

臺中港遠程外廓堤水工模型動床漂沙試驗探討

林受勳¹ 李政達² 李俊穎³ 何良勝⁴ 朱志光⁵

¹交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員

²交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

³交通部運輸研究所港灣技術研究中心第二科科长

⁴交通部運輸研究所港灣技術研究中心 退休科長

⁵臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司總工程司

摘要

本文藉由平面水工模型試驗，探討臺中港遠程外廓堤增建設施完成後，所造成港內外之漂沙影響，採用三百分之一之水平比尺，造波條件為夏季、颱風及冬季之規則波，模擬 1、4 年後侵淤變化。試驗結果與臺中港現場海岸地形水深測量成果比較。北防波堤堤頭北側呈現堆積，堤頭西方產生冲刷坑洞，北堤南側顯示微量淤積情形，南堤區域呈現輕微掏刷現象。

一、前言

臺中港遠期規劃方案，北防波堤延伸建置完成後，其配置如圖 1，本研究透過水工模型動床試驗，瞭解所造成漂沙侵淤現象的影響情形，並與數值模擬(臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司，2021)比對。延續交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)於 2019-2021 年執行臺中港漂沙試驗模擬近長程外廓堤增建設施完成後，推估侵淤情況，依相同試驗模擬條件，賡續進行遠程外廓堤增建設施完成後，推估 1、4 年後之侵淤情況比較及影響結果，提出結構物完工後的漂沙趨勢，由於現場漂沙運移機制影響因素甚多，本研究沿用(蘇等，2020)波浪造波搭配不同時期水工模型，推估整體漂沙趨勢變化。

二、試驗作業執行概述

本研究依港研中心往昔從事漂沙試驗之經驗，研析臺灣西部海岸地形變遷之水工模型試驗，應用許等人(1985)之模式可獲致較佳之試驗結果。因此，本試驗沿用(蘇等，2020)之模式比尺。

$$N_H = \mu^{2/5} \lambda^{4/15} N_r N_{D50}^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

$$N_T = \mu^{1/5} \lambda^{2/15} N_r^{1/2} N_{D50}^{1/6} = N_H^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$N_t = \lambda / (\mu)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

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。

從模型相似性觀之，面臨包含廣大海域之海岸動床漂沙模型試驗，其水平方向與垂直方向一般無法採用同比尺，否則在垂直比尺方面將因比尺太小，導致模型水深太淺與波高太小，因此，必需採用平面方向與垂直方向比尺不同之歪比模型。另外，為考量預定應用之現場範圍、試驗水池大小，及考慮應用上列公式與造波機造波能力，本試驗之水平比尺 λ 為 1/300，垂直比尺 μ 為 1/75。

2.1 動床漂沙試驗執行

動床漂沙試驗條件沿用(蘇等，2020)，如表 1，造波條件採規則波波浪入射，季風與颱風波浪之造波方向、造波時間及試驗水深，如下所述：

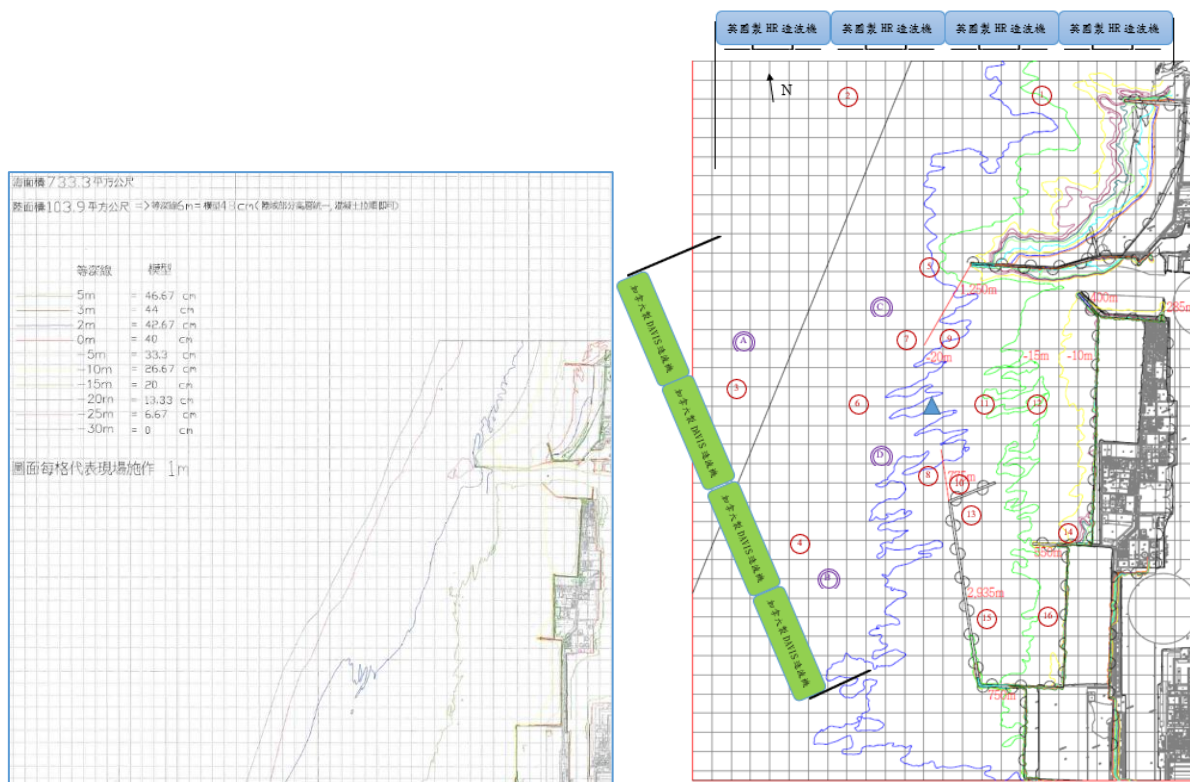
- (1) 夏季季風波浪造波方向 W 方向，採大潮平均高潮位做為季節波浪試驗水深 41.36cm，依預備試驗重現週期需造波時間 6 小時(按照現場實際狀況模擬，先進行夏季季風造波 3 小時後停止，再進行颱風波浪造波 30 分鐘，接著繼續夏季季風造波 3 小時結束)。
- (2) 冬季季風波浪造波方向 NNE 方向，採大潮平均高潮位做為季節波浪試驗水深 41.36cm，依預備試驗重現週期需造波時間 8 小時。
- (3) 颱風波浪造波方向 NNE 方向，使用 50 年迴歸期暴潮水位做為颱風波浪試驗水深 42.59cm，依預備試驗重現週期需造波時間 30 分鐘。

