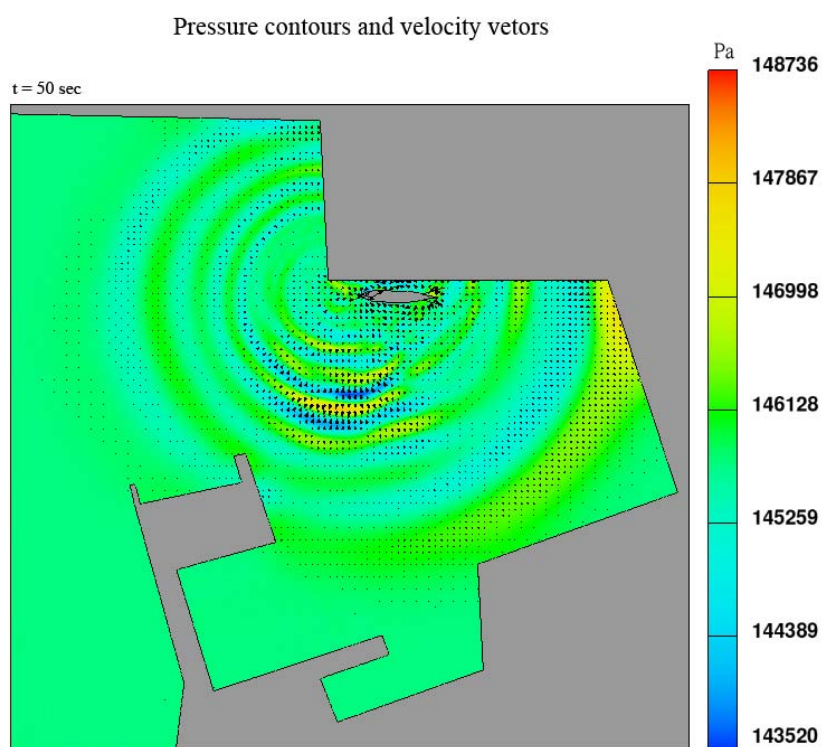
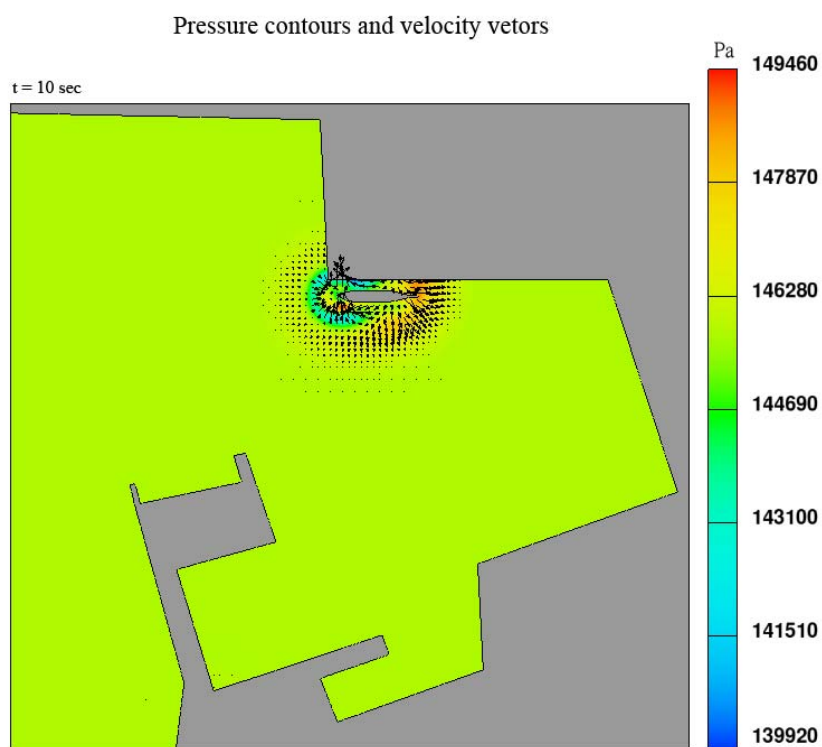


圖 5.25 船舶進港之岸壁效應，船速 3 節，船寬 $1.0B$ ，壓力速度向量圖

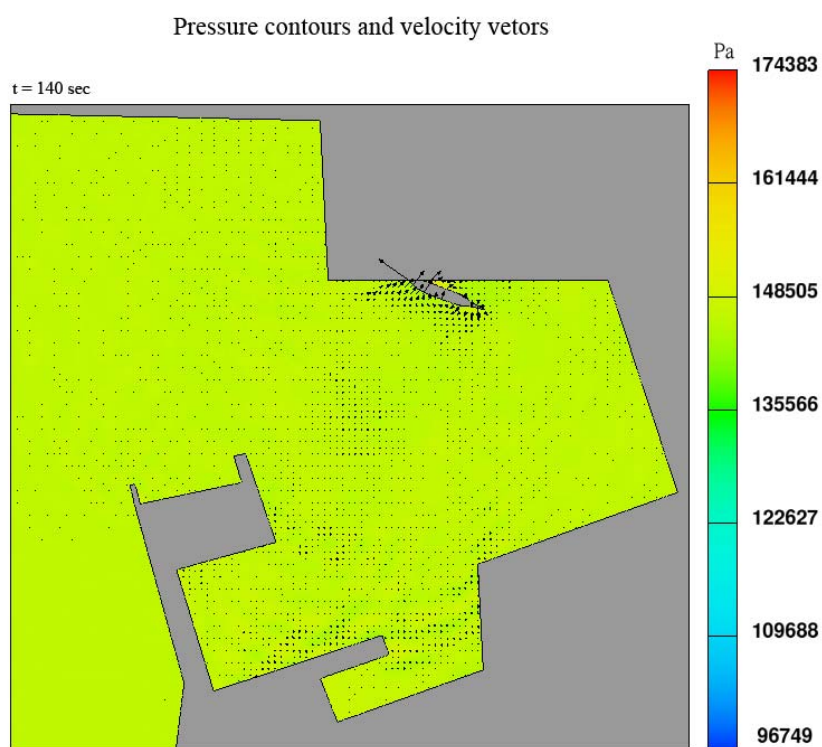
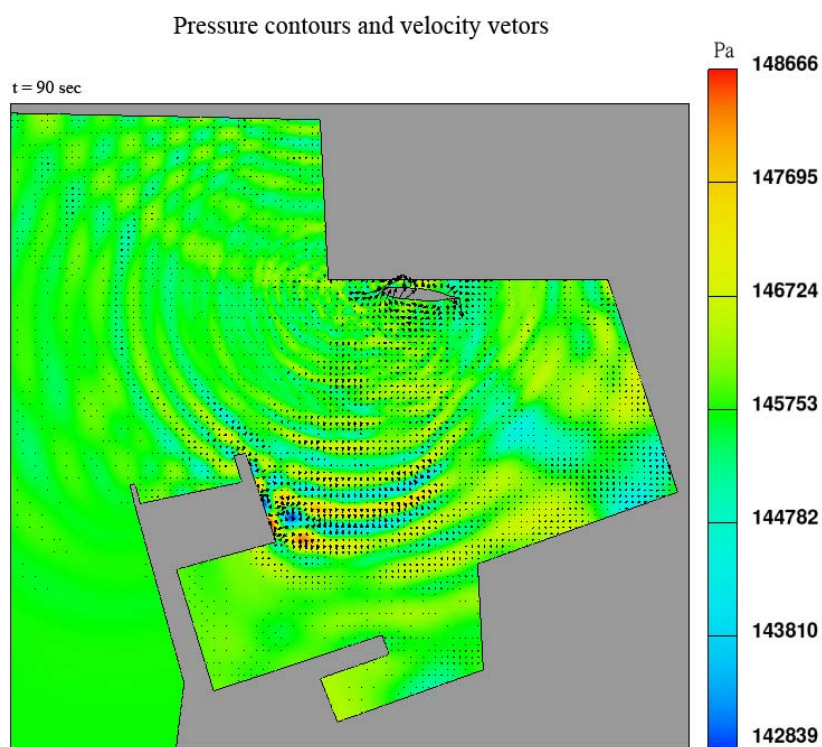


圖 5.25 船舶進港之岸壁效應，船速 3 節，船寬 $1.0B$ ，壓力速度向量圖
(接續)

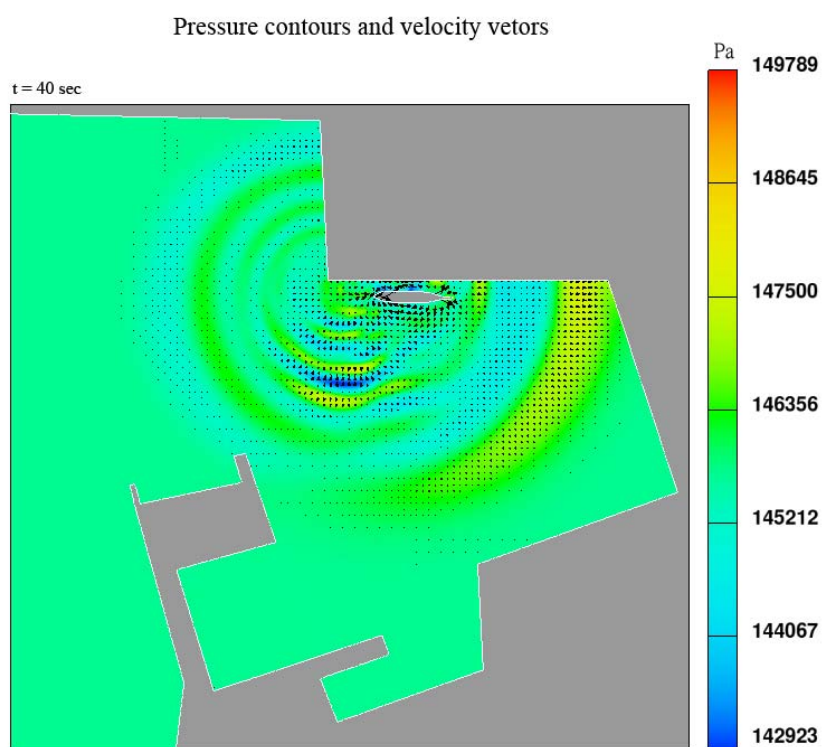
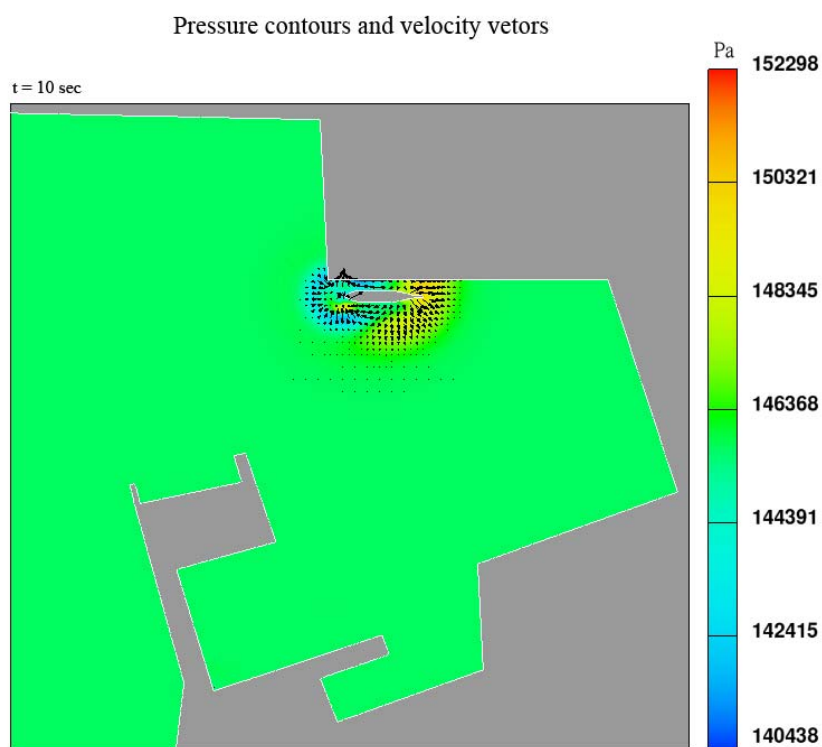


圖 5.26 船舶進港之岸壁效應，船速 6 節，船寬 $1.0B$ ，壓力速度向量圖

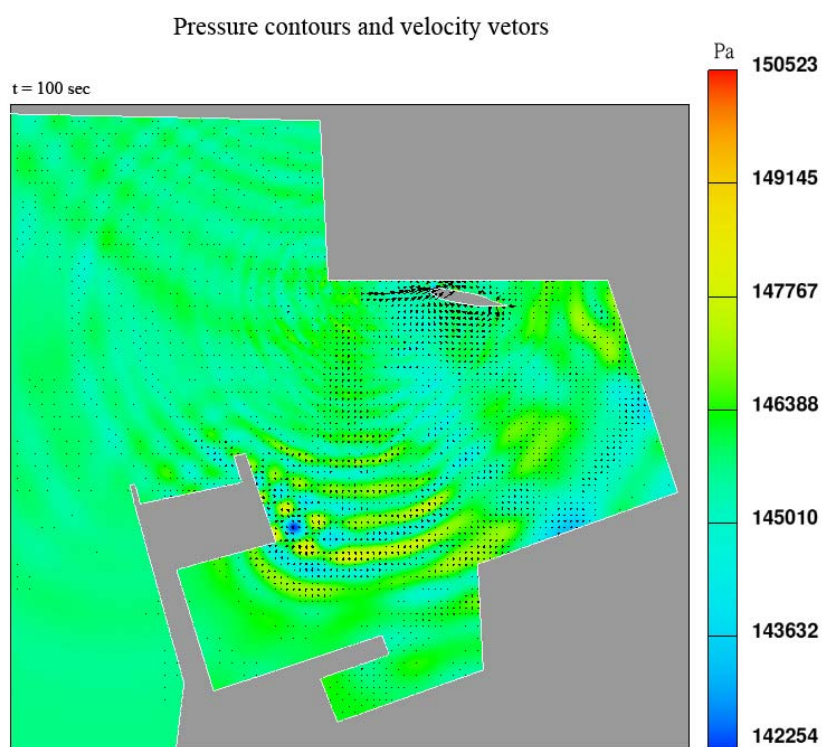
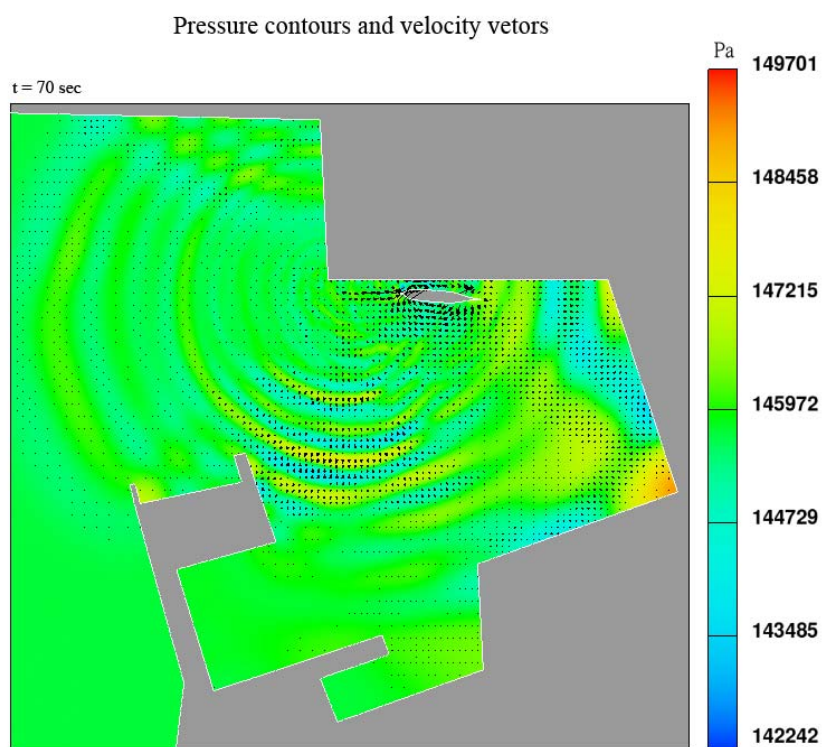


圖 5.26 船舶進港之岸壁效應，船速 6 節，船寬 $1.0B$ ，壓力速度向量圖
(接續)

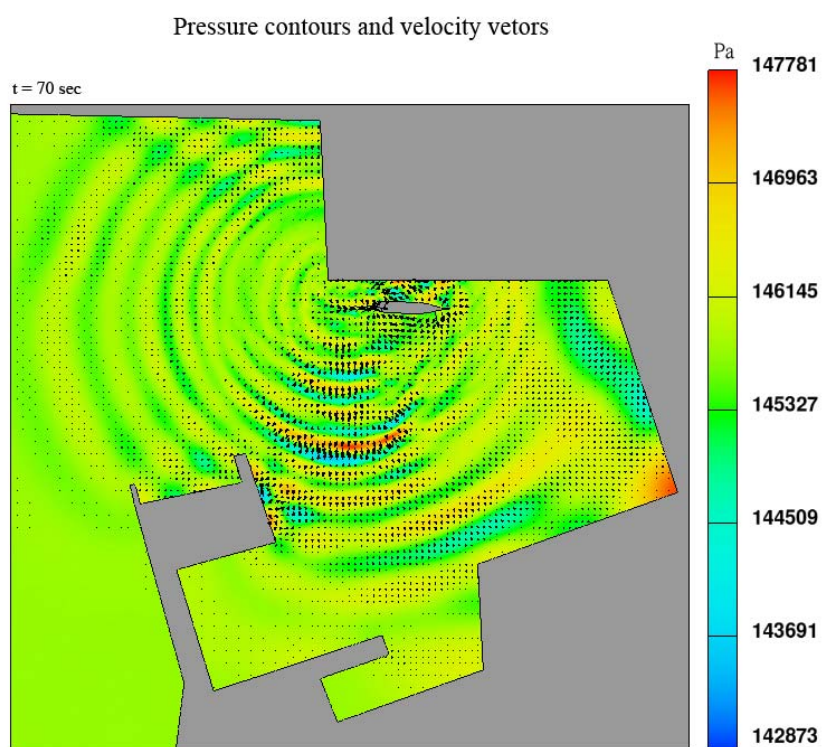
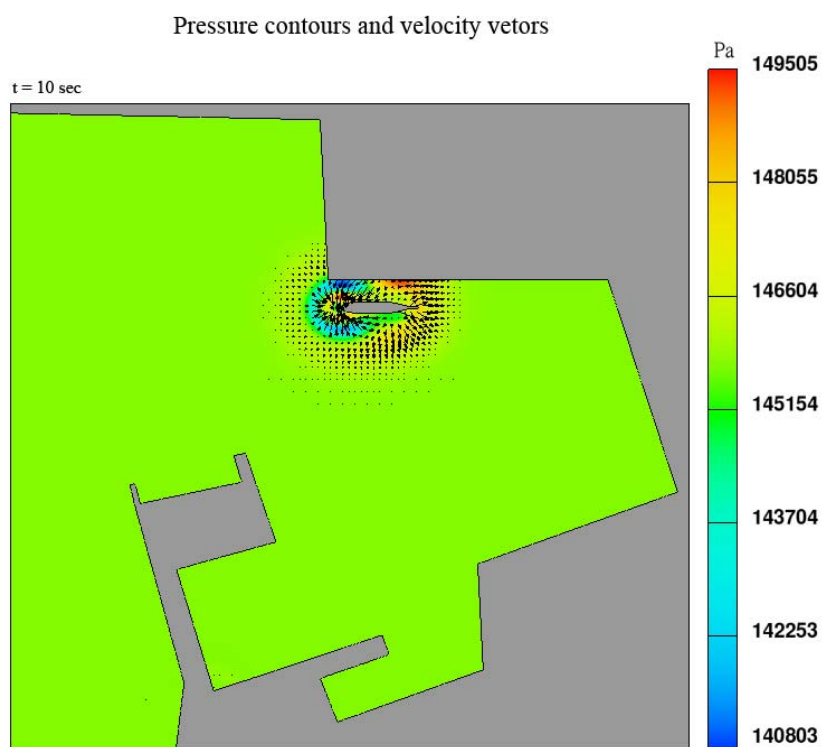


圖 5.27 船舶進港之岸壁效應，船速 3 節，船寬 $2.0B$ ，壓力速度向量圖

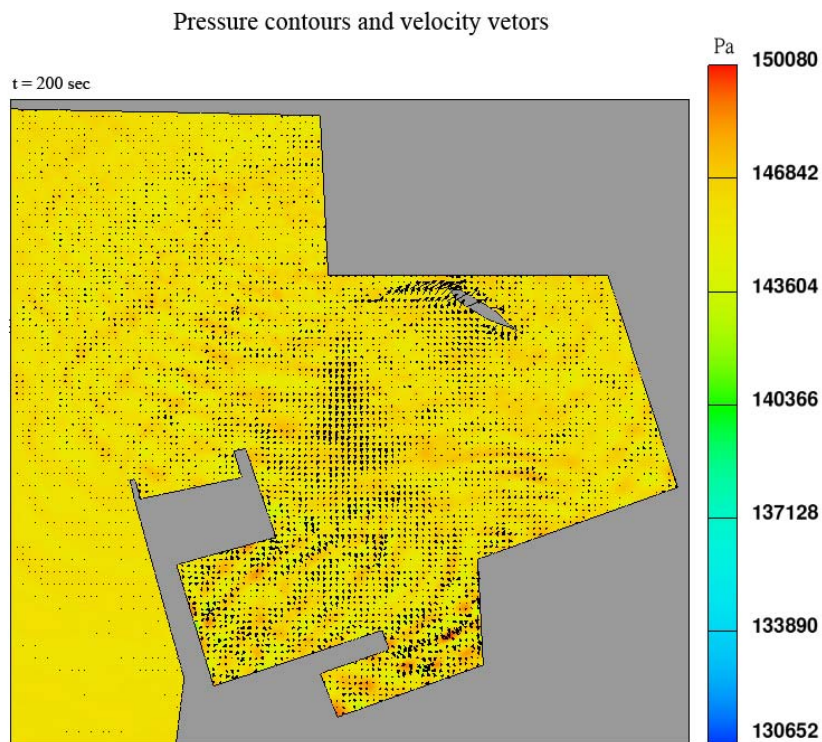
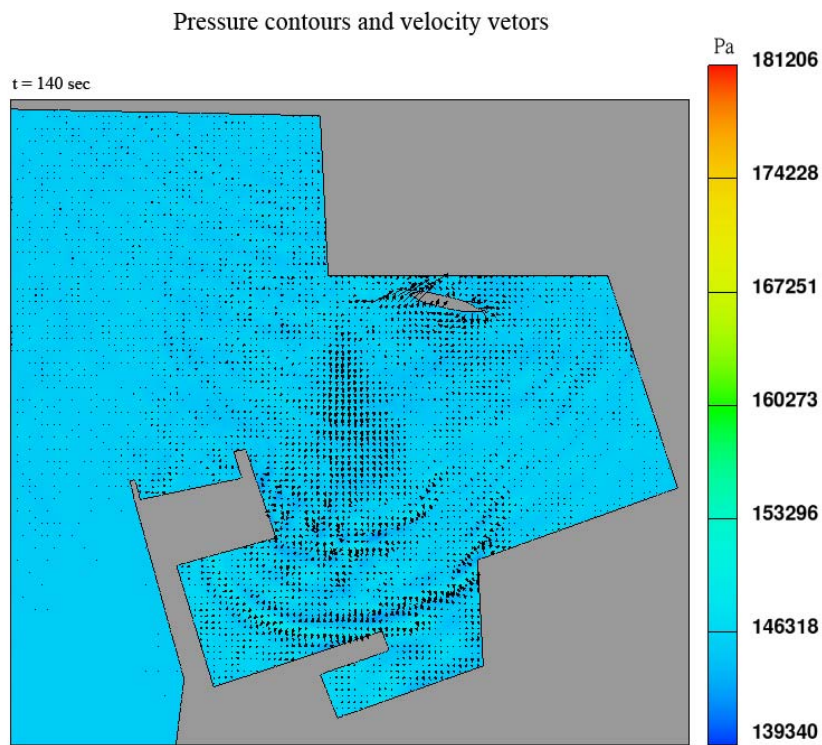


圖 5.27 船舶進港之岸壁效應，船速 3 節，船寬 $2.0B$ ，壓力速度向量圖
(接續)

