

98-70-7424
MOTC-IOT-97- H2DB003

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (4/4)



交通部運輸研究所

中華民國 98 年 5 月

98-70-7424
MOTC-IOT-97- H2DB003

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (4/4)

著 者：蔡立宏、徐如娟、許泰文、張人懿、李裕群

交通部運輸研究所

中華民國 98 年 5 月

國家圖書館出版品預行編目資料

系列潛堤應用於海岸保護之研究. (4/4) / 蔡立宏等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 98.05

面; 公分

參考書面:面

ISBN 978-986-01-8722-9(平裝)

1. 海岸工程 2. 防波堤

443.3

98009642

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (4/4)

著者: 蔡立宏、徐如娟、許泰文、張人懿、李裕群

出版機關: 交通部運輸研究所

地址: 10548 臺北市敦化北路 240 號

網址: www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電話: (04)26587176

出版年月: 中華民國 98 年 5 月

印刷者: 良機事務機器有限公司

版(刷)次冊數: 初版一刷 110 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價: 200 元

展售處:

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話: (02)23496880

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

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

GPN : 1009801342

ISBN : 978-986-01-8722-9 (平裝)

著作財產權人: 中華民國(代表機關: 交通部運輸研究所)

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

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：系列潛堤應用於海岸保護之研究 (4/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-01-8722-9（平裝）	政府出版品統一編號 1009801342	運輸研究所出版品編號 98-70-7424	計畫編號 97-H2DB003
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：蔡立宏 研究人員：徐如娟 聯絡電話：04-26587177 傳真號碼：04-26560661	合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會 計畫主持人：許泰文 研究人員：張人懿、李裕群 地址：台南市大學路1號 聯絡電話：06-2757575		研究期間 自 97 年 3 月 至 97 年 11 月
關鍵詞：系列潛堤工法、布拉格共振現象、緩坡方程式			
摘要： 本研究探討波浪通過各種型式之系列潛堤所衍生的布拉格共振效應。理論解析方面以 Hsu 等人 (2003) 所發展的演進型式緩坡方程式 (Evolution Equation for Mild-Slope Equation, EEMSE) 為基礎，並發展波浪數值模式，用以模擬波浪於二維平面上通過各種系列潛堤佈置所產生的布拉格現象，進而探討各種影響因子之特性。本研究同時根據數值計算結果，歸納布拉格現象可能之影響因子，並從中規劃各種模擬方案用以分析波浪通過系列潛堤時的共振效應特性。在實際工程考量下，提出系列潛堤工法可能的斷面設計以及使用材質與工程費用，再以整體成果為依據規劃出系列潛堤工法的設計流程圖，做為日後海岸保育防護工法之參考。本研究同時以台灣新竹港南海域為示範區，參考設計流程利用數值模式模擬現場海域的系列潛堤工法設計，探討其應用於實際海域的可行性。 本研究成果證實系列潛堤海岸保護工法應用至臺灣海岸，具有海岸保護之可行性效益，並對系列潛堤工法在平面布置，其入射波浪條件與潛堤布置條件，所形成的水理機制，做進一步的解析。依據本研究提出之設計步驟與施工經費計算方法，以及其他系列潛堤特性之研究成果，可作為本所、施政設計單位以及各機關擬進行軟式工法系列潛堤重要的參考。			
出版日期	頁數	定費	本 出 版 品 取 得 方 式
97 年 5 月	174	200 元	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費價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件：☐ 年 月 日解密，☐ 公布後解密，☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密，☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: On the application of a series of submerged breakwaters to coastal protection (4/4)			
ISBN (OR ISSN) ISBN 978-986-01-8722-9 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009801342	IOT SERIAL NUMBER 98-70-7424	PROJECT NUMBER 97-H2DB003
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Tsai Li-bung PROJECT STAFF: Hsu Ju-Chuan PHONE: (04) 26587177 FAX: (04) 26560661			PROJECT PERIOD FROM March 2008 TO November 2008
RESEARCH AGENCY: NCKU Hydraulics and Ocean Engineering R&D Foundation PRINCIPAL INVESTIGATOR: Hsu Tai-Wen PROJECT STAFF: Chang Jen-Yi, Yu-Cyun Li ADDRESS: No. 1, Ta-Hsueh Road, Tainan 701, Taiwan, R.O.C. PHONE: (06) 2757575~63249			
KEY WORDS: A Series of Submerged Breakwaters, Bragg Reflection, Mild Slope Equation			
ABSTRACT: In this project, the Bragg reflection for water waves propagating over a series of submerged breakwaters is investigated. A numerical model based on the Evolution Equation of the Mild-Slope Equation developed by Hsu et al. (2003) was used to simulate wave transformation. Numerical simulations were analyzed to find out the influence factors for waves passing over a series of submerged breakwaters. Design criteria will also be proposed based on the numerical simulations. A plenary protection countermeasure against beach erosion is designed using the criteria to produce Bragg scattering and protect beach erosion from attacking wave. This practical procedure testifies to the applicability of the current model. The results can provide the government institutes and consultants, including the Ministry of Transportation and Communications, harbor bureaus, the Water Resource Agency, consultant incorporations et al., with references for the design of a series of submerged breakwaters coastal structures to protect the coast.			
DATE OF PUBLICATION May 2009	NUMBER OF PAGES 174	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

目 錄.....	I
圖 目 錄.....	IV
表 目 錄.....	X
符 號 表.....	XI
第一章 緒 論	1-1
1.1 研究動機.....	1-1
1.2 文獻回顧.....	1-3
1.3 研究方法與預期成果.....	1-8
1.3.1 研究方法	1-8
1.3.2 預期成果	1-10
1.4 本研究組織.....	1-10
第二章 計畫前三年度之回顧	2-1
2.1 計畫第一年度 (94 年)之回顧.....	2-1
2.2 計畫第二年度 (95 年)之回顧.....	2-6
2.3 計畫第三年度 (96 年)之回顧.....	2-9
2.4 本年度 (97 年) 計畫之簡述.....	2-15
第三章 EEMSE 模式	3-1
3.1 理論基礎.....	3-1
3.2 數值方法	3-4
3.2.1 差分方程式	3-4
3.2.2 邊界條件	3-6
3.2.3 收斂條件	3-9
3.3 模式驗證.....	3-9

第四章 系列潛堤工法應用於現場海域之應用-以新竹港南海域為例	4-1
4.1 研究方法	4-1
4.1.1 布拉格共振影響因子與能量透過率	4-1
4.1.2 系列潛堤設計流程圖	4-3
4.2 新竹港南海域之現況	4-5
4.3 系列潛堤工法於新竹港南海域之設計流程步驟	4-8
4.3.1 斷面影響因子之決定	4-8
4.3.2 平面影響因子之決定	4-22
4.3.3 現場海域之波場模擬	4-36
第五章 系列潛堤工法安全性及成本評估之初步研究-以新竹港南海域為例	5-1
5.1 潛堤工程斷面之研擬	5-1
5.1.1 常用的潛堤分類	5-1
5.1.2 斷面型式	5-2
5.2 安全性估算與基本斷面設計	5-4
5.2.1 表面載重	5-4
5.2.2 基本斷面設計	5-6
5.3 潛堤材質的選擇與成本的初步估算	5-7
5.3.1 潛堤材質的選擇	5-7
5.3.2 潛堤成本的初步估算	5-8
5.4 系列潛堤工法之限制與優缺點	5-11
5.5 含工程施工之系列潛堤工法設計流程圖	5-13
第六章 結論與建議	6-1
6.1 結論	6-1
6.2 建議	6-3
參 考 文 獻	參-1

附錄一 期中報告意見回覆處理情形	附 1-1
附錄二 期末報告意見回覆處理情形	附 2-1
附錄三 期中報告簡報檔	附 3-1
附錄四 期末報告簡報檔	附 4-1

圖 目 錄

圖 1-1 波浪行經沙漣底床之反射波變化情形	1-5
圖 1-2 布拉格共振之時序列	1-5
圖 2-1 正弦沙漣底床地形示意圖	2-3
圖 2-2(A) 規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (CASE D3)	2-3
圖 2-2(B) 不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖(CASE D3)	2-4
圖 2-3 半餘弦人工潛堤底床地形示意圖	2-4
圖 2-4(A) 不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖(配置 K1)	2-5
圖 2-4(B) 不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖(配置 K2)	2-5
圖 2-5 試驗系列潛堤之佈置及參數示意圖	2-7
圖 2-6 試驗水槽斷面圖	2-7
圖 2-7 不同潛堤個數下 $S_1:S_2=1:1.25$ 時入射波與透射波譜之比較	2-8
圖 2-8 $N=4$ 時不同潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 之關係圖	2-8
圖 2-9(A) 波浪通過無限長系列潛堤之波高分佈圖(潛堤個數 $N=4$, 堤長與堤距比 $G/S=N=\infty$)	2-10
圖 2-9(B) 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖(潛堤個數 $N=4$, 堤長與堤距比 $G/S=7$)	2-11
圖 2-9(C) 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖(潛堤個數 $N=4$, 堤長與堤距比 $G/S=3$).....	2-11

圖 2-9(D) 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖(潛堤個數 $N=4$, 堤長與堤距比 $G/S=1$)	2-12
圖 2-10 多組系列潛堤佈置下比較能量透過率縱向擷取範圍示意圖	2-12
圖 2-11(A) 不同潛堤堤長能量透過率 E_s 與 $2S/L$ 關係圖	2-13
圖 2-11(B) 二維平面上共振現象與非共振現象情況下能量透過率(E_s) 與相對堤長(G/S)關係分佈圖	2-13
圖 2-12 佈置系列潛堤工法初步設計流程圖	2-14
圖 2-13 10 年迴歸期颱風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 有潛堤佈置	2-15
圖 3-1 數值模式格網示意圖	3-5
圖 3-2 港嘴海域水深及波場位相分佈圖 (颱風波浪條件)	3-11
圖 3-3 港嘴海域之波高分佈 [王, 2001 (颱風波浪條件)]	3-11
圖 3-4 港嘴海域之波高分佈 [本研究模式 (颱風波浪條件)]	3-11
圖 3-5(A) 縱岸方向斷面①上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)	3-12
圖 3-5(B) 縱岸方向斷面②上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)	3-12
圖 3-5(C) 縱岸方向斷面③上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)	3-12
圖 3-5(D) 沿岸方向斷面④上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)	3-13
圖 3-5(E) 沿岸方向斷面⑤上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)	3-13
圖 3-5(F) 沿岸方向斷面⑥上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)	3-13
圖 4-1 多組系列潛堤佈置之平面布拉格反射因子示意圖 (A) 平面 圖 ; (B) 剖面圖	4-2
圖 4-2 系列潛堤工法設計流程圖	4-4
圖 4-3 新竹港南海岸平面位置圖	4-6

圖 4-4 新竹港南附近海域地形侵淤變化圖 (87.09~94.04).....	4-7
圖 4-5 新竹港南附近海域地形圖 (87 年 9 月實測).....	4-9
圖 4-6 不同潛堤個數下能量透過率 E_S 與 週期 T 之關係圖 ...	4-11
圖 4-7 不同堤距 (S) 下能量透過率 E_S 與 週期 T 之關係圖 ..	4-12
圖 4-8 不同堤距 (S) 下能量透過率 E_S 與 週期 T 之關係圖 ..	4-12
圖 4-9 不同堤趾水深(H)下能量透過率 E_S 與週期 T 之關係圖.	4-14
圖 4-10 不同潛堤個數下能量透過率 E_S 與 週期 T 之關係圖 .	4-16
圖 4-11(A) $S=35$ 潛堤堤數 $N=2$ 佈置及波高變化圖 ($T=10.6\text{sec}$)	4-16
圖 4-11(B) $S=35$ 潛堤堤數 $N=4$ 佈置及波高變化圖 ($T=10.6\text{sec}$)	4-17
圖 4-11(C) $S=35$ 潛堤堤數 $N=6$ 佈置及波高變化圖 ($T=10.6\text{sec}$)	4-17
圖 4-11(D) $S=35$ 潛堤堤數 $N=8$ 佈置及波高變化圖 ($T=10.6\text{sec}$)	4-18
圖 4-12(A) 不同堤距 (S) 下能量透過率 E_S 與 週期 T 之關係圖	4-20
圖 4-12(B) 不同堤距 (S) 下能量透過率 E_S 與 週期 T 之關係圖	4-20
圖 4-12(C) 不同堤距 (S) 下能量透過率 E_S 與 週期 T 之關係圖	4-21
圖 4-13 不同潛堤個數下能量透過率 E_S 與 $2S/L$ 之關係圖.....	4-21
圖 4-14 波浪通過無限長系列潛堤之波高分佈圖.....	4-25
圖 4-15 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖($N=4$, $N_G=1$, $D/h=0.5$, $B/S=0.29$, $T=10.6\text{sec}$, $G/S=7$).....	4-25

