

臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討 I

李政達 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
林受勳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

摘要

本研究依據臺灣港務股份有限公司委託台灣世曦工程顧問股份有限公司「臺中港 40 年期主計畫」長程外廓堤增建設施規劃，以及蒐集臺中港地形水深資料，研究臺中港長程配置方案完成後，推估 2 年後之港區變化、港灣安全與水域穩定性之影響。配合臺中港長程配置方案進行水工模型試驗與利用數值模式加以評估水工模型試驗之結果，掌握臺中港長程外廓堤增建設施完成後與鄰近港區之地形變化特性，探討港區未來保護與維護之建議，並初步探討波浪數值水槽之可行性。

一、前言

隨著中彰地區離岸風電場開發，基地母港臺中港船舶運量、港區水陸運輸、海上運補，以及碼頭靠泊需求與日俱增；根據臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司(以下簡稱臺中港務分公司)近 8 年船舶進出統計資料分析，港區進出口船舶運量已由 103 年 1,250 艘次之月平均運量增加至 109 年 1,541 艘次，如圖 1 所示，港內船舶增加，考量海事工程易受自然天候因素影響，僅能在特定的風速與波浪條件下作業，故港池若遭受長波影響，經常發生港內震盪現象，造成港域不靜穩，而有船隻與人員作業時，發生危險之風險。

因此，對於港灣及海岸工程之相關研究中，如何預測波浪行為與模擬港灣之水動力變化極為重要，一般而言，波浪與結構物相互作用之研究，最常以波浪水槽試驗來進行模擬，但建置與準備試驗必須耗費相當人力與物力與成本，經過長時間的發展，物理試驗的研究與技術已臻至成熟，隨著異常天候的情況持續發生，導致保護標準提高，原港灣 50 年迴歸週期之設計標準已無法滿足需求，如需要於試驗室建立大型造波水槽模擬實際波浪，試驗室水槽長度將達數百公尺，相關配套設置要求較高，且不易維護和保養，耗資巨大；反觀近幾年來隨著計算機運算能力提高，數值水槽過去困難之運算問題，已長足進步。基此，如何利用數值水槽模擬水工模型試驗之各種情況，協助物理水槽克服前所遭遇之困難，本研究將進行初步探討。

臺中港務分公司近8年進出船舶統計資料分析

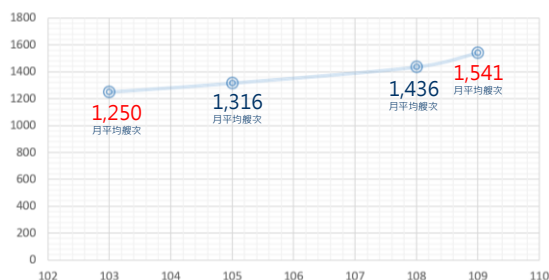


圖 1 臺中港船舶運量分析圖

二、水工模型試驗與規劃

本研究沿襲交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)於

2019-2020 年執行臺中港漂沙試驗模擬近程外廓堤增建設施完成後，推估 5 年之侵淤情況比較及影響結果，依相同試驗模擬條件賡續進行長程外廓堤增建設施完成後，推估 2 年之侵淤情況比較及影響結果。

2.1 模型配置與試驗條件

本試驗位於港研中心之平面水槽，其全長為 56.5m、寬 53m、高 1.13m，試驗廠棚內共安裝 2 組往復式平推造波機 (piston type)，每塊造波板寬度皆為 6m，每組系統由 4 片造波板組成。本研究試驗條件水平比尺選用 1/300 比例，垂直比尺選用 1/75 比例，波高比尺選用 1/25.74 比例，週期比尺選用 5.07 比例，其中冬季波浪週期 1.48sec 與波高 8.35cm，夏季波浪週期 1.28sec 與波高 3.38cm，颱風波浪週期 1.68sec 與波高 16.28cm 等條件，試驗相關條件與比尺，如表 1 所示。

表 1 試驗條件與比尺

物理量比尺		類別	現場	試驗
水平	1/300			
垂直	1/75	潮位	季風 +4.61 ~ +0.89 m	+6.15 ~ +1.19 cm
		颱風	+6.00 ~ +2.76 m	+8.00 ~ +3.68 cm
波高	1/25.74	冬季波浪	2.15 m	8.35 cm
		夏季波浪	0.87 m	3.38 cm
		颱風波浪	4.19 m	16.28 cm
週期	1/5.07	冬季波浪	7.5 sec	1.48 sec
		夏季波浪	6.5 sec	1.28 sec
		颱風波浪	8.5 sec	1.68 sec
潮汐	1/34.6	半日潮	12 hr	20.8 min

