

99-75-7484

MOTC-IOT-98-H2DB004

消能式結構物特性之研究(1/4)



交通部運輸研究所

中華民國 99 年 5 月

99-75-7484

MOTC-IOT-98-H2DB004

消能式結構物特性之研究(1/4)

著 者：邱永芳、林炤圭、蔡金吉

交通部運輸研究所

中華民國 99 年 5 月

消能式結構物特性之
(1/4)

交通部運輸研究所

GPN: 1009901783

定價 200 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. (1/4) / 邱永芳, 林
炤圭, 蔡金吉著. -- 出版 - 臺北市：交
通部運研所, 民 99. 05

面； 公分

參考書目：面

ISBN 978-986-0-3694-1 (平裝)

1. 港埠工程 2. 數值分析 3. 生態模擬

443.2

99009949

消能式結構物特性之研究(1/4)

著 者：邱永芳、林炤圭、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 (中文版>中心出版品)

電 話：(04)26587176

出版年月：中華民國 99 年 5 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 100 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價：新臺幣 200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

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

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

GPN：1009901783

ISBN：978-986-02-3694-1 (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(1/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-986-02-3694-1（平裝）	政府出版品統一編號 1009901783	運輸研究所出版品編號 99-75-7484	計畫編號 98-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、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：林昭圭副教授 研究人員：、岳景雲、翁文凱、楊國誠 地址：基隆市中正區北寧路2號 聯絡電話：02-24622192		研究期間 自 98 年 03 月 至 98 年 11 月
關鍵詞：消能式結構物、數值模擬、水工模型試驗			
摘要： 本計畫為四年期研究計畫之第一年，主要目標在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。依環境特性與功能屬性分類，消能式結構物的型式包含長波抗浪型、功能目的使用型或臨時性設施型、以及環境保護型等結構物等三大類型。本研究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，並期能達符合海岸空間環境需求且具保全功能之目的。長波抗浪型結構物主要著重於如何利用水力阻尼削減長週期波動能量的水工模型試驗，同時也引進FLOW-3D軟體進行相關的模擬。從研究結果確認內建斜坡式消波結構物可以有效地削減入射波能，但消波室內的排水問題必須解決。透過模型試驗及數值模擬，功能目的使用型或臨時性設施型的研究著重於快速佈放柔性浮式結構物的討論，藉由浮式結構物的數值模擬與水工模型試驗發現浮體下方所增加的直立翼版會增加浮體的附加質量，不僅改變其運動型式，也改變了運動的週期。環境保護型主要著重於以環境保護型則研擬一由潛堤與消波式圓弧型岸壁構成的潛式多孔隙透水結構物對波浪水理特性影響的數值模擬以及部分的水工模型試驗。從研究中發現本計畫所設計的潛式多孔隙透水結構物除了具備應有的消波功能外，也可促使波浪在堤身上擾動及碎波，應可增加氣水的交換並進而提高水中的含氧量，此一情形有利於近岸的海岸水下生態復育。			
成果效益： 1. 在經濟效益上，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。 2. 在應用上，可針對臺灣各區域之港灣特性決定結構型式，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考依據、提供近岸保護工法各港在鄰港區域地形保護之應用、提供消能結構物設計使用，以減低工程經費及延長結構物之壽齡。			
出版日期	頁數	工本費	本出版品取得方式
99 年 5 月	186	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按工本費價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 ☐ 月 ☐ 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
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 (1/4)			
ISBN(OR ISSN) ISBN978-986-02-3694-1 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009901783	IOT SERIAL NUMBER 99-75-7484	PROJECT NUMBER 98-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 2009 TO November 2009
RESEARCH AGENCY: NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lin Jaw-guei PROJECT STAFF: Yueh Ching-yun, Weng Wing-kai, Yang Kuo-cheng. 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			
ABSTRACT The major goal of this four-year study is to develop suitable new wave dissipation structures for Taiwan coastal zones with different characteristics. The functions of coastal structures around Taiwan can be divided into three types: long period wave dissipation type, fast installation/special purpose type, and environmental protection/restoration type. With the numerical simulations and hydraulic model tests, the new structures of the three types will be designed, tested, and evaluated. A study of long period wave dissipation type, a series of hydraulic model tests and numerical simulations with FLOW-3D on the new prototype of wave dampening by a hydraulic mechanism were done, and the results show their effectiveness. For the fast installation/special purpose type structure research, a floating structure with two wings under the bottom was studied via model tests and numerical simulations, the added wings were found to be able to increase the added mass of the floating structure and thus detour the behavior of motions and the frequency of vibrations. For the environmental protection/restoration type structure research, a combination of a submerged dike and a curve-type perforated wave dissipation breakwater was set up and evaluated by hydraulic model tests and numerical simulations. The results show that, except for the functions of coastal structures, such structures can cause strong mixing in the waves and thus should increase the quantity of air inside the water, which is needed for the development of aquaculture.			
DATE OF PUBLICATION May 2010	NUMBER OF PAGES 186	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

中文摘要表·····	I
英文摘要表·····	II
目錄·····	III
圖目錄·····	VI
表目錄·····	XII
照片目錄·····	XIV
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·····	1-3
1.3 研究範圍與對象·····	1-5
1.4 研究內容與工作項目·····	1-7
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·····	2-3
2.3 波浪的溯升/溯降(run up/run down)理論·····	2-6
2.3.1 碎波相似參數(Surf-Similarity Parameter; Iribarren Number) ·····	2-9
2.3.2 波浪的溯升/溯降·····	2-10
2.4 材料阻尼式結構研究·····	2-22
2.4.1 消能材料抗壓機械性質·····	2-24

2.4.2 消能材料周次負載實驗·····	2-26
2.4.3 彈性材料阻尼之水力結構物的收集與討論·····	2-34
2.5 水力式阻尼結構物的研究·····	2-36
2.6 數值模擬方法·····	2-46
2.6.1 FLOW-3D 之主要特性·····	2-46
2.6.2 FLOW-3D 所使用之理論方程式·····	2-52
2.6.3 數值模擬流程·····	2-54
2.6.4 數值計算結果與討論·····	2-58
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·····	3-1
3.2 理論推導·····	3-5
3.3 水工模型實驗配置與方法·····	3-13
3.3.1 實驗設備與儀器·····	3-13
3.3.2 實驗方法·····	3-17
3.3.3 進行實驗與量測·····	3-23
3.4 數值模擬與討論·····	3-24
3.4.1 翼板長度對浮體消波特性和運動之影響·····	3-25
3.4.2 翼板角度對浮體消波特性和之影響·····	3-30
3.4.3 翼板個數對浮體消波特性和之影響·····	3-32
第四章 環境保護型消能結構物·····	4-1
4.1 研究動機與目的·····	4-1

4.2 理論推導·····	4-8
4.3 數值計算結果與分析·····	4-15
4.4 水工模型試驗與結果分析·····	4-22
4.4.1 水工模型試驗·····	4-22
4.4.2 試驗結果與分析·····	4-25
第五章 結論與建議·····	5-1
5.1 結論·····	5-1
5.2 建議·····	5-2
5.3 成果效益與後續應用情形·····	5-4
參考文獻·····	6-1
附錄一 期中報告審查意見處理情形表·····	7-1
附錄二 期末報告審查意見處理情形表·····	8-1
附錄三 期中簡報資料·····	9-1
附錄四 期末簡報資料·····	10-1

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·····	2-4
圖 2.2.2 長週期波消能結構物之數值造波水槽研究·····	2-5
圖 2.2.3 Kee 等[10]之數值模型定義圖·····	2-5
圖 2.2.4 Kee 等[10]測試之數值模型系統(a)雙平版；(b)三平版·····	2-6
圖 2.3.1 波浪溯升/溯降示意圖·····	2-7
圖 2.3.2 波浪在不同的斜坡表面上的溯升與溯降示意圖·····	2-8
圖 2.3.3 光滑斜坡上之正向入射波的 $R_{u2\%}$ (CEM) ·····	2-12
圖 2.3.4 光滑斜坡上之正向入射波的 R_{us} (CEM) ·····	2-12
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 α_{eq} 及 α 的定義(CEM) ·····	2-15
圖 2.3.8 根據台階對溯升高度影響度對 ξ_{eq} 選用值的評估(CEM) ···	2-16
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) ·····	2-19
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)·····	2-20
圖 2.4.1 單軸壓縮工程應力應變圖·····	2-25

圖 2.4.2 不同橡膠材料彈性模數度硬度圖·····	2-26
圖 2.4.3 波形示意圖·····	2-27
圖 2.4.4 型式 A(a)周次應力振幅曲線圖(b)周次峰值應力曲線圖··	2-28
圖 2.4.5 型式 B(a)周次應力振幅曲線圖(b)周次峰值應力曲線圖··	2-28
圖 2.4.6 型式 C(a)周次應力振幅曲線圖(b)周次峰值應力曲線圖··	2-28
圖 2.4.7 型式 D(a)周次應力振幅曲線圖(b)周次峰值應力曲線圖··	2-29
圖 2.4.8 型式 A 不同周次遲滯曲線比較圖·····	2-30
圖 2.4.9 型式 B 不同周次遲滯曲線比較圖·····	2-30
圖 2.4.10 型式 C 不同周次遲滯曲線比較圖·····	2-30
圖 2.4.11 型式 D 不同周次遲滯曲線比較圖·····	2-31
圖 2.4.12 型式 A 周次塑性應變能曲線圖·····	2-32
圖 2.4.13 型式 B 周次塑性應變能曲線圖·····	2-32
圖 2.4.14 型式 C 周次塑性應變能曲線圖·····	2-32
圖 2.4.15 型式 D 周次塑性應變能曲線圖·····	2-33
圖 2.4.16 不同型式橡膠材質之周次塑性應變能曲線比較圖·····	2-34
圖 2.4.17 海岸快速安裝防波堤模型(美國陸軍工程研究及發展中心) ·····	2-35
圖 2.4.18 利用導槽式橡皮壩阻擋及削減波浪進入內水域的構想··	2-36
圖 2.5.1 內建斜坡式消能結構物的初步構想·····	2-38
圖 2.5.2 多孔隙隔艙式消能結構物的初步構想·····	2-39
圖 2.5.3 修正之內建斜坡式消能結構物的構想一·····	2-39
圖 2.5.4 修正之內建斜坡式消能結構物的構想二·····	2-39

圖 2.5.5 修正之內建斜坡式消能結構物的三種方案·····	2-40
圖 2.5.6 內建斜坡式消能結構物的波動與水流現象·····	2-41
圖 2.6.1 體積比函數 $F(x, y, z; t)$ ·····	2-48
圖 2.6.2 數值造波器示意圖·····	2-49
圖 2.6.3 數值模擬流程圖·····	2-55
圖 2.6.4 直立壁開孔模型外觀圖·····	2-56
圖 2.6.5 多孔隙介質模型外觀圖·····	2-56
圖 2.6.6 模型元件組合外觀圖·····	2-56
圖 2.6.7 x-z 平面網格區塊位置示意圖·····	2-57
圖 2.6.8 網格系統之 3D 示意圖·····	2-57
圖 2.6.9 計算領域之邊界條件示意圖·····	2-58
圖 2.6.10 入射波與反射波合成之包絡線·····	2-60
圖 2.6.11 波高計 1 至波高計 4 之量測位置·····	2-61
圖 2.6.12 小斷面水槽預備試驗之波高計量測值示意圖(CASE 1)··	2-61
圖 2.6.13 數值計算結果示意圖(CASE 1) ·····	2-64
圖 3.1.1 快速安裝防波堤系統構想圖·····	3-2
圖 3.1.2 RIBS 半比例尺現場實驗·····	3-3
圖 3.1.3 RIBS 水工模型試驗·····	3-4
圖 3.1.4 小型 RIBS 的基本配置圖·····	3-4
圖 3.1.5 大型 RIBS 的基本斷面圖·····	3-5
圖 3.2.1 繫留浮體定義圖·····	3-5

圖 3.3.1 實驗模型尺寸側面圖·····	3-18
圖 3.3.2 模型佈製圖·····	3-21
圖 3.3.3 斷面水槽配置圖·····	3-21
圖 3.3.4 拉力彈簧之率定·····	3-23
圖 3.3.5 入射波波型(標示處為擷取位置) ·····	3-24
圖 3.3.6 反射波波型(標示處為擷取位置) ·····	3-24
圖 3.3.7 透射波波型(標示處為擷取位置) ·····	3-24
圖 3.4.1(a) 浮體底部配置單翼板定義圖·····	3-25
圖 3.4.1(b) 浮體底部兩側配置雙翼板定義圖·····	3-25
圖 3.4.2(a) 自由浮體不同翼板長度對反射率之影響·····	3-27
圖 3.4.2(b) 自由浮體不同翼板長度對透過率之影響·····	3-28
圖 3.4.3(a) 不同翼板長度對自由浮體之前後移(surge)運動之影響·····	3-28
圖 3.4.3(b) 不同翼板長度對自由浮體之垂直移(heave)運動之影響·····	3-29
圖 3.4.3(c) 不同翼板長度對自由浮體之俯仰(pitch)運動之影響·····	3-29
圖 3.4.4 $\sigma^2 h/g = 1.5 \sim 3.0$ 波浪入射時，不同翼板角度對其反射率之影響·····	3-31
圖 3.4.5 $\sigma^2 h/g = 0.5 \sim 1.25$ 波浪入射時，不同翼板角度對其反射率之影響·····	3-31
圖 3.4.6 安裝不同翼板數量對其反射率之影響·····	3-32
圖 4.1.1(a) 過去傳統保護海岸的工法·····	4-2

圖 4.1.1(b) 波浪直接衝擊消波工·····	4 - 2
圖 4.1.1(c) 利用人工潛堤保護工法·····	4-3
圖 4.1.2 生態型潛礁示意圖·····	4-4
圖 4.1.3 珊瑚移植示意圖(日本平良港)·····	4-4
圖 4.1.4 未來防坡堤示意圖·····	4-4
圖 4.1.5 縱條型開孔堤·····	4-5
圖 4.1.6 中空型多孔堤·····	4-5
圖 4.1.7 萬代福靜波沉箱側視圖·····	4-5
圖 4.1.8 凸型曲面防波堤構造示意圖·····	4-5
圖 4.1.9 凸型曲面防波堤(日本船川港) ·····	4-5
圖 4.1.10 半圓形防波堤·····	4 - 6
圖 4.2.1 環境保護型防波堤定義圖·····	4-9
圖 4.3.1 改變潛堤間距時反射率 $ R $ 變化與 kh 關係圖($d_c/h=0.4$, $R_c/h=0.4$) ·····	4-17
圖 4.3.2 改變潛堤間距時反射率 $ R $ 變化與 kh 關係圖($d_c/h=0.4$, $R_c/h=0.6$) ·····	4-17
圖 4.3.3 改變潛堤間距時反射率 $ R $ 變化與 kh 關係圖($d_c/h=0.3$, $R_c/h=0.4$) ·····	4-18
圖 4.3.4 改變潛堤間距時反射率 $ R $ 變化與 kh 關係圖($d_c/h=0.3$, $R_c/h=0.6$) ·····	4-18
圖 4.3.5 改變潛堤間距時反射率 $ R $ 變化與 D/L 關係圖($d_c/h=0.4$, $R_c/h=0.4$)·····	4-19
圖 4.3.6 改變潛堤間距時反射率 $ R $ 變化與 D/L 關係圖($d_c/h=0.4$,	

Rc/h=0.6)·····	4-19
圖 4.3.7 改變潛堤間距時反射率 $ R $ 變化與 D/L 關係圖($dc/h=0.3$, Rc/h=0.4)·····	4-20
圖 4.3.8 改變潛堤間距時反射率 $ R $ 變化與 D/L 關係圖($dc/h=0.3$, Rc/h=0.6)·····	4-20
圖 4.4.1(a) 水動力實驗室斷面水槽(側視)·····	4-29
圖 4.4.1(b) 定床斷面造波水槽波高計配置示意圖 連結式($S/h=0$)··	4-30
圖 4.4.2 波浪通過連結式消能結構物之 $ R $ 與 kh 關係圖($dc/h=0.4$ 、 Rc/h=0.4)·····	4-30
圖 4.4.3 波浪通過連結式消能結構物之 $ R $ 與 kh 關係圖($dc/h=0.4$ 、 Rc/h=0.6)·····	4-31
圖 4.4.4 波浪通過連結式消能結構物之 $ R $ 與 kh 關係圖($dc/h=0.3$ 、 Rc/h=0.4)·····	4-31
圖 4.4.5 波浪通過連結式消能結構物之 $ R $ 與 kh 關係圖($dc/h=0.3$ 、 Rc/h=0.6)·····	4-32
圖 4.4.6 直立岸壁上波壓與 Sainflou 重複波壓理論比較圖·····	4-33
圖 5.1.1 定床斷面造波水槽環境保護型消能結構物配置示意圖····	5-3

表 目 錄

表 2.3.1 不透水斜坡上的碎波型式與相關的 ξ_0 值(CEM)	2-10
表 2.3.2 式(2.3.3)的相關係數.....	2 - 1 2
表 2.3.3 式(2.3.3)中表面粗糙度減衰係數(適用於 $1 \leq \xi_{op} \leq 3 \sim 4$).....	2-14
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 - 1 8
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 - 2 1
表 2.4.1 材料製成特性表.....	2-24
表 2.5.1 空水槽造波測試的三次反射率分析結果.....	2-42
表 2.5.2 方案一造波測試的三次反射率分析結果.....	2-43
表 2.5.3 方案二造波測試的三次反射率分析結果.....	2-44
表 2.5.4 方案三造波測試的三次反射率分析結果.....	2-45
表 2.6.1 數值計算之波浪條件.....	2-59
表 2.6.2 數值模擬及水槽試驗之反射率(K_R)比較表.....	2 - 6 3
表 3.3.1 試驗波浪條件.....	3-19
表 4.3.1 配置(I)反射率最小值 $ R _{\min}$ 與發生位置.....	4-21
表 4.3.2 配置(II)反射率最小值 $ R _{\min}$ 與發生位置.....	4 - 2 1
表 4.3.3 配置(III)反射率最小值 $ R _{\min}$ 與發生位置.....	4 - 2 1
表 4.3.4 配置(IV)反射率最小值 $ R _{\min}$ 與發生位置.....	4 - 2 1
表 4.4.1 波浪通過環境保護型消能結構物之波浪條件.....	4-29

表 5.1.1 波浪通過環境保護型消能結構物之波浪條件($S/h=0$ 、 $d_c/h=0.4$ 、 $R_c/h=0.4$)·····	5 - 3
---	-------

照 片 目 錄

照片 2.4.1 河川工程所使用的橡皮壩·····	2-36
照片 2.5.1 內建斜坡式消能結構物實體模型·····	2-40
照片 2.5.2 試驗斷面水槽全景·····	2-40
照片 2.5.3 修正之內建斜坡式消能結構物水工模型試驗·····	2-41
照片 3.3.1 斷面造波水槽·····	3-14
照片 3.3.2 小斷面水槽消波斜坡·····	3-14
照片 3.3.3 造波機·····	3-15
照片 3.3.4 波高計·····	3-15
照片 3.3.5 訊號增幅器·····	3-15
照片 3.3.6 資料擷取接線·····	3-16
照片 3.3.7 資料擷取系統螢幕顯示·····	3-16
照片 3.3.8 傾角計(左) MOTION SENSOR(右)·····	3-17
照片 3.3.9 拉力計·····	3-17
照片 3.3.10 彈簧、細鋼索、滑車、繫結器·····	3-20
照片 4.1.1(a) 基隆市碧砂漁港(右視)·····	4-3
照片 4.1.1(b) 以高大海堤及消波塊構成之海岸保護工(左視)·····	4-3
照片 4.1.1(c) 降低堤頂高程後之海洋大學工學院後方海堤·····	4-3
照片 4.1.1(d) 海洋大學藝文中心於工學院後方曼波公園舉辦海堤音樂 會·····	4-4
照片 4.4.1 試驗設備與儀器·····	4-28

照片 4.4.2 模型製作與配置·····	4-29
-----------------------	------

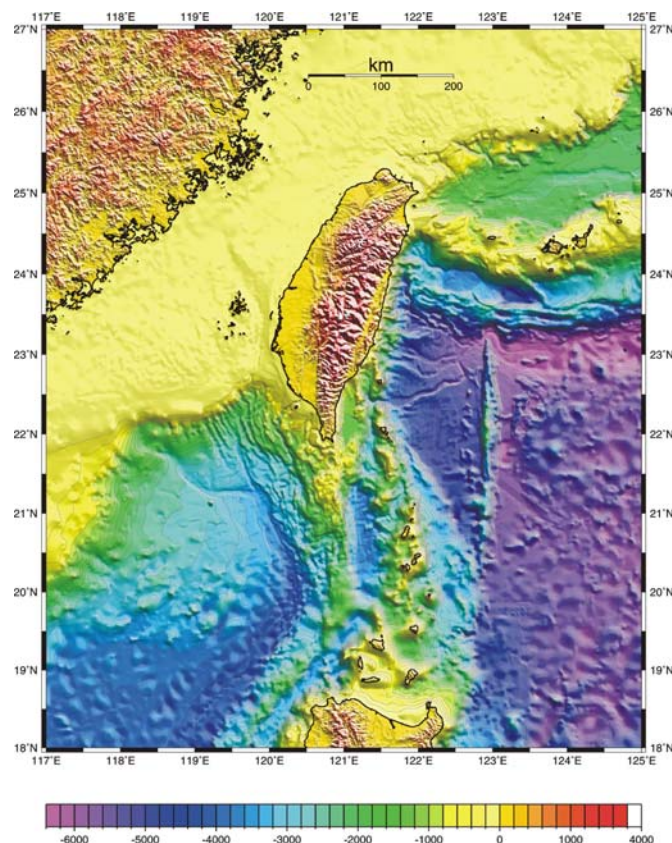
第一章 計畫背景分析

1.1 計畫目的

臺灣由於位處於大陸棚的邊緣(如圖 1.1.1 所示)，水深地形相當地複雜且變化劇烈，連帶地也影響到附近的海氣象變化，以及海岸設施所受的不同外力型式。例如，臺灣東部海底坡度陡峭，且是東北季風波浪、颱風波浪或湧浪必經之地，使得此區域的海岸經常要受到長浪的侵襲，而相關的港灣構造物也因此幾乎都採用重力式的大型結構物，然而在強大波力經年累月的作用下，臺灣東部的港灣結構物常發生因大波浪作用而受到破壞的工程案例，顯示以目前依規範所設計之重力式結構物以硬碰硬的抗浪方式似乎尚不足以抵抗此種強大的自然力的作用，因此有必要從其他削減波能的方式來思考，研發其他新型構造物或配置以其能降低長浪之作用力。而臺灣西部的海岸則屬海底平坦且多沙的特性，由於中央山脈的阻擋，颱風期間之波力不若東部所受的影響大，但伴隨而來的則是因為河川輸沙造成海岸的急遽變遷，使得沿岸的水下生態不像臺灣其他海岸那麼豐富，因此如何以人為工程方式促進及豐富海洋生態的復育，應列為臺灣西部海岸環境復育的首要目標。而長久以來，不管結構物設施之使用功能或用途，臺灣港灣結構物之設置皆以永久性設施為主要考量，其原因可能包含自然環境的惡劣(風大浪大)，以及工程顧問公司的專業習性甚而工程人員養成教育中所建立以為採用永久性設施可以一勞永逸的觀念，所導致今天臺灣可資利用的海岸幾乎被人工構造物所佔據。但對於某些臨時性或季節性等使用率並不是非常高的海岸空間使用，建構永久性港灣設施不僅可能造成投資過當，也可能間接地被環保人士歸類為海岸景觀及環境破壞的殺手。以位於臺北縣瑞芳鎮瑞濱海岸的深澳油港為例，由於僅是作為卸下外國進口原油之用，使用率不若商港那麼頻繁，為了避免破壞深澳灣的海域生態及水質，同時也節省工程建設經費，深澳油港自始即採用棧橋式卸油碼頭，同時也僅利用天然灣澳的屏

障，不作防波堤，只興建必要性的泊船與工作船碼頭，至今已經使用至少三十年而仍能正常運作。但自此以後，國內似乎未見有任何類似的設計。任何海岸設施的規劃設計均應考慮該項設施所定位的功能用途是經常性的或者是間斷性甚至偶發性的，來決定所應該採用的型式與規模。

依據上述的思維，及參考臺灣各地區的環境特性與設施的功能屬性分類，港灣結構物的功能大致可分為長波抗浪型(以臺灣東部海岸為主要考量)、功能目的使用型或臨時性設施型、及環境保護型(以臺灣西部海岸為主要考量)等三大類型。本計畫之主要目標即在於針對上述三種型態，探討並研發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，以達符合海岸空間環境需求且具保全功能之目的。



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

臺灣位處於歐亞大陸交界處，東、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、西部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，加上西部人口集中，在過去幾十年高度追求經濟發展，以及每年天然災害颱風的推波助瀾下，導致臺灣本島一千三百餘公里的海岸線，已有超過 55% 的比例成為人工海岸，佈滿了大大小小三百多個港口及看似無限延伸的海堤，此種高度開發建設與充分利用重力式硬體設施的結果亦導致海岸空間環境的強烈變遷，不僅造成海岸區域生態失去平衡，亦影響海岸區域的景觀。

近年來由於人民生活水準提高，環保意識抬頭，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、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，2007 年 6 月行政院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，在海堤上已經儘量採用符合生態的柔性工法，但是港灣構造物部分則尚無有效而妥善的改善方式，仍以重力式結構物為主要的規劃設計考量。港灣構造物設置的目的主要提供一可供船舶靠泊、上下貨、休憩、整修及避颱、避風之水域，然而檢視臺灣之港口，有部分港灣或因規模太小、或因環境地理因素、或因使用目的功能的需求(並非所有港口皆需要或有能力具有避風、避颱等功能)，而僅能於平時提供休憩、上下貨等功能，此類港口之保護設施如果仍以傳統重力式結構設施作為防波堤等使用的話，由於使用性相對不高但卻長期佔用閒置，其不僅影響海岸環境生態甚鉅，亦可能破壞了海岸空間景觀，阻礙或阻斷了人們的親水活動。另外，由於臺灣東西兩岸地形特性的差異性甚大，加上平均每年有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。東部海域坡度陡且面像廣

闊的太平洋，港灣結構物常面臨長波作用，結構所受波壓較大，亦常發生防波堤破壞或港池共振問題；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海岸劇烈變遷問題。

根據前面所述，臺灣各海岸地區之地理環境、所面臨之問題、港灣碼頭之使用功能需求皆有所不同，僅以單一型式之重力式結構物並不足以解決所有臺灣地區各港灣所面臨之問題，而且可能造成資源上的浪費，實有必要針對各種要求型態提出其解決之方式。

如前節所述，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復育功能)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，目前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，經常面臨結構破壞或港池共振等問題，而依現有普遍觀念採用增加結構物之強度或重量以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，但如果要應用於港灣構造物的話，其適當型式為何，亦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，而是定位於以抵抗季節風浪為主，其規劃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、海上救難、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，以設置簡單快速、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。

1.3 研究範圍與對象

針對長波抗浪型之區域、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，大致可分為下列三個型式：

1. 長波抗浪型

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岸地形的變化。而消能的方式尚可以從利用結構體的慣性阻尼方式來思考，此為本項研究重點的思考方向。阻尼型消能式結構物可以結構元件或水力結構形成其阻力特性，結構元件之阻尼特性乃利用彈性材料設計阻尼器，並安裝於直立式防波堤海側的適當位置。當大波浪作用於結構體時，藉由彈性材料的變形發揮阻尼作用，以達到消能的目標，本計畫主要以防波堤設施為考量。此種設計構想是在調整原本屬於剛性的防波堤使其在主要波浪作用高度附近具有某一程度的彈性，利用彈性構材產生能量的阻尼。而水力結構之阻尼特性則利用港灣結構與水理運動之特性形成阻尼，以達消減長波能量的功能，本計畫主要以港內碼頭設施為考量。

2. 功能目的使用型或臨時性設施型

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：

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。

針對海岸因為風災而發生嚴重流失時，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。

3. 環境保護型

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。

本研究主要以水工模型試驗及理論數值解析方式探討環境保護型結構物之相關特性。

1.4 研究內容與工作項目

本計畫主要研究工作乃針對長波抗浪型、環境保護型及功能目的使用型或臨時性設施型三大屬性類型區域開發各自較為合適的消能結構設施。預計分4年執行，各年度主要研究工作分述如下。本年度的實際工作進度說明則依各研究子題分獨立章節說明於后。

第一年：

1. 長波抗浪型：

能以較柔式的阻尼方式降低波浪之能量，其主要分為結構材料阻尼與水力式阻尼兩種型式。

- (1) 材料阻尼式結構：首先將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。
- (2) 水力式阻尼結構：首先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。

2. 功能目的使用型或臨時性設施型：

功能目的或臨時性設施之海事結構以浮式結構較為通用與合適，其著眼點主要在於施工簡便、符合環境保護與經濟原則，本年度首先對柔性浮式結構物理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，並進行水工模型試驗以驗證數值模擬結果。

3. 環境保護型：

本年度首先以數值計算考慮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。

第二年：

1. 長波抗浪型：

波抗浪型材料阻尼式結構在本年度將使用有限元素方法進行電腦模擬，尋求最佳消能元件外型分析。而水力式阻尼結構亦在本年度建構數值模擬程式，並進行相關的測試與模擬探討。

2. 功能目的使用型或臨時性設施型：

延續第一年度所建立之解析構架，並將浮體下方之兩薄板推展至可撓性薄板，並分別以彈性樑及弦方程式加以模擬，探討及消波特性之差異，同時並與第一年度之研究成果相互比較。

3. 環境保護型：

接續第一年之研究，並將入射波浪由正向入射推展至斜向入射，檢討波浪斜向入射時，直立堤前潛式透水結構之消能效果。

第三年：

1. 長波抗浪型：

材料阻尼式結構研究將配合水工模型試驗，以檢驗所設計之元件

對於長波之實際消能效果，並檢討配置之型式。而水力阻尼機構則利用水工斷面模型試驗及數值模式，對各種可能的水力阻尼機構，完整地進行測試與比較。在前三年中主要以碼頭用的阻尼機構進行研究，以探討如何削減港內的長週期波動能量，在研究過程中也同時研討針對衝擊波力的處理方式。

2. 功能目的使用型或臨時性設施型：

本年度之研究重點則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，加入流之效應，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：

年度將進行水工模型試驗，其實驗結果可與數值計算之結果做一驗證，並且可以決定試驗材料在數值計算中與其相關的係數之值。

第四年：

1. 長波抗浪型：

材料阻尼式結構研究將對具最佳遲滯阻尼特性及外型的消能元件進行一系列不同負載條件下的疲勞試驗，建立壽命曲線以評估消能結構物在不同波浪作用下得使用壽命。同時觀察構件在破損情形，以做為消能結構物，汰舊換新之依據。而水力阻尼機構研究在本年度將進行完整的測試，及針對實際應用時綜合性的檢討。

2. 功能目的使用型或臨時性設施型：

本年度將探討實際應用時，浮體下方薄板使用材料的性質，並檢討透水性薄版對波浪水流之影響，同時針對實際應用時之型式進行檢討。

3. 環境保護型：

針對前述三年之研究成果綜合評估，並檢討合於實際應用之方案與配置。

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是為一體，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。然而這些削減波能方式，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。

本部分的研究主要分為結構材料阻尼與水力式阻尼兩種型式。分述如下：

- (1) 材料阻尼式結構：主要研究對象是作為外廓設施的防波堤或海堤。本計畫將以兩年時間內，在實驗室完成相關的實驗分析與理論模擬。第一年將收集適用於海洋環境下的消能材料及製造商，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。第二年將對具最佳遲滯阻尼特性結構物進行一系列不同負載條件下的疲勞試驗，建立壽命曲線以評估，消能結構物在不同波浪作用下可使用壽命。同時觀察構件在外表破損情形，以做為消能結構物汰舊換新之依據。第三年將選一海堤將消能結構物配置於海堤上，配合電腦模擬分析如何最佳的現場配置以減少海堤搖晃程度來減緩港區內波浪傳遞的能量傳播，確保港區內船舶航行安全。但此部分的研究內容與進度在本年度期中審查以後，參考審查委員的建議未來將重新調整，並以結構物的型式設計與測試為首要工作。
- (2) 水力式阻尼結構：主要研究對象是港內的碼頭設施。本計畫首先將就目前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。目前初步之研究構想如下：
 - a. 收集自然及人工斜坡之相關研究成果，以整理分析斜坡地形之消波

特性

b. 設計多種直立式多孔隙消波結構物並進行相關之試驗與評估。

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，目的是希望能夠將長週期波的反射能量降到最低，同時又能兼具碼頭靠泊船舶及裝卸貨物之用，因此該結構型式基本上外觀應該為直立式多孔隙或透水的壁面。對於直立式消波結構物至今已經開發有相當多種型式且應用於工程實務上，例如利用萬代福等多孔隙直立塊體堆疊或開孔消波室的多孔隙消波碼頭，斜坡棧橋式碼頭等。然而由於縱深有限，對於長週期波的消能功能則不太明顯。

在材料阻尼方面的研究主要是以橡膠材料為主，探討適用於海洋環境下的最佳的消能材料及幾何構造體，以提供最佳的消能機制。參考 Kozhushko 及 Koponv^[14]、Saintie 等人^{[27],[28]}、Kim 等人^[12]、Kim 及 Jeong^[13]、Legorju-jago 及 Bathias^[21]、Mars 及 Fatemi^{[25],[26]}的相關文獻可知在視由眾多探討橡膠材料在周次負載做用下，可知橡膠材料主要破壞型態是疲勞破壞。

橡膠材料目前常應用於防撞吸震、隔音、止水等裝置，更因其所具備之高壓縮強度、良好吸能效果及回復能力等特性，在工程上亦常被應用於結構物體上做為的消能機材，吸收外界衝擊能量，達到結構體減震之目的。基於相同消能減震概念，因本計劃預定使用橡膠材料做為消能材料以保護海堤，因此須充份掌握橡膠材料在外力長期做用下材料的周次行為變化。同時根據橡膠材料受損情況狀況，建立較佳使用壽命的估算方法。在眾多探討橡膠材料在周次負載做用下，發現橡膠材料主要破壞型態是疲勞破壞。不同橡膠材料在不同外力型態下其壽命估算方法有不同定義，如 Kozhushko and Koponv^[14]所定義。如何選定在海洋環境中合適的消能材料，首先對此類主要市售橡膠材

料，設計者須對其基本性能需有所認知，方可對受測橡膠材料，發展一個簡單又符合海洋環境下疲勞損傷機制的分析模型，準確估算使用壽命，此目標將是本研究中的一個重要課題。

在水力阻尼方面的研究，雖然在港灣工程規劃設計與管理中都對港內的長週期波動能量所造成的負面影響相當頭痛。例如，港內的長週期波動可能引致較高的溯升高度進而影響繫靠船舶的穩定性及貨物的裝卸作業安全。但有關長波抗浪型結構物的研究文獻並不多。Hiraishi^[6]利用數值模擬的方式探討自然及人工斜坡對長週期波的消能效果，結果發現長週期波的反射率可以降低到 0.3 以下。Hiraishi^[7]利用水工模型試驗及數值造波水槽模擬的方式探討如圖 2.2.1 及 2.2.2 之長週期波消能結構物在 30 至 300 秒長週期波動作用下的功能，目前發現後側之多孔隙介質之深度至少需要達到將近一倍的波長，在實用上仍有討論的空間。Kee 等^[10]以 2D 線性波理論及 Darcy's law 探討沈箱消波室內裝兩層或三層略微傾斜或水平的多孔隙板(如圖 2.2.3 及 2.2.4 所示)，發現適當的沒水深度、傾斜角及孔隙率可以有效地降低長週期波的能量。

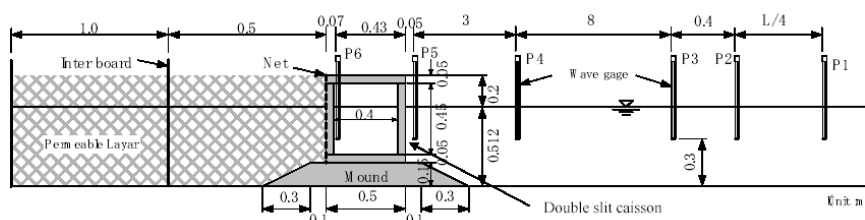
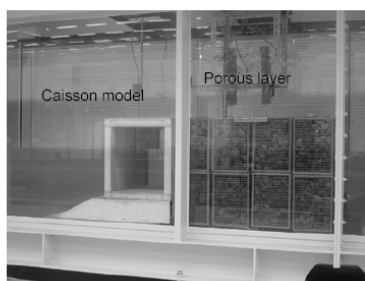


Fig. 1 Cross section of long period wave absorbing sea wall



(1) Model caisson and porous layer

(2) Prototype example of porous layer

Photo. 1 Overview of long period wave absorber

圖 2.2.1 長週期波消能結構物之研究概觀

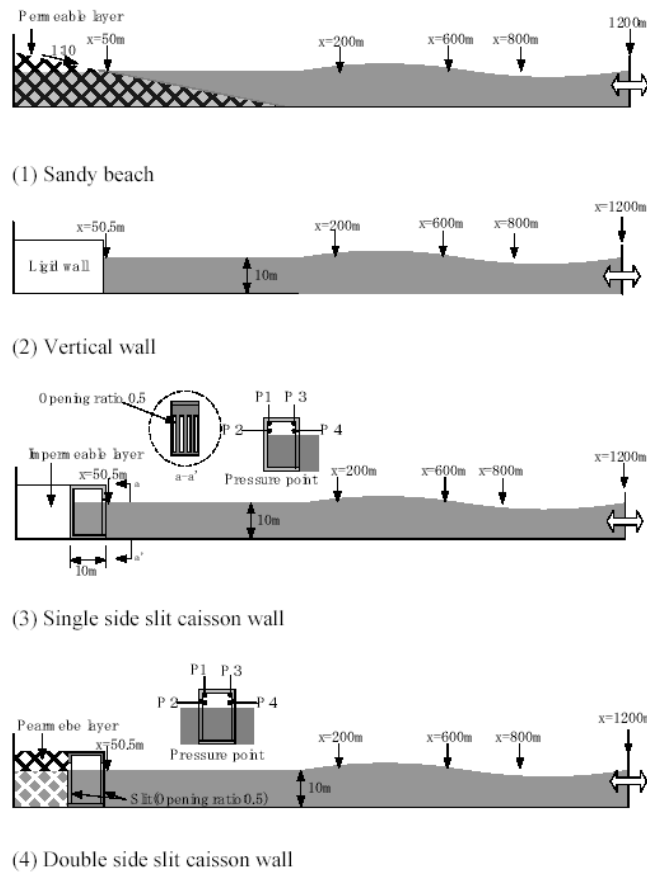


圖 2.2.2 長週期波消能結構物之數值造波水槽研究

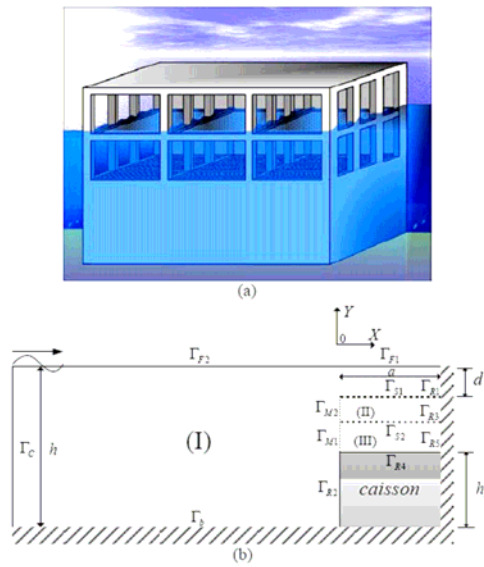


Fig. 1 Definition sketch (a) and integration domains (b)

圖 2.2.3 Kee 等^[10]之數值模型定義圖

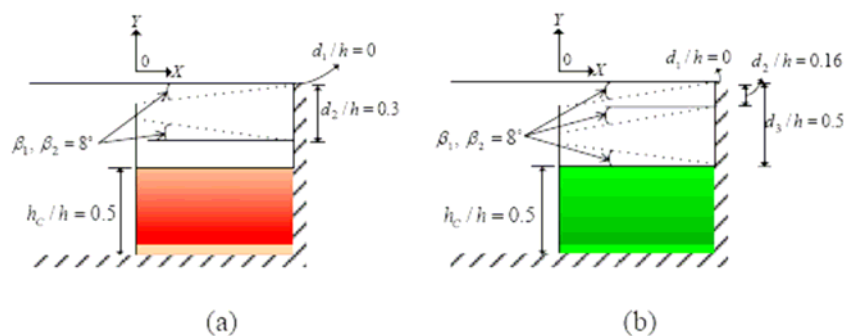


圖 2.2.4 Kee 等^[10]測試之數值模型系統(a)雙平版；(b)三平版

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^[8]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以下各節所述。