圖 4-16 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖($N=4$, $N_G=1$, $D/h=0.5$, $B/S=0.29$, $T=10.6\text{sec}$, $G/S=5$).....	4-26
圖 4-17 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖($N=4$, $N_G=1$, $D/h=0.5$, $B/S=0.29$, $T=10.6\text{sec}$, $G/S=3$).....	4-26
圖 4-18 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖($N=4$, $N_G=1$, $D/h=0.5$, $B/S=0.29$, $T=10.6\text{sec}$, $G/S=1$).....	4-27
圖 4-19 不同潛堤堤長度下能量透過率 E_S 與週期 T 之關係圖	4-27
圖 4-20 共振與非共振情況下能量透過率 (E_S) 與相對堤長 (G/S) 之關係分佈圖	4-28
圖 4-21 多組系列潛堤佈置下能量透過率擷取範圍示意圖	4-30
圖 4-22(A) 不同組距下堤後之能量透過率 E_S 與週期 T 之關係圖	4-31
圖 4-22(B) 不同組距下堤後之能量透過率 E_S 與週期 T 之關係圖	4-31
圖 4-22(C) 不同組距下堤後之能量透過率 E_S 與週期 T 之關係圖	4-32
圖 4-23(A) $G/S=7$ 時共振與非共振情況下能量透過率情況下能量 透過率 (E_S) 與相對組距 (S_G/G) 關係分佈圖	4-32
圖 4-23(B) $G/S=5$ 時共振與非共振情況下能量透過率情況下能量 透過率 (E_S) 與相對組距 (S_G/G) 關係分佈圖	4-33
圖 4-23(C) $G/S=3$ 時共振與非共振情況下能量透過率情況下能量 透過率 (E_S) 與相對組距 (S_G/G) 關係分佈圖	4-33
圖 4-24 $G/S=6$ 時不同組數下堤後之能量透過率 E_S 與週期 T 之關係圖	4-35
圖 4-25 系列潛堤平面佈置相關參數尺度示意圖	4-36

圖 4-26 系列潛堤斷面佈置相關參數尺度示意圖	4-36
圖 4-27 港南海域附近系列潛堤佈置示意圖	4-41
圖 4-28 10 年迴歸期颱風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 潛堤佈置平行等深線 (C) 潛堤佈置平行海岸線 (D) 潛堤 逆時針旋轉與海岸線夾 18 度角 ($H=6.6M$, $T=10.8SEC$, 波 向 NNE)	4-42
圖 4-29 50 年迴歸期颱風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 潛堤佈置平行等深線 (C) 潛堤佈置平行海岸線 (D) 潛堤 逆時針旋轉與海岸線夾 18 度角 ($H=9.1M$, $T=12.7SEC$, 波 向 NNE)	4-43
圖 4-30 夏季季風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 潛 堤佈置平行等深線 (C) 潛堤佈置平行海岸線 (D) 潛堤逆時 針旋轉與海岸線夾 18 度角 ($H=0.83M$, $T=4.95SEC$, 波向 WSW)	4-44
圖 4-31 冬季季風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 潛 堤佈置平行等深線 (C) 潛堤佈置平行海岸線 (D) 潛堤逆時 針旋轉與海岸線夾 18 度角 ($H=1.27M$, $T=5.28SEC$, 波向 N)	4-45
圖 4-32(A) 10 回歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波場分佈圖	4-46
圖 4-32(B) 10 回歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波場分佈圖	4-47
圖 4-33(A) 50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖	4-47
圖 4-33(B) 50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖	4-48
圖 4-34 颱風波浪作用下斷面 3 之相對能量透過率分佈圖	4-48
圖 4-35(A) 冬季季風波浪作用下斷面 1 之波場分佈圖	4-49

圖 4-35(B) 冬季季風波浪作用下斷面 2 之波場分佈圖	4-49
圖 4-36(A) 夏季季風波浪作用下斷面 1 之波場分佈圖	4-50
圖 4-36(B) 夏季季風波浪作用下斷面 2 之波場分佈圖	4-50
圖 5-1 本研究之單一潛堤縱向斷面設計示意圖	5-6
圖 5-2 本研究之單一潛堤橫向斷面設計示意圖	5-7
圖 5-3 方塊凹凸形楔樁示意圖	5-8
圖 5-4 含成本效益之系列潛堤工法初步設計流程圖	5-14

表 目 錄

表 4-1 新竹港南海域之波浪條件資料表	4-10
表 4-2 數值模擬之平面系列潛堤佈置參數	4-22
表 4-3 不同系列潛堤佈置下港南海域相對能量透過率之比較表 ..	4-46
表 5-1 斜坡堤與合成堤透過率比較	5-4
表 5-2 覆蓋層載重參數計算表	5-6
表 5-3 潛堤材料價格表（北部地區）	5-9
表 5-4 單一潛堤各部分材料成本計算表	5-10
表 5-5 單組潛堤（ $N=4$ ）價格初步估算表	5-10
表 5-6 系列潛堤工法之限制與有缺點比較表	5-12

符 號 表

A	：波浪之振幅
$\hat{\alpha}$	：吸收係數 (absorption coefficient)
B	：潛堤寬度
B_c	：潛堤靠岸側之堤趾保護寬度
C	：波浪速度
C_g	：群波波速
θ'	：波浪於邊界上的角度
D	：潛堤高度
D'	：覆蓋層高度
δ	：底床擾變地形函數
$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$	：水平方向梯度因子
$\nabla_h^2 h$	：底床曲率項
$ \nabla_h h ^2$	：底床坡度平方項
$\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$	：水平梯度運算因子
Δx	：x 軸之差分間距
Δy	：y 軸之差分間距
Δt	：時間的變化
Δ	：塊石相對密度
E_S	：能量透過率
E'_S	：相對能量透過率
ε	：攝動參數
f_1	：底床曲率係數
f_2	：底床斜率平方項係數
f_d	：能量消散項
F'	：波浪能量衰減或反射率

g : 重力加速度

G : 格網個數

G : 潛堤長度

G' : 減去斜坡部分後堤長

H : 波高

H_o : 無佈置結構物的波高

H_t : 系列潛堤堤後方某一格點相對的波高

H_s : 堤趾波高

H_{si} : 入射波有義波高

H_i : 入射波高

h : 平均水深

h'_c : 底床至堤頂高

h' : 堤頂水深

j : 格網點編號

ξ_1 、 ξ_2 : 擴大因子 (amplification factor)

K : 沙漣底床漣長的周波數

K_1 : 第一組沙漣漣長的周波數

K_2 : 第二組沙漣漣長的周波數

K_T : 透過率

k : 入射波浪的周波數

L : 波長

L_s : 堤趾波長

L_0 : 深海波長

l : 沙漣底床沙漣波長

N : 潛堤個數

n : 時間

N_G : 系列潛堤組數
 N_s^* : 相關係數
 p : 代表 x 軸方向的第 p 個格點
 ∂B_x : x 軸的邊界
 ∂B_y : 波浪通過垂直於 y 軸的幅射邊界
 Φ : 流速勢
 ϕ_i : 正 x 方向的入射波
 ϕ_r : 負 x 方向的反射波
 ϕ_s : 散射波
 q : 代表 y 軸方向的第 q 個格點
 r : 波浪路徑
 r_r : 被覆塊單位體積重
 r_w : 水單位體積重
 R_c : 堤頂出水高
 δ : 微小地形變化參數
 S : 潛堤間距
 S : 第一組潛堤間距
 S : 第二組潛堤間距
 S' : 防禦破壞率
 S_G : 潛堤組距
 θ : 波浪入射角
 θ' : 波浪於邊界上的角度
 T : 週期
 t : 時間因子
 $\bar{t}$: 緩慢時間變量
 $\tan \beta$: 海床坡度

ω ：角頻率

W ：表面載重

W_{disign} ：設計表面載重

W' ：堤心設計載重

(x, y) ：水平座標

$\bar{\psi}$ ：加入攝動參數之流速勢

第一章 緒 論

1.1 研究動機

臺灣四面環海，常年遭受海洋波浪之侵襲，特別是在颱風季節，巨大的颱風波浪，對地形變化的影響尤其顯著。根據中央氣象局颱風資料統計分析之結果顯示，每年平均約有 3.5 次颱風侵襲臺灣海岸，颱風期間之暴潮巨浪直接侵襲海岸，造成海岸侵蝕，近岸海域變遷而使碎波線內移，甚至接近至海堤堤線，且由於海岸線內移，波浪常越過堤頂而導致海水倒灌及沿海區域之溢淹。近年來因海岸侵蝕，沿海地層下陷以及平均海水面上升，海岸災害發生頻率與規模與日俱增，所造成之災害損失為臺灣重要天然災害之一。民國 85 年賀伯颱風所造成的海岸災害至今記憶猶新。

基於保護海岸之目的，早期的傳統工法包括構築海堤、突堤、離岸堤等消波工，利用結構物來消減波浪能量，制止海灘流失，以達到保護海岸的目的。海堤能防潮防浪且施工容易，在直接感覺上較有安全感，但堤線如太靠近灘線，或颱風季節較大的波浪時，波浪會直接作用於海堤，造成反射作用，加驟波浪的作用效果，使海灘侵蝕加速；突堤能攔截沿岸漂沙、控制海灘地形及阻擋沿岸流方向，利用改變海岸線的方法，達到防止海岸侵蝕的目的，但突堤容易使漂沙在上游側形成堆積，而使下游側發生侵蝕的現象；離岸堤能使波浪在堤前減衰，漂沙在堤後堆積，形成突出原海岸地形的沙舌 (salient) 或繫岸沙洲 (tombolo)，間接發揮安定海灘之功能，但離岸堤工程費高，施工不易，堤趾易被沖刷，且維護費可觀。傳統的海岸保護工法，通常以高於海平面的混凝土及消波塊構築於海岸，不僅造成景觀破壞，更因消波塊設置於陸地與海洋之間，阻隔人民接觸海洋的機會，進而降低人民親水的意願。從海岸永續利用的觀點來看，海岸結構物不應以防災之單一目的而建造，所考慮之工法必須滿足多元性之需求，即海岸結構物應與海岸生態及人類生活並存，海岸景觀的美化、海岸結構

的親水性及海岸生態的維持應為台灣海岸永續利用及整體規劃中必須考慮的要素。

往昔一般海岸結構物的設計，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，但堤前消波塊的拋置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廣泛被採納，其在保護海岸的同時並利用海洋及海岸天然資源做為休閒遊憩的地方，例如法國的海岸開發政策是以生態景觀和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，使兼具防災與親水的功能，並創造優良的整體生存環境。反觀國內，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，從過去防止海浪侵蝕破壞，保護海岸地區生命財產安全的單純目的，轉變成包含景觀美化與遊憩行為並重等多功能的目標。未來，工程與景觀的調和及親水性設計遂成為設計海岸保護設施時必要考慮的因素。

布拉格反射 (Bragg reflection) 為布拉格 (1890~1971) 研究 X 射線光波通過二平行晶體的反射時所發現的現象，其研究發現，當晶體的間距為波長一半的整數倍時，光波的反射最強，此發生光波反射的條件稱之為布拉格定律。系列潛堤 (a series of submerged breakwaters) 即利用此原理，以系列潛堤並列平行於海岸線，讓通過潛堤水域的波浪反射至外海，而使到達海岸的波浪變小。學理上的研究顯示，若入射波浪之波長 (L) 為正弦沙漣底床沙漣波長 (l) 的二倍時，反射現象達到最大，稱為布拉格共振 (Bragg resonance)。共振之效應可以使得入射波向岸傳遞之能量衰減，導致波浪傳遞至岸邊時波能減小，進而達到海岸保護之效果，又為了達到維護海岸景觀環境、海域生態、

親水以及海岸防災的目的，系列潛堤為目前可考慮的海岸工法之一。由於潛堤沉沒於水面，不妨礙海域景觀，且位於較深的水域，防護的機制雖與離岸堤有所不同但皆可有類似的消浪效果，且仍保持波浪透射效應，使堤內海水能維持交換；除此之外，沉沒潛堤消波塊容易長出青苔，能吸引浮游生物聚集，對海域生態的復育有正面的效果。適當的系列潛堤配置能產生布拉格反射，使波浪能量消散於外海，故能以較少的材料達成防波的效果。

本年計畫延續過去三年的研究成果，以 Hsu¹ 等人 (2003) 所發展的演進型式緩坡方程式 (Evolution Equation for Mild-Slope Equation, EEMSE) 為基礎，利用數值模式模擬波浪於二維平面上通過各種系列潛堤佈置所產生的布拉格現象，進而探討各種影響因子之特性。將系列潛堤工法應用於實際海域為主要目標。有鑑於目前多數相關的研究皆以一維斷面之布拉格反射因子進行探討，然而實際空間是三維的，若能在二維平面上佈置各式系列潛堤，並進一步探討其各項影響因子，進而利用此研究結果規劃現場佈置並輔以數值計算，相信最終可將整體規劃應用於實際海域。因此，本年度計畫以過去的研究成果作為基礎，更詳細地分析平面上布拉格共振的影響因子，並檢視第三年度所提出的系列潛堤工法初步設計流程圖，除了改善整個流程使之更符合工程機制外，並以台灣新竹港南海域作為設計範例，運用數值模式逐步檢視流程各步驟的合理性。且考慮台灣的現況，選擇適當的潛堤安定估算公式以及材質來進行系列潛堤工法的斷面設計。當平面佈置與斷面設計都完成後，利用數值模式計算目標海域之波場，並探討波浪能量因系列潛堤工法所導致的衰減情況，藉以說明系列潛堤工法之成效。最後，彙整四年度的研究結果，說明系列潛堤工法的優缺點、適用性以及相關限制。

1.2 文獻回顧

近年來許多學者透過模型試驗、數值模式及理論分析，研究波浪通過沙漣底床的布拉格共振現象，當通過沙漣底床的波浪週波數

k ，等於底床週波數 K 的一半時，即 $2k/K=1$ ，波浪於沙漣底床上逐漸形成駐波，並於底床前方形成共振反射，稱為布拉格共振現象，這時大部分的入射波浪能量於共振時衰減，使得波浪傳遞至近岸時能量較小進而避免波浪直接衝擊海岸，達到保護海岸的目的。