2.2 預備試驗

本研究預備試驗係依據港研中心往昔從事漂沙試驗之經驗與離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討(2/4)研究成果，波浪條件採用臺中港 99 年 11、12 月份，100 年 1、2、3 月份之冬季季風波浪，以及臺中港 100 年 5 月 27 日桑達颱風之颱風波浪資料，並利用 99 年 12 月~100 年 5 月與 99 年 11 月~100 年 8 月現場水深地形資料製作水工模型；此外，夏季季風以臺中港 107 年 5 月~107 年 11 月之現場地形資料，搭配臺中港夏季季

風波浪條件進行試驗，以尋求模型與現場地形變化之冬季季風、颱風與夏季季風重現時間，決定漂沙變化之時間比尺，提供做為後續規劃港型試驗時間之依據，試驗結果以冬季季風波浪作用 8 小時(採大潮平均高潮位做為季節波浪試驗水深 41.36cm，冬季季風波浪造波方向為 NNE 方向)，再以夏季季風波浪 3 小時(夏季季風波浪造波方向為 W 方向)、颱風波浪 30 分鐘(颱風波浪使用 50 年迴歸期暴潮水位做為颱風波浪試驗水深 42.59cm，颱風波浪造波方向為 NNE 方向)、夏季季風 3 小時之波浪作用情況，可重現現場 1 年時間之地形變化，試驗流程如圖 2 所示。

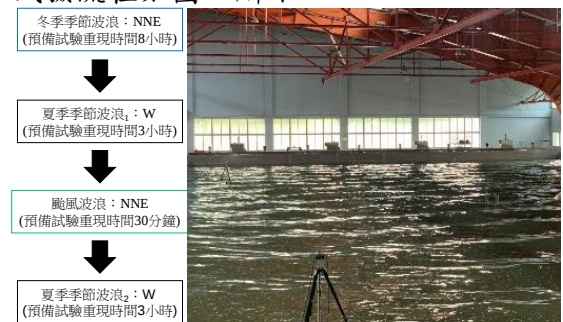


圖 2 試驗流程圖

三、數值水槽初步探討

由於波浪運動具有不規則性和非線性特徵，受到實際地形紛紜變化影響，數值方法要精確模擬波浪折射、繞射、反射、淺水變形等綜合影響難度很大，故前人提出多種關於波浪傳播之研究與計算方法，如射線理論、波能平衡方程式和波作用量守恒方程式、波浪繞射方程式 (Helmholtz 方程)、緩坡方程式 (Helmholtz 方程型、拋物線型、雙曲線型、RCPWAVE 型)，布斯尼斯克方程式 (Boussinesq 方程式) 以及勢流理論。

對多數流體而言，由於黏性不大，可以採用勢流理論來描述。只有在速度梯度很大的區域，黏性應力才有明顯的影響。勢流理論是類比波浪傳播運動的

重要手段之一。基於勢流理論的波浪模式數值實現，主要依靠邊界元法數值求解邊界積分方程式。一些學者如 Ohyama 和 Nadaoka(1991, 1992, 1994)、Driscoll 等人(1992)，採用這種方法進行了波浪對建築物作用方面研究工作。勢流理論本身忽略結構物附近的黏性，因此，當黏性較大而不能忽略時，它就無法模擬準確。由於勢流運動是無旋的前提下，故於波浪破碎之前，可以用勢流理論描述波浪運動。但是當波浪破碎或作用於結構物上產生紊動、渦(eddy)及渦的分離和輸移部分時，勢流理論將無法準確模擬。

早期波浪數值模擬是基於水深平均方程式，如淺水方程式和 Boussinesq 方程式等。在這些方程式中引入由於波浪破碎而引起的能量耗散項。在水深平均方程式中，由於維數減少了一維，計算效率較高，並且這種方法可以模擬波浪傳遞與溯升等問題，目前仍是一個很熱門的研究領域。儘管水深平均方程式具有簡單的優點，但也有很多侷限性，這種方法不能準確預測複雜自由液面位置；而且也不能提供紊流相關訊息。遇到波浪破碎等非線性複雜問題時，無法準確模擬。

3.1 解析 Navier-Stokes 方程式

如果想要擴展模式的模擬對象至任意波浪或複雜的底床地形，以及反應真實流場紊流情況時，須利用完整流場的方程式求解，較能趨近真實流況，因此需求解 Navier-Stokes(簡稱：NS)方程式，目前海岸和海洋工程採用 NS 方程式，做為基本控制方程式的波浪模式大致分三類：(1)直接模擬，直接求解 NS 方程式；(2)大渦模擬；(3)平均運算模式，對 NS 進行平均運算，然後實行模式化，此模式又可分為雷諾應力模式(Reynolds Stress Model，簡稱 RSM)與渦動滯度概念模式。為探討數值水槽之可

