

95-43-7185
MOTC-IOT-94-H2DA004

臺灣地區鄰港海岸環境保護及 監測調查研究 (1/4)



交通部運輸研究所

中華民國 95 年 3 月

99-43-7185
MOTC-IOT-94-H2DA004

臺灣地區鄰港海岸環境保護及 監測調查研究 (1/4)

著 者：蔡立宏、何良勝、徐如娟

交通部運輸研究所

中華民國 95 年 3 月

臺灣地區鄰港海岸環境保護及監測調查研究.(1
/4)/ 蔡立宏, 何良勝, 徐如娟著.-- 初版.

-- 臺北市：交通部運研所, 民 95

面：公分

ISBN 986-00-4810-X (平裝)

1. 海岸工程 2. 海岸

443.3

95005926

臺灣地區鄰港海岸環境保護及監測調查研究(1/4)

著者：蔡立宏、何良勝、徐如娟

出版機關：交通部運輸研究所

地址：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 95 年 3 月

印刷者：大興國際科技有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 130 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：500 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：臺北市八德路 3 段 10 號 B1•電話：(02)25781515

五南文化廣場：臺中市中山路 2 號 B1•電話：(04)22260330

GPN：1009500750

ISBN：986-00-4810-X (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

95

臺灣地區鄰港海岸環境保護及監測調查研究
(1/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1009500750

定價 500 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：臺灣國內商港海域海氣象觀測分析研究(1/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-00-4810-X（平裝）	政府出版品統一編號 1009500750	運輸研究所出版品編號 95-43-7185	計畫編號 94-H2DA004
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：蔡立宏 參與研究人員：何良勝、徐如娟、江玟德、羅建明、陳明宗、許泰文、 黃清和、張憲國、陳建志、林綉美、林東廷、謝志敏、 溫志中、林柏廷、王順寬、張人懿 行政助理：張惠華 聯絡電話：04-26587177 傳真號碼：04-26571329			研究期間 自 94 年 01 月 至 94 年 12 月
關鍵詞：海氣象觀測、臺北港、安平港、海上觀測樁			
摘要： 為達到海岸環境之維護與永續利用的目標，在海岸保護及應用上，目前世界潮流均考慮海岸長期變遷，結構物建造考量親水及生態的觀念，亦即兼具保護海岸、民眾親水、生態復育、改善及創造生態環境之效果。符合以上條件的新工法，國內的研究及實際案例均處於初期發展階段。本研究根據臺灣目前的海岸環境，分析海岸結構物附近生態系間之關係性，探討符合上述功能之海岸保護措施。根據資料統計分析、理論推導、水工試驗以及數值模擬計算的結果，本研究提出國內生態型保護工法初期應以結構物附加生態機能為主，污染物在系列潛堤結構物前側的水平及垂直方向的擴散現象，不規則波通過系列潛堤布拉格反射帶寬更大，可以保護來襲的波浪週期條件更寬。本研究結果可提供爾後海岸工程規劃設計以及施政單位之參酌。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
95 年 3 月	244	500	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
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: Investigation of the Coastal Environments and Studying the Structures of Coastal Protection in Taiwan (1/4)			
ISBN(OR ISSN) ISBN986-00-4810-X (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009500750	IOT SERIAL NUMBER 95-43-7185	PROJECT NUMBER 94-H2DA004
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Tsai Li-hug PROJECT STAFF: Ho Liang-sheng , Hsu Ju-chuan , Jiang Wen-der, Lo Chien-ming, Chen ing-tzong, Hsu Tai-wen, Hwang Ching-her, Chang Hsien-kuo, Chen Chien-chih, Lin Po-chih, Wang Swun-kwang, Chang Jen-yi, Chang Hui-hua PHONE: 886-4-26587177 FAX: 886-4-26571329			PROJECT PERIOD FROM January 2005 TO December 2005
KEY WORDS: Coastal Structure, Coastal Environments, Ecologically Coastal Engineering			
ABSTRACT: In the past time, the primary objectives of traditional shore protective methods have been only to prevent the coastal disaster from erosions and further to protest its stability of coast. To achieve the goals of both environmental uphold and sustainability, nowadays people usually consider not only the safety level of coast but also its effect on promenade and ecology. The purpose of this study is to investigation the relationships between coastal structures and the environments. Experiments, both theoretical and numerical calculations were carried out respectively in this project. The topics included in the present research are as follows: 1. Investigate and discuss Taiwan's coastal ecological environment. 2. Study the influencing factors on the environments of coastal structures. 3. Develop proper shore protection methods and coastally ecological engineering methods. 4. Conduct on the appropriate coastal protection structures including the function of safety, promenade and ecology. 5. Study the phenomena of pollutant diffusion by a series of submerged breakwaters. 6. Research the Bragg scattering of irregular waves by ripple bed and artificial bar. The results can be provided as the references for the design of ecologically coastal engineering to protect the coastal environments.			
DATE OF PUBLICATION March2006	NUMBER OF PAGES 244	PRICE 500	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

摘 要.....	
目 錄.....	
表目錄.....	
圖目錄.....	
照片目錄.....	
第一章 緒論.....	1-1
1.1 前言.....	1-1
1.2 研究動機及目的.....	1-2
1.3 研究方法與步驟.....	1-3
1.4 本文組織.....	1-4
第二章 國內港灣環境現況.....	2-1
2.1 潮汐.....	2-1
2.2 海流與潮流.....	2-2
2.2.1 海流.....	2-2
2.2.2 潮流.....	2-4
2.3 波浪.....	2-6
2.4 海域水質.....	2-9
2.4.1 台灣海域水體分類.....	2-9
2.4.2 五大港水質.....	2-12
2.5 海岸地質.....	2-13

2.6 海洋生物資源之種類與分佈	2-15
2.6.1 海藻與海草	2-17
2.6.2 海洋無脊椎動物	2-20
2.7 地理環境與海域生態之特性	2-21
2.8 海域生態與自然條件之相關性	2-23
2.9 海岸開發利用對海域生態之衝擊	2-25
2.10 海岸結構物周邊生態環境	2-26
第三章 海岸保護工法發展	3-1
3.1 海岸侵蝕型態	3-1
3.2 海岸保護工法之型式與演進	3-2
3.3 海岸保護工法實行效果	3-15
3.3.1 海岸保護工法之屬性	3-16
3.3.2 海岸保護工法之優缺點	3-17
3.3.3 海岸保護工法之功能	3-19
3.4 開發案例	3-19
第四章 生態工法於海岸保護工程之應用	4-1
4.1 生態工法概述	4-1
4.1.1 生態工法之沿革	4-1
4.1.2 生態工法之精神	4-2
4.1.3 生態工法之基本考量	4-3
4.2 國內生態工法發展概況	4-4
4.2.1 生態工法之定義	4-5

4.2.2 生態工法之研究.....	4-5
4.2.3 生態工法之推動與成果.....	4-5
4.3 國內海岸生態工法研究概況	4-7
4.3.1 相關研究與文獻.....	4-7
4.3.2 研究概況.....	4-9
4.3.3 相關研討會	4-11
4.4 日本海岸生態工法研究概況	4-13
4.5 開發案例.....	4-19
4.5.1 國內案例.....	4-19
4.5.2 國外案例.....	4-27
第五章 生態型海岸保護工法研析.....	5-1
5.1 相關課題探討.....	5-1
5.2 生態型海岸保護工法之內涵	5-3
5.3 發展方向與型態.....	5-3
5.3.1 發展方向.....	5-3
5.3.2 發展型態.....	5-5
5.4 生態型海岸保護結構物之檢討流程	5-9
5.4.1 建設檢討流程	5-10
5.4.2 設計流程.....	5-10
5.5 生態型海岸保護結構物之斷面型式	5-13
5.5.1 附加生態機能之基本對策.....	5-13
5.5.2 生態型斷面構造型式	5-15

5.5.3 生態型斷面設計例.....	5-20
5.6 未來研發重點建議.....	5-22
第六章 波浪通過系列潛堤擴散水工模型試驗.....	6-1
6.1 試驗設備及儀器.....	6-1
6.2 試驗步驟及方法.....	6-4
6.2.1 儀器及試劑率定.....	6-4
6.2.2 試驗佈置.....	6-8
6.2.3 試驗條件.....	6-13
6.3 布拉格反射試驗結果.....	6-14
6.4 氯化鈉試液擴散試驗結果	6-15
第七章 系列潛堤之流場分佈與污染物擴散分析.....	7-1
7.1 NAVIER-STOKES EQUATIONS 數學模式	7-2
7.1.1 控制方程式	7-2
7.1.2 邊界條件.....	7-3
7.2 數值模式.....	7-5
7.2.1 網格變數計算點之配置.....	7-6
7.2.2 方程式之離散化.....	7-7
7.2.3 速度與壓力耦合技巧	7-11
7.2.4 自由表面的處理.....	7-15
7.2.5 濃度擴散處理	7-16
7.2.6 計算程序.....	7-16
7.3 模式驗證.....	7-17

7.4 結果與討論.....	7-23
7.4.1 波浪通過雙列潛堤之流場特性.....	7-23
7.4.2 波浪變形.....	7-25
7.4.3 流場變化.....	7-31
7.4.4 污染物擴散分析.....	7-37
第八章 不規則波通過系列潛堤之反射率.....	8-1
8.1 數值模式.....	8-1
8.1.1 控制方程式	8-1
8.1.2 能量消散係數	8-2
8.1.3 波譜分割與合成.....	8-8
8.2 反射係數公式.....	8-10
8.2.1 EEMSE 模式之反射係數	8-10
8.2.2 Miles 理論之不規則波反射係數.....	8-14
8.3 波譜的選擇.....	8-15
8.4 不規則波布拉格共振之研究	8-17
8.4.1 正弦沙漣底床反射係數之研究.....	8-17
8.4.2 系列潛堤反射係數之研究.....	8-23
第九章 結論與建議.....	9-1
6.1 結論.....	9-1
6.2 建議.....	9-2
參考文獻.....	10-1

表 目 錄

表 2-1	歷年商港外海示性波高、週期及波向統計表	2-7
表 2-2	台灣地區沿海海域範圍及海域分類	2-9
表 2-3	海域環境分類及海洋環境品質標準	2-11
表 2-4	台灣五大港不同季節水質變化表	2-12
表 2-5	大型現生海洋生物在全世界及台灣已記錄或約有之種類	2-16
表 2-6	台灣漁港消波塊上主要附著性海藻之生物特性及生態習性	2-28
表 2-7	台灣漁港主要附著性動物之生物特性及生態習性	2-30
表 2-8	台灣漁港主要底棲生物特性及生態習性	2-33
表 3-1	整合性海岸保護工法及其適用海岸	3-15
表 3-2	海岸保護工法控制因子及優缺點比較表	3-18
表 3-3	海岸防護措施之各種功能綜合比較表	3-19
表 4-1	國內近年來相關海岸生態工法研討會概況	4-12
表 4-2	日本自然調和型漁港推進事業迄 2002 年實施概況	4-30
表 4-3	日本藻場造成型示範漁港實施概要	4-31
表 6-1	系列潛堤試驗佈置及波浪條件表	6-13
表 7-1	控制方程式中各變數對應之擴散係數與源項關係	7-8
表 8-1	不同個數成份波之合成波誤差比較表	8-17
表 8-2	波浪通過正弦沙漣底床試驗條件	8-19
表 8-3	半餘弦人工潛堤底床試驗條件	8-24

圖 目 錄

圖 2-1	本省海岸潮差變化圖 (水利局, 1973).....	2-2
圖 2-2	台灣附近海流月份變化	2-3
圖 2-3	台灣附近海域各季海流分佈圖	2-4
圖 2-4	台灣沿海海域環境分類	2-10
圖 2-5	台灣沿岸及鄰近海域底質分佈圖	2-14
圖 2-6	台灣附近海域目前及過去所調查到海洋魚類之種數	2-22
圖 3-1	海岸保護工法演進示意圖	3-3
圖 3-2	海堤與護岸示意圖	3-4
圖 3-3	突堤形狀種類與攔砂示意圖	3-5
圖 3-4	離岸堤示意圖	3-6
圖 3-5	潛堤與人工潛礁示意圖	3-7
圖 3-6	岬頭形狀與設置方向	3-8
圖 3-7	魚尾型防波堤與保護海灘示意圖	3-9
圖 3-8	地工砂管應用於海岸保護	3-10
圖 3-9	重力排水示意圖	3-11
圖 3-10	日本波崎海岸透水材詳圖	3-11
圖 3-11	土砂側渡法示意圖	3-12
圖 3-12	花蓮海岸保護工程平面圖	3-22
圖 3-13	南濱離岸潛堤斷面圖	3-22
圖 3-14	天橋立迂迴供砂途徑	3-23
圖 3-15	片添浜海岸平面圖	3-24
圖 3-16	鹿島灘岬頭控制計畫平面圖	3-25

圖 4-1	海域生態性工法之分類	4-10
圖 4-2	大阪關西國際機場應用生態型消波塊例	4-14
圖 4-3	北海道福島漁港防波堤應用產卵礁例	4-15
圖 4-4	附加藻場機能海岸結構物	4-17
圖 4-5	附加海水交換機能海岸結構物	4-18
圖 4-6	安平港海岸整治工程配置及馬刺型突堤頭生態潛礁斷面圖	4-20
圖 4-7	烏石漁港南端防波堤增建工程	4-22
圖 4-8	富基漁港北防波堤延長工程平面及標準斷面圖	4-23
圖 4-9	後灣海岸環境及景觀改善計畫	4-24
圖 4-10	富來漁港藻場造成型防波堤成效追蹤調查	4-33
圖 5-1	融入生態觀念之工程概念關係圖	5-4
圖 5-2	生態型海岸保護工法發展型態	5-5
圖 5-3	北海道福島漁港兼具海水交換與生態機能之堤體斷面構造 ..	5-9
圖 5-4	生態型海岸保護結構物建設檢討流程	5-11
圖 5-5	生態型海岸保護結構物之設計流程 - 以藻場造成型為例	5-12
圖 5-6	生態型海岸保護結構物示意圖	5-13
圖 5-7	傳統海岸保護結構物附加生態機能之改善對策	5-14
圖 5-8	海岸結構物模仿周邊藻場環境示意圖	5-15
圖 5-9	改良基本斷面形狀之生態型海岸保護結構物 - 以藻場造成 型為例.....	5-17
圖 5-10	附加原有斷面構造生態機能之生態型海岸保護結構物 - 以 藻場造成型為例.....	5-18
圖 5-11	改良原有斷面構造部材之生態型海岸保護結構物 - 以藻場 造成型為例.....	5-19
圖 5-12	附加潛堤混成堤之海藻與海草可能生長部位	5-21

圖 5-13	附加潛堤混成堤之堤體與潛堤距離關係	5-22
圖 6-1	導電度值以及溶液體積關係圖($T = 25^{\circ}C$)	6-6
圖 6-2	莫耳濃度(M)與導電度值關係圖($T = 25^{\circ}C$)	6-6
圖 6-3	潛堤佈置、波高計佈置以及造波控制量測系統示意圖	6-9
圖 6-4	潛堤佈置、導電度計、蠕動幫浦以及資料擷取系統示意圖	6-10
圖 6-5	潛堤、波高計與導電度計佈置相關位置尺寸示意圖	6-11
圖 6-6	不同週期波浪通過系列潛堤反射率變化圖	6-14
圖 6-7	系列潛堤前方水平方向濃度比較圖	6-16
圖 6-8	系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖	6-16
圖 6-9	系列潛堤前方水平方向濃度比較圖	6-17
圖 6-10	系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖	6-17
圖 6-11	系列潛堤前方水平方向濃度比較圖	6-18
圖 6-12	系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖	6-18
圖 6-13	系列潛堤前方水平方向濃度比較圖	6-20
圖 6-14	系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖	6-20
圖 6-15	系列潛堤前方水平方向濃度比較圖	6-21
圖 6-16	系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖	6-21
圖 6-17	系列潛堤前方水平方向濃度比較圖	6-22
圖 6-18	系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖	6-22
圖 6-19	系列潛堤前方水平方向不同時段濃度比較圖(0.5M)	6-23
圖 6-20	系列潛堤前方垂直水深方向不同時段濃度比較圖(0.5M)	6-24
圖 6-21	系列潛堤前方水平方向不同時段濃度比較圖 (1.0M)	6-24
圖 6-22	系列潛堤前方垂直水深方向不同時段濃度比較圖 (1.0M)	6-25
圖 6-23	不同鹽水濃度之水平方向濃度比較圖 ($t=101\sim 200\text{sec}$) ...	6-26

圖 6-24	不同鹽水濃度之水平方向濃度比較圖 ($t=201\sim300\text{sec}$)	... 6-26
圖 6-25	不同鹽水濃度之水平方向濃度比較圖 ($t=301\sim400\text{sec}$)	... 6-27
圖 6-26	不同鹽水濃度之垂直水深方向濃度比較圖 ($t=101\sim200\text{sec}$)	 6-27
圖 6-27	不同鹽水濃度之垂直水深方向濃度比較圖 ($t=201\sim300\text{sec}$)	 6-28
圖 6-28	不同鹽水濃度之垂直水深方向濃度比較圖 ($t=301\sim400\text{sec}$)	 6-28
圖 7-1	交錯網格系統	 7-7
圖 7-2	控制體及通量示意圖	 7-7
圖 7-3	計算自由表面網格之壓力時所用到之變數定義	 7-15
圖 7-4	實驗量測之液面變化	 7-18
圖 7-5	實驗量測和數值模擬之流場圖	 7-20
圖 7-6	波浪通過潛堤自由液面振幅之空間變化	 7-21
圖 7-7	波浪通過潛堤不同位置之波形變化	 7-22
圖 7-8	數值計算與實驗量測之流速時序列結果比較	 7-23
圖 7-9	波浪和雙列潛堤作用的示意圖	 7-24
圖 7-10	波浪通過潛堤在不同位相之空間波形變化	 7-27
圖 7-11	波浪通過潛堤主頻至三倍頻無因次波浪振幅空間變化圖	.. 7-28
圖 7-12	不同間下波浪通過潛堤之反射率與透設率	 7-31
圖 7-13	波浪通過雙列潛堤之流場變化圖	 7-34
圖 7-14	波浪通過雙列潛堤之流場變化圖	 7-35
圖 7-15	波浪通過 4 列潛堤之流場變化圖	 7-36
圖 7-16	波浪通過 4 列潛堤之流線變化圖	 7-36
圖 7-17	鹽水佈放位置	 7-37

圖 7-18	波浪通過 4 列潛堤之不同時間下濃度變化圖	7-38
圖 8-1	入射波與反射波座標示意圖	8-11
圖 8-2	混合波譜分割示意圖	8-16
圖 8-3	正弦沙漣底床地形示意圖	8-19
圖 8-4	波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D1)	8-20
圖 8-5	波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D2)	8-20
圖 8-6	波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D3)	8-21
圖 8-7	不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D1)	8-21
圖 8-8	不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D2)	8-22
圖 8-9	不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D3)	8-22
圖 8-10	半餘弦人工潛堤底床地形示意圖	8-25
圖 8-11	不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖 (配置 K1).....	8-26
圖 8-12	不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖 (配置 K2).....	8-26

照片目錄

照片 2-1	東北部海岸地形及代表性海藻	2-18
照片 2-2	南部及東南部海岸地形及代表性海藻	2-18
照片 2-3	西南部海岸地形及代表性海藻	2-19
照片 3-1	海堤例.....	3-4
照片 3-2	護岸例.....	3-4
照片 3-3	突堤例.....	3-5
照片 3-4	旗津海岸突堤群	3-5
照片 3-5	離岸堤例.....	3-6
照片 3-6	日本皆生海岸離岸堤群	3-6
照片 3-7	日本鐘崎海岸人工潛礁	3-7
照片 3-8	日本新潟海岸人工潛礁	3-7
照片 3-9	日本白浜海岸人工岬灣	3-8
照片 3-10	英國 Morecambe 海岸魚尾型防波堤	3-9
照片 3-11	澳洲飛魚岬海岸地工砂管	3-10
照片 3-12	德國 Isle of Sylt 海岸地工砂管	3-10
照片 3-13	日本波崎海岸重力排水施工	3-11
照片 3-14	土砂側渡法施工情形	3-12
照片 3-15	安平海岸直接置砂法	3-12
照片 3-16	人工砂丘施工與設置例	3-13
照片 3-17	砂籬與植栽定砂例	3-14
照片 3-18	整合性海岸保護工法例	3-15
照片 3-19	茄萣海岸一	3-21

照片 3-20	茄萣海岸二	3-21
照片 3-21	離岸堤後民眾晨泳情形	3-21
照片 3-22	離岸堤海藻著生情形	3-21
照片 3-23	天橋立 1979 年鳥瞰	3-23
照片 3-24	天橋立 1990 年鳥瞰	3-23
照片 3-25	片添浜海岸拱橋連接之突堤	3-24
照片 3-36	片添浜海岸	3-24
照片 3-27	鹿島灘防治侵蝕實施前	3-25
照片 3-28	鹿島灘防治侵蝕實施後	3-25
照片 4-1	消波塊上之生態例	4-13
照片 4-2	表面凹凸處理之消波塊與方塊	4-14
照片 4-3	消波塊表面加設纖維網	4-15
照片 4-4	後灣海岸環境及景觀改善工程施工前後	4-26
照片 4-5	Gran Dominicus 海灘外之三列礁球潛堤.....	4-27
照片 4-6	Gran Dominicus 海灘設立礁球潛堤前後之比較.....	4-27
照片 4-7	慶野松原海岸之生態型人工潛礁	4-28
照片 5-1	生態資源豐富之潮間帶	5-7
照片 5-2	人工潮池之施工與設置	5-7
照片 5-3	安平港海岸整治工程之人工潮池與潮間帶	5-8
照片 5-4	石川縣富來漁港具海水交換機能之透水堤	5-9
照片 5-5	烏石與富基漁港設計採用之生態型方塊	5-23
照片 5-6	日本開發之生態型消波塊與方塊例	5-24
照片 6-1	蠕動泵浦及導電度計轉換器等試驗設備	6-3
照片 6-2	導電度計資料擷取系統	6-3

照片 6-3	導電度計試驗水槽內率定情形	6-7
照片 6-4	導電度計化學試驗室率定情形	6-7
照片 6-5	試驗水槽內系列潛堤佈置情形	6-12
照片 6-6	試驗水槽內導電度計佈置情形	6-12

第一章 緒 論

1.1 前言

60 年代以來，台灣在經濟優先的導向下，工商農漁業積極發展，呈現目前台灣繁榮的景象。過去在發展過程中，由於學理的認知、技術的受限、考慮層面以及公共道德心的缺乏，導致許多的建設在缺乏各方面的完整考量以及短視近利下完成。這些建設工程雖然短期間能達成建造的目的，但長期以來，卻衍生許多的問題。台灣四周環海，在防災以及經濟發展的需求下，40 年來，積極建設海岸工程以及港灣工程，近年來由於海岸過度開發、河川輸沙減少以及全球氣候的異常，且隨著環保意識的高漲與海洋環境問題之愈受重視，目前的海岸港灣建設有許多已不合時宜。綜觀目前的海岸問題，如：海岸的侵蝕淤積、沿海地層下陷、海水污染與生態景觀破壞等，海岸災害發生的頻率與日俱增。

早期保護工以海岸港灣安全為主要考量，傳統海岸保護工法如海堤、突堤、離岸堤、潛堤等，大多以防潮禦浪之防災功能為主，近年來由於世界潮流衝擊、國人環保意識高漲及海域休閒遊憩之興起，致使海岸保護工程之規劃，除滿足防災之功能外，逐漸朝向兼具生態、景觀等多功能目標。尤其海岸港灣工程建設時，往往造成藻場、漁場及濕地等海洋環境之破壞，對於自然環境、生態與景觀之影響較為忽視，未來海岸港灣保護結構物之規劃設計，除防災功能與結構安全考量外，須進一步融入景觀與生態理念，研擬合適之海岸保護工法，兼具復育、改善、創造生態環境之效果，以達到海岸港灣環境之維護與永續利用。

本計畫為四年期研究，本年(94)度(第一年)主要蒐集國內外海岸保護工法之相關案例與文獻，分析具景觀、生態、港灣環境的工法於海岸保護及港灣工程之應用情形，並檢討國內海岸港灣生態環境，研擬

本土化生態型海岸保護工法之發展方向、結構物型式及調查計畫。另外針對具景觀、生態、親水及防災的柔性工法系列潛堤，研究其防災效果及對海洋環境的影響，期由研究成果提供後續研究、施政及海岸港灣保護工程設計之參酌。

1.2 研究動機及目的

傳統海岸結構物的設計，大多以保護陸地或經濟開發為主，海堤的興建雖然防止浪潮的入侵，但同時也扼阻了人們與海洋的接觸機會，忽略了自然生態、景觀和人類親近水邊的權利。近年來海岸區自然化的觀念在歐美及日本等先進國家已被廣泛採納，在保護海岸的同時，並利用海洋及海岸天然資源做為生態保育及休閒遊憩的地方。例如法國的海岸開發政策是以生態和景觀休閒利用為第一優先，產業活動反而居次。日本近年來在海岸港灣開發時，非常注重結構物與海域生態環境的諧和性，對海岸的防災大部份都以“面”的保護工法取代了“線”保護工法，亦即利用離岸堤、突堤、潛堤等保障岸前沙灘，再配合生態工法，使兼具防災、親水與生態的功能，並創造優良的整體生存環境。近年來由於國民所得大增及受世界潮流衝擊，國人環保意識高漲且對遊憩休閒設施需求逐漸殷切，致使海岸空間利用規劃必須滿足更高之期望。因此海岸結構物之設置，從過去防止波浪侵蝕破壞，保護海岸地區生命財產安全的單純目的，轉變成包含防災、生態保育復育、景觀美化、遊憩行為並重等多功能的目標。在海岸防災、生態維護、景觀的調和及親水性功能成為設計上，為未來海岸保護設施時必要考慮的因素。

本研究目的主要在維護及改善台灣地區港灣及海岸環境的前提下，建立具防災和生態型海岸保護工法之發展方向與工程應用技術，以提昇國內海岸保護和生態工法之研究技術水準，促進海岸保護工程建設與自然環境之共生共榮，並期本研究成果能提供學術、施政、設計及施工相關單位之參酌。

1.3 研究方法與步驟

本研究以國內港灣及海岸為研究對象，探討適合海岸及港灣生態環境之保護結構物，在安全維護的前提下，改善對自然環境造成之破壞與生態影響。研究期間蒐集調查國內外相關基本資料，分析海岸保護工法之相關案例與實行效果、生態工法於海岸保護及港灣工程之應用、國內海岸生態與環境關係等，研擬本土化生態型海岸保護工法之發展方向、類型及結構物型式，並探討新式柔性工法—系列潛堤的水理機制，俾供後續相關研究之參考。研究相關工作內容簡述如下：

1.基本資料蒐集

蒐集國內外海岸保護工法 國內海岸港灣生態環境以及國內外海岸港灣生態工法等相關案例與文獻，資料來源包括專書、研究報告、期刊、論文及網站資訊等，並整理歸納相關海岸保護工法、海岸港灣生態環境、海岸港灣生態工法等特性。

2.保護工法發展分析

參考國內外海岸保護工法之發展情形，歸納分析國內外海岸保護工法之類別、適用性及演進，建立相關實施案例及最新發展趨勢，並檢討各項海岸保護工法之機能，分析工程與海岸環境間之相容性，對海岸生態之貢獻與影響。

3.國內海岸生態環境分析

依據所蒐集國內海岸生態環境相關資料，歸納分析海岸生態與環境間之關係。包括海岸環境分析(水質、底質、海流、潮汐等)、海岸生態分析(附著性生物海藻、動物、魚類、底棲生物等)以及海岸生態與環境關係分析。

4.生態工法於海岸保護及港灣工程之應用分析

參考國內外生態工法於海岸及港灣工程之應用情形,分析海岸港灣生態工法之特性,探討其實行效果。包括各式生態工法沿革、精神及基本考量。

5.生態型海岸保護工法研擬

依據國內外海岸保護工法 生態工法等發展分析及國內海岸生態環境特性,加以整合並研擬適合本土化生態型海岸保護工法之發展方向、結構物型式及調查計畫,俾供未來後續相關研究之參考。

6.探討系列潛堤保護工法保護效果

在不同系列潛堤佈置下,利用更符合實際的不規則波為入射波條件,探討波浪通過於堤前發生布拉格反射的效果。並分析不同波浪條件下,堤前反射率分布以及探討海岸保護效果。

7.探討系列潛堤海岸環境保護效果

分別利用水工模型試驗以及數值模擬計算方式,分析波浪通過系列潛堤時,堤前污染物擴散的情形,探討利用系列潛堤堤前水體交換情形

1.4 本文組織

本研究共分為九章,第一章為緒論,說明本文之研究背景、動機、目的及方法;第二章說明國內港灣及海岸生態環境,包括海象、海域水質、海岸地質、海岸生態等,並分析海岸生態與環境之關係;第三章歸納分析海岸保護工法之類別、演進及實行效果,並以實例說明;第四章探討國內生態工法發展概況、生態工法應用於海岸保護工程與港灣工程之情形,並以實例說明;第五章研擬國內生態型海岸保護工法之發展方向與型態,生態型海岸保護結構物之斷面型式等;第六章探討新式工法系列潛堤波浪通過時堤前污染源擴散水工模型試驗;第七章探討波浪通過系列潛堤水體交換機制;第八章探討不規則波通過系列潛堤海岸保護之效果;第九章為結論與建議。

第二章 國內港灣環境現況

台灣四面環海，海岸生態資源豐富，並與沿岸地理環境特性及海氣象條件息息相關，本章就國內海岸環境、海岸生態以及海岸生態與環境間之相關性說明如后。

2.1 潮汐

潮汐乃太陰與太陽之引力引起之海水面緩慢升降現象，亦即海洋水體受天文引力驅動之長週期波動，在近岸呈現水位規律之升降及潮流往復之運動，屬於淺水波運動。潮汐水位變化通常於一日之內有兩次升降現象，平均週期為 12 小時 25 分，或受海底地形等因素影響亦有一日僅一次之升降，週期為 24 小時 50 分。每次潮位漲退中，水位最高時稱為高潮或滿潮(high tide)，最低時稱為低潮或乾潮(low tide)，二相鄰高潮與低潮之海面高差稱為潮差(tide range)。每日有一高潮與低潮者稱為一日一回潮，每日有兩次高、低潮者稱為一日二回潮。一日二回潮中每二次之高低潮位不相等之現象稱為日潮不等(diurnal inequality)，二次高潮中水位較高者稱為高高潮(higher high tide)，次高者稱為低高潮(lower high tide)，低潮中水位較低者稱為低低潮(lower low tide)，較高者稱為高低潮(higher low tide)。高高潮至次一高高潮之時間變化，每日遲延約 50 分，高高潮至低高潮之時間間隔亦每日不同，每半年高低潮發生時刻正好易位。

天體與地球之相對位置不同時起潮力亦異，當地球與太陽及月球在同一直線時起潮力最大，因此潮差最大，故新月(朔)或滿月(望)時潮差大，此段時間之潮汐稱為大潮(spring tide)；如自地球視之，太陽與月球成直角時起潮力彼此抵消，故在上弦或下弦時潮差較小，此段時間之潮汐稱為小潮(neep tide)。但實際之海面因有慣性力及摩擦力之影響，朔望之後 1~3 日潮差最大稱為大潮差，而上下弦後 1~3 日潮差

最小稱為小潮差。台灣以峽溝狀之台灣海峽與大陸間隔，潮波自太平洋向亞洲大陸沿海傳播時，因地形影響而自台灣海峽南北開口進入，並於海峽中部交會，形成潮汐有不同之漲落。漲潮時潮波進入台灣海峽並因海峽寬度束縮而壅昇，退潮時反向自南、北開口流出，形成台灣中西部海岸之潮差高於南、北兩端之現象。故台灣沿岸以西岸中部潮差較大，並於通霄附近最大，最大潮差達 5.90m，潮差向台灣海峽南北兩端遞減至約 2.0m，東岸潮差則較小約 1.5~3.0m。

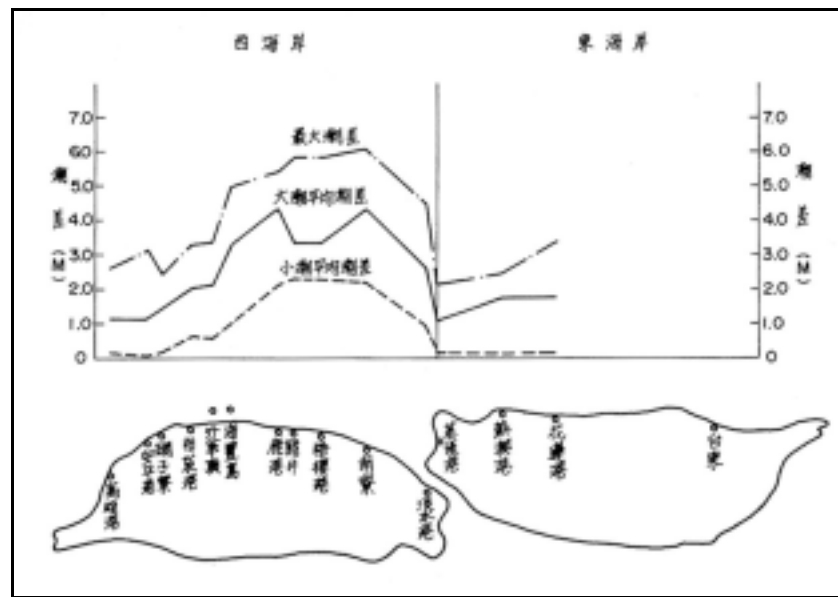


圖 2-1 本省海岸潮差變化圖 (水利局，1973)

2.2 海流與潮流

2.2.1 海流

海洋中存在著各種不同規模之水流，其中規模最大有如海洋中之河川，長期不變以一定方向及速度流動者為海流。影響台灣附近之海流主要有黑潮、中國沿岸流及南海季風流等，其受季節影響很大。圖 2-2、圖 2-3 為台灣附近一、四、七、十各月及各季之海流略圖，可見其季節變化情形。

台灣附近海流以黑潮最為重要，發源於菲律賓北部海面，其主流

由台灣東岸北上，支流經巴士海峽流入中國南海，作反時鐘向之環流，部份則沿台灣海峽北上流入東海與黑潮之主流相會合，流速3~5節、寬約30海浬(55.6公里)，對台灣及日本沿海水產影響最深切。黑潮支流受季節風影響甚大，冬季為東北季風所阻，部份流入中國南海，夏季受西南季風之推送，大部份流入台灣海峽。

中國沿岸流發源於中國北部沿海，冬季受東北季風之推送，勢力增強而沿中國海岸南下，經台灣海峽入中國南海。夏季受西南季風阻礙，影響約僅至長江口。

南海季風流在冬季因有黑潮支流及中國沿岸流流入，呈反時鐘向環流；夏季西南季風盛行，流向轉變，以東北向為主進入台灣海峽。

(摘自：海軍海道測量局，1962)

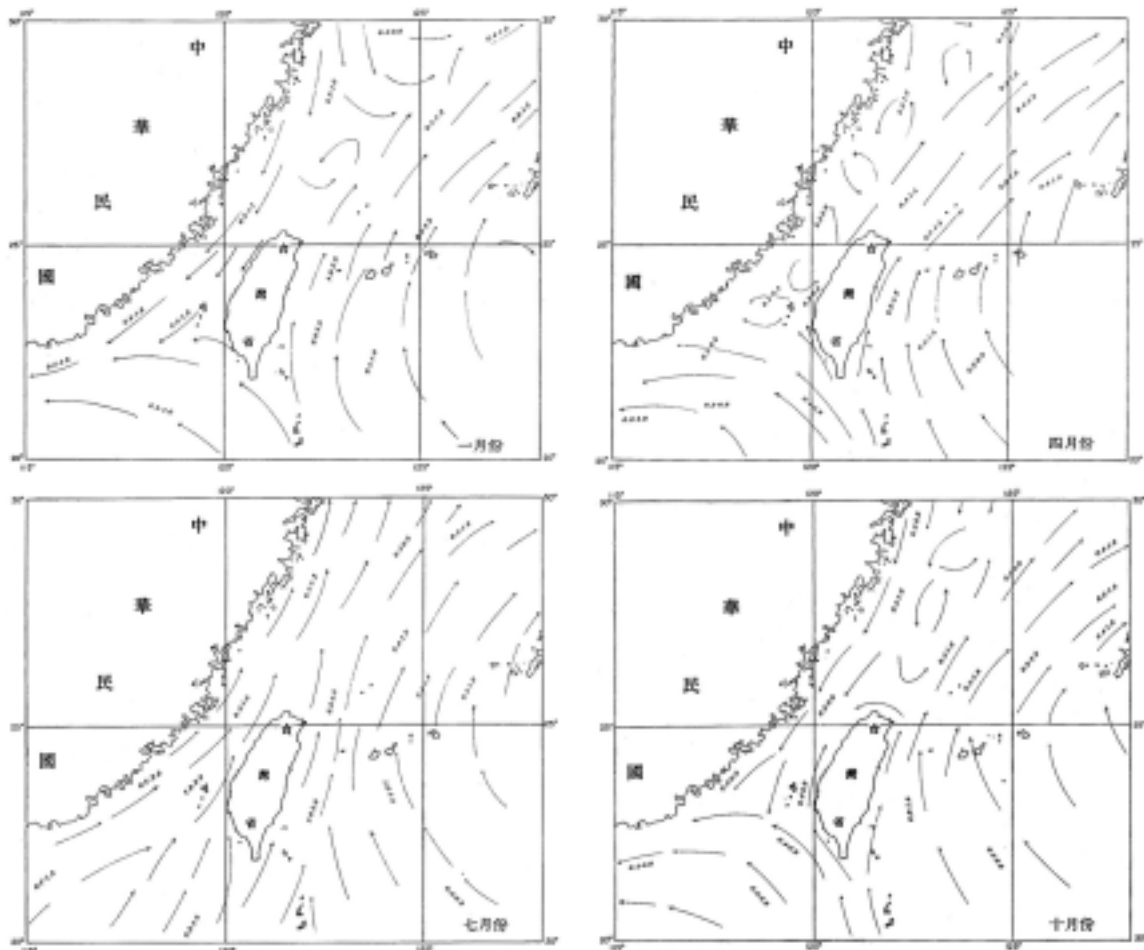


圖 2-2 台灣附近海流月份變化

(摘自：國家海洋科學研究中心海洋資料庫 <http://www.ncor.ntu.edu.tw/ODBS/adcp/>)

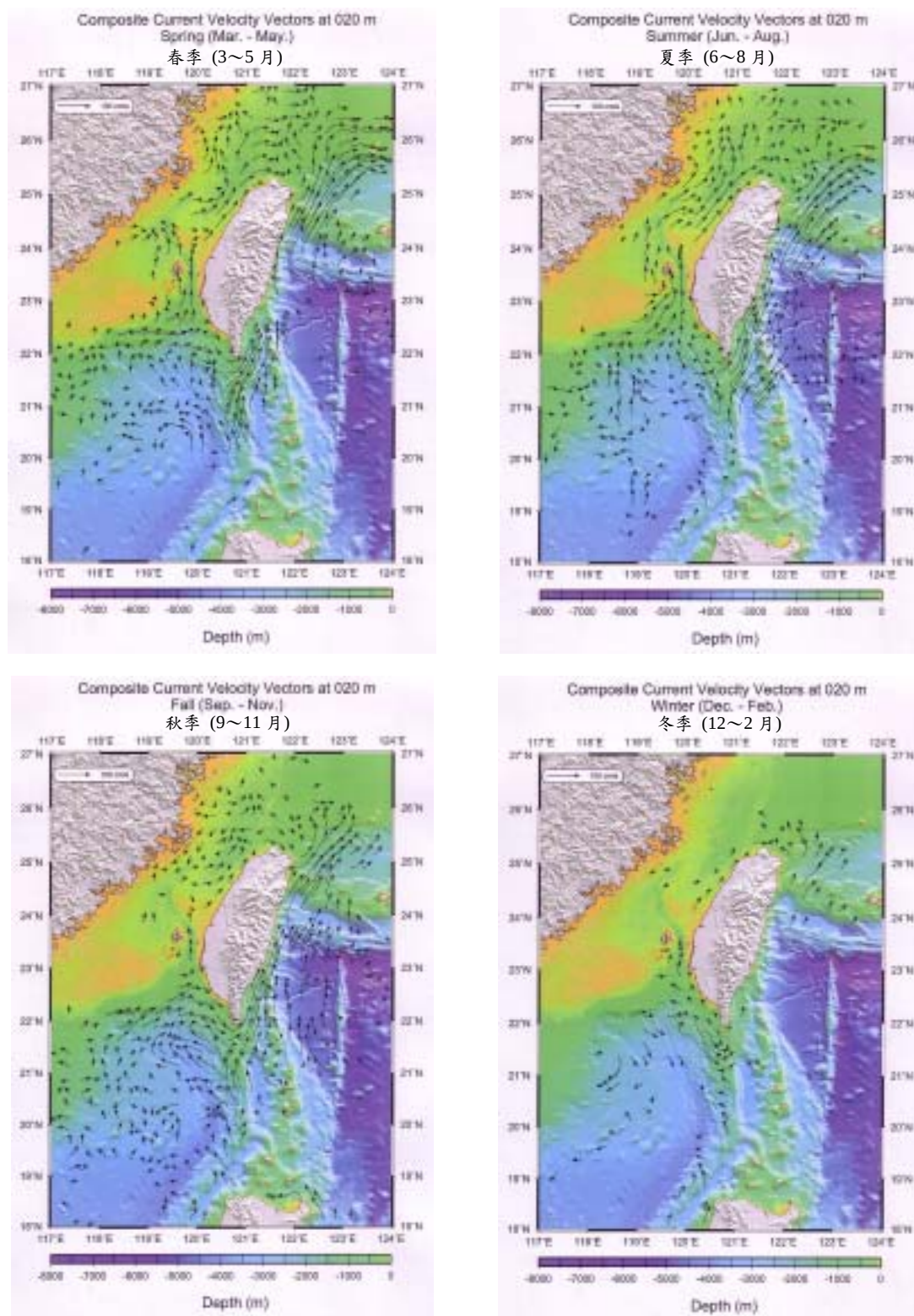


圖 2-3 台灣附近海域各季海流分佈圖

2.2.2 潮流

海洋中因潮位升降而發生之流動稱為潮流，潮流既因潮汐而生，故與潮汐同具週期性之變化，潮流可視為各種週期性分潮潮流之合成，海面潮流多與海流互相匯合。根據海軍海道測量局(1962)發行之潮流圖，台灣本島西岸之北段漲潮潮流向南，西岸南段漲潮潮流向北，兩者之會合區約在北緯 24 度 20 分。在台灣東岸北緯 24 度 30 分以南之潮流較弱且不規則，北緯 24 度 30 分以北之潮流較強，漲潮時向北。在台灣北端，漲潮時之強烈潮流向西，退潮時反之。各地海岸漲退潮概況如下：

台灣北端富貴角至三貂角一帶之潮流退潮時向東及漲潮時向西，其速率最大約 4 節，向東潮流約開始於高潮後 2 小時，向西潮流約開始於低潮後 2 小時。西北部一帶，淡水至白沙岬間之漲潮潮流向西南，退潮潮流沿岸向東北，離岸約 4 哩處其向西南潮流之速率可達 1 至 2 節，向東北潮流之速率可達 3 至 4 節；白沙岬以南之潮流逐漸減弱，由於向北之洋流較強，使向南之漲潮潮流僅限制於近岸區，並消失於後龍一帶，此一區域之潮流因受季節及氣候之影響甚大，故較不規則且欠穩定。中部大安至海口一帶之潮流甚強，大安附近之漲潮潮流向北，退潮潮流向南，夏季因向北之洋流佔優勢，因此其潮流均為向北，最大速率在漲潮時為 2 節，退潮時 1 節；塗葛堀外有向北之潮流，但無顯著之向南潮流；鹿港外海之向南潮流可察覺，惟其速率僅有向北潮流之半。嘉義塭港及布袋之漲潮潮流向北，最大速率約 3.5 節。西南部國聖港至鵝鑾鼻沿岸一帶之潮流通常漲潮向西北，退潮向東南，向西北之潮流因受向北洋流影響保持之時間較長，流速亦較強，該流約在高潮後 1 小時減弱。東部蘇澳至台東沿海一帶之潮流漲潮時向東北，退潮時向西南，因黑潮影響，使向東北之潮流加速，向西南之潮流減速。

2.3 波浪

台灣位於東亞大陸棚上，東海岸面臨太平洋，西海岸除南端外，均為比降甚緩之淺灘海岸，隔台灣海峽與大陸相望，各海岸波浪因地理條件不同而異。依據交通部運輸研究所歷年(1999~2002)於各商港外海實測波浪分析結果如表 2-1 所示。

北部之基隆港全年波浪統計結果，84.4%波高小於 2.0 公尺，其中 57.0%波高集中於 1.0 公尺以下；97.0%週期小於 8 秒，其中 49.6%週期介於 6~8 秒，47.4%週期小於 6 秒；79.1%波向為 NNE~ESE，9.6%波向為 SSW~WNW。

南部之安平港全年波浪統計結果，97.7%波高小於 2.0 公尺，其中 89.6%波高集中於 1.0 公尺以下；98.4%週期小於 8 秒，其中 83.1%週期小於 6 秒，15.3%週期介於 6~8 秒；49.8%波向為 SSW~WNW，12.4%波向為 NNE~ESE。高雄港全年波浪統計結果，96.0%波高小於 2.0 公尺，其中 81.9%波高集中於 1.0 公尺以下；96.4%週期小於 8 秒，其中 61.6%週期小於 6 秒，34.8%週期介於 6~8 秒；49.1%波向為 SSW~WNW，15.8%波向為 NNE~ESE。

東部之花蓮港全年波浪統計結果，87.5%波高小於 2.0 公尺，其中 53.7%波高集中於 1.0~2.0 公尺，33.8%波高小於 1.0 公尺；90.7%週期小於 8 秒，其中 73.4%週期介於 6~8 秒，17.3%週期小於 6 秒；70.4%波向為 NNE~ESE，0.4%波向為 SSW~WNW。蘇澳港全年波浪統計結果，86.5%波高小於 2.0 公尺，其中 44.9%波高小於 1.0 公尺，41.6%波高介於 1.0~2.0 公尺；97.1%週期小於 10 秒，其中 57.9%週期介於 6~8 秒，20.4%週期介於 8~10 秒，18.8%週期小於 6 秒；77.2%波向為 NNE~ESE，2.4%波向為 SSW~WNW。

表 2-1 歷年商港外海示性波高、週期及波向統計表

港別與項目	冬 季	春 季	夏 季	秋 季	全 年
一、基隆港					
H _{1/3} 平均值(米)	1.67	1.13	0.62	1.50	1.17
T _{1/3} 平均值(秒)	6.3	6.0	5.8	6.3	6.1
H _{1/3} 最大值/週期/波向	5.98/7.5/NE	4.92/9.6/E	6.78/6.6/ENE	11.35/5.5/N	11.35/5.5/N
H _{1/3} 小於 1 米(%)	28.7	58.5	89.6	36.5	57.0
H _{1/3} 介於 1~2 米(%)	38.8	29.3	9.4	39.4	27.4
H _{1/3} 大於 2 米(%)	32.6	12.2	1.0	24.1	15.6
波向 NNE~ESE	96.7	98.8	57.7	78.4	79.1
波向 SSW~WNW	0	0	30.1	1.8	9.6
T _{1/3} 小於 6 秒(%)	32.2	54.1	60.6	35.9	47.4
T _{1/3} 介於 6~8 秒(%)	64.0	43.7	36.5	60.6	49.6
T _{1/3} 介於 8~10 秒(%)	3.8	2.1	2.8	3.4	3.0
T _{1/3} 大於 10 秒(%)	0	0	0.1	0.1	0.1
二、台北港					
H _{1/3} 平均值(米)	1.60	0.82	0.55	1.23	-
T _{1/3} 平均值(秒)	6.9	5.7	5.3	6.2	-
H _{1/3} 最大值/週期/波向	5.03/9.3/N	4.16/9.5/N	2.67/8.2/NNW	6.54/9.1/N	-
H _{1/3} 小於 1 米(%)	22.7	72.1	90.8	48.1	-
H _{1/3} 介於 1~2 米(%)	49.7	24.6	8.8	34.5	-
H _{1/3} 大於 2 米(%)	27.5	3.3	0.3	17.4	-
波向 NNE~ESE	21.2	27.1	16.3	23.9	-
波向 SSW~WNW	1.0	6.3	26.7	3.7	-
T _{1/3} 小於 6 秒(%)	20.1	56.7	75.2	49.5	-
T _{1/3} 介於 6~8 秒(%)	61.9	39.9	21.3	38.6	-
T _{1/3} 介於 8~10 秒(%)	17.9	3.4	3.1	10.1	-
T _{1/3} 大於 10 秒(%)	0.1	0	0.4	1.7	-
三、安平港					
H _{1/3} 平均值(米)	0.45	0.38	0.91	0.58	0.59
T _{1/3} 平均值(秒)	5.3	4.9	5.8	5.2	5.2
H _{1/3} 最大值/週期/波向	1.24/4.0/NW	2.34/6.9/SW	6.99/4.1/WSW	2.73/9.1/SW	6.99/4.1/WSW
H _{1/3} 小於 1 米(%)	99.7	98.1	71.9	90.1	89.6
H _{1/3} 介於 1~2 米(%)	0.3	1.8	20.1	9.0	8.1
H _{1/3} 大於 2 米(%)	0	0	8.0	0.9	2.3
波向 NNE~ESE	18.9	17.6	1.7	1.1	12.4
波向 SSW~WNW	34.6	40.8	71.5	58.9	49.8
T _{1/3} 小於 6 秒(%)	88.0	91.1	61.2	85.9	83.1
T _{1/3} 介於 6~8 秒(%)	12.0	8.9	34.0	12.9	15.3
T _{1/3} 介於 8~10 秒(%)	0	0	4.6	1.2	1.5
T _{1/3} 大於 10 秒(%)	0	0	0.2	0	0

資料來源：「2002 年臺灣海氣地象觀測資料年報(波浪部份)」，交通部運輸研究所，92 年 12 月。

表 2-1(續) 歷年商港外海示性波高、週期及波向統計表

港別與項目	冬 季	春 季	夏 季	秋 季	全 年
四、高雄港					
H _{1/3} 平均值(米)	0.58	0.38	0.95	0.67	0.70
T _{1/3} 平均值(秒)	5.7	5.4	6.5	5.7	5.9
H _{1/3} 最大值/週期/波向	1.30/4.3/N	2.23/5.0/S	7.95/7.8/WSW	3.77/5.3/SE	7.95/7.8/WSW
H _{1/3} 小於 1 米(%)	97.3	96.5	66.4	83.3	81.9
H _{1/3} 介於 1~2 米(%)	2.7	3.3	24.8	14.1	14.1
H _{1/3} 大於 2 米(%)	0	0.2	8.8	2.6	4.0
波向 NNE~ESE	0	9.5	23.9	17.9	15.8
波向 SSW~WNW	59.5	39.6	59.3	38.7	49.1
T _{1/3} 小於 6 秒(%)	72.3	85.7	34.2	72.8	61.6
T _{1/3} 介於 6~8 秒(%)	27.7	14.3	55.9	27.1	34.8
T _{1/3} 介於 8~10 秒(%)	0.1	0	9.9	0.1	3.6
T _{1/3} 大於 10 秒(%)	0	0	0	0	0
五、花蓮港					
H _{1/3} 平均值(米)	1.58	1.24	1.09	1.27	1.32
T _{1/3} 平均值(秒)	6.9	6.7	6.6	6.8	6.8
H _{1/3} 最大值/週期/波向	3.43/7.6/E	3.33/8.6/E	8.48/13.5/E	6.07/8.3/ESE	8.48/13.5/E
H _{1/3} 小於 1 米(%)	10.2	36.0	67.2	33.9	33.8
H _{1/3} 介於 1~2 米(%)	71.3	56.4	19.5	55.7	53.7
H _{1/3} 大於 2 米(%)	18.5	7.6	13.3	10.4	12.5
波向 NNE~ESE	78.1	57.0	46.6	87.9	70.4
波向 SSW~WNW	1.8	0	0.2	0.1	0.4
T _{1/3} 小於 6 秒(%)	6.9	18.0	35.0	16.0	17.3
T _{1/3} 介於 6~8 秒(%)	83.8	72.2	54.2	76.1	73.4
T _{1/3} 介於 8~10 秒(%)	9.3	8.6	7.2	7.6	8.2
T _{1/3} 大於 10 秒(%)	0	1.3	3.6	0.4	1.0
六、蘇澳港					
H _{1/3} 平均值(米)	1.76	1.18	1.16	1.23	1.31
T _{1/3} 平均值(秒)	7.6	6.9	7.0	7.2	7.2
H _{1/3} 最大值/週期/波向	4.45/9.4/E	6.14/12.2/E	99.98/9.5/E	4.65/9.5/ENE	99.98/9.5/E
H _{1/3} 小於 1 米(%)	13.0	43.5	71.6	43.1	44.9
H _{1/3} 介於 1~2 米(%)	55.8	47.3	23.5	44.5	41.6
H _{1/3} 大於 2 米(%)	31.2	9.2	4.5	12.3	13.4
波向 NNE~ESE	0	0	60.7	85.1	77.2
波向 SSW~WNW	0	0	4.2	1.5	2.4
T _{1/3} 小於 6 秒(%)	4.4	21.2	33.0	13.2	18.8
T _{1/3} 介於 6~8 秒(%)	62.5	60.0	47.9	63.2	57.9
T _{1/3} 介於 8~10 秒(%)	32.5	17.8	13.4	20.4	20.4
T _{1/3} 大於 10 秒(%)	0.6	1.1	5.4	3.2	2.8

資料來源：「2002 年港灣海氣地象觀測資料年報(波浪部份)」，交通部運輸研究所，92 年 12 月。

2.4 海域水質

2.4.1 台灣海域水體分類

台灣地區沿海海域範圍、水體分類及水質標準，乃依據行政院環境保護署 90 年 12 月 26 日(90)環署水字第 0081750 號公告之「海域環境分類及海洋環境品質標準」，將台灣本島及澎湖群島、蘭嶼、綠島等離島，由海岸向外延伸之領海範圍，依據海域之最佳用途、涵容能力及水質現況，訂定台灣地區沿海海域範圍及海域分類如表 2-2 及圖 2-4 所示。

表 2-2 台灣地區沿海海域範圍及海域分類

海 域 範 圍	水體分類
鼻頭角向澎佳嶼延伸至高屏溪口向琉球嶼延伸線間海域	甲
高屏溪口向琉球嶼延伸至曾文溪口向西延伸線間海域	乙
曾文溪口向西延伸線至王功漁港向西延伸線間海域	甲
王功漁港向西延伸線至鼻頭角向澎佳嶼延伸線間海域	乙
澎湖群島海域	甲
備註：在上列之一海域水體內之河川、區域排水出海口或廢水管線排放口出口半徑二公里之範圍內之水體得列為次一級之水體。	

依據上述標準將海域環境分為甲、乙、丙三類，其中甲類適用於一級水產用水、二級水產用水、工業用水、游泳及環境保育，乙類適用於二級水產用水、工業用水及環境保育，丙類適用於環境保育。各類海域及保護人體健康之海洋環境品質標準，如表 2-3 所示。該標準第九條規定，海域環境經自淨後達到相關海洋環境品質標準時，即不得降低其海洋環境分類及相關環境標準值，中央主管機關得於每三年檢討修正現行海洋環境分類及海洋環境品質標準。



圖 2-4 台灣沿海海域環境分類

表 2-3 海域環境分類及海洋環境品質標準

基準 別	水質項目 ⁽¹⁾		標 準 值		
			甲類海域	乙類海域	丙類海域
海 域 環 境 品 質 標 準	pH 值		7.5~8.5	7.5~8.5	7.5~8.5
	溶氧量(DO)		≥ 5.0	≥ 5.0	≥ 2.0
	大腸桿菌群		≤ 1,000		
	生化需氧量(BOD)		≤ 2.0	≤ 3.0	≤ 6.0
	氨氮(NH ₃ -N)		0.3		
	總磷(TP)		0.05		
	氰化物		0.01	0.01	0.02
	酚類		0.01	0.01	0.01
	礦物性油脂		2	2	
保 護 人 體 健 康 之 海 洋 環 境 品 質 標 準	鎘		0.01	0.01	0.01
	鉛		0.1	0.1	0.1
	六價鉻		0.5	0.5	0.5
	砷		0.05	0.05	0.05
	汞		0.002	0.002	0.002
	硒		0.05	0.05	0.05
	銅		0.03	0.03	0.03
	鋅		0.5	0.5	0.5
	錳		0.05	0.05	0.05
	銀		0.05	0.05	0.05
	農 藥	有機磷劑+氨基甲酸鹽 ⁽²⁾	0.1	0.1	0.1
		安特靈	0.0002	0.0002	0.0002
		靈丹	0.004	0.004	0.004
		毒殺芬	0.005	0.005	0.005
		安殺番	0.003	0.003	0.003
		飛佈達及其衍生物 (Heptachlor, Heptachlor epoxide)	0.001	0.001	0.001
		滴滴涕及其衍生物 (DDT, DDD, DDE)	0.001	0.001	0.001
		阿特靈、地特靈	0.003	0.003	0.003
		五氯酚及其鹽類	0.005	0.005	0.005
		除草劑 ⁽³⁾	0.1	0.1	0.1

註：(1)各項基準值單位如下：氫離子濃度指數：無單位；大腸桿菌群：每 100 毫升水樣在濾膜上所產生之菌落數(CFU/100mL)；其餘：毫克/公升。

(2)有機磷劑(巴拉松、大利松、達馬松、亞素靈、一品松、陶斯松)及氨基甲酸鹽(滅必蟲、加保扶、納乃得)之總量。

(3)除草劑係指：丁基拉草、巴拉刈、2、4-地。

2.4.2 五大港水質

根據運輸研究所 92 年「台灣五大港區海水水質調查分析」結果，顯示五大港區之海水受到季節變化之趨勢如表 2-4 所示，表中顯示一年四季以台中港的鹽度(Salinity)為最高約為 34~34.5ppt 之間，相對的台中港的導電度值(Conductivity)亦最高，介於 47.5~52.5ms/cm 之間，比電阻與導電度成倒數關係，故台中港比電阻(Conducante)最小介於 19.0~21.0Ω/cm 之間。溶氧量(Dissolved Oxygen)以高雄港最低，一年四季的值均為 14.0mg/l。酸鹼度(PH)以夏季花蓮港航道 60 的值最低，為 ph7.25，而夏季在基隆港東 2 碼頭及高雄港 14 碼頭的值最高，為 ph8.99，水溫以基隆港春季的 17.5℃最低，高雄港秋季 31.0℃為最高。氯離子濃度在各碼頭水域範圍為 14000~26300ppm，以冬季高雄港 #14 為 26300 ppm 最高，秋季基隆港 #7 涵洞之 14000ppm 最低。

表 2-4 台灣五大港不同季節水質變化表

季節	碼頭編號	項目	鹽度 sal (ppt)	導電度 TDS(A) (mS/cm)	比電阻 (B) (Ω/cm)	溶氧量 DO (mg/l)
春	範圍值		29.3~34.5	38.0~47.5	21.0~26.0	4.5~8.4
	港口碼頭		基東2~台中	基東2; 東3~台中	台中~基東2	高14~基24; 花蓮
夏	範圍值		29.5~34.19	45.0~52.0	20.0~22.5	4.5~7.5
	港口碼頭		蘇6; 高14~台中	蘇駁~台中	台中~蘇駁	高14~蘇7
秋	範圍值		30.5~34.0	45.0~50.1	20.0~22.5	5.2~7.7
	港口碼頭		高77~台中	高14~台中	台中~高14	高14~蘇7
冬	範圍值		32.5~34.5	49.0~52.5	19.0~20.0	5.0~8.0
	港口碼頭		高14~台中	高14~台中	台中~高14	高14~基24
季節	碼頭編號	項目	酸鹼度 pH (-)	水溫 Temp ()	氯離子 Cl (ppm)	備註(季節區分)
春	範圍值		8.25~8.65	17.5~26.0	16500~18200	*春(9101~9103)
	港口碼頭		高14; 蘇駁~基隆; 花蓮	基隆~高雄	基東2; 東3~台中	
夏	範圍值		7.25~8.99	24.0~30.0	15120~21500	*夏(9104~9106)
	港口碼頭		花航60; 基東2~高14	基; 花; 蘇~高; 中	花航60; 高14~基24; 中西1	
秋	範圍值		7.80~8.20	26.0~31.0	14000~22000	*秋(9107~9109)
	港口碼頭		蘇澳~花蓮; 台中	台中~高雄	基7涵洞~基25; 基18	
冬	範圍值		7.80~8.25	23.0~28.0	17500~24300	*冬(9110~9112)
	港口碼頭		蘇澳~花蓮; 台中	基隆~高雄	基22~高14	

資料來源：交通部運輸研究

2.5 海岸地質

台灣沿岸及其鄰近海域之底質分佈，如圖 2-5 所示。北部自台北縣淡水至宜蘭縣大溪海岸除少數為沙質外，大部份為礁石；陸棚淺海部份，自淡水至富貴角底質為沙，泥沙間或有岩石，富貴角至金山底質為岩礁，基隆港港口附近為岩石外，其餘大部份是沙或泥。

宜蘭縣大溪至蘇澳海岸及陸棚淺海之底質均由沙及泥所構成。蘇澳以南沿台灣東海岸南下經鵝鑾鼻至枋山一帶沿岸，除少數河口為沙質海岸外，其餘均為礁石海岸；陸棚底質部份，自蘇澳至南澳間 20 公尺以淺為礁石，20 公尺以深至 200 公尺為泥；南澳以南至鵝鑾鼻沿海 200 公尺以淺陸棚狹窄陡峭，有部份地區甚至無陸棚存在，南澳至花蓮縣和平溪口為泥；和平溪以南至美崙鼻北方海岸陡峭，水深均在 248 公尺以上，無陸棚存在。美崙鼻至木瓜溪口 20 公尺以淺為礁石，20 公尺以深之陸棚為沙泥。木瓜溪口南下至台東都蘭灣之狹長陸棚大部份由沙及沙泥所構成，都蘭灣陸棚為岩石底質。台東富岡附近以南至屏東港口灣之狹長陸棚底質大部份為砂石，港口灣陸棚底質為岩礁。鵝鑾鼻至車城之陸棚由礁石及珊瑚礁所構成，車城至枋山沿海陸棚底質為泥沙。

屏東枋山起沿台灣西海岸北上至淡水河口除高雄壽山附近為岩岸外，其餘幾乎為沙質海岸，陸棚平坦，陸棚底質大都由沙、沙泥所構成。

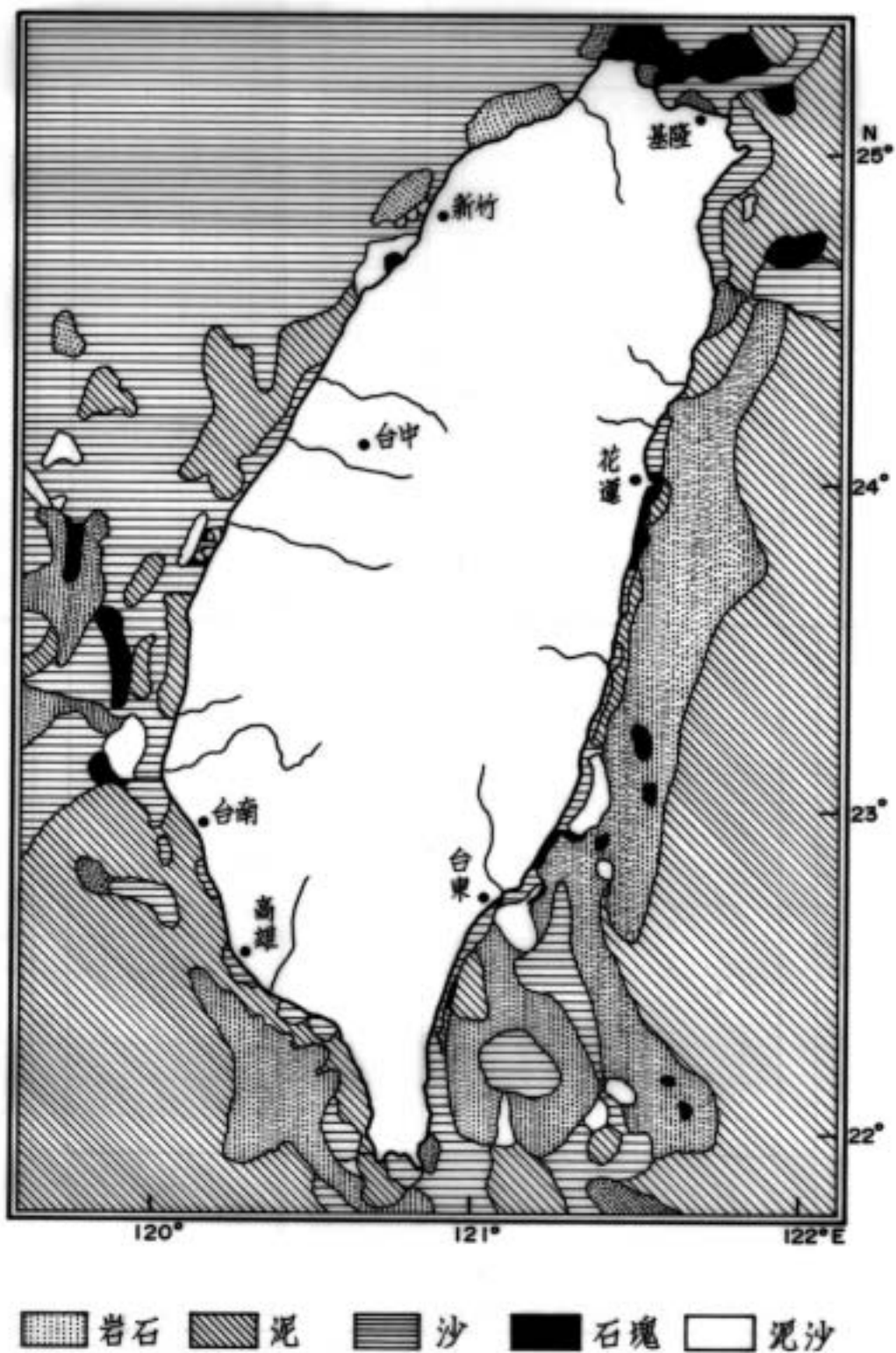


圖 2-5 台灣沿岸及鄰近海域底質分佈圖

2.6 海洋生物資源之種類與分佈

海洋佔地表面積之 71%，自前寒武紀以來，為地球上原始生命之孕育所。目前人類對海洋之瞭解遠比陸地上陌生，許多海洋區域仍待研究探索，雖然如此，海洋中之生物多樣性仍高於陸地。目前已知 35 個動物門中，有 34 個可以在海洋中發現蹤跡，其中更有 15 個門只生存於海洋，近幾年來發現之鬚腕動物門、環口動物門皆是生活在海洋中之種類，推測海洋中仍有許多未知之生物種類。海岸線是陸地與海洋之交界處，在整個地球僅佔極微小部分，但它同時具有陸地本質及海洋風貌，海岸線豐富而多變化之景觀，以及棲息其間之生命型態，實在是自然界賦予人類之珍寶。台灣海岸線之特性受到陸地地質、海洋環境及人文建設等因素所影響，而發展出各種海岸環境不同之特色。

台灣島四周環海，東邊是廣大之太平洋，從赤道北上之黑潮在離岸數公里處由南向北流，貧營養鹽及溫暖之海水圍繞蘭嶼與綠島。黑潮之支流亦向西進入巴士海峽，造就墾丁國家公園內海域豐富之熱帶珊瑚礁群。黑潮這股流暖加上南中國海表面之溫水團，通常可影響及至高雄外海之小琉球以及澎湖群島南方島嶼，但是台灣海峽仍被大陸沿岸之海流，包括冬天由北方南侵之冷水團所影響，而北部金山、野柳、東北角及基隆北邊之澎佳嶼與馬祖列島，基本上都是位在大陸東海海水影響範圍之內。