Mei² (1985) 提出理論解釋布拉格共振現象，陳和湯³ (1990) 及陳^{4~6} (1991a, 1991b; 1992) 利用攝動參數，對布拉格共振提出理論說明，Davies 和 Heathershaw⁷ (1984) 及 Webster 和 Wehausen⁸ (1995) 以水位變化說明布拉格共振效應。圖 1-1 為波浪通過沙漣時，在接近布拉格共振的條件下，Davies 和 Heathershaw (1984) 得到之反射波變化情形。不同時刻波浪通過沙漣底床之空間波形，Webster 和 Wehausen (1995) 所得的結果如圖 1-2 所示，圖中顯示由於布拉格反射作用，沙漣底床前方逐漸形成近似駐波現象，沙漣後方則透射波減低。Davies 等人⁹ (1989) 及 O'Hare 和 Davies¹⁰ (1993) 的研究指出，波浪通過單一沙漣底床時，不只 $2k/K=1$ 時有主頻共振 (primary resonance)，當 $2k/K=2$ 時亦有次頻共振 (second-order resonance) 產生。

對於具有同樣振幅但不同週波數 K_1 及 K_2 ($K_2 > K_1$) 的沙漣，疊加而成的複合正弦沙漣底床，Belzons 等人¹¹ (1991) 以逐次近似模式 (step approximation model) 及 Guazzelli 等人¹² (1992) 以連續運算矩陣法 (successive application matrix method)，進行布拉格共振研究時發現，除了主頻共振及次頻共振外，波浪通過複合式沙漣底床時，在 $k=(K_2+K_1)/2$ 及 $k=(K_2-K_1)/2$ 的地方，會有諧頻共振 (harmonic resonance) 及分諧頻共振 (sub-harmonic resonance) 發生。

由於正弦沙漣底床，在實際工程應用上較為困難，故近代學者改以人工潛堤 (artificial bars)，來探討布拉格共振的情形，方便實際工程上的應用。Mei 等人¹³ (1988) 提出布拉格防波堤的觀念，來保護鑽油平臺。Kirby 和 Anton¹⁴ (1990) 利用 Miles¹⁵ (1981) 理論及 EMSE 模式，研究系列潛堤的布拉格反射，他們證實人工潛堤與正弦沙漣底床一樣，會發生布拉格共振的現象。Bailard 等人^{16~17} (1990,

1992) 以等間距的人工沙連底床，進行現場實際海岸的保護研究。張等人¹⁸ (1997) 擴展 Miles (1981) 的理論，探討不同型式系列潛堤，及不同潛堤佈置條件之布拉格共振現象。岳等人¹⁹⁻²³ (1997a, 1997b; 1998; 1999; 2000) 以邊界元素法 (boundary element method, BEM) 探討不同入射波浪

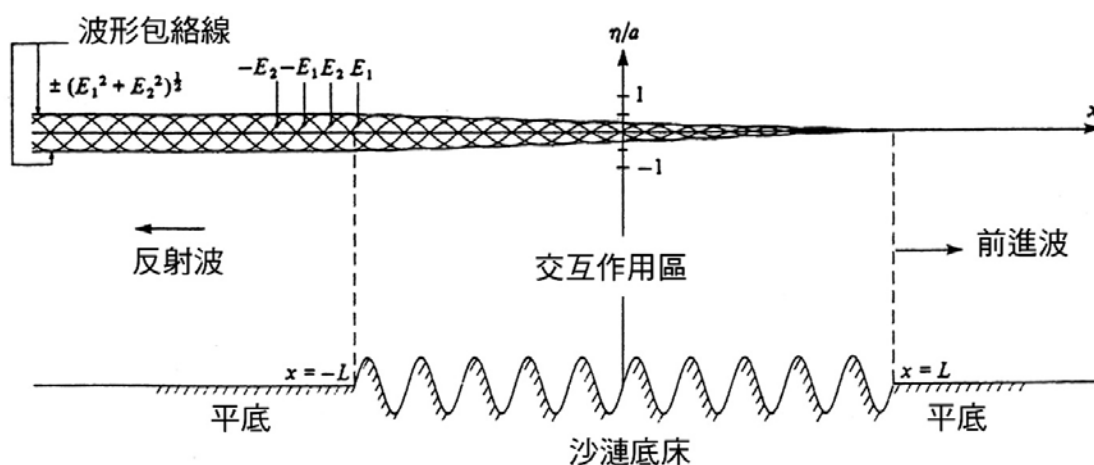


圖 1-1 波浪行經沙連底床之反射波變化情形
(Davies 和 Heathershaw, 1984)

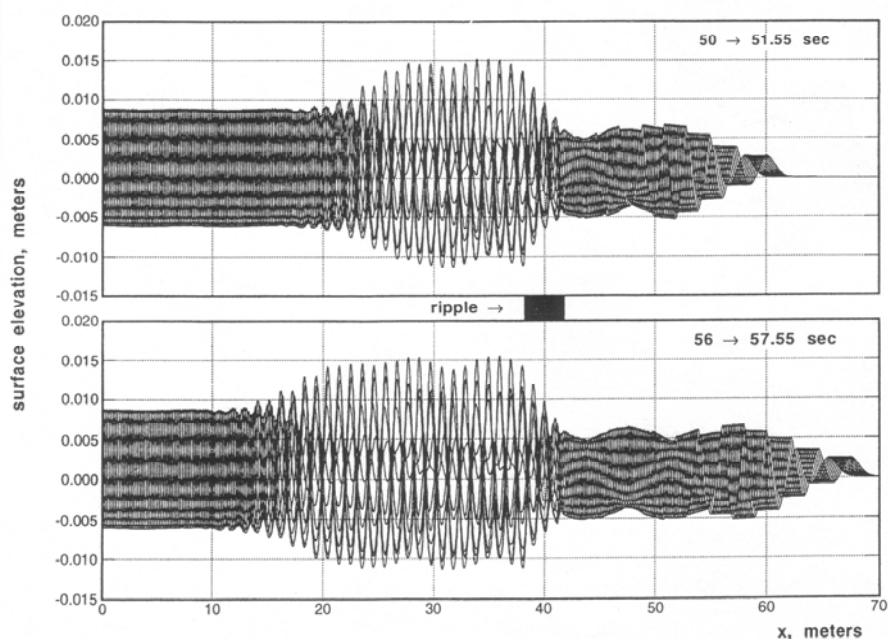


圖 1-2 布拉格共振之時序列 (Webster 和 Wehausen, 1995)

條件，及不同的系列潛堤佈置的反射係數與布拉格共振現象。Zhang 等人²⁴ (1999) 則提出複合式正弦沙漣佈置，使布拉格共振反射係數及頻寬增加的方法。Twu 和 Liu²⁵ (2004) 討論在非碎波效應的影響下規則波浪通過透水系列潛堤時的現象。Wang²⁶ 等人(2006) 利用三點法反射率計算，提出複合式系列潛堤以及不規則波浪作用下系列潛堤的共振機制。Li 和 Mei²⁷ (2007) 提出在考慮勢能流理論下，當波浪通過圓柱且圓柱直徑遠小於波長時，會產生布拉格分散效應。

近年來有許多學者針對 Berkhoff²⁸ (1972) 所提出的緩坡方程式 (Mild-Slope Equation, MSE) 加以修正，以數值計算方式研究布拉格反射。Kirby²⁹ (1986) 在 Berkhoff (1972) 的緩坡方程式中，引入一個微小的地形變化參數 δ ，推導波浪通過潛沒障礙物的延伸型態緩坡方程式 (Extended Mild-Slope Equation, EMSE)，並針對波浪通過正弦沙漣之反射係數進行數值計算。O'Hare 和 Davies (1993) 指出由於 EMSE 未考慮高階影響量，因此對於擾變雙正弦沙漣底床所引發的次諧波共振效應無法預測。Chamberlain 及 Porter³⁰ (1995) 將 EMSE 忽略的高階項：底床曲率項 $\nabla_h^2 h$ 和底床坡度平方項 $|\nabla_h h|^2$ 加入方程式中，推導成修正型態緩坡方程式 (Modified Mild-Slope Equation, MMSE)，其中 $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 為水平梯度運算因子， h 為平均水深。數值分析結果顯示，由於擾變地形參數的考慮，MMSE 可以增加布拉格反射效應之精度。Porter 和 Staziker³¹ (1995) 以變分法 (variational method) 及葛拉金特徵函數法 (Galerkin eigenfunction method) 對緩坡方程式推導，進而得到另一延伸型態的緩坡方程式。Suh 等人³² (1997) 將 EMSE 改為與時間相關之方程式，探討波浪通過擾變底床的時序列變形。Zhang 等人(1999) 將 Kirby (1986) 所忽略的高階項考慮於方程式中，並加入底床地形擾變量 δ 之影響，提出與時間相關之雙曲線型式的混合模式 (Hybrid model, HM)，用以解析波浪通過複合式正弦沙漣底床之布拉格反射效應。數值計算結果顯示，利用複合式正弦沙漣可增加布拉格反射的範圍，但

HM 並未考慮波浪斜向入射及斜坡底床時的效應，同時在求解緩坡方程式所花費時間龐大，實際應用上不能符合計算效率。Hsu 和 Wen³³ (2001a) 於緩坡方程式引入微小時間變量，提出演進型緩坡方程式 (Evolution Equation of Mild-Slope Equation, EEMSE)，方程式的型式為拋物線，與雙曲線型的方程式相較，能節省 G 倍的計算時間，此處 G 為格網的個數。Hsu 和 Wen³⁴ (2001b) 引入碎波及能量消散項於 EEMSE 中，用以描述波浪通過斜坡底床的碎波效應。Hsu 等人 (2003) 再於 EEMSE 模式中，加入底床地形擾變量的影響，而成為拋物線型的緩坡方程式 (parabolic mild-slope equation, PMSE)。

在實際應用方面，Mei (1988) 提出布拉格防波堤的觀念，用以保護位於北海 Ekofisk 油田的鑽油平臺，免於受大波浪的破壞。Bailard 等人 (1990) 應用 Kirby 和 Anton (1990) 的研究結果，設計二種型式的人工沙洲，在佛羅里達的卡納維爾角海岸 (Cape Canaveral Beach, Florida) 做現場試驗，試驗結果可知波浪週期在預期的布拉格反射的範圍內，其反射係數可達 0.4 以上。Bailard 等人 (1992) 以波浪通過等間距的人工沙洲底床進行海岸保護研究，結果顯示以八個等間距的人工沙洲，可以減少美國海灣及大西洋海岸約 25% 的侵蝕率，在潛堤前方可達到所預期的布拉格反射效應，惟其可執行的波浪範圍狹小。郭³⁵ 等人 (1999) 試驗室研究指出雙列潛堤佈置，不但增加堤前反射係數及減少堤後透射係數，並能減緩海灘侵蝕或促進灘線前進。有鑒於等間距人工沙洲所形成的布拉格反射帶寬較小，在實際應用上，有效的防禦波浪範圍受到限制。若能藉由不等間距的沙連底床佈置，將可增加波浪適用範圍，故 Guazzelli 等人 (1992) 及 Zhang 等人 (1999) 提出複合式正弦沙連佈置，使布拉格反射發生的條件能增加，且布拉格反射的大小及波浪適用範圍隨著沙連的個數及振幅的增加而增加。Wang³⁶ 等人 (2006) 引用 Miles (1981) 理論探討雙潛堤之布拉格共振現象。Hsu³⁷ 等人 (2006) 利用布式方程式 (Boussinesq Equation) 模擬波浪通過潛堤之布拉格現象，以觀察當非線性效應增

強以及不規則波浪作用時，所產生的變化。Wen 及 Tasi³⁸ (2008) 整合布拉格影響因子，提出影響因子的最佳組合建議。

綜合以上，從研究文獻得知，往昔學者對於布拉格反射研究較著重於以各種理論及模式在正弦沙漣底床及人工沙洲進行布拉格反射探討，如要將布拉格反射效應實際應用至海岸現場，除了考量適合實際海域水深地形以及海岸現場條件，更應將探討的範圍擴展在二維平面上。本研究將以較符合實際海岸工法-矩形潛堤，探討不同潛堤佈置條件在不同入射波浪條件的海岸保護效果，進一步作有系統深入研究。然而過去常使用反射率來分析布拉格共振效應，然而反射率的理論多以一維斷面為主，若要在二維平面上討論恐有失真的現象，於是本研究採用能量透過率作為分析的參數，希望可以更有效地說明平面上布拉格共振效應的特性，進而推廣至實際海域的應用。

1.3 研究方法與預期成果

1.3.1 研究方法

本研究預計分為四年執行，第一年 (94 年) 的研究項目及進行步驟分別如下：

1. 收集國內外有關係列潛堤與布拉格反射理論的文獻報告，並歸納整理其優劣及適用的條件，作為本研究及今後研究參考。
2. 波場模式必須具備波浪的淺化、反射、折射、繞射及碎波等效應，本研究擬應用 EEMSE 模式，計算規則波通過系列潛堤波場分佈情形，所得結果將與理論結果比較，以驗證本研究之數值模式的適用性。
3. 以 EEMSE 數值模式，應用至不規則波，計算波浪通過正弦沙漣底床地形，波場之分佈情形，並應用反射係數公式求出各系列潛堤前反射係數以檢驗各系列潛堤之防禦功效。

第二年 (95 年) 的研究項目及進行步驟分別為：

1. 不規則波浪通過各式複合式人工潛堤地形之斷面試驗與數值模擬。
2. 探討等間距系列潛堤在布拉格反射條件上的限制，進一步考慮複合式系列潛堤，以不同的潛堤間距組合，測試布拉格反射的效用，進而探討防禦波浪條件的範圍。先以數值模擬布拉格反射效果，再以試驗校核數值模擬之結果。
3. 針對不同系列潛堤配置整理其海岸防禦效果，進而歸納比較在不規則波浪作用下欲產生布拉格共振效應時，各式地形佈置的特性。