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)。本節首先參考參考郭一羽教授編輯的海岸工程學^[44]及美國陸軍工兵團編定的海岸工程手冊^[2](Coastal Engineering Manual，簡稱 CEM)整理相關的理論。

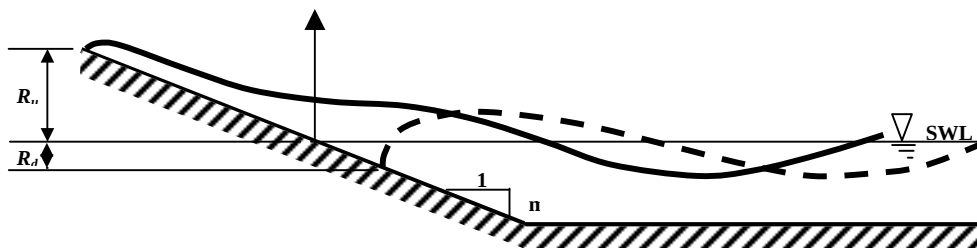


圖 2.3.1 波浪溯升/溯降示意圖

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為什麼拋石防波堤會被重新塑形成 S-曲線。

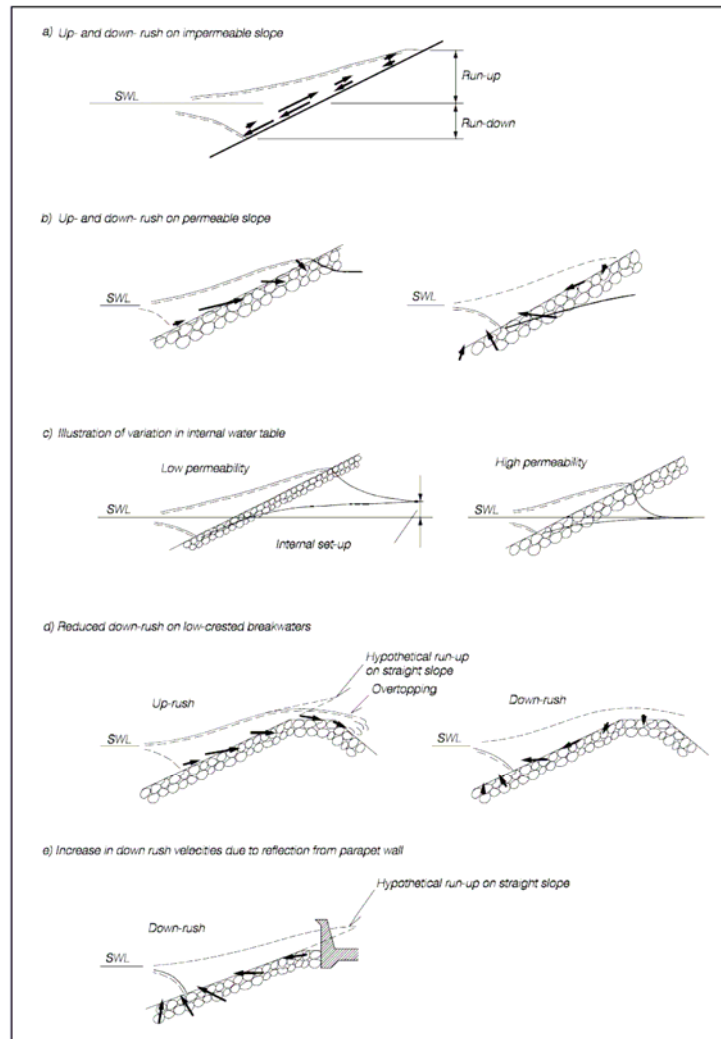


圖 2.3.2 波浪在不同的斜坡表面上的溯升與溯降示意圖

(Burcharth, 1993, CEM) ^[2]

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)

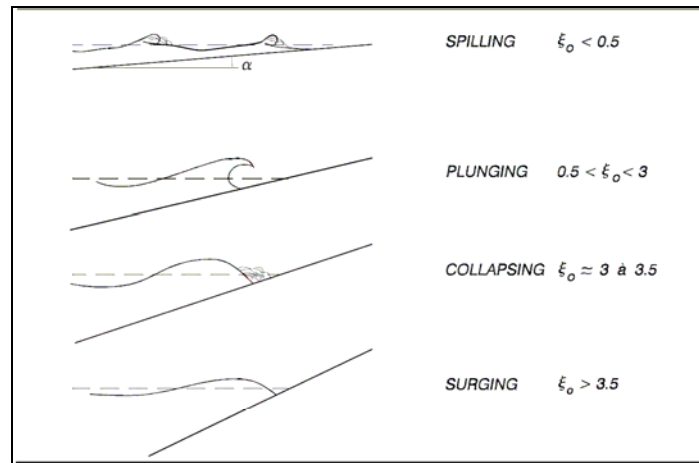
波浪在結構物上的溯升與溯降與波浪的碎波型式有關係。碎波的型式可以用碎波相似參數(Surf-Similarity Parameter, Battjes 1974b) ξ 來區分。該參數也被稱為碎波參數(Breaker Parameter or Iribarren Number)。原始的碎波相似參數是以規則波定義的

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

其中， α 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 ξ_b 。表 2.3-1 顯示碎波型式和相關的 ξ_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 ξ_0 值(CEM)



對於不規則波，碎波相似參數可定義為：

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

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； ξ = 碎波相似參數(ξ_{om} 或 ξ_{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 ξ 及 i 有關的係數； γ_r = 受表面粗糙度影響的減衰係數(在光滑表面上， $\gamma_r = 1$)； γ_b = 受台階影響的減衰係數(沒有台階的情形， $\gamma_b = 1$)； γ_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， $\gamma_h = 1$)； γ_β = 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) σ_{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(The coefficient of variation) σ_{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。

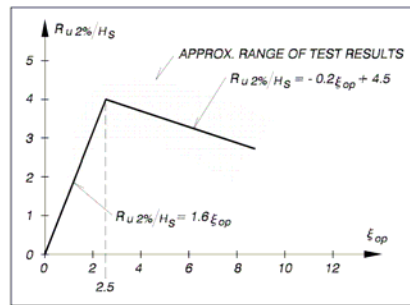


圖 2.3.3 光滑斜坡上之正向入射波的 $R_{u2\%}$ (CEM)

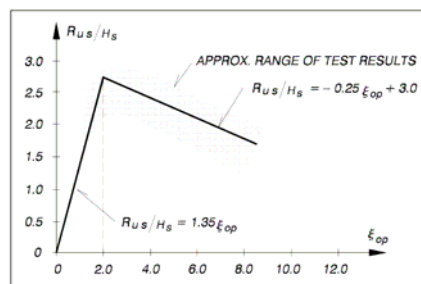


圖 2.3.4 光滑斜坡上之正向入射波的 R_{us} (CEM)

表 2.3.2 式(2.3.3)的相關係數

ξ	R_u	ξ -Limits	A	C	σ_{Ru} / R_u
ξ_{op}	$R_{u2\text{ percent}}$	$\xi_p \leq 2.5$	1.6	0	≈ 0.15
		$2.5 < \xi_p < 9$	-0.2	4.5	
	R_{us}	$\xi_p \leq 2.0$	1.35	0	≈ 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 γ 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。

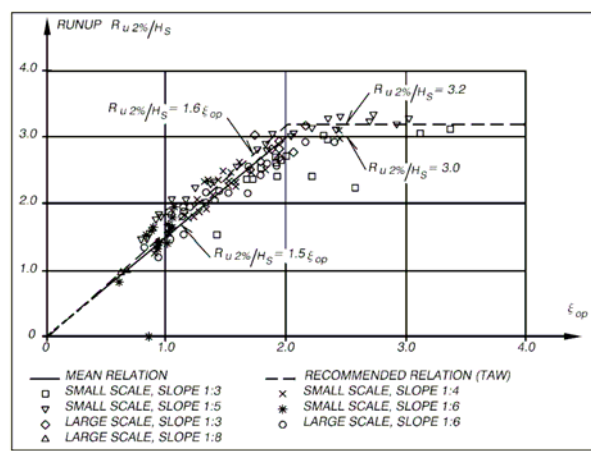


圖 2.3.5 正向長峰波在光滑斜坡上的溯升 $R_{u2\%}$ (CEM)

a. 表面粗糙度對溯升的影響

在荷蘭出版品及舊版的美國陸軍工兵團海岸保護手冊中，原始的 γ_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

γ_r 值適用於 $1 \leq \xi_{op} \leq 3 \sim 4$ 。對於較大的 ξ_{op} ， γ_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			γ_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 , ($H_s/D = 1.5 - 3.0$)			0.55 - 0.6
2 or more layers of rock, ($H_s/D = 1.5 - 6.0$)			0.50 - 0.55
Roughness elements on smooth surface (length parallel to waterline = ℓ , width = b , height = h)			
Quadratic blocks, $\ell = b$			
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， ξ_{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 γ_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 α_{eq} 及平均坡度角 α 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 ξ_{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 $\gamma_r = \gamma_h = \gamma_\beta = 1$ 。

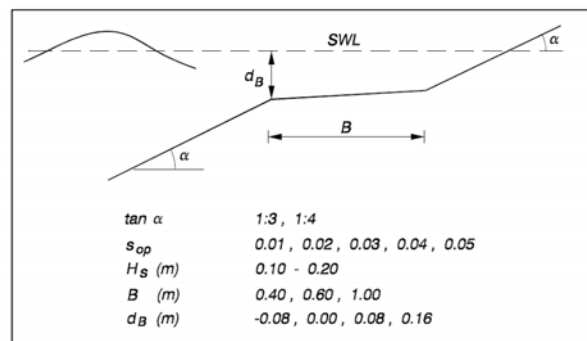


圖 2.3.6 Delft Hydraulic 進行台階試驗的相關參數(CEM)

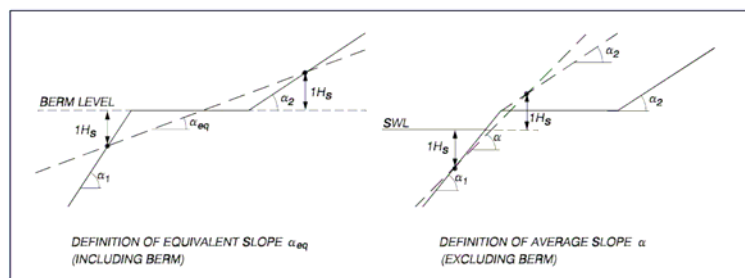


圖 2.3.7 式(2.3.9)中有關 α_{eq} 及 α 的定義(CEM)

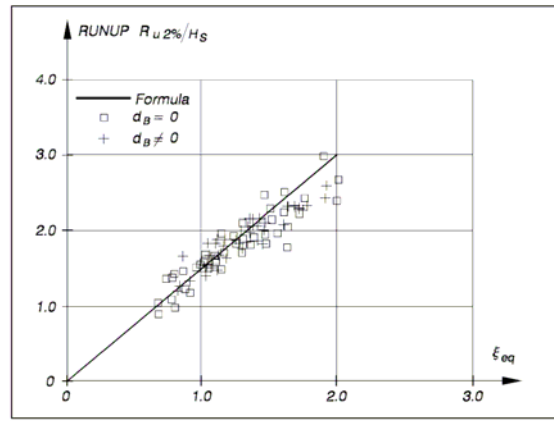


圖 2.3.8 根據台階對溯升高度影響度對 ξ_{eq} 選用值的評估(CEM)

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 γ_β 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， γ_β 值會大於 1；而短峰波也會在 β 接近 50° 時， γ_β 值會接近於 1。根據試驗的結果，可以得到下列 γ_β 平均值的公式

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

$$\text{短峰波: } \gamma_{\beta} = 1 - 0.0022\beta$$

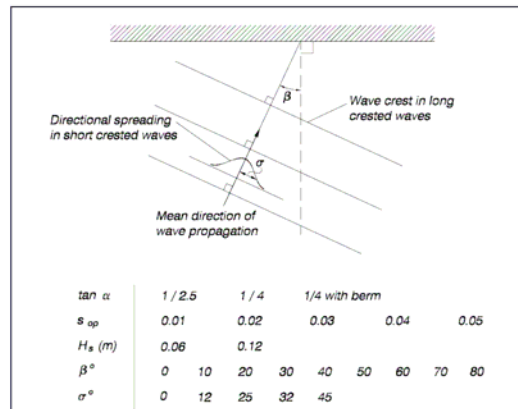


圖 2.3.9 Delft Hydraulic 所進行之光滑斜坡之波浪溯升試驗(CEM)

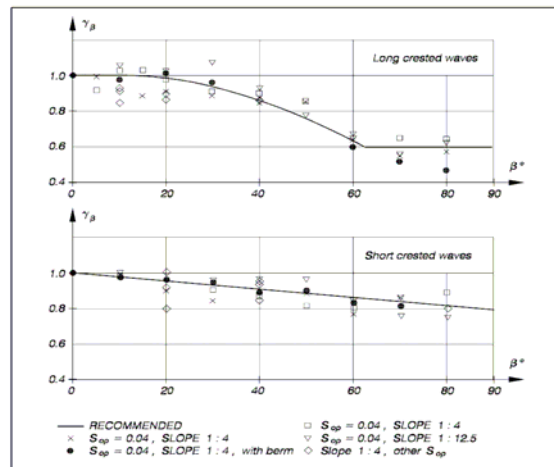


圖 2.3.10 波浪入射角與方向分佈性對溯升高度的影響(CEM)

(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。在表 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 $P = 0.4$ 並不是從試驗中得來，而是一個估計值。依據表 2.3-4 試驗條件所得的溯升結果顯示於圖 2.3.12 中。圖中 $\xi_{om} = \tan \alpha / (2\pi H_s / g T_{om}^2)^{1/2}$ ，其中 T_{om} 為波浪平均週期用來取代 ξ_{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 α	Grading D_{85}/D_{15}	Spectral Shape	Core Permeability	Relative Mass Density	Number of Tests	Range H_s/AD_{n50}	Range s_{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 ¹	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 ¹	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 ²	1.25	PM	permeable	1.62		1.6-2.5	0.014-0.031
2 ³	1.25	PM	permeable	1.62		1.4-5.9	0.010-0.046
PM Pierson Moskowitz spectrum ¹ Some tests repeated in Delta Flume				² Foreshore 1:30 ³ Low-crested structure with foreshore 1:30			

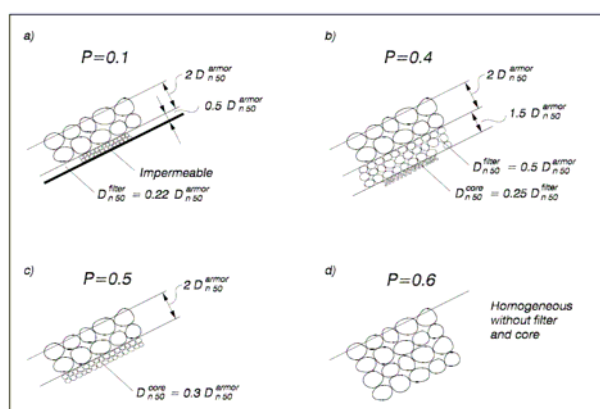


圖 2.3.11 標示透水參數(CEM)

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。

(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

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

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。

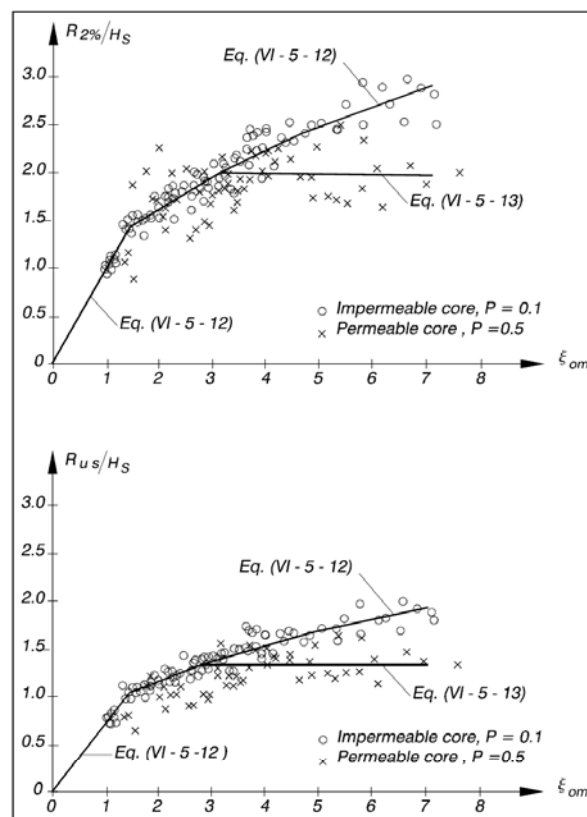


圖 2.3.12 不規則正向波在不透水/透水岩石斜坡上 2%及示性溯升高度 (CEM)

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 ¹	A	B	C	D ²
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

¹ Exceedence level related to number of waves
² 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：

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

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

其中， $R_{up\%}$ = 波浪發生 $P\%$ 溯升機率的溯升高度

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

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

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

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

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 材料阻尼式結構研究

材料式阻尼之特性研究構想主要乃利用彈性材料設計阻尼器，並安裝於直立式防波堤海側的適當位置。當大波浪作用於結構體時，藉由彈性材料的變形發揮阻尼作用，以達到消能的目標。此種設計是在原本屬於剛性的防波堤加入適當的彈性材料元件，使其在主要波浪作用高度附近具有某一程度的彈性，並利用彈性構材產生能量的阻尼。

本計畫的第一年主要是在實驗室中進行下列實驗：

1. 位移控制下單軸壓力實驗
2. 位移控制下完全反覆負載周次實驗(找最佳消能材料)
3. 不同控制應力比下完全反覆負載周次實驗
4. 使用影像技術評估試片表面裂縫長度
5. 實體消能結構體疲勞實驗

而預計完成工作項目如下：

1. 根據所量測實驗數據，來評估受測橡膠材料其吸收總應變能，作為選定最佳消能材料的依據標準。
2. 對具最佳消能橡膠材料進行一系列完全反覆疲勞實驗。由疲勞實驗數據，建立疲勞壽命曲線及取得相關的疲勞特性參數，提供元件壽命設計之用。
3. 對所有疲勞損壞後試片表面染色處理且使用影像處理方法進行

表面裂縫長度量測。

4. 對具有最佳消能橡膠材料進行靜定壓縮實驗以取得相對應的外力變形曲線中。從中評估此材料相對的強度與延性及韌性等機械性質。
5. 依據疲勞實驗與電腦數值分析，建立消能結構體簡單力學分析模型，來預測其它幾何外型消能結構體疲勞損傷模型及使用壽命。

在本計劃中將分析具黏彈性特性的橡膠材料吸收能量特性作為消能材料，應用於海堤來吸收波浪能量，減緩波浪能量傳遞到海堤結構物的能量，以降低海堤結構物在波浪作用下所產生的應力及變形並減少其搖晃程度。根據此一研究目標，本年度計劃首先選定三種市面上常用天然橡膠(NB)及杜邦公司所生產氯丁二烯橡膠(CR)進行材料吸能特性研究。在此使用型式 A、B 及 D 分別代表被選定三種常用天然橡膠材料，杜邦公司所生產氯丁二烯橡膠在此用型式 C 來代表。這四種材料其材料製成特性如表 2.4-1 所示。在本年度計劃中將對這四種不同橡膠材料進行實驗觀察其壓縮特性，做為改進橡膠材料依據。同時將對這四種橡膠材料分別進行周次負載實驗，觀察這四種橡膠材料在完全受壓下情況其周次行為反應並進行材料吸能特性分析。進行此一實驗目的是希望從實驗中，了解受測橡膠材料在完全受壓情況下，動態載荷對周次行為反應的影響並分析影響橡膠疲勞的因素，以建立橡膠材料在受壓情況下，動態載荷對疲勞性能的研究方法，期能建立消能結構體疲勞壽命預報模型。

在本計劃中，將使用直徑為 28.5 mm 高為 12.7 mm 圓柱型試體進行所有相關力學實驗。

表 2.4.1 材料製成特性表

	Type A	Type B	Type C	Type D
CB particle diameter (nm)	30	30	52.5	30
Specific weight	1.184	1.190	1.358	1.152
CB phr	68	52	48	5.5
Volume fraction (%)		31.9		
Total phr	196	188	74	175
Curing time (s)	60	413	60	60
Curing temperature (°C)	142	143°	142	142
Hardness	67	67	62	61
Modulus of elasticity (MPa)	6.438	6.438	4.998	4.722

此外，設計者除需考量具良好消能特性外，也必須考量是否會對海洋環境造成影響。因此在本計劃將進行橡膠材料對文蛤活力影響試驗，以分析橡膠材料是否會影響海洋環境。

2.4.1 消能材料抗壓機械性質

本計劃將研究橡膠材料本身所具的遲滯阻尼特性來有效消除波浪能量以減緩波浪對海岸結構及防波堤的作用力。因此對於消能結構物上的阻尼材料在受壓狀態下的材料特性了解，在設計及決定結構阻尼有其重要性。本計劃將對於每一型式的橡膠材料試體分別進行壓縮實驗且所有壓縮實驗皆在室溫中進行。對於此一實驗項目，在本計劃中選定三種不同壓縮應變率對橡膠試體進行壓縮實驗。這三種壓縮應變率分別為 5.0325(% /Min) 與 10.0659(% /Min)及 50.3402(% /Min)。而本計劃中所進行靜定壓縮實驗將在 Instron 公司所生產的 8801 型伺服控制電子液壓動態試驗系統中完成。同時應用 Max 軟體進行實驗資料的截取與儲存。由所取得的數據中，可分別取得橡膠材料在不同大小的壓縮速率下所對應的工程壓應力應變曲線。在本計劃中將對從所記錄的壓應力應變曲線中，分析橡膠材料靜定受壓特性。

如圖 2.4.1 所示為型式 A 橡膠材料在三種不同壓縮速率下，量測到

的工程應力應變實驗曲線。可發現此類型天然橡膠材料，壓縮速率對其工程壓縮應力應變曲線幾乎沒有影響。在壓縮初期可發現壓應力大小將隨壓縮程度增加而緩慢上升。此外當橡膠試體壓縮率達 40% 後其對應壓應力會隨壓縮量增加而快速增加。對於橡膠材料在壓縮過程中其壓應力變化情況，在此將依分子論的觀點進行分析。因為橡膠試體內的網鏈密度隨著壓縮程度增加而增加，網鏈密度的增加將使大分子鏈的運動阻力增加，此種來自於橡膠內部分子結構不規則改變致使橡膠材料抗力也隨之改變。因此橡膠試體的壓應力隨著壓縮量增加而增加。此外，但當網鏈密度過大時將造成分子鏈之間有新的架橋作用，進而造成網鍊尺寸變小，從而使抗壓強度快速提升。這種來自於試體大尺度壓縮進而形成內部網鏈尺寸及密度增加，將會造成橡膠材質硬化及永久變形。由實驗中可發現對此類形橡膠材料，當試體壓縮率達 66% 時，對應的壓應力約為 13.23Mpa。

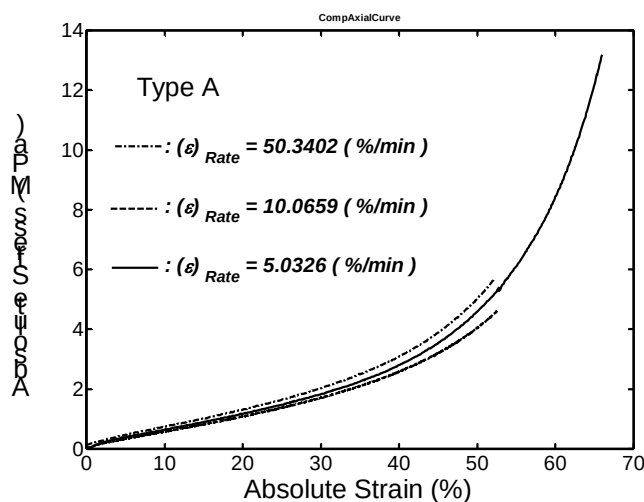


圖 2.4.1 單軸壓縮工程應力應變圖

四種受測橡膠材料的彈性模數與 Shore A 硬度值之間關係如圖 2.4.2 所示，由圖中可清楚得知彈性模數將隨橡膠硬度值增加而增加。受測橡膠材料的彈性模數與 Shore A 硬度值大小如表 2.4-1 所示。

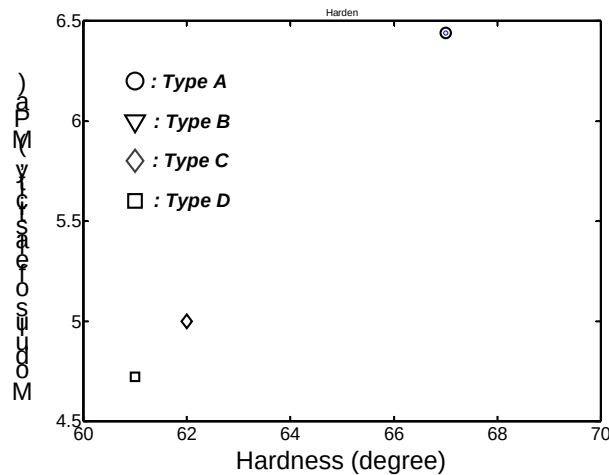


圖 2.4.2 不同橡膠材料彈性模數硬度圖

2.4.2 消能材料周次負載實驗

在本計劃中將對四種不同橡膠試體在溫度 25°C 下進行周次實驗。其中要求試體在周次負載過程中，試體是處在受壓狀態下。對於此一實驗項目，本計劃將使圓柱型試體在平均壓應變為 25(%)情況下，進行六種不同應變振幅的周次負載實驗，以分析不同橡膠材料在全壓狀態下，材料周次行為反應及應變能吸收與負載周次的關連性，期能以此吸能特性來定義橡膠材料在全壓狀態下之壽命，做為橡膠材料在全壓狀態下壽命評估基礎。在此計劃中周次荷重作用時間訂定為 1 秒 (1Hz)，輸入負載應變波形使用正弦波，全壓狀態下整體輸入波形如圖 2.4.3 所示。在此研究中使用試驗機為 Instron 公司生產的 8801 型伺服控制電子液壓動態試驗系統來進行周次負載試驗。此外亦使用 Max 軟體自動擷取系統記錄試驗過程中軸向壓縮量與荷重及周數之間關係。

本計劃目前已完成型式 B 與 C 及 D 三種橡膠材料在平均應變為 25(%)下應變振幅為 25(%)的周次負載實驗及型式 A 的天然橡膠在應變振幅為 10(%)的周次負載實驗。

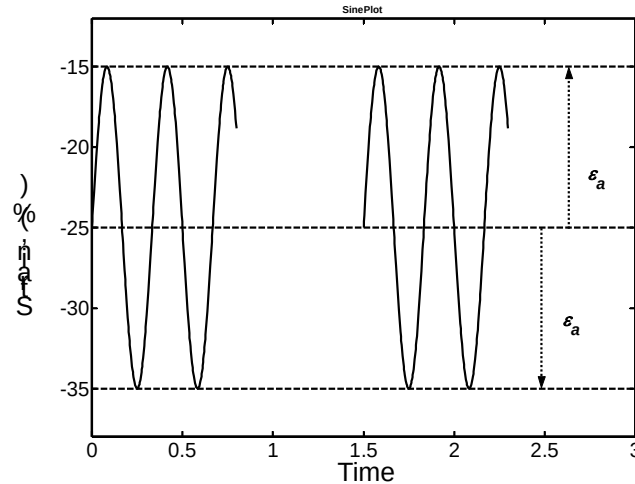


圖 2.4.3 波形示意圖

圖 2.4.4 代表型式 A 橡膠材料在平均應變為 25(%)下應變振幅為 10(%)的周次應力圖。圖 2.4.5、圖 2.4.6 與圖 2.4.7 分別代表型式 B、C 與 D 這三種橡膠材料在平均應變為 25(%)下應變振幅為 25(%)的周次應力圖。在應力振幅與負載周次關連性方面，由這四圖中可清楚看出，這四種橡膠材料應力振幅大小將隨負載周次增加而下降且應力振幅減少情況並不一致。這代表著此負載狀態會逐次減少實驗橡膠材料的壓縮承載力，同時壓縮承載力下降狀況與材料材質有關。在峰值應力與負載周次方面，這四種橡膠材料在最大壓縮變形時其對應壓縮應力反應亦會隨負載周次增加而減緩。顯現大分子鏈之間的斥力將隨不斷往覆壓縮變形過程而減緩。對於壓縮恢復方面，型式 B 與 C 及 D 這三種橡膠材料的最小壓縮變形率被設定為零，因此相對此一應變率，系統量測到的負載應力為幾乎為零是相當合理，但對型式 A 橡膠材料最小壓縮變形率被設定為 -10%，但相對應壓縮應力也幾乎是零，此行為顯現型式 A 橡膠材料壓縮恢復力在 -10% 以上的壓縮變形率中已完全喪失。

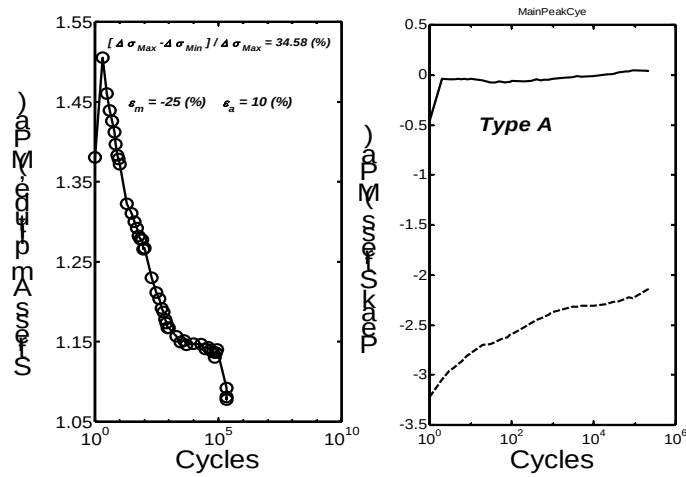


圖 2.4.4 型式 A(a)周次應力振幅曲線圖(b)周次峰值應力曲線圖

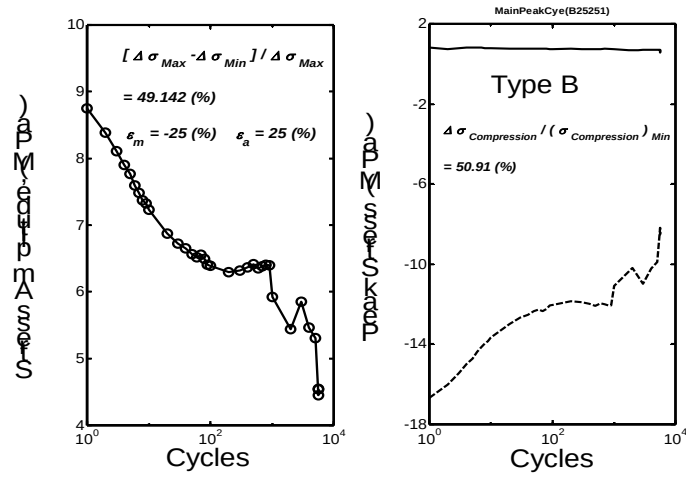


圖 2.4.5 型式 B(a)周次應力振幅曲線圖(b)周次峰值應力曲線圖

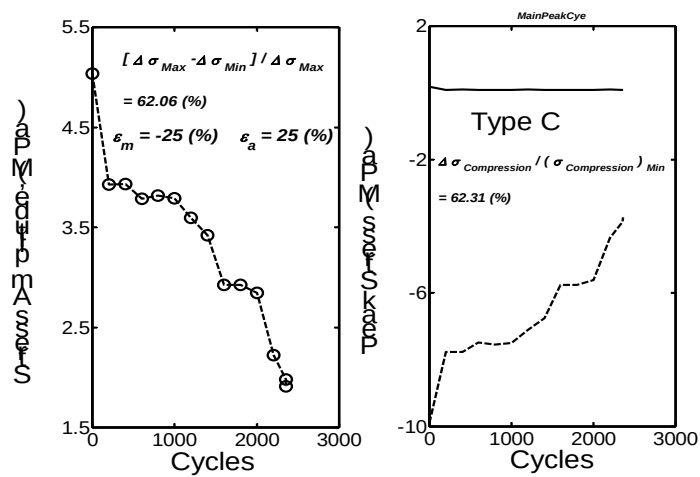


圖 2.4.6 型式 C(a)周次應力振幅曲線圖(b)周次峰值應力曲線圖

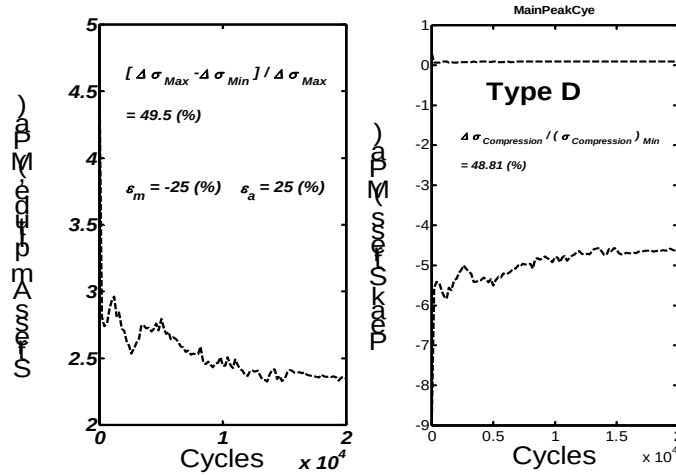


圖 2.4.7 型式 D(a)周次應力振幅曲線圖(b)周次峰值應力曲線圖

圖 2.4.8 到圖 2.4.11 分別代表型式 A、B、C、D 這四種橡膠材料在不同負載周次時的壓縮力與壓縮位移的行為反應曲線。如圖所示，被量測到外力位移曲線皆以封閉型態呈現。一般而言，此封閉曲線可視為由壓縮曲線及回彈曲線組成。對於 B、C、D 這三種橡膠材料其壓縮曲線向下彎曲程度隨壓縮程度增加而明顯彎曲，代表著隨著壓縮程度增加，大分子鏈的之間的運動阻力將隨之增加。對於回彈曲線可清楚發現彎曲程度隨著壓縮恢復量增加而漸緩，同時恢復壓縮變形超過一半後，回彈曲線形狀幾乎呈現平坦狀，表示大分子鏈之間的做用力隨著變形減緩而減低直至幾乎到零。

此外，封閉外力位移曲線上的最大壓縮變形點位置會隨負載周次增加而向上移動。代表著周次外力位移曲線將會隨負載周次增加而朝圖型上方移動。換言之，此材料的周次壓縮曲線及回彈曲線將會隨負載周次增加而朝圖型上方移動。根據以上實驗觀察，清楚得知 B、C、D 這三種橡膠材料在不同負載周次下，外力位移曲線會隨負載周次增加而有發生改變且變化程度明顯不一致，代表雖在相同位移負載型態作用下，不同材質其周次行為反應亦有不同。

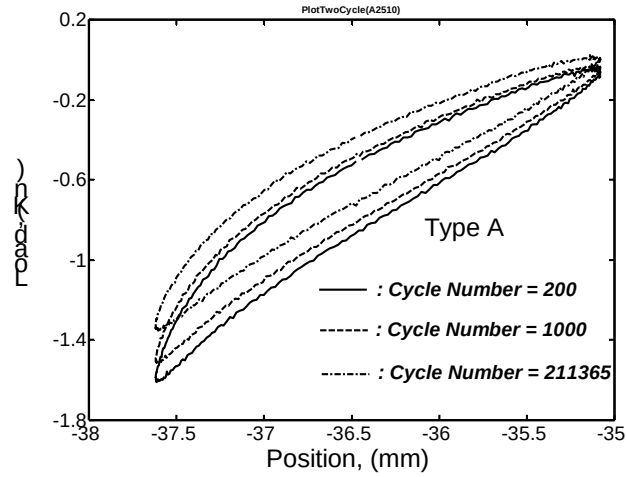


圖 2.4.8 型式 A 不同周次遲滯曲線比較圖

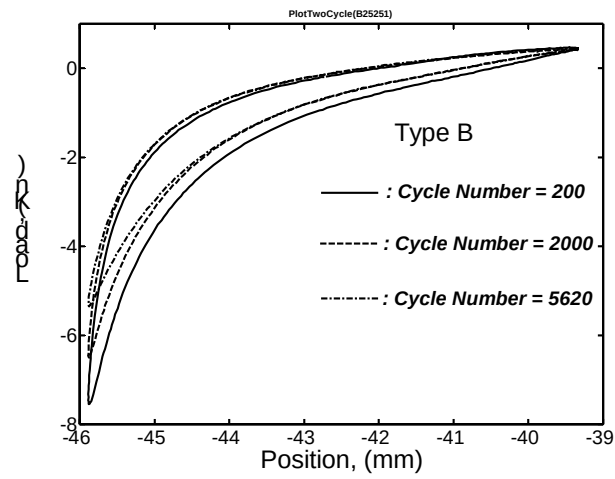


圖 2.4.9 型式 B 不同周次遲滯曲線比較圖

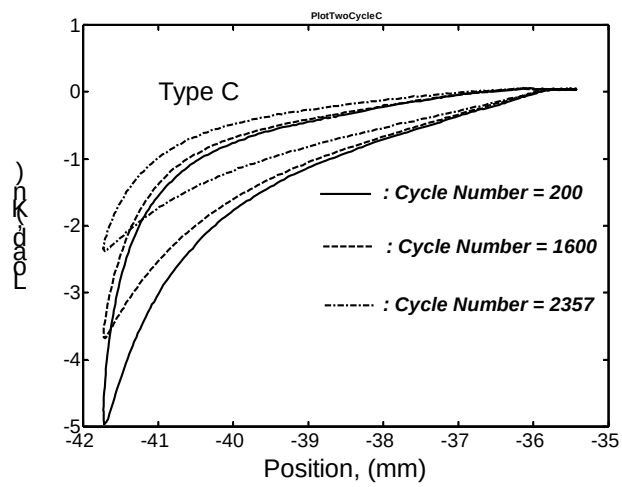


圖 2.4.10 型式 C 不同周次遲滯曲線比較圖

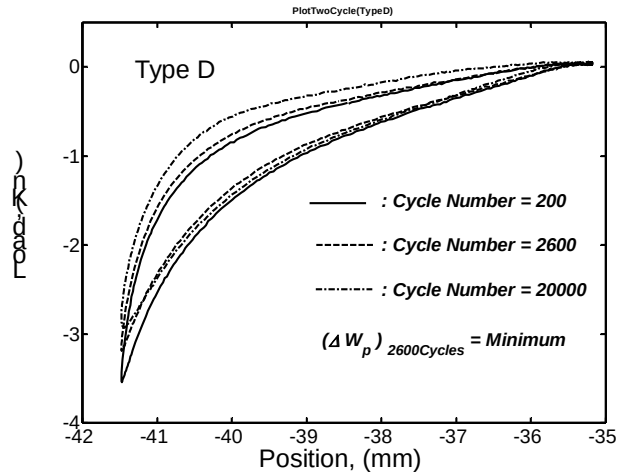


圖 2.4.11 型式 D 不同周次遲滯曲線比較圖

對於型式 A 橡膠材料其周次外力位移反應曲線如圖 2.4.8 所示，在圖中可清楚看出，封閉外力位移曲線亦隨負載周次增加而有發生改變。對於每一周次的回彈曲線其彎曲程度均較壓縮曲線明顯。此外，每一周次對應壓縮曲線均呈現類直線形式。由以上的實驗觀察得知，橡膠材料在應變或位移控制下進行周次負載，其被量測的外力位移曲線或應力應變曲線外型如同金屬材料般以封閉型態呈現。一般而言，對於每周次的封閉曲線所包圍的面積，代表每一負載周次過程中被材料所吸收的能量。在此將根據此一物理特性，分析受測橡膠材料在全壓狀態下吸收應變能的能力及與負載周次之間的關連性。