試驗作業依相同試驗模擬條件，賡續進行遠程外廓堤增建設施完成後，推估 1、4 年後之侵淤情況，並利用地面光達量測試驗地形數據，進行比較及影響評估。

表 1 臺中港漂沙試驗造波條件

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	夏季		0.87 m	3.38 cm
		颱風		4.19 m	16.28 cm
		冬季		2.15 m	8.35 cm
週期	1/5.07	夏季		6.5 sec	1.28 sec
		颱風		8.5 sec	1.68 sec
		冬季		7.5 sec	1.48 sec
潮汐	1/34.6	半日潮		12 hr	20.8 min

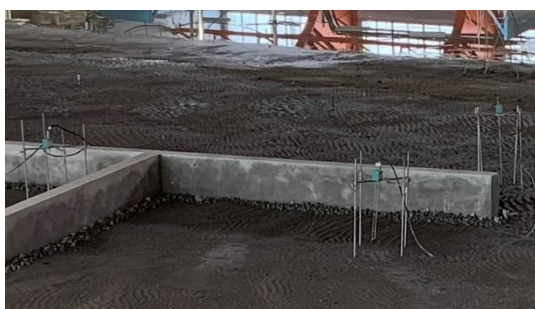
*沿用(蘇等，2020)



*左圖摘自(蘇等，2020)、右圖圖內○符號內數字 1~16 為日本製 KENEK 容量式波高計擺設位置，量取試驗波高；▲符號為挪威製 NORTEK 超音波式剖面流速儀(ADCP)擺設位置，量取試驗流速、◎符號內 A~D 為英國製 HR 波高計擺設位置，量取試驗波高