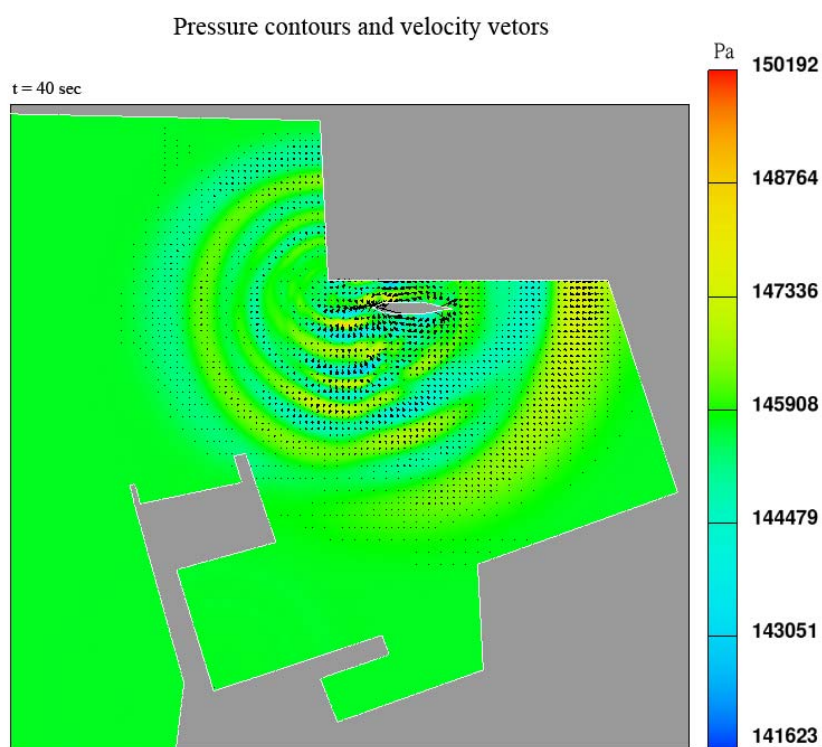
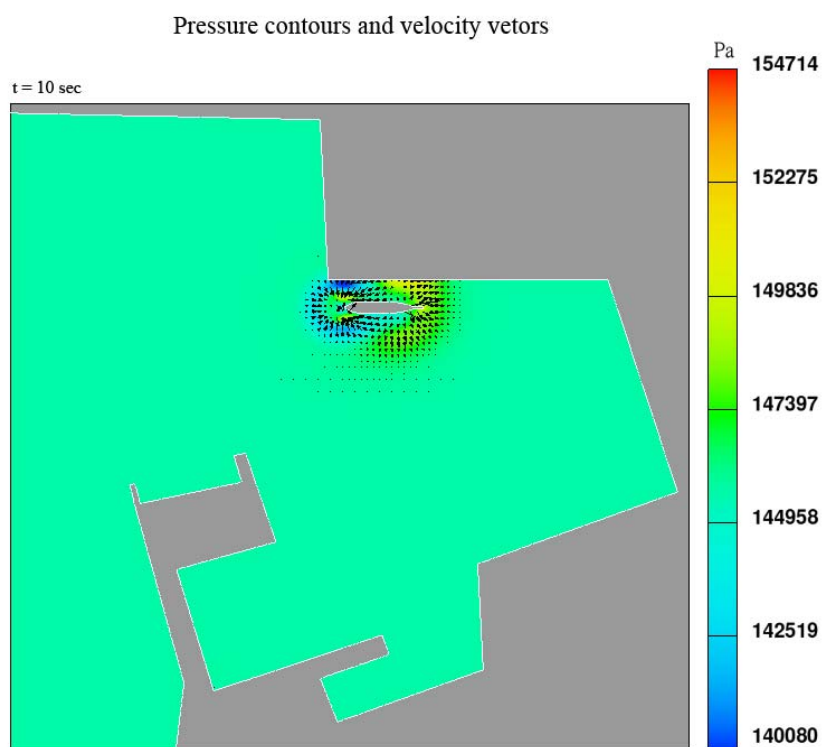


圖 5.28 船舶進港之岸壁效應，船速 6 節，船寬 $2.0B$ ，壓力速度向量圖

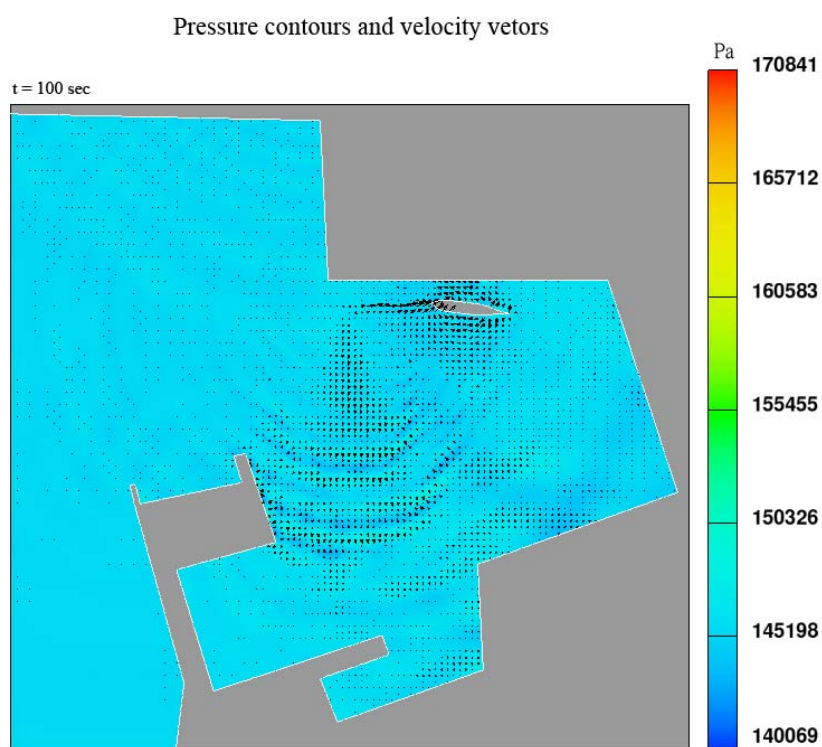
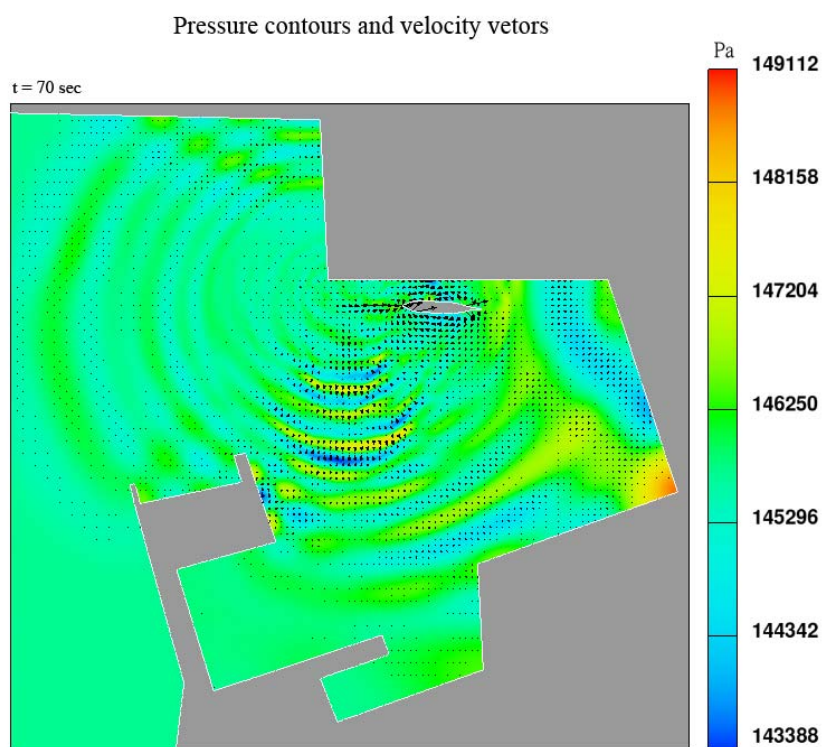


圖 5.28 船舶進港之岸壁效應，船速 6 節，船寬 $2.0B$ ，壓力速度向量圖
(接續)

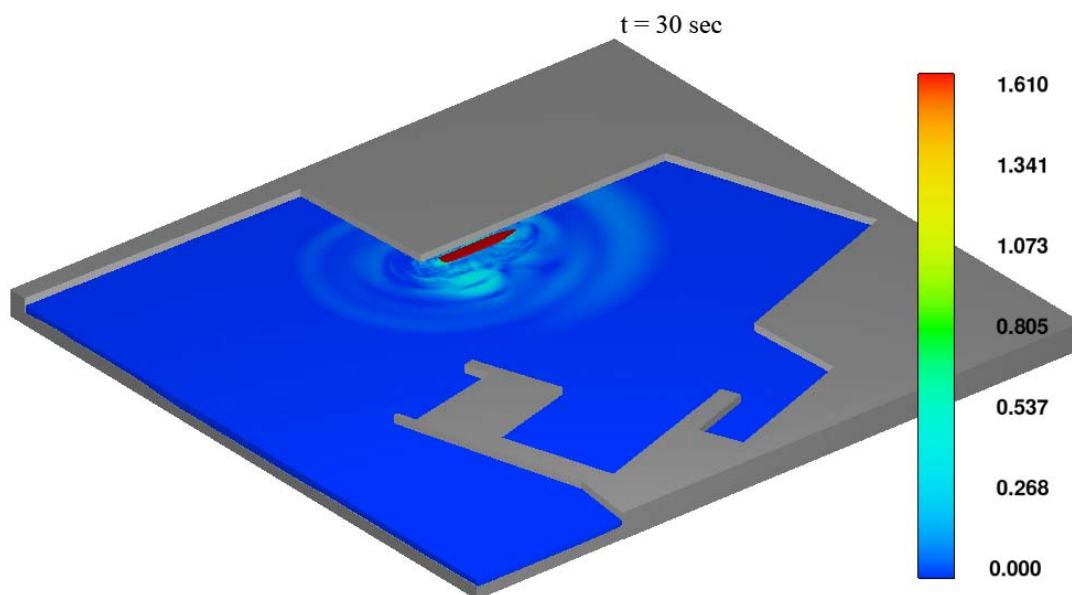
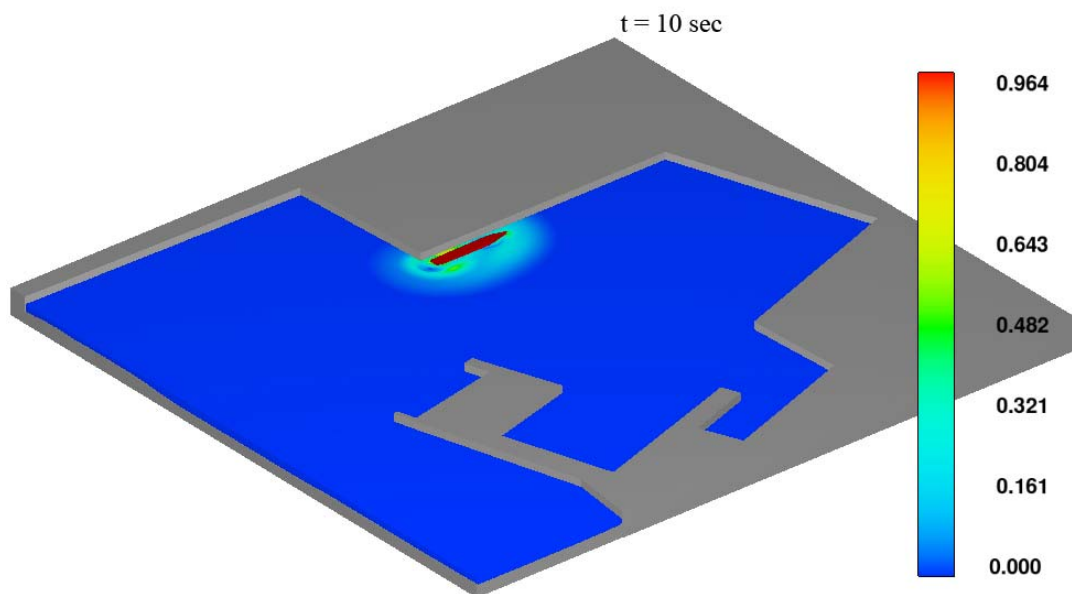


圖 5.29 船舶岸壁效應 3D 圖，船速 3 節，船距 $0.5B$

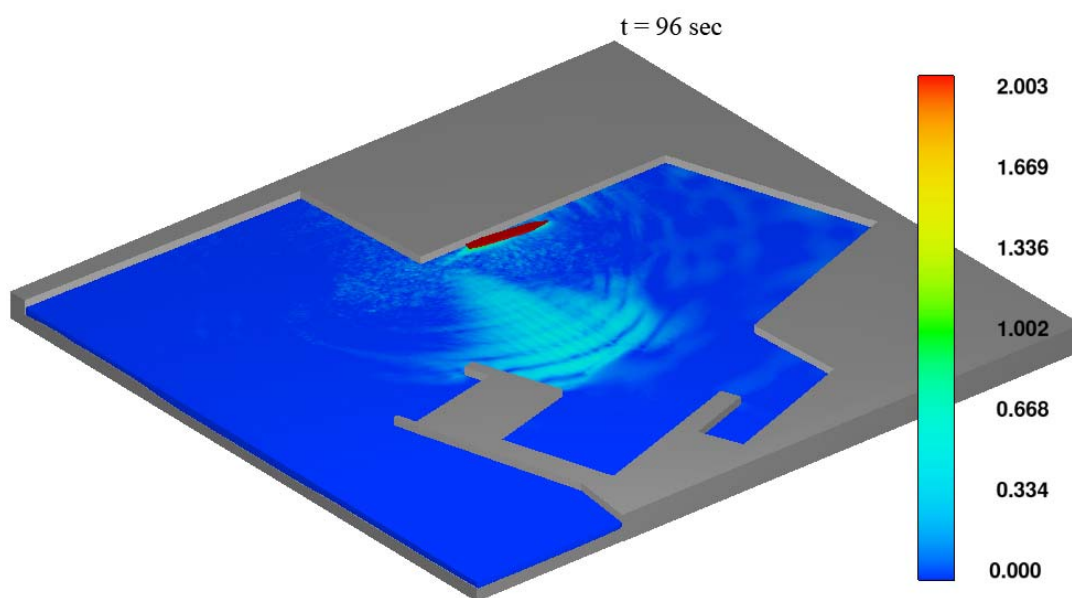
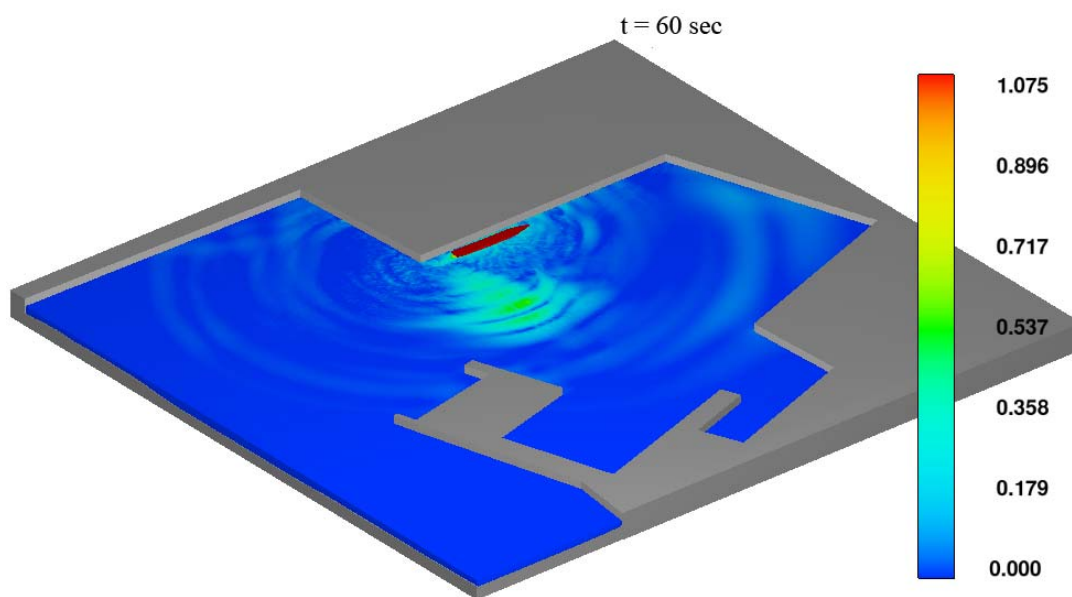


圖 5.29 船舶岸壁效應 3D 圖，船速 3 節，船距 $0.5B$ （接續）

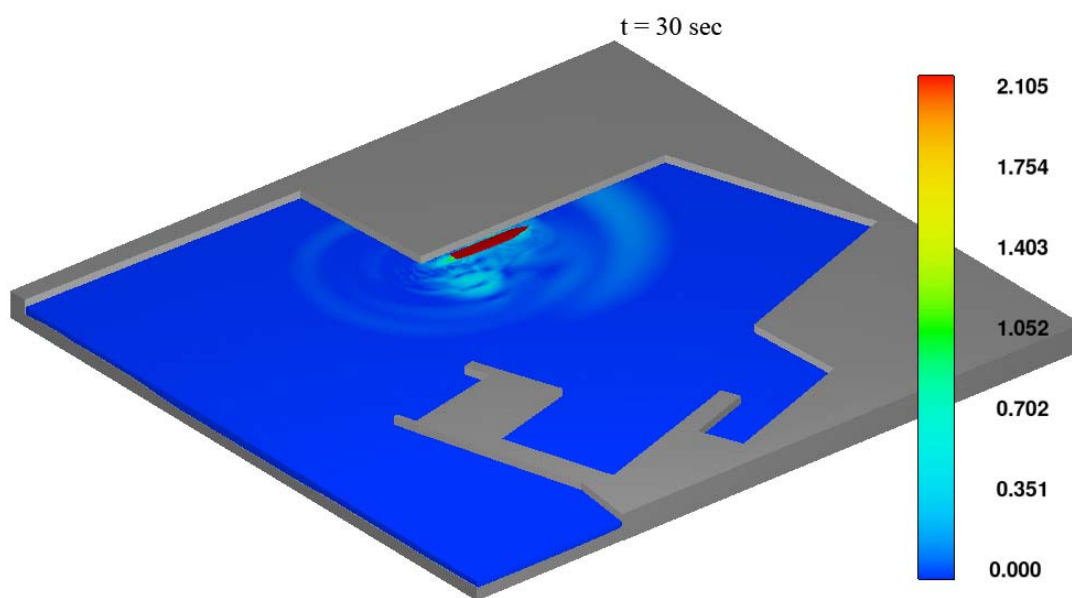
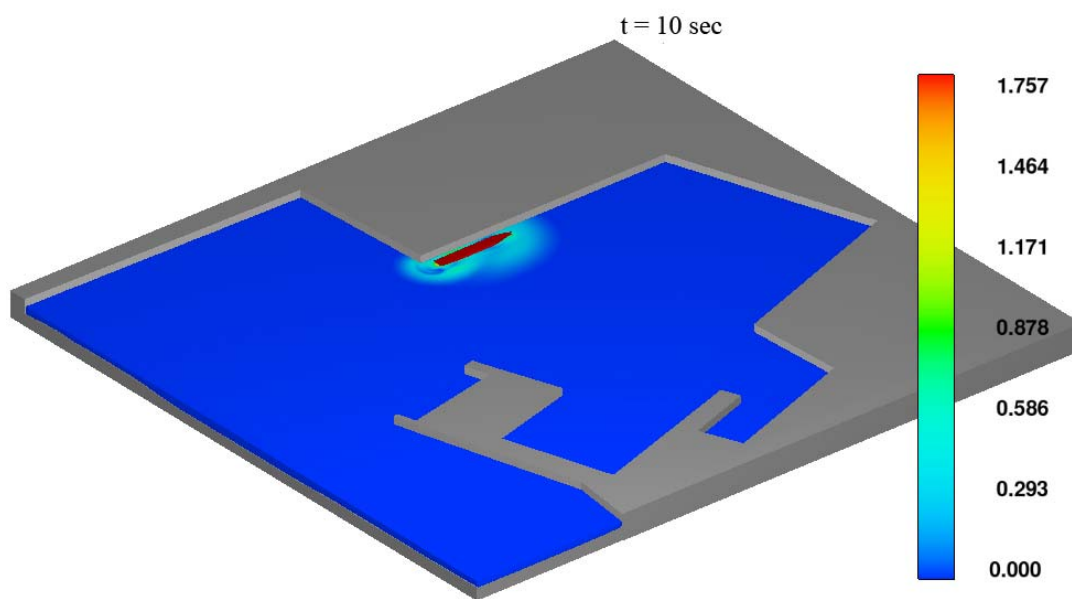


圖 5.30 船舶岸壁效應 3D 圖，船速 6 節，船距 $0.5B$

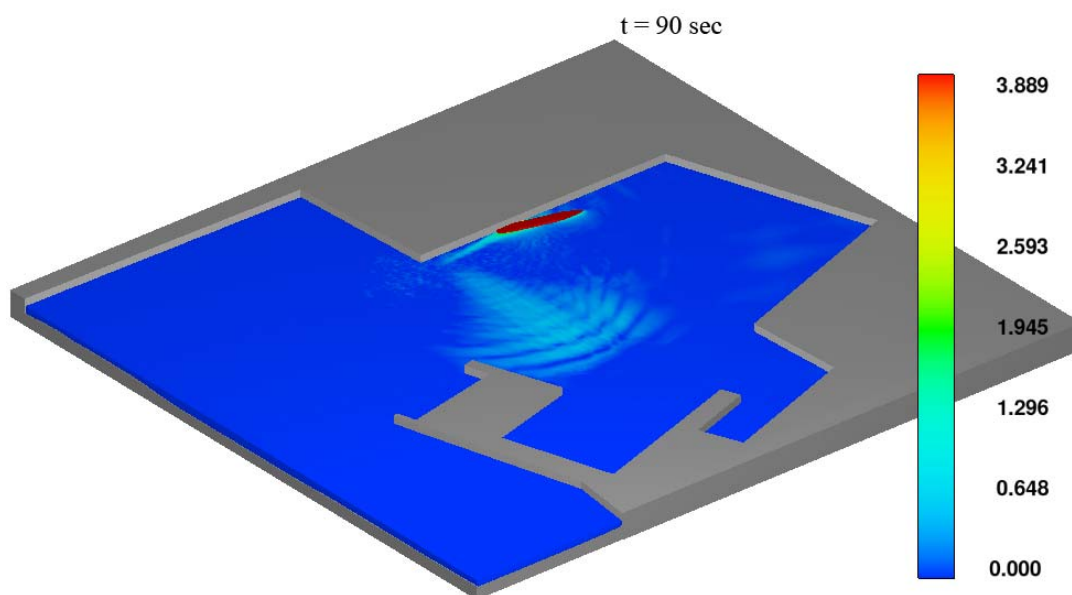
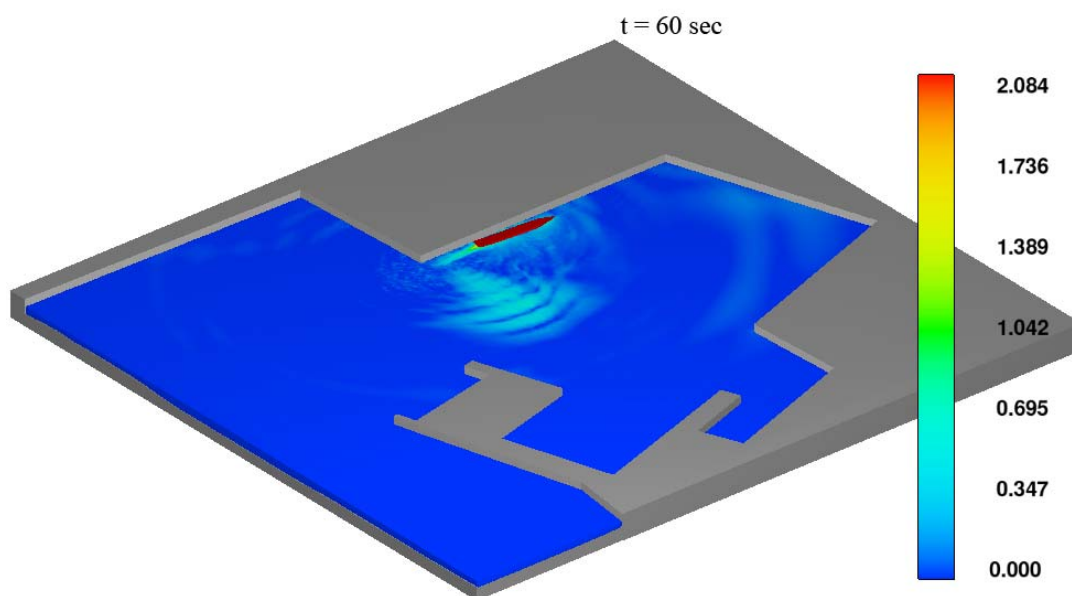