圖 2.4.12 到圖 2.4.15 中分別代表 A、B、C、D 這四種不同受測橡膠材料，吸收應變能與負載周次之間的關連圖。一般而言，受測橡膠材料的吸能能力將負載周次增加而下降，這代表封閉的外力位移曲線面積隨負載周次增加而變小。在圖 2.4.12 與圖 2.4.15 中可發現，當負載周次達到某一臨界周次時其吸能能力不再下降反而上升，這代表封閉曲線面積將不再隨負載周次增加而下降。

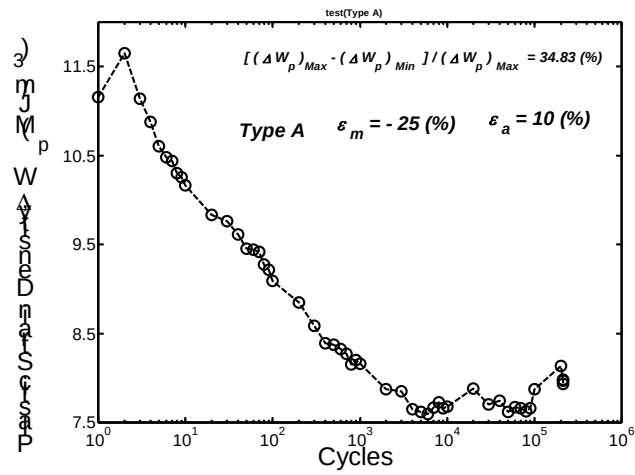


圖 2.4.12 型式 A 周次塑性應變能曲線圖

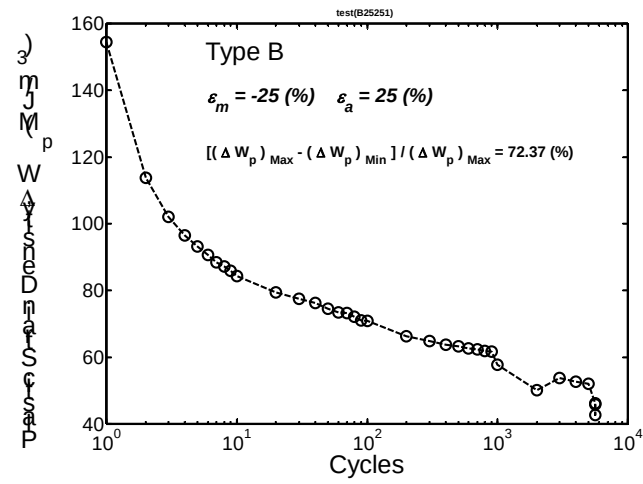


圖 2.4.13 型式 B 周次塑性應變能曲線圖

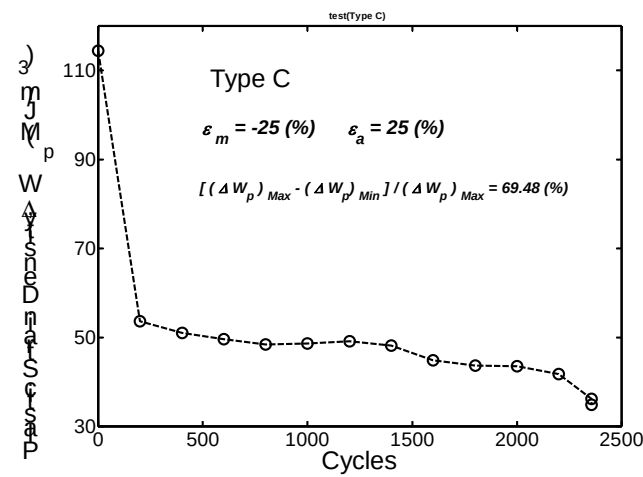


圖 2.4.14 型式 C 周次塑性應變能曲線圖

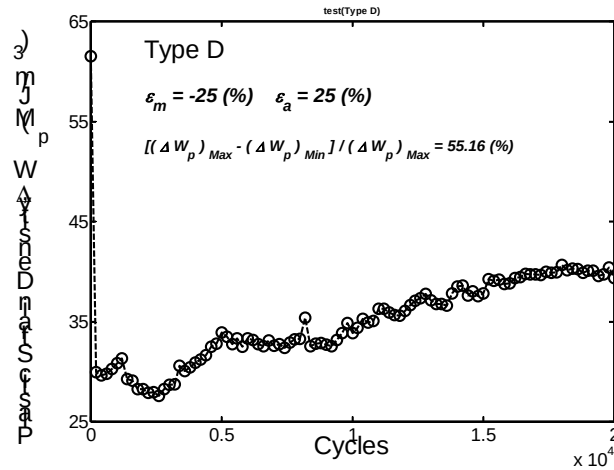


圖 2.4.15 型式 D 周次塑性應變能曲線圖

為分析此一現象，在此將對型式 D 橡膠材料的周次壓縮外力與壓縮位移的行為反應曲線進行觀察。首先由實驗數據得知，受測橡膠材料 D 最小吸能能力在負載周次為 2600 時發生，因此對周次為 2600 與 20000 所對應的外力位移反應曲線進行比較。在圖 2.4.11 中發現 20000 周次的回彈曲線在 2600 周次的回彈曲線上方。反之 20000 周次的壓縮曲線在 2600 周次壓縮曲線的下方。

依據上述比較，很清楚得知對應 20000 周次封閉曲線面積會大於 2600 周次對應下的封閉曲線下面積，使得在 20000 周次下材料吸能能力會高於 2600 周次。根據實驗觀察，對於型式 D 橡膠材料在 20000 周次的壓縮曲線在 2600 周次壓縮曲線的下方，可視為此材料在不斷的壓縮過程雖會降低分子鍊之間的斥力，但隨周次增加網鍊之間距離因斥力減少而逐漸接近，形成內部網鍊尺寸及密度增加且當網鍊密度達到某一程度時，分子鍊之間產生新的架橋作用，致使分子鍊之間的斥力提升，造成壓縮曲線朝圖形下方移動。

一般而言，這種來自於周次負載做用次數增加，將會對材料內部網鍊尺寸及密度造成影響，重新改變分子鍊之間斥力，從而形成材質硬化及永久變形。根據以上實驗分析，可歸納出橡膠材料的外力位移曲線會隨負載周次增加而發生改變，且在全壓狀態下吸能能力會隨負載周次增加而下降直至分子鍊之間有新的架橋作用產生。本計劃將根

據此一物理特性來定義橡膠材料的疲勞壽命，作為建立橡膠材料壽命曲線準則。

在圖 2.4.16 中比較 B、C、D 這三種不同受測橡膠材料，在相同負載條件下，吸收應變能與負載周次之間的關連圖。由圖中可清楚得知，形式 B 橡膠材料具有最佳的吸能能力，代表著形式 B 橡膠材料最具遲滯阻泥特性。本計劃下半年度將針對此一擁有最佳滯阻泥特性的橡膠材料的機械性質參數做一完整分析。同時將對此橡膠材料進行一系列壓縮疲勞實驗，以取得全壓狀態下的疲勞壽命曲線及相關的疲勞參數，做為消能結構體在受壓狀態下，疲勞壽命預報模型的基礎。

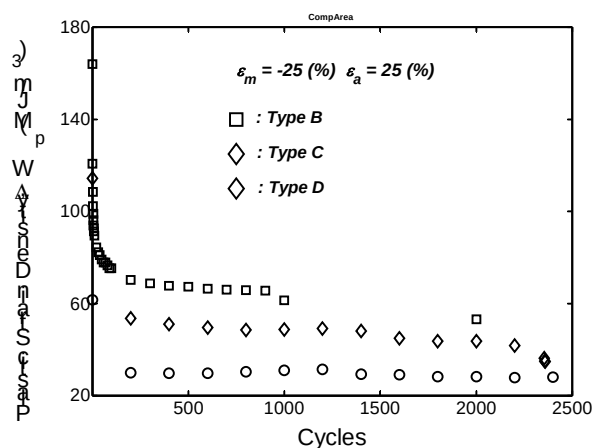


圖 2.4.16 不同型式橡膠材質之周次塑性應變能曲線比較圖

2.4.3 彈性材料阻尼之水力結構物的收集與討論

除了進行橡膠材料的性質試驗外，本研究也針對材料性阻尼進行討論及資料收集。初步收集了有關橡皮壩的資料。

根據美國陸軍工兵團的研究，圖 2.4.17 顯示一種海岸線的快速安裝防波堤(Shoreline-Rapid Installed Breakwater)，其設計的目標是削減週期 6 秒的波浪的 50% 能量。照片 2.4.1 為國內河川工程中所使用的橡皮壩。由於橡皮壩具有彈性可以吸收部分的波浪作用能量，又由於其平時係扁平躺在固定座上，一旦加壓充氣(或充水)即可提升壩體至設計高度，可能可以應用於短期性的抗浪設施上。例如為了在颱風侵襲前後

期間阻擋長週期波進入花蓮港造成蕩漾，有構想在港口入口處，或受限航道上裝置臨時性閘門，於常時放導致放於海底，以不影響船舶的通行，而在颱風期間升起以便提供一靜穩水域。此一構想如果以剛性材料製作閘門的話，可能造成維護與操作不易的問題。而如果能以橡皮壩的觀念則不僅工程經費較低，維護也較剛性構造物為容易。

在考慮港灣的水深通常在 10 至 16 公尺之間，一般橡皮壩可能無法勝任，擬定初步構想如圖 2.4.18 所示。在受限航道之前端設置傾斜之導槽型橡皮壩，容許部分波浪越波以降低壩體的受力；但在後端設置一較高的導槽型橡皮壩阻滯水流或波動進入內港，並以其間的水域作為消能池。

然而，由於如橡膠類的彈性材料處在惡劣海洋環境中，如日曬(高溫且多紫外線)、海水(高濕及高鹽)及外力作用大(波浪、流及船舶衝擊)，材料的耐久性、施工的難易度與建造經費、後續的維護工作、時機與費用等，都受到嚴峻的考驗。雖然圖 2.4.18 及圖 2.4.19 在試驗研究中仍屬可行，但在工程實務上，不得不考慮上述的各項因素。

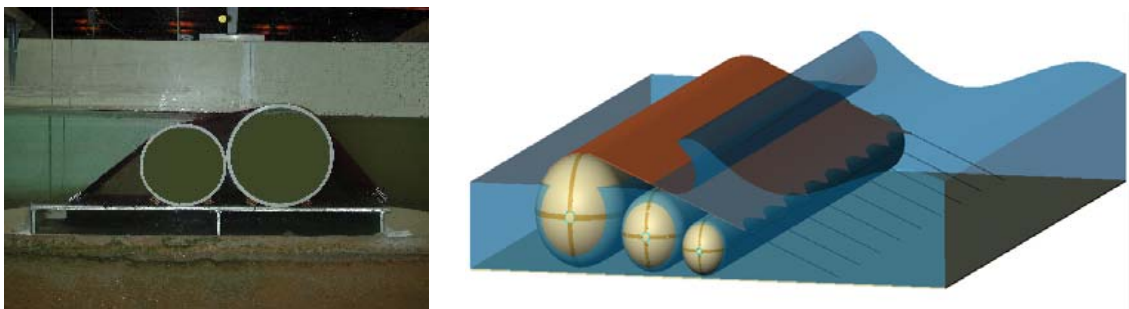


圖 2.4.17 海岸快速安裝防波堤模型(美國陸軍工程研究及發展中心)



照片 2.4.1 河川工程所使用的橡皮壩

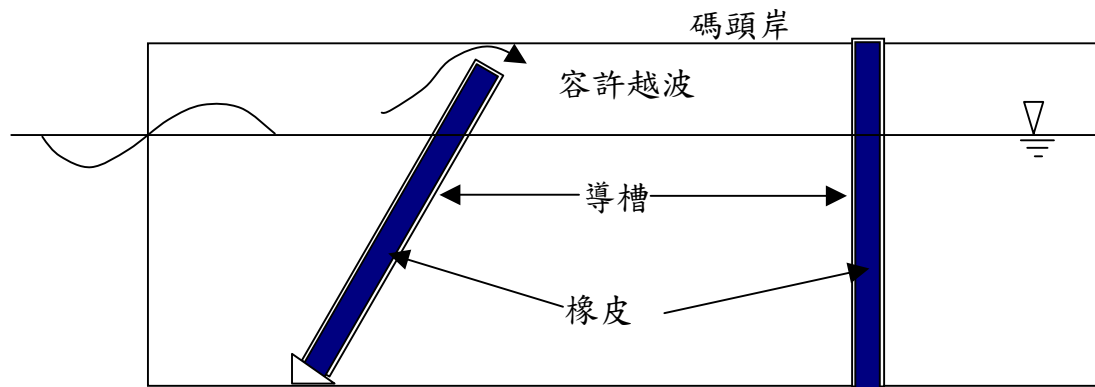


圖 2.4.18 利用導槽式橡皮壩阻擋及削減波浪進入內水域的構想

2.5 水力式阻尼結構物的研究

水力結構阻尼之特性研究構想主要是利用港灣結構與波流水理運動間的交互作用特性形成阻尼，以達消滅長波能量的功能。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。初步的構想如圖 2.5.1 及 2.5.2 所示。但為考量實際的碼頭高度大約在 12 公尺以上，可能無法直接由底部建構一斜坡促使波浪溯升而不會因為坡度太陡而發生反射。因此乃重新檢討碼頭斷面如圖 2.5.3 至 2.5.5，其主要想法是讓波浪在斜坡上溯升但利用後方的空隙讓上溯的水流發生跌水現象而不直接回溯造波。因為跌水所造成的殘餘水量則設法透過側向或下方排水的方式排出堤體。為了瞭解斜坡式消能結構物各項機構的功能，本年度乃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 2.5.5(a)及照片 2.5.1 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 2.5.5(b)所示，考慮前方開孔部的比例，將其減少 50%。
- (4) 方案三：如圖 2.5.5(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 2.5.5(c)方案三中所示，詳細尺寸如圖 2.6.4 所示。所有的試驗是以 1/25 的比例縮尺，在海洋大學海港工程館的小斷面水槽(50 公尺長、80 公分寬，如照片 2.5.2)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 2.5-1 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 2.5-1 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 2.5-1 中。表 2.5-2 至表 2.5-4 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。

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 2.5.6 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。

由於本項試驗是計畫執行的第一年，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，以及需要配套的措施。未來在水工模型試驗的部分將在此一基礎下，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。

- (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

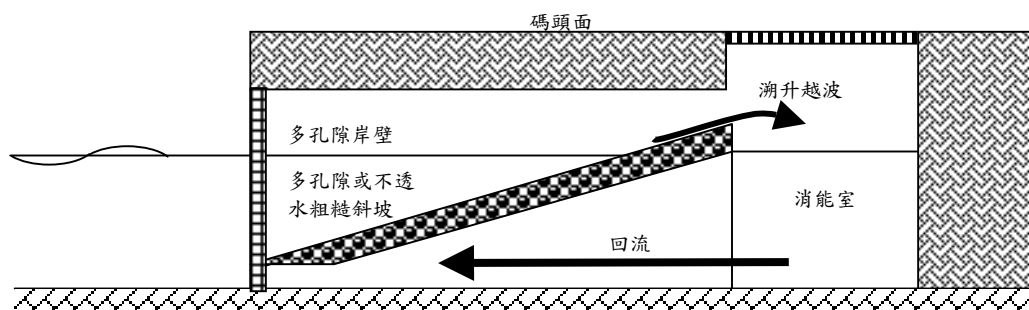


圖 2.5.1 內建斜坡式消能結構物的初步構想

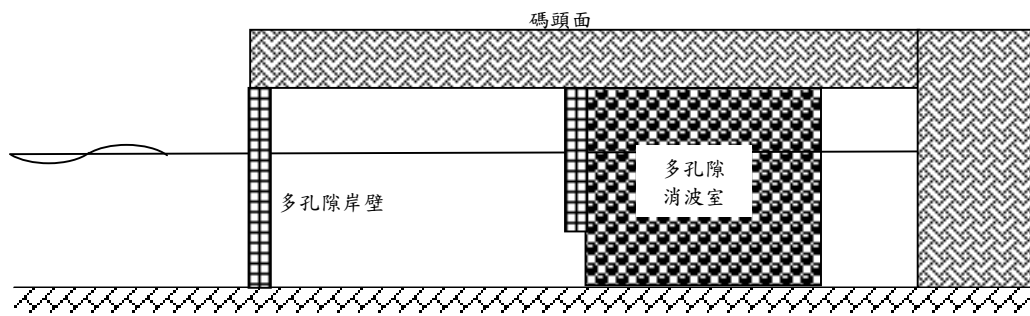


圖 2.5.2 多孔隙隔艙式消能結構物的初步構想

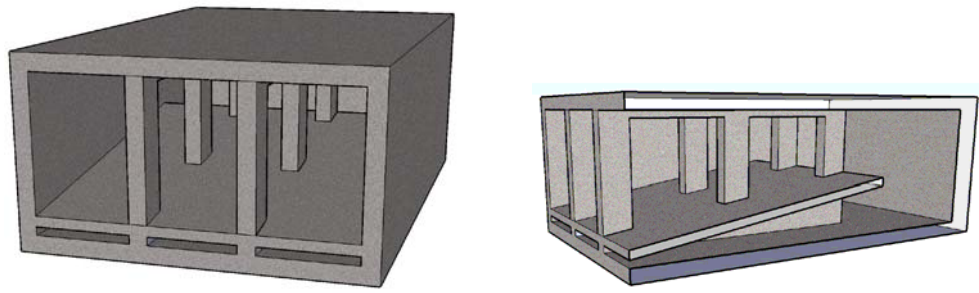


圖 2.5.3 修正之內建斜坡式消能結構物的構想一

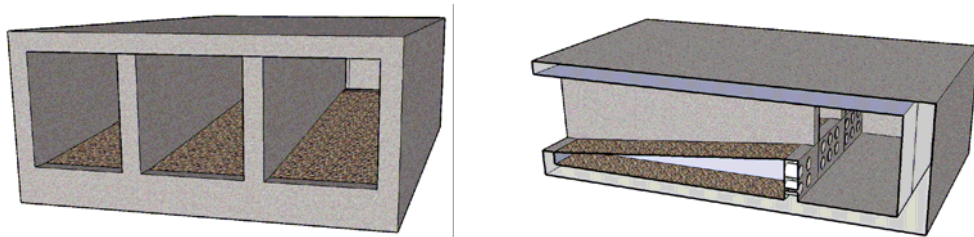
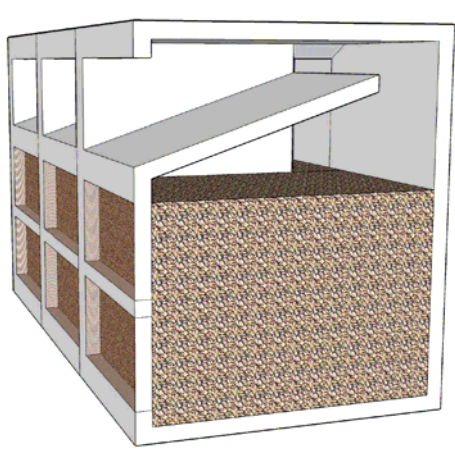
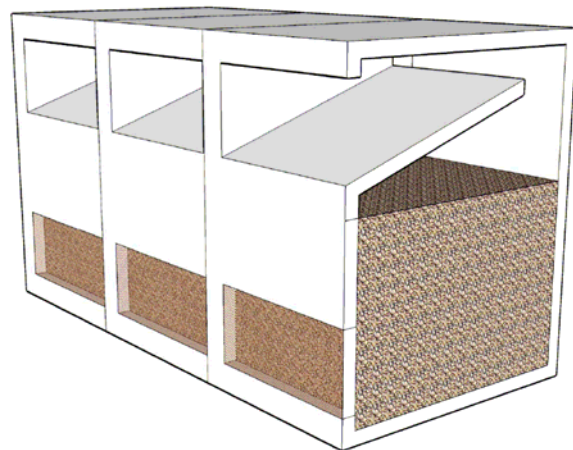


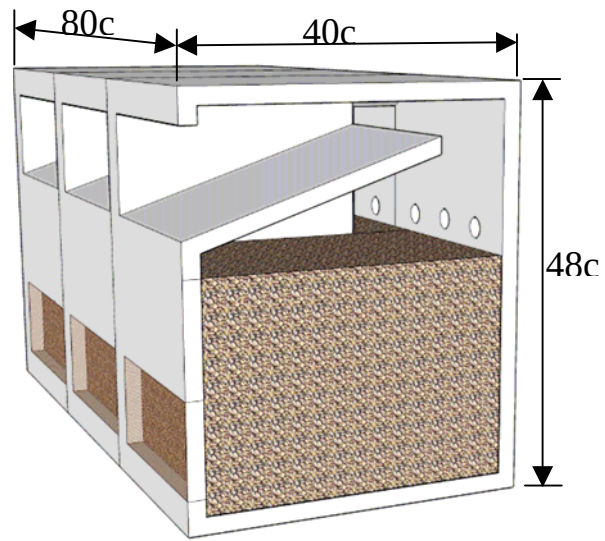
圖 2.5.4 修正之內建斜坡式消能結構物的構想二



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

圖 2.5.5 修正之內建斜坡式消能結構物的三種方案



照片 2.5.1 內建斜坡式消能結構物實體模型



照片 2.5.2 試驗斷面水槽全景

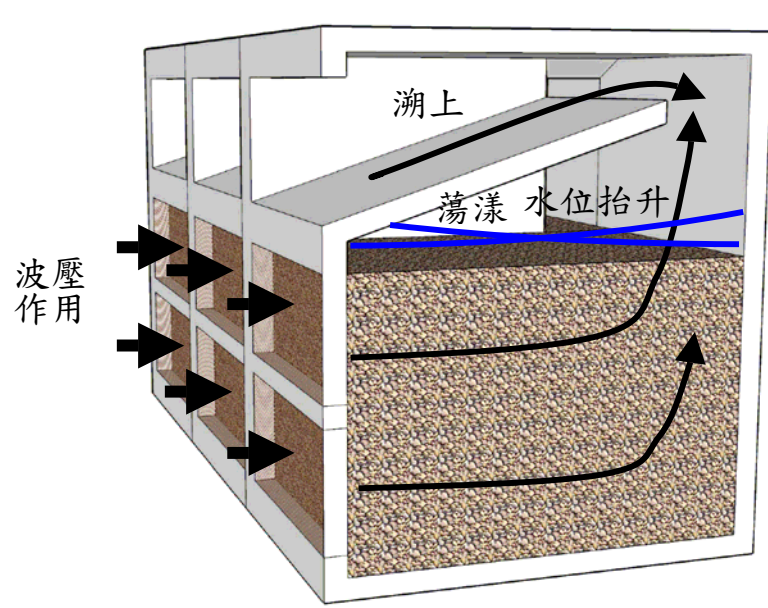


圖 2.5.6 內建斜坡式消能結構物的波動與水流現象



照片 2.5.3 修正之內建斜坡式消能結構物水工模型試驗

表 2.5.1 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 2.5.2 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 2.5.3 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 2.5.4 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

數值模擬方面，由於考量消波式碼頭附近可能包含波動及水流運動，初步擬評估使用 VOF(volume of fluid)理論模式進行數值分析。

2.6 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。

2.6.1 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. 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 $F(x, y, z; t)$ ，並根據網格單元中來架構及追蹤自由水面之位置。如圖 2.6.1 所示，若 $F(x, y, z; t) = 1$ 時，則表該單元內全部被指定流體所佔據；若 $F(x, y, z; t) = 0$ 時，則該單元內被非指定流體所佔滿；若 $0 < F(x, y, z; t) < 1$ 時，則自由水面介於此網格單元中。而流體體積函數 $F(x, y, z; t)$ 需滿足下列之守恒型傳輸方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right] = F_{DIF} \dots\dots\dots(2.6.1)$$

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(2.6.1)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

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \right\} \dots\dots\dots (2.6.2)$$

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。

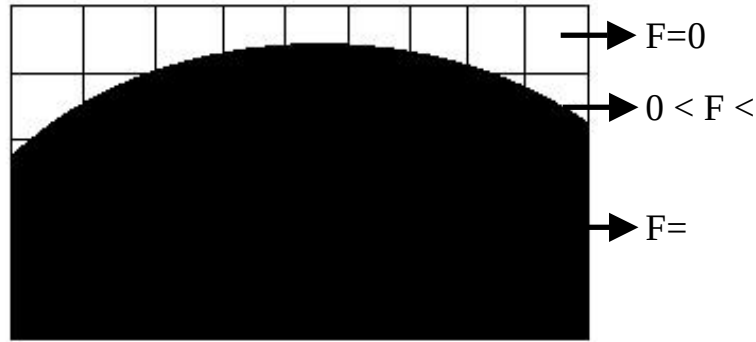


圖 2.6.1 體積比函數 $F(x, y, z; t)$

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 2.6.2 所示。

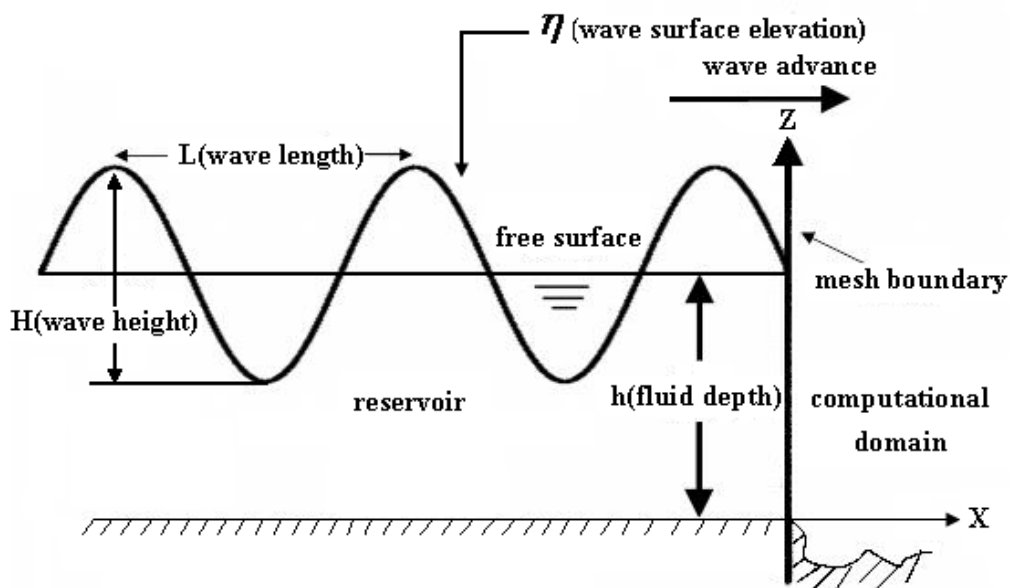


圖 2.6.2 數值造波器示意圖

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， φ 表相位角， k 為波數及 ω 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 ϕ ，且滿足 Laplace Equation，其解可表示為

$$\phi(x, z, t) = \frac{A\omega \cosh[k(z + h)] \sin(kx - \omega t + \varphi)}{k \sinh(kh)} \dots\dots\dots (2.6.3)$$

流體速度是二維的 x 及 z 方向組成，可表示為：

$$u(x, z, t) = \frac{A\omega \cosh[k(z+h)] \cos(kx - \omega t + \varphi)}{\sinh(kh)} \dots\dots\dots (2.6.4)$$

$$w(x, z, t) = \frac{A\omega c \sinh[k(z+h)] \cos(kx - \omega t + \varphi)}{\sinh(kh)} \dots\dots\dots (2.6.5)$$

波速 $c = \omega/k$ 關係式可表示為：

$$c^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \dots\dots\dots (2.6.6)$$

其中， λ 為波長；波的頻率和振幅的關係式為

$$\omega^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \dots\dots\dots (2.6.7)$$

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. 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

$$U = -K_p \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots (2.6.8)$$

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

$$\bar{b} = K_d \bar{u} \dots\dots\dots (2.6.9)$$

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

$$K_p = \frac{\varepsilon \mu}{\rho K_d} \dots\dots\dots (2.6.10)$$

之關係式，其中， ε 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：

(6) 孔隙率依存法 (Porosity Dependent drag)

$$K_d = a \times \varepsilon^{-b} \dots\dots\dots (2.6.11)$$

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

$$(R_e)_D = \frac{\rho U D}{\mu} < 1$$

之場合。

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

$$K_d = \frac{D^2 \varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2} \dots\dots\dots (2.6.12)$$

上式亦被稱為 Carmen-Kozeny 公式，適用於飽和流之場合。

(8) 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

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

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)

$$K_d = \frac{\mu}{\rho} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \left[a \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + b \frac{(R_e)_D}{D} \right] \dots\dots\dots(2.6.13)$$

2.6.2 FLOW-3D 所使用之理論方程式

1. 質量連續方程式(Continuity Equation)：

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{DIF} \dots\dots\dots(2.6.14)$$

其中， ρ 為流體密度。等號右項為紊流衍生擴散項，可表為

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ v_F A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_F A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ v_F A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right\} \dots\dots\dots(2.6.15)$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x) \dots\dots\dots(2.6.16)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y) \dots\dots\dots(2.6.17)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z) \dots\dots\dots(2.6.18)$$

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(2.6.9)所示。 (f_x, f_y, f_z) 為各方向的黏滯力分量(viscous force)可表示為

$$\rho V_F f_x = - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) \right\} \dots\dots\dots(2.6.19)$$

$$\rho V_F f_y = - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) \right\} \dots\dots\dots(2.6.20)$$

$$\rho V_F f_z = - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \right\} \dots\dots\dots(2.6.21)$$

其中

$$\tau_{xx} = -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \dots\dots\dots(2.6.22)$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \dots\dots\dots(2.6.23)$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \dots\dots\dots(2.6.24)$$

$$\tau_{xy} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \dots\dots\dots(2.6.25)$$

$$\tau_{xz} = -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \dots\dots\dots(2.6.26)$$

$$\tau_{yz} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \dots\dots\dots(2.6.27)$$

μ 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。

2.6.3 數值模擬流程

FLOW-3D 為一 CFD 套裝軟體，須依據如圖 2.6.3 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 2.6.4 為直立壁開孔模型外觀圖，而圖 2.6.5 多孔隙介質模型外觀圖，最後將其組合成如圖 2.6.6 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 $x=0\sim0.4\text{m}$ 處，用來納入前述建置之模型；第二區塊置於 $x=0.4\sim33\text{m}$ 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 2.6.6 所示，針對第一網格區塊設定單位網格尺寸為 1cm ，總網格數約 5 萬個；第二網格區塊設定單位網格尺寸為 1.6cm ，總網格數約 105 萬個，而圖 2.6.7 為網格系統之 3D 外觀圖。

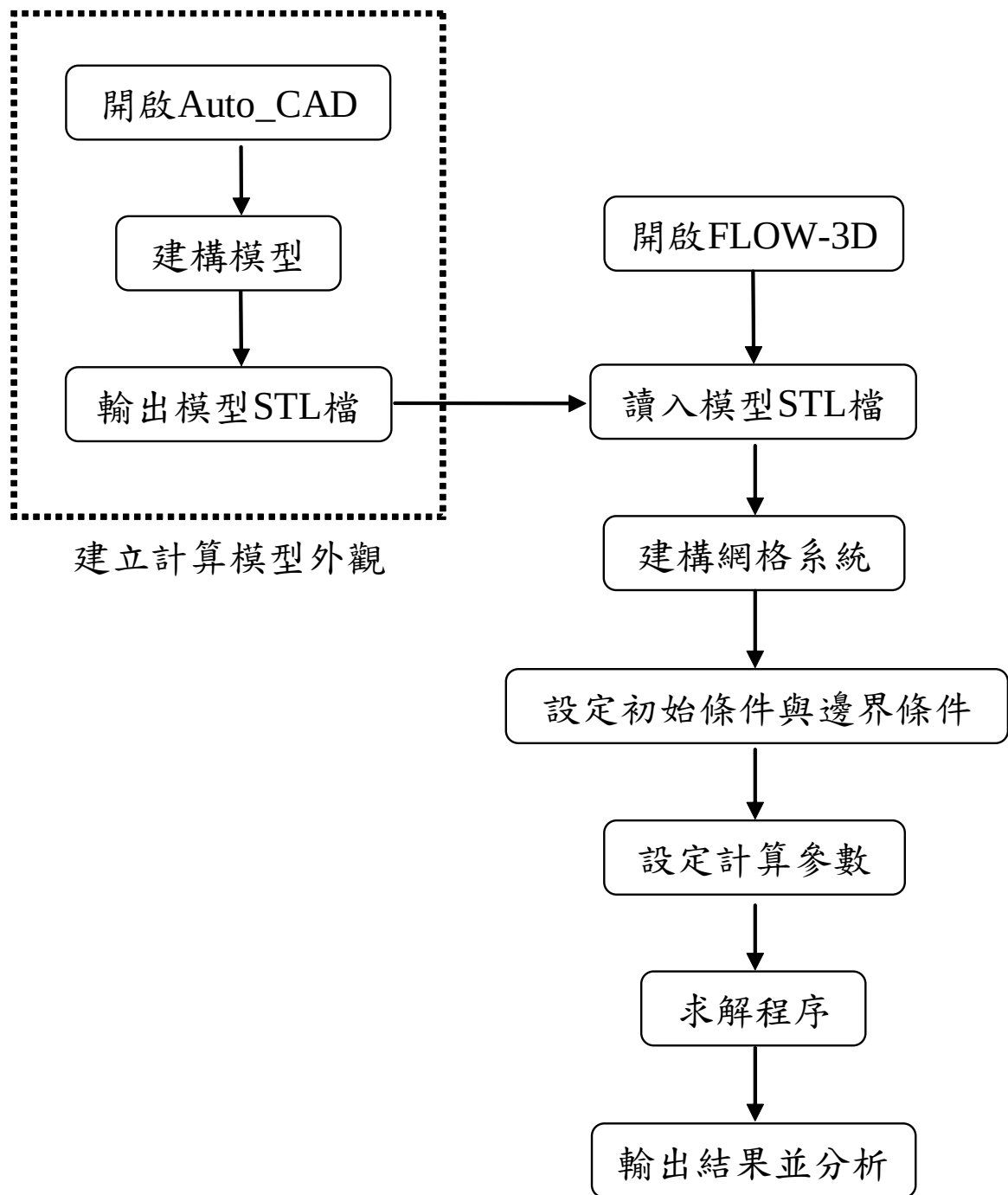


圖 2.6.3 數值模擬流程圖

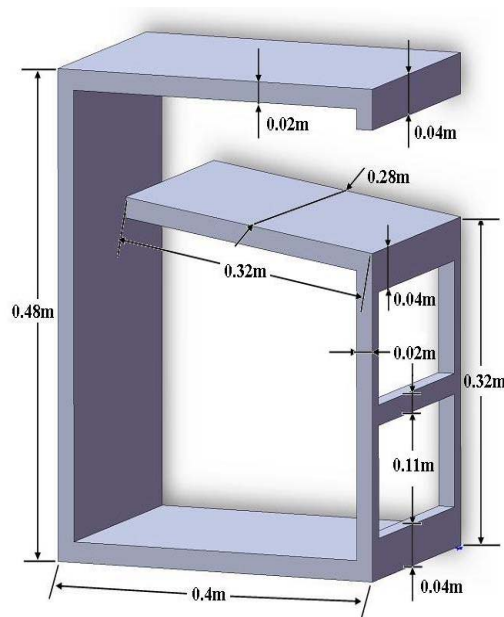


圖 2.6.4 直立壁開孔模型外觀圖

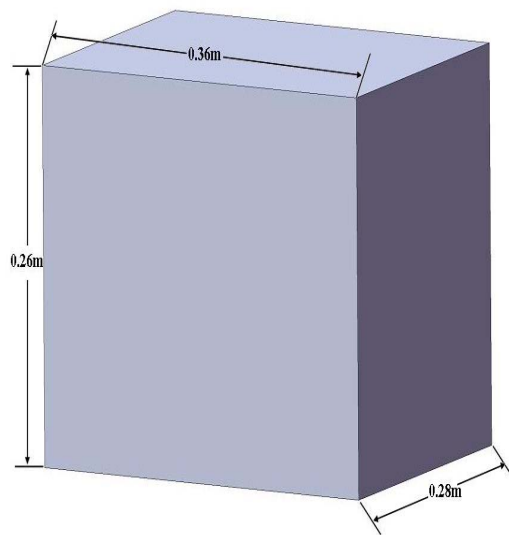


圖 2.6.5 多孔隙介質模型外觀圖

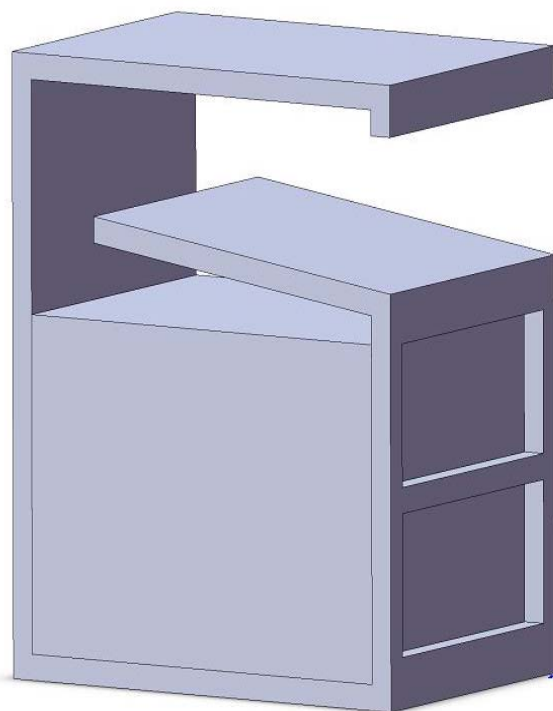


圖 2.6.6 模型元件組合外觀圖

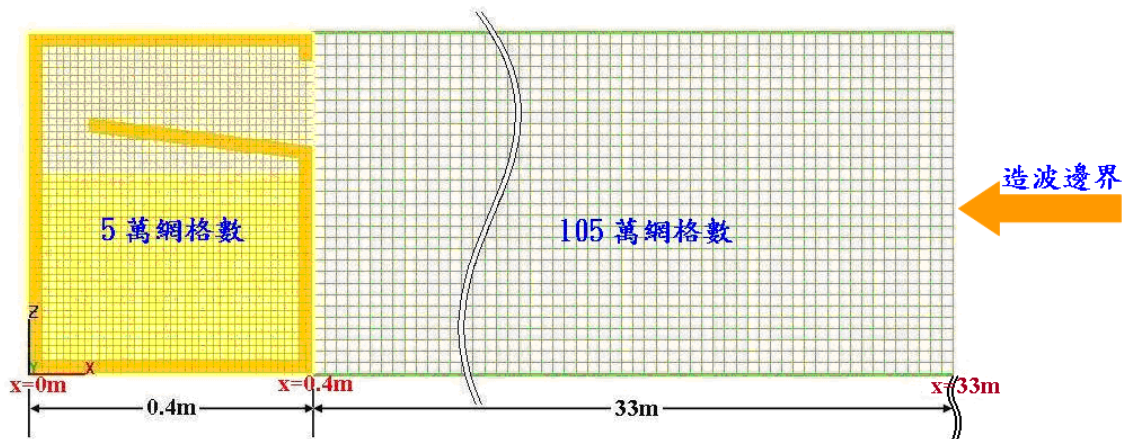


圖 2.6.7 x-z 平面網格區塊位置示意圖

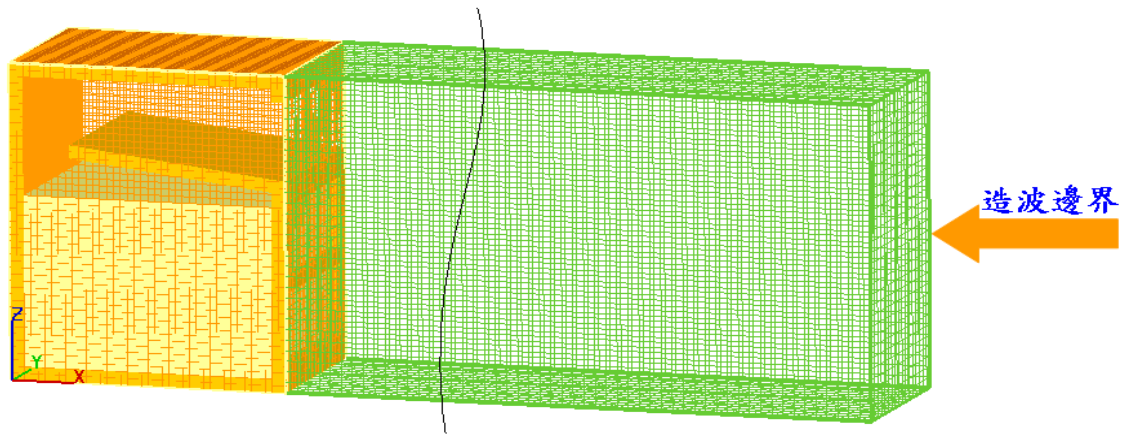


圖 2.6.8 網格系統之 3D 示意圖

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 2.6.8 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 2.6.2 所示，給定如：波高(H)、週期(T)、水深(h)及位相角(ϕ) 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。