台灣位於熱帶西太平洋區，加上黑潮及大陸沿岸冷流交會影響，兼具熱帶、亞熱帶及溫帶性之海洋生物。台灣海洋生物之分佈主要受沿岸地質、地形、溫度及洋流之影響最為顯著，此乃因台灣沿岸海底質在環島四周多樣化之不同所造成。台灣目前已經發表之海洋生物種類數，大約有超過 2,300 種之魚類、250 種之珊瑚、300 種之大型甲殼類及 150 種之棘皮動物，如表 2-5 所示(邵廣昭，1998)。已紀錄之大型海藻相十分豐富，共約有 600 種以上(Lewis & Norris 1987；江永棉 1992；Lin 2002, 2004)。參考邵廣昭(1998)所著有關體型較大之現生本土海洋生物之種類與分佈，摘述如下：

表 2-5 大型現生海洋生物在全世界及台灣已記錄或約有之種類

類 別	主要成員	英 俗 名	全世界估計現生種	台灣已記錄
植物				
海藻	綠藻,褐藻	Green algae , brown algae	7,000 , 1,500	600
	紅藻	Red algae	4,000	
海草		Sea grasses (eelgrass,turtle grass)	50	5
動物				
無脊椎動物				
海綿			5,000	?
刺細胞動物	水母,海葵	Sponges	9,000	?
物	珊瑚,水螅	Jellyfish , sea-anemones	(珊瑚 2,500)	珊瑚 250
		Coral , hydroids		
扁形動物	海舌蛭,貝	Flatworms	112,000 (含淡水)	2,500
	螺,烏賊,章魚	Sea-sugs , bivalves		
軟體動物	多毛類	Snails , squids , octopus	8,700	?
	甲殼類	Polychaetes	蟹 4,500	300
		Shrimp	蝦 2,900	267
環節動物	海膽,海星	Crab	6,000	>150
	海參,陽燧足	Sea urchine , sea-star		
節肢動物	文昌魚	Sea cucumber , sea brister	>10	2
	海鞘	Lancelet	1,600	?
		Sea squirt	42,800	
棘皮動物			15,000	2,350
	海龜,海蛇	Marine fishes	7~8 , 21	5 , 14
	岸鳥,海鳥	Sea turtle , sea snake	316	10 , 40
頭索動物	鬚鯨	Sea birds	<10	7
	齒鯨	Baleen whale	<85	25
尾索動物	海牛	Dolphins , propoises	4	-
		Manatees , dugongs		
脊椎動物				
魚類				
爬蟲				
鳥類				
哺乳類				

資料來源：邵廣昭(1998)

2.6.1 海藻與海草

1. 海藻

由於大型海藻需行底棲固著生活，故多分佈在台灣南、北、東及各離島岩礁岸，季節變化明顯。Lewis & Norris(1987)整理 1866～1987 年之所有文獻及同種異名後，共獲 476 種海藻(紅藻 55%、褐藻 24%、綠藻 21%)。江永棉(1992)綜合描述台灣藻類之研究現況，包括藍綠藻在內之台灣產海藻，共已記錄有 524 分類單元。

本省海藻資源之應用以龍鬚菜(*Gracilaria*)及紫菜(*Porphyra*)利用最廣，大多用於製造洋菜(agar)及九孔養殖之飼料。紫菜養殖大多在澎湖、金馬地區，面積小，產量不高。膠膜(*Monostroma*，俗稱海菜)為另一食用藻，主要產於澎湖，用於製成海菜醬。馬尾藻(*Sargassum*)可製成醫藥、飼料、肥料及提煉藻膠用，石花菜(*Gelidium*)及翼枝菜(*Pterocladia*)則是製造洋菜之上等原料，不過數量已少。

海藻資源之保育於宜蘭縣之蘇澳澳仔角、頭城之外澳至石城、基隆市沿岸、屏東車城等地設有海域生物資源保育區，管制紫菜或石花菜之採收期。墾管處、東海岸風景管理處及野柳岬東西兩岸亦設有海域生物保護區，保護區內珊瑚礁之生物包括海藻在內。

(1) 北部至東北角海岸

以台灣北部至東北角而言，因沿岸底質以岩礁為主，加上受到大陸低溫冷水流影響頗大，東北部之海藻相有許多冷水性溫帶之藻種，如日本石花菜、日本沙菜等，與日本之海藻相有許多相似之處，如照片 2-1 所示。



(A)東北角馬崗海岸

(B)東北角頭城海岸



(C)日本沙菜

(D)日本石花菜

(E)牛角藻

照片 2-1 東北部海岸地形及代表性海藻

(2)南部及東南部海岸

在台灣南部及東南海域，因受到自赤道北上之高溫、高鹽及貧營養鹽之黑潮暖流影響，主要為熱帶珊瑚礁海岸，並以多樣化之大型底棲海藻群落(如照片 2-2)作為提供海中動物之食物主要來源，其並為許多海洋生物棲息地及孕育下一代之繁殖場所，直接或間接造就珊瑚礁區高歧異度之海洋生物。



(A)台東小野柳海岸春季褐藻之馬尾藻繁生



(B)葉片龍鬚菜



(C)褐藻褐腔藻之一種

照片 2-2 南部及東南部海岸地形及代表性海藻

(3)西部海岸

台灣西部自屏東枋寮以北至台北淡水河南岸，主要為沙泥或礫石底質之淺海域，海岸線特性為潮間帶較寬廣、海底平緩，除海中動物相與北部往東至墾丁國家公園海域之差異極大，在海藻相方面亦因缺乏可供附著生長之礁岩，相較之下顯得十分貧乏，但在有些人工海岸結構物仍可以發現些許藻種，如照片 2-3 所示。



(A)屏東林園海邊以沙岸為主



(B)大鵬灣常見藻石蓴



(C)林邊海岸石塊上之海藻相



(D)林邊沿海冬季常見之可食紅藻

照片 2-3 西南部海岸地形及代表性海藻

2.海草

海草在台灣之種類與數量皆少，多半夾雜在淺海珊瑚礁區內，如墾丁或澎湖等離島低潮線下 1~2 公尺內之淺水域，少數種類則分佈在較深之礁區周緣之沙泥地上，不過國內在海草之調查研究尚為缺乏。南中國海之東沙島上俗稱海人草，則數量甚豐。

2.6.2 海洋無脊椎動物

台灣海洋無脊椎動物之研究較為落後，僅在甲殼類、珊瑚、貝類、棘皮動物方面之分類調查研究較多，其餘各類多尚在起步或乏人問津。在腔腸動物方面，除水母外，共記錄有水螅蟲綱 16 種，珊瑚蟲綱(含海葵、石珊瑚與軟珊瑚等)300 餘種；軟體動物方面估計約有 2,500 ~3,000 種，其他的掘足綱 15 種、多板綱 20 種、頭足綱 70 種以上、雙殼綱 635 種、腹足綱 1,800 種以上；甲殼類方面，蝦類(長尾類)250 種以上、寄居蟹(短尾類)293 種；棘皮動物方面，海參 26 種、海星 16 種、陽燧足 25 種、海百合 20 種及海膽 35 種以上。

2.6.3 海洋脊椎動物

1. 魚類

台灣之海水魚類估計應在 2,400 種以上，遠比陸地上約 50 種之純淡水魚及包括生活在河口內之 150 種為多。其中約有 1,500 種為生活在珊瑚礁區之小型魚類，其餘則是中表層洄游或沙泥底棲洄游性之經濟魚種。

2. 爬蟲類(海蛇與海龜)

本省產之海蛇約有 20 種左右，以蘭嶼與綠島較多。台灣過去曾有 5 種海龜之記錄，且有在全省各地沙岸(除西海岸外)上岸產卵之記錄，可惜因長期干擾、破壞及獵捕，目前僅剩綠蠵龜較為常見，其上岸產卵亦僅在澎湖望安一地，其他離島則更少。

2. 海洋哺乳類(鯨與海豚)

台灣目前鯨類正式記錄為 26 種，而就漁港走訪及根據水溫、地理分佈等資料研判，目前確認 28 種，尚有 4 種可能會出現，未來總種數可能達 32 種，其中包括 7 種鬚鯨、25 種齒鯨類，佔世界種類約 40%。

2.7 地理環境與海域生態之特性

參考邵廣昭(1998)所著有關台灣地理環境與海域生態之特性，摘述如下：

台灣海洋生物之分佈主要受底質與溫度(洋流)之影響最大，乃因台灣沿海海底底質種類多，西岸為沙泥底為主之淺水域，亦有河口與紅樹林區，南北兩端及離島為海中熱帶雨林之珊瑚礁，東海岸為陡峭之岩礁深海，各種不同棲地或沿海生態系皆有其獨特之海洋生物種類。

台灣西部自枋寮以北至淡水河南岸，概為沙泥或礫質之淺灘，潮間帶寬廣，海底平緩，生物相完全不同，為本省重要底拖、流刺與延繩釣之重要漁場，除蝦、蟹、貝類外，尚盛產底棲性沙鰕、石首魚、雞魚、鯛及比目魚等。河口區則以淡水河、大甲溪、大肚溪、濁水溪、八掌溪、曾文溪、高屏溪、雙溪、蘭陽溪、花蓮溪、秀姑巒溪等主要河川之出海口，是許多仔稚魚、蝦、蟹幼生聚集孵育成長或洄游之場所。台灣紅樹林以點狀或塊狀散佈在西海岸之各河口或溪口，主要以淡水之竹園、關渡，嘉義布袋、八掌溪，台南北門、七股、四草及高雄縣茄萣、永安一帶面積較大。北部以水筆仔為主，南部多為海茄苳；欖李與五梨跤僅侷限於台南、高雄沿海，數量稀少。紅樹林生態系為聯結陸地與海洋之重要媒介，匯集來自河川上游及海洋帶來之各種無機鹽與有機物，孕育許多特別之魚、蝦、蟹、貝類，亦是許多候鳥遷徙、棲息之重要場所。

東海岸陡峻水深，有豐富洄游性魚類資源，但相對深海之資源因欠缺調查與開發，所知仍極有限。台灣南北兩端，特別是墾丁國家公園為本省最大之珊瑚礁區，孕育之海洋生物最為豐富，珊瑚礁魚類種數即在 1,100 種以上，包括鰈、鰕虎、隆頭、粗皮鯛、金鱗魚等小型魚類。圖 2-6 為台灣四周沿岸魚類之種數分佈，這些魚類中有不少是該種南北分佈之界限。

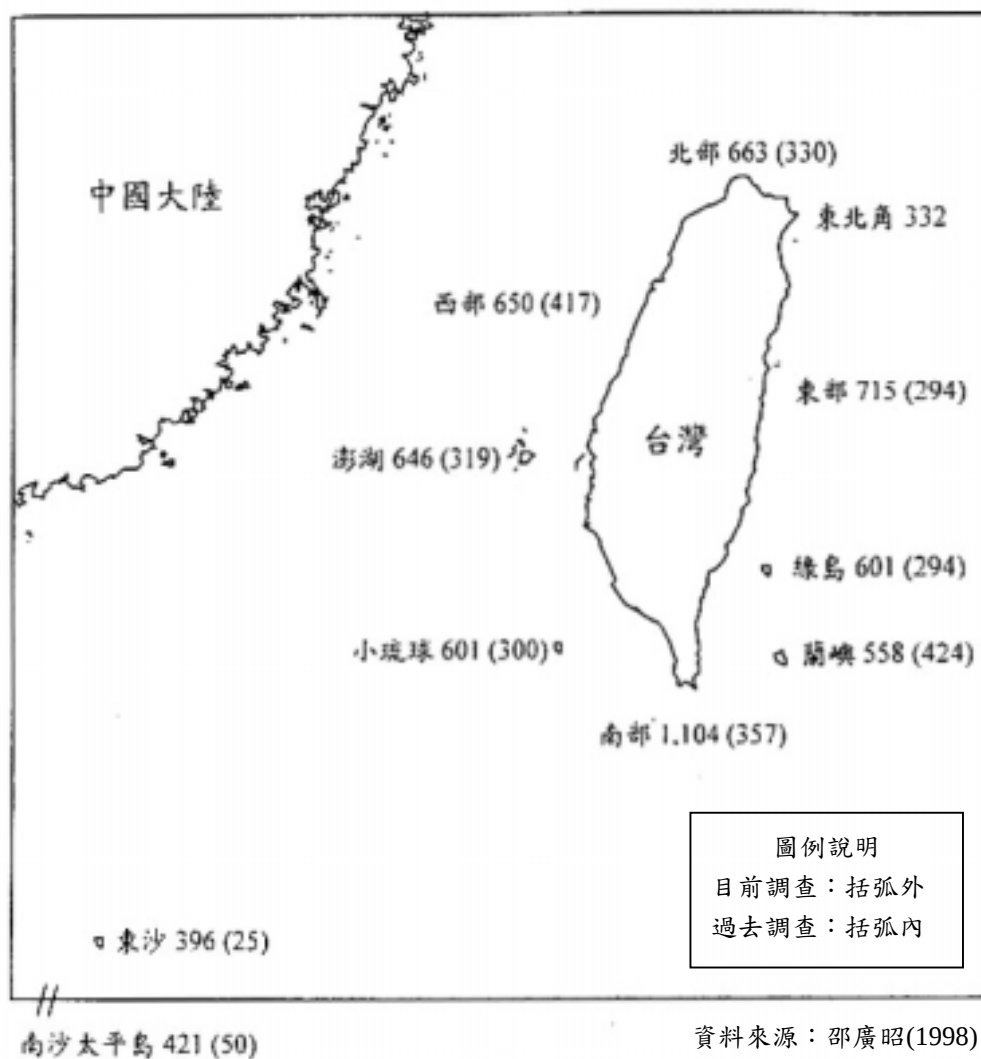


圖 2-6 台灣附近海域目前及過去所調查到海洋魚類之種數

台灣附近海域水溫受不同海流之影響，而兼具熱帶及亞熱帶之海洋環境。南部墾丁國家公園海域、東部蘭嶼、綠島、三仙台及西部之小琉球均主要受高溫高鹽之黑潮暖流北上流經影響，冬季水溫亦在 21~22℃ 以上，故熱帶種生物均豐富。北部則受大陸低溫低鹽之閩浙沿岸冷水流南下影響，水溫可低到 16~17℃，故與南部之種類組成有相當差異。而台灣海峽中央之澎湖海域則因在黑潮、大陸沿岸流及來自南中國海高溫低鹽之水團三流交會之影響，生物相兼具南北兩地之特色。至於台灣東部則以東北角為南北交會區，而並非在東部。

2.8 海域生態與自然條件之相關性

若將海洋環境視為由許多環境因子所組成之多維空間，則每一種海洋生物均佔有一席之地，即海洋生物對於多變之海洋環境所能適應之範圍。海洋生物之生長環境與自然條件息息相關，本節主要以海藻為例，說明海域生態與自然條件之相關性。

1. 海底地形底質

大型海藻行底棲固著生活方式，需有固定基質供其著生，故多分佈於岩礁岸。海草多半夾雜在淺海珊瑚礁區內，少數種類則分佈在較深之礁區周緣之沙泥地上。

海水魚類之分佈，主要受海底地形底質、海流及水溫等因素影響最大。本省西岸皆為沙質淺灘，棲息魚類除中表層洄游魚種外，均為沙泥底棲性之魚種。台灣之岩礁或珊瑚礁呈不連續之帶狀或塊狀分佈，多集中在北部、南部及離島地區，岩礁或珊瑚礁棲性之魚種複雜且豐富。

2. 溫度

海藻之分佈很廣，由寒帶至熱帶地區均有其蹤跡，通常溫帶地區之海藻相較其他地區豐富且種類多，藻體亦較大型，最大之海藻－海帶類即生長在寒冷之溫水域中。

台灣因位處熱帶及亞熱帶地區，四周海域較溫暖，海藻相較為貧乏，亦無巨大海帶類褐藻生長。根據黃淑芳(2000)自民國 81 年起長期調查東北角海岸，以冬、春兩季為本區海藻生長之繁盛期，而在夏秋時海藻之數量與種類明顯減少，尤其在夏天烈陽高溫下，海藻不易生存，潮間帶大多光禿，但在較深水域仍可發現許多海藻。林綉美等(2004)於 92 年調查西南海岸結構物之海藻著生狀況，各月平均水溫介於 20.2～32.4℃，藻類生長具有明顯之季節性變化，以冬、春季藻

相較豐富，夏、秋季之種數較少，大致上於溫度高之季節相對海藻物種與數量較少。

3.水深

由飛沫帶、潮間帶至潮下帶均有海藻生長，最深水域之固著性藻類曾於 268 公尺發現，最大之海藻－海帶類可達 100 公尺，而主要生長區則為潮間帶及較淺之潮下帶。大體而言，綠藻多分佈在日光可及之潮間帶，紅藻可比其他藻類生長在較深之海域，有時在水深 200 公尺處仍可發現其蹤跡。

根據黃淑芳(2000)調查東北角海岸之海藻水深垂直分佈，潮間帶上部多為綠藻類，潮間帶中部以褐藻類居多，而低潮線附近及深海部份則多為紅藻類。中華大學(2003)在 92 年於新竹、安平、興達及烏石等漁港所進行之消波塊上附著性海藻調查，其分佈自潮上帶至潮下帶，水深 0～5 公尺。

4.波高

依據中華大學(2005)之研究指出，波浪易造成強烈之水流及土砂之移動，對生物之棲息會造成困擾，但適當之波浪對生物係有益。例如海藻適合生長於波高 2～3 公尺之地方，附著性動物適合於波高 1～1.5 公尺之處，並以波高 1.5～2 公尺範圍之動物多樣性最高。在波高 0.5 公尺以下，不論何種形式之構造物，附著性動物出現量都急遽減少，主要原因為此處海水交換不良及浮泥堆積易造成動物死亡，但波高大的地方，有時會造成附著性動物從基盤上剝落或攝食不易。

5.漂砂

依據中華大學(2005)之研究指出，海岸漂砂活動為造成海岸地理環境與生態環境改變之重要因素，漂砂活動對海洋生物之棲息環境弊多於利，劇烈之漂砂會造成底棲生物生存不易，魚礁、藻礁之沉埋，礁岩

上附著生物之剝落，以及海水渾濁透光度不佳等。但適量之底質移動可避免污染物之沉澱，對生物則有所幫助。

2.9 海岸開發利用對海域生態之衝擊

污染物質對沿岸環境品質之影響，與當地之自然環境條件有密不可分之關係。台灣為地狹人稠之島嶼，其中 69% 為高山地區，以中央山脈將台灣分隔成東、西兩部份，人口主要都集中在西部地區，東部地區則因地形、交通及就業機會等各種因素之故，人口較少。由於交通、運輸、地理及人力資源等各種因素之影響，台灣大部份之工廠皆設立於西部地區，反之東部地區僅有少數工廠之設立。境內大小河流均以中央山脈為主要分水嶺，分別注入西部之台灣海峽及東部之太平洋。台灣之河川由於地形之故，一般而言短小且落差大，因此每年雨季往往因為大量雨水使山洪爆發、河水暴漲，但在極短之時間內河水便很快注入海洋。此外，台灣山坡地過度開發日益嚴重，濫墾、濫伐屢見不鮮，水土保持不良，因此河川之輸砂量大，當大雨來臨常易引起土石流之發生。台灣之雨量具有季節性及區域性分佈之明顯差異，於中、南部每年三至九月為雷雨型之雨季，而每年九月至翌年三月則為乾旱期，在乾旱季節時河川水量少甚至乾涸。西部沿岸臨台灣海峽，水深較淺，坡度平緩且具廣大之潮間帶，沙岸多而岩岸較少；東部沿岸則臨太平洋，水深較深，梯度變化極大，潮間帶窄小，岩岸多於沙岸。台灣之水產養殖業大多集中於西部沿海，而東部主要沿岸養殖則為九孔。由於潮汐漲、落之週期性運動主宰沿岸海水之潮流現象，對河川或陸上逕流排入沿海之污染物質有稀釋、淨化之作用，但是如果污染物質超過其負荷，則污水經常在沿海隨潮汐往返擺動無法驅散淨化。台灣西岸近岸之沿岸流大致與海岸平行往返流動，漲潮時在北段向南流，而南段則向北流，退潮時則流向相反，流速一般在 20 至 40 cm/sec 之間，它不但可經由侵蝕或堆積作用而改變海岸地形，亦能沿著海岸傳送污染物質而使其污染範圍擴大。

近年來，隨著台灣經濟起飛，過度開發利用自然資源之情形，使得海岸潮間帶之生物資源，無可避免地受到不良之影響與破壞。這些破壞海岸資源之情形，主要有過度撈捕、非法捕魚及河水污染，再加上各種工程所造成之直接破壞與污染，都使得台灣之海岸生物資源大不如前。許多自然環境與生物棲地被破壞後，很難再回復原來之狀態，而且歷經千萬年所演化出來之生物物種，一旦消失滅絕之後，亦不可能再改變回來。台灣位於南中國海之北界，亦是全球珊瑚礁生物多樣性最高的熱點之一。台灣本島與周圍海域所擁有之珊瑚礁與珊瑚群聚亦相當豐富，包括台灣本島之墾丁、東北角、北海岸、花東海岸，離島之澎湖群島、小琉球、綠島與蘭嶼，以及位在南中國海系統內之東沙環礁與南沙群島之太平島，都有多樣之珊瑚群聚或珊瑚礁生物，在全球保護海洋中之熱帶雨林活動上，台灣不應該置身事外。挽救我們的海洋是很重要之一件事情，在保護海洋生態方面，國人及政府相關單位應以積極之態度，以山林保育之觀念與態度來對待海洋，並教育社會大眾不釣珊瑚礁生物或稀有之魚類、不亂倒污水及垃圾，以免影響到海洋生物生活與生長之環境空間。同時注重工程建設與自然環境之和諧共生，謀求海岸保護與海岸生態之共生共榮。

2.10 海岸結構物周邊生態環境

參考中華大學水域生態環境研究中心(2003、2005)調查研究台灣地區漁港構造物周邊之生態環境指出，漁港水域中有浮游生物、附著生物、底棲生物及游泳動物等，而易於調查及在生態工法之應用作為指標性用途者，以附著生物與底棲生物為主。

1. 附著生物

附著生物通常是指一群經過在水中之漂浮時期後，於堅硬之基質附著，同時改變外部型態，並固定於該處不再移動直至死亡。附著生物種類繁多，扮演生產者角色之大型海藻為海岸重要附著生物之一，而海洋無脊椎動物中，由構造簡單之海綿、水螅至構造複雜之藤壺、牡

蠣、貽貝及海鞘等均為常見之附著生物。附著生物在固著於基質後，由於長期固著於該環境而不再遷徙，因此附著生物之生長過程與族群之分佈等生物特性，將可以反應當地海域環境之狀況。表 2-6、表 2-7 為台灣漁港常見之附著性海藻與動物之種類與棲地型態。

2.底棲生物

底棲生物以海底底質為家，有些種類大部份時間在表面活動或固著底質表面稱為表棲生物，有些種類則會挖掘洞穴居住於底質內部稱為內棲生物，如文蛤、沙蠶、蝦、蟹等。由分類之觀點而言，底棲生物幾乎包括所有類別之生物，由細菌、藻類、真菌至無脊椎動物、脊椎動物均有，其中以原生動物門之纖毛綱、扁形動物門之渦蟲綱及線形動物門之圓蟲，其種類與數量最為龐大。海岸潮間帶之底質特性如顆粒大小、粉砂－黏土含量、含水率、有機質含量、底質有氧層之深度及微地形之變化等，均會影響底棲生物之分佈與豐度變化。反之底棲生物之活動亦會改變棲地環境之特性，乃因底棲生物很少移動或不移動，長期居住在當地，經年累月受海岸影響，具有累積周遭環境訊息之能力，可以反映海岸生態體系之變化。表 2-8 為台灣漁港常見之底棲生物之種類與棲地型態。

表 2-6 台灣漁港消波塊上主要附著性海藻之生物特性及生態習性

分類	物種	水深 (m)	出現時間 (繁盛期)	藻體形式	適合底質	分佈海域	生育環境			壽命	增殖方法	漁港記錄
							潮下帶	潮間帶	潮上帶			
綠藻	石莖	0-2	全年(2-4月)	葉片狀	岩礁區	全省	■	■■■	■	1-數月	孢子及有性生殖	烏石、新竹、安平、興達漁港
	裂片石莖	0-3	全年(2-4月)	長條葉狀	岩礁區	全省	■■	■		1-數月	孢子及有性生殖	烏石、新竹、安平、興達漁港
	粗丹菜	0	全年(5-6月)	葉狀	岩礁區	北部、東北部、恆春半島、東部		■■		1-數月	孢子及有性生殖	烏石、新竹漁港
	腸辟苔	0-1	全年(12-4月)	條狀	岩石或石礫上	全省	■	■■■	■■	1-數月	孢子及有性生殖	烏石、新竹、安平、興達漁港
褐藻	滑苔	0	全年(3-5月)	條狀	潮泡及沙灘地	北部、東北部		■■	■■	1-數月	孢子及有性生殖	烏石、新竹漁港
	馬尾藻*	1-5	北部(3-7月) 南部(1-4月)	具有附著器、柄及葉狀構造	岩礁區	北部、東北部、恆春半島、東部	■■■	■	-	多年生	殘留的附著器及有性生殖	澳底漁港
紅藻	龍紫菜	0-0.5	11月至翌年3月	葉狀	岩礁區	北部、東北部		■■		1-數月	葉狀體為主要的生活史階段，主要由於孢子萌發而來	烏石漁港
	石花菜	0-10	全年(3-5月)	分枝羽狀	岩礁區	北部、東北部	■■■	■		多年生	有性生殖或斷裂生殖	烏石、新竹漁港
	硬胞藻	0-0.5	全年(10-3月)	絲狀	岩礁區	全省	■	■■			孢子及有性生殖	烏石、新竹、興達漁港

*由於馬尾藻常聚集生長形成藻林，具有發展人工藻礁的潛力，故列出做為參考

■：代表在該帶狀分布地點的位置（愈多表示物分布的範圍愈廣，愈少則分布較易受到限制）

表 2-6(續) 台灣漁港消波塊上主要附著性海藻之生物特性及生態習性

分類	物種	水深 (m)	出現時間 (繁盛期)	藻體形式	適合底質	分佈海域	生育環境			壽命	增值方法
							潮下帶	潮間帶	潮上帶		
綠藻	寬礁膜(俗稱青海藻)	0-2	12月至翌年4月	葉片狀	岩礁區	全省、澎湖		■	■	1-數月	孢子及有性生殖
	杰氏松藻	0-10	全年(2-6月)	匍匐分枝	岩礁區	北部、東北部、恆春半島、東部	■	■		數月	有性生殖
	球松藻	0-5	全年(2-6月)	球狀	岩礁區	北部、東北部	■			數月	有性生殖
	蕨藻	0-5	全年(12-4月)	球狀、羽狀、長條狀等	岩礁區	北部、東北部、恆春半島、東部	■			1-數月	有性生殖與匍匐根生長
	綠毛藻	0-1	全年(3-5月)	絲狀	潮池或沙地與礁石交接處	東北部、恆春半島、東部	■	■		1-數月	孢子及有性生殖
褐藻	馬尾藻*	1-5	北部(3-7月)南部(1-4月)	具有附著器、柄及葉狀構造	岩礁區	北部、東北部、恆春半島、東部	■	■		多年生	殘留的附著器及有性生殖
	團扇藻	0-2	12月至翌年6月	扇形	岩礁區或沙地	北部、東北部、恆春半島、東部	■	■		數月	孢子及有性生殖
	小海帶	0-0.5	3-4月	長條帶狀	岩礁區	北部、東北部	■	■		2月	孢子及有性生殖
	蜈蚣藻	0-0.5	12月至翌年3月	長條葉狀	岩礁區	北部、東北部、恆春半島、東部	■	■		1-數月	葉狀體為主要的生活史階段，主要由四分孢子萌發而來。
紅藻	皮絲藻	0	9月至翌年4月	細分枝狀	岩礁區	北部、東北部、恆春半島、東部		■	■	1月	孢子及有性生殖

資料來源：中華大學水域生態環境研究中心，2003。

表 2-7 台灣漁港主要附著性動物之生物特性及生態習性

分類	物種	水深 (m)	棲地 生態	適合底質	分佈海域	生育環境			漁港記錄
						潮下帶	潮間帶	潮上帶	
軟體動物中腹足目	細粒玉黍螺	0-1.5	岩礁	棲息在海蝕平台或岩石的淺海中	臺灣西南、東北海域、南沙太平島、東部海域、澎湖、蘭嶼海域		■	■■■	新竹、安平、興達、烏石漁港
	粗紋玉黍螺	0-1.5	岩礁、紅樹林	棲息在海蝕平台或岩石的淺海中	臺灣西南、東北海域、南沙太平島、東部海域、澎湖、蘭嶼海域、恆春半島、小琉球		■■■	■■	新竹、安平、興達、烏石漁港
	台灣玉黍螺	0-1.5	岩礁	棲息在海蝕平台或岩石的淺海中	臺灣南部、東北海域、東部海域、綠島、龜山島、澎湖、蘭嶼海域	■	■■■	■■	新竹、安平、興達、烏石漁港
	顆粒玉黍螺	0-1.5	岩礁	棲息在海蝕平台或岩石的淺海中	臺灣南部、東北海域、東部海域、澎湖、蘭嶼海域、金門		■■	■■■	新竹、安平、興達、烏石漁港
	波紋玉黍螺	0-1.5	岩礁	棲息在海蝕平台或岩石的淺海中	臺灣南部、東北海域、東部海域、澎湖、花東海岸、蘭嶼海域、恆春半島、小琉球、金門、東沙島	■	■■■	■	新竹、安平、興達漁港
	金塔玉黍螺	0-2	岩礁	棲息在岩石的淺海中	臺灣南部、蘭嶼海域、恆春半島	■	■	■■■	安平漁港

表 2-7(續 1) 台灣漁港主要附著性動物之生物特性及生態習性

分類	物種	水深 (m)	棲地 生態	適合底質	分佈海域	生育環境			漁港記錄
						潮下帶	潮間帶	潮上帶	
原始 腹足目	花笠螺	0-2	岩礁	棲息在海蝕平台或 岩石的淺海中（有 凹到原來棲息地的 特性）	東部、北部海岸、東北角 海域、南部的岩礁區及各 離島的岩礁海岸	■■■	■■■	■■■	新竹、安平、興 達、烏石漁港
	斗笠螺	0-2	岩礁	棲息在海蝕平台或 岩石的淺海中	台灣東北部、南部、東部 海域、澎湖、龜山島	■■	■■■	■	興達漁港
	花青螺	0-2	岩礁	棲息在海蝕平台或 岩石、內灣淺海中	台灣北部海域、花東海 岸、恆春半島、澎湖海 域、金門、龜山島		■■	■	烏石漁港
	花帽青 螺	0-2	岩礁	棲息在海蝕平台或 岩石、內灣淺海中	台灣北部、西南部、台灣 東北部海域、花蓮海岸、 綠島、小金門海域		■■	■■■	烏石漁港
新 腹足目	珂岩螺	0-5	岩 礁、 紅樹 林	棲息在溪流出口 淺水處	台灣北部、西南部、東北 角海域、花蓮海岸、恆春 半島、金門、澎湖	■■■	■■		安平漁港
貽 貝目	綠殼菜 蛤	0-5	岩 礁、 紅樹 林	棲息在溪流出口 淺水處、船底	東部、北部海岸、東北角 海域、南部的岩礁區及各 離島的岩礁海岸	■■■	■■		新竹、安平、興 達、烏石漁港
石 蟹目	鱗紋石 蟹	0-20	岩礁	棲息在海岸邊凹洞 中的潮間帶，也有 棲息於深海	臺灣東北部、南部海域	■■■	■■		新竹、興達、烏 石漁港

表 2-7(續 2) 台灣漁港主要附著性動物之生物特性及生態習性

分類	物種	水深 (m)	棲地 生態	適合底質	分佈海域	生育環境			漁港記錄
						潮下帶	潮間帶	潮上帶	
管絃目	黑齒牡蠣	0-5	岩礁	棲息在潮間帶及淺海的岩礁海底	台灣東北角、南部海域、花東海岸、澎湖、蘭嶼、小金門、南沙太平島、恆春半島	■	■■■	■	新竹、烏石漁港
	長牡蠣	0-5	岩礁	棲息在溪流出口淺水處	台灣東北角、南部海域、澎湖、蘭嶼、小金門、恆春半島	■	■■■	■■	新竹、興達、安平、烏石漁港
	紋藤壺	0-10	岩礁、紅樹林	棲息在海蝕平台或岩石、蚵架、樹枝、蚵殼、紅樹林之樹幹上	臺灣南部、東北海域、東部海域、澎湖、花東海岸、蘭嶼海域、恆春半島、小琉球	■■■	■■■	■■■	新竹、安平、興達、烏石漁港
甲殼動物圓胸目	龜爪藤壺	0-5	岩礁	棲息在海蝕平台、海洋底層或岩石、浮木、船底下	臺灣東北角海域	■■	■■■	■■	烏石漁港
	皮氏小藤壺	0-10	岩礁、紅樹林	棲息在海蝕平台、海洋底層或岩石、浮木	臺灣南部海域	■	■■■	■■	安平、興達漁港
	東方小藤壺	0-10	岩礁、紅樹林	棲息在海蝕平台、海洋底層或岩石、浮木	臺灣南部海域	■	■■■	■	安平、興達漁港

資料來源：中華大學水域生態環境研究中心，2005。

表 2-8 台灣漁港主要底棲生物特性及生態習性

分類	物種	水深 (m)	出現時間 (繁殖期)	棲所生態	適合底質	分佈海域	漁港記錄
蟹頭蟹科	頑強黎明蟹	0-10	全年	棲息在淺海的 砂泥底	棲息在沙質海 岸的潮間帶至 淺海中	全省沿岸	新竹、安平、烏 石漁港
	紅點黎明蟹	0-15	全年(冬季)	棲息在淺海的 砂泥底	潮間帶至 15m 深的沙地	台灣沿岸	興達漁港
	捲折蟹頭蟹	20-60	全年(5-6月)	棲息在淺海的 砂泥底	沙底或岩礁邊 緣	台灣各地沿岸	新竹漁港
	勝利黎明蟹	0-15	5-10月, 11 月間會遷移 至較深水處	棲息在淺海的 砂泥底	沙岸潮間帶至 15m 深的海底	台灣各地沙岸	新竹漁港
對蝦類	日本對蝦	0-90	全年	棲息在河口交 叉處及其下流 混有海水地帶	砂或淤泥	全省沿岸	烏石、新竹、興 達漁港

表 2-8(續) 台灣漁港主要底棲生物特性及生態習性

分類	物種	水深 (m)	棲地生態	適合底質	分佈海域	漁港記錄
真腹足目 (Architectonicidae)	黑線車輪螺 (<i>Architectonica perspectiva</i>)	0-10	沙灘地	棲息在沙質海岸的 淺海中	臺灣則分佈在西、南 沿海	新竹、安 平、興達港
	烏車輪螺 (<i>Discotectonica acutissima</i>)	0-10	沙灘地	棲息在沙質海岸的 淺海中	臺灣東北部、西、南 部海域	烏石漁港
異足目 (Heteropoda)	褐帶鶴螺 (<i>Tonna sulcosa</i>)	5-10	沙灘地	棲息在沙質海岸的 淺海中	臺灣則分佈在西南 沿海	安平漁港
	條紋雙螺 (<i>Phalium flammiferum</i>)	0-5	沙灘地	棲息在沙質海岸的 淺海中	臺灣東北、西南海域	烏石漁港
新腹足 (Neogastropoda)	花筍螺 (<i>Hastula strigilata</i>)	0-10	沙灘地	棲息在沙質海岸的 潮間帶至淺海中	產於台灣海峽的淺 海砂底	新竹、安平、 興達港
	台灣捲管螺 (<i>Turricula javana</i>)	0-5	沙灘地	棲息水深一般在淺 水區	臺灣則分佈在西、南 沿海	新竹、安平 漁港
	台灣鳳凰螺 (<i>Babylonia formosae habei</i>)	5-10	沙灘地	棲息水深一般在淺 水區	臺灣則分佈在海峽 北部，東北角	安平漁港
	麗紋蝸筆螺 (<i>Vexillum plicarium</i>)	0-5	岩礁、沙 灘地	棲息水深一般在淺 水區	臺灣則分佈在南沿 海	興達港
	短拳螺 (<i>Vasum turbinellum</i>)	0-5	沙灘地	棲息在沙質海岸的 淺海中	臺灣西南、東北海 域、南沙太平島	烏石漁港
	柳菊螺 (<i>Duplicaria dussumieri</i>)	0-5	沙灘地	棲息在淺海砂底	台灣海峽的淺海砂 底、東北海域	烏石漁港
多齒目 (Taxodonta)	結毛蚶 (<i>Tegillarca nodifera</i>)	0-5	沙灘地	棲息在沙質海岸的 潮間帶至淺海中	臺灣則分佈在北 部、南部	安平漁港

資料來源：中華大學水域生態環境研究中心，2003。

第三章 海岸保護工法發展

傳統海岸保護工法主要以防潮禦浪之防災機能為考量，因應世界發展潮流與國內整體環境變化，謀求海岸永續發展已是時代趨勢與責任，促進生態工法於海岸保護工程之應用有其必要性，茲將海岸保護工法之發展概況敘述如后。

3.1 海岸侵蝕型態

海岸保護之目的主要為防止或改善海岸侵蝕，而發生海岸侵蝕之原因乃供應海岸砂量與流出砂量不平衡所造成。一般海岸侵蝕之型態可分類如下：

1.海崖侵蝕

海崖侵蝕為軟質泥岩或堆積岩基部因受波浪長期作用及上部荷重，使陸岸崩陷而形成海崖侵蝕。

2.河川輸砂減少

就大部份海岸而言，河川輸出之泥砂為海岸漂砂之最主要來源。河川自上游攜帶山區匯集之大量土石流，隨洪水挾帶至河口，因水流流速及輸砂能力急速降低而沉積於出海口及近岸，受潮流、沿岸流及波浪等運搬形成沿岸漂砂，若輸砂量遠勝過波浪之輸砂作用，則於出海口形成三角洲，於沿岸形成堆積海岸。若上游因水土保持使土壤流失減少，大量採取河川砂石而使挾帶至下游之砂石減少，河川整治使河岸沖刷減少等因素，致河口砂源大量減少，使河川堆積作用弱而波浪侵蝕作用強，而造成海岸發生侵蝕。

3.海岸結構物之影響

防波堤、突堤、離岸堤等海岸結構物不僅阻擋海流，亦使波浪產生繞射與反射現象，導致遮蔽區波浪變小、水流流速降低而使泥砂沉澱，反射區之波浪則變大且流速增加而加速泥砂移動。沿岸流被結構物阻擋，沿岸漂砂沉澱於結構物上游側，部份泥砂被離岸流帶向外海方向。結構物較短時，離岸流可能折向結構物下游方向，將漂砂帶往下游，部份沿岸漂砂繼續流向下游側海岸，若結構物太長則將沿岸漂砂完全阻擋，下游無法獲得砂源而使海岸結構物下游側產生侵蝕而上游側發生堆積現象。

4. 波浪與潮流作用

波浪與潮汐產生之水流為海岸輸砂之原動力，垂直海岸入射之波浪使碎波帶產生回流(return flow)，加上重力作用而使底質向外海移動。波浪尖銳度較大或前灘坡度較陡時，回流速度隨之增加，容易使海灘侵蝕；反之波浪尖銳度小且底質孔隙大或坡度較緩，回流流速較溯升速度慢，則海灘較容易堆積。前者通常為颱風波浪作用下之海灘，漂砂以向海方向為優勢；後者一般為季節風浪或湧浪作用下之海灘，漂砂向岸堆積。

3.2 海岸保護工法之型式與演進

早期海岸保護著重於海岸「線」之保護，即利用構築護岸、海堤、消波等方法，沿海岸線作線形保護，具有防止波浪越波、遏止海水入侵及陸地流失等效果，但因反射加強而加劇堤腳沖刷，又為防止堤腳沖刷及越波再加拋消波塊或加高堤高，不但妨礙民眾親海權且破壞海岸景觀。因此逐漸瞭解以硬性工法阻擋波浪之方式並非理想，需以柔性工法創造海灘，借海灘自然吸收及抑制波能，始能避免海灘之破壞與侵蝕，故漸以緩坡堤、防砂突堤、離岸堤、潛堤、養灘等方式交互使用之整合性海岸保護工法，以「面」之保護方式控制漂砂、保護海灘進而抑制侵蝕(如圖 3-1)。近年來謀求工程與海岸自然環境之和諧共生漸受重視，兼具親水、生態及景觀之海岸保護結構物亦因應而生。

1/5 且不使用消波工，其功用一方面保護海岸侵蝕，同時可配合景觀規劃海岸環境空間，兼具親水、景觀機能。

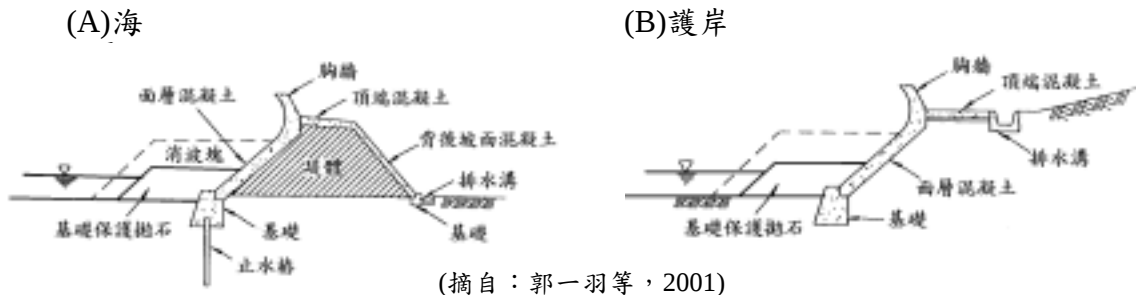


圖 3-2 海堤與護岸示意圖



照片 3-1 海堤例



照片 3-2 護岸例

(摘自：<http://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/>)

2. 突堤

突堤(groins)為垂直於海岸線或與海岸線形成某一夾角，由沙灘向海興建突出海岸之結構物(如圖 3-3)，用以攔截沿岸漂砂、控制海灘地形、改變海岸線方向、阻擋沿岸流或壓迫潮流方向，進而減少保護區域之海岸侵蝕。突堤對垂直海岸方向之輸砂並無影響，但對波浪斜向入射之海岸則因有限制沿岸輸砂之功能，能使二突堤間小範圍內之漂砂保持平衡，對侵蝕嚴重之海岸頗具保護成效，故突堤或突堤群(如照片 3-3、照片 3-4)常用於綿長海灘之保護。由於突堤具有阻擋沿岸輸砂之作用，故可能促進上游側海灘之堆積，但過長之突堤則可能完全阻擋沿岸漂砂，反而會導致下游海灘之侵蝕。突堤群不僅能保護海

岸免於侵蝕，配合養灘更可促進海灘面積之增加，供民眾休憩場所使用。

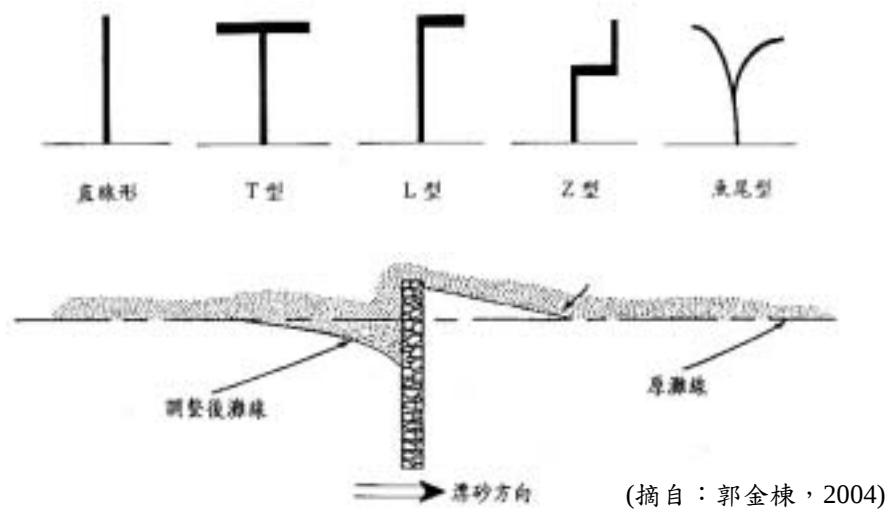


圖 3-3 突堤形狀種類與攔砂示意圖

(摘自 <http://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/>)



照片 3-3 突堤例



照片 3-4 旗津海岸突堤群

3.離岸堤

離岸堤(detached breakwater)為離開陸地且約平行海岸線之堤防，能使波浪於堤前減衰，漂砂在堤後堆積，間接發揮安定海灘之功能(如圖 3-4)。由於離岸堤背後波浪繞射形成遮蔽區，波高及沿岸流速減緩，使沿岸漂砂沉澱淤積，形成突出海岸地形之砂舌(salient)，最後形成繫陸沙洲(tombolo)，一旦繫陸沙洲形成則沿岸輸砂完全被阻斷，無法繞過堤體供給下游海岸，下游海岸將形成嚴重侵蝕。離岸堤最初由義大利、日本所採用(如照片 3-5、照片 3-6)，因效果良好，美、歐漸多採用作為保護海岸促進沙灘成長之結構物。一般而言，由於離岸堤建

於海中結構體受力頗大，故工程費高、施工不易且維護費可觀，以往海岸保護較少採用，近年來隨著其防護功能發揮、土地開發利用及施工技術之進步，使用離岸堤之案例亦增多。由於離岸堤突出海面嶙峋不雅觀，近年來有改採潛堤之趨勢，即使堤頂低於平均低潮位，以免破壞海岸景觀。

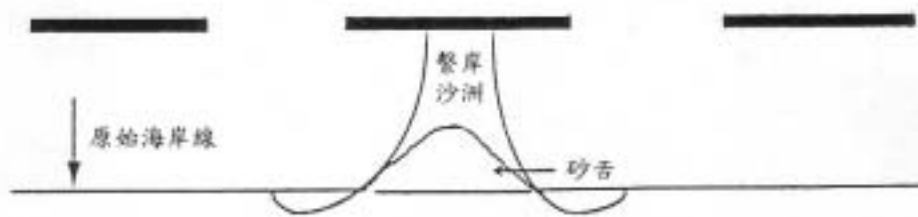


圖 3-4 離岸堤示意圖



(摘自 <http://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/>)

照片 3-5 離岸堤例



(摘自：日本土木學會，1994)

照片 3-6 日本皆生海岸離岸堤群

4. 潛堤與人工潛礁

潛堤(submerged breakwater)與人工潛礁(artificial reef)為突出海底潛沒於水面下之結構物(如圖 3-5)，借由其形狀(堤頂水深、堤寬、坡度、空隙)，使入射波產生碎波、分裂、滲透、反射或折射等減衰入射波能量或改變其進行方向，抑制堤後透過波能量，降低水流流速使漂砂沉積於堤後，可控制海灘侵蝕達到保護海岸之目的。其功能類似離岸堤，但阻擋之水流斷面積較離岸堤少，對海水循環妨礙較小，對生態環境影響相對減輕，且結構物不露出水面對景觀破壞較少，此工法較符合環保之需求。潛堤與人工潛礁之功能相近，主要不同處為人工潛

礁之堤體較寬(數倍於波高或水深，約為波長之半以上)、堤頂水深較大且具透水性。由於人工潛礁(如照片 3-7、照片 3-8)具有寬敞之淺水部份，使碎波後及小波浪再碎波摩擦效果較大，故波浪消減比一般潛堤明顯，但因堤體大工程費亦較為昂貴。本工法實例不多，仍在開發階段，日本為改善海岸景觀不惜將離岸堤露出水面部份拆除移至內、外坡改成潛堤之作法值得參考。

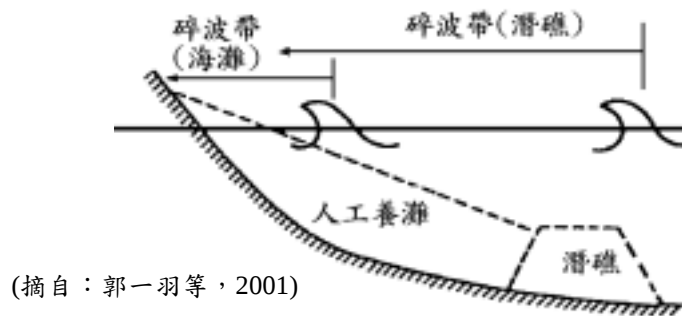


圖 3-5 潛堤與人工潛礁示意圖



(摘自：日本土木學會，1994)



(摘自：日本土木學會，1994)

照片 3-7 日本鐘崎海岸人工潛礁 照片 3-8 日本新潟海岸人工潛礁

5. 人工岬灣

岬灣係存在於自然界中常見之一種海岸地形，天然岬灣在平面上有大小與深淺之別，安定性則依照漂砂進入岬灣之多寡，而有靜態平衡與動態平衡岬灣之分。人工岬灣(headland control)為摹擬大自然波浪經由折射與上游端岬頭(headland)之繞射作用，使卓越方向波浪能幾乎垂直達到灣岸內各處海岸線，降低沿岸漂砂量，而於岬頭之間所形成之安定海岸，用以保護與安定因上游漂砂源斷絕而被侵蝕之海岸(如圖 3-6、照片 3-9)。人工岬灣可以在平直海岸以侵蝕與堆積相平衡之

方式來造灣，或以不影響原有海岸線之方式造灣，或在受侵蝕之大海灣內加築幾個小灣以穩定大灣，亦可在凸出之狹長沙洲外圍以人工岬灣保護沙洲。

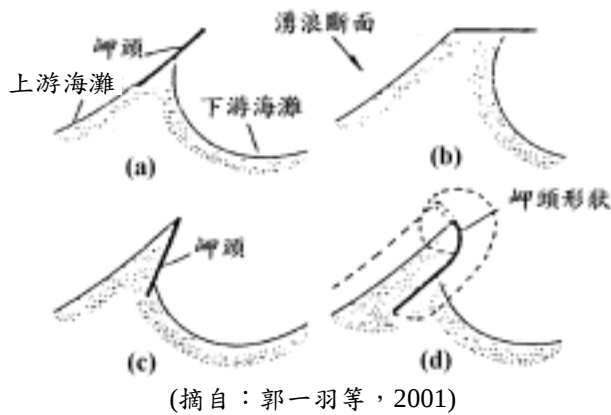


圖 3-6 岬頭形狀與設置方向



(摘自：日本土木學會，1994)

照片 3-9 日本白浜海岸人工岬灣

6. 魚尾型防波堤

海岸保護工法中，突堤與人工岬灣之主要差別為後者利用大型結構物消減下游海岸之侵蝕而利於海灘之形成，但二者並無離岸堤利用較少之結構將波浪阻擋產生繞射保護海灘之優點。故 Fleming(1990) 結合上述突堤、離岸堤及人工岬灣等保護工法之優點，發展出魚尾型防波堤(fishtailed breakwater)作為海岸保全工法(如圖 3-7、照片 3-10)。其保護沙灘之機制，於防波堤 OA 與 OB 段主要用來消減波浪能量，而 AOC 段用來阻礙沿岸漂砂，故上游海灘形成主要利用類似突堤形成之 AOC 防波堤正常堆積而來，下游海灘主要利用離岸堤之原理，即 AO 與 OB 防波堤形成沙灘。AC 段可阻絕及改變沿岸、離岸及潮流之方向以降低海岸侵蝕至最低程度，將 AC 段設計成彎曲線且在 C 點處與海岸線垂直；COA 彎曲之大小以減少波浪反射率，以減緩堤址之冲刷。

7. 地工砂管(袋)

地工砂管(袋)之應用始於 1970 年代，由美國陸軍工兵署於德州裝填砂質泥土於尼龍袋中，作為波浪碎波之用。隨著地工織物技術之發展，利用高強度地工織物縫合成一大型之密閉結構，內部以機械或水力填入泥沙製成地工砂管(袋)，在海岸、港灣工程方面可應用於構築突堤、護岸、離岸堤、防波堤等(如圖 3-8、照片 3-11、照片 3-12)，並配合人工養灘、海岸景觀再造等工法。近年來歐美國家利用屬於柔性結構之地工砂管(袋)作為臨時性或永久性之結構物，用以抵禦波浪之沖蝕。應用於海岸保護工法上，先將地工砂管鋪設於欲保護之海岸線上，抽取當地海沙，混水填充於地工沙管中，其上可鋪設當地之土沙形成人工沙丘，或覆蓋石料、混凝土塊形成突堤、離岸堤等。

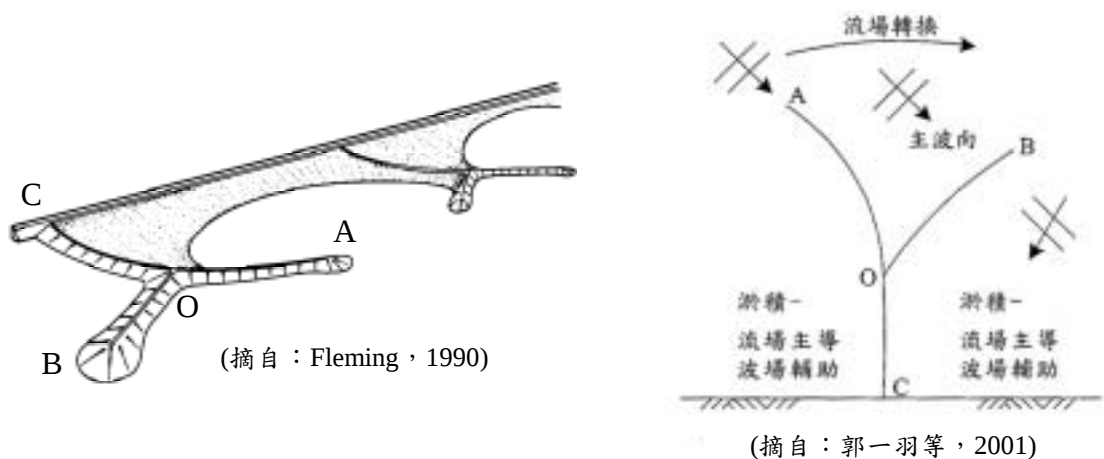
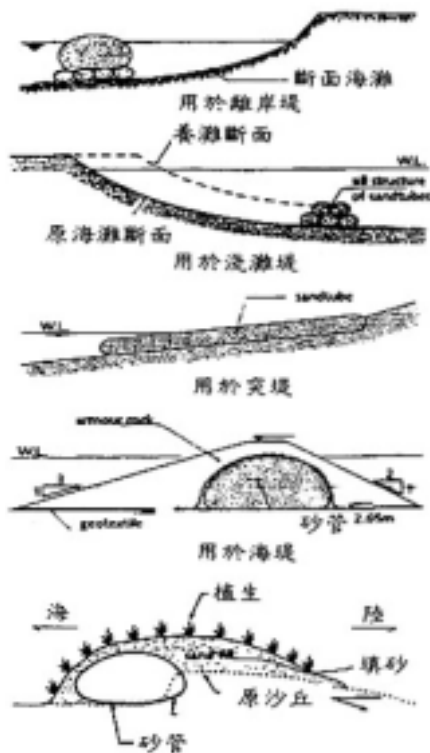


圖 3-7 魚尾型防波堤與保護海灘示意圖



照片 3-10 英國 Morecambe 海岸魚尾型防波堤



(摘自：郭金棟，2004)



照片 3-11 澳洲飛魚岬海岸地工砂管



圖 3-8 地工砂管應用於海岸保護 照片 3-12 德國 Isle of Sylt 海岸地工砂管

8.重力排水

重力排水係於沙灘底下埋設透水層增加沙灘透水能力，降低水位穩定海灘之工法，如圖 3-9 所示。透水層材料可使用石料或混凝土塊包覆地工織布，有效之透水系統使溯升之波浪水流不經坡面回流，而經由下滲至地下排水系統流回海域，可使沙灘免於受波浪作用侵蝕。其功用一方面減少沙灘坡面之沙粒被回流海水帶走，增加沙灘坡面之安定性，二方面下滲入沙灘之海水可因過濾而得到淨化，三方面沙灘下面有海水帶來之有機養份，提供底棲生物之食物來源，增加生物豐富性。本工法在埋設透水層或集水管時難免會破壞沙灘，但施工後海灘恢復原狀不致於破壞海岸景觀，頗受歐美日國家注目(如圖 3-10、照片 3-13)，尚在繼續研究中，惟此方法使用於局部海岸防侵尚可，但整片海岸使用不無問題。

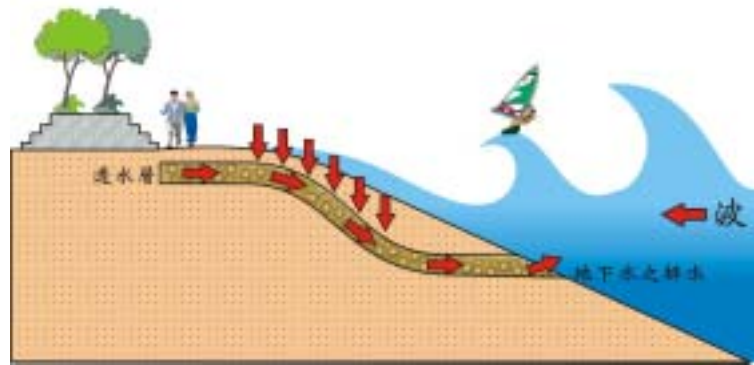
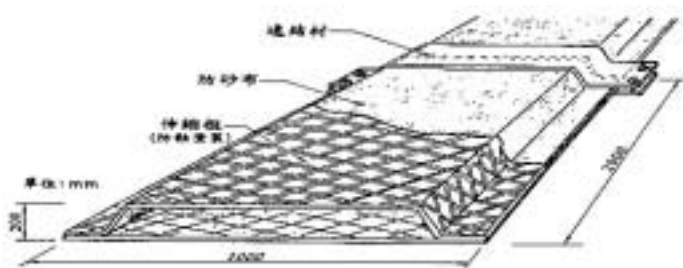


圖 3-9 重力排水示意圖



(摘自：郭金棟，2004)

圖 3-10 日本波崎海岸透水材詳圖



照片 3-13 日本波崎海岸重力排水施工

9.人工養灘

沙灘為天然消波體，利用工程手法在受侵蝕之海岸補給砂源造灘，稱為人工養灘(artificial beach nourishment)。一般係利用浚渫或挖掘土砂，以船隻、車輛或幫浦等人為方法，利用風力、波浪、水流等自然力造成海灘，改善或維護海灘免受侵蝕，亦即將粒徑大小適宜之砂源補給至侵蝕地區，使沿岸輸砂量供需達到平衡狀態，進而達到海灘穩定之目的，屬於非結構性之海岸侵蝕防治工法。應用人工養灘時必須先瞭解漂砂之優勢方向、補給之土砂量與性質、海灘坡度等特性，其工法可分為土砂側渡法、直接置砂法等(如圖 3-11、照片 3-14、照片 3-15)。養灘無法一勞永逸，養灘後土砂仍有繼續流失之趨勢，故需不斷繼續補充土砂養灘，或輔以適當之人工結構物，如突堤、離岸堤、潛堤、人工岬頭等設施，以減緩土砂流失，同時創造親水性之海岸空間。



圖 3-11 土砂側渡法示意圖



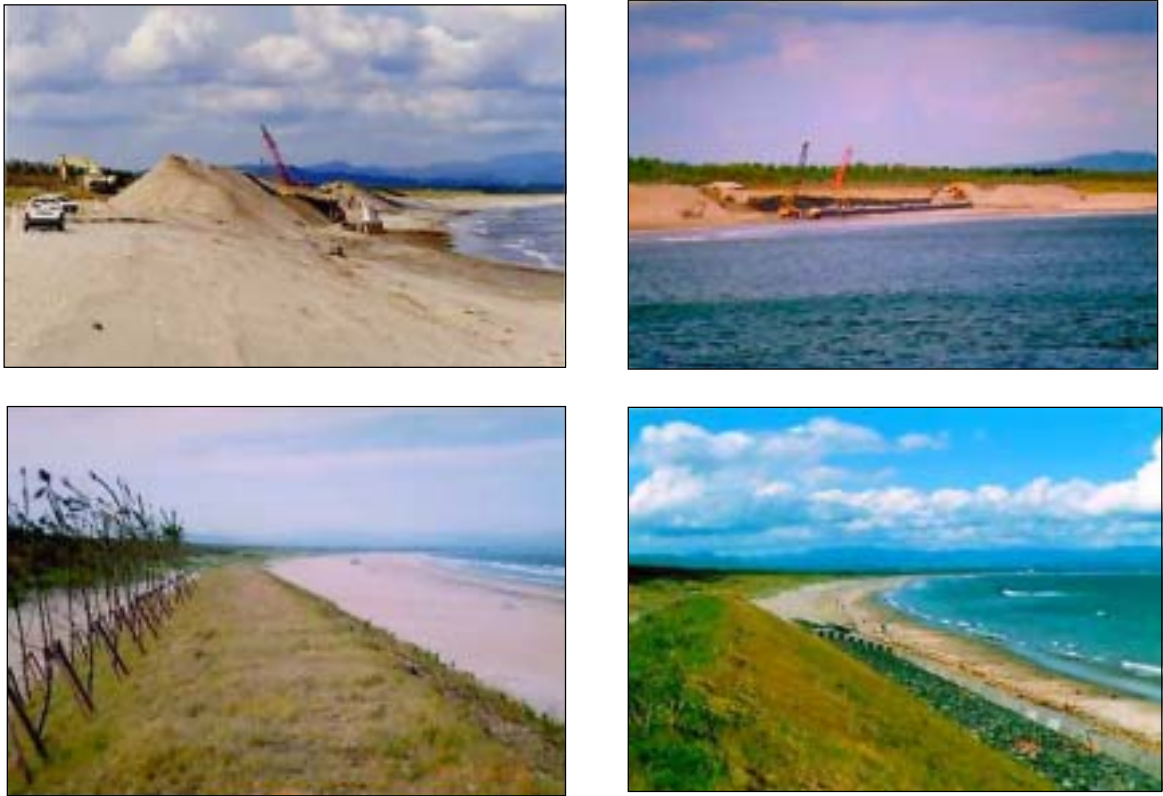
照片 3-14 土砂側渡法施工情形



照片 3-15 安平海岸直接置砂法

10. 人工砂丘

砂丘為海岸地區常見之地形景觀，由於其特殊之地形位置與組成特徵，使其成為海岸自然防禦系統中之最後一道防線。近年來由於海岸空間開發之壓力，海岸砂丘遭受多方人為破壞，連帶使得海岸安全出現危機，故有以人工方式重建砂丘恢復自然環境生態之工法，同時達到海岸保護之目的(如照片 3-16)。人工砂丘之建造係依據物理原理，干擾地表面之氣流而消減其能量，促進氣流中之沙粒沉澱堆積，具有調適與緩衝海岸地形環境變化、防止海水淹沒陸地等功能。最常見之方法係築沙籬，如使用木材、竹子、塑膠、鋼材等具有孔網之材料，以消散風能達到堆積風沙之目的，又可減輕結構體所受外力負荷。大多數之人工砂丘重建技術往往配合編築沙籬與植物植生二種方法，歐、美及澳洲地區已有廣大之人工砂丘發育，歐洲海岸甚至有達三、四百年歷史之人工砂丘。



(摘自 <http://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/>)

照片 3-16 人工砂丘施工與設置例

11. 砂籬與植栽定砂

廣義之漂砂包含因風引起之飛砂現象，海岸飛砂地區設置攔砂籬以攔截砂石，再輔助種植甜根子草、濱刺麥、林投等定砂植物，以穩定砂丘，為最常用且最有效之方法(如照片 3-17)。編籬定砂依材料、構築方法之不同略可分為柴枝攔砂籬、蘆葦攔砂籬、竹條攔砂籬、木皮攔砂籬、竹梢攔砂籬等，或利用尼龍網配合竹子構築成防風網。台灣因盛產竹子，價格便宜，能大量生產與採收，用以建造攔砂籬頗符合就地取材、物盡其用之原則，故目前台灣較常見之攔砂籬以竹片或竹梢攔砂籬為主。近年來由於人工費用之攀升，許多海濱地區紛紛使用尼龍防風網作為攔砂防風之主要設施，同時為加速定砂效果，於防風網後方栽植草海桐、刺桐、黃槿等多種植物，不僅可有效定砂，並可達到快速綠化之效果。



將軍漁港海岸



(摘自 <http://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/>)

(摘自 <http://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/>)

照片 3-17 砂籬與植栽定砂例

12. 整合性海岸保護

近年來海岸保護漸由「線」之防護改為「面」之防護方式，亦即利用上述海岸保護方式交互使用之整合性海岸保護工法，一般之整治模式與適用海岸如表 3-1 所示。藉由柔性工法創造出之海灘，發揮自然吸收並抑制波能之功效，以避免海灘之破壞與侵蝕，並兼顧海岸景觀之維護(如照片 3-18)。

表 3-1 整合性海岸保護工法及其適用海岸

整 治 模 式	適 用 海 岸
高潮、海嘯防波堤＋堤防、護岸	灣狀海岸
離岸堤＋堤防、護岸	侵蝕趨勢很強之海岸
潛堤＋堤防、護岸	尋求與周遭環境調和之海岸
浮防波堤＋堤防、護岸	水深及潮差大之海岸
堤防、護岸＋養灘	海洋遊憩需求高之海岸
離岸堤＋堤防、護岸＋養灘	海洋遊憩需求高之海岸
潛堤＋堤防、護岸＋養灘	海洋遊憩需求高之海岸
人工潛礁＋堤防、護岸＋養灘	尋求與周遭環境調和之海岸
複斷面堤防、護岸及緩坡斜坡堤護岸＋養灘	水域有設施限制之海岸
人工岬灣＋堤防、護岸＋養灘	海洋遊憩需求高之海岸

資料來源：「海岸工程學」，郭一羽等(2001)。

(摘自：日本土木學會，1994)



(A)結合離岸堤、岬頭及人工養灘 (B)結合 T 型突堤、緩傾斜護岸及人工養灘

照片 3-18 整合性海岸保護工法例

3.3 海岸保護工法實行效果

傳統海岸保護工法主要以防潮禦浪為主，隨著時代潮流之發展趨勢，順乎海岸自然性質及海岸資源永續發展已成為未來海岸防治之主軸，即未來海岸防護措施除防災功能外，尚需兼具景觀、親水、生態等功能，謀求海岸保護工程建設與海岸環境共生共榮。茲就各項海岸保護工法之屬性、優缺點及功能概述如后：

3.3.1 海岸保護工法之屬性

目前常用之海岸保護工法屬性大致可分為硬性工法、軟(柔)性工法及軟硬性結合工法等，其特性分別說明如下：

1. 硬性工法

硬性工法為傳統海岸防護措施，其主要策略係以硬體結構物擾亂或改變自然之原有海岸動力系統，以達到局部海岸地區之防護目的。此工法對高能量海潮與波浪之突然來襲確有顯著功效，而建造費用亦相當昂貴。硬性工法雖有抵抗強烈浪潮之功能，但對海岸生態環境及景觀之影響常居負面，同時硬體結構物會加速砂粒之沖蝕，造成沙灘之流失及結構物之不穩定，且結構物施工完成即不易變更或挪移。常見之硬性工法包括：

- (1) 海堤、護岸
- (2) 突堤
- (3) 離岸堤
- (4) 潛堤、人工潛礁

2. 軟(柔)性工法

軟(柔)性工法為近代海域環保意識抬頭及審美觀轉變雙重衝擊下之產物，其主要精神在於順應自然界之趨勢作設計，謀求工程建設與海岸環境之調和，以防止海岸砂土之流失，而不作直接對抗考慮。常見之軟(柔)性工法包括：