圖 5.30 船舶岸壁效應 3D 圖，船速 6 節，船距 $0.5B$ （接續）

5.3 兩船於臺北港航行的對遇

本節模擬的案例有兩船對遇，兩船船距分別為 $0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $1B$ ，兩船的船速分別為 $V_1 = 3$ 節 VS. $V_2 = 6$ 節。

1. 船舶的橫移力

圖 5.31 與圖 5.32 為船舶 1 與船舶 2 之時變性橫移力比較圖，我們分別呈現不同船距於船舶 1 與船舶 2 的比較，由圖可發現兩船在對遇的過程，持續產生劇烈的橫移力變化，之後兩船之間相互作用，船吸力與推力交替變換。在臺北港航行時，兩船間互遇過程，由於水壓的關係及高低壓區的相互干擾或相互吸引造成擠離或互吸現象。兩船之間交互作用發生時，我們應注意：兩船接近的距離、接近的速度、同向影響較久(追越大於對遇)、大小不同之船，小船易偏離航向。

2. 船舶偏航

兩船反向通過時，雖然彼此間受相互作用之期間較短，但由於相對速度增加仍會造成強烈的吸引力(或排斥力)及偏向力矩。圖 5.33 與圖 5.34 為船舶 1 與船舶 2 之時變性偏航角比較圖，船舶航向 x 軸移動時，船艏向同時相對於 z 軸搖擺。由模擬的結果顯示兩船間距分別為 $0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $1.0B$ 其偏航的狀況皆不一樣，這表示臺北港港區地形的變化，可能會造成兩船對遇時其航向的偏移。角度為正表示船艏向左舷轉；反之，負值表向右舷轉。也可以說，若船舶偏航角維持正值，表示船艏向左偏航；若偏航角為負值，表示船艏向右偏航。圖 5.35 至圖 5.37 為兩船船距別為 $0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $1B$ ，兩船對遇的質心偏移量比較。

3. 壓力速度分佈圖

圖 5.38 與圖 5.40 為兩船對遇的壓力速度分佈，在兩船船距為 $0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $1B$ ，流場的壓力與速度向量圖。船舶對遇時，兩船皆會興波形成倒 V 型波，直到兩船船艙接近時，兩波相會、互制形成新的合成波，此興波的大小受到船體持續與水體交互作用而改變，當兩船船艙交會離開後，我們觀察到很明顯的艤跡流。兩船艤跡流其流速相對於船艤跡流的流速慢，產生了相對較高的壓力，此壓力會作用於兩船的船艤，使其產生偏航的力矩，但由於作用時間很短，所以危險性不如在兩船船艙接近時的作用。

4. 3D 速度強度圖

圖 5.41 至圖 5.43 分別為不同船距 ($0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $1B$)，航速 3 節與 6 節，船舶進出臺北港的 3D 興波圖。等高線的顏色表示海表面的速度強度。由這些圖可知船舶所引起的水波波動，由於只有一端開口，三端是閉口，所以造成水面劇烈變動，船舶的航向變得很不固定，這表示除非真的有需要，才進行對遇航行，另外追越狀況更須避免，不宜在臺北港內進行。比較保守的建議，船舶進出臺北港建議為單向航行，確保航行安全。

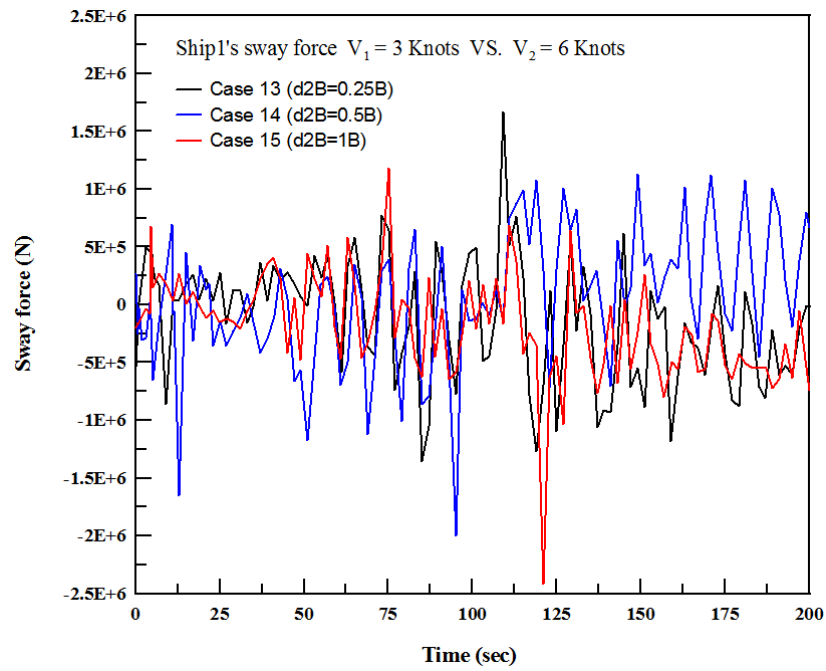


圖 5.31 兩船之不同船距、船舶 1 之橫移力比較圖(船速 3 節 VS. 6 節):
對遇

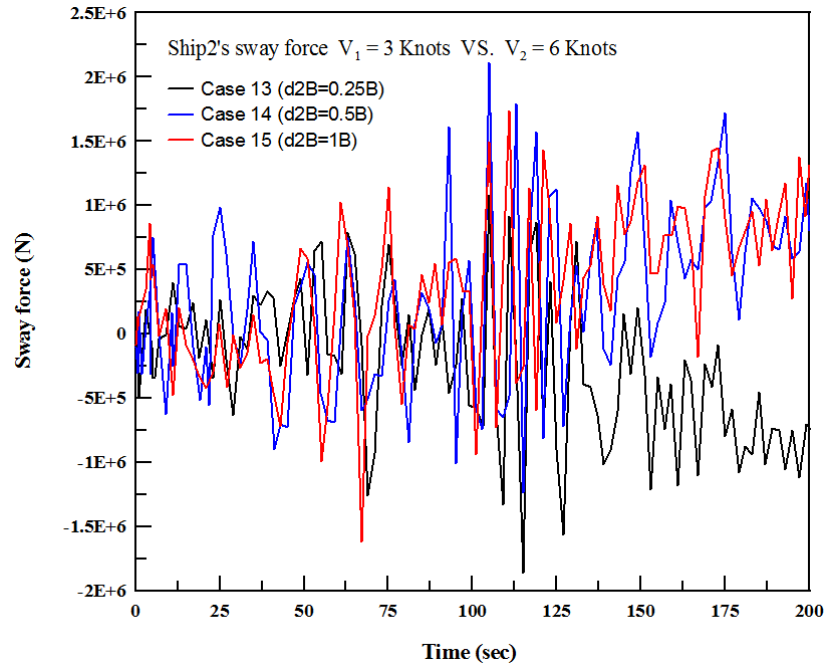


圖 5.32 兩船之不同船距、船舶 2 之橫移力比較圖(船速 3 節 VS. 6 節):
對遇

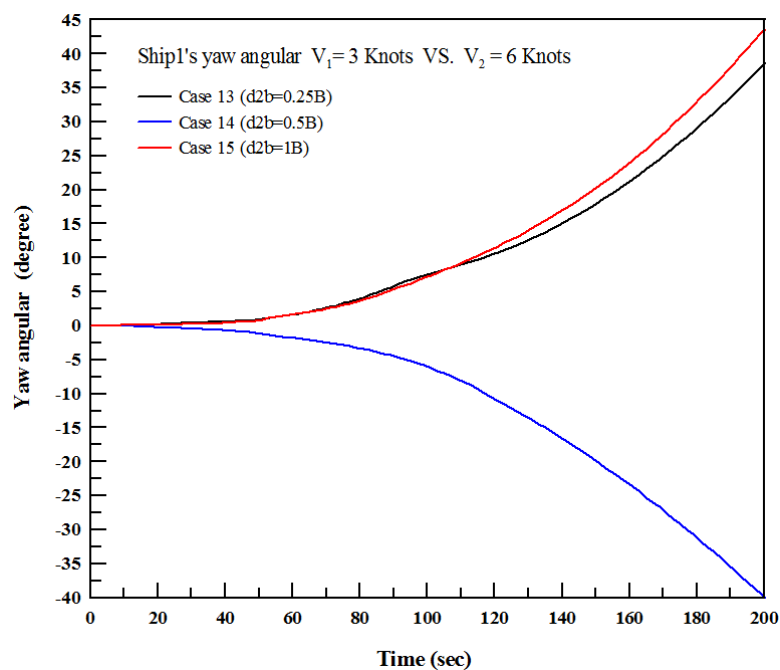


圖 5.33 兩船之不同船距、船舶 1 之偏航角比較圖(船速 3 節 VS. 6 節):
對遇

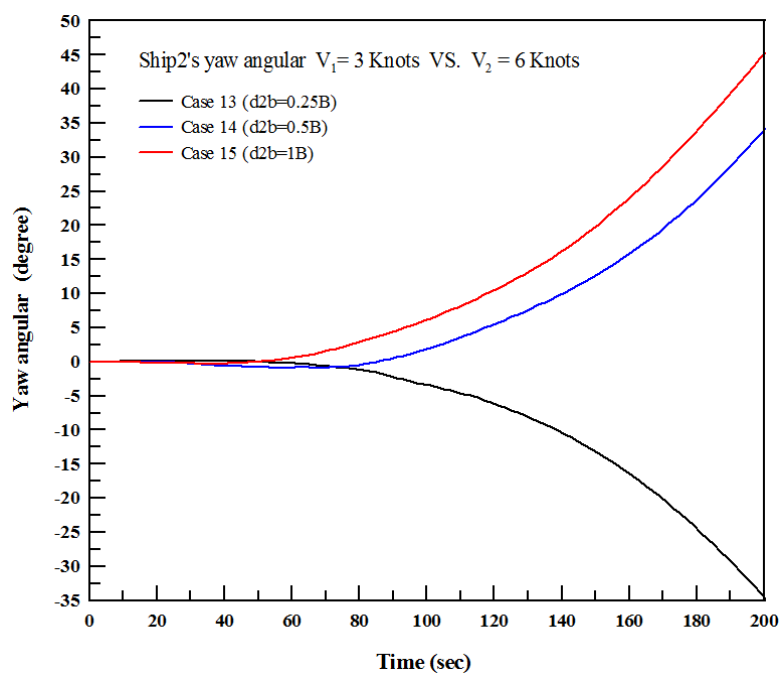


圖 5.34 兩船之不同船距、船舶 2 之偏航角比較圖(船速 3 節 VS. 6 節):
對遇

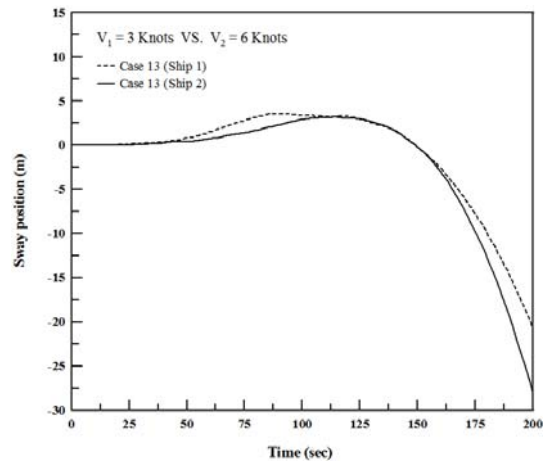


圖 5.35 兩船之船距 $0.25B$ 、船舶 1 與船舶 2 之質心偏移量比較圖（船速 3 節 VS. 6 節）：對遇

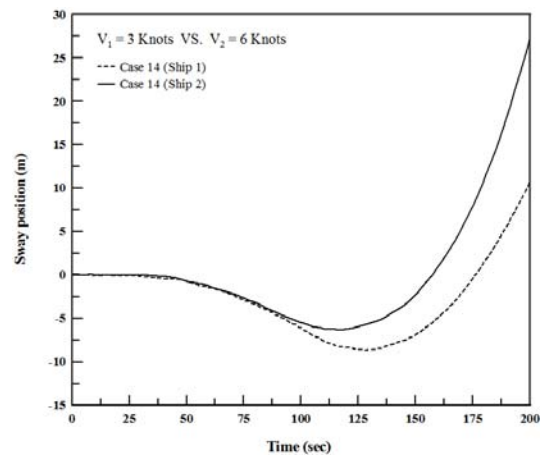


圖 5.36 兩船之船距 $0.5B$ 、船舶 1 與船舶 2 之質心偏移量比較圖（船速 3 節 VS. 6 節）：對遇

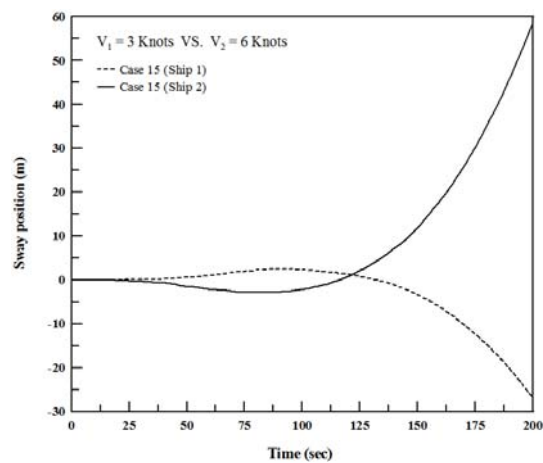


圖 5.37 兩船之船距 $1B$ 、船舶 1 與船舶 2 之質心偏移量比較圖（船速 3 節 VS. 6 節）：對遇

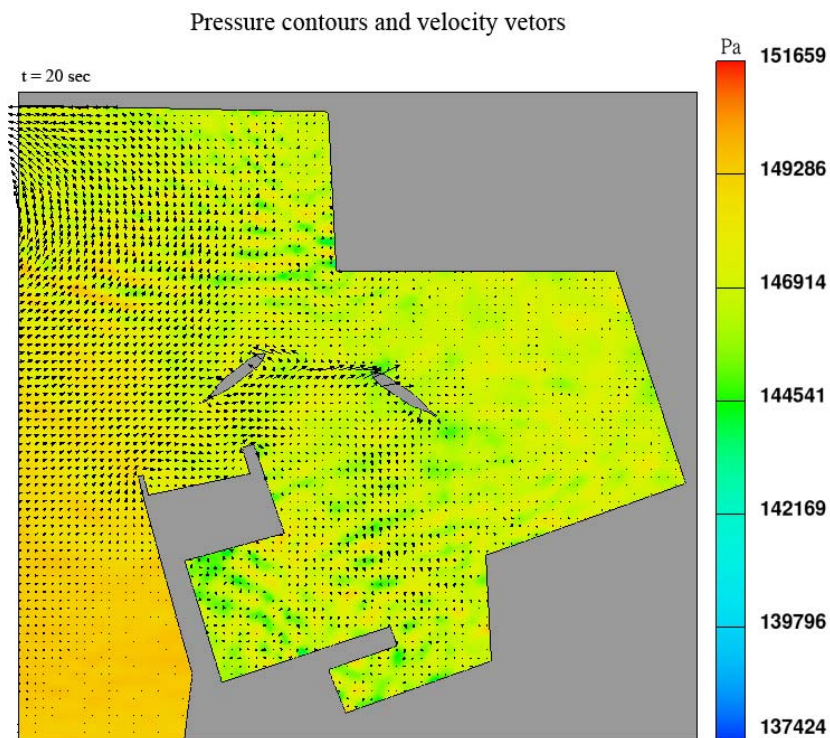
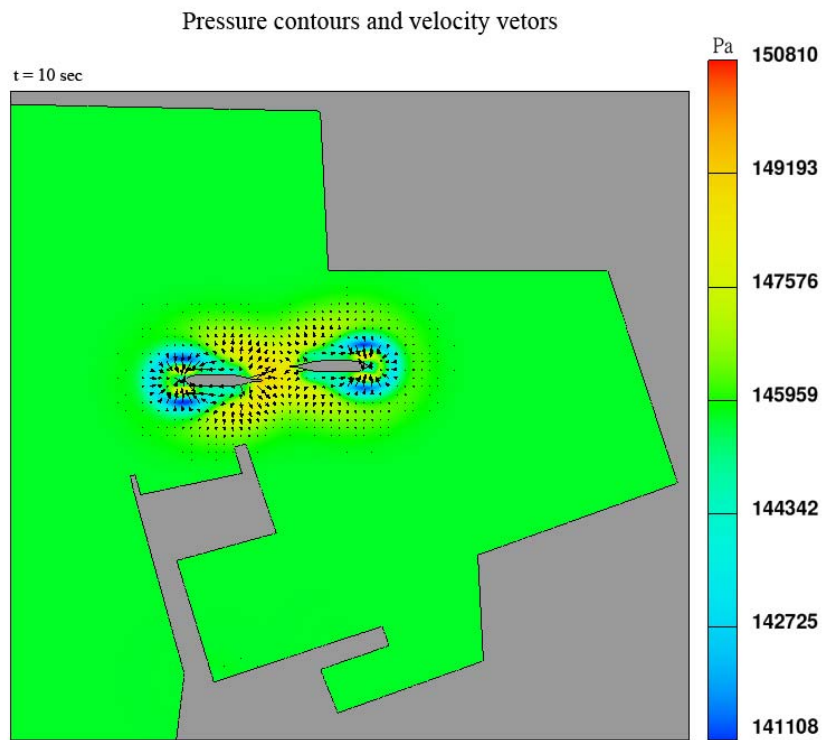


圖 5.38 船舶對遇壓力速度向量圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.25B$

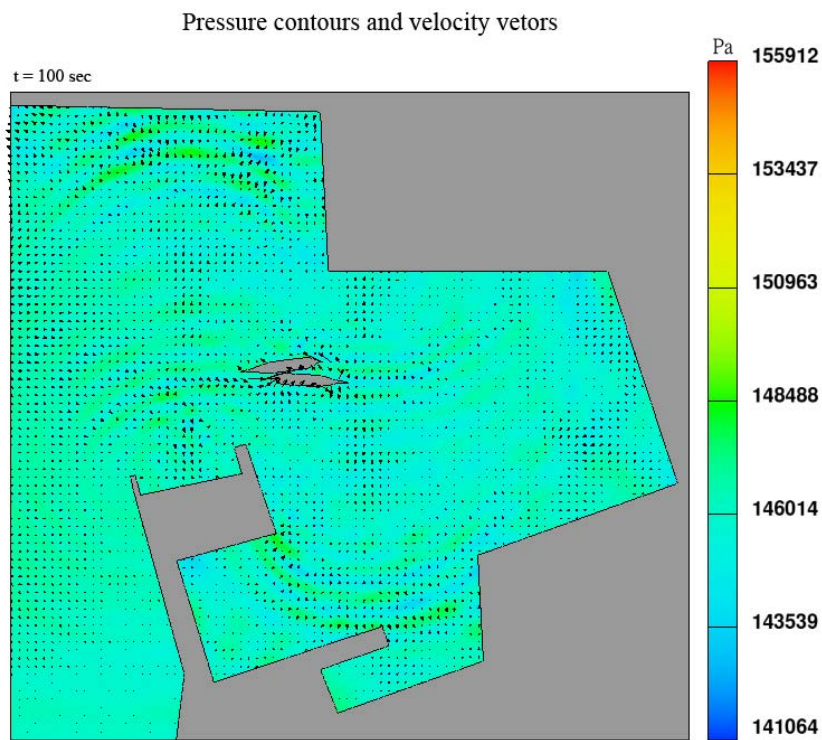
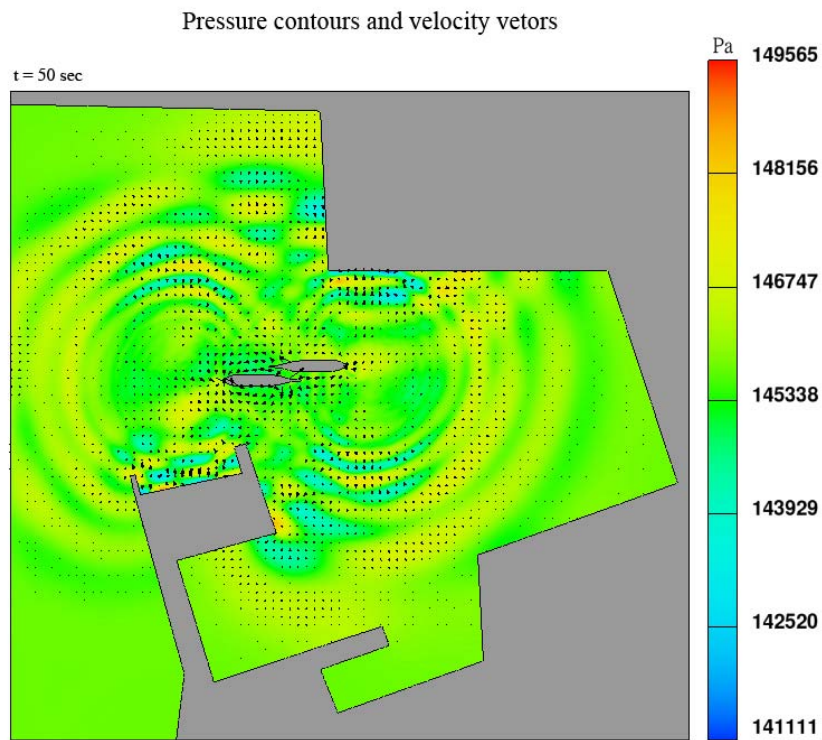


圖 5.38 船舶對遇壓力速度向量圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.25B$ （接續）

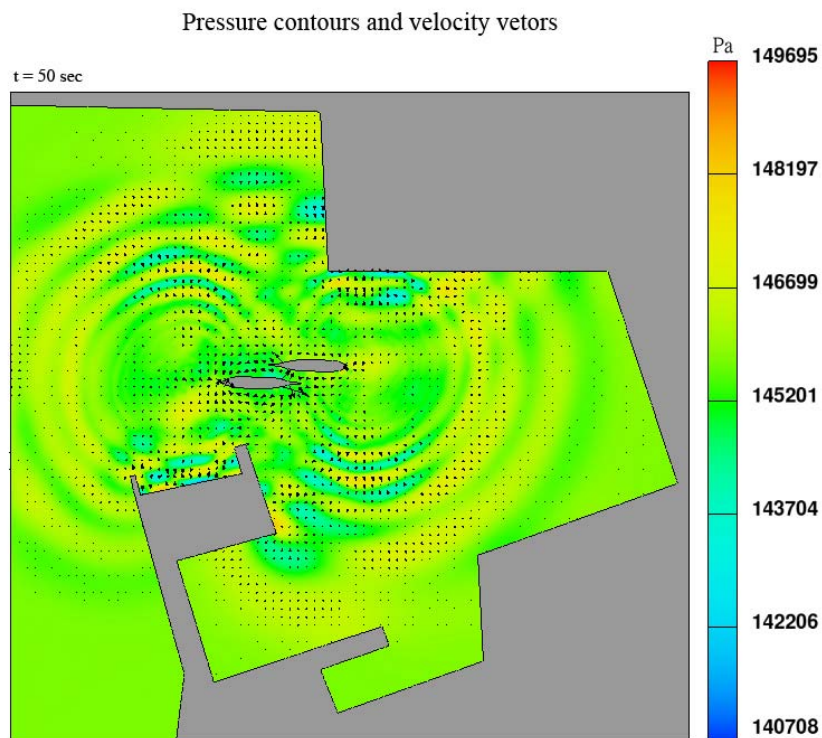
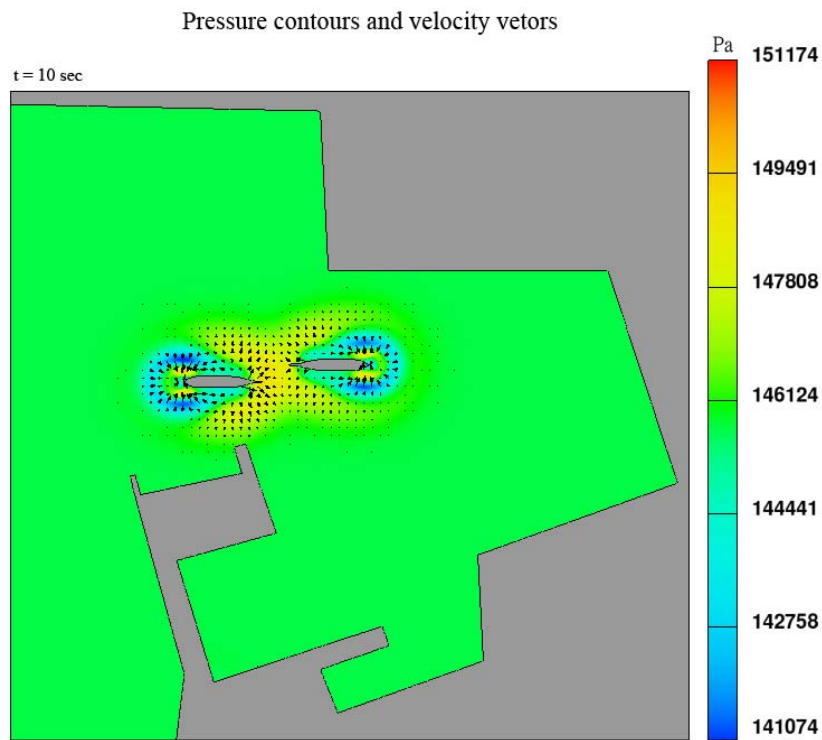