行性，數值方式該如何解析 Navier-Stokes 方程式，詳述如下。

3.1.1 直接模擬(Direct Numerical Simulation, DNS)

直接求解 NS 方程式而不包含紊流模式(Miyata,1986)或在時間和空間上包含紊動黏性。該模式不考慮或部分考慮紊流影響，通常只求解波浪的平均運動。由於電腦計算速度和容量問題的影響，目前還很難達到採用 DNS 去計算波浪紊流運動尺度。Miyata(1986)和 Hino 等人(1983)應用東京大學改良 MAC 方法的 TUMMAC(Tokyo University Modified Marker And Cell)自由液面法，計算微小振幅波在坡度 1/5 斜坡上的波動和孤立波在 1/20 斜坡上的傳播與破碎過程，得到了碎波的速度分佈。Wang 和 Su(1993)計算沿斜坡之波浪碎波流場。因此，直接求解方法可利用 3 組動量方程式與 1 組連續方程式求解未知數，普遍用於一次性求解渦流與紊流情況。

3.1.2 大渦模擬 (Large Eddy Simulation, LES)

求解雷諾平均 NS 方程式(Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, 又稱 RANS) (Lemos 1992, Lin and Liu 1998 a,b, Bradford 2000)。考慮波浪紊動特性，對 NS 方程式進行時間平均後，產生雷諾應力項，再採用紊流模式求解封閉方程式。這類方程式也是從平均的角度求解各物理量，但在求解的過程中，考慮了紊流特徵對平均流場的影響。Lemos(1992)第一個應用模式並配合流體體積法(Volume of fluid method, 又稱 VOF)去求解斜坡上碎波流場。Bradford (2000)利用重整群組(RNG)模式和 VOF 方法去計算斜坡上碎波流場。Lin 和 Liu (1998a) 求解雷諾平均 NS 方程式，並結合 $k-\varepsilon$ 紊流模式計算碎波帶之碎波，Lin

和 Liu(1998b)則進一步描述碎波帶的溢波(spilling)和捲波(plunging)之狀態。Hsu 等人(2004)利用求解 RANS 數值方法，使用 HF (Height Function)自由液面配合 $k-\varepsilon$ 亂流模式，探討波浪通過不透水雙列潛堤之渦流特性。

3.1.3 平均運算模式

解析空間濾波的 NS 方程式 (Zhao and Tanimoto 1998, Wijayaratna and Okayasu 2000, Christensen and Deigaard 2001)，即大渦模擬。該類模式將紊流分為不同尺度，對大渦大尺度量採用數值求解，對小渦小尺度量(網格約 10cm 以下無法分析)以模式化，因此，引入亞網格(Subgrid)進行處理。由於波浪碎波具有紊流特性，碎波與建築物作用時，水流結構相當複雜。其求解的困難主要在於，碎波紊流的非線性特徵難以數值模擬，以及碎波紊流脈動的頻率譜域極寬，數值模擬技術難以模擬出連續變化的各級紊流運動。Watanabe 和 Saeki (1999) 則求解大渦模擬，配合 VOF 自由液面技巧，計算捲波的碎波過程，Zhao 等人(2004)使用 Multi-scale 紊流模式搭配 VOF 來求解碎波問題，或者利用解析 NS 方程式、渦流粘滯係數(Turbulencemodel)與風剪力、底床摩擦剪力與科氏力搭配，以求解複雜流體問題。

四、臺中港遠程外廓堤水工模型試驗

本研究水工試驗主要量測儀器為波高計，共選用 16 只波高計進行實驗，波高計配置情形，如圖 3 所示，圖中符號○之 1-16 為日本製 KENEK 容量式波高計擺設位置，量取試驗波高、符號▲為挪威製 NORTEK 超音波式剖面流速儀(ADCP)擺設位置，量取防波堤間航道剖

