

100-20-7512  
MOTC-IOT-99-H2DB004

# 消能式結構物特性之研究( 2/4 )



交通部運輸研究所

中華民國 100 年 4 月

100-20-7512  
MOTC-IOT-99-H2DB004

# 消能式結構物特性之研究( 2/4 )

著 者：邱永芳、林炤圭、蔡金吉

交通部運輸研究所

中華民國 100 年 4 月

100

消能式結構物特性之研究  
(2/4)

交通部運輸研究所

GPN: 1010000314

定價 300 元

國家圖書館出版品預行編目資料

消能式結構物特性之研究( 2/4 )

/邱永芳等著.--初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，

民 100.04

面 ； 公分

ISBN 978-986-02-5106-7 (平裝)

1. 海岸工程 2. 數值分析 3.生態模擬

443.2

100002690

消能式結構物特性之研究( 2/4 )

著 者：邱永芳、林焯圭、蔡金吉

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版>中心出版品)

電 話：(04)26587176

出版年月：中華民國 100 年 4 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 90 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：新臺幣 300 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010000314

ISBN：978-986-02-5106-7 (平裝)

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：消能式結構物特性之研究( 2/ 4 )			
國際標準書號 ( 或叢刊號 ) ISBN978-986-02-5106-7 ( 平裝 )	政府出版品統一編號 1010000314	運輸研究所出版品編號 100-20-7512	計畫編號 99-H2DB004
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳主任 計畫主持人：邱永芳主任 研究人員：蔡金吉 參與人員：楊怡芸 聯絡電話：04-26587221 傳真號碼：04-26571329	合作研究單位：國立臺灣海洋大學 計畫主持人：林焯圭副教授 研究人員：岳景雲、翁文凱、楊國誠、陳文浚 地址：20224 基隆市中正區北寧路 2 號 聯絡電話：02-24622192		研究期間 自 99 年 03 月 至 99 年 11 月
關鍵詞：消能式結構物、數值模擬、水工模型試驗、海岸公路邊坡			
<p>摘要：</p> <p>本計畫為四年期研究計畫的第二年，主要目標在透過水工模型斷面試驗及數值模擬等方式探討並發展符合臺灣各區地理環境需求的消能式港灣結構物。依臺灣地區之環境特性與功能屬性分類，消能式結構物的型式可包含長波抗浪型、功能目的使用型或臨時性設施型、以及環境保護型等三大類型結構物。本研究分別進行探討及研發新型之消能式結構物以替代傳統保護港灣、海岸之重力式海岸結構物，並期能達符合海岸空間環境需求且具保全功能之目的。在前二年的研究工作裡，長波抗浪型結構物的研究中研發一種利用內建斜坡促使波浪越波消能的碼頭結構物的雛形，並在第二年進行相關的水工模型試驗，結果確認即使在入射波週期為40秒之長波亦能得到0.5的反射率，顯示其可行性。功能目的使用型或臨時性設施型的研究中探討了外加襯板的浮式結構物的運動行為及附近波場特性；環境保護型則著重於探討潛式多孔隙透水結構物的波浪特性。在探討海岸公路邊坡防護的結構物方面，主要是收集公路邊坡的破壞案例以及相關文獻與資料，並檢討各案例的破壞原因。</p> <p>成果效益：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 針對臺灣地區特性與港灣構造物之使用功能與目的研發出具體可行之可消減長波能量的實用型結構設施、具環境保育與結構安全的港灣結構設施型式及高機動性、符合環境保護的結構設施。針對臺灣各區域之港灣特性決定結構型式，活絡臺灣港灣環境及水質，並提供各港務局及水利署等單位作為改善現有港灣設施及海岸基礎建設之參據。</li> <li>2. 計畫屬於創新前瞻、技術開發之研究，不僅可促成學界合作研究，其研究成果亦可作為各港務局及公路總局在海岸道路保護及港灣構造物消能設施之依據，以改善海洋環境品質，整體研究過程與成果不僅可培育相關人才，亦可增進公共服務設施之品質與效能，同時在經濟效益上，亦可提供功能性較高之港灣結構物，節省工程建設及維護費用。</li> </ol>			
出版日期	頁數	工本費	本 出 版 品 取 得 方 式
100 年 4 月	328	300	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工本費價購。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>密 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>( 解密條件：<input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密， <input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密 )</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>普通</p>			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Water Wave Energy Dissipation Structures (2/4)			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-02-5106-7 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010000314	IOT SERIAL NUMBER 100-20-7512	PROJECT NUMBER 99-H2DB004
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yuang-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu Yuang-fang PROJECT STAFF: Tsai Chin-chi, Yang Yi-yun PHONE: +886-4-26587221 FAX: +886-4-26571329			PROJECT PERIOD FROM March 2010 TO November 2010
RESEARCH AGENCY: NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lin Jaw-guei PROJECT STAFF: Yueh Ching-yun, Weng Wing-kai, Yang Kuo-cheng, Chen Wen-juinn. ADDRESS: 2 Pei-ning Road, Keelung, Taiwan 20224, R.O.C PHONE: +886-2-24622192			
KEY WORDS: Wave dissipation structure, Numerical simulation, Hydraulic model test, Coastal highway			
<p><b>ABSTRACT</b></p> <p>The second year of a four-year study entitled “Water Wave Energy Dissipation Structures,” was preceded. The major goal is, by using the numerical simulations and hydraulic model tests, to develop the suitable new wave dissipation structures for Taiwan coastal zone with different characteristics. The functions of coastal structures needed around Taiwan coast in different coastal area : long period waves dissipation type, fast installation/ special purpose type, and environmental protection type. In the first two years, the new structures of the three types are designed, tested, and evaluated. For the study on long period wave dissipation type structure, a new wharf structure which utilized an internal slope that causes the wave overtopping and dissipates the wave energy had been designed, and the hydraulic model tests of the prototype was carried out, the results show that even for the incident wave with period of 40 second, the obtained reflection coefficient is around 0.5. In the study on the fast installation/special purpose type structure, a skirt type floating structure was with developed and tested. In the study on the environmental protection/restoration type structure, the influence of submerged permeable structure on wave characteristics was studied. For the study of shore protection of coastal highway, the failure cases were collected and analyzed, and also the relative references and the characteristics about the coastal highway of Taiwan were collected and discussed.</p>			
DATE OF PUBLICATION April 2011	NUMBER OF PAGES 328	PRICE 300	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XVI
照片目錄.....	XIX
第一章 計畫背景分析.....	1-1
1.1 計畫目的.....	1-1
1.2 計畫重要性.....	1-2
1.3 研究範圍與工作項目.....	1-5
1.3.1 長波抗浪型消能結構物.....	1-5
1.3.2 功能目的使用型或臨時性設施型消能結構物.....	1-6
1.3.3 環境保護型消能結構物.....	1-8
1.3.4 海岸公路邊坡保護工法.....	1-8
1.4 過去研究成果與未來工作項目.....	1-9
第二章 長波抗浪型結構物.....	2-1
2.1 研究目的.....	2-1
2.2 重要文獻回顧.....	2-2
2.3 波浪的溯升/溯降 (run up/run down) 理論.....	2-5
2.3.1 碎波相似參數 (Surf-Similarity Parameter; Iribarren	

Number ).....	2-8
2.3.2 波浪的溯升/溯降.....	2-9
2.4 水力阻尼式消能碼頭的水工模型試驗.....	2-21
2.4.1 常時波浪的水工模型試驗 (初期測試) .....	2-22
2.4.2 長週期波浪的水工模型試驗.....	2-30
2.4.3 水工模型試驗的討論與建議.....	2-50
2.5 數值模擬方法.....	2-52
2.5.1 FLOW-3D 之主要特性.....	2-52
2.5.2 FLOW-3D 所使用之理論方程式.....	2-57
2.5.3 數值模擬流程.....	2-59
2.5.4 初步率定的數值計算結果與討論.....	2-63
2.5.5 長週期波浪的數值模擬試驗.....	2-69
2.5.6 平面水槽之數值模擬試驗.....	2-76
第三章 功能目的使用型或臨時性設施型.....	3-1
3.1 快速安裝防波堤系統(RIBS)簡介.....	3-2
3.2 繫留浮體理論推導.....	3-9
3.3 繫留浮體水工模型實驗配置與方法.....	3-17
3.3.1 實驗設備與儀器.....	3-17
3.3.2 模型製作與佈置.....	3-22
3.3.3 實驗進行與量測.....	3-25
3.3.4 實驗結果與討論.....	3-26

3.4 壓氣型浮式結構物理論.....	3-32
3.4.1 壓氣型浮式結構物理論建立.....	3-32
3.4.2 壓氣型浮式結構物理論發展.....	3-38
第四章 環境保護型消能結構物.....	4-1
4.1 研究目的.....	4-1
4.2 相關文獻回顧.....	4-6
4.3 水工模型試驗.....	4-9
4.3.1 試驗設備與儀器.....	4-9
4.3.2 模型製作與佈置.....	4-10
4.3.3 試驗條件.....	4-13
4.4 水工模型試驗與數值計算結果與分析.....	4-16
4.4.1 連結式雙潛堤反射率分析與討論.....	4-16
4.4.2 分開式雙潛堤反射率分析與討論.....	4-17
4.4.3 直立岸壁波壓力分析與討論.....	4-18
4.4.4 四分之一圓弧板波壓力分析與討論.....	4-19
4.5 FLOW-3D 計算結果與分析.....	4-32
4.5.1 FLOW-3D 數值計算流程與設定.....	4-32
4.5.2 模式驗證.....	4-38
4.5.3 數值計算結果與討論.....	4-45
4.6 波浪斜向入射結構物數值計算結果與分析方法.....	4-54
4.6.1 數值計算方法.....	4-55

4.6.2 模式驗證.....	4-63
4.6.3 數值計算結果與討論.....	4-67
4.7 小結.....	4-74
第五章 海岸公路邊坡保護工法 .....	5-1
5.1 海岸公路背景.....	5-1
5.2 東部海岸公路簡介.....	5-4
5.3 東部公路環境背景.....	5-7
5.3.1 地形與地質.....	5-7
5.3.2 波浪.....	5-9
5.3.3 潮汐.....	5-11
5.3.4 海流.....	5-13
5.3.5 颱風.....	5-16
5.4 海岸公路之現況.....	5-16
5.4.1 臺 11 線.....	5-17
5.4.2 臺 9 線與臺 17 線.....	5-24
5.5 海岸公路防護因應對策.....	5-27
5.5.1 歷史災資料庫之建置：.....	5-27
5.5.2 現有易致災地點之普查：.....	5-27
5.5.3 易致災地點地文及海象資料監測.....	5-28
5.5.4 即時監視系統建置.....	5-28
5.5.5 海岸公路潛勢區段之分類與劃分.....	5-31

5.5.6 相關海岸相關單位之合作.....	5-32
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-5
6.3 成果效益與後續應用情形.....	6-6
參考文獻.....	參-1
附錄一 期中報告審查意見處理情形表.....	附 1-1
附錄二 期末報告審查意見處理情形表.....	附 2-1
附錄三 期中簡報資料.....	附 3-1
附錄四 期末簡報資料.....	附 4-1

## 圖目錄

圖 1.1.1 臺灣附近海域的水深地形圖.....	1-2
圖 2.2.1 長週期波消能結構物之研究概觀.....	2-3
圖 2.2.2 長週期波消能結構物之數值造波水槽研究.....	2-4
圖 2.2.3 Kee 等[14]之數值模型定義圖.....	2-4
圖 2.2.4 Kee 等[14]測試之數值模型系統(a)雙平版；(b)三平版.....	2-5
圖 2.3.1 波浪溯升/溯降示意圖.....	2-6
圖 2.3.2 波浪在不同的斜坡表面上的溯升與溯降示意圖.....	2-7
圖 2.3.3 光滑斜坡上之正向入射波的 $R_{u2\%}$ (CEM).....	2-11
圖 2.3.4 光滑斜坡上之正向入射波的 $R_{us}$ (CEM).....	2-11
圖 2.3.5 正向長峰波在光滑斜坡上的溯升 $R_{u2\%}$ (CEM).....	2-13
圖 2.3.6 Delft Hydraulic 進行台階試驗的相關參數(CEM).....	2-15
圖 2.3.7 式(2.3.9)中有關 $\alpha_{eq}$ 及 $\alpha$ 的定義(CEM).....	2-15
圖 2.3.8 根據台階對溯升高度影響度對 $\xi_{eq}$ 選用值的評估(CEM).....	2-15
圖 2.3.9 Delft Hydraulic 所進行之光滑斜坡之波浪溯升試驗(CEM).....	2-17
圖 2.3.10 波浪入射角與方向分佈性對溯升高度的影響(CEM)...	2-17
圖 2.3.11 標示透水參數(CEM).....	2-18
圖 2.3.12 不規則正向波在不透水/透水岩石斜坡上 2% 及示性溯升高度	

(CEM) .....	2-19
圖 2.4.1 內建斜坡式消能結構物的三種方案 .....	2-24
圖 2.4.2 內建斜坡式消能結構物的波動與水流現象.....	2-25
圖 2.4.3 長波抗浪型模型的尺寸.....	2-32
圖 2.4.4 長波抗浪型模型配置圖.....	2-36
圖 2.4.5 $T=3.0\text{sec}$ 空水槽原始時間序列圖.....	2-39
圖 2.4.6 各配置 $Kr-T$ 之分布圖.....	2-40
圖 2.4.6(續) 各配置 $Kr-T$ 之分布圖.....	2-41
圖 2.4.6(續) 各配置 $Kr-T$ 之分布圖.....	2-42
圖 2.4.6(續) 各配置 $Kr-T$ 之分布圖.....	2-43
圖 2.4.7 固定縱深比之波浪與斜坡坡度之比較圖.....	2-48
圖 2.4.8 固定斜坡坡度之波浪與縱深比之比較圖.....	2-49
圖 2.5.1 體積比函數 $F(x, y, z; t)$ .....	2-54
圖 2.5.2 數值造波器示意圖.....	2-54
圖 2.5.3 數值模擬流程圖.....	2-60
圖 2.5.4 直立壁開孔模型外觀圖.....	2-61
圖 2.5.5 多孔隙介質模型外觀圖.....	2-61
圖 2.5.6 模型元件組合外觀圖.....	2-61
圖 2.5.7 $x-z$ 平面網格區塊位置示意圖.....	2-62
圖 2.5.8 網格系統之 3D 示意圖.....	2-62
圖 2.5.9 計算領域之邊界條件示意圖.....	2-62

圖 2.5.10	入射波與反射波合成之包絡線.....	2-64
圖 2.5.11	波高計 1 至波高計 4 之量測位置.....	2-66
圖 2.5.12	小斷面水槽預備試驗之波高計量測值示意圖(CASE 1).....	2-66
圖 2.5.13	數值計算結果示意圖 (CASE 1).....	2-69
圖 2.5.14	試驗設置與網格設定圖 .....	2-70
圖 2.5.15	縱深比 D1、斜坡坡度 1/2、週期 3.0s 原始時序圖.....	2-71
圖 2.5.16	縱深比 D1，斜坡坡度 S1/2 時之數值模擬反射率比較圖.....	2-71
圖 2.5.17	縱深比 D1 時，不同斜坡坡度之數值模擬反射率比較圖.....	2-74
圖 2.5.18	縱深比 D2 時，不同斜坡坡度之數值模擬反射率比較圖.....	2-74
圖 2.5.19	縱深比 D3 時，不同斜坡坡度之數值模擬反射率比較圖.....	2-74
圖 2.5.20	斜坡坡度 S1/2 時，不同縱深比之數值模擬反射率比較圖.....	2-75
圖 2.5.21	斜坡坡度 S1/4 時，不同縱深比之數值模擬反射率比較圖.....	2-75
圖 2.5.22	斜坡坡度 S1/8 時，不同縱深比之數值模擬反射率比較圖.....	2-75
圖 2.5.23	組合式數值模擬模型及尺寸圖.....	2-77
圖 2.5.24	嵌入組合式數值模擬模型之多孔隙介質外觀尺寸圖.....	2-77
圖 2.5.25	y-z 平面網格配置及波高擷取位置示意圖.....	2-78

圖 2.5.26 y-z 平面網格配置.....	2-79
圖 2.5.27 3D 計算領域示意圖.....	2-80
圖 2.5.28 平面水槽原始時序圖.....	2-81
圖 2.5.29 正 x 軸排水區斷面處之等值側向速度( $V_x$ )之時間序列示意.....	2-83
圖 3.1.1 快速安裝防波堤系統構想圖.....	3-3
圖 3.1.2 在佛羅里達 Cape Canaveral 港外海的現場測試.....	3-4
圖 3.1.3 大型 RIBS 的基本組件及安裝.....	3-4
圖 3.1.4 大型 RIBS 佈放時與波浪的關係圖及佈放後的鳥瞰圖.....	3-5
圖 3.1.5 小型 RIBS 的基本配置圖.....	3-5
圖 3.1.6 小型 RIBS 半比例尺現場實驗.....	3-6
圖 3.1.7 RIBS 水工模型試驗.....	3-6
圖 3.1.8 Hydro RIB 的成品與佈放方式.....	3-7
圖 3.1.9 XM 2001 的結構示意圖及施工圖.....	3-7
圖 3.1.10 XM 2001 的存放與佈放方式.....	3-8
圖 3.2.1 繫留浮體定義圖.....	3-9
圖 3.3.1 斷面水槽模型配置圖.....	3-24
圖 3.3.2 入射波波形(標示處為擷取位置) .....	3-26
圖 3.3.3 反射波波形(標示處為擷取位置) .....	3-26
圖 3.3.4 透射波波形(標示處為擷取位置) .....	3-26
圖 3.3.5 剛性翼板繫留浮體 0 度水平振幅.....	3-27
圖 3.3.6 剛性翼板繫留浮體 30 度水平振幅.....	3-28

圖 3.3.7 刚性翼板繫留浮體 0 度垂直振幅.....	3-29
圖 3.3.8 刚性翼板繫留浮體 30 度垂直振幅.....	3-29
圖 3.3.9 刚性翼板繫留浮體 0 度旋轉振幅.....	3-30
圖 3.3.10 刚性翼板繫留浮體 30 度旋轉振幅.....	3-30
圖 3.3.11 刚性翼板繫留浮體 0 度反射率.....	3-31
圖 3.3.12 刚性翼板繫留浮體 30 度反射率.....	3-32
圖 3.4.1 壓氣型浮式結構物示意圖.....	3-33
圖 4.1.1 生態型潛礁示意圖.....	4-2
圖 4.1.2 珊瑚移植示意圖.....	4-2
圖 4.1.3 未來防坡堤示意圖.....	4-2
圖 4.1.4 凸型曲面防波堤構造示意圖.....	4-3
圖 4.1.5 凸型曲面防波堤(日本船川港).....	4-3
圖 4.1.6 半圓形防波堤.....	4-3
圖 4.1.7 開孔曲面堤演變過程(繪圖:褚懷宇).....	4-4
圖 4.1.8 環境保護型消能結構物(繪圖:褚懷宇).....	4-5
圖 4.2.1 本文與部分前人研究相關圖說明.....	4-6
圖 4.3.1 定床斷面造波水槽波高計配置示意圖(連結式 S/h=0).....	4-10
圖 4.3.2 壓力計安裝位置(試驗水深 h=50cm).....	4-10
圖 4.3.3 波形變化時序列圖及反射率計算.....	4-15
圖 4.3.4 波壓計時間序列圖(單位 gw/cm <sup>2</sup> ).....	4-15
圖 4.4.1 波浪作用於連結式透水結構物 R 與 kh 關係圖.....	4-20

圖 4.4.2	波浪作用於分開式透水結構物 $ R $ 與 $kh$ 關係圖.....	4-21
圖 4.4.3	波浪作用於分開式透水結構物 $ R $ 與 $kh$ 關係圖.....	4-22
圖 4.4.4	連結式雙潛堤最大波壓力與 Sainflou 重複波壓力比較 圖.....	4-23
圖 4.4.5	分開式雙潛堤最大波壓力與 Sainflou 重複波壓力比較 圖.....	4-24
圖 4.4.6	圓弧曲面板無因次最大波壓分布比較圖.....	4-25
圖 4.4.7	圓弧曲面板無因次最大波壓分布比較圖.....	4-26
圖 4.5.1	佈置網格並將模型匯入.....	4-32
圖 4.5.2	比較 FAVOR 技術所呈現圖形之差異.....	4-33
圖 4.5.3	FAVOR 與傳統 FDM 網格描述之差異比較.....	4-33
圖 4.5.4	以 FAVOR 技術定義環境保護型結構物.....	4-34
圖 4.5.5	環境保護型結構物配置示意圖.....	4-36
圖 4.5.6	邊界條件設定圖.....	4-37
圖 4.5.7	入射波網格獨立性分析.....	4-40
圖 4.5.8	水工模型試驗與數值造波水槽配置示意圖.....	4-41
圖 4.5.9	水工模型試驗進行波反射率計算結果圖.....	4-42
圖 4.5.10	數值造波水槽進行波反射率計算結果圖.....	4-42
圖 4.5.11	進行波流速分佈比較.....	4-43
圖 4.5.12	進行波流速分佈比較.....	4-44
圖 4.5.13	FLOW-3D 反射率計算結果與水工模型圖.....	4-46
圖 4.5.14	環境保護型結構物配置示意圖.....	4-47

圖 4.5.15 波形變化圖.....	4-47
圖 4.5.16 波浪與環境保護型結構物交互作用之速度分佈.....	4-50
圖 4.5.16(續) 波浪與環境保護型結構物交互作用之速度分佈.....	4-51
圖 4.5.17 波浪與環境保護型結構物作用之速度分佈.....	4-52
圖 4.5.17(續) 波浪與環境保護型結構物作用之速度分佈.....	4-53
圖 4.6.1 環境保護型結構物示意圖.....	4-54
圖 4.6.2 摩擦係數改變下波浪斜向入射透水堤反射率與 $\theta$ 之關係.....	4-64
圖 4.6.3 波浪斜向入射八列透水潛堤反射率、透過率及能量損失與 $\theta$ 關係.....	4-65
圖 4.6.4 波浪斜向入射四列透水潛堤反射率與 $k \wedge \cos \theta$ 之關係.....	4-66
圖 4.6.5 波浪斜向入射四列透水潛堤反射率與 $(2(B+l) \cos \theta / L)$ 之關係.....	4-66
圖 4.6.6 波浪斜向入射反射率 $ R $ 及能量損失 $E_l$ 與 $kh$ 之關係.....	4-69
圖 4.6.7 波浪斜向入射反射率 $ R $ 及能量損失 $E_l$ 與 $kh$ 之關係.....	4-70
圖 4.6.8 波浪斜向入射反射率 $ R $ 及能量損失 $E_l$ 與 $kh$ 之關係.....	4-71
圖 4.6.9 波浪斜向入射反射率 $ R $ 及能量損失 $E_l$ 與 $kh$ 之關係.....	4-72
圖 5.1.1 不同類型之海岸公路災害(網路蒐集) .....	5-1
圖 5.1.2 臺灣公路網( <a href="http://www.wintimes.com.tw/play/tw-map.htm">http://www.wintimes.com.tw/play/tw-map.htm</a> ) .....	5-3
圖 5.1.3 海岸公路嘉平段路面塌陷情形.....	5-3
圖 5.2.1 臺九線和臺十一線示意圖.....	5-4
圖 5.2.2 花蓮縣境內臺9線及臺11線路線圖.....	5-5

圖 5.2.3 臺東縣境內臺9線及臺11線路線圖.....	5-6
圖 5.3.1 東部地區地質圖 (黑線為臺11位置示意圖) .....	5-8
圖 5.3.2 臺灣四周海域年平均海況流矢展示圖.....	5-14
圖 5.3.3 臺灣四周海域各季平均海況流矢展示圖.....	5-15
圖 5.3.4 1897-2009 颱風侵襲臺灣路徑圖.....	5-16
圖 5.4.1 臺11線 0-20km.....	5-17
圖 5.4.2 臺11線 20-40km.....	5-18
圖 5.4.3 臺11線 40-60km.....	5-19
圖 5.4.4 臺11線 60-80km.....	5-20
圖 5.4.5 臺11線 80-100km.....	5-20
圖 5.4.6 臺11線 100-140km.....	5-21
圖 5.4.7 臺11線 140km-終點 (無災害) .....	5-21
圖 5.4.8 臺9線 410K+650(左)及 411K+150 路面塌陷災害.....	5-24
圖 5.4.9 臺9線 429K+800~430K 路面塌陷災害.....	5-25
圖 5.4.10 為臺東縣大武漁港南側臺9線之公路現況.....	5-25
圖 5.4.11 臺17線臺南黃金海岸段邊坡護岸破壞情形.....	5-26
圖 5.5.1 海岸道路越波捕捉面.....	5-29
圖 5.5.2 道路越波計算步驟.....	5-29
圖 5.5.3 日本公路越波監視與預測分析之流程圖.....	5-30
圖 5.5.4 日本公路越波防護對策分析流程圖.....	5-30

## 表 目 錄

表 2.3.1 不透水斜坡上的碎波型式與相關的 $\xi_0$ 值(CEM).....	2-9
表 2.3.2 式(2.3.3)的相關係數.....	2-11
表 2.3.3 式(2.3.3)中表面粗糙度減衰係數.....	2-13
表 2.3.4 Delft Hydraulics 對透水/不透水斜坡上的溯升研究測試條件 (CEM) .....	2-18
表 2.3.5 不規則正向波在不透水/透水岩石斜坡上之相關係數值 (CEM) .....	2-20
表 2.4.1 空水槽造波測試的三次反射率分析結果.....	2-26
表 2.4.2 方案一造波測試的三次反射率分析結果.....	2-27
表 2.4.3 方案二造波測試的三次反射率分析結果.....	2-28
表 2.4.4 方案三造波測試的三次反射率分析結果.....	2-29
表 2.4.5 大型斷面造波水槽規格.....	2-30
表 2.4.6 長波抗浪型斷面試驗模型配置.....	2-32
表 2.4.7 長波抗浪型斷面試驗波浪條件(現場與模型).....	2-33
表 2.4.8 試驗波浪代號與條件.....	2-38
表 2.4.9 試驗配置代表名稱.....	2-38
表 2.5.1 數值計算之波浪條件.....	2-64
表 2.5.2 數值模擬及水槽試驗之反射率(KR)比較表.....	2-68
表 2.5.3 組合式及斷面模型反射率比較表.....	2-82
表 4.3.1 水工模型造波試驗條件表.....	4-13

表 4.3.2	波浪通過環境保護型消能結構物之波浪條件( $h=50\text{ cm}$ )...	4-14
表 4.4.1	配置(I)反射率最小值 $ R _{\min}$ 與發生位置.....	4-27
表 4.4.2	配置(II)反射率最小值 $ R _{\min}$ 與發生位置.....	4-27
表 4.4.3	配置(III)反射率最小值 $ R _{\min}$ 與發生位置.....	4-27
表 4.4.4	配置(IV)反射率最小值 $ R _{\min}$ 與發生位置.....	4-27
表 4.4.5	連結式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力.....	4-28
表 4.4.6	連結式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力.....	4-28
表 4.4.7	連結式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力.....	4-29
表 4.4.8	連結式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力.....	4-29
表 4.4.9	分開式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力.....	4-30
表 4.4.10	分開式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力.....	4-30
表 4.4.11	分開式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力.....	4-31
表 4.4.12	分開式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力.....	4-31
表 4.5.1	造波條件( $h=50\text{cm}$ ).....	4-35
表 4.5.2	最大時間步長.....	4-37
表 4.5.3	各週期 Turbulent k.e.值.....	4-38
表 4.5.4	FLOW-3D 計算反射率值與水工模型之比較.....	4-47
表 4.6.1	不同配置下反射率出現極值大小與發生位置.....	4-73
表 5.3.1	蘇澳港測站 1990-2008 波浪數據統計.....	5-10
表 5.3.2	花蓮港測站 1990-2007 波浪數據統計.....	5-10
表 5.3.3	臺東波浪數據統計.....	5-10

表 5.3.4 花蓮潮位站潮位統計表.....	5-11
表 5.3.5 氣象局蘇澳潮位站 2005-2007 潮位統計表.....	5-11
表 5.3.6 氣象局富岡潮位站潮位統計表.....	5-12
表 5.3.7 氣象局石梯潮位站潮位統計表.....	5-12
表 5.4.1 臺 11 線易致災路段說明表.....	5-22
表 5.4.1(續) 臺 11 線易致災路段說明表.....	5-23

## 照片目錄

照片 2.4.1 內建斜坡式消能結構物實體模型.....	2-25
照片 2.4.2 試驗斷面水槽全景.....	2-25
照片 2.4.3 海洋工程館大斷面水槽.....	2-34
照片 2.4.4 容量式波高計及訊號增幅器與資料擷取盒.....	2-35
照片 2.4.5 instruNet 資料擷取系統軟體波形視窗.....	2-35
照片 2.4.6 長波抗浪型斷面試驗模型完工與設置.....	2-36
照片 2.4.7 波高計設置.....	2-37
照片 3.3.1 斷面造波水槽.....	3-17
照片 3.3.2 造波機.....	3-18
照片 3.3.3 量測用波高計.....	3-19
照片 3.3.4 波高增幅器.....	3-19
照片 3.3.5 資料擷取系統硬體.....	3-20
照片 3.3.6 資料擷取系統視窗即時顯示系統.....	3-20
照片 3.3.7 水平變位計.....	3-21
照片 3.3.8 垂直變位計.....	3-21
照片 3.3.9 角度變位計.....	3-22
照片 3.3.10 剛性翼板繫留浮體模型(0 度 25 公分) .....	3-23
照片 4.2.1 美國 Gran Dominicus 生態礁球.....	4-8
照片 4.2.2 法國 ECOPODE 凹凸生態塊.....	4-8
照片 4.2.3 德國 Elastocoast 新工法生態礁塊.....	4-8

照片 4.3.1 試驗儀器設備.....	4-11
照片 4.3.1 (續) 試驗儀器設備.....	4-12
照片 4.3.2 水工模型圓弧板上壓力計安裝照片.....	4-13

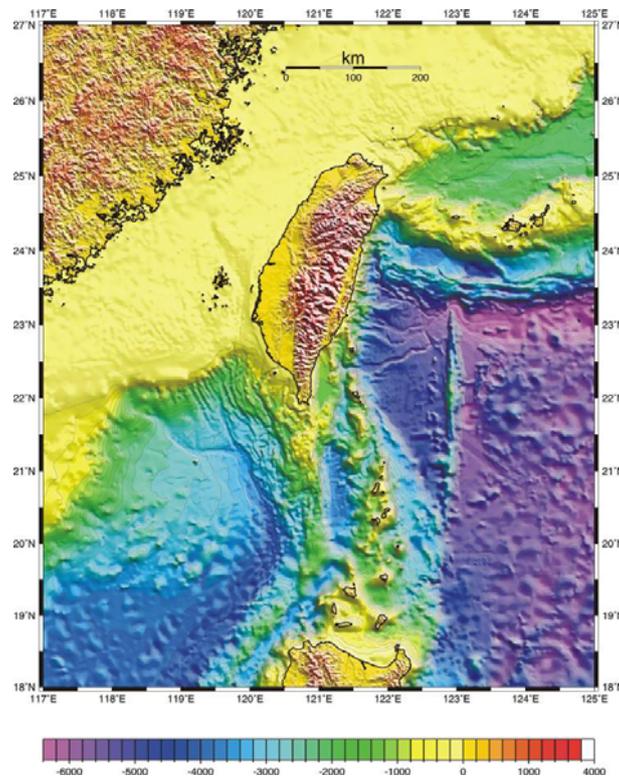
# 第一章 計畫背景分析

## 1.1 計畫目的

臺灣由於位處於大陸棚的邊緣，西部海岸以水深約在 100 公尺以內的臺灣海峽與大陸連接；東部則面臨陡峻的太平洋水域，近岸有花東海盆；東北側水域有琉球島弧、沖繩海槽與和平海盆；東南側有呂宋島弧及北呂宋海槽；南側有恆春海脊及馬里亞那海溝；西南側則有許多峽谷。由於水深地形相當地複雜且變化劇烈，連帶著也影響到附近的海氣象變化，以及海岸設施所遭受的不同外力型式。例如，臺灣東部海底坡度陡峭，且是颱風波浪必經之地，此區域之港灣構造物經常受到長浪的侵襲，因此該區所設置的港灣構造物幾乎全為重力式大型結構物，然而從以往至今，臺灣東部的港灣結構物常有因颱風波浪作用而導致破壞的事例，顯示以現有規範所設計之重力式結構物仍不足以抵擋在此環境下之颱風波浪，有必要考慮其他設施型式或消能方式配合以降低長浪之作用力；而在臺灣西部則是海底平坦且多沙岸，加上臺灣中央山脈之阻擋，颱風期間之波力不似對東部的影響大，但伴隨的則為海洋環境問題。而長久以來，不管結構物設施之功能或用途，我國的港灣結構物皆以永久性設施為主要考量，其考量當然是為了應付多變且多惡劣海象的海洋環境，並受制於國內的年度預算中編列維護費的高困難性，乃以資本門屬性的營建設備費的方式，尋求一勞永逸的方法，建造所謂「堅固耐用」的結構物。但是此種方式對於某些臨時性或季節性的海岸空間使用，其不僅可能造成投資過當，也很容易被不瞭解海岸災害嚴重性的人們誤認為是破壞海岸景觀及環境的元凶。就海岸工程技術的觀點來看，確實目前的海岸工程與開發情形，有可以檢討的空間。

依臺灣地區之環境特性與功能屬性分類，港灣結構物所需要的功能大致可分為長波抗浪型區域(主要功能以保護港灣結構物減少受長波

作用的影響為主)、功能目的使用型或臨時性設施型(以環境保護功能或短期性特殊使用目的功能為主)及環境保護型區域(兼顧港灣結構物及環境之復育功能)等三大類型。本計畫之目標主要在於針對上述三種型態，探討並研展符合臺灣各區地理環境需求的各種消能式港灣結構物，以替代傳統保護港灣、海岸之重力式海事結構物，達到符合海岸空間環境需求且具保全功能之目的。此外，有鑑於海岸公路邊坡常因為自然界外力的作用導致坍塌，而危及公路設施與人員車輛的安全，本年度乃納入本計畫之研究項目之一。



資料來源：海科中心網站

圖 1.1.1 臺灣附近海域的水深地形圖

## 1.2 計畫重要性

如前所述，臺灣東部及西部海岸地形因環境位置因素有很大的差異，東部岸地形陡峭，而西部海岸則較為平緩，也因此東西兩側海岸

在海岸空間的利用與保護的難易度存在相當大的差異。例如西部人口集中，而且在過去數十年裡高度追求經濟發展下，海岸呈現出過度開發及過度與海鄰接的問題，加上每年總是會有多次颱風侵襲的推波助瀾下，臺灣一千餘公里的海岸線佈滿了大大小小三百多個港口以及無數的海堤；而東部海岸由於直接受到太平洋深海波浪的直接侵襲，加上海岸地形多屬曾經歷過劇烈變動的破碎岩層，海岸邊坡經常發生坍方，相關單位為了保護海岸線，以減少侵蝕，乃大量地使用了混凝土的人工構造物。此種高度開發建設與大量設置重力式剛性設施的結果常易刺激海岸空間環境的劇烈變遷，其不僅影響海岸區域的景觀與環境平衡，且可能引致海岸區域生態的劇烈改變。

自從臺灣解嚴，海岸逐漸開放以來，加上近年來人民生活水準提高，環保意識抬頭，大眾對海岸空間環境與生態之要求與關心亦相對提升，也因此影響到現今海岸保護之工法及施政策略，如以消能式柔性工法替代傳統剛性工法、以面的保護形式取代過去線狀的保護、視海堤後方保護標的物的重要性而決定保護方式與工法等。在行政院經建會民國 94 年編印『挑戰 2008 國家發展重點計畫』報告中將「維持自然海岸線比例不再降低」列為評估指標，並指出未來海岸地區之利用管理，應以減量、復育為基本原則，且需以符合「資源保護」與「災害防治」者為優先考量。再者，凡涉及海岸地區之相關施政計畫，均應優先考量海岸防災、海岸生態資源保育與護育、環境復育、景觀改善、生態旅遊等價值，並作必要之調整。民國 96 年 6 月行政院核定之「永續海岸整體發展方案」更宣示將全面檢視全臺灣的海岸、港灣等海事結構物，顯示政府整頓海岸空間環境之決心。

目前海岸環境的保護方式，在海堤方面儘量以符合生態的柔性工法，但港灣構造物由於需要考慮其抗浪的功能，目前尚無有效且妥善的改善方式，仍以重力式結構物為主。雖然，港灣構造物設置的目的主要是提供一可進行貨物裝卸、人員休憩、船舶靠泊、整修及避颱、避風之靜穩水域。然而如果深入檢視臺灣各種不同型式的港口，可發現或因規模太小、或因環境地理因素、或因使用目的功能的需求不同，

並非所有港口皆需要具備有避颱風的功能，而僅需於平時(觀光遊憩碼頭)或部分時間(如離島的運補碼頭)提供休憩、裝卸貨等功能，此類港口之保護設施如防波堤等若仍然使用傳統重力式結構設施，其不僅耗費大量工程經費但事倍功半而僅得到部分的成效外，對海岸環境的原有平衡影響甚鉅，亦因此而可能破壞海岸空間景觀。另外，由於臺灣東西兩岸地形落差甚大，加上平均每年將近四個颱風的侵襲影響，港灣構造物所面臨之問題亦不同，東部海域坡度陡，港灣結構物面常遭受到長波作用，結構物所受波壓較大，發生防波堤破壞或港池共振問題的機會很大；西部海域港灣結構所受颱風波浪作用雖較小，但因地形底質因素，其較常面臨之問題大都為沖刷淤積等問題。在此種各區地理環境、所面臨之問題、港灣碼頭之使用功能皆有所不同的狀況下，僅以單一的重力式結構物方式並不足以解決所有臺灣地區各港灣所面臨之問題，實有必要針對各種型態提出其解決之方式。

若以較為簡潔的方式區分，臺灣近岸區域依港灣結構物的功能，大致可分為長波抗浪型之區域（主要功能以港灣結構保護為主）、環境保護型區域（兼顧港灣結構及環境之護育功能）及功能目的使用型或臨時性設施型（以環境保護功能或特殊使用目的功能為主）等三大類型，長波抗浪型設施之區域大致以臺灣東部近岸港灣結構物為代表，此類結構物大都為傳統重力式結構物，由於此區環境地理因素特殊加上颱風波浪必經之路，常面臨結構破壞或港池共振等問題，以現有傳統之方式增加結構物之強度或重量來抵擋波浪作用力並非有效的解決之道，有必要思考其他之消減長波作用力的結構型式；環境保護型區域則以東北部及西部海岸為代表，近年來臺灣生態工法之應用漸趨成熟，潛堤於海岸保護之應用亦時有所聞，但應用於港灣構造物之型態為何，則有必要進一步加以檢討；功能目的使用型或臨時性設施型，主要目的並非抵擋颱風波浪，而是以季節風浪為主，其特性為以不改變環境因素但平時仍具有保護功能，因此其機動性較高，此類設施之應用的範圍較廣，舉凡污染擴散的防止、海洋能源與資源的開發、海岸的保護、休憩觀光碼頭及防波堤之設置、甚或軍事設施、水質之淨

化等，設置簡單、不影響海岸空間環境及多樣性、對設置區域環境之高適應性是其優點，但抗浪性較低則是其缺點，然其特性與功能對於目前部份港灣設施及海岸保護之需求是適切的，實有必要進一步加以探討。

此外，臺灣東部濱海公路有多處路段緊臨海岸，其海側邊坡及趾部常遭長浪及颱風暴浪之侵襲淘刷，導致路基坍塌流失，造成交通中斷嚴重影響東部的觀光及產業運輸。公路單位為防止海岸公路災況之惡化，往往採取拋放大量消波塊之方式防止邊坡之淘蝕現象，但坍塌流失情形仍時有發生，且消波塊之拋放亦嚴重影響海岸公路之景觀與生態環境，要求改善復育之批評聲浪日益高漲。因此探討海岸公路邊坡破壞類型與機制，研提可行監測方案及改善策略，對東部經濟及觀光之發展將有密切幫助。

### **1.3 研究範圍與工作項目**

本計畫預定執行四年，目前係進行第二年的工作，各年之主要工作項目包括長波抗浪型之區域、環境保護型區域及功能目的使用型或臨時性設施型三大類型之結構開發新的消能方式，以及海岸公路邊坡保護工法，分別說明如后。

#### **1.3.1 長波抗浪型消能結構物**

傳統的消能型海岸結構物主要是利用自體重量、多孔性及表面粗糙度來反射或削減波浪的能量，但由於這是屬於硬碰硬的行為，往往也造成了結構體的破壞或海底的地形變化。如果從削減波浪的作用能量來思考的話，除了前面所述利用剛性結構物本身的特性、來消耗、降低或反射入射波的能量外，也可以思考利用結構物附近的水理運動行為或結構物的運動來產生不同的消能效果。例如就港內的碼頭結構物而言，對於已經進入港內的入射波能量，能夠做的就是設法讓反射

波降到最低，此種方式簡稱為水力結構之阻尼。例如在港內設置自然消波海灘讓入射波能在沙灘上消耗殆盡而不致反射。然而由於現今的港灣規劃往往為了多爭取一些碼頭空間，已經使得港內自然消波海灘已不多見。可以確認的是：設法削減反射波可以降低港內的波動甚至避免共振的誘發。另一方面，波浪的反射主要還包含了水粒子運動與結構物之間的相互運動的問題。目前所使用的消能式結構物幾乎都是剛性且固定不動的形式，但如果參考相關的海上波能發電設備，可以發現當結構物隨波運動時，可以從波動中吸收部分的波浪能量，相對地也可以使波動的能量降低。因此，妥善利用結構物的材質特性與結構物的運動也可能可以達到削減波能的功效，此種方式簡稱為材料阻尼。為了能夠得到具體且實用的研究成果，本子計畫將集中研究人力與研究能量在水力結構之阻尼特性部分。本年度的工作內容包含以水力式阻尼之長波抗浪型結構物的研發為主，持續且同步進行數值模式與水工模型試驗等研究，以進行新型水力阻尼結構物特性探討及最佳配置的研發。同時也持續討論港灣相關的波浪的溯上與越波。前半年將主要以水工模型試驗的方式，來檢討前一年所設計的結構物型式，並確認其可行性。後續則仍回歸到同時利用水工模型試驗及數值模擬等方式進行研發。

### **1.3.2 功能目的使用型或臨時性設施型消能結構物**

本研究的第二個研究重點是快速佈放柔性浮式結構物的開發研究，其目的是考量我國的海岸環境特殊，不僅是地形，包括風、浪、流、潮位的變化都大，而且還分有颱風季節與週期性的季節變化。當海岸附近發生緊急事故時，例如發生海難事故需要進行搜救任務、海岸發生嚴重侵蝕可能危及後方設施、或重要海岸構造物毀壞需要搶修等，可能需要一種設施可以局部性地構成較靜穩的水域，以便能執行搶險任務。或者是在一個沒有固定港灣設施的水域，例如離島，要進行運補或季節性的遊憩活動，需要較靜穩的水域以便能順利安全地登島時，一個能簡易而快速地佈放臨時性的浮式結構物便可能滿足此一

需求，而毋需花費大量經費建構一個短期性用途的港灣設施。

因此，如何研發簡易快速佈放浮式結構物，以便能在短時間內可以快速佈放並獲得一個區域性的靜穩海域，以提升海上作業的安全或者減緩海岸工程事故的擴大，乃是本研究主題的重心所在。由於快速佈放的考量，此類浮式結構物的研發並不為抵擋臺灣附近海域的強大颱風波浪。而是在颱風侵襲時間以外的時期，能提供一適合該地區環境地理需求的臨時性或短期性遮蔽，並於颱風來襲前可快速回收的簡易結構物。因此，其設定的功能可包含

### **1. 短期性用途：**

針對部分水域不需在颱風期間提供避風避浪空間，而僅需於平時作業時能提供符合觀光遊憩或物資運補之靠泊需求。

### **2. 臨時性工程用途：**

(1) 針對海事結構物破壞維修，以臨時性浮式防波堤替代往昔利用沙袋或混凝土塊體進行圍堰所需花費的時間與經費。

(2) 針對海岸嚴重流失時，快速佈放以減緩波浪的侵襲能量，避免災害擴大。

### **3. 臨時性海難事故用途：**

針對沿近海船舶失去動力或是擱淺，需要進行海上救難時，在波浪作用方向快速佈放以獲取局部性的靜穩水域便利搜救行動。

基於以上各點，消波結構物中浮式結構物應為最佳之選擇，本研究主要以探討此符合前述各項功能之柔性浮式結構物。本年度的工作分水工模型試驗及數值模式建置與模擬。水工模型試驗部份主要延續第一年度所建立之解析構架，進行第一年附加剛性翼板之浮體的水工模型試驗；數值模擬則應考慮將浮體下方之附加翼板推展至可撓性薄板，並以彈性樑理論加以模擬，探討其消波特性之差異，同時並與第

一年度之研究成果相互比較。

### 1.3.3 環境保護型消能結構物

海岸保護、海岸環境復育及海岸空間利用必須走向柔性、親水、近自然、近生態等的海岸保護措施，並提供人們最舒適親水的空間，並能兼顧防災、安全、親水、休閒遊憩及良好的視野景觀等的條件，是國內外設計海岸保護結構物之未來趨勢。

近年來，潛式多孔隙透水式結構物研究逐漸受到重視，主要是它們具有下列特性：因為具有孔隙易附著生物對生態較為友善破壞較少；組成元件可以容易在陸地上建造；可以快速安裝施工；所需維護費用較少；孔隙間海水可以流通對水質較好；損壞時易於修補恢復性高。

本年度的工作分水工模型試驗及數值模式建置與模擬。數值模擬方面延續第一年度所使用數值方法，利用多領域邊界元素法（Multi-domain BEM）計算波浪由正向入射推展至探討斜向入射波作用下，直立堤前透水結構物之消能效果。水工模型試驗方面則延續第一年繼續進行試驗將針對兩潛堤間距離為分開式（ $S \neq 0$ ）進行反射率及波壓力之量測，以探討其對消波減壓效果之影響，並與前一年連結式的成果作一比較。其試驗結果應可提供數值計算之驗證，並且可以用來決定試驗材料在數值計算所需之相關參數值。

### 1.3.4 海岸公路邊坡保護工法

臺灣四面環海，東西兩岸之海象與地形及地質條件差異迥大，西部因砂質海岸居多，且陸側腹地較廣，因此濱海公路雖然仍沿海岸興建，但絕大多數之路線離開海岸尚有一段緩衝距離，颱風暴潮對海岸公路造成之災害極少發生。東部因為平原不多，海岸公路之開發有許多路段被迫不得不緊臨海岸興建，大多興建於高聳陡峻之海岸邊坡上，先天之安全因素即已受到威脅，加上東部海域水深、坡陡，東北

長浪及颱風大浪皆直接拍打於海岸邊坡，常造成趾部之淘刷及邊壁之崩落而危及公路之安全，道路受大暴浪越波拍打或因邊坡流失而封閉之事件屢屢發生，嚴重影響東部之發展。再者東部海岸公路亦有部份路段如臺 11 線之大武漁港段，因為嚴重之侵蝕問題，造成海側路界持續內縮，對公路之穩定亦產生嚴重威脅。此些不同破壞型態與機制皆有需要加以探討研究，由於東部海岸長達數百公里，加上沿線海岸公路綿長，本計畫調查及收集國內各海岸公路的特性並分類整理，以及針對幾處曾經發生的破壞案例或有安全威脅之路段進行破壞機制檢討。收集國外有關海岸公路監測及防護作業準則與保護工法，並研擬適合國內海岸公路特性的相關作業準則。

## 1.4 過去研究成果與未來工作項目

98 年度已經完成：

### 1. 長波抗浪型：

材料阻尼式方面：收集適用於海洋環境下的消能材料，製造不同材質的消能結構物，分別進行相同位移控制下的疲勞試驗，以取得不同材質所對應的外力位移曲線。並進一步計算消能結構物所吸收應變能，藉由分析來確定最佳的消能材料。

水力式阻尼方面：以水工斷面模型試驗及 FLOW-3D 數值軟體，規劃不同的斷面進行模型試驗與數值模擬，以瞭解水力阻尼式機構可能遭遇的問題與特性，其消能能力與在實際應用時所面臨之問題及可解決的方法。已獲具初步的雛形與成果。

### 2. 功能目的使用型或臨時性設施型：

完成翼版型柔性浮式結構物理論解析之基本構架，探討與改進其穩定與消能能力，同時對在浮體下方之兩薄板則首先假設其為剛性固

體，探討薄板長度、間距對規則波消能特性之影響;另外，並探討浮體之運動與繫留索之受力，比較中發現單翼版可能造成浮體的不穩定，雙翼版可以增加浮體運動的附加質量，三翼版則無多大助益。

### **3. 環境保護型：**

數值模擬及水工模型試驗檢討波浪為正向入射通過直立堤前潛式多孔隙透水結構物的情形，探討潛式多孔隙透水結構物對波浪水理特性的影響。

而後續 100 至 101 等兩個年度主要研究工作分述如下：

100 年度：

#### **1. 長波抗浪型：**

考量港內與港外波動特性的不同，除持續研討水力式阻尼之長波抗浪型碼頭結構物外，也以數值模式與水工模型試驗方式，進行港外新型水力阻尼型消能式防波堤的開發與特性研究。

#### **2. 功能目的使用型或臨時性設施型：**

研究重點主要是利用前兩年所發展之波浪與柔性浮式結構物互制之數值模式，增加考慮流之效應，以探討波流交會情況下，柔性浮式結構物之運動與受力特性。

#### **3. 環境保護型設施：**

主要是參考前二年的研究成果，以水工模型試驗及數值模擬方式進行新型離岸式人工潛礁配置方案的研究，在研究中應考慮到形狀、堤寬及高度，並應思考其可能造成的水理特性變化。

#### **4. 海岸公路邊坡保護工法**

針對各種海岸公路破壞類型進行現有保護工法的檢討與研擬，同時進行相關的水工模型試驗以資驗證比較，並提出適當工法的建議檢討。

101 年度：

##### **1. 長波抗浪型：**

綜合前三年的研究成果，針對水力阻尼型之消波式防波堤及碼頭，從設計規範的角度，以水工模型試驗及數值模擬方式進行相關參數的研發，並提出相關的設計方法，包含設計條件的訂定，與力學分析的步驟。

##### **2. 功能目的使用型或臨時性設施型結構：**

本年度應從實際應用的角度，檢討浮體下方薄板使用不同材料所引致的浮體運動行為與消能特性，並檢討透水性薄版對波浪及水流之影響，同時針對實際應用時之最佳型式進行評估與檢討。

##### **3. 環境保護型設施研究：**

針對前述三年之研究成果綜合評估，持續以水工模型試驗及數值模擬的方式，檢討適合於實務應用之方案與配置，並研擬彙整規劃設計之相關參數資料或表格。

#### **4. 海岸公路邊坡保護工法**

依照國內特殊的海岸環境分區檢討各種海岸公路邊坡破壞類型的監測作業準則及保護工法，並以東部海岸公路為例進行專項研討與相關試驗，並提出適當工法。

## 第二章 長波抗浪型結構物

### 2.1 研究目的

目前對於港內長週期波動的處理方式，大致有：

1. 將長週期波動的能量利用港灣外廓設施的配置將其反射、導波、或消波於港外，以減少其侵入港內的能量比例。但由於長週期波的波長甚長，除非有足夠的作用距離，否則要在短距離內促使波浪的傳播方向改變或能量衰減都是相當困難的。
2. 對於已經入侵港內的長週期波能量設法提高碼頭岸壁的消波能力，以降低反射波的能量。現有的港灣設施對於短週期波可以充分發揮其消波效果，但是對長週期波則一籌莫展。

如果進一步分析碼頭附近的波動行為可以發現其間包含了至少兩種流體行為：碼頭岸壁的反射，以及波浪在斜坡上的溯升水流與溯降時的造波行為。因此，要消滅長週期波動的反射能量可能需要從這兩方面著手：

1. 減少碼頭壁面的反射功能，也就是儘量提高壁面透水性，讓波浪能量進入到碼頭結構物內部，並設法在裡面將波動能量消滅。避免大量反射波的能量與入射波能量結合造成複雜的水面波動。
2. 減少波浪溯升水流的回溯造波，也就是設法將溯升的水體透過某些機制將其排放，避免直接回溯至海水面形成二次造波。讓港域水面裡僅存在入射波的能量，如此將可以降低港灣共振的機會。

而對於防波堤抵抗長波的問題，則至目前為止仍是將其與一般的風浪視為一體，尚未有明確的定位。就防波堤抵抗波浪的機制而言，不外乎利用自體的強度與重量或者消波塊的輔助與波力相抗衡、或是

利用潛堤促使波浪提早碎波以削減波能、或是在防波堤上加裝翻水牆導引衝擊波轉向、或是利用防波堤上加設消波式胸牆以削減衝擊波壓。然而這些消減波能方式，有的是因為臺灣海岸地形的特殊，導致結構物或消波塊容易因基礎淘空而傾倒或流失，有的是因為長期受強大波力作用而引起結構物的材料或強度老化而破壞，有的則上述兩個原因都有，在在都顯示硬碰硬的抗浪方式，最終人工構造物還是要輸給大自然。因此，如何進一步利用材料或者型的特性，來削減強大波力，尤其是長浪，對結構物的作用，成為本計畫的研究課題之一。

本部分的第一年研究中即針對水力式阻尼結構物（主要是港內碼頭設施）進行相關探討，包含就所收集之消能式結構物，研討其消能機制、優缺點與可能遭遇的問題，研選可能之斷面進行水工斷面模型試驗，藉由不同的設計與試驗來瞭解水力阻尼式機構可能遭遇的問題與特性，以瞭解水力式阻尼結構之消能能力與在實際應用時所面臨之問題及可解決的方法。

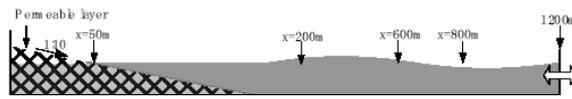
本年度首先將就目前所收集之消能式結構物以及第一年度所設計的內建斜坡越波消能式碼頭型式，研討其消能機制、優缺點與可能遭遇的問題，研選可能之斷面進行水工斷面模型試驗，藉由不同的設計與試驗來瞭解水力阻尼式機構可能遭遇的問題與特性，以瞭解水力式阻尼結構之消能能力與在實際應用時所面臨之問題及可解決的方法。在第一年度中所遭逢的消波室排水問題，將設法加以處理，以提升消波的效率。

為進一步考量在水工模型試驗中很難取得的堤前流場變化。本研究仍將持續引入 FLOW-3D 以數值模擬方式進行計算。在正式引用之前，將針對 FLOW-3D 是否適用於波場的模擬作深入的探討。

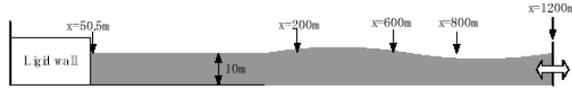
## 2.2 重要文獻回顧

長波抗浪型結構物主要是使用於港內水域的碼頭部分，目的是希

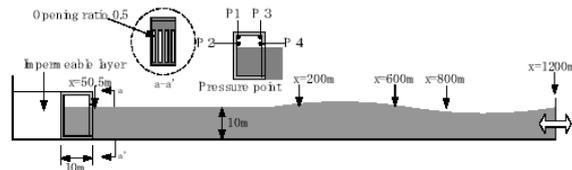




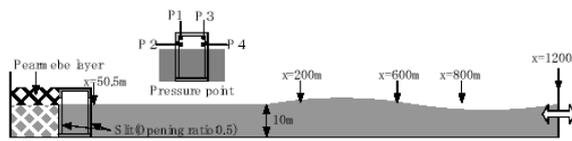
(1) Sandy beach



(2) Vertical wall

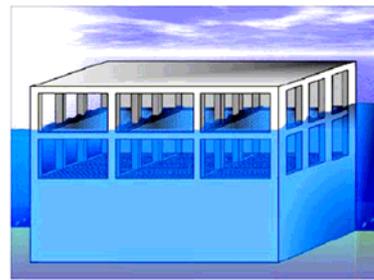


(3) Single side slit caisson wall

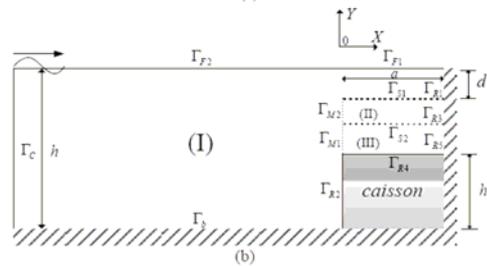


(4) Double side slit caisson wall

圖 2.2.2 長週期波消能結構物之數值造波水槽研究



(a)



(b)

Fig.1 Definition sketch (a) and integration domains (b)

圖 2.2.3 Kee 等[14]之數值模型定義圖

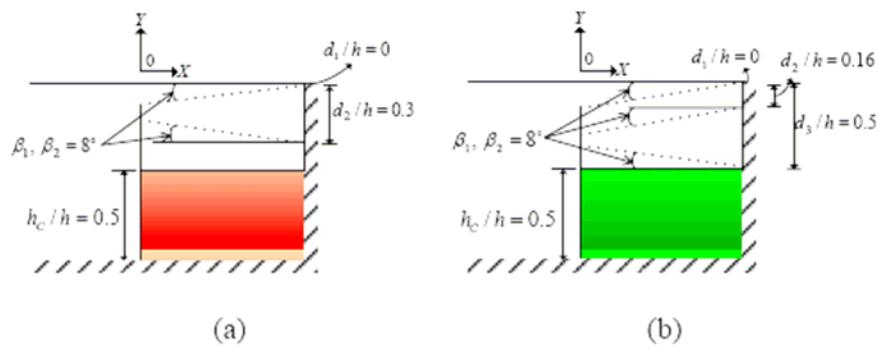


Fig. 12 Definition sketch of system with (a) two plates, (b) triple plates.

圖 2.2.4 Kee 等[14]測試之數值模型系統 (a) 雙平版；(b) 三平版

在利用數值模擬方法處理自由液面 (free surface) 之問題上，長久以來一直是相當棘手及困難的課題之一。Hirt and Nichols[12]首先提出 Volume-of-Fluid (VOF) 的概念很成功地解決了此項難題，隨後更據此於 1985 年發展出 FLOW-3D 計算流體動力分析系統之計算模擬套裝軟體。其解算技術於實務模擬及計算準確度上，皆受到使用者的肯定。特別是針對常見的金屬鑄造 (metal casting) 及海岸水力學等複雜之自由液面工程問題上，提供了更高信賴度、更高精度及更高效率的數值解析工具。

由於初步構想中之長波消能式結構物與波浪的溯升與越波相關，本計畫乃收集與整理相關的理論如下節所述。

### 2.3 波浪的溯升/溯降 (run up/run down) 理論

當入射波浪由外海向岸邊傳播時，由於地形逐漸由深變淺，波浪的行進可能發生淺化、折射及碎波；而如果行進中遭遇到島嶼或人工構造物如防波堤時，則會在結構物前方發生反射，而在後方發生繞射現象；當波浪遇到斜坡式的地形或海岸結構物 (如防波堤、海堤或護岸) 時，由於波浪會因為水深的變淺，波形將變陡，並因為波峰處水粒子速度逐漸增大，終至在斜坡表面上發生碎波，然後以水流型式沿

斜坡往上爬升，此一現象被稱為波浪的溯升 (wave run-up)，而最大爬升 (垂直) 高度稱為溯升高度  $R_u$ ，如圖 2.3.1 所示。其後水體將再度回落到水面，此一現象被稱為波浪的溯降 (wave run-down)，其最大下降深度稱為溯降深度  $R_d$ ，而爬落幅度  $R_{ud} = (R_u - R_d)$ 。在決定結構物出水高度 (靜水面至堤頂高的垂直距離) 或護坡鋪面防護範圍時，溯升高度與溯降深度是重要的參考因素。當溯降水流回落到水面上時，由於重力加速度的作用，將會因造波作用而發生反射波在堤前形成部分重複波系統。而如果波浪溯升高度大於結構物的頂高時，波浪將會越過堤頂而發生越波現象 (overtopping)。本節首先參考郭一羽教授編輯的海岸工程學[53]及美國陸軍工兵團編定的海岸工程手冊[3] (Coastal Engineering Manual, 簡稱 CEM) 整理相關的理論。

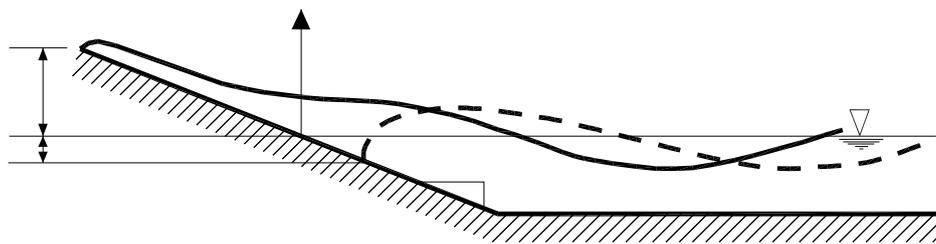


圖 2.3.1 波浪溯升/溯降示意圖

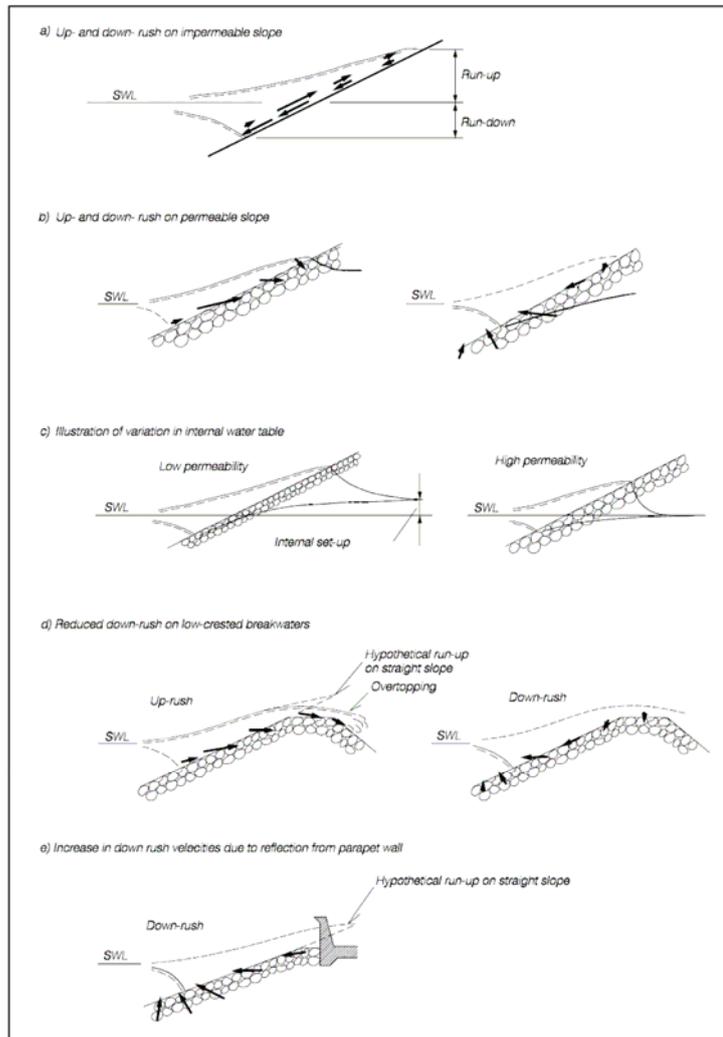


圖 2.3.2 波浪在不同的斜坡表面上的溯升與溯降示意圖  
(Burcharth, 1993, CEM) [2]

不同的斜坡特性會影響到波浪的溯升/溯降，圖 2.3.2 (a) 說明在不透水斜坡上當波浪作用過程中的水流向量變化情形。圖 2.3.2 (b) 說明如果斜坡具透水性時的變化情形。不論是水流的大小或方向對消波塊的安定性都有極重要的影響。一般而言，由於在靜水面附近或以下會發生臨界流場，使得下刷水流往往會產生最大的能使消波塊不安定的最大力量。不過，當坡度小於大約 1:3.5 時，由於上刷水流很弱，則不會發生上述情形。圖 2.3.2 (b) 中的流速向量也說明拋石防波堤會被重新塑形成 S-曲線的原因。

增加斜坡的透水性可以降低沿著波面的水流速度，因為會有大量的水體進入到結構物內部，進而減低溯升的高度。如圖 2.3.2(c) 所示，波浪在斜坡上溯升的行為會使得透水堤體內部水位上升，並引致平均孔隙水壓的上升。堤內自由水面將會持續上升到出流量等於入流量。而當結構物的透水性愈低，溯升高度就愈高。

增加結構物的孔隙率可以降低越波的流速，因為可以有大量的入射水體被留存在堤體的孔隙中，也降低了使得消波塊不穩定的力量。不過此一正面的貯留效應會因為內部水位的抬升而降低。

對於防波堤的堤頂低於溯升高度時，雖然和不越波斜坡相比，其溯升速度幾乎不變，但是由於部分入射波浪的越波而使得溯降的速度明顯降低，如圖 2.3.2(d) 所示。越波量愈大，溯降的流速和作用在消波塊的流體力就愈小，可提升消波塊的穩定性。如圖 2.3.2(e) 所示的胸牆將會因為截斷了溯升水流的路徑，將會提升溯降的流速而因此增加作用在消波塊上的流體力，使其更不穩定。

### 2.3.1 碎波相似參數 (Surf-Similarity Parameter; Iribarren Number)

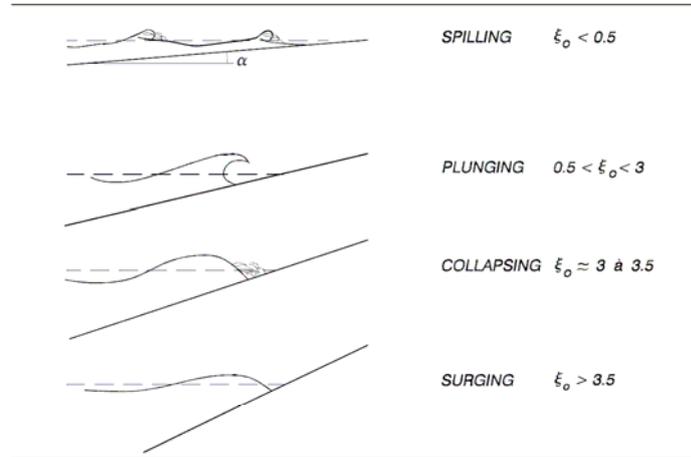
波浪在結構物上的溯升與溯降與波浪的碎波型式有關係。碎波的型式可以用碎波相似參數 (Surf-Similarity Parameter, Battjes 1974b)  $\xi$  來區分。該參數也被稱為碎波參數 (Breaker Parameter or Iribarren Number)。原始的碎波相似參數是以規則波定義的

$$\xi_o = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_o}} \dots\dots\dots(2.3.1)$$

其中， $\alpha$  是坡度角； $s_o = H_o/L_o$  是深水波的波形尖銳度； $H_o$  是深水波波高； $L_o$  是深水波波長； $T$  是波浪週期； $g$  是重力加速度。

在碎波點處的波高  $H_b$  有時會被用來取代  $H_o$ ，此時該參數表示為  $\xi_b$ 。表 2.3-1 顯示碎波型式和相關的  $\xi_o$  值範圍。各個不同碎波型式中的轉換介面乃是個近似值。

表 2.3.1 不透水斜坡上的碎波型式與相關的  $\xi_0$  值 (CEM)



對於不規則波，碎波相似參數可定義為：

$$\xi_{om} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{om}}} \quad \text{or} \quad \xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{op}}} \dots\dots\dots(2.3.2)$$

$$\text{其中，} s_{om} = \frac{H_s}{L_{om}} = \frac{2\pi}{g} \frac{H_s}{T_m^2} ; \quad s_{op} = \frac{H_s}{L_{op}} = \frac{2\pi}{g} \frac{H_s}{T_p^2}$$

且  $H_s$  為堤趾處的入射示性波高， $T_m$  為平均週期， $T_p$  為譜峰週期。必須提醒的是， $s_{om}$  及  $s_{op}$  都是虛構的波形尖銳度，因為它們是結構物上的統計波高與深水代表波長的比值。

### 2.3.2 波浪的溯升/溯降

影響波浪溯升的因素相當多，包含了入射波浪特性（波高及波形尖銳度、入射方向以及其與反射波的交互作用）、水深、結構物前的海床坡度及結構物的堤面坡度、形狀粗糙度、透水性與孔隙率等。

在給定的波浪條件及斜坡坡度狀況下，最大的流速及最大  $R_u$  及  $R_d$  值將發生在無透水性的平滑斜坡上。當波浪不發生碎波，且不考慮堤面或底床摩擦時，較陡的堤面會發生波浪完全反射，故在直立堤之情況  $R_u = H$ ， $H = 2a$  為入射波高， $a$  為振幅。

我們可以依不同的溯升特性將溯升問題分類為非透水性斜坡與透水性斜坡。非透水性斜坡一般出現在海堤、護坡和防波堤，它們是在細粒料堤心物質上鋪設不透水的表面（如瀝青或混凝土表面）或粗糙表面（如拋石或混凝土塊）透水性斜坡則主要是指擁有第二層保護層、濾層及卵石堤心的拋石結構物。

### 1. 波浪在不透水斜坡上的溯升與溯降

不規則波在不透水斜坡上的溯升 Battjes (1974) 以下列型式表示

$$\frac{R_{ui\%}}{H_s} = (A\xi + C)\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta \dots\dots\dots(2.3.3)$$

其中， $R_{ui\%}$  = 超越  $i\%$  入射波個數的溯升高度； $\xi$  = 碎波相似參數 ( $\xi_{om}$  或  $\xi_{op}$ )； $A, C$  = 在滿足 Rayleigh 波高分佈的長峰正向波作用在光滑直線不透水斜坡上的溯升中，與  $\xi$  及  $i$  有關的係數； $\gamma_r$  = 受表面粗糙度影響的減衰係數（在光滑表面上， $\gamma_r = 1$ ）； $\gamma_b$  = 受台階影響的減衰係數（沒有台階的情形， $\gamma_b = 1$ ）； $\gamma_h$  = 受淺水區域波高不在是 Rayleigh 分佈影響的減衰係數（Rayleigh 分佈時， $\gamma_h = 1$ ）； $\gamma_\beta$  = 受波浪入射角影響的減衰係數（當正向長峰波入射時， $\gamma_\beta = 1$  即  $\beta = 0^\circ$ ）。在短峰波入射時，方向分佈的影響也應該涵蓋在本係數中。

#### (1) 不規則長峰波在平緩不透水斜坡上之溯升

Van Oorschot and d'Angremond (1968) 測試了斜坡坡度為 1:4 及 1:6，且  $\xi_{op} < 1.2$  時的條件。Ahrens (1981a) 調查了坡度為 1:1 及 1:4，且  $\xi_{op} > 1.2$  的條件。圖 2.3.3 顯示測試結果的分佈範圍及  $R_{u2\%}$  的近似公式，如式 (2.3.3) 所示。大部分應是因為對  $\xi_{op} > 1.2$  的試驗條件之波浪數只大約 100-200 個波，變化量 (coefficient of variation)  $\sigma_{R_u}/R_u$  大約在 0.15 左右。圖 2.3.4 顯示的示性溯升高程  $R_{us} = R_{u33\%}$  並不包含  $\xi_{op} < 1.2$  的資料。變化量  $\sigma_{R_u}/R_u$  大約在 0.1 左右。參數  $A$  及  $C$ ，以及  $R_u$  的變化參數推估值如表 2.3-2 所示。值得注意的是，由 Allsop

et al. (1985) 所提供的資料顯示溯升高程明顯地小於此處所提供的值。

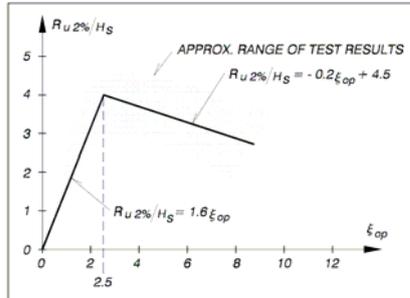


圖 2.3.3 光滑斜坡上之正向入射波的  $R_{u2\%}$  (CEM)

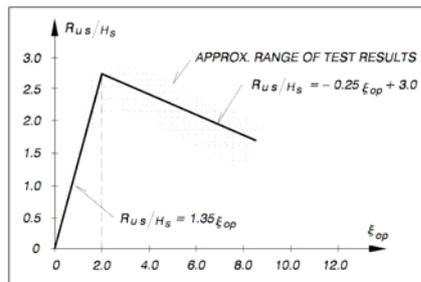


圖 2.3.4 光滑斜坡上之正向入射波的  $R_{us}$  (CEM)

表 2.3.2 式 (2.3.3) 的相關係數

$\xi$	$R_u$	$\xi$ -Limits	A	C	$\sigma_{Ru} / R_u$
$\xi_{op}$	$R_{u2\text{ percent}}$	$\xi_p \leq 2.5$	1.6	0	$\approx 0.15$
		$2.5 < \xi_p < 9$	-0.2	4.5	
$\xi_{op}$	$R_{us}$	$\xi_p \leq 2.0$	1.35	0	$\approx 0.10$
		$2.0 < \xi_p < 9$	-0.15	3.0	

至目前為止，只有很少的試驗在討論波浪的溯降。對於平緩不透水底床上不規則長峰波作用下與  $R_{d2\%}$  有關的溯降可以下式估算

$$\frac{R_{d2\%}}{H_s} = \begin{cases} 0.33\xi_{op} & \text{for } 0 < \xi_{op} \leq 4 \\ -1.5 & \text{for } \xi_{op} > 4 \end{cases} \dots\dots\dots (2.3.4)$$

在 Rijkswaterstaat(1990) 編寫的 Dutch publication : *Slope Revetments of Placed Blocks* 中提出了以混凝土版鋪設的光滑斜面的溯降計算公式如下所示：

$$\frac{R_{d2\%}}{H_s} = 0.5\xi_{op} - 0.2 \dots\dots\dots(2.3.5)$$

另外，de Waal and van der Meer (1992) 也提出長峰波在光滑斜坡上的溯升資料（如圖 2.3.5 所示）。該資料涵蓋小比例尺（其坡度分別為 1:3, 1:4, 1:5 及 1:6），與大比例尺（1:3, 1:6 及 1:8）的水工模型試驗。對小比例尺試驗而言，碎波相似參數介於  $0.6 < \xi_{op} < 3.4$  之間，而大比例尺試驗，則介於  $0.6 < \xi_{op} < 2.5$ 。這些資料曾經被 de Waal and van der Meer (1992) 及 van der Meer and Janssen (1995) 用來評估由式 (2.3.3) 所定義的  $\gamma$  係數。由推導式 (2.3.3) 的參考資料所得到的平均關係表示如下式，及圖 2.3.5 中的實線。點線包含一較小的安全係數，而且此一關係被荷蘭的 Technical Advisory Committee on Water Defence 推薦作為設計參考。但根據相對於圖 2.3.5 較少的資料，有關式 (2.3.6) 的不確定性，de Waal and van der Meer (1992) 假設係數 1.5 是一個具正規分佈的隨機變數，並得到變化量為 0.085。

$$\frac{R_{d2\%}}{H_s} = \begin{cases} 1.5\xi_{op} & \text{for } 0.5 < \xi_{op} \leq 2 \\ -3.0 & \text{for } 2 < \xi_{op} < 3-4 \end{cases} \dots\dots\dots(2.3.6)$$

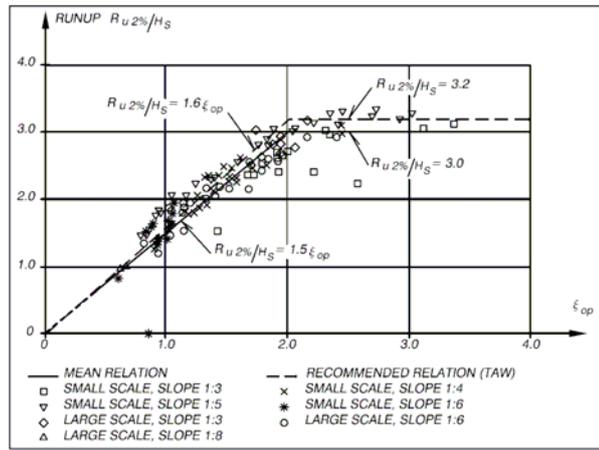


圖 2.3.5 正向長峰波在光滑斜坡上的溯升  $R_{u2\%}$  (CEM)

a. 表面粗糙度對溯升的影響

在荷蘭的出版品及舊版的美國陸軍工兵團海岸保護手冊中，原始的  $\gamma_r$  值已經用新的實驗資料（包含大尺度的不規則波試驗）更新過。這些係數提供在表 2.3-3 中。由 de Waal and van der Meer (1992) 所得到的新  $\gamma_r$  值適用於  $1 \leq \xi_{op} \leq 3 \sim 4$ 。對於較大的  $\xi_{op}$ ， $\gamma_r$  值將會漸增至 1。

表 2.3.3 式 (2.3.3) 中表面粗糙度減衰係數 (適用於  $1 \leq \xi_{op} \leq 3 \sim 4$ )

Type of Slope Surface			$\gamma_r$
Smooth, concrete, asphalt			1.0
Smooth block revetment			1.0
Grass (3 cm length)			0.90 - 1.0
1 layer of rock, diameter $D_r$ , ( $H_s/D_r = 1.5 - 3.0$ )			0.55 - 0.6
2 or more layers of rock, ( $H_s/D_r = 1.5 - 6.0$ )			0.50 - 0.55
Roughness elements on smooth surface (length parallel to waterline = $l$ , width = $b$ , height = $h$ )			
Quadratic blocks, $l = b$			
$h/b$	$b/H_s$	area coverage	
0.88	0.12 - 0.19	1/9	0.70 - 0.75
0.88	0.12 - 0.24	1/25	0.75 - 0.85
0.44	0.12 - 0.24	1/25	0.85 - 0.95
0.88	0.12 - 0.18	1/25 (above SWL)	0.85 - 0.95
0.18	0.55 - 1.10	1/4	0.75 - 0.85
Ribs			
1.00	0.12 - 0.19	1/7.5	0.60 - 0.70

b. 台階 (berm) 對溯升的影響

Delft Hydraulics 曾經執行一個試驗計畫來澄清一個水平或幾乎水平的台階對溯升的影響。圖 2.3.6 顯示測試的斷面及波浪條件。根據 de Waal and van der Meer (1992) 的研究，台階的影響可以參照式 (2.3.6) 以下列公式表示

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = \begin{cases} 1.5\xi_{op}\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta = 1.5\xi_{eq}\gamma_r\gamma_h\gamma_\beta & \text{for } 0.5 < \xi_{eq} \leq 2 \\ -3.0\gamma_r\gamma_h\gamma_\beta & \text{for } \xi_{eq} > 2 \end{cases} \dots\dots\dots(2.3.7)$$

其中， $\xi_{eq}$  是根據一等值坡度 (參考圖 2.3.7) 計算的碎波時的碎波相似參數。

台階的影響係數  $\gamma_b$  定義如下

$$\gamma_b = \frac{\xi_{eq}}{\xi_{op}} = 1 - \gamma_B(1 - \gamma_{dB}), \quad 0.6 \leq \gamma_b \leq 1.0 \dots\dots\dots(2.3.8)$$

其中，

$$\gamma_B = 1 - \frac{\tan \alpha_{eq}}{\tan \alpha} \text{ 及 } \gamma_{dB} = 0.5 \left( \frac{d_B}{H_s} \right)^2, \quad 0 \leq \gamma_{dB} \leq 1 \dots\dots\dots(2.3.9)$$

而等值平衡坡度角  $\alpha_{eq}$  及平均坡度角  $\alpha$  定義如圖 2.3.7 所示。當台階的水平表面設置低於在靜水面以下  $H_s\sqrt{2}$  時，台階的影響可以忽略。而如果高於靜水面以上  $d_B = H_s\sqrt{2}$ ， $B/H_s \geq 2$  的話，則溯升可以設為  $R_{u2\%} = d_B$ 。最具影響的台階是設在靜水面上，即  $d_B = 0$ 。一個寬度為 B 的最佳台階 ( $\gamma_b = 0.6$ ) 可以從式 (2.3.8) 及 (2.3.9) 計算而得。在式 (2.3.7) 中的  $\xi_{eq}$  的選用是由圖 2.3.6 中所給的條件下試驗所得的圖 2.3.8 來評估，其中令  $\gamma_r = \gamma_h = \gamma_\beta = 1$ 。

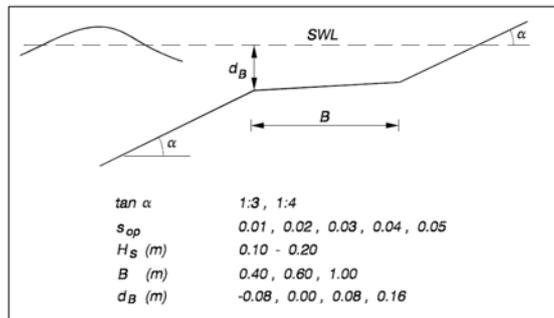


圖 2.3.6 Delft Hydraulic 進行台階試驗的相關參數 (CEM)

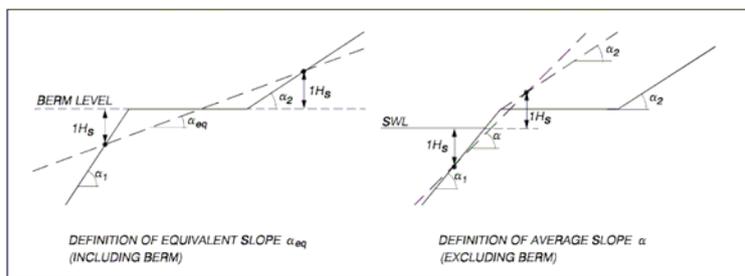


圖 2.3.7 式 (2.3.9) 中有關  $\alpha_{eq}$  及  $\alpha$  的定義 (CEM)

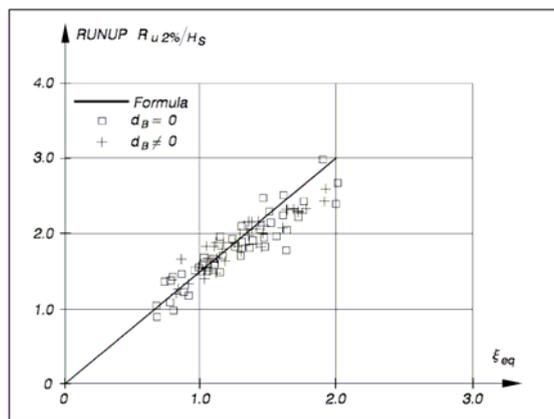


圖 2.3.8 根據台階對溯升高度影響度對  $\xi_{eq}$  選用值的評估 (CEM)

c. 淺水域對溯升的影響

在式 (2.3.7) 中使用的波高是  $H_s$ ，它可對深水波條件且波高滿足 Rayleigh 分佈提供一個唯一的定義。然而在淺水域中，有一些波浪會在到達結構物前就已發生碎波，使得波高不再是 Rayleigh 分佈。根據 de Waal and van der Meer (1992) 的研究，影響係數可以下式估算

$$\gamma_h = \frac{H_{2\%}}{1.4H_s} \dots\dots\dots(2.3.10)$$

其中，示性波高是設定在結構物的堤趾處水深的波高（對 Rayleigh 分佈的波高而言， $H_{2\%} / H_s = 1.4$ ）

d. 波浪入射角對溯升的影響

不論是入射波的角度和波浪的方向分散情形都會影響到溯升。根據 Delft Hydraulics 有關光滑斜坡上的溯升試驗，如圖 2.3.9 所示的試驗條件，顯示影響係數  $\gamma_\beta$  的變化可以表示如式 (2.3.11) 及圖 2.3.10 所示。值得一提的是，界於  $10^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$  的長峰波， $\gamma_\beta$  值會大於 1；而短峰波也會在  $\beta$  接近  $50^\circ$  時， $\gamma_\beta$  值會接近於 1。根據試驗的結果，可以得到下列  $\gamma_\beta$  平均值的公式

長峰波（主要是湧浪）：

$$\gamma_\beta = \begin{cases} 1.0 & \text{for } 0^\circ \leq \beta \leq 10^\circ \\ \cos(\beta - 10^\circ) & \text{for } 10^\circ \leq \beta \leq 63^\circ \\ 0.6 & \text{for } \beta > 63^\circ \end{cases} \dots\dots\dots(2.3.11)$$

短峰波： $\gamma_\beta = 1 - 0.0022\beta$

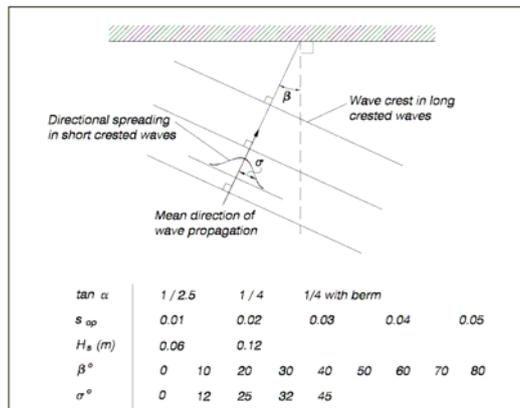


圖 2.3.9 Delft Hydraulic 所進行之光滑斜坡之波浪溯升試驗 (CEM)

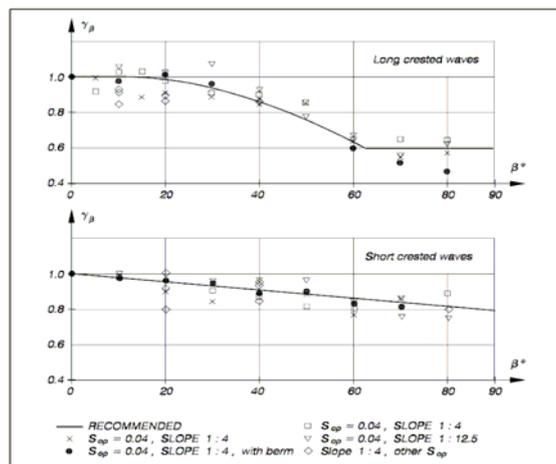


圖 2.3.10 波浪入射角與方向分佈性對溯升高度的影響 (CEM)

(2) 塊石保護斜坡上不規則長波的溯升

表 2.3-4 為 Delft Hydraulics 有關塊石保護的透水/不透水斜坡上的溯升高度研究的測試條件。表 2.3-4 中的堤心透水性的詳細說明可參考圖 2.3.11 的 a, c 及 d (van der Meer, 1988)。該圖提供的標示透水性參數曾被 van der Meer 用在許多不同的考慮透水性對波浪作用力的影響的公式中。圖 2.3.11(b) 中的  $P = 0.4$  並非從試驗中得來，而是一個估計值。圖 2.3.12 顯示依據表 2.3-4 試驗條件所得的溯升

結果。圖中  $\xi_{om} = \tan \alpha / (2\pi H_s / gT_{om}^2)^{1/2}$ ，其中  $T_{om}$  為波浪平均週期用來取代  $\xi_{op}$ 。如果用  $T_{om}$  來取代  $T_{op}$ ，則可以考慮頻譜寬度的變化。對於 JONSWAP 頻譜， $T_{om}/T_{op} = \xi_{om}/\xi_{op} = 0.79 \sim 0.87$ ；對於 P-M 頻譜， $T_{om}/T_{op} = \xi_{om}/\xi_{op} = 0.71 \sim 0.82$ 。

對於不透水岩性斜坡試驗資料的近似公式如下（Delft Hydraulics，1989）

$$\frac{R_{ui}\%}{H_s} = \begin{cases} A\xi_{om} & \text{for } 1.0 < \xi_{om} \leq 1.5 \\ -B\xi_{om}^C & \text{for } \xi_{om} > 1.5 \end{cases} \dots\dots\dots(2.3.12)$$

表 2.3.4 Delft Hydraulics 對透水/不透水斜坡上的溯升研究測試條件 (CEM)

Slope Angle cot $\alpha$	Grading $D_{10}/D_{15}$	Spectral Shape	Core Permeability	Relative Mass Density	Number of Tests	Range $H_s/4D_{10}$	Range $\xi_{om}$
2	2.25	PM	none	1.63	1.9e+31	0.8-1.6	0.005-0.016
3	2.25	PM	none	1.63		1.2-2.3	0.006-0.024
4	2.25	PM	none	1.63		1.2-3.3	0.005-0.059
6	2.25	PM	none	1.63		1.2-4.4	0.004-0.063
3 <sup>1</sup>	1.25	PM	none	1.62		1.4-2.9	0.006-0.038
4	1.25	PM	none	1.62		1.2-3.4	0.005-0.059
3	2.25	narrow	none	1.63		1.0-2.8	0.004-0.054
3	2.25	wide	none	1.63		1.0-2.4	0.004-0.043
3 <sup>1</sup>	1.25	PM	permeable	1.62		1.6-3.2	0.008-0.060
2	1.25	PM	permeable	1.62		1.5-2.8	0.007-0.056
1.5	1.25	PM	permeable	1.62		1.5-2.6	0.008-0.050
2	1.25	PM	homogeneous	1.62		1.8-3.2	0.008-0.059
2	1.25	PM	permeable	0.95		1.7-2.7	0.016-0.037
2	1.25	PM	permeable	2.05		1.6-2.5	0.014-0.032
2 <sup>2</sup>	1.25	PM	permeable	1.62		1.6-2.5	0.014-0.031
2 <sup>3</sup>	1.25	PM	permeable	1.62		1.4-5.9	0.010-0.046

PM Pierson Moskowitz spectrum  
Some tests repeated in Delta Flume

<sup>2</sup> Foreshore 1:30  
<sup>3</sup> Low-crested structure with foreshore 1:30

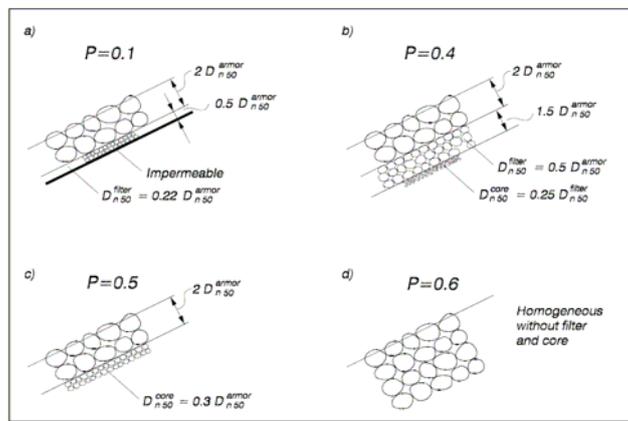


圖 2.3.11 標示透水參數 (CEM)

公式中的係數 A, B 及 C 可參考表 2.3-5。對於不透水性斜坡 A、B 及 C 的變化量為 7%。由 Ahrens and Heinbaugh (1988a) 所提供不透水亂拋斜坡的最大溯升高度於式 (2.3.12) 相符。式 (2.3.12) 也可應用於結構物前的相對深水域，波高滿足 Rayleigh 分佈的情形。波浪在前灘碎波時將會截斷溯升的分佈，而大多得到低超越機率的較低溯升高度。不過，根據 Delft Hydraulics 的試驗及 Texas A&M University 的試驗，有時候也會發生較高的溯升高度。

## 2. 波浪在透水斜坡上的溯升與溯降

有關溯升的討論中，透水性結構物是定義為一個具有透水性堤心材料的結構物，堤體內波浪引致的孔隙水流及地下水水位面會隨著波浪的頻率而變化。結構孔隙的儲存量會使得最大溯升高度將低於具有不透水堤心的相同結構物。

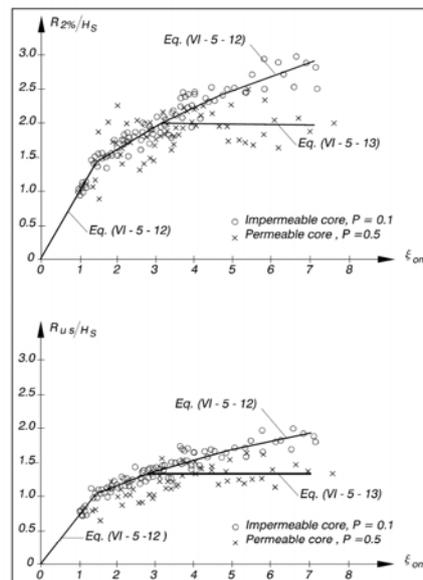


圖 2.3.12 不規則正向波在不透水/透水岩石斜坡上 2%及示性溯升高度 (CEM)

(1) 不規則長峰波作用於岩石護坡的情形

Delft Hydraulics 曾在如表 2.3-4 的模型試驗中，測試不規則正向波在如圖 2.3.11 (c) 所示岩石保護的透水性斜坡 ( $P = 0.5$ ) 的溯升情形，結果顯示如圖 2.3.12 所示，相關的近似公式如下所示

$$R_{ui\%}/H_s = \begin{cases} A\xi_{om} & \text{for } 1.0 < \xi_{om} \leq 1.5 \\ B(\xi_{om})^C & \text{for } 1.5 < \xi_{om} \leq (D/B)^{1/C} \dots\dots\dots(2.3.13) \\ D & \text{for } (D/B)^{1/C} < \xi_{om} < 7.5 \end{cases}$$

係數說明如表 2.3-5 所示。對於透水性結構物而言， $A$ ,  $B$ ,  $C$  and  $D$  的變化量為 12%。有關如圖 2.3.11(d) 所示均勻岩石結構 ( $P = 0.6$ ) 的結果與圖 2.3.11 (c) 結果類似。式 (2.3.13) 亦可用於波高分佈趨近於 Rayleigh 分佈的相對深水域中。由於水深限制導致波浪在堤前碎波會截斷波浪溯升的分佈而導致低超越機率的小溯升高度。不過根據 Delft Hydraulics 的試驗 (van der Meer and Stam, 1992) 仍然可能發生較高的溯升高度。表 2.3-4 的模型試驗測試了淺水域中透水性岩石護坡的溯升高度，但是其結果與式 (2.3.13) 沒有明顯的差異。

**表 2.3.5 不規則正向波在不透水/透水岩石斜坡上之相關係數值 (CEM)**

Percent <sup>1</sup>	A	B	C	D <sup>2</sup>
0.1	1.12	1.34	0.55	2.58
2.0	0.96	1.17	0.46	1.97
5	0.86	1.05	0.44	1.68
10	0.77	0.94	0.42	1.45
(significant)	0.72	0.88	0.41	1.35
50 (mean)	0.47	0.60	0.34	0.82

<sup>1</sup> Exceedence level related to number of waves  
<sup>2</sup> Only relevant for permeable slopes

(2) 溯升的統計分佈

有關波高近似 Rayleigh 分佈的波浪在坡度  $\tan \alpha \geq 2$  的透水性岩石鋪面斜坡上的溯升，van der Meer and Stam (1992) 提出最佳擬合的雙參數 Weibull 分佈：

$$\text{Prob}(R_u > R_{up\%}) = \exp\left[-\left(\frac{R_{up\%}}{B}\right)^C\right] \text{ 或} \dots\dots\dots(2.3.14)$$

$$R_{up\%} = B(-\ln p)^{1/C} \dots\dots\dots(2.3.15)$$

其中， $R_{up\%}$  = 波浪發生  $P\%$  溯升機率的溯升高度

$$B = H_s \left[0.4(s_{om})^{-1/4} (\cot \alpha)^{-0.2}\right] \dots\dots\dots(2.3.16)$$

$$C = \begin{cases} 3.0\xi_{om}^{-3/4} & \text{for } \xi_{om} \leq \xi_{omc} \text{ (plunging waves)} \\ -0.52P^{-0.3}\xi_{om}^P \sqrt{\cot \alpha} & \text{for } \xi_{om} > \xi_{omc} \text{ (surging waves)} \end{cases} \dots\dots(2.3.17)$$

$$\xi_{om} = (5.77P^{0.3} \sqrt{\tan \alpha})^{1/(P+0.75)} \dots\dots\dots(2.3.18)$$

$$s_{om} = \frac{2\pi H_s}{gT_{om}^2}, \quad P = \text{標示透水率}$$

當  $P = 0.37$  時， $\ln p = -1$ 。因此從式 (2.3.15) 可得比例參數  $B$  等於  $R_{u_{37\%}}$ 。若形狀參數等於 2 的話，式 (2.3.14) 將成為 Rayleigh 分佈。有關比例參數  $B$  的不確定性，當  $P < 0.4$  時，其變化量為 6%，而當  $P \geq 0.4$  時，其變化量為 9%。

根據 Delft Hydraulics 的試驗（如表 2.3-4 所列試驗條件）顯示在岩石斜坡上的溯降可以得到以下包含結構透水性影響  $P$  的公式（參考圖 2.3.11）。

$$\frac{R_{d2\%}}{H_s} = 2.1\sqrt{\tan \alpha} - 1.2P^{0.15} + 1.5e^{-60s_{om}} \dots\dots\dots(2.3.19)$$

## 2.4 水力阻尼式消能碼頭的水工模型試驗

水力式消能斜坡碼頭結構物之特性研究構想主要是利用港灣結構物的形狀與緩衝區的規劃，促成多種型式的水理運動間的交互作用，並形成阻尼除了消耗入射波的能量外，也降低反射波的發生機會，以達到消滅港內長波能量的功能。也就是藉由內設的斜坡令入射的波浪

沿斜坡溯上，除可由表面的粗糙度及孔隙率消減波能，也促使發生越波，以降低溯降水流二次造波的機會，如此可以減低反射波的發生。而越波後的水體則利用後設的消波室消減其震盪能量，其後藉由多孔隙介質由碼頭的下部結構排水。因此，本研究中所考慮的機構包含有溯上斜坡、孔隙介質與消波室等影響參數，為了瞭解其間的特性，本研究針對此三種影響參數，進行水工模型試驗，以便能掌握水力式消能斜坡碼頭結構物特性。其終極目標是希望能研選適當的新型水力阻尼性碼頭結構物，並提出其設計的步驟與準則，以及未來維護上應注意的事項。

#### 2.4.1 常時波浪的水工模型試驗（初期測試）

為了瞭解斜坡式消能結構物各項機構的功能，本計畫於第一年度以逐步試驗並改善所發現問題的方式，先後進行下列水工模型試驗

1. 空水槽試驗：以瞭解斷面造波水槽的功能，以及為量測反射率而設置的波高計位置的適當性。
2. 方案一：如圖 2.4.1 (a) 及照片 2.4.1 所示的布置，為斜坡式消能結構物的基本構造。
3. 方案二：如圖 2.4.1 (b) 所示，考慮前方開孔部的比例，將其減少 50%。
4. 方案三：如圖 2.4.1 (c) 所示，考慮消波室的排水問題，以方案二為基礎，在後方開孔排水。

模型的長寬高如圖 2.4.1 (c) 方案三中所示，詳細尺寸如圖 2.5.4 所示。所有的試驗是以 1/25 的比例縮尺，在海洋大學海洋工程館的小斷面水槽（50 公尺長、80 公分寬，如照片 2.4.2）中進行水工模型試驗（造波水深 37 公分，造波週期分別為 1.0、1.4、1.8 及 2.2 秒，造波波高 1 至 4 公分，各條件重複 3 次）。設置的波高計除了一支量測入射波以外，另設置三支波高計以便量測反射率，波高計的設置距離主要係參考 Goda 兩點法求反射率的建議。表 2.4-1 中整理了空水槽各次測試

的反射率，從試驗結果可看到，由於斷面水槽的側壁及底床無法完全保持平行且光滑，使得波動在傳播過程中仍會有些微的能量損失，而且由於用來求反射率的波高計的設置位置雖然符合 Goda 的兩點法求反射率的規定，但仍因波長與結構物的對應關係而有其不確定因素存在，藉由空水槽中的反射率應該趨近於 0 的基礎，本計畫表 2.4-1 中各個造波條件的三次造波的平均反射率進行比對，並以反射率最小的一組波高計配對作為後續各個造波條件選擇適當波高計的配對的反射率做為代表值。各造波條件的最佳配對以陰影顯示於表 2.4-1 中。表 2.4-2 至表 2.4-4 分別為三個方案的反射率試驗結果，同樣地代表性的反射率亦以陰影標示。表中顯示以大約 10 個量測波高所求得反射率的平均值(mean)與標準偏差(std)。