圖 5.39 船舶對遇壓力速度向量圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.5B$

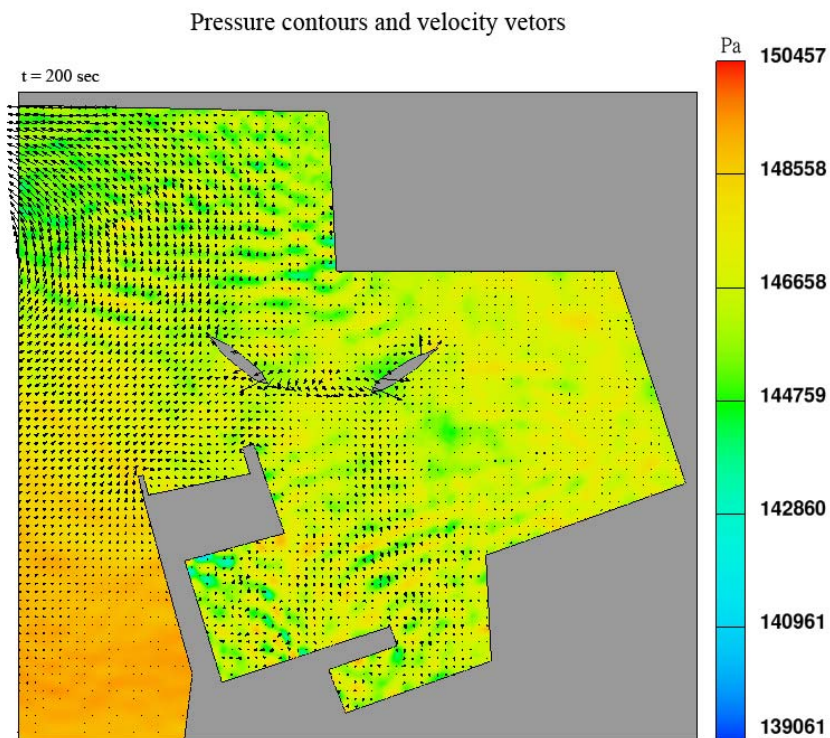
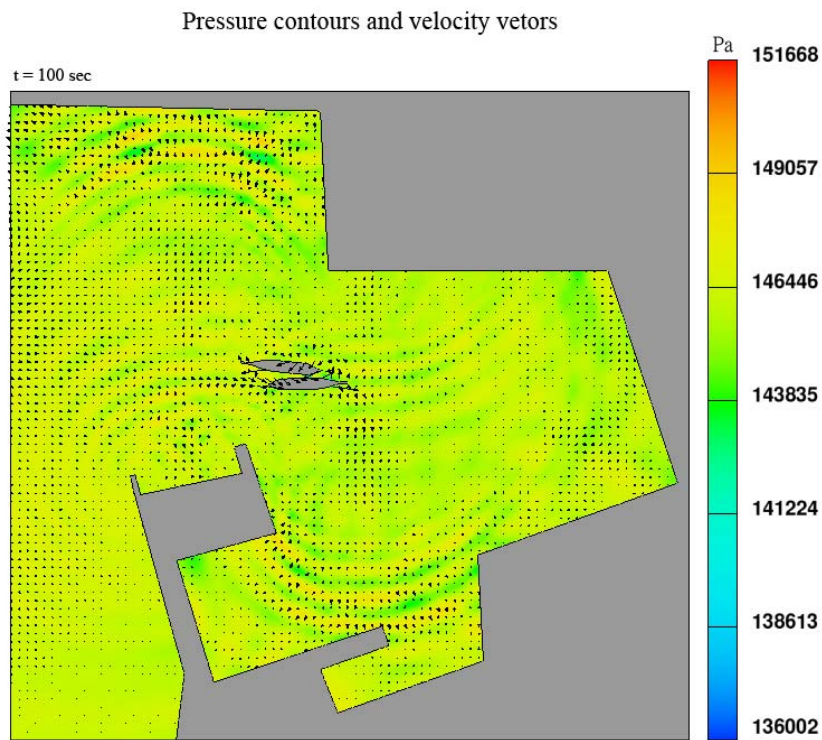


圖 5.39 船舶對遇壓力速度向量圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.5B$ （接續）

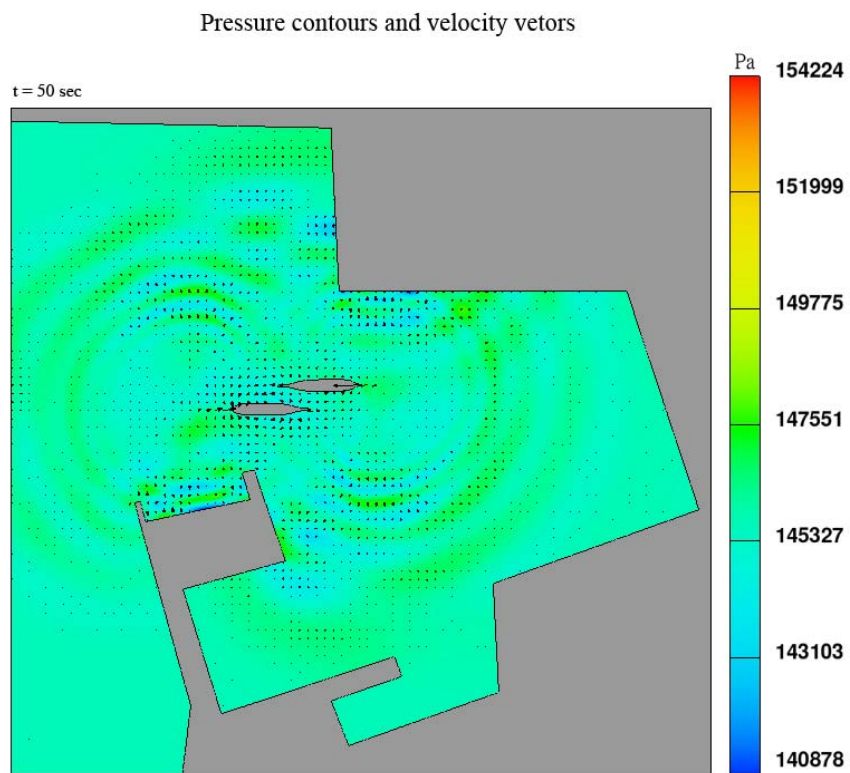
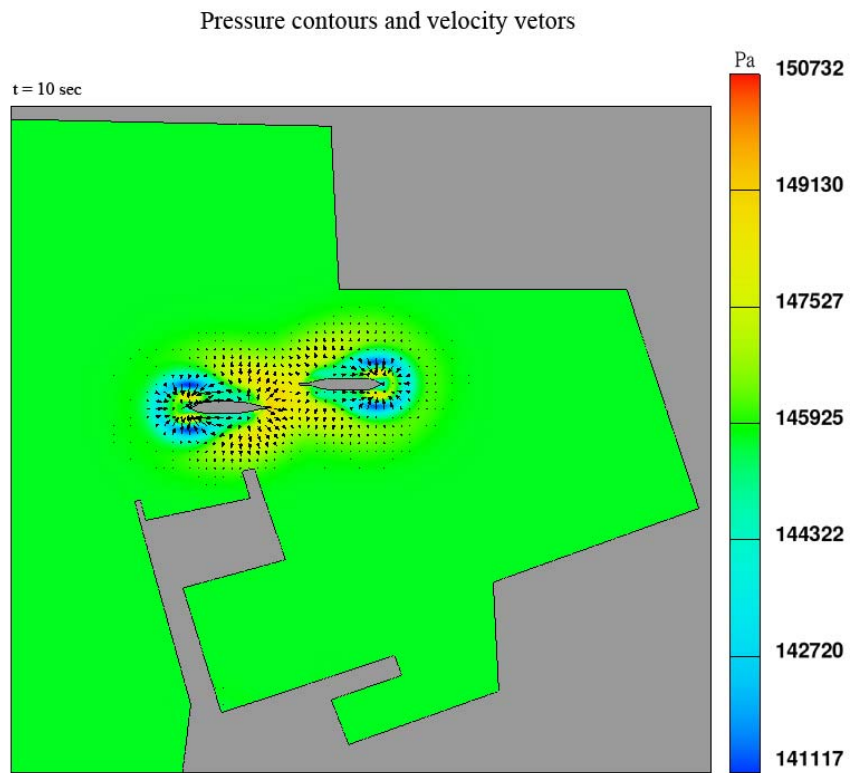
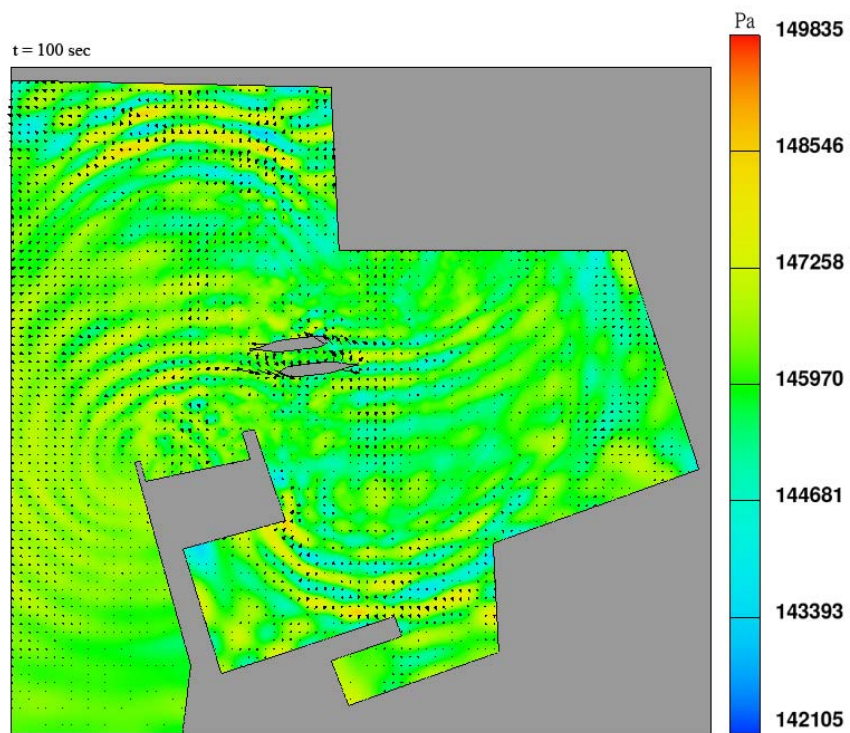


圖 5.40 船舶對遇壓力速度向量圖，船速 3 節對 6 節，船距 1B

Pressure contours and velocity vectors



Pressure contours and velocity vectors

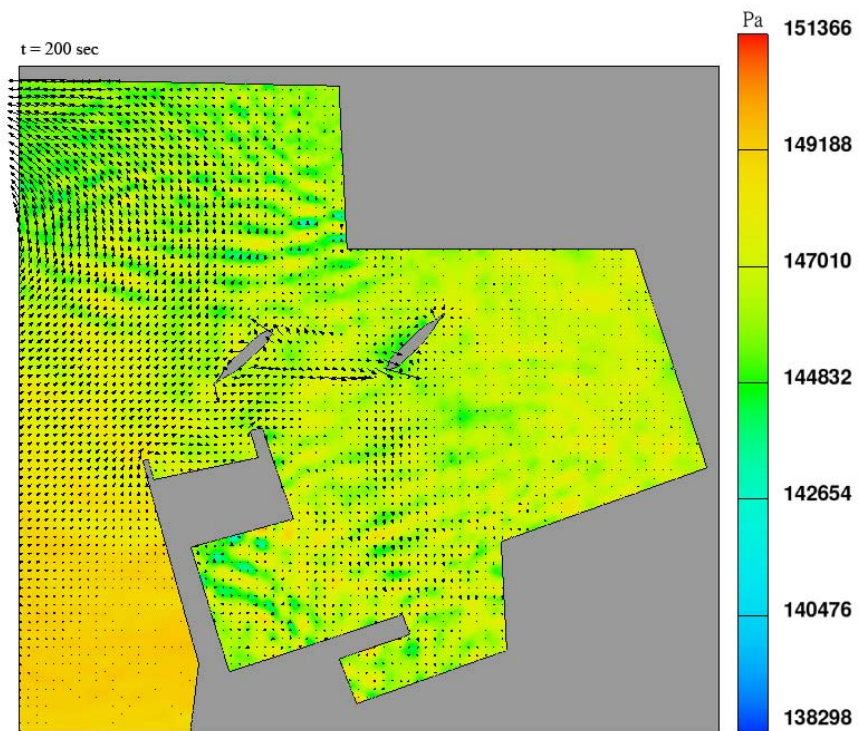


圖 5.40 船舶對遇壓力速度向量圖，船速 3 節對 6 節，船距 $1B$ （接續）

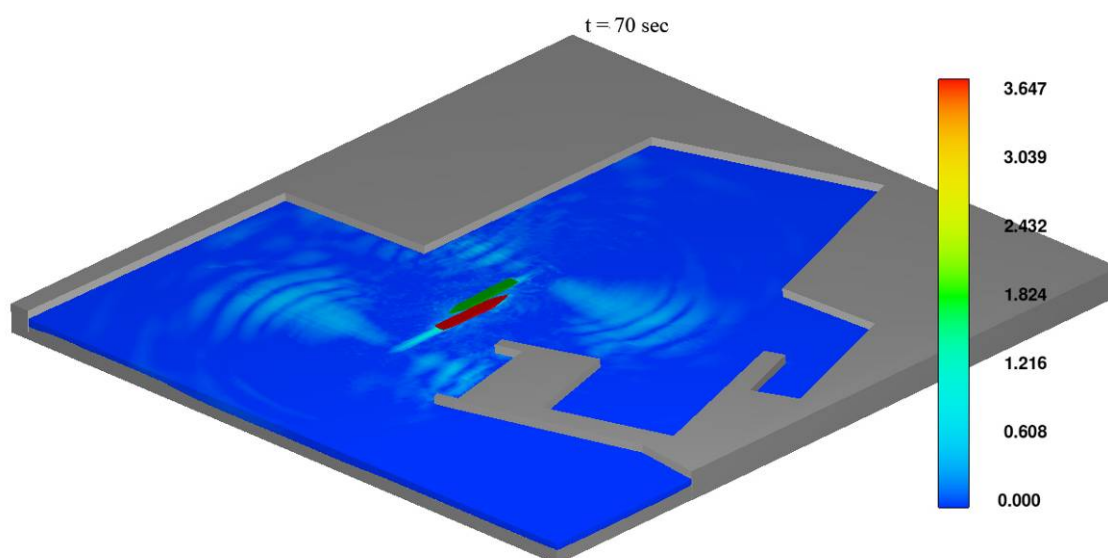
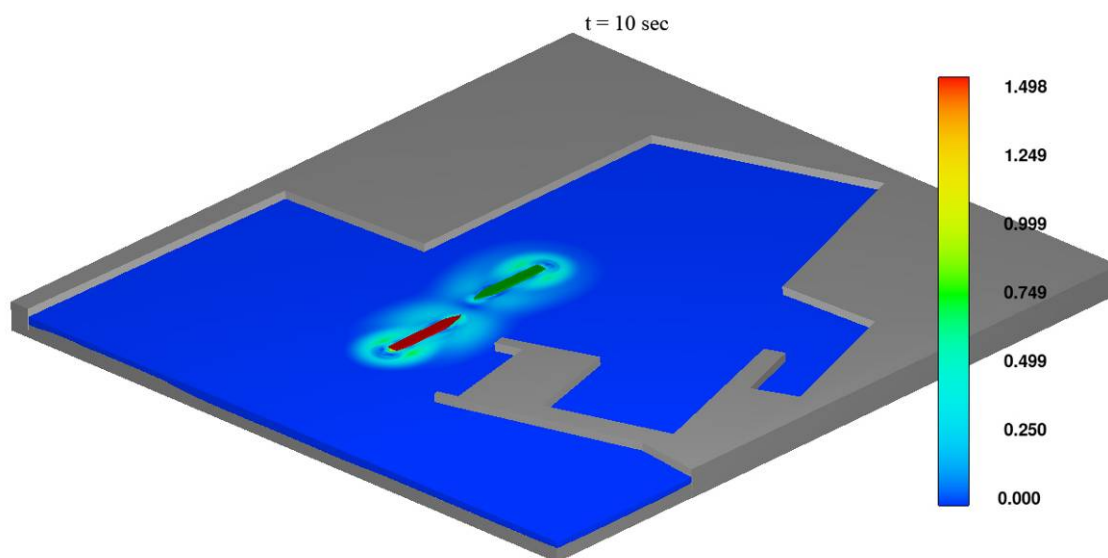


圖 5.41 船舶對遇 3D 圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.25B$

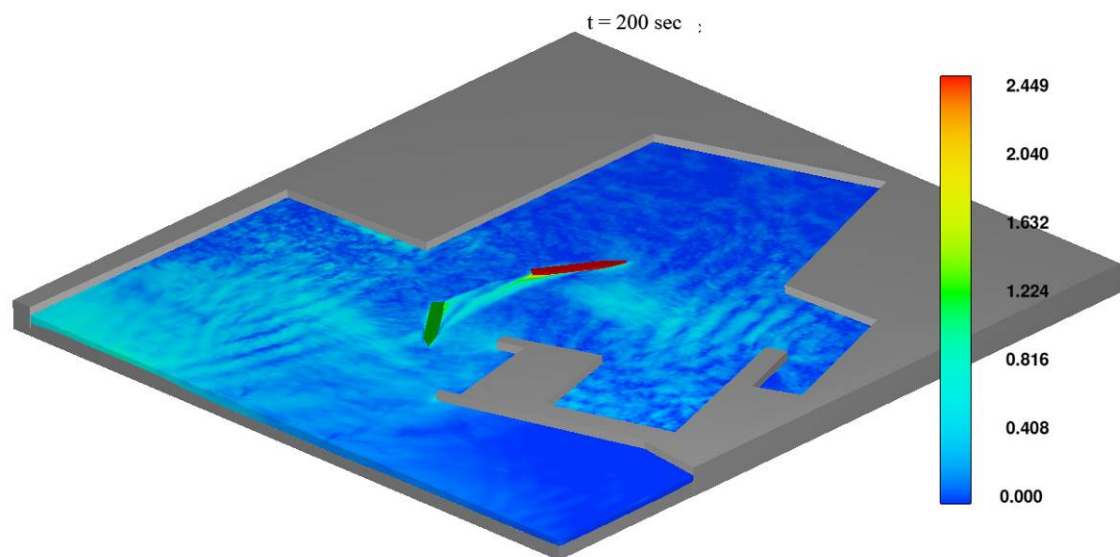
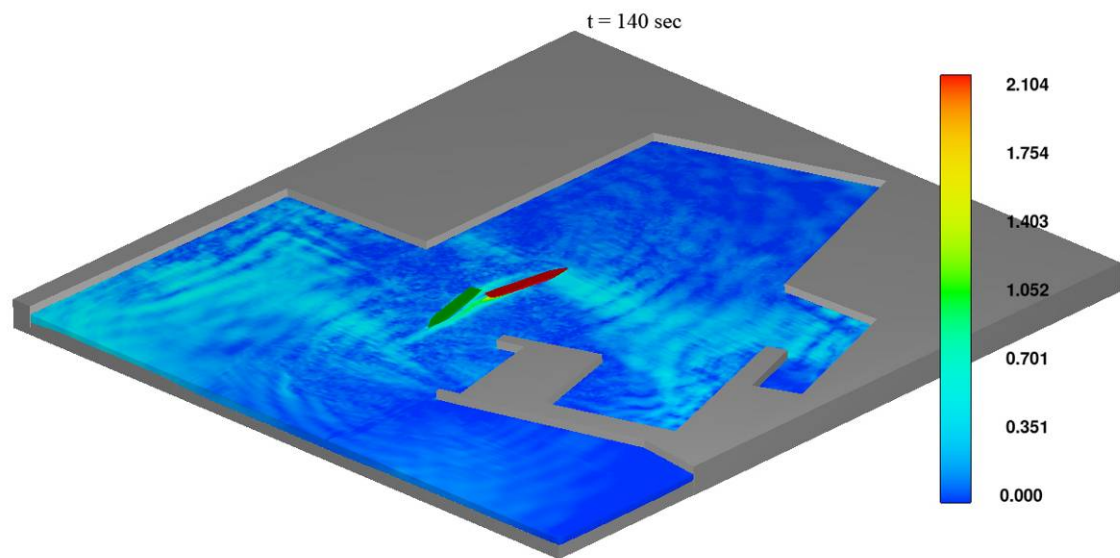


圖 5.41 船舶對遇 3D 圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.25B$ （接續）

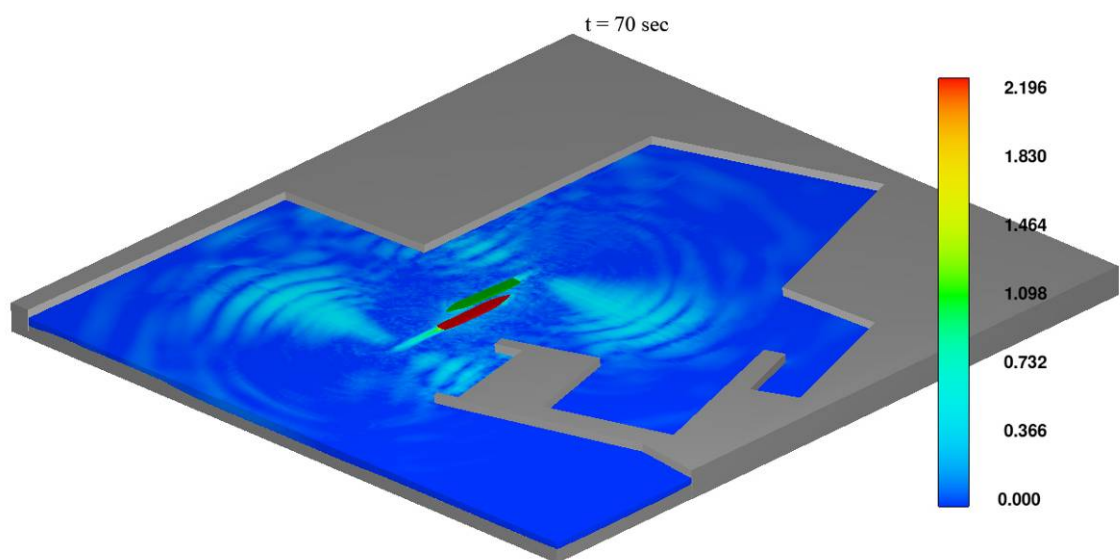
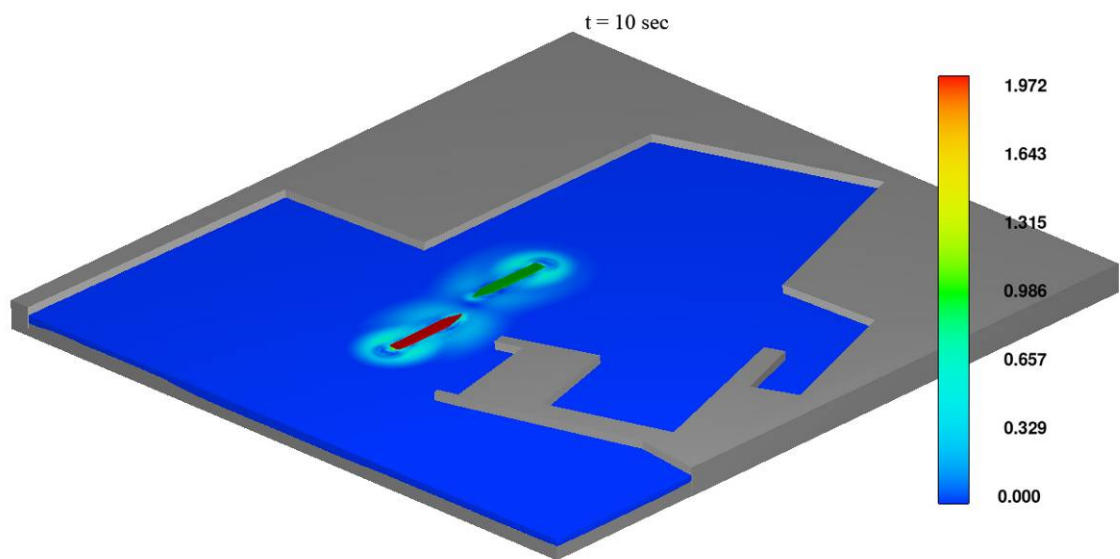


