

115-016-7E16
MOTC-IOT-114-H2CA001e

長週期波斷面模型試驗(3/3)－ 消能結構物型式之可行性研究



交通部運輸研究所

中華民國 115 年 3 月

115-016-7E16
MOTC-IOT-114-H2CA001e

長週期波斷面模型試驗(3/3)－ 消能結構物型式之可行性研究

著者：許師瑜、林受勳

交通部運輸研究所

中華民國 115 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

長週期波斷面模型試驗. (3/3) : 消能結構物型式之
可行性研究 / 許師瑜, 林受勳著. -- 初版. -- 臺北
市 : 交通部運輸研究所, 民 115.03

面 ; 公分

ISBN 978-986-531-754-6(平裝)

1.CST: 波動 2.CST: 數值分析

351.941

115001536

長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究

著 者：許師瑜、林受勳

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.iot.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 115 年 3 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 46 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：250 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸科技及資訊組•電話：(02)2349-6789

國家書店松江門市：104472 臺北市中山區松江路 209 號•電話：(02)2518-020

五南文化廣場：400002 臺中市區中山路 6 號•電話：(04)2226-0330

GPN：1011500198

ISBN：ISBN 978-986-531-754-6 (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。

GPN : 1011500198

定價 250 元

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：長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-531-754-6 (平裝)	政府出版品統一編號 1011500198	運輸研究所出版品編號 115-016-7E16	計畫編號 MOTC-IOT-114-H2CA001e
主辦單位：運輸技術研究中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：許師瑜 研究人員：林受勳 參與人員：李江澤、陳天時 聯絡電話：(04)26587125 傳真號碼：(04)26560661			研究期間 自 114 年 01 月 至 114 年 12 月
關鍵詞：長週期波、港灣振盪、消能結構物、複合式、窄航道			
摘要： 本計畫以 3 年期研究針對長週期波各相關議題進行探討。第 1 年主要蒐集並回顧國內外長週期波動特性相關研究及其所可造成的災害與成因，其次綜整長週期波可能造成之破壞機制與對策。第 2 年選定花蓮港 7 號碼頭做為個案研究主軸，以水工模型斷面試驗研擬消滅長週期波浪作用的消能結構物之雛形，並首次提出複合式消能結構物的概念。本年度綜整前 2 年的研究成果，探討複合式消能結構物的初步功能性研發，以解決花蓮港內在異常海象期間的長週期波動問題。研究團隊使用水工模型斷面試驗，以局部改裝基本模型，開發並測試多種單元性配置。試驗結果顯示，複合式消能結構物之概念，有利於針對各港灣不同海象時期之水位與波浪條件，依消波機制進行個別測試、評估與整合。本計畫另針對花蓮港窄航道的岸壁，初步研擬並測試新型消能岸壁型式。相關研究成果亦將提供平面水工模型試驗參考，並可提供後續工程實務的改建規劃之應用。			
成果效益： 本計畫以複合式消能結構物之概念，提出適用花蓮港內港區，消滅長週期波浪能量之結構物型式方案，以減少港灣內長週期波浪振盪而造成避湧行動的次數，並降低港內船隻斷纜發生機率。此方法可應用於國內各港灣研擬適切的消能結構物參考。			
提供政府單位應用情形： 提供臺灣港務股份有限公司、經濟部水利署、農業部漁業署及各地方政府提升港灣靜穩度及推動海岸防護政策之參據，以及本所海岸及港灣工程相關研究後續探討運用。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
115 年 3 月	190	250	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Long Period Wave Flume Tests(3/3) - Feasibility Study on Types of Energy Dissipation Structures			
ISBN (OR ISSN) 978-986-531-754-6 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011500198	IOT SERIAL NUMBER 115-016-7E16	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-114- H2CA001e
DIVISION: TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PROJECT ADVISOR: Shih-Yu Hsu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Shou-Shiun Lin PROJECT STAFF: Chiang-Tse Lee, Tian-Shih Chen PHONE: 04-26587125 FAX: 04-26560661			PROJECT PERIOD FROM January 2025 TO December 2025
KEY WORDS: Long period waves, Harbor oscillations, Wave dissipation structures, Composite, Narrow Channel			
<p>ABSTRACT:</p> <p>This three-year study explores the issue about the long-period waves in Hualien Port, Taiwan. The first year primarily collected and reviewed domestic and international research on the characteristics of long-period waves in harbors, their potential hazards and causes, and then synthesized the destructive mechanisms and countermeasures caused by long-period waves. In the second year, Pier 7 of Hualien Port was taken as a case study by using 2-D hydraulic model tests in the wave flume to develop a prototype energy-dissipating structure to mitigate the effects of long-period waves. The concept of composite wave dissipation structure was proposed. In this third year, the two year's research results are integrated to explore the preliminary functional development of a composite energy-dissipating structure to address the problem of long-period waves during extreme sea states in Hualien Port. Various modular configurations composited by several wave dissipation parts with different mechanisms have been tested. The results show that using the concept of the composited wave-dissipating structure is more effective than using a single, unified structure. For each part with different wave dissipation mechanism can be more clearly tested, assessed, replaced and organized, including their interactions and couplings under the water elevation and wave conditions of the target port in different sea state. Additionally, several new wave-dissipating structures were initially developed and tested for the embankment of a narrow channel. The research results are also helpful for the following model tests in wave basin and applied to subsequent engineering practice and construction planning.</p> <p>Results and benefits :</p> <p>This project proposed the concept of a composite energy dissipation structure to reduce the energy of long-period waves in Hualien Port. The research results and its procedures can also be applied to other harbors to seek their suitable prototypes.</p> <p>Possible Governmental Applications :</p> <p>To provide the available information on the improvements of harbor tranquility and shore protection strategies for transportation department of central or local governments, port authorities, Water Resource Agency.</p>			
DATE OF PUBLICATION March 2026	NUMBER OF PAGES 190	PRICE 250	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XIII
第一章 緒論.....	1-1
1.1 研究緣起與目的.....	1-1
1.2 花蓮港簡介.....	1-4
1.3 研究項目與內容.....	1-10
1.4 研究方法.....	1-11
第二章 文獻回顧.....	2-1
2.1 長週期波相關研究.....	2-1
2.2 消減港灣長週期波相關研究.....	2-17
2.3 小結.....	2-24
第三章 碼頭消能結構物水工斷面模型試驗.....	3-1
3.1 先期研究-花蓮港內港碼頭改善選定之數值模擬.....	3-1
3.1.1 數值模型配置設計.....	3-2
3.1.2 數值模擬結果分析.....	3-4
3.1.3 數值模擬結果討論.....	3-8
3.2 水工斷面試驗室簡介.....	3-9

3.3	新型消能碼頭的研擬.....	3-12
3.4	消能碼頭水工斷面模型試驗設計.....	3-18
3.5	消能碼頭水工斷面模型試驗分析.....	3-21
3.5.1	理論成分波形的線性疊加與觀察.....	3-22
3.5.2	波形時序列之觀察.....	3-24
3.5.3	FFT 分析波譜圖之觀察.....	3-28
3.5.4	零上切個別波高及週期時序圖之觀察.....	3-30
3.5.5	反射率分析的觀察.....	3-32
3.6	消能碼頭水工斷面模型試驗結果.....	3-36
3.6.1	FT01 系列.....	3-36
3.6.2	FT02 系列.....	3-38
3.6.3	FT04 系列.....	3-42
3.7	單元式消波效果的交叉比較.....	3-46
3.8	波高計配對的討論.....	3-50
3.9	小結.....	3-52
第四章	窄航道側壁消能結構物水工斷面模型試驗.....	4-1
4.1	前言.....	4-1
4.2	窄航道消能岸壁的水工模型設計.....	4-5
4.3	窄航道消能岸壁的水工模型試驗與分析.....	4-12
4.4	小結.....	4-22

第五章 結論與建議.....	5-1
5.1 結論	5-1
5.2 建議	5-3
參考文獻.....	參-1
附錄一 期末報告審查意見處理情形表.....	附 1-1
附錄二 期末審查簡報.....	附 2-1
附錄三 專家學者座談會議紀錄.....	附 3-1
附錄四 工作會議紀要.....	附 4-1

圖目錄

圖 1.1 花蓮港位置示意圖.....	1-4
圖 1.2 花蓮港現況平面配置圖.....	1-5
圖 1.3 花蓮港專區規劃示意圖.....	1-6
圖 1.4 花蓮港內港#7 碼頭.....	1-8
圖 1.5 花蓮港內港#8 碼頭.....	1-9
圖 1.6 花蓮港外港#17 與#18 碼頭.....	1-9
圖 2.1 海洋波浪分類(改自 Munk, 1950)	2-1
圖 2.2 花蓮港 2005 年波浪觀測站分布圖.....	2-6
圖 2.3 C06 測站之特性波高與週期分布時序圖	2-7
圖 2.4 C10 測站之特性波高與週期分布時序圖	2-8
圖 2.5 C12 測站之特性波高與週期分布時序圖	2-9
圖 2.6 C14 測站之特性波高與週期分布時序圖	2-10
圖 2.7 C16 測站之特性波高與週期分布時序圖	2-11
圖 2.8 C17 測站之特性波高與週期分布時序圖	2-12
圖 2.9 C18 測站之特性波高與週期分布時序圖	2-13
圖 2.10 自然海灘.....	2-18
圖 2.11 人工海灘.....	2-18
圖 2.12 人工斜坡.....	2-19
圖 2.13 直立型消能結構物.....	2-21
圖 2.14 口袋型消波灘(Thompson et al., 2004).....	2-22
圖 2.15 大島和森屋(2005)導水式開孔沉箱模型.....	2-23

圖 2.16 低反射性沉箱示意圖	2-23
圖 3.1 數值模擬範圍及地形	3-3
圖 3.2 數值網格、測點位置及討論水域	3-3
圖 3.3 非定值反射率設定值	3-4
圖 3.4 花蓮港 3~250 秒週期入射波作用之波高增幅曲線比較圖	3-5
圖 3.5 花蓮港不同配置與週期之波高增幅係數($0.5 < K_D < 2.0$)分布情形	3-6
圖 3.6 LAY01KR1(完全反射)與 LAY01KR3(完全消波)的 K_D 差值 ..	3-7
圖 3.7 LAY01KR1(完全反射)與 LAY02KR2(非定值反射)的 K_D 差值	3-7
圖 3.8 本所水工斷面試驗室	3-9
圖 3.9 斷面水槽試驗觀測段	3-9
圖 3.10 造波設備	3-10
圖 3.11 波高量測設備	3-11
圖 3.12 消能結構物氣室的形成	3-13
圖 3.13 FT01 系列	3-15
圖 3.14 FT02 系列	3-16
圖 3.15 FT04 系列	3-17
圖 3.16 試驗水槽佈置情形	3-19
圖 3.17 試驗地形佈置情形	3-19
圖 3.18 消能碼頭結構物試驗之波高計率定結果	3-20
圖 3.19 波浪傳播時間計算示意圖	3-22
圖 3.20 二維理論倍頻波形之線性疊加	3-23

圖 3.21	兩個三維理論波形之線性疊加.....	3-24
圖 3.22	空水槽(FT00)試驗的 8 支波高計波形時序圖	3-25
圖 3.23	FT01 試驗週期 1 秒重複 3 次的 8 支波高計波形時序圖....	3-26
圖 3.24	FT01 試驗週期 5 秒重複 3 次的 8 支波高計波形時序圖....	3-27
圖 3.25	FT01 試驗 8 支波高計之波譜圖	3-29
圖 3.26	FT01 試驗 8 支波高計之個別波高/週期時序圖.....	3-31
圖 3.27	FT01 試驗波高計 G1 配對之反射率時序圖	3-33
圖 3.27(續)	FT01 試驗波高計 G1 配對之反射率時序圖	3-34
圖 3.27(續)	FT01 試驗波高計 G1 配對之反射率時序圖	3-35
圖 3.28	FT01 之波列分析法的反射率分布圖	3-36
圖 3.29	FT03 之波列分析法的反射率分布圖	3-37
圖 3.30	FT01 與 FT03 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖	3-37
圖 3.31	FT02 之波列分析法的反射率分布圖	3-39
圖 3.32	FT09 之波列分析法的反射率分布圖	3-39
圖 3.33	FT10 之波列分析法的反射率分布圖	3-39
圖 3.34	FT11 之波列分析法的反射率分布圖	3-40
圖 3.35	FT02 與 FT09 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖	3-40
圖 3.36	FT02 與 FT10 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖	3-40
圖 3.37	FT02 與 FT11 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖	3-41

圖 3.38	FT10 與 FT11 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖 ...	3-41
圖 3.39	FT04 之波列分析法的反射率分布圖	3-43
圖 3.40	FT05 之波列分析法的反射率分布圖	3-43
圖 3.41	FT06 之波列分析法的反射率分布圖	3-43
圖 3.42	FT07 之波列分析法的反射率分布圖	3-44
圖 3.43	FT08 之波列分析法的反射率分布圖	3-44
圖 3.44	FT04 與 FT05 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖 ...	3-44
圖 3.45	FT05、FT06 與 FT07 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖	3-45
圖 3.46	FT04 與 FT08 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖 ...	3-45
圖 3.47	FT04 與 FT06 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖 ...	3-45
圖 3.48	FT01、FT02 與 FT06 不同波高之反射率分布及迴歸曲線比較	3-46
圖 3.49	FT01 與 FT02 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較	3-47
圖 3.50	FT01 與 FT06 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖 ...	3-47
圖 3.51	FT09 與 FT10 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖 ...	3-48
圖 3.52	FT06、FT07 與 FT08 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖	3-49
圖 3.53	FT04(H=5 公分)波高計配對之反射率分布	3-50

圖 3.54	FT04(H=10 公分)波高計配對之反射率分布	3-51
圖 4.1	突堤群與海岸漂沙(美國海岸工程手冊 Part V, 2002).....	4-2
圖 4.2	不同渠道斷面的速度分布(Chow, 1959)	4-2
圖 4.3	水流通過障礙物之流跡線(Van Dyke, 1982).....	4-3
圖 4.4	水流通過不同大小凹陷地形之流跡線(Van Dyke, 1982)	4-3
圖 4.5	水流通過障礙物之流跡線(Ramoul 等人, 2019)	4-4
圖 4.6	渦流型導波式岸壁結構物(基本型一)示意圖	4-5
圖 4.7	渦流型導波式岸壁結構物(基本型二)示意圖	4-6
圖 4.8	通用型試驗構架示意圖.....	4-6
圖 4.9	試驗模型一(NC01)示意圖.....	4-7
圖 4.10	試驗模型二(NC02)示意圖.....	4-7
圖 4.11	試驗模型三(NC03)示意圖.....	4-7
圖 4.12	試驗模型四(NC04)示意圖.....	4-8
圖 4.13	試驗水槽模型及量測設備配置圖.....	4-8
圖 4.14	窄航道消能側壁試驗之波高計率定結果.....	4-9
圖 4.15	試驗佈置完工照片	4-9
圖 4.16	5 種模型不同造波條件下各波高計配對之 K_R -T 分布圖 ...	4-13
圖 4.17	各波高計之 m_0 能量分布，5 種模型/週期 1.5 秒/波高 10 公分	4-14
圖 4.18	各波高計之 m_0 能量分布，5 種模型/週期 5 秒/波高 10 公分	4-15
圖 4.19	波高計 G1 配對之入/反射波振幅參數，5 種模型/週期 1.5 秒/波 高 5 公分.....	4-17

圖 4.20 波高計 G1 配對之入/反射波振幅參數，5 種模型/週期 5 秒/波 高 5 公分.....	4-18
圖 4.21 波高計 G1 配對之入/反射波振幅參數，5 種模型/週期 1.5 秒/波 高 10 公分.....	4-19
圖 4.22 波高計 G1 配對之入/反射波振幅參數，5 種模型/週期 5 秒/波 高 10 公分.....	4-20
圖 4.23 5 種模型不同造波條件下各波高計配對之反射率參數	4-21

表 目 錄

表 1-1 花蓮港內港碼頭簡介	1-7
表 1-2 花蓮港外港碼頭簡介	1-8
表 2-1 各測站之特性波高與相對週期跨閾值統計	2-14
表 2-2 各測站之特性週期與相對波高跨閾值統計	2-15
表 2-3 各測站之最大波高/週期值與相對週期/波高	2-16
表 3-1 9 種位置岸壁類型的反射率設定情形	3-4
表 3-2 HR Wallingford 造波機之造波能力範圍	3-11
表 3-3 11 種模型之單元設計	3-14
表 3-4 碼頭消能結構物較優之單元型式	3-53

第一章 緒論

1.1 研究緣起與目的

臺灣為一複雜性的海島型環境，其海岸型態與海象條件具有高度區域差異性。東部海岸線多呈曲折之岩岸地形，且直接面向深邃的太平洋，長期暴露於開放海域的海洋氣候之下；相對而言，西部海岸則以砂質或礁石海岸為主，近岸水深變化較為平緩，並伴隨多處沙崙地形分布，其西側臨接臺灣海峽，與中國大陸相距僅百餘公里，因而同時受到海峽型氣候與大陸型氣候的共同影響。

在氣候特性方面，我國海域於夏季主要受西南季風主導，冬季則轉為東北季風；春、秋兩季為季風交替之過渡期。然而，5 至 12 月期間皆有颱風侵襲紀錄，且全年亦頻繁受到鋒面系統影響。由季風所引致之波浪，主要反映季節性氣壓配置與氣流場的變化，其生成機制相對穩定，波浪特性亦較具規律性。相較之下，颱風波浪則源於強烈熱帶氣旋系統，其中心氣壓常低於 950 mb，並由中心向外近似同心圓狀遞增至約 1020 mb。此一顯著氣壓梯度所驅動的風場，配合柯氏力作用，使風向呈現旋轉並隨颱風移動，促使波浪在作用風域內持續成長，直至離開風場後轉化為週期較長的湧浪。

就港灣水域之波動特性而言，只要鄰近廣闊水體(如外海或大型湖泊)，港內存在長週期波動幾乎無可避免。此類波動多起因於近地區強風與巨浪等極端氣候事件，亦可能源自遠端廣闊海域所傳輸之湧浪，而後者往往具有更長的波浪週期。當長週期波浪之有效波長與港灣之特徵長度呈現特定倍數關係時，極易誘發更大更長的區域型港池振盪，甚至形成長時間難以消散之共振現象。雖然實際港內振幅不致達到理論分析中之無限放大，但在多重反射波疊加下，其振幅仍可能逼近完全反射條件下入射波振幅之兩倍。

此類大振幅港內振盪，將顯著加劇船舶之上下運動(heaving)、側移(swaying)、俯仰(pitching)與滾動(rolling)，嚴重影響船舶繫纜、裝卸作業效率與人員上下船安全，甚至迫使港口暫時封閉；海水溢淹上岸亦屬常見的風險。即便在波長未與港灣特徵尺度形成共振條件下，長週期波浪所引發之水平流動仍是當前港區安全管理中最受關注的問題之一。其原因在於大量水體動能於半個週期內朝同一方向運動，造成船舶產生進退(surging)與偏航(yawing)行為，使繫纜系統長時間承受反覆且持續之拉力。一旦繫纜設施不堪負荷而發生斷裂，失控船舶在強風浪環境下極可能與其他船舶或港灣設施碰撞，甚至導致傾覆或沈沒事故。

基於上述風險，即使部分港灣過去未曾發生顯著災損，各港灣管理單位仍普遍投入大量心力與資源，積極研擬並採取各種工程或管理對策，以期有效削減港灣水域中由長週期波動所帶來的潛在危害。

花蓮港自民國 67 年開始規劃及擴建第四期外港區擴建工程，直至民國 80 年完成後，即發現港內存在有長週期波動問題。為了找出長週期振盪(或共振)機制，本所在花蓮港務局的委託下，自民國 78 年起即陸續在港內及港外，展開一系列的長期海象觀測。民國 85 年，本所與花蓮港務局合作舉辦『花蓮港港池振盪及其改善方案研討會』，邀集國內產官學的專家學者共同探討花蓮港的共振問題。也接受建議在港內及港外展開一系列的長期海象觀測，至民國 89 年更擴大至全港內與東防波堤外側，設置多個測波站(最多達 19 個測站)的同步觀測，其間也包括了許多自發性的研究計畫。由於海象觀測蒐集資料相當龐大(民國 78 年至 112 年已經或多或少持續觀測超過 30 年)，惟因人力與物力有限，目前僅能完成基本統計分析，至於與港灣規劃、管理及工程設計所需的海象資料，包含極值分析或經驗統計模式等，則尚需持續累積與統計分析整理。任何改善工程都是需要龐大經費且不可逆，必須謹慎行事，花蓮港的長週期波動問題，至今尚未找到確切且具顯著效益之改善方案。

為此，本所於 112 年 12 月 14 日獲邀參與臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司(以下稱花蓮港務分公司)召開「花蓮港-港池共振內港削減改善討論會議」，並參考會議結論：「因花蓮港內港未來十年規劃轉型朝向發展觀光遊憩，港池共振是花蓮港長久問題，並直接影響內港水域能否做為風帆船或遊艇基地之發展。國內外已有相關消能設施案例，建議可考量花蓮港受限航道段整建為消波岸壁、7 號與 12 號碼頭整建為消波岸壁、9 號至 16 號碼頭間水域增建消能擋浪堤、或其他可能工程方案等，做為削減港池共振之評估方案。」據以定調本計畫之研究目標。

本所考量到改善花蓮港內長週期振盪問題，囿於經費限制與時間考量，如要大規模地改變港形或增設開口，在執行上有很大的困難度，而且任何變更都可能引發新的問題。因此，本計畫規劃以 3 年時間改善現有碼頭型式為研究課題，期望以降低港內長週期波浪能量的方式，減緩花蓮港的長週期振盪，同時達到提高港內的靜穩度之目的。在此前提下，本計畫也嘗試配合花蓮港部分觀測資料的統計分析以及港灣波動各種方案的數值模擬，以滾動式調整來輔助斷面水槽模型試驗的試驗項目與方向的訂定。

1.2 花蓮港簡介

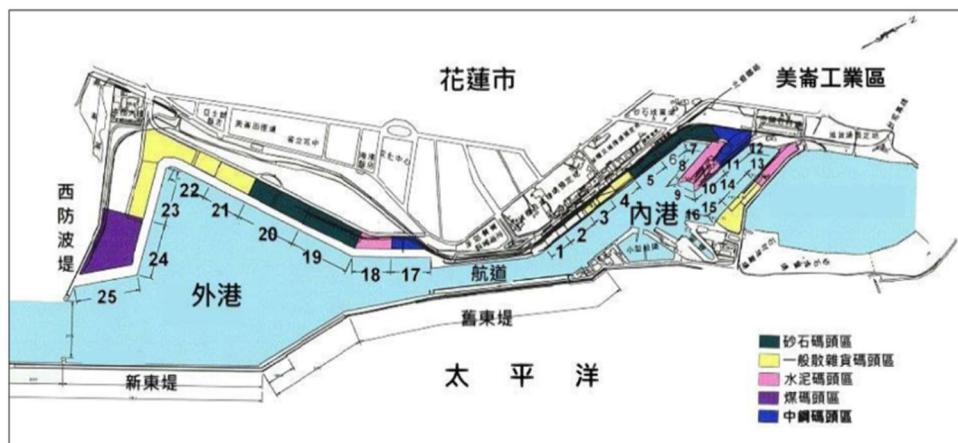
花蓮港是定位為國際商港的人工港，位於臺灣東部海岸(如圖 1.1 所示)，以向外築堤造陸構築方式而成。隨著世界潮流趨勢與對天然資源需求的改變，花蓮港服務的對象逐漸由以貨物為主，部分業務移轉為面向以服務人為主，相對地對於港灣的相關設施及功能，尤其是港灣穩靜度的要求，將會更加提高。

然而花蓮港由於附近海底地形的陡峭與特有狹長港形的緣故(如圖 1.2 所示)，在港內容易引發與港池特性長度有關的長週期振盪，嚴重地影響到港內船舶的靠泊、貨物裝卸以及人員登船與下船過程間的安全性。目前此一長週期振盪現象，已經引致在惡劣天候下，尤其是颱風侵襲之前，造成花蓮港內的船舶必須離港避湧，明顯地違背港灣建設開發的目的。再加上由於花蓮港外海水深且浪大，船舶的出海錨泊，仍可能因為流錨，而發生船舶擱淺的船難事件，所以應研擬出改善花蓮港內長週期振盪問題的方法。



資料來源：Google map

圖 1.1 花蓮港位置示意圖



資料來源：花蓮港務分公司

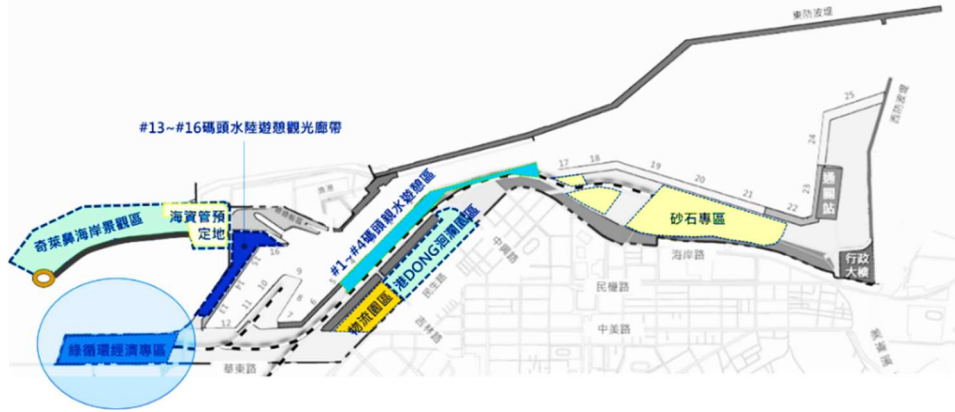
圖 1.2 花蓮港現況平面配置圖

花蓮港於民國 68 年開始至民國 80 年 12 月完成的第四期外港擴建工程，興建了新東堤 1837 公尺，並於外港新建 9 座深水碼頭(#17~#25)。第四期外港擴建工程完成後，讓花蓮港的港形呈現為狹長喇叭形，中間以束縮航道連接內港區與外港區，並開始面臨港池振盪的問題，也讓各界持續至今仍在尋找解決方案。然而在文獻回顧裡，發現很多鄰接大水域水岸的港灣都遭遇到長週期波動的問題。顯示這樣的問題並非看似單純，需要累積長期理論解析、現場觀測與分析、多種方案的水工模型平面與斷面試驗、數值模擬與工程經驗等，才有機會找出可能的解決方案，包括本計畫也只算是個初步嘗試。

花蓮港屬於商港與漁港入出航道共用而水域相連性質，與其他如蘇澳港、基隆港、臺中港、高雄港等商港同為漁商港共存的港灣，其中商港包含了同類型的客貨運、漁港包括了傳統漁業及遊憩(賞鯨豚與海釣)業，這些用途對水域的穩靜度有不同的要求。例如，位於花蓮港內的花蓮漁港原係由商港的小型船渠撥用改建，由於水域空間不足，於民國 89 年起進行專用漁港的規劃設計與建設，原先有另外闢建進出口航道的構想，但基於建設經費與港內穩靜度問題的考量，最後仍決定採用商漁共用航道方式。

目前花蓮港正在推動花蓮國際商港轉型兼具觀光遊憩發展，如圖 1.3 所示，規劃將港區觀光遊憩發展區分別變更為「港埠事業遊憩服務

專用區」與「港埠事業旅遊服務專用區」，如何減少港內長週期波動成為一重要課題。



資料來源：花蓮港務分公司

圖 1.3 花蓮港專區規劃示意圖

花蓮港之現有內港區 16 座碼頭(#1~#16)及外港區於民國 80 年 12 月新建完成的 9 座深水碼頭(#17~#25)，碼頭簡介如表 1-1~1-2 所列。由表 1-1 可知，內港區碼頭型式多為重力式，少部份為板樁式。重力式碼頭以 7 號碼頭為例(如圖 1.4)，岸壁以方塊混凝土堆疊，後方拋石與回填土構築碼頭。6 號碼頭為板樁式碼頭(如圖 1.5 所示)，以鋼板作為岸壁，加上背後的錨碇固定。由圖 1.4 與圖 1.5 可看出重力式及板樁式碼頭岸壁則皆為直立壁，不具有實質消減波浪能量的功能。由此推斷，當波浪進入內港區，會在內港各碼頭岸壁反射，接續發生多次反射，僅有少部份波浪會向外港區而去，造成內港波浪能量難以有效消滅。又因狹長港形的因素，加上波浪能量累積，造成整體花蓮港之港池振盪，於颱風來襲期間尤甚。

花蓮港外港區 9 座深水碼頭為第四期外港擴建工程所新建而成，僅有 25 號為重力式碼頭，其它 8 座碼頭皆為萬代福消波塊配方塊混凝土或沉箱型式。因屬深水碼頭且需考量承重，雖然外港有 8 座碼頭設置了萬代福消波塊(如圖 1.6 所示)，但其深度僅約 5 公尺，高度則約為 4.5~6 公尺，加上外港區的多邊形岸壁反射，對於波浪能量的削減效能有限。

表1-1 花蓮港內港碼頭簡介

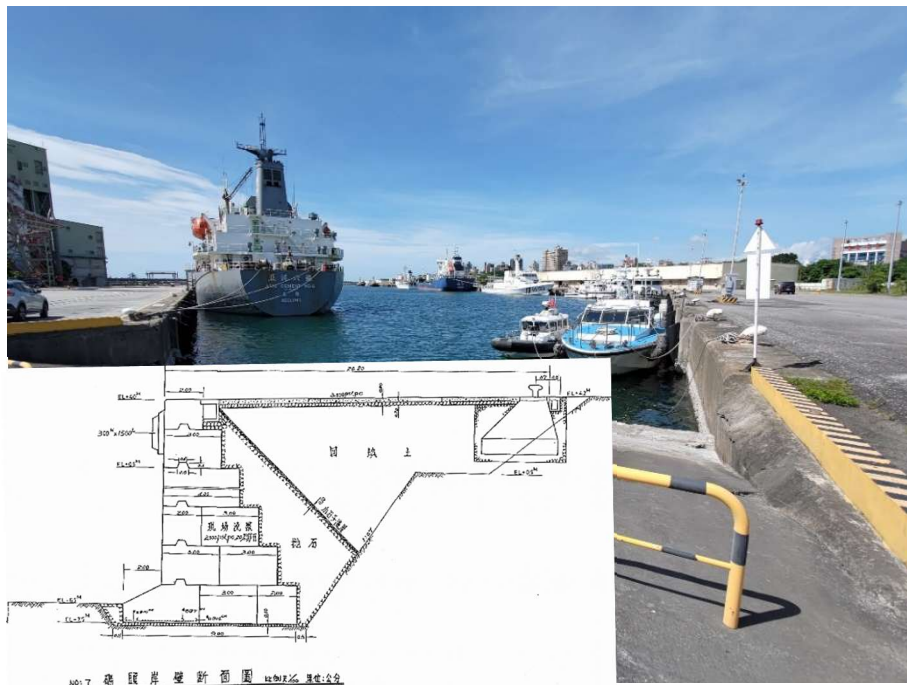
碼頭 編號	長度	寬度	設計水深	用途說明	碼頭型式
	(公尺)	(公尺)	(公尺)		
1	123	10	7.5	公務碼頭	重力式碼頭 (方塊混凝土)
2	153	10	7.5	公務碼頭	重力式碼頭 (方塊混凝土)
3	134	10	7.5	公務碼頭	重力式碼頭 (方塊混凝土)
4	160	20	8.5	公務碼頭	板樁式碼頭
5	160	20	8.5	公務碼頭	板樁式碼頭
6	150	20	8.5	公務碼頭	板樁式碼頭
7	120	20	6.5	公務碼頭	重力式碼頭 (方塊混凝土)
8	220	30	10.5	專業碼頭	板樁式碼頭
9	103	30	9.5	調度碼頭	板樁式碼頭
10	183	30	9.5	亞泥專用碼頭	重力式碼頭 (方塊混凝土)
11	185	30	9.5	中鋼專用碼頭	重力式碼頭 (方塊混凝土)
12	150	30	7.5	調度碼頭	重力式碼頭 (方塊混凝土)
13	185	30	9.5	客運碼頭(國際郵輪 優先,其他客貨輪次 之)	重力式碼頭 (方塊混凝土)
14	185	30	9.5	客運碼頭(國內客輪 優先,其他客貨輪次 之)	重力式碼頭 (方塊混凝土)
15	100	30	8.5	客運碼頭(停泊次 序:遊艇及賞鯨船優 先,國內客輪次之, 其他客貨輪)	重力式碼頭 (方塊混凝土)
16	144	15	7.5	客運碼頭(停泊次 序:國內客輪優先, 其他客貨、船修作業 輪次之)	重力式碼頭 (方塊混凝土)

資料來源：花蓮港務分公司

表1-2 花蓮港外港碼頭簡介

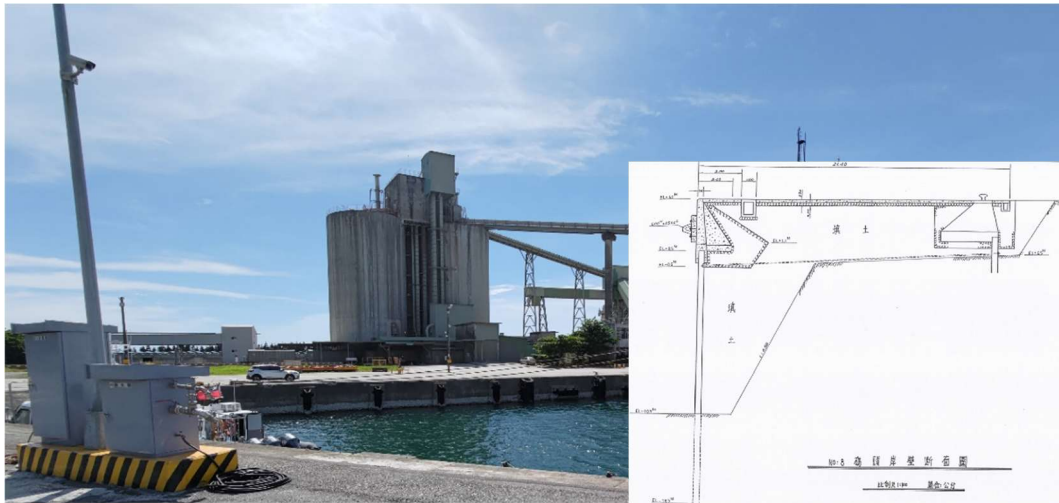
碼頭編號	長度	寬度	設計水深	用途說明	碼頭型式
17	200	20	12	營運碼頭	萬代福消波塊 方塊混凝土
18	200	20	12	營運碼頭	萬代福消波塊 方塊混凝土
19	310	43	14	營運碼頭	萬代福消波塊 沉箱
20	302	43	14	營運碼頭	萬代福消波塊 沉箱
21	200	43	14	營運碼頭	萬代福消波塊 沉箱
22	200	43	14	營運碼頭	萬代福消波塊 沉箱
23	272	43	14	營運碼頭	萬代福消波塊 沉箱
24	271	43	14	營運碼頭	萬代福消波塊 沉箱
25	332	54	16.5	營運碼頭	重力式碼頭
					(沉箱式碼頭)

資料來源：花蓮港務分公司



資料來源：花蓮港務分公司

圖 1.4 花蓮港內港#7 碼頭



資料來源：花蓮港務分公司

圖 1.5 花蓮港內港#8 碼頭



資料來源：花蓮港務分公司

圖 1.6 花蓮港外港#17 與#18 碼頭

1.3 研究項目與內容

本計畫以 3 年期(112-114 年)研究進行規劃，針對長週期波浪運動各相關議題進行探討。112 年為長週期波水工模型試驗探討(許及林，2024)、113 年為花蓮港現況碼頭之水動力與改善研究初探(許及林，2025)及本(114)年度為消能結構物型式之可行性研究，目標是研究如何削減港內的長週期波動之能量。

112 年首先蒐集回顧國內外長週期波動特性相關研究，及其所造成的災害資料與研究，綜整歸納長週期波所造成之破壞機制與對策。另以花蓮港所遭遇的問題為主軸，研擬設計多種可能消滅長週期波浪作用的結構或設施之雛形。

113 年配合花蓮港#7 及#12 碼頭屬性研選 4 種港灣型結構物進行水工模型斷面試驗，包含 2 種波高及涵蓋 0.9 秒至 5 秒的 11 種週期，並延伸應用針對波高計配對的 Goda & Suzuki (1976) 兩點測反射率法，試驗中並以 8 頻道監視器記錄試驗過程，做為隨時觀察與後續檢討各個模型的消波機制之用。

本(114)年度依據前 2 年的研究心得，以複合式消能結構物的概念，局部改裝 2 個基本模型(FT02 及 FT04)各個單元，包括增加斜坡面的突起以提高摩擦損失、加強消波艙的消波功能以及後側集水槽的排水功能。利用水工模型斷面試驗，驗證了複合式消能結構物有機會藉由各個單元的改善，進一步增益整體的消能效果，最後，也針對工程實務提出複合式消能碼頭的意象圖。同時進行花蓮港窄航道消能設施的構思研發，並以水工模型斷面試驗初步測試。最後做綜合整理與評估，以提供工程規劃單位的參考。

1.4 研究方法

有關改善長週期波浪作用下之港灣靜穩度的探討及分析，112 及 113 年已經執行：

1. 實際破壞案例回顧：蒐集國內外長週期波浪所造成災害實例及參考資料，並初步分析致災因素。
2. 文獻蒐集研讀：蒐集長週期波浪相關議題文獻，並針對可能消滅長週期波能的結構物及設施相關之國內外研究，包括彙整研讀花蓮港碼頭興建及修繕相關資料，進行蒐集、研讀及歸納整理。
3. 分析長週期波浪造成破壞之機制：利用綜合討論長週期波浪的實際破壞案例致災因素及相關文獻，從水動力的觀念整合長週期波浪所引致的破壞機制與對策。
4. 提出消滅港灣長週期波浪結構物或設施雛形：經由長週期波浪的結構破壞機制，研擬適用於消滅長週期波浪的結構物斷面或設施型式。最後定位於消能結構物應針對不同的水動力環境，例如，水面上及下之水動力行為，以複合式觀念組合多種消能機制來各個處理，並評估其綜合表現與可能的互制現象。
5. 建置針對非定值反射岸壁之港灣波動數值模擬程式，除以多種簡單港型研討適當的模擬程序，以求掌握港灣波動特性之辨識與評估方法外，亦針對花蓮港進行港灣波動數值模擬，評估及辨識外港水域及內港水域為 2 個幾乎相互獨立的波動現象，以及東西船渠波動特性與設置不同消能結構物對整個港區波動的影響。
6. 以 2005 年龍王颱風時期，本所於花蓮港內外之水壓式波浪觀測紀錄，進行相關的統計分析，以及最大可能波浪之數值模擬，來嘗試瞭解花蓮港各個水域波動特性與其間的相關性。

本(114)年度接續執行複合式消能結構物研究，研究方法包含：

1. 文獻蒐集研讀：針對國內外有關消減波能設施及應對長週期波的結構物保護研究，進行蒐集研讀，並應用生成式 AI 搜尋文獻，分析其抵禦或消能機制。
2. 消能碼頭型式精進與驗證：彙整並檢討前一年度研究成果，進行消能碼頭型式之改良，再以斷面之水工模型試驗確認其消能效果。
3. 規劃設置於窄航道的消能斷面或設施：綜整前 2 年研究心得，提出適用於花蓮港內窄航道兩側，可消減長週期波能之結構物斷面或設施型式。
4. 窄航道消能斷面水工模型試驗：規劃試驗量測項目及設置，進行港灣內長週期波作用下，窄航道斷面改善前後之水工模型試驗。
5. 水工斷面試驗結果分析及評估可行性：分析試驗數據以評估成效，得到消減港灣內長週期波浪的結構物斷面或設施型式之最佳方案。

第二章 文獻回顧

2.1 長週期波相關研究

海洋存在有各種不同類型的波浪，如圖 2.1 所示，依 Munk(1950) 可將海洋波浪依週期分為表面張力波(0.1 秒以下)、短週期重力波(0.1 秒~1 秒)、一般重力波(1 秒~30 秒)、長週期重力波/亞重力波(30 秒~300 秒)、長週期波(5 分鐘~12 小時)、一般潮汐波(12 小時~24 小時)以及週期 24 小時以上的變遷潮汐波。在工程上，也有將波浪分成 10 秒以下的常時波浪、10~30 秒的湧浪、30~300 秒的長週期波以及 300 秒以上的超長週期波。日本全國港灣海洋波浪情報網(NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS in Japan)主要探討 3 個週期範圍，分別為 30 秒以下、30 秒~150 秒及 150 秒~300 秒，其原因可能是日本處於高緯度，且直接承受太平洋傳播的長週期波浪。

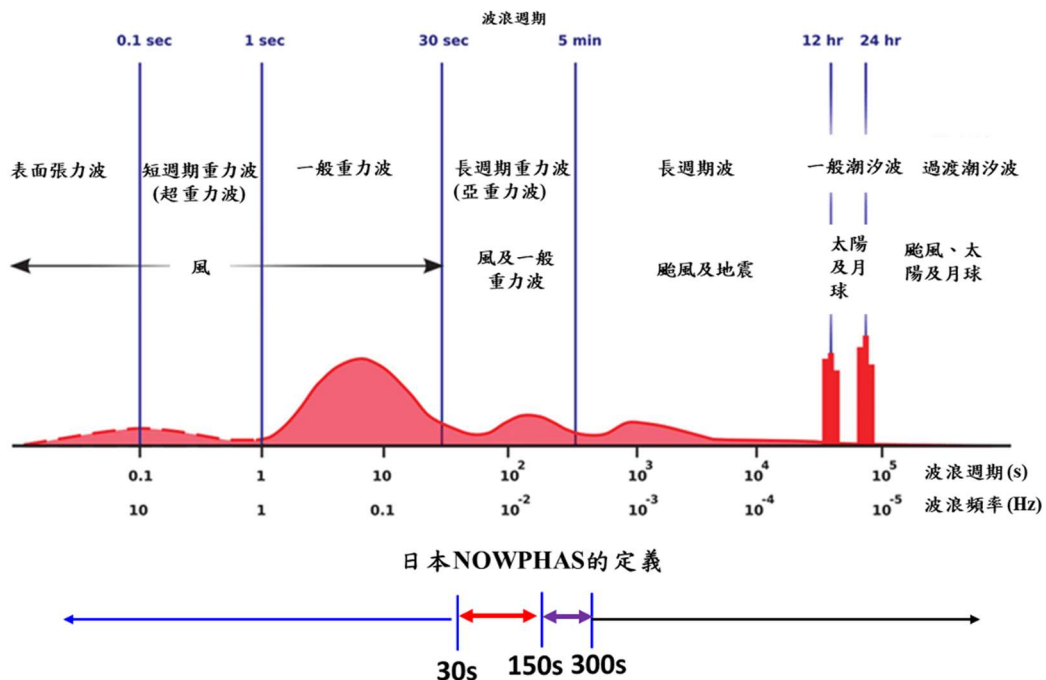


圖 2.1 海洋波浪分類(改自 Munk, 1950)

有關國內外與長週期波相關研究在 112 年報告 (許及林, 2024) 的第二章即已做了許多回顧, 在後續 2 年只找到類似的文獻, 因此增補不多。在嘗試界定長週期波的範圍時會發現各國都是因著各海域及海岸的波動特性, 以及海岸利用的不同需求, 而各自有自己的關心範圍, 例如很多港灣的長週期波指的就是湧浪, 也有直接定義是颱風時期所有可能發生的浪, 或者專門針對港內船舶靠泊安全的長週期波, 可能是湧浪及其所引致的港灣長週期振盪, 也可能是颱風波浪所引致的港灣長週期振盪, 而在臺灣海域, 我們也發現鋒面引發的強浪也有相當大的威脅。綜合而言, 本計畫建議除加強實測波浪的統計分析以外, 也希望能夠針對研究目標港灣綜合港務管理、航海安全及工程安全各方面的需求的波高及週期訂定跨閾值, 以期能朝著「對症下藥」的方向努力。

在編寫期末報告時, 為瞭解花蓮港於颱風時期可能面臨的波高與週期的變化(而不是粗略地長週期且大波高的概念), 因此, 重新回顧 2005 年龍王颱風時期 7 個測站(如圖 2.2)的 168 個小時觀測分析結果, 並分別啟動對分析之個別波高與週期依波高大小排序(變數名稱首字以 H 表示)之特性波高(HH_{max} 、 $HH_{1/3}$ 及 HH_{mean})與相對週期(HT_{max} 、 $HT_{1/3}$ 及 HT_{mean})以及依週期大小排序(變數名稱首字以 T 表示)之特性週期(TT_{max} 、 $TT_{1/3}$ 及 TT_{mean})與相對波高(TH_{max} 、 $TH_{1/3}$ 及 TH_{mean})。特性波高可以看到港內曾經發生過的波高大小變化; 特性週期可以看到港內曾經發生過的週期長短變化, 但特性波高與特性週期僅在平均波高與平均週期才有直接關係。

圖 2.3~圖 2.9 依序為港外(C06)及港內(依討論順序為 C10、C12、C14、C16、C17 及 C18 等測站的(a)依波高大小排序的特性波高(HH_{max} 、 $HH_{1/3}$ 及 HH_{mean}); (b)依波高大小排序的相對週期(HT_{max} 、 $HT_{1/3}$ 及 HT_{mean})及(c)依週期大小排序的特性週期(TT_{max} 、 $TT_{1/3}$ 及 TT_{mean})的時序列分布。

表 2-1 為各測站之特性波高與相對週期跨閾值統計是為了瞭解各測站之特性波高以及相對週期的變化，表 2-2 為各測站之特性週期與相對波高跨閾值統計是為了瞭解各測站之特性週期以及相對波高的變化。後者在本計畫中尤為重要，因為它沒有如相對週期被波高大小的排序所平均而失去本質特性。

表 2-3 列舉了各測站之最大波高(週期)與相對應的週期(波高)值。從 $HH_{max}(HT_{max})$ 值可知各測站的最大波高 HH_{max} 以 C06 最大，港內 C10~C18 等 6 個測站除 C16 以外都有 2m 以上的最大波高；C10、C12、C14、C16 的 TT_{max} 始終比 HT_{max} 長，但 C17~C18 則有相同的值，似乎指出在內港發生最長波浪時，內港是整個在振盪。以下交叉比對表 2.1~2.3 後就各測站分別討論：C06 (港外)、C10(入口航道)、C12(外港迴船池)、C14(窄航道入口)、C16(內港迴船池)、C17(東船渠)以及 C18(西船渠)。

1. C06 (港外)：如圖 2.3 所示，全期 HH_{max} 最大值 11.86m(4m 以上佔 24/168)； $HH_{1/3}$ 最大值 8.12m(4m 以上佔 12/168)； HH_{mean} 最大值 6.20m(4m 以上佔 8/168)； TT_{max} 最大值 30.23s(15s 以上佔 100/168、10s 以上佔 168/168)； $TT_{1/3}$ 最大值 18.30s(15s 以上佔 23/168、10s 以上佔 164/168)； TT_{mean} 最大值 15.84s(15s 以上佔 5/168、10s 以上佔 72/168)。
2. C10(入口航道)：如圖 2.4 所示，全期 HH_{max} 最大值 3.2m(1m 以上佔 20/168)； $HH_{1/3}$ 最大值 2.34m(1m 以上佔 16/168)； HH_{mean} 最大值 1.71m(1m 以上佔 9/168)； TT_{max} 最大值 51.11s(15s 以上佔 168/168、10s 以上佔 168/168)； $TT_{1/3}$ 最大值 25.26s(15s 以上佔 1/168、10s 以上佔 121/168)； TT_{mean} 最大值 20.96s(15s 以上佔 30/168、10s 以上佔 163/168)。
3. C12(外港迴船池)：如圖 2.5 所示，全期 HH_{max} 最大值 2.68m(1m 以上佔 19/168)； $HH_{1/3}$ 最大值 2.02m(1m 以上佔 14/168)； HH_{mean} 最大值 1.33m(1m 以上佔 7/168)； TT_{max} 最大值 62.73s(15s 以上佔

- 168/168、10s 以上佔 168/168)； $TT_{1/3}$ 最大值 34.17s(15s 以上佔 156/168、10s 以上佔 168/168)； TT_{mean} 最大值 21.35s(15s 以上佔 59/168、10s 以上佔 168/168)。
4. C14(窄航道入口)：如圖 2.6 所示，全期 HH_{max} 最大值 2.38m(1m 以上佔 16/168)； $HH_{1/3}$ 最大值 1.91m(1m 以上佔 10/168)； HH_{mean} 最大值 1.21m(1m 以上佔 5/168)； TT_{max} 最大值 63.09s(15s 以上佔 168/168、10s 以上佔 168/168)； $TT_{1/3}$ 最大值 35.52s(15s 以上佔 151/168、10s 以上佔 168/168)； TT_{mean} 最大值 22.52s(15s 以上佔 43/168、10s 以上佔 149/168)。
 5. C16(內港迴船池)：如圖 2.7 所示，全期 HH_{max} 最大值 1.5m(1m 以上佔 4/168)； $HH_{1/3}$ 最大值 1.3m(1m 以上佔 2/168)； HH_{mean} 最大值 0.74m(1m 以上佔 0/168)； TT_{max} 最大值 157.03s(15s 以上佔 168/168、10s 以上佔 168/168)； $TT_{1/3}$ 最大值 157.03s(15s 以上佔 156/168、10s 以上佔 168/168)； TT_{mean} 最大值 64.46s(15s 以上佔 114/168、10s 以上佔 166/168)。
 6. C17(東船渠)：如圖 2.8 所示，全期 HH_{max} 最大值 2.13m(1m 以上佔 6/168)； $HH_{1/3}$ 最大值 1.93m(1m 以上佔 4/168)； HH_{mean} 最大值 1.17m(1m 以上佔 1/168)； TT_{max} 最大值 192.88s(15s 以上佔 168/168、10s 以上佔 168/168)； $TT_{1/3}$ 最大值 158.27s(15s 以上佔 167/168、10s 以上佔 168/168)； TT_{mean} 最大值 86.5s(15s 以上佔 118/168、10s 以上佔 167/168)。
 7. C18(西船渠)：如圖 2.9 所示，全期 HH_{max} 最大值 2.58m(1m 以上佔 12/168)； $HH_{1/3}$ 最大值 1.77m(1m 以上佔 8/168)； HH_{mean} 最大值 1.41m(1m 以上佔 1/168)； TT_{max} 最大值 147.93s(15s 以上佔 168/168、10s 以上佔 168/168)； $TT_{1/3}$ 最大值 122.06s(15s 以上佔 166/168、10s 以上佔 168/168)； TT_{mean} 最大值 89.54s(15s 以上佔 112/168、10s 以上佔 165/168)。

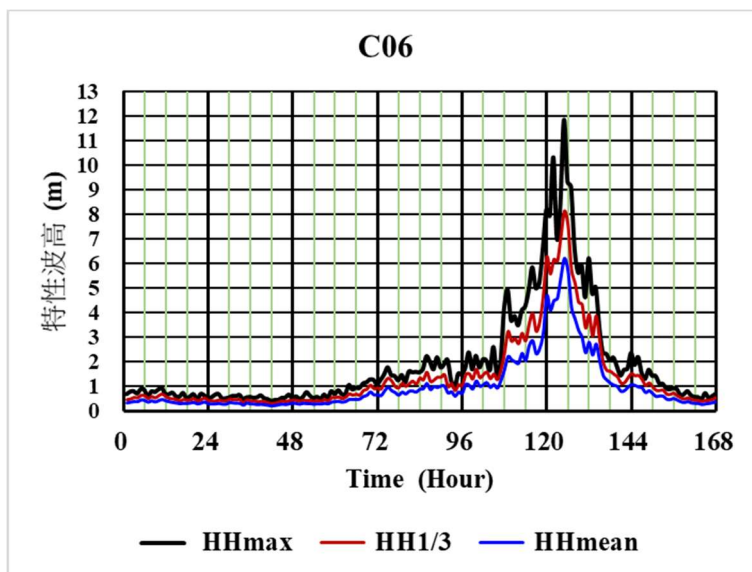
綜合以上的討論，本計畫嘗試依據波高與週期平均值觀察測站的波動特性，而以最大值與三分之一最大平均值觀察測站的異常波動，進行以下比較與討論：