圖 1 水工模型動床漂沙試驗鋪設 2017 年夏季初始地形及儀器配置示意圖

水工模型動床漂沙試驗波浪及流速儀器設備照片，如圖 2，地形鋪設及遠程外廓堤配置鋪設情形，如圖 3。



日本製 KENEK 波高計



挪威製 NORTEK 超音波式剖面流速儀

圖 2 儀器設備照片

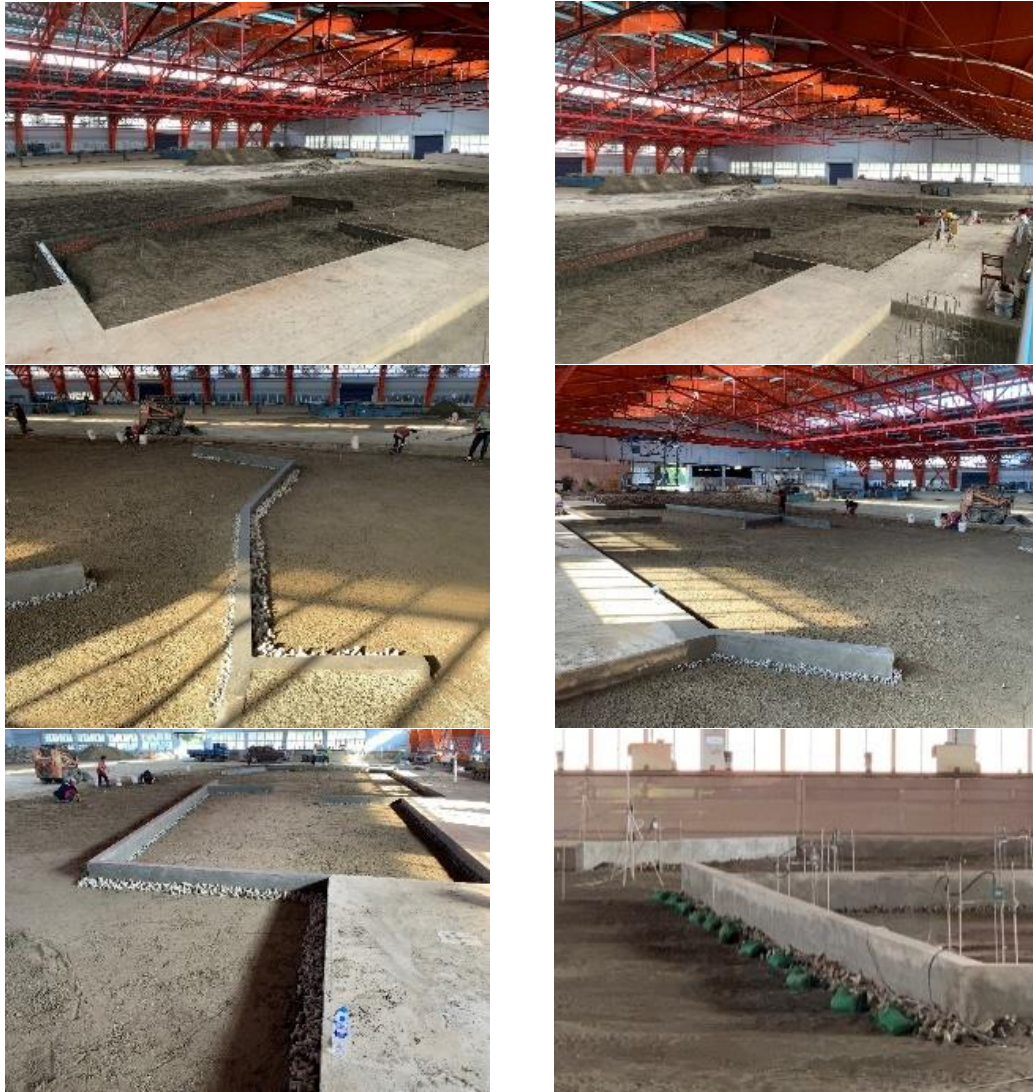


圖 3 臺中港水工模型動床漂沙試驗模型鋪設情形

遠程外廓方案下，夏季、冬季及颱風試驗所量測波高，擷取(24,000 筆)資料後，以時序列統計求取示性波高 $H_{1/3}$ ，並轉換成現場示性波高統計資料，如表 2，顯示編號 11-16 波高計在季風波浪下所量測轉換成現場之示性波高，均小於 1 公尺。

表 2 遠程外廓方案冬夏季及颱風試驗量測波高轉換成現場波高統計表

波高計編號	轉換後現場示性波高(公尺)		
	W夏季	NNE颱風	NNE冬季
Ch1	0.308736	3.262275	2.622365
Ch2	0.28218	3.632802	3.688348
Ch3	0.764845	1.903583	1.276154
Ch4	0.330396	2.404655	1.929243
Ch5	0.752885	4.406303	2.409168
Ch6	0.974251	2.497961	2.259977
Ch7	0.405938	2.391461	1.878745
Ch8	0.344211	4.832534	1.528466
Ch9	0.56882	2.24841	1.764225
Ch10	0.235353	2.063109	1.335696

Ch11	0.340765	1.515132	0.738476
Ch12	0.787854	1.556531	0.807657
Ch13	0.177984	1.436154	0.514046
Ch14	0.526655	1.53714	0.773337
Ch15	0.681833	1.499925	0.721543
Ch16	0.124163	1.392651	0.605473

遠程外廓方案下，航道口於未來近遠程外廓堤完成後，夏季季風及冬季季風條件下所量測進出港口附近之流速平均值及流向值，依式(4)在擷取(24,000 筆)資料後，將試驗值轉換現場流速值資料，如表 3。