第三年 (96 年) 的研究項目及進行步驟分別為：

1. 利用數值模式分析布拉格反射於平面上之各項影響因子，進而做為現場規劃之依據。
2. 針對反射率的部分，尋求適用於現場平面之方法，以求更吻合實際現象。
3. 選擇台灣西部新竹港南海域進行海岸環境保護規劃研究，先從實測資料分析本海域地形變化及海岸侵蝕原因探討。並蒐集水深地形及海氣象資料，提供數值模式計算之輸入之基本資料。
4. 以實際海域波場之分析結果規劃海域可能的系列潛堤配置方案。進行數值計算，探討各種系列潛堤配置方案的優缺點及可行性。

第四年 (97 年) 的研究項目及進行步驟分別為：

1. 整合前三年度之計畫成果，歸納分析系列潛堤工法於實際海岸可能的限制以及優缺點，作為未來實際工程應用之參考。
2. 以第三年之計畫示範區為基礎，進一步考慮結構可能成本、基礎操船等現實問題，輔以數值模式探討示範海域可能之最佳系列潛

堤工法配置。

3. 根據示範區海域之現場實況，在考慮各項布拉格共振影響因子及經濟成本下，歸納出系列潛堤工法之設計方法、步驟及流程圖。

1.3.2 預期成果

1. 利用數值模式重新校驗系列潛堤工法設計流程圖，並利用台灣常用之海洋保護工法資料作為基礎，藉以初步評估系列潛堤工法可能之經濟成本，再說明工法適用於實際海域的位置以及其功效。
2. 導入系列潛堤工法結構物之建構成本於工法設計流程圖中，並以現場海域作為示範佈置區，運用數值模式實際模擬波場並探討波浪通過結構物後之能量透過率，以期可以做為未來實際應用時之依據與參考。
3. 綜合過去三年之成果進行整合分析歸納，說明系列潛堤工法之影響因子的相互關係以及此工法於現場海域應用時可能的限制與優缺點。

1.4 本研究組織

本研究於第一章，將國內外有關係列潛堤、布拉格共振以及數值模式的文獻，加以分類整理作為本研究研究之參考。第二章回顧過去三年計畫執行的重點以及主要成果，並說明整體計畫的目標與完成度。第三章敘述本年度所採用的數值模式其控制方程式，並說明邊界條件與數值方法的使用，且簡單說明模式之驗證。第四章以新竹港南海域為範例，利用所提出的系列潛堤設計流程圖以及數值模式於港南海岸規劃適合的系列潛堤工法，希望可以作為往後實際應用之參考依據。第五章延續第四章所規劃之系列潛堤佈置，選取適當的安定性公式來設計系列潛堤於實際海域可能之斷面佈置，進而計算單組系列潛堤可能之造價，作為施工的參考依據。最後，於第六章說明本年度以及整個連續性計畫之結論與建議。

第二章 計畫前三年度之回顧

如緒論所言整個計畫最主要的目的在於研究系列潛堤工法於實際海域應用時，其可行性、優缺點、適用性以及限制，最後提出系列潛堤工法設計流程圖以及選取適當海域作為範例說明整體規劃的步驟與佈置。為期四年的計畫進入統整總結的最後一年，因此另闢章節說明前三年度的研究成果以及結論，用以說明整個計畫的連續性與執行度。

2.1 計畫第一年度 (94 年) 之回顧

計畫第一年分別就理論解析、數值模式及現場與模型試驗三大部分，將過去眾學者相關之研究成果進行整理分析。從研究文獻得知，往昔學者對於布拉格反射的研究著重於利用理論與模式探討正弦沙連底床及人工沙洲進行布拉格反射現象。然而，要將布拉格反射效應實際應用於現場海岸，仍須考量實際海域水深地形與現場條件，因此應以較符合實際海岸工法 - 矩形潛堤作為本研究目標，而在研究的過程中需以不同潛堤佈置及不同波浪條件下系列潛堤於海岸保護的效果為主要目的，進行有系統且深入之研究。

分析瞭解前人之研究成果後，計畫第一年度以 Miles (1981) 的理論作為基礎針對在斷面上波浪通過各式不同系潛堤之布拉格反射進行理論分析，以期作為數值模式計算之驗證。並同時以 EEMSE 作為基礎建立適當的波浪數值模式，將模式計算結果與理論及相關試驗資料進行比較，用以驗證模式計算能力的正確性。此外，並利用不規則波浪可以視為無數個規則波線性疊加的結果，來推導適用於不規則波浪之反射率公式，其後再利用數值模式模擬不規則波浪通過二維斷面之規則變化地形，藉以探討當波浪為紛紜不一之不規則波時布拉格共振現象將會呈現何種特性。

於計畫第一年度的成果中包含了在一維斷面上規則與不規則波浪通過正弦沙連底床之數值分析並與理論以及實驗比較，地形如下圖

2-1 所示，規則波與不規則波的結果分別如圖 2-2(A)及 2-2(B)所示。為了更仔細的瞭解不規則波浪於系列潛堤工法的適用性，計畫中以半餘弦人工潛堤作為佈置地形，研究不規則波浪通過此地形時之類布拉格共振現象，其中地形與反射係數的分佈結果如圖 2-3 及圖 2-4 所示。

由計畫第一年度的結果得知本研究所使用的數值模式之可靠性以及不管是規則波浪或不規則波浪當其經過系列潛堤時皆會有類布拉格共振效應產生。因此藉由發展布拉格共振理論並模擬計算此等較為單純變化的地形，可初步了解布拉格反射現象的學理特性，並建立分析問題的程序，以供計畫未來研究之依據。

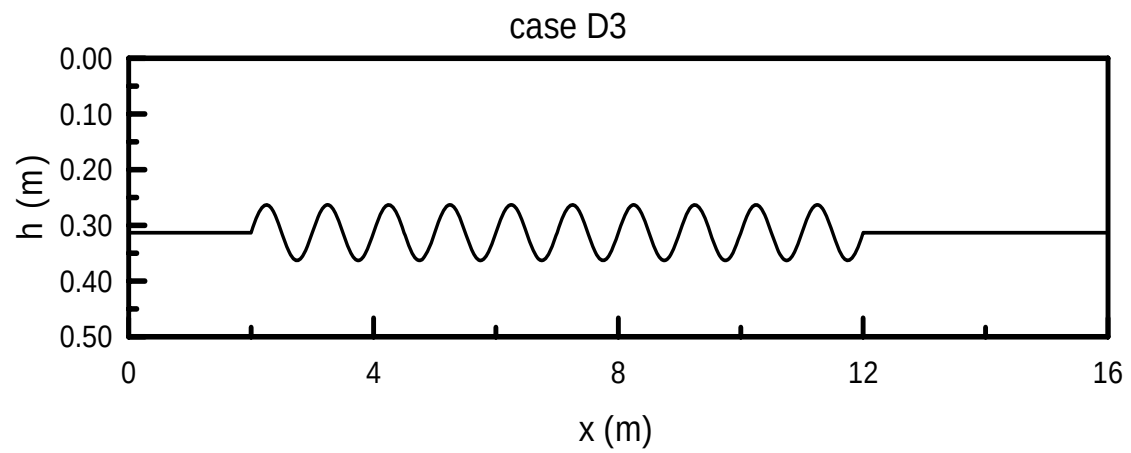


圖 2-1 正弦沙漣底床地形示意圖

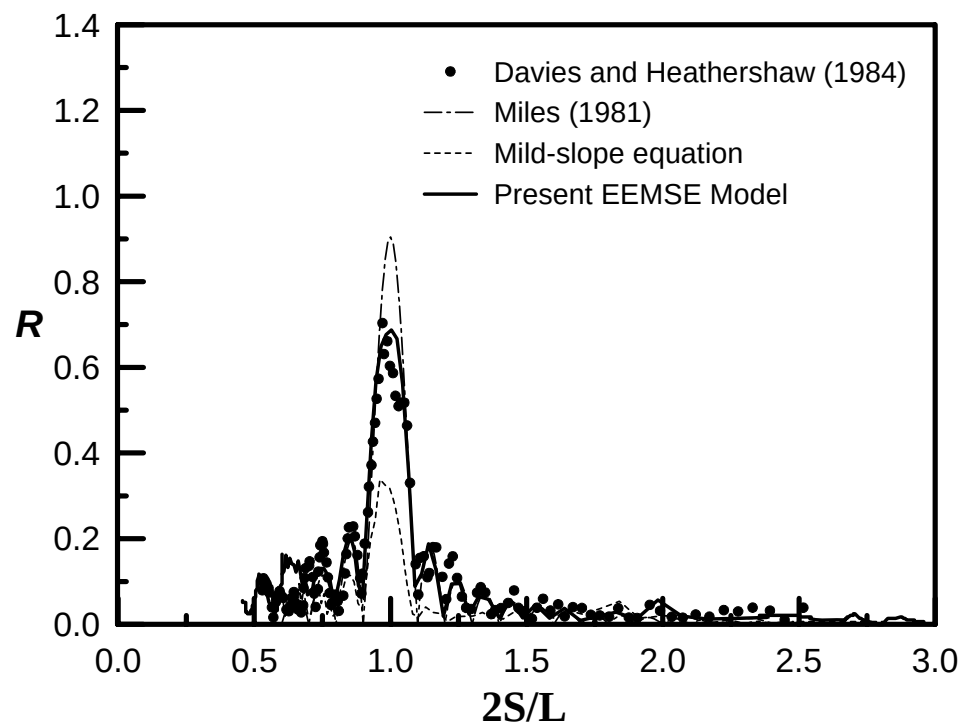


圖 2-2(A) 規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (Case D3)

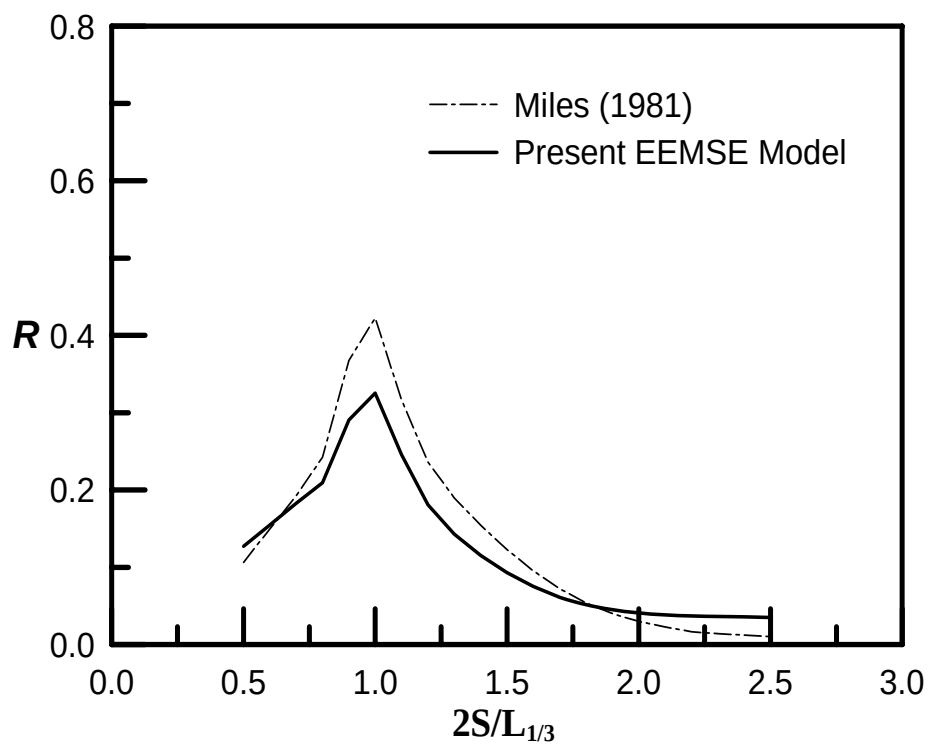


圖 2-2(B) 不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖(Case D3)