面流速、符號◎A-D 為英國製 HR 波高計擺設位置，量取試驗波高。

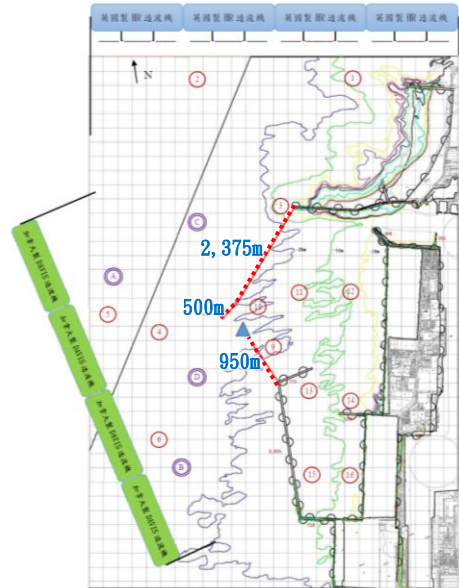


圖 3 臺中港水工模型(含長程外廓堤配置與波高計配置情況)漂沙試驗示意圖

冬季季風北防波堤模型造波初期入射條件週期 1.48sec，波高 8.35cm，產生大量越波現象，波高計 CH3 量測得 $T_{1/3}$ 為 1.47sec， $H_{1/3}$ 為 5.41cm，如圖 4 所示，且冬季季風試驗波浪試驗初期 LNG 港池內有長週期震盪，於放置消波塊(如圖 4 紅圈位置)後，較不穩靜現象獲得改善並趨於穩定。



圖 4 冬季季風北防波堤試驗情形

冬季季風外廓防波堤模型延伸布置入射條件週期 1.48sec，波高 8.35cm，最後

500m 防波堤堤頭處，於試驗中明顯越堤，堤頭產生紊亂現象，波高計 CH8 量測得 $T_{1/3}$ 為 1.47sec， $H_{1/3}$ 為 6.71cm；冬季季風造波試驗時，外商港區(迴船池)波浪明顯產生紊亂現象，LNG 港池內則為較平靜穩定，波高計 CH9~CH12 量測得 $T_{1/3}$ 為 0.74~1.45sec， $H_{1/3}$ 為 1.44~2.17cm，如圖 5 所示。

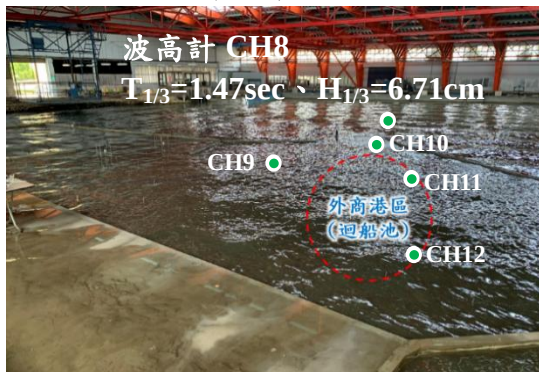


圖 5 冬季季風外商港區試驗情形

夏季季風波浪造波試驗時，入射條件週期 1.28sec，波高 3.38cm，外商港區(迴船池)除 CH12 量測得 $T_{1/3}$ 為 1.25~1.28sec， $H_{1/3}$ 為 3.02~3.46cm 偏高外，波高計 CH9~CH11 量測得 $T_{1/3}$ 為 1.25~1.28sec， $H_{1/3}$ 為 1.19~1.47cm 波浪呈現變小趨勢；LNG 港池波浪部分，波高計 CH15 量測得 $T_{1/3}$ 為 1.26~1.28sec， $H_{1/3}$ 為 0.79~1.12cm，整體普遍呈現水面平穩現象，如圖 6 所示。



圖 6 夏季季風外商港區與 LNG 港池試驗情形

颱風期間波浪試驗之入射條件週期 1.68sec，波高 16.28cm，當時除 LNG 港池波浪(波高計 CH15 量測得 $T_{1/3}$ 為 0.8sec， $H_{1/3}$ 為 3.16cm) 稍小以外，港區內外皆呈現不靜穩情況，其中港外波浪波高計 CH1~CH8 量測得 $T_{1/3}$ 為 1.66~1.67sec， $H_{1/3}$ 為 11.82~14.48cm，外商港區(迴船池) 波高計 CH9~CH12 量測得 $T_{1/3}$ 為 0.8~1.63sec， $H_{1/3}$ 為 6.35~8.82cm，顯示長程外廓堤配置確實能減少港內不靜穩之情況，如圖 7 所示。

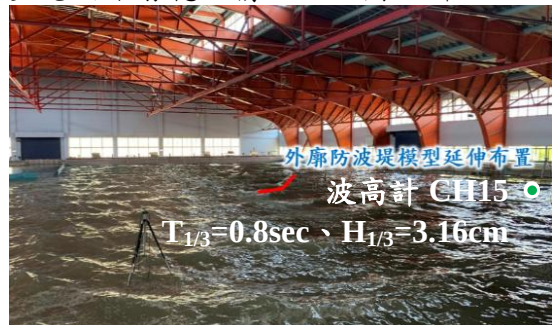


圖 7 夏季季風臺中港區試驗情形

臺中港外廓堤延伸模型試驗第 2 年後，於長程外廓防波堤增建設施內側產生 4 處沉箱趾部地形刷深與淘空現象；因此，有關防波堤基礎之穩固與傾斜程度，須加強監測與維護，確保結構物安全，如圖 8 所示。