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

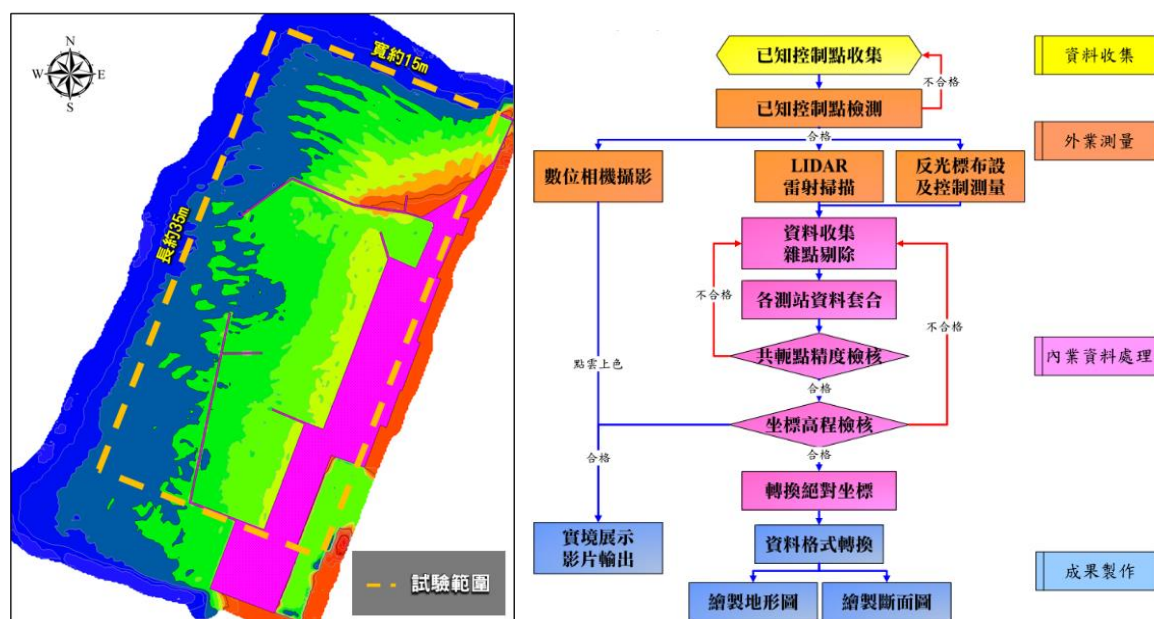
式中 v_p 為轉換現場流速值資料

表 3 遠程外廓堤配置漂沙試驗換算冬夏季流速及流向值

試驗造規則波量測航道出入口位置流速平均值(cm/s)			
W(夏)	流向	NNE(冬)	流向
55.6	NNE	78.2	ENE

2.2 水工模型漂沙試驗地形光達測量

本研究針對水工模型試驗場進行地形測量計算，採用地面光達進行陸域地形全面測量，雷射掃描儀無法施測區域則以空載光達測點補足，地面光達測量設備使用奧地利製 RIEGL VZ400i 型 3D 地面雷射掃描儀器，搭配 Nikon D850 數位相機 4,570 萬畫素，掃描速度每秒達 500,000 點，掃描方式為縱向掃描，水平視角 360 度，垂直視角 100 度，單點平均精度 3mm。依照地形變化，於測區佈設 17 個反光規標，由已知控制點以導線測量方式施測規標平面坐標及高程，做為平面及高程控制，進行全區域陸域地形特徵高程點掃描。其測繪範圍與作業流程，如圖 4。



臺中港漂沙地形光達掃描工作照片及地面坐標套合精度與成果圖，如圖 5 及圖 6 所示，點雲顯示由上而下呈現 3 次量測成果，其水工模型試驗漂沙各測次配置之代表值，如表 4，分別代表 2017 年初始地形配置、遠程外廓堤增建波浪作用經 1 年後(2018 年)地形、遠程外廓堤增建波浪作用經 4 年後(2021 年)地形資料。