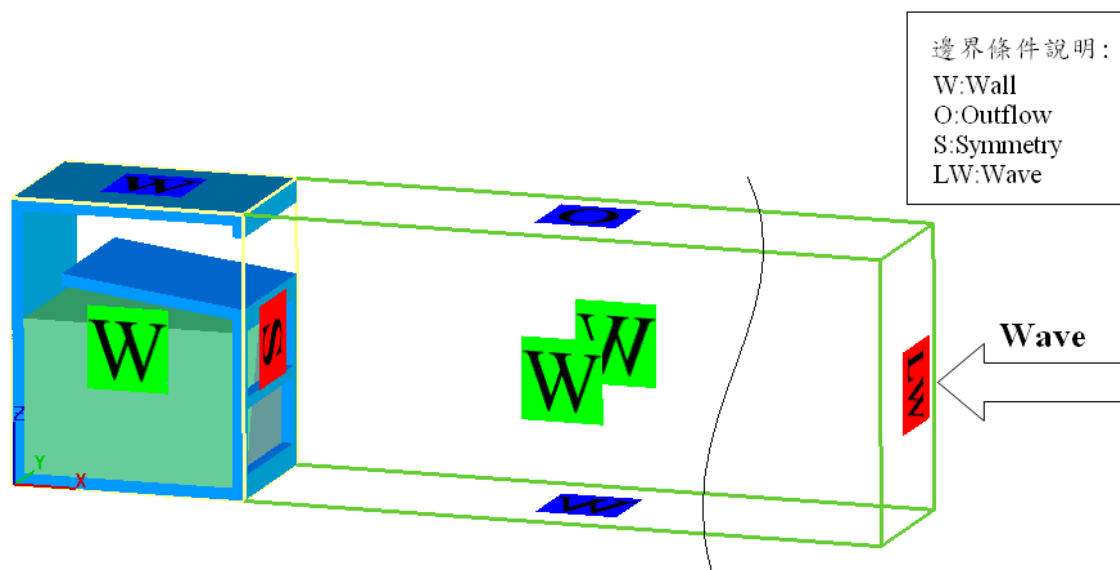


圖 2.6.9 計算領域之邊界條件示意圖

2.6.4 數值計算結果與討論

1. 前期主要結果

(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 $t=50\text{sec}$ 之前時，流體尚未越過斜坡，其水位仍然保持一定。但當 $t=60\text{sec}$ 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。未來將建議考慮對消波室的部分增加後方排水或側向排水。本期報告並未針對此進行數值模擬，日後將再考量予以檢討。

(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 $t=30\text{sec}$ 時，此時雖尚無流體越過斜坡，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 $t=30\text{sec}$ 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。本期報告已初步做數值模擬探討，並於後節予以討論。

2. 本期研究之主要結果

本期主要之工作，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 K_R (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 2.6-1 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 2.6.1 數值計算之波浪條件

CASE	週期 T (sec)	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 2.6.9 所示，藉由腹點(antinode)及節點(node)處之波形振幅，以式(2.6.28)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。

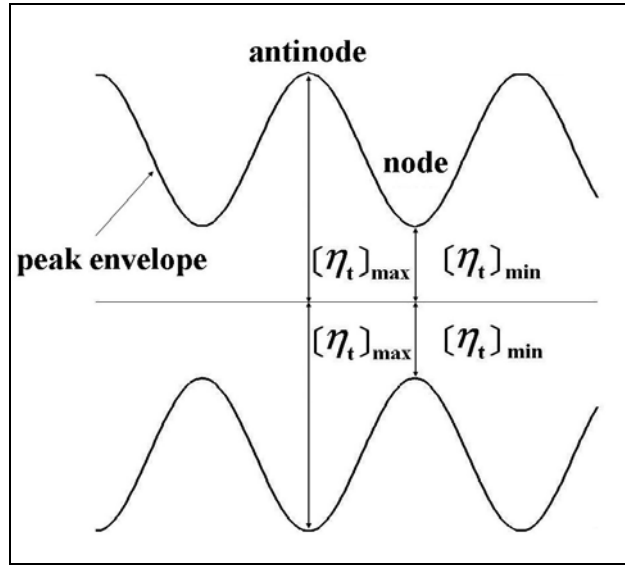


圖 2.6.10 入射波與反射波合成之包絡線

$$K_R = \frac{[\eta_t]_{\max} - [\eta_t]_{\min}}{[\eta_t]_{\max} + [\eta_t]_{\min}} \dots\dots\dots (2.6.28)$$

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(K_R)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 2.6.10 所示。圖 2.6.11 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。

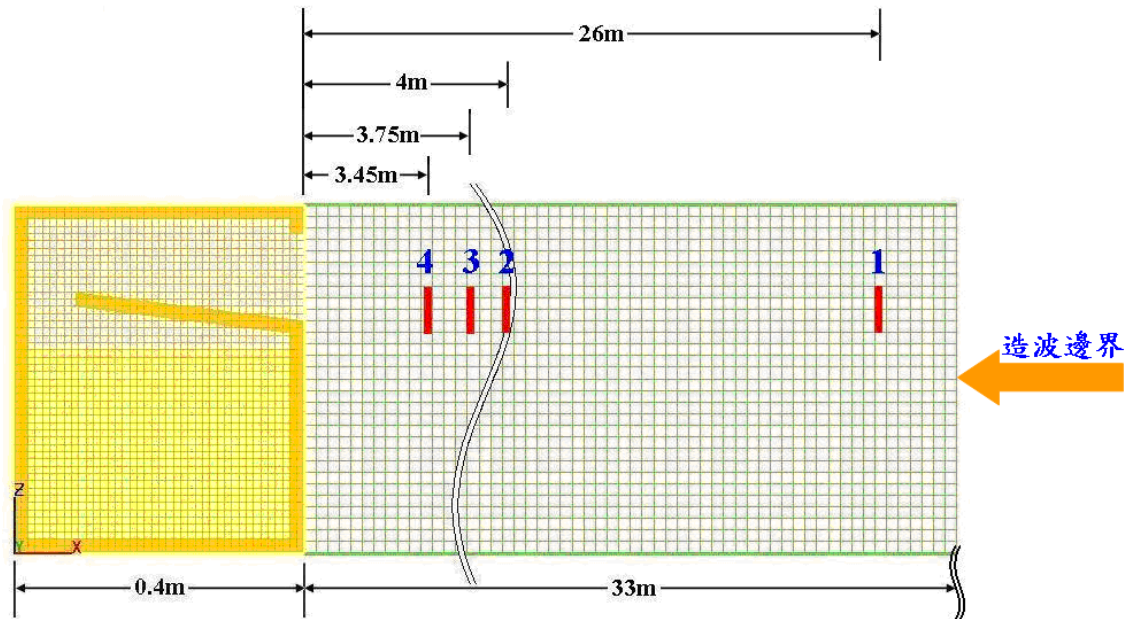


圖 2.6.11 波高計 1 至波高計 4 之量測位置

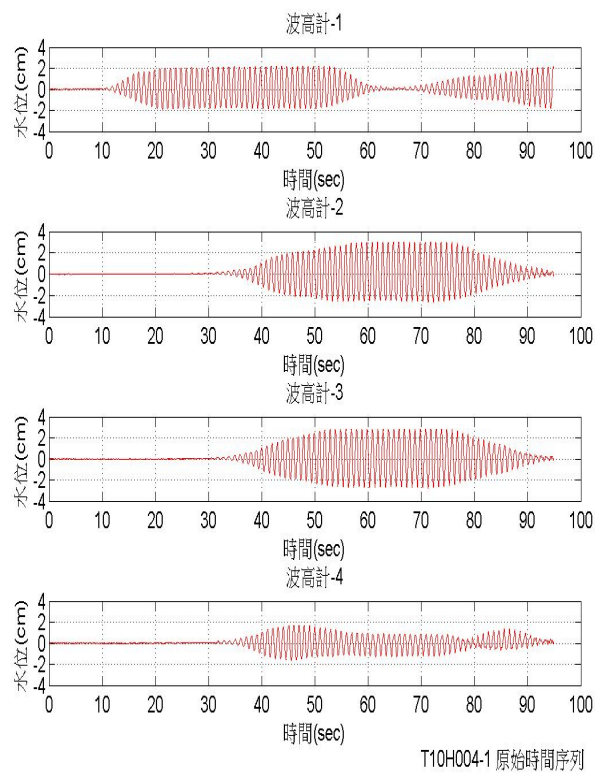


圖 2.6.12 小斷面水槽預備試驗之波高計量測值示意圖(CASE 1)

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

本期研究主要著重於導入 *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(60 秒)，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 K_R (reflection ratio)，其餘三支波高計採下列原則設置：

數值波高計 4：距直立壁 2L 處，並自此處擷取 2T 之波高值。

數值波高計 2：距直立壁 4L 處。

數值波高計 3：介於波高計 1 及波高計 2 之間。

圖 2.6.12 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 ($C=1.416\text{m/sec}$)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 2.6-2。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(K_R)之推算方法具高採信度。

表 2.6.2 數值模擬及水槽試驗之反射率(K_R)比較表

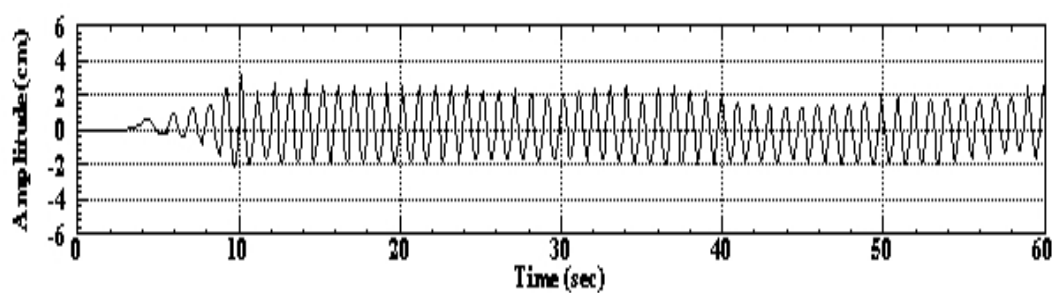
Case	造波條件	數值模擬	水槽試驗	
1	造波週期： 1.0sec 造波波高：4cm	0.1921	空水槽	0.0172
			方案一	0.0251
2	造波週期： 1.4sec 造波波高：4cm	0.1111	空水槽	0.0217
			方案一	0.0481
3	造波週期： 1.8sec 造波波高：4cm	0.1837	空水槽	0.0171
			方案一	0.1064
4	造波週期： 2.2sec 造波波高：4cm	0.1318	空水槽	0.0218
			方案一	0.1592

綜合上述之結果與討論，可歸納本期之研究成果：

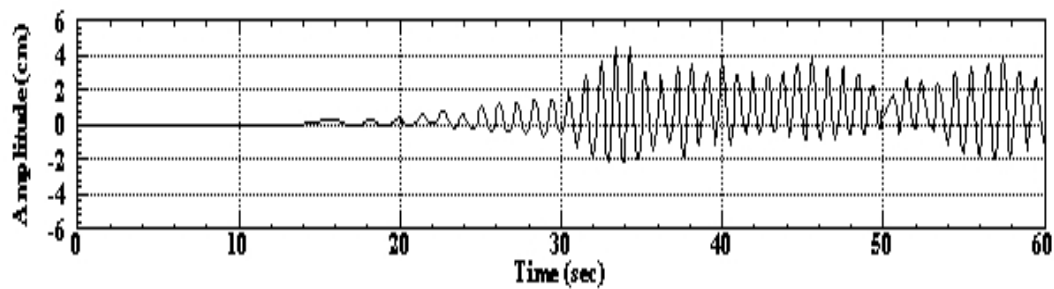
1. 所採用之數值模擬方法，能適切地展現合理之波浪水理現象，可供做為後續數值研究之可靠工具。
2. 所建構之反射率(K_R)試算法，與水工模型試驗大致有相同的趨勢，可供做為後續評估分析之準則。

此外，後續之研究項目將進行：

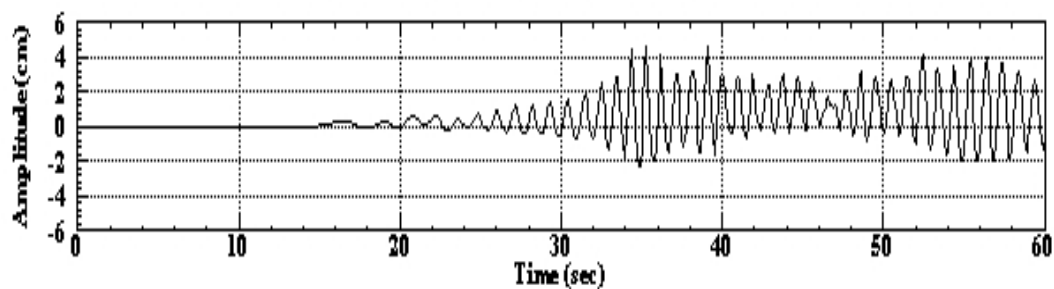
1. 探討其它多孔隙介質流量損失模式，對波浪水理之影響。
2. 不同波浪條件下及其它消能結構物方案之定量性探討分析。



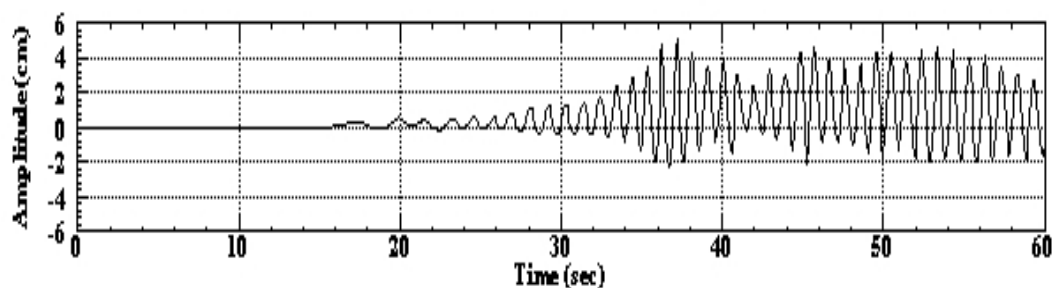
(a) $h=0.34\text{m}$, $H=0.04\text{m}$, $T=1.0\text{sec}$, $L=1.416\text{m}$, $l_1=26\text{m}$



(a) $h=0.34\text{m}$, $H=0.04\text{m}$, $T=1.0\text{sec}$, $L=1.416\text{m}$, $l_2=5.664\text{m}$



(a) $h=0.34\text{m}$, $H=0.04\text{m}$, $T=1.0\text{sec}$, $L=1.416\text{m}$, $l_3=4.248\text{m}$



(a) $h=0.34\text{m}$, $H=0.04\text{m}$, $T=1.0\text{sec}$, $L=1.416\text{m}$, $l_4=2.832\text{m}$

圖 2.6.13 數值計算結果示意圖(CASE 1)

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

第三章 功能目的使用型或臨時性設施型

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減週期不超過 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減透過波能。

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 年代基於以上考量所開發的新型浮式防波堤，其構想如圖 3.1.1 所示，其目的是要消減背風處的波高，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。它的構想是藉

由一個 V 形的結構幾何及偏向特性來分離波向，讓入射波沿著 V 形的邊界偏向，以遮蔽內部以及下風處某一距離內的水域。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。圖 3.1.2 是在現場研究機構(Field Research Facility, FRF, Duck, NC)所進行的 1/2 比例尺現場安裝試驗；圖 3.1.3 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。圖 3.1.4 及圖 3.1.5 是兩種不同的結構物型式。

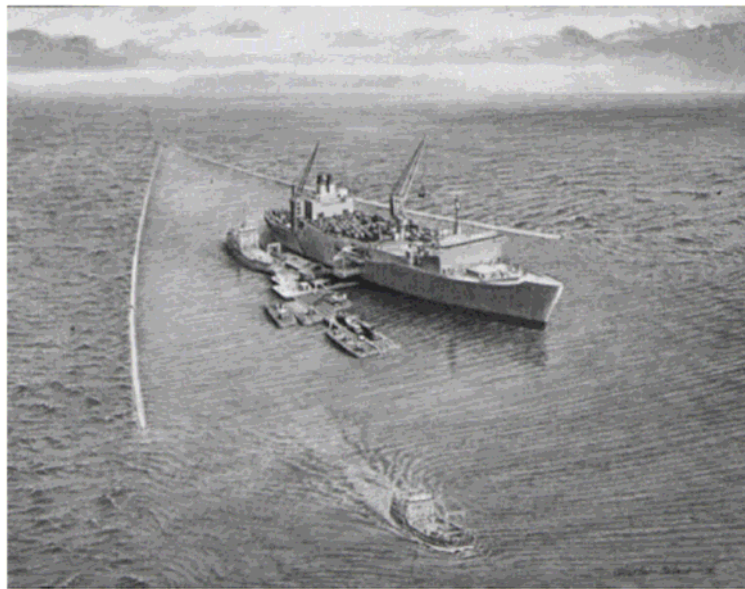


Figure 1. Rapidly Installed Breakwater System (RIBS) concept.

圖 3.1.1 快速安裝防波堤系統構想圖

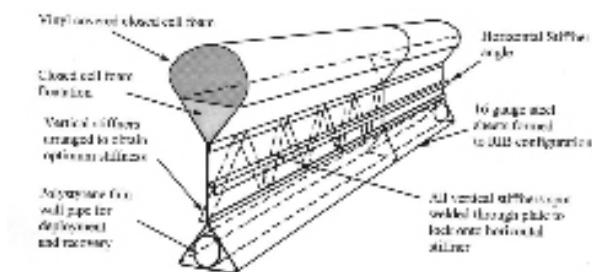


圖 3.1.2 RIBS 半比例尺現場實驗

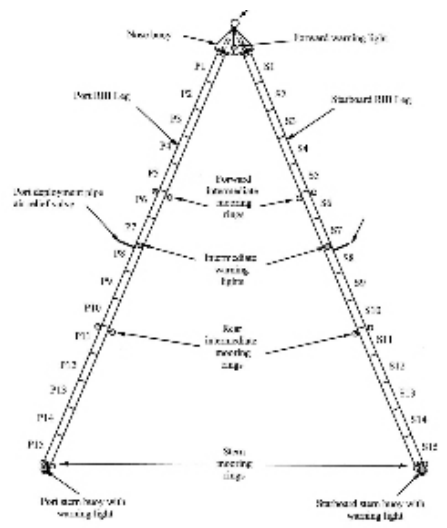




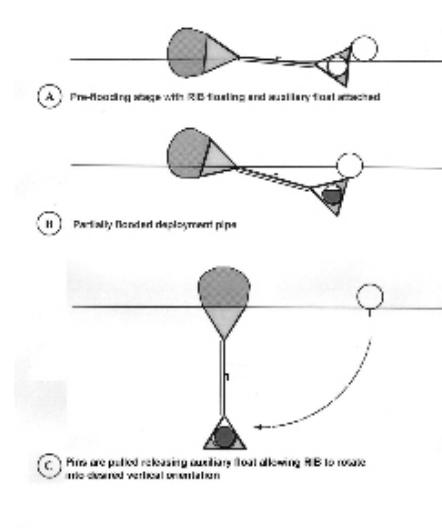
圖 3.1.3 RIBS 水工模型試驗



(a) 基本 RIBS 模組



(b) 錨碇的配置圖



(c) 佈放的方式

圖 3.1.4 小型 RIBS 的基本配置圖



圖 3.2.1 繫留浮體定義圖

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 $x = \ell_1$ ， $x = -\ell_2$ ，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 ζ_0 為入射波振幅， σ 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 ϕ 為：

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

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：

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

(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 $\phi_{II}(\ell_1, z)$

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

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

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

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

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

(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 ξ 、 η 與 ω (逆時針為正)，則兩者的關係如下：

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

(5) 浮體運動邊界條件

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

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。

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

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

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

其中

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

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

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

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

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

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

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

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。

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

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

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

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

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

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

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：

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

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：

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

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

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

其中

$$a_1 = 2 \frac{K_{xx}}{\rho g} - \frac{m}{\rho} \frac{\sigma^2}{g}$$

$$a_2 = 2 \frac{K_{x\delta}}{\rho g} = c_3$$

$$a_3 = 2 \frac{K_{\delta x}}{\rho g}$$

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

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

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：

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

其中

$$c_1 = \frac{a_4}{a_1 a_4 - a_2 a_3}$$

$$c_2 = \frac{a_2}{a_1 a_4 - a_2 a_3}$$

$$c_3 = \frac{1}{a_5}$$

$$c_4 = \frac{a_3}{a_1 a_4 - a_2 a_3}$$

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

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：

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

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：

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

其中 n_f 為場點法向量。

將領域(II)的封閉邊界線 Γ 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

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

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

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

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

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 水工模型實驗配置與方法

3.3.1 實驗設備與儀器

本實驗於國立臺灣海洋大學海洋工程綜合實驗館中進行，實驗之設備儀器如下：

1. 實驗斷面水槽

本實驗於海洋工程綜合實驗館內的小斷面造波水槽中進行，該水槽的長、寬、深分別為 50m×1m×0.8m。水槽為鋼製不透水底床，一側不透水鋼板壁，另一側為透明強化玻璃，方便觀察實驗之進行過程。斷面水槽前方為活塞式推拉造波機，後端有一段 1：3 的消波斜坡，為了使消波效果更佳，故使用多孔鐵板與海綿當作消波結構物，同時斜坡上每隔 10 公分設置一 2 公分高之方型格樑，增加斜坡上之粗造度，有利快速消除波浪能量，縮短實驗靜待水面穩定的時間。如照片 3.3.1、3.3.2。



照片 3.3.1 斷面造波水槽



照片 3.3.2 小斷面水槽消波斜坡

2. 造波機

本次實驗使用的斷面造波機，其硬體與軟體原為日本伊勢屋機械製作所(ISEYA)所製造，屬於活塞推拉式(piston type)造波機，造波板前緣設有一回饋訊號波高計，以修正造波機所推出之波高，為一無反射式設計之不規則造波機，其利用油壓來控制造波板的移動以推動水體達到造波目的，可造單方向規則波與不規則波。

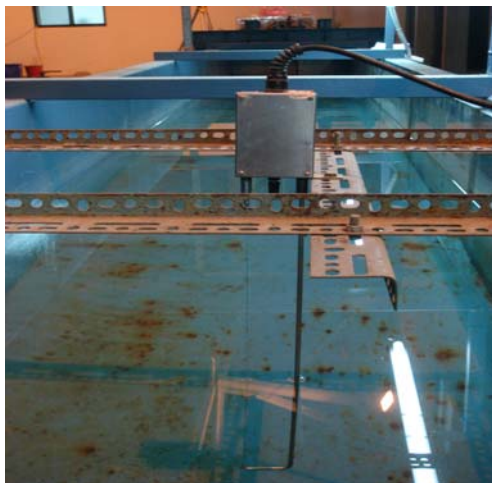
近年來試驗室控制軟體改採用加拿大國家海洋研究中心所研發造波系統，其可造出最大波高為 15 公分，可輸出週期範圍為 0.5 秒至 2.2 秒之間，造波訊號的輸出是由控制電腦直接輸入造波條件以達控制造波週期、波高的目的。如照片 3.3.3。



照片 3.3.3 造波機

3. 波高計與增幅器

本實驗採用長度 50cm 全英公司製造的容量式波高計測波高，透過電容式電路感應金屬與訊號線間，因水位波動導致的浸水面積變化轉成電壓起伏，經電纜線傳回波高增幅器將水面變化訊號變大後，由資料擷取系統轉化取得量測波高。如照片 3.3.4、3.3.5。



照片 3.3.4 波高計



照片 3.3.5 訊號增幅器

4. 資料擷取系統與軟體

資料擷取系統是採用國內三聯公司代理的 Instrunet 軟體，包含資料擷取訊號輸入、輸出線路等硬體及一套類比、數位訊號轉換與資料處理分析軟體，此系統之優點是可直接感測 Current、Thermocouple、Voltage、Strain Gage.....等。利用 16se/8di 14 位元類比訊號讀取，而每套資料擷取系統共有 8 個頻道類比輸出訊號和 8 條數位訊號 I/O 線。資料擷取器(硬體)需遠離電腦以降低電腦內部的雜訊干擾。Instrunet 擷取系統之硬體及軟體如照片 3.3.6、3.3.7 所示。

5. 傾角計

本實驗所使用之傾角計(PMP-S10L)為 MIDORI 公司所製造，最大有效之量測角度為 ± 10 度，傾角計所量得資料為電壓，經電纜線傳到資料擷取器再傳到電腦中加以紀錄，可量測浮體運動時之傾角變化量。照片 3.3.8 所示

6. MOTION SENSOR

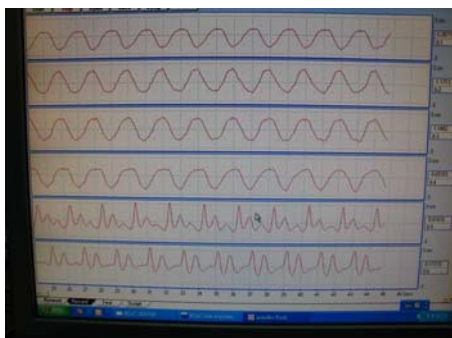
MOTION SENSOR 內部為機械式之儀器，可測得三維方向之加速度與 X、Y 方向之旋轉角，三維方向之加速度從電腦中紀錄所得到的值為 G 值，旋轉角最大有效之量測角度為 ± 30 度。照片 3.3.8 所示。

7. 拉力計

本試驗所使用之拉力計，得以量測細鋼索載浮體運動時所受之拉力，此儀器可承受之拉力範圍於 0-100lb，經單位換算紀錄至 Instrunet 軟體，量測之值以 kgw 為單位並儲存。照片 3.3.9 所示。



照片 3.3.6 資料擷取接線



照片 3.3.7 資料擷取系統螢幕顯示



照片 3.3.8 傾角計(左) MOTION
SENSOR(右)



照片 3.3.9 拉力計

3.3.2 實驗方法

本實驗為繫留浮體所要量測的資料為:反射率、透過率、浮體運動的傾角與浮體運動的位移且與數值分析的資料做比較驗證。

1. 模型的製作

本實驗模型以Ⅱ型為整體實驗模型，因水槽寬 1m 高 0.8m 避免模型碰撞到水槽，故實驗模型的兩側分別預留 2.5cm。實驗模型尺寸分為兩個部份，主要部份為一矩形木箱長 49.8cm 寬 95cm 高 20cm，次要部份為兩片鋼板長 35cm 寬 95cm 厚 0.2cm，分別與矩形體同高對齊且固定在矩形體前後，則鋼板會露出 15cm 如圖 3.3.1 所示。

實驗模型之防水措施，以防木頭腐爛與進水先以紅色油漆上漆，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。

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，並計算質心高度結果為板面向下 11.67cm，而載重以鋼板和鋼條為主，並對稱放置載重固定於木箱內，而實驗模型總重為 48.26 kgw。

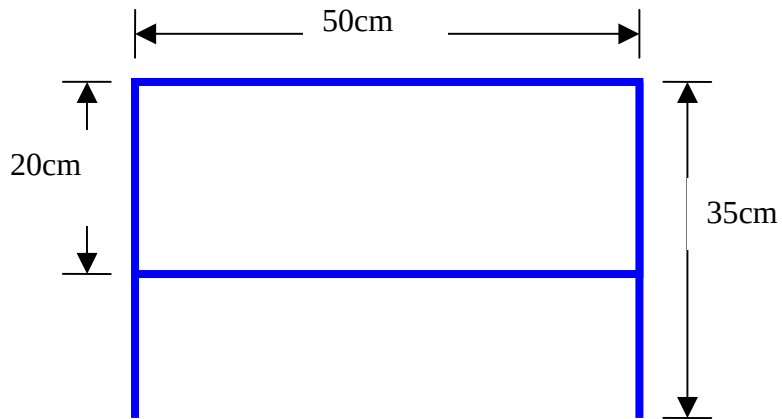


圖 3.3.1 實驗模型尺寸側面圖

2. 實驗條件

本實驗設定條件:水深為 0.5m，波形為規則波，造波條件如表 3.3-1 所示，當水深(h)與波長(L)比值大於 0.5 時為深水範圍，當(h/L)小於 0.05 時為淺水範圍，而介於兩者之間的為中度水深之範圍，故此實驗為中度與淺水深範圍，造波之週期為 1 至 2.5 秒，每個週期重複造波 3 次，入射波波高於 3 至 6 cm。

模型尺寸如圖 3.3.1 所示，實驗模型沒水深度為 10 cm、形式相同之彈簧，細鋼索與水平線之夾角為 45 度。

表 3.3.1 試驗波浪條件

週期 (sec)	波高 (m)	波長 (m)	波形尖銳度	試驗水深 (m)	水深波長比	Ursell 數
t	H	L	H/L	h	h/L	Ur
1	0.03	1.513	0.019828	0.5	0.3304	1.1772
1.1	0.03	1.7813	0.016842	0.5	0.2806	1.4244
1.2	0.04	2.0484	0.019527	0.5	0.2440	2.2602
1.3	0.04	2.3116	0.017304	0.5	0.2163	2.6526
1.4	0.04	2.5717	0.015554	0.5	0.1944	3.0764
1.5	0.05	2.827	0.017687	0.5	0.1768	4.4145
1.6	0.05	3.0772	0.016249	0.5	0.1624	5.0227
1.7	0.05	3.3256	0.015035	0.5	0.1503	5.6701
1.8	0.05	3.5711	0.014001	0.5	0.1400	6.3568
1.9	0.06	3.8141	0.015731	0.5	0.1310	8.4993
2	0.06	4.0549	0.014797	0.5	0.1233	9.4176
2.1	0.06	4.2939	0.013973	0.5	0.1164	10.382
2.2	0.06	4.5312	0.013242	0.5	0.1103	11.395
2.3	0.06	4.7669	0.012587	0.5	0.1048	12.454
2.4	0.06	5.0014	0.011997	0.5	0.0999	13.561
2.5	0.06	5.2416	0.011447	0.5	0.0953	14.715

3.實驗模型與儀器之佈置

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；四條細鋼索固定位置具模型中心 0.5m，細鋼索一端固定於實驗模型由上至下 20cm 處，另一端則裝上彈簧，再裝置調整長度之繫節器裝置於拉力計與彈簧間，而拉力計固定位置統一固定在於離水面上 80 公分處。圖 3.3.2、照片 3.3.10 所示。

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⁽¹⁾(1976)支兩點分離推定法量測反射率，波高

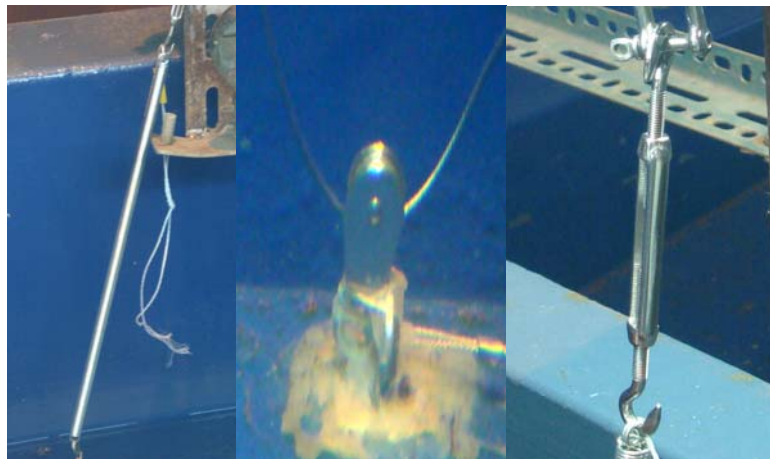
計的架設須滿足下列條件；

- (1) $0.05L \leq \Delta L \leq 0.45L$
- (2) 波高計距離結構物之距離 $\geq 0.1L$

ΔL 為兩支波高計之間距， L 為入射波波長。

此實驗造波波長 5.2416 至 1.513m，因此波高計之間距為 0.262 至 0.68m 之間，波高計之間距為 0.3m 和 0.4m，離實驗模型之波高計距離必須大於 0.524m，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，需距離潛堤 1.5 倍波長處可得到穩定波形，本試驗最長之波長為 5.2416m 與避免量測到反射波，本試驗透過波之波高計距離實驗模型 8m。如圖 3.3.3。



照片 3.3.10 彈簧、細鋼索、滑車、繫結器

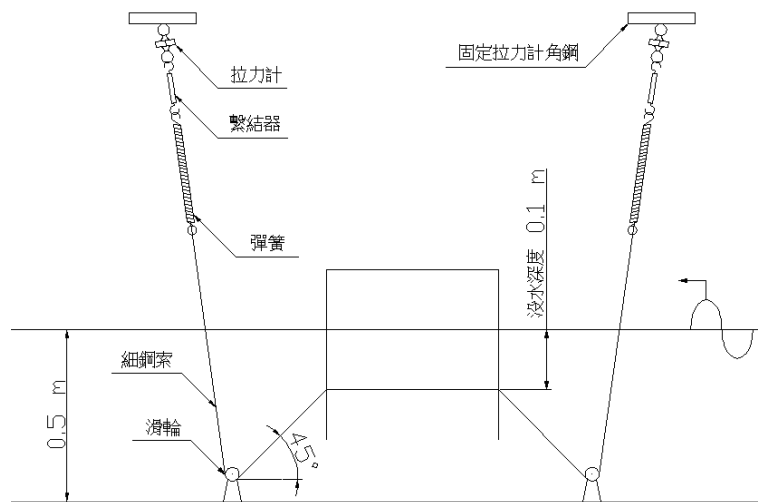


圖 3.3.2 模型佈製圖

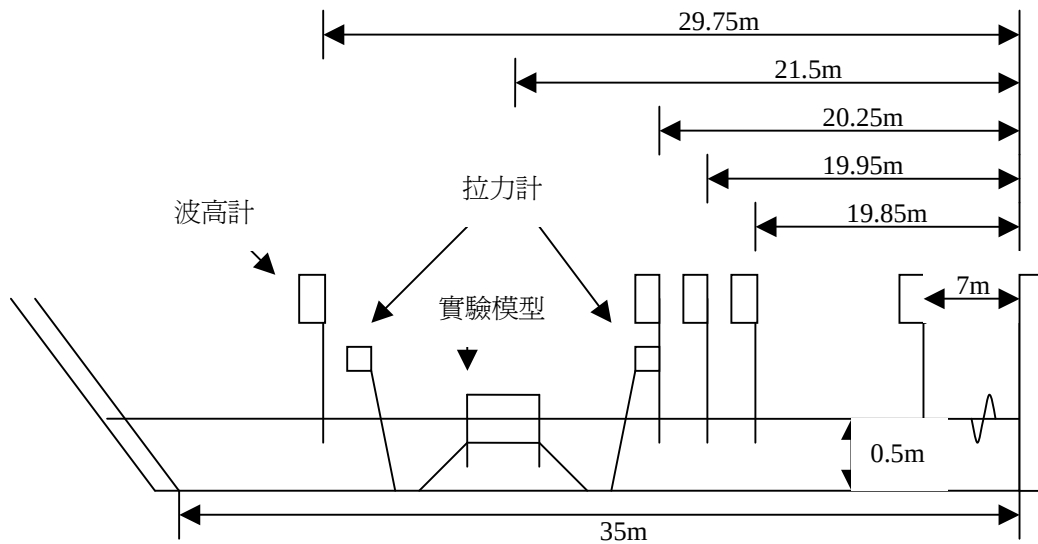


圖 3.3.3 斷面水槽配置圖

4. 實驗儀器之率定

實驗開始之前必須將所有用到之儀器率定，以求實驗結果之正確性，避免因為儀器故障而導致實驗資料不正確。

(1) 波高計之率定

入射波波高、反射波波高、反射率等之量測必須應用波高計量測

之波高加以計算，波高計的率定方式將波高計經電纜線連接至波高增幅器後再傳到電腦中紀錄，將波高計放入一與水槽同高之率定水筒中，調整測棒沒入水中達一半高度時將增幅器歸零，訂定此時的水位為零水位，之後，往上與往下垂直移動波高計 $\pm 5\text{cm}$ 並紀錄水位讀數，比較波高計量得之水位與測尺所量得之波高必須呈線性變化方能使用此波高計。

(2) Motion sensor

將 motion sensor 定於驗模型質心上，且實驗模型擺放至水平面空水槽中，motion sensor 出廠時會附上電壓與加速度參數和旋轉角參數，率定時先將儀器連接上資料擷取盒與電腦，並將 MOTION SENSOR 出場時附上之參數輸入至資料擷取軟體，將 motion sensor 上標示箭頭朝造波板方向，則 motion sensor 的加速度和角度讀數應分別為 0G 與 0° 。

(3) 傾角計率定

將傾角計連接至資料擷取器與電腦，傾角計固定於水平板上，再以量角器準確量得角度來率定傾角計，調整傾角計的固定板傾斜程度，並隨時讀取量角器量測之角度，及電腦所測得之角度值，使得傾角計的角度與電腦讀數一致，傾角計才算率定完成。

(4) 拉力計率定

拉力計出場時附有率定參數，將參數輸入至 Instrunet 軟體，並將 lb 單位換算成 kg，設定完成後將拉力計固定且將不同載重綁在拉力計上，則電腦資料擷取讀數與容器重量相同便率定完成。

(5) 彈簧率定

圖 3.3.4 為四條彈簧率定之結果，將彈簧直立固定住上端，而下端裝上載重，逐步加載重並量其伸長量，以求得彈簧之彈力係數 K。

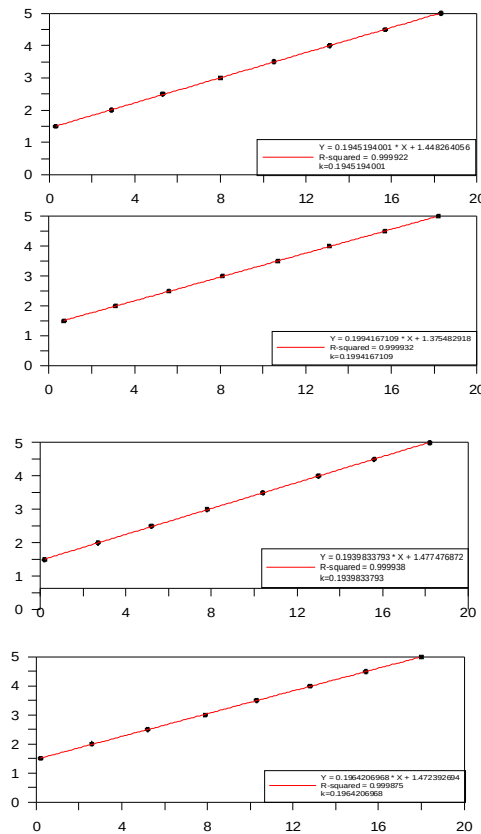


圖 3.3.4 拉力彈簧之率定

3.3.3 進行實驗與量測

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，造波時間都固定為 1 分 15 秒，資料擷取至 1 分 30 秒，以便實驗後整理資料統整。

2. 實驗資料擷取與分析

入射波波高由入射波波型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做平均，如圖 3.3.5 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 3.3.6 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 3.3.7 所示。

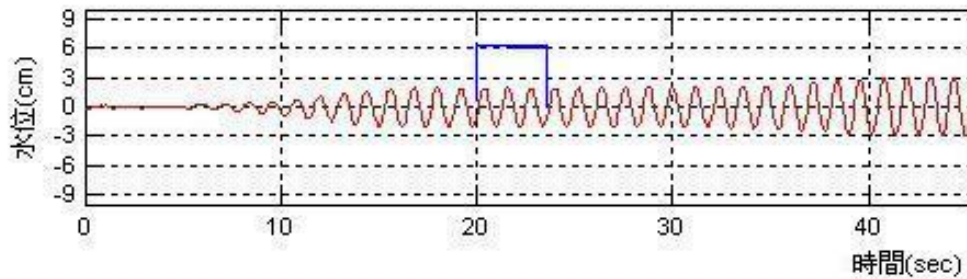


圖 3.3.5 入射波波型(標示處為擷取位置)