從試驗的結果可以看到，三種配置都能夠得到很好的消波效果，所有測試條件所產生的反射率多在 0.25 以下，顯示利用斜坡越波的方式降低堤面的反射率，以及削減溯上水流的溯下造波可能性是有效的。不過從試驗中也發現消波室的排水問題明顯影響到其消波功能，如圖 2.4.6 所示，原設計的構想是藉由內建斜坡促使波浪溯上越波不致產生溯下造波，降低波浪反射率，而越波後的殘流水體則藉由下部多孔隙拋石體藉由內外的水位差將多餘水體以水流排出結構物，並藉以擾動入射波運動。但從試驗中發現，下部多孔隙壁體也會使得波壓及水粒子運動透入結構體，而產生由下向上的水流，造成消波室的水位抬升，以及蕩漾，並進行影響到波浪的溯上越波，甚至產生逆向溯下水流。不過此一現象當在增加後側局部排水時則有改善情形。未來必須設法解決溯上越波後的排水情形，以免造成消波室內的水體堆積。增加內建斜坡的消能功能（例如增加粗糙度）以及透水功能（例如增加透水性），以及增加側向排水或後側排水均可明顯改善消波室內水體堆積的問題，並提高其消波功能。

由於本項試驗主要在確認及驗證研究的方向，並瞭解此類防波堤的消波機制，大致由下列幾項：

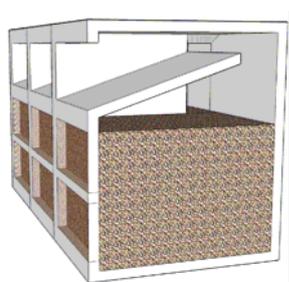
(1)越波排水的方式

(2)斜坡的透水性

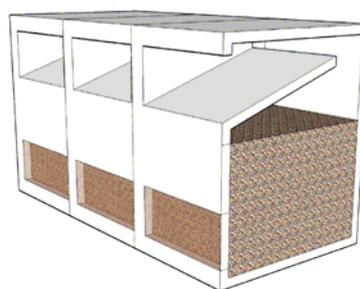
(3)斜坡的坡度

(4)堤內拋石的孔隙率與透水性

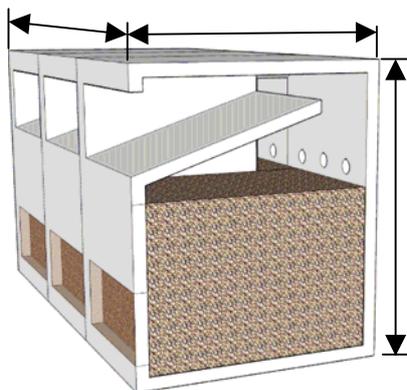
(5)暴潮水位與不同波高



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

圖 2.4.1 內建斜坡式消能結構物的三種方案



照片 2.4.1 內建斜坡式消能結構物實體模型



照片 2.4.2 試驗斷面水槽全景

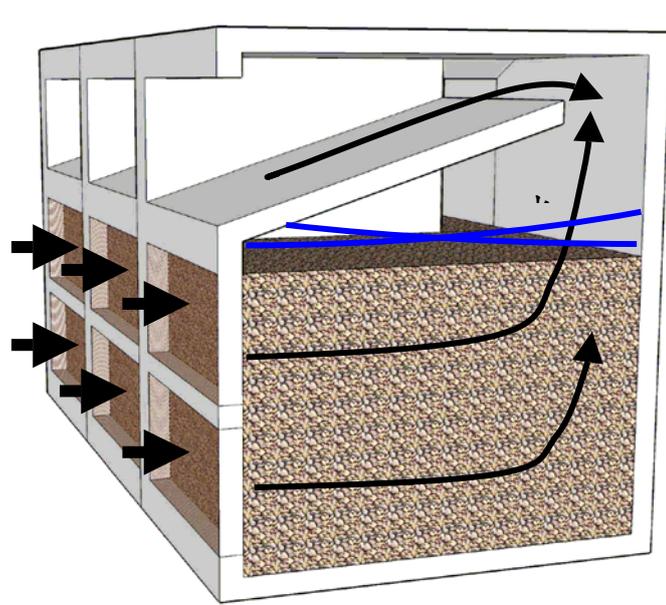


圖 2.4.2 內建斜坡式消能結構物的波動與水流現象

表 2.4.1 空水槽造波測試的三次反射率分析結果

波高計配對		ch2-ch3		ch2-ch4		ch3-ch4		所有平均值	
週期 (sec)	波高 (cm)	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
1.0	1	0.0213	0.0066	0.0795	0.0146	0.0415	0.0092	0.0474	0.0101
		0.0227	0.0068	0.0887	0.0130	0.0510	0.0088	0.0542	0.0095
		0.0188	0.0074	0.0984	0.0201	0.0679	0.0141	0.0617	0.0139
1.0	2	0.0354	0.0085	0.0979	0.0110	0.0404	0.0043	0.0579	0.0079
		0.0185	0.0057	0.0829	0.0127	0.0466	0.0058	0.0494	0.0081
		0.0187	0.0047	0.0761	0.0091	0.0407	0.0051	0.0451	0.0063
1.0	3	0.0208	0.0035	0.0769	0.0057	0.0376	0.0028	0.0451	0.0040
		0.0243	0.0040	0.0777	0.0063	0.0339	0.0031	0.0453	0.0045
		0.0184	0.0038	0.0726	0.0072	0.0363	0.0039	0.0424	0.0050
1.0	4	0.0172	0.0058	0.0758	0.0115	0.0413	0.0047	0.0448	0.0073
		0.0292	0.0048	0.0875	0.0072	0.0387	0.0030	0.0518	0.0050
		0.0284	0.0035	0.0839	0.0044	0.0357	0.0024	0.0493	0.0035
1.4	1	0.0425	0.0214	0.0444	0.0148	0.0265	0.0096	0.0378	0.0153
		0.0309	0.0135	0.0276	0.0100	0.0133	0.0036	0.0239	0.0090
		0.0363	0.0129	0.0386	0.0061	0.0232	0.0045	0.0327	0.0078
1.4	2	0.0194	0.0047	0.0290	0.0057	0.0253	0.0073	0.0246	0.0059
		0.0303	0.0134	0.0411	0.0144	0.0361	0.0116	0.0358	0.0131
		0.0295	0.0064	0.0405	0.0061	0.0308	0.0059	0.0336	0.0061
1.4	3	0.0294	0.0139	0.0397	0.0137	0.0299	0.0085	0.0330	0.0120
		0.0227	0.0044	0.0354	0.0061	0.0310	0.0076	0.0297	0.0061
		0.0282	0.0130	0.0391	0.0139	0.0296	0.0097	0.0323	0.0122
1.4	4	0.0286	0.0119	0.0400	0.0114	0.0316	0.0072	0.0334	0.0102
		0.0269	0.0102	0.0385	0.0097	0.0310	0.0059	0.0321	0.0086
		0.0217	0.0041	0.0357	0.0053	0.0322	0.0059	0.0299	0.0051
1.8	1	0.0357	0.0206	0.0359	0.0118	0.0290	0.0045	0.0335	0.0123
		0.0334	0.0166	0.0373	0.0144	0.0352	0.0124	0.0353	0.0144
		0.0341	0.0126	0.0324	0.0092	0.0265	0.0060	0.0310	0.0093
1.8	2	0.0147	0.0037	0.0191	0.0031	0.0202	0.0051	0.0180	0.0039
		0.0220	0.0047	0.0261	0.0040	0.0239	0.0087	0.0240	0.0058
		0.0227	0.0058	0.0271	0.0040	0.0241	0.0069	0.0246	0.0056
1.8	3	0.0200	0.0040	0.0254	0.0079	0.0242	0.0107	0.0232	0.0075
		0.0205	0.0033	0.0254	0.0069	0.0236	0.0093	0.0232	0.0065
		0.0218	0.0041	0.0255	0.0065	0.0223	0.0093	0.0232	0.0066
1.8	4	0.0171	0.0044	0.0204	0.0094	0.0183	0.0122	0.0186	0.0086
		0.0184	0.0040	0.0217	0.0084	0.0189	0.0107	0.0197	0.0077
		0.0191	0.0039	0.0220	0.0086	0.0190	0.0118	0.0201	0.0081
2.2	1	0.0402	0.0315	0.0303	0.0193	0.0300	0.0178	0.0335	0.0229
		0.0364	0.0259	0.0343	0.0257	0.0410	0.0409	0.0372	0.0308
		0.0556	0.0373	0.0283	0.0158	0.0304	0.0197	0.0381	0.0242
2.2	2	0.0367	0.0246	0.0283	0.0122	0.0257	0.0112	0.0303	0.0160
		0.0321	0.0191	0.0265	0.0128	0.0256	0.0147	0.0281	0.0155
		0.0319	0.0218	0.0271	0.0110	0.0263	0.0110	0.0284	0.0146
2.2	3	0.0252	0.0101	0.0251	0.0105	0.0233	0.0126	0.0246	0.0111
		0.0317	0.0136	0.0281	0.0098	0.0236	0.0103	0.0278	0.0112
		0.0321	0.0158	0.0282	0.0103	0.0247	0.0091	0.0283	0.0117
2.2	4	0.0222	0.0140	0.0218	0.0153	0.0258	0.0167	0.0233	0.0153
		0.0230	0.0142	0.0233	0.0179	0.0260	0.0208	0.0241	0.0177
		0.0247	0.0092	0.0238	0.0085	0.0232	0.0138	0.0239	0.0105

表 2.4.2 方案一造波測試的三次反射率分析結果

波高計配對		ch2-ch3		ch2-ch4		ch3-ch4		所有平均值	
週期 (sec)	波高 (cm)	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
1.0	1	0.0192	0.0119	0.0640	0.0139	0.0330	0.0109	0.0387	0.0122
		0.0334	0.0133	0.0879	0.0164	0.0420	0.0127	0.0544	0.0141
		0.0376	0.0125	0.0936	0.0167	0.0439	0.0089	0.0584	0.0127
1.0	2	0.0220	0.0088	0.0655	0.0130	0.0269	0.0101	0.0381	0.0106
		0.0391	0.0106	0.0902	0.0084	0.0332	0.0076	0.0542	0.0089
		0.0210	0.0104	0.0722	0.0134	0.0360	0.0072	0.0430	0.0103
1.0	3	0.0285	0.0096	0.0799	0.0094	0.0371	0.0051	0.0485	0.0081
		0.0183	0.0093	0.0637	0.0092	0.0291	0.0104	0.0370	0.0097
		0.0419	0.0186	0.0892	0.0205	0.0331	0.0072	0.0547	0.0154
1.0	4	0.0555	0.0302	0.1057	0.0381	0.0390	0.0207	0.0667	0.0297
		0.0251	0.0087	0.0807	0.0091	0.0371	0.0068	0.0476	0.0082
		0.0433	0.0182	0.0913	0.0220	0.0348	0.0077	0.0565	0.0160
1.4	1	0.0366	0.0438	0.0276	0.0287	0.0266	0.0291	0.0303	0.0338
		0.0264	0.0149	0.0281	0.0146	0.0289	0.0190	0.0278	0.0162
		0.0272	0.0255	0.0240	0.0152	0.0297	0.0212	0.0270	0.0207
1.4	2	0.0674	0.0595	0.0439	0.0369	0.0335	0.0380	0.0483	0.0448
		0.0518	0.0457	0.0347	0.0215	0.0227	0.0199	0.0364	0.0290
		0.0505	0.0380	0.0316	0.0196	0.0210	0.0203	0.0344	0.0260
1.4	3	0.0639	0.0658	0.0393	0.0395	0.0325	0.0398	0.0453	0.0484
		0.0459	0.0440	0.0314	0.0222	0.0233	0.0221	0.0335	0.0294
		0.0466	0.0416	0.0343	0.0216	0.0248	0.0217	0.0352	0.0283
1.4	4	0.0543	0.0427	0.0406	0.0250	0.0273	0.0249	0.0407	0.0308
		0.0481	0.0432	0.0385	0.0249	0.0279	0.0229	0.0382	0.0303
		0.0799	0.0669	0.0583	0.0452	0.0416	0.0425	0.0599	0.0515
1.8	1	0.0788	0.0416	0.0645	0.0339	0.0455	0.0295	0.0629	0.0350
		0.0825	0.0481	0.0670	0.0342	0.0473	0.0267	0.0656	0.0363
		0.0659	0.0401	0.0300	0.0149	0.0122	0.0127	0.0360	0.0226
1.8	2	0.0826	0.0524	0.0591	0.0315	0.0366	0.0181	0.0594	0.0340
		0.1050	0.0524	0.0728	0.0404	0.0436	0.0281	0.0738	0.0403
		0.0887	0.0420	0.0654	0.0275	0.0426	0.0183	0.0656	0.0293
1.8	3	0.0999	0.0663	0.0771	0.0447	0.0535	0.0303	0.0768	0.0471
		0.1185	0.0613	0.0941	0.0442	0.0681	0.0324	0.0936	0.0459
		0.1163	0.0581	0.0891	0.0400	0.0628	0.0289	0.0894	0.0423
1.8	4	0.1064	0.0727	0.0794	0.0470	0.0546	0.0316	0.0801	0.0504
		0.1073	0.0728	0.0828	0.0491	0.0587	0.0347	0.0829	0.0522
		0.1078	0.0736	0.0853	0.0509	0.0627	0.0361	0.0853	0.0536
2.2	1	0.0537	0.0381	0.0705	0.0317	0.0944	0.0348	0.0729	0.0349
		0.0701	0.0399	0.0713	0.0308	0.0750	0.0250	0.0721	0.0319
		0.0466	0.0314	0.0556	0.0221	0.0895	0.0243	0.0639	0.0259
2.2	2	0.1052	0.0558	0.1230	0.0610	0.1417	0.0654	0.1233	0.0607
		0.0773	0.0492	0.0958	0.0533	0.1155	0.0545	0.0962	0.0523
		0.1120	0.0649	0.1310	0.0677	0.1483	0.0693	0.1304	0.0673
2.2	3	0.1395	0.0915	0.1576	0.0935	0.1786	0.0983	0.1586	0.0944
		0.1168	0.0844	0.1350	0.0889	0.1589	0.0993	0.1369	0.0909
		0.1317	0.0903	0.1498	0.0907	0.1716	0.0948	0.1510	0.0920
2.2	4	0.1127	0.0833	0.1394	0.0948	0.1708	0.1102	0.1410	0.0961
		0.1421	0.0955	0.1683	0.1039	0.1993	0.1183	0.1699	0.1059
		0.1063	0.0802	0.1300	0.0863	0.1592	0.0951	0.1319	0.0872

表 2.4.3 方案二造波測試的三次反射率分析結果

波高計配對		ch2-ch3		ch2-ch4		ch3-ch4		所有平均值	
週期 (sec)	波高 (cm)	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
1.0	1	0.1485	0.0473	0.6156	0.0557	0.4627	0.0552	0.4089	0.0527
		0.0522	0.0375	0.4923	0.0850	0.2474	0.1016	0.2639	0.0747
		0.0413	0.0338	0.4618	0.0544	0.2268	0.0862	0.2433	0.0582
1.0	2	0.0114	0.0124	0.4276	0.0229	0.1264	0.0678	0.1884	0.0344
		0.0263	0.0151	0.4620	0.0137	0.1501	0.0855	0.2128	0.0381
		0.0128	0.0105	0.3925	0.0066	0.0808	0.0564	0.1620	0.0245
1.0	3	0.0083	0.0068	0.4016	0.0136	0.0964	0.0505	0.1688	0.0237
		0.0078	0.0058	0.3932	0.0130	0.0879	0.0478	0.1630	0.0222
		0.0107	0.0063	0.4139	0.0133	0.1015	0.0487	0.1753	0.0228
1.0	4	0.0116	0.0072	0.4192	0.0101	0.1076	0.0527	0.1795	0.0233
		0.0092	0.0067	0.4082	0.0098	0.1051	0.0506	0.1742	0.0224
		0.0079	0.0069	0.4002	0.0092	0.1017	0.0504	0.1700	0.0222
1.4	1	0.1891	0.0919	0.1639	0.0456	0.2390	0.0505	0.1973	0.0627
		0.2343	0.1037	0.1756	0.0605	0.2684	0.0569	0.2261	0.0737
		0.2014	0.0953	0.1639	0.0540	0.2524	0.0367	0.2059	0.0620
1.4	2	0.1042	0.0319	0.1121	0.0404	0.1690	0.0691	0.1284	0.0471
		0.0922	0.0484	0.1267	0.0528	0.1477	0.0900	0.1222	0.0637
		0.0998	0.0584	0.1457	0.0650	0.1741	0.1022	0.1399	0.0752
1.4	3	0.0983	0.0476	0.1520	0.0657	0.1822	0.1135	0.1442	0.0756
		0.0910	0.0693	0.1470	0.0832	0.2080	0.1514	0.1486	0.1013
		0.0935	0.0656	0.1454	0.0793	0.1744	0.1222	0.1377	0.0890
1.4	4	0.1182	0.1036	0.1847	0.1133	0.2332	0.1665	0.1787	0.1278
		0.1164	0.1026	0.1812	0.1101	0.2277	0.1612	0.1751	0.1246
		0.1126	0.0995	0.1786	0.1082	0.2265	0.1633	0.1726	0.1237
1.8	1	0.1271	0.1016	0.0832	0.0678	0.0750	0.0437	0.0951	0.0710
		0.0681	0.0730	0.0544	0.0436	0.0577	0.0353	0.0601	0.0506
		0.1243	0.1020	0.0945	0.0747	0.0832	0.0473	0.1007	0.0747
1.8	2	0.1254	0.1093	0.1050	0.0920	0.1510	0.1193	0.1271	0.1069
		0.0961	0.0856	0.0689	0.0637	0.0986	0.0825	0.0878	0.0772
		0.0961	0.0849	0.0639	0.0601	0.0931	0.0820	0.0844	0.0757
1.8	3	0.1309	0.1026	0.1053	0.0809	0.1529	0.1074	0.1297	0.0970
		0.1378	0.1089	0.1224	0.0902	0.1650	0.1123	0.1417	0.1038
		0.1396	0.1099	0.1236	0.0926	0.1597	0.1104	0.1410	0.1043
1.8	4	0.1312	0.1225	0.1278	0.1065	0.1654	0.1318	0.1414	0.1203
		0.1250	0.1194	0.1200	0.1056	0.1565	0.1296	0.1338	0.1182
		0.1263	0.1197	0.1215	0.1053	0.1590	0.1314	0.1356	0.1188
2.2	1	0.1485	0.0473	0.6156	0.0557	0.4627	0.0552	0.4089	0.0527
		0.0522	0.0375	0.4923	0.0850	0.2474	0.1016	0.2639	0.0747
		0.0413	0.0338	0.4618	0.0544	0.2268	0.0862	0.2433	0.0582
2.2	2	0.0114	0.0124	0.4276	0.0229	0.1264	0.0678	0.1884	0.0344
		0.0263	0.0151	0.4620	0.0137	0.1501	0.0855	0.2128	0.0381
		0.0128	0.0105	0.3925	0.0066	0.0808	0.0564	0.1620	0.0245
2.2	3	0.0083	0.0068	0.4016	0.0136	0.0964	0.0505	0.1688	0.0237
		0.0078	0.0058	0.3932	0.0130	0.0879	0.0478	0.1630	0.0222
		0.0107	0.0063	0.4139	0.0133	0.1015	0.0487	0.1753	0.0228
2.2	4	0.0116	0.0072	0.4192	0.0101	0.1076	0.0527	0.1795	0.0233
		0.0092	0.0067	0.4082	0.0098	0.1051	0.0506	0.1742	0.0224
		0.0079	0.0069	0.4002	0.0092	0.1017	0.0504	0.1700	0.0222

表 2.4.4 方案三造波測試的三次反射率分析結果

波高計配對		ch2-ch3		ch2-ch4		ch3-ch4		所有平均值	
週期 (sec)	波高 (cm)	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
1.0	1	0.0160	0.0146	0.4474	0.0525	0.1534	0.0615	0.2056	0.0429
		0.0258	0.0162	0.4705	0.0413	0.1111	0.0519	0.2024	0.0365
		0.0103	0.0084	0.4462	0.0143	0.1067	0.0416	0.1877	0.0214
1.0	2	0.0186	0.0108	0.4143	0.0104	0.0743	0.0294	0.1691	0.0169
		0.0262	0.0049	0.4571	0.0246	0.1066	0.0352	0.1967	0.0216
		0.0459	0.0284	0.4744	0.0302	0.1689	0.0959	0.2297	0.0515
1.0	3	0.0178	0.0073	0.4333	0.0147	0.1152	0.0536	0.1888	0.0252
		0.0113	0.0037	0.4124	0.0070	0.0761	0.0252	0.1666	0.0120
		0.0251	0.0114	0.4321	0.0092	0.0881	0.0225	0.1818	0.0144
1.0	4	0.0067	0.0056	0.3847	0.0093	0.0959	0.0499	0.1624	0.0216
		0.0230	0.0082	0.4555	0.0075	0.0997	0.0374	0.1927	0.0177
		0.0277	0.0085	0.4618	0.0038	0.0964	0.0370	0.1953	0.0164
1.4	1	0.0398	0.0216	0.1160	0.0396	0.1487	0.0947	0.1015	0.0520
		0.0369	0.0189	0.1173	0.0302	0.1459	0.0824	0.1000	0.0438
		0.0298	0.0144	0.0968	0.0217	0.1367	0.0627	0.0878	0.0329
1.4	2	0.0675	0.0537	0.1318	0.0760	0.1515	0.1086	0.1169	0.0794
		0.0816	0.0416	0.1285	0.0704	0.1480	0.1037	0.1194	0.0719
		0.0596	0.0358	0.1397	0.0656	0.1662	0.1105	0.1218	0.0707
1.4	3	0.1154	0.0690	0.1919	0.0972	0.2389	0.1494	0.1821	0.1052
		0.0872	0.0487	0.1454	0.0733	0.1527	0.1076	0.1284	0.0765
		0.0928	0.0408	0.1463	0.0707	0.1557	0.1037	0.1316	0.0717
1.4	4	0.0756	0.0476	0.1333	0.0713	0.1447	0.1020	0.1179	0.0736
		0.0739	0.0532	0.1373	0.0741	0.1473	0.1058	0.1195	0.0777
		0.0705	0.0467	0.1311	0.0705	0.1409	0.1018	0.1142	0.0730
1.8	1	0.0203	0.0178	0.0289	0.0146	0.0589	0.0417	0.0360	0.0247
		0.0151	0.0136	0.0222	0.0133	0.0393	0.0250	0.0255	0.0173
		0.0146	0.0113	0.0206	0.0116	0.0348	0.0128	0.0233	0.0119
1.8	2	0.0362	0.0218	0.0288	0.0182	0.0549	0.0359	0.0400	0.0253
		0.0333	0.0370	0.0404	0.0275	0.0842	0.0427	0.0526	0.0357
		0.0310	0.0323	0.0400	0.0222	0.0756	0.0379	0.0489	0.0308
1.8	3	0.0687	0.0328	0.0741	0.0379	0.0795	0.0524	0.0741	0.0410
		0.0494	0.0451	0.0721	0.0415	0.0952	0.0561	0.0722	0.0476
		0.0498	0.0460	0.0701	0.0419	0.0917	0.0564	0.0705	0.0481
1.8	4	0.0420	0.0465	0.0513	0.0402	0.0702	0.0502	0.0545	0.0456
		0.0484	0.0443	0.0558	0.0390	0.0727	0.0508	0.0590	0.0447
		0.0476	0.0461	0.0574	0.0378	0.0791	0.0490	0.0614	0.0443
2.2	1	0.1243	0.0238	0.1207	0.0282	0.1099	0.0386	0.1183	0.0302
		0.1623	0.0407	0.1259	0.0178	0.1211	0.0467	0.1365	0.0351
		0.0946	0.0121	0.1106	0.0169	0.0998	0.0294	0.1017	0.0195
2.2	2	0.1801	0.0839	0.1760	0.0667	0.1624	0.0504	0.1728	0.0670
		0.1630	0.0875	0.1597	0.0709	0.1470	0.0599	0.1566	0.0728
		0.1542	0.0635	0.1706	0.0673	0.1689	0.0632	0.1646	0.0647
2.2	3	0.2091	0.1199	0.2018	0.1030	0.1717	0.0850	0.1942	0.1027
		0.1750	0.1058	0.1785	0.0919	0.1607	0.0754	0.1714	0.0911
		0.1873	0.0929	0.1995	0.0863	0.1916	0.0777	0.1928	0.0856
2.2	4	0.2250	0.1071	0.2307	0.0989	0.2139	0.0873	0.2232	0.0977
		0.1943	0.1178	0.2008	0.1091	0.1899	0.0908	0.1950	0.1059
		0.2070	0.1273	0.2106	0.1124	0.1994	0.0917	0.2057	0.1105

## 2.4.2 長週期波浪的水工模型試驗

為了瞭解水力式消能斜坡碼頭結構物在長週期波作用下的表現，本年度主要進行的是有關長週期波的水工模型試驗。相關細節分述如下：

### 1. 斷面水槽之選定

由於水工模型試驗的規劃設計會受到斷面水槽的尺寸、造波機造波能力與模型縮尺的限制，而本研究的主要目標是長波抗浪型消能結構物的開發研究。為了滿足長週期造波的要求，本研究乃採用國立臺灣海洋大學河海工程學系海洋工程綜合試驗館之大型斷面水槽進行試驗，該水槽的相關基本規格如表 2.4-5 所示

表 2.4.5 大型斷面造波水槽規格

項目	規格說明
水槽位置	國立臺灣海洋大學河海工程學系海洋工程綜合試驗館
水槽總長	100m
水槽寬度	3m
水槽高度	3m
造波機型式	活塞式
造波機動力系統	ISEYA 株式會社 伊勢屋機械製作所
造波控制系統	加拿大水工試驗所研發之 NDAC 造波控制系統
造波形式	規則波、不規則波
造波頻率範圍	0.125Hz~1.25Hz (0.8sec-8.0sec)
最大造波波高	30cm
試驗最佳水深	1.5m

### 2. 模型縮尺之選定

考慮大型斷面水槽造波機所能造出之最大週期波浪條件，以模擬長週期波浪作用於結構物的影響，並參考 Froude 相似率定義（假設模型縮尺為  $1/r$ ，則長度尺度縮尺為  $1/r$ 、時間縮尺為  $1/\sqrt{r}$ ），選

用之水工模型斷面試驗模型縮尺為 1/36（即長度縮尺為 1/36、時間縮尺 1/6）。

### 3. 試驗條件選定

由於規劃的碼頭結構所造成的水理現象複雜，較易評估的是碼頭前面的反射率，依目前的討論，影響結構物前反射率的參數如下：

$$Kr: f(h, T, L, H, \tan \theta, n, \mu, D, \varepsilon) \dots\dots\dots(2.4.1)$$

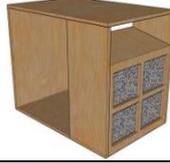
其中  $h$ ：水深； $T$ ：週期； $L$ ：波長； $H$ ：波高； $\tan \theta$ ：斜坡的坡度； $n$ ：斜坡的粗糙度； $\mu$ ：斜坡的滲透性； $D = D_b / D_a$ ：縱深比； $D_a$ ：碼頭（包含斜坡與孔隙室）的縱深； $D_b$ ：消波室的縱深； $\varepsilon$ ：碼頭下部結構的拋石孔隙率；

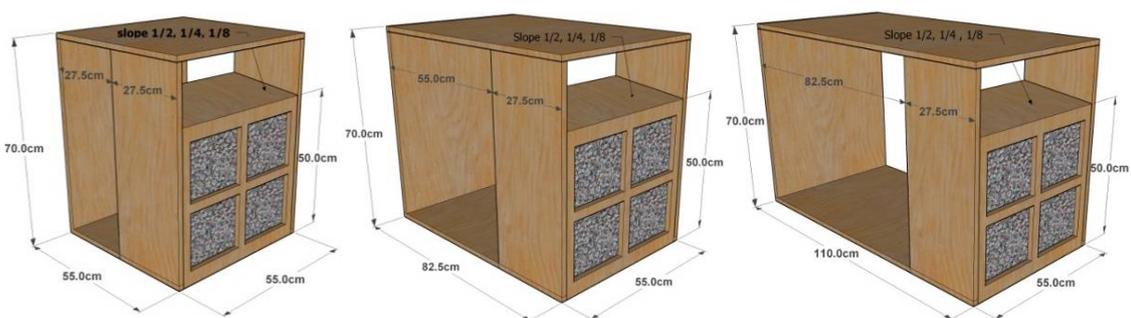
本試驗首先將針對最基本的參數(斜坡坡度與縱深比)進行討論，也就是考慮光滑不透水斜坡表面、固定水深、波高及孔隙率，改變週期、斜坡坡度與縱深比三項參數，來探討相互影響之關係，以瞭解模型配置的特性是否能發揮消波效果。對於不同斜坡表面性質，如粗糙度、透水性等在後續研究中探討。

### 4. 試驗模型配置之選定

由於消能斜坡是否能促成入射波浪越波及其越波量的大小，對堤前的波浪反射率有很大的影響，以及後方中空消波室的縱深對越波後所造成的水位上升與振盪的影響，本模型試驗配置藉由改變斜坡坡度  $\tan \theta = 1/2$ 、 $1/4$  和  $1/8$ ，及縱深比  $D = 1$ 、 $2$  和  $3$ 。將坡度與縱深比進行相互配對共有 9 種不同的試驗配置如下表 2.4-6。其中，也規劃了空水槽的試驗，以瞭解在指定造波條件下，空水槽的波動情形，作為後續的比對。各配置的多孔隙消波室中都使用相同之塊石，其孔隙率為 0.35，而其靠水側(前方)為完全開放，後方靠岸側則為 50% 開放，其目的為了使後方水體可以藉由下方排水至前方，維持水位堆積不致過高，以提升消波室接收越波水量與消能的能力。

表 2.4.6 長波抗浪型斷面試驗模型配置

縱深比 (代碼)	坡度 (代碼)		
	1/2 (S1_2)	1/4 (S1_4)	1/8 (S1_8)
1 (D1)			
2 (D2)			
3 (D3)			



(a)  $D_b/D_a=1$

(b)  $D_b/D_a=2$

(c)  $D_b/D_a=3$

圖 2.4.3 長波抗浪型模型的尺寸

表 2.4.7 長波抗浪型斷面試驗波浪條件（現場與模型）

現場波浪條件				模型試驗造波條件					
週期 (s)	水深 (m)	波高 (m)	波長 (m)	週期 (s)	水深 (m)	波高 (m)	波長 (m)	kh	H/L
18.0	18.0	1.8	230.3	3.0	1.1	0.05	9.0434	0.7643	0.0055
19.2			246.8	3.2			9.7512	0.7088	0.0051
20.4			263.2	3.4			10.4531	0.6612	0.0048
21.6			279.6	3.6			11.1500	0.6199	0.0045
22.8			295.9	3.8			11.8427	0.5836	0.0042
24.0			312.2	4.0			12.5318	0.5515	0.0040
25.2			328.5	4.2			13.2179	0.5229	0.0038
26.4			344.7	4.4			13.9013	0.4972	0.0036
27.6			360.9	4.6			14.5825	0.4740	0.0034
28.8			377.1	4.8			15.2616	0.4529	0.0033
30.0			393.3	5.0			15.9389	0.4336	0.0031
31.2			409.4	5.2			16.6146	0.4160	0.0030
32.4			425.6	5.4			17.2890	0.3998	0.0029
33.6			441.7	5.6			17.9621	0.3848	0.0028
34.8			457.8	5.8			18.6341	0.3709	0.0027
36.0			473.9	6.0			19.3051	0.3580	0.0026
42.0	490.0	7.0	22.6480	0.3052	0.0022				
48.0	506.1	8.0	25.9764	0.2661	0.0019				

### 5. 試驗水深與波浪條件之選定

考慮實際碼頭前水深高度可能為 10m 至 18m，由模型長度縮尺換算後得到試驗水深為 50cm，本次實驗以碼頭消能斜坡的最底端做為參考平均水位點，因此水位放置高度至斜坡之最底端。波浪條件則模擬現場 18 秒至 48 秒之週期波浪，經由模型時間縮尺換算後得到試驗週期為 3 秒至 8 秒，其對應之波長  $L=9.0434\text{m}$  至  $25.9764\text{m}$ 、 $kh=0.7643$  至  $0.2661$ 、波浪尖銳度  $H/L=0.0055$  至  $0.0019$  和波速  $c=3.0145\text{m/s}$  至  $3.2471\text{m/s}$ 。由於上述試驗週期條件中具有淺水波浪，為避免突變地形影響到入射波浪在淺化過程中可能產生的碎波情形，本研究利用前段 20m 長、斜度 1/33 的緩坡來導引波浪的淺化，並設置高度 60cm 而長 13m 的平台以便設置試驗模型，因此試

驗水深加深到 110cm，而試驗波高固定為 5cm，相關現場與模型之波浪條件如下表 2.4-7 所示，其下標 field 代表現場條件，下標 lab 代表模型條件。

## 6. 試驗儀器規劃

### (1) 斷面水槽

本試驗所使用的斷面水槽為國立臺灣海洋大學河海工程學系海洋工程綜合試驗館之大斷面水槽如照片 2.4.3，水槽長度 100m、寬度 3m 及高度 3m，水槽側邊距有三段玻璃觀測段，以利於實際觀測水槽中之試驗情形，水槽的兩端分別為造波機端與斜坡消波段，最佳試驗水深為 1.5m，由於本試驗模擬之需要，將試驗水深定為 1.1m 進行試驗。為便於同步進行試驗，本造波水槽的後段以鐵板分割成寬度各為 1.5m 的水道，如圖 2.4.4 的左圖所示。

### (2) 造波機系統

造波系統的機械部分是日本 ISEYA 株式會社伊勢屋機械製作所製作之造波機與造波油壓系統，波浪控制系統則使用加拿大水工試驗所研發之 NDAC 造波控制系統，可造規則波及不規則波，其中不規則波可以模擬 Pierson-Moskowitz 波譜、JONSWAP 頻譜、Bretschneider 波譜、OCHI double peak 波譜、Scott 波譜、TMA 波譜(淺水波)、Neumann 波譜、Mitsuyasu- Bretschneider 波譜與 Mitsuyasu 波譜等九種不規則波波譜，可造波週期 0.8s~8.0s。本次造波是以規則波為主。



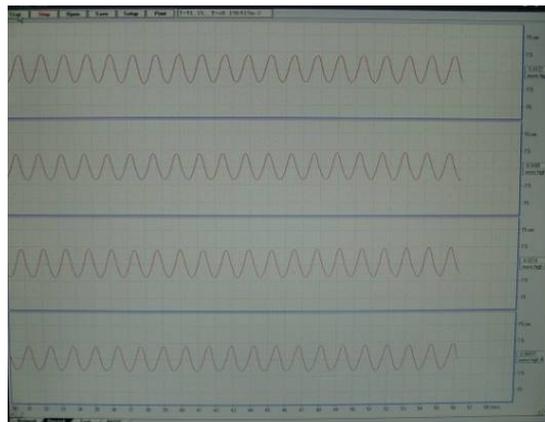
照片 2.4.3 海洋工程館大斷面水槽

### (3)波高擷取系統與軟體

為得到本試驗中水位變動情形，將採用全英公司所製造的長度 50cm 之容量式波高計如照片 2.4.4，透過電容式電路感應金屬與測線因水位變動之變化轉換成電壓值，經電纜線傳至波高增幅器後，再經由國內三聯公司所代理的 instruNet 資料擷取盒如照片 2.4.5，將類比訊號轉換為數位訊號，傳輸至電腦後經由 instruNet 資料擷取系統軟體波形視窗，將本試驗所有之量測資料彙整為一個以時間為橫軸，以觀測值為縱軸得數位資料，易於日後的資料分析工作。



照片 2.4.4 容量式波高計及訊號增幅器與資料擷取盒



照片 2.4.5 instruNet 資料擷取系統軟體波形視窗

## 7. 模型規劃

依據試驗水槽之間隔寬度為 150cm 與規劃之模型配置圖，利用 1.75cm 厚的木心板製作模型，並於外部表面塗上 PU 防水漆，以防止木板吸水後膨脹變形，並維持模型沉箱重量與延長模型使用壽命。其中一組上方設置活動頂板以利於更換配置模型及安裝量測儀器，模型完工與設置於水槽中之情形如照片 2.4.6。



照片 2.4.6 長波抗浪型斷面試驗模型完工與設置

## 8. 斷面水槽模型配置

本斷面水槽模型試驗配置包括內側與外側兩水道進行試驗，靠玻璃觀測窗之外側水道內之造波機、地形、波高計及模型等，各項之相關位置如圖 2.4.4 所示，而內側水道與外側水道設置位置相同，但其使用之波高計為 No.5-No.8。

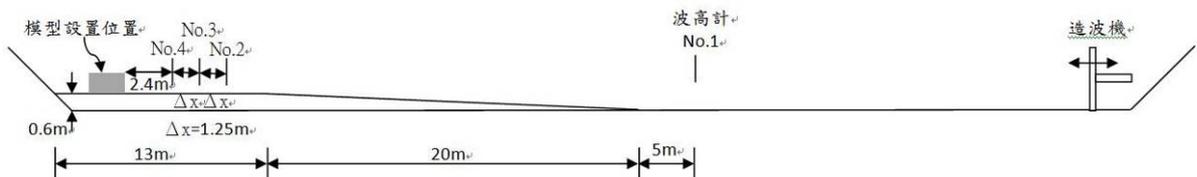


圖 2.4.4 長波抗浪型模型配置圖

## 9. 斷面水槽模型配置

為了解作用於消波室結構物前的波動情形，本試驗在堤前設置三支波高計以便以 Goda 兩點法計算堤前反射率，並於造波機前適當位置設置波高計以量測入射波，在考量 Goda 兩點法設置波高計之限制條件後，各波高計位置規劃如圖 2.4.4 所示，No.1~No.4 為靠玻璃之外側試驗段，而 No.5~No.8 為靠水泥壁之水槽內側試驗段，其中波高計 No.1 和 No.5 為入射波波高計設置距離 1/33 斜坡起點 5m，No.2~No.4 和 No.6~No.8 為量測反射波高之波高計，No.4 和 No.8 距離模型 2.4m，各波高計間間距為 1.25m。照片 2.4.7 為波高計的設置情形。



照片 2.4.7 波高計設置

## 10. 試驗流程

本試驗針對不同斜坡坡度與縱深比之不同配對，有 9 種不同之配置，每次配置進行週期  $T=3.0$  至  $8.0$  的波浪條件試驗，每個波浪條件試驗三次，整理如表 2.4-8 所示，配置試驗結束後放水進行配置更換，含空水槽試驗共進行 10 次試驗，包含三種不同縱深比  $D = D_b / D_a$ ，及三種不同斜坡坡度為  $\tan \theta$ ，其試驗配置代表名稱整理如表 2.4-9 所示。

表 2.4.8 試驗波浪代號與條件

順序	試驗代號	試驗波浪條件		試驗次數
		波高 (m)	週期 (sec)	
1	T30	0.05	3.0	3
2	T32	0.05	3.2	3
3	T34	0.05	3.4	3
4	T36	0.05	3.6	3
5	T38	0.05	3.8	3
6	T40	0.05	4.0	3
7	T42	0.05	4.2	3
8	T44	0.05	4.4	3
9	T46	0.05	4.6	3
10	T48	0.05	4.8	3
11	T50	0.05	5.0	3
12	T52	0.05	5.2	3
13	T54	0.05	5.4	3
14	T56	0.05	5.6	3
15	T58	0.05	5.8	3
16	T60	0.05	6.0	3
17	T70	0.05	7.0	3
18	T80	0.05	8.0	3

表 2.4.9 試驗配置代表名稱

試驗順序	1	2	3	4	5
配置代號	empty	D1S1_2	D1S1_4	D1S1_8	D2S1_2
配置名稱 代表意義	空水槽	縱深比 D1 $D1 = D_b / D_a = 1$	縱深比 D1 $D1 = D_b / D_a = 1$	縱深比 D1 $D1 = D_b / D_a = 1$	縱深比 D2 $D2 = D_b / D_a = 2$
		斜坡坡度 S1_2 $\tan \theta = 1/2$	斜坡坡度 S1_4 $\tan \theta = 1/4$	斜坡坡度 S1_8 $\tan \theta = 1/8$	斜坡坡度 S1_2 $\tan \theta = 1/2$
試驗順序	6	7	8	9	10
配置代號	D2S1_4	D2S1_8	D3S1_2	D3S1_4	D3S1_8
配置名稱 代表意義	縱深比 D2 $D2 = D_b / D_a = 2$	縱深比 D2 $D2 = D_b / D_a = 2$	縱深比 D3 $D3 = D_b / D_a = 3$	縱深比 D3 $D3 = D_b / D_a = 3$	縱深比 D3 $D3 = D_b / D_a = 3$
	斜坡坡度 S1_4 $\tan \theta = 1/4$	斜坡坡度 S1_8 $\tan \theta = 1/8$	斜坡坡度 S1_2 $\tan \theta = 1/2$	斜坡坡度 S1_4 $\tan \theta = 1/4$	斜坡坡度 S1_8 $\tan \theta = 1/8$

## 11. 試驗結果基本分析

將波高量測擷取系統 instruNet 所得到之文字輸出檔案，先將波高計 No.1 至 No.4 與 No.5 至 No.8 整理為試驗配置各個週期波高原始整理檔案，並進行初步歸零處理，與原始時間序列圖之繪製，用以判斷試驗資料是否正確，圖 2.4.10 為空水槽週期 3.0 秒之原始時間序列圖。

為瞭解改變結構物之縱深比及斜坡坡度之九種配置，在入射波浪作用下的消波能力，將試驗所得到的試驗水面波動時間序列資料，首先繪製原始時間序列圖如圖 2.4.10，接著將整理後之波高計資料利用 Goda 兩點法分析波浪反射率，並將其結果繪圖以利於比較。

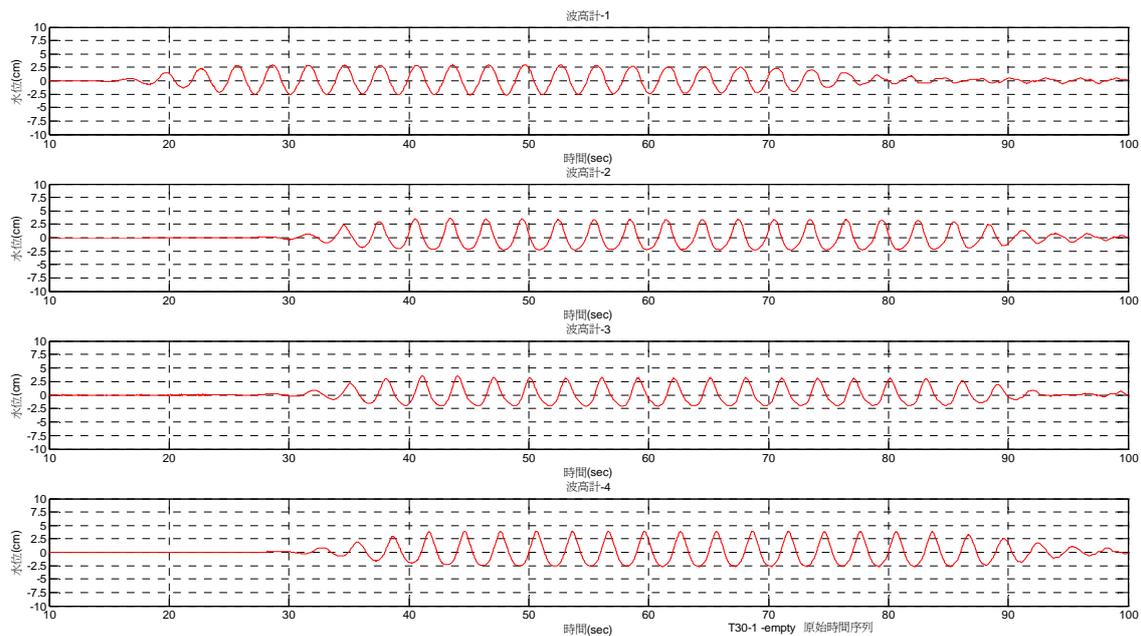
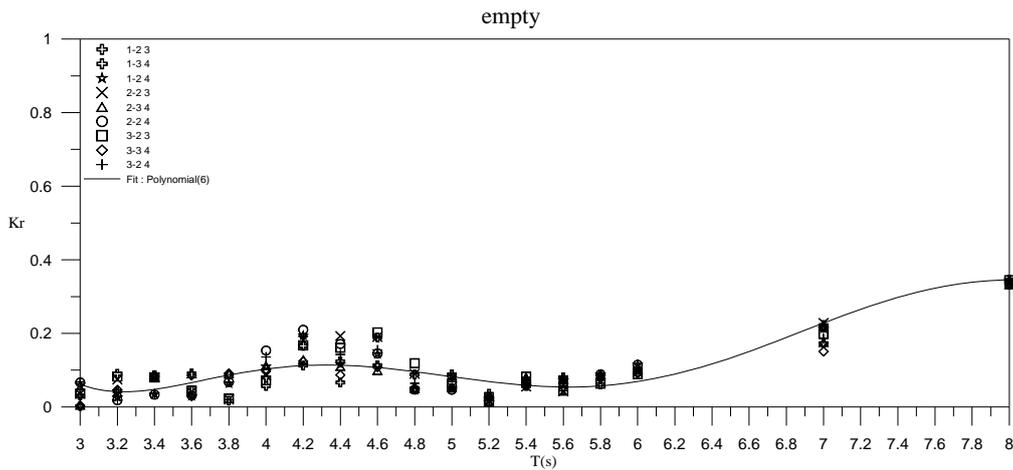
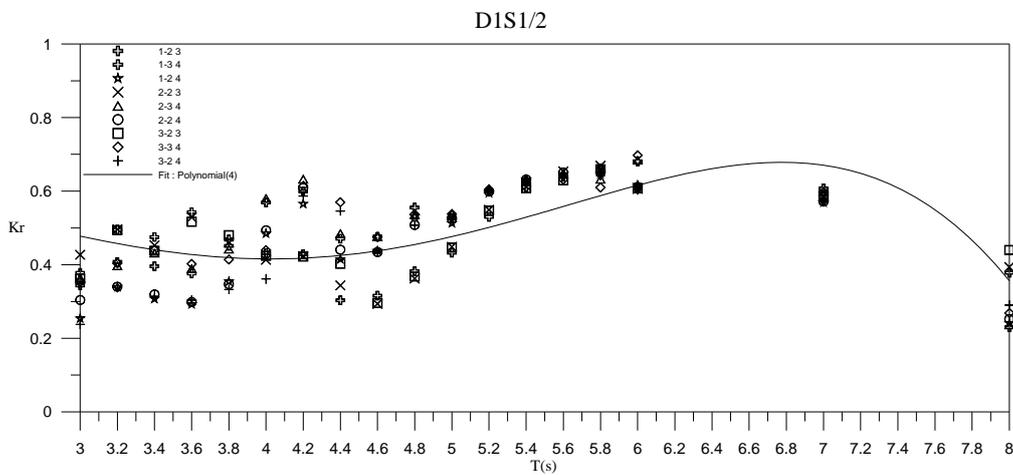


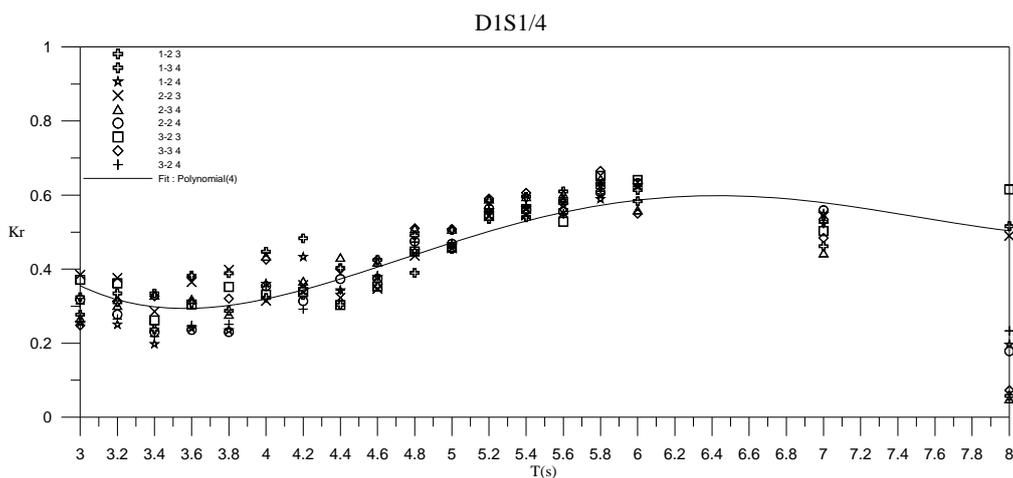
圖 2.4.5 T=3.0sec 空水槽原始時間序列圖



(a) empty

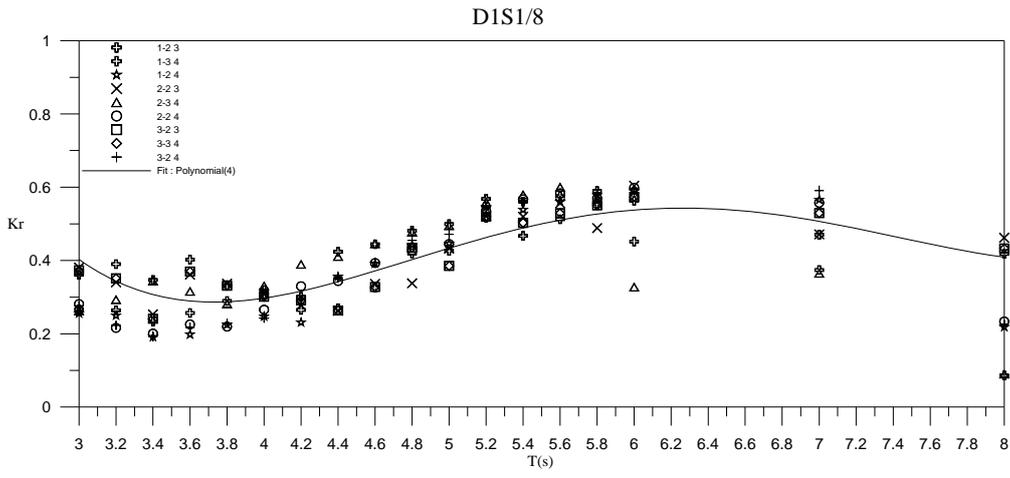


(b) D1S1/2

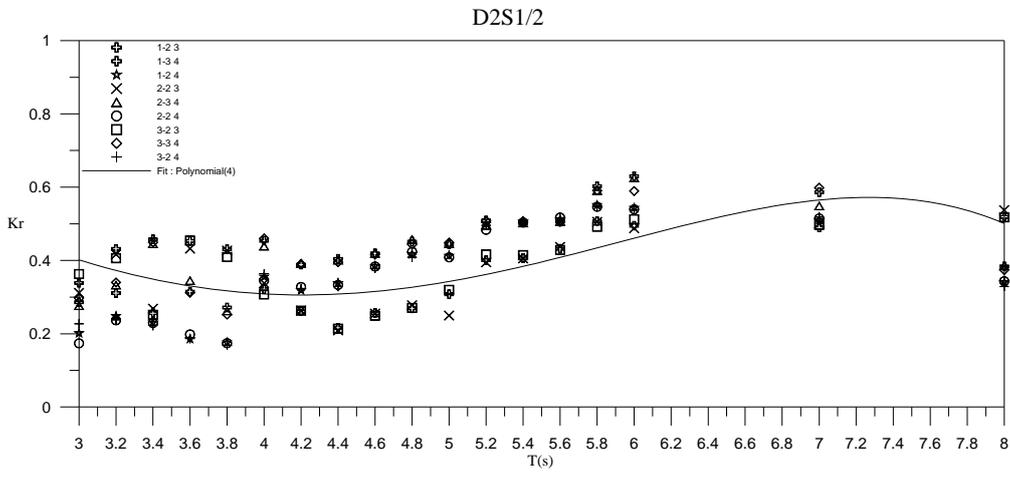


(c) D1S1/4

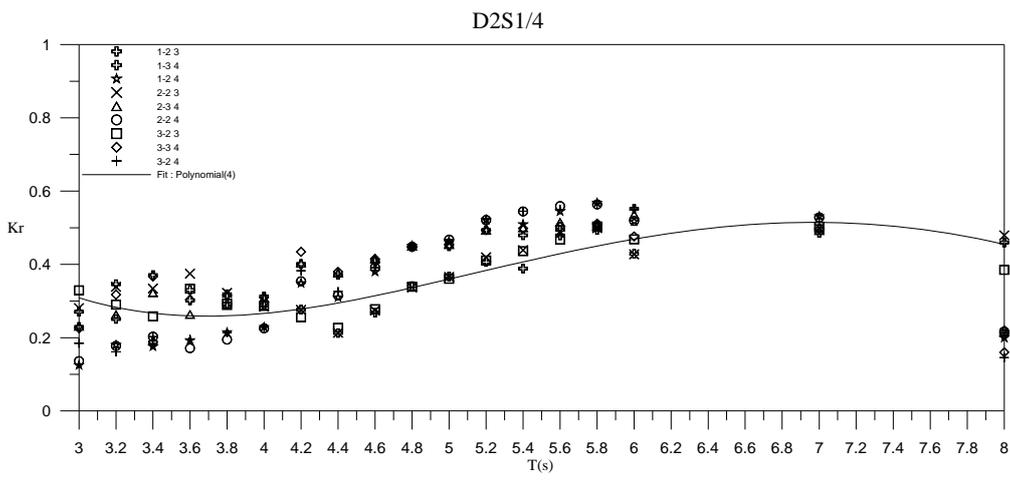
圖 2.4.6 各配置 Kr-T 之分布圖



(d) D1S1/8

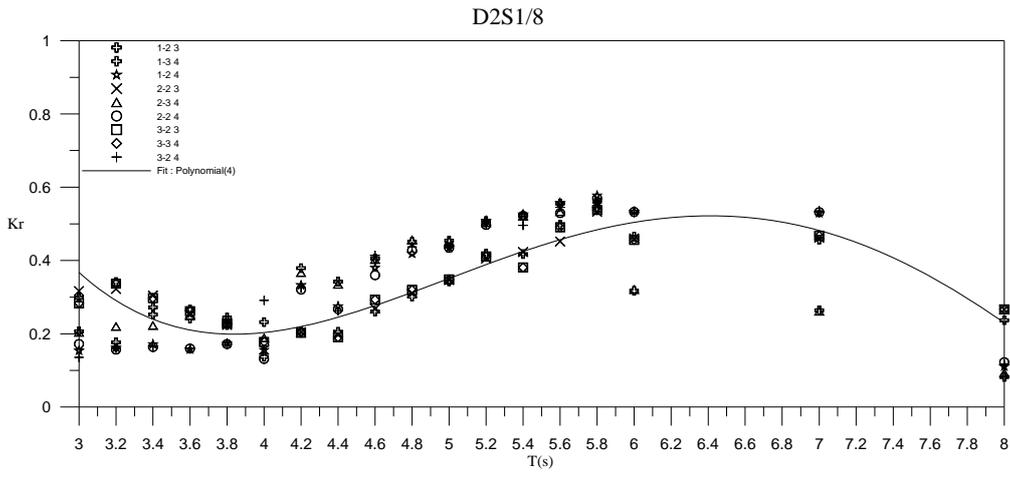


(e) D2S1/2

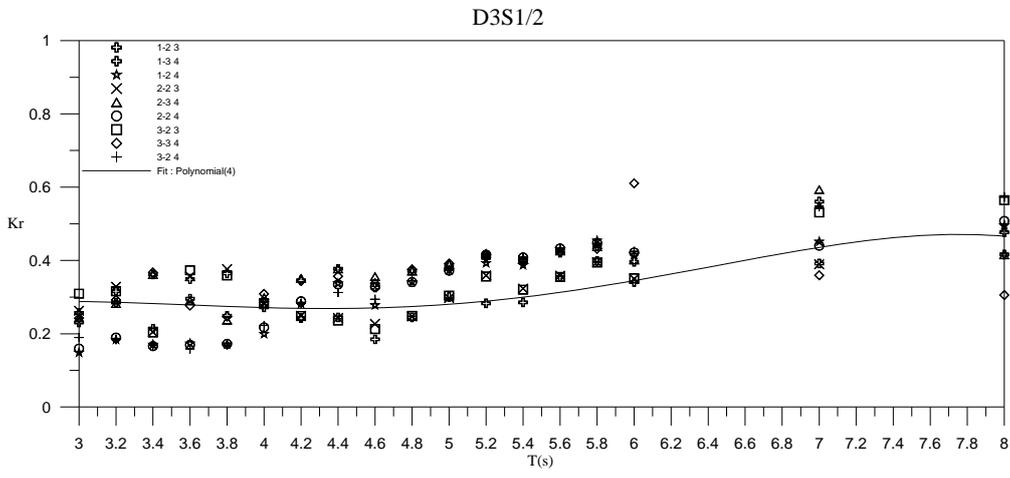


(f) D2S1/4

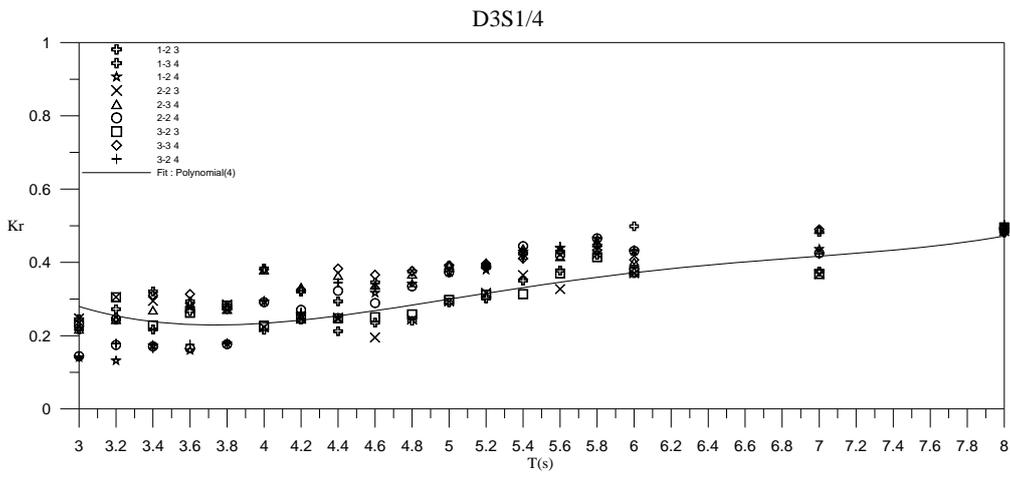
圖 2.4.6 (續) 各配置 Kr-T 之分布圖



(g) D2S1/8

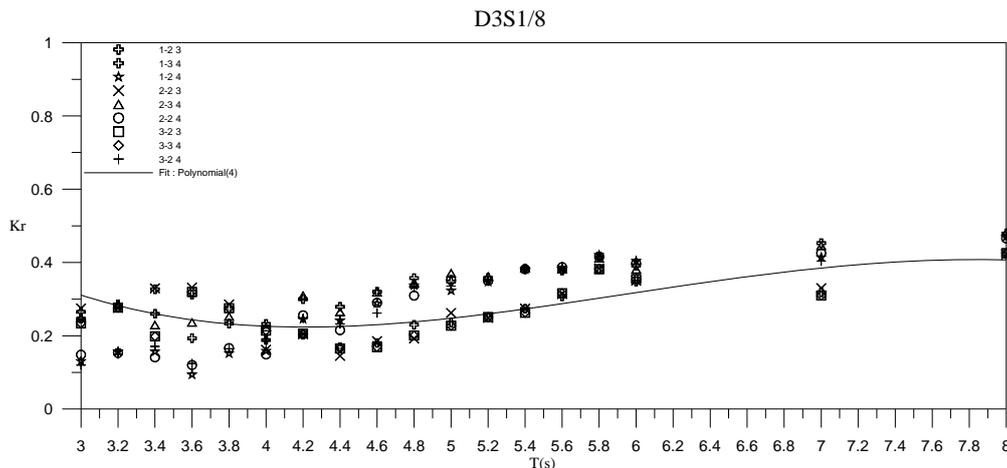


(h) D3S1/2



(i) D3S1/4

圖 2.4.6 (續) 各配置 Kr-T 之分布圖



(j) D3S1/8

圖 2.4.6 (續) 各配置 Kr-T 之分布圖

## 12. 分析結果

將原始資料數據擷取波浪作用穩定段，再根據 Goda 兩點法分析反射率，由於波高計規劃設置三支，故於三次試驗中皆有三種波高計配對之反射率，No.2-No.3、No.3-No.4 和 No.2-No.4，其各配置之反射率與週期之分布圖如圖 2.4.5，各圖之圖說中的代號如 1-2 3 代表第一次試驗中利用波高計 2 與波高計 3 的量測資料計算所得的反射率，其餘依此類推。各圖中除了將波高計反射率配對繪出結果並將其各週期之九次試驗配對以最小二乘方法求其近似曲線。

在圖 2.4.6 中各配置之水工模型試驗結果中顯示各個造波週期試驗條件中所得到的 9 組反射率結果差距在 0.1 內，顯示三之波高計的設置位置尚稱妥當。而在短週期部分會有較大的反射率差距，主要原因應為原設置斜坡構想是要使波浪溯上後越波以達到削減波浪之結果，但當波浪溯升能量較低時作用於斜坡坡度較高的配置時會無法越過斜坡，故在溯下後順著斜坡流下之水流會對前方的造成擾動對於反射率的計算造成較大的誤差。此種情形在實際的波浪場中，由於具有各種不同的週期成分，屬於不可避免的情形，但在實用上則應該要考慮至少要让出現較多的波動週期要能夠發生越波消能的效果。

### 13. 試驗結果綜合比較

為了解波浪條件與模型配置之相互影響結果，本節根據規劃設置的控制參數即斜坡坡度與縱深比兩個方面與波浪進行進一步的深入討論，以瞭解其造成影響的物理機制為何。

#### (1) 固定縱深比且不同斜坡坡度之討論比較

本段首先依三種縱深比分別探討固定縱深比時，不同的斜坡坡度對各種造波波浪條件所產生的影響與特性，並進行綜合分析。在固定縱深比下，三種斜坡坡度的反射率迴歸近似曲線整理於圖 2.4.7。

##### a. 縱深比 D1：

在縱深比  $D1 = D_b / D_a = 1$  即中空消波室縱深( $D_b$ )為斜坡縱深( $D_a$ )一倍時，於較短週期 3.0s 至 4.4s 中斜坡坡度 1:4 與 1/8 兩種坡度反射率約為 0.3 左右，兩坡度反射率差距皆在 0.1 以內，而坡度 1:2 的反射率約在 0.4 至 0.5 左右與其他兩種坡度之差距約為 0.1 到 0.2 間，主要原因為斜坡坡度為控制斜坡縱深固定當坡度較陡時代表其出水高較高，所以短週期時波浪溯上能量不夠時無法使用後方消波室削減波浪能量，而順著斜坡流回造波端方向，而回流水體由如瀑布般擾動前方水域使水域靜穩度降低，當波浪條件週期在 4.4s 至 5.0s 中三種坡度之反射率皆以相似的上升趨勢由 0.4 增加至 0.45 左右，而後週期 5.0s 至 5.8s 時坡度 1:2 與 1/4 兩種坡度反射率趨勢非常相似，而坡度 1:8 之反射率則略低於其他兩種坡度，爾後之週期 5.8s 以坡度陡反射率較高，坡度較緩的反射率較低。

比較縱深比 D1 中坡度 1:8 之反射率為 D1 中之最佳配置，坡度 1:4 雖然在週期 3.4s 至 4.6s 間反射率略低於坡度 1:8，但在週期大於 4.6s 後皆大於坡度 1:8 之反射率，代表坡度 1:4 於少部分週期消波效果略優於坡度 1:8，但於其他週期皆較差，而坡度 1:2 之整體反射率皆為最大之配置，其消波效果為最差的。

#### b. 縱深比 D2

在縱深比  $D2 = D_b / D_a = 2$  即消波室縱深( $D_b$ )為斜坡縱深( $D_a$ )兩倍時，週期 3.0s 至 4.0s 間斜坡坡度 1:2 和 1/4 之反射率高於坡度 1:8 之原因為短週期之溯上能力比較不足，當波浪無法越波會使前方反射率增加，而坡度 1:8 之反射率則隨著週期平緩的上升，當週期在 4.0s 至 5.6s 間三種坡度皆具有相同之反射率趨勢，而週期大於 5.6s 後反射率會隨著斜坡坡度減緩而降低。

比較縱深比 D2 中週期 3.6s 至 5.4s 之反射率差距不大，消波效果相似，而週期 3.0s-3.6s 及 5.4s-8.0s 皆為坡度 1:8 配置之消波效果最佳，而坡度 1:2 配置之消波效果最差。

#### c. 縱深比 D3

在縱深比  $D3 = D_b / D_a = 3$  即消波室縱深( $D_b$ )為斜坡縱深( $D_a$ )三倍時，三種斜坡坡度在反射率的表現上，皆為短週期時約為 0.25 左右，以相同趨勢緩緩上升至長週期波 8.0s 時的 0.45 左右，其中坡度 1:8 之反射率有較其他兩種坡度之反射率略低些。

比較縱深比 D3 之三種斜坡坡度配置之消波能力效果差距皆在 0.05 內，而當週期大於 5.0s 後坡度 1:8 之配置消波效果較坡度 1:2 及坡度 1:4 佳，差距略增至 0.1 左右

#### d. 縱深比綜合比較

綜觀三種縱深比，消波室縱深較小時，波浪於斜坡較陡之配置會有較大的反射率產生，當入射波浪週期逐漸變長時，縱深比小之反射率受坡度改變之影響差距較大，隨著縱深比漸漸變長後，改變三種坡度試驗條件之各週期反射率差距減小，且整體之反射率也漸漸降低，當縱深比為配置之最大比例(D3)時，三種坡度之反射率非常接近，其中坡度 1:8 較其他兩種坡度反射率略低一點，所以當縱深比固定時利用較緩之斜坡坡度，讓波浪能

夠溯上、越波將可消減較多之波浪能量，以達到較佳之消波效果。

## (2) 固定斜坡坡度且不同縱深比之討論比較

本節討論固定斜坡坡度時，各種試驗波浪條件作用於不同縱深比消波室之堤前反射率變化情形。比較先就各固定斜坡坡度，進行三種不同縱深比之討論與比較。各迴歸反射率近似曲線彙整如圖 2.4.8 所示。

### a. 1/2 坡度

在斜坡坡度 1:2 即坡度  $\tan \theta = 1/2$  時，在縱深比 D1 時，反射率約在 0.3 以上，在週期為 7.0s 時之反射率峰值約為 0.68；而在縱深比 D2 時，反射率峰值 0.6 發生在週期 7.4s 時，最低值約為 0.41 則發生在週期 4.0s 時；但縱深比 D3 時，週期 3.0s 至 4.6s 之反射率約為 0.28，最大 0.53 出現在週期 8s 處。隨著縱深比增加，反射率有減小的趨勢，且反射率峰值也有向長週期方向移動的趨勢。

### b. 1/4 坡度

在斜坡坡度 1:4 即坡度  $\tan \theta = 1/4$  時，三種縱深比當週期在 3.4s 至 4.0s 附近反射率為最低，其值約在 0.25 至 0.3 間，反射率仍隨縱深比越大而越小。反射率峰值部分則為 D1 約發生在週期 6.4s 附近；而 D2 則發生在約 7s 附近；但 D3 的峰值則應該更大於 8s。同樣地，隨著縱深比增加，反射率有減小的趨勢，且反射率峰值也有向長週期方向移動的趨勢。

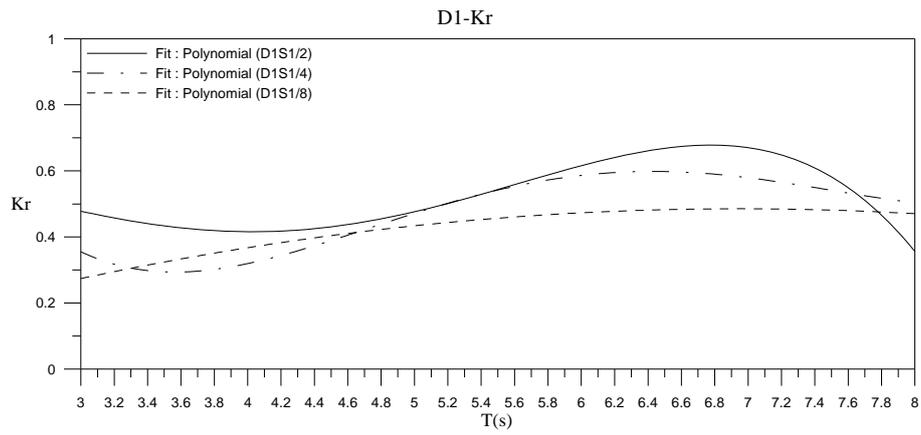
### c. 1/8 坡度

在斜坡坡度 1:8 即坡度  $\tan \theta = 1/8$  時，三種縱深比當週期在 3.4s 至 4.0s 附近反射率為最低，其值約在 0.2 至 0.3 間，反射率仍隨縱深比越大而越小。反射率峰值部分則為 D1 約發生在週期 6.2s 附近；而 D2 則發生在約 6.4s 附近；但 D3 的峰值則應該更大於

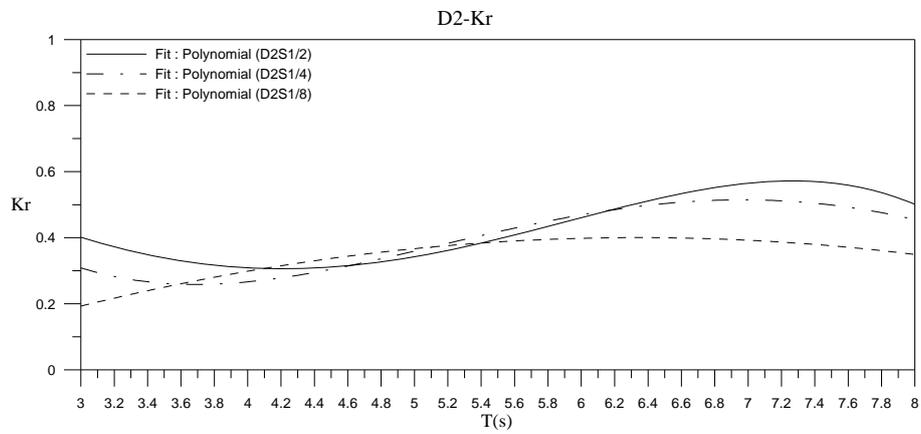
8s。同樣地，隨著縱深比增加，反射率有減小的趨勢，且反射率峰值也有向長週期方向移動的趨勢。

#### d. 斜坡坡度綜合比較

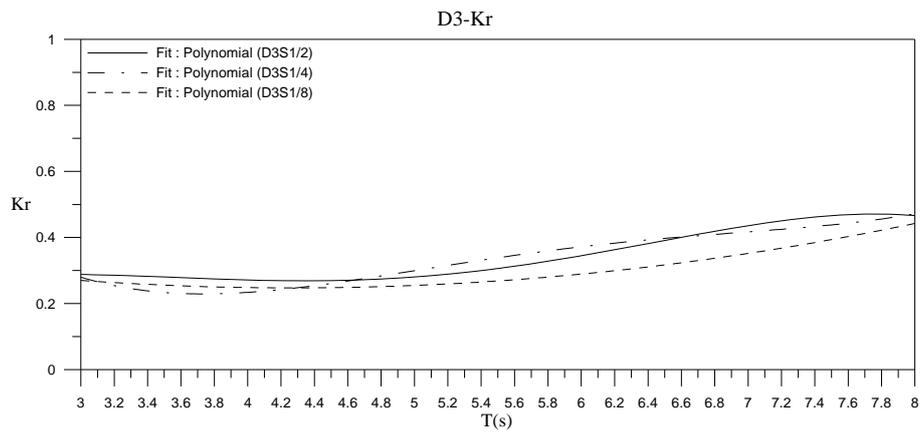
綜觀比較固定三種坡度的斜坡試驗改變縱深比 D1-D3 所得之結果，發現其整體反射率皆隨縱深比之增加而降低，只有在坡度 1:8 週期 3.4s 至 4.4s 間縱深比 D2 反射率低於縱深比 D3，大致上當固定斜坡坡度時以縱深比 D3 為最佳配置。



(a) D1

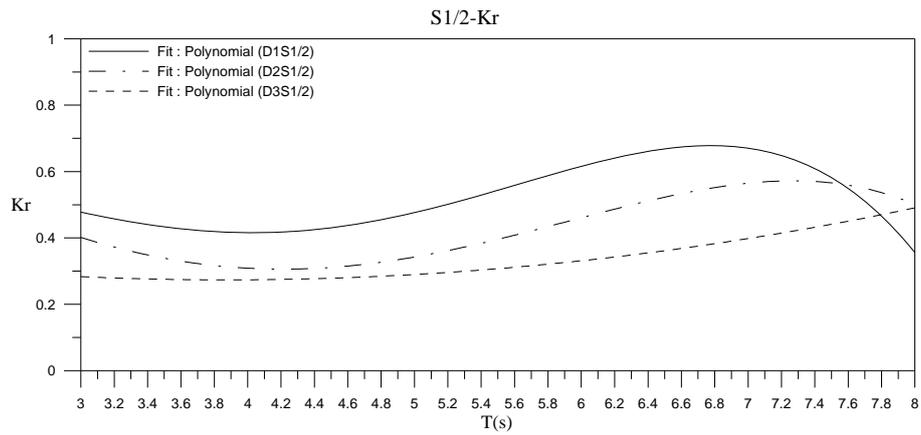


(b) D2

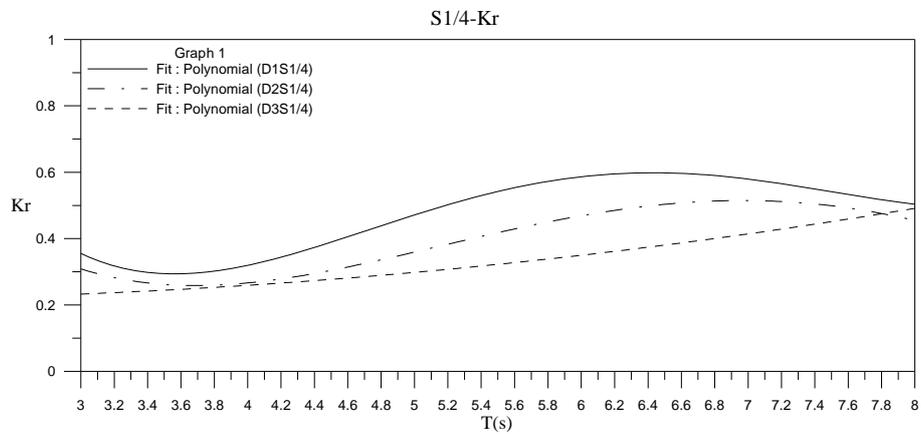


(c) D3

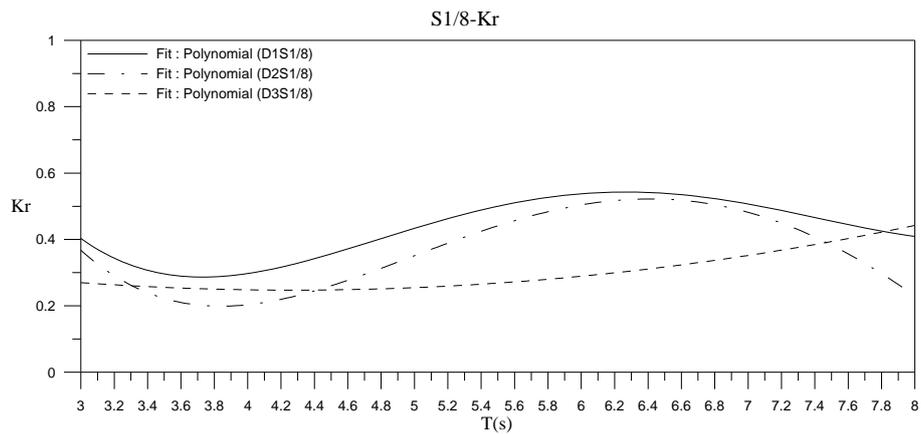
圖 2.4.7 固定縱深比之波浪與斜坡坡度之比較圖  
 (a) 縱深比 D1； (b) 縱深比 D2； (c) 縱深比 D3



(a) S1/2



(b) S1/4



(c) S1/8

圖 2.4.8 固定斜坡坡度之波浪與縱深比之比較圖  
 (a) 坡度=1/2； (b) 坡度=1/4； (c) 坡度=1/8

### 2.4.3 水工模型試驗的討論與建議

綜合上述的水工模型試驗結果可以得到以下心得

- (1) 短週期波作用於坡度較陡之斜坡，如果溯上能力不足，其順斜坡溯下之水流將會對於前方水域加以擾動，造成反射率之部分增大之現象。
- (2) 縱深比加大時，對整體造波週期而言，反射率都有降低的趨勢。
- (3) 當縱深比為 D1 時，週期小於 5.0s 之反射率為坡度 1:2 > 1/8 > 1/4，週期大於 5.0s 之反射率為 1/2 > 1/4 > 1/8；當縱深比為 D2 時，週期小於 3.6s 與週期大於 5.8s 之反射率為坡度 1:2 > 1/4 > 1/8，在週期 3.8s 至 5.8s 時，反射率非常接近；當縱深比為 D3 時，縱深比 D3 時三種坡度之反射率趨勢相同，反射率約為 0.25 至 0.35。
- (4) 當斜坡坡度相同時，整體反射率與峰值隨著縱深比增加而降低，但發生的週期有後移之趨勢。
- (5) 坡度 1:8 在縱深比 D2 週期 3.8s 時反射率小於縱深比 D1 和 D3 之最小值。
- (6) 固定縱深比時以斜坡坡度 1:8 之消波效果最佳。
- (7) 固定斜坡坡度時以縱深比 D3 之消波效果最佳。

而在後續的研究中，應該要考慮到下列事項：

- (1) 由於本試驗考慮之控制因素為縱深比與斜坡坡度，故對於斜坡支出水高度並未進行考慮，所以坡度較大之配置對於溯上能力不足之波浪條件消波能力也較差，可針對斜坡之出水高度進行補充之討論與比較。
- (2) 因後方消波室與前方水理運動，除經由上方斜坡越波之水體，

也有因前方水體影響之壓力變化所形成通過孔隙室之水體，所以原固定孔隙率之試驗，可加入孔隙室之孔隙率改變對於模型消波效果之影響。

- (3) 當部分波浪於斜坡上無法越波或是越波能量小時，可能無法利用到後方消波室之消波能力，故可考慮是否由斜坡上之表面粗糙度之改變，來增強其消波效果。

## 2.5 數值模擬方法

在水力式阻尼結構方面的數值模擬研究，由於考量消波式碼頭附近，可能包含波動及水流運動之複雜層面。如何精確地描述自由水面 (free surface) 之形狀及位置？並能考慮到自由面形狀如何隨時間而改變？將是影響數值模擬結果之合理性的最主要關鍵點。本計畫擬採用以體積分率法 (Fractional Volume of Fluid, VOF) 為解算技術之 FLOW-3D 為初步評估之工具，期能與水工斷面模型試驗結果建構良好之一致性。

FLOW-3D 是國際知名流體力學大師 Dr. C. W. Hirt 畢生之作，從 1985 年正式推出後，其計算流體自由水面複雜運動之 VOF 運算技術，在實務工程問題的模擬與計算準確度上皆受到使用者的好評。目前廣泛地應用於航太工業 (Aerospace)、鑄造 (Casting)、噴墨 (Inkjets)、船舶 (Maritime)、水利與環境工程 (Water and Environment) 及微機電工程 (MEMS Applications) 等相關研究，其在準確模擬自由水面的成效上有無可替代的地位。

### 2.5.1 FLOW-3D 之主要特性

由於 FLOW-3D 特有之 VOF 計算技術，能夠提供精確而穩定的計算結果，更能提供自由水面流場詳盡的資訊，深受相關業界及研究單位之肯定，接下來僅就 FLOW-3D 之主要特色略述於後。

#### 1. 多重區塊結構式網格系統 (Multi-Block Structure Grid System)

FLOW-3D 使用有限差分法 (Finite Difference Method, FDM) 為基礎，大部分使用簡單的矩形或六面體之結構式網格系統，將主要的統御方程式予以離散化。但對於複雜的幾何形狀，必須要以增加網格數目的手段來解決，相對地也衍生增加記憶體的使用量及增加運算時間之負面效應。因此在建立網格系統的技巧上，FLOW-3D 採用連結型 (Linked Blocks) 及巢狀型 (Nested Blocks) 之多重網格系統，將

我們所需要加強的區域產生不同解析度的網格點，來精確描述複雜的幾何結構，以減少網格數目及縮短運算時間，並得到較精確的運算結果。

## 2. 流體體積分率法 (Fractional Volume of Fluid, VOF)

在固定網格系統中欲知其自由面形狀時，目前常用自由面追跡法(surface tracking)及流量追跡法(volume tracking)二種方式處理。前者使用一系列之離散點及曲線線段來表示自由面之外形，然後依流體流動方程式及質點運動方程式，計算出每一時間步進內這些離散點及曲線線段的新位置。此方法雖具有方法簡潔、計算存儲量少的優點，但是無法處理自由面翻轉或合併之現象。而屬後者之 VOF 法(Hirt 等[8])，以其儲存量小、應用簡單而深受廣大使用者的喜愛。其基本原理在於定義通過網格單元(grid cells)中，流體和網格體積比函數來確定自由水面，追蹤流體的變化，而非追蹤自由水面上質點的運動，可以輕易地處理自由水面合併或翻轉等非線性現象。VOF 定義每個網格單元中指定及非指定流體之體積函數(the volume of fluid function)為  $F$ ，並根據網格單元中來架構及追蹤自由水面之位置。如圖 2.5.1 所示，若  $F=1$  時，則表該單元內全部被指定流體所佔據；若  $F=0$  時，則該單元內被非指定流體所佔滿；若  $0 < F < 1$  時，則自由水面介於此網格單元中。而流體體積函數需滿足下列之守恒型傳輸方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right] = F_{DIF} \quad \dots\dots\dots(2.5.1)$$

其中， $V_F$  為作用流體之體積分量(the fractional volume)。另  $(A_x, A_y, A_z)$  分別為  $(x, y, z)$  方向網格之面積分量；另外  $(u, v, w)$  為各座標方向之速度分量。而式(2.5.1)等號之右項為紊流衍生擴散項，僅適用於紊流模式中，可表為

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots(2.5.2)$$

上式中  $\nu_F (= c_F \mu / \rho)$  為擴散係數，且  $c_F$  為定值之史密特數。

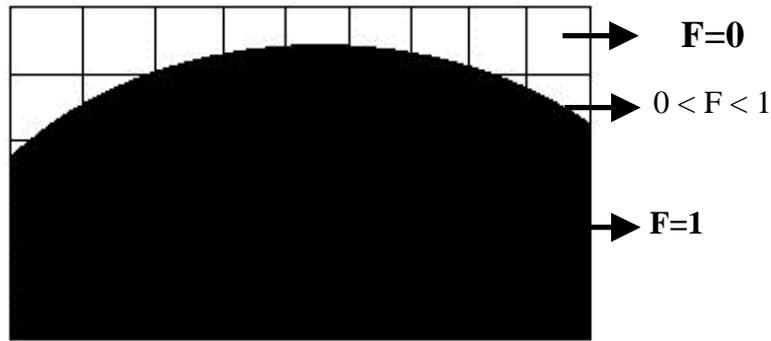


圖 2.5.1 體積比函數  $F(x, y, z; t)$

### 3. 可設定多種類型之邊界條件

可指定各類型之邊界條件，以符合實際工程問題之所需。譬如：對稱面 (Symmetry)、靜止的壁面 (Wall)、與外界大氣接觸面 (Out-Flow)、連續面 (Continuative)、體積流率 (Volume of rate)、波浪 (Wave)、指定壓力 (Specified pressure)、指定速度 (Specified velocity) 等之邊界條件。本研究是以不同的入射波對水力式阻尼結構之影響為主要對象，在入射邊界面上我們可設定為入射波邊界條件 (Wave Boundary Condition)。其理論基礎乃引用 George Biddell Airy 之線性波理論，並假設入射波為由平坦底部的大水槽內造波，而進入計算領域，如圖 2.5.2 所示。

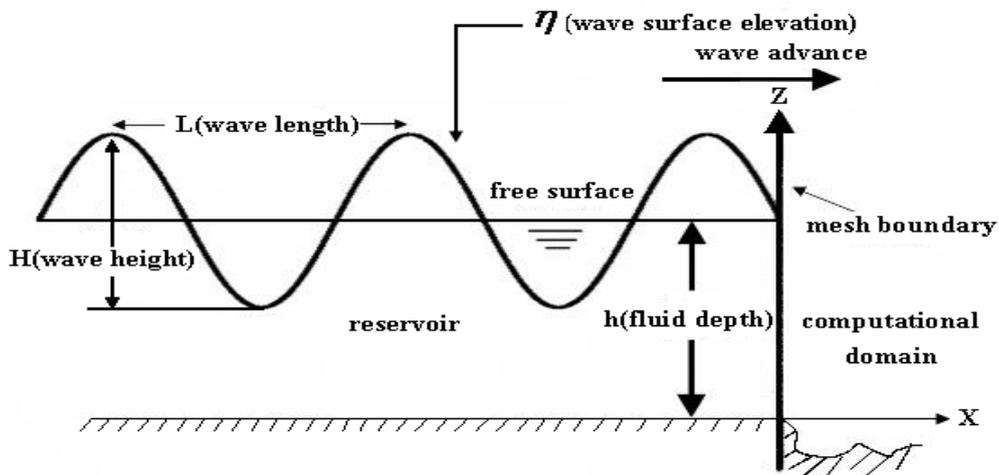


圖 2.5.2 數值造波器示意圖

而其基本假設為：

- (1) 二維不可壓縮流 (2D incompressible Flow)
- (2) 無黏流 (Inviscid) 及非旋性流 (Irrational)
- (3) 線性波必須在靜止的水域產生
- (4) 線性波振幅小於水深及波長
- (5) 自由水面的波高可表為  $\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \varphi)$ ，其中 A 為振幅， $\varphi$  表相位角， $k$  為波數及  $\omega$  表頻率。

根據以上的假設，我們可以將波動問題歸納為位勢函數  $\phi$ ，且滿足 Laplace Equation，其解可表示為

$$\phi(x, z, t) = \frac{A \omega \cosh[k(z+h)] \sin(kx - \omega t + \varphi)}{k \sinh(kh)} \dots\dots\dots(2.5.3)$$

流體速度是二維的 x 及 z 方向組成，可表示為：

$$u(x, z, t) = \frac{A \omega \cosh[k(z+h)] \cos(kx - \omega t + \varphi)}{\sinh(kh)} \dots\dots\dots(2.5.4)$$

$$w(x, z, t) = \frac{A \omega \sinh[k(z+h)] \cos(kx - \omega t + \varphi)}{\sinh(kh)} \dots\dots\dots(2.5.5)$$

波速  $c = \omega/k$  關係式可表示為：

$$c^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \dots\dots\dots(2.5.6)$$

其中， $\lambda$  為波長；波的頻率和振幅的關係式為

$$\omega^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \dots\dots\dots(2.5.7)$$

一旦入射波進入計算領域內時，不需要限定為平坦底部，且流體可以是無黏流 (inviscid)，層流 (laminar) 或是紊流 (turbulent)。

在此這種情況下，波面雖然可能偏離上述之解析解，但由於整體流場為求解完全 Navier-Stokes 方程式，故非線性波解亦包含於求解過程。此外 FLOW-3D 亦可設定非線性入射波 (non-linear wave)，它是藉由幾個不同振幅、頻率及位相角的線性波所組合而成的。

#### 4. 多孔隙介質模組 (Porous Media Models)

流體通過多孔性介質時，常會因介質孔隙內之黏性及轉折效應 (tortuosity effect)，致令流速  $U$  受阻礙變化，並產生流量損失 (flow losses) 之狀況。Henri Darcy (1856) 於觀測水流經過濾沙層時，發現流通介質之流速  $U$  與介質前後壓力差成正比，並與通過濾沙之厚度成反比。並提出

$$U = -K_p \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots(2.5.8)$$

之關係式，這成為第一個多孔隙流的公式，稱為達西法則 (Darcy's Law)。其中， $K_p$  稱為導水係數 (hydraulic conductivity) 或滲透係數 (permeability)，其值與作用流體無關，且單位為  $m^2$ 。一般而言，碎石或粗砂之  $K_p = 10^{-7} \sim 10^{-9} m^2$ ；陶土或黏土之  $K_p = 10^{-13} \sim 10^{-16} m^2$ 。其值越小時，越阻滯流體流通，並轉化為對流體之阻力，成為運動量方程式 (momentum equation) 之附加阻力 (additional drag)。FLOW-3D 將上述之附加阻力  $\bar{b}$  以

$$\bar{b} = K_d \bar{u} \dots\dots\dots(2.5.9)$$

之方式，附加於下節所述運動量方程式之等號右項。其中  $K_d$  為多孔隙介質之阻力係數 (the porous media drag coefficient)； $\bar{u}$  為網格單元之瞬時速度。且  $K_p$  及  $K_d$  之間，存在著

$$K_p = \frac{\varepsilon \mu}{\rho K_d} \dots\dots\dots(2.5.10)$$

之關係式，其中， $\varepsilon$  為多孔隙介質之孔隙率 (porosity)。

FLOW-3D 針對不同型態之多孔隙流特性，有多種決定  $K_d$  之方式，以下僅就與本研究相關之方法略述於下：

(1) 孔隙率依存法 (Porosity Dependent drag)

$$K_d = a \times \varepsilon^{-b} \dots\dots\dots(2.5.11)$$

其中，常數  $a=180/D^2$ ，不可設為 0 (將被視為無限流通體)， $D$  為顆粒直徑。另  $b=1.8/D \sim 4.0/D$  為選項值，可設為 0。此方式適用於小粒徑，且為  $(R_e)_D = \rho UD / \mu < 1$  之場合。

(2) 飽和流依存法 (Drag Calculations in Saturated Flows)

$$K_d = \frac{D^2 \varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2} \dots\dots\dots(2.5.12)$$

上式亦被稱為 Carmen-Kozeny 公式，適用於飽和流之場合。

(3) 雷諾數依存法 (Renolds Number Dependent Drag)

當多孔隙介質是由粗砂粒 (Coarse particle) 或小徑管柱 (Fibers) 所架構時，流場流速變化急遽，此時流量損失常與速度之平方成正比，若

$$(R_e)_D = \frac{\rho UD}{\mu} > 10$$

將同時考量線性達西流 (Linear Darcian Flow) 及二次非達西流 (Quadratic Darcian Flow) 之效應，採用關係式 (2.6.13)

$$K_d = \frac{\mu}{\rho} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \left[ a \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + b \frac{(R_e)_D}{D} \right] \dots\dots\dots(2.5.13)$$

## 2.5.2 FLOW-3D 所使用之理論方程式

### 1. 質量連續方程式 (Continuity Equation) :

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{DIF} \dots\dots\dots(2.5.14)$$

其中， $\rho$  為流體密度。等號右項為紊流衍生擴散項，可表為

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_F A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_F A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_F A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right\} \dots\dots\dots (2.5.15)$$

僅適用於紊流模式中，當計算非均勻密度流體之紊流模式時不可或缺之項目。

## 2. 動量方程式 (Momentum Equation)

由三個運動方向 ( $x, y, z$ ) 所組成的 Navier-Stokes Equations 為

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x) \dots\dots (2.5.16)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y) \dots\dots (2.5.17)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z) \dots\dots (2.5.18)$$

式中 ( $G_x, G_y, G_z$ ) 為三個方向的重力加速度分量；( $b_x, b_y, b_z$ ) 為流體流經多孔性介質 (porous media) 或多孔性阻隔板 (porous baffle plate) 時，各個方向因流量損失 (flow losses) 所引致之阻力分量 (drag force)，如式 (2.5.9) 所示。( $f_x, f_y, f_z$ ) 為各方向的黏滯力分量 (viscous force) 可表示為

$$\rho V_F f_x = - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) \right\} \dots\dots\dots (2.5.19)$$

$$\rho V_F f_y = - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) \right\} \dots\dots\dots (2.5.20)$$

$$\rho V_F f_z = - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \right\} \dots\dots\dots (2.5.21)$$

其中

$$\tau_{xx} = -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \dots\dots\dots(2.5.22)$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \dots\dots\dots(2.5.23)$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \dots\dots\dots(2.5.24)$$

$$\tau_{xy} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \dots\dots\dots(2.5.25)$$

$$\tau_{xz} = -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \dots\dots\dots(2.5.26)$$

$$\tau_{yz} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \dots\dots\dots(2.5.27)$$

$\mu$  為黏滯係數； $\tau_{ii}$  ( $i = x, y, z$ ) 表正向應力； $\tau_{ij}$  ( $i, j = x, y, z; i \neq j$ ) 為剪應力。

### 2.5.3 數值模擬流程

FLOW-3D 為一 CFD 套裝軟體，須依據如圖 2.5.3 所示之進行數值模擬，以下僅就主要步驟循序略述於後：

#### 1. 建立及讀入計算模型

為了建構水工實驗縮尺外型及要求尺寸精確度之計算模型，本研究採用 AUTO-CAD 繪圖軟體，依照實驗模型尺寸建立 3D 之幾何模型，並匯出 STL 格式之圖檔，供 FLOW-3D 讀取。

為了要便於建置多孔隙介質，本研究之數值模型採用零件組合的方式建立。圖 2.5.4 為直立壁開孔模型外觀圖，而圖 2.5.5 多孔隙介質模型外觀圖，最後將其組合成如圖 2.5.6 所示之數值模擬模型元件組合外觀圖。

## 2. 建構網格系統

網格建立的方式採用連結式網格區塊法，設定兩個計算網格區塊。第一區塊置於  $x=0\sim 0.4\text{m}$  處，用來納入前述建置之模型；第二區塊置於  $x=0.4\sim 33\text{m}$  處，用來做為造波後之行走水道區。然而為了能精確模擬流場急速變化之消能結構物區域，因此針對第一區塊部份的網格需予以緊密化，使其物理量於計算過程中具連續性，以減少計算誤差。另在設定連結式網格區塊時，需注意在兩個網格區塊的連結面上，其網格間距之間的比例不能過大，會造成數值計算結果之誤差。本期數值模擬採用均勻網格切割計算領域，如圖 2.5.6 所示，針對第一網格區塊設定單位網格尺寸為  $1\text{cm}$ ，總網格數約 5 萬個；第二網格區塊設定單位網格尺寸為  $1.6\text{cm}$ ，總網格數約 105 萬個，而圖 2.5.7 為網格系統之 3D 外觀圖。

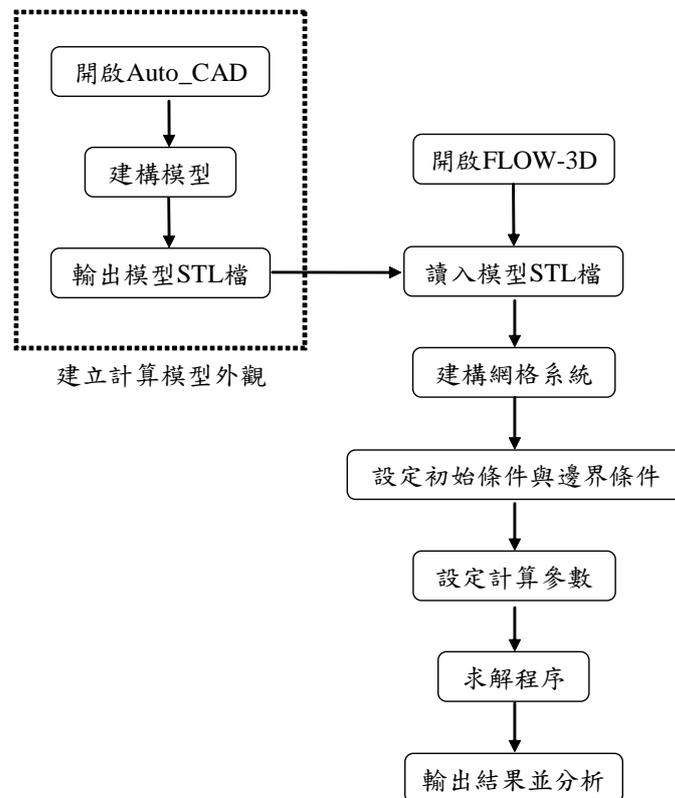


圖 2.5.3 數值模擬流程圖

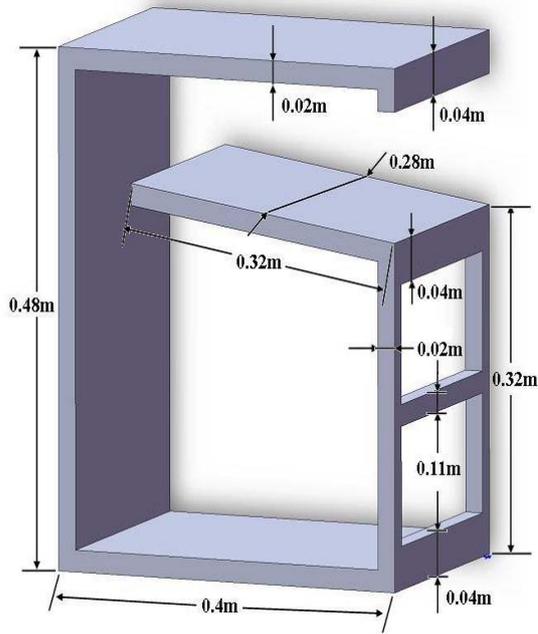


圖 2.5.4 直立壁開孔模型外觀圖

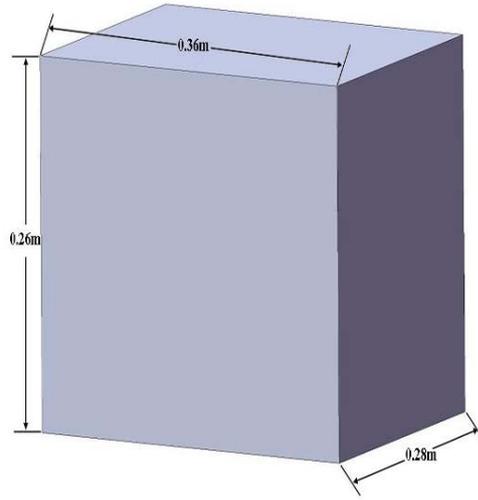


圖 2.5.5 多孔隙介質模型外觀圖

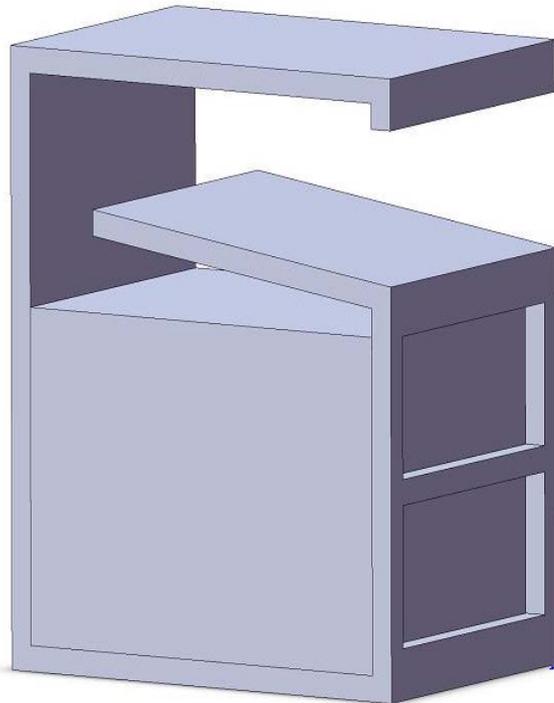


圖 2.5.6 模型元件組合外觀圖

### 3. 設定邊界條件

為了能與水工試驗條件具一致性，數值模擬設定如圖 2.5.8 所示之邊界條件。W 表無滑動之剛體壁面，流體無法流出此邊界；O 表與外界大氣接觸之開放界面；LW 為造波邊界，可依圖 2.5.2 所示，給定如：波高(H)、週期(T)、水深(h)及位相角( $\varphi$ ) 等入射波參數；S 表兩個網格之連結面，允許流體連續通過此壁面。