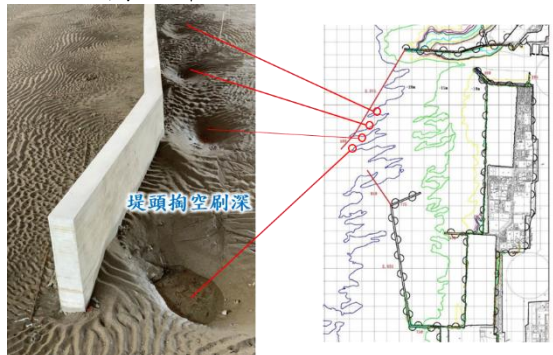


圖 8 臺中港外廓防波堤內側刷深淘空

五、數值模式驗證分析

為進一步驗證長程外廓防波堤增建設施內側產生 4 處沉箱趾部地形刷深與

淘空現象，以及初步探討波浪數值水槽之可行性，本研究採丹麥水力研究所 (Danish Hydraulic Institute, 簡稱 DHI) 發展之二維數值模式 MIKE21 HD(Hydro-dynamic Module)模型，用以模擬近海及海岸地區潮流生成對結構物間之交互作用，以評估分析底床摩擦之剪應力行為。

5.1 起始條件與邊界條件

本研究地形條件延續採用臺中港務分公司 109 年全域水深測量成果，做為模式三角網格之水深地形，並以臺灣港務股份有限公司 108 年委託台灣世曦工程顧問股份有限公司辦理「臺中港 40 年期主計畫」技術服務報告之長程外廓堤增建設施，做為港區結構物之邊界與各轉折之節點條件、非結構性三角網格(結構物趾部與轉折處網格已加密處理)、設置數值各項基本參數、初始條件、粗糙度與運行條件等，MIKE21 HD 建模情形，如圖 9 所示，模式建置與臺中港配置合成圖，如圖 10 所示。

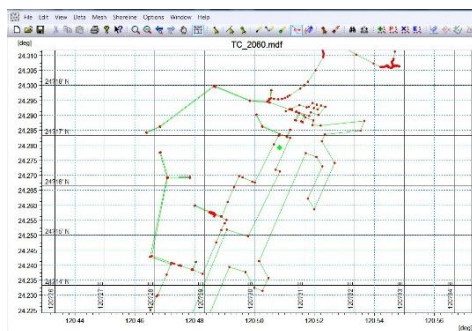


圖 9 MIKE21 HD 建模情形



圖 10 模式建置與臺中港配置合成圖

本研究數值水理條件採用 2018 年 1 月 1 日 00:00:00~2018 年 1 月 15 日 DHI 全球潮位預報模式逐時潮位預報資料，作為潮流模式之設定，該模式設定三邊界潮時資料(分別為：南側、北側與西側潮時邊界)，如圖 11 所示。

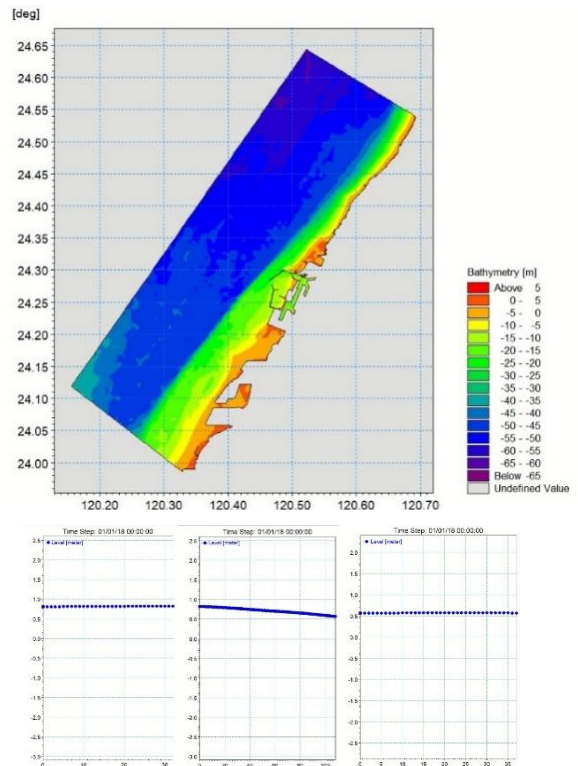


圖 11 模式採用逐時潮位預報資料

本研究後續數值摩擦剪應力分析，利用模式運算得出之流速，再透過流速與剪應力的關係，推導出摩擦剪應力分佈之結果，由於格點資料甚多，為簡要解釋流體之水動力行為，僅就剪應力最大發生處進行討論。