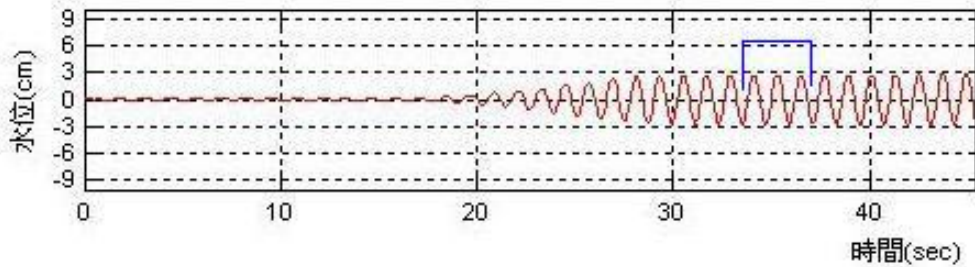


圖 3.3.6 反射波波型(標示處為擷取位置)

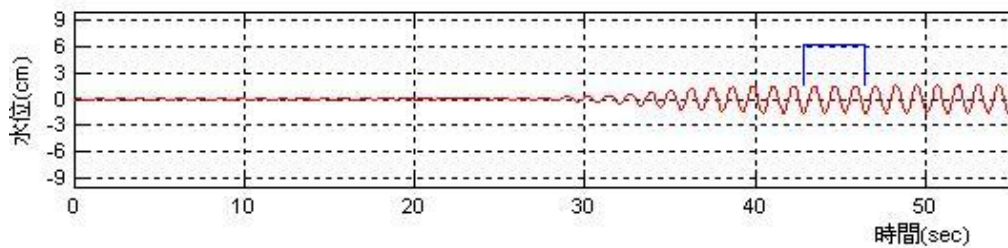


圖 3.3.7 透射波波型(標示處為擷取位置)

3.4 數值模擬與討論

針對本章第一節所述具快速佈放能力的臨時性浮式防波堤，為能達高機動性，其防波堤的佈設並不考慮繫留繩索的問題，因此本研究在探討浮體下方設置翼板對整體運動及消波特性的影響時，將針對自

由浮體討論，翼板設置之型式如圖 3.4.1(a)、(b)所示，並定義浮體為矩形，其長為 2ℓ 、沒水深度為 q_1h 、翼板長度 q_2h 、翼板與 x 軸之夾角為 θ ，並假設翼板的質量與厚度相對於水深與浮體本身質量相當小，因此在分析時不考慮其板厚與質量，本研究討論方向主要在於瞭解翼板的長度、角度對浮體運動與消波特性之影響。

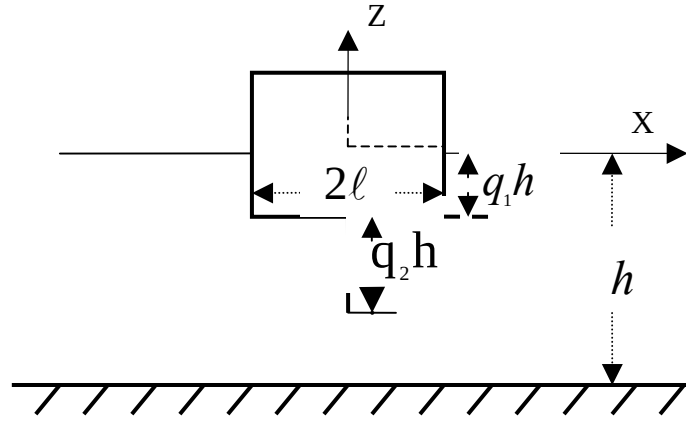


圖 3.4.1(a) 浮體底部配置單翼板定義圖

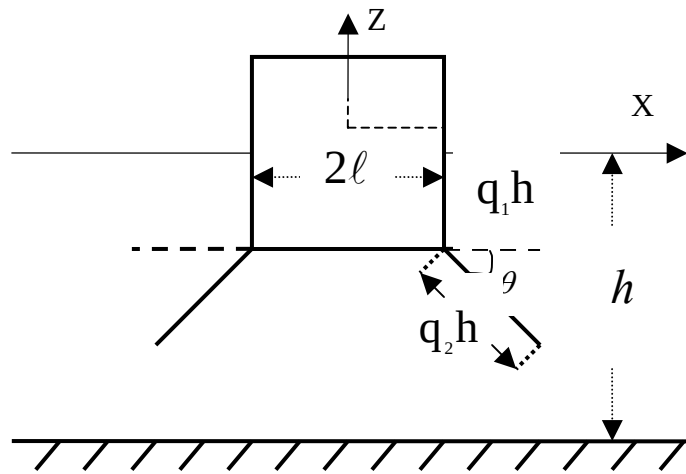


圖 3.4.1(b) 浮體底部兩側配置雙翼板定義圖

3.4.1 翼板長度對浮體消波特性與運動之影響

如圖 3.4.2(a)、(b)所示為浮體長 $2\ell = h$ 、沒水深度 $q_1h = 0.25h$ ，浮體底板兩側設置有兩翼板，各翼板長度分別為 $q_2h = 0, 0.125h, 0.25h$ ，及 $0.375h$ 、翼板垂直向下即 $\theta = -90^\circ$ 時的反射與透過

率，翼板長度為 0 時即為原來自由浮體型式，基本上而言，浮式結構物對長週期波的消波效果普遍不佳，由圖 3.4.2(a)所示，在浮體底部未設置翼板時，其反射率在 $\sigma^2 h/g \leq 1.5 (kh \leq 1.62)$ 時皆在 0.4 以下，當浮體具有底部具有兩個翼板時，可有效地增大對長週期波入侵的阻隔效果，亦即可提升較長週期波作用時的反射率，底部垂直翼板長度越長，對長週期波能量的阻絕效果越明顯，而圖 3.4.2(b)所示則為本計算例之透過率，其中並驗證本數值模式能量守恆公式 $K_r^2 + K_t^2 = 1.0$ ，能量守恆線不管在長週期波或短週期波的計算結果皆等於 1.0，顯示本數值模式的穩定性。

圖 3.4.3(a)~(c)所示分別為浮體的無因次前後移(surge)、垂直移(heave)及縱轉(pitch)運動與無因次週期 $\sigma^2 h/g$ 間之關係，比較在浮體有、無加設翼板對其各自由度運動之影響，由圖 3.4.3(a)前後移運動變化顯示，當浮體受較長週期波 ($\sigma^2 h/g \leq 0.5$) 或短週期波 ($\sigma^2 h/g \geq 3.0$) 作用時，有無加設翼板對前後移運動影響變化並不大，但當介於中間週期之波浪入射時，加設垂直翼板浮體的前後移運動則明顯有增大情形，而翼板長度越長，前後移運動振幅有越大、且激發大振幅的頻率亦越傾向於低頻區，此應是浮體加設翼板後，阻絕入射波能量透過的能力增加，而此部份被阻絕的波浪能量反應於浮體運動所致。至於對垂直移運動的影響則亦有類似的趨勢，在未加設垂直翼板前 ($q_2 = 0.0$)，其垂直位移約在 $\sigma^2 h/g \cong 1.5$ 附近達極大值，但在增設垂直翼板後，其發生極值頻率則偏向低頻區，板長越長極值有越往低頻區偏移的趨勢，同時運動的極值亦有越大的傾向，基本上而言，垂直移運動因受恢復力影響，因此其運動特性存在共振頻率區，其運動將因外力作用的頻率而引起共振，自由浮體垂直移自然振動頻率為 $\omega_n = [\rho g A_w / (M + A_{33})]^{1/2}$ ，其中 A_w 為浮體水線面積，而 M, A_{33} 分別為浮體質量與垂直移附加質量，在本計算例中並未考慮翼板的重量，因此浮體的質量並未改變，浮體在增設垂直翼板後，其自然振動頻率移往低頻區，主要應是加設翼板後，浮體運動時帶動覆於翼板內之水體而導致其附加質量增加所致。圖 3.4.2(c)所示為垂直翼板對縱轉運動的

影響，其運動特性大致亦隨著翼板的增長，共振頻率區有向低頻偏移的特性，而此應是浮體底部兩側加設垂直翼板後對較長週期波有較佳消波特性的主要因素。

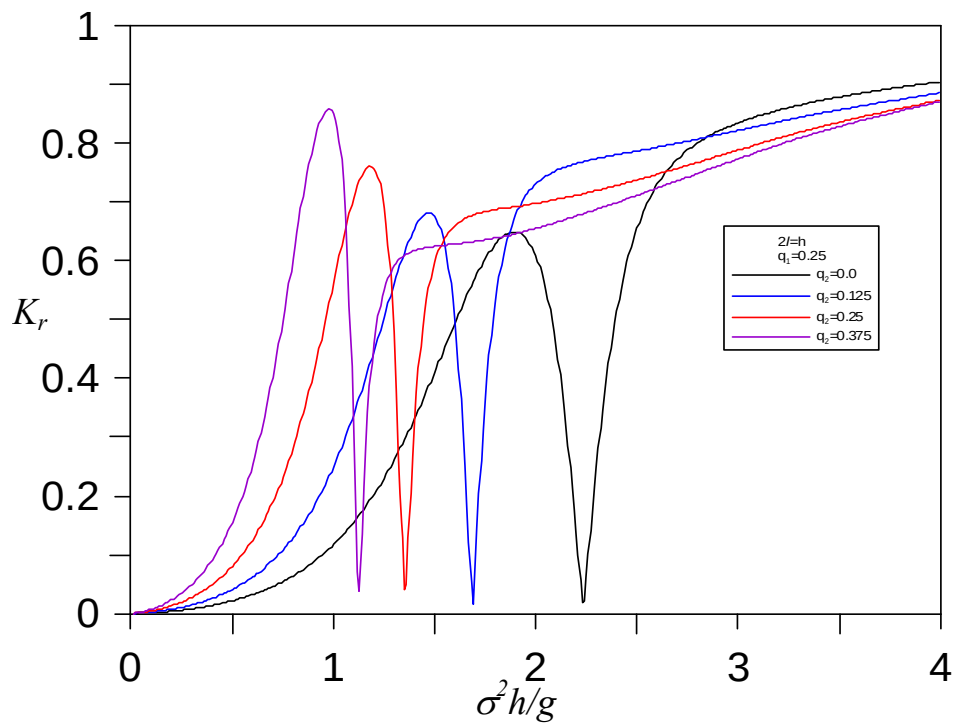


圖 3.4.2(a) 自由浮體不同翼板長度對反射率之影響

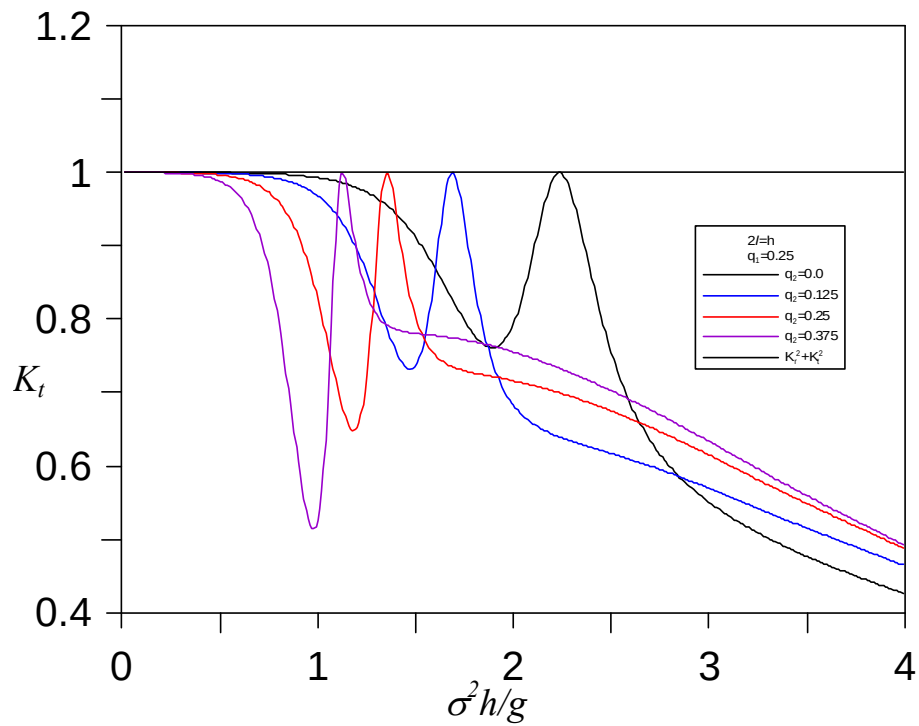


圖 3.4.2(b) 自由浮體不同翼板長度對透過率之影響

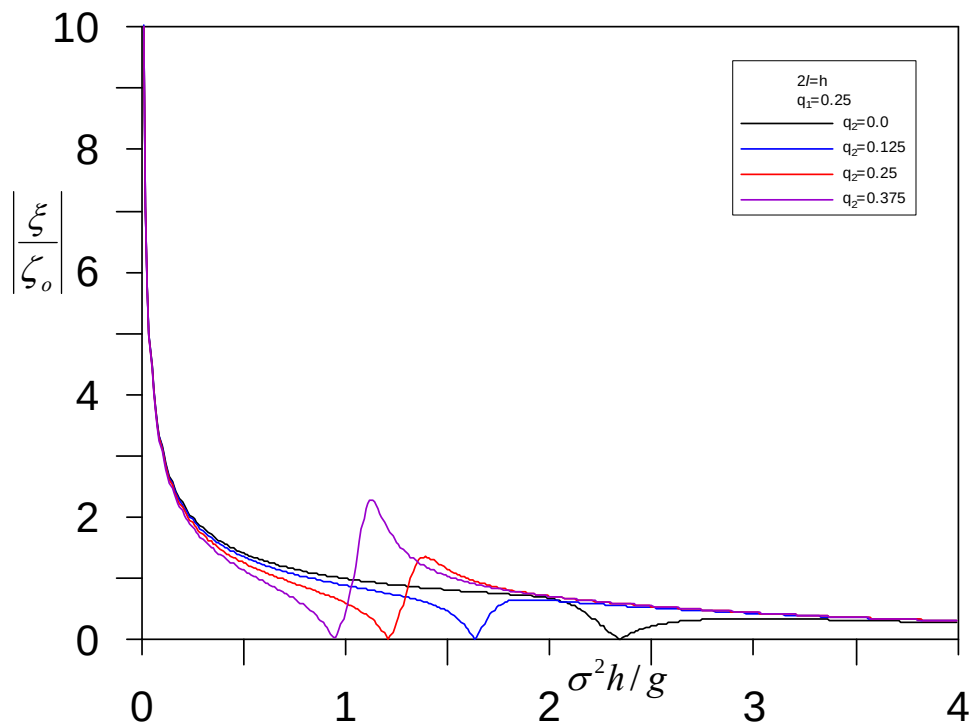


圖 3.4.3(a) 不同翼板長度對自由浮體之前後移(surge)運動之影響

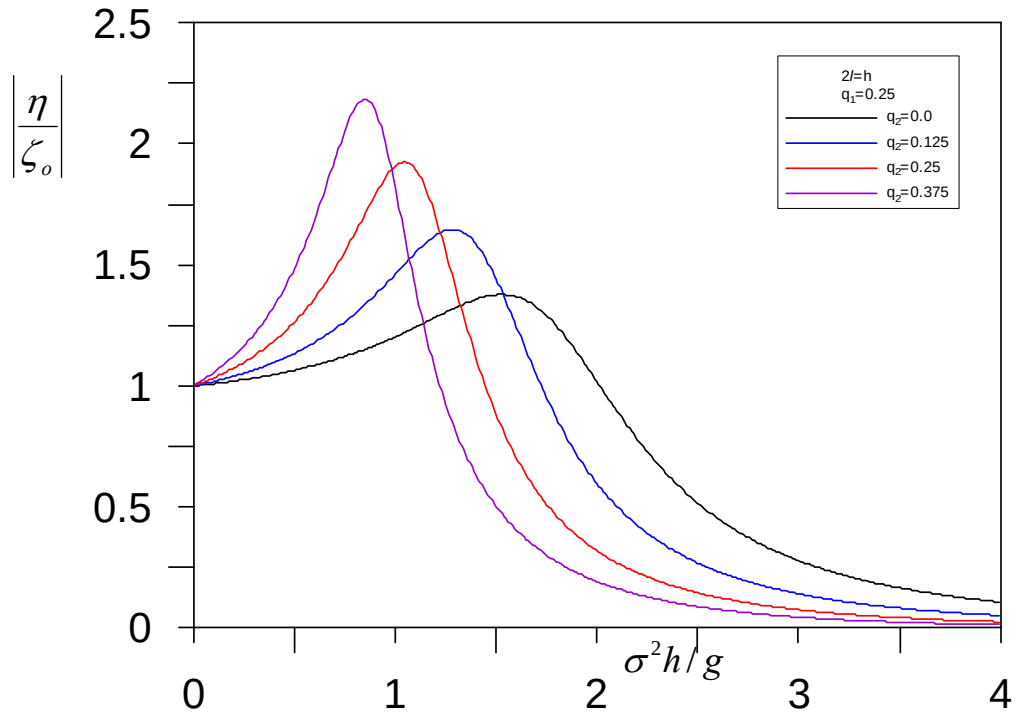


圖 3.4.3(b) 不同翼板長度對自由浮體之垂直移(heave)運動之影響

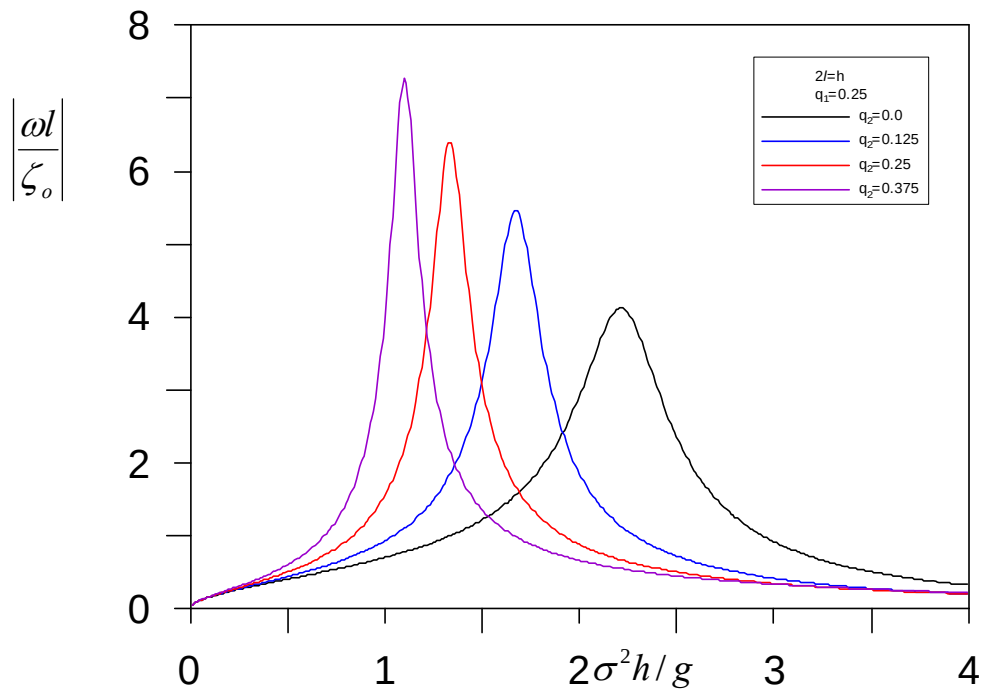


圖 3.4.3(c) 不同翼板長度對自由浮體之俯仰(pitch)運動之影響。

3.4.2 翼板角度對浮體消波特性之影響

本節將討論浮體底部兩側設置翼板情況下，兩翼板角度對浮體消波與運動特性之影響，如前所述，翼板角度 θ 的定義為右側翼板與 x 軸之夾角，逆時針為正，並設兩翼板呈反對稱形式配置，並分別以不同無因次波浪週期 $\sigma^2 h/g$ (0.5~3.0)、翼板角度 θ 為 0(翼板水平)~-90 度(垂直向下)進行討論其消波特性，在進行數值計算例時，浮體各單元尺寸分別為：浮體長度 $2\ell=h$ 、沒水深度 $q_1 h=0.25h$ 、翼板長度 $q_2 h=0.25h$ 。

如圖 3.4.4 所示為較短週期波 $\sigma^2 h/g=1.5\sim 3.0$ 入射時，不同翼板角度對其反射率之影響，在此較範圍的較短週期波浪作用下，翼板角度對其反射率的影響大致呈現一規律的變化，越短週期波在兩側翼板為水平時，其反射率較佳，而翼板角度逐漸向下傾斜時，其反射率首先降低，而後右逐漸增大並達到其最大的反射率值，此最大反射率發生的翼板角度隨入射波週期而不同，越短週期的波浪作用下，其角度越傾斜。

而圖 3.4.5 所示則為較長週期波 $\sigma^2 h/g=0.5\sim 1.25$ 作用下所得結果，如圖中各波浪條件計算所得反射率與翼板角度之關係，發現其反射率與翼板角度的變化並不十分明顯，大致上而言，翼板水平時並無法得到最佳的消波效果，與較短週期波作用時相同的是，翼板由水平傾斜至垂直向下時，各週期的波浪均會在某一翼板角度達一最佳之反射率，越長週期波入射時，翼板傾斜在較小角度時，其反射率可達一極值，此現象與短週期波之結果恰巧相反，而比較圖 3.4.4 與圖 3.4.5 之結果顯示，垂直向下的翼板將可使介於無因次波週期 1.25 與 1.5 間(波長約為浮體長度的 1.5 倍)的波浪的反射率達一極值。

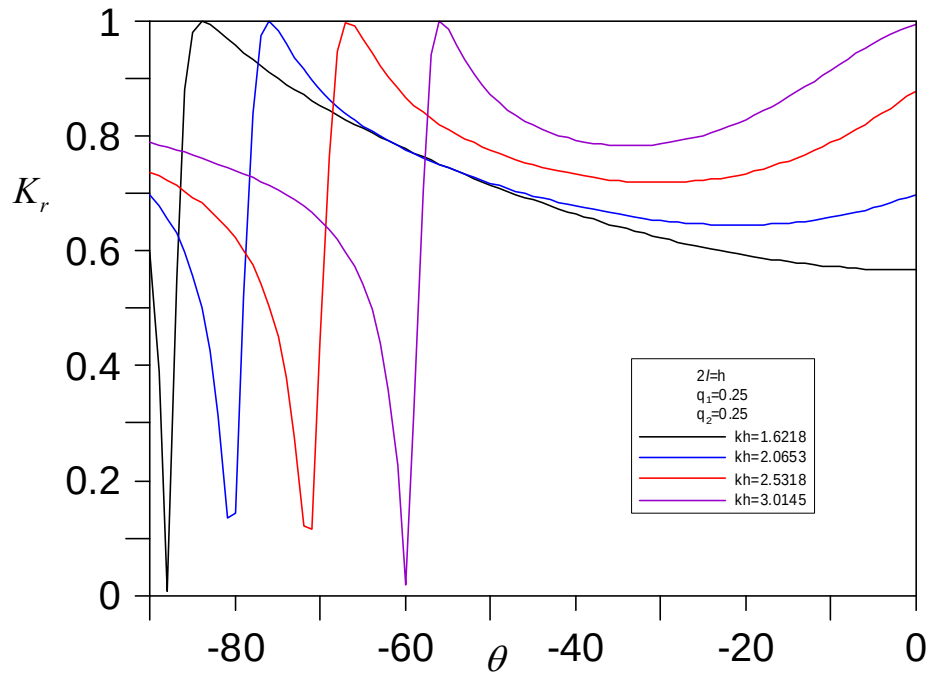


圖 3.4.4 $\sigma^2 h/g=1.5 \sim 3.0$ 波浪入射時，不同翼板角度對其反射率之影響

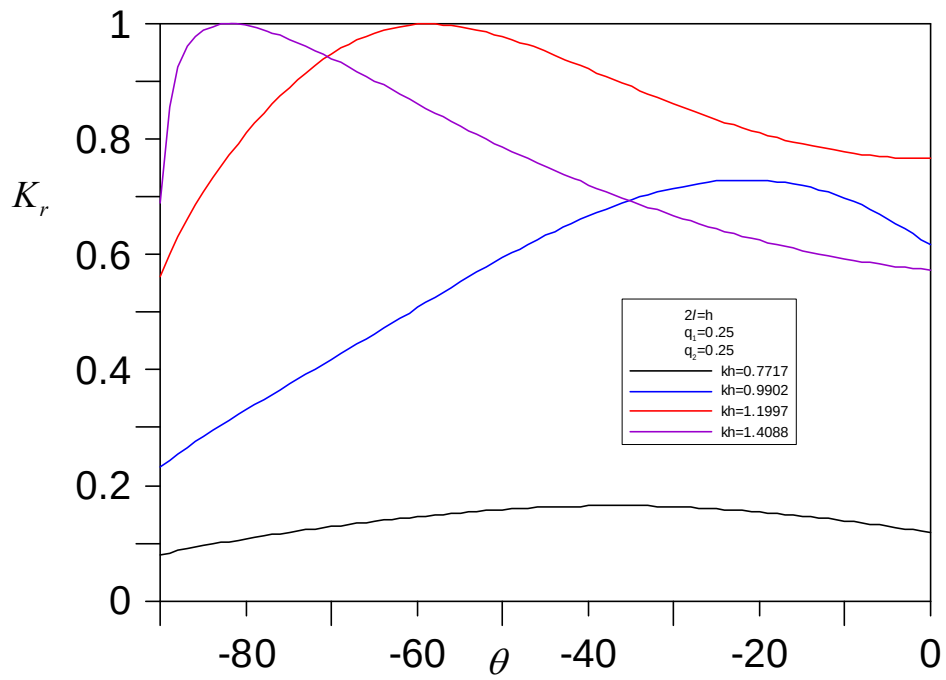


圖 3.4.5 $\sigma^2 h/g=0.5 \sim 1.25$ 波浪入射時，不同翼板角度對其反射率之影響

3.4.3 翼板個數對浮體消波特性之影響

本節主要討論浮體底板下方設置無厚度翼板時，翼板設置個數對浮體消波特性之影響，亦即檢討圖 3.4.1(a)、(b)斷面消波特性之差異，為方便討論，翼板之角度均設其為垂直向下，而浮體長度為 $2\ell=h$ 、沒水深度與翼板長度皆為 $q_1=q_2=0.25$ 。圖 3.4.6 所示為單翼板置於浮體底板中央(N=1)、雙翼板位於浮體兩側(N=2)及兩者位置綜合三翼板(N=3)時的反射率，由圖中顯示單翼板置於浮體的消波特性與單浮體未設置翼板時大致相同，而三翼板較設置雙翼板時的反射率稍佳，但差異並不大，顯示在浮體底部兩側設置雙翼板後，再加設其他翼板，對於浮體消波效果的提升並不大。

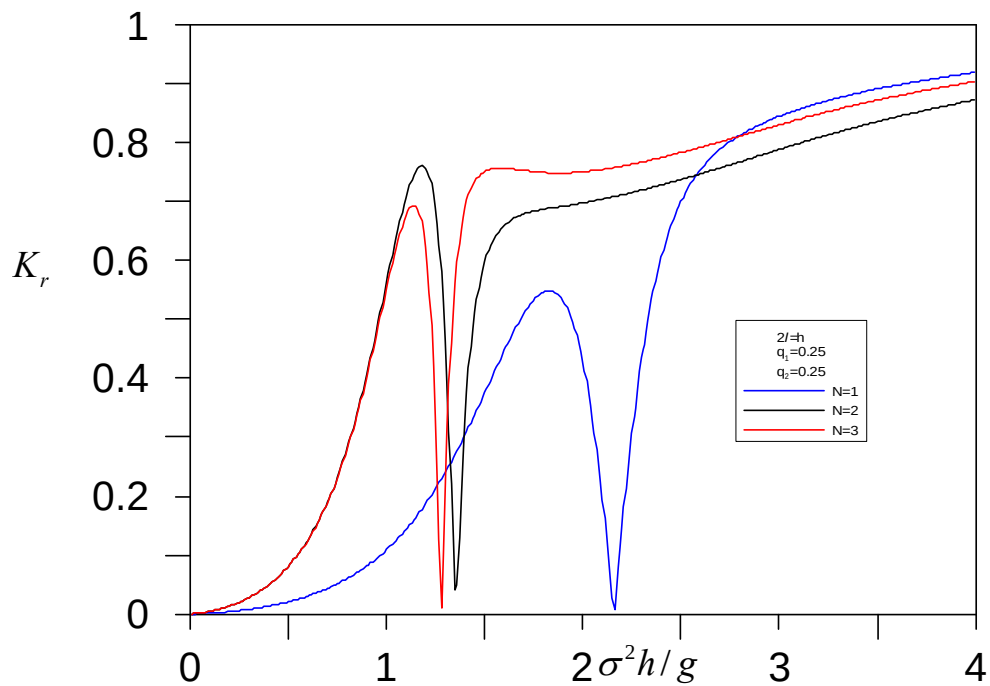


圖 3.4.6 安裝不同翼板數量對其反射率之影響

第四章 環境保護型消能結構物

4.1 研究動機與目的

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，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，並在堤前加拋各種型式之消波塊，以防堤身崩壞，如圖 4.1.1 所示，而且大多過度安全保護。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。

由於混凝土塊外表突兀又妨礙人民入海親水通路，並造成海岸環境破壞，目前應停止再建造硬性之混凝土結構物，而改採柔性工法、綠美化、親水性、生態工法、近自然工法等方向去發展實施。設法穩定及增進海岸的沙丘、防風林與海灘，形成一自然之海岸景觀，並儘量採用沙土、塊石、木材、植生等天然資源，增進多樣化的生態環境，以期與周圍環境調和，減低對自然環境的衝擊。

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，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 4.1.2 至圖 4.1.4 所示。

近年來，潛沒式多孔隙透水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，對生態較為友善且所造成之破壞較少，其組成元件易於在陸上建造，安裝施工快速，所需維護費用較少，損壞時易於修補恢復性高，以及海水可在孔隙間交換流通等優點。一般防波堤或碼頭上部結構物多為不透水型式，但可以採用縱條型、中空型多孔消波式沉箱堤及萬代福靜波沉箱，如圖 4.1.5 至圖 4.1.7 所示，即沉箱前面設置多孔堤取代原有消波塊，或利用中間

的游水室可以吸收部份波能成為魚類棲息的很好場所，若表面適當加以處理則具有藻礁功能。

近年來港灣工程由於在施工技術上有突破性發展與進步，新型式防波堤陸續被開發出來，例如：半圓形防波堤、凹型曲面堤、凸型曲面堤、圓形防波堤、雙重圓筒沉箱堤、弧形防波堤、連結式透過堤及開孔型透過堤等(Tanimoto et al.^[31]；郭^[46]；陳和林^[49])。此類新型防波堤除了可以擋浪外又兼具有消波性、安全性、景觀性、經濟性等特點，值得作進一步的研究。

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 4.1.8 至圖 4.1.10 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。

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游水室並配合弧形孔隙板之想法，使波浪在入射到堤前多了一層的消波室，並利用波浪通過薄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，使得堤前水面波動能大幅下降，並減少越波量及波壓力之作用。

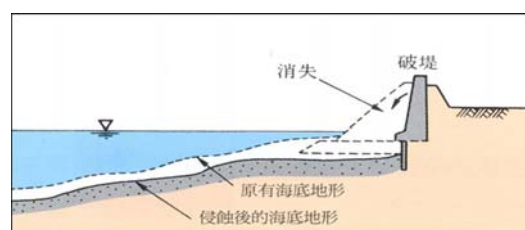
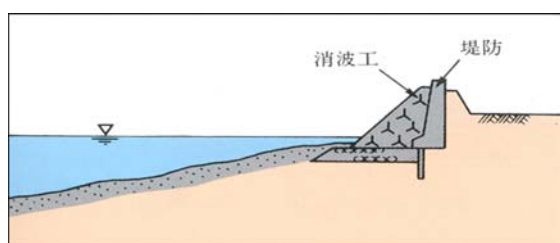


圖 4.1.1(a) 過去傳統保護海岸的工法 圖 4.1.1(b) 波浪直接衝擊消波塊

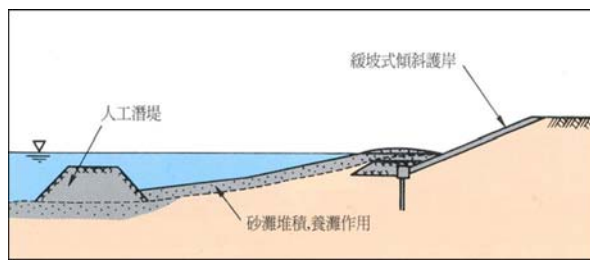


圖 4.1.1(c) 利用人工潛堤保護工法



照片 4.1.1(a) 基隆市碧砂漁港(右視)



照片 4.1.1(b) 以高大海堤及消波塊構成之海岸保護工(左視)



照片 4.1.1(c) 降低堤頂高程後之海洋大學工學院後方海堤



照片 4.1.1(d) 海洋大學藝文中心於工學院後方曼波公園舉辦
海堤音樂會

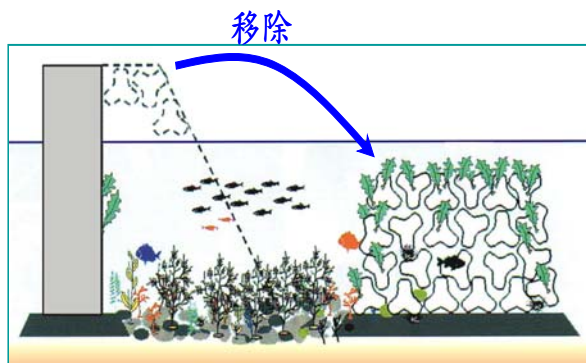


圖 4.1.2 生態型潛礁示意圖

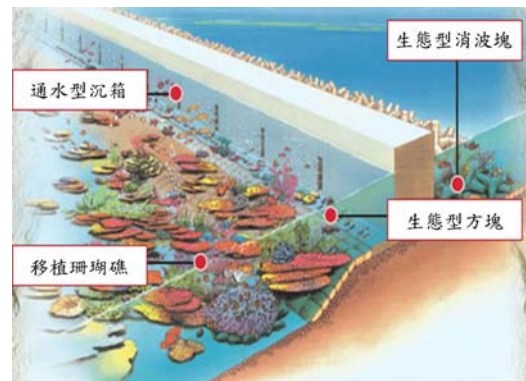


圖 4.1.3 珊瑚移植示意圖
(日本平良港)

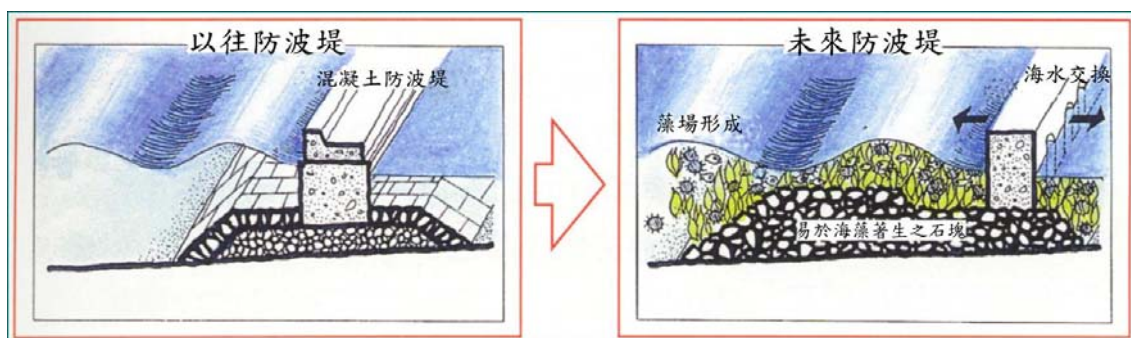


圖 4.1.4 未來防坡堤示意圖

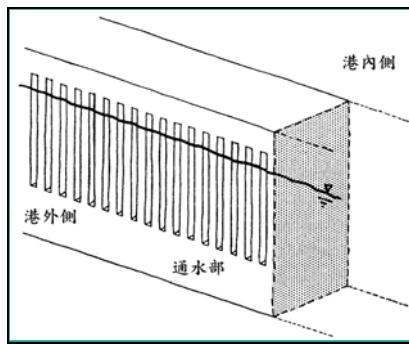


圖 4.1.5 縱條型開孔堤

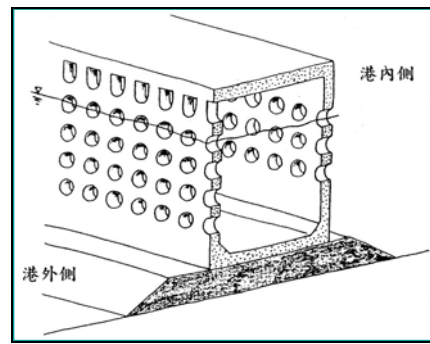


圖 4.1.6 中空型多孔堤

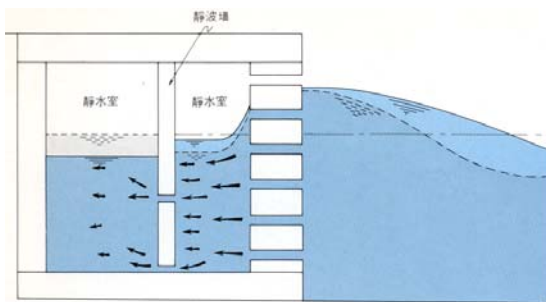


圖 4.1.7 萬代福靜波沉箱側視圖

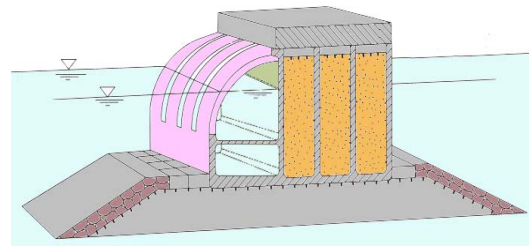


圖 4.1.8 凸型曲面防波堤構造示意圖



圖 4.1.9 凸型曲面防波堤(日本船川港)



(a)日本宮崎港



(b)大陸天津港

圖 4.1.10 半圓形防波堤

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^[29]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。Madsen^[24]延續 Sollitt and Cross 的方法，計算在岸壁前加入透水層來消減波能，得到的結果比沒有設置透水層的效果來的更好。Sulisz^[30]用邊界元素法 (BEM) 解析不同透水材質、梯形的透水結構物並將計算的結果與實驗值做了比對，得到相當一致得結果。Dalrymple et al.^[3]研究波浪斜向入射透水防波堤，探討不同波長、波浪入射角、防波堤孔隙材料特性等對反射率及透過率之影響。Wu et al.^[33]在不透水直立堤前設置一透水平板，當增加無因次孔隙影響參數時能消散波能，並且降低波高。Xie^[34]利用水工模型試驗縮尺 1:20，進行不規則波試驗(JONSWAP、QUO spectrum)探討波浪作用於潛沒式半圓形防波堤之波力。Jia (1999)針對 5 階 Stokes wave，利用數學模式解析通過高水位完全潛沒式半圓形防波堤時，若採用日本 Goda 公式必須加以修正。Xie^[34]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，並對作用於半圓形防波堤上之波浪力作了論述。Lee and Chwang^[20]在微小振幅波理論下，利用特徵函數展開法就四種不同型態之透水薄板，在不同的透水參數(G)條件下，探討無限長水域中波浪入射透水薄板結構物時之反射率、透過率、能量損失及作用於透水薄板水平力及傾倒力矩。謝等^[52]針對底寬為半圓形堤身的一半，而堤身由 $1/4$ 圓的圓弧迎浪

面、水平底板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。Kee et al.^[10]在岸壁前方加入消波結構物利用孔隙薄板與不透水潛堤的結合，討論在潛堤寬度與孔隙板水平與不同角度擺放時，反射率的變化，並找出其最佳配置。Liu et al.^[23]利用特徵函數展開法解析直立堤前設置上部為開孔式，底部為拋石式之組合堤，並利用實驗加以比對。Liu et al.^[22]同樣利用特徵函數展開法解析直立堤前設置上部為開孔式，底部為拋石式之組合堤，當波浪通過時之反射率大小，並對規則波及不規則波之反射率分別進行水工模型試驗，比較分析其差異性。Gu et al.^[5]採用 RANS 數值模式，將非線性項、黏性項及亂流項一併考慮，針對四分之一圓弧形防波堤(QCB)與半圓形防波堤(SCB)作一比較與討論。