圖 5.42 船舶對遇 3D 圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.5B$

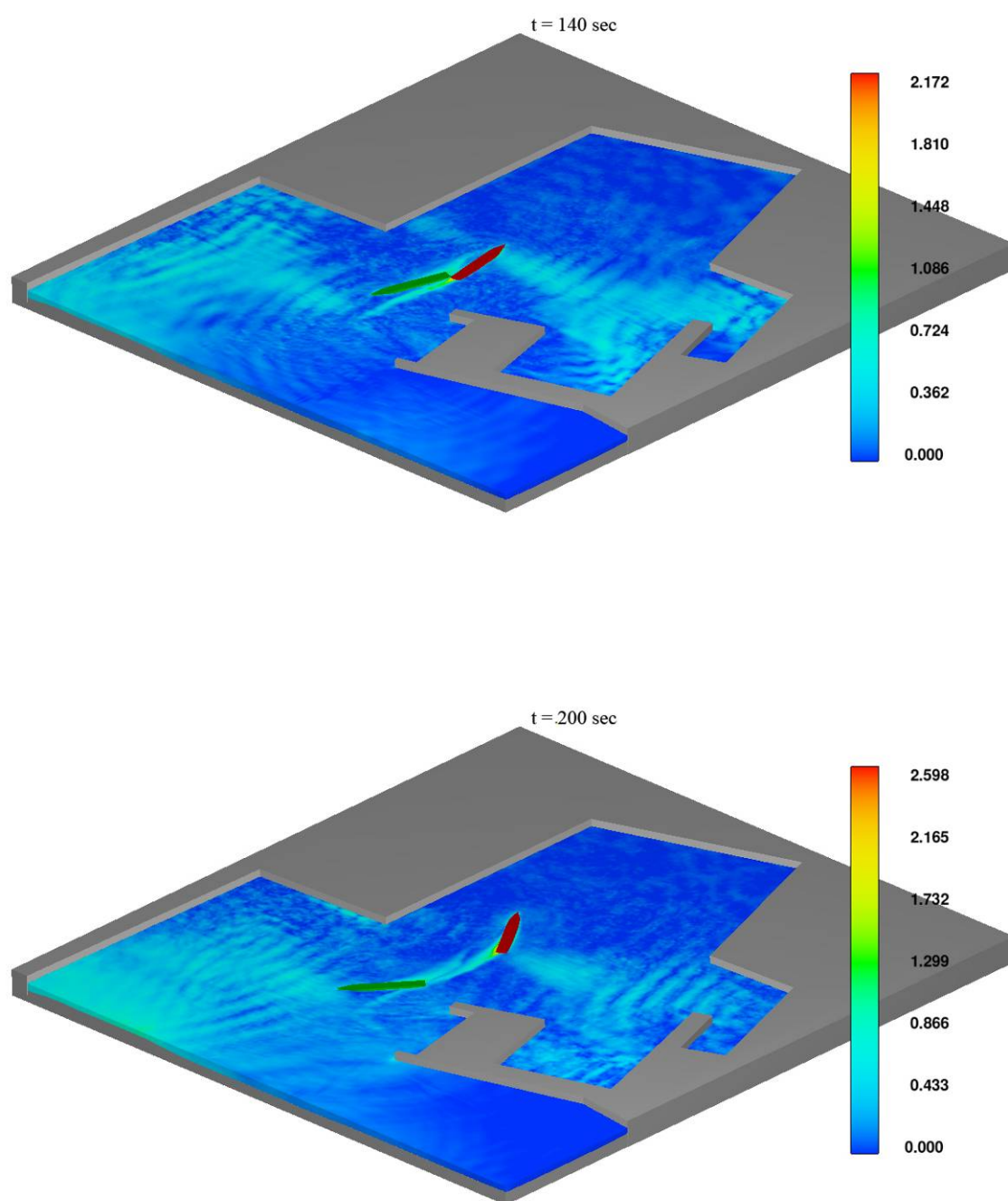


圖 5.42 船舶對遇 3D 圖，船速 3 節對 6 節，船距 $0.5B$ （接續）

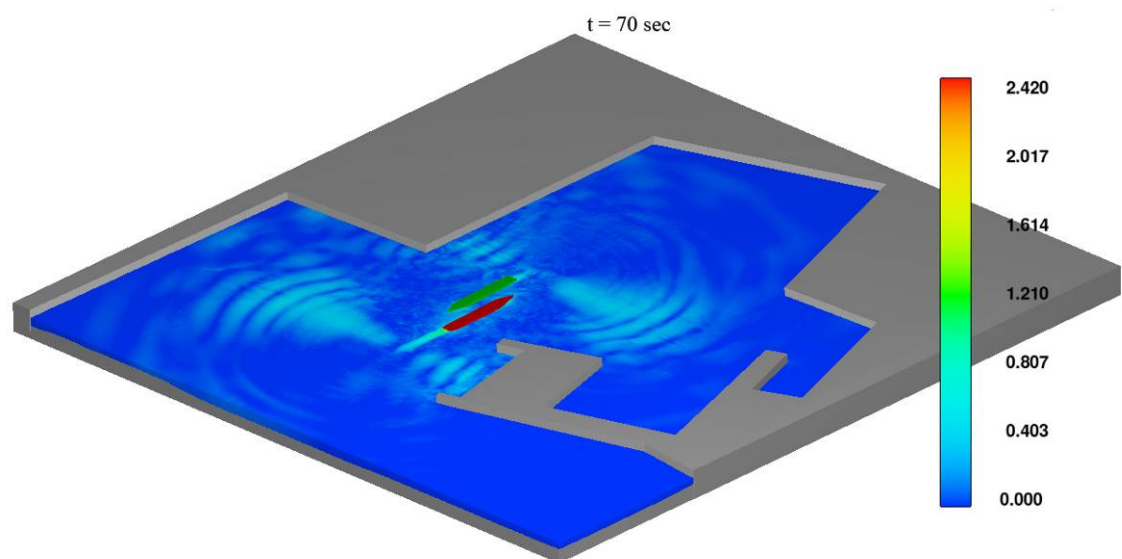
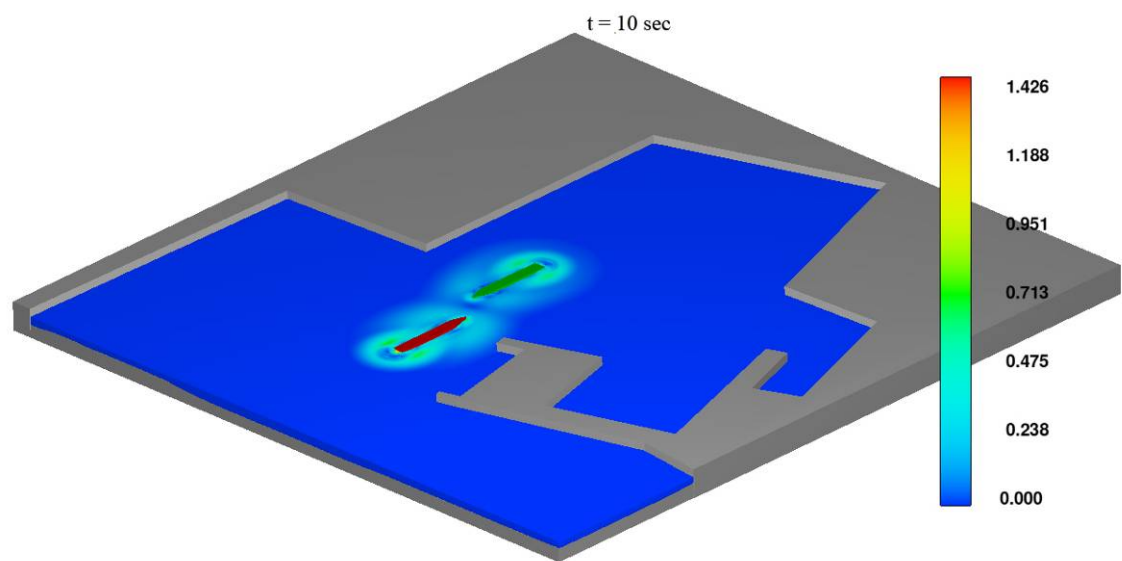


圖 5.43 船舶對遇 3D 圖，船速 3 節對 6 節，船距 1B

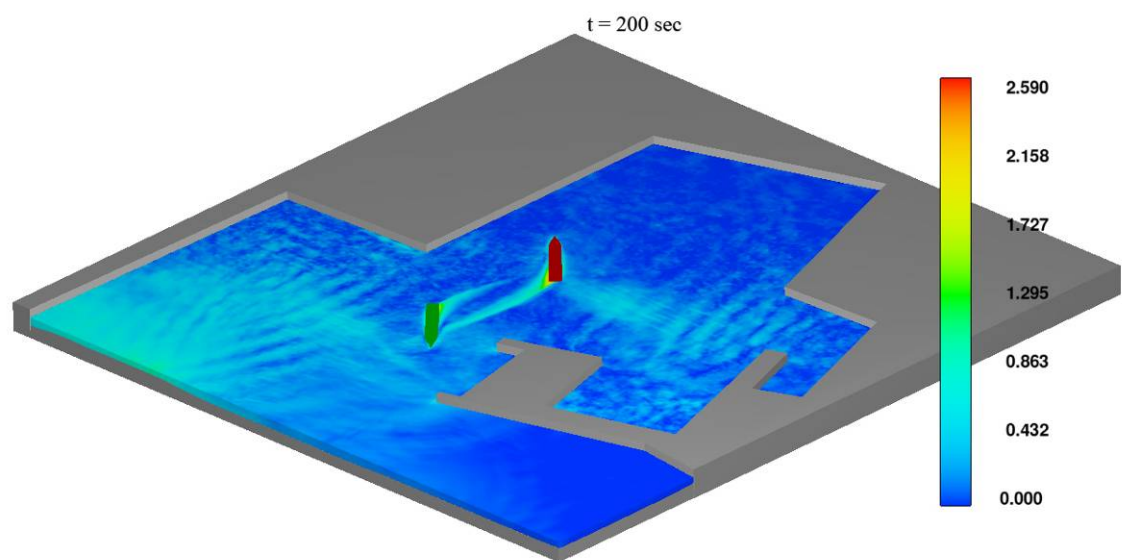
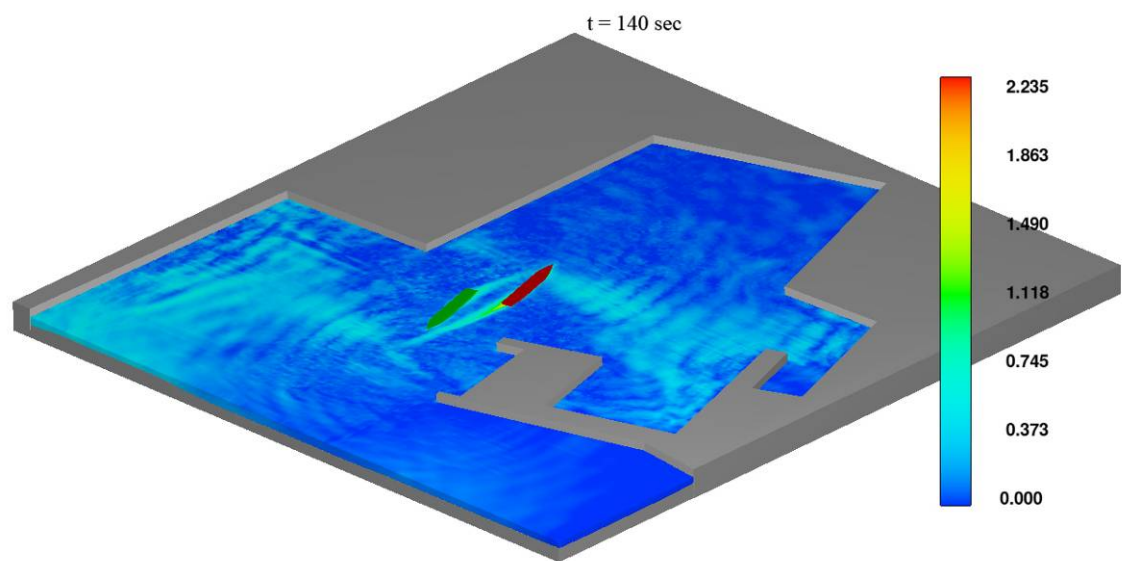


圖 5.43 船舶對遇 3D 圖，船速 3 節對 6 節，船距 1B（接續）

第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究應用 3D 實體建模來建製船模與港灣地形，並使用計算流力的方法模擬單一船舶航行於限制性水域與臺北港內，並分析所引發的興波效應、船舶沿著岸壁航行產生的岸壁效應、兩船對遇與追越的相互作用。由模擬顯示：

1. 建製實體模型

本研究使用電腦輔助設計(CAD)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。未來可使用相同原理，擴展至其他相關問題之研究，如海流、波浪對船舶航行安全性的影響；另外也可考量不同船舶噸位、水深地形對船模進出港的影響，藉以評估船舶進出港合宜的噸位。

2. 船舶的興波效應

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；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。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，故在港內船速宜慢速行駛，尤其是大型船舶應格外小心。

3. 船舶的岸壁效應

船舶於航行中產生岸壁效應的因素包含了船型、吃水、龍骨下餘隙水深 (under keel clearance ,UKC)、俯仰 (trim)、傾斜 (list)、航速、水深、航道幾何、船岸距離 (distance to bank , d2b) 及風壓等，本文僅對航速與船岸距離進行探討。我們模擬船舶航行於規則的限制性水域或於臺北港航行，皆有明顯的岸吸與岸推作用造成了岸壁效應。距岸壁越近、偏離航道中心越遠，岸壁效應越激烈。水道寬度越窄，岸壁效應越激烈。航速越高，岸壁效應越激烈。由於本文使用固定的水深進行模擬，事實上，淺水效應也會增加岸壁效應的強度。

4. 兩船間交互作用

在限制水域中，兩船間相遇及追越過程，由於水壓的關係及高低壓區的相互干擾或相互吸引造成擠離或互吸現象。兩船相互平行航行時，因兩船舶四周水壓分布改變而形成相互作用，亦即船舶航行所形成之興波互相作用於對方而形成之作用力，會對它船造成影響，它船也會對本船作用，兩船艏會隨著交互作用左右搖擺。兩船反向對遇時，雖然彼此間受相互作用之期間較短，但由於相對速度增加仍會造成強烈的吸引力（或排斥力）及偏向力矩。船舶同向追越通過時，因船舶間相對速度較小，致使互相通過之時間較反向對遇通過所需之時間為長，於是船舶彼此間受相互作用影響之期間亦加長，船舶間發生碰撞之機率也提高。

6.2 建議

近年世界貨櫃船大型化趨勢十分明顯，臺北港現今興建的港灣工程，計畫進港船型提升為大型貨櫃輪，以符合貨櫃輪進泊需求。然而，船舶進出臺北港所引發的興波機制，是值得進一步分析與探討。大型貨櫃船進出港口會引發海面波動，劇烈的波動引起本船與它船的航行

安全，船舶停泊碼頭，船舶裝卸貨物時，船舶纜繩係因水面波動起伏過大，纜繩與船舶劇烈拉扯，提高纜繩斷裂的風險。因此，臺北港二期外廓防波堤為已完工之既有設施，現階段已無法修改調整防波堤佈置。但遠期計畫所擬外廓防波堤佈置，應模擬大型船舶航行於臺北港的興波效應與其航行安全，以提供佐證資料來確保防波堤佈置之適宜性，擬定遠期外廓防波堤最佳配置計畫。良好的港灣工程設計，可減低船舶進出港產生的興波，以確保船舶航行安全，未來的計畫可探討中、大型貨櫃船進泊所引發的興波機制，提出改善建議方案，評估改善方案之效果，俾提供臺北港港灣設計以及工程單位之參酌。

1. 數值模擬中型、大型、超大型船舶在固定船速下，航行於臺北港所引發的興波效應，探討其發生的機制，比較分析結果。
2. 模擬不同船舶在不同船速下，比較分析航行於臺北港所引發的興波效應。
3. 擬船舶在高、中、低潮位下，航行於臺北港引發波動效應是否會造成港內劇烈波動，並評估船舶自身的航行安全，探討相關機制。
4. 探討不同潮位下，估算船舶允許進泊的噸位。模擬在不同海流狀況下，船舶航行於臺北港的安全評估，並探討興波效應之影響。
5. 評估中型、大型、超大型船舶在不同海流條件下，航行於臺北港的安全評估，並探討興波效應之影響。
6. 評估中型、大型、超大型船舶在不同波浪條件作用下，航行於臺北港的安全評估，並探討興波效應之影響。評估船舶進港所引發興波效應，提出建議的防治方案。
7. 探討船舶興波的波浪反射率預估，並加入消能的邊界條件，可作為消減波浪能量與反射率的方法。
8. 前提減少興波效應的對策，可使未來港灣營運不受影響，能提高船舶航行安全，增加港口航運運載量，並確保港灣及船舶航行安全。

6.3 成果效益及後續應用情形

本研究模擬船舶航行於限制性水域的水動力分析，並將模式擴展至船舶進出臺北港引發的興波效應。應用 3D 建模可真實呈現臺北港船舶進泊的狀況，其興波造成的波動分析，可設定觀測點以取得波高時序列分析。船舶興波作用的原因與船舶噸位大小、船速、水深有關，由結果顯示航行在臺北港之船舶，由於船艏高壓區作用，使其前部的水被推送向前，而在船艏的前面造成一道艏波（bow wave），同時船艉高壓區亦會造成另一道較小之橫波（transverse following wave）。興波引發波動劇烈震盪，由於受限於港灣邊界的影響，水波無法散射出港，造成港區的水面波動劇烈震盪。為了能掌握臺北港工程建構中的興波作用，希冀能進行波浪反射率的預估，並加入消能的水工設施，評估是否有效削減波浪的能量，減少浪浪的反射率，以利船舶航行安全。

本研究成果提供主管港灣建設相關單位如交通部、港務局以及臺北港港灣設計以及工程單位之參酌，作為未來問題對策的研擬以及施政設計之參據，亦可作為學術單位學術發展研究之參考。

參考文獻

1. Baha M. Suleiman (2000), Identification of Finite-Degree-of-Freedom Models for Ship Motions, Virginia Polytechnic Institute and State University.
2. Flow-3D® User Manual (2007), Flow Science Inc.
3. 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.
4. 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.
5. Hong Chun-Beom and Doi Yasuaki. (2006), Numerical and Experimental Study on Ship Wash Including Wave-Breaking on Shore, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 132, pp. 369-378.
6. Lee Sang-Joon, Koh Min-Seok and Lee Choung-Mook (2003), PIV Velocity Field Measurements of Flow around a KRISO 3600TEU Container Ship Model, *J Marine Sci. Technol.*, Vol.8, pp.76-87.
7. Thomson W. (Lord Kelvin)(1976), On Ship Waves, *Trans. Inst. Mech. Eng.*, Vol.8, pp. 409–433.
8. Tarmo-Soomere (2007), Nonlinear Components of Ship Wake Waves, *Applied Mechanics Reviews: Transactions of the ASME*, Vol.60, pp. 120-138.
9. Wei Gengsheng (2006), An Implicit Method to Solve Problems of Rigid Body Motion Coupled with Fluid Flow, Flow Science Inc.
10. 蔡坤澄(1989)，操船學，周氏兄弟出版社。
11. 蘇東濤 (1993)，狹窄水道操船與避碰問題之研究，眾望文化事業有限公司。

12. 陸磬安 (1999)，造船原理—船舶動力學，國立編譯館。
13. 趙月林(2000)，船舶操縱，大連海事大學出版社。
14. 徐國裕(2006)，船舶操縱理論與實務，國立臺灣海洋大學海運研究中心出版，pp182-183。
15. 陳力民(2008)，交通部基隆港務局，臺北港大貨櫃輪真實操船模擬試驗，宇泰工程顧問有限公司。

附錄一 簡報資料

船舶進出台北港引發的 興波作用之研究

報告人：羅德章

日期：100 / 11 / 30

大綱

- ☞ 工作團隊
- ☞ 計畫目的
- ☞ 理論與軟體介紹
- ☞ 研究方法
- ☞ 結果與討論
 - 船舶航行於限制性水域之模擬與分析
 - 船舶航行於台北港之模擬與分析
- ☞ 結論與建議

工作團隊

◆ 計畫主持人：

羅德章 副教授 國立高雄海洋科技大學海事資訊科技研究所

◆ 計畫協同主持人：

楊德良 教授 國立台灣大學土木工程學系暨研究所

陳力民 助理教授 國立高雄海洋科技大學航運技術系

◆ 計畫專任助理：

吳姿瀨 國立高雄海洋科技大學海事資訊科技研究所

◆ 計畫兼任助理：

鄭宇祈 國立高雄海洋科技大學海事資訊科技研究所

3

計畫目的

有關港灣或海岸工程規劃設計所需之設計船舶興波資料須由數值模擬或水工模型試驗來輔助設計。然而水工模型試驗需耗費的成本較大，因此數值模擬船舶進出港所引的興波作用，就顯得相對成本低。藉由模擬的分析，可取得港內波高時間序列，流場、壓力場分佈狀況，並可搭配動畫之呈現，讓模擬結果可供港灣設計者重要參考之數據，以減低船舶興波作用造成的波動。

船速設限位置為避免靠泊港內碼頭裝卸作業船隻免受浪擊傷害(Wash Damage)，港內速度設限之標準必須依港口環境、港口水深、船舶大小為依據。依國際商港港務管理規則第9條規定：「五百總噸以上船舶在港內航行，其航行時速不得超過五節」。如要求進港船舶滿足此條規定，不僅臺北港大型船舶無法進港，其他各國際商港之大型船舶皆無法進港。

4

理論與軟體介紹

- 1980年，Dr.Hirt創辦了Flow Science Inc.，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)及其流體靜力。1985年，正式推出FLOW-3D流體分析軟體。
- FLOW-3D的理論基礎在於質量守恆方程式、動量方程式以及能量不減方程式等，因此它可以應用在絕大部分的、任何型態的流體流動。針對本文所研究的物理現象，乃為流體流動力學問題，其所遵行的數學模式為 Navier-Stokes 方程式。因現今之解析法仍未能完全解析此偏微分方程式，故本文研究乃採用數值方法來模擬此一流場。

5

船體六個自由度

船模的運動包括相對於船體座標系的旋轉與相對於數值航道的移動，數值航道設定笛卡兒直角座標系統，如圖1。

定義船模質心為原點 ($x=y=z=0$) 為船模在數值航道水域裡運動的參考點，船模相對於質心而產生分別為縱移（沿x軸位移）、橫移（沿y軸位移）、起伏（沿z軸位移）及橫搖（繞x軸旋轉）、縱搖（繞y軸旋轉）、平擺（繞z軸旋轉），六個自由度（6 Degrees of freedom, 6DOF）的運動，如圖2。

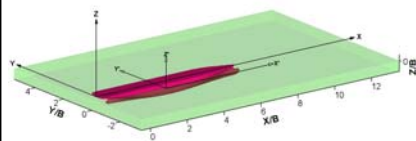


圖1 數值航道示意圖

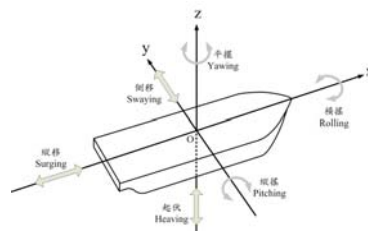


圖2 船模相對於原點而產生六個自由度的運動

6

KCS 3600TEU 貨櫃船模驗證

船體航行於水面四周流場極其複雜，準確的分析對於現今的船舶設計固然重要，然而最好的方式就是獲得可信賴的試驗值。SANG-JOON LEE 等人，利用循環水道（circulating water channel, CWC）與PIV流場測速系統，對KCS 3600TEU貨櫃船模進行船體流場速度的試驗測定。

循環水道長 $4.5m$ 、寬 $1.0m$ 、深 $1.0m$ ，船模尺度比 λ 為 $1/153$ ，循環水道流速設定 $0.6m/s$ 。此文獻與本計畫引用相同船模，利用FLOW-3D建立一相似之CWC進行模擬比較，探討船艏船底截面之流場顯示渦流之情況，如圖3所示。