圖 5 地形光達掃描工作照片

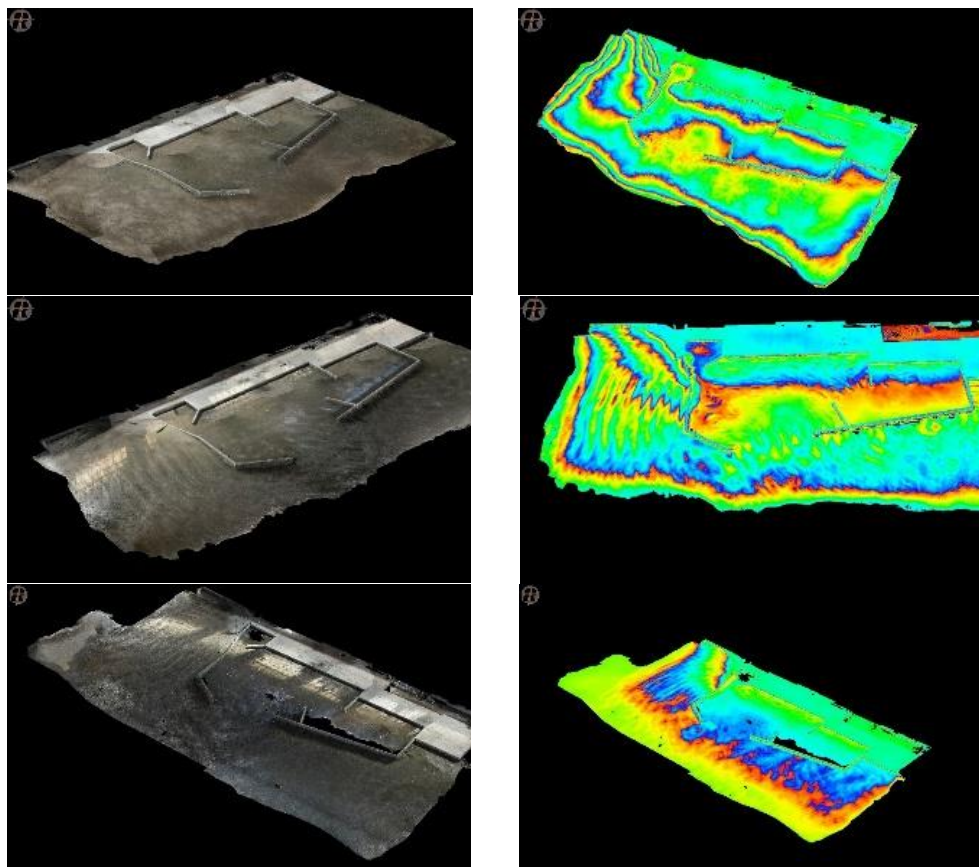


圖 6 漂沙地形光達掃描成果圖

2.3 水工模型漂沙試驗地形測量侵淤分析

本研究共施作 1 種配置，為配合臺中港遠程外廓堤擴建計畫，外廓堤工程包含南內外廓堤延伸 750m、北外廓堤平行海岸延伸 1,250 m、北內堤延伸 550m，以水工動床漂沙試驗模擬外廓

堤興建後所產生地形變化影響，進行 2017 年初始地形配置、遠程外廓堤增建波浪作用經 1 年後地形、遠程外廓堤增建波浪作用經 4 年後地形資料，並與各測次掃描日期及對應地形比較。

表 4 水工模型試驗漂沙各測次配置表

測次	測量日期	地形配置
1	2021/11/10	2017 年初始地形配置
2	2021/11/16	遠程外廓堤增建波浪作用經 1 年後(2018 年)地形
3	2021/12/06	遠程外廓堤增建波浪作用經 4 年後(2021 年)地形

為利於分析將臺中港水工模型動床漂沙試驗由北至南分為 3 區進行比較，A 區為臺中港北防波堤以北，B 區為北防波堤至中油石化專區外海突堤，C 區則為中油石化專區外海突堤以南區域(如圖 7)。使用水深測量專用軟體，每次地形成果以克利金(Kriging)法進行數值計算，並依模型水平縮尺 1/300 及垂直縮尺 1/75 之比例放大後進行分析比較，將計算結果整理為各階段侵淤變化圖，如圖 8 所示，各區清淤土方量，如表 5 所示。