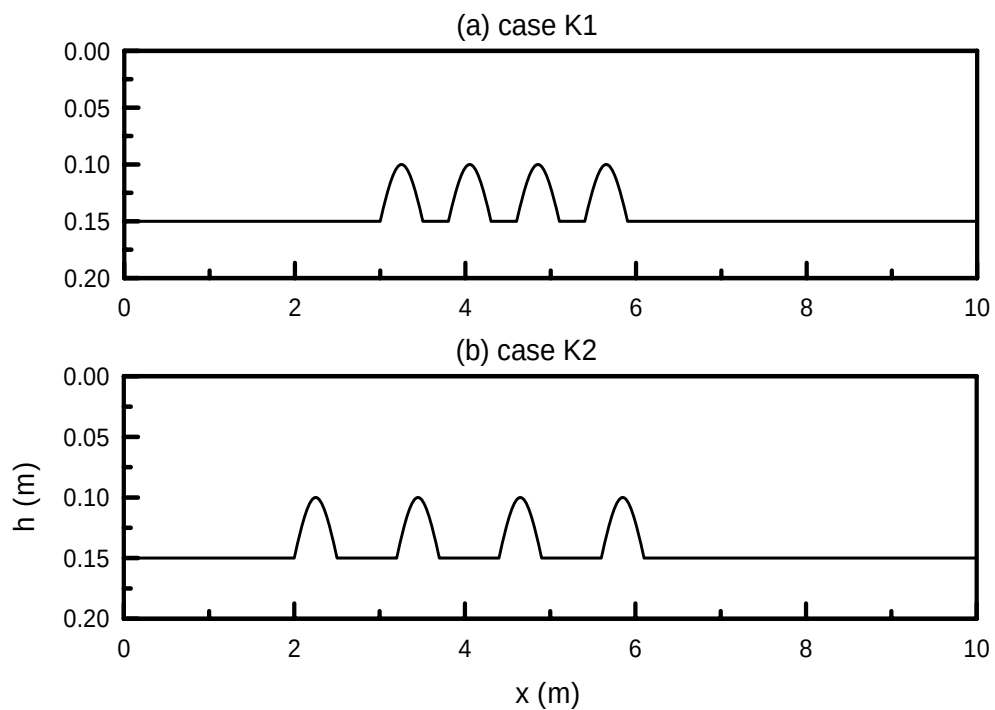


圖 2-3 半餘弦人工潛堤底床地形示意圖

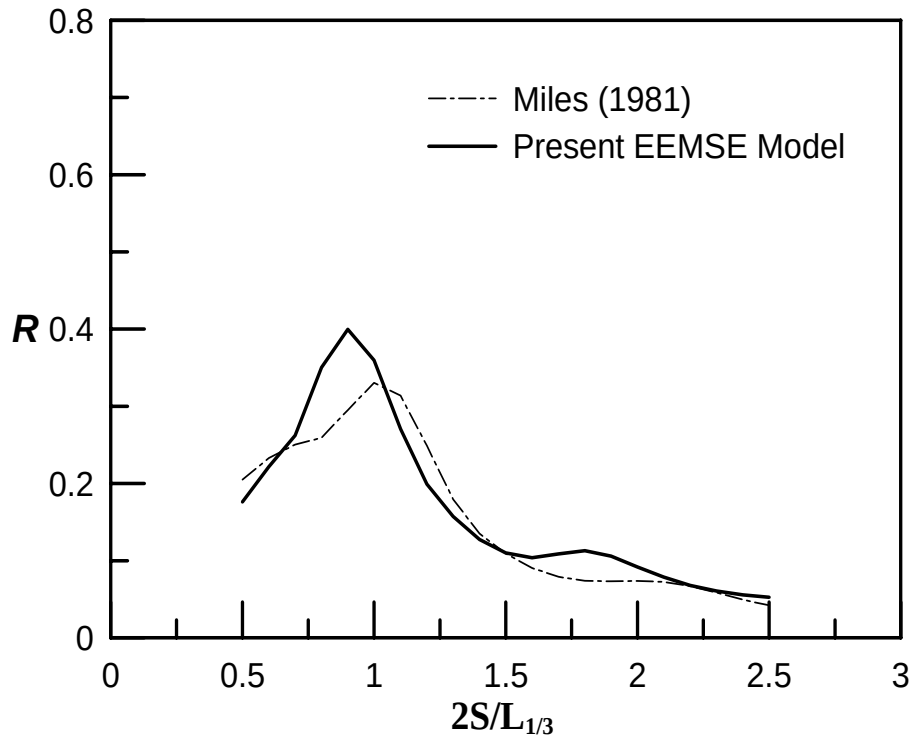


圖 2-4(A) 不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖
(配置 K1)

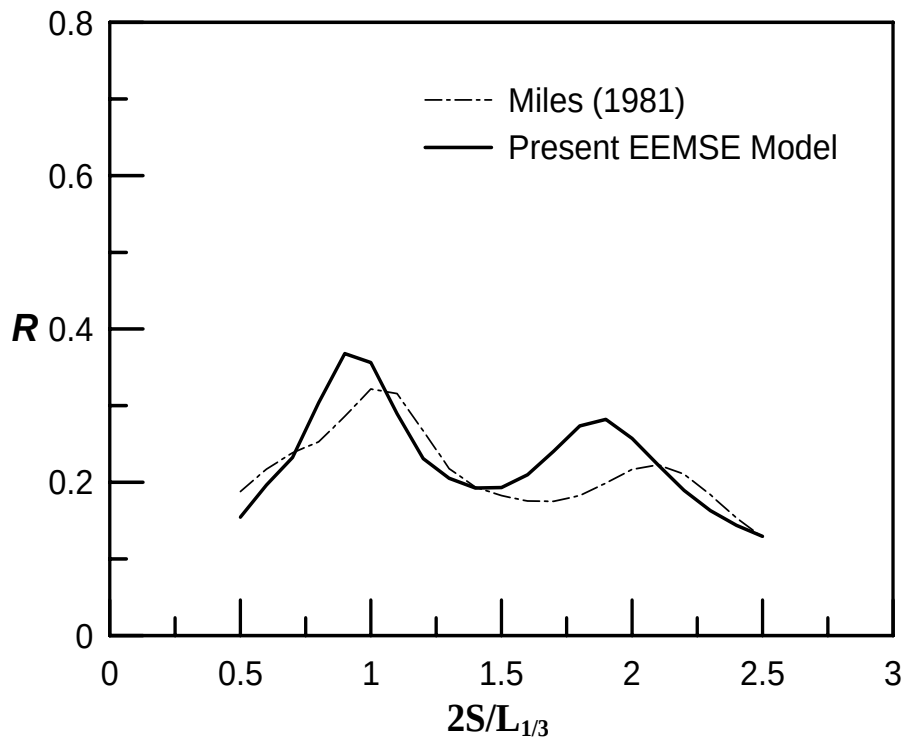


圖 2-4(B) 不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖
(配置 K2)

2.2 計畫第二年度 (95 年) 之回顧

延續第一年對波浪通過系列潛堤工法產生的布拉格共振機制之研究成果，計畫第二年為了更進一步瞭解該工法於實際海域的適用性，針對紛紜不一的不規則波浪一系列的探討，希望可以更明白在不規則波的條件下整個布拉格共振現象的特質，進而瞭解系列潛堤工法於實際海域的適用性。

於計畫第二年中，先根據第一年對於複合式系列潛堤研究之成果，模擬不規則波通過各種複合式系列潛堤，進而瞭解如何改善系列潛堤在布拉格共振機制上的限制，增加布拉格反射帶寬效果，擴大防禦波浪條件的範圍。更進一步，於國立成功大學水利及海洋工程系的斷面水槽中進行不規則波之布拉格共振試驗，利用試驗結果與數值模擬進行比較分析探討布拉格共振的成效。其中圖 2-5 為複合式系列潛堤之參數示意圖，圖 2-6 則為試驗水槽佈置圖，圖 2-7 則為不同潛堤個數下潛堤間距比為 $S_1:S_2=1:1.25$ 時試驗的入射波與透射波譜之比較圖，可以發現利用複合式系列潛堤可以有效使得不規則波浪通過該結構物時能量明顯消減。而圖 2-8 則是潛堤個數 $N=4$ 時不同潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 之關係圖，其中包含實驗以及數值模擬的結果。

由計畫第二年度之研究成果可以瞭解，雖然過去並沒有很充足的研究資料說明在不規則波浪的條件下布拉格共振機制的特性，但利用不規則波浪是由無數個規則波線性疊加的觀點切入，由數值模擬及水工試驗的結果，可以瞭解即便在不規則波浪的條件下，只要能夠瞭解波譜之主頻特性即可規劃出適當的系列潛堤佈置，使得不規則波通過該結構物時主頻區及次頻區皆可產生類布拉格共振現象，進而使得波浪能量有大幅的衰減，且當利用多種組合的複合式系列潛堤時，亦可有效增加布拉格共振機制的帶寬，兩者相輔相成則可擴大防禦波浪條件的範圍。由結果顯示系列潛堤工法對於紛紜不一之不規則波浪確實具有一定的消能功效，因此該工法應用於實際海域時確有其適用性。

在計畫第二年度的最後，藉由數值模擬分析所得之結果，比較在不規則波的條件下欲使布拉格共振效應產生時，相關影響因子所具有的特性，藉以闡述系列潛堤工法於不規則波浪作用下之可行性並作為計畫第三年度對於平面影響因子研究之參考依據。

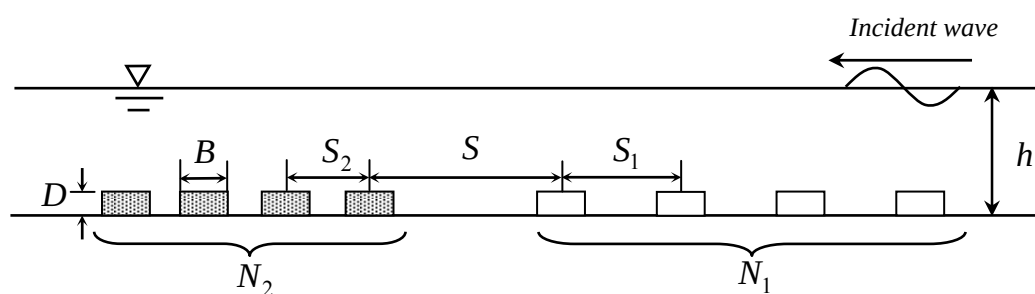


圖 2-5 試驗系列潛堤之佈置及參數示意圖

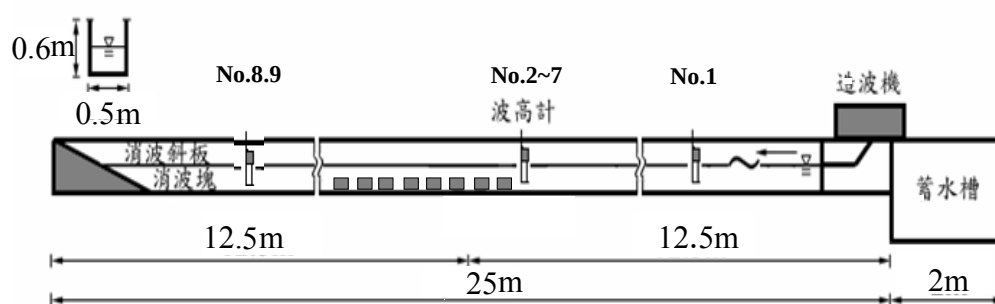


圖 2-6 試驗水槽斷面圖

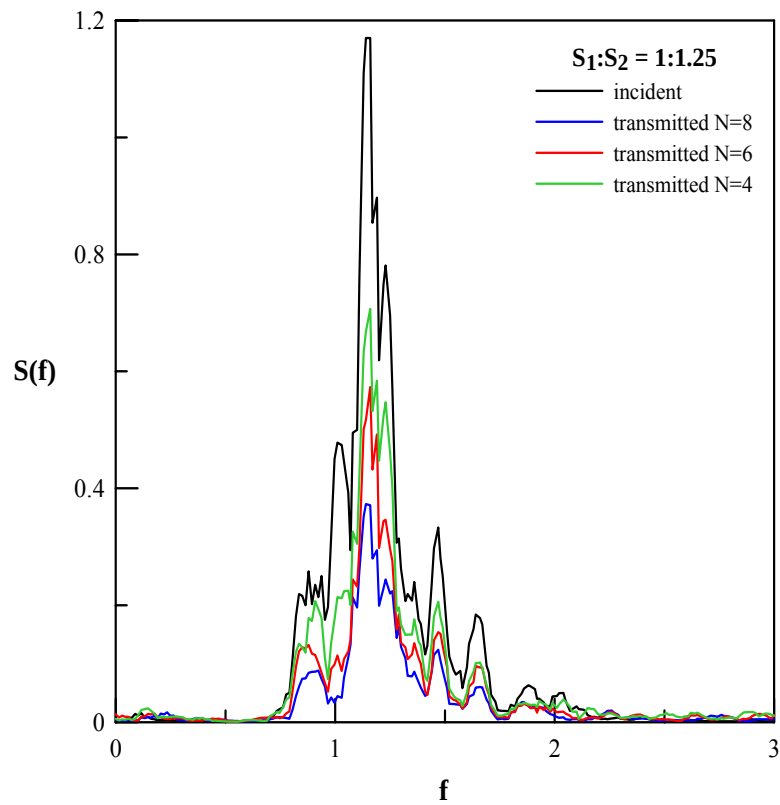


圖 2-7 不同潛堤個數下 $S_1:S_2=1:1.25$ 時入射波與透射波譜之比較

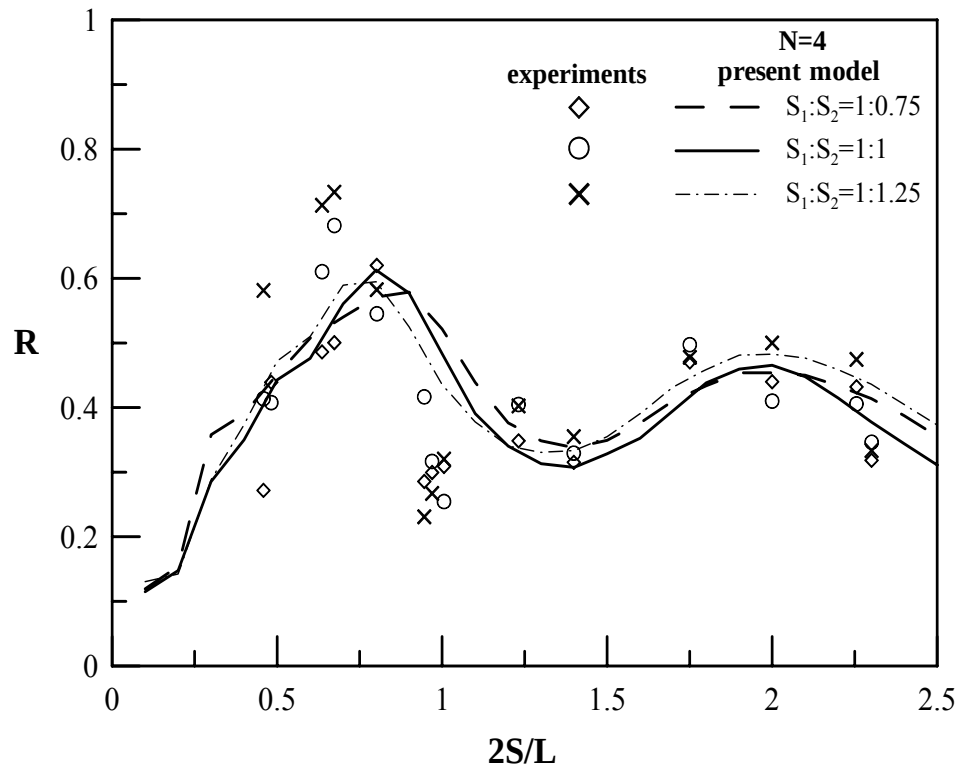


圖 2-8 $N=4$ 時不同潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 之關係圖

2.3 計畫第三年度 (96 年) 之回顧

在計畫的第一、第二年度將重心放在前人研究成果的蒐集、數值模式的發展以及模式的驗證，其間針對模式特性進行多方面的研究測試，為了瞭解實際海域中紛紜不一之不規則波浪在布拉格共振機制中的特性，在一維斷面的地形上利用數值模式、理論分析與水工試驗探討不規則波浪通過系列潛堤的現象，由此說明實際海域建構系列潛堤工法的可能性。