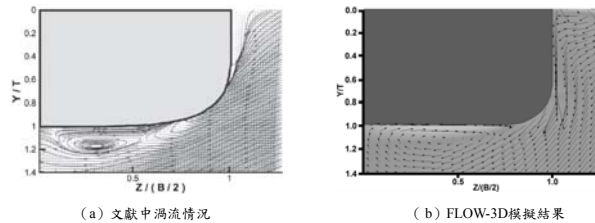


圖3 船模船艏橫剖面船底截面之渦流分布情況

船舶阻力計算驗證

根據Gengsheng文獻模擬驗證，一小艇實船船長 $3.0m$ ，船寬 $0.8m$ ，吃水 $0.2m$ 。小艇排水量 $118.2kg$ ，求其 x 方向移動的船舶阻力。

小艇質心慣性張量：

$$I = \begin{bmatrix} 6.7 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 93.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 96.7 \end{bmatrix} (m^2 \cdot kg)$$

- ✓ 計算網格包含兩個區塊，裡面為巢狀，劃分38400個網格，其網格密度是外面區塊網格的二倍，外面區塊網格劃分45000個，總共121,800個固定網格，而實際為156,388個計算網格。
- ✓ 物理條件用紊流（Renormalized Group, RNG）模式計算流場，使用通用的移動物體（General Moving Objects, GMO）隱性解（implicit）與鬆弛法（Successive Over-Relaxation, SOR）模式。
- ✓ 小艇頂流速（upstream speed）分別為（ $5.04 m/s$, $5.88 m/s$, $6.72 m/s$, $7.98 m/s$ ）等， $5.04 m/s$, $5.88 m/s$, $6.72 m/s$ 之計算阻力為其最後 $1s$ 之平均值， $7.98 m/s$ 之計算阻力為其最後三個週期（ $2.2s \sim 4.0s$ ）之平均值，如表1。
- ✓ 模擬時間分別設定 $t = 4s$ ，圖4為小艇實船船舶阻力之模擬過程。

表1 測量阻力表

| | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 頂流速度 (m/s) | 5.04 | 5.88 | 6.72 | 7.98 |
| 計算阻力 (N) | 169.0 | 187.1 | 185.3 | 210.2 |
| 測量阻力 (N) | 171.4 | 178.2 | 188.2 | 217.1 |
| 誤差(%) | 1.4 | 5.0 | 1.5 | 3.2 |

測量阻力來源：Courtesy of the Azimut yacht

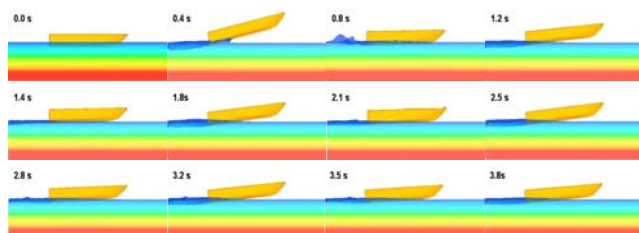
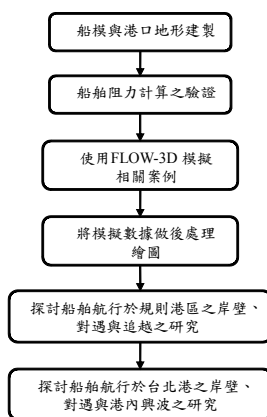


圖4 艇實船求解船舶阻力之模擬過程 (V = 7.98m/s, t = 0 ~ 4s)

9

研究方法

依計畫目的，研究內容為模型前處理，包含船體及港口模型之建製船舶阻力計算之驗證；數值模擬分析不同節速、船寬等，航行於台北港之岸壁效應、對遇及興波效應港內的波動分析研究，相關計畫流程如下：



10

船模建製步驟

- 船模相似概念：利用船模試驗來研究船模的運動，須遵守力學相似律，即船模和實船應幾何相似、運動相似和動力相似。滿足了這些條件後，將船模試驗的結果換算到實船。
- 本文中使用的船模分別為航行於規則港區（使用縮小比例船模）與航行於台北港區（使用原始比例船模）。
- 本文首先利用縮小的船模，模擬船模於限制性水道的岸壁效應、船舶對遇與追越的探討。然後建製船舶與台北港的原型，並匯置於FLOW-3D軟體內作各項參數的設定，船舶與台北港依照1：1的比例尺，模擬船舶航行港內的興波效應。

11

船模試驗的相似律

• 幾何相似

船模與實船幾何相似，即二者之間所對應之每一線性尺度的比例是一樣的，即

$$\frac{L_s}{L_m} = \frac{B_s}{B_m} = \frac{T_s}{T_m} = \lambda$$

KCS船模縮小比例尺率

$$\frac{230.0m}{7.2786m} = \frac{32.2m}{1.019m} = \frac{10.8m}{0.3418m} = 31.5994$$

L ：船長 B ：船寬 T ：吃水 s ：實船 m ：船模 λ ：尺度比

• 運動相似

$$\frac{V_{s1}}{V_{m1}} = \frac{V_{s2}}{V_{m2}} = \dots = C_v$$

V_s ：實船的航速

V_m ：船模的航速

下標1、2：對應點與流體質點的位置



12

船模試驗的相似律

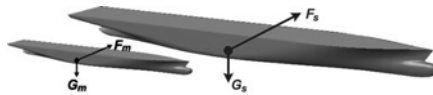
$$\frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}}$$

| V_s (Knots) | V_s (m/s) | g_s (m/s ²) | g_m (m/s ²) | L_s (m) | L_m (m) | V_m (m/s) |
|---------------|-------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | 0.51 | 9.81 | 9.81 | 230 | 7.2786 | 0.0915 |
| 2 | 1.02 | 9.81 | 9.81 | 230 | 7.2786 | 0.183 |
| 3 | 1.54 | 9.81 | 9.81 | 230 | 7.2786 | 0.2745 |
| 6 | 3.09 | 9.81 | 9.81 | 230 | 7.2786 | 0.549 |

•動力相似

$$\frac{F_s}{F_m} = \frac{G_s}{G_m} = \dots = C_F$$

F_s 、 F_m 表示作用在實船與船模對應點上的力
(壓力、慣性力、黏性力、重力)



13

KCS船模與實船之幾何數據表

| 參數項目 | 實船 | 船模 | 單位 |
|----------------------|---------|---------|-------------------|
| 尺度比 λ | 1 | 31.5994 | - |
| 垂標間長 L_{PP} | 230.0 | 7.2786 | m |
| 船寬 B | 32.2 | 1.0190 | m |
| 吃水 T | 10.8 | 0.3418 | m |
| 排水量 Δ | 53330.0 | 1.6909 | tons |
| 排水量體積 | 52030.0 | 1.6497 | m ³ |
| 浸水面積 S | 9424.0 | 9.4984 | m ² |
| 肥瘦係數 C_B | 0.6508 | 0.6508 | - |
| 菱形係數 C_P | 0.6608 | 0.6608 | - |
| 定傾高度 \overline{GM} | 7.326 | 0.2318 | m |
| L_{PP}/B | 7.143 | 7.1430 | - |
| B/T | 2.981 | 2.9810 | - |
| g 重力加速度 | 9.81 | 9.81 | m/s ² |
| ρ 流體密度 | 1025 | 1025 | kg/m ³ |
| 質心 x | 111.6 | 3.53 | m |
| 質心 y | 0.0 | 0.0 | m |
| 質心 z | 5.9 | 0.187 | m |

14

貨櫃船KCS位於station 236.9之船型表

| x | y | z | x | y | z | x | y | z |
|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 236.9 | 0 | 4.9580 | 236.9 | 0.4464 | 5.5978 | 236.9 | 0.4079 | 6.3728 |
| 236.9 | 0.0506 | 5.0006 | 236.9 | 0.4640 | 5.6619 | 236.9 | 0.3760 | 6.4310 |
| 236.9 | 0.1005 | 5.0439 | 236.9 | 0.4785 | 5.7266 | 236.9 | 0.3398 | 6.4868 |
| 236.9 | 0.1487 | 5.0888 | 236.9 | 0.4895 | 5.7919 | 236.9 | 0.2997 | 6.5398 |
| 236.9 | 0.1944 | 5.1359 | 236.9 | 0.4969 | 5.8576 | 236.9 | 0.2560 | 6.5899 |
| 236.9 | 0.2371 | 5.1859 | 236.9 | 0.5006 | 5.9236 | 236.9 | 0.2091 | 6.6367 |
| 236.9 | 0.2764 | 5.2387 | 236.9 | 0.5004 | 5.9896 | 236.9 | 0.1593 | 6.6800 |
| 236.9 | 0.3124 | 5.2941 | 236.9 | 0.4962 | 6.0557 | 236.9 | 0.1074 | 6.7206 |
| 236.9 | 0.3453 | 5.3517 | 236.9 | 0.4877 | 6.1214 | 236.9 | 0.0541 | 6.7593 |
| 236.9 | 0.3751 | 5.4112 | 236.9 | 0.4748 | 6.1863 | 236.9 | 0 | 6.7970 |
| 236.9 | 0.4019 | 5.4722 | 236.9 | 0.4574 | 6.2501 | | | |
| 236.9 | 0.4256 | 5.5345 | 236.9 | 0.4351 | 6.3124 | | | |

15

貨櫃船KCS（縮小 λ 倍的船模）位於station 7.50之船型表

| x | y | z | x | y | z | x | y | z |
|------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|
| 7.50 | 0 | 0.1569 | 7.50 | 0.0141 | 0.1771 | 7.50 | 0.0129 | 0.2017 |
| 7.50 | 0.0016 | 0.1582 | 7.50 | 0.0147 | 0.1792 | 7.50 | 0.0119 | 0.2035 |
| 7.50 | 0.0032 | 0.1596 | 7.50 | 0.0151 | 0.1812 | 7.50 | 0.0108 | 0.2053 |
| 7.50 | 0.0047 | 0.1610 | 7.50 | 0.0155 | 0.1833 | 7.50 | 0.0095 | 0.2070 |
| 7.50 | 0.0062 | 0.1625 | 7.50 | 0.0157 | 0.1854 | 7.50 | 0.0081 | 0.2085 |
| 7.50 | 0.0075 | 0.1641 | 7.50 | 0.0158 | 0.1875 | 7.50 | 0.0066 | 0.2100 |
| 7.50 | 0.0087 | 0.1658 | 7.50 | 0.0158 | 0.1895 | 7.50 | 0.0050 | 0.2114 |
| 7.50 | 0.0099 | 0.1675 | 7.50 | 0.0157 | 0.1916 | 7.50 | 0.0034 | 0.2127 |
| 7.50 | 0.0109 | 0.1694 | 7.50 | 0.0154 | 0.1937 | 7.50 | 0.0017 | 0.2139 |
| 7.50 | 0.0119 | 0.1712 | 7.50 | 0.0150 | 0.1958 | 7.50 | 0 | 0.2151 |
| 7.50 | 0.0127 | 0.1732 | 7.50 | 0.0145 | 0.1978 | | | |
| 7.50 | 0.0135 | 0.1751 | 7.50 | 0.0138 | 0.1998 | | | |

16

船模建製

根據船型表，匯入Rhino marine三維CAD軟體來繪製船模取靜水面與船舫剖面的交線和艏垂線的交點為原點($x=y=z=0$)，船艏橫剖面線station(-006)到船艉橫剖面線station(236.9)，總共繪製57個橫剖面線，如圖5所示。將繪製的完成的船模，如圖6。利用CAD軟體將船模轉成FLOW-3D所支援檔案型態，STL (stereo lithography) 格式，最後匯入FLOW-3D前處理器建立網格進行模擬。

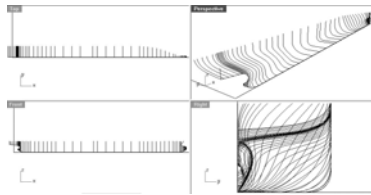


圖5 船模橫剖面線



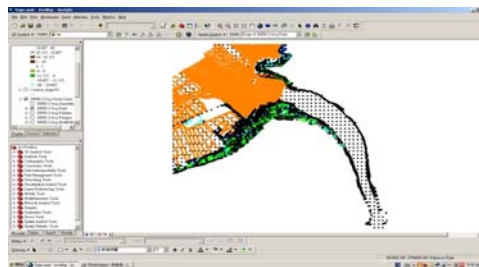
圖6 KCS船模船體模型

17

水深高程地形建製

- 利用GIS轉出數據化的地形

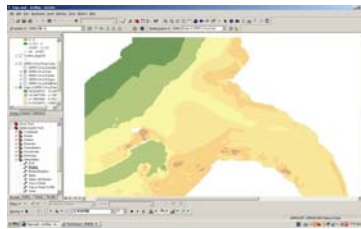
台北港地形的製作方法與步驟，首先利用台中港灣技術研究中心的水深地形資料，將水深測量資料與圖檔，匯入地理資訊系統 (Geographic Information System)，方便製作高程水深模型檔。利用一等水深裡面的1/20000的dwg資料檔案匯入GIS裡面後，為了要製作3D模型，所以將後面的比例網格關掉避免在製作等高線時，系統後面的網格也算進去，如圖所示。



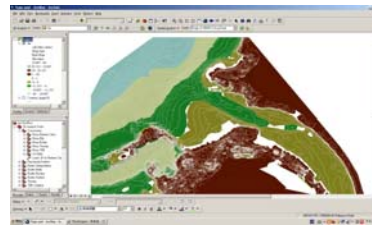
18

水深高程地形建製

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會依數據產生高度色塊分佈圖層。套用上面的高度色塊分佈圖利用指令介面，轉換成等高線如左圖所示。在GIS裡面經由等高線圖層做最後一次高度轉換之後會完成一個高度色差圖層，最後再利用GIS裡面的指令給予高度勾選讓圖裡面的高度數據開啟之後，如右圖顯示出該地方的深度與高度，完成後將上面的檔案轉存成WRL檔，檔案匯入Maya與3D MAX進行港口建製。



高度色塊圖層



等高線轉換成的高度色差圖

19

水深高程地形建製

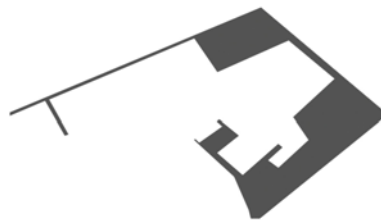
● 利用3D軟體製作受測模型

使用工程用的向量式港口碼頭建製圖形與高度，經過掃描如左圖，另外使用測量說明該份文件中測量範圍的圖片，進入繪圖軟體做重疊並且跟其他相關的dwg檔做比對，之後將完成的圖檔匯入3D製圖軟體，進行點對點的描繪，以確保港口碼頭輪廓不會有位移、變形等偏差，在經由3D軟體的指令將線稿實體化之後會如右圖所示。



(資料來源：宇泰工程顧問有限公司)

向量工程圖



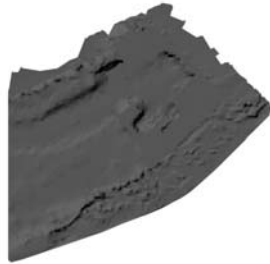
實體化台北港模型

20

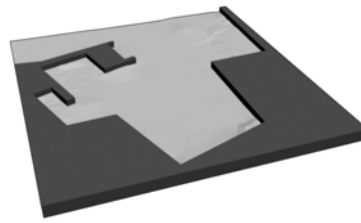
水深高程地形建製

• 水深高程地形與港灣之合成

將GIS轉出的WRL檔匯入3D製圖軟體，製作成立體水深高程模型線稿，並且實體化，再將水深高程模型與港口碼頭模型的中心點對位，使高度與港口的方位完整重疊，並且些許切割進行受測區域的縮小，製作出圖形如左圖。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，如右圖所示。



重疊台北港水深高程模型



台北港水深高程模型受測區域

21

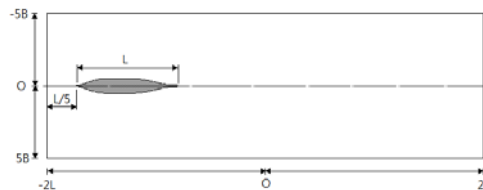
模擬案例

模擬案例分為規則港區之模擬與台北港區之模擬，其目的為比較兩者間的差異性及對船舶進出台北港引發的興波效應、岸壁效應、船舶對遇等更進一步的探討，下列將介紹規則港區之模擬案例：

• 規則港區模擬（縮小比例31.5994倍）

單一船舶航行於規則港區

單一船舶之計算區域長為 $4L$ 、寬為 $10B$ ， L 為船長（ $7.2786m$ ）、 B 為船寬（ $1.0190m$ ）、吃水 $0.3418m$ ，船舶置於進口處的 $L/5$ ，如圖所示，模擬船速分別為 $V_1 = 0.275 \text{ m/s}$ 及 $V_2 = 0.55 \text{ m/s}$ 。



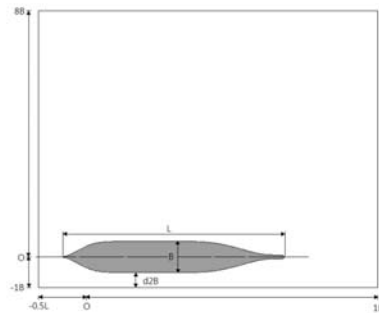
22

模擬案例

- 規則港區模擬（縮小比例31.5994倍）

船舶航行於規則港區之岸壁效應

船舶航行於規則港區岸壁效應之計算區域長為 $1.5L$ 、寬為 $9B$ ， L 為船長（ $7.2786m$ ）、 B 為船寬（ $1.0190m$ ）、吃水 $0.3418m$ ，如圖所示。模擬船速分別為 $V_1=0.275\text{ m/s}$ 及 $V_2=0.55\text{ m/s}$ ，船與岸壁距離分別為 $0.5B$ 、 $1B$ 、 $1.5B$ 、 $2B$ 。



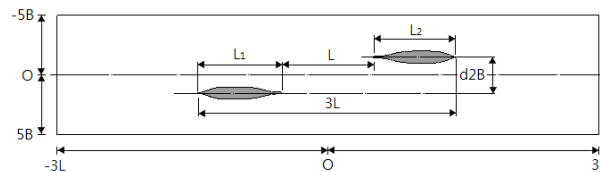
23

模擬案例

- 規則港區模擬（縮小比例31.5994倍）

船舶對遇航行於規則港區

船舶對遇之計算區域長為 $6L$ 、寬為 $10B$ ， L 為船長（ $7.2786m$ ）、 B 為船寬（ $1.0190m$ ）、吃水 $0.3418m$ ，船舶一（ L_1 ）與船舶二（ L_2 ）船頭距離為一個船長（ L ）、船尾距離為三個船長（ $3L$ ）；而船壁距離分別為 $0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $1B$ 、 $2B$ ，如圖所示，模擬船速分別為 $V_1=0.275\text{ m/s}$ 對 $V_2=0.55\text{ m/s}$ 與 $V_1=0.275\text{ m/s}$ 對 $V_2=0.275\text{ m/s}$ 兩組船速。



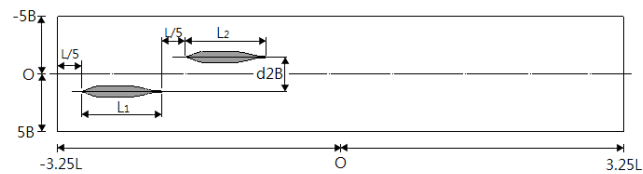
24

模擬案例

- 規則港區模擬（縮小比例31.5994倍）

船舶追越航行於規則港區

船舶對遇之計算區域長為 $6.5L$ 、寬為 $10B$ ， L 為船長（ $7.2786m$ ）、 B 為船寬（ $1.0190m$ ）、吃水 $0.3418m$ ，船舶置於進口處的 $L/5$ 。船舶一（ L_1 ）與船舶二（ L_2 ）船頭與船尾距離為 $L/5$ ，而船壁距離分別為 $0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $1B$ 、 $2B$ ，如圖3.25所示，模擬船速分別為 $V_1=0.55m/s$ 對 $V_2=0.18m/s$ 。



25

- 台北港港內模擬（依照原型比例尺1：1建製）

台北港港內模擬案例分為單一船舶以不同船速及航向，航行於台北港內之興波效應，依不同船岸距離之模擬船舶航行於台北港之岸壁效應及兩艘船舶以不同船壁距離之對遇情況。港內航道水深設定為平均 $18m$ ，船舶吃水為 $10.8m$ ，液面的水位設為 $0m$ 。設定控制點觀察船舶航行於港內之興波變化，在內港中擷取了八個觀測點，如圖所示。



26

• 台北港模擬案例表

| 案例 | 船舶航行情況 | 參數 | 航行時間 |
|--------|----------------|--|------|
| Case1 | 單一船舶進港 | 船速 3節 ($V_1=3$ Knots) | 500秒 |
| Case2 | 單一船舶進港 | 船速 6節 ($V_2=6$ Knots) | 300秒 |
| Case3 | 單一船舶進港，偏航10度航行 | 船速 3節 ($V_1=3$ Knots) | 500秒 |
| Case4 | 單一船舶進港，偏航10度航行 | 船速 6節 ($V_2=6$ Knots) | 300秒 |
| Case5 | 單一船舶出港 | 船速 3節 ($V_1=3$ Knots) | 500秒 |
| Case6 | 單一船舶出港 | 船速 6節 ($V_2=6$ Knots) | 500秒 |
| Case7 | 岸壁效應分析 | 船速 3節 ($V_1=3$ Knots) 船岸距離 ($d2b=0.5B$) | 200秒 |
| Case8 | 岸壁效應分析 | 船速 3節 ($V_1=3$ Knots) 船岸距離 ($d2b=1B$) | 200秒 |
| Case9 | 岸壁效應分析 | 船速 3節 ($V_1=3$ Knots) 船岸距離 ($d2b=2B$) | 200秒 |
| Case10 | 岸壁效應分析 | 船速 6節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=0.5B$) | 200秒 |
| Case11 | 岸壁效應分析 | 船速 6節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=1B$) | 200秒 |
| Case12 | 岸壁效應分析 | 船速 6節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=2B$) | 200秒 |
| Case13 | 船舶對遇 | 船速 3節 ($V_1=3$ Knots) 船速 6節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=0.25B$) | 200秒 |
| Case14 | 船舶對遇 | 船速 3節 ($V_1=3$ Knots) 船速 6節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=0.5B$) | 200秒 |
| Case15 | 船舶對遇 | 船速 3節 ($V_1=3$ Knots) 船速 6節 ($V_2=6$ Knots) 船岸距離 ($d2b=1B$) | 200秒 |

27

邊界條件

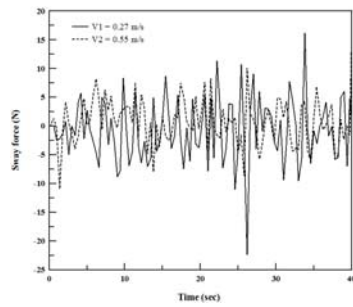
台北港港內的地形，因三面為閉口端，設定閉口端固體邊界為無滑動條件，入口處為出流邊界條件，另外底床也須滿足無滑動邊界條件。船舶則依給定的航速作設定，一般而言，船體運動設定為6個自由度的耦合運動，若欲設定船舶沿固定航線行駛，則船舶平擺與側移須設為零。

28

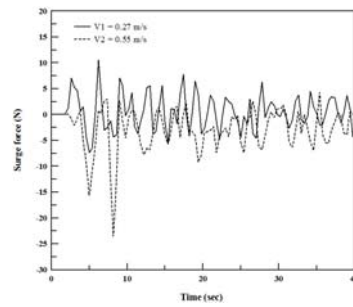
結果與討論

- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

船舶於限制性水域的航行



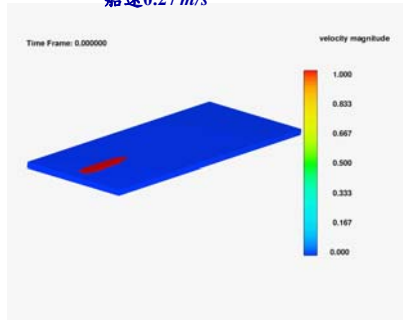
船舶航行於狹窄水道船速0.27 m/s與0.55 m/s之橫移力比較圖



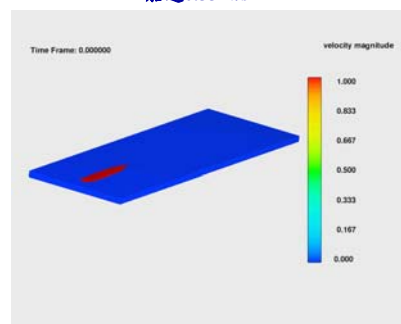
船舶航行於狹窄水道船速0.27 m/s與0.55 m/s之阻力比較圖

29

船速0.27 m/s



船速0.55 m/s



船舶航行於狹窄水道船速0.27 m/s與0.55 m/s之興波圖

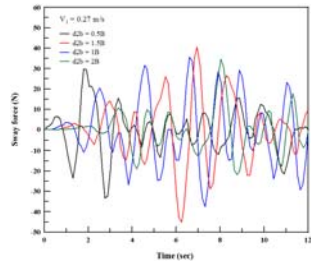
30

結果與討論

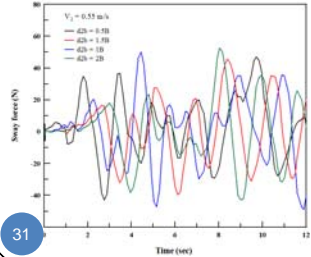
- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