1. 港外(C06)應屬於典型的颱風波浪，夾帶小部分湧浪。但入口航道(C10)則顯示花蓮港的遮蔽效果相當不錯，C10的波高不到C06的三分之一，應是以因繞射入港為主。然而特性週期部分C10比C06長，顯示C10的波浪不與C06直接相關，而是可能是港口因水位壅高所產生的水動力現象和港內的長週期振盪波動特性(C10與C12的特性週期很接近)的共同作用，前者在目前的有限資料裡無法確認。
2. C12與C10的波動有強烈相關(HH_{mean} 與 TT_{mean})，但C12的 TT_{max} 及 $TT_{1/3}$ 比C10還長，顯示C12有其區域性的振盪。
3. C14與C12的波動有強烈相關，但與C16的關係不明顯。
4. C16顯示內港迴船池區的波高較其它測站均小，相當靜穩，但以長週期波動為主， $TT_{1/3}$ 與C17相近，顯示內港迴船池區與東船渠的波動為同一系統。
5. C17與C18顯示兩個船渠以自身的水域振盪為主，C17與C16的波動有關，但C18為一獨立系統。
6. C17的大波高不多，1m以上波高， HH_{max} 僅佔6/168； $HH_{1/3}$ 僅佔4/168； HH_{mean} 僅佔1/168；但是 TT_{max} 、 $TT_{1/3}$ 、 TT_{mean} 幾乎都在10s以上，顯示，就2005年龍王颱風而言，東船渠需要面對的主要是長週期但小波高的波動。長週期且大波高的作用時間僅數小時，應是颱風登陸時期。
7. C18的波動比C17略大，1m以上波高， HH_{max} 佔12/168； $HH_{1/3}$ 僅佔8/168； HH_{mean} 僅佔1/168； TT_{max} 、 $TT_{1/3}$ 、 TT_{mean} 也幾乎都在10s以上，顯示，就2005年龍王颱風而言，西船渠振盪地比東

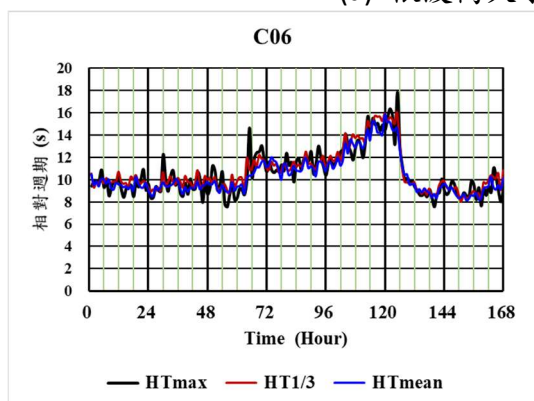
船渠還劇烈，需要面對的主要也是長週期但小波高的波動。長週期且大波高的作用時間僅數小時，應是颱風登陸時期。



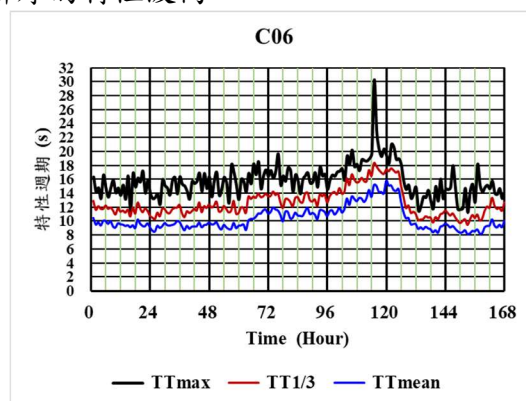
圖 2.2 花蓮港 2005 年波浪觀測站分布圖



(a) 依波高大小排序的特性波高

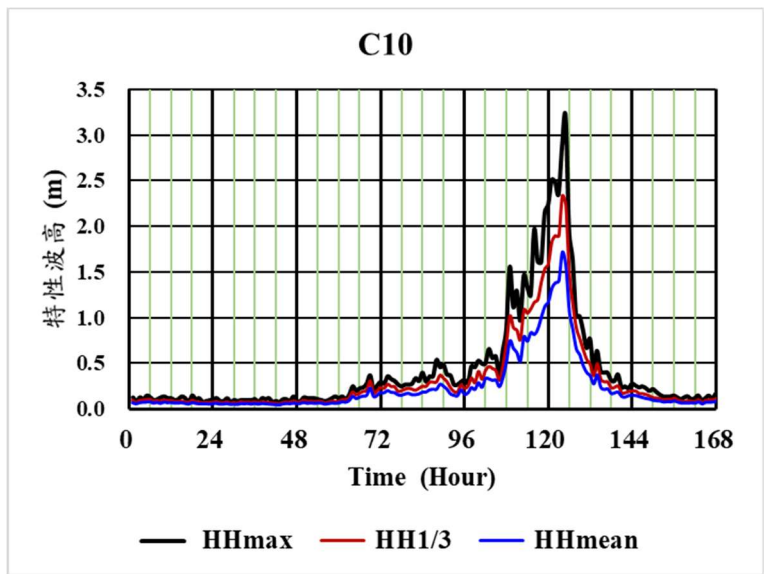


(b) 依波高大小排序的相對週期

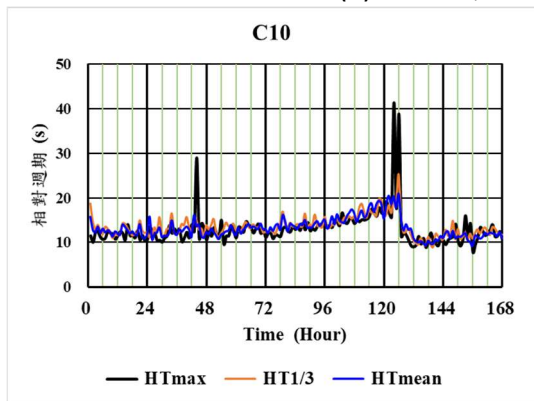


(c) 依週期大小排序的特性週期

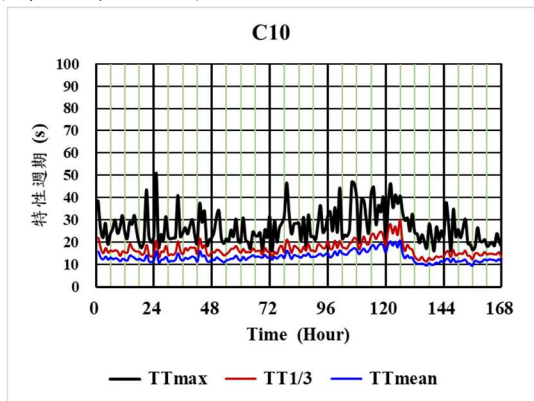
圖 2.3 C06 測站之特性波高與週期分布時序圖



(a) 依波高大小排序的特性波高

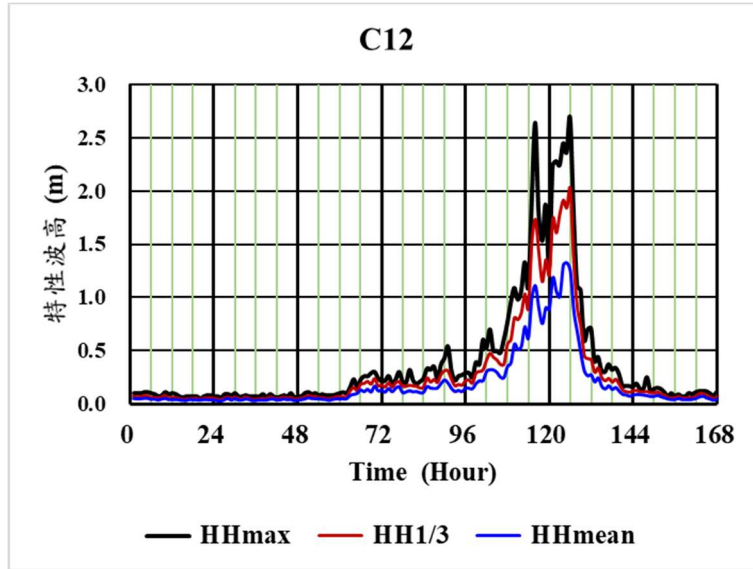


(b) 依波高大小排序的相對週期

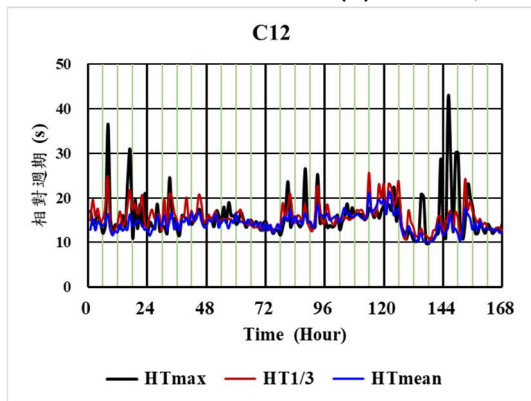


(c) 依週期大小排序的特性週期

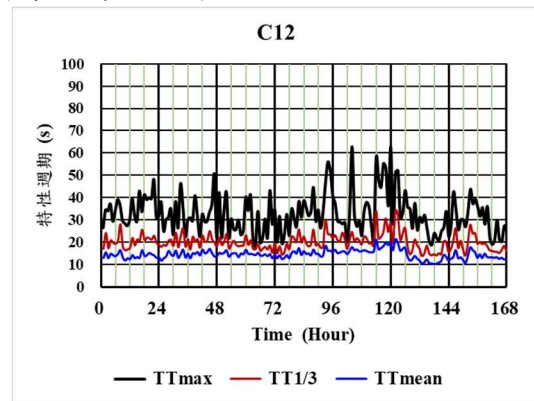
圖 2.4 C10 測站之特性波高與週期分布時序圖



(a) 依波高大小排序的特性波高

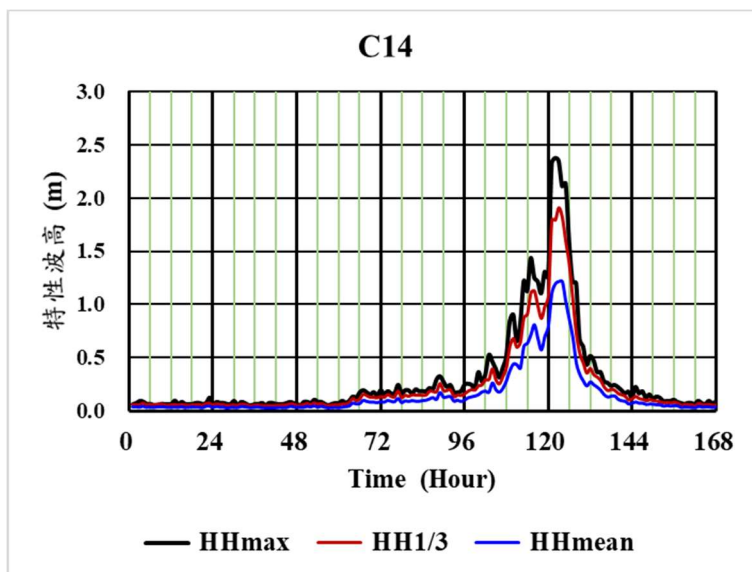


(b) 依波高大小排序的相對週期

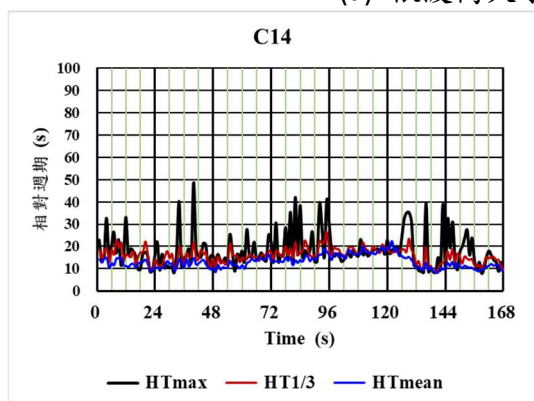


(c) 依週期大小排序的特性週期

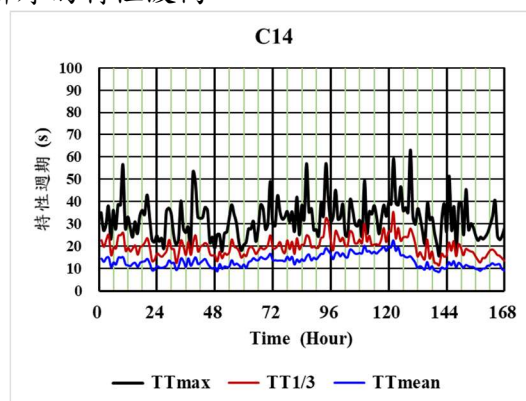
圖 2.5 C12 測站之特性波高與週期分布時序圖



(a) 依波高大小排序的特性波高

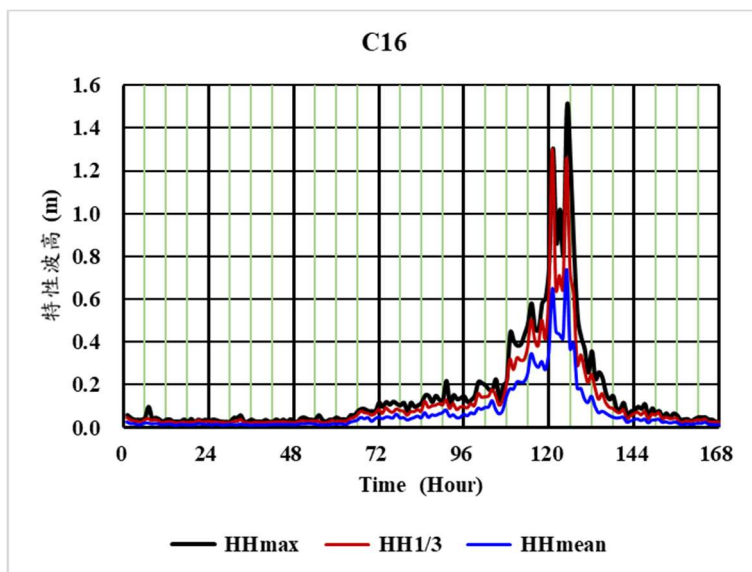


(b) 依波高大小排序的相對週期

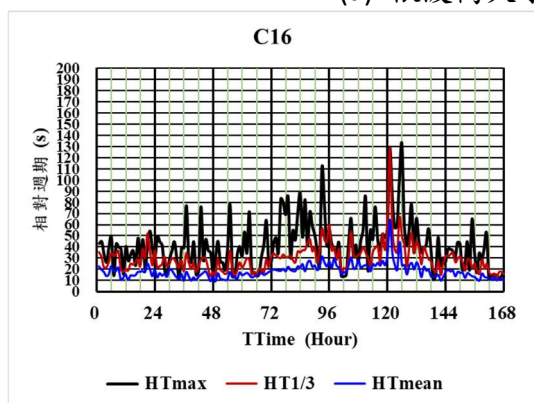


(c) 依週期大小排序的特性週期

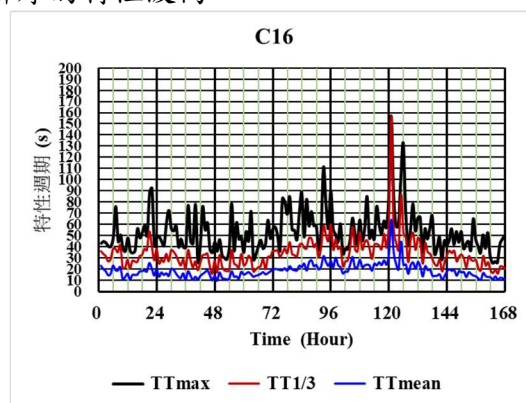
圖 2.6 C14 測站之特性波高與週期分布時序圖



(a) 依波高大小排序的特性波高

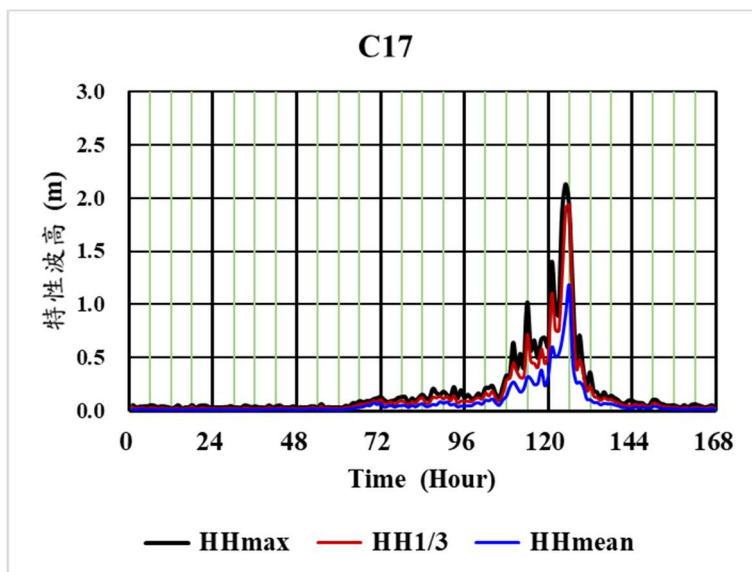


(b) 依波高大小排序的相對週期

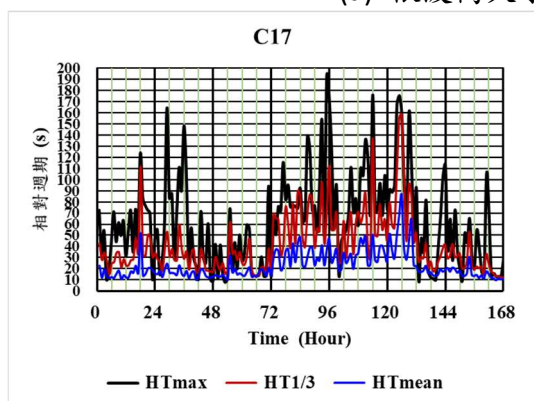


(c) 依週期大小排序的特性週期

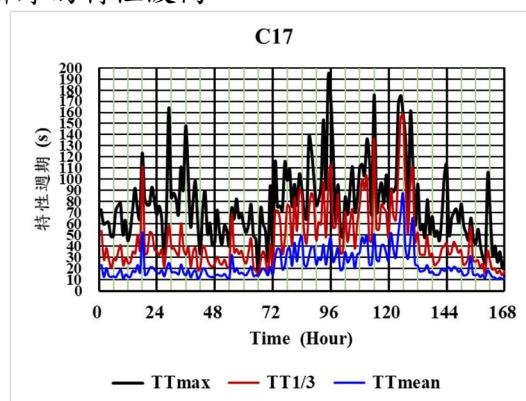
圖 2.7 C16 測站之特性波高與週期分布時序圖



(a) 依波高大小排序的特性波高

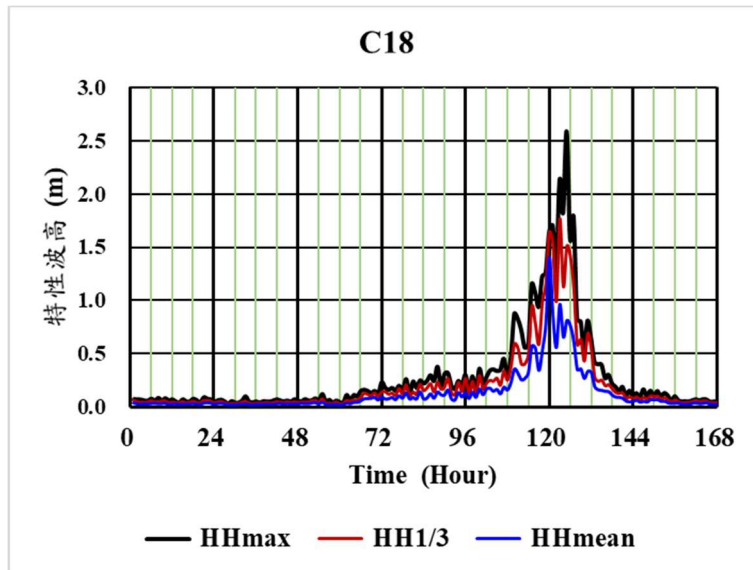


(b) 依波高大小排序的相對週期

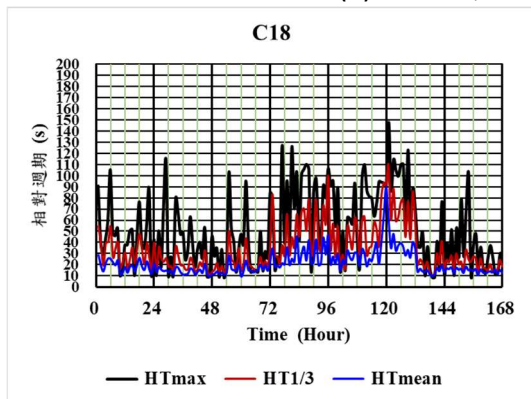


(c) 依週期大小排序的特性週期

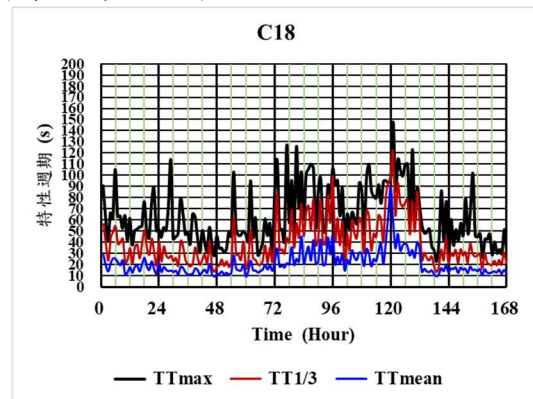
圖 2.8 C17 測站之特性波高與週期分布時序圖



(a) 依波高大小排序的特性波高



(b) 依波高大小排序的相對週期



(c) 依週期大小排序的特性週期

圖 2.9 C18 測站之特性波高與週期分布時序圖

表2-1 各測站之特性波高與相對週期跨閾值統計

項 目	跨閾值	C06	C10	C12	C14	C16	C17	C18
<i>HH_{max}</i>	最大值	11.86	3.20	2.68	2.38	1.50	2.13	2.58
	最小值	0.42	0.08	0.05	0.06	0.03	0.02	0.03
	> 8m	6	0	0	0	0	0	0
	> 6m	11	0	0	0	0	0	0
	> 4m	24	0	0	0	0	0	0
	> 2m	43	7	7	5	0	1	2
	> 1m	86	20	19	16	4	6	12
<i>HH_{1/3}</i>	最大值	8.12	2.34	2.02	1.91	1.30	1.93	1.77
	最小值	0.28	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03
	> 8m	1	0	0	0	0	0	0
	> 6m	6	0	0	0	0	0	0
	> 4m	12	0	0	0	0	0	0
	> 2m	28	2	1	0	0	0	0
	> 1m	72	16	14	10	2	4	8
<i>HH_{mean}</i>	最大值	6.20	1.71	1.33	1.21	0.74	1.17	1.41
	最小值	0.20	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02
	> 8m	0	0	0	0	0	0	0
	> 6m	1	0	0	0	0	0	0
	> 4m	8	0	0	0	0	0	0
	> 2m	25	0	0	0	0	0	0
	> 1m	45	9	7	5	0	1	1
<i>HT_{max}</i>	最大值	17.84	41.33	42.58	48.54	132.59	192.88	147.93
	最小值	7.56	7.83	9.71	8.03	10.98	7.97	7.98
	> 100s	0	0	0	0	4	27	19
	> 60s	0	0	0	0	25	83	58
	> 30s	0	2	5	19	117	123	115
	> 15s	7	23	75	110	155	144	139
	> 10s	83	156	166	151	168	164	159
<i>HT_{1/3}</i>	最大值	16.05	25.26	25.59	26.39	128.59	158.27	109.28
	最小值	8.00	9.02	10.30	8.99	12.87	12.04	9.99
	> 100s	0	0	0	0	1	7	1
	> 60s	0	0	0	0	3	34	22
	> 30s	0	0	0	0	73	99	71
	> 15s	12	34	95	110	163	159	152
	> 10s	85	162	168	162	168	168	167
<i>HT_{mean}</i>	最大值	15.84	20.96	21.35	22.52	64.46	86.50	89.54
	最小值	8.14	9.26	10.06	8.39	9.32	9.82	9.40
	> 100s	0	0	0	0	0	0	0
	> 60s	0	0	0	0	1	3	3
	> 30s	0	0	0	0	7	37	27
	> 15s	5	30	59	43	114	118	112
	> 10s	72	163	168	149	166	167	165

註：最大/最小波高值單位為 m；最大/最小週期值單位為 sec；跨閾值係統計發生的累計時間。

表2-2 各測站之特性週期與相對波高跨閾值統計

項 目	跨閾值	C06	C10	C12	C14	C16	C17	C18
TH_{max}	最大值	6.65	2.89	2.22	1.22	1.50	2.13	2.58
	最小值	0.09	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
	> 8m	0	0	0	0	0	0	0
	> 6m	1	0	0	0	0	0	0
	> 4m	2	0	0	0	0	0	0
	> 2m	12	2	1	0	0	1	2
	> 1m	32	7	7	7	2	5	11
$TH_{1/3}$	最大值	6.48	1.66	1.72	1.46	1.07	1.93	1.55
	最小值	0.19	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02
	> 8m	0	0	0	0	0	0	0
	> 6m	2	0	0	0	0	0	0
	> 4m	7	0	0	0	0	0	0
	> 2m	23	0	0	0	0	0	0
	> 1m	38	8	10	6	1	4	8
TH_{mean}	最大值	6.20	1.71	1.33	1.21	0.74	1.17	1.41
	最小值	0.20	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02
	> 8m	0	0	0	0	0	0	0
	> 6m	1	0	0	0	0	0	0
	> 4m	8	0	0	0	0	0	0
	> 2m	25	0	0	0	0	0	0
	> 1m	45	9	7	5	0	1	1
TT_{max}	最大值	30.23	51.11	62.73	63.09	157.03	192.88	147.93
	最小值	11.27	15.98	18.05	15.90	25.51	16.99	22.73
	> 100s	0	0	0	0	4	33	20
	> 60s	0	0	2	1	42	114	75
	> 30s	1	47	97	93	161	161	160
	> 15s	100	168	168	168	168	168	168
	> 10s	168	168	168	168	168	168	168
$TT_{1/3}$	最大值	18.30	25.26	34.17	35.52	157.03	158.27	122.06
	最小值	9.45	30.23	13.76	11.44	15.83	14.22	13.20
	> 100s	0	11.43	0	0	1	9	1
	> 60s	0	0	0	0	3	40	28
	> 30s	0	0	5	4	96	119	95
	> 15s	23	1	156	151	168	167	166
	> 10s	164	121	168	168	168	168	168
TT_{mean}	最大值	15.84	20.96	21.35	22.52	64.46	86.50	89.54
	最小值	8.14	9.26	10.06	8.39	9.32	9.82	9.40
	> 100s	0	0	0	0	0	0	0
	> 60s	0	0	0	0	1	3	3
	> 30s	0	0	0	0	7	37	27
	> 15s	5	30	59	43	114	118	112
	> 10s	72	163	168	149	166	167	165

註：最大/最小波高值單位為 m；最大/最小週期值單位為 sec；跨閾值係統計發生的累計時間。

表2-3 各測站之最大波高/週期值與相對週期/波高

參數	C06	C10	C12	C14	C16	C17	C18
HH_{max} (HT_{max})	11.86 (17.84)	3.20 (41.33)	2.68 (42.58)	2.38 (48.54)	1.50 (132.59)	2.13 (192.88)	2.58 (147.93)
TH_{max} (TT_{max})	6.65 (18.86)	2.89 (51.11)	2.22 (62.73)	1.22 (63.09)	1.50 (157.06)	2.13 (192.88)	2.58 (147.93)
$HH_{1/3}$ ($HT_{1/3}$)	8.12 (16.05)	2.34 (25.26)	2.02 (25.59)	1.91 (26.39)	1.30 (128.59)	1.93 (158.27)	1.77 (109.28)
$TH_{1/3}$ ($TT_{1/3}$)	6.48 (18.96)	1.66 (30.23)	1.72 (34.14)	1.46 (35.52)	1.07 (157.03)	1.93 (158.27)	1.55 (122.06)
HH_{mean} (HT_{mean})	6.20 (17.10)	1.71 (20.96)	1.33 (21.35)	1.21 (22.52)	0.74 (64.46)	1.17 (86.50)	1.41 (89.54)
TH_{mean} (TT_{mean})	6.20 (14.66)	1.71 (20.96)	1.33 (21.35)	1.21 (22.52)	0.74 (64.46)	1.17 (86.50)	1.41 (89.54)

註：波高值單位為 m；週期值單位為 sec。

2.2 消減港灣長週期波相關研究

本計畫的目標為透過多元化思維找出港灣內長週期波動問題發生機制，並尋找減緩及改善的策略，而本計畫屬於水工模型試驗部份之斷面試驗，本計畫從多個面向收集與整理與港灣設施相關的工程手段文章，並針對與長週期波有關的方向進行討論。

有關與港灣實務有關的消能結構物之部分文獻收集，在 112 年報告 (許及林，2024)的第二章已做了基本的回顧，在後續兩年只找到類似功能的文獻，因此增補不多。本節進一步對各種消能結構物做功能性的檢討：

1. 消能斜坡

消能斜坡可以分成三大類：

- (1) 自然透水海灘：(如圖 2.10)主要利用斜坡的坡度、督孔隙介質與粗糙度(沙灘或礫石灘)讓波浪在斜坡上發生淺化、碎波、溯升來破壞波浪結構，並利用斜坡的多孔隙讓溯升/溯降的水體入滲多孔隙介質以削減水體的能量並減少波浪的反射；
- (2) 人工透水海灘：(如圖 2.11)以人工拋石、拋混凝土型塊或拋消波塊構成斜坡，其消波機制與自然海灘類似，但孔洞較大，波浪結構較容易被破壞；
- (3) 人工斜坡：(如圖 2.12)以混凝土或瀝青或黏土鋪設透水/不透水的斜坡，前者可在斜坡上加設混凝土凸起以增加粗糙度；抑或可考慮適當的植栽來增加表面粗糙度，為了能在有限長度空間提高消能效果，也有在不透水斜坡面上加拋不同厚度的排水層，並得到相當不錯的效果。



福隆海灘



臺東海岸

圖 2.10 自然海灘



花蓮南濱海岸



花蓮南濱海岸

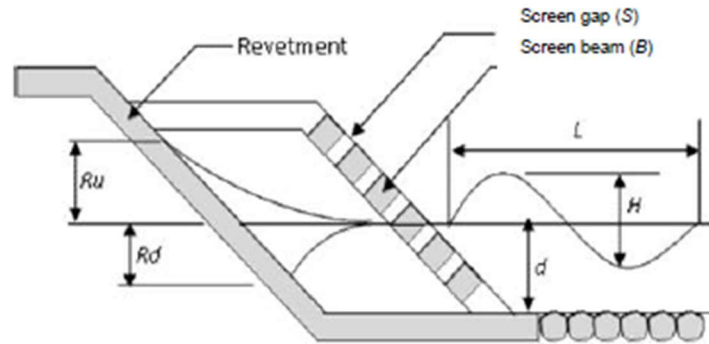
圖 2.11 人工海灘



苗栗通霄海岸



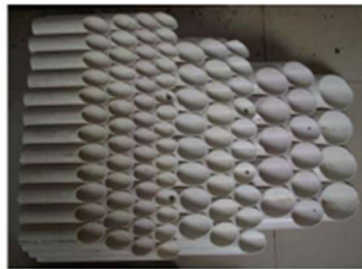
花蓮溪口北側海岸



開孔型海堤(Thaha et al., 2013)



(I) Front view



(II) Top view

(a) Perforate-pipe breakwater



(b) Double horizontal plate breakwater

開孔管型防波堤(Yang et al., 2024)

圖 2.12 人工斜坡

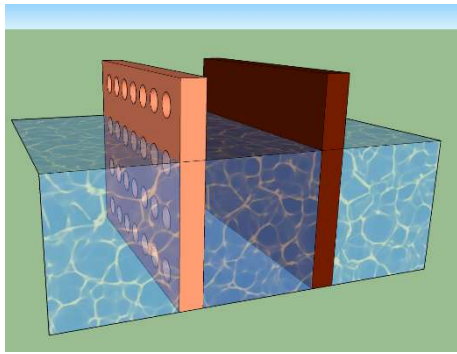
消能斜坡利用斜坡坡度、形狀破壞波浪結構和孔隙率入滲等消減波能，但由於僅利用自然排水，一旦因高水位或波浪作用頻度太高於來不及排水，使得多孔隙處於飽和狀態，波浪將會在等同於不透水光滑斜坡的行為甚至發生越波。從時間軸的概念來看，實務上消能斜坡不應視為完全消波的岸線，尤其是對長週期波而言。表面上的突起雖可增加粗糙度，但其形狀與大小也可能導致波浪的提前反射。

2. 直立型消能結構物

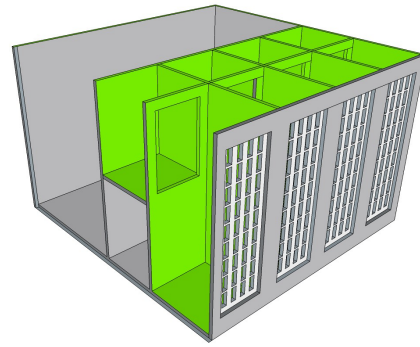
如圖 2.13 所示，包含多孔結構物(perforated structure, 圖 2.13a)、狹縫型結構物(slit type structure, 圖 2.13b) 及開孔結構物(slotted structure, 圖 2.13c)。多孔結構物通常是開直徑相同或交錯直徑不同但規則排列的圓孔；狹縫型結構物是開垂直或水平的長條型孔；開孔結構物是開垂直或水平的大型長方形開孔。後兩者並無確切尺寸分界，但應可以波浪是否能直接進入而不受孔洞效應影響來區分。當波峰作用於圓孔或狹縫岸壁時，水位會壅高，水流通過開孔可能會束縮與加速進入消波艙但也受到開口邊界的摩擦損失，波浪結構可能因此而遭受破壞；當波谷作用時，消波艙水體是以排水形式而不再是波浪排出。波浪反射除了有部分波浪會由多孔壁的未開孔部份直接反射，也可能因消波艙空間被水體佔據，導致後續波浪無法進入而反射。也有以消波型塊組立出直立消能碼頭，如圖 2.13(d)所示。海水水位高低以及消波艙是否能及時排水。將直接影響其消能效果。

多重開孔岸壁的設置係以過濾器的概念來設計：如圖 2.13(e)所示，採取相同開孔率或越接近海側孔洞越大的方式，可以削減較多波能，但仍以消波艙的水位高低以及能否及時排水為主要關鍵。也有幾種結構物在消波艙加設不透水或多孔式水平版或傾斜版，如圖 2.13(f)，其目的也是為了破壞波浪結構並將其轉換為水體運動。其消波的關鍵應該仍是與水平版或傾斜版的設置高度是否能促使波浪結構破壞有關。

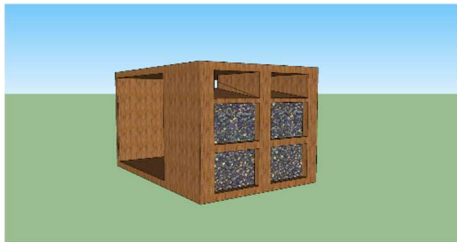
Franco et al. (2019)針對評估「開孔」設計相對於傳統「實心」沉箱，可有效地在不增加結構體積的情況下，證明了透過優化前牆開孔與消波室配，在降低波浪反射方面的具體效果，如圖 2.13(e)。另有結合新型混合防波堤-波浪能轉換裝置(WEC)系統，如圖 2.13(f)，透過調整「消波室寬度」與「底部小開口尺寸」，可精確調整系統共振點，以適應不同海域波浪特性。



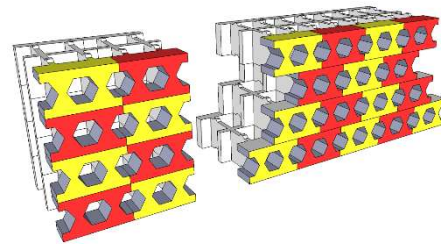
(a) 多孔結構物(著者自繪示意圖)



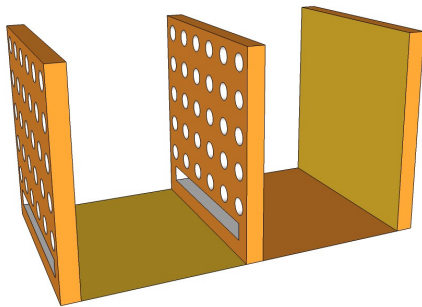
(b) 狹縫型結構物(林等人, 2017)



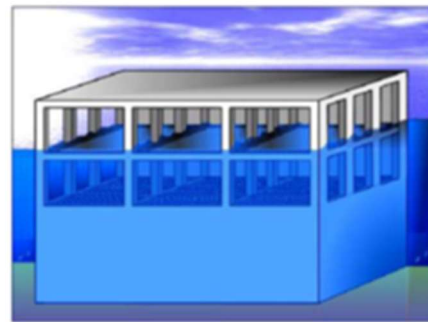
(c) 開孔結構物(李, 2010)



(d) 萬代福消波型塊(著者自繪示意圖)



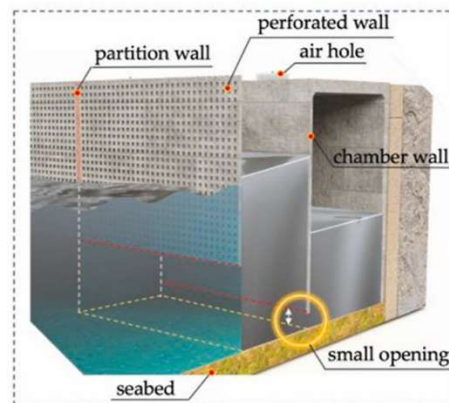
(e) 多重多孔結構物(著者自繪示意圖)



(f) 三層水平板(Kee et al., 2006)



(g) 開孔沉箱(Franco et al., 2019)

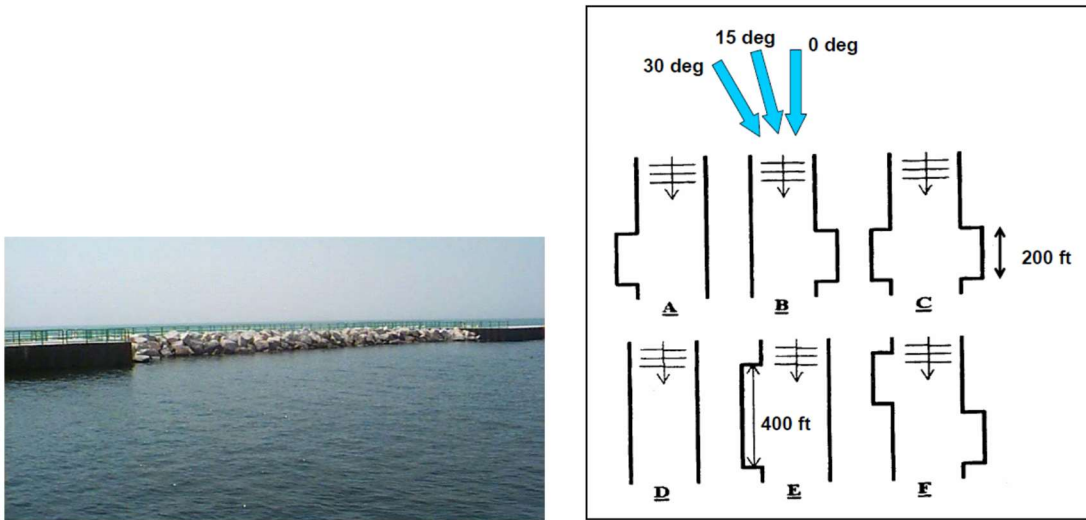


(h) 混合防波堤-波浪能轉換裝置系統
(Zhao et al., 2022)

圖 2.13 直立型消能結構物

3. 產生共振箱效應的口袋型消波灘(pocket beach)

如圖 2.14 所示，在波浪可能到達岸壁位置設置三面直立壁的消波灘，讓波浪在該區域做局部性反射、振盪與消波，並視需要在散射波可能到達的對岸也設置同樣的消波灘。使其形成一共振系統。此種系統必須詳細觀測及追蹤波浪真正集中的位置。



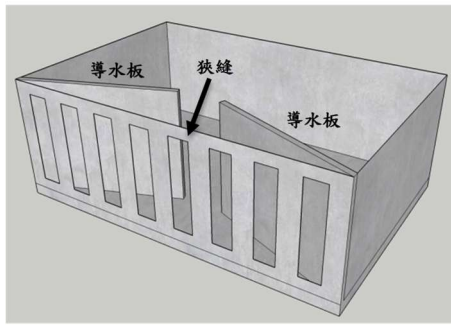
(a) 密西根州 Pentwater 實例

(b) 水工模型試驗配置

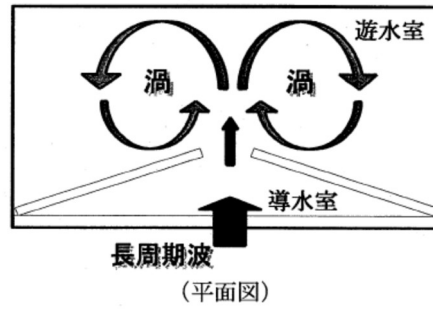
圖 2.14 口袋型消波灘(Thompson et al., 2004)

4. 導水式渦流型消能結構物

如圖 2.15 所示，主要為日本大島香織團隊所提出並應用於幾個地方性漁港。其設計採用內凹型雙斜向導水板，使波浪在凹型斜向版前(集波區)集中壅高，並以水流的型式在尖端產生渦流來抓住某些能量再慢慢消散。此一設計因實務上的應用而未見深入的探討，例如後置消波艙需要多少才不致影響渦流的發展、斜向入射波是否能維持同樣的消波效果、斜向導水板寬度與渦流產生的開口寬度之關係為何(因為集波區也會反射波浪)等。



(a) 內設導水板開孔沉箱

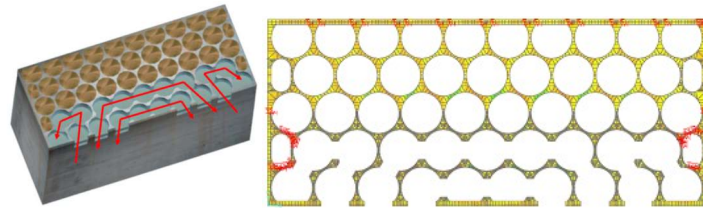


(b) 水動力構想

圖 2.15 大島和森屋(2005)導水式開孔沉箱模型

5. 低反射率沉箱

Feys(2009)、Garrido et al.(2010) 與 Gonzalez-Eecrival et al.(2018) 所提出的一種低反射率沉箱型式(如圖 2.16 所示)，係利用開孔圓柱的相互連結形成不同長度的通路，來遲滯長週期波浪，但對長週期波的反射率仍高。前項導水式渦流型消能結構物所引出的疑點仍未解決。



(a) Garrido (2010)



(b) Gonzalez-Eecrival et al.(2018)ARJ-R 型圓形及矩形消波室

圖 2.16 低反射性沉箱示意圖

2.3 小結

由於港區水域得來不易，需要耗費龐大工程經費與施工期程，所有岸線必須要審慎應用以獲得最大效益。為了消減港內的多次反射，以降低發生港區振盪或共振的機會，國際上專家學者們提供了很多種消能的方法，包括用高壓空氣式及水力式防波堤概念擾動及破壞波浪結構；鋪放多孔隙介質來產生水力阻尼；或者在岸線拋消波塊設置消波灘(如菱形塊、鼎型塊、雙 T 塊等)；或改為多孔隙消能結構物(如狹縫型沉箱、開孔式沉箱、以及用萬代福、達恩塊等型塊堆置的直立式碼頭)；或者改建為內置消能斜坡的棧橋式碼頭，甚至使用多孔隙透水式碼頭等。這些消能結構物或方法都能提供某一範圍的消能效果，但都無法完全涵蓋所有可能週期的波浪範圍。

直立式消能結構物是最有機會提供船舶繫纜及碼頭利用空間的設施。在傳統概念中，大部分直立式消能結構物係結合多孔隙(圓孔或方孔或狹縫型)的形狀，並利用縱深不定消波艙且配置多孔隙材料的來消減波能，對於常時波浪(ordinary waves)的消波效果還算有效果，最佳反射率(reflection coefficient, K_r)大約在 0.6 或更小。但在颱風時期發生的長週期浪，其消波表現則不盡理想， K_r 會達到 0.8 以上。

本計畫因此提出複合式消能結構物的概念，企圖從不同的港內波動狀況(水位、波高、週期)及港灣波動特性進行分類(包括季節性變化)，再就各種消波單元分別測試及改良其消波特性與效能。

第三章 碼頭消能結構物水工斷面模型試驗

本章主要是研擬碼頭消能結構物型式，以及執行水工斷面模型試驗。藉由第二章蒐集並研讀的文獻，進行彙整及分析各種消能型式構造之特性，以規劃適用於本計畫標的花蓮港內港西船渠 7 號碼頭之新型式，並針對設計的新型斷面進行水工模型斷面試驗，藉以評估其消能機制與效能。

依照許及林(2023)，從 2005 年龍王颱風的波浪觀測分析與港灣波動數值模擬得知，花蓮港的內港與外港域各有其波動特性，交互的影響較少。西船渠 7 號碼頭主要扮演連通水道的窄航道與外港入射波浪連接；東船渠 12 號碼頭則與內港水域形成一個振盪系統，再連接窄航道。本計畫因此選定先以改善 7 號碼頭為目標。

3.1 先期研究-花蓮港內港碼頭改善選定之數值模擬

依據 112 年 12 月 14 日花港分公司「花蓮港-港池共振內港削減改善討論會議」之結論：「因港池共振是花蓮港長久以來的問題，並直接影響內港水域能否發展風帆船或遊艇基地。國內外已有相關消能設施案例，可考量花蓮港窄航道段整建為消波岸壁、7 號與 12 號碼頭整建為消波岸壁、9 號至 16 號碼頭間水域增建消能擋浪堤、或其他可能工程方案等，做為削減港池共振之評估方案。」

考量未來花蓮港內港 9 號至 16 號碼頭間水域，可能增建消能擋浪堤，惟內港之碼頭岸壁皆為直立壁，無法發揮實質的削減波浪能量功能。因此本計畫先選定內港 7 號碼頭作為改善標的，利用港灣數值模擬，瞭解改建 7 號碼頭為消能式碼頭後，對於花蓮港之港灣靜穩度的影響為何。部分之數值模擬結果已刊登於 113 年 10 月港灣季刊第 129 期(林及許，2024)及本計畫前一年度之報告書(許及林，2024)。

3.1.1 數值模型配置設計

本數值模擬選定花蓮港位於內港西船渠的 7 號碼頭，以改善該碼頭的消波能力對於全港區靜穩度影響做為應用例說明。數值模式沿用 Lin(1995)的無限元素港灣波動模式的版本，進行邊界條件的設定改善。圖 3.1 為數值模擬範圍及水深。模擬的港形有兩種：港形一為現況(Lay01)設置，而港形二(Lay02)為假設不拆除現有設施，但犧牲西船渠 7 號碼頭前端約 30 公尺縱深，做為消能設施的改善空間。Lay01 計有 281,530 個三角元素網格、142,060 個節點、岸壁邊界 1,428 個線元素及假想邊界為 1,160 個線元素；Lay02 計有 281,504 個三角元素網格、142,046 個節點、岸壁邊界 1,424 個線元素及假想邊界為 1,160 個線元素。波浪條件為正東向入射，週期 3~30 秒間距 0.1 秒，以及 30~250 秒間距 1 秒，波高則假設為 1 公尺。

在假設其他岸壁均為固定值反射率前提下，7 號碼頭岸壁的消波能力配置有 3 種：

1. 配置一：港形一假設 7 號碼頭為完全反射(模擬最惡劣情形，LAY01KR1)；
2. 配置二：港形一假設 7 號碼頭為完全消波(模擬最佳情形，LAY01KR3)；
3. 配置三：港形二假設 7 號碼頭為非定值反射率岸壁(LAY02KR2)。

圖 3.2 為花蓮港數值網格，有 8 個測點位置及 3 種討論水域(全港域、外港區及內港區)。表 3-1 為 9 種岸壁類型的反射率設定情形，其中 LAY02KR2 的 Type 7 非定值反射率設定值，如圖 3.3 所示。目前本計畫僅模擬東向入射波浪，分析結果以波浪繞射效應為主。

有關波高增幅值的擷取方式有 3 種：1. 測點值(黑色線)：直接指定網格節點位置，此種方式最容易從十幾萬個節點擷取模擬值，但不同的港灣配置會因網格分割不同，而使得測站不在同一位置，另一種方式是

指定擷取位置座標，並以其為中心搜尋邊長 20 公尺的正方形區域內的最接近值；2. 測區中的最大值(紅色線)：為搜尋指定座標範圍內的最大值；3. 測區平均值(藍色線)：為搜尋指定座標範圍內的所有節點加權平均值，也是計算船席區內代表波高增幅值的方法。

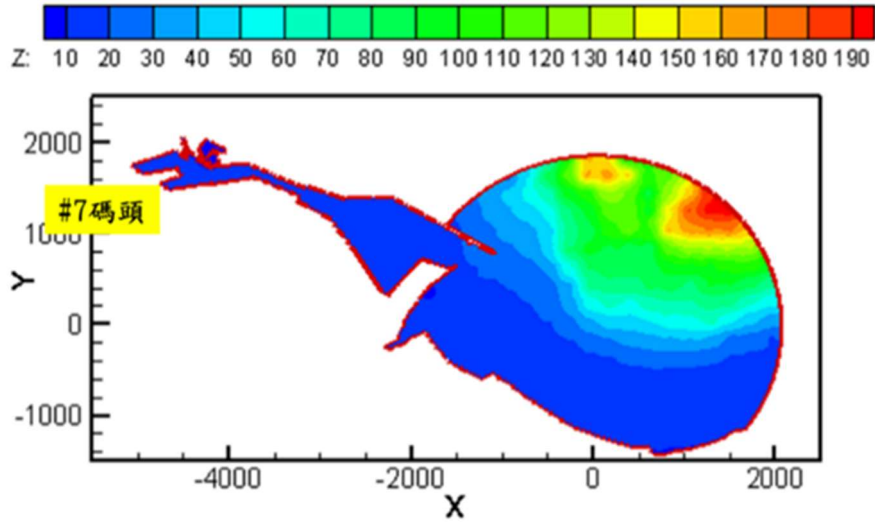


圖 3.1 數值模擬範圍及地形

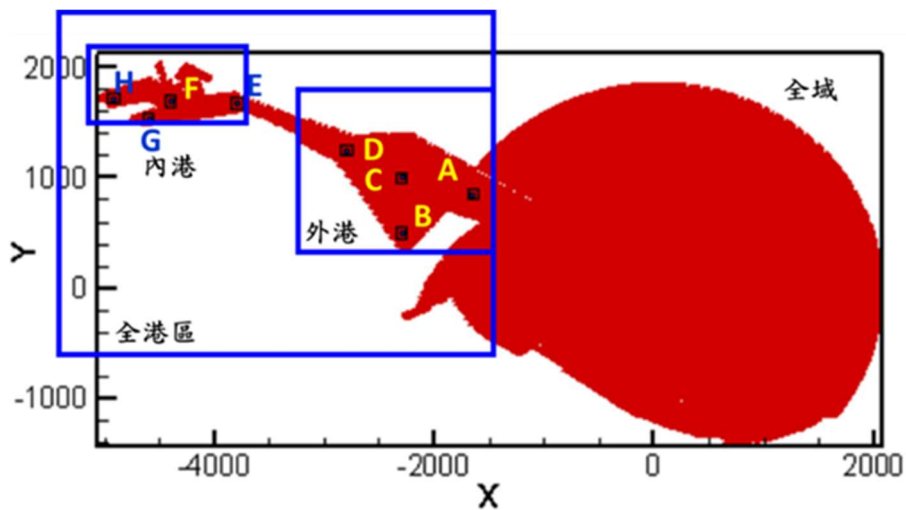


圖 3.2 數值網格、測點位置及討論水域

表3-1 9種位置岸壁類型的反射率設定情形

Case	週期	岸壁類型									備註
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
LAY01 KR1	5s~30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	Type 1：東防波堤外測及至東縮水道前的內側 Type 2：東縮水道 Type 3：漁港全區 Type 4：#13~#16碼頭 Type 5：#12碼頭 Type 6：#8~#11碼頭 Type 7：#7碼頭 Type 8：所有西岸碼頭 Type 9：西防波堤外測及南北濱海岸 v：隨週期變動之反射率
	>30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	
LAY02 KR2	5s~30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	0.2~0.39(v)	1.0	0.5	
	>30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	0.39	1.0	0.5	
LAY01 KR3	5s~30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	0	1.0	0.5	
	>30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	0	1.0	0.5	

