

111-013-7C97

MOTC-IOT-110-H2CA001g

臺中港靜穩度水工試驗暨波 浪數值水槽之初步探討



交通部運輸研究所

中華民國 111 年 3 月

111-013-7C97

MOTC-IOT-110-H2CA001g

臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討

著者：李政達、林受勳、李江澤、陳天時、李俊穎

交通部運輸研究所

中華民國 111 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討
/ 李政達, 林受勳, 李江澤, 陳天時, 李俊穎著.

-- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民
111. 03

面 ; 公分

ISBN 978-986-531-387-6(平裝)

1. CST: 港埠工程 2. CST: 水利工程

443.2

111001266

臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討

著 者：李政達、林受勳、李江澤、陳天時、李俊穎

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：105004 臺北市松山區敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>數位典藏>本所出版品)

電 話：(04)2658-7200

出版年月：中華民國 111 年 3 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 50 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：200 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：1011100182 ISBN：978-986-531-387-6 (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份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-986-531-387-6(平裝)	政府出版品統一編號 1011100182	運輸研究所出版品編號 111-013-7C97	計畫編號 MOTC-IOT-110-H2CA002b
本所主辦單位：港灣技術研究中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：李政達 研究人員：林受勳、李江澤、陳天時、李俊穎 聯絡電話：(04)2658-7127 傳真號碼：(04)2656-0661			研究期間 自110年1月至110年12月
關鍵詞：水工模型試驗、動床、漂沙、臺中港			
摘要： 本計畫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，並配合數值模式加以評估水工模型試驗之結果與鄰近港區之地形變化特性，結果顯示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，符合水工模型試驗之研究成果。 此外，為探討港灣安全與水域穩定性，本計畫依據臺中港近程與長程配置方案，以水工遮蔽試驗探討港區靜穩度，配合數值模式進行特性分析，評估各配置方案對於臺中港近程與長程方案 LNG 港域內靜穩情形。結果顯示遮蔽試驗近程於夏季(W)、冬季(N)與颱風(N)波浪情境臺中港入港港內波高較大，特別是冬季與颱風情境需注意波浪增強；遮蔽試驗長程方案於夏季(W)、冬季(N)與颱風(N)波浪情境，冬季時入港港內波高相比近程方案，減少 60~70%波高，而颱風時入港內波高相比近程方案，則減少 50~60%波高，較近程方案明顯改善，符合船舶碼頭靜穩需求容許波高。 本計畫利用水工模型試驗與數值模式探討臺中港近長程配置方案，完成冬夏季與颱風風浪漂沙與遮蔽研究，評估北外廓防波堤的重要性，相關研究成果提供做為交通部及所屬機關公司可行性規劃及建設方案之參考依據，臺中港建港港型規劃一直以來係本所關注焦點之一，本所以水工試驗與數值模式協助評估，做為臺灣國際商港計畫推動的依據。			
出版日期	頁數	定價	本出版取得方式
111 年 3 月	202	200	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。
備註：1.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: Study on the port changes in the expansion of Taichung Port with hydraulic model test and numerical model			
ISBN(OR ISSN) 978-986-531-387-6(pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011100182	IOT SERIAL NUMBER 111-013-7C97	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-110-H2CA002b
DIVISION:Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Cheng-Da Lee PROJECT STAFF: Shou-Shiun Lin, Chiang-Tse Lee, Tian-Shih Chen, Chun-Ying Lee PHONE:886-4-2658-7127 FAX: 886-4-2656-0661			PROJECT PERIOD FROM January 2021 TO December 2021
KEY WORDS: Hydraulic model test; movable bed; floating sand; Taichung Port			
ABSTRACT : This study, based on the long-term planning on outer bank extension under the “Taichung Port 40-year Master Plan” undertaken by Taiwan CECI commissioned by Taiwan International Ports Corporation, involves the collection of topographic and water depth data of Taichung Port, for investigating the long-term layout schemes of Taichung Port, and, after the completion of said investigation, and an estimation of the changes of the port area 2 years ahead. The work included an assessment of the results of hydraulic model tests and the characteristics of topographic changes in the adjacent port areas using numerical models. The assessment demonstrated the concentration of frictional shear stress on the perimeters of structures from eddy currents and turbulent currents within the dikes, which was consistent with the findings of hydraulic model test. In addition, to explore the safety in the harbor and the stability of the waters, this study explored the stability of the port area by hydraulic shielding tests and based on the short-term and long-term layout schemes of Taichung Port, as well as assessed the stability in the LNG harbor area under the short- and long-term schemes of the Port. The results showed higher waves in the inbound port of Taichung Port in the short-term shielding test in the contexts of summer (W), winter (N) and typhoon (N) waves, especially in winter and typhoon contexts where wave enhancement should be heeded. When the long-term scheme was put to shielding test for contexts of summer (W), winter (N) and typhoon (N) waves, the wave height in the inbound port was reduced by 60-70% compared with the short-term scheme in winter, and reduced by 50-70% in typhoons, which was a significant improvement over the short-term scheme, and met the allowable wave heights for the stability requirements of the vessel terminals. This study used hydraulic model tests and numerical models to discuss the near-long-range configuration plan of Taichung Port, completed study on sand drift and shelter from typhoon waves and waves in winter and summer, evaluated the importance of the north outer perimeter breakwater, and provided relevant research results to the Ministry of Transportation and Communications and its affiliates. The reference can basis for the engineering consulting company of feasibility planning and Taiwan Port Corporation.			
DATE OF PUBLICATION March 2022	NUMBER OF PAGES 202	PRICE 200	
1. The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目錄

第一章 前言	1-1
1.1 研究背景與目的	1-1
1.2 計畫範圍與對象	1-3
1.3 研究項目	1-4
1.4 研究架構	1-5
1.5 預期成果	1-6
第二章 水工模型試驗規劃	2-1
2.1 試驗規劃	2-1
2.2 漂沙試驗	2-4
2.2.1 漂沙預備試驗	2-4
2.2.2 動床模型配置與試驗條件	2-6
2.3 遮蔽試驗	2-12
2.3.1 定床模型配置與試驗條件	2-12
第三章 臺中港近長程外廓堤水工模型試驗	3-1
3.1 動床漂沙試驗結果	3-1
3.1.1 冬季季風波浪試驗結果與討論	3-2
3.1.2 夏季季風波浪試驗結果與討論	3-8
3.1.3 漂沙試驗結果與討論	3-10
3.2 定床遮蔽試驗結果	3-12
3.2.1 近程方案試驗結果	3-13
3.2.2 長程方案試驗結果	3-20

第四章 數值水槽分析探討	4-1
4.1 二維波浪模式	4-1
4.1.1 MIKE21 水動力模式	4-1
4.1.2 二維數值驗證分析	4-3
4.2 三維波浪模式	4-7
4.2.1 MIKE3 波浪模式	4-7
4.2.2 三維數值驗證分析	4-11
4.3 數值水槽與三維波浪模式探討	4-14
4.3.1 數值文獻回顧	4-14
4.3.2 雷諾平均 Navier-Stokes 方程式	4-17
4.3.3 黏性數值水槽與試驗案例比較	4-19
第五章 研究比較分析	5-1
5.1 水工模型試驗與數值模式驗證分析	5-1
5.1.1 漂沙試驗與數值模式驗證比較	5-1
5.1.2 遮蔽試驗研究結果	5-2
5.1.3 三維數值模式驗證比較	5-8
5.2 數值水槽的可行性	5-10
第六章 結論與建議	6-1
6.1 結論	6-1
6.2 建議	6-2
6.3 成果效益與後續應用情形	6-3
參考文獻	參-1
附錄一、期末報告審查意見處理情形表	附錄 1-1

附錄二、期末簡報內容	附錄 2-1
附錄三、光達測量工作	附錄 3-1
附錄四、試驗波高平面圖	附錄 4-1
附錄五、工作會議記錄內容	附錄 5-1

圖目錄

圖 1.1 臺灣 2000~2019 年各發電量與比例	1-1
圖 1.2 臺灣 2000~2019 年各類型能源發電占比	1-2
圖 1.3 臺中港近 8 年船舶進出年月平均運量統計圖	1-3
圖 2.1 南外廓防波堤增建方案	2-1
圖 2.2 臺中港現況(左圖)與南外廓防波堤近程增建方案(右圖)	2-2
圖 2.3 臺中港現況(左圖)與南北外廓防波堤長程增建方案(右圖)	2-2
圖 2.4 北外廓堤防設計規劃縱斷面圖(I)	2-3
圖 2.5 北外廓堤防設計規劃縱斷面圖(II)	2-3
圖 2.6 臺中港漂沙試驗流程圖	2-6
圖 2.7 本實驗室試驗水槽平面圖	2-7
圖 2.8 日本 KENEX CH-064 波高計	2-9
圖 2.9 挪威 Vectrino 流速計	2-10
圖 2.10 漂沙試驗設備配置情形	2-11
圖 2.11 近程方案(上圖)與長程方案(下圖)	2-13
圖 3.1 水工模型試驗地形侵淤變化計算範圍	3-3
圖 3.2 臺中港試驗後侵淤比較圖	3-5
圖 3.3 臺中港試驗後侵淤比較圖(不計第 4 區)	3-6
圖 3.4 長程方案冬季造波初期產生之越波現象	3-7
圖 3.5 長程方案冬季外廓防波堤(左)港外情況與(右)港內情況	3-7
圖 3.6 北淤沙區大量漂沙有堆積情形	3-8
圖 3.7 LNG 接收區域內波浪較為靜穩	3-8

圖 3.8 夏季條件港內靜穩現象.....	3-9
圖 3.9 颱風情境港內外產生不靜穩情形.....	3-9
圖 3.10 北外廓防波堤南北側掏刷現象.....	3-10
圖 3.11 原北防波堤外側補充消波塊改善情形.....	3-11
圖 3.12 南外廓防波堤外海處之淤積情形.....	3-11
圖 3.13 北外廓防波堤延伸堤內側產生刷深現象.....	3-12
圖 3.14 北淤沙區呈現淤積現象.....	3-12
圖 3.15 近程方案試驗量測區域分配圖.....	3-14
圖 3.16 原臺中港進出口(CH12 測點)試驗影像	3-15
圖 3.17 南外廓防波堤內至北內防波堤之間試驗影像.....	3-15
圖 3.18 LNG 天然氣接收站試驗影像.....	3-16
圖 3.19 近程方案胸牆墊高試驗影像.....	3-19
圖 3.20 近程方案流速計設置位置圖.....	3-20
圖 3.21 長程方案試驗配置情形.....	3-21
圖 3.22 長程方案試驗量測區域分配圖.....	3-21
圖 4.1 MIKE 21 HD 數值模式模型建置情形	4-3
圖 4.2 模型建置與臺中港影像融合圖.....	4-3
圖 4.3 數值模式之潮時邊界(逐時).....	4-4
圖 4.4 模擬第 101 小時之最大剪應力分佈.....	4-5
圖 4.5 模擬第 125 小時之最大剪應力分佈.....	4-5
圖 4.6 模擬第 131 小時之最大剪應力分佈.....	4-6
圖 4.7 模擬第 137 小時之最大剪應力分佈.....	4-6
圖 4.8 模擬第 149 小時之最大剪應力分佈.....	4-7

圖 4.9 模型配置與數值計算領域示意圖	4-12
圖 4.10 MIKE3 造波方位設置情形	4-12
圖 4.11 遮蔽試驗長程方案颱風情境數值模擬結果	4-13
圖 4.12 波浪和斜坡作用的示意圖	4-20
圖 4.13 模擬結果與試驗值之比較結果	4-20
圖 4.14 不同位置波形時間序列圖	4-21
圖 4.15 橢圓函數波在斜坡上之流速驗證	4-22
圖 5.1 長程方案配置水工模型試驗與數值模式驗證比較	5-1
圖 5.2 遮蔽試驗近程方案冬季(N)方向波浪遮蔽係數(KD)	5-2
圖 5.3 遮蔽試驗近程方案夏季(W)方向波浪遮蔽係數(KD)	5-3
圖 5.4 遮蔽試驗近程方案颱風(N)方向波浪遮蔽係數(KD)	5-4
圖 5.5 遮蔽試驗長程方案冬季(N)方向波浪遮蔽係數(KD)	5-5
圖 5.6 遮蔽試驗長程方案夏季(W)方向波浪遮蔽係數(KD)	5-6
圖 5.7 遮蔽試驗長程方案颱風(N)方向波浪遮蔽係數(KD)	5-7
圖 5.8 數值模式長程方案冬季情境遮蔽係數(KD)模擬結果	5-9
圖 5.9 數值模式長程方案颱風情境遮蔽係數(KD)模擬結果	5-9
圖 5.10 半無限長防波堤解析解	5-11

表目錄

表 2.1 預備試驗條件	2-4
表 2.2 臺中港漂沙試驗條件(動床)	2-8
表 2.3 流速計 Vectrino 儀器規格	2-10
表 2.4 臺中港遮蔽試驗條件(定床)	2-16
表 2.5 遮蔽試驗 JONSWAP Wave 試驗條件	2-16
表 2.6 遮蔽試驗不規則波	2-17
表 3.1 長程漂沙方案實驗量測波高各情境波浪轉換表(實際波高)	3-2
表 3.2 臺中港長程方案土方量侵淤變化表	3-5
表 3.3 近程方案冬季及颱風 N 及 NNE 方向各區波高轉換實際波高彙整 表	3-13
表 3.4 近程外廓防波堤遮蔽試驗量測之波高值轉換表(實際波高)	3-16
表 3.5 近程方案遮蔽試驗與船舶碼頭靜穩需求容許波高比較表	3-19
表 3.6 臺中港歷年海流流速及流向與試驗造引致流統計表	3-19
表 3.7 長程外廓方案冬、夏季風及颱風遮蔽試驗量測所得波高值	3-23
表 3.8 近程與長程方案量測港內外波高比較表	3-25
表 3.9 長程方案夏季波浪、冬季與颱風波浪觀測值比較表	3-25
表 3.10 長程方案遮蔽試驗與船舶碼頭靜穩需求容許波高比較表	3-26
表 3.11 冬季長程、近程與近程胸牆墊高方案船舶碼頭靜穩度比較	3-26
表 3.12 近程與長程方案於各試驗條件波高平均值比較	3-27
表 3.13 近程與長程方案於 CH12 測點各試驗條件波高平均值比較	3-27
表 4.1 遮蔽試驗長程方案試驗與數值計算比對結果	4-13

表 5.1 遮蔽試驗近程方案遮蔽係數(KD)比較	5-4
表 5.2 遮蔽試驗長程方案遮蔽係數(KD)比較	5-7
表 5.3 數值模式遮蔽試驗長程方案遮蔽係數(KD)	5-8
表 5.4 遮蔽試驗長程方案試驗與數值計算比對結果.....	5-10

第一章 前言

1.1 研究背景與目的

依據臺灣能源發展之歷史經驗，臺灣自產能源相當匱乏，能源供給來源高達 98% 依賴進口，且化石能源供應比例偏高，惟全球碳排放減量壓力持續增加情勢下，臺灣能源發展相較其他國家所面臨的挑戰將更加嚴峻，容易受到國際政治局勢與能源需求情勢動盪；自政府廢除第四核能發電廠後，經濟產業發展之所需電力面臨巨大考驗，政府不斷尋求新興能源彌補，例如離岸風力發電與天然氣發電等潔淨能源，然而臺灣臺灣海峽雖然風力充沛，但卻是冬季較夏季風力旺盛，因此，夏季尖峰用電仍存在潛在不足風險，為穩定增加備載容量，以及減低空氣污染影響兼顧碳排放減量，確保國家整體電力的穩定供應，天然氣發電有望將成為臺灣未來最重要的電力來源，對此，經濟部能源局能源統計手冊統計 2000~2019 年燃氣發電比例已由 9.55% 增加至 33.26%，如圖 1 與圖 2 所示。

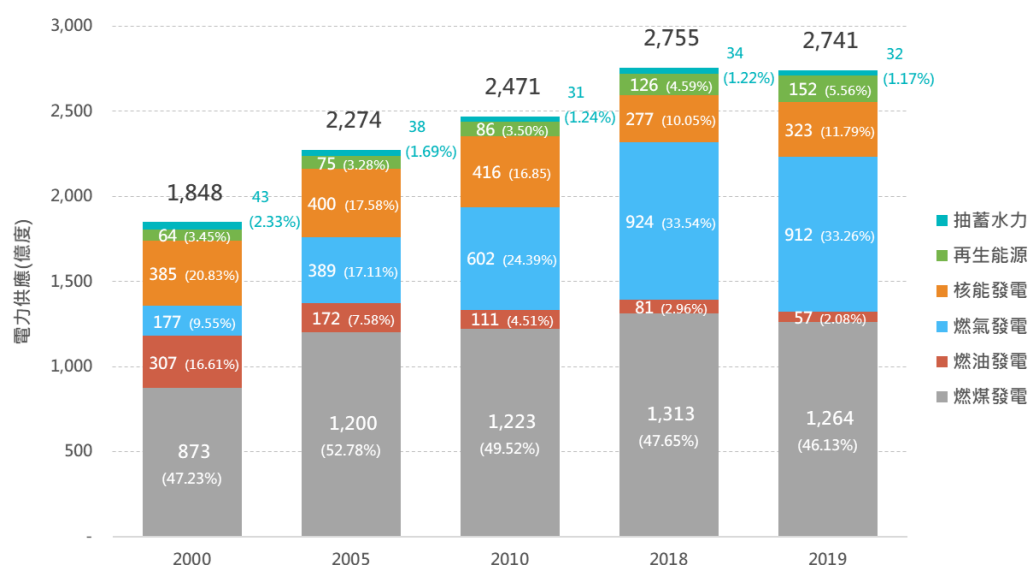


圖 1.1 臺灣 2000~2019 年各發電量與比例

基於天然氣穩定供應及安全存量為確保供電最重要的課題，我國已陸續推動各項天然氣輸送、儲存設施等新(擴)建計畫，以提升儲槽容積與安全存量，並分散購氣來源等強化能源供應鏈，期望天然氣供氣量可從 2019 年的 912 萬公噸，2025 年增加為 2,620 萬公噸，達

成能源轉型之燃氣需求量 50%目標，因此，台灣中油股份有限公司(以下簡稱中油)、台灣電力股份有限公司(以下簡稱台電)於桃園市觀音區大潭觀塘工業區、臺中港台中火力發電廠、基隆協和電廠新設天然氣接收站，以解決 LNG 設備供給量不符需求等問題。

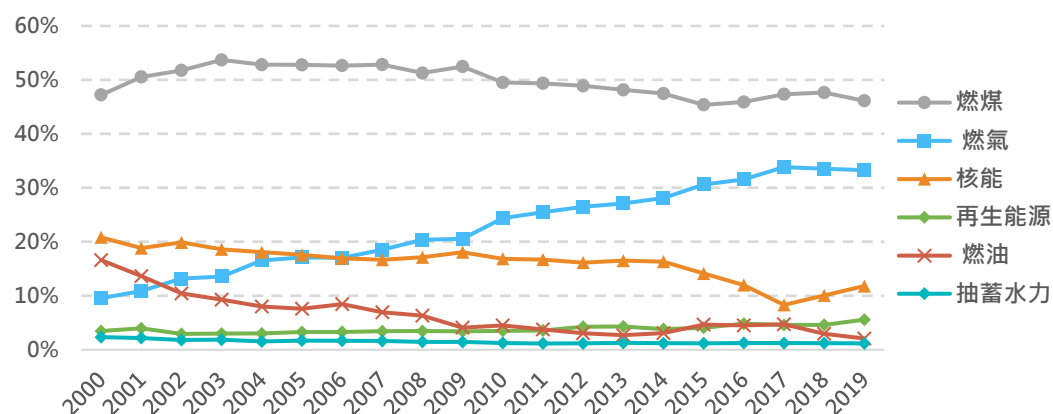


圖 1.2 臺灣 2000~2019 年各類型能源發電占比

此外，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)近年船舶進出統計資料分析，港區進出口船舶運量已由 103 年至 109 年之年月平均運量以約 50 艘次增加，由 1,250 艘次增加至 1,541 艘次，顯示船舶運量與港區負荷逐漸增加，如圖 1.3 所示。面對政府能源轉型所規劃的五接天然氣計畫，台電積極推動中火燃氣發電、中油新建天然氣卸收碼頭及臺中港務分公司辦理臺中港外港區擴建，同時必須兼顧離岸風力發電場之基地母港船舶航行安全，於港區船舶運量增加、水陸運輸繁忙、海上運補頻繁，及碼頭靠泊需求與日俱增之困境下，港區規劃必須縝密周延，爰辦理本計畫進行水工模型試驗探討。

另外，海岸與海洋工程的研究進展，波浪預測與模擬對於環境評估與工程開發極為重要，40 多年前港口海岸和海洋工程中，波浪與結構物相互作用之研究大多是以水工模型試驗來進行波浪行為模擬，鮮少有數值方式進行，但隨著科技進步，電子計算機運算能力不斷提升，數值模式亦隨之蓬勃發展，不再同日而語，過去囿於計算能力不足，無法在有限的時間之內計算複雜的水理問題，但現今儼然已成為研究不可或缺的工具之一，通過建立數

值水槽取代物理水工模型試驗已是新的趨勢方向，其與水工試驗相比，數值水槽具備模型布置容易建構、觀測便捷、成本較低，量測密度較高等優點。總結上關於流體力學研究概可分為純數學解析(或稱理論解析)、水工模型試驗以及數值模式三種方式，撇除理論解析，水工模型試驗是基於模型相似性理論，將原本現場之環境與結構物依照模型縮尺，將其縮小能放置水槽內之結構物，反覆經波浪作用，透過量測其水動力反應進行水理分析，水工模型試驗的研究與各項技術歷經很長時間的發展，目前已臻成熟完善，但受限於試驗水槽具局限性，如需建立大型造波水槽模擬實際波浪(例如：水槽尺寸長達數百公尺)耗資巨大，且配套設置要求較高，觀察手段較複雜，而且也不容易維護和保養，因此，為了降低水工試驗時間及試驗成本與人力問題，利用數值波浪水槽之計算機模擬程式，代替試驗室物理模型發展數值波浪水槽，究竟是否為可行方式，本計畫計畫探討透過數值軟體建構數值水槽，做為後續實際工程問題解決的工具。

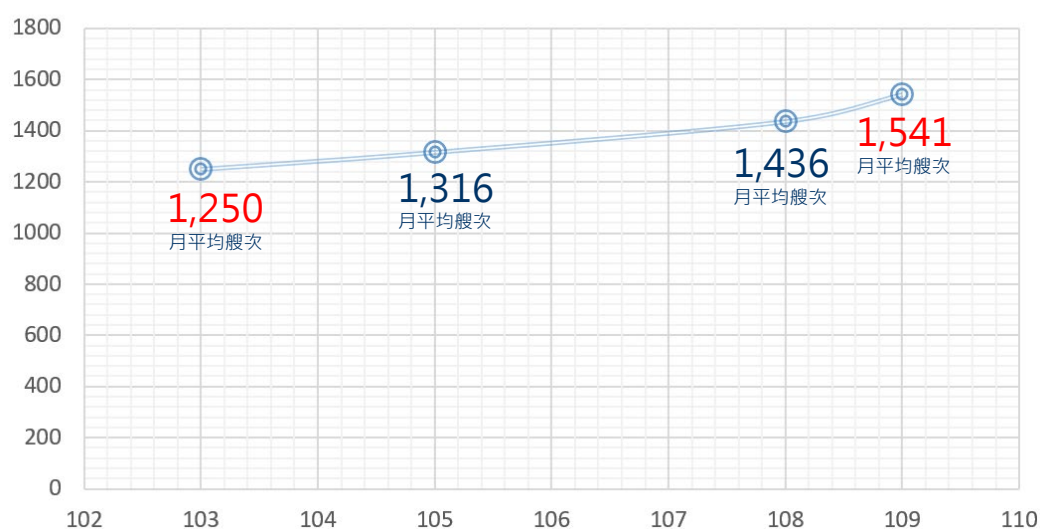


圖 1.3 臺中港近 8 年船舶進出年月平均運量統計圖

1.2 計畫範圍與對象

新增天然氣接收站面臨許多困境，包含生態保育、供氣期程緊迫以及天然氣管線鋪設不易等議題，但工程上最為在乎是外港區擴建防波堤是否足以因應季風期間的 LNG 天然氣平常接氣之情況、及商

船登輪之安全與離岸風電船舶之作業標準；因此，本計畫針對臺中港區近程與長程外廓防波堤規劃配置，進行漂沙試驗與試驗，以臺中港發展前景為主要研究對象，探討港池內靜穩度變化情形，並初步評估港區折繞射現象生成之原因，輔以數值模式驗證水工模型試驗之結果，比較分析堤防波浪變化、波浪引致流現象與漂沙淤積情形，最後再進行波浪數值水槽之初探，做為本所內部研究與相關單位後續規劃使用之參考，有關研究範圍、試驗規劃與條件等內容將於第二章水工模型試驗規劃中說明。

1.3 研究項目

本計畫主要有 3 項研究主題與 5 個研究項目，研究主題部分包含：水工模型試驗研究、數值模式驗證與數值水槽的可行性，此 3 項研究主題彼此間相互關聯，但篇章架構安排未獨立分列，而係將性質較近者歸屬同章節，以利臺中港近程與長程外廓防波堤規劃方案間之比較，有關研究主題要點分述如下：

研究主題 1：

進行水工模型試驗研究，探討研究的近長程配置方案、模型時空縮尺、實驗室環境設備儀器與水工模型試驗條件(包含波高週期條件與波浪方向)，將於第二章陳述內容；至於水工模型試驗長程方案配置之漂沙試驗研究的結果、近程配置與長程配置之遮蔽試驗水動力波浪變化的現象討論，以及 LNG 船舶於接收站碼頭之靜穩需求，將於第三章分節說明。

研究主題 2~3:

研究主題 2 分別進行水工模型漂沙試驗與數值模式驗證，以及水工模型遮蔽試驗與數值模式驗證，前項水工模型漂沙試驗與數值模式驗證部份，採用二維 MIKE21 水動力數值模式之潮流模組進行驗證漂沙試驗結果，後項水工模型遮蔽試驗與數值模式驗證探討，利用三維 MIKE3 wave 數值模式驗證遮蔽試驗結果；除此之外，研究主題 3 數值水槽可行性初步探討，蒐集數值水槽相關研究文獻，探討波浪基本控制方程式，以

及黏性流體對於有無紊流條件下之處理方法，以及數值波浪水槽相關應用範疇與案例比較，將於第四章分節說明。

本計畫研究項目包含：文獻回顧、建立水工試驗地文模型與試驗規劃、進行水工模型漂沙與遮被試驗、評估與數值驗證臺中港靜穩度現象、探討波浪數值水槽之可行性等 5 項，其研究要點分述如下：

1. 文獻回顧：

蒐集港池靜穩度及國內外港區靜穩度及數值水槽之研究報告與應用案例，彙整研析後綜整相關文獻。

2. 建立水工試驗地文模型與試驗規劃：

蒐集經濟部水利署第三河川局、臺灣港務股份有限公司關於臺中港海域地形監測資料，以及本所自行發包測量的地形資料，包括基本地形水深調查測量資料；並進行地形與試驗模型修改、製作，並完成試驗條件規劃。

3. 進行水工模型漂沙與遮蔽試驗：

針對臺中港區近程與長程外廓防波堤規劃，進行港區漂沙試驗探討地形變化，以及進行遮蔽水工模型試驗。

4. 評估與數值驗證臺中港靜穩度現象：

利用試驗數據探討港池內靜穩度情形，並評估港區折繞射變化；此外，利用數值模式對實驗結果加以比較驗證，相互檢核研究成果，以確認港區水理變化。

5. 初探波浪數值水槽之可行性：

經由文獻回顧與經典案例分析，探討波浪數值水槽的可行程度，做為後續研究參考與應用依據。

1.4 研究架構

本計畫研究架構共分 6 章，各章內容簡要說明如下：

第一章：前言部分先就研究背景回顧進行概述、並對遭遇困難、研究目的、研究方向、研究範圍、研究方法、與離岸風電發展現況加以闡述。

第二章：水工模型規劃與試驗部分，對試驗規劃、臺中港港型、配置尺寸、方案細節、試驗儀器與設備、漂沙與遮蔽試驗過程，如何進行預備試驗決定時間比尺等內容。

第三章：臺中港近長程外廓堤水工模型試驗部分，探討漂沙與遮蔽試驗結果、進行定性描述討論、與定量量測數據的分析結果，並將試驗結果分區討論，及碼頭靜穩度容許波高的討論。

第四章：數值水槽分析探討，蒐集港國內外港區靜穩度及數值水槽之研究報告與應用案例，並綜整相關文獻；另外，簡要說明本計畫所使用二、三維數值模式的方程式與控制方程式，討論數值模式與試驗結果之驗證，最後探討波浪數值水槽的可行性。

第五章：研究比較分析，本章綜合討論第三章與第四章結果，並進行比較分析。

第六章：結論與建議，為本計畫主要研究成果內容。

1.5 預期成果

本計畫預期成果如下：

(一)完成文獻蒐集與回顧：蒐集並彙整研析國內外港區靜穩度及數值水槽之研究報告與應用案例，提供初步研究與後續數值水槽開發及自辦研究使用之參考。

(二)完成水工模型試驗與評估靜穩度現象：利用經濟部水利局與臺灣港務股份有限公司水深地形調查資料建置臺中港區水工模型，探討港區靜穩度於各種情境(包括颱風事件於港池震盪的變化)，瞭解現況、近(長)程外廓堤規劃對靜穩

度影響，做為未來港區改善配置與靜穩度改善的應用參考。

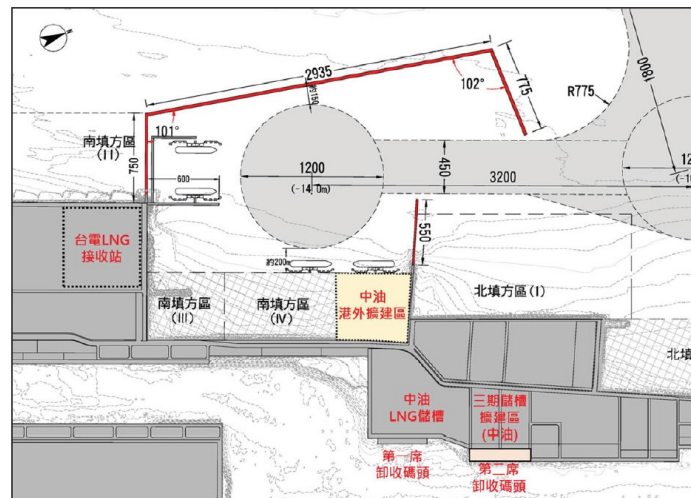
- (三)完成波浪數值水槽之可行性探討：以數值水槽界面配合水工模型試驗探討港區波浪行為，比較分析數值試驗室應用於遮蔽試驗室之成效，並依據數值與試驗成果，提出波浪數值水槽之可行性，做為後續研究的基礎。

第二章 水工模型試驗規劃

本計畫為探究臺中港外港區擴建變化，規劃以 2 類型水工模型試驗進行探討：(1)漂沙試驗與(2)遮蔽試驗；由於此 2 類型水工模型試驗研究之條件與背景相同，為使終端使用者(end user)易於掌握本計畫範疇，將於本小節分述說明：試驗規劃、模型佈置情形與試驗條件等內容。

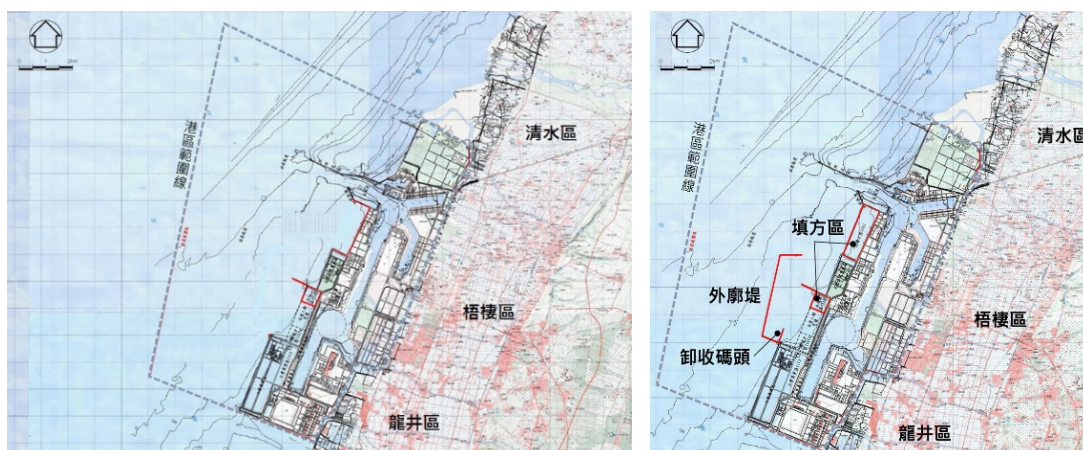
2.1 試驗規劃

臺中港外港區擴建之增建方案包含 2 種港型，第 1 種規劃是近程方案，配合國家能源政策中油將於臺中港填方區新建天然氣卸收碼頭、儲氣槽及相關設施，臺中港務分公司將協助擴建碼頭與南外廓防波堤，堤防由南填方區(II)向外延伸 750m，主堤防再向北延伸 2,935m，最後向東 775m，且於中油港外擴建區向外新增北內堤防 550m，如圖 2.1 所示，臺中港現況與近程方案比較如圖 2.2 所示；第 2 種規劃是長程方案，因應國際商港發展面臨快速變革與挑戰，故臺中港務分公司於近程方案完工後近 40 年，規劃於臺中港北堤沿-20m 水深處延伸 2,375m，堤防尾端再延伸 500m，總計興建北外廓防波堤共 2,875m，同時於南外廓防波堤主堤防轉折處向西北邊延伸 950m，如圖 2.3 所示。



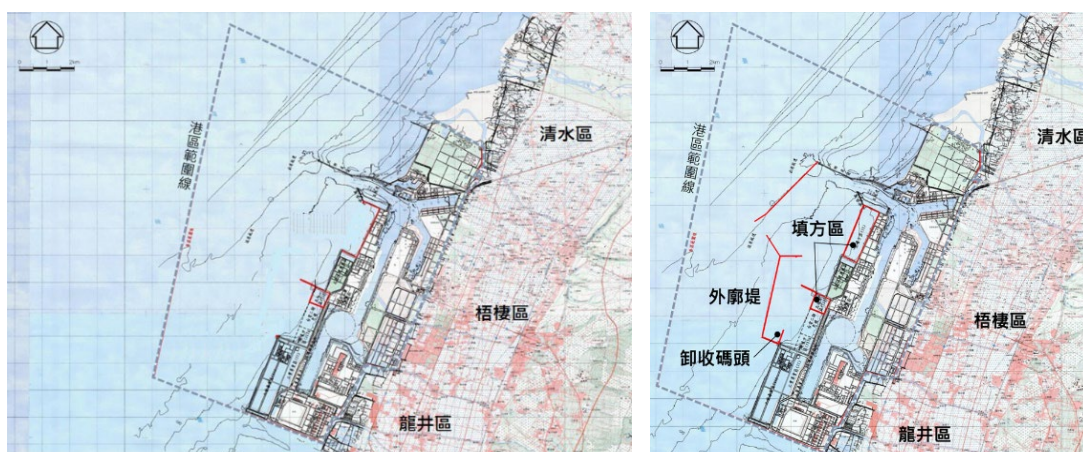
資料來源：臺中港 40 年期主計畫

圖 2.1 南外廓防波堤增建方案



資料來源：臺灣港務股份有限公司臺中港分務分公司(2021).

圖 2.2 臺中港現況(左圖)與南外廓防波堤近程增建方案(右圖)



資料來源：臺灣港務股份有限公司臺中港分務分公司(2021).

圖 2.3 臺中港現況(左圖)與南北外廓防波堤長程增建方案(右圖)

另有關試驗北外廓堤防係採用宇泰工程顧問有限公司設計規劃配置，該設計之高程系統係使用臺中港築港高程系統，該平均高潮位(H.W.L)為 EL.+5.20，平均低潮位(L.W.L)為 EL.0.00，原規劃堤防道路高程 EL.+8.00，如圖 2.4 所示，設計堤防高度原則依照北堤堤防道路高程進行延伸，如圖 2.5 所示，該堤防高度將依據試驗類型(漂沙或遮蔽試驗)之垂直比尺條件進行縮小尺寸，有關比尺部分後續小節將予分述說明。綜上所述，當近長程外廓堤增建設施完成後，可能造成之臺中港港域漂沙及港內外穩靜之影響，以水工模型試驗過程與結果作探討，藉此明瞭未來港區發展時附近範圍可能遭遇之問題，可進一步研擬各種因應對策有效改善缺失。

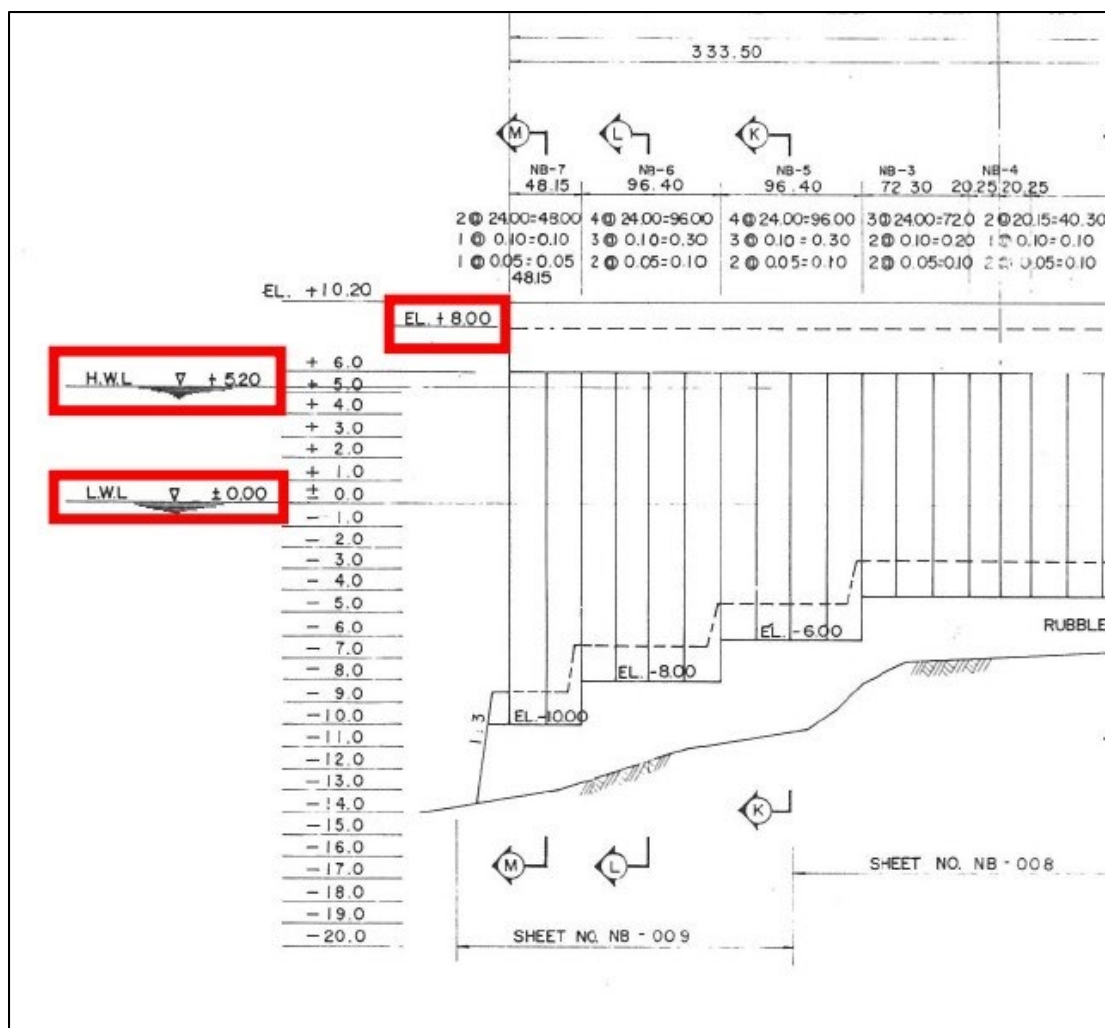


圖 2.4 北外廓堤防設計規劃縱斷面圖(I)

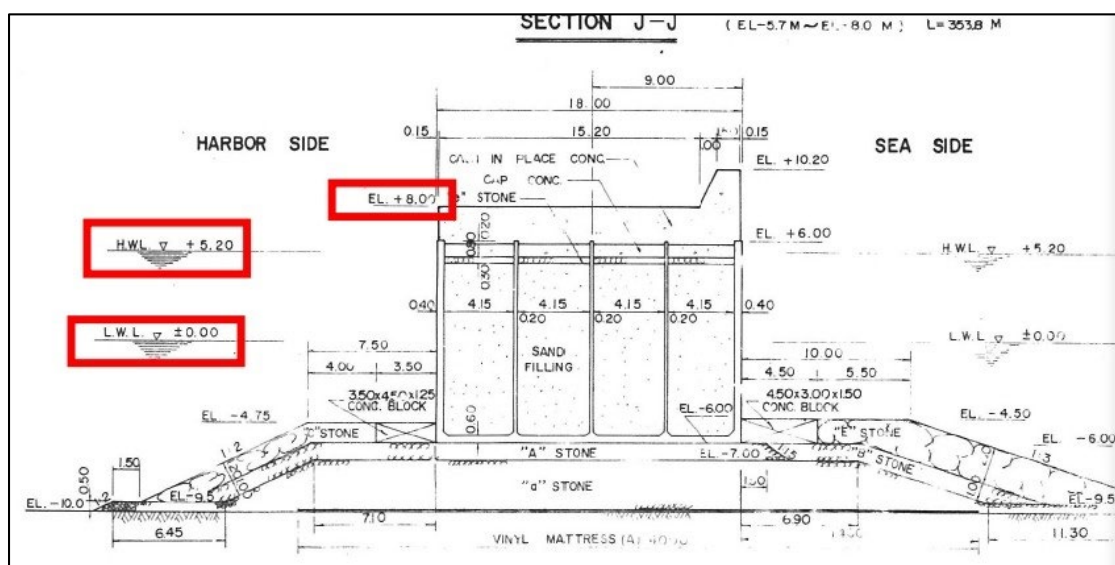


圖 2.5 北外廓堤防設計規劃縱斷面圖(II)

2.2 漂沙試驗

水工模型漂沙試驗以長程外廓堤增設完成後(即參考前小節，圖 2.3 港型配置)，配合臺中港務分公司於民國 108 年 8 月測量之夏季海域地形，進行未來 2 年的侵淤情況模擬，重現地形之時間條件依序進行夏季季風 3hrs、颱風 30mins、夏季季風 3hrs 與冬季季風 8hrs 等波浪條件造波，比擬為 1 年之地形變化，因此，模擬 2 年應進行 2 輪循環，以觀測了解所產生港區附近地形變化，進而評估可能影響情況和範圍；其中重現地形之時間條件又稱為預備試驗，以下進一步說明預備試驗內容。

2.2.1 漂沙預備試驗

預備試驗為動床試驗之前重要的準備工作，研究方法係使用過去實測地形且於水工模型實驗室鋪沙重現地形原貌，配合海氣象條件造波，並嘗試各種情境之模擬時間，再測量地形變化後加以觀察，如此反覆鋪設試驗地形，以及不斷嘗試各季風與颱風模擬時間、測量與觀察地形變化，探討出實驗室內最符合試驗條件之時間尺度，最能重現實測海域之地形變化與特性。本計畫預備試驗結果係依據本所 107-108 年執行「離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討」研究成果，試驗條件與地形如表 2.1 所示，其中表 2.1 內編號 1~2 為 107 年預備試驗條件與過程，先探討冬季波浪情況，表 2.1 內編號 3~4 為 108 年度預備試驗條件與過程，再探討夏季與颱風情境之地形重現。

表 2.1 預備試驗條件

編號	試驗條件	現場地形時間	備註
1	冬季波浪	99.12~100.5	水利署
2	冬季波浪+桑達颱風	99.11~100.8	港務公司
3	夏季波浪	107.5~107.8	港研中心 港務公司
4	冬季波浪+夏季波浪+蘇拉颱風	100.8~101.9	港務公司 (校驗工作)

(一)107 年預備試驗(表 2.1 內編號 1)：

本所以經濟部水利署第三河川局 99 年 12 月測量地形進行縮尺地形鋪設，試驗波浪條件採用本所 93 年至 105 年期間之長期波浪觀測之統計資料(歷年波高、週期及波向)波高 2.61m，週期為 7.1sec，波向 NNE，做為冬季季風條件結果，試驗後再與水利署 100 年 5 月實測地形比較。

(二)107 年預備試驗(表 2.1 內編號 2)：

本所進一步驗證，以臺中港務分公司 99 年 11 月測量地形進行縮尺地形鋪設，配合本所長期波浪觀測之冬季季風統計資料波高 2.61m，週期為 7.1sec，波向 NNE，以及 100 年 5 月 27 日桑達颱風之颱風資料波高為 2.78m，週期 8.4 秒，波向為 NNE 進行試驗，試驗後再與臺中港務分公司 100 年 8 月實測地形比較。

(三)108 年預備試驗(表 2.1 內編號 3)：

由於 107 年預備試驗尚未探討夏季季風之影響，因此，利用本所於 107 年 5 月發包測量之地形進行縮尺地形鋪設，配合本所長期波浪觀測之夏季季風統計資料，波高為 0.7m，週期為 6.1 秒，波向為 W 向進行試驗，試驗後再與臺中港務分公司 107 年 8 月實測地形比較。

(四)108 年預備試驗(表 2.1 內編號 4)：

最後使用臺中港務分公司 100 年 8 月測量地形進行縮尺地形鋪設，配合本所長期波浪觀測之夏季波高 1.04m，週期為 6.3 秒，波向為 W 向、冬季波高 2.24m，週期為 7.5 秒，波向為 NNE 向之季風統計資料，以及 101 年 7 月蘇拉颱風波高 2.54m，週期 7.2sec，波向為 NNE 向進行試驗，試驗後再與臺中港務分公司 101 年 9 月實測地形比較。

綜合評估後，實驗室時間尺度以夏季季風造波 3hrs、颱風造波 30mins、夏季季風造波 3hrs 與冬季季風造波 8hrs 最為接近現場 1 年之實際地形變化，因此，後續臺中港漂沙試驗流程如圖 2.6 所示，故

如探討 2 年時間之漂沙地形變化，需將上述試驗過程重複 2 次，依此類堆。

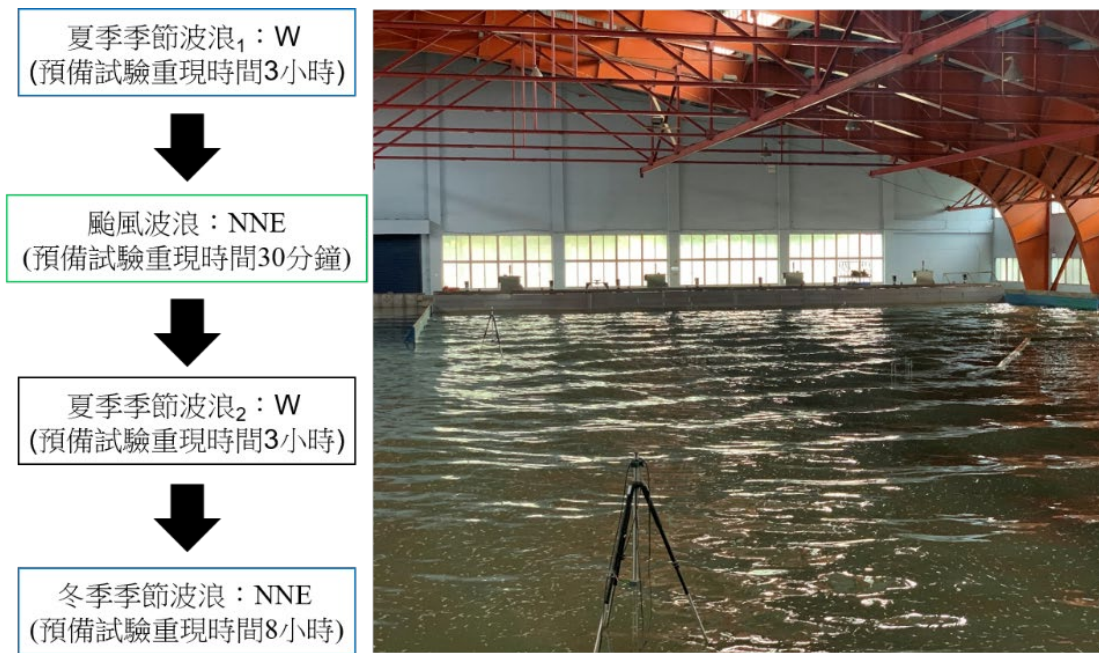


圖 2.6 臺中港漂沙試驗流程圖

2.2.2 動床模型配置與試驗條件

本實驗室試驗水槽尺寸長度為 56.5m，寬度為 53m，如圖 2.7 所示，該尺寸為實際可提供鋪設地形與佈置造波機、實驗室量測設備與消波設施之空間。

由於臺中港長度大約為 12 公里，寬度大約為 4 公里，為考量試驗水池大小、造波機造波能力與為將試驗模型最大化，試驗與原型水平比尺採用 1/300 已能將 12 公里長的臺中港縮小為 40m，實驗室長度僅剩於 16.5m 範圍能進行其他設備配置，如水平比尺再稍大些便無法將港區範圍佈置於水槽當中，而垂直比尺則採用 1/75，不等比率（又稱歪比）為 4 倍範圍之內，依據經濟部水利署水利規劃試驗所民國 100 年出版之「水工模型試驗參考手冊」之研究，歪比率宜小於 6，本計畫建議歪比以 3~5 間為最佳，本計畫動床漂沙模型僅配置「南北外廓防波堤長程增建方案」，並採用不等比尺方式進行模型縮尺與水工模型實驗。

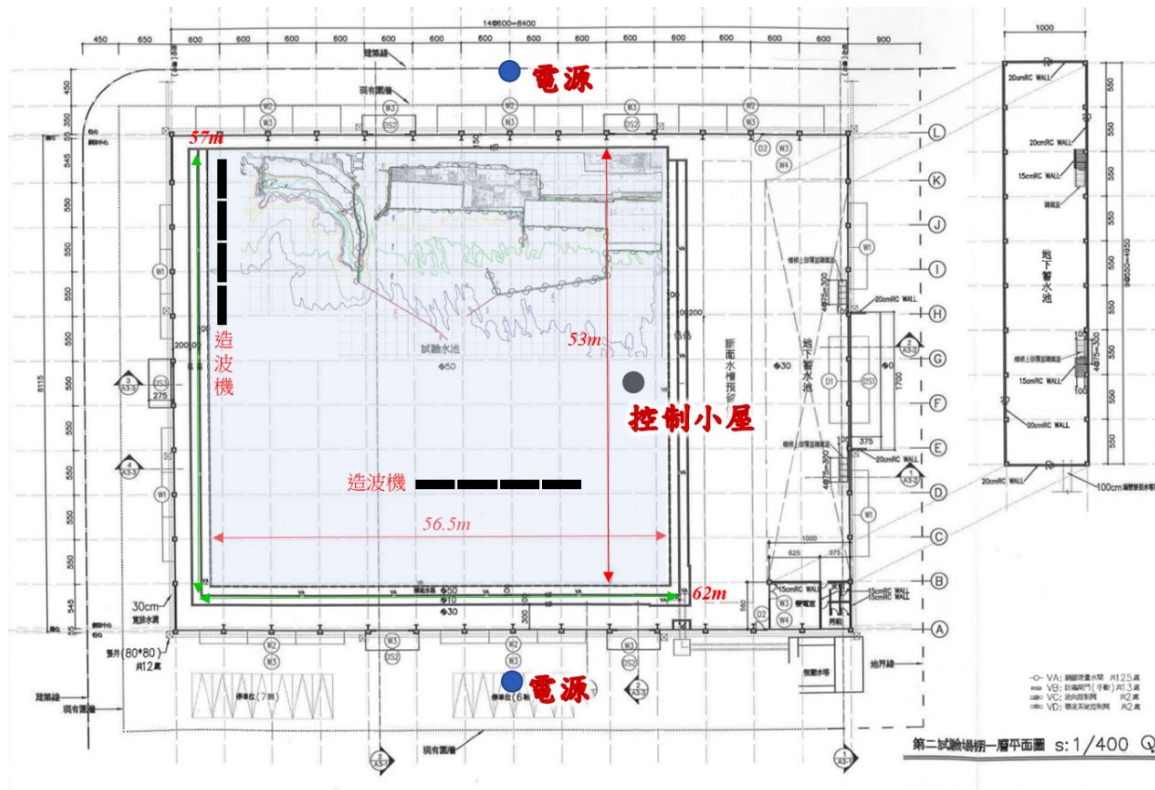


圖 2.7 本實驗室試驗水槽平面圖

有關波浪與週期比尺部分，根據本所過去從事水工模型試驗慣例，於臺灣西部海岸地形變遷之水工模型試驗，採用許泰文等人(1985)之模式可獲致較佳之試驗結果，該模式比尺如下：

$$\text{波高比尺, } N_H = \mu^{2/5} \lambda^{4/15} N_r N_{D50}^{1/3} \dots\dots\dots(2-1)$$

$$\text{週期比尺, } N_T = \mu^{1/5} \lambda^{2/15} N_r^{1/2} N_{D50}^{1/6} = N_H^{1/2} \dots\dots\dots(2-2)$$

$$\text{潮汐比尺, } N_t = \lambda / (\mu)^{1/2} \dots\dots\dots(2-3)$$

式中 N_T ：波浪週期比尺， N_H ：波高比尺， μ ：垂直比尺，

λ ：水平比尺， r ：底質比重， D_{50} ：底沙之中值粒徑。

綜上所述，將水平比尺(λ)1/300、垂直比尺(μ)1/75、 D_{50} 中值粒徑 0.2mm 與底質比重(r)2.65 等參數，代入許泰文等人(1985) 模式比尺公式，可得本試驗波高比尺(N_H)為 1/25.74，週期(N_T)為 1/5.07；試驗水深部分，季節波浪試驗水深採大潮平均高潮位做為試驗水深， $d=41.36\text{cm}$ ，颱風波浪試驗水深使用 50 年迴歸期暴潮水位做為試驗水深， $d=42.59\text{cm}$ ，動床試驗條件經比尺換算，整理如表 2.2 所示。

表 2.2 臺中港漂沙試驗條件(動床)

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

造波設備為英國 HR Walingford 及加拿大 Davis 所製造之規則與不規則長波峰造波機(Long Crested Wavemakers)兩套，每套造波機皆有 4 臺長、高分別為 6m、0.8m 的往復平推式造波板模組，最大可組成 24m 之平面造波寬度。規則波可以在指定的時間週期、振幅、相位和方向從造波板面產生規則諧波，不規則波造波軟體可供選擇使用之波譜軟體內有建大量的波譜形式，如 JONSWAP、Pierson-Moskowitz、TMA、Bretschneider and ISSC、Ochi double peak、SIWEH 波群模擬等。

波高量測儀器所使用之波高計，以日本 KENEK 所製造容量式波高計為主，量測精準度為 $\pm 0.3\%$ ，透過電容式電路感應金屬連桿與測線間因水位變化導致的浸水面積變化，換成電壓的起伏，再經由電纜線傳回波高增幅器，經適當之訊號放大後，由 AD 轉換器將類比訊號轉換為數位訊號輸入電腦存檔並進行資料判別與處理，每部波高量測裝置有獨立的波高增幅器可連接波高計，本試驗至多同時支援 64 支進行波高之量測，以量測區域內同時刻之水位變化。因此，本漂沙試驗設置 16 支日本 KENEX CH-064 波高計(如圖 2.8 所示)，港外共佈設 8 支波高計以 CH1~CH8 表示外廓防波堤外測點，港內共佈設 8 支波高計用以量測水位變化，其中 CH9~CH12 為北外廓防波堤堤內(又稱外商港區迴船池)測點，CH13~CH16 為南外廓防波堤堤內(又稱 LNG