船舶於限制性水域航行的岸壁效應

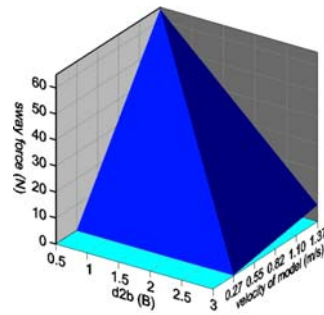
不同岸壁距離、船速0.27 m/s之橫移力比較圖



不同岸壁距離、船速0.55 m/s之橫移力比較圖



31

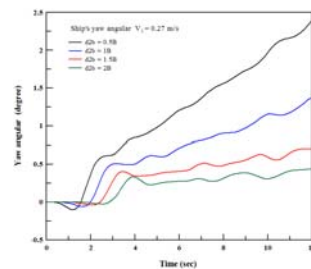


結果與討論

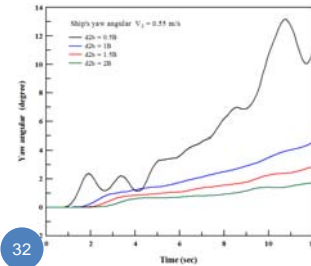
- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

船舶於限制性水域航行的岸壁效應

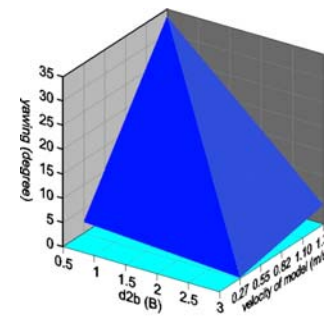
不同岸壁距離、船速0.27 m/s之偏航角比較圖



不同岸壁距離、船速0.55 m/s之偏航角比較圖



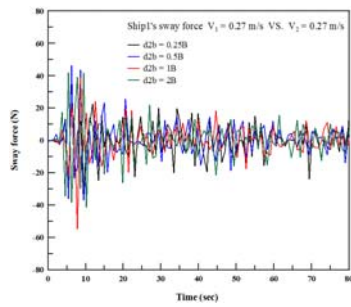
32



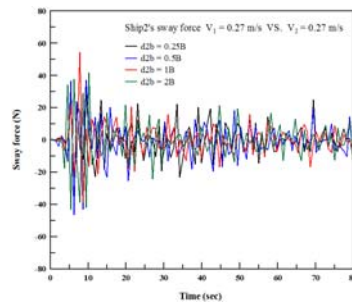
- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

結果與討論

兩船於限制性水域航行的對遇



兩船之不同船距、船舶1之橫移力比較圖
(船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s)



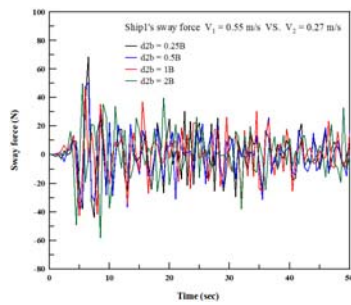
兩船之不同船距、船舶2之橫移力比較圖
(船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s)

33

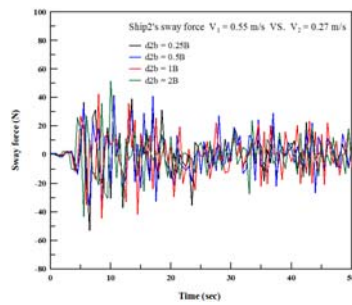
- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

結果與討論

兩船於限制性水域航行的對遇



兩船之不同船距、船舶1之橫移力比較圖
(船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s)



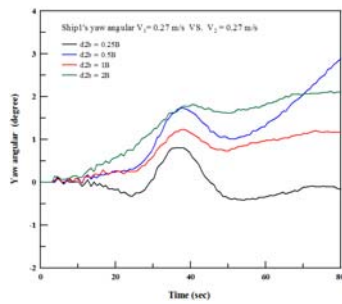
兩船之不同船距、船舶2之橫移力比較圖
(船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s)

34

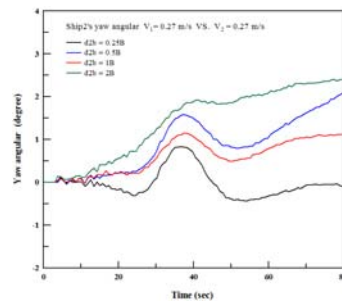
- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

結果與討論

兩船於限制性水域航行的對遇



兩船之不同船距、船舶1之偏航角比較圖
(船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s)



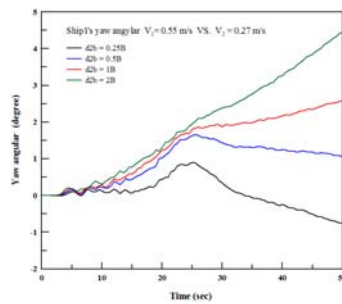
兩船之不同船距、船舶2之偏航角比較圖
(船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s)

35

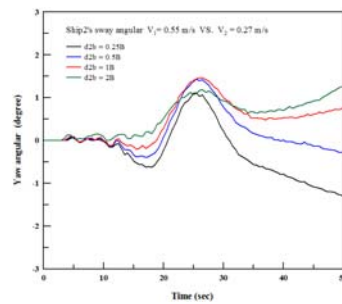
- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

結果與討論

兩船於限制性水域航行的對遇



兩船之不同船距、船舶1之偏航角比較圖
(船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s)

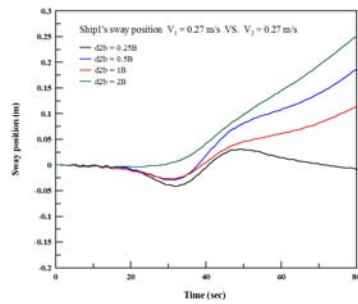


兩船之不同船距、船舶2之偏航角比較圖
(船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s)

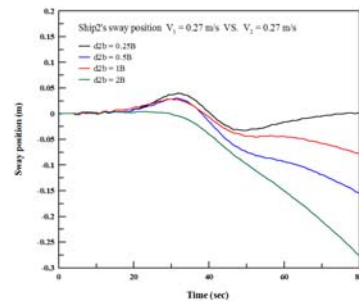
36

- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

兩船於限制性水域航行的對遇



兩船之不同船距、船舶1之質心偏移量比較圖
(船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s)

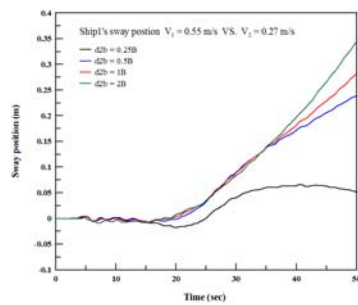


兩船之不同船距、船舶2之質心偏移量比較圖
(船速 0.27 m/s VS. 0.27 m/s)

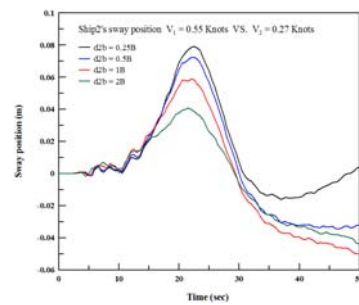
37

- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

兩船於限制性水域航行的對遇



兩船之不同船距、船舶1之質心偏移量比較圖
(船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s)

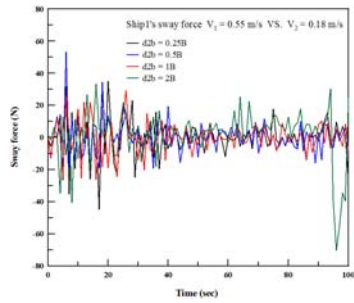


兩船之不同船距、船舶2之質心偏移量比較圖
(船速 0.55 m/s VS. 0.27 m/s)

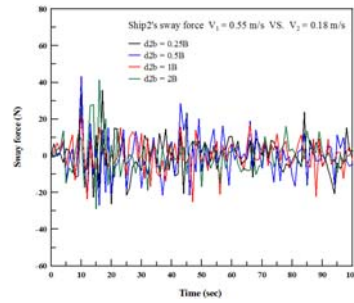
38

- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

兩船於限制性水域航行的追越



兩船之不同船距、船舶1之橫移力比較圖
(船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s)

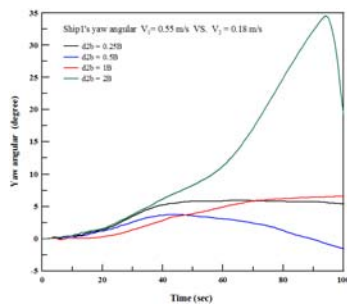


兩船之不同船距、船舶2之橫移力比較圖
(船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s)

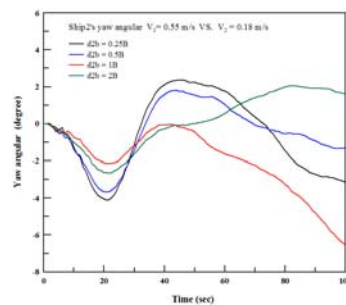
39

- 船舶航行於限制性水域之模擬與分析

兩船於限制性水域航行的追越



兩船之不同船距、船舶1之偏航角比較圖
(船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s)

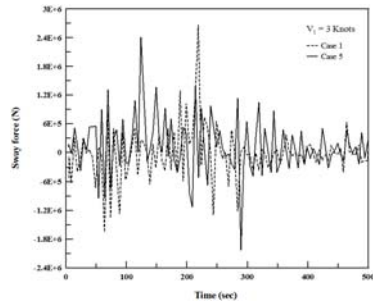


兩船之不同船距、船舶2之偏航角比較圖
(船速 0.55 m/s VS. 0.18 m/s)

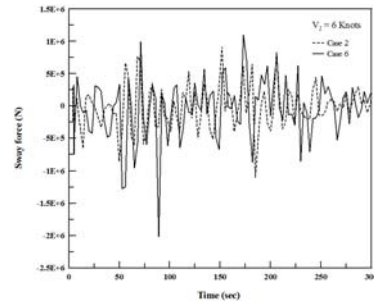
40

船舶航行於台北港之模擬與分析

船舶於台北港航行



船舶航行於台北港船速3節之橫移力比較圖
(Case1 VS. Case5, 進出港)

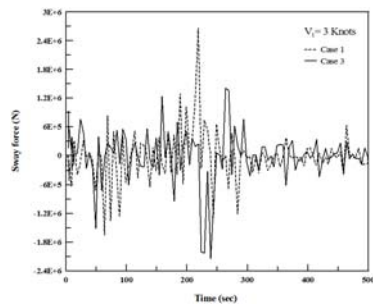


船舶航行於台北港船速6節之橫移力比較圖
(Case2 VS. Case6, 進出港)

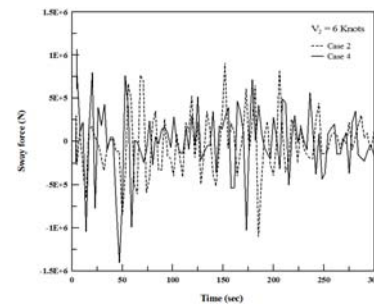
41

船舶航行於台北港之模擬與分析

船舶於台北港航行

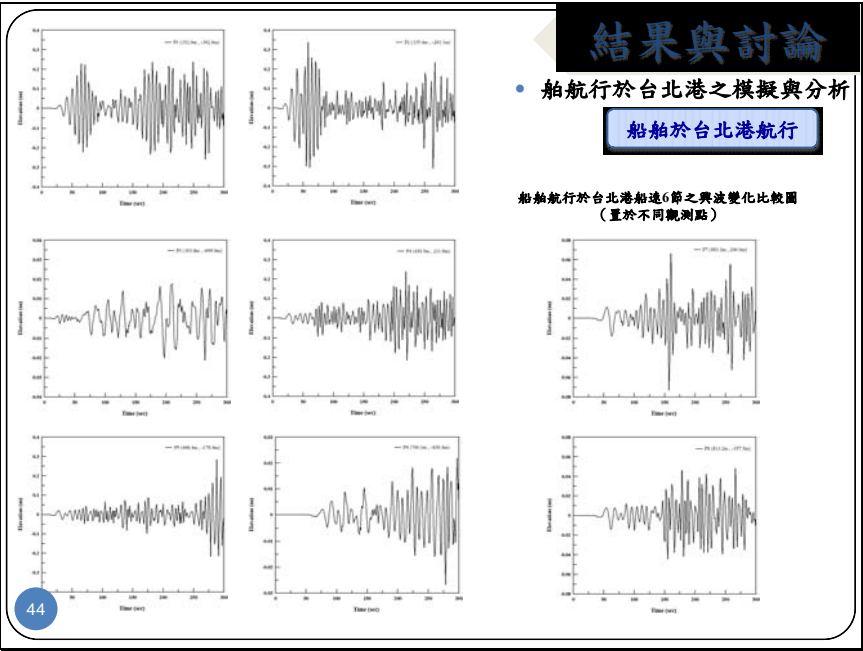
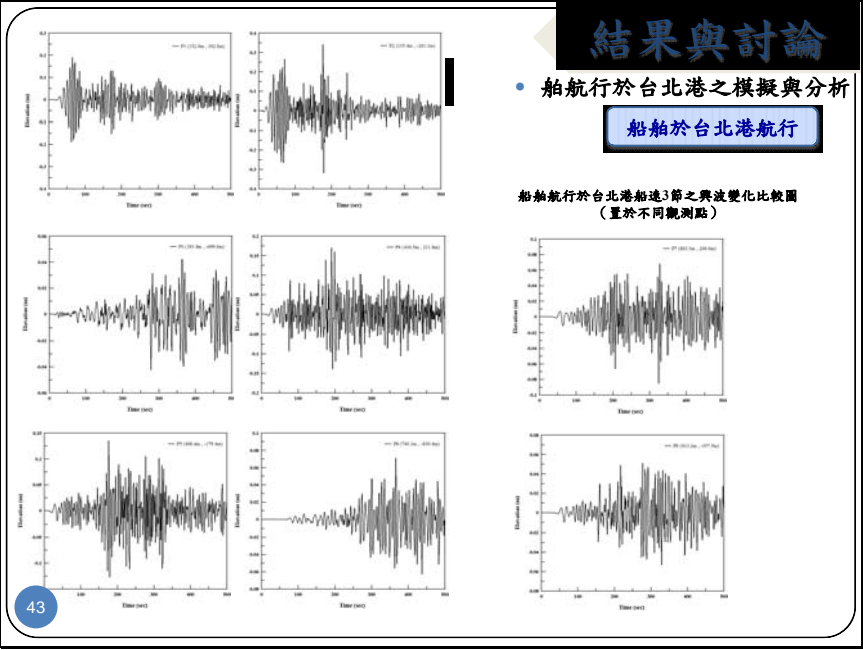


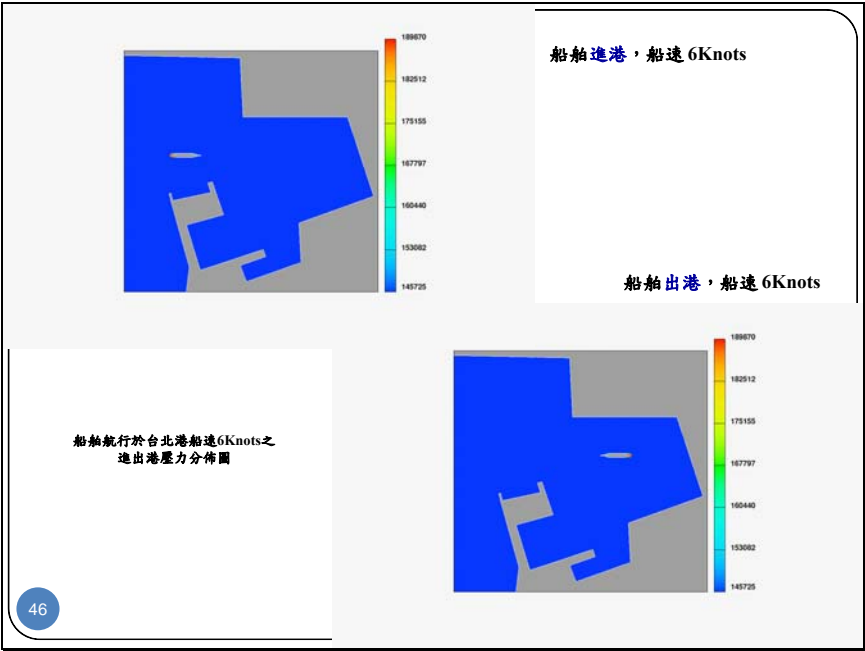
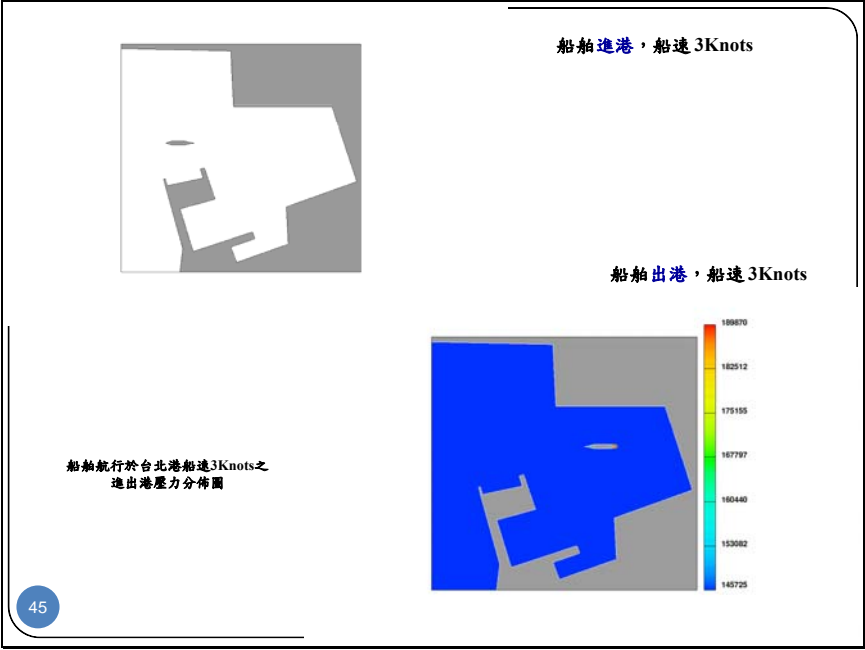
船舶航行於台北港船速3節之橫移力比較圖
(Case1 VS. Case3, 不同角度)

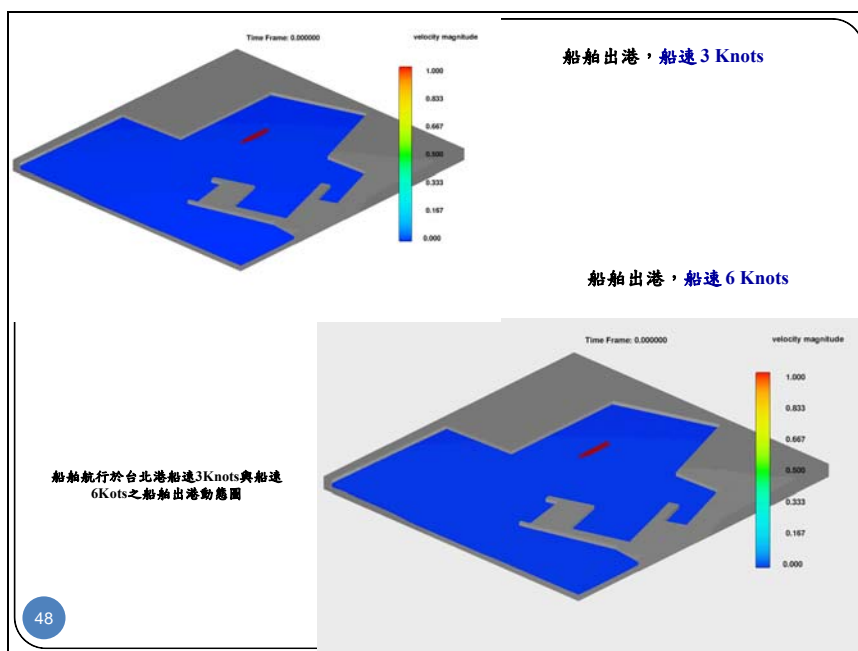
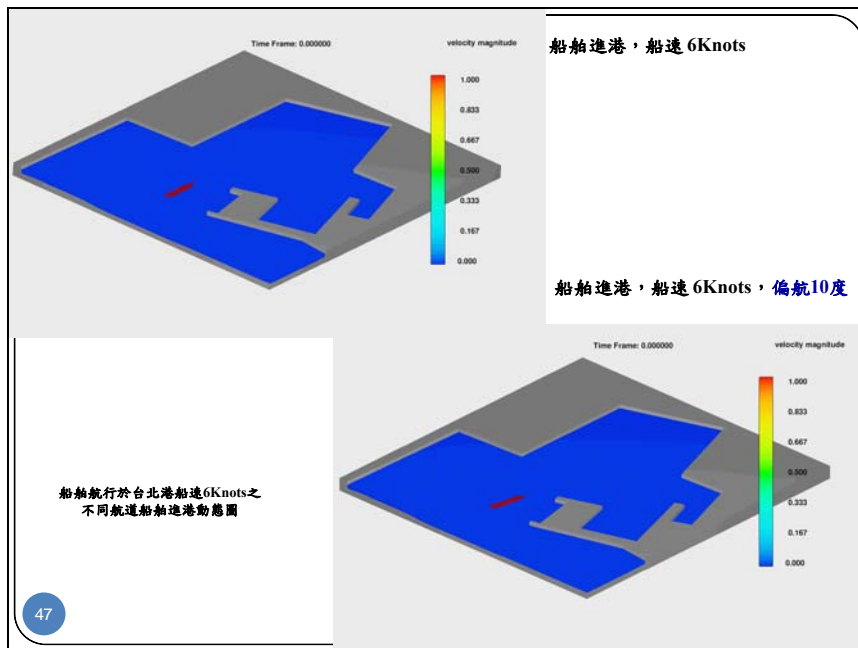


船舶航行於台北港船速6節之橫移力比較圖
(Case2 VS. Case4, 不同角度)