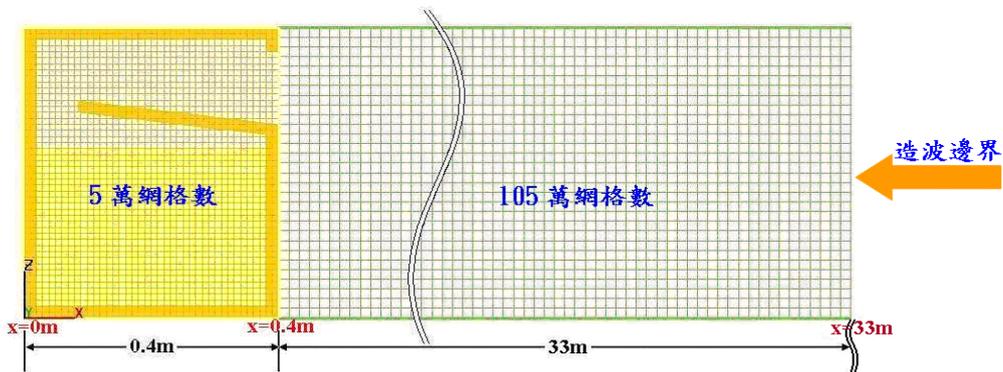


圖 2.5.7 x-z 平面網格區塊位置示意圖

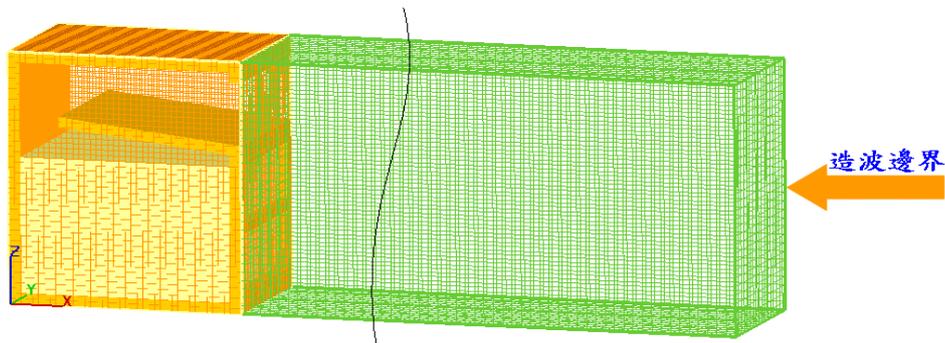


圖 2.5.8 網格系統之 3D 示意圖

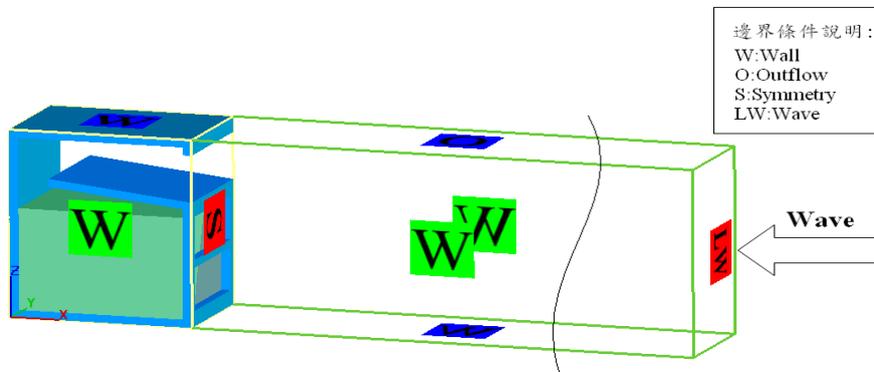


圖 2.5.9 計算領域之邊界條件示意圖

## 2.5.4 初步率定的數值計算結果與討論

### 1. 不透水式直立岸壁及不透水式斜坡

針對直立壁模型之數值模擬結果，因其前方為不透水之實體結構，直立壁後方之空間可視為一儲水槽。當  $t=50s$  之前時，流體尚未越過斜坡，其水位仍然保持一定。但當  $t=60s$  時，流體動能足夠，便會越過斜坡而堆積在後方，使其水位慢慢升高，並發生振盪。若後方的流體水位大於斜坡之高度，流體便會往回流。此種現象於水工斷面模型預備試驗時，亦有類似狀況。未來吾人將於隨後之章節，針對消波室增加後方排水或側向排水之機構予以檢討。

### 2. 透水式開孔直立岸壁及不透水式斜坡

針對開孔式直立壁模型之數值模擬結果，因其前方為可透水之實體結構，直立壁後方之空間形成一水位上下隨時間變化之振盪儲水槽。當  $t=30s$  時，此時雖尚無流體越過斜板，但因波動之流體運動直接由直立壁開孔部分進入消波室，其水位已開始緩慢地上下振盪。當  $t=30s$  之後時，雖流體從未越過斜板，但後方儲水槽之上下振盪越來越激烈，甚而流體由斜板回流之情事出現。究其原因，應是消波室部分充分通水所致，未來將在考量填入多孔隙介質探討不同透水性的情形。

藉由初步的率定，除了持續掌握瞭解 FLOW-3D 之強大功能，期能更熟稔操作技巧之外，更嘗試檢討多孔隙介質對波浪水理之影響、不同條件下波浪反射率  $KR(\text{reflection ratio})$  之變化，以及略微評估水工試驗無法遂行之長週期波浪特性之可行性。且爾後將先僅針對如表 2.5-1 所示之波浪條件，進行數值模擬與預備試驗結果間之分析及探討，期能精進數值模擬之穩定性。

表 2.5.1 數值計算之波浪條件

CASE	週期 T (s)	波高 H (m)	水深 h (m)	波長 L (m)	波速 C (m/s)
1	1.0	0.04	0.34	1.416	1.416
2	1.4	0.04	0.34	2.259	1.614
3	1.8	0.04	0.34	3.056	1.697
4	2.2	0.04	0.34	3.829	1.741
5	2.6	0.04	0.34	4.586	1.764
6	3.0	0.04	0.34	5.338	1.779
7	3.4	0.04	0.34	6.085	1.790
8	3.8	0.04	0.34	6.828	1.797

此外，為了往後便於由數值模擬，能就不同類型之消能結構物，檢討其消波效能，本期研究沿用 Healy(1953)所提出之方法，如圖 2.5.9 所示，藉由腹點(antinode)及節點(node)處之波形振幅，以式(2.5.28)計算波浪反射率，並以其做為評估準則，以下僅將初步結果列述於後。

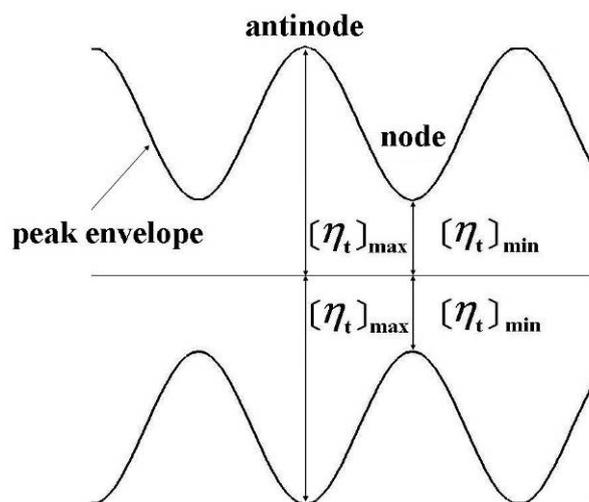


圖 2.5.10 入射波與反射波合成之包絡線

$$K_R = \frac{[\eta_i]_{\max} - [\eta_i]_{\min}}{[\eta_i]_{\max} + [\eta_i]_{\min}} \dots\dots\dots(2.5.28)$$

小斷面水槽預備試驗時，於透水式開孔直立壁後方，堆置入平均孔隙率  $\varepsilon=0.35$  之小碎石。為了能與數值模擬間相互驗證，於水道中散佈波高計，量測波浪時間序列之波高值，並期能評估兩者間反射率(KR)之差異性。本期試驗自造波器(波高計 1 距離 7m)至直立壁止(波高計 4 距離 3.45m)，依編號序設置了四支波高計，其相對位置如圖 2.5.10 所示。圖 2.5.11 為 CASE 1 之波高計試驗量測值，圖中由上到下，依序對應 1~4 號波高計之量測結果。由波高計 1 之結果得知，造波器啟動後約於 10 秒前導波通過，其後約 20~50 秒間有穩定的波形持續通過。但於約 35 秒時，前導波自直立壁一次反射後通過波高計 4。為了能量取穩定之波形，並避免造波器二次反射波之干擾，即關閉造波器。約 50~60 秒間波高開始衰減，直至 70 秒二次反射波通過。

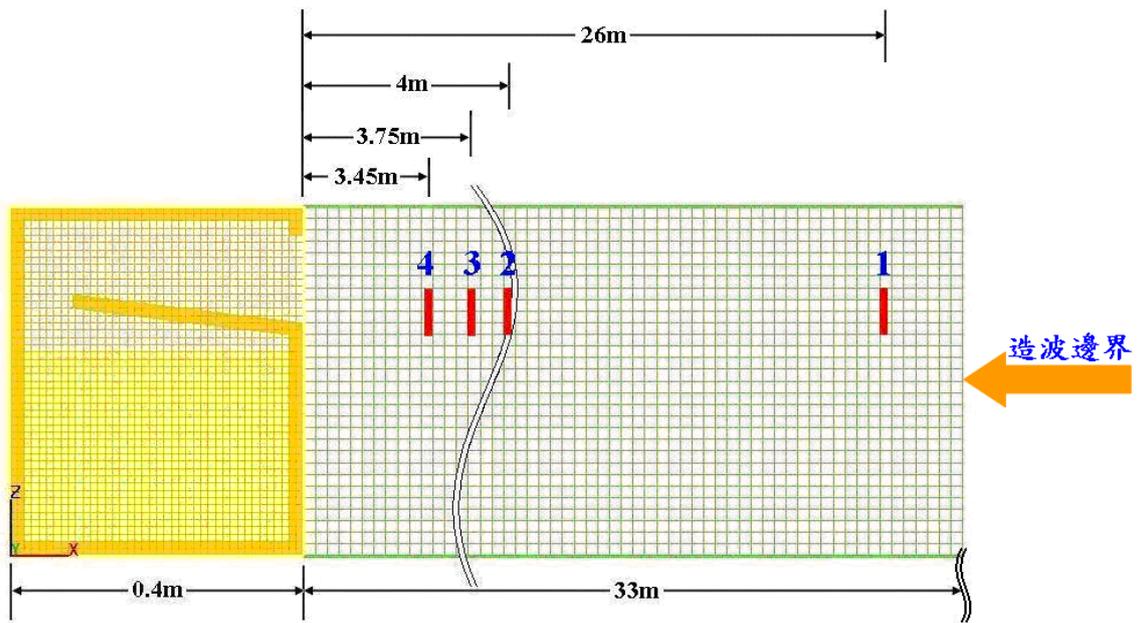


圖 2.5.11 波高計 1 至波高計 4 之量測位置

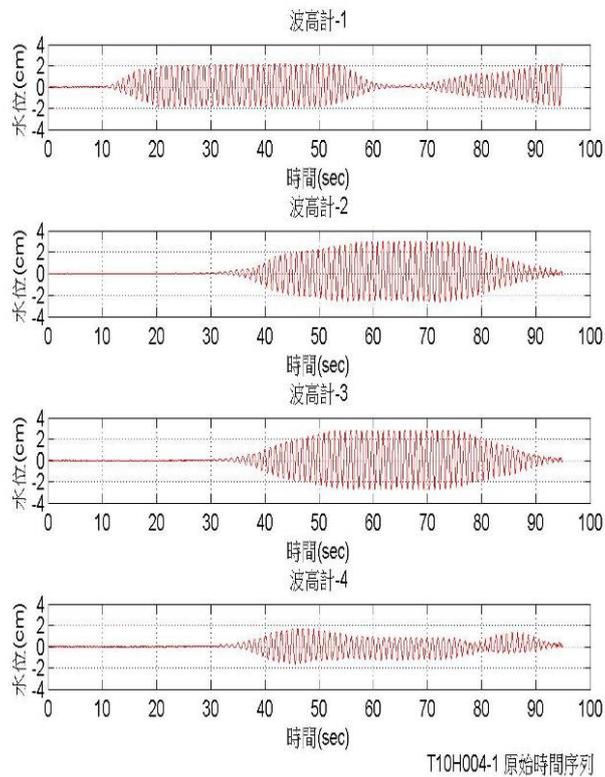


圖 2.5.12 小斷面水槽預備試驗之波高計量測值示意圖 (CASE 1)  
 (  $T=1.0\text{sec}$ ,  $H=0.04\text{m}$ ,  $h=0.34\text{m}$ ,  $L=1.416\text{m}$ ,  $C=1.416\text{m/sec}$  )

本部分研究主要著重於如何導入 FLOW-3D 之多孔隙介質模組 (Porous Media Models)，並與試驗結果相互驗證數值模擬之可信性。為了簡單化起見，與試驗條件相同，於數值計算中，將多孔隙介質視為  $\varepsilon=0.35$  之碎石或粗砂 ( $K_p=10^{-7}\sim 10^{-9}\text{m}^2$ ) 材質所組成，並採用 FLOW-3D 之預設之孔隙率依存法 (porosity dependent drag) 進行數值計算。此外數值造波器自計算開始，即持續不斷地造波，直至計算結束為止 (60s)，這是與水槽試驗極為不同之處。

此外數值模擬波高計之位置，除了波高計 1 與水槽試驗位置相同外，為了能符合 Healy(1953)之準則，並獲得足以信賴穩定之反射率 KR(reflection ratio)，其餘三支波高計採下列原則設置：

- (1) 數值波高計 4：距直立壁 2L 處，並自此處擷取 2T 之波高值。
- (2) 數值波高計 2：距直立壁 4L 處。
- (3) 數值波高計 3：介於波高計 1 及波高計 2 之間。

圖 2.5.12 為 CASE 4 之數值計算結果示意圖，由波高計 1 之計算結果可知，數值造波器開始計算後，前導波約 5 秒後通過，與由波速 ( $C=1.416\text{m/s}$ ) 試算到達波高計 1 之時間完全一致，而水槽試驗延遲至 10 秒才抵達，可足證數值模擬法之精確度。其它波高計前導波，亦與前述同樣狀況。

為了進一步確認本研究採行之數值模擬之合理性，由數值結果試算 Case1~Case4 之反射率，並與試驗結果比較後列於表 2.5-2。由結果可看出，除 Case1 較水槽試驗過高評估，尚需後續再予以檢討分析其原因之外，其它之反射率與水槽試驗結果，大致有相同的趨勢，證明反射率(KR)之推算方法具高採信度。

表 2.5.2 數值模擬及水槽試驗之反射率(KR)比較表

Case	造波條件	數值模擬	水槽試驗	
1	造波週期：1.0s 造波波高：4cm	0.1921	空水槽	0.0172
			方案一	0.0251
2	造波週期：1.4s 造波波高：4cm	0.1111	空水槽	0.0217
			方案一	0.0481
3	造波週期：1.8s 造波波高：4cm	0.1837	空水槽	0.0171
			方案一	0.1064
4	造波週期：2.2s 造波波高：4cm	0.1318	空水槽	0.0218
			方案一	0.1592

綜合上述之結果與討論，可歸納本部分之研究成果：

- (1)所採用之數值模擬方法，能適切地展現合理之波浪水理現象，可供做為後續數值研究之可靠工具。
- (2)所建構之反射率(KR)試算法，與水工模型試驗大致有相同的趨勢，可供做為後續評估分析之準則。

後續需要在進行以下項目的探討：

- (1)探討其它多孔隙介質流量損失模式，對波浪水理之影響。
- (2)不同波浪條件下及其它消能結構物方案之定量性探討分析。

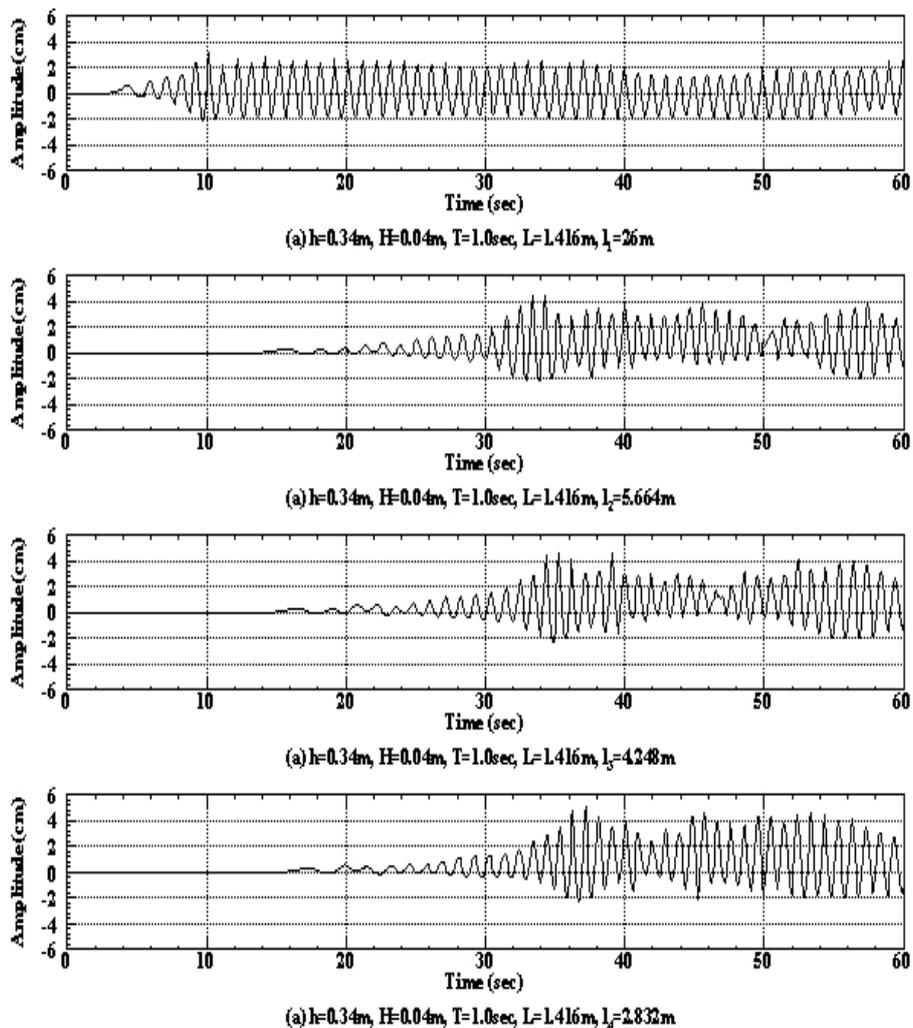


圖 2.5.13 數值計算結果示意圖 (CASE 1)

( $T=1.0\text{sec}$ ,  $H=0.04\text{m}$ ,  $h=0.34\text{m}$ ,  $L=1.416\text{m}$ ,  $C=1.416\text{m/sec}$ )

### 2.5.5 長週期波浪的數值模擬試驗

由於水工模型試驗在造波週期方面有其極限，無法充分模擬極長週期的造波條件。為了更深入了解長週期波浪作用於水力式消能碼頭，本研究嘗試使用 FLOW-3D 進行數值模擬。其目標是首先利用與水工模型試驗相同的造波條件與模型佈置進行數值模擬的比較與驗證，以了解 FLOW-3D 模擬水面波動即與結構物之互制行為的合理性；其次

則將利用 FLOW-3D 進行更長週期的數值模擬，以了解長週期波動作用下新型消波式結構物的消波能力與其附近的水理現象。相關設定如下：

### 1. 模型縮尺

選用與水工模型斷面試驗相同之模型縮尺為 1/36（即長度縮尺為 1/36、時間縮尺 1/6）。

### 2. 試驗模型、水深與波浪條件

數值模擬採用與水工模型試驗相同之模型配置，如表 2.4.9 所示，包含改變斜坡坡度  $\tan\theta = 1/2$ 、 $1/4$  和  $1/8$ ，以及改變縱深比  $D_b/D_a = 1$ 、 $2$  和  $3$ ，斜坡坡度與縱深比進行相互配對共有 9 種不同的試驗配置，消波孔隙室中使用相同之塊石孔隙率為 0.35。

### 3. 試驗地形設置與網格、波高擷取設定

如圖 2.5.14 所示，模型設置於試驗地形上，試驗地形為一 20m 平台經由一 20m 斜坡連結造波機前方之水平段。網格設置基本為粗網格  $8\times 8\times 8\text{cm}$ ，並針對試驗模型配置進行網格加密即細網格以  $1\times 1\times 1\text{cm}$  進行計算，於平台上距試驗模型 2.5m、3.7m 與 4.9m 間距 1.2m 進行反射率波高擷取位置。

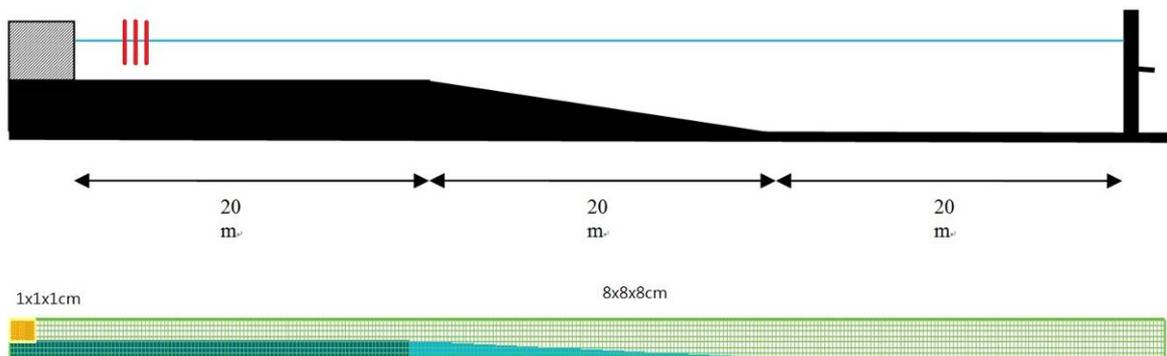


圖 2.5.14 試驗設置與網格設定圖

#### 4. 試驗結果與基本分析

將 FLOW-3D 計算所之資料進行輸出，並依據其網格中之網格佔水比例  $f$  值進行判斷，以求得水面波動情形，並將其繪製成原始時序圖將波型變化情形儲存下來，如圖 2.5.15 所示，而後進行反射率之計算。與水工模型試驗相同，各配對之波高計所計算得到的反射率都點繪於圖上，並求其近似迴歸反射率曲線，如圖 2.5.16 所示。

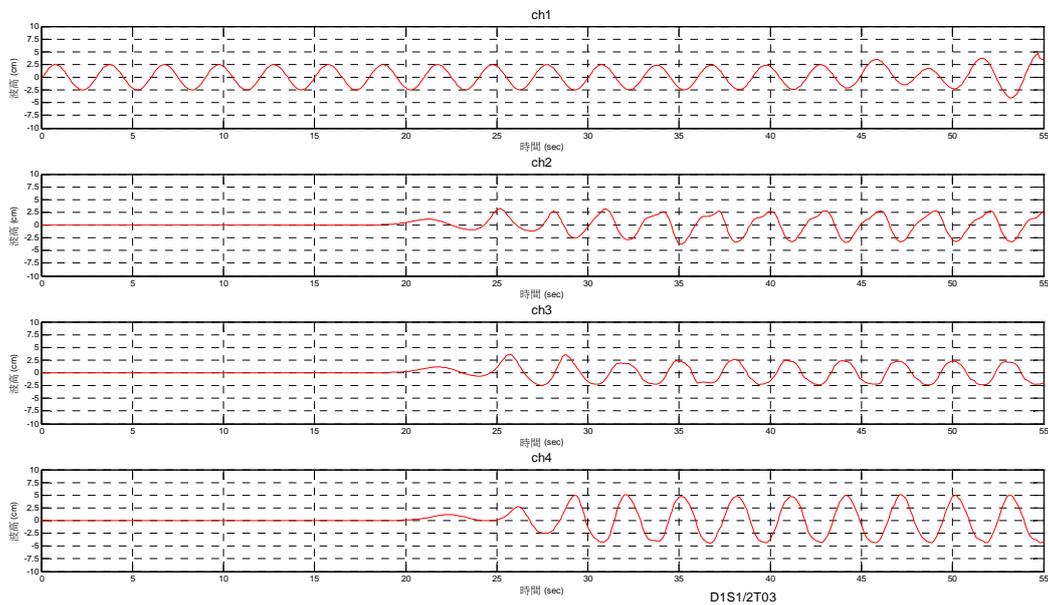


圖 2.5.15 縱深比 D1、斜坡坡度 1/2、週期 3.0s 原始時序圖

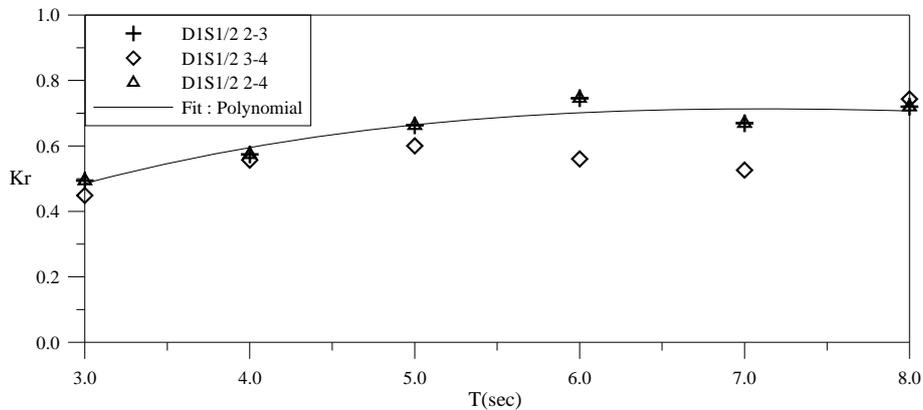


圖 2.5.16 縱深比 D1，斜坡坡度 S1/2 時之數值模擬反射率比較圖

## 5. 綜合比較

### (1) 固定縱深比改變斜坡坡度比較

當固定縱深比改變斜坡坡度時三種斜坡坡度之反射率變化差距並不大且有許多相似的趨勢，見圖 2.5.17~圖 2.5.19，於縱深比 D1 時斜坡坡度較緩於 3.0s~4.0s 消波效果優於其他兩種坡度，坡度 1/2 於週期 3.0s~6.0s 之反射率最高，而於 7.0s~8.0s 時為最低其原因為坡度較緩的兩種配置因為消波式縱深較小，波浪進入後隨即反射且因斜坡高度較小所以少部分經由斜坡下滑至前方水面，故反射率高於斜坡坡度 1/2 之情形。

縱深比 D2 與 D3 於改變斜坡坡度後反射率變化趨勢相似，反射率約隨週期之增加由 0.1 變化至 0.4 左右，縱深比 D2 約在週期 5.0s 時反射率爬升至 0.4，而後變化趨緩有些許下降，縱深比 D3 則由週期 3.0s~8.0s 反射率平緩上升。

### (2) 固定斜坡坡度改變縱深比

當固定斜坡坡度改變縱深比由圖 2.5.20~圖 2.5.22 反射率整體趨勢隨縱深比之增加而降低，固定斜坡坡度 1/2 時縱深比 D1 與 D2 之反射率於週期 5.0s 時差距最小約 0.2，而週期 3.0s 時差距為 0.4，縱深比 D2 與 D3 於週期 4.0s~5.0s 時反射率差距最大約為 0.2 且往兩側週期反射率降低。

固定斜坡坡度 1/4 時縱深比 D1 與 D2 之反射率於週期 5.0s 時差距最小約 0.2，而週期 3.0s 時差距為 0.45，縱深比 D2 與 D3 於週期 5.0s 時反射率差距最大約為 0.1 且往兩側週期反射率降低。

固定斜坡坡度 1/8 時縱深比 D1 與 D2 之反射率於週期 5.0s 時差距最小約 0.1，而週期 3.0s 時差距為 0.35，縱深比 D2 與 D3 於週期 5.0s 時反射率差距最大約為 0.2 且往兩側週期反射率降低。

長週期波浪作用於水力式消能碼頭改變縱深比、斜坡坡度與波浪條件，了解改變變數對於水力式消能碼頭前方式反射率變化情形，用以判斷其配置之消能效果，固定縱深比改變其斜坡坡度之各坡度反射率隨週期變化趨勢相似，固定斜坡坡度時縱深比的增加可使反射率隨週期變化的趨勢下降，利用縱深比來消減入射波波浪能量的效果較斜坡坡度之效果佳，而斜坡坡度延伸之高度對於水體運動於斜坡上是否越波有些微影響。

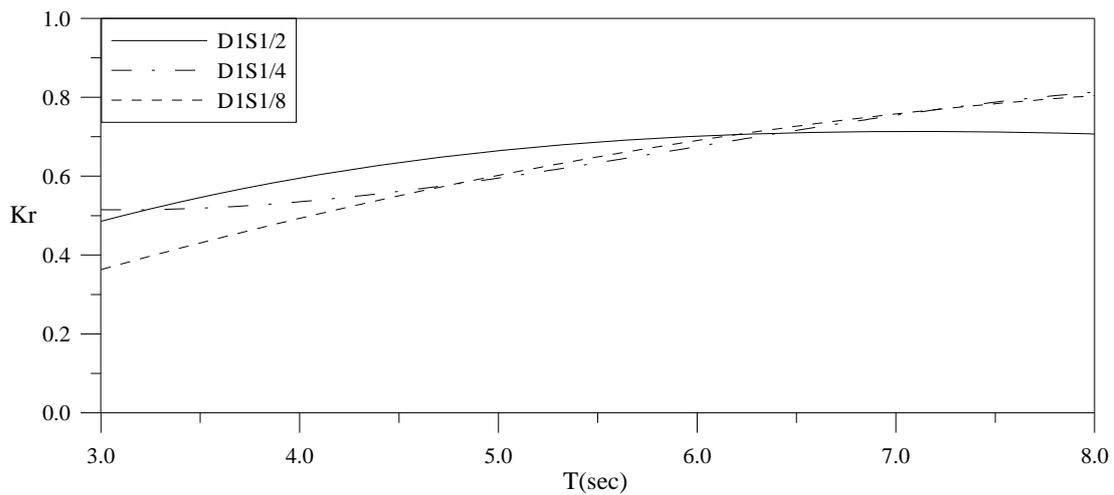


圖 2.5.17 縱深比 D1 時，不同斜坡坡度之數值模擬反射率比較圖

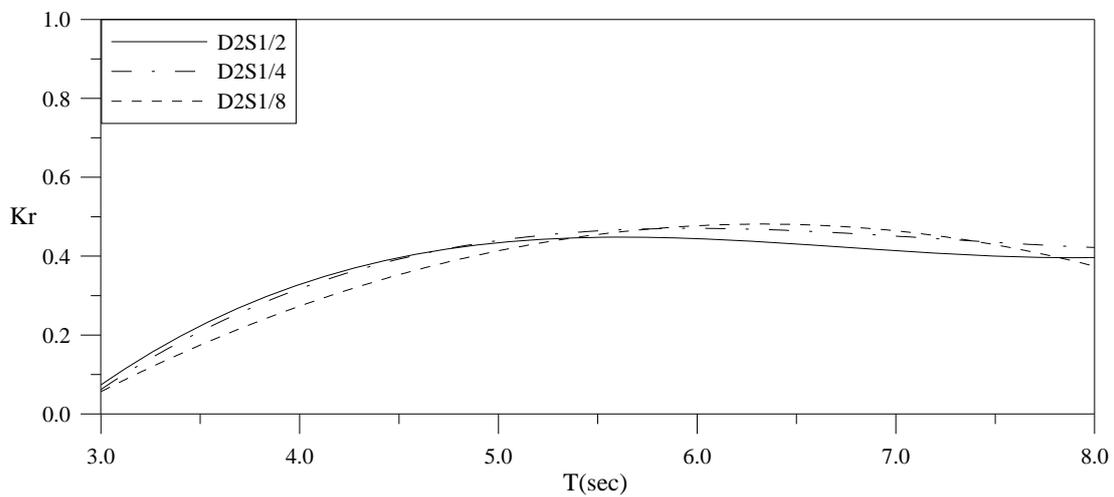


圖 2.5.18 縱深比 D2 時，不同斜坡坡度之數值模擬反射率比較圖

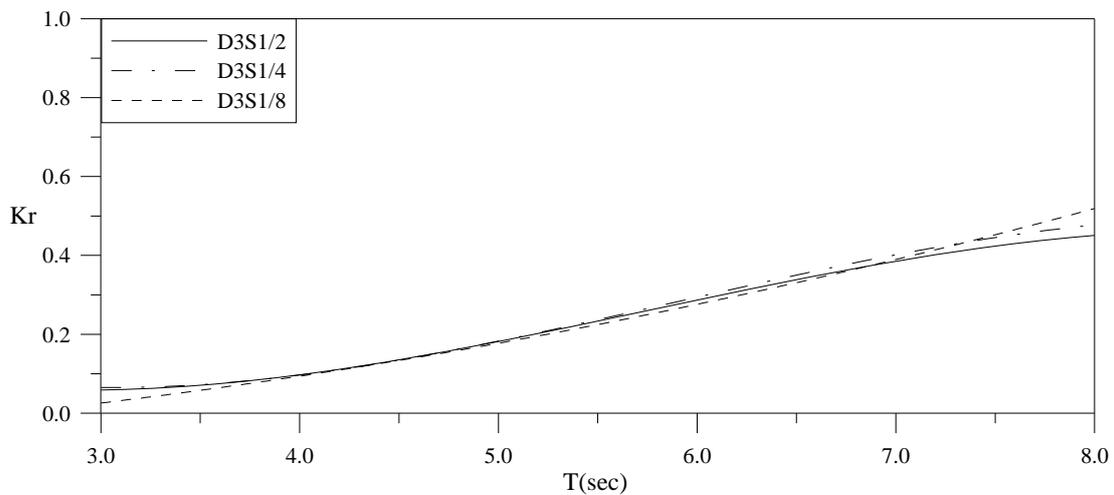


圖 2.5.19 縱深比 D3 時，不同斜坡坡度之數值模擬反射率比較圖

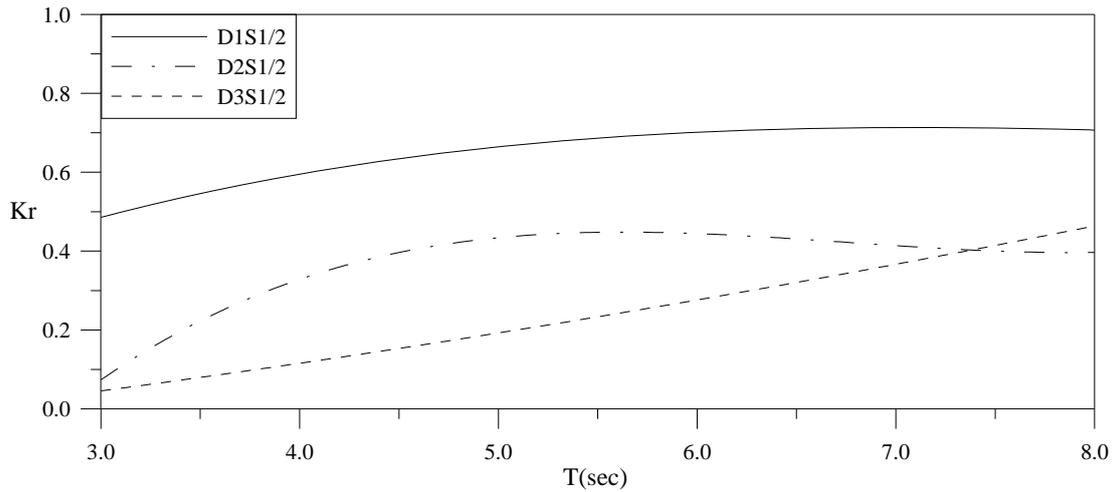


圖 2.5.20 斜坡坡度  $S1/2$  時，不同縱深比之數值模擬反射率比較圖

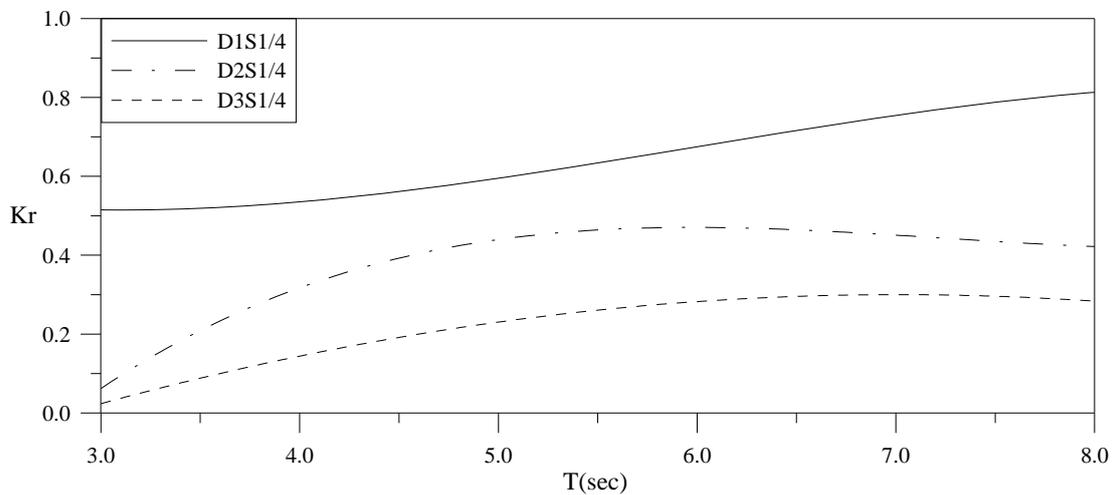


圖 2.5.21 斜坡坡度  $S1/4$  時，不同縱深比之數值模擬反射率比較圖

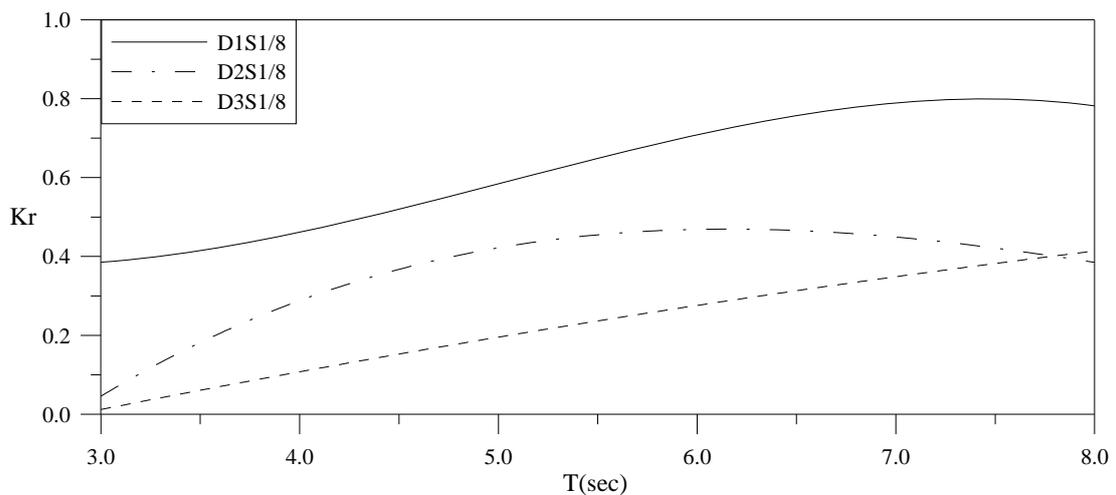


圖 2.5.22 斜坡坡度  $S1/8$  時，不同縱深比之數值模擬反射率比較圖

## 2.5.6 平面水槽之數值模擬試驗

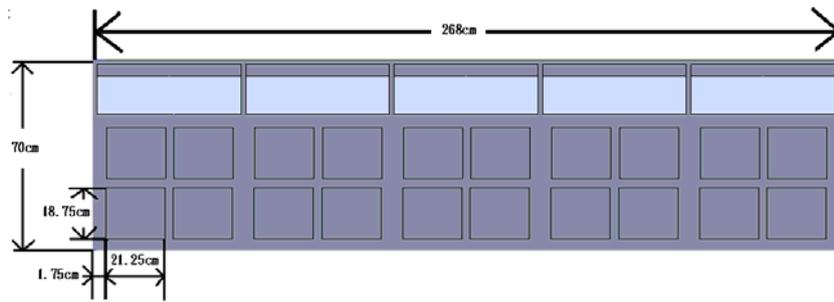
由於堤前的波浪反射率，受消能斜坡是否能促成入射波浪越波及其越波量的大小，造成很大的影響。此外堤後方中空消波室的縱深長，對越波後所造成的水位上升與振盪現象，亦是另一需考量之影響因子，此現象或可用消波室具可側向排水之方式來消減。

前節考慮光滑不透水斜坡表面、固定水深、波高及孔隙率之條件下，改變週期、斜坡坡度與縱深比三項參數，藉由水工模型試驗及數值模擬間之比較驗證，探討其對反射率之相互影響關係，並做了廣泛及系列之討論。但因未考量外堤後方中空消波室之側向排水功能，與實際之水力式消能碼頭結構物設置環境有所差異，實有必要做定性之先期探討，以利供未來實際施作之參考。

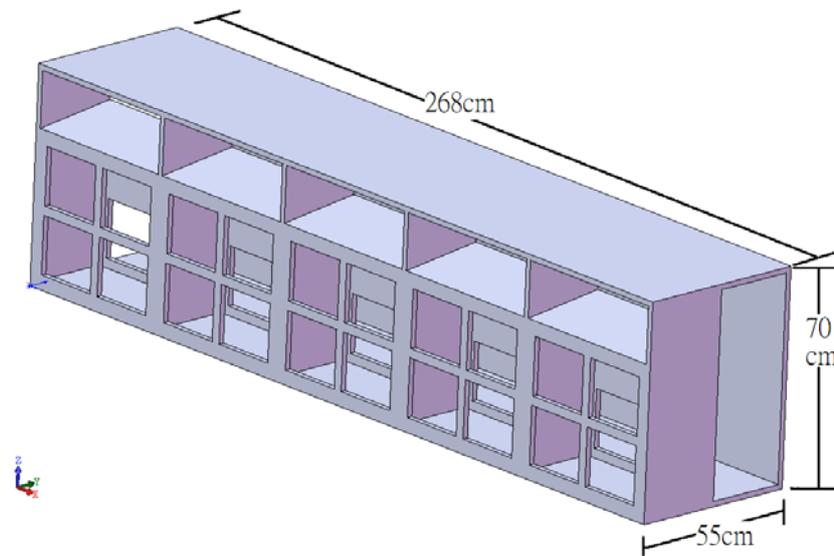
為了解具側向排水之新型消波式結構物，其消波能力與附近的水理現象。另為與前節結果做驗證，以及能契合實際狀況，除了沿用其相同之基本條件外，其他與數值模擬之相關設定如下：

### 1. 數值模擬模型設定

為提高實際施作之可行性，以及兼顧消能結構物強度，可考慮前節所採用的單一斷面模型，做多樣式的組合。吾人採用由五個單一斷面模型，所組合而成 268×70×55cm 之模組化數值模擬模型，如圖 2.5.23 所示。其中板厚均為 1.75cm,中間的十字結構的寬度為 3 公分。另為了往後探討多孔隙介質之效應，於中空之消波室嵌入如圖 2.5.24 所示，孔隙係數  $\varepsilon = 0.35$  之透水性介質。



(a) 正視圖



(b) 3D 立體圖

圖 2.5.23 組合式數值模擬模型及尺寸圖(縱深比  $D1 = D_b / D_a = 1$ ，斜坡坡度比 S1/8)

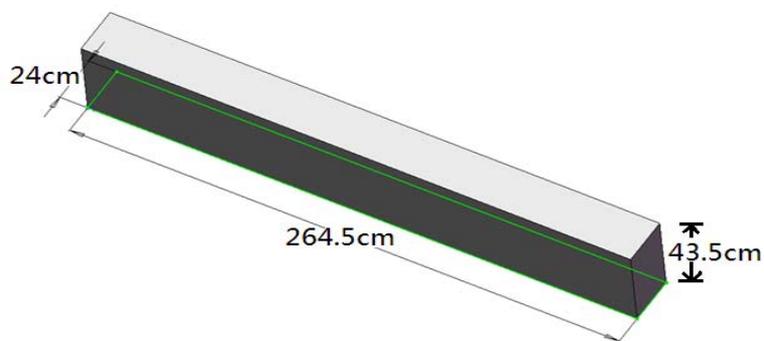


圖 2.5.24 嵌入組合式數值模擬模型之多孔隙介質外觀尺寸圖  
(孔隙係數  $\varepsilon = 0.35$ )

## 2. 試驗地形設置與網格、波高擷取設定

如圖 2.5.25 所示，模型設置於長度 20m 平台地形之一端，另一端為數值造波器之入射波端。於平台上距試驗模型 2.5m、3.7m 與 4.9m 間距 1.2m 設為反射率波高擷取位置。

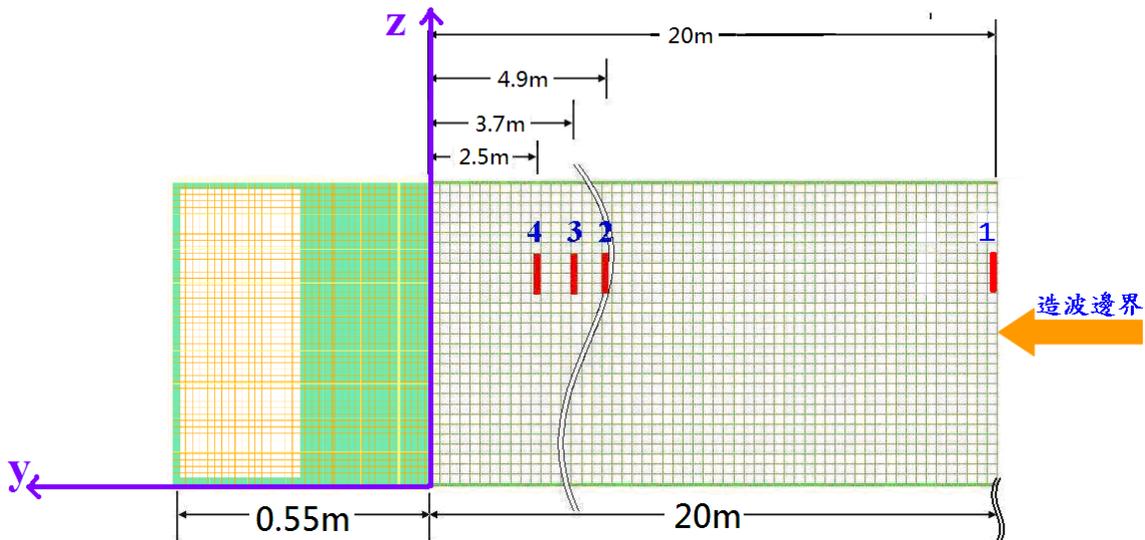


圖 2.5.25 y-z 平面網格配置及波高擷取位置示意圖

此外為了探討側向排水效應，設定如圖 2.5.26 所示之平面水槽 (20.55×5.36m)，並將模型設置於各距二側壁面 1.34m 處，使模型可將前方之水流，從後方通道往 x 方向排水。

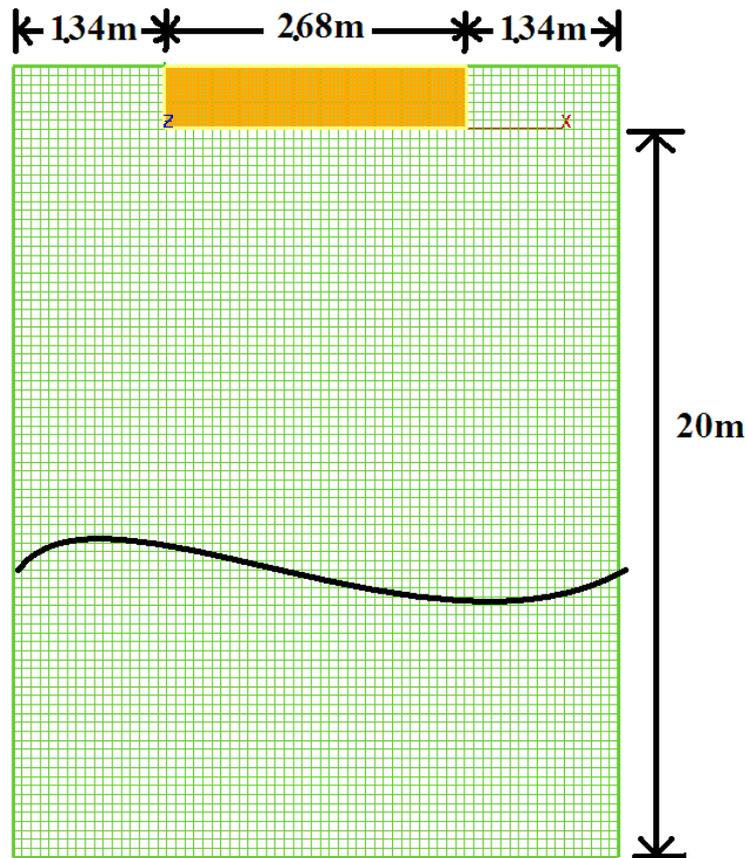
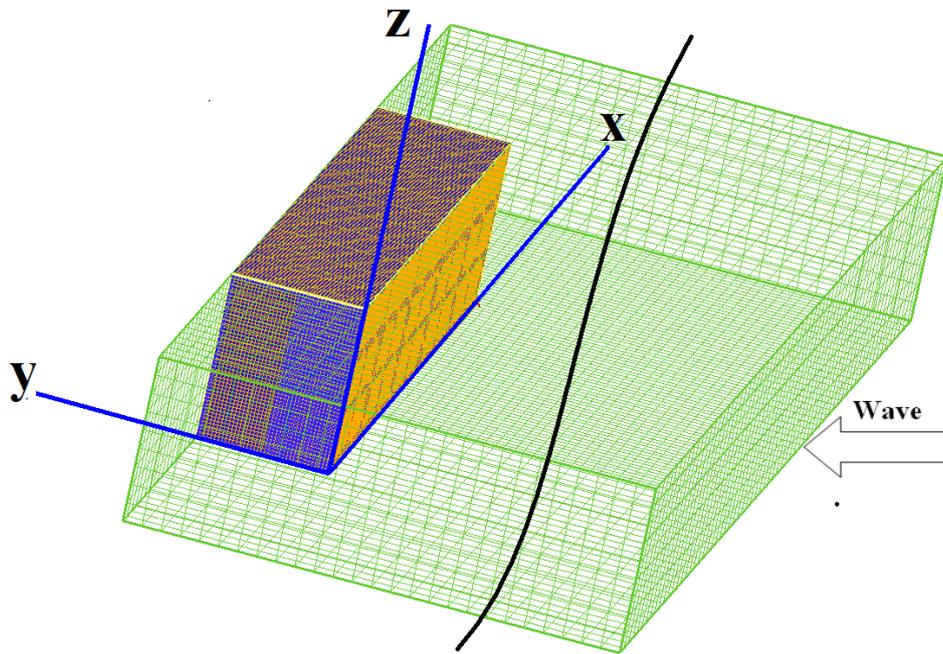


圖 2.5.26 y-z 平面網格配置

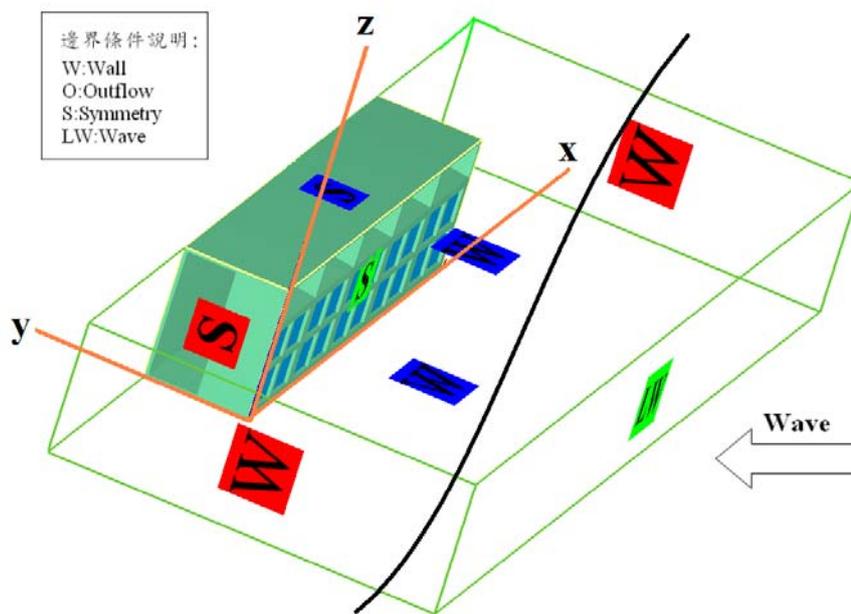
網格設置基本為粗網格  $8 \times 8 \times 8 \text{cm}$ ，並針對試驗模型配置以  $1 \times 1 \times 1 \text{cm}$  細網格予以加密，並構成如圖 2.5.27(a)所示之三維網格系統。此外設定如圖 2.5.27(b)所示之邊界條件進行計算。

### 3. 平面水槽數值計算結果與基本分析

將 FLOW-3D 計算所之資料進行輸出，並依據其網格中之網格佔水比例  $f$  值進行判斷，以求得水面波動情形，並將其繪製成原始時序圖，其波型變化如圖 2.5.28 所示。與圖 2.4.15 斷面模型之計算結果極具一致性將而前導波前者較後者較快抵達模型前方直立壁，宜將水道長度(20m)及計算時間加長。



(a) 3D 網格系統



(b) 邊界條件之設定

圖 2.5.27 3D 計算領域示意圖

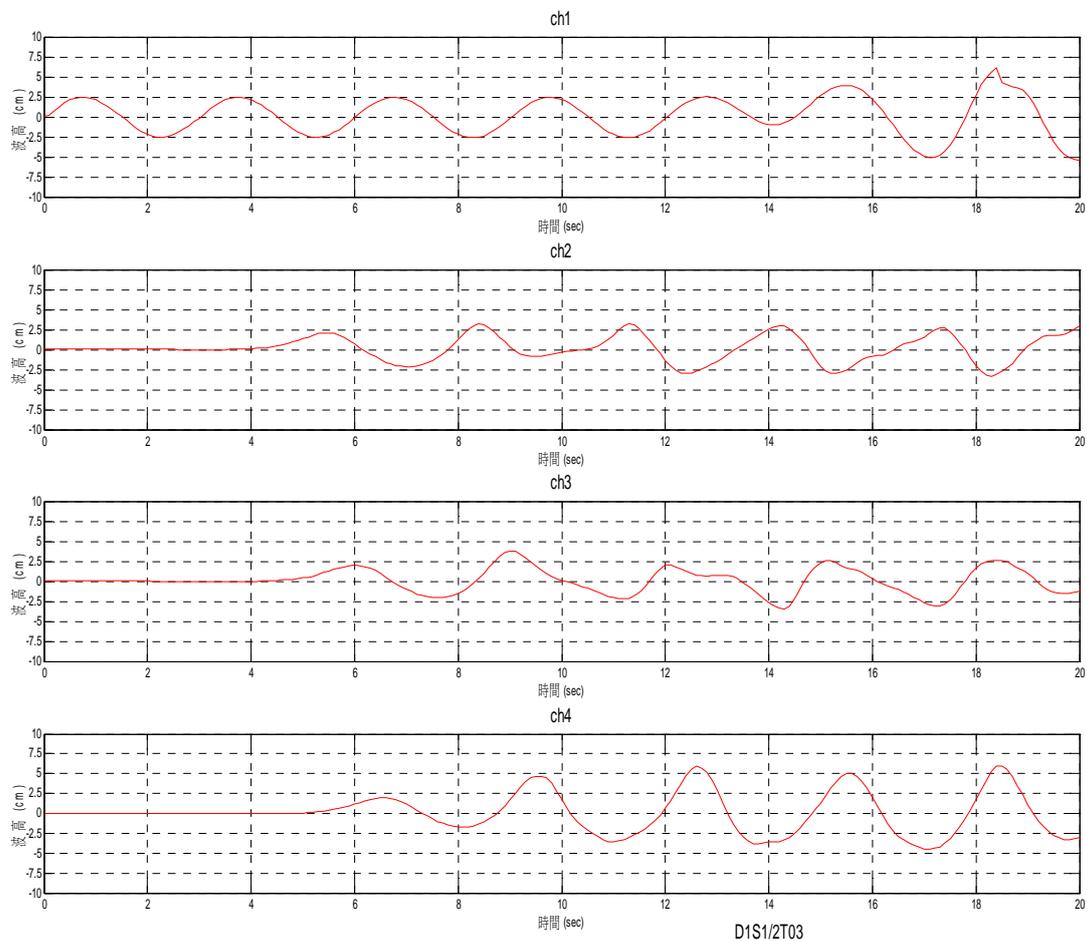


圖 2.5.28 平面水槽原始時序圖(縱深比 D1、斜坡坡度 1/2、週期 3.0s)

此外為探討側向排水效應與反射率間之相互關係，吾人取週期 3s、波高 5cm 及縱深比 D1 之情況下，在改變斜坡坡度時，比較組合模型及斷面模型間之反射率為計算案例，其計算結果如表 2.5-3 所示。由表可看出，側向排水之反射率較斷面模型之結果為高，其原因應為水道長度過短、計算時間過短所致。另外組合式模型中空消波室內之流場，乃由入射波方向往復進出之水流，及側向往復排進排出之水流所構成極為複雜之三維流場。若側向排水區與二側壁面間距過短 (1.34m)，且排出水流速度過大時，撞擊側壁面之迴流勢必造成渦旋區，更增加模型附近流場之複雜度。吾人以表 2.5-3 中之配置代號 D1S1/2

為例，取正 x 軸排水區斷面處之等值側向速度( $V_x$ )之時間序列示意圖，如圖 2.5.29 所示，即可印證上述現象。其中自時間  $t=15$  秒起，至一週期 3 秒( $t=18$  秒)止，其 1/4 波段做為時間序列，依序顯示  $t/T=5.0, 5.25, 5.5, 5.75$  及  $6.0$  之側向速度等值圖。另若  $V_x > 0$  表水流流出消波室，反之  $V_x < 0$  表水流流入消波室。自  $t/T \geq 5.25$  起消波室排水通道底部，已漸漸出現極強之正向排出速度，其正向極大速度值依時間序為  $2.46, 2.88$  及  $4.48\text{m/s}$ 。此時消波室上半區域，也同時出現負值之流入速度，依時間序為  $-0.31, -0.49$  及  $-0.32\text{m/s}$ ，此亦為產生渦旋之典型特徵。至於此現象如何影響反射率，應是個很值得深入探討的課題。

表 2.5.3 組合式及斷面模型反射率比較表

週期 (s)	波高 (cm)	配置代號	組合式模型 Kr 數值結果			斷面模型 Kr 數值結果
			ch2-ch3 Mean	ch2-ch4 Mean	ch3-ch4 Mean	
3.0	5.0	D1S1/2	0.987	0.426	0.679	0.48
		D1S1/4	0.974	0.345	0.571	0.51
		D1S1/8	0.910	0.412	0.589	0.36

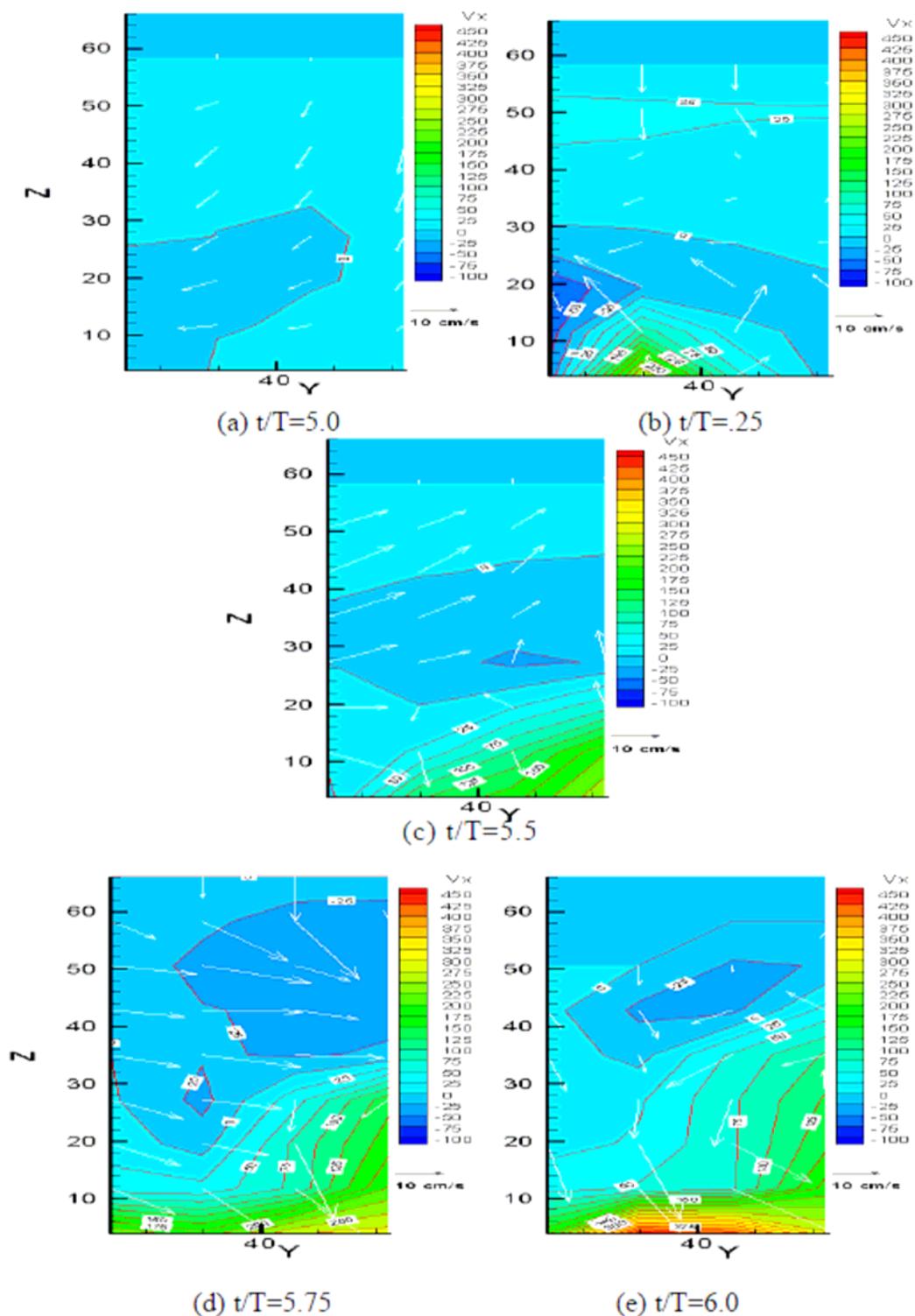


圖 2.5.29 正 x 軸排水區斷面處之等值側向速度( $V_x$ )時間序列示意圖

### 第三章 功能目的使用型或臨時性設施型

臺灣大大小小之港灣設施眾多，包含國際、國內商港及漁港、工業港、遊艇港等，一千餘公里內散佈達三百多個港口，海岸空間利用的密度相當高，但其或因功能、使用目的不同或因環境因素、水域面積的受限，導致部分港灣設施之使用頻率過低，形成資源浪費並衍生海岸空間環境資源破壞的問題，事實上，若加以仔細檢討評估，部分港灣設施在使用上有的僅提供上、下貨或補給之功能，並無法或不需完整提供避風、避浪的功能，而其使用上亦僅以平時季節風浪即可達到作業目的的需求，此類港灣設施實不需以傳統港灣結構物設計的方式加以構思。另外，臺灣位於颱風必經區域，部份海岸區域易因颱風波浪的衝擊而使得該區域短暫性的破壞，需以臨時性結構物加以補強，以防止其惡化。凡此種種結構物的功能需具備高機動性，佈設與拆卸須簡單、方便與迅速，而其功能主要抵擋季節風浪為主，並不需要具有抵抗颱風所引起的強浪，環顧相關的港灣結構物以浮式結構物最符合上述需求，其不僅具有上述功能，對於環境生態破壞亦最小，在大潮差與軟弱海底底質條件下亦能應用。

有關浮式結構物的研究相當早，相關研究成果亦相當多，基本上，浮式結構物的消能特性與其斷面尺寸及繫留繩勁度及繫留方式有關，斷面越大，消能效果有越佳的趨勢，然斷面尺寸越大並不符合經濟原則，因此有部分學者針對其型式加以改良，如 Araki 等(1979)檢討 IHI 型浮式防波堤的特性，Murali 等(1997)探討箱網型浮式防波堤的消能特性，Gesraha(2006)分析 II 型浮式結構物的運動與消能特性，Weng 等(2007)分析雙筒式浮式結構之消波與運動特性，而 Briggs(2001)更以實體浮式防波堤檢討其消能與運動特性，其所設計浮式防波堤以每單位長 2m 之浮箱為主構件，其下連接以鋼骨為骨架、外披不透水布組成一柔性布幕延深至水深-7m 左右，其特性為增大斷面，但質輕且拆裝便利，具有高度實用價值。

### 3.1 快速安裝防波堤系統(RIBS)簡介

浮式防波堤(Floating wave breakwaters)早期被稱為 vertical wave barriers、curtain walls 或 wave screens 等，其開發的目的主要是為了應用在灣澳地區或河口來部分地抵擋非常大的波浪，基本上，這種結構物主要是在消滅週期不超過 4 秒，且波高低於 1.22 公尺的波浪。然而在海洋上當颱風時期波高往往大於 6.1 公尺，且週期可以長達 18 秒，要應用此種結構物到海洋來抵擋將是非常困難的。因此有必要開發新的高效防波堤，它可能是浮式的、潛沒式的或懸吊式的防波堤，也可能是固體式或構架式的防波堤。Mani and Jayakumar (1995)發展了一種懸吊式浮管防波堤，是一列相互貼近的直立管狀結構物，並用來保護漁港。Murali and Mani (1997)研究一種從一個梯形浮箱懸吊具間隙的兩列等間距直立管狀結構物的防波堤。Ohyama 等(1989)、Tanaka 等(1990)、及 Tanaka 等(1992)則研究一固定於底床的充水式彈性構件，藉由入射波及由構件運動所引發散射波的交互作用來消滅透過波能。

Jones (1971) 曾經根據過去的研究與試驗成果，指出一個有效的浮式結構物必須要有至少 1/4 到 1/3 波長的寬度。而且必須要有相當的剛性及質量。以避免防波堤的造波行為。還有浮式防波堤具有(a)其防波功能強烈地與波浪週期有關；(b)不容易錨碇；(c)在大波作用之下，很容易發生結構失敗的可能。這些因素主導了浮式防波堤的開發。

RIBS(Rapidly Installed Breakwater System)係美國陸軍工兵團水道試驗站的海岸工程研究中心(Coastal Engineering Research Center (CERC) of the U. S. Army Waterways Experiment Station)在 90 年代基於上述考量所開發的新型浮式防波堤，其構想如圖 3.1.1 所示，它是一個使用高強度海洋纖維所製作的一個 V 形且由海面延伸到海底可承受水壓力的結構物，藉由 V 字形的結構幾何及偏向特性 RIBS 可以如風向計一般產生兩側力平衡的作用使其尖端自動轉向面對入射波，並可以分向入射波使波浪沿著斜面傳播或反射，而使得波浪遠離 V 形結構

物內部，提供遮蔽區或結構物下風處的波高，以提供一個較穩靜的水域給船舶後勤支援用，讓小型船舶及駁船可以安全地裝載貨物並轉運到岸上。隨著設置地點需求的不同，V形結構物的兩翼長度可以從700到1000呎。鼻端的絞鏈型設計可以使兩翼的末端可以固定在一起以便利在拖放時的運動或者是在颱風波浪作用下可以降低破壞的可能。由於結構物的形狀入射波能大部分都被偏折而不是被吸收或反射，因此錨碇的外力將可以減到最小。該項結構物的研發，美國陸軍工兵團不僅進行了結構應力分析、數值模擬、水工模型試驗，還進行了小尺度的現場安裝試驗。現場的實體模型測試(XM99)是1999年5月現場研究機構(Field Research Facility, FRF, Duck, NC)在美國佛羅里達州Melbone進行的1/2比例尺現場安裝試驗，圖3.1.2為佈放位置示意圖及鼻端組件的拖放照片，其兩翼的長度為77.11公尺長、2.44公尺寬及7.232公尺深，佈放處的水深平均為13.4公尺。圖3.1.3是基本組件的調裝圖，圖3.1.4是大型RIBS佈放時與波浪的關係圖及佈放後的鳥瞰圖。圖3.1.5是小型RIBS的基本模組、錨碇配置及佈放方式圖，圖3.1.6是半比例尺現場實驗照片。圖3.1.7是在美國陸軍工兵水道試驗站(U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, WES, Vicksburg, MS)及O.H. Hinsdale波浪研究實驗室(Wave Research Laboratory, 奧瑞崗州立大學, OSU, Corvallis, OR)所進行的一系列水工模型試驗。



Figure 1. Rapidly Installed Breakwater System (RIBS) concept.

圖 3.1.1 快速安裝防波堤系統構想圖

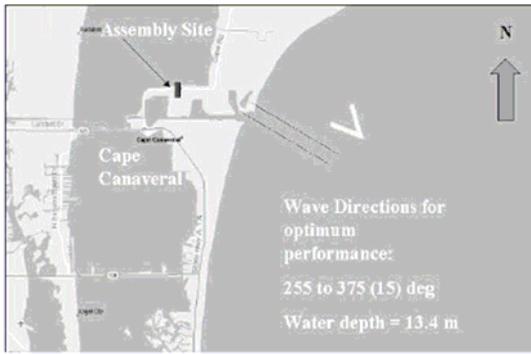


圖 3.1.2 在佛羅里達 Cape Carnaveral 港外海的現場測試

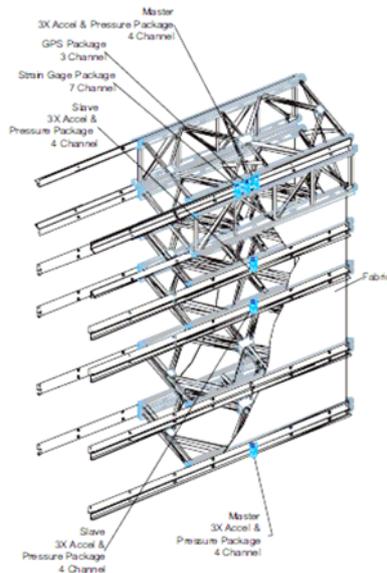


圖 3.1.3 大型 RIBS 的基本組件及安裝





圖 3.1.6 小型 RIBS 半比例尺現場實驗

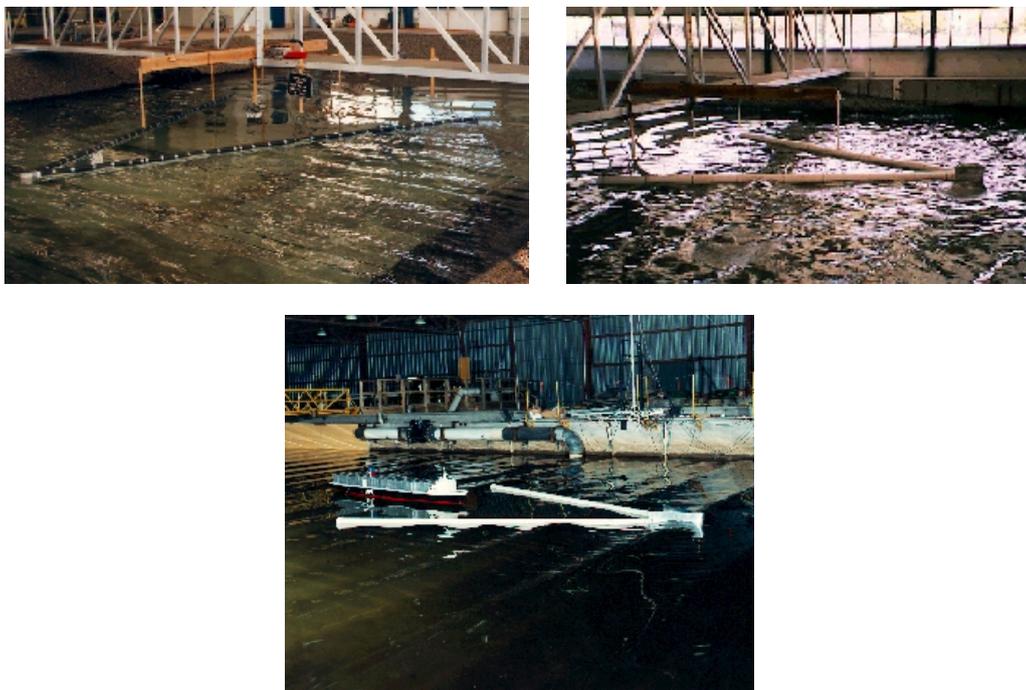


圖 3.1.7 RIBS 水工模型試驗

RIBS 的概念不僅僅是用於軍事用途，它也可以應用於海難事件的搜救或者是海上漏油的油污防擴散裝置。第一個柔性的 RIBS 是如圖 3.1.8 所示的 Hydro RIB，它首先於 1997 年在美國佛羅里達州的 Pensacola 海岸進行測試。Hydro RIB 為一柔性構造物可預先捲在佈放圓筒上，而到達預定位置以後直接佈放於海中，除充氣至浮艙外，也

打海水進入主體結構以增加其剛性。雖然此一形式已經有相當好的效果，但仍有可以在改進的地方。

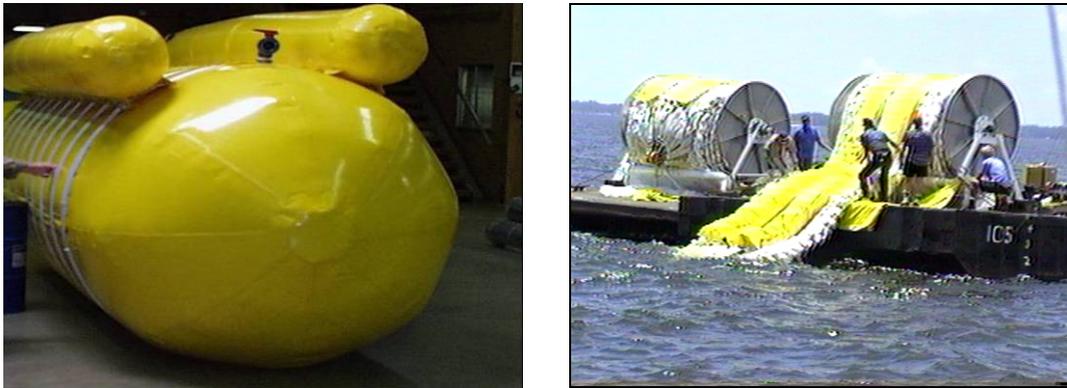


圖 3.1.8 Hydro RIB 的成品與佈放方式

一個改良型的 RIB 系統-XM2000，曾於 2000 年在美國佛羅里達州的 Pensacola 海岸進行了 5 個星期的現場測試。與 Hydro RIB 不同的地方是它在結構體的周圍增加了高強度海洋纖維材料的加勁帶以便增加浮體的強度，同時錨碇系統改採用 Seaflex 系統，它是用加強型吸能彈性繩索製作，可以增加對作用於浮體上波力的吸收能力，並允許較大的錨碇角度以節省空間。圖 3.1.10 是繼 XM2000 之後的改良型 XM2001 的造型。它的主體直徑為 28 呎，每一個區段可以長達 200 呎長。圖 3.1.11 為其存放架模型與現場佈放方式。目前本 RIBS 在佈放時非常的快速及方便，但回收則尚有改進空間。



圖 3.1.9 XM 2001 的結構示意圖及施工圖



**圖 3.1.10 XM 2001 的存放與佈放方式**

綜合而言，快速安裝的浮式防波堤應具備有構造簡單存放空間小而且攜帶方便，安裝簡單且快速，消波抗浪效率佳，以及回收方便等特性，它不僅可以應用於軍事用途中的海上運補，也可以用在海上救難、海上漏油之防擴散、以及其他臨時或短期性的海上活動中的抗浪設施。

### 3.2 繫留浮體理論推導

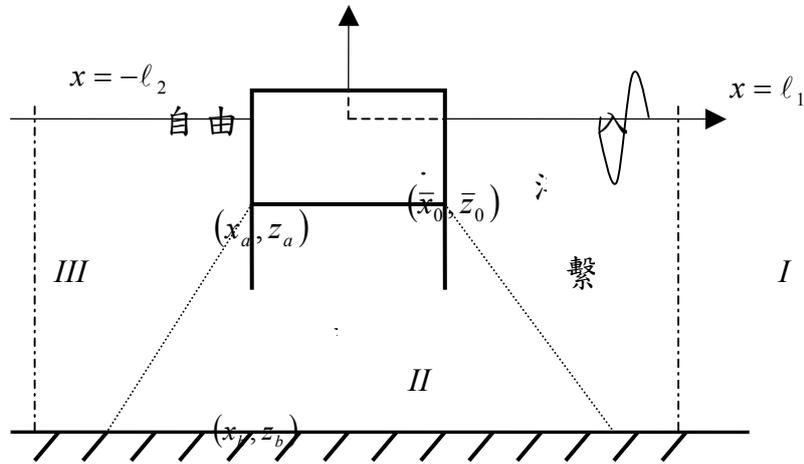


圖 3.2.1 繫留浮體定義圖

在圖 3.2.1 中所示，在一定水深  $h$  之海域中有一繫留浮體，設  $X$  軸水平向右為正，而  $Z$  軸垂直向上為正，同時在距離浮體極遠處設立兩假想邊界面  $x = l_1$ ， $x = -l_2$ ，可將整個領域分割為 (I)、(II) 及 (III) 之領域，並假設海底及浮體為不透水。

假設討論之流體具有非壓縮性、非黏性和非旋轉性的理想流體運動之特性，則各領域內流體粒子的運動可用速度勢  $\Phi(x, z, t)$  來描述並且滿足 Laplace 方程式，如下式所示：

$$\Phi(x, z; t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \cdot \phi(x, z) \cdot e^{i\sigma t} \dots\dots\dots(3.2.1)$$

其中  $\zeta_0$  為入射波振幅， $\sigma$  為週頻率。

假設假想邊界離浮體很遠，因而假設領域 (I) 和 (III) 內的流體運動不受到浮體的存在所引起的散射波 (scattering waves) 與輻射波 (radiation waves) 影響，其速度勢可如下表示：

領域 ( I ) 之勢函數  $\phi$  為 :

$$\phi_{(I)}(x, z) = [e^{ik(x-\ell)} + K_r e^{-ik(x-\ell)}] \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots(3.2.2)$$

在假想的邊界面上 (  $x = \ell_1$  ) 勢函數和 X 的正方向導函數值可表示為 :

$$\phi_{(I)}(\ell_1, z) = [1 + K_r] \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots(3.2.3)$$

$$\frac{\partial \phi_{(II)}}{\partial n} = ik(1 - K_r) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots(3.2.4)$$

其中  $K_r$  為複數反射率。

領域 ( III ) 同理在假想的邊界面上 (  $x = -\ell_2$  ) 勢函數和導函數值可表示為 :

$$\phi_{(III)}(-\ell_2, z) = K_t \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots(3.2.5)$$

$$\frac{\partial \phi_{(III)}}{\partial n} = -ikK_t \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots(3.2.6)$$

$K_t$  為複數透過率。

### 1. 邊界條件

(1) 自由水面邊界條件 :

假設自由水面上之大氣壓力一定，由自由水面運動與動力邊界條件可得到 :

$$\frac{\partial \phi_{(II)}}{\partial n} = \frac{\sigma^2}{g} \cdot \phi_{(II)}(x, z) \quad , z = 0 \dots\dots\dots(3.2.7)$$

(2) 海底底床邊界條件 :

設海底底床為固定且不透水，則流體在海底底床之法線方向流速為零，即：

$$\frac{\partial \phi_{(II)}}{\partial n} = 0, z = -h \dots \dots \dots (3.2.8)$$

(3) 假想邊界面上的力學邊界條件與反射率和透過率：

在假想邊界面上 ( $x = \ell_1, -\ell_2$ )，由於領域 ( I )、( II )、( III ) 之流體運動所引起的能量流束與質量流束必須連續，得到：

$$\phi_{(I)} = \phi_{(II)}, x = \ell_1 \dots \dots \dots (3.2.9)$$

$$\frac{\partial \phi_{(I)}}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{(II)}}{\partial n}, x = \ell_1 \dots \dots \dots (3.2.10)$$

$$\phi_{(II)} = \phi_{(III)}, x = -\ell_2 \dots \dots \dots (3.2.11)$$

$$\frac{\partial \phi_{(III)}}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{(II)}}{\partial n}, x = -\ell_2 \dots \dots \dots (3.2.12)$$

將式 (3.2.4) 代入式 (3.2.10)，並且兩邊各乘  $\cosh k(h+z)$ ，再由  $z = -h \sim 0$  積分得反射率  $K_r$

$$K_r = 1 + \frac{i}{N_o \sinh kh} \int_{-h}^0 \frac{\partial \phi_{II}}{\partial n} \cosh k(h+z) dz \dots \dots \dots (3.2.13)$$

其中  $N_o = \frac{1}{2} \left( \frac{1+2kh}{\sinh 2kh} \right)$

再由上式代入式 (3.2.9) 得到邊界上  $x = \ell_1$  各節點之勢函數  $\phi_{II}(\ell_1, z)$

$$\phi_{II}(\ell_1, z) = 2 \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} + 2i \frac{\cosh k(h+z)}{N_o \sinh 2kh} \int \frac{\partial \phi_{II}}{\partial n} \cosh k(h+z) ds \dots \dots (3.2.14)$$

將式 (3.2.6) 代入式 (3.2.12)，並且兩邊各乘  $\cosh k(h+z)$ ，再由  $z = -h \sim 0$  積分得透過率  $K_t$

$$K_t = \frac{i}{N_0 \sinh kh} \int_{-h}^0 \frac{\partial \phi}{\partial n} \cosh k(h+z) ds \dots\dots\dots(3.2.15)$$

再代入 (3.2.11) 式得到 ( $x = -\ell_2$ ) 各節點之勢函數：

$$\phi_{(II)}(-\ell_2, z) = 2i \frac{\cosh k(h+z)}{N_0 \sinh 2kh} \int \frac{\partial \phi_{(II)}}{\partial n} \cosh k(h+z) ds \dots\dots(3.2.16)$$

**(4) 浮體上之邊界條件與運動位移以及各繫留索受力：**

領域 (II) 中  $\phi_{II}(x, z)$ ，因浮體運動重心由  $(\bar{x}_0, \bar{z}_0)$  移至  $(x_0, z_0)$ ，如果浮體運動的水平、垂直與回轉角振幅為  $\xi$ 、 $\eta$  與  $\omega$  (逆時針為正)，則兩者的關係如下：

$$x_0 - \bar{x}_0 = \xi e^{i\omega t}, z_0 - \bar{z}_0 = \eta e^{i\omega t}, \delta = \omega e^{i\omega t} \dots\dots\dots(3.2.17)$$

**(5) 浮體運動邊界條件**

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{\partial(x_0 - \bar{x}_0)}{\partial t} \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial(z_0 - \bar{z}_0)}{\partial t} \frac{\partial z}{\partial n} + \frac{\partial \delta}{\partial t} \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z_0 - \bar{z}_0) - \frac{\partial z}{\partial n} (x_0 - \bar{x}_0) \right] \dots\dots(3.2.18)$$

設其質量與慣性矩分別為  $m$  和  $I_y$ ，則整個系統作用於浮體的壓力除重力、流體動壓力  $p$  外，還有恢復力  $R_z$ 。流體力對各浮箱重心的恢復力矩以  $M_y$  表示。如圖 3.2.1，繫留索固定在底床 B 點  $(x_b, z_b)$  以及浮體上 A 點  $(x_a, z_a)$ ，使浮體受流體運動使浮體產生水平、垂直方向的反力及力矩分別以  $\hat{F}_x$ 、 $\hat{F}_z$ 、 $\hat{M}_y$  表示。

$$m \frac{d^2(x_0 - \bar{x}_0)}{dt^2} = \int p \frac{\partial x}{\partial n} ds + \sum_{j=1}^n \hat{F}_x \dots\dots\dots(3.2.19)$$

$$m \frac{d^2(z_0 - \bar{z}_0)}{dt^2} = \int p \frac{\partial z}{\partial n} ds + Rz + \sum_{j=1}^n \hat{F}_z \dots\dots\dots(3.2.20)$$

$$I_y \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \int P \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z_0 - \bar{z}_0) - \frac{\partial z}{\partial n} (x_0 - \bar{x}_0) \right] ds + My + \sum_{j=1}^n \hat{M}_y \dots\dots\dots(3.2.21)$$

其中

$$P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -i\rho g \zeta_0 \phi e^{i\sigma t} \dots\dots\dots (3.2.22)$$

$$R_z = -\int \rho g (z_0 - \bar{z}_0) \frac{\partial z}{\partial n} ds \dots\dots\dots (3.2.23)$$

$$M_y = -\int \rho g \delta (x_0 - \bar{x}_0) \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z_0 - \bar{z}_0) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_0) \right] ds \dots\dots\dots (3.2.24)$$

各繫留索力分別為  $\hat{F}_x$  ,  $\hat{F}_z$  及力矩  $\hat{M}_y$

$$\hat{F}_x = -K_{xx}(x_0 - \bar{x}_0) - K_{xz}(z_0 - \bar{z}_0) - K_{x\delta} \delta \dots\dots\dots (3.2.25)$$

$$\hat{F}_z = -K_{zx}(x_0 - \bar{x}_0) - K_{zz}(z_0 - \bar{z}_0) - K_{z\delta} \delta \dots\dots\dots (3.2.26)$$

$$\hat{M}_y = -K_{\delta x}(x_0 - \bar{x}_0) - K_{\delta z}(z_0 - \bar{z}_0) - K_{\delta\delta} \delta \dots\dots\dots (3.2.27)$$

其中 AB 繫留索各方向之彈性係數分別以為  $K_{xx}$  、  $K_{zz}$  、  $K_{xz}$  、  $K_{zx}$  、  
 $K_{x\delta}$  、  $K_{\delta x}$  、  $K_{z\delta}$  、  $K_{\delta z}$  及  $K_{\delta\delta}$  表示。

$$K_{xx} = \frac{(x_b - x_a)^2}{l_{ab}^2} K_{ab} + \frac{(z_b - z_a)^2}{l_{ab}^2} \frac{F_0}{l_{ab}}$$

$$K_{zz} = \frac{(z_b - z_a)^2}{l_{ab}^2} K_{ab} + \frac{(x_b - x_a)^2}{l_{ab}^2} \frac{F_0}{l_{ab}}$$

$$K_{xz} = K_{zx} = \frac{(x_b - x_a)(z_b - z_a)}{l_{ab}^2} \left( K_{ab} - \frac{F_0}{l_{ab}} \right)$$

$$K_{x\delta} = K_{\delta x} = \frac{(x_b - x_a)}{l_{ab}^2} [(z_b - z_a)(x_a - \bar{x}_0) - (x_b - x_a)(z_a - \bar{z}_0)] K_{ab} \\ + \frac{(z_b - z_a)}{l_{ab}^2} [(x_b - x_a)(x_a - \bar{x}_0) - (z_b - z_a)(z_a - \bar{z}_0)] \frac{F_0}{l_{ab}}$$

$$\begin{aligned}
K_{z\delta} = K_{\bar{z}} &= \frac{(z_b - z_a)}{l_{ab}^2} [(z_b - z_a)(x_a - \bar{x}_0) - (x_b - x_a)(z_a - \bar{z}_0)] K_{ab} \\
&\quad + \frac{(x_b - x_a)}{l_{ab}^2} [(x_b - x_a)(x_a - \bar{x}_0) - (z_b - z_a)(z_a - \bar{z}_0)] \frac{F_0}{l_{ab}} \\
K_{\delta\delta} &= \frac{[(x_b - x_a)(z_a - \bar{z}_0) - (z_b - z_a)(x_a - \bar{x}_0)]^2}{l_{ab}^2} K_{ab} \\
&\quad + \frac{[(z_b - z_a)(z_a - \bar{z}_0) - (x_b - x_a)(x_a - \bar{x}_0)]^2}{l_{ab}^2} \frac{F_0}{l_{ab}} \\
&\quad + \frac{[(z_b - z_a)(z_a - \bar{z}_0) - (x_b - x_a)(x_a - \bar{x}_0)]^2}{l_{ab}^2} F_0
\end{aligned}$$

其中  $l_{ab}$  繫留索原長度， $F_0$  為繫留索所受預力

$$l_{ab} = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (z_b - z_a)^2}$$

繫留索的受力  $F_{ab}$  為：

$$\begin{aligned}
\frac{F_{ab}}{K_{ab}\zeta_0} &= \frac{-1}{l_{ab}} \left\{ (x_b - x_a) \frac{(x_0 - \bar{x}_0)}{\zeta_0} + (z_b - z_a) \frac{(z_0 - \bar{z}_0)}{\zeta_0} + [(x_b - x_a)(z_0 - \bar{z}_0) - (z_b - z_a)(x_0 - \bar{x}_0)] \right\} \dots\dots\dots \\
&\dots\dots\dots (3.2.28)
\end{aligned}$$

將式 (3.2.17) 代入式 (3.2.19) ~ 式 (3.2.21) 求浮體各自由度之運動振幅：

$$\begin{aligned}
\frac{\xi}{\zeta_0} &= \frac{-i}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \left\{ a_4 \int \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds - a_2 \int \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z_0 - \bar{z}_0) - \frac{\partial z}{\partial n} (x_0 - \bar{x}_0) \right] ds \right\} \dots\dots\dots \\
&\dots\dots\dots (3.2.29)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\eta}{\zeta_0} &= \frac{-i}{a_5} \int \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds \dots\dots\dots (3.2.30)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\omega}{\zeta_0} &= \frac{-i}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \left\{ -a_3 \int \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds + a_1 \int \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z_0 - \bar{z}_0) - \frac{\partial z}{\partial n} (x_0 - \bar{x}_0) \right] ds \right\} \dots\dots\dots \\
&\dots\dots\dots (3.2.31)
\end{aligned}$$

$$\text{其中 } a_1 = 2 \frac{K_{xx}}{\rho g} - \frac{m \sigma^2}{\rho g} ; \quad a_2 = 2 \frac{K_{x\delta}}{\rho g} = c_3 ; \quad a_3 = 2 \frac{K_{\delta x}}{\rho g} ;$$

$$a_4 = 2 \frac{K_{\delta\delta}}{\rho g} + \int (x_0 - \bar{x}_0) \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z_0 - \bar{z}_0) - \frac{\partial z}{\partial n} (x_0 - \bar{x}_0) \right] ds - \frac{I_y \sigma^2}{\rho g} ;$$

$$a_5 = 2 \frac{K_{zz}}{\rho g} + \int \frac{\partial z}{\partial n} ds - \frac{m \sigma^2}{\rho g}$$

由式 (3.2.25) ~ 式 (3.2.27) 運算代入式 (3.2.18) 得浮體運動邊界條件：

$$\frac{\partial \phi_{(II)}}{\partial n} = -\frac{\sigma^2}{g} \left\{ \begin{array}{l} c_1 \left( \frac{\partial x}{\partial n} \right) \int \phi \left( \frac{\partial x}{\partial n} \right) ds + c_2 \left( \frac{\partial x}{\partial n} \right) \int \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z_0 - \bar{z}_0) - \frac{\partial z}{\partial n} (x_0 - \bar{x}_0) \right] ds \\ + c_3 \frac{\partial z}{\partial n} \int \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds - c_4 \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z_0 - \bar{z}_0) - \frac{\partial z}{\partial n} (x_0 - \bar{x}_0) \right] \int \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds \\ + c_5 \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z_0 - \bar{z}_0) - \frac{\partial z}{\partial n} (x_0 - \bar{x}_0) \right] \int \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z_0 - \bar{z}_0) - \frac{\partial z}{\partial n} (x_0 - \bar{x}_0) \right] ds \end{array} \right\} \quad (3.2.32)$$

$$\text{其中 } c_1 = \frac{a_4}{a_1 a_4 - a_2 a_3} ; \quad c_2 = \frac{a_2}{a_1 a_4 - a_2 a_3} ; \quad c_3 = \frac{1}{a_5} ; \quad c_4 = \frac{a_3}{a_1 a_4 - a_2 a_3} ;$$

$$c_5 = \frac{a_1}{a_1 a_4 - a_2 a_3}$$

## 2. 積分方程與離散化

利用 Green 函數與積分方程式的分離化，使得領域 (II) 上之勢函數  $\phi(x, z)$  滿足 Laplace 方程式，並且假設二次導函數存在。在此方式以複合邊界元素法 (Dual Boundary Element Method, DBEM) 進行，可解決薄版上同一邊界兩個邊界條件之問題。

根據 Green 定理 (Green's Second Identity Law) 可得知，邊界上之勢函數值  $\phi(\xi', \eta')$ 。領域 (II) 上之勢函數可由下式表示之：

$$\pi\phi(\xi', \eta') = \int_{\Gamma} \phi(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n_s} (-\ln r) ds - \int_{\Gamma} \frac{\partial \phi(\xi, \eta)}{\partial n_s} (-\ln r) ds \quad \dots\dots\dots(3.2.33)$$

其中  $\ln(1/r)$  為 Laplace 方程式的特解，而  $r = \sqrt{(\xi' - \xi)^2 + (\eta' - \eta)^2}$ 。

對於翼版厚度趨近於零之情況，則必須對式 (3.2.33) 偏微求出另一條奇異積分方程，因此對式 (3.2.33) 偏微可得邊界點 Green 積分方程式之第二式由下式表示：

$$\pi \frac{\partial \phi(\xi', \eta')}{\partial n_f} = \int_{\Gamma} \phi(\xi, \eta) \frac{\partial^2}{\partial n_f \partial n_s} (-\ln r) ds - \int_{\Gamma} \frac{\partial \phi(\xi, \eta)}{\partial n_s} \frac{\partial (-\ln r)}{\partial n_f} ds \quad \dots\dots\dots(3.2.34)$$

其中  $n_f$  為場點法向量。

將領域 (II) 的封閉邊界線  $\Gamma$  以常數元素離散化成 N 個元素，每一元素之物理量以中點之值作為代表值，則 Green 積分方程式 (3.2.33) 與式 (3.2.34) 可用矩陣表示如下

$$[\bar{U}]\{\phi\} = [U] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial n_s} \right\} \quad \dots\dots\dots(3.2.35)$$

$$[\bar{L}]\{\phi\} = [L] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial n_f} \right\} \quad \dots\dots\dots(3.2.36)$$

將式 (3.2.33) 與式 (3.2.34) 混合使用以求出邊界未知物理量，若以邊界點積分方程式的第一式為主體，則必須將式 (3.2.35) 中在翼版一側的代數方程以式 (3.2.36) 中翼版一側之代數方程予以置換。

經置換後，得矩陣如下表示

$$[A]\{\phi\} = [B] \quad \dots\dots\dots(3.2.37)$$

將各邊界條件代入式 (3.2.37) 即可求領域 (II) 所有勢函數，再由其求得浮體之運動振幅與纜繩受力及反射與透過率。

### 3.3 繫留浮體水工模型實驗配置與方法

#### 3.3.1 實驗設備與儀器

本試驗利用國立臺灣海洋大學海洋工程綜合實驗館小斷面造波水槽進行本實驗，其實驗設備如下。

##### 1. 小斷面造波水槽(wave flume)

水槽總長 50 公尺，寬 1 公尺，高 0.8 公尺，為一鋼製的水槽，其一側為透明強化玻璃，一端為造波機，另一端為 1:3 的消波斜坡及消波板，以供消波，如照片 3.3.1 所示。



照片 3.3.1 斷面造波水槽

##### 2. 造波機(Wave generator)

本實驗所使用之造波機為日本依勢屋機械製作所(Iseya)所製造，唯一吸能活塞式造波機，由電力驅動一變速馬達控制造波板移動造波，造波板之前後最大位移為 30 公分。造波訊號由控制電腦及控制面板分別控制造波週期、波高，可製造規則波與不規則波，近年來實驗室控制軟體改採用加拿大國家海洋研究中心所研發造波系統，其可造出最大波高為 15 公分，可輸出週期範圍為 0.5 秒至 2.2

秒之間，造波訊號的輸出是由控制電腦直接輸入造波條件以達控制造波週期、波高的目的。如照片 3.3.2 所示。



照片 3.3.2 造波機

### 3. 波高計及訊號放大器(Wave gauge and Amplification)

本實驗中所使用之波高計為容量式波高計，量測的水面變化範圍為 50 公分，由波高計進入水中之訊號線、水位變化與測棒間圍成之面積所產生之電容變化，再經由訊號放大器後轉為輸出電壓值而得，如照片 3.3.3、3.3.4 所示。



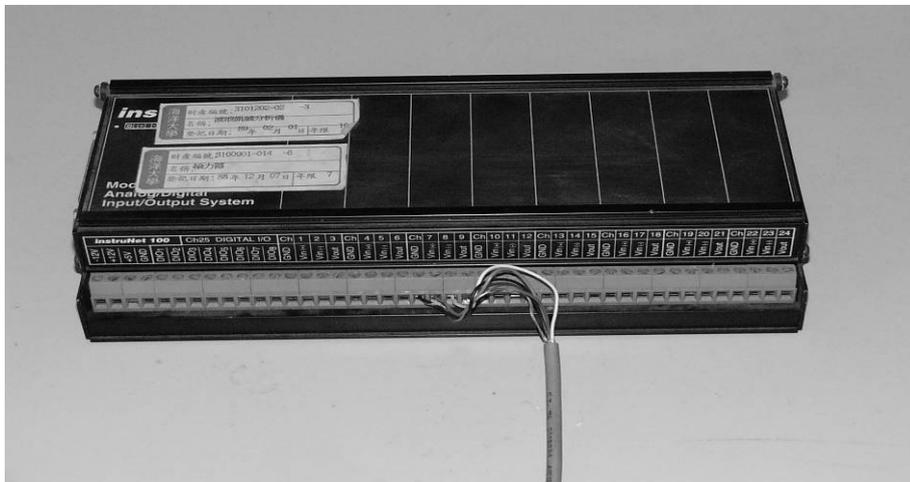
照片 3.3.3 量測用波高計



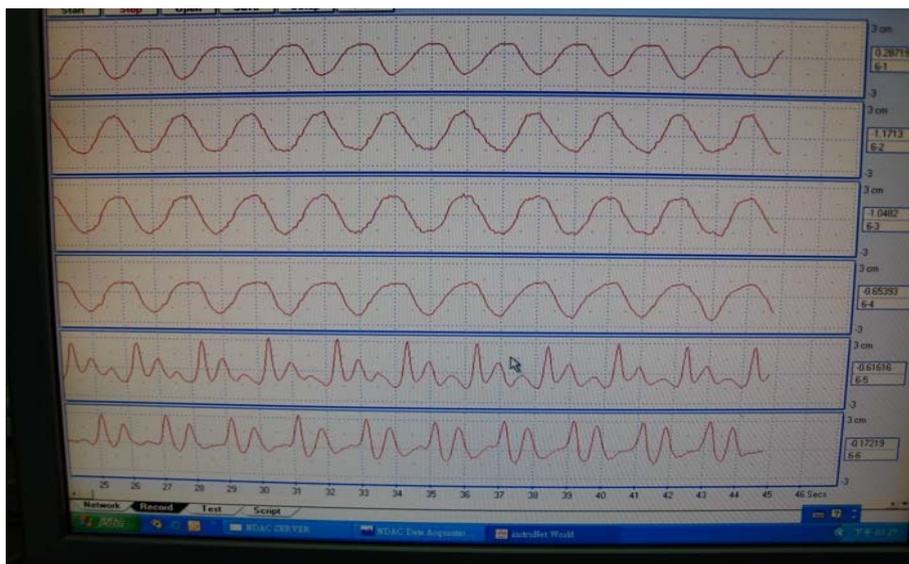
照片 3.3.4 波高增幅器

#### 4. 資料擷取系統與軟體

資料擷取系統是採用國內三聯科技公司所代理的美國 IntraNet 資料擷取即時顯示系統作為水位資料訊號之擷取與分析系統，此系統除具有原有 A-D 轉換功能，更可在進行試驗時，將各項量測訊號即時顯示，有利試驗進行過程中試驗資料之觀察與判別，試驗過程中所量測之水位變化經由波高計測得後，再經由訊號線傳輸與增幅器放大後，以 A-D 轉換器將其離散化，離散數位化資料於儲存後，經由資料分析系統可作進一步之分析工作，如零上切波高與週期之判讀，頻譜分析、繪圖等，如照片 3.3.5、3.3.6 所示。