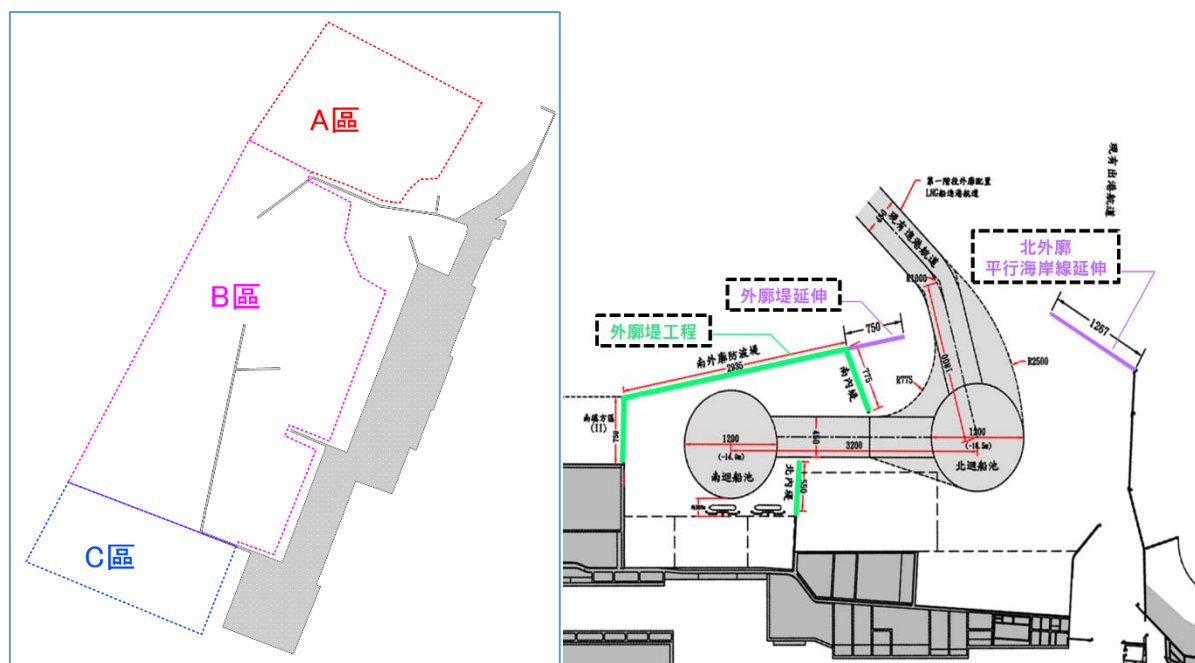


圖 7 港區漂沙分區及配置示意圖

初始地形經 1 年漂沙試驗：模擬外廓堤工程完成後，北防波堤外側大部分呈現侵蝕，北堤頭內側則產生部分淤積堆疊，於北防沙堤至北防波堤間有大範圍掏刷現象，變化最大量區域多達-9m。港內由於堤防阻擋作用，地形變化相對較小；在南外廓堤外側以掏刷為主，伴隨零星堆積，顯示的變化量在-4m~+3m 之間。

初始地形經 1 年與經 4 年漂沙試驗比較：經過全程水工模擬漂沙試驗，可見到北防波堤北側區域大部分呈現帶狀掏刷，且於北防波堤北側堤腳有大量體的掏刷，變化最大多達-8m；北防沙堤至北防波堤間掏刷現象趨緩並有轉為淤積趨勢。南外廓堤外側由第 1 年侵蝕轉為淤積，變化量在-3m~+4m 之間，顯現侵蝕堆積互相持平的現象。

初始地形經 4 年漂沙試驗比較：北防波堤北側部分呈現帶狀掏刷，且於原北防波堤北側堤腳有大量沙體的掏刷，變化最大多達-6m；於北防沙堤至北防波堤間有明顯掏刷現象。南迴船池附近淤積量在 0.5m 內；經過 4 年作用下在南堤外側侵蝕與堆積持平，南堤中段堤腳有明顯掏刷現象。南外廓堤南方區域顯現侵淤互現，侵蝕略大於淤積，4 年土方變化減少約 42.54 萬立方公尺。