往昔學者對於布拉格共振機制的研究大多著重在一維斷面上，而忽略了波浪實際傳遞時會有折射、繞射等效應，於是在計畫第三年度，將把重心放在如何將布拉格共振效應實際應用至現場海岸，除了考量適合實際海域水深地形以及現場實況外，更將探討的範圍擴展至平面，藉以瞭解在波浪繞射、折射與淺化等變形的影響下布拉格共振機制之特性，並以較符合實際海岸工法 - 矩形潛堤來探討不同潛堤佈置條件在不同入射波浪條件下其海岸保護的效果。最後歸納往昔的研究成果以及分析平面上的特性，進而提出系列潛堤工法初步設計流程圖。

圖 2-9(A) ~圖 2-9(D) 為波浪通過不同潛堤長度之波場分佈圖，藉以說明當在二維平面上考慮系列潛堤工法時，波浪通過結構物所產生的繞射效應將影響整個布拉格共振機制，因此整體的波浪變形機制不似僅考慮一維斷面時如此簡易。又過去對於布拉格共振現象多以反射率作為探討的參數，但在二維平面上反射率的估算並非易事且並沒有相關研究可以做為參考，因此計畫中首度導入了能量的觀點，利用波高與能量的關係以能量透過率來說明系列潛堤工法於現場海域的特性。

計畫第三年度，更進一步探討平面上布拉格影響因子的特性，其中平面影響因子的示意圖如圖 2-10 所示。由數值模擬的成果得知在平面上，系列潛堤組距的影響與堤長的影響都是必須要考量的重要因

素之一，且由結果瞭解採用能量透過率的方式將更容易於平面上分析系列潛堤工法的特性（如圖 2-11 所示）。根據過去的研究成果要將系列潛堤設計佈置於現場，欲得到最佳適化的佈置，首先必須確認目標防禦波浪條件，初估其波長及判定佈置區域之堤趾水深後，則可決定初步的堤距，再依照順序決定堤寬、堤長、堤數、系列潛堤組數、縱向堤距以及堤頂水深，則得到初始佈置條件，若潛堤平均水深與原先假設之不同，應再對堤距做適當的調整，以確定所選定的佈置條件，其發生布拉格共振的範圍為現場所欲防禦的波浪條件。茲將設計步驟初步繪製成流程圖，如圖 2-12 所示。最後，以新竹港南海域為例，利用蒐集之海象資料輔以各影響因子的特性，初步規劃適合之系列潛堤工法佈置，進而利用數值模式計算其波浪場分佈，如圖 2-13 所示，最後簡單探討系列潛堤於現場應用的可行性及優缺點。

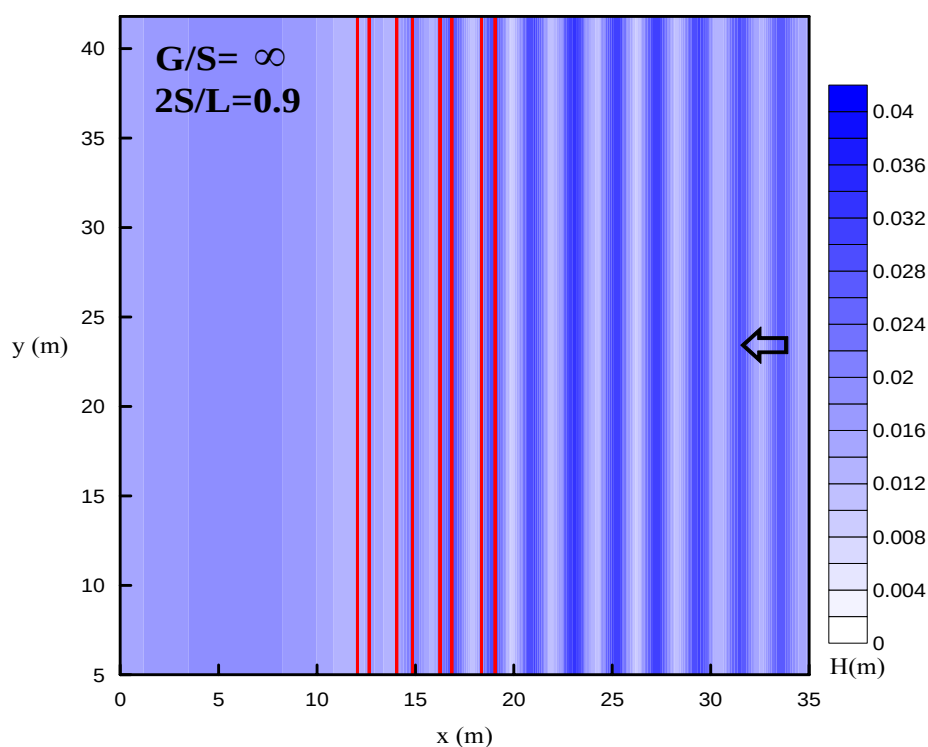


圖 2-9(A) 波浪通過無限長系列潛堤之波高分佈圖

(潛堤個數 = $N = 4$ ，堤長與堤距比 = $G/S = N = \infty$)

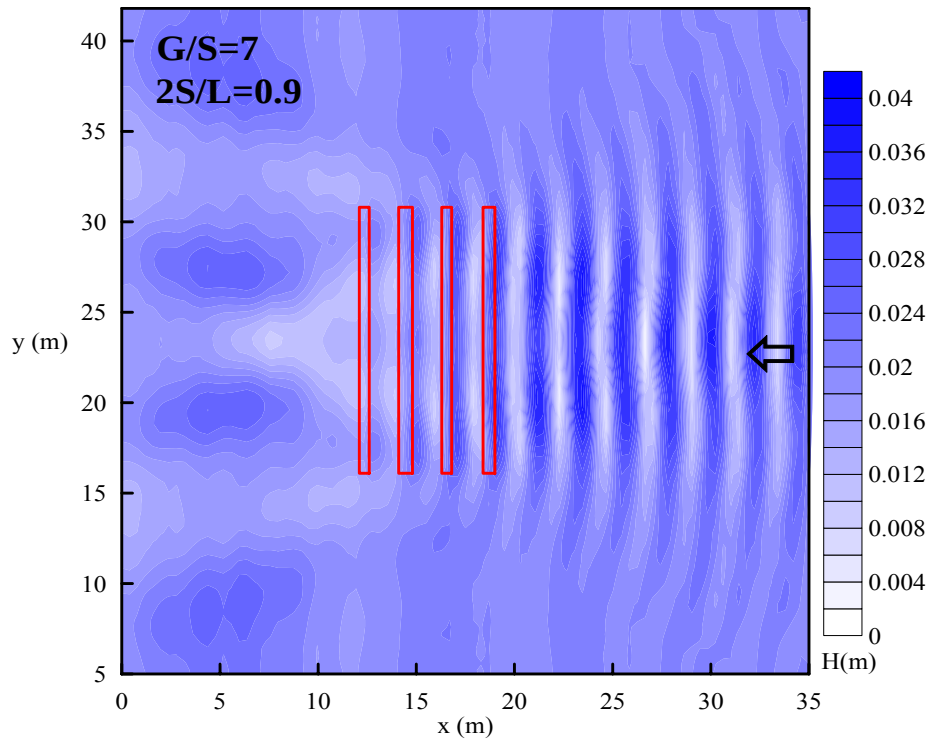


圖 2-9(B) 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

(潛堤個數= $N=4$ ，堤長與堤距比= $G/S=7$)

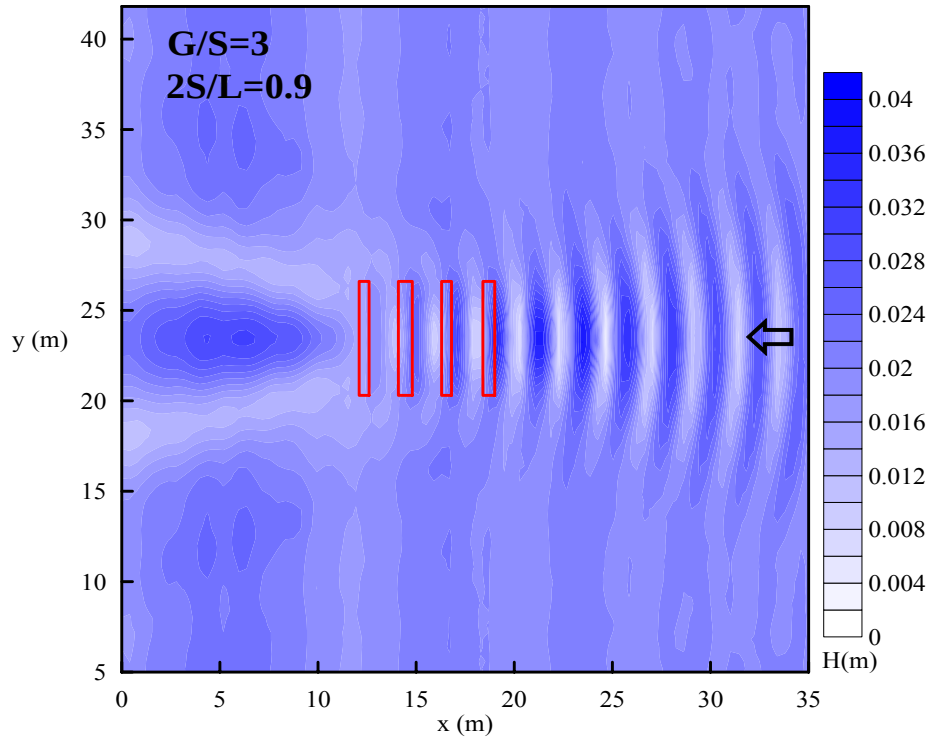


圖 2-9 (C) 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

(潛堤個數= $N=4$ ，堤長與堤距比= $G/S=3$)

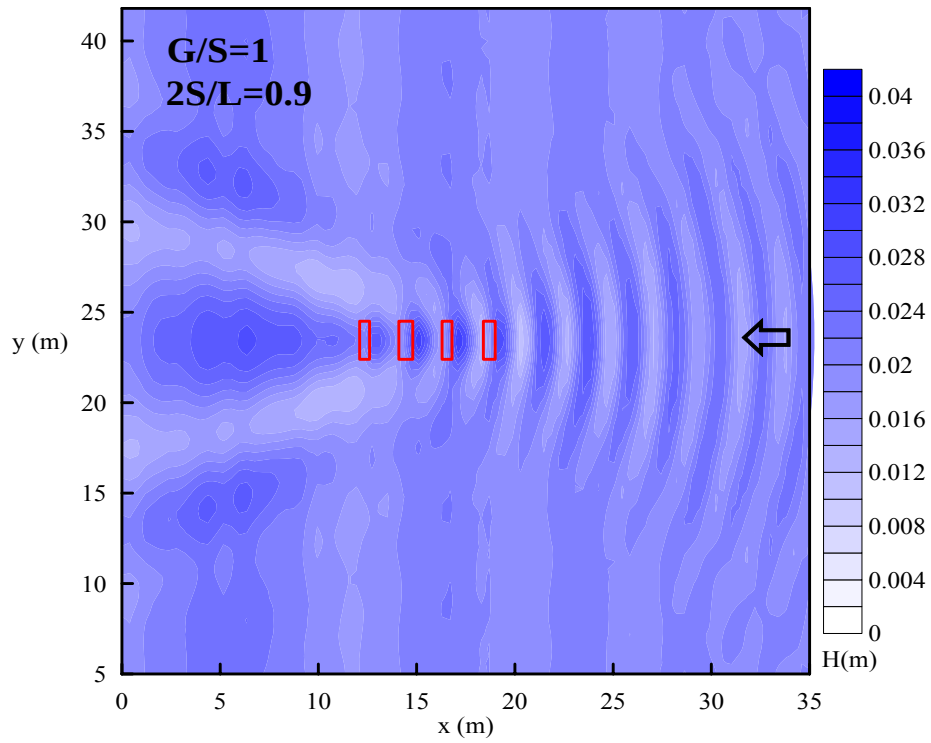


圖 2-9 (D) 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

(潛堤個數= $N=4$ ，堤長與堤距比= $G/S=1$)