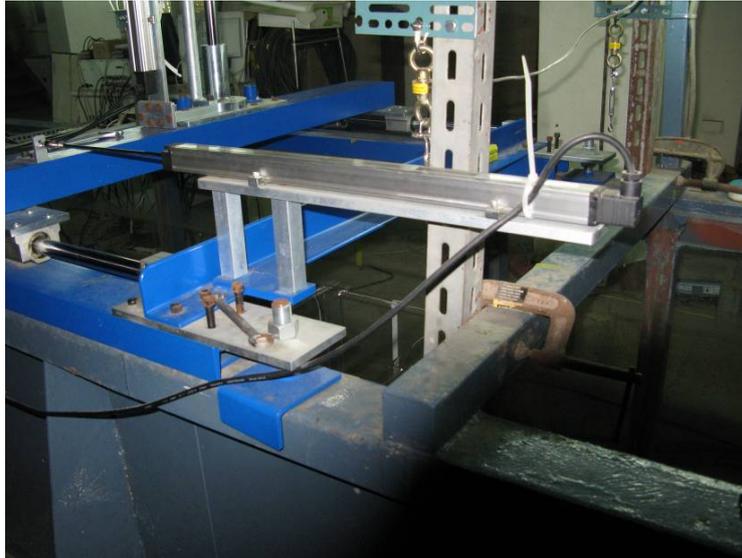
照片 3.3.5 資料擷取系統硬體



照片 3.3.6 資料擷取系統視窗即時顯示系統

## 5. 變位計

變位計內部為碳刷，垂直與水平之變位計是利用線性的電壓變化進行量測，當測桿以軸向進行位移時，會改變其變位計之電壓值，而轉化成位移，水平位移擺設 50 公分之變位計，垂直位移擺設 20 公分之變位計。照片 3.3.7、3.3.8 所示。



照片 3.3.7 水平變位計



照片 3.3.8 垂直變位計

角度變位計可測得範圍是 0 到 180 度，是為一圓形的電壓，固定於歸零點，其當平板擺動時會改變其電壓，進而轉化為角度。照片 3.3.9 所示。



照片 3.3.9 角度變位計

### 3.3.2 模型製作與佈置

#### 1. 剛性翼板繫留浮體模型之製作

本實驗中所使用的剛性翼板繫留浮體模型，以  $\Pi$  型為整體實驗模型，模型可分為主體及翼板兩部分，主體部分長 50 公分，寬 96 公分，高 20 公分，緊鄰斷面水槽兩側，為木板所製成，為避免木板吸水變形及進水，表面作基本的防水處理，以紅色油漆上漆，油漆乾之後並使用矽膠在每一面的接縫由外而內加以塗抹。而翼板部分由壓克力所製成，其向下的長度分成四種，分別為 0、5、15、25 公分，並且分別使壓克力折角 0、30 度。如照片 3.3.10 所示為剛性翼板繫留浮體模型。



照片 3.3.10 刚性翼板繫留浮體模型(0 度 25 公分)

實驗模型質心的位置計算，利用靜力學質心公式加以計算，而載重均已對稱方式擺放，故質心位於平面方向之正中央，並計算質心高度，而載重以鋼板和鋼條為主，並對稱放置載重固定於木箱內。

無翼板的質心位置為木箱底部向上 8.5 公分，模型總重為 43.9kgw，翼板垂直向下(0 度)伸長量為 5、15 與 25 公分其質心位置分別 8.1、8.7 與 9.3 公分，模型總重分別為 44.11、44.11 與 43.31kgw，翼板角度 30 度伸長 5、15 與 25 公分其質心位置分別 8.1、8.7 與 9.3 公分，模型總重分別為 44.01、43.9 與 43.31kgw。

## 2. 模型佈置

水槽中之造波板至消波段長 35m，本實驗模型以模型中心為基準，將模型放置距造波板 21.5m 處，水深為 50cm，沒水深為 10cm；四條細鋼索固定位置具模型中心 0.5m，一端以繫節器連接彈簧固定於水槽底部，固定位置距離模型中心 50 公分處，彈簧預力為 1.4kg，彈簧 K 值為 0.089，繩索與水槽底部角度呈 60 度。斷面水槽模型配置圖如圖 3.3.1 所示。

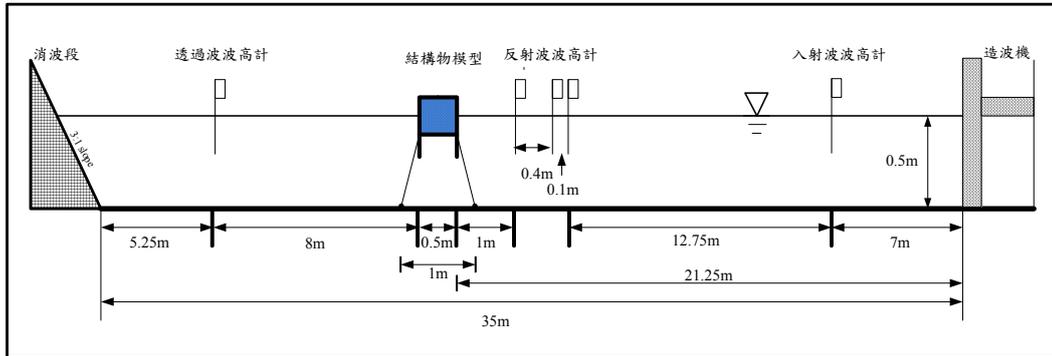


圖 3.3.1 斷面水槽模型配置圖

入射波波高計擺放位置不可以太靠近造波板，以免受到造波運動時產生之駐波所影響，本實驗水深為 0.5m 固至少距離造波板 1.5m，考量造波之波浪固定與水槽長度，故在距造波板前 7m 處裝置波高計以量測入射波波高。

本實驗利用 Goda 等<sup>(1)</sup>(1976)支兩點分離推定法量測反射率，本實驗反射率用波高計距離實驗模型定為 1m。

透過波之波高計放置位置，需距離浮體邊緣 1.5 倍波長處可得到穩定波形，本試驗透過波之波高計距離實驗模型 10m。

### 3.3.3 實驗進行與量測

#### 1. 輸入入射波

造波前須等待斷面水槽內之水面靜穩，並且觀察各儀器是否歸零，方能依照造波條件開始進行實驗，造波時間為 1 分 30 秒，以便實驗後整理資料統整。

#### 2. 造波條件

實驗的造波條件為單一方向週期性規則波，週期由 0.8 秒到 2.5 秒，造波條件如下表所示。

週期	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.4
波高	6.0	6.1	6.0	6.0	6.0	6.0
週期	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5
波高	4.1	5	5.6	6.0	7.1	7.0

#### 3. 實驗資料擷取與分析

入射波波高由入射波波形觀察波浪成熟度與穩定，當第一個成熟入射波到達波高計和波浪被實驗模型反射回來為止，用零上切法取前三個穩定之入射波高作平均。如圖 3.3.2 所示。

反射波擷取本試驗以 Goda 等 (1976) 支兩點分離推定法量測反射率，本研究取前三個成熟反射波計算反射率。如圖 3.3.3 所示。

透過波由透射波波型觀察波浪成熟度，用零上切法取三個透射波波高做平均，且要在波浪被實驗水槽末端消波段反射回來之前，取三個穩定透射波波高做平均。如圖 3.3.4 所示。

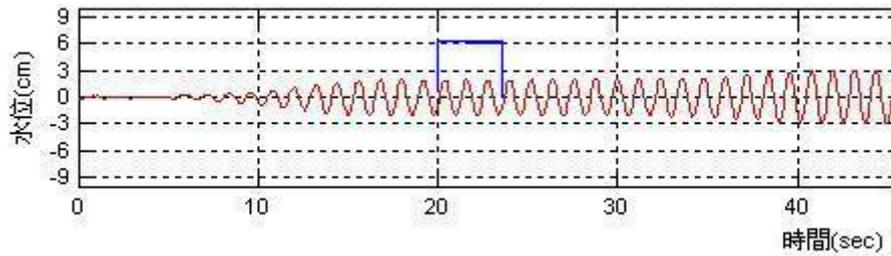


圖 3.3.2 入射波波形(標示處為擷取位置)

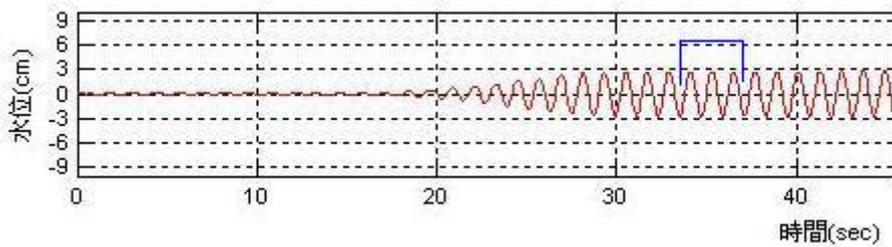


圖 3.3.3 反射波波形(標示處為擷取位置)

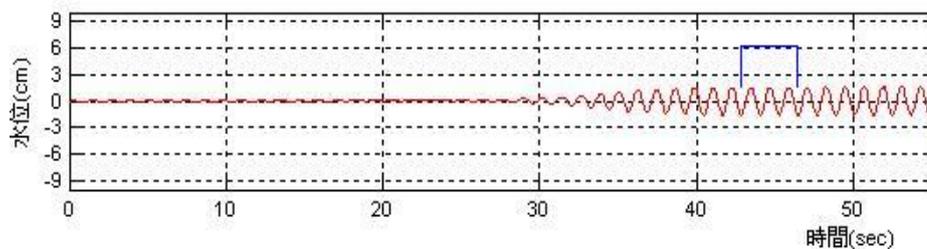


圖 3.3.4 透射波波形(標示處為擷取位置)

### 3.3.4 實驗結果與討論

本實驗主要目的是探討相同水深下( $h=0.5\text{m}$ )，以規則波為模擬之波浪條件，分別改變入射波週期、入射波波高、翼板的長度與角度。並探討在不同翼板長度與角度時，浮體的運動情形和反射率與無因次參數的關係。

## 1. 剛性翼板對繫留浮體之運動特性

運動特性包括水平、垂直與旋轉振幅，分別於圖 3.3.5 至圖 3.3.10 中顯示，比較固定翼板角度下，不同翼板長度時之運動特性。

圖 3.3.5 所示為剛性翼板繫留浮體在裝設垂直向下(0 度)之翼板，長度分別為 5、15、25cm 時，水平運動振幅之比較，並且與無翼板的情形作比對。其中 x 軸為無因次之週期，y 軸為無因次之水平振幅。

在無翼板與翼板 5 公分時，其自然振頻的位置並不明顯，而在 15 公分與 25 公分可發現其自然振頻的位置分別約在 1.25 及 0.8，可由圖中發現，翼板長度越長其自然振頻有越往低頻的趨勢。

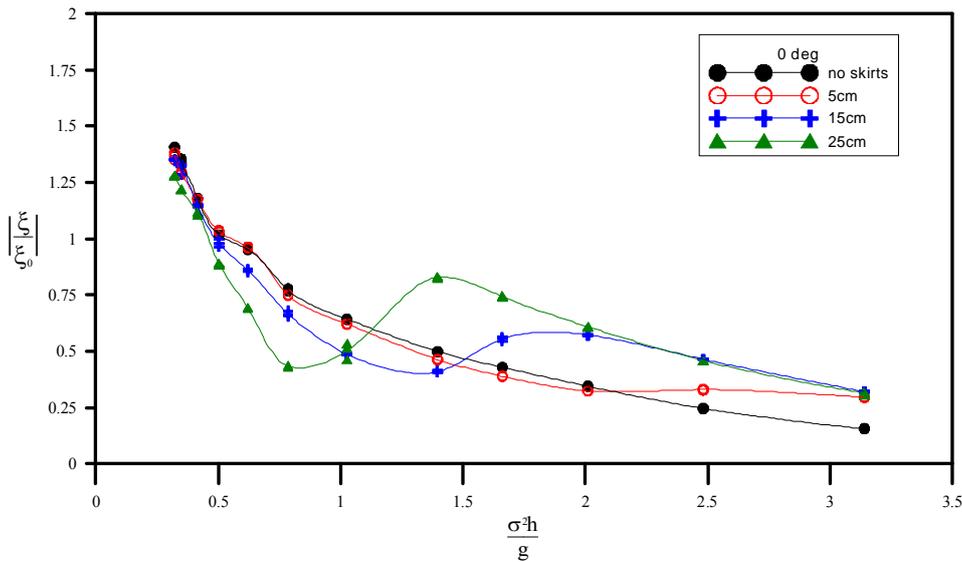


圖 3.3.5 剛性翼板繫留浮體 0 度水平振幅

圖 3.3.6 所示為剛性翼板繫留浮體翼板角度在 30 度時水平振幅之比較，其結果與翼板角度 0 度時的結果相似，其自然振頻同樣有隨翼板長度增加而往低頻的趨勢。

可由圖 3.3.6 中發現，在翼板長度 15cm 與 25cm 時之自然振頻分別約為 0.8 與 0.5，與翼板角度 0 度的結果相較下，在 30 度時浮體的自然振頻更往低頻靠近。

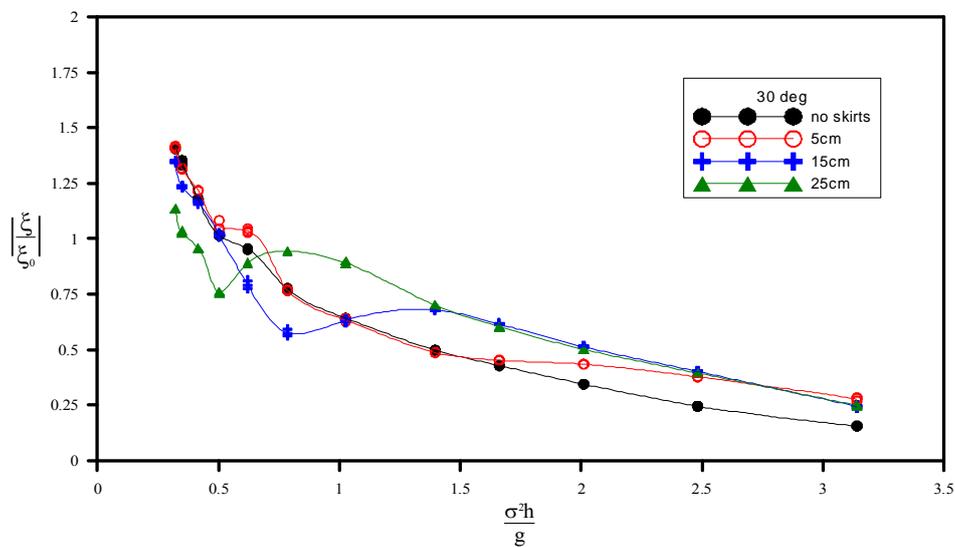


圖 3.3.6 剛性翼板繫留浮體 30 度水平振幅

圖 3.3.7 所示為翼板角度 0 度(垂直向下)時的垂直振幅，y 軸為無因次之垂直振幅。可發現在無翼板時，其自然振頻的位置並不明顯，而在裝設翼板後其最大垂直振幅，也就是自然振頻的位置，隨著翼板長度增加而往低頻的趨勢。

而在高頻的地方，可由圖中發現翼板長度越長，其水平振幅有越小趨向，顯示其較無翼板的繫留浮體而言，擁有較佳的消波能力。

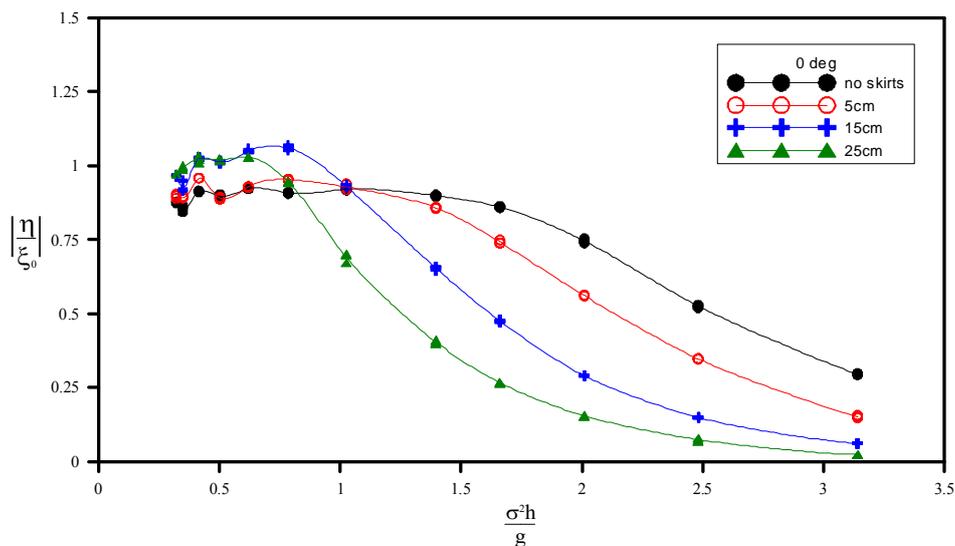


圖 3.3.7 剛性翼板繫留浮體 0 度垂直振幅

圖 3.3.8 所示為翼板角度為 30 度時的垂直振幅，與角度 0 度時結果相似，但翼板角度 30 度的自然振頻較 0 度的浮體更往長週期。

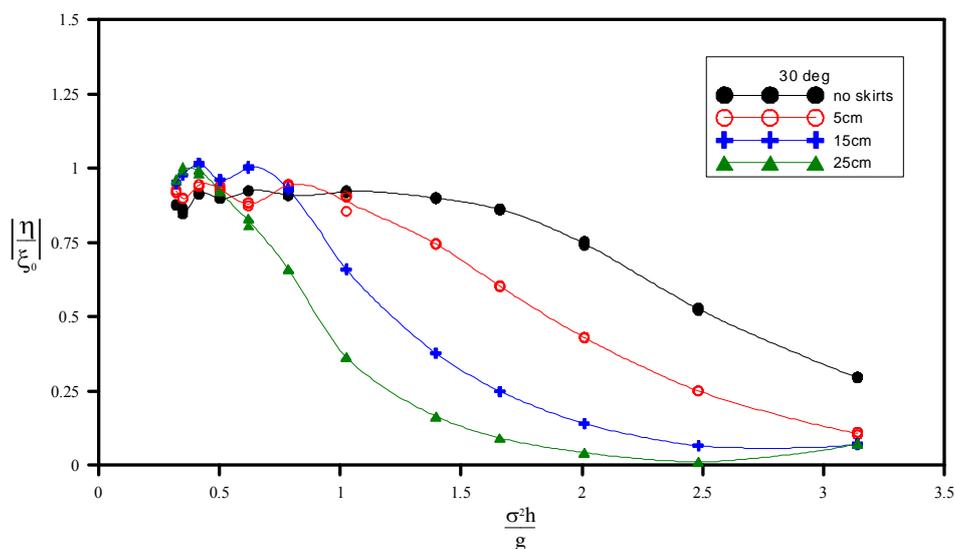


圖 3.3.8 剛性翼板繫留浮體 30 度垂直振幅

圖 3.3.9 所示為剛性翼板繫留浮體角度為 0 度時之旋轉振幅，y 軸為無因次之旋轉振幅，其旋轉振幅隨著翼板長度增加而有往低頻的趨勢。

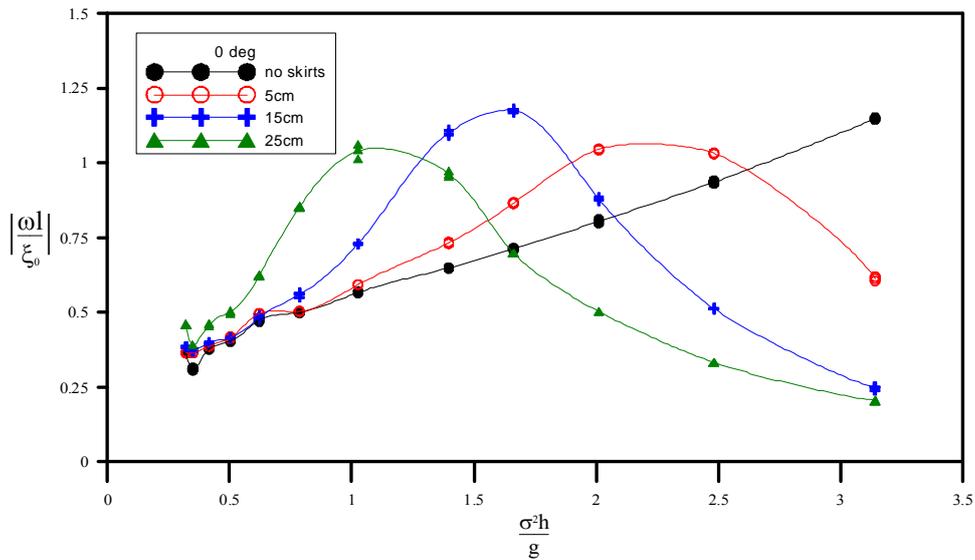


圖 3.3.9 剛性翼板繫留浮體 0 度旋轉振幅

圖 2-10 所示為剛性翼板繫留浮體角度為 30 度時之旋轉振幅，其旋轉振幅與 0 度時的特性相似，但其旋轉振幅較 0 度時來的小，其自然振頻也更往低頻靠近。

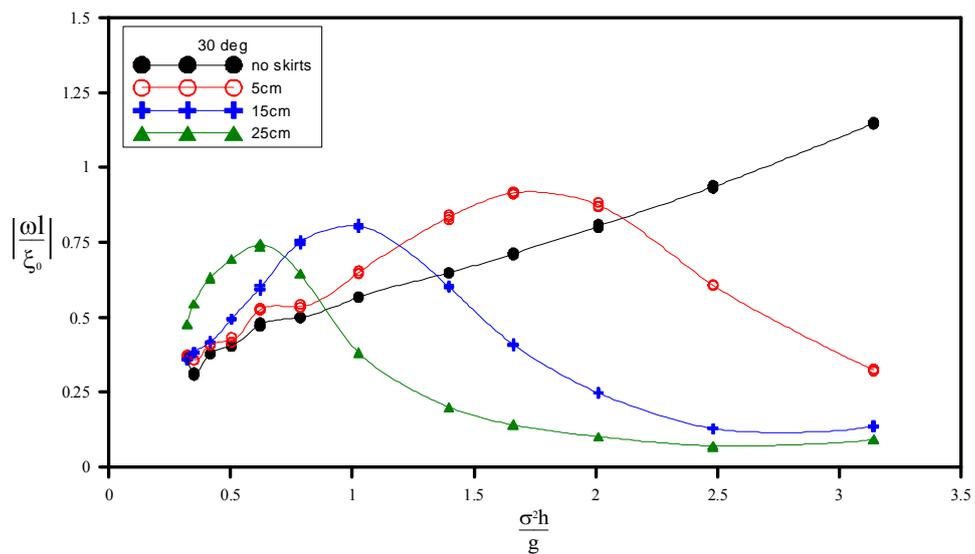


圖 3.3.10 剛性翼板繫留浮體 30 度旋轉振幅

## 2. 刚性翼板对繫留浮体之反射率

圖 3.3.11 所示為刚性翼板繫留浮體在翼板角度為 0 度時的反射率，y 軸為反射率。一般而言，浮式結構物的對波浪的反射效果與其斷面尺寸與質量有相當大的關係，斷面尺寸或重量越大，則所得的反射率越大，因此在某一固定斷面或重量下，浮式結構物對越短週期的波浪具有越大的反射效果，如圖 3.3.11 所示，在無翼板情況下(實心圓點)，其反射率隨著入射波長的變短，反射率則逐漸增大。當浮體下方具有一固定刚性翼板時，浮體對波浪的反射率有增大的情形，同時試驗結果亦顯示當翼板增長時，其反射率亦呈增大趨勢。

圖 3.3.12 所示為刚性翼板繫留浮體在翼板角度為 30 度時的反射率，其反射率與入射波週期及翼板長度間之關係大致與翼板角度 0 度時的結果相似，即翼板增長將提升其反射率，同時與垂直翼板(圖 2-11)的反射率比較結果，其在高頻的地方，無因次週期約在 0.75 至 1.75 之間，其翼板傾斜 30 度時有較佳的反射率。

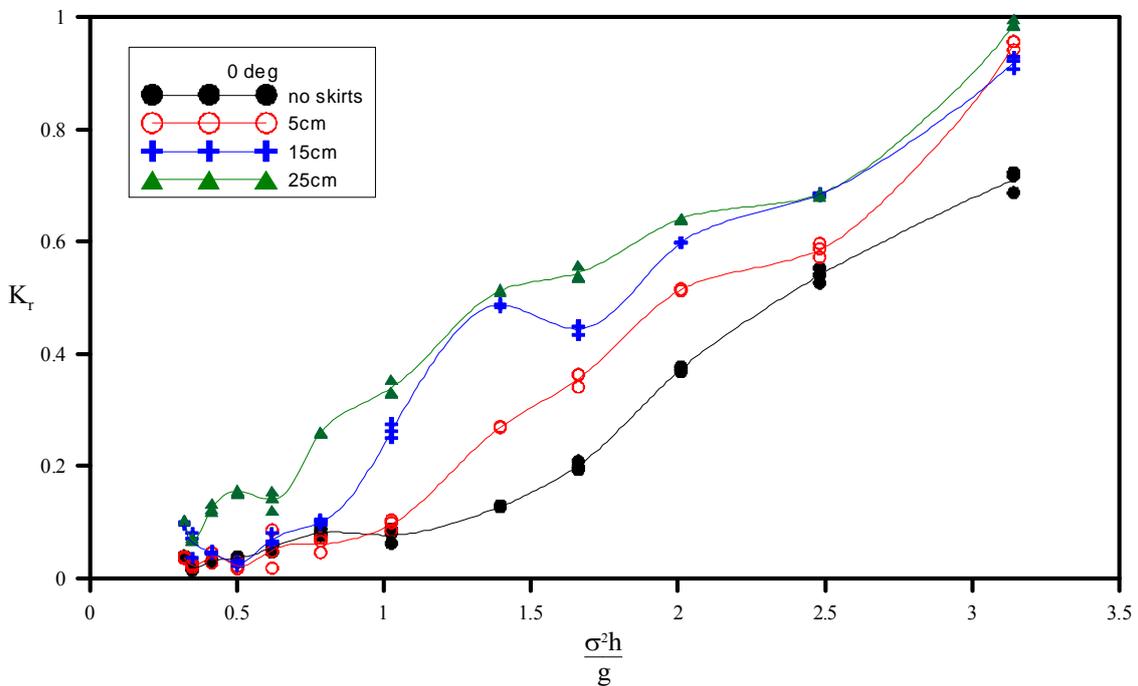


圖 3.3.11 刚性翼板繫留浮體 0 度反射率

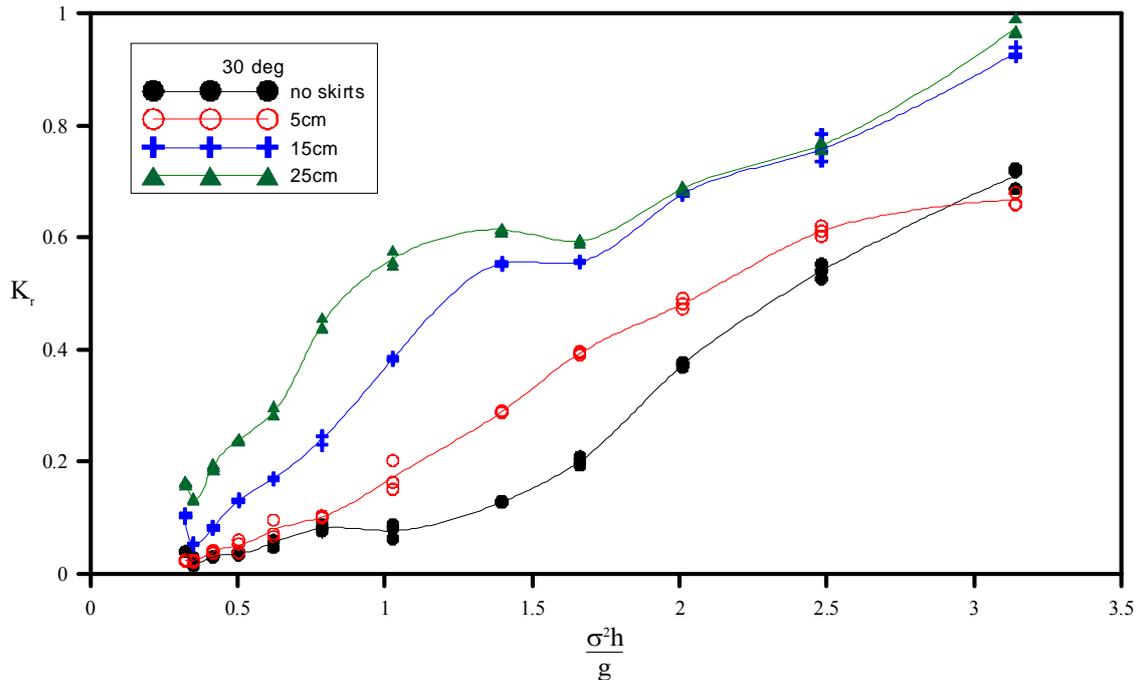


圖 3.3.12 剛性翼板繫留浮體 30 度反射率

### 3.4 壓氣型浮式結構物理論

#### 3.4.1 壓氣型浮式結構物理論建立

在考量短期性功能型浮式結構物時，例如離島的運補碼頭，其主要功能是提供每隔 1 至 3 個月一次的運補船有靠泊及卸貨的空間與設施，在平時是閒置的。然而如果採用永久性結構物構建的話，其將在任何時間都需要承受各種自然力的作用，以及長期曝曬所面臨的材質老化問題；再者，如離島的觀光遊憩碼頭，其可能的使用時間是屬於風浪較小的時期，在冬季季風時期以及颱風時期，往往碼頭是封閉的，因此這類的碼頭如果以永久固定式結構物構建的話，也將面臨前述的問題。本節所討論的構想是充氣式的浮式結構物，在平時其為一浮式結構物，而當大風浪來襲時可以排氣後沈置於水中。此類碼頭的繫留方式可以是以錨碇系統或是以樁柱式兩種，但不論是哪一種繫留方式，都仍需要評估利用充氣方式提供浮力的方式，對浮式結構物的運動行為的影響。因此，本節主要是延續上一節的浮式結構物的構想，進一步探討壓氣型繫留浮式結構物，其示意圖如圖 3.4.1 所示。一個由

兩個浮箱及纜繩組成的浮式結構物設置在海上，兩浮箱中間為一壓縮空氣室。使用卡式座標系統，定義原點於靜止時自由水面處， $x$  軸為向右為正， $z$  軸向上為正。結構物對稱於  $x=0$ 。

假設結構物之運動為微小振幅運動。當有一振幅為  $\zeta_0$ 、頻率為  $\sigma$  的入射波往  $-x$  方向前進，若整個領域流體為不可壓縮及無黏性，則流體運動具有一速度勢  $\Phi(x, z; t) = g\zeta_0 / \sigma \cdot \phi(x, z) e^{i\sigma t}$ ，而其勢函數必須滿足 Laplace 方程式

$$\nabla^2 \phi(x, z) = 0 \dots\dots\dots(3.4.1)$$

將欲分析的領域進一步分割為三個領域，領域 1 ( $x \geq \ell_1$ )，領域 2 ( $-\ell_2 \leq x \leq \ell_1$ )，和領域 3 ( $x \leq -\ell_2$ )。各領域之速度勢表示為  $\phi_j$  ( $j=1,2,3$ )。領域 2 包含了結構物以及為一不等水深  $z = h'(x)$  之區域。領域 1,3 為等水深  $h$ ，且位於不受浮體結構物運動以及海底底床所引起之輻射波以及散射波影響的位置。

而結構物方面，靜止時兩側浮箱厚為  $c_1$ ，水面至浮箱底部為  $q_1 h$ ，在結構物內外水面高度差為  $q_2 h$ ，壓氣室內零水位上之高度為  $d_0$ ，壓氣室長為  $\ell$ ，兩側浮箱各繫一纜繩固定於海底，纜繩兩端坐標分別為浮箱底  $(x_a, z_a)$  及海底  $(x_b, z_b)$ 。

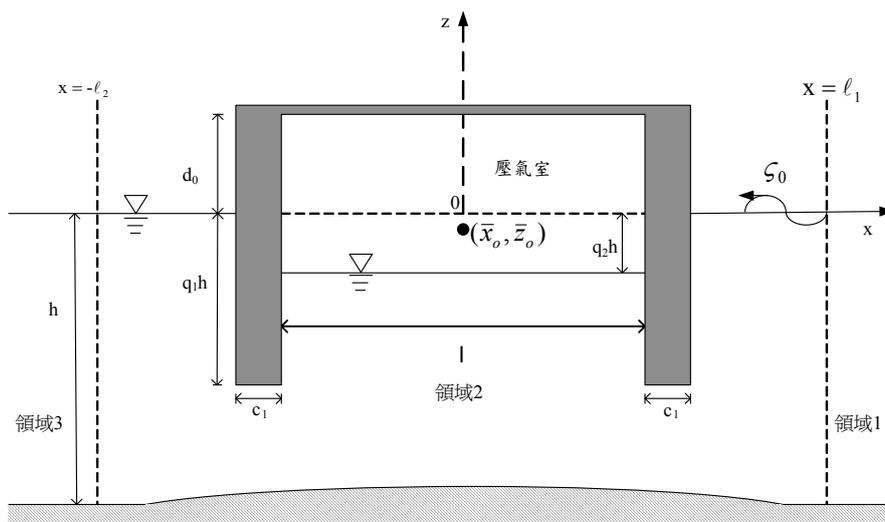


圖 3.4.1 壓氣型浮式結構物示意圖

## 1. 領域 1 及領域 3 之速度勢

由於領域 1 及領域 3 位於等水深且距離結構物較遠的位置，而不受浮體結構物運動以及海底底床所引起之輻射波以及散射波影響的位置，故有一入射波由右向左進入領域 2，則領域 1 及領域 3 之速度勢可將其輻射波以及散射波之無窮其數項忽略，分別表示為：

$$\phi_1(x, z) = \left[ e^{ik(x-\ell_1)} + K_r e^{-ik(x-\ell_1)} \right] \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (3.4.2)$$

$$\phi_3(x, z) = K_t e^{-ik(x+\ell_2)} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (3.4.3)$$

$K_r$  和  $K_t$  為複數反射及透過係數， $k$  為入射波週波數，滿足分散關係式  $\sigma^2 = gk \tanh kh$ 。領域 1 及領域 3 給予之假定邊界  $x = \ell_1$  和  $x = -\ell_2$  可表示為：

$$\phi_1(\ell_1, z) = (1 + K_r) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (3.4.4)$$

$$\bar{\phi}_1(\ell_1, z) = ik(1 - K_r) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (3.4.5)$$

$$\phi_3(-\ell_2, z) = K_t \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (3.4.6)$$

$$\bar{\phi}_3(-\ell_2, z) = -ikK_t \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (3.4.7)$$

## 2. 領域 2 之邊界條件

領域 2 被虛擬邊界 ( $\Gamma_1, \Gamma_7$ )、自由液面 ( $\Gamma_2, \Gamma_6$ )、結構沒水部份 ( $\Gamma_B$ )、壓氣室水面 ( $\Gamma_4$ ) 及不透水海底底床 ( $\Gamma_8$ ) 所包圍。自由水面和海底底床邊界條件分別表示為：

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \quad (z = 0) \dots\dots\dots (3.4.8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (z = h'(x)) \dots\dots\dots (3.4.9)$$

在各領域間交界面處之虛擬邊界( $\Gamma_1, \Gamma_7$ )必滿足質量連續及能量連續的條件：

$$\phi_1 = \phi_2 \quad , x = l_1 \dots\dots\dots (3.4.10)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \quad , x = l_1 \dots\dots\dots (3.4.11)$$

$$\phi_3 = \phi_2 \quad , x = -l_2 \dots\dots\dots (3.4.12)$$

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \quad , x = -l_2 \dots\dots\dots (3.4.13)$$

在分析結構物的反應時，假定結構物進行一二維的剛體運動，結構物經一波浪作用後，結構物的運動可分解為小振幅的水平移，垂質移和縱轉運動。此三種形式的運動位移表示為：

$$\begin{aligned} x_o - \bar{x}_o &= \xi e^{i\sigma t} \\ z_o - \bar{z}_o &= \eta e^{i\sigma t} \\ \delta &= \omega e^{i\sigma t} \end{aligned} \dots\dots\dots (3.4.14)$$

結構物在靜止時的質心位置為 $(\bar{x}_o, \bar{z}_o)$ ，運動瞬間的質心位置為 $(x_o, z_o)$ 。  $\xi, \eta$  和  $\omega$  分別為水平、垂直及旋轉運動振幅。則浮體沒水處之表面一階運動邊界條件為：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{\partial(x_o - \bar{x}_o)}{\partial t} \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial(z_o - \bar{z}_o)}{\partial t} \frac{\partial z}{\partial n} + \frac{\partial \delta}{\partial t} \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] \dots (3.4.15)$$

結構物的運動為流體壓力、纜繩力及力矩所造成的，可表示為：

$$\begin{aligned}
m \frac{d^2(x_o - \bar{x}_o)}{dt^2} &= \int_B p \frac{\partial x}{\partial n} ds + \sum_{j=1}^n \widehat{F}_x^j \\
m \frac{d^2(z_o - \bar{z}_o)}{dt^2} &= \int_B p \frac{\partial z}{\partial n} ds + R_z + P_0^* + \sum_{j=1}^n \widehat{F}_z^j \quad \dots\dots(3.4.16) \\
I_y \frac{d^2(\delta)}{dt^2} &= \int_B p \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds + M_y + \sum_{j=1}^n \widehat{M}_y^j
\end{aligned}$$

$m$  為結構物之質量， $I_y$  為質量慣性矩， $p$  為流體動壓力， $R_z, M_y$  為恢復力和恢復力矩， $n$  表示  $n$  條纜繩， $P_0^*$  為壓氣室內之變動壓力所引起之力量，為浮體運動及水面變動所造成之變動壓力。上述之壓力及恢復力表示為：

$$\begin{aligned}
p &= -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -i\rho g \zeta_0 \phi e^{i\sigma t} \\
R_z &= -\int_B \rho g (z_o - \bar{z}_o) \frac{\partial z}{\partial n} ds \quad \dots\dots\dots(3.4.17) \\
M_y &= -\int_B \rho g \delta (x - \bar{x}_o) \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds \\
P_0^* &= -P_0 \ell e^{i\sigma t}
\end{aligned}$$

纜繩力及力矩表示如下，：

$$\begin{aligned}
\widehat{F}_x^j &= -K_{xx}^j (x_o - \bar{x}_o) - K_{xz}^j (z_o - \bar{z}_o) - K_{x\delta}^j \delta \\
\widehat{F}_z^j &= -K_{zx}^j (x_o - \bar{x}_o) - K_{zz}^j (z_o - \bar{z}_o) - K_{z\delta}^j \delta \\
\widehat{M}_y^j &= -K_{\alpha x}^j (x_o - \bar{x}_o) - K_{\alpha z}^j (z_o - \bar{z}_o) - K_{\alpha\delta}^j \delta \quad \dots\dots\dots(3.4.18)
\end{aligned}$$

其中  $F_o$  為纜繩平衡狀態時之預力， $\ell_{ab}$  為纜繩長， $K^j$  為纜繩勁度。

$$\begin{aligned}
K_{xx}^j &= \frac{(x_b - x_a)^2}{\ell_{ab}^2} K^j + \frac{(z_b - z_a)^2}{\ell_{ab}^2} \frac{F_o}{\ell_{ab}} \\
K_{zz}^j &= \frac{(z_b - z_a)^2}{\ell_{ab}^2} K^j + \frac{(x_b - x_a)^2}{\ell_{ab}^2} \frac{F_o}{\ell_{ab}} \\
K_{xz}^j &= K_{zx}^j = \frac{(x_b - x_a)(z_b - z_a)}{\ell_{ab}^2} \left( K^j - \frac{F_o}{\ell_{ab}} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K_{x\delta}^j &= K_{\ddot{x}}^j = \frac{(x_b - x_a)}{\ell_{ab}^2} [(z_b - z_a)(x_a - \bar{x}_o) - (x_b - x_a)(z_a - \bar{z}_o)] K^j \\
&+ \frac{(z_b - z_a)}{\ell_{ab}^2} [(x_b - x_a)(x_a - \bar{x}_o) - (z_b - z_a)(z_a - \bar{z}_o)] \frac{F_o}{\ell_{ab}} \\
K_{z\delta}^j &= K_{\ddot{z}}^j = \frac{(z_b - z_a)}{\ell_{ab}^2} [(z_b - z_a)(x_a - \bar{x}_o) - (x_b - x_a)(z_a - \bar{z}_o)] K^j \\
&+ \frac{(x_b - x_a)}{\ell_{ab}^2} [(x_b - x_a)(x_a - \bar{x}_o) + (z_b - z_a)(z_a - \bar{z}_o)] \frac{F_o}{\ell_{ab}} \\
K_{\delta\delta}^j &= \frac{[(x_b - x_a)(z_a - \bar{z}_o) - (z_b - z_a)(x_a - \bar{x}_o)]^2}{\ell_{ab}^2} K^j \\
&+ \frac{[(z_b - z_a)(z_a - \bar{z}_o) + (x_b - x_a)(x_a - \bar{x}_o)]^2}{\ell_{ab}^2} \frac{F_o}{\ell_{ab}} \\
\ell_{ab} &= \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (z_b - z_a)^2}
\end{aligned}$$

### 3. 壓氣室之水位變動及體積變化

領域 2 中，壓氣室內的水位變動造成內部空氣體積變化，而導致壓力變化。壓氣室內的壓力  $P_a$  表示為：

$$P_a = \bar{P}_0 + P_0 e^{i\sigma t} \quad (\bar{P}_0 = P_{air} + \rho g q_2 h) \dots\dots\dots (3.4.19)$$

$\bar{P}_0$  為初期空氣壓， $P_{air}$  為大氣壓， $P_0$  為浮體運動及水面變動所造成之變動壓力， $\rho$  為流體密度。則壓氣室內之水面邊界條件可表示為：

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \left( \phi - i \frac{P_0}{\rho g \zeta_0} \right) \dots\dots\dots (3.4.20)$$

壓氣室內空氣之壓力變化與體積變化關係根據波義爾定律，假設壓氣室內空氣變化無溫度(熱能)傳遞。則

$$P_a(t) = \bar{P}_0 \left( \frac{V_0}{V_0 + \Delta V} \right)^\gamma \quad (\gamma = 1.4)$$

$$P_0 e^{i\sigma t} = -\gamma \frac{\Delta V}{V_0} \bar{P}_0 \dots\dots\dots (3.4.21)$$

$V_0$  為初期空氣體積， $\Delta V$  為空氣因浮體運動及水面變動所造成的體積變化，表示為：

$$V_0 = (q_2 h + d_0) \ell ; \Delta V = \int_{-\ell/2}^{\ell/2} [(z_0 - \bar{z}_0) - \eta^*] dx \dots\dots\dots (3.4.22)$$

其中  $\eta^*$  為壓氣室內水面波形變化。

式(3.4.21)經泰勒級數展開後，可整理得出浮體運動及水面變動所造成之變動壓力，表示為式(3.4.23)，其中  $\eta$  為浮體垂直運動振幅。

$$\frac{P_0}{\rho g \zeta_0} = \frac{-\gamma q_2 h}{(1 + \gamma) q_2 h + d_0} \left( \frac{\eta}{\zeta_0} + \frac{i}{\ell} \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx \right) \dots\dots\dots (3.4.23)$$

而壓氣室內之水位  $\eta^*$  之變化，可表示為：

$$\frac{\eta^*}{\zeta_0} = -i \phi e^{i\sigma t} - \frac{P_0}{\rho g \zeta_0} e^{i\sigma t} \dots\dots\dots (3.4.24)$$

### 3.4.2 壓氣型浮式結構物理論發展

#### 1. 反射係數及透過係數

反射係數和透過係數根據在虛擬邊界上質量和能量流束連續的條件，將式(3.4.5)帶入式(3.4.11)，同乘  $\cosh k(h+z)$ ，積分後可得出反射係數  $K_r$  為：

$$K_r = 1 + \frac{i}{N_0 \sinh kh} \int_{\Gamma_1} \bar{\phi} \cosh k(h+z) dz \dots\dots\dots (3.4.25)$$

$$N_0 = [1 + 2kh / \sinh 2kh] / 2$$

再將式(3.4.25)代入式(3.4.4)與式(3.4.10)，即可得出虛擬邊界  $x = \ell_1$  處的邊界條件：

$$\phi(\ell_1, z) = 2 \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} + 2i \frac{\cosh k(h+z)}{N_0 \sinh 2kh} \int_{\Gamma_1} \bar{\phi}(\ell_1, z) \cosh k(h+z) dz \dots (3.4.26)$$

透過係數同樣的採取相同方法，將式(3.4.7)代入式(3.4.13)，同乘  $\cosh k(h+z)$ ，積分後可得出反射係數  $K_r$  為：

$$K_r = \frac{i}{N_0 \sinh kh} \int_{\Gamma_7} \bar{\phi} \cosh k(h+z) dz \dots\dots\dots(3.4.27)$$

虛擬邊界  $x = -\ell_2$  處之邊界條件，經由同樣方法將(3.4.27)式代入(3.4.6)式和(3.4.12)式，表示為：

$$\phi(-\ell_2, z) = 2i \frac{\cosh k(h+z)}{N_0 \sinh 2kh} + \int_{\Gamma_7} \bar{\phi}(-\ell_2, z) \cosh k(h+z) dz \dots\dots\dots(3.4.28)$$

## 2. 浮體表面邊界條件

將三方向的運動振幅以及流體的動壓力及浮體的恢復力代入浮體各自由度的運動作整理，將式(3.4.14)及式(3.4.17)代入式(3.4.16)後可重新得出三方向運動之振幅：

$$\begin{aligned} & \left( \frac{K_{xx}}{\rho g} - \frac{m\sigma^2}{\rho g} \right) \frac{\xi}{\zeta_0} + \frac{K_{xz}}{\rho g} \frac{\eta}{\zeta_0} + \frac{K_{x\delta}}{\rho g} \frac{\omega}{\zeta_0} = -i \int_B \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds \\ & \frac{K_{zx}}{\rho g} \frac{\xi}{\zeta_0} + \left( \frac{K_{zz}}{\rho g} + \int_B \frac{\partial z}{\partial n} ds - \frac{m\sigma^2}{\rho g} - \frac{\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \right) \frac{\eta}{\zeta_0} + \frac{K_{z\delta}}{\rho g} \frac{\omega}{\zeta_0} \\ & = \left( \frac{-\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \right) i \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx - i \int_B \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds \\ & \frac{K_{\delta x}}{\rho g} \frac{\xi}{\zeta_0} + \frac{K_{\delta z}}{\rho g} \frac{\eta}{\zeta_0} + \left\{ \frac{K_{\delta z}}{\rho g} + \int_B (x - \bar{x}_o) \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] - \frac{I_y \sigma^2}{\rho g} \right\} \frac{\omega}{\zeta_0} \\ & = -i \int_B \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds \\ & \dots\dots\dots(3.4.29) \end{aligned}$$

各係數運動振幅之係數可假設為：

$$A_1 \frac{\xi}{\zeta_0} + B_1 \frac{\eta}{\zeta_0} + C_1 \frac{\omega}{\zeta_0} = D_1$$

$$A_2 \frac{\xi}{\zeta_0} + B_2 \frac{\eta}{\zeta_0} + C_2 \frac{\omega}{\zeta_0} = D_2$$

$$A_3 \frac{\xi}{\zeta_0} + B_3 \frac{\eta}{\zeta_0} + C_3 \frac{\omega}{\zeta_0} = D_3$$

$$R = A_1[B_2C_3 - B_3C_2] + A_2[B_3C_1 - B_1C_3] + A_3[B_1C_2 - B_2C_1]$$

再經由聯立計算求解後即可求得三方向運動之振幅：

$$\begin{aligned} \frac{\xi}{\zeta_0} &= \frac{1}{R} \{ [B_2C_3 - B_3C_2] [-i] \int_B \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds + [B_3C_1 - B_1C_3] \left[ \left( \frac{-\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \right) i \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx - i \int_B \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds \right] \right. \\ &\quad \left. + [B_1C_2 - B_2C_1] \left[ -i \int_B \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds \right] \right\} \\ \frac{\eta}{\zeta_0} &= \frac{1}{R} \{ [A_3C_2 - A_2C_3] [-i] \int_B \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds + [A_1C_3 - A_3C_1] \left[ \left( \frac{-\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \right) i \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx - i \int_B \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds \right] \right. \\ &\quad \left. + [A_1C_2 - A_2C_1] \left[ -i \int_B \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds \right] \right\} \\ \frac{\omega}{\zeta_0} &= \frac{1}{R} \{ [A_2B_3 - A_3B_2] [-i] \int_B \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds + [A_3B_1 - A_1B_3] \left[ \left( \frac{-\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \right) i \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx - i \int_B \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds \right] \right. \\ &\quad \left. + [A_1B_2 - A_2B_1] \left[ -i \int_B \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds \right] \right\} \\ &\dots\dots\dots(3.4.30) \end{aligned}$$

將式(3.4.30)代入式(3.4.15)，可得出結構物沒水處表面之邊界條件為：

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \phi}{\partial n} = & \frac{\sigma^2}{g} \left\{ \left( \frac{B_2 C_3 - B_3 C_2}{R} \right) \int_B \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds + \left( \frac{B_3 C_1 - B_1 C_3}{R} \right) \frac{\partial x}{\partial n} \left[ \left( \frac{\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \right) \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx + \int_B \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds \right] \right. \\
& + \left( \frac{B_1 C_2 - B_2 C_1}{R} \right) \frac{\partial x}{\partial n} \int_B \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds \\
& + \left( \frac{A_3 C_2 - A_2 C_3}{R} \right) \frac{\partial z}{\partial n} \int_B \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds + \left( \frac{A_1 C_3 - A_3 C_1}{R} \right) \frac{\partial z}{\partial n} \left[ \left( \frac{\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \right) \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx + \int_B \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds \right] \\
& + \left( \frac{A_2 C_1 - A_1 C_2}{R} \right) \frac{\partial z}{\partial n} \int_B \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds \\
& + \left( \frac{A_2 B_3 - A_3 B_2}{R} \right) \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] \int_B \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds \\
& + \left( \frac{A_3 B_1 - A_1 B_3}{R} \right) \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] \left[ \left( \frac{\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \right) \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx + \int_B \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds \right] \\
& + \left. \left( \frac{A_1 B_2 - A_2 B_1}{R} \right) \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] \int_B \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds \right\}
\end{aligned}
\tag{3.4.31}$$

### 3. 壓氣室之水面邊界條件

壓氣室內之壓力變化與垂直位移有關，因此將式(3.4.30)之垂直位移代入變動壓力式(3.4.23)，可重新得出完整之變動壓力項，表示為：

$$\begin{aligned}
\frac{P_0}{\rho g \zeta_0} = & \frac{-\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \left\{ \left( \frac{A_3 C_2 - A_2 C_3}{R} \right) (-i \int_B \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds) + \left( \frac{A_1 C_3 - A_3 C_1}{R} \right) \left[ \left( \frac{-\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \right) i \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx - i \int_B \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds \right] \right. \\
& + \left. \left( \frac{A_1 C_2 - A_2 C_1}{R} \right) (-i \int_B \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds) + \frac{i}{\ell} \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx \right\}
\end{aligned}
\tag{3.4.32}$$

再將式(3.4.32)代入壓氣室內之水面邊界條件式(3.4.20)，可將邊界條件整理為：

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \phi}{\partial z} = & \frac{\sigma^2}{g} \phi + \frac{\sigma^2}{g} \frac{\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \left( -\frac{1}{\ell} + \frac{A_1 C_3 - A_3 C_1}{R} \frac{\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \right) \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \phi dx \\
& + \frac{\sigma^2}{g} \frac{\gamma q_2 h}{(1+\gamma)q_2 h + d_o} \left\{ \frac{A_3 C_2 - A_2 C_3}{R} \int_B \phi \frac{\partial x}{\partial n} ds + \frac{A_1 C_3 - A_3 C_1}{R} \int_B \phi \frac{\partial z}{\partial n} ds \right. \\
& + \left. \frac{A_1 C_2 - A_2 C_1}{R} \int_B \phi \left[ \frac{\partial x}{\partial n} (z - \bar{z}_o) - \frac{\partial z}{\partial n} (x - \bar{x}_o) \right] ds \right\}
\end{aligned}
\tag{3.4.33}$$

#### 4. 數值解析

由於領域 2 之勢函數滿足 Laplace Equation，而且其二次導數存在，根據 Green 定理，領域內之勢函數可由邊界上之勢函數值及對邊界法線方向之微分值來決定。在分割領域 2 之邊界為八區域的情況下，可以一矩陣式表示，式(3.4.34)為其矩陣式以及轉置後之矩陣式：

$$[H][\phi] = [G][\bar{\phi}] \dots\dots\dots(3.4.34)$$

再將領域 2 對應之各項邊界條件，帶入矩陣式中，可求得各邊界之勢函數及其導函數，並可依式(3.4.25)及式(3.4.27)求反射係數及透過係數，代入式(3.4.30)求結構物各自由度之振幅以及位移量，代入式(3.4.24)求壓氣室內之水面變化。

由於領域 2 之勢函數滿足 Laplace Equation，而且其二次導數存在，根據 Green 定理，領域內之勢函數可由邊界上之勢函數值及對邊界法線方向之微分值來決定。其內部點之勢函數可以下式表示之。

$$\phi(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_B \left[ \frac{\partial \phi(x, z)}{\partial n} \ln \frac{1}{r} - \phi(x, z) \frac{\partial}{\partial n} \ln \frac{1}{r} \right] ds \dots\dots\dots(3.4.32)$$

而邊界上面的點之勢函數為

$$\phi(x', z') = \frac{1}{2\pi} \int_B \left[ \frac{\partial \phi(x', z')}{\partial n} \ln \frac{1}{r} - \phi(x', z') \frac{\partial}{\partial n} \ln \frac{1}{r} \right] ds \dots\dots\dots(3.4.33)$$

在式(3.4.31)及式(3.4.32)中之  $\ln(1/r)$  為滿足 Laplace 方程式之基本解。

$$(r = \sqrt{(x_i - x)^2 + (z_i - z)^2})$$

在分割領域 2 之邊界為八段的情況下，可以一矩陣式表示為：

$$[H][\phi] = [G][\bar{\phi}] \dots\dots\dots(3.4.34)$$

再將領域 2 對應之各項邊界條件，帶入矩陣式中，可求得各邊界之勢函數及其導函數，並可依式(3.4.25)及式(3.4.27)求反射係數及透過係數，代入式(3.4.30)求結構物各自由度之振幅以及位移量，代入式(3.4.24)求壓氣室內之水面變化。

## 第四章 環境保護型消能結構物

### 4.1 研究目的

臺灣的海岸歷經多年之努力，現已完成大約有 500 公里海岸防護設施，其中包括有：海堤約 392,972 m、護岸約 9,338.2 m、消波工約 56,051 m、潛堤 11 座、離岸堤 184 座、突堤 129 座、導流堤 27 座(郭、李，2005)，確實已經達到保護沿海百姓生命財產安全之目標；但絕大部分海岸防護均以高大混凝土結構物建造，而且大多過度安全保護，並在堤前加拋各種型式之消波塊，以防堤身崩壞，當波浪直接衝擊消波工時，造成消波塊滾落消失、越波量變大、砂灘流失、海岸侵蝕及堤防破壞，先行由點的破壞變成線的破壞，進而造成面的破壞。在侵蝕嚴重地區，有時消波塊也會流失或因底部被淘刷而沉陷。若能將原本拋放在堤前的消波塊移除，吊放至外海一段距離使其成為沒水式潛堤，強迫大部分波浪於堤上碎波而減低波能，並以緩坡式傾斜護岸取代原有高大之消波工，除了可以防止養灘砂的流失外並可避免海岸侵蝕，是一個值得推廣的人工潛堤保護工法。

臺灣西海岸坡度平緩，但底質大多屬於沙質海岸，因此若稍加以人為方法設置透水式潛堤、潛礁，佈置適合海草、海藻類及其它海洋生物生活空間，例如藻礁、魚礁、產卵礁等生態礁於海底，採用生態型消波塊、方塊及通水型沉箱作海水交換，則可以產生豐富的水產資源，達到環境復育的功能，其示意圖如圖 4.1.1 至圖 4.1.3 所示。

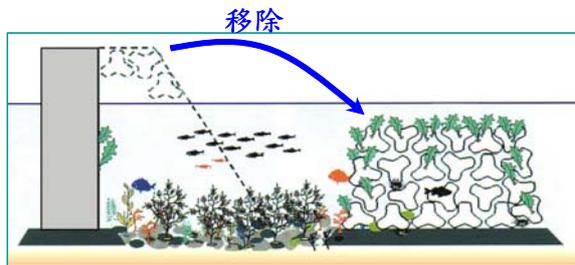


圖 4.1.1 生態型潛礁示意圖

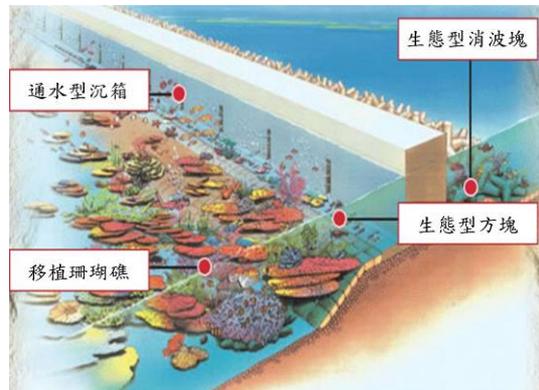


圖 4.1.2 珊瑚移植示意圖  
(日本平良港)

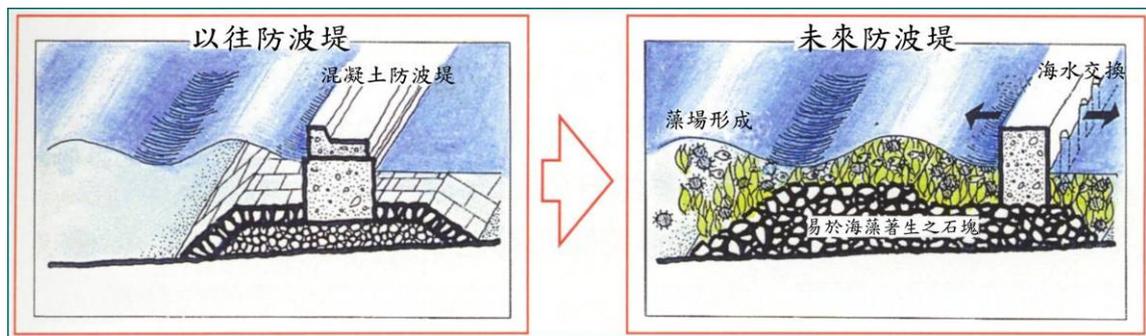


圖 4.1.3 未來防坡堤示意圖

所謂景觀、親水、環境保護型結構物是將直線形改為曲面，在外形及擋波功能上均有不同的變化，如圖 4.1.4 至圖 4.1.6 所示。此種曲面結構物除了對港灣波浪有防波效果外，工程建設與自然環境和諧共生，符合時代潮流，更可增加海岸景觀上的特殊視覺美感，靜穩海域、保護海岸等功能，是一個值得積極研究開發的海岸結構物。開孔曲面堤其演變過程可以由圖 4.1.7 說明，最先是利用堤前方不透水斜面將波浪動能轉換成淤上位能；其後有學者利用開孔直立堤來消波；二者合併即為開孔斜面堤；考慮景觀、波力等因素即演變成開孔曲面堤。

因此，本文提出在不透水直立堤前方銜接梯形透水潛堤，並於其上方設置四分之一圓弧形孔隙板，前方距離堤址一段處設置另一道梯形透水潛堤，組合成「環境保護型」消能結構物。利用兩透水梯形潛

堤間之空間水域當成遊水室，並配合曲面弧形孔隙板之想法，使波浪在入射到直立堤前多了一層的消波室，並利用波浪通過曲面弧形板其所造成波浪相位差及透水潛堤之孔隙率及摩擦係數，消減入射波的能量和降低反射率，使得堤前水面波動大幅下降，並可以減少越波量及降低波浪作用於直立堤波壓力之作用。本文環境保護型消能結構物，其示意圖及未來願景模擬可以圖 4.1.8 表示。

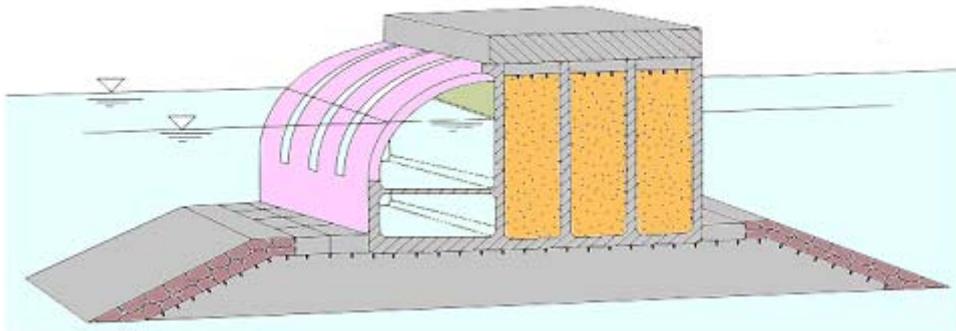


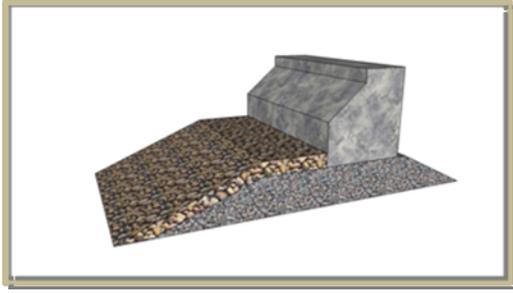
圖 4.1.4 凸型曲面防波堤構造示意圖



圖 4.1.5 凸型曲面防波堤（日本船川港）



圖 4.1.6 半圓形防波堤



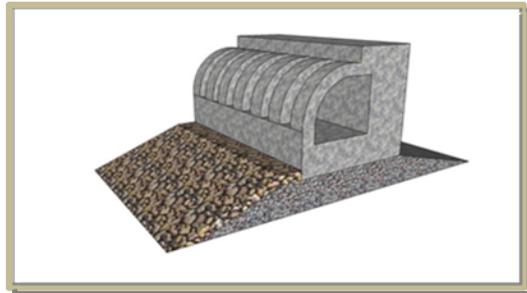
(a) 不透水斜面堤



(b) 開孔直立堤

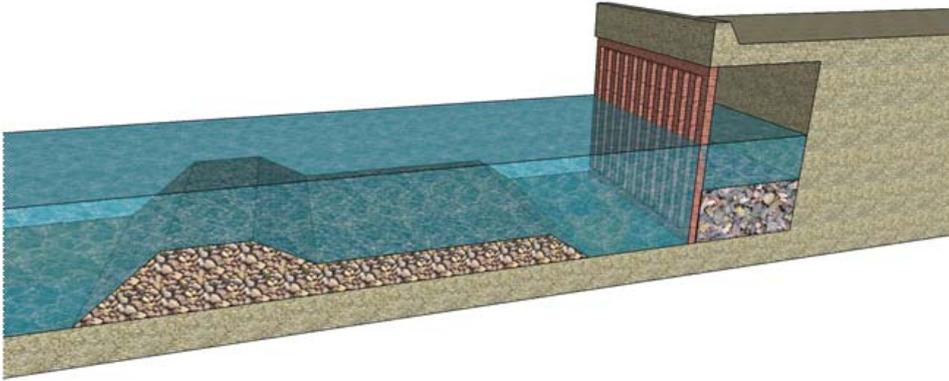


(c) 開孔斜面堤

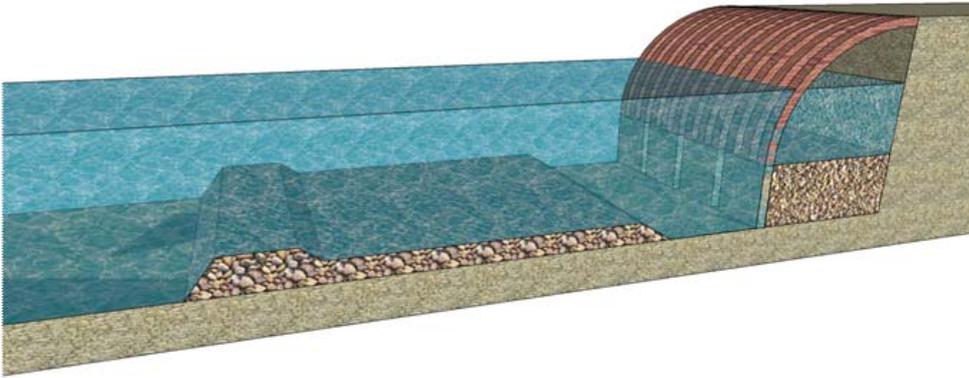


(d) 開孔曲面堤

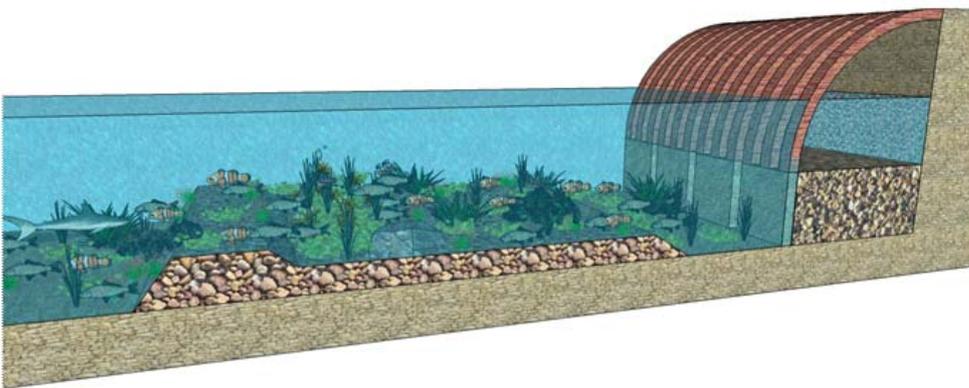
圖 4.1.7 開孔曲面堤演變過程



(a) 環境保護型（直立開孔、拋石、分開式）



(b) 環境保護型（曲面開孔、拋石、分開式）



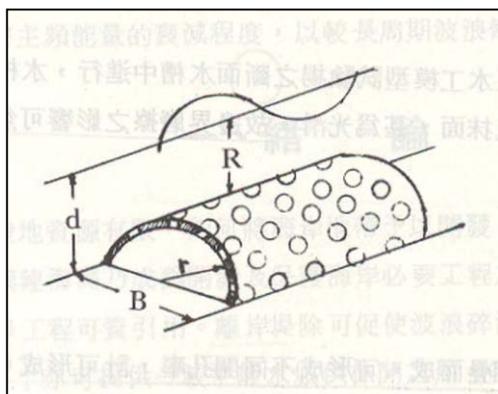
(c) 未來願景模擬

圖 4.1.8 環境保護型消能結構物

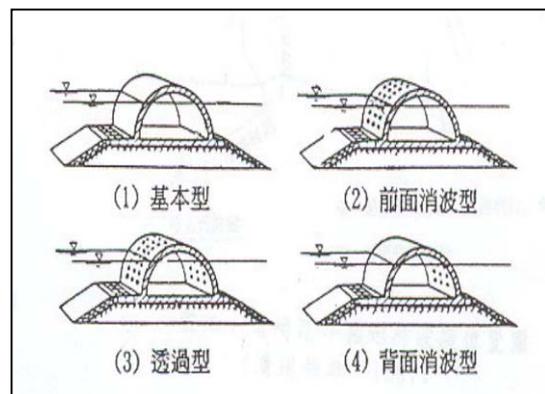
## 4.2 相關文獻回顧

過去已有許多學者都對波浪與透水結構物之間交互作用做過相關研究：國外學者：Sollitt and Cross (1972) 利用 Lorentz 能量等功原理，提出線性摩擦係數描述多孔介質流體之能量消散特性。謝 (2000) 介紹天津港半圓形防波堤和長江口半圓形導堤其結構斷面圖及設計應用情況。謝等 (2006) 針對堤身由四分之一圓和直立後牆所組成圓弧面防波堤，進行波浪力初步分析，並與半圓形防波堤波浪力作比較。

至於針對曲面型透水防波堤則有：郭和黃 (1990) 利用水工模型試驗針對規則波及不規則波通過半圓形開孔堤其反射率及透過率加以試驗研究。林東廷 (2001,a) 針對半圓形防波堤因為具有：中空構造、能阻擋較大波浪、適用於軟弱地盤嚴苛條件下、能充分發揮安定性、低反射率之功效，亦即兼顧了消波、環境及景觀等優點。林東廷 (2001,b) 利用直立堤之合田波壓計算方法，考慮曲面形狀所引起波壓相位差及弧形曲面所引起波壓減衰效果，利用試驗探討半圓形防波堤之波力計算並加以修正。謝志敏等 (2008) 針對半圓形防波堤底寬約為其高的 2 倍，有可能太寬而不經濟，採用四分之一圓弧面新堤型，可以減少大量拋石數量，並使用空間平均 RANS 模式，自由液面以流體體積法 (VOF)，模擬波流與透水結構物互制之作用。



(a) 摘自郭和黃 (1990)



(b) 摘自林東廷 (2001, a)

圖 4.2.1 本文與部分前人研究相關圖說明

此外，國內對於海岸保護、親水性、生態性及港灣生態景觀等研究亦有許多單位及學者從事研究：

蔡立宏等（2005）執行「海岸保護及親水性結構物最適化配置研究（4/4）」，根據具有親水性質的系列潛堤、沙丘及護岸等作水理機制與視覺景觀分析與探討，並應用於新竹港南海岸及高雄彌陀海岸，達到親水及海岸保護之功效。

徐如娟等（2006）執行「生態型海岸保護工法研究（1/4）」，探討海岸保護工法之發展演進、海岸生態工法之發展概況、國內海岸生態環境及生態型海岸保護工法之發展方向與型態。在改善工法上可考慮基本斷面形狀改良、原有斷面附加生態機能、改良原有斷面部材構造等三種基本對策。

經濟部（2009）「南濱及化仁海岸生態情勢調查及新工法研發之研究（2/2）」，第五章中海岸生態工法提及國外案例：美國生態暗礁球潛堤，高 1.2m 重約 3000kg，對海灘休閒區具有保護作用，如照片 4.2.1 所示。法國以特殊模板澆灌具有凹凸不平溝紋與粗糙表面的生態塊，抵抗南大西洋暴浪，如照片 4.2.2。德國研發特殊的塑膠黏著劑，以黏結小碎石塊，成為高孔隙率而安定的生態礁塊，可有效消滅波能。而針對化仁及南北濱海岸，建議今後可以改用類似法國生態塊，增強管蟲附著及生長的底基；以德國生態礁塊替代目前使用拋石緩坡，不但可以固灘並有效降低波浪溯升高，如照片 4.2.3 所示。

簡仲璟等（2010）分四年長期研究收集資料，執行「港灣生態景觀規劃設計應用研究（1/4）」，其內容涵蓋有：港灣生態環境評估準則；景觀營造技術探討；親水設施營造；景觀美質評估因子及分級標準，其研究成果可以作為工程、景觀、生態三者不同科技領域的整合及經驗培養。資料豐富並得到不錯結果，可以提供後續工程之參考。



(a) 礁球成品



(b) 礁球放置水中

照片 4.2.1 美國 Gran Dominicus 生態礁球



(a) 法國 ECOPODE 生態塊



(b) 施工後海岸護岸的實景

照片 4.2.2 法國 ECOPODE 凹凸生態塊



(c) 德國生態礁塊施工



(d) 德國生態礁塊護岸

照片 4.2.3 德國 Elastocoast 新工法生態礁塊

## 4.3 水工模型試驗

本節主要是介紹利用斷面水槽，在不同造波試驗條件下進行水工模型試驗，探討規則波通過環境保護型結構物消能特性，量測四分之一圓弧曲面板上與後方直立岸壁（不透水）之波壓分佈大小，並討論透水潛堤前方反射率大小等現象，本節將說明試驗設備儀器、模型製作與佈置等、試驗條件等等。

### 4.3.1 試驗設備與儀器

本文所有水工模型試驗，係在國立臺灣海洋大學河海工程學系河工一館地下室「水動力試驗室」內的斷面造波水槽中進行，該水槽總長 28 m、寬 0.8 m、高 0.8 m，水槽底部為混凝土處理所鋪設而成，水槽兩旁鑲嵌透明強化玻璃以供試驗觀測之用。

造波機為加拿大國家水利研究所（CHC/NRC）以及 DAVIS 所製，長 1.32 m、寬 1.16m 屬於活塞式造波機。造波機可造規則波與不規則波，本文採規則波試驗，造波週期在 0.7 sec~1.7 sec，共計 8 組，試驗水深固定為 0.5 m。

波高資料擷取設備包含容量式波高計、波高增幅器及波高資料擷取電腦軟體系統，水位變化由波高計量測得到後，經波高增幅器擴大訊號，再由類比-數位轉換系統轉換訊號到個人電腦中，並利用零上切法判斷波高變化，分析計算出入射波波高值。水槽後段放置孔洞型消波構造物，可以減低反射波對結構物之影響。

壓力計為日本 KYOWA 株式會社生產 PGM-0.2KG ( $200\text{gw}/\text{cm}^2$ )、PGM-0.5KG ( $500\text{gw}/\text{cm}^2$ ) 壓力計，本試驗共使用 11 顆 KYOWA 壓力計，6 顆量測圓弧曲面板透水結構物上之壓力，5 顆量測不透水直立岸壁上之壓力。

數位攝影器材使用日本 SONY 株式會社所製，型號 DSC-F717 的

數位相機；總畫素 524 萬，動（靜）態有效畫素為 503 萬畫素。

### 4.3.2 模型製作與佈置

首先選用寬 78 cm、高 60 cm、厚度 3 mm 之鐵板作為模型材料，並於鐵板上以相同孔徑開孔，其孔洞直徑 ( $d_p$ ) 為 1.5 cm，整體孔隙板之孔隙率 ( $\varepsilon_p$ ) 為 0.367，再將直立式孔隙板彎曲成曲面半徑為 38.2 cm，弧長為 60 cm 之四分之一圓的曲面孔隙板。透水潛堤以礫石直徑 ( $d_r$ ) 為 1.5 cm~3 cm 組成，整個礫石間的孔隙率 ( $\varepsilon_r$ ) 為 0.46 之多孔隙結構物構成之梯型透水潛堤，佈置於斷面水槽中不透水直立岸壁前，組合而成「環境保護型」消能式結構物。整個試驗儀器設備如照片 4.3.1 所示。

各波高計架設於造波水槽中之位置如圖 4.3.1 所示。在不透水岸壁上相對水深  $z/h$  為 0.085、0.025、-0.055、-0.5、-0.7 的位置，安裝 5 個壓力計其編號以 1~5 表示；在四分之一圓弧形孔隙板上相對水深  $z/h$  為 -0.39、-0.14、0、0.12、0.23、0.264 的位置，安裝 6 個壓力計其編號以 6~11 表示（試驗水深  $h$  為 50cm），來探討曲面孔隙板上與直立岸壁上之波壓力大小。其壓力計安裝位置如圖 4.3.2 所示。水工模型圓弧板上壓力計安裝如照片 4.3.2 所示。

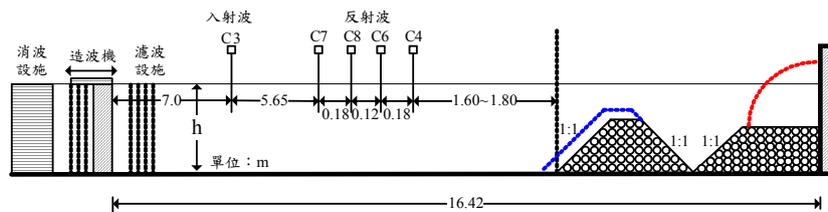


圖 4.3.1 定床斷面造波水槽波高計配置示意圖（連結式  $S/h=0$ ）

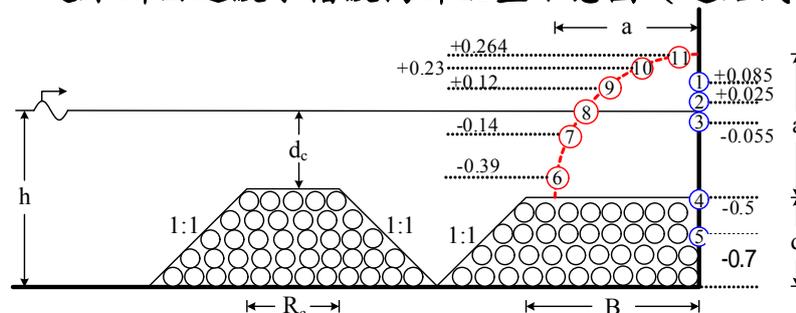


圖 4.3.2 壓力計安裝位置（試驗水深  $h=50\text{cm}$ ）



(a) 試驗水槽



(b) 造波機



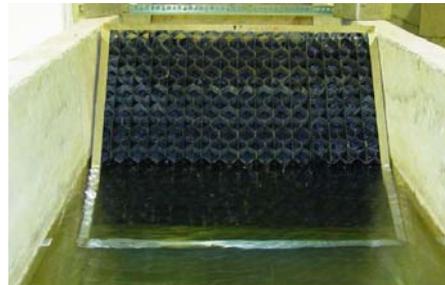
(c) 容量式波高計與波高增幅器



(d) 造波系統及波高擷取系統



(e) 桌上型電腦



(f) 水槽後方孔洞型消波結構物

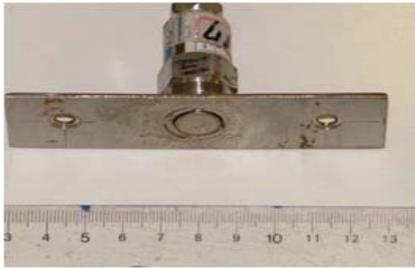


(g) 壓力計(200gw/cm<sup>2</sup>、500gw/cm<sup>2</sup>)



(h) 透水石

照片 4.3.1 試驗儀器設備



(i) 壓力頭固定後



(j) instruNet 資料擷取盒



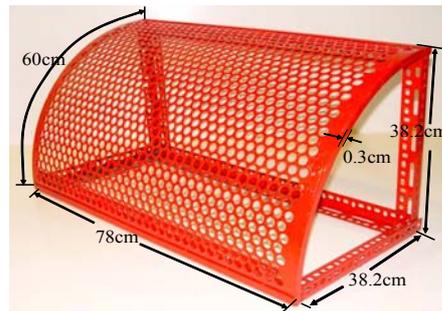
(k) instruNet 擷取卡



(l) 數位相機



(m) 曲面孔隙板 ( $\epsilon_p=0.367$ )



(n) 曲面孔隙板 ( $\epsilon_p=0.367$ ) 尺寸

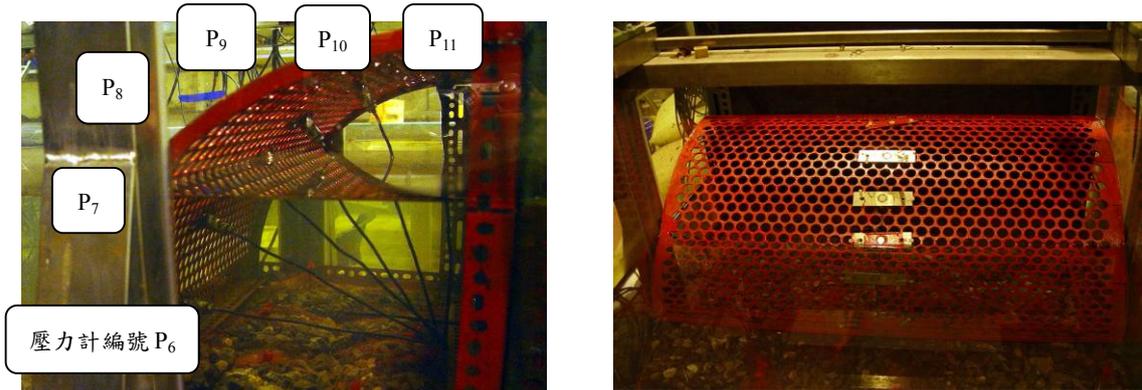


(o) 礫石粒徑示意圖 ( $\epsilon_r=0.46$ )



(p) 粒徑示意 ( $d_r=1.5\sim 3.0\text{cm}$ )

照片 4.3.1 (續) 試驗儀器設備



(a) 後視圖

(b) 上視圖

照片 4.3.2 水工模型圓弧板上壓力計安裝照片

### 4.3.3 試驗條件

本文試驗為定床等水深之試驗，試驗水深固定為 50cm，所造波形為規則波，造波週期共有 8 組 ( $T=0.7\text{sec}\sim T=1.7\text{sec}$ )，造波波高  $H=2.29\text{cm}\sim 9.96\text{cm}$ ，無因次週波數  $kh=0.95\sim 4.11$ ，相對水深  $h/L=0.15\sim 0.65$ ，波浪尖銳度固定為  $H/L=0.03$ ，Ursell number  $Ur=0.11\sim 8.78$ 。在試驗條件下，量測環境保護型消能式結構物之反射率及波壓力。試驗條件如表 4.3-1 所示。

表 4.3.1 水工模型造波試驗條件表

$T$ (sec)	$\sigma^2 h/g$	$kh$	$L$ (cm)	$H$ (cm)	$H/L$	$h/L$	$Ur$
0.7	4.11	4.11	76.2	2.29	0.03	0.65	0.11
0.75	3.58	3.58	87.6	2.63	0.03	0.57	0.16
0.8	3.14	3.16	99.5	2.98	0.03	0.50	0.24
0.9	2.48	2.52	124.8	3.74	0.03	0.40	0.47
1.0	2.01	2.08	151.0	4.50	0.03	0.33	0.82
1.1	1.66	1.76	178.1	5.34	0.03	0.28	1.36
1.2	1.40	1.54	204.0	6.12	0.03	0.25	2.04
1.7	0.70	0.95	332.0	9.96	0.03	0.15	8.78

註：0.05  $L_{\max}=16.6$  cm

0.45  $L_{\min}=34.3$  cm

本文模型配置中，直立岸壁前方梯形透水潛堤其相對堤頂寬固定為  $B/h = 0.44$ ，相對堤頂高固定為  $d/h = 0.5$ ，邊坡固定為 1:1，而上方四分之一圓弧曲面半徑水深比固定為  $a/h = 0.764$ 。主要是改變前方第一道梯形潛堤相對堤寬  $R_c/h$  有二組  $R_c/h = 0.4, 0.6$ ；相對沒水深二組  $d_c/h = 0.3, 0.4$ ；兩道潛堤間距有三組  $S/h = 0$ （連結式）、0.5、1.0（分開式）。而水工模型試驗中波浪通過環境保護型消波結構物如表 4.3-2 所示。其中  $d_{c1}/L$ 、 $d_{c2}/L$  分別表示堤頂沒水深 15 cm、20 cm 與入射波長之比；而  $R_{c1}/L$ 、 $R_{c2}/L$  分別表示堤頂寬 20 cm、30 cm 與入射波長之比。

表 4.3.2 波浪通過環境保護型消能結構物之波浪條件 ( $h=50$  cm)

T (sec)	$\sigma^2 h/g$	kh	L (cm)	H (cm)	H/L	h/L	$d_{c1}/L$	$d_{c2}/L$	$R_{c1}/L$	$R_{c2}/L$
0.7	4.11	4.11	76.2	2.29	0.03	0.65	0.20	0.26	0.26	0.39
0.75	3.58	3.58	87.6	2.63	0.03	0.57	0.17	0.23	0.23	0.34
0.8	3.14	3.16	99.5	2.98	0.03	0.50	0.15	0.20	0.20	0.30
0.9	2.48	2.52	124.8	3.74	0.03	0.40	0.12	0.16	0.16	0.24
1.0	2.01	2.08	151.0	4.50	0.03	0.33	0.10	0.13	0.13	0.20
1.1	1.66	1.76	178.1	5.34	0.03	0.28	0.08	0.11	0.11	0.17
1.2	1.40	1.54	204.0	6.12	0.03	0.25	0.07	0.10	0.10	0.15
1.7	0.70	0.95	332.0	9.96	0.03	0.15	0.05	0.06	0.06	0.09

註： $d_{c1}=15$  cm， $d_{c2}=20$  cm

$R_{c1}=20$  cm， $R_{c2}=30$  cm

波高計取樣頻率為 20Hz，造波 60 秒共接收 1200 筆資料，經由擷取系統接收後存置電腦硬碟中。反射率之計算是將 Goda 兩點法寫入本研究室研發 MATLAB 程式後，讀取兩波高計試驗資料，即可繪製出波形變化時序列圖並計算出各時刻之反射率，取樣範圍在第一個成熟波到達波高計至二次反射前，選取波形穩定段計算，將其平均即可求得此造波條件下之反射率，如圖 4.3.3 所示。

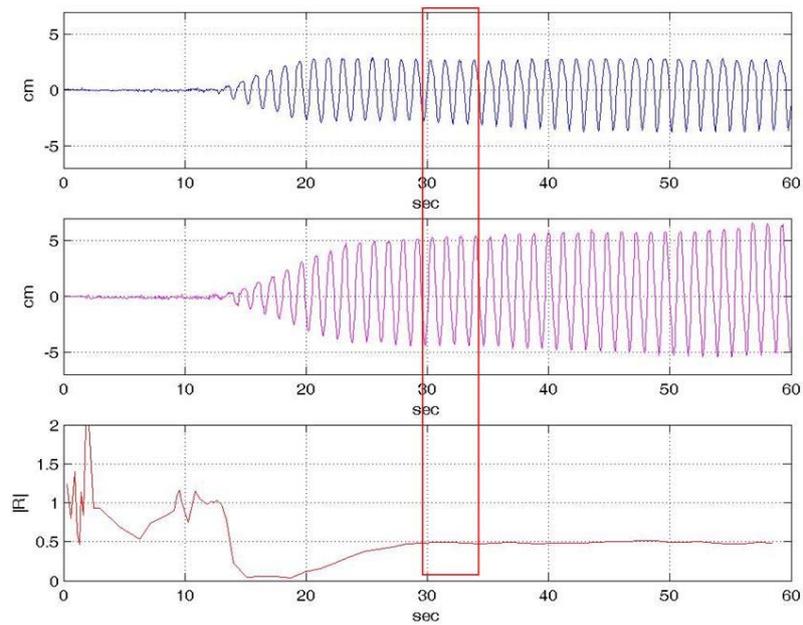


圖 4.3.3 波形變化時序列圖及反射率計算

擷取壓力計量測 60 秒的資料進行分析，壓力計量測時設定每秒接收 8 筆，分別繪製波壓時間序列圖（如圖 4.3.4），選取波形穩定段來進行分析，分別取連續三個穩定波峰（最大值）與連續三個穩定波谷（最小值）之平均，分別作為壓力平均值。將分析的數據以 Grapher 程式繪製成無因次波壓圖後，再討論下一組配置來進行比較。

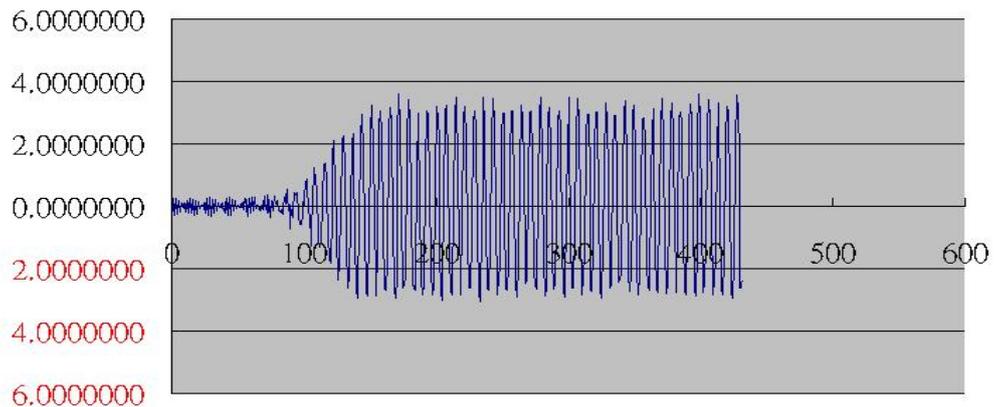


圖 4.3.4 波壓計時間序列圖（單位  $\text{gw}/\text{cm}^2$ ）

## 4.4 水工模型試驗與數值計算結果與分析

本文將每次水工模型試驗所得 8 組反射率值，繪成如圖 4.4.1 至圖 4.4.3 所示，其中縱座標表示反射率，橫座標以無因次週波數 ( $kh$ ) 表示。圖中符號  $\square$ 、 $\nabla$ 、 $\diamond$ 、 $\circ$  分別代表在各試驗條件下，經由四支波高計所量測到之反射率，反射率之計算是經由 Goda 二點法計算而得之反射率值，紅色符號  $\bullet$  則為各次試驗中，所求得之反射率平均值以  $|R|_{AVG}$  表示，實線部分 ( — ) 則為本文數值解。數值計算結果如表 4.4-1 至表 4.4-4 所示。

### 4.4.1 連結式雙潛堤反射率分析與討論

圖 4.4.1 (a) 顯示在配置 (I) 第一道潛堤相對沒水深  $d_c/h=0.4$ ，相對堤寬  $R_c/h=0.4$  固定下，探討水工模型試驗反射率  $|R|$  變化與無因次週波數  $kh$  之關係。水工模型試驗結果發現，在  $kh=0.95$  (相當於週期  $T=1.7\text{sec}$ ) 至  $kh=2.52$  ( $T=0.9\text{sec}$ ) 中間性波部份，反射率先行下降而後上升，最小值  $|R|_{min}=0.32$  發生在  $kh=1.54$  ( $T=1.2\text{sec}$ ) 處，顯示加設第一道潛堤可以有效的使波浪通過透水潛堤時，在堤頂與內部塊石間之孔隙因摩擦而產生能量損失，以及兩潛堤邊坡間遊水室空間使其產生相位差，因而產生較佳之消波效果。但在  $kh=2.52$  ( $T=0.9\text{sec}$ ) 時，反射率卻逐漸上升至 0.77，顯示此配置堤頂沒水深  $d_c$  較深，試驗設計波高較低，致使波浪大多直接通過堤頂，再經由堤前消波室與四分之一圓弧形孔隙板消減部分波能後，最後由直立岸壁反射。在  $kh=3.16$  ( $T=0.8\text{sec}$ ) 至  $kh=4.11$  ( $T=0.7\text{sec}$ ) 深水波部份，反射率由 0.62 略微下降至 0.52 後上升至 0.76，顯示對深水短波消能效果較差。

當潛堤相對沒水深固定為  $d_c/h=0.4$ ，增加相對堤寬為  $R_c/h=0.6$  即配置 (II)，此時反射率變化如圖 4.4.1 (b) 所示，由於堤寬從 20cm 僅增加為 30 cm，但相對於入射波長比仍太小，因此反射率變化與圖 4.4.1 (a) 比較差異不大，此時在  $kh=1.54\sim 2.08$  間有最低反射率值，之後反

射率值則漸漸變大。

若提高透水潛堤高度（即相對沒水深減少為  $d_0/h=0.3$ ；水下 15 cm），再次進行配置（III）、（IV）兩組試驗（相對堤寬  $R_0/h=0.4、0.6$ ），由於堤高增加、堤寬變厚，透水潛堤體積變大，波浪通過時其消能距離變長、空間變大，消能效果增加，因此在  $kh=0.95\sim 2.52$  間中間性波，反射率值會降低，其值皆小於 0.5，有一定之消能效果（如圖 4.4.1(c)、(d) 所示）。

連結式雙潛堤（ $s/h=0$ ）經由數值計算結果顯示：不論採用何種配置，反射率都會先急速下降至一最小值，而後隨著  $kh$  增加，反射率略為上升後再下降至另一最低點， $kh>\pi$ （深水波）之後反射率值波動變化較不明顯，會漸漸趨於一穩定值。當堤高、堤寬增加由表 4.4-4 中可查得最小反射率值發生在  $kh=0.46$  及 1.61 之處，值分別為  $|R|_{\min}=0.359$  與 0.287，經由換算第一道堤前趾至岸壁距離（ $D$ ）與入射波長之比大約在  $D/L=0.25$  及 0.86 處。

#### 4.4.2 分開式雙潛堤反射率分析與討論

改變第一道潛堤與第二道潛堤間堤趾之距離  $S$  分別為 25cm，50cm，其相對無因次堤距水深比為  $S/h=0.5、1.0$ ，本文稱為分開式雙潛堤配置。波浪通過時反射率與  $kh$  之關係如圖 4.4.2 至圖 4.4.3 所示。

當雙潛堤間距較小時（ $S/h=0.5$ ），整體反射率變化趨勢在中間性波浪區間（ $kh=0.95\sim 2.52$ ）反射率平均值介於 0.29~0.49，而且在週期  $T=1.7$  sec（ $kh=0.95$ ）不論是堤高加大、堤寬加厚，均會得到較小反射率。而在深水波區間（ $kh>\pi$ ），反射率平均值大於 0.5 以上機會較多。

若雙潛堤間距拉大至  $S/h=1.0$  時，表示潛堤間遊水室空間變大，波浪可以利用此空間及潛堤上方水域來作消能，試驗結果如圖 4.4.3 所示，不論何種配置下，由圖明顯看出在長週期波下（ $T=1.7$  sec， $kh=0.95$ ）都會有最小反射率值，而且其值會隨著潛堤寬度、高度之增加而下降。在短週期波下（ $T=0.7$  sec， $kh=4.11$ ），由於波浪能量大多集中於水面附

近，較無法感應到雙潛堤存在，波浪大多從潛堤上方通過，僅有部份進入透水潛堤內，因此消能效果有限，所以反射率會有較大值。

若採用分開式潛堤 ( $s/h \neq 0$ ) 數值計算結果顯示：反射率整體變化趨勢與連結式很相似，同樣隨著潛堤配置改變都會有二個最小反射率值出現，但是從數值計算結果表 4.4-1 至表 4.4-4 分析除了反射率值會降低外，發生最小反射率值之位置有漸漸往長週期波 ( $kh$  較小) 處移動，當堤高、堤寬增加由表 4.4-4 中可查得最小反射率值發生在  $kh=0.37$  及 1.23 之處，值分別為  $|R|_{\min}=0.472$  與 0.128，經由換算第一道堤前趾至岸壁距離 ( $D$ ) 與入射波長之比大約在  $D/L=0.26$  及 0.85 處。

#### 4.4.3 直立岸壁波壓力分析與討論

進行直立岸壁波壓力量測時，壓力計共安裝 5 組，分別位於水面上 +4.25cm、+1.25cm、水面下 -2.75cm、-25cm 及 35cm，其無因次水深比分別為  $z/h=0.085$ 、0.025、-0.055、-0.5 及 -0.7，編號為  $P_1$  至  $P_5$ 。本文所有壓力計量測到壓力  $P$  值均作無因次化，無因次波壓力是利用  $P$  值除以各個不同造波週期的波高作無因次化。其試驗結果如圖 4.4.4 至圖 4.4.5 所示。圖中實線為 Sainflou 公式計算結果；◆為試驗值；四種配置下，不論連結式或分開式其試驗之無因次波壓表如表 4.4-5 至表 4.4-12 所示。

圖 4.4.4 採用連結式雙潛堤配置時，由於有第一道透水潛堤阻擋，波浪通過後作用到直立岸壁波壓力會明顯降低，都比 Sainflou 重複波壓力小，其最大波壓力值發生在水面附近 (編號  $P_2$ )；而且壓力會隨著水深漸增壓力漸減；另外，由表 4.4-5 至 4.4-8 顯示第一道潛堤增高、堤寬加厚，對直立岸壁波壓力之影響比較，發現在週期比  $T=1.2\text{sec}$  小之波浪作用，壓力變化差異不大且較無規則性，但在週期  $T=1.7\text{sec}$ ，直立壁無因次波壓力會隨著堤高、堤寬增加從  $P/\rho gH=0.723$  而下降至  $P/\rho gH=0.693$ 。

採用分開式雙潛堤配置時，直立岸壁最大波壓與 Sainflou 重複波

壓比較如圖 4.4.5 所示。波壓力分佈趨勢與連結式很相似；同樣最大波壓力值發生在水面附近（編號  $P_2$ ）；而且壓力會隨著水深漸增壓力漸減；由表 4.4-9 至 4.4-12 分析顯示造波週期  $T=1.2\text{sec}$  以下，採用分開式雙潛堤配置下直立岸壁波壓較連結式為小；但是長週期  $T=1.7\text{sec}$  採用分開式配置，直立岸壁波壓力反而變大，即使堤高堤厚增加，無因次最大波壓力值會從  $P/\rho gH=0.693$ （連結式）增加至  $P/\rho gH=0.833$ （分開式）。

#### 4.4.4 四分之一圓弧板波壓力分析與討論

進行四分之一圓弧波壓力量測時，壓力計共安裝 6 組，分別位於水面下 -19.5cm、-7cm、水面、水面上 6cm、11.5cm 及 13.2cm，其無因次水深比分別為  $z/h=-0.39$ 、 $-0.14$ 、 $0$ 、 $0.12$ 、 $0.23$  及  $0.264$ ，編號為  $P_6$  至  $P_{11}$ 。同樣所有壓力計量測到壓力  $P$  值均作無因次化，無因次波壓力是利用  $P$  值除以各個不同造波週期的波高作無因次化，由於波浪作用於圓弧形板，波力指向曲板底部中心，並以一單位線段長度表示無因次波壓。其試驗結果如圖 4.4.6 至圖 4.4.7 所示。

當連結式雙潛堤配置時，前面 7 組試驗中，波浪週期  $T=0.7\text{ sec}$  至  $T=1.2\text{ sec}$ ，由於波高較小，加上圓弧型上孔洞作用，波浪溯上時會有部分波浪落入孔洞中，因此大大降低波浪溯升高，水面上波壓計編號  $P_9$  至  $P_{11}$  完全量測不到波浪作用力，因此所測得壓力為零，而且以位於水面下 -7cm（編號  $P_7$ ）可以量測到最大波壓力；但是最大無因次波壓力  $P/\rho gH$  都小於 1.0。可是當最後一組試驗造波週期 1.7 秒之波浪，由於其波長較長而且波高較大，波浪沿著圓弧板溯上，會直接作用到相對位置較高的壓力計上（ $P_9$ ），因此會有壓力值，此時壓力以位水面附近（編號  $P_7$ 、 $P_8$ 、 $P_9$ ）會有最大壓力；最大無因次波壓力  $P/\rho gH$  約為 0.542。而編號  $P_{10}$ 、 $P_{11}$  壓力計則位於水面上較高處，完全量不到波壓力。試驗進行中亦發現，長週期波浪進入孔洞中後碰到直立岸壁後，由於大量水體堆積，水位抬升，波浪作用後會有一股水流沿著直立壁往圓弧板上方噴出現象。

採用分開式雙潛堤配置時，波浪作用於四分之一圓弧板上波壓力分佈如圖 4.4.7 所示，其趨勢上大致與連結式波壓力分佈很相似，但是比較試驗無因次波壓力值結果（如表 4.4-5 至表 4.4-12 所示），可以發現前面 7 組試驗中，編號 P<sub>9</sub> 至 P<sub>11</sub> 壓力作用不到同樣為零；水面下編號 P<sub>7</sub> 壓力計量測到最大波壓力；但是其壓力值與連結式壓力值作比較後發現偏小，但是最後一組長週期波試驗，卻發現大部份最大無因次波壓力值會變大。