- (1) 人工岬灣
- (2) 地工砂管
- (3) 重力排水
- (4) 人工養灘
- (5) 人工砂丘
- (6) 砂籬與植栽定砂

3. 軟硬性結合工法

軟硬性工法各有其優缺點與限制，抵抗強風巨浪以硬性工法較有效，但在景觀與環境方面較不理想，而軟性工法之功能正好相反。因此結合軟硬性工法之優點，兼顧防災及環境品質，相得益彰。此種軟硬性結合工法又可稱為整合性工法，如突堤、離岸堤結合人工養灘，人工岬灣、離岸堤結合人工養灘等。

3.3.2 海岸保護工法之優缺點

常用海岸保護工法之控制因子及其優缺點如表 3-2 所示，各有其使用特性，應就所需要之目的選擇適當工法。

海堤為海岸侵蝕防禦中最普遍使用之方法，具防潮禦浪功能，惟海堤常縮短原有海灘距離，波浪在堤前短促距離內波能未能消耗殆盡，不當設計可能使這些能量轉為反射波及因潮能增加而加速海岸侵蝕。由於不當興建海堤會加速海岸侵蝕，如非屬必要以不建為宜，如有充份腹地海堤應儘量後退，以保留海灘吸收波能。

突堤具有直接阻止海岸漂砂之功能，如設計過長將完全阻絕向下游移動之漂砂，形成上游側堆積、下游側侵蝕，遮蔽區堆積、反射區侵蝕之情況。如突堤堤線與波向角夾角太小，近堤線附近會因反射波及尾波而沖刷，致灘線後退，乃至於堤根發生侵蝕，故突堤設計較不適合垂直入射之波浪。

離岸堤雖能在堤後遮蔽區使波浪變小並形成環流，將泥砂帶入遮蔽區內堆積形成沙舌或繫岸沙洲，但離岸堤開口部份水流流速增加，可能形成侵蝕，堤體兩側因環流將泥砂帶往遮蔽區，故有明顯侵蝕。離岸堤通常構築於海中，故堤體常受波浪作用而崩潰或滑落，必須經常維護。

人工岬灣可以安定已經受到侵蝕之海岸，使卓越方向之波浪幾乎垂直到達灣岸內各處海岸線，將沿岸漂沙降為最低。然而採用人工岬灣，後灘區之土砂會被颱風波浪帶走，而在碎波點附近形成有保護性

之潛洲，再由繼之而來之湧浪將它搬回，因此實際應用時須考慮颱風波浪等外在因素及其作用歷程之影響。

潛堤與人工潛礁之構築常影響船隻之航行，施工時必須標示明確位置或設置警示設施。堤腳沖刷雖不若離岸堤嚴重，設計時仍需注意堤址附近流況，以減少沖刷之危害。

人工養灘雖為較理想之柔性工法，但養灘料來源取得不易，成本相對增加，且養灘粒料必須適當篩選，如養灘料太細於大潮大浪之侵襲即大量損失，可能造成環境污染。

表 3-2 海岸保護工法控制因子及優缺點比較表

工法種類	控制因子	控制目標	優 點	缺 點	價格
傳統海堤	以硬體結構物防潮禦浪	防潮、禦浪、線之防禦。	施工容易，成本較低。	堤前反射，容易加速沙灘流失，造成海灘侵蝕，親水性較差。	普通
緩坡海堤	向離岸漂砂傳輸	藉緩坡增加波浪溯上距離以消減波浪能量	反射波浪較弱，堤腳沖刷現象得以減輕，景觀與親水性較佳。	須寬廣腹地，對沿岸漂砂傳輸掌控較弱，暴潮來襲時禦浪效果有限。	普通
突堤	沿岸流流速、沿岸輸砂。	減緩沿岸流流速，攔阻沿岸漂砂，防止海岸線後退。	結構簡單、施工容易。	易引起堤頭沖刷及造成下游海灘侵蝕加劇。	普通
離岸堤	波浪繞射、近岸流型態、向離岸輸砂。	降低波浪強度，增加防禦縱深，聚砂成灘。	離岸堤後形成砂舌或繫陸沙洲，具養灘效果。	堤趾易沖刷，維護不易，並易導致下游側發生侵蝕，景觀性差。	昂貴
離岸潛堤	近岸流型態、向離岸輸砂。	消減波浪能量，聚砂成灘。	具抑制漂砂往外海移動之功能，不影響景觀。	對沿岸輸砂傳輸之掌控力較弱，潮差大時不適用，須考慮航行安全。	昂貴
人工岬灣	藉人工岬頭掌握沿岸漂砂傳輸	點之防禦，藉改變波場以達到海灘穩定之目的。	海灣形成靜態平衡	應用在波浪較小且沿岸漂砂方向恆定之海岸較具功效	經濟
人工養灘	以持續人工補砂維持海灘之存在	維持海灘存在以防潮禦浪	形成自然海灘，保持海灘以吸收波能，具親水性。	須持續補砂，執行成本高，與其他工法配合效果較佳。	昂貴
人工砂丘	以人工補砂維持海岸砂丘之存在	維持海岸砂丘以防潮禦浪	為良好波能吸收體，親水性佳。	須有廣大腹地，且需持續補砂或配合砂籬、植栽定砂效果較佳。	昂貴
整合性海岸保護	結合離岸(潛)堤、突堤、自然(人工)海灘、緩坡海堤等整合性工法。	以面之防禦擴大抵禦浪潮侵襲之防禦縱深	安全性高，景觀性與親水性佳。	須有寬廣腹地且經費高	昂貴

參考資料： 1.國立成功大學水工試驗所(2002)，「海灘侵蝕防治新科技研發(3/4)」。
2.郭一羽等(2001)，海岸工程學。

3.3.3 海岸保護工法之功能

各項海岸保護工法之功能均不同，應分別由安全性、耐久性、經濟性、施工性、環境衝擊與景觀、休憩、生態等方面綜合評估，如表 3-3 所示。安全性包括受波力及其他外力作用時之結構物安全，以及興建後對周邊之危害程度。經濟性包括建設工程費、用地補償費等。施工上因陸地施工或海上施工所需之施工設備及工程費用相差很大，同時海上施工往往因工期、施工場地受限制而有相當差異。環境衝擊包括對海岸地形平衡之破壞、陸上與水生動植物棲息環境之破壞及水質影響等。景觀為海岸工程建設愈來愈受重視之問題，不僅避免破壞海岸景觀，更需加強水岸設計，積極改善沿岸景觀，提供民眾海邊親水活動與休閒空間。

表 3-3 海岸防護措施之各種功能綜合比較表

防護措施 \ 功能別		安全	景觀 (親水)	環境	生態
硬性 工法	沿岸線形(海堤、護岸、直立岸壁等)	●	×	×	×
	垂直岸線型(突堤、導流堤、防波堤等)	◎	○	×	×
	離岸型(離岸堤、離岸潛堤等)	●	◎	◎	○
軟性 工法	砂丘建造	◎	●	●	●
	人工養灘	◎	●	◎	◎
	人工岬灣	◎	◎	○	○
軟硬性結合工法		●	●	◎	◎

註 1.符號說明：● 優良、◎ 尚可、○ 不佳、× 極差。

2.參考資料：薛曙生(2002)，「海岸工法之規劃與管理」。

3.4 開發案例

海岸保護工法由過去以直立式海堤、護岸為主之「線的防禦」，演進為以潛堤、離岸堤、突堤、人工岬頭等配合人工養灘及緩坡海堤、

護岸之「面的防禦」，以增加海岸防禦縱深。同時因應整體環境變化及時代發展潮流，順應海岸自然性質及海岸資源永續發展之觀點漸受重視，未來海岸保護除防止災害保障生命財產安全外，並朝向兼具親水、景觀、生態等功能，故結合軟硬性工法之整合性海岸保護已逐漸成為海岸防治之主軸。蒐集整理已開發之軟硬性工法開發案例如后，以瞭解海岸保護工法之發展概況與趨勢，俾供未來海岸防護方法研擬之參考。

計畫名稱：高雄縣茄萣鄉海岸保護工程

主辦機關：水利署第六河川局

保護工法：海堤、離岸堤

計畫概要：近年來由於河川上游水土保持與整治工作之持續進行，河川輸砂補注海岸漂砂之砂源明顯減少，致台灣西南海岸普遍發生侵蝕現象。高雄縣茄萣鄉海濱原闢有海堤設施，近年來亦面臨海灘侵蝕後退之問題，由於海堤後側隔台 17 線道路即為當地人口密集之村莊，海岸防護工作不容輕忽，故主管機關於二仁溪南側海岸陸續興建 16 座離岸堤，漸形成砂舌與繫陸沙洲，海灘侵蝕現象已獲改善。離岸堤後之水域與沙洲已成為民眾晨泳與休憩玩耍場所，春、冬季時並可見海藻著生於離岸堤上，兼具豐富海岸生態效果。

參考圖片：

(摘自：漢光文化事業股份有限公司，2000)



照片 3-19 茄萣海岸一



照片 3-21 離岸堤後民眾晨泳情形



照片 3-20 茄萣海岸二



照片 3-22 離岸堤海藻著生情形

計畫名稱：花蓮市海岸保護工程

主辦機關：水利署第九河川局

保護工法：海堤、潛堤

計畫概要：花蓮市沿岸由美崙溪口至花蓮溪口段，長年受到颱風波浪侵襲及花蓮港東防波堤延建完成後之岬灣效應，海岸線逐年退縮，近 50 年來退縮 100 多公尺，過去所興建之階梯式觀光海堤亦先後遭受颱風波浪作用而崩坍。為保護海岸、防止侵蝕，主管機關於南濱海岸以 30 噸型消波塊設置 7 座潛堤合計 280 公尺，於化仁海岸設置 4 座潛堤 280 公尺，以消波減浪、保護海岸及防止侵蝕，穩固保護整個南濱公園及防止海岸線退縮，並提供市民假日休閒及親水活動場所。

參考圖片：



圖 3-12 花蓮海岸保護工程平面圖

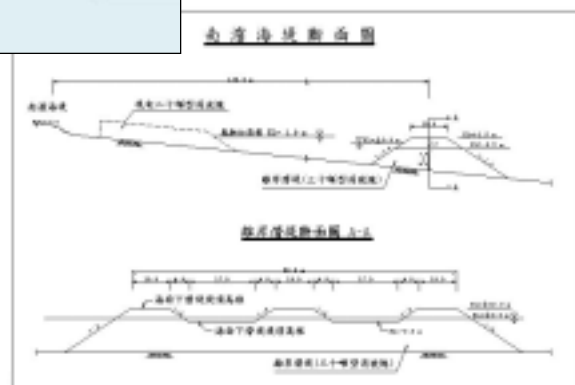


圖 3-13 南濱離岸潛堤斷面圖

計畫名稱：日本天橋立海岸侵蝕防治

主辦機關：京都府

保護工法：突堤、迂迴供砂

計畫概要：位於日本京都府之天橋立原為日本海宮津灣發達之砂嘴，係日本著名三景之一，由於治山防洪後砂源減少及受鄰近日置港、江尻港防波堤截斷部份砂源之影響，破壞海岸漂砂供給平衡，導致 1945 年起日漸侵蝕，砂嘴寬度變窄，故於 1951~1971 年共興建 61 座拋石突堤以穩定海灘，並於 1975 年起分五年，以每年 4,000m³ 迂迴供砂方式，自海灣浚挖土砂輸送至突堤上游以涵養此段海岸，同時提供遊憩親水環境。

參考圖片：

(摘自：日本土木學會，1994)



照片 3-23 天橋立 1979 年鳥瞰

(摘自：日本海洋開發建設協會，1995)



圖 3-14 天橋立迂迴供砂途徑



照片 3-24 天橋立 1990 年鳥瞰

計畫名稱：日本片添浜海岸整備計畫

主辦機關：山口縣

保護工法：突堤 2 座、養灘 1.8 公頃、潛堤 580m、緩傾斜護岸 720m、
都市公園 88.7 公頃

計畫概要：日本片添浜海岸係位於瀨戶內海屋代島之東部，為一水質良好、風景優美之海洋遊憩基地，為防止海岸侵蝕及提昇環境舒適性，海岸整備採用突堤、潛堤、緩傾斜護岸等構造，並配合沙灘養灘。

(摘自：日本海洋開發建設協會，1995)

參考圖片：

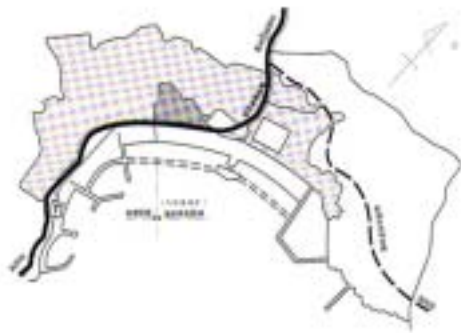


圖 3-15 片添浜海岸平面圖



照片 3-25 片添浜海岸拱橋連接之突堤

(摘自：日本海洋開發建設協會，1995)



照片 3-36 片添浜海岸

計畫名稱：日本鹿島灘岬頭控制計畫

主辦機關：茨城縣

保護工法：突堤式人工岬頭 40 座(每座 150m、間隔 1km)

計畫概要：鹿島灘為位於大洗港至利根川河口之沙質海岸，由於河川輸砂供給不足及沿岸流作用之影響，致海岸逐漸呈現侵蝕現象，迄 1986 年局部侵蝕達 30 公尺。為防止海岸侵蝕擬定鹿島灘岬頭控制計畫，於長約 96 公里海岸建造 40 座突堤式人工岬頭，堤長 150 公尺，岬頭呈半圓船錨式，船錨直徑 100 公尺，每座突堤間隔 1 公里，以安定此段海岸。本計畫自 1985 年開始實施，已完成之 40 座船錨式岬頭間幾近安定之海岸線隨冬、夏季波浪方向之改變而擺動。

參考圖片：

(摘自：日本海洋開發建設協會，1995)

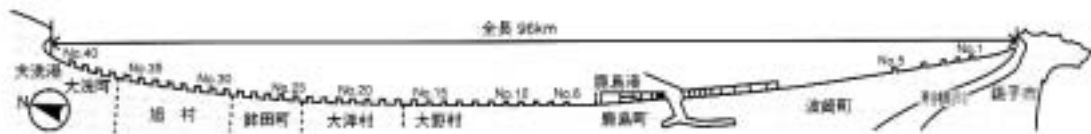


圖 3-16 鹿島灘岬頭控制計畫平面圖

(摘自：日本土木學會，1994)

(摘自：日本海洋開發建設協會，1995)



照片 3-27 鹿島灘防治侵蝕實施前



照片 3-28 鹿島灘防治侵蝕實施後

第四章 生態工法於海岸保護工程之應用

生態工法起源於歐洲二十世紀初，在國際間謀求地球環境永續發展之潮流中，已成為重要工程方法之一。國內於民國 87 年引進生態工法，政府並積極推動公共工程採用生態工法，由早期主要應用於溪流整治、野溪復育、水利工程、水土保持等，近年來已有更多元之發展，包括海岸、港灣工程亦逐漸重視生態環境之重要性。茲蒐集歸納生態工法之發展及於海岸保護工程之應用情形，俾供生態型海岸保護工法研擬之參考。

4.1 生態工法概述

因應地球整體環境之變遷與自然資源保育之重要性，人類科學技術必須考量自然環境之永續利用，修正「人定勝天、征服自然」之心態，建立尊重自然、愛好自然，進而親近自然。因此，因應世界潮流趨勢及整體環境因素，生態工法之推行已是必行之方向。參考國內相關生態工法專書(林鎮洋等，2003、2004)及行政院公共工程委員會全國生態工法入口網(<http://eem.pcc.gov.tw/natural/index.php>)資料，概述生態工法之沿革、精神及基本考量如下。

4.1.1 生態工法之沿革

二十世紀初，歐洲地區拜工業發展之賜，社會經濟驟然起飛，在提升物質生活豐富度之餘，亦因各項需求接踵而至，必須大量開發自然資源以因應社會發展之步調。但隨著森林野地之過度開發利用，大規模災害因而接二連三發生，包括雪崩、山崩、洪氾等，尤其阿爾卑斯山區鄰近數國，被迫必須立即提出可行因應之道。據此，1938 年德國 Seifert 首先提出「近自然河溪整治」之概念，希望能用自然之方法來整治河川，可謂最早生態工法之觀念。1962 年美國生態學家

H.T.Odum 等提出將自組行為之生態學概念運用於工程中，首度提及「生態工程」(ecological engineering)一詞，直至 1989 年生態學家 Mitsch 與 Jorgensen 正式探討生態工程之觀念並賦予定義，講求應用生態原則及自然力量之工程技術時代可謂正式來臨。經過數十年之研究與討論，生態工法逐漸由一種概念，轉變成實際之施工準則，生態工法亦從歐陸逐步散播到北美、日本，並成為全世界重要工程方法之一。

有關生態之治理概念有眾多相似名詞，如近自然河溪管理、近自然荒溪治理等，在德國稱之為河溪生態自然工法，澳洲稱為綠植被工法，日本則有近自然工法、近自然工事、自然調合型等。

4.1.2 生態工法之精神

生態工法基本上係遵循自然法則，使自然與人類共存共榮，將屬於自然之地方還給自然。生態工法所重建之近自然環境，能提供日常休閒遊憩空間、各類生物棲息環境、治山防洪、國土保安、水土保持、生態保育、環境綠美化、景觀維護、自然教育、國民健康及森林遊憩等功能。根據林鎮洋、邱逸文(2003)歸納生態工法之基本精神如下：

1.創造具豐富多樣性之環境條件

近年來為求簡便而迅速之工程設計與施工方式，棲地之地形與環境因子被單純化，而後果是造成貧相而不安定(無法達到動態穩定)之生態系。未考慮生態因素而過度人工化之地貌與環境型態，從此演變後不再具有相似之處。因此，為提高生態系之穩定度與豐富度，便需從環境條件之修正著手：

- (1)盡量設計雕塑不規則之空間型態，使地型保有起伏與多樣之風貌。
- (2)無須統一空間中縱斷面、橫斷面之配置。
- (3)周遭立地條件應朝高低不一、疏密不一、種類不一之植被組成為規劃方向，不但有助於蟲魚鳥獸族群之復育，並能提供動人景致，使生態恢復原有之機能。

2.容許生態系自我消長之發生

自然地貌在水文、風化，甚至天然「災害」(指對人類而言有害之風災、地震等)之作用下，於時間軸上創造出動態之空間變化。這種自然作用力提供新生地形成之機會，無疑地能為新物種開創新機。單一化之傳統整治工法，剝奪生態系自我消長之環境條件與能力，缺乏演替「材料」之空間，注定生物族群之滅亡。因此，應盡量提供一定之空間及條件，使自然進行一定之消長，故豐富之環境因素是絕對必要。

3.避免生態系之零碎化

自然環境中原本便存在一種景觀上及生態上之連貫性與延續性，但設計不夠周延之整治規劃案中，往往會製造出片段之生態系及破碎之景觀。這也是生物物種得自人工環境之一大潛在性威脅，因為不完整之棲地無法滿足每一個生命週期中各個階段之所需，亦不足以永久支持各物種族群繁衍上所需之能量。因此，應特別注意如何在規劃設計上，兼顧人類之需求與生態棲地之完整性。

4.1.3 生態工法之基本考量

依據林鎮洋、邱逸文(2003)所述，規劃設計一符合生態工法精神之工程案例，應在下列要項中逐一分析相關限制以及需滿足之條件。若不能滿足生態工法之基本考量，則整體計畫之周延性必定出現某種程度或某方面之瑕疵，致使無法以最經濟、有效之整治措施，提供最大之效益。

1.安全考量

- (1)確實調查整治工程位址之關聯區域中，所有社區、住家，以及合法農地、建物、設施等之位置、面積，以為安全標準評估依據之一。若皆非座落於潛在危險範圍之內，則應進一步以生態之角度，評估侵蝕、沖刷與崩塌等是否為可接受之自然作用力(如是否會影響某些特定需保育之物種)。

- (2)安全標準之計算。
- (3)選定之工法與結構必須滿足力學安全標準。

2.構造物之於周遭生物棲地應有之考量

- (1)結構與造材是否能夠提供生物生息必須之空間與屏障。
- (2)避免動物往返通道之阻隔。
- (3)確保食物來源無虞。
- (4)避免全面栽植單一植物，應依據未受干擾之區塊組成，「模擬」其植物社會結構，尤其應避免外來種之栽種、移入。
- (5)生態調查之意義除有助於瞭解現況外，應進一步深入評估現階段生態組成所反映出之訊息。

3.施工過程中降低生態衝擊之考量

- (1)採取必要之噪音、污染、震動等干擾之防範措施。
- (2)物種之臨時性遷移，若無法全部遷移，則應將能維持其族群衍續之最低個體數，遷移至他處，以確保將來完工後，重新移回時該族群順利繁衍。
- (3)對於特殊生態系或景觀，若無法保全，則應於他處重建，以為補償。

4.後續生態環境管理應有之考量

- (1)養護機關(單位)與其他權責單位之溝通協調。
- (2)持續性之監測以及系統化之資料保存。
- (3)志工培訓，並提供民眾參與之管道，鼓勵社區或特定團體參與後續之經營管理工作。

4.2 國內生態工法發展概況

國內於民國 87 年引進生態工法，並於 89 年大規模運用在 921 重建區之土石流及崩塌地整治(郭清江，2002)，近年來政府更大力推動公共工程採用生態工法。

4.2.1 生態工法之定義

生態工法是依據生態工程之理念所衍生之「遵循自然生態特質之解決問題方法」，亦即生態工法並非「特定工法」，舉凡能以兼顧生態需求並有效治本之技術皆屬之(林鎮洋，2004)。

國內負責推動生態工法之公共工程委員會，於民國 91 年組成生態工法諮詢小組，並於 91 年 8 月共同研議出生態工法之統一定義：「生態工法(Ecotechnology)係指基於對生態系統之深切認知與落實生物多樣性保育及永續發展，而採取以生態為基礎、安全為導向的工程方法，以減少對自然環境造成傷害。」。

上述類似定義為：「生態工法係指人類基於對生態系統的深切認知，為落實生物多樣性保育及永續發展，採取以生態為基礎、安全為導向，減少對生態系統造成傷害的永續系統工程皆稱之。」(郭清江，2004)。

4.2.2 生態工法之研究

國內生態工法之全面性研究始於 88 年，第一個系統化針對生態工法進行長期研究與推廣之研究計畫，於 88 年 7 月由前經濟部水資源局委託國立台北科技大學，展開為期四年之「集水區親水及生態工法之建立」研究(2000~2003)。自 90 年起，包括農委會、水利署、營建署及公共工程委員會等單位，亦分別在各自權責範疇中，委託執行相關之生態工法應用研究計畫。顯示生態工法已受到政府之重視，並引起社會廣泛之注意，以及學術界積極之研討，同時促進國內公共工程開始朝向生態、環境、景觀、人類需求等各方面之平衡，謀求永續發展之實踐。已實施案例主要包括土石流崩塌地整治工程、野溪整治工程、河川整治工程、道路工程、建築工程等。

4.2.3 生態工法之推動與成果

國內應用生態工法於公共工程始於 921 災區土石流、崩塌地之整治，其後逐漸推廣至河溪整治、道路工程等。為配合國家發展計畫落實生物多樣性目標，行政院訂定各分年分期達成率指標，由第一年預計佔總工程經費之 15%逐年遞增，其中所涵蓋公共工程範圍包括道路、鐵路、橋樑、隧道、捷運、機場、海岸港灣、水庫、水力發電廠、自來水、河川整治、下水道、土方資源場、掩埋場、山坡地開發、工業區開發、治山防洪等 19 類工程。期望由生態工法之推動，達成台灣永續發展之終極目標。

依據公共工程委員會(<http://eem.pcc.gov.tw/natural/index.php>)歸納台灣推動生態工法之成果如下：

1.保障人民生命財產・降低天然災害發生頻率與強度

目前災區應用生態工法進行源頭處理，經過兩年來防汛期間之災情回報顯示，經整治過之崩塌坡面多數已獲得穩定。根據水保局在全省 540 處整治地點調查結果顯示，92%整治工不需再做任何維修工作，其中積極參與整治之鄉鎮如古坑、東鎮、埔里、泰安等地，即使在桃芝、納莉兩大颱風接踵襲擊下，相較於其他區域災情顯得輕微。

2.提高人民生活品質・青山長在、綠水長流、魚蝦常駐、人類常遊

生態工法應用於工程建設，除改善民眾居家安全外，亦對當地生態景觀之復育有相當大助益，以砌石護岸穩定河道除創造多孔隙，營造生物性多樣棲地環境，降低對週遭環境景觀之衝擊，塑造獨特風格發展生態旅遊及民宿。不僅帶動社區就業，亦大幅提高當地居民所得、改善生活環境，均衡地區經濟發展與環境保護，實踐村民對這塊土地永續之承諾，讓「青山長在、綠水長流、魚蝦常駐、人類常遊」。

3.充實生態旅遊設施・提升台灣觀光競爭優勢

過去台灣經濟發展立基於自然資源之使用與勤奮不懈之勞動力，隨著政府加入 WTO，農業轉型成為必然之趨勢，如何在兼顧經濟發展與

生態平衡下謀求永續之道，成為政府首要推動之政策方向。隨著全球化之腳步，發展地方化之生態旅遊產業，成為台灣農村在面對加入WTO後產業轉型之新契機，透過生態工法政策之推動，充實生態旅遊設施，進而提升觀光競爭優勢。

4. 奠定社區總體營造基礎・凝聚社區意識，創造在地就業機會

結合地方社區與民間環保團體，形成休戚與共之夥伴關係，藉由訓練地區民眾擔任生態解說工作，植基地方環保意識，並創造在地就業機會。

4.3 國內海岸生態工法研究概況

早期國內生態工法之觀念與技術多應用於溪流整治、野溪復育、水利工程及水土保持等，近年來已有更多元化之應用與發展，亦有少數海岸保護工程採用生態工法之實例可資參考。

4.3.1 相關研究與文獻

過去水利單位與學界在海岸工程領域所提出之相關倡議，包括軟性工法、柔性工法、近自然工法等名稱雖異，實際上均具生態工法之精神與內涵。但不容諱言，國內生態工法於海岸工程之研究尚處起步階段，近年來除前經濟部水資源局委託國立成功大學所執行為期四年(2000~2003)之「海岸工法之新技術研發」計畫涵括生態工法之探討，郭一羽等所著「水域生態工程」(2001)、「海岸景觀與生態設計」(2005)，郭金棟(2004)所著「海岸保護」，經濟部水利署委託中華大學水域生態環境研究中心所進行「海岸生態復育之結構物的研發及應用研究－以新竹港南海岸為例」(2002)，國科會在92年徵求「生態工程專案研究計畫」所規劃六大研究項目之一為「海岸生態工法及復育」，其子題包括海岸生態調查研究、生態型海岸結構物的研發、人工海灘之生態復育技術的研發、海岸生物棲地模擬數值模式的研發等四項，農委會漁

業署亦在 92、93 年委託辦理生態工法應用於漁港港灣工程之研究外，未來尚需投入更多之本土化研究，俾利國內生態工法於海岸工程之推廣與應用。所蒐集相關研究計畫與文獻如下：

1.經濟部水利署研究計畫

- (1)國立成功大學，「海岸工法之新技術研發(1/4～4/4)」，89～92 年。
- (2)中華大學水域生態環境研究中心，「海岸生態復育之結構物的研發及應用研究－以新竹港南海岸為例」，91 年 12 月。
- (3)中華民國環境綠化協會，「海岸生態資料調查及資料庫建置(1/2)」，93 年 12 月。
- (4)中華顧問工程司，「新竹港南海岸生態工法之研擬(1)－人工養灘對底棲生物之影響」，94 年度計畫。

2.農委會漁業署研究計畫

- (1)中華大學水域生態環境研究中心，「委託辦理生態工法應用於漁港港灣工程類別、分析與建議工作」，92 年 12 月。
- (2)郭一羽，「漁港構造物採用生態工法之開發」，93 年 12 月。
- (3)蔡清標，「人工生態潛堤之安定性及波場變化實驗(1/2)」，93 年 12 月。
- (4)中華大學水域生態環境研究中心，「漁港工程生態工法規範之研究探討工作」，94 年 6 月。
- (5)蔡清標，「人工生態潛堤之安定性及波場變化實驗(2/2)」，94 年度計畫。
- (6)交通大學，「漁港水質淨化技術及策略之研究」，94 年度計畫。

3.國科會研究計畫

- (1)郭一羽，「生態型人工養灘之研究」，93 年 10 月。
- (2)郭一羽，「海岸淺灘之生態工法研究－總計畫」，93 年 11 月。
張憲國，「子計畫一：淺灘生態環境創造之研究」。
張睿昇，「子計畫二：附著生物在海岸淺灘的生態效果分析研究」。
簡文達，「子計畫三：微生物在海岸淺灘的生態效果分析研究」。

(3)郭一羽，「評估淺灘生態工法之整合性研究－總計畫」，93 年度計畫。

郭一羽，「子計畫一：人工潮池內外生態差異之研究」。

張憲國，「子計畫二：淺灘二枚貝復育成效之研究」。

朱達仁，「子計畫三：應用底棲生物整合指標法評估在海岸淺灘的環境衝擊及生態效果分析研究」。

林明炤，「子計畫四：利用附著生物評估海岸淺灘生態工法成效之研究」。

簡文達，「子計畫五：應用海洋弧菌評估海岸淺灘生態工法之成效」。

蕭炎泉，「子計畫六：海岸淺灘資訊管理系統之建立」。

(4)郭一羽，「海岸生態工程指標生物的研究」，94 年度計畫。

(5)黃清和，「生態型消波塊之研發與試驗」，94 年度計畫。

4.專書

(1)郭一羽等，水域生態工程，中華大學水域生態環境研究中心，90 年 2 月。

(2)行政院公共工程委員會，2004 生態工法案例編選集，93 年 3 月。

(3)郭金棟，海岸保護，科技圖書股份有限公司，93 年 4 月。

(4)郭一羽、李麗雪，海岸景觀與生態設計，田園城市文化事業有限公司，94 年 4 月。

4.3.2 研究概況

郭金棟(2004)指出海岸近自然工法(不用生態工法而用近自然工法，乃基於內容尚難臻生態工法之境界，而暫以恢復自然海岸為重點)不僅應能防止海岸災害，確保人民生命與財產之安全，同時考量海岸原有自然形態與附近生態系統，景觀、親水、文化與社會經濟等各種因素來辦理海岸整治計畫之一種技術，旨在達成防災確保安全、改善生態環境、提升生活品質與資源之永續利用。在規劃設計海岸近自然工法前應先對海岸有充份之認識與了解才能獲得滿足之結果，其規劃

原則包括「尊重自然預留空間、維護生態多樣性、結構物與景觀環境之融合」等。同時對於目前海岸保護工破壞海岸景觀與環境之缺失，提出「覆蓋化、潛沒化、親水化、綠化、開孔化、近自然化」等整治對策。

郭一羽等(2002)指出整體生存環境的優劣是影響生態系最大的因素，為了達到生態平衡的最佳狀態，我們必須創新海岸保護措施的工法，來保護或創造優良的整體生存環境。所謂生態工法意指創造或改善生態環境的海岸保護措施。創造基礎環境的保護工法著重在無中生有的技術，也就是利用海洋特性與構造物之間相互的關係來設計保護工法，達到創造藻場生存的基礎環境後，讓海洋物種聚集。而改善工法係現階段的海洋環境是具有生物聚集性的，由於水質、空間分佈、日光……等因素破壞了較優良的環境，造成生物的不適應性使得生物聚集的數量減少，這就有賴改善工法來進行讓生態的環境恢復舊觀。改善環境與創造的海岸保護措施，其最大的成效就是讓生態數量回復，或是自然生成而達到自然平衡的狀態，使得海洋生物能生生不息的發展下去。故將海域生態工法依創造基礎環境與改善環境之工法，分類如圖 4-1 所示。

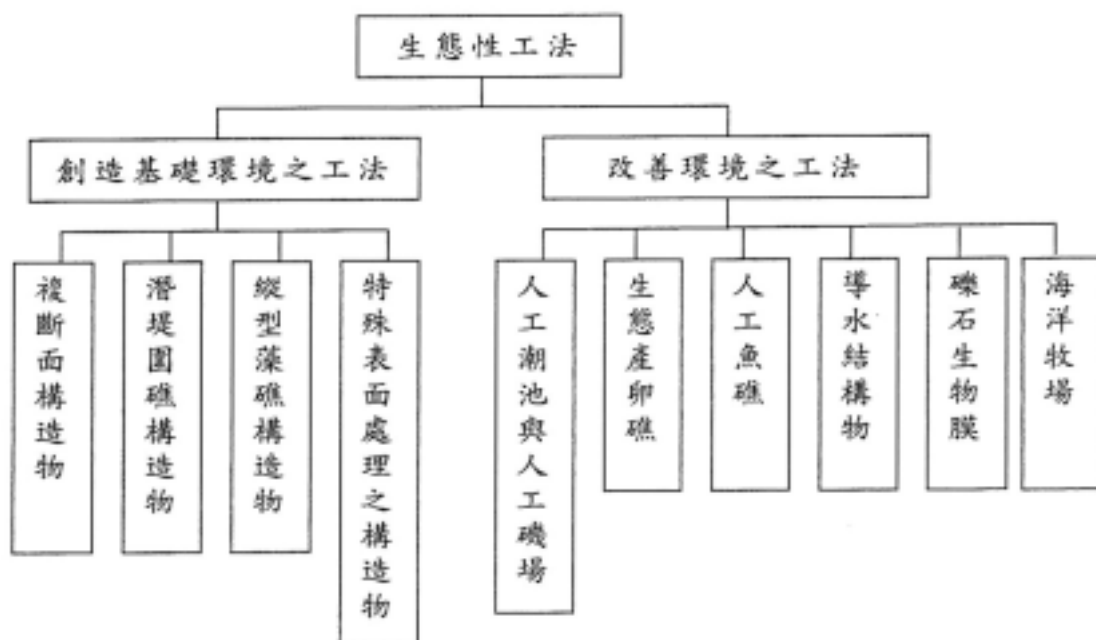


圖 4-1 海域生態性工法之分類 (郭一羽等，2002)

4.3.3 相關研討會

近年來政府積極推動生態工法，除相關研究計畫外，並透過生態工法研討會宣導實施理念與方法，主要探討領域以河溪、集水區、濕地、道路、建築等為主，相對在海岸生態工法方面則較少，茲整理相關研討會概況如表 4-1。

表 4-1 國內近年來相關海岸生態工法研討會概況

研討會名稱	主辦單位	會議日期	會議地點	相關講題或資料
邁向 21 世紀海洋國家策略研討會	中國土木水利學會 榮民工程股份有限公司 中華大學	90.11.9	台灣大學	許泰文：海岸保護改善策略 張憲國：近岸生態景觀創造策略
海岸新工法與海洋再生研討會	中國土木水利工程學會 中華民國海下技術協會	91.12.5	台灣大學	郭一羽、張憲國等：海域生態工法 許時雄：海岸生態工法可能遭遇的困難和解決方法
漁港工程運用生態工法講習訓練座談會	漁業署 中華大學	92.11.19 92.11.20	漁業署	郭一羽：生態工法概論 郭一羽：漁港生態工法 朱達仁：應用底棲生物整合性指標法評估漁港生態環境
2003 年生態工法人才培訓講習會	公共工程委員會	92.12.3	台中市 新天地餐廳	郭金棟：海岸整治與生態工法應用之案例介紹
生態工法於漁港工程之發展研討會	漁業署 中華大學	93.12.2	中華大學	郭一羽：漁港生態工法 石村忠昭：漁港內水質改善技術 深堀一夫：沿岸漁場開發促進水產資源永續發展
漁港工程生態工法施工規範解說座談會	漁業署 中華大學	94.5.18 94.5.23	漁業署	郭一羽：生態工法操作手冊說明 郭一羽：永安、外埔、王功、鹽埔等漁港生態工法案例說明
第 25 屆中日工程技術研討會	中國工程師學會 交通部高雄港務局 中山大學	94.6.14	中山大學	構建生態型海岸之稀有生物棲息地之生態工法 自然共生型海岸之促進方法
2005 全國海岸生態工法理念與實務研討會	行政院公共工程委員會 內政部營建署 彰化縣政府	94.10.28	彰化鹿港 立德文教休閒會館	郭一羽：生態工法應用於海岸地區之理念探討 許榮中：海岸生態工法案例研析 李如儀：生態海岸新思維－減量美學
2005 海岸生態工法博覽會研討會	行政院公共工程委員會 經濟部水利署 屏東縣政府	94.11.6	海洋生物博物館	郭一羽：海岸工程與生態工法 許泰文：海岸生態工法案例探討 邱永芳：海岸生態環境之營造 沈建全：利用多孔柱狀消波塊創造新的海岸生態與景觀

4.4 日本海岸生態工法研究概況

日本於西元一九九〇年代初期即開始實施「自然調和型漁港推進事業」，主要對漁港設施實施附加藻場、海水交換及人工干潟(潮間帶、灘地)等機能，並進行相關研究與技術手冊之編纂，可供國內生態型海岸保護工法研擬之參考。

1.生態型消波塊、方塊之應用

海岸結構物為維護結構安定、減少越波及防止基礎沖刷等，常使用消波塊、方塊等混凝土型塊，而傳統型塊之設計主要以發揮抗浪、抗流作用，達到保護結構物之功能。由於消波塊、方塊具有類似岩礁之功能，適於作為海洋生物著生之基質，常見海藻、貝類等海洋生物附著其表面，成為魚介貝類棲息、育成、隱蔽及產卵場所，形成豐富生態系(如照片 4-1)。消波塊、方塊表面經特殊設計與處理等改良，使更符合對象生物之生態特性，往往較天然岩礁具有更佳生態效果，如凹凸處理、鋪設纖維網、塗抹藥劑或使用輕量多孔質混凝土等。



(A)北海道松前町消波堤之海藻著生與鮑魚生息 (摘自：德田廣等，1991)



(B)沖繩縣那霸港防波堤之珊瑚著生與魚類棲息 (摘自：株式會社 TETRA 1)

照片 4-1 消波塊上之生態例

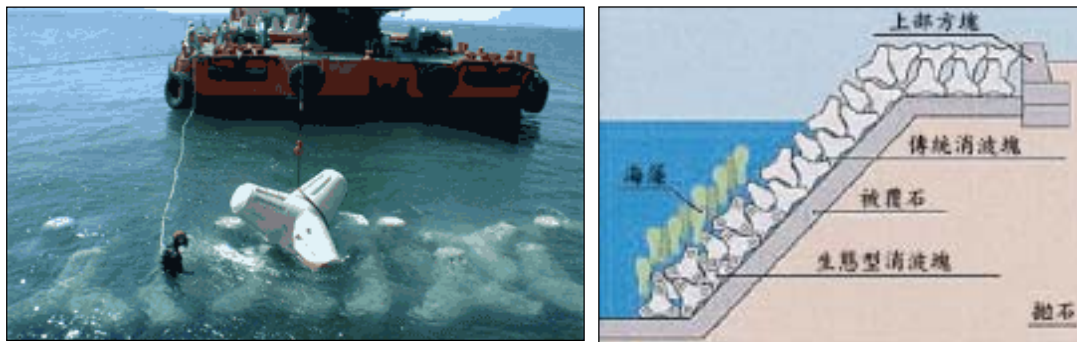
(1)凹凸處理

將消波塊、方塊表面設計成凹凸形狀，如附加凹槽或突起物(如照片 4-2、圖 4-2)，以增加表面稜角更接近天然岩礁構造，其周邊形成之渦流易於海藻孢子之捲入著生。所附加凹槽利於大型海藻及生物之著生，其寬度、深度及角度等須視對象海藻之根部大小與對象生物之種類而定，已開發之型塊凹槽大小如寬 10cm、深 6cm(新潟縣高千漁港)，寬 5~7cm、深 12cm(島根縣濱田漁港)等例。



(摘自 <http://www.tetra.co.jp/>) (摘自：全國漁港協會，1997) (摘自：日本海洋開發建設協會，1995)

照片 4-2 表面凹凸處理之消波塊與方塊



(摘自 <http://www.tetra.co.jp/>)

圖 4-2 大阪關西國際機場應用生態型消波塊例

(2)鋪設纖維網

於消波塊、方塊模具內側鋪設促進海藻發育之纖維網，混凝土澆製後於消波塊表面形成類似凹凸狀，而易於海藻著生(如照片 4-3)，並可於纖維網上預植海藻孢子或幼苗，加速藻場之形成。



(摘自 <http://www.pa.hrr.mlit.co.jp/>)

照片 4-3 消波塊表面加設纖維網

(3) 塗佈海藻增殖塗料

於消波塊、方塊表面塗佈海藻增殖塗料，如硫酸一鐵液劑，可促進海藻之著生與繁茂。

(4) 輕量多孔質混凝土

消波塊、方塊材料採用輕量多孔質混凝土，其表面微小連續孔隙適合甲殼類、多毛類之生息，且具透水性可促進生態環境之調和。惟其強度較小、重量較輕，在工程設計上須預加考慮。

2. 生態礁之應用

海岸工程斷面結合生態礁之設計，如藻礁、魚礁、產卵礁(如圖 4-3)等，以提供海藻與生物之著生、棲息及繁殖場所，為生態型海岸結構物之一。

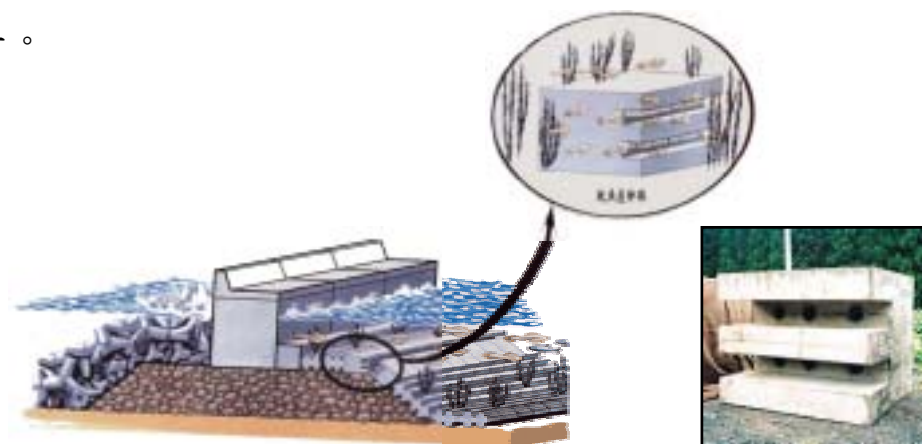


圖 4-3 北海道福島漁港防波堤應用產卵礁例

3.附加藻場機能

改善傳統海岸結構物設計，以適於海藻之著生成長，兼具藻場生態機能，屬生態型海岸結構物之一。改善現地環境不利藻場形成之限制要因，一般所採用之改善工法如下(日本水產廳漁港部，1999)：

(1)基質之投入

於原有海岸工程斷面投入適合海藻著生之基質(如石塊、混凝土型塊等)至生育水深帶，構成藻場生長之基盤，如圖 4-4(A)。

(2)附加小段消波工、緩坡度消波工

具消波工之防波堤、護岸可藉由附加小段消波工或緩和消波工坡度，以達適合海藻之生育水深，如圖 4-4(B)、(C)所示。當消波工會造成藻場消失之情況，可採用離岸式消波工之複式斷面以保全藻場，如圖 4-4(D)。

(3)傾斜堤、緩坡度傾斜堤

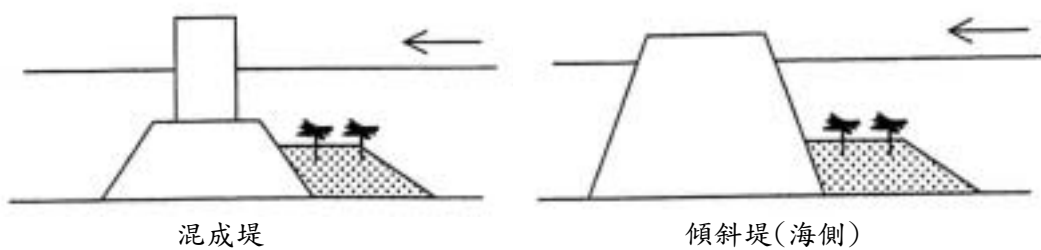
改善直立堤或混成堤部份為傾斜堤，並緩和傾斜堤坡度至海藻生育水深，如圖 4-4(E)。

(4)潛堤、人工潛礁

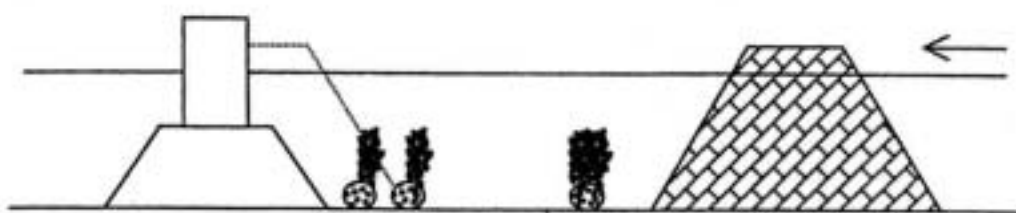
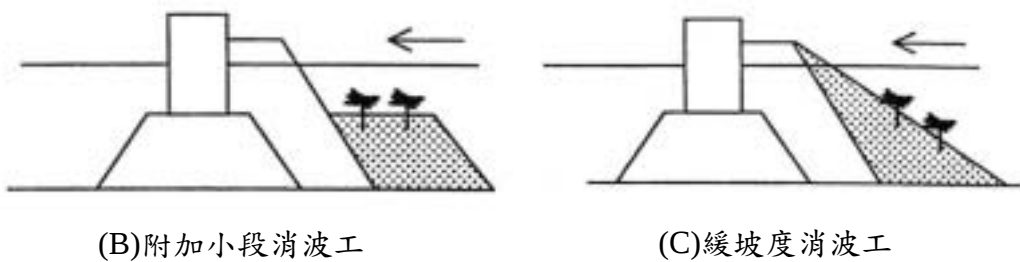
利用潛堤、人工潛礁之碎波機能，改善海藻生育之波浪環境，如圖 4-4(F)、(G)、(H)。

4.附加海水交換機能

海岸結構物之構築易阻礙海水流通性，形成半閉鎖性水域，堆積各種物質，而影響附近海域水質環境，不利於水中生物多樣性及景觀親水之發展。為改善水質狀況，在工程上常採用物理方法，利用潮汐或波浪能量促進海岸結構物內外海水之交換。日本針對防波堤、護岸等海岸結構物所開發或研發中之海水交換型構造物，如圖 4-5 所示。



(A)基質投入



(D)離岸式消波工



(E)緩坡度傾斜堤

(F)人工潛礁

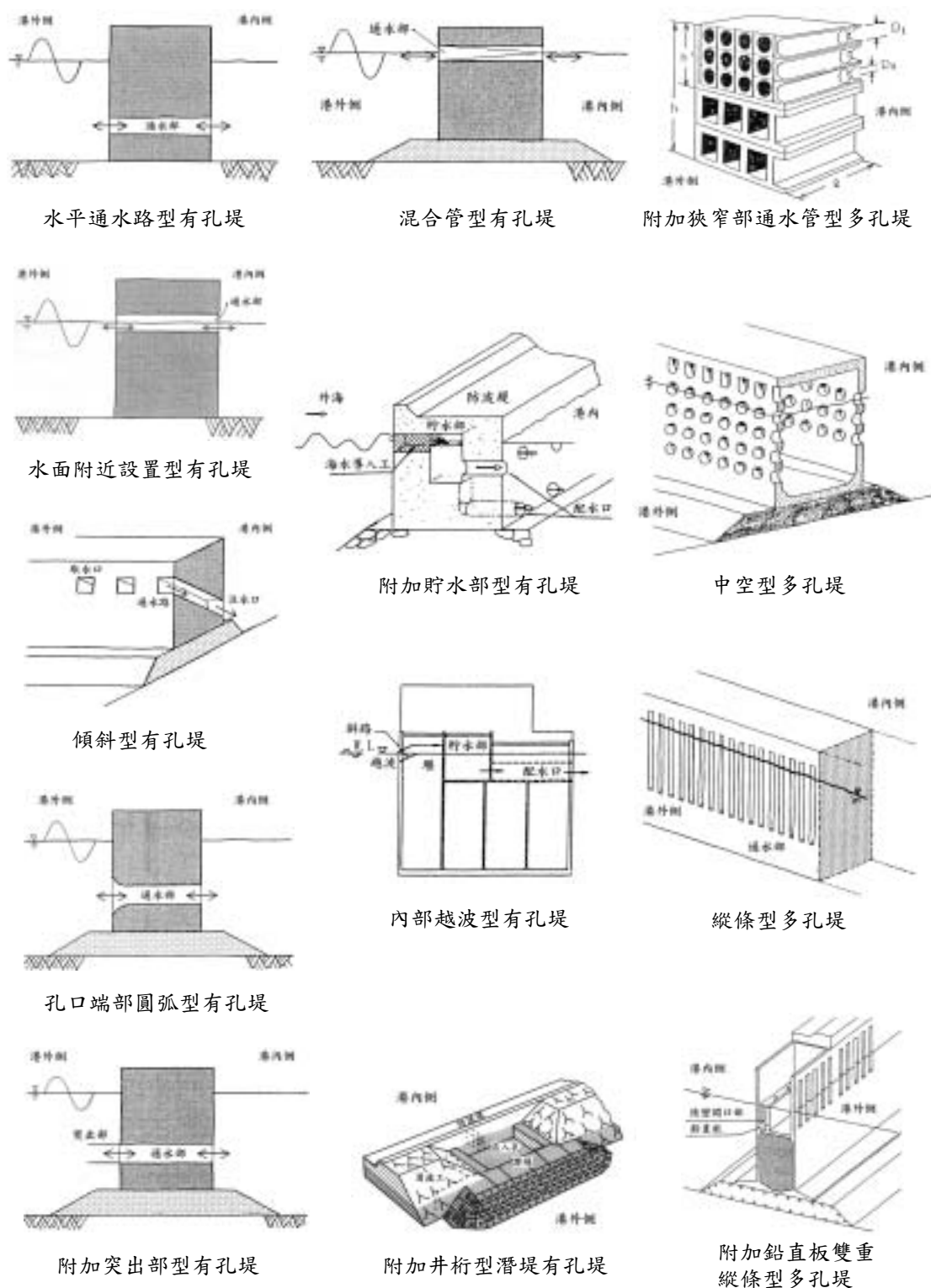


(G)複式人工潛礁

(H)附加潛堤防波堤

(摘自：日本水產廳漁港部，1999)

圖 4-4 附加藻場機能海岸結構物



(摘自：水產土木建設技術中心，2000)

圖 4-5 附加海水交換機能海岸結構物

4.5 開發案例

蒐集國內外海岸生態工法之開發案例，主要以生態工法於海岸保護及港灣工程之應用情形為主，俾供國內發展生態型海岸保護工法之參考。

4.5.1 國內案例

以國內生態工法在海岸工程之應用而言，其實際發展時間與進度較河川整治、水土保持、營建、建築等工程領域稍晚。就海岸保護所實施之工法而言，由過去海岸地區普遍施行之植栽定砂(防止飛砂)、編籬定砂(防止飛砂)、自然消波海灘等工法，至近來人工養灘新工法漸受到重視與採用，已實施案例如烏石漁港南側海岸穩定工程(養灘量約 38 萬方)、新竹漁港航道泊地疏浚及迂迴供砂工程(養灘量約 62 萬方)、安平港海岸整治工程(養灘量約 200 萬方)等，為較熟知柔性工法於海岸工程之實際應用。近年來由於公共工程委員會積極推動公共工程採用生態工法，在海岸保護、港灣工程領域亦逐漸融入生態理念，並有少數實施案例可參考且陸續增加中。

1. 安平港海岸整治工程

高雄港務局為減緩歷年來因波浪、流、人為因素所造成之安平海岸侵蝕，並善加利用安平港擴建發展所產生之工程剩餘土，以補充遭波浪侵蝕所流失之沙土，爰辦理安平港海岸整治工程。

本工程基於土砂資源利用及海岸保護需求，採生態工法設計，以達到海岸防護、生態及親水等機能，為目前國內最大人工養灘區，並可發展成為戶外教學自然生態區。主要工程項目(如圖 4-6)包括銜接商漁港防波堤外側各興建南、北馬刺型突堤，水深-2~-4 公尺，於突堤堤頭利用現有消波塊設置生態潛礁，供水棲生物群聚；於南馬刺型突堤之岸側以拋石堤構造設置南堤生態潛礁、分隔堤等，形成人工潮池

區、人工潮間帶，俾利水生動植物生長；並利用安平港航道疏浚土砂，於安平商漁港間海岸進行人工養灘，估計養灘量達 200 萬方。

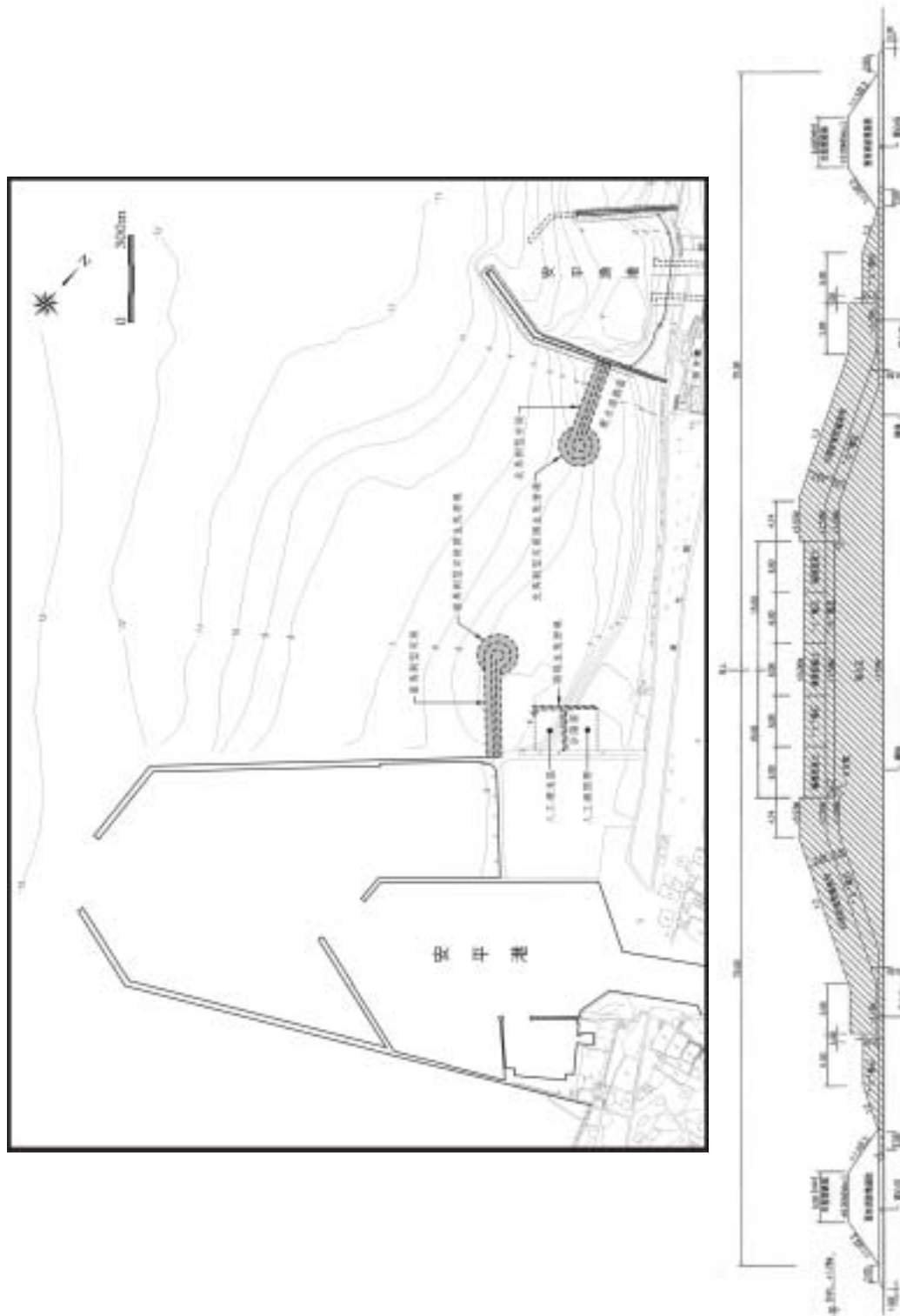


圖 4-6 安平港海岸整治工程配置及馬刺型突堤潛礁斷面圖

本工程於 92 年 9 月開工，業於 94 年 3 月完工，將收保護鄰近沙灘資源，減少養灘區沙量流失，兼具遊憩休閒價值，拓展民眾親水空間，群聚水棲生物，營造多樣化海岸生態等工程效益。

2. 烏石漁港南端防波堤增建工程

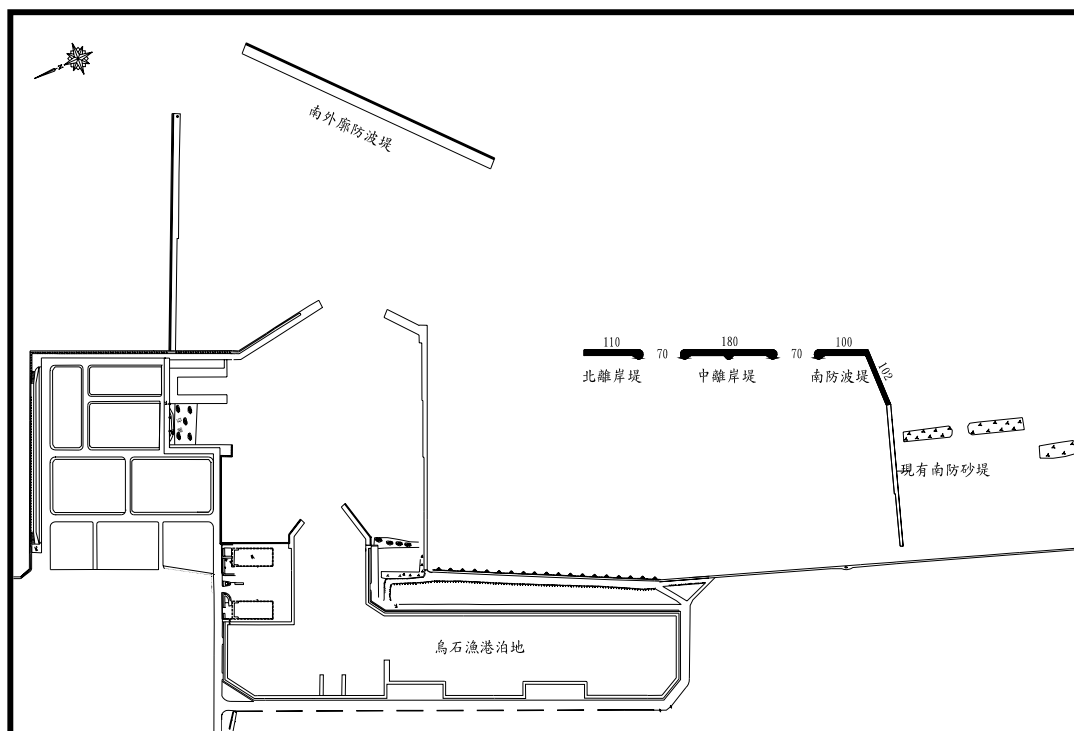
宜蘭縣政府為增闢烏石漁港南側新生地，於現有海堤之海側以離岸堤圍築靜穩水域及保護堤後區域，並於計畫灘線附近新建海堤，俾利海堤後側進行造地工程，以填築新生地利用。

由於本區面臨太平洋，夏秋之際易受颱風侵襲，為兼顧堤體安全及促進景觀調和，離岸堤採混成堤型式，海側以消波塊被覆，岸側則以沒水方塊保護，而堤體之岸側壁面採造型模板澆置以降低景觀突兀現象，並改良傳統方塊表面為凹凸狀(生態型方塊)，增加與海水接觸之表面積，提供魚介貝類產卵、棲息場所及海藻群落生成，屬生態型海岸結構物之設計，如圖 4-7 所示。本工程於 92 年 10 月開工，目前仍在施工中。

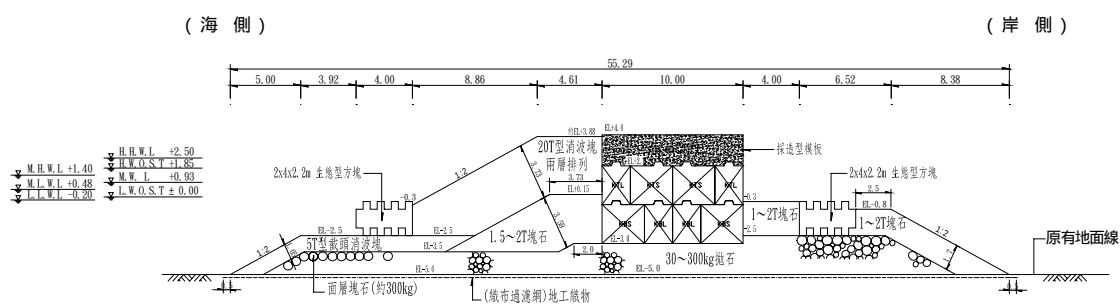
3. 富基漁港北防波堤延長工程

台北縣富基漁港配合港區環境改善，計畫延長北防波堤 104 公尺以提高港內穩靜，由於本港位於北海岸特殊地質景觀區域，沿岸生態資源豐富，為謀求工程建設與自然環境之共生共榮，防波堤建設採用兼顧安全與環境和諧之生態工法設計，除發揮防潮禦浪之功能外，兼具復育、改善、創造生態環境之效果。

本防波堤採複合式斷面設計(如圖 4-8)，由堤體與前側生態礁段、潛堤段所構成，寬廣之生態礁區設置生態礁，提供海藻、海洋生物之著生及棲息繁殖場所，同時降低方塊與消波塊高度減少對海岸景觀之影響。本工程業於 93 年 11 月開工，其成效具有指標性意義，可供國內推動港灣生態工法之參考。

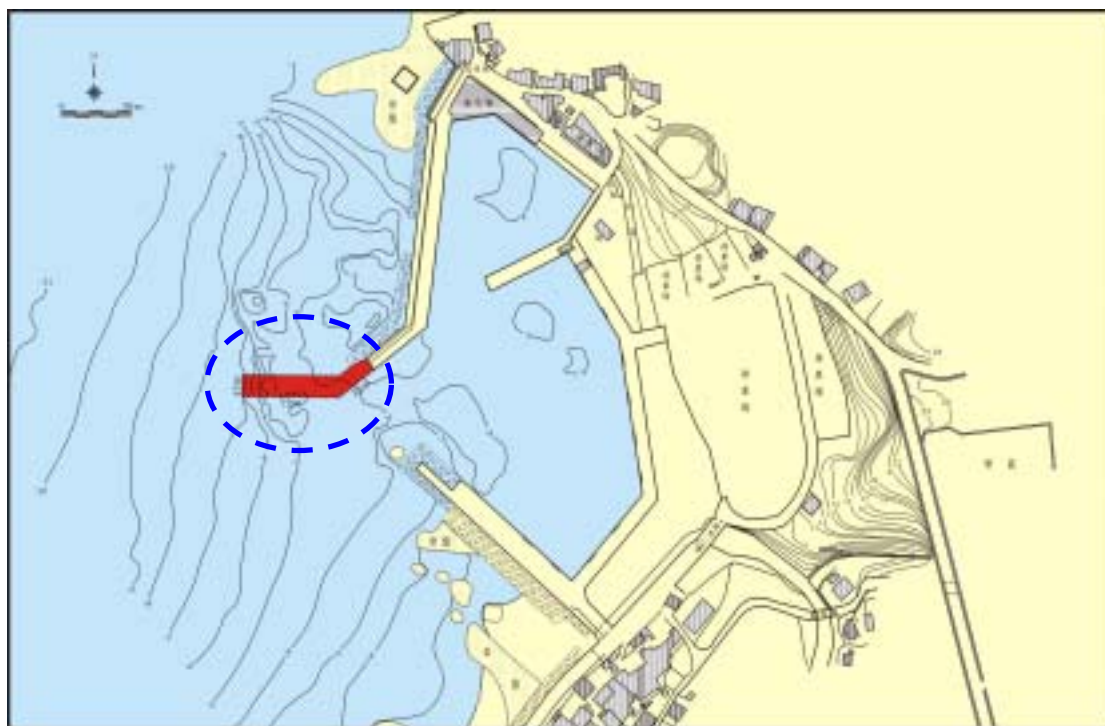


(A)工程平面圖

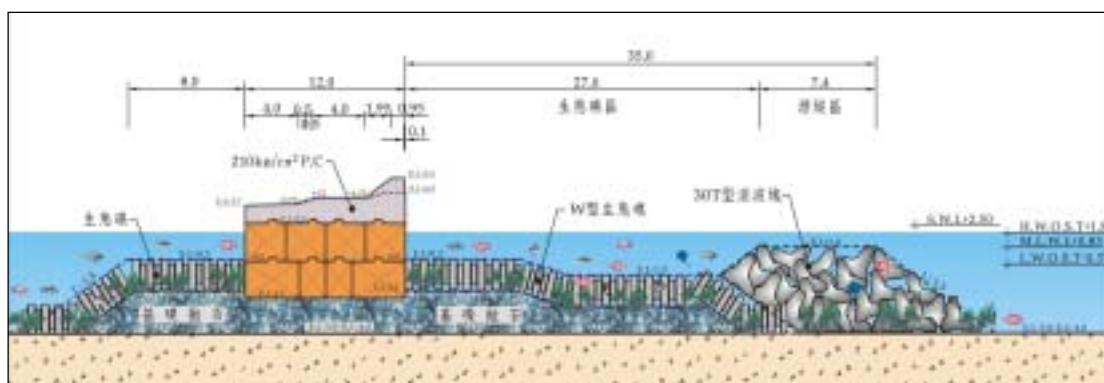


(B)離岸堤標準斷面圖

圖 4-7 烏石漁港南端防波堤增建工程



(A)工程平面圖



(B)防波堤標準斷面圖

圖 4-8 富基漁港北防波堤延長工程平面及標準斷面圖

4. 後灣海岸環境及景觀改善工程

後灣海岸位於屏東縣南端車城鄉境內，屬於墾丁國家公園範圍，北鄰國立海洋生物博物館，東倚龜山，西臨台灣海峽，係為優美之半月形天然岬灣。惟因沿岸設有漁港與後灣海堤等設施，而造成景觀之視覺障礙及阻斷民眾之親水空間，為改善海岸環境景觀，由水利署第七河川局辦理本工程。參考第七河川局網站資料(<http://www.wra07.gov.tw>)摘述工程計畫如下：

(1) 計畫概要

改善海岸環境景觀 550m，增加岬灣視覺美感空間，營造多樣化生物孳息環境，恢復自然海岸風貌，配合鄰近地區，創造整體優美自然之海岸環境。主要作法係降低海堤高度 1.2m，並將原混凝土構造物改為較柔性自然之土堤加以植生，改善海岸景觀及營造休憩、教育功能。

(2) 工程內容

後灣海堤環境及景觀改善工程 L=550m

距岸約 42m 處(EL：-0.5~-1.1m)設置定砂堤乙座(L=300m)

距岸 90~120m 處(EL：-2.5~-3.5m)設置碎波潛堤乙座(L=146m)