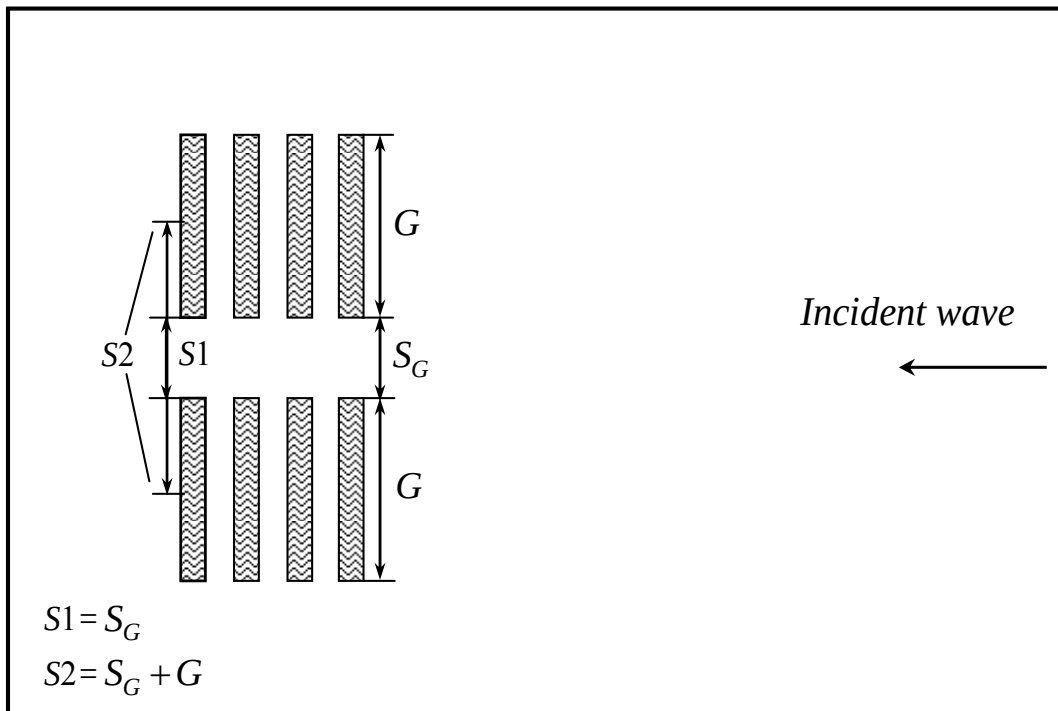


圖 2-10 多組系列潛堤佈置下比較能量透過率縱向擷取範圍示意圖

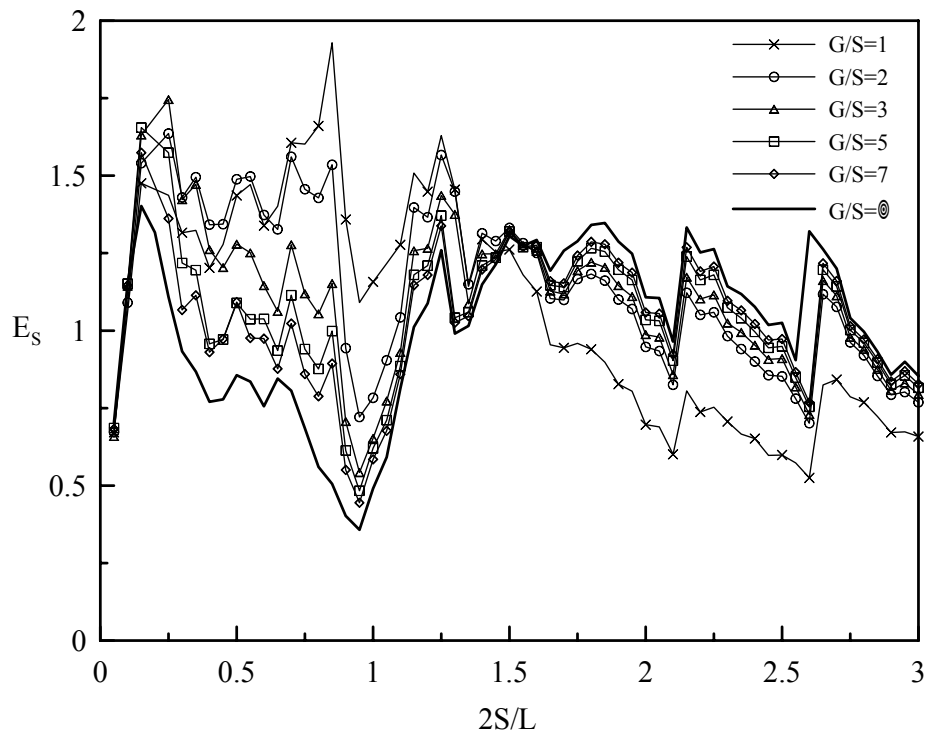


圖 2-11(A) 不同潛堤堤長能量透過率 E_s 與 $2S/L$ 關係圖

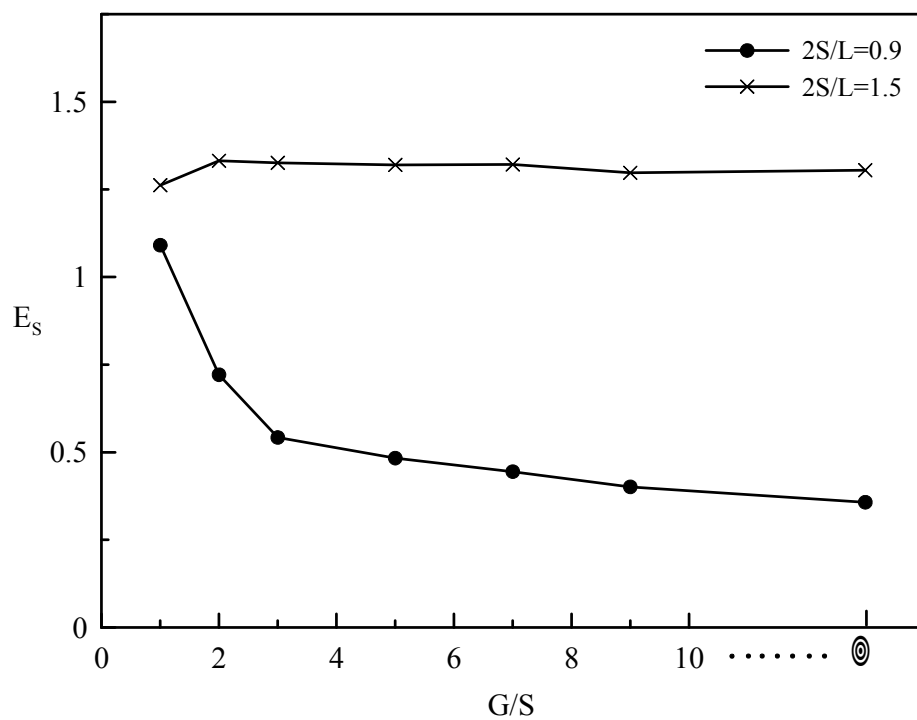


圖 2-11(B) 二維平面上共振現象與非共振現象情況下能量透過率(E_s)
與相對堤長(G/S)關係分佈圖

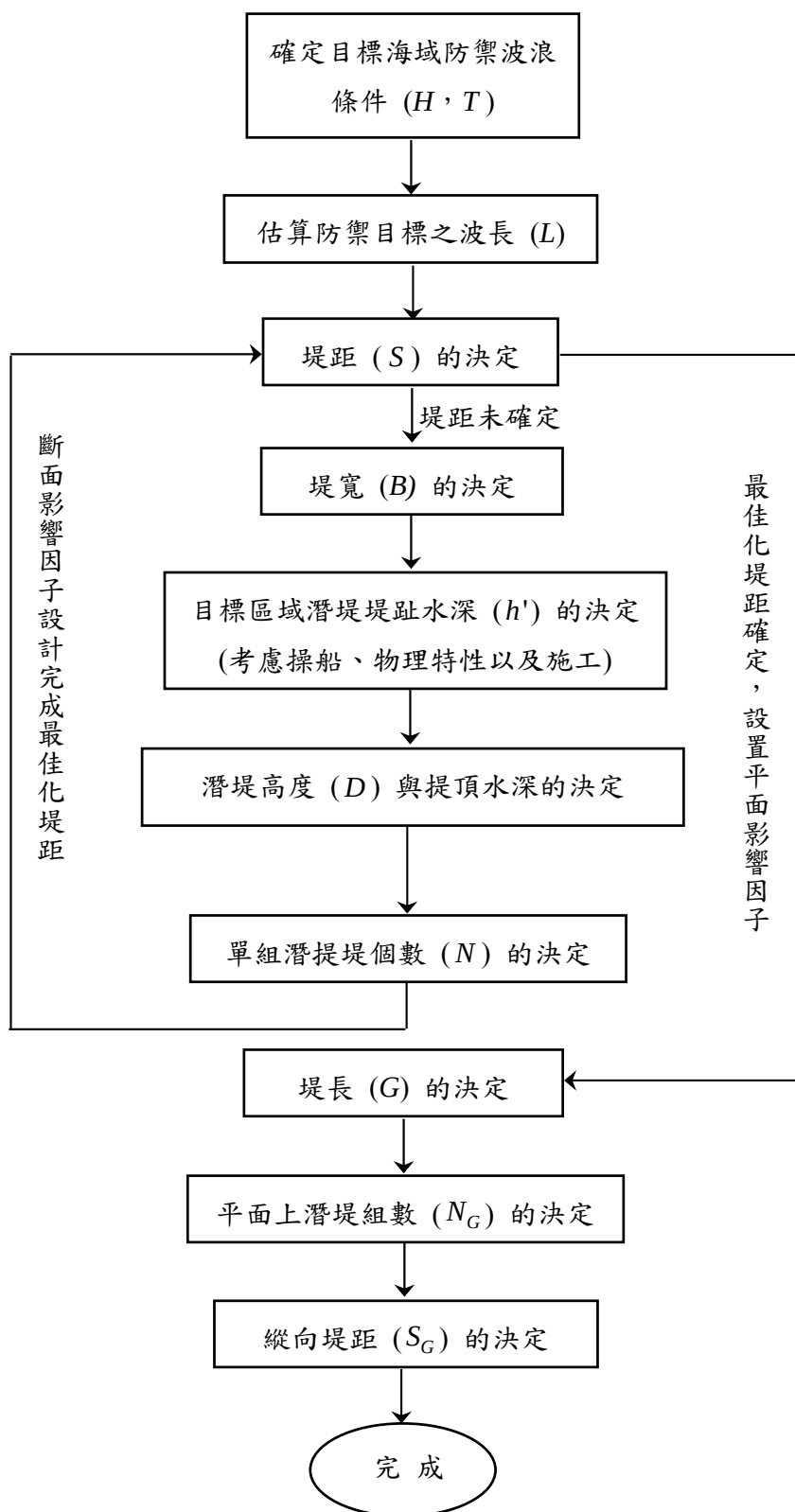


圖 2-12 佈置系列潛堤工法初步設計流程圖

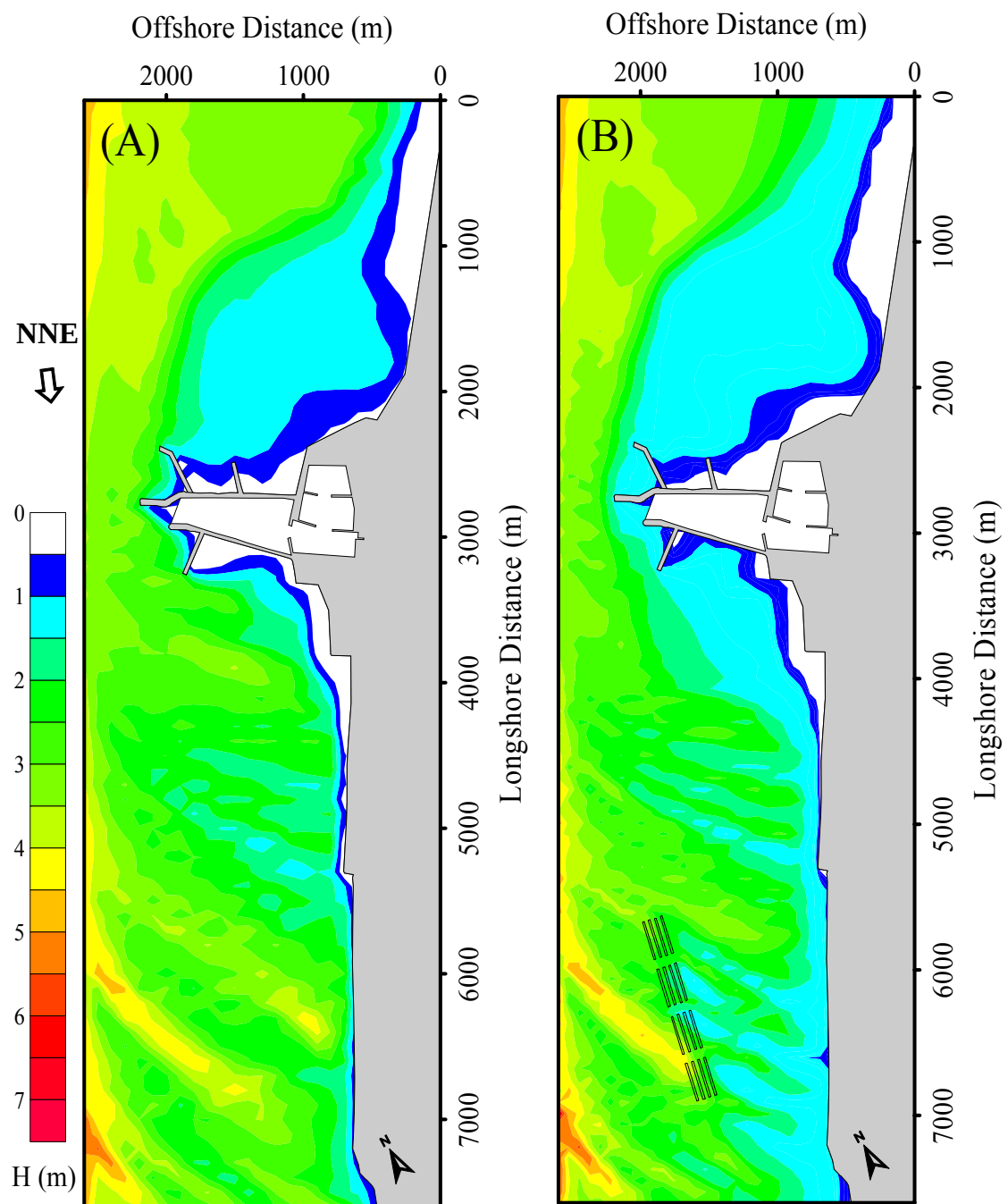


圖 2-13 10 年迴歸期颱風波浪作用下之波場分佈圖

(A) 無潛堤佈置 (B) 有潛堤佈置

($H=6.6\text{m}$, $T=10.8\text{sec}$, 波向 NNE)