港)測點，英國 HR 製造波高計共 4 組，擺放於港外量取試驗波高，編號為 A~D。



圖 2.8 日本 KENEX CH-064 波高計

資料擷取與分析裝置，本試驗之水位變化以波高計量測，並經由訊號線傳輸與增幅器放大後，以 AD 轉換器將其離散化，離散數位化資料於儲存後，經由資料分析系統可作進一步之分析工作，如零上切波高與週期之判讀，頻譜分析、繪圖等。資料擷取即時顯示系統作為水位、波壓資料訊號之擷取與分析系統，此系統除具有原有 AD 轉換功能，更可在進行試驗時，將訊號即時顯示，有利試驗進行過程中之資料觀察與判別。攝影紀錄及影像處理系統，本試驗在探討碼頭港內遮蔽及港外鄰近水域波動情況時，另外利用縮時攝影紀錄及影像處理，隨時觀察波浪在近岸及港內處之變形外，並藉由攝影機錄影隨時拍攝部分特殊敏感區域之波浪變化，加以記錄試驗過程，並將影像處理轉換成影像檔並數位化。經由攝影紀錄，不僅補充儀器紀錄之不足，同時可重現試驗過程中所欲瞭解現象之變化歷程，藉由攝影歷程所呈現三維變化了解港灣構造物配置後，數值模式無法模擬之物理現象，以提供後續碼頭規劃與設計參考。

流速計採用挪威 Nortek 公司生產之高精度都卜勒點式聲學流速計(Vectrino)，如圖 2.9 所示，可用來測量水流之三维流速，測量技術基礎基於都卜勒訊號處理，量測端能透過聲學反射求得水流速度，量測特點係測量精度高，能應用於各種實驗環境，特別是濁度較高的水質，比如水工模型試驗室裡測量各種流場，儀器規格如表 2.3 所示，流速計規劃放置於臺中港進出口，漂沙試驗設備配置情形，如圖 2.10 所示



圖 2.9 挪威 Vectrino 流速計

表 2.3 流速計 Vectrino 儀器規格

規格	內容
流速範圍	$\pm 0-4\text{m/s}$
精度	測量值的 $\pm 1\%\pm 1\text{mm/s}$
採樣輸出頻率	1-25Hz(標準) / 1-200Hz(高級)
採樣點	距探頭距離：0.05m
聲學發射頻率	10MHz
解析度	線性刻度
強度範圍	25dB

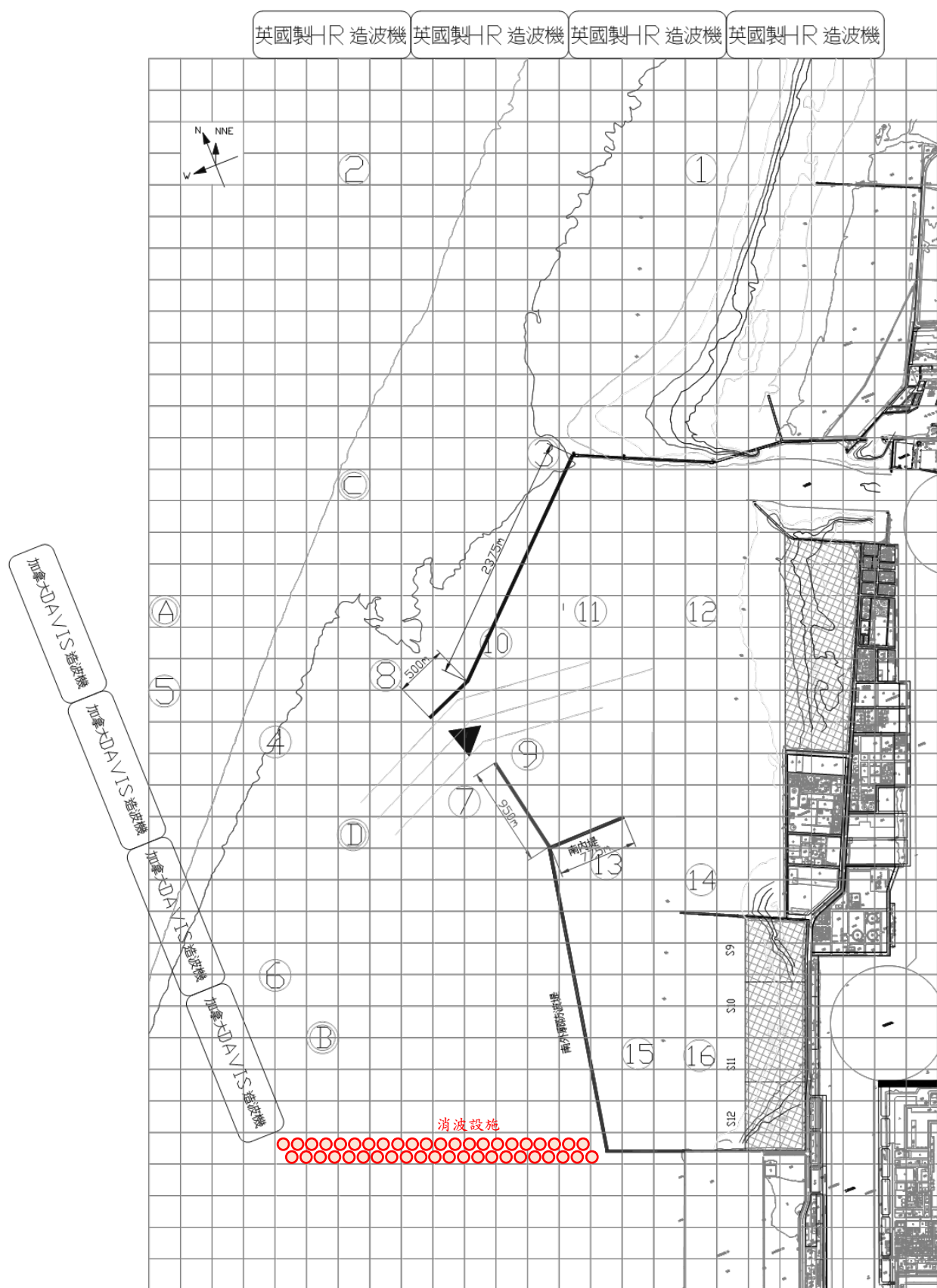


圖 2.10 漂沙試驗設備配置情形

2.3 遮蔽試驗

本計畫遮蔽試驗又稱水動力試驗，試驗使用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」技術服務報告(定稿)設計規劃港型，透過臺中港近長程外廓堤水工模型之遮蔽試驗，探討外廓堤配置需求及臺中港長程開發構想，以及外港區水域規劃目標、水域條件與配置方案之靜穩度；此外，本計畫模擬港內外穩靜影響，配合港域波高量測數據分析結果，將做一整體性敘述與評估，以明瞭未來港區內靜穩情形，是否滿足使用單位需求，及透過港口航道流速剖面量測比較其差異，探討港區可能造成之影響並提出適當建議，以下小節就模型配置、試驗條件、項目、方法、儀器設備分別詳述之。

2.3.1 定床模型配置與試驗條件

定床模型配置(1)南外廓防波堤近程增建方案(又稱近程方案)與(2)南北外廓防波堤長程增建方案(又稱近長程或稱長程方案)，兩種堤防配置最主要差異在於北外廓防波堤是否進行延伸，本實驗造波機由英國 HR Walingford 模擬冬季季風與颱風情境來自北向之波浪，加拿大 Davis 則模擬夏季來自西向之波浪，定床試驗設置 48 支日本 KENEX CH-064 波高計，依據近程與長程外廓防波堤方案配置說明如下：

近程外廓防波堤方案：港外-20m 水深外測點共佈設 9 支波高計以 CH1~CH9 表示，港外-20m 水深以內至南外廓防波堤測點共佈設 20 支波高計用以量測水位變化，以 CH10~CH29 表示，南外廓防波堤堤內(又稱 LNG 港)共 19 點測點，以 CH30~CH48 表示，英國 HR 製造波高計共 4 組，擺放於港外量取試驗波高，編號為 A~D。

長程外廓防波堤方案：港外共佈設 9 支波高計以 CH1~CH9 表示外廓防波堤外測點，港內共佈設 39 支波高計用以量測水位變化，其中 CH10~CH29 為北外廓防波堤堤內(又稱外商港區迴船池)測點共 20 點，CH30~CH48 為南外廓防波堤堤內(又稱 LNG 港)測點共 19 點，英國 HR 製造波高計共 4 組，擺放於港外量取試驗波高，編號為 A~D，配置實驗配置如圖 2.11 所示。

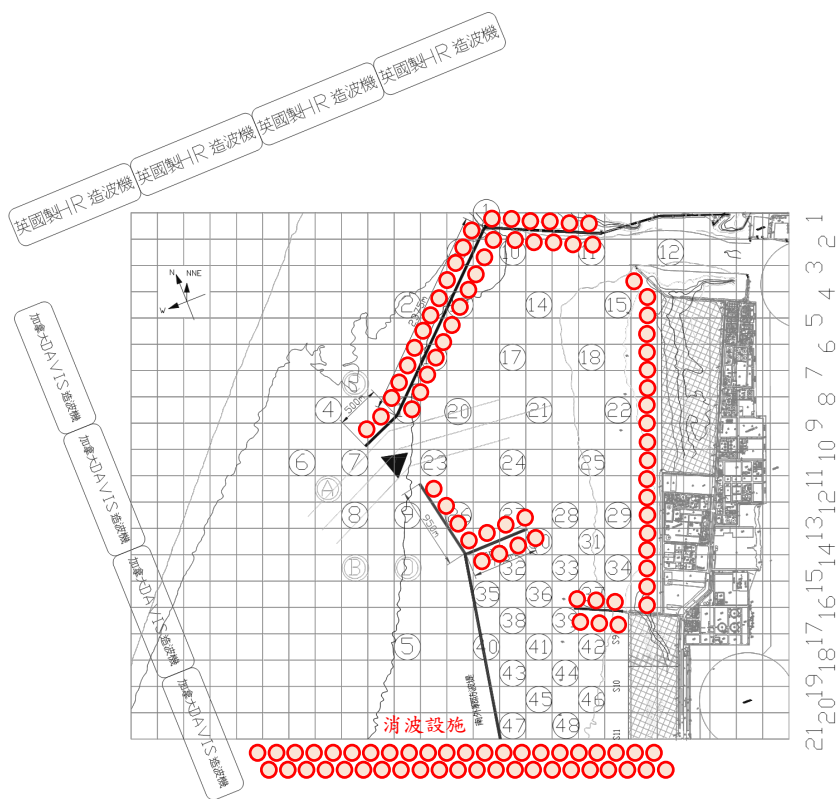
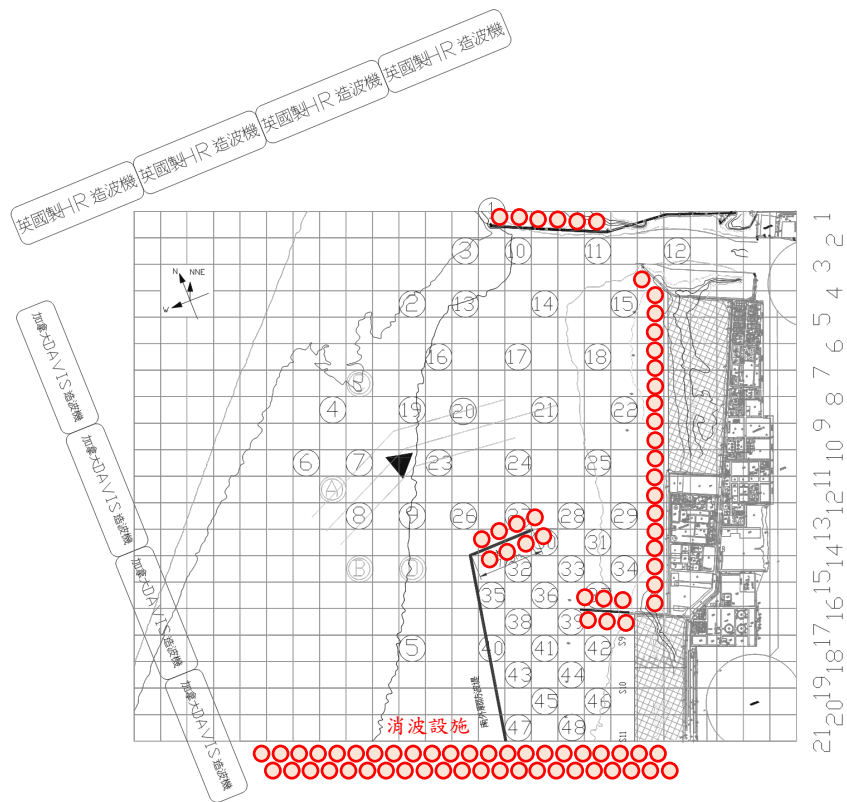


圖 2.11 近程方案(上圖)與長程方案(下圖)

水工模型試驗之進行乃利用與實體相似之模型體於水槽中模擬水理現象，並依據討論之目的與需要進行觀測所需之物理量，在模型體與實體之物理量上則需依相似律之關係儘量還原實際情形，一般而言，在遮蔽試驗之水理現象探討上，波浪由於地形、水深、結構物存在因素影響，而引發反射、折射、繞射、淺化、碎波等變形，波浪運動及流場所受外力主要為重力因素影響，其他如黏滯力、表面張力等屬次要因素影響較小(忽略為前提下)，因此控制模型尺度之相似律採用福祿德定律（Froude Law）為依據，使模型與實體間之慣性力與重力之比值相等，其定義為：

$$v_p / (g L_p)^{1/2} = v_m / (g L_m)^{1/2} \dots\dots\dots(2-4)$$

上式中 v 代表示性速度、 g 為重力加速度、 L 代表長度，下標 p 、 m 分別為實體與模型之尺度。實驗相關之各尺度縮尺：

$$1. \text{長度縮尺：} L_r = L_m / L_p = 1 / 150 \dots\dots\dots(2-5)$$

凡是與長度尺度相關之物理量如結構物之長、寬、高，波浪之波長、波高、水深等都能依此比例尺進行縮小。圖面每格為試驗室放樣鋪設尺寸 2m，並定義原型-30m 為模型原點，故地形與結構物採用等深比 1/150 直接換算如下：

$$\text{實際水深}-30\text{m} = -3,000\text{cm} * (1/150) + 20\text{cm} = 0\text{cm}$$

$$-20\text{m} = -2,000\text{cm} * (1/150) + 20\text{cm} = 6.67\text{cm}$$

$$-15\text{m} = -1,500\text{cm} * (1/150) + 20\text{cm} = 10.00\text{cm}$$

$$-10\text{m} = -1,000\text{cm} * (1/150) + 20\text{cm} = 13.33\text{cm}$$

$$0\text{m} = 0\text{cm} * (1/150) + 20\text{cm} = 20.00\text{cm}$$

$$\text{因此，大潮平均高潮位}(\text{CD}.2.67\text{m} + 4.84\text{m}) = +7.51\text{m}$$

$$= 751\text{cm} * (1/150) + 20\text{cm} = 25.01\text{cm}(\text{季節波浪試驗水深})$$

$$50 \text{ 年迴歸期暴潮水位}(\text{CD}.2.67\text{m} + 5.96\text{m}) = +8.63\text{m}$$

$$= 863\text{cm} * (1/150) + 20\text{cm} = 25.75\text{cm}(\text{颱風波浪試驗水深})$$

地形水深依照本所臺中港近程外廓堤漂沙試驗模型模擬(推估 113 年 5 月)之海域地形資料為依據，鋪設至水深-30m。

$$2. \text{時間縮尺：} T_r = T_m / T_p = (L_m / L_p)^{1/2} = (1 / 150)^{1/2} = 1/12.247$$

凡是與時間有關之物理量如作用時間、波浪週期都能依此縮尺加以縮小。波高之量測以波高計進行測量，在本試驗中波高之量測採每間隔 2m 設置一測點，以量測港口與港內水域之波高，另外，於造波機前方約 5m 處架設二波高計以量測入射波高。每種試驗情況模行量測時間為 3 鐘，相當於原型 36.74 分鐘，每次試驗每頻道取樣速度為 30Hz。為避免試驗時模型範圍內的水面波動經造波板之二次反射與水槽內其它部份結構物的反射波干擾，導致逐時水位變化資料的量測誤差，試驗水面波動分析是選擇入射波浪進入港區內後開始進行量測之波高紀錄值，為 4,096 筆水位離散資料，每次試驗可得約 140 個左右之零上切波浪值。

3.波高計率定：為確保試驗的正確性，每支波高計均事先經過校正，將波高計固定於客製化率定桶之鐵架並連接至增幅器與量測分析用電腦後，首先將測線的中央點移動至與靜水面相接，其後每隔 1cm 上下移動測棒，並適當調整訊號的放大倍率，使電腦所得到的水面變動值與實際相符，如此往復來回率定，直至確定該測棒的實際水位變化與量測值成線性關係。

另外，於造波機前方約 6.0m 處架設 2 支波高計以量測入射波高。並量測水面波動及判斷波高與週期，用以檢定所擷取之波高資料，且調整訊號放大倍率至所造出的波高、週期達到所需之條件。固定水深下，不同波向、週期、波高皆將影響放大之倍率。波高之量測範圍主要以港域泊地、碼頭港內、港外區域，每間隔 2m 則量測一點波高。另外，於颱風波浪作用下，越過防波堤之越波量在定量上雖較不可靠，但在定性上之觀測應可作為規劃設計上之參考。

所使用之造波理論波譜為 JONSWAP 波譜，其理論方程式以波高與週期表示之係數 γ 值表示波譜能量之集中度，一般取其平均值 3.3。

$$\gamma = 1 \rightarrow 7, \sigma_a \approx 0.07, \sigma_b \approx 0.09$$

$$\sigma = \{\sigma_a : f \leq f_p, \sigma_b : f \geq f_p\}$$

進行颱風及冬季季風波浪試驗時，以 N 及 NNE 向波浪為入射波波譜，為造波機所模擬之 JONSWAP 理論頻譜，颱風 $T_p = T_s/0.93 = 1.045$ ，冬季季風 $T_p = T_s/0.93 = 0.776$ 。夏季季風波浪試驗時，則以 W 方向波浪之入射波波譜， $T_p = T_s/0.93 = 0.756$ 。本計畫定床試驗條件經比尺換算，整理如表 2-4 所示，模擬 N 方向與 NNE 方向之冬季季風與颱風情境波浪，由試驗結果獲知主要影響外廓防波堤與港內變化最大者為 N 方向，亦符合顧問公司數值模擬規劃時考量 N 方向為主要因素，故本遮蔽試驗僅討論冬季及颱風 N 方向波浪條件造波，關於 JONSWAP 理論頻轉換為實驗室條件整理如表 2.5 與表 2.6 所示。

表 2.4 臺中港遮蔽試驗條件(定床)

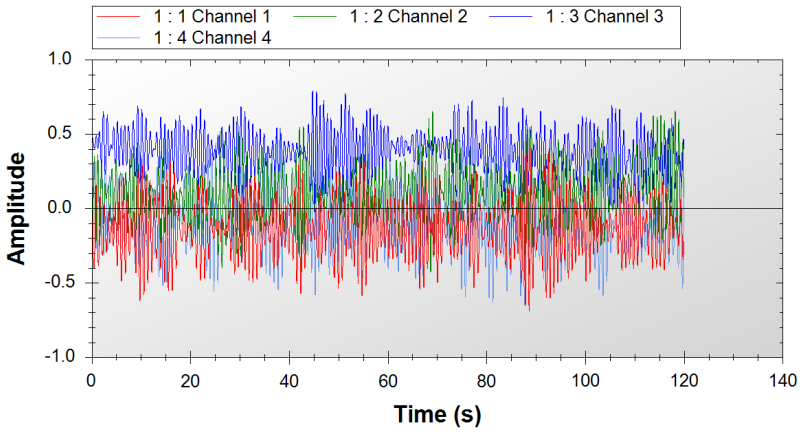
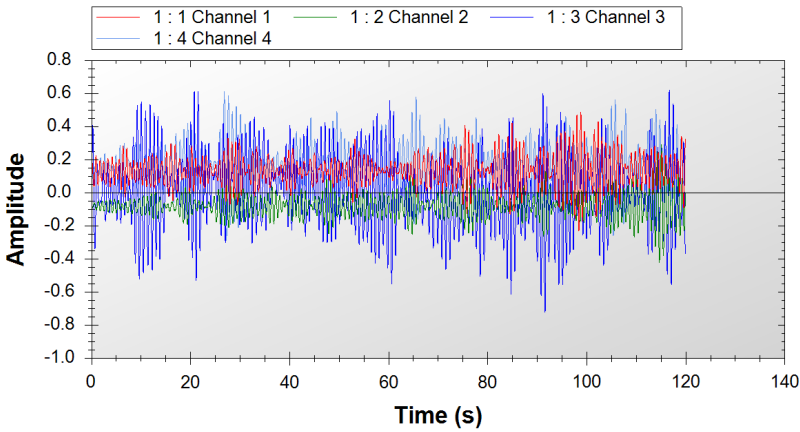
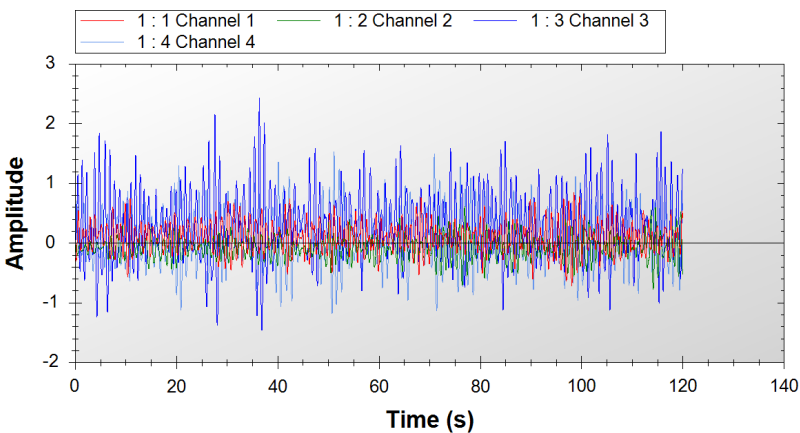
波向 條件			示性波高 Hs(cm)		示性週期 Ts(sec)		潮位(cm)	
			原型 (m)	模型 (cm)	原型 (sec)	模型 (sec)	原型 (m)	模型 (cm)
季風	夏季	W	1.93	1.29	8.61	0.703	7.51	25.01
	冬季	NNE	3.37	2.25	8.84	0.722		
		N						
颱風		NNE	8.0	5.33	11.9	0.972	8.63	25.75
		N						

(試驗條件來源：本所港研中心觀測統計資料)

表 2.5 遮蔽試驗 JONSWAP 試驗條件

造波波向 模擬條件		示性波高Hs(cm)	Tp波浪週期(sec)
		不規則波，採用JONSWAP波譜	
夏季季風	W	1.29	0.756
冬季季風	N	2.25	0.776
颱風	N	5.33	1.045

表 2.6 遮蔽試驗不規則波

	JONSWAP
夏季 (W)	Instrument Output 
冬季 (N)	Instrument Output 
颱風 (N)	Instrument Output 
圖例	A 為 1 : 1 Channel 1 B 為 1 : 2 Channel 2 C 為 1 : 3 Channel 3 D 為 1 : 4 Channel 4

第三章 臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

本章說明動床漂沙試驗與定床遮蔽試驗成果，其中依第二章試驗條件動床漂沙試驗以規則波，含夏、冬兩季節與颱風情境下時間比尺進行實驗，研究長程方案配置與漂沙地形的侵淤變化。定床遮蔽試驗，則以不規則波(JONSWAP 波譜)及冬季節與颱風情境下進行實驗，研究近程方案配置與長程方案配置的水動力變化。

3.1 動床漂沙試驗結果

本計畫依第二章試驗佈置與模擬條件進行長程方案(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，即利用預備試驗結果之時間比尺條件進行預備試驗 2 回；基此，第 1 回以夏季 W 方向波浪條件：試驗週期 1.28sec、試驗波高 3.38cm、試驗水深 41.36cm，造波 3 小時，再進行颱風波浪條件：試驗週期 1.68sec、試驗波高 16.28cm、試驗水深 42.59cm，造波 30 分鐘，接續夏季 W 方向相同波浪條件造波 3 小時，緊接冬季 NNE 方向波浪條件：試驗週期 1.48sec、試驗波高 8.35cm、試驗水深 41.36cm，造波 8 小時完成後結束，接續再重複第 2 回，完成 2 年推估。

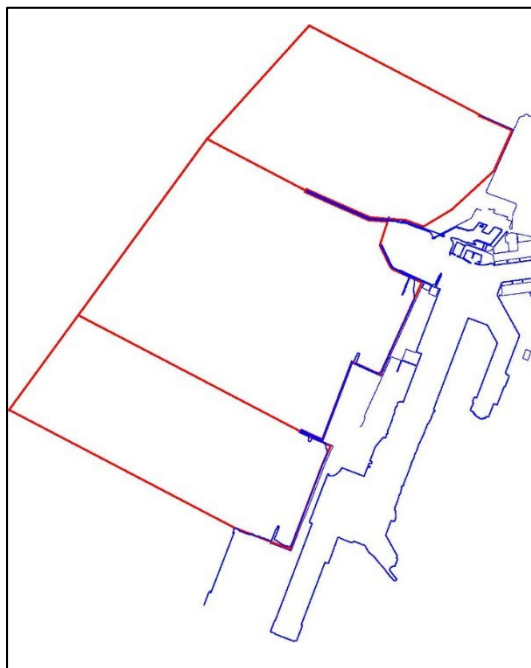
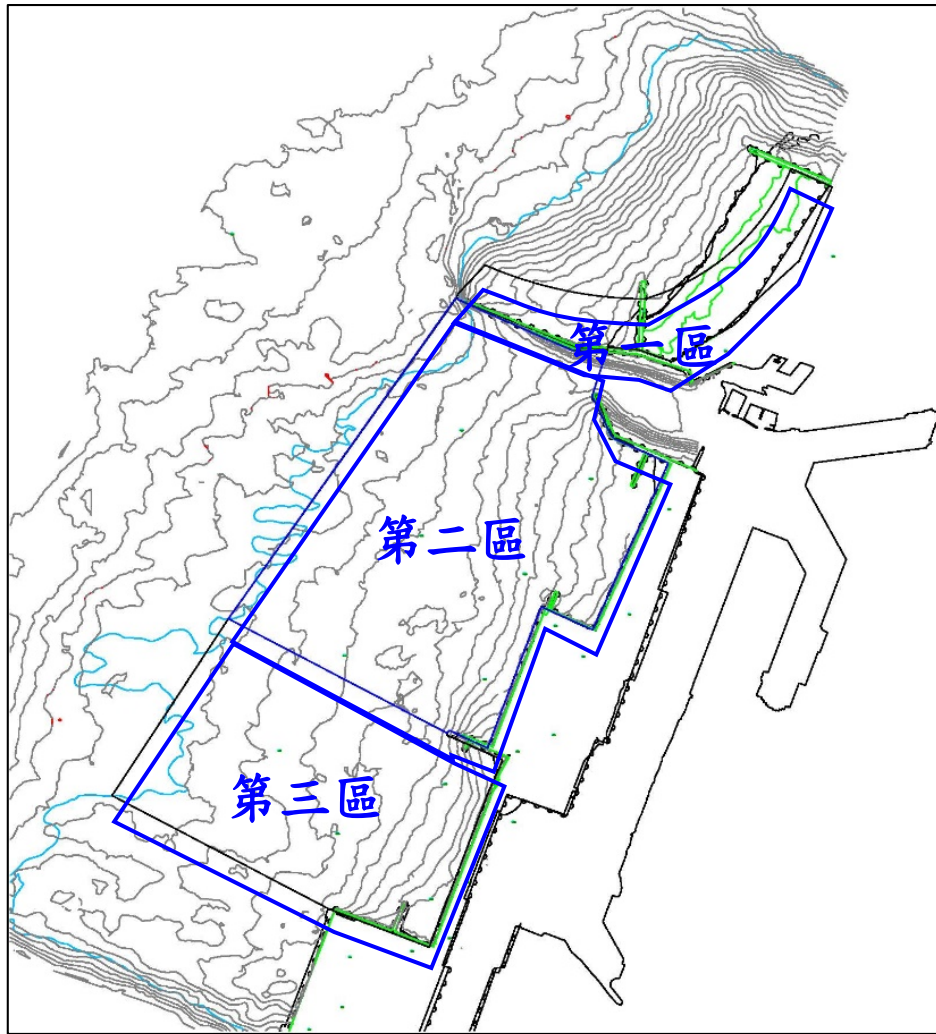
將實驗量測波高轉化成實際波高如表 3.1，其中 CH7 與 CH8 為外廓防波堤進出口外側最近測點，CH9 與 CH10 為北外廓防波堤堤內(又稱外商港區迴船池)測點，CH15 與 CH16 為 LNG 接收站位置；冬季時北外廓防波堤外測點 0.76m~0.97m 大於北外廓防波堤堤內測點 0.49m~0.70m，夏季時北外廓防波堤外測點 0.434m~0.795m 亦大於北外廓防波堤堤內測點 0.357m~0.380m。

因此，不論冬季與夏季情況港外側測點波高皆大於港內測點波高，顯示北外廓防波堤能有效防止港外波浪進入港區，惟颱風情境下北外廓防波堤外測點與堤內測點沒無明顯變化，但南外廓防波堤內之 LNG 接收站位置不論冬季、夏季與颱風情境波高為 0.14m~1.16m，顯示南外廓防波堤能有效阻擋波浪折繞射影響，甚至於颱風亦有相當成效。

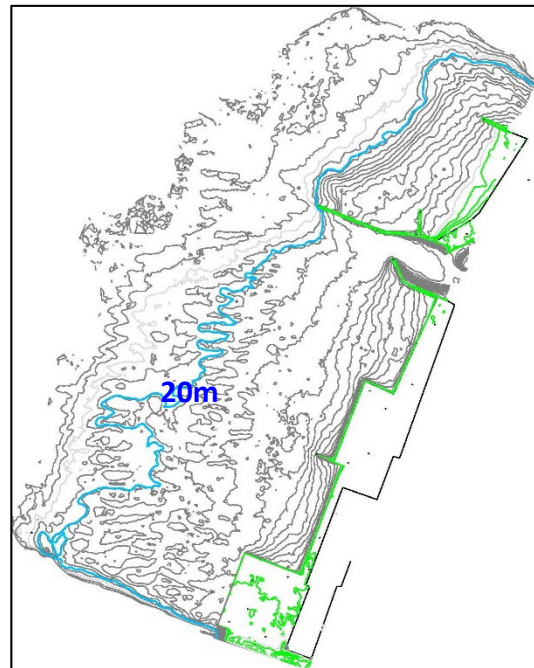
表 3.1 長程漂沙方案實驗量測波高各情境波浪轉換表(實際波高)

規則波試驗 波高量測位置	H _{1/3} 波高值(公尺)		
	NNE(冬)	W(夏)	NNE(颱風)
CH1	2.40	0.755	4.01
CH2	1.93	0.647	4.28
CH3	1.03	0.815	5.03
CH4	1.57	1.143	2.75
CH5	1.10	1.399	2.43
CH6	0.70	1.085	3.32
CH7	0.76	0.795	3.61
CH8	0.97	0.434	2.07
CH9	0.49	0.357	2.09
CH10	0.70	0.380	3.22
CH11	0.14	0.344	1.30
CH12	0.86	0.890	1.64
CH13	0.49	0.262	0.93
CH14	0.65	0.597	1.60
CH15	0.35	0.205	1.16
CH16	0.14	0.313	0.80

水工模型試驗地形測量工作成果侵淤分析，為利於臺中港模型試驗地形分析比較，港區以北至南分為 3 區進行分析，如圖 3.1，第 1 為臺中港北防波堤以北，第 2 為北防波堤至中油石化專區外海突堤，第 3 為中油石化專區外海突堤以南區域。為避免受到水工模型試驗場地邊界影響的關係，本次水工模型試驗地形侵淤土方量邊界控制在初始地形-20m 水深範圍內，並調整第 1 區計算範圍，以符合實際地形變化趨勢。



(1) 水工模型試驗分區



(2) 水工模型試驗初始地形

圖 3.1 水工模型試驗地形侵淤變化計算範圍

配合臺中港長程方案施作外廊堤興建配置試驗後所產生之地形變化影響，再利用光達測量工作，如附錄三所示，及採用水深測量專業軟體 Hypack MAX 中的 TIN(不規則三角網, Triangulated Irregular Network) Model 程式，程式計算侵淤變化情形。有關臺中港長程方案土方量侵淤變化表，漂沙計算方式係採用兩次地形成果所建出之數值高程模型 DEM，後續依據模型水平縮尺 1/300 及垂直縮尺 1/75 依比例放大，後續以 TIN 不規則三角網進行數值計算兩次地形變化之差值，得出土方量侵淤之結果。本土方量計算所使用數據，為本試驗現場量測之數據，並委託詮華國土測繪有限公司進行相關土方量侵淤變化。

本計畫呈現漂沙試驗結果經歷 7 次時間比尺之波浪作用(相當於現場波浪作用 7 年)，其中近程方案配置漂沙地形每次均配合設計水深補充-20 水深之等深線，以模擬臺中港海域地形，重複經波浪作用後 5 年後，再進行長程外廊堤方案探討波浪作用 2 年後所產生之地形變化，此地形變化再與近程方案波浪作用 5 年後地形(即 109 年 10 月 08 日漂沙試驗結果)進行侵淤比較，有關侵淤比較圖，如圖 3.2 所示。

由於長程方案之外廊堤新建位置係沿著-20 水深之等深線興建北外廊防坡堤，由於-20 水深係漂沙試驗補充沙源位置，屬於漂沙試驗啟動的西邊界，為避免邊界效應影響，因此，無法比較比較北外廊延伸段防波堤港區外地形變化，僅呈現地形侵淤變化情形，不計算土方量變化，如圖 3.3 所示。由圖 3.2 所示，第 3 區：中油石化專區外海突堤以南區域，淤積內呈現均勻淤積的情況，總淤積量 245.70 萬 m^3 最大，淤積高程約原地形高程+0.5~+3m；第 2 區：北防波堤至中油石化專區外海突堤，淤積量 135.81 萬 m^3 次之，雖亦呈現均勻淤積的情況，但原北堤內側侵蝕情況嚴重，侵蝕高程約原地形高程-5m，淤積平衡後，總淤積情形較第 3 區輕微；第 1 區：臺中港北防波堤以北，淤積量 2.88 萬 m^3 接近平衡，但侵蝕淤積分布較不均勻，例如原北堤外側侵蝕情況嚴重，新建外廊堤轉折與北飛沙整治區外側呈現淤積，總計臺中港 2 年內總淤積量為 384.39 萬 m^3 ，年淤積量每年 192.195 萬 m^3 ，如表 3.2 所示。

表 3.2 臺中港長程方案土方量侵淤變化表

區段	淤積土方量 (萬 m ³)	沖刷土方量 (萬 m ³)	合計土方量 (萬 m ³)
1	284.76	-281.88	2.88
2	564.30	-428.49	135.81
3	342.27	-96.57	245.70

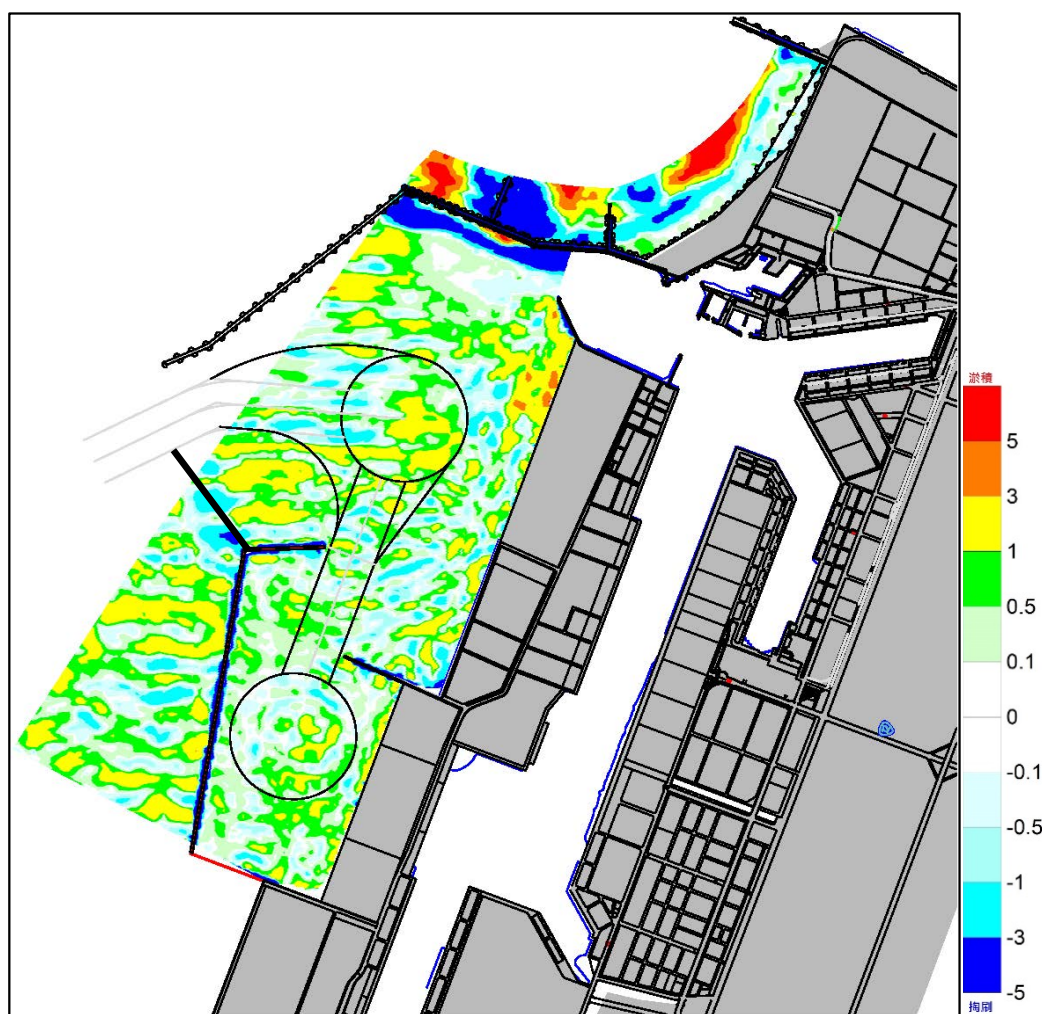


圖 3.2 臺中港試驗後侵淤比較圖

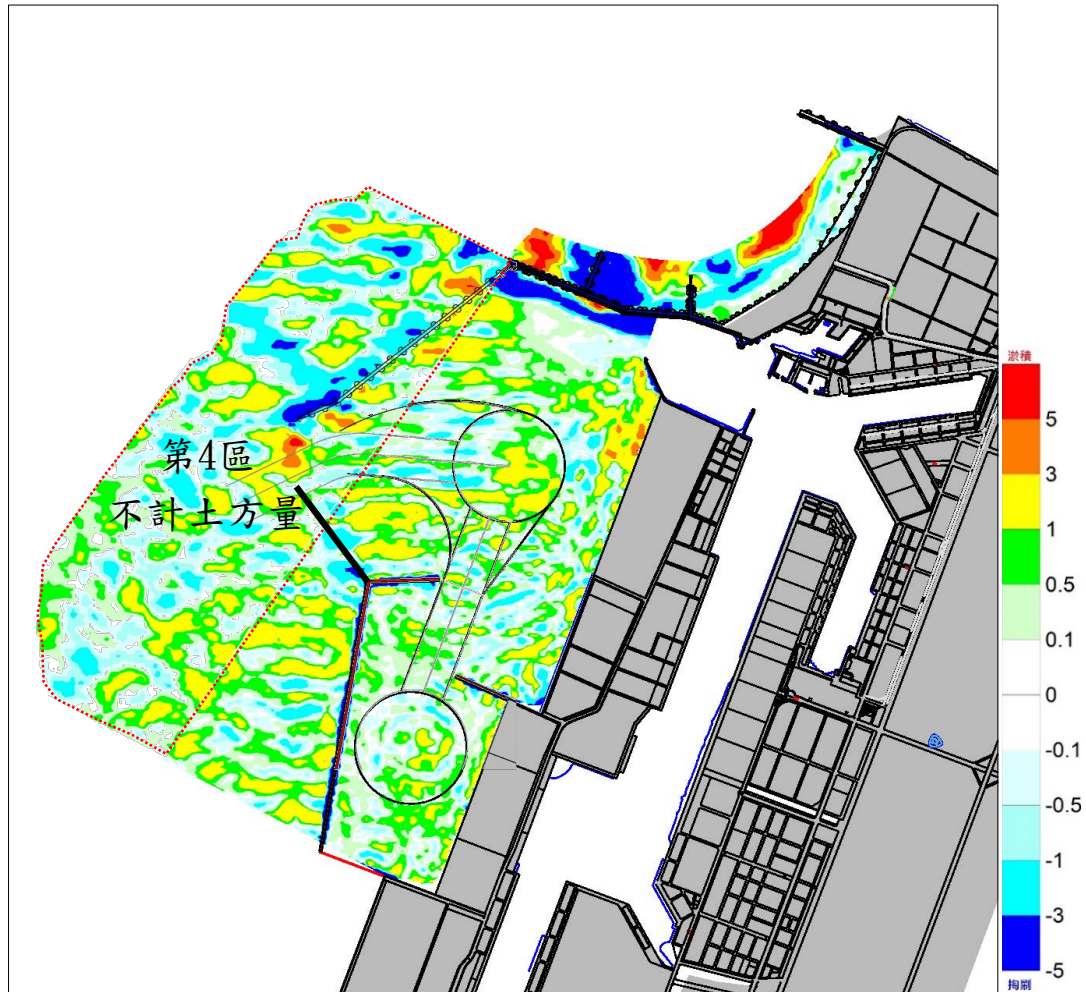


圖 3.3 臺中港試驗後侵淤比較圖(不計第 4 區)

3.1.1 冬季季風波浪試驗結果與討論

試驗初期長程方案之北防波堤模型遭遇造波初期產生越波現象，如圖 3.4 所示，經於試驗水池及模型周圍設置消波塊石，整體消能改善反射波互制及波浪折繞射振盪影響，北防波堤越波現象逐漸趨於平衡穩定趨勢。以實驗結果而言，當外廓堤模型延伸防波堤建置完成後，原有臺中港北防波堤以及延伸區域，於試驗波浪產生明顯較大波高，CH3 量測到波高 4cm，相當現場真實波高 1.03m，且外廓防波堤內外均產生較大的紊亂波高，如圖 3.5 所示，特別需注意大量漂沙有堆積北淤沙區情形，如圖 3.6 所示，而且堤體基礎附近亦有掏刷之現象，需加強注意其如何改善問題。

此外，本計畫關注南外廓防波堤內側 LNG 接收站產生不靜穩現象，當在堤防外側放置消波塊改善後，港內較不穩靜情形下降，並使防波堤護基及堤腳掏刷現象減緩，防波堤堤體趨於穩定；至於長程外廓防波堤模型延伸布置情況，最後 500m 的海堤外海，由於規則波產生較大波高，CH4 量測實驗波高為 6cm，相當現場真實波高 1.54m，因此，北外廓防波堤頭處附近包括港內外均呈現紛亂震盪，總結來說，冬季季風造波試驗時，外商港區(迴船池)波浪相較於 LNG 接收區大，LNG 接收區內則波浪較為靜穩，如圖 3.7 所示。



圖 3.4 長程方案冬季造波初期產生之越波現象

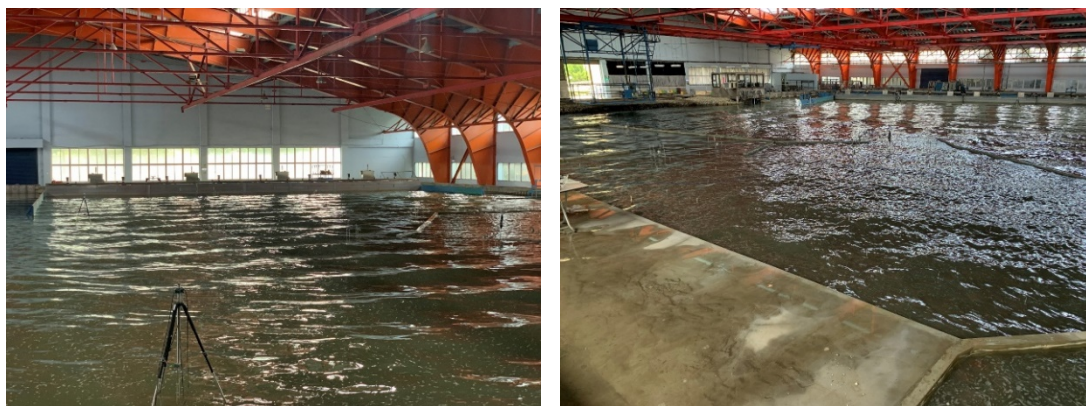


圖 3.5 長程方案冬季外廓防波堤(左)港外情況與(右)港內情況



圖 3.6 北淤沙區大量漂沙有堆積情形



圖 3.7 LNG 接收區域內波浪較為靜穩

3.1.2 夏季季風波浪試驗結果與討論

進一步探討外廓防波堤延伸布置後，於夏季波浪條件下，外商港區(迴船池)CH9~CH12 量測 1.389cm~3.494cm，相當現場真實波高 0.357m~0.890m，以及 LNG 接收站內 CH13~CH16 量測 0.796cm~

2.319cm，相當現場真實波高 0.205m~0.597m，該二位置波浪呈現靜穩定現象，如圖 3.8 所示，與颱風波浪試驗條件相比靜穩許多，惟颱風情境港內產生不靜穩現象，如 CH9~CH16 量測 0.031cm~12.509cm，相當現場真實波高 0.8m~3.22m，而且於外廓防波堤堤頭處易產生波浪越堤情況，如圖 3.9 所示，影響港池內靜穩狀態。



圖 3.8 夏季條件港內靜穩現象



圖 3.9 颱風情境港內外產生不靜穩情形

3.1.3 漂沙試驗結果與討論

本計畫依據臺中港長程外廓堤之規劃，於臺中港南填方區及石化專區外興建外廓防波堤，堤內興建 LNG 接收站，故水工模型試驗配合設計水深調整海域地形，先使用近程南外廓防波堤興建後經規則波漂沙作用後 5 年後之地形，再於長程北外廓防波堤興建後，使用相同試驗條件之波浪作用，探討 1 年後之地形變化，第 1 年試驗結束後，再重新進行補沙作業，並於北防坡堤北側堤基及堤腳掏刷處補充拋放模型消波塊，再繼續第 2 年的水工模型試驗，並觀察試驗結果與保護成效。

由第 1 年漂沙試驗地形變化之結果，獲以下結論，位於北外廓防波堤處，堤防南北側均出現掏刷之情形，如圖 3.10 所示，後續第 2 年將進行模型消波塊石的補充，以符合現場未來需求，故原北防波堤外側附近產生明顯掏空刷深現象已獲得改善，顯示堤址及基礎處產生淤積固沙護基功效，如圖 3.11 所示；位於南外廓防波堤處，LNG 港迴船池皆出現淤積情形，新建之南外廓防波堤外海處亦有淤積之情形，如圖 3.12 所示，但南外廓防波堤轉折處則呈現掏刷現象。



圖 3.10 北外廓防波堤南北側掏刷現象

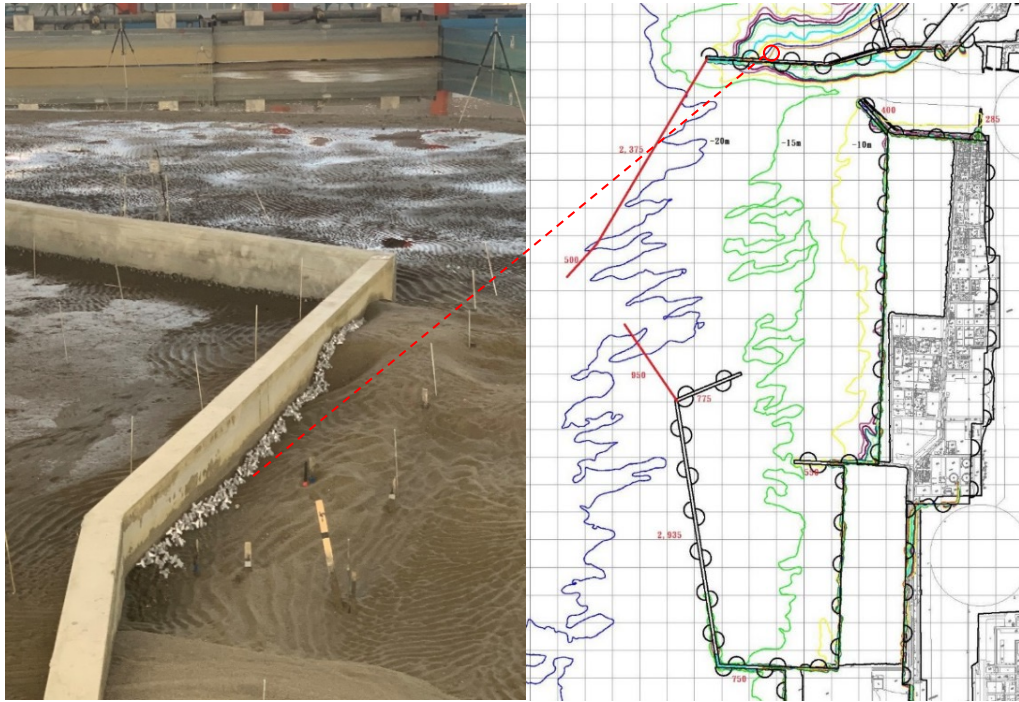


圖 3.11 原北防波堤外側補充消波塊改善情形

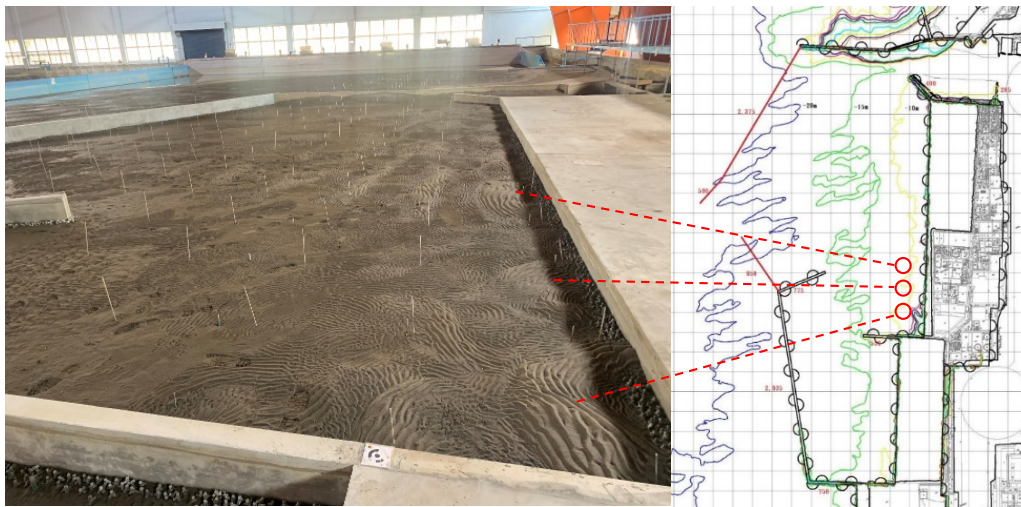


圖 3.12 南外廓防波堤外海處之淤積情形

由第 2 年漂沙試驗地形變化之結果，獲以下結論，位於北外廓防波堤內側附近產生明顯掏空刷深現象，如圖 3.13 所示，此特殊現象可另由斷面試驗探討研究；另外於北淤沙區外海、北堤與新建北外廓堤轉角處鋪設消波塊後，有淤積情形，如圖 3.14 所示。

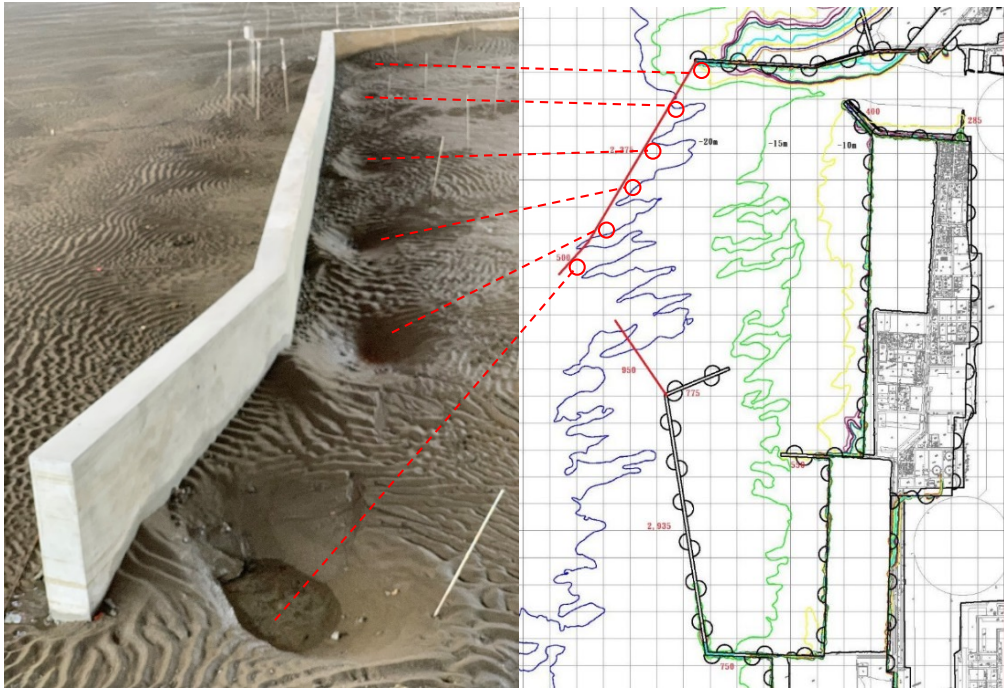


圖 3.13 北外廓防波堤延伸堤內側產生刷深現象

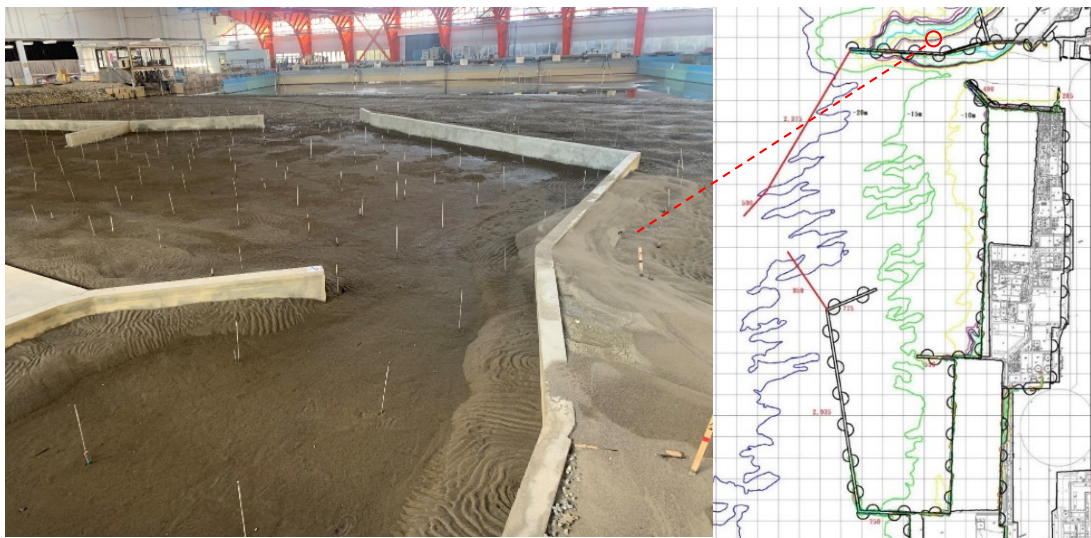


圖 3.14 北淤沙區呈現淤積現象

3.2 定床遮蔽試驗結果

本遮蔽試驗探討臺中港近程南外廓防波堤興建方案，及長程北外廓防波堤興建方案，探討 125 年填方區與外廓堤配置之初步構想，及碼頭後續浚挖與圍堤工程完成後，對於其他港池泊地、航道、迴船池及碼頭作業區等水域靜穩度，是否能滿足船舶航行、靠泊與碼頭裝卸作業等需求，本小節將對於颱風、季風波浪作用情況下，探討波浪經

地形淺化與折射變形，以及通過防波堤結構物繞射後，對港池靜穩影響之評估。

3.2.1 近程方案試驗結果

經本所對於臺中港長期觀測與統計資料顯示，冬季與颱風情境 NNE 方向波浪大約佔 49.25%，N 方向波浪約佔 40.20%，其餘方向波浪約佔 10.55%，原商港區入港航道與港池內受舊有北堤遮蔽保護，並未造成港池不穩靜情況，因此，商港區域船舶作業不致受波浪影響太大，後續近程南外廓防波堤興建後對港池影響情形，亦須確保商港區入港航道與港池內之靜穩度，根據台灣世曦工程顧問股份有限公司研究報告評估，近程配置方案當中以冬季 N 方向影響較大，本試驗結果如表 3.3 所示，冬季 N 方向影響較大與世曦評估報告相符。