42



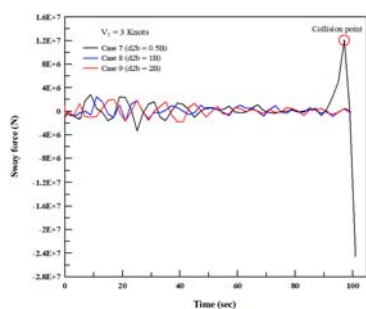




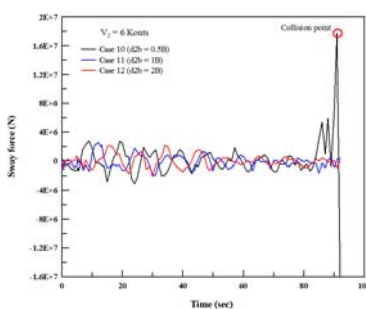
- 船舶航行於台北港之模擬與分析

結果與討論

船舶於台北港航行的岸壁效應



船舶航行於台北港船速3節之橫移力比較圖



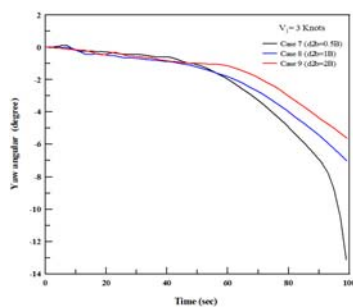
船舶航行於台北港船速6節之橫移力比較圖

49

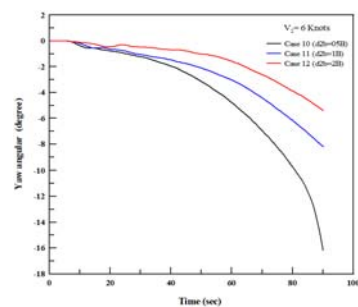
- 船舶航行於台北港之模擬與分析

結果與討論

船舶於台北港航行的岸壁效應

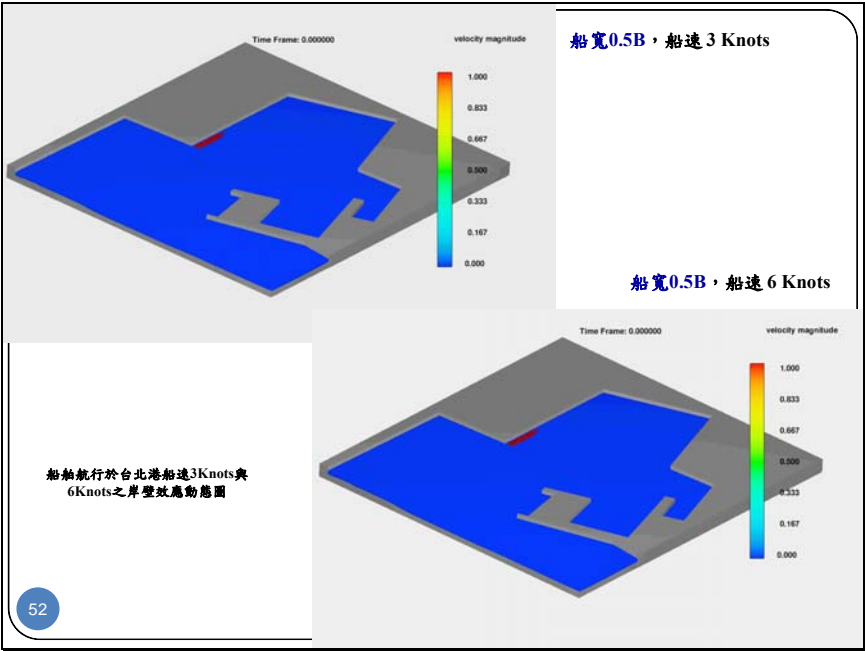
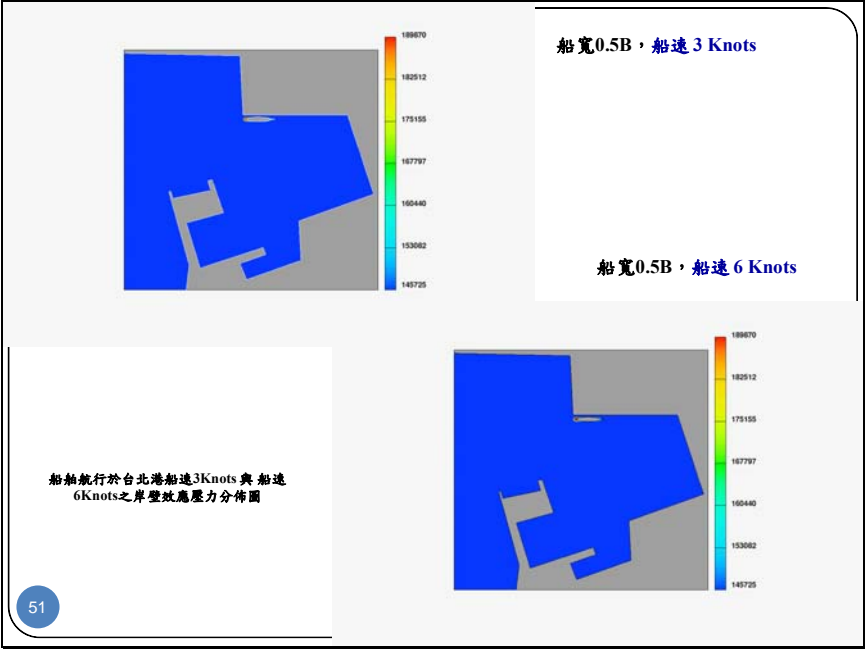


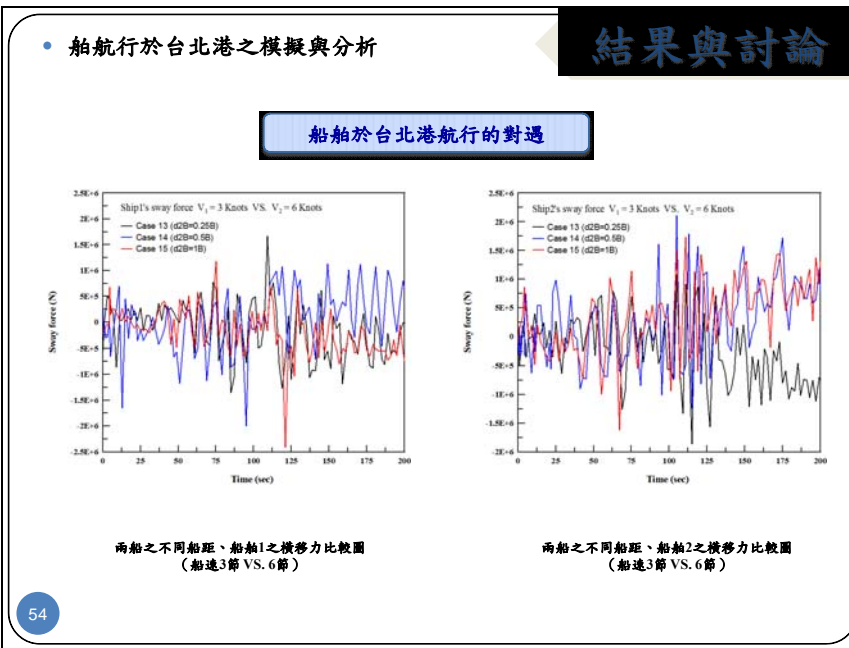
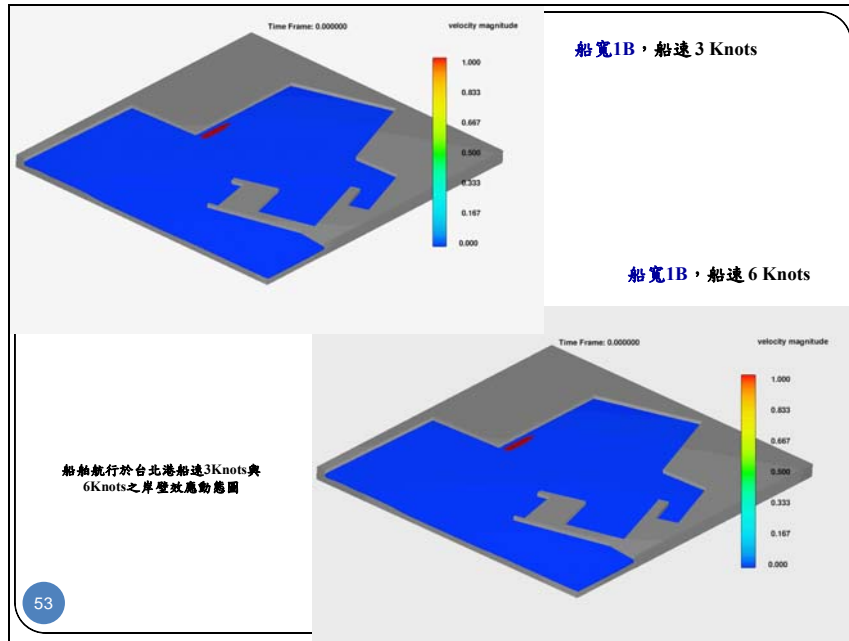
船舶航行於台北港船速3節之偏航角比較圖



船舶航行於台北港船速6節之偏航角比較圖

50

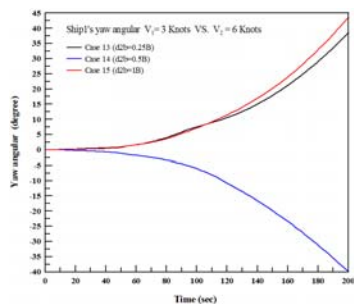




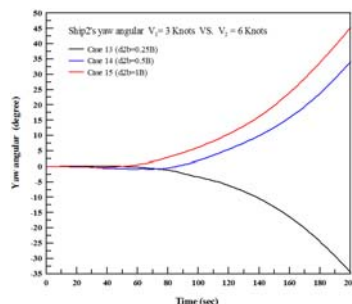
- 船舶航行於台北港之模擬與分析

結果與討論

船舶於台北港航行的對遇



兩船之不同船距、船舶1之偏航角比較圖
(船速3節 VS. 6節)



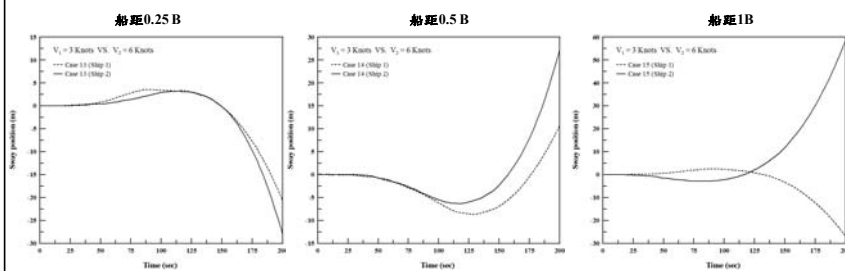
兩船之不同船距、船舶2之偏航角比較圖
(船速3節 VS. 6節)

55

- 船舶航行於台北港之模擬與分析

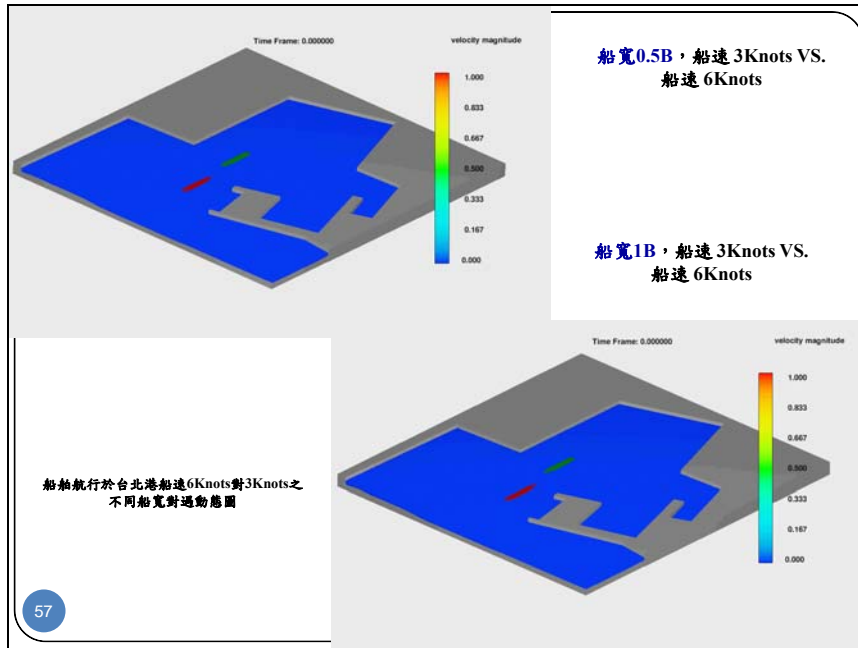
結果與討論

船舶於台北港航行的對遇



兩船之不同船距船舶1與船舶2之質心偏移量比較圖 (船速3節 VS. 6節)

56



結論與建議

本文應用3D實體建模來建製船模與港灣地形，並使用計算流力的方法模擬單一船舶航行於限制性水域與台北港內，並分析所引發的興波效應、船舶沿著岸壁航行產生的岸壁效應、兩船對遇與追越的相互作用。由模擬顯示：

- **建製實體模型**

使用電腦輔助設計（CAD）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。

未來可使用相同原理，擴展至其他相關問題之研究，如海流、波浪對船舶航行安全性的影響；另外也可考量不同船舶噸位、水深地形對船模進出港的影響，藉以評估船舶進出港合宜的噸位。

• 船舶的興波效應

- ✓ 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。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。
- ✓ 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，故在港內船速宜慢速行駛，尤其是大型船舶應格外小心。

59

• 船舶的岸壁效應

- ✓ 船舶於航行中產生岸壁效應的因素包含了船型、吃水、龍骨下餘隙水深（under keel clearance ,UKC）、俯仰（trim）、傾斜（list）、航速、水深、航道幾何、船岸距離（distance to bank , d2b）及風壓等，本文僅對航速與船岸距離進行探討。
- ✓ 模擬船舶航行於規則的限制性水域或於台北港航行，皆有明顯的岸吸與岸推作用造成了岸壁效應。
- ✓ 距岸壁越近、偏離航道中心越遠，岸壁效應越激烈。水道寬度越窄，岸壁效應越激烈。航速越高，岸壁效應越激烈。
- ✓ 由於本文使用固定的水深進行模擬，事實上，淺水效應也會增加岸壁效應的強度。

60

- **兩船間交互作用**

- ✓ 在限制水域中，兩船間相遇及追越過程，由於水壓的關係及高低壓區的相互干擾或相互吸引造成擠離或互吸現象。
- ✓ 兩船相互平行航行時，因兩船舶四周水壓分布改變而形成相互作用，亦即船舶航行所形成之興波互相作用於對方而形成之作用力，會對它船造成影響，它船也會對本船作用，兩船舶會隨著交互作用左右搖擺。
- ✓ 兩船反向對遇時，雖然彼此間受相互作用之期間較短，但由於相對速度增加仍會造成強烈的吸引力（或排斥力）及偏向力矩。
- ✓ 船舶同向追越通過時，因船舶間相對速度較小，致使互相通過之時間較反向對遇通過所需之時間為長，於是船舶彼此間受相互作用影響之期間亦加長，船舶間發生碰撞之機率也提高。

61

- **建議**

良好的港灣工程設計，可減低船舶進出港產生的興波，以確保船舶航行安全，未來的計畫可探討中、大型貨櫃船進泊所引發的興波機制，提出改善建議方案，評估改善方案之效果，俾提供台北港港灣設計以及工程單位之參酌。

- ✓ 數值模擬中型、大型、超大型船舶在固定船速下，航行於台北港所引發的興波效應，探討其發生的機制，比較分析結果。
- ✓ 模擬不同船舶在不同船速下，比較分析航行於台北港所引發的興波效應。
- ✓ 擬船舶在高、中、低潮位下，航行於台北港引發波動效應是否會造成港內劇烈波動，並評估船舶自身的航行安全，探討相關機制。
- ✓ 探討不同潮位下，估算船舶允許進泊的噸位。模擬在不同海流狀況下，船舶航行於台北港的安全評估，並探討興波效應之影響。
- ✓ 評估中型、大型、超大型船舶在不同海流條件下，航行於台北港的安全評估，並探討興波效應之影響。

62

- ✓ 評估中型、大型、超大型船舶在不同波浪條件作用下，航行於台北港的安全評估，並探討興波效應之影響。評估船舶進港所引發興波效應，提出建議的防治方案。
- ✓ 提出減少興波效應的對策，可使未來港灣營運不受影響，能提高船舶航行安全，增加港口航運運載量，並確保港灣及船舶航行安全。

63

Thank you for your patience

64

附錄二

期末審查意見及辦理情形說明表

交通部運輸研究所合作研究計畫

□期中■期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：船舶進出臺北港引發的興波作用之研究

執行單位：國立高雄海洋科技大學

| 參與審查人員 及其所提之意見 | 合作研究單位 處理情形 | 本所計畫承辦單位 審查意見 |
|--|---|------------------|
| 陳陽益委員 | | |
| 一、建議以最簡單的情況（如無邊界、深海 $c/\sqrt{gh}=\infty$ 情況）來檢測本模式之正確性（如與船跡波之理論與試驗印証一下）。 | 一、感謝委員之指導，未來研究會加入無邊界、深海 $c/\sqrt{gh}=\infty$ 情況等檢測本模式之正確性。 | 符合規定 |
| 二、再進一步檢測淺水情況即 $c/\sqrt{gh} \rightarrow$ 小的情況。 | 二、感謝委員之指導，未來研究會加入檢測淺水情況即 $c/\sqrt{gh} \rightarrow$ 小的情況。 | 符合規定 |
| 三、再用線性反射方式加上反射波情況。 | 三、感謝委員之指導，未來研究會加入線性反射方式加上反射波情況，更進一步做探討。 | 符合規定 |
| 四、繪出等波高線或等位相線的波形（即水位）線系統。 | 四、感謝委員之指導，未來研究會加入等波高線或等位相線的波形（即水位）線系統之繪製。 在未來研究上會參考相關文獻加以試驗比 | 符合規定 |

| | | |
|--|--|--|
| | <p>對，例如：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.Froude, W (1877) , Experiments Upon the Effect Produced on the Wave-Making Resistance of Ships by Length of Parallel Middle Body, Trans. Inst. Naval Architects, 18, pp. 77–87. 2.Thomson, W. (Lord Kelvin) (1976) , On Ship Waves, Trans. Inst. Mech. Eng.,8, pp. 409–433. 3.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, 81, pp. 398–430. 4.Tarmo-Soomere (2007) , Nonlinear Components of Ship Wake Waves, Applied Mechanics Reviews: Transactions of the ASME, Vol.60, pp. | |
|--|--|--|

| | | |
|--|---|---|
| <p>五、至於模式中是有 singular point 亦請討論一下。</p> | <p>120-138.</p> <p>五、感謝委員指教，本模式無分析 singular point。</p> | <p>符合規定</p> |
| <p>蔡清標委員</p> | | |
| <p>一、本研究以 Flow-3D，研究臺北港船舶航行所引發的興波效應，包含船模速度、船岸距離及航行時間等參數，研究結果豐富。</p> <p>二、模擬條件，如水深（平均潮位或高潮位），建議有說明。</p> <p>三、Flow3D 之模擬中，相關參數及網格設定，應有所說明。</p> <p>四、岸壁邊界條件，實際為消波邊界，建議未來研究可予參考。</p> <p>五、臺北港過去應有操船模擬之數據，未來如果能引用驗證模擬結果，將更佳。</p> <p>六、§2.2.1 中，各方程式所用符號並未儘定義，請補充。</p> | <p>一、感謝委員的肯定。</p> <p>二、感謝委員指教，已於第三章 3.4.2 節補充說明。</p> <p>三、感謝委員指教已於第三章 3.5 節補充說明。</p> <p>四、感謝委員建議，未來研究會加入消波邊界進行探討。</p> <p>五、感謝委員建議，未來研究會蒐集更充足的資料進行驗證比對。</p> <p>六、感謝委員指正，已於第二章 2.2.1 節補充修正。</p> | <p>符合規定</p> <p>符合規定</p> <p>符合規定</p> <p>符合規定</p> <p>符合規定</p> <p>符合規定</p> |

| | | |
|--|--|------|
| 翁文凱委員 | | |
| 一、內容豐富，計算例考慮周詳，短時間有此結果，顯示本研究團隊相當用心。 | 一、感謝委員的肯定。 | 符合規定 |
| 二、研究單位（英文）寫錯，應更正。 | 二、感謝委員指正，已於英文摘要表作修正。 | 符合規定 |
| 三、船舶運動主程式為何？文中並無說明，在船舶具前進速度下，surging 運動不知如何定義。 | 三、感謝委員指教，船舶給定前進速度，其運動以六個自由度來呈現並配合解 Navier-Stokes 方程式，即可算出每個時刻流場的速度場與壓力場以及船舶受到各方向的作用力，船舶受力後會依據六個自由度的定義運動，詳細船舶運動主方程式已於第二章 2.2.3 節補充說明。 | 符合規定 |
| 四、2.3 節中驗證模式 2.3.1 節與 2.3.2 阻力計算驗證結果如何，並未說明，尤其阻力計算驗證，僅有計算結果，但未有其他文獻比較，應再進一步說明。 | 四、感謝委員指正，2.3 節中驗證模式已於第二章 2.3.1 節與 2.3.2 節作修正，加入計算值與實驗值之結果補充說明。 | 符合規定 |
| 五、船舶於狹長水道中 | 五、感謝委員的建議，對於未來進一步 | 符合規定 |

| | | |
|--|--|-------------|
| <p>航行或水道中兩船相遇而過的研究，以往即有相關研究，可再進一步搜尋相關文獻，而比較與驗證結果與差異，建議可搜尋（日本及關西道船協會論文集）相關研究，使本研究更具嚴謹性。</p> | <p>船舶於狹長水道中航行或水道中兩船相遇而過的研究會以委員提供文獻作相關研究。</p> | |
| <p>六、船模建構中，三個相似定律所引用之相似定律並無法一致，如慣性力以 Fr Number，而阻力、黏性力等以 Re Number 為主，如何同時應用 Fr.及 Re.於同一模型中？</p> | <p>六、感謝委員指教，即 $(Fr)_M = (Fr)_S$ 以及 $(Re)_M = (Re)_S$ 無法同時滿足，在船模試驗當中，特徵雷諾數一般是在 $10^6 \sim 10^7$，而對實船而言，特徵雷諾數一般是在 $10^8 \sim 10^9$，這樣的高雷諾數，其黏性力相對於慣性力小很多，當實船與船模之福祿數及雷諾數無法分別對應相等時，可以把黏性力省略簡化，而保持福祿數相等，為較易達到的條件，即船模以較實船為小的速度來進行試驗，應較合理且可相對地減小試</p> | <p>符合規定</p> |

| | | |
|---|--|------|
| 七、擬案例之邊界條件應說明清楚，是否考慮輻射波？規則波？兩端之邊界條件為何？ | 驗設備。 七、感謝委員指教，模擬案例並無考慮輻射波與規則波，各案例之邊界條件於第三章 3.5 節作補充說明。 | 符合規定 |
| 八、圖 4.3、4.4 壓力之單位為何？應標示清楚。此壓力是否是由於興波所引起？圖 4.11、4.12 所得結果，船舶偏離岸壁距離應是無考慮螺槳推力效應之結果，建議文中增加說明限制條件。 | 八、感謝委員指教，圖 4.3、圖 4.4 壓力之單位為 Pa，於定稿作補充修正。此壓力是船舶航行於臺北港所形成的壓力變化。對於船舶偏離岸壁距離並無考慮螺槳推力效應，於第四章 4.2 節作補充說明。 | 符合規定 |
| 張憲國委員 | | |
| 一、研究結果相當充實，值得肯定。 | 一、感謝委員的肯定。 | 符合規定 |
| 二、未來研究目標建議針對實務管理上所需要的船舶航行規範標準，及船行興波定量分析。 | 二、感謝委員建議，未來會加入定量分析，以達到實務管理上所需要的船舶航行規範標準。 | 符合規定 |
| 何良勝委員 | | |
| 一、建議修正第二、第 | 一、感謝委員建議，已 | 符合規定 |

| | | |
|---|---|---|
| <p>三章之章名及 1.4 節之節名稱，另並請將文內有關”台”字修正為”臺”字。</p> <p>二、整體性而言，已完成計畫之預定工作項目，惟為符合實際可應用情況，建議後續宜參考實際情況（如波浪條件、潮位、水深或者大型船隻等），以及港內碼頭區之消能、反射情況，以獲得較定量可信之結果。</p> <p>三、部分模擬條件、參數設定等宜補充說明。</p> | <p>將第二、三章之章名及 1.4 節之節名作修正與文內有關”台”字修正為”臺”字。</p> <p>二、感謝委員建議對，未來會參考實際情況，以及港內碼頭區之消能、反射情況等，作更深入的探討。</p> <p>三、感謝委員指教，模擬條件於第三章 3.4.2 節與 3.5 節作補充說明。</p> | <p>符合規定</p> <p>符合規定</p> |
| <p>蔡立宏委員</p> | | |
| <p>一、建議第一章中增加研究工作項目。</p> <p>二、第五章許多計算 Case 間比較，建議文中增加 Case 間主要比較的條件差異。</p> <p>三、參考文獻需與文章提及文獻一致。</p> <p>四、圖 5.1 中船在進、</p> | <p>一、感謝委員指教，工作項目已於第一章 1.5 節作補充說明。</p> <p>二、感謝委員指教，Case 間主要比較的條件差異於第五章作補充說明。</p> <p>三、感謝委員指正，已於文內作修正。</p> <p>四、感謝委員指教，圖</p> | <p>符合規定</p> <p>符合規定</p> <p>符合規定</p> <p>符合規定</p> |

| | | |
|---|---|-------------|
| <p>出港之橫移力比較中，產生極值的原因。與船舶行駛所在位置是否有關？</p> <p>五、本研究在有限經費、時間下完成，內容充實、報告編撰精緻，值得肯定。</p> | <p>5.1 中船在進、出港之橫移力比較中，產生極值的原因是受臺北港地形，船舶航行的航線也會影響。</p> <p>五、感謝委員的肯定。</p> | <p>符合規定</p> |
|---|---|-------------|