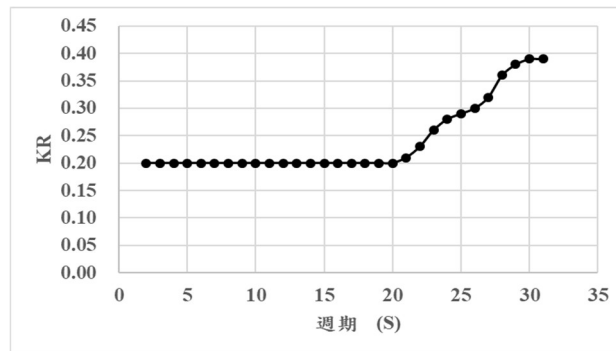


圖 3.3 非定值反射率設定值

3.1.2 數值模擬結果分析

圖 3.4 為 3~250 秒週期入射波作用之波高增幅曲線比較圖，分為外港區(A、B、C、D 測站)及內港區(E、F、G、H 測站)，圖中繪製了 3 種波高增幅曲線，分別為測區最大值(紅色線)、測區平均值(藍色線)及測點值(黑色線)。從圖中各測站的波高增幅曲線可發現：

1. 測區最大值始終大於測區平均值及測點值；而測點值則極不穩定，顯示用測區最大值或測點值的 K_D 均較不恰當，無法代表該港區的波動特性。因此後續之比較均以測區平均值(藍色線)為主。
2. 比較 LAY01KR1(完全反射)與 LAY01KR3(完全消波)的 K_D 變化，外港區由於邊界條件設定相同，其趨勢幾乎相同，但仍略為受 7 號碼頭的完全消波之影響。內港區則明顯表現出 7 號碼頭的完全消波對內港區之影響，波高增幅曲線有大幅的下降。

3. LAY02KR2(非定值反射)的波高變化趨勢介於 LAY01KR1 與 LAY01KR3 之間，推測其原因除了消波能力外，可能是港形二的碼頭岸線少了 60 公尺，改變了西船渠的縱深以及港灣共振特性，詳細原因則需要另外深入探討。然而，也須留意到 LAY01KR3 的完全消波是一種理想狀態，實際港灣很難達到此一境界。

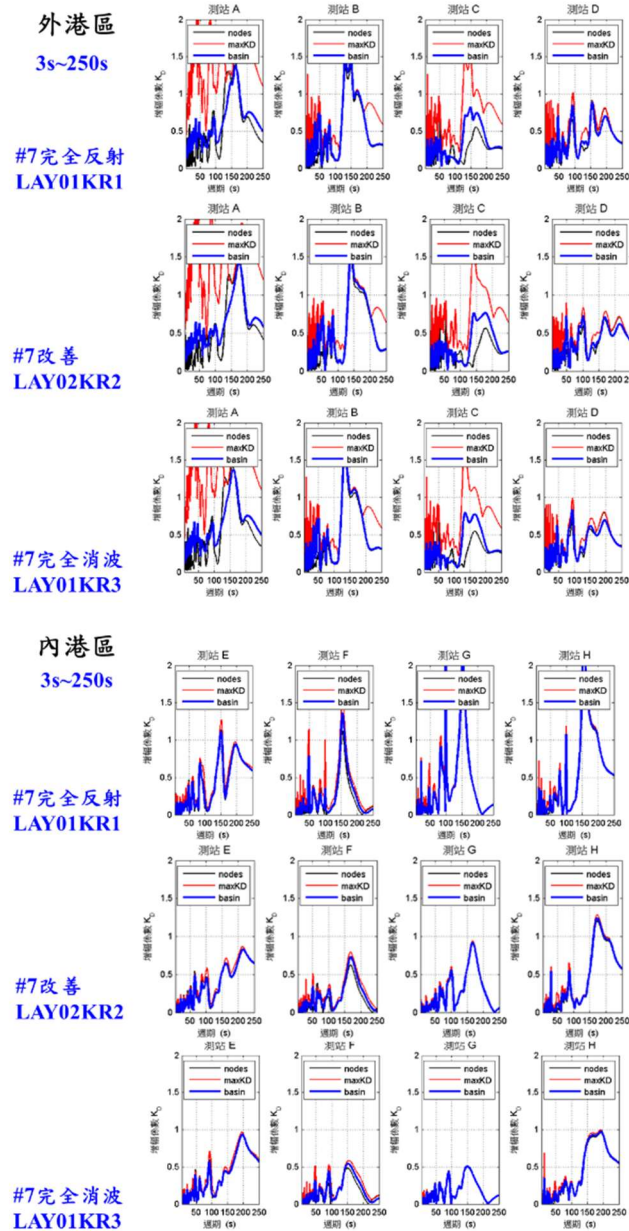


圖 3.4 花蓮港 3~250 秒週期入射波作用之波高增幅曲線比較圖

圖 3.5 為 3 種配置全港區波高增幅係數分布情形，入射波作用週期為 25、30、60、100、150 及 200 秒，為能清楚觀察港灣波動的差異性，本圖設定了門檻值($0.5 < K_D < 2.0$)。圖中顯示外港區的波動差異不大，主要差異從受限航道開始，而且入侵波浪似乎以 19 號及 20 號碼頭為第 1 主要反射區；內港區則顯示 7 號碼頭的消波功能有明顯正面影響。

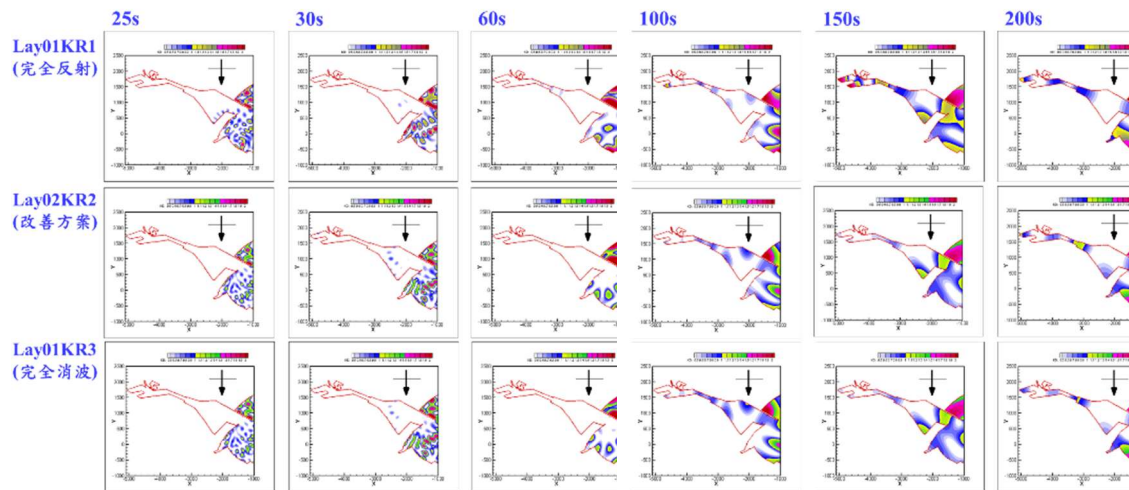


圖 3.5 花蓮港不同配置與週期之波高增幅係數($0.5 < K_D < 2.0$)分布情形

圖 3.6 及圖 3.7 為 LAY01KR1(完全反射) 分別與 LAY01KR3(完全消波)及 LAY02KR2(非定值反射)的 8 個測區平均 K_D 值差值，在交叉比較中獲致下列初步心得：

1. 由於兩種港形(LAY01 及 LAY02)的縱深與網格分割不同，指定座標值的測點與港灣水域的相對位置(例如距離岸壁的遠近)會有不同，因此，兩港形的變化趨勢可能會有差異。
2. LAY01KR1 及 LAY01KR3 為相同港形，僅有#7 碼頭的消波能力不同，比較其 K_D 差值 (正值表示完全反射 KR1 的波動較大，也是完全消波 KR3 有較佳靜穩度)，外港區在 135 秒至 185 秒之間差異較大，顯示 7 號碼頭消波能力的改善，對外港區(測點 B、C 及 D)有較多正面改善，但入口航道(測點 A)則可能因合成波能之影響，反而大於完全反射 KR1 狀態而有負值情形；束縮水道末端(測點 E)在 160 秒至 180 秒之間亦有類似情形；但是內港區(測點 F、G 及 H)則顯示 7 號碼頭消波能力的改善，對於大部分波浪週期都有助益。

3. LAY01KR1 及 LAY02KR2 的港形略為不同，比較其 K_D 差值（正值表示完全反射 KR1 的波動較大，也表示非定值消波 KR2 有較佳靜穩度），顯示 7 號碼頭的消波能力的改善，對整個港區大部分週期的波動都有助益；外港區與內港區皆有較多負差值的原因，應是西船渠的長度縮短改變了自然週期所致。

綜合而言，從 3 種配置方案的比較中發現以取單點 K_D 值的方式來評估港灣靜穩度時，容易因座標錯位而有低估情形。但若以一個船席水域裡的最大 K_D 值又可能過於高估，因為船舶實際上會因船體運動特性有壓波情形，因此，目前建議以船席水域的平均 K_D 值來評估。未來如能瞭解波高與船舶運動量間的關係，靜穩度的評估將更能符合需求。

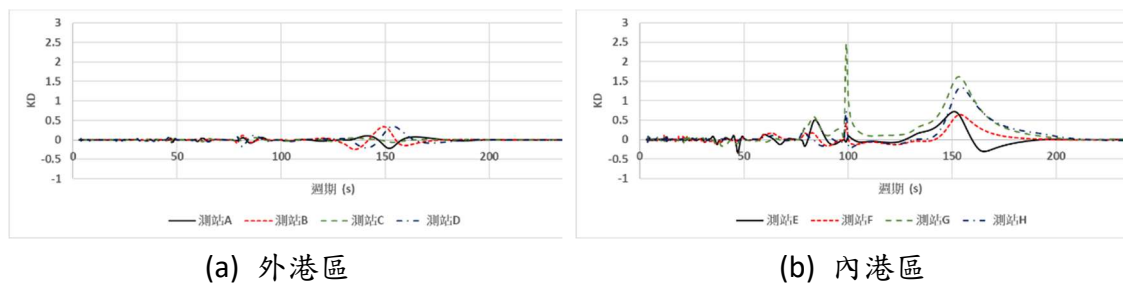


圖 3.6 LAY01KR1(完全反射)與 LAY01KR3(完全消波)的 K_D 差值

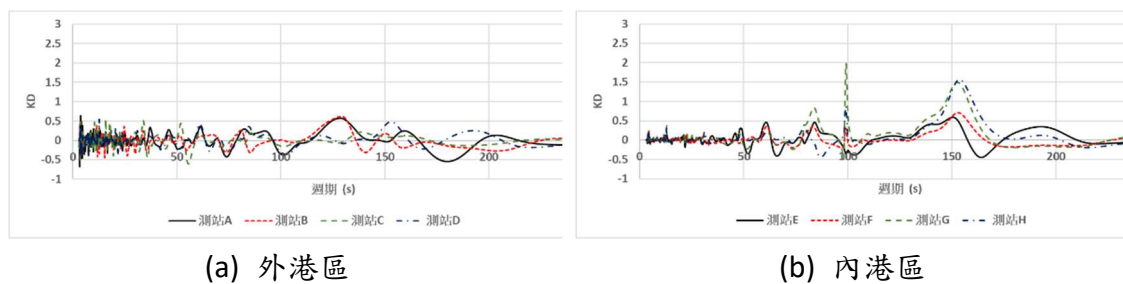


圖 3.7 LAY01KR1(完全反射)與 LAY02KR2(非定值反射)的 K_D 差值

3.1.3 數值模擬結果討論

港灣共振發生原因主要是入侵波浪在港內發生多次反射，導致能量累積而引發的自然振盪。常用的港灣波動評估方法包括進行系列性多個週期的模擬，以尋找港內各水域的自然共振週期，或是針對某些特定週期評估港區水面可能的波動情形。如想瞭解港區各岸壁段的消波能力對港區靜穩度有多少貢獻，則可先模擬全港區岸壁為完全反射及完全消波，以極端的 2 種情境來瞭解最差及最佳的波動情形。其次，可將港區岸壁依其消波特性分類，且蒐集其波浪週期與反射率相關曲線來建立變動反射率對照表，以便模擬符合港區現況之波動情形，接著再針對可能改善之岸線段與可能選用之消波結構物(假設其它岸壁之邊界條件不變)進行模擬，透過交叉比較可瞭解影響港灣靜穩度的各項因子，並評估其改善的成效，本計畫建議以船席水域的 K_D 平均值進行評估。

港灣靜穩度的評估應包含各個分區水域，在各種波浪週期條件下的波動情形。港灣共振的發生並不全然是整個港域，而可能只發生在某些局部水域內，但也可能港灣並未發生共振，而某些水域如船渠的末端、角隅或束縮水道等水域的波動特別大。長方形港池底端的波高增幅曲線常被用來觀察港灣靜穩情形，但換個位置或換個港形就又另當別論。因此，如何選擇適當的位置來繪製波高增幅曲線，以便能適切地評估港灣靜穩度，應列為港灣規劃的先決課題。

在數值模擬過程中，岸壁消波能力的改變會影響到港內波高；而港形改變則因改變了港灣特性長度，而影響到自然共振週期。本計畫刻意參考工程實務，將港形 LAY01 改變成港形 LA02，主要是想凸顯港區內岸線的改變，可能會影響到整個港灣的波動情形。

3.2 水工斷面試驗室簡介

1. 斷面試驗水槽

本所運輸技術研究中心水工斷面試驗室為 3 棟建築物組成，如圖 3.8 所示，其中間貫穿設有一斷面水槽，整體水槽內尺寸為 1.5 公尺寬、2 公尺高及全長約 100 公尺。斷面水槽設有 2 段試驗觀測段，如圖 3.9 所示，皆為 15 公尺長，分別位於第 2 與第 3 棟建築物內，供試驗進行過程中，可即時觀察試驗情況。斷面水槽觀測段由加厚強化玻璃與固定鋼架所組成，水槽頭尾兩端設有多孔斜坡板之被動消波設施。為避免波浪的二次反射影響，並爭取最大波浪作用時間，通常海岸結構物的試驗是在第 3 棟的第 2 觀測段進行，而第 1 觀測段則做為波浪傳播的觀測段。



圖 3.8 本所水工斷面試驗室



第 1 試驗觀測段



第 2 試驗觀測段

圖 3.9 斷面水槽試驗觀測段

2. 造波設備

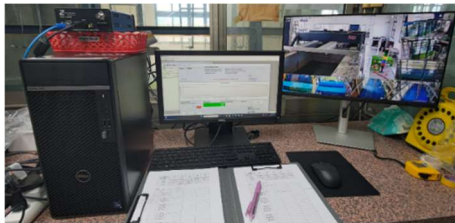
目前使用之造波設備是 112 年底更新設置完成，為英國 HR Wallingford 斷面造波系統 (具有主動消波裝置)，使用造波軟體-HR Merlin)如圖 3.10 所示。其造波能力如表 3-2 所示。為能全程監看造波機做動與造波過程，水槽前中段的週邊及水槽內裝置有 8 頻道封閉式監視系統，圖 3.10 (b)的右上角為監視器的畫面。

3. 波高量測設備

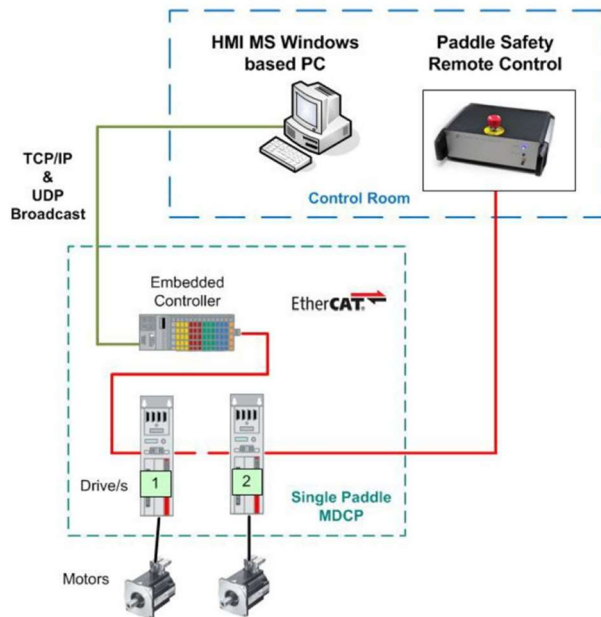
使用英國 HR Wallingford 生產的 8 頻道電阻式波高計系統，並使用擷取軟體-HR DAQ，可即時顯示擷取波形與紀錄波形時序列資料，如圖 3.11 所示。



(a) 雙制動活塞平推式造波機



(b) 造波控制專用個人電腦



(c) 造波機控制系統圖

圖 3.10 造波設備

表 3-2 HR Wallingford 造波機之造波能力範圍

波形類別	可造波水深	設計最大波高	可製造波譜
規則波	0.3m~1.2m	預期設計 0.6m @週期: 2.3~3.6 sec	
不規則波		預期設計 0.31m @週期: 2.3~3.6 sec	(1) Pierson-Moskowitz (2) JONSWAP (3) SIWEH 波群模擬 (4) 自設波譜 (user-defined spectrum)



(左起) 8 頻道集線放大器、30 公尺訊號線及阻抗式測棒 [中：量測範圍 60 公分] (from: HR Wallingford)

圖 3.11 波高量測設備

3.3 新型消能碼頭的研擬

為了能夠改善長週期波浪作用下的港灣共振問題，首先研析花蓮港之港灣環境及波動特性，在考慮儘量保留碼頭的使用功能原則下，112 年研擬了 3 種消能式結構物基本型，並將結構物以多個消能單元進行組合。113 年進行基本型消能式結構物模型試驗，以便能釐清各個消能單元的消波效果，再以滾動式檢討與改裝方式進行各單元的改善。於本(114)年度進行精進模型之斷面水工試驗，以評估各模型之消波功能，並檢討彼此間的耦合或互制關係。

依據花蓮港內港 7 號碼頭之尺寸資料：長度 120 公尺、寬度 20 公尺、設計水深 6.5 公尺。考量斷面水槽的尺寸及可設置水深，擬定消能碼頭斷面水工試驗採用 Froude Law(福祿定律)相似律，將試驗縮尺訂為長度縮尺 1/25，時間縮尺為 1/5。

考量模型縮尺及工程實務的規格，各種模型以 3 個不大於長 50 公分×寬 60 公分之箱體組合而成，各個箱體相當於原型現場的長 12.5 公尺長×寬 15 公尺。因設定為現況港灣設施改善工程，原則上考量可現場施工或預鑄元件型式為主，不考慮沉箱結構。

有關水工斷面試驗模型的設計，113 年將結構物分割為 3 個大單元，本(114)年度則細分增加為 6 個單元：

1. **主體單元**：為一具有斜坡頂板之直立式開孔結構物。考量模型縮尺，以及工程實務的規格，各個模型以 3 個 50 公分長、60 公分寬(主體為 40 公分)箱體結構組合而成。
2. **上部越波排水單元**：平均海水面以上的斜面或弧面頂板，主要針對高水位、大波高可以產生強烈溯升之波浪，也就是讓波浪能在坡面上能發生淺化、碎波、溯升及越波為原則。本單元測試了光滑弧面和斜面，另於斜面上加裝雙逆下斜向高度約 1.2 公分的突起，主要是想瞭解其對波浪溯升溯降以及消能效果的影響，尤其是小波高的

時候。下斜突起的設計是想導引水流的方向，使溯降不直接造波。為了讓波浪容易發生溯升與越波，斜坡面需要在有限寬度內盡量和緩，以及斜坡底部必須伸入平均水位以下。

3. **下部前牆單元**：主要考量平均潮位以下的波動，也就是針對無法登上斜坡的波浪，探討如何消滅其波能。目前測試了全開放式、柵欄式、直開孔短隔牆及直開孔長隔間牆等型式。
4. **內部消波艙單元**：由上部斜面/弧面頂板、下部前牆、左右側壁及後側懸吊板構成，針對入侵消波艙的波浪進行能量消滅，必須考慮消能設施一旦沒水，因孔隙處於飽和含水狀態，消波效果較不顯著。消波艙的頂高通常僅有數公尺，可發揮的空間有限，而且此單元還需與其他單元共同評估其共伴效應，例如插入水中的上部斜面/弧面、後側懸吊板以及兩個側壁構成之氣室(如圖 3.12 所示)。本年度比較了空消波艙、後置平台、後置平台加排水道及後置平台加延伸排水道。

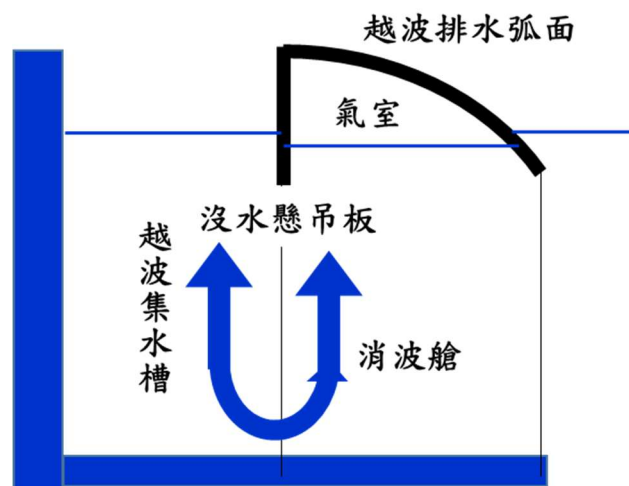


圖 3.12 消能結構物氣室的形成

5. **後側集水槽及連通管單元**：收集越波的水量，並利用集水槽與結構物外的位能差來排水。此外，初期設計構想是想以插入平均水位的懸吊板來隔離集水槽與消波艙的波動，但後來發現它們亦構成了連通管的振盪水柱現象，干擾了消波艙與集水槽的波動。

6. **底部排水道單元**：目的是要使後側集水槽因越波所累積的水體，因內外水位差而產生排水之水流，並同時宣洩部分在集水槽發生振盪的能量。

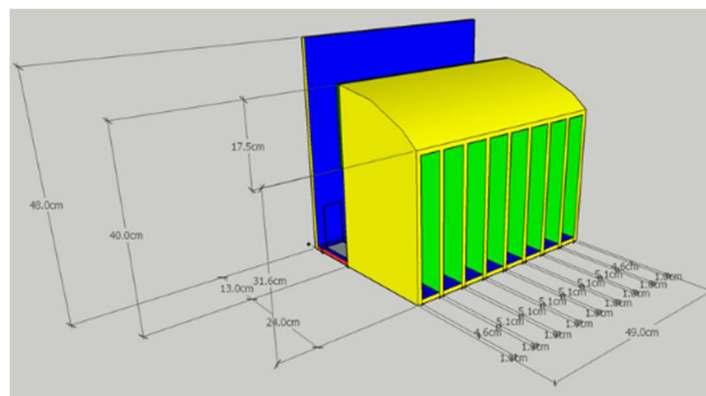
依據上述的各單元，113 年及本(114)年度的試驗研究依據 3 種基本型(簡稱 FT01 系列、FT02 系列及 FT04 系列)，組合設計 11 種試驗模型(FT01~FT11)，表 3-3 顯示各模型之消波單元配置情形及圖 3.13~3.15 所示，說明如下：

表 3-3 11種模型之單元設計

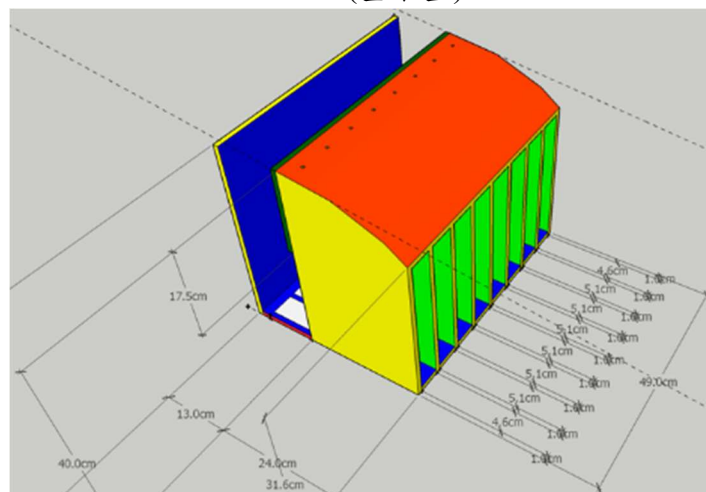
模型代碼	基本型	主體單元	上部越波排水單元	下部消波艙前側/消波艙後側	後側集水槽
FT01	FT01	隔間牆	光滑弧面	空的/空的	入水懸吊板
FT02	FT02	柵欄與斜向導水板	光滑斜面	空的/空的	開放型
FT03	FT01	隔間牆	頂部開孔光滑弧面	空的/空的	入水懸吊板
FT04	FT04	隔艙壁	光滑斜面	空的/空的	入水懸吊板
FT05	FT04	隔艙壁	光滑斜面	空的/階梯式平台	入水懸吊板
FT06	FT04	隔艙壁	光滑斜面加斜向突起	空的/平台加下方排水道	入水懸吊板
FT07	FT04	隔艙壁	光滑斜面加斜向突起	平台加延伸排水道	入水懸吊板
FT08	FT04	隔艙壁	光滑斜面加斜向突起	空的/空的	入水懸吊板
FT09	FT02	柵欄與斜向導水板	光滑斜面加斜向突起	空的/空的	開放型
FT10	FT02	斜向導水板(無柵欄)	光滑斜面加斜向突起	空的/空的	開放型
FT11	FT02	斜向導水板(無柵欄)	光滑斜面加斜向突起	加設三維斜坡/空的	開放型

1. **FT01 系列**：包含 FT01 及 FT03 模型，如圖 3.13 所示，上部單元為以弧面越波排水為主的開孔式結構物(FT01)，弧面的選擇是考慮讓

溯升波浪更容易越波。弧面的製作於實務上，可採用鋼模的預鑄混凝土結構施做，下部結構的開孔式以隔艙壁替代，形成每個模型單元都有 8 個隔艙，而非一整體。試驗中發現弧面斜坡與後側懸吊板及側壁構成了一個氣室(如圖 3.12)，在波浪作用下，於波峰時會壓縮空氣與波谷時會排氣洩壓，分別對波浪產生壓制及干擾的現象。為進一步瞭解氣室對消波效果的影響，於 113 年臨時增加在 FT01 模型的弧面頂部開孔排氣型式(FT03)，以瞭解氣室的效能。試驗結果顯示 FT03 因為頂部開孔，讓水面都承受相同空氣壓力，反而失去氣室壓波功能，造成其反射波浪較 FT01 略高。加上考慮弧面施工的困難度較高，無法因應水位的漲落，而切實掌握弧面的入水角度，反而容易增加波浪的溯下造波，FT01 模型後續改善暫不考慮。



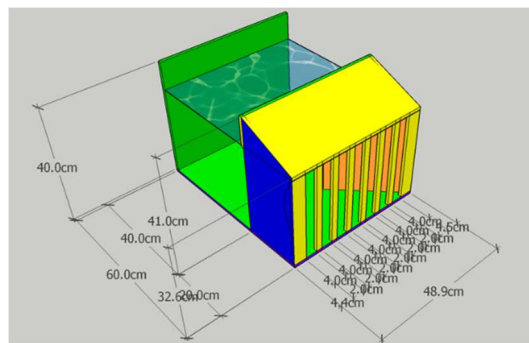
FT01(基本型)



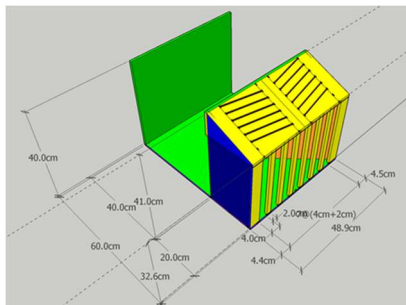
FT03

圖 3.13 FT01 系列

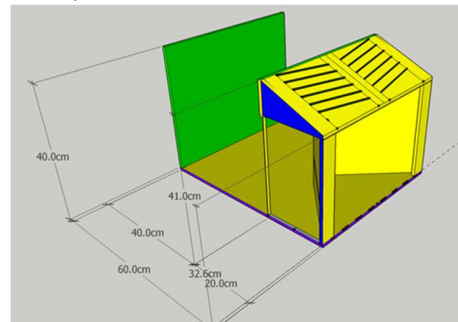
2. **FT02 系列**：包含 FT02、FT09、FT10 及 FT11 模型，如圖 3.14 所示，為以斜面越波排水為主的渦流式結構物(FT02) (參考大島及森屋，2005)，前壁為柵欄式開孔，消波艙內以設置有交角與開口的兩片斜向隔間板，分隔成前艙的消波艙與後艙的渦流艙。本單元企圖利用隔間板的交角與開口，在後側渦流艙產生渦流，來將波能轉為流能並滯留能量。本次試驗僅作特性觀察，並未探討最佳斜向導水板夾角與開口寬度。FT09 為 FT02 增加斜面突起；FT10 為 FT09 拆除柵欄；FT11 為 FT10 加設立體斜坡及下方排水道。



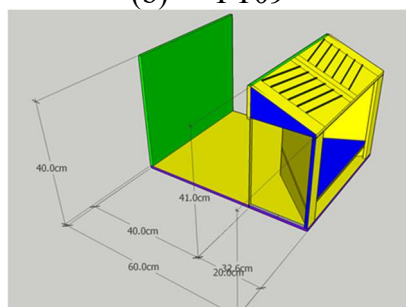
(a) FT02(基本型)



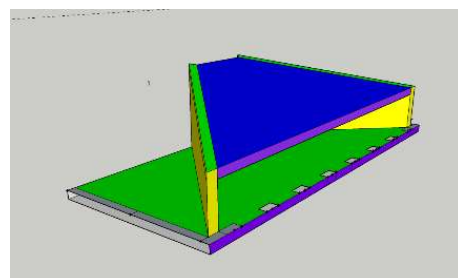
(b) FT09



(c) FT10



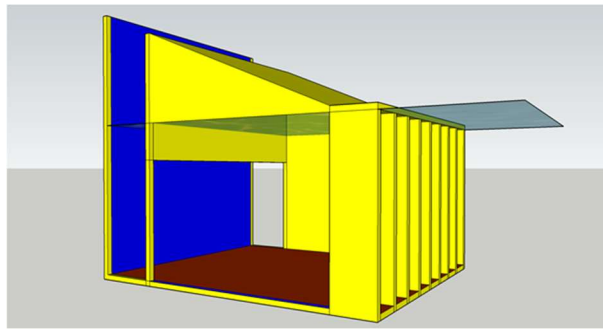
(d) FT11



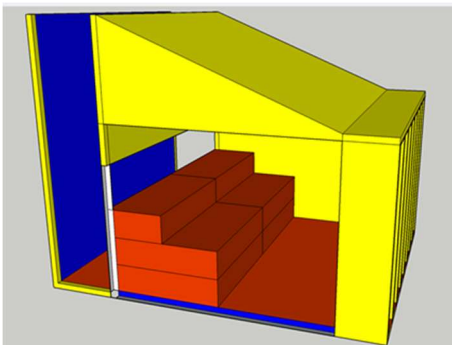
(e) 立體斜坡及排水道

圖 3.14 FT02 系列

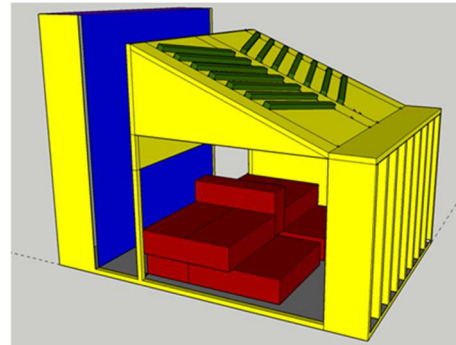
3. **FT04 系列**：包含 FT04、FT05、FT06、FT07 及 FT08 模型，如圖 3.15 所示，為以斜面越波排水為主的開孔式結構物(FT04)，屬於工程上比 FT01 及 FT02 還容易施作的結構物。前壁以短牆來替代開孔樁柱，也加強結構強度及干擾入射波動，後側目前仍為一整體之消波艙，以便後續可再增加消能設施。FT05 為 FT04 消波艙後側加設高平台；FT06 為 FT04 斜面加設斜向突起，並於消波艙後側加設低平台並加設排水道；FT07 為 FT06 延伸排水道至前壁短牆端；FT08 為空消波艙，僅於 FT04 斜面上加設斜向突起。



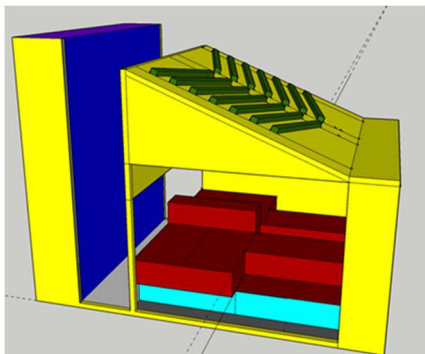
FT04(基本型)



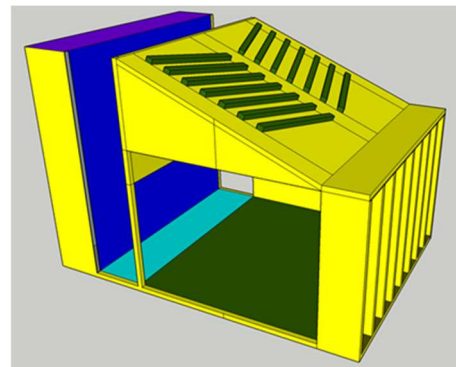
FT05



FT06



FT07



FT08

圖 3.15 FT04 系列

3.4 消能碼頭水工斷面模型試驗設計

基於考量多年度的試驗項目並參考造波水槽之規格，選定的模型縮尺為 1/25，如圖 3.16 為試驗水槽的佈置情形。使用的水槽長度約 83 公尺，造波水深為 74 公分，在距造波板約 66 公尺處設置一 6% 斜率之緩坡(7 公尺長，42 公分頂高)，以將入射波調整為淺水波，後面續接一沒水 32 公分之 9.6 公尺長平台，作為試驗區。整個模型地形是以 45x45x3 公釐厚鍍鋅角鋼焊接及組裝而成，上面鋪設木芯板並做防水塗層。如圖 3.17(a)所示，斜坡為了安全性，最終以縱軸向分成兩個單元，而平台部分則以 4 個 480 公分(長)x74 公分(寬)x40 公分(高)單元進行組裝，方便後續因試驗需要的延長。為避免模型地形與兩側水槽壁因漏水而影響波形，相接縫均以彈性泡棉膠條填塞。圖 3.17(b)為地形的完工照片。相關的試驗規劃簡述如下：

1. 造波條件

為能測試各消能結構物模型的消波效果，FT01、FT02 及 FT03 以規則波進行了造波週期介於 0.9 秒至 5 秒之間的試驗，實際執行了 0.9、1.0、1.1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5 及 5 秒共 11 個條件，造波波高原則以 5 公分(小波高)及 10 公分(大波高)為主，每個造波條件原則重複 3 次，並以造波 120 秒及波高計 100Hz 同步取樣 300 秒進行。因為 0.9~1.1 秒的波形不穩定，但 1.5 秒以上之波形與分析結果相當穩定，因此 FT04~FT11 均執行 1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5 及 5 秒共 8 個條件，且僅執行 1 次造波，整個傳播過程沒發生碎波情形。

為了確認試驗造波之穩定性，本次試驗另增加了空水槽試驗(FT00)，即結構物岸壁位置設置為直立壁。

2. 波高計佈置

8 支波高計的佈置及編號如圖 3.16 所示，W1 做為入射波高計，W2~W8 則以等間距 0.68 公尺佈置於碼頭模型 1 公尺前，量測波形

時序列做為分析波浪反射率之用。波高計於設置前，先使用英國 HR Wallingford 之波高計擷取軟體-HR DAQ 進行率定，結果如圖 3.18 所示。

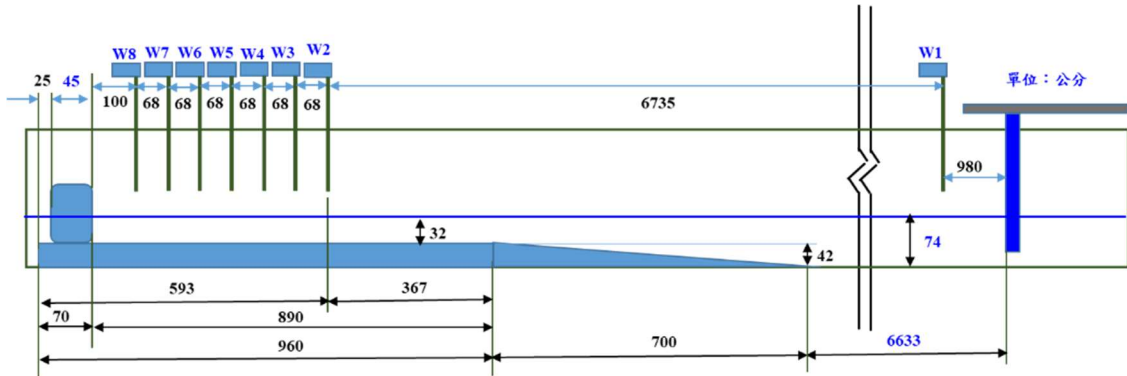
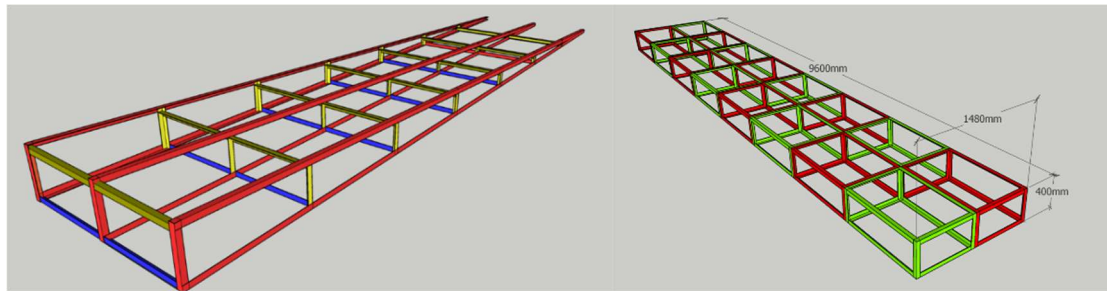
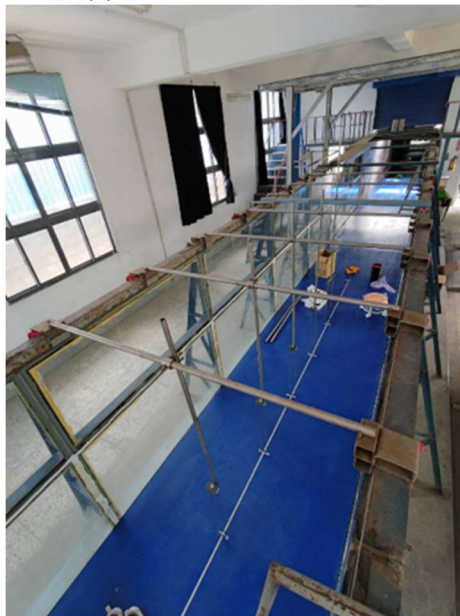


圖 3.16 試驗水槽佈置情形

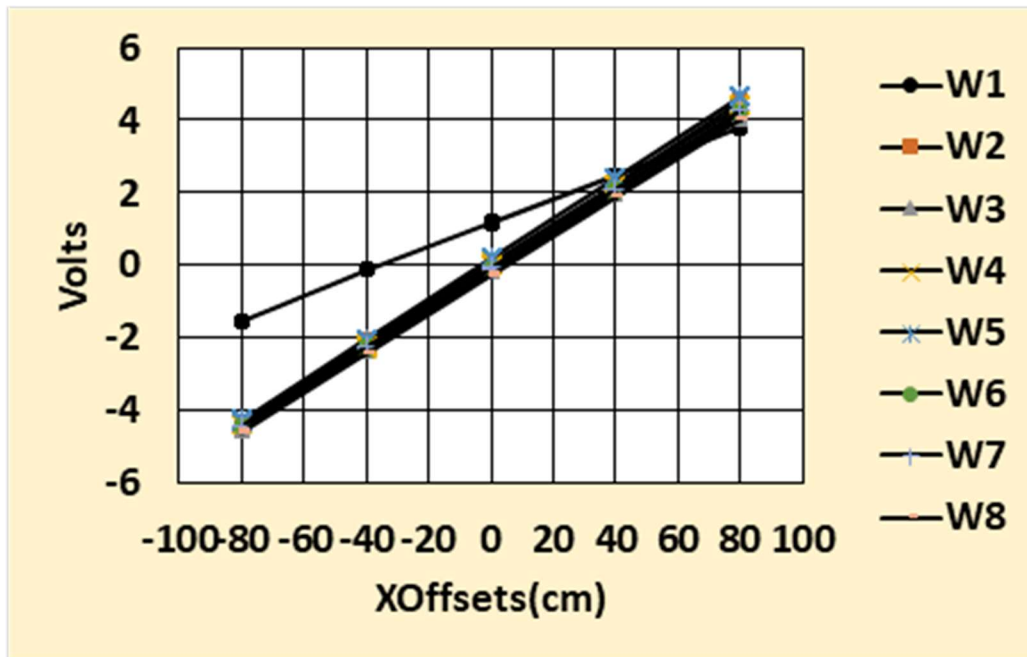


(a) 模型地形角鋼構架



(b) 完工照片

圖 3.17 試驗地形佈置情形



Instrument Serial/ID	Calibration(mm)	Zero(Volts)	R ²	95% CI @ FSD
W1	30.12390221	1.161620412	0.999812669	0.085151186
W2	18.60500727	-0.267381728	0.999996797	0.008149457
W3	18.38309276	-0.061845597	0.999995983	0.008860101
W4	18.52604358	-0.107361317	0.999994335	0.010640751
W5	17.95335585	0.196056626	0.999993296	0.010940391
W6	18.31155138	0.033195062	0.999983537	0.017718875
W7	18.65004955	-0.186970206	0.999617535	0.088617971
W8	18.30454699	0.068335803	0.999961788	0.026898862

圖 3.18 消能碼頭結構物試驗之波高計率定結果

3.5 消能碼頭水工斷面模型試驗分析

本年度試驗初步擬定進行下列的基本分析：

1. **波列傳播過程及穩定分析：**以線性波理論之分散關係式配合模型及波高計與造波板間的距離，計算入射波、一次反射波及二次反射波到達各之波高計的時間(如圖 3.19 所示)，以觀察波浪的穩定性及選定適合分析的波段。
2. **零上切個別波分析：**對每一個測試條件之每一支波高計量測波形時序列，以零上切法判讀個別波高與週期，並繪製時序圖以瞭解波高及週期與設定波浪條件之間的差異。
3. **FFT 波譜分析：**對每一個測試條件之每一支波高計量測波形時序列，進行 FFT 分析並繪製波譜圖，以瞭解波浪能量的變化。
4. **個別波分析求反射率法：**將 7 支(W2~W8)波高計進行配對，並以 Goda and Suzuki (1976)的個別波兩點求反射率法，對每一組配對之同步波形進行分析，為增加參考反射率數，以每次位移五分之一週期擷取一個週期的個別波波形，來進行分析方式，並繪製 Kr-T 之時序圖。
5. **波列分析求反射率法：**將 7 支(W2~W8)波高計進行配對，並以 Goda and Suzuki (1976)的不規則波(時序列)兩點求反射率法，對每一組配對之同步波形進行分析。因為是以 60 秒長的時序列計算反射率，只會得到一個值，將以同樣時段長度的黑色實線表示，標示於個別波分析的 Kr-T 時序圖上以利觀察。
6. 波高計配對條列如下：
 - (1) 第一組(G1)：W2-W3、W3-W4、W4-W5、W5-W6、W6-W7 及 W7-W8；
 - (2) 第二組(G2)：W2-W4、W3-W5、W4-W6、W5-W7 及 W6-W8；
 - (3) 第三組(G3)：W2-W5、W3-W6、W4-W7 及 W5-W8；
 - (4) 第四組(G4)：W2-W6、W3-W7 及 W4-W8；

(5) 第五組(G5)：W2-W7 及 W3-W8；

(6) 第六組(G6)：W2-W8。本組因只有一組配對。只列入觀察。

7. 應用試算表針對各個試驗模型的分析文字檔結果，進行個別分析與各個模型間之交叉比較。

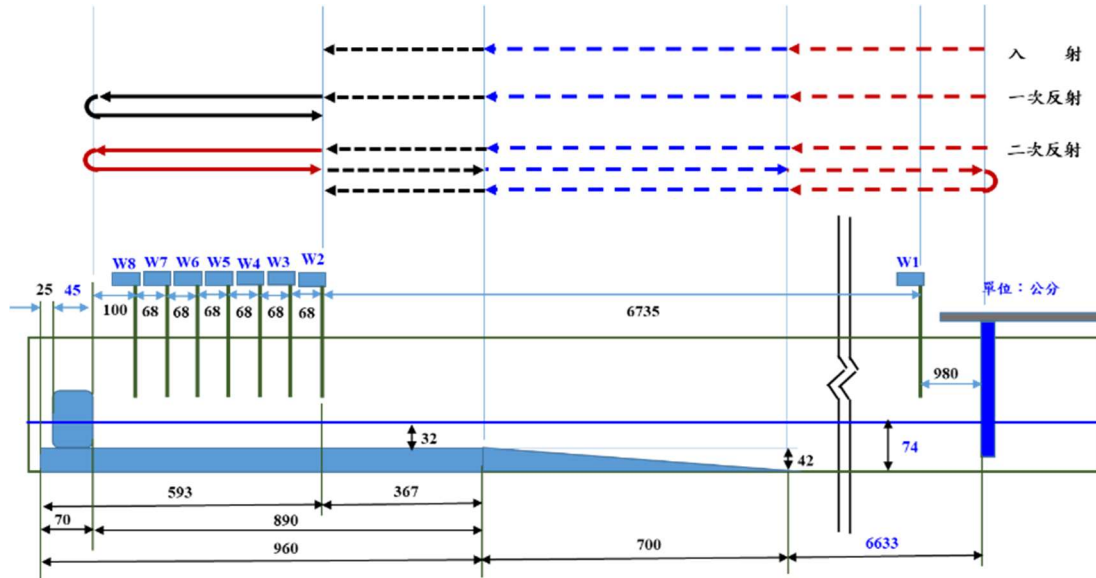


圖 3.19 波浪傳播時間計算示意圖

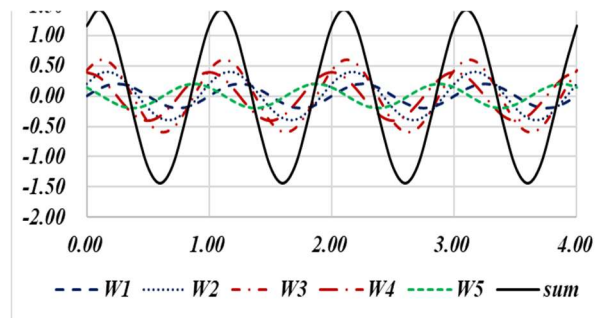
3.5.1 理論成分波形的線性疊加與觀察

為瞭解單一週期規則造波受消能式結構物反射後，可能發生的波形變化情形，圖 3.20 以倍頻波為探討對象，如式 3.1，進行不同振幅及相位的波形疊加。圖 3.20(a)為 5 個週期相同，但振幅及相位不同之正弦波的成分波與疊加合成波之波形時序列。測試中發現只要週期相同，合成波仍保持原來週期不會改變。圖 3.20 (b)為 2 個倍頻波且振幅及相位不同之正弦波的成分波與疊加合成波之波形時序列。左小圖為主頻波振幅大於倍頻波，合成波之週期與主頻相同；右小圖為主頻波振幅小於倍頻波，合成波之週期與倍頻相同，而且零上切波高會有交叉高低變化。圖 3.20 (c)為 3 倍頻波且振幅及相位不同之正弦波的成分波與疊加合成波之波形時序列。左小圖為主頻波振幅大於 2 種倍頻波，合成波之週期與主頻相同；右小圖為第 1 倍頻振幅大於主頻波及第 2 倍頻波，合成波之週期與第 1 倍頻相同，零上切波高會有強烈變化。

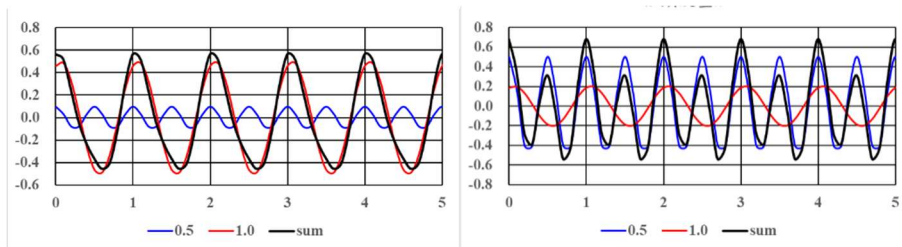
$$\eta(t) = \sum_{i=1}^3 a_i \cos(-i\omega t + \phi_i) \text{ -----(3.1)}$$

本計畫也編寫二維及三維之兩線性波形疊加測試程式，前者可繪製不同週期、振幅及相位之入射波與反射波的線性疊加；後者可繪製不同週期、振幅及相位之入射波與斜向反射波的線性疊加。作為觀察波形成分組合之輔助工具。圖 3.21 為兩個三維同週期波形，即週期、振幅與相位相同，但有不同的方向角之合成波形(公式如式 3.2 所示)。

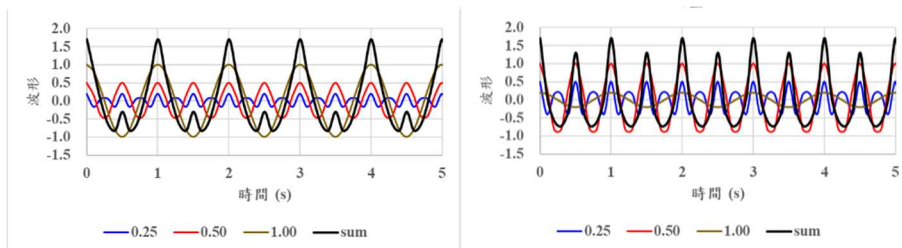
$$\eta(x, y; t) = a_1 \cos(k_1 x \cos\theta_1 + k_1 y \sin\theta_1 - \omega_1 t + \phi_1) + a_2 \cos(k_2 x \cos\theta_2 + k_2 y \sin\theta_2 - \omega_2 t + \phi_2) \text{ -----(3.2)}$$



(a) 5 個週期相同但振幅及相位不同之正弦波的疊加



(b) 2 倍頻波但振幅及相位不同之正弦波的疊加



(c) 3 倍頻波但振幅及相位不同之正弦波的疊加

圖 3.20 二維理論倍頻波形之線性疊加

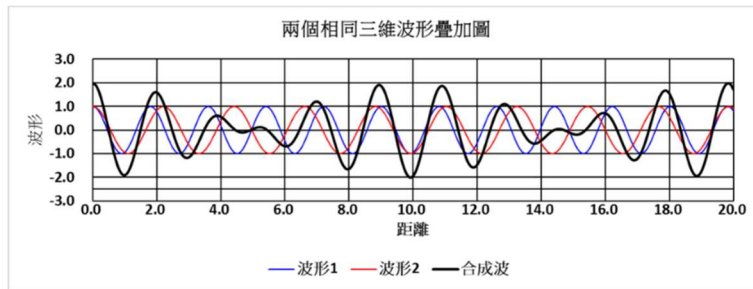
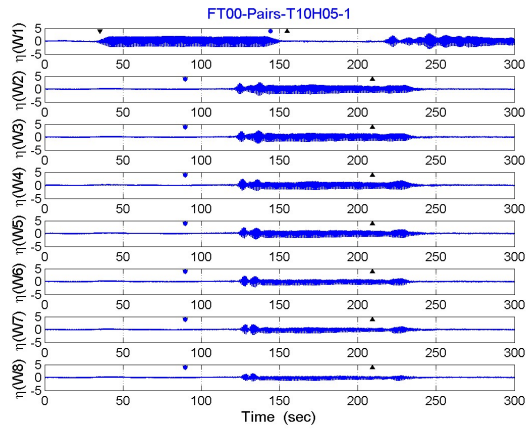