國內學者：在過去針對剛性垂直透水薄板或透水潛堤已經有許多學者作過研究，涂和林^[54]在等水深半無限長水槽中裝置一片、二片或三片透水結構物後，對微小振幅波波形及波壓之影響作探討。在相同 G 值下，雙層透水板在 $S/L=1/4+0.5n$ (n 為整數) 時，反射率最小，而於 $S/L=1/2+0.5n$ (n 為整數) 時達到最大。林和涂^[38]從理論上分析單層或雙層透水結構物設於一不透水端牆前，探討其波力消減效果與透水結構物相對間距及透水參數之影響。李和劉^[37]對透水結構物之理論做了分析並提出一套新理論解析。林^[39]探討多層透水式結構物之消波及波力變化，利用波浪通過各分牆時之能量損失及所產生之相位差，以消減並分散波浪能量。柯等^[43]曾對透水潛堤內外波流場利用理論解析。涂和劉^[55]提出系列透水潛堤之消波效應之研究，針對系列潛堤間距、堤寬比例的改變而產生的布拉格反射現象，對消波之效果更顯出眾。

至於針對曲面型透水防波堤則有郭和黃^[47]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。試驗結果顯示：半圓形開孔堤在開孔率小於 0.3、堤頂高於靜水面、相對堤寬與波長比介於 0.1~0.15 時有較佳的消波效果。林東廷^[38]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

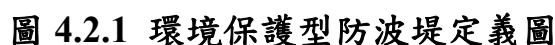
波、環境及景觀等優點。文中並介紹日本宮崎港、大陸天津半圓形防波堤、長江口航道治理半圓形導堤及其施工方式。林東廷^[39]利用直立堤之合田波壓計算方法，考慮曲面形狀所引起波壓相位差及弧形曲面所引起波壓減衰效果，利用試驗探討半圓形防波堤之波力計算並加以修正。其他學者如蘇等^[53]，吳等^[36]均對波浪與透水結構物、孔隙牆、多孔岸壁、透水潛堤等做過相關的研究。

本計畫使用多領域邊界元素法(Multi-domain BEM)，於眾多數值方法中，邊界元素法因為可以將問題降低一個維度，故可以減少電腦空間使用量及計算時間。針對多個領域相互連接之問題，將對各領域獨自使用邊界元素法後，再將各領域的代數方程式依相鄰領域相互的連續條件或邊界條件聯立來處理。而本計畫研究之問題即可使用此數值方法來求解。

4.2 理論推導

1. 線性波浪通過環境保護型防波堤之理論分析

考慮在不透水直立牆前方銜接梯形透水潛堤(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 處設置另一道梯形透水潛堤，組合成環境保護型防波堤。將此環境保護型防波堤設置在一定水深 h 的海域中，且規則波由左方向此防波堤正向入射。其中四分之一圓弧形孔隙板半徑為 a ；直立牆前方潛堤堤高 d ，堤頂寬為 B ；前方距離 S 處之透水潛堤堤頂寬 R_c ，堤頂沒水深 d_c 。原點 O 位於不透水直立牆左方距離 B 之靜水面處， z 軸垂直水面向上為正， x 軸沿波浪入射方向為正。並於結構物左方一定距離處設立一假想邊界線($x = -\ell$)，而將此斷面領域中純水區域分為(I)、(II)及(III)三個領域，而梯形透水潛堤則為領域(IV)，合計四個領域，其定義圖如圖 4.2.1 所示；其中 Γ^{M_2} 為領域(III)與領域(IV)在潛堤堤頂之邊界， Γ^{M_3} 為領域(II)與領域(IV)在潛堤斜坡之邊界， Γ^{M_4} 為領域(II)與領域(III)在弧形薄板曲面之邊界。



(1) 純水區域(I)、(II)及(III)領域

當外海領域(I)有一振幅 ζ_0 ，週頻率 σ 之規則波由左方向此環境保護型防波堤正向入射，則各純水領域速度勢可表示為：

上式中， g 為重力加速度， $\Phi^{(j)}(x,z)$ 則為各領域勢函數，上標 j 表示位於第 j 領域。

有關透水結構物理論，一般以勢能流理論開始發展，本文引用 Sollitt and Cross^[29]所提出的多孔隙介質擬勢能流(quasi-potential flow)理論，將摩擦阻力項分成層流和紊流摩擦阻力，並加入流體運動之慣性阻力，作為多孔介質中的控制方程式，可定義出一速度勢 $\Phi^{(IV)}(x, z; t)$ 的存在，且滿足 Laplace 方程式，即：

$$\nabla^2 \Phi^{(IV)} = 0$$

領域(IV)的速度勢可表示為：

$$\Phi^{(IV)}(x, z; t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi^{(IV)} e^{-i\sigma t} \dots\dots\dots (4.2.2)$$

3. 領域(I)之勢函數表示

若假想邊界線($x = -\ell$)離防波堤甚遠時，則可假定(I)領域之流體運動不受防波堤存在而引起的消散波影響，所以領域(I)之勢函數可表示如下：

$$\Phi^{(I)}(x, z) = [e^{ik(x+\ell)} + R \cdot e^{-ik(x+\ell)}] \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (4.2.3)$$

其中 R 為複數反射率。

由式(4.2.3)在假想邊界線($x = -\ell$)上之勢函數 $\phi^{(I)}$ 及向 x 負方向導函數 $\bar{\phi}^{(I)}$ 分別如下所示：

$$\Phi^{(I)}(x = -\ell, z) = (1 + R) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (4.2.4)$$

$$\bar{\Phi}^{(I)}(x = -\ell, z) = -ik(1 - R) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (4.2.5)$$

其中，

$$\bar{\phi}^{(I)} = -\frac{\partial \phi^{(I)}}{\partial x}$$

而上標^(I)表示位於第(I)領域，且 $\bar{\phi}$ 表示勢函數對法線方向之一次微分。

4. 邊界條件

各領域的勢函數必須滿足以下邊界條件：

(1) 自由水面之邊界條件

$$\bar{\phi}^{(j)}(x, z) = \frac{\partial \phi^{(j)}}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \phi^{(j)}(x, z) \quad , z = 0 \quad , j = \text{I, II, III} \dots\dots\dots (4.2.6)$$

(2) 海底底床及不透水岸壁之邊界條件

$$\bar{\phi}^{(j)}(x, z) = \frac{\partial \phi^{(j)}}{\partial z} = 0 \quad , z = -h \quad , j = \text{I, II, IV} \dots\dots\dots (4.2.7)$$

$$\bar{\phi}^{(j)}(x, z) = \frac{\partial \phi^{(j)}}{\partial x} = 0 \quad , x = B \quad , j = \text{III, IV} \dots\dots\dots (4.2.8)$$

(3) 假想邊界線($x = -\ell$)上之邊界條件

$$\phi^{(\text{I})}(x, z) = \phi^{(\text{II})}(x, z) \quad , x = -\ell \dots\dots\dots (4.2.9)$$

$$\bar{\phi}^{(\text{I})}(x, z) = \bar{\phi}^{(\text{II})}(x, z) \quad , x = -\ell \dots\dots\dots (4.2.10)$$

(4) 四分之一圓弧形孔隙板之邊界條件

假設四分之一圓弧形孔隙板結構物為均質、剛性材料所製成且透水薄板中之法線方向速度會與法線方向之壓力差成正比，根據 Yu^[35]之透水邊界條件(porous boundary condition)為：

$$\frac{\partial \phi^{(\text{II})}(x, z)}{\partial n^{(\text{II})}} = -\frac{\partial \phi^{(\text{III})}(x, z)}{\partial n^{(\text{III})}} = ikG(\phi^{(\text{II})} - \phi^{(\text{III})}) \quad , \text{on } \Gamma^{M_4} \dots\dots\dots (4.2.11)$$

上式中， n 為向外法向之單位向量， G 為複數透水性影響參數(complex porous effect parameter)。

另外在純水與梯形透水潛堤之接觸面上，領域內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：

$$\phi^{(\text{II})}(x, z) = (S_r + if_r)\phi^{(\text{IV})}(x, z) \quad , \text{on } \Gamma^{M_3} \dots\dots\dots (4.2.12)$$

$$\frac{\partial \phi^{(\text{II})}(x, z)}{\partial n^{(\text{II})}} = -\varepsilon_r \frac{\partial \phi^{(\text{IV})}(x, z)}{\partial n^{(\text{IV})}} \quad , \text{on } \Gamma^{M_3} \dots\dots\dots (4.2.13)$$

$$\phi^{(\text{III})}(x, z) = (S_r + if_r)\phi^{(\text{IV})}(x, z) \quad , \text{on } \Gamma^{M_2} \dots\dots\dots (4.2.14)$$

$$\frac{\partial \phi^{(III)}(x, z)}{\partial z} = \varepsilon_r \frac{\partial \phi^{(IV)}(x, z)}{\partial z}, \text{ on } \Gamma^{M_2} \dots\dots\dots (4.2.15)$$

其中， S_r 為潛堤慣性係數， $S_r = 1 + C_M(1 - \varepsilon_r)/\varepsilon_r$ ， ε_r 為潛堤孔隙率， C_M 為孔隙介質虛擬質量係數， f_r 為潛堤摩擦係數。

5. 反射率(R)之解析

在左側假想邊界線($x = -\ell$)上，將式(4.2.4)代入式(4.2.9)，再利用兩邊同乘以 $\cosh k(h + z)$ ，且再對水深方向 z 從 $-h$ 至 0 予以積分並離散化，可求得反射率 R 如下：

$$R = -1 + \frac{k}{N_0 \sinh kh} \sum_{p=1}^{M_1} \phi^{(II)}(z_p) \cosh k(h + z_p) \Delta Z_p \dots\dots\dots (4.2.16)$$

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

式中， M_1 為假想邊界線($x = -\ell$)上之分割元素數， z_p 為水深方向元素中點座標， ΔZ_p 則為 z_p 所在元素之元素長度。

6. 勢函數之解析

將式(4.2.16)代入式(4.2.5)、(4.2.10)，並將假想邊界線($x = -\ell$)對水深方向分割成 M_1 個元素，可求得假想邊界線($x = -\ell$)上各元素勢函數在 x 負方向之導函數值 $\bar{\phi}^{(II)}(z_p)$ 與勢函數值 $\phi^{(II)}(z_p)$ 間之關係，如下所示：

$$\bar{\phi}^{(II)}(z_p) = -\frac{2ik \cosh k(h + z_p)}{\cosh kh} + \frac{ik^2 \cosh k(h + z_p)}{N_0 \sinh kh \cosh kh} \sum_{p=1}^{M_1} \phi^{(II)}(z_p) \cosh k(h + z_p) \Delta Z_p \dots\dots (4.2.17)$$

其中 $p = 1, 2, 3, \dots, M_1$ 。

將式(4.2.17)化為矩陣形式，則得

$$\left\{ \bar{\phi}_p^{(II)} \right\} = \left\{ S_p \right\} + \left\{ S_{pp} \right\} \left[C_{hp} \right] \left\{ \phi_p^{(II)} \right\} \dots\dots\dots (4.2.18)$$

上式中

$$S_p = -\frac{2ik \cosh k(h + z_p)}{\cosh kh}$$

$$S_{pp} = \frac{ik^2 \cosh k(h + z_p)}{N_0 \sinh kh \cosh kh}$$

$$C_{hp} = \cosh k(h + z_p) \Delta Z_p$$

其中 $p = 1, 2, 3, \dots, M_1$ 。

◎ 子領域之勢函數表示

因領域(j)的勢函數 $\phi^{(j)}(x, z)$ ，滿足 Laplace 方程式，且其存在二次導函數，領域(j)任一點 $P_0(x, z)$ 之勢函數 $\phi^{(j)}(P_0)$ 可以用積分方程式搭配 Laplace 方程式基本解 $C(Q, P_0) = \ln r$ 來表示。若將點 $P_0(x, z)$ 移至邊界上特定點 $P_B(\xi', \eta')$ ，則可得邊界點積分方程如下所示：

$$\pi \phi^{(j)}(P_B) = \int_r \left[\phi^{(j)}(Q) \frac{\partial C(Q, P_B)}{\partial n_Q} - C(Q, P_B) \frac{\partial \phi^{(j)}(Q)}{\partial n_Q} \right] ds \dots\dots\dots (4.2.19)$$

其中， Q 為邊界線上之源點， n_Q 表示 Q 點之法向量， $\Gamma^{(j)}$ 表示領域(j)之封閉邊界線。

將 $\Gamma^{(j)}$ 以常數元素離散化成 N_j 個元素，每一元素之物理量以中點值為代表量，則積分方程式(4.2.19)可以矩陣形式表示如下：

$$\left[\bar{U}^{(j)} \right] \left\{ \phi^{(j)} \right\} = \left[U^{(j)} \right] \left\{ \bar{\phi}^{(j)} \right\} \quad j = \text{II, III, IV} \dots\dots\dots (4.2.20)$$

將各領域合併可得：

$$\begin{bmatrix} \left[\bar{U}^{(\text{II})} \right] & 0 & 0 \\ 0 & \left[\bar{U}^{(\text{III})} \right] & 0 \\ 0 & 0 & \left[\bar{U}^{(\text{IV})} \right] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi^{(\text{II})} \\ \phi^{(\text{III})} \\ \phi^{(\text{IV})} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[U^{(\text{II})} \right] & 0 & 0 \\ 0 & \left[U^{(\text{III})} \right] & 0 \\ 0 & 0 & \left[U^{(\text{IV})} \right] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\phi}^{(\text{II})} \\ \bar{\phi}^{(\text{III})} \\ \bar{\phi}^{(\text{IV})} \end{Bmatrix} \dots\dots (4.2.21)$$

將左假想邊界線、自由水面、海底底床及透水性結構物等邊界條

件式，(4.2.18)、(4.2.6)、(4.2.7)、(4.2.8)、及(4.2.12)~(4.2.15)，代入式(4.2.21)中，即可得如下之矩陣形式：

$$\begin{bmatrix} A^* \end{bmatrix} \left\{ \phi^{(**)} \right\} = \begin{Bmatrix} B^* \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (4.2.22)$$

由式(4.2.22)可求得各子領域邊界線上之勢函數，將位於($x=-\ell$)假想邊界線上之勢函數代入式(4.2.16)，即可求出反射率 R 之值。

7. 結構物上壓力之求解

利用多領域邊界元素法可求得各領域邊界線上勢函數 ϕ 分佈的數值。結構物邊界若屬於純水領域，依線性化伯努力方程式(Bernoulli equation)可得動壓如式(4.2.23)所示；若結構物邊界屬於透水結構物領域，則依擬勢流理論(Sollitt and Cross^[29])再導入線性化伯努力方程式可得動壓如式(4.2.24)所示

$$P = p e^{-i\sigma} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = i \rho g \zeta_0 \phi e^{-i\sigma} \dots\dots\dots (4.2.23)$$

$$P = p e^{-i\sigma} = -\rho \left(S \frac{\partial \Phi}{\partial t} + f \sigma \Phi \right) = i(S + if) \rho g \zeta_0 \phi e^{-i\sigma} \dots\dots\dots (4.2.24)$$

因此將求得位於結構物邊界上的 ϕ 值，依結構物邊界所屬領域分別代入式(4.2.23)或式(4.2.24)，此時即得到該位置的波壓值。若要表示成無因次波壓則可將式(4.2.23)及式(4.2.24)改寫如下：

$$P / \rho g \zeta_0 = p e^{-i\sigma} / \rho g \zeta_0 = i \phi e^{-i\sigma} \dots\dots\dots (4.2.25)$$

$$P / \rho g \zeta_0 = p e^{-i\sigma} / \rho g \zeta_0 = i(S + if) \phi e^{-i\sigma} \dots\dots\dots (4.2.26)$$

若要獲得各位置最大無因次波壓的分佈，參考式(4.2.25)及式(4.2.26)我們可知各位置無因次波壓隨時間週期的振動，故振幅即為最大無因次波壓 $P_{\max}$ 如下：

$$P_{\max} = |p| / \rho g \zeta_0 = |i \phi| \dots\dots\dots (4.2.27)$$

$$P_{\max} = |p| / \rho g \zeta_0 = |i(S + if)\phi| \dots\dots\dots(4.2.28)$$

將結構物邊界上各位置的 $P_{\max}$ 連線即可得最大無因次波壓分佈圖。

再對欲求邊界積分，可得作用在弧形孔隙薄板上單位寬度之水平波力、垂直波力及不透水直立牆上之水平波力如(4.2.29)、式(4.2.30)與式(4.2.31)所示：其中 β 為弧形薄板曲線邊界上元素與水平軸間之角度。

$$F_{px} = -i\rho g \zeta_0 \left[\int \left(\phi^{(II)} - \phi^{(III)} \right) \sin \beta ds \right] \cdot e^{-i\sigma t} \quad , on \quad \Gamma^{M_4} \dots\dots\dots(4.2.29)$$

$$F_{pz} = i\rho g \zeta_0 \left[\int \left(\phi^{(II)} - \phi^{(III)} \right) \cos \beta ds \right] \cdot e^{-i\sigma t} \quad , on \quad \Gamma^{M_4} \dots\dots\dots(4.2.30)$$

$$F_w = i\rho g \zeta_0 \left[(S + if) \int_{-h}^{-h+d} \phi^{(IV)} dz + \int_{-h+d}^0 \phi^{(III)} dz \right] \cdot e^{-i\sigma t} \quad , on \quad x = B \dots\dots(4.2.31)$$

4.3 數值計算結果與分析

本文數值計算時，首先固定四分之一圓弧形孔隙板於直立堤前透水潛堤上，其半徑 a 與水深 h 比為 0.764($a/h=0.764$)，直立堤前透水潛堤其堤頂寬 B 與水深比為 0.88($B/h=0.88$)，其堤高 d 與水深比為 0.5($d/h=0.5$)，此時圓弧形孔隙板會有部分露出水面。

另外，在堤前加設一道梯形透水潛堤，將邊坡之坡度固定為 1:1，並改變堤頂沒水深 dc 及堤頂寬 Rc ，使其與堤前兩潛堤間之距離為 S 。探討兩潛堤在間距 S 改變下，反射率 $|R|$ 變化與 kh 之關係，本文數值計算例中，透水潛堤之孔隙率固定為 $\varepsilon_r=0.46$ ，摩擦係數 $fr=1.8$ ，慣性係數 $s=1.015$ ；四分之一圓弧形孔隙板其孔隙率固定為 $\varepsilon_p=0.367$ 、透水參數 $G=0.2$ ，分別加以進行計算。其數值計算結果如圖 4.3.1 至圖 4.3.4 所示；且求得各配置下反射率最小值 $|R|_{\min}$ 與發生位置如表 4.3-1 至表 4.3-4 所示。

圖 4.3.1 為第一道潛堤相對沒水深 $dc/h=0.4$ ，相對堤寬 $Rc/h=0.4$ 固定下，改變兩潛堤間之距離 $S/h=0.0、0.5、1.0$ 三種情況下，探討反射率 $|R|$ 變化與無因次週波數 kh 之關係。圖中顯示在 $kh<0.5$ 時，反射率會急速下降至一低點而後呈現震盪型變化，增加兩潛堤間距會使得堤與堤之間消波空間變大，能充分消減波能，因此反射率會有一最小值 $|R|_{\min}=0.227$ ，發生位置在 $kh=1.38$ 處。其後隨著 kh 增加，改變兩潛堤間距對反射率變化影響不大，三者反射率值會漸趨於一定值，反射率約為 0.59。

若相對沒水深 $dc/h=0.4$ 不變，而增加相對堤寬 $Rc/h=0.6$ ，其結果如圖 4.3.2 所示。反射率整體變化趨勢與圖 4.3.1 類似，最小反射率 $|R|_{\min}$ 則發生在 $kh=1.29$ 處，其值下降至 0.21， kh 較大處三者反射率值接近，約在 0.58 附近。

相對沒水深 $dc/h=0.3$ 時，改變相對堤寬 $Rc/h=0.4、0.6$ 之變化，其結果如圖 4.3.3 至圖 4.3.4 所示。當第一道潛堤相對堤高、堤寬增加，則透水潛堤體積變大，波浪通過時水流受到孔隙介質的影響及摩擦阻力作用，因而消能效果變大，反射率會明顯下降，由圖 4.3.4 中可得知此時最小反射率發生在 $kh=1.23$ 處， $|R|_{\min}=0.128$ ，而 kh 較大處平均反射率約為 0.513。

為了探討第一道潛堤設置地點遠近，對於堤前反射率的影響，本文將堤前岸壁至潛堤向海堤址處之距離稱為總長設為 D ，並將圖 4.3.1 至圖 4.3.4 橫座標由 kh 改為 D/L ，重新整理得到結果如圖 4.3.5 至圖 4.3.8 所示。

由圖中皆可以很清楚發現，不論相對沒水深、堤寬及間距改變下，三者反射率在相對總長(D/L)約在某些特定值附近均會出現有最小反射率值。例如在圖 4.3.5 中， D/L 大約在 0.3 及 0.9 附近有最小反射率，但是隨著相對沒水深減小，堤寬增加，其發生最小反射率值有漸漸趨近於 $D/L=0.25、0.75$ 附近(即大約在 $1/4$ 波長與 $3/4$ 波長處)。其各種配置下反射率最小值與發生位置整理成表 4.3-1 至表 4.3-4 所示。

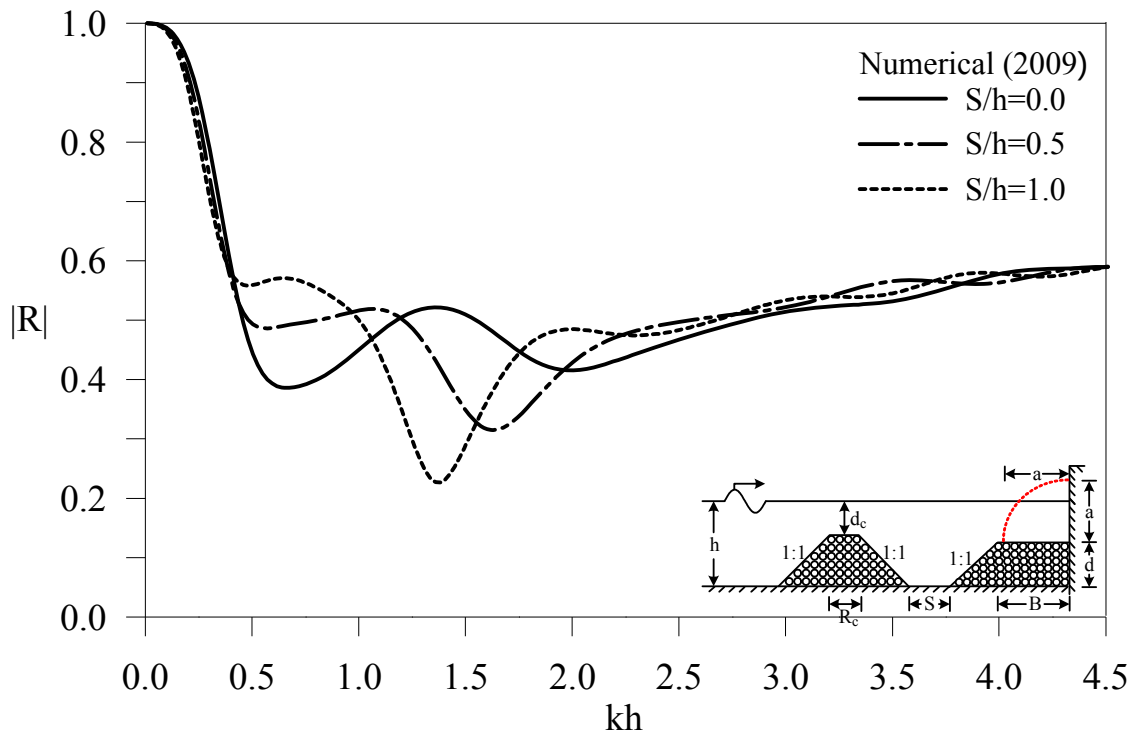


圖 4.3.1 改變潛堤間距時反射率 $|R|$ 變化與 kh 關係圖 ($d_c/h=0.4$, $R_c/h=0.4$)

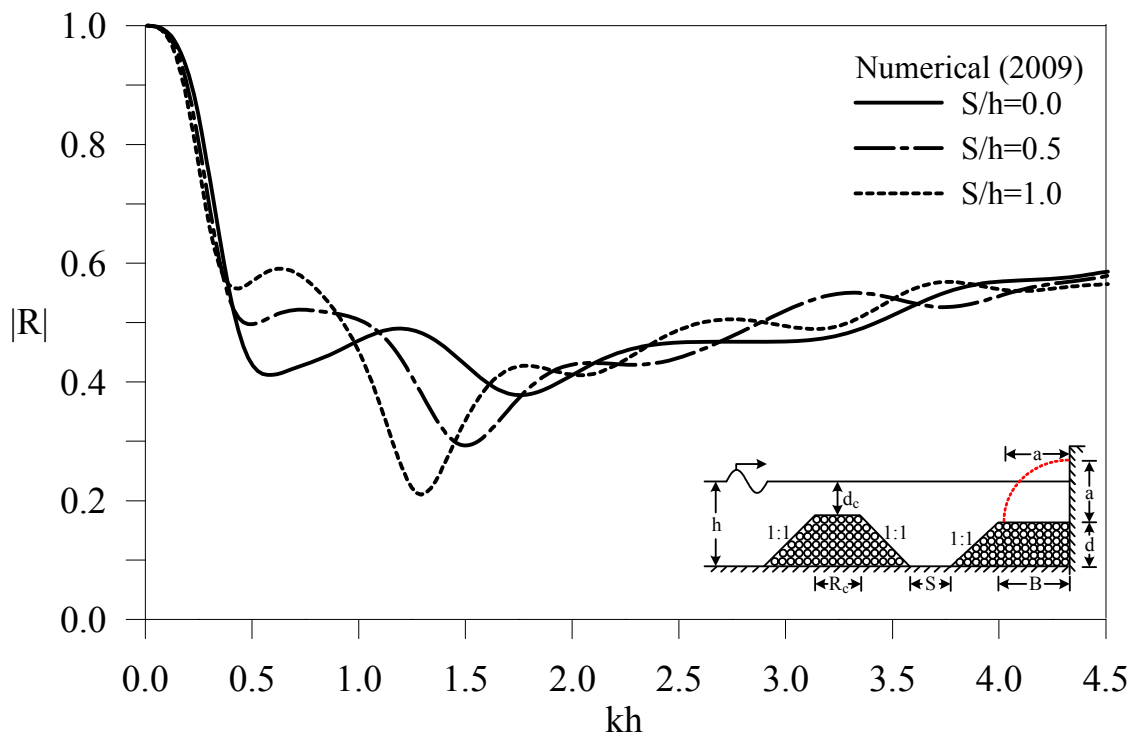


圖 4.3.2 改變潛堤間距時反射率 $|R|$ 變化與 kh 關係圖 ($d_c/h=0.4$, $R_c/h=0.6$)

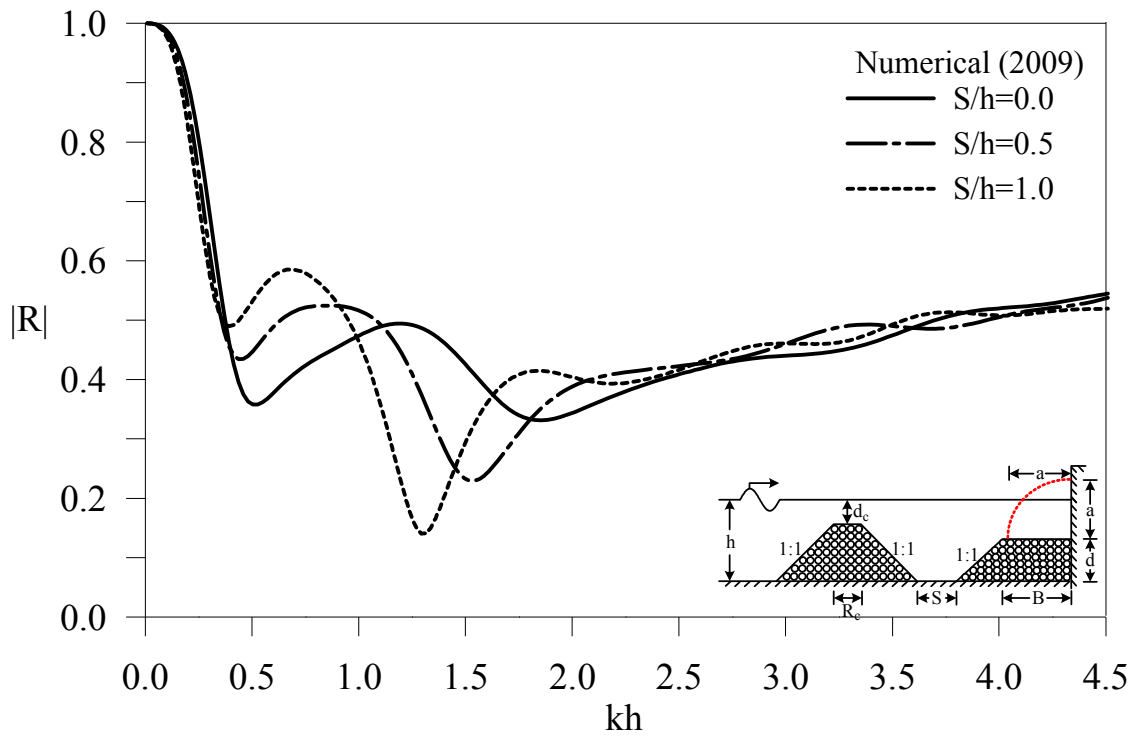


圖 4.3.3 改變潛堤間距時反射率 $|R|$ 變化與 kh 關係圖 ($d_c/h=0.3$,
 $R_c/h=0.4$)

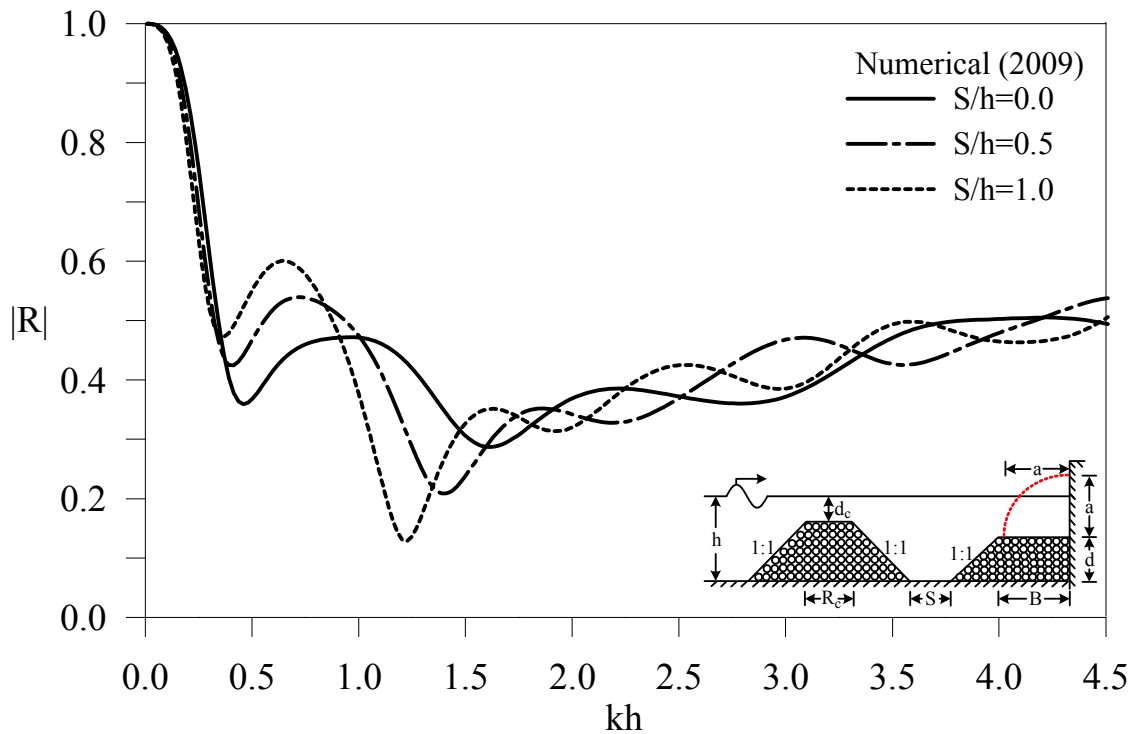


圖 4.3.4 改變潛堤間距時反射率 $|R|$ 變化與 kh 關係圖 ($d_c/h=0.3$,
 $R_c/h=0.6$)

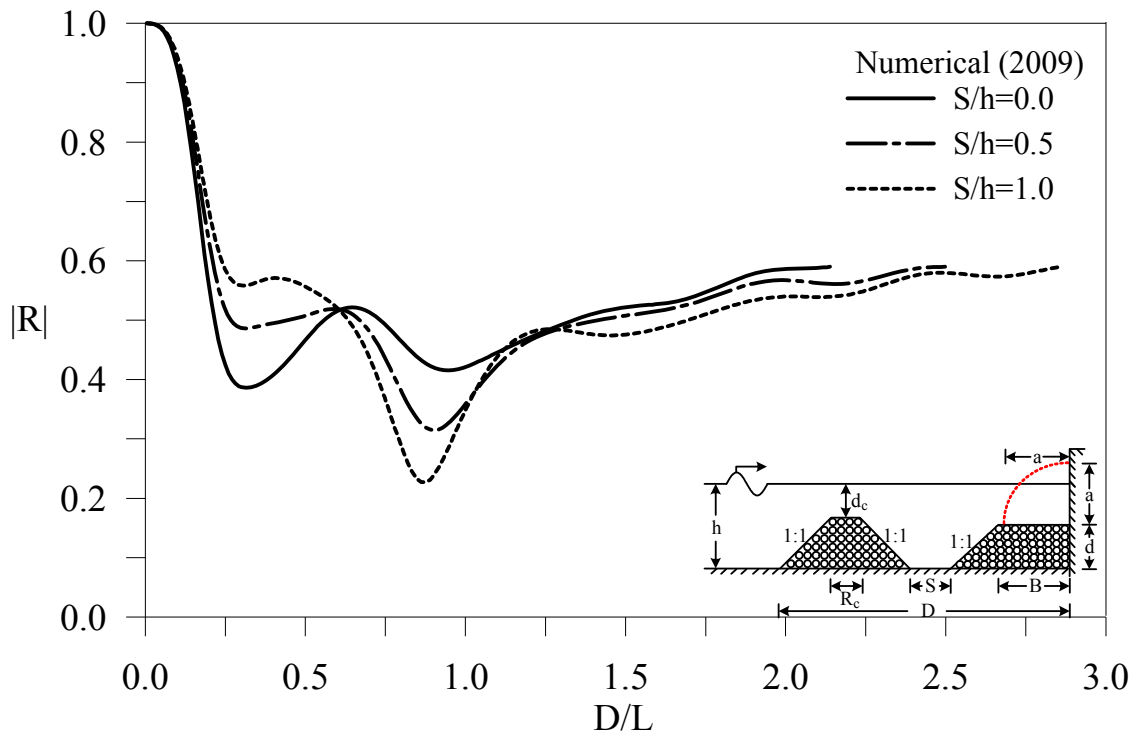


圖 4.3.5 改變潛堤間距時反射率 $|R|$ 變化與 D/L 關係圖 ($d_c/h=0.4$, $R_c/h=0.4$)

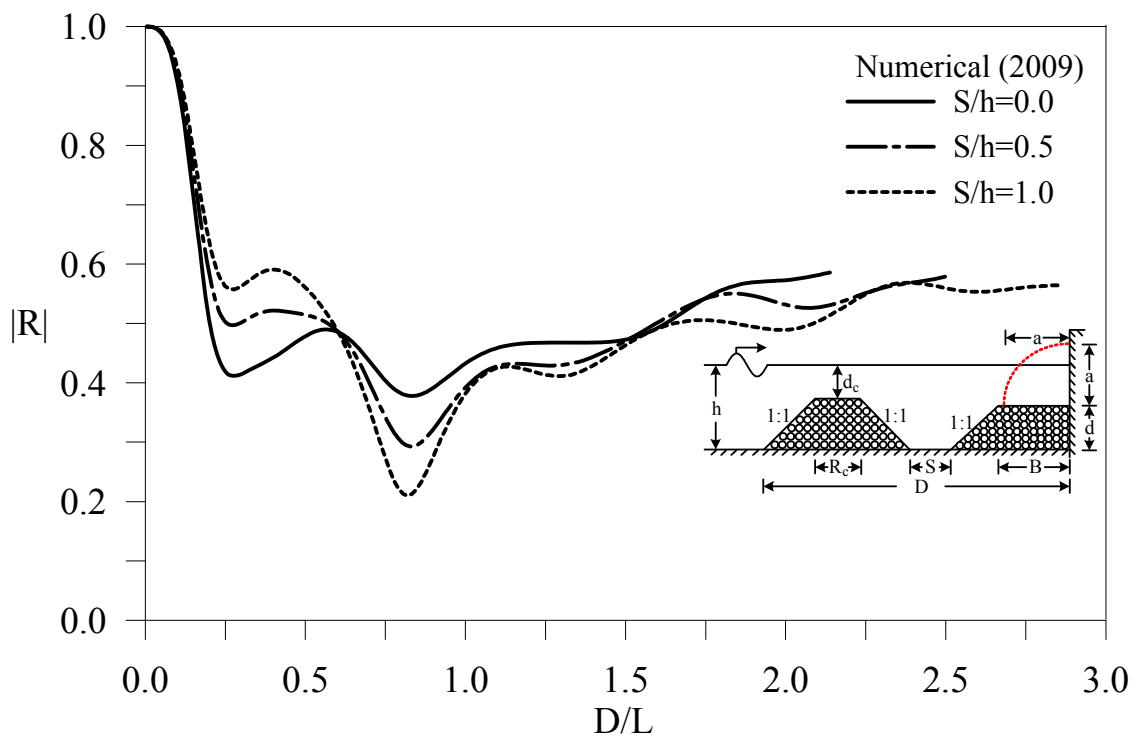


圖 4.3.6 改變潛堤間距時反射率 $|R|$ 變化與 D/L 關係圖 ($d_c/h=0.4$, $R_c/h=0.6$)

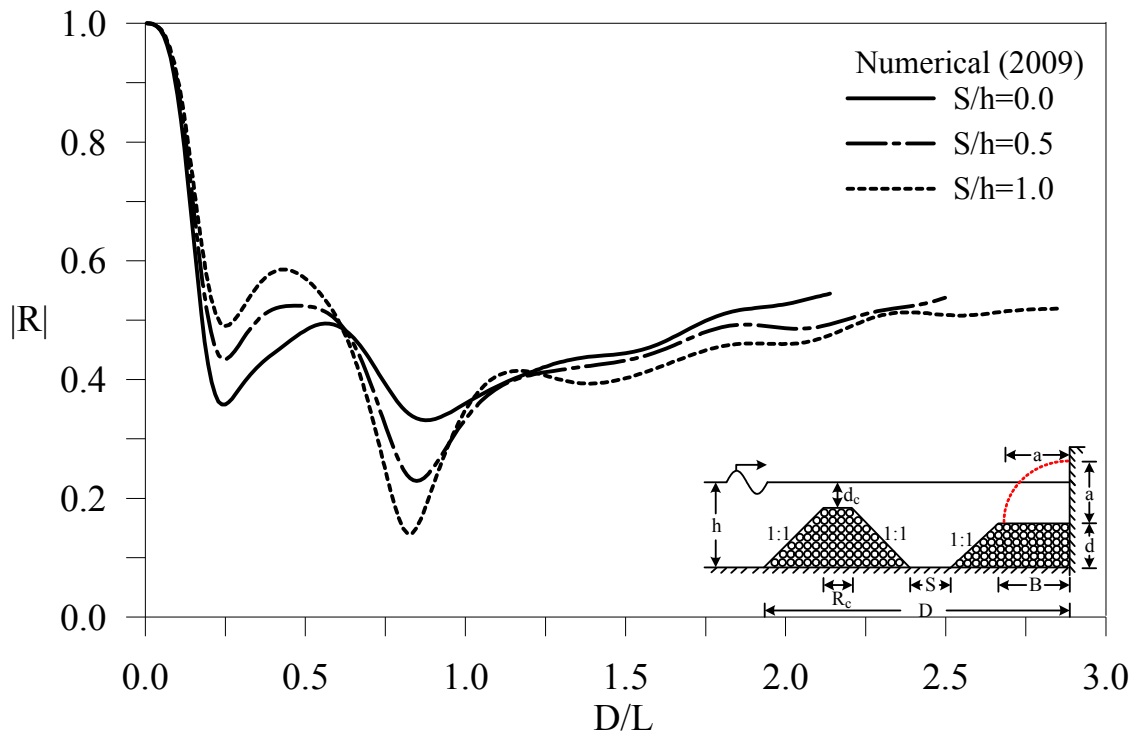


圖 4.3.7 改變潛堤間距時反射率 $|R|$ 變化與 D/L 關係圖 ($d_c/h=0.3$, $R_c/h=0.4$)