表 3.3 近程方案冬季及颱風 N 及 NNE 方向各區波高轉換實際波高彙整表

各試驗條件波浪區域	冬季季風 (NNE) 均值		冬季季風 (N) 均值		颱風 (NNE) 均值		颱風 (N) 均值	
	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)
CH1~9	2.78	9.68	1.99	9.68	6.93	12.12	4.76	12.12
CH10~29	1.78	9.92	2.62	9.80	4.72	13.23	6.78	12.37
CH30~37	1.12	10.29	2.06	9.80	3.69	12.86	6.25	11.39
CH38~48	0.77	10.41	1.82	10.17	2.74	12.98	4.91	12.98

以整體分區檢討而言，近程方案波高配置共分 4 區說明，包括：
 I. 港外-20m 水深、II. 港外-20m 水深以內至南外廓防波堤、III. 南外廓防波堤內至北內防波堤之間，以及 IV. LNG 天然氣接收站，近程方案試驗量測區域分配圖，如圖 3.15 所示；因此，除港外-20m 水深外測點 CH1~CH9 冬季與颱風情境，波浪 N 方向均值小於波浪 NNE 方向波高(H_{1/3})均值外，其餘波高計於冬季與颱風情境 CH10~CH29 量測值，包括港外-20m 水深以內至南外廓防波堤，南外廓防波堤內至北內防波堤之間 CH30~CH37 量測值以及 LNG 天然氣接收站 CH38~CH48 量測值，波浪 N 方向波高(H_{1/3})均值皆大於波浪 NNE 方向波高(H_{1/3})均值，

符合顧問公司數值模擬規劃時考量波浪 N 方向為主要因素，因此，近程外廓設計規劃，以遮蔽試驗結果探討，確實以波浪 N 方向對港內有較為明顯影響。

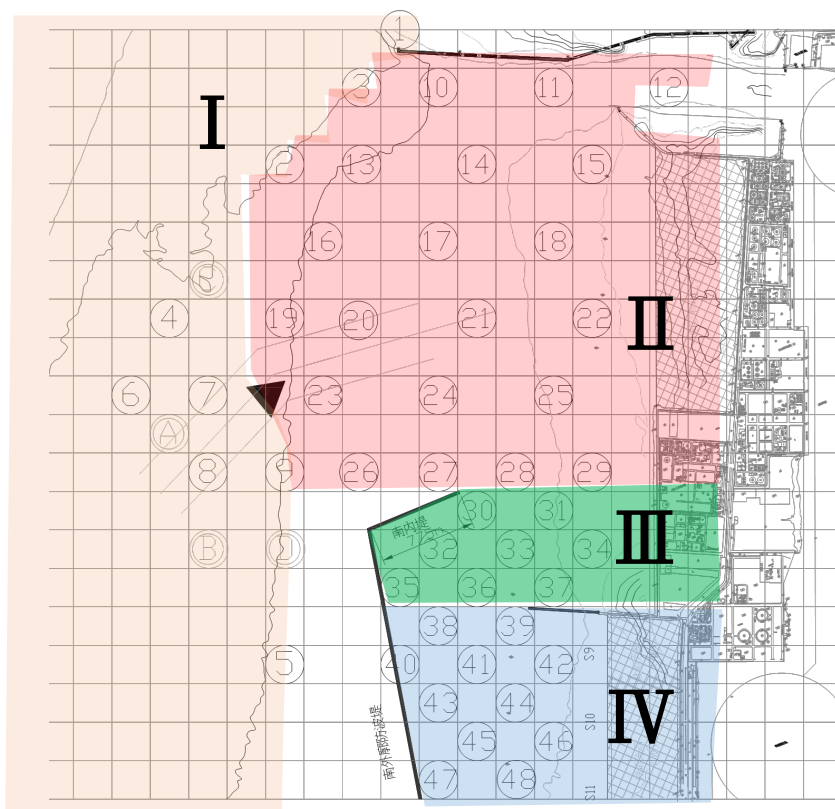


圖 3.15 近程方案試驗量測區域分配圖

以點位檢討而言，近程外廓防波堤遮蔽試驗各量測點試驗值轉換成實際波高，如表 3.4 所示，夏季期間於臺中港港外測點向港內測點觀察，CH4 測點波高($H_{1/3}$)為 1.741m、CH7 測點波高($H_{1/3}$)為 1.428m、CH12 測點波高($H_{1/3}$)為 1.196m、CH32 測點波高($H_{1/3}$)為 0.768m、CH45 測點波高($H_{1/3}$)為 0.313m，波浪由港外向港內逐漸變小，顯示南外廓防波堤對於夏季 W 向波浪能防止波浪進入 LNG 港內，至於冬季與颱風情境討論，臚列如下：

- (1)港外-20m 水深外：測點 CH4 冬季以 NNE 方向波高($H_{1/3}$)3.34m 較 N 方向波浪大，颱風以 NNE 方向波高($H_{1/3}$)為 8.712m 較 N 方向波浪大；測點 CH7 冬季以 NNE 方向波高($H_{1/3}$)為 1.855m 較 N 方向波浪大，颱風以 NNE 方向波高($H_{1/3}$)為 4.547m 較 N 方向波浪大。

(2)港外-20m 水深以內至南外廓防波堤：測點 CH12 冬季以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 0.435m 較 NNE 方向波浪大，但相對靜穩；颱風以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 1.227m 較 NNE 方向波浪大；測點 CH17 冬季以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 3.868m 較 NNE 方向波浪大，但相對靜穩；颱風以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 9.168m 較 NNE 方向波浪大，如圖 3.16 所示。

(3)南外廓防波堤內至北內防波堤之間：測點 CH32 冬季以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 1.408m 較 NNE 方向波浪大，颱風以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 5.038m 較 NNE 方向波浪大，如圖 3.17 所示。

(4)LNG 天然氣接收站：測點 CH45 冬季以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 2.095m 較 NNE 方向波浪大，颱風以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 3.770m 較 NNE 方向波浪大，如圖 3.18 所示。

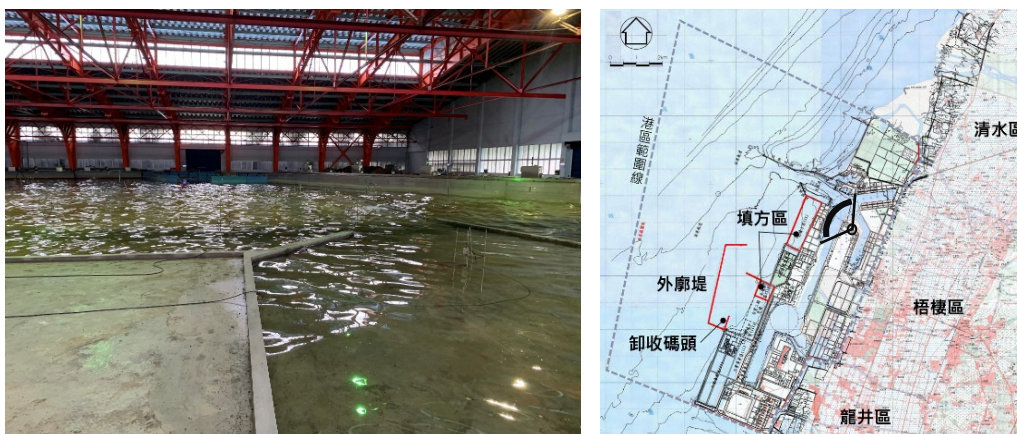


圖 3.16 原臺中港進出口(CH12 測點)試驗影像

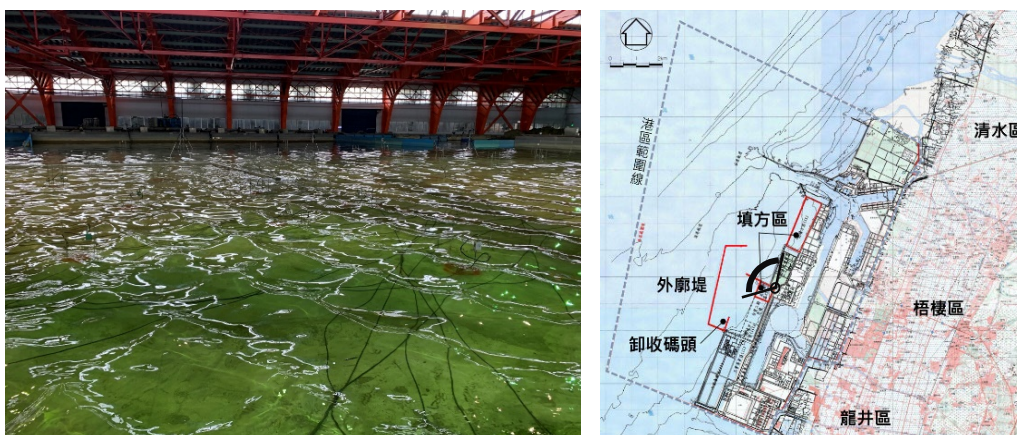


圖 3.17 南外廓防波堤內至北內防波堤之間試驗影像



圖 3.18 LNG 天然氣接收站試驗影像

表 3.4 近程外廓防波堤遮蔽試驗量測之波高值轉換表(實際波高)

不規則波 試驗量測 位置	H _{1/3} 波高值(m)				
	N(冬)	NNE(冬)	W(夏)	NNE(颱風)	N(颱風)
CH1	4.451	5.705	1.213	11.950	9.443
CH2	2.897	3.395	0.880	8.926	7.003
CH3	3.940	3.279	1.757	7.596	8.125
CH4	1.650	3.340	1.741	8.712	3.949
CH5	0.654	2.516	1.990	6.672	2.862
CH6	0.993	1.716	1.719	3.893	2.564
CH7	1.744	1.855	1.428	4.547	3.729
CH8	0.849	2.251	1.423	6.837	2.491
CH9	0.776	0.954	0.733	3.242	1.886
CH10	1.497	1.067	1.636	3.189	5.308
CH11	0.956	0.929	1.114	2.619	3.392
CH12	0.435	0.365	1.196	0.018	1.227
CH13	3.481	2.461	1.409	7.200	8.723
CH14	1.777	1.069	1.569	3.345	4.635

不規則波 試驗量測 位置	H _{1/3} 波高值(m)				
	N(冬)	NNE(冬)	W(夏)	NNE(颱風)	N(颱風)
CH15	0.823	0.789	2.385	2.534	2.573
CH16	2.956	2.581	1.330	7.589	7.758
CH17	3.868	1.701	1.817	4.204	9.168
CH18	1.827	1.009	1.942	3.343	4.175
CH19	2.758	1.773	0.897	5.306	6.740
CH20	4.194	3.825	1.828	8.584	8.999
CH21	5.770	2.958	2.911	4.272	17.155
CH22	1.723	1.039	1.403	3.182	4.943
CH23	2.877	2.782	1.374	7.604	7.326
CH24	2.642	1.544	1.155	5.713	6.129
CH25	2.976	1.260	1.471	4.448	7.743
CH26	2.365	2.693	1.522	6.394	5.689
CH27	3.318	2.377	2.180	7.518	7.733
CH28	2.530	2.164	1.374	4.060	7.528
CH29	3.713	1.272	1.429	3.371	8.648
CH30	2.363	1.443	0.957	4.831	6.982
CH31	1.844	1.454	0.977	3.642	8.654
CH32	1.408	0.874	0.768	2.773	5.038
CH33	2.658	1.299	0.706	4.729	7.066
CH34	3.549	1.719	0.818	6.059	8.748
CH35	1.586	0.723	0.408	2.164	4.869
CH36	1.454	0.701	0.472	2.555	4.694
CH37	1.647	0.765	0.447	2.806	3.943
CH38	1.719	0.723	0.431	2.382	5.224

不規則波 試驗量測 位置	H _{1/3} 波高值(m)				
	N(冬)	NNE(冬)	W(夏)	NNE(颱風)	N(颱風)
CH39	1.760	0.981	0.478	3.325	5.044
CH40	2.110	0.824	0.487	3.280	5.917
CH41	1.834	0.813	0.392	2.777	5.225
CH42	1.862	0.683	0.289	2.465	4.771
CH43	2.046	0.641	0.385	2.383	5.128
CH44	0.561	0.789	0.215	2.876	4.626
CH45	2.095	0.664	0.313	2.213	3.770
CH46	2.435	1.020	0.458	3.711	6.363
CH47	1.866	0.699	0.297	2.214	4.425
CH48	1.732	0.679	0.230	2.466	3.546

近程南外廓防波堤方案，探討冬季季風 NNE 方向波浪、N 方向波浪，由於冬季 N 方向波浪造成些許越波情況，為防止波浪越堤發生，本計畫追加胸牆墊高條件進行試驗，如圖 3.19 所示，即探討胸牆墊高 N 方向波浪試驗條件，並量測南外廓防波堤內至北內防波堤之間 CH30～CH37 測點與 LNG 天然氣接收站 CH38～CH48 測點波高。

由於為直接探討船舶碼頭靜穩需求容許波高，因此，實驗值換算現場真實波浪值再與比較，本處波高平均值 H_{mean} 表示試驗波高量測值換算後時序列之平均值，各條件差異比較，如表 3.5 所示，南外廓防波堤內至北內防波堤之間，除冬季 NNE 方向波浪小於 LNG 船容許波高，其餘情況均未達標準；LNG 天然氣接收站區冬季 NNE 方向波浪與胸牆墊高(磚塊厚度 5cm 相當於墊高 7.5m)冬季 N 方向波浪，均符合 LNG 船容許波高，惟冬季 N 方向波浪超標，均大於 LNG 船與風電船容許波高。因此，冬季船舶行駛與靠泊等作業仍須特別留意波浪造成之影響。



圖 3.19 近程方案胸牆墊高試驗影像

表 3.5 近程方案遮蔽試驗與船舶碼頭靜穩需求容許波高比較表

試驗波高 量測區域	波高平均值 H_{mean}			船舶碼頭靜穩需 求容許波高
	NNE(冬)	N(冬)	胸牆墊高 N(冬)	
CH30~37	0.66m	1.29m	1.30m	LNG船<1.0m
CH38~48	0.48m	1.12m	0.92m	風電船<0.7m

此外，依據台灣世曦公司彙整 2003~2016 年本所觀測臺中港歷年海流統計資料，可知臺中港歷年由夏季主要流向為 N 方向與 NNW 方向，其他月份流向則以 WSW 方向及 W 方向為主，全年平均流速約在 34.1cm/sec~47.8cm/sec 之間，其中以冬季平均流速最大、春季最小，歷年最大流速發生在夏季，流速約 259.7cm/sec；本試驗討論波引致流部分，近程方案流速計設置位置圖，如圖 3.20 所示，夏季流向 ENE，夏季平均流速 21.21cm/s，冬季流向 WSW，冬季平均流速 119.61cm/s，如表 3.6 所示。

表 3.6 臺中港歷年海流流速及流向與試驗造引致流統計表

季節	現場實測海流統計資料			試驗波引致流	
	平均流速 (cm/s)	主要流向(%)	最大流速(cm/s)與 流向	平均流速 (cm/s)	流向
冬	39.9	WSW(18.6%)	248.3 / W	119.61	WSW
夏	38.7	N(28.4%)	259.7 / SW	21.21	ENE



圖 3.20 近程方案流速計設置位置圖

3.2.2 長程方案試驗結果

長程方案設計雖能增加臺中港可用之腹地，但興建後對港區影響如何，能否確保商港區入港航道與港池內穩定，因此，本階段試驗仍延續動床試驗條件繼續研究，據研究觀察北外廓防波堤於冬季與颱風情境 N 方向波浪條件下，遮蔽作用具有顯著效果，特別係外商港區迴船池內港池震盪程度減緩，顯示絕大部分波浪能量已於港區外屏蔽，因此，北防波堤對於波浪能量的反射，以及臺中港池的靜穩度起到至關重要之作用，如圖 3.21 所示。

本試驗結果將分區及單點討論，長程方案波高配置 48 支，同樣分 4 區進行說明，包括：I. 臺中港港外區，測點 CH1～CH9、II. 外商港區迴船池，測點 CH10～CH29、III. 南外廓防波堤內至北內防波堤之間，測點 CH30～CH37，以及 IV. LNG 天然氣接收站，測點 CH38～CH48，如圖 3.22 所示，單點部分於 I～IV 區域各選擇幾點做為討論，臺中港港外區選擇 CH4 與 CH7，外商港區迴船池選擇 CH12 與 CH17，南外廓防波堤內至北內防波堤之間，選擇北內提前 CH32，LNG 天然氣接收站 CH45 站點進行討論。

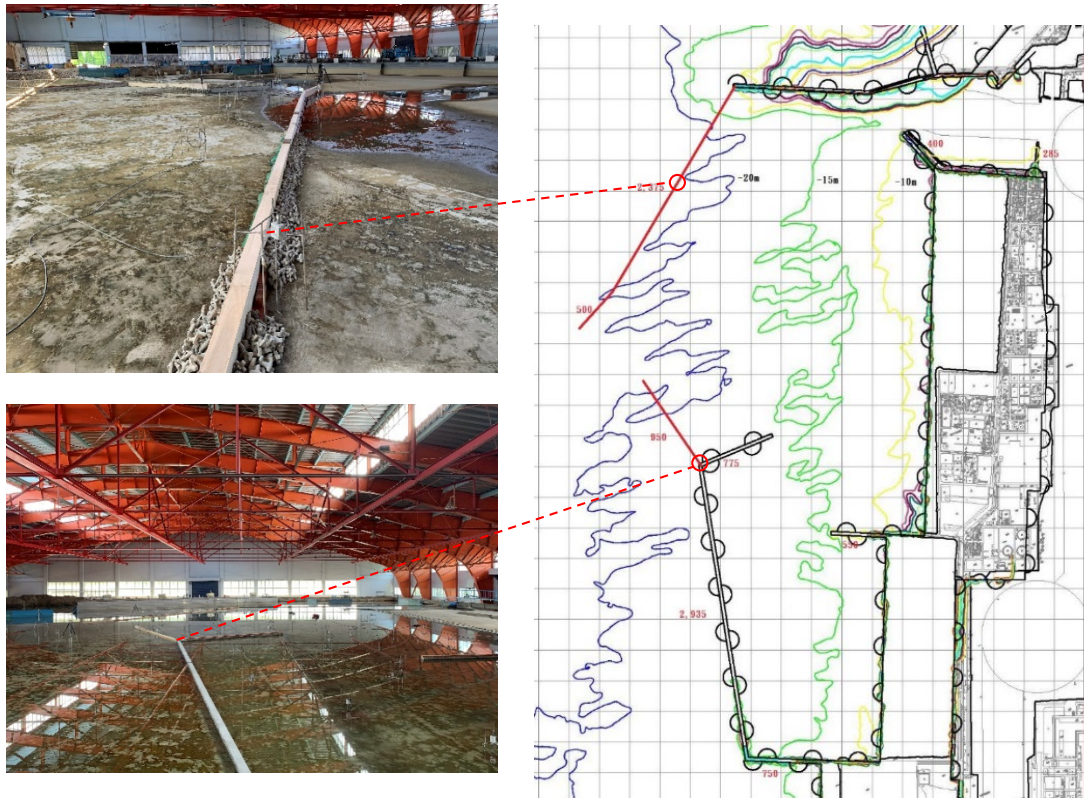


圖 3.21 長程方案試驗配置情形

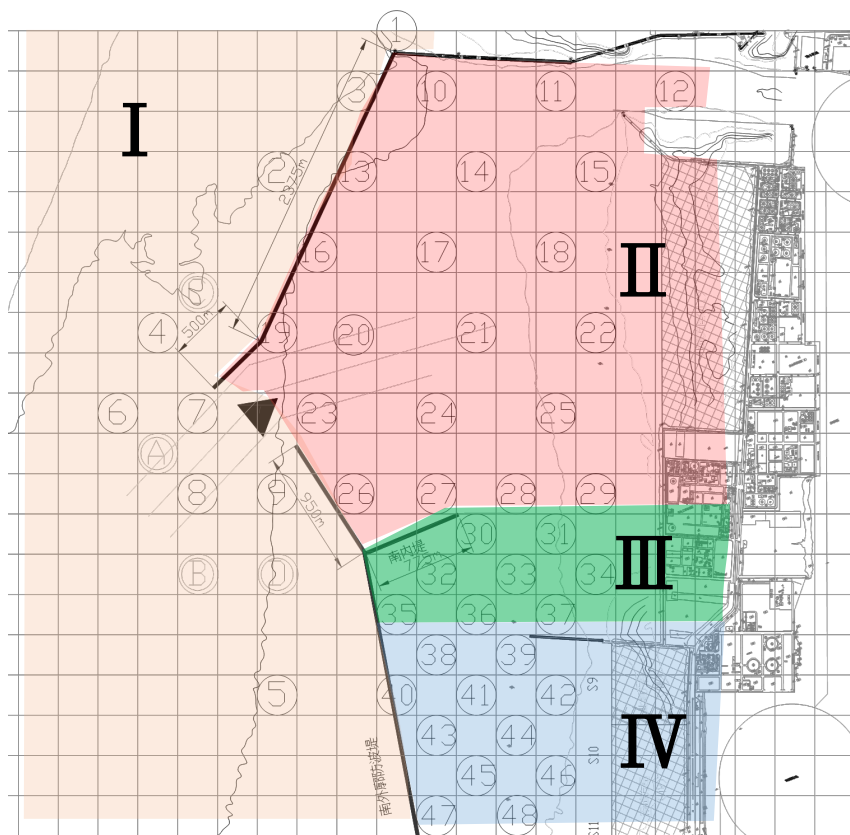


圖 3.22 長程方案試驗量測區域分配圖

以點位說明，長程外廓防波堤遮蔽試驗各量測點試驗值轉換成實際波高，如表 3.7 所示，夏季期間於臺中港港外測點向港內測點觀察，CH4 測點波高($H_{1/3}$)為 1.607m、CH7 測點波高($H_{1/3}$)為 1.384m、CH12 測點波高($H_{1/3}$)為 1.105m、CH32 測點波高($H_{1/3}$)為 0.663m、CH45 測點波高($H_{1/3}$)為 0.435m，波浪由港外向港內逐漸變小，顯示南外廓防波堤對於夏季 W 向波浪能防止波浪進入 LNG 港內，至於冬季與颱風情境討論，臚列如下：

(1)臺中港港外區：測點 CH4 冬季以 N 方向波高($H_{1/3}$)2.762m，颱風以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 6.040m；測點 CH7 冬季以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 1.483m，颱風 N 方向波高($H_{1/3}$)為 2.423m。

(2)外商港區迴船池：測點 CH12 冬季以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 0.273m，颱風以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 0.825m。

(3)南外廓防波堤內至北內防波堤之間：測點 CH32 冬季以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 0.775m，颱風以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 1.547m。

(4)LNG 天然氣接收站：測點 CH45 冬季以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 0.536m，颱風以 N 方向波高($H_{1/3}$)為 1.170m。

本計畫遮蔽試驗以 2 種配置方案進行，並選擇近程、長程相同波浪條件進行比較，探討 2 種方案的靜穩程度，從夏季探討，除 LNG 天然氣接收站 CH45 測點波高($H_{1/3}=0.537\text{m}$)長程方案配置略大於近程方案，港內其餘位置波高長程方案配置均小於近程方案；冬季部分探討，除臺中港港外區 CH4 測點波高($H_{1/3}=2.762\text{m}$)長程方案配置略大於近程方案，港內其餘位置波高長程方案配置均小於近程方案；颱風情境探討，除臺中港港外區 CH4 測點波高($H_{1/3}=6.040\text{m}$)長程方案配置略大於近程方案，港內其餘位置波高長程方案配置均小於近程方案，綜上所述顯示長程方案遮蔽效果卓著，特別於颱風情境 LNG 天然氣接收站特別明顯，此外，除颱風 N 方向波浪超標，大於 LNG 船容許波高(<1.0m)外，冬季 N 方向波浪與夏季 W 方向波浪，均符合 LNG 船容許波高。颱風事件，在本試驗條件下超過容許波高，因此，仍建議 LNG 船舶於颱風期間先行躲避波浪，待波浪轉小後再進行接氣作業，以免接氣管路脫落造成危險，如表 3.8 所示。

表 3.7 長程外廓方案冬、夏季風及颱風遮蔽試驗量測所得波高值

不規則波 試驗量測位置	長程方案試驗H _{1/3} 波高值(m)		
	N(冬)	W(夏)	N(颱風)
CH1	3.814	0.770	9.724
CH2	3.100	1.231	8.627
CH3	2.157	0.578	7.960
CH4	2.762	1.607	6.040
CH5	1.325	2.407	2.775
CH6	1.670	1.805	4.275
CH7	1.483	1.384	2.423
CH8	1.154	2.051	3.874
CH9	0.768	0.819	1.439
CH10	0.285	1.399	1.340
CH11	0.441	1.000	1.123
CH12	0.273	1.105	0.825
CH13	0.907	1.163	2.007
CH14	0.712	1.438	1.379
CH15	0.984	1.982	1.286
CH16	0.884	0.821	1.755
CH17	1.070	1.623	2.088
CH18	0.827	2.035	1.475
CH19	1.449	1.709	2.061
CH20	1.229	1.925	1.934
CH21	1.194	1.196	2.292
CH22	0.960	0.805	2.594
CH23	0.874	1.104	2.600

不規則波 試驗量測位置	長程方案試驗H _{1/3} 波高值(m)		
	N(冬)	W(夏)	N(颱風)
CH24	1.392	0.870	2.529
CH25	1.484	0.948	2.388
CH26	0.912	1.318	1.856
CH27	1.234	0.781	2.248
CH28	0.874	0.577	1.879
CH29	1.178	0.786	2.191
CH30	1.186	0.747	2.032
CH31	1.047	0.618	2.110
CH32	0.775	0.663	1.547
CH33	0.921	0.653	1.876
CH34	1.160	0.783	2.060
CH35	0.832	0.657	1.523
CH36	0.859	0.606	1.627
CH37	0.486	0.300	1.119
CH38	0.766	0.594	1.722
CH39	0.665	0.598	1.642
CH40	0.722	0.634	1.352
CH41	0.663	0.734	1.409
CH42	0.561	0.630	1.139
CH43	0.425	0.678	1.109
CH44	0.355	0.435	0.989
CH45	0.536	0.537	1.170
CH46	0.623	0.496	1.538
CH47	0.397	0.441	1.072
CH48	0.455	0.422	0.808

表 3.8 近程與長程方案量測港內外波高比較表

各試驗條件量測 港內外波高比較		水工模型配置方案					
		長程	近程	長程	近程	長程	近程
		夏(W)		冬(N)		颱風(N)	
CH4	H _{1/3} (m)	1.607	1.741	2.762	1.650	6.040	3.949
CH7		1.384	1.428	1.483	1.744	2.423	3.729
CH12		1.105	1.196	0.273	0.435	0.825	1.227
CH32		0.663	0.768	0.775	1.408	1.547	5.038
CH45		0.537	0.313	0.536	0.561	1.170	4.626

此外，臺中港港外區冬季 N 方向 CH1～CH9 平均波高(H_{1/3})為 2.03m，港內 CH10～CH48 平均波高(H_{1/3})均小於 1m，夏季 W 方向 CH1～CH9 平均波高(H_{1/3})為 1.41m，港內第Ⅲ、Ⅳ區平均波高(H_{1/3})均小於 1m，颱風 N 方向 CH1～CH9 平均波高(H_{1/3})為 5.24m，港內 CH10～CH48 平均波高(H_{1/3})均未小於 1m，長程方案夏季波浪、冬季與颱風波浪觀測值比較，如表 3.9 所示。

表 3.9 長程方案夏季波浪、冬季與颱風波浪觀測值比較表

波高量測區域	冬季 (N)均值		夏季 (W)均值		颱風 (N)均值	
	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)
CH1~9	2.03	9.80	1.41	9.80	5.24	11.88
CH10~29	0.96	19.11	1.23	9.80	1.89	12.25
CH30~37	0.91	9.80	0.63	10.17	1.74	12.25
CH38~48	0.56	10.17	0.57	13.59	1.28	12.98

船舶碼頭靜穩需求容許波高探討部分，如表3.10所示，得出長程外廓方案於冬季與夏季條件下，不論是LNG船於港內天然氣接收站，平均波高均小於需求容許波高1m，符合一般性接輸氣作業，颱風條件 LNG 船舶進出北內堤時平均波高大於1m，需特別注意。

表 3.10 長程方案遮蔽試驗與船舶碼頭靜穩需求容許波高比較表

試驗波高 量測區域	波高平均值 H_{mean}			船舶碼頭靜穩需 求容許波高
	冬季(N)	夏季(W)	颱風(N)	
CH30~37	0.54m	0.38m	1.07m	LNG船<1.0m
CH38~48	0.34m	0.36m	0.78m	風電船<0.7m

此外，冬季N方向試驗條件於南外廓防波堤內至北內防波堤之間，以冬季近程與近程胸牆墊高方案並無明顯差異，但長程方案平均波高(H_{mean})為0.54m有明顯改善；港內LNG天然氣接收站位置冬季近程平均波高(H_{mean})為1.12m最大，大於船舶碼頭靜穩需求容許波高1m需求，未達標準船舶容許波高要求，近程胸牆墊高稍微改善港內不靜穩情況平均波高(H_{mean})為0.92m次之，長程方案港內最為靜穩平均波高(H_{mean})為0.34m最低，如表3.11所示。

表 3.11 冬季長程、近程與近程胸牆墊高方案船舶碼頭靜穩度比較

試驗波高 量測區域 (不規則波)	波高平均值 H_{mean}			船舶碼頭靜穩需 求容許波高
	冬季(N) 長程	冬季(N) 近程	冬季(N) 近程胸牆墊高	
CH30~37	0.54m	1.29m	1.30m	LNG船<1.0m
CH38~48	0.34m	1.12m	0.92m	風電船<0.7m

長程方案遮蔽試驗不規則波引致流，夏季流向ENE流速平均值為36.21cm/sec，冬季流向SWW與SWS流速約在85cm/sec～99cm/sec之間，流速平均值為85.12 cm/sec，颱風流向SSW流速約在196cm/sec～392cm/sec之間，流速平均值391.53cm/sec。

本計畫近程方案與長程方案差異於近程方案僅興建南外廓防波堤2,395m與轉角775m，而長程方案係在近程方案基礎上於南外廓防波堤轉角再向外海延伸950m，以及新建北外廓防波堤2,375m與北外廓防波堤轉角延伸500m，前述2方案遮蔽試驗結果經初步比較分析，本計畫得出以下結論，颱風條件不論何種方案，2種方案於港內LNG天然氣接收站位置之波高平均值(CH38~48測點 H_{mean})近程1.80m與長程0.78m均為最大，其次是冬季條件於同樣位置波高平均值(CH38~48

測點 H_{mean})近程1.12m次之，影響最小者為夏季條件於同樣位置波高平均值(CH38~48測點 H_{mean})近程0.26m最小，惟長程方案不論冬季或夏季條件波高平均值(CH38~48測點 H_{mean})並無明顯差異，如表3.12所示。

表 3.12 近程與長程方案於各試驗條件波高平均值比較

不規則波試驗 觀測區域	波高平均值 H_{mean} 比較			船舶碼頭靜穩需求 容許波高 LNG船<1.0m 風電船<0.7m
	冬季(N)	夏季(W)	颱風(N)	
CH30~37	1.29m	0.40m	2.38m	近程方案： 南堤2,395公尺 轉角775公尺
CH38~C48	1.12m	0.26m	1.80m	
CH30~37	0.54m	0.38m	1.07m	長程方案： 北堤2,875公尺 南堤延伸950公尺
CH38~48	0.34m	0.36m	0.78m	

冬季季風時入港內的波高與近程外廓方案比較後明顯減少58~71%，與長程外廓方案比較後明顯減少29~49%，皆可完全符合船舶碼頭靜穩需求容許波高，惟入港前夏季季風浪所造成防波堤或港灣構造物反射效應仍較大需注意，颱風時無論近程或長程方案遮蔽效應較無法達到港內靜穩效果，長程方案則明顯改善，至於原臺中港進出口範圍於冬季、夏季與颱風條件下觀測點波高($H_{1/3}$)及週期($T_{1/3}$)，冬季波高($H_{1/3}$)約在0.27~0.43m與週期($T_{1/3}$)平均值9.8sec，夏季波高($H_{1/3}$)約在1.10~1.20m與週期($T_{1/3}$)平均值9.8秒，颱風波高($H_{1/3}$)約在0.83~1.23m與週期($T_{1/3}$)平均值9.8秒，如表3.13所示。

表 3.13 近程與長程方案於 CH12 測點各試驗條件波高平均值比較

試驗量 測位置 CH12	N(冬)		W(夏)		N(颱風)	
	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(sec)$	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(sec)$	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(sec)$
近程	0.43	9.80	1.20	9.80	1.23	12.25
長程	0.27	9.80	1.10	9.80	0.83	12.25

因此，除冬季無論近程或長程方案，皆不致影響原商港區船舶碼

頭靜穩需求及容許波高，除此之外夏季與颱風情境原商港區接近操船臨界(亦即超過船舶靜穩容許波高需求，LNG 船種超過 1m 波高標準，風電作業船種超過 70cm 波高標準)，建議多加留意。

第四章 數值水槽分析探討

本章節在探討數值水槽可行性分析之前，先就第三章水工模型試驗結果進行數值驗證比對，數值驗證部分採用麥水力研究所(Danish Hydraulic Institute, 簡稱 DHI)發展的 MIKE 21 與 MIKE3 模擬程式進行，數值計算港灣地區之海洋流動，波浪變化與沉積物運移，解決港灣基礎設施的影響評估，港內靜穩度與碼頭裝卸作業等問題；基本上本計畫分別探討水工模型試驗之漂沙試驗與遮蔽試驗 2 部分，但為更進一步掌握 LNG 天然氣接收區的靜穩度，本年度更著重於遮蔽試驗，漂沙試驗僅配合實驗室模型重新鋪設前所追加之研究工作，在此亦一併探討，本章討論漂沙試驗以二維波浪模式加以驗證，遮蔽試驗則以三維波浪模式加以驗證。

後續數值水槽分析探討，由於數值模擬的關鍵在如何選擇適當的理論模式來解決問題，長期以來，研究波浪問題之數學模式一般性以勢流框架的無黏理論為主，但對其他如非線性波浪與中、小尺度結構物的相互作用等複雜流動，流體黏性則不可忽略，因此，流體從黏性不可壓縮流體的控制方程式出發，模擬非線性波浪等相關問題，近年來已具有十分重要的理論意義和實用價值，亦廣受到產官學門的重視，本章將就其理論演進，綜合討論應用數值模式於數值水槽分析的可行程度。

4.1 二維波浪模式

4.1.1 MIKE21 水動力模式

本計畫二維波浪模式使用 MIKE 21 的水動力模式(Hydrodynamic Module, 簡稱 HD)，控制方程式由 Boussinesq 假設之不可壓縮流之雷諾平均斯托克斯(Reynolds averaged Navier-Stoke)方程式，該連續方程式可表達為式(4-1)，動量方程式為式(4-2)、式(4-3)整理如下形式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \dots\dots\dots(4-1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + v_s S \quad \dots\dots\dots(4-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \quad \dots\dots\dots(4-3)$$

t 為時間，x、y、z 為空間坐標，η 為自由液面，d 為靜水深，h=η+d 為總水深，u、v、w 分別為 x、y、z 方向上之速度，g 為重力加速度，f 為科氏力參數，ρ 為海水密度，p_a 為大氣壓力，s_{xx}、s_{xy}、s_{yx}、s_{yy} 為輻射應力張量，S 為點源的排出量。將上列式(4-1)～式(4-3)沿水深方向(z 方向)積分，可得到二維淺水長波方程組：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = hS \quad \dots\dots\dots(4-4)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{S_{xx}}{\partial x} + \frac{S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \quad \dots\dots\dots(4-5)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{S_{yx}}{\partial x} + \frac{S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \quad \dots\dots\dots(4-6)$$

其中τ_{sx}、τ_{sy} 為表面風應力，τ_{bx}、τ_{by} 為底部應力， $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 為水深平均速度。模式底床摩擦力參數可採用蔡希係數(Chezy Number，又稱 Cn 係數)或曼寧係數(Manning Number)設定，二維部分採用曼寧係數，如下(k_s 為底床粗糙高度)。

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/3}} m^{1/3} / S \quad \dots\dots\dots(4-7)$$

4.1.2 二維數值驗證分析

本計畫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增加密度處理)、設置數值各項基本參數、初始條件、粗糙度與運行條件等，模型建置情形如圖 4.1 所示，模型建置與臺中港影像融合圖，如圖 4.2 所示。

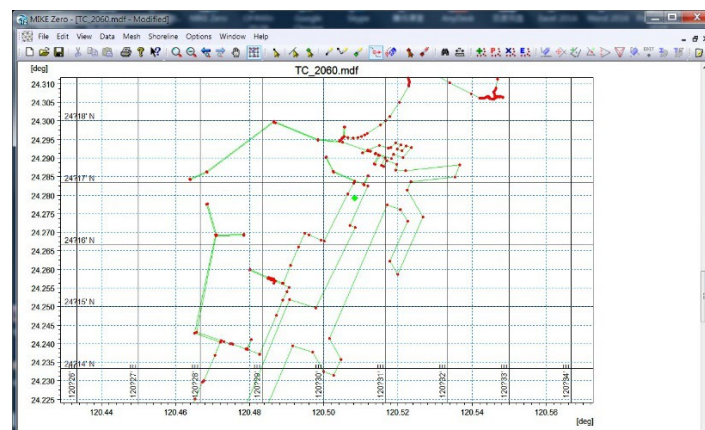


圖 4.1 MIKE 21 HD 數值模式模型建置情形



圖 4.2 模型建置與臺中港影像融合圖

水理條件採用 DHI 全球潮位預報模式資料庫 2018 年 1 月 1 日 00:00:00~2018 年 1 月 15 日逐時潮位之預報資料，於模擬範圍邊界上取出對應所需之模擬時間內差出潮汐水位之時間序列，做為潮流模式邊界之輸入條件，該模式設定三個邊界潮時資料(分別為：南側、北側與西側潮時邊界)，如圖 4.3 所示。

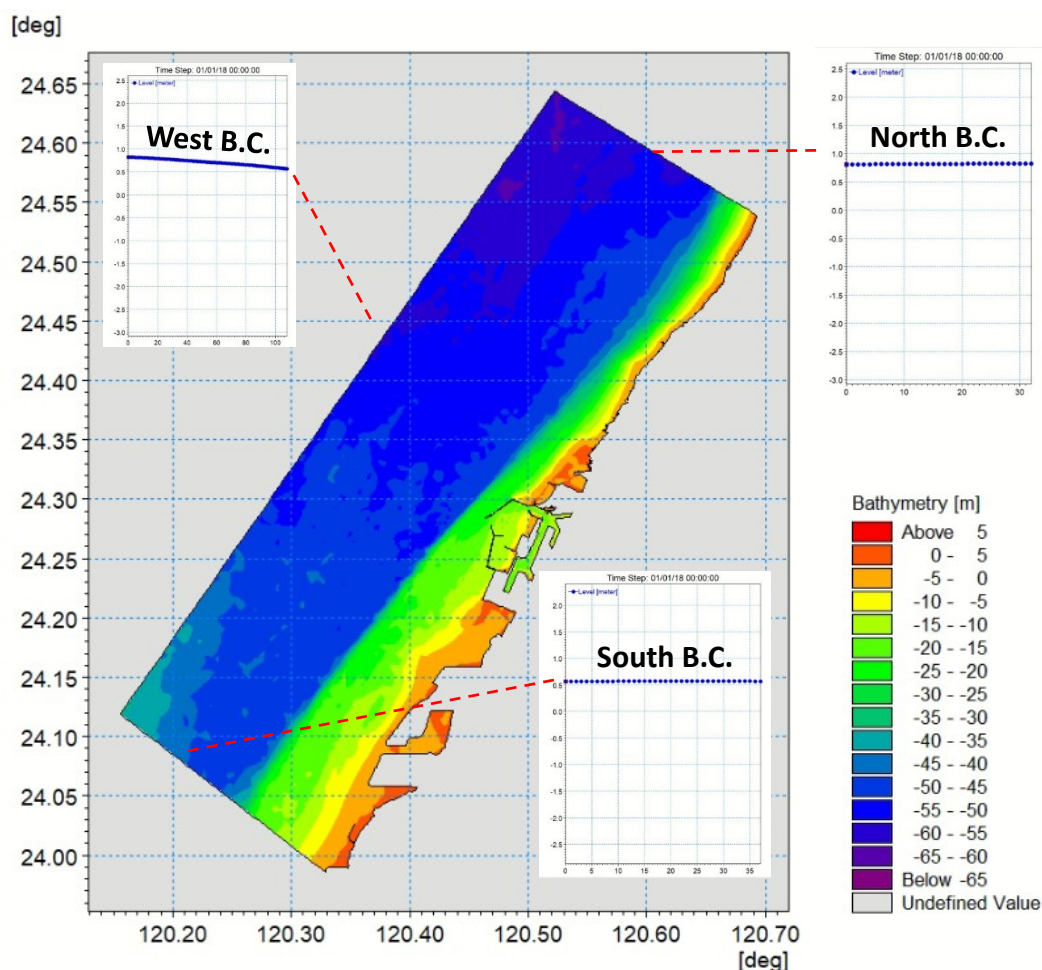


圖 4.3 數值模式之潮時邊界(逐時)

本計畫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。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，模擬第 101 小時，即於 2018 年 1 月 4 日 5:00 發生最大剪應力，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 4.4 所示；模擬第 125 小時，即於

2018 年 1 月 5 日 5:00，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 4.5 所示。

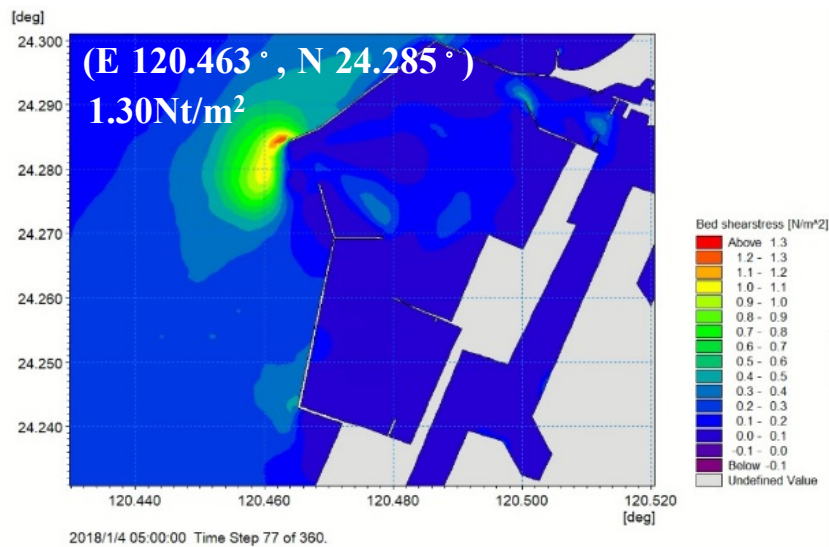


圖 4.4 模擬第 101 小時之最大剪應力分佈

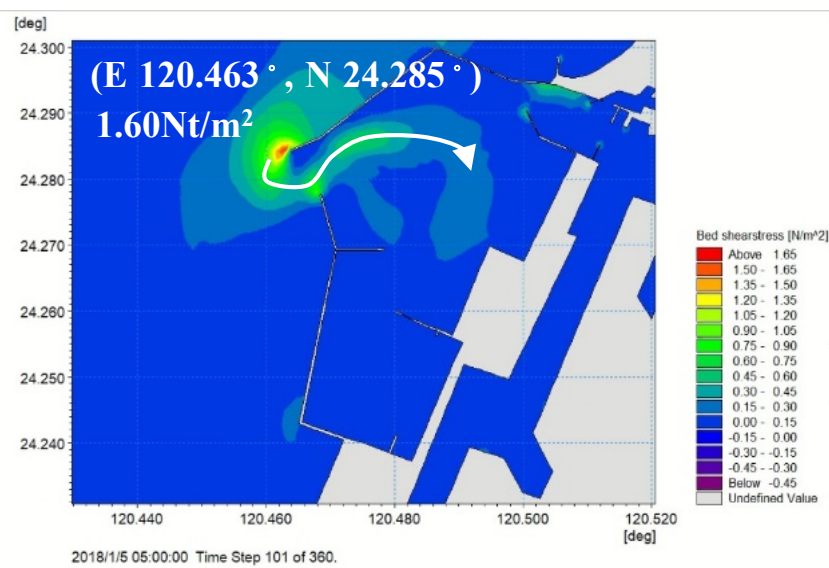


圖 4.5 模擬第 125 小時之最大剪應力分佈(箭頭為剪應力變化方向)

模擬第 131 小時，即於 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 4.6 所示；緊接模擬運算無間斷，模擬第 137 小時，即於 2018 年 1 月 5

日 17:00，此時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 4.7 所示。

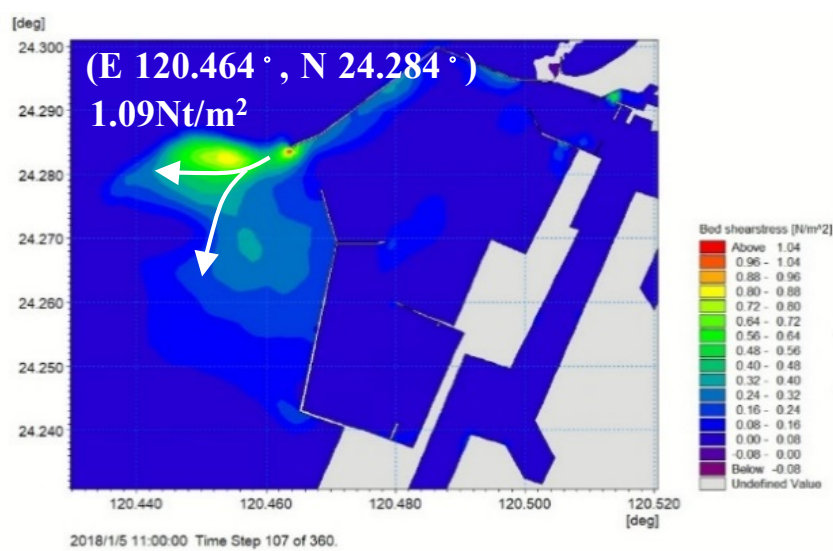


圖 4.6 模擬第 131 小時之最大剪應力分佈(箭頭為剪應力變化方向)

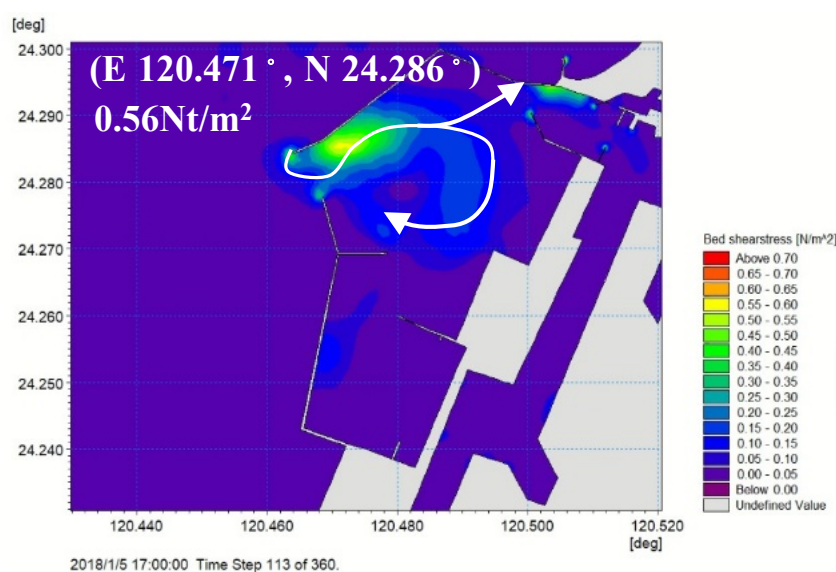


圖 4.7 模擬第 137 小時之最大剪應力分佈(箭頭為剪應力變化方向)

此後再經歷 12 小時模式運算後，即模擬第 149 小時，時刻於 2018 年 1 月 6 日 5:00，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 ，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 2.31 Nt/m²，如圖 4.8 所示。

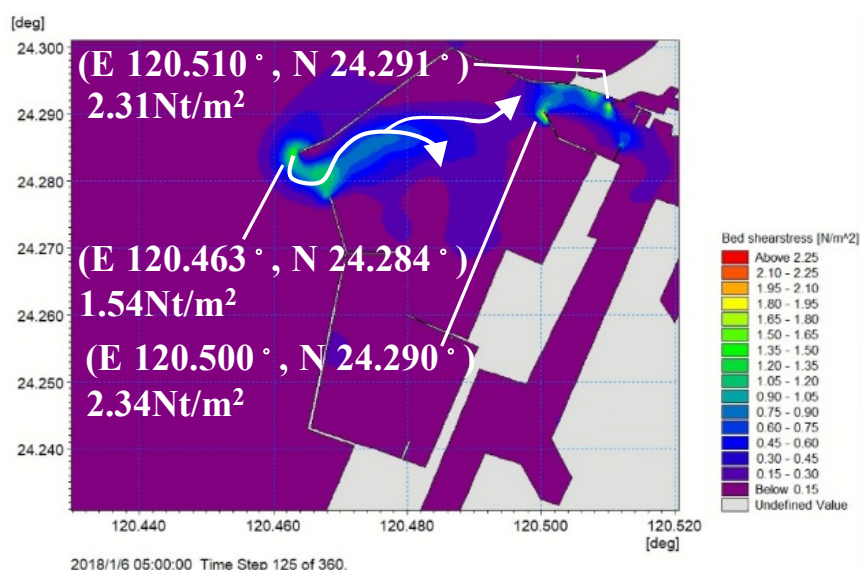


圖 4.8 模擬第 149 小時之最大剪應力分佈(箭頭為剪應力變化方向)

4.2 三維波浪模式

4.2.1 MIKE3 波浪模式

本小節波浪模式採用不可壓縮納維-斯托克斯(Navier-Stokes)方程為控制方程，並引入 σ 坐標，水體沿水深方向分層，層數越高，精度越高。空間離散為混合有限體積法，並使用 HLL 格式進行界面處通量計算。模型包含邊界造波和域內造波兩種造波方式，具備生成多種波浪的能力：規則波、隨機波、多向隨機波，能準確模擬波浪折射、繞射、碎波、溯升(Run-up)等過程。

模型控制方程為不可壓縮納維-斯托克斯(Navier-Stokes)方程。在笛卡爾坐標系 (x_1^*, x_2^*, x_3^*) 和時間 t^* 下，方程可表達為如下形式：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i^*} = 0 \dots\dots\dots(4-8)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t^*} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j^*} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i^*} + g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j^*} \dots\dots\dots(4-9)$$

其中 $(i, j) = 1, 2, 3$, $x_1^* = x^*$, $x_2^* = y^*$, $x_3^* = z^*$, u_i 是 x_i^* 方向速度 , p 為總壓力 , ρ 為水體密度 , $g_i = -g\delta_{i3}$ 表示體積力 , $\tau_{ii} = \nu_i(\partial u_i / \partial x_j^* + \partial u_j / \partial x_i^*)$ 表示湍流應力 , ν_i 為運動黏性係數。為了準確地描述底床和自由表面並施加壓力邊界條件,模型使用由 Phillips (1957)提出的 σ 坐標系,見式(4-3)。

$$\begin{cases} t = t^* \\ x = x^* \\ y = y^* \\ \sigma = \frac{z^* + h}{D} \end{cases} \dots\dots\dots (4-10)$$

其中 $D(x, y, t) = h(x, y, t) + \eta(x, y, t)$, h 是靜水深 , η 為水表面高程。

σ 座標下 , σ 變化範圍為 0~1 , 物理域垂直方向上的座標變化即被限制在該範圍內(Lin and Li, 2002)。利用鏈鎖法則 , 變數 $f = f(x^*, y^*, z^*, t^*)$ 存在以下變換關係 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t^*} &= \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial t^*} \\ \frac{\partial f}{\partial x^*} &= \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} \\ \frac{\partial f}{\partial y^*} &= \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} \\ \frac{\partial f}{\partial z^*} &= \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial z^*} \end{aligned} \dots\dots\dots (4-11)$$

將式(4-11)代入式(4-8)、(4-9),可以導出 σ 坐標系 (x, y, σ) 和時間 t 下的控制方程 :

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \dots\dots\dots (4-12)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial \sigma} = S_h + S_p + S_\tau \dots\dots\dots (4-13)$$

其中 , $U = (Du, Dv, D\omega)^T$ 為變數向量 , F 、 G 和 H 為通量向量

$$F = \begin{pmatrix} Duu + \frac{1}{2}gD^2 \\ Duv \\ Duw \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} Duv \\ Dvv + \frac{1}{2}gD^2 \\ Dvw \end{pmatrix} \quad H = \begin{pmatrix} u\omega \\ v\omega \\ w\omega \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4-14)$$

S_h 、 S_p 和 S_τ 為源項，定義為

$$S_h = \begin{pmatrix} gD \frac{\partial h}{\partial x} \\ gD \frac{\partial h}{\partial y} \\ 0 \end{pmatrix} S_p = \begin{pmatrix} -\frac{D}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{x^*} \right) \\ -\frac{D}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{y^*} \right) \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \end{pmatrix} S_\tau = \begin{pmatrix} DS_{\tau_x} \\ DS_{\tau_y} \\ DS_{\tau_z} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(4-15)$$

其中總壓力分為兩部分：動壓力 p ，靜壓力 $\rho g(\eta - z)$ 。另外，式(4-14)中 w 表示笛卡爾坐標系下的垂向速度，式(4-12)與式(4-14)中 ω 表示 σ 坐標系下垂向速度，定義為：

$$\omega = D \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t^*} + u \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} + v \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} + w \frac{\partial \sigma}{\partial z^*} \right) \dots\dots\dots(4-16)$$

同時，存在下列變換關係

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial t^*} &= \frac{1}{D} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} &= \frac{1}{D} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} &= \frac{1}{D} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial z^*} &= \frac{1}{D} \end{aligned} \dots\dots\dots(4-17)$$

湍流耗散項運算式：

$$\begin{aligned} S_{\tau_x} &= \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{x^*} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{y^*} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{z^*} \\ S_{\tau_y} &= \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{x^*} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{y^*} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{z^*} \\ S_{\tau_z} &= \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{x^*} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{y^*} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{z^*} \end{aligned} \dots\dots\dots(4-18)$$

其中應力可由如下座標變換關係計算：

$$\begin{aligned}
\tau_{xx} &= 2\nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} \right) \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} \right) \\
\tau_{yy} &= 2\nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} \right) \tau_{xz} = \tau_{zx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial z^*} + \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} \right) \dots\dots\dots(4-19) \\
\tau_{zz} &= 2\nu_t \left(\frac{\partial w}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial z^*} \right) \tau_{yz} = \tau_{zy} = \nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial z^*} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} \right)
\end{aligned}$$

運動黏性係數 ν_t 可根據 Smagorinsky 亞網格模型或者 $k-\varepsilon$ 雙方程模型計算得到，其中對於 Smagorinsky 亞網格模型可由下式計算 ν_t ：

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \dots\dots\dots(4-20)$$

式中 C_s 為 Smagorinsky 係數範圍 $0.1 \sim 0.2$ ， $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta \sigma D)^{1/3}$ ，應力張量 $S_{ij} = 0.5(\partial u_i / \partial x_j^* + \partial u_j / \partial x_i^*)$ 。將式(4-12)對 σ 從 $0 \sim 1$ 積分，並在利用 ω 在底床和水面的邊界條件，可得自由表面運動控制方程

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \int_0^1 u d\sigma \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \int_0^1 v d\sigma \right) = 0 \dots\dots\dots(4-21)$$

造波邊界，邊界造波能生成下述波浪：線性規則波、孤立波、二階 Stokes 波、橢圓餘弦波和基於 JONSWAP 譜的隨機波。線性規則波，需要指定波高 H ，週期 T ，水深 h ：

$$\begin{aligned}
\eta &= \frac{H}{2} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \omega t + \phi \right) \\
U &= \left[\frac{H\omega}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \omega t + \phi \right) - sd \right] \cos \theta \\
V &= \left[\frac{H\omega}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \omega t + \phi \right) - sd \right] \sin \theta \dots\dots\dots(4-22) \\
W &= \frac{H\omega}{2} \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \omega t + \phi \right)
\end{aligned}$$