圖 3.21 兩個三維理論波形之線性疊加

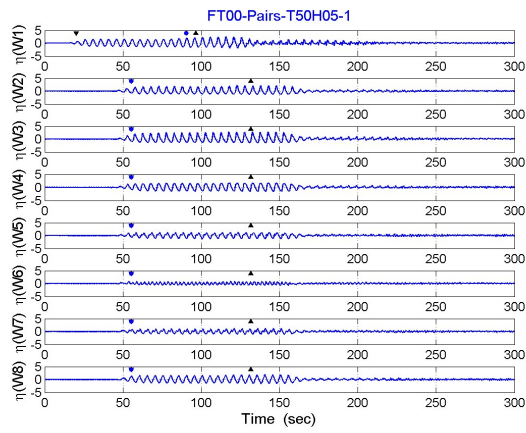
3.5.2 波形時序列之觀察

圖 3.22 為空水槽(FT00)試驗的 8 支波高計波形時序圖，子圖(a)為代碼 T10H05-1(週期 1 秒、波高 5 公分、第 1 次重複)；子圖(b)為週期 5 秒、波高 5 公分、第 1 次重複(代碼 T50H05-1)。每個時序圖都以 W1 為參考，自通過 W1 之波形大於 1 公分開始起算到達時間(leadtdt)。配合水深及週期透過分散關係式計算波速，再據以推算「理論」通過每支波高計的時間(包含入射波、一次反射及二次反射波)，並以下列符號標示▼：入射波到達時間、●：一反射波到達時間及▲：二次反射波到達時間。從子圖(a)中發現量測的波形並未如線性波理論所推估到達時間通過各波高計；但從子圖(b)中則發現推估到達時間與實際通過各波高計的時間相近。經多方研討，確認波浪在水槽中確實依理論推估時間通過每一支波高計，沒有延遲，只是前導波與尾波的波高有衰減情形，而且短週期波比較容易衰減到無法辨認。

圖 3.23 及圖 3.24 分別為 FT01 試驗週期 1 秒及 5 秒各重複 3 次的 8 支波高計波形時序圖，圖中各子圖，第二欄為波高 5 公分；第三欄為波高 10 公分；第二至第四列為依序為 3 次重複，顯示各個造波條件的 3 次重複相當接近，即造波機與水槽配置的穩定性高。週期 1 秒、波高 10 公分的波形較不穩定；週期 5 秒、波高 10 公分的波形則明顯非線性，應與 FT01 之消能有關。



(a) FT00，週期 1 秒，波高 5 公分、第 1 次重複(代碼 T10H05-1)



(b) FT00，週期 5 秒，波高 5 公分、第 1 次重複(代碼 T50H05-1)

圖 3.22 空水槽(FT00)試驗的 8 支波高計波形時序圖

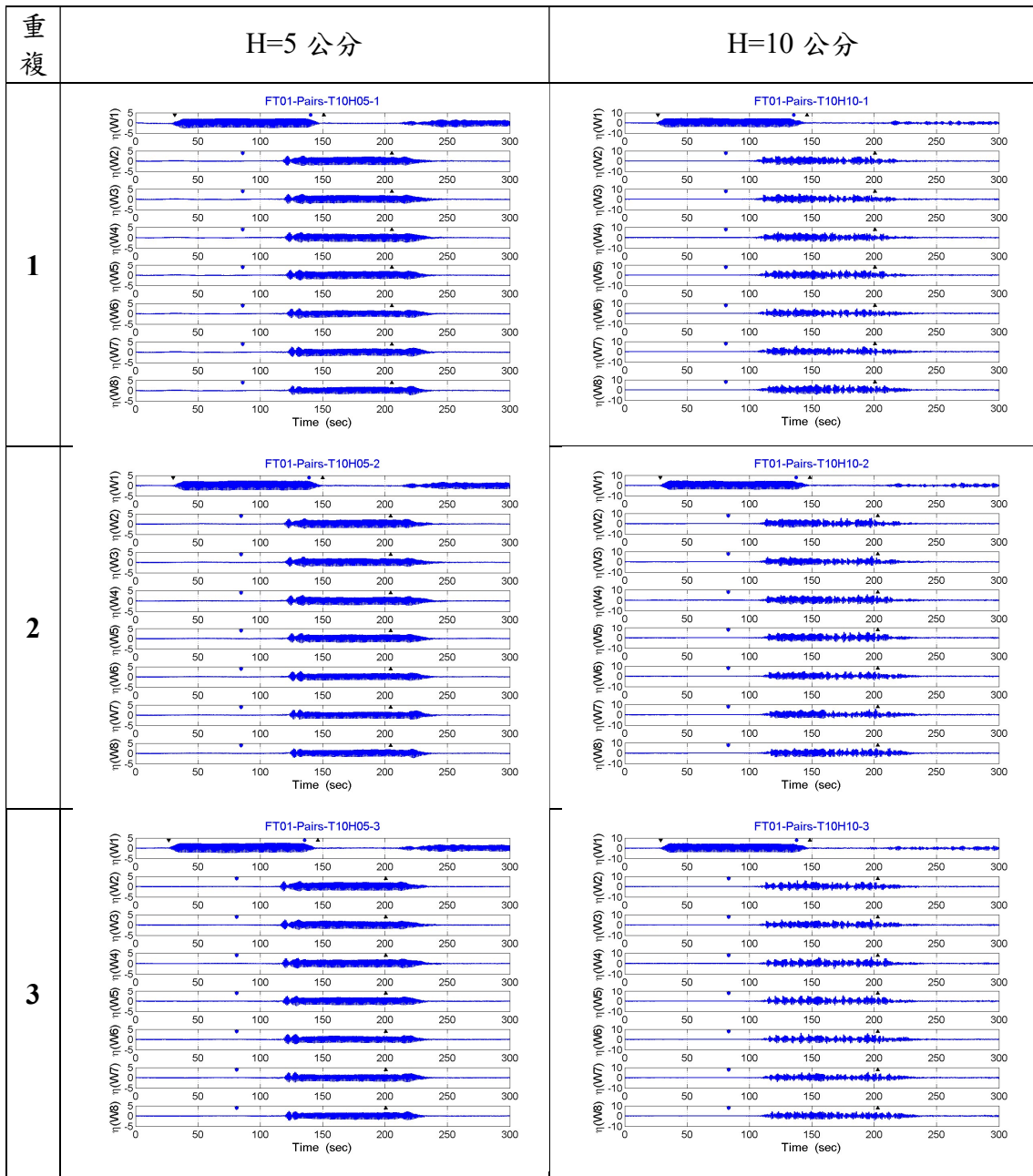


圖 3.23 FT01 試驗週期 1 秒重複 3 次的 8 支波高計波形時序圖

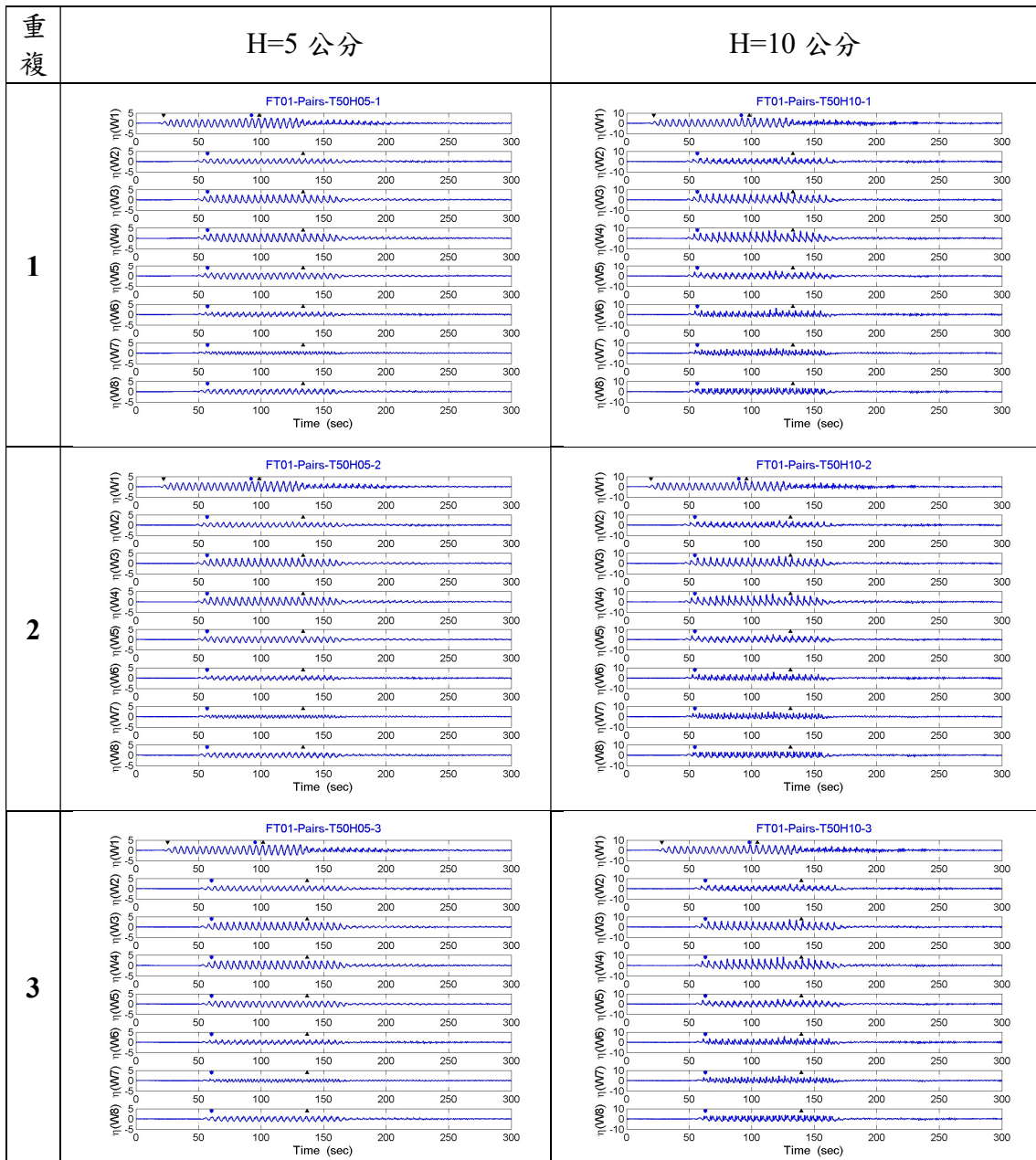


圖 3.24 FT01 試驗週期 5 秒重複 3 次的 8 支波高計波形時序圖

3.5.3 FFT 分析波譜圖之觀察

圖 3.25 為 FT01 試驗：其中 5 個週期、波高 5 公分之 8 支波高計波譜圖，子圖(a)為各波高計之波譜的配置情形；子圖(b)~子圖(f)依序為週期 1、2、3、4 及 5 秒的分析波譜。為便於閱讀，波譜圖的縱軸範圍並非相同。

子圖(b)FT01-T10H05 的各個波譜明顯符合規則波之單脈衝譜，W1 的譜峰值明顯大於其它，W2~W8 能量大約相近，顯示波浪在傳輸過程中明顯衰減。

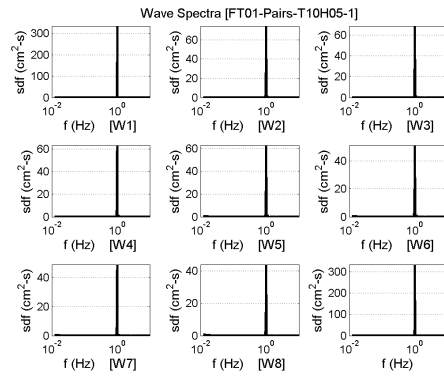
子圖(c) FT01-T20H05 的 W2~W8 的波譜出現了倍頻成分脈衝譜，它可能是非線性波或三維斜向波所造成。其中，W2~W8 出現譜峰值不對等的情形，可能是消能結構物前的波動有接近定常之趨勢(例如駐波狀態下，波峰/波谷極值點處的能量最大；而節點處的能量趨近於 0)。

子圖(d)FT01-T30H05 中，W3、W6 及 W7 呈現雙脈衝譜；但 W4、W5 及 W8 則出現三脈衝譜，而 W8 更是倍頻能量高於主頻，顯然不是非線性波。藉此，本計畫發現消能結構物可能會引發三維的斜向反射波。

子圖(e) FT01-T40H05 中，W2、W3、W7 及 W8 出現倍頻能量大於主頻的三脈衝譜；W1、W4、W5 及 W6 則出現主頻能量最高的雙脈衝譜，可能也是消能結構物引發的三維斜向反射波。

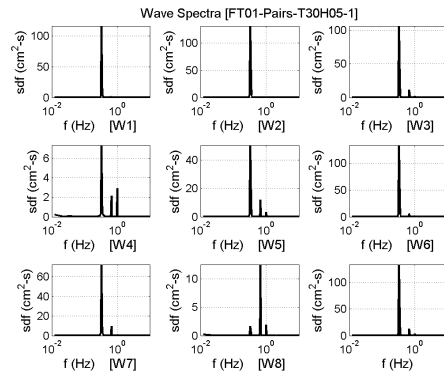
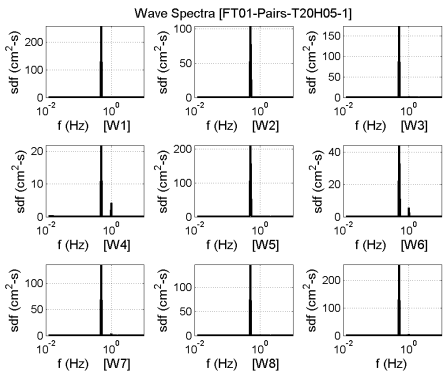
子圖(f) FT01-T50H05 中，W6 及 W8 出現主頻能量最高的三脈衝譜；W3、W4 及 W7 為雙脈衝譜，但 W7 的倍頻能量明顯大於主頻。

W1	W2	W3
W4	W5	W6
W7	W8	W1~W8 波譜疊 加



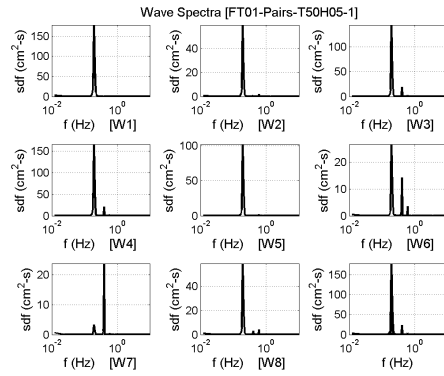
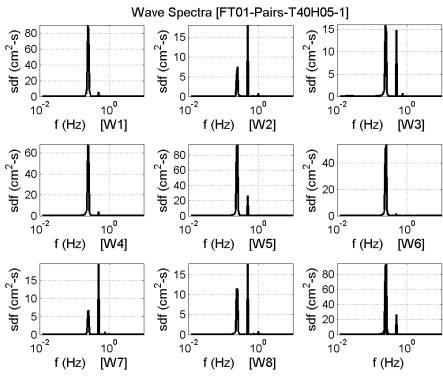
(a) 波譜圖中各波高計之配置情形

(b) 週期 1 秒，波高 5 公分



(c) 週期 2 秒，波高 5 公分

(d) 週期 3 秒，波高 5 公分



(e) 週期 4 秒，波高 5 公分

(f) 週期 5 秒，波高 5 公分

圖 3.25 FT01 試驗 8 支波高計之波譜圖

3.5.4 零上切個別波高及週期時序圖之觀察

圖 3.26 羅列了 FT01 試驗中波高 5 公分、週期為 1、2.5、3、3.5、4 及 5 秒，依序為子圖(a)~子圖(f)，8 支波高計(由上而下)之個別波高(左欄)及週期(右欄)的時序圖，從圖中可以發現，單純波浪入射與反射應只會得到單一波高值及單一週期值的時序列。

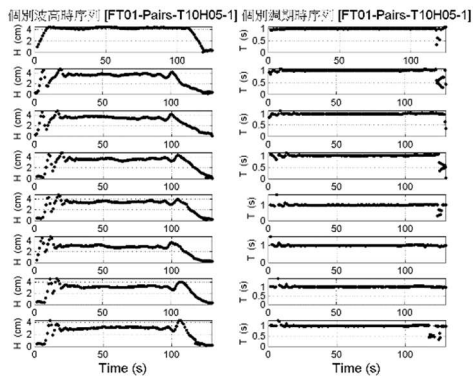
子圖(a) FT01-T10H05 中，各波高計之波高出現前後較小的情形，應該與波形的衰減有關。波高的突然變化，可能發生在衰減的反射前導波與後續的進行波交會之際，尾波亦有類似情形，但分析波高未達到指定的造波波高；週期部分除了前後端部分序列外，中段相當穩定。

子圖(b) FT01-T25H05 中，發現 W2 出現 3 種波高值和 4 種週期值，而 W5 出現 2 種波高值和 2 種週期值。依據 5.1 節的討論，顯示波動並不是非線性波，或倍頻波所引致，應該是水槽裡面出現三維的波動。

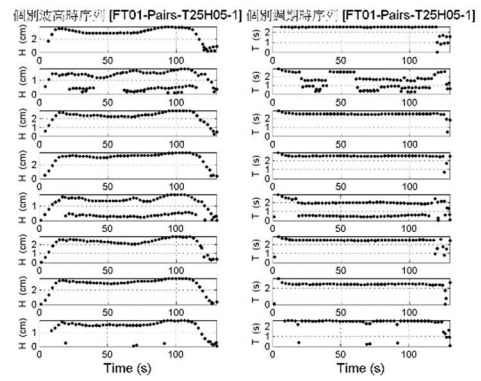
子圖(c) FT01-T30H05 中，發現 W4 出現 2 種波高值和 2 種週期值，而 W8 出現 2 種波高值和 1 種週期值，可能也是因為水槽裡面出現三維的波動。

子圖(d) FT01-T35H05 中，發現 W3、W4 及 W8 出現 2 種波高值和 2 種週期值；子圖(e) FT01-T40H05 中，發現 W2、W7 及 W8 出現 2 種波高值和 2 種週期值；子圖(f) FT01-T50H05 中，發現 W6、W7 及 W8 出現 2 種波高值和 2 種週期值。

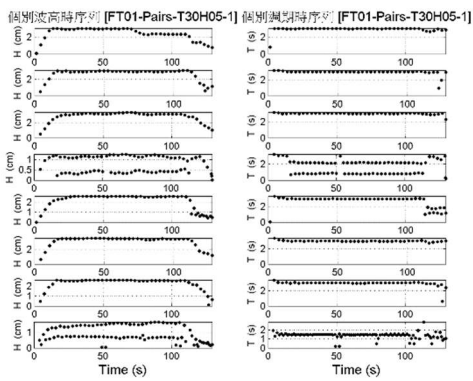
綜合而言，試驗水槽因為消能結構物的反射，而發生三維波動的可能性很高。



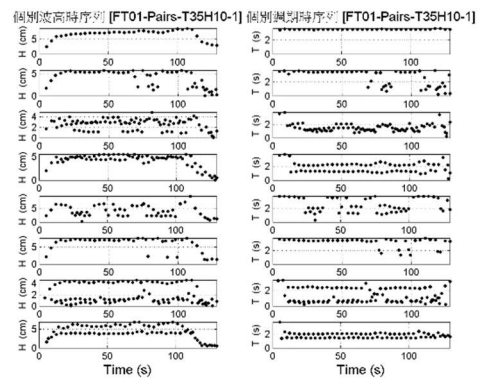
(a) 週期 1 秒，波高 5 公分



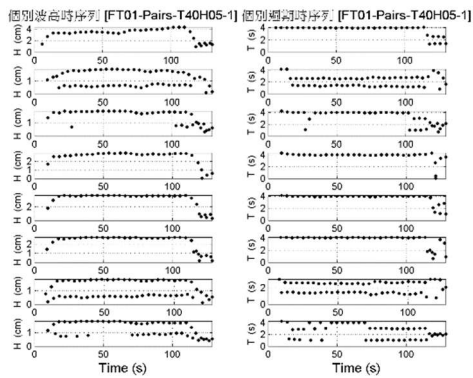
(b) 週期 2.5 秒，波高 5 公分



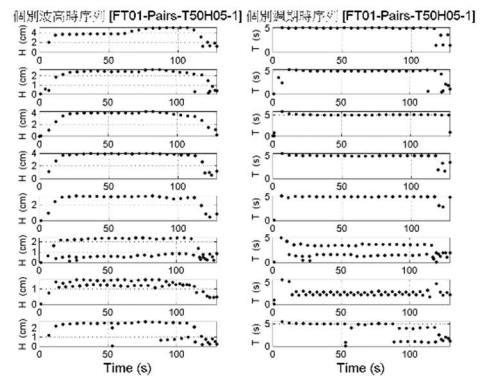
(c) 週期 3 秒，波高 5 公分



(d) 週期 3.5 秒，波高 5 公分



(e) 週期 4 秒，波高 5 公分



(f) 週期 5 秒，波高 5 公分

圖 3.26 FT01 試驗 8 支波高計之個別波高/週期時序圖

3.5.5 反射率分析的觀察

為瞭解利用 Goda 及 Suzuki(1976)兩點法，進行多組配對波高計求反射率的可行性，本計畫同時啟用個別波分析法及波列分析法，而波高計配對僅呈現相鄰 2 支波高計之 6 組配對。分析步驟說明如下：

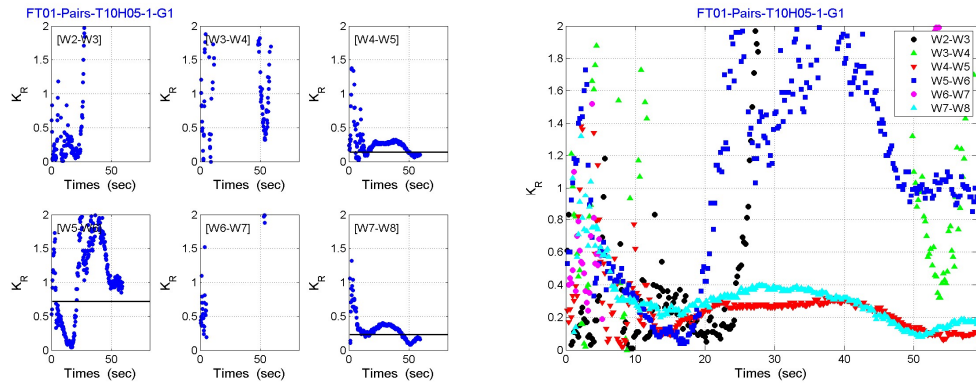
1. 針對每一組波高計配對，搜尋第 1 支波高計的波形大於 1 公分的時間點，再加上 2 個週期時間作為起始時間。
2. 個別波分析法：自起始時間開始擷取 60 秒(造波 120 秒的一半)，然後每次平移 0.2 倍週期，擷取 1 個週期的波形進行 Goda 兩點法單一波分析，最後每一組配對會得到很多個反射率(K_r)值(反射率時序圖中的藍圓點)。
3. 波列分析法：自起始時間開始擷取 8192 個點波形，進行 Goda 兩點波譜法分析，最後每一組配對會得到一個反射率(K_R)值(反射率時序圖中的黑實線)。
4. 如果時間序列擷取不當，反射率時序圖可能會發散。
5. 從各組配對的交叉比較，可以篩選掉不適當的配對(例如波高計間距不對)，本報告暫不啟動篩選。

圖 3.27 羅列了 FT01 試驗中，波高 5 公分、週期為 1~5 秒(每間隔 0.5 秒)之反射率分析時序圖(左圖)及各個配對合併圖(右圖)，依序如子圖(a)~子圖(i)，各圖中有 W2-W3、W3-W4、W4-W5、W5-W6、W6-W7 及 W7-W8 等六張子圖。

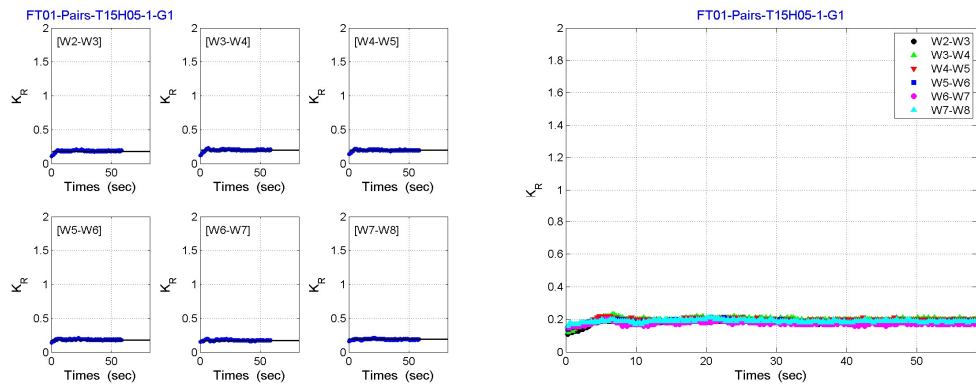
子圖(a)為週期 1 秒，明顯看到反射率值的發散情形，可能是波形不穩定緣故。在本計畫中，週期 0.9、1.0 及 1.1 秒的波形都不穩定，所求反射率也都發散無法求得代表值。但週期 1.5 秒以後波形則趨於正常。

子圖(b)~子圖(i)中，左側時序圖顯示個別波分析法所求得之反射率值(藍色圓點)相當集中，與應用波列法所求得之反射率值(黑色實線)亦近乎相同。右側 6 個配對的所有反射率合成圖，也顯示出具有集中性，

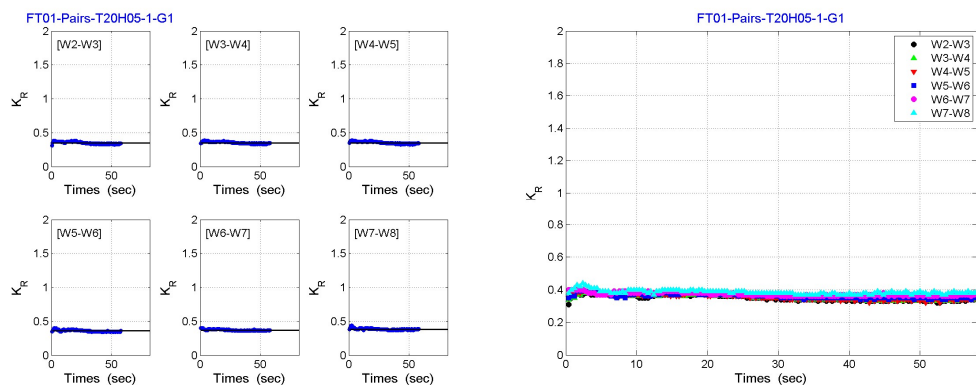
反射率變化的間距在 0.2 之間，且造波週期越長間距越大。不過，仔細觀察各個配對的反射率分佈會發現大部分的波浪條件均呈現 W1-W8 配對的反射率最大，而 W2-W3 配對的反射率最低。其差異可能與水槽波動並非二維波動有關。



(a) 週期 1 秒，波高 5 公分

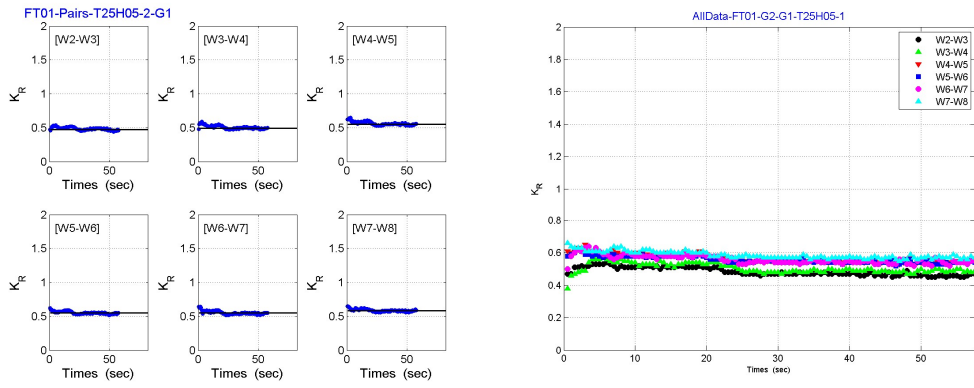


(b) 週期 1.5 秒，波高 5 公分

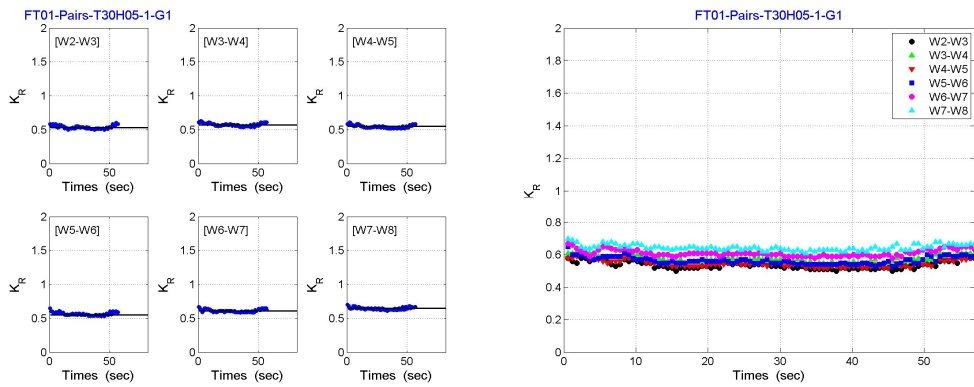


(c) 週期 2 秒，波高 5 公分

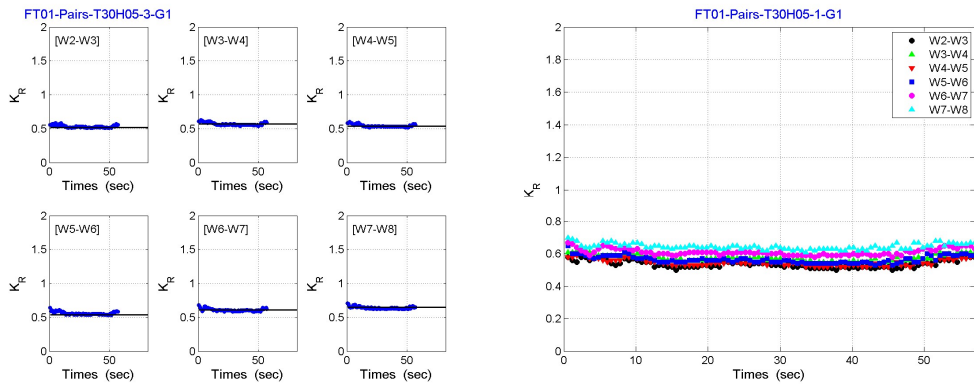
圖 3.27 FT01 試驗波高計 G1 配對之反射率時序圖



(d) 週期 2.5 秒，波高 5 公分

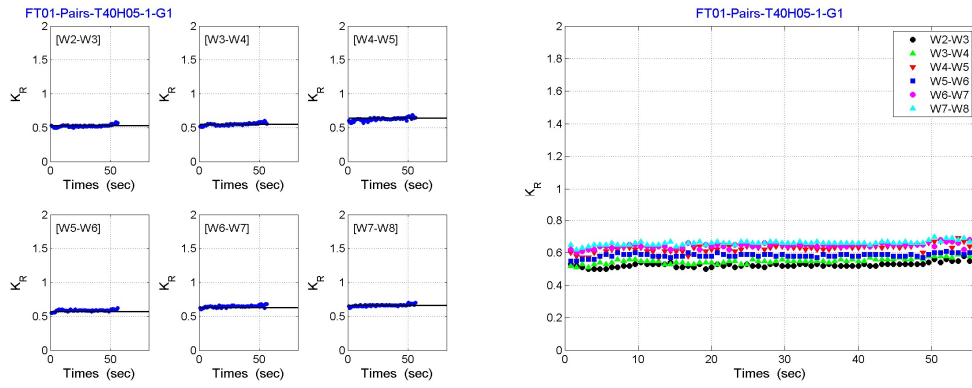


(e) 週期 3 秒，波高 5 公分

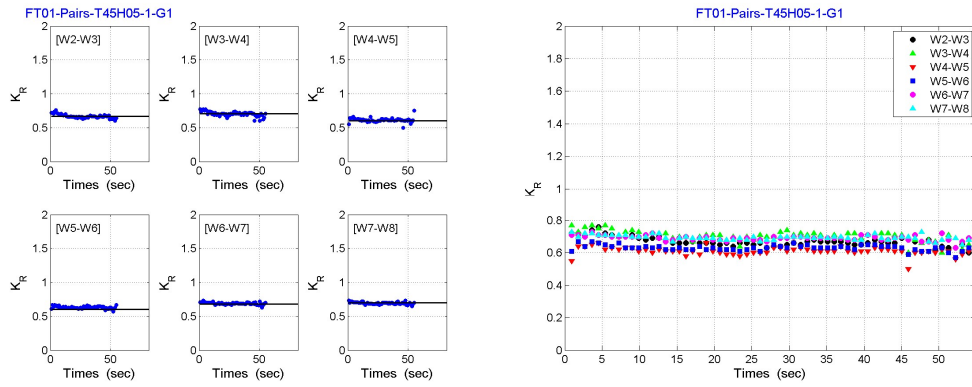


(f) 週期 3.5 秒，波高 5 公分

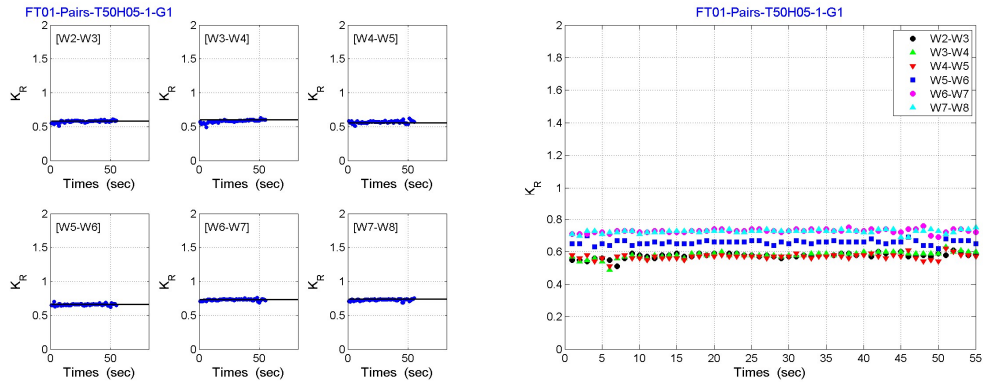
圖 3.27(續) FT01 試驗波高計 G1 配對之反射率時序圖



(g) 週期 4 秒，波高 5 公分



(h) 週期 4.5 秒，波高 5 公分



(i) 週期 5 秒，波高 5 公分

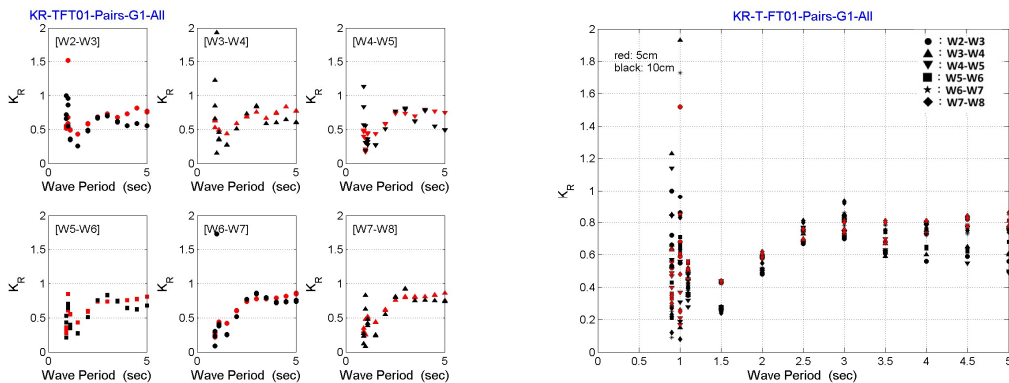
圖 3.27(續) FT01 試驗波高計 G1 配對之反射率時序圖

3.6 消能碼頭水工斷面模型試驗結果

本節針對 3 種系列的試驗資料進行分析與討論，由於分析繪製的圖很多，且個別波分析法與波列分析法的結果相近，此處主要討論波列分析法的反射率分布與迴歸結果。

3.6.1 FT01 系列

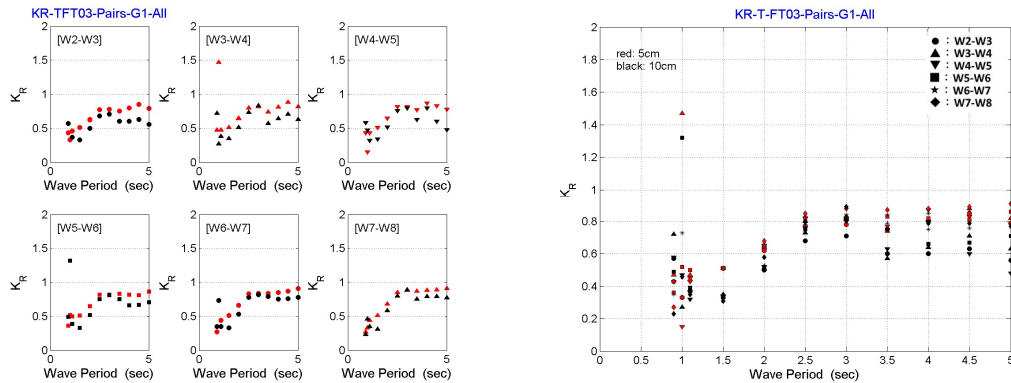
圖 3.28 及圖 3.29 分別為 FT01 及 FT03 之波列分析法的反射率分布圖，兩圖中顯示大部分波高 5 公分(紅色標記)的反射率大於波高 10 公分(黑色標記)，應係小波高的波浪沒有完全於弧面上溯升與越波作用，反而因溯降而產生反射波。大波高則因越波及排水，反射率可見稍低於小波高的結果。由於 FT01 及 FT03 主要為測試弧面的消波功能，因為弧面在平均水位附近的弧度較陡，一旦沒發生越波排水現象，就很容易發生反射，因此反射率在週期 1.5 秒可以降到 0.5 以下(下部結構的消能)，但接近週期 5 秒時即提升到 0.8 附近。



(a) 各波高計配對

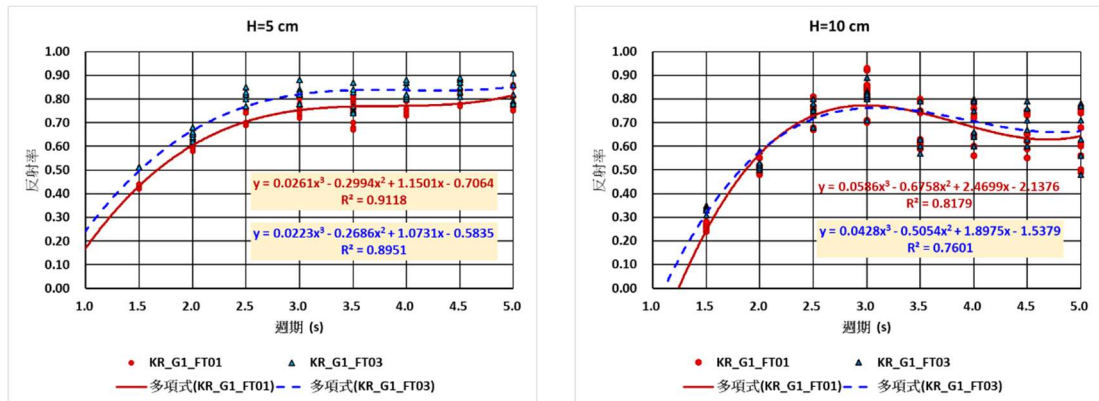
(b) 所有波高計配對

圖 3.28 FT01 之波列分析法的反射率分布圖



(a) 各波高計配對 (b) 所有波高計配對
圖 3.29 FT03 之波列分析法的反射率分布圖

圖 3.30 為合併 FT01 與 FT03 反射率分布曲線與迴歸公式的比較，分別進行(a)波高 5 公分(小波高)與(b)波高 10 公分(大波高)。由於 FT01 有氣室，而 FT03 則於弧面頂端設置了解壓孔，其反射率反而增大，顯示因為氣室裡的空氣壓縮與解壓過程，對波動有產生壓制與消能作用。



(a) 波高 5 公分 (b) 波高 10 公分

圖 3.30 FT01 與 FT03 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

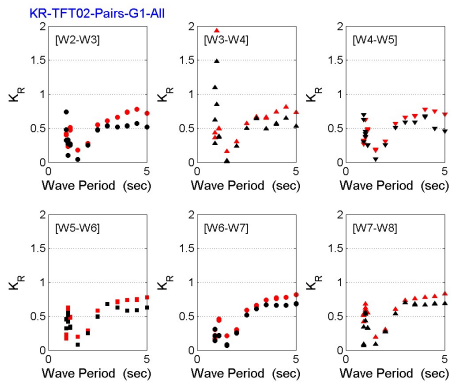
3.6.2 FT02 系列

圖 3.31 至圖 3.34 分別為 FT02、FT09~FT11 之波列分析法的反射率分布圖。同樣地，圖中均顯示大部分波高 5 公分(紅色標記)的反射率略大於波高 10 公分(黑色標記)，因小波高幾乎無法發生越波，使其反射率明顯高於大波高。大波高的反射率最大值約在 0.6 左右，顯示增加越波排水的渦流式消能結構物有很好的消能表現。

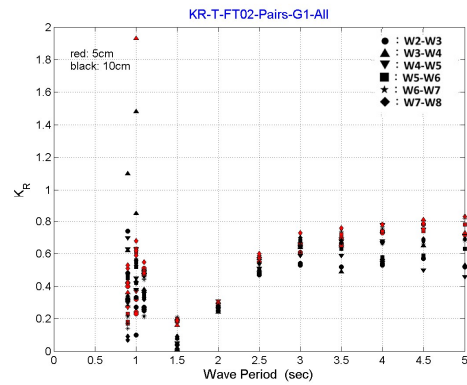
圖 3.35 至圖 3.37 依序為 FT02 分別與 FT09、FT10 及 FT11 的比較，而圖 3.38 為 FT10 與 FT11 的比較。圖 3.35 顯示增加斜面突起(FT09)，對小波高的反射率影響差異極小。反之，對大波高而言，因為波浪多能爬上斜坡，週期 3.5 秒以下，反射率影響差異小；但週期 3.5 秒以上反射率反而升高，可能是突起雖會消耗波能，但反而略為影響到波浪的越波。FT02 及 FT09 的反射率差值約在 0.05 左右，整體的反射率差異不明顯。

圖 3.36 比對了 FT02 與 FT10 的反射率，討論斜面突起及下部前牆柵欄對反射率的影響。小波高主要利用下部單元進行消減波能，週期 3.5 秒以下因缺少柵欄而反射率升高，其差值約在 0.05 左右；3.5 秒以上則差異小，推測柵欄對較長週期小波高波浪的影響可能較小。然而對大波高而言，則 FT10 比 FT02 的反射率普遍增大到 0.1 左右，顯示柵欄的設置有利於削減大波高部分波能，且斜面突起影響了波浪越波。

再嘗試於 FT10 前艙室增加傾斜板，以改變渦流發生射流現象，並建立排水道。圖 3.37 為針對 FT02 與 FT11 的反射率進行討論，對小波高主要探討下部單元設置前牆柵欄或傾斜板之差異，FT11 反射率皆略為降低，其差值約在 0.05 左右，顯示傾斜板消減部分波能效果略優於柵欄。對大波高而言，FT11 無前牆柵欄，但設置傾斜板有排水道及斜面突起，於週期 3.5 秒有一反射率轉折，推測斜面突起對於較長週期波浪的越波有影響。以圖 3.38 單獨比較有無設置傾斜板與排水道的差異，明顯看出 FT11 優於 FT10 有大約 0.1 的反射率。

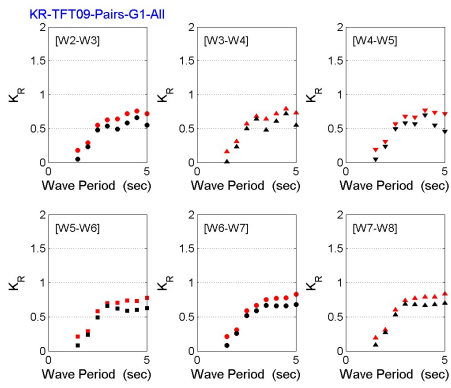


(a) 各波高計配對

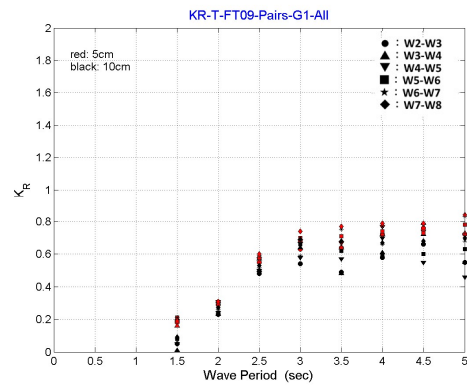


(b) 所有波高計配對

圖 3.31 FT02 之波列分析法的反射率分布圖

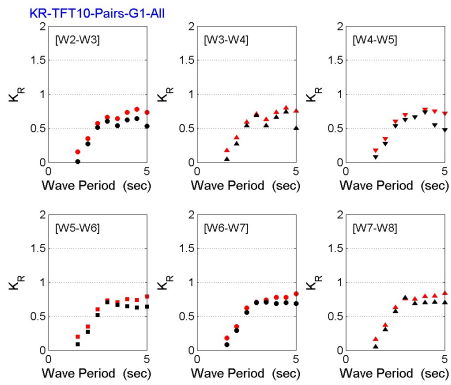


(a) 各波高計配對

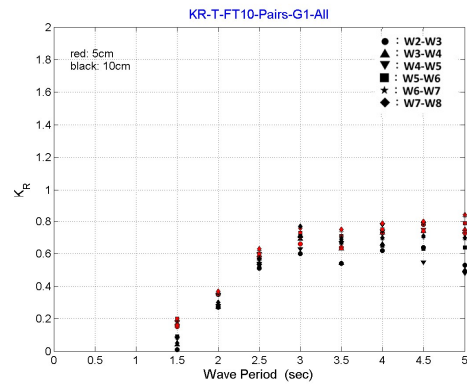


(b) 所有波高計配對

圖 3.32 FT09 之波列分析法的反射率分布圖

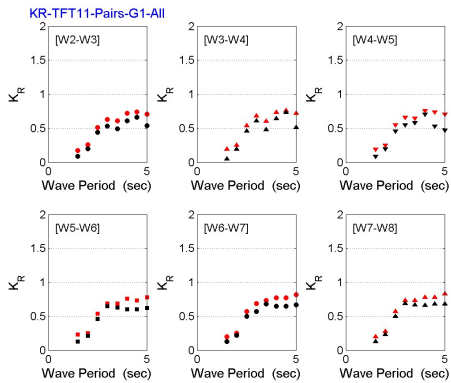


(a) 各波高計配對

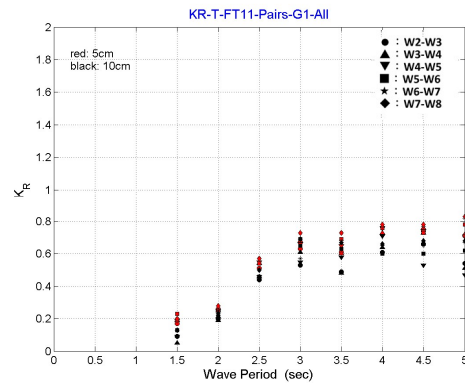


(b) 所有波高計配對

圖 3.33 FT10 之波列分析法的反射率分布圖

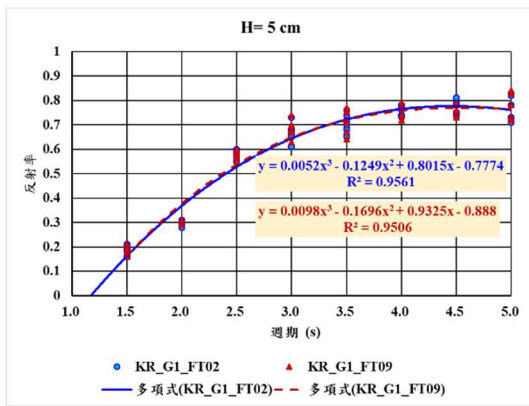


(a) 各波高計配對

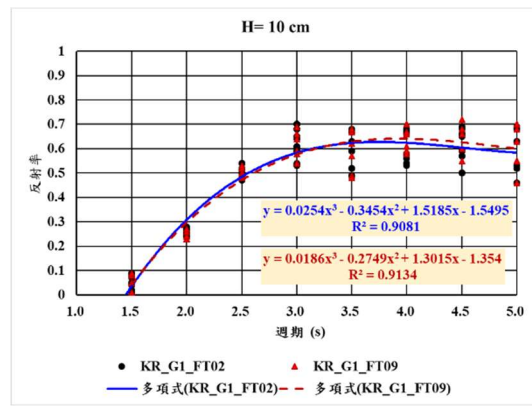


(b) 所有波高計配對

圖 3.34 FT11 之波列分析法的反射率分布圖

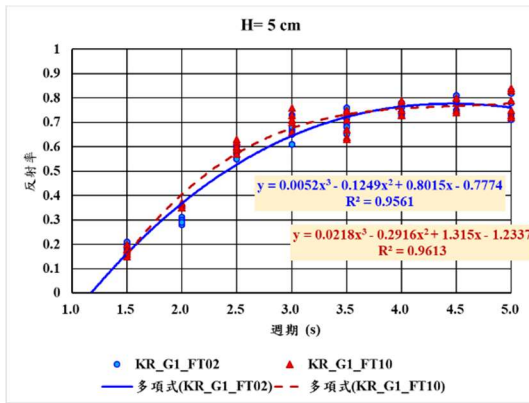


(a) 波高 5 公分

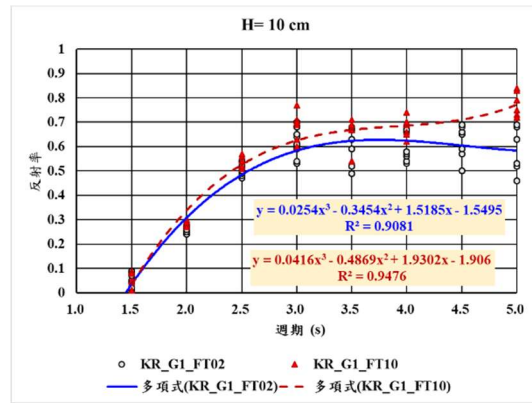


(b) 波高 10 公分

圖 3.35 FT02 與 FT09 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

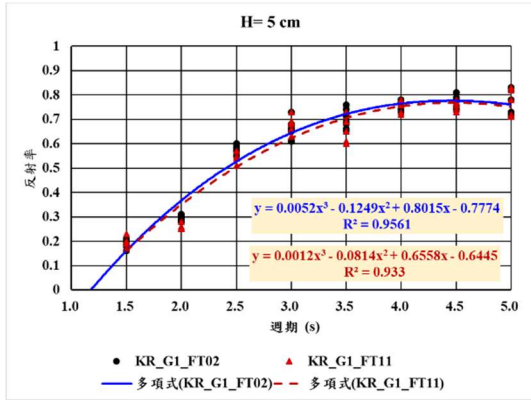


(a) 波高 5 公分

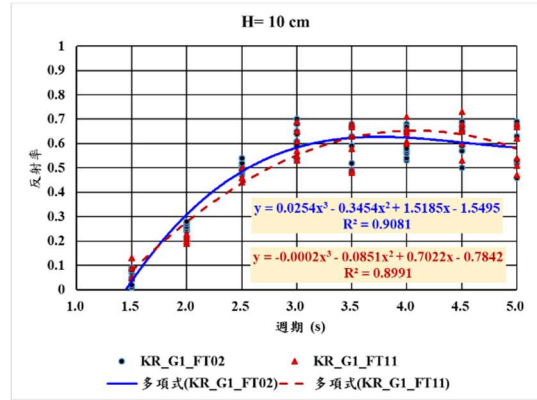


(b) 波高 10 公分

圖 3.36 FT02 與 FT10 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

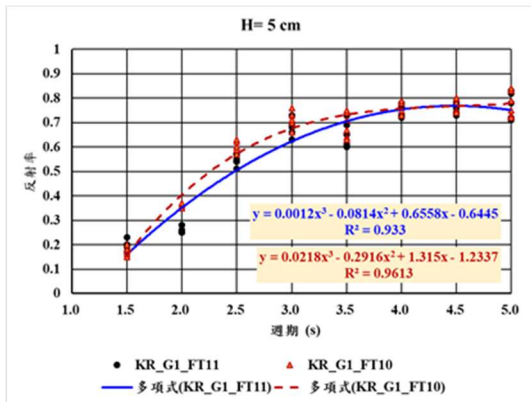


(a) 波高 5 公分

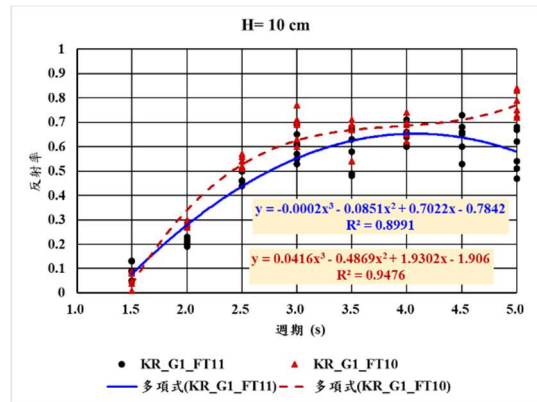


(b) 波高 10 公分

圖 3.37 FT02 與 FT11 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖



(a) 波高 5 公分



(b) 波高 10 公分

圖 3.38 FT10 與 FT11 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

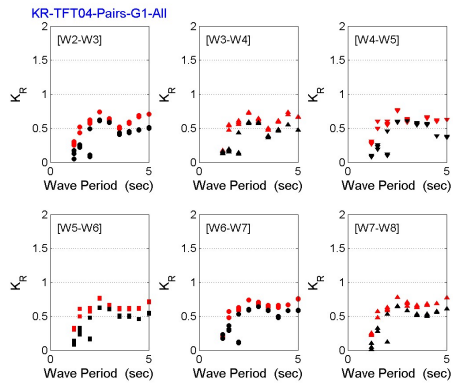
3.6.3 FT04 系列

圖 3.39 至圖 3.43 分別為 FT04~FT08 之波列分析法的反射率分布圖，各圖中均顯示大部分波高 5 公分(紅色標記)的反射率大於波高 10 公分(黑色標記)，因小波高幾乎無法發生越波，使其反射率明顯高於大波高。大波高的反射率最大值大約在 0.5 左右，顯示應用斜坡促進越波排水，使消能結構物有很好的消能表現，其中，又以 FT06 為最佳。