5.2 摩擦剪應力分析結果

模擬研究結果顯示，當潮流經過港灣結構物時，結構物周邊發生流速加快的現象，比如模式初期於 2018 年 1 月 4 日 05:00 有最大剪應力發生，該地點位於長程外廓防波堤北方外側(東經 120.463 度、北緯 24.285 度)，剪應力值為

1.30Nt/m^2 ，此時港外潮流影響尚未傳遞至港內，因此港內摩擦剪應力尚未有明顯增加情形，如圖 12 所示。

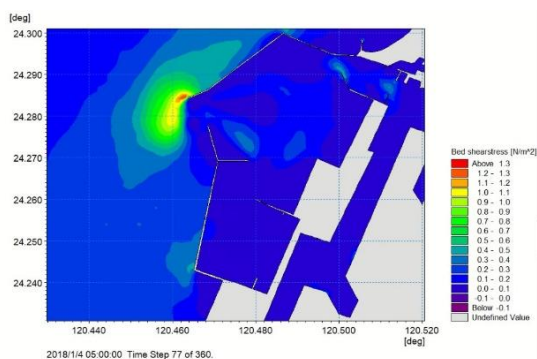


圖 12 長程外廓防波堤北方外側 2018 年 1 月 4 日 05:00 發生最大剪應力情形

模式次日(即模擬之 24 時以後)於 2018 年 1 月 5 日 05:00，潮流持續影響長程外廓防波堤北方外側，並且於堤外(東經 120.463 度、北緯 24.285 度)處發生最大剪應力，此時剪應力提高至 1.60Nt/m^2 ，此時港外潮流已逐漸影響港內，因此，剪應力由防波堤頭擴散至港內以及原臺中港進出口，如圖 13 所示。

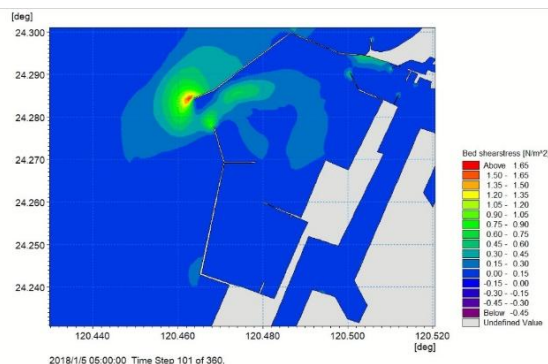


圖 13 長程外廓防波堤北方外側 2018 年 1 月 5 日 05:00 發生最大剪應力情形

數值模式緊接於 6 小時後(即模擬之 30 時以後)，時刻於 2018 年 1 月 5 日 11:00，潮流持續影響長程外廓防波堤北方外側，並且於堤頭內側(東經 120.464 度、北緯 24.284 度)處發生最大剪應力，

此時剪應力減少至 1.09Nt/m^2 ，如圖 14 所示。

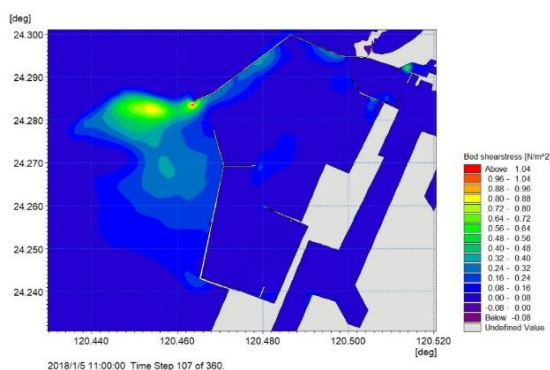


圖 14 長程外廓防波堤外側 2018 年 1 月 5 日 11:00 發生最大剪應力情形

隨後模式再於模擬之 6 小時後(即數值模擬之 36 時以後)，時刻於 2018 年 1 月 5 日 17:00，最大剪應力已由長程外廓防波堤外側逐漸轉向堤防內側(東經 120.471 度、北緯 24.286 度)，但剪應力已逐漸減小至 0.56Nt/m^2 ，如圖 15 所示。