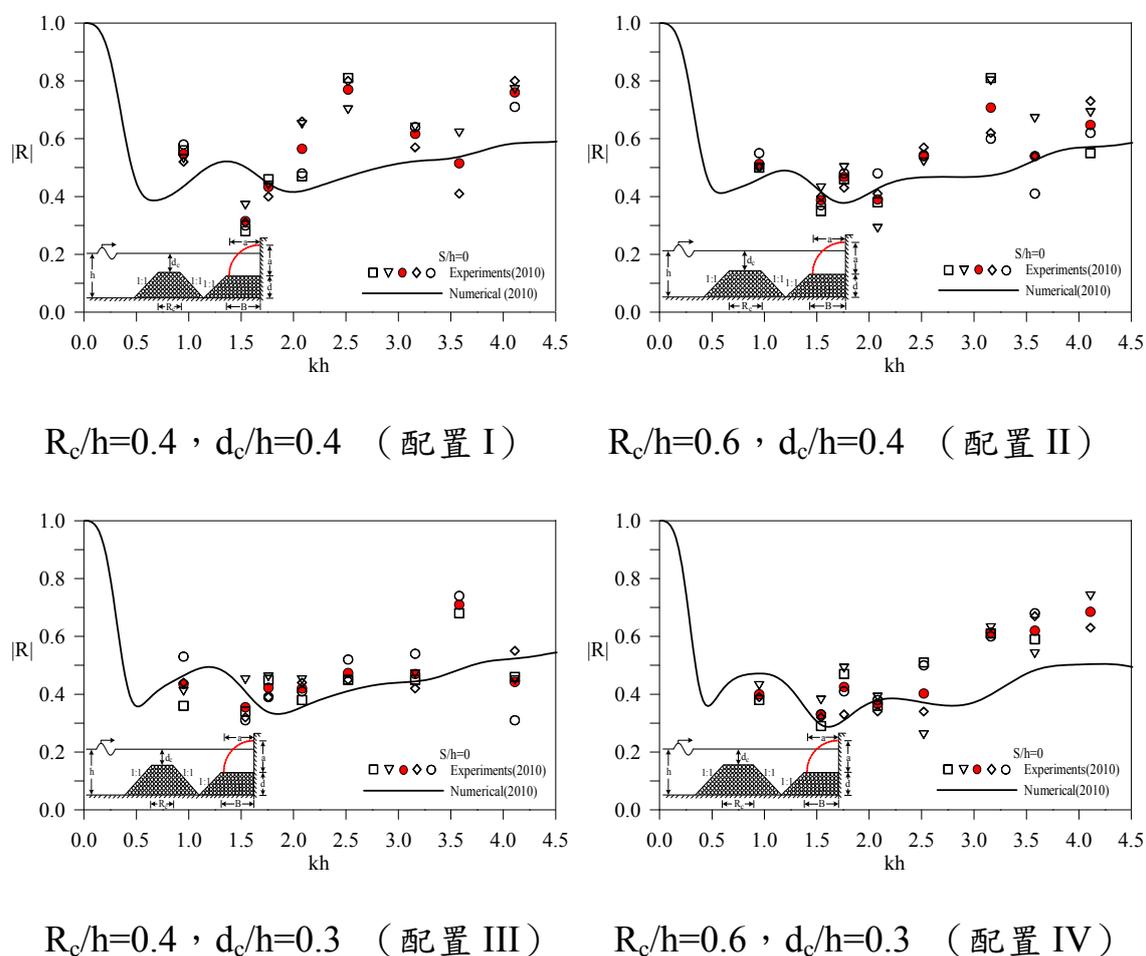
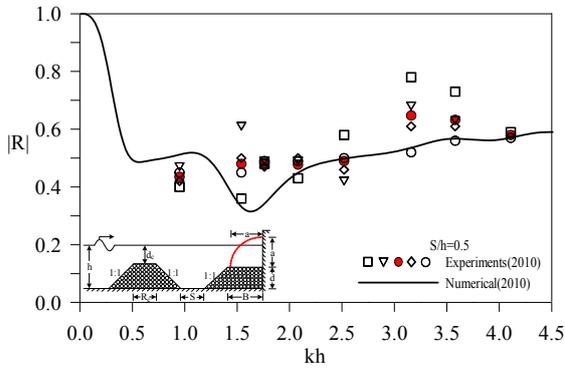
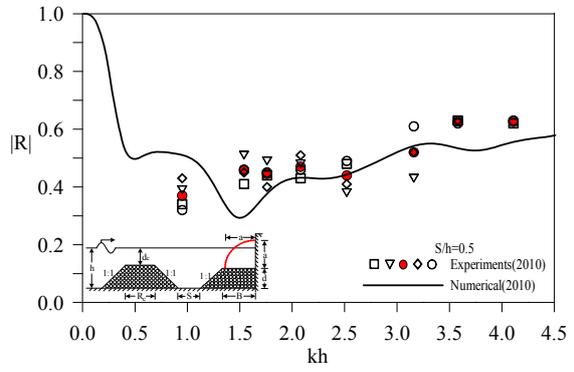


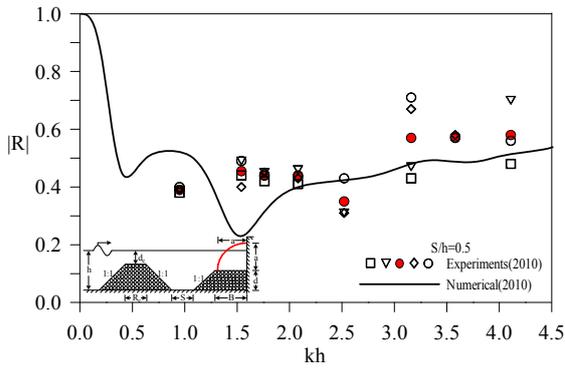
圖 4.4.1 波浪作用於連結式透水結構物 $|R|$ 與  $kh$  關係圖



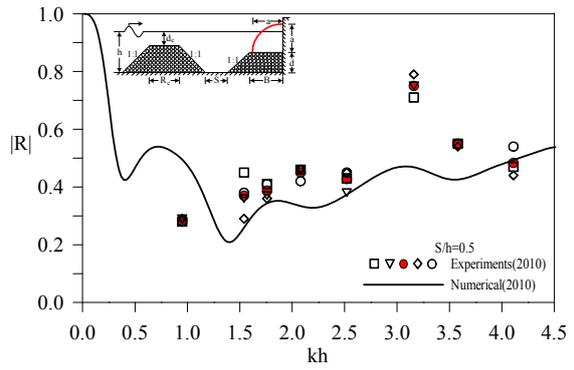
$R_c/h=0.4$  ,  $d_c/h=0.4$  (配置 I)



$R_c/h=0.6$  ,  $d_c/h=0.4$  (配置 II)

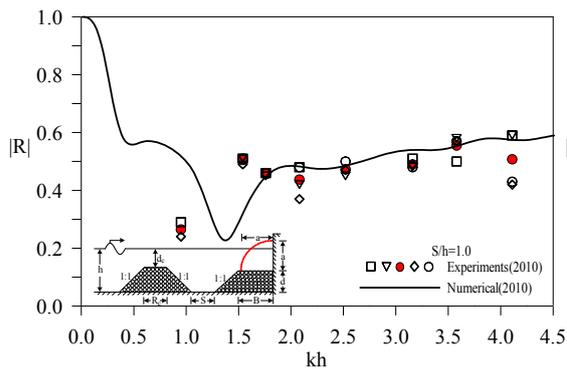


$R_c/h=0.4$  ,  $d_c/h=0.3$  (配置 III)

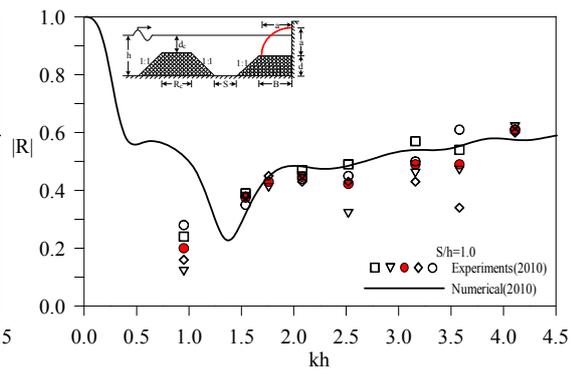


$R_c/h=0.6$  ,  $d_c/h=0.3$  (配置 IV)

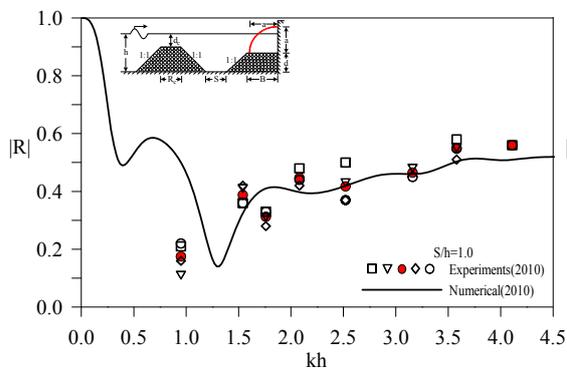
圖 4.4.2 波浪作用於分開式透水結構物|R|與 kh 關係圖



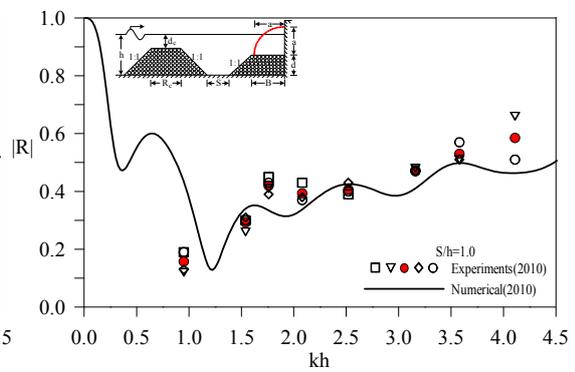
$R_c/h=0.4, d_c/h=0.4$  (配置 I)



$R_c/h=0.6, d_c/h=0.4$  (配置 II)



$R_c/h=0.4, d_c/h=0.3$  (配置 III)



$R_c/h=0.6, d_c/h=0.3$  (配置 IV)

圖 4.4.3 波浪作用於分開式透水結構物|R|與 kh 關係圖

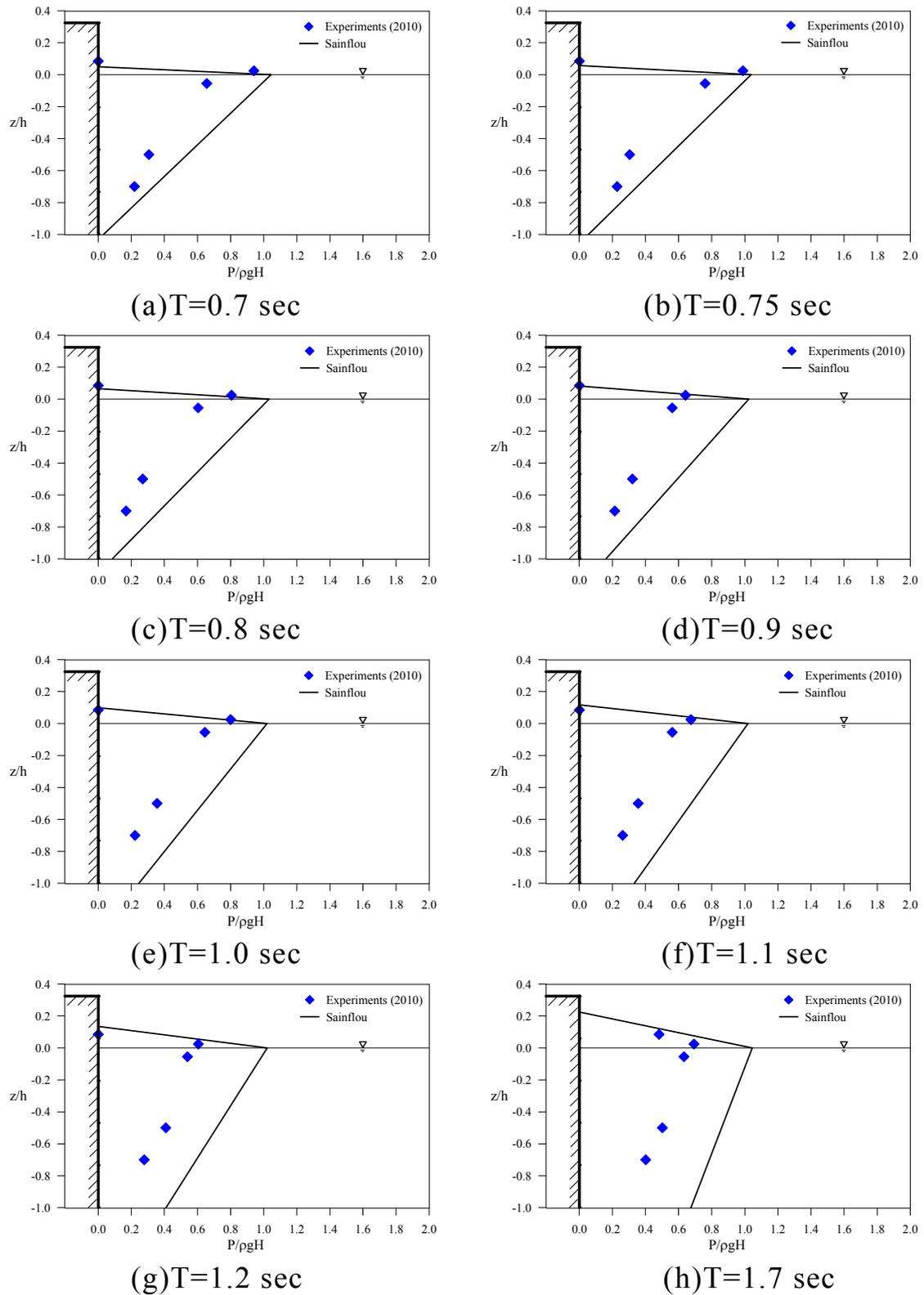


圖 4.4.4 連結式雙潛堤最大波壓力與 Sainflou 重複波壓力比較圖  
( $R_c=0.6$ ,  $d_c=0.3$ ,  $S/h=0$ )

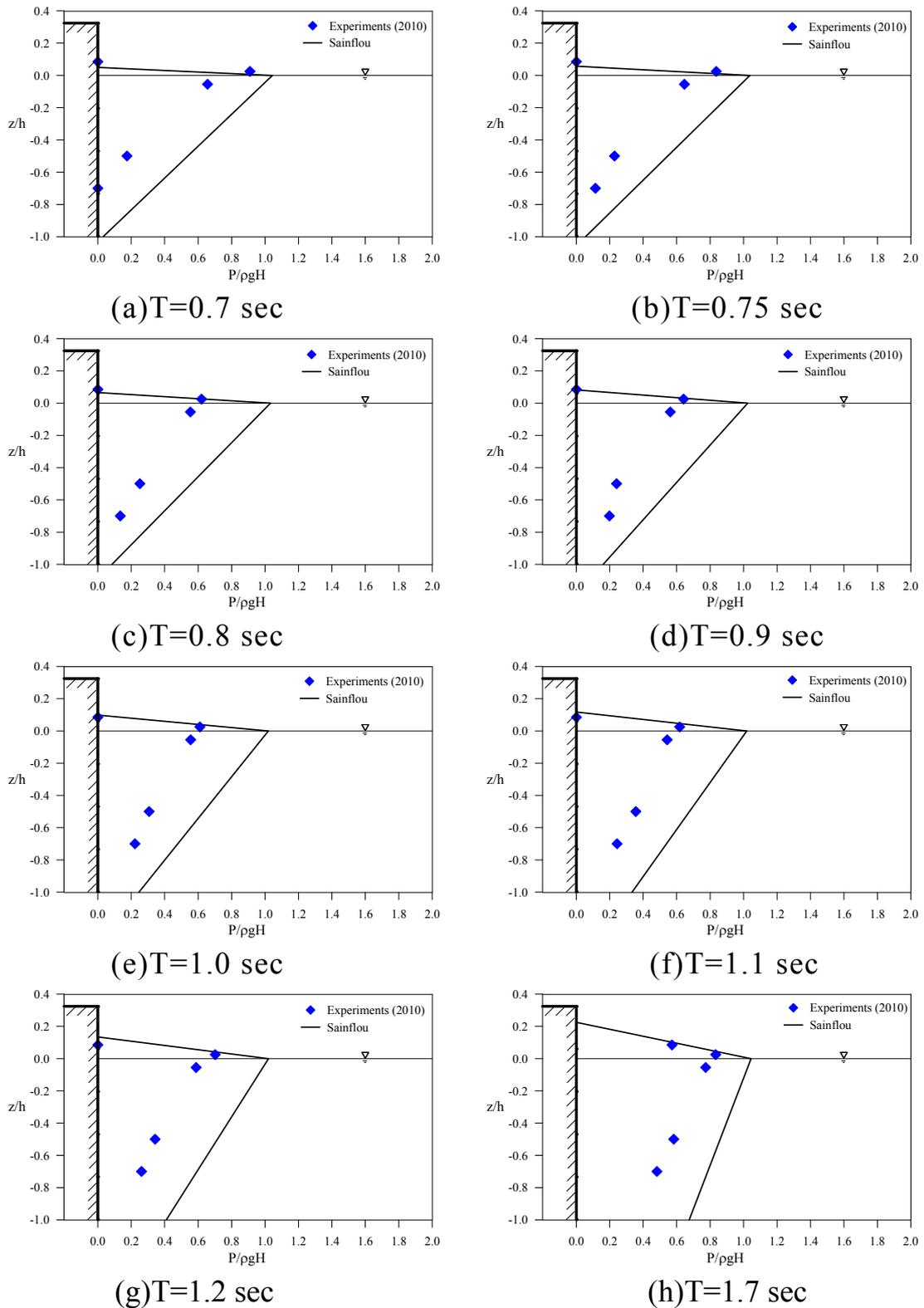


圖 4.4.5 分開式雙潛堤最大波壓力與 Sainflou 重複波壓力比較圖  
 ( $R_c=0.6$ ,  $d_c=0.3$ ,  $S/h=1.0$ )

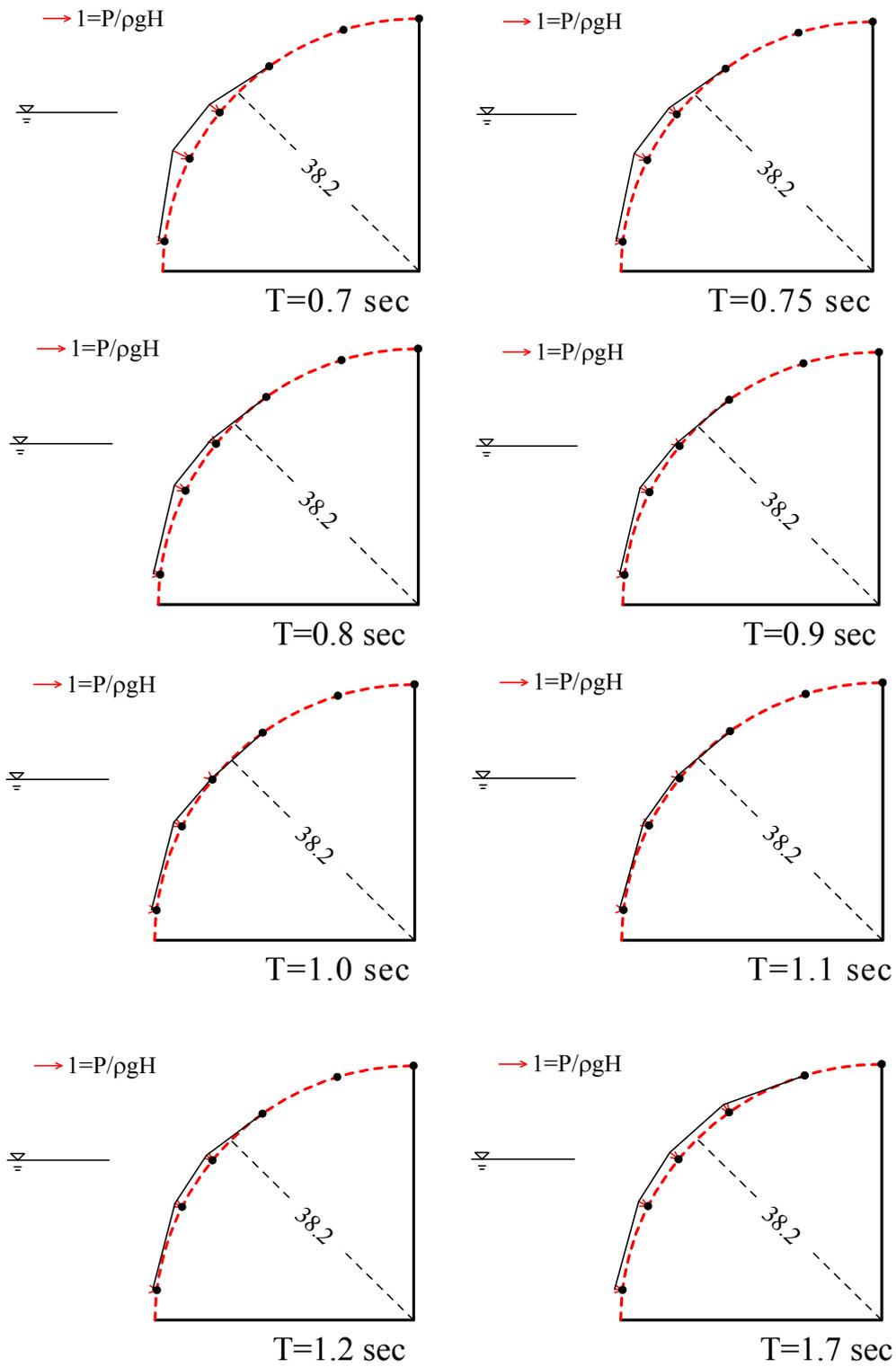


圖 4.4.6 圓弧曲面無因次最大波壓分布比較圖  
 ( $Rc/h=0.6$ ,  $dc/h=0.3$ ,  $S/h=0$ )

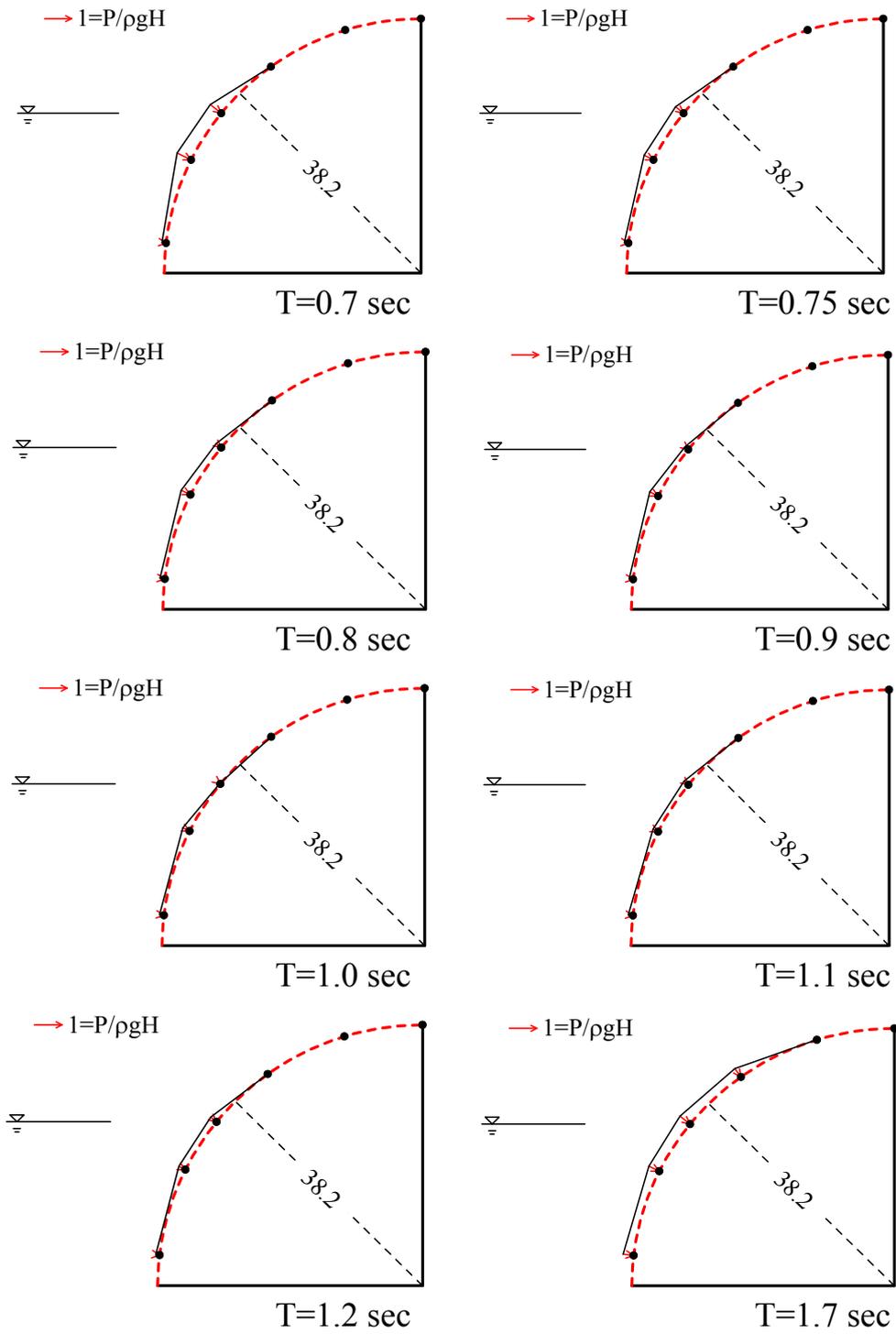


圖 4.4.7 圓弧曲面無因次最大波壓分布比較圖  
 ( $R_c/h=0.6$ ,  $d_c/h=0.3$ ,  $S/h=1$ )

表 4.4.1 配置 (I) 反射率最小值 $|R|_{\min}$  與發生位置

潛堤配置	(I) $d_c/h=0.4$ 、 $R_c/h=0.4$					
潛堤間距	S/h=0.0		S/h=0.5		S/h=1.0	
潛堤總長	D/h=2.98		D/h=3.48		D/h=3.98	
kh	0.66	1.99	0.57	1.63	0.48	1.38
D/L	0.31	0.94	0.32	0.90	0.31	0.88
$ R _{\min}$	0.386	0.416	0.486	0.315	0.558	0.227

表 4.4.2 配置 (II) 反射率最小值 $|R|_{\min}$  與發生位置

潛堤配置	(II) $d_c/h=0.4$ 、 $R_c/h=0.6$					
潛堤間距	S/h=0.0		S/h=0.5		S/h=1.0	
潛堤總長	D/h=3.18		D/h=3.68		D/h=4.18	
kh	0.57	1.77	0.48	1.50	0.44	1.29
D/L	0.29	0.89	0.28	0.88	0.29	0.86
$ R _{\min}$	0.412	0.378	0.497	0.293	0.557	0.210

表 4.4.3 配置 (III) 反射率最小值 $|R|_{\min}$  與發生位置

潛堤配置	(III) $d_c/h=0.3$ 、 $R_c/h=0.4$					
潛堤間距	S/h=0.0		S/h=0.5		S/h=1.0	
潛堤總長	D/h=3.18		D/h=3.68		D/h=4.18	
kh	0.51	1.86	0.44	1.54	0.39	1.29
D/L	0.26	0.94	0.26	0.90	0.26	0.86
$ R _{\min}$	0.358	0.331	0.434	0.230	0.490	0.141

表 4.4.4 配置 (IV) 反射率最小值 $|R|_{\min}$  與發生位置

潛堤配置	(IV) $d_c/h=0.3$ 、 $R_c/h=0.6$					
潛堤間距	S/h=0.0		S/h=0.5		S/h=1.0	
潛堤總長	D/h=3.38		D/h=3.88		D/h=4.38	
kh	0.46	1.61	0.42	1.41	0.37	1.23
D/L	0.25	0.86	0.26	0.87	0.26	0.85
$ R _{\min}$	0.359	0.287	0.424	0.209	0.472	0.128

表 4.4.5 連結式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力  
( $R_c/h=0.4$ ,  $d_c/h=0.4$ ,  $S/h=0$ )

無因次最大波壓力 $P/\rho gH$											
配置	直立岸壁					四分之一圓弧型薄板					
壓力計 編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$z/h$	0.085	0.025	-0.055	-0.5	-0.7	-0.39	-0.14	0	0.12	0.23	0.264
$T=0.7$	0	0.875	0.612	0.219	0.197	0.219	0.551	0.437	0	0	0
$T=0.75$	0	1.065	0.760	0.331	0.209	0.221	0.570	0.380	0	0	0
$T=0.8$	0	0.705	0.570	0.201	0.134	0.134	0.403	0.201	0	0	0
$T=0.9$	0	0.695	0.615	0.294	0.200	0.187	0.321	0.080	0	0	0
$T=1.0$	0	0.733	0.578	0.311	0.222	0.133	0.244	0.067	0	0	0
$T=1.1$	0	0.674	0.599	0.346	0.262	0.150	0.262	0.094	0	0	0
$T=1.2$	0.245	0.678	0.621	0.408	0.310	0.163	0.294	0.245	0	0	0
$T=1.7$	0.442	0.723	0.673	0.500	0.412	0.301	0.343	0.346	0.281	0	0

表 4.4.6 連結式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力  
( $R_c/h=0.6$ ,  $d_c/h=0.4$ ,  $S/h=0$ )

無因次最大波壓力 $P/\rho gH$											
配置	直立岸壁					四分之一圓弧型薄板					
壓力計 編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$z/h$	0.085	0.025	-0.055	-0.5	-0.7	-0.39	-0.14	0	0.12	0.23	0.264
$T=0.7$	0	0.962	0.656	0.175	0.131	0.175	0.569	0.481	0	0	0
$T=0.75$	0	0.989	0.760	0.247	0.190	0.152	0.570	0.342	0	0	0
$T=0.8$	0	0.772	0.604	0.268	0.168	0.218	0.470	0.201	0	0	0
$T=0.9$	0	0.695	0.602	0.294	0.201	0.187	0.388	0.134	0	0	0
$T=1.0$	0	0.733	0.644	0.356	0.222	0.178	0.344	0.044	0	0	0
$T=1.1$	0	0.693	0.599	0.356	0.281	0.159	0.281	0.082	0	0	0
$T=1.2$	0	0.686	0.605	0.408	0.286	0.147	0.310	0.180	0	0	0
$T=1.7$	0.653	0.693	0.622	0.492	0.392	0.261	0.432	0.371	0.402	0	0

表 4.4.7 連結式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力  
( $R_c/h=0.4$  ,  $d_c/h=0.3$  ,  $S/h=0$ )

無因次最大波壓力 $P/\rho gH$											
配置	直立岸壁					四分之一圓弧型薄板					
壓力計 編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$z/h$	0.085	0.025	-0.055	-0.5	-0.7	-0.39	-0.14	0	0.12	0.23	0.264
$T=0.7$	0	1.006	0.656	0.262	0.175	0.175	0.612	0.525	0	0	0
$T=0.75$	0	0.989	0.722	0.266	0.190	0.190	0.570	0.304	0	0	0
$T=0.8$	0	0.738	0.604	0.285	0.205	0.208	0.463	0.215	0	0	0
$T=0.9$	0	0.668	0.588	0.348	0.219	0.201	0.393	0.182	0	0	0
$T=1.0$	0.111	0.822	0.667	0.400	0.244	0.189	0.393	0.111	0	0	0
$T=1.1$	0.187	0.693	0.599	0.375	0.275	0.159	0.262	0.127	0	0	0
$T=1.2$	0.163	0.654	0.588	0.441	0.310	0.180	0.343	0.258	0	0	0
$T=1.7$	0.452	0.683	0.633	0.482	0.402	0.331	0.542	0.402	0.500	0	0

表 4.4.8 連結式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力  
( $R_c/h=0.6$  ,  $d_c/h=0.3$  ,  $S/h=0$ )

無因次最大波壓力 $P/\rho gH$											
配置	直立岸壁					四分之一圓弧型薄板					
壓力計 編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$z/h$	0.085	0.025	-0.055	-0.5	-0.7	-0.39	-0.14	0	0.12	0.23	0.264
$T=0.7$	0	0.941	0.656	0.306	0.219	0.219	0.700	0.481	0	0	0
$T=0.75$	0	0.989	0.760	0.304	0.228	0.251	0.551	0.380	0	0	0
$T=0.8$	0	0.805	0.604	0.268	0.168	0.252	0.453	0.242	0	0	0
$T=0.9$	0	0.642	0.561	0.321	0.214	0.179	0.388	0.160	0	0	0
$T=1.0$	0	0.800	0.644	0.356	0.222	0.189	0.333	0.044	0	0	0
$T=1.1$	0	0.674	0.562	0.356	0.262	0.150	0.225	0.131	0	0	0
$T=1.2$	0	0.605	0.539	0.408	0.278	0.154	0.294	0.291	0	0	0
$T=1.7$	0.482	0.693	0.633	0.502	0.402	0.291	0.382	0.412	0.351	0	0

表 4.4.9 分開式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力  
( $R_c/h=0.4$  ,  $d_c/h=0.4$  ,  $S/h=1.0$ )

無因次最大波壓力 $P/\rho gH$											
配置	直立岸壁					四分之一圓弧型薄板					
壓力計 編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$z/h$	0.085	0.025	-0.055	-0.5	-0.7	-0.39	-0.14	0	0.12	0.23	0.264
$T=0.7$	0	0.831	0.691	0.131	0	0.218	0.525	0.416	0	0	0
$T=0.75$	0	0.837	0.684	0.171	0.076	0.171	0.494	0.247	0	0	0
$T=0.8$	0	0.604	0.537	0.235	0.100	0.168	0.336	0.114	0	0	0
$T=0.9$	0	0.668	0.650	0.259	0.163	0.187	0.310	0.080	0	0	0
$T=1.0$	0	0.711	0.667	0.311	0.244	0.176	0.318	0.067	0	0	0
$T=1.1$	0	0.655	0.646	0.345	0.272	0.87	0.277	0.131	0	0	0
$T=1.2$	0	0.686	0.621	0.376	0.294	0.150	0.229	0.152	0	0	0
$T=1.7$	0.338	0.820	0.743	0.582	0.482	0.361	0.469	0.392	0.151	0	0

表 4.4.10 分開式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力  
( $R_c/h=0.6$  ,  $d_c/h=0.4$  ,  $S/h=1.0$ )

無因次最大波壓力 $P/\rho gH$											
配置	直立岸壁					四分之一圓弧型薄板					
壓力計 編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$z/h$	0.085	0.025	-0.055	-0.5	-0.7	-0.39	-0.14	0	0.12	0.23	0.264
$T=0.7$	0	0.875	0.634	0.197	0.087	0.153	0.437	0.569	0	0	0
$T=0.75$	0	0.875	0.665	0.266	0.103	0.152	0.418	0.342	0	0	0
$T=0.8$	0	0.638	0.570	0.252	0.101	0.151	0.336	0.218	0	0	0
$T=0.9$	0	0.668	0.588	0.294	0.203	0.139	0.294	0.187	0	0	0
$T=1.0$	0	0.667	0.644	0.333	0.222	0.167	0.267	0.133	0	0	0
$T=1.1$	0	0.655	0.581	0.356	0.243	0.140	0.243	0.169	0	0	0
$T=1.2$	0.180	0.694	0.637	0.392	0.302	0.139	0.261	0.212	0	0	0
$T=1.7$	0.512	0.843	0.793	0.602	0.500	0.361	0.432	0.422	0.141	0	0

表 4.4.11 分開式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力  
( $R_c/h=0.4$  ,  $d_c/h=0.3$  ,  $S/h=1.0$ )

無因次最大波壓力 $P/\rho gH$											
配置	直立岸壁					四分之一圓弧型薄板					
壓力計 編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$z/h$	0.085	0.025	-0.055	-0.5	-0.7	-0.39	-0.14	0	0.12	0.23	0.264
$T=0.7$	0	0.853	0.643	0.087	0	0.131	0.569	0.437	0	0	0
$T=0.75$	0	0.798	0.627	0.228	0.133	0.190	0.418	0.323	0	0	0
$T=0.8$	0	0.705	0.537	0.235	0.134	0.134	0.336	0.185	0	0	0
$T=0.9$	0	0.695	0.561	0.294	0.187	0.187	0.294	0.160	0	0	0
$T=1.0$	0	0.656	0.589	0.311	0.156	0.169	0.222	0.080	0	0	0
$T=1.1$	0.125	0.644	0.581	0.356	0.262	0.178	0.225	0.187	0	0	0
$T=1.2$	0	0.523	0.572	0.359	0.286	0.098	0.229	0.208	0	0	0
$T=1.7$	0.582	0.833	0.783	0.562	0.462	0.351	0.472	0.472	0.311	0	0

表 4.4.12 分開式雙潛堤波壓試驗之無因次最大波壓力  
( $R_c/h=0.6$  ,  $d_c/h=0.3$  ,  $S/h=1.0$ )

無因次最大波壓力 $P/\rho gH$											
配置	直立岸壁					四分之一圓弧型薄板					
壓力計 編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$z/h$	0.085	0.025	-0.055	-0.5	-0.7	-0.39	-0.14	0	0.12	0.23	0.264
$T=0.7$	0	0.910	0.656	0.175	0	0.153	0.577	0.525	0	0	0
$T=0.75$	0	0.837	0.646	0.228	0.114	0.152	0.380	0.380	0	0	0
$T=0.8$	0	0.621	0.554	0.252	0.134	0.168	0.369	0.235	0	0	0
$T=0.9$	0	0.642	0.561	0.241	0.198	0.147	0.348	0.160	0	0	0
$T=1.0$	0	0.611	0.556	0.307	0.222	0.156	0.267	0.022	0	0	0
$T=1.1$	0	0.618	0.543	0.356	0.243	0.169	0.206	0.206	0	0	0
$T=1.2$	0	0.703	0.588	0.343	0.261	0.139	0.261	0.269	0	0	0
$T=1.7$	0.572	0.833	0.773	0.582	0.482	0.382	0.422	0.472	0.371	0	0

## 4.5 FLOW-3D 計算結果與分析

以往進行水工模型試驗時須考量造波機造波能力與所需試驗場地大小、人力配置、經費需求及試驗時間長短等，且傳統單點侵入式量測儀器由於探頭、測桿之大小可能會影響施測流速之精度，而且較難同步量測得孔隙結構物內部速度場分佈及附近之全域波流場時空之變化。現今電子計算機發展技術成熟，以數值模式研發軟體模擬真實流況中紊流情勢必為未來趨勢。本研究以 FLOW-3D 商業套裝計算流體力學軟體(CFD)來模擬波浪於環境保護型結構物交互作用之行為。

### 4.5.1 FLOW-3D 數值計算流程與設定

- (1)FLOW-3D 軟體以 Navier-Stokes 方程式作為控制方程式，考慮實際流體之黏滯性以及結構物附近紊流的發生，因此必須加入紊流模式，並以有限差分法將控制方程式離散。
- (2)使用多區塊網格技術以建構連結型或巢狀型區塊，並匯入欲模擬之模型，如圖 4.5.1 所示，製作模型可使用 AutoCAD、Pro/E 等繪圖軟體建構 3D 模型，完成後模型輸出成 STL 檔匯入 FLOW-3D。

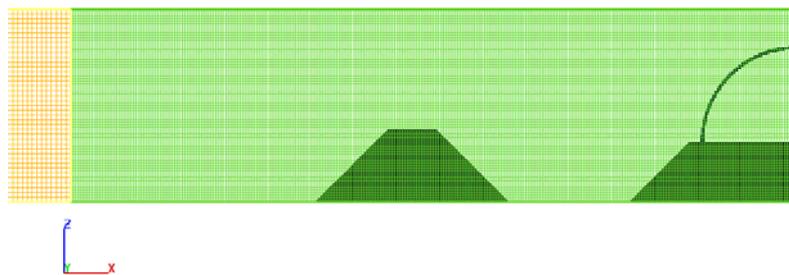


圖 4.5.1 佈置網格並將模型匯入

利用 FLOW-3D 數值軟體特有的 FAVOR 技術，使曲面造型的 Model 也能夠順利的以矩形網格加以描述，使分析模型不會失真，如圖 4.5.2 所示，右圖比左圖明顯減少了許多稜稜角角。

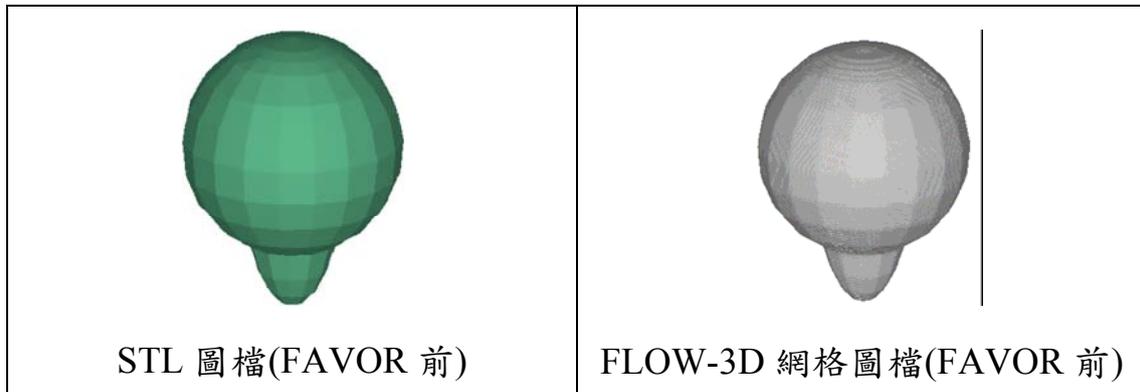


圖 4.5.2 比較 FAVOR 技術所呈現圖形之差異

如圖 4.5.3 所示，FAVOR 技術對網格數量的影響，同樣的幾何造型，FAVOR 僅需三個網格就可以描述得很精確，但是傳統的 FDM 技術必須以較多的網格數量才能夠達到相同的要求。

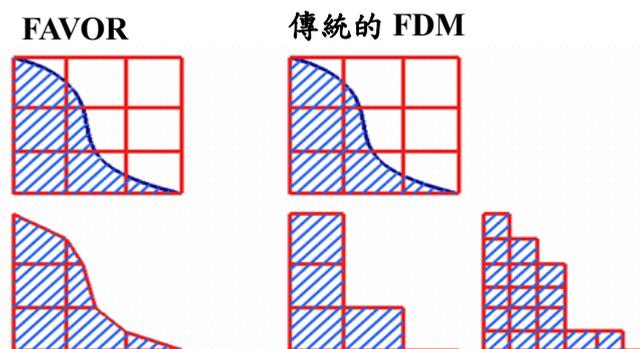


圖 4.5.3 FAVOR 與傳統 FDM 網格描述之差異比較

本研究利用 FAVOR 技術以網格控制體積方式定義通量面積比與體積比來描述網格中之環境保護型結構物，如圖 4.5.4 所示。

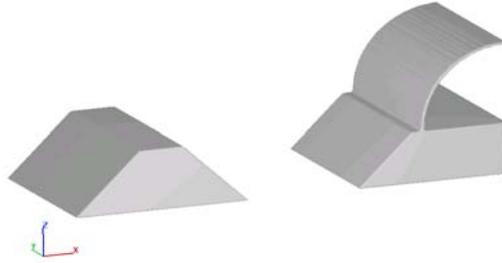


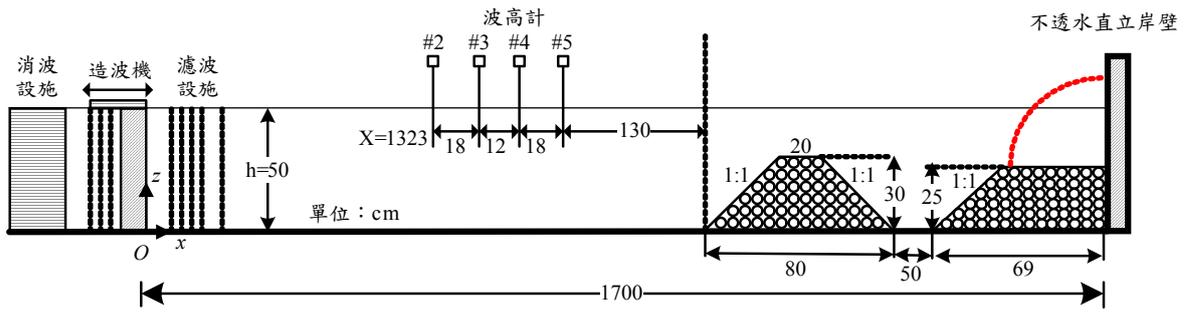
圖 4.5.4 以 FAVOR 技術定義環境保護型結構物  
( $d_c/h=0.4$ 、 $R_c/h=0.4$ 、 $S/h=1.0$ )

- (1) 首先選定數值模擬水槽相對於水工模型試驗量測波高之波高計擺設的位置，再輸出那些位置的自由液面高度，配合其所開發之流體體積分率法(VOF)模擬自由液面，藉以計算輸出的自由液面高度，其次扣除造波水深而可以得到自由液面波動變化，再以求得的自由液面高度以 Goda and Suzuki (1976)二點法進行反射率之計算，但必須注意 FLOW-3D 模擬水工模型波高計相對的量測位置須距離結構物 0.1 倍波長以上，即  $x > 0.1L$ ，其中  $x$  為波高計與結構物間距，而相鄰二支波高計間距( $\Delta l$ )須滿足  $0.05L_{max} < \Delta l < 0.45L_{min}$  範圍。
- (2) 造波條件：本研究以小週期  $T=0.7\text{sec}$  到大週期  $T=1.7\text{sec}$  共分 8 組進行造波模擬，水深固定為  $h=50\text{cm}$ ，其中各組入射波造波條件無因次週波數  $kh$ ，波高  $H$ ，波長  $L$ ，波速  $C$ ，如表 4.5-1 所示

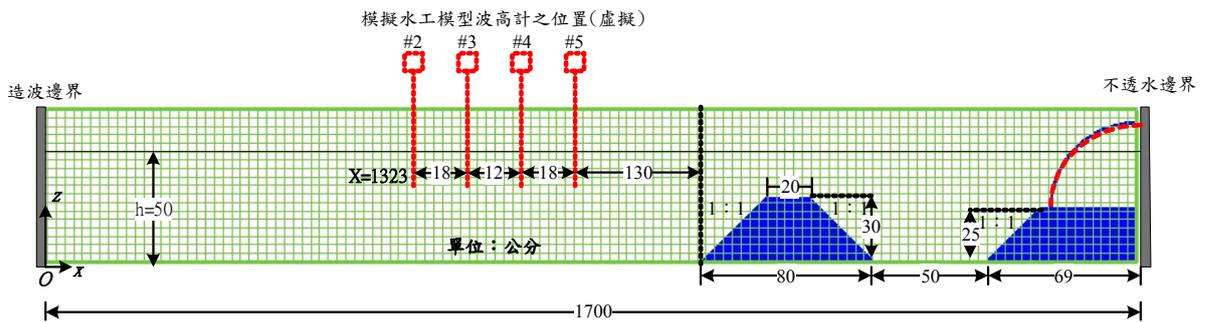
表 4.5.1 造波條件(h=50cm)

T(sec)	kh	H(cm)	L(cm)	C(cm/s)
0.7	4.11	2.286	76.4	109.1
0.75	3.58	2.63	87.6	116.8
0.8	3.16	2.98	99.5	124.3
0.9	2.52	3.74	124.8	138.6
1.0	2.08	4.5	151.3	151.3
1.1	1.76	5.34	178.1	161.9
1.2	1.54	6.12	204.8	170.6
1.7	0.95	9.96	332.6	195.6

- (3) 模型配置：於 FLOW-3D 中 Model Setup 建立一數值造波水槽；將 x 方向長度設定為 1700cm，y 方向長度設定為 20cm，z 方向高度設定為 80cm；將 x y z 三方向之網格以 1cm 等間距分配。模型配置則在不透水邊界前方銜接梯形透水護基潛堤(坡度為 1:1)，並於其上方設置四分之一圓弧形孔隙板，前方距離 S=50cm 處設置另一道梯形透水潛堤，組合成環境保護型結構物。且規則波由左向右於防波堤正向入射。其中四分之一圓弧形孔隙薄板半徑為 a=38.2cm、厚度設定為 1.5cm；直立牆前方護基潛堤堤高 d=25cm，堤頂寬為 B=44cm；前方距離處 S=50cm 之透水梯形潛堤堤頂寬 Rc=20cm，堤頂沒水深 dc=20cm，坡度 1：1。原點 O 位於造波邊界起點不透水底床處，z 軸垂直向上為正，x 軸沿波浪入射方向為正，其配置圖如圖 4.5.5(a)(b)所示。



(a) 水工模型



(b) FLOW-3D(Goda and Suzuki (1976))

圖 4.5.5 環境保護型結構物配置示意圖

- (4) 模組選定：a. Gravity：採用 CGS 制，重力設定  $z$  方向向下為  $-981\text{cm/s}^2$ 。b. Viscosity and turbulence：選擇牛頓流體與  $k-\varepsilon$  紊流模式。c. Porous media：選取孔隙介質模式中之雷諾數依存法，設定透水潛堤孔隙率  $\varepsilon_r=0.46$  與透水薄板孔隙率  $\varepsilon_p=0.367$  及透水潛堤拖曳參數  $a_r=20$ 、 $b_r=0.6$ 。(潛堤內石頭粒徑為  $d_s=3\text{cm}$ )

在 FLOW-3D 中，孔隙介質特性對多孔介質阻力係數的影響，如下式所示， $F_d = a \times V_f^{-b}$ ，其中  $a=180/D^2$ ，而  $b$  之範圍介於  $1.8/D$  和  $4.0/D$  之間， $b$  值越大則越粗糙。參數  $a$  被指定為每個多孔成分以防止非物理流，若  $a=0$  則代表這材料具有無限滲透性。而參數  $b$  的定義具有選擇性，初始設定為  $b=0$ 。多孔介質之飽和流體的孔隙雷諾數(pore Reynolds number)可由下式計算， $Re_p = \rho U D / \mu$ ，一般而言，飽和流體孔隙雷諾數小於 1，這通常只適用於低流速或小孔徑的多孔隙介質。(參考 賴, 2009)

- (1) 邊界條件：邊界條件將上游邊界設定為造波邊界 Wave( $x_{min}$ )，入射波由左方入射，下游邊界設定為不透水牆邊界 Wall( $x_{max}$ )，水槽兩側( $y_{min}$ 、 $y_{max}$ )及底床( $z_{min}$ )處亦設定為不透水牆邊界 Wall，如圖 4.5.6 所示。

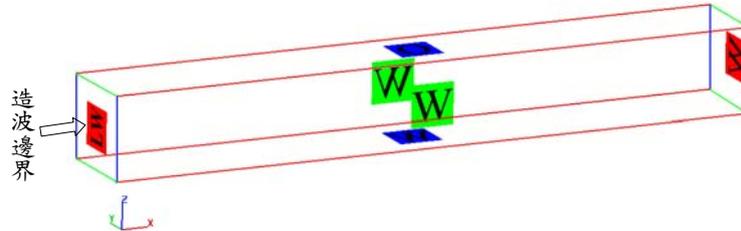


圖 4.5.6 邊界條件設定圖

- (2) 求解設定：單位使用 CGS 制，流體選定溫度為  $20^{\circ}C$  之水，密度為  $\rho=1g/cm^3$ ，動力黏性  $\mu=0.01g/cm/s$ ，模擬造波時間設定為 60 秒，資料輸出間隔 0.05 秒(擷取頻率為 20Hz)。起始時間步長(Initial time step)設定為  $10^{-4}$  秒，最大時間步長(Maximum time step)則限定為網格間距與波速比  $\leq 1$ ，即一個時間步長內流體的運動速度位移不超過一個網格間距，以網格  $1cm$ 、波速  $C=151.3cm/s$  來計算，最大時間步長限制為  $1/151.3=6.6 \times 10^{-3}$  秒，如表 4.5-2 所示。

表 4.5.2 最大時間步長

T(sec)	最大時間步長
0.7	$9.16 \times 10^{-3}$
0.75	$8.56 \times 10^{-3}$
0.8	$8.04 \times 10^{-3}$
0.9	$7.21 \times 10^{-3}$
1.0	$6.61 \times 10^{-3}$
1.1	$6.17 \times 10^{-3}$
1.2	$5.86 \times 10^{-3}$
1.7	$5.11 \times 10^{-3}$

- (3) 參數設定：在 Viscosity and turbulence 選項中選定 k- $\epsilon$  紊流模式必須設定以下兩點(1)TLEN 值(Turbulent mixing length)=0.07，

當作起始值，預設情況最小尺寸的 7%，在這指的是水槽水位深度。（參考賴，2009)(2) Turbulent k.e.值- $K=U_p^2/2$ ， $U_p=A_l C_p$  其中  $U_p$  水平速度、 $C_p$  波速、 $A_l=2.5\times 10^{-3}$ ，如表 4.5-3 所示。(參考 劉，2009)

表 4.5.3 各週期 Turbulent k.e.值

T(sec)	C(cm/s)	Turbulent k.e.值(K)
0.7	109.1	$3.71\times 10^{-2}$
0.75	116.8	$4.26\times 10^{-2}$
0.8	124.3	$4.82\times 10^{-2}$
0.9	138.6	$6.00\times 10^{-2}$
1.0	151.3	$7.15\times 10^{-2}$
1.1	161.9	$8.19\times 10^{-2}$
1.2	170.6	$9.09\times 10^{-2}$
1.7	195.6	$11.95\times 10^{-2}$

## 4.5.2 模式驗證

### 1. 入射波網格獨立性分析

本研究之入射波網格獨立性分析以 1cm 之網格來描述此週期  $T=1\text{sec}$ 、波長  $L=151.3\text{cm}$ 、波高  $H=4.5\text{cm}$  之入射波，並與理論公式進行比對。水面波形取樣位置為造波邊界向下游第一個單位網格處，取樣時間為 15sec，以避免反射波干擾入射波形，所量測到之入射波形時間序列繪製如圖 4.5.7(a)所示。其中紅線(—)表示以波浪理論公式(1)所繪出圖形，黑線(—)則為 FLOW-3D 計算結果。

$$\eta = a_i \sin(kx - \sigma t) \dots\dots\dots(4.5.1)$$

$\eta$  為水位高程， $a_i$  為振幅， $k$  為無因次週波數， $\sigma$  為無因次週頻率

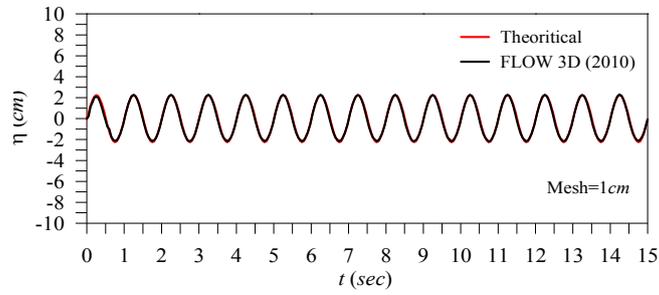
由圖 4.5.7(a)中可發現使用網格 1cm 時所模擬之結果與理論公式一致，且 15 秒內共有 15 個完整的波形，顯示此一網格大小能完整

描述此波浪條件。圖 4.5.7(b)與圖 4.5.7(c)則為 1cm 網格設定時，於水面下 9.5cm 處量測而得之 x、z 方向之速度時間序列圖，並與波浪理論進行波公式(2)至(3)比對，亦得到準確的結果。

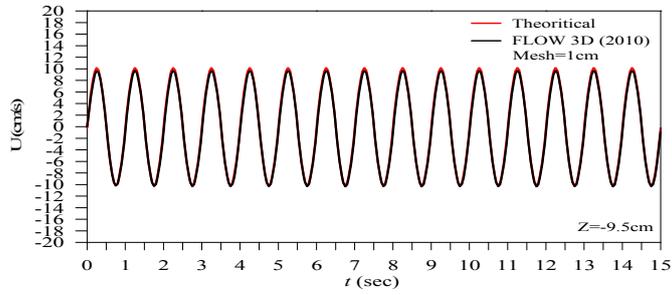
$$U = a_i \sigma \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \dots\dots\dots(4.5.2)$$

$$W = a_i \sigma \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \dots\dots\dots(4.5.3)$$

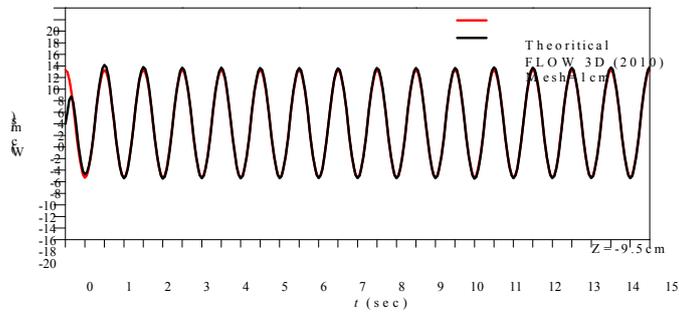
其中 U 為 x 方向水平速度，W 為 z 方向垂直速度，z 為靜水面向上之座標系統，h 為水深。



(a) 入射波波形時間序列圖



(b) x 方向水平速度  $U$  (cm/s)



(c) z 方向垂直速度  $W$  (cm/s)

圖 4.5.7 入射波網格獨立性分析

## 2. 空水槽驗證

圖 4.5.8 為水工模型試驗與數值造波水槽配置示意圖，於造波板前方 5.2m 處架設一支 ADV 流速計以量測水下各點流速，於 7m 處至 8.33m 處架設 8 支波高計(#1~#8)以量測進行波反射率，相鄰二支波高計間隔 0.19m，於 16m 至 17m 架設消波設施以避免反射波干擾。

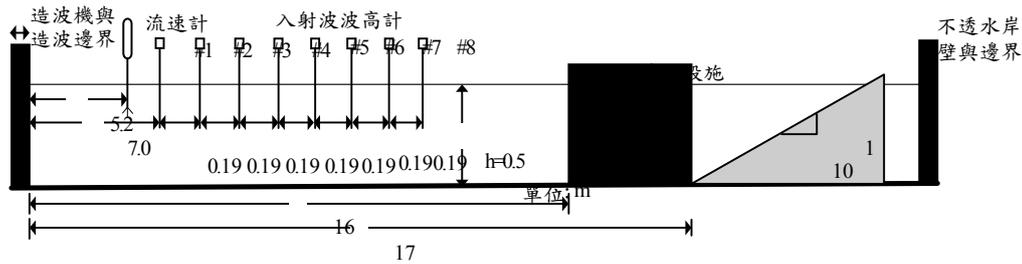
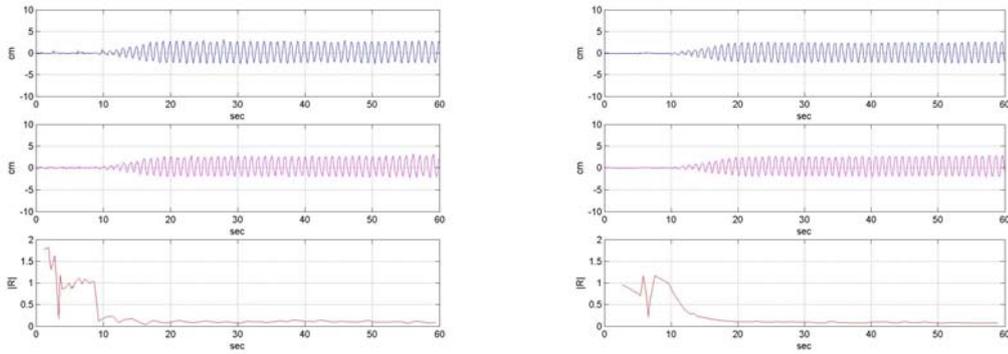


圖 4.5.8 水工模型試驗與數值造波水槽配置示意圖

試驗條件為週期  $T=1.0\text{sec}$ ，波高  $H=4.5\text{cm}$ ，水深  $h=50\text{cm}$ ，無因次週波數  $kh=2.08$ ，波長  $L=151.3\text{cm}$ ，波速  $C=151.3\text{cm/s}$ 。各波高計計算而得之反射率，如圖 4.4.9(a)(b)所示(取其中兩組)；FLOW-3D 數值造波水槽長度(X 方向)設定為 100m，於  $X=65\sim 100\text{m}$  處設置一斜坡以消減波能，Y 方向寬度設定為 10cm、Z 方向高度設定為 80cm；將 X Y Z 三方向以 2cm 之網格等間距分配。波高資料擷取位置同水工模型試驗，其反射率計算結果，如圖 4.5.10(a)(b)所示(取其中兩組)，FLOW-3D 計算結果各組反射率值皆為 0.1 左右與水工模型試驗相比結果相當吻合。(其中  $|R|$  下標表示波高計編號)

以週期  $T=1.0\text{sec}$ ，波高  $H=4.5\text{cm}$ ，水深  $h=50\text{cm}$ ，無因次週波數  $kh=2.08$ ，波長  $L=151.3\text{cm}$ ，波速  $C=151.3\text{cm/s}$  為造波條件，分析探討 x、z 方向流速分佈，圖 4.5.11(a)(b)中虛線( )分別為波浪理論進行波公式(2)、(3)計算而得之 X、Z 方向水粒子運動速度 U、W 峯谷值。圖中菱形(◆)為 ADV 流速計量測結果，較細之其它線為 FLOW-3D 計算所得進行波 1 個週期內 10 個相位之速度分佈，三者進行比較於峯谷處速度分佈大小相當吻合。

在以另一週期  $T=1.7\text{sec}$ ，波高  $H=9.96\text{cm}$ ，水深  $h=50\text{cm}$ ，無因次週波數  $kh=0.95$ ，波長  $L=332.6\text{cm}$ ，波速  $C=195.6\text{cm/s}$  為造波條件，圖 4.5.12(a)(b)中虛線(—)分別為波浪理論進行波公式(2)、(3)計算而得之  $X$ 、 $Z$  方向水粒子運動速度  $U$ 、 $W$  峯谷值，較細之其它線為 FLOW-3D 計算所得進行波 1 個週期內 16 個相位之速度分佈，兩者進行比較於峯谷處速度分佈大小相當吻合。

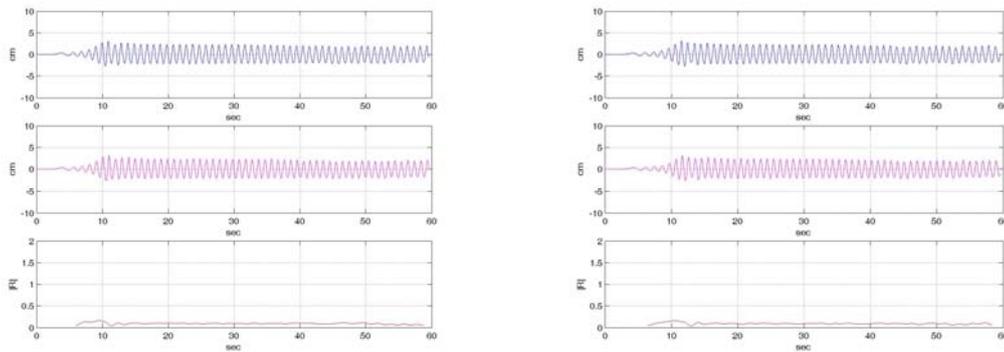


(a)  $|R|_{23}=0.09$

(b)  $|R|_{78}=0.09$

圖 4.5.9 水工模型試驗進行波反射率計算結果圖

( $T=1.0\text{s}$ ,  $h=50\text{cm}$ ,  $kh=2.08$ ,  $H=4.5\text{cm}$ ,  $L=151.3\text{cm}$ ,  $C=151.3\text{cm/s}$ )

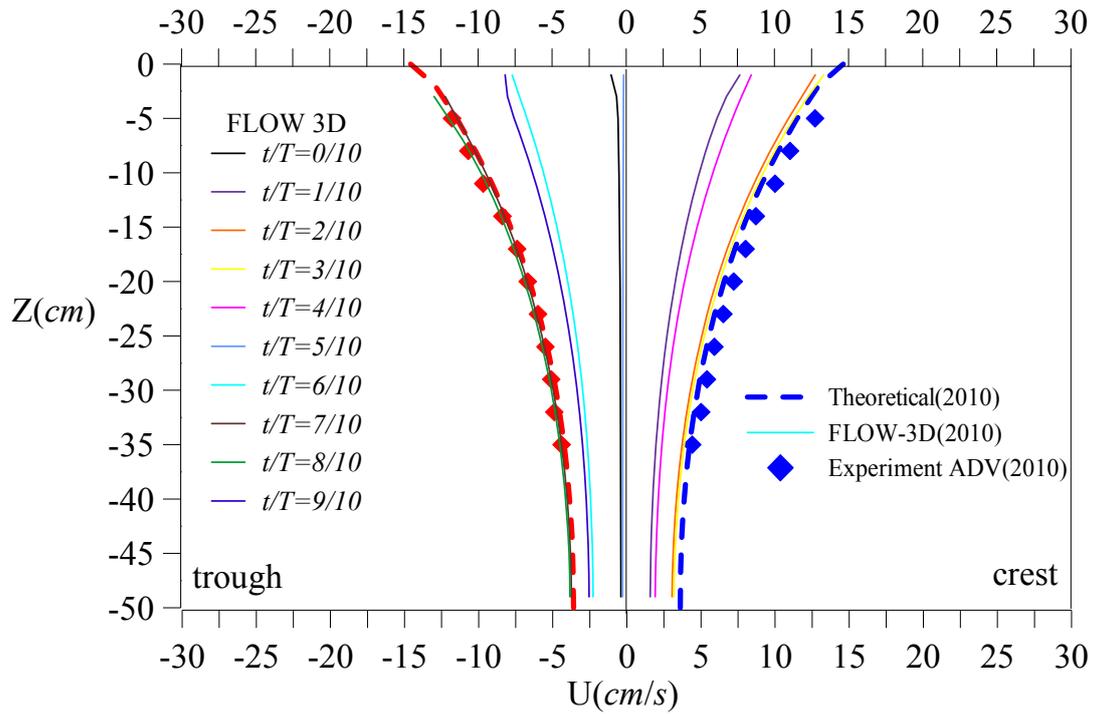


(a)  $|R|_{23}=0.09$

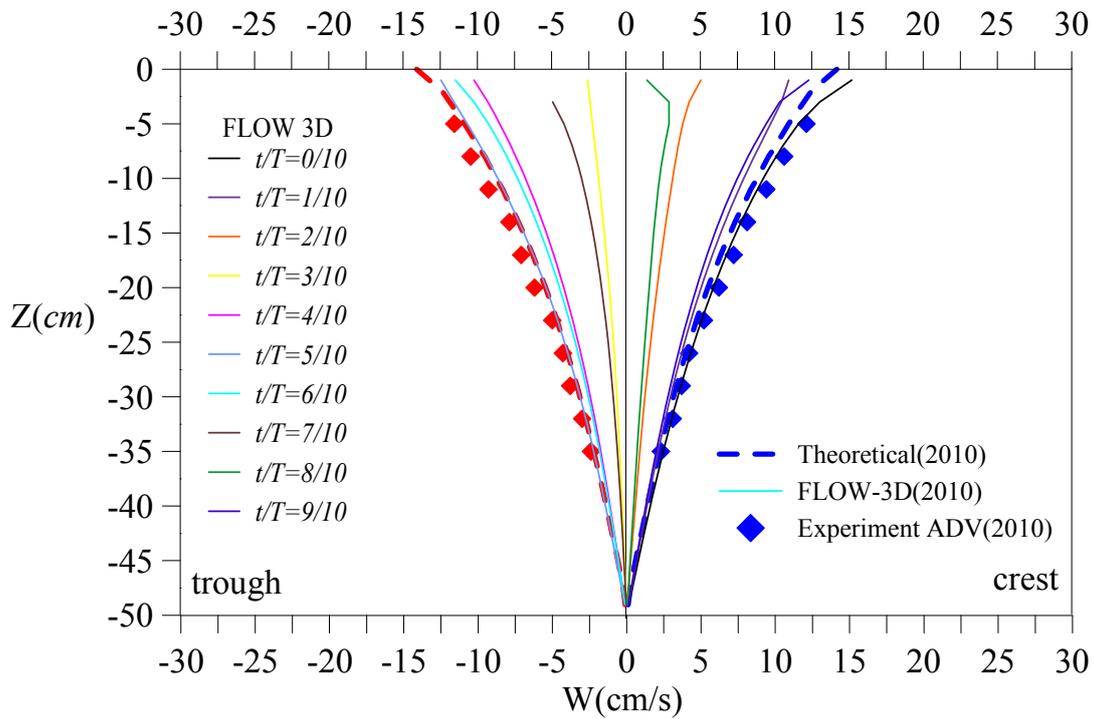
(b)  $|R|_{78}=0.08$

圖 4.5.10 數值造波水槽進行波反射率計算結果圖

( $T=1.0\text{s}$ ,  $h=50\text{cm}$ ,  $kh=2.08$ ,  $H=4.5\text{cm}$ ,  $L=151.3\text{cm}$ ,  $C=151.3\text{cm/s}$ )



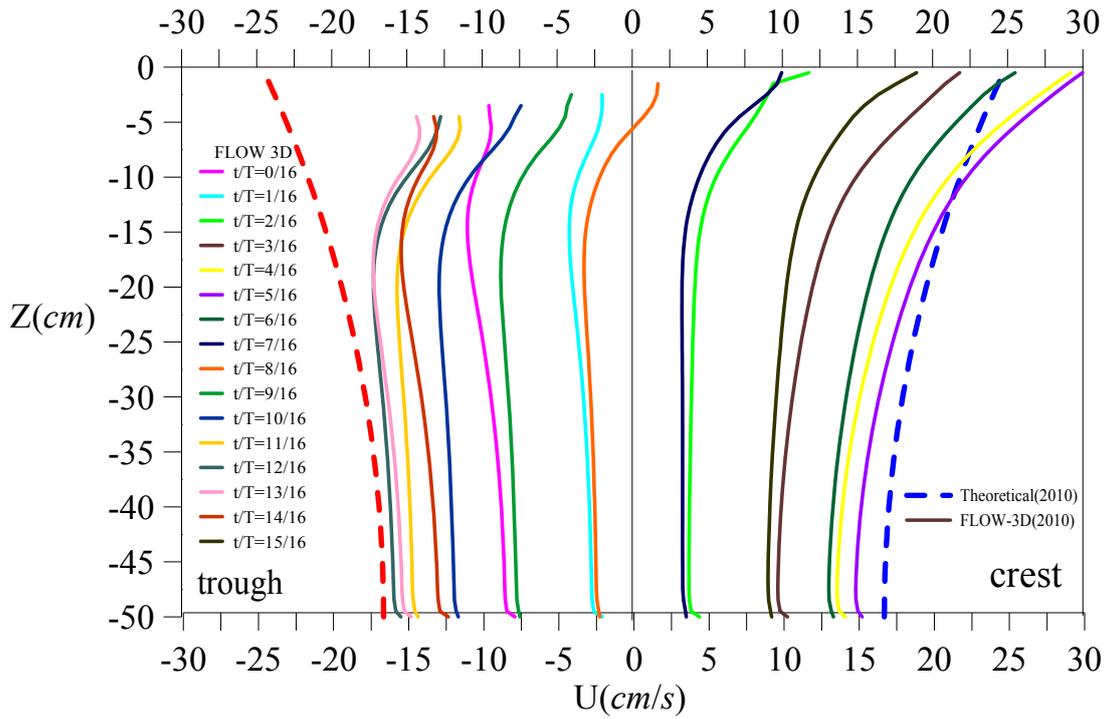
(a) 水平流速  $U(\text{cm/s})$



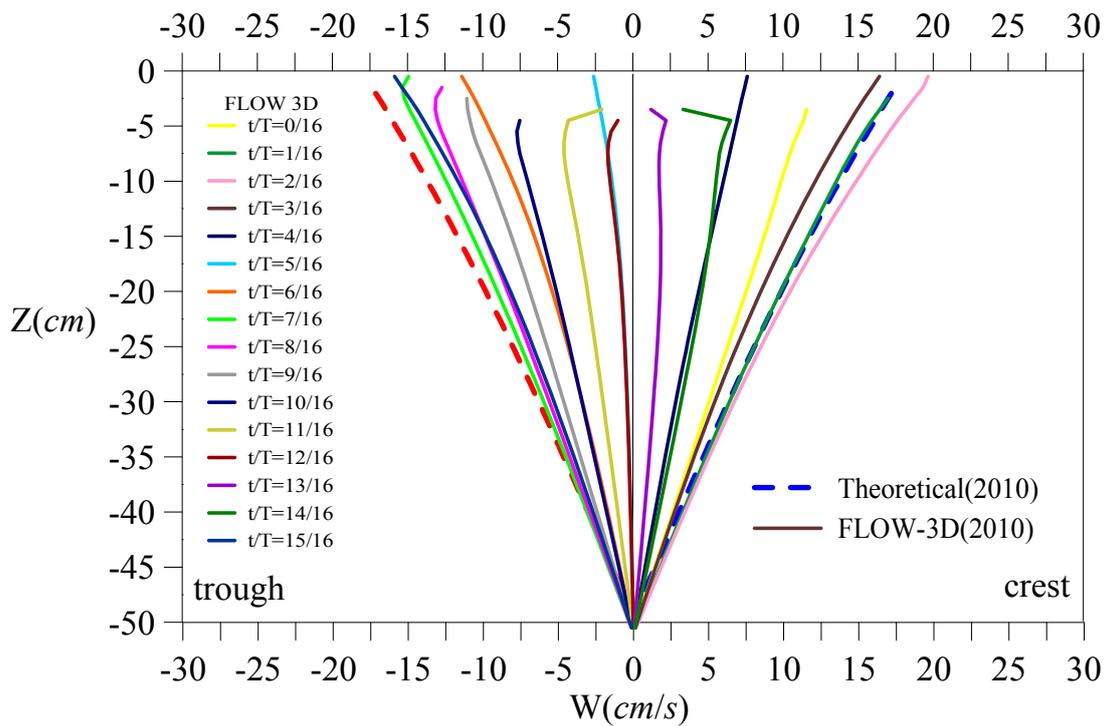
(b) 垂直流速  $W(\text{cm/s})$

圖 4.5.11 進行波流速分佈比較

( $T=1.0\text{s}$ ,  $H=4.5\text{cm}$ ,  $kh=2.08$ ,  $L=151.3\text{cm}$ ,  $C=151.3\text{cm/s}$ )



(a) 水平流速  $U$ (cm/s)



(b) 垂直流速  $W$ (cm/s)

圖 4.5.12 進行波流速分佈比較

( $T=1.7s$ ,  $H=9.96cm$ ,  $kh=0.95$ ,  $L=332.6cm$ ,  $C=195.6cm/s$ )

### 4.5.3 數值計算結果與討論

本節使用 FLOW-3D 軟體模擬實際斷面造波水槽中波浪與環境保護型結構物交互作用時之反射率與速度分佈。首先與水工模型試驗所求得之反射率結果進行比對，其中造波條件與模型配置於 4.4.1 有詳細的介紹，另外，為了瞭解波浪通過結構物時之流場分佈作一討論，針對造波條件取其中  $T=1sec$ 、 $T=1.7sec$  來分析，但因週期  $T=1.7sec$  波速較快，波浪作用於結構物的時間較迅速，加上前導波至成形波的過程占了不少時間，使得計算結果的可用範圍縮減，為了避免二次反射波影響整個流廠，因此把原先 FLOW-3D 計算領域水平長度由  $x=1700cm$  拉長至  $x=2200cm$ 。

其中透水潛堤之設定以粒徑  $d_s=3cm$  計算，得到參數  $a_r=180/3^2=20$ ， $b_r$  以  $1.8/d_s$  計算得， $b_r=1.8/3=0.6$  潛堤孔隙率  $\varepsilon_r$  為 0.46，透水薄板其上孔隙率設定為  $\varepsilon_p=0.367$ 。以下分別針對反射率與速度分佈進行分析。

#### 1. 反射率結果與分析

利用水工模型試驗結果與 FLOW-3D 數值計算之反射率值  $|R|$  與無因次關係如圖 4.5.13 所示。圖中圓點“●”為利用斷面水槽水工模型試驗結果，而三角點“▲”為 FLOW-3D 數值計算結果。發現各週期的試驗結果與 FLOW-3D 數值解相當接近，數值解皆小於水工模型試驗值，另外由表 4.5-4 週期大於  $T=1.1sec$  以後反射率差異比較大，試驗結果與數值解差值百分比大於 10% 以上，剩下幾組週期差值較小反射率都相當接近。

另外在這幾組週期當中取一週期  $T=1.7sec$  利用 Healy(1953)提出的方法 ( $|R|=(波腹-波節)/(波腹+波節)$ ) 求反射率，首先利用 FLOW-3D 模擬水工模型試驗中移動式波高計在某一段距離來回移動量測時間變化的自由液面波動變化量，相對在 FLOW-3D 數值計算中輸出不同時間但同一段距離的自由液面波動變化量，如圖 4.5.14 所示，之後在造波 11.2sec 以後波浪進行一次反射至 24.1sec 波浪開始二次反

射之間的範圍選定一時間往後推一個週期，把此週期分為 8 個相位，針對每個相位的波形變化進行探討，在此本研究擷取  $t=15.09\text{sec}\sim 16.79\text{sec}$  來進行分析，因為時間的變化把各相位的波形重疊於水平方向  $x=1600\text{cm}\sim 1900\text{cm}$  這段距離，可以明顯看出波形呈一包絡線，如圖 4.5.15 所示，分別計算出包絡線之波腹與波節的值為  $10.17\text{cm}$ 、 $5.62\text{cm}$ ，再帶入 Healy 法求出反射率  $|R|=0.288$ ，與利用 Goda 二點法算出的反射率  $|R|=0.232$  及水工模型試驗求得的反射率  $|R|=0.27$  相當接近。

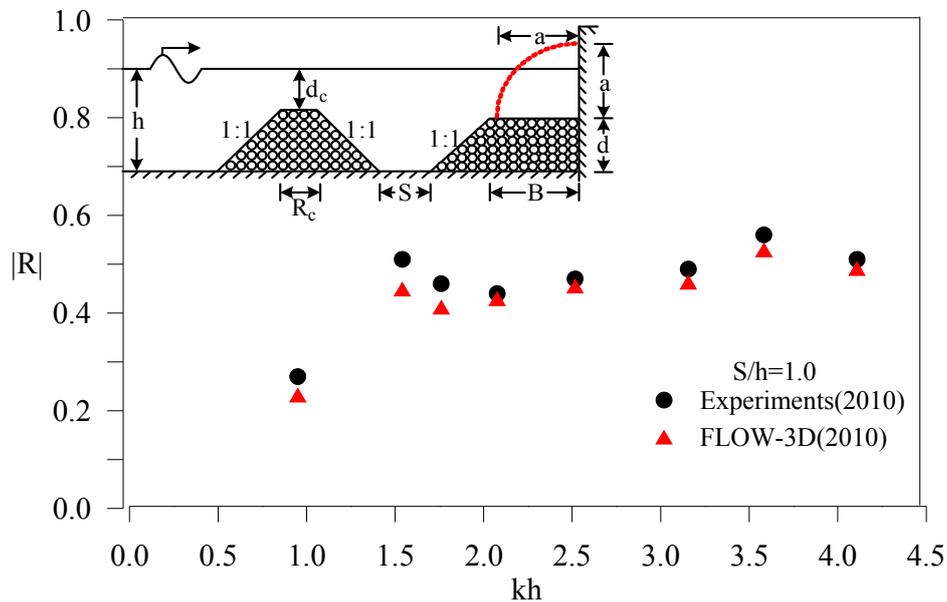
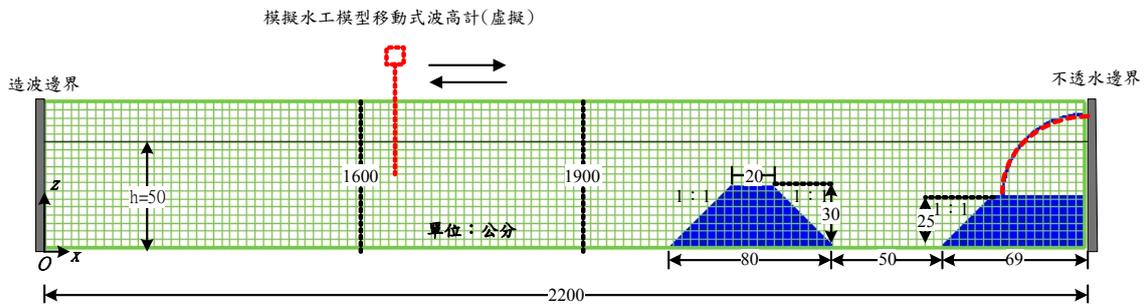


圖 4.5.13 FLOW-3D 反射率計算結果與水工模型圖  
( $d_c/h=0.4, R_c/h=0.4, S/h=1.0$ )

表 4.5.4 FLOW-3D 計算反射率值與水工模型之比較

T (sec)	kh	L (cm)	$K_r$ (試驗值)	$K_r$ (FLOW-3D)	差值百分比 (%)
0.70	4.11	76.2	0.51	0.49	3.9
0.75	3.58	87.6	0.56	0.53	5.4
0.80	3.16	99.5	0.49	0.46	6.1
0.90	2.52	124.8	0.47	0.45	4.3
1.00	2.08	151	0.44	0.43	2.3
1.10	1.76	178.1	0.46	0.41	10.9
1.20	1.54	204	0.51	0.45	11.8
1.70	0.95	332	0.27	0.23	14.8



FLOW-3D(Healy(1953))

圖 4.5.14 環境保護型結構物配置示意圖

( $T=1.7\text{sec}$ ,  $H=9.96\text{cm}$ ,  $kh=0.95$ ,  $L=332.6\text{cm}$ ,  $C=195.6\text{cm/s}$ )

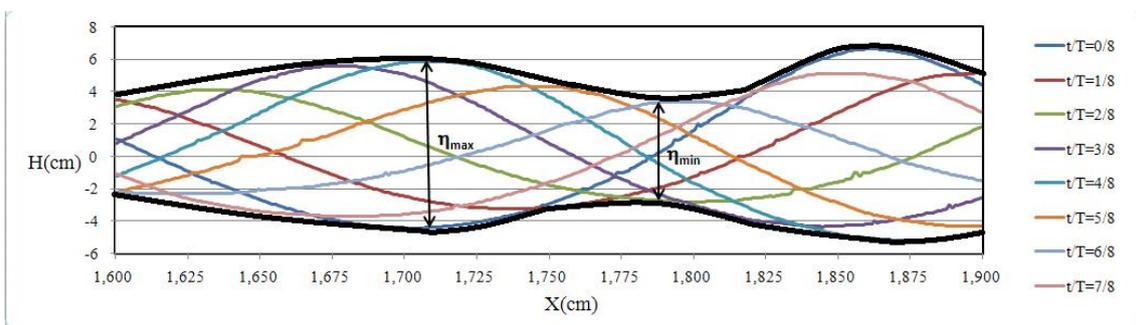


圖 4.5.15 波形變化圖

( $T=1.7\text{sec}$ ,  $H=9.96\text{cm}$ ,  $kh=0.95$ ,  $L=332.6\text{cm}$ ,  $C=195.6\text{cm/s}$ )

## 2. 速度分佈結果與分析

圖 4.5.16(a)~(h)為週期  $T=1\text{sec}$ ，波速  $C=151.3\text{cm/sec}$ ，波浪由外海傳遞至環境保護型結構物與其交互作用之速度分佈情形，波浪到達直立堤前需約  $11.2\text{sec}$ ，而超過  $31.2\text{sec}$  波浪開始進行二次反射，因此圖中擷取造波後第  $20\text{sec}\sim 21\text{sec}$  間一個週期，將其分為 8 個相位，每一相位相距  $1/8$  週期，以波峯到達第一道潛堤堤趾前水深處為基準，定義為( $t/T=0$ )，針對環境保護型結構物中各部份速度分佈進行討論。

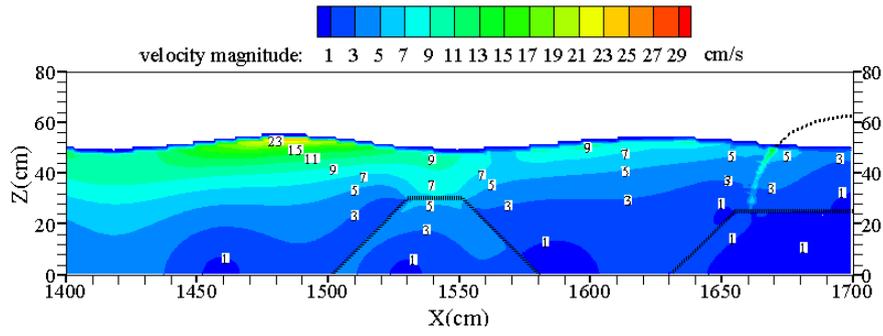
由前半個週期圖 4.5.16 (a) $t/T=0/8$  至(d)  $t/T=3/8$  時可發現，波浪於接觸第一道潛堤向海處邊坡時由於水深漸淺造成淺化現象，因此水位會略為抬升、波高有變大趨勢，其後於潛堤堤頂處及堤頂上方自由水面有較大之速度分佈，分別為  $11\text{cm/sec}$  及  $29\text{cm/sec}$ 。

後半個週期時經過第一道潛堤進入二潛堤之間消波空間時，(如圖 4.5.16(e)  $t/T=4/8$  至(h)  $t/T=7/8$ )所示，堤頂上方水面附近流速分佈明顯降低，而後接觸四分之一圓弧形孔隙板，於  $t/T=7/8$  時孔隙板前方水面附近產生較大之速度分佈，且因孔隙板的設置，可使得孔隙板後方與岸壁間之遊水室速度有變小趨勢。圖中亦顯示在外海加設第一道潛堤，於此中間性波海域下，可有效降低兩潛堤之間消波空間區域速度，且對於透水潛堤孔隙介質內之速度分佈亦可以被計算出並清楚的顯示其流場分佈。

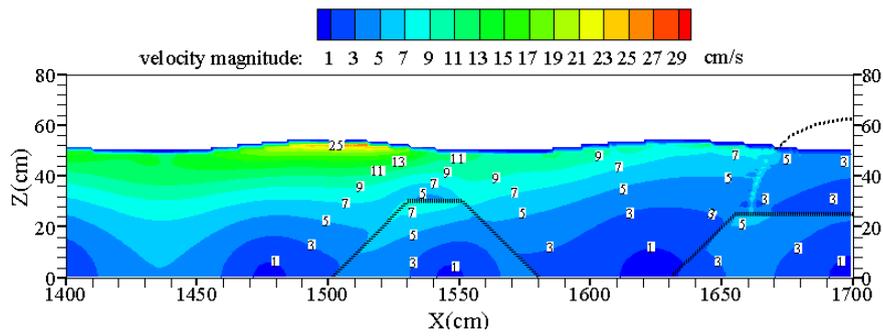
其次計算週期  $T=1.7\text{sec}$ ，波速  $C=195.6\text{cm/s}$ ，波浪由外海傳遞至環境保護型結構物與其交互作用後流場之速度分佈情形，如圖 4.5.17(a)~(h)所示， $x$  方向水平計算領域若取  $1700\text{cm}$ ，則波浪  $8.7$  約  $\text{sec}$  即到達直立堤，而超過  $24.14\text{sec}$  就量測到波浪進行二次反射的值，而前導波到成形波這段時間亦影響到計算結果的可用範圍，因此將  $x$  方向長改為  $2200\text{cm}$ ，圖中擷取造波後第  $20.19\sim 21.89$  秒間一個週期，將其分為 8 個相位，每一相位相距  $1/8$  週期，以波峯到達

第一道潛堤堤趾前等水深處為基準，定義為  $t/T=0/8$ ，針對環境保護型結構物中各部份速度分佈進行討論。

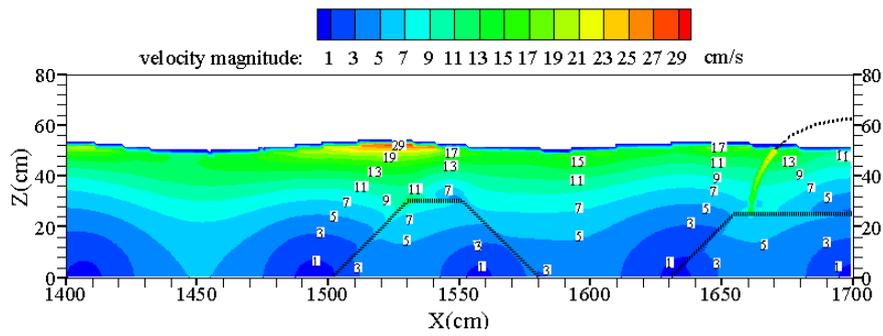
由圖 4.5.17(a) $t/T=0/8$  至圖 4.5.17(b) $t/T=1/8$  時發現波浪由左方漸漸往右進行時流速緩緩提升，圖 4.5.17(c) $t/T=2/8$  時波浪接觸第一道潛堤向海處邊坡時造成淺化，因而水位抬升、波高變大，潛堤堤頂有較大速度分佈，自由液面流速由  $26\text{cm/s}$  增大至  $36\text{cm/s}$ ，而且孔隙板內部的流速也逐漸變大。圖 4.5.17(d) $t/T=3/8$  至圖 4.5.17(f) $t/T=5/8$ ，波浪經過第一道潛堤進入第二道潛堤時，之間的消波空間與水面附近流速慢慢的降低，之後接觸四分之一圓弧形孔隙板，如圖 4.5.17(g) $t/T=6/8$  至圖 4.5.17(h) $t/T=7/8$  所示，遊水室上方及孔隙板前方產生較大之流速分佈。在外海設置第一道透水潛堤及孔隙板，可使得岸壁前方遊水室與兩道潛堤之間的消波區域速度降低；週期  $T=1\text{sec}$  與  $T=1.7\text{sec}$  同屬於中間性波，但因週期  $T=1.7\text{sec}$  波速及波長比週期  $T=1\text{sec}$  來的大，週期  $T=1.7\text{sec}$  在此配置下遊水室上方及四分之一薄板附近的整體波速較  $T=1\text{sec}$  來的大。



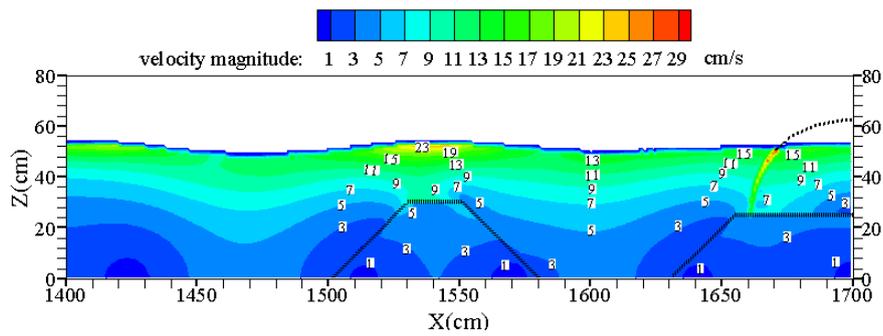
(a)  $t/T = 0/8$



(b)  $t/T = 1/8$

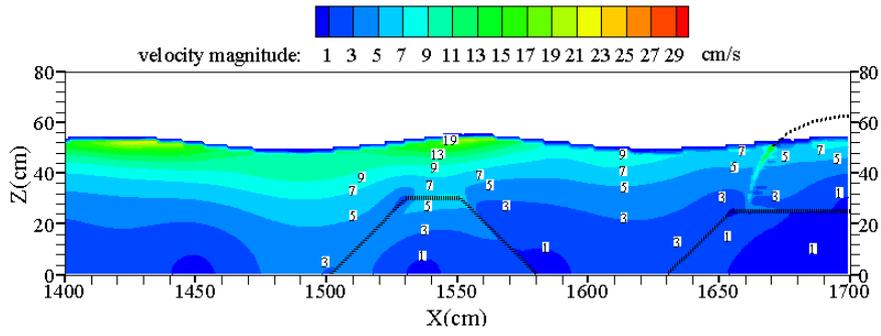


(c)  $t/T = 2/8$

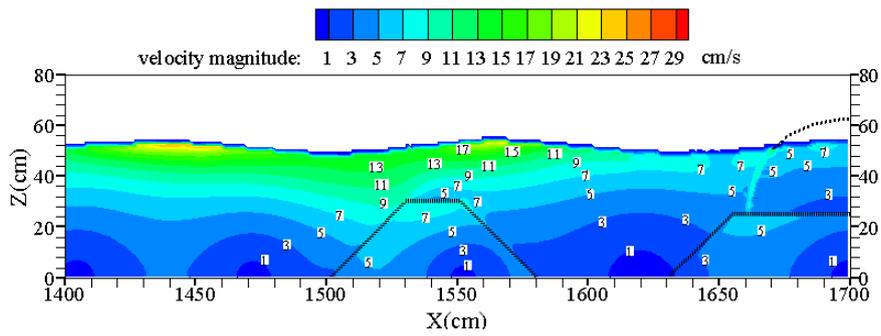


(d)  $t/T = 3/8$

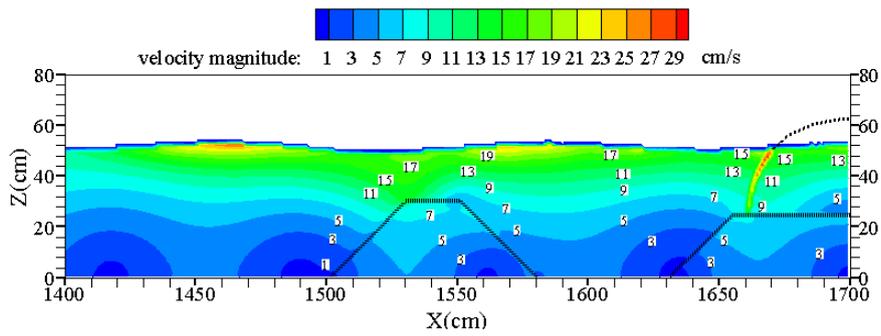
圖 4.5.16 波浪與環境保護型結構物交互作用之速度分佈  
( $T=1.0s$ ,  $H=4.5cm$ ,  $kh=2.08$ ,  $L=151.3cm$ ,  $C=151.3cm/s$ )



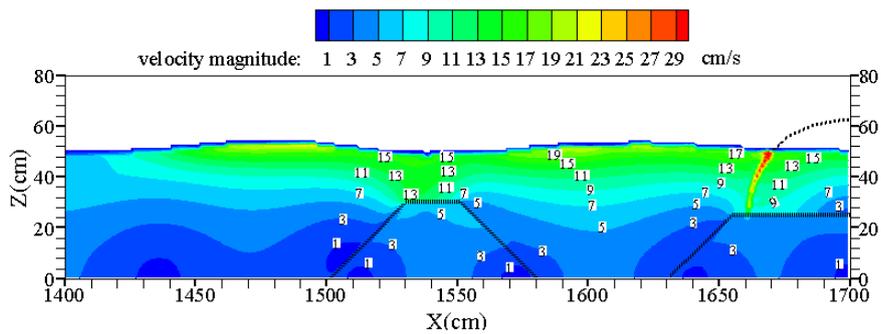
(e)  $t/T = 4/8$



(f)  $t/T = 5/8$

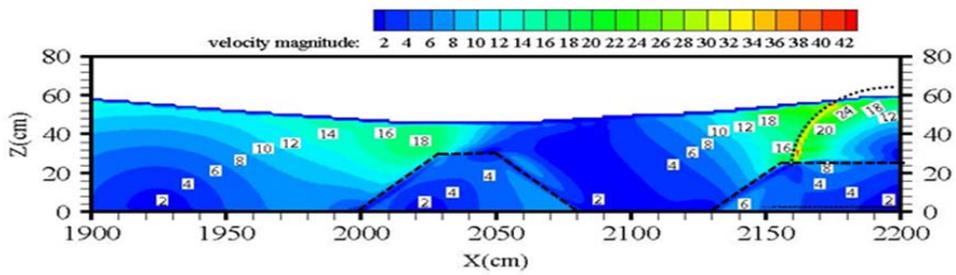


(g)  $t/T = 6/8$

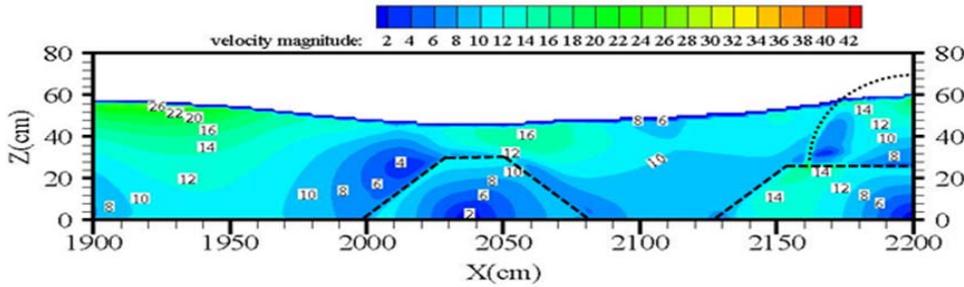


(h)  $t/T = 7/8$

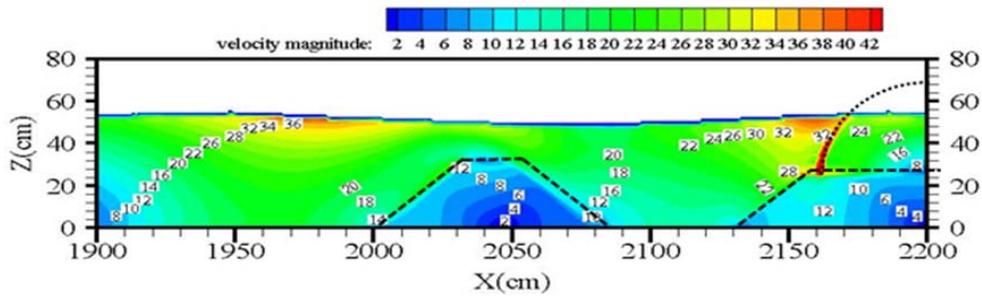
圖 4.5.16(續) 波浪與環境保護型結構物交互作用之速度分佈  
( $T=1.0s$ ,  $H=4.5cm$ ,  $kh=2.08$ ,  $L=151.3cm$ ,  $C=151.3cm/s$ )



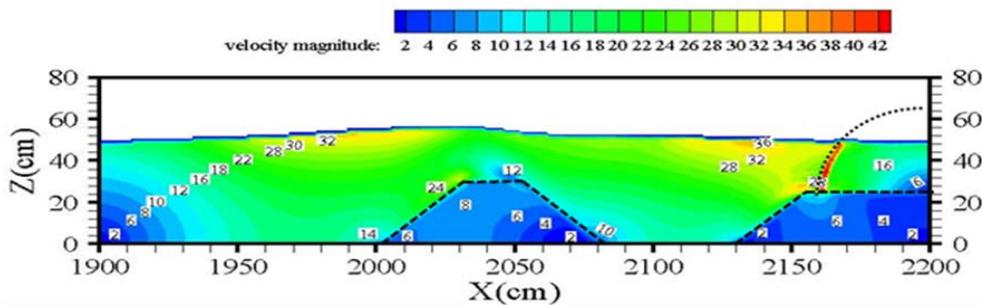
(a)  $t/T=0/8$



(b)  $t/T=1/8$

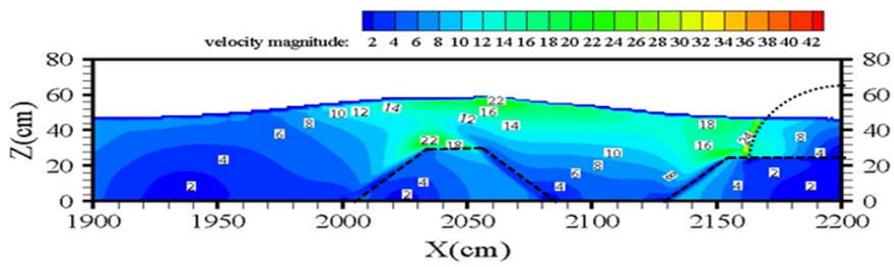


(c)  $t/T=2/8$

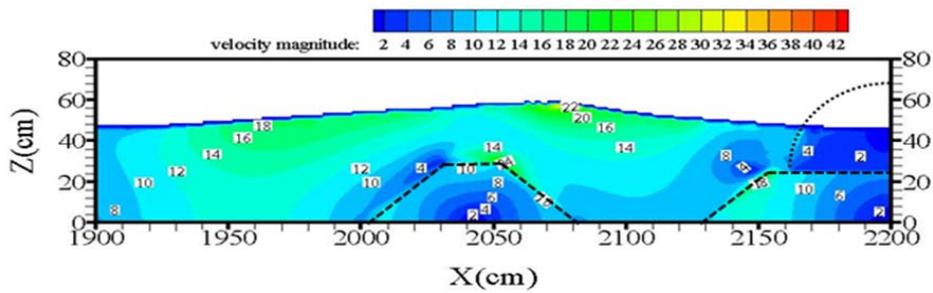


(d)  $t/T=3/8$

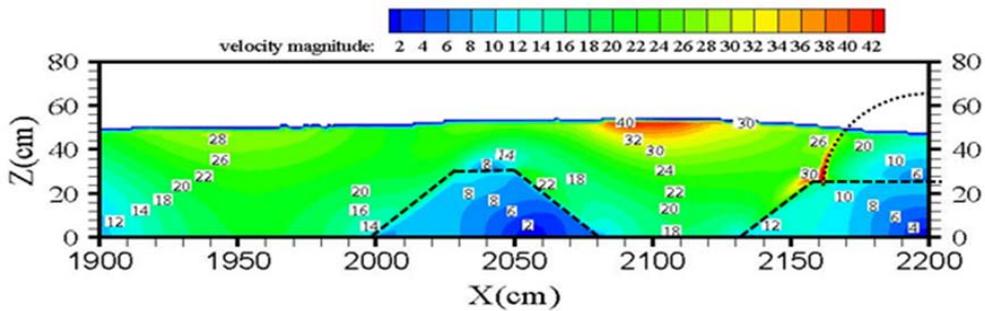
圖 4.5.17 波浪與環境保護型結構物作用之速度分佈  
( $T=1.7\text{sec}$ ,  $H=9.96\text{cm}$ ,  $kh=0.95$ ,  $L=332.6\text{cm}$ ,  $C=195.6\text{cm/s}$ )