工程費：15,948,000 元

施工期限：92 年 12 月 10 日至 93 年 5 月 31 日止

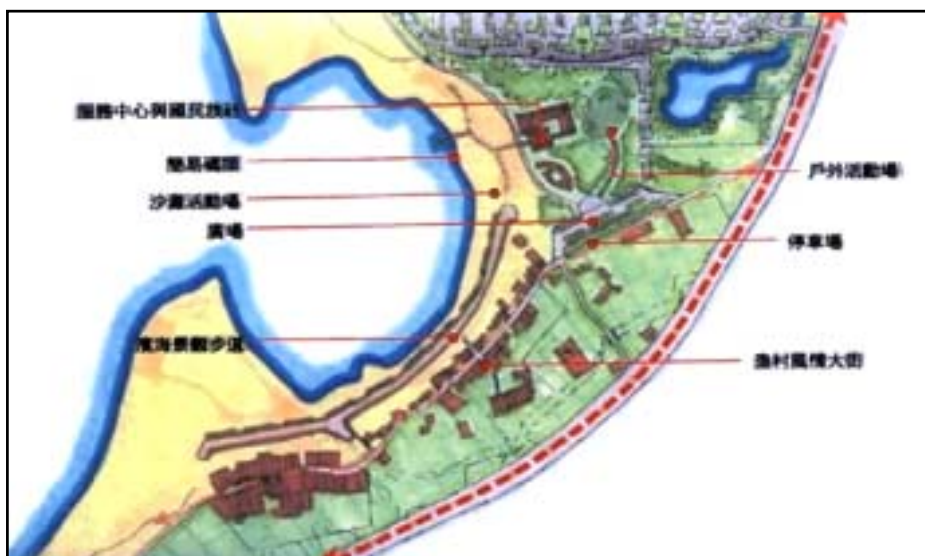


圖 4-9 後灣海岸環境及景觀改善計畫(<http://www.wra07.gov.tw>)

(3)計畫成效

計畫創新性

本計畫首創國內降低既有海堤堤頂高度之先例，並將原混凝土堤改為土堤，以增加天然岬灣視覺美感，堤前佈置緩坡式坡面，配合人工養灘以減低越波量，而越波水量則以堤後截水渠道加強排水處理，兼顧堤後居民生命財產安全。

創造多樣生態環境

堤前植生綠帶配合緩坡式岬灣沙灘地形及灘前塊石拋放區，藉以增加海域與灘線之交界範圍，而維持寬廣之海灘空間，並考量水生動、植物生存空間與遊客親水需求，創造生態多樣化棲地環境。

營造多孔隙空間

於灘線及海域中採用大型塊石、柔性織袋、石堆等拋放排列堆疊形成孔洞，並配合海域中裙礁分佈，營造多孔隙空間，利於水中植物、生物(魚、蝦、蟹類)等生長棲息。

恢復自然海岸風貌

以碎波潛堤配合人工養灘佈置，並依現況調查栽植不同種類之原生植物於堤前、後坡，除可保護海岸及提供生物棲息外，亦可恢復自然海岸風貌。

加強教育解說功能

配合教育功能，於適當地點設置解說牌及酌設休閒設施，營造兼具休憩旅遊與生態教育之景觀特色。

(4)目標達成度

本工程海岸人工養灘寬度約 40m，完工後仍呈穩定趨勢，能有效減緩波浪侵蝕。潛堤配合人工養灘工法，日後仍可能有沙灘流失之虞慮，將持續監測以為後續維護參考，必要時可利用漁港之疏浚土砂養灘，以維灘岸平衡及環境永續。

(5)相關照片

施工前後相關照片，如照片 4-4 所示。



照片 4-4 後灣海岸環境及景觀改善工程施工前後(<http://www.wra07.gov.tw>)

4.5.2 國外案例

1. 多明尼加 Gran Dominicus 海灘保護工程

位於多明尼加(Dominican)Bayathibe 之 Gran Dominicus 海灘休閒區過去面臨沙灘侵蝕、海灘寬度變窄之問題，由於海岸需要保護，又因此區域為海灘休閒區不能因保護工法而破壞景觀及生態機能，故設計礁球式潛堤，利用礁球(reef ball)作為人工淺礁(artificial reef)之兼具生態海岸保護工法，如照片 4-5 海灘陰暗部份。此礁球潛堤約佈置 450 個，分為三列，所處水深約為 1.6~2.0 公尺，離岸 15~37 公尺，礁球高有 1.2 公尺(reef ball unit)及 1.4 公尺(ultra ball)兩種，重量約為 6,000 磅(約 3,000 公斤)。此礁球潛堤於 1998 年暑假佈置完成，經過九月 Georges 颱風大波浪之作用及十月份 Mitch 颱風之湧浪作用，由 11 月觀察發現沙灘並未受到侵蝕，而礁球亦是安定未被移動，如照片 4-6 所示。11 月同時調查礁球附近之生態狀況，發現有豐富之底棲生物、藻類附著於礁球上，而礁球內之小石頭提供微小生物之生活及躲藏空間，因此本礁球潛堤具有相當強之生態性。



照片 4-5 Gran Dominicus 海灘外之三列礁球潛堤 (Lee E. Harris, 2001)



照片 4-6 Gran Dominicus 海灘設立礁球潛堤前後之比較 (Lee E. Harris, 2001)

2001 年 Gran Dominicus 海灘休閒公司委託 Florida 技術研究所調查此區域之海灘變化。從在礁球潛堤開口(gap)之沙灘增寬約 10~13 公尺，增高約 1.5 公尺，而潛堤旁之海灘高程雖有微量增加，但海灘寬並不明顯，顯示礁球潛堤對海灘保護具有效果，且礁球原本具有多類生物聚集效果之生態性，經由工程及生態調查證實本生態工法實例係一成功案例。

2. 日本慶野松原海岸人工潛礁

日本慶野松原海岸位於兵庫縣三原郡西淡町，為防止冬季海岸侵蝕須採取海岸保護對策，由於附近為天然名勝之白砂青松海岸，考慮珍貴之珊瑚礁景觀及海洋生物之生息，而採用天然石料施工之人工潛礁。人工潛礁施工後，灘線回復至防止侵蝕之預定位置，且人工潛礁上形成繁茂藻場及聚集魚類棲息(如照片 4-7)。



(摘自 <http://web3.pref.hyogo.jp/>)

照片 4-7 慶野松原海岸之生態型人工潛礁

3. 日本自然調和型漁港推進事業

日本水產業近年來亦面臨漁業資源變遷之情勢，為保全沿岸海域良好之藻場、水質、干潟等自然環境，於 1994 年起實施「自然調和型漁港推進事業」，確立今後漁港建設與自然環境和諧共生之整備方向，並積極開發各種環境共生之工法，至 2002 年全國實施之漁港已超過 40 處。同時配合修法，將原「漁港法」與「沿岸漁場整備開發法」合併制定「漁港漁場整備法」，於 2002 年 4 月 1 日公布實施，原水

產廳漁港部亦擴大為漁港漁場整備部，彰顯未來漁港建設與漁場環境共生之重要性，邁入漁港漁場整備之新里程碑。

由日本所實施之自然調和型漁港推進事業，其應用相當我國所謂之生態工法於港灣工程已有超過十年經驗，主要工程技術手法係對於漁港建設時，在確保原有設施功能之情況下，附加藻場、海水交換、干潟等機能，以保全、復育及創造周邊之自然環境。

(1)實施漁港

日本自 1994 年推動自然調和型漁港建設，根據水產廳統計，迄 2002 年已有 42 個漁港實施(如表 4-2)，地點遍及北海道、本州、九州、四國及琉球等地。

(2)實施目的

已實施漁港案例中，以附加藻場機能為目的者有 37 個(佔 68%)，以海水交換機能為目的者有 16 個(佔 30%)，防止流冰機能者有 1 個(佔 2%)，其中同時推動藻場、海水交換機能者有 12 個。

(3)實施對象設施

所實施漁港案例中，主要以防波堤、護岸等設施為主，其中以防波堤為實施對象設施者有 36 個(佔 75%)，以護岸為對象者有 9 個(佔 19%)，以人工潛礁為對象者有 2 個(佔 4%)，防止流冰設施者有 1 個(佔 2%)，而同時實施防波堤、護岸為對象者有 6 個。

(4)藻場造成型示範漁港實施概要

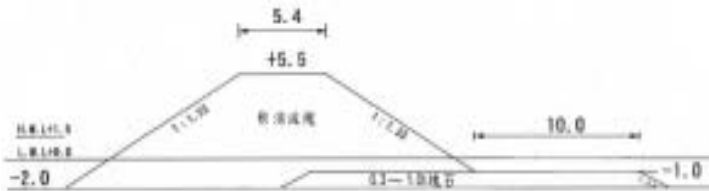
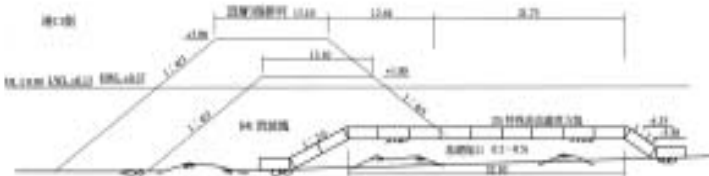
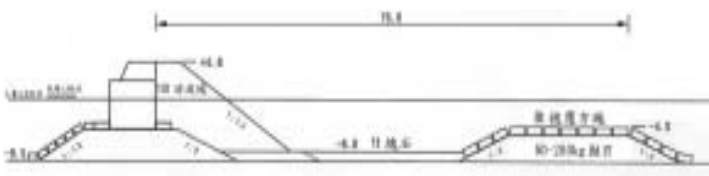
所實施自然調和型漁港附加藻場機能工法中，以漁港構造物附加寬廣拋石平台、潛堤及被覆生態型方塊、消波塊、藻礁等為主。依據 ITANKI 等示範漁港之實施過程(如表 4-3)，由確立計畫目的後，依序進行事前環境調查(藻場、底棲動物、魚類、流況、水質、底質等)，將調查結果納入設計考慮事項，並於施工期間及完工後實施完整之成效追蹤調查。由上述示範漁港之追蹤調查結果顯示，所設計藻場平台上之海藻現存量多呈逐年增加(如圖 4-10)，並有底棲生物與魚類棲息情況，實施成效良好。

表 4-2 日本自然調和型漁港推進事業迄 2002 年實施概況

都道府縣	漁港名稱	指定年度	目 的	實施對象設施
開發局	元地	1996	海水交換、藻場	防波堤
開發局	福島	1996	藻場、海水交換	防波堤
開發局	壽都	1994	藻場	防波堤
開發局	江良	1994	藻場	防波堤
開發局	樣似	1994	藻場、海水交換	護岸
開發局	SAMARO 湖	1997	與 SAMARO 湖調和	防止流冰設施
北海道	鳧舞	1996	海水交換	防波堤
北海道	ITANKI	1996	藻場	防波堤
北海道	禮文	1994	藻場	防波堤
北海道	別刈	1996	藻場	防波堤
岩手	堀内	1994	藻場、海水交換	防波堤
秋田	金浦	1994	藻場、海水交換	防波堤、護岸
秋田	八森	1996	藻場	防波堤
千葉	乙浜	1996	藻場	防波堤
新潟	高千	1994	藻場	防波堤
富山	四方	1994	海水交換	防波堤
富山	藪田	1994	藻場	防波堤、護岸
石川	富來	1996	藻場、海水交換	防波堤、護岸
石川	庵	2002	藻場、海水交換	防波堤
石川	元目	1994	海水交換	防波堤
三重	和具	1996	藻場	防波堤
三重	神島	1994	藻場	防波堤、護岸
京都	浦島	1996	藻場	防波堤
京都	間人	1996	藻場	防波堤
大阪	深日	1997	藻場	護岸
兵庫	石見	2002	藻場	防波堤
兵庫	坊勢	2001	藻場、海水交換	防波堤
兵庫	丸山	1998	藻場	防波堤
和歌山	田邊	1996	藻場	人工潛礁
島根	浜田	1994	藻場、海水交換	防波堤、護岸
廣島	大地藏	2001	藻場	防波堤
廣島	沖浦	1997	海水交換	防波堤
山口	奈古	1997	藻場	防波堤
香川	馬篠	1996	藻場、海水交換	防波堤
高知	小才角	1994	藻場	防波堤
佐賀	向島	1996	藻場、海水交換	防波堤
長崎	浦	1996	藻場	防波堤
長崎	有喜	1994	藻場、海水交換	防波堤
熊本	大江	1996	藻場	人工潛礁
大分	泊内	1996	藻場	防波堤
沖繩	川満	1994	藻場	防波堤、護岸
沖繩	宜野座	1998	藻場	護岸

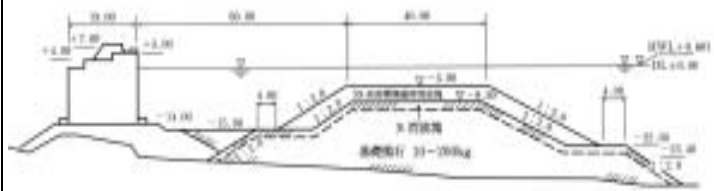
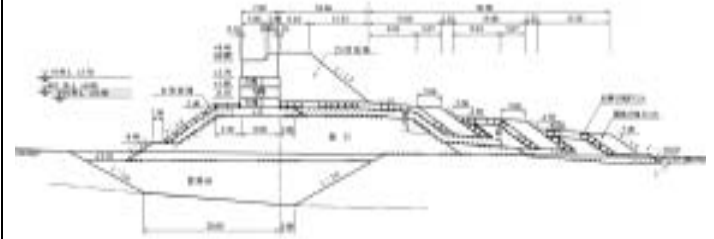
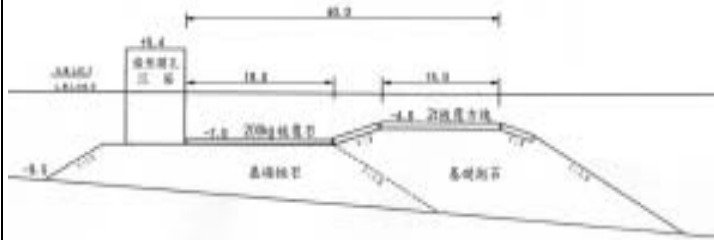
資料來源：日本全國漁港漁場協會(2003)

表 4-3 日本藻場造成型示範漁港實施概要

漁港別及實施位置	計畫概要	設計條件	標準斷面
	對象設施：防波堤 111m 工法：附加背後小段傾斜堤 對象海藻： <i>Laminaria angustata</i> 事前調查設計：1995 年 施工：1995~1997 年 追蹤調查：1996~1999 年	颱風波向：SE 波高：7.5m 週期：11.7s 設置水深：0.4~3.3m 設計波高：4.0m 設置地盤：岩盤、砂	
	對象設施：防波堤 100m 工法：附加背後小段傾斜堤 對象海藻： <i>Ecklonia stolonifera</i> <i>Sargassum spp.</i> 事前調查設計：1994 年 施工：1995~1997 年 追蹤調查：1995~1999 年	颱風波向：NW 波高：11.2m 週期：13.7s 設置水深：-5.0~-7.0m 設計波高：7.5m 設置地盤：岩盤、礫	
	對象設施：防波堤 190m 工法：附加潛堤寬廣拋石平台型防波堤 對象海藻： <i>Sargassum spp.</i> 事前調查設計：1995~1996 年 施工：1997~2001 年 追蹤調查：1998~2002 年	颱風波向：WSW 波高：7.7m 週期：11.02s 設置水深：-8.7~-10m 設計波高：4.2m 設置地盤：砂	

參考資料：日本全國漁港漁場協會(2003)

表 4-3(續) 日本藻場造成型示範漁港實施概要

漁港別及實施位置	計畫概要	設計條件	標準斷面
 浜田漁港	對象設施：防波堤 480m 工法：附加潛堤防波堤 對象海藻： <i>Ecklonia kurome</i> <i>Sargassum spp.</i> 事前調查設計：1995～1996 年 施工：1995～2002 年 追蹤調查：1996～2001 年	颱風波向：N 波高：9.5m 週期：12.6s 設置水深：-23～-30m 設計波高：7.2、7.3m 設置地盤：岩盤	
 有喜漁港	對象設施：離岸防波堤 120m 工法：附加小段消波工被覆堤 對象海藻： <i>Ecklonia kurome</i> <i>Sargassum spp.</i> 事前調查設計：1994～1995 年 施工：1995～1998 年 追蹤調查：2000～2002 年	颱風波向：SW 波高：12.3m 週期：14.9s 設置水深：-10.7m 設計波高：4.7m 設置地盤：砂	
 泊内漁港	對象設施：防波堤 60m 工法：附加潛堤寬廣拋石平台型防波堤 對象海藻： <i>Ecklonia kurome</i> <i>Sargassum spp.</i> 事前調查設計：1995～1996 年 施工：1997～2000 年 追蹤調查：1999～2002 年	颱風波向：ENE 波高：4.1m 週期：6.8s 設置水深：-17.0m 設計波高：3.2m 設置地盤：砂	

參考資料：日本全國漁港漁場協會(2003)

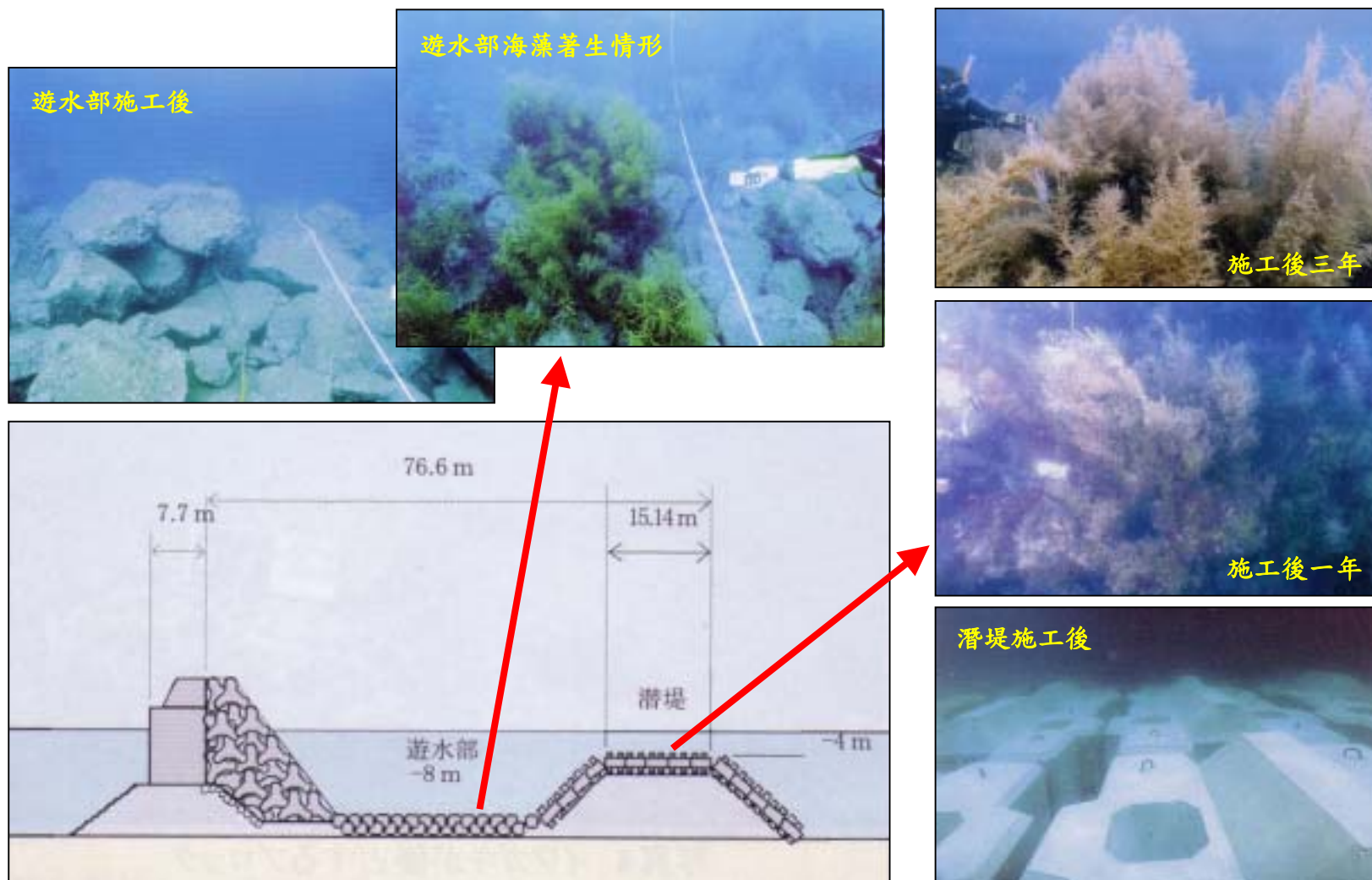


圖 4-10 富來漁港藻場造成型防波堤成效追蹤調查 (摘自：安藤亘，2002a)

第五章 生態型海岸保護工法研析

21 世紀為國際環境世紀，因應世界發展潮流，未來各項開發建設必須積極謀求資源永續利用及自然環境和諧共生等均衡，確保人類生活環境之永續發展。海岸保護工法為海岸工程之一環，未來亟思改變傳統工程建設「安全但僵硬、快速但違反生態原則、易維護但不易親近(林鎮洋、邱逸文，2001)」之缺點，朝向融合海岸自然環境，促進自然生態共生共榮之生態型海岸保護工法發展。

5.1 相關課題探討

依據前述海岸保護工法發展、國內海岸生態環境、生態工法於海岸保護工程應用等分析，針對國內發展生態型海岸保護工法之相關課題探討如下：

1.課題一：國外生態型海岸結構物之發展型態與成效

(1)檢討

國外生態型海岸結構物之發展型態，以日本為例主要包括生態型異型塊(如消波塊、方塊)、生態礁之應用，附加海岸結構物之生態、海水交換機能，傳統斷面之改良等，其使用材料包括天然石料、混凝土、輕質多孔質混凝土、增殖塗料、纖維網等，經施工後之追蹤調查大多符合預期成效，如消波塊上之海洋生物生長與棲息(參考前照片 4-1)、藻場造成型構造物完工後之海藻著生(參考前圖 4-10)等。

(2)建議

上述日本生態型海岸結構物之發展型態原則上均可供國內借鏡參考，並針對我國海岸生態環境特性，進一步開發本土化之生態型海岸結構物。

2.課題二：國內適合發展之生態型海岸保護工法

(1)檢討

海岸保護工法由早期著重於海岸「線」之保護，利用構築護岸、海堤、消波等方法，沿海岸線作線形保護工，以防止波浪越波、遏止海水入侵及陸地流失，逐漸發展以緩坡堤、防砂突堤、離岸堤、潛堤、養灘等方式交互使用之整合性海岸保護工法，以「面」之保護方式控制漂砂、保護海灘進而抑制侵蝕，至近年來謀求工程建設與海岸自然環境之和諧共生，兼具親水、生態機能及景觀改善之海岸保護結構物亦因應而生。

(2)建議

國內生態型海岸保護工法尚在起步階段，相關專業知識與工程技術仍待多方建立，初期發展宜以現有海岸保護結構物之改善為優先，附加生態機能及減低對周遭生態環境之影響，循序漸進。

3.課題三：國內海岸條件適合改善與創造之海岸生態環境

(1)檢討

台灣位於熱帶西太平洋區，受黑潮及大陸沿岸冷流交會影響，兼具熱帶、亞熱帶及溫帶性之海洋生物，其分佈主要受沿岸地質、地形、溫度及洋流之影響，目前已發表之海洋生物種類數大約有超過 2,300 種之魚類、250 種之珊瑚、300 種之大型甲殼類、150 種之棘皮動物及 600 種以上之大型海藻。

(2)建議

海岸保護結構物主要由拋石、混凝土型塊所構成，形成所謂擬礁岩環境，適合附著性動植物之著生及海洋生物之躲藏、棲息，故針對海岸環境特性附加結構物生態機能，可改善、創造海岸生態環境，於增進西部沙質海岸之生態效果尤具意義。

5.2 生態型海岸保護工法之內涵

基於海岸保護之需要所實施之工程與管理措施可謂海岸保護工法，而生態型海岸保護工法主要仍以海岸保護為目的，即防止海岸侵蝕、保護沿岸居民生命財產安全，並兼具海岸生態共生共榮之機能。亦即生態型海岸保護工法在規劃設計上除海象、地質、漂砂等自然條件之基本考量外，並考慮海岸生態環境因素，使之不僅滿足工程目的，同時能兼顧生態需求，減少對海岸自然環境造成損害。

5.3 發展方向與型態

5.3.1 發展方向

生態工法是根據生態工程的理念所衍生之「遵循自然生態特質的解決問題的方法」，亦即生態工法並非「特定工法」，舉凡能以兼顧生態需求並有效治本的技術皆屬之(林鎮洋，2004)。生態工法為生態工程之一種，就工程技術對被干擾前基地生態環境之深入程度而言，概分為復育(restoration)、修復(rehabilitation)、改善(enhancement)及創造(creation)等四種(林鎮洋、邱逸文，2003)，如圖 5-1 所示。

復育：使現有棲地型態經過人工施做，使其各種組成、條件、功能、景觀等都能回復至未受干擾前的狀態。

修復：針對某特定區塊被干擾前應具有的部分重點特徵，進行施做，使其能重現這部分的功能、特質。

改善：棲地之任何功能、環境品質之進步，但無須考據是否為原有的環境特質。

創造：重新「產生」一個全新的環境或資源，即使此環境所包含的特質從未出現在此區域中。

上述復育之技術須完全參照棲地干擾前之狀態，而修復、改善、

創造之技術則部分或不須參照棲地干擾前之狀態，其中改善、創造之技術可謂近自然工法之統稱。換言之，生態工法所重建之近自然環境具有復育、修復、改善及創造環境等功能，而近自然工法則側重於改善、創造環境。

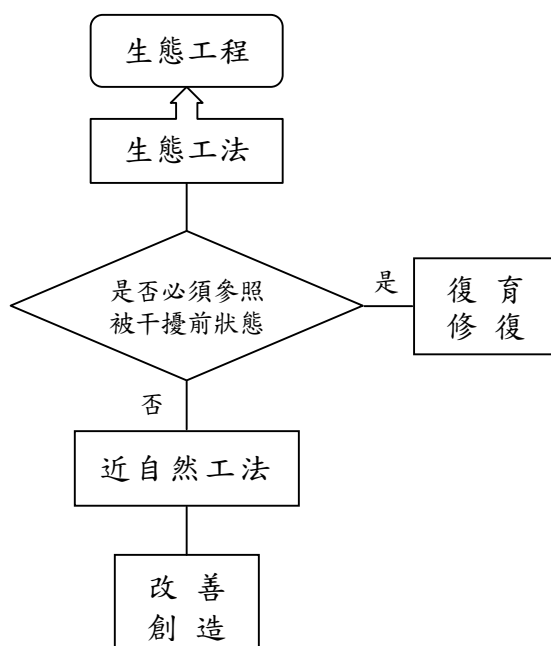


圖 5-1 融入生態觀念之工程概念關係圖 (林鎮洋、邱逸文，2001)

海岸保護工程由於地工織物、拋石、築堤、養灘等設施，往往造成工程範圍內海岸底質之改變，破壞原有生態棲地環境，尤其對生態性較豐富之岩岸地形影響為大，如藻場、底棲生物棲地之破壞等。針對海岸建設可能對生態環境之破壞，可參考 1973 年美國提出之補償措施(Mitigation)概念，考慮對生態環境破壞之迴避、減輕及補償等措施。因此海岸保護工程事先應儘可能避開生態敏感區，避免對生態環境之破壞，採用適當之工程規模及人工設施，減輕對生態環境之破壞，並針對工程技術內容結合當地生態環境，提供適於生物共生共榮之環境。

由於海岸工程建設不免破壞原有海岸環境難以恢復干擾前狀態，屬於不可逆，因此對於採用生態理念設計之海岸保護工法應屬偏重於改善、創造海岸生態環境之技術為主，即較接近於一般所謂之近自然工法。因此生態型海岸保護工法之發展方向應以「改善、創造原有海

岸保護工法之生態機能」，使其發揮基本海岸保護功能外，並能提供適合海洋生物著生、棲息及繁殖之空間，達到海岸保護與海域生態和諧共生之目的。

5.3.2 發展型態

依前述分析，未來國內生態型海岸保護工法之發展方向建議朝向改善、創造原有海岸保護工法之生態機能，亦即以附加海岸保護工法之生態機能為主，並減低對周遭生態環境之負面影響。因此未來生態型海岸保護工法之發展型態建議如后(如圖 5-2)：

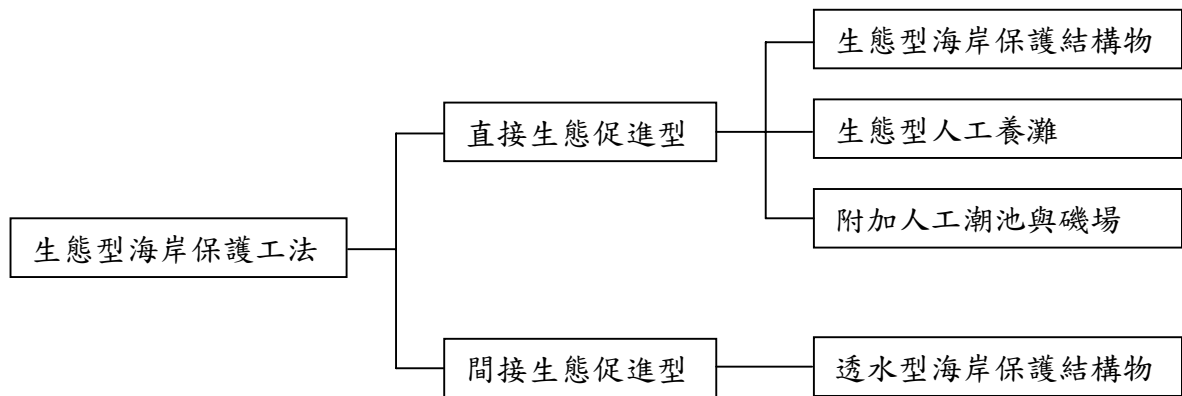


圖 5-2 生態型海岸保護工法發展型態

1. 直接生態促進型

所謂「直接生態促進型」係指具有直接促進海岸保護工法之生態效果者，初步建議發展類型如下：

(1) 生態型海岸保護結構物

海岸保護結構物常使用大量拋石、方塊、消波塊等材料，適提供附著性海洋動物與植物之良好著生基質，材料間空隙亦是水產生物之良好棲息繁殖場所，形成所謂之「擬礁石海岸」，具有豐富生態效果。因此利用海岸結構物所使用材料之生態效果特質，善加規劃設計各部構體之形狀、尺寸、位置、材質等要素，擴大發

揮其生態棲地環境效果，使海岸保護結構物兼具生態機能，形成所謂之生態型海岸保護結構物。

台灣西部多沙泥質海岸，且漂砂活動強烈，植物著生困難，生物生存環境較嚴苛，其生態性不若礁岩性海岸豐富，而西部為人口集中及政經中心，各項經濟開發蓬勃發展，加上河川、集水區整治，致近年來沿海普遍出現海岸侵蝕現象，不得不採取各項海岸保護措施，故海堤、護岸、突堤、離岸堤等海岸保護結構物觸目可見且仍在增加中。不論未來新設或既有海岸保護結構物如能附加生態機能，即採用或改建為生態型海岸保護結構物，對於改善西部沙泥質海岸生態較貧乏狀況將有莫大助益。生態型海岸保護結構物為生態型海岸保護工法之根本，將是未來國內較可行及應用較廣之發展型態。

(2)生態型人工養灘

過去國內港灣工程之疏浚土砂除用於填築新生地外，多採用陸上或海上棄置方式處理，隨著海岸漂砂砂源之減少及海岸侵蝕愈趨嚴重，凝聚港灣工程界重視浚漂土砂為一寶貴資源並儘量用於海岸養灘之共識，因此近年來人工養灘愈趨普遍，如安平港、新竹漁港等例。人工養灘所形成之人工沙灘可消減波浪能量，並有親水遊憩功能，沙灘內之生態效果亦必須重視。沙灘之形成包括顆粒大小、級配、組成及沙灘海底坡度等，除考慮受波浪作用能否安定外，如能進一步考慮底棲生物之生活環境條件，將可同時營造具有生態性之海岸環境。

國內人工養灘尚處起步階段，並有相當大之發展空間，兼具生態機能之生態型人工養灘將是未來努力方向，亦是生態型海岸保護工法可發展型態之一。

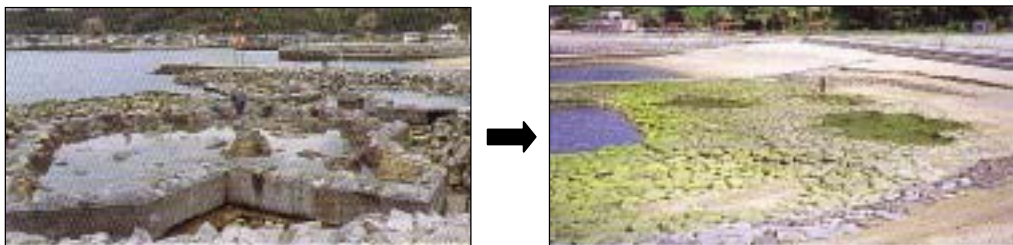
(3)附加人工潮池與磯場

潮間帶為蘊育海岸重要生態之區域，尤其礁岩性海岸之生態性更為豐富。於沙質海岸實施海岸保護工程，所營造之沙灘環境較為單調，生態亦較為貧乏，如附加適當人工潮池與磯場設施，將可增加沙灘之生態效果及親水教育環境。

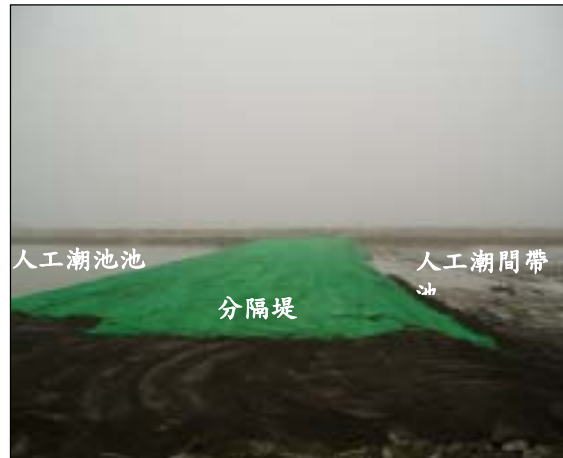


照片 5-1 生態資源豐富之潮間帶

人工潮池係利用漲潮時生物於潮池停留或覓食，俟退潮時將生物留置於潮池中，形成退潮時仍有海水狀態，在潮池中創造出多元之生態效果。人工磯場則是利用人造礁石或岩盤之起伏變化，提供藻類附著基質，有利於魚貝介類之覓食棲息活動。於沙質海岸附加人工潮池與磯場形成局部礁石海岸地形，利用此多樣之地形變化，創造出較豐富之生態系，對此海岸保護工程附加其他生態設施與效果，亦是生態型海岸保護工法可考慮之發展型態。



照片 5-2 人工潮池之施工與設置 (摘自：株式會社 TETRA 2)

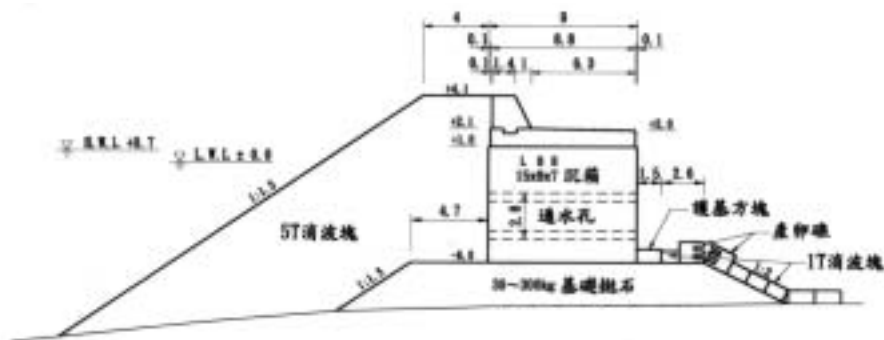


照片 5-3 安平港海岸整治工程之人工潮池與潮間帶

2. 間接生態促進型

所謂「間接生態促進型」係指具有減低海岸保護工法對周遭海域環境之影響者，初步建議發展透水型海岸保護結構物之類型。

海岸生態除受底質地形之影響外，水質環境(如水溫、鹽分、酸鹼度、溶氧等)之優劣亦會影響生物之多樣性及繁榮性，因此潔淨海水為營造生態環境最主要之條件，水質淨化可謂生態復育之基礎。近年來海岸保護漸朝向面之防護方式，並趨向不同保護工法搭配使用之整合性海岸保護工法，形成完善海岸防護方式。由於海岸保護結構物交錯配置遮蔽下，後側水域與外海海水之交換較低且流動較小，易形成半閉鎖性水域，而影響附近海域水質環境，間接污染海岸生態之生存環境。為改善海岸結構物之闢建所導致水質劣化，在工程上可考慮利用物理手法，採用透水型海岸保護結構物，即海岸保護結構物附加海水交換機能，利用潮汐或波浪能量促進海水交換。



(摘自：全國漁港協會，1997)

圖 5-3 北海道福島漁港兼具海水交換與生態機能之堤體斷面構造

(摘自：水產土木建設技術中心，2001)



照片 5-4 石川縣富來漁港具海水交換機能之透水堤

5.4 生態型海岸保護結構物之檢討流程

依前述生態型海岸保護工法發展方向與型態之分析，未來國內海岸保護工法朝向與自然生態環境和諧發展，就目前開發現況及未來執行面觀之，應以改善現有海岸保護工法兼具生態效果，對現有海岸防護方式衝擊較小且執行較易，故建議初期以發展海岸保護結構物附加生態機能最為可行，即開發所謂之生態型海岸保護結構物，促進海岸工程建設與自然環境之共生共榮。

5.4.1 建設檢討流程

生態型海岸保護結構物主要營造適合海域生物生存之環境，在種類繁多之海域生物中，對象生物之評估宜根據實施海域之生態調查為基礎，選定適合之生物物種作為生態型海岸保護結構物之對象目標。由於海藻為海洋基礎生產者，可提供海洋動物之食物來源，生產有機質與氧氣，並提供海洋生物良好棲地與蔽護場所，形成豐富之生態系，因此由日本開發生態型海岸保護結構物之發展經驗，藻場造成型構造物成為最基本及非常重要地位，可供國內參考借鏡。

生態型海岸保護結構物之建設檢討流程(如圖 5-4)，應依據整體海岸保護計畫之需求，首先檢討海岸保護工法之型式，進一步配合考慮附加其生態機能(生態型海岸保護工法)，藉由事前生態調查，分析對象生物(如海藻)之環境條件，併入海岸保護結構物之設計條件考量，並且於工程施工中及完工後持續實施成效追蹤調查，評估實際工程生態成效，不斷檢討改進回饋至下次設計，累積生態工程技術。

5.4.2 設計流程

生態型海岸保護結構物之設計流程主要係於一般海岸保護結構物之設計過程考慮對象生物之造成條件，於基本斷面之假設上涵括考慮利於生物附著棲息之構材、斷面形狀、平面配置等，其餘設計計算與一般海岸結構物大致無異，以藻場造成型為例之設計流程如圖 5-5 所示。

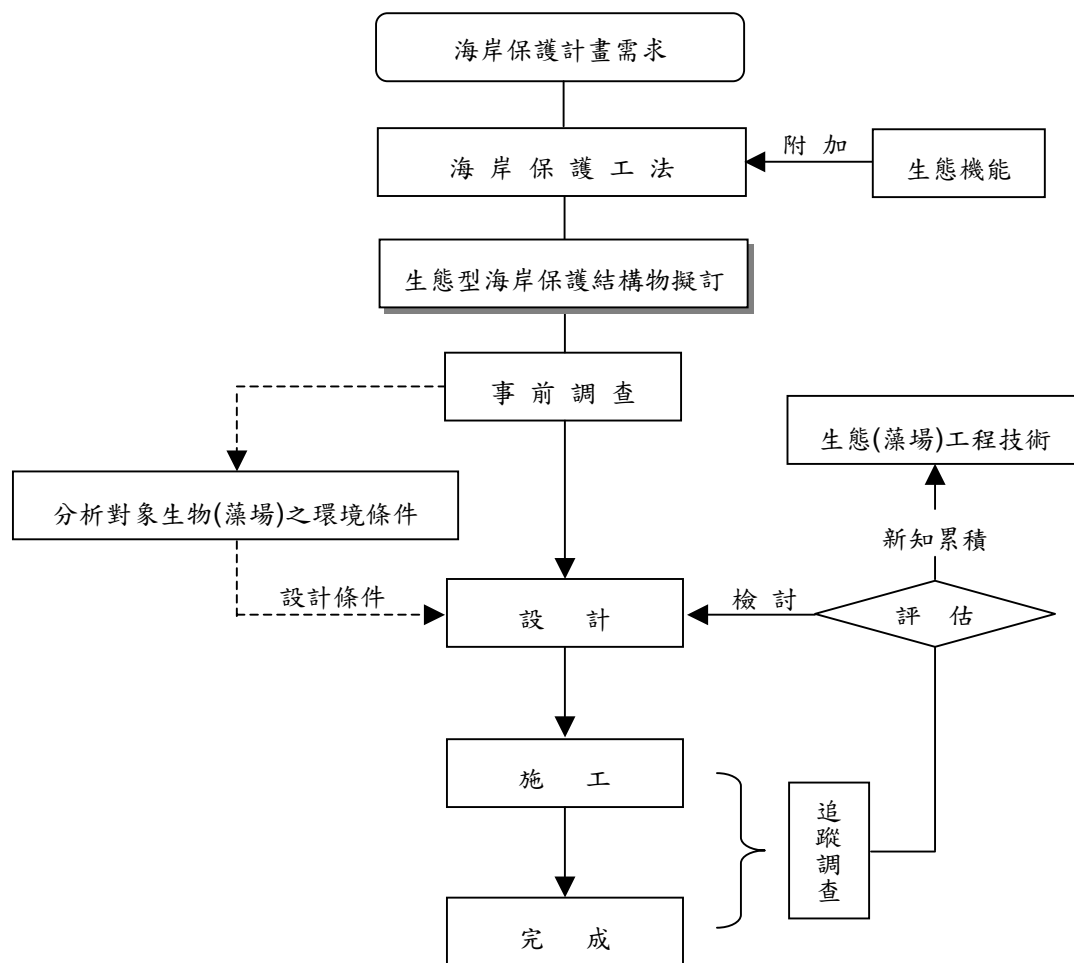


圖 5-4 生態型海岸保護結構物建設檢討流程

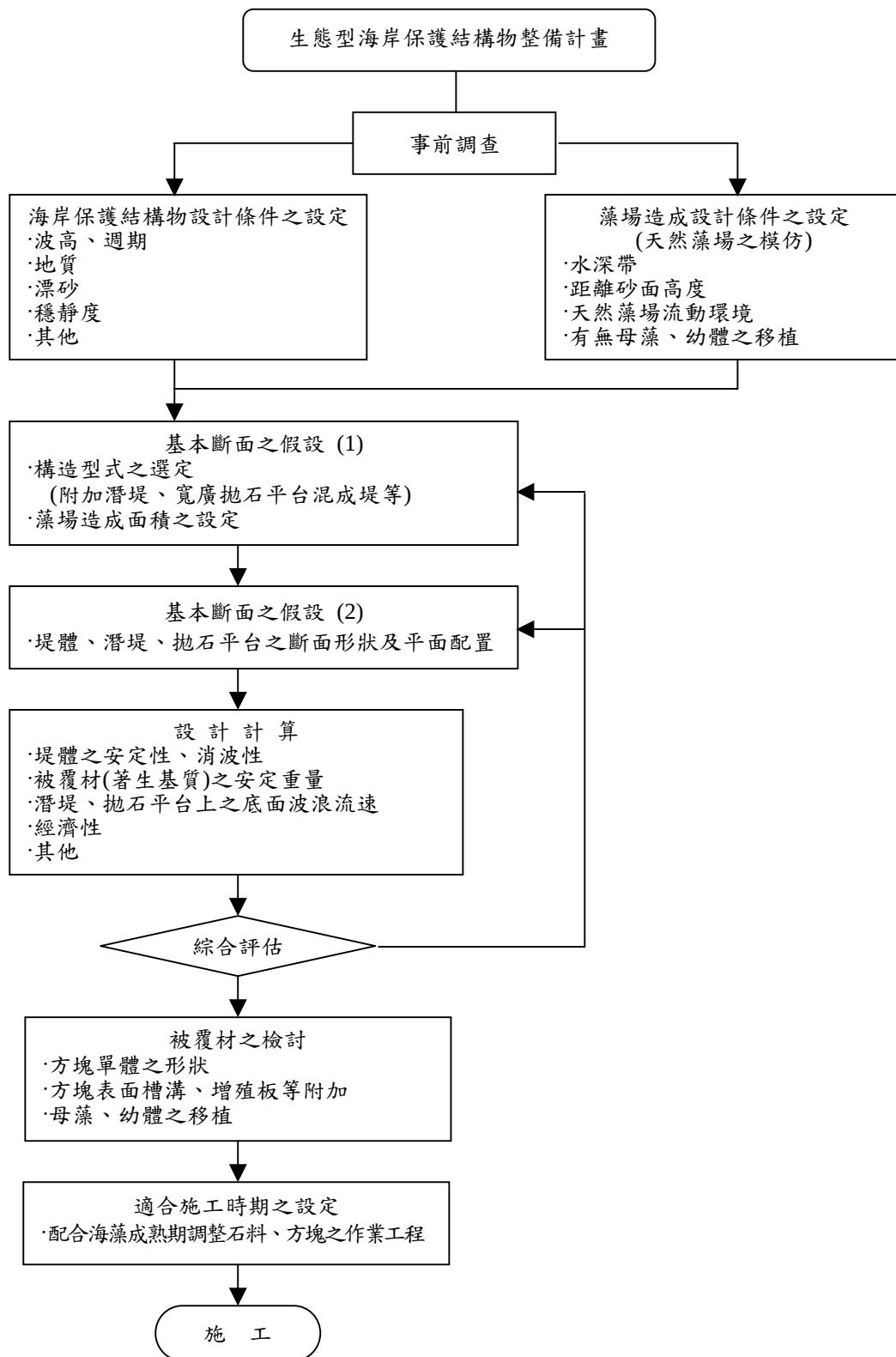


圖 5-5 生態型海岸保護結構物之設計流程 - 以藻場造成型為例

5.5 生態型海岸保護結構物之斷面型式

生態型海岸保護結構物係附加傳統海岸保護結構物之生態機能，規劃設計上除考量結構物基本之安定性、施工性、經濟性外，並且重視海洋生物之生息環境，以促進海岸工程建設與生態之和諧共存。

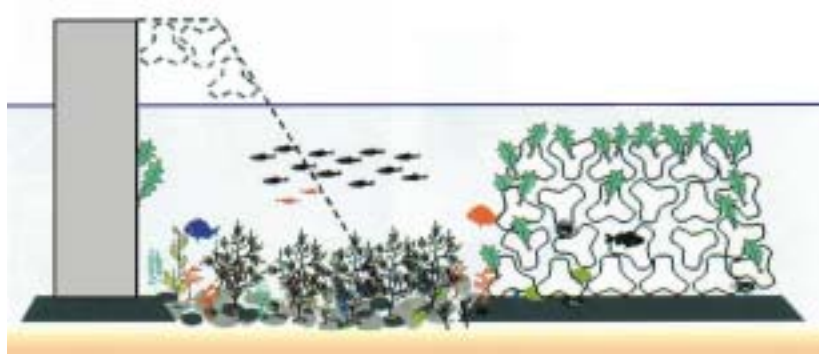


圖 5-6 生態型海岸保護結構物示意圖 (摘自：安藤亘，2002b)

5.5.1 附加生態機能之基本對策

由以往工程案例顯示，海岸結構物之拋石、消波塊如能妥善運用，對海洋生態不僅不會造成損害，反而有所助益。傳統海岸結構物由於使用卵石、塊石等天然材料及方塊、消波塊等混凝土材料，具有類似礁岩功能，提供海洋生物著生基質，故具有生態效果，因此在海岸地區常可發現設置海岸結構物之區域魚貝類較豐富，而深受釣客所喜愛。主要原因為構成之工程材料使防波堤、護岸、潛堤等海岸結構物周邊形成海藻著生，成為海洋動物基本之棲息地，且工程材料間之孔隙亦是動物躲藏之良好場所。因此利用此工程特質與海洋生物特性，善加規劃設計工程斷面，使用天然石料、特殊處理混凝土表面(如藥劑處理、凹凸狀、鋪設纖維網等)或多孔質混凝土等促進生態機能，往往較一般海岸結構物更具生態效果。

生態型海岸保護結構物主要改善傳統海岸保護結構物之生態效果，亦即附加海岸保護結構物之生態機能，在改善工法上可考慮下列

三種基本對策(如圖 5-7)：

1.對策一：基本斷面形狀改良

對策一為改善原有斷面構造適於海洋生物之生息繁殖，包括斷面形狀、設施配置等改良，如提高拋石基礎高度至對象生物之繁殖水深帶，設置潛堤之複式斷面等。

2.對策二：原有斷面構造前提下附加生態機能

對策二係在原有斷面構造基礎下附加設施配置以增加其生態機能，如增設方塊或生態礁、加拋石料或消波塊等繁殖基盤至對象生物之繁殖水深帶。

3.對策三：原有斷面構造前提下改良部材構造

對策三亦在原有斷面構造基礎下改良部材構造，如改良消波塊、方塊之外觀、形狀或材料，採用生態型消波塊、生態礁(如藻礁、產卵礁、魚礁)等。

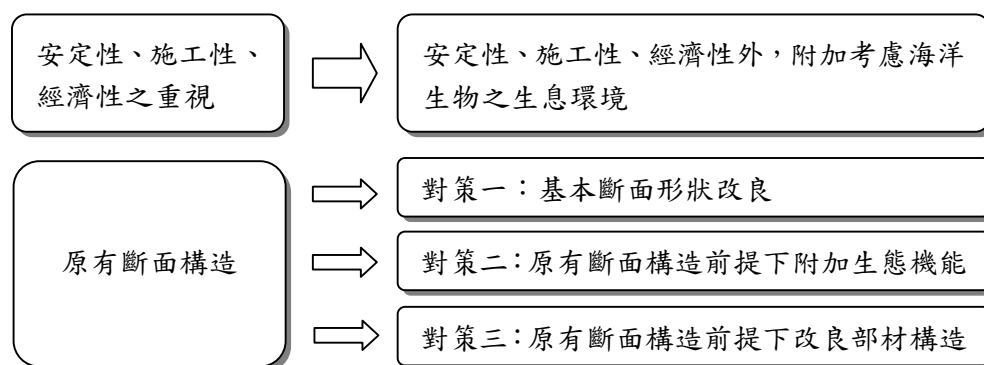
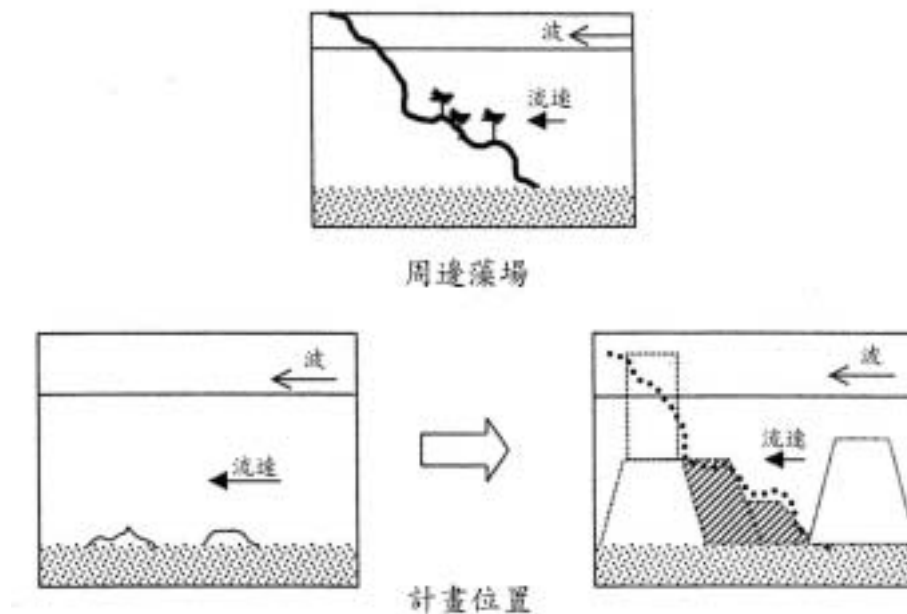


圖 5-7 傳統海岸保護結構物附加生態機能之改善對策

5.5.2 生態型斷面構造型式

海洋生物之分佈與棲地環境習習相關，如水溫、水質、波浪、潮位、海流、海岸地形、地質等，例如附著性生物(包括動物、植物)之生長環境需堅硬之基質附著，故於海岸礁岩、人工結構物可常見大型海藻、藤壺、牡蠣、貽貝、海鞘等生物，而一般水產生物習於隱蔽、躲藏、易覓食之場所，亦喜棲息於礁岩、人工結構物之區域。因此透過相關生態調查及文獻資料，瞭解海洋生物之生息環境，利用工程技術改善方法，儘可能模仿生物棲息條件之實際狀態 (如圖 5-8)，營造海岸結構物適於生物共生之環境，以達到兼具生態機能之目的。



(摘自：日本水產廳漁港部，1999)

圖 5-8 海岸結構物模仿周邊藻場環境示意圖

依上述改善傳統海岸保護結構物之生態效果對策，以海藻為對象生物為例，為獲得充分陽光一般在水深 3~8 公尺最適合其生存，針對混成堤、消波塊被覆堤、傾斜堤等常用斷面構造，將其改良為生態型海岸保護結構物之參考斷面構造型式如下：

1.基本斷面形狀改良型

藉由提高結構物之海、陸側拋石基礎高度或於結構物前增設潛堤形成複式斷面等基本斷面形狀改良方式，改善海藻著生基質於繁殖水深帶之分佈規模，以利於藻場形成，如圖 5-9 所示。

2.原有斷面構造附加生態機能型

藉由增設方塊、加拋石料或消波塊至海藻繁殖水深帶等方式，在原有斷面構造基礎下增加海藻繁殖基盤之規模，以利於藻場形成，如圖 5-10 所示。

3.原有斷面構造改良部材型

藉由改良構造設施中之消波塊、方塊之外觀、形狀或材料，採用生態型之消波塊、方塊或藻礁等方式，在原有斷面構造基礎下改良部材，以利於海藻著生及藻場形成，如圖 5-11 所示。

參考資料：漁港漁村建設技術研究所 (2001)

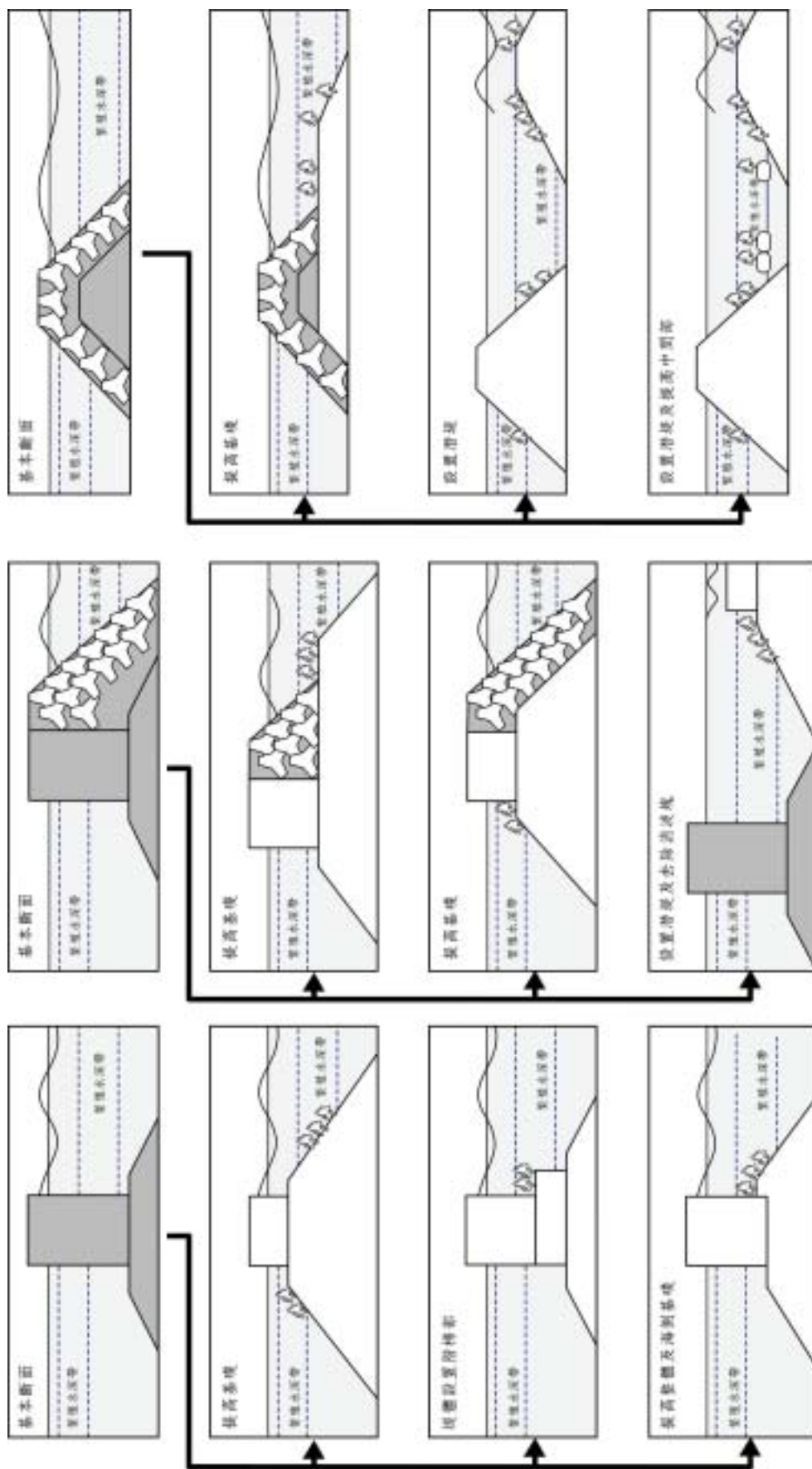


圖 5-9 改良基本斷面形狀之生態型海岸保護結構物 - 以藻場造成型為例

Figure 1 illustrates the construction process of the water conservancy project through a series of cross-sectional diagrams. The process begins with the initial state (基本圖面), showing the existing structure and water levels. The first step involves increasing the length of the flow-reducing dike (增加消流堤壩長度). The second step shows the addition of dike height (增加壩體高度). The third step involves further increasing the dike length (增加壩體長度). The final state (設置方塊) shows the completed structure with the placement of blocks. The diagrams are arranged in three rows, with arrows indicating the sequence of construction steps.