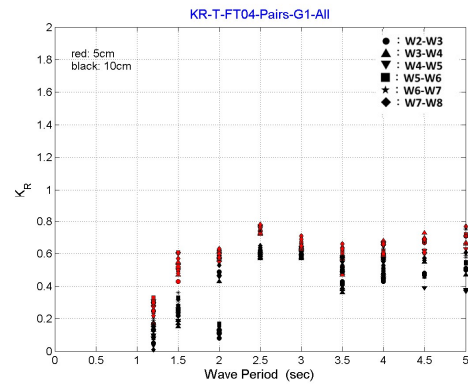
圖 3.44 至圖 3.46 依序為 FT04 與 FT05、FT05 與 FT06 及 FT07、以及 FT04 與 FT08 的比較。圖 3.44 顯示在消波艙堆置磚塊構成平台，對小波高較長週期段反而不好，應該因為設置平台沒水 17 公分，不僅沒破壞波浪結構，反而因淺化而提高反射波高，此外也影響後側集水槽的排水；大波高的反射率則差異不大。

圖 3.45 比對 3 款平台下設置排水道，以分辨集水槽的排水之差異，由圖中可見 FT06 的消波效果是三者中最佳。FT07 因排水口剛好設在波浪入口處，波浪的作用影響排水且增加反射。圖 3.46 單獨比較 FT04 與增設斜坡突起的 FT08 的差異，可明顯對比光滑斜坡式結構，增加突起反而妨礙越波及增加反射，尤其對於大波高影響加大。

圖 3.47 單獨比較 FT04 與增設斜坡突起的 FT06 的差異，對於小波高而言，下部單元增加排水道，對於消減波能有助益。大波高則受斜面突起及排水道之影響，對大波高的短週期不利，顯示增加排水道對長週期有利，但增加突起可能反而妨礙越波且增加反射，可以再改進。

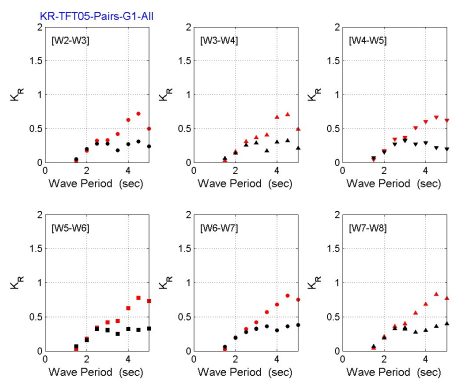


(a) 各波高計配對

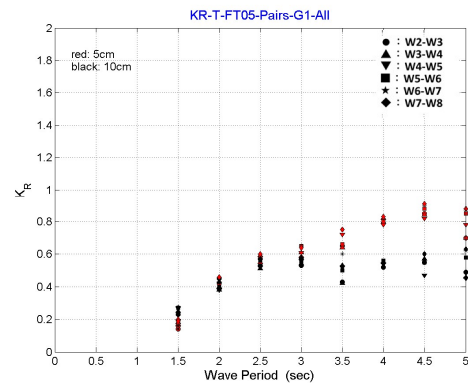


(b) 所有的配對

圖 3.39 FT04 之波列分析法的反射率分布圖

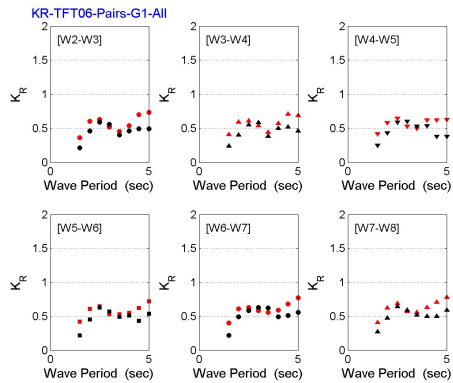


(a) 各波高計配對

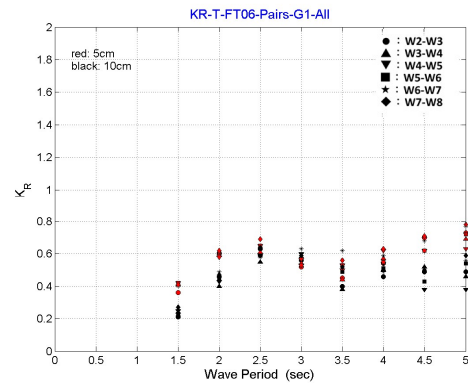


(b) 所有的配對

圖 3.40 FT05 之波列分析法的反射率分布圖

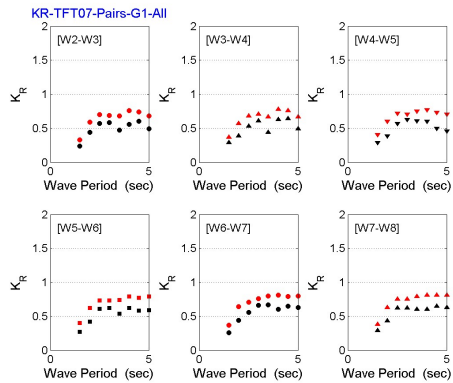


(a) 各波高計配對

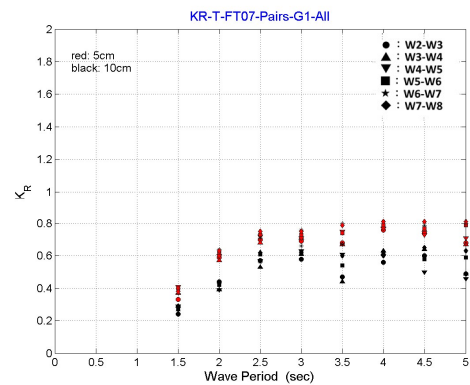


(b) 所有的配對

圖 3.41 FT06 之波列分析法的反射率分布圖

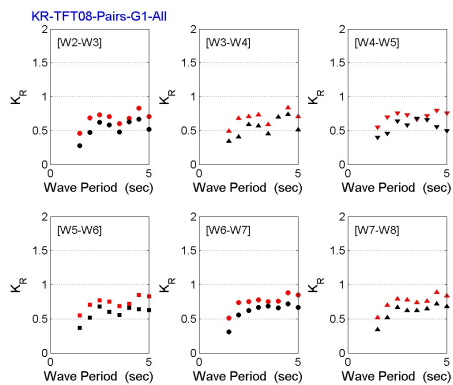


(a) 各波高計配對

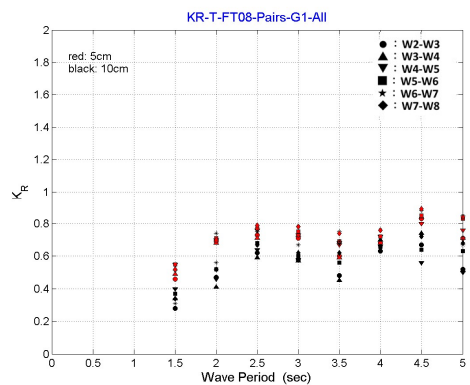


(b) 所有的配對

圖 3.42 FT07 之波列分析法的反射率分布圖

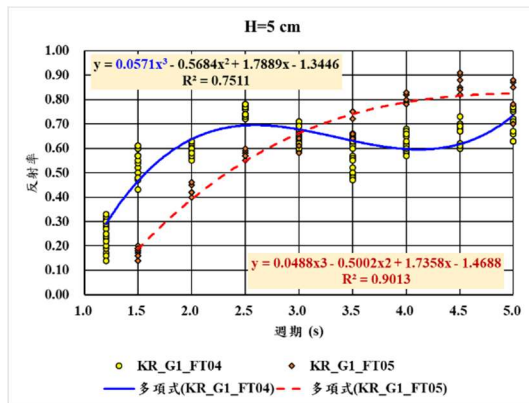


(a) 各波高計配對

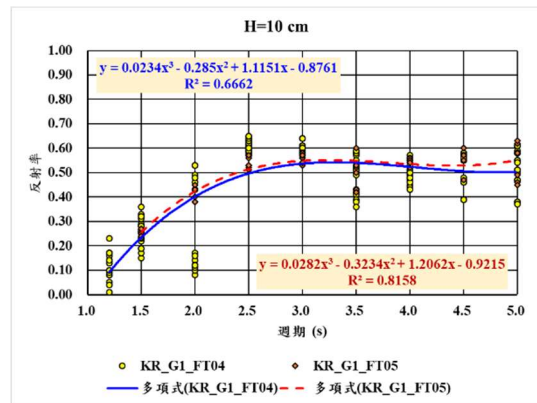


(b) 所有的配對

圖 3.43 FT08 之波列分析法的反射率分布圖

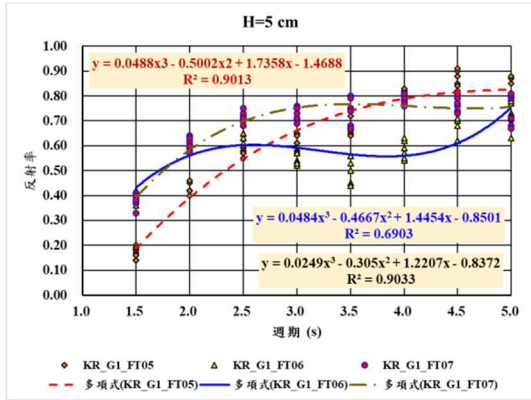


(a) 波高 5 公分

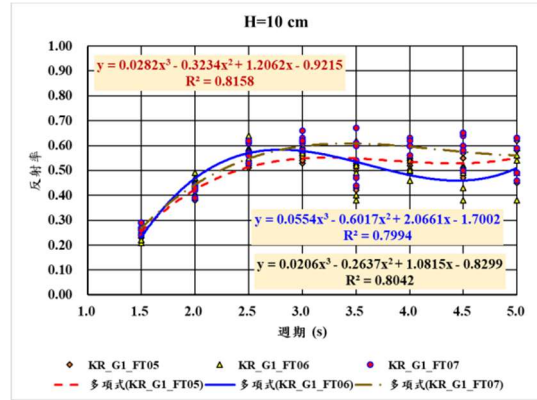


(b) 波高 10 公分

圖 3.44 FT04 與 FT05 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

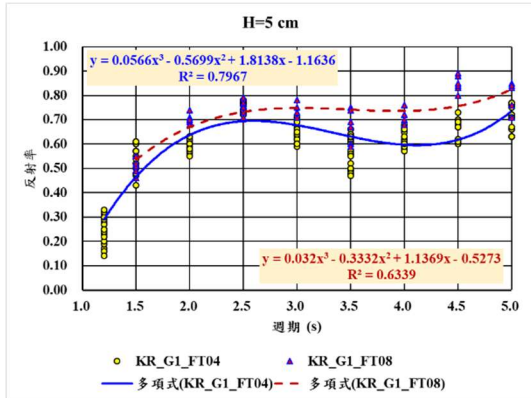


(a) 波高 5 公分

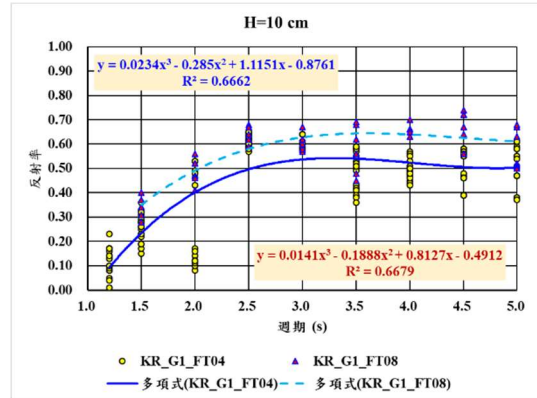


(b) 波高 10 公分

圖 3.45 FT05、FT06 與 FT07 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

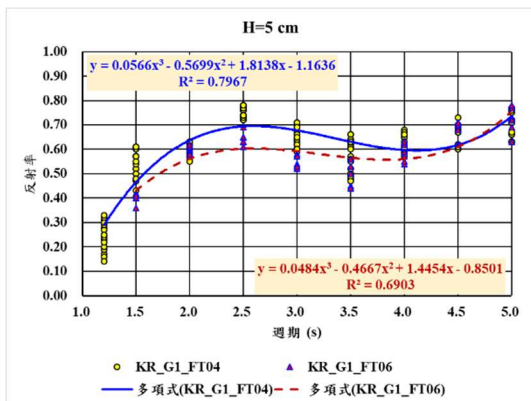


(a) 波高 5 公分

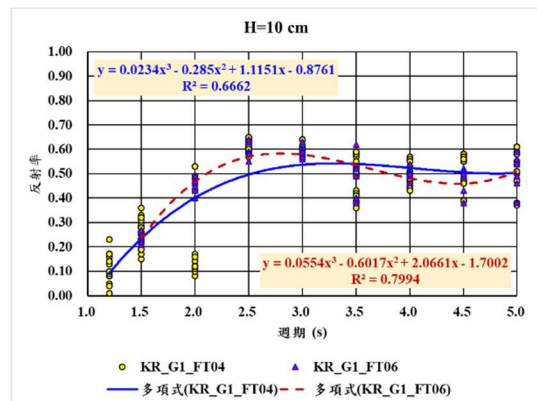


(b) 波高 10 公分

圖 3.46 FT04 與 FT08 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖



(a) 波高 5 公分



(b) 波高 10 公分

圖 3.47 FT04 與 FT06 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

3.7 單元式消波效果的交叉比較

圖 3.48 至圖 3.50 分別為 FT01、FT02 與 FT06 於不同波高之反射率分布交叉比較圖，圖中亦包含迴歸曲線及公式，FT06 為 FT04 系列的代表。各單元比較如下：

1. 主體單元：分別為具有直斜面配備柵欄(FT02)或短隔牆(FT06)或弧面斜坡配備隔間壁(FT01)，皆為直立式開孔另配備有氣室的結構物。圖 3.48 顯示 FT01、FT02 與 FT06 等 3 種模型系列的反射率曲線變化趨勢均不同，FT01 的反射率為最大，應與波浪是否能在弧面斜坡上發生溯升與越波有關。FT02 及 FT06 在 3 秒左右呈現交錯現象，3 秒以下 FT02 較小；但 3 秒以上則以 FT06 較小。大波高除 3 秒外，10 公分波高的消波效果($K_R < 0.8$)比 5 公分波高($K_R < 0.9$)好，應仍是與波浪是否能在斜坡上發生溯升與越波有關。週期 3 秒以下以 FT02 較佳；但週期 3 秒以上以 FT06 較佳。檢討推測是 FT02 目前的斜向導水板與消波艙縱深，較容易讓短週期波動發展出渦流來貯留波浪能量。

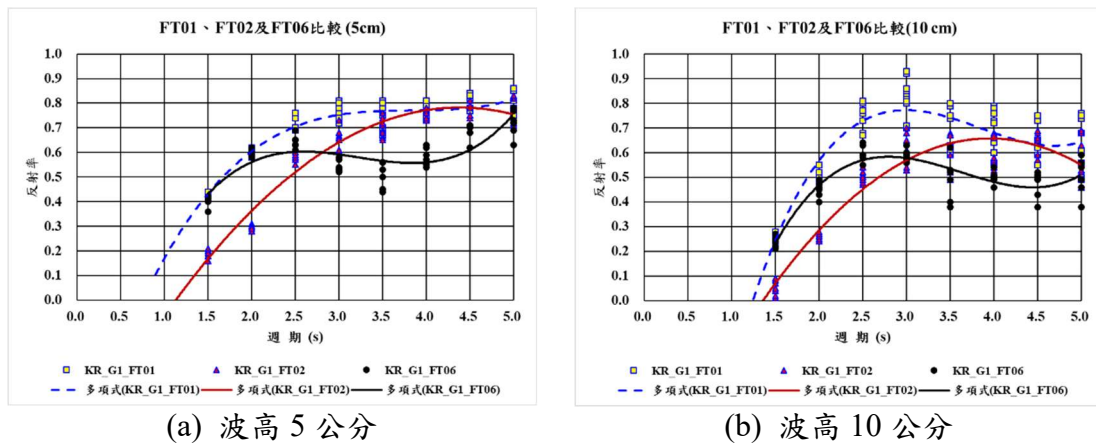
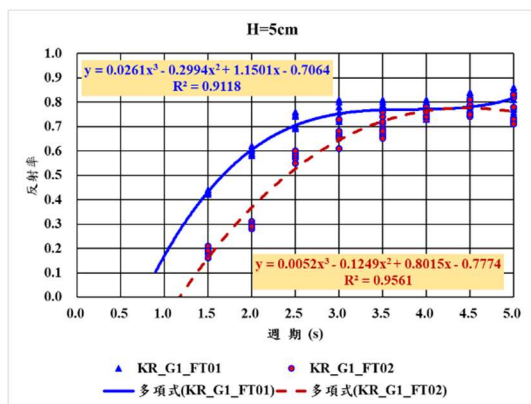
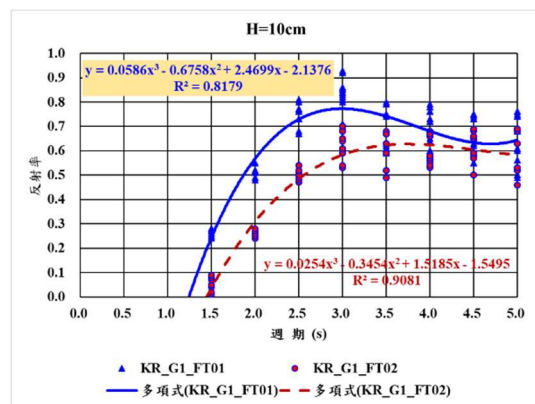


圖 3.48 FT01、FT02 與 FT06 不同波高之反射率分布及迴歸曲線比較

2. 越波排水單元：為一具有直斜面或弧面斜坡，表面可為光滑或加設突起。圖 3.49(FT01 與 FT02 比較)及圖 3.50(FT01 與 FT06 比較)顯示弧面斜坡因圓弧頂點附近坡度較陡，動量較小的小波高或短週期不易溯升及越波，因此反射率較大。圖 3.35 (FT02 與 FT09 比較)顯示增加斜面上的凸起條對消波效果影響不大。圖 3.46(FT04 與 FT08 比較)則顯示光滑表面明顯優於有突起的斜面，應與目前使用的長方條形凸起容易在海側反射波浪，並因增加斜面粗糙度導致波浪受阻擋，無法完全在斜面上溯升及越波而提高反射率。

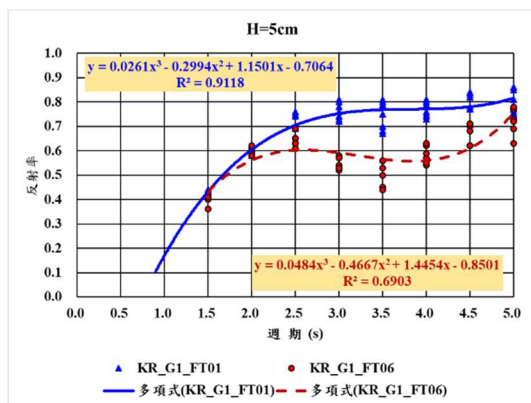


(a) 波高 5 公分

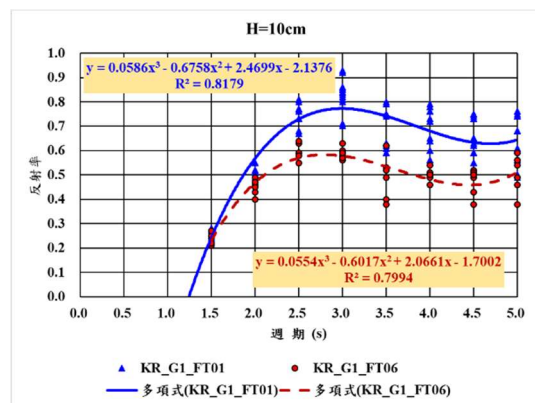


(b) 波高 10 公分

圖 3.49 FT01 與 FT02 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較



(a) 波高 5 公分



(b) 波高 10 公分

圖 3.50 FT01 與 FT06 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

- 前牆單元：圖 3.51 比較了 FT09 及 FT10 的前牆為全開放式或設有柵欄的差異，圖中顯示於大波高條件下，柵欄的設置會增加消能效果，特別於較長週期波浪段。
- 氣室單元：圖 3.30 比較 FT01 及 FT03 顯示氣室的構成，有利於壓制波動。

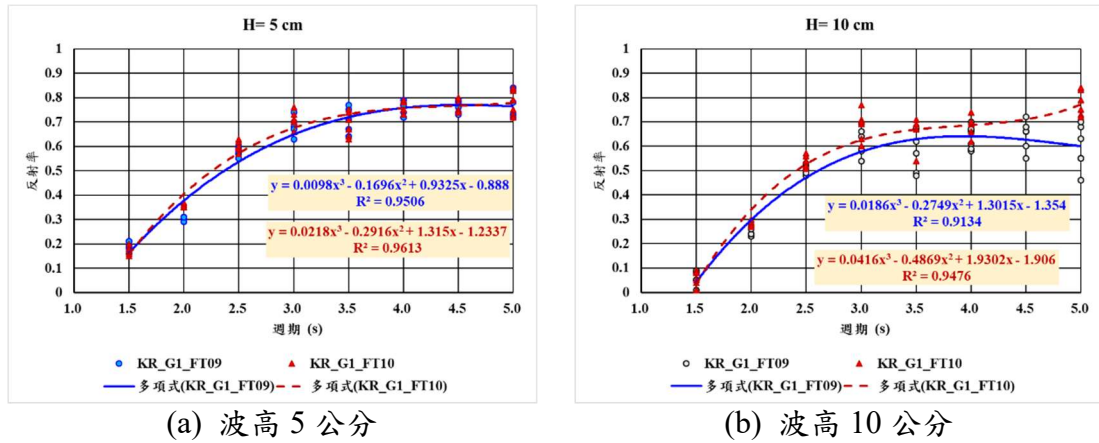
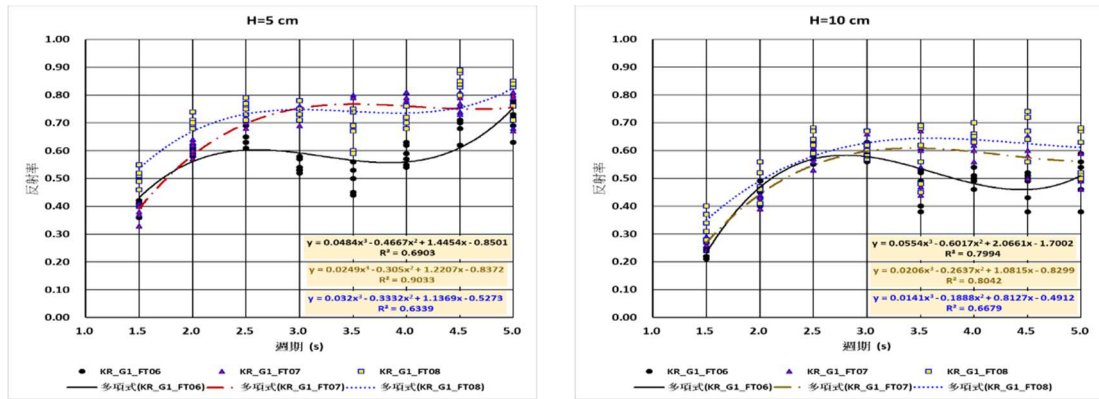


圖 3.51 FT09 與 FT10 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

- 消波艙單元：圖 3.52 比較 FT06、FT07 及 FT08，顯示消波艙要增設有有利於消波的消能設施，必須考慮在自由水面附近有破壞波浪結構的機能。然而沒水太深的消能設施沒有太大效果，甚至可能因誘發波高的增大而反射更多。FT06 及 FT07 因設置平台及連接集水槽之排水道，相較於 FT08 反射率有明顯變化，但 FT06 最佳。



(a) 波高 5 公分

(b) 波高 10 公分

圖 3.52 FT06、FT07 與 FT08 不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

6. 集水槽及連通管單元：從試驗觀察中發現集水槽及連通管組合，可以誘發不對稱型的振盪水柱(消波艙較寬，集水槽較窄)，有將水平傳播的波動轉為水體垂直運動的特色，而且可能因水流的擴散而衰減部分能量。後續如能在集水槽添加水平柵欄或多孔板，有機會促成波浪能量在此堆積，可降低反射。
7. 排水道單元：圖 3.38 比較 FT10 及 FT11，顯示藉由在集水槽或消波艙底部設置專屬不受消波艙波動干擾的排水道，水體藉由水位差並從水粒子動量較小的底部排出，有利於宣洩部分在集水槽發生振盪的能量。

3.8 波高計配對的討論

本節以 FT04 為例，觀察不同波高各波高計配對的反射率分布，圖 3.53 及圖 3.54 分別為波高 5 公分及波高 10 公分，各有 5 組配對(G1~G5)之各配對的反射率分布。從兩圖中可看出 G1、G2 與 G3 配對可以得到相當接近的反射率分布，而 G3 因試驗量測而稍微發散。本計畫乃以 G1 配對為主要比較資料。

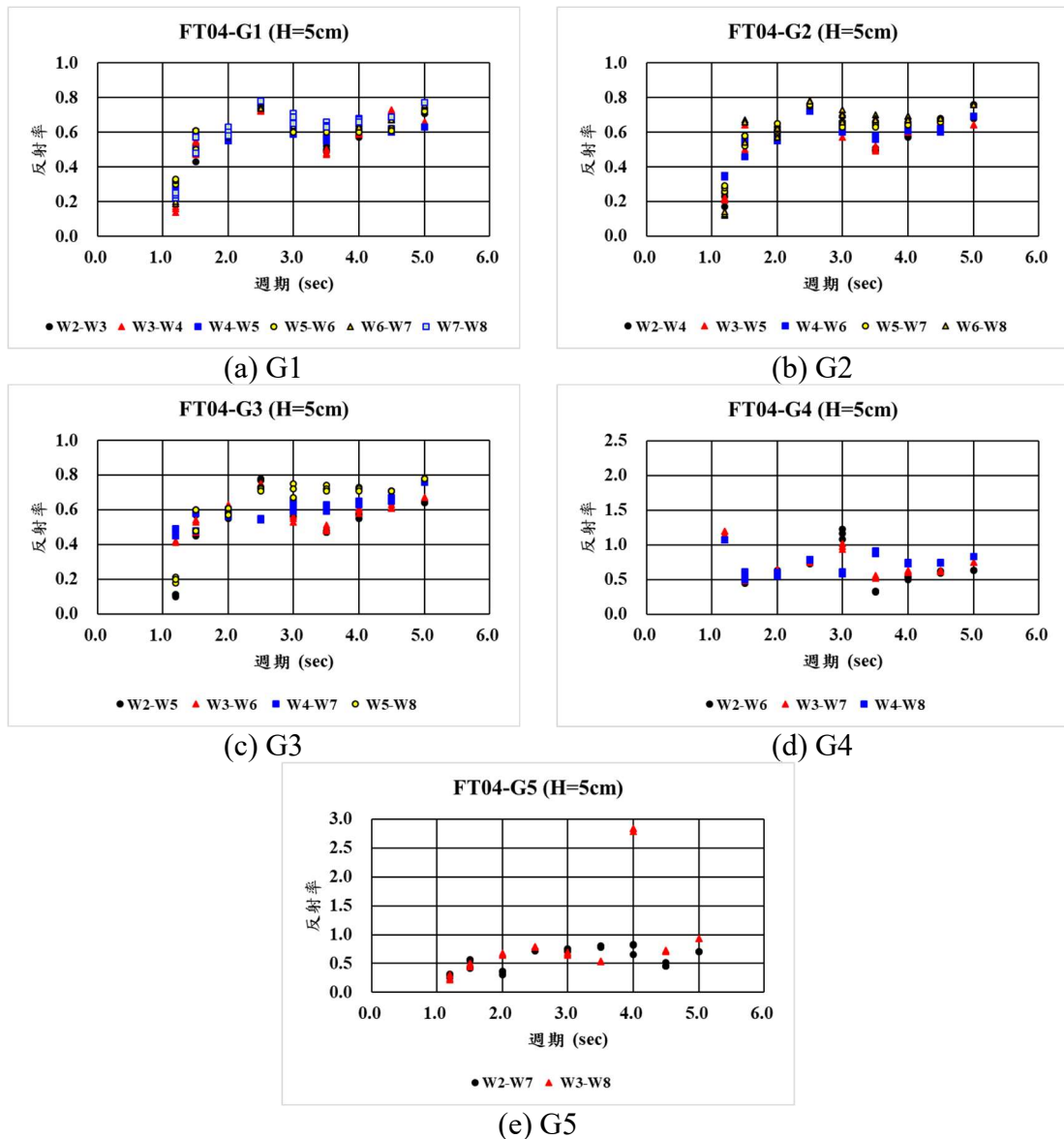
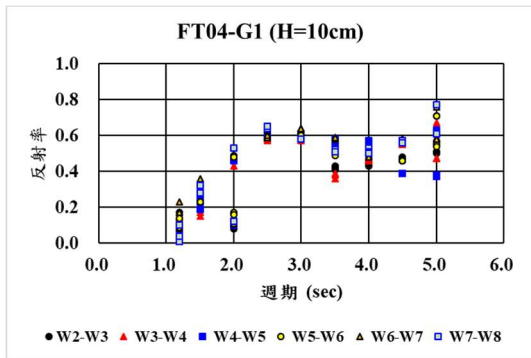
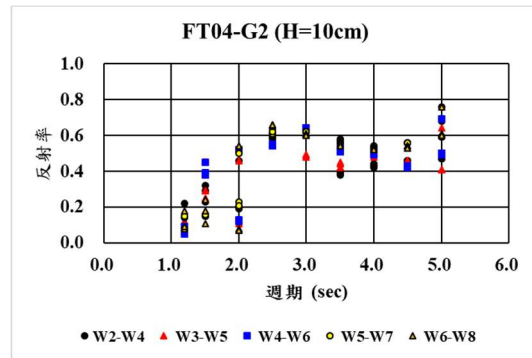


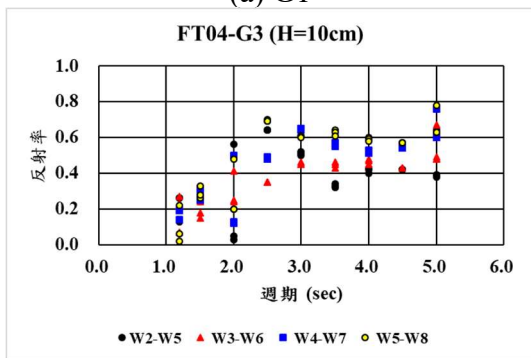
圖 3.53 FT04(H=5 公分)波高計配對之反射率分布



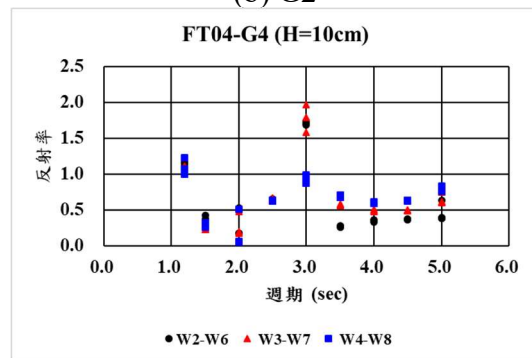
(a) G1



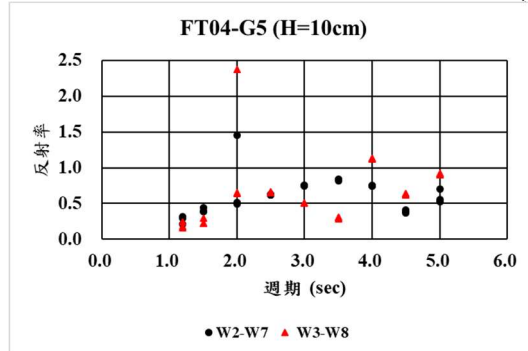
(b) G2



(c) G3



(d) G4



(e) G5

圖 3.54 FT04(H=10 公分)波高計配對之反射率分布

3.9 小結

1. 波高小時，波浪不容易在斜坡溯升及越波，且容易受長方形突起的阻礙甚至反射；波高小而週期長時，可能因突起消耗了部分能量而無法越波；波高大且週期長時則可發揮溯升越波的效能。
2. 整體而言，FT01 系列以 FT01 表現最好，驗證氣室的功效；FT02 系列以 FT11 表現最好；FT04 系列以 FT06 表現最好。然而，由於相差還不算大，各個模型在嚴謹分析後，認為都有機會再改善。
3. 文獻回顧顯示，單一消能機制的試驗反射率大多在 0.6~0.9 以上。本次所有試驗模型之試驗，小波高於長週期時反射率可降至 0.8，但大波高則在 0.7 以下。經本計畫研討後，認為並非單一消能機制所能達成，各單元較優型式與效能，如表 3-4 所示。後續還是應朝向複合式消能機制思考，惟各機制之間可能互制也可能耦合。後續需要透過水工斷面試驗及數值模擬才能驗證整合效果，目前本計畫僅進行了基本型的單元性功能研究。
4. 本試驗在長水槽裡，分析反射率所擷取的波列，以入射加一次反射時段為宜。
5. 消能式結構物因結構較為複雜，會引起三維波動，FFT 分析中很容易被誤會為非線性波。
6. 應用 Goda 兩點法，以多組波高計配對方式，可以免去調整波高計位置的困擾，目前顯示 G1~G3 配對的結果很接近；G4~G6 則因波高計間距太大而反射率發散。
7. 消能結構物前的波動現象相當複雜，除了入射波以外，還有很多來源且相位不同的反射波，也導致波浪是否能在斜坡上溯升及越波都無法預測，例如各配對於 10 公分波高，週期 5 秒的反射率就找不到規律性。

表3-4 碼頭消能結構物較優之單元型式

單元位置	較優型式	消能機制	模型代碼
主體單元	柵欄與斜向導水板	流體擾動	FT02、 FT09
上部越波排水單元	光滑斜面	使波浪溯上越波	FT02、 FT09
下部消波艙前側/消波艙後側	平台加下方排水道	干擾波動及排水	FT06
	加設三維斜坡		FT11
後側集水槽	入水懸吊板	共振水柱及氣室	FT01、 FT03~FT08

第四章 窄航道側壁消能結構物水工斷面模型試驗

4.1 前言

本章為研擬窄航道岸壁的新結構物型式，期望能消減通過窄航道的波浪能量，主要以水工斷面模型試驗方式進行測試。窄航道裡的波流特性幾乎平行於岸線且為大角度入射結構物之波動特性，此類型的消能特性少有研究並無定論。因為是首次探討有關窄航道的側壁消能結構物，本年度先設法依據以往累積研發消能結構物的經驗，開啟窄航道消能結構物的研發思路。將首先收集窄航道內波流的特性及觀察初步設計之成效，俾便推動後續研究。

有關窄航道消能岸壁的試驗研究係屬於新增的初始特性研究，不在原始規劃的計畫內容裡，主要是考量想要改善花蓮港港內長週期波動問題時，一定會面對是否能在窄航道發揮一些消波功能的討論。此一討論課題有幾個困難，首先，花蓮港窄航道的寬度大約只有 100 公尺，水深大約 13 公尺，考量船舶的航行安全，不適合在窄航道區段構建佔據過多航道寬度的大型消能結構物，斜坡式的消能設施更無法正向設置。其次，目前在大多數文獻中很少討論側向消波岸壁的消能效果，或者說，大角度入射的波浪消波，而窄航道附近的波動幾乎是平行岸壁運動。

為此，本計畫乃嘗試規畫一種新的消能概念，首先參考到布置在海岸的突堤群(如圖 4.1 所示)的水動力現象，波浪及沿岸水流會以繞射與擴散作用分出部分能量進入突堤間的水域，也連帶地沉積所攜帶的漂砂，但最終會達到平衡狀態。

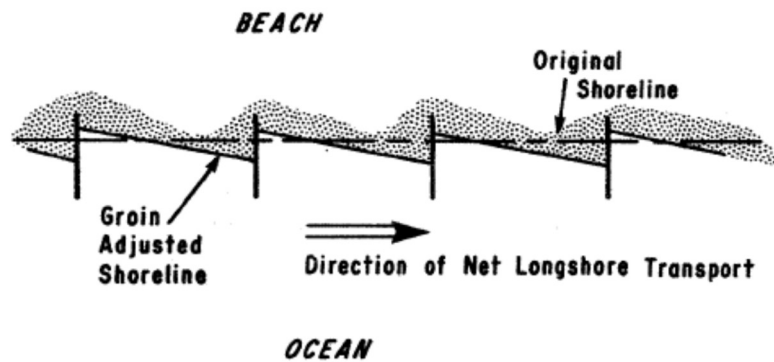


圖 4.1 突堤群與海岸漂沙(美國海岸工程手冊 Part V, 2002)

其次，考慮水流在水道裡的可能變化情形，如圖 4.2 為不同渠道斷面的速度分布，Chow(1959)指出，由於底床表面摩擦阻力作用緣故，渠道水流不會是均勻流，而是以近邊界底床的流速愈慢，愈接近中心線但不一定是在自由水面流速越大，矩形斷面渠道寬度大於 5 到 10 倍的水深距離時(受底床粗糙度的影響)可能會出現中央水流區。或者，可以認為邊界粗糙度可能會影響到 2.5 至 5 倍的水深距離內的穩定流。除了一些標準規則斷面渠道可以有經驗公式外，在實務應用上，都必須仰賴水工模型試驗或數值模式來模擬可能的水流狀況，如 Kean 等人(2009)以水工模型試驗，測試近岸邊界的流速分布與剪應力的影響並用以檢驗多種推估模式。Cassan et al.(2019)以計算流體動力學軟體建立一套數值模式，以模擬不同粗糙度底床表面對水流速度分布的影響。

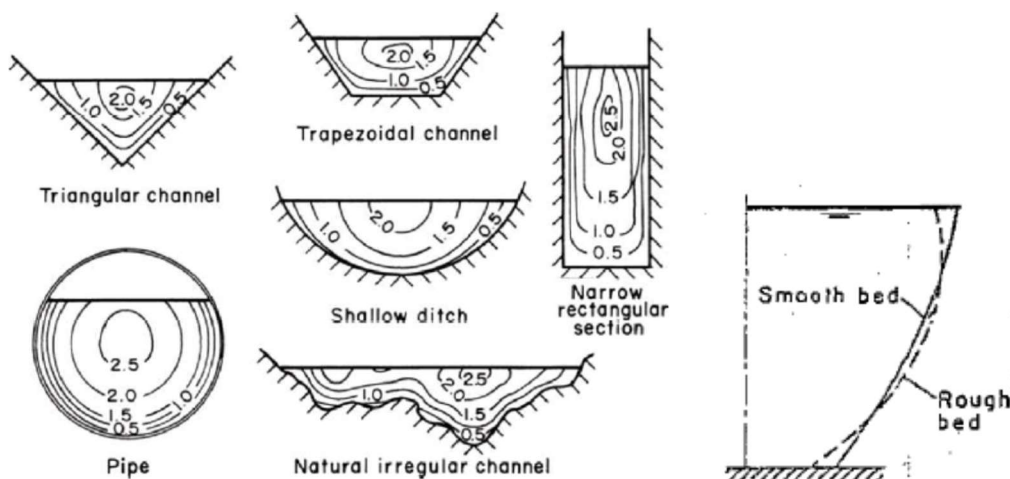
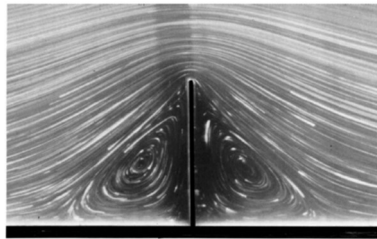
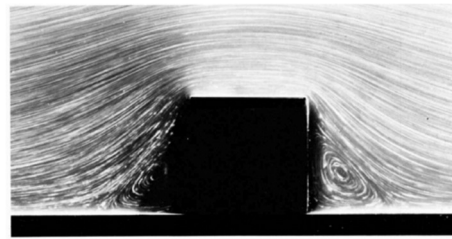


圖 4.2 不同渠道斷面的速度分布(Chow, 1959)

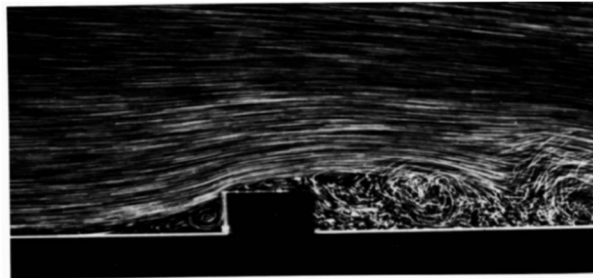
Van Dyke (1982)以攝影方式拍下水流通過障礙物之流跡線(如圖 4.3)與凹陷地形之流跡線(如圖 4.4)。Ramoul et al. (2019)引用 OpenFoam 模擬三種 RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes)模型：標準化 $k-\epsilon$ 模型，理想化 $k-\epsilon$ 模型及 RNG(Re-Normalisation Group) $k-\epsilon$ 模型模擬空氣污染源在障礙物附近的濃度分布，模擬之流跡線如圖 4.5 所示。



(a) 通過板狀障礙物之層流



(b) 通過矩形障礙物之層流



(c) 通過矩形障礙物之紊流

圖 4.3 水流通過障礙物之流跡線(Van Dyke, 1982)

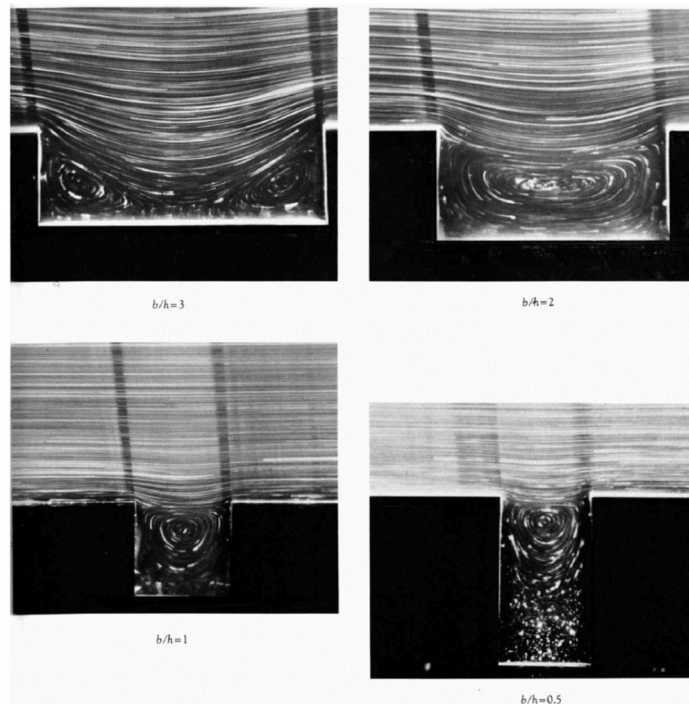
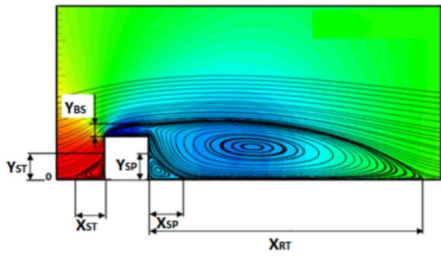
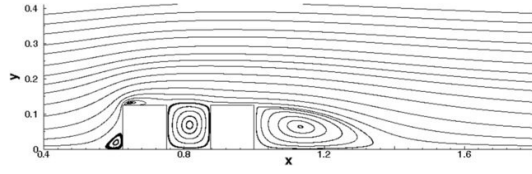


圖 4.4 水流通過不同大小凹陷地形之流跡線(Van Dyke, 1982)



(a) 水流通過獨立障礙物



(b) 水流通過兩個障礙物

圖 4.5 水流通過障礙物之流跡線(Ramoul 等人, 2019)

4.2 窄航道消能岸壁的水工模型設計

考慮到波浪係以切線或大角度方向作用於窄航道岸壁，而僅能以邊界粗糙度或波動利用能量擴散進入消波區，而若應用口袋型消波淺灘(Thompson et al., 2004)不僅需要較大空間，也容易造成航道的側向振盪。初步評估認為利用導水板導引部分波動進入側向消波區，再設法引發消波艙的振盪水柱效應，或許能抓住較多的能量而達到某種程度的消波效果。然而此種行為可能與水流通過粗糙渠道表面的邊界層特性有關，只能透過滾動式調整進行試驗研究，因此本項試驗僅為初步的特性觀察。

為了瞭解此一消波概念的水動力行為與消波特性，本計畫規劃了2種基本型分別說明如下：

1. 基本型一：如圖 4.6 所示，結構分為前側集波與後側消波段兩部分。主要利用集波段裡設置向上游外伸的斜向板或直角板，以攔截部分波動進入消波段並產生渦流。
2. 基本型二：如圖 4.7 所示，延續基本型一在後側消波段增設入水式懸吊板成為隔間板。波浪會在兩片隔間板間的水面因反射而往復運動，並利用下方開孔構成振動艙而產生振盪水柱。

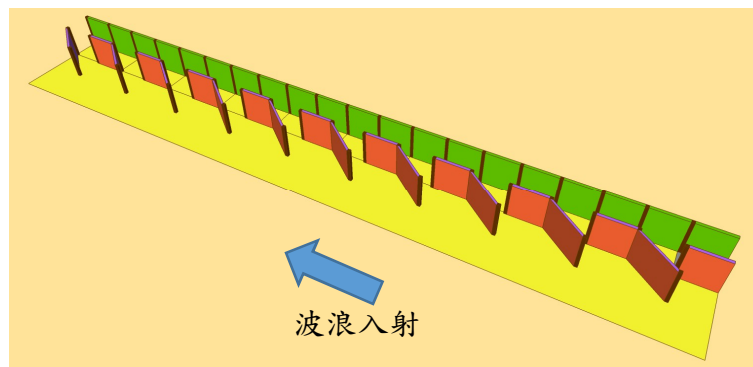


圖 4.6 渦流型導波式岸壁結構物(基本型一)示意圖

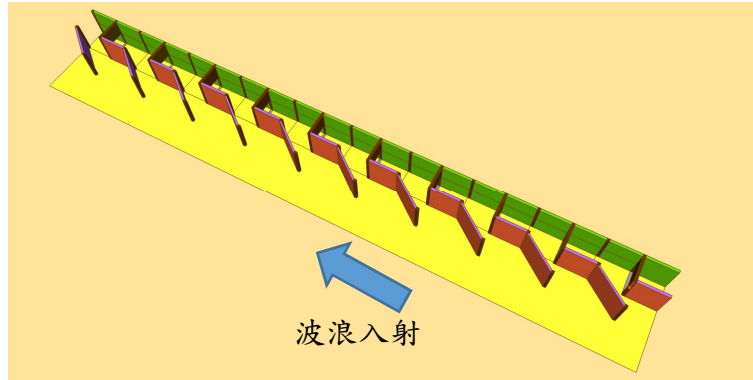
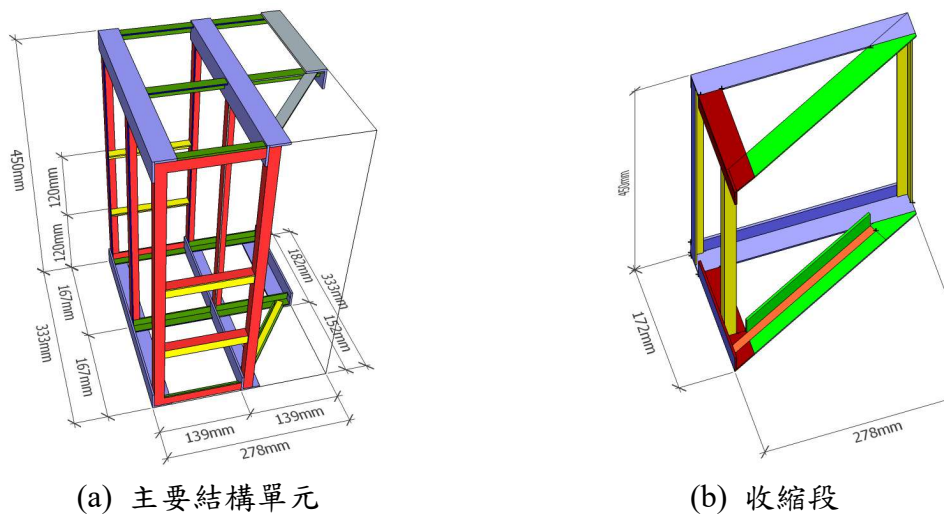


圖 4.7 渦流型導波式岸壁結構物(基本型二)示意圖

本計畫綜合目前所考慮到的試驗模型以及後續可能的滾動式檢討，配合使用角鋼及木心板等材料開發了一組通用型的試驗構架，如圖 4.8 所示。應用此一通用型角鋼構架再配合不同尺寸的木心板，初步組合成 4 種試驗模型。依試驗的順序說明如下：