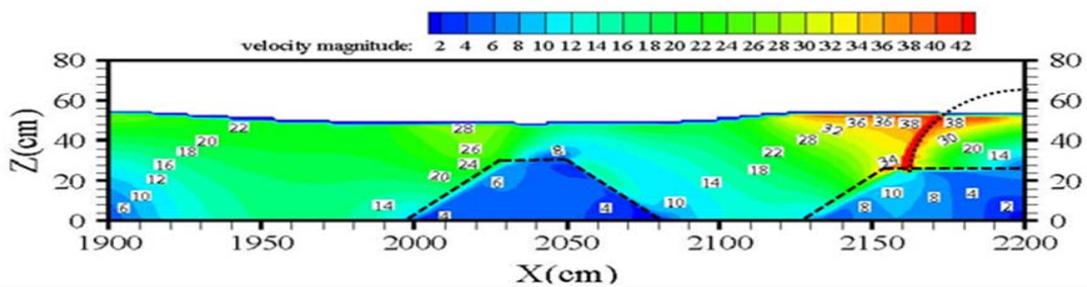
(e)  $t/T=4/8$



(f)  $t/T=5/8$



(g)  $t/T=6/8$



(h)  $t/T=7/8$

圖 4.5.17(續) 波浪與環境保護型結構物作用之速度分佈  
( $T=1.7\text{sec}$ ,  $H=9.96\text{cm}$ ,  $kh=0.95$ ,  $L=332.6\text{cm}$ ,  $C=195.6\text{cm/s}$ )

## 4.6 波浪斜向入射結構物數值計算結果與分析方法

考慮在一定水深之海域中不透水直立堤前方銜接梯形透水護基塊石潛堤，並於其上方設置四分之一圓弧形孔隙板，前方距堤址位置  $S$  處設置另一道梯形透水潛堤，其坡度皆為 1:1，組合成所謂「環境保護型」消能結構物。假設有一規則波由左方與  $x$  軸夾以  $\theta$  角度向此結構物入射。其中透水薄板(孔隙板)之厚度與入射波長之比趨近於零，即薄板與入射波長相較之下為一厚度非常薄之結構物，其四分之一圓半徑為  $a$ 。直立堤前護基塊石填入之高度為  $d$ ，頂寬為  $B$ ，第一道梯形潛堤頂寬為  $R_c$ ，與自由水面距離為  $d_c$ 。取座標原點  $O$ ，位於直立堤中間上方之靜水面處。 $x$  軸向右為正， $z$  軸垂直向上為正。並且於第一道潛堤左側一定距離處( $x=-l$ )設立一假想邊界線，由假想邊界線及透水薄板將此斷面領域中純水區域分為(I)、(II)及(III)三個領域，而填石的透水結構物區域則為領域(IV)，其中領域(II)、(IV)交界處之邊界定為  $\Gamma^{M_2}$ ，領域(III)、(IV)交界處之邊界為  $\Gamma^{M_3}$ ，領域(II)、(III)交界處之邊界則為  $\Gamma^{M_4}$ ，如圖 1 所示。

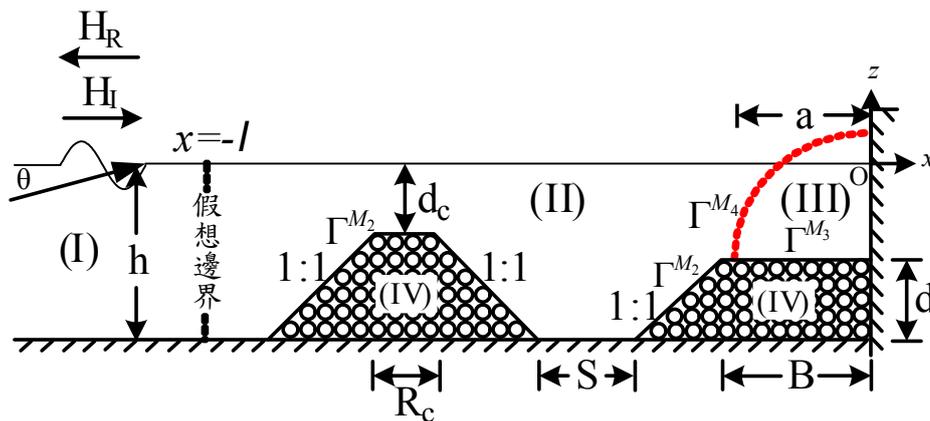


圖 4.6.1 環境保護型結構物示意圖

## 4.6.1 數值計算方法

### 1. 基本假設

(1) 純水區域—(I)、(II)、(III)領域：

考慮線性波浪理論，假設海底底床為不透水、直立堤及孔隙板結構物均為剛性且沒有位移、透水潛堤結構物材料性質為均質，領域內流體均為不可壓縮性(incompressible)、無黏滯性(inviscid)且為非旋性(irrotational)之理想流體，因此可定義出一速度勢(velocity potential)  $\Phi^j(x, y, z; t)$  的存在，且滿足 Laplace 方程式，即：

$$\nabla^2 \Phi^j(x, y, z; t) = \frac{\partial^2 \Phi^j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi^j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi^j}{\partial z^2} = 0, \quad j = \text{I, II, III} \dots\dots\dots(4.6.1)$$

上式  $t$  表示時間，上標  $j$  表示位於第( $j$ )領域。

當外海領域(I)有一振幅  $\zeta_0$ ，週頻率  $\sigma$  ( $\sigma = 2\pi/T$ ， $T$ :入射波週期)之規則波與  $x$  軸夾以入射角度  $\theta$  入射至領域(II)時，則領域(I)、(II)及(III)的速度勢  $\Phi^j(x, y, z; t)$  可表示為：

$$\Phi^j(x, y, z; t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi^j(x, z) \cdot e^{i(\beta y - \sigma t)}, \quad j = \text{I, II, III} \dots\dots\dots(4.6.2)$$

其中， $g$  為重力加速度， $\phi^j(x, z)$  為領域( $j$ )的勢函數(potential function)， $\beta = k \sin \theta$ ， $k$  為入射波週波數，且滿足下列分散關係式。

$$\frac{\sigma^2 h}{g} = kh \tanh kh \dots\dots\dots(4.6.3)$$

將式(4.6.2)代入式(4.6.1)Laplace 方程式，得領域(I)、(II)及(III)內勢函數之控制方程式將滿足下列 modified Helmholtz 方程式。

$$\frac{\partial^2 \phi^j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi^j}{\partial z^2} - \beta^2 \phi^j = 0, \quad j = \text{I, II, III} \dots\dots\dots(4.6.4)$$

(2) 透水潛堤結構物區域—(IV)領域：

根據 Sollitt and Cross (1972)的假設可定義出一速度勢  $\Phi^{IV}(x, y, z; t)$  的存在，且滿足 Laplace 方程式，即：

$$\nabla^2 \Phi^{IV}(x, y, z; t) = \frac{\partial^2 \Phi^{IV}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi^{IV}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi^{IV}}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(4.6.5)$$

當外海領域(I)有一振幅  $\zeta_0$ ，週頻率  $\sigma$  之規則波以入射角度  $\theta$  入射至領域(II)時，則領域(IV)的速度勢  $\Phi^{IV}(x, y, z; t)$  可表示為(Losada *et al.*, 1996; 吳等人，1999)：

$$\Phi^{IV}(x, y, z; t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi^{IV}(x, z) \cdot e^{i(\beta y - \sigma t)} \quad \dots\dots\dots(4.6.6)$$

其中， $\phi^{IV}(x, z)$  則為領域(IV)的勢函數。

2. 領域(I)之勢函數表示

若假想邊界線( $x = -\ell$ )離環境保護型結構第一道潛堤之堤趾處甚遠時，則可假定(I)領域之流體運動不受潛堤存在而引起的消散波 (evanescent waves) 影響，所以領域(I)之勢函數  $\phi^I(x, z)$  可分別表示如下：

$$\phi^I(x, z) = \left[ e^{i\alpha(x+\ell)} + R \cdot e^{-i\alpha(x+\ell)} \right] \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad \dots\dots\dots(4.6.7)$$

上式中，右邊第一項表示入射波勢函數，第二項表示反射波勢函數，其中， $R$  為複數反射率， $\alpha = k \cos \theta$ 。

由式(4.6.7)，在假想邊界線( $x = -\ell$ )上之勢函數及其向  $x$  負方向導函數 ( $\frac{\partial \phi^I}{\partial n} = -\frac{\partial \phi^I}{\partial x}$ ) 分別如下所示

$$\phi^I(x = -\ell, z) = (1 + R) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad \dots\dots\dots(4.6.8)$$

$$\bar{\phi}^1(x = -\ell, z) = -i\alpha(1-R) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots(4.6.9)$$

其中  $\bar{\phi}^1 = \frac{\partial \phi^1}{\partial n} = \frac{-\partial \phi^1}{\partial x}$ ，而  $n$  為法線方向之單位向量。

### 3. 邊界條件

在線性波浪作用下，其各邊界之邊界條件如下所示：

#### (1) 自由水面之邊界條件

在大氣壓力一定下，自由水面動力學邊界條件(DFSBC)及運動邊界條件(KFSBC)均忽略非線性項後，聯立後可得自由水面邊界條件(CFSBC)，即：

$$\frac{\partial \phi^j}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \phi^j \quad \text{on } z=0, \quad j = \text{I, II, III} \dots\dots\dots(4.6.10)$$

#### (2) 不透水海底底床及直立堤之邊界條件

假設海底底床及直立堤為固定且不透水，所以其法線方向流速為零，即：

$$\frac{\partial \phi^j}{\partial n} = 0 \quad \text{on } z = -h, \quad j = \text{I, II, III, IV} \dots\dots\dots(4.6.11)$$

#### (3) 假想邊界線上之力學條件

在左假想邊界線上( $x = -\ell$ )，由於領域(I)、(II)的流體運動所引起之能量流束(energy flux)及質量流束(mass flux)必須連續，故可得下列條件：

$$\phi^{\text{I}} = \phi^{\text{II}} \quad \text{on } x = -\ell \dots\dots\dots(4.6.12)$$

$$\frac{\partial \phi^{\text{I}}}{\partial x} = \frac{\partial \phi^{\text{II}}}{\partial x} \quad \text{on } x = -\ell \dots\dots\dots(4.6.13)$$

#### (4) 透水薄板兩側邊界條件

假設四分之一圓透水薄板為均質、剛性材料所製成且沒有位移、流體通過透水薄板時滿足達西定律(Darcy's law)，則透水薄板中之  $x$  方向速度會與薄板兩側  $x$  方向之壓力差成正比，此透水邊界條件 (porous boundary condition) 可表示如下 (Chwang, 1983; Twu and Lin, 1991; Yu, 1995)：

$$u^- = u^+ = \frac{kG}{\rho\sigma} (p^- - p^+) \quad \dots\dots\dots(4.6.14)$$

上式中  $u$  為  $x$  方向速度， $p$  為流體動壓力， $\rho$  為流體密度，上標  $^-$   $^+$  分別表示位於薄板左、右側邊界上， $G$  為複數透水性影響參數 (complex porous effect parameter) 可表示為

$$G = G_r + iG_i \quad \dots\dots\dots(4.6.15)$$

其中  $G_r$  為其實部，與介質之阻抗有關， $G_i$  為其虛部，與慣性力影響有關，並且由式(4.6.14)可看出當  $G = 0$  時為不透水薄板。

根據線性波浪理論及 Sollitt and Cross (1972) 的假設，可將各領域的  $u$  及  $P$  分別表示如下：

$$u^j(x, z) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \frac{\partial \phi^j(x, z)}{\partial x}, \quad j = \text{I, II, III, IV} \quad \dots\dots\dots(4.6.16)$$

$$p^j(x, z) = i\rho g\zeta_0 \phi^j(x, z), \quad j = \text{I, II, III} \quad \dots\dots\dots(4.6.17)$$

$$p^{\text{IV}}(x, z) = i\rho g\zeta_0 (S + if) \phi^{\text{IV}}(x, z) \quad \dots\dots\dots(4.6.18)$$

將式(4.6.16)至式(4.6.18)依薄板兩側所對應的領域，分別代入式(4.6.14)，則可獲得薄板兩側之邊界條件如下 (Li *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Teng *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2007)：

$$\frac{\partial \phi^{\text{II}}}{\partial n} = \frac{\partial \phi^{\text{III}}}{\partial n} = ikG(\phi^{\text{II}} - \phi^{\text{III}}) \quad \text{on } \Gamma^{M_4} \quad \dots\dots\dots(4.6.19)$$

(5) 純水領域與透水潛堤塊石介質領域接觸面之邊界條件

在領域(II)與領域(IV)及領域(III)與領域(IV)之接觸面上，即領域(II)與領域(IV)、領域(III)與領域(IV)共有的邊界上，由流體運動所引起之能量流束及質量流束仍然必須連續，故可得下列條件：

$$\phi^{\text{II}} = (S + if)\phi^{\text{IV}} \quad \text{on } \Gamma^{M_2} \dots\dots\dots(4.6.20)$$

$$\frac{\partial \phi^{\text{II}}}{\partial n} = \varepsilon \frac{\partial \phi^{\text{IV}}}{\partial n} \quad \text{on } \Gamma^{M_2} \dots\dots\dots(4.6.21)$$

$$\phi^{\text{III}} = (S + if)\phi^{\text{IV}} \quad \text{on } \Gamma^{M_3} \dots\dots\dots(4.6.22)$$

$$\frac{\partial \phi^{\text{III}}}{\partial n} = \varepsilon \frac{\partial \phi^{\text{IV}}}{\partial n} \quad \text{on } \Gamma^{M_3} \dots\dots\dots(4.6.23)$$

4. 反射率 R 求解

將式(4.6.8)及式(4.6.9)分別代入式(4.6.12)及式(4.6.13)可得

$$\phi^{\text{II}}(x = -\ell, z) = (1 + R) \frac{\cosh k(h + z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots(4.6.24)$$

$$\bar{\phi}^{\text{II}}(x = -\ell, z) = -i\alpha(1 - R) \frac{\cosh k(h + z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots(4.6.25)$$

利用函數的正交性，將式(4.6.24)之左右兩邊各項分別同乘以  $\cosh k(h + z)$ ，再對水深方向  $z$  從  $-h$  至  $0$  予以積分，可求得反射率 R 如下

$$R = -1 + \frac{k}{N_0 \sinh kh} \int_{-h}^0 \phi_1^{\text{II}} \cosh k(h + z) dz \dots\dots\dots(4.6.26)$$

其中，下標 <sub>1</sub> 代表位於  $(x = -\ell)$  上之勢函數  $\phi_1^{\text{II}}$ ，而  $N_0$  則如下所示

$$N_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

將式(4.6.26)離散化可得如下所示

$$R = -1 + \frac{k}{N_0 \sinh kh} \sum_{p=1}^{N_1} \phi_{1p}^{\text{II}} \cosh k(h+z_p) \Delta z_p \dots\dots\dots(4.6.27)$$

其中， $N_1$  為假想邊界線上 ( $x = -\ell$ ) 之分割節點數， $z_p$  為水深方向節點座標， $\Delta z_p$  則為節點所在分割元素之長度。

### 5. 勢函數之解析

將式(4.6.26)之  $R$  代入式(4.6.25)，並將假想邊界線 ( $x = -\ell$ ) 對水深方向分割為  $N_1$  個節點，可求得假想邊界線 ( $x = -\ell$ ) 上各節點勢函數在  $x$  負方向之導函數值與勢函數值間之關係，如下所示

$$\bar{\phi}_p^{\text{II}} = \frac{-2i\alpha \cosh k(h+z_p)}{\cosh kh} + \sum_{r_1=1}^{N_1} \int_{\Gamma_{r_1}} f_{pr_1} \phi_{r_1}^{\text{II}} dz \dots\dots\dots(4.6.28)$$

$$\text{上式中， } f_{pr_1} = \frac{i\alpha k \cosh k(h+z_{r_1}) \cosh k(h+z_p)}{N_0 \sinh kh \cosh kh} ; p = 1, \dots, N_1 ;$$

$r_1 = 1, \dots, N_1$ ；而  $z_p$  表示水深方向特定點座標， $z_{r_1}$  表示水深方向任意點座標。

把式(4.6.28)化為矩陣型式，則得

$$\{\bar{\phi}_p^{\text{II}}\} = \{S_p\} + \{F_{pr_1}\} \{\phi_{r_1}^{\text{II}}\} \dots\dots\dots(4.6.29)$$

$$\text{上式中， } F_{pr_1} = \int_{\Gamma_{r_1}} f_{pr_1} dz ; S_p = \frac{-2i\alpha \cosh k(h+z_p)}{\cosh kh} ; p = 1, \dots, N_1 ;$$

$r_1 = 1, \dots, N_1$

## 6. 邊界元素法

由於領域(II)、(III)及(IV)的勢函數 $\phi^j(x,z)$ ，皆滿足 modified Helmholtz 方程式，且其存在二次導函數。而根據格林第二恆等式 (Green's second identity)，領域內部點 $P_o(x,z)$ 之勢函數 $\phi^j(P_o)$ ，可由邊界線上 $Q(\xi,\zeta)$ 勢函數值 $\phi^j(Q)$ 及其對邊界線上法線方向微分值 $\partial\phi^j(Q)/\partial n_Q$ 來表示，並配合 modified Helmholtz 方程式之基本解 $C(Q,P_o)=-K_0(\beta r_o)$ 及其法線方向微分值 $\partial C(Q,P_o)/\partial n_Q$ 來決定，其中 $r_o=\sqrt{(x-\xi)^2+(z-\zeta)^2}$ ， $K_0(\beta r_o)$ 為修正型第二類零階貝索函數(the modified zeroth order Bessel function of second kind)，因此領域內任一點 $P_o(x,z)$ 之勢函數 $\phi^j(P_o)$ 可以用下列積分方程來表示：

$$2\pi\phi^j(P_o)=\int_{\Gamma^j}\left[\phi^j(Q)\frac{-K_0(\beta r_o)}{\partial n_Q}-(-K_0(\beta r_o))\frac{\partial\phi^j(Q)}{\partial n_Q}\right]ds, \quad j=II,III,IV \dots(4.6.30)$$

上式中， $n_Q$ 表示 $Q$ 點(source point)之法向量， $\Gamma^j$ 表示領域( $j$ )之封閉邊界線。

若將點 $P_o(x,z)$ 移至邊界上特定點 $P_B(\xi',\zeta')$ ，並假定邊界線是平滑的，則可得邊界點積分方程如下所示

$$\pi\phi^j(P_B)=\int_{\Gamma^j}\left[\phi^j(Q)\frac{(-K_0(\beta r_o))}{\partial n_Q}-(-K_0(\beta r_o))\frac{\partial\phi^j(Q)}{\partial n_Q}\right]ds, \quad j=II,III,IV \dots(4.6.31)$$

此式稱為通常的邊界積分方程式(Ordinary Boundary Integral Equation, OBIE)，式中 $\phi^j(P_B)$ 為領域( $j$ )邊界線上 $P_B$ 點之勢函數。

將式(4.6.31)之封閉邊界線 $\Gamma^j$ 以常數元素(constant elements)離散化成 $N^j$ 個元素，每一元素以中點值作為代表量，經重新整理並以矩陣形式表示為：

$$[\bar{U}^j]\{\phi^j\} = [U^j]\left\{\frac{\partial\phi^j}{\partial n}\right\}, \quad j = \text{II, III, IV} \dots\dots\dots(4.6.32)$$

上式中

$$\bar{U}_{ab}^j = \int_{\Gamma_{\beta}^j} \frac{(-K_0(\beta r_o))}{\partial n_Q} ds - \pi\delta_{ab}, \quad j = \text{II, III, IV} \dots\dots\dots(4.6.33)$$

$$U_{ab}^j = \int_{\Gamma_{\beta}^j} (-K_0(\beta r_o)) ds, \quad j = \text{II, III, IV} \dots\dots\dots(4.6.34)$$

其中， $\delta_{ab}$  為 Kronecker delta，即：

$$\delta_{ab} = \begin{cases} 1 & \text{for } a = b \\ 0 & \text{for } a \neq b \end{cases} \dots\dots\dots(4.6.35)$$

由式(4.6.32)可獲得領域(II)、(III)及(IV)各自的代數方程式，我們將此三領域合併於一總體矩陣如下：

$$\begin{bmatrix} [\bar{U}^{\text{II}}] & 0 & 0 \\ 0 & [\bar{U}^{\text{III}}] & 0 \\ 0 & 0 & [\bar{U}^{\text{IV}}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\phi^{\text{II}}\} \\ \{\phi^{\text{III}}\} \\ \{\phi^{\text{IV}}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [U^{\text{II}}] & 0 & 0 \\ 0 & [U^{\text{III}}] & 0 \\ 0 & 0 & [U^{\text{IV}}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \left\{\frac{\partial\phi^{\text{II}}}{\partial n}\right\} \\ \left\{\frac{\partial\phi^{\text{III}}}{\partial n}\right\} \\ \left\{\frac{\partial\phi^{\text{IV}}}{\partial n}\right\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(4.6.36)$$

分別將上述自由水面、不透水海底底床、假想邊界線、透水薄板、純水與透水潛堤結構物交界面等全部邊界條件代入式(4.6.36)中，經移項整理後可得如下之矩陣形式：

$$[A^*]\{\phi\} = \{B^*\} \dots\dots\dots(4.6.37)$$

其中， $[A^*]$ 為已知係數矩陣，而 $\{B^*\}$ 為已知之係數向量。

## 7. 結構物上壓力之求解

同樣將式(4.6.40)所求得之領域(II)、(III)及(IV)各邊界線上元素的勢函數值，對照欲求位置的領域而代入式(4.6.17)或(4.6.18)，可得

作用在此元素上之動壓，故可得到作用於結構物上的動壓分佈，亦可將其無因次化以求得無因次壓力如下：

$$\frac{p^j(x, z)}{\rho g \zeta_0} = i \phi^j(x, z), \quad j = \text{I, II, III} \dots\dots\dots(4.6.38)$$

$$\frac{p^{\text{IV}}(x, z)}{\rho g \zeta_0} = i(S + if)\phi^{\text{IV}}(x, z) \dots\dots\dots(4.6.39)$$

## 8. 水面波形之求解

將有自由水面的領域，其位於自由水面元素之勢函數值根據自由水面動力學邊界條件(DFSBC)代入，可得水位 $\eta$ 如下式所示。

$$\eta^j = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi^j}{\partial t} \Big|_{z=0} = i \zeta_0 \phi^j \cdot e^{i(\beta y - \sigma t)}, \quad j = \text{I, II, III} \dots\dots\dots(4.6.40)$$

### 4.6.2 模式驗證

為了驗證本研究開發數值模式之可行性及正確性，分別與多位學者研究結果作一比較及驗證，如圖 4.6.2 至圖 4.6.4 所示。

圖 4.6.2 為本文與 Dalrymple et al. (1991)所做的驗證，由圖中可以看出波浪斜向入射  $B/h=1.0$  露出水面之透水矩形拋石堤時，改變摩擦係數為  $f=1.0、3.0、5.0$ ，固定波浪之  $kh$  為  $0.463$ ，由凸顯示以正向入射時( $\theta=0^\circ$ )會有較大的反射率值，隨著入射波浪的角度變大，其反射率會漸小，並在入射角度  $\theta=70^\circ \sim 80^\circ$  之間產生一反曲點，為反射率極小值，甚至在  $f=1.0$  時的配置下，幾乎會出現零反射的現象，其反射率值之接近  $0$ ，之後則會迅速攀升。

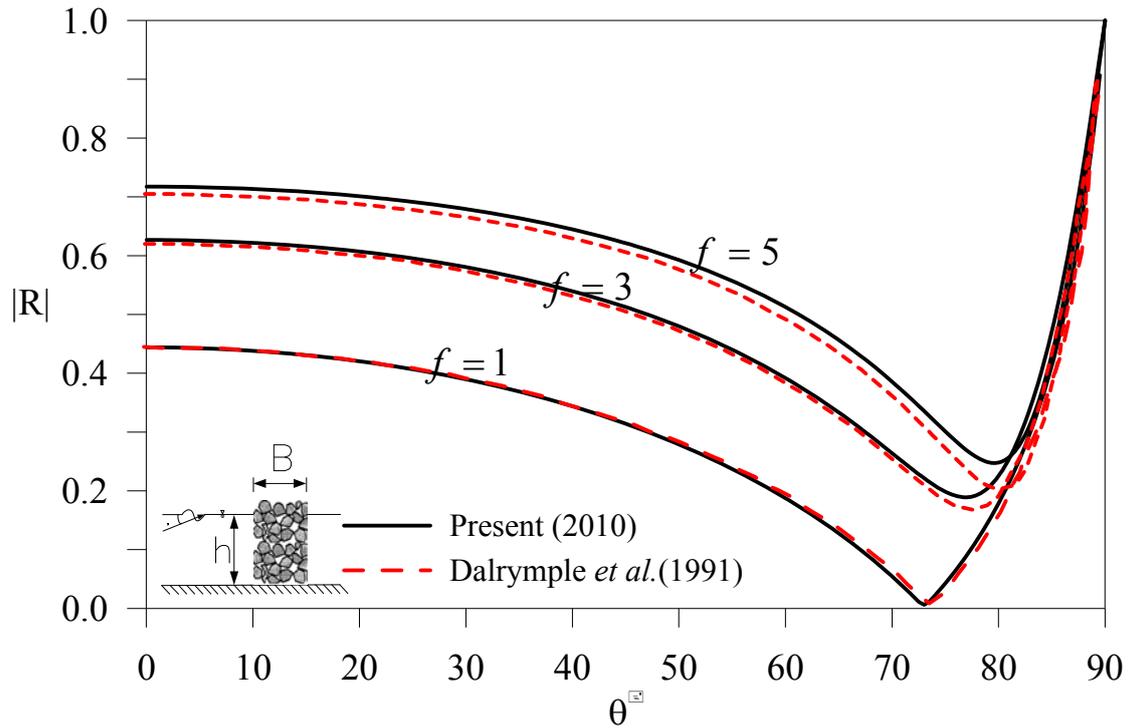


圖 4.6.2 摩擦係數改變下波浪斜向入射透水堤反射率與  $\theta$  之關係

$$(B/h=1.0, \frac{\sigma^2 h}{g}=0.2012, kh=0.463)$$

圖 4.6.3 為本文與 Twu (2002) 之驗證，其配置為八列形狀相同且等間距規則排列之矩形透水潛堤，固定入射波浪條件相對水深  $h/L=0.1$ 、相對堤高  $d/h=0.5$ 、相對堤寬  $B/h=1.0$ 、相對潛堤間距  $\lambda/h=4.0$ ，討論反射率與入射角度變化之計算例，由圖中可明顯看出其結果相當一致，其反射率在入射角度  $\theta=53^\circ$  時會有一接近零反射的極小值發生，反射率值約為 0.02，透過率約為 0.41，能量損失係數則高達 0.83。

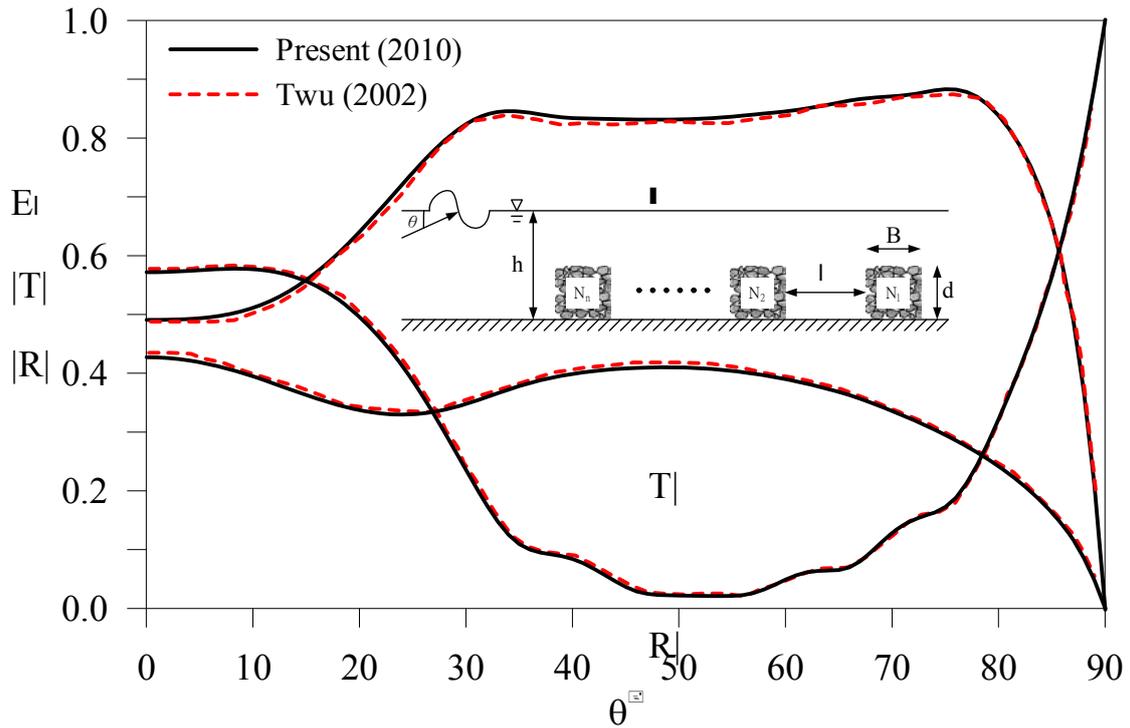


圖 4.6.3 波浪斜向入射八列透水潛堤反射率、透過率及能量損失與  $\theta$  關係( $h/L=0.1$ ,  $d/h=0.5$ ,  $B/h=1.0$ ,  $l/h=4.0$ ,  $N=8$ ,  $S_r = f_r=1.0$ )

圖 4.6.4 亦為本文與 Twu (2002) 之驗證，圖中實線為本文之計算結果，分別為  $\theta=0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  及  $60^\circ$ ，虛線為 Twu (2002) 之計算結果，其相對堤高為  $d/h=0.5$ 、相對堤寬  $B/h=1.0$ 、相對潛堤間距  $l/h=4.0$ ，討論波浪斜向入射四列透水潛堤反射率與  $k \wedge \cos \theta$  之關係，其中符號  $\wedge$  表示堤寬與間距之和，即  $\wedge=B+l$ ，由圖中可看出各種不同入射角度之反射率會在  $k \wedge \cos \theta = \pi$  及  $2\pi$  附近產生反射率局部最大值，圖 4.6.5 則為將圖 4.6.4 橫座標除以  $\pi$ ，即再改變  $x$  座標為  $2(B+l)\cos \theta/L$ ，明顯會使整個反射率之局部最大值發生在  $2(B+l)\cos \theta/L=1、2$  附近產生，其反射率分佈情形類似 Bragg 反射。

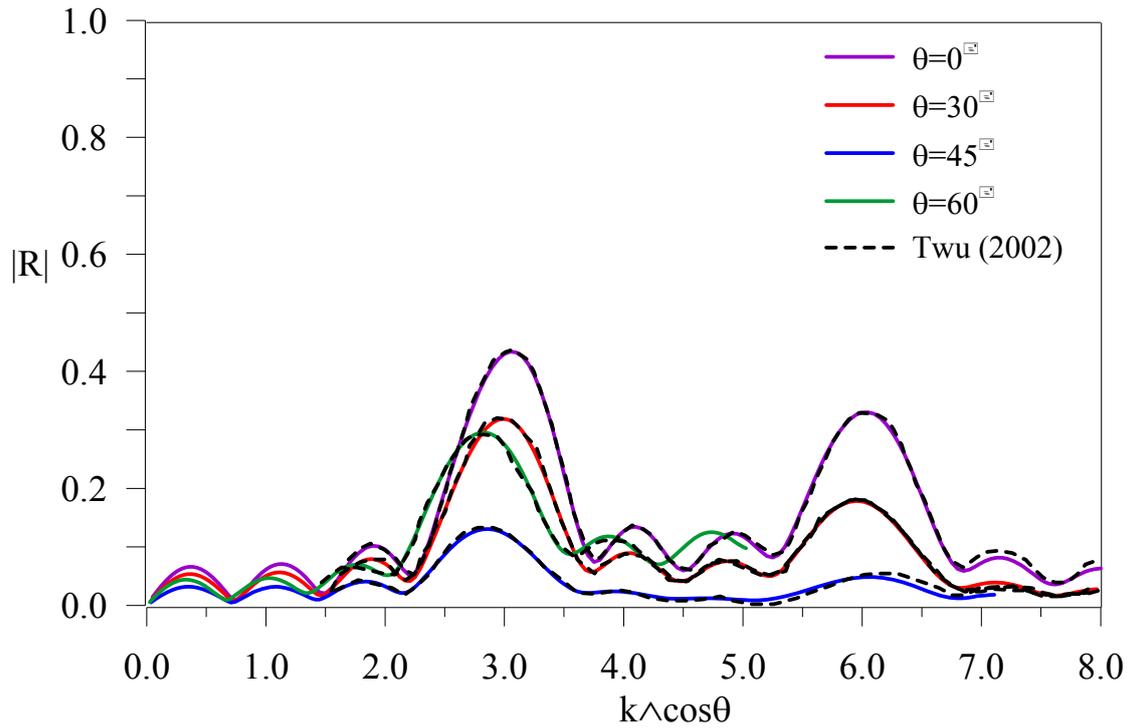


圖 4.6.4 波浪斜向入射四列透水潛堤反射率與  $k \cos \theta$  之關係  
 ( $d/h=0.5$ ,  $B/h=1.0$ ,  $l/h=4.0$ ,  $\Delta=B+l$ ,  $N=4$ ,  $S_r = f_r=1.0$ )

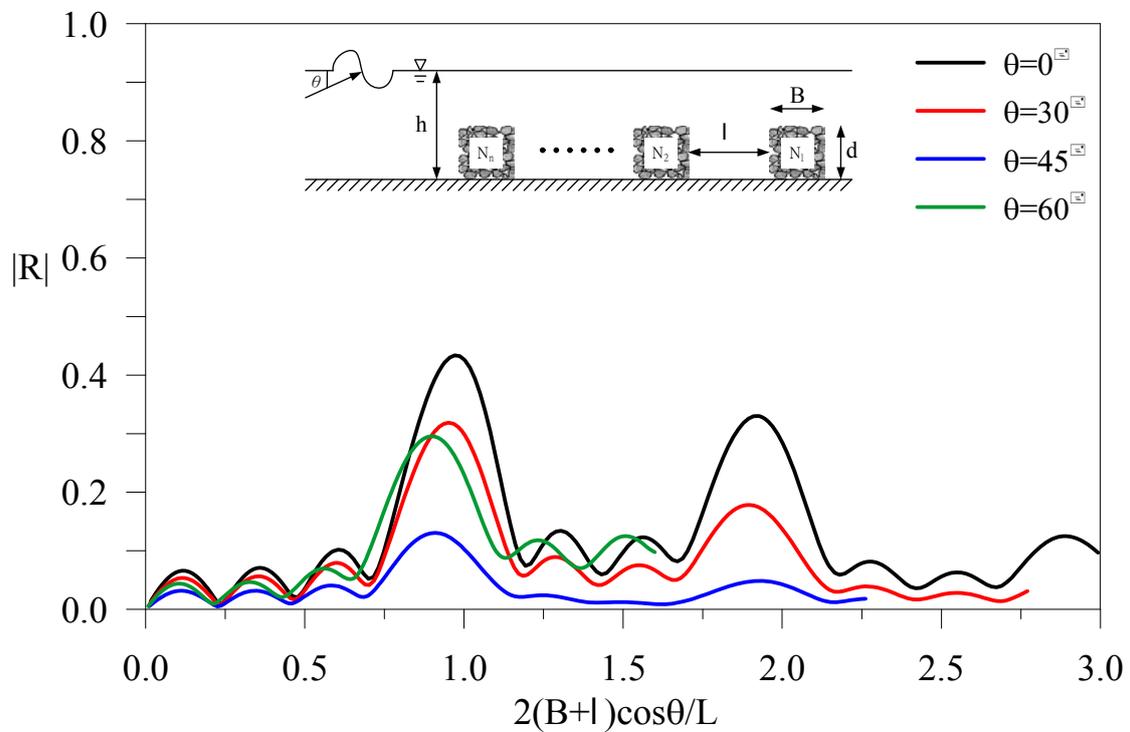


圖 4.6.5 波浪斜向入射四列透水潛堤反射率與  $(2(B+l) \cos \theta / L)$  之關係  
 ( $d/h=0.5$ ,  $B/h=1.0$ ,  $l/h=4.0$ ,  $\Delta=B+l$ ,  $N=4$ ,  $S_r = f_r=1.0$ )

經由以上驗證不論是露出水面透水拋石堤或是潛沒於水下系列透水潛堤，利用本模式均可以得到精度高且合理結果，證明了採用本模式探討環境保護型結構物是一可行的方法。

### 4.6.3 數值計算結果與討論

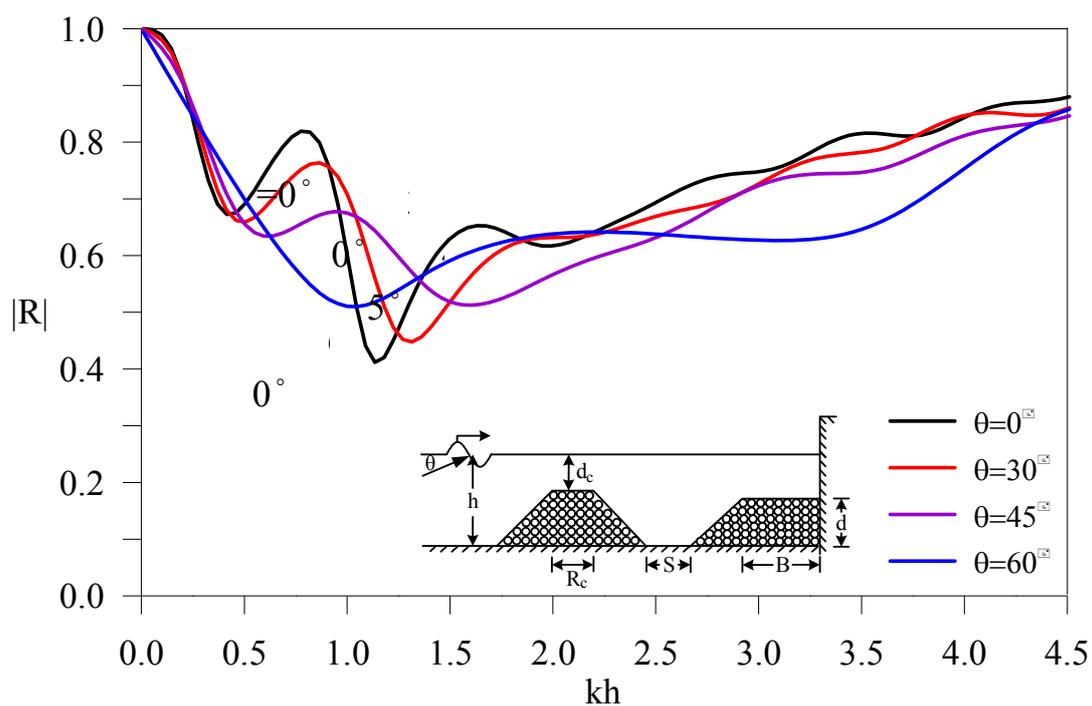
在本節中，我們將討論波浪斜向入射環境保護型防波堤其反射率及能量損失之結果。首先固定兩潛堤之相對間距  $S/h=1.0$ ，並以第一道潛堤相對頂寬兩種配置  $R_c/h=0.4、0.6$ ，第一道潛堤距水面相對沒水深兩種配置  $d_c/h=0.3、0.4$  去作探討，共四種配置，所有數值計算例中固定塊石摩擦係數  $f_r=1.8$ 、孔隙率  $\varepsilon_r=0.46$ 、塊石慣性係數  $S_r=1.015$ ，並分別以波浪與  $x$  軸夾以  $0^\circ、30^\circ、45^\circ$  及  $60^\circ$  入射去作計算，討論其無因次週波數  $kh$  與反射率  $|R|$  及能量損失  $E_l$  之關係，數值計算結果如圖 4.6.6 至圖 4.6.9 所示，其各配置下之反射率極值大小及其發生位置如表 4.6.1 所示。

波浪斜向入射第一種配置 ( $R_c/h=0.4, d_c/h=0.4$ )，反射率與能量損失結果如圖 4.6.6(a)、(b)所示。由圖中我們可以明顯看出其反射率會出現兩個局部最小值及一個局部最大值，又以正向入射時( $\theta=0^\circ$ )會有較大反射率  $|R|=0.819$ ，發生在  $kh=0.775$  的位置，且隨著波浪入射的角度變大( $30^\circ、45^\circ、60^\circ$ )，反射率尖峰值其分佈會漸漸往圖右側，也就是往較大的  $kh$  側移動。然而約在  $kh$  大於 1.5 之後各線段反射率變化較為散亂發生許多交叉點，並無一定的規律性存在。但是在  $kh=4.5$ (深水波)波浪能量大多被反射，因此反射率值都趨近於 0.86 附近，能量損失係數則在 0.2~0.3 附近。

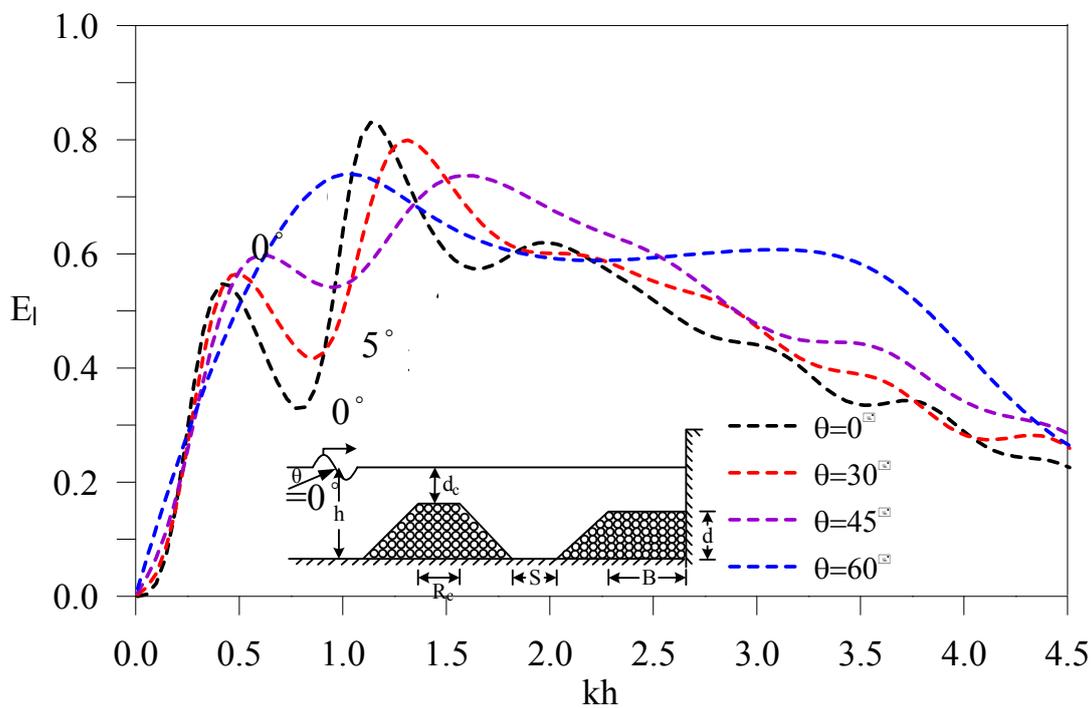
圖 4.6.7 為第二種配置( $R_c/h=0.6, d_c/h=0.4$ )，保持第一道潛堤距離水面高度，即相對沒水深不變，但增加其寬度，其反射率變化各線段趨勢基本上與第一種配置大致相同，唯獨在局部極值的部份無論是  $|R_{\min}|$  或  $|R_{\max}|$  亦或是出現的  $kh$  值都相對較小，但同樣在較大的  $kh$  值時趨勢大致相同，仍會有各線段交會但無一規律性的情況出現。

在第三種配置( $R_c/h=0.4, d_c/h=0.3$ )下我們加高第一道潛堤的高度使相對沒水深為  $d_c/h=0.3$ ，其相對頂寬變回  $R_c/h=0.4$ ，結果如圖 4.6.8 所示，此種配置下使得反射率再度降低，由此可見增加透水潛堤塊石的體積，在無論任何角度的波浪入射下都可以降低反射率、增加其能量的損失，以達到保護後方直立岸壁的效果，相同的，此種配置下的所有極值發生位置亦都相對往更小的  $kh$  值移動。

在第四種配置 ( $R_c/h=0.6, d_c/h=0.3$ ) 下，如圖 4.6.9 所示，我們再度加寬了第一道潛堤的相對頂寬至  $R_c/h=0.6$ ，相對沒水深固定不變為  $d_c/h=0.3$ ，此為四種配置中第一道潛堤體積最大的( $\nabla=0.91$ 單位)，波浪通過此又高又寬大之透水潛堤能充分利用塊石摩擦及其孔隙內部水流來消減波能，因此其反射率變化仍然滿足前述之規律性，即隨著波浪入射角度變大，其局部極值的反射率則會相對變小，且發生在更小的  $kh$  值上。但其在較大的  $kh$  值上( $kh=4.5$ )所呈現的反射率各線段變化同樣會趨於一定值，約在 0.7 附近，因此其能量損失係數則在 0.5 附近。



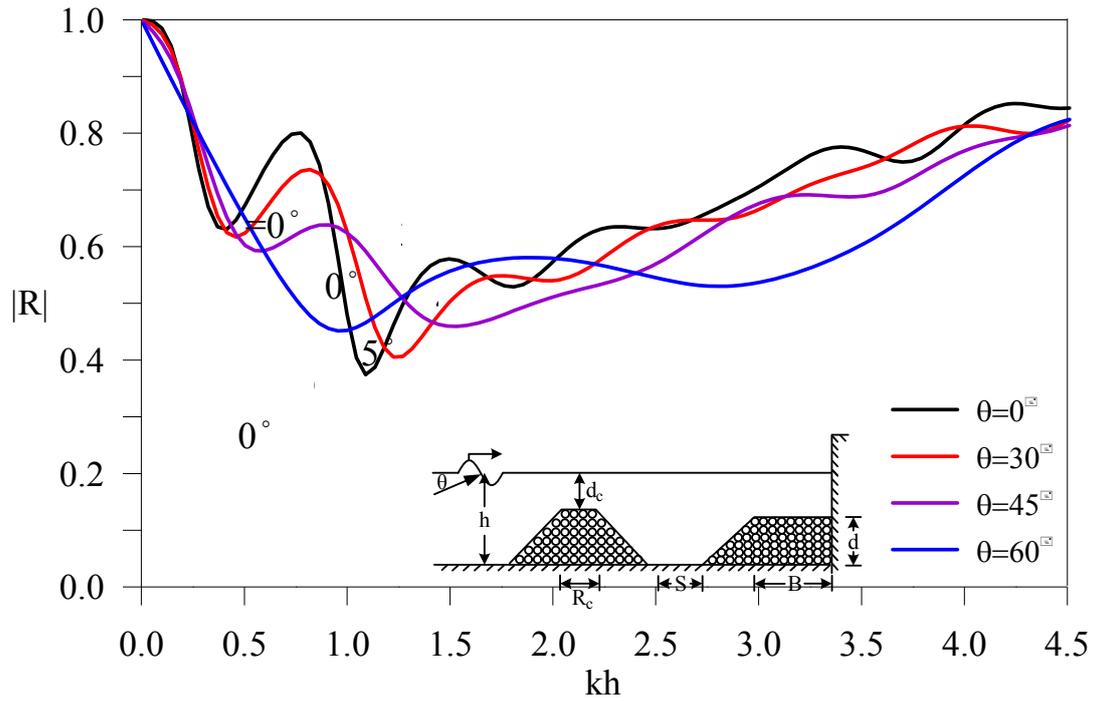
(a) 反射率



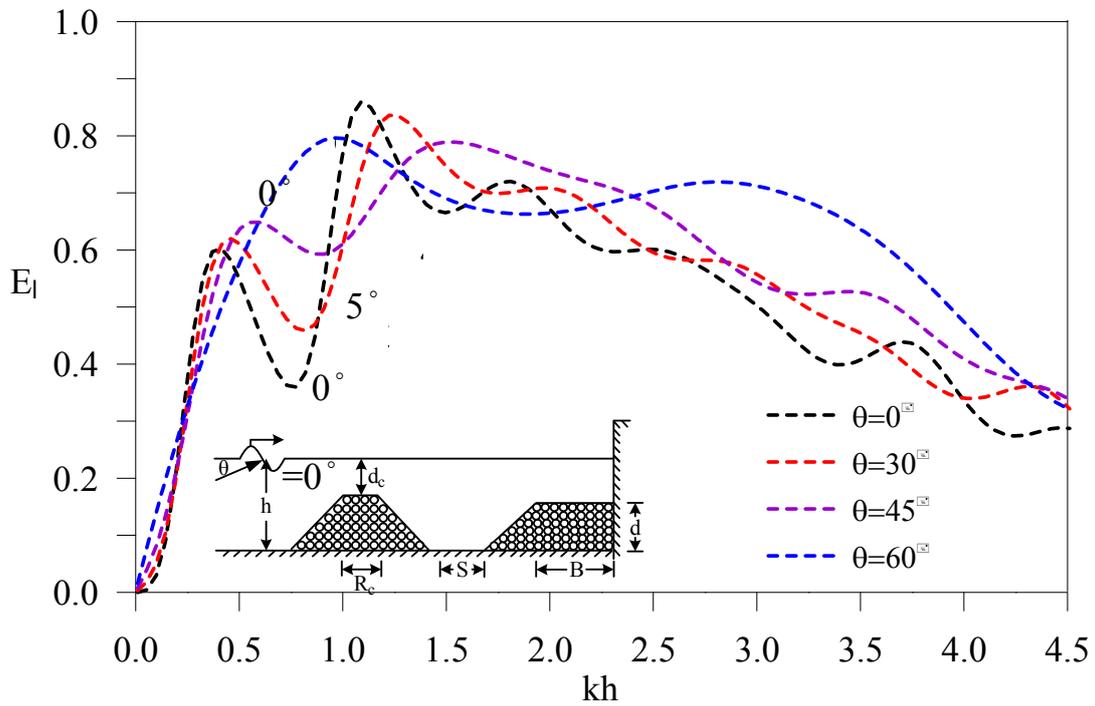
(b) 能量損失

圖 4.6.6 波浪斜向入射反射率  $|R|$  及能量損失  $E_l$  與  $kh$  之關係

$$(R_c/h = 0.4, d_c/h = 0.4, S/h = 1.0)$$

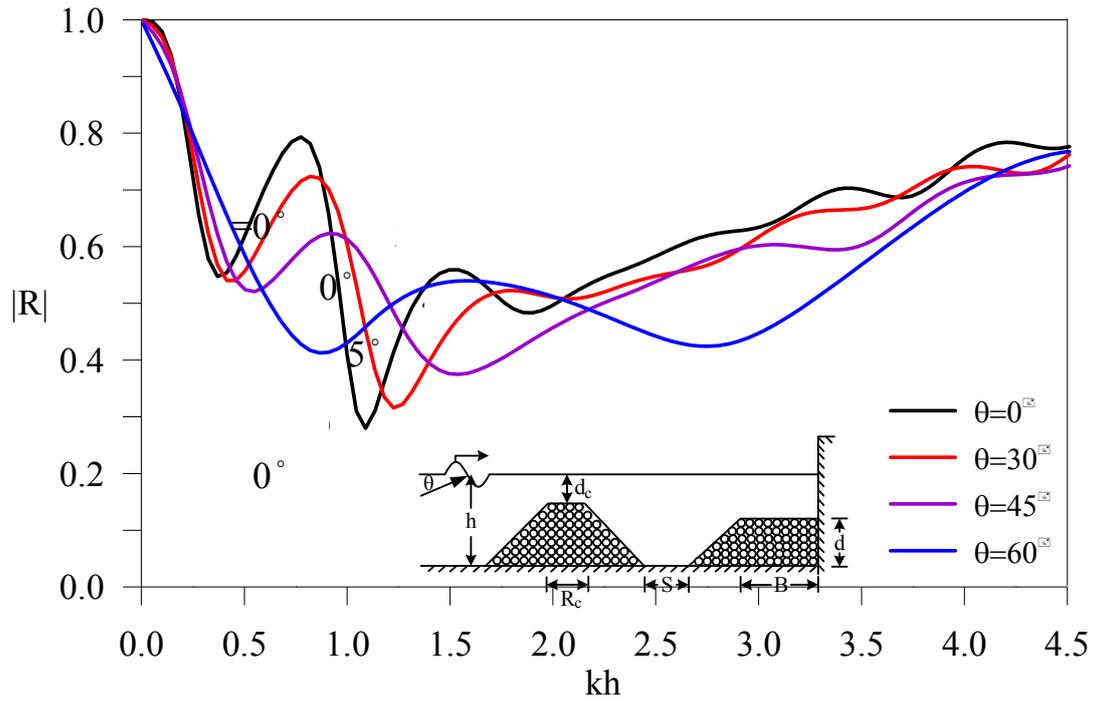


(a) 反射率

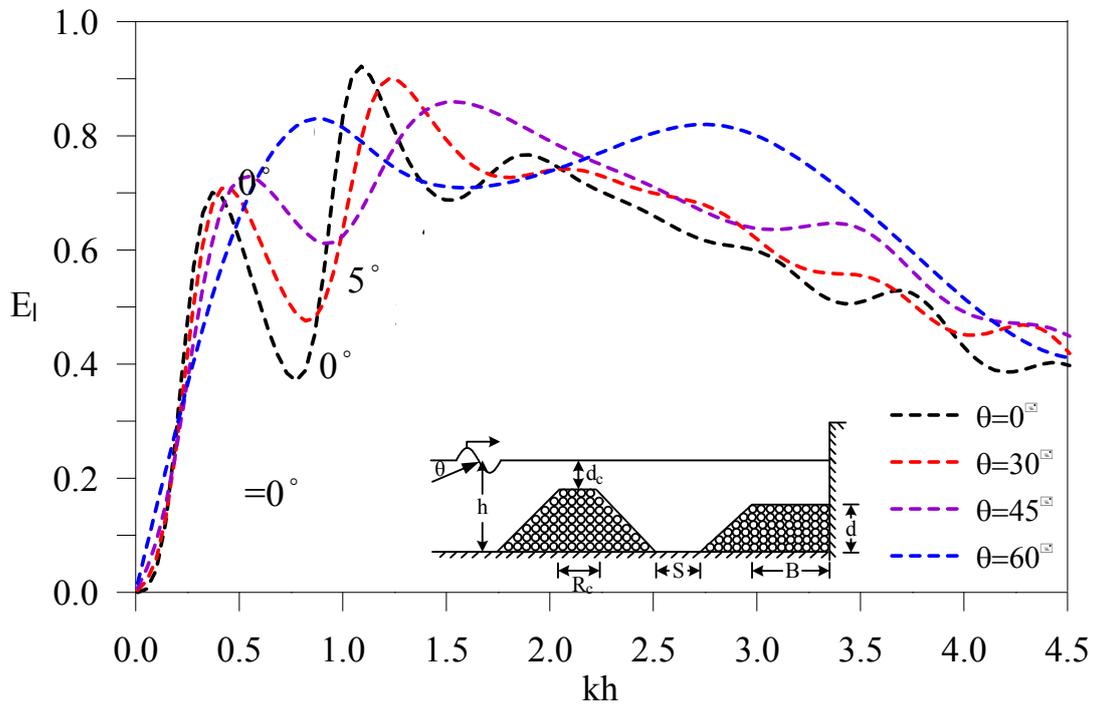


(b) 能量損失

圖 4.6.7 波浪斜向入射反射率  $|R|$  及能量損失  $E_l$  與  $kh$  之關係  
 $(R_c/h = 0.6, d_c/h = 0.4, S/h = 1.0)$



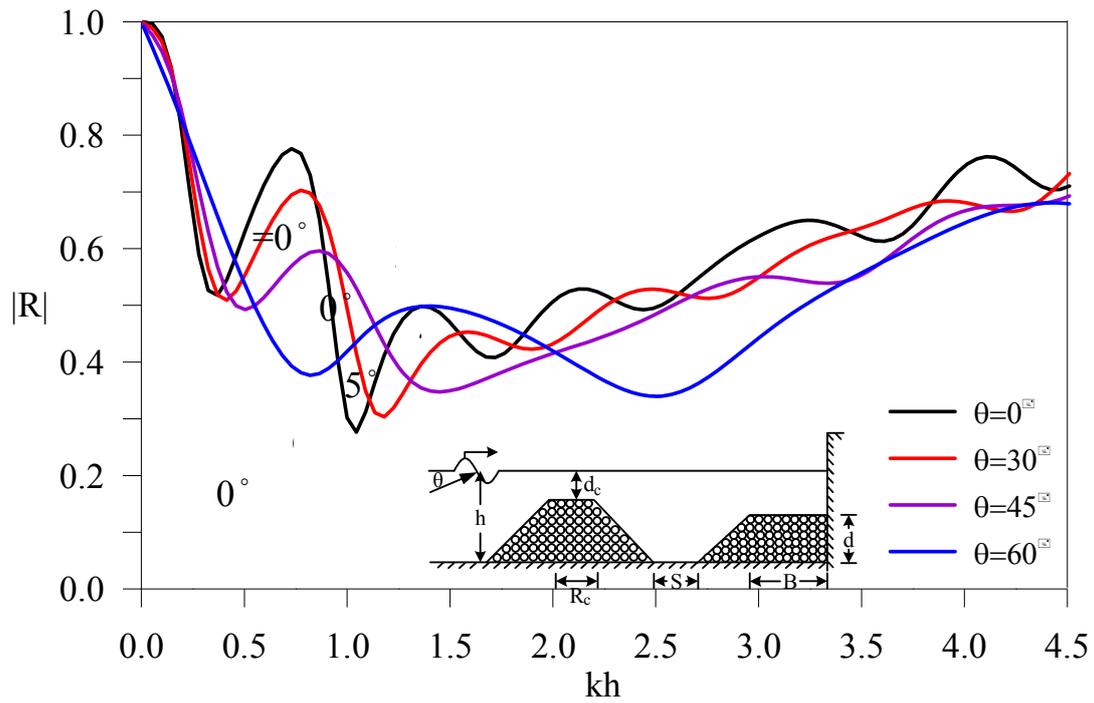
(a) 反射率



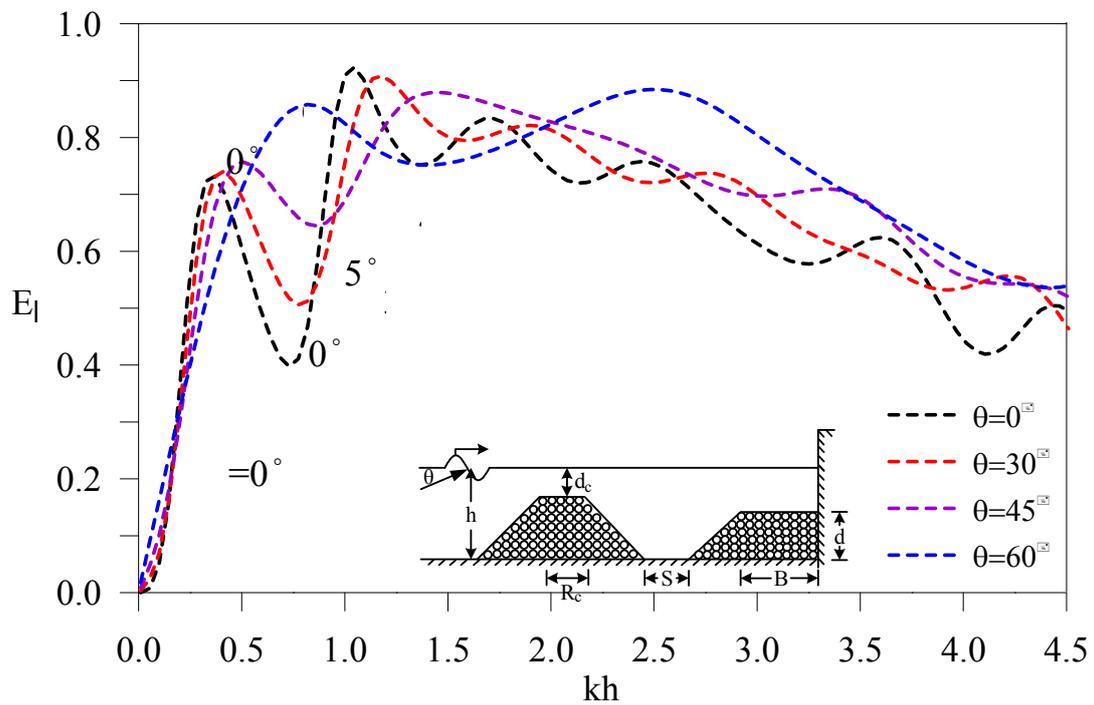
(b) 能量損失

圖 4.6.8 波浪斜向入射反射率  $|R|$  及能量損失  $E_l$  與  $kh$  之關係

$$(R_c/h = 0.4, d_c/h = 0.3, S/h = 1.0)$$



(a) 反射率



(b) 能量損失

圖 4.6.9 波浪斜向入射反射率  $|R|$  及能量損失  $E_l$  與  $kh$  之關係

$$(R_c/h=0.6, d_c/h=0.3, S/h=1.0)$$

表 4.6.1 不同配置下反射率出現極值大小與發生位置

<b>(a) <math>R_c/h=0.4</math> , <math>d_c/h=0.4</math> , <math>S/h=1.0</math></b>						
波向	$ R_{\min} _1$		$ R_{\max} _1$		$ R_{\min} _2$	
	kh	$ R $	kh	$ R $	kh	$ R $
$\theta=0^\circ$	0.415	0.672	0.775	0.819	1.135	0.412
$\theta=30^\circ$	0.505	0.659	0.865	0.763	1.315	0.448
$\theta=45^\circ$	0.595	0.634	0.955	0.677	1.585	0.512
$\theta=60^\circ$	1.045	0.51	2.215	0.642	3.115	0.627

<b>(b) <math>R_c/h=0.6</math> , <math>d_c/h=0.4</math> , <math>S/h=1.0</math></b>						
波向	$ R_{\min} _1$		$ R_{\max} _1$		$ R_{\min} _2$	
	kh	$ R $	kh	$ R $	kh	$ R $
$\theta=0^\circ$	0.415	0.63	0.775	0.8	1.09	0.374
$\theta=30^\circ$	0.46	0.617	0.82	0.736	1.225	0.405
$\theta=45^\circ$	0.595	0.593	0.91	0.638	1.54	0.459
$\theta=60^\circ$	0.955	0.452	1.9	0.581	2.8	0.53

<b>(c) <math>R_c/h=0.4</math> , <math>d_c/h=0.3</math> , <math>S/h=1.0</math></b>						
波向	$ R_{\min} _1$		$ R_{\max} _1$		$ R_{\min} _2$	
	kh	$ R $	kh	$ R $	kh	$ R $
$\theta=0^\circ$	0.37	0.547	0.775	0.792	1.09	0.279
$\theta=30^\circ$	0.46	0.54	0.82	0.724	1.225	0.316
$\theta=45^\circ$	0.55	0.521	0.91	0.623	1.54	0.375
$\theta=60^\circ$	0.865	0.412	1.585	0.54	2.755	0.424

<b>(d) <math>R_c/h=0.6</math> , <math>d_c/h=0.3</math> , <math>S/h=1.0</math></b>						
波向	$ R_{\min} _1$		$ R_{\max} _1$		$ R_{\min} _2$	
	kh	$ R $	kh	$ R $	kh	$ R $
$\theta=0^\circ$	0.37	0.518	0.73	0.775	1.045	0.276
$\theta=30^\circ$	0.415	0.51	0.775	0.703	1.18	0.303
$\theta=45^\circ$	0.505	0.493	0.865	0.596	1.45	0.347
$\theta=60^\circ$	0.82	0.377	1.405	0.499	2.485	0.34

## 4.7 小結

本文提出在不透水直立堤前方銜接梯形透水潛堤，並於其上方設置四分之一圓弧形孔隙板，前方距離堤址一段處設置另一道梯形透水潛堤，組合成「環境保護型」消能結構物。本年度經由水工模型試驗與數值計算結果，初步得到下列幾點結論：

1.

當

波浪正向入射時，採用分開式雙潛堤配置，表示潛堤間遊水室空間變大，波浪可以利用此空間及潛堤上方水域來作消能，水工模型試驗結果顯示在長週期波下都會有最小反射率值，而且其值會隨著潛堤寬度、高度之增加而下降。在短週期波下，由於波浪能量大多集中於水面附近，較無法感應到雙潛堤存在，波浪大多從潛堤上方通過，僅有部份進入透水潛堤內，因此消能效果有限，所以反射率會有較大值。

另外，當波浪正向入射時，數值計算結果顯示發生最小反射率值之位置有漸漸往長週期波( $kh$  較小)處移動，當堤高、堤寬增加，經由換算第一道堤前趾至岸壁距離( $D$ )與入射波長之比大約在  $D/L=0.26$  及  $0.85$  附近處；而且其趨勢與水工模型試驗結果相當一致。

2. 水工模型試驗結果顯示採用分開式雙潛堤配置時，由於有第一道透水潛堤阻擋，波浪通過後作用到直立岸壁波壓力會明顯降低，都比 Sainflou 重複波壓力小，其最大波壓力值發生在水面附近 ( $z/h=0.025$ )；而且壓力會隨著水深漸增壓力漸減；但是長週期  $T=1.7\text{sec}$  採用分開式配置，直立岸壁波壓力反而變大，即使堤高堤厚增加，無因次最大波壓力值會從  $P/\rho gH=0.693$ (連結式)增加至  $P/\rho gH=0.833$ (分開式)。

3. 水工模型試驗結果顯示：四分之一圓弧板上由於孔洞作用，波浪溯上時會有部分波浪落入孔洞中，因此大大降低波浪溯升高，水面上

波壓計完全量測不到波浪作用力，因此所測得壓力為零，而且以位於水面下-7cm( $z/h=-0.14$ )可以量測到最大波壓力，但是其壓力值與連結式壓力值作比較後發現偏小，而最後一組長週期波試驗，卻發現大部份最大無因次波壓力值會變大。

4. 本研究運用 FLOW-3D 套裝軟體模擬波浪作用於環境保護型結構物之反射率與流速分佈進行研究。利用自由水面計算結果，擷取相對於水工模型試驗虛擬之波高計量測位置的水面波形資料，分別利用 Goda and Suzuki (1976) 二點法或 Healy(1953) 公式求得反射率，與數值模式計算結果與水工模型試驗量測值大致接近。另外流速分佈在本研究計算例中向海第一道透水潛堤相對沒水深  $d_c/h=0.4$ 、相對堤寬  $R_c/h=0.4$  及二潛堤相對間距  $S/h=1.0$  時，利用 FLOW-3D 計算流場分佈可以清楚顯示第一道潛堤上方流速變大，而且二潛堤間遊水室流速有降低趨勢，且因四分之一圓弧形孔隙板之設置，亦可有效降低其與直立岸壁間之流速大小。
5. 浪正向或斜向入射環境保護型防波堤，不論在何種配置下，其反射率皆會產生兩個局部最小值及一個局部最大值，其中又以正向入射時( $\theta=0^\circ$ )會有較大反射率，但會隨著波浪斜向入射的角度變大( $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ )，反射率尖峰值其分佈會漸漸往較大的  $kh$  值側移動。而在  $kh=4.5$ (深水波)時，波浪能量大多被反射，無論入射角度為何，各配置下反射率皆會趨於一定值。

## 第五章 海岸公路邊坡保護工法

### 5.1 海岸公路背景

在全球以海洋為界之國家中，海岸公路往往成為該國攸關民生與經濟之重要交通脈絡，許多海岸公路也成為該國觀光旅遊之經濟資產，如美國加州 101 海岸公路、17 哩海岸公路、日本但馬海岸道路及臺灣之蘇花公路等，海岸公路重要者亦為該國國防安全之重要建設。一般常謂之海岸公路(Coastal highway)即是行車道路兩側皆臨海面或至少有一側濱臨海岸者，惟美國聯邦公路局 FHWA(2008)將海岸公路定義為路面之一側或雙側因濱臨海岸且易受到海水位、波浪、暴潮及漂砂影響之公路，此定義即是將海岸公路明確侷限在會受到海岸環境與海象條件影響者方稱之為海岸公路。由於海岸公路經常是緊臨海岸邊側興建，部份路段可能濱臨海面或貼臨海崖峭壁，故常因地質條件及海象環境等因素之影響，於外力作用時(颱風、大浪、海嘯等)而有越波或波浪淘蝕等危及橋梁、路面、邊坡或道路附屬設施之安全(圖 5.1.1)，故其興建及防護之挑戰性遠比一般純陸域公路來得嚴峻。



圖 5.1.1 不同類型之海岸公路災害(網路蒐集)

臺灣因為經濟開發及運輸交通需求，於全島公路網中，有多條濱海興建的海岸公路(圖 5.1.2)。但因目前主管道路機關之專業人力主要多為土木工程領域，具海岸工程背景之專業人力較少，加上臨海側路段邊坡與基腳之巡視檢測不若陸側之方便，故其定期之安全評估較常被忽略或無法確實檢測，致使海岸公路臨海側之部份路段可能潛藏有不確定之損壞風險。且臨海側海岸公路之保護方法除該地段之地質、地形及水文條件有關外，主要尚須考慮波浪、潮汐、海岸地形及漂砂等問題，故其防護工法之規劃與設計亦與一般陸域公路不同，因此必須有海岸工程專業人力參與方能研提較適宜的保護策略。

東部地區兩條濱海公路為臺 9 線和臺 11 線，此二條公路為東部地區之主要交通幹道，對東部之產業及經濟發展功不可沒，且臺 9 線臺 11 線大部份路段皆濱海開闢，沿途可欣賞海岸山脈及太平洋之美景，亦是東部之觀光資源。惟臺灣東部地區位於板塊碰撞之交界處，山壁陡峭及地質不穩定，加上東部海岸濱臨太平洋為颱風侵襲頻繁之處，在暴潮巨浪及長浪拍打作用下，公路常因下邊坡之崩塌、掏空而造成道路中斷情形(見圖 5.1.3)，再者波浪長期作用之海岸侵蝕亦已威脅公路路基之安全，海岸公路有被迫改線之情形，部份路段亦因長浪越波沖擊危及行車安全，這些情形皆有待檢討及改善。

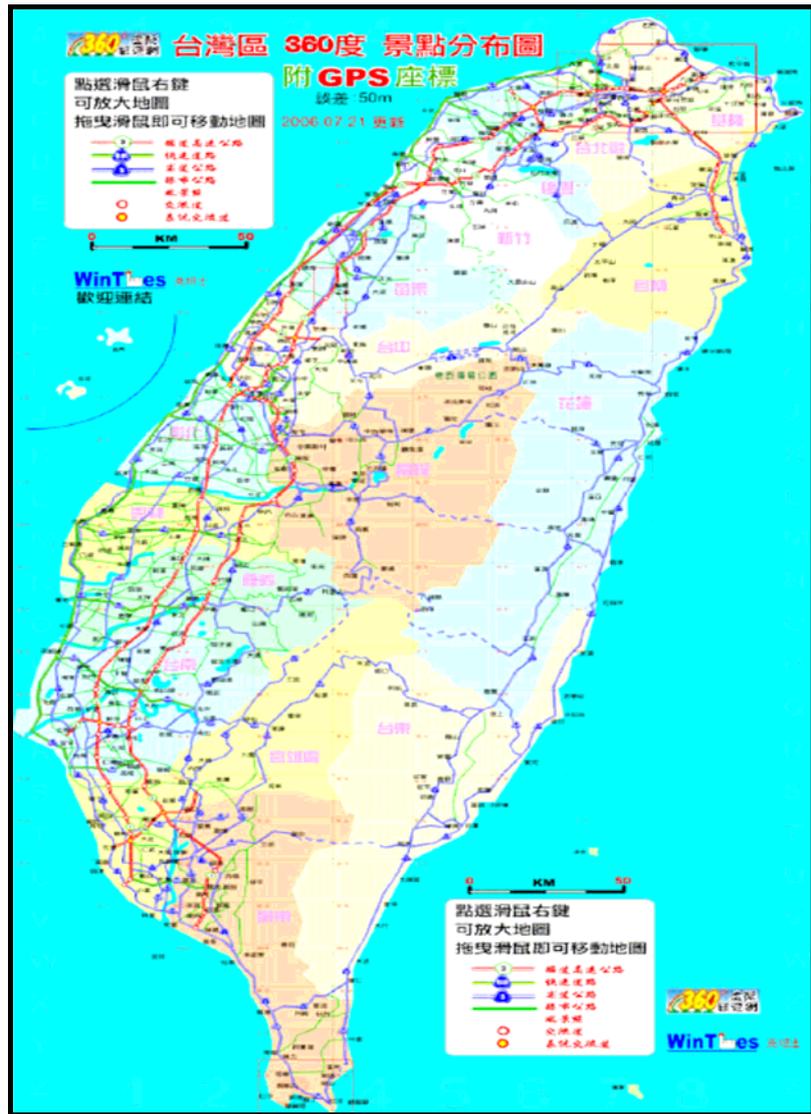


圖 5.1.2 臺灣公路網(<http://www.wintimes.com.tw/play/tw-map.htm>)



圖 5.1.3 海岸公路嘉平段路面塌陷情形

## 5.2 東部海岸公路簡介

臺灣東部海岸公路主要由臺9線和臺11線所構築而成，其公路範圍如圖 5.2.1 所示。臺9線是一條縱貫臺灣東部之公路，涵蓋北宜公路、蘇花公路、花東公路和南迴公路。臺9線北起為臺北市忠孝東路，經新店、頭城、羅東、蘇澳、南澳、花蓮市、玉里、池上、鹿野、臺東市、太麻里、大武到臺東楓港，全長約為 475km，為臺灣公路里程數最長的公路。其中由宜蘭縣頭城鎮二城至花蓮市田埔及臺東縣知本至達仁段為濱海興建之海岸公路。而其中一段以路段險峻及風景秀麗聞名之蘇花公路，北起宜蘭縣蘇澳鎮白米橋，南至花蓮市中山中正路口花蓮郵局前，全長 118 公里（現今里程縮短至 102.4 公里），大致依海岸線修築，沿路可看太平洋海景與峭壁山色，是一條世界著名的景觀公路。蘇花公路因運量、地質及海岸侵蝕問題，部份路段已內移改線，舊道路目前已改為觀光步道。臺11線海岸公路緊鄰花蓮至臺東之太平洋海岸修築，北起花蓮市田埔，經鹽寮、磯崎、豐濱、靜浦、長濱、成功、東河、都蘭至臺東市知本，全長 182 公里。圖 5.2.2 及圖 5.2.3 分別為花蓮縣及臺東縣境內臺9線和臺11線之路線圖。

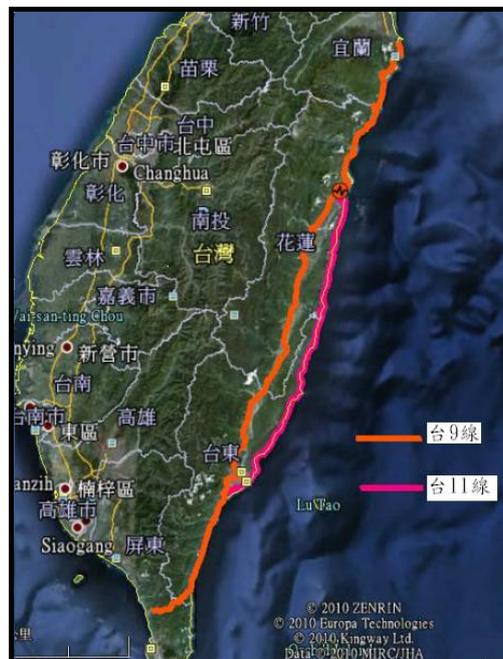


圖 5.2.1 臺九線和臺十一線示意圖

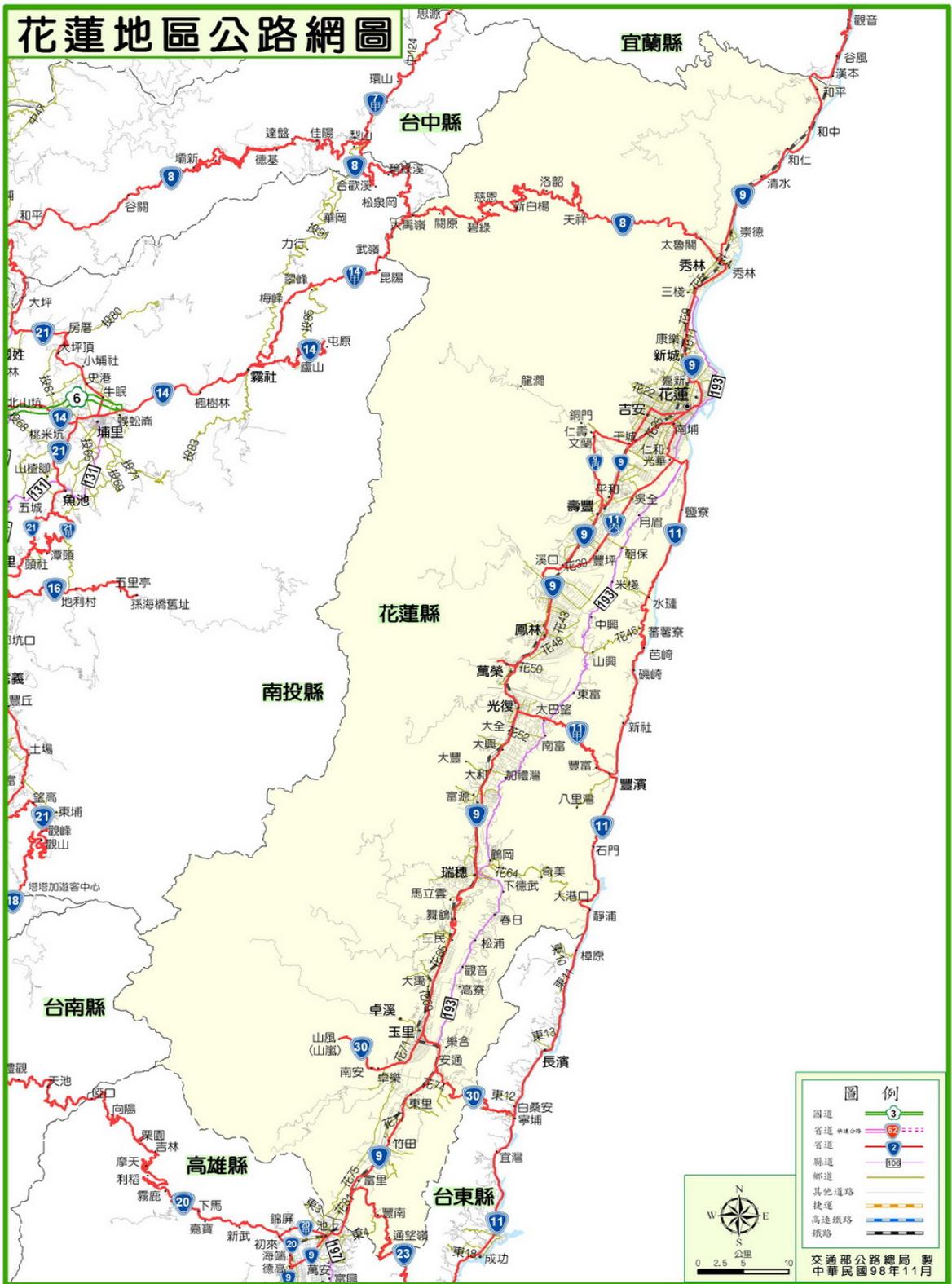


圖 5.2.2 花蓮縣境內臺 9 線及臺 11 線路線圖



## 5.3 東部公路環境背景

### 5.3.1 地形與地質

臺灣東部海岸地區以豐富的地質地形景觀聞名，所露出的岩層地質主要有火山岩、沈積岩、深海碎屑岩和泥岩層，且仍在繼續隆升中，因長年受風化、海水侵蝕以及堆積作用，地形更富變化，有海岸階地、沙灘、礫石灘、礁岸、離岸島、海岬和海蝕平台、海蝕溝、海蝕洞等等，另外亦因受到地殼構造運動的影響，山脈直接入海，部分以岩岸為主之海岸形成壯觀的峽谷及斷崖海岸地形，其中夾雜零星的小沙灘點綴其間。由此更孕育了豐富的動植物及海底生態景觀，沿線可欣賞清水斷崖、石梯坪、三仙台、石雨傘與小野柳獨特的海蝕地形景觀。綜觀東部海岸公路其沿線地形大致可區分為灣澳礁岩地形、海崖斷層地形、礫石沙灘地形等。如前述由於東部海岸大部分屬於離水型(隆升型)海岸，侵蝕作用較為發達，除了河口與港灣之外，多處都有海岸侵蝕的現象。而東部海岸地區之地質也較為脆弱，其岩層主要為火山岩層、礫岩、頁岩、砂岩和和部分泥岩所構成，由於岩層上的差異，也可能造成不同的災害。比如花蓮境內豐濱鄉以北山脈地質脆弱，一遇颱風，常常容易引發山崩挾帶大量土石，造成道路中斷，著名之蘇花公路，由於其地質結構屬於石灰岩地形，土質較為鬆散，自修建以來擴寬改善工程就不曾間斷，而邊坡露頭之尖硬岩層部分也因長期風化作用而易於外力衝擊時產生剝落崩離，對公路之安全構成威脅。往後評估災害保護之工法，亦會有所不同。有鑑於此，對於東部海岸地形和地質應審慎觀察，作為往後施工時評估對策之參考條件。

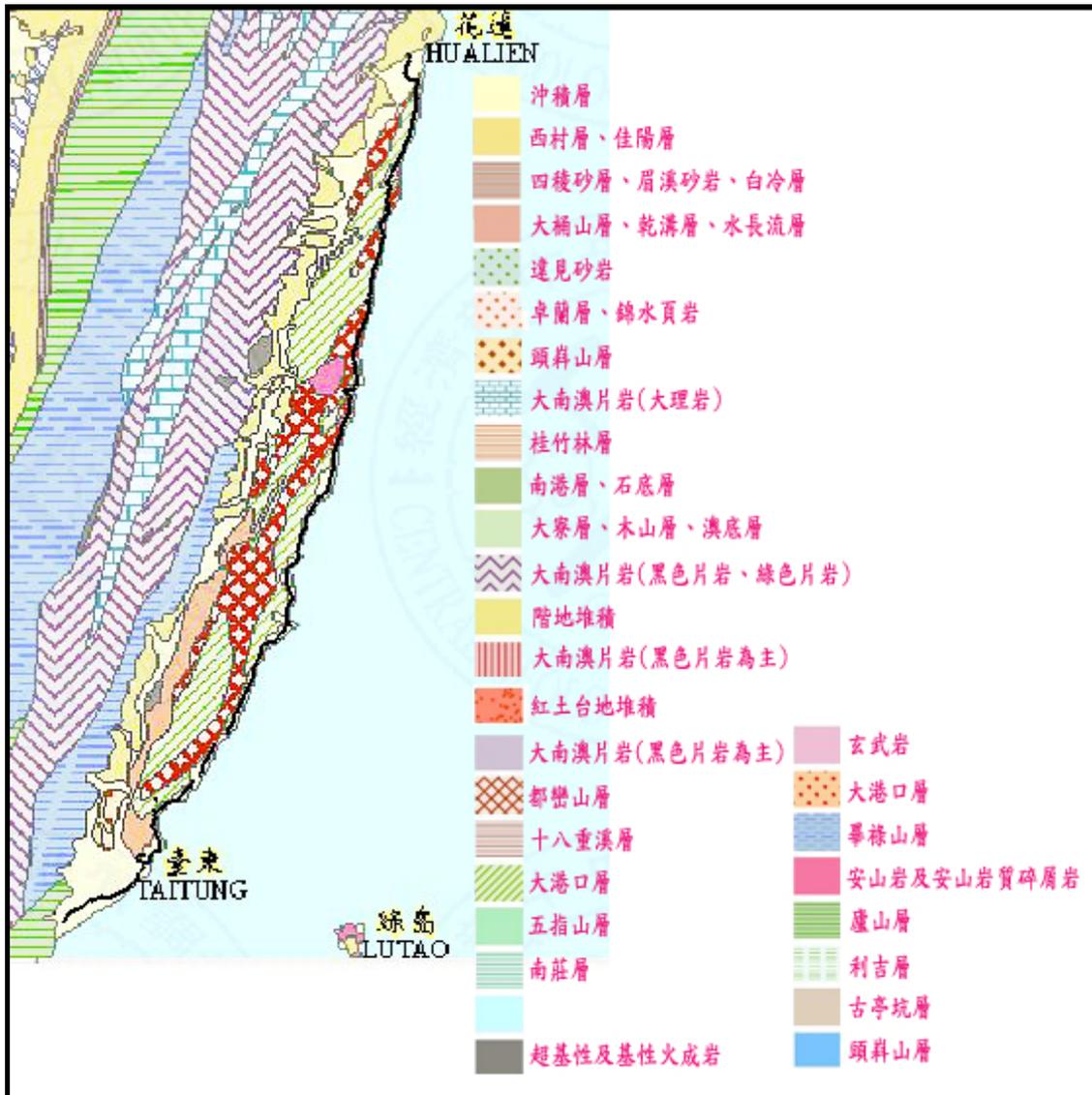


圖 5.3.1 東部地區地質圖 (黑線為臺 11 位置示意圖)

### 5.3.2 波浪

本節波浪海象資料主要取自於港灣技術研中心和中央氣象局，港灣技術研究中心東部觀測站主要為蘇澳港和花蓮港，蘇澳港測站位置位於  $24^{\circ}36'04''$  N， $121^{\circ}51'32''$  E，花蓮港測站位置位於  $23^{\circ}59'36''$  N， $121^{\circ}37'42''$  E；中央氣象局東部觀測站主要為龜山島、蘇澳站、花蓮站和成功站，蘇澳站浮標位置位於  $24^{\circ}37'31''$  N， $121^{\circ}51'32''$  E，花蓮站浮標位置位於  $24^{\circ}02'07''$  N， $121^{\circ}37'50''$  E，成功站浮標位置位於  $23^{\circ}04'47''$  N， $121^{\circ}23'00''$  E。

依據交通部交通部運輸研究所港灣技術研究中心波浪年報及中央氣象局臺東測站的統計數據顯示（表 5.3-1、表 5.3-2、表 5.3-3），東部沿海地區因為受到東北季風之影響，冬季示性波高介於 1.02~1.85 公尺之間，而週期介於 6.0~9.0 秒，波向多為東北向，夏季波高介於 0.5~1.0 公尺之間，週期介於 6.0~7.0 秒，且最為頻繁的波高除夏季的 0.34~1.58 公尺以外，其他各季皆在 0.47~2.1 公尺之間；但週期除了夏、秋季的 6.0~10.0 秒之間最為頻繁之外，其他各季皆在 6.0~7.0 秒之間；夏、秋季為颱風最為頻繁之期，由表可知東部海岸波浪長期受至颱風引響。

表 5.3.1 蘇澳港測站 1990-2008 波浪數據統計

季節	示性波高 (m)	示性波高週期 (sec)	最大 示性波高(m)	最大 示性波高週期(sec)
春	0.55-1.38	6.0-9.0	2.43	11.4
夏	0.34-1.58	6.0-10.0	4.98	13.1
秋	0.47-2.1	6.0-10.0	4.94	14.2
冬	1.02-1.85	6.0-9.0	2.75	10.7

表 5.3.2 花蓮港測站 1990-2007 波浪數據統計

季節	示性波高 (m)	示性波高週期 (sec)	最大 示性波高(m)	最大 示性波高週期(sec)
春	0.8-1.3	6.6-7.6	3.92	8.0
夏	0.5-1.0	6.0-7.0	8.78	11.7
秋	1-1.5	6.8-7.8	8.64	12.3
冬	1-1.5	7.0-8.0	3.95	8.5

表 5.3.3 臺東波浪數據統計

研究單位	期間 (年/月)	位置	水深(m)	波高 (m)	週期 (sec)
中央氣象局	69/06~ 71/08	新港	-36	夏季：0.5~0.75	夏季：6.5~8.0
				冬季：1.0~1.5	冬季：7.0~8.5
中央氣象局	69/06~ 76/10	成功	-36	夏季：1.03	夏季：6.84
				冬季：1.15	冬季：6.90
中央氣象局	92/01~ 96/10	成功	-38	夏季：0.97	夏季：8.12
				冬季：1.64	冬季：8.06

### 5.3.3 潮汐

東部海岸地區之潮汐設站不若西部海岸來得分佈密集與均勻，目前中央氣象局、水利署及港灣技術研究中心等有關單位於東部建置之長期潮汐觀測站計有宜蘭海岸之烏石、梗枋、蘇澳港，花蓮海岸之石梯、花蓮港及臺東海岸之成功、富岡、大武及綠島等。表 5.3-4~表 5.3-7 為花蓮、蘇澳、富岡及石梯之巢位統計表。

表 5.3.4 花蓮潮位站潮位統計表

最高高潮位	H.H.T	1.06
平均潮位	M.W.L	0.00
最低低潮位	L.L.W.L	-1.04
最大潮差	MM.T.R	2.10
平均潮差	MEAN	0.93
觀測基準面		以花蓮測站年平均潮位為基準
資料年度		民國 88 年 1 月~民國 96 年 12 月

表 5.3.5 氣象局蘇澳潮位站 2005-2007 潮位統計表

最高高潮位	H.H.T	1.330
大潮平均高潮位	H.W.O.S.T	0.851
平均高潮位	M.H.W.L	0.561
小潮平均高潮位	H.W.O.N.T	0.497
平均潮位	M.W.L	0.038
小潮平均低潮位	L.W.O.N.T	-0.476
平均低潮位	M.L.W.L	-0.553
大潮平均低潮位	L.W.O.S.T	-0.789
最低低潮位	L.L.W.L	-1.080
平均潮差	MEAN	1.114
資料年度		民國 84 年 1 月~民國 95 年 12 月

表 5.3.6 氣象局富岡潮位站潮位統計表

最高高潮位	H.H.T	1.37
大潮平均高潮位	H.W.O.S.T	0.89
平均高潮位	M.H.W.L	0.63
小潮平均高潮位	H.W.O.N.T	0.56
平均潮位	M.W.L	0.12
小潮平均低潮位	L.W.O.N.T	-0.39
平均低潮位	M.L.W.L	-0.35
大潮平均低潮位	L.W.O.S.T	-0.67
最低低潮位	L.L.W.L	-1.15
平均潮差	MEAN	0.96
潮差基準		潮位水準點 TG16 為 2.9810m
資料年度		民國 89 年 12 月~民國 95 年 12 月

表 5.3.7 氣象局石梯潮位站潮位統計表

最高高潮位	H.H.T	1.37
大潮平均高潮位	H.W.O.S.T	0.82
平均高潮位	M.H.W.L	0.66
平均潮位	M.W.L	0.07
平均低潮位	M.L.W.L	-0.50
大潮平均低潮位	L.W.O.S.T	-0.70
最低低潮位	L.L.W.L	-1.23
最大潮差	MM.T.R	2.30
平均潮差	EAN	1.16
大潮平均潮差	S.T.R	1.53
觀測基準面		以基隆平均海水面為基準
資料年度		民國 90 年 11 月~民國 96 年 12 月

### 5.3.4 海流

海流猶如大洋中的河流，會向某一特定的方向流動，流動的路徑大致固定。唯有在沿岸部份，會因潮汐、地形及河流的注入等影響其變化。近岸海域之海潮，除受到漲退潮影響外，終年大多受由南往北之黑潮主流流經的影響，流向為北或東北，流經臺灣東部者為黑潮主流，具高溫、高鹽度等特性，最強流速出現在接近臺灣的海岸處，流速向東逐漸降低，主流沿臺灣東部海岸北上，對臺灣東部的氣候與漁產有相當大的影響。再者，東海岸地形陡降，黑潮主流常年流經東部海域，是大洋性洄游性魚類必經的通路，在此的底棲、上中層洄游性魚類及貝介類也十分豐富，是良好的漁場。

圖 5.3.2 為 1991~2007 年臺灣四周海域臺灣附近水深 30 公尺，15 分網格平均海況流矢展示圖，而則為上述期間各季之平均海況流矢展示圖，其中以彩色水深地形圖為底圖，箭頭方向表示流向，箭頭大小為流速大小，箭頭起始點代表該網格點內，在該時間區間與深度區間所有流速資料的平均。臺灣附近的流場以東岸的黑潮最為明顯，流向北北東。黑潮是北太平洋環流的一部份，經菲律賓東北轉而沿著臺灣東岸外海北上，黑潮主流平行且靠近臺灣岸邊，距岸約 40km，寬度約 200km。臺灣海峽內冬季東北季風來臨時，黑潮水從巴士海峽流向西北，進入臺灣海峽，在澎湖群島附近與往北的黑潮水相遇；夏季西南季風強時，黑潮水由巴士海峽經臺灣東岸向北流，南海海水則從巴士海峽通過臺灣海峽北上。

圖 5.3.3 為臺灣於深度-20m 之海流展示圖，以時間及深度為區分 49 張圖，其中以彩色水深地形圖為底圖，並畫上該深度之等深線，箭頭方向表示流向，箭頭大小為流速大小，箭頭起始點代表該網格點內，在該時間區間與深度區間所有流速資料的平均。

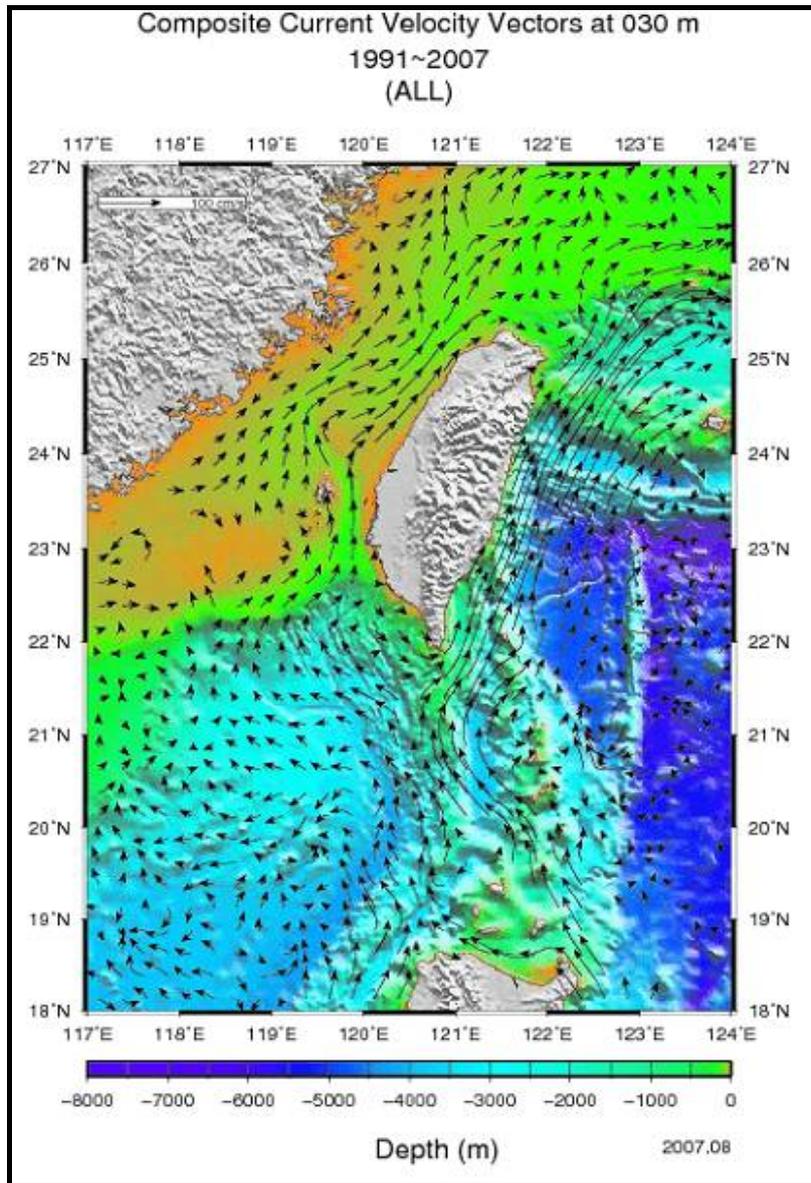


圖 5.3.2 臺灣四周海域年平均海況流矢展示圖

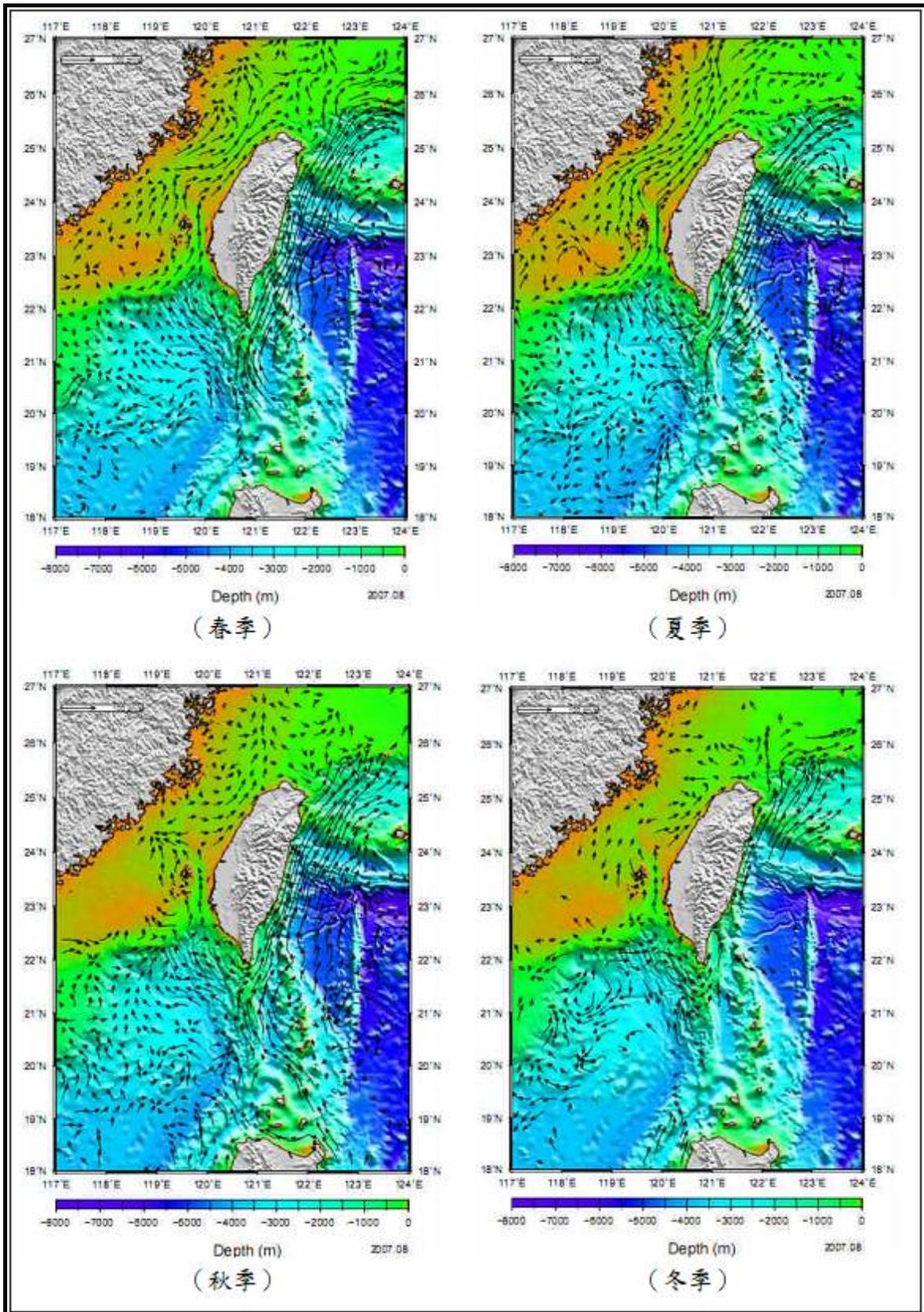


圖 5.3.3 臺灣四周海域各季平均海況流矢展示圖

### 5.3.5 颱風

臺灣因位於西太平洋颱風區，所以每當夏季時，常有颱風侵襲臺灣，根據颱風侵襲臺灣路徑分析圖(圖 5.3.4)得知，東部海岸於颱風侵襲季節時，有甚多路徑皆會對其照成威脅，因此東部地區海岸公路，往往首當其衝受到颱風豪雨及暴潮巨浪的嚴重侵襲，造成莫大的災害。