其中 θ 為波浪入射角， $\phi = ky \sin \theta$ ， $sd = gH^2 / 8ch$ 。二階 Stokes 波，需要給定波高 H ，週期 T ，水深 h ：

$$\begin{aligned}
\eta &= \frac{H}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) + \frac{H^2 k}{16} \frac{\cosh kh(2 + \cosh 2kh)}{\sinh^3 kh} \cos 2\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) \\
U &= \frac{H\omega}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) + \frac{3H^2 \omega k}{16} \frac{\cosh 2k(z+h)}{\sinh^4 kh} \cos 2\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) \dots\dots\dots(4-23) \\
V &= 0 \\
W &= \frac{H\omega}{2} \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) + \frac{3H^2 \omega k}{16} \frac{\sinh 2k(z+h)}{\sinh^4 kh} \sin 2\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right)
\end{aligned}$$

JONSWAP 譜，需要給定 $H_{1/3}$ ， T_p ， F_{Min} ， F_{Max} ， N ：

$$\begin{aligned}
\eta &= \sum_{i=1}^N \frac{H_i}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega_i t + \phi_i\right) \\
U &= \sum_{i=1}^N \frac{H_i \omega_i}{2} \frac{\cosh k_i(z+h)}{\sinh k_i h} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega_i t + \phi_i\right) - sd_i \dots\dots\dots(4-24) \\
V &= 0 \\
W &= \sum_{i=1}^N \frac{H_i \omega_i}{2} \frac{\sinh k_i(z+h)}{\sinh k_i h} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega_i t + \phi_i\right)
\end{aligned}$$

ϕ_i 表示相位延遲， $sd_i = gH_i^2 / 8c_i h$ 表示斯托克斯漂移， H_i 為均方根波高。

4.2.2 三維數值驗證分析

本計畫試數值模式(MIKE3 wave)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，做為模式三角形與四邊形混合網格之水深地形，港區配置採用長程方案(即北外廓防波堤 2,875 公尺，以及南外廓防波堤延伸 950 公尺)，模型配置與數值計算領域示意圖，如圖 4.9 所示。模式測試過程先後運算幾個計算領域與測試幾種網格尺寸大小，最後於確保試驗與數值計算比對結果良好，且維持模式計算精確度，將數值計算領域調整成目前設置，及將網格調整為網格設定 20m，模擬層數分為 5 層，波浪造波設定 30 分鐘，模式允許越波發生，堤高由無限高改設置為防波堤堤頂路面設計高度為 3m，深海造波水深為 30m，波浪造波條件採用 JONSWAP 波譜，颱風情境波浪方向為 N 向，模擬波高 $H_s=8m$ ，模擬週期 $T_p=12.8s$ ；冬季情境波浪方向為 N 向，模擬波高 $H_s=3.37m$ ，模擬週期 $T_p=9.5s$ ，造波方位設置情形，如圖 4.10 所示。

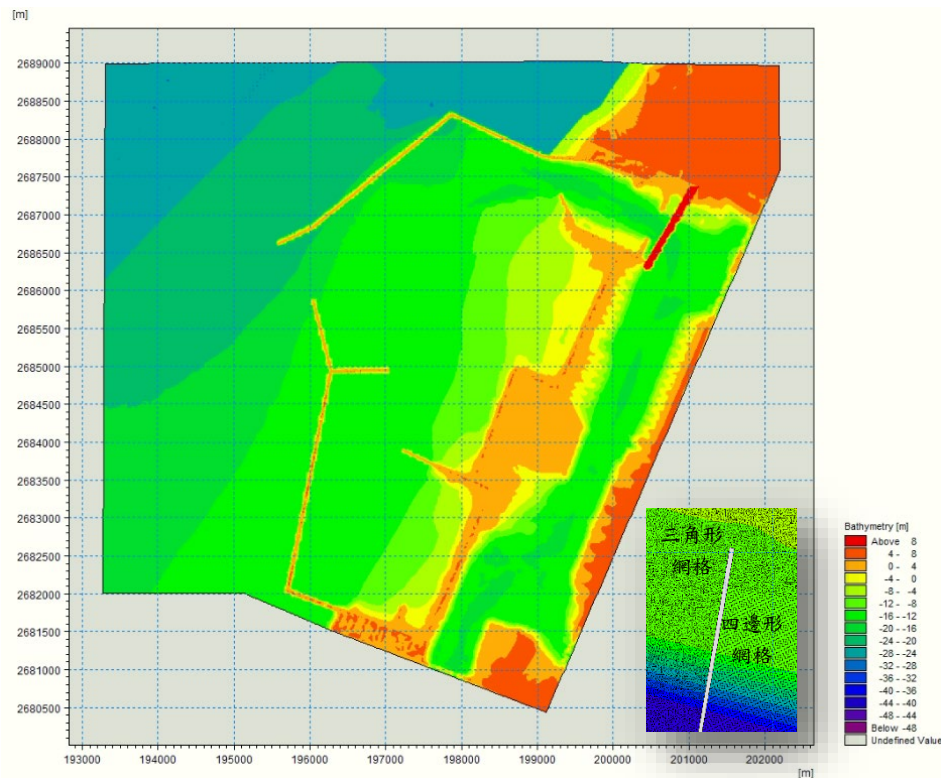


圖 4.9 模型配置與數值計算領域示意圖

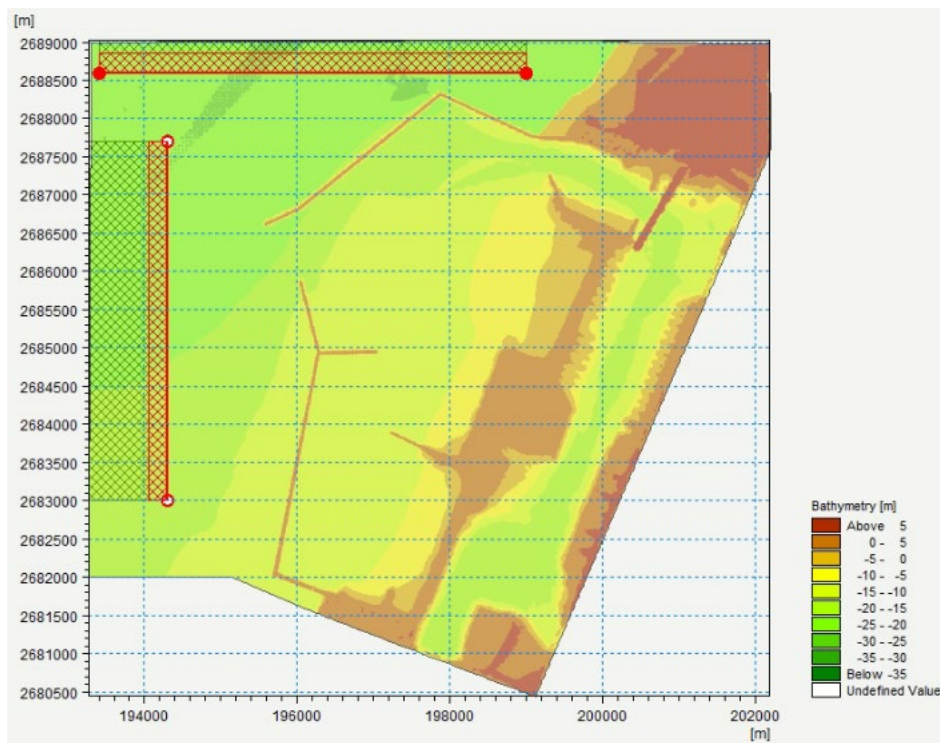


圖 4.10 MIKE3 造波方位設置情形

模擬結果以點位檢討，如表 4.1 所示，冬季於臺中港港外測點 CH4 測點波高($H_{1/3}$)為 2.03m、CH7 測點波高($H_{1/3}$)為 1.41 與試驗結果

相比誤差 5~26%，其他港內測點如 CH12、CH17、CH32、CH45 模擬結果均偏小；颱風情境於臺中港港外測點 CH4 測點波高($H_{1/3}$)為 4.60m、CH7 測點波高($H_{1/3}$)為 2.31 與試驗結果相比誤差 5~24%，其他港內測點如 CH12、CH17、CH32、CH45 模擬結果同冬季情境均偏小。

表 4.1 遮蔽試驗長程方案試驗與數值計算波高比對結果

測點位置		遮蔽試驗波高比對					
		試驗 (m)	MIKE3 (m)	誤差 (%)	試驗 (m)	MIKE3 (m)	誤差 (%)
		冬(N)			颱風(N)		
CH4	$H_{1/3}$ (m)	2.76	2.03	26%	6.04	4.60	24%
CH7		1.48	1.41	5%	2.42	2.31	5%
CH12		0.27	0.02	93%	0.83	0.10	88%
CH17		1.07	0.06	94%	2.09	0.18	91%
CH32		0.78	0.04	95%	1.55	0.07	95%
CH45		0.54	0.02	96%	1.17	0.05	96%

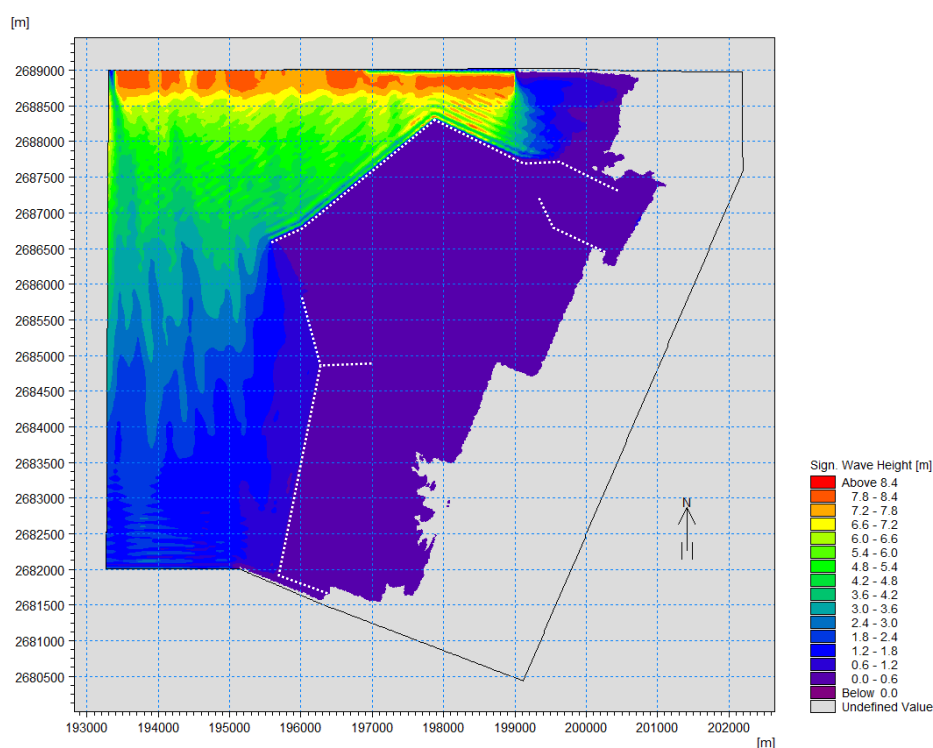


圖 4.11 遮蔽試驗長程方案颱風情境數值模擬結果

4.3 數值水槽與三維波浪模式探討

在實驗室波浪斷面水槽或平面水槽中建造物理模型，進行水工模型試驗研究，雖可以模擬複雜的波浪現象，因此，在研究中佔有重要地位，但受限於試驗場地環境之侷限，實驗條件無法完全滿足相似準則，僅能以近似現場環境之方式重現水理行為，就因為需要掌控之因子甚多，故需要較多的人力與物力投入其中，同時擁有這些優良設備的政府機關、學校與實驗室並不多見，包括：造價昂貴的造波機與各種測量設備無法一應俱全，因此，利用數值水槽模擬或許是較為折衷與彈性的研究方法。透過數值法可建立數值波浪水槽(Numerical Wave Tank，簡稱 NWT)，不僅成本低且不受尺寸限制，設驗配置與條件易於修改、能全面取得時間和空間上任何位置的物理量等諸多優點，此外，現今計算機運算能力已大幅提升，即使是個人電腦的運算速率亦日益快速，使得利用數值模擬之方法解決問題相當的有效率，另一方面隨演算法的不斷改進，促使演算結果愈趨穩定與精確，無疑成為數值模擬方法之良好利器，也使得數值模擬在波浪問題中得到了越來越廣泛的應用。

4.3.1 數值文獻回顧

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，但勢流理論忽略了流體的黏性，不能對結構物附近的渦旋和波浪的破碎過程進行模擬，因此，非線性波浪和結構物相互作用過程中，波浪在結構物附近會發生急劇的變形，甚至破碎，黏性不可以被忽略，故於黏性不可壓縮流動模式中，能處理自由表面的運動和變形是問題的關鍵。

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，主要依靠邊界元素法數值求解邊界積分方程式。一些學者如 Ohya 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，基此，如果想要擴展模式的模擬對象至任意的波浪或複雜的底床地形，以及反應真實流場紊流情況時，求解 Navier-Stokes 方程式(簡稱 NS)已成為解決研究海岸工程波浪問題的有效工具，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 3 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。

(一)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。

(二)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 $k-\epsilon$ 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 $k-\epsilon$ 亂流模式，探討波浪通過不透水雙列潛堤之渦流特性。

(三)平均運算模式

解析空間濾波的 NS 方程式 (Zhao and Tanimoto 1998, Wijayarathna 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、渦流黏滯係數 (Turbulence model) 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。

4.3.2 雷諾平均 Navier-Stokes 方程式

直接模擬(DNS)模式不能合理的考慮水體的紊流特性，但工程應用對於紊流運動的時間平均效應較為關心，因此，常用紊流模式多以雷諾時間平均(以下稱雷諾時均)做為基礎，由於雷諾時均的過程忽略紊流運動的細節，模式化過程參雜許多人為因素，故封閉雷諾時均方程式的各類紊流模式，對於複雜精細之紊流結構僅能有限度之模擬。

基於計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)的理論和方法，建立可以建立紊流結構，加以模擬波浪之問題，研究重點集中於 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations，簡稱雷諾平均 NS 方程式)波浪與建築物作用模式和基於空間濾波 NS 方程式的波浪與建築物作用模式。研究初期對於碎波研究著重於碎波發生的條件，碎波形式、波高衰減及水位推升之探討，對於碎波帶內之流體運動，其在時空上之分佈特性則尚未十分明瞭，往昔許多學者針對不同碎波型態探討渦紊流的特性，並且提出渦流生成機制、碎波帶之流場可視化與紊流能量方程等重要結果，然而對於碎波帶完整之時空分佈則較少論述。

以黏性流模式出發，計算波浪在透水結構物的文獻有：Van Gent(1995)採用 NS 計算波浪與透水防波堤互制問題。Huang 等人(2003)和張(2004)以有限解析法(Finite Analytic Method, FAM)配合史丹福大學改良 MAC 方法的 SUMMAC 法(Stanford University Modified Marker And Cell)求解 NS，探討孤立波通過透水單一潛堤之流場和波浪變形。Lin(1998)利用 RANS 方程式並結合雙方程 $k-\varepsilon$ 紊流模式，自由液面採用流體體積法(Volume of Fluid, VOF)，來求解波浪通過透水防波堤的波形變化和流場關係。Hsu 等人(2002)則發展 VARANS (Volume-Averaged / Reynolds Averaged Navier-Stokes)法，多孔介質內部孔隙流採用空間平均(spatially averaged)的 NS 方程式，自由表面應用 VOF 法，以計算透水結構物前之碎波現象。Lara 和

Losada(2006)利用 RANS 模式和 VOF 方法去探討不規則波通過透水結構物；Lin 和 Karunarathna(2007)應用 RNAS 模式探討孤立波與透水堤防互制之研究；Losada (2008)等人採用 RANS 模式去計算透水防波堤之越波案例。Hsieh 等人(2016)使用 RANS 模式探討波浪與透水結構物互制所產生碎波後之碎波流場特性，採用了 VOF 來追蹤自由液面。因此，初步探討利用雷諾平均 NS 方程式，配合數值模式採用有限體積法，求解雷諾平均 Navier-Stokes 方程式，能解析波浪場中非線性與黏性效應的影響，同時配合 k- ε 紊流模式來模擬紊流效應，將能完整地考慮非線性、黏性和紊流效應，以展現流場的變化，有機會解決臺中港靜穩度所遭遇之問題。

(一)雷諾平均 Navier-Stokes 控制方程式

水流運動的控制方程為連續及 Naiver-Stokes 方程式，該方程組引入 Reynolds 氏平均之後分別可得連續方程式：

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots(4-25)$$

動量方程式：

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) + g_i$$

\dots\dots\dots(4-26)

其中 U_i 為平均速度分量，P 表單位質量流體之壓力場， g_i 為重力加速度， ν 是流體滯度。

(二)紊流模式

本文引入 Boussinesq 渦旋黏滯性假設(eddy viscosity)來模擬雷諾應力 $(-\overline{u'_i u'_j})$ ，由下所示：

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \dots\dots\dots(4-27)$$

式中 ν_t 是紊流渦動滯度， k 為紊流動能， δ_{ij} 為 Kronecker 函數， ν_t 概念的引入把求解雷諾應力的問題轉化為求解 ν_t 的問題。紊流模式處理 ν_t 一般可分為零方程式(zero equation)、單方程式(one equation)、雙方程式(two equation)，本文採用雙方程 $k-\varepsilon$ 紊流模式，紊流動能 k 及紊流消散率 ε 的傳輸方程式分別如下：

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \dots\dots\dots(4-28)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \dots\dots\dots(4-29)$$

其中 P_k 為紊流動能產生項，可寫成如下

$$P_k = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \dots\dots\dots(4-30)$$

當 k 、 ε 由傳輸方程(4-21)、(4-22)求出後， ν_t 即可由 k 、 ε 表示如下

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \dots\dots\dots(4-31)$$

方程式(4-28)、(4-29)、(4-31)三式構成 $k-\varepsilon$ 紊流模式。模式中紊流常數分別為 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 、 $C_\mu=0.09$ 、 $C_1=1.44$ 、 $C_2=1.92$ 。

(三)自由液面處理

有關自由液面的處理，本計畫蒐集流體體積法描述之，流體體積法係由 Hirt 和 Nichols(1981)所發展，將計算的網格點額外再定義一變數稱為流體體積函數 $F(x,z,t)$ ，且此變數之位置和壓力相同，都位於網格中心點，其值介於 0 和 1 之間。由於自由表面會隨時間而移動，因此，每一網格之 F 值也理所當然必須隨著變化才能反映此液面之變動。Hirt 和 Nichols(1981)提出 F 值之控制方程式為

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U \frac{\partial F}{\partial x} + W \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(4-32)$$

4.3.3 黏性數值水槽與試驗案例比較

圖 4.11 為不同位置波形時間序列圖，分別位於 $x=2.5, 4.5, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5, 10.5\text{m}$ 的波形變化，圓圈代表 Ting 和 Kirby (1994) 的試驗結果，實線為探討 Hsieh (2006) 模式之水面模擬結果，由圖 4.11 可知道模擬結果與實測資料相當吻合，故可知本模式模擬尚不錯。

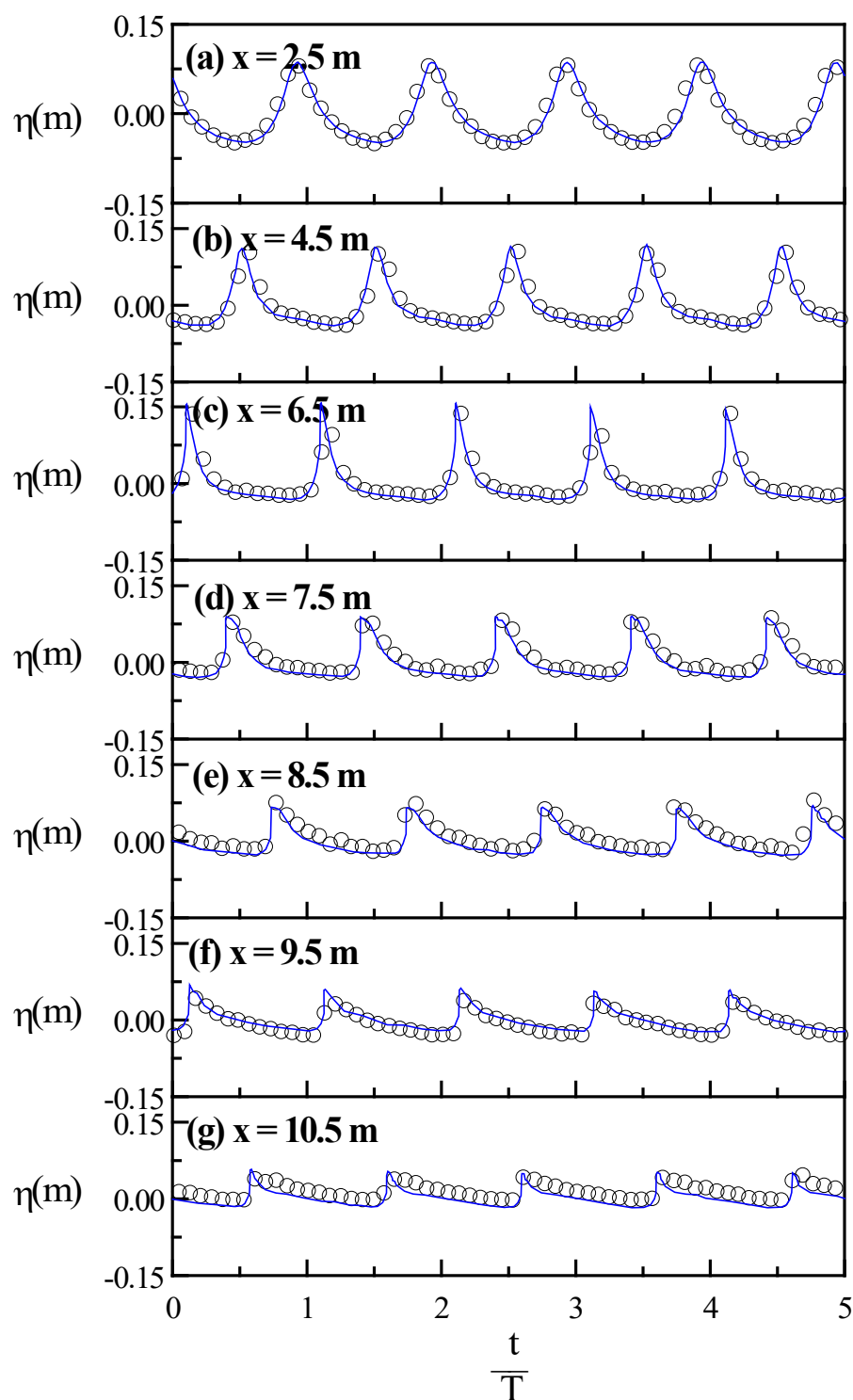


圖 4.14 不同位置波形時間序列圖

圖 4.12 為橢圓函數波在斜坡上不同位置之水平、垂直速度時間序列圖，(a)(b)分別為水平速度(U)和垂直速度(V)位於($x=7.275\text{ m}$ ， $z=0.1\text{ m}$)處，(c)(d)分別為水平速度(U)和垂直速度(V)位於($x=9.110\text{ m}$ ， $z=0.1\text{ m}$)處，圓圈代表 Ting 和 Kirby(1996)的試驗資料，實線為 Hsieh (2006)模式結果，由圖 4.12 可知道模擬結果與實測資料相當吻合，故可知本模式模擬尚不錯。

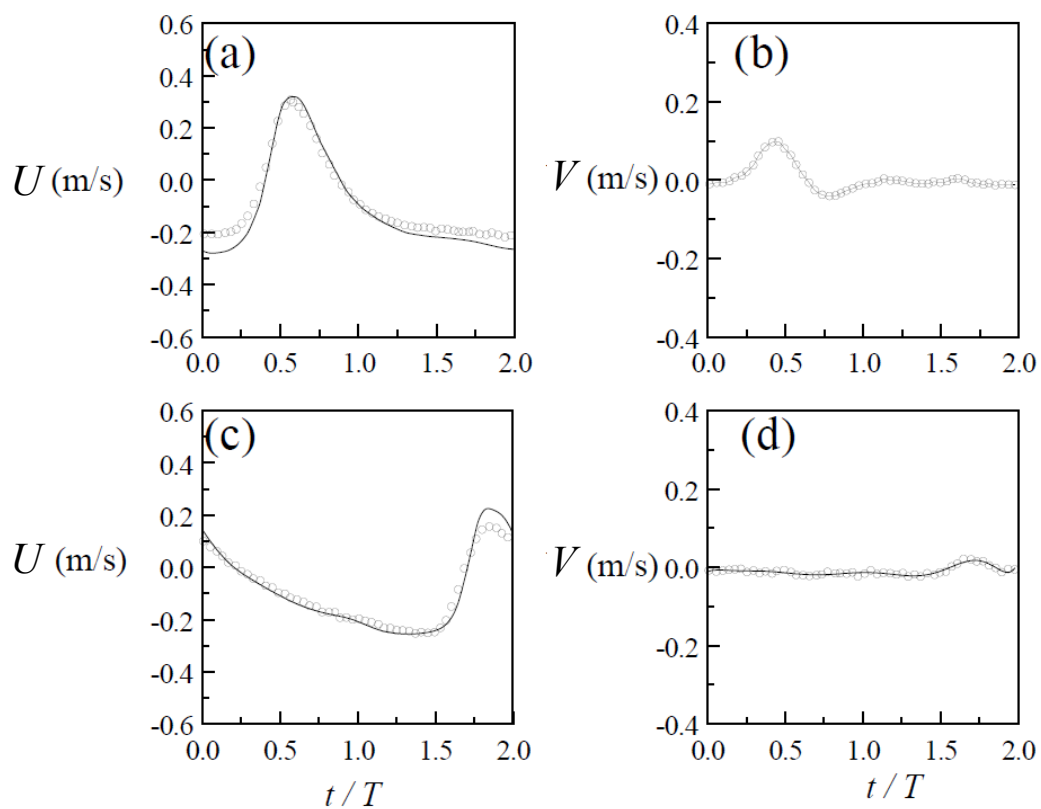


圖 4.15 橢圓函數波在斜坡上之流速驗證

(實線: Hsieh (2006)模式；圓圈：Ting and Kirby (1996) 實驗資料)

第五章 研究比較分析

本計畫為探究臺中港外港區擴建變化，規劃以 2 類型水工模型試驗進行探討：(1)漂沙試驗與(2)水動力試驗；由於此 2 類型水工模型試驗有些試驗研究之條件與背景相同，為使終端使用者(end user)易於掌握試驗內容，將於本章分述說明：試驗規劃、模型佈置情形與試驗條件等內容：

5.1 水工模型試驗與數值模式驗證分析

本小節分析討論 3 個部分，包括：遮蔽試驗繞射之結果，並討論漂沙試驗與數值模式驗證比較之成果，以及遮蔽試驗與三維數值模式驗證比較之成果，分析討論臚列如下：

5.1.1 漂沙試驗與數值模式驗證比較

本計畫第 3.1.3 小節漂沙試驗結果與討論，探討長程方案水工模型試驗，得知水工模型北外廓防波堤末端堤體之周邊流場混亂，且堤外側與堤內側附近產生掏刷孔洞與有刷深現象，此與 4.1.2 MIKE21 潮流影響港灣結構物的剪應力分佈情況之結果比對，於堤防結構物周邊確實底床剪應力增大，顯示渦流與紊流對於結構物周邊產生應力集中現象，剪應力越大越易造成底床顆粒間滑移，底床淘刷範圍越亦大，如圖 5.1 所示，堤防內側產生掏刷孔洞。

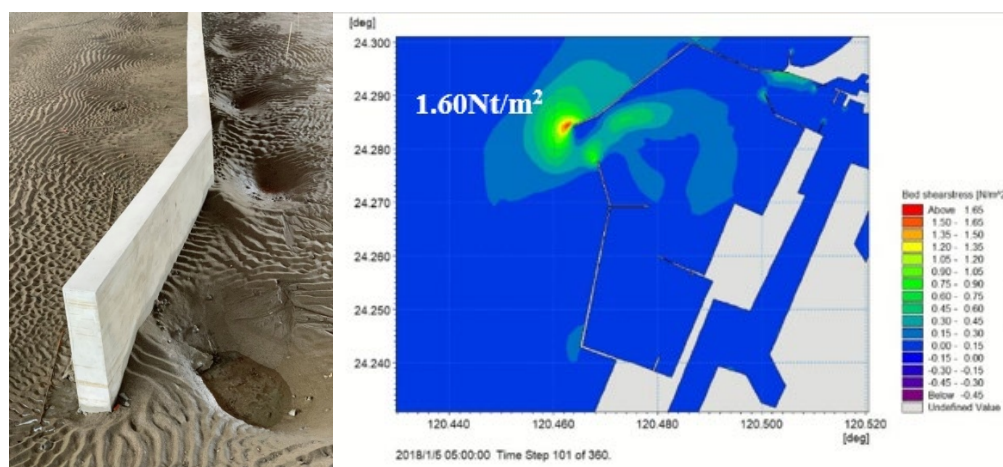


圖 5.1 長程方案配置水工模型試驗與數值模式驗證比較

5.1.2 遮蔽試驗研究結果

本計畫第 3.2 小節定床遮蔽試驗執行結果，已進行分區及單點討論，惟為更進一步探討近程與長程各不同案例之平面波場變化，特別是波浪前進至航道口時，透過繞射進入港內之波浪之衰減情形，故需以遮蔽係數(H_m/H_0 ，其中 H_m 為試驗過程中量測 $H_{1/3}$ 平均波高， H_0 為實驗室造波波高之試驗波高)進行討論，近程與長程試驗遮蔽係數結果討論如下：

(一)遮蔽試驗近程方案

冬季係以 N 方向波高($H_{1/3}$)3.37m 進行試驗，港外 CH1~9 最大遮蔽係數為 1.00，外商港(迴船池)CH10~29 最大遮蔽係數亦是 1.00，顯示近程方案沒有北外廓防波堤之保護，因此，冬季 N 方向波浪可以直接由港外繞射進入外商港(迴船池)之位置；港外 CH1~9 最大遮蔽係數為 1.00，LNG 天然氣接收站 CH38~48 最大遮蔽係數為 0.72，顯示天然氣接收站港池於冬季仍呈現不靜穩現象，亦符合第 3.2.1 小節冬季情境下波浪均未小於 LNG 船與風電船靜穩需求容許波高標準，如圖 5.2 與表 5.1 所示。

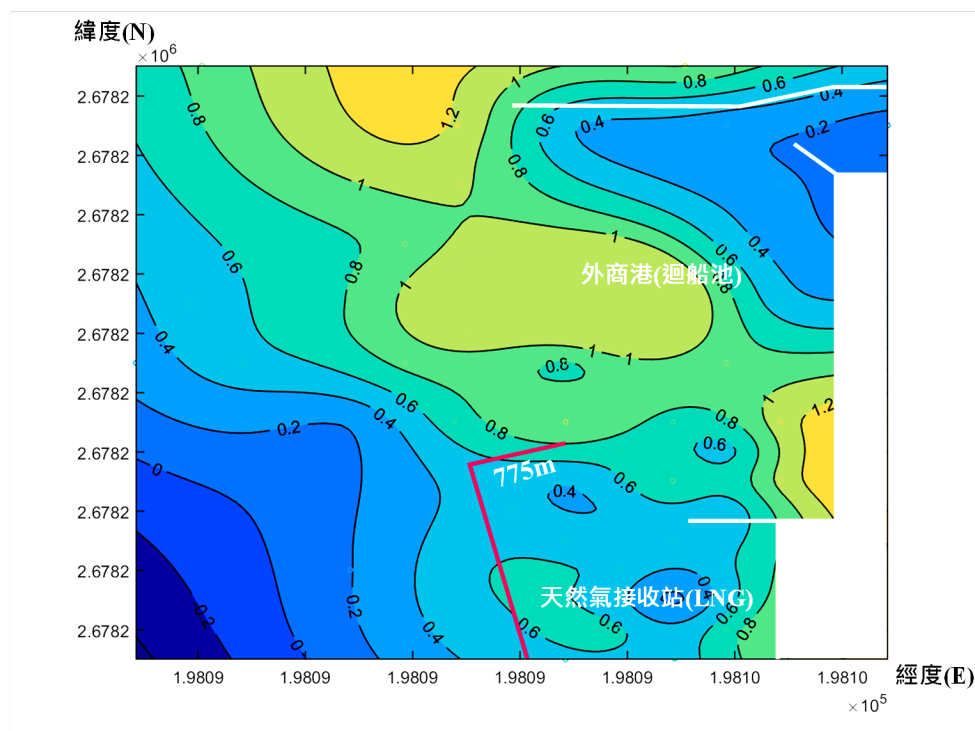


圖 5.2 遮蔽試驗近程方案冬季(N)方向波浪遮蔽係數(KD)

夏季係以 W 方向波高($H_{1/3}$)1.93m 進行試驗，港外 CH1~9 最大遮蔽係數為 1.00，外商港(迴船池)CH10~29 最大遮蔽係數亦是 1.00，由於波向與臺中港開口緣故，因此，夏季 W 方向波浪亦直接由港外進入外商港(迴船池)之位置，南外廓防波堤至北內堤之間 CH30~37 最大遮蔽係數為 0.51，及 LNG 天然氣接收站 CH38~48 最大遮蔽係數為 0.25，顯示夏季波浪已遮蔽至南外廓防波堤外，且北內防波堤能減緩進入天然氣接收站港池內，港池內呈現靜穩情形，符合夏季波浪小於 LNG 船與風電船靜穩需求容許波高標準，如圖 5.3 與表 5.1 所示。

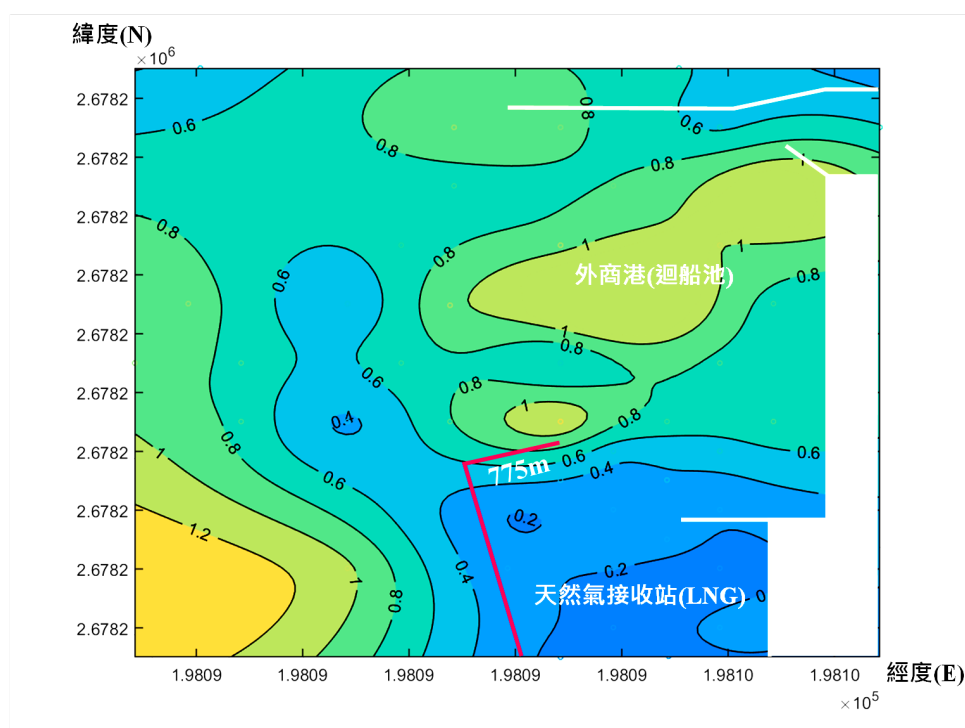


圖 5.3 遮蔽試驗近程方案夏季(W)方向波浪遮蔽係數(KD)

颱風係以 N 方向波高($H_{1/3}$)8.00m 進行試驗，不論港外 CH1~9、外商港(迴船池)CH10~29 以及南外廓防波堤至北內堤間 CH30~37 最大遮蔽係數均為 1.00，而 LNG 天然氣接收站 CH38~48 最大遮蔽係數降為 0.80，顯示颱風期間波浪可以直接由港外繞射進入外商港(迴船池)之位置，近程方案規劃之南外廓防波堤無法阻擋來自 N 方向的颱風波浪，最直接原因係近程方案缺乏北外廓防波堤保護，造成 LNG 天然氣接收站港池內呈現不靜穩，故颱風期間於近程方案下影

響臺中港甚鉅，建議颱風期間船舶勿進港作業，且採行避浪措施，如圖 5.4 與表 5.1 所示。

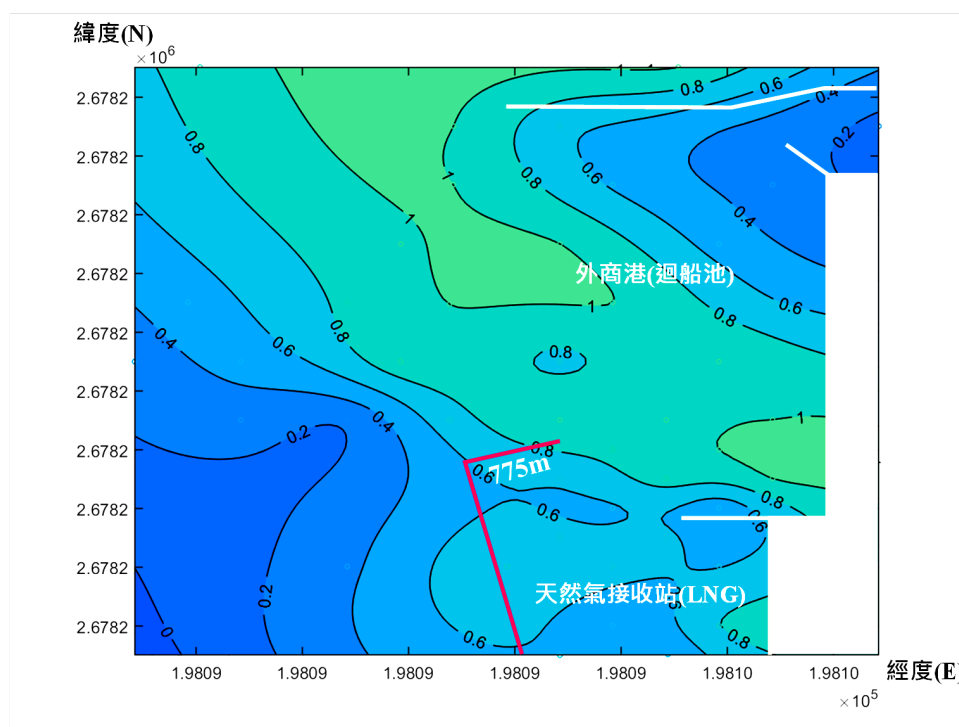


圖 5.4 遮蔽試驗近程方案颱風(N)方向波浪遮蔽係數(KD)

表 5.1 遮蔽試驗近程方案遮蔽係數(KD)比較

位置\條件	冬季(N)		夏季(W)		颱風(N)	
	最大(KD)	平均(KD)	最大(KD)	平均(KD)	最大(KD)	平均(KD)
CH1~9	1.00	0.59	1.00	0.74	1.00	0.58
CH10~29	1.00	0.78	1.00	0.83	1.00	0.85
CH30~37	1.00	0.61	0.51	0.36	1.00	0.78
CH38~48	0.72	0.54	0.25	0.19	0.80	0.61

總結來說，遮蔽試驗近程方案結果，臺中港除夏季遮蔽成效較佳以外，冬季與颱風成效均為不佳，基此，如臺中港五接天然氣計畫採行近程方案規劃，於冬季與颱風儘量避免操船與商港登輪等作業，且建議仍需要適當規劃北外廓防波堤保護港區，以減少波浪進入港內，

與維持港內靜穩度；至於夏季遮蔽成效較佳，探究其原因，主要還是夏季波浪較其他情境小，故波浪傳遞情形較不像冬季與颱風情況劇烈，但並不代表近程方案能有效阻擋夏季波浪進入 LNG 天然氣接收站港池內。

(二)遮蔽試驗長程方案

與近程方案不同，長程方案已增設北外廓防波堤 2,875 公尺進行保護，遮蔽試驗長程方案結果如下，冬季係以 N 方向波高($H_{1/3}$)3.37m 進行試驗，港外 CH1~9 最大遮蔽係數為 1.00，外商港(迴船池) CH10~29 最大遮蔽係數降至 0.44，南外廓防波堤至北內堤間 CH30~37 最大遮蔽係數均為 0.35，LNG 天然氣接收站 CH38~48 最大遮蔽係數降為 0.21，由外往內遮蔽係數逐漸減小，顯示有北外廓防波堤之保護，港池靜穩度已有顯著改善，亦符合第 3.2.2 小節冬季波浪小於 LNG 船與風電船靜穩需求容許波高標準，原臺中進出口位置遮蔽係數亦於 0.2 以下港池相當靜穩，如圖 5.5 與表 5.2 所示。

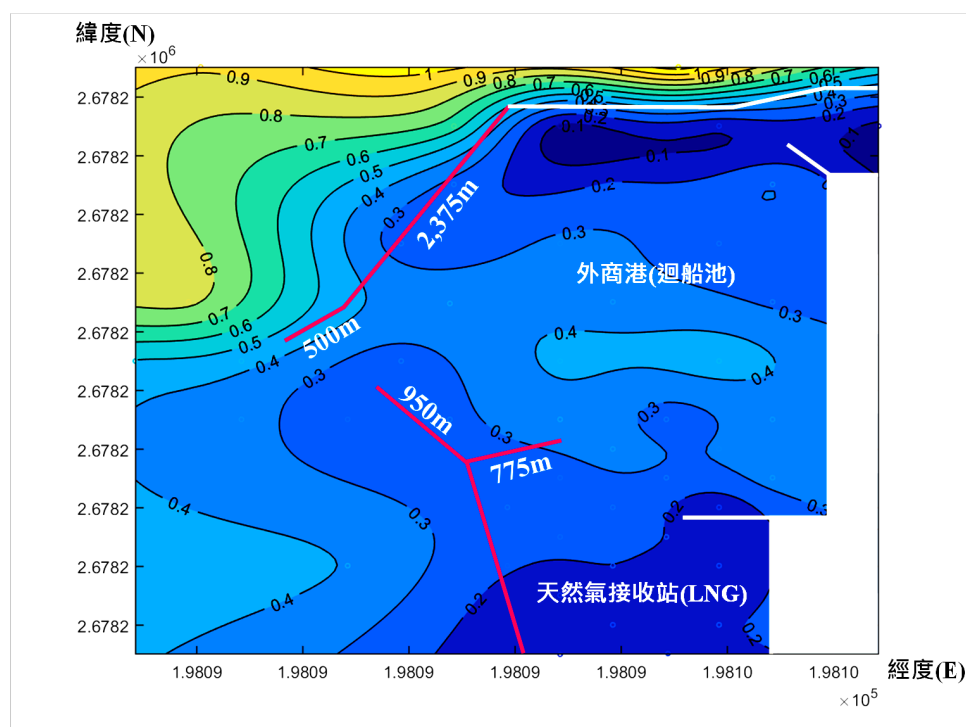


圖 5.5 遮蔽試驗長程方案冬季(N)方向波浪遮蔽係數(KD)

夏季係以 N 方向波高($H_{1/3}$)1.93m 進行試驗，港外 CH1~9 最大遮蔽係數為 1.00，外商港(迴船池)CH10~29 最大遮蔽係數降亦為 1，

南外廓防波堤至北內堤間 CH30~37 最大遮蔽係數降至 0.40，LNG 天然氣接收站 CH38~48 最大遮蔽係數降為 0.38，由外往內遮蔽係數亦逐漸減小，但較冬季情況不明顯，但由港外與外商港(迴船池)遮蔽係數結果觀察，夏季波浪仍由港外進入外商港(迴船池)，主要原因與臺中港開口方向較易於夏季波浪進入之緣故，此外，外廓防波堤至北內堤間與 LNG 天然氣接收站港區遮蔽係數已顯著降低至 0.4 以下，顯示北內堤能阻擋波浪進入港區，如圖 5.6 與表 5.2 所示。

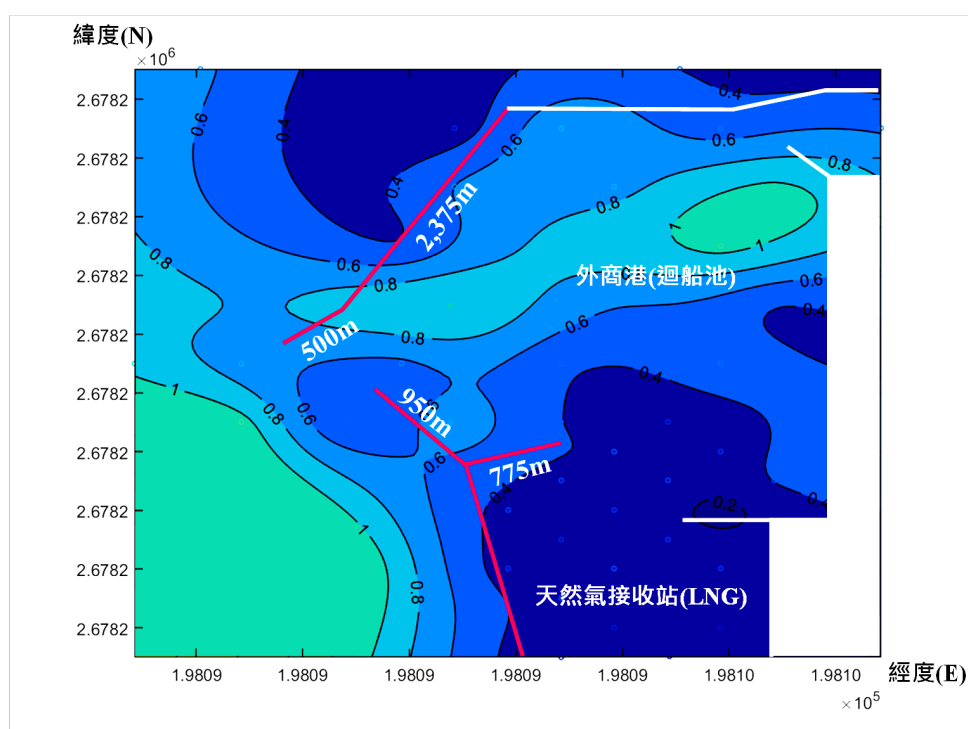


圖 5.6 遮蔽試驗長程方案夏季(W)方向波浪遮蔽係數(KD)

颱風係以 N 方向波高($H_{1/3}$)8.00m 進行試驗，港外 CH1~9 最大遮蔽係數 1.00，外商港(迴船池) CH10~29 最大遮蔽係數降至 0.32，南外廓防波堤至北內堤間 CH30~37 最大遮蔽係數均為 0.26，LNG 天然氣接收站 CH38~48 最大遮蔽係數降為 0.22，由外往內遮蔽係數逐漸減小，此情況與冬季情境試驗結果相符，兩者波浪均來自 N 方向波浪，北外廓防波堤有效阻擋波浪進入港區，港池靜穩度相當靜穩，亦符合第 3.2.2 小節冬季情波浪小於 LNG 船與風電船靜穩需求容許波高標準，原臺中進出口位置遮蔽係數亦於 0.2 以下港池相當靜穩，如圖 5.7 與表 5.2 所示。

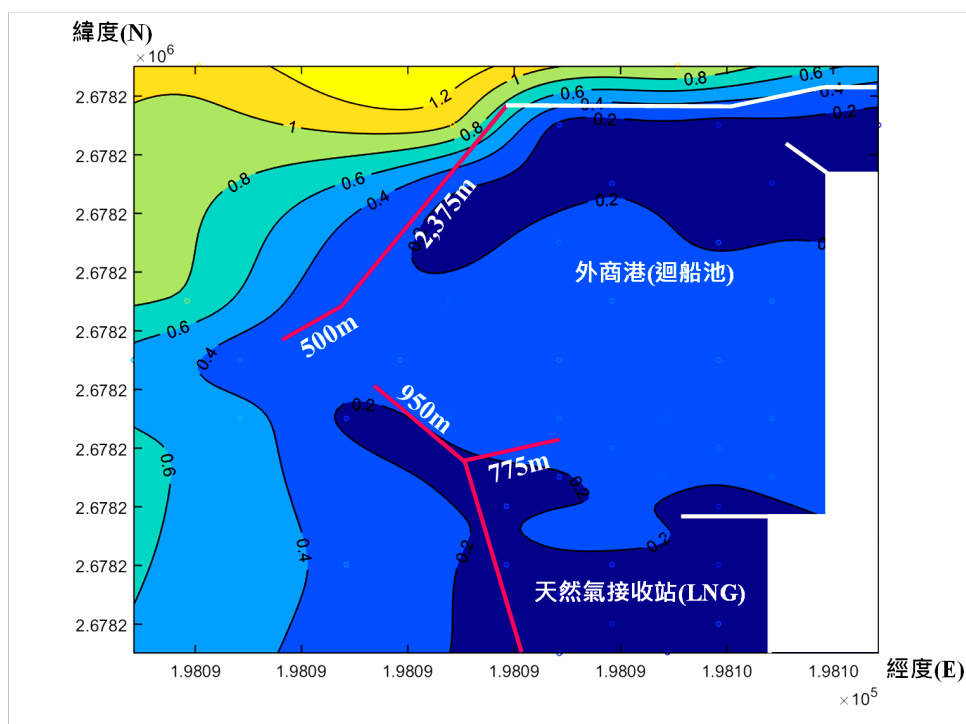


圖 5.7 遮蔽試驗長程方案颱風(N)方向波浪遮蔽係數(KD)

表 5.2 遮蔽試驗長程方案遮蔽係數(KD)比較

位置\條件	冬季(N)		夏季(W)		颱風(N)	
	最大(KD)	平均(KD)	最大(KD)	平均(KD)	最大(KD)	平均(KD)
CH1~9	1.00	0.60	1.00	0.73	1.00	0.63
CH10~29	0.44	0.28	1.00	0.64	0.32	0.24
CH30~37	0.35	0.27	0.40	0.33	0.26	0.22
CH38~48	0.21	0.17	0.38	0.29	0.22	0.16

總結來說，遮蔽試驗長程方案優於近程方案遮蔽試驗結果，臺中港興建北外廓防波堤極大程度改善港內靜穩程度，不論冬季、夏季與颱風何種情境，均能獲得良好遮蔽成效，確保符合五接天然氣船舶需求容許波高標準。至於北外廓防波堤長度是否需要建置 2,875 公尺，受限於工程經費能否縮短規劃配置需求，後續研究能進階討論北外廓防波堤縮短之折衷方案，同樣兼顧保護標的要求，此外工程兼顧生態

環境維持等議題(例如白海豚)，亦是討論重點之一，相關工程措施建議能持續納入研究進行探討。

5.1.3 三維數值模式驗證比較

本計畫三維數值模式驗證結果並不理想，如表 5.3 所示，冬季於臺中港港外測點 CH4 測點遮蔽係數為 0.20 相較試驗的遮蔽係數小、CH7 遮蔽係數為 0.15 相較試驗的遮蔽係數小，其他港內測點如 CH12、CH17、CH32、CH45 模擬結果遮蔽係數均偏小，如圖 5.8 所示；颱風情境於臺中港港外測點 CH4 測點遮蔽係數為 0.57 相較試驗的遮蔽係數小、CH7 遮蔽係數為 0.29 相較試驗的遮蔽係數相近，其他港內測點如 CH12、CH17、CH32、CH45 模擬結果遮蔽係數均偏小，如圖 5.9 所示。

表 5.3 數值模式遮蔽試驗長程方案遮蔽係數(KD)

位置\條件	冬季(N)		颱風(N)	
	試驗(KD)	數值模式(KD)	試驗(KD)	數值模式(KD)
CH4	0.82	0.20	0.76	0.57
CH7	0.44	0.15	0.30	0.29
CH12	0.08	0.00	0.10	0.01
CH17	0.32	0.01	0.26	0.02
CH32	0.23	0.00	0.19	0.01
CH45	0.16	0.00	0.15	0.01

波引致流部分討論，如表 5.4 所示，冬季於臺中港港外測點 CH4 測點流速(V)為 0.57cm/s、CH7 測點流速(V)為 0.47cm/s，其他港內測點如 CH12、CH17、CH32、CH45 測點流速(V)約為 0.13~0.21cm/s，經比對與試驗流速差異甚大，尚無法評估其正確性；颱風情境於臺中港港外測點 CH4 測點流速(V)為 8.42cm/s、CH7 測點流速(V)為

15.82cm/s，其他港內測點如 CH12、CH17、CH32、CH45 測點流速(V)約為 1.84~2.95cm/s，建議增測其他流速測站，取得數據後再進行討論。

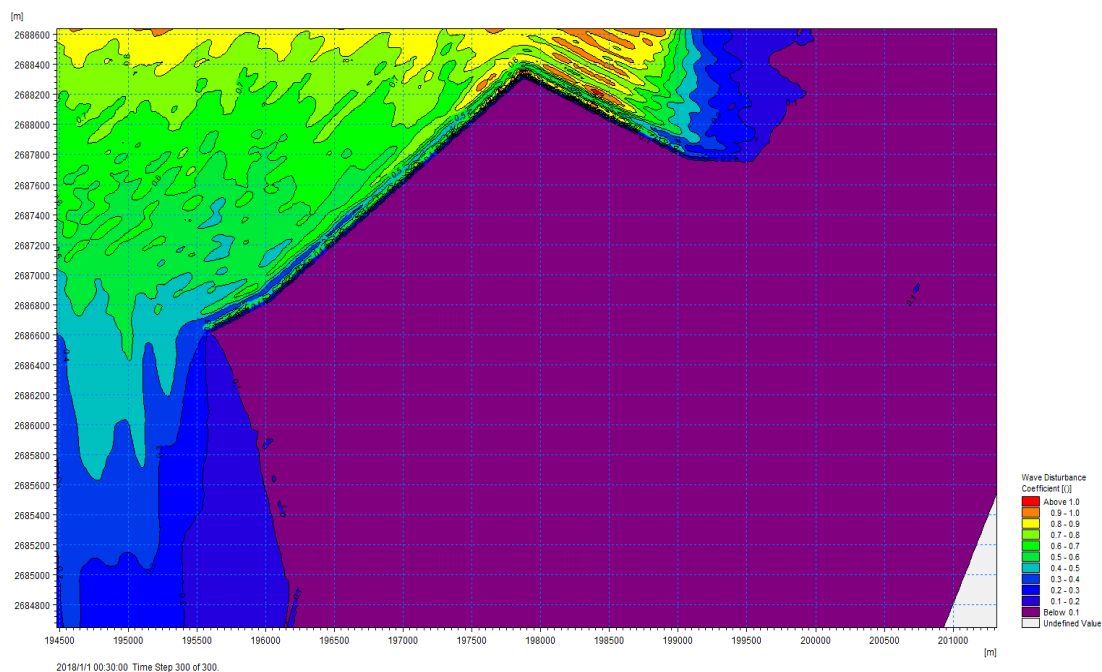


圖 5.8 數值模式長程方案冬季情境遮蔽係數(KD)模擬結果

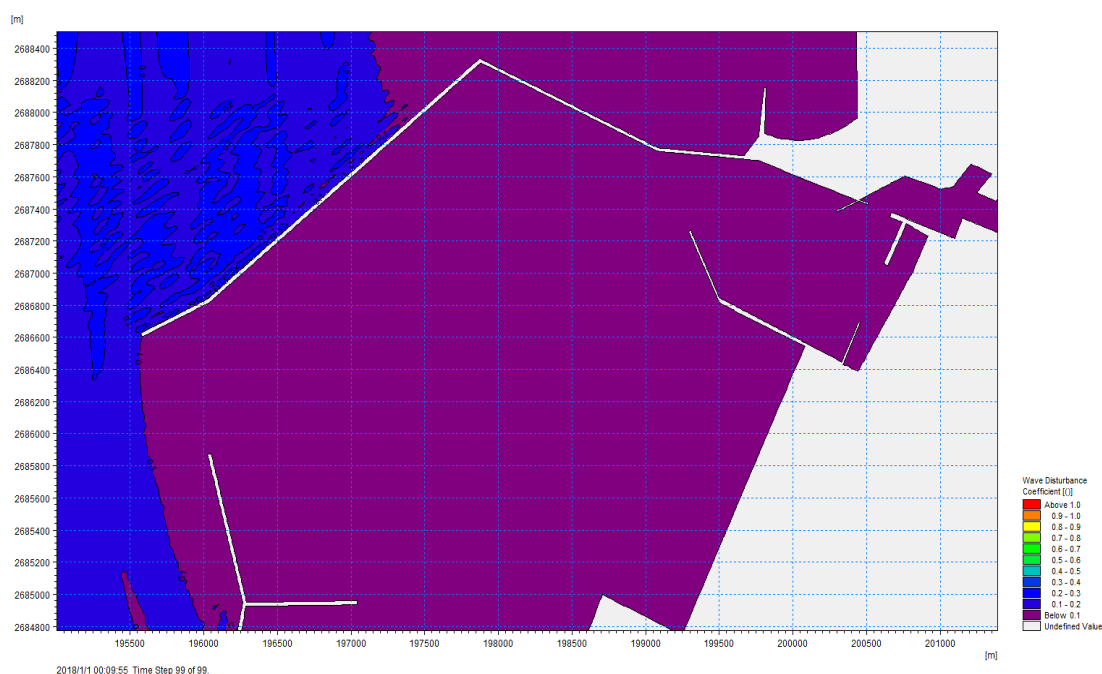


圖 5.9 數值模式長程方案颱風情境遮蔽係數(KD)模擬結果

表 5.4 遮蔽試驗長程方案試驗與數值計算比對結果

測點 位置	遮蔽試驗長程方案MIKE3模擬結果							
	u (cm/s)	v (cm/s)	V (cm/s)	試驗 (cm/s)	u (cm/s)	v (cm/s)	V (cm/s)	試驗 (cm/s)
	冬(N)				颱風(N)			
CH4	0.56	0.09	0.57	119.6	5.52	6.36	8.42	-
CH7	0.46	0.07	0.47		10.67	11.68	15.82	
CH12	0.11	0.06	0.13	-	1.59	0.92	1.84	-
CH17	0.18	0.03	0.18	-	2.83	0.50	2.87	-
CH32	0.16	0.13	0.21	-	2.34	1.79	2.95	-
CH45	0.00	0.18	0.18	-	0.32	2.71	2.73	-