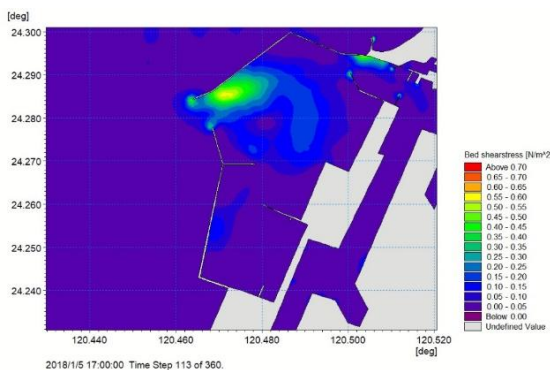


圖 15 長程外廓防波堤內側 2018 年 1 月 5 日 17:00 發生最大剪應力情形

再經歷 12 小時運算後(即數值模擬之 48 時以後)，時刻於 2018 年 1 月 6 日 05:00，於長程外廓防波堤趾(東經 120.463 度，北緯 24.284 度)處持續產生剪應力集中現象，該剪應力提高為 1.54Nt/m^2 ；此外，外商港區迴船池內與原臺中港進出口南堤頭(東經 120.500 度、北緯 24.290 度)處發生最大剪應力 2.34Nt/m^2 ，原臺中港進出口北堤頭(東經

120.510 度、北緯 24.291 度)處發生次要剪應力 2.31Nt/m^2 ，如圖 16 所示。

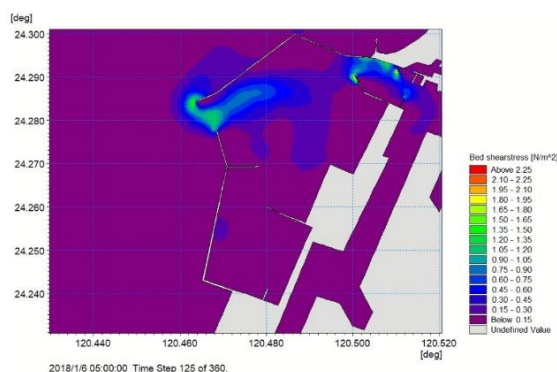


圖 16 長程外廓防波堤內外側 2018 年 1 月 6 日 05:00 發生最大剪應力情形

六、結論與建議

本研究以臺中港長程配置方案進行水工模型試驗，並利用二維數值模式進行水工模型試驗結果驗證；另外，本研究進行三維波浪數值水槽文獻回顧，以及初步探討建立三維波浪數值水槽之可行性，相關結論與建議分述如下：

6.1 結論

經由本研究遠程外廓堤延伸水工模型試驗定性初步結果，顯示長程外廓堤配置確實能阻擋長波進入港池，解決港池不靜穩之情況，因此能增加 LNG 港池之安定性。

此外，本研究水工模型試驗之外廓堤延伸堤內側趾部發生淘刷現象，產生 4 處沖刷坑，此與數值模式潮流影響港灣結構物的剪應力分佈情況之結果比對，模式初期於 2018 年 1 月 4 日 05:00 發生最大剪應力，地點位於長程外廓堤頭北方外側，此時港內剪應力尚未有明顯增加；經歷 24 小時之後，剪應力經由港外逐漸向港內擴散；經歷 30 小時之後，剪應力沿著長程外廓堤內側方向傳遞增加；經歷 36 小時，長程外廓堤內側堤頭周邊持續發生影響；經歷 48 小時之

後，於 2018 年 1 月 6 日 5:00 傳遞至原臺中港進出口發生最大剪應力效應。

綜上所述，堤防內側渦流與紊流確實對於結構物周邊產生摩擦剪應力集中之現象，結果顯示剪應力越大越易造成底床顆粒間之滑移，淘刷範圍亦越大；因此，不論水工模型試驗與數值模式研究，兩者比對均有一致性結果。

本研究已初步對三維波浪數值水槽進行相關文獻回顧，現階段雖然尚無法完成三維模式建置與 Navier-Stokes 方程式解析，但以二維數值模式配合水工模型試驗，探討港區之水動力行為原則可行；爰此，本研究成果將可做為本所後續研究之基礎與發展三維波浪數值水槽之應用參考。

6.2 建議

建議臺中港務分公司港區日後營運管理，於外廓堤建置之後，需增加堤基保護等相關措施，且為減少基礎淘刷導致傾倒可能，需要長期監測沉箱之傾斜度，並於趾部掏刷產生空隙前預為處置，避免港灣結構物受損而發生災害。

參考文獻

1. 臺灣港務股份有限公司，臺中港 40 年期主計畫，2019 年。
2. 鍾英鳳、張欽森、王珮文，「配合國家能源政策於國際商港 LNG 接收站之規劃及建設」，中國工程師學會會刊，第 94 卷第 1 期，2021 年，37-43 頁。
3. Driscoll, A. M., Dalrymple, R. A., and Grill, S. T., "Harmonic generation and transmission past a submerged rectangular obstacle," 23rd Coastal Engineering Congress, ASCE, 1992, pp. 1142-1152.
4. Hsu, T.W., Hsieh, C.M. and Hwung, R., "Using RANS to simulate vortex