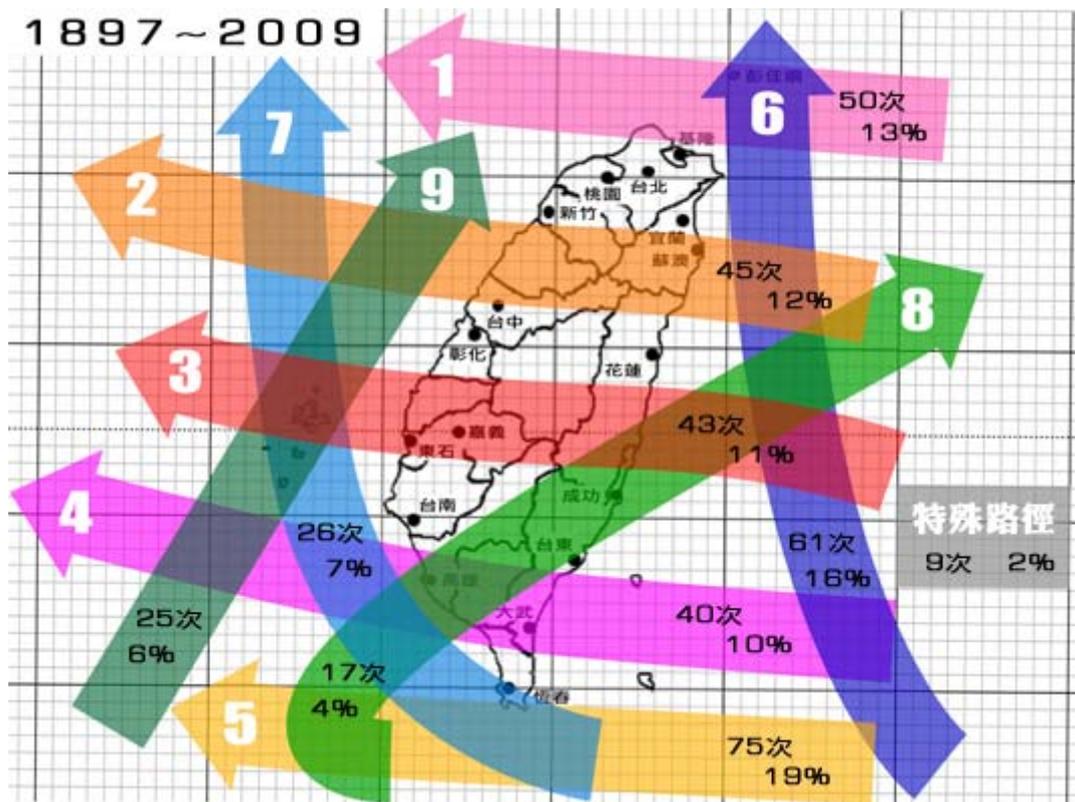


圖 5.3.4 1897-2009 颱風侵襲臺灣路徑圖

### 5.4 海岸公路之現況

臺灣海岸公路因受前述地文、水文、海象及漂砂等因素影響，導致海岸公路臨海側常發生越波、邊坡崩塌、路基流失、堤址侵蝕及保護工毀損等災害，其中又以東部海岸公路之災況較為頻繁與嚴重，西部海岸公路因大都距離海岸線有一定距離，故由海象環境引起之災況較少。本節主要以臺 11 線截至目前為止之蒐集資料，就易致災各路段

發生災害之原因和保護方式，整理如下，最後再就臺 9 線及臺 17 線各一處之災害說明。

#### 5.4.1 臺 11 線

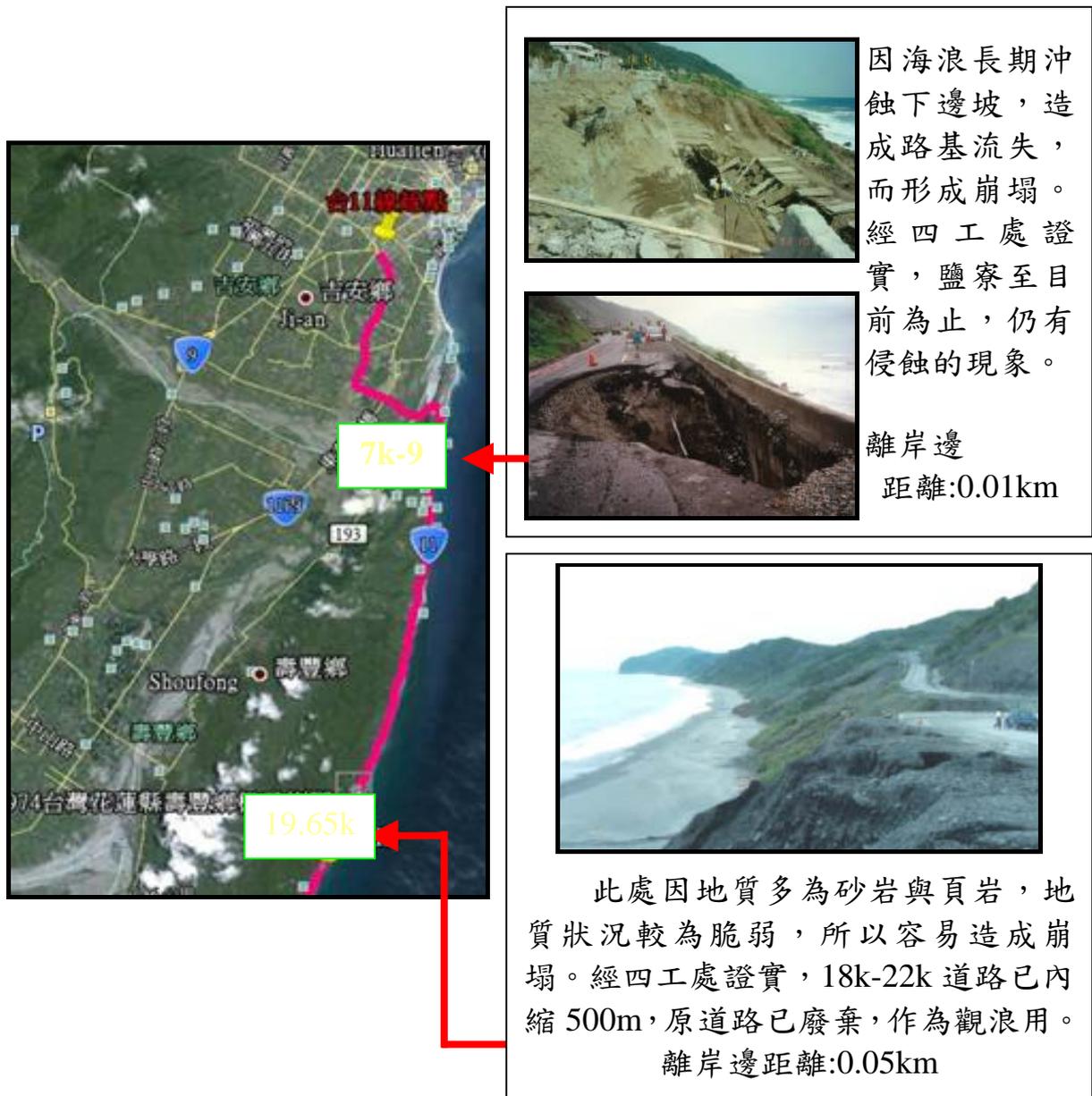
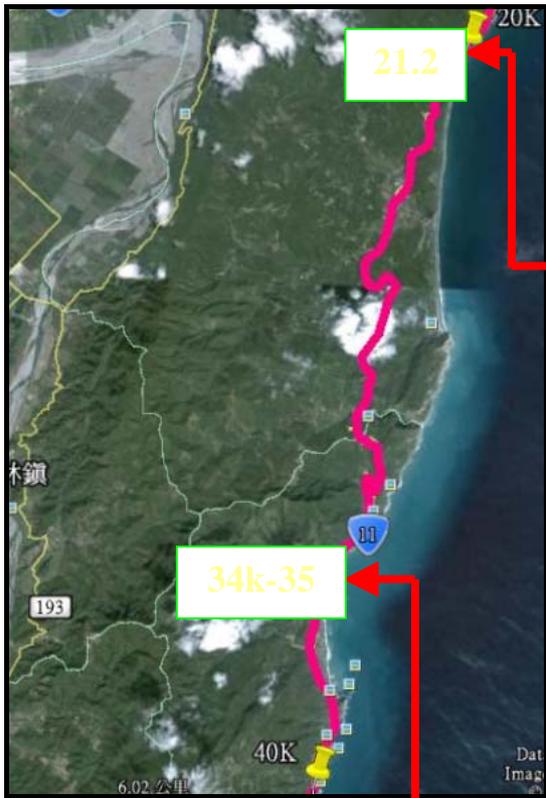


圖 5.4.1 臺 11 線 0-20km



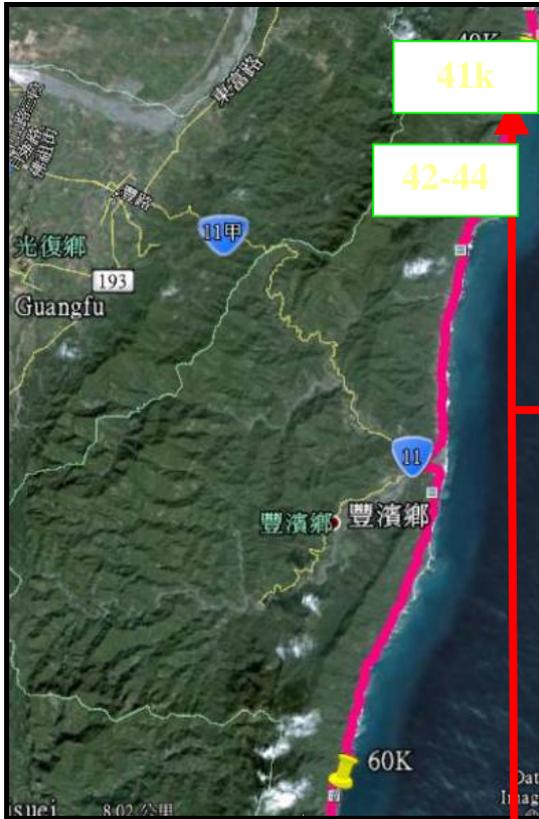
此段為跳浪段，左邊兩張照片分別為公路上下邊坡，下邊坡因海岸侵蝕後退，已危急公路路基的穩定。經四工處證實，18k-22k道路已內縮500m，原道路以廢棄，作為觀浪之用。離岸邊距離：0.11km



此段為大崩段，地質包含了凝灰岩和泥岩...等。凝灰岩膠結性不佳，孔隙率大，風化快；泥岩則是遇水則軟化。因此處有了這兩種地質特徵，所以此處形成了台11線的大崩段。經四工處證實，該段道路崩塌之情況，趨於減緩。

離岸邊距離:0.18km

圖 5.4.2 臺 11 線 20-40km



該段有設置新機隧道，但因地質多為舊崩積土，加上離海近，路基易被海岸侵蝕淘刷，進而產生崩塌。目前四工處已將此段內縮 100m，現今仍在施工中。

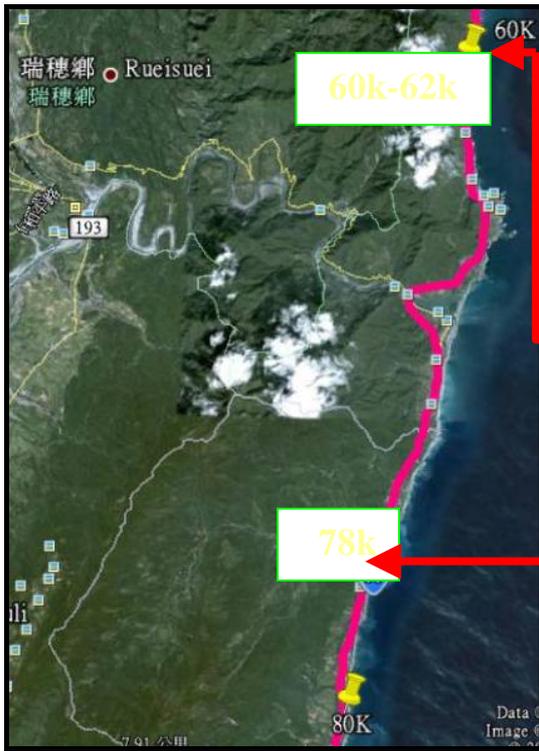
離岸邊離:0.1km



此地段因路基長期被海岸侵蝕淘刷，進而產生崩塌。

離岸邊距離:0.1km

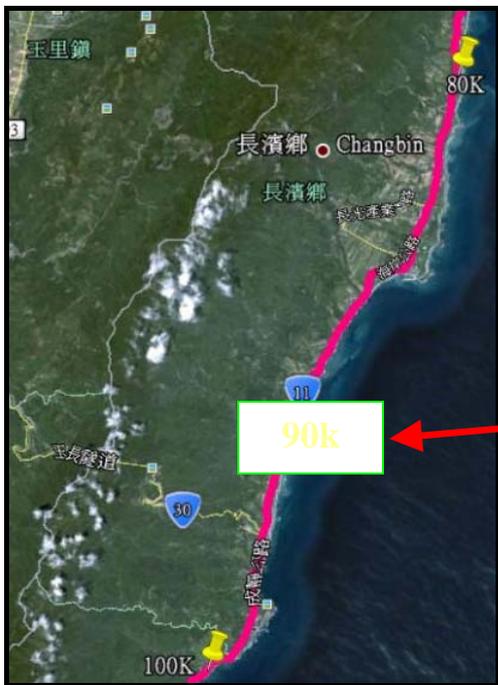
圖 5.4.3 臺 11 線 40-60km



此區因地質為火山岩，抗剪力較弱，所以易造成崩塌，有多次路基掏空紀錄。  
離岸邊距離:0.05km

此段因較鄰近海域，常有越波情況，已設置防浪牆，不過礙於景觀視野，設置高度受限，效果亦有限。

圖 5.4.4 臺 11 線 60-80km



台 11 線 80k~100k，依三工處說明，此路段過去並無破壞情形，惟因所拋消波塊逐漸失去消能作用，致使今年颱風侵襲期間 90K\_700~830 處護岸下側混凝土坡面工被波浪侵襲而大片剝落毀損。



圖 5.4.5 臺 11 線 80-100km

依公路局第三養護工程處之說明，臺 11 線 100K~終點為止，此段公路上撐安定，並無明顯之公路災況發生。

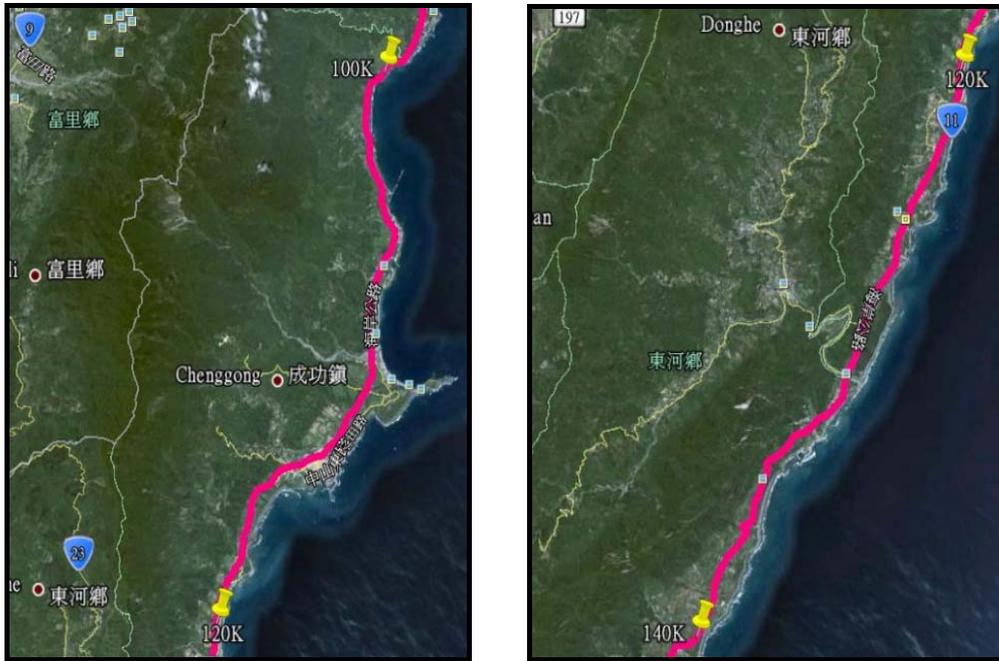


圖 5.4.6 臺 11 線 100-140km

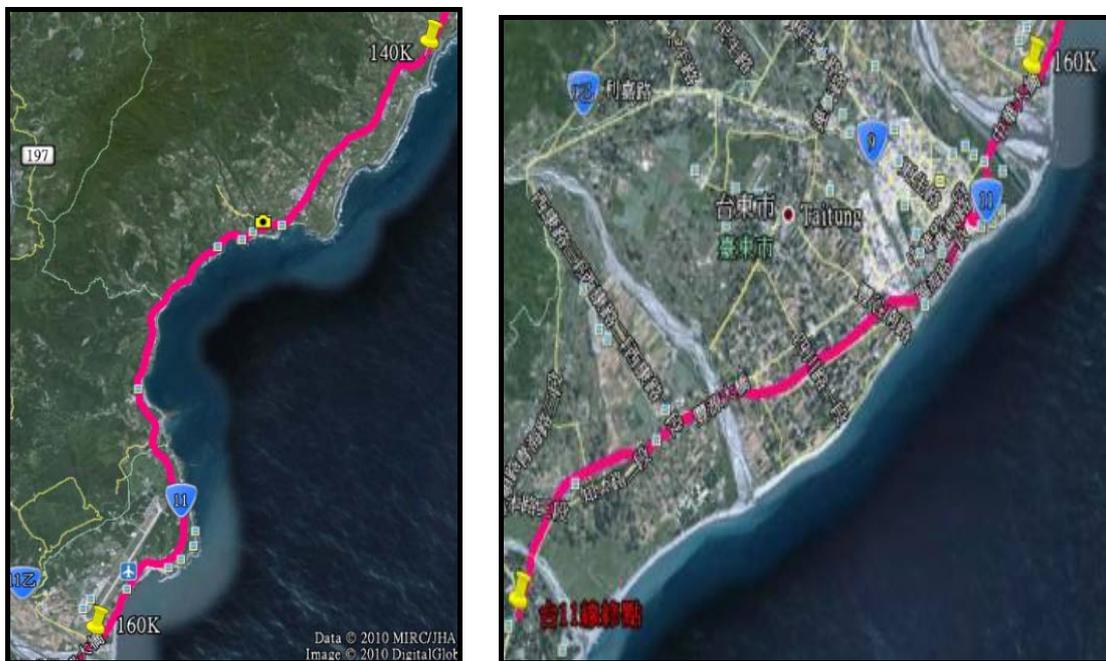


圖 5.4.7 臺 11 線 140km-終點 (無災害)

上述曾發生災害地點，其災害發生原因及現有實施的保護工法和現況整理於表 5.4-1。

表 5.4.1 臺 11 線易致災路段說明表

災害地點 里程數	災害原因	保護方式 與現況	現況照片
<p><b>7k-9k</b></p>	<p>公路離海約 10-20m，易造成海岸侵蝕，路基流失。</p>	<p>以拋 3000 餘個消波塊減緩海岸侵蝕，並施做防波堤和防浪堤。大致已穩定，不過鹽寮段仍有部分海岸侵蝕的現象。</p>	
			<p>8k+600</p>  <p>9k+700</p>
<p><b>18k-22k</b></p>	<p>此段稱為跳浪段，公路離海約 50m，加上地質脆弱，造成海岸侵蝕，且易崩塌。</p>	<p>原本拋 1600 餘個消波塊，但還是嚴重侵蝕，經評估過後，該段公路已內縮 500m，原公路已廢棄，留作觀光海浪之用。</p>	 <p>臺 11 線 十二號橋</p>
<p><b>34k-35k</b></p>	<p>此段稱為大崩段，因地質含有凝灰岩和泥岩，特別容易造成崩塌，因此該段有大崩段之稱號。</p>	<p>以地工和植生等技術，穩定其下邊坡。經四工處證實，該路段已穩定。</p>	

表 5.4.1 (續) 臺 11 線易致災路段說明表

災害地點 里程數	災害原因	保護方式 與現況	現況照片
41k	該段為新機 隧道之路 段，因其地質 多為舊崩積 土，加上離海 亦近，易造成 海岸侵蝕。	現今四工處已 將該段內縮 100m，正在施 工中。	
42k-44k	該段因路基 長期被海岸 侵蝕淘刷，進 而產生崩塌。	已設置防波堤 和拋置消波 塊。經四工處證 實，該段已穩 定。	
59k-62k	公路旁的邊 坡過於陡 峭，並緊臨海 岸，易造成下 邊坡崩塌和 海岸侵蝕； 62k 的人定勝 天附近，有多 次路基掏空 之紀錄。	已拋置 1000 餘 個消波塊。經四 工處證實，該段 已趨於穩定。	 <p data-bbox="1043 1464 1267 1503">62k 人定勝天</p>
78k	該段因離海 近，常有越波 發生，已影響 公路及用路 人之安全。	已設置防浪 牆，不過礙於景 觀視野，設置高 度受限，效果也 有限。	

#### 5.4.2 臺 9 線與臺 17 線

臺 9 線過去常見大浪越波及海岸侵蝕危及路線安全之災害，尤以稱蘇花公路和平溪至立霧溪段最為險峻，但在歷經內移改線、興建隧道等工程改善措施後，因海象條件所引起之公路災害已不多見。今年梅姬颱風於此段公路所釀巨大災況，雖然海側邊坡亦有大片滑落崩塌情形，但此災害係因公路上邊坡大量土石瞬間擠壓加上暴雨強烈沖刷所造成，並非海象因素所引發之公路災況。圖 5.4.8 及圖 5.4.9 分別為臺東縣境內臺 9 線 410K~411K 及 429K~430K.於莫拉克颱風侵襲期間，因為上邊坡流下土石擠壓、暴雨逕流及大浪之淘刷，引起海側邊坡崩塌、路基流失後所造成之公路路面塌陷災害。由於臺 9 線於太麻里至大武間之路線有多處離海岸之距離僅有 60 公尺左右，甚至亦有公路邊坡趾部已臨海面，於颱風大浪時，波浪激烈沖刷邊坡及崖壁趾部，日積月累已逐漸危及公路之安全。2003 杜鵑颱風來侵時，臺 9 線南迴公路 435K 大溪明隧道口附近，發生巨浪越波將車子打落公路之意外。2004 年 10 月陶卡基颱風過境之外圍環流所引起之長浪將南迴公路多良及尚武路段之水泥護欄沖毀道路面上並將路基淘空約近百餘公尺。2009 年莫拉克颱風侵襲期間，臺 9 線 438.5K，即在臺東大武南興路段，路基因為被海浪嚴重侵蝕，交通受到影響，當時僅能維持單線雙向通車。



圖 5.4.8 臺 9 線 410K+650(左)及 411K+150 路面塌陷災害



圖 5.4.9 臺 9 線 429K+800~430K 路面塌陷災害

圖 5.4.10 為臺東縣大武漁港南側臺 9 線之公路現況，此段海岸目前因漂砂被北堤攔阻及繞射進入港內而缺少砂源，致使南岸地形持續崩塌後退，一些臨時搭建的屋舍已落入海中，現南迴公路臨海側路基也面臨塌陷危險。由此圖可發現，受到大武漁港北堤阻擋沿岸漂沙造成南側海岸嚴重侵蝕，公路海側已無砂灘，颱風大浪時，波浪直逼公路路基腳，雖然屢拋消波塊保護，但侵蝕問題持續發生，越波及路基沖蝕災況持續不斷，研擬適當對策應刻不容緩。



圖 5.4.10 為臺東縣大武漁港南側臺 9 線之公路現況

臺 17 線在臺南市區黃金海岸段之路線因海灘侵蝕，路基於颱風大浪期間有被沖刷問題，此乃因公路外側緩衝消能海灘寬度不足，據成大水工試驗所「臺南市海岸環境監測計畫」之分析，發現二仁溪北岸灣裡一帶海岸線於 1993 年至 2004 年的侵淤變化中，後退量最大約 100 公尺左右。圖 5.4.11 為臺 17 線於臺南市黃金海岸附近公路海側之邊坡護岸於非颱風季節時之長浪作用下，造成嚴重之破損現象，已明顯危及護岸內側車道之安全，事後第六河川局緊急復原修護確保公路之穩定。由於臺 17 線於二仁溪南、北兩側之路線離海岸消波工之距離大都僅在 60~100 公尺內，最近者距離不到 30 公尺，此些路段皆可能潛藏有波浪上溯淘刷之危害風險。



圖 5.4.11 臺 17 線臺南黃金海岸段邊坡護岸破壞情形

## 5.5 海岸公路防護因應對策

由於緊鄰海岸闢建之海岸公路其所處之環境除一般陸域公路之外力條件外，尚須考慮海象條件及海域地形變遷之影響，故其定期維護或災害防護之作業準則應該與一般陸域公路有所區隔，尤其在臨海側，對可能有致災風險之海象環境應該有具體之考量。臺灣東西兩岸之海岸公路地形型態及海象環境差異迥大，惟整體海岸公路防護作業應該具有相似之因應對策。

參考國外相關單位之作業方式及臺灣現地環境狀況，本計畫初步擬定臺灣海岸公路防護之作業準則應該朝以下之方式思考、研擬：

### 5.5.1 歷史災資料庫之建置：

由於過去公路單位人力欠缺，加上對海岸防護觀念專業知識之不足，過去至今之許多公路災害狀況皆未做有系統之歸類建檔，以致資料零散於各單位，或資訊之不公開等因素，致使相關歷史災況資料之搜集頗為困難。惟不同期程歷史災況之資料，可供研究單位參考分析，歸納易致災地段、探討致災原因及檢討防護工法之效益，此對探討目前海岸公路各路段之致災風險與規劃適宜防護工法甚有幫助，因此海岸公路災況資料庫之建置應該是最基本與必須之工作，相關單位可參考歐美等國公路主管單位之作法，建置完整之災況資料庫系統。

### 5.5.2 現有易致災地點之普查：

一般公路養護單位對其轄區內各公路之現況皆有完整的資料，大致了解其管轄公路網中哪些路況於颱風豪雨季節屬於較易釀災之危險路段，也會有定期之維護巡視，隨時掌握各路段之穩定狀況，對交通網之順暢與行車安全有很大之幫助。惟此一工作對陸域公路系統較容易獲得掌握一切狀況，但對臨海側公路之邊坡、崖腳、護岸、保護工

及海灘寬度等狀況之掌握較為不易，根本無法對整條海岸公路進行確實之巡視維護工作。尤其東部海岸公路有許多路段崖壁陡峭或高差甚大，平時根本無法掌握邊坡及崖腳之穩定狀況，僅能於公路發生塌陷或損壞時方能得知可能之狀況。因此各養護單位應就其轄屬道路於颱風、大浪季節經常發生越波、邊坡崩塌或路面塌陷之路段加以普查並作成資料庫。再依人力、經費及設備之狀況，定期對這些易致災路段之海側邊坡、崖腳、沙灘及保護設施等進行檢視、量測，以供研判是否會有持續性之致災風險或研判防護設施是否有機能降低情形，期能即時維護，減少路況災害之發生。

### 5.5.3 易致災地點地文及海象資料監測

臺灣公路系統中，山區或邊坡易崩塌路段之監測系統之建置與監測資料之蒐集皆較完備，除公路養護單位之邊坡位移與地下水觀測等系統外，尚有氣象局、水利署、水保局、地調所及其他研究機構所建置之水文、地文測站可供輔助參考使用，但東部海岸公路海側邊坡之監測系統幾乎沒有。且因為邊坡、崖腳、沙灘主要受到暴潮巨浪之上溯淘蝕為主要之破壞外力，但目前海象觀測網尚無法均佈於環島四周海域，以致部分路段欠缺實測之海象資料可資應用參考。建議公路養護單位除能於常釀邊坡崩塌路段加強巡查外，亦應選擇適當路段裝測邊坡穩定偵測系統，除能掌握易致災地點之邊坡特性外，亦可觀測邊坡暴雨逕流及波浪之沖刷狀況。同時亦應協調氣象局或委由學術單位於欠缺海象資料之高風險地點，建置長期之海象觀測站，蒐集諸如波浪、潮汐、海流、風速等相關海象水文資料，以提供災況研判、防護工法設計及災情預警分析之應用。

### 5.5.4 即時監視系統建置

雖然目前環島海域有氣象局或水利署等單位所設置之海象觀測站可提供相關之海氣象資料，但為能提供掌握異常氣象條件時路面越波狀況及提供釋判海灘寬度之變化，公路相關單位可於易發生大浪越波

災害或常發生因緩衝海灘寬度不足致海岸公路有因坡趾或崖趾侵蝕而產生邊坡崩塌或路面崩陷等災況之路段，在適當岸側地點架設越波影像監視設備，搭配影像分析技術，可分析出公路在波浪作用時之最大越波高度及越波影響範圍，提供防護工程規劃設計之參考。另外所分析數據亦可結合波浪、潮汐、越波即時推算模式，提供模式演算之驗核，再由演算結果，由道路主觀機關或災害應變指揮中心依據當地道路路型與行車速限等資料之配合，可於颱風暴潮時提供即時越波預警作用，提供公路單位做為封路或暫時管制行車之參考。圖 5.5.1 即為日本海岸道路所架設越波監視系統捕捉波浪越坡時之分析畫面，圖 5.5.2 則為提供道路越波預警分析之分析步驟示意圖。圖 5.5.3 及圖 5.5.3 則為日本研究單位所規劃海岸公路越波監測與分析之作業流程示意圖，公路養護或研究單位可參考制定適合臺灣之作業方式。



圖 5.5.1 海岸道路越波捕捉面

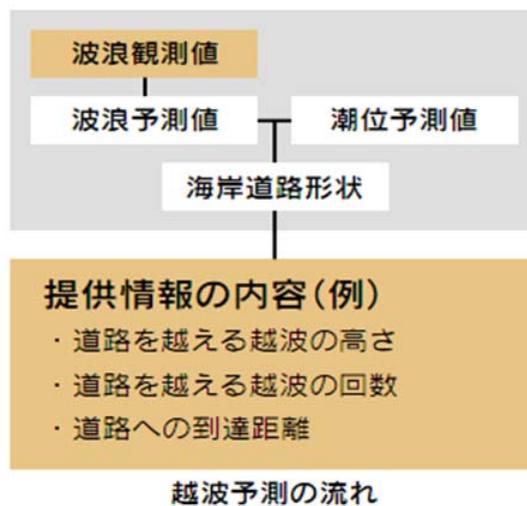


圖 5.5.2 道路越波計算步驟

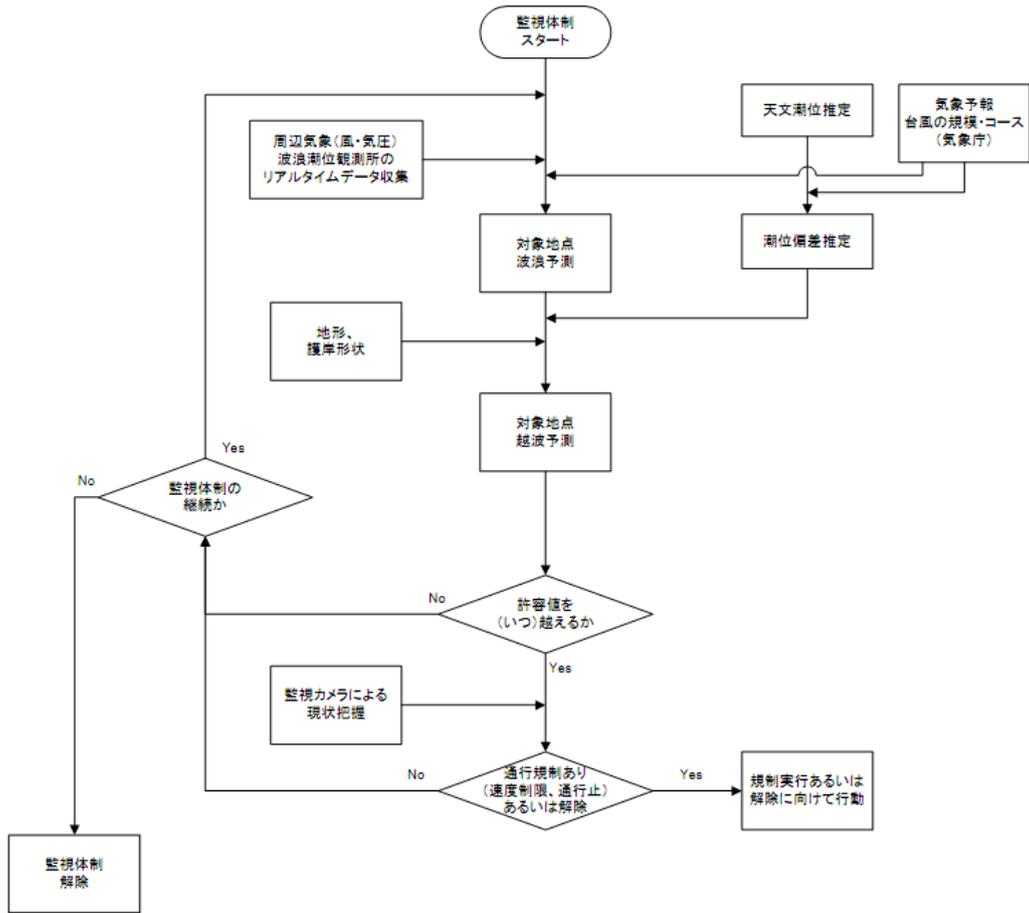


圖 5.5.3 日本公路越波監視與預測分析之流程圖

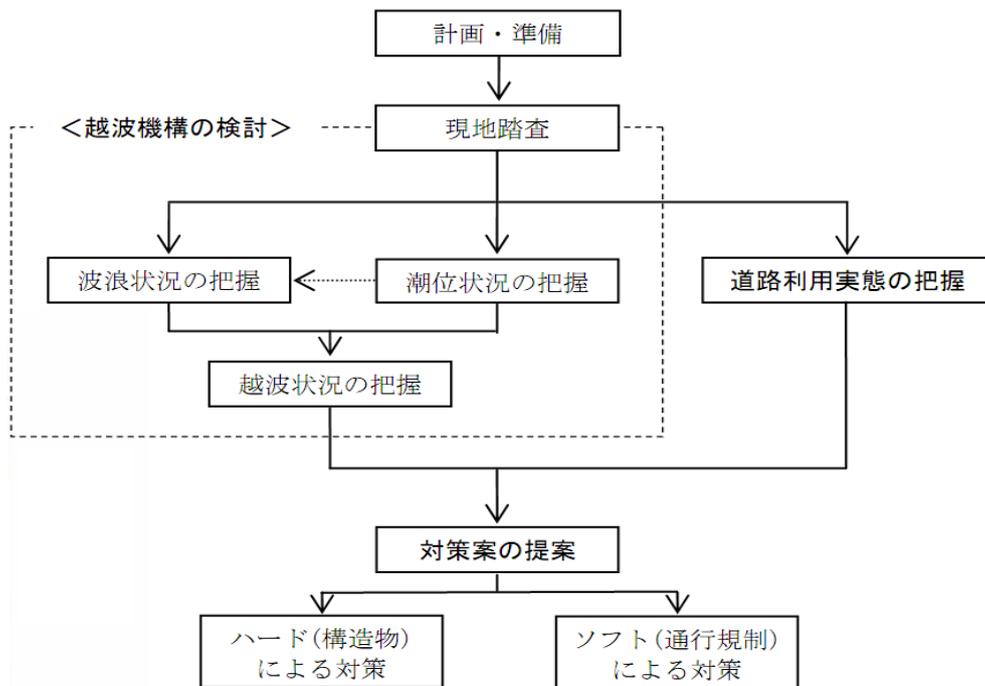


圖 5.5.4 日本公路越波防護對策分析流程圖

由於目前世界各地海岸公路釀災原因之一即為海岸侵蝕嚴重，公路外側海灘緩衝寬度明顯不足，造成波浪直接淘刷邊坡或衝擊海堤護岸而引發公路災害，臺灣海岸公路亦面臨海岸侵蝕所衍生之破患問題。海岸線之變遷問題非常複雜，除波流外力影響外，尚與當地海岸地形特徵及漂沙有密切關係，若無完整資料，無法有效預測與分析，且往往一場颱風巨浪之作用即造成海灘嚴重流失，有時在季風浪能量之傳輸，海灘也無法完全回復颱風前之寬度，為有效掌握海岸公路外側海岸線之變遷，了解海灘緩衝寬度之變化，公路主管單位亦可同時利用前述之即時影像監視系統之功能，由監測影像資料分析岸線位置及海灘寬度，如此養護單位可評估公路海側海灘是否有侵蝕後退情形，據此對有崩塌之路段預先規劃適當之防護措施。另外此砂灘寬度侵淤之變化，亦可提供研判或制訂海岸公路安全緩衝帶之依據，依美國加州公路局之研究，認為公路側之海灘至少應有 230 英尺以上之緩衝寬度方能提供海岸公路之安全。臺灣東海岸部份路段易於暴潮大浪時產生越波，且部份路段亦因砂灘消能寬度不足而發生趾部遭受波浪淘蝕情形，故此系統應適宜建置，提供公路安全防護及預警管制參考。

#### 5.5.5 海岸公路潛勢區段之分類與劃分

每段海岸公路之運輸功能、環境區位、地質條件及海氣象因素皆有不同，因此其致災之脆弱性因子與致災之潛勢風險皆有差異，所以無法以單一之防護對策或施工方法運用於所有海岸公路之養護上。目前東部海岸公路致災之主要原因應為地質條件與海象條件兩大因素，目前路線之地質因素之了解與掌握較為完整，但公路外側臨海邊坡之穩定性與崖趾之承載性則因觀測與調查不易，尚無法有效了解，目前觀測技術與設備之進步應可克服地形上之困難，公路主管機關應該分期全面檢測，以分類各公路在地質與地形上之脆弱程度。另外由於自然與人為外力之作用，海岸漂沙失去供輸平衡，造成各處海灘嚴重侵蝕，海岸線明顯後退之情形，此一現象導致高能量之波浪與海流頻頻直接侵襲至公路之邊坡或基腳，終至引起保護工失效，路基流失、道路塌陷之災害。究竟每段海岸尚有多少海灘寬度？各段海岸公路需

要多少之緩衝寬度方能將低波浪對公路之危害？目前海灘侵蝕之速率又是多少？這些數據將直接影響到海岸公路之安全與否？也關連到該段海岸公路究竟是以侵蝕防護工法保護即可或是必須以路線內移改造方式規劃？因此公路主管單位可參考美國之作法，對各區段海岸公路進行海岸變遷分析與不同年度之侵蝕幅度預測，在據以繪製海岸公路侵蝕潛勢分區圖。最後再依地質脆弱性、侵蝕脆弱性、海氣象條件與運輸功能等級等加以評比，劃分出各段海岸公路之災害潛勢與防護等級，提供研擬最佳防護對策之參考依據。

#### 5.5.6 相關海岸相關單位之合作

由於海岸公路海側邊坡或保護工之破壞機制之分析或相關適宜防護設施之設計規劃須有完整之海氣象資料、地形與漂砂資料、現有防護工法資料外，尚須有海岸工程背景之專業人士相互配合方能提供海岸公路得到較佳之安全防護機制。惟目前公路主管機關之進用工程人力大都為土木職系之專業人才，較欠缺海岸及海洋科學方面之人力，亦較缺少相關之監測、調查與研究設備。交通部雖轄有港灣技術研究中心，編制有專精之海岸工程研究人員，惟受限於人力編制，該中心無法全面支援公路單位在此方面之研究。因此公路主管機關應可參考美國各州相關公路單位之作法，可與水利、海岸研究單位或機關合作或進行縱橫間之合作溝通、協調、互享資料，同時委由海岸相關學術研究單位進行相關海氣象與海岸地形變遷之評估與研判，提供最終端之分析成果與防護建議方案，再由公路單位進行相關工程之設計與施工。另外公路單位亦可定期分批選派適當人力至水利單位及學術機構進行專業培訓與技術研習，讓各養護單位能培育編制內之海岸工程專業人力，如此將有助於平時海岸公路之安全檢測與現地災況潛勢之預判，同時亦能在設計時能融入海岸工程之知識，規劃出更適於當地海岸環境之防護工法，如此將有助於海岸公路之安全性之提升。美國各州公路局皆與 FEMA 及美國工兵團合作，除採納專業諮詢並選配人員至該單位學習，成效良好，故此一方法應該亦為提升臺灣海岸公路安全之一軟性策略。

## 第六章 結論與建議

本計畫之目標主要在於探討並發展符合臺灣各區地理環境需求的消能式港灣結構，依臺灣地區之環境特性與功能屬性分類，港灣結構物的功能大致可分為長波抗浪型區域(主要功能以港灣結構保護為主)、環境保護型區域(兼顧港灣結構及環境之護育功能)及功能目的使用型或臨時性設施型(以環境保護功能或特殊使用目的功能為主)等三大類型，針對前述三種型態，分別進行探討個別之消能式結構型式以替代傳統保護港灣、海岸之重力式海事結構物，以達符合海岸空間環境需求且具保全功能之目的。而海岸公路邊坡保護工法的研究則分別針對臺灣東部及西部海岸公路的特性進行破壞機制與防治方法的研究。

### 6.1 結論

#### 1. 長波抗浪型

在第一年的研究裡，藉由針對內建斜坡水力消能式結構物的基本型態考慮前方通水面積的多寡所演變的三種配置方案的水工模型試驗及數值模擬，可以發現三種配置都能夠得到很好的消波效果，所有測試條件所產生的反射率多在 0.25 以下，顯示利用斜坡越波的方式降低堤面的反射率，以及削減溯上水流的溯下造波可能性是有效的。不過從試驗中也發現消波室的排水問題明顯影響到其消波功能，未來必須設法解決溯上越波後的排水情形，以免造成消波室被的水體堆積。增加內建斜坡的消能功能（例如增加粗糙度）以及透水功能（例如增加透水性），以及增加側向排水或後側排水均可明顯改善消波室內水體堆積的問題，並提高其消波功能。

在確認促使波浪溯升越波可以削減波浪因溯降造波可能提高堤前的反射率的機制後，本第二年度的研究裡，在水工模型試驗方面，主要考

慮內建斜坡的坡度，以及後方中空消波室的縱深對波浪越波以及越波後的振盪與排水等的影響，結果顯示斜坡越緩，消波室越深都可以降低堤前的波動。然而我們也注意到在實際港灣內的波動場裡，可能存在的是很短週期的波動及很長週期的蕩漾，如何有效地調整斜坡的坡度、長度及出水高度以促使主要的成分波在斜坡上發生越波，將會是一個很重要的研究課題。

## 2. 功能目的使用型或臨時性設施型

由裝置剛性翼板之繫留浮體試驗，剛性翼板繫留浮體翼板角度在 30 度時水平振幅之比較，其結果與翼板角度 0 度時的結果相似，其自然振頻同樣有隨翼板長度增加而往低頻的趨勢。可發現，在翼板長度 15cm 與 25cm 時之自然振頻分別約為 0.8 與 0.5，與翼板角度 0 度的結果相較下，在 30 度時浮體的自然振頻更往低頻靠近。翼板角度為 30 度時的垂直振幅，則與角度 0 度時結果相似，但翼板角度 30 度的自然振頻較 0 度的浮體更往長週期。剛性翼板繫留浮體角度為 30 度時之旋轉振幅，其旋轉振幅與 0 度時的特性相似，但其旋轉振幅較 0 度時來的小，其自然振頻也更往低頻靠近。

剛性翼板繫留浮體在翼板角度為 30 度時的反射率，其反射率與入射波週期及翼板長度間之關係大致與翼板角度 0 度時的結果相似，即翼板增長將提升其反射率，同時與垂直翼板(圖 2-11)的反射率比較結果，其在高頻的地方，無因次週期約在 0.75 至 1.75 之間，其翼板傾斜 30 度時有較佳的反射率。

## 3. 環境保護型消能結構物

本文提出在不透水直立堤前方銜接梯形透水潛堤，並於其上方設置四分之一圓弧形孔隙板，前方距離堤址一段處設置另一道梯形透水潛堤，組合成「環境保護型」消能結構物。本年度經由水工模型試驗與數值計算結果，初步得到下列幾點結論：

(1) 當波浪正向入射時，採用分開式雙潛堤配置，表示潛堤間遊水室空間變大，波浪可以利用此空間及潛堤上方水域來作消能，水工模型試驗結果顯示在長週期波下都會有最小反射率值，而且其值會隨著潛堤寬度、高度之增加而下降。在短週期波下，由於波浪能量大多集中於水面附近，較無法感應到雙潛堤存在，波浪大多從潛堤上方通過，僅有部份進入透水潛堤內，因此消能效果有限，所以反射率會有較大值。

另外，當波浪正向入射時，數值計算結果顯示發生最小反射率值之位置有漸漸往長週期波( $kh$  較小)處移動，當堤高、堤寬增加，經由換算第一道堤前趾至岸壁距離( $D$ )與入射波長之比大約在  $D/L=0.26$  及  $0.85$  附近處；而且其趨勢與水工模型試驗結果相當一致。

(2) 水工模型試驗結果顯示採用分開式雙潛堤配置時，由於有第一道透水潛堤阻擋，波浪通過後作用到直立岸壁波壓力會明顯降低，都比 Sainflou 重複波壓力小，其最大波壓力值發生在水面附近 ( $z/h=0.025$ )；而且壓力會隨著水深漸增壓力漸減；但是長週期  $T=1.7\text{sec}$  採用分開式配置，直立岸壁波壓力反而變大，即使堤高堤厚增加，無因次最大波壓力值會從  $P/\rho gH=0.693$ (連結式)增加至  $P/\rho gH=0.833$ (分開式)。

(3) 水工模型試驗結果顯示：四分之一圓弧板上由於孔洞作用，波浪溯上時會有部分波浪落入孔洞中，因此大大降低波浪溯升高，水面上波壓計完全量測不到波浪作用力，因此所測得壓力為零，而且以位於水面下  $-7\text{cm}(z/h=-0.14)$  可以量測到最大波壓力，但是其壓力值與連結式壓力值作比較後發現偏小，而最後一組長週期波試驗，卻發現大部份最大無因次波壓力值會變大。

(4) 本研究運用 FLOW-3D 套裝軟體模擬波浪作用於環境保護型結構物之反射率與流速分佈進行研究。利用自由水面計算結果，擷取相對於水工模型試驗虛擬之波高計量測位置的水面波形資料，分別利用 Goda and Suzuki (1976) 二點法或 Healy(1953) 公式求得反射率，與數值模式計算結果與水工模型試驗量測值大致接近。另外流速分佈在本研究計算例中向海第一道透水潛堤相對沒水深  $d_c/h=0.4$ 、相對堤寬  $R_c/h=0.4$  及二潛堤相對間距  $S/h=1.0$  時，利用 FLOW-3D 計算流場分佈可以清楚顯示第一道潛堤上方流速變大，而且二潛堤間遊水室流速有降低趨勢，且因四分之一圓弧形孔隙板之設置，亦可有效降低其與直立岸壁間之流速大小。

(5) 波浪正向或斜向入射環境保護型防波堤，不論在何種配置下，其反射率皆會產生兩個局部最小值及一個局部最大值，其中又以正向入射時( $\theta=0^\circ$ )會有較大反射率，但會隨著波浪斜向入射的角度變大( $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ )，反射率尖峰值其分佈會漸漸往較大的  $kh$  值側移動。而在  $kh=4.5$ (深水波)時，波浪能量大多被反射，無論入射角度為何，各配置下反射率皆會趨於一定值。

#### 4. 海岸公路邊坡保護工法

台灣東部地區兩條濱海公路位於板塊碰撞之交界區域，山壁陡峭及地質不穩定，加上東部海岸濱臨太平洋為颱風侵襲頻繁之處，在暴潮巨浪及長浪拍打作用下，公路常因下邊坡之崩塌、掏空而造成道路中斷情形，再者波浪長期作用之海岸侵蝕亦已威脅公路路基之安全，部份路段亦因長浪越波沖擊危及行車安全。

## 6.2 建議

### 1. 長波抗浪型

未來在水工模型試驗的部分將在此一累積的經驗下，研究設計新的型式，並就以下事項進行檢討改進並進行相關測試。

- 越波排水的方式
- 斜坡的透水性
- 斜坡的坡度
- 堤內拋石的孔隙率與透水性
- 暴潮水位與不同波高

在數值模擬方面經由兩年的測試，目前已經能夠初步掌握及確認 FLOW-3D 在波動模擬方面的適切性，本年度也應用水工模型試驗的布置進行數值模擬，結果顯示週期越長其試驗與模擬的結果趨勢越接近。此外，本團隊也嘗試著進行三維的造波平面水槽數值模擬。在進行相關的驗證後，未來的研究將以水工模型試驗探討其他可能影響消波能力的參數，並用 FLOW-3D 繼續進行更長週期的二維及三維的數值模擬，以彌補水工模型試驗在造波週期方面的限制。

### 2. 功能目的使用型或臨時性設施型

本年度考量固定式浮式結構物的避浪功能，新增壓氣型浮式結構物的研究，並進行初步的理論分析。然而，由於錨碇式壓氣型浮式結構物在消能的效果並非很理想，後續將再構思其他如樁柱式壓氣型浮式結構物等消能特性。

### 3. 環境保護型消能結構物

(1) 在後續研究中，將再進一步檢討其工程應用上可能遭遇的問題並作適當地改良。

(2)用 FLOW-3D 進行模擬中，孔隙介質內的流體現象仍需要進一步探討。

#### 4. 海岸公路邊坡保護工法

此些不同破壞型態與機制皆有需要加以探討研究，由於東部海岸長達數百公里，加上沿線海岸公路綿長，本年度主要針對台 11 線公路邊坡的災害進行調查，後續將持續收集並分類整理國內各海岸公路的災害特性，藉以針對幾處曾經發生的破壞案例或有安全威脅之路段進行破壞機制檢討，並研擬適合國內海岸公路特性的相關作業準則。後續研究亦將加強蒐集海外海岸公路之資料、監測方式與保護工法。

### 6.3 成果效益與後續應用情形

1. 本計劃主要針對臺灣地區特性與港灣構造物之使用功能與目的研發出具體可行之可消滅長波能量的實用型結構設施、具環境保育與結構安全的港灣結構設施型式及高機動性、符合環境保護的結構設施。
2. 可針對臺灣各區域之港灣特性決定結構型式，活絡臺灣港灣環境及水質，並提供各港務局及水利署等單位作為改善現有港灣設施及海岸基礎建設之參據。
3. 計畫屬於創新前瞻、技術開發之研究，不僅可促成學界合作研究，其研究成果亦可作為各港務局及公路總局在海岸道路保護及港灣構造物消能設施之依據，以改善海洋環境品質，整體研究過程與成果不僅可培育相關人才，亦可增進公共服務設施之品質與效能，同時在經濟效益上，亦可提供功能性較高之港灣結構物，節省工程建設及維護費用。

## 参 考 文 献

1. Araki, T. and T. Chujo, 1979. "Development of the IHI Floating Breakwater," Coastal Engineering in Japan, Vol.22, PP.75-89
2. Briggs, M.J., 2001. Analytical and Numerical Models of the RIBS XM99 Ocean-Scale Prototype, Report of US Army Corp of Engineers, ERDC/CHL TR-01-19.
3. Coastal Engineering Manual, 2002. U.S. Army Corps of Engineers, EM-1110-2-1100.
4. Cuomoa, G., Shimosakob, K.I. and Takahashic, S., 2009. "Wave-in-deck loads on coastal bridges and the role of air," Coastal Engineering, Vol.56, pp.793-809.
5. Dalrymple, R.A., Losada, M.A. and Martin, P.A., 1991. "Reflection and Transmission from Porous Structures under Oblique Wave Attack," Journal of Fluid Mechanics, 224, pp.625-644.
6. Elchahal, G., Ra.c Younes and P. Lafon, 2008. "The Effects of Reflection Coefficient of the Harbour Sidewall on the Performance of Floating Breakwaters," Ocean Engineering, Vol.35, pp.1102-1112.
7. Gesraha, M.R., 2006. "Analysis of  $\Pi$  shaped floating breakwater in oblique waves : I. Impervious rigid wave boards", Journal of Applied Ocean Research, Vol.28, pp.327-338.
8. Gu, H.B., Jiang, X.L. and Li, Y.B., 2008, "Research on Hydraulic Performances of Quarter Circular Breakwater," Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, pp.21-25.
9. Hassan, R.M., 2002. "Coastal protection and development of Alexandria," Coastal Environment : Environmental Problems in Coastal Regions IV.
- 10.Hiraishi, T., 2002. "Long Period wave absorbing by artificial beach,"

- Proceeding of 6th Littoral 2002, EUROCOAST, pp.601-606.
- 11.Hiraishi, T., 2006. "Development of long period wave absorber," Proceeding of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.3, pp.621-625.
  - 12.Hirt, C.W. and B.D. Nichols, 1981. "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," J. Computational Physics, Vol.39, pp.201-225.
  - 13.Jia, D.H., 1999. "Study on the interaction of water waves with semi-circular breakwater," China Ocean Engineering, Vol.13, No.1, pp.73-80.
  - 14.Kee, S.T., Lee, S.H. and Ko, Jin-Seok, 2006 "Submerged Porous Plate Wave Absorber," Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.626-631.
  - 15.Kim, J.-H. and H.-Y. Jeong, 2005. "A study on the material properties and fatigue life of natural rubber with different carbon blacks," International Journal of Fatigue, Vol.27, pp.263-272.
  - 16.Kim, W.D., H.J. Lee, J.Y. Kim, and S.-K. Kohb, 2004. "Fatigue life estimation of an engine rubber mount," International Journal of Fatigue, Vol.26, pp.553-560.
  - 17.Kozhushko G.G. & V.A. Koponv 1995. "Fatigue strength function in shear loading of fabric conveyor belt," International Journal of Fatigue, Vol.17, No.8, pp.539-544.
  - 18.Lee, M.M. and A.T. Chwang, 2000. "Scattering and radiation of water waves by permeable barriers," Physics of Fluids, Vol.12, pp.54-65.
  - 19.Legorju-jago, K. and C. Bathias, 2004. "Fatigue initiation and propagation in natural and synthetic rubbers," International Journal of Fatigue, Vol.24, pp.85-92.
  - 20.Liu, Y., Y.C. Li, B. Teng, and B.L. Ma, 2007. "Reflection of regular and irregular waves from a partially perforated caisson breakwater with a

- rock-filled core,” *Acta Oceanologica Sinica*, Vol.26, No.3, pp.129-141.
- 21.Liu, Y., Y.C. Li, B. Teng, and J.J Jiang, 2006. “Experimental and Theoretical Investigation of Wave Forces on A Partially-Perforated Caisson Breakwater with A Rock-Filled Core,” *China Ocean Engineering*, Vol.20, No.2, pp.179-198.
- 22.Madsen, P.A., 1983. “Wave Reflection from a Vertical Permeable Wave Absorber,” *Coastal Engineering*, Vol.7, pp.381-396.
- 23.Mars W.V. & A. Fatemi, 2004. “A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber,” *International Journal of Fatigue*, Vol.24, 949-961.
- 24.Mars W.V. & A. Fatemi, 2006. “Multiaxial stress effects on fatigue behavior of filled natural rubber,” *International Journal of Fatigue*, Vol.28, 521-529.
- 25.Murali, K. and J. S. Mani, 1997. “Performance of Cage Floating Breakwater,” *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.123, No.4, pp.172-179.
- 26.Ohkusu, M., M. Kashiwagi, K. Ikegami, M. Ozaki, Y. Isozaki, 1991. “Study of Performance of Floating Breakwater Utilizing the Relative Motion of Inside Water,” *日本造船協會論文集*, 169 號, pp.215- 222.
- 27.Overton, M.F. and Fisher, J.S., 2005. *NC Coastal Highway Vulnerability, Final Reprt, Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, North Carolina State University.*
- 28.Saintier, N., G. Cailletaud and R. Piques, 2006a. “Multiaxial fatigue life prediction for a natural rubber,” *International Journal of Fatigue*, Vol.28, pp.530–539
- 29.Saintier, N., G. Cailletaud, and R. Piques, 2006b, “Crack initiation and propagation under multiaxial fatigue in a natural rubber,” *International Journal of Fatigue*, Vol.28, pp.61-72.
- 30.Sollitt, C.K. and Cross, R.H., 1972. “Wave Transmission through

- Permeable Breakwaters,” Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, Vancouver, BC, pp.1827-1846.
31. Sollitt, C.K. and Cross, R.H., 1972. “Wave Transmission through Permeable Breakwaters,” Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, Vancouver, BC, pp.1827-1846.
32. Sullisz, W., 1985. “Wave Reflection and Transmission at Permeable Breakwaters of Arbitrary Cross Section,” Coastal Engineering, Vol.9, pp.317-386.
33. Tanimoto, K., Endoh, H. and Takahashi, S., 1992. “Field experiments on a dual cylindrical caisson breakwater,” Proceedings of the 23th International Conference on Coastal Engineering, ICCE, Venice, Vol. II, pp.1625-1638.
34. Weng, W.K. and C.R. Chou, 2007. “Analysis of Responses of Floating Dual Pontoon Structure,” China Ocean Engineering, Vol.21, No. 1, pp.91-104.
35. Wu, J.H, Wan, Z. P. and Fang, Y., 1998. “Wave reflection by a vertical wall with a horizontal submerged porous plate,” Ocean Engineering, Vol.25, pp.767-779.
36. Xie, S.L., 1999. “Wave forces on submerged semi-circular breakwater and similar structures,” China Ocean Engineering, Vol.13, No.1, pp.63-72.
37. Yu, X., 1995. “Diffraction of Water Waves by Porous Breakwaters,” Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol.121, pp.275-282.
38. 邓超文，2003，“廣東西部沿海高速公路臺山段某邊坡滑塌機理及整治”，廣東公路交通，第4期。
39. 吳永照、許瑞昌，陳俊吉，1999，“斜向入射波與透水潛堤的交互作用”，第二十一屆海洋工程研討會論文集，259頁~266頁。

40. 李兆芳、劉正琪，1995，“波浪通過透水潛堤之新理論解析”，第 17 屆海洋工程研討會論文集，593 頁~605 頁。
41. 李德河，2000，邊坡保護設施成效評估與改善方法之研究，國科會專題研究計畫成果報告。
42. 林東廷，1996，“多層透水式防波堤之消波及波力探討”，港灣技術，第十一卷第 1 期，1 頁~37 頁。
43. 林東廷、涂盛文，1991，“孔隙牆防波堤所受波力之研究”，第 13 屆海洋工程研討會論文集，126 頁~140 頁。
44. 林東廷，2001a，“淺談半圓形防波堤之發展”，海洋技術期刊，第 11 卷，第 2 期，第 31~37 頁。
45. 林東廷，2001b，“半圓形防波堤之設計波力介紹」，海洋技術期刊，第 11 卷，第 3 期，第 43~47 頁。
46. 林英傑，2004，“規則波作用下直立式防波堤動態行為試驗研究”，碩士論文，國立台灣海洋大學河海工程學系，基隆，台灣。
47. 涂盛文、林東廷，1990，“孔隙板對微小振幅波之影響”，港灣技術，第五期，95 頁~124 頁。
48. 涂盛文、劉正琪，2001，“系列透水潛堤之消波效應”，第 12 屆水利工程研討會論文集，H-41 頁~H-48 頁。
49. 柯文貴、李忠潘、陳陽益，1997，“透水潛堤內外波流場之理論解析”，第八屆全國海岸工程學術討論會暨 1997 年海峽兩岸港口集海岸開發研討會論文集（下），715 頁-722 頁。
50. 孫維芳，2002，海岸山脈北段公路沿線邊坡崩塌特性研究，國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文。
51. 徐如娟、黃清和、陳建志、曾森煌、林秀美、林東廷、蔡立宏，2006，“生態型海岸保護工法研究（1/4）”，交通部運輸研究所。

- 52.許泰文，2003，“近岸水動力學”，科技書局。
- 53.郭一羽，2003，海洋工程學，文山書局。
- 54.郭一羽、李麗雪，2005，海洋景觀與生態設計，田園城市文化事業有限公司。
- 55.陳昌生、林東廷，2003，“淺談日本新形式防波堤之發展”，港灣報導，第64期，15頁-27頁。
- 56.郭金棟，海岸工程，第10-8~10-10頁。
- 57.郭金棟、黃貴麟，1990，“半圓型開孔堤反射透射特性之試驗研究”，第12屆海洋工程研討會論文集，第502~522頁。
- 58.陳崇華，2004，“台十一線海岸公路邊坡崩塌災害分析”，國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文。
- 59.黃清和、蔡立宏、陳昌生、林東廷，2006，“淺談生態型消波塊之發展類型”，港灣技術，第75期，33頁~38頁。
- 60.楊昊，2008，“遼寧濱海公路潮差侵蝕路段路基頂面標高的推算方法”，北方交通，第4期。
- 61.經濟部，2009，“南濱及化仁海岸生態情勢調查及新工法研發之研究（2/2）”，經濟部水利署第九河川局，國立中山大學承辦。
- 62.蔡立宏、何良勝、陳明宗，2005，“海岸保護及親水性結構物最適化配置研究（4/4）”，交通部運輸研究所。
- 63.謝世楞，2000，“半圓型防波堤的設計和研究進展”，中國工程科學，第2卷，第11期，第35-39頁。
- 64.謝世楞、李炎保、吳永強、谷漢斌，2006，“圓弧面防波堤波浪力初步研究”，中國大陸海洋工程，第24卷，第1期，第14-18頁。
- 65.謝志敏、黃榮鑑、楊文昌，2008，“波浪與透水結構物互制之研究”，

- 第 30 屆海洋工程研討會論文集，第 373–378 頁。
66. 簡仲璟，2010，“港灣生態景觀規劃設計應用研究（1/4）”，交通部運輸研究所。
67. 蘇青和、歐善惠、章梓雄，1992，“多孔岸壁港池之波能消散現象”，中國港灣技術期刊，第七期，126 頁~140 頁。

# 附錄一 期中報告審查意見處理情形表

## 交通部運輸研究所合作研究計畫

### ■期中□期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-99-H2DB004

計畫名稱：消能式結構物特性之研究(2/4)

執行單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<b>一、郭一羽委員：</b>		
1. 說明各種新式消波結構的適用性。(基於實驗和理論結果)。	1. 感謝委員指教，環境保護型為了與數值計算作比較，採用波浪未碎波下規則波試驗，目前適用條件尚未訂定。工程使用上仍以混凝土為主，可以在陸地施工場鑄，不會有銹蝕問題。 長波抗浪型的碼頭構造物將在期末報告時設法定位其適用範圍。	1. 依處理情形辦理。
2. 環境型的結構條件，往後需考慮生態性條件。	2. 感謝委員指教，環境保護型除了工程上消波減壓作用外，若有後續研究，應結合漁類及生態學者加強此方面研究，針對水流、波高大小對魚類、藻類生存條件作一探討。	2. 依處理情形辦理。
3. 海岸公路防災建議採用二段式保護，離岸堤可採用樁式基礎結構。	3. 感謝委員指教，並提供寶貴意見。海岸公路防災將朝此方向努力規劃。環境保護型後續研究可採用下部為群樁式，上部為消	3. 依處理情形辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
	波式結構物組合成腳柱式。附加釣魚平台是目前趨勢，但須注意是否有上揚力問題。	
<p><b>二、梁乃匡委員：</b></p> <p>1. 對海岸公路邊坡保護，在東部海底坡度特陡處，建議考慮本人在臺灣海洋工程學刊發表的「一種人工海中森林消波研究」所建議的工法，在材料上作一些加強，也許可以解決問題。</p> <p>2. 壓氣型浮式結構物的目的在於以打空氣使浮式結構物在使用時浮出，不使用時卸氣。將浮式結構物沉入水中，如此將可使浮式結構物尺寸加大，消波效果才能達到目標。</p> <p>3. 四分之一圓弧孔隙板其實際工程上材料及孔隙率大小為何？</p>	<p>1. 感謝委員寶貴意見，將拜讀文章，並加入工法規劃之參考。</p> <p>2. 將在後續研究中檢討浮式結構物的裝卸方式，委員意見將列入參考。但由於長週期颱風波浪作用時，海底底床都可能受到淺水波波力及水流的作用，僅是排氣沉底而不考慮其固定問題，可能仍會有安全顧慮。</p> <p>3. 感謝委員指教，目前日本半圓形防波堤、曲面堤採用混凝土結構，有挖圓洞、縱條開孔等，本文採圓形孔洞直徑 1.5cm，孔隙率為<math>\epsilon_p=0.367</math>；若孔洞太小，長時間後易附著藻類塞住，孔洞大，則消波及生態性較差。</p>	<p>1. 依處理情形辦理。</p> <p>2. 依處理情形辦理。</p> <p>3. 依處理情形辦理。</p>
<p><b>三、韓文育委員：</b></p>		

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
1. 歷次各委員審查意見及回應表，宜附列於報告書中。	1. 將於期末報告中列入，包含第一年度部分。	1. 依處理情形辦理。
2. 長波抗浪型構造研究，有關數值及水工試驗之反射率比較表(表 2.5-2)，部份方案 CASE1 數值結果明顯較實驗數據高，但報告書歸納稱數值『具高採信度』，合理性如何？	2. 數值模擬過程中由於做許多假設與簡化，尤其是能量消散部分，例如底床或孔隙間的摩擦損失，或碎波的能量損失，因此其數值結果可能較實驗值為高，後續將再詳細討論。	2. 依處理情形辦理。
3. 功能目的使用型或臨時性設施研究中，係以「繫留浮體」及「氣壓型浮式結構物」二種構造型式進行探討，建議先述明該二種構造與過去之研究或實例不同之處或構想優點何在，並於整體研究結束後將成果或實務可行性具體呈現。又本章對美軍開發之「快速安裝防波堤系統(RIBS)」簡介中，建議稍微敘述「快速安裝」之方法；另 pp.3-3 中未見圖 3.14 及 3.15 請補附或修正。	3. 為了能夠找出最佳的設計構想，本計畫參考過去委員的建議，進行多方向的構思，並設法進行數值模擬或水工模型試驗，相關的比較必須要等試驗的結果出爐後才能作具體的結論及可行性分析。美國陸軍工兵團所開發的 RIBS 的安裝方式將於期末報告中補充說明。	3. 依處理情形辦理。
4. 浮式構造物主要探討波浪反射、透過及浮體運動位移，如需繫留，似乎宜以「易設易拆」為原則，本研究將繫留索與水平夾角設為 55.9°。其意義何在？(pp.3-20)	4. 目前試驗中浮式結構物的繫留主要是模擬實務上的錨碇系統，但進一步假設其固定不流錨。繫留索的水平夾角是試驗中實際裝設後的夾角，並無特殊意義。	4. 依處理情形辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
5. 環境保護型消能結構物之研究，其數值計算理論推導宜於報告書中列出，又研究成果圖中建議將弧形板清楚繪出；pp.4-24 波壓圖建議將潛堤配置一併繪出(如配置有圓弧板亦然)。	5. 感謝委員指教，實線部份為去年(1/4)採用多領域邊界元素法計算結果與今年(2/4)試驗作一比較。期末報告會加強小圖以顏色區分。P4-24 重複波壓力比較圖會加小圖以方便比較並判讀兩者之差異。P4-26 圓弧曲面板無因次最大波壓以圖區分連結式與分開式。	5. 依處理情形辦理。
<b>四、劉景毅委員：</b>		
1. 花蓮港內的長波共振問題，一直無法有效解決，本研究提出內建斜坡的消波結構物方案，再應用水工模型試驗與數值模擬來測試其效果，若能有具體成果，對於港灣實務問題應有助益。	1. 利用港灣構造物解決港灣內部長週期振動的問題是本計畫的目標之一，在規劃各種可能配置方案時，本研究團隊也一直以花蓮港的問題為依據。謝謝委員鼓勵。	1. 依處理情形辦理。
2. 本研究嘗試以套裝軟體Flow-3D模擬消能結構物的波浪反射問題。請說明模式開放邊界的入射波與反射波如何處理？數值模式內如何估算結構物的阻力與消能狀況？是否在模式內部依紊流模式計算而得？有哪些輸入參數？2-52 頁的控制方程式中，並沒有水位項，模式中模式如何估算波浪振幅(圖2.5-13)？由自由液面	2. FLOW-3D 在波動問題上的應用技巧將在期末報告中說明。	2. 依處理情形辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
估算而得？		
3. 水工模型試驗在處理長波問題，有其極限性，因此應用數值模式來輔助研究，應是相需相成的作法。而雖然Flow-3D已相當廣泛應用於流體相關問題的模擬，但應用在海岸波浪模擬相對有限，可以本研究水工模型試驗之模擬案例，進行Flow-3D模式應用於本研究案例之驗證，並詳細述明輸入之波浪條件、參數以及與模擬成果之比較等。	3. 為了確認FLOW-3D能正確地(或適當地)應用在海岸波動問題，本研究團隊秉持著嚴謹的態度測試各種可能遭遇的問題，以及應該符合的物理現象。並將利用水工模型試驗的結果來進行模擬與驗證。	3. 依處理情形辦理。
4. 浮體會隨波著流，浮式結構物的設計是靠怎樣的機制來消能？或者是藉由反射波能來達到防浪之目標？繫留索的作用是什麼？是否波能藉其消耗？	4. 浮式結構物的設計理論是藉由構成浮式結構的直立部分的彈性材料，例如帆布。藉由該材料的彈性變形來吸收波動能量以達到消能效果。也因為如此，本浮式結構物並不針對抵抗颱風波浪而設計，但其至少需要抵擋季風波浪與鋒面造成的異常波動。繫留索除了固定結構物限制其在某一小範圍內運動外，其與浮式結構物的互制行為也具有消能的效果。	4. 依處理情形辦理。
5. 浮式結構物試驗是否需符合相似律，浮體寬0.95m，相當靠近側壁，是否有邊界效應？	5. 目前的試驗屬於基礎功能測試，未來在確認適當尺寸後，將可考慮在大型斷面水槽中，或是平面水	5. 依處理情形辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
如何決定試驗浮體之 體積？	槽裡進行測試。	
6. 圖 3.4-1 之試驗結果顯示，長週期波的反射率較小，此是否表示有較多波浪穿透消能結構物，此情況顯示之浮式結構物的防浪效果，可否由浮式結構物前後的波高資料來驗證？影響浮式結構物的擋浪或消能效果的主要因素有哪些？波長與浮式結構物的相對長度重要嗎？	6. 浮式結構物對於抵擋長週期波動向來不太專擅，反射率的降低應是意謂著透過波的增加。後續將在進一步驗證。浮式結構物所使用柔性材料的勁度、水下的長度、繫留的方式以及結構物的整體形狀都可能造成所受波浪能量的消耗或者是重新分配，而得到區域性的較高穩靜度。波長與單一塊體的浮式結構物的相對長度有明顯的影響，但對於整合後的浮式防波堤的影響則尚在評估中。	6. 依處理情形辦理。
7. 請說明 3.5 節之壓氣型浮式結構物如何消減波能？	7. 壓氣型浮式結構物的設計構想是藉由浮體內的空氣壓縮產生附加質量力，以消耗波能。其效率目前正在評估中。	7. 依處理情形辦理。
8. 環境保護消能結構物的試驗中，設置有梯型塊石潛堤。如何決定使用 $d=1.5-3\text{cm}$ 的礫石來代表塊石？相似性主要考量重量(F)或孔隙率(R)因素？重量與穩定性有關，孔隙率與反射率有關。這樣大小的礫石相當於現場多重的塊石？試驗進行時，這些塊石會不會移	8. 感謝委員指教，並提供寶貴意見，本文試驗礫石直徑固定為 $1.5\text{cm}\sim 3.0\text{cm}$ ，孔隙率 $\varepsilon_r=0.46$ ，利用透水網袋裝成小袋，再組合成透水結構物，試驗進行中並未發生移動或滾落情形，斷面不會變形，屬於定床試驗；可利用相似率換算成實體大小與重量。	8. 依處理情形辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
動？斷面是否會變形？是否有穩定性問題？		
9. 本研究希望藉由試驗找到較佳的环境保護消能結構物配置，考慮的因素有潛堤寬與沒水深、潛堤間距，並使用不同的波浪條件進行測試，在實務上，應再加入考慮(暴潮)水位變化的影響。	9. 感謝委員指教，並提供寶貴意見，後續計畫中會考慮辦理。	9. 依處理情形辦理。
10. 圖 4.4-1~4.4-3 應說明不同符號代表的意義，圖中顯示長週期波浪的反射率較低，而對短週期波的消波效果相對有限。	10. 感謝委員指教，符號□▽◇○在文中章節 4.4 水工模型試驗會加強說明。	10. 依處理情形辦理。
11. 表 5.3-1 與表 5.3-2 所示之蘇澳與發示性波高小，Page5-10 有關海流的描述與圖 5.2.2 有些不一致，請修正。	11. 感謝委員指正，將依正確資料修正。	11. 依處理情形辦理。
12. 在台 11 曾經發生的海岸崩塌事件，大都因海岸侵蝕，致使邊坡發生塌陷而成災。保護方式以加拋消波塊為主，這樣的案例在國外是否有不一樣的做法可供參考，例如公路內移。另外，期末報告亦應加強蒐集台灣西岸的海岸公路破壞案例，據以整體研擬海岸公路保護工法的相關作業準	12. 感謝委員指導，將持續蒐集國外相關改善方案，西岸的海岸公路破壞案例亦遵照意見，補入期末報告中。	12. 依處理情形辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
則。		
<b>五、何良勝委員：</b>		
1. 本研究為分年期計畫，建議於期末報告中增列前第一年之工作成果；同時，本年度之試驗結果可與以前之數值分析結果，作一比較。	1. 遵照辦理。	1. 依處理情形辦理。
2. 建議於相關圖示結果中增列試驗條件，例如圖 2.4.5、圖 2.4.6 等。	2. 遵照辦理。	2. 依處理情形辦理。
3. 本研究中三種不同功能之結構物型態試驗中，有關反射率求法為何皆有所不同？	3. 感謝委員指教，針對本文反射率測定是利用 Goda and Suzuki (1976)兩點法計算反射率。	3. 依處理情形辦理。
4. 研究中有關「長波抗浪」型結構物試驗中，建議後續試驗中分析週期的變化情況。	4. 遵照辦理。	4. 依處理情形辦理。

## 附錄二 期末報告審查意見處理情形表

### 交通部運輸研究所合作研究計畫

#### □期中 ■期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-99-H2DB004

計畫名稱：消能式結構物特性之研究(2/4)

執行單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>一、郭一羽委員：</p> <p>1. 本研究提出多種新構想具創新性。</p> <p>2. 在實際應用上需後續深入研究的地方，希望能有所建議。</p> <p>3. 嘗試尋找現地試驗的機會。</p> <p>4. 建議往後與景觀和生態方面的專家多討論，以增加其功能。</p>	<p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員寶貴意見，本計畫各子題皆有其訴求及功能，後續深入研究建議即為各子題的後續工作項目建議，並期望運研所持續推動本計畫。</p> <p>3. 感謝委員寶貴意見，由於本計畫經費有限，將建議運研所納入後續計畫研究。</p> <p>4. 感謝委員寶貴意見，後續研究將納入參考。</p>	<p>1. 符合。</p> <p>2. 依處理情形辦理。</p> <p>3. 下年度經費未編列現地試驗費用。</p> <p>4. 依處理情形辦理。</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>二、梁乃匡委員：</p> <p>1. 期中報告審查意見處理情形(2 頁)本人意見 2 「……僅是排氣沉底而不考慮其固定問題，可能仍能會有安全顧慮。」，因本人建議的出發點，在於功能目的型防波堤為顧及實際可行性，必須考慮施工安裝的方便性，因功能目的型防波堤多為短期使用，以目前臺灣的現況，大概只能用在定點不定期非颱風期的裝卸貨物之用，例如東沙港、西沙港等，但這些地點水深應該不小，如果結構物體積夠大夠重，也就沒有固定問題。</p> <p>2. 東部沿海公路邊坡破壞的問題主要在於颱風波浪，尤其是湧浪，因為湧浪的週期特別大，因為波浪的功率是平均波浪能量乘群速度，東岸海岸坡度很陡，海灘寬度窄，使波浪直接襲擊到公路，因此海灘的海底水深圖非常關鍵，另颱風湧浪已有預報方法，可採用作為預警機制之一。</p>	<p>1. 感謝委員寶貴建議，有關功能目的使用型或臨時性設施可分為兩個方向，其一為固定設施，但使用頻率較低，如離島運補碼頭；其二為臨時佈放設施，如海上救難或海洋污染防堵等設施。計畫主要以第二類為主，委員建議將列入後續參考。</p> <p>2. 感謝委員建議，將於後續防護準則中加入方案中。</p>	<p>1. 依處理情形辦理。</p> <p>2. 依處理情形辦理。</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>三、韓文育委員：</p> <p>1. 本研究為四年期計畫之第二年計畫，對本階段之工作成果，敬表肯定。</p> <p>2. 本計畫之所有研究(不論數值或水工)，其最終目的，宜向「研發」合理應用之消能結構，以為實際工程之應用，故本人期待第四年計畫之期末報告能提出具體之消能結構物之研發結果及研具臺灣東部海岸公路之防護作業準則與保護工法，方符合本計畫目標。</p> <p>3. 本計畫之所有研究(不論數值或水工)，其最終目的，宜向「研發」合理應用之消能結構，以為實際工程之應用，故本人期待第四年計畫之期末報告能提出具體之消能結構物之研發結果及研具臺灣東部海岸公路之防護作業準則與保護工法，方符合本計畫目標。</p> <p>4. 另本人於前期報告審查時所提意見，雖屬參考性質，但如回應「將於期末報告改進」而實際未改進，似有未宜。</p>	<p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員指正，有關各子題後續皆會朝實用目標進行研發，海岸公路之保護準則及工法將依建議於最後一年提出具體之方案。</p> <p>3. 感謝委員寶貴建議，後續研究方向的確將朝向斜坡板的表面粗糙度及透水性探討。目前試驗的結果並未有溯上觸及頂板的情況，後續於數值模擬更大的波浪條件，或許會出現此情況，將考量對結構物強度進行探討。</p> <p>4. 感謝委員指教，將於定稿中修正。</p>	<p>1. 符合。</p> <p>2. 依處理情形辦理。</p> <p>3. 依處理情形辦理。</p> <p>4. 依處理情形辦理。</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>四、劉景毅委員：</p> <p>1. 報告內容涵蓋四個獨立主題且為四個年度延續計畫內容的撰寫宜有一致性，建議先描述第一年之成果摘要，與本年度之鏈結，以及最後有一個小結，以利報告之研讀。</p> <p>2. 長波抗浪型之工法，成果顯示消波效果佳，在實際應用上應考慮是否會有淤塞問題，如何維護管理。</p> <p>3. 環境保護型消能研究中，以 Flow-3D 來模擬分析，應釐清應用此模式於本研究中之定位，因以數值模式模擬分析結構物附近的波流場與消能存在許多未知，而反射率的影響因子與結構物之形狀與材質有密切關係，因此針對某一斷面模擬之成果並不一定能應用於其他斷面，因此如何尋找較具一般性的參數值，應是努力的方向(也可能徒勞無功)。</p>	<p>1. 感謝委員寶貴意見，將於定稿中補充說明。</p> <p>2. 感謝委員肯定及意見，在前一年的研究過程中，於長浪作用下，的確會有排水不及的現象出現，因此本年度的研究內容，於試驗部份加長縱深及在數值模擬側向排水，皆是為了提供較大之消波室，也都得到了很好的結果。實際應用上，需於設計時考慮增設維修孔。</p> <p>3. 感謝委員的建議，未來會利用 FLOW-3D 軟體往平面流場方向進行分析及研究發揮其強項功能。在期末報告中所呈現的是整個環境保護型結構物之斷面流場分佈，若要分開討論各個結構物附近或內部流場，亦可局部放大進行討論分析，在資料擷取及後處理部分需做更精細的調整即可。報告中僅針對 <math>S/h=1.0</math> 之配置進行 FLOW-3D 模擬，茲因於數值及試驗中 <math>S/h=1.0</math> 之配置消能效果</p>	<p>1. 依處理情形辦理。</p> <p>2. 依處理情形辦理。</p> <p>3. 依處理情形辦理。</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>4. 模擬條件的選擇應符合現況，例如用不規則波、考慮底床坡度、採用之風波浪條件等。</p> <p>5. 應加強蒐集海外海岸公路之資料與保護工法。</p>	<p>最佳。未來會嘗試更多不同週期的波浪條件進行模擬，期望能找出較全面的配置條件。影響反射率因子確實與結構物形狀、材質(<math>\epsilon</math>、<math>f</math>)有關，未來會朝此方向作更深入之研究。</p> <p>4. 感謝委員的建議，FLOW-3D 亦可設定不規則入射波，是藉由不同週期、振幅以及相位角的線性規則波所組合而成；目前 FLOW-3D 軟體在不規則波部份應用於海工方面文獻較少，其適用性值得進一步研究。針對海底底床坡度可於網格中匯入一坡度變化之不透水結構物置於底部用以模擬真實海底底床之情形。</p> <p>5. 感謝委員指正，後續將加強蒐集歐美日及其他國家之保護工法。</p>	<p>4. 依處理情形辦理。</p> <p>5. 依處理情形辦理。</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>五、何良勝委員：</p> <p>1. 報告內容修正之處</p> <p>(1)請依本所出版品規定提送報告修正稿。</p> <p>(2)報告內圖與表之號碼順序請統一，例表 2.4-1 圖 2.4.1。</p> <p>(3)表 2.4-1~表 2.4-4 中有關英文代號請加註說明其意義。</p> <p>(4)修正圖 2.4.4 部分圖示，例如造波機前有斜坡設置等。</p> <p>(5)建議刪除 2.5.5 節與 2.5.6 節之節名中“試驗”兩字。</p> <p>(6)第六章章名請修正為“結論與建議”。</p> <p>2. 2.4 節中主要為消能碼頭結構物，但於試驗方案三中卻有排水消波室，此於施行上是否可行？</p> <p>3. 2.4.3 節中之綜合比較結果，仍無法獲致最佳之佈置方案，此於後續工作中可否進行改善。</p> <p>4. 建議於 3.3.4 節增列一綜合性比較結果。</p> <p>5. 3.2 節中有關理論推導與試驗關係有何關連性？另，3.4 節之理論建立說明有何作用？</p>	<p>1. -----</p> <p>(1) 遵照辦理。</p> <p>(2) 感謝委員指正，將於定稿修正。</p> <p>(3) 感謝委員意見，將於定稿補充說明。</p> <p>(4) 感謝委員意見，本圖將如實繪製實驗配置，並增加文字說明。</p> <p>(5) 感謝委員指正，將於定稿修正。</p> <p>(6) 感謝委員指正，將於定稿修正。</p> <p>2. 感謝委員寶貴建議，因排水考量而增加消波室，此結構物需要較大的腹地，依目前之規劃，最大縱深約在 25m，應屬合理。</p> <p>3. 感謝委員寶貴建議，此部份之實驗主要著重於定性探討，並已獲致具體心得，後續研究將致力於最佳配置之決定。</p> <p>4. 感謝委員寶貴意見，將於定稿中補充。</p> <p>5. 感謝委員寶貴意見，3.2 節的繫留浮體理論推導用以與試驗結果進行比較探討，以驗證數值模式</p>	<p>1. -----</p> <p>(1) 依處理情形辦理。</p> <p>(2) 依處理情形辦理。</p> <p>(3) 依處理情形辦理。</p> <p>(4) 依處理情形辦理。</p> <p>(5) 依處理情形辦理。</p> <p>(6) 依處理情形辦理。</p> <p>2. 依處理情形辦理。</p> <p>3. 依處理情形辦理。</p> <p>4. 依處理情形辦理。</p> <p>5. 依處理情形辦理。</p>

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
	<p>之可行性，便於未來進行更多條件的數值模擬。3.4節主要為考量建立另一種功能目的臨時性設施，嘗試利用空氣壓縮造成阻尼作用。</p>	

# 附錄三 期中簡報資料

交通部運輸研究所合作研究計畫

**消能式結構物特性之研究(2/4)**  
(MOTC-IOT-99-H2DB004)  
期中報告

國立臺灣海洋大學  
林超圭、岳景雲、翁文凱、楊國誠、陳文俊

國立臺灣海洋大學河海工程系

**計畫內容**

1. 研究期程：四年期研究計畫，本年度為第二年。
2. 主要目標：探討並發展符合臺灣各區地理環境需求的消能式港灣結構物，以及探討海岸公路邊坡保護工法。
3. 依臺灣地區之環境特性與功能屬性分三大類：
  - 長波抗浪型(主要功能以港灣結構保護為主)
  - 功能目的使用型或臨時性設施型(以環境維護功能或特殊使用目的功能為主)
  - 環境保護型(兼顧港灣結構及環境之護育功能)
4. 本計畫透過水工模型斷面試驗及數值模擬方式針對上述三種型態分別進行探討及研發新型之消能式結構物以替代傳統保護港灣、海岸之重力式海岸結構物，並期望能符合海岸空間環境需求且具安全功能之目的。

國立臺灣海洋大學河海工程系

**計畫主要目標及研究內容**

消能式結構物特性之研究

長波抗浪型  
水力阻尼  
消波式結構物

功能目的使用型  
臨時性設施型  
快速佈設式洋式  
結構物

環境保護型  
潛式多孔隙  
透水結構物

海岸公路邊坡保護  
坡段裁制、監測  
及防護舉措

水工模型試驗及數值模擬

改善或取代  
傳統保護港灣、海岸  
之重力式海岸結構物

國立臺灣海洋大學河海工程系

**長波抗浪型～水力式阻尼結構**

98年度的三種配置都能得到很好的消波效果，所有測試條件所產生的反射率多在0.25以下，顯示利用斜坡越波的方式降低堤面的反射率以及削減潮上水流的潮下流波行為是有效的。

下部多孔隙型體也會使得波壓及水粒子運動進入結構體，造成消波室的水位抬升及湧浪，並影響到波浪的潮上越波甚至產生逆向潮下水流，如能增加局部排水可以改善此現象。

增加局部排水  
and others...