5.2 數值水槽的可行性

在探討數值水槽之前，必須先了解數值模式所遭遇的困難，及確保三維數值模式的限制與限度，才能做為評估數值水槽的標準，以下就數值水槽可行性進行說明：

(一)經 4.2 與 4.3 小節數值水槽與三維波浪模式探討與 5.1.3 小節三維數值模式(MIKE3 wave)驗證比較，初步探討數值模式與試驗結果，本計畫水理計算結果試驗結果相比偏小，尚未滿足或優於水工模型試驗的結果，可能的原因有數值模式與水工模型試驗存在比尺效應，造成數值模式運算結果小於水工模型試驗波浪。

(二)承上，另個可能的原因係數值模式理論限制，波浪通過半無限長堤防繞射現象已經驗證，但理論僅繞射遮蔽係數的一半，如圖 5.10 所示，以致於多餘的波浪被半無限堤屏蔽，波浪繞射不進港區導致模式波浪偏小，後續仍待討論驗證。

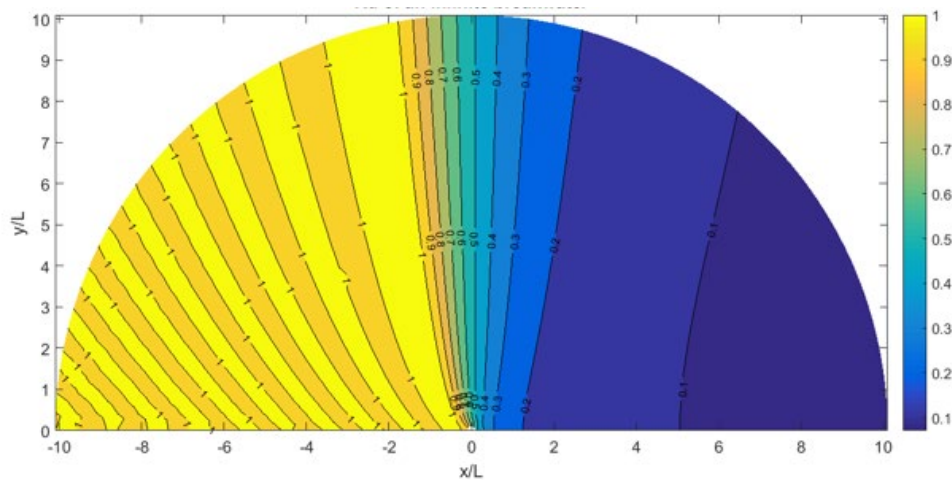


圖 5.10 半無限長防波堤解析解

- (三)承上，三維數值模式(MIKE3 wave)模擬過程產生的越波現象，本計畫模式雖可模擬，但波浪越波之飛濺現象仍無法被模式忠實還原，初步推測是本計畫數值模式未納入流體體積(VOF)模型，因此，模式不能表現波浪傾覆、飛濺、噴射與衝擊等流體行為，故漫溢至堤防後的水量有限，導致於本計畫模擬結果較差，雖然三維波浪數值水槽研究 4.3.3 小節二維案例成效不錯，但模擬複雜水動力的狀況，數值模式尚存改善空間。
- (四)此外，不論採用何種三維數值模式均能利用實測地形資料建置模式運算邊界與條件，以直接獲取水理機制模擬之結果，但未必能取得良好的結果，故如果利用數值模式配合縮尺將數值模型尺寸縮小，是否會造成或產生更為複雜的效應，是否有其必要性，此部分尚未進一步證實。
- (五)關於數值水槽的可行性，經本計畫第四章與第五章討論結果，三維數值模式(MIKE3 wave)雖成效仍待改進，但已能處理黏性流體與分析完全非線性的波浪問題，及具備相當程度的模式雛形，然而越波問題的水面變化是一個簡單高度複雜性函數，該模式無法良好描述，故數值水槽模擬的好壞決定於紊流模式，此部分已於 4.3.1 小節回顧，未來如需建立數值波浪水槽，建議採用雷諾平均之紊流模式，配合具控制流體體積(VOF)之計算流體力學數值模式(Computational Fluid Dynamics，稱 CFD)，例如：FLOW-3D 或者 OpenFOAM 數值模式解析越波行為下氣場與流場之變化。

第六章 結論與建議

本計畫已完成 3 項研究主題與 5 個研究項目工作，其中水工模型試驗研究、數值模式驗證與數值波浪水槽可行性評估已於第三至五章內容陳述，本章將總結前五章內容，提出以下點 8 結論與 5 點建議，提供後續應用參考及研究使用：

6.1 結論

- (一)漂沙試驗長程方案，外廓防波堤址附近護基有底床掏刷情形，可再進一步評估形成掏刷之原因。
- (二)本計畫由於沙源充沛，漂沙侵淤變化趨勢，以中油石化專區外海突堤(北內防波堤)以南側區域呈現均勻淤積的情況，總淤積量最大，達到 245.70 萬 m^3 ；原臺中港北防波堤至中油石化專區外海突堤(北內防波堤)亦呈現淤積，總淤積量次之，達到 135.81 萬 m^3 ，且原臺中港北堤內側有侵蝕情況嚴重現象；原臺中港北防波堤以北淤積量接近平衡，但侵蝕淤積分布較不均勻，淤積量僅 2.88 萬 m^3 ，此三區總計淤積量為 384.39 萬 m^3 。
- (三)遮蔽試驗近程方案，於三種波浪情境夏季(W)、冬季(N)與颱風(N)分析得知臺中港入分區後港內波高較大。且冬季與颱風情境港內波高較大。
- (四)遮蔽試驗近程方案，研究於冬季(N)、颱風(N)與冬季(NNE)、颱風(NNE)比較，試驗結果發現以波浪入射 N 方向對於臺中港影響較大，波浪越波現象較為明顯，遠大於波浪入射 NNE 方向的影響，對於 LNG 港域內不靜穩狀態會有影響。
- (五)遮蔽試驗長程方案，於三種波浪情境夏季(W)、冬季(N)與颱風(N)試驗分析北防波堤延伸 2,775 公尺、南外廓防波堤延伸 950 公尺，冬季時Ⅲ區、Ⅳ區港內波高相比近程方案，減少 60~70%波高，而颱風時Ⅲ區、Ⅳ區港內波高相比近程方案，則減少 50~60%波高，較近程方案明顯改善，符合船舶碼頭靜穩需求容許波高，惟夏季

波浪因方向且受防波堤與港灣構造物反射對港內靜穩度影響較大。

- (六)以二維數值模式(MIKE21 HD)探討漂沙試驗長程方案，例如潮流影響港灣結構物的剪應力分佈情況之結果比對，於堤防結構物周邊確實底床剪應力增大，顯示渦流與紊流對於結構物周邊產生應力集中現象，剪應力越大越易造成底床顆粒間滑移，底床淘刷範圍越大。
- (七)以三維數值模式(MIKE3 wave)探討遮蔽試驗長程方案，結果顯示颱風情境模擬過程亦發生越波現象與試驗結果一致，但數值模式越波影響港內程度遠不及試驗結果，初步推測是本模式未納入流體體積(VOF)模型，導致波浪越波之飛濺現象仍無法被描述，造成本計畫模擬結果較差，顯示數值模式尚存改善空間。
- (八)關於數值水槽之可行性，由文獻回顧得知目前黏性流體於二維水槽已具相當良好的模擬程度，惟初步探討三維水槽雖亦已能處理黏性流體與分析完全非線性的波浪問題，但波浪越波入港使水面變化由簡單高度函數，變成簡單高度複雜性函數。

6.2 建議

- (一)有關臺中港未來興建外廓防波堤後，堤址附近可能造成波引致流，造成護基底床掏刷與形成孔洞現象，值得持續研究探討，建議深入驗證，持續研究討論，以利港埠長期安定發展。
- (二)本計畫水工模型漂沙試驗於無限沙源條件下，臺中港漂沙侵淤變化趨勢以淤積為主，LNG 天然氣接收站港域可能造成淤積情形，是否未來會發生港內淤積致水深不足，影響 LNG 船舶無法入港接氣或潛在擱淺風險，建議後續持續研究討論。
- (三)本計畫遮蔽試驗近程方案，冬季與颱風風浪偏大；遮蔽試驗長程方案，夏季波浪所造成防波堤或港灣構造物反射效應顯著，建議後續可持續探討不同規劃配置與試驗條件進行研究探討。

- (四)本計畫漂沙試驗採用不等比尺進行試驗研究，造成漂沙淤積量偏大，如何減少不等比尺效應，還原試驗結果，建議可持續研究探討；另外，為求得漂沙試驗之時間尺度，預備試驗常以規則波浪尋求時間比尺，對於以不規則波尋求時間比尺研究較少，建議日後執行漂沙試驗時，可採用不規則波進一步探討。
- (五)數值水槽模擬的好壞決定於紊流模式，未來如需建立數值波浪水槽，建議採用建立於計算流體力學(CFD)之上的數值模式，並且採用雷諾平均之紊流模式及具控制流體體積(VOF)之數值模式，例如：FLOW-3D 或者 OpenFOAM，以獲取更好的模擬成果。

6.3 成果效益與後續應用情形

- (一)本計畫利用水工模型試驗與數值模式探討臺中港近長程配置方案，完成冬夏季與颱風風浪漂沙與遮蔽研究，評估北外廓防波堤的重要性，相關研究成果提供做為交通部及所屬機關港灣工程規劃及設計之參考依據。
- (二)本計畫探討港區靜穩度於各種情境，包括颱風事件於港池震盪的變化，與近(長)程外廓堤規劃對靜穩度影響，相關靜穩度評估成果，可做為未來港區改善配置與靜穩度改善的應用參考。
- (三)臺中港建港港型規劃一直以來係本所關注焦點之一，本所以水工試驗與數值模式協助評估，後續可與港務公司與台灣世曦工程顧問公司保持技術交流，使實務應用能持續精進，做為臺灣國際商港計畫推動的依據。

參考文獻

1. 臺灣港務股份有限公司，2021，「110 年度臺中港外廓防波堤保育對策堤型方案可行性、具體化方案暨數值模擬分析」委託技術服務報告書。
2. 臺灣港務股份有限公司，2020，「臺中港 40 年期主計畫」委託技術服務報告書。
3. 臺灣港務股份有限公司，2018，「臺北港三、四期圍堤暨基隆港收容填區圍堤造地工程設計監造工作」委託技術服務，基隆港航道、迴船池水域加深浚挖工程及土方收容填區圍堤工程平面水工模型試驗及評估報告書。
4. 台灣電力股份有限公司，2017，「臺中港液化天然氣接收站計畫可行性研究」報告書。
5. 交通部運輸研究所，2003～2016，「港灣海氣地象觀測資料年報」(波浪、海流、潮汐等部分)。
6. 交通部運輸研究所，2018，「離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討」(2/4)
7. 交通部運輸研究所，2019，「離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討」(3/4)
8. 交通部運輸研究所，2020，「離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討」(4/4)
9. 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。
10. 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.
11. 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.
12. 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.

13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Watanabe, Y. and Saeki, H. "Three -dimensional large eddy simulation of breaking wave", Coastal Engineering 41, 1999, pp. 281-301.
24. 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.

25. 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.
26. Zhao, Q., Armfield, S. and Tanimoto, K., "Numerical simulation of breaking waves by a multi-scale turbulence model," Coastal Engineering 51, 2004, pp. 53-80.
27. Miyata, H., "Finite-difference simulation of breaking waves", Journal of Computational Physics, Vol. 65, 1986, pp. 179-214.
28. Lemos, C. M., "Wave Breaking over a Submerged Plate-A Numerical Study", In Computer Modelling of Seas and Coastal Regions, 1992, pp. 83-95.
29. Bradford, S.F., "Numerical simulation of surf zone dynamics", J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng., Vol. 126, 2000, pp. 1-13.
30. 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.
31. 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.
32. Zhao, Q., & Tanimoto, K., "Numerical simulation of breaking waves by large eddy simulation and VOF method", In Coastal Engineering 1998, 1999, pp. 892-905.
33. Christensen, E. D., & Deigaard, R., "Large eddy simulation of breaking waves. Coastal engineering", 42(1), 2000, pp. 53-86.

附錄一

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究 期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-110-H2CA001g

計畫名稱：臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討

審查日期：110年12月15日(星期三)

參與審查人員 及其所提之意見	自辦研究承辦科 處理情形
林佑任委員：	
1. 臺中港早期開始建港港型規劃的第一步，就有中華顧問工程司的規劃及港研中心就參並辦理最重要的靜穩及漂砂水工模型試驗，很感謝港研中心的協助讓臺中港有今天的發展。臺中港自104年著手港區遠期規劃時雖有外廓堤構想但屬於遠期的需求，短中期的需求可以說是以圍堤造地為主，尚無考量外港外廓需求，到105年台灣電力公司開始有自設LNG接收站需求的想法而產生外廓堤需求等因能源政策而產生的近程外廓堤建設需求並滿足中油接收站外廓堤需求，並納入106年底公司內部由世曦工程顧問公司所提出之近中遠期規劃。本研究考量該規畫長程與短程之需求進行模擬，臺灣的國際商港真的很感謝有港研中心的研究推動，讓前置作業有所參據。近期因為環評的過程，短期外廓方案考量優化保育措施，交通部有新的優化想法，讓外廓堤由近程再跨出一步，堤型與原各期配置之比較有所調整，也很感謝港研中心與世曦工程顧問公司的持續協助。	感謝委員肯定，有關臺中港建港港型規劃一直以來係本所關注焦點之一，特別係近幾年來面對能源轉型，各階段外廓堤工程規劃不斷遭受環評之挑戰，對於港務公司短中長期的需求，本所以水工試驗與數值模式協助模擬，做為臺灣國際商港計畫推動的依據之一，期盼未來能有更多機會與臺灣港務股份有限公司、台灣世曦工程顧問公司能與本所持續保持合作，共同為臺中港繁榮而努力。
2. 報告p.5-2頁，近程方案顯示冬季與颱風均有不穩靜情形，且波高未小於LNG船風電船容許波高，及p5-4，說明北外廓防波堤的重要性，p.5-5，長程方案說明遮蔽係數降低一半以上效果超好，結論也提到冬季與颱風比進	感謝委員肯定，本研究水工模型試驗結果明瞭北外廓防波堤的重要性，惟後續許多現象、議題與關注重點仍值得繼續研究討論，建議後續能持續研究探討，未來能提供更多研究成果，做為交通部及所屬機關公司可行性規劃及建設方案

程方案可減少50%~70%的波高，均恰可呼應目前交通部對於短期宜採用優化保育方案延長北堤的需求很明確，感謝港研中心的研究。	之參考依據。
3.港內靜穩度情形，臺中港港內#106碼頭施工時，外側太空包圍堰工法曾被季節風浪打壞，造成工期延誤，現場波高工程師描述有1~2m，由於臺中港面積大風域長度長，風吹浪影響可能無法忽略，建議納入分析參考。	感謝委員建議，有關臺中港內吹風距離較長，風趨流部分本研究尚未進行深入研究討論，對於港內太空包圍堰工法曾被季節風浪打壞，因此，風吹浪影響可能無法忽略，此現象值得納入研究探討，本研究後續將繼續探討。
4.報告p.2-1頁，有關2.1試驗規劃新設防波堤的配置說明部分，漏掉了北內堤的配置與長度說明。	感謝委員意見，已於報告p.2-1頁，有關試驗規劃新設防波堤的配置說明部分，增加「中油港外擴建區向外新增北內堤防550m」說明。
5.報告p.2-2頁，有關模擬採用之設計堤防高度依照北堤堤防道路高程 +8 m部分，建議亦可參考胸牆的高度與越波實際作用效果安排。	感謝委員意見，有關委員所提海堤是否有超量越波部分導致港內漂沙淤積嚴重，除非是飛沙造成，不然越波並不會造成港內淤積。另外，有關水工試驗胸牆墊高係以砌磚方式加高初步探討，磚厚度5cm相當於實際南外廓胸牆墊高7.5m，對於越波實際作用效果，後續將持續研究討論。
6.有關本遮蔽與漂沙之模擬，就波浪部分於預備試驗或後續試驗與數模是否有觀察到共振現象，若有建議可以提出可能之共振區熱及早注意。	感謝委員建議，有關本遮蔽與漂沙之模擬是否有觀察到共振現象，本研究水工試驗係有覺察共振現象，目前尚無法確定及描述呈現，因此仍須仔細檢視應證，建議持續朝此目標研究討論。
7.報告p.2-5頁，有關漂沙預備試驗中，編號1.與編號2.採用之波高與週期均為定值，如冬季波高為2.61 m等，但編號3.與編號4.有關波高與週期不論夏季或冬季均給一個範圍，如冬季波高2.24~2.61 m，但颱風則給一個波高與週期。請問給定範圍的部分是否代表造波之規則波波形會在給定之範圍調整。	感謝委員意見，有關編號3.與編號4.有關波高與週期不論夏季或冬季均給定範圍，例如冬季波高2.24~2.61 m，此部分屬為編號3~編號4預備試驗的條件，以給定範圍方式呈現易造成誤解，已修正報告p.2-5頁內容為代表波浪之條件。
8.報告p.2-7頁，確認一下有關模型底質的比重比尺 N_r 與中值粒徑比尺 N_{d50} 是否均設為1，與原型採用相同底質。	感謝委員意見，有關模型底質的比重比尺 N_r 與中值粒徑比尺 N_{d50} 均設為1，採用與原型相同中值粒徑0.2mm之底質。

9.報告p.3-6頁，漂沙試驗結果與討論圖3.8北淤沙區外海呈現淤積現象，平面圖與現場照片的對應位置不同，請修正。另外，有關現場照片窪區與地形與等高線圖比較，地形圖宜盡量配合地形變化趨勢，光達密度應該很高，有關沙漣或雜訊的影響盡量克服。	感謝委員指正，漂沙試驗結果與討論圖3.8北淤沙區外海呈現淤積現象，平面圖與現場照片的對應位置不同，此為線條位置錯置，已修正調整，如報告p.3-6頁。另外，有關現場照片窪區與地形與等高線圖地形變化趨勢，將於後續研究納入比較。
10.圖3.13與圖3.14是否漏掉長程方案南外廓防波堤的再延伸段980 m。	感謝委員指正，有關圖3.13與圖3.14漏掉長程方案南外廓防波堤的再延伸段980m，已於報告p.3-11~3-12頁修正此二圖形。
11.報告p.3-11頁，有關描述長程方案123區的淤積及土方量及總淤積量384.39萬方部分，淤積數量甚高寫得太明確或肯定可能會與實際有過大落差，另亦可能為模型防波堤堤頂高程的設定造成超量越波現象所造成，建議再探討評估並以稍保守的描述呈現。	感謝委員建議，本研究漂沙淤積量為沙源充足情況試驗2年結果之總量，與臺中港年歷年浚挖量(約100萬方)比較尚有差異；對此，確實應以保守方式描述呈現，且須仔細檢視應證，釐清是否有超量越波現象或者其他成因所造成，建議持續研究討論。
12.報告p.3-17頁，最後一段文字，接收站除冬季N方向波浪超標大於LNG船容許波高外，其餘情況冬季NNE方向波浪與胸牆墊高冬季N方向波浪，均符合LNG船容許波高，如果模擬結果認為依照胸牆高程墊高堤防之模型如果比較合理，建議以胸牆墊高的描述為主未墊高者為輔。	感謝委員建議，有關本研究南外廓胸牆墊高方案為初步探討，胸牆高程墊高堤防能改善港區內靜穩情形，故內文敘述修正為胸牆墊高的描述為主，未墊高者說明內容為輔，如報告p.3-18頁所示。
13.報告p.3-18頁，表3.5冬季北向浪於CH30~37胸牆墊高較未墊高之波高大，及報告p.3-24頁，有關CH45夏季長程波高較近程大，報告p.5-6頁，CH38~48最大遮蔽係數長程反而較大，似不合理。	感謝委員意見，針對所提於不合理處，經檢視水工試驗數據確實如此，可能成為何委員所指研究數據擷取較不具代表性段落分析結果所致；另外，夏季波高於CH45及CH38~48反而較大，似乎於CH45發生共振現象造成偏大，建議持續研究討論釐清。
14.建議表3.4與表3.7有關冬夏與颱風的波高值整理的部分，各條件波高如果再輔以平面圖直接呈現有益判讀。	感謝委員建議，有關表3.4與表3.7有關冬夏與颱風的波高值整理的部分，已配合等深圖並套繪至附錄四呈現。
15.報告p.5-1頁，漂沙試驗圖5.1北堤南(內)側呈現規則的坑洞，成因除了繞射是否有其他原因造成(如越波、共	感謝委員建議，有關北堤南(內)側呈現規則的掏刷坑洞，成因除了繞射原因，其他如越波、共振、短峰波…等等原因皆

振、短峰波…等等)。	有可能仍待驗證，建議持續研究討論，以釐清真正成因。
16.報告p.5-5頁，有關(二)遮蔽長程方案CH10~CH29遮蔽係數降至0.49但對照表5.2為0.44，請確認哪個數字正確。	感謝委員指正，有關報告p.5-5頁，文字敘述係對照表5.2數據說明，故遮蔽長程方案CH10~CH29遮蔽係數降至0.49為數值誤植，正確應為0.44，已完成修正，請委員參閱。
17.表5.3所呈現的遮蔽係數為平均值或最大值請說明。	感謝委員建議，有關表5.3所呈現的遮蔽係數非最大值，為有義波高($H_{1/3}$)平均波高之遮蔽係數，如報告p.5-2頁所示。
何良勝委員：	
1.本報告內容頗為充實，架構描述清晰易於理解。工作項目及成果亦符合預期成果。	感謝委員肯定，將持續觀測臺中港海域，以取得更完整的研究成果。
2.依本報告內容，仍有頗多值得後續持續研究探討。	感謝委員建議，有關堤防與堤基波引致流、沖刷孔洞、漂沙淤積量等流固交互作用現象值得持續研究探討，本研究尚未深入驗證，將繼續研究討論。
3.建議下列修正或補充說明之處： (1)目錄3.1及目錄3.2之「執行方案」，可刪除「執行」二字。 (2)報告p.1-4頁，可做適度修正。 (3)報告p.2-11頁，圖2.10，可增列等深線之水深數字。 (4)第3.1節中，增列「推估2年」之試驗條件說明。 (5)報告p.5-1頁，內文「兩者比對均有一致性結案」，可做適度修正，或補充說明。 (6)第六章「結論」之第一項，內文「形成穴蝕孔洞」，可做適度修正。 (7)第六章「建議」之第四項，可做適度	有關建議修正或補充處，說明如下： (1)感謝委員建議，有關目錄3.1及目錄3.2之「執行方案」已刪除「執行」。 (2)感謝委員建議，報告p.1-4頁，有關「計畫範圍與對象」，以及「研究項目」已補充內容及適度修正。 (3)感謝委員建議，有關報告p.2-11頁，圖2.10，建議增列等深線之水深數字(-10m、-15m與-20m)，已將其套繪等深圖並呈現於附錄四。 (4)感謝委員建議，已將預備試驗條件說明增列於第3.1節，如報告p.3-1頁。 (5)感謝委員建議，本研究水工試驗現象與數值模式驗證值得持續研究探討，內文結論尚存不確定待釐清，已酌修文字，如報告p.5-1與6-2頁。 (6)感謝委員建議，有關第六章結論內文形成穴蝕孔洞部份，為避免與穴蝕專有名詞混淆，已統一修正為掏刷孔洞，如報告p.6-1~6-2頁。 (7)感謝委員建議，本研究水工試驗發現

修正。	之現象與議題應再仔細求證，故委員建議適度修正部份，已於報告p.6-3頁酌修。
(8)參考文獻部分，和報告相關者，才陳列於內。	(8)感謝委員建議，有關參考文獻部分已經酌予調整，請委員參閱。
朱志誠委員	
1.地形變遷預備試驗採用前期研究成果，故本次試驗則為配置方案之地形變遷之預測。由試驗結果顯示，長程外廓方案與近程外廓方案在二年間之港內淤積量達381萬方(即每年191萬方)，此值約與現況臺中港年歷年浚挖量(約100萬方)相近，尚屬合宜。	感謝委員肯定，本研究漂沙淤積量為沙源充足情況採2年試驗結果之合計總量，為清楚呈現年淤積量，已酌修部分文字於p.3-11頁；感謝委員補充漂沙不確定性為1個數量級即漂沙量差距 10^1 ，因此，以本研究年淤積量與臺中港年歷年浚挖量(約100萬方)比較相近且合理。
2.臺中港之地形變遷受波浪及潮流雙重影響，而水工模型試驗尚無法描述潮流流場特性，僅能以波浪產生之沿岸流流場加以模擬，實際地形變遷趨勢，建議後續研究可綜合數值模擬分析成果，較能完整呈現整體地形變遷現象。	感謝委員指教，本研究水工模型試驗確實僅能探討波引致流的影響，對於潮流影響未能於實驗中重現，此為受限於試驗室場地設備所致；而本研究數值模式同樣未考慮委員所述波浪與潮流的雙重影響，後續研究將綜合數值模擬分析，以呈現較完整地形變遷現象。
3.整體地形變遷之趨勢尚屬合宜，但圖3.10北外廓內側有6個坑洞，此特殊現象應進一步研究，初步建議可由數值模擬水工試驗條件，分析是否有類似堤內側短峰波現象。	感謝委員建議，有關本研究北外廓內側有6個坑洞特殊，確實有類似短峰波現象，後續研究將驗證孔洞直徑是否為入射短峰波波長2分之1，以探討北外廓內側是否有受到短峰波效應影響。
4.遮蔽試驗之結果受入射條件及海底地形影響甚大，在以往試驗過程中，常常因為外海造波機與模擬地形間之地形鋪設未能與規劃設計一致，致使試驗結果有所偏差。建議報告中應完整繪製模型鋪設地形圖及波高分佈圖，以充分展示波能分佈之特性。	感謝委員建議，不論試驗與數值模式結果，皆與試驗與數模條件相關，但率定結果有無充分展現起始條件未能顯見，若能繪製模型鋪設地形圖及波高分佈圖，將可充分呈現波能分佈之特性，此部份已將波高分佈圖套繪至等深圖呈現，如附件四所示。
5.以本試驗近程方案在冬季N向之結果顯示LNG碼頭區之波高均值達1.82m，此值將不符停靠需求(報告p.3-13)，另將南外廓胸牆墊高後，則降低至0.92 m(報告p.3-18頁)，由上結果可知南外廓越浪特性造成港池靜穩之嚴重影響，建議報告中可明確標示	感謝委員指教，有關南外廓胸牆墊高係以砌磚方式加高，但未述明增加多高部份，本研究採用磚塊墊高為初步探討，磚厚度5cm相當於實際南外廓胸牆墊高7.5m，至於胸牆墊多高能達到最佳經濟防護效果，本研究尚未深入探討，後續研究將納入委員建議。

胸牆墊高之高程，以利後續設計參考之用。	
林雅雯委員	
1.第五章水工模型試驗及數值水槽遮蔽係數分開繪圖，建議套疊製作差異量等值線圖，俾利看出面的差異。	感謝委員建議，本研究遮蔽係數平面圖係以水工模型試驗48支波高計繪製，數值水槽遮蔽係數僅擷取6個點位無法繪圖，後續研究將納入委員建議增加擷取數值水槽之遮蔽係數，並分開繪圖與比較差異。
2.水工模型試驗波高計、攝影紀錄及流速計資料，是否可以後續分析紀錄波場(波高、波向及週期)、流場，俾利日後與數值水槽驗證。	感謝委員建議，誠如委員所述本研究水工模型試驗紀錄之波高、流速與影像資料，未來均可以進一步使用於三維數值水槽開發與進行驗證，後續研究將持續探討。
3.p.3-10~p.3-11，圖3.13與圖3.14侵淤比較圖建議合併，報告p.5-9頁，圖5.8及圖5.9看不清楚。	感謝委員建議，有關第1~4區侵淤比較圖已合併於圖3.14所示；此外，圖5.8與圖5.9色階不清楚部份，後續成果報告書將以彩色列印改善圖5.8與圖5.9。
4.報告p.3-2頁，試驗水池及模型周圍，報告p.3-7頁，北防波堤外側皆放置消波塊；報告p.3-17頁，胸牆墊高，建議補充敘述。	感謝委員建議，有關試驗水池及模型周圍與北防波堤外側皆放置消波塊範圍已更新至圖2.11所示；另外，本研究磚塊墊高厚度5cm相當於實際南外廓胸牆墊高7.5m，已更新於報告p.3-17頁。
5.報告p.3-6頁，南外廓防波堤轉折處掏刷現象，建議後續分析探討原因。	感謝委員建議，有關南外廓防波堤轉折處掏刷現象已初步探討，惟仍須進一步驗證，後續將持續分析研究其成因。
賴瑞應委員	
1.報告內容包含水工模型試驗及數值模擬，並進行相互驗證分析，研究成果豐碩，具實務應用價值，研究人員的努力值得肯定。	感謝委員肯定，本研究內容承蒙港務公司與台灣世曦工程顧問公司技術交流，受益良多，期望實務應用上能持續精進，以創造應用價值。
2.報告p.2-6頁，動床模型配置採水平與垂直不等比尺方式來配置，文中提到不等比尺控制於4倍範圍之內，建議可補充說明「依經濟部水利署水利規劃試驗所民國100年出版之『水工模型試驗參考手冊』之研究，不等比率宜小於6，符合其規定。」	感謝委員建議，有關報告p.2-6頁，動床模型配置不等比尺部份，已於報告書內新增建議，依據經濟部水利署水利規劃試驗所民國100年出版之「水工模型試驗參考手冊」，建議不等比率宜小於6的規定。

3.報告p.3-18頁，提到彙整2003～2016年本所觀測臺中港歷年海流統計資料，以冬季平均流速最大，春季最小，但歷年最大流速發生在夏季，建議是否補充說明最大流速發生於夏季的可能原因。	感謝委員建議，有關彙整本所觀測臺中港歷年海流統計資料(2003～2016年)，以冬季平均流速最大，春季最小，歷年最大流速發生在夏季，由於臺中港海氣象特性為資料統計結果，影響原因可能來自於海床地形、港埠及季風等因子，冬季平均流速最大主係因流速受東北季風影響，但歷年夏季最大流速發生受颱風因素甚大，但是否為主因尚需驗證與持續分析探討，後續將持續分析研究其成因。
4.報告p.3-21頁，探討近程及遠程配置方案的遮蔽效果，原則上遠程方案優於近程方案，惟夏季季風LNG天然氣接收站CH45測點長程方案配置之波高略大於近程方案，建議能探討其原因。另外，文中提到符合LNG船容許波高，建議補充說明其容許波高值為何。	感謝委員建議，有關夏季季風LNG天然氣接收站CH45測點長程方案配置之波高略大於近程方案，本研究發現該處於長程配置時有共振現象發生，因此略高於近程，惟此共振是否為持續現象，仍待探討釐清；另外，LNG船容許波高為1.0m，已於報告p.3-21頁增加。
5.報告p.5-1頁，圖5.1長程方案配置水工模型試驗與數值模式驗證比較，由水工模型試驗結果顯示，堤內側產生幾個較深的沖刷坑洞，此物理現象值得後續進一步探討，並驗證是否與試驗結果一致。	感謝委員建議，有關水工模型試驗結果，堤內側產生幾個較深的沖刷坑洞，此物理現象今年度已由MIKE21水動力之潮流模式加以驗證，後續將探討波引致部份是否係受短峰波影響，後續將持續分析研究探討。
6.第六章結論與建議部分，建議先簡述研究目的與問題，再提出具體「結論」與「建議」，並加強敘明本研究成果之效益，以及可提供本所或其他政府機關後續應用情形。	感謝委員建議，有關第六章結論與建議部分內容各委員均有建議需微調酌修，且本研究成果效益亦建議增加，此部份已於第六章補充與增加。
7.部分文字修訂建議，提供書面資料供參。	感謝委員指正，有關書面部分文字修訂建議，報告p.1-5、p.1-7、p.2-1、p.3-11、p.3-13、p.3-18、p.3-21、p.5-5頁均已修正完畢。
李俊穎委員	
1.報告p.2-2頁，所述最低低潮位為EL 0.00 m，圖面為L.W.L，請再確認相關說明。	感謝委員指正，有關本研究L.W.L經確認為朔望平均低潮位，L.L.W.L始為最低低潮位，報告p.2-2頁誤植處已修訂完成。

2.建議後續可考量將表3.1、表3.4及表3.7套繪至平面圖上可於附錄呈現，以利判讀相關資料。	感謝委員建議，有關表3.1、表3.4及表3.7套繪至平面圖上已新增於附錄四呈現。
3.第3.1節，建議繪製各期水工試驗後等深圖，並配合港區配置適當調整區塊及文字說明。	感謝委員建議，有關各期水工試驗後等深圖，已採用表3.1、表3.4及表3.7等數據配合等深圖套繪至附錄四呈現。
4.圖4.5～圖4.8上有箭頭符號，請補述其代表意義。	感謝委員意見，有關圖4.5～圖4.8箭頭符號表示為最大剪應力變化的方向，報告p.4-5～4-7頁均已修正與補充。
5.第5章模擬結果與水工試驗差異甚大，建議後續可蒐集其他單位相關2維模式報告，整併討論。	感謝委員建議，本研究潮流模式有剪力比較大情形，與水工試驗差異甚大，後續研究將持續蒐集其他單位相關數值模式研究報告與分析探討波引致流之現象。
6.表3.11為何是 H_{mean} ，與容許波高定義不同，請補述說明。	感謝委員指正，本研究 H_{mean} 為波高值時序列平均值，容許波高係指容許作業的波高標準，此二部份定義已於報告p.3-17頁補充修正。
7.圖4.4～圖4.8相似圖檔討論，建議將顏色及區間統一，以利資料解讀。	感謝委員建議，有關圖4.4～圖4.8色階圖之顏色與區塊為MIKE21系統自動產生，本研究未進行調整設定，後續數值模式驗證之色階圖將予以調整修正，以利資料理解。

附錄二

期末簡報內容

臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討



(Published : 15 Dec. 2021)

Presenter: 李政達

Researchers : 林受勳、李江澤、陳天時、李俊穎



研究提要(Highlight)

- 1 漂沙搬運行為與二維數值模式驗證情形
- 2 遮蔽試驗近/長程水動力變化探討與方案差異評估
- 3 數值水槽的可行性
- 4 綜合討論與建議

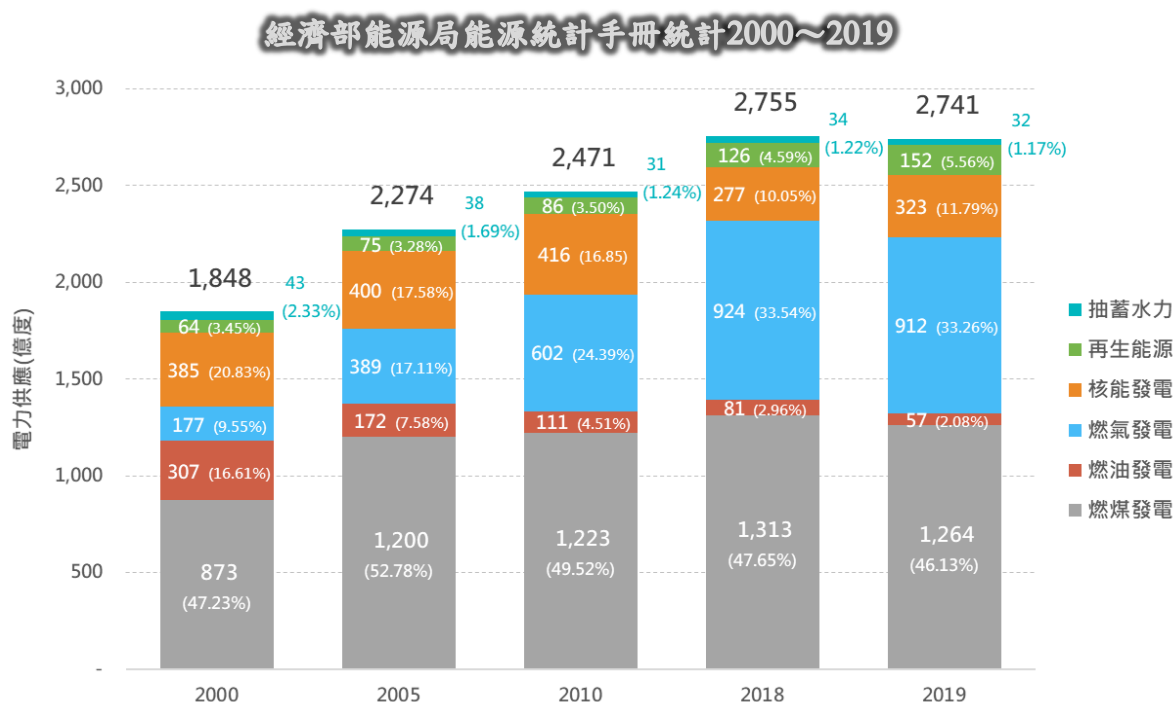


研究大綱(Outline)

- 1 前言(目的、回顧、架構、計畫範圍)
- 2 水工模型試驗規劃(試驗規劃: 漂沙/遮蔽, 條件)
- 3 臺中港近長程外廓堤水工模型試驗(漂沙/遮蔽試驗結果呈現)
- 4 數值水槽分析探討(二、三維波浪模式校驗、數值水槽文獻回顧)
- 5 研究比較分析(試驗與模式比較分析)
- 6 結論與建議

Page 2

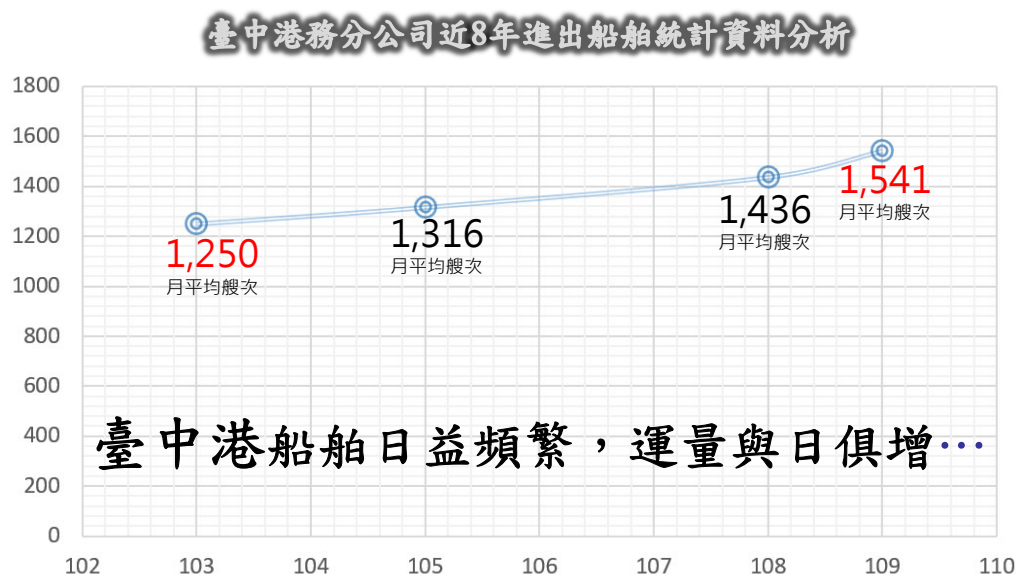
一：研究緣起與目的(1/5)



108年燃氣發電較89年增加 24%

Page 3

一：研究緣起與目的(2/5)



109年船舶運量較103增加 **23%**

Page 4

一：研究緣起與目的(3/5)

1. 隨著政府能源轉型的規劃，台電積極推動中火燃氣發電計畫、**臺中港務分公司辦理臺中港外港區擴建計畫**，並協助中油新建天然氣卸收碼頭
2. 本研究以**水工試驗**進行擴建研究探討，並以**數值模式**進行驗證，並以文獻**回顧**及數值模式**驗證成果**，**評估數值水槽可行性**，綜合討論後提出幾點建議。



Page 5

一：研究緣起與目的(4/5)

臺中港南外廓堤增建與LNG接氣計畫...



Page 6

一：研究緣起與目的(5/5)

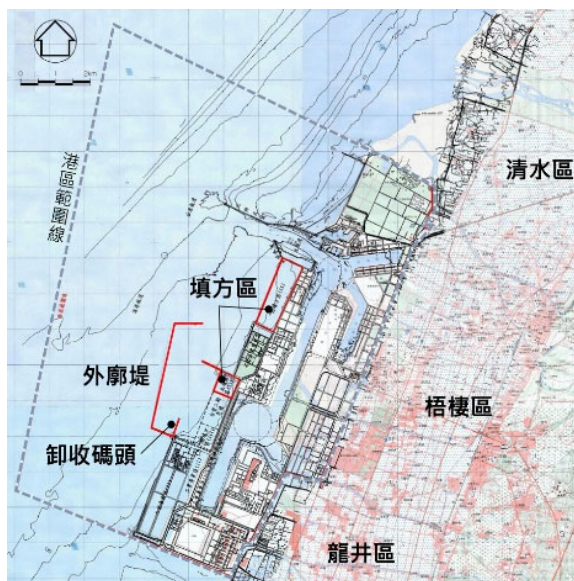
1. 進行波浪數值水槽之初步探討，做為本所內部計算機模式發展，與後續研究之應用參考。
2. 臺灣港務股份有限公司與臺中港分公司等未來施政之應用。



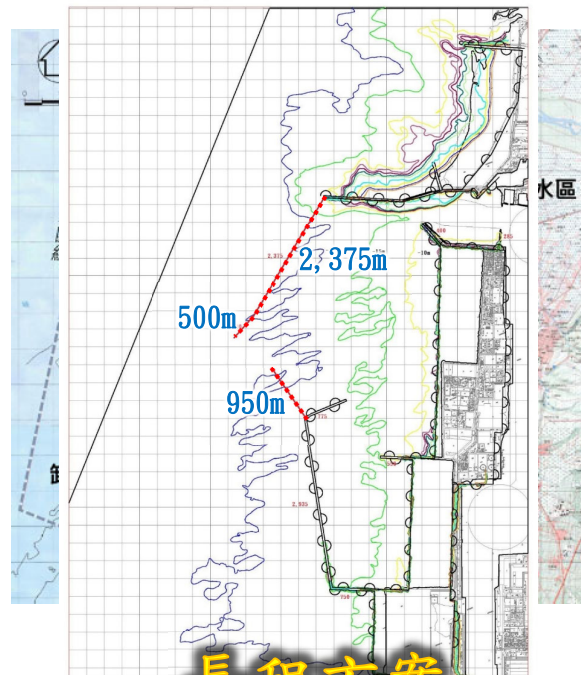
Page 7

二、水工模型試驗規劃 (試驗研究範圍)

研究範圍以臺中港及鄰近海域範圍內。



109年近程外廓堤增建



長程方案

Page 8

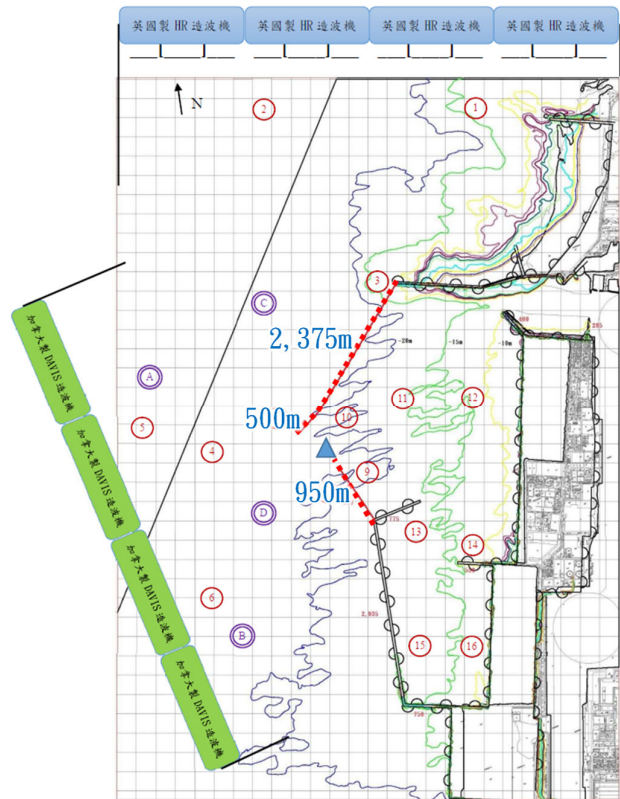
二、水工模型試驗規劃 (試驗廠棚、場地與佈置)



Page 9

二、水工模型試驗規劃 (試驗設備)

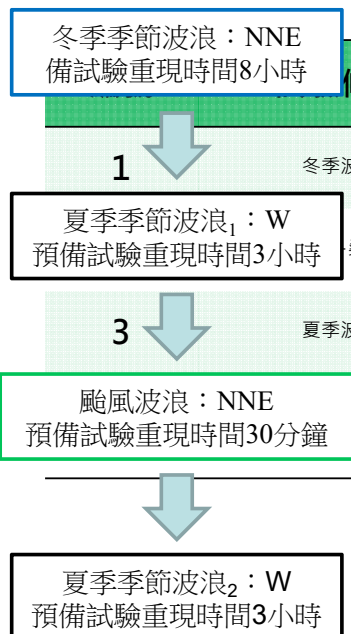
- 符號○號1-16為本 KENEX 公司製造之容量式波高計



Page 10

二、水工模型試驗規劃

- 預備試驗 (動床試驗之前置準備工作)



1年



Page 11

二、水工模型試驗規劃 (試驗條件與縮尺)

(規則)

漂沙

試驗條件

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	1	2.15 m	8.35 cm
		夏季波浪	2	0.87 m	3.38 cm
		颱風波浪	3	4.19 m	16.28 cm
週期	1/5.07	冬季波浪	1	7.5 sec	1.48 sec
		夏季波浪	2	6.5 sec	1.28 sec
		颱風波浪	3	8.5 sec	1.68 sec

(動床試驗)

Page 12

二、水工模型試驗規劃 (試驗條件與縮尺)

[等比縮尺1/150] [時間縮尺1/12.247]

(不規則)

遮蔽

試驗條件

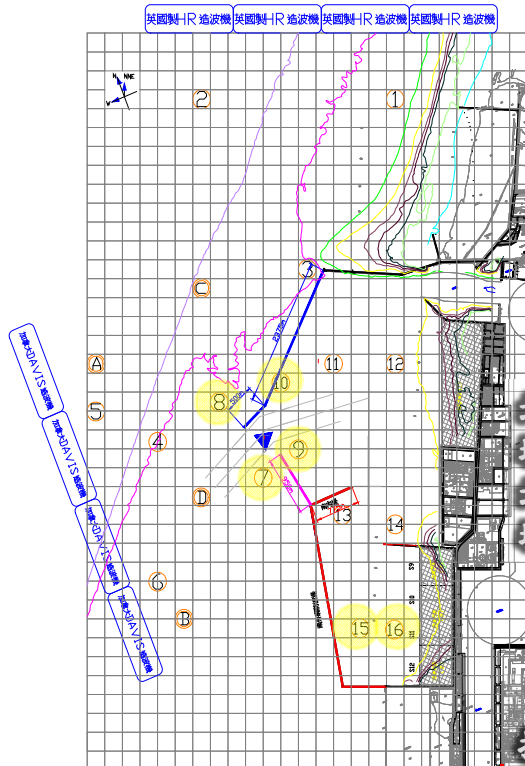
波向 \ 條件			示性波高Hs(cm)		示性週期Ts(sec)		潮位(cm)	
			原型(m)	模型(cm)	原型(sec)	模型(sec)	原型(m)	模型(cm)
季風	夏季	W	1.93	1.29	8.61	0.703	7.51	25.01
	冬季	NNE	3.37	2.25	8.84	0.722		
		N						
颱風		NNE	8.0	5.33	11.9	0.972	8.63	25.75
		N						

(定床試驗)

Page 13

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (漂沙試驗)



規則波試驗 波高量測位置	H _{1/3} 波高值(公尺)		
	NNE(冬)	W(夏)	NNE(颱風)
CH1	2.40	0.755	4.01
CH2	1.93	0.647	4.28
CH3	1.03	0.815	5.03
CH4	1.57	1.143	2.75
CH5	1.10	1.399	2.43
CH6	0.70	1.085	3.32
北防波堤外側 CH7	0.76	0.795	3.61
北防波堤外側 CH8	0.97	0.434	2.07
北防波堤內側 CH9	0.49	0.357	2.09
堤內 CH10	0.70	0.380	3.22
CH11	0.14	0.344	1.30
CH12	0.86	0.890	1.64
CH13	0.49	0.262	0.93
CH14	0.65	0.597	1.60
LNG接收站 CH15	0.35	0.205	1.16
CH16	0.14	0.313	0.80

Page 14

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (漂沙試驗)

1.冬季季風北防波堤模型遇造波初期(30分鐘)產生大量越波現象。

2.冬季季風試驗波浪初期LNG港內產生明顯長週期震盪效應，放置消波塊後較不穩定現象獲得改善趨於穩定。



波高計CH3：T_{1/3}=6.54sec，H_{1/3}=1.03m

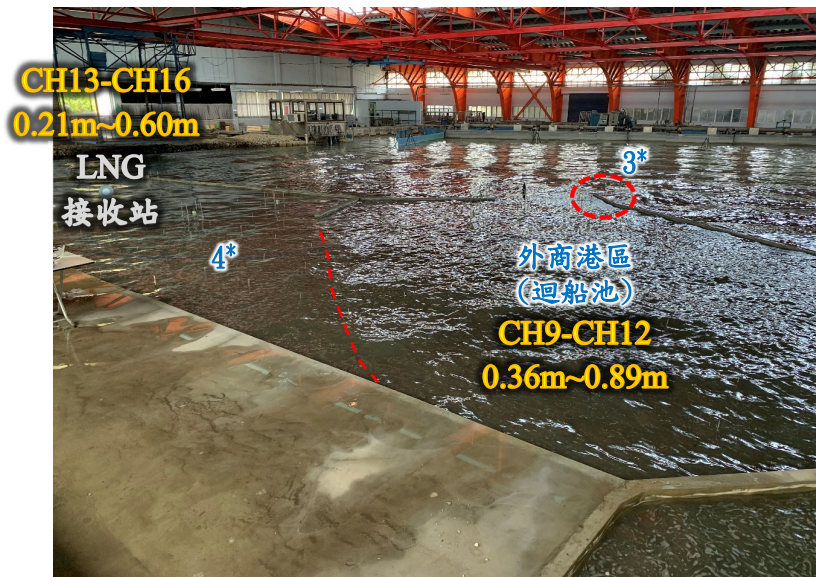
Page 15

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (漂沙試驗)

3.冬季季風外廓防波堤模型延伸布置，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。

4.冬季季風造波試驗時，明顯產生外商港區(迴船池)波浪仍屬紊亂現象，LNG區內則為較平靜穩定。



Page 16

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (漂沙試驗)

5.夏季季風波浪造波試驗時，外商港區(迴船池)及LNG區內之波浪，則為整體上普遍明顯較平穩現象。

6.颱風波浪試驗時為普遍明不靜穩現象，且堤頭處附近明顯易產生越堤。



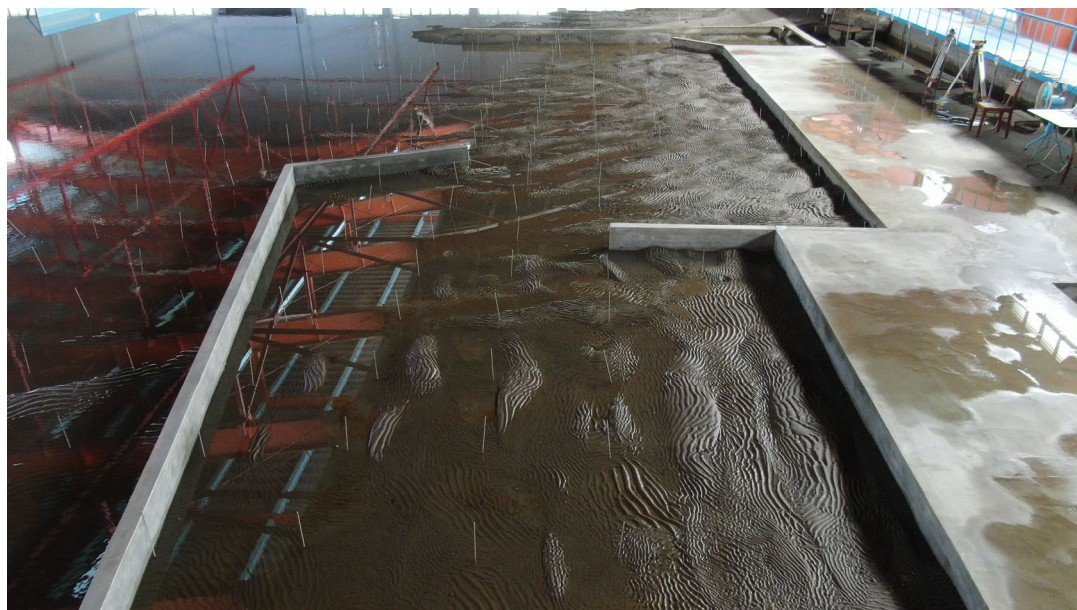
(颱風條件： $T_{1/3}=8.5\text{sec}$ ， $H_{1/3}=4.19\text{m}$)

波高計CH15： $T_{1/3}=4.0\text{sec}$ ， $H_{1/3}=0.81\text{m}$

Page 17

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (漂沙試驗)

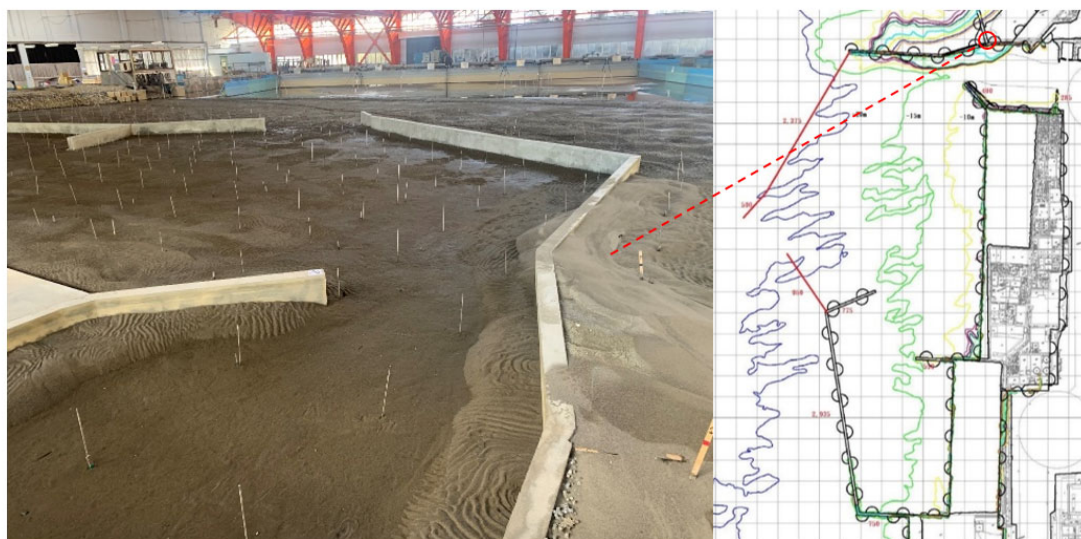


109年離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討

Page 18

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (漂沙試驗)