圖 5-10 附加原有斷面構造生態機能之生態型海岸保護結構物——以藻場造成型為例

5.5.3 生態型斷面設計例

以附加潛堤之混成堤構造物為例，參考全國漁港漁場協會(2003)與郭一羽和李麗雪(2005)等文獻，說明其生態特性及基本設計如下所述：

1.生態特性

於混成堤海側設置潛堤，以增加藻類及其他海洋生物之生活空間，結構物與海水接觸表面上各部位(如圖 5-12)之海藻、海草生長狀況如下：

(1)部位 I

港內側一般因海水滯留不易流動，較港外側易堆積浮泥，無堆積浮泥且無水質污染及光源充足之場所，可有大型海藻生長。

(2)部位 II

堤體直立壁為螺貝類著生之處，水越深光線與水流越弱，比較上於低潮線附近生物分佈較廣。

(3)部位 III

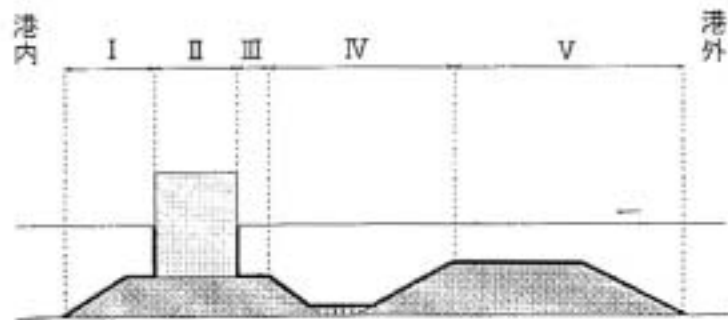
此處因堤體之反射波作用造成較大水流，僅適合可適應強烈水流之藻類生長。

(4)部位 IV

此處水流及光線較弱，僅適合深水性藻類之生長。

(5)部位 V

堤頂會發生碎波產生固定方向之水流，僅適合適應強烈水流之藻類生長，而靠近海底面部份有砂子之堆積與移動，藻類生存不易。



(摘自：全國漁港漁場協會，2003)

圖 5-12 附加潛堤混成堤之海藻與海草可能生長部位

2. 基本設計

附加潛堤之混成堤構造物為避免產生衝擊碎波壓力與越波之發生，主要堤體與潛堤設置之距離(如圖 5-13)可由下式決定：

$$h_c / h \leq 0 \text{ 時} \dots\dots\dots l' / L > 0.2$$

$$0 < h_c / h \leq 0.25 \text{ 時} \dots\dots\dots l' / L > 0.25$$

$$0.25 < h_c / h \leq 0.50 \text{ 時} \dots\dots\dots l' / L > 0.40$$

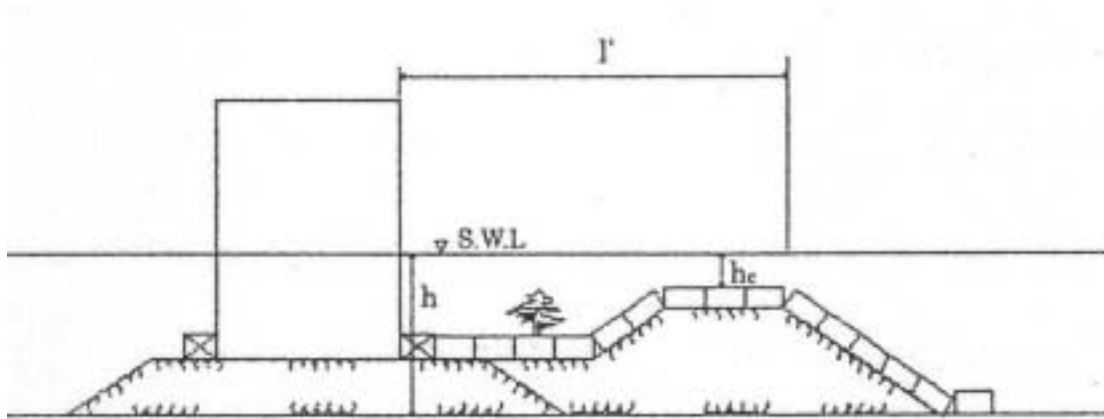
式中

h ：壁體前面之水深(m)

L ：對應水深 h 之波長(m)

h_c ：潛堤上端水深(m)

l' ：壁體前端至潛堤上端前緣之距離(m)



(摘自：全國漁港漁場協會，2003)

圖 5-13 附加潛堤混成堤之堤體與潛堤距離關係

5.6 未來研發重點建議

因應地球生存環境永續發展時代之來臨，推行生態工法已是必行方向，近年來政府亦積極推動公共工程採用生態工法，惟本土化生態工法之專業知識與工程技術仍極為欠缺，亟待多方建立。海岸為人類生存環境之一環，維護海岸環境之永續發展責無旁貸，因此未來在推動海岸生態工法，建立生態型海岸保護工法相關技術上，仍需投入更多研究，避免錯誤施工或無法達到預期效果。生態工法具跨學門、跨領域之特質，應多徵詢生態專家之意見及協助參與，建議未來在生態型海岸保護工法之研發重點如下：

1. 海岸生態環境調查

海岸生態環境資料為推行海岸生態工法之基礎，未來須加強海岸構成要素及生態環境調查，以作為規劃設計之依據。過去國內相關海岸生態調查主要以天然海岸為對象，近年來已有中華大學(中華大學水域生態環境研究中心，2002、2003、2005)、台東大學(林綉美等，2004)等先後投入海岸結構物周遭生態環境調查，並亟需擴大建立國內海岸

生態資料庫，以提供生態型海岸保護工法研擬之參考。同時在實施生態型海岸保護結構物計畫時，朝向建立開發前、施工中及施工後之生態調查機制，以確保實施成效及促進生態工程技術。

2.生態型消波塊、方塊之研發

消波塊、方塊為海岸結構物重要設施，近年來尤其是消波塊之存在性與合理性受到各界多方質疑，不過在尚無其他適當替代措施之情況下，一時之間恐難以完全捨棄不用，而仍有其存在之必要與價值。因應整體環境之變化，未來應積極謀求改善混凝土型塊常為人垢病破壞海岸景觀之缺點，並進一步兼具生態機能，開發生態型消波塊、方塊，改良海岸結構物部材構造。國內在此方面之研發仍在起步階段，相關產品並不多見(如照片 5-5)，可觀摩國外如日本之發展經驗作為借鏡參考(如照片 5-6)。



照片 5-5 烏石與富基漁港設計採用之生態型方塊



(摘自：株式會社 TETTRA 2)



(摘自：株式會社三柱)

照片 5-6 日本開發之生態型消波塊與方塊例

3.工程生態材料之開發

利於海岸生態效果之工程材料開發，亦是生態型海岸保護工法之研究重點之一。例如混凝土製成後之初期硬化過程會溶出強鹼成份，阻害水中生物生長，若使用高爐水泥以消化氫氧化鈣鹼性成份，或將亞鐵硫酸(FeSO_2)塗佈於混凝土表面防止強鹼溶出，均有益於生物之生長；使用輕質多孔隙混凝土，其表面微小連續孔隙適合藻類、甲殼類、多毛類之生息場所，優於普通混凝土之生態效果。

4.本土化生態工程斷面之研究

國內在生態型海岸保護工法之研究仍在起步階段，未來仍需投入相關基礎調查研究，結合海岸生態環境，開發符合我國情之本土化生態型海岸保護結構物工程技術。

第六章 波浪通過系列潛堤擴散水工模型試驗

系列潛堤為柔性保護工法，由於潛沒海中不影響海洋視覺景觀及阻礙民眾親水，且設置水深約為 10~20m，其結構物本身適合海中動植物的生存，故系列潛堤除防災功能外，亦具有景觀、親水及生態之功能。為探討波浪通過系列潛堤堤前污染物擴散情形，於交通部運輸研究所港灣技術研究中心風洞試驗室的斷面水槽進行水工模型試驗，試驗設備與儀器、試驗步驟與方法以及試驗結果分述如下。

6.1 試驗設備及儀器

1. 斷面水槽

試驗水槽長 100 公尺×寬 1.5 公尺×高 2 公尺。試驗水槽前端設置一造波機，尾端設有消波設施，水槽中段有兩處 10 公尺長的玻璃壁，藉透明玻璃觀察試驗進行時波浪的變化過程，其餘水槽兩側以及底部均為光滑不銹鋼板。光滑不銹鋼表面可以減小波浪通過時與牆壁及底床的摩擦力，減小能量損失。

2. 造波機

造波機為丹麥水工試驗所(DHI) 出品的直推式油壓式造波機，藉由電腦程式控制，依試驗需求造出各種不同條件的規則波。藉由電腦程式設定，依試驗需求可造出各種不同條件的規則波浪。

3. 容量式波高計、增幅器、資料擷取系統

本試驗之水位訊號係以採用 35 公分及 25 公分長兩種型式容量式波高計所量得，共 8 支，分別置於試驗水槽中。當波高計因不同高度之水位改變電壓值輸出，利用增幅器(amplifier)將電壓值放大，再利用資

料擷取系統將各波高計擷取之類比(analogue)訊號轉換為數位(digital)訊號，以利電腦處理分析所得之波浪資料。

4. 導電度計、蠕動泵浦及資料擷取系統

本試驗之污染源濃度(氯化鈉濃度)係以測導電度的原理所量得，導電度計共 17 支，分別置於試驗水槽中。量測範圍為 0~20000 $\mu\text{s/cm}$ ，精確度為 $\pm 2\%$ ，量測容許溫度為 0-80°C，偵測器尺寸為直徑 1.5 公分、長 15 公分，偵測電極端無包覆以正確量測水流變化之鹽水擴散。為使氯化鈉試劑(鹽水)平均且準確灑入水槽，本試驗利用一機多管蠕動泵浦(如照片 6-1)，流量範圍為 5 ~ 3400 ml/min (每部) 以上。每部管數為 4 管，使用兩部總共為 8 管，流量誤差為 $\pm 2\%$ 。每部具有可操控速度、運轉方向、啟動、停機、逆洗及關機等功能，試劑噴頭則採用具可調角度及噴灑集中分散均勻功能的銅製噴頭。利用內徑 6mm 外徑 10mm 的矽膠管，連接試驗鹽水經蠕動泵浦延續至試驗水槽靜水面上 10cm，再接噴頭均勻佈置在 1.5m 水槽斷面上。當蠕動泵浦壓送鹽水 (NaCl) 均勻撒入水槽中，因波浪水流、鹽水本身擴散以及沉降作用，不同位置的鹽水濃度因而變化。導電度計因不同鹽水濃度產生導電度連續變動，變動訊號經轉換盒 (如照片 6-1) 傳送到資料擷取系統 (VR18 無紙記錄器)，再經由記錄器 (如照片 6-2) 的儲存媒體將數據傳輸到電腦中，以便分析所得之濃度資料。



照片 6-1 蠕動泵浦及導電度計轉換器等試驗設備



照片 6-2 導電度計資料擷取系統

6.2 試驗步驟及方法

6.2.1 儀器及試劑率定

1. 波高計率定

利用波高計率定桶，分別對 8 支波高計進行率定。每支波高計改變不同的水位，根據不同水位的電壓值，設定不同的放大率，本研究以 2.0cm/volt 為率定基準。

2. 造波機波高率定

本研究需造出不同週期(1.02sec ~ 3.38cse)和固定波高(8cm)之波浪條件，試驗前對造波機及控制系統進行率定，調整造波機之衝程及週期，使造出之波浪符合預期需求。

3. 蠕動幫浦流量率定

為使每部蠕動幫浦之每支押送管，所送出之溶劑量為設定值，需對蠕動幫浦流量作率定。每部蠕動幫浦首先調整(1 次 4 支)總調開關，使 4 支管總流量為所設定值(3L/min)，再作每支微調成相同流量(0.75L/min)，最後再作總量調整為 8 支噴頭總共流率為 6L/min=0.1L/sec，均勻噴灑到 1.5m 寬的斷面水槽。

4. 鹽水濃度率定

任何濃度已知的溶液稱為標準溶液 (standard solution)。溶質於溶液中的濃度通常表示為溶液單位重量或體積中所含溶質的重量或體積。通常重量單位是克，體積單位是升。本研究應用上，把克換為莫耳，其所表示的濃度為莫耳濃度 (molarity)，為每升溶液中所含溶質的莫耳數。莫耳濃度(M 或 mol/L) = 溶質莫耳數 / 溶液體積(升)。一莫耳濃度的溶液，寫成 1M，即將足量的水加入一莫耳物質，使配成恰為一升的溶液。若為 1M NaCl (分子量為 58.5) 溶液可稱取 58.5g

的 NaCl，加水達到 1 升。本研究所使用之氯化鈉標準溶液之濃度為 1M 以及 0.5M。

5. 導電度計率定

首先將適量試藥氯化鈉加入適量蒸餾水量取導電度值，再逐次加 5 1000ml 不等之純水(蒸餾水)，測其導電度值，導電度值以及溶液體積關係圖如圖 6-1 所示，圖 6-2 則為換算成莫耳濃度(M)與導電度值關係圖，圖 6-1 及圖 6-2 中實線為其試驗值之迴歸曲線，迴歸曲線的方程式如式 6-1 及式 6-2，其中 $\hat{C}$ 為導電度值， C 為氯化鈉莫耳濃度值， V 溶液之體積，導電度計率定過程如照片 6-3 及照片 6-4 所示。

$$\ln(\hat{C}) = -0.8819 \ln(V) + 4.860 \quad \dots\dots\dots(6-1)$$

$$C = 0.0114 + 1.487\hat{C} - 0.1770\hat{C}^2 \quad \dots\dots\dots(6-2)$$

在進行導電度與莫耳濃度值換算過程中，還需作溫度補償，以水溫度為攝氏 25 度為基準，補償公式如式 6-3 所示，其中 T 為試驗當時的水溫。

$$\hat{C} = \frac{\hat{C}}{1 + 0.0171(T - 25)} \quad \dots\dots\dots(6-3)$$

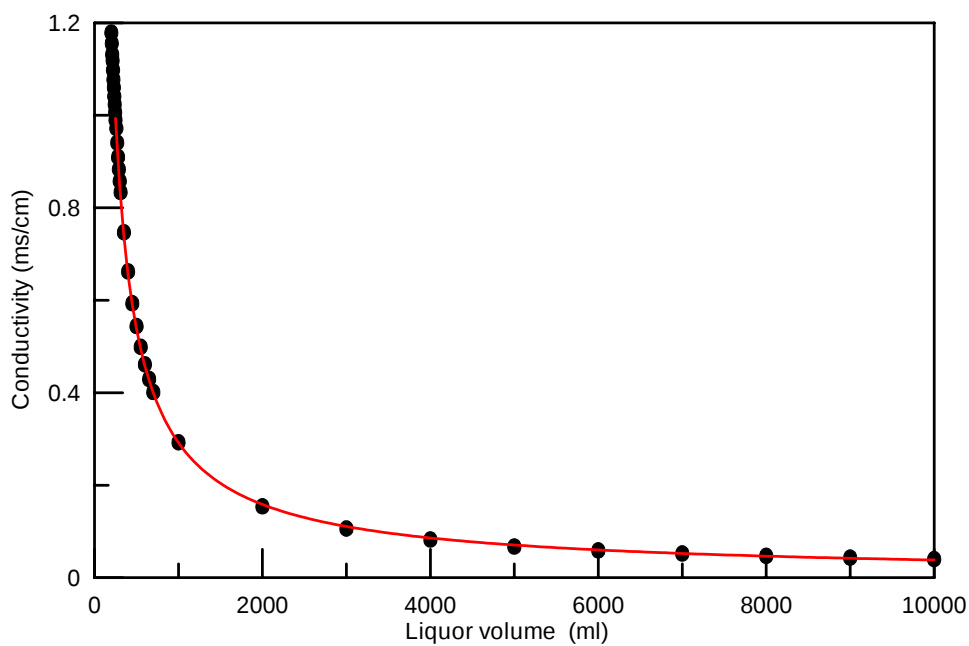


圖 6-1 導電度值以及溶液體積關係圖($T = 25^{\circ}C$)

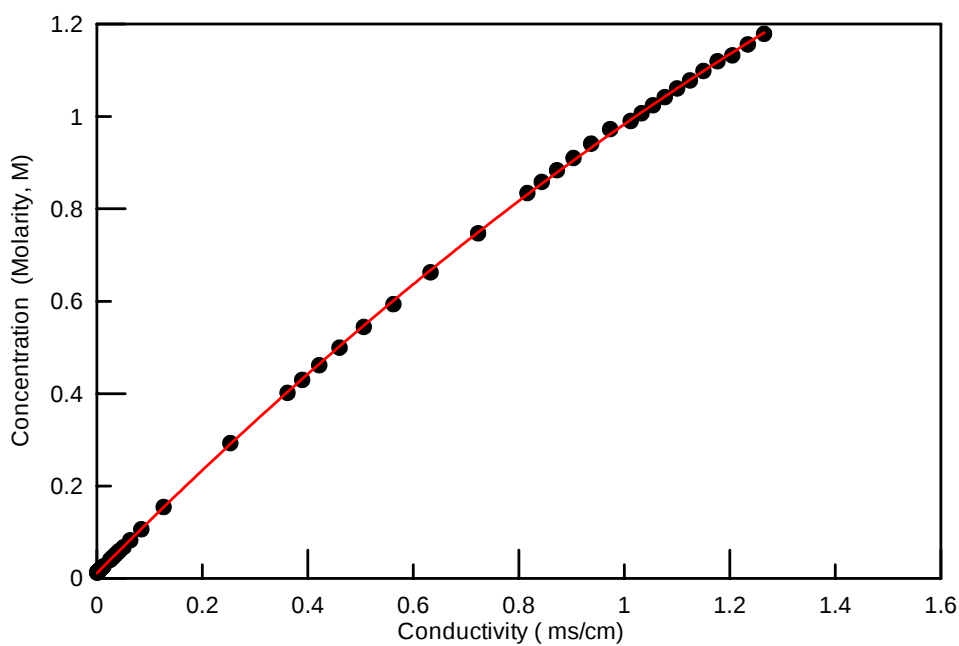
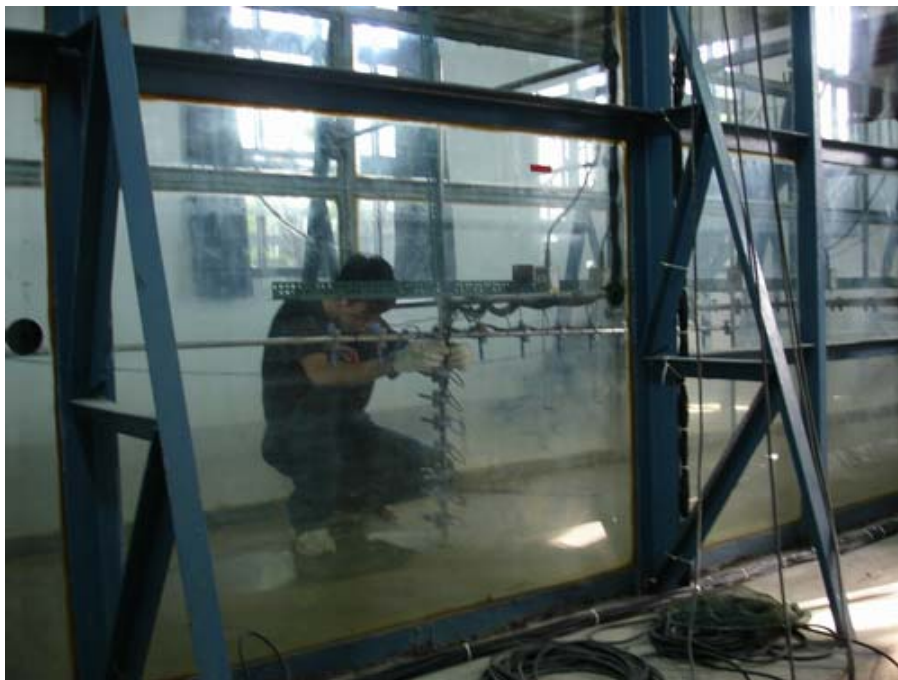
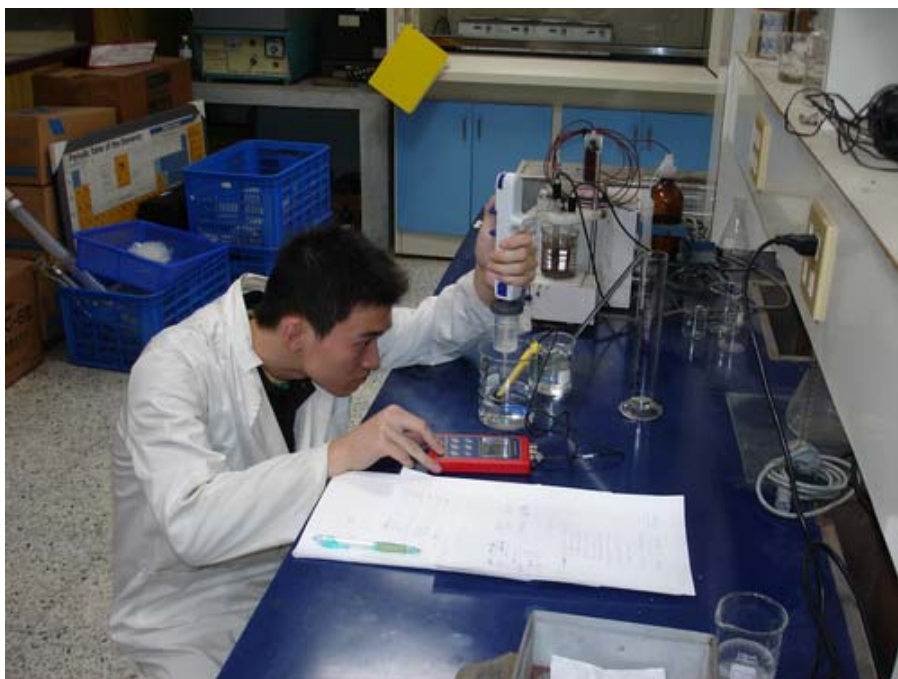


圖 6-2 莫耳濃度(M)與導電度值關係圖($T = 25^{\circ}C$)



照片 6-3 導電度計試驗水槽內率定情形



照片 6-4 導電度計化學實驗室率定情形

6.2.2 試驗佈置

1. 潛堤佈置

潛堤以木製夾板製成，中間放置鐵塊，以防波浪通過時，因水流及壓力變化造成震動影響試驗品質。潛堤寬度為 $B=60\text{cm}$ ，潛堤高度為 $D=30\text{cm}$ ，潛堤個數為 $N=4$ ，潛堤堤體中心間距為 $S=180\text{cm}$ 。潛堤配置以造波機前 55 公尺為第 1 個潛堤配置點，依序往後佈置共 4 個潛堤，佈置情形如照片 6-5 所示。

2. 波高計佈置

為有效量測入射、反射以及透射波之水位，波高計佈置分為三區域。第一區為入射區，於造波板前 5 公尺處放置 1 支波高計，藉以量測入射波。第二區為堤前區，此區域在入射端的第一個潛堤前約 4 公尺到 8 公尺處，架設 6 支不等間距波高計，用以量測堤前的水位變化，經由資料擷取系統及計算程式，計算波高及反射率。第三區為堤後區，為潛堤後方等水深區域，此區放置 1 支波高計，用以觀測波浪的透射情形，試驗室的潛堤佈置、波高計佈置以及造波控制量測系統示意如圖 6-3 所示。

3. 導電度計佈置

為有效量測堤前氯化鈉溶液擴散的情形，導電度計分為水平以及縱向水深佈置。在水平佈置中，於入射端的第一個潛堤前約 4 公尺到 6 公尺處，放置 11 支等間距鹽度計，每支間距為 16cm，導電度計量測點—電極為水面下 10cm。在垂直佈置中，於入射端的第一個潛堤前約 4.5 公尺由水面下 18cm 依序垂直往水深下處佈置共 6 支等間距導電度計，間距為 7cm。試驗室的潛堤佈置、導電度計、蠕動幫浦以及資料擷取系統示意如圖 6-4 所示。潛堤、波高計與導電度計佈置相關位置詳細尺寸示意如圖 6-5 所示，波高計及導電度計實際佈置如照片 6-6 所示。

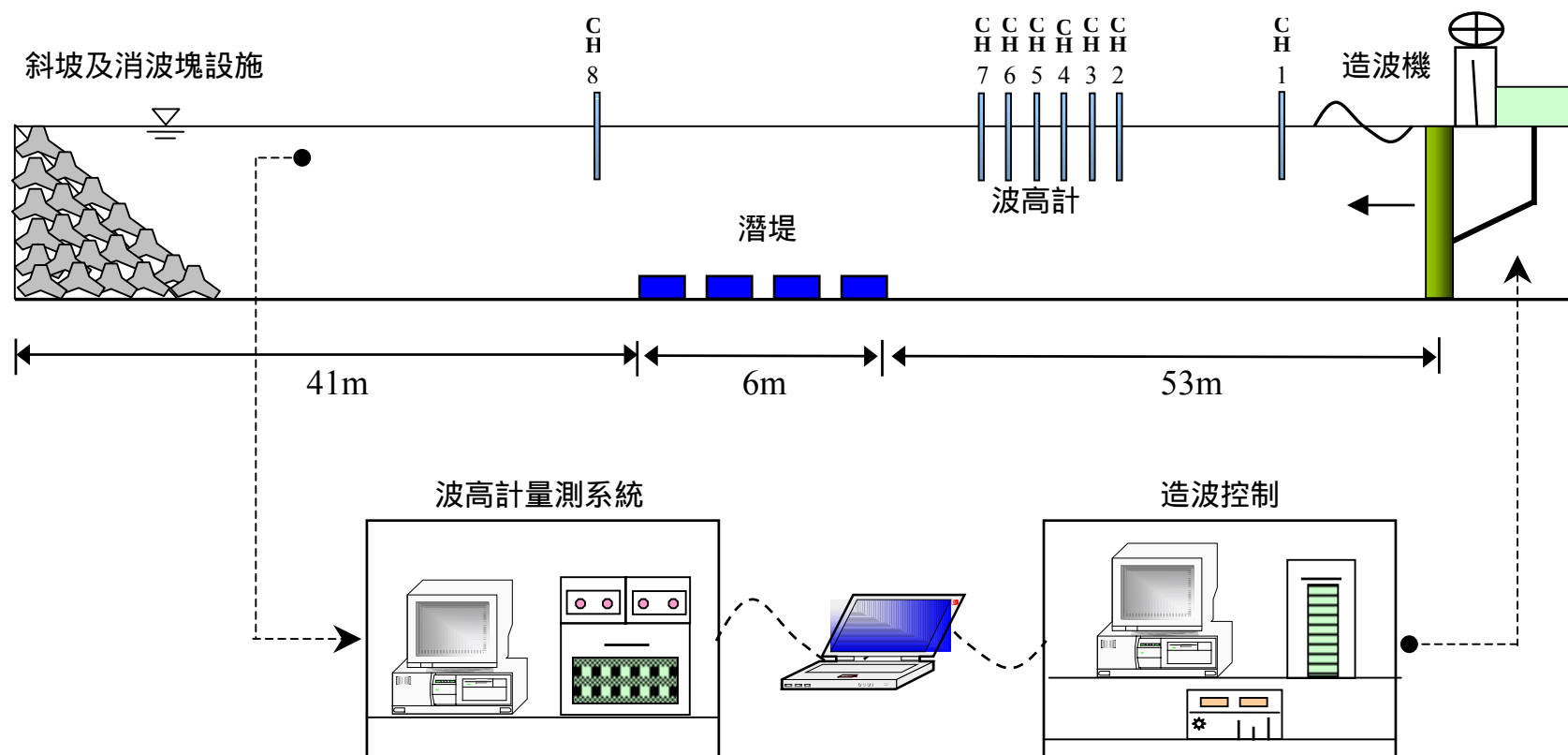


圖 6-3 潛堤佈置、波高計佈置以及造波控制量測系統示意圖

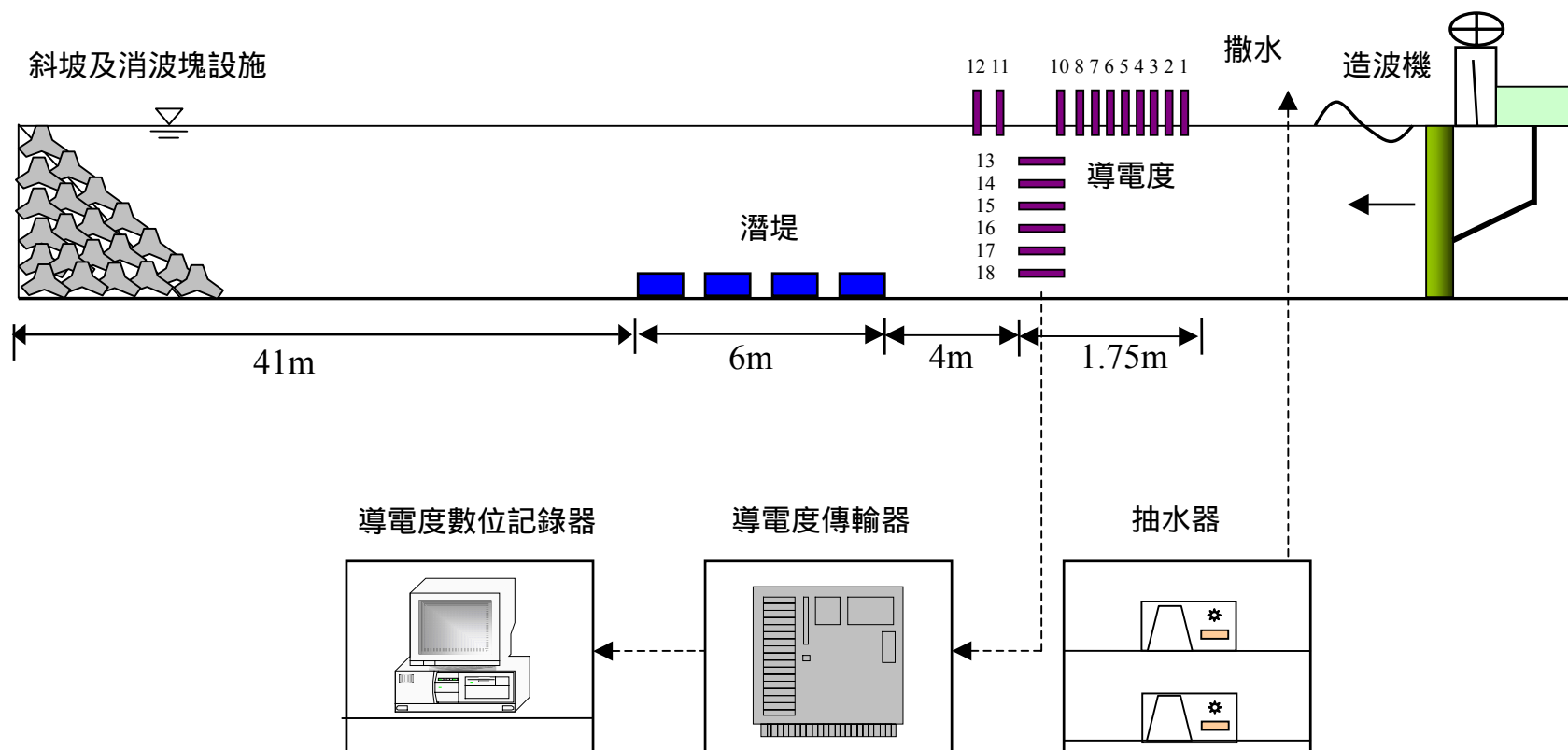
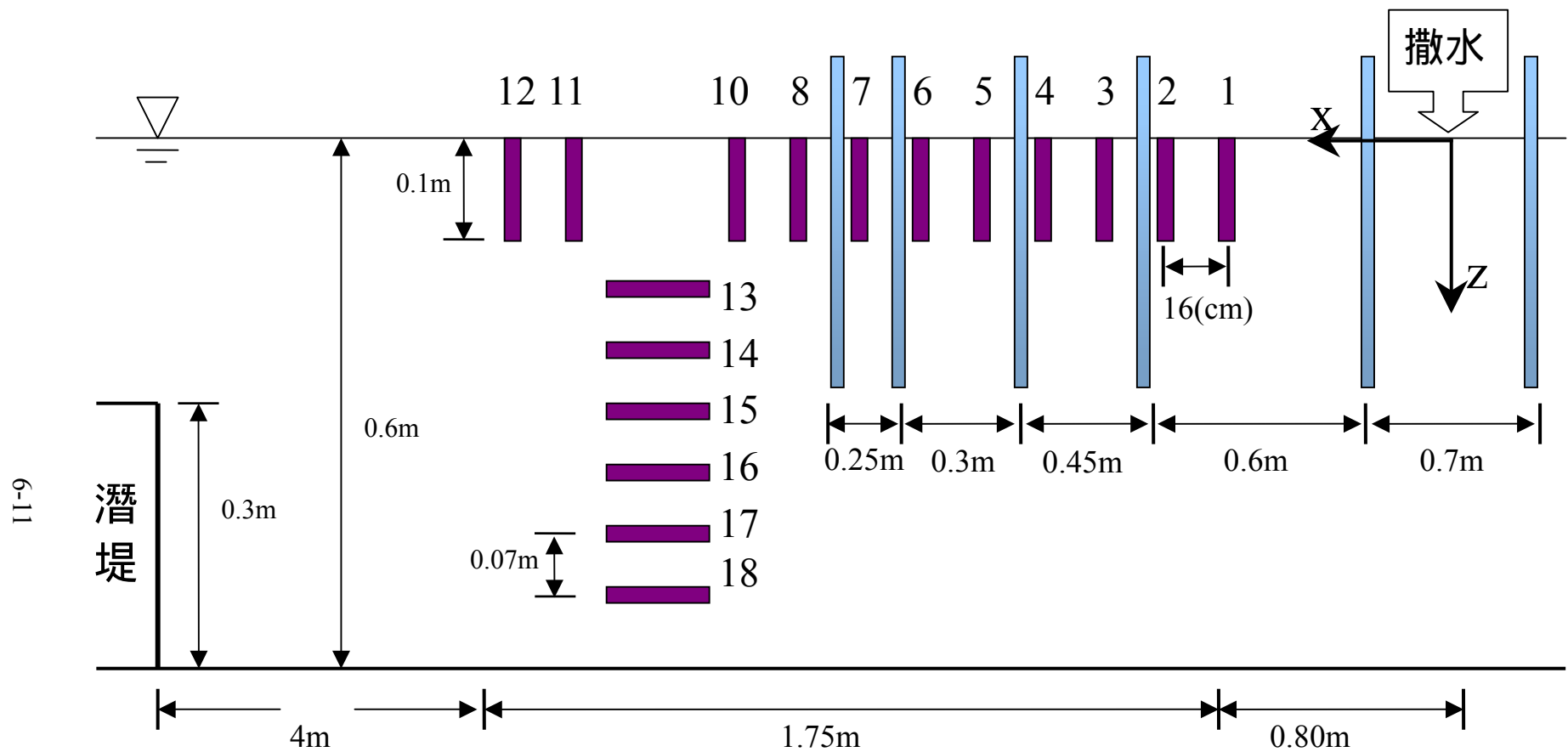


圖 6-4 潛堤佈置、導電度計、蠕動幫浦以及資料擷取系統示意圖



導電度計
波高計

圖 6-5 潛堤、波高計與導電度計佈置相關位置尺寸示意圖



照片 6-5 試驗水槽內系列潛堤佈置情形



照片 6-6 試驗水槽內導電度計佈置情形

6.2.3 試驗條件

1. 布拉格反射造波條件

依據往昔之文獻研究，波浪通過系列潛堤時，當潛堤間距(S)約為入射波長(L)之半($2S/L \sim 1$)，將產生布拉格反射，本研究欲探討布拉格反射發生時的污染物擴散現象，首先必須作不同波浪條件的反射波量測分析。試驗中採用規則波入射之週期為 $T=1.02 \sim 3.38 \text{ sec}$ ，入射波高為 $H=8 \text{ cm}$ ，水深為 $h=60 \text{ cm}$ ，潛堤個數為 4 個，潛堤間距 $S=180 \text{ cm}$ ，堤高 $D=30 \text{ cm}$ ，堤寬 $B=60 \text{ cm}$ ，潛堤佈置以及波浪條件如表 6-1 所示。

表 6-1 系列潛堤試驗佈置及波浪條件表

潛堤 型式	堤數 (N)	間距 (S)	堤寬 (B)	堤高 (D)	水深 (h)	波浪條件	
						週期 (T)	波高(H)
矩型	4	180 cm	60 cm	30 cm	60 cm	1.02~3.38 sec	8 cm

在波高計的佈置方面，為同時配合 Isaacson (1991) 計算反射係數之三波高法及取樣頻率的限制，組成數組以三支波高計為反射率計算單位的波高計量測組。並考慮採取數支波高計以不等距離的分配方式來進行佈置。其中波高計間距的決定主要依照實驗過程中所造之波長大小決定，以分別在長波及短波的情形下，波高計均可量測到足夠的取樣頻率(30Hz)以及避免反射率計算時發生發散誤差。

2. 氯化鈉試液擴散試驗條件

本研究以布拉格反射發生的波浪條件為入射條件，以兩種不同濃度的氯化鈉溶液為污染物(擴散源)，濃度分別為 1M 及 0.5M，比重為 1.06 及 1.03。氯化鈉溶液由造波開始即開始噴灑，總共造波 400sec，氯化鈉溶液亦施灑 400sec，總共施灑 40L 氯化鈉試液，單位寬度施灑

量為 $40\text{L}/1.5\text{m} = 2.67\text{L}/\text{m}$ 。導電度量測以每秒 1 點量測擷取試驗值，總共量測 400 sec，兩次試驗時間水溫各別為 94 年 12 月 9 日 $T=19.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 94 年 12 月 18 日 $T=19.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6.3 布拉格反射試驗結果

為找出通過系列潛堤發生布拉格反射的波浪條件，本研究根據 6.2.3 造波條件造波，利用不同位置波高計量測水位的結果，加以分析成反射率，試驗結果如圖 6-6 所示。由圖可知在 $2S/L=0.4 \sim 2.2$ 的波浪條件範圍內，共發生一次的反射率振盪變化，並在 $2S/L=0.93$ 附近發生布拉格反射現象，反射率尖峰值約為 0.7。故爾後擴散試驗，即以 $2S/L=0.93$ 為造波條件，亦即波浪週期為 $T=1.86\text{ sec}$ ，波高為 $H=8\text{ cm}$ 。另外污染源位置(氯化鈉溶液噴頭位置)的決定，則以發生布拉格反射的波浪條件造波時，所觀察到堤前水位震盪最劇烈之位置加以架設，依據觀察結果，灑水器架設於第一座潛堤前 6.55m 位置。

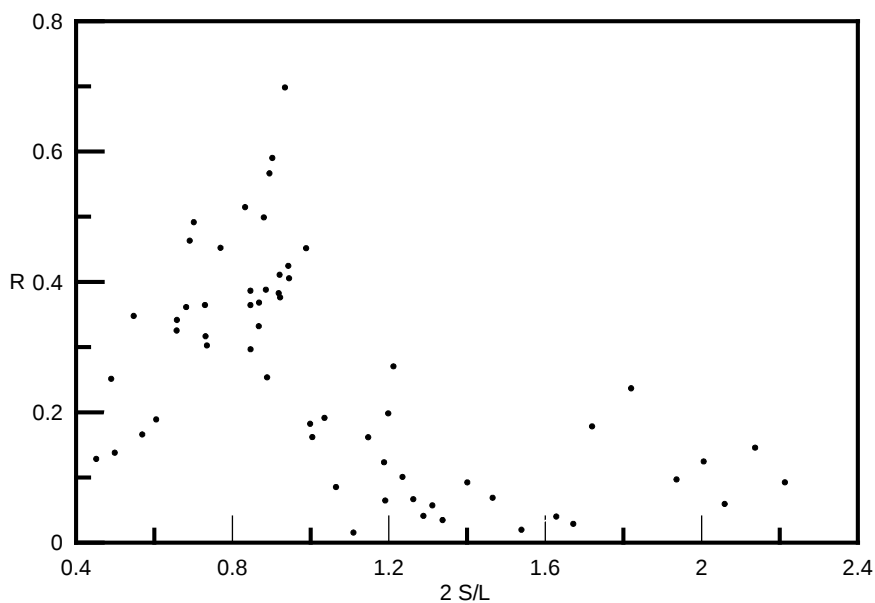


圖 6-6 不同週期波浪通過系列潛堤反射率變化圖

6.4 氯化鈉試液擴散試驗結果

為探討波浪通過系列潛堤，於堤體前方所產生的反射波對潛堤前方受到污染時，其污染物的擴散情形。本研究於堤體前方水表面處施放鹽水，藉以觀察鹽水之擴散情形。試驗結果分別說明如下。

圖 6-7 及圖 6-8 分別為施灑時間及造波時間為 101 ~ 200 sec 時，鹽水濃度為 0.5M 的配置下，水平方向及垂直水深方向平均濃度表示圖。圖中 X 表示為離施灑鹽水位置之距離，Z 表示距水面下之距離。圖 6-7 中顯示，在水平方向上，距施放處越近時，其濃度值較遠處之濃度值高。圖 6-8 中顯示在垂直水深方向上，由於鹽水尚未擴散至導電度計上，其濃度值仍然呈現原水之濃度值。

圖 6-9 及圖 6-10 分別為施灑時間及造波時間為 201 ~ 300 sec 時，水平方向及水深方向平均濃度表示圖。圖 6-9 中顯示，在施灑時間為 201 ~ 300 sec 時，前方 3 支導電度計受到鹽水濃度擴散之影響，導電度計有明顯的濃度反應，但其餘之導電度計，由於鹽水濃度受到重力沉降之影響，於自由表面附近處之導電度計並未測得明顯的濃度值。另外在圖 6-10 中顯示，垂直方向的導電度計，受到鹽水重力沉降及波浪作用之影響，故於水深方向較上端之導電度計仍無測得明顯的濃度值，於較接近底部的導電度計則有明顯的濃度反應，依此推測鹽水的擴散為拋物線型式的擴散方式進行擴散。

圖 6-11 及圖 6-12 分別為施灑時間及造波時間為 301 ~ 400 sec 時，水平方向及水深方向平均濃度表示圖。圖 6-11 及圖 6-12 的濃度測定值與圖 6-9 及圖 6-10 相似，顯示擴散於 301 ~ 400 sec 時，其波浪與施灑濃度之相互作用已達到穩定的狀態。

由於鹽水濃度擴散受到重力沉降及堤體前方反射波浪之影響，堤前的濃度值，並不會擴散至整個斷面，只會局部性的擴散於施灑位置附近處及沈降至較為深處的底床附近處。其擴散情形呈現一拋物線的分佈狀態，且侷限於有限的區域位置內，並不會造成大規模的擴散。

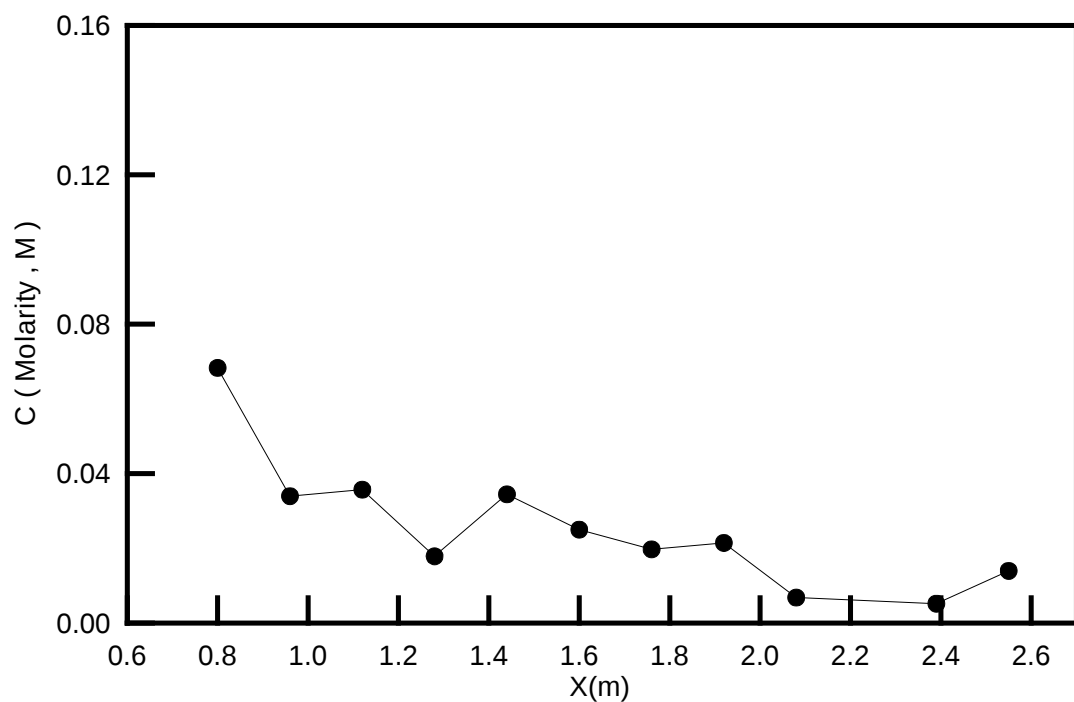


圖 6-7 系列潛堤前方水平方向濃度比較圖 ($t=101\sim 200\text{sec}$, 0.5M NaCl)

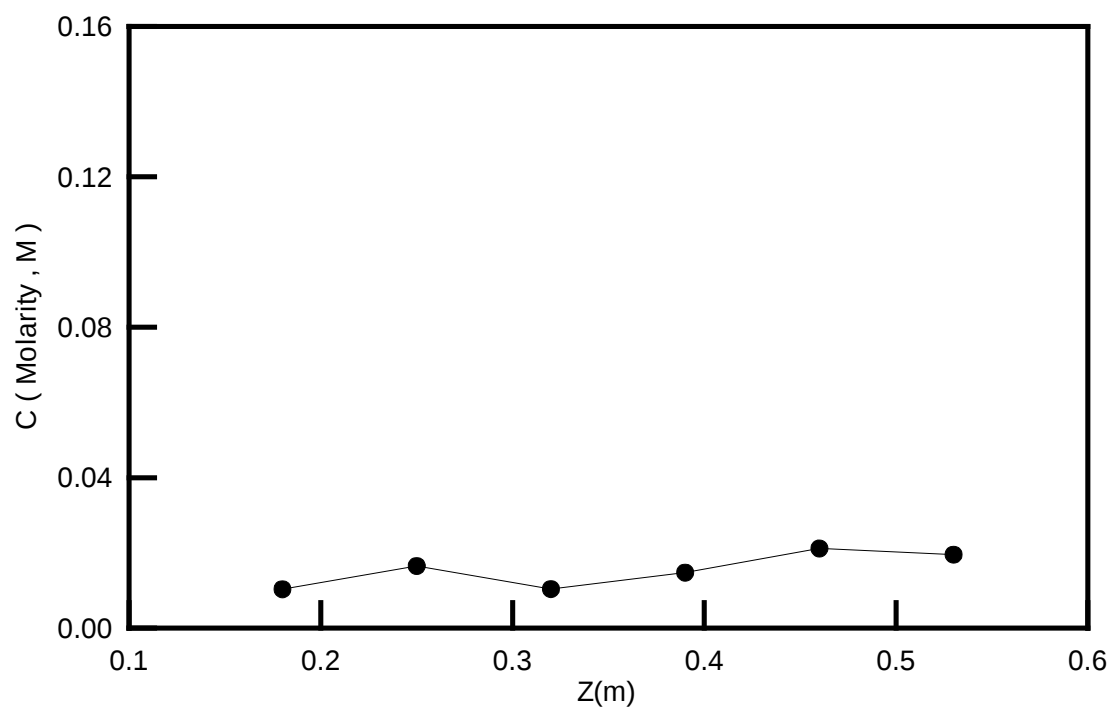


圖 6-8 系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖
($t=101\sim 200\text{sec}$, 0.5M NaCl)

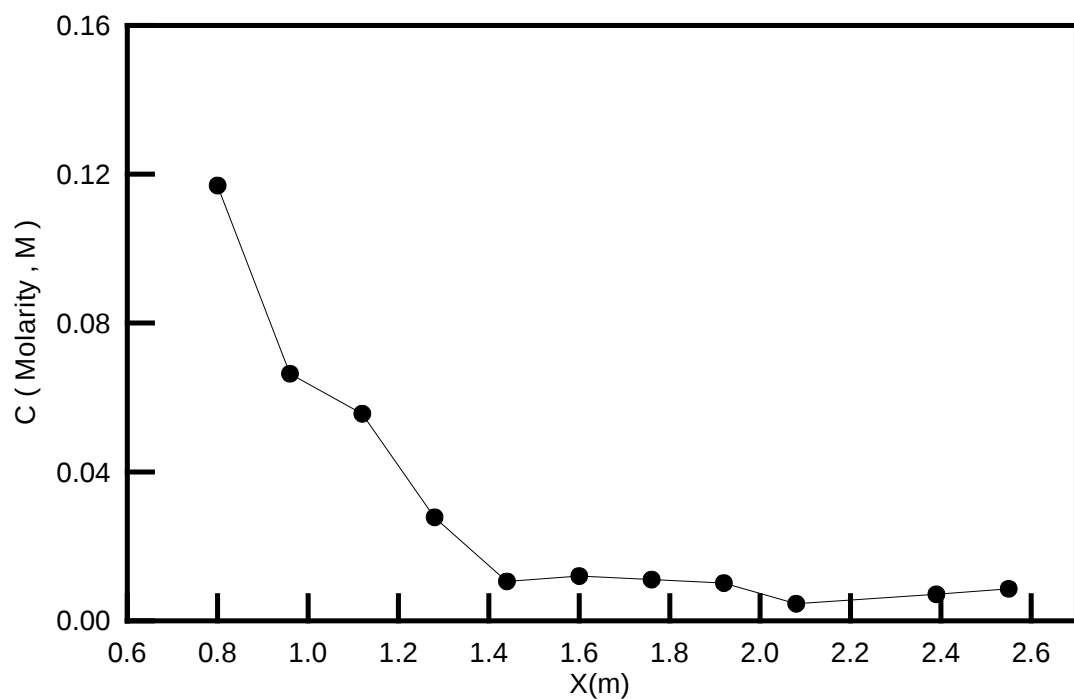


圖 6-9 系列潛堤前方水平方向濃度比較圖
($t=201\sim300\text{sec}$, 0.5M NaCl)

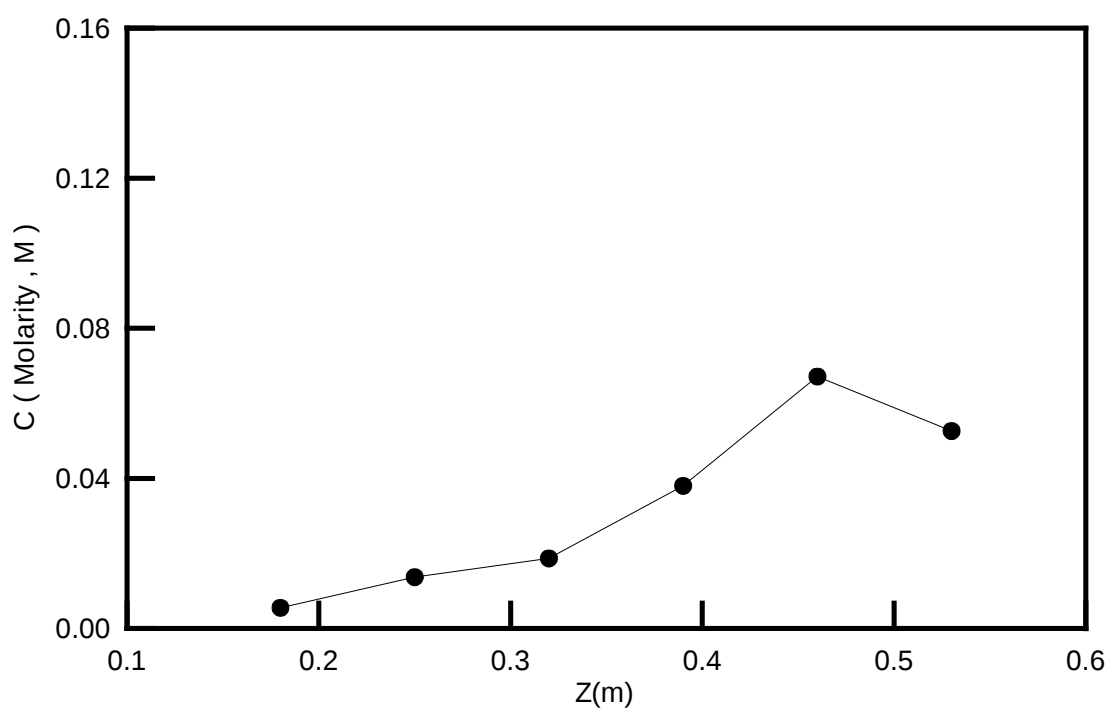


圖 6-10 系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖
($t=201\sim300\text{sec}$, 0.5M NaCl)

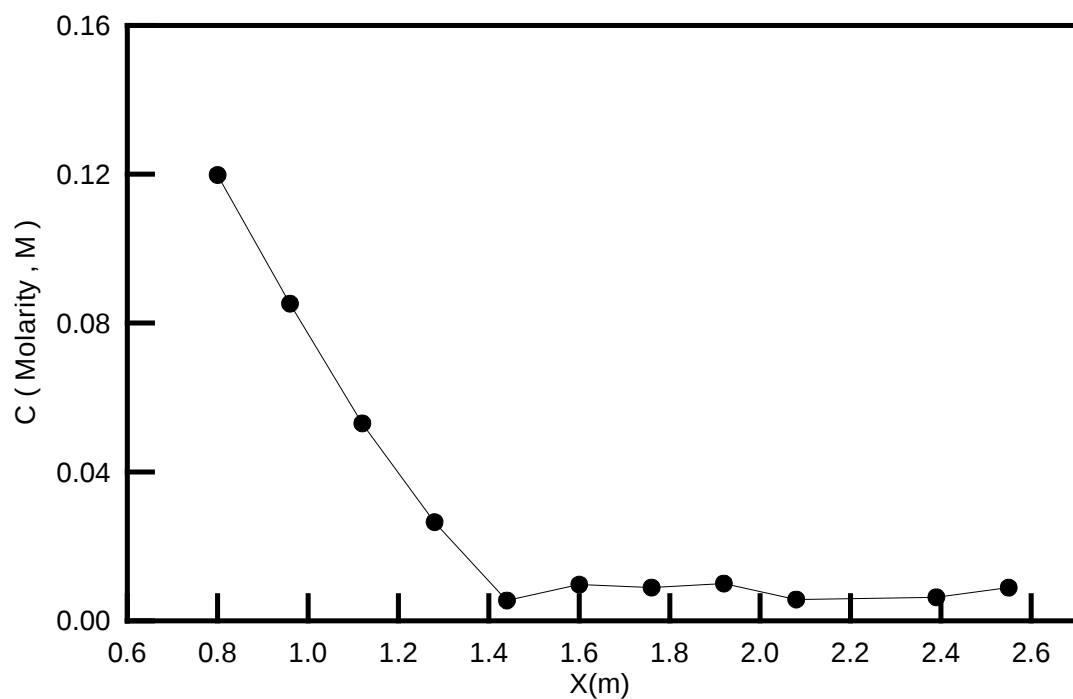


圖 6-11 系列潛堤前方水平方向濃度比較圖
($t=301\sim400\text{sec}$, 0.5M NaCl)

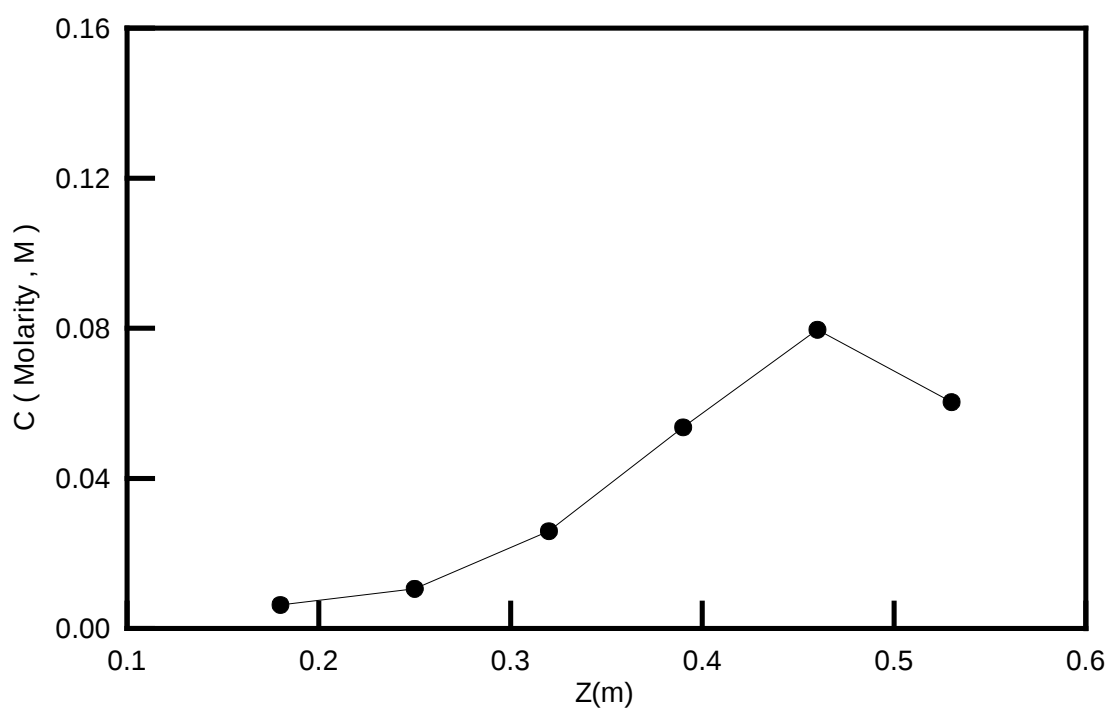


圖 6-12 系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖
($t=301\sim400\text{sec}$, 0.5M NaCl)

圖 6-13 及圖 6-14 分別為施灑時間及造波時間為 101 ~ 200 sec 時，鹽水濃度為 1M 配置下，水平方向及水深方向濃度變化圖。圖 6-13 中顯示，由於鹽水濃度值較高，在水平方向上整體的擴散情形較不明顯。所呈現的趨勢仍為距施放處越近時，其濃度值較遠處之濃度值高的分佈情形。在垂直水深方向上，由於鹽水擴散速度較為緩慢，其濃度值仍然呈現原水之濃度值。

圖 6-15 及圖 6-16 分別為施灑時間及造波時間為 201 ~ 300 sec 時，水平方向及水深方向平均濃度表示圖。圖 6-15 中顯示，在施灑時間為 201 ~ 300 sec 時，前方 3 支導電度計受到鹽水濃度擴散之影響，導電度計有濃度反應，但其餘之導電度計，受到鹽水濃度較濃擴散速度較緩慢之影響，自由表面附近處之導電度計並未測得明顯的濃度值。在圖 6-16 垂直方向的濃度分布結果顯示，鹽水受重力沈降及波浪作用之影響，於水深方向較靠近底床表面的導電度計測得較高的濃度值，但愈靠近自由液面的濃度愈不明顯。其沈降方式仍為一拋物線的擴散方式進行沈降，故於水深方向較上端仍無法測得明顯的濃度值，但於較為接近底部的導電度計則有明顯的濃度反應。

圖 6-17 及圖 6-18 分別為施灑時間及造波時間為 301 ~ 400 sec 時，水平方向及水深方向平均濃度分布圖。由於波浪作用時間及鹽水擴散時間較長，故於水平方向及水深方向上所測得的濃度值較 201 ~ 301sec 時高。但在水平方向上，仍以較靠近灑水端附近處之導電度計較能測得明顯鹽水濃度，其餘導電度計無法有效測得明顯的鹽水濃度。在垂直方向上，在波浪作用於 301 ~ 400 sec 時，其波浪作用與施灑濃度之相互作用達到穩定的狀態，鹽水濃度於較靠近底床附近處，有明顯濃度發生。其擴散情形仍呈現一拋物線的分佈狀態，且侷限於有限的區域位置內，並不會造成大規模的擴散。

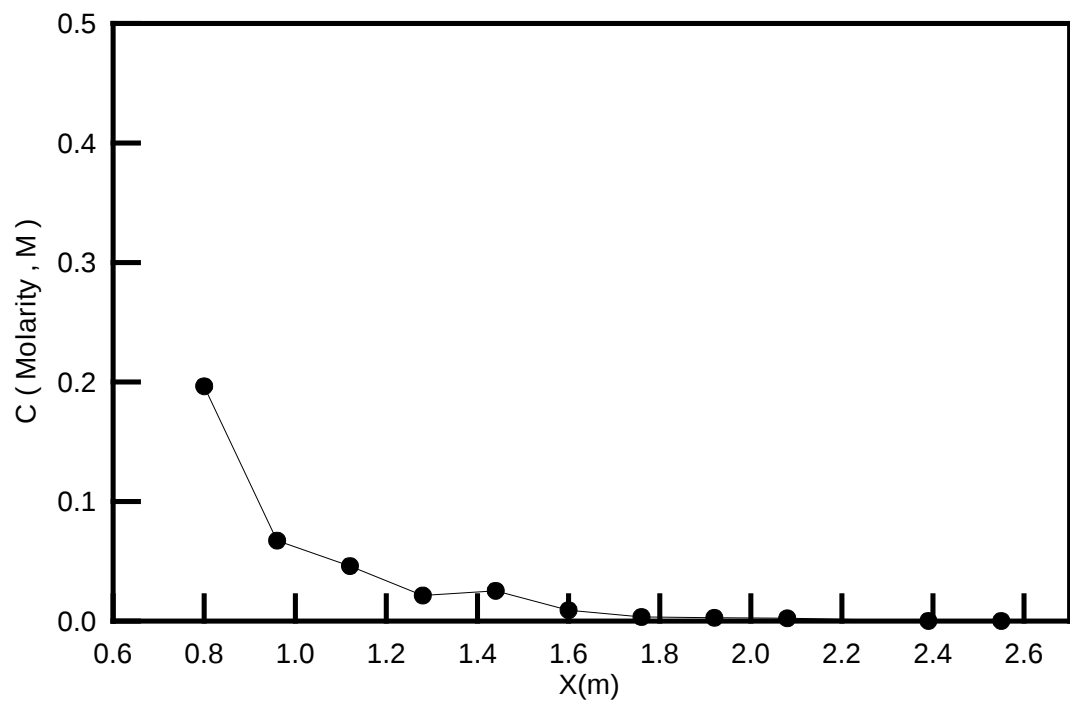


圖 6-13 系列潛堤前方水平方向濃度比較圖
($t=101\sim 200\text{sec}$, 1.0M NaCl)

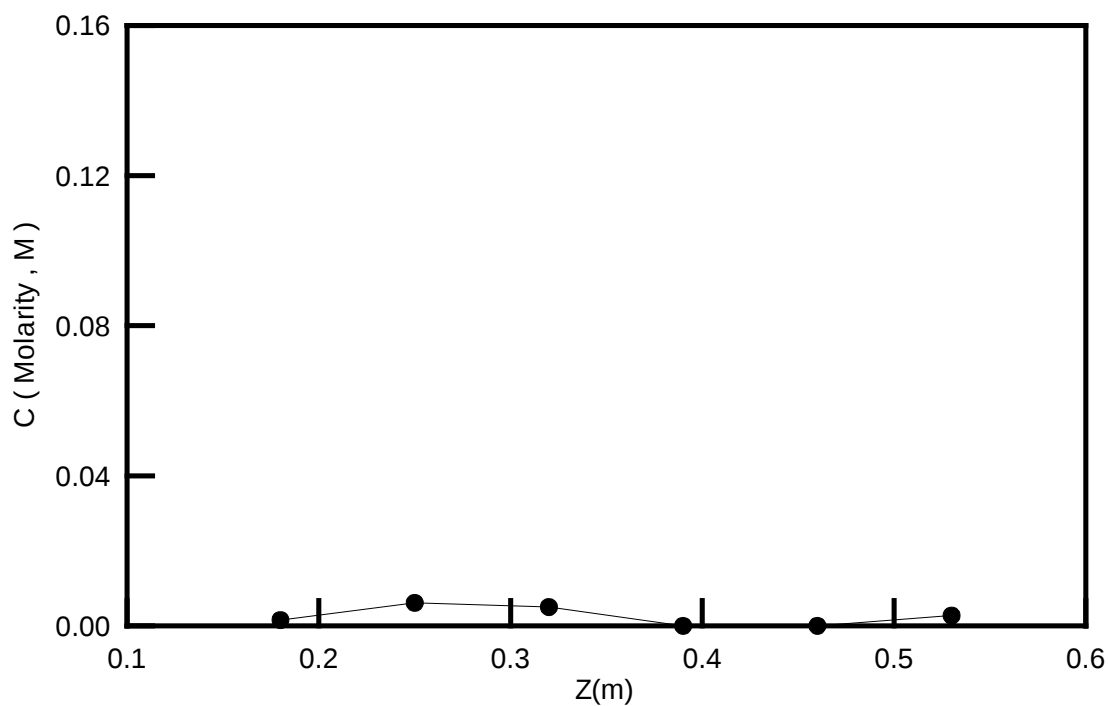


圖 6-14 系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖
($t=101\sim 200\text{sec}$, 1.0M NaCl)

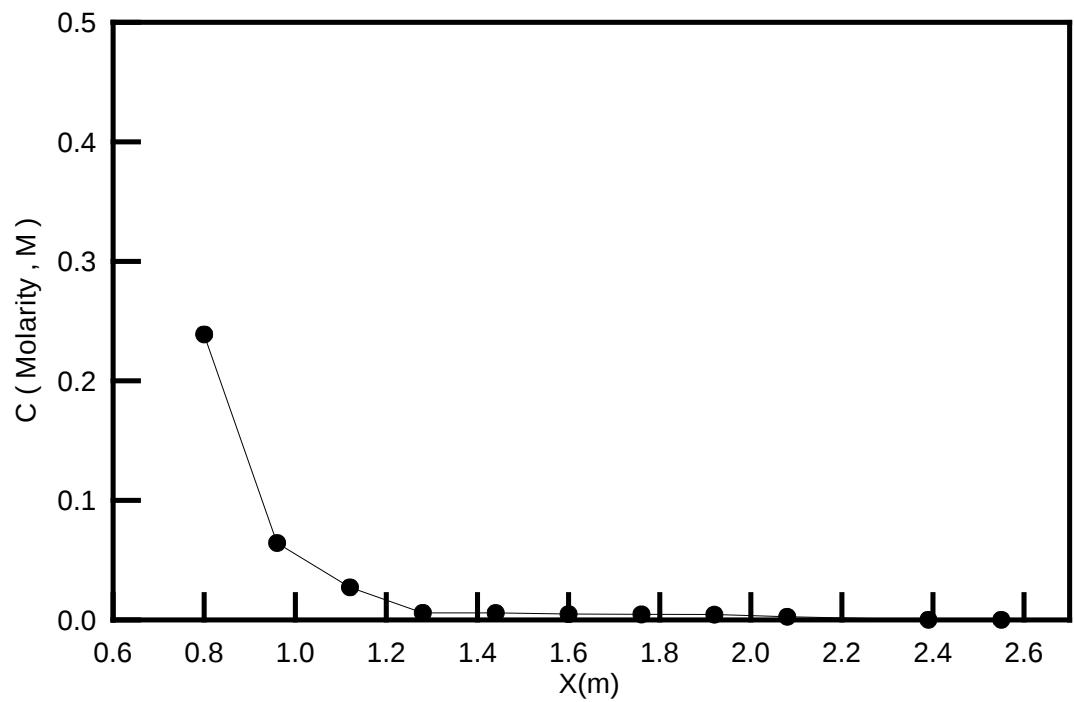


圖 6-15 系列潛堤前方水平方向濃度比較圖
(t=201~300sec , 1.0M NaCl)

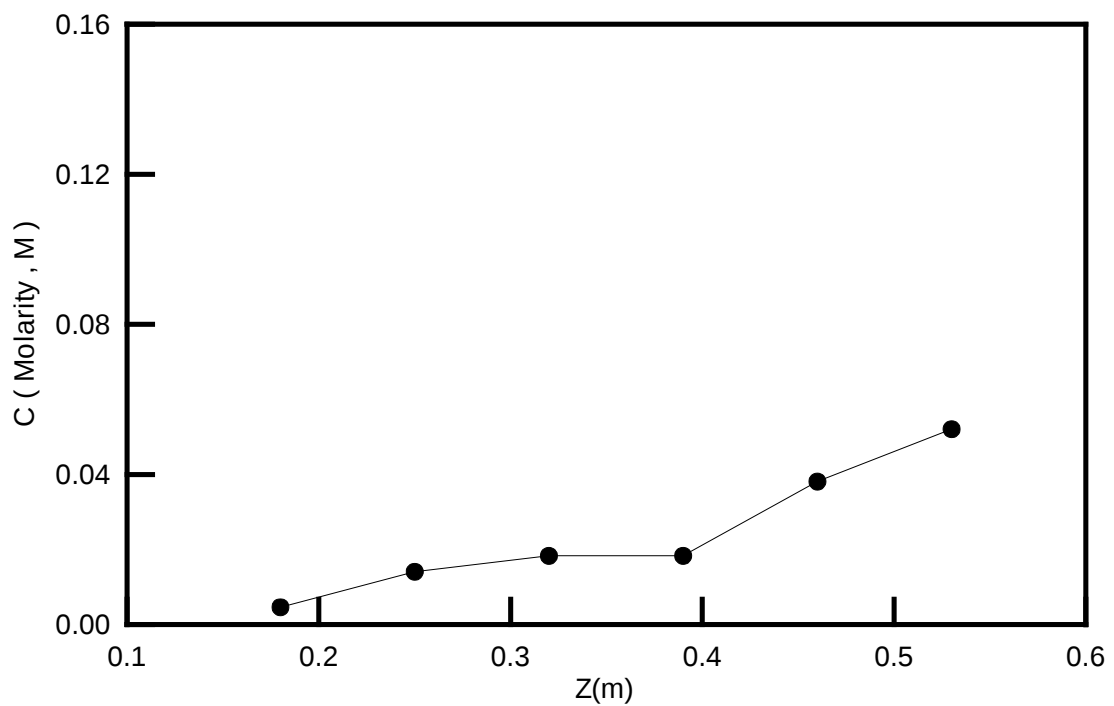


圖 6-16 系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖
(t=201~300sec , 1.0M NaCl)

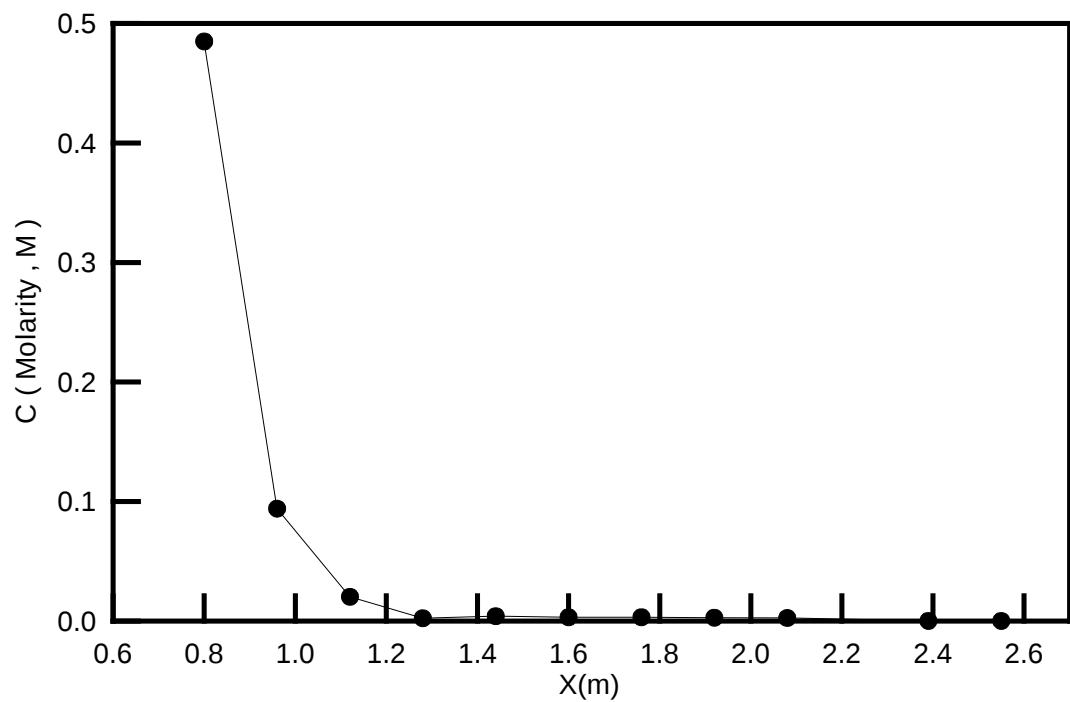


圖 6-17 系列潛堤前方水平方向濃度比較圖
($t=301\sim400\text{sec}$, 1.0M NaCl)

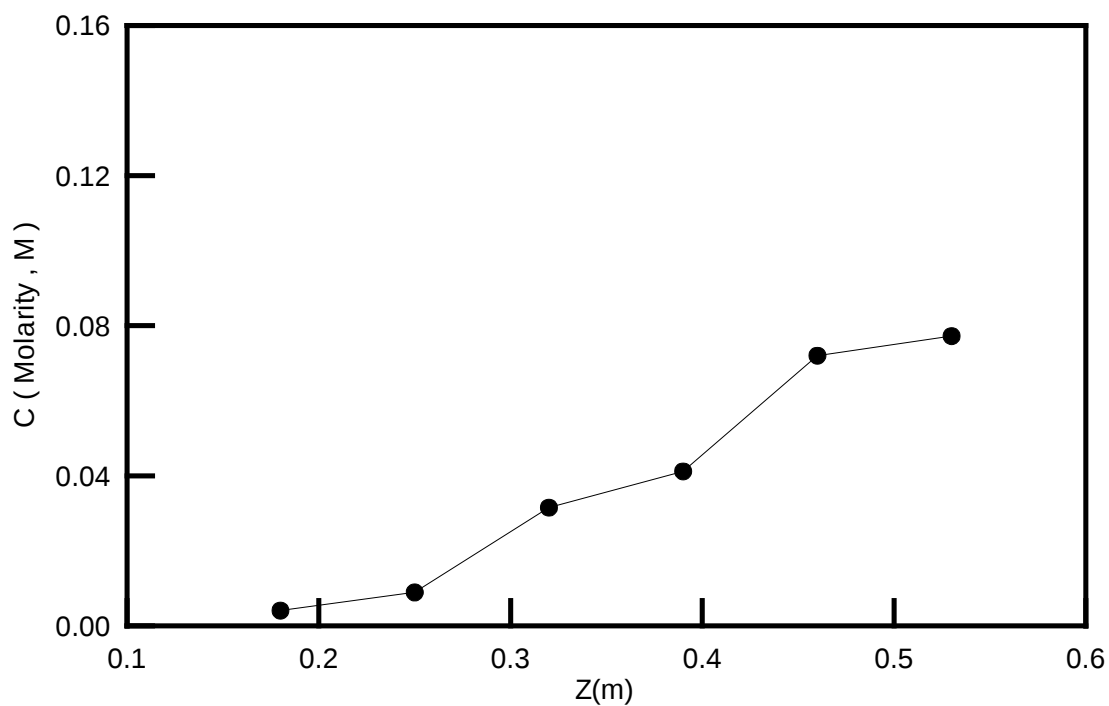


圖 6-18 系列潛堤前方垂直水深方向濃度比較圖
($t=301\sim400\text{sec}$, 1.0M NaCl)

圖 6-19 及圖 6-20 為施灑相同鹽水濃度(0.5M)於不同時段,水平方向及垂直水深方向上所得之濃度分佈比較圖。於圖中可知,當作用時間為 201~301sec 及 301~400sec 時段,所得的水平方向濃度值分佈相近且濃度值穩定。在垂直方向上,受重力沈降的影響,濃度值則隨著時間的增加有增加的趨勢。圖 6-21 及圖 6-22 為施灑鹽水濃度 1M 於不同時段,水平方向及垂直水深方向上所得之濃度分佈比較圖。圖中顯示,除較靠近施灑位置處之導電度計有明顯的濃度值外,其餘之導電度計所得的水平方向濃度值分佈值則趨近於零。在垂直方向上,受鹽水濃度擴散較為緩慢的影響,濃度值則隨著時間的增加有明顯增加的趨勢。