(a) 主要結構單元

(b) 收縮段

圖 4.8 通用型試驗構架示意圖

1. 試驗模型一(NC01)：如圖 4.9 所示，為一設置外伸直角板岸壁且消波區增設斜坡板。

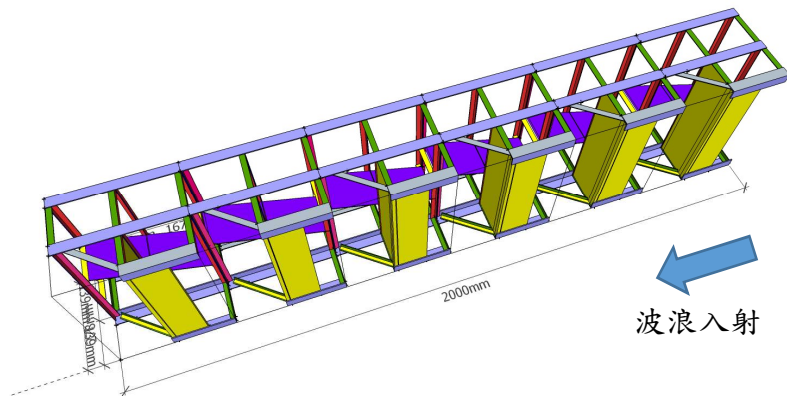


圖 4.9 試驗模型一(NC01)示意圖

2. 試驗模型二(NC02)：如圖 4.10 所示，為一設置外伸斜向板岸壁且消波區增設斜坡板。

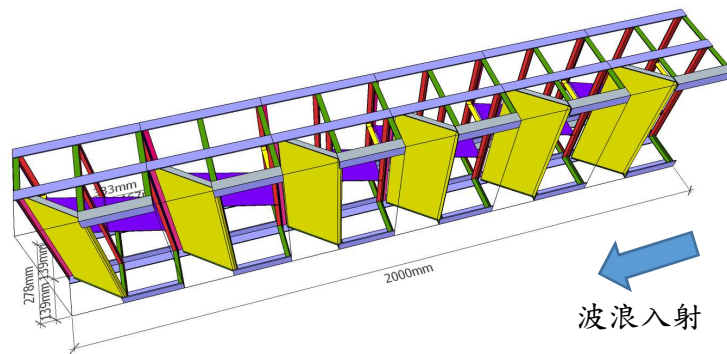


圖 4.10 試驗模型二(NC02)示意圖

3. 試驗模型三(NC03)：如圖 4.11 所示，為一設置外伸斜向板岸壁且消波區增設入水懸吊板。

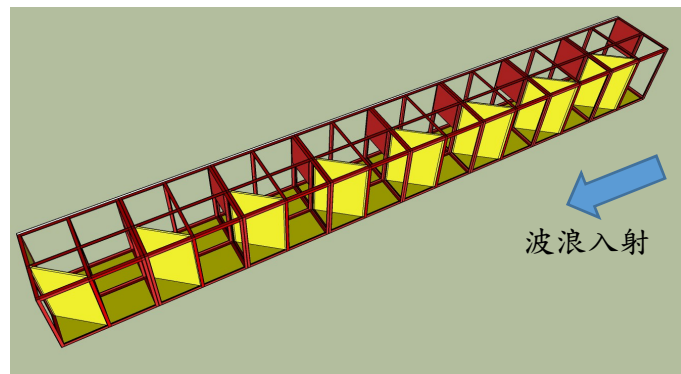


圖 4.11 試驗模型三(NC03)示意圖

4. 試驗模型四(NC04)：如圖 4.12 所示，為一設置直立不透水岸壁的窄航道，模擬現況之直立壁。

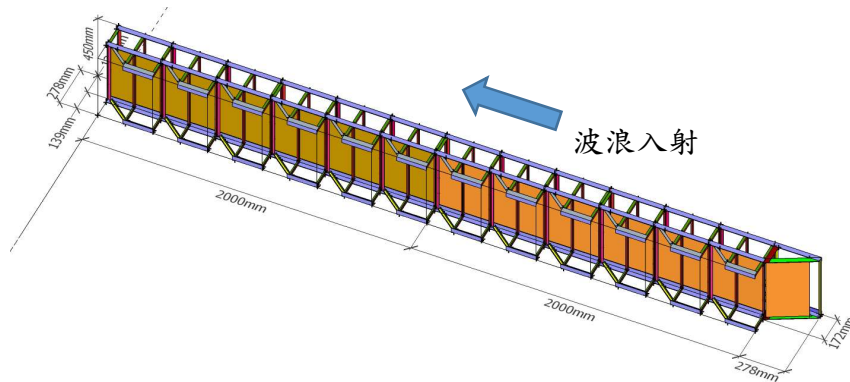


圖 4.12 試驗模型四(NC04)示意圖

由於窄航道的消能試驗係增加的計畫附屬項目，本試驗只利用現有緩變斜坡及平台底床地形進行模型(4.3 m 長)配置，單元框架設置於距平台起點 2.65 公尺處，波高計 W1 放置於距造波板前 9.8 公尺，波高計 W2 與 W8 分別置於單元框架的前與後 1 公尺處，波高計 W3~W7 則依序放置於 W2 後，各波高計的間距皆為 1 公尺。另於波高計 W2 與 W3、W7 與 W8 之中間，各設置 1 支流速計(V1 與 V2)。圖 4.13 為試驗水槽模型及量測設備配置圖，圖 4.14 窄航道消能側壁試驗之波高計率定結果，圖 4.15 為設置完成照片。

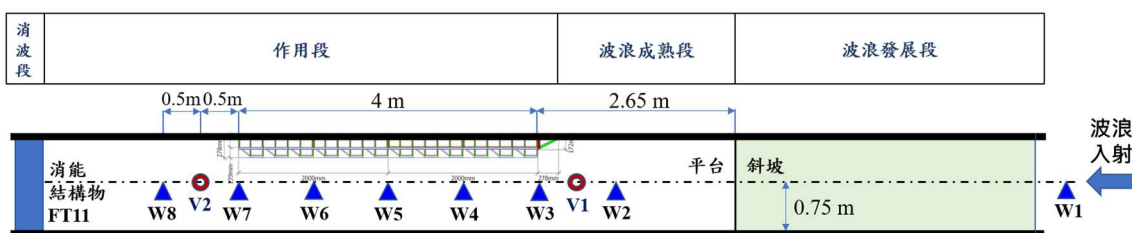
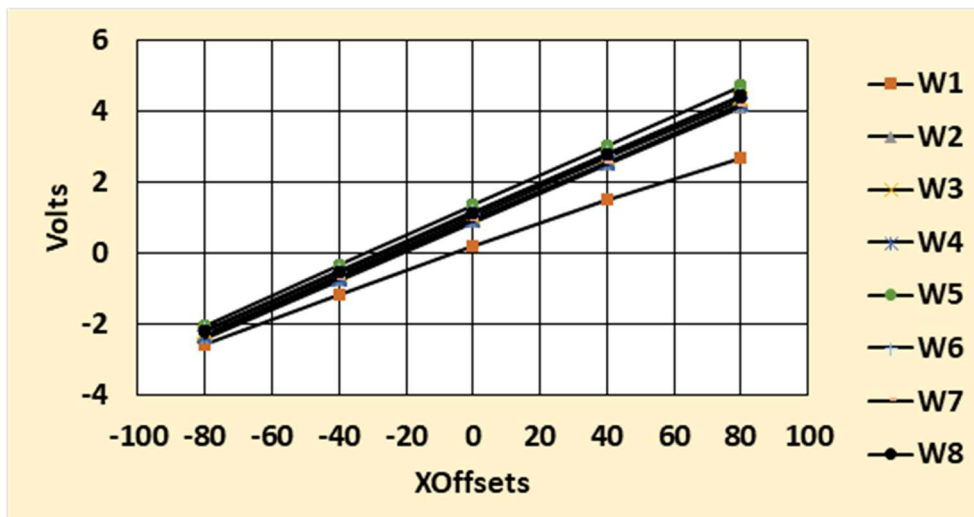


圖 4.13 試驗水槽模型及量測設備配置圖



Instrument Serial/ID	Calibration(mm)	Zero(Volts)	R ²	95% CI @ FSD
WP01	30.38988345	0.107988807	0.998819367	0.240357071
WP02	24.52285389	0.840620247	0.999988897	0.017639723
WP03	24.20694849	1.006624527	0.99997133	0.027526179
WP04	24.47011132	0.910971523	0.999986362	0.019369314
WP05	23.72023014	1.317939095	0.999983356	0.019913287
WP06	24.23815393	1.129879177	0.99997897	0.023300535
WP07	24.56645763	0.891676708	0.999964254	0.031537703
WP08	24.17747821	1.097089712	0.999988539	0.017178769

圖 4.14 窄航道消能側壁試驗之波高計率定結果



圖 4.15 試驗佈置完工照片

綜合分析的心得，斷面模型試驗區的水動力特性分區檢討如下：

在 FT00~FT11 碼頭消能結構物的反射率試驗裡(如圖 3.16 所示)，亦可將水域分成波浪發展段、波浪成熟段、過渡段及作用段。

1. 波浪發展段：包含自造波板起的等深地形及緩變斜坡部分，波浪在此區發展至平台水深的波浪；
2. 波浪成熟段：包含成熟穩定的入射波及反射波傳播區域，反射率在此一區段進行量測；
3. 過渡段：主要針對反射波剛離開消能結構物而波形尚未達到穩定的區段；
4. 作用段：即波浪發生能量損失的區段，亦可稱為消波段。

在此認為，波浪成熟段裡不應該存在有任何會增加或減少入反射波波能的機制。

在消能結構物的試驗結果中 7 支波高計(W2~W8)中，雖然 W8 波高計仍符合 Goda & Suzuki(1976)的建議，試驗分析中仍可看到 G1 配對中，W7-W8 配對的結果不穩定，但 W2~W3、W3~W4、W4~W5、W5~W6 及 W6~W7 則相當穩定。

窄航道的試驗設計是為了能儘量符合花蓮港有限水域長度的狀況，乃在窄航道試驗段的後方設置消能結構物(FT11)，以便能比較設置窄航道側壁消能設施前後的反射率變化情形。如果窄航道後側不設置消能設施而讓波浪直接通過，將沒有反射率可以比較而只能觀察波高的變化。在學理研究上，由於缺乏相關的文獻及案例參考，本項試驗也算是在一般反射率試驗的知識下，對窄航道側壁消能研究的初步水工模型試驗。

本窄航道試驗的側壁消能設施、波高計及流速計佈置與分區如圖 4.13 所示。然而沿用消能結構物試驗的分析方法，試驗的分析裡發現 NC01、NC02 及 NC03 的 $K_R - T$ 分布圖與 FT11 非常接近，甚至顯示出 FT11 的消能效果為四者中最佳，而窄航道的側壁消能設施幾乎對波能的消減沒有貢獻。經依前述的定義及回顧試驗過程的觀察檢討後發現，由於入射波與反射波均有機會以繞射或散射形式進入側壁消能設施的水域，且入射波還可能經過後側水道從後續的入口散射，而形成另一種入射波來源。

也就是說，各個波高計測點的入射波並非完全是造波板所造波浪，而反射波並非完全是末端消能結構物所反射的波浪。在窄航道消能設施區段，受到直角板或斜向板作用而分出部分波動能量進入側壁內部水域，但經由後側連通水道自後續單元入口散射也是一種能量損失，反射波亦有類似情形。此種傳播過程中仍有能量的變化等現象，導致窄航道附近的波浪相當複雜，也不符合 Goda & Suzuki(1976)求反射率的入射波與反射波的定義，或者說，整個窄航道都處於作用區段而不是單純的波浪成熟區。

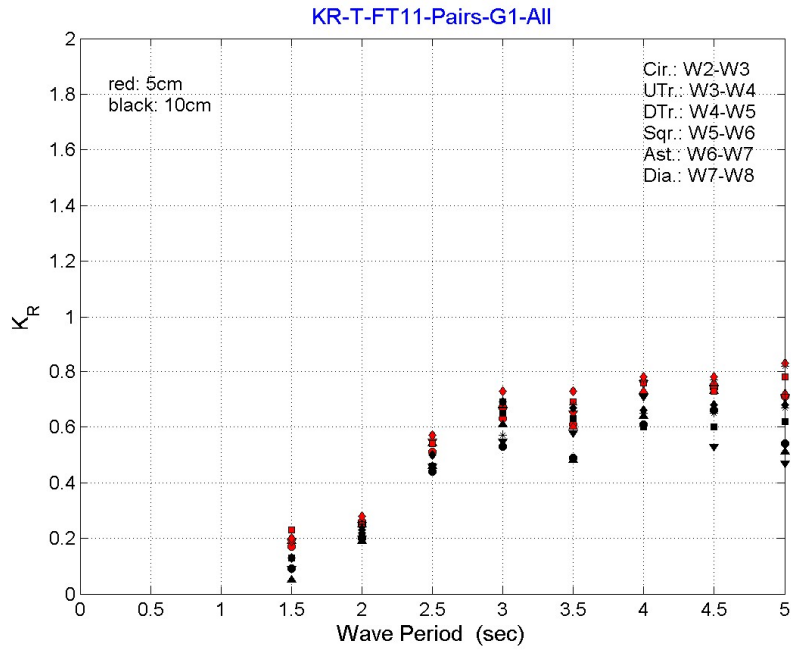
4.3 窄航道消能岸壁的水工模型試驗與分析

為了能夠檢討波能的變化，本節將以 FT11 為對照組，與 NC01、NC02 及 NC03 等 3 個模型的分析結果，進行綜合性的比較與討論。NC04 為窄航道的現況模擬(空水槽)試驗之參考。因為需要與 FT11 之結果進行比較，所以分析方式先與消能結構物採用相同基本分析方法，如 3.5 節所列。

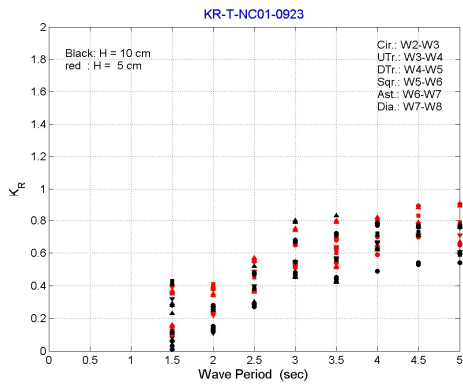
討論上將以獨立事件來針對每一個配對進行反射率的檢討。其中由於 W7 及 W8 在窄航道末端的邊緣，會受到水道寬度縮小所引致的反射波波高增大的影響，W7-W8 配對的反射率可能會比 FT11 來得大。而 W2-W3 位於窄航道入口處附近，將其視為波浪成熟段的參考。

圖 4.16 首先呈現 5 種模型的 $K_R - T$ 分布圖，會發現 FT11 與 NC01、NC02 及 NC03 的 $K_R - T$ 分布圖非常相似，而且 FT11 似乎消波的效果為最佳。基於 NC01、NC02 及 NC03 都是配合 FT11 再增加不同配置的窄航道側壁消能設施，但概觀 NC01、NC02 及 NC03 反射率皆略大於 FT11，似乎指出側壁消能結構物可能對窄航道造成更多的擾動。除了在入口附近可能因斷面寬度束縮而抬高入射波作用水位，在能量守恆之下，出口附近可能又因斷面寬度束縮，而抬高反射波作用水位。但除非有額外的能量變化(增加或減少)，窄航道內的反射率不應該比 FT11 大，此一現象也提示了有關窄航道裡測反射率的適切性。NC04 因側壁僅為直立壁，其反射率趨勢與 FT11 相近。

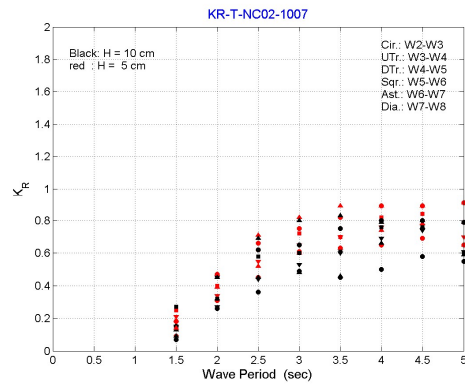
為此，本節也檢視了 5 種模型的試驗結果，但因圖幅太多，僅比較顯示波高 10cm 的部分。圖 4.17 與圖 4.18 分別為波浪週期 1.5 秒與 5 秒於大波高(10 公分)造條件作用下，5 種模型的 8 支波高計的 m_0 能量分布，各子圖中均顯示各個波高計處的 m_0 值，比較各造波條件下 5 種模型之 m_0 能量分布，會發現 m_0 能量分布有類似的變化趨勢，但是 m_0 則有所不同，顯示不同模型的窄航道裡應該有能量的變化。



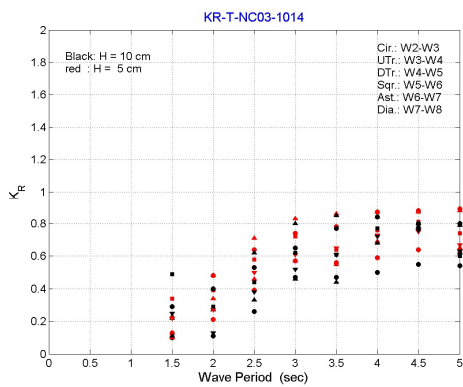
(i) FT11



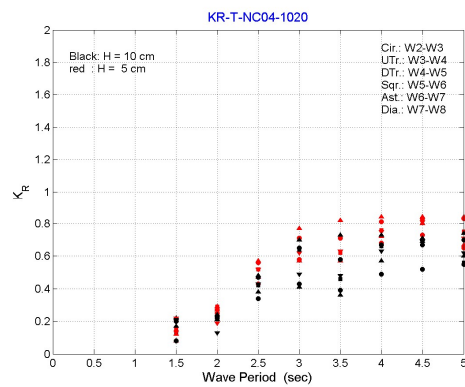
(ii) NC01



(iii) NC02

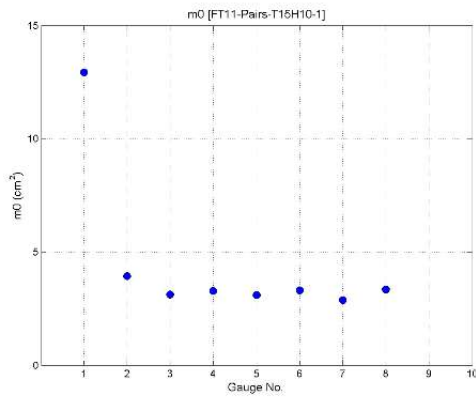


(iv) NC03

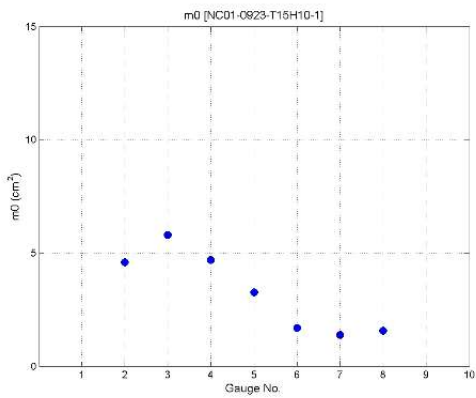


(v) NC04

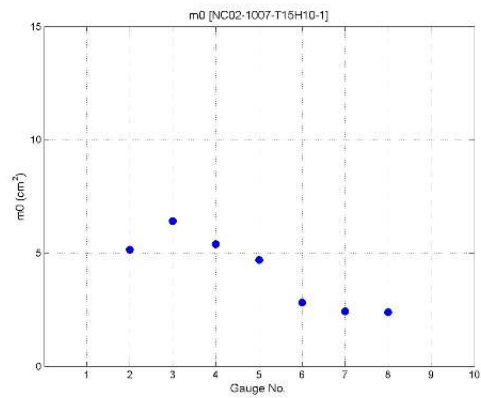
圖 4.16 5 種模型不同造波條件下各波高計配對之 $K_R - T$ 分布圖



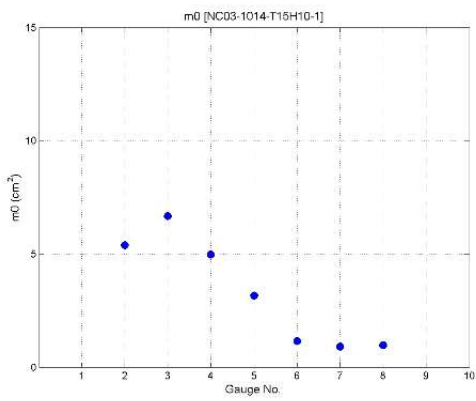
(i) FT11



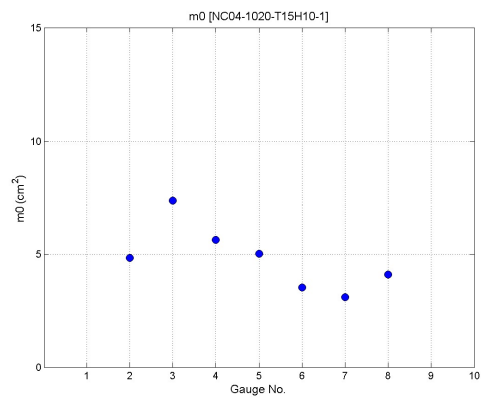
(ii) NC01



(iii) NC02

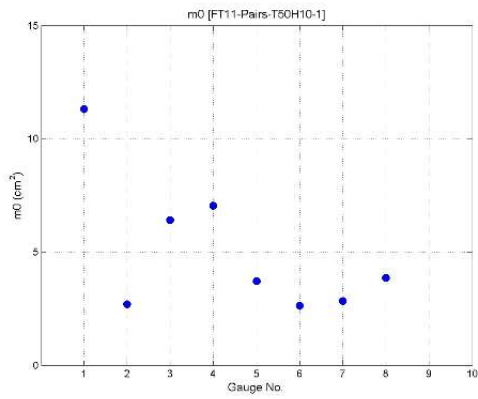


(iv) NC03

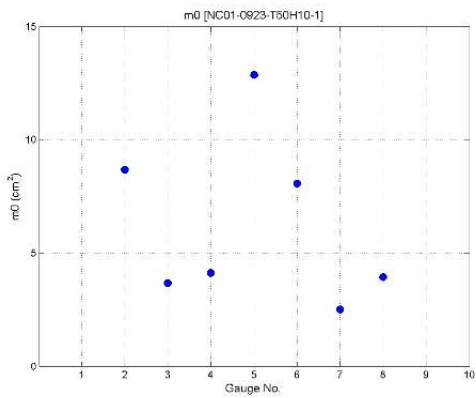


(v) NC04

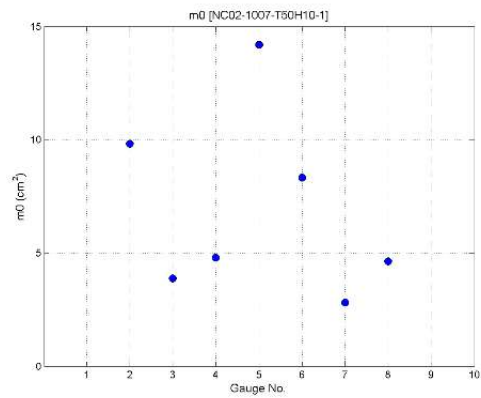
圖 4.17 各波高計之 m_0 能量分布，5種模型/週期 1.5 秒/波高 10 公分



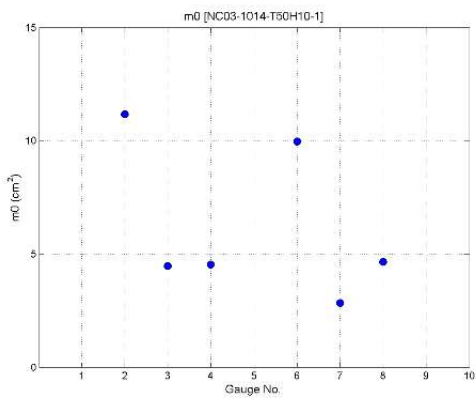
(i) FT11



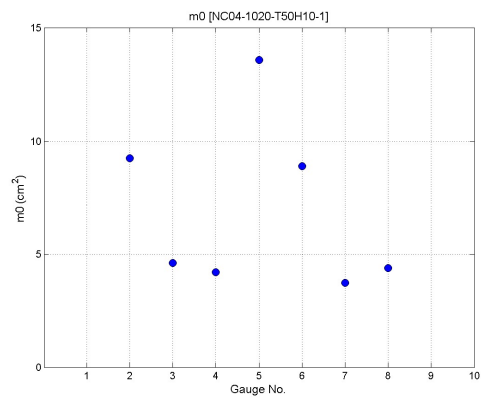
(ii) NC01



(iii) NC02



(iv) NC03



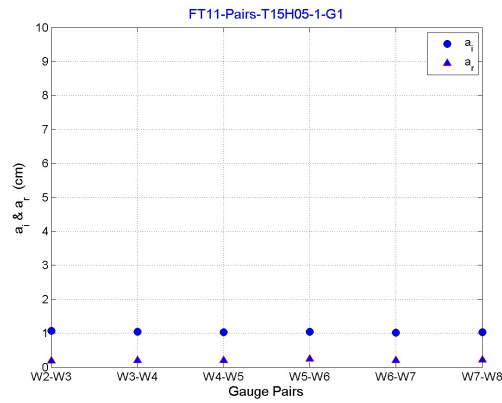
(v) NC04

圖 4.18 各波高計之 m_0 能量分布，5種模型/週期5秒/波高10公分

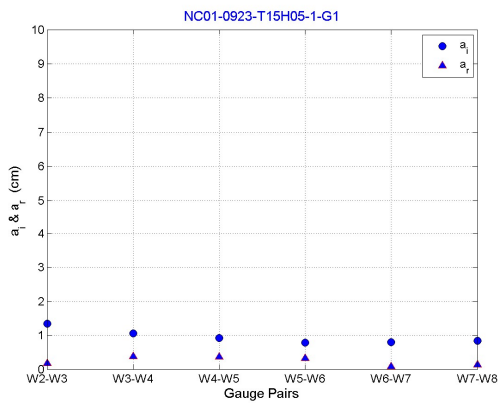
本節進一步利用個別波分析法，繪製於波高計 G1 配對所得之入射波及反射波振幅參數 a_i 及 a_r ，分別羅列 5 種模型之週期 1.5 秒與 5 秒、波高 5 公分與 10 公分的造波條件下，橫軸為依波高計的順序之 G1 配對，如圖 4.19~圖 4.22 所示。

由於除了 FT11 為平台末端的獨立消能結構物，並無其他消能設施，各造波條件的子圖(i)顯示入射波振幅係數 a_i ，各配對一直保持一致不變，而反射波振幅係數 a_r 則因量測誤差的些微變量。從子圖(ii)~(v)中發現 NC01~NC04 的入射波振幅係數 a_i ，會隨配對離結構物越近振幅越小；反射波振幅係數 a_r ，則隨配對離結構物越遠振幅越小(即隨反射波的行進方向遞減)。所以，推論是入射波或反射波皆隨著波浪通過窄航道側壁消能設施越長，可能造成能量消減越多。在此情形下，由於 a_i 及 a_r 一直在變化，從圖 4.16 看起來 FT11 與 NC01~NC04 的反射率非常接近，而且 NC01~NC03 的反射率差異並不明顯。而從圖 4.19~圖 4.22 約略看到 NC03 的各站間能量衰減較多，NC01 其次，NC02 第三，但差異並不大，仍可視為量測誤差及未能掌握的影響因子範圍內。

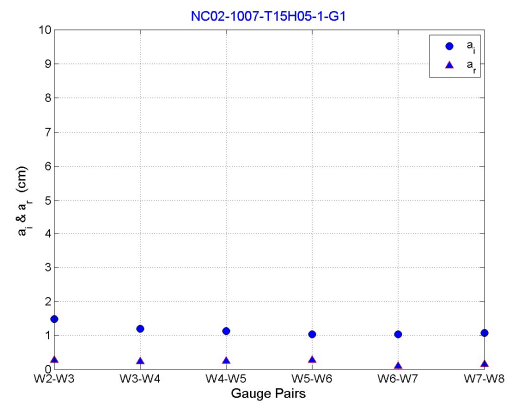
進一步分析討論，圖 4.23 為 5 種模型不同造波條件下，分列各波高計配對之反射率參數，證明了本計畫所設計之側壁消能結構物並非對窄航道波能的消減沒有貢獻。只是因為用來計算反射率的入射波與反射波振幅並非穩定值，入射波波高在通過各波高計後，還繼續受側壁消能設施的減波影響；而反射波離開末端消能結構物再進入窄航道以後，也再次受到不同程度的減波影響。



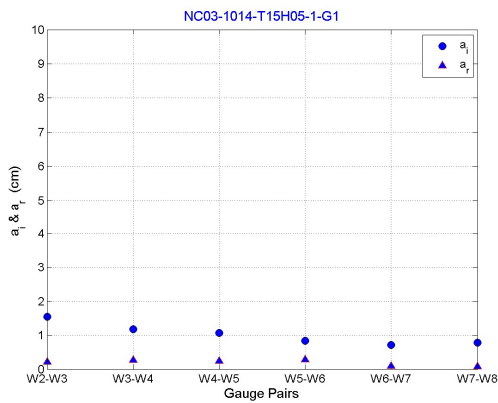
(i) FT11



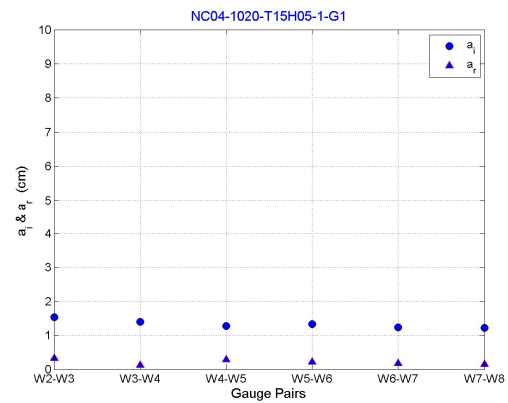
(ii) NC01



(iii) NC02

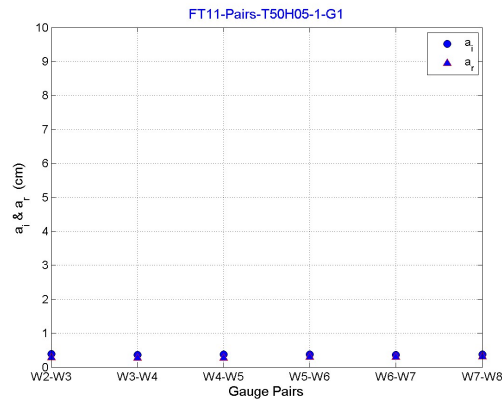


(iv) NC03

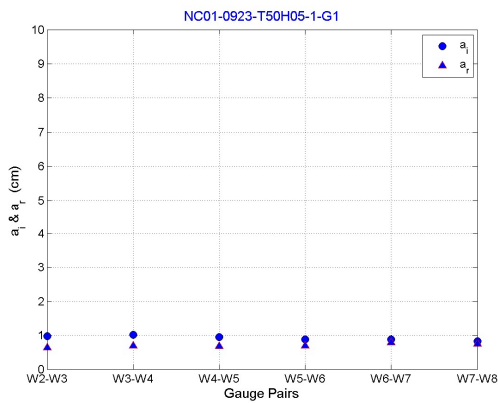


(v) NC04

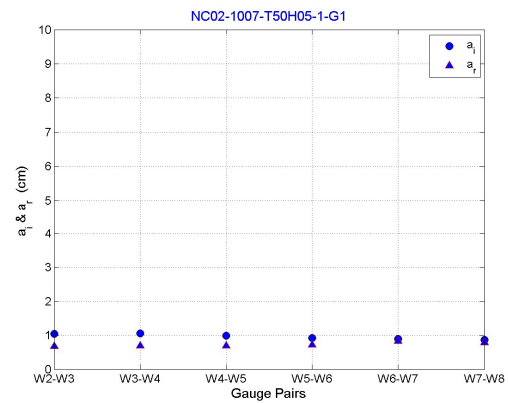
圖 4.19 波高計 G1 配對之入/反射波振幅參數，5 種模型/週期 1.5 秒/
波高 5 公分



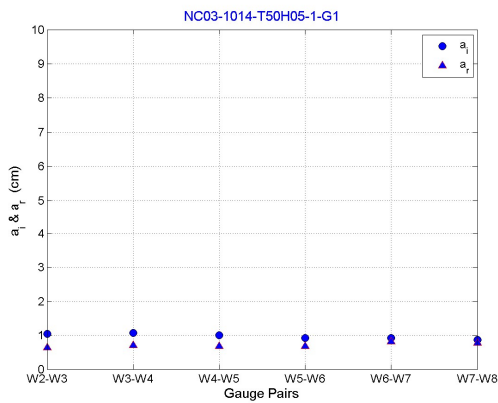
(i) FT11



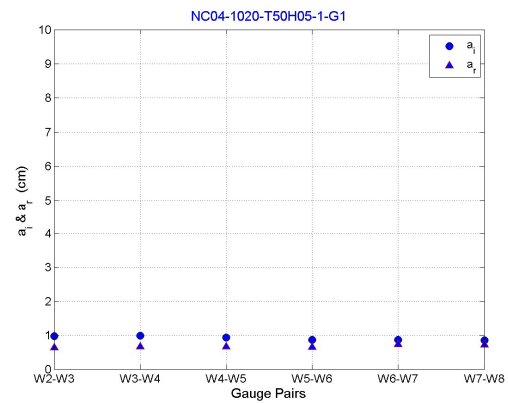
(ii) NC01



(iii) NC02

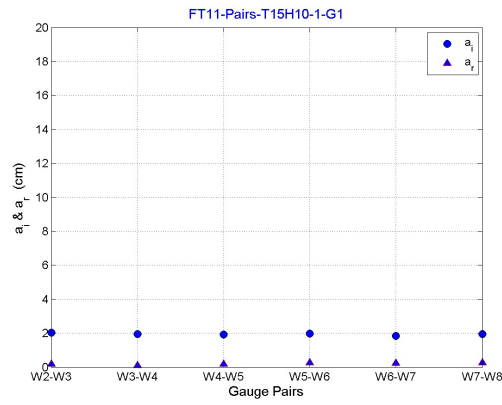


(iv) NC03

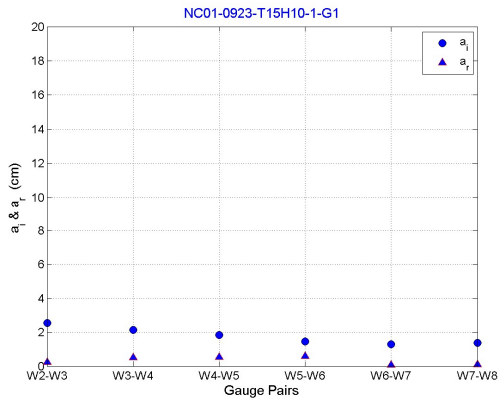


(v) NC04

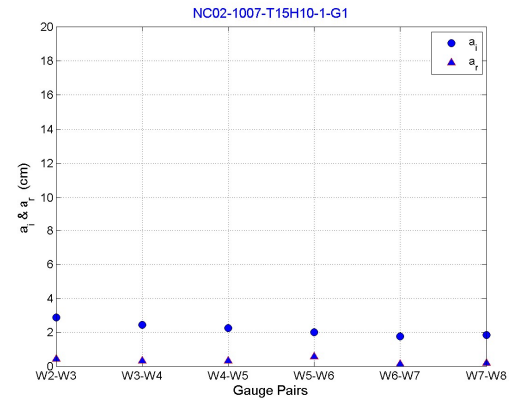
圖 4.20 波高計 G1 配對之入/反射波振幅參數，5 種模型/週期 5 秒/波高 5 公分



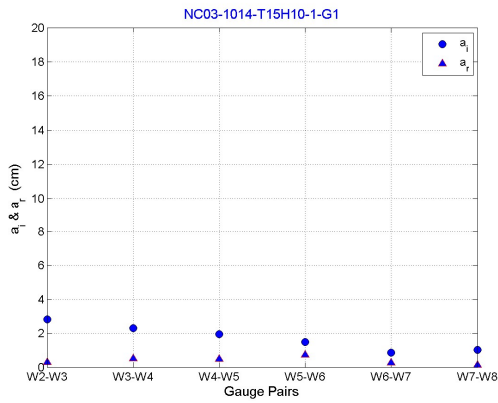
(i) FT11



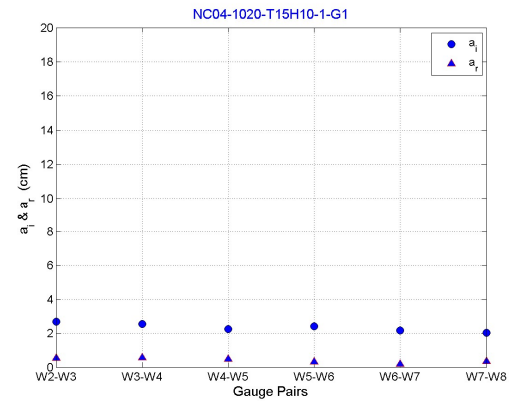
(ii) NC01



(iii) NC02

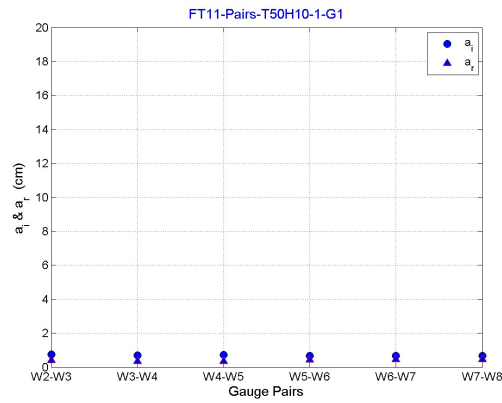


(iv) NC03

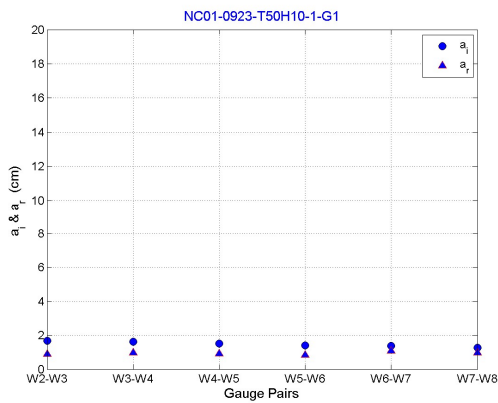


(v) NC04

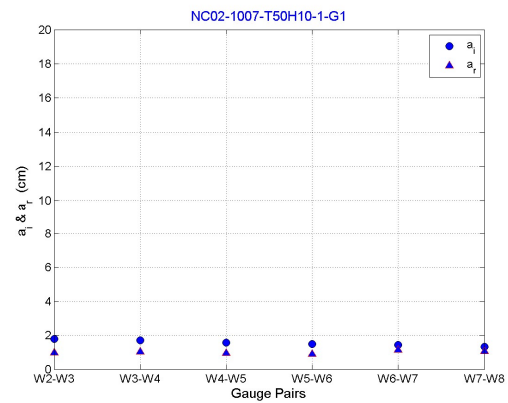
圖 4.21 波高計 G1 配對之入/反射波振幅參數，5 種模型/週期 1.5 秒/
波高 10 公分



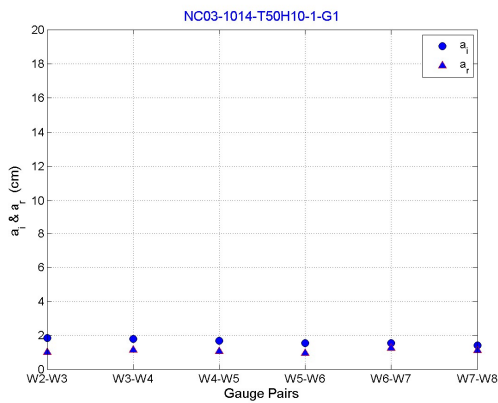
(i) FT11



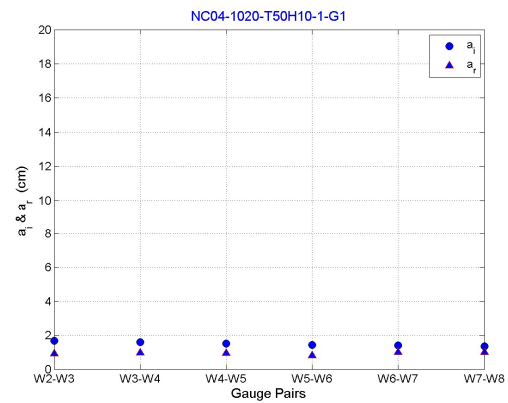
(ii) NC01



(iii) NC02

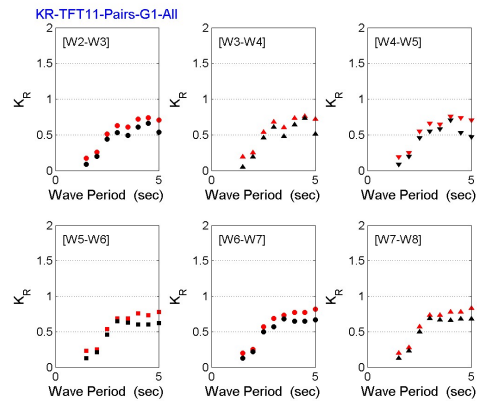


(iv) NC03

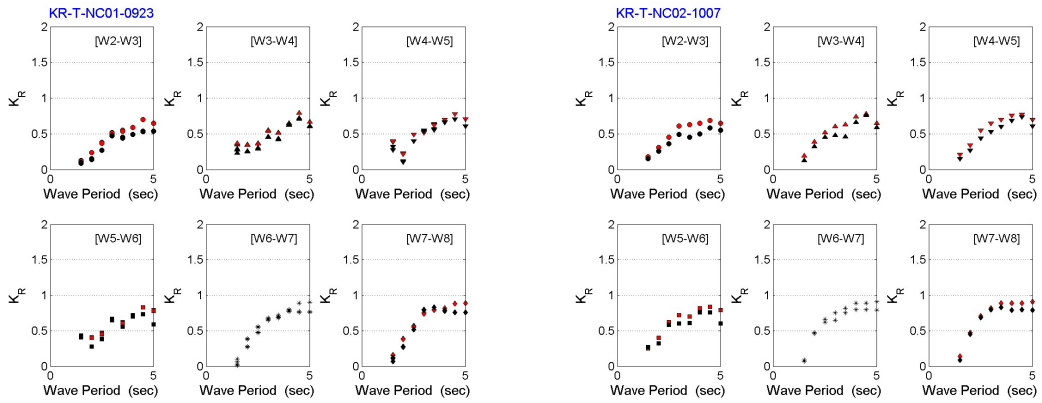


(v) NC04

圖 4.22 波高計 G1 配對之入/反射波振幅參數，5 種模型/週期 5 秒/波高 10 公分

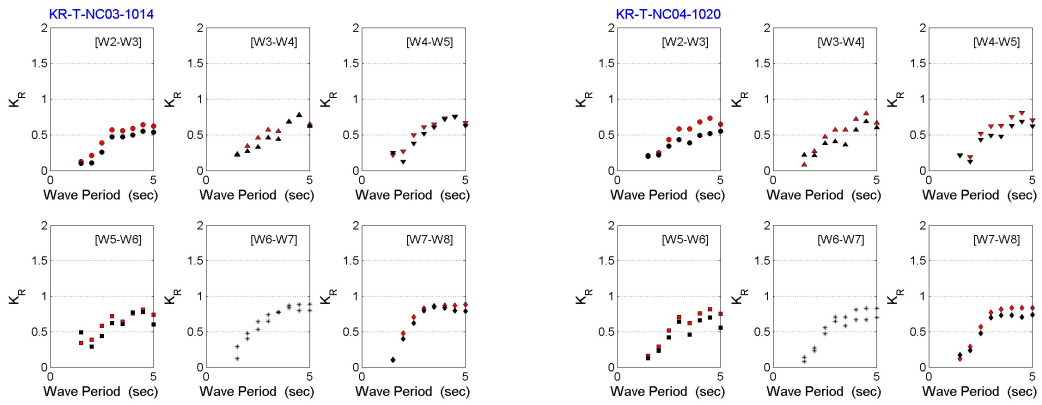


(i) FT11



(ii) NC01

(iii) NC02



(iv) NC03

(v) NC04

圖 4.23 5 種模型不同造波條件下各波高計配對之反射率參數

4.4 小結

側壁消能結構物與碼頭消能結構物的消波機制不同，後者是波浪幾乎與結構物正面交會，波浪在平均水面以上可能會登上斜坡表面發生淺化、碎波或溯升，並可能在斜坡頂部發生越波，能量也可以在這些變形裡做部分折減，前者則幾乎都沒有這些現象。波浪不與側壁消能結構物正面作用，而是在通過各個消波單元的入口時，因水位差及動量差，部分波浪會從高位能或高動能的入口，分散部分能量進入側壁內側水域而形成繞射效應，直角板與斜向板則主要是導引波浪入內，並阻礙其快速回到航道。波浪在消波單元內產生反射及振盪消能，再從單元或經由後側水道從開放水道散射回航道。

由於每一個單元對入射波與反射波都有類似的折減波能的作用(如同海岸突堤群的沿岸流與波動能量是逐段遞減的)，整個側壁消能段的入射波與反射波的波高一直在變，即使同時通過同一位置的入射波與反射波都可能受到消波單元影響，造成不同比例的折減。然而，由於影響僅是些微無法辨識，目前只能當作同一支波高計處，為量測到受到相同程度消波影響的入射波與反射波。

藉由本章的試驗、分析與討論，我們發現 Goda & Suzuki(1976)所提的兩點法的反射率分析方法，無法確切地描述波浪在窄航道的側壁消能段的波能變化，值得再深入探討。目前，本計畫規劃將波高計移出能量消減段，再嘗試找出側壁消能結構物的適切反射率量測方法。

第五章 結論與建議

綜合本計畫 3 年期執行成果與心得，依工作項目分項提出結論與建議。

5.1 結論

1. 波高計配對求反射率法：本計畫在水工模型試驗裡設置了 7 支波高計量測反射率，在距離結構物前 1 公尺開始佈放，皆以 68 公分間距放置。佈放原則遵循 Goda & Suzuki (1976) 的建議，分析結果顯示配對 G1(間距 68 公分)及 G2(間距 136 公分)各組可獲得很接近的反射率值，但其他配對則有發散的情形。實務上的適切間距尚無定數，但基本參考 Goda & Suzuki(1976)建議的精神，再應用多支波高計配對分析可以藉此排除不適切的配對，也免除移動波高計並重新率定的需求。個別波分析法與波列分析法可以得到相近的反射率，惟前者容易顯示因量測誤差所產生的反射率值差值(有約 0.2 的變異量，且受波高和週期的影響)，後者則很接近前者的算術平均值。
2. 碼頭消能結構物：即便是自然沙灘的消波效果也涉及多種消波機制，例如斜坡坡度、表面粗糙度、砂質粒徑、孔隙率、地下水位、透水性及排水率等等，本計畫旨在以「複合式消能結構物」定義過去已開發及本計畫所設計的模型。「複合式消能結構物」一詞並非首創，主要是想強調各種消能結構物的消能效果，其實是可以由單元組合式的觀念去規劃與測試，最後再來評估其間的正負面交互作用，並設法尋求平衡之解。相關研究文獻顯示，單一消能機制的試驗反射率大多在 0.7~0.9 以上。本次所有試驗模型之試驗所得反射率多在 0.7 以下，經研討認為並非單一消能機制所能達成，結構物的消波能力應為多種消波功能的複合性表現。
3. 窄航道側壁消能結構物：有關窄航道側壁消能結構物的設計與水工斷面模型試驗，屬於首次的可行性研究。波浪在側壁消能結構物區

域會一直受到干擾及能量衰減，也導致通過波高計的波形並非如碼頭消能結構物試驗中的穩定，而是一直在變。以 G1 配對為例，六組波高計配對的反射率均不同。實際上是入射波高及反射波高，皆在側壁消能結構物水域內一直在衰減，然而目前的量測方式並不符合 Goda & Suzuki 的兩點求反射率法定義中的假設入射波不變。但如以各波高計配對各自獨立的角度看待，其所求之反射率仍有參考價值。

4. 港灣波動數值模擬：應用改良的非定值反射率港灣波動模式，並對港灣岸壁依構造物消能特性分類，可以節省很多修改邊界條件的時間，快速地進行模擬計算。如配合標準化且格式化的輸出與適當的後處理程序，本計畫能在短時間內執行多種不同情境假設的花蓮港港灣波動模擬，並辨識出西船渠 7 號碼頭的消波特性直接影響窄航道裡的波動；東船渠 12 號碼頭的消波特性直接與內港水域的波動有關；而 19 號碼頭可能主導了外港的主要波動。
5. 2005 年龍王颱風觀測波浪的統計分析：藉由涵蓋颱風登陸前後 168 小時花蓮港全港區佈放 7 支波高計的觀測資料，確認了港外、外港及內港的波動不同步，港內出現了與港外不一致的長週期波動，但能在颱風中心遠離後的數小時即發散消失，顯示著該時期的長週期波動屬於強制性的波動。

5.2 建議

基於以上的結論，可以發現任何消能結構物的施作，都會使用大量固體結構物，任何修改都將遭遇各種困難度。因此提出以下建議：

1. 於規劃與設計前，除考量使用需求外，若能掌握越多當地各種海象狀況下的波浪、水位與水流特性，也是提示應該著重哪一部分的消能，將為決定其結構物設計成功與否的關鍵。
2. 改良的非定值反射率港灣波動模式，目前不足的是尚未掌握各種岸壁類型的消波特性(Kr-T 反射率曲線)，以及底床摩擦參數(陳炫杉教授的無限元素港灣模式之底床摩擦參數)，若能確實加入模擬，相信能使模擬結果更接近現場實際情況。
3. 藉由 2005 年龍王颱風觀測波浪的統計分析結果，確認了港外、外港及內港的波動並不同步，研判此行為應與港灣入口外之水動力行為及港形有關，惟目前尚無更完整觀測資料可資分析。
4. 除了直立不透水光滑反射壁以外，並無絕對好或壞之消能結構物。只要能區分出並掌握各個單元的消波特性，就有機會達成局部性與加成性的改善。本計畫也是初步嘗試去拆解討論各種單元的消波特性。綜合前述 3 個系列碼頭消能結構物模型測試，提出後續相關研究想法如下：
 - (1) 沒有所謂【通用型】的消能結構物，各種模型之設計必須要因「港」制宜，包括結構物前各種波高、週期及水位之聯合分布。消能結構物消波效能至少要分為 3 個時期考慮：常時(分季節評估)、颱風時期、以及異常海象時期(如鋒面浪及湧浪的長週期波動)的波浪與水位。
 - (2) 消能結構物之消能效益，建議分為上部坡面(溯升與越波)、下部前牆(開孔)、內部消波艙、後端集水槽、以及下端排水等單元分項評估；或者，先以平均水位區分為出水部分及沒水部分。

- (3) 本計畫初步研究利用了可越波斜坡、簡易消波艙及後側越波集水槽與排水道。雖然每種單一單元的改善結果不顯著，但多種消波效果卻可累加，後續應朝向複合式消能機制思考，惟各機制之間可能互制或耦合，需要透過水工斷面試驗才能驗證整合效果。目前如何增益消波艙的消能效果，例如，改用多孔隙水平板或傾斜板破壞波形結構、設置排水道導流集水槽的水體與波動能量或加強聯通水域振盪水柱效應，藉以消減部分反射波能，都是後續試驗的考慮方向。
 - (4) 雖然是在斷面水槽進行模型試驗，但由於結構形狀複雜緣故，會引發三維的波動，應用 FFT 分析很容易被誤解為非線性波。此外，波浪在斷面水槽傳播過程中，會發生衰減而導致判定起始波動的困難。
 - (5) 各種消能結構物的消波效率，與其能否促成波浪在自由水面附近發生強烈水動力行為有關。無自由水面的消能結構物屬於沒水式結構物，也算是飽和含水的多孔隙介質，會降低其消能效果。
5. 本項計畫後續可以進一步應用計算水動力模式，如 FLOW-3D 輔助驗證，並以數值模式，模擬斷面水槽無法造出之更長週期波動。應用時變性的港灣波動數值模式，則必須考慮除了數值穩定性及收斂性以外，如何評估港區波動已達定常狀態。

參考文獻

1. Ben Ramoul, L., Korichi, A., Popa, C., & et al. (2019). Numerical study of flow characteristics and pollutant dispersion using three RANS turbulence closure models. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 379–400. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-9628-2>
2. Cassan, L., Roux, H., & Dartus, D. (2020). Velocity distribution in open channel flow with spatially distributed roughness. *Environmental Fluid Mechanics*, 20, 321–338. <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09720-x>
3. Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill.
4. Feys, S. (2009). Design of a new anti-reflective caisson [Master's thesis, Universitat Politècnica de València & Ghent University].
5. Franco, L., Cecioni, C., Bellotti, G., & Andersen, T. L. (2019). Laboratory tests on the reflection coefficient of a perforated caisson. In N. Goseberg & T. Schlurmann (Eds.), *The 8th International Coastal Structures Conference 2019* (pp. 253–262). Bundesanstalt für Wasserbau. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-64-9_026
6. Garrido, J. M., de León, D. P., Berruguete, A., Martínez, S., Manuel, J., Fort, L., Yague, D., González-Escrivá, J. A., & Medina, J. R. (2011). Study of reflection of new low-reflectivity quay wall caisson. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), structures.27. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.structures.27>

7. Goda, Y., & Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proceedings of 15th International Conference on Coastal Engineering*, 828–845.
8. Gonzalez-Escriva, J. A., Molines, J., Medina, J. R., & Gómez-Martín, M. E. (2018). Analysis of long-circuit type caissons for attenuation of long-period waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(36), papers.19. <https://doi.org/10.9753/icce.v36.papers.19>
9. Kean, J. W., Kuhnle, R. A., Smith, J. D., Alonso, C. V., & Langendoen, E. J. (2009). Test of a method to calculate near-bank velocity and boundary shear stress. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(7), 588–601. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000049](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000049)
10. Kee, S. T., & Lee, S. H. (2006). Submerged porous plate wave absorber. *Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 626–631.
11. Lin, J.-G. (1995). Statistical properties of wave conditions in harbor [Doctoral dissertation, North Carolina State University].
12. Munk, W. H. (1950). Origin and generation of waves. *Proceedings of 1st International Conference on Coastal Engineering*, 1–4.
13. Thaha, A., Dwipuspita, A. I., Minggu, W., & Maddi, H. C. (2013, September 6–8). The performance of perforated screen seawall in dissipating waves, minimizing reflected wave and run-up/run-down [Paper presentation]. 4th International Seminar of HATHI, Yogyakarta, Indonesia.