國立臺灣海洋大學河海工程系

**長波抗浪型～水力式阻尼結構**

本年度

- 設法解決潮上越波後的排水情形，以免造成消波室內的水體堆積。
- 增加側向排水或後側排水均可明顯改善消波室內水體堆積的問題，內建斜坡的消能功能(例如增加粗糙度)，以及透水功能(例如增加透水性)提高消波功能。

斜坡的透水性

越波排水的方式

暴潮水位  
與不同波高

堤內拋石的  
孔隙率與透水性

**改變影響參數**

$$Kr = f(\lambda, T, L, H, \tan\theta, n, \mu, D, \epsilon)$$

固定參數

其中

$\lambda$ : 波長;	$n$ : 斜坡的粗糙度;	$D_0$ : 碼頭(包含斜坡與孔隙室)的板深;
$H$ : 水深;	$\mu$ : 斜坡的滲透性;	$D_1$ : 消波室的板深;
$T$ : 週期;	$\tan\theta$ : 斜坡的坡度;	$\epsilon$ : 碼頭下部結構的拋石孔隙率;

國立臺灣海洋大學河海工程系

**長波抗浪型～水力式阻尼結構**

■ 水工模型試驗：各個模型以1/36比例縮尺，在國立臺灣海洋大學河海工程綜合實驗室的大型斷面水槽(100mx3mx3m)中進行試驗

■ 試驗模型配置改變斜坡坡度  $\tan\theta=1/2$ 、 $1/4$  和  $1/8$  及板深比  $D=D_0+D_1+D_2+D_3$ ，將坡度與板深比配對得到9種不同試驗配置

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

海峽式阻浪物特性之研究(10)

■ 長波抗浪型斷面試驗波浪條件：水深設置考慮碼頭前水深高度為18m的碼頭水深，可模擬現場波浪條件18秒至48秒之週期波浪，現場波高1.5m，經由模型縮尺(1/36)換算後得到試驗試驗條件如下：

現場波浪條件				模型試驗波浪條件			
波高	週期	水深	水深	波高	週期	水深	水深
1.5	18	18	0.5	0.417	18	0.5	0.5
1.5	24	18	0.5	0.417	24	0.5	0.5
1.5	30	18	0.5	0.417	30	0.5	0.5
1.5	36	18	0.5	0.417	36	0.5	0.5
1.5	42	18	0.5	0.417	42	0.5	0.5
1.5	48	18	0.5	0.417	48	0.5	0.5

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

海峽式阻浪物特性之研究(10)

固定縱深比—波浪VS.斜坡坡度

■ 縱深比 D1(Da/Db=1:1)：  
週期 T < 5.0sec  
反射率 Kr ~ S1/2 > S1/8 > S1/4  
週期 T > 5.0sec  
反射率 Kr ~ S1/2 > S1/4 > S1/8

■ 縱深比 D2(Da/Db=1:2)：  
週期 T < 3.6sec 與週期 T > 5.8sec  
反射率 Kr ~ S1/2 > S1/4 > S1/8  
週期 3.6sec < T < 5.8sec 時  
反射率 Kr 非常接近

■ 縱深比 D3(Da/Db=1:3)：  
三種坡度之反射率趨勢相同  
反射率 Kr 均為 0.25 至 0.45

■ 固定縱深比時以斜坡坡度 S1/3 之波浪效果最佳

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

海峽式阻浪物特性之研究(10)

固定斜坡坡度—波浪VS.縱深比

■ 短週期波作用於坡度較陡之斜坡，如果測上風力不足，其順斜坡而下之水流將會對於前方水域加以擾動，造成反射率之部分增大之現象。

■ 當斜坡坡度 S 相同時，整體反射率與縱深比增加而降低。

■ 縱深比加大對於整體週期都有降低的趨勢，反射率約可以降低 0.2 左右。

■ 固定斜坡坡度時以縱深比 D3 之波浪效果最佳。

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 功能目的使用型/臨時性設施型

海峽式阻浪物特性之研究(10)

■ 本項目之重點在於快速佈放柔性浮式結構物的開發研究。

■ 設定的功能有：

- 短期性用途：提供觀光遊憩或物資運補之靠泊需求。
- 臨時性工程用途：海峽結構物之破壞維修，海岸流失嚴重，快速佈放用以減緩其侵蝕情形。
- 臨時性海難事故用途：近海船隻失去動力或擱淺，用以獲取局部性的靜穩水域，以便海面上搜救行動。

■ 針對此功能目的使用型或臨時設施型消能式結構物，進行了

- 剛性異板繫留浮體水工模型試驗
- 壓氣型浮式結構物理論模式建構

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 功能目的使用型/臨時性設施型

海峽式阻浪物特性之研究(10)

#### 剛性異板繫留浮體水工模型試驗

海洋工程綜合實驗館  
小斷面造波水槽  
(L50m×W1m×D0.8m)  
ISEYA piston type 不規則造波機  
CRC 造波軟體及資料擷取軟體

模型示意圖

試驗水槽

海洋造波斜坡

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 功能目的使用型/臨時性設施型

海峽式阻浪物特性之研究(10)

#### 剛性異板繫留浮體水工模型試驗

海洋工程綜合實驗館  
小斷面造波水槽  
(L50m×W1m×D0.8m)  
ISEYA piston type 不規則造波機  
CRC 造波軟體及資料擷取軟體

模型示意圖

試驗水槽

海洋造波斜坡

國立臺灣海洋大學河海工程系

功能目的使用型/臨時性設施型 海峽式浮體物性之研究(10)

### 試驗波浪條件

剛性翼板繫留浮體水工模型試驗

- 水深為0.5m, 波形為規則波
- 造波之週期為1至3.5秒, 每週期重複造波3次

序	波高	波長	週期	波速	波向	波向
1.0	0.094	1.539	0.679	2.340	2.295	4.790
1.1	0.078	1.563	0.646	2.480	2.207	5.126
1.2	0.103	1.644	0.618	2.590	2.242	5.094
1.3	0.080	1.615	0.613	2.590	2.250	5.097
1.4	0.070	1.575	0.620	2.590	2.244	5.078
1.5	0.077	1.629	0.610	2.600	2.190	5.294
1.6	0.067	1.670	0.611	2.600	2.164	5.404
1.7	0.060	1.700	0.610	2.600	2.160	5.400
1.8	0.060	1.721	0.604	2.600	2.140	5.400
1.9	0.060	1.744	0.603	2.600	2.131	5.400
2.0	0.059	1.768	0.607	2.600	2.123	5.400
2.1	0.060	1.793	0.610	2.600	2.116	5.400
2.2	0.060	1.819	0.613	2.600	2.110	5.400
2.3	0.060	1.846	0.617	2.600	2.105	5.400
2.4	0.060	1.874	0.621	2.600	2.101	5.400
2.5	0.060	1.903	0.624	2.600	2.098	5.400
2.6	0.060	1.933	0.628	2.600	2.095	5.400
2.7	0.060	1.964	0.631	2.600	2.093	5.400
2.8	0.060	1.996	0.634	2.600	2.092	5.400
2.9	0.060	2.029	0.637	2.600	2.092	5.400
3.0	0.060	2.063	0.640	2.600	2.093	5.400
3.1	0.060	2.098	0.643	2.600	2.094	5.400
3.2	0.060	2.134	0.646	2.600	2.095	5.400
3.3	0.060	2.171	0.649	2.600	2.096	5.400
3.4	0.060	2.209	0.652	2.600	2.097	5.400
3.5	0.060	2.248	0.655	2.600	2.098	5.400
3.6	0.060	2.288	0.658	2.600	2.099	5.400
3.7	0.060	2.329	0.661	2.600	2.100	5.400
3.8	0.060	2.371	0.664	2.600	2.101	5.400
3.9	0.060	2.414	0.667	2.600	2.102	5.400
4.0	0.060	2.458	0.670	2.600	2.103	5.400
4.1	0.060	2.503	0.673	2.600	2.104	5.400
4.2	0.060	2.549	0.676	2.600	2.105	5.400
4.3	0.060	2.596	0.679	2.600	2.106	5.400
4.4	0.060	2.644	0.682	2.600	2.107	5.400
4.5	0.060	2.693	0.685	2.600	2.108	5.400
4.6	0.060	2.743	0.688	2.600	2.109	5.400
4.7	0.060	2.794	0.691	2.600	2.110	5.400
4.8	0.060	2.846	0.694	2.600	2.111	5.400
4.9	0.060	2.899	0.697	2.600	2.112	5.400
5.0	0.060	2.953	0.700	2.600	2.113	5.400
5.1	0.060	3.008	0.703	2.600	2.114	5.400
5.2	0.060	3.064	0.706	2.600	2.115	5.400
5.3	0.060	3.121	0.709	2.600	2.116	5.400
5.4	0.060	3.179	0.712	2.600	2.117	5.400
5.5	0.060	3.238	0.715	2.600	2.118	5.400
5.6	0.060	3.298	0.718	2.600	2.119	5.400
5.7	0.060	3.359	0.721	2.600	2.120	5.400
5.8	0.060	3.421	0.724	2.600	2.121	5.400
5.9	0.060	3.484	0.727	2.600	2.122	5.400
6.0	0.060	3.548	0.730	2.600	2.123	5.400

功能目的使用型/臨時性設施型 海峽式浮體物性之研究(10)

### 剛性翼板繫留浮體水工模型試驗初步分析結果

不同角度翼板延伸15cm與無翼板之反射率及各運動振幅

功能目的使用型/臨時性設施型 海峽式浮體物性之研究(10)

### 壓氣型浮式結構物理論推導

探討壓氣型浮體的運動振幅、反射率及透過率  
使用複合式邊界元法(DBEM), 解決浮體邊界問題

- 假設邊界  $x = \ell_1$
- 自由水面
- 浮體浸水處
- 壓氣室水面邊界
- 假設邊界  $x = -\ell_2$
- 不透水海底泥床

基本假設

- 流體: 無黏性、不可壓縮
- 浮體運動: 微小振幅運動
- 流體運動具有一速度勢:  $\Phi(x, z, t) = \Re\{ \phi(x, z) e^{-i\omega t} \}$
- 控制方程式: Laplace方程式  $\nabla^2 \phi(x, z) = 0$

功能目的使用型/臨時性設施型 海峽式浮體物性之研究(10)

### 壓氣型浮式結構物理論推導

壓氣室內之水位變動及體積變化

自由水面:  $\frac{\partial \phi}{\partial z} = -g\eta$

海底泥床:  $\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, z = -h$

邊界面上的質量連續和能量連續

領域 I、III 之速度勢可分別表示為

利用質量連續和能量連續, 可推得反射率及透過率

壓氣室內之壓力變動及體積變化

壓氣室內水位變動造成壓力變化, 壓氣室內壓力表示為  $p = p_0 + p_1 e^{-i\omega t}$

經由運動及動力水面邊界條件可推得

壓氣室內之壓力假設由波長關係定律

結合動態發展後可得

整理後浮體運動及水面變動所造成的變物壓力表示為

功能目的使用型/臨時性設施型 海峽式浮體物性之研究(10)

### 壓氣型浮式結構物理論推導

浮體表面邊界條件

- 浮體之表面一階運動邊界條件為
- 浮體之運動為流體壓力和外力所造成
- 壓力、各恢復力及力矩以及壓氣室內之變物壓力所引起之力量可表示為
- 二方向之運動振幅為

將各運動振幅代入運動邊界條件, 可整理浮體表面邊界條件為

將各運動振幅代入壓氣室內之變物壓力, 可得

則完整之壓氣室內水面邊界條件為

各係數化簡後表示為

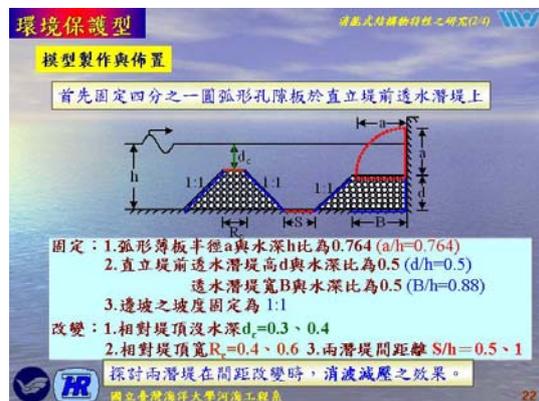
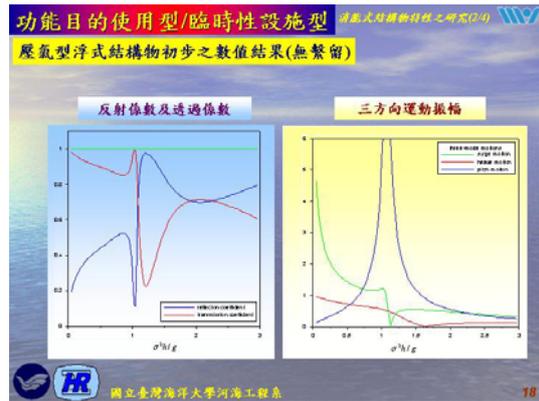
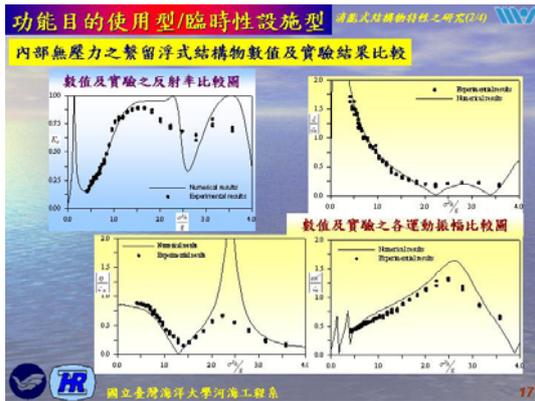
功能目的使用型/臨時性設施型 海峽式浮體物性之研究(10)

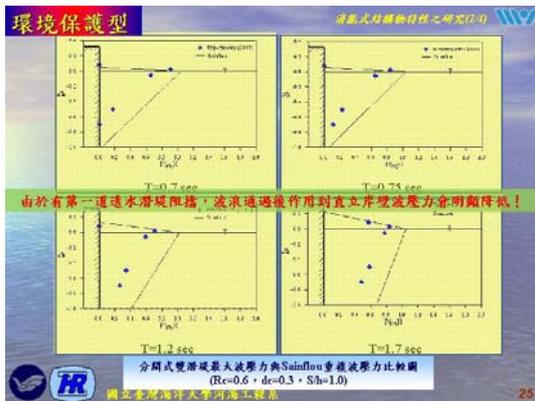
### 壓氣型浮式結構物理論推導

壓氣型浮體數學模型

壓氣型浮體數學模型

壓氣型浮體數學模型





### 環境保護型

消波式結構物特性之研究(2/4)

**無因次最大波壓力比較**  
R<sub>0</sub>/h=0.4, d<sub>0</sub>/h=0.4

波高 H	Sainflou					R				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
6.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
6.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
7.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
7.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
8.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
8.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

不論何種配置下，對直立壁所造成的波壓力仍與Sainflou公式相同於水面處會產生最大的動壓力。

相同配置下，週期1.7秒分開式的配置會較連綿式對水面附近造成更大的波壓力。

國立臺灣海洋大學河海工程系 26



### 環境保護型

消波式結構物特性之研究(2/4)

**結論**

- 採用分開式雙潛堤配置，表示潛堤間透空空間變大，波浪可以利用此空間及潛堤上方水域來作消能，水工模型試驗結果顯示在長週期波下都會有最小反射率值，且其值隨著潛堤寬度、高度之增加而下降。在短週期波下，由於波浪能量大多集中於水面附近，較無法感應到雙潛堤存在，波浪大多從潛堤上方通過，僅有部份進入透水潛堤內，因此消能效果有限，所以反射率會有較大值。
- 數值計算結果顯示發生最小反射率值之位置會漸漸往長週期波(kh較小)處移動，當堤高、堤寬增加，經由換算第一道堤頂距至岸壁距離(D)與入射波長之比大約在D/L=0.26及0.85附近處；而且其趨勢與水工模型試驗結果相會一致。
- 由於有第一道透水潛堤阻擋，波浪通過後作用到直立岸壁波壓力會明顯降低，都比Sainflou重複波壓力小，其最大波壓力值發生在水面附近(z/h=0.025)；而且壓力會隨著水深漸增壓力漸減；但是長週期T=1.7sec採用分開式配置，直立岸壁波壓力反而變大，即使堤高堤厚增加，無因次最大波壓力值會從P<sub>0</sub>/ρgH=0.693(連綿式)增加至P<sub>0</sub>/ρgH=0.833(分開式)。
- 試驗結果顯示，四分之一圓弧板上由於孔洞作用，會使得部分滲入水流進入孔洞中而降低波浪洩升高度，水面上波壓計量測不到壓力。但於水面下7cm(z/h=-0.14)位置量測到最大波壓力，但是其壓力值與連綿式壓力值比較發現偏小，而最後一組長週期波試驗，卻發現大部份最大無因次波壓力值會變大。

國立臺灣海洋大學河海工程系 28

### 海岸公路邊坡保護工法

清嘉式結構物特性之研究(2/4)

#### 研究目的

調查及收集國內各海岸公路的特性並分類整理，以及曾經發生的破壞案例與破壞機制檢討。收集國外有關海岸公路監測及防護作業準則與保護工法，並研擬適合國內海岸公路特性的相關作業準則。

#### 研究方法

1. 搜集先進國家外公路主管機關如美國聯邦公路署(FHWA)及各州之運輸局、日本国土交通省等單位有關海岸公路監測計畫、防護方法及作業準則等，並據以參考再針對東部海岸公路之適宜性進行修正，並與東部海岸公路實際養護之工務段進行實務討論作為未來規劃實施之參考。
2. 蒐集東部海岸公路沿線之興建時間、路線、邊坡特性、防護工法、海象、運輸功能等資料，進行質性分析比對，分類整理出質性相近之海岸公路，以利規劃管理之參考。
3. 向海岸公路養護機關及相關單位蒐集海岸公路邊坡損壞之資料，配合災害照片、海氣象、邊坡保護方式、邊坡地質及海灘緩衝距離、歷年灘線變化等進行各項相關之因子分析，藉以找出可能的破壞機制，作為次年度研擬可能防護工法及水工試驗規劃之參考。

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清嘉式結構物特性之研究(2/4)

#### 海岸公路之定義及功能

- 一般所謂之海岸公路(Coastal highway)即是行車道路有一側濱臨海岸者。
- 美國聯邦公路局FHWA(2008)將海岸公路定義為路面之一側或雙側因濱臨海岸且易受到海水位、波浪、暴潮及漂砂影響之公路。
- 海岸公路除交通運輸功能外，亦具有國防運輸及帶動區域性產業與經濟之發展，對其通過鄉鎮之繁榮具有一定的指標功能。
- 再者無論國內外之海岸公路，沿線皆有許多秀麗之自然景點或重要生態之棲地，成為具觀光價值之動線。如台9線、台11線、美國1號公路等。

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清嘉式結構物特性之研究(2/4)

#### 海岸公路(Coastal highway)之問題及災害

- 海岸公路暨臨海岸側興建，索因地形陡峭、地質脆弱及海象環境之侵襲而危及路面、路基或道路設施之安全，其興建及防護之挑戰性遠比一般公路來得嚴峻。
- 一般常見之海岸公路災害大致有因為波浪作用引起海岸侵蝕導致邊坡崩壞、路面塌陷及超波捲入的土砂及水體造成路面交通之中斷等問題。
- 國外亦有因颶風巨浪或海嘯之作用將整條海岸公路或跨海橋梁沖毀之情形。

↑ 侵蝕

↑ 越波

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清嘉式結構物特性之研究(2/4)

#### 海岸公路災害~景觀之衝擊

行政院永續海岸整體發展方案中  
有關台灣海岸面臨問題其中一點  
即為：**東部海岸台11線省道拓寬與海岸侵蝕之消波塊，破壞海岸地形與景觀。**

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清嘉式結構物特性之研究(2/4)

#### 台灣東部之海岸公路

- 台灣東部公路主要由台9線和台11線所構築而成。
- 台9線是一條縱貫台灣東部之公路，涵蓋北宜公路、蘇花公路、花東公路和南迴公路。台9線北起為台北市忠孝東路，經新店、頭城、羅東、蘇澳、南澳、花蓮市、玉里、池上、鹿野、台東市、太麻里、大武到台東楓港，全長約為475km，為台灣公路里程數最長的公路。其中由豐濱鎮頭城鎮二城至花蓮市四城及台東縣知本至達仁段為濱海興建之海岸公路。
- 台11線海岸公路繫指花蓮至台東之太平洋海岸線，北起花蓮市頭城，經樂樂、磯崎、豐濱、靜浦、長濱、成功、東河、都蘭至台東市知本，全長182公里。

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清嘉式結構物特性之研究(2/4)

#### 影響海岸公路之自然因子(海岸過程)

- 海水位
- 暴潮
- 重大氣象事件—颶風、熱帶氣旋
- 波浪
- 海岸侵蝕、海岸線後退、沿岸侵蝕
- 海嘯
- 降雨
- 高速水流
- 越波及洪水
- 其他外力

#### 台11線海岸公路災害潛勢因子

- 地質因素
- 地形因素
- 颶風暴潮上湧淘刷
- 長浪之作用
- 地震帶之影響
- 暴雨之沖刷

FHWA(2008)

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清淤式結構物特性之研究(2/4)

#### 台11線海岸公路災害類型

- 邊坡地質風化之持續性崩塌，造成路面塌陷。
- 波浪累積性之崖趾冲刷，造成邊坡崩塌，引發路基與路面破壞。
- 颶風大浪之淘刷引起邊坡崩落及路基掏空。
- 豪雨之持續冲刷，造成邊坡之滑動，引起路面破壞。
- 長期海岸侵蝕，海岸線後退，引起公路崩塌。
- 颶風大浪之越波，造成公路路面破損及行車危險。

公路災害類型 → 邊坡崩塌、崖趾及海岸侵蝕、越波

地質風化 → 清波塊、護岸造成景觀問題

國立臺灣海洋大學河海工程系 35

### 海岸公路邊坡保護工法

清淤式結構物特性之研究(2/4)

#### 台11線海岸公路災害潛勢地點

災害地點	災害原因	保護方式與現況
7k-9k	公路離海約10-20m，因海浪長期冲刷下建堤，易造成海岸侵蝕，路基流失。	以拋3000餘個消波塊護堤海岸侵蝕，並填設防波塊和防浪堤。警署設有部分海岸有侵蝕的現象。
18k-23k	此段為高浪區，公路離海約50m，加上地質脆弱，造成海岸侵蝕，且易崩塌。	每本拋1600餘個消波塊，但屬及屬空侵蝕，經評估過後，該段公路已內縮500m，原公路已廢棄，留作觀光海濱之用。
34k-35k	此段屬高浪區，因地質含有凝灰岩和泥岩，特別容易造成崩塌，因此該段有大圍籬之崩壁。	以土工和植生等技術，穩定其下建堤，經四工處證實，該路段已穩定。
41k	該段為新興隧道之路段，因該地質多為頁岩層上加上聯海奇近，易造成海岸侵蝕。	現今四工處已將該段內縮100m，正在施工中。
42k-44k	該段聯路基長期被海岸侵蝕淘刷，進而產生崩塌。	已設置防波塊和圍置消波塊，經四工處證實，暫時減輕崩塌情形。
59k-65k	公路旁的連續海堤於颶風，產聚越海岸，易造成下建堤崩塌和海岸侵蝕，62k的人定聯大橋堤，有多次路基崩空之紀錄。	已拋置1000餘個消波塊，經四工處證實，該段已趨於穩定。
78k	該段離海近，常有越波發生，已影響公路及用路人之安全。	已設置防波塊，不過礙於景觀視野，設置高度受限，效果也有限。

國立臺灣海洋大學河海工程系 36

### 海岸公路邊坡保護工法

清淤式結構物特性之研究(2/4)

#### 台11線海岸公路災害潛勢地點

災害地點	災害原因	保護方式
7k-10k	因海浪長期冲刷下建堤，造成路基流失，而發生崩塌，經四工處證實，警署每日浦為止，仍有侵蝕的現象，公路離海約10-20m。	以拋3000餘個消波塊護堤海岸侵蝕，並填設防波塊和防浪堤。大圍籬穩定，不過警署仍有部分海岸侵蝕的現象。
18k-23k	地質多為砂岩與頁岩地質脆弱，造成海岸侵蝕，且易崩塌。21.2k稱為礁岩段，公路離海約50m。	原本拋1600餘個消波塊，因屬及屬空侵蝕，經評估過後，該段公路已內縮500m，原公路已廢棄留作觀光海濱之用。
34k-35k	此段屬高浪區，因地質含有凝灰岩和泥岩，特別容易造成崩塌，因此該段有大圍籬之崩壁。	以土工和植生等技術，穩定其下建堤，經四工處證實，該路段已穩定。

現況照片 災害照片

21k-200 現況照片 災害照片

此段為礁岩段，上下圍分別為公路上下建堤，下建堤後海岸侵蝕後退，避免公路路基的穩定。

國立臺灣海洋大學河海工程系 37

### 海岸公路邊坡保護工法

清淤式結構物特性之研究(2/4)

#### 台11線海岸公路災害潛勢地點

42k+900 公路未設置消波已有明顯被波浪淘刷現象

56k+400 公路海濱護街寬度不足，恐有面壁侵蝕及越波危險。

58k+600 公路路基有被波浪淘空現象

62k+000-62k+200 公路路基有被波浪淘空現象

- 公路路基有淘空現象
- 路基下邊坡有被淘刷崩落情形

國立臺灣海洋大學河海工程系 38

### 海岸公路邊坡保護工法

清淤式結構物特性之研究(2/4)

#### 海岸公路侵蝕對策—柔性工法案例

利用鋼袋石料工法取代清波塊，除清淤效果佳，減緩反射，讓砂積蓄外，亦可降低清波塊對景觀之衝擊。

新居海岸 甲辰 14 年 8 月 被災

砂浜の消失

甲辰 15 年 7 月 施工前後

飛沫、景觀の悪化

飛沫、越波の防止

神奈川県小田原市国道135号線

國立臺灣海洋大學河海工程系 39

### 海岸公路邊坡保護工法

清淤式結構物特性之研究(2/4)

#### 海岸公路越波對策—案例

利用多孔洞消波護岸，除清淤波效果佳，減緩反射及越波，亦可降低清波塊對景觀之衝擊，惟於陡峭路段將不適用。

飛沫、越波の防止

神奈川県小田原市国道135号線

國立臺灣海洋大學河海工程系 40

目前成果及後續工作項目 消波式結構物設計之研究(2/4)

1. 長波抗浪型断面試驗結果，當固定斜坡坡度時，縱深比 D3 之消波效果最佳；當固定縱深比時，斜坡坡度 5/8 之消波效果最佳。後續考量其他變因並搭配使用 FLOW-3D 進行驗證模擬。
2. 功能目的使用型或臨時設施型消能式結構物研究，進行了剛性異板繫留浮體水工模型初步試驗，並建構壓氣型浮式結構物理論模式。
3. 環境保護型，採用分開式雙潛堤配置，表示潛堤間避水室空間變大，波浪可以利用此空間及潛堤上方水域來作消能。
4. 海岸公路邊坡保護工法部份，首先針對台 11 線公路邊坡的災害進行調查，後續將持續收集國內各海岸公路的特性並分類整理。


41



# 簡報完畢

## 敬請指正


42

長波抗浪型～水力式阻尼結構 消波式結構物設計之研究(2/4)





D3S1/4-T30

D3S1/8-T30

D3S1/8-T80

- 由於本試驗考慮之控制因素為縱深比與斜坡坡度，對斜坡出水高度尚未進行考慮，所以斜度較大之配置對於潮上能力不足之波浪條件造成影響，後續可針對斜坡之出水高度進行補充之討論與比較。
- 因後方消波室與前方水理運動，除經由上方斜坡越波之水體，也有因前方水體影響之壓力變化所形成過滿孔隙室之水體，所以原因定孔隙率之試驗，可加入孔隙室之孔隙率改變對於模型消波效果之影響。
- 當部分波浪於斜坡上無法越波或是越波能量小時，可能無法利用到後方消波室之消波能力，故可考慮是否由斜坡上之表面粗糙度之改變，來增強其消波效果。


43

# 附錄四 期末簡報資料

交通部運輸研究所合作研究計畫

消能式結構物特性之研究(2/4)  
(MOTC-IOT-99-H2DB004)  
期末簡報

國立臺灣海洋大學  
林超圭、岳景雲、翁文凱、楊國誠、陳文俊

國立臺灣海洋大學河海工程系

計畫內容

1. 研究期程：四年期研究計畫，本年度為第二年。
2. 主要目標：探討並發展符合臺灣各區地理環境需求的消能式港灣結構物。
3. 依臺灣地區之環境特性與功能屬性分三大類：
  - 長波抗浪型(主要功能以港灣結構保護為主)
  - 功能目的使用型或臨時性設施型(以環境維護功能或特殊使用目的功能為主)
  - 環境保護型(兼顧港灣結構及環境之護育功能)
4. 本計畫透過水工模型斷面試驗及數值模擬方式針對上述三種型態分別進行探討及研發新型之消能式結構物以替代傳統保護港灣、海岸之重力式海岸結構物，並期望能符合海岸空間環境需求且具保全功能之目的。

國立臺灣海洋大學河海工程系

計畫主要目標及研究內容

消能式結構物特性之研究

- 長波抗浪型  
水力阻尼  
消波式結構物
- 功能目的使用型  
臨時性設施型  
快速佈設式洋式  
結構物
- 環境保護型  
潛式多孔阻  
浪式結構物
- 海岸公路邊坡保護  
破壞機制、監測  
及防護策略

水工模型試驗及數值模擬

改善或取代  
傳統保護港灣、海岸  
之重力式海岸結構物

國立臺灣海洋大學河海工程系

長波抗浪型~水力式阻尼結構

98年度的三種配置都能得到很好的消波效果，所有測試條件所產生的反射率多在0.25以下，顯示利用斜坡越過的方式降低堤面的反射率，以及削減測上水流的測下流行為是有效的。

下部多孔阻浪體也會使波浪變及水粒子運動進入結構體，造成消波常的水位抬升及溢流，並影響到波浪的測上越過，甚至產生逆測下水流，如能增加局部擄水可以改善此現象

增加局部擄水  
and others...

國立臺灣海洋大學河海工程系

長波抗浪型~水力式阻尼結構

長週期波浪的水工斷面模型試驗

長波抗浪型斷面試驗波條件：水深設置考慮碼頭前水深高度為18m的碼頭水深，可模擬現場波浪條件18秒至48秒之週期波浪，現場波高1.8m，經由模型縮尺(1/36)換算後得到試驗條件如下：

現場波浪條件			模型試驗速度條件		
波高 (x)	水深 (m)	週期 (s)	波高 (x)	水深 (m)	週期 (s)
18.0	200.0	3.0	0.5000	5.5556	0.0833
19.2	204.0	3.2	0.5278	5.7778	0.0889
20.4	208.0	3.4	0.5556	6.0000	0.0944
21.6	212.0	3.6	0.5833	6.2222	0.1000
22.8	216.0	3.8	0.6111	6.4444	0.1056
24.0	220.0	4.0	0.6389	6.6667	0.1111
25.2	224.0	4.2	0.6667	6.8889	0.1167
26.4	228.0	4.4	0.6944	7.1111	0.1222
27.6	232.0	4.6	0.7222	7.3333	0.1278
28.8	236.0	4.8	0.7500	7.5556	0.1333
30.0	240.0	5.0	0.7778	7.7778	0.1389
31.2	244.0	5.2	0.8056	8.0000	0.1444
32.4	248.0	5.4	0.8333	8.2222	0.1500
33.6	252.0	5.6	0.8611	8.4444	0.1556
34.8	256.0	5.8	0.8889	8.6667	0.1611
36.0	260.0	6.0	0.9167	8.8889	0.1667
37.2	264.0	6.2	0.9444	9.1111	0.1722
38.4	268.0	6.4	0.9722	9.3333	0.1778
39.6	272.0	6.6	1.0000	9.5556	0.1833
40.8	276.0	6.8	1.0278	9.7778	0.1889
42.0	280.0	7.0	1.0556	10.0000	0.1944
43.2	284.0	7.2	1.0833	10.2222	0.2000
44.4	288.0	7.4	1.1111	10.4444	0.2056
45.6	292.0	7.6	1.1389	10.6667	0.2111
46.8	296.0	7.8	1.1667	10.8889	0.2167
48.0	300.0	8.0	1.1944	11.1111	0.2222

國立臺灣海洋大學河海工程系

長波抗浪型~水力式阻尼結構

長週期波浪的水工斷面模型試驗

固定水深比~波高VS.斜坡坡度

- 縱深比 D1(Da:Db=1:1)：
  - 週期 T < 5.0sec
  - 反射率 Kr ~ S1/2 > S1/8 > S1/4；
  - 週期 T > 5.0sec
  - 反射率 Kr ~ S1/2 > S1/4 > S1/8
- 縱深比 D2 (Da:Db=1:2)：
  - 週期 T < 3.6sec 與週期 T > 5.8sec
  - 反射率 Kr ~ S1/2 > S1/4 > S1/8
  - 週期 3.8sec < T < 5.8sec 時，反射率 Kr 非常接近
- 縱深比 D3 (Da:Db=1:3)：
  - 三種坡度之反射率趨勢相同，反射率 Kr 約為 0.25 至 0.45

固定水深比時以斜坡坡度 S1/8 之消波效果最佳

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

固定斜坡坡度-波浪VS.水深比

長週期波浪的水工斷面模型試驗

- 短週期波作用於坡度較陡之斜坡，如果涌上能力不足，其順斜坡湧下之水流將會對於前方水坑加以擾動，造成反射率之部分增大之現象。
- 當斜坡坡度 $S$ 相同時，整體反射率與時值隨着水深比增加而降低。
- 水深比加大對於整體週期都有降低的趨勢，反射率約可以降低的0.2左右。

■ 固定斜坡坡度時以縱深比 $D_3$ 之消波效果最佳。

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

長週期波浪的數值模擬試驗

為更深入了解長週期波浪作用於水力式消能碼頭，使用FLOW-3D進行數值模擬計算比較其結果與水工模型試驗之消波能力與水理表現是否相符，故將進行一系列之數值模擬測試，利用類似的試驗條件進行比較，相關設定如下。

1. 模型縮尺之選定

參考Froude相似準則選用與水工模型斷面試驗模型縮尺相同之縮尺為1/36 (即長度縮尺為1/36、時間縮尺1/6)。

現場波浪條件				模型試驗通過條件					
週期 (s)	水深 (m)	波高 (m)	波長 (m)	週期 (s)	水深 (m)	波高 (m)	kh	H/L	
18.0	18.0	1.8	230.3	3.0	1.1	0.05	9.04	0.7643	0.0055
24.0			312.2	4.0			12.53	0.5515	0.0040
30.0			393.3	5.0			15.94	0.4336	0.0031
36.0			473.9	6.0			19.31	0.3580	0.0026
42.0			490.0	7.0			22.65	0.3052	0.0022
48.0			506.1	8.0			25.98	0.2661	0.0019

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

長週期波浪的數值模擬試驗

2. 試驗模型、水深與波浪條件

與水工模型試驗採相同之模型配置藉由改變斜坡坡度1/2、1/4和1/8，以及縱深比1、2和3，斜坡坡度與縱深比進行相互配對共有9種不同的試驗配置，消波孔隙中均使用相同之燒石孔隙率為0.35，模型孔隙至前方為完全開放，後方為前方開孔之50%開放。

試驗順序	1	2	3
配置代號	DIS1/2	DIS1/4	DIS1/8
配置名稱	縱深比 $D_1/D_2=1$	縱深比 $D_1/D_2=1$	縱深比 $D_1/D_2=1$
代表說明	斜坡坡度 $\tan\theta=1/2$	斜坡坡度 $\tan\theta=1/4$	斜坡坡度 $\tan\theta=1/8$
試驗順序	5	6	7
配置代號	DIS1/2	DIS1/4	DIS1/8
配置名稱	縱深比 $D_1/D_2=2$	縱深比 $D_1/D_2=2$	縱深比 $D_1/D_2=2$
代表說明	斜坡坡度 $\tan\theta=1/2$	斜坡坡度 $\tan\theta=1/4$	斜坡坡度 $\tan\theta=1/8$
試驗順序	8		
配置代號	DIS1/2	DIS1/4	DIS1/8
配置名稱	縱深比 $D_1/D_2=3$	縱深比 $D_1/D_2=3$	縱深比 $D_1/D_2=3$
代表說明	斜坡坡度 $\tan\theta=1/2$	斜坡坡度 $\tan\theta=1/4$	斜坡坡度 $\tan\theta=1/8$

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

長週期波浪的數值模擬試驗

3. 試驗地形設置與網格、波高擷取設定

模型設置於試驗地形上，試驗地形為一20公尺平台經由一20公尺斜坡連結造波機前方之水平段。網格設置基本為每網格 $8 \times 8 \times 8 \text{ cm}$ ，並針對試驗模型配置進行網格加密細網格以 $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}$ 進行計算，於平台上距試驗模型2.5m、3.7m與4.9m間距1.2m進行反射率波高擷取位置。

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

長週期波浪的數值模擬試驗

4. 試驗結果與基本分析

將FLOW-3D計算所之資料進行輸出，並依據其網格中之網格估水比例 $\beta$ 值進行判斷，以求得水面波動情形，並將其繪製成原始時序圖將波型變化情形儲存下來，而後進行反射率之計算。

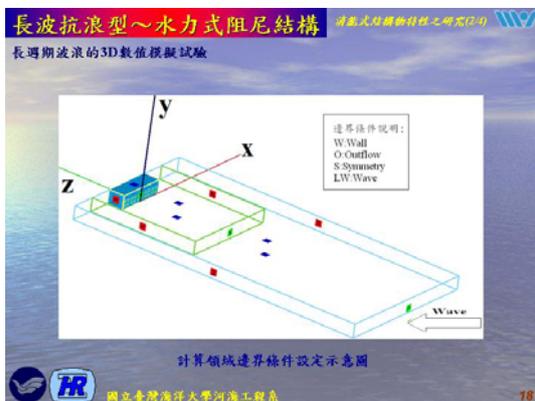
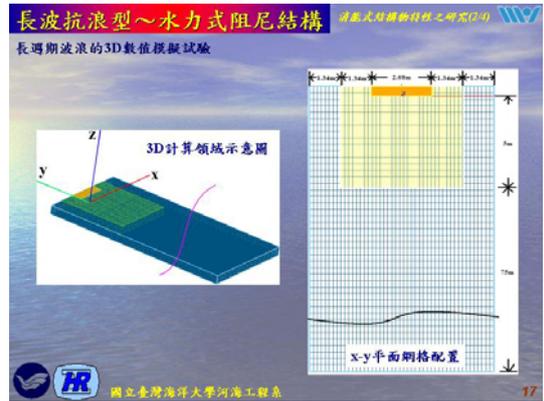
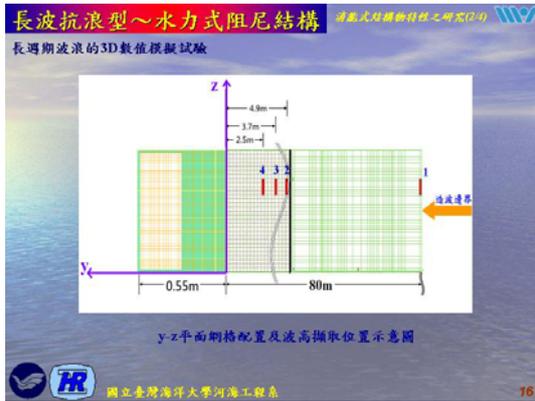
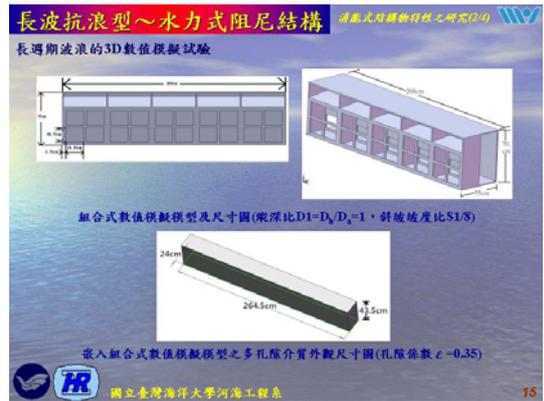
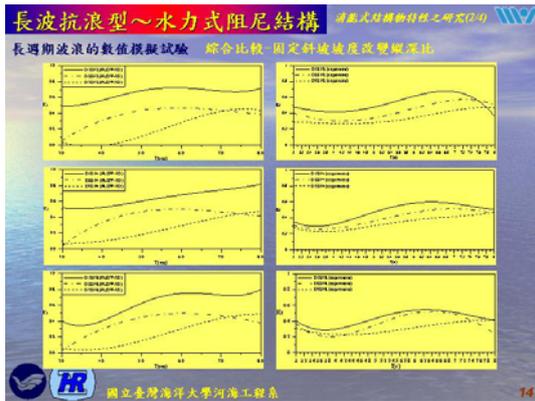
國立臺灣海洋大學河海工程系

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

長週期波浪的數值模擬試驗

綜合比較-固定縱深比改變斜坡坡度比較

國立臺灣海洋大學河海工程系



### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

海峽式阻浪物結構之研究(15)

長週期波浪的3D數值模擬試驗 組合式及断面模型反射率數值結果比較表

週期 (s)	波高 (cm)	配置代號	組合式模型Kr數值結果			断面模型 Kr數值結果
			cb2-cb3 Mean	Cb3-cb4 Mean	Cb2-cb4 Mean	
4.0	5.0	D1S1/2	0.4813	0.5073	0.6402	0.42
		D1S1/4	0.2369	0.4886	0.3718	0.30
		D1S1/8	0.1919	0.3186	0.3469	0.35
5.0	5.0	D1S1/4	0.4162	0.4848	0.5109	0.46
		D1S1/4	0.3428	0.3530	0.3723	0.56
		D1S1/8	0.2242	0.4265	0.2924	0.46
6.0	5.0	D1S1/4	0.3428	0.4652	0.4570	0.50
		D2S1/4	0.1494	0.0874	0.1184	0.44
		D2S1/8	0.2288	0.2558	0.2743	0.36
8.0	5.0	D3S1/4	0.4223	0.6098	0.7235	0.28
		D3S1/4	0.8461	0.8220	0.8417	0.25
		D3S1/4	0.7229	0.8375	0.8758	0.35
6.0	5.0	D3S1/8	0.2312	0.2287	0.2117	0.32
		D3S1/4	0.7873	0.5790	0.8838	0.48

國立臺灣海洋大學河海工研系

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

海峽式阻浪物特性之研究(10)

長週期波浪的3D數值模擬試驗

平面水槽原站時序圖(縱深比D1、斜坡坡度1/2、週期4.0s)

國立臺灣海洋大學河海工程系

20

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

海峽式阻浪物特性之研究(10)

長週期波浪的數值模擬試驗

- 長週期波浪作用於水力式消能碼頭改變縱深比、斜坡坡度與波浪條件，了解改變變數對於水力式消能碼頭前方式反射率變化情形，用以判斷其配置之消能效果。固定縱深比改變其斜坡坡度之各坡度反射率隨週期變化趨勢相似，固定斜坡坡度時縱深比的增加可使反射率隨週期變化的趨勢下降，利用縱深比來消滅入射波波能量的效果較斜坡坡度之效果佳，而斜坡坡度延伸之高度對於水體運動於斜坡上是否越波有些微影響。
- FLOW-3D數值模擬與水工模型試驗之趨勢不同處初步判斷為數值模擬之孔隙可能無法完全模擬如水工模型試驗之拋石孔隙間的水體流動所造成之效果，於縱深比D1的FLOW-3D模擬之反射率皆大於水工模型實驗，孔隙室消波效果不明顯，而縱深比D2與D3於週期較短週期部分又有變低之趨勢，有需要更深入之探討是否需要更改孔隙模擬之設定，以模擬更接近水工模型試驗之結果。

國立臺灣海洋大學河海工程系

21

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

海峽式阻浪物特性之研究(10)

構想圖(混凝土方塊式碼頭)

- 利用混凝土型塊堆疊碼頭
- 需考慮自重
- 需考慮嵌合問題
- 會有各種型塊

國立臺灣海洋大學河海工程系

22

### 長波抗浪型~水力式阻尼結構

海峽式阻浪物特性之研究(10)

構想圖(棧橋式碼頭)

- 利用棧橋式碼頭的構想，可以不用考慮地形整平及自重的問題
- 利用組件嵌合固定的方式，亦可提供抗剪功能

國立臺灣海洋大學河海工程系

23

### 功能目的使用型/臨時性設施型

海峽式阻浪物特性之研究(10)

■ 本項目之重點在於快速佈放柔性浮式結構物的開發研究。

■ 設定的功能有：

- 短期性用途：提供觀光遊憩或物資運補之靈活需求。
- 臨時性工程用途：海事結構物之破壞維修，海岸流失嚴重，快速佈放用以減輕其侵蝕情形。
- 臨時性海難事故用途：近海船舶失去動力或擱淺，用以獲取局部性的靜穩水域，以便利海上搜救行動。

■ 針對此功能目的使用型或臨時設施型消能式結構物，進行了

- 剛性翼板繫留浮體水工模型試驗
- 壓氣型浮式結構物理論模式建構

國立臺灣海洋大學河海工程系

24

### 功能目的使用型/臨時性設施型

海峽式阻浪物特性之研究(10)

圖 11.2 臺灣屏東墾 Cipe Canal 港外海的現場測試

圖 11.4 大型 RBDS 係統與波浪的關係圖及佈設後的鳥瞰圖

圖 11.3 大型 RBDS 的基本佈局及安裝

國立臺灣海洋大學河海工程系

25

功能目的使用型/臨時性設施型 浮載式結構物特性之研究(2/4)

(a) 基本 RIBS 結構

(b) 船底的配置圖

(c) 連接的方式

圖 3.1.5 小型 RIBS 的基本配置圖

國立臺灣海洋大學河海工程系 26

功能目的使用型/臨時性設施型 浮載式結構物特性之研究(2/4)

圖 3.1.6 小型 RIBS 半比例尺現場實驗

圖 3.1.7 RIBS 水工模型試驗

國立臺灣海洋大學河海工程系 27

功能目的使用型/臨時性設施型 浮載式結構物特性之研究(2/4)

圖 3.1.8 Hydro RIB 的成品與存放方式

圖 3.1.9 XM 2001 的結構示意圖及施工圖

圖 3.1.10 XM 2001 的存放與存放方式

國立臺灣海洋大學河海工程系 28

功能目的使用型或臨時設施型 浮載式結構物特性之研究(2/4)

本項目之重點在於快速佈放柔性浮式結構物的開發研究。

設計功能如下：

- 1. 短期性用途：提供觀光遊覽或物資運輸之靠泊需求。
- 2. 臨時性工程用途：海事結構物之破壞維修，海岸流失嚴重，快速佈放用以減緩其侵蝕情形。
- 3. 臨時性海難事故用途：近海船舶失去動力或擱淺，用以獲取局部性的靜穩水域，以便利海上搜救行動。

針對此功能目的使用型或臨時設施型消能式結構物，進行了

- ◆剛性翼板繫留浮體水工模型試驗
- ◆壓氣型浮式結構物理論模式建構

國立臺灣海洋大學河海工程系 29

剛性翼板繫留浮體水工模型試驗 浮載式結構物特性之研究(2/4)

海洋工程綜合實驗室

小断面波浪水槽(L50m×W1m×D0.8m)

ISEYA piston type 不規則造波機

CRC 造波軟體及資料擷取軟體

增輪器

資料擷取系統

拉力計

角位移位計

垂直位移計

國立臺灣海洋大學河海工程系

剛性翼板繫留浮體水工模型試驗 浮載式結構物特性之研究(2/4)

模型示意圖

波高計位置示意圖

國立臺灣海洋大學河海工程系

滑流式結構物特性之研究(2/4)

**浮體參數固定**

重約43-44kg

長寬高分別為50·96·20cm

沒水深度10cm

質心高約8-9cm

彈簧角度60度

彈簧預力1.4kgf

彈簧K值0.085-0.089

分有翼板及無翼板兩種

翼板角度為0度及30度

翼板長度分別各有5·15·25cm三種

	無翼板	0度翼板 5cm	0度翼板 15cm	0度翼板 25cm	30度翼板 5cm	30度翼板 15cm	30度翼板 25cm
長	96	96	96	96	96	96	96
寬	50	50	50	50	50	50	50
高	20	20	20	20	20	20	20
質心位置	8.5	8.1	8.7	8.3	8.1	8.7	9.36
重量	43.9	44.11	44.11	43.31	44.01	43.9	43.31
彈簧K值	0.089	0.089	0.089	0.085	0.085	0.085	0.085
彈簧角度	60	60	60	60	60	60	60
彈簧預力	1.4kg	1.4kg	1.4kg	1.4kg	1.4kg	1.4kg	1.4kg
沒水深度	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm

試驗模型參數

國立臺灣海洋大學河海工程系
32

滑流式結構物特性之研究(2/4)

**剛性翼板繫留浮體  
水工模型試驗**

**本實驗設定條件：**

翼板高度0.5m，波形為規則波

試驗條件如右表所示

翼板波之週期為0.8至2.5秒，每波數重複造波3次

T	H	L	H/L	k	k/L	U <sub>0</sub>	H/k
1.0	0.0204	1.5130	0.0135	0.5000	0.3305	0.7989	0.2907
1.1	0.0250	1.7813	0.0140	0.5000	0.2897	1.1870	0.2500
1.2	0.0302	2.0484	0.0146	0.5000	0.2441	1.5925	0.2564
1.3	0.0360	2.3146	0.0153	0.5000	0.2163	2.0067	0.2605
1.4	0.0423	2.5717	0.0162	0.5000	0.1941	2.4397	0.2701
1.5	0.0477	2.8270	0.0173	0.5000	0.1769	2.8724	0.2754
1.6	0.0487	3.0772	0.0182	0.5000	0.1625	3.3065	0.2814
1.7	0.0451	3.3226	0.0175	0.5000	0.1503	3.7488	0.2901
1.8	0.0390	3.5711	0.0160	0.5000	0.1400	4.1969	0.3000
1.9	0.0301	3.8141	0.0138	0.5000	0.1311	4.6413	0.3108
2.0	0.0225	4.0519	0.0137	0.5000	0.1233	5.0719	0.3160
2.1	0.0160	4.2932	0.0140	0.5000	0.1164	5.5002	0.3200
2.2	0.0103	4.5312	0.0133	0.5000	0.1103	5.9246	0.3205
2.3	0.0075	4.7669	0.0137	0.5000	0.1049	6.3446	0.3310
2.4	0.0078	5.0014	0.0142	0.5000	0.1000	6.7588	0.3416
2.5	0.0094	5.2417	0.0134	0.5000	0.0954	7.1670	0.3499

國立臺灣海洋大學河海工程系
33

滑流式結構物特性之研究(2/4)

**剛性翼板繫留浮體水工模型試驗分析結果**

◆ 長板與長浮體在波場中運動的振幅較短板與短浮體小，自然於波場中的旋轉角，翼板角度傾斜與波面同傾變向。

◆ 翼板垂直0度延伸不同長度與無翼板之垂直振幅

國立臺灣海洋大學河海工程系
34

滑流式結構物特性之研究(2/4)

◆ 翼板傾斜30度延伸不同長度與無翼板之垂直振幅

國立臺灣海洋大學河海工程系
35

滑流式結構物特性之研究(2/4)

翼板長度越長，浮體旋轉運動的自然頻率趨向於控制區。

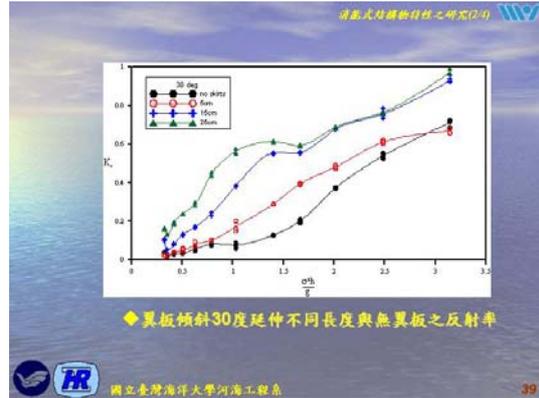
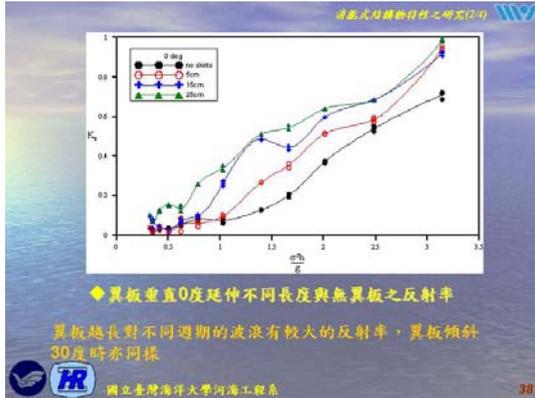
◆ 翼板垂直0度延伸不同長度與無翼板之旋轉振幅

國立臺灣海洋大學河海工程系
36

滑流式結構物特性之研究(2/4)

◆ 翼板傾斜30度延伸不同長度與無翼板之旋轉振幅

國立臺灣海洋大學河海工程系
37



綜合結論

- 浮體的遮蔽效能主要由其重量與尺寸大小決定，重量與尺寸越大，透過波越小，遮蔽率越佳。
- 翼板的增加與增長可有效提高浮式防波堤的制波能力。
- 翼板的增設可使重量輕、尺寸小的浮式防波堤達到尺寸大的遮蔽效能。

國立臺灣海洋大學海工系

浮筒式結構物特性之研究(2/4)

壓氣型浮式結構物理論推導

- 探討浮氣型浮體的運動振幅、反射率和透過率
- 使用複合式邊界元素法(DBEM)，解決浮體邊界問題

將欲處理的領域分割為數個邊界

- 假定邊界  $x = l_1$
- 自由水面
- 浮體頂水處
- 壓氣室水面邊界
- 假定邊界  $x = -l_2$
- 不透水海底床

基本假設

- 液體：無黏性、不可壓縮
- 浮體運動：微小振幅運動
- 液體運動具有一速度勢： $\Phi(x, z, t) = \Re\{\phi(x, z) e^{i\omega t}\}$
- 控制方程式：Laplace方程式  $\nabla^2 \phi(x, z) = 0$

國立臺灣海洋大學海工系

浮筒式結構物特性之研究(2/4)

壓氣型浮式結構物理論推導

邊界條件

- 自由水面： $\frac{\partial \phi_0}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \phi_0(x, z), z=0$
- 海底底床： $\frac{\partial \phi_0}{\partial z} = 0, z=-h$
- 邊界面上的質量連續和能量連續： $\phi_0 = \phi_{(j)}, j = I, III$   
 $\frac{\partial \phi_0}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{(j)}}{\partial n}, j = I, III$
- 領域 I - III 之速度勢可分別表示為：  
 $\phi_0(x, z) = (1 + K_r) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$   
 $\phi_0(-l_1, z) = K_t \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$
- 利用質量連續和能量連續，可換得出反射率及透過率：  
 $K_r = 1 + \frac{i}{N_0 \sinh kh} \int_0^L \cosh k(h+z) dz$   
 $K_t = \frac{i}{N_0 \sinh kh} \int_0^L \cosh k(h+z) dz$

◆壓氣室內之水位變動及體積變化

- 壓氣室內水位變動造成壓力變化，壓氣室內壓力表示為：  
 $P_0 = \bar{P}_0 + P_0 e^{i\omega t} (\bar{P}_0 = P_\infty + \rho g_0 z)$
- 經由運動及動力水面邊界條件可推導出： $\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} (\phi - i \frac{P_0}{\rho g_0})$
- 壓氣室內之壓力假設由波義爾定律：  
 $P_0(t) = \bar{P}_0 (\frac{V_0}{V_0 + \Delta V})^\gamma \quad (\gamma = 1.4)$   
 $\Delta V = \int_0^L (h_1 - z_1) \omega dz$   
 $V_0 = \omega_0 h + \omega_1 M$
- 經泰勒級數展開可得： $P_0 e^{i\omega t} = -\frac{\Delta V}{V_0} P_0$
- 整理後浮體運動及水面變動所造成的變動壓力表示為：  
 $\frac{P_0}{\rho g_0} = \frac{-\gamma g_0 h}{(1 + \gamma) g_0 h + g_0} (\frac{\eta}{g_0} + \int_0^L \phi dz)$

國立臺灣海洋大學海工系

浮筒式結構物特性之研究(2/4)

壓氣型浮式結構物理論推導(浮體表面邊界條件)

- 浮體之表面一階運動邊界條件為：  
 $\frac{\partial \phi_0}{\partial t} = \frac{\partial(x_2 - z_2)}{\partial t} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial(z_2 - z_2)}{\partial t} \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \phi}{\partial x} (z - z_2) - \frac{\partial \phi}{\partial z} (x - x_2)$
- 浮體之運動為流體壓力和外力所造成
- 三方向之運動振幅為：  
 $\frac{z}{g_0} = \frac{i}{\omega} \int_0^L \frac{\partial \phi}{\partial z} dz$   
 $\frac{y}{g_0} = \frac{1}{\omega} \int_0^L \frac{-1}{\alpha_1 + \alpha_2} \int_0^L \phi dz - \frac{-1}{\alpha_1 + \alpha_2} \int_0^L \phi \frac{\partial z}{\partial n} dz$   
 $\frac{M_y}{g_0} = \frac{i}{\omega} \int_0^L \phi \frac{\partial z}{\partial n} (z - z_2) - \frac{\partial \phi}{\partial z} (x - x_2) dz$
- 壓力、各級慣力及力矩以及壓氣室內之變動壓力所引起之力量可表示為：  
 $P = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\rho g_0 \phi e^{i\omega t}$   
 $F_y = -\int_0^L \rho g_0 (z_2 - z_2) \frac{\partial \phi}{\partial z} dz$   
 $M_y = -\int_0^L \rho g_0 \phi (x - x_2) \frac{\partial \phi}{\partial z} (z - z_2) - \frac{\partial \phi}{\partial z} (x - x_2) dz$   
 $F_x = F_0 e^{i\omega t}$

國立臺灣海洋大學海工系

浮橋式結構物特性之研究(2/4)

### 壓氣型浮式結構物理論推導 (浮體表面邊界條件)

將各運動振幅代入運動邊界條件，可整理浮體表面邊界條件為

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\sigma^2}{\delta} \left( \frac{-1}{\alpha_1} \right) \phi \frac{\partial z}{\partial t} + (-\alpha_2) \left( \frac{-1}{\alpha_1 + \alpha_2 \ell} \right) \frac{\partial z}{\partial t} \int \phi dz + \left( \frac{-1}{\alpha_1 + \alpha_2 \ell} \right) \frac{\partial z}{\partial t} \int \phi \frac{\partial z}{\partial t} dz + \frac{-1}{\alpha_1} \left[ \frac{\partial z}{\partial t} (z - z_p) - \frac{\partial z}{\partial t} (x - x_p) \right] \int \phi \left[ \frac{\partial z}{\partial t} (z - z_p) - \frac{\partial z}{\partial t} (x - x_p) \right] dz$$

將前述運動振幅代入壓氣室中之運動壓力，可得出

$$\frac{p_0}{\rho g h_0} = -[(\alpha_2)^2 \left( \frac{-1}{\alpha_1 + \alpha_2 \ell} \right) + \frac{\alpha_2}{\ell}] \int \phi dz - \alpha_2 \left( \frac{-1}{\alpha_1 + \alpha_2 \ell} \right) \int \phi \frac{\partial z}{\partial t} dz$$

則完整之壓氣室內水面邊界條件為

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\sigma^2}{\delta} \left\{ \phi + [(\alpha_2)^2 \left( \frac{-1}{\alpha_1 + \alpha_2 \ell} \right) + \frac{\alpha_2}{\ell}] \int \phi dz - \alpha_2 \left( \frac{-1}{\alpha_1 + \alpha_2 \ell} \right) \int \phi \frac{\partial z}{\partial t} dz \right\}$$

各簡化係數表示為

$$\alpha_1 = \frac{m \ell^2}{\rho g h_0} = \frac{m \ell^2}{(1+p)g h_0 + 4}$$

$$\alpha_2 = \frac{m \ell^2}{\rho g} \left[ \frac{\partial z}{\partial t} \right]$$

$$\alpha_3 = \frac{J \sigma^2}{\rho g} \left[ (x - x_p) \frac{\partial z}{\partial t} (z - z_p) - \frac{\partial z}{\partial t} (x - x_p) \int \phi dz \right]$$

44

浮橋式結構物特性之研究(2/4)

### 壓氣型浮式結構物理論推導 壓氣型浮體數學模型

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\sigma^2}{\delta} \left( \frac{-1}{\alpha_1} \right) \phi \frac{\partial z}{\partial t} + (-\alpha_2) \left( \frac{-1}{\alpha_1 + \alpha_2 \ell} \right) \frac{\partial z}{\partial t} \int \phi dz + \left( \frac{-1}{\alpha_1 + \alpha_2 \ell} \right) \frac{\partial z}{\partial t} \int \phi \frac{\partial z}{\partial t} dz + \frac{-1}{\alpha_1} \left[ \frac{\partial z}{\partial t} (z - z_p) - \frac{\partial z}{\partial t} (x - x_p) \right] \int \phi \left[ \frac{\partial z}{\partial t} (z - z_p) - \frac{\partial z}{\partial t} (x - x_p) \right] dz$$

45

浮橋式結構物特性之研究(2/4)

### 海岸公路邊坡保護工法

#### 海岸公路 (Coastal highway)

- 一般常謂之海岸公路 (Coastal highway) 即是行車道路兩側皆臨海面或至少有一側濱臨海岸者。
- 美國聯邦公路局 FHWA(2008) 將海岸公路定義為路面之一側或雙側因濱臨海岸且易受到海水位、波浪、暴潮及漂砂影響之公路，此定義即是將海岸公路明確侷限在會受到海岸環境與海象條件影響者方稱之為海岸公路。

46

浮橋式結構物特性之研究(2/4)

### 海岸公路邊坡保護工法

#### 海岸公路的功能

- 交通運輸
- 經濟發展
- 地方繁榮
- 觀光旅遊
- 國防安全

47

浮橋式結構物特性之研究(2/4)

### 海岸公路邊坡保護工法

#### 台灣主要公路網

台灣東部海岸公路主要由台9線和台11線所構築而成。

48

浮橋式結構物特性之研究(2/4)

### 海岸公路邊坡保護工法

#### 台9線及台11線路線圖

49

### 海岸公路邊坡保護工法

清島式結構物特性之研究(2/4)

#### 東部海岸公路地質特性



東部海岸地區之地質較為脆弱，其岩層主要為火山岩層、礫岩、頁岩、砂岩和部分泥岩所構成，由於岩層上的差異，也可能造成不同的災害。比如花蓮境內豐濱鄉以北山脈地質脆弱，一遇颶風，常常容易引發山崩挾帶大量土石，造成道路中斷，著名之蘇花公路，由於其地質結構屬於石灰岩地形，土質較為鬆軟，自修建以來擴寬改善工程就不曾間斷，而連城瀨頭之尖壁岩層部分也因長期風化作用而易於外力衝擊時產生剝落崩離，對公路之安全構成威脅。

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清島式結構物特性之研究(2/4)

#### 台9線廢棄路段



蘇花公路已廢棄之早期路段“姑子斷崖棄身隧道”，可見過去路段之險峻及公路已崩壞毀損。

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清島式結構物特性之研究(2/4)

#### 常見海岸公路災害



國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清島式結構物特性之研究(2/4)

#### 台11線災害潛勢路段



因海浪長期沖蝕下連城，造成路基流失，而形成崩塌。經四工處證實，豐寮至目前為止，仍有侵蝕的現象。  
離岸距離:0.01km

此處因地質多為砂岩與頁岩，地質狀況較為脆弱，所以容易造成崩塌。經四工處證實，18k-22k道路已內縮500m，原道路已廢棄，作為觀浪之用。  
離岸距離:0.05km

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清島式結構物特性之研究(2/4)

#### 台11線災害潛勢路段



此段為陡浪段，左邊兩張照片分別為公路上下連城，下連城因海岸侵蝕後退，已處急公路路基的穩定。經四工處證實，18k-22k道路已內縮500m，原道路以廢棄，作為觀浪之用。  
離岸距離:0.11km

此段為大崩段，地質包含了凝灰岩和泥岩...等。凝灰岩膠結性不佳，孔隙率大，風化快，泥岩則是遇水則軟化。因此處有了這兩種地質特徵，所以此處形成了台11線的大崩段。經四工處證實，該段道路崩塌之情況，趨於減緩。  
離岸距離:0.18km

國立臺灣海洋大學河海工程系

### 海岸公路邊坡保護工法

清島式結構物特性之研究(2/4)

#### 台11線災害潛勢路段



此段有設置新機隧道，但因地質多為礫岩土，加上離海近，路基易被海岸侵蝕淘刷，進而產生崩塌。目前四工處已將此段內縮100m，現今仍在施工中。  
離岸距離:0.1km

此段因路基長期被海岸侵蝕淘刷，進而產生崩塌。  
離岸距離:0.1km

國立臺灣海洋大學河海工程系

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

台11線災害潛勢路段

台11線57公里處花蓮縣豐濱鄉沙灣段，因為公路路基已瀕臨海岸，近幾年來颱風期間不斷遭到巨浪衝擊，海岸侵蝕，路基常遭海浪掏空流失。

57k

60k

國立臺灣海洋大學河海工程系 56

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

台11線災害潛勢路段

此區因地質為火山岩，抗剪力較弱，所以易造成崩壞，有多次路基掏空紀錄。

離岸距離:0.05km

此路段因比較鄰近海城，常有越波情況，已設置防浪牆，不過礙於景觀視野，設置高度受限，效果亦有限。

60k-62k

78k

國立臺灣海洋大學河海工程系 57

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

台11線災害潛勢路段

台11線80k~100k，依三工處說明，此路段過去並無破壞情形，惟因所鋪消波塊逐漸失去消能作用，致使今年颱風侵襲期間90K\_700~830處護岸下割泥泥上被面工被波浪侵襲而大片崩落毀損。

90k

國立臺灣海洋大學河海工程系 58

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

台9線災害潛勢路段

台9線410K~411K於莫拉克颱風侵襲期間，因為上述護漁下土石構層，暴雨連漲及大浪之淘刷，引起海側護坡崩壞，路基流失後所造成之公路路面塌陷受害。

410.65k

411.15k

國立臺灣海洋大學河海工程系 59

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

台9線災害潛勢路段

台9線429K~430K，於莫拉克颱風侵襲期間，因為上述護漁下土石構層，暴雨連漲及大浪之淘刷，引起海側護坡崩壞，路基流失後所造成之公路路面塌陷受害。

此段位於大武壠港南側，目前因漂砂被北堤攔阻，致使造成南側海岸嚴重侵蝕，地形持續崩壞後退，一些臨時搭建的屋舍已落入海中，現南側公路臨海側路基也面臨塌陷危險，雖然屢經消波塊保護，但侵蝕問題持續發生，越波及路基沖蝕變況持續不斷。

429.3-430k

438-439.5k

國立臺灣海洋大學河海工程系 60

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

台17線災害潛勢路段

台南市黃金海岸附近公路海側之護坡護岸於非颱風季節時之湧浪作用下，造成嚴重之破壞現象，已明顯危及護岸內側車道之安全，事後第六河川局緊急復原修復確保公路之穩定。由於台17線於二仁溪南、北兩側之路線離海岸消波工之距離大都僅在60~100公尺內，最近者距離不到30公尺，此些路段皆可能潛藏有波浪上湧淘刷之危害風險。

183k

國立臺灣海洋大學河海工程系 61

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

台1線災害潛勢路段



449-450k

此路段台1線屏鵝公路崙山段，海岸有明顯侵蝕後退情形，大浪已侵蝕至公路旁約5公尺高之土坡，嚴重威脅此段公路之安全。

國立臺灣海洋大學河海工程系

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

海岸公路災害原因

- ◆ 地質條件脆弱
- ◆ 地形陡峭因素
- ◆ 颱風暴潮巨浪
- ◆ 海岸侵蝕後退
- ◆ 防護工法問題

國立臺灣海洋大學河海工程系

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

海岸公路災害原因

- ◆ 地質條件脆弱  
部份路段因地質破碎、條件不佳，易於風化而造成邊坡自然崩塌，也易因暴雨及大浪之衝擊而發生滑動、塌陷，造成公路之危害。
- ◆ 地形陡峭因素  
由於台9線及台11線許多路段無論是路側之上邊坡或是海側之下邊坡，因為坡度陡峭，易造成土體承載之滑落、崩塌。海側邊坡之陡峭也易發生填土承載力不足而發生崩落土石崩落，影響路基安全之問題。
- ◆ 颱風暴潮巨浪  
東部海岸公路位處颱風巨浪及東北季風大浪侵襲之處，常因雨能波浪之衝擊淘刷，引發越波溢流、坡面與坡趾沖蝕而造成路基流失、路面塌陷等災害。西部海岸於颱風大浪及湧浪之作用也易引發公路安全威脅。

國立臺灣海洋大學河海工程系

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

海岸公路災害原因

- ◆ 海岸侵蝕問題  
由於台灣多處海岸因為人為或自然外力之作用，引發土砂供給之失調而造成海灘流失、岸線後退之情形，波浪因而直接淘蝕公路路基或外側邊坡，造成海岸公路安全之威脅，台9線、台11線有多處之內移改道即為明證。目前此一問題仍須影響全台灣海岸公路之安全，相關單位應該重視此一現象。
- ◆ 防護工法問題  
因地質、地形或波浪問題，為保護海岸公路之安全或因災害搶險需求，海岸公路多以硬性之混凝土護岸、擋土牆、防浪牆來保護邊坡及路面，或以拋石消波塊保護崖腳避免波浪淘刷。此些防護工法或可收到保護功效，但因直接抵擋波浪水流之衝擊，除結構體易以損壞外，亦因波浪反射、下刷能率之增強而引發越波或坡趾嚴重淘蝕現象，直接對公路安全造成影響。再者目前東部海岸公路多處已屬於國家公園範圍，此類工法非但不適當且已不適宜，研發可行消能工法已刻不容緩。

國立臺灣海洋大學河海工程系

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

海岸公路災害原因



自然風化及外力作用造成邊坡之崩落

國立臺灣海洋大學河海工程系

海岸公路邊坡保護工法 清島式結構物特性之研究(2/4)

海岸公路災害原因



公路邊坡遭大浪淘蝕及護岸毀損情形。

國立臺灣海洋大學河海工程系

海岸公路邊坡保護工法 請參見結構物特種之研究(2/4)

海岸公路災害原因

公路邊坡遭受波浪侵蝕，底下路基掏空情形，拋放大量消波塊保護。

國立臺灣海洋大學河海工程系 68

海岸公路邊坡保護工法 請參見結構物特種之研究(2/4)

海岸公路災害原因

因為海岸侵蝕問題，為確保行車安全，公路被迫內移改道。

國立臺灣海洋大學河海工程系 69

海岸公路邊坡保護工法 請參見結構物特種之研究(2/4)

台9線受害防護搶修工法

里程數	破壞原因	照片	建議搶修保護工法
413k+550~450	狂風颶風暴雨侵蝕，路基崩塌		1. 石籠護土牆 2. 100cm 厚瀝青黏土 低強度混凝土
413k+360~455	暴雨侵蝕，路基崩塌		1. 石籠護土牆 2. 100cm 厚瀝青黏土 低強度混凝土
411k+000~4190	丹瑞颶風暴雨侵蝕，路基下陷		1. 填方碎石填墊料

國立臺灣海洋大學河海工程系 70

海岸公路邊坡保護工法 請參見結構物特種之研究(2/4)

台9線受害防護搶修工法

里程數	破壞原因	照片	建議搶修保護工法
410k+000~4160	中強颶風暴雨侵蝕，路基流失		1. 打點鋼軌樁
413k+070~4200	莫拉克颶風暴雨侵蝕，路基下陷		1. 鋼筋混凝土護土牆
420k+450~490	莫拉克颶風暴雨侵蝕，下邊坡土層破壞		1. 鋼筋混凝土護土牆
430k+000~430k+500	莫拉克颶風暴雨侵蝕，下邊坡土層破壞，機噐掉路		1. 拋填塊 2. 石籠護土牆 3. 防浪板 4. 加勁土牆

國立臺灣海洋大學河海工程系 71

海岸公路邊坡保護工法 請參見結構物特種之研究(2/4)

台9線受害防護搶修工法

里程數	破壞原因	照片	建議搶修保護工法
431k+200~4225	暴雨侵蝕，下邊坡掏空		新建鋼筋混凝土墩坎 25m 長
430+600~650	莫拉克颶風暴雨侵蝕，下邊坡崩塌		1. 鋼筋混凝土護土牆

國立臺灣海洋大學河海工程系 72

海岸公路邊坡保護工法 請參見結構物特種之研究(2/4)

海岸公路防護因應對策

- 歷史災資料庫之建置
- 現有易致災地點之普查
- 易致災地點地文及海象資料監測
- 即時監視系統建置
- 海岸公路潛勢區段之分類與劃分
- 相關海岸相關單位之合作

國立臺灣海洋大學河海工程系 73

消能式結構物特性之研究(2/4)

## 環境保護型消能結構物

### 報告內容

- 一、研究動機與目的
- 二、水工模型試驗結果與分析
- 三、FLOW-3D計算結果與分析
- 四、波浪斜向入射結構物數值模擬

國立臺灣海洋大學河海工程系 74

消能式結構物特性之研究(2/4)

## 一、研究動機與目的(1/4)

國立臺灣海洋大學河海工程系 75

消能式結構物特性之研究(2/4)

## 一、研究動機與目的(2/4)

國立臺灣海洋大學河海工程系 76

消能式結構物特性之研究(2/4)

## 一、研究動機與目的(3/4)

此類新型防波堤除了可以擋浪外又兼具消浪性、安全性、景觀性、經濟性等特點，值得作進一步的研究。

日本北海道內浦灣鋼鐵邊堤  
千島町開口防波堤

國立臺灣海洋大學河海工程系 77

消能式結構物特性之研究(2/4)

## 一、研究動機與目的(4/4)

國立臺灣海洋大學河海工程系 78

消能式結構物特性之研究(2/4)

## 一、研究動機與目的(4/4)

### 曲面開孔設計概念沿革圖

國立臺灣海洋大學河海工程系 79

清淤式結構物特性之研究(2/4)

## 一、研究動機與目的(4/4)

環境保護型(曲面開孔·拋石·分開式)

未來風景構型

國立臺灣海洋大學河海工程系

清淤式結構物特性之研究(2/4)

## 二、水工模型試驗結果與分析

### 儀器設備(1/2)

波浪槽

容量式波高計與波高增幅器

桌上型電腦

壓力計(200gw/cm<sup>2</sup>、500gw/cm<sup>2</sup>)

國立臺灣海洋大學河海工程系

清淤式結構物特性之研究(2/4)

## 二、水工模型試驗結果與分析

### 儀器設備(2/2)

曲面開孔板( $\epsilon_p=0.367$ )尺寸

卵石粒徑分佈圖( $\epsilon_r=0.46$ )

$d_r/h=0.3$

$B_r/h=0.4$

實驗配置為間距 $S/h=1.0$ 時之實驗照片

國立臺灣海洋大學河海工程系

清淤式結構物特性之研究(2/4)

## 二、水工模型試驗結果與分析

### 模型製作與佈置

首先固定四分之一圓弧形孔隙板於直立堤前透水潛堤上

固定：1.弧形薄板半徑 $a$ 與水深 $h$ 比為0.764( $a/h=0.764$ )  
 2.直立堤前透水潛堤高 $d$ 與水深比為0.5( $d/h=0.5$ )  
 透水潛堤寬 $B$ 與水深比為0.5( $B/h=0.88$ )  
 3.邊坡之坡度固定為1:1 4.堤前兩潛堤間之距離 $S/h$

改變：1.相對堤頂水深 $d_r=0.3、0.4$   
 2.相對堤頂寬 $B_r=0.4、0.6$

探討兩潛堤在間距改變時，消波減壓之效果。

國立臺灣海洋大學河海工程系

清淤式結構物特性之研究(2/4)

## 二、水工模型試驗結果與分析

### 水槽配置示意圖

以改變間距、堤高以及間距去討論其反射率以及壓力之變化

入射波

反射波

分開式( $S/h=0.5-1$ )

國立臺灣海洋大學河海工程系

清淤式結構物特性之研究(2/4)

## 二、水工模型試驗結果與分析

### 壓力計配置示意圖

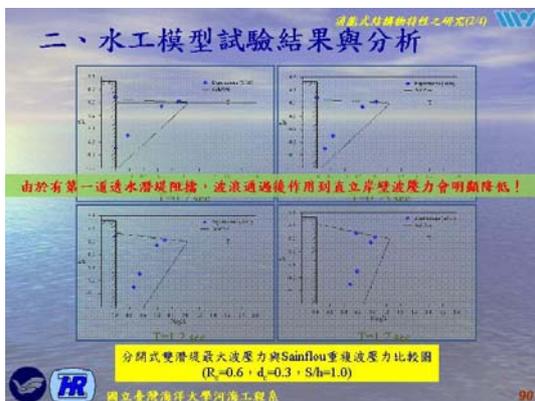
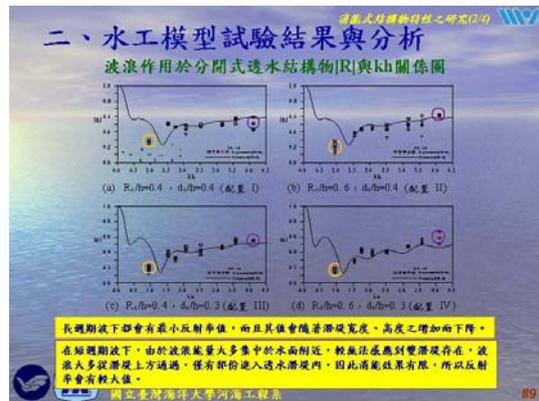
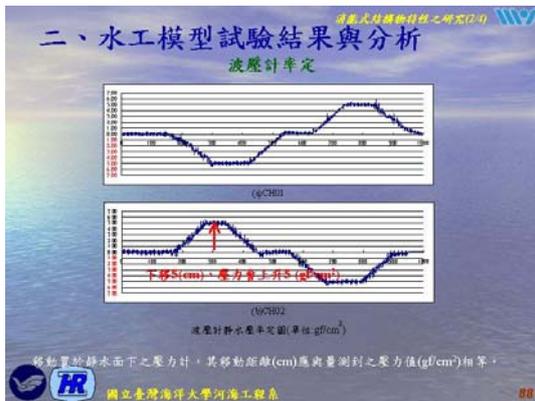
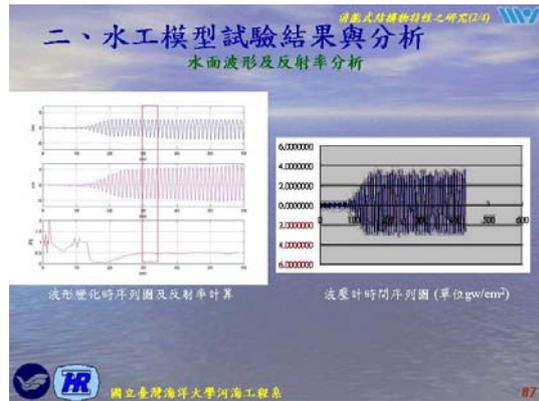
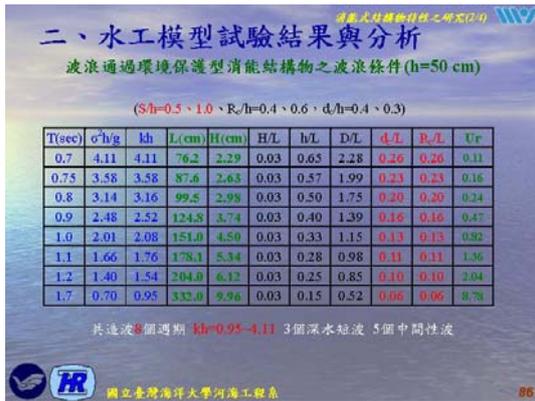
直立壁安裝  
 $P_1-P_3$   
 共五支壓力計

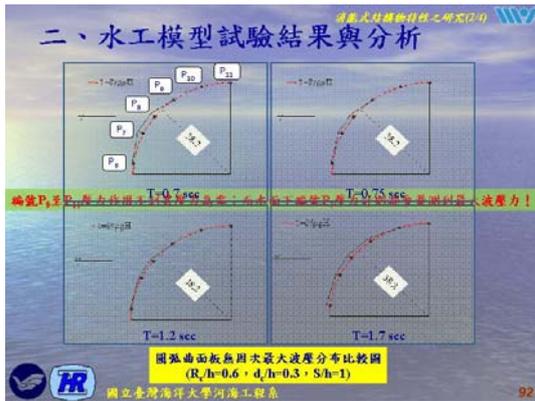
圓弧板安裝  
 $P_4-P_6$   
 共六支壓力計

無因次壓力計安裝位置(試驗水深 $h=50\text{cm}$ )

單位: h

國立臺灣海洋大學河海工程系





- ### 三、FLOW-3D計算結果與分析
- 進行水工模型試驗時須考量：
- 造波機造波能力
  - 試驗場地大小
  - 人力配置
  - 經費需求
  - 試驗時間長短
- 傳統單點侵入式量測儀器由於探頭、測桿之大小可能會影響地測流速之精度，而且較難同步量測得孔隙結構物內部速度場分佈及附近之全域波流場時空之變化。
- 93

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

現今電子計算機發展技術成熟，以數值模式研發軟體模擬真實流況中紊流情形勢必為未來趨勢。本研究以FLOW-3D商業套裝計算流體力學軟體(CFD)來模擬波浪於環境保護型結構物交互作用之行為。

94



- ### 三、FLOW-3D計算結果與分析
- #### FLOW-3D數值計算流程與設定
- General**
- 單位使用CGS制。
  - 模擬造波時間設定為60秒。
- Physics**
- (1) Gravity：採用CGS制，重力設定z方向向下為 $-981\text{cm/s}^2$ 。
  - (2) Viscosity and turbulence：選擇牛頓流體與k- $\epsilon$ 紊流模式。
  - (3) Porous media：選取孔隙介質模式中之雷諾數依存法，設定透水潛堤孔隙率 $\epsilon=0.46$ 與透水薄板孔隙率 $\epsilon_p=0.367$ 及透水潛堤拖曳參數 $a_z=20$ 、 $b_z=0.6$ 。(潛堤內石顆粒徑為 $d_s=3\text{cm}$ )
- 96



### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D數值計算流程與設定

**Meshing Geometry**

模擬水槽長度 $x=1700\text{cm}$ ,  $y=20\text{cm}$ ,  $z=30\text{cm}$  網格間距 $1\text{cm}$

圖4.5.5 環境保護型結構物配置示意圖

直立牆前方覆蓋基槽堤高 $d=25\text{cm}$ , 堤頂寬為 $D=44\text{cm}$ , 坡度 $1:1$

四分之一圓弧形孔隙薄板半徑為 $a=38.2\text{cm}$ , 厚度設定為 $1.5\text{cm}$  兩堤間距 $S=50\text{cm}$

第一道槽堤堤頂寬 $d=20\text{cm}$ , 堤頂水深 $d=20\text{cm}$ , 坡度 $1:1$

國立臺灣海洋大學河海工程系 99

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D數值計算流程與設定

**Boundaries**

- 邊界條件將上游邊界設定為造波邊界Wave( $x_{min}$ )。
- 下游邊界設定為不透水牆邊界Wall( $x_{max}$ )。
- 水槽兩側( $y_{min}$ 、 $y_{max}$ )及底床( $z_{min}$ )處亦設定為不透水牆邊界Wall, 如圖4.5.6所示。

圖4.5.6 邊界條件設定

國立臺灣海洋大學河海工程系 99

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D數值計算流程與設定

**Boundaries**

表4.5.1 造波條件( $h=50\text{cm}$ )

T(sec)	kh	H(cm)	L(cm)	C(cm/s)
0.7	4.11	2.286	76.4	109.1
0.75	3.58	2.63	87.6	116.8
0.8	3.16	2.98	99.5	124.3
0.9	2.52	3.74	124.8	138.6
1.0	2.08	4.5	151.3	151.3
1.1	1.76	5.34	178.1	161.9
1.2	1.54	6.12	204.8	170.6
1.7	0.95	9.96	332.6	195.6

國立臺灣海洋大學河海工程系 100

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D數值計算流程與設定

**Initial**

- TLEN值(Turbulent mixing length)=0.07, 當作起始值, 預設情況最小尺寸的7%, 在這指的是水槽水位深度。(參考賴, 2009)
- Turbulent k.e.值 $-K=U_p^2/2$ ,  $U_p=A_p C_p$  其中:  $U_p$ 表示水平速度、 $C_p$ 為波速、 $A_p=2.5 \times 10^{-3}$ , 如表4.5.3所示。(參考劉, 2009)

國立臺灣海洋大學河海工程系 101

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D數值計算流程與設定

**Initial**

表4.5.3 各週期Turbulent k.e.值( $A_p=2.5 \times 10^{-3}$ )

T(sec)	$C_p$ (cm/s)	$U_p$ (cm/s)	Turbulent k.e.值(K)
0.7	109.1	0.2727	$3.7196 \times 10^{-2}$
0.75	116.8	0.2920	$4.2632 \times 10^{-2}$
0.8	124.3	0.3107	$4.8282 \times 10^{-2}$
0.9	138.6	0.3465	$6.0031 \times 10^{-2}$
1.0	151.3	0.3782	$7.1536 \times 10^{-2}$
1.1	161.9	0.4047	$8.1911 \times 10^{-2}$
1.2	170.6	0.4265	$9.0951 \times 10^{-2}$
1.7	195.6	0.4890	$11.9560 \times 10^{-2}$

國立臺灣海洋大學河海工程系 102

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D數值計算流程與設定

**Output**

- 資料輸出間隔0.05秒(擷取頻率為20Hz)。

**Numerics**

- 最大時間步長(Maximum time step)則限定為網格間距與波速比 $\leq 1$ , 即一個時間步長內流體的運動速度位移不超過一個網格間距,  $\Delta t \leq \Delta x / C$ 。
- 範例: 以網格 $1\text{cm}$ 、波速 $C=151.3\text{cm/s}$ 來計算, 最大時間步長限制為 $1/151.3=6.6 \times 10^{-3}$ 秒。

國立臺灣海洋大學河海工程系 103

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D數值計算流程與設定

**Numerics**

表4.5.2 最大時間步長( $\Delta t=1\text{cm}$ )

T(sec)	C(cm/s)	最大時間步長
0.7	109.1	$9.16 \times 10^{-3}$
0.75	116.8	$8.56 \times 10^{-3}$
0.8	124.3	$8.04 \times 10^{-3}$
0.9	138.6	$7.21 \times 10^{-3}$
1.0	151.3	$6.61 \times 10^{-3}$
1.1	161.9	$6.17 \times 10^{-3}$
1.2	170.6	$5.86 \times 10^{-3}$
1.7	195.6	$5.11 \times 10^{-3}$

國立臺灣海洋大學河海工程系 704

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D數值計算流程與設定

**Analyze**

選定數值模擬水槽相對於水工模型試驗量測波高之波高計擺設的位置，再輸出選定位置的自由液面高度，配合其所開發之流體體積分率法(VOF)模擬自由液面，藉以計算輸出的自由液面高度，其次扣除造波水深而可以得到自由液面波動變化，再以求得的自由液面高度以Godá and Suzuki (1976)二點法進行反射率之計算。

※但必須注意FLOW-3D模擬水工模型波高計相對的測量位置須距離結構物0.1倍波長以上，即 $x > 0.1L$ ，其中 $x$ 為波高計與結構物間距，而相距二波高計間距( $\Delta l$ )須滿足 $0.05L_{max} < \Delta l < 0.45L_{min}$ 之範圍。

國立臺灣海洋大學河海工程系 705

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D模式驗證

- 1.入射波網格獨立性分析
  - > 波形 $\eta$ 、波高H驗證
  - > 水平、垂直流速U、W驗證
- 2.進行波之峯、谷值平均流速U、W驗證
  - > 水工模型試驗與FLOW-3D空水槽  $\square T=1.0\text{sec}$
  - >  $\square T=1.7\text{sec}$
- 3.反射率驗證
  - > 水工模型試驗空水槽
  - > FLOW-3D空水槽
- 4.FLOW-3D空水槽驗證
  - > 重複波波形、反射率

國立臺灣海洋大學河海工程系 706

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D模式驗證(1/4)

- 1.入射波網格獨立性分析：波形 $\eta$ 、波高H驗證
  - > 與理論公式相當吻合!

$\eta = a \sin(kx - \sigma t)$

圖4.5.8 入射波波形時間序列圖  
( $T=1.0\text{s}$ ,  $b=50\text{cm}$ ,  $kh=2.08$ ,  $H=4.5\text{cm}$ ,  $L=151.3\text{cm}$ ,  $C=151.3\text{cm/s}$ )

國立臺灣海洋大學河海工程系 707

### 三、FLOW-3D計算結果與分析

#### FLOW-3D模式驗證(1/4)

- 1.入射波網格獨立性分析：水平、垂直流速U、W驗證
  - > 網格1cm時水平、垂直流速U、W與理論公式驗證結果吻合

(a) x方向水平速度U(cm/s)

$$U = a\sigma \frac{\cosh k(x+h)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \dots (2)$$

(b) z方向垂直速度W(cm/s)

$$W = a\sigma \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \dots (3)$$

量測位置為 $h=9.5\text{cm}$ 水面下9.5cm

圖4.5.8 入射波流速時間序列比較圖  
( $T=1.0\text{s}$ ,  $b=50\text{cm}$ ,  $kh=2.08$ ,  $L=151.3\text{cm}$ ,  $C=151.3\text{cm/s}$ )

國立臺灣海洋大學河海工程系 708

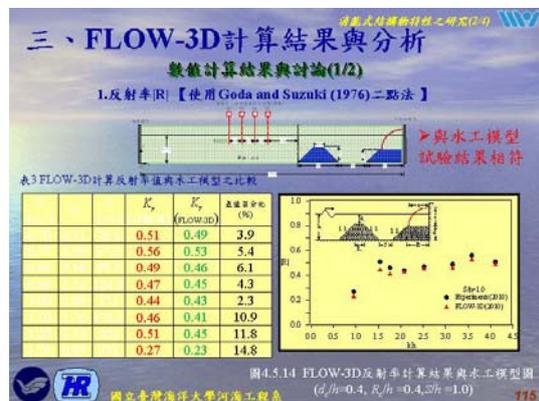
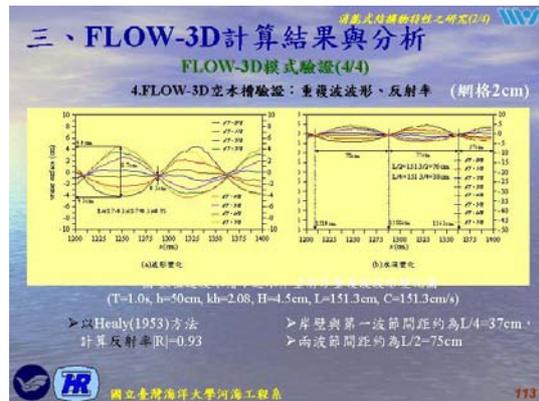
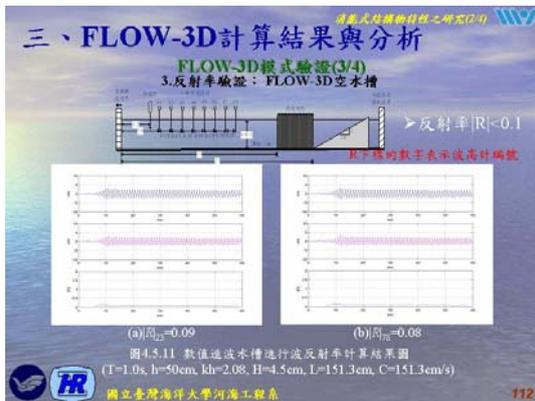
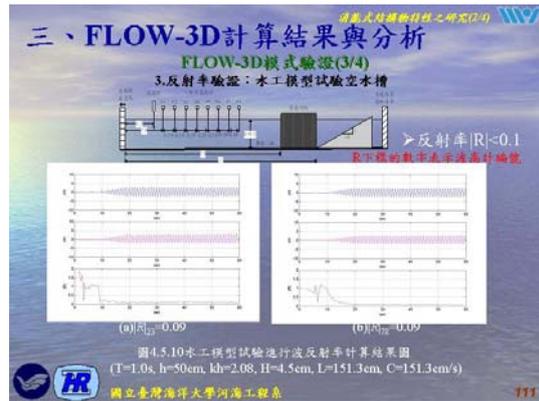
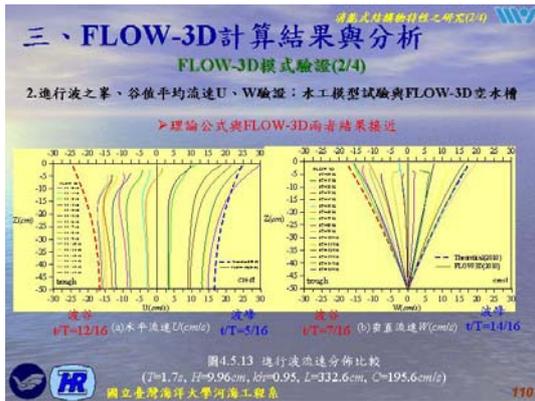
### 三、FLOW-3D計算結果與分析

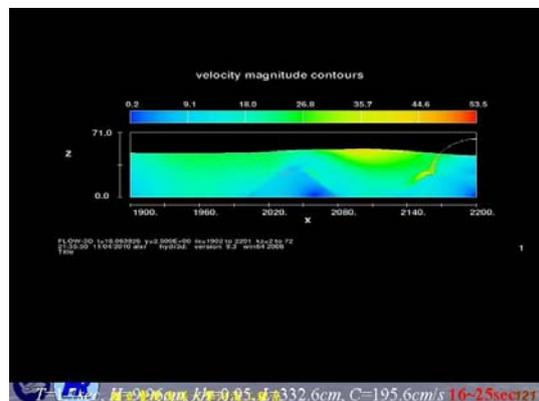
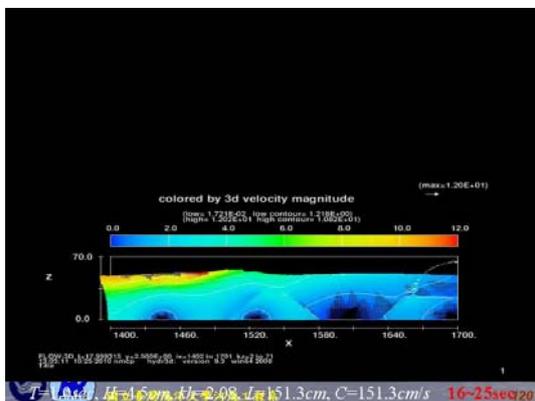
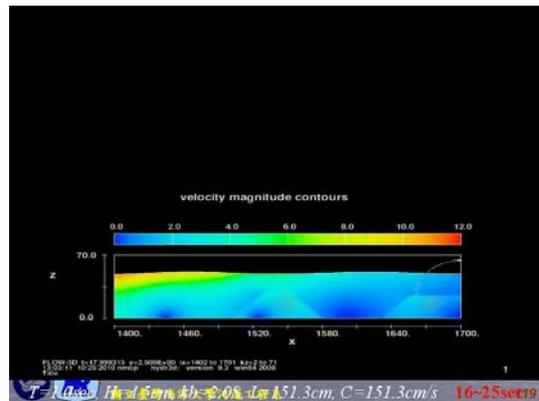
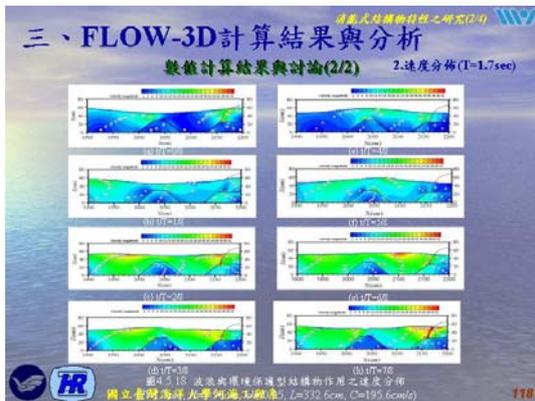
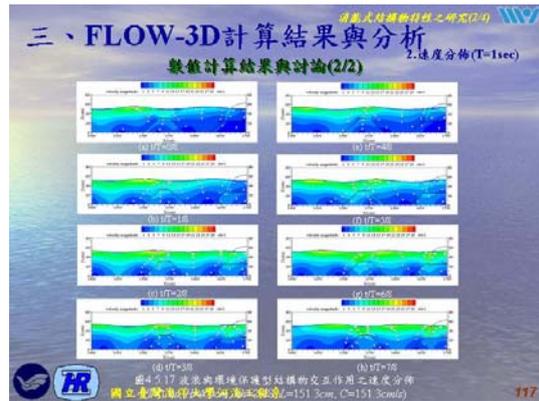
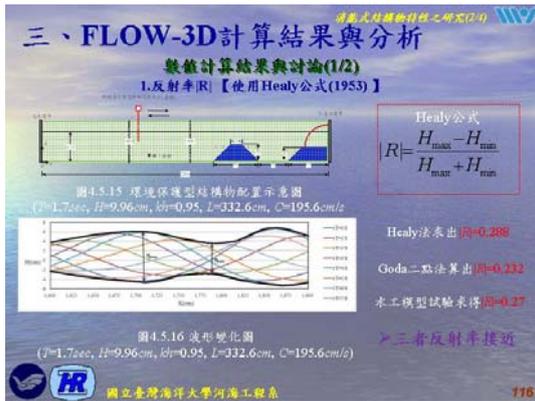
#### FLOW-3D模式驗證(2/4)

- 2.進行波之峯、谷值平均流速U、W驗證：水工模型試驗與FLOW-3D空水槽
  - > 水工模型試驗、理論公式與FLOW-3D三者結果接近

圖4.5.12 進行波流速分佈比較  
( $T=1.0\text{s}$ ,  $b=4.5\text{cm}$ ,  $kh=2.08$ ,  $L=151.3\text{cm}$ ,  $C=151.3\text{cm/s}$ )

國立臺灣海洋大學河海工程系 709







四、波浪斜向入射結構物數值模擬  
勢函數之解析(2/2)

把式(28)化為矩陣型式，則得

$$\begin{Bmatrix} \phi_p^{\text{II}} \\ \phi_p^{\text{III}} \\ \phi_p^{\text{IV}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_p \\ F_p \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_p^{\text{I}} \end{Bmatrix} \quad (29)$$

上式中

$$F_p = \int_{\Gamma} f_p d\tau$$

$$S_p = \frac{-2i\alpha \cosh k(h+z_p)}{\cosh kh}$$

$$p = 1, \dots, M_1 \quad r_1 = 1, \dots, M_1$$

國立臺灣海洋大學河海工程系 128

四、波浪斜向入射結構物數值模擬  
邊界元素法(1/5)

由於領域(II)、(III)、及(IV)的勢函數  $\phi^j(x, z)$ ，皆滿足 modified Helmholtz 方程式，且其存在二次導函數。而根據格林第二恆等式(Green's second identity)，領域內部點  $P_0(x, z)$  之勢函數  $\phi^j(P_0)$ ，可由邊界線上  $Q(\xi, \zeta)$  之勢函數值  $\phi^j(Q)$  及其對邊界線上法線方向微分值  $\partial\phi^j(Q)/\partial n_Q$  來表示，並配合 modified Helmholtz 方程式之基本解  $c(Q, P_0) = -K_0(\beta r_0)$  及其法線方向微分值  $\partial c(Q, P_0)/\partial n_Q$  來決定。

其中  $r_0 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (z-\zeta)^2}$ ， $K_0(\beta r_0)$  為修正型第二類零階貝塞函數 (the modified zeroth order Bessel function of second kind)

國立臺灣海洋大學河海工程系 129

四、波浪斜向入射結構物數值模擬  
邊界元素法(2/5)

因此領域內任一點之勢函數可以用下列積分方程來表示

$$2\pi\phi^j(P_0) = \int_{\Gamma^j} \left[ \phi^j(Q) \frac{-K_0(\beta r_0)}{\partial n_Q} - (-K_0(\beta r_0)) \frac{\partial\phi^j(Q)}{\partial n_Q} \right] d\Omega \quad j = \text{II, III, IV} \quad (30)$$

上式中， $P_0$  表示  $Q$  點(source point)之法向量， $\Gamma^j$  表示領域 (j) 之封閉邊界線

若將點  $P_0(x, z)$  移至邊界上特定点  $P_0(\xi', \zeta')$  並假定邊界線是平滑的，則可得邊界點積分方程如下所示

$$\pi\phi^j(P_0) = \int_{\Gamma^j} \left[ \phi^j(Q) \frac{(-K_0(\beta r_0))}{\partial n_Q} - (-K_0(\beta r_0)) \frac{\partial\phi^j(Q)}{\partial n_Q} \right] d\Omega \quad j = \text{II, III, IV} \quad (31)$$

國立臺灣海洋大學河海工程系 130

四、波浪斜向入射結構物數值模擬  
邊界元素法(3/5)

此式稱為通常的邊界積分方程式(Ordinary Boundary Integral Equation, OBIE)，式中  $\phi^j(P_0)$  為領域(j)邊界線上  $P_0$  點之勢函數。

將式(31)之封閉邊界線  $\Gamma^j$  以常數元素(constant elements)離散化成  $N^j$  個元素，每一元素以中點值作為代表量，經重新整理並以矩陣形式表示為：

$$[U_{ij}^j] \{\phi^j\} = [V_{ij}^j] \left\{ \frac{\partial\phi^j}{\partial n} \right\} \quad j = \text{II, III, IV} \quad (32)$$

上式中

$$U_{ij}^j = \int_{\Gamma_j} \left[ \frac{(-K_0(\beta r_0))}{\partial n_Q} \right] d\Omega - \pi\delta_{ij} \quad j = \text{II, III, IV} \quad (33)$$

$$V_{ij}^j = \int_{\Gamma_j} (-K_0(\beta r_0)) d\Omega \quad j = \text{II, III, IV} \quad (34)$$

國立臺灣海洋大學河海工程系 131

四、波浪斜向入射結構物數值模擬  
邊界元素法(4/5)

其中， $\delta_{ij}$  為 Kronecker delta，即：

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{for } i=j \\ 0 & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (35)$$

由式(32)可獲得領域(II)、(III)及(IV)各自的代數方程式，我們將此三領域合併於一總體矩陣如下：

$$\begin{bmatrix} [U^{\text{II}}] & 0 & 0 \\ 0 & [U^{\text{III}}] & 0 \\ 0 & 0 & [U^{\text{IV}}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\phi^{\text{II}}\} \\ \{\phi^{\text{III}}\} \\ \{\phi^{\text{IV}}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [U^{\text{II}}] & 0 & 0 \\ 0 & [U^{\text{III}}] & 0 \\ 0 & 0 & [U^{\text{IV}}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \left\{ \frac{\partial\phi^{\text{II}}}{\partial n} \right\} \\ \left\{ \frac{\partial\phi^{\text{III}}}{\partial n} \right\} \\ \left\{ \frac{\partial\phi^{\text{IV}}}{\partial n} \right\} \end{Bmatrix} \quad (36)$$

國立臺灣海洋大學河海工程系 132

四、波浪斜向入射結構物數值模擬  
邊界元素法(5/5)

分別將上述自由水面、不透水海底底床、假想邊界線、透水薄板、純水與透水潛堤結構物交界面等全部邊界條件代入式(36)中，經移項整理後可得如下之矩陣形式：

$$[A] \{\phi\} = \{B\} \quad (37)$$

其中， $[A]$  為已知係數矩陣， $\{\phi\}$  為已知之係數向量。由式(37)可求得領域(II)、(III)及(IV)各邊界線之上勢函數，將位於假想邊界線  $x$  之勢函數，代入式(27)，即可求出反射率  $R$  之值。

國立臺灣海洋大學河海工程系 133

### 四、波浪斜向入射結構物數值模擬

結構物上壓力之求解

- 將式(37)所求得之領域(II)、(III)及(IV)各邊界線上元素的勢函數值，對照欲求位置的領域而代入式(17)或(18)，可得作用在此元素上之動壓，故可得到作用於結構物上的動壓分佈，亦可將其無因次化以求得無因次壓力如下：

$$\frac{P^I(x,z)}{\rho g \zeta_0} = f^I(x,z) \quad j = I, II, III \quad (38)$$

$$\frac{P^IV(x,z)}{\rho g \zeta_0} = f^IV(x,z) \quad (39)$$

國立臺灣海洋大學河海工程系 734

### 四、波浪斜向入射結構物數值模擬

水面波形之求解

- 將有自由水面的領域，其位於自由水面元素之勢函數值根據自由水面動力學邊界條件(DFSBC)代入，可得水位  $\eta^j$  如下式所示：

$$\eta^j = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi^j}{\partial z} \Big|_{z=0} = i \zeta_0 \phi^j e^{i(kx - \omega t)} \quad j = I, II, III \quad (40)$$

國立臺灣海洋大學河海工程系 735

### 四、波浪斜向入射結構物數值模擬

模式驗證(1/4)

圖4.6.2 摩擦係數改變下波浪斜向入射透波反射率與 $\theta$ 之關係 ( $B/h=1.0$ ,  $d/h=0.2012$ ,  $l/h=0.463$ ,  $\epsilon_r=0.4$ ,  $S_r=1.0$ )

圖中顯示以正向入射時( $\theta=0^\circ$ )會有較大的反射率值，隨著入射波浪的角度變大，其反射率會漸小，並在入射角度 $\theta=70^\circ-80^\circ$ 之間產生一反曲點，為反射率極小值，甚至在  $f=1.0$  時的配置下，幾乎會出現零反射的現象，其反射率值接近0，之後則會迅速攀升。

國立臺灣海洋大學河海工程系 730

### 四、波浪斜向入射結構物數值模擬

模式驗證(2/4)

圖4.6.3 波浪斜向入射入射透波模反射率、透過率及能量損失與 $\theta$ 之關係 ( $h/L=0.1$ ,  $d/h=0.5$ ,  $B/h=1.0$ ,  $l/h=4.0$ ,  $N=8$ ,  $S_r=f_r=1.0$ ,  $\epsilon_r=0.5$ )

由圖中可明顯看出其結果相當一致，其反射率在入射角度 $\theta=53^\circ$ 時會有一接近零反射的極小值發生，反射率值約為0.02，透過率約為0.41，能量損失係數則高達0.83。

國立臺灣海洋大學河海工程系 737

### 四、波浪斜向入射結構物數值模擬

模式驗證(3/4)

圖4.6.4 波浪斜向入射四列透波模反射率與 $k \cos \theta$ 之關係 ( $d/h=0.5$ ,  $B/h=1.0$ ,  $l/h=4.0$ ,  $\Delta B/l, N=4$ ,  $S_r=f_r=1.0$ ,  $\epsilon_r=0.5$ )

由圖中可看出各種不同入射角度之反射率會在  $k \cos \theta = \pi$  及  $2\pi$  附近產生反射率局部最大值。

國立臺灣海洋大學河海工程系 738

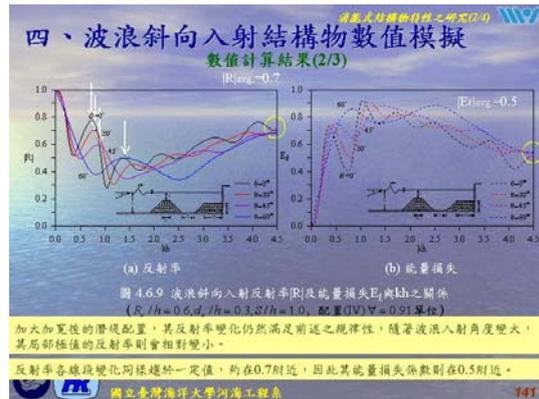
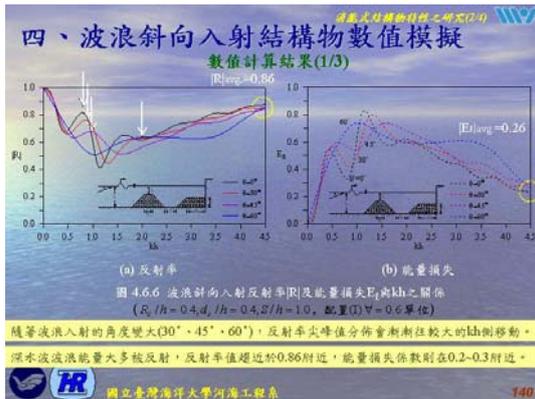
### 四、波浪斜向入射結構物數值模擬

模式驗證(4/4)

圖4.6.5 波浪斜向入射四列透波模反射率與  $2(B+d) \cos \theta / L$  之關係 ( $d/h=0.5$ ,  $B/h=1.0$ ,  $l/h=4.0$ ,  $\Delta B/l, N=4$ ,  $S_r=f_r=1.0$ )

反射率之局部最大值發生在  $2(B+d) \cos \theta / L = 1, 2$  附近產生，其反射率分佈情形類似Bragg反射。

國立臺灣海洋大學河海工程系 739



### 四、波浪斜向入射結構物數值模擬 數值計算結果(3/3)

不同配置下反射率出現極值大小與發生位置表

波向	R_max			R_min		
	kh	R	kh	kh	R	kh
$\theta=0^\circ$	0.415	0.672	0.775	0.819	1.133	0.412
$\theta=30^\circ$	0.505	0.659	0.885	0.303	1.305	0.488
$\theta=45^\circ$	0.595	0.638	0.955	0.677	1.385	0.512
$\theta=60^\circ$	1.065	0.51	2.215	0.682	3.113	0.627

波向	R_max			R_min		
	kh	R	kh	kh	R	kh
$\theta=0^\circ$	0.415	0.63	0.775	0.8	1.09	0.278
$\theta=30^\circ$	0.46	0.617	0.82	0.756	1.225	0.405
$\theta=45^\circ$	0.595	0.593	0.91	0.638	1.54	0.459
$\theta=60^\circ$	0.955	0.452	1.9	0.581	2.8	0.53

波向	R_max			R_min		
	kh	R	kh	kh	R	kh
$\theta=0^\circ$	0.37	0.547	0.775	0.792	1.09	0.229
$\theta=30^\circ$	0.46	0.54	0.82	0.724	1.225	0.316
$\theta=45^\circ$	0.55	0.523	0.91	0.623	1.54	0.375
$\theta=60^\circ$	0.863	0.412	1.385	0.54	2.753	0.428

透水管堤體積愈大，其反射率極小值愈小且發生位置的 $kh$ 值愈小。

國立臺灣海洋大學河海工程學系 142

- ### 環境保護型消能結構物結論(1/3)
- 採用分間式雙潛堤配置，表示潛堤間過水空間變大，波浪可以利用此空間及潛堤上方水域來作消能，水工模型試驗結果顯示在長週期波下都會有最小反射率值，而且其值會隨著潛堤高度、高度之增加而下降。在短週期波下，由於波浪能量大多集中於水面附近，較無法適應雙潛堤存在，波浪大多從潛堤上方通過，僅有部份進入透水管堤內，因此消能效果有限，所以反射率會有較大值。
  - 數值計算結果顯示發生最小反射率值之位置有漸漸往長週期波( $kh$ 較小)處移動，當堤高、堤寬增加，經由換算第一道堤前距至岸壁距離( $D$ )與入射波長之比大約在 $D/L=0.26$ 及 $0.85$ 附近處；而且其趨勢與水工模型試驗結果相當一致。
  - 由於有第一道透水潛堤阻擋，波浪通過後作用到直立岸壁波壓力會明顯降低，都比Sainflou重複波壓力小，其最大波壓力值發生在水面附近( $z/h=0.25$ )；而且壓力會隨著水深漸增壓力漸減；但是長週期 $T=1.7\text{sec}$ 採用分間式配置，直立岸壁波壓力反而變大，即使提高堤厚增加，無因次最大波壓力值會從 $P/\rho gH=0.693$ (連結式)增加至 $P/\rho gH=0.833$ (分間式)。
- 國立臺灣海洋大學河海工程學系 143

- ### 環境保護型消能結構物結論(2/3)
- 水工模型試驗結果顯示：四分之一圓弧板上由於孔洞作用，波浪潮上時會有部分波浪落入孔洞中，因此大大降低波浪潮高，水面上波壓計完全量測不到波浪作用力，所測得壓力為零，而且以位於水面下 $7\text{cm}(z/h=0.14)$ 可以量測到最大波壓力，但是其壓力值與連結式壓力值作比較後發現偏小，而最後一組長週期波試驗，卻發現大部份最大無因次波壓力值會變大。
  - FLOW-3D計算流場分佈清楚顯示第一道潛堤上方流速變大，且二層堤間過水空間流速降低趨勢，而四分之一圓弧孔板的設置，有效降低了其與直立岸壁間之流速大小，另外，週期 $T=1\text{sec}$ 與 $T=1.7\text{sec}$ 雖同屬於中間性波，但週期 $T=1.7\text{sec}$ 波速及波長比週期 $T=1\text{sec}$ 的大，週期 $T=1.7\text{sec}$ 在此配置下過水室上方及四分之一薄板附近的整體流速較 $T=1\text{sec}$ 的大。
  - 波浪正向或斜向入射環境保護型防波堤，不論在何種配置下，其反射率皆會產生波動變化，又以正入射( $\theta=0^\circ$ )會有較大反射率，但會隨著波浪斜向入射的角度變大，反射率尖峰分佈會往較大的 $kh$ 值側移動。而在 $kh=4.5$ (深水波)時，波浪能量大多被反射，無論入射角度為何，各配置下反射率皆會趨於一定值。
- 國立臺灣海洋大學河海工程學系 144

### 報告結束 敬請指教

國立臺灣海洋大學河海工程學系 145