- generation and dissipation around submerged breakwaters”, *Coastal Engineering* 51(7), 2004, pp.557-579.
5. Ohyama, T. and Nadaoka, K., “Development of a numerical wave tank for analysis of nonlinear and irregular wave field”, *Fluid Dynamics Research* 8, 1991, pp.231-251.
 6. Ohyama, T. and Nadaoka, K., “Modeling the transformation of nonlinear waves passing over a submerged dike”, *Proceedings of 23th International Coastal Engineering Conference, Venice, ASCE*, 1992, pp.526-539.
 7. Ohyama, T. and Nadaoka, K., “Transformation of a nonlinear waves train passing over a submerged shelf without breaking”, *Coastal Engineering* 24, 1994, pp.1-12.
 8. Peng, Y. F. and Hsieh, C. M., “Study on structured multi-block Cartesian grid method”, *Proceedings of 17th International Offshore and Polar Engineering Conference (EI), Lisbon, Portugal*, 2007, pp.2061-2068.
 9. Rojanakamthorn, S., Isobe, M., and Watanabe, A., “A mathematical model of wave transformation over a submerged breakwater”, *Coastal Engineering in Japan* 32, 1989, pp.209-234.
 10. Rojanakamthorn, S., Isobe, M. and Watanabe, A., “Modeling of wave transformation on submerged breakwater”, *Proc. 22nd Coast., Eng. Conf., ASCE, Delft, Netherlands*, 1990, pp.1060 - 1073.
 11. Stiassnie, M., Naheer, E. and Boguslavsky, I., “Energy losses due to vortex shedding from the lower edge of a vertical plate attacked by surface waves”, *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 396, 1984, pp.131-142.
 12. Tadeipalli, S. and Synolakis, C. E., “The run-up of N waves on sloping beaches”, *Proc. R. Soc. Lond. A* 445, 1994, pp.99-112.
 13. Ting, F. C. K. and Kim, Y. K., “Vortex generation in water waves propagation over a submerged obstacle”, *Coastal Engineering* 24, 1994, pp.23-49.
 14. Ting, F. C. K. and Kirby, J. T., “Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone”, *Coastal Engineering* 24, 1994, pp.51-80.
 15. Ting, F. C. K. and Kirby, J. T., “Dynamics of surf-zone turbulence in a strong plunging breaker”, *Coastal Engineering* 24, 1995, pp.177-204.
 16. Watanabe, Y. and Saeki, H., “Three-dimensional large eddy simulation of breaking wave”, *Coastal Engineering* 41, 1999, pp.281-301.
 17. Wijayarathna, N., and Okayasu, A., “DNS of wave transformation, breaking and run-up on sloping beds”, *Proc. 4th Int. Conf. on Hydrodynamics, Vol. 2, IAHR Yokohama, Japan*, 2000, pp.527-532.
 18. Zhao, Q. and Tanimoto, K., “Numerical simulation of breaking waves by large eddy simulation and VOF method”, *Proc. 26th Int. Conf. on Coastal Eng. ASCE, Copenhagen, Denmark*, 1998, pp.892-905.
 19. Zhao, Q., Armfield, S. and Tanimoto, K., “Numerical simulation of breaking waves by large eddy simulation and VOF method”, *Proc. 26th Int. Conf. on Coastal Eng. ASCE, Copenhagen, Denmark*, 1998, pp.892-905.

- king waves by a multi-scale turbulence model,” *Coastal Engineering* 51, 2004, pp.53-80.
20. Miyata, H., “Finite-difference simulation of breaking waves”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 65, 1986, pp.179-214.
 21. Lemos, C. M., “Wave Breaking over a Submerged Plate-A Numerical Study”, In *Computer Modelling of Seas and Coastal Regions*, 1992, pp.83-95.
 22. Bradford, S.F., “Numerical simulation of surf zone dynamics”, *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, Vol. 126, 2000, pp.1-13.
 23. Lin, P. and Liu P. L. F., “A Numerical Study of Breaking Waves in the Surf Zone”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 359, 1998a, pp.239-264.
 24. Lin, P. and Liu P. L. F., “Turbulence Transport, Vorticity Dynamics Solute Mixing Under Plunging Breaking Waves in Surf Zone”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, 1998b, pp.15677-15694.
 25. Zhao, Q., & Tanimoto, K., “Numerical simulation of breaking waves by large eddy simulation and VOF method”, In *Coastal Engineering 1998*, 1999, pp.892-905.
 26. Christensen, E. D., & Deigaard, R., “Large eddy simulation of breaking waves. *Coastal engineering*”, 42(1), 2000, pp.53-86.