14. Thompson, E. F., Bottin, R. R., Jr., & Selegan, J. P. (2004). Effectiveness of pocket wave absorbers in vertical-wall, coastal entrance structures (ERDC/CHL CHETN-III-69). U.S. Army Corps of Engineers.
15. U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2002). Coastal engineering manual - Part V (EM 1110-2-1100).
16. Van Dyke, M. (1982). An album of fluid motion. Parabolic Press.
17. Yang, S., Yang, L., Shi, B., Na, J., & Guo, Y. (2024). Experimental investigation on wave dissipation of perforated pipe breakwater under regular wave conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(12), 2137. <https://doi.org/10.3390/jmse12122137>
18. Zhao, X., Li, Y., Zou, Q., Han, D., & Geng, J. (2022). Long wave absorption by a dual purpose Helmholtz resonance OWC breakwater. *Coastal Engineering*, 178, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104203>
19. 大島香織、森屋陽一 (2005)。導水板によるスリット構造物の長周期波消波特性 [Wave dissipation characteristics of a slit-type structure with a guide plate for long-period waves]。海洋開発論文集，21，791–796。
20. 李健鴻 (2010)。越波式消能結構物之研究 [Study on overtopping-type energy dissipation structures] (碩士論文)。國立臺灣海洋大學河海工程研究所。
21. 林炤圭、許師瑜 (2024)。岸壁非定值反射率對港灣波動評估模式之影響 [The influence of non-constant quay wall reflectivity on harbor wave evaluation models]。港灣季刊，(129)，1 – 19。

22. 林焯圭、連皓宇、張維庭、蔡世璿、李大鴻、林蔚、林鵬、阮天野、陳池威、陳德鋼、楊升耀、楊輝斌、歐陽榮桓 (2017)。新型設置導流板之直立開孔式結構物的消波特性和初期研究 [Preliminary study on the wave dissipation characteristics of a new vertical perforated structure with guide plates]。海洋工程學刊，17(4)，242-268。
23. 許師瑜、林受勳 (2024)。長週期波斷面模型試驗(1/3)-長週期波水工模型試驗探討 [Long-period wave section model test (1/3): Discussion on hydraulic model tests for long-period waves] (研究報告)。交通部運輸研究所。
24. 許師瑜、林受勳 (2025)。長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港現況碼頭之水動力及改善研究初探 [Long-period wave section model test (2/3): Preliminary study on hydrodynamics and improvement of current wharves in Hualien Port] (研究報告)。交通部運輸研究所。
25. 蘇棋福、井島武士、詹政祥、陳樹旺、村山盛見 (1979)。萬代福直立式靜波牆沉箱碼頭在本省各海岸應用之特徵 [Characteristics of the application of "Wonderful" vertical wave-stilling wall caisson wharves in various coasts of the province]。第3屆海洋工程研討會論文專輯，139 - 157。

附錄一

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所 114 年度自行研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：MOTC-IOT-114- H2CA001e 長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究

執行單位：運輸研究所運輸技術研究中心

參與審查人員及其所提之意見	執行單位處理情形
(一)臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司工程處 鄭璟生委員	
1. 本研究從第二期開始，非常用心設計岸壁消能單元組合，尋求複合式消波構造的消能最佳解，模型設計值得肯定，而從結果看來，模型 FT11 是#7 碼頭的最佳解，那#12 碼頭是否也是這個答案嗎？建議具體建議的最佳構造單元，可明確下在結論陳述。	感謝委員肯定，將補充結論內容。本計畫主要以#7 碼頭為標的進行水工斷面試驗，就試驗設計而言，#12 碼頭與#7 碼頭主要差異點為設計水深多 1 公尺。若複合式消能結構物欲應用在其他正對波浪的碼頭，在結構物的幾何尺寸需進行調整，消能單元的組合可就碼頭使用需求，進行選用搭配。
2. 側壁消能設施的試驗是首次有這樣的模擬航道消能分析，雖然模型試驗分析出來的結果可能不是那麼直觀與有利辨識，但研究歷程與初步成果數據具有價值，建議後續持續改定量觀測與分析方式，以得到可實務應用的結果。	感謝委員肯定。
3. #7 與#12 岸壁消能、航道岸壁消能以及東堤拋石（另案），在花蓮港港型不變的前提下，仍然是有機會找到答案的方向，期待後續持續就航道岸壁消能觀測與數據分析作精進，也可以比較#7+#12 同時設消能岸壁的能量消減成果對照。	感謝委員肯定。
(二)國立臺灣海洋大學 蘇仕峯委員	
1. 研究結論指出，文獻中採單一消能機制之結構物，其反射率（Reflection Coefficient）多落在 0.7 至 0.9 以上；本研究開發之消能模型，其反射率普遍低於 0.7，顯示其消波效能顯著優於傳統型式。此優勢歸因於多重消能機制之加乘效應。其中，越波排水機制是否是提升消能效率最關鍵主因？	前人研究長波抗浪型的消能斜坡結構物，即有明顯降低反射率之成效，證明斜坡造成的越波排水機制，具有相當的消減波能之效果。本計畫採用複合式消能結構物，且造波最長週期條件為現場的 25 秒波浪，亦達到顯著的消能成效，應可歸功於複合消能單元間之相互配合的加成效果。
2. 斷面水槽試驗中，以規則波做為輸入條	雖然斷面水槽內為二維波浪之造波，但波

<p>件，經由快速傅立葉變換（FFT）分析發現，除了主頻外，亦觀察到顯著之二倍頻、三倍頻能量及低頻次谐波（如圖 3.25(e), (f)所示），證實波浪在傳播過程中發生明顯的非線性能量轉移。針對此現象，採用 Goda 與 Suzuki (1976)之兩點法分離入射與反射波時，需審慎考量其線性波理論之基礎，探討該方法在面對強非線性波況或顯著能量轉移時的使用限制與誤差範圍。</p>	<p>浪作用於結構物或設施時，因幾何形狀或消能的影響，會產生不同方向的波浪反射，甚至會因水動力作用影響，使得產生新的造波行為，例如，溯下造波。正因為有如此複雜的波動行為，本計畫仍以 Goda 與 Suzuki (1976)之兩點法為分析方法，採用多達 7 支波高計進行多組配對分析，以多組結果確認結果之正確性。</p>
<p>3. 研究結論指出，無自由水面之消能結構（屬於沒水式結構）其內部孔隙趨於飽和，屬飽和含水之多孔隙介質，導致其消能效果受限，顯示水面下消波塊之消波功能具其侷限性。在實務應用上，必須考量颱風期間隨之而來的暴潮位抬升，當結構物沒水深度增加，將直接削弱消能結構之功能，進而影響泊區內之靜穩度。</p>	<p>本計畫標的#7 碼頭設計水深為 6.5 公尺，試驗水位設定為現場 8 公尺，有加上潮汐水位，並未考量暴潮水位。為符合實務應用，後續於規劃設計前，應先取得設計標的於異常氣候期間之水位觀測分析，並進行迴歸週期計算，以做為消能結構物幾何設計依據。</p>
<p>4. 針對沿航道設置之側壁消能結構，航道之幾何尺度（長度與寬度）與消能配置間的相互關係為關鍵影響因子。由於窄航道內波場複雜，傳統基於兩點法測得之反射率未必能精確反映其效能，建議改採航道前後波浪衰減率（dissipation rate）做為評估指標，以更準確地衡量波浪沿航道傳播過程中的能量衰減。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>
<p>5. 試驗波高 10cm 案例的反射率，許多結構物在 3.0~3.5 秒的值相對較高，可能是何種機制？</p>	<p>由試驗過程觀察，在波高 10 公分且週期大於 3.5 秒的條件，波浪能完全越波，且因懸吊板造成共振水體與氣室壓波的機制較明顯，因此，反射率會略為降低。</p>
<p>(三)國立成功大學水工試驗所 江文山委員</p>	
<p>1. 摘要與結論建議要與研究項目內容呼應，例如以複合式消波結構物的概念，局部改裝基本模型各個單元…等。</p>	<p>已依委員意見補述於報告書摘要與結論建議。</p>
<p>2. 5-1 節為結論然其中第二點的敘述主要是建議，應納入第 5-2 節。</p>	<p>已依委員意見修正於報告書 P5-3。</p>
<p>3. 第三章實驗數據非常珍貴，值得後續進一步分析，提取更核心精要的結果。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>

4. P3-20 波高計率定結果，建議要有迴歸式及相關係數等。	感謝委員建議，已補充於報告書章節 3.4 與 4.2。
5. 若有實驗過程中的相關影像紀錄，建議納入報告以利瞭解，若無則建議後續實驗能增加影像紀錄。	感謝委員建議，將考量納入後續工作。
(四) 本所運輸技術研究中心第一科 賴瑞應 研究員兼科長	
1. 報告提出的 FT 系列模型包含複雜的消波艙、後側集水槽及底部排水道，實務應用需考慮設計、施工及後續維護的可行性與生命週期成本，報告後續可討論這些隱蔽空間在實務中是否容易淤積漂流木、海漂垃圾或產生泥砂淤積，以及是否會增加清理維護的難度。	感謝委員肯定，後續將再努力。
2. 報告初步探討了窄航道側壁消能設施（NC 系列），利用導水板攔截能量，因為窄航道寬度僅約 100 公尺，任何側壁結構的增設（如直角板或斜向板）均可能影響有效航道寬度與船舶操縱穩定性，建議後續報告可訪談引水人的意見或以操船模擬進行相關的安全評估。	感謝委員建議，將考量納入後續工作。
(五) 本所運輸技術研究中心第三科 陳鈞彥 副研究員	
1. P2-20，有無圖 2.13(g)、(f)之說明或介紹？	已依委員意見補充說明於報告書 P2-20。
2. 報告書中錯字請修正。	將參考並於報告書中進行修正。
3. 4.2 節，各種側向壁 case 的示意圖，建議標註造波方向以利閱讀。	感謝委員建議，已補充標註於報告書 4.2 節進行補充。
(六) 本所運輸技術研究中心第二科 李俊穎 研究員兼科長	
1. 計畫內應用水工試驗評估多種複合式消能結構物之消能效果，成果豐碩具參考性。	感謝委員肯定。
2. 建議第三章小結時能製表說明不同複合式之消能效果。	感謝委員建議，已補充說明於報告書 3.9 節。
3. 側壁消能結構物，後續計畫可再考量實際窄航道來配置。	感謝委員建議，將納入後續工作參考。

附錄二
期末審查簡報

長週期波斷面模型試驗(3/3)

消能結構物型式之可行性研究

期末審查

簡報者：許師瑜 助理研究員

115.01.05

長週期波斷面模型試驗(3/3)

消能結構物型式之可行性研究

人力分配

經費：1,300千元
來源：本所科技預算
(事務費、設備及投資)

類別	姓名/職稱	主要工作內容
計畫主管	蔡立宏/主任 柯正龍/副主任 李俊穎/副研究員	監督計畫執行
計畫主持人	許師瑜/助理研究員	計畫統籌、文獻資料蒐集分析、斷面水槽測試、試驗規劃及報告書撰寫
研究人員	林受勳/助理研究員	協助斷面水槽測試、試驗規劃及工作時程安排進行
研究/計畫參與人員	李江澤/技工	斷面水槽測試、模型及設備布置
	陳天時/技工	斷面水槽測試、模型及設備布置

簡報內容

- 壹、緒論
- 貳、文獻回顧
- 參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗
- 肆、窄航道側壁消能結構物水工斷面模型試驗
- 伍、結論與建議



研究緣起與目的

花蓮港的挑戰 面臨異常海象與長週期波動問題，影響港內靜穩度。

複雜海氣象環境

臺灣海域環境複雜，單一消波機制無法提供完整消能效果，難以解決港內長週期波動問題。

整合性解決方案

需針對不同海象條件與港灣特性，整合適當消能設施，調整互制行為以發揮最大效率。

本研究以花蓮港#7及#12碼頭為對象，研發「複合式」消能結構，整合不同消能機制以提升效率。

圖片來源：<https://hl.twport.com.tw/>



壹、緒論 / 研究項目與內容

- 112年** 蒐集回顧國內外長週期波動特性相關研究及其所造成的災害資料
 另綜整歸納長週期波所造成之破壞機制與對策
 以花蓮港所遭遇的問題為主軸，研擬可能消減長週期波浪作用的結構或設施之雛形
- 113年** 先蒐集研讀國內外有關港灣內具消能機制的碼頭與構造物型式之文獻資料，以分析歸納可消減長週期波能之結構物型式
 選定標的碼頭位置及規劃消能碼頭型式，
 執行斷面水工模型試驗，針對現況碼頭與新型消能碼頭的斷面
 綜合第一年的研究成果及今年之試驗成果，研擬消能碼頭斷面型式建議，尋求降低長週期波的能量與反射率，以改善港內振盪現象
- 114年** 應用前二年的研究成果，進行消能碼頭精進之斷面水工模型試驗，並另探討於束縮的受限航道設置消能側壁
 驗證消能結構物反射率及消能的成效。最後作綜合整理與評估，以提出國內近岸削減長週期波浪能量之結構物或設施型式



壹、緒論 / 研究方法

文獻蒐集研讀

- 針對國內外有關消減波能設施及應對長週期波的結構物保護研究，進行蒐集研讀彙整，並應用生成式AI搜尋文獻，分析其抵禦或消能機制。

消能碼頭型式精進與驗證

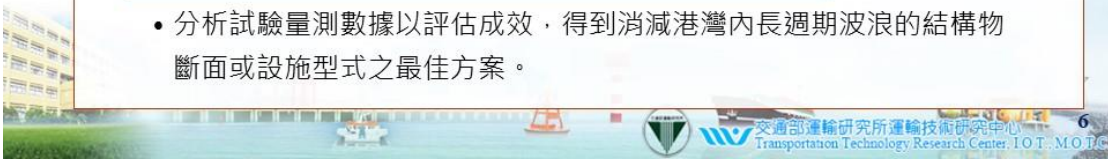
- 彙整並檢討前一年度的成果，以進行消能碼頭型式之改良，再以斷面之水工模型試驗確認其消能效果。

規劃設置於窄航道的消能側壁結構物並進行斷面之水工模型試驗

- 綜整前兩年研究心得，提出適用於花蓮港內窄航道側壁，可消減長週期波能的結構物斷面型式，並以斷面之水工模型試驗確認其消能效果。

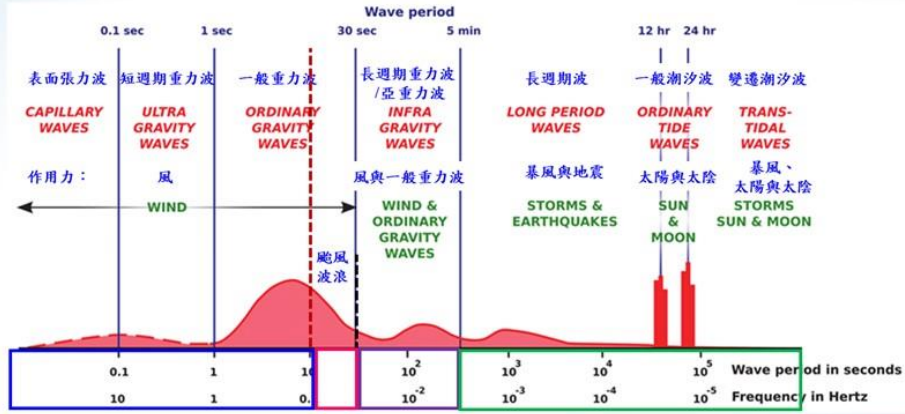
水工斷面試驗結果分析及評估可行性

- 分析試驗量測數據以評估成效，得到消減港灣內長週期波浪的結構物斷面或設施型式之最佳方案。



貳、文獻回顧/長週期波相關研究

Munk(1950)將海洋波浪依週期分為：



貳、文獻回顧/消滅港灣長週期波相關研究

消能斜坡

自然透水海灘

福隆海灘

人工斜坡

花蓮溪口北側海岸

開孔型海堤(Thaha et al., 2013)

人工透水海灘

花蓮南濱海岸

(I) Front view (II) Top view

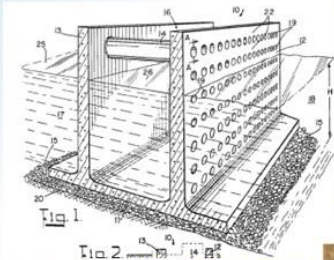
(a) Perforate-pipe breakwater

(b) Double horizontal plate breakwater

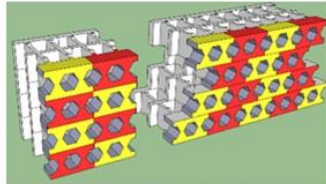
開孔管型防波堤(Yang et al., 2024)

貳、文獻回顧/ 消滅港灣長週期波相關研究

直立型消能結構物



Jarlan型式消波結構物
(Jarlan, 1964)



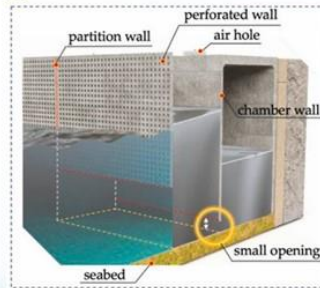
萬代福直立開孔式消能碼頭



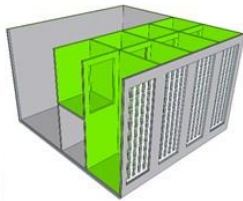
三層水平板
(Kee et al., 2006)



開孔沉箱
(Franco et al., 2019)



混合防波堤-波浪能轉換裝置系統
(Zhao et al., 2022)



狹縫型結構物
(林等人, 2017)

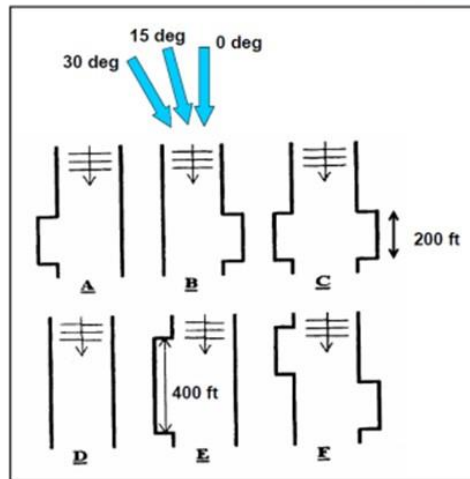


貳、文獻回顧/ 消滅港灣長週期波相關研究

產生共振箱效應的口袋型消波灘(pocket beach)



密西根州Pentwater的口袋型消波灘
(Thompson et al., 2004)



水工模型試驗測試多種口袋型消波灘
配置 (Thompson et al., 2004)



貳、文獻回顧/消減港灣長週期波相關研究

導水式渦流型消能結構物

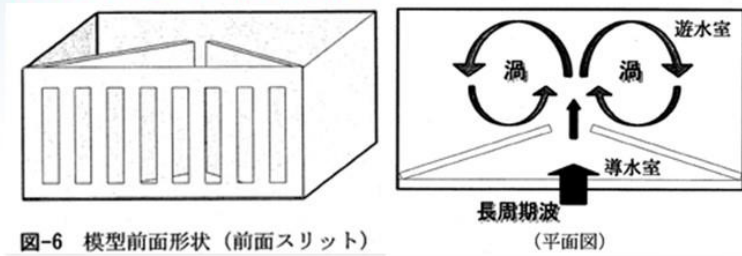
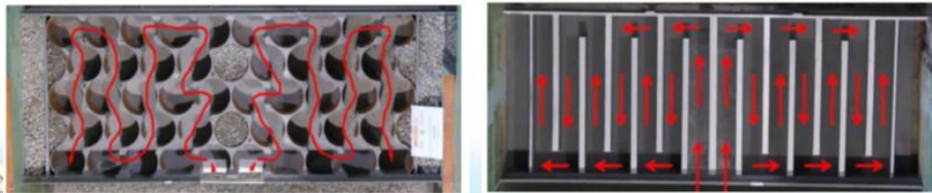


圖-6 模型前面形狀 (前面スリット)

(平面圖)

導水式開孔沉箱之模型配置 (大島和森屋, 2005)

低反射率沉箱



Gonzalez-Eccrival et al.(2018)ARJ-R型圓形及矩形消波室

貳、文獻回顧/小結

港區空間珍貴，需透過多元手段防治波浪反射

- 物理干擾：高壓空氣式或水力式防波堤。
- 水力阻尼：鋪設多孔隙介質。
- 消波結構：設置消波灘（鼎型塊等）或消能碼頭（開孔式沉箱、棧橋式碼頭）。

傳統直立式結構在「長週期浪」表現不佳

- 直立式消能結構（如開孔碼頭）雖然能兼顧船舶繫纜與空間利用，是目前的首選，但在效能上存在瓶頸

研發「複合式消能結構」以優化效能

- 單元測試：針對各種消波單元進行獨立測試與改良。
- 全面應對：「不同季節有不同的波浪及潮位條件」→ 企圖打破傳統結構的限制，開發出能適應多變海象（特別是長週期浪）的高效能消波設施。

參、碼頭消能結構物水工断面模型試驗/水工断面試驗室簡介

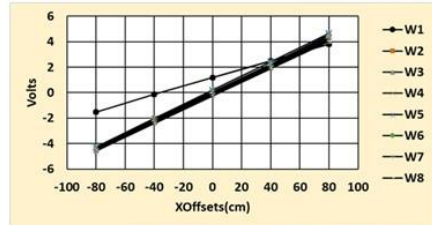
- 水槽內尺寸為1.5m寬、2m高及全長約100m。
- HR Wallingford断面造波系統與8頻道電阻式波高計系統。



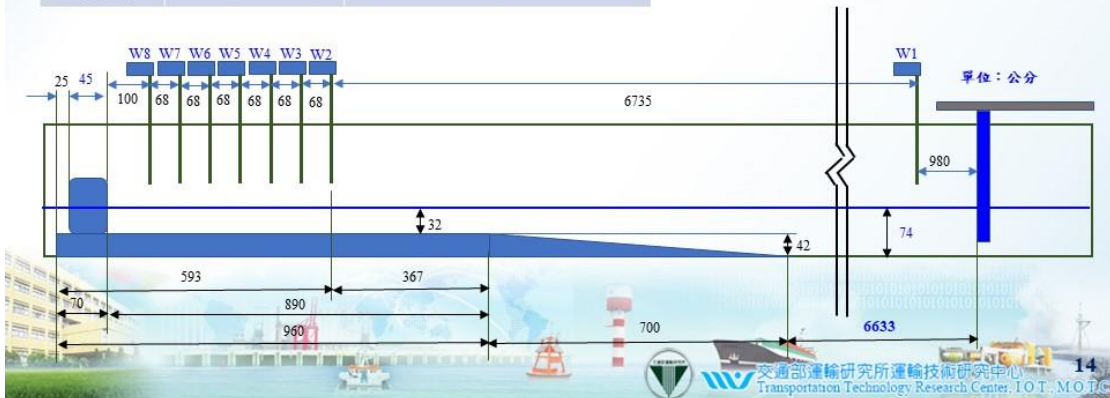
參、碼頭消能結構物水工断面模型試驗/試驗設計

模型縮尺：1/25 造波120秒，擷取300秒

內港#7	現場	試驗
水深	EL-6.5m~ EL-8m	EL-0.26m~EL-0.32m
週期	4.5~25sec	0.9s(0.1s)1.1s、 1.5s(0.5s)5s
波高	1.25、2.5m	0.05、0.10m



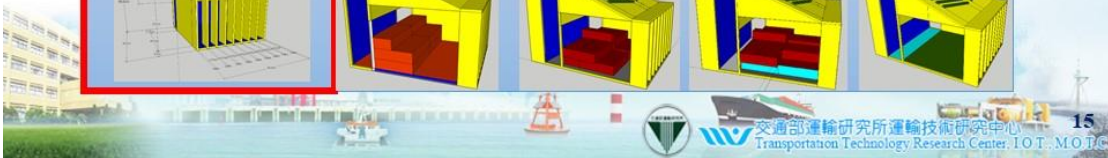
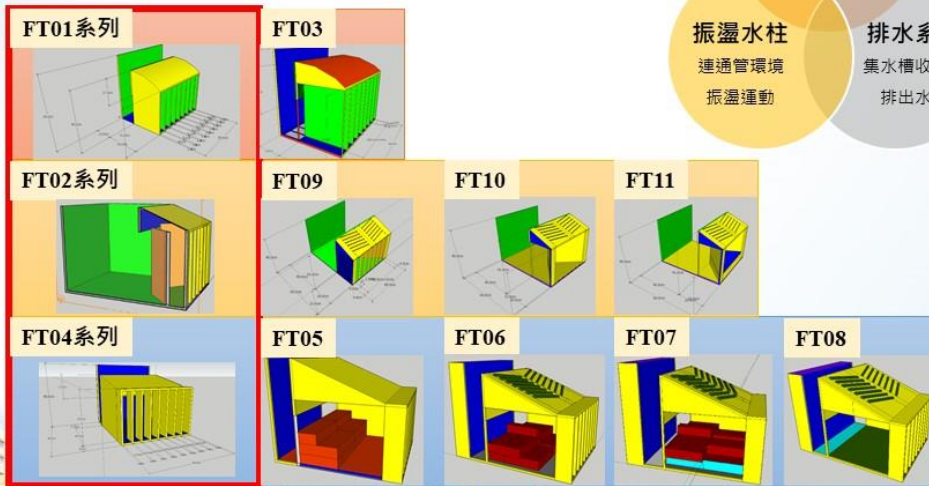
8支波高計率定結果



參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/ 新型消能碼頭研擬

消能結構物設計概念

複合式消能機制



參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/ 新型消能碼頭研擬

FT04消能結構物設計概念

以本研究的斜面越波排水開孔式 **FT04** 模型為例：

上部斜坡單元

適當頂端高度，前端伸入水面下的斜坡，讓波浪易於溯升及越波，減少回溯造波量體並降低反射率。

下部消波艙單元

前端設短隔牆，後側有下懸吊板。構成氣室，對波浪形成變形連通管內的振盪水柱運動。

後側集水槽單元

收集越波水體，先靜波後以較高淨水頭差從懸吊板下方開孔流入消波艙再排出。

參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/ 試驗數據分析

試驗數據分析方法

(1) 波列傳播過程及穩定分析

(2) 零上切個別波分析

(3) FFT波譜分析

(4) 7支(W2~W8)波高計進行配對，
兩點個別波法求反射率Goda規則波解法)

(5) 7支(W2~W8)波高計進行配對，
兩點波列法求反射率Goda不規則波解法)

延伸 Goda & Suzuki (1976) 兩點求反射率法。將 W2~W8 波高計進行分組配對 (G1~G6)。

G1 : W2-W3、W3-W4、W4-W5、W5-W6、W6-W7及W7-W8；

G2 : W2-W4、W3-W5、W4-W6、W5-W7及W6-W8；

G3 : W2-W5、W3-W6、W4-W7及W5-W8；

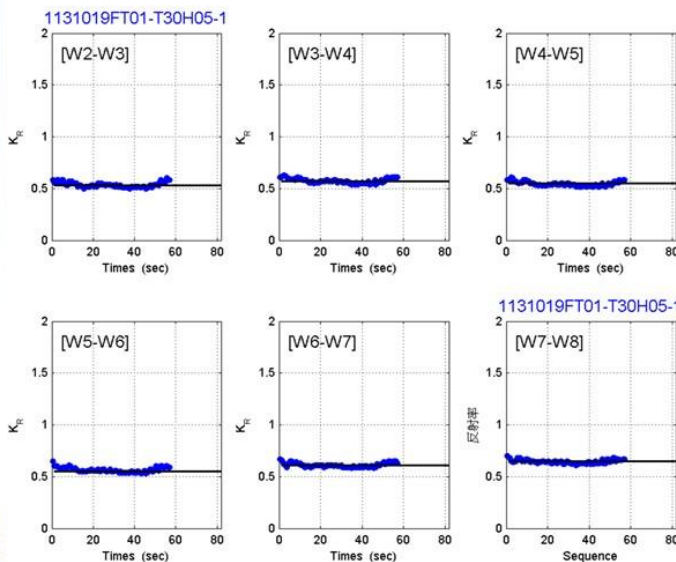
G4 : W2-W6、W3-W7及W4-W8；

G5 : W2-W7及W3-W8；

G6 : W2-W8。



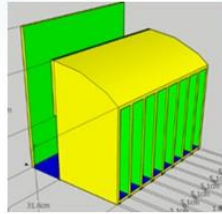
參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/ 反射率分析的觀察 兩點個別波及波列法分析反射率



- 針對每一組波高計配對，以第一支波高計自波形大於0.1倍設計波高開始
- 擷取60秒(造波120秒的一半)，然後每次平移0.2倍週期，擷取一個週期的波形進行Goda兩點法個別波分析，最後每一組配對會得到很多一個反射率值(圖中的藍圓點)。
- 擷取8192個點波形進行Goda兩點波列法分析，最後每一組配對會得到一個反射率值(圖中的黑實線)。

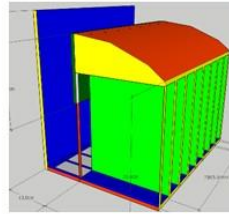
參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

FT01系列 消波單元比較：氣室單元



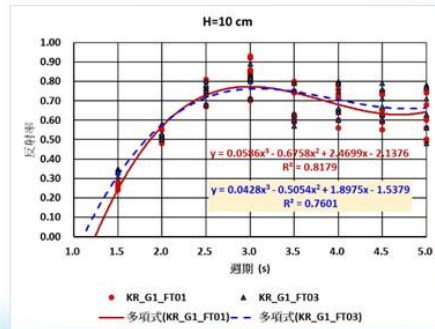
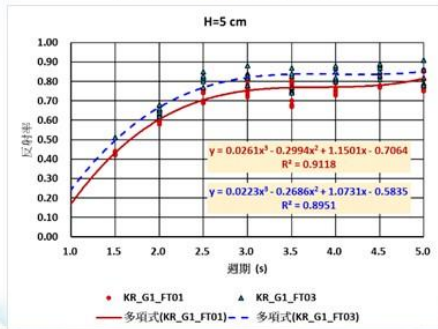
FT01

隔間牆
光滑弧面
入水懸吊板



FT03

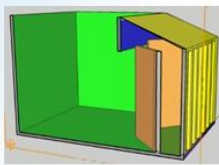
隔間牆
光滑弧面
頂部開孔
入水懸吊板



FT01與FT03不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

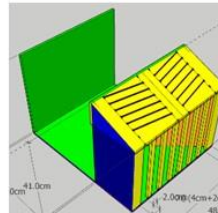
參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

FT02系列



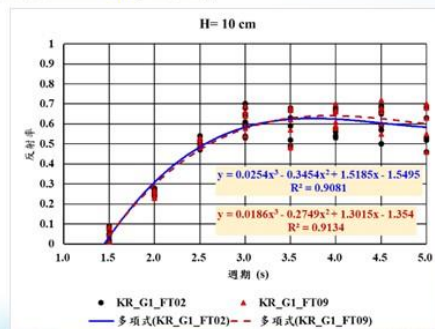
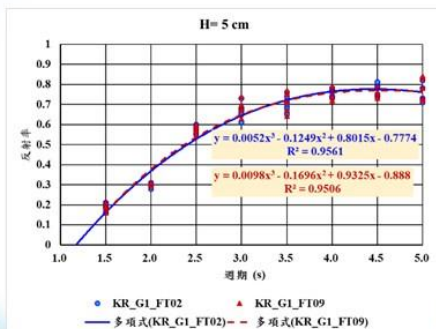
FT02

柵欄與斜向導水板
光滑斜面
後側開放型



FT09

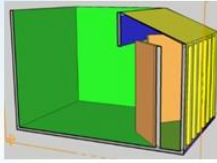
柵欄與斜向導水板
光滑斜面
加斜向突起
後側開放型



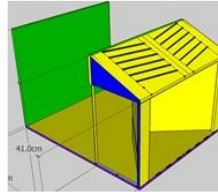
FT02與FT09不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

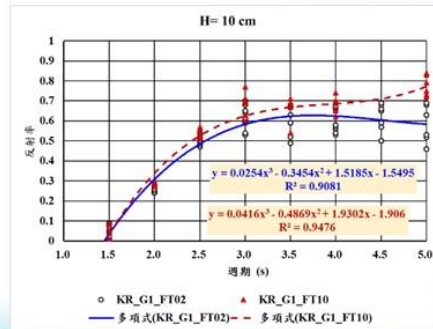
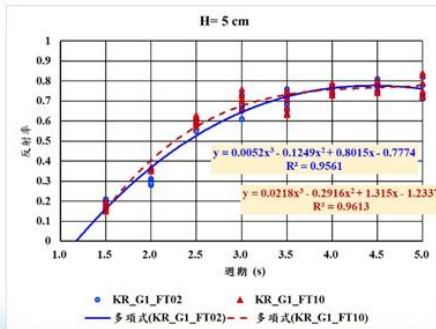
FT02系列



FT02
柵欄與斜向導水板
光滑斜面
後側開放型



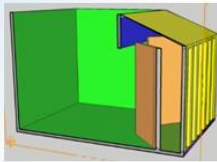
FT10
斜向導水板(無柵欄)
光滑斜面加斜向突起
後側開放型



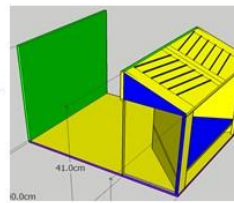
FT02與FT10不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

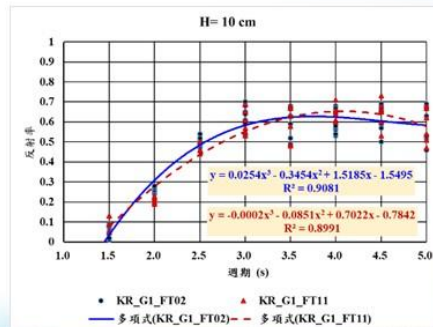
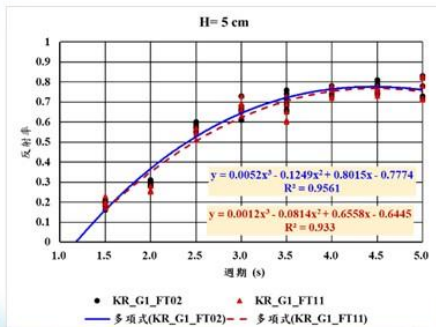
FT02系列



FT02
柵欄與斜向導水板
光滑斜面
後側開放型



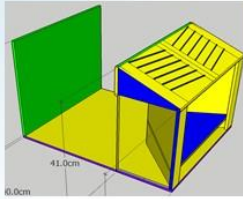
FT11
斜向導水板(無柵欄)
光滑斜面加斜向突起
下部前倉加設三維斜坡
後側開放型



FT02與FT11不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

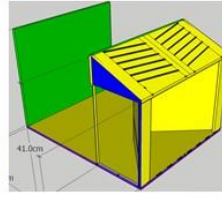
參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

FT02系列 消波單元比較：排水道單元



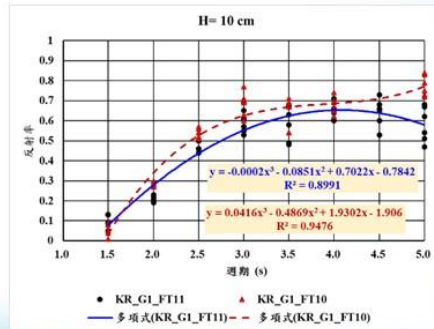
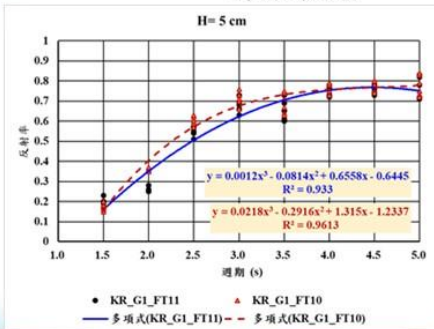
FT11

斜向導水板(無柵欄)
光滑斜面加斜向突起
下部前艙加設三維斜坡
後側開放型



FT10

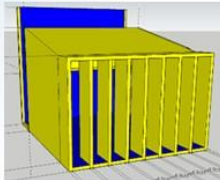
斜向導水板(無柵欄)
光滑斜面加斜向突起
後側開放型



FT11與FT10不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

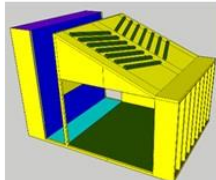
參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

FT04系列



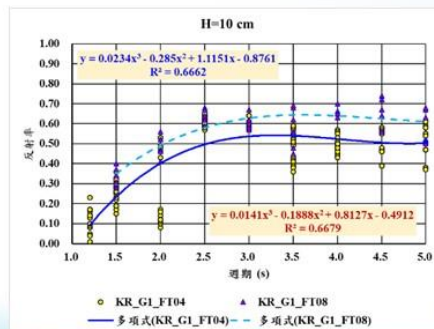
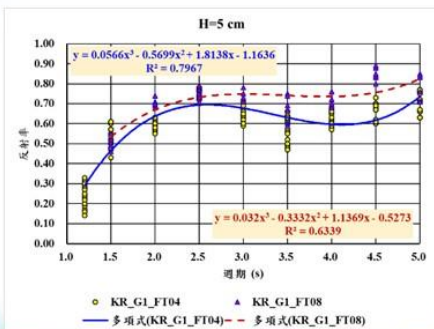
FT04

隔艙壁
光滑斜面
入水懸吊板



FT08

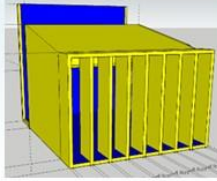
隔艙壁
光滑斜面加斜向突起
入水懸吊板



FT04與FT08不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

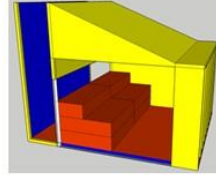
參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

FT04系列



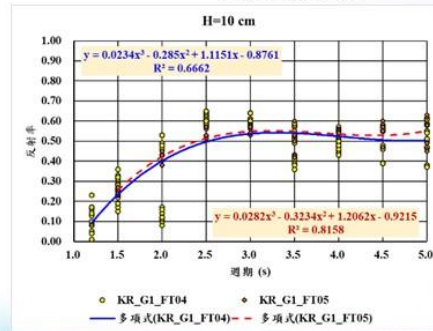
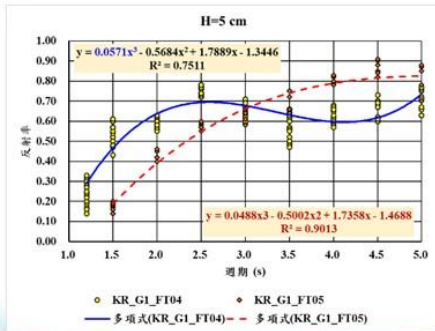
FT04

隔艙壁
光滑斜面
入水懸吊板



FT05

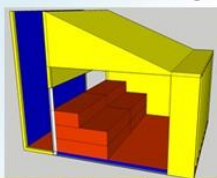
隔艙壁
光滑斜面
下部後艙階梯式平台
入水懸吊板



FT04與FT05不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

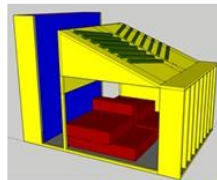
FT04系列



FT05

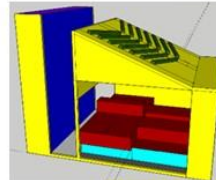
隔艙壁
光滑斜面
入水懸吊板

下部後艙階梯式平台



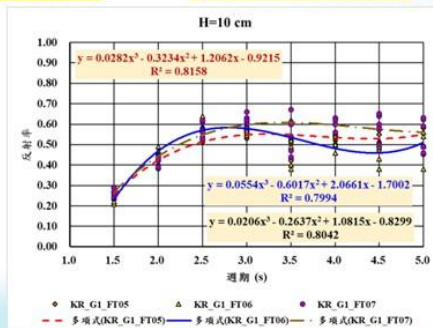
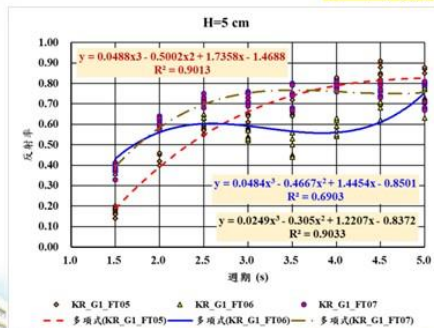
FT06

光滑斜面加斜向突起
下部後艙加下方排水道



FT07

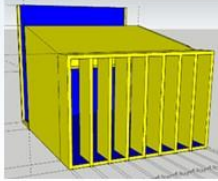
光滑斜面加斜向突起
平台加延伸排水道



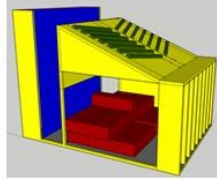
FT05~FT07不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

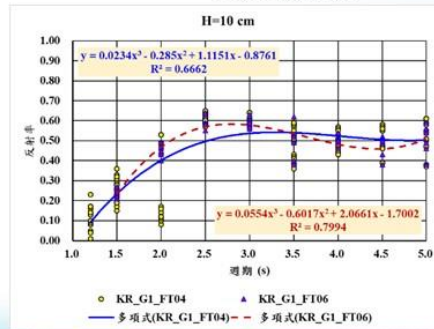
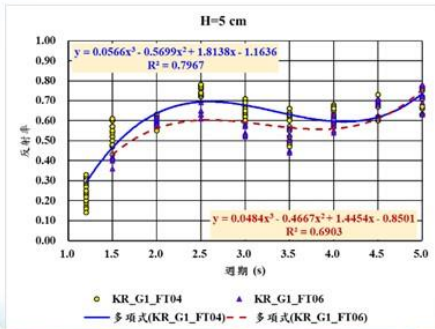
FT04系列



FT04
隔艙壁
光滑斜面
入水懸吊板



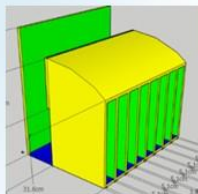
FT06
隔艙壁
光滑斜面加斜向突起
下部後艙加下方排水道
入水懸吊板



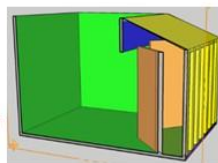
FT04與FT06不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

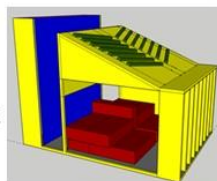
消波單元比較：主體單元、越波排水單元



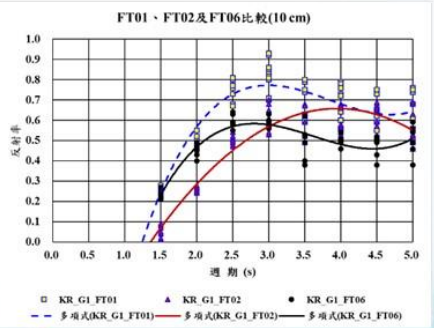
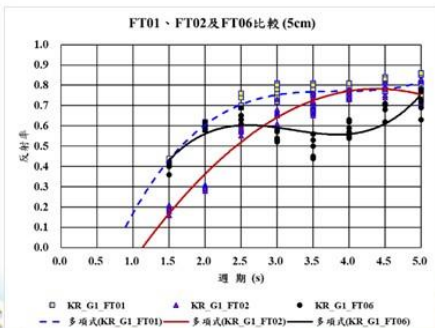
FT01
隔間牆
光滑弧面



FT02
柵欄
斜向導水板
光滑斜面



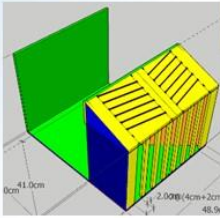
FT06
隔艙壁
光滑斜面
加斜向突起



FT01、FT02、FT06不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

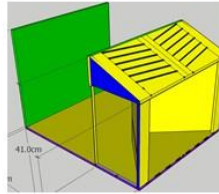
參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

消波單元比較：前牆單元



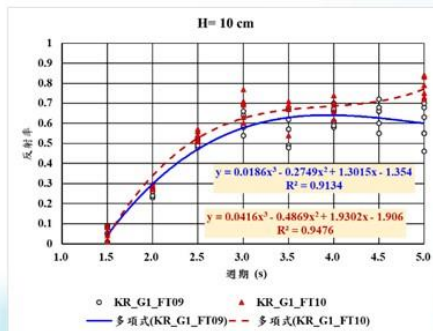
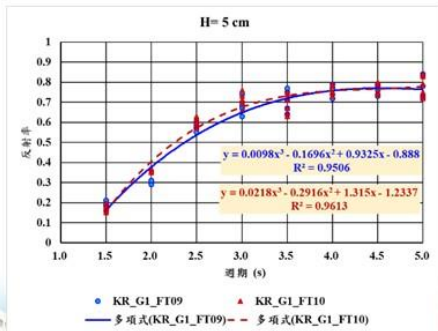
FT09

柵欄與斜向導水板
光滑斜面加斜向突起
後側開放型



FT10

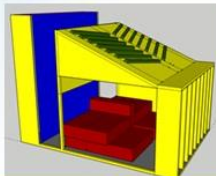
斜向導水板(無柵欄)
光滑斜面加斜向突起
後側開放型



FT09與FT10不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

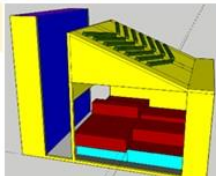
參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

消波單元比較：消波倉單元



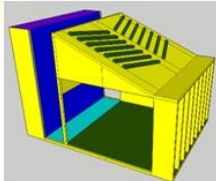
FT06

下部後倉加下方排水道



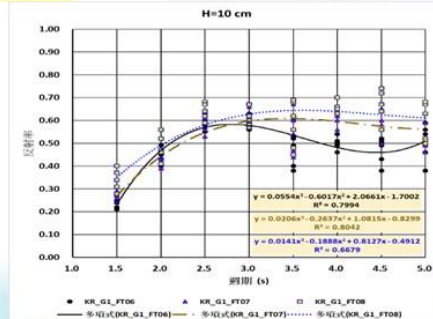
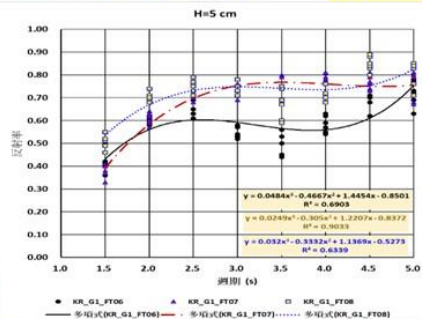
FT07

平台加延伸排水道



FT08

隔倉壁
光滑斜面加斜向突起
入水懸吊板



FT06~FT08不同波高之反射率分布圖及迴歸曲線比較圖

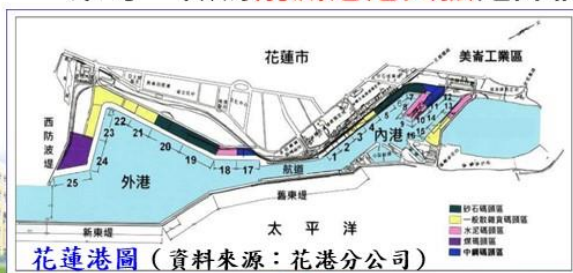
參、碼頭消能結構物水工斷面模型試驗/小結

模型代碼	基本型	主體單元	上部越波排水單元	下部消波艙前側/消波艙後側	後側集水槽
FT01	FT01	隔間牆	光滑弧面	空的/空的	入水懸吊板
FT02	FT02	柵欄與斜向導水板	光滑斜面	空的/空的	開放型
FT03	FT01	隔間牆	頂部開孔光滑弧面	空的/空的	入水懸吊板
FT04	FT04	隔艙壁	光滑斜面	空的/空的	入水懸吊板
FT05	FT04	隔艙壁	光滑斜面	空的/階梯式平台	入水懸吊板
FT06	FT04	隔艙壁	光滑斜面加斜向突起	空的/平台加下方排水道	入水懸吊板
FT07	FT04	隔艙壁	光滑斜面加斜向突起	平台加延伸排水道	入水懸吊板
FT08	FT04	隔艙壁	光滑斜面加斜向突起	空的/空的	入水懸吊板
FT09	FT02	柵欄與斜向導水板	光滑斜面加斜向突起	空的/空的	開放型
FT10	FT02	斜向導水板(無柵欄)	光滑斜面加斜向突起	空的/空的	開放型
FT11	FT02	斜向導水板(無柵欄)	光滑斜面加斜向突起	加設三維斜坡/空的	開放型



肆、窄航道側壁消能結構物水工斷面模型試驗/緣起

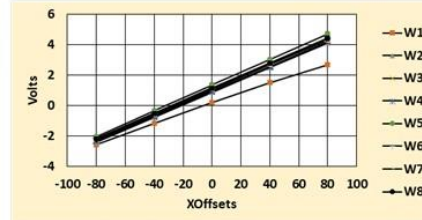
- ✓ 112年12月14日臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司召開「花蓮港-港池共振內港削減改善討論會議」所做之結論：「因花蓮港內港未來十年規劃轉型朝向發展觀光遊憩，港池共振是花蓮港長久問題，並直接影響內港水域能否做為風帆船或遊艇基地之發展。國內外已有相關消能設施案例，建議可考量花蓮港受限航道段整建為消波岸壁、7號與12號碼頭整建為消波岸壁、9號至16號碼頭間水域增建消能擋浪堤、或其他可能工程方案等，做為削減港池共振之評估方案。」