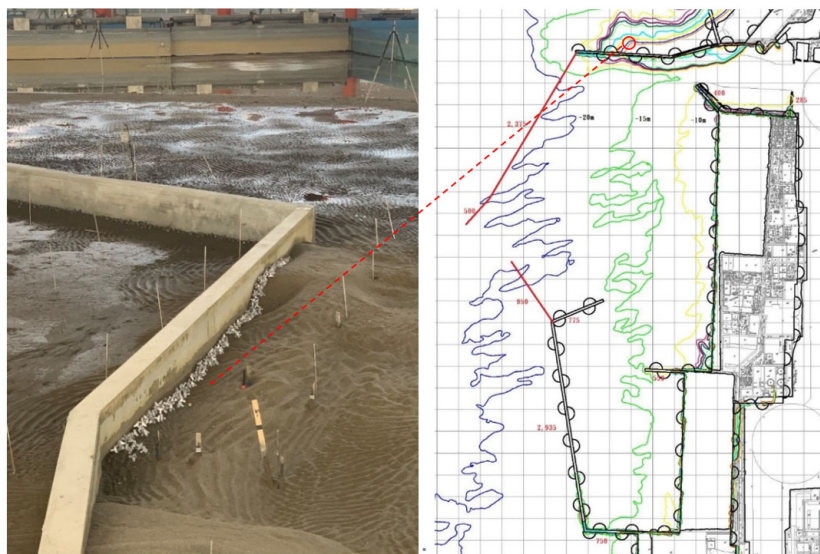


7.外廓堤延伸模型試驗第2年後，北淤沙區外海呈現淤積現象

Page 19

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

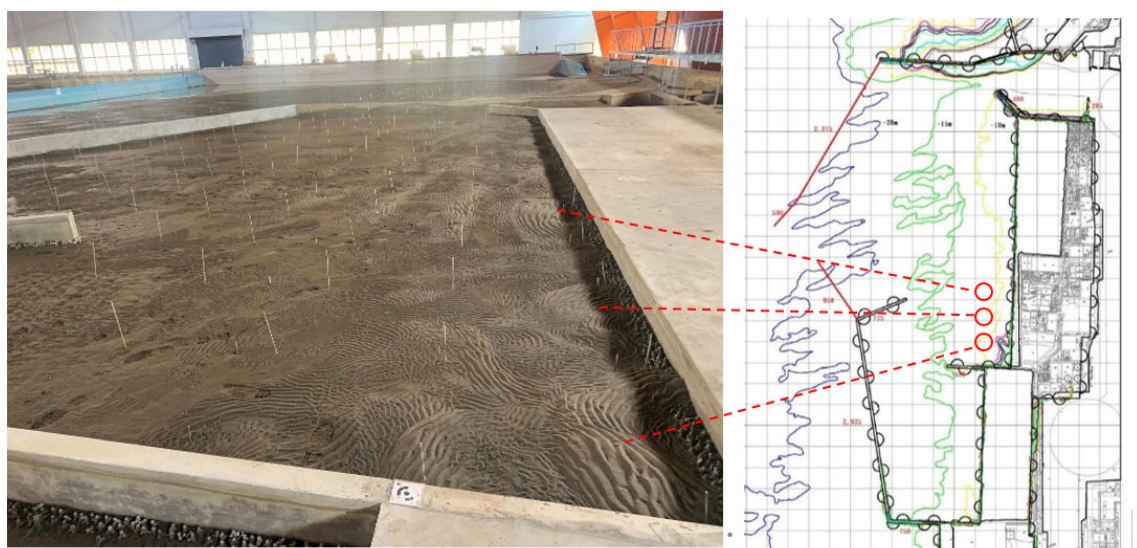
-長程方案 (漂沙試驗)



8.外廓堤延伸模型試驗第2年後，北淤沙區(原北防波堤外側)
侵蝕補充消波塊改善情形

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (漂沙試驗)



9.外廓堤延伸模型試驗第2年後，北內堤外側淤積情形

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

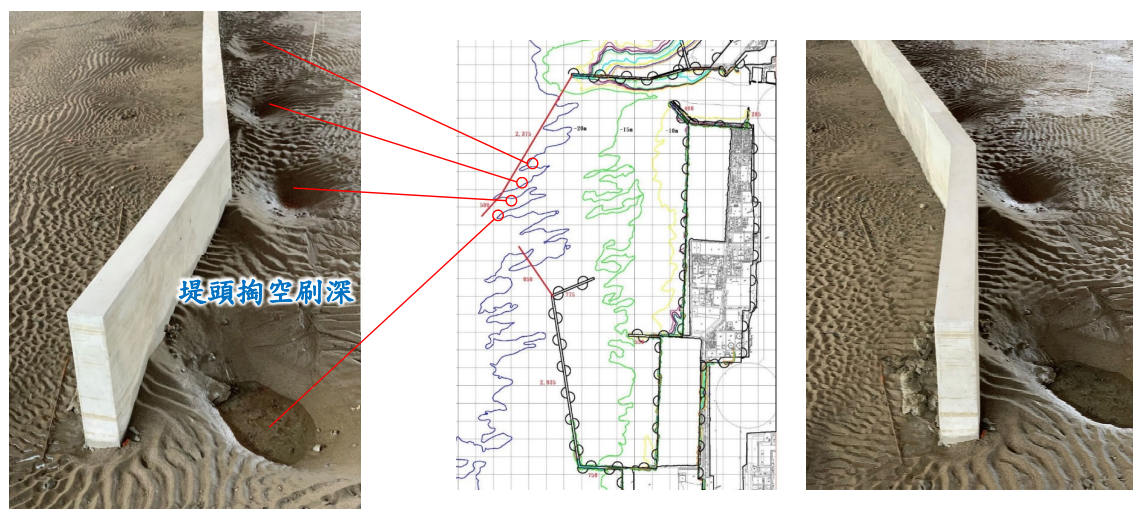
-長程方案 (漂沙試驗)



10.外廓堤延伸模型試驗第2年後，防波堤內外側附近產生掏刷現象

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (漂沙試驗)



11.外廓堤延伸模型試驗第2年後，防波堤內側附近產生明顯掏空刷深現象

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

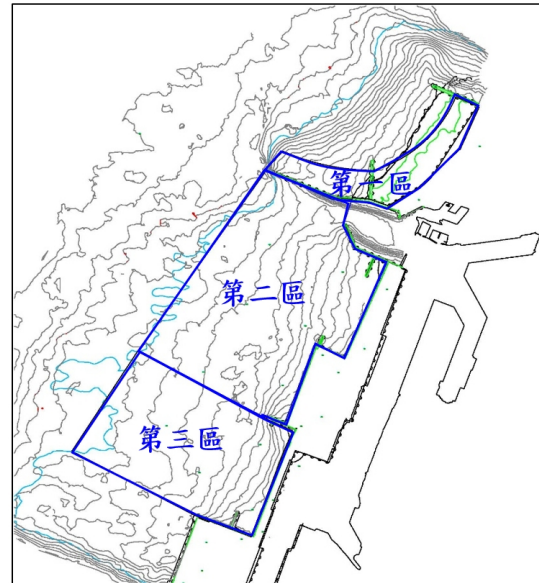
-長程方案 (漂沙試驗)

項目	規格	儀器照片
最大測距	可測2,500m以上 (使用一級雷射Laser Class 1)	
測距精度	2mm-3mm	
掃描頻率	1,200,000 點/秒(超過百萬點)	
測量範圍	100度(垂直)×360度(水平)	
自動拼接	有(i系列才具備自動拼接功能)	
雲端支援	有	
特色	國內掃描儀測距距離最遠 自動化拼接	

光達掃描作業流程

- ①控制測量。
- ②地面掃描與多站結合。
- ③點雲資料過濾分析。
- ④轉出DEM成果。

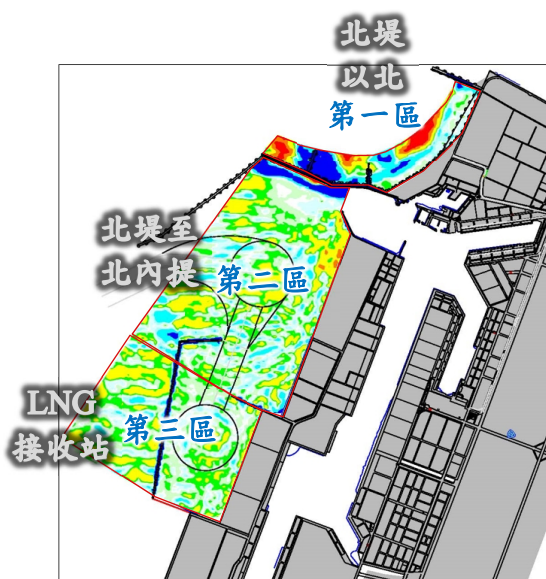
委託詮華國土測繪有限公司勞務工作計算



(動床漂沙試驗)

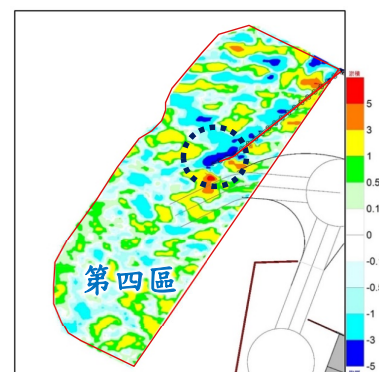
三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (漂沙試驗)



區段	淤積土方量 (萬立方公尺)	沖刷土方量 (萬立方公尺)	合計土方量 (萬立方公尺)
1	284.76	-281.88	2.88
2	564.30	-428.49	135.81
3	342.27	-96.57	245.70

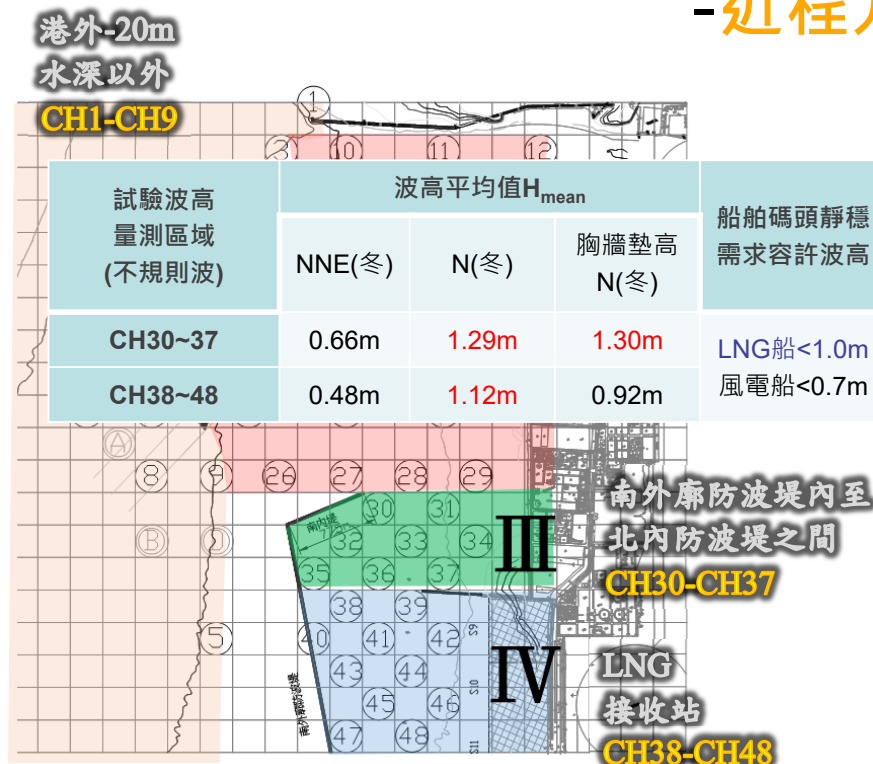
註：土方量計算所使用數據，為試驗現場量測數據，依模型水平縮尺1/300及垂直縮尺1/75依比例放大後計算之成果



臺中港近程外廓堤波浪作用5年後及增設長程外廓堤波浪作用2年之土方量侵淤變化第一~三區(詮華國土測繪)

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-近程方案 (遮蔽試驗)



1.冬季N方向波浪與
颱風N方向波浪均大
於NNE方向波浪。

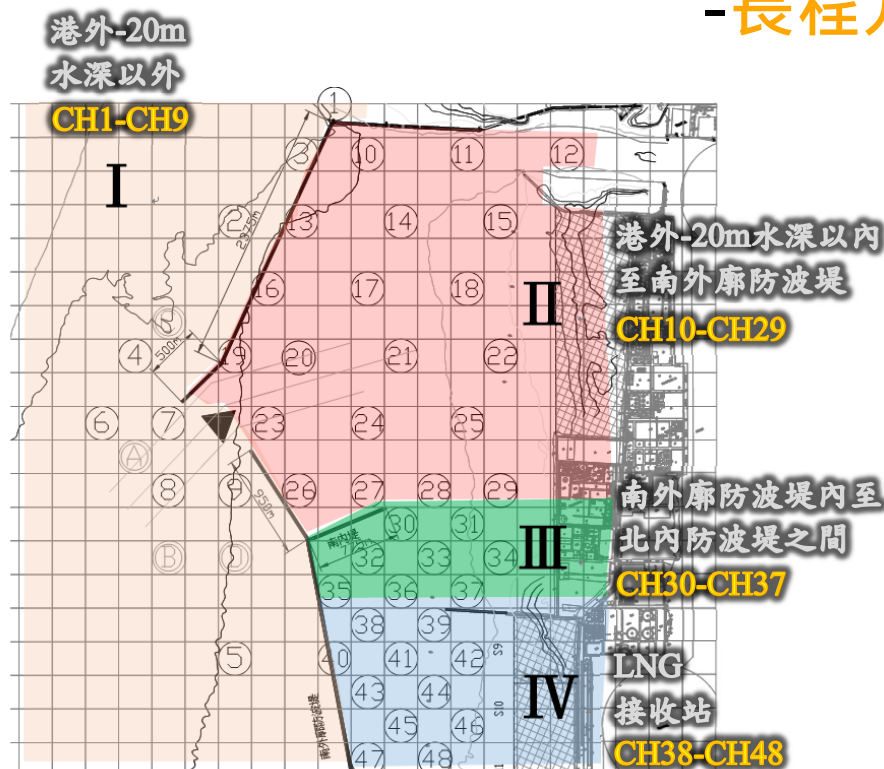
2.第Ⅲ區，除冬季
NNE方向波浪小於
LNG船容許波高，其
餘情況均未達標準。

3.第Ⅳ區，除冬季N
方向波浪超標，大於
LNG船容許波高外，
其餘情況冬季NNE方
向波浪與胸牆墊高冬
季N方向波浪，均符
合LNG。

Page 26

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (遮蔽試驗)



4.夏季探討，除LNG
接收站CH45測點波
高($H_{1/3}=0.537m$)長
程大於近程，港內其
餘位置長程方案均小
於近程。

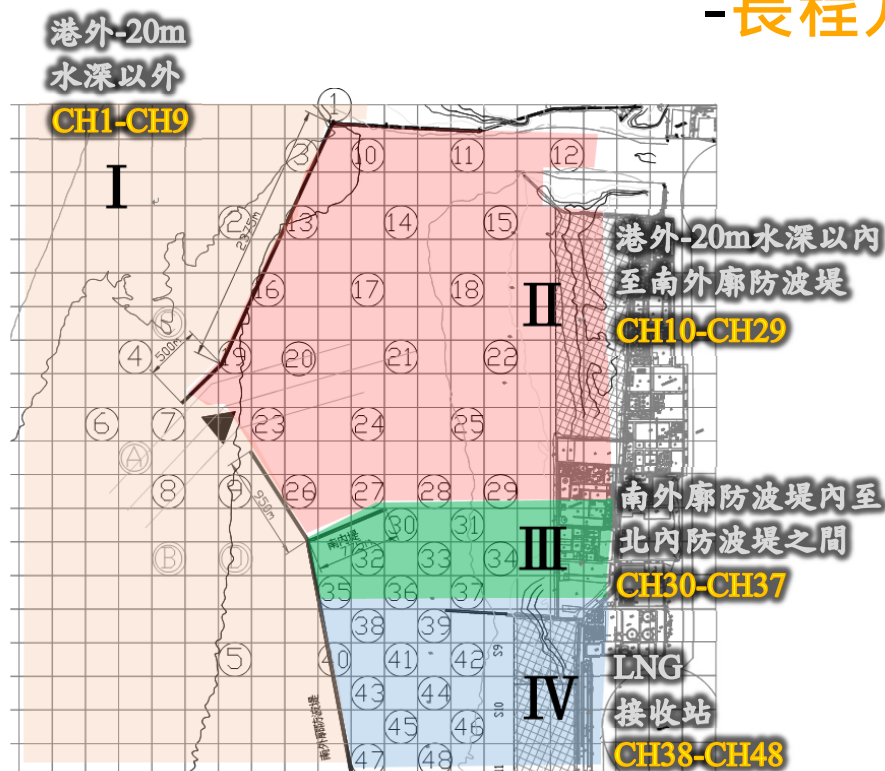
5.冬季探討，港內波
高長程方案均小於近
程。

6.颱風情境探討，港
內波高長程方案均小
於近程。

Page 27

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (遮蔽試驗)



7. 颱風N方向波浪，超標大於LNG船容許波高外，冬季N方向波浪與夏季W方向波浪，均符合LNG船容許波高。

8. 颱風期間LNG船舶應先行躲避波浪，建議波浪轉小後再進行接氣作業，以免造成接氣管路脫落造成危險

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

-長程方案 (遮蔽試驗)

長程方案 不規則波各試驗條件 量測港內外波浪觀測 值區域	冬季 (N)均值		夏季 (W)均值		颱風 (N)均值	
	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)
CH1~9	2.03	9.80	1.41	9.80	5.24	11.88
CH10~29	0.96	19.11	1.23	9.80	1.89	12.25
CH30~37	0.91	9.80	0.63	10.17	1.74	12.25
CH38~48	0.56	10.17	0.57	13.59	1.28	12.98

試驗波高 量測區域 (不規則波)	波高平均值 H_{mean}			船舶碼頭靜穩需 求容許波高
	冬季(N) 長程	冬季(N) 近程	冬季(N) 近程胸牆墊高	
CH30~37	0.54m	1.29m	1.30m	LNG船<1.0m 風電船<0.7m
CH38~48	0.34m	1.12m	0.92m	

三、臺中港近長程外廓堤水工模型試驗

- 長程方案 (遮蔽試驗)

不規則波試驗 觀測區域	波高平均值 H_{mean} 比較			船舶碼頭靜穩需求容 許波高LNG船<1.0m 風電船<0.7m
	冬季(N)	夏季(W)	颱風(N)	
CH30~37	1.29m	0.40m	2.38m	近程方案： 南堤2,395公尺 轉角775公尺
CH38~C48	1.12m	0.26m	1.80m	
CH30~37	0.54m	0.38m	1.07m	長程方案： 北堤2,875公尺 南堤延伸950公尺
CH38~48	0.34m	0.36m	0.78m	

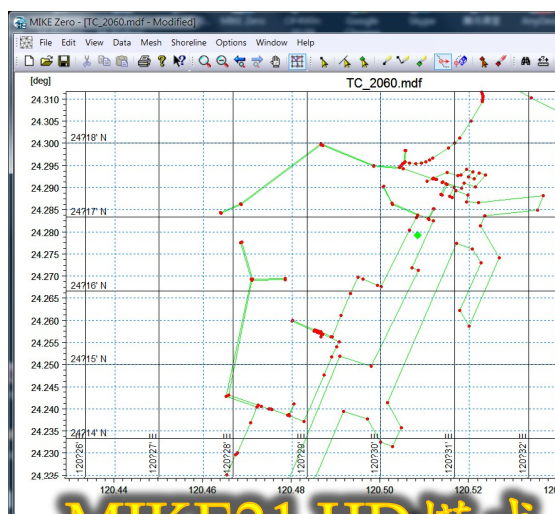
長程方案較近程方案明顯減少 29~49%

長程方案完全符合船舶碼頭靜穩需求容許波高...

Page 30

四、數值驗證與數值水槽探討

- 二維模式 (MIKE21)



MIKE21 HD模式

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」技術服務報告定稿報告之長程外廓堤增建設施



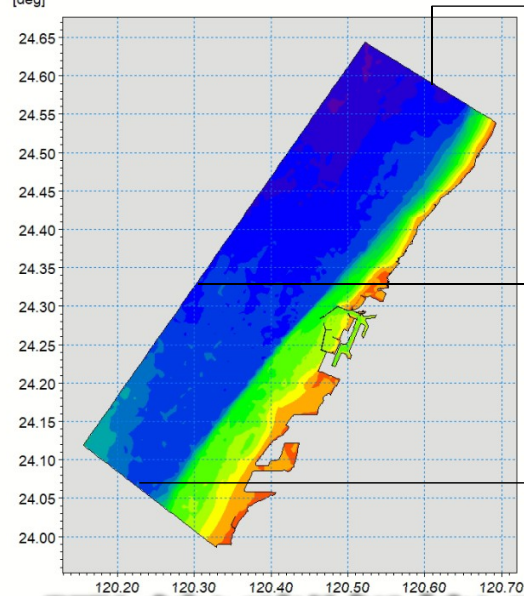
(長期配置方案)

Page 31

四、數值驗證與數值水槽探討

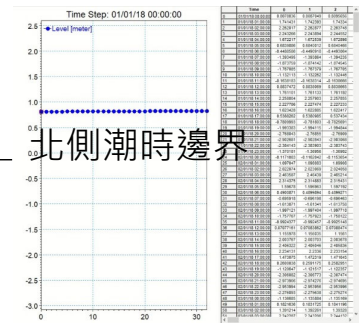
- 二維模式 (MIKE21)

(加入最大剪應力分佈應證)

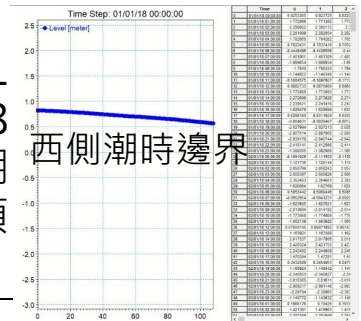


水理條件採用2018年1月1日00:00:00 ~ 2018年1月15日DHI全球潮位預報模式逐時潮位預報資料

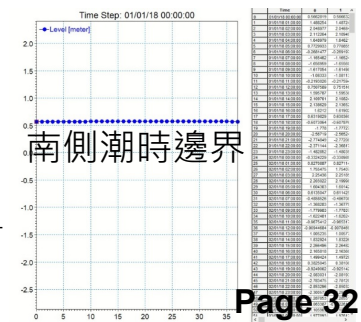
DHI全球潮位預報模式逐時潮位預報資料



北側潮時邊界



西側潮時邊界

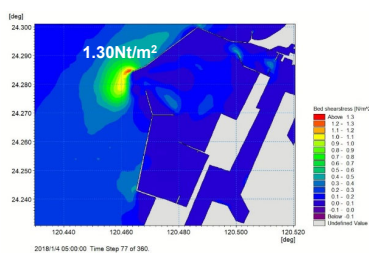


南側潮時邊界

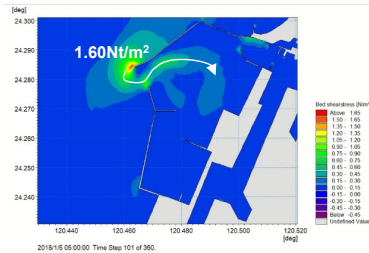
Page 32

四、數值驗證與數值水槽探討

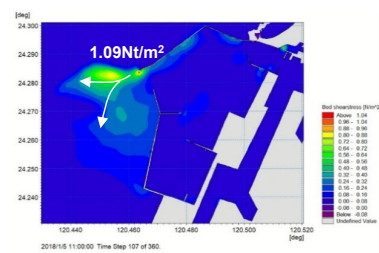
- 二維模式 (MIKE21)



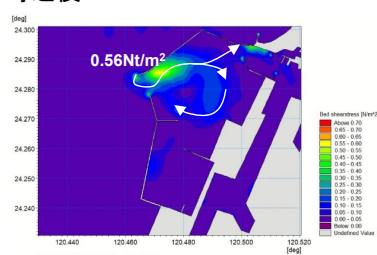
潮流發生101小時之後



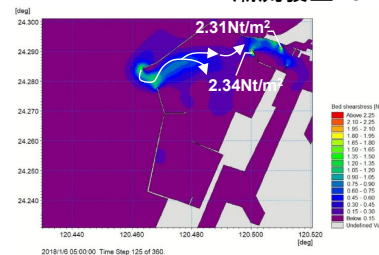
潮流發生125小時之後



潮流發生131小時之後



潮流發生137小時之後



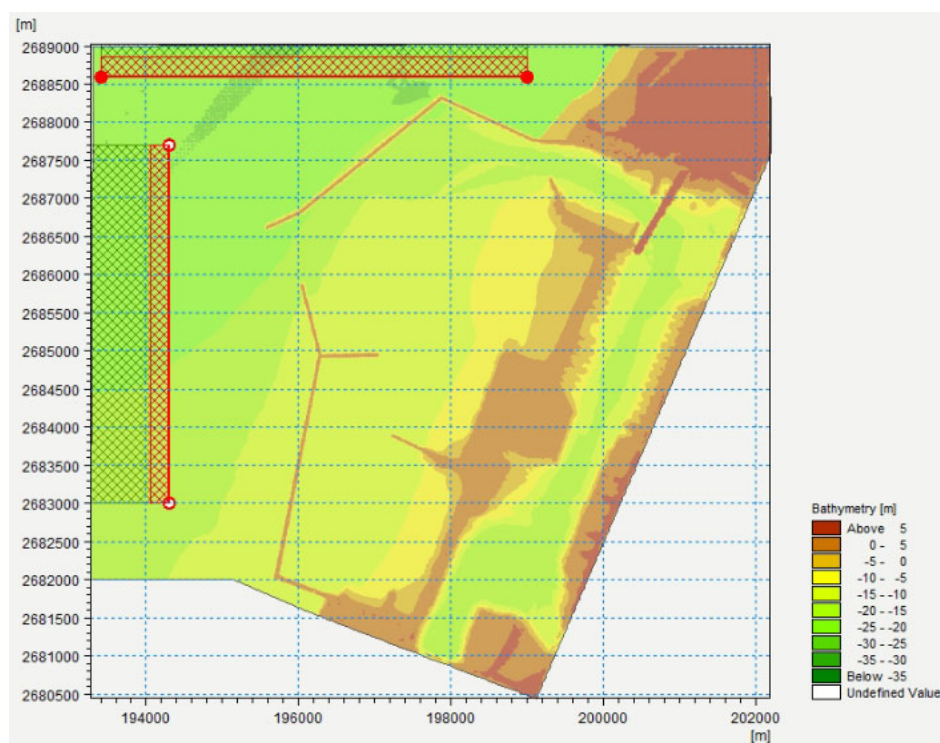
潮流發生149小時之後

(MIKE21 HD 最大剪應力分佈應證)

Page 33

四、數值驗證與數值水槽探討

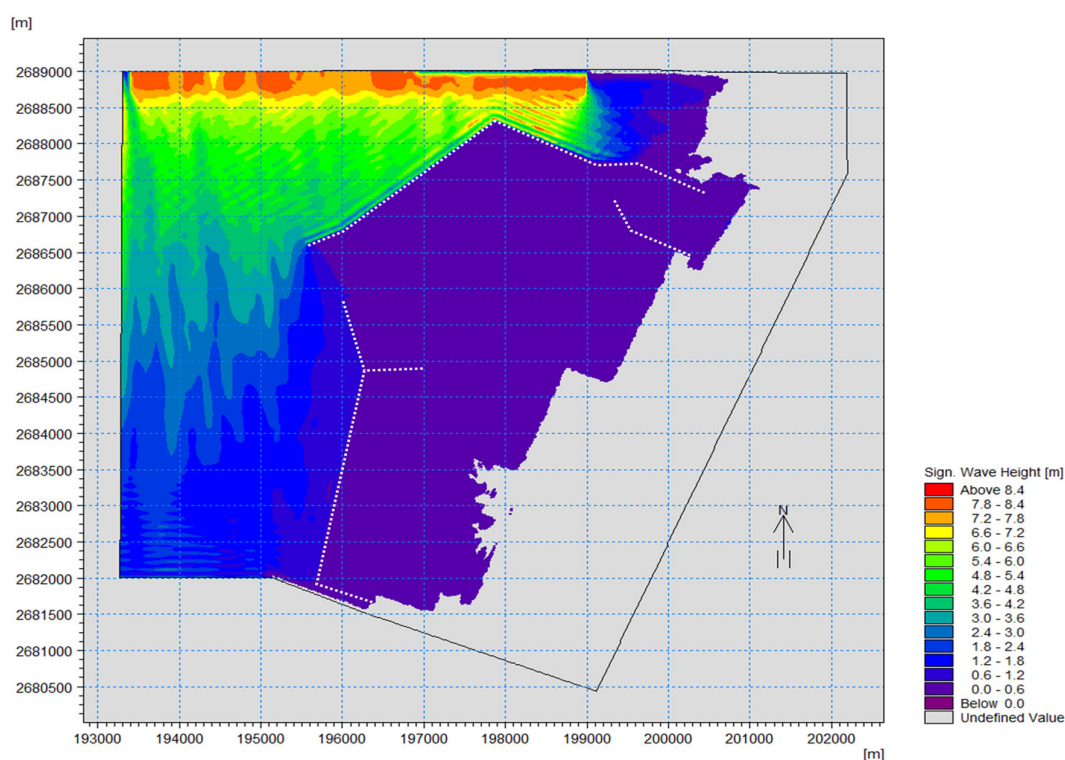
- 三維模式 (MIKE3)



Page 34

四、數值驗證與數值水槽探討

- 三維模式 (MIKE3)



Page 35

四、數值驗證與數值水槽探討

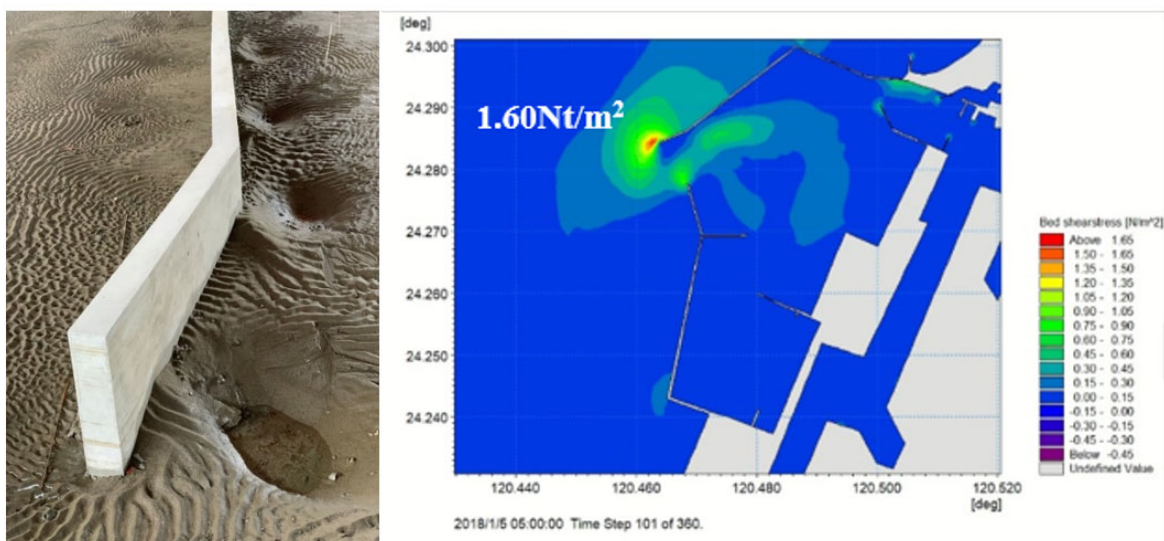
- 三維模式 (MIKE3)

測點位置		遮蔽試驗波高比對					
		試驗 (m)	MIKE3 (m)	誤差(%)	試驗 (m)	MIKE3 (m)	誤差(%)
		冬(N)			颱風(N)		
CH4	H _{1/3} (m)	2.76	2.03	26%	6.04	4.60	24%
CH7		1.48	1.41	5%	2.42	2.31	5%
CH12		0.27	0.02	93%	0.83	0.10	88%
CH17		1.07	0.06	94%	2.09	0.18	91%
CH32		0.78	0.04	95%	1.55	0.07	95%
CH45		0.54	0.02	96%	1.17	0.05	96%

1. 冬季於臺中港港外測點CH4測點波高(H_{1/3})為2.03m、CH7測點波高(H_{1/3})為1.41m與試驗結果相比誤差5~26%；颱風誤差5~24%。
2. 冬季與颱風港內測點CH12、CH17、CH32、CH45模擬結果均偏小。

Page 36

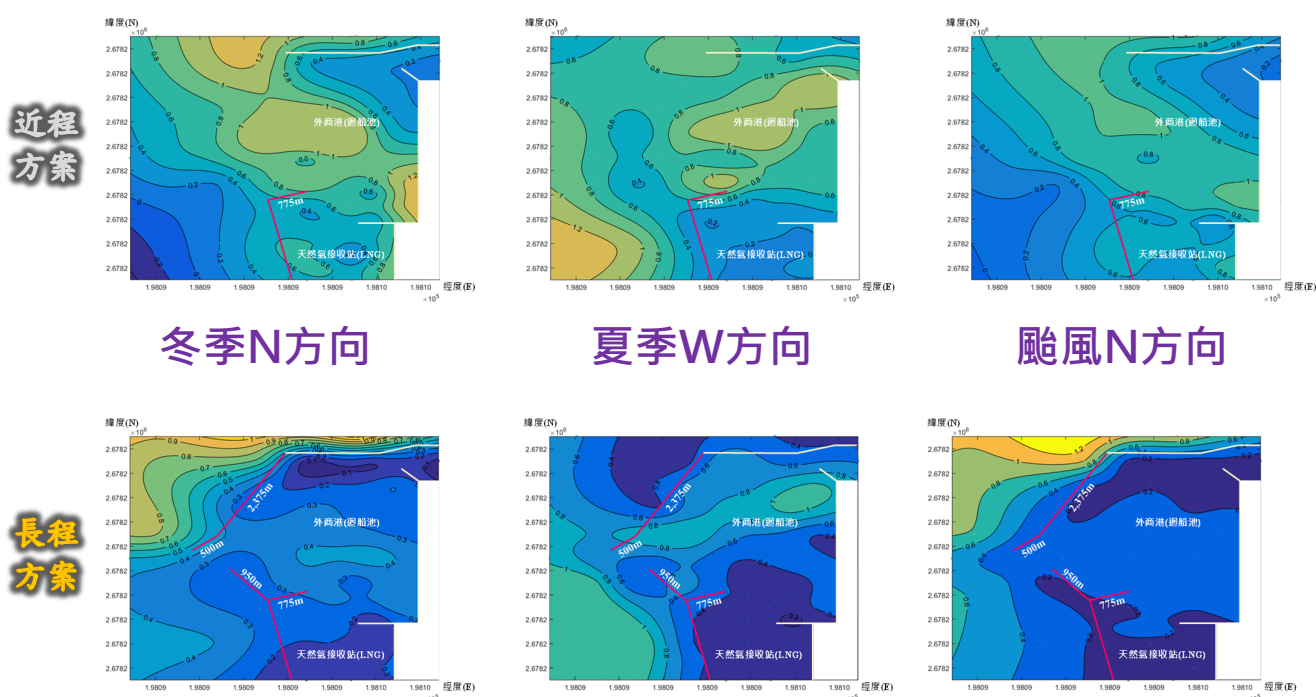
五、研究比較分析 - 水工模型與數值模式



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，水工模型試驗與數值模式驗證比較，北外廓防波堤末端堤體之周邊流場混亂，兩者比對均有一致性結果

Page 37

五、研究比較分析 - 遮蔽係數探討



Page 38

五、研究比較分析 - 遮蔽係數探討

近程 位置條件 方案	冬季(N)		夏季(W)		颱風(N)		長程 位置條件 方案	冬季(N)		夏季(W)		颱風(N)	
	最大 (KD)	平均 (KD)	最大 (KD)	平均 (KD)	最大 (KD)	平均 (KD)		最大 (KD)	平均 (KD)	最大 (KD)	平均 (KD)	最大 (KD)	平均 (KD)
CH1~9	1.00	0.59	1.00	0.74	1.00	0.58	CH1~9	1.00	0.60	1.00	0.73	1.00	0.63
CH10~29	1.00	0.78	1.00	0.83	1.00	0.85	CH10~29	0.44	0.28	1.00	0.64	0.32	0.24
CH30~37	1.00	0.61	0.51	0.36	1.00	0.78	CH30~37	0.35	0.27	0.40	0.33	0.26	0.22
CH38~48	0.72	0.54	0.25	0.19	0.80	0.61	CH38~48	0.21	0.17	0.38	0.29	0.22	0.16

遮蔽試驗近程方案結果，臺中港除夏季遮蔽成效較佳以外，冬季與颱風成效均為不佳，基此，如臺中港五接天然氣計畫採行近程方案規劃，於冬季與颱風儘量避免操船與商港登輪等作業，且建議仍需要適當規劃北外廓防波堤保護港區，以減少波浪進入港內，與維持港內靜穩度；至於夏季遮蔽成效較佳，探究其原因，主要還是夏季波浪較其他情境小，故波浪傳遞情形較不像冬季與颱風情況劇烈，但並不代表近程方案能有效阻擋夏季波浪進入LNG天然氣接收站港池內

Page 39

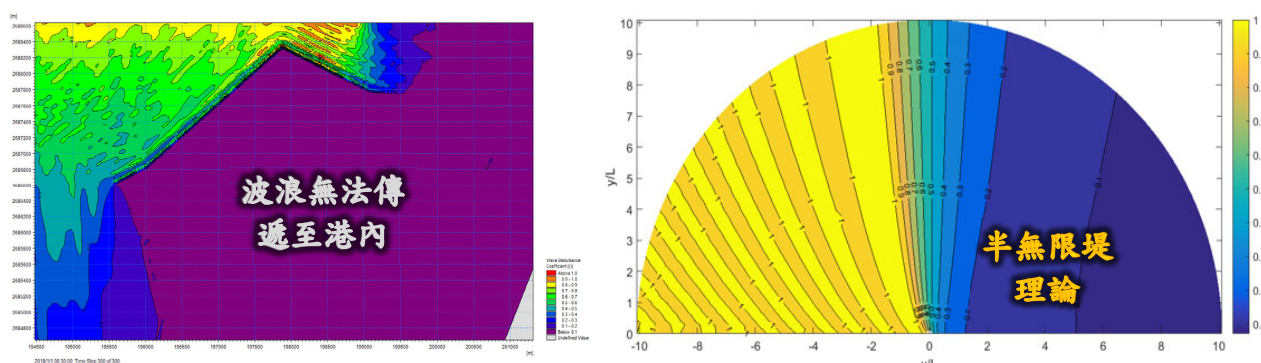
五、研究比較分析 - 遮蔽係數探討

近程方案 位置條件	冬季(N)		夏季(W)		颱風(N)		長程方案 位置條件	冬季(N)		夏季(W)		颱風(N)	
	最大(KD)	平均(KD)	最大(KD)	平均(KD)	最大(KD)	平均(KD)		最大(KD)	平均(KD)	最大(KD)	平均(KD)	最大(KD)	平均(KD)
CH1~9	1.00	0.59	1.00	0.74	1.00	0.58	CH1~9	1.00	0.60	1.00	0.73	1.00	0.63
CH10~29	1.00	0.78	1.00	0.83	1.00	0.85	CH10~29	0.44	0.28	1.00	0.64	0.32	0.24
CH30~37	1.00	0.61	0.51	0.36	1.00	0.78	CH30~37	0.35	0.27	0.40	0.33	0.26	0.22
CH38~48	0.72	0.54	0.25	0.19	0.80	0.61	CH38~48	0.21	0.17	0.38	0.29	0.22	0.16

遮蔽試驗長程方案優於近程方案試驗結果，臺中港興建北外廓防波堤極大程度改善港內靜穩程度，不論冬季、夏季與颱風何種情境，均能獲得良好遮蔽成效，確保符合五接天然氣船舶需求容許波高標準、以及操船與商港登輪等作業標準。至於北外廓防波堤長度是否需要建置2,875公尺，受限於工程經費能否縮短規劃配置需求，後續研究能進階討論北外廓防波堤縮短之折衷方案，同樣兼顧保護標的要求，此外工程兼顧生態環境維持等議題(例如白海豚)，亦是討論重點之一，相關工程措施建議能持續納入研究進行探討。

Page 40

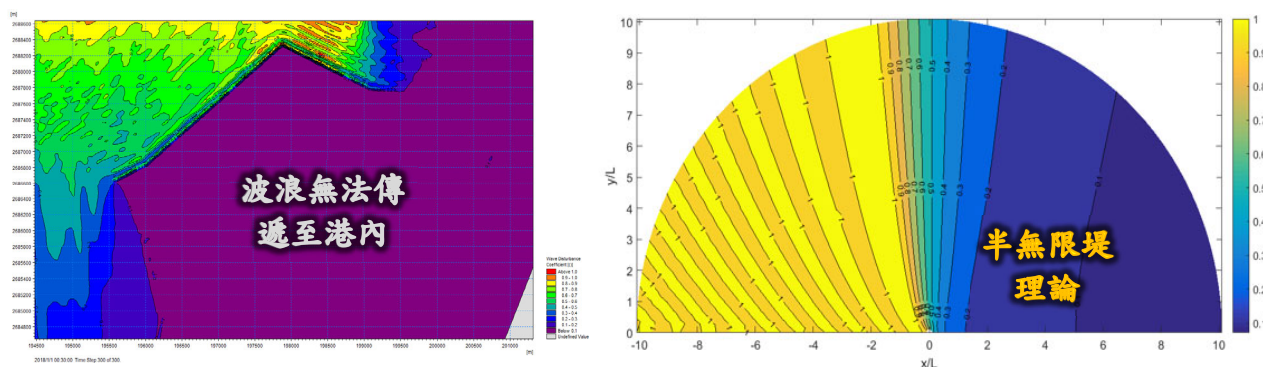
五、研究比較分析 - 數值水槽可行性



1. 本研究水理計算結果試驗結果相比偏小，尚未滿足或優於水工模型試驗的結果，可能的原因有數值模式與水工模型試驗存在比尺效應，造成數值模式運算結果小於水工模型試驗波浪。
2. 模式尚未滿足或優於水工模型試驗的結果，可能的原因係數值模式理論限制，波浪通過半無限長堤防繞射現象已經驗證，理論僅繞射遮蔽係數的一半，以致於多餘的波浪被半無限堤屏蔽，波浪繞射不進港區導致模式波浪偏小，後續仍待討論驗證。

Page 41

五、研究比較分析 - 數值水槽可行性



3. 模擬過程產生的越波現象，本研究模式雖可模擬，波浪越波之飛濺現象仍無法被模式忠實還原，初步推測是本研究數值模式未納入流體體積(VOF)模型，因此模式不能表現波浪傾覆、飛濺、噴射與衝擊等流體行為，故漫溢至堤防後的水量有限，導致於本研究模擬結果較差。

六、研究比較分析後提出下列結論

- 漂沙長程方案，北外廓防波堤址附近護基底床掏刷或形成穴蝕孔洞現象，應多加留意堤防沉箱傾斜問題。
- 漂沙趨勢，以LNG接收站區呈現均勻淤積的情況，總淤積量最大，達到245.70萬 m^3 ；北堤至北內堤亦呈現淤積，總淤積量次之，達到135.81萬 m^3 ，惟原北堤內側有侵蝕情況嚴重現象；原北堤以北側淤積量接近平衡，但侵蝕淤積分布較不均勻，淤積量僅2.88萬 m^3 ，此三區總計淤積量為384.39萬 m^3 。

六、研究比較分析後提出下列結論

- 遮蔽試驗近程方案，於三種波浪情境夏季(W)、冬季(N)與颱風(N)初步分析得知港入港內波高較大，特別是冬季與颱風情境需注意波浪集成增強。
- 遮蔽試驗近程方案，研究於冬季(N)、颱風(N)與冬季(NNE)、颱風(NNE)比較，試驗結果發現以波浪入射N方向對於臺中港影響較大，N方向波浪越波產生飛濺防波堤現象較為明顯，遠大於波浪入射NNE方向的影響，對於LNG港域內不靜穩狀態確實有影響。

Page 44

六、研究比較分析後提出下列結論

- 遮蔽試驗長程方案，於三種波浪情境夏季(W)、冬季(N)與颱風(N)試驗分析北防波堤延伸2,775公尺、南外廓防波堤延伸950公尺，冬季時入港內波高相比近程方案，減少60~70%波高，而颱風時入港內波高相比近程方案，則減少50~60%波高，較近程方案明顯改善，符合船舶碼頭靜穩需求容許波高，惟夏季波浪造成防波堤與港灣構造物反射效應較大仍需注意。

Page 45

六、研究比較分析後提出下列結論

- 以二維數值模式(MIKE21 HD)探討漂沙試驗長程方案，結果顯示北外廓防波堤配置確實能減緩長浪進入臺中港，解決港池內(包含外商港迴船池與LNG港池)不靜穩情形，惟北外廓防波堤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效應，剪應力越大造成底床顆粒間滑移程度越大，淘刷範圍亦越大，不論水工模型試驗與數值模式研究結果，兩者均呈現一致性現象。

Page 46

六、研究比較分析後提出下列結論

- 以三維數值模式(MIKE3 wave)探討遮蔽試驗長程方案，結果顯示颱風情境模擬過程亦發生越波現象與試驗結果一致，但數值模式越波影響港內程度遠不及試驗結果，初步推測是本模式未納入流體體積(VOF)模型，導致波浪越波之飛濺現象仍無法被描述，造成本研究模擬結果較差，顯示數值模式尚存改善空間。
- 關於數值水槽之可行性，由文獻回顧得知目前黏性流體於二維水槽已具相當良好的模擬程度，惟三維水槽雖亦已能處理黏性流體與分析完全非線性的波浪問題，但波浪越波入港使水面變化由簡單高度函數，變成簡單高度複雜性函數，本研究尚未克服。

Page 47

六、建議事項

- 有關臺中港未來興建外廓防波堤後，需特別注意堤址附近造成之護基底床掏刷與形成孔洞現象，建議定期安排人員測量沉箱傾斜度掌握、或安排潛水人員進行水下調查工作確認，以及安排例行性防波堤結構物保養維修作業，以利港灣長期安定發展。
- 臺中港漂沙侵淤變化趨勢以淤積為主，建議特別留意LNG天然氣接收站港域的淤積情形，以免港內淤積致水深不足，影響LNG船舶無法入港接氣或蒙受潛在擱淺風險。

Page 48

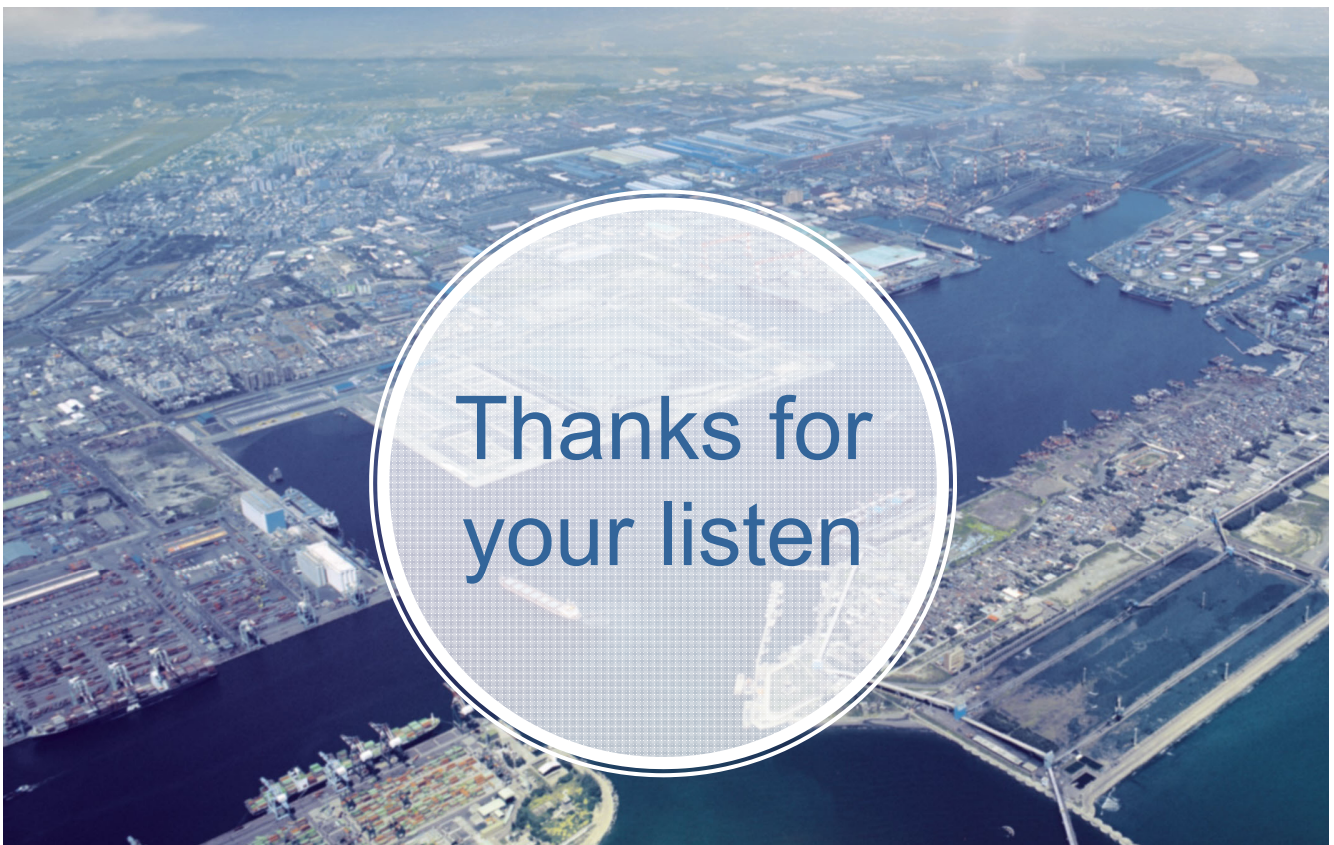
六、建議事項

- 本研究遮蔽試驗近程方案，冬季與颱風風浪仍大，建議儘量避免操船與商港登輪等作業；本研究遮蔽試驗長程方案，夏季波浪所造成防波堤或港灣構造物反射效應仍較大，後續研究建議持續進行後續水工模型試驗探討。
- 本研究漂沙試驗長程方案，採用不等比尺進行試驗研究，有歪比影響試驗結果，建議能於更大的試驗場地進行試驗，以減少比尺效應；另外漂沙試驗預備試驗常以規則波浪尋求時間比尺，尚未有研究以不規則波尋求時間比尺，日後執行漂沙試驗時建議以不規則波方式進行探討。

Page 49

六、建議事項

- 數值水槽模擬的好壞決定於紊流模式，未來如需建立數值波浪水槽，建議採用建立於計算流體力學(CFD)之上的數值模式，並且採用雷諾平均之紊流模式及具控制流體體積(VOF)之數值模式，例如：FLOW-3D或者OpenFOAM，以獲取更好的模擬成果。



附錄三

光達測量工作

針對水工模型試驗場進行地形測量作業，委託詮華國土測繪有限公司測繪，採地面光達掃描方式施測，平均測點間距需小於 2cm，平面及高程測量精度需優於 $\pm 5\text{mm}$ ，每次測量成果需繳交原始光達點雲資料、2cm 間距之 DEM 及 2cm 等高線間距之地形圖。並進行試驗地形測量結果比較分析，配合施測範圍約為 15m x 35m，如圖 1。水工模型試驗地形測量實測點雲成果及範圍：

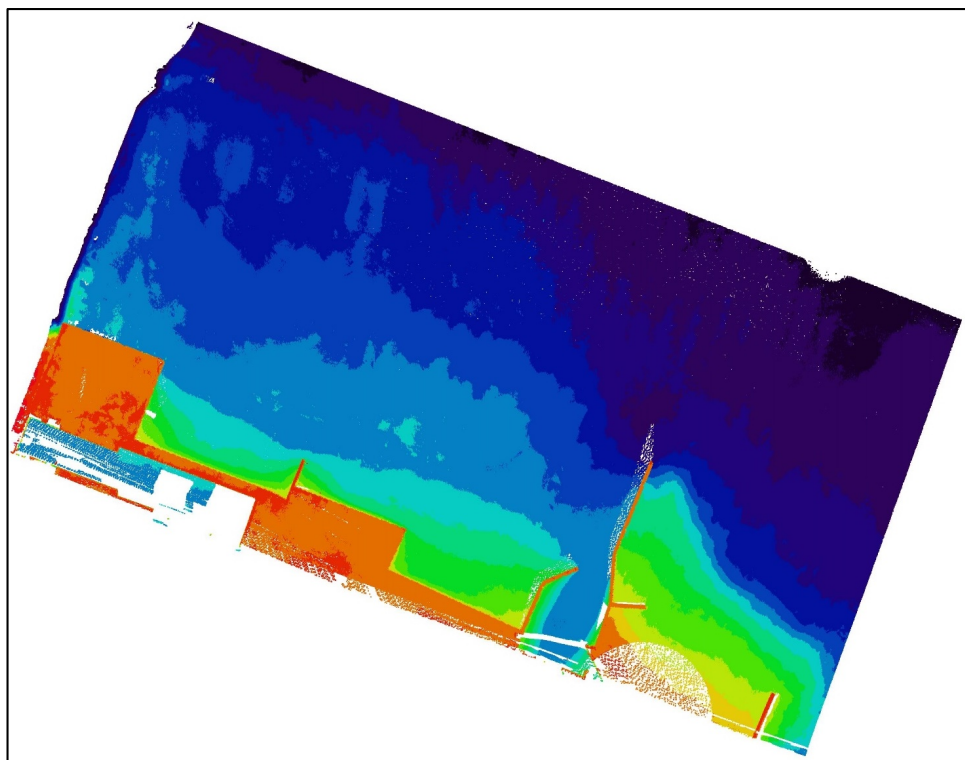


圖 1 試驗施測範圍

(一)作業要求：

採地面光達掃描方式施測，平均測點間距需小於 2cm，平面及高程測量精度需優於 $\pm 5\text{mm}$ ，每次測量成果需繳交原始光達點雲資料、2cm 間距之 DEM 及 2cm 等高線間距之地形圖。

(二)作業方法：

1. 地面三維雷射掃描儀又稱地面光達 (terrestrial lidar)，或稱三維影像掃描儀(3D image scanner)由於可藉由細緻掃描將現場實體物精密紀錄三維數據，依獲取之高密度數據數據便可還原現場實景可稱為逆向工程儀，掃描儀是由伺服馬達驅儀器

本體作水平與垂直旋轉，設定參數控制雷射光掃描方向，由儀器本體或透過 Wi-Fi 技術同步傳輸至電腦記錄水平及垂直掃描數據，相當是一部自動高密度觀測之全測站式電子經緯儀。

2. 採用 RIEGL VZ2000i 多波段三維雷射掃描儀，水平轉動角度為 360 度，垂直轉動角度為 100 度，測距可達 2,500m，掃描頻率最高可達 120 萬點/秒，具有自動拼接功能，三維雷射掃描儀可將整個測區進行高密度掃描，如表 1；並在測站與測站之間自動計算形成共軛面，將不同測站所收集到的點雲資料加以套合、分析，將不同角度之掃描結果連接，獲得更詳盡地貌狀況。

表 1 地面光達掃描儀 RIEGL VZ2000i 儀器規格表

項目	規格	儀器照片
最大測距	可測2,500m以上 (使用一級雷射Laser Class 1)	
測距精度	2mm-3mm	
掃描頻率	1,200,000 點/秒(超過百萬點)	
測量範圍	100度(垂直) × 360度(水平)	
自動拼接	有(i系列才具備自動拼接功能)	
雲端支援	有	
特色	國內掃描儀測距距離最遠 自動化拼接	