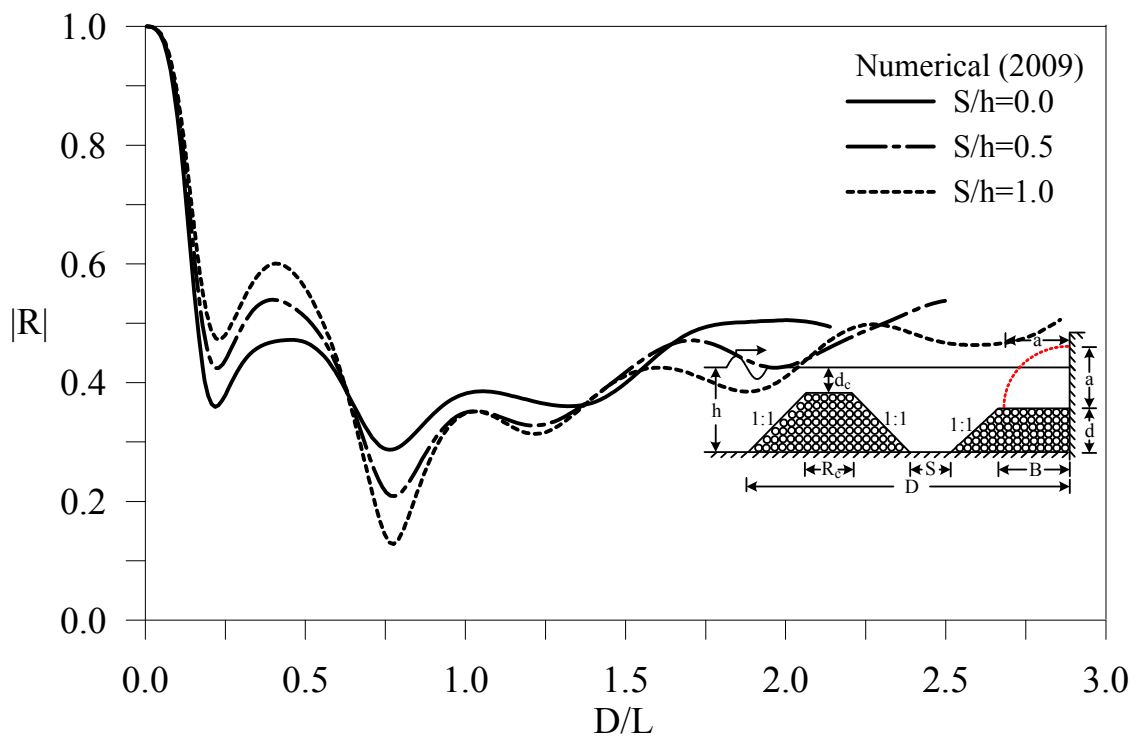


圖 4.3.8 改變潛堤間距時反射率 $|R|$ 變化與 D/L 關係圖 ($d_c/h=0.3$, $R_c/h=0.6$)

表 4.3.1 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	
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 4.3.2 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	
kh	0.60	1.77	0.48	1.50	0.44	1.29
D/L	0.28	0.84	0.27	0.83	0.28	0.82
$ R _{\min}$	0.413	0.378	0.497	0.293	0.557	0.210

表 4.3.3 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	
kh	0.51	1.86	0.44	1.54	0.39	1.29
D/L	0.24	0.88	0.24	0.85	0.25	0.82
$ R _{\min}$	0.360	0.331	0.434	0.230	0.490	0.141

表 4.3.4 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	
kh	0.46	1.61	0.42	1.41	0.37	1.23
D/L	0.22	0.76	0.23	0.78	0.23	0.78
$ R _{\min}$	0.358	0.287	0.424	0.209	0.472	0.128

4.4 水工模型試驗與結果分析

4.4.1 水工模型試驗

本研究之水工模型試驗於臺灣海洋大學河海工程學系河工一館地下室「水動力實驗室」中進行。本次試驗所使用之設備儀器與量測方法如下：

1. 斷面造波水槽

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，如圖 4.4.1(a)所示及照片 4.4.1(a)所示。

2. 造波機

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(piston type wave generator)，如照片 4.4.1(b)所示。藉由電腦輸入不同之造波條件，經由控制盒傳送訊號以驅動造波機造波，造波機可造規則波與不規則波，本研究造波週期在 0.7 sec~1.7 sec，共計 8 組，採規則波試驗，試驗水深固定為 0.5 m。

3. 波高計及增幅器

波高資料擷取設備包含容量式波高計(capacitance wave gauge)、波高增幅器(amplifier)及波高資料擷取電腦軟體系統，如照片 4.4.1(c)~(d)所示。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(AD converter)轉換訊號到個人電腦中。

4. 壓力計及訊號擴大器

壓力計為日本 KYOWA 株式會社所生產之 PGM-0.5KG(500gw/cm²)壓力計，精度可達 0.07gw/cm² 以上，借由水面波動所產生的動壓變化，由壓力計之壓力面經由感應器測得應力大小，再傳至資料擷取接線盒，經由電纜線接至試驗用電腦，本試驗共

使用 11 組 KYOWA 壓力計量測四分之一圓弧形薄板上及不透水直立岸壁上之壓力。

資料擷取系統是採用國內三聯科技公司所代理的 InstruNet，本系統可直接量測 Current、Thermocouple、Voltage、Strain Gage.. 等等，利用 16se/8di 14 位元類比訊號讀取，共有 8 個頻道，每一個頻道可提供獨立之類比濾波、積分時間、取樣率及數位訊號濾波之設定，如照片 4.4.1(e)~(h)所示。

5. 模型製作與配置

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，其孔洞直徑(d_p)為 1.5 cm，而孔隙板之孔隙率(ε_p)為 0.367，如照片 4.4.2(a)所示。配合以礫石直徑(d_r)為 1.5 cm~3 cm，礫石間的孔隙率(ε_r)為 0.46 之多孔隙結構物(如照片 4.4.2(b)~(c)所示)構成之梯型透水潛堤，佈置於斷面水槽中不透水岸壁前，組合而成環境保護型消能式結構物。各波高計架設於造波水槽中之位置如圖 4.4.1(b)所示。

在不透水岸壁上相對水深 z/h 為 0.085、0.025、-0.055、-0.5、-0.8 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 -0.16、-0.02、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 4.4.1(c)所示。

6. 試驗條件

本次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 $Ur=0.11\sim 8.75$ 。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 4.4-1 所示。

7. 波高計率定

將容量式波高計固定於可上下垂直移動之固定架上，接著調整固定架之旋轉鈕，使波高計分別依次向上和向下移動 5 公分，再將波高測線的中心點位置與靜水面對齊，然後並調整增幅器至歸零，於移動完畢後即量取波高計之對應電容伏特數，重複以上過程並經由程式進行波高計的迴歸分析，則可得到此波高計之率定方程式多點為一直線，再把率定方程式代入擷取軟體的設定檔中，如此可將波高計所量測到的電壓值轉換為波高，並在擷取軟體中輸出，其率定曲線如圖 4.4.1(d)所示。

8. 壓力計率定

壓力計率定分為靜水壓率定及動水壓率定。靜水壓率定：將試驗中水深 $h=10、15、20\text{cm}$ 處量測到壓力資料與理論上靜水壓做比較，如圖 4.4.1(e)所示。動水壓率定則與 Sainflou 重複波理論公式比對，將實際量測所得重複波壓力與 Sainflou 重複波理論公式算出的壓力值趨勢吻合，即完成壓力計之動水壓率定，如圖 4.4.1(f)所示。

9. 開始試驗

本文進行水工模型試驗時，首先於直立堤前透水潛堤上固定一四分之一圓弧形孔隙板，其半徑 a 與水深 h 比為 $a/h=0.764$ ，直立堤前透水潛堤其堤頂寬 B 與水深比為 $B/h=0.88$ ，方便安裝及架設孔隙板不致下滑，其堤高 d 與水深 h 比為 $d/h=0.5$ ，此時四分之一圓弧形孔隙板會有部分露出水面。另外，在堤前加設一道梯形透水潛堤，將邊坡之坡度固定為 1:1，並改變堤頂沒水深 d_c 及堤頂寬 R_c ，初步試驗時首先進行直立堤前透水潛堤間之距離為 $S=0$ (本文稱為連結式)，探討其消波減壓之效果。後續再進行兩潛堤間有一段距離形成游水室， $S \neq 0$ (分開式)，並可以與連結式作一比較。

波高計與壓力計率定完成後，等待水面靜穩並將儀器歸零後即可

依照造波條件進行試驗，造波時間與資料擷取時間設定為 60 秒。

10. 波高計資料擷取

波高計取樣間隔為 0.05 秒記錄一次電壓(擷取頻率為 20Hz)，即每秒接收 20 筆資料，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 兩點法寫入程式後，讀取兩波高計試驗資料，輸入兩波高計之水平距離與試驗水深後，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 4.4.1(g)所示。

11. 壓力計資料擷取

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，即每一個測點皆有 480 筆資料，分別繪製波壓時間序列圖，選取波形穩定段來進行分析，以週期 1.1sec 為例，以每十一筆資料為單位，選取三~十組資料，取波峰(最大值)與波谷(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，再討論下一種配置來進行比較。

4.4.2 試驗結果與分析

1. 反射率 $|R|$ 試驗與數值計算結果比較

為了驗證及比較水工模型試驗結果與數值計算結果之合理性，本文將水工模型試驗所得資料，點繪入以數值計算所得之波浪通過環境保護型消能式結構物反射率 $|R|$ 與 kh 關係圖中，如圖 4.4.2 至圖 4.4.5。

圖中符號 $\square$ 、 ∇ 、 $\diamond$ 、 $\circ$ 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 $|R|_{76}$ 、 $|R|_{64}$ 、 $|R|_{84}$ 、 $|R|_{78}$ ，其中下標代表計算反射率 $|R|$ 值之波高計編號，符號 $\bullet$ 則為各次試驗中，所求得之反射率平均值 $|R|_{AVG}$ ，實線(——)部分則為本文數值計算結果。

圖 4.4.2 顯示在第一道潛堤相對沒水深 $dc/h=0.4$ ，相對堤寬 $Rc/h=0.4$ 固定下，探討水工模型試驗與數值計算結果二者間反射率 $|R|$ 變化與無因次週波數 kh 之關係。經由數值計算結果顯示在 $kh<0.66$ 時，反射率會急速下降至一最小值 $|R|_{\min}=0.386$ ，而後隨著 kh 增加，反射率略為上升後下降至另一低點 0.416，發生位置在 $kh=1.9$ 處。其後隨著 kh 增加至 4.5，深水波反射率緩緩上升至 0.57。另外，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 $|R|_{\min}=0.31$ 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，以及兩潛堤邊坡間游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 dc 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 $dc/h=0.4$ ，增加相對堤寬為 $Rc/h=0.6$ ，此時反射率變化如圖 4.4.3 所示，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 $dc/h=0.3$)，再次進行兩組試驗(相對堤寬 $Rc/h=0.4$ 、 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、空間變大，消能效果增加，因此在 $kh=0.95\sim 2.52$ 間反射率會降低，有一定之消能效果。(如圖 4.4.4 至圖 4.4.5 所示)

2. 直立岸壁波壓力之比較

圖 4.4.6 為本文數值計算波浪通過環境保護型消能結構物後直立岸壁上之波壓分佈圖。其中實線為 Sainflou 公式計算結果，◆為試驗

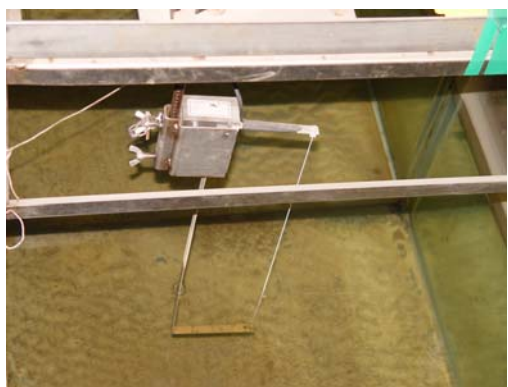
結果，虛線則為數值計算結果，而在數值計算時，摩擦係數分別以 $f_r=1.8$ 、 1.0 、 0.5 及 0 代入模式計算，而 $f_r=0$ 即表示波浪通過無潛堤只有直立岸壁時之結果，與 Sainflou 公式計算結果非常一致，隨著透水潛堤 f_r 之增加，作用於直立岸壁之波壓力則明顯的變小，而在週期較小時，改變摩擦係數 f_r 之大小，對直立岸壁波壓力影響不顯著，但都小於 Sainflou 公式，而試驗結果分析與數值結果比較則有較大差異。



(a) 試驗水槽



(b) 造波機



(c) 波高計



(d) 造波系統及波高資料擷取系統



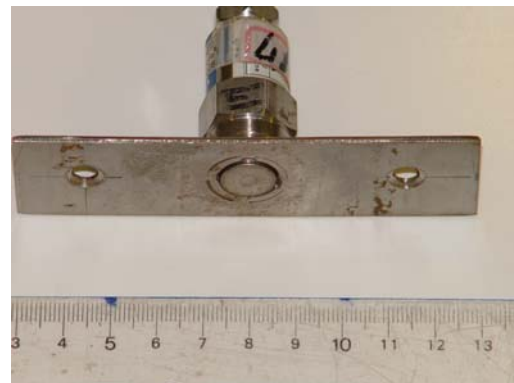
(e) instruNet 資料擷取盒



(f) instruNet 擷取卡

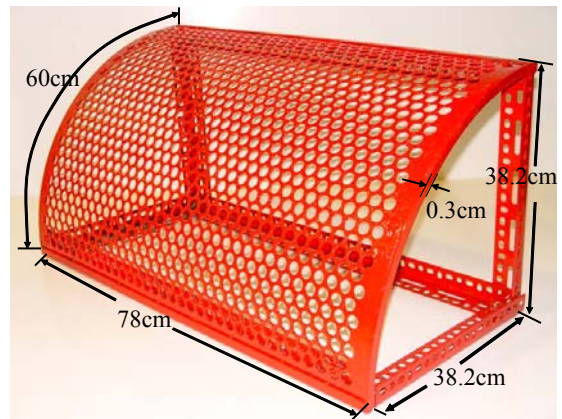


(g) KYOWA 壓力計(500g)



(h) 固定後壓力計

照片 4. 4. 1 試驗設備與儀器



(a) 四分之一圓弧形透水結構物($\epsilon_p = 0.367$)
(將孔隙板 60cm 彎曲成半徑 38.2cm，並利用角鐵支撐)



(b) 礫石孔隙率($\epsilon_r=0.46$)



(c) 粒徑示意圖($d_r=1.5\sim 3.0\text{cm}$)

照片 4.4.2 模型製作與配置

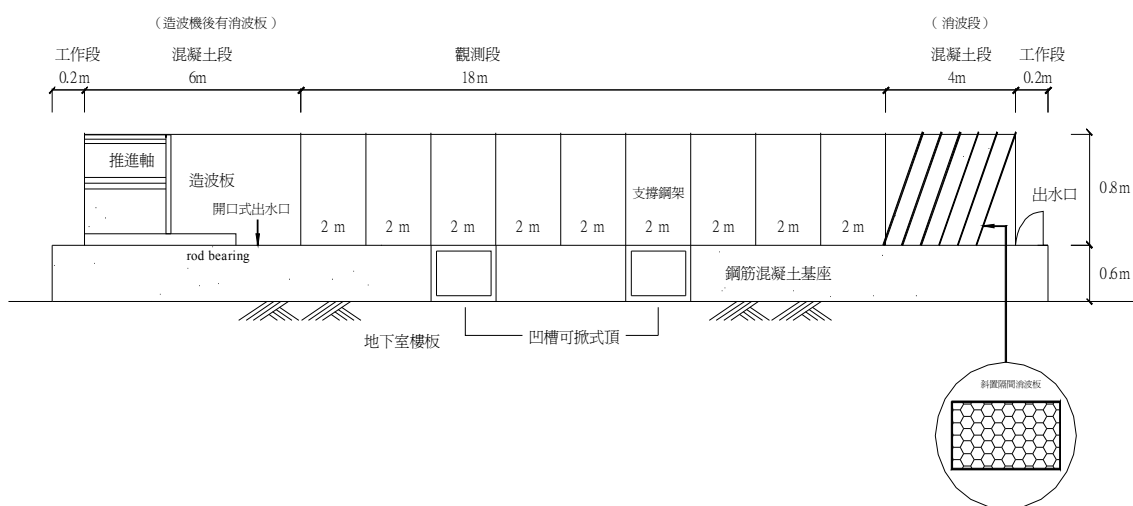


圖 4.4.1(a) 水動力實驗室斷面水槽(側視)

表 4.4.1 波浪通過環境保護型消能結構物之波浪條($S/h=0$ 、 $d_c/h=0.4$ 、 $R_c/h=0.4$)

T(sec)	$\sigma^2 h/g$	kh	L(cm)	H(cm)	H/L	h/L	D/L	d_c/L	R_c/L	U_r
0.7	4.11	4.11	76.2	2.29	0.03	0.65	2.28	0.26	0.26	0.11
0.75	3.58	3.58	87.6	2.63	0.03	0.57	1.99	0.23	0.23	0.16
0.8	3.14	3.16	99.5	2.98	0.03	0.50	1.75	0.20	0.20	0.24
0.9	2.48	2.52	124.8	3.74	0.03	0.40	1.39	0.16	0.16	0.47
1.0	2.01	2.08	151.0	4.50	0.03	0.33	1.15	0.13	0.13	0.82
1.1	1.66	1.76	178.1	5.34	0.03	0.28	0.98	0.11	0.11	1.36
1.2	1.40	1.54	204.0	6.12	0.03	0.25	0.85	0.10	0.10	2.04
1.7	0.70	0.95	332.0	9.96	0.03	0.15	0.52	0.06	0.06	8.78

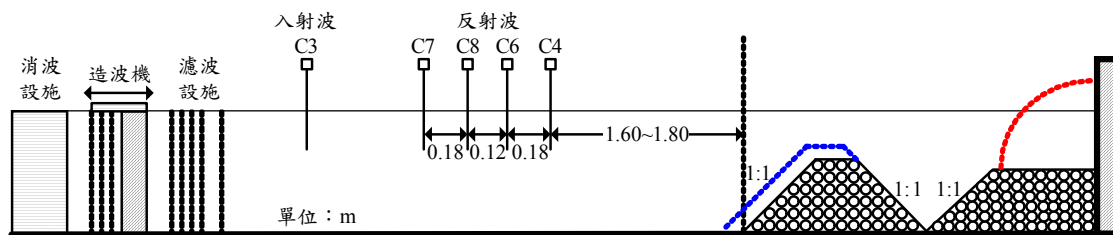


圖 4.4.1(b) 定床斷面造波水槽波高計配置示意圖 連結式($S/h=0$)

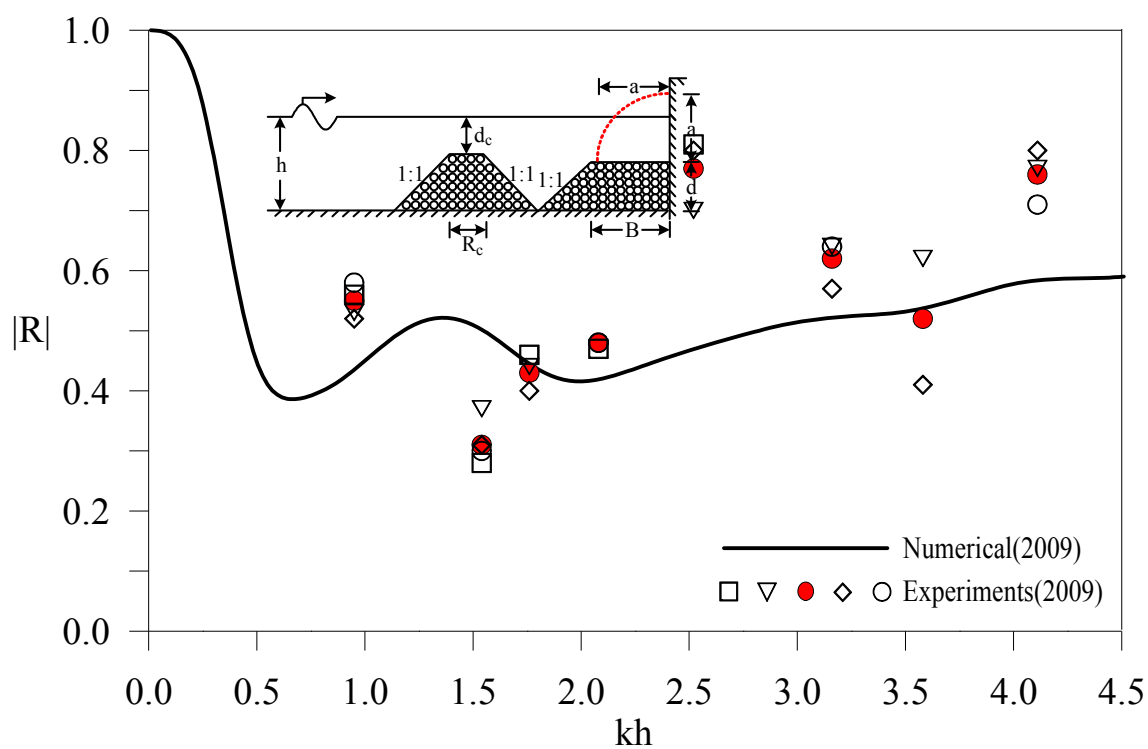


圖 4.4.2 波浪通過連結式消能結構物之 $|R|$ 與 kh 關係圖($d_c/h=0.4$ 、 $R_c/h=0.4$)

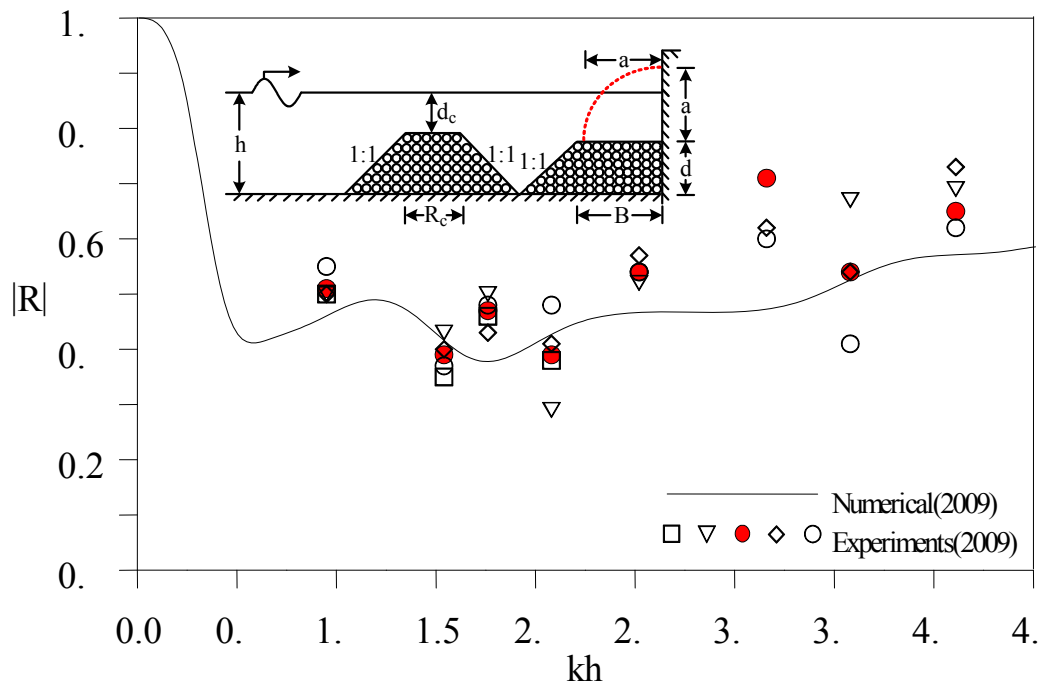


圖 4.4.3 波浪通過連結式消能結構物之 $|R|$ 與 kh 關係圖 ($d_c/h=0.4$ 、 $R_c/h=0.6$)

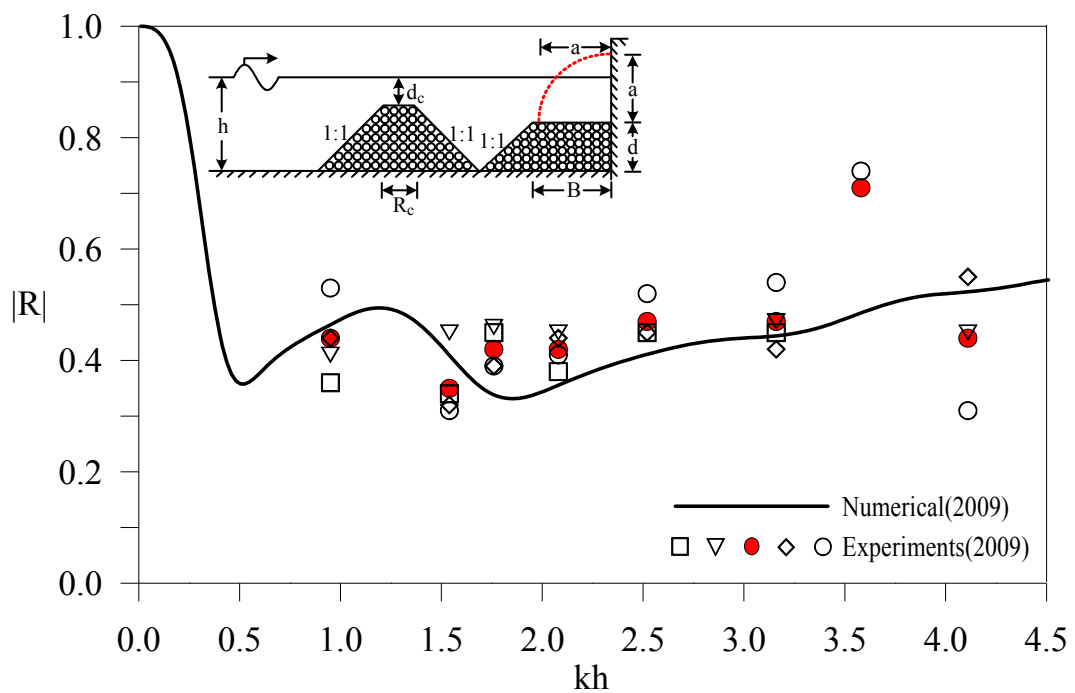


圖 4.4.4 波浪通過連結式消能結構物之 $|R|$ 與 kh 關係圖 ($d_c/h=0.3$ 、 $R_c/h=0.4$)

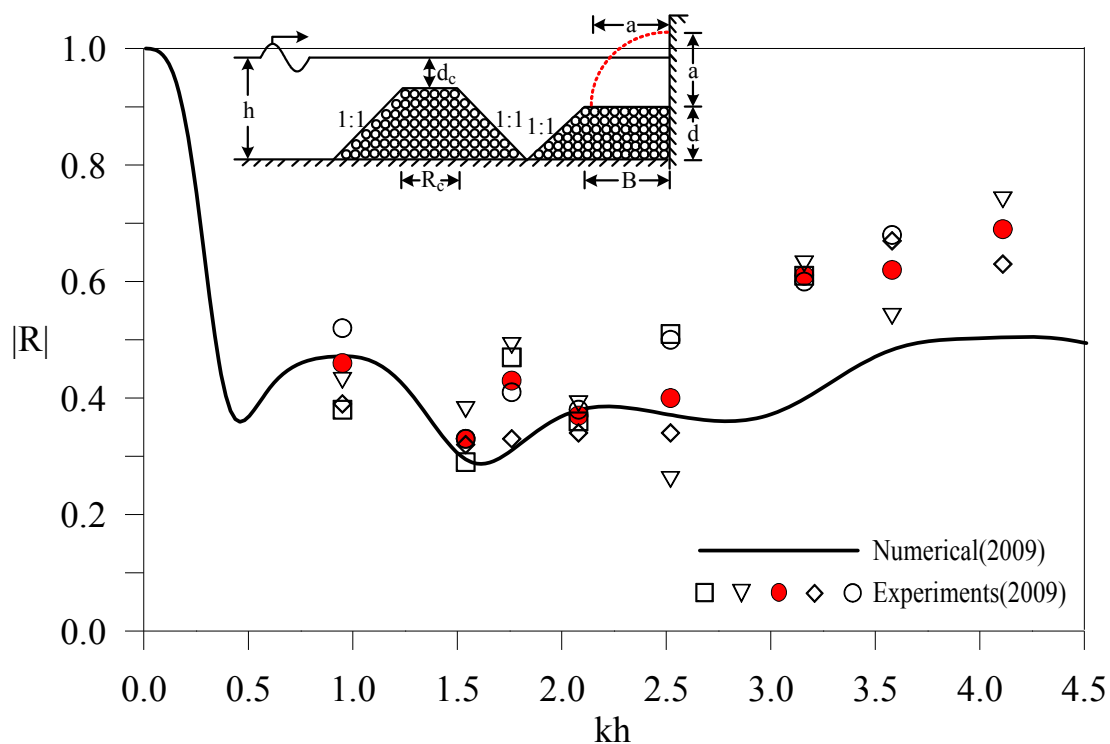
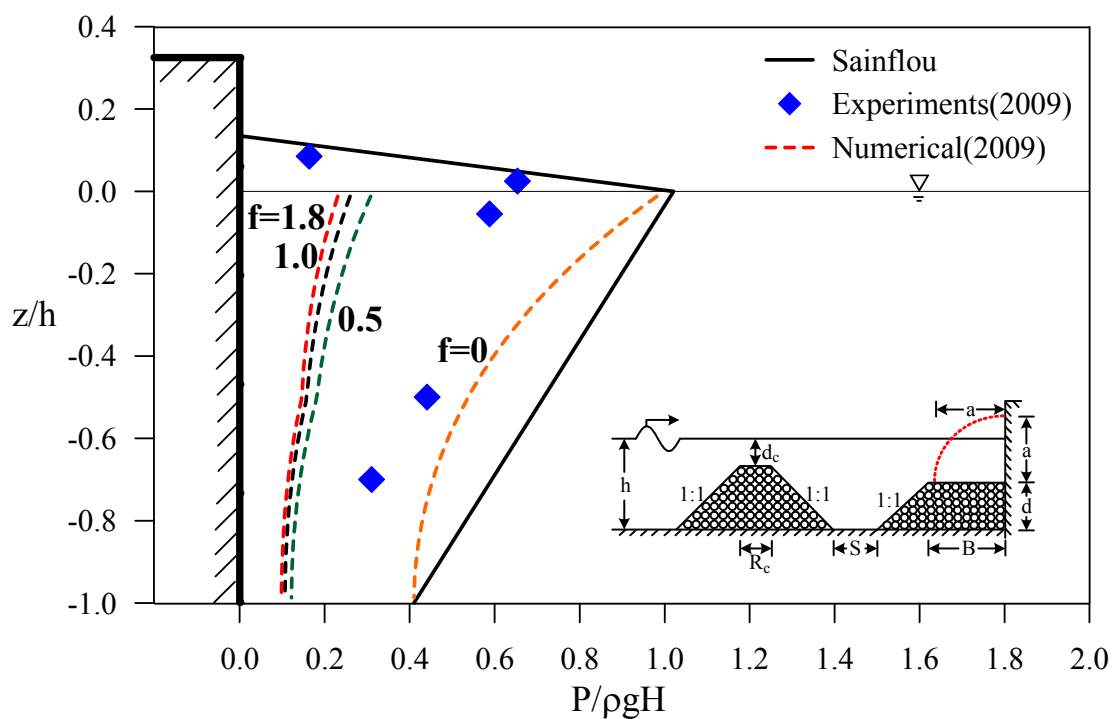
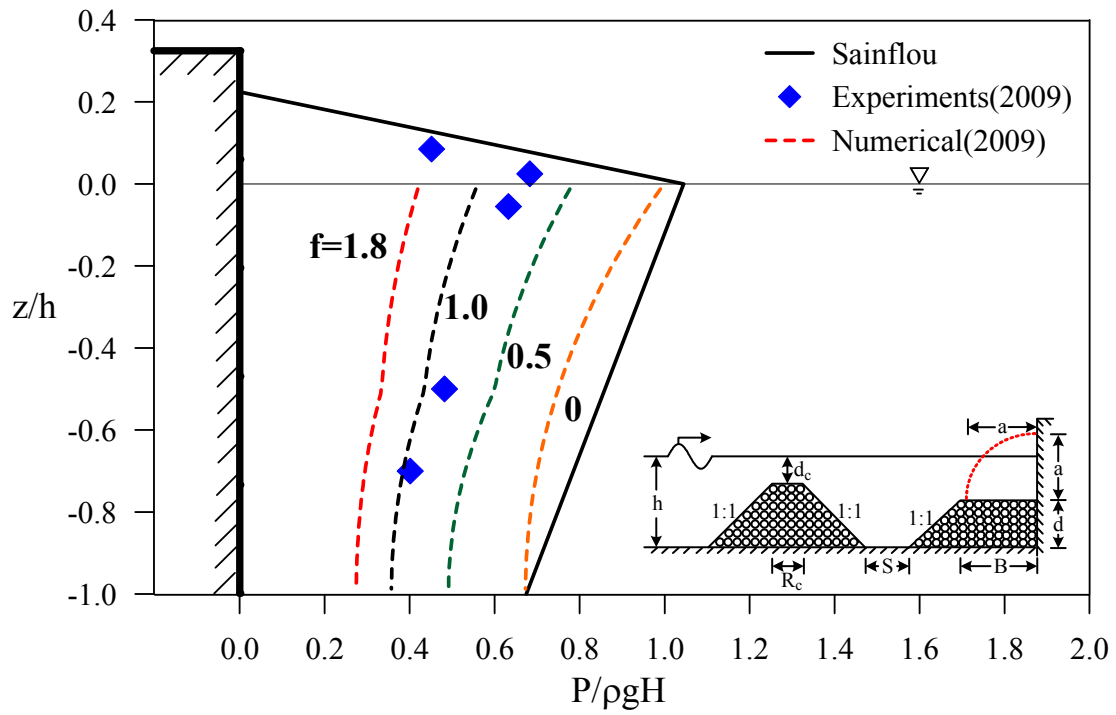


圖 4.4.5 波浪通過連結式消能結構物之 $|R|$ 與 kh 關係圖 ($d_c/h=0.3$ 、 $R_c/h=0.6$)



(a) $T=1.2\text{sec}$



(b) $T=1.7\text{sec}$

圖 4.4.6 直立岸壁上波壓與 Sainflou 重複波壓理論比較圖($S/h=0$,
 $d_c/h=0.3$, $R_c/h=0.4$)

第五章 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。

5-1 結論

1. 有關長波抗浪型的研究，藉由針對內建斜坡水力消能式結構物的基本型態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促使波浪沿斜坡溯上且越波，水流不致大量溯降回流，而可以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。
2. 有關功能目的使用型或臨時性設施型的研究，利用複合邊界元素法以處理邊界值問題中退化邊界問題，同時探討浮體底部配置無厚度翼板時的消波特性，結果發現浮體在底板兩側增設雙翼板時，可有效提升其對較長週期波的反射效果，同時增加浮體各自由度運動的附加質量與力矩係數，使得激發浮體自然振動的頻率更向低頻區偏

移，提升對長週期波的消波能力，在實用上可以較小斷面而得到較佳的消波效果。就影響加裝翼板的浮式結構而言，翼板的傾斜角度與長度及翼板數目為影響此類型結構消波特性的主要參數，其中長度為主要影響參數，翼板的傾斜角度雖對結構的反射率亦有影響，但視其作用波浪的週期而定，另外，翼板數目在一個時，並無法有效的提升其消波能力，但雙翼板與三翼板之消波能力差異並不大。

3. 有關環境保護型消能結構物的研究，利用多領域邊界元素法數值計算波浪通過環境保護型消能式結構物之反射率及波壓力，其方法是可行的，反射率變化所獲得結論：不論透水潛堤相對沒水深(d_c/h)、相對堤寬(R_c/h)及相對間距(S/h)如何改變，其反射率變化與直立岸壁堤前至潛堤向海堤址處之距離 D 與入射波長 L 之比(D/L)有一明顯關係存在；亦即 D/L 在某些特定值時反射率會有一極小值存在，可以提供給工程設計上做為參考。

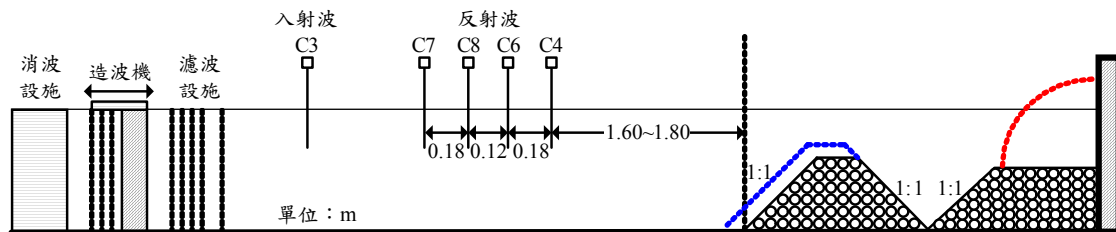
5-2 建議

1. 有關長波抗浪型的研究，由於本項試驗是計畫執行的第一年，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，以及需要配套的措施。未來在水工模型試驗的部分將在此一基礎下，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。
 - (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
 - (6)在數值模擬方面也將要再精進，適當地控制所有的相關參數設定，以求能正確地模擬結構物附近的水力現象。

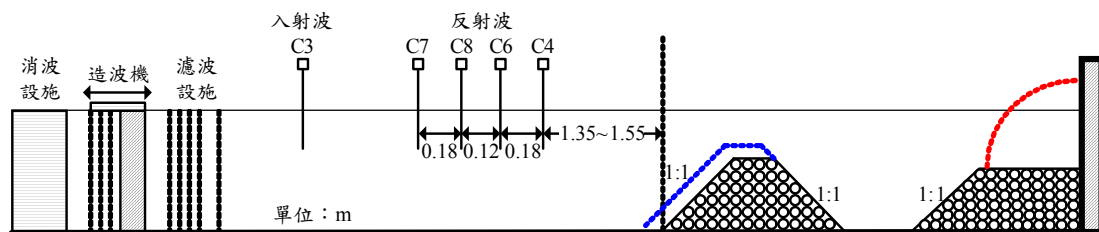
2. 有關功能目的使用型或臨時性設施型的研究，後續將就附加剛性翼版的浮式結構物進行水工模型試驗，同時也研究建置附加彈性翼版的可行性。
3. 有關環境保護型消能結構物的研究，由於環境保護型消能結構物之設置，希望能發揮消波減壓的功效。後續除繼續進行數值模擬外，也將進行水工模型試驗，量測反射率值及波壓力大小，並與數值計算作一比對及討論。其造波條件與模型配置如表 5.1.1 及圖 5.1 所示。

表 5.1.1 波浪通過環境保護型消能結構物之波浪條件($S/h=0$ 、 $dc/h=0.4$ 、 $Rc/h=0.4$)

T(sec)	$\sigma^2 h/g$	kh	L(cm)	H(cm)	H/L	h/L	D/L	d_c/L	R_c/L	Ur
0.7	4.11	4.11	76.2	2.29	0.03	0.65	2.28	0.26	0.26	0.11
0.75	3.58	3.58	87.6	2.63	0.03	0.57	1.99	0.23	0.23	0.16
0.8	3.14	3.16	99.5	2.98	0.03	0.50	1.75	0.20	0.20	0.24
0.9	2.48	2.52	124.8	3.74	0.03	0.40	1.39	0.16	0.16	0.47
1.0	2.01	2.08	151.0	4.50	0.03	0.33	1.15	0.13	0.13	0.82
1.1	1.66	1.76	178.1	5.34	0.03	0.28	0.98	0.11	0.11	1.36
1.2	1.40	1.54	204.0	6.12	0.03	0.25	0.85	0.10	0.10	2.04
1.7	0.70	0.95	332.0	9.96	0.03	0.15	0.52	0.06	0.06	8.78



(a) 連結式($S/h=0$)



(b) 分開式($S/h=1$)

圖 5.1 定床斷面造波水槽環境保護型消能結構物配置示意圖

5-3 成果效益與後續應用情形

本計畫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。在經濟效益上，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。在應用上，可針對臺灣各區域之港灣特性決定結構型式，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考依據、提供近岸保護工法各港在鄰港區域地形保護之應用、提供消能結構物設計使用，以減低工程經費及延長結構物之壽齡。

參 考 文 獻

1. Chen, C.Y. and C.P. Lee. "Flow characteristics inside large porous structure by constant head device," Journal of Chung Cheng Institute of Technology, 32 (1), 2003, 1-16
2. Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineers
3. Dalrymple, R.A., M.A. Losada and P. A. Martin. "Reflection and transmission from porous structures under oblique wave attack," Journal of Fluid Mechanics, 224,
4. Elchahal, G., R. Younes and P. Lafon. "The effects of reflection coefficient of the harbour sidewall on the performance of floating breakwaters," Ocean Engineering, 35(11-12), 2008, 1102-1112.
5. Gesraha , M. R.. "Analysis of Π shaped floating breakwater in oblique waves : I. Impervious rigid wave boards," Applied Ocean Research, 28(5), 2006, 327-338.
6. Gu, H.B., X.L. Jiang, and Y.B. Li. "Research on hydraulic performances of quarter circular breakwater," Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, 2008, 21-25.
7. Hiraishi, T., "Long period wave absorbing by artificial beach," Proc. 6th, LITTORAL 2002, EUROCOAST, 2002, pp.601-606.
8. Hiraishi, T., "Development of Long Period Wave Absorber," Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference, 2006, 621-625
9. Hirt C.W. and B.D. Nichols. "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries," J. Comp. Phys., 39, 1981, 201.
10. Jia, D.H.. "Study on the interaction of water waves with semi-circular breakwater," China Ocean Engineering, 13(1), 1999, 73-80.
11. Kee, S.T., S.H. Lee, and Jin-Seok, Kuo. "Submerged porous plate wave absorber," Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Eagineering Conference, 2006, 626-631.