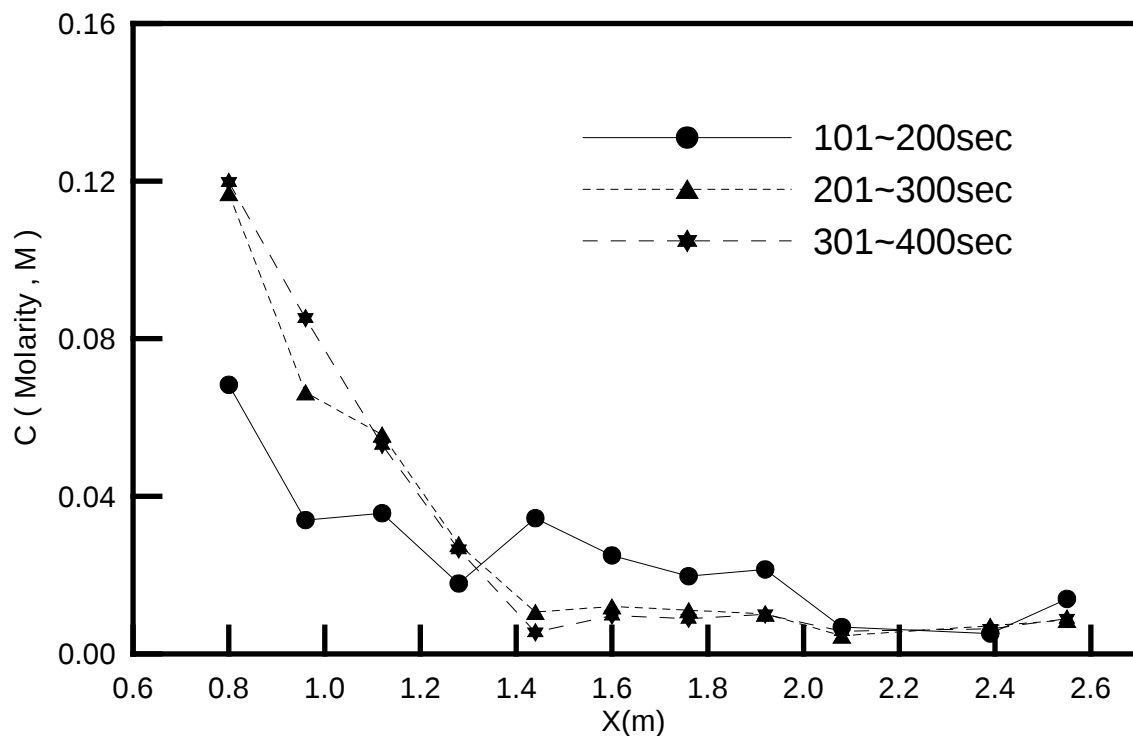


圖 6-19 系列潛堤前方水平方向不同時段濃度比較圖(0.5M)

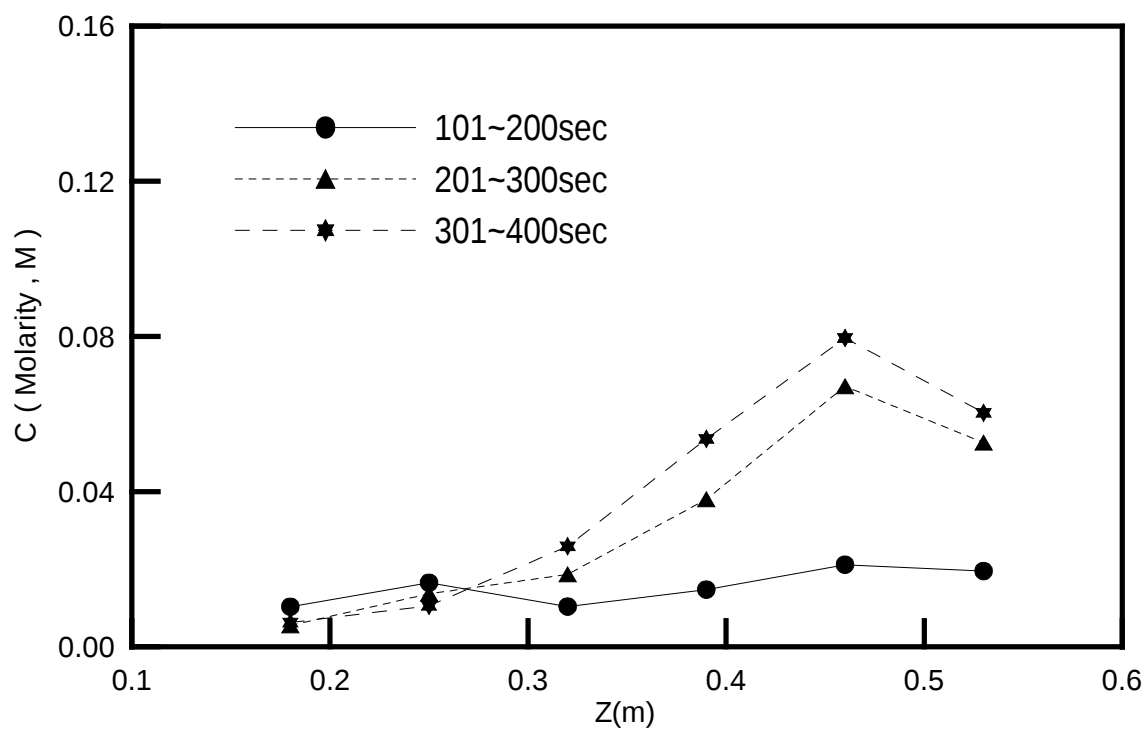


圖 6-20 系列潛堤前方垂直水深方向不同時段濃度比較圖(0.5M)

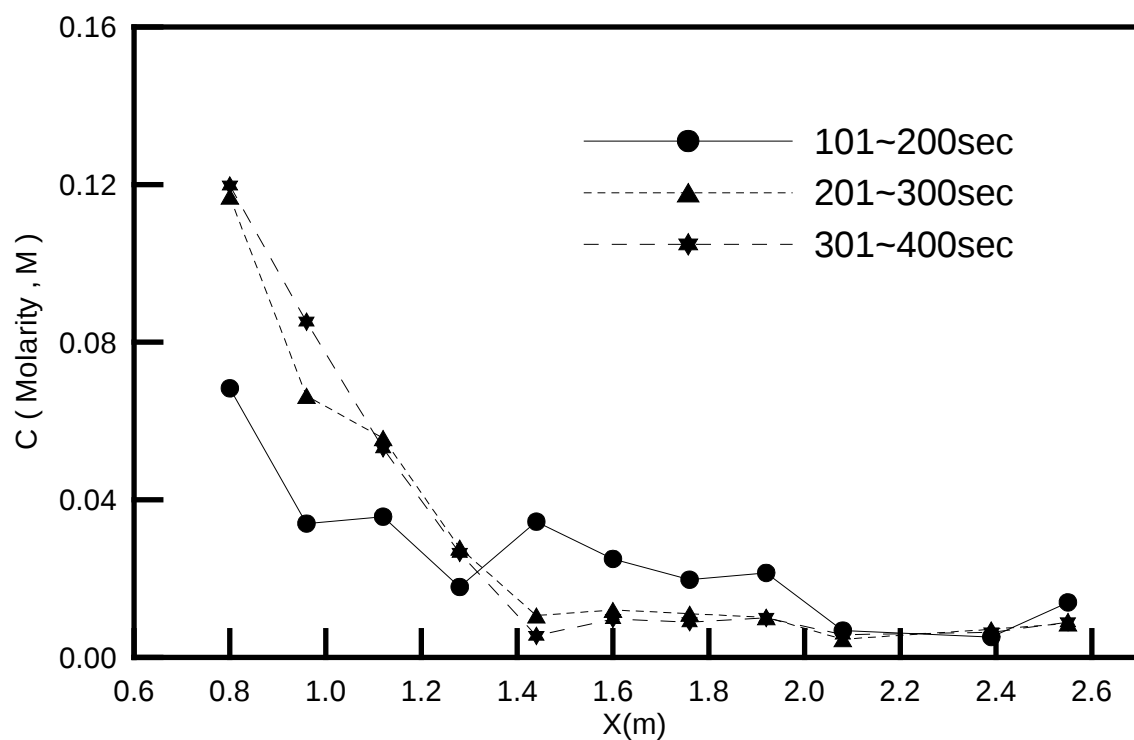


圖 6-21 系列潛堤前方水平方向不同時段濃度比較圖 (1.0M)

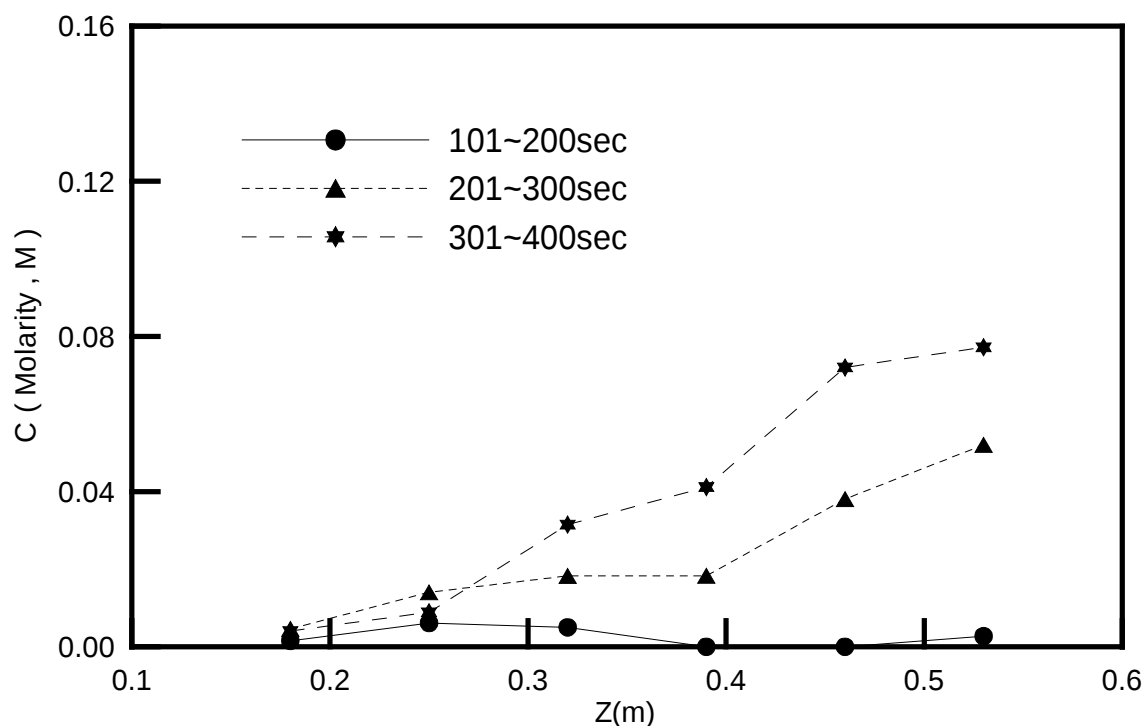


圖 6-22 系列潛堤前方垂直水深方向不同時段濃度比較圖 (1.0M)

為比較在系列潛堤前方施灑種不同鹽水濃度情況下，堤體前方測得之鹽水濃度值，本研究將相關資料進行比較，其結果如圖 6-23 圖 6-28 所示。圖中顯示，在水平方向處的比較上，除較靠近施灑位置處之導電度計外，其餘導電度計之量測值幾乎相同。在水深方向上，於剛開始量測時，較靠近自由表面之導電度計所測得之鹽水濃度，鹽水濃度 0.5M 時所量測之濃度值較鹽水濃度 1.0M 時為高，其原因為較低濃度鹽水，黏滯性較小擴散係數較高。但在長時間作用下，則兩者趨於穩定。

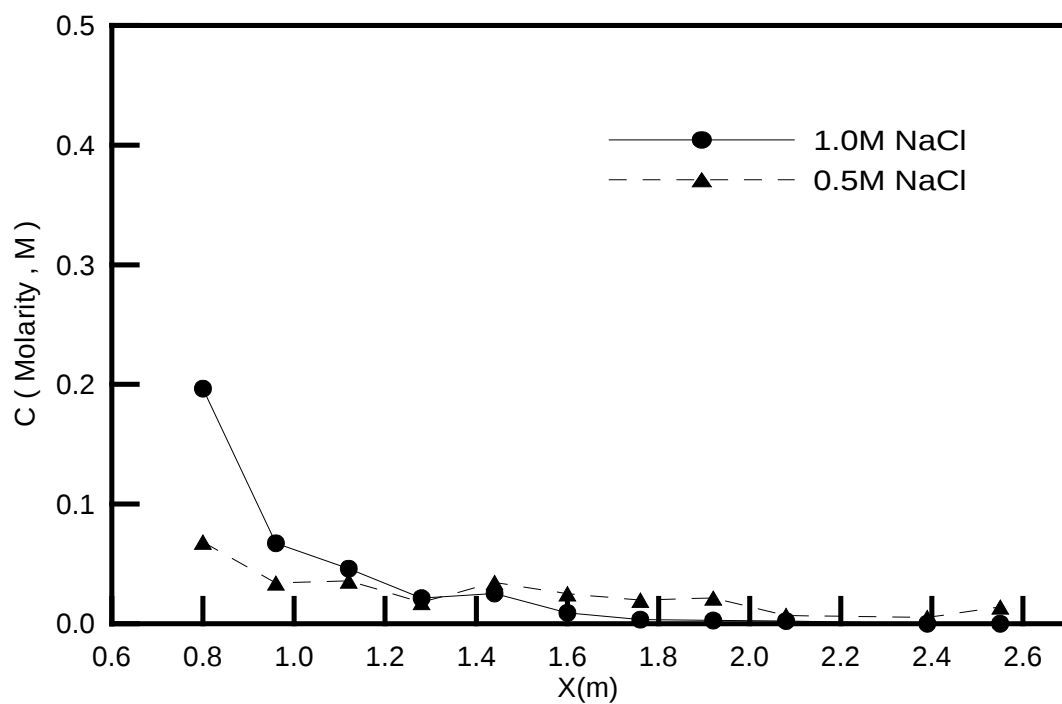


圖 6-23 不同鹽水濃度之水平方向濃度比較圖 (t=101~200sec)

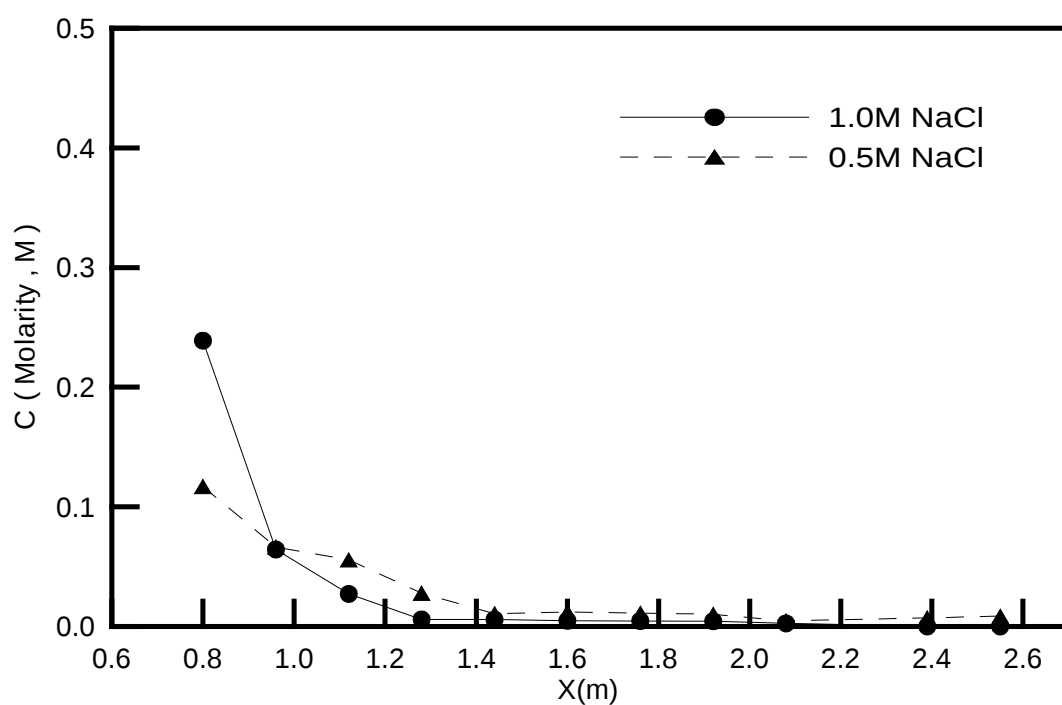


圖 6-24 不同鹽水濃度之水平方向濃度比較圖 (t=201~300sec)

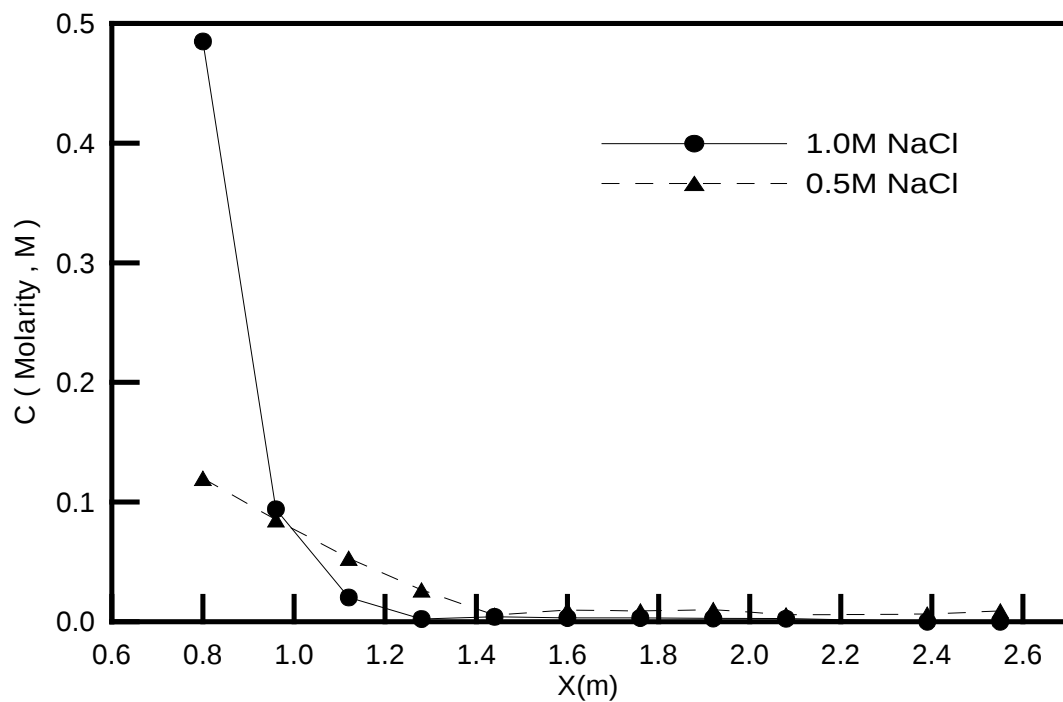


圖 6-25 不同鹽水濃度之水平方向濃度比較圖 ($t=301\sim400\text{sec}$)

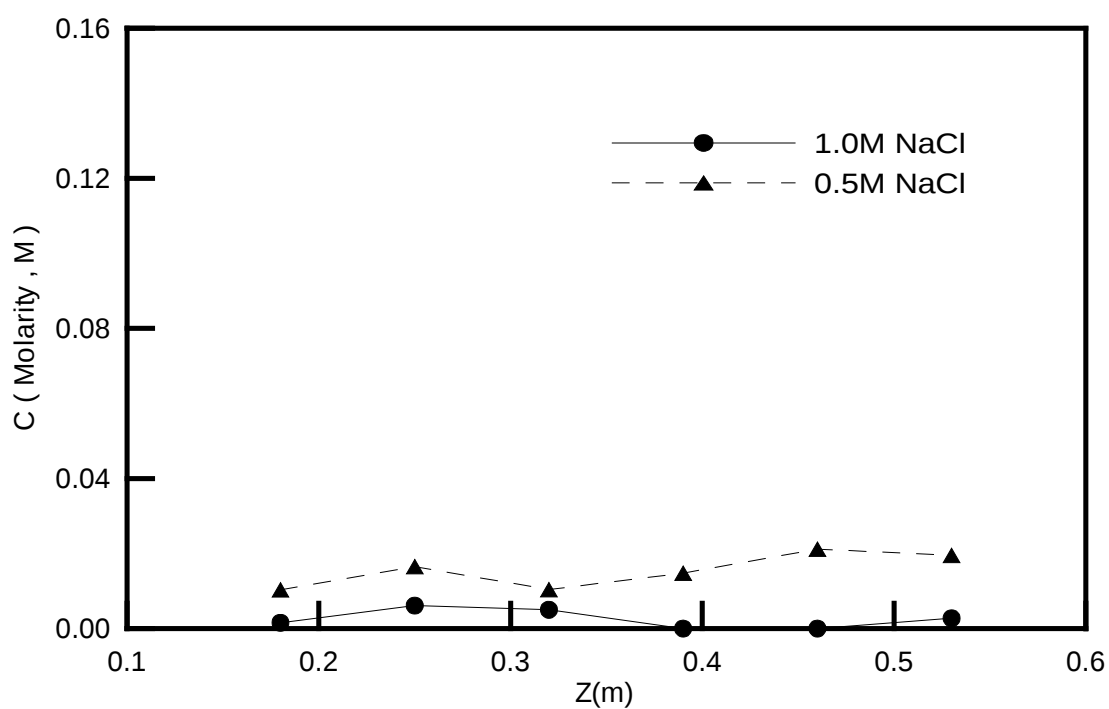


圖 6-26 不同鹽水濃度之垂直水深方向濃度比較圖 ($t=101\sim200\text{sec}$)

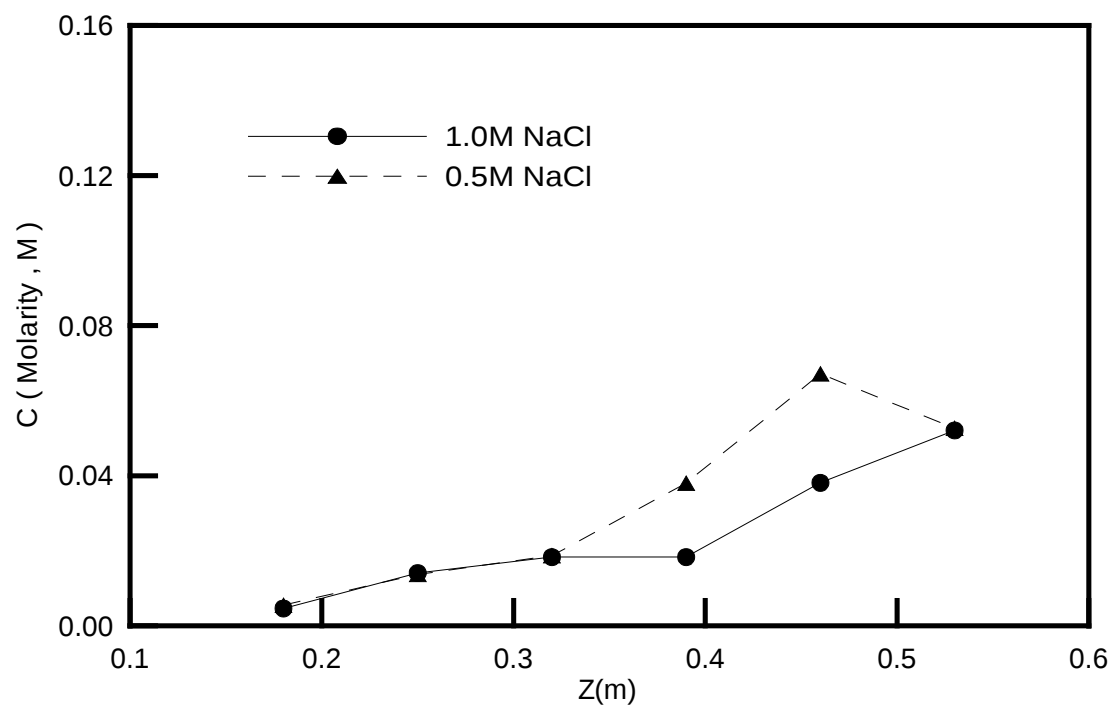


圖 6-27 不同鹽水濃度之垂直水深方向濃度比較圖 (t=201~300sec)

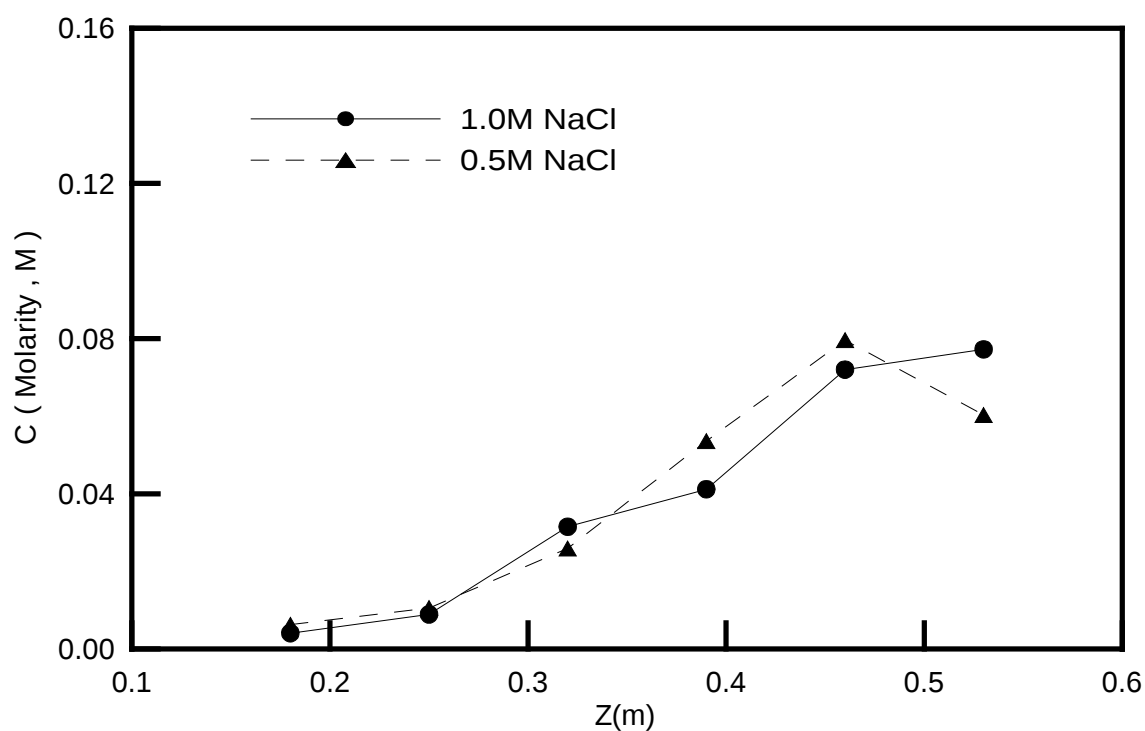


圖 6-28 不同鹽水濃度之垂直水深方向濃度比較圖 (t=301~400sec)

第七章 系列潛堤之流場分佈與污染物擴散分析

本章主要利用數值來求解 Navier-Stokes 方程式，計算系列潛堤之水理特性，以瞭解堤體前方所產生的反射波浪對潛堤前方受到污染時，其污染物的擴散情形，希冀由數值模式模擬潛堤附近之流場分佈與濃度擴散情形，藉以分析並瞭解該區域之水動力，提供研擬海岸保護參考依據。

本研究探討的流場為波浪通過不透水系列潛堤擴散情形，為了對此流場有所了解，必須先對雙潛堤之間距有所了解，雙列潛堤是單列潛堤排列方式的延伸，也是系列潛堤應用的基礎。過去的文獻中，對於雙列潛堤資料相當缺乏。因此，本研究選擇雙列潛堤的流場進行研究。為了瞭解波浪與雙列潛堤之間的交互作用，利用本數值模式進行一系列的數值模擬，改變潛堤間距，討論其流場特性，包括流場變化和波浪變形等，以瞭解波浪通過雙列潛堤流場特性，進而採用試驗條件探討共振下的 4 列潛堤流場，污染物的擴散情形。

為驗證波浪通過不透水雙列潛堤之流場及渦流生成現象和波浪變形數值計算之準確性，本研究選取 (1) Ting 和 Kim (1994) 利用杜普勒雷射測速儀 (LDA) 觀察未碎波波浪通過單一矩形潛堤之流場和水位變化；(2) 盧 (1999) 利用 FLDV 量測波浪通過雙潛堤之水平和垂直速度和使用波高計量測水位變化。藉由實驗與解析解來驗證數值計算結果。

近年來，隨著電腦容量、計算速度以及計算方法的迅速發展，利用數值方法求解波浪之運動越來越受到重視。與試驗相較，數值模式可在短時間內進行更多方案，費用較低且可以得到更多流場訊息。如近年來採用數值方法求解波浪之運動，依據基本方程不同，可分成四種，即 (1) 緩坡方程式 (Mild-Slope Equation, MSE)；(2) 布斯尼斯方程式 (Boussinesq Equation, BE)；(3) 拉普拉斯方程式 (Laplace

Equation);(4) 納維爾-斯托克斯方程式(Navier-Stokes Equations ,NSE)。

實際流體具有黏性，波浪通過結構物在結構物附近會產生分離流，故與勢能流理論之相關模式，如 MSE 及 BE 等已經不適用於結構物附近流場之模擬。使用黏性理論模擬波浪通過結構物之渦流更能符合實際物理現象。納維爾-斯托克斯方程式為求解流體最根本之控制方程式，可描述黏性流體的流場變化趨勢，故以上四種基本方程只有 NSE 可以真實描述波浪通過結構物的渦流特性及邊界層特性。

7.1 Navier-Stokes Equations 數學模式

7.1.1 控制方程式

在古典力學中，物質體系所遵循的物理法則是「質量守恆」及『動量守恆』。對於二維不可壓縮黏性流體，連續方程式及動量方程式在直角座標系的型式為

連續方程式：

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(7-1)$$

動量方程式，在 x 方向和 z 方向分別表示如下：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots(7-2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) - g \dots\dots\dots(7-3)$$

上式中 U 、 W 分別表示水平和垂直方向之瞬時速度分量， x 、 z 分別為水平和垂直方向之座標， P 為瞬時壓力，而 ρ 、 ν 分別為流場之

密度和運動黏滯係數。 ρ 和 ν 在數值模擬過程中假設不受其它因素之影響而保持定值。

7.1.2 邊界條件

(1)上游邊界條件

計算波浪變形及其流場通常有四種邊界，分別為上游、下游、自由表面以及底部邊界。上游邊界一般為造波條件，係指選擇何種波形作為入射波之條件。由於波浪行進遇到障礙物時，會有反射波往上游傳遞，因此上游邊界條件之設定不可距離結構物太近，必須取較為足夠之距離，以避免反射波干擾入射波之條件。

一般數值模擬之流場其初始條件為靜止狀態，因此流場內唯一之驅動力為上游邊界給定已知的入射波浪，使其往下游傳遞。目前處理上游造波邊界採用給定波形和速度來產生波浪。根據各種不同波浪的適用範圍，各種不同波浪理論之適用範圍，只要給定入射波之波長 L ，水深 h ，週期 T 和波高 H ，即能決定應採用何種波浪理論來產生入射波。由於波浪行進中遇到障礙物時，會有部份能量被反射，反射波往上游傳遞，因此上游邊界之設定不可距離結構物太近，必須取足夠之距離以避免反射波影響到上游之邊界條件，通常取 5~6 倍之波長作為上游邊界至結構物之距離。

(2)下游邊界條件

數值造波水槽與實驗室造波水槽一樣，不能將造波水槽無限延長，因此為了消滅反射波浪能量，實驗室造波水槽尾端常放置消波設施。理論上在造波水槽下游邊界，必須滿足輻射條件，亦即波浪是向外傳遞的。本模式下游採用輻射邊界條件為 (Orlanski, 1976)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + C \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (7-4)$$

其中 Φ 為任一變數，如 U 和 d ， C 為波的相速。

(3)底部邊界條件和結構物邊界條件

在底部和結構物邊界方面，黏性流體在物面上必須滿足不滑動條件 (no slip condition)，即底部和結構物邊界上的水平、垂直速度為零。

(4)自由表面邊界條件

波動之自由表面邊界條件為移動邊界，會隨時間和空間而變，因此必須先得知表面之形狀才能給定速度邊界條件，然而給定之速度又會影響到此表面的變化，所以自由表面和速度邊界條件兩者互為相關。一般自由表面邊界條件可分成自由表面運動邊界條件 (KFSBC) 和自由表面動力邊界條件 (DFSBC)，而動力邊界條件又可分為切線方向和法線方向兩種。兩者於分別說明如下：

1.自由表面運動邊界條件 (KFSBC)

在自由表面處，流體與自由表面兩者在法線上之速度分量必須相同，亦即流體質點不能跳脫自由表面，即

$$\frac{\partial d}{\partial t} + U \frac{\partial d}{\partial x} = W \dots\dots\dots (7-5)$$

式中 $d = d(x, t)$ 為自由表面之水位高程，決定自由表面如何隨時間變化。

2.自由表面動力邊界條件 (DFSBC)

自由表面之合成應力 σ_{ij} 在切線分量 t_i 為零 ($t_i \sigma_{ij} n_j = 0$; $i, j=1$ 或 2) , 而在法線之分量 n_i 等於大氣壓力即 $n_i \sigma_{ij} n_j = -P_{atm}$, 式中 n_i 及 t_i 分別表示自由液面上法線及切線方向的單位向量。在忽略表面張力作用下 , 切線方向之動力邊界條件如下 :

$$2 \frac{\partial d}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \left[\left(\frac{\partial d}{\partial x} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) = 0 , \quad z = d(x, t) \dots (7-6)$$

而法線方向之動力邊界條件如下 :

$$P = \frac{2\nu_e}{1 + \left(\frac{\partial d}{\partial x} \right)^2} \left[\left(\frac{\partial d}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial d}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \frac{\partial W}{\partial z} \right] , \quad z = d(x, t) \dots (7-7)$$

式 (7-6) 用來給定自由表面之速度邊界條件, 而式 (7-7) 則用來給定自由表面之壓力邊界條件。當流體黏滯性不大和自由表面斜率較小時 , 則式 (7-7) 可簡化為

$$P = 0 , \quad z = d(x, t) \dots (7-8)$$

7.2 數值模式

本計畫利用數值模式來探討此一研究課題 , 利用數值方法解偏微分方程式必須先將計算領域分割成許多元素或網格 , 然後將方程式加以離散化(discretization)求解。對控制方程式之離散化使用有限體積法(Finite Volume Method, FVM)。此法可以提高結構物附近數值計算精度和程式執行之經濟效率。首先 , 將傳輸方程式對控制體積分 , 而對流項 (convection term) 和擴散項 (diffusion term) 的流通率總和以

Patankar (1980) 所提出幂次方格式 (Power Law Difference, PLD) 處理；壓力場則以預測-修正 (predictor-correction) 方法建立；自由表面是以高度函數法 (Height Function, HF) 處理，以下即分別詳述之。

7.2.1 網格變數計算點之配置

一般數值模擬所採用之網格可分成二類，一為所有變數都位於同一點的非交錯網格 (non-staggered grid)，另一則為各變數互相錯開各自擁有自己的儲存點之交錯網格 (staggered grid)。本計畫採用 Harlow 和 Welch (1965) 所提出之 MAC (Marker And Cell) 法作為交錯網格之配置。如圖 7-1 所示，將各網格視為一個控制體積，純量變數計算點 (P 、 d) 放在控制體的中央，速度分量 (向量項) 分別置於控制體積表面上，且 U 、 W 各自有以其為中心之控制體積體系，因此 U 、 W 和 d 各自有其控制體系，在 Patankar (1980) 一書中用方位節點編號 E 、 W 、 N 、 S 、 e 、 n 、 w 、 s 來表示變數計算點編號和變數之控制體積控制面編號，各變數計算點之四周鄰近計算點 E 、 W 、 N 、 S ，而 e 、 w 、 n 、 s 表示各變數之控制體積的四個控制面 (如圖 7-2)，圖 7-1 和圖 7-2 之關係為 $U_E = U_{i+1/2,k}$ ； $U_W = U_{i-1/2,k}$ ； $W_N = U_{i,k+1/2}$ ； $W_S = U_{i,k-1/2}$ ； $\Delta x = \delta x_i / 2$ 及 $\Delta z = \delta z_k / 2$ ，而各變數計算點和變數之控制體積控制面之關係為 $\Phi_e = (\Phi_E + \Phi_P) / 2$ ； $\Phi_w = (\Phi_W + \Phi_P) / 2$ ； $\Phi_n = (\Phi_N + \Phi_P) / 2$ 及 $\Phi_s = (\Phi_S + \Phi_P) / 2$ 。

交錯網格在使用上其優點在於：(1) 壓力因配置在速度之控制體積的控制面上，而在數值觀點上成為速度變化之自然驅動力，如此可避免在非交錯網格下所可能產生之不合物理現象的棋盤狀 (checkerboard) 速度場或壓力場解；(2) 配合預測-修正方法使得計算壓力時不須使用邊界之壓力值，壓力場是以自我調整的方式建立。

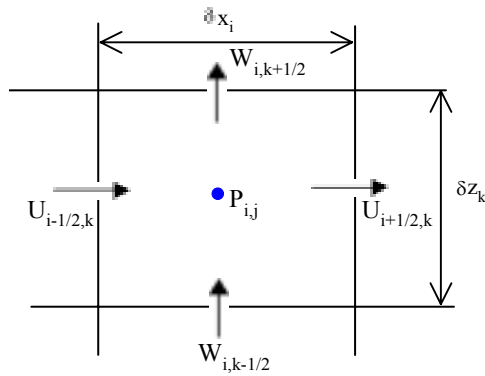


圖 7-1 交錯網格系統

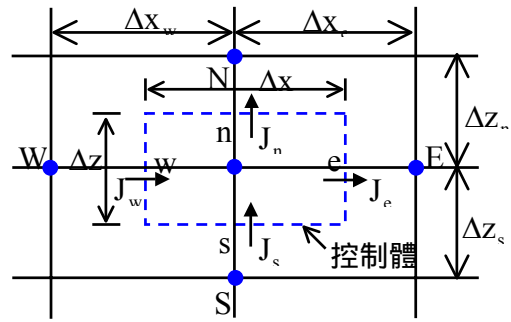


圖 7-2 控制體及通量示意圖

7.2.2 方程式之離散化

對控制方程式求解時，必須對控制方程式進行空間及時間上之離散化，使其成為計算機所能解析的代數聯立方程式。式 (7-1) ~ (7-3) 中變數 Φ ($\Phi = U, W$) 之傳輸方程式可寫為：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(U\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(W\Phi)}_{\text{對流項}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z})}_{\text{擴散項}} + \underbrace{S_\Phi}_{\text{源項}} \quad \text{..... (7-9)}$$

式中之 Φ 為物理量之變數，如速度 U 和 W ，而擴散係數 Γ_Φ 和源項 S_Φ 則示於表 7-1，表中 $Re = U_\infty h / \nu$ 為雷諾數 (Reynolds number)， $Fr = U / \sqrt{gh}$ 為福祿數 (Froude number)， h 為水深。為了方便分析，將式 (7-9) 改寫為

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} J_x + \frac{\partial}{\partial z} J_z = S_\Phi \quad \text{..... (7-10)}$$

式中 x 、 z 方向的對流擴散通量分別為 $J_x = U\Phi - \Gamma_\Phi \partial \Phi / \partial x$ ；

表 7-1 控制方程式中各變數對應之擴散係數與源項關係

變數 方程式	Φ	Γ_{Φ}	S_{Φ}
連續方程式	1	0	0
水平動量方程式	U	$\frac{1}{Re}$	$-\frac{\partial P}{\partial x}$
垂直動量方程式	W	$\frac{1}{Re}$	$-\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{Fr^2}$

有限體積法對控制方程式之離散過程，即先將變數 Φ 對控制體積分後，得到

$$\int_s^n \int_w^e \frac{\partial \Phi}{\partial t} dx dz + \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} J_x dx dz + \int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial z} J_z dz dx = \int_s^n \int_w^e S_{\Phi} dx dz \dots\dots\dots (7-11)$$

而式 (7-11) 中之源項 S_{Φ} 可用變量的線性函數表示，即 $S_{\Phi} = S_C + S_P \Phi_P$ ， S_C 是源項 S_{Φ} 中的常數部分， S_P 表示源項依賴於變量的線性係數。進一步整理此關係可得

$$\frac{\Phi_P - \Phi_P^0}{\Delta t} \Delta x \Delta z + J_e - J_w + J_n - J_s = (S_C + S_P \Phi_P) \Delta x \Delta z \dots\dots\dots (7-12)$$

式中為 Φ_P^0 上一時刻之值。上式各項分別表示如下：

$$J_e = \int_s^n J_x dz = \int_s^n (U\Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x})_e dz = \left[(U\Phi)_e - \Gamma_{\Phi,e} \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta x} \right] \Delta z \quad (7-13)$$

$$J_w = \int_s^n J_x dz = \int_s^n (U\Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x})_w dz = \left[(U\Phi)_w - \Gamma_{\Phi,w} \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta x} \right] \Delta z \dots\dots\dots (7-14)$$

$$J_n = \int_w^e J_z dx = \int_w^e (W\Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z})_n dx = \left[(W\Phi)_n - \Gamma_{\Phi,n} \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta z} \right] \Delta x$$

..... (7-15)

$$J_s = \int_w^e J_z dx = \int_w^e (W\Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z})_s dx = \left[(W\Phi)_s - \Gamma_{\Phi,s} \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta z} \right] \Delta x$$

..... (7-16)

將式 (7-13) ~ (7-16) 代入式 (7-12) 中，可得

$$\begin{aligned} & \frac{\Phi_P - \Phi_P^0}{\Delta t} \Delta x \Delta z + \underbrace{\left[(U\Phi)_e - \frac{(\Gamma_\Phi)_e}{\Delta x} (\Phi_E - \Phi_P) \right] \Delta z}_{J_e} - \underbrace{\left[(U\Phi)_w - \frac{(\Gamma_\Phi)_w}{\Delta x} (\Phi_P - \Phi_W) \right] \Delta z}_{J_w} \\ & + \underbrace{\left[(W\Phi)_n - \frac{(\Gamma_\Phi)_n}{\Delta z} (\Phi_N - \Phi_P) \right] \Delta x}_{J_n} - \underbrace{\left[(W\Phi)_s - \frac{(\Gamma_\Phi)_s}{\Delta z} (\Phi_P - \Phi_S) \right] \Delta x}_{J_s} \\ & = (S_c + S_p \Phi_p) \Delta x \Delta z \end{aligned}$$

..... (7-17)

將式 (7-17) 用下式的符號，改寫為

$$\begin{aligned} & \frac{\Phi_P - \Phi_P^0}{\Delta t} \Delta x \Delta z + \underbrace{[F_e \Phi_e - D_e (\Phi_E - \Phi_P)]}_{J_e} - \underbrace{[F_w \Phi_w - D_w (\Phi_P - \Phi_W)]}_{J_w} \\ & + \underbrace{[F_n \Phi_n - D_n (\Phi_N - \Phi_P)]}_{J_n} - \underbrace{[F_s \Phi_s - D_s (\Phi_P - \Phi_S)]}_{J_s} \\ & = (S_c + S_p \Phi_p) \Delta x \Delta z \end{aligned}$$

..... (7-18)

而對流強度 D 、擴散強度 F 之定義為

$$F_e \equiv U_e \Delta z ; F_w \equiv U_w \Delta z ; F_n \equiv W_n \Delta x ; F_s \equiv W_s \Delta x \quad \text{..... (7-19)}$$

$$D_e \equiv (\Gamma_\phi)_e \Delta z / \Delta x_e \quad ; \quad D_w \equiv (\Gamma_\phi)_w \Delta z / \Delta x_w \dots\dots\dots (7-20)$$

$$D_n \equiv (\Gamma_\phi)_n \Delta x / \Delta z_n \quad ; \quad D_s \equiv (\Gamma_\phi)_s \Delta x / \Delta z_s \dots\dots\dots (7-21)$$

將式 (7-18) 再進一步整理，即得一組由一計算點 P 與其四周鄰近點組合而成之代數方程式：

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b \dots\dots\dots (7-22)$$

為了加速收斂並提高計算效率，使用冪次方格式處理，對於 Patankar (1980) 所提出之冪次方律差分法，係將傳輸方程式中對流項及擴散項進行離散化，此方法源自於對一維、非時變、無壓力梯度且無源項之傳輸方程式之正確解所產生的指數差分法 (Exponential Difference Method, EDM)。由於指數差分法在計算上必須使用自然指數函數，因而使計算量增大，因此 Patankar 使用一高次方多項式取代含自然指數之部份，用以減少其計算量，此即為冪次方格式。

式 (7-18) 中各係數表示如下：

$$a_E = D_e \times \text{Max}[0, (1 - 0.1|(Pe)_e|)^5] + \text{Max}(0, -F_e) \dots\dots\dots (7-23)$$

$$a_W = D_w \times \text{Max}[0, (1 - 0.1|(Pe)_w|)^5] + \text{Max}(0, F_w) \dots\dots\dots (7-24)$$

$$a_N = D_n \times \text{Max}[0, (1 - 0.1|(Pe)_n|)^5] + \text{Max}(0, -F_n) \dots\dots\dots (7-25)$$

$$a_S = D_s \times \text{Max}[0, (1 - 0.1|(Pe)_s|)^5] + \text{Max}(0, F_s) \dots\dots\dots (7-26)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta z \dots\dots\dots (7-27)$$

$$b = S_C \Delta x \Delta z + a_p^0 \Phi_p^0 \dots\dots\dots (7-28)$$

其中 $a_p^0 = \Delta x \Delta z / \Delta t$, 以上各式中的 Pe 稱為貝克來數 (Peclet number) , 它反映了對流輸運強度和擴散強度之比。 Pe_e 、 Pe_w 、 Pe_n 和 Pe_s 分別表示為

$$Pe_e \equiv F_e / D_e ; Pe_w \equiv F_w / D_w ; Pe_n \equiv F_n / D_n ; Pe_s \equiv F_s / D_s \dots\dots\dots (7-29)$$

以上即為二維不可壓縮紊流傳輸方程式之離散式，每一個變數在各計算點上必須滿足各自之代數式，至於壓力場則以預測-修正方法建立，其方法將於下節說明之。

7.2.3 速度與壓力耦合技巧

動量方程式是 Φ 的通用方程式，即式 (7-9)，的特殊情況。如取 $\Phi = U$ ， $\Gamma_\Phi = (1/Re)$ ，應用前面的方法可以求解動量方程式，但計算速度場的真正困難在於壓力場未知，而這個未知量壓力 P 卻沒有明確的控制方程式可以求解，它出現在動量方程的源項中。如何構建一直接求解的壓力方程式，或在假定初始壓力分布條件下，如何構建一間接求解壓力，就成為求解不可壓縮流的關鍵問題，並稱此問題為速度與壓力耦合問題。因為不可壓縮流體運動控制方程中，沒有專門的方程可以直接求解壓力，為了克服這個困難，在每一個時間段的運算中先給出壓力場的初始值，再根據動量方程式求出猜測速度場，並由連續方程導出的壓力場修正方程式，得到壓力場修正後，對猜測的壓力場再進行修正，經過不斷的疊代可求得速度場和壓力場，此收斂值又可作為下一時間段的初始值，進行新的運算。

由雷諾方程式所求得之速度分量，對於任一個滿網格皆須滿足連續方程式，即

$$D = \frac{U_{i+1/2,k}^{n+1} - U_{i-1/2,k}^{n+1}}{\delta x_i} + \frac{W_{i,k+1/2}^{n+1} - W_{i,k-1/2}^{n+1}}{\delta z_k} = 0 \quad (7-30)$$

進行計算時，先以舊時間之壓力 $P_{i,k}^n$ 為猜測值來取代新時間之壓力值 $P_{i,k}^{n+1}$ ，解得新速度，代入式 (7-30) 後得一非零之 D 值，然後再以此 D 值決定一壓力修正量 δP ，並由此再取得新的壓力值與速度值。對所有網格，由壓力所引起之速度修正值分別為

$$(U_{i+1/2,k}^{n+1})^{N+1} = (U_{i+1/2,k}^{n+1})^N + \Delta t \frac{(\delta P_{i,k}^{n+1})^N}{(\delta x_i + \delta x_{i+1})/2} \quad (7-31)$$

$$(U_{i-1/2,k}^{n+1})^{N+1} = (U_{i-1/2,k}^{n+1})^N - \Delta t \frac{(\delta P_{i,k}^{n+1})^N}{(\delta x_i + \delta x_{i-1})/2} \quad (7-32)$$

$$(W_{i,k+1/2}^{n+1})^{N+1} = (W_{i,k+1/2}^{n+1})^N + \Delta t \frac{(\delta P_{i,k}^{n+1})^N}{(\delta z_k + \delta z_{k+1})/2} \quad (7-33)$$

$$(W_{i,k-1/2}^{n+1})^{N+1} = (W_{i,k-1/2}^{n+1})^N - \Delta t \frac{(\delta P_{i,k}^{n+1})^N}{(\delta z_k + \delta z_{k-1})/2} \quad (7-34)$$

其中 N 表示第 N 次修正疊代之次數，對於計算網格中，某些位置的速度分量維持不變，如底床的速度等於零及障礙體速度分量為零等，使用網格邊界條件參數 (cell boundary condition parameters) γ ，在速度維持不變之網格可以設 γ 為零，其餘網格則將 γ 設為 1，因此網格的壓力變化所引起之速度修正，可改寫成

$$(U_{i+1/2,k}^{n+1})^{N+1} = (U_{i+1/2,k}^{n+1})^N + \Delta t \frac{(\delta P_{i,k}^{n+1})^N}{(\delta x_i + \delta x_{i+1})/2} \gamma_{i+1,k} \quad (7-35)$$

$$(U_{i-1/2,k}^{n+1})^{N+1} = (U_{i-1/2,k}^{n+1})^N - \Delta t \frac{(\delta P_{i,k}^{n+1})^N}{(\delta x_i + \delta x_{i-1})/2} \gamma_{i-1,k} \quad (7-36)$$

$$(W_{i,k+1/2}^{n+1})^{N+1} = (W_{i,k+1/2}^{n+1})^N + \Delta t \frac{(\delta P_{i,k}^{n+1})^N}{(\delta z_k + \delta z_{k+1})/2} \gamma_{i,k+1} \dots\dots\dots (7-37)$$

$$(W_{i,k-1/2}^{n+1})^{N+1} = (W_{i,k-1/2}^{n+1})^N - \Delta t \frac{(\delta P_{i,k}^{n+1})^N}{(\delta z_k + \delta z_{k-1})/2} \gamma_{i,k-1} \dots\dots\dots (7-38)$$

1. 滿網格壓力修正量：

滿網格處若不滿足連續方程式，所造成的網格變化為

$$(\delta P_{i,k}^{n+1})^N = - \frac{D}{\delta t \left[\frac{\frac{\gamma_{i+1,k}}{DXR} + \frac{\gamma_{i-1,k}}{DXL}}{\delta x_i} + \frac{\frac{\gamma_{i,k+1}}{DZT} + \frac{\gamma_{i,k-1}}{DZB}}{\delta z_k} \right]} \dots\dots\dots (7-39)$$

其中 $DXR = (\delta x_i + \delta x_{i+1})/2$ ； $DXL = (\delta x_i + \delta x_{i-1})/2$ ； $DZT = (\delta z_k + \delta z_{k+1})/2$ ； $DZB = (\delta z_k + \delta z_{k-1})/2$

若 D 小於零，表示有過多的流體流入此網格，則必須增加壓力以減少流體之流入，反之則 D 大於零。式 (7-39) 乘上一鬆弛因子 (relaxation factor) λ ，一般 λ 大於零且不超過 2， λ 的選擇對收斂速度及數值穩定會有相當程度之影響。而關於網格邊界條件參數 γ 之設定，若網格邊界有速度分量維持不變的情況下設 γ 為零，由式 (7-39) 分母可以看出，其網格壓力變化將比一般滿網格有更大之改變量，據此亦可達到收斂的目的。茲定義一新的變數 β 如下：

$$\beta = - \frac{\lambda}{\delta t \left[\frac{\frac{\gamma_{i+1,k}}{DXR} + \frac{\gamma_{i-1,k}}{DXL}}{\delta x_i} + \frac{\frac{\gamma_{i,k+1}}{DZT} + \frac{\gamma_{i,k-1}}{DZB}}{\delta z_k} \right]} \dots\dots\dots (7-40)$$

則式 (7-40) 可改寫為

$$(\delta P_{i,k}^{n+1})^N = -\beta \cdot D \dots\dots\dots (7-41)$$

另外，在此程式中，設定障礙網格其 β 值為負值 (如 $\beta = -1$)，因障礙網格之壓力及速度分量不需要計算，程式迴圈中之運算式可設定其跳過此部份以節省計算時間。

2. 自由表面網格壓力修正量：

自由表面網格之壓力及速度因受內部區的影響，故仍須加以修正。自由表面網格之壓力可由流體液面之壓力 (P_S) 及緊鄰表面網格之壓力 ($P_{i,kt-1}$) 經內插法得到，即：

$$(P_{i,kt}^{n+1})^N = (1 - \eta_0)(P_{i,kt-1}^{n+1})^N + \eta_0 P_S \dots\dots\dots (7-42)$$

其中 $\eta_0 = d_c / d_s$ ； d_c 為液面網格中心點 (i, kt) 至內插網格 ($i, kt-1$) 之距離，而 d_s 為自由表面到內插網格中心點之距離。故在液面區，壓力之修正量可表為：

$$\delta P = (P_{i,kt}^{n+1})^N - (P_{i,kt}^{n+1})^{N-1} = (1 - \eta_0)(P_{i,kt-1}^{n+1})^N + \eta_0 P_S - (P_{i,kt}^{n+1})^{N-1} \dots\dots (7-43)$$

將式 (7-43) 代入式 (7-35) ~ (7-38) 中，可得到新的液面區壓力和速度值。圖 8-3 表計算自由表面網格之壓力時，所用到之變數定義：

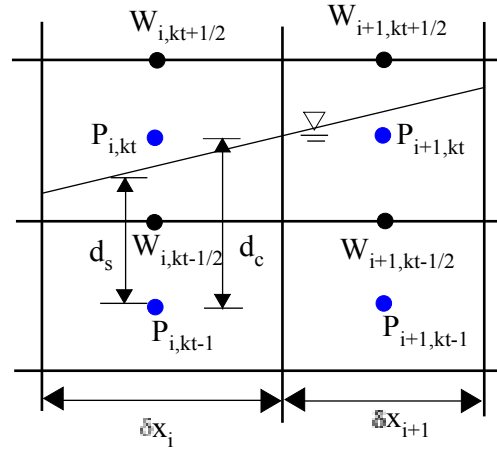


圖 7-3 計算自由表面網格之壓力時所用到之變數定義

7.2.4 自由表面的處理

以數值方法處理自由表面變化相當不容易，因為自由表面非為固定而隨時間移動。數值方法處理自由表面的問題應具效率，避免繁複之判斷和疊代。本研究採用高度函數法 (HF)。高度函數法 (HF) 為處理自由表面變化較為簡單的方法，此法根據 KFSBC 定義水位函數如下：

$$\frac{\partial d}{\partial t} + U \frac{\partial d}{\partial x} = W \quad \dots\dots\dots (7-44)$$

利用高度函數 $d = d(x, t)$ 來描述自由表面，其花費的儲存空間約 $O \sim (N)$ ，此法所描述之自由表面斜率不能大於網格長寬比，且針對某一 x 值不能有二個以上之 d 值，如碎波之情形為多值函數便不適用 HF 方法處理自由表面之問題。

當壓力、速度疊代至收斂後，則利用式 (7-39) 之差分方程去計算液面的變動，其方程式如下：

$$d_{i,kt}^{n+1} = d_{i,kt}^n + \Delta t [-FHX + W_s] \quad \dots\dots\dots (7-45)$$

式中 FHX 表示 $U_s \partial d / \partial x$ 之差分式， U_s 、 W_s 分別表示液面處之水平

及垂直速度。

7.2.5 濃度擴散處理

對於波浪通過系列潛堤，於堤體前方所產生的反射波浪對潛堤前方受到污染時，其污染物的擴散方程式如下所示：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + W \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + S \dots\dots\dots (7-46)$$

式中 C 表示濃度值、 S 為源項的濃度， K_x 、 K_z 分別表示水平及垂直濃度擴散係數。

7.2.6 計算程序

因本章所使用之數值方法為顯性法，所以求解代數式並不需要龐大之矩陣運算，可減少計算量負荷，由於收斂之要求，時間間距不宜太長，否則會導致數值不穩定甚至發散。而下一時刻之變數可用上一時刻之已知值疊代計算，直到每個變數均被修正至合理之範圍，應用此預測-修正之疊代技巧求解方程式，其流程如下：

1. 生成計算網格，給定整個流場初始值。
2. 求解動量方程式，計算 $U_{i+1/2,k}^{n+1}$ 及 $W_{i,k+1/2}^{n+1}$ 。
3. 以疊代法求解壓力場，並同時對流場進行校正。
4. 計算自由表面之高度 d 。
5. 計算濃度擴散方程式 C 。
6. 輸出計算結果。
7. 返回 (2) 進行下一時段的求解，直至計算結束。

在每一次疊代過程中不斷透過求解速度場所得之資訊來修正壓力場，並同時對流場進行校正。最後在滿足連續方程式時，速度場和自由表面便能滿足傳輸方程式及其邊界條件。以上之程序收斂後只代表某一時段，一直重複此程序直至達到穩定態為止，才算完成此流場

計算。

7.3 模式驗證

為驗證數值計算之準確性，本研究分別選取比較 (1) 驗證有結構物下之波浪通過矩形潛堤之波形、渦流現象比較 (Ting 和 Kim, 1994); (2) 盧 (1999) 之波浪通過雙潛堤之波形、波浪通過單潛堤之水平和垂直速度實驗數據。

Ting 和 Kim (1994) 利用杜普勒雷射測速儀觀察未碎波波浪通過矩形潛堤之渦流現象，潛堤長 60.69 cm，寬 91.44 cm，高 30.48 cm，試驗水深 60.69 cm，入射波浪週期 4 sec，波高 5.85 cm，波長 9.529 m，圖 7-4 為其實驗量測和數值之潛堤上方水位變化，水位變化之橫軸及縱軸分別以潛堤寬度及水深無因次化，圖 7-5 則為本研究數值模式所模擬之流場。觀察圖 7-7 當 $t/T = 0$ 時，離岸堤頂有一剛發展之順時針渦流，而向岸堤頂有一消散的逆時針渦流； $t/T = 1/4$ 時，離岸堤頂之順時針渦流已發展完全並開始消散，向岸堤壁開始形成順時針渦流； $t/T = 1/2$ 時，向岸堤壁之順時針渦流向上抬升後開始消散，最後當 $t/T = 3/4$ 時，向岸堤頂有一發展成熟之逆時針渦流，而離岸堤壁已開始生成逆時針渦流。比較圖 7-4 和 7-5 不同相位下之流場及液面變化可發現數值計算與實驗結果相當一致。

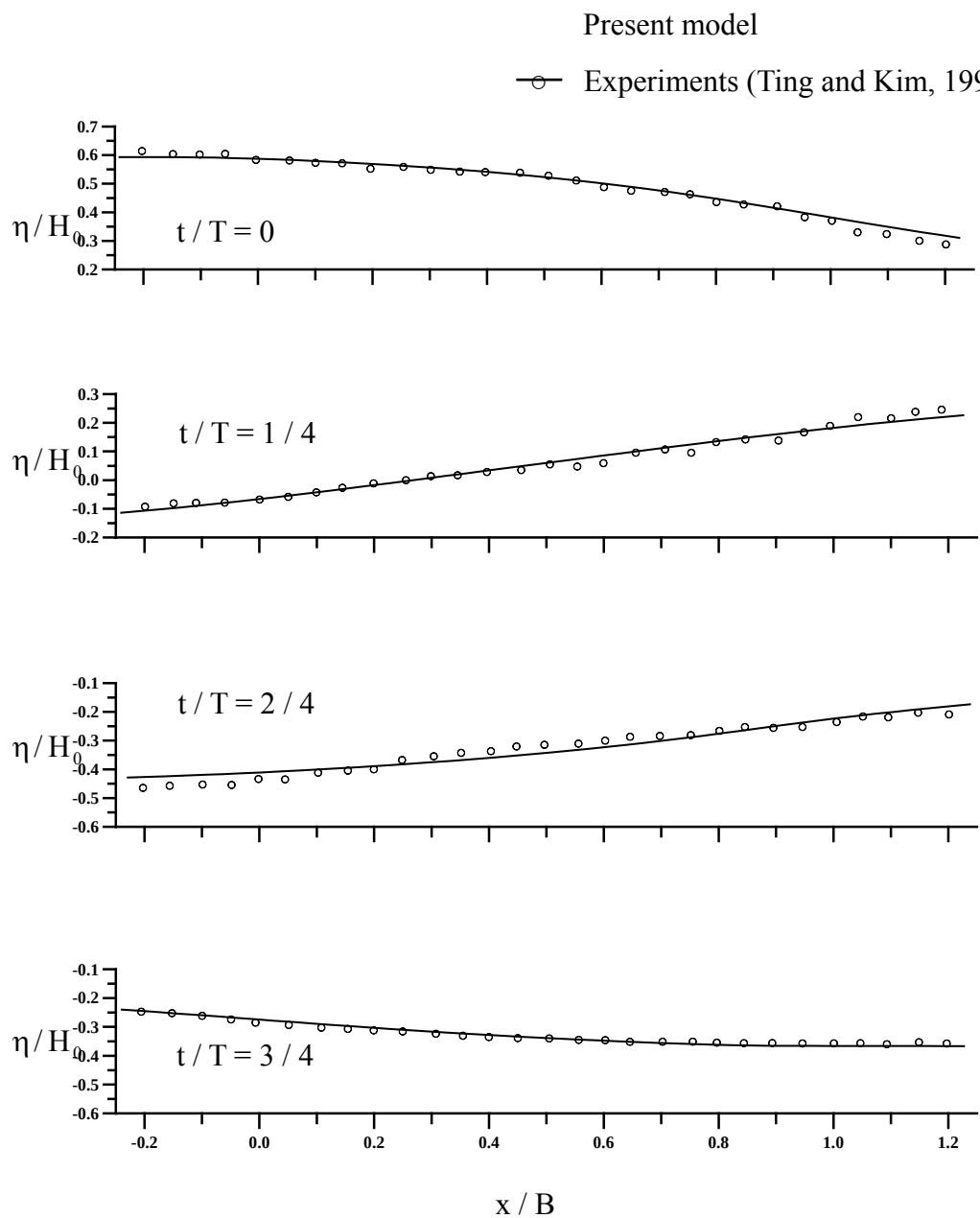
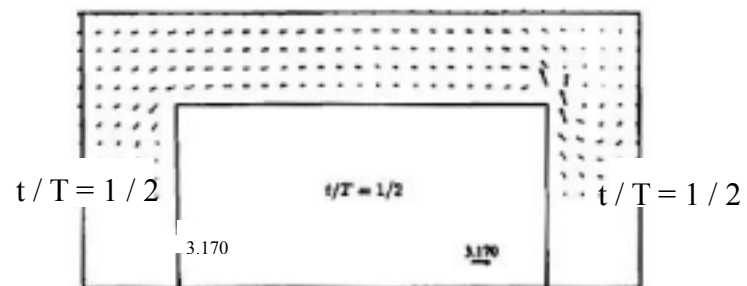
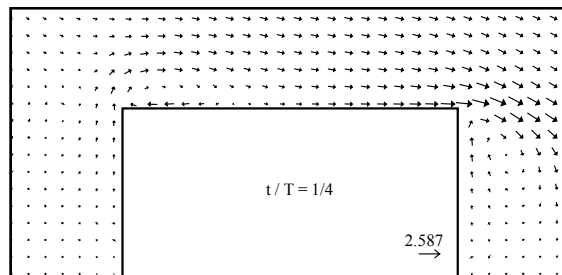
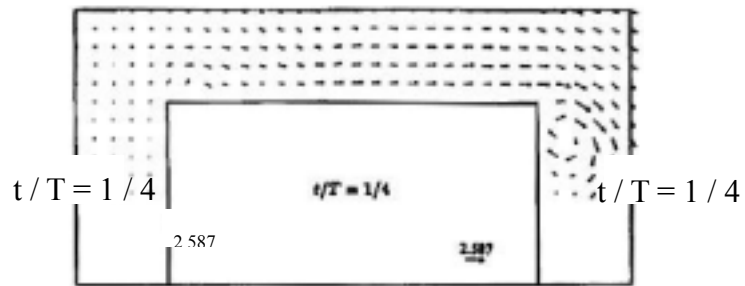
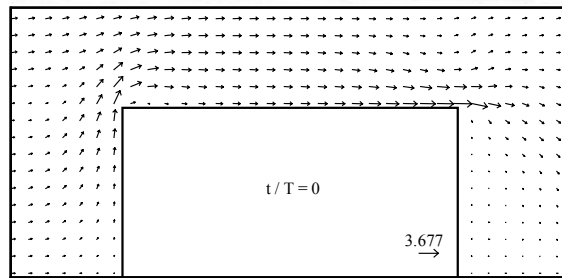
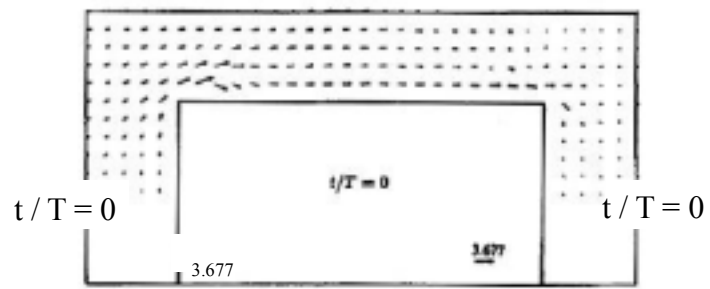


圖 7-4 實驗量測之液面變化

($h = 60.96 \text{ cm}$, $T = 4.0 \text{ sec}$, $H = 5.85 \text{ cm}$) , (Ting and Kim1994)



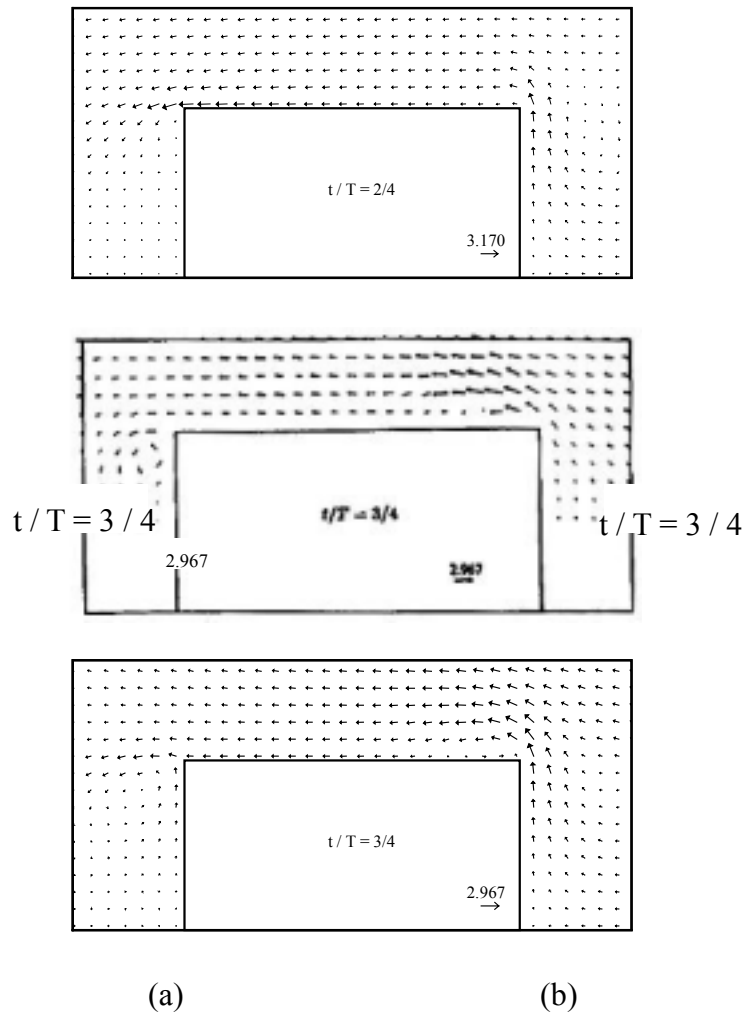


圖 7-5 實驗量測和數值模擬之流場圖

($h = 60.96 \text{ cm}$, $T = 4.0 \text{ sec}$, $H = 5.85 \text{ cm}$) ,

((a) : 實驗量測 , (b) : 數值解)