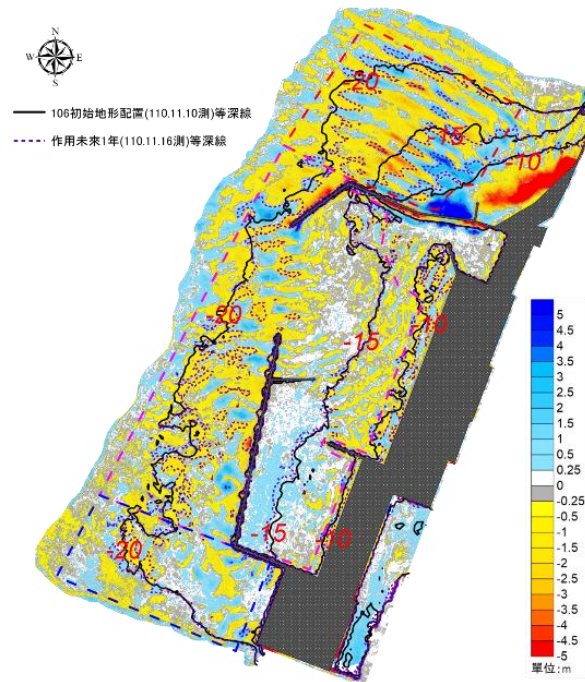


圖 8a 初始地形經 1 年漂沙試驗地形差異圖

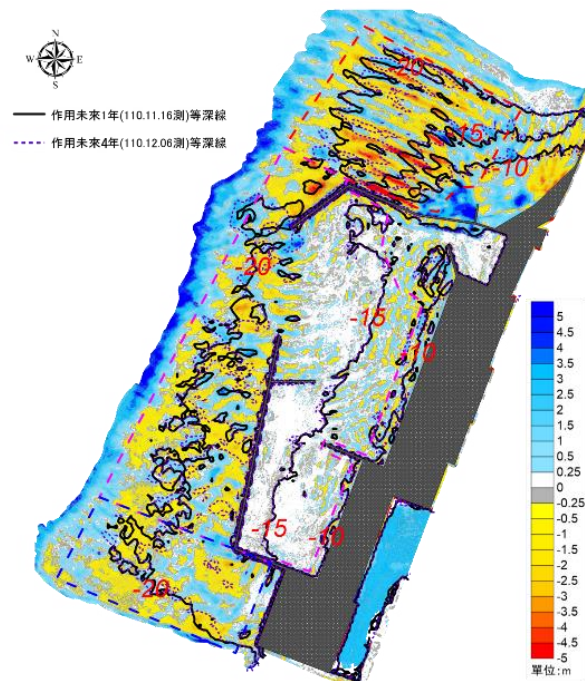


圖 8b 初始地形經 1 年與經 4 年漂沙試驗地形差異圖

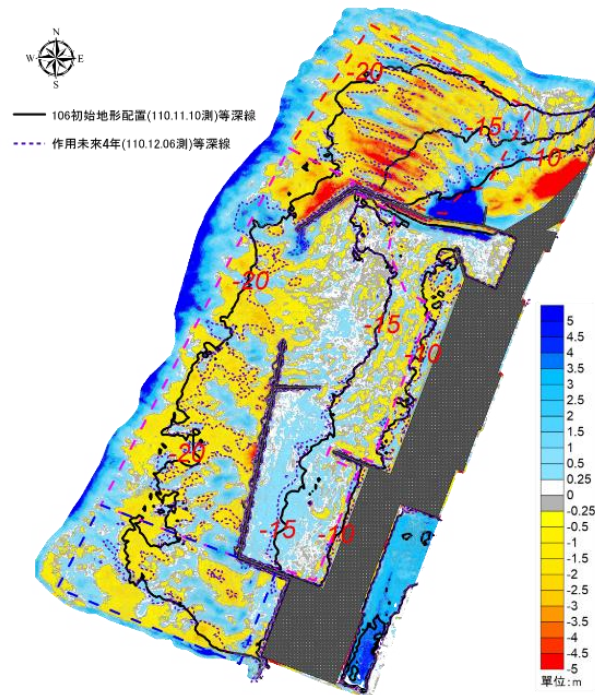


圖 8c 初始地形經 4 年漂沙試驗地形差異圖

表 5 各區清淤土方量統計表(萬立方公尺)

配置	區段	淤積土方量	沖刷土方量	合計土方量
2017 年初始地形模擬漂沙作用 1 年	A	308.26	-517.77	-209.51
	B	426.59	-837.10	-410.51
	C	105.53	-115.05	-9.53
2018 年地形模擬漂沙作用經過 4 年	A	296.43	-697.27	-400.83
	B	753.08	-630.92	122.16
	C	172.70	-206.30	-33.60
2017 年與 2021 年地形模擬漂沙比較	A	291.96	-902.30	-610.34
	B	708.69	-997.04	-288.34
	C	197.44	-239.97	-42.54

三、光達測量與試驗結果討論

傳統水工試驗地形測量僅以人工利用經緯儀進行點狀量測，並輔以單調線條繪製平面地形圖，成果難呈現細緻地形變化與突顯對施工區域土地與結構物之空間位置關係。藉由地面光達掃描技術，測量成果可獲得高密度及高精度三維空間資訊。

3.1 遠程外廓堤增建設施完成後之水工模型動床漂沙試驗與討論

本研究依據臺中港遠程外廓堤規劃於南填方區及石化專區外興建外廓堤設置 LNG 港，配合設計水深調整海域地形，經規則波漂沙作用後 4 年後之地形分析評估，與同試驗條件波浪作用 1 年後之地形進行侵淤比較，水工模型漂沙試驗情形如圖 9。未來港域完成後北側 A 區域呈現侵蝕，B 區域港內由於堤防阻擋作用，顯現侵蝕的現象，南側 C 區域呈現地形變化相對較小。

模擬規劃設計的遠程外廓堤水工模型漂沙試驗造波第 1 年後，放水觀察模擬試驗之地形變化初步結果及進行每年預估補沙作業，以利之後繼續第 2、3 年的模擬推估試驗。除此，並於北防波堤北側堤基及堤腳掏刷處給予模型消波塊的拋放，觀察試驗結果與保護成效。

延伸遠程外廓堤第 1 年試驗模擬造波後，結果顯示原北防波堤模型北側堤外大量掏沙現象，因此，附近產生明顯掏空刷深坑洞，符合目前現場實際狀況，延伸的 1,250m 北防波堤內側產生淤積，為第 2 年試驗模擬造波後之影響結果。