3. 地面光達掃描儀，可迅速測得現地即時的 3D 環場資料，宛若一部立體的彩色影印機一樣，可以快速而完整地將建築物現場以雷射點雲的方式數位保存在電腦中，保留所有物件的尺寸、位置、坐標、方向等幾何關係，並可產生 CAD 圖檔或進行物件模型化。
4. 作業方式為使用地面地面光達掃描儀進行結構物掃描作業，取得結構物三維點雲資料，經過內業處理套疊、清除雜訊後，可以獲得相關之三維點雲數位模型，並由模型上量得精確之相關尺寸，以製作三維建物模型。
5. 在掃描工作完成後，配合專用的後續處理軟體，利用中值(Median)法來濾除雜訊以達到平滑化，過濾植被並清除地上物

後，參考控制點的坐標進行坐標轉換，即可得到地物的絕對坐標值。

6. 雷射掃描儀的掃描原理為計算飛行時間法(Time-of-flight)，即利用計算雷射撞擊待測點反射回感應器之往返飛行時間求得掃描頭至待測點之距離觀測量，據此計算待測點之坐標位置，此法與傳統的測量儀器之測距儀有相同之原理，如圖 2 所示。

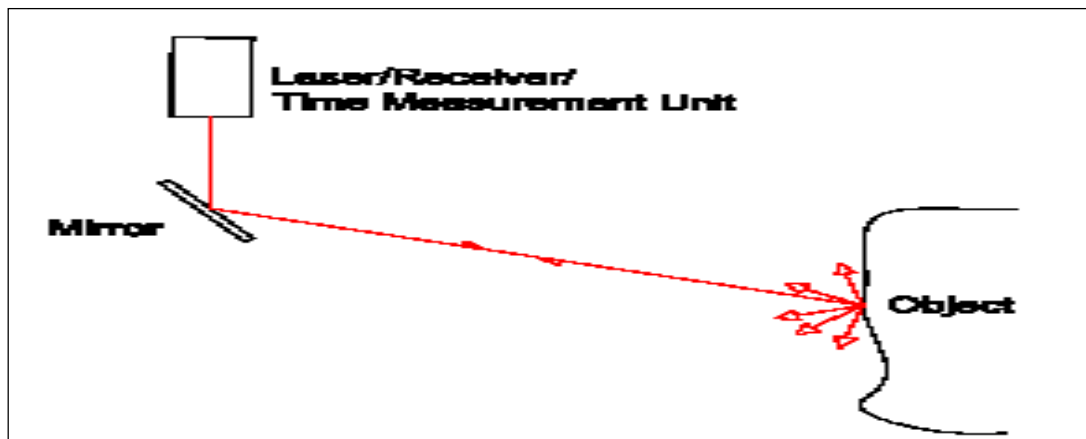


圖 2 雷射掃描儀的掃描原理為計算飛行時間法示意圖

7. 掃描成果提供真實色彩、灰階及反射訊號強度等 3 種點雲資料的成果。
8. 地面光達掃描作業步驟說明如下：
 - (1) 規劃掃描測站位置，以達到最大通視及最大掃描範圍為主，減少設站數目，並方便後續測量之擺站位置。若於車輛可到達之處，則以行動掃描測量車以油壓桿將掃描儀升高，以獲得最佳視角及通視情況。
 - (2) 各站之間放置三個以上的共軛掃描 Target，擺設以前後左右上下均勻分布，且須前後站均能看到為原則。掃描 Target 擺設位置須至少一次。
 - (3) 儀器架設需定心、定平，掃描完場景及 Target 後，轉站並重複上述步驟至掃描完畢。

(4)三維掃描獲得點雲資料後，經過內業處理套疊、清除雜訊後，可以獲得相關之三維點雲數位模型、相關尺寸的獲取及數位模型資料。

9. 點雲掃描坐標系統與地面坐標轉換精度分析:以本計畫所使用之掃描設備，需將後視之三個共軛掃描 Target 賦予指定之坐標系統坐標值，便可藉由坐標轉換模式進行掃描之假設坐標系統與圖根點之坐標系統進行轉換，並進行轉換精度分析，檢核方式可利用結構中明顯特徵物體於系統中量測其長寬是否達到作業要求。地面光達掃描作業流程及資料處理流程，如圖 3 所示：

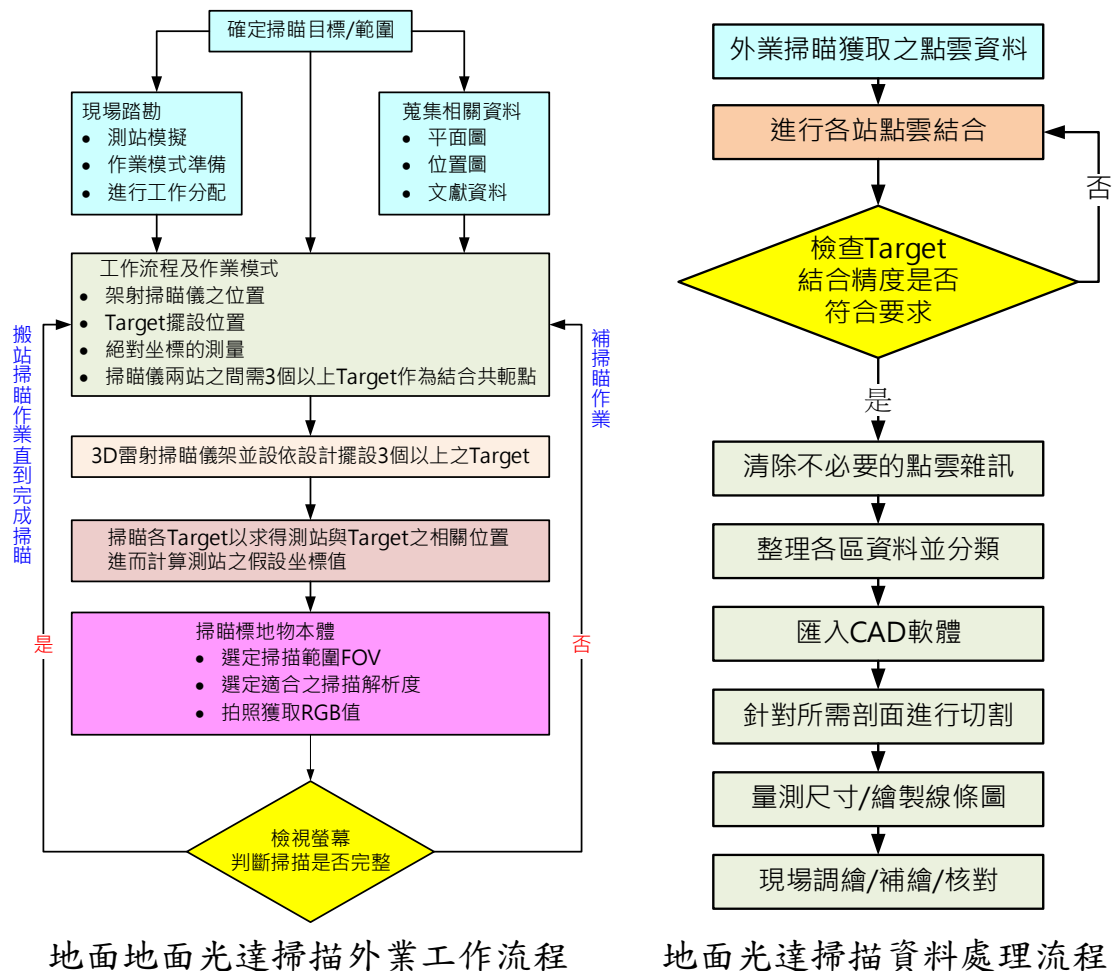


圖 3 地面光達掃描作業流程及資料處理流程圖

(三)作業程序：

本水工模型試驗場執行地面三維雷射掃描儀地形量測作業，獲取

掃描成果程序作業流程如下所述：

- ① 控制測量。
- ② 地面掃描與多站結合。
- ③ 點雲資料過濾分析。
- ④ 轉出 DEM 成果。

1. 控制測量：控制測量的目的是提供測區高精度之地理坐標資料，供地面雷射掃描儀測量反射規標轉換空間坐標，如圖 4 所示。

(1) 傳統平面控制法：本法適用於建築群或隧道等處，通常是於對空良好空曠處，先以 GPS 靜態測量測定二組可通視之點對共四點，作為控制基準，再以全測站式電子經緯儀以導線法進行由起始點對開始測量，閉合於終點點對，控制測量成果供地面雷射掃描儀架設反射規標用以轉換空間座標。

(2) 掃描儀軸心定位法：本法適用於野外空曠處，是於掃描儀頂端安裝菱鏡或衛星定位儀，再利用經緯儀或衛星定位儀以 RTK 定位方式求取掃描站坐標，作為多站結合後轉換依據。

(3) 全測站經緯儀臨時控制點及 UAV 輔助標測量計算：本控制點座標成果是以全測站經緯儀配合光線法計算座標搭配電子水準儀獲取高程成果，如圖 5 與表 2 所示。水工模型控制點測量情形，如圖 6 所示。



圖 4 控制測量情形

編輯 代碼 角度 導線觀測手簿 計算設定 系統設定 文字編輯 視窗											
測量日期 2019/5/22 檔名 2019/5/22 下午 03:22:3 操作者 儀器代號 Trimble(Geodimeter)											
尺度比 1.00000000 尺度比重算											
後視	A	縱坐標	9,999.645	橫坐標	4,983.346	高程	0.441				
測站	B	縱坐標	10,000.000	橫坐標	5,000.000	高程	0.084				
後視角	0.00-00	反算方位角	268.46-44	反算距離	16.658	☐ 自由測站	儀器高	1.495			
測點	視標	水平角	垂直角	斜距	平距*K	連線代碼	主要地類	縱坐標	橫坐標	高程	轉站
A	1.310	0.0000	89.2425	16.659	16.658	1		9,999.645	4,983.346	0.441	☐
A1	0.001	333.2415	90.2700	37.821	37.820			9,982.351	4,966.551	1.281	☒
A2	0.001	238.1447	80.1427	8.075	7.958			9,993.324	5,004.331	2.947	☒
A3	0.001	124.2258	87.3444	32.081	32.052			10,026.832	5,017.533	2.933	☒
A4	0.001	92.3638	90.1658	58.479	58.478			10,058.461	5,001.418	1.290	☒
C	1.310	119.2741	89.4529	51.304	51.304			10,045.197	5,024.275	0.486	☒
B14	1.310	124.3000	90.3039	21.281	21.280			10,017.790	5,011.677	0.079	☒
B13	1.310	127.2143	90.3816	17.393	17.392			10,014.045	5,010.257	0.075	☒
B12	1.310	120.2324	90.4240	15.624	15.623			10,013.642	5,007.614	0.075	☒
B11	1.310	125.4215	90.4305	15.202	15.201			10,012.530	5,008.606	0.079	☒
B10	1.310	129.0160	90.5332	12.311	12.310			10,009.725	5,007.547	0.077	☒
B09	1.310	125.3759	90.5817	11.084	11.082			10,009.143	5,006.263	0.081	☒
B08	1.310	133.5549	92.5715	9.018	9.006			10,006.618	5,006.109	-0.196	☒
B06	1.310	136.2306	91.4202	6.332	6.329			10,004.463	5,004.488	0.081	☒
B05	1.310	148.1933	92.1929	4.559	4.555			10,002.474	5,003.825	0.084	☒
B04	1.310	142.2215	93.1823	3.209	3.204			10,002.010	5,002.495	0.084	☒
B02	1.310	99.5521	96.0040	1.822	1.812			10,001.791	5,000.274	0.078	☒
B01	1.310	327.1319	97.3432	1.439	1.426			9,999.202	4,998.817	0.079	☒
B03	1.310	238.5914	95.0543	2.051	2.043			9,998.272	5,001.090	0.087	☒
B18	1.310	121.2838	90.2331	27.162	27.161			10,023.461	5,013.686	0.083	☒
B07	1.310	115.0947	90.5829	10.604	10.602			10,009.690	5,004.303	0.089	☒
B15	1.310	113.4558	90.2652	23.690	23.689			10,021.879	5,009.083	0.084	☒
B17	1.310	114.4027	90.2450	27.075	27.074			10,024.838	5,010.775	0.073	☒
B16	1.310	101.0428	90.2429	25.597	25.596			10,025.219	5,004.380	0.087	☒
B20	1.310	83.0652	89.5552	27.916	27.916			10,027.637	4,996.063	0.303	☒
B19	1.310	116.5547	90.1745	33.969	33.969			10,030.606	5,014.735	0.094	☒
B21	0.115	20.4058	94.3927	14.406	14.358			10,004.784	4,986.462	0.294	☒

圖 5 水工模型控制點高程及座標成果



圖 6 水工模型控制點測量情形

表 2 水工模型漂沙試驗地形光達測量控制點坐標成果表

點名	縱坐標	橫坐標	高程
A	9999.645	4983.346	0.441
B	10000.000	5000.000	0.084
C	10045.197	5024.275	0.486
A1	9982.351	4966.551	1.281
A2	9993.324	5004.331	2.947
A3	10026.832	5017.533	2.933
A4	10058.461	5001.418	1.290
B01	9999.202	4998.817	0.079
B02	10001.791	5000.274	0.078
B03	9998.272	5001.090	0.087
B04	10002.010	5002.495	0.084
B05	10002.474	5003.825	0.084
B06	10004.463	5004.488	0.081
B07	10009.690	5004.303	0.089
B08	10006.618	5006.109	-0.196
B09	10009.143	5006.263	0.081
B10	10009.725	5007.547	0.077
B11	10012.530	5008.606	0.079
B12	10013.642	5007.614	0.075
B13	10014.045	5010.257	0.075
B14	10017.790	5011.677	0.079
B15	10021.879	5009.083	0.084
B16	10025.219	5004.380	0.087
B17	10024.838	5010.775	0.073
B18	10023.461	5013.686	0.083
B19	10030.606	5014.735	0.094
B20	10027.637	4996.063	0.303
B21	10004.784	4986.462	0.294

2. 地面掃描與多站結合：於測區架設三維雷射掃描儀將整個測區進行高密度掃描，掃描站之架設以能盡量目視測區無阻礙遮蔽之地理位置為佳，並採多站掃描方式避免同向方位陰影過多，掃描站各站結合方式採規標結合法與地物特徵(共軛三角)結合法。地面光達掃描作業情況，如圖 7 所示。



圖 7 地面光達掃描作業情況

(1) 規標結合法：掃描同時於相鄰兩站架設 4 組以上控制規標，並於相鄰站對此規標進行細緻掃描，利用相鄰控制規標之幾何對應關係進行結合。利用規標結合法將不同掃描站加以結合並控制結合精度優於 5mm，如圖 8 所示。

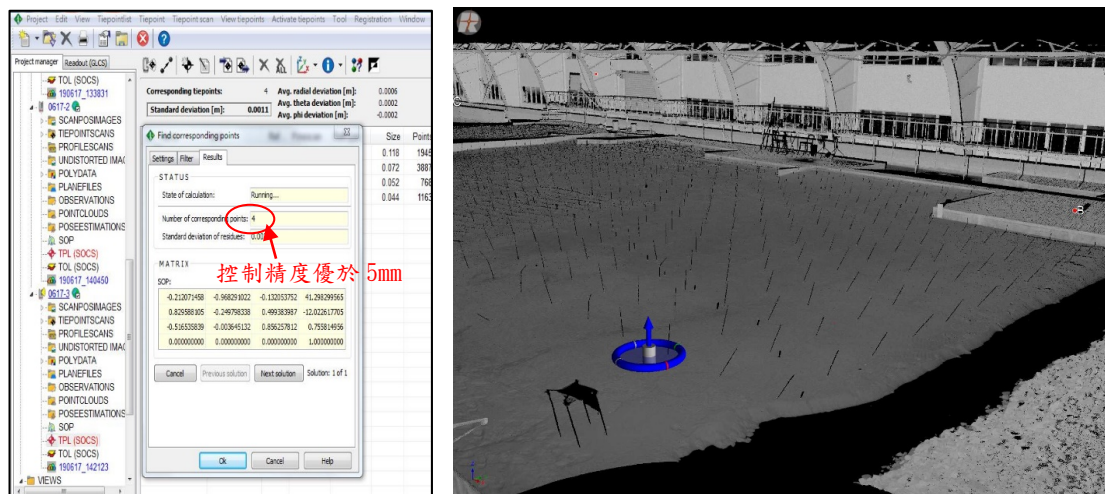


圖 8 地面光達掃描作業情況

(2) 地物特徵結合法：掃描完成後將各測站所收集到的點雲資料

加以計算求出可利用之共軌三角中心，再將相鄰站資料加以比對向量關係進行匹配完成多站結合。掃描測站與點雲結合畫面，如圖 9 所示。

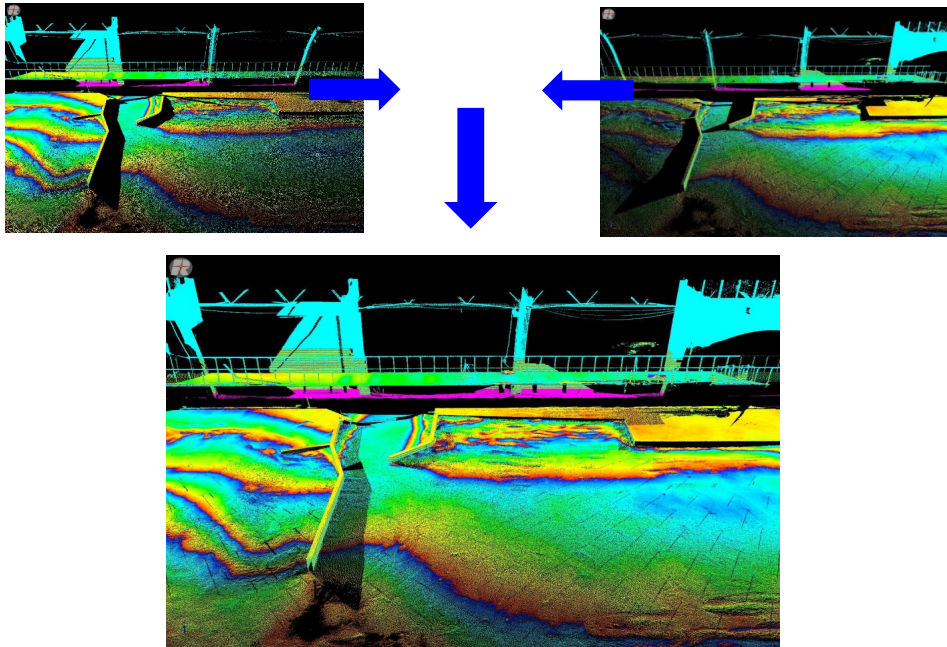


圖 9 點雲結合畫面

3. 點雲資料過濾分析：掃描外業完成後將不同測站所收集到的點雲資料結合完成後，利用多重回波(Full Waveform)的特性，過濾地表植被及隆起物體求取原地面高程點，以便獲得更詳盡之地貌狀況，特別是野外陡峭山壁利用此項技術省去砍伐林木及除草作業，兼具環保安全及便利性。點雲資料過濾分析，如圖 10 所示。

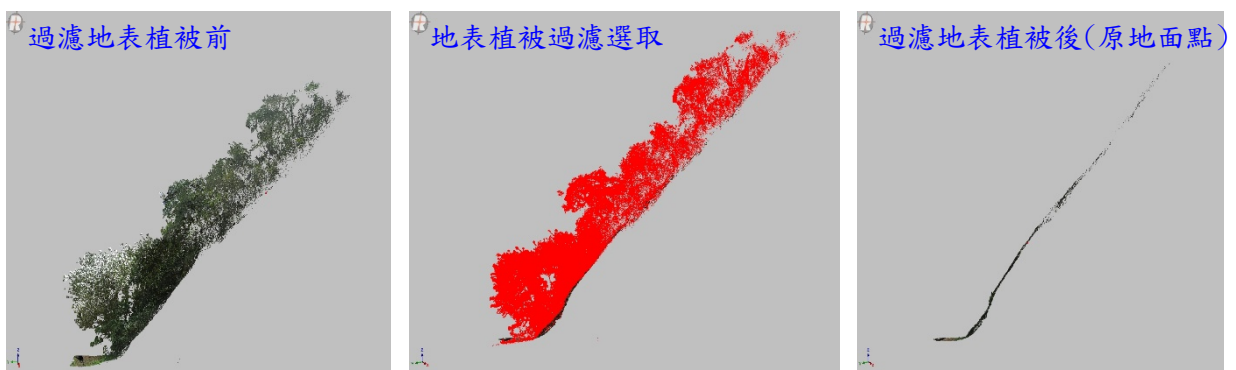


圖 10 點雲結合畫面

4. 轉出 DEM 成果：當過濾地表程序完成求取原地面點成果後，輸

入各規標之地理坐標值藉由此坐標值轉換矩陣，完成坐標對位與轉換工作轉出 DEM 成果繪製地形圖。

- (1)系統轉換：輸入現場水工模型控制點座標，將成果資料附合藉由已知固定座標轉換成果，如圖 11 所示。座標輸入計算軟體進行轉換：

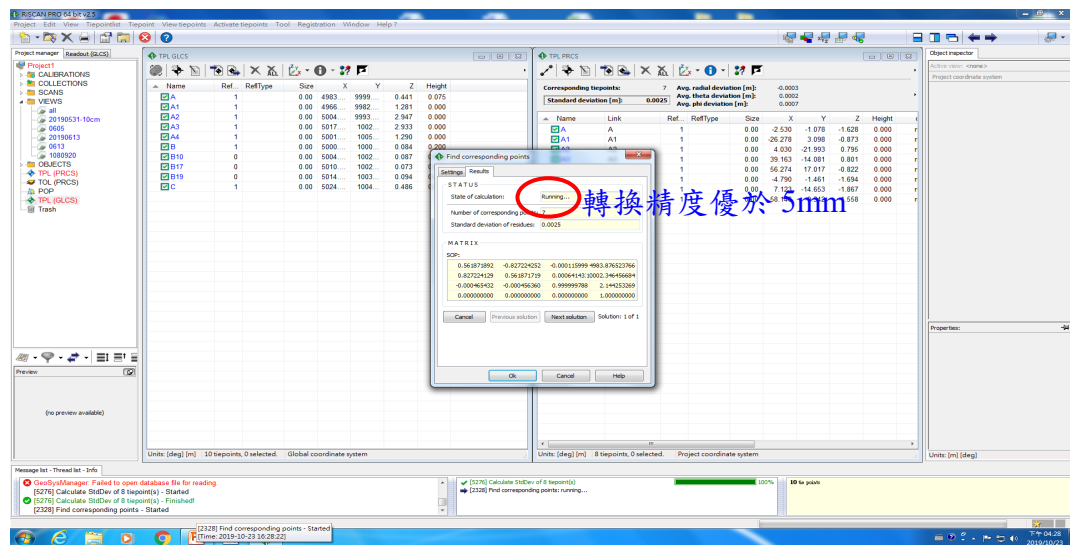


圖 11 固定座標轉換成果

- (2)坐標輸出：將轉換完成點雲資料輸出成原始光達點雲資料、2cm 間距之 DEM 成果。成果輸出文字檔，如圖 12 所示。

源區名稱	顯示	點號	點坐標	標坐標	高程	邊緣編號	地圖圖
20190521-10cm	☒	0	9,996,396	5,003,844	0.096		
20190530-10cm	☒	1	9,996,450	5,003,846	0.086		
20190605-10cm	☒	2	9,996,441	5,003,769	0.084		
20190613-10cm	☒	3	9,996,468	5,003,710	0.086		
20190617-10cm	☒	4	9,996,522	5,003,626	0.085		
20190617-10cm	☒	5	9,996,485	5,003,841	0.080		
模型堤防線	☒	6	9,996,569	5,003,751	0.079		
	☒	7	9,996,546	5,003,908	0.081		
	☒	8	9,996,644	5,003,817	0.063		
	☒	9	9,996,570	5,003,660	0.071		
	☒	10	9,996,685	5,003,258	0.159		
	☒	11	9,996,734	5,003,173	0.173		
	☒	12	9,996,715	5,003,258	0.163		
	☒	13	9,996,757	5,003,207	0.166		
	☒	14	9,997,302	5,002,859	-0.159		
	☒	15	9,997,331	5,002,795	-0.162		
	☒	16	9,997,369	5,002,677	-0.169		
	☒	17	9,996,876	5,002,810	0.145		
	☒	18	9,996,917	5,002,733	0.133		
	☒	19	9,996,931	5,002,721	0.153		
	☒	20	9,996,965	5,002,644	0.125		
	☒	21	9,996,997	5,002,576	0.116		
	☒	22	9,997,028	5,002,478	0.109		
	☒	23	9,996,780	5,003,081	0.163		
	☒	24	9,996,819	5,003,021	0.147		
	☒	25	9,996,818	5,003,016	0.162		
	☒	26	9,996,822	5,003,143	0.158		
	☒	27	9,996,873	5,003,044	0.156		
	☒	28	9,996,888	5,002,904	0.147		
	☒	29	9,996,864	5,002,926	0.163		
	☒	30	9,996,913	5,002,856	0.140		
	☒	31	9,996,868	5,002,845	0.158		
	☒	32	9,996,946	5,002,982	0.144		
	☒	33	9,996,914	5,002,978	0.157		
	☒	34	9,996,986	5,002,903	0.125		
	☒	35	9,997,068	5,003,165	0.111		
	☒	36	9,997,007	5,003,008	0.130		
	☒	37					

圖 12 成果輸出文字檔

- (3)地形圖轉換：將測量成果轉換成圖面 AutoCAD 並及繪製 2cm 等

高線間距之地形圖，如圖 13 所示。

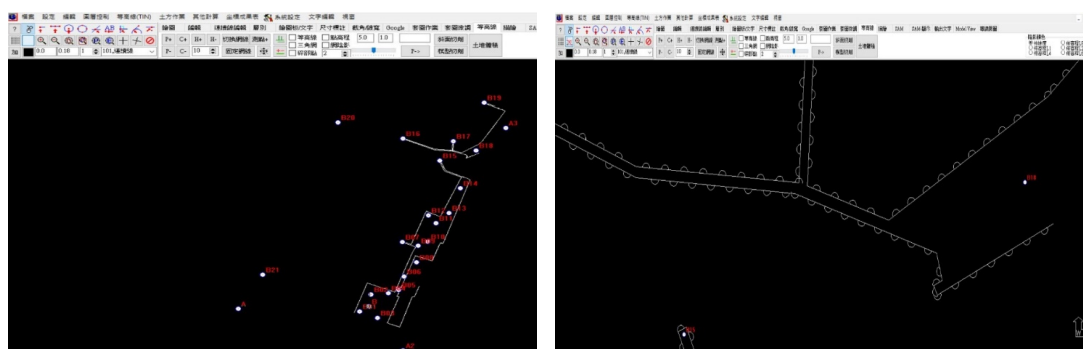


圖 13-1 現場控制點展點並套繪固定結構物

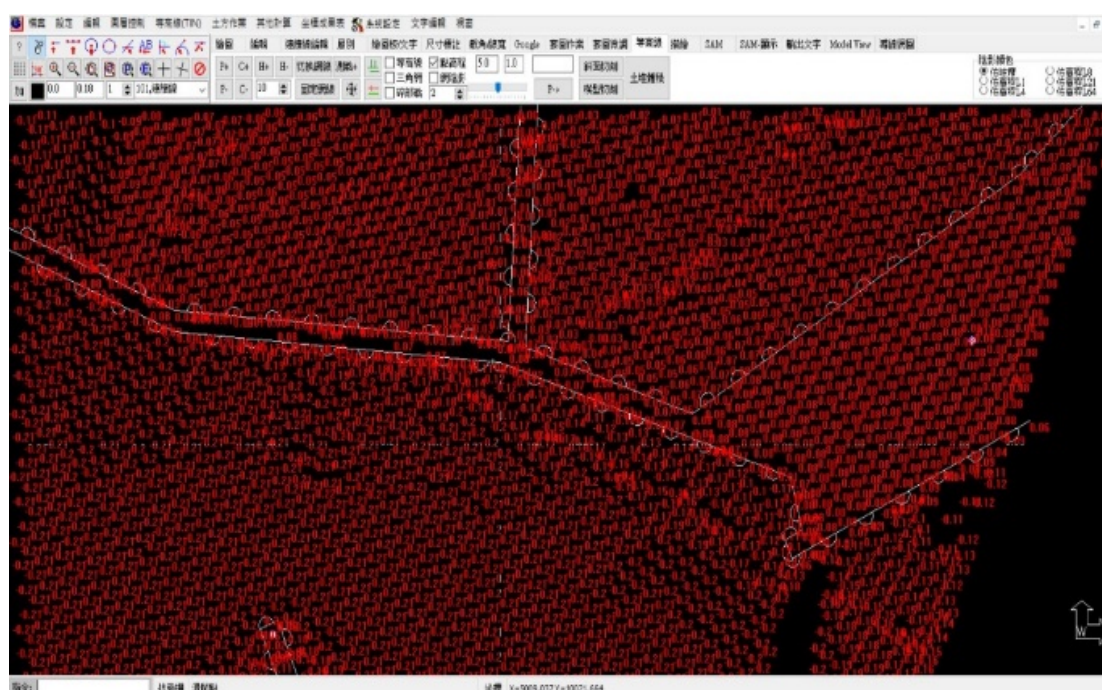


圖 13-2 展繪實測高程點

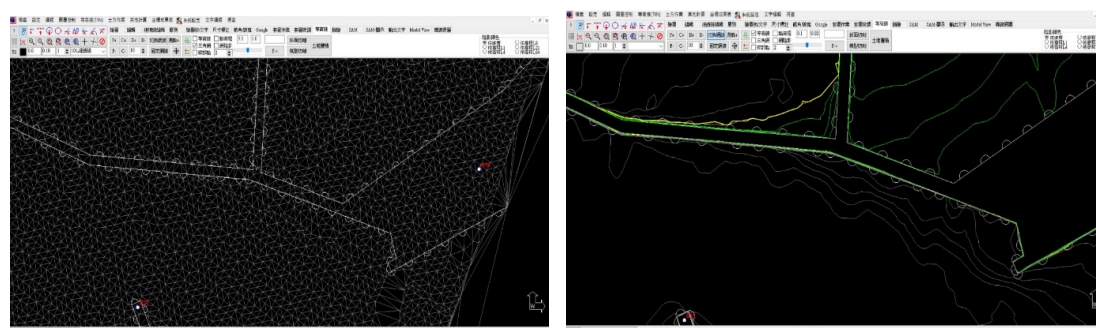


圖 13-3 依實測高程點組成不規則三角網格並繪製等高線

(4)完成數值地形圖：結合上述高程點、等高線、結構物及控制點後，即可產製測量成果地形圖。水工模型試驗場數值地形圖成

果展示，如圖 14 所示。

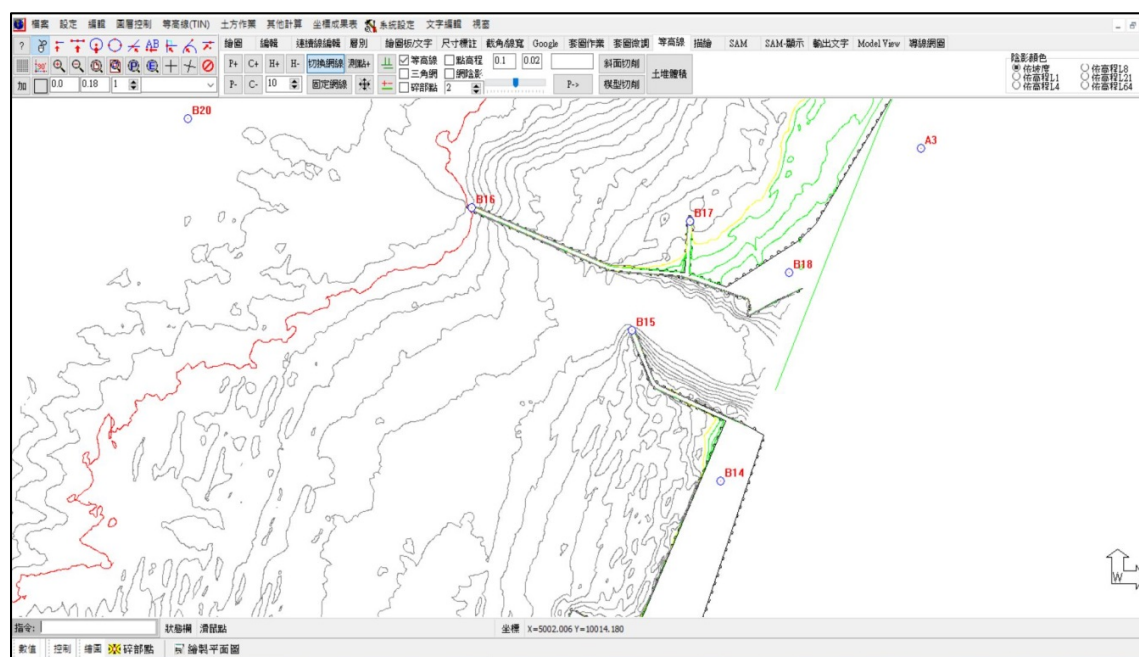
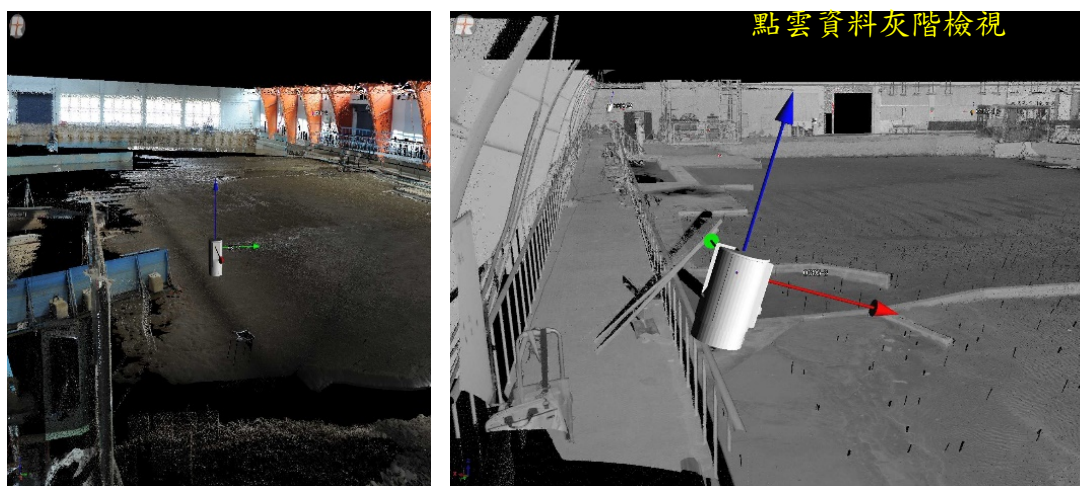


圖 14 完成數值地形圖

5. 傳統地形測量僅以單調的線繪製平面地形圖，測量成果利用者對其施工區域土地與結構物之空間位置關係較難連結。藉由地面光達掃描技術測量可獲得高密度及高精度三維空間資訊，使傳統平面圖立體化，達到多功能使用目的。三維雷射掃描彩色點雲成果，如圖 15 所示。



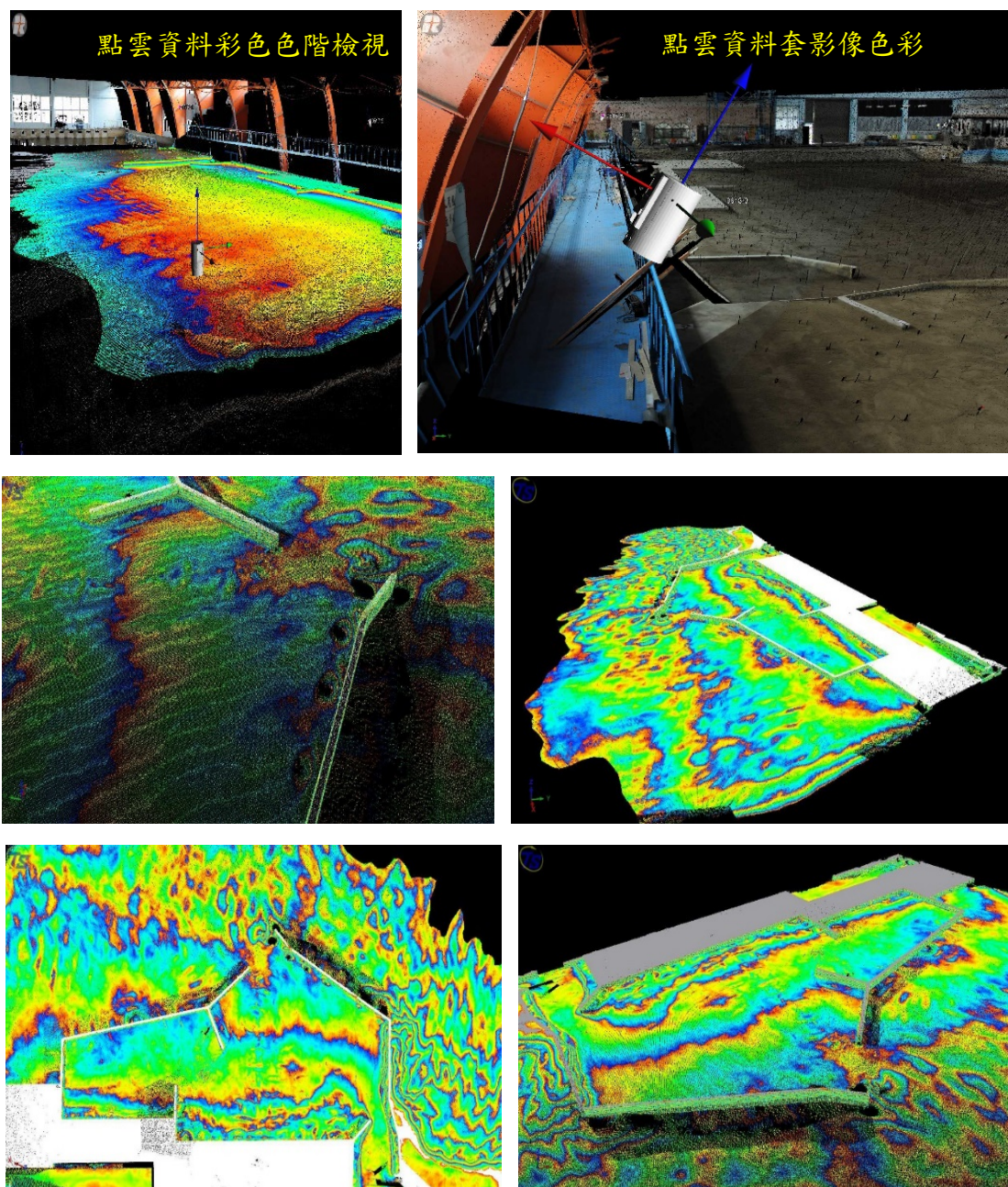


圖 15 完成平面地形圖

6. 地面光達掃描測量精度檢核成果：本次水工模型試驗地形測量採用地面光達掃描方式，同時將成果與經緯儀施測方式進行比對，其高程差異結果皆符合 5mm 之精度差異規範，可證明地面光達方式可取代經緯儀施測方式，且可取得更高解析度及整體完整資訊之地形資料。由點雲成果於標竿位置擷取高程資料操作，優點：平均測點間距小於 2cm，平面及高程測量精度優於 $\pm 5\text{mm}$ ，如圖 16 所示。

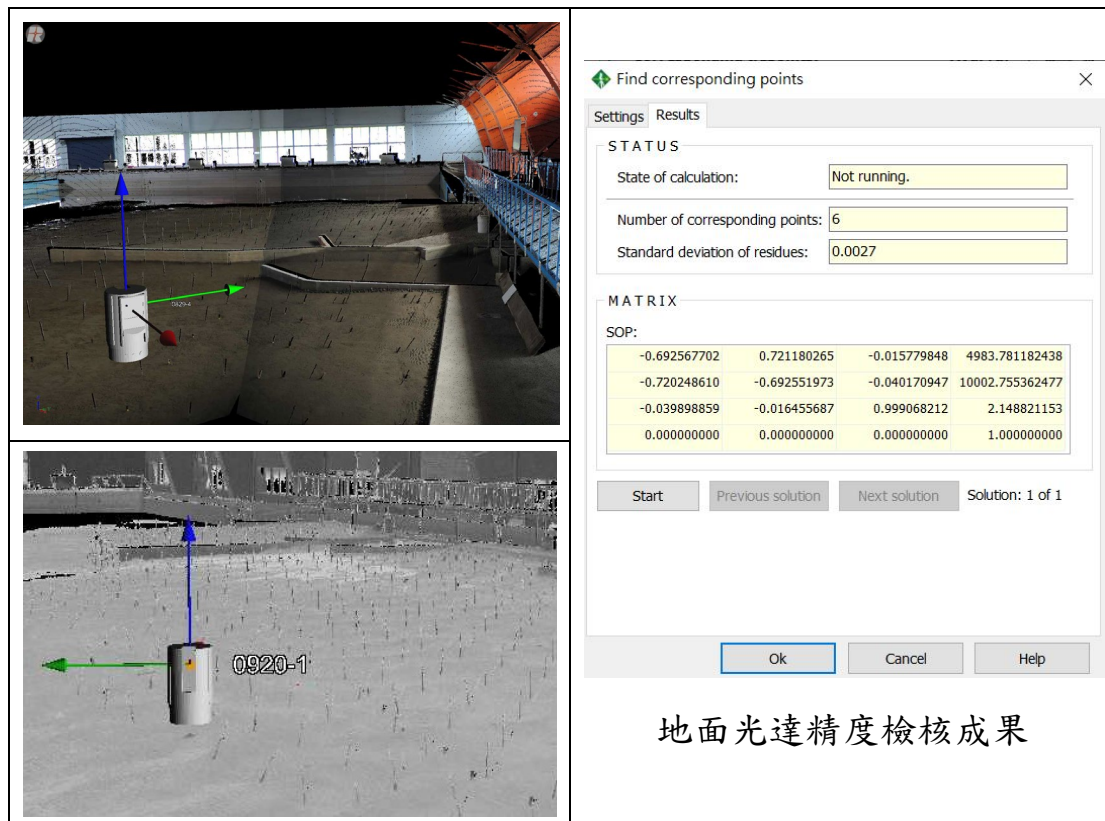
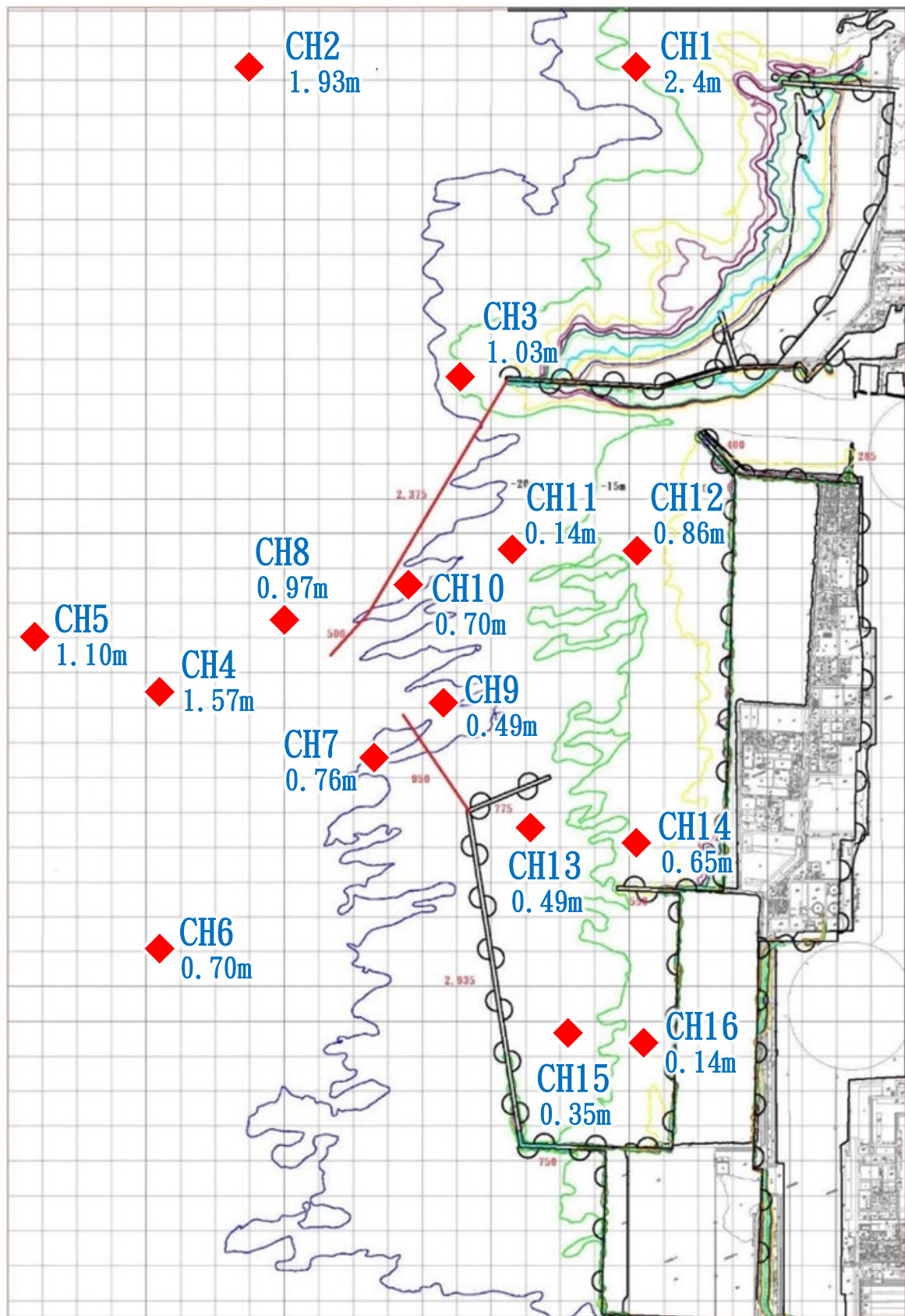


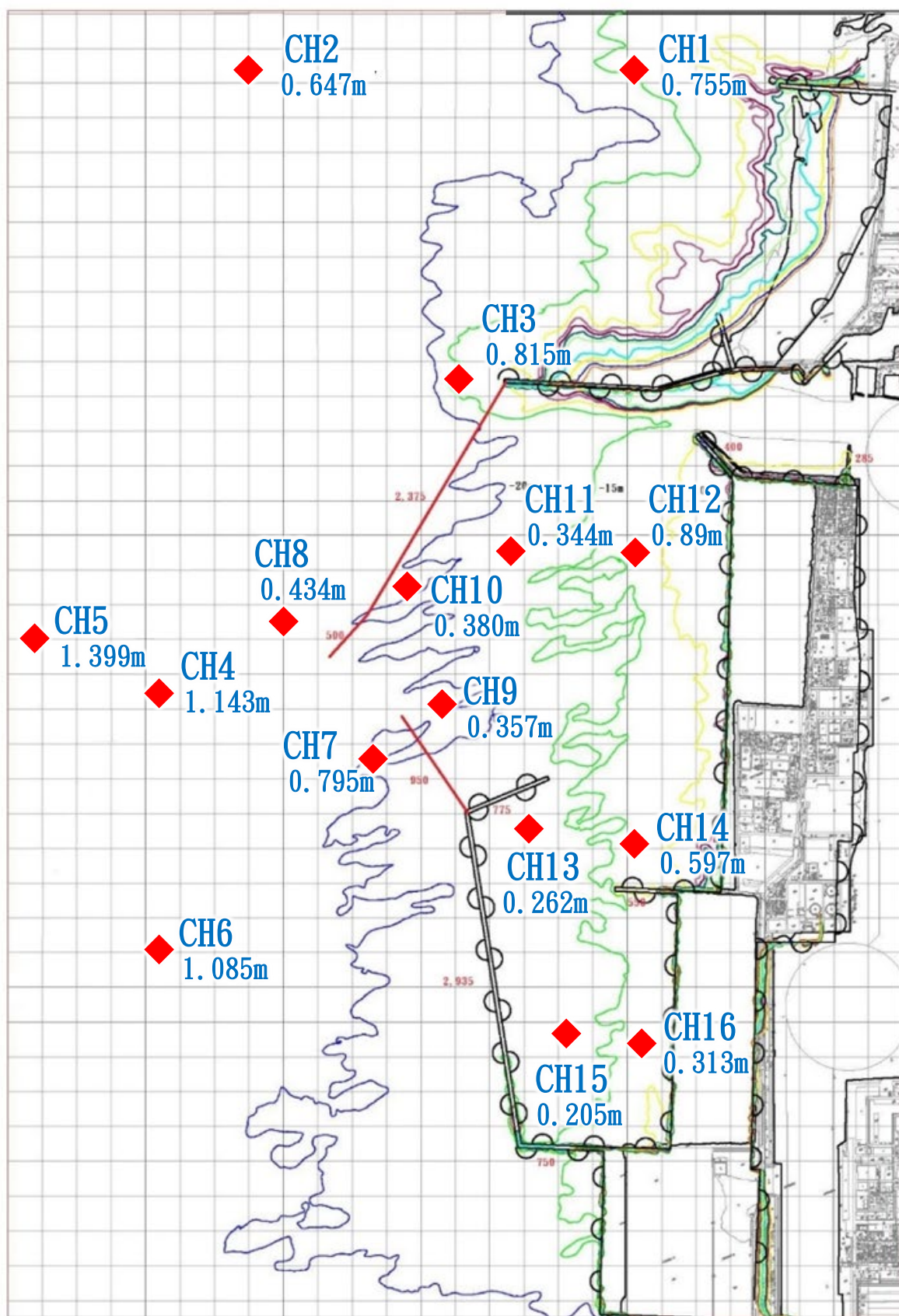
圖 16 地面光達掃描測量精度檢核成果

附錄四

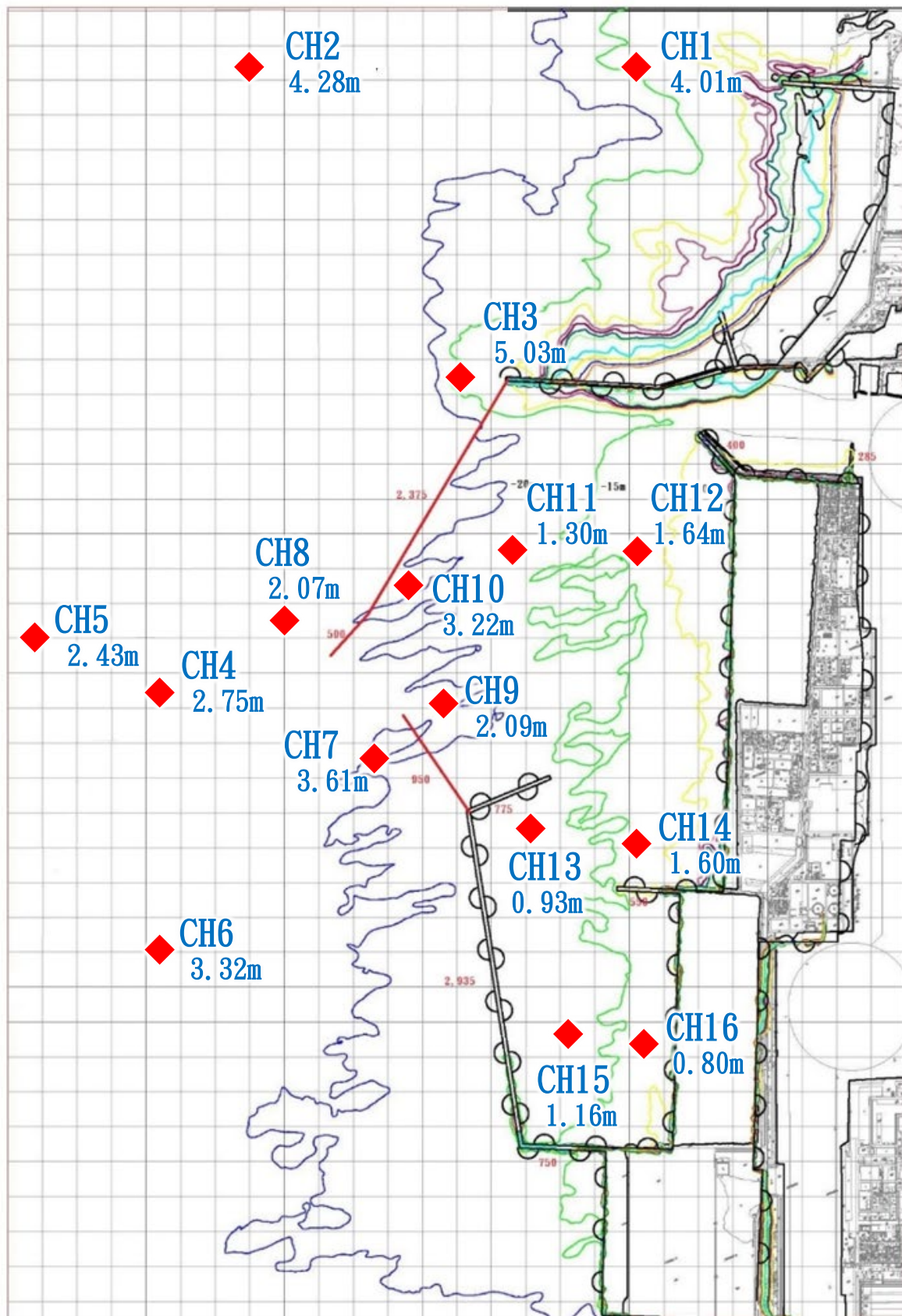
試驗波高平面圖



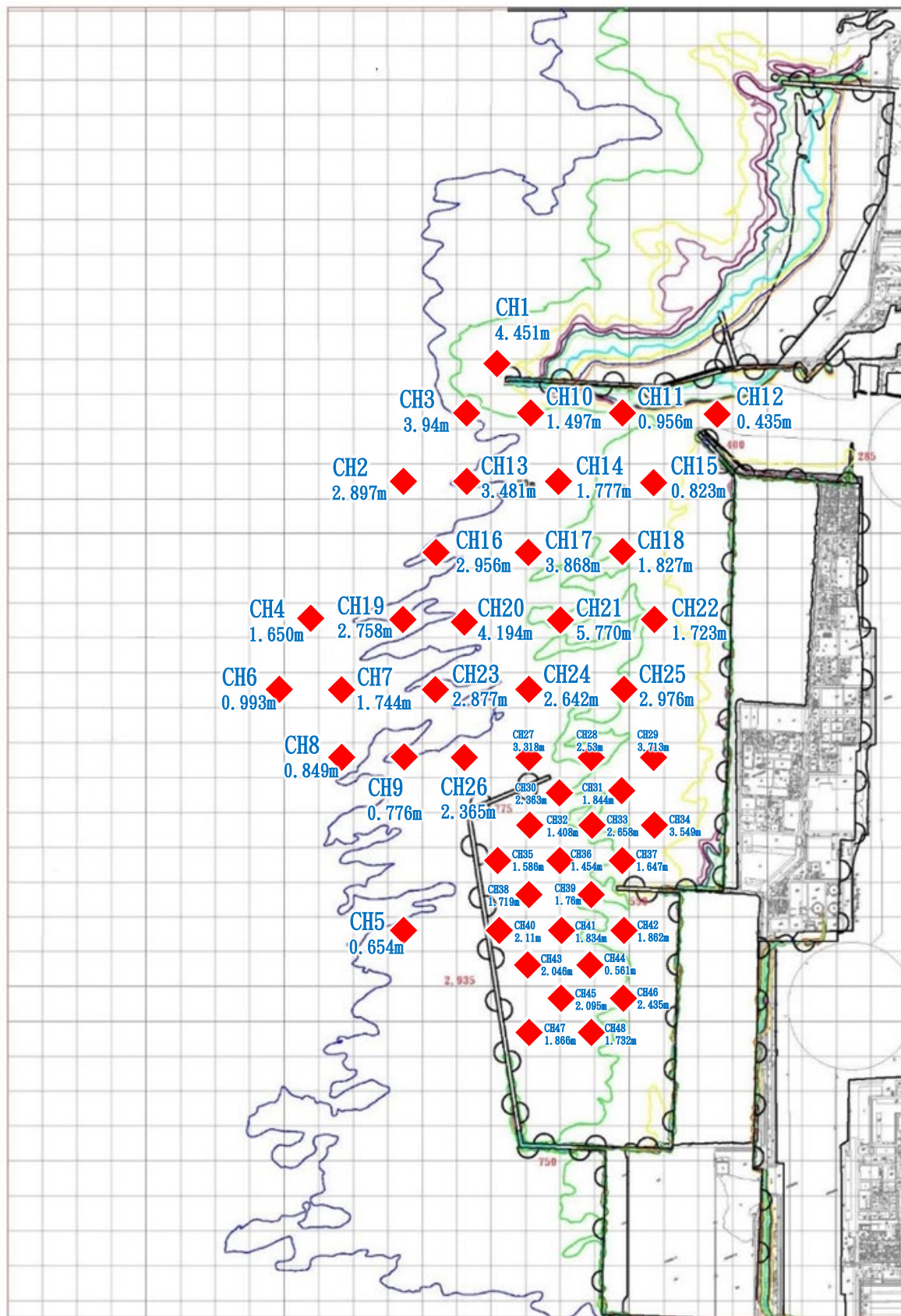
附圖 4.1 長程配置方案漂沙試驗波高平面圖(表 3.1 NNE 冬季)