肆、窄航道側壁消能結構物水工斷面模型試驗/試驗設計

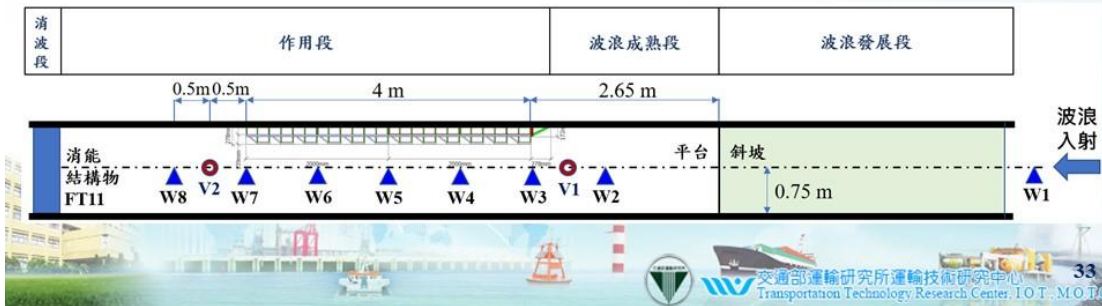
模型縮尺：1/36 造波120秒，擷取300秒

窄航道	現場	試驗
水深	EL-10m~EL-13m	EL-0.28m~EL-0.36m
週期	9~30sec	1.5~5sec，間隔0.5sec
波高	1.8、3.6m	0.05、0.10m



8支波高計率定結果

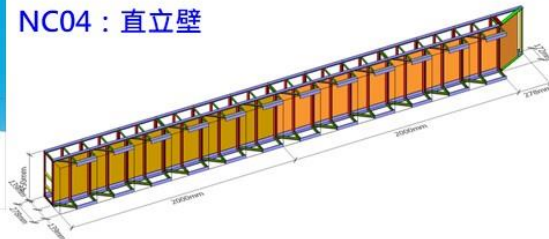
配置8支波高計(W1~W8)、2支流速計(V1、V2)、2台攝影機及監視器組



肆、窄航道側壁消能結構物水工斷面模型試驗/消能側壁研擬



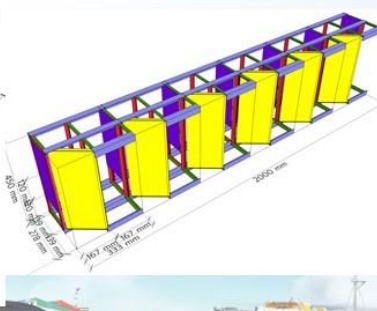
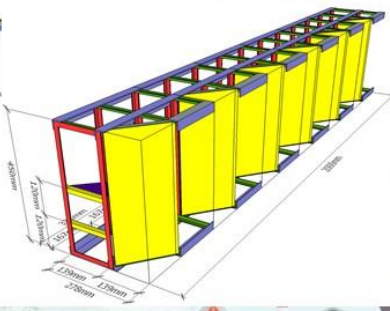
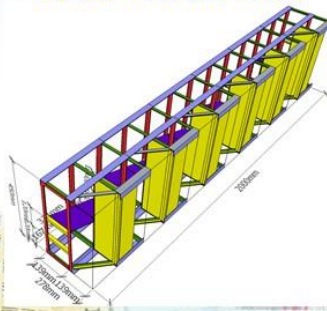
NC04：直立壁



NC01：直角壁+斜坡

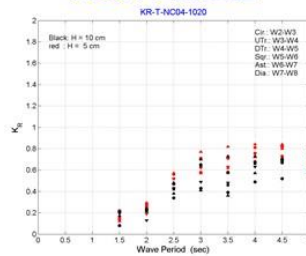
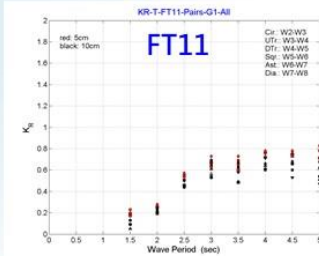
NC02：前斜壁+斜坡

NC03：前斜壁+懸吊板



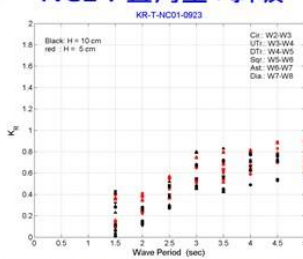
肆、窄航道側壁消能結構物水工断面模型試驗/試驗結果討論

NC04：直立壁

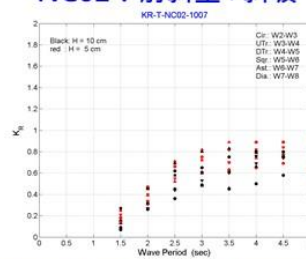


- 概觀NC01、NC02及NC03反射率皆略大於FT11
- NC04因側壁僅為直立壁，其反射率趨勢與FT11相近

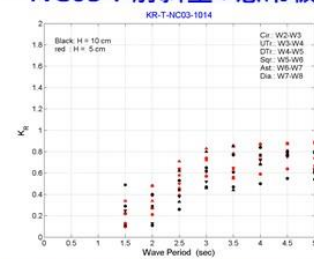
NC1：直角壁+斜坡



NC02：前斜壁+斜坡



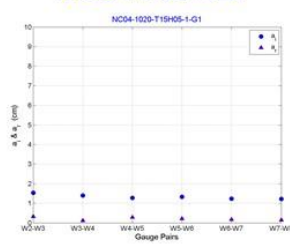
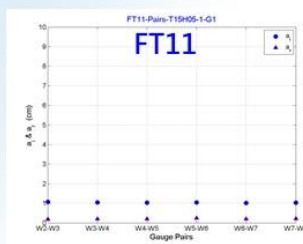
NC03：前斜壁+懸吊板



5種模型不同造波條件下各波高計配對之 $K_R - T$ 分布圖

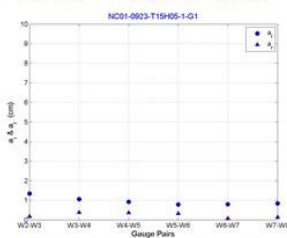
肆、窄航道側壁消能結構物水工断面模型試驗/試驗結果討論

NC04：直立壁

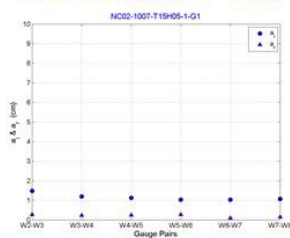


- NC01~NC04的入射波振幅係數 a_i ，會隨配對離結構物越近振幅越小；反射波振幅係數 b_i ，則隨配對離結構物越遠振幅越小

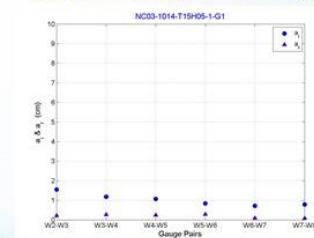
NC1：直角壁+斜坡



NC02：前斜壁+斜坡



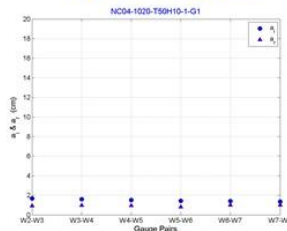
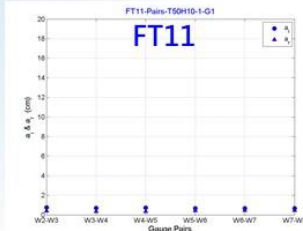
NC03：前斜壁+懸吊板



波高計G1配對之入/反射波振幅參數，5種模型/週期1.5秒/波高5公分

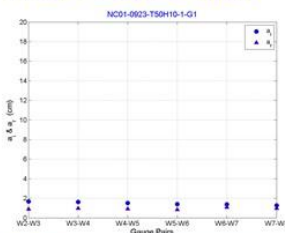
肆、窄航道側壁消能結構物水工斷面模型試驗/試驗結果討論

NC04：直立壁

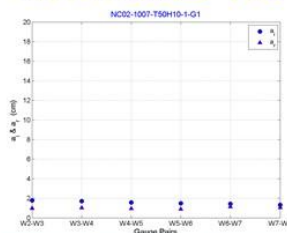


NC01~NC04的入射波振幅係數 a_i ，會隨配對離結構物越近振幅越小；反射波振幅係數 a_r ，則隨配對離結構物越遠振幅越小

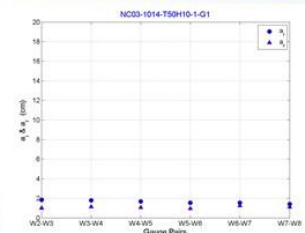
NC1：直角壁+斜坡



NC02：前斜壁+斜坡



NC03：前斜壁+懸吊板



波高計G1配對之入/反射波振幅參數，5種模型/週期5秒/波高10公分

肆、窄航道側壁消能結構物水工斷面模型試驗/小結

消能機制的不同：正面作用 vs. 側面導引

- 碼頭結構（正面交會）：波浪直接衝擊結構，透過坡面淺化、碎波、溯升及越波來折減能量。
- 側壁結構（側面作用）：波浪平行通過，利用水位與動量差將能量導向消波單元。透過直角或斜向版引導波浪進入內部產生繞射與振盪，最後再以散射方式回到航道。

能量衰減的特性：逐段遞減與動能轉換

- 逐段遞減：類似海岸突堤效應，波浪能量隨消波單元序列逐段下降。
- 動態變化：由於入射波與反射波在通過每一段時都會受到不同程度的影響，導致側壁段內的波高特徵不斷改變，量測上難以辨識單一位置的確切影響比例。

量測技術的困境與優化方向

- 分析法不適用：顯示 Goda & Suzuki (1976) 的「兩點法」無法精確描述本配置側壁消能段的波能變化。
- 實驗配置改良：計畫將波高計移出能量消減段，試圖開發出更適合「側壁型結構」的反射率量測標準與分析模型。

伍、結論與建議

本計畫所提出的**複合式結構物**，不只是談**形狀**的複合式，而是針對**複合式消波能力**的評估。我們主要在探討多種消波單元的**個別消波效益**，以及**組合**後的整體表現。

無通用型結構

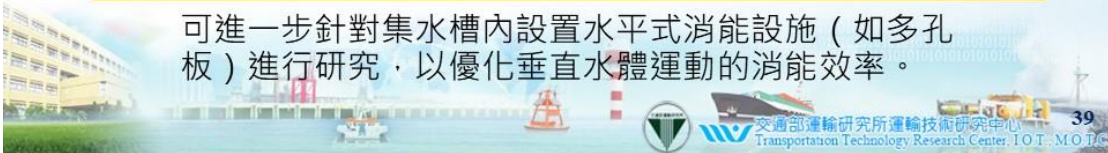
消能設施需因「港」制宜，針對目標港灣的海象特性（常時、颱風、長週期波）進行客製化設計。

複合式優勢

各種消能結構物可用單元組合式觀念規劃測試，優於單一機制，證實複合式配置對抗長週期波的可行性。

後續精進方向

可進一步針對集水槽內設置水平式消能設施（如多孔板）進行研究，以優化垂直水體運動的消能效率。



伍、結論與建議

消能結構物具有「**一旦完工便難以修改**」的特性，因此提出了未來規劃與研究的方向：

掌握「現地海象」與「模擬參數」精確化

掌握環境特性：完整掌握波浪、水位、水流，須更深入分析港口水動力與港形之關係。
完善模型參數：現有數值模式納入底床摩擦參數，使模擬結果能真實反映現場消波特性。

採用「數值驗證」進行「長週期波研究」

數模工具應用：使用 FLOW-3D 等水動力模式輔助驗證，解決實體斷面水槽難以模擬更長之「長週期波」的困境。



簡報結束 敬請指教



參考文獻

1. Ben Ramoul, L., Korichi, A., Papa, C., & et al. (2019). Numerical study of flow characteristics and pollutant dispersion using three RANS turbulence closure models. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 379–400. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-0628-2>
2. Cassan, L., Roux, H., & Bortus, B. (2020). Velocity distribution in open channel flow with spatially distributed roughness. *Environmental Fluid Mechanics*, 20, 321–338. <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09720-x>
3. Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill.
4. Feys, S. (2000). Design of a new anti-reflective caisson [Master's thesis, Universitat Politècnica de Valencia & Ghent University].
5. Franco, L., Cecioni, C., Bellotti, G., & Andersen, T. L. (2019). Laboratory tests on the reflection coefficient of a perforated caisson. In N. Goseberg & T. Schlurmann (Eds.), *The 8th International Coastal Structures Conference 2019* (pp. 253–262). Bundesanstalt für Wasserbau. https://doi.org/10.18451/978-3-039230-64-9_026
6. Garrido, J. M., de León, D. P., Berruete, A., Martínez, S., Manuel, J., Fort, L., Yague, D., González-Esciva, J. A., & Medina, J. R. (2011). Study of reflection of new low-reflectivity quay wall caisson. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), structures, 27. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.structures.27>
7. Goda, Y., & Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proceedings of 15th International Conference on Coastal Engineering*, 828–845.
8. González-Esciva, J. A., Molines, J., Medina, J. R., & Gómez-Martin, M. E. (2018). Analysis of long-circuit type caissons for attenuation of long-period waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(36), papers, 10. <https://doi.org/10.9753/icce.v36.papers.10>
9. Kean, J. W., Kuhnle, R. A., Smith, J. D., Alonso, C. V., & Langendoen, E. J. (2000). Test of a method to calculate near-bank velocity and boundary shear stress. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(7), 588–601. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000049](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000049)
10. Kee, S. T., & Lee, S. H. (2006). Submerged porous plate wave absorber. *Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 626–631.
11. Lin, J.-G. (1995). Statistical properties of wave conditions in harbor [Doctoral dissertation, North Carolina State University].
12. Unk, W. H. (1950). Origin and generation of waves. *Proceedings of 1st International Conference on Coastal Engineering*, 1–4.
13. Thaha, A., Dwipuspita, A. I., Mingga, W., & Maddi, H. C. (2013, September 6–8). The performance of perforated screen seawall in dissipating waves, minimizing reflected wave and run-up/run-down [Paper presentation], 4th International Seminar of BATHI, Yogyakarta, Indonesia.
14. Thompson, E. F., Bottin, R. R., Jr., & Selegan, J. P. (2004). Effectiveness of pocket wave absorbers in vertical-wall, coastal entrance structures (ERIC/CHL CHETN-111-69). U.S. Army Corps of Engineers.
15. U. S. Army Corps of Engineers (USACE). (2002). *Coastal engineering manual - Part V (EM 1110-2-1100)*.
16. Van Dyke, M. (1982). *An album of fluid motion*. Parabolic Press.
17. Yang, S., Yang, L., Shi, B., Wu, J., & Guo, Y. (2024). Experimental investigation on wave dissipation of perforated pipe breakwater under regular wave conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(12), 2137. <https://doi.org/10.3390/jmse12122137>
18. Zhao, X., Li, Y., Zou, Q., Han, D., & Geng, J. (2022). Long wave absorption by a dual purpose Helmholtz resonance OWC breakwater. *Coastal Engineering*, 178, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104203>
19. 大島孝敏、森屋陽一 (2005)。導水板によるスリット構造物の長周期波消波特性 [Wave dissipation characteristics of a slit-type structure with a guide plate for long-period waves]。海洋開発論文集, 21, 791–796。
20. 李健鴻 (2010)。越波式消能結構物之研究 [Study on overtopping-type energy dissipation structures] (碩士論文)。國立臺灣海洋大學河海工程研究所。
21. 林紹主、許師瑜 (2024)。岸壁非定值反射率對港灣波動評估模式之影響 [The influence of non-constant quay wall reflectivity on harbor wave evaluation models]。港灣季刊, (129), 1–19。
22. 林紹主、連瑞宇、張維庭、蔡世培、李大鴻、林蔚、林騰、阮天野、陳沁成、陳德鋼、楊升輝、楊輝斌、歐陽榮極 (2017)。新型設置導流板之直立開孔式結構物的消波特性初期研究 [Preliminary study on the wave dissipation characteristics of a new vertical perforated structure with guide plates]。海洋工程學刊, 17(4), 242–268。
23. 許師瑜、林受物 (2024)。長週期波斷面模型試驗(1/3)-長週期波水工模型試驗探討 [Long-period wave section model test (1/3): Discussion on hydraulic model tests for long-period waves] (研究報告)。交通部運輸研究所。
24. 許師瑜、林受物 (2025)。長週期波斷面模型試驗(2/3)-花蓮港規規碼頭之水動力及改善研究初探 [Long-period wave section model test (2/3): Preliminary study on hydrodynamics and improvement of current wharves in Hualien Port] (研究報告)。交通部運輸研究所。
25. 蘇耀錫、井島武士、唐政輝、陳樹旺、村山隆見 (1970)。萬代福直立式靜波消浪碼頭在各省各海應用之特徵 [Characteristics of the application of "Wonderful" vertical wave-stilling wall caisson wharves in various coasts of the province]。第3屆海洋工程研討會論文專輯, 130–157。



附錄三

專家學者座談會議紀錄

交通部運輸研究所運輸技術研究中心會議紀錄

會議名稱：114 年度本所運輸技術研究中心第二科及第三科自行研究
計畫專家學者座談會議

時間：114 年 5 月 14 日(星期三) 上午 10 時

地點：本所運輸技術研究中心 2 樓會議室

主持人：蔡立宏主任

紀錄：林英爵

出席單位及人員：如後附簽到表

壹、審查意見：

一、張家豪委員：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

風力限制係船舶進出臺中港重要條件之一，目前航港局訂定之臺中港船舶進港風力管制標準係採用北堤運輸技術研究中心（以下簡稱運技中心）測站及南堤台灣中油股份有限公司（以下簡稱中油公司）測站風力數據之平均值，惟引水人反映中油公司南堤測站之數據並非公開資料，建議改採用南堤運技中心測站。但各測站因設置地點、障礙物、角度不同，測得之風力數據亦不同，如果可透過本研究之校正機制，採用運技中心南北堤兩個測站公開資料重新調整風力管制標準，亦可解決引水人因現行中油公司南堤測站資訊沒公開而無法即時判斷及預測風力大小的問題。

(二)澎湖港設計水位之探討：

1. 本研究之範圍界定無敘明清楚，請釐清是否只探討澎湖港碼頭設計水位，抑或有包括蒐集臺北港等 11 個商港之潮位觀測資料並進行分析。
2. 另請確認臺灣港務股份有限公司（以下簡稱港務公司）委託代管測站是否有包含馬祖港及金門港，因目前上述二港係由行政院指定連江及金門縣政府代管。

(三)臺灣港群波流觀測資

料統計分析及通訊技術精進(2/2)-水中無線通訊系統建置：

1. 計畫中說明 113 年於基隆港、114 年於高雄港布設無線底碇式波流觀測站外，尚會優先針對易斷纜之港口規劃設置上述測站，目前尚有規劃哪些港口要設置。
2. 臺中港時常有海豚洄游至港區，本案利用聲波無線通訊取代傳輸纜線方式傳送資料，是否對海豚等水下生物聽覺造成影響，這部分可能成為另一個保育課題。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估：

據瞭解運輸研究所長期研究花蓮港港池靜穩度，本案為 3 年期計畫，今年為第 3 年，簡報亦說明將會研擬包括通水箱涵、消能碼頭及拋石消能設施等改善方案，由於用在港口公共基礎設施之航港建設基金建設經費逐年減少，在資源有限下，建議各方案可納入財務及經濟效益分析，以提供耗費少卻具改善效益之方案予港務公司參考。

(五)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

P34-36 本案 3 年期計畫第 2 年(113 年)係選定花蓮港 7 號碼頭規劃改善為消能碼頭型式，第 3 年(114 年)是否亦針對該碼頭之消能碼頭型式予以改良及精進。上述之研究成果是否有可能與第 4 案消能措施方案予以整合，以有效改善花蓮港內港區之水域靜穩度。

(六)智慧航安與海氣象資訊應用探討(4/4)-整合船舶智慧航行管理系統：

為了降低我國周邊海域船舶在劇烈海象下發生海難的風險，目前已由航港局協調中央氣象署進行優化災害性天氣及颱風期間近岸 12 浬淨空措施，依據該署新一代劇烈天氣監測系統(QPEplus)客製化逐 3 小時預報資料，規劃我國海域海象監控區域及設定預警閾值，當氣象單位預測劇烈海象即將影響某一海域時，航港局會至少於 12 小時前利用基隆海岸電台 NAVTEX、該局海事中心 AIS 信文廣播推播訊息及各港口 VTS 無線電通報等管道通知該海域警戒區滯留船舶勸離近岸 12 浬，

以確保該等船舶在劇烈海象影響前具有充裕時間可航行至安全水域避風。建議未來也可以研議是否結合目前運輸研究所正在研究的特高頻資料交換系統(VDES)進行船舶資訊傳遞。另外航港局之航港 1 號智慧監控船舶亦可提供運輸研究所做為測試研究使用。

(七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析(3/3)-船舶觀測分析：

報告中說明海洋陣列雷達船舶觀測資訊運用將有助於船舶航行安全，由於目前政府亦重視非本國籍船舶於領海內航行之國安問題，想瞭解目前海巡署利用岸際雷達監控近岸 12 浬可疑船舶，如運用海洋陣列雷達是否也可以強化船舶辨識及監控成效。

(八)港區水下巡查技術初探(3/3)-水下無人載具可應用性評估：

本案縱使於港區內水域海流亦非常強勁，是否亦需考量水下無人載具(ROV)抗流能力，以避免影響其檢測及辨識成效。另 ROV 運用面，除可使用於港區水下設施巡查外，當於港區內外沉船海難應變時，抽油業務係為優先處理項目，ROV 是否也可以運用在船體外觀及船艙油櫃探測上，甚至是否也有鑽孔及抽油能力，亦值得研議。

(九)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

本案研究範圍係針對馬祖商港福澳碼頭鄰水區域進行影像辨識作業，由於該港係由連江縣政府經營，而非港務公司經營，建請修正。

(十)智慧港口環境資訊平臺探討：

經航港局中部航務中心分析去年臺中港發生之 5 起海事案件中，部分案件肇因受到風力及海流影響，進出港船舶無法控制航向，導致碰撞防波堤或其他靠泊船舶。本案研究成果倘可提供港務公司建置港區海氣象資訊平臺，利用視覺化及圖形化工具提供即時港區風波潮流等觀測與預測資訊，方便船長或引水人進出港或移泊時可即時參考及判斷，並適切操縱船舶航向及航速，將可降低非人為海事發生風險。

(十一)馬祖海域數值模式建置研究(1/2)-水動力模式研究：

有關研究項目部分，想瞭解如何以生成式AI協助蒐集文獻。其他計畫是否也可以利用AI蒐集資料？

二、江文山委員：

- (一)商港風力案，測站校正部分，建議考量納入預報數據，相關分析多著重在極端數據。
- (二)港群流的觀測類型包含雷達表面流，底碇與航道水平海流等，各項觀測之間的比較探討。
- (三)航安與海氣象資訊應用案，建議考量探討各項海氣象因子，以利瞭解相項因子的重要性。
- (四)部分港的研究有多個單項各別探討，建議考量整合為一個整合性的計畫，提供更全面的成果。
- (五)花蓮碼頭波高預測，除以波高進行模式訓練以外，建議嘗試以波譜進行訓練，並比較其成果。
- (六)相關研究成果建議再考量對外推廣，以凸顯運技中心的研究能量。

三、林芳如委員：

- (一)大部分計畫與中央氣象署(海象氣候組)業務相關，希望相關成果可與該組交流分享。
- (二)感謝提供花蓮港即時影像監測資料，供中央氣象署發展異常波浪預報系統使用。
- (三)108年起中央氣象署即開始發展 schism-wwm 波潮流耦合模式，目前已作業化運作，並和該署 NWW3 波浪作業模式結果做比較與相關校驗，相關波浪輸出已經可供波浪預報參考使用，相關報告與研究可提供運技中心建置模式參考。簡報內之計算網格範圍很大，未來是只分析花蓮港區或全部？因模式計算需耗費計算資源，建議可再加以評估。
- (四)單一港區如有多個數值模式模擬，可以系集方式呈現，供使用者一起參考。

四、鍾權宏委員：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

1. 本計畫透過商港風力觀測資料檢核、風速測站相關性分析、各商港主要測站校正機制探討，預期完成「商港主要測站之相關性」，與「商港風力資料檢核機制」，應用面在於「建立各港區之風力資料校正係數與方法，提供港務管理單位做為即時資料修正、推估及模擬預測之應用參據」，以及「訂定適用商港風力觀測資料校正機制之作業流程」，做為未來運技中心建立自動化及作業化資料檢核及校正之參考依據。請問本研究未來所提出的各港校正係數值(可能內港1個係數、外港1個係數)，將來應用上是預計哪一種方式：(1)港務單位在取得風速資料數列測值時，乘上該校正係數後，基本上就是信賴可靠的風速資料；(2)各港港務單位須先行參照運技中心112年建立9項風力資料品管程序，剔除異常數據後，在使用本研究所提出的修正係數；(3)運技中心港灣系統呈現的風力數據，即透過本研究所提的修正係數做校正後發布，各港港務單位無需自行檢視或修正。
2. 本研究提修正係數，未來仍會因各港陸續建立的風速計數量位置與環境差異，而持續滾動調整，所以除此修正係數會持續更新外，使用上會是(3)較務實且充分發揮本研究之成效。

(二)花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估：

1. 本研究根據花蓮港湧浪特性，評估合適之消能方案，並將消能設施布設於花蓮港模型，再接續施以前期探討之湧浪條件，量測消能設施布設前後波高變化情形，進行後續數據處理，比對波浪能量削減成果，所以消能方案的選擇將是本研究重要關鍵，建議儘量蒐集相關國外針對長週期波的實務案例，也包含同樣到(3/3)期本次運技中心自行研究案「長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究」的方案結果。

2. 本案前兩期研究期間，花蓮港務分公司與運技中心實務交流期間也提到幾個方案(向)，目前所悉可能方向包括：

- (1) #10~#16 碼頭水域，以雙 T 塊堆築擋浪堤，圍築成一有限開口船渠，降低擋浪堤反射波對其他水域之影響。
- (2) #7 碼頭與#12 碼頭屬重力式碼頭，改建為消能式碼頭，碼頭後現有大排水溝，可延長水體消能空間。
- (3) 新東堤 0k+000~0k+500 港側萬代福消波岸壁，增拋 40 噸雙 T 塊，削減正面入港之湧浪能量。
- (4) 受限航道 400 公尺長，東側為斜坡，西側為鋼板樁岸壁，可評估是否有適當消能設施導入的機會。

(三) FUNWAVE 模式港內模擬探討(1/2)-港區波浪模擬建立：

1. 本研究以花蓮港區為主要研究範圍，依其水深地形、海象條件及港內結構特性進行數值模擬分析，模擬範圍涵蓋港外波浪傳遞至港內的過程，考慮波浪在港內的繞射、反射與消能情形，並針對港區內不同區域(如航道、碼頭等) 進行波浪變化的比較與評估。針對以下兩種情境，建議可納入研究案作分析比較：

- (1) 依據 113 年 10 月 30 日康芮颱風來襲時，運技中心於花蓮港外港所拍攝的最大堤前浪高海氣象紀錄，納入本研究分析其影響。
- (2) 針對#10~#16 碼頭水域，以雙 T 塊或其他形式堆築擋浪堤，圍築成一有限開口船渠，波浪在港內遭遇此擋浪堤之繞射、反射與消能情形，與擋浪堤本身造成反射波對其他水域之影響。

2. 113 年 10 月的康芮颱風，將花蓮港新東堤約 1,200 公尺里程的第三道胸牆打落至港池，接下來的修復工程也將設計打除混凝土塊拋放至港側堤趾，修築增厚成為堤趾保護工，接下來製作約 200 顆 40 噸雙 T 塊，預計嘗試拋放新東堤 0k+000~0k+500 港側萬代福消波岸壁，完成時機預計在 115 年 6 月底，建議運技中心可配合設置相關監測設備，以進行

相關研究分析，或於本案可做部分驗證。

(四)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

1. 進一步優化第 2 年的新型消能結構物並評估其可行性部分：

(1)113 年(第 2 期)的研究方案已針對#7 碼頭消能碼頭方案提出試驗結果分析，請問預期本(114)期的優化方向為何？

(2)花蓮港形狀似口袋，#7 碼頭與#12 碼頭都是位於袋底，而 #7 與#12 碼頭後線均有大排水溝，可延長水體消能空間，建議可納入分析評估。

2. 航道消能方案的選擇部分，因航道寬度限制，所以消能方案的選擇上，不宜僅限於拋放預鑄混凝土消波構造(影響有效寬度)，如果國外有不錯的實務案例，縱使工程金額更高(如岸壁改建為消能岸壁)，此在本階段執行研究方案評估上都可納入，未來可行性研究階段再去做財務面的考量。

五、鄭志宏委員：

(一)本案所提各研究案均非常有價值，非常肯定。

(二)計畫可跟國內外研究單位或機構合作，如港務公司、工業技術研究院、成功大學、高雄科技大學、航港局、中央氣象署、海洋大學、船舶中心、引水人等交流。

(三)研究內容包含之前研究案，希望可以公開分享。

(四)未來商港如有擴建案，包含臺北港、臺中港、高雄港、基隆港，希望可以先研議。

(五)澎湖水位案，希望可以整合海洋大學之成果一併檢討，並納入 LAT 高程討論。

(六)花蓮研究案，希望可以納入管理機制。

(七)水下無人載具，港務公司有成果可提供分享。

(八)消能結構物，希望可以帶入港務公司消波式碼頭結構模型，提供消能碼頭反射係數研究。

(九)馬祖北竿機場跑道刻正要辦理整建加長，可否協助分析海象。

六、蘇仕峯委員：

- (一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：
1. 各港區風力觀測站校正因子訂定時，可考量未來氣候變遷對極端風力事件的影響。
 2. 如何評估測站位置具有代表性？即當初決定設定的位置所獲得的資料是否符合需求。
- (二)澎湖港設計水位之探討：
1. 澎湖港設計水位分析時，是否蒐集歷年相關澎湖地區海岸及港灣工程規劃設計之報告，對這些工程規劃使用之設計水位是否有疑慮？
 2. 設計水位分析結果，可注意是否有極端水位發生，因為島嶼地貌和臺灣陸地邊界之潮位有所不同。
 3. 可應用到交通部觀光署，例如摩西分海等景點。
- (三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2)：
- 水中無線通訊系統建置後，資料傳輸穩定性可與既有有線系統相比。
- (四)花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) -消能措施方案評估：
1. 水工模型試驗結果可結合數值模擬進行驗證，以提高方案適用性。
 2. 試驗除了規則波，也要考量真實環境的不規則波。
- (五)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：
- 長波不易消散能量，但可改變港型地貌，產生不同模態週期振盪，降低波高。
- (六)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3)：
1. 雷達訊號應用可比對現場觀測波浪與數值模擬結果。
 2. 可積極與相關使用單位技術交流，例如國家海洋研究院。
- (七)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：
- 影像辨識系統可針對不同能見度（如濃霧）或夜間進行辨識精度驗證。
- (八)花蓮港碼頭波高預測模式作業化成果評估：
- 9、17、25 碼頭波浪觀測可與港外觀測波高建立關係，

可以不用模擬資料。港外數據進一步和花蓮浮標比對。

(九)花蓮海域海象模擬分析：

1. SCHISM-WWM 與 SWAN 波浪模擬差異性不大，可以檢視模式之控制方程式。SCHISM 模式不適合用於港區波浪，適合於花蓮港近岸波流場。
2. 網域模擬納入黑潮，中央氣象署利用相同模式。

(十)馬祖海域數值模式建置研究(1/2)：

馬祖島嶼礁岩多，地貌複雜，波浪有明顯繞射現象，利用 MIKE21 水動力與波浪模組，如何訂定模式網格邊界潮位條件？(利用 SCHISM-WWM) 島嶼下風處繞射效應利用波浪模組能符合需求嗎？

(十一)FUNWAVE 模式港內模擬探討(1/2)：

可利用「花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估」之試驗結果進行模式驗證。

(十二)114 年度運技中心期刊研討計畫：

1. 建議蒐集近 20 年知名國際期刊有關港灣工程或管理的論文，先瞭解鄰近國家在港灣方面的研究方向與成果。
2. 鼓勵投稿國際期刊，與國際學術機構合作，提升國際能見度與影響力。

(十三)基隆海域風浪模組模擬參數調校探討

SWAN 可與「花蓮海域海象模擬分析」之模擬結果比較，兩位置海象環境特性接近。

貳、結論：

感謝各位委員提供本所相當寶貴之專業建議，請案關業務同仁將委員意見納入參採，以符合實際應用面，並提升研究成果之廣度及實用性。

參、散會：中午 12 時 15 分

附錄四
工作會議紀要

114 年 6 月工作會議紀要

會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科 114 年度自行研究計畫第 1 次工作會議

時間：114 年 6 月 25 日(星期三) 上午 10 時

地點：本所運輸技術研究中心 3 樓會議室

主持人：李研究員兼科長俊穎 彙整：林英爵

出席者：如後附簽到表

主辦單位：本所運輸技術研究中心第二科

壹、討論議題/計畫名稱：

一、工作進度說明：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

- 1.專家學者座談會意見處理情形。
- 2.商港風力觀測資料檢核作業化程式開發成果。
- 3.風力測站相關分析測試結果。

(二)澎湖港設計水位之探討：

- 1.參考文獻及觀測資料蒐集進度報告。
- 2.海氣象設備維運作業情形摘要說明。
- 3.設計水位分析方法盤點說明。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) -水中無線通訊系統建置：

- 1.臺灣港群波流即時觀測系統布設概況及運作情形。
- 2.水中無線通訊系統建置規劃。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) -消能措施方案評估：

- 1.試驗設備狀況及率定佈設。
- 2.消能設施研擬及佈設。
- 3.通水箱涵方案初步成果分析。

(五)長週期波斷面模型試驗 (3/3) -消能結構物型式之可行性研究：

- 1.應用生成式 AI 協助搜尋消減波能設施文獻並研讀。
 - 2.精進消能碼頭型式並以斷面水工模型試驗進行驗證。
 - 3.規劃窄航道岸壁之消能斷面型式。
- (六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：
- 1.特高頻資料交換系統 (VDES)發展現況。
 - 2.探討 AI 技術於船舶航行安全整合系統。
- (七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：
- 1.回顧海洋雷達船舶觀測應用相關文獻。
 - 2.蒐集臺中港 AIS 船舶資料。
 - 3.分析雷達船舶調適性偵測法程式。
 - 4.說明 114 年第 1 次海洋雷達願景會議的辦理情形。
- (八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：
- 1.現有觀測資料與資料庫盤點狀況之說明。
 - 2.海氣象觀測作業數位管理系統精進與開發進度之說明。
 - 3.後續工作項目之說明。
- (九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：
- 1.進行港區 ROV 水下定位測試數據分析。
 - 2.進行港區 ROV 影像獲取及處理技術分析。
- (十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：
- 1.高解析度攝影機佈設工作情形。
 - 2.影像數位化監控系統建置進度說明。
 - 3.後續工作項目之說明。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論：

- (一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：
- 1.討論風力觀測資料檢核作業化程式及鄰站檢核程序方法。
 - 2.討論風力測站相關分析方法及校正機制之後續規劃。
- (二)澎湖港設計水位之探討：
- 1.討論澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭之潮汐型態差異性。

- 2.討論設計水位—暴潮位分析方法之選用。
- (三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) -水中無線通訊系統建置：
- 1.不同觀測系統配置與即時資料中斷原因。
 - 2.水中儀器架及離近岸端模組設計。
- (四)花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) -消能措施方案評估：
- 1.討論花蓮港內消能設施型式佈設方式及考量其它方案。
 - 2.討論花蓮港平面水工模型建置內容。
- (五)長週期波斷面模型試驗 (3/3) -消能結構物型式之可行性研究：
- 1.目前消能碼頭型式僅有下部結構部分，若加入消能碼頭之上部或為完整結構，建議考量是否會對反射率造成影響。
 - 2.窄航道岸壁之消能斷面設置的直立斜板方向，建議評估其方向為向著波流進入內港方向或是背向能得到最好效果。
- (六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：
- 1.蒐集國外 VDES 資料等相關船舶航行安全通訊技術。
 - 2.評估可應用於 VDES 監控與預警之 AI 技術。
- (七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：
- 1.討論海洋雷達船舶觀測應用相關文獻。
 - 2.比較海洋雷達船舶與臺中港 AIS 資料差異。
 - 3.探討雷達船舶調適性偵測法程式之辨識情形。
 - 4.討論 114 年第 1 次海洋雷達願景會議之後續推動。
- (八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：
- 1.現有測站觀測資料與資料庫盤點狀況之討論。
 - 2.委外系統精進優化之進度討論。
- (九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：
- 1.ROV 水下定位測試結果討論。
 - 2.水下影像獲取及處理流程說明。
- (十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

- 1.影像物件標註及應用討論。
- 2.監控系統測試及操作介面情形說明。

貳、主要結論：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

- 1.風力觀測資料檢核作業化程式，建議可優化檢核結果報表產出功能，以提供更詳盡的資料檢核資訊。
- 2.階段成果投稿部分，後續請配合海工研討會規劃之格式要求，另提供 2 頁摘要文章內容。

(二)澎湖港設計水位之探討：

針對設計水位—暴潮位分析方法仍以蒐集模型颱風參考文獻為主，建議可嘗試利用實測資料進行暴潮位計算。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) -水中無線通訊系統建置：

- 1.已修復完成之測站請持續觀察，年度維運作業請依規劃期程進行。
- 2.離近岸端模組設計，需將後續維運及檢修作業可能面臨之狀況納入考量。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) -消能措施方案評估：

- 1.持續滾動檢討消能設施方案。
- 2.於執行試驗過程中，應觀察港內水位抬升變化情形。

(五)長週期波斷面模型試驗 (3/3) -消能結構物型式之可行性研究：

- 1.窄航道岸壁之消能斷面設置的直立斜板方向，應可一併測試平行岸壁的型式。
- 2.應加速進行窄航道岸壁型式設計的定案，以免延誤採購及試驗進程。

(六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：

- 1.透過 IMO 國際 VDES 發展趨勢，確認相關技術整合架構。
- 2.可透過新 AI 技術於減少航安事故及提升港口效率。

(七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：

- 1.有關雷達船舶調適性偵測法程式之辨識情形，與臺中港 AIS 資料差異，請妥為釐清偵測偏差原因。
- 2.由於臺中港南側雷達站訊號品質較差，請協助釐清造成訊號不穩的原因，並安排相關人員進行檢修，以確保資料穩定性與持續性。

(八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：

- 1.系統建置原始資料下載功能，下載資料建議加密確保資訊安全。
- 2.系統須符合使用者需求，建議開發階段多與相關承辦人員交換意見確認系統功能開發方向。

(九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：

- 1.港區水下定位測試分析，可再針對精度誤差進行評估。
- 2.影像解析度影響水下目標物檢測能力，未來可再深入研究。

(十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

- 1.請向連江縣政府港務處瞭解客運碼頭小白屋之監控影像資料情形，以利納入影像物件數據辨識分析。
- 2.建議物件辨識能透過數值量化方式呈現，以利港區管理。

參、散會：下午 3 時 30 分。

114 年 8 月工作會議紀要

會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科 114 年度自行研究計畫第 2 次工作會議

時間：114 年 8 月 27 日(星期三) 上午 9 時 30 分

地點：本所運輸技術研究中心 3 樓會議室

主持人：李研究員兼科長俊穎 彙整：林英爵

出席者：如後附簽到表

主辦單位：本所運輸技術研究中心第二科

壹、討論議題/計畫名稱：

一、工作進度說明：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

- 1.進行高雄港鄰近測站資料蒐集及整理分析。
- 2.進行高雄港各測站相關性分析。
- 3.運用決策樹回歸模型(屬監督式機器學習模型)與長短期記憶模型(LSTM)進行高雄港風速風向資料補遺之初步測試。

(二)澎湖港設計水位之探討：

- 1.參考文獻及觀測資料蒐集進度報告。
- 2.設計水位初步成果報告。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(2/2)-水中無線通訊系統建置：

- 1.臺灣港群波流即時觀測站修復進度及後續規劃。
- 2.水中無線通訊系統執行進度及規劃。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估：

- 1.造波設備狀況說明。
- 2.初步試驗成果分析。
- 3.規劃改善方案工作期程說明。

(五)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

- 1.以斷面水工模型試驗進行驗證精進消能碼頭型式。
 - 2.規劃窄航道岸壁之消能斷面型式。
 - 3.分析斷面試驗結果及改善提案。
- (六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：
- 1.特高頻資料交換系統 (VDES)國際應用趨勢。
 - 2.探討 AI 技術於船舶航行安全整合系統。
- (七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：
- 1.辦理國家雷達觀測網整合分項工作。
 - 2.辦理 7 月 4 日雙首長平台第 3 次會議本中心海洋陣列雷達研究成果分享。
 - 3.辦理雷達船舶目標訊號檢測、驗證與系統調整改善工作。
 - 4.開發雷達原始功率頻譜偵測船舶分析程式。
 - 5.辦理雷達南站訊號中斷排除工作。
- (八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：
- 1.資訊流與備份範圍盤點說明。
 - 2.原始資料及時序列資料備份方法說明。
 - 3.系統上版測試結果及後續待修正部分說明。
- (九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：
- 1.進行水下影像擷取及處理技術分析。
 - 2.進行水下影像品質評估。
- (十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：
- 1.智慧電子圍籬系統強化進度說明。
 - 2.電腦主機規格及採購工作進度。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論：

- (一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：
- 1.討論本所代管之高雄港風力測站資料與氣象署測站之差異。
 - 2.討論決策樹回歸模型(屬監督式機器學習模型)與長短期記憶模型(LSTM)補遺效果。

(二)澎湖港設計水位之探討：

- 1.檢討設計水位—天文潮預測之準確性及差異性。
- 2.討論設計水位—暴潮位不同分析方法結果差異原因。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) -水中無線通訊系統建置：

- 1.已恢復即時傳輸及後續預計修復之港口討論。
- 2.水中儀器架及離岸端電池桶製作情形。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) -消能措施方案評估：

- 1.花蓮港凱米颱風觀測數據分析及現況遮蔽效果探討。
- 2.消能設施試驗規劃方案及布設內容。

(五)長週期波斷面模型試驗 (3/3) -消能結構物型式之可行性研究：

- 1.窄航道岸壁型式於實際應用上，可採用何種結構形式與材料，建議依斷面試驗結果進行規劃。
- 2.建議針對消能碼頭型式精進之型式構造與試驗結果關係，進行更深入的討論。

(六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：

- 1.蒐集國外 VDES 資料等相關船舶國際應用趨勢。
- 2.評估可應用於 VDES 監控與預警之 AI 技術。

(七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：

- 1.討論國家雷達觀測網整合分項工作。
- 2.討論雷達船舶目標訊號檢測、驗證與系統調整改善工作。
- 3.探討雷達原始功率頻譜偵測船舶分析程式之開發情形。
- 4.討論雷達南站訊號中斷排除之後續工作。

(八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：

- 1.既有核可之維護紀錄刪除並保存歷程之討論。
- 2.增加系統自動化儀表板與異常通知之討論。

(九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：

- 1.水下影像擷取及處理方法說明。

2.水下影像品質評估結果討論。

(十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

- 1.電子圍籬功能項目及展示情形。
- 2.影像物件辨識成果探討。

貳、主要結論：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

- 1.本所代管之高雄港風力測站資料與氣象署測站差異討論部分，後續可適時提供氣象署參考。
- 2.本研究所建置之機器學習模型，後續可與實測資料進行驗證測試。

(二)澎湖港設計水位之探討：

- 1.建議再檢視設計水位之天文潮分析方式是否有誤。
- 2.針對設計水位之暴潮位分析方法，建議先行檢視何種分佈較佳再行分析。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(2/2)-水中無線通訊系統建置：

- 1.臺中港底碇式波流即時觀測站修復，請依照所訂時程執行。
- 2.高雄港無線式底碇波流即時觀測系統建置完成後，需詳加留意系統運作情形，以利即時調整。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估：

- 1.請掌握造波機設備維修及更新相關工作時程，以利後續試驗及分析工作推動。
- 2.波浪條件為8-30秒週期規則波，後續分析建議與觀測資料之8-30秒間之放大係數進行比較。

(五)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

- 1.精進消能碼頭型式之成效討論，應於期末報告詳細完整呈現。

2.待窄航道岸壁模型完成，依規劃期程安排，儘快進行窄航道岸壁之水工斷面試驗。

(六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：

- 1.透過國際 VDES 發展趨勢，評估以傳遞天氣資訊相關技術。
- 2.配合 VDES 合作計畫，協助進行實海域訊號實測，注意相關安全防護。

(七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：

- 1.有關雷達所偵測船舶回波與實際船舶尺寸之關聯性，請進一步探討其對辨識準確度之影響，並釐清可能造成偵測偏差之因素。
- 2.有關研究報告書章節規劃，第五章標題敘述略顯口語化，建議重新修訂，以提升專業性與報告整體一致性。

(八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：

- 1.系統服務對象為現場觀測同仁，須持續由同仁協助回饋及修正。
- 2.請於 9 月份邀集美寶公司及觀測同仁召開工作會議。

(九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：

- 1.水下影像增強處理流程，建議可再詳加敘述。
- 2.水下影像品質評估結果，未來可再結合港區水下構造物維護管理手冊之設施劣化度判定標準一併探討。

(十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

- 1.建議補充辨識貨櫃物件，以利辨識港區貨櫃作業管理。
- 2.有關纜繩物件，影像截圖纜繩似乎被視作船體一部分，以及人員在有欄杆內，有無法辨識情形，請瞭解相關可能影響因素並進行改善。
- 3.請於 9 月上旬安排工作會議，以利掌握工作進度。

參、散會：下午 4 時整。

114 年 10 月工作會議紀要

會議名稱：本所運輸技術研究中心第二科 114 年度自行研究計畫第 3 次工作會議

時間：114 年 10 月 29 日(星期三) 上午 9 時 30 分

地點：本所運輸技術研究中心 3 樓會議室

主持人：李研究員兼科長俊穎 彙整：林英爵

出席者：如後附簽到表

主辦單位：本所運輸技術研究中心第二科

壹、討論議題/計畫名稱：

一、工作進度說明：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

- 1.進行臺灣港群各測站相關性分析。
- 2.高雄港風速風向資料補遺之決策樹回歸模型驗證分析。

(二)澎湖港設計水位之探討：

- 1.設計水位成果報告。
- 2.港灣季刊投稿文章撰寫進度說明。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進(2/2)-水中無線通訊系統建置：

- 1.臺灣港群波流即時觀測系統現況。
- 2.高雄港水中無線通訊系統建置情形。

(四)花蓮港湧浪遮蔽試驗(3/3)-消能措施方案評估：

- 1.即時系統維運情形及後續修復規劃。
- 2.水中無線通訊系統建置進度。

(五)長週期波斷面模型試驗(3/3)-消能結構物型式之可行性研究：

- 1.以斷面水工模型試驗進行 4 種窄航道側壁之消能功能驗證。
- 2.分析斷面試驗結果及研擬改善提案。
- 3.規劃期末報告書章節。

(六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：

- 1.特高頻資料交換系統 (VDES) 國際應用先導測試。
- 2.探討 AI 技術於船舶航行安全整合系統。

(七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：

- 1.報告臺灣陣列高頻海洋雷達遠端檢測標準作業程序手冊專家座談會，故障樹具體作法，進行跨部會合作討論事宜。
- 2.說明雷達系統調整與天線改善注意事項。
- 3.說明分析雷達船舶解算程式與驗證。
- 4.討論如何提升空間圖譜船舶與背景之訊噪比。

(八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：

- 1.委外勞務契約進度說明。
- 2.時序列資料及原始資料下載與資料蒐集率統計功能說明。
- 3.新增品保標籤管理功能說明。

(九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：

- 1.進行水下影像品質評估。
- 2.進行水下無人載具應用性評估。

(十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：

- 1.電子圍籬系統介面及功能說明。
- 2.成果報告章節規定說明。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論：

(一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：

- 1.討論臺灣港群各測站相關分析結果。
- 2.討論決策樹回歸模型補遺效果及後續精進方向。

(二)澎湖港設計水位之探討：

- 1.設計水位調和分析之平均潮位誤差來源探討。

(三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進 (2/2) -水中無線通訊系統建置：

- 1.即時系統維運情形及後續修復規劃。

- 2.水中無線通訊系統建置進度。
- (四)花蓮港湧浪遮蔽試驗 (3/3) -消能措施方案評估：
- 1.試驗設備狀況及率定佈設。
 - 2.試驗配置及方案成效分析。
 - 3.115 年自行研究計畫規劃說明。
- (五)長週期波斷面模型試驗 (3/3) -消能結構物型式之可行性研究：
- 1.依據目前斷面試驗初步成果，建議可投稿國際期刊。
 - 2.建議評估窄航道的實際現況是否能於斷面水槽中完整呈現。
 - 3.於斷面水槽中進行消能側壁之試驗，造成之三維波流現象應如何進行分析討論，建議審慎評估。
- (六)智慧航安與海氣象資訊應用探討 (4/4) -整合船舶智慧航行管理系統：
- 1.蒐集國外 VDES 資料等相關船舶國際應用先導測試。
 - 2.彙整可應用於 VDES 監控與預警之 AI 技術。
- (七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析 (3/3) -船舶觀測分析：
- 1.討論海洋雷達船舶觀測應用相關文獻。
 - 2.討論陣列雷達船舶辨識技術評估。
 - 3.探討船舶辨識資料分析與驗證情形。
- (八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：
- 1.討論後續如何有效利用精進及定期教育訓練。
 - 2.討論底碇式波流觀測系統資料搬遷進度與金門港、馬祖港之資料流與備份流程。
- (九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：
- 1.水下影像品質評估過程討論。
 - 2.水下無人載具應用性評估結果說明。
- (十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：
- 1.目前成果及未來精進內容探討。
 - 2.建議可串流馬祖福澳港相關影像，以利評估相關功能運作。

貳、主要結論：

- (一)商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究：
- 1.在各測站相關性分析，建議後續可進一步將靜風區的資料剔除再比較分析結果，另臺北港相關性偏低且具有海陸風等問題，建議後續可進一步分析。
 - 2.本研究所建置之機器學習模型，在誤差較大的部分，建議可從風向因子進一步分析。
- (二)澎湖港設計水位之探討：
- 1.建議釐清調和分析之平均潮位誤差來源是否來自水準點引測。
 - 2.有關暴潮偏差之計算可考慮利用以往實測資料扣除調和分析而得，不須侷限於模型颱風模擬結果。
- (三)臺灣港群波流觀測資料統計分析及通訊技術精進（2/2）-水中無線通訊系統建置：
- 1.已修復完成之測站請持續觀察，尚未修復之測站請依規劃進度執行。
 - 2.水中無線通訊系統建置後，請持續觀察並滾動式調整。
- (四)花蓮港湧浪遮蔽試驗（3/3）-消能措施方案評估：
- 1.試驗成果宜再確認波高計數據。
 - 2.內港碼頭改善方案建議採單支波高計進行比較。
- (五)長週期波斷面模型試驗（3/3）-消能結構物型式之可行性研究：
- 1.消能碼頭型式成效之討論，應有具體完整說明。
 - 2.應依規劃期程安排，如期完成期末報告書。
- (六)智慧航安與海氣象資訊應用探討（4/4）-整合船舶智慧航行管理系統：
- 1.針對國際 VDES 發展趨勢，評估後續可發展相關技術。
 - 2.配合 VDES 整體發展架構，可彙整對應我國各機關執行業務內容，以供參考。
- (七)臺中港海洋陣列雷達訊號應用分析（3/3）-船舶觀測分析：

- 1.探討雷達系統調整與天線品管標準能否評估增加訊噪比，以利定量性評估。
 - 2.建議將海洋雷達船舶軌跡與臺中港 AIS 資料進行案例比較與分析探討。
- (八)海氣象觀測作業數位管理系統建置之研究 (2/2) -系統精進：
- 1.金門港、馬祖港測站資料流與備份流程，請再持續追蹤確認。
 - 2.系統持續加強同仁使用率與教育訓練。
- (九)港區水下巡查技術初探 (3/3) -水下無人載具可應用性評估：
- 1.水下無人載具可應用性評估結果建議可再詳加敘述。
 - 2.影像品質評估過程及目的建議可再進行補充。
- (十)港埠鄰水作業管理影像智慧辨識技術研究：
- 1.請於連江縣港務處交流會議中分享本案研究成果，以利瞭解港埠管理單位相關想法及需求。
 - 2.請蒐集港務公司戰情中心監控系統或其他相關商業化使用情形，以利參考納入未來精進參考。

參、散會：下午 4 時 10 分。