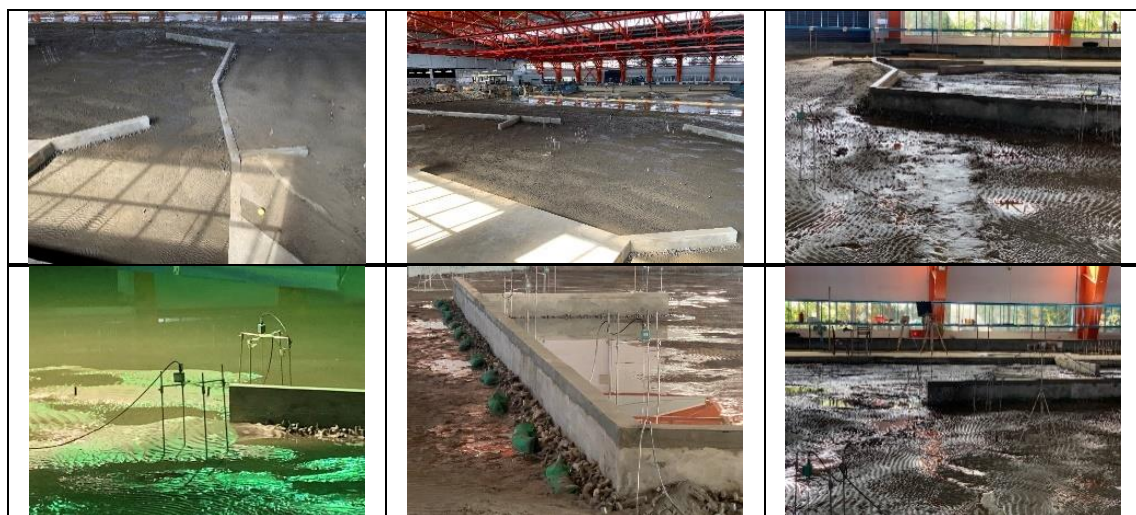


圖 9 臺中港遠程外廓堤水工模型漂沙試驗情形

3.2 海岸分區之地形侵淤特性分析與試驗比較

外廓堤延伸模型試驗第 2 年後，未來應於堤址及基礎處拋放護基設施或消波塊石，藉以防止堤身傾倒或歪斜破壞，此現象可藉由斷面試驗進行研究，同時另有堤面越波問題需予探討。

(1) 冬季波浪 1,250m 北外廓堤頭，有明顯沿堤面越波現象(試驗照片，如圖 10)，於堤基及堤底部分施以消波塊增設佈放，來觀察改善成果。



圖 10 冬季波浪沿北外廓堤頭及堤面越波照片

(2)同時在規劃之南外廓堤外側預計施行生態廊道(依臺灣港務股份有限公司生態廊道構想,本試驗以碎石網袋間隔配置),加以帶狀消波塊增設佈放,來觀察其固沙改善成果。由於水深臨界20m等深線附近,理論上無法達漂沙啟動條件,試驗結果顯示水深亦無明顯變化。

(3)若考慮大型塊石取得不易或施工難度容易性,可透過長期或定期之浚挖淤沙後拋置方式,進行填平補充,以利生態廊道的可行性。

原北防波堤外側附近產生明顯掏空刷深現象,補充消波塊進行模型試驗第2年後,在堤址及基礎處看見產生淤積固沙護基功效。本研究同時蒐集臺中港鄰近海岸實測水深資料(2017~2021年),未來將與試驗相同之A、B、C分區進行海岸地形變化與統計漂沙數量分析,本次分析成果為北防波堤堤頭北側呈現堆積,堤頭西方產生沖刷坑洞,北堤南側顯示微量淤積情形,南堤區域呈現輕微掏刷現象。

四、結論

水工模型漂沙試驗以遠程外廓堤增建設施完成後,進行未來1、4年後的侵淤情況模擬,其中依序夏季季風、颱風、冬季季風等波浪條件造波,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,做為港灣規劃參酌。另北堤延伸段1,250m堤頭越波現象,經計算胸牆墊高由原先現場沉箱設計高度+8m,增加約4m高度後為+12m,其堤頭及原北堤冬季季風越波現象改善許多。但由於本動床漂沙試驗之造波採規則波方式進行,長時間造波之入射波浪經結構物反射、折射後,仍有呈現波能重疊集中的情形,初步研判防波堤外某些固定區域易產生駐波後造成底床掏挖刷深情形,或導致波浪沿北堤延伸段堤頭越波現象,而未來值得探討的是以不規則波進行試驗,可更符合實際自然物理現象呈現及結果。

除此,本試驗並針對臺中港現場水深地形測量資料整理與動床漂沙試驗結果進行分析,根據臺中港遠程外廓堤增建設施完成後,可能造成之漂沙效果及港內外影響,進行試驗量測數據分析比較,綜整所有試驗結果,做一整體性敘述和評估說明,可提供臺中港未來港灣發展規劃時滾動修正參考依據。

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2021),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成果報告(初稿)修正方案,臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司。
2. 李政達、林受勳、李江澤、陳天時、李俊穎(2021),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。
3. 衛紀淮,洪維屏,林受勳,李政達(2019),離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討(3/4),交通部運輸研究所。
4. 蘇青和,洪維屏,陳鈞彥(2020),離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討(4/4),交通部運輸研究所。

5. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2020)，臺中港 40 年期主計畫委託技術服務期末報告定稿，臺灣港務股份有限公司。
6. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，浩海工程顧問股份有限公司(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)報告書期末報告，臺灣港務股份有限公司。
7. 宇泰工程顧問有限公司(2017)，臺中港液化天然氣接收站計畫可行性研究報告書(LNG 港埠工程可行性評估)，台灣電力股份有限公司。
8. 蘇青和、李俊穎、蔡立宏、廖慶堂、蔣敏玲、衛紀淮、羅冠顯、林受勳、傅怡釧、陳鈞彥(2017)，2014 年臺灣海氣象觀測資料統年報(臺中港域觀測海氣象資料)，交通部運輸研究所臺灣技術研究中心。
9. 張金機，何良勝，簡仲璟等(1986)，基隆新港不規則波水工模型遮蔽試驗報告，台灣省交通處臺灣技術研究所。