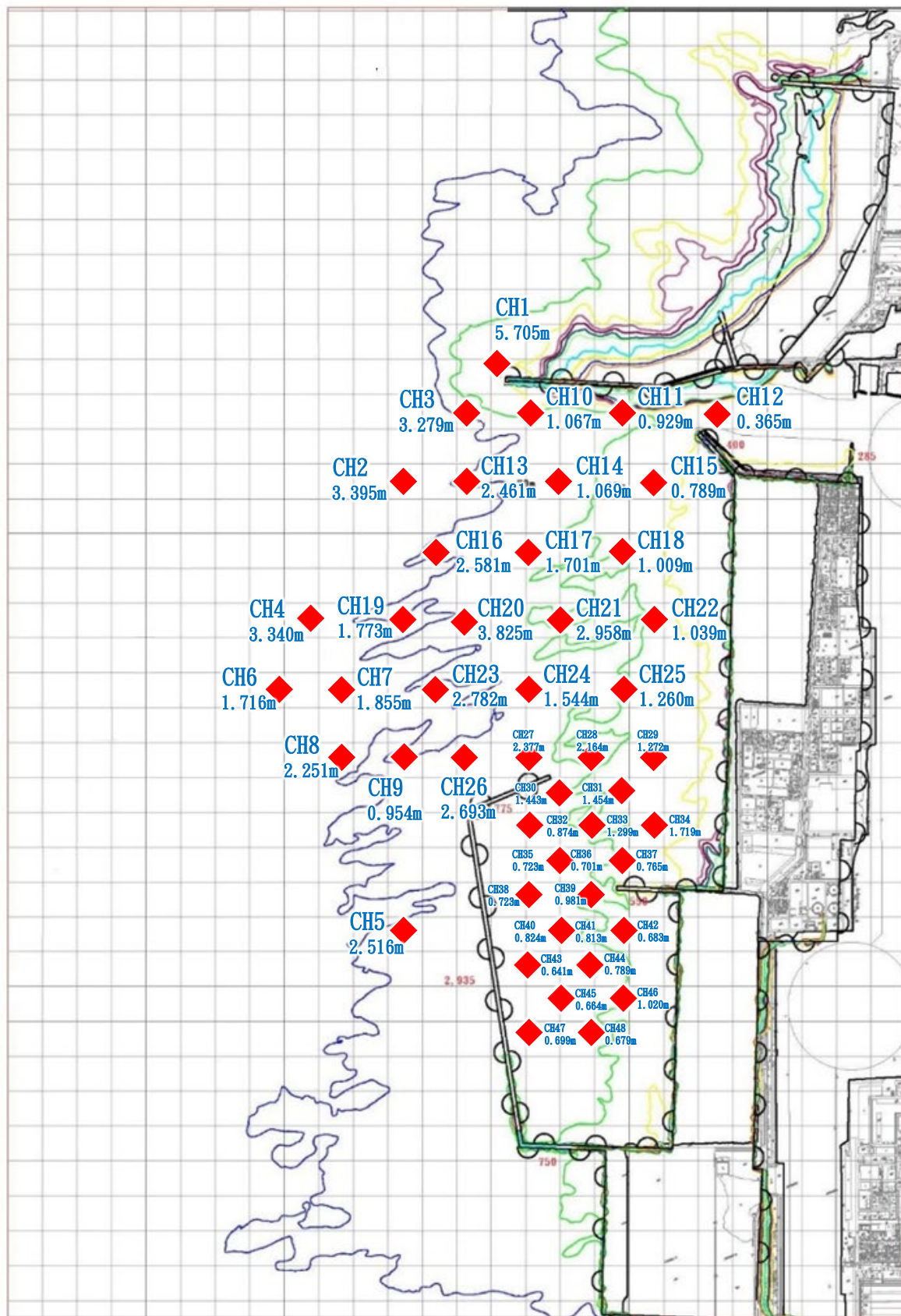
附圖 4.2 長程配置方案漂沙試驗波高平面圖(表 3.1 W 夏季)



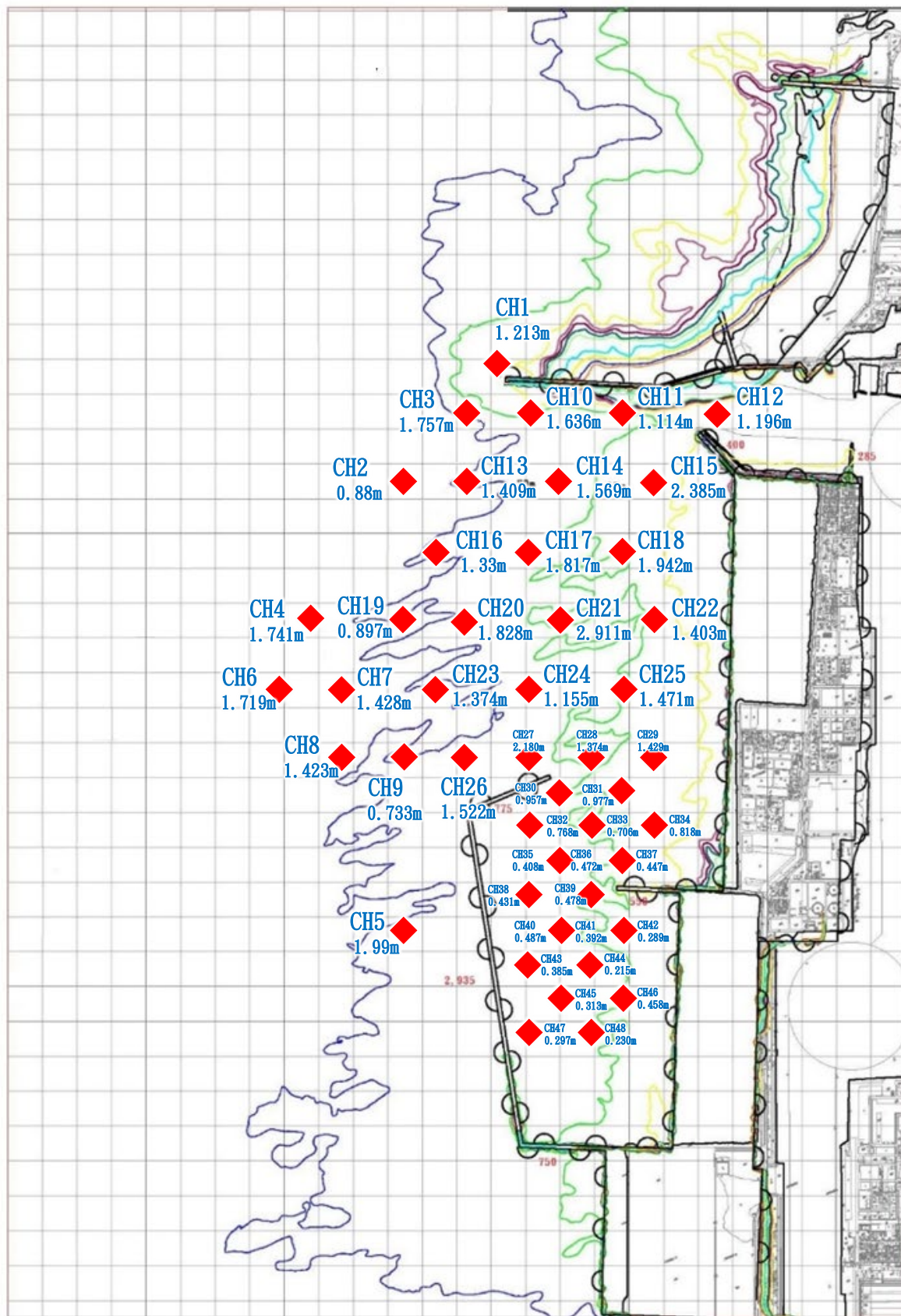
附圖 4.3 長程配置方案漂沙試驗波高平面圖(表 3.1 NNE 颱風)



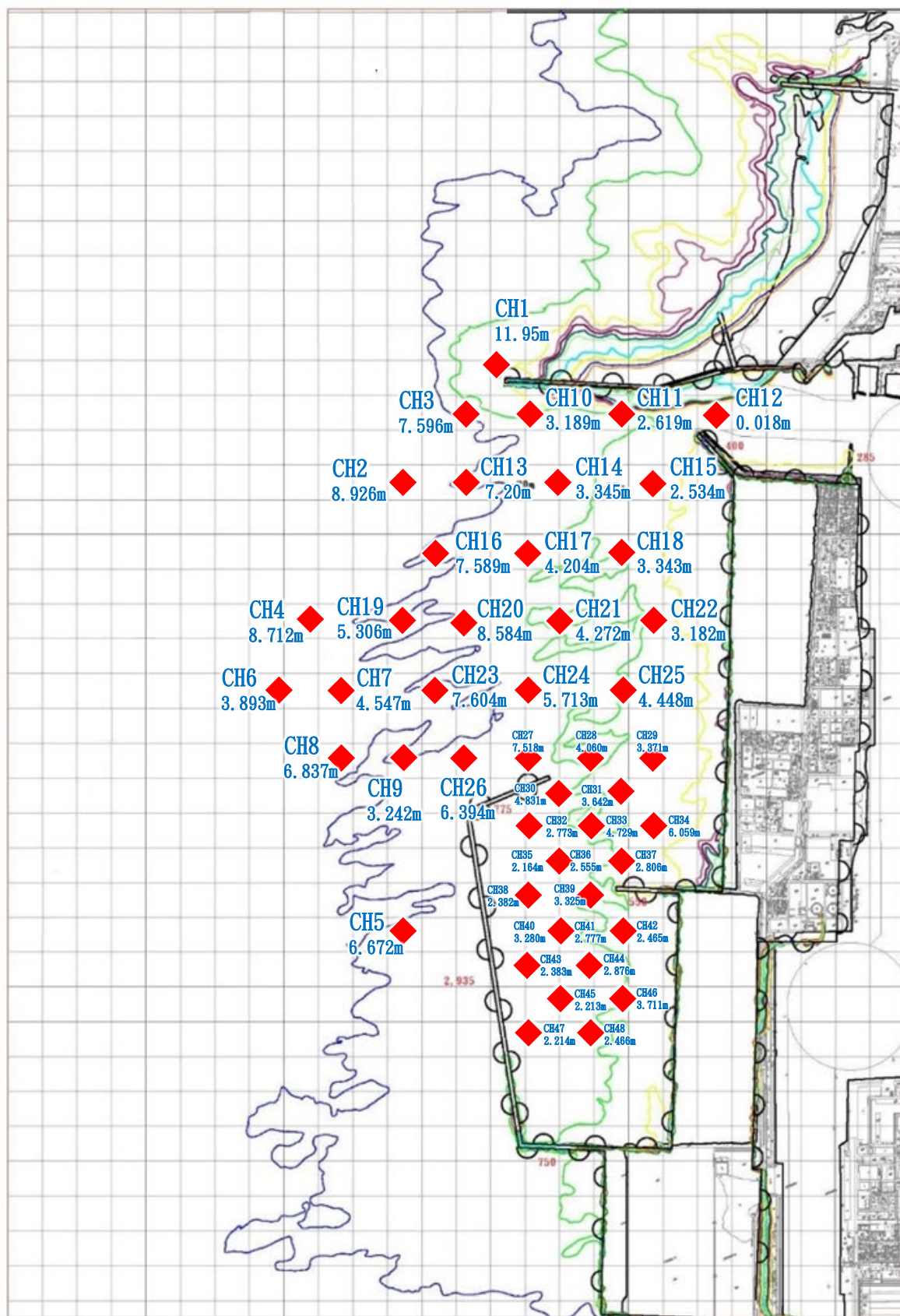
附圖 4.4 近程配置方案遮蔽試驗波高平面圖(表 3.4 N 冬季)



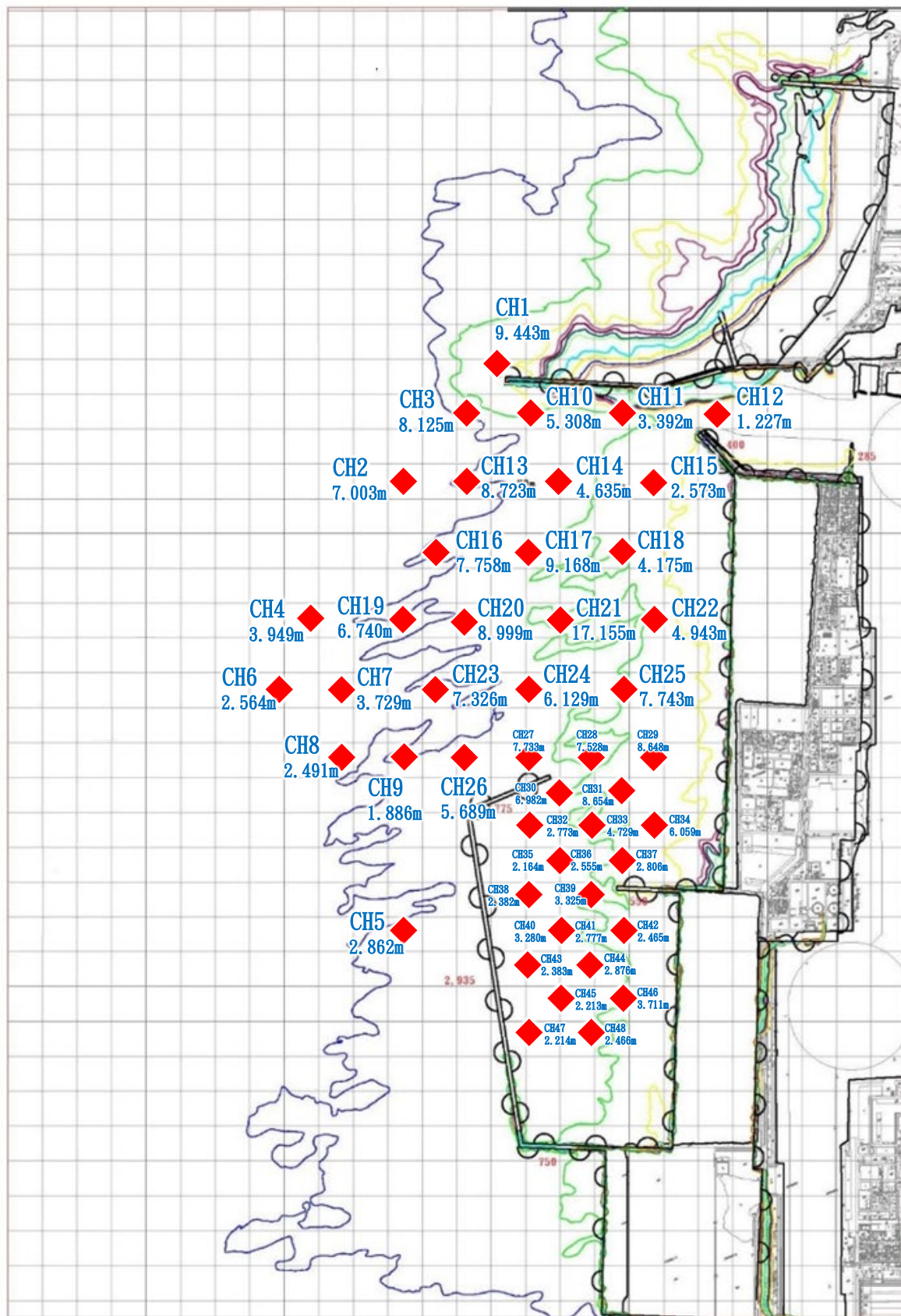
附圖 4.5 近程配置方案遮蔽試驗波高平面圖(表 3.4 NNE 冬季)



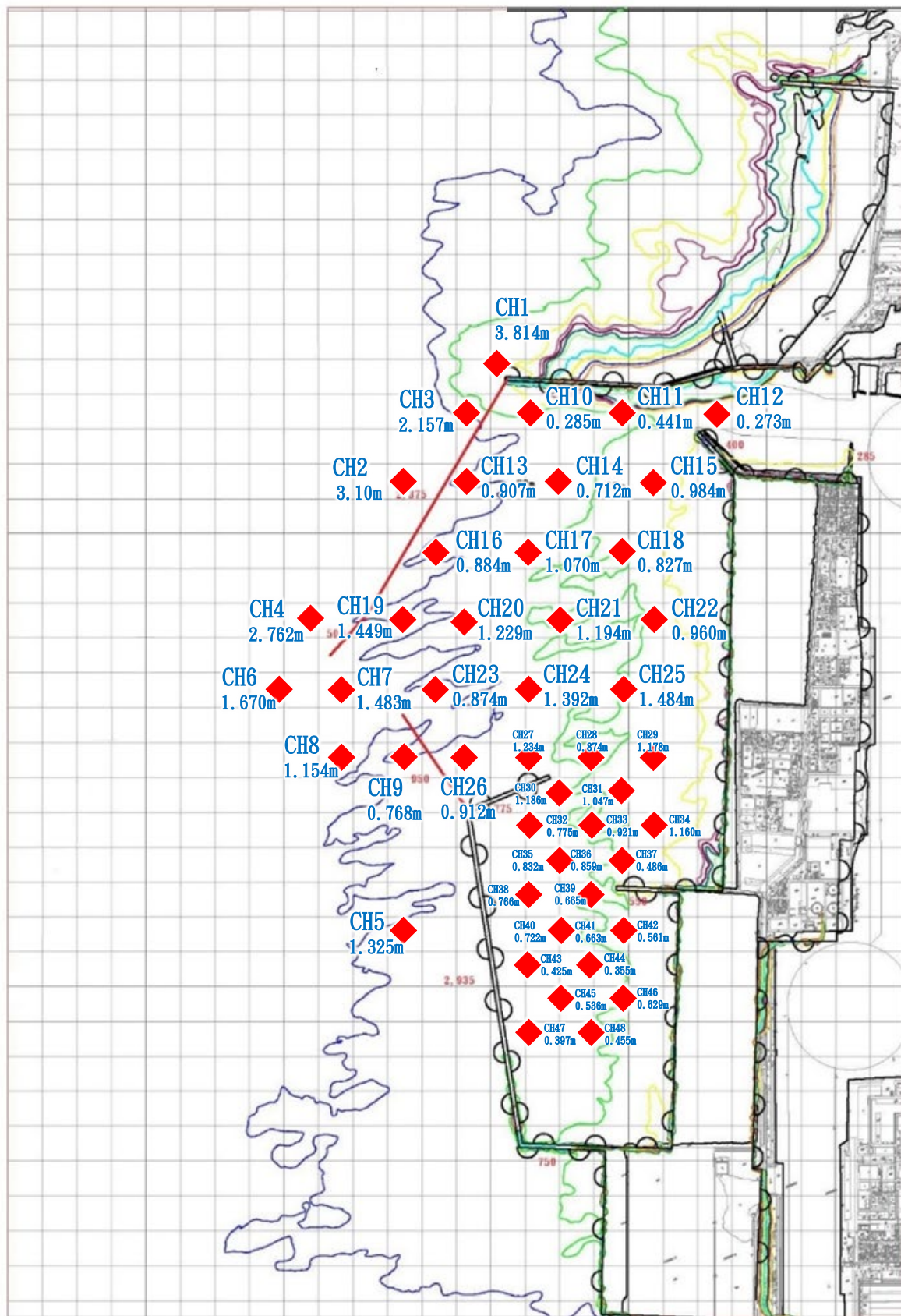
附圖 4.6 近程配置方案遮蔽試驗波高平面圖(表 3.4 W 夏季)



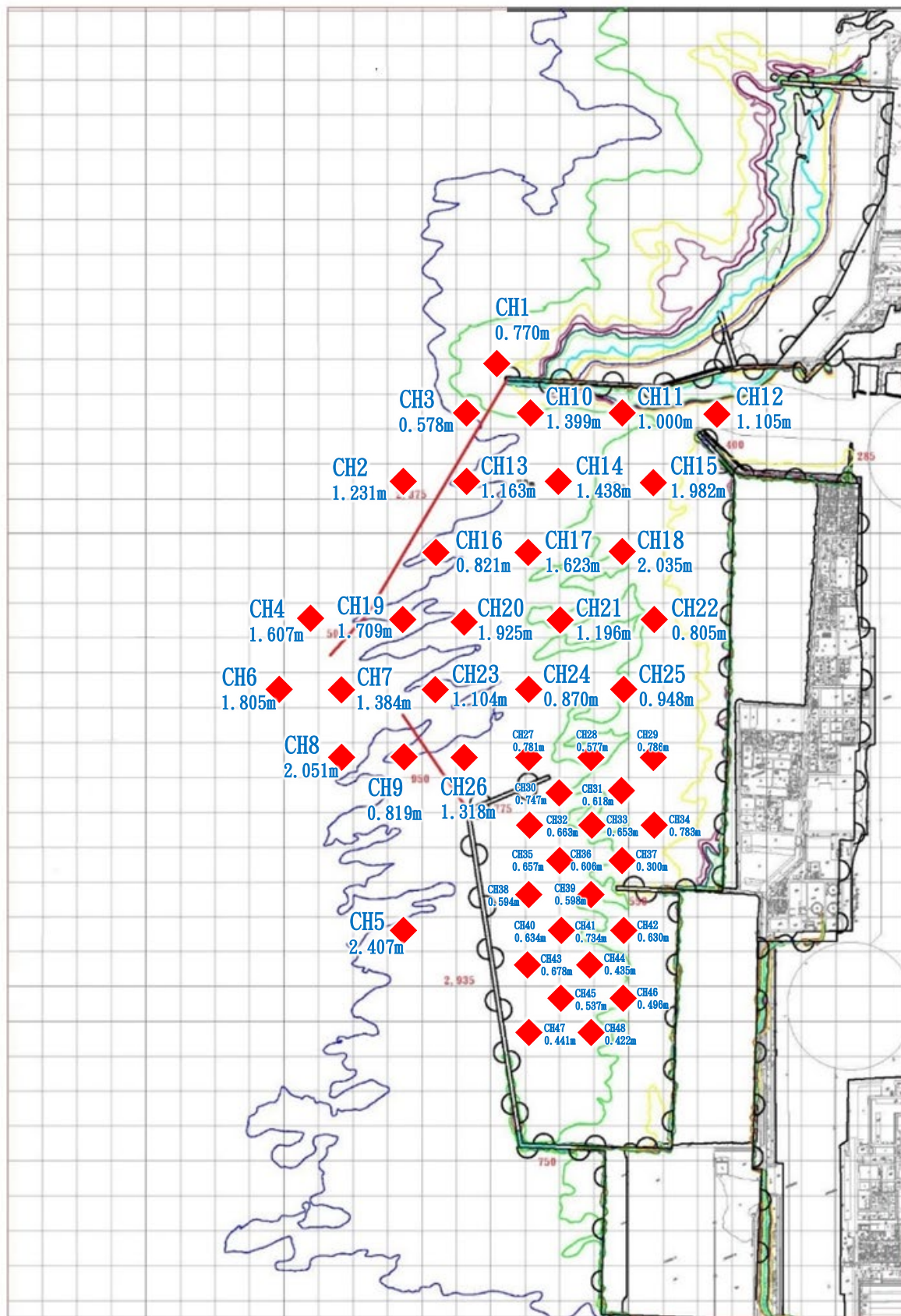
附圖 4.7 近程配置方案遮蔽試驗波高平面圖(表 3.4 NNE 颱風)



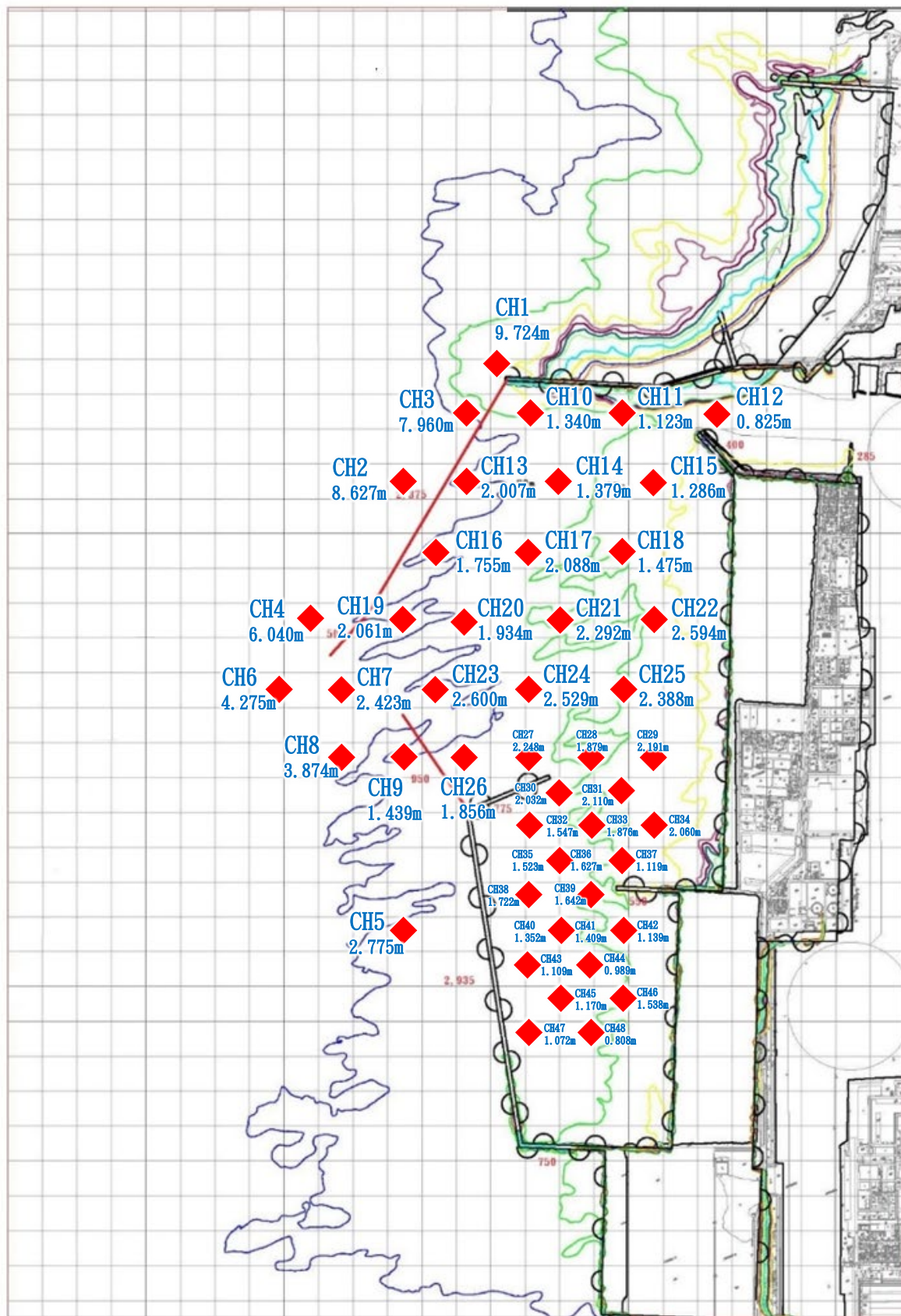
附圖 4.8 近程配置方案遮蔽試驗波高平面圖(表 3.4 N 颱風)



附圖 4.9 長程配置方案遮蔽試驗波高平面圖(表 3.7 N 冬季)



附圖 4.10 長程配置方案遮蔽試驗波高平面圖(表 3.7 W 夏季)



附圖 4.11 長程配置方案遮蔽試驗波高平面圖(表 3.7 N 颱風)

附錄五

工作會議記錄內容

交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：本所港灣技術研究中心第二科 110 年自行研究計畫第 1 次工作會議

貳、時間：

一、第一場次：110 年 6 月 22 日(星期二)上午 9 時至下午 12 時 15 分
(原訂 110 年 6 月 18 日舉行，因故延期)

二、第二場次：110 年 6 月 21 日(星期一)上午 9 時 30 分至下午 12 時 15 分

參、地點：本所港灣技術研究中心 5 樓第二會議室

肆、主持人：蔡主任 立宏

紀錄：曹勝傑

伍、出席單位及人員：如後附簽到表

陸、討論議題：

一、工作進度說明：

(一) 110 年主要商港風潮觀測與特性分析

1. 持續蒐集各港風力、潮位資料並逐月做資料品管。
2. 完成強陣風特性分析方法擬定及陣風指標選定，並已完成高雄港 2020 年 9~12 月各陣風指標計算。
3. 完成蒐集 2016~2020 年高雄港颱風資料並完成潮位資料品管及歷線圖繪製。

(二) 船舶監控預警系統之應用(2/2)-交通量及事故熱點分析應用模組開發

1. 透過 VPN 網路介接航港局 AIS 資訊，以資料庫方式儲存臺灣周圍海域船舶 AIS 資訊並進行資料篩選、比對及統計分析。
2. 完成利用介接航港局 AIS 動態資訊，及本所港研中心歷年開發之 AIS 應用模組，計算分析臺灣周圍相關海域及港口之船舶種類與交通流量。
3. 針對臺灣東西側主要航運通道及離岸風電區，完成鄰近海域之逐月交通量變化趨勢。

(三) 臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討

1. 完成數值水槽文獻資料蒐集。

2. 完成水工試驗地文模型與試驗規劃。
3. 進行遠程外廓堤增建配置方案之動床水工模型試驗，完成初步試驗結果分析與現象探討。
4. 初探波浪數值水槽之可行性。

(四) 110 年主要商港波流觀測與特性分析

1. 完成臺中港（主要觀測站）、基隆港（輔助觀測站）及高雄港（輔助觀測站）港外波流觀測系統佈放。
2. 完成臺北港、高雄港及花蓮港港池靜穩監測系統建置。
3. 完成臺北港微波雷達觀測系統觀測鐵架及貨櫃機房裝設。
4. 辦理各港波流觀測資料品質管理及研究報告章節擬定。

(五) 臺北港鄰近海域歷年地形變遷特性分析

1. 完成臺北港風、波、潮流觀測資料蒐集分析。
2. 進行臺北港鄰近海域漂沙特性分析。
3. 完成臺北港冬、夏季及歷年夏季斷面侵淤分析。

(六) 馬祖港域能見度探討之研究(1/2)-環境因子特性分析

1. 完成國內外能見度觀測方式及規範等文獻資料蒐集。
2. 完成馬祖福澳港區能見度觀測資料庫建置，以及開發氣象局氣象站及民航局機場氣象站資料介接程式。
3. 參考世界氣象組織(WMO)與海洋即時觀測數據品管(QARTOD)作業手冊，完成福澳港能見度觀測資料品管程序 Test1~Test6 檢核機制建立。

(七) 水波時尺或時頻分析法之比較與應用(4/4)

1. 持續進行水波時頻分析法之探討。
2. 持續進行模式建置及數值處理分析。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論：

(一) 110 年主要商港風潮觀測與特性分析

1. 風潮資料特性分析之資料品管方式。
 2. 強陣風特性分析需定義所需關注強陣風事件特徵。
 3. 暴潮分析建議增加不同颱風事件分類之影響。
- (二) 船舶監控預警系統之應用(2/2)-交通量及事故熱點分析應用模組開發
1. 部分船舶 AIS 資料跨越陸地，應探討其正確性。
 2. 本計畫開發船舶交通量自動統計應用模組及船舶事故之海氣象資料自動產生模組，後續是否提供應用單位使用？
- (三) 臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討
1. 確認水工模型試驗規劃、配置、流程與初步結果。
 2. 探討水工試驗不等比尺因子，以及討論預備試驗等內容。
 3. 探討水工試驗外航道與內港區物模與數模之淤積量差異，以及侵淤變化趨勢。
 4. 討論研究報告章節與篇章內容。
- (四) 110 年主要商港波流觀測與特性分析
1. 臺北港微波雷達架設進度及後續資料分析方式討論。
 2. 商港波流觀測資料後續分析內容討論。
 3. 研究報告章節內容探討。
- (五) 臺北港鄰近海域歷年地形變遷特性分析
1. 臺北港鄰近海氣象及河川資料分析成果之討論。
 2. 臺北港鄰近海域地形變遷分析方法之討論。
- (六) 馬祖港域能見度探討之研究(1/2)-環境因子特性分析
1. 確認資料品管流程及程序。
 2. 探討馬祖地區濃霧特性，以及能見度影響因子。
- (七) 水波時尺或時頻分析法之比較與應用(4/4)

1. 前期研究有關水波模擬之最適仔波已確立。
2. 本年度研究 Wavelet variant 與水波基本公式有差異，故應用於水波模擬仍須進一步探討。

柒、結論：

一、110 年主要商港風潮觀測與特性分析

- (一) 本計畫已研訂初步風力、潮位資料品管機制，後續可參考本所過去相關資料品管報告，強化及完備風潮品管程序。
- (二) 本計畫已參照相關強陣風分析之指標計算，後續進一步針對相關陣風指標間之相關性及時間延遲性做分析。
- (三) 本計畫颱風暴潮分析已完成潮位資料品管及歷線圖繪製，後續計算颱風暴潮偏差及峰值時間延遲差並依不同颱風事件進行分類。
- (四) 本年度風潮年報建議以單冊型式與本研究報告一併出版。

二、船舶監控預警系統之應用(2/2)-交通量及事故熱點分析應用模組開發

- (一) 本計畫目前介接航港局 AIS 資料，應先剔除相關 AIS 錯誤資訊，再進行後續比對及統計分析作業。
- (二) 臺灣周圍相關海域及港口交通流量圖，應增加圖例或色塊說明。

三、臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討

- (一) 本研究數值模式驗證之確切性，建議研究團隊可加以檢討，確認水動力之模擬是否與水工模型試驗成果一致。
- (二) 有關本研究水工模型試驗之動床部分，於北側外廓堤延伸段港內側產生淘刷洞穴，其引致成因及淘刷量為何？建議可找國內專業顧問公司加以評估，並參考台灣世曦工程顧問公司或宇泰工程顧問公司之前報告。

四、110 年主要商港波流觀測與特性分析

- (一) 本研究所使用之現場觀測儀器，如 AWAC、資料浮標及微波雷達等，建議於研究報告內說明不同儀器特性、優缺點及量測限制等。
- (二) 本年度研究報告第三～五章係針對臺北港海象特性執行分

析，建議應於報告第一章清楚敘明。

(三) 本年度波流年報建議以單冊型式，與本研究報告一併出版。

(四) AWAC 與資料浮標海流量測方式不同，後續分析時需詳加留意。

(五) 有關臺北港微波雷達資料分析，儀器量測距離、解析度及分析資料如何呈現，請釐清並妥適規劃。

五、臺北港鄰近海域歷年地形變遷特性分析

(一) 本計畫已初步完成臺北港鄰近海域歷年夏季斷面侵淤分析，後續再進行歷年冬季測量成果斷面及平面侵淤分析，並將臺北港不同時期擴港歷程納入評估討論。

(二) 本計畫已完成臺北港全年海氣象資料統計分析，後續將再針對夏季、冬季分季節進行細部分析，以利研究之精進。

(三) 有關臺北港鄰近海域漂沙特性分析，將再針對分析步驟進行敘明，另相關圖資來源也將於報告內標註清楚。

(四) 有關臺北港河川輸沙資料分析，為強化本計畫成果，可再蒐集淡水河每年向南移動之輸沙量納入報告一併討論，未來可提供應用單位參考。

六、馬祖港域能見度探討之研究(1/2)-環境因子特性分析

(一) 本計畫已研訂初步能見度即時資料品管機制，後續可再持續蒐集其他可參考之氣象品管機制，並進一步評估不同品管程序之效果。

(二) 本計畫已參照先期審議之意見，將氣象局及民航局觀測資料納入，建議後續可進一步比較 3 個測站資料之關聯性。

(三) 在環境因子分析，後續建議可納入潮位計量測之水溫資料，以及不同區域之(地表)溫度變化。

(四) 為強化本計畫成果，可預先研析研究產出項目與應用目的之關聯性，以提供應用單位決策應用。

七、水波時尺或時頻分析法之比較與應用(4/4)

(一) 所發現 Wavelet variant 有其特色，亦可研究應用於其他領域。

(二) 研究若有具體成果建議可投稿期刊。

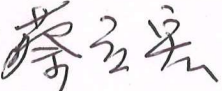
捌、散會：下午 12 時 15 分。

會議簽到表

壹、會議名稱：「臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討」自行，
研究案第一次工作會議

貳、時間：110年6月21日(星期一) 上午11時30分

參、地點：本所港灣技術研究中心5樓第二會議室（視訊會議）

肆、主持人：蔡主任立宏 

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
第一科	科長	賴瑞集
第二科	科長 駐點工程師 駐點人員 副研究員 副研究員 駐點工程師 技工 副研究員 助理研究員 技工 研究員 研究員 副研究員 駐點工程師 副研究員 助理研究員	李俊翔 張大偉 陳孟宏 許金堂 黃冠升 許義清 許建豪 劉淑敏 李冠廷 林冠文 陳天時
第三科	科長	林雅雯
其他單位		

(註：簽到表請掃描成 pdf 檔，若欲與會議紀錄整併成 1 個 pdf 檔，可至「https://www.ilovepdf.com/zh-tw/merge_pdf」，將會議紀錄與簽到表上傳後進行合併，再上傳至公文系統附件區供陳核)

交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：本所港灣技術研究中心第二科 110 年自行研究計畫第 2 次工作會議

貳、時間：110 年 8 月 27 日(星期五)上午 9 時

參、地點：本所港灣技術研究中心 5 樓第二會議室

肆、主持人：李科長 俊穎

紀錄：曹勝傑

伍、出席單位及人員：如後附簽到表

陸、討論議題：

一、工作進度說明：

(一) 110 年主要商港風潮觀測與特性分析

1. 持續蒐集各港風力、潮位資料並逐月辦理資料品管作業。
2. 完成高雄港 2020 年 9~12 月各陣風指標計算，並搭配平均風速與最大風速歷線圖，研析指標與其間之關係。
3. 完成蒐集 2016~2020 年高雄港颱風資料及品管作業。

(二) 110 年主要商港波流觀測與特性分析

1. 辦理臺北港底碇式 AWAC 及資料浮標海流觀測資料分析。
2. 辦理臺北港港池靜穩監測資料分析。
3. 完成臺北港微波雷達觀測系統建置。
4. 辦理各港波流觀測資料品質管理及研究報告撰寫。

(三) 臺北港鄰近海域歷年地形變遷特性分析

1. 進行臺北港鄰近海域漂沙特性分析。
2. 進行臺北港平面侵淤分析。
3. 進行遙測影像校正作業。

(四) 船舶監控預警系統之應用(2/2)-交通量及事故熱點分析應用模組開發

1. 針對臺灣東西側主要航運通道及離岸風電區，完成鄰近海域之逐月交通量變化趨勢。
2. 完成臺灣周圍海域及港口航道船舶交通流量自動統計應用模組開發，提供航港局航線規劃及航路建議之參考應用。

3. 完成船舶事故之海氣象資料自動產生模組，提供航港局做為海上交通管理之參據。

(五) 馬祖港域能見度探討之研究(1/2)-環境因子特性分析

1. 完成馬祖港區多參數氣象站監測資料庫、以及中央氣象局馬祖氣象站與南竿機場航空站氣象資料介接及歷史資料建檔。
2. 完成馬祖港區能見度觀測數據與現場 CCTV 比對。
3. 完成 Test1~Test7、Test9、Test11 品管程式開發及測試。
4. 完成資料蒐集率統計表、能見度分級統計表、歷線圖、盒鬚圖、霧日熱點圖、分月玫瑰圖繪圖程式。

(六) 臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討

1. 針對水工模型漂沙試驗後地形變化，進行地面光達掃描儀，並計算土方沖刷量與淤積量之變化情形。
2. 利用本中心 108 年 5 月臺中港水深地形測量資料，建置 MIKE 3 Wave 三角與四邊形混合之數值網格，並配合定床試驗進行三維波浪數值模擬工作。
3. 完成水工模型動床試驗(漂沙)，以及定床試驗夏季與冬季規則與不規則波浪條件研究工作，並評估臺中港區水動力與靜穩度現象。

(七) 水波時尺或時頻分析法之比較與應用(4/4)

1. 持續進行水波時頻分析法之探討。
2. 持續進行模式建置及數值處理分析。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論：

(一) 110 年主要商港風潮觀測與特性分析

1. 強陣風特性分析，需定義所需關注強陣風事件特徵。
2. 暴潮分析，建議增加不同颱風事件分類之影響。

(二) 110 年主要商港波流觀測與特性分析

1. 臺北港 AWAC 及資料浮標海流觀測資料相關性。
2. 臺北港分層海流資料。
3. 臺北港資料浮標及港池靜穩監測資料分析。

4. 商港波流觀測資料後續分析內容。
- (三) 臺北港鄰近海域歷年地形變遷特性分析
 1. 臺北港鄰近海域漂沙特性。
 2. 臺北港平面侵淤趨勢分析成果。
 3. 臺北港遙測影像校正方式。
- (四) 船舶監控預警系統之應用(2/2)-交通量及事故熱點分析應用模組開發
 1. 部分船舶 AIS 資料跨越陸地，可針對呈現方式進行修正。
 2. 事故熱點分析應用及船舶事故之海氣象資料自動產生模組開發，兩者關連性說明。
- (五) 馬祖港域能見度探討之研究(1/2)-環境因子特性分析
 1. 資料品管流程及程序，以及極端值濾除規則。
 2. 環境影響因子及特性分析初步結果。
- (六) 臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討
 1. 水工模型試驗遠程方案之堤基淘刷現象。
 2. 水工模型試驗堤防堤頂之越波現象。
 3. 針對潮流引致港區底床最大剪應力分佈之定性。
 4. 三維波浪數值模擬之工作進度。
- (七) 水波時尺或時頻分析法之比較與應用(4/4)
 1. 前期研究有關水波模擬之最適仔波已確立。
 2. 本年度研究 Wavelet variant 與水波基本公式有差異，故應用於水波模擬仍須進一步探討。
 3. 不同時頻分析技法其應用特長與使用時機。
 4. 數值處理分析程式建置。

柒、結論：

一、110 年主要商港風潮觀測與特性分析

- (一) 強陣風事件可再蒐集高雄港以前的新聞，儘量針對有發生重大港區意外事件進行分析。

- (二) 有關潮位資料缺漏較多之 2019 年，可使用鄰近測站之潮位資料代替，後續計算各颱風暴潮偏差及峰值時間延遲差，並依不同颱風事件進行分類。

二、110 年主要商港波流觀測與特性分析

- (一) 本研究分層海流定義，建議應於報告清楚敘明。
- (二) AWAC 與資料浮標海流量測機制不同，於後續分析時應詳加留意。
- (三) AWAC 及資料浮標海流相關性探討，呈現兩組不同資料群，建議可將潮汐特性納入，以利後續分析。
- (四) 港池靜穩監測資料分析，有關 TP03 觀測資料週期變化成因探討，建議可朝風力(海、陸風)相關性進行及增加繪製有義波高 $H_{1/3}$ 歷線圖，確認是否亦有此現象。

三、臺北港鄰近海域歷年地形變遷特性分析

- (一) 臺北港平面侵淤趨勢分析，建議後續可針對局部特定區域(如臺北港-林口電廠)，進行較細緻論述並嘗試量化分析。
- (二) 臺北港鄰近海域漂沙特性，建議應於報告中詳細說明主要波向擇定方式及分析方法。
- (三) 本研究遙測影像來源，建議應於報告中說明。
- (四) 不同年份平面侵淤趨勢分析，原則 1 年有 2 次測量資料，建議於報告中說明測量資料選用時間。

四、船舶監控預警系統之應用(2/2)-交通量及事故熱點分析應用模組開發

- (一) 交通流統計量呈現目的，預測臺灣海域何處可能為交通流量及密度最高之區域，依此進行分散航線的評估參考，減少海上航行碰撞事故發生機率。
- (二) 針對本計畫開發海氣象資料自動產生模組及船舶交通流量自動統計應用模組，增加說明後續應用情形。

五、馬祖港域能見度探討之研究(1/2)-環境因子特性分析

- (一) 本計畫已研訂初步能見度即時資料品管機制，其包含 11 項程序與 3 項標記(flag)，建議持續探討異常資料濾除之規則，以有效獲取可信之資料。

(二) 在環境因子分析上，建議可著重在低能見度進行分析，並探討溫度變化對能見度之影響。

(三) 玫瑰圖主要用在呈現具方向性之觀測項目，目前能見度資料為時間序列分析，建議採用直方圖即可。

六、臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討

(一) 簡報內容與撰寫之計畫名稱，須正確引述臺灣港務公司計畫名稱或環評計畫名稱，較為明確；另外，水工模型試驗 H_s 或 $H_{1/3}$ 名稱需一致，且目錄章節應加強試驗與數模應證之比較，以與主題相互呼應。

(二) 有關水工模型漂沙試驗之侵淤變化量，建議增加分區討論，俾利釐清漂沙行為與地形變化之掌握。

七、水波時尺或時頻分析法之比較與應用(4/4)

(一) 所發現 Wavelet variant 有其特色，亦可研究應用於其他領域。

(二) 期能建置完善之數值處理分析程式，以提供本所海象資料分析應用。

(三) 研究若有具體成果，建議投稿期刊發表。

捌、散會：下午 5 時 30 分

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所港灣技術研究中心第二科 110 年自行研究計畫第 2 次
工作會議

貳、時間：110 年 8 月 27 日(星期五) 上午 9 時 0 分

參、地點：本所港灣技術研究中心5樓第二會議室（視訊會議）

肆、主持人：李科長俊穎 *李俊穎*

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸安全組	<i>請假</i>	
第一科	<i>科長</i>	<i>賴清進</i>
	<i>科長</i>	<i>李俊穎</i>
	<i>研究員</i>	<i>黃茂仁</i>
	<i>研究員</i>	<i>許義宏</i>
	<i>助研員</i>	<i>蔡金吉</i>
	<i>駐點人員</i>	<i>劉淑敏</i>
	<i>駐點人員</i>	<i>張維庭</i>
第二科	<i>駐點人員</i>	<i>陳孟宏</i>
	<i>技工</i>	<i>李以澤</i>
	<i>副研究員</i>	<i>李政達</i>
	<i>助理研究員</i>	<i>林夢力</i>
	<i>副研究員</i>	<i>劉明名</i>
	<i>副研究員</i>	<i>羅秋穎</i>
	<i>研究員</i>	<i>孫育達</i>
	<i>副研究員</i>	<i>衛紀淮</i>
	<i>副研究員</i>	<i>郭張亮</i>
	<i>助理研究員</i>	<i>曹勝傑</i>
第三科	<i>科長</i>	<i>林雅雯</i>

(註：簽到表請掃描成 pdf 檔，若欲與會議紀錄整併成 1 個 pdf 檔，可至「https://www.ilovepdf.com/zh-tw/merge_pdf」，將會議紀錄與簽到表上傳後進行合併，再上傳至公文系統附件區供陳核)

交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：本所港灣技術研究中心第二科 110 年自行研究計畫第 3 次工作會議

貳、時間：110 年 10 月 19 日(星期二)上午 9 時

參、地點：本所港灣技術研究中心 2 樓簡報室

肆、主持人：李科長 俊穎

紀錄：曹勝傑

伍、出席單位及人員：如後附簽到表

陸、討論議題：

一、工作進度說明：

(一) 臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討

1. 針對水工模型漂沙試驗後地形變化與數模驗證部分進行探討，報告投稿港灣季刊之工作進度。
2. 利用本中心 108 年 5 月臺中港水深地形測量資料，建置 MIKE 3 Wave 三角與四邊形混合之數值網格，完成長期配置方案冬季季風與颱風情境之模擬工作，並進行水工試驗與數值模擬波高統計結果之比對。
3. 完成長程方案水工模型動床試驗(漂沙)，以及近程、中程、遠程與長程定床試驗研究工作，並評估臺中港區外廓堤建置後水動力與靜穩度現象是否滿足 LNG 船接氣之作業需求(即港內靜穩需小於 1.5m)。

(二) 臺北港鄰近海域歷年地形變遷特性分析

1. 進行臺北港鄰近海域漂沙特性分析。
2. 進行臺北港平面侵淤變化分析。
3. 進行遙測影像灘線變遷分析。

(三) 馬祖港域能見度探討之研究(1/2)-環境因子特性分析

1. 完成 Test1~ Test11 品管程式開發及測試。
2. 完成期末報告初稿第 1 章~第 3 章撰寫。

(四) 110 年主要商港風潮觀測與特性分析

1. 完成風力及潮位年報第一章觀測儀器資料說明。

2. 完成風潮主要報告 2020 年 9 月~2021 年 8 月歷線圖繪製。
3. 完成高雄港 2020 年 9~12 月陣風因子計算，並搭配其與平均風速與最大風速之相對關係，做為預警系統精進使用。
4. 完成蒐集 2016~2020 年高雄港颱風資料蒐集及計算暴潮偏差。

(五) 110 年主要商港波流觀測與特性分析

1. 臺北港港池靜穩監測資料分析。
2. 臺北港微波雷達觀測資料分析。
3. 波流觀測系統維運、資料品管及研究報告撰寫。

(六) 船舶監控預警系統之應用(2/2)-交通量及事故熱點分析應用模組開發

1. 針對臺灣東西側主要航運通道及離岸風電區，完成鄰近海域之逐月交通量變化趨勢。
2. 完成臺灣周圍海域及港口航道，船舶交通流量自動統計應用模組開發與船舶事故之海氣象資料自動產生模組，提供航港局航線規劃及航路建議之參考應用。
3. 撰寫期末報告初稿。

(七) 水波時尺或時頻分析法之比較與應用(4/4)

1. 持續進行水波時頻分析法之探討。
2. 持續進行模式建置及數值處理分析。
3. 撰寫期末報告初稿。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論：

(一) 臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討

1. 討論水工模型試驗近中長遠程配置方案之目的與是否能解決問題。
2. 討論水工模型漂沙試驗(動床)遠程增做部分是否需要納入研究成果。
3. 針對港務公司、台電與中油操船需求，討論南北內堤縮短問題。
4. 討論三維波浪數值模擬之後續工作進度。

(二) 臺北港鄰近海域歷年地形變遷特性分析

1. 臺北港鄰近海域漂沙特性討論。
2. 臺北港平面侵淤趨勢分析成果討論。
3. 臺北港遙測影像灘線變遷分析成果討論。

(三) 馬祖港域能見度探討之研究(1/2)-環境因子特性分析

1. 品管程序確認及方法論討論，報告書可直接提出各項參數預設值之建議。
2. 針對資料離群值檢查研提 6 種方法，可再嘗試利用中位數法進行分析。

(四) 110 年主要商港風潮觀測與特性分析

1. 年報部分各測站資料呈現方式。
2. 風潮主要報告歷線圖呈現方式。
3. 強陣風預警系統精進相關參數探討。
4. 暴潮分析呈現方式。

(五) 110 年主要商港波流觀測與特性分析

1. 臺北港港池靜穩監測資料驗證及遮蔽係數分析。
2. 臺北港微波雷達資料蒐集與分析。
3. 研究報告撰寫內容及資料分析成果。

(六) 船舶監控預警系統之應用(2/2)-交通量及事故熱點分析應用模組開發

1. 介接航港局 AIS 資料相關問題，建議可利用文字說明。
2. 統計分析航港局歷年船舶海難事故因素，該海事案件發生原因，如何區分海氣象因素。

(七) 水波時尺或時頻分析法之比較與應用(4/4)

1. 不同時頻分析技法其應用特長與使用時機之討論。
2. 數值處理分析程式建置之討論。
3. 針對數值模擬結果及先前試驗所得資料，應用時頻分析理論之驗證結果。
4. 研究報告撰寫內容之討論。

柒、結論：

一、臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討

- (一) 有關簡報內容數模結果與水工模型試驗之入射波，尚未受到折繞射與結構體影響，兩者於港外條件應該趨於一致，需更進一步探討數值模式問題點為何？探討港內模擬情況較有意義。
- (二) 有關水工模型漂沙試驗遠程增做部分，受限於時程因素建議與本年度自辦報告分開討論，後續納入未來研究工作探討；另外，MIKE 21 HD 波引致流部分建議研究人員討論是否能納入分析，以為周延。

二、臺北港鄰近海域歷年地形變遷特性分析

- (一) 建議蒐集歷年淡水河口輸沙量，以利後續臺北港平面侵淤變化因素之探討。
- (二) 臺北港平面侵淤趨勢分析圖，建議可針對臺北港構造物部分以線條標註清楚，以利顯示不同區域之侵淤變化。
- (三) 臺北港南堤以南至林口電廠以北區域之土方量侵淤計算，因臺北港出海口人為浚深因素，恐影響整體之侵淤土方量評估，建議修改土方量計算範圍。

三、馬祖港域能見度探討之研究(1/2)-環境因子特性分析

- (一) 本計畫已完成能見度即時資料品管機制擬定，其包含 11 項程序與 3 項標記(flag)，建議後續可針對各項程序之標記結果進行綜合品管。
- (二) 針對能見度特性分析部分，後續可透過低能見度之實際個案(如濃霧封港事件)，進行各項環境因子探討。

四、110 年主要商港風潮觀測與特性分析

- (一) 年報部分第一章應以港口區分而非港域，後續章節應呈現歷年風力及潮月、季、年相關統計，其中潮位統計有關基準的部分，需區分平均零水位與有基準的資料分別計算。
- (二) 風潮歷線圖應以主要測站為主，不需加上副站或鄰近測站比對。
- (三) 強陣風預警系統精進應固定參數以比對不同事件及 Case 之優缺點。

(四) 暴潮分析應以預測天文潮位與實際潮位相減之歷線圖呈現。

五、110 年主要商港波流觀測與特性分析

(一) 研究報告主要分析測站請以本所觀測站為主。

(二) 研究報告第 2.4.4 節(颱風觀測資料分析)，請於標題及內文增加資料區間說明。

(三) 臺北港微波雷達觀測系統於波高及週期計算仍存在一定限制，系統後續如何修正及規劃請詳加注意；有關微波雷達觀測系統特性、功能及限制，請於研究報告中說明。

(四) 港池靜穩監測資料分析，TP01~TP03 測站遮蔽係數、波高及週期已有分析成果，研究報告撰寫可多加論述。

六、船舶監控預警系統之應用(2/2)-交通量及事故熱點分析應用模組開發

(一) 船舶交通流量自動統計應用模組，應於期末報告增加各港口進出港之交通流趨勢。

(二) 針對本計畫使用自動產生海氣象資料模、船舶交通流量及船舶海難事故統計表格，增加說明相關數據使用用途。

七、水波時尺或時頻分析法之比較與應用(4/4)

(一) 針對數值模擬結果及先前試驗所得資料，以應用時頻分析理論之驗證，請持續進行。

(二) 期能建置完善之數值處理分析程式，以提供本所海象資料分析應用。

(三) 研究若有具體成果建議可投稿期刊。

捌、散會：下午 17 時 30 分

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所港灣技術研究中心第二科 110 年自行研究計畫第 3 次工作會議」

貳、時間：110 年 10 月 19 日(星期二) 上午 9 時 0 分

參、地點：本所港灣技術研究中心 2 樓簡報室

肆、主持人：李科長俊穎

李俊穎

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸安全組		請假
第一科	科長	賴瑞雄
第二科	駐卓人員	劉淑敏
	駐點人員	陳子健
	派遣人員	陳孟宏
	副研究員	劉明宏
	副研究員	許張亮
	研究員	林達達
	研中員	黃茂信
	助理員	楊金吉
	"	林孝文
	派遣人員	張維廉
	副研究員	羅冠翔
	副研究員	張維廉
	副研究員	衛紀作
	技 工	林江澤
	"	陳天時
	副研究員	丁政正
	研究員	許義宏
	助理研究員	曹勝強
第三科	科長	林雅雯

(註：簽到表請掃描成 pdf 檔，若欲與會議紀錄整併成 1 個 pdf 檔，可至「https://www.ilovepdf.com/zh-tw/merge_pdf」，將會議紀錄與簽到表上傳後進行合併，再上傳至公文系統附件區供陳核)