12. Ker, W.K. & C.P. Lee. "Interaction of waves with a floating porous TLP," J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 128(2), 2002, 88-95.
13. Kim, W.D., H.J. Lee, J.Y. Kim, and S.K. Kohb. "Fatigue life estimation of an engine rubber mount," International Journal of Fatigue, 26, 2004, 553-560.
14. Kim, J.H. and H.Y. Jeong. "A study on the material properties and fatigue life of natural rubber with different carbon blacks," International Journal of Fatigue, 27, 2005, 263-272.
15. Kozhushko, G.G. and V.A. Koponv. "Fatigue strength function in shear loading of fabric conveyor belt," International Journal of Fatigue, 17(8), 1995, 539-544.
16. Lee, C.P. & J.F. Lee. "Wave-induced surge motion of a tension leg structure,"
17. Ocean Engineering, 20(2), 1993, 171-186.
18. Lee, C.P. and W.K. Ker. "Coupling of linear waves and a hybrid porous TLP," Ocean Engineering, 29(9), 2002, 1049-1066.
19. Lee, C.P., W.K. Ker, and J.R. You. "Wave field with a submerged porous breakwater," J. of the Chinese Institute of Engineers, 26(3), 2003, 333-342
20. Lee, C.P.. "Dragged surge motion of a tension leg structure," Ocean Engineering, 21(3), 1994, 311-328.
21. Lee, H.H., P.W. Wang and C.P. Lee. "Dragged surge motions of tension-leg platforms and strained elastic tethers," J. of Ocean Engineering, 26, 1999, 575-594.
22. Lee, M.M. and A. T. Chwang 2000. Scattering and radiation of water waves by permeable barriers. Physics of Fluids, 12, 54-65.
23. Legorju-jago, K. and C. Bathias. "Fatigue initiation and propagation in natural and synthetic rubbers," International Journal of Fatigue, 24, 2004, 85-92.

24. Liu, Y., Y.C. Li, B. Teng, and B.L. Ma. "Reflection of regular and irregular waves from a partially perforated caisson breakwater with a rock-filled core," *Acta Oceanologica Sinica*, 26(3), 2007, 129-141.
25. Liu, Y., Y.C. Li, B. Teng, and J.J. Jiang. "Experimental and theoretical Investigation of wave forces on a partially-perforated caisson breakwater with A rock-filled core," *China Ocean Engineering*, 20(2), 2006, 179-198.
26. Madsen, P.A.. "Wave reflection from a vertical permeable wave absorber," *Coastal Engineering*, 7, 1983, 381-396.
27. Mars W.V. and A. Fatemi. "Multiaxial stress effects on fatigue behavior of filled natural rubber," *International Journal of Fatigue*, 28, 2006, 521-529.
28. Mars, W.V. and A. Fatemi. "A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber," *International Journal of Fatigue* , 24, 2004, 949-961.
29. Saintier N., G. Cailletaud and R. Piques. "Crack initiation and propagation under multiaxial fatigue in a natural rubber," *International Journal of Fatigue*, 28, 2006, 61-72.
30. Saintier N., G. Cailletaud and R. Piques. "Multiaxial fatigue life prediction for a natural rubber," *International Journal of Fatigue*, 28, 2006, 530-539.
31. Sollitt, C.K. and R.H. Cross. "Wave Transmission through permeable breakwaters," *Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference*, Vancouver, BC, 1972, 1827-1846.
32. Sullisz, W.. "Wave reflection and transmission at permeable breakwaters of arbitrary cross section," *Coastal Engineering*, 9, 1985, 317-386.
33. Tanimoto, K., H. Endoh and S. Takahashi. "Field experiments on a dual cylindrical caisson breakwater," *Proceedings of the 23th International Conference on Coastal Engineering, ICCE, Venice, II* , 1992, 1625-1638.
34. Weng, W.K. and C.R. Chou. "Anlysis of responses of floating dual pontoon structure," *China Ocean Engineering*, 21(1), 2007, 91-104.
35. Wu, J.H., Z.P. Wan, and Y. Fang. "Wave reflection by a vertical wall with a horizontal submerged porous plate," *Ocean Engineering*, 25, 1998, 767-779.

36. Xie, S.L.. "Wave forces on submerged semi-circular breakwater and similar structures," *China Ocean Engineering*, 13(1), 1999, 63-72.
37. Yu, X.. "Diffraction of Water Waves by Porous Breakwaters," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 121, 1995, 275-282.
38. 吳永照、許瑞昌 與 陳俊吉，「斜向入射波與透水潛堤的交互作用」，第 21 屆海洋工程研討會論文集，1999，第 259~266 頁。
39. 李兆芳 與 劉正琪，「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，1995，第 593~605 頁。
40. 林東廷 與 涂盛文，「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，1991，第 126~140 頁。
41. 林東廷，「多層透水式防波堤之消波及波力探討」，*港灣技術*，第 11 卷，第 1 期，1996，第 1~37 頁。
42. 林東廷，「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，2001，第 43~47 頁。
43. 林東廷，「淺談半圓形防波堤之發展」，*海洋技術期刊*，第 11 卷，第 2 期，2001，第 31~37 頁。
44. 柯文貴，波浪與浮式透水防波堤之交互作用，碩士論文，國立中山大學海洋環境工程研究所，高雄，台灣，1997。
45. 柯文貴、李忠潘 與 陳陽益，「透水潛堤內外波流場之理論解析」，第 8 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)，1997，第 715~722 頁。
46. 郭一羽 與 李麗雪，*海洋生態景觀環境營造*，田園城市文化事業有限公司，2006，402 頁。
47. 郭一羽 與 李麗雪，*海洋景觀與生態設計*，田園城市文化事業有限公司，2005，282 頁。
48. 郭一羽主編，*海岸工程學*，文山書局，2003，474 頁。

49. 郭金棟 與 黃貴麟，「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，1990，第 502~522 頁。
50. 郭金棟，海岸工程，中國土木水利工程學會，1989，第 10-8~10-10 頁。
51. 陳昌生 與 林東廷，「淺談日本新形式防波堤之發展」，港灣報導，第 64 期，2003，第 15~27 頁。
52. 黃清和、蔡立宏、陳昌生 與 林東廷，「淺談生態型消波塊之發展類型」，港灣技術，第 75 期，2006，第 33~38 頁。
53. 謝世楞，「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，2000，第 35-39 頁。
54. 謝世楞、李炎保、吳永強 與 谷漢斌，「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，2006，第 14-18 頁。
55. 蘇青和、歐善惠 與 章梓雄，「多孔岸壁港池之波能消散現象」，中國港灣技術期刊，第 7 期，1992，第 126~140 頁。
56. 涂盛文 與 林東廷，「孔隙板對微小振幅波之影響」，港灣技術，第 5 期，1990，第 95~124 頁。
57. 涂盛文 與 劉正琪，「系列透水潛堤之消波效應」，第 12 屆水利工程研討會論文集，2001，H-41~48 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-98-H2DB004

計畫名稱：消能式結構物特性之研究(1/4)

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
一、郭一羽委員：		
1. 研究結果實用目標重於學術理論創新，故可充分引用和利用以往研究結果，只求技術創新即可。	1. 本計畫將會儘量參考及歸納以往研究的成果及理論，以溫故知新與集思廣益的態度，尋求新型結構物的創作。	1. 依處理情形辦理。
2. 堤寬(縱深)與入射波長的比值，即無因次化表示，才能知道實際上可應用於多少波長或週期的消波。	2. 相關的實驗成果將儘量已無因次化的方式檢討與評估。	2. 依處理情形辦理。
3. 數值模擬可做很好的預測，但應與水工試驗做適當搭配，將可看出更多的消波特性。	3. 本計畫團隊目前所採用的研發方式是先檢討建構結構物雛形，進行水工模型預備試驗，以瞭解其水力特性，再據此訂定數值模擬的型式及流程，進行先期開發上的評估，而後再以最佳設計進行水工模型試驗印證。	3. 依處理情形辦理。
4. 長波消波是否可考慮以潛礁將長波分裂再行消波，後期可朝此方向思	4. 委員建議將納入後其研究方向。	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
波，後期可朝此方向思考看看。		
二、李忠潘委員：		
1. 圖表字體請放大。	1. 將於期末報告改進。	1. 依處理情形辦理。
2. 透水潛堤的文獻另請參考柯文貴(1997)碩士論文，以及 J. of Ocean Engineering 的三篇文章。	2. 將於期末報告改進，並感謝委員提供參考文獻。	2. 依處理情形辦理。
3. (4.2.1)式筆誤，請修正。	3. 將於期末報告改進。	3. 依處理情形辦理。
4. 浮堤的文獻另請參考 Lee and Lee(1994)，Lee(1995 或 1996?) J. of Ocean Eng. 的兩篇文章。	4. 將於期末報告改進。	4. 依處理情形辦理。
5. 第二章及第三章的腳頻率分別用 ω 及 σ ，請改為一致，(ω : P.65 為振幅)。	5. 將於期末報告改進。	5. 依處理情形辦理。
6. (3.2.2)式的 κ 請定義。	6. 將於期末報告改進。	6. 依處理情形辦理。
7. (3.2.33) ξ 、 η 為座標，P.65 則為振幅，請修改以免混淆。	7. 將於期末報告改進。	7. 依處理情形辦理。
8. 第三章所用符號的定義，請確認。	8. 將於期末報告改進。	8. 依處理情形辦理。
9. 潛堤促使波浪破碎而降低波能的功能，比未碎波大很多，應可於實驗水槽進行研究。	9. 將納入後續試驗中討論	9. 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
三、韓文育委員：		
1. 研究報告中用詞宜審慎，與本研究無關之情緒性或臆測性文字，諸如 p.1 及 P.2 中「……直接成為海岸景觀及環境破壞之原兇」及「引致海岸區域生態的滅絕」等等，均應避免。	1. 將於期末報告改進。	1. 依處理情形辦理。
2. P.2「臺灣 1 千餘公里海岸佈滿了大大小小三百多個港口及海堤」，宜區分為本島海岸線長 1356 Km 及澎湖 64 主要島嶼海岸線長 374 Km，再敘述各區海岸利用狀況，較符實際，並避免誤導。	2. 將於期末報告改進。	2. 依處理情形辦理。
3. P.40「橡膠材料對文哈活力影響分析」，實驗水缸中「橡膠濃度」與拋放於海中消波橡膠所釋出之橡膠濃度是否相當？又與文哈是否潛沙有何關連？其實驗結論「……濃度在 1.38 g/L 與 2.74 g/L 之間，對文哈存活率與潛沙能力均無顯著性影響」，此結論是要說明文哈耐污染，還是有其他	3. 將重新檢討定位此一部分後期的研究方向，並於期末報告改進。	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
意義。		
4. P.54「水力阻尼消能式結構」其尺寸變化(或組合)及波浪特性，應與消能有直接相關，本計畫僅以二組尺寸外型之模型進行數值模擬，恐難建立可應用於實際工程設計之圖表，建議日後此部分研究，宜朝實用目標努力(包括結構體安全分析及施工可行性探討)。	4. 遵照辦理。	4. 依處理情形辦理。
5. 計畫研究項目之「環境保護型消能結構物」為何要自限於「防波堤」？又堤前潛堤形狀與結果有關連嗎？	5. 實際上本計畫各子題在未來都可能會相互聯繫。本計畫團隊會盡量考慮各種可能性。	5. 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-98-H2DB004

計畫名稱：消能式結構物特性之研究(1/4)

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
一、郭一羽委員： 1. 研究具有創意，且朝各種不同類型的方向考慮，值得肯定。 2. 結構設計上，應朝實用上的一些問題去克服。 3. 長波抗浪型結構物其水質淨化效果對港內水質有很大幫助。	1. 感謝委員的肯定。 2. 長波抗浪型結構物的研究最終目標係以能進行實務應用為主，目前的研究上亦多考慮其實用上可能遭遇的問題以及尋求解決的方法。感謝委員的提醒，也請委員未來能繼續提供改進意見。 3. 感謝委員的提醒，後續研究將設法收集相關水質環境資料列入研發的參考。	1. 符合。 2. 依處理情形辦理。 3. 依處理情形辦理。
二、李忠潘委員： 1. 內容豐富，進度完成值得肯定。 2. P.6 第一年長波抗浪型是否進行數值及水工試驗，請敘	1. 謝謝委員的肯定。 2. 1.4 節所列係本計畫招標文件上的預定工作項目，與本	1. 符合。 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
明。	年度實際工作內容與進度略有差異。本年度每一個子題都同時進行數值及水工試驗。	
3. P.8 及 P.10，長波抗浪型的第四年及第三年工作項目稍有不同，請修正或確認。	3. 由於期中審查委員所提共的意見，長波抗浪型中材料阻尼型的研究內容與進度將有所調整，1.4 節僅是說明招標文件上的工作項目。	3. 依處理情形辦理。
4. 港內消能用的材料阻尼結構，所用橡膠材料與文蛤活力有何關係？(P.40，2-4-3 節)	4. 文蛤活力的生態試驗主要是作為檢驗橡膠材料是否具有污染性的指標。本部分內容已依委員意見不列入期末報告。	4. 依處理情形辦理。
5. P.45，快速安裝防波堤 (Fig.2.4.18) 似不屬於 2-4 節？	5. 2.4 節的快速安裝防波堤主要是用來說明其使用的彈性材料。	5. 依處理情形辦理。
6. 第三章所述，本研究與 RIBS 有何異同？請說明。	6. 本研究所設計的浮式結構物比 RIBS 多了下方的擋板，使得其運動行為不一樣。	6. 依處理情形辦理。
7. 第三章及第四章理論推導部份，請敘明引述來源。	7. 感謝委員指正。4.2 節的理論推導中，加入引用 Sollitt and Cross(1972) 所提出多孔隙介質擬勢流 (quasi-potential flow) 理論，證明速度勢存在，且滿足 Laplace 方程式。	7. 依處理情形辦理。
三、韓文育委員：		
1. 本研究為四年期計畫，各年	1. 誠如委員所賜意見，日後	1. 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
度預定工作項目，本人原則敬表贊同，惟水力式阻尼結構物，其構想構造物中斜坡板及頂板應力分析，建議納入後三年之工作項目，以供日後實際應用之參考。至本計畫最重要之成果顯現應於第四年提出具體可行之實際應用方案，本人對此抱持高度期待。 2. 本年度為第一年計畫，本人對報告之意見業於期中審查時提出供參，對期中審查意見 2.及意見 3.請研究單位再斟酌，尤其意見 3.如無特殊必要之理由，建議 P.40 文蛤試驗乙節整段刪除，以免降低整篇報告之聚焦性。	實際應用原構想之三種水力式阻尼結構物模型方案時，除需考量到易於實體施工建造之外，其斜坡板、頂板及整體之應力分析亦是相當重要且必要之一環。惟至實際應用前，需針對越波排水方式、斜坡板透水性、斜坡板坡度、堤內拋石孔隙率與透水性及暴潮水位與不同高度等因子，對三種長波抗浪型防波堤方案消波機制之影響，做一系列驗證探討後，從中建議最佳模型予以定型化再施以應力分析，是較能事半功倍之策略。本項研究的終極目標，如同委員的想法，將朝著研擬與設計施工相關的應力分析，及設計步驟努力。 2. 未能完全反應委員的期中審查意見，計畫團隊在此表示歉意，並已經重新改寫第一章的文字。文蛤活力的生態試驗主要是作為檢驗橡膠材料是否具有污染性的指標，但可能與工程設計無太直接關係，本部分內容已依委員意見不	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
	列入期末報告。	
四、楊瑞源委員： 1. Page 2 圖 1.1.1 建議加註地形水深之色層分佈說明。 2. Page 129 請加註試驗水槽之尺寸，操作水深及相關試驗程序(造波時間、資料收錄時間等)及模型結構物之相關尺寸。 3. 入射波特性與長波抗浪型消能結構體尺寸大小之互制影響如何，建請加強論述。 4. 環境保護型潛堤後側之圓弧型基座堤體 B 與水深(h)之關係，建議補充說明。	1. 已經重新引用海科中心的水深地形圖。 2. 謝謝委員指正。已於 4.4 節中分成兩部份加以討論。 4.4.1 節水工模型試驗(包含：斷面造波水槽尺寸、波高計壓力計之率定、模型製作與配置、波浪條件、試驗水深及相關試驗程序等)。 4.4.2 節則為試驗結果與分析。 3. 此一部份屬於後續研究中待討論的因子。 4. 謝謝委員指正。已補充堤頂寬 (B) 與水深 (h) 比為 $B/h=0.88$ 。方便試驗時安裝及架設孔隙板。	1. 依處理情形辦理。 2. 依處理情形辦理。 3. 依處理情形辦理。 4. 依處理情形辦理。

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(1/4)

(MOTC-IOT-98-H2DB004)

期中報告

林昭圭、岳景雲、翁文凱、楊國誠

國立臺灣海洋大學 河海工程學系

98年7月16日

消能式結構物特性之研究(1/4)

計畫主要目標及研究內容

台灣之重要港口與河川

高雄港域：

1. 港灣結構物所造成阻礙或消能效果
2. 港口地形及通商因素，海床變遷與淤積量，港口海床淤積量有無

基隆港域：

1. 港口淤積量，港灣結構物造成阻礙或消能效果，所有淤積量較大，所有淤積量較大
2. 基隆港域淤積量，所有淤積量較大，所有淤積量較大

基隆港域：

1. 港口淤積量，港灣結構物造成阻礙或消能效果，所有淤積量較大，所有淤積量較大
2. 基隆港域淤積量，所有淤積量較大，所有淤積量較大

台灣各區之地理環境、所遭遇之問題、以及港灣碼頭之使用功能皆有所不同，單一型式之重力式結構物並不足以滿足所有港灣的需求，有必要針對各種不同的需求提出不同解決方式

研究地點：基隆港域、高雄港域、基隆港域

P.2

消能式結構物特性之研究(1/4)

計畫主要目標及研究內容

材料阻尼及水力阻尼
長波抗浪型
功能目的使用型/臨時性設施型
快速修築柔性浮式結構物
模型試驗及數值模擬
潛式多孔阻尼水結構物
數值模擬
環境保護型

消能式結構物特性之研究

取代重力式
傳統保護港灣、海岸之重力式海岸結構物

P.3

消能式結構物特性之研究(1/4)

長波抗浪型~水力式阻尼結構

水力結構阻尼之特性研究初步構想

利用港灣結構與波流水理運動間的交互作用特性形成阻尼，以達消減長波能量的功能。

內建斜坡式消能結構物的初步構想

多孔阻尼式消能結構物的初步構想

P.4

消能式結構物特性之研究(1/4)

長波抗浪型~水力式阻尼結構

水力結構阻尼之特性研究構想

修正之內建斜坡式消能結構物的構想一

修正之內建斜坡式消能結構物的構想二

但實際的碼頭高度大約在12m以上，可能無法直接由底部建構一斜坡促使波浪洶湧而不會因為坡度太陡而發生反射，因此乃重新研擬碼頭斷面

P.5

消能式結構物特性之研究(1/4)

長波抗浪型~水力式阻尼結構

水力結構阻尼之水工模型預備試驗

修正之內建斜坡式消能結構物的方案一

修正之內建斜坡式消能結構物水工模型預備試驗

根據方案一，以比例尺1/25的縮尺，在海洋大學海港工程館的小斷面水槽（50公尺長、80公分寬）中進行預備試驗（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）

P.6

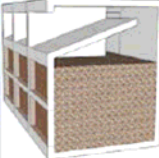
長波抗浪型~水力式阻尼結構

水力結構阻尼之水工模型預備試驗

方案一的配置對所有的測試條件，均能有效地促使入射波浪可以成功地產生越波與跌水的現象，因此反射率都小於0.2。

後續將就以下事項進行檢討改進並進行相關測試：

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



P.7

長波抗浪型~水力式阻尼結構

水力結構阻尼之水工模型預備試驗

表 5.5.1 方案一之反射率試驗結果比較

波高 (m)	波長 (m)	反射率 (R)	透射率 (T)	反射率 (R)	透射率 (T)	反射率 (R)	透射率 (T)	反射率 (R)	透射率 (T)
0.5	10.0	0.15	0.85	0.18	0.82	0.20	0.80	0.22	0.78
1.0	10.0	0.12	0.88	0.15	0.85	0.18	0.82	0.20	0.80
1.5	10.0	0.10	0.90	0.12	0.88	0.15	0.85	0.18	0.82
2.0	10.0	0.08	0.92	0.10	0.90	0.12	0.88	0.15	0.85
2.5	10.0	0.05	0.95	0.08	0.92	0.10	0.90	0.12	0.88
3.0	10.0	0.03	0.97	0.05	0.95	0.08	0.92	0.10	0.90
3.5	10.0	0.02	0.98	0.03	0.97	0.05	0.95	0.08	0.92
4.0	10.0	0.01	0.99	0.02	0.98	0.03	0.97	0.05	0.95

P.8

長波抗浪型~水力式阻尼結構

數值模擬：Flow-3D數值模擬程式建構測試

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。

如何正確地描述自由液面之形狀及位置？並能考慮到自由液面形狀如何隨時間改變？將是數值模擬結果之合理性的最主要關鍵點。

擬採用以

1. 多重區塊結構式網格系統(Multi-Block Structure Grid System)
2. 流體體積分率法(Fractional Volume of Fluid,VOF)
3. 可設定多種類型之邊界條件

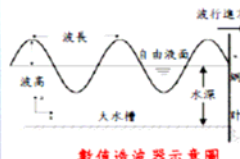
為解算技術之Flow-3D為初步評估工具。

P.9

長波抗浪型~水力式阻尼結構

Flow-3D之主要優勢

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，在入射邊界面上設定為入射波邊界條件。



可設定各類型之邊界條件，以符合實際工程問題所需。例如：
 對稱面(Symmetry)、
 靜止的壁面(Wall)、
 與外界大氣接觸面(Out-Flow)、連續面(Continuity)等邊界條件。

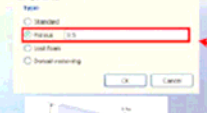
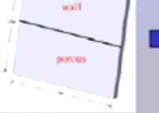
數值邊界器示意圖

P.10

長波抗浪型~水力式阻尼結構

Flow-3D數值模擬測試實例(多孔隙材質)

Flow-3D設定多孔隙材質示意

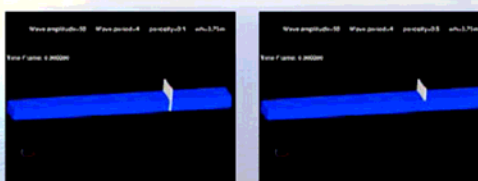
矩形模型尺寸示意圖

槽狀式網格區域示意圖

P.11

長波抗浪型~水力式阻尼結構

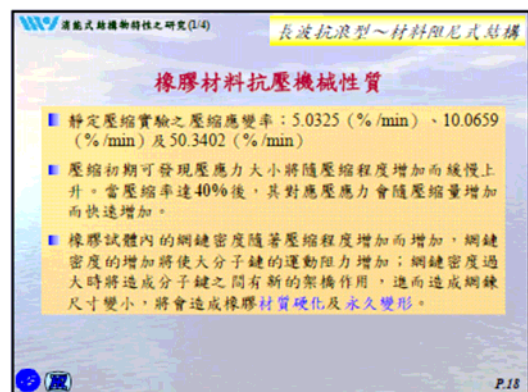
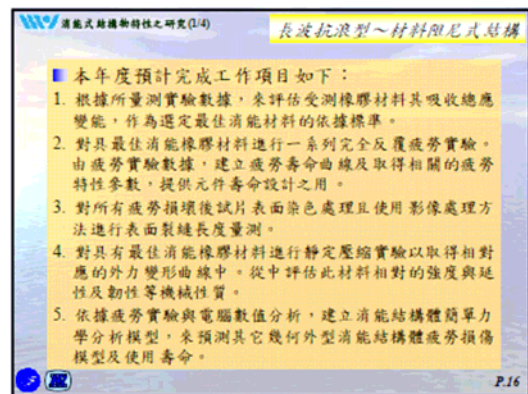
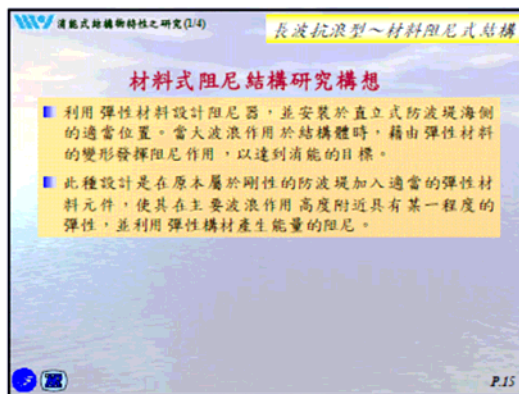
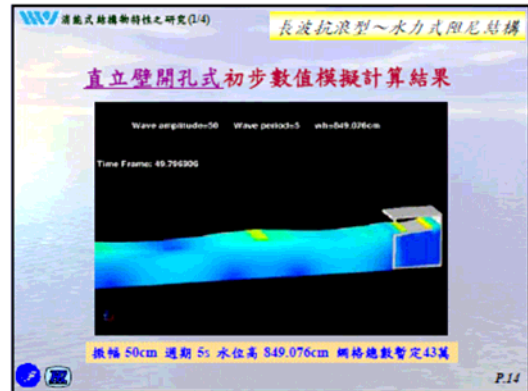
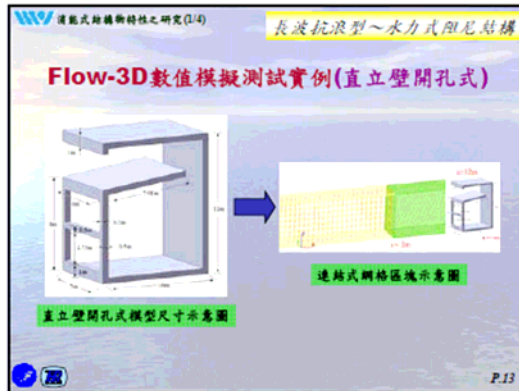
多孔隙材質初步數值模擬計算結果



振幅 50cm 週期 4s
 孔隙率 0.1 水位高 3.75m

振幅 50cm 週期 4s
 孔隙率 0.5 水位高 3.75m

P.12



消能式結構物特性之研究(I.4)

功能目的使用型或臨時性設施型

繫留浮體理論推導

■ 積分方程與離散化
用Green函數與積分方程式的離散化，使得領域(II)上之勢函數滿足Laplace方程式，並且假設二次導函數存在。以複合邊界元素法(DBEM)進行，可解決薄版上同一邊界有兩個邊界條件之問題。得矩陣如下式：

$$[A]\{\phi\} = [B]$$

將各邊界條件代入上式即可求領域(II)所有勢函數，再由其求得浮體之運動振幅與殘餘力及反射與透過率。

P.25

消能式結構物特性之研究(I.4)

環境保護型

環境保護型之消能結構型式

潛式多孔隙透水式結構物	曲面透水薄板
- 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	- 減少衝擊波壓作用 - 波力指向於圓心 - 增加抗滑及傾倒力矩 - 確保結構安定 - 較不會發生衝擊破波 - 堤體可於陸地上預製，減少海上施工，並有利於重新吊放使用 - 下部結構採用多孔隙型結構，可以成為很好的生物棲息環境 - 形成消能、景觀、生態三者兼具之結構物

環境保護型防波堤定義圖

P.26

消能式結構物特性之研究(I.4)

環境保護型

線性波浪通過環境保護型防波堤之理論推導

■ 基本假設與速度勢
以線性波理論為基本假設，假設流體為不可壓縮、無黏滯性與非旋性流體，持有一速度勢 $\Phi(x, z, t)$ ，且滿足Laplace方程式

(1) 純水區域—(I)、(II)及(III)領域

$$\Phi^{(j)}(x, z, t) = \frac{gC_0}{\sigma} \phi^{(j)}(x, z) e^{-i\sigma t}, \quad j = I, II, III$$

(2) 透水區域—(IV)領域

$$\Phi^{(IV)}(x, z, t) = \frac{gC_0}{\sigma} \phi^{(IV)}(x, z) e^{-i\sigma t}$$

P.27

消能式結構物特性之研究(I.4)

環境保護型

理論推導

■ 領域(I)之勢函數 $\Phi^{(I)}(x, z) = \int_0^\infty \phi^{(I)}(x, z) e^{-i\sigma t} \cosh k(h+z) dz$

■ 邊界條件

- (1) 自由水面 $\nabla^2 \Phi^{(j)} = 0, \quad z=0, \quad j=I, II, III$
- (2) 海底底床及不透水岸壁 $\nabla^2 \Phi^{(j)} = 0, \quad z=-h, \quad j=I, II, IV$
- (3) 假想邊界線上 $(x=-l)$ $\nabla^2 \Phi^{(j)} = 0, \quad x=-l, \quad j=I, II, III, IV$
- (4) 四分之一圓弧形孔隙板 $\frac{\partial \Phi^{(I)}}{\partial z} = \frac{\partial \Phi^{(II)}}{\partial z} = \frac{\partial \Phi^{(III)}}{\partial z} = \frac{\partial \Phi^{(IV)}}{\partial z} = 0, \quad z=0, \quad x=0$

P.28

消能式結構物特性之研究(I.4)

環境保護型

理論推導

■ 反射率(R)之解析 $R = \frac{C_R}{C_I} = \frac{\int_0^\infty \phi^{(I)}(x, z) e^{-i\sigma t} \cosh k(h+z) dz}{\int_0^\infty \phi^{(II)}(x, z) e^{-i\sigma t} \cosh k(h+z) dz}$

■ 勢函數之解析 $\phi^{(j)}(x, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} \cosh k_n(h+z) \cos k_n x$

■ 子領域之勢函數 $\phi^{(j)}(x, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} \cosh k_n(h+z) \cos k_n x$

◆ 由上式可求得各子領域各邊界線上之勢函數，將位於假想邊界線上之勢函數代入反射率(R)，即可求出反射率R

■ 結構物上壓力與合力之求解

$$F_{px} = -\rho g \int_0^h \left(\phi^{(I)} - \phi^{(II)} \right) \cos kx dz, \quad \text{on } x=0$$

$$F_{py} = -\rho g \int_0^h \left(\phi^{(I)} - \phi^{(II)} \right) \sin kx dz, \quad \text{on } x=0$$

$$F_{px} = -\rho g \int_0^h \left(\phi^{(I)} + \phi^{(II)} \right) \cos kx dz, \quad \text{on } x=a$$

$$F_{py} = -\rho g \int_0^h \left(\phi^{(I)} + \phi^{(II)} \right) \sin kx dz, \quad \text{on } x=a$$

P.29

消能式結構物特性之研究(I.4)

環境保護型

數值計算結果與分析

■ 首先固定四分之一圓弧形孔隙板於直立堤前透水潛堤上，並在堤前加設一道梯形透水潛堤

■ 定值

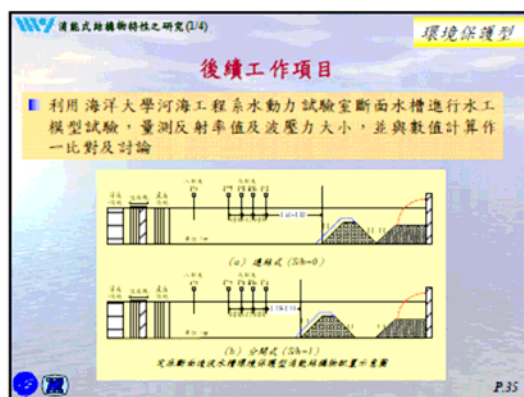
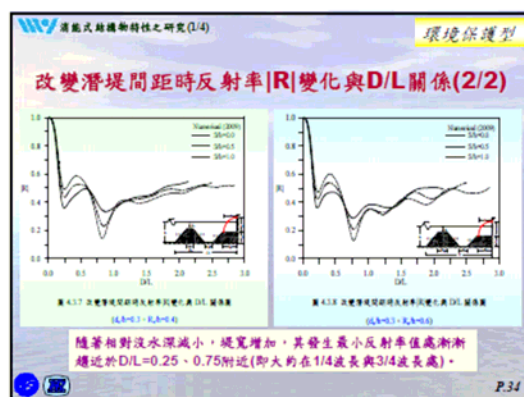
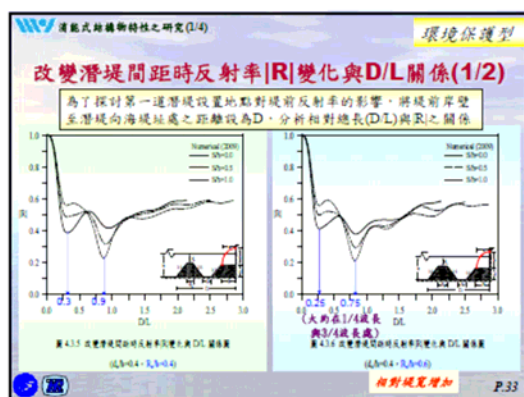
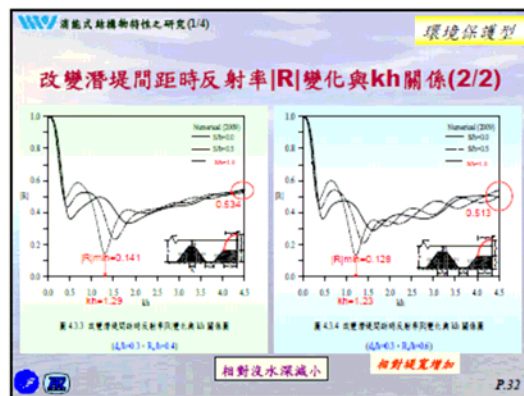
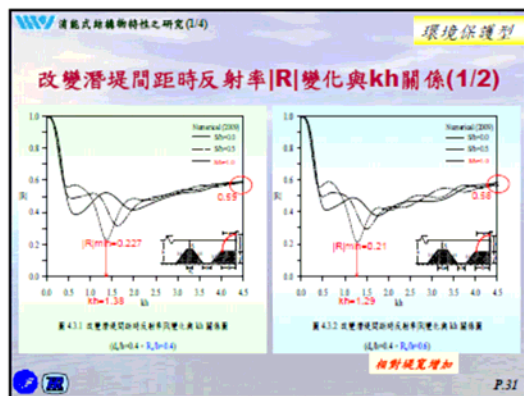
- (1) 孔隙板半徑a與水深h比為0.764 (a/h=0.764)
- (2) 直立堤前透水潛堤高d與水深比為0.5 (d/h=0.5)
- (3) 邊坡之坡度固定為1:1

■ 變數

- (1) 堤頂沒水深dc
- (2) 堤頂寬Rc
- (3) 堤前兩潛堤間之距離S

探討兩潛堤在間距S改變下，反射率|R|變化與kh之關係

P.30



簡報完畢

敬請指正

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(1/4)

(MOTC-IOT-98-H2DB004)

期末報告

林昭主、岳景雲、翁文凱、楊國誠

國立臺灣海洋大學 河海工程學系

98年11月16日

消能式結構物特性之研究(1/4)

摘要

- 本計畫為四年期研究計畫之第一年，其目標在於探討並發展符合臺灣各區域環境需求之消能式結構物，包括**長波抗浪型**、**內建斜坡式消能型**及**環境保護型**，以及**環境保護型**等三大類型。
- 透過**水工模型試驗**及**數值模擬**方式探討及研發新型消能式結構物以替代傳統式海岸結構物，以期能達成海岸空間環境需求且具保安功能之目的。
- 在第一年的研究工作裡
 - 長波抗浪型結構物**：設計一**內建斜坡式消能結構物**，藉由**水工模型試驗**，及引進**FLOW-3D**進行**數值模擬**，研究如何利用水力阻尼削減長週期波動能量。結果顯示內建斜坡式消能結構物可以有效削減入射波能，但消波室內的排水問題必須解決。
 - 內建斜坡式消能型**：藉由**新型消能式結構物**的**數值模擬**與**水工模型試驗**以瞭解浮體下方所增加的蓋立量能除可增加浮體的附加質量，改變其運動型式外，也改變運動的週期。
 - 環境保護型**：藉由一由潛堤與消波式圓弧形岸壁構成的**潛式多孔消波式結構物**對波浪水理特性影響的**數值模擬**以及部分的水工模型試驗。該潛式多孔消波式結構物除具備應有的消波功能外，也可促使波浪在堤身上擾動及碎波，應可增加氣水的交換並進而提高水中的含氧量，有利於近岸水生生態復育。

P.2

消能式結構物特性之研究(1/4)

計畫主要目標及研究內容

長波抗浪型 材料水力阻尼 消波式結構物	功能目的使用型/臨時性設施型 快速佈設柔性浮式結構物	環境保護型 潛式多孔消波式結構物
----------------------------------	--------------------------------------	----------------------------

水工模型試驗 + 數值模擬

消能式結構物特性之研究

取代傳統式

傳統保護港灣、海岸之重力式海岸結構物

P.3

消能式結構物特性之研究(1/4)

長波抗浪型 水力式阻尼結構

水力結構阻尼之特性研究初步構想

■ 利用港灣結構與波浪水流運動間之交互作用特性形成阻尼，以達消減長波能量的功能。

P.4

消能式結構物特性之研究(1/4)

長波抗浪型 水力式阻尼結構

內建斜坡式消能結構物之水工模型試驗

■ 各個模型以1/25比例縮尺，在海洋大學海洋工程綜合實驗館的小断面水槽(L50m×W1m)中進行試驗

- 迎波水深：37公分
- 迎波週期：分別為1.0、1.4、1.8及2.2秒
- 迎波波高：1至4公分
- 各迎波條件均重複試驗3次

■ 空水槽試驗：以瞭解斷面造成水槽的功能，以及為量測反射率而設置的波高計位置的適當性。

■ 方案一：為斜坡式消能結構物的基本構造。

■ 方案二：考慮將前方間孔部的比例減少50%。

■ 方案三：考慮消波室的排水問題，以方案二為基礎，在後方間孔排水。

P.5

消能式結構物特性之研究(1/4)

長波抗浪型 水力式阻尼結構

內建斜坡式消能結構物之水工模型試驗

方案一

方案二

方案三

P.6