為進一步驗證數值模式之正確性，吾人依據 Ting and Kim (1994) 之試驗條件計算波浪通過潛堤時自由液面波形主頻 (1st Harmonic)、二倍頻 (2 nd Harmonic) 及三倍頻 (3 rd Harmonic) 波浪振幅之空間變化情形，計算結果如圖 7-6 所示。圖中十字形、星形及圓形符號分別為 Ting and Kim (1994) 試驗結果所分離之無因次主頻、二倍頻及三倍頻波浪振幅，線段則為數值模式計算結果，橫軸以潛堤寬度無因次化，潛堤位於 0 至 1 之間。結果顯示在潛堤上方處一倍頻波浪振幅模式計算值明顯大於實驗值，但在潛堤前方及後方兩者的變化趨勢確是相當的一致，吾人認為波浪振幅的差異主要來自於水槽末端的反射波所

導致，除此之外二倍頻及三倍頻亦非常吻合。由圖 7-6 足以驗證本研究數值模式計算波浪變形之正確性。

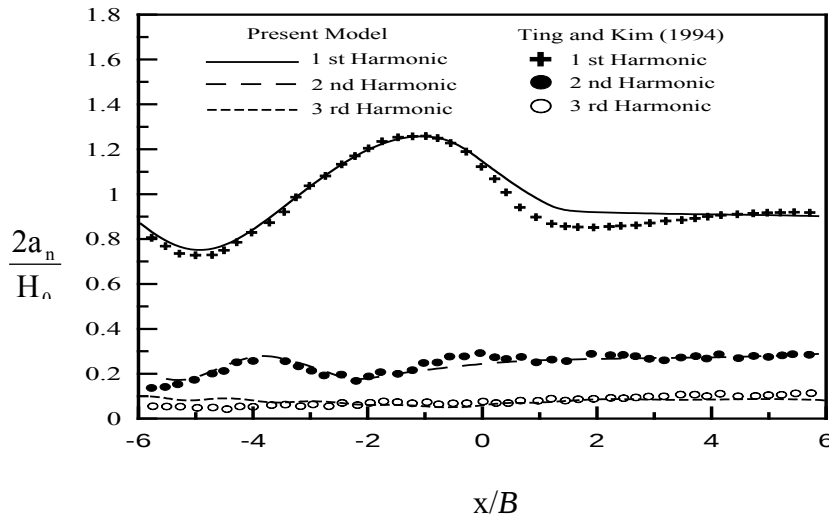


圖 7-6 波浪通過潛堤自由液面振幅之空間變化
($h = 60.96 \text{ cm}$, $T = 4.0 \text{ sec}$, $H = 5.85 \text{ cm}$)

盧 (1999) 之試驗條件之水深為 20 公分、兩潛堤間距為 35 公分、入射波高 4.77 公分、入射週期為 1.8 秒，試驗中擺放五支波高計，波高計位置分別在第一潛堤前 4.47 m、0.43 m 處，及第一潛堤上方 ($x = 0 \text{ m}$)、第一潛堤後 0.25 m、0.6 m 處。圖 7-7 為波浪通過潛堤不同位置之波形變化圖，圖中實線為數值模擬結果，圓形符號為試驗數據，由圖 7-7 中可發現本研究數值結果與試驗值頗為接近，可見在自由液面方面之模擬能力效果良好。

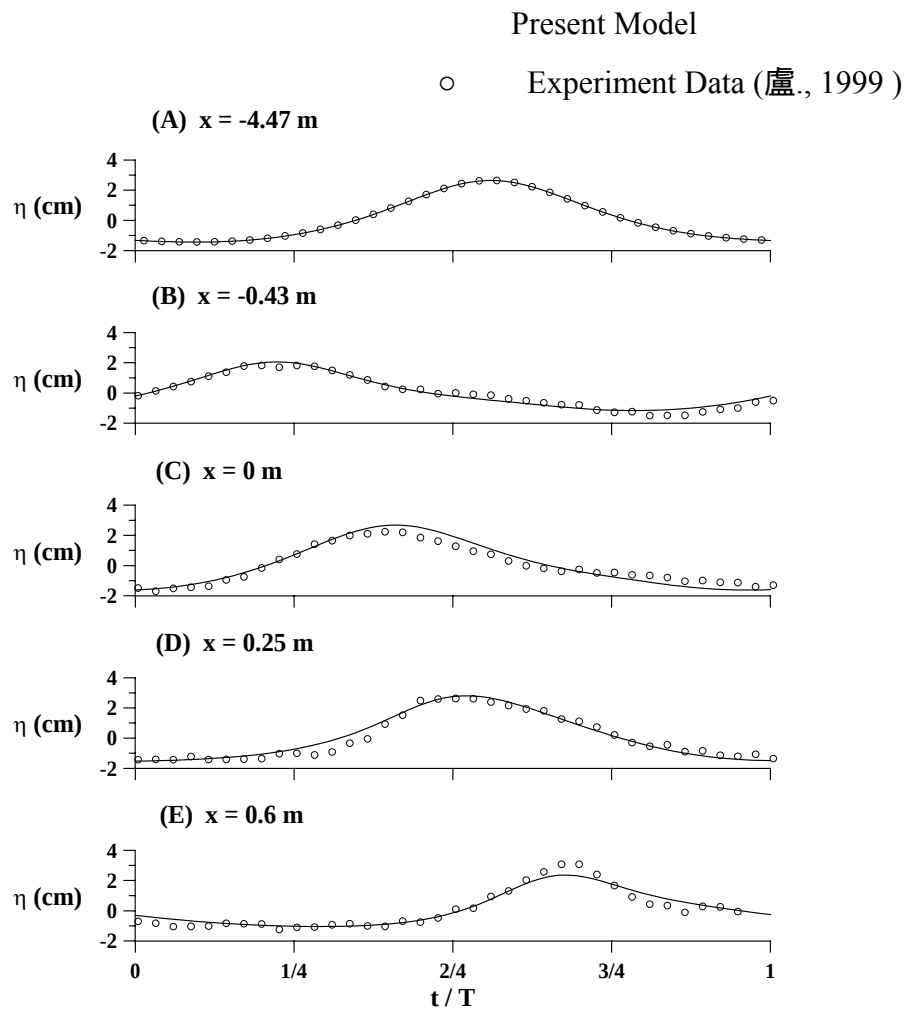


圖 7-7 波浪通過潛堤不同位置之波形變化

(實線: 數值模擬, ○ 號: 實驗值),

($h = 20$ cm、 $S = 35$ cm、 $H = 4.77$ cm、 $T = 1.8$ sec)

為了驗證數值模式所計算之流速, 進一步比較盧 (1999) 以 FLDV 量測波浪通過單一不透水潛堤之流速, 試驗水深為 20 cm, 潛堤高 10 cm, 寬 15 cm, 入射波高 5.85 cm, 入射週期為 1.3 sec。分別取 $x = 0.225$ m、 $z = 0.15$ m 及 $x = -0.075$ m、 $z = 0.081$ m 兩點潛堤附近之流速與試驗值比較, 如圖 7-8 所示, 數值模式所計算之流速與試驗值相當接近, 且相位一致, 整體而言, 可見在自由液面方面之模擬能力效果良好, 可以證明數值模式之正確性。

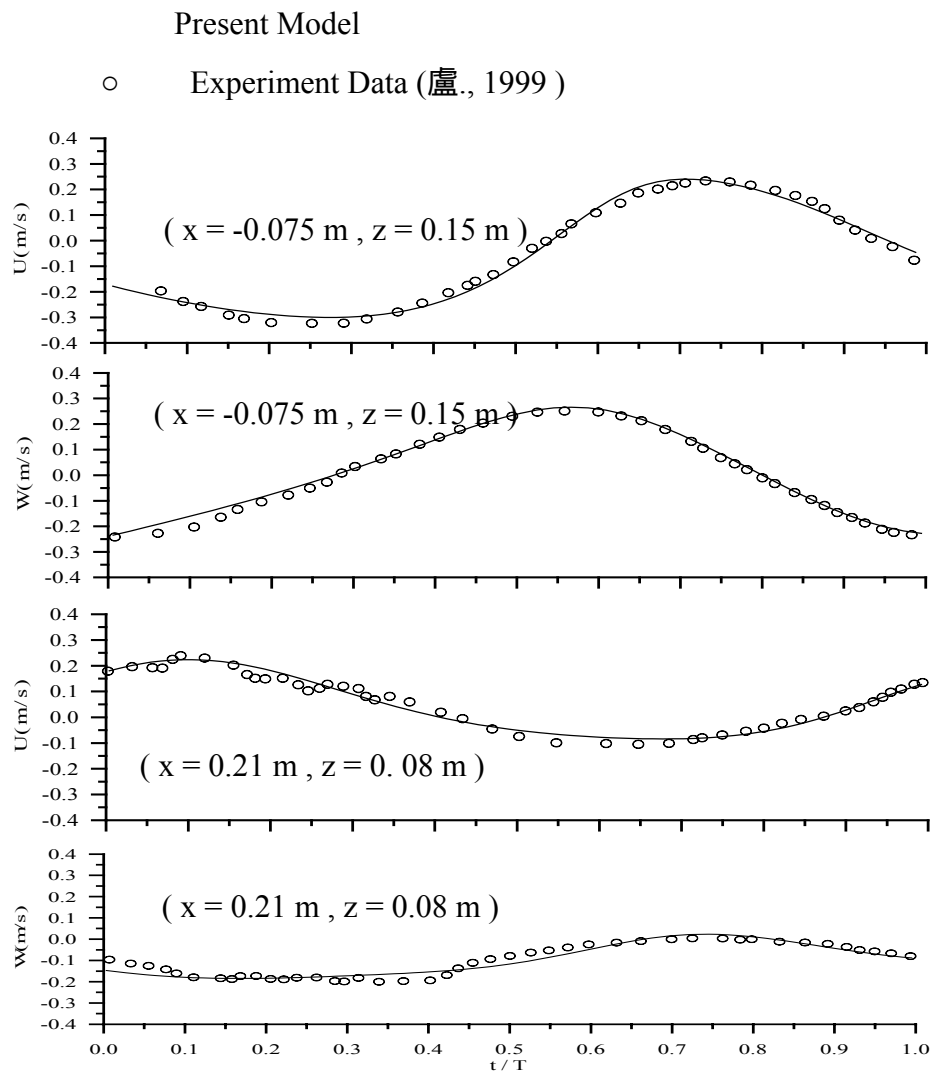


圖 7-8 數值計算與實驗量測之流速時序列結果比較

7.4 結果與討論

7.4.1 波浪通過雙列潛堤之流場特性

當波浪通過雙列潛堤時，水面之變動量 η 可表為下列物理量之函數，如下所示

$$\eta(x,t) = f(H, L, h_1, h_2, h, B, S, \nu, T, t) \dots\dots\dots (7-47)$$

其中 H 為入射波高、 L 為波長、 h_1 為潛堤高度、 h_2 為堤頂水深、 h 堤前水深、 B 為堤寬、 S 為堤與堤之間距、 ν 為水的運動黏滯係數、 T 為波浪週期、 t 為時間。將以上影響變數做無因次化分析後，波浪的特性將可利用下列之無因次參數表示

$$\frac{\eta}{H} = F\left(\frac{h_1}{h}, \frac{h_2}{h}, \frac{H}{h}, \frac{B}{L}, \frac{S}{L}, \frac{HL^2}{h^3}, \frac{HL}{h^2}, \frac{U_\infty h_1}{\nu}, \frac{t}{T}\right) \dots\dots\dots (7-48)$$

其中 HL^2/h^3 為 Ursell 數，表示波浪之非線性量的程度。 HL/h^2 為 KC (Keulegan-Carpenter) 數，用來表示波浪受結構物影響的程度，其值可代表波浪受結構物影響程度之大小， $Re = U_\infty h_1 / \nu$ 為 Reynolds 數。因此，根據上述無因次參數選定試驗之波浪條件及潛堤尺寸參數進行試驗，模擬波浪通過潛堤之流場，進一步分析波浪通過潛堤之水力特性。

為了瞭解波浪與潛堤之間的交互作用，利用本研究之數值模式進行一系列的數值模擬，潛堤配置如圖 7-9 所示，試驗週期為 1.3 s，水深皆為 20 cm，潛堤高度為 10 cm、寬度為 15 cm，潛堤配置皆以不透水雙潛堤為例，變換不同的潛堤間距討論其流場特性，包括流場變化、渦度、波浪變形，以瞭解波浪通過潛堤流場之特性，下列就不同條件之流場特性分別予以討論。

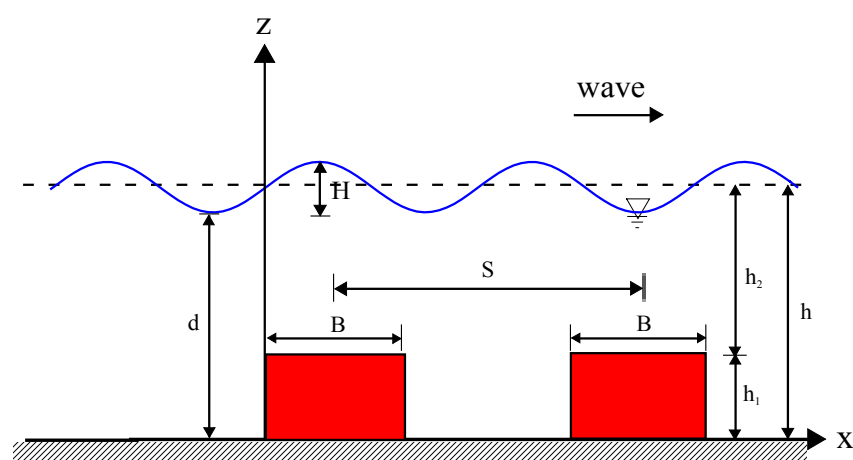


圖 7-9 波浪和雙列潛堤作用的示意圖

7.4.2 波浪變形

1. 波形變化

波浪由深海向近岸傳遞，由於水深逐漸變淺，波浪與底床之交互作用逐漸明顯，除了波高變大外，波浪尖銳度亦會增加且波形開始呈現不對稱，甚至產生碎波現象。Ishida 與 Takahashi (1981) 證實淺化中的波浪經過矩形突起底床時，因共振與非線性之交互作用，會產生異於主頻波的高階調和波。圖 7-10 為改變間距 $S/L = 1/8$ 、 $S/L = 4/8$ 所得的波浪通過潛堤不同位相之水位空間變化圖。圖形顯示在潛堤附近波形變化劇烈，堤頂淺水區水深越淺，淺化後的波高會越大，二次波峰會更明顯，甚至會有三次波峰，其原因可能是水深太淺導致高階非線性量增大所致。從圖 7-10 可以看出當波浪通過潛堤時，由於水深變淺，波浪前緣移動慢而後緣移動快，使得波浪尖銳度增加，在達潛堤堤頂時，二階高頻波逐漸變得明顯，當波浪由淺水進入深水時，因高階波速與主頻波速不一致，且高階波中之強制波與自由波有能量交換的情形，以致造成相當大的波形變化。

2. 高階成份波探討

為了對波浪通過雙列潛堤所生成高頻波，進一步了解，本研究透過 FFT 計算，結果如圖 7-11 為波浪通過潛堤時空間分佈之調和波高圖 (harmonic wave height)。從圖 7-11 中得知三倍頻以上的高階量非常小，所以圖 7-11 只分析到三倍頻。圖 7-11 中虛線為潛堤的位置，波浪由負 x 方向入射，橫軸為距離與潛堤高之比值，縱軸為主頻至三倍頻波振幅與入射波浪振幅之比值。由圖中可知，隨著波浪向潛堤上方傳遞，各倍頻之波高因淺化效應皆有變大的趨勢，且因反射波的影響而呈現震盪的現象。綜觀整個過程，可知波浪通過潛堤時因水深變淺，非線性效應驟增，能量便會往高頻進行轉移，主頻至三倍頻之無因次波高沿 x 方向變化。當波浪進入雙列潛堤時，由深水進入淺水時非線性效應增強，主頻之能量轉到倍頻，從圖形中可發現二

倍頻、三倍頻的振幅增大。當波浪通過雙列潛堤後，由於潛堤的設置削減了主頻波的波能，使得主頻波振幅變小。

圖中顯示當波浪通過潛堤時主頻波振幅會急劇的下降，而二倍頻及三倍頻波振幅則向上增加，因為波浪由深水傳遞至淺水處非線性效應增強，會額外生成高頻波。觀察圖 7-11 得知當潛堤間距為 $S/L = 6/8$

8/8 時，主頻波振幅會在兩座潛堤間形成震盪，因波浪通過第一潛堤時有部分透射及部分反射，透射波前進至第二潛堤時發生第二次反射，反射與入射波交互作用形成主頻波振幅的上下震盪，雖然非線性效應造成二倍頻波振幅的增加，但入反射作用亦造成二倍頻波振幅的震盪。

在圖 7-11 不同 S/L 試次之波浪振幅變化圖中，可發現波浪通過雙列潛堤後二倍頻波浪振幅增加幅度明顯上升，當 $S/L=0.5$ 時，由圖中亦發現當波浪通過雙列潛堤後主頻波浪振幅明顯大幅的衰減，主頻波振幅減小，表示系列潛堤確實有削減波能的效果。

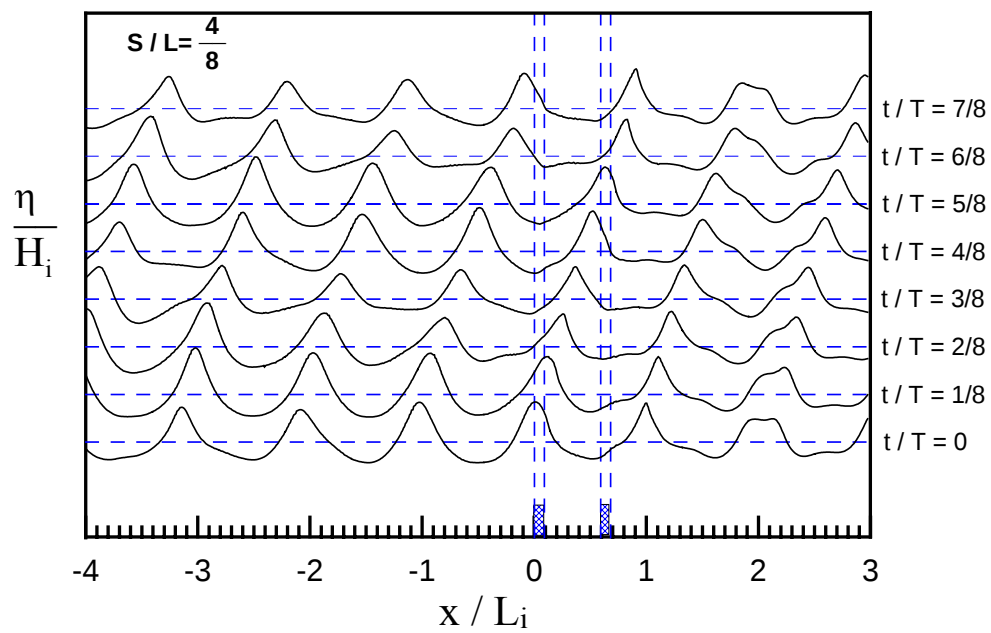
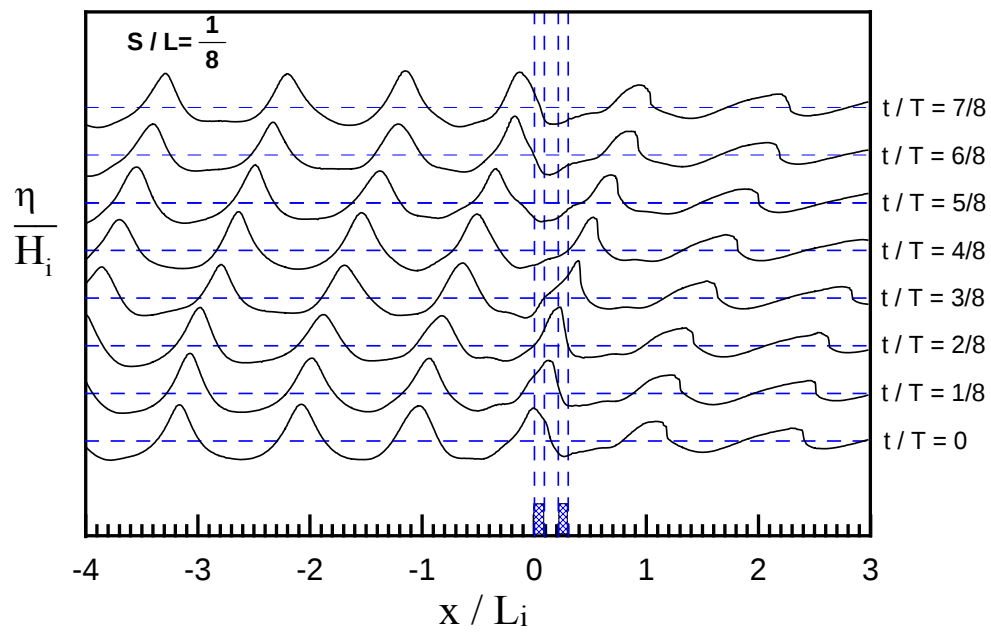


圖 7-10 波浪通過潛堤在不同位相之空間波形變化
($S/L = 1/8$; $S/L = 4/8$)

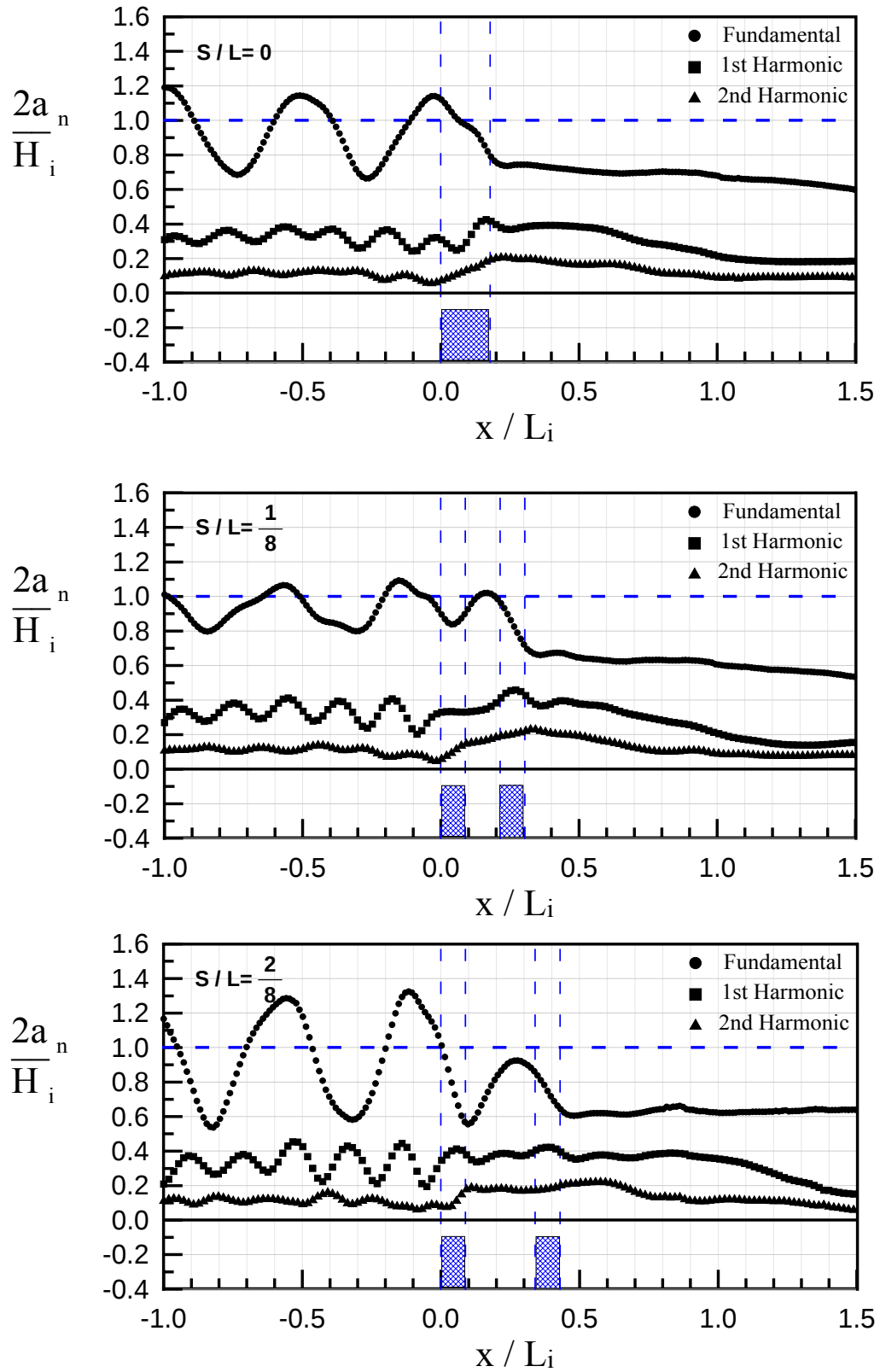


圖 7-11 波浪通過潛堤時主頻至三倍頻無因次波浪振幅空間變化圖

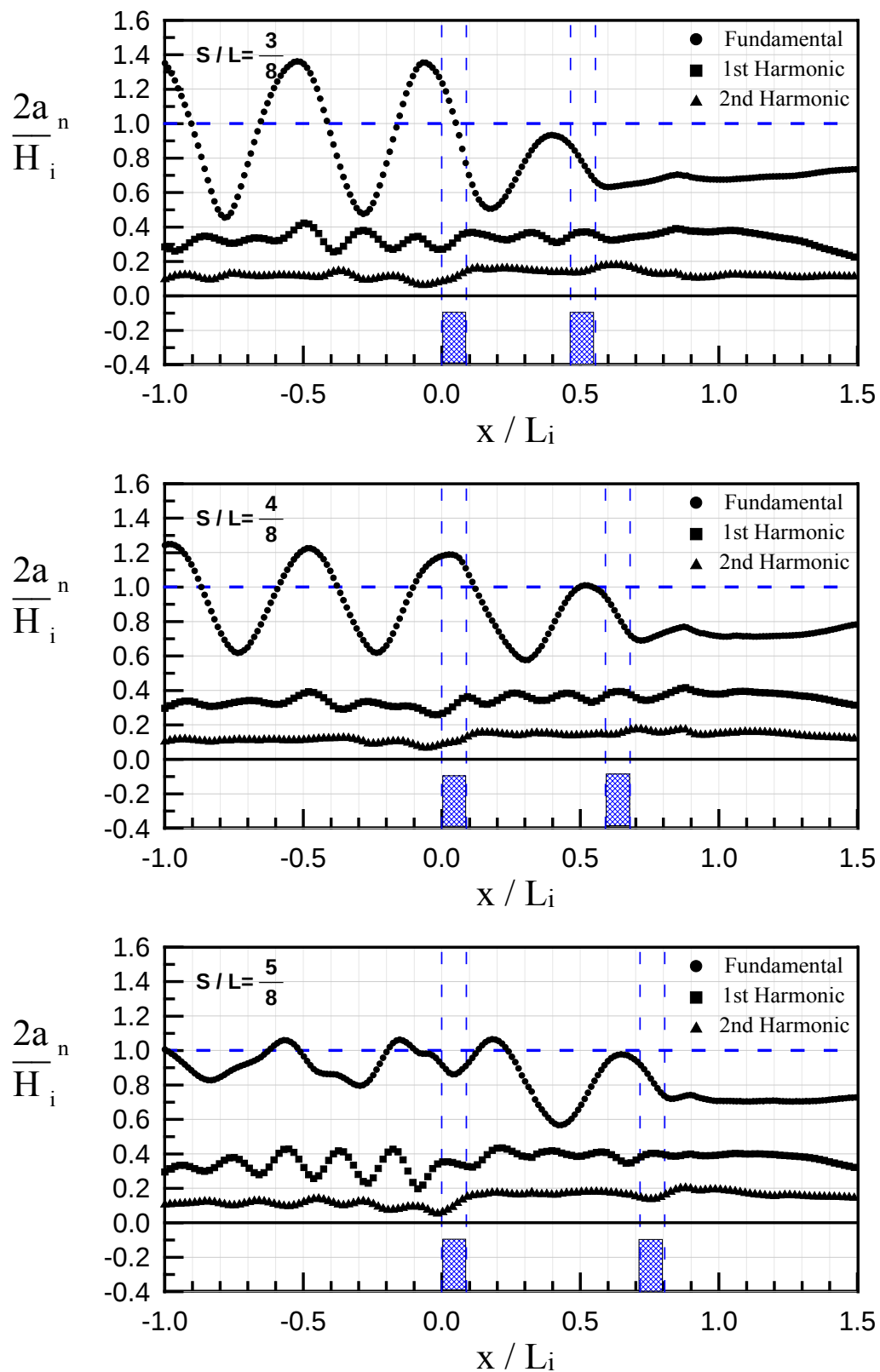


圖 7-11 波浪通過潛堤時主頻至三倍頻無因次波浪振幅空間變化圖 (續)

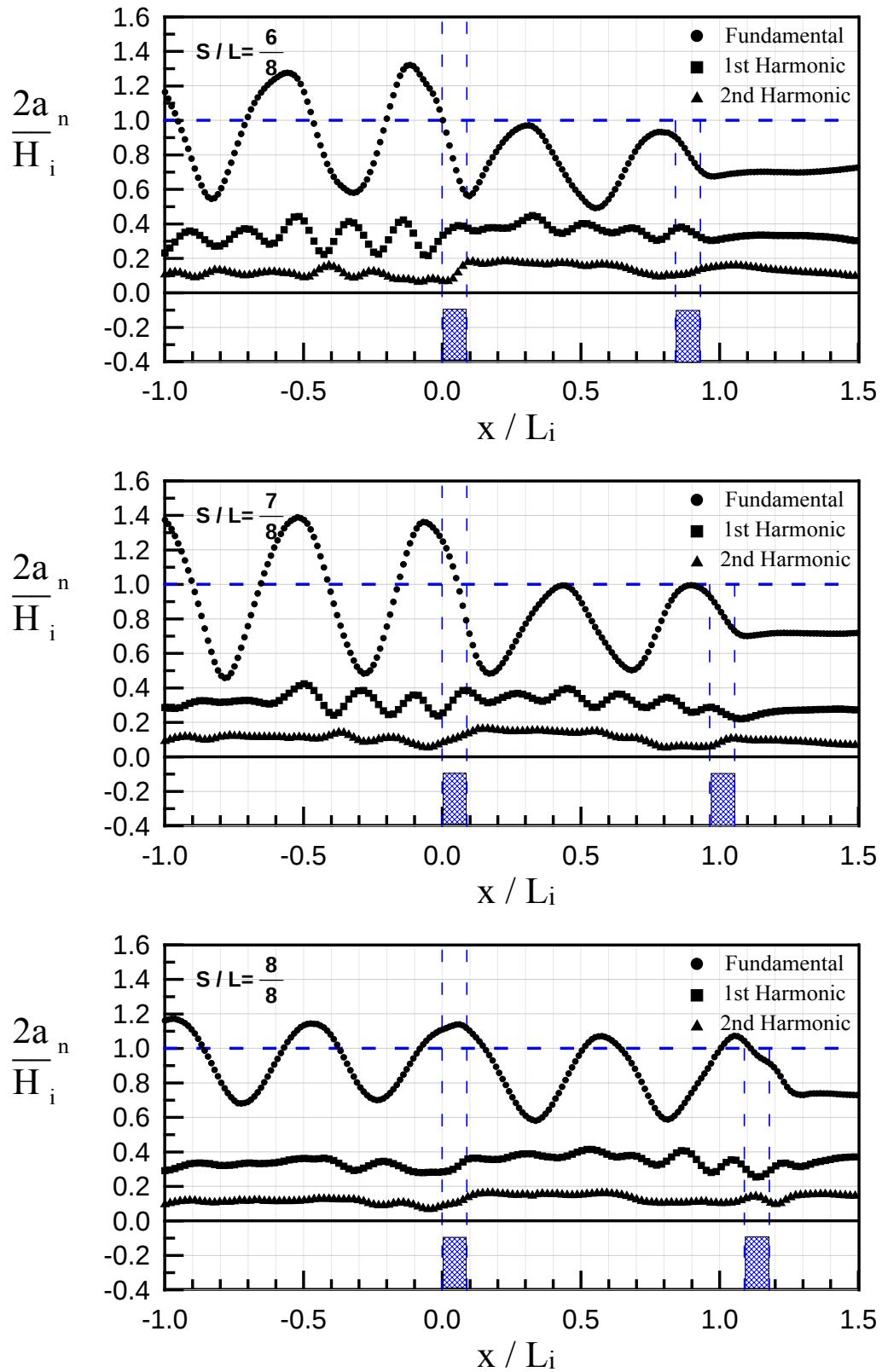


圖 7-11 波浪通過潛堤時主頻至三倍頻無因次波浪振幅空間變化圖 (續)

3.反射率和透射率探討

由於布拉格共振發生在入射波浪之波長約為間距的兩倍時,此時反射率最大,故可知波浪反射率 R 與兩倍間距除以波長之值 $2S/L$ 有關,因此探討 S/L 與反射率 R 和透射率 T 之變化,從圖中可以知道 $S/L = 4/8$ 有最大反射率和最小的透射率。

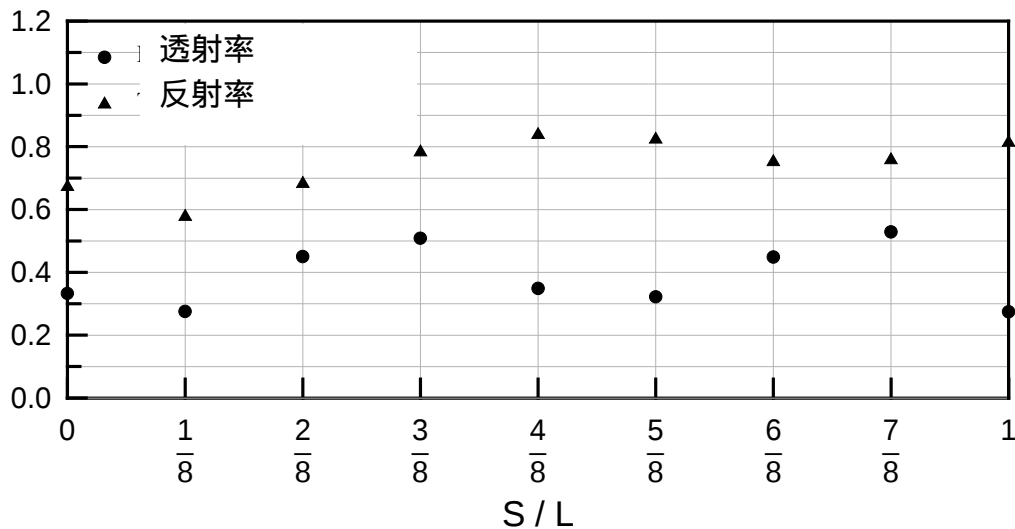


圖 7-12 不同間下波浪通過潛堤之反射率與透設率

7.4.3 流場變化

當波浪作用於潛堤時,由於邊界層之發展,使得潛堤附近會有渦流 (vortex) 的生成與消散。相較其附近流場而言,渦流本身流速快,對結構物產生的衝擊力強,不但對自由水面造成影響,亦會影響鄰近流場之運動,帶動水中的沙粒及可漂移物體,對於潛堤本身也會造成沖刷破壞及堤趾之淘刷,直接威脅潛堤結構物本體之安全。由此潛堤周圍流場及渦流行為之研究對於實際工程應用上極具價值。

為了方便有關波浪通過雙列潛堤之討論,故將離岸之潛堤稱為第一潛堤,向岸之潛堤稱為第二潛堤。圖 7-13 為試驗 (間距 $S/L = 1/8$, 入射週期 $T = 1.3 \text{ sec}$, 入射波高 $H = 5.85 \text{ cm}$, 靜水深 $h = 20 \text{ cm}$) 雙列潛堤之流速與水位變化圖,波浪由左向右方入射,橫軸為水平距離,

縱軸為垂直距離。第一潛堤置於 $x/h_1 = 0 \sim 1.5$ 之間，第二潛堤置於 $x/h_1 = S \sim 1.5 + S$ 之間，為了方便比較，所以有關雙列潛堤討論之相位皆以波峰到達第一潛堤離岸堤壁為基準，定義為 ($t/T = 0$)，將一波浪週期分為 8 個相位，每一相位點相距 $1/8$ 週期。

由圖 7-13 和 7-14 波浪通過雙列潛堤不同相位之流場變化。圖 7-13 $t/T = 0$ 時，第一潛堤向岸堤壁開始形成順時針渦流，而第二潛堤離岸堤壁之逆時針渦流亦因為波谷即將到達，所以逐漸被抬升消散，同時間第一潛堤之離岸堤頂開始生成順時針渦流而第二潛堤向岸堤頂之逆時針渦流發展成熟且逐漸消散中。圖 7-13 $t/T = 2/8$ 時，由於波峰已通過第一潛堤，所以第一潛堤之向岸堤壁順時針渦流發展至最大且即將抬升消散，同時離岸堤壁之逆時針渦流開始形成，而第二潛堤之向岸堤壁順時針渦流開始發展，同時離岸堤頂之順時針渦流發展成熟急速消散中。圖 7-13 $t/T = 4/8$ 時，此時波谷正通過第一潛堤，所以其逆時針渦流更趨成熟，而此時第二潛堤因波谷之到達，故向岸堤壁之順時針渦流已逐漸抬升消散。圖 7-13 $t/T = 6/8$ ，觀察第一潛堤之渦流情況，此時離岸堤壁有一逆時針渦流成長至最大規模，開始消散；離岸堤頂則有一順時針渦流開始形成；而向岸堤頂有一逆時針渦流生成至最大而急速消散。而觀察第二潛堤上方之水位，判斷第二潛堤所在位置應處於波浪之波谷段，第二潛堤之向岸堤頂與離岸堤壁皆有逆時針渦流存在。

由各相位之流速變化圖可知，波浪之波峰段經過潛堤時，部分波浪能量會傳給順時針渦流，使順時針渦流得以發展；而波谷段經過時波浪能量則傳遞給逆時針渦流區，使逆時針渦流得以發展。當順時針渦流發展時，逆時針渦流處於消散之階段；反之，當逆時針渦流發展時，則順時針渦流消散。整體來說，當波峰經過潛堤時會在離岸堤頂及向岸堤壁產生順時針渦流，而波谷來時則會在離岸堤壁及向岸堤頂產生逆時針渦流。

接著研究潛堤間距對流場的影響，當間距大時，可以發現兩座潛

堤的渦流不會互相影響。比較圖 7-13 和圖 7-14 可得知當潛堤間距縮小到一定程度時，潛堤間之渦流生成將受到粘滯性影響而限制其發展，此現象極具工程應用價值，若設計現場潛堤時能將潛堤寬度縮小，每隔一定間距在設置另一座潛堤，則既可穩定堤後水域又可節省製造潛堤的成本。

本章為了配合水工試驗，也模擬波浪通過 4 列潛堤之流場變化圖，圖 7-14 為波浪通過 4 列潛堤之流場變化圖，波浪條件為 $T = 1.86$ sec， $H = 5$ cm，靜水深 60 cm，間距為 180 cm，波浪通過潛堤之流場現象與通過雙列潛堤之現象雷同，當波峰經過潛堤時會在離岸堤頂及向岸堤壁產生順時針渦流，而波谷來時則會在離岸堤壁及向岸堤頂產生逆時針渦流。

圖 7-16 為波浪通過 4 列潛堤之流線變化圖，由圖中可發現此共振的 CASE 在共振流場在波峰到達時，垂直速度達到最大；非共振流場在波峰到達處，水平速度最大。

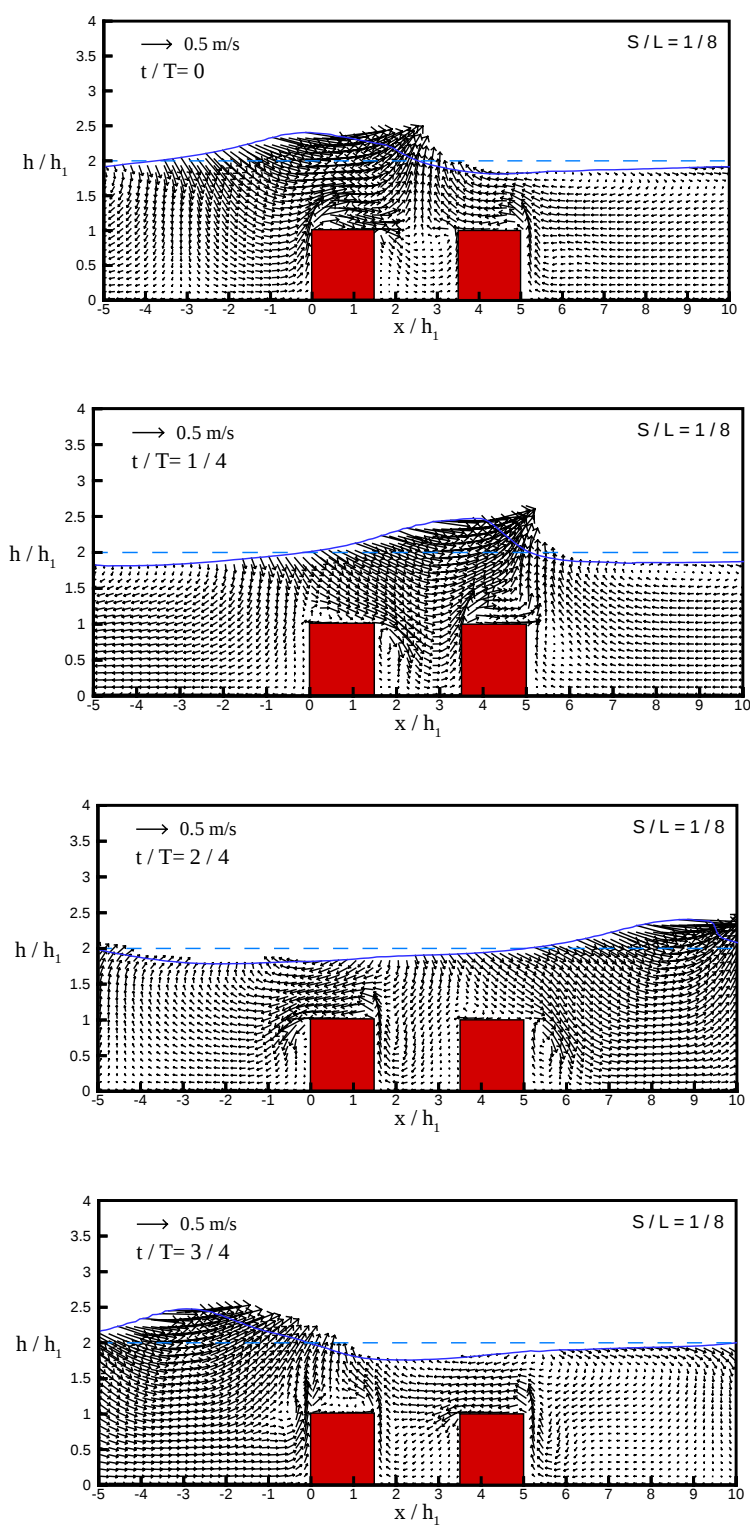


圖 7-13 波浪通過雙列潛堤之流場變化圖
($T = 1.3 \text{ sec}$, $H = 5.85 \text{ cm}$, $S/L = 1/8$)

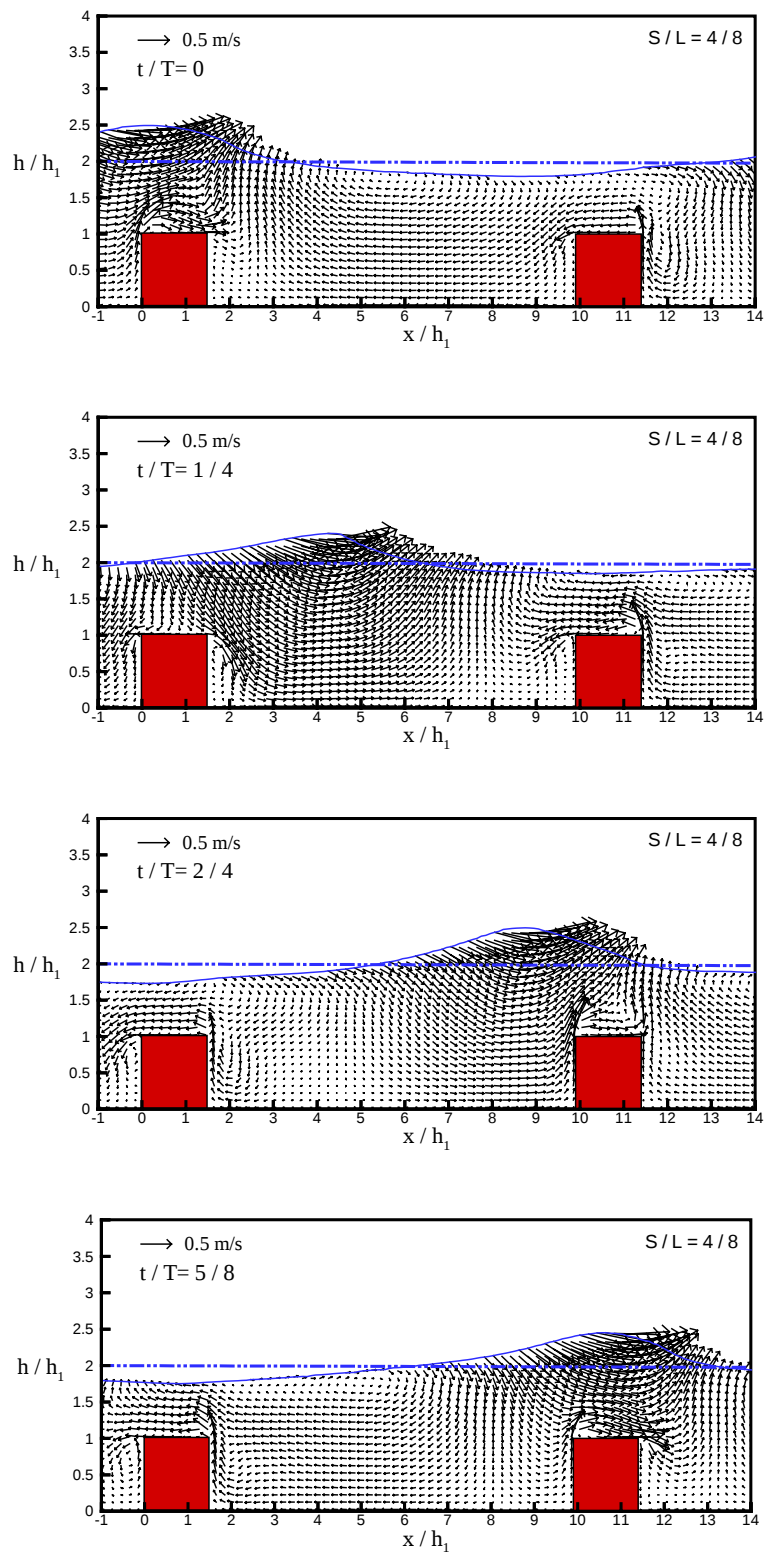


圖 7-14 波浪通過雙列潛堤之流場變化圖
($T = 1.3 \text{ sec}$, $H = 5.85 \text{ cm}$, $S/L=4/8$)

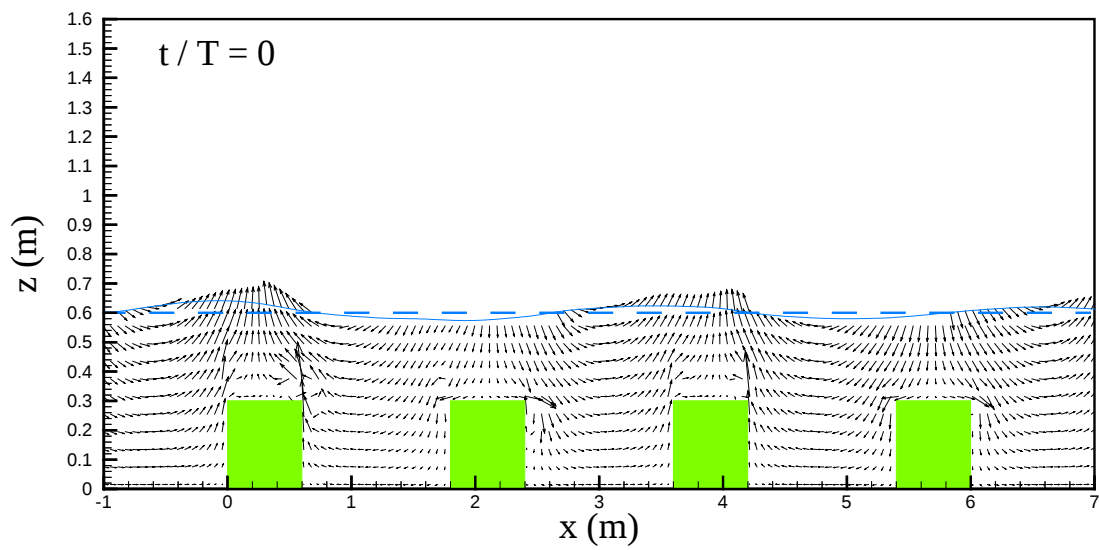


圖 7-15 波浪通過 4 列潛堤之流場變化圖
($T = 1.86 \text{ sec}$, $H = 5 \text{ cm}$, $S/L = 0.45$)

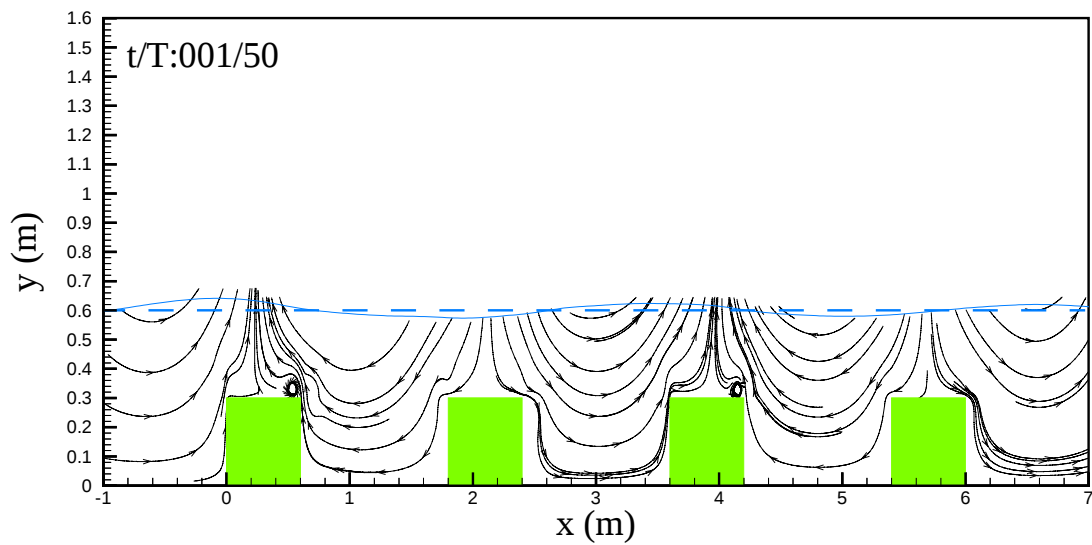


圖 7-16 波浪通過 4 列潛堤之流線變化圖
($T = 1.86 \text{ sec}$, $H = 5 \text{ cm}$, $S/L = 0.45$)

7.4.4 污染物擴散分析

為了解共振下的污染物擴散分佈情況，本研究模擬波浪通過 4 列潛堤之濃度變化，圖 7-17 為鹽水佈放位置，圖 7-18 為波浪通過 4 列潛堤之不同時間下濃度變化圖，從圖中可發現由於鹽水濃度隨波浪作用時間增加而向污染源水平方向前後擴散，另外，鹽水亦向垂直水深方向之深水處擴散。

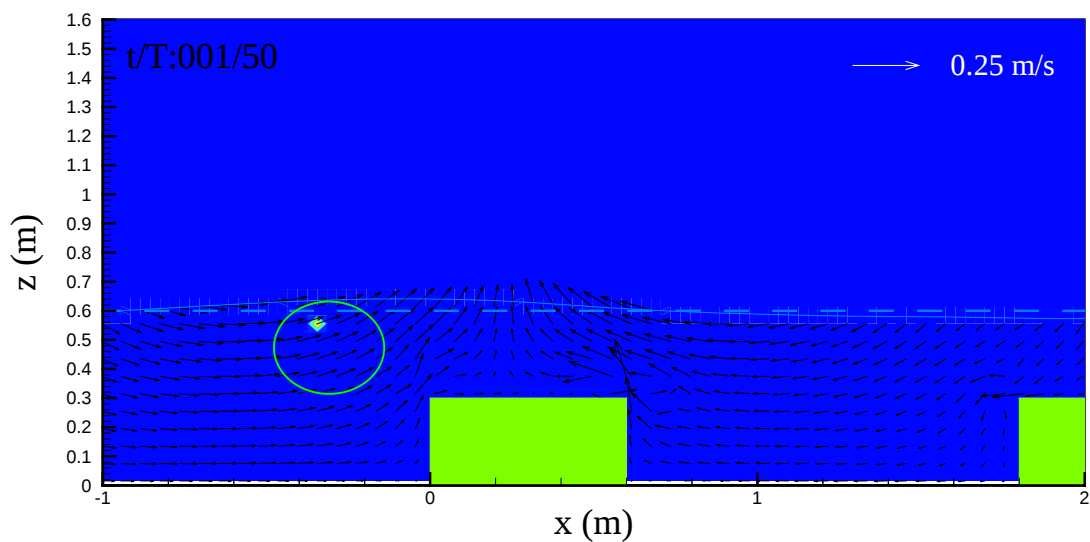


圖 7-17 鹽水佈放位置

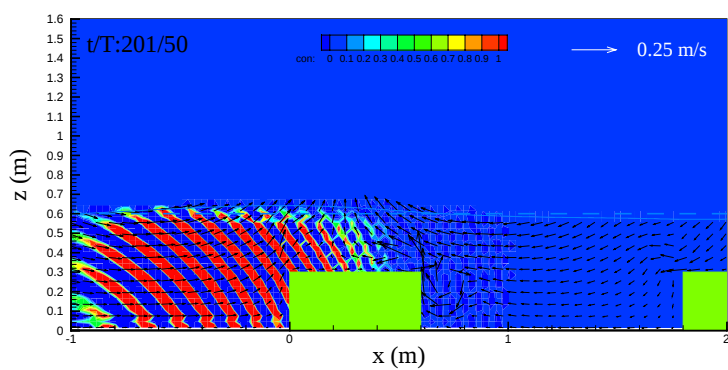
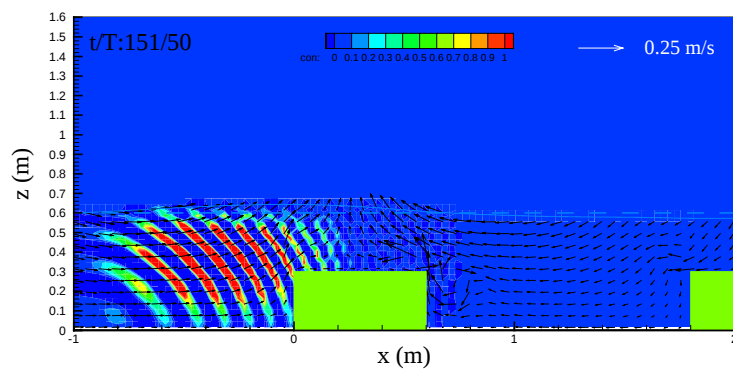
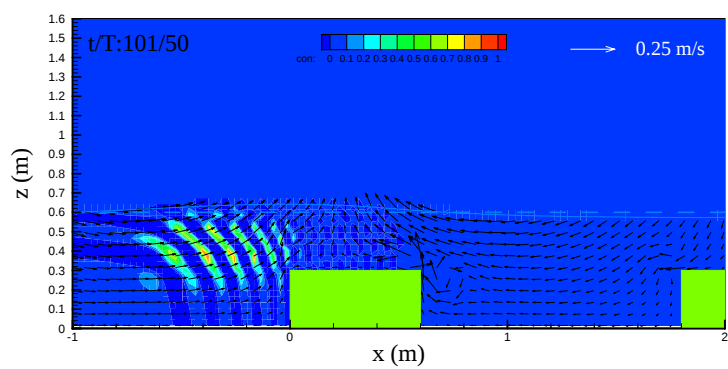
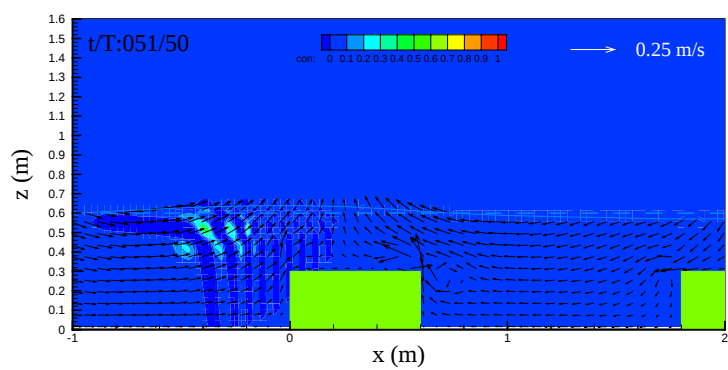


圖 7-18 波浪通過 4 列潛堤之不同時間下濃度變化圖

第八章 不規則波通過系列潛堤之反射率

系列潛堤為新式的海岸保護工法，目前尚在研究階段，近幾年來許多文獻研究積極對其水理機制作探討，雖已有許多的成果，但畢竟現場波浪為不規則波，而系列潛堤所應用的反射原理為布拉格共振，根據以往規則波研究結果，布拉格共振發生的條件僅侷限在某些特定條件($2S/L \sim 1$)，在不規則的作用下，布拉格共振效果如何尚未明瞭。故本章以不規則波為入射波條件，利用數值模式計算方式，探討不同波浪條件下，堤前反射率變化以及布拉格共振的現象。茲將研究方法、過程以及結果說明如下：

8.1 數值模式

8.1.1 控制方程式

本研究以波譜分割法處理不規則波浪問題，將不規則波視為由無數個單一成份波組成，分別進行計算後再予以合成不規則波之變形，對於單一成份波之計算，本研究以演進型緩坡方程式 EEMSE (Hsu 等人，2003)作為控制方程式，同時仿照 Isobe (1987) 之處理方式，在方程式中加入能量消散係數 f_{Di} ，如下所示：

$$-\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot [(CC_g)_i \nabla_h \phi_i] + [(k^2 CC_g)_i (1 + if_{Di}) - \omega_i^2 + F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 g k |\nabla_h h|^2] \phi_i = 0 \quad (8-1)$$

式中下標 i 代表單一成份波之物理量，因此 ϕ_i 為單一成份波之速度勢能函數，而能量消散係數 $f_{Di} = f_{si} + f_{di} + f_{nl3i}$ ，其中 f_{si} 、 f_{di} 與 f_{nl3i} 分別代表非線性波浪淺化效應、碎波能量消散效應與非線性三波

交互作用效應。

為簡化式(8.1)，引用 Radder (1979) 之尺度因子，如下所示：

$$\Psi_i = \frac{\phi_i}{\sqrt{(CC_g)_i}} \dots\dots\dots(8-2)$$

則式(8-2)可簡化如下：

$$-\frac{2\omega_i i}{(CC_g)_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} = \nabla_h^2 \phi_i + (k_c^2)_i \phi_i \dots\dots\dots(8-3)$$

其中 k_c 為虛擬週波數，如下式所示

$$(k_c^2)_i = k_i^2 (1 + if_{Di}) - \frac{\nabla_h^2 \sqrt{(CC_g)_i}}{\sqrt{(CC_g)_i}} + \frac{[F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 (\nabla_h h)^2 g k_i]}{(CC_g)_i} \quad (8-4)$$

式(8-3)即為本研究計算單一成份波之控制方程式。

8.1.2 能量消散係數

對於波浪的能量方程式，可藉由分離緩坡方程式中的實部及虛部推得。波譜分割後的每一個成份波，其波浪勢能函數可以表示為 $\phi = A_w e^{is}$ ，將其代入式緩坡方程式中，成雙曲線型緩坡方程式(Booij, 1983)，並分離方程式中的實部與虛部，再藉由波浪勢能函數與水位變化函數的關係($\phi = -i \frac{g}{\omega} f\eta$)，將波浪勢能函數之振幅 A_w 代換為水位變化振幅 a ，則可推得下列一組方程式，如下所示：

$$\frac{1}{a_i} \frac{\partial^2 a_i}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial s_i}{\partial t} \right)^2 = (CC_g)_i [k_i^2 - (\nabla_h s_i)^2] - \omega_i^2 + \frac{\nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h a)_i}{a_i} \dots\dots\dots(8-5)$$

$$-\frac{a_i^2}{\omega_i} \frac{\partial^2 s_i}{\partial t^2} - \frac{2a_i}{\omega_i} \frac{\partial s_i}{\partial t} \frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla_h \cdot \left(\frac{a^2 C C_g \nabla_h s}{\omega} \right)_i = - \left(\frac{f a^2 C C_g k^2}{\omega} \right)_i = -D_i$$

.....(8-6)

式中 D_i 為單位時間內每單位面積所產生的能量損失，其中包含有 (a) 波浪非線性淺化效應 ($D_i = D_{si}$)、(b) 波浪碎波能量消散效應 ($D_i = D_{di}$) 及 (c) 波浪非線性交互作用效應 ($D_i = D_{nl3i}$)。若在穩態情況下，且 $\theta \approx 0^\circ$ ， $\nabla S_i = 1$ ，則式(8-6)可簡化為一維波浪能量通率方程式，如下所示：

$$\frac{d(EC_g)_i}{dx} = -D_i = -f_{di} k_i (EC_g)_i \dots\dots\dots(8-7)$$

式中 $E_i = \rho g H_i^2 / 8$ ，為每單位面積的波浪能量， $H_i = 2a_i$ 為波高， ρ 為海水的密度。

1.非線性淺化效應

關於波浪淺化效應時波高所需的修正量，本研究依照能量通率的觀點，結合 Shuto (1978) 提出的非線性淺化波高公式，推導出波浪的淺化修正量。假設非線性波高分佈可表示為 $\tilde{H}_i = H_i + (H_{non})_i$ ，其中 $\tilde{H}_i$ 為波浪的總波高， H_i 為線性波浪理論下的波高， $(H_{non})_i$ 為受非線性效應影響所產生的非線性波高。將上式代入式(8-7)波浪的能量通率方程式，並假設 $D_i = D_{si}$ 及 $f_i = f_{si}$ ，則波浪的過剩能量通率可表示為

$$-D_{si} = \frac{1}{8} \rho g \frac{d}{dx} [(2H H_{non} + H_{non}^2) C_g]_i \dots\dots\dots(8-8)$$

其所對應的能量通率方程式為

$$\frac{d(EC_g)_i}{dx} = -D_{si} = -f_{si} k_i (EC_g)_i \dots\dots\dots (8-9)$$

而 Shuto (1974) 提出之斜坡底床上的非線性淺化公式如下所示：

$$\left\{ \begin{array}{ll} \left(\frac{H}{H_0} \right)_i = \sqrt{\frac{1}{2n_i} \frac{1}{\tanh k_i h}} & \text{for } U_r \leq 30 \\ H_i h^{2/7} = \text{const} & \text{for } 30 < U_r \leq 50 \dots\dots\dots (8-10) \\ H_i h^{5/2} (\sqrt{U_r} - 2\sqrt{3}) = \text{const} & \text{for } U_r > 50 \end{array} \right.$$

式中 H_{0i} 為入射波波高， $n_i = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_i h}{\sinh 2k_i h} \right)$ ， $U_r = \frac{gHT^2}{h^2}$ 為 Ursell number。

將上式三種情況分別代入式 (8-9)，並應用 $\frac{d(\quad)_i}{dx} = \frac{dh}{dx} \frac{d(\quad)_i}{dh} = -\tan \beta \frac{d(\quad)_i}{dh}$ 之關係，其中 $\tan \beta$ 為底床平均坡度，因此可整理得

$$f_{si} = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{for } U_r \leq 30 \\ \frac{1}{k_i h} \left(-\frac{4}{7} + s_1 + s_2 \right) \tan \beta & \text{for } 30 < U_r \leq 50 \\ \frac{1}{k_i h} \left(-\frac{3\sqrt{U_r} - 10\sqrt{3}}{1.5\sqrt{U_r} - 2\sqrt{3}} + s_1 + s_2 \right) \tan \beta & \text{for } U_r > 50 \end{array} \right. \dots\dots\dots (8-11)$$

式中 $s_1 = \frac{k_{0i}h - h^2(k_i^2 + k_{0i}^2)}{4n_i^2 \sinh^2 k_i h}$, $s_2 = \frac{2n_i - 1}{2n_i}$, 其中 k_{0i} 為入射波浪之週波數。

2.波能量消散效應

關於碎波消耗項本研究採用 Eldeberky 和 Battjes (1995) 之理論, 首先將 Battjes 和 Janssen (1978) 之碎波公式推衍至波譜型式, 如下所示:

$$S_{br}(\omega_i, \theta_i) = -\frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\omega_i, \theta_i) \dots\dots\dots (8-12)$$

式中 E_{tot} 為波浪總能量, $E(\omega_i, \theta_i)$ 為波譜能量密度, D_{tot} 為因碎波造成之每單位水體之平均能量消散率, 表示如下:

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\bar{\omega}}{2\pi} \right) H_{max}^2 \dots\dots\dots (8-13)$$

其中 $\alpha_{BJ} = 1$, 為可調整的參數, $\bar{\omega}$ 為平均角頻率, Q_b 為碎波微小量, H_{max} 為最大可能波高, 分別如下所示:

$$Q_b = \exp \left[\frac{1 - Q_b}{(H_{rms} / H_{max})^2} \right] \dots\dots\dots (8-14)$$

$$H_{max} = \frac{0.88}{k} \tanh \left(\frac{\gamma kh}{0.88} \right) \dots\dots\dots (8-15)$$

此處

$$\gamma = 0.5 + 0.4 \tanh \left(33 \frac{H_{rms,0}}{L_0} \right) \dots\dots\dots (8-16)$$

上式中 H_{rms} 為波浪均方根波高，而 $H_{rms,0}$ 為入射波浪之均方根波高， L_0 為入射波之波長。將式(8-12)代入式(8-9)中，可推得如下關係：

$$\frac{d}{dx}(EC_g)_i = (S_{br})_i = -f_{di}k_i(EC_g)_i \dots\dots\dots(8-17)$$

故

$$f_{di} = -\frac{(S_{br})_i}{k_i(EC_g)_i} \dots\dots\dots(8-18)$$

而碎波指標本研究選用 McCowan (1894) 提出之公式進行判斷，碎波判斷式如下所示：

$$\frac{H_b}{h_b} > 0.78 \dots\dots\dots(8-19)$$

式中 H_b 為碎波波高， h_b 為碎波水深。

3.線性三波交互作用效應

波浪傳遞至淺水時，受非線性效應之影響，會在波譜主頻與倍頻處產生能量的重新分配，使得波浪能量會由低頻處往高頻區移動，因此波浪整體的平均週期有變小之趨勢。而對於非線性三波交互作用項，最早加入模式計算的為 Eldeberky 和 Battjes (1995)，Eldeberky (1996) 發表應用 LTA (lumped triad approximation) 來計算三波交互作用項，如下所示：

$$S_{nl3}(\omega_i, \theta_i) = S_{nl3}^-(\omega_i, \theta_i) + S_{nl3}^+(\omega_i, \theta_i) \dots\dots\dots(8-20)$$

其中

$$S_{nl3}^+(\omega_i, \theta_i) = \max \left\{ 0, \alpha_{EB} 2\pi (CC_g)_i (J_{nl3}^2)_i |\sin(\beta_t)| E^2(\omega_i/2, \theta_i) - 2 E(\omega_i/2, \theta_i) E(\omega_i, \theta_i) \right\} \dots\dots\dots (8-21)$$

$$S_{nl3}^-(\omega_i, \theta_i) = -2S_{nl3}^+(2\omega_i, \theta_i) \dots\dots\dots (8-22)$$

式中 α_{EB} 為調整比例係數 (tunable proportionality coefficient) , 本研究模式設定為 1.0 , β_t 為雙位相 (biphase) , 可表示為

$$\beta_t = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh \left(\frac{0.2}{U_r} \right) \dots\dots\dots (8-23)$$

而三個波波交互作用發生時 U_r 的範圍為 $1116 > U_r > 11$, J_{nl3} 為交互作用係數 , 由 Madsen 和 Sørensen (1993) 建議其表示式為

$$(J_{nl3})_i = \frac{k_{\omega_i/2}^2 (g h + 2 C_{\omega_i/2}^2)}{k_{\omega_i} h (g h + \frac{2}{15} g h^3 k_{\omega_i}^2 - \frac{2}{5} \omega_i^2 h^2)} \dots\dots\dots (8-24)$$

式中 $k_{\omega_i/2}$ 為發生交互作用頻率之週波數 , k_{ω_i} 為中心頻率之週波數 , $C_{\omega_i/2}$ 為發生交互作用之位相速度。

將式(8-20)代入式(8-9)可得

$$\frac{d(EC_g)_i}{dx} = -f_{nl3i} k_i (EC_g)_i = (S_{nl3})_i \dots\dots\dots (8-25)$$

即

$$f_{nl3i} = -\frac{(S_{nl3})_i}{k_i(EC_g)_i} \dots\dots\dots(8-26)$$

8.1.3 波譜分割與合成

本研究假設不規則波之入射波波譜具有線性波譜之特性，亦即波譜可被分割為無數個成份能譜，每一個成份能譜各有一代表頻率，亦即視為一規則成份波。實際應用時應將波譜分割成有限個成份能譜，分割數的多寡視要求的精度而定。一般而言，波譜分割有 (1) 等頻率分割、(2) 等能量分割、(3) 混和分割等三種方式。等頻率分割雖然方法較為簡單，但各個成份波之間的能量差距過大；而等能量分割之缺點為在高頻部分其中心代表頻率所代表之範圍過大，但在工程上之應用較具實用性。而本研究因考慮波浪在主頻附近的能量變化較為迅速，在高頻處的能量變化較為緩慢，為提高計算效率，故採用混和分割方式，利用指數分佈來離散波浪頻率，過程說明如下：

已知波譜能量密度 $S(f)$ ，先決定波譜分割之最高頻率 (f_{high}) 與最低頻率 (f_{low})，假設波譜分割數為 M ，則頻率分割之間隔以下式計算

$$\Delta f_i = \left[\left(\frac{f_{high}}{f_{low}} \right)^{\frac{1}{M-1}} - 1 \right] f_i \dots\dots\dots(8-27)$$

各成份波對應之頻率如下所示：

$$f_1 = f_{low} \dots\dots\dots(8-28)$$

$$f_M = f_{high} \dots\dots\dots(8-29)$$

$$f_{i+1} = \left(\frac{f_M}{f_1} \right)^{\frac{1}{M-1}} f_i \dots\dots\dots(8-30)$$

而各成份波對應之波高與週期以下式計算

$$H_i = 4\sqrt{S(f_i)\Delta f_i} \ , \ T_i = 1/f_i \dots\dots\dots(8-31)$$

而對於波譜分割範圍與切割數的決定，其基本原則為波譜合成後之波高與週期能重現原不規則波之波浪特性。因此，本研究模式之頻率切割範圍大致上為尖峰頻率 f_p 之 0.1 倍至 5 倍之間，若以能量觀點檢視，此範圍應已足夠代表整個波譜，而切割數至少為 20 個以上。

由成份波所對應之波高及頻率，利用前述切割之觀念，可由式(8-31)反推成份波能譜與成份波波高之關係，如下所示：

$$S(f_i) = H_i^2 / 16\Delta f_i \dots\dots\dots(8-32)$$

根據 Longuet-Higgins (1952) 之推導指出，波浪之示性波高 $H_{1/3}$ 、平均週期 $\bar{T}$ 與波譜之各次動差如下所示：

$$H_{1/3} = 4.004\sqrt{m_0} \dots\dots\dots(8-33)$$

$$\bar{T} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \dots\dots\dots(8-34)$$

式中， m_k 為波譜之 k 次動差，以下式計算

$$m_k = \int_0^{\infty} S(f) f^k df \dots\dots\dots(8-35)$$

根據 Bretschneider (1968)、Goda 和 Nagai (1968) 依實測數據之分析結果顯示，示性週期與平均週期間之關係為

$$T_{1/3} = \bar{T} / 0.9 \dots\dots\dots(8-36)$$

由式 (8-33) 與式 (8-36) 即可求得此能譜所代表之波浪條件，亦即示性波高與示性週期。

8.2 反射係數公式

8.2.1 EEMSE 模式之反射係數

有關反射係數的計算公式，目前已有許多文獻提出不同的計算方法，如 Goda 和 Suzuki (1976) 的兩點法、Mansard 和 Funke (1980) 及 Chang (2002) 的三點法。Goda 和 Suzuki (1976) 將波高計固定於斷面水槽，並將量測到的波形利用富立葉級數 (Fourier series) 展開，進而計算波浪的反射係數。Chang (2002) 提出頻率領域反射係數之推算方法，利用空間任意三點等間距的水位振幅，進而求出斜坡底床的波浪反射係數。由於本研究模式計算所得為波場，而非時系列之波形，故以 Chang (2002) 之反射係數公式作為本研究規則波反射係數之依據，對於單一規則波，其反射係數推算過程如下：

如圖 8-1 所示，任意水深合成波之波形可表示為

$$\begin{aligned}
\eta(x,t) &= a_I \cos\left(\int_0^x k dx + \omega t + \varepsilon_i\right) + a_R \cos\left(\int_0^x k dx - \omega t + \varepsilon_r\right) \\
&= a_I \{ [\cos\left(\int_0^x k dx + \varepsilon_i\right) + R \cos\left(\int_0^x k dx + \varepsilon_r\right)] \cos \omega t \\
&\quad + [\sin\left(\int_0^x k dx + \varepsilon_i\right) - R \sin\left(\int_0^x k dx + \varepsilon_r\right)] \sin \omega t \} \quad (8-37)
\end{aligned}$$

式中 a_I 和 a_R 分別為入、反射波振幅， $R = a_R / a_I$ 為反射係數， ε_i 和 ε_r 則為入、反射波之位相差。利用三角函數之和差化積，可得在 x 位置的水位振幅為

$$\begin{aligned}
|\eta| &= a_I [1 + R^2 + 2R \cos(2 \int_0^x k dx + \varepsilon_i + \varepsilon_r)]^{1/2} \\
&= a_0 k_s [1 + R^2 + 2R \cos(2 \int_0^x k dx + \varepsilon_i + \varepsilon_r)]^{1/2} \dots\dots\dots (8-38)
\end{aligned}$$

式中 a_0 為外海入射波之振幅， k_s 為線性波之淺化係數。

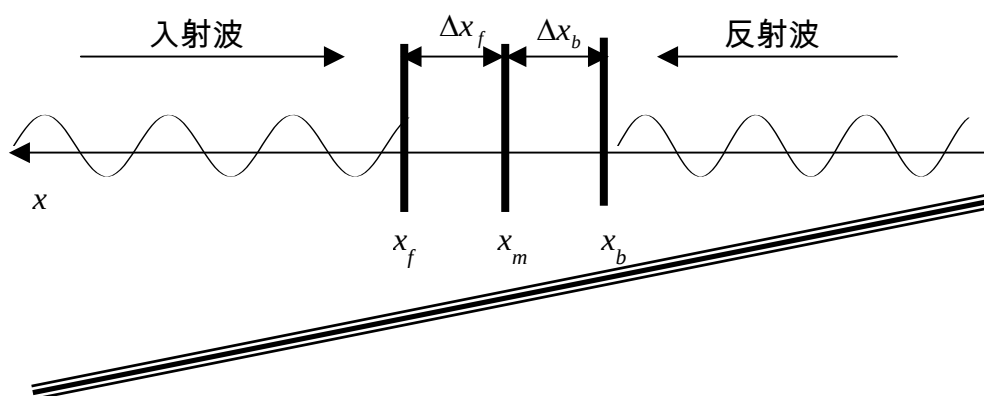


圖 8-1 入射波與反射波座標示意圖

由圖 8-1， x_f 處之空間位相函數為

$$\begin{aligned}
\int_0^{x_f} k dx &= \int_0^{x_m} k dx + \int_{x_m}^{x_m + \Delta x_f} k dx = X_m + \int_{x_m}^{x_m + \Delta x_f} \left(k_m + \frac{dk}{dx}\right) dx \\
&= X_m + k_m \Delta x_f + \frac{dk}{dx} \bigg|_{x=x_m} \frac{\Delta x_f^2}{2} \dots\dots\dots (8-39)
\end{aligned}$$

式中 k_m 為 x_m 處的週波數， dk/dx 為週波數隨距離的變化，其

變化值可由微小振幅波的延散關係式 (Dispersion Relation) 求得，其關係式如下所示：

$$\frac{dk}{dx} = \frac{dk}{dh} \frac{dh}{dx} = \frac{k^2 \tan \beta}{(kh + 1/2 \sinh 2kh)} \dots\dots\dots (8-40)$$

式中 $\tan \beta$ 為底床坡度，如水平底床則 $\tan \beta = 0$ 。根據式 (8-38) 至式 (8-40)， x_b 、 x_m 及 x_f 三點之水位振幅分別為

$$|\eta|_b = a_0 k_{sb} [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 - \alpha_b)]^{1/2} \dots\dots\dots (8-41)$$

$$|\eta|_m = a_0 k_{sm} [1 + R^2 + 2R \cos \alpha_1]^{1/2} \dots\dots\dots (8-42)$$

$$|\eta|_f = a_0 k_{sf} [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 + \alpha_f)]^{1/2} \dots\dots\dots (8-43)$$

其中

$$\alpha_1 = 2X_m + \varepsilon + \varepsilon_r \dots\dots\dots (8-44)$$

$$\alpha_b = 2k_m \Delta x_b + \frac{2k_m^2 \Delta x_b^2 \tan \beta}{2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m} \dots\dots\dots (8-45)$$

$$\alpha_f = 2k_m \Delta x_f - \frac{2k_m^2 \Delta x_f^2 \tan \beta}{2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m} \dots\dots\dots (8-46)$$

由式 (8-5) 至式 (8-7)，則可得以下之關係：

$$B = \left(\frac{|\eta_b|}{k_{sb}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 - \alpha_b)] \dots\dots\dots (8-47)$$

$$M = \left(\frac{|\eta_m|}{k_{sm}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos \alpha_1] \dots\dots\dots (8-48)$$

$$F = \left(\frac{|\eta_f|}{k_{sf}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 + \alpha_f)] \dots\dots\dots (8-49)$$

利用式 (8-47) 至式 (8-49) 可解得位相 α_1 及波浪反射係數 R 分別表示如下：

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left[\frac{F - B + (B - M) \cos \alpha_f - (F - M) \cos \alpha_b}{(B - M) \sin \alpha_f + (F - M) \sin \alpha_b} \right] \dots\dots (8-50)$$

$$R = \frac{B - F}{2a_0^2 [\cos(\alpha_1 - \alpha_b) - \cos(\alpha_1 + \alpha_f)]} \dots\dots\dots (8-51)$$

由已知之反射係數，代入式 (8-41) 至式 (8-43) 可求出各點之入射波水位振幅，至於各點之反射波水位振幅可由 $a_R = a_I \cdot R$ 求得。

至於不規則波之反射係數，Goda 和 Suzuki (1976) 認為可由入射波與反射波之總能量求得，即

$$R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \dots\dots\dots (8-52)$$

其中 E_I 為入射波總能量， E_R 為反射波總能量。由於本研究視不規則波之波譜，是由不同成份之規則波疊加而成，故入射波與反射

波之總能量為

$$E_I = \sum_i \left(\frac{1}{2} a_I^2 \right)_i \dots\dots\dots (8-53)$$

$$E_R = \sum_i \left(\frac{1}{2} a_R^2 \right)_i \dots\dots\dots (8-54)$$

由以上的分析可知，由波譜切割而成之各個成份波，先利用 EEMSE 模式，計算出各成份波之水位振幅，再以 Chang (2002) 之方法，分別求出各成份波之入射波與反射波振幅，代入式 (8-52) 至式 (8-54) 即可求得不規則波之反射係數。

8.2.2 Miles 理論之不規則波反射係數

Miles (1981) 理論雖然可適用於各種不同的底床型式，但其反射係數僅適合單一成份之規則波，對於 Miles (1981) 理論之不規則波反射係數，目前並沒有相關文獻做探討，本研究以 Goda 和 Suzuki (1976) 之能量觀點，計算不規則波 Miles (1981) 理論之反射係數為：

$$R = \sqrt{\frac{\sum_i S(f_i) df \cdot R_i^2}{\sum_i S(f_i) df}} \dots\dots\dots (8-55)$$

式中 f_i 為不規則波各成份波之頻率， $S(f_i)$ 為各成份波之波譜能量密度函數， R_i 為頻率 f_i 的成份波，應用 Miles (1981) 理論所求得之反射係數。式 (8-55) 中 $S(f_i) df$ 代表各成份波之入射波能量，而 $S(f_i) df \cdot R_i^2$ 則為各成份波之反射波能量，故式 (8-55) 即為反射波總能量與入射波總能量之比，此與 Goda 和 Suzuki (1976) 之能量方法，具有相同之物理意義。

8.3 波譜的選擇

一般而言，為了達到保護海岸的目的，人工潛堤均設置於淺水區域或中間性水深，就波譜而言，TMA 波譜較能適用於淺水區域，而 JONSWAP 波譜則是有限吹送距離下，常被使用的標準波譜，兩者的差別在於 TMA 波譜比 JONSWAP 波譜多了一個水深函數，Bouws 等人 (1987) 認為 JONSWAP 波譜亦可以適用於有限水深，故本研究以 Goda (1999) 提議之 JONSWAP 波譜，做為本研究計算之波譜，其型式如下：

$$S(f) = \sigma_1 H_{1/3}^2 T_p^4 f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma_0^2]} \dots\dots(8-56)$$

$$\sigma_1 = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (8-57)$$

$$T_p = \frac{T_{1/3}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}} \dots\dots\dots(8-58)$$

式中 $\gamma = 3.3$ 為能量集中度參數 (peak enhancement factor), T_p 為尖峰頻率 f_p 之倒數, $T_{1/3}$ 為示性週期, 當 $f \leq f_p$ 時, $\sigma_0 = 0.07$, 當 $f > f_p$ 時, $\sigma_0 = 0.09$ 。

利用本研究建議之混合分割方法，分割 JONSWAP 波譜之結果示於圖 8-2。由圖中顯示，尖峰頻率附近的能量變化較為迅速，而在高頻處的能量變化則較為緩慢。波譜混合分割的方法，主要利用密次方指數，來離散波浪頻率，在改善等頻率分割時，各成分波的能量差異太大，及等能量分割時，高頻部份其中心代表頻率所代表的範圍太大的缺點。由圖 8-2 可以看出，在高頻部份分割的間距，較尖峰頻率附近為寬，且在尖峰頻率附近之分割間距又不致於太窄，顯示混合分割的方法，能夠改善等能量分割及等頻率分割方法的缺點。

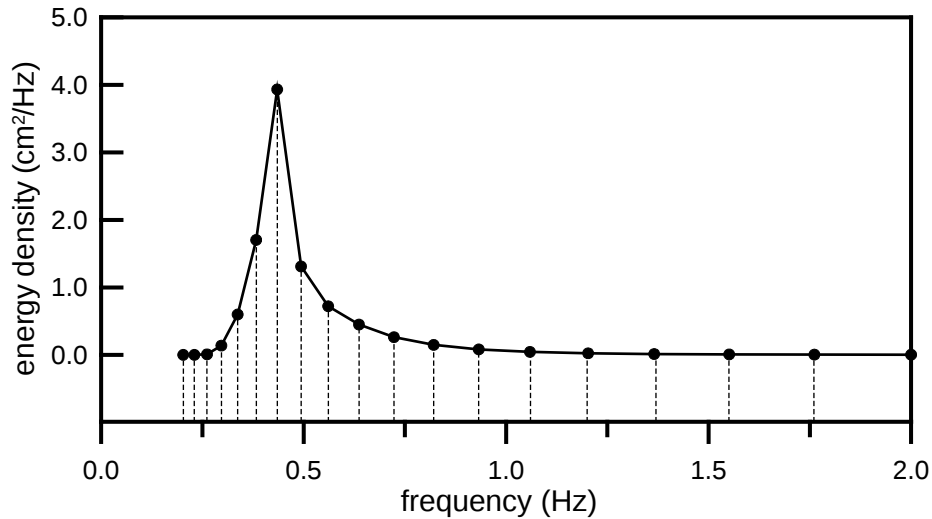


圖 8-2 混合波譜分割示意圖

為了驗證混合分割方法能夠掌握波譜的特性，本研究以週期 $T_{1/3} = 1.67921$ 秒，示性波高 $H_{1/3} = 0.01$ m 之條件，利用式 (8-56) 得到 JONSWAP 波譜，選擇不同的成份波個數，再以 8.1.3 節波譜分割與合成的方法，得到合成波之示性波高及週期，表 8-1 為不同個數成份波所得之誤差情形，由表中可以看出，各種成份波個數，其合成波之週期，誤差均在 1% 以下，而合成波波高的誤差，則隨分割成份波個數的增加而減少，基於計算時間的考量，本研究以 50 個成份波，做為計算不規則波反射係數的依據。

表 8-1 不同個數成份波之合成波誤差比較表

成份波 個數	合成波 $\bar{T}$ (sec)	合成波 $T_{1/3}$ (sec)	誤差	合成波波高 (m)	誤差
20	1.49718	1.66353	0.93%	0.01054	5.40%
30	1.52086	1.68984	0.63%	0.01017	1.70%
40	1.51975	1.68861	0.56%	0.01017	1.70%
50	1.51970	1.68856	0.56%	0.01010	1.00%
60	1.51999	1.68888	0.58%	0.01007	0.70%
70	1.52035	1.68928	0.60%	0.01005	0.50%
80	1.52047	1.68941	0.61%	0.01003	0.30%
90	1.52070	1.68967	0.62%	0.01001	0.10%
100	1.52076	1.68973	0.63%	0.01000	0.00%

8.4 不規則波布拉格共振之研究

過去有關布拉格反射係數之試驗，不管正弦沙漣底床或人工潛堤，均僅限於規則波之研究，然而實際海域的波浪紛紜不一，並非單一的規則波浪所能模擬，由單一規則波浪作用於潛堤，所得之反射係數，應與不規則作用所得的結果有所不同，因此瞭解不規則波之布拉格共振情形，應是值得研究的課題。

8.4.1 正弦沙漣底床反射係數之研究

本研究依據 Davies 和 Heathershaw (1984) 所做之試驗，來瞭解不規則波作用於正形沙漣底床，布拉格反射之變化情形，其試驗條件及佈置如表 8-2 及如圖 8-3 所示，試驗結果及利用 miles 理論與 EEME

計算結果如圖 8-4 至圖 8-6 所示。由前人之研究得知，規則波入射沙漣底床時，當入射波浪之波長 (L) 約為沙漣底床波長 (ℓ) 的兩倍時，此時產生布拉格共振，得到最大的反射係數，故波浪入射沙漣底床時，其反射係數應與兩倍沙漣底床波長與波浪波長之比值 ($2\ell/L$) 有關，本研究比照規則波理論，針對 Davies 和 Heathershaw (1984) 之試驗，求得 EEMSE 模式不規則波之反射係數，其結果示於圖 8-7 至圖 8-9，圖中橫軸之 $L_{1/3}$ 為不規則波示性週期 $T_{1/3}$ 所對應之波長。

Suh 等 (1997) 及 Lee 等 (2003) 雖曾利用不規則波緩坡方程，對 Davies 和 Heathershaw (1984) 試驗之正弦沙漣底床，進行布拉格共振之數值計算，但這些學者僅對布拉格共振頻率 $2\ell/L_{1/3}=1$ 時，穿透波頻譜衰減與入射波頻譜進行比較，並沒對布拉格反射係數，做整體之描述，故由於並無相關試驗數據及數值結果可做驗證，本研究僅將計算的結果，與 Miles (1981) 理論及傳統緩坡方程所求得的不規則波反射係數進行比較。

由圖 8-7 至圖 8-9 之結果可以發現，如同規則波之布拉格反射現象，不規則波反射係數在頻率 $2\ell/L_{1/3}=1$ 附近亦發生主頻共振現象，而有尖峰值存在。根據圖 8-4 至圖 8-9 比較結果顯示，不規則波布拉格共振之尖峰反射係數比規則波來得小，但不規則波共振區的帶寬則較規則波為寬。造成此結果的原因可由能量觀點進行闡述，在共振條件附近，其所對應頻率的入射成份波會產生布拉格共振，單一規則波的能量均集中於此共振頻率，因此入射波能量會因布拉格共振的影響而產生相當大的反射作用，而不規則波為不同頻率之成份波線性疊加而成，其總能量為各種不同頻率的成份波加總而成，集中於共振頻率附近之能量僅佔總能量之部份，當示性週期 $T_{1/3}$ 所對應之波長符合共振條件時，此時僅有約等於此共振波長之成份波才會發生共振效應，但由於造成共振之成份波能量不如規則波來得集中，因此反應出的尖峰反射係數便較規則波小，而其他不符合共振條件之成份波，沙漣底床雖仍會對其造成反射作用，但其反射效果較差，對整體反射係數的提昇作用不大。同理，當計算的示性週期所對應之波長並非造成共振之

波長，此時主頻能量較不會受到共振之影響，但其他成份波仍含有可造成布拉格共振條件之波長，其對整體反射係數仍有影響，尤其示性週期愈趨近共振情況，對整體反射係數更有相當程度的提昇，因此主共振區之帶寬才會產生變寬的現象。

表 8-2 波浪通過正弦沙漣底床試驗條件

(Davies 和 Heathershaw , 1984)

試驗配置	b (cm)	ℓ (K) (cm)	N	h (cm)
D1	5.0	100 (0.0628 cm^{-1})	2	15.6
D2	5.0	100 (0.0628 cm^{-1})	4	15.6
D3	5.0	100 (0.0628 cm^{-1})	10	31.3

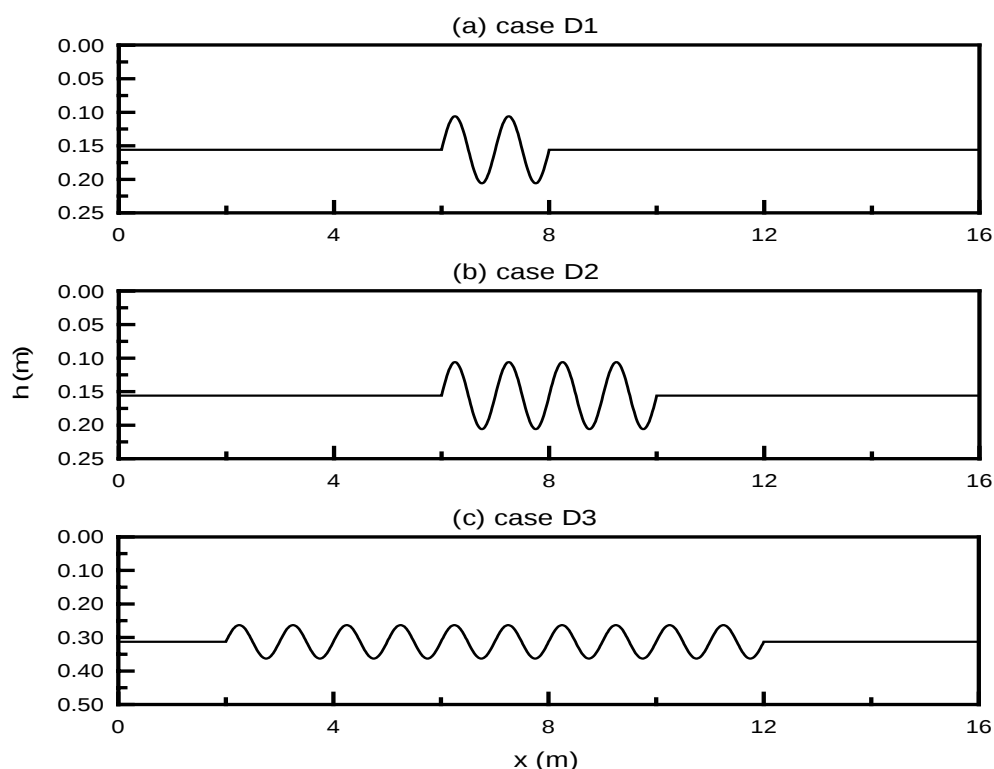


圖 8-3 正弦沙漣底床地形示意圖

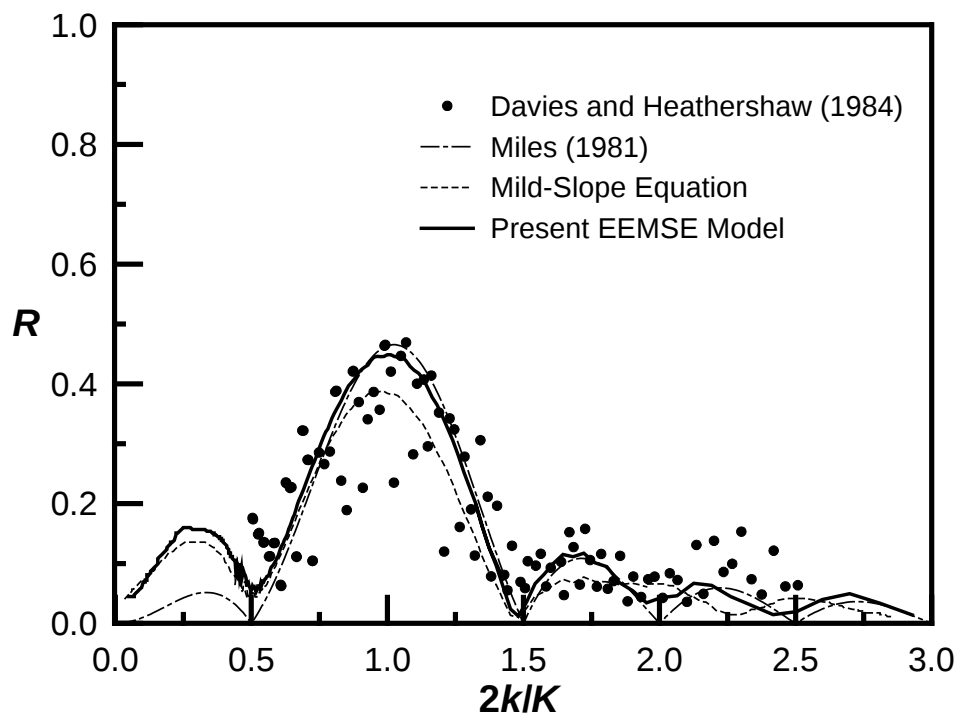


圖 8-4 波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D1)

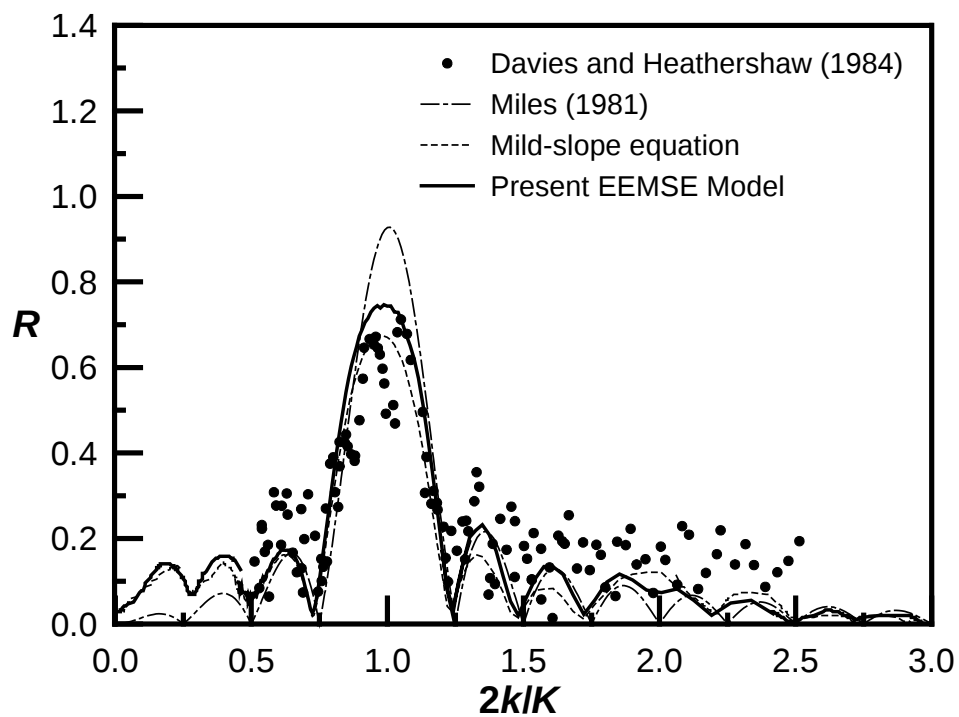


圖 8-5 波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D2)

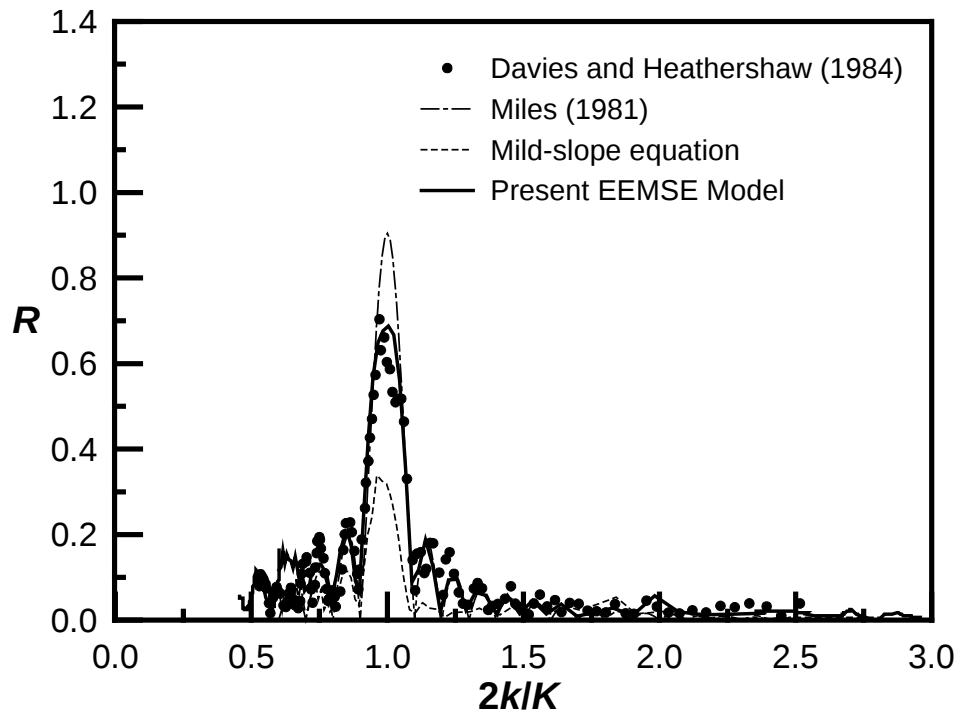


圖 8-6 波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D3)

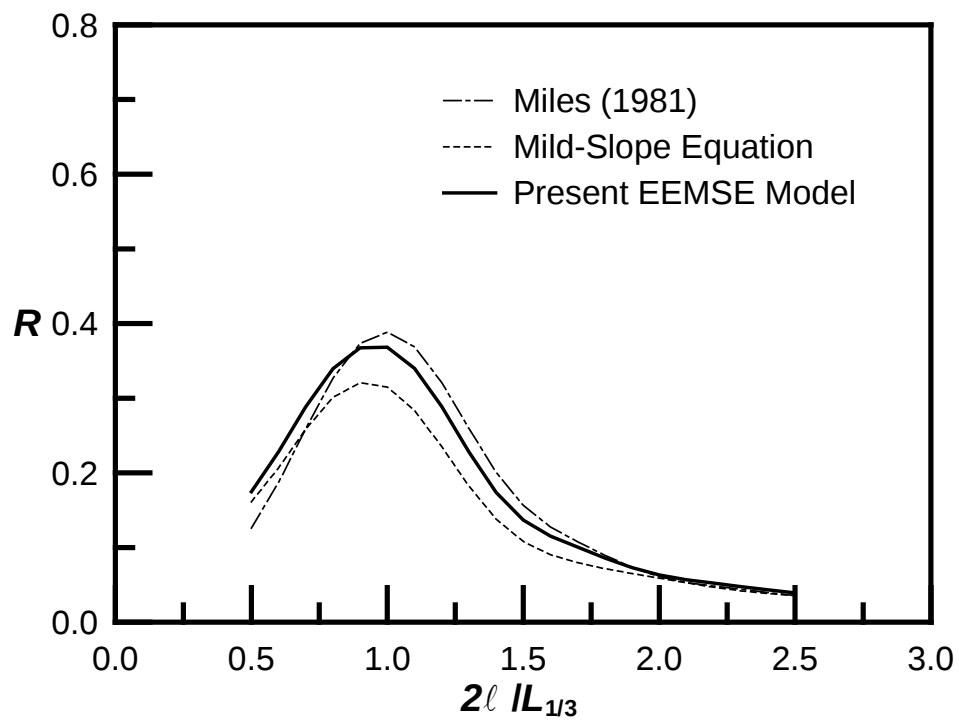


圖 8-7 不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D1)

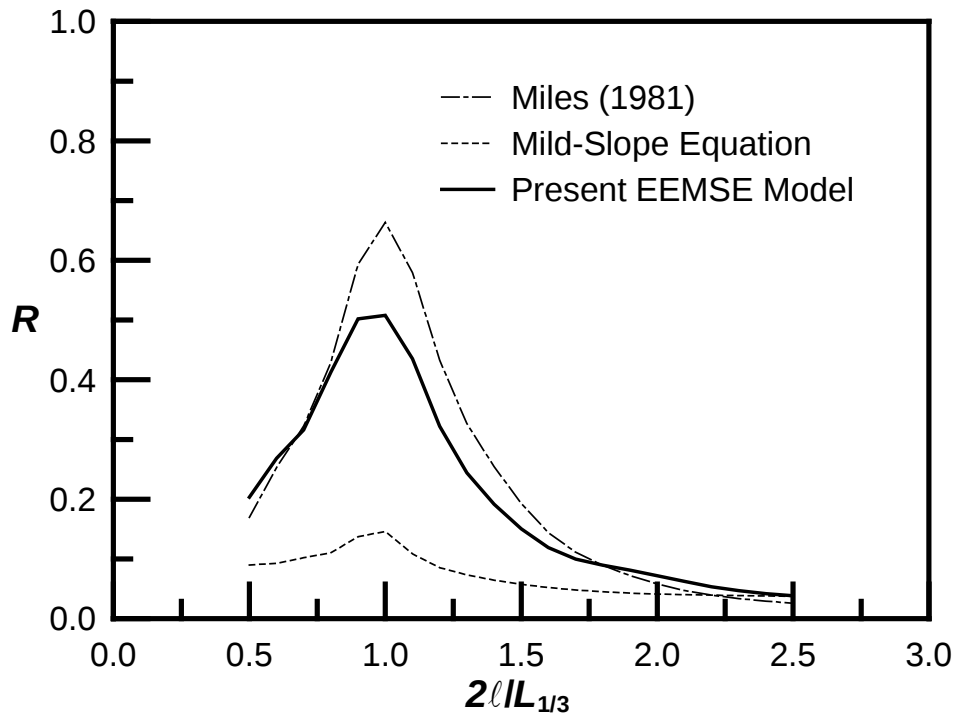


圖 8-8 不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D2)

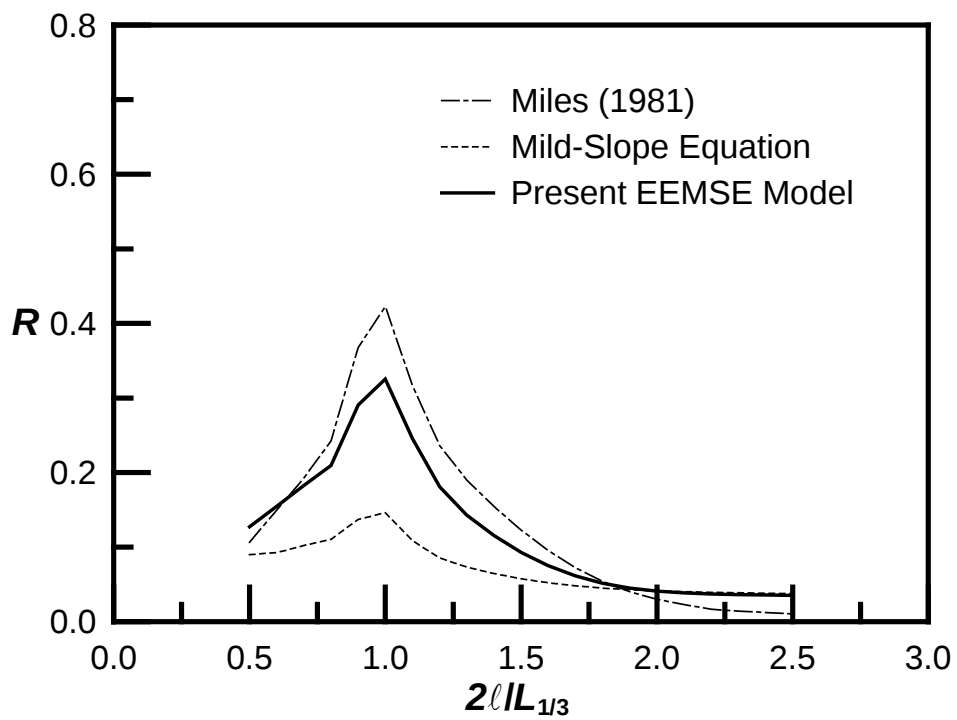


圖 8-9 不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D3)

比較圖 8-7 至圖 8-9 中，本研究 EEMSE 模式、傳統緩坡方程及 Miles (1981) 理論的結果可以發現，在頻率 $2\ell/L_{1/3}=1$ 附近，EEMSE 所得的反射係數，較 Miles (1981) 理論所得的反射係數小，而比傳統緩坡方程所得的反射係數大，此結果與規則波所得的結果相似，故造成這種現象的理由，應與規則波相同，在此不再詳述。

另外從圖 8-7 至圖 8-9 中亦可看出，在主頻共振區外，較大值之 $2\ell/L_{1/3}$ 區域，不規則波之反射係數，呈現較平均的狀態，不像規則波會有極小的反射係數出現，且高諧波之布拉格共振現象並不存在。就波譜的能量觀點而言，這種現象仍屬合理，雖然示性週期遠離主頻共振區，但在整個頻譜中，仍包含引起布拉格共振現象之成份波存在，故對反射係數仍有所助益，以致於造成在主頻共振區外，仍有相當程度的反射作用。

由以上的結果可以得知，當正弦沙漣底床實際應用於海岸防禦工程時，其防禦效果應與規則波的效果有所不同，實際應用時，不規則波雖仍會發生布拉格反射的現象，但主頻共振和高諧波共振的反射係數，不如規則波情況時大，但其反射係數帶寬則較規則波來的大，且在較大的 $2\ell/L_{1/3}$ 時，反射係數亦有所提昇；由此可見，若以示性波浪來設計人工沙漣時，主頻共振區反射係數雖不能如規則波情況來得理想，但仍有不錯的防護作用，且由於主頻共振區外之反射係數提高，增加可防禦的波浪條件，對於海岸保護應仍有所助益。

8.4.2 系列潛堤反射係數之研究

Kirby 和 Anton (1990) 以半餘弦人工潛堤地形，研究規則波之布拉格反射效果，本研究以其試驗地形，做為不規則波通過等間距人工系列潛堤，數值計算的依據，藉以瞭解布拉格反射的變化情形，Kirby 和 Anton (1990) 之試驗條件與本研究數值計算之地形示於表 8-3 及圖 8-10。由於缺乏不規則波之試驗數據，及數值計算結果的相關文獻可作參考驗證，本研究僅將 EEMSE 數值計算的結果，與 Miles (1981) 理

論及傳統緩坡方程所求得的不規則波反射係數進行比較。

圖 8-11 及圖 8-12 為不規則波通過半餘弦人工潛堤，反射係數與 $2S/L_{1/3}$ 之關係圖，圖中顯示，人工潛堤在 $2S/L_{1/3} = 2$ 附近，有很明顯高諧波布拉格共振現象發生，此結果與 Kirby 和 Anton (1990) 所作之規則波試驗及數值計算結果相當一致，且從圖中可以發現，隨著潛堤間距的增加，主頻共振之尖峰反射係數有變小的趨勢，而高諧波共振之反射係數則隨之變大，此現象又與 Kirby 和 Anton (1990) 之研究吻合，然而本研究應用不規則波，所得的尖峰反射係數，較 Kirby 和 Anton (1990) 所用之規則波來得小，而共振區之帶寬，則比 Kirby 和 Anton (1990) 的帶寬為大，此現象如同正弦沙灘底床，其原因應與前述相同，概因不規則波之能量分散所造成的結果。

表 8-3 半餘弦人工潛堤底床試驗條件 (Kirby 和 Anton, 1990)

試驗配置	D (m)	B (m)	S (m)	N	h_0 (cm)	D/h_0
K1	0.05	0.5	0.8	4	0.15	0.33
K2	0.05	0.5	1.2	4	0.15	0.33

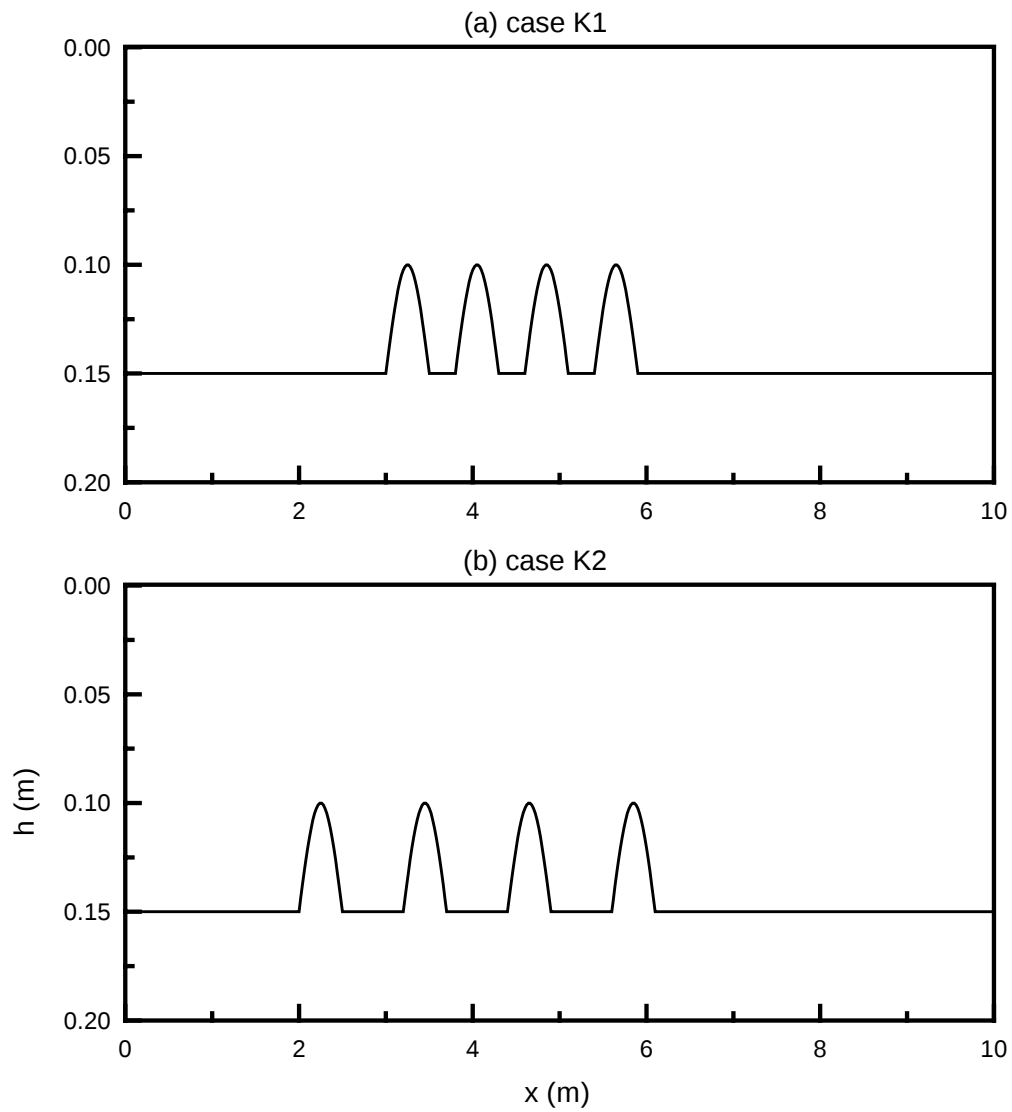


圖 8-10 半餘弦人工潛堤底床地形示意圖

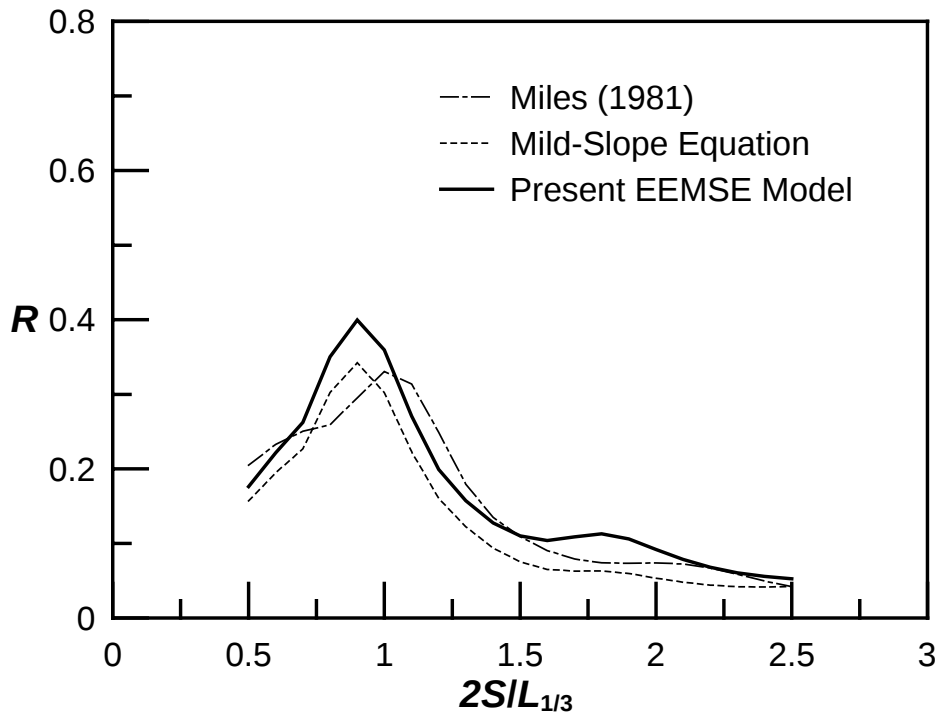


圖 8-11 不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖 (配置 K1)

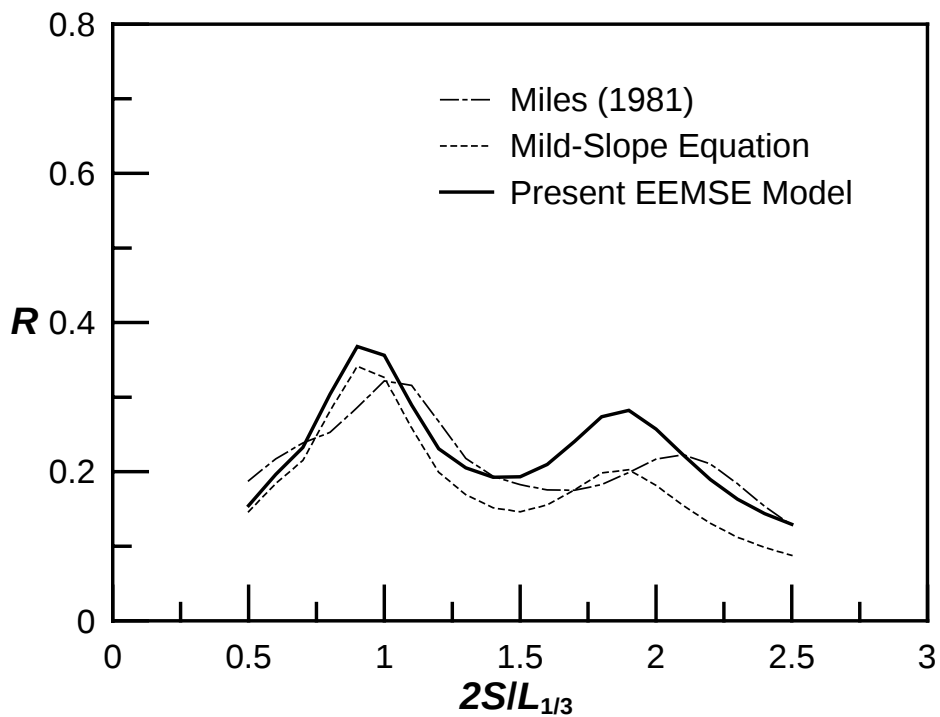


圖 8-12 不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖 (配置 K2)

雖然 Miles (1981) 理論能夠很容易的求得反射係數，在工程應用上較為方便，且可當作一般研究的佐證，但由於其方法視週波數為定值，故無法完全滿足某些物理現象。Kirby 和 Anton (1990) 的研究指出，當規則波入射人工潛堤時，主頻共振與高諧波共振應發生於 $2S/L=1$ 與 $2S/L=2$ 附近，尖峰反射係數會有偏移 (shift) 的現象，由圖 8-10 及圖 8-12 可以發現，不規則波入射人工潛堤時，EEMSE 模式所得的結果亦有相同的情況，但 Miles (1981) 理論所得的主頻尖峰反射係數卻仍發生於 $2S/L=1$ 處。

比較 Kirby 和 Anton (1990) 與 Davies 和 Heathershaw (1984) 的試驗條件，除了正弦沙漣底床之波長與半餘弦人工潛堤之間距較為不同外，其他因素則為相近或相同，故比較圖 8-7、圖 8-10 及圖 8-11 的結果，人工潛堤在主頻共振之尖峰反射係數雖減少的現象，但會有高諧波共振產生，且共振帶寬較正弦沙漣底床增加，對於來擊的波浪，不管其示性週期為何，均有某種程度的反射作用，若將人工潛堤應用於海岸保護工程時，應與正弦沙漣底床同樣，具備海岸保護的功用。

第九章 結論與建議

本研究為四年期之第一年工作，主要探討海岸保護工法之發展演進、海岸生態工法之發展概況、國內港灣海岸生態環境、國內生態型海岸保護工法之發展方向與型態，並探討兼具防災、生態與環境保護之系列潛堤保護工，其波場以及流場等水理機制。茲將本研究所獲致結論與建議歸納如下。

6.1 結論

1. 國內未來發展生態型海岸保護工法，初期以開發海岸保護結構物附加生態機能較為可行，在改善工法上可考慮基本斷面形狀改良、原有斷面附加生態機能、改良原有斷面部材構造等三種基本對策。
2. 台灣位處熱帶西太平洋區，受黑潮及大陸沿岸冷流交會影響，兼具熱帶、亞熱帶及溫帶性質之海洋生物，其分布主要受沿岸地質、地形、溫度、光照及洋流之影響，目前已發表之海洋生物種類大約超過 2,300 種之餘累、370 種之珊瑚、300 種之大型甲殼累、150 種之棘皮動物及 600 種以上之海藻。
3. 本研究應用混合能譜分割法，進行不規則波的模式計算，兼具等頻率分割與等能量分割的優點。對於波浪能量消散方面，同時考慮非線性淺化效應、碎波能量消散效應及非線性三波交互作用效應，對於計算不規則波浪，通過各種系列潛堤的反射係數，具高度的可靠性。
4. 利用 Goda 和 Suzuki (1976) 的能量方法，求出的不規則波布拉格反射係數，其反射係數的分佈型態，與規則波之布拉格反射係數相似，但由於不規則波譜是由各種不同頻率之成份波組成，各個成份波之能量不如規則波來得集中，造成尖峰反射係數較規則波小，而共振區之帶寬變寬的現象。
5. 由布拉格反射係數的分佈情形來看，當沙漣底床或人工潛堤應用於實際海域時，對於紊亂的不規則波浪，均具有一定的反射效果，雖

然其尖峰反射係數不如單一規則波的反射係數，但其共振帶寬明顯加大，即對任何來襲的波浪，均有一定的削波作用，能夠達到保護海岸的目的。

6. 規則波浪通過系列潛堤時，由於矩形潛堤突起於底床，產生異於主頻波之高階調和波，主頻能量因共振與非線性的交互作用，轉換到倍頻及三倍頻。主頻能量減小，表示系列潛堤具有削減波能的效果。
7. 規則波浪通過系列潛堤時，於潛堤四周因不同波浪相位而產生不同的流場及渦流。當布拉格共振條件發生時，在堤體上，當波峰到達時其流場垂直速度達到最大，相對波谷到達潛堤堤間時，於堤間處水平流度達最大。
8. 鹽水於系列潛堤前擴散隨著時間增加而增加，水平方向由於波浪作用及鹽水擴散，以愈接近施放點濃度愈大。垂直水深方向由於鹽水比重較水大，以愈接近底床的濃度較高。施放鹽水濃度愈高，由於本身比重及黏滯度較大，擴散速度較慢。

6.2 建議

1. 為了驗證本研究採用的 EEMSE 模式的可靠性，本年度在潛堤的型式上，選擇文獻中對規則波已進行過試驗的正弦沙漣底床與半餘弦人工潛堤，作為研究的對象。這兩種型式的潛堤，並不符合實際應用，建議明年可選擇較容易應用的潛堤型式，如矩形或梯形潛堤，進行相關的研究，如此方能應用於實際的海域。
2. 由於目前的文獻中，對於不規則波浪方面，並沒有布拉格共振的相關試驗，由 EEMSE 模式所得的數值結果，僅能與 Miles (1981) 的理論，或規則波所作的試驗結果加以比較，對於不規則波的系列潛堤布拉格反射係數分佈情形，仍有待水工試驗加以驗證。故若經費許可，建議於爾後的研究中，加入水工模型試驗來驗證數值模式計算的結果，如此才能證實本研究的準確性。
3. 建議加強海岸構成要素及生態調查，建立海岸生態環境資料庫，以作為生態型海岸保護工法規劃設計之依據，並於實施生態型海岸保

護結構物計畫時，建立開發前、施工中及施工後之生態調查機制，以確保實施成效及促進生態工程技術。

4. 為因應整體環境之變化，未來應積極謀求改善混凝土型塊常為人垢病破壞海岸景觀之缺點，並進一步兼具生態機能，開發生態型消波塊、方塊，改良海岸結構物部材構造。
5. 應開發符合我國情之本土化生態型海岸保護結構物工程技術，以及利於海岸生態效果之工程材料。

參考文獻

1. Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M., “Energy loss and set-up due to breaking in random Waves,” *Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Hamburg, Vol. 1, pp. 569-578 (1978).
2. Bouws, E., Günther, H., Rosenthal, W., Vincent, C. L., “Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water. Part 2: Statistical Relations between Shape and Growth Stage,” *Dt. Hydrogr. Z.* 40 (1987).
3. Bretschneider, C.L., “Significant waves and wave Spectrum,” *Ocean Industry*, pp. 40-46 (1968).
4. Chang, K.A. & Liu P. L-F, “Measurement of breaking waves using particle image velocimetry,” *Proceedings 25th International Conference of Coastal Engineering*, ASCE, pp. 527-536 (1996).
5. Chang, H.K., “A Three-point method for separating of incident and reflected waves over a sloping bed,” *China Ocean Engineering*, Vol. 16 pp. 499-511 (2002).
6. Davies, A.G. and Heathershaw, A.D., “Surface wave propagation over sinusoidally varying topography,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 144, pp. 419-443 (1984).
7. Eldeberky, Y., *Nonlinear Transformation of Wave Spectra in the Nearshore Zone*, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands (1996).
8. Eldeberky, Y. and Battjes, J.A., “Parameterization of triad interactions in wave energy models,” *Proceedings of Coastal Dynamics Conference '95*, Gdansk, Poland, pp. 140-148 (1995).
9. English S., Wilkinson C. and Baker V. (Eds), “Survey manual for tropical marine resources (2nd edition),” Published by Australian Institute of Marine Science, Townsville, Queensland, Australia, 390 (1997).
10. Fleming, G. A., “Guide on the use of groynes in coastal engineering,” CIRIA, Report 119 (1990).

11. Goda, Y., "A comparative review on the functional forms of directional wave spectrum," *Coastal Engineering Journal*, Vol. 41(1), pp. 1-20 (1999).
12. Goda, Y. and Nagai, K., "Report of the port and harbour," *Res. Inst.*, No. 61, pp.64 (1968).
13. Goda, Y. and Suzuki, Y., "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiment," *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Hawaii, pp. 628-650 (1976).
14. Harlow, F.H. and Welch, J.E., "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface," *Phy. Fluids*, Vol. 8, pp. 2182-2189 (1965).
15. Isobe, M., "A parabolic equation model for transformation of irregular waves due to refraction, diffraction and breaking," *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 30, pp. 33-47 (1987).
16. Kirby, J.T. and Anton, J.P., "Bragg reflection of waves by artificial bars," *Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, pp. 757-768 (1990).
17. Lee, E. Harris, "Submerged reef structures for habitat enhancement and shoreline erosion abatement," Coastal Engineering Technical Note, U.S. Army Corps of Engineers, (2001).
18. Lee, C., Kim, G., Suh, K.D., "Extended mild-slope equation for random waves," *Coastal Engineering*, Vol. 48, pp. 277-287 (2003).
19. Lewis, J. E. and J.N. Norris, "A history and annotated account of the benthic marine algae of Taiwan," *Smith.Contri. Mar. Sci.* Vol.29, pp.1-38 (1987).
20. Lin, S. M., Kraft, G.T. and Hommersand, H.M., "Characterization of *hemineura frondosa* and the *hemineureae* trib," nov. (Delesseriaceae, Rhodophyta) from southern Australia. *Phycologia*, Vol.40, No.2, pp. 135-146 (2001a).
21. Lin S.M., Fredericq, S. and Hommersand, H.M. "Systematics of the Delesseriaceae (Ceramiales, Rhodophyta) based on LSU and rbcL sequences, including the Phycodryoideae subfam," *Journal of Phycology*

- Vol. 37, pp. 881-899 (2001b).
22. Lin, S.M. "Some marine red algae (Rhodophyta) new to Taiwan, including *Schizoseris bombayensis* (Boergesen) comb," nov. Philip. Scientists, Vol. 39, pp. 36-47 (2002).
 23. Lin, S.M. "Three marine red algal genera newly reported for Taiwan: *Acrosorium*, *Hypoglossum* and *Taenioma* (Delesseriaceae, Rhodophyta)," *Platax* Vol. 1, pp. 13-20 (2004).
 24. Longuet-Higgins, M.S., "On the statistical distributions of the height of sea waves," *Jour. Marine Res.*, Vol. IX, No. C5, pp. 245-266 (1952).
 25. Madsen, P.A. and Sørensen, O.R., "Bound waves and triad interactions in shallow water," *Ocean Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 359-388 (1993).
 26. Mansard, E.P.D. and Funke, E.R., "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method", *Proceeding of the 17th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 154-172 (1980).
 27. McCowan, J., "On the highest wave of permanent type," *Philos. Mag. Edinburgh*, 38(5), pp. 351-358 (1894).
 28. Miles, J.W., "Oblique surface-wave diffraction by a cylindrical obstacle," *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Vol. 6, pp. 121-123 (1981).
 29. Orlanski, I. "A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows", *Journal of Computational Physics*, Vol. 21 (1976).
 30. Patankar, S. V. and Splading, D. B. *Heat and mass transfer in boundary layers*, 2d ed., Intertext, London (1970).
 31. Patankar, S. V., "A calculation procedure for two-dimensional elliptic situations," *Num. Heat Transfer*, Vol. 2, pp. 231-251 (1979).
 32. Patankar, S. V., *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere, Washington, D.C. (1980).
 33. Radder, A.C., "On the parabolic equation method for water wave Propagation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 95, No. 1, pp. 159-176 (1979).

34. Saito Y. and Atobe S. “Phytosociological study of intertidal marine algae. I. Usujiri Benten-Jima, Hokkaido,” , Bulletin of the Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Vol.21, pp.37-69 (1970).
35. Shuto, N., “Nonlinear long waves in a channel of variable section,” *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 17, pp. 1-12 (1974).
36. Suh, K.D., Lee, C. and Part, W.S., “Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography,” *Coastal Engineering*, Vol. 32, pp. 91-117 (1997).
37. Ting, F. C.K. and Kim, Y. K., “Vortex generation in water waves propagation over a submerged obstacle,” *Coastal Engineering*, Vol. 24, pp. 28-49 (1994).
38. 異形ブロックへの海藻・珊瑚の著生事例，株式会社テトラ(TETRA) 1。
39. 海・自然環境との調和を求めて，株式会社テトラ(TETRA) 2。
40. 三柱ブロックと自然共生～藻場造成の創造～，株式会社三柱。
41. 徳田廣、川嶋昭二、大野正夫、小河久朗，海藻の生態と藻礁，株式会社緑書房 (1991)。
42. 日本の海岸とみなと〔第2集〕，日本土木學會 (1994)。
43. これからの海洋環境づくり-海との共生をもとめて，日本海洋開発建設協會 (1995)。
44. ひと工夫した漁港構造物事例集，社團法人全國漁港協會 (1997)。
45. 自然調和型漁港づくり技術マニュアル-藻場機能の付加-，水産廳漁港部 (1999)。
46. 自然調和型漁港づくり技術マニュアル-水質浄化技術，社團法人水産土木建設技術センター(2000)。
47. 富來漁港-自然調和型漁港づくり推進事業の概要，水産土木建設技術センター-會報 No.60 (2001)。

48. 漁港構造物に藻場機能を付加するためのガイドブック作成業務委託報告書，財團法人漁港漁村建設技術研究所 (2001)。
49. 安藤亘，自然調和型漁港づくり事業の現状-石川縣富來漁港，水產土木建設技術センター會報 No.62，4 頁～7 頁 (2002a)。
50. 安藤亘，藻場造成型漁港構造物の設計ガイドラインの概要について，水產土木建設技術センター會報 No.63，8 頁～13 頁 (2002b)。
51. 藻場造成型漁港構造物調査の設計ガイドライン，社團法人全國漁港漁場協會 (2003)。
52. 水利局，台灣省海堤整建計劃書，(1973)。
53. 江永棉，台灣藻類研究現況，台灣生物資源調查及資訊管理研討會論文集，101 頁～118 頁 (1992)。
54. 邵廣昭，海洋生態學，明文書局(1998)。
55. 盧建林，「以 FLDV 量測波浪作用下潛堤附近之渦流特性」，國立成功大學水利暨海洋工程研究所碩士論文 (1999)。
56. 漢光文化事業股份有限公司，台灣海岸之美西部篇，(2000)。
57. 黃淑芳，台灣東北角海藻圖錄，國立台灣博物館，(2000)。
58. 柳芝蓮，台灣海藻彩色圖鑑，行政院農業委員會，(2000)。
59. 國立台北科技大學，集水區親水及生態工法之建立(1/4～4/4)，(2000～2003)。
60. 國立成功大學，海岸工法之新技術研發(1/4～4/4)，(2000～2003)。
61. 郭一羽，海岸工程學，文山書局(2001)。
62. 郭一羽，水域生態工程，中華大學水域生態環境研究中心(2001)。
63. 林鎮洋、邱逸文，生態工程與生態工法，九十年度創造台灣城鄉新風貌示範計畫生態工法講習會手冊，1-16 頁～1-45 頁 (2001)。
64. 許泰文，海岸保護改善策略，邁向 21 世紀海洋國家策略研討會論文集，1 頁～23 頁 (2001)。

65. 張憲國，近岸生態景觀創造策略，邁向 21 世紀海洋國家策略研討會論文集，pp.34～51 (2001)。
66. 國立成功大學水工試驗所，海灘侵蝕防治新科技研發(3/4)，(2002)。
67. 薛曙生，海岸工法之規劃與管理，海岸新工法與海洋再生研討會論文集，116 頁～129 頁，(2002)。
68. 郭清江，生態工法之發展趨勢與推動機制，2002 生態工法研討會論文集 (2002)。
69. 中華大學水域生態環境研究中心，海岸生態復育之結構物的研發及應用研究－以新竹港南海岸為例，(2002)。
70. 郭一羽、張憲國、劉勁成，海域生態工法，海岸新工法與海洋再生研討會論文集，34 頁～54 頁 (2002)。
71. 林鎮洋、邱逸文，生態工法概論，明文書局 (2003)。
72. 謝瑞麟、林鎮洋，河溪生態工法案例圖輯，明文書局 (2003)。
73. 交通部運輸研究所，2002 年港灣海氣地象觀測資料年報(波浪部份)，(2003)。
74. 中華大學水域生態環境研究中心，委託辦理生態工法應用於漁港港灣工程類別、分析與建議工作，(2003)。
75. 中華大學水域生態環境研究中心，漁港工程運用生態工法講習訓練座談會議講習資料，(2003)。
76. 行政院公共工程委員會，2003 年生態工法人才培訓講習會論文集，(2003)。
77. 林鎮洋，生態工法技術參考手冊，明文書局 (2004)。
78. 郭清江，生態工法與永續發展，2004 年生態工法國際研討會論文集，(2004)。
79. 中華民國環境綠化協會，海岸生態資料調查及資料庫建置(1/2)，(2004)。

80. 郭一羽，漁港構造物採用生態工法之開發，(2004)。
81. 蔡清標，人工生態潛堤之安定性及波場變化實驗(1/2)，(2004)。
82. 郭一羽(2004)，生態型人工養灘之研究，(2004)。
83. 郭一羽、張憲國、張睿昇、簡文達，海岸淺灘之生態工法研究，(2004)。
84. 行政院公共工程委員會(2004)，2004 生態工法案例編選集，(2004)。
85. 郭金棟，海岸保護，科技圖書股份有限公司，(2004)。
86. 中華大學水域生態環境研究中心，生態工法於漁港工程之發展研討會資料集，(2004)。
87. 郭金棟，「海岸整治與生態工法之應用」，2004 生態工法案例編選集，316 頁～338 頁 (2004)。
88. 林綉美、張瑞欣、林東廷，「西南海岸結構物之海藻著生調查」，第 26 屆海洋工程研討會論文集，559 頁～566 頁 (2004)。
89. 郭一羽、李麗雪，海岸景觀與生態設計，田園城市文化事業有限公司，(2005)。
90. 中華大學水域生態環境研究中心，漁港工程生態工法規範之研究探討工作，(2005)。
91. 中華大學水域生態環境研究中心，漁港工程生態工法操作參考手冊，(2005)。
92. 中華大學水域生態環境研究中心，漁港工程生態工法施工規範解說座談會資料集，(2005)。
93. 中國工程師學會，第 25 屆中日工程技術研討會港埠工程論文集，(2005)。
94. 中華顧問工程司，新竹港南海岸生態工法之研擬(1)－人工養灘對底棲生物之影響工作會議報告書，(2005)。
95. 行政院公共工程委員會，2005 全國海岸生態工法理念與實務研討會大會手冊，(2005)。

96. 行政院公共工程委員會，2005 海岸生態工法博覽會研討會論文集，(2005)。