2.4 本年度 (97 年) 計畫之簡述

有鑑於目前多數相關的研究皆以一維斷面之布拉格反射因子來進行探討，然而若要將此現象應用於現場平面上之波浪變形效應勢必不可忽略，故若能在平面上佈置各式系列潛堤，並進一步探討其各項影響因子，進而利用此研究結果規劃現場佈置並輔以數值計算，相信最終可將整體規劃應用於實際海域。因此，本年度計畫將延續過去三年的研究成果，將更加詳細的探討平面上因系列潛堤工法產生之布拉格共振機制的影響因子，並初估系列潛堤工法之經濟成本，希望最後規劃出包含經濟效益之系列潛堤工法現場設計流程圖，以期能做為未來現場應用的重要參考。此外，應用歸納出之設計流程圖，以台灣新竹港南海岸為示範區進行系列潛堤工法佈置範例，且利用發展之平面數值模式計算其相關波浪場，用以探討系列潛堤防護工法可能之成效。最後，總結各年度所有的研究成果，期望本海岸防護工法之研究能成為海岸防禦的一環達到防災禦浪之效果，並兼具親水海岸之功能，符合海岸永續利用之理想與目標。

第三章 EEMSE 模式

3.1 理論基礎

當波浪由外海向近岸傳播時，除了因水深變化而產生折射、繞射及淺化效應外，當結構物存在時，波浪亦將因繞射及反射而產生變形，若能正確地描述近岸波場因折射、淺化、繞射及反射共同效應的波浪變化，即可為近岸工程之規劃設計提供良好之參考。

本研究所選取的波浪模式，以 Suh 等人(1997) 及 Hsu 和 Wen³⁹ (2000) 所推導含有底床非線性項之雙曲線型緩坡方程式為基礎，計算波浪通過離岸潛堤所產生的近岸波場。方程式中所含之底床非線性項，包含有底床曲率項及底床斜率平方項之係數。Suh 等人 (1997) 所推導之延伸型緩坡方程式 (extended mild-slope equation) 如下：

$$-\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) + (CC_g k^2 - \omega^2) \Phi + [f_1(kh)g\nabla^2 h + f_2(kh)(\nabla h)^2 gk] \Phi = 0 \quad (3-1)$$

式中

$$f_1(kh) = \frac{[-4kh \cosh(kh) + \sinh(3kh) + \sinh(kh) + 8(kh)^2 \sinh(kh)]}{8 \cosh^3(kh)} \cdot [2kh + \sinh(2kh)] - \frac{kh \tanh(kh)}{2 \cosh^2(kh)} \quad (3-2)$$

$$f_2(kh) = \frac{\sec^2 h^2(kh)}{6[2kh + \sinh(2kh)]^3} \cdot \{8(kh)^4 + 16(kh)^3 \sinh(2kh) - 9 \sinh^2(2kh) \cosh(2kh) + 12(kh) \cdot [1 + 2 \sinh^4(kh)][kh + \sinh(2kh)]\} \quad (3-3)$$

式中 Φ 為流速勢， $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 為水平方向梯度因子， (x, y) 為水平座標， t 為時間因子， C 為波速， C_g 為群波波速， g 為重力加速度， $k = 2\pi/L$ 為週波數， ω 為角頻率， L 為波長， h 為水深， f_1 及 f_2 為底床曲率及底床斜率平方項係數。

對於式 (3-1) 所描述的波浪變形，只涵蓋波浪未碎波前之波形變化，若考慮波浪於近岸之碎波變形，一般加入波浪能量消散 (wave energy dissipation) 於式 (3-1) 中處理碎波後的波形，即

$$-\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) + CC_g k^2 [(1 + if_d) - \omega^2] \Phi + [f_1(kh)g\nabla^2 h + f_2(kh)(\nabla h)^2 gk] \Phi = 0 \quad (3-4)$$

式中 $i = \sqrt{-1}$ 。式 (3-4) 中的能量消散項 f_d ，採用 Isobe⁴⁰ 等人 (1987) 建議

$$f_d = \frac{5}{2} \tan \beta \sqrt{\frac{1}{kh}} \sqrt{\frac{\gamma - \gamma_r}{\gamma_s - \gamma_r}} \quad (3-5)$$

$$\gamma_r = 0.135 \quad (3-6)$$

$$\gamma_s = 0.4 \cdot (0.57 + 5.3 \tan \beta) \quad (3-7)$$

$$\gamma = |A|/h \quad (3-8)$$

$$\gamma_b = 0.53 - 0.3 \exp(-3\sqrt{h/L_0}) + 5(\tan \beta)^{3/2} \exp[-45(\sqrt{h/L_0} - 0.1)^2] \quad (3-9)$$

其中 $\tan \beta$ 為海床坡度， A 為波浪之振幅， L_0 為深海波長。

雙曲線型緩坡方程式，在處理邊界上較為繁複，故 Hsu 和 Wen (2000) 依 Mei⁴¹ (1983) 之建議，將一緩慢時間變量引入緩坡方程式中，其變量為

$$\bar{t} = \varepsilon t \quad (3-10)$$

其中 $\bar{t}$ 為緩慢時間變量， ε 為攝動參數 (perturbation coefficient)，且 $\varepsilon \ll 1$ 。根據式 (3-10)，則流速勢可進一步寫成

$$\Phi(x, y, t) = \bar{\psi}(x, y, \bar{t}) e^{-i\omega t} \quad (3-11)$$

式中 $\bar{\psi}$ 為加入攝動參數之流速勢。將式 (3-11) 代入式(3-4)，並將二階微小量省略，只保留一階以下各項，則可得一個新的時變性拋物線型緩坡方程式 (time-dependent parabolic mild-slope equation)，如下式所示：

$$\begin{aligned} -2\omega i \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial t} = & \nabla \cdot (CC_g \nabla \bar{\psi}) + CC_g k^2 (1 + if_d) \bar{\psi} \\ & + [f_1(kh)g\nabla^2 h + f_2(kh)(\nabla h)^2 gk] \bar{\psi} \end{aligned} \quad (3-12)$$

上式能降低矩陣之維度，降低數值計算之時間。Hsu 和 Tasi (2003) 將包含擾變地形水深函數 $h'(x,y)$ 視為平均水深函數 $h(x,y)$ 及擾變地形函數 $\delta(x,y)$ 的組合，即 $h'(x,y) = h(x,y) - \delta(x,y)$ ，帶入不透水底床地形邊界條件，引用 Radder⁴² (1979) 之尺度因子，如式 (3-13) 所示：

$$\bar{\psi} = \frac{\phi}{\sqrt{CC_g}} \quad (3-13)$$

則控制方程式可以改寫為

$$\begin{aligned} -\frac{2\omega i}{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial t} = & \nabla_h^2 \phi + k_c^2 \phi + \frac{g}{\sqrt{\Omega}} \left(2\vec{F}_1 \cdot \delta \nabla_h \frac{\phi}{\sqrt{\Omega}} \right) \\ & + \frac{\delta}{\sqrt{\Omega}} \nabla_h \left[g(1 - \lambda^2) \right] \cdot \nabla_h \left(\frac{\phi}{\sqrt{\Omega}} \right) \end{aligned} \quad (3-14)$$

其中

$$k_c^2 = \left[(g\vec{F}_1 \cdot \nabla_h^2 \delta + gF_2 + k^2 CC_g) / \Omega \right] - \left[(\nabla_h^2 \sqrt{\Omega}) / \sqrt{\Omega} \right] \quad (3-15)$$

$$\vec{F}_1 = \lambda(1 - \lambda^2)(k\nabla_h h + h\nabla_h k)$$

$$\begin{aligned} F_2 = & \alpha_1 (\nabla_h h)^2 k + \alpha_2 \nabla_h^2 h + \alpha_3 \nabla_h k \cdot \nabla_h h / k \\ & + \alpha_4 \nabla_h^2 k / k^2 + \alpha_5 (\nabla_h h)^2 / k^3 \end{aligned}$$

上式中 $\Omega = CC_g - g(1 - \lambda^2)\delta$ ， ϕ 為流速勢， $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 為水

平方向梯度因子， C 為波速， C_g 為群波波速， δ 為擾變地形函數， $\lambda = \tanh kh$ ， $\omega^2 = gk \tanh kh$ ， $\alpha_{1\sim5}$ 為待定參數如下所示

$$\alpha_1 = -\lambda(1-\lambda^2)(1-\lambda q) - 2(1-\lambda^2)\lambda^2 k \delta$$

$$\alpha_2 = -\lambda q(1-\lambda^2)/2 + (1-\lambda^2)\lambda k \delta$$

$$\alpha_3 = q(1-\lambda^2)(2q\lambda^2 - 5\lambda/2 - q/2) - 2(1-\lambda^2)(2\lambda^2 q - \lambda - q)k \delta$$

$$\alpha_4 = q(1-\lambda^2)(1-2\lambda q)/4 - \lambda/4 + (1-\lambda^2)\lambda q k \delta$$

$$\alpha_5 = q(1-\lambda^2)(4\lambda^2 q^2 - 4q^2/3 - 2\lambda q - 1)/4 + \lambda/4 + (1-\lambda^2)q^2(1-2\lambda^2)k \delta$$

式 (3-14) 較先前的雙曲線型緩坡方程式，能節省數值疊代之計算時間，適用於較大範圍的海域波場計算。

3.2 數值方法

3.2.1 差分方程式

對於數值方法的選取，本研究以交替方向隱式法 (Alternating Direction Implicit Method)，簡稱 ADI 法求解式(3-14)。波場差分網格示意圖，如圖 3-1 所示。其控制方程式式 (3-14) 的數值差分式如下：

$$f_{p,q} \frac{\phi_{p,q}^{n+1/2} - \phi_{p,q}^n}{\frac{1}{2}\Delta t} i = \delta_x^2 \phi_{p,q}^{n+1/2} + \frac{1}{2}(k_c^2)_{p,q} \phi_{p,q}^{n+1/2} + \delta_y^2 \phi_{p,q}^n + \frac{1}{2}(k_c^2)_{p,q} \phi_{p,q}^n \quad (3-16)$$

$$f_{p,q} \frac{\phi_{p,q}^{n+1} - \phi_{p,q}^{n+1/2}}{\frac{1}{2}\Delta t} i = \delta_x^2 \phi_{p,q}^{n+1/2} + \frac{1}{2}(k_c^2)_{p,q} \phi_{p,q}^{n+1/2} + \delta_y^2 \phi_{p,q}^{n+1} + \frac{1}{2}(k_c^2)_{p,q} \phi_{p,q}^n \quad (3-17)$$

$$f_{p,q} = -\frac{2\omega}{(\alpha_p)_{p,q}} \quad (3-18)$$

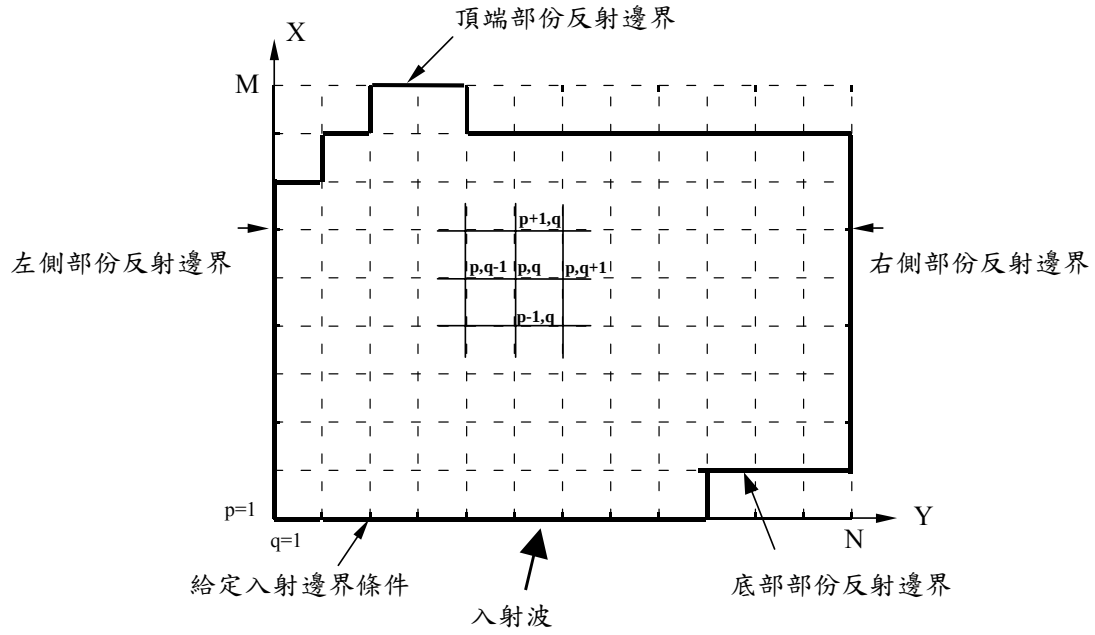


圖 3-1 數值模式格網示意圖

$$\delta_x^2 \phi_{p,q}^n = \frac{\phi_{p-1,q}^n - 2\phi_{p,q}^n + \phi_{p+1,q}^n}{\Delta x^2} \quad (3-19)$$

$$\delta_y^2 \phi_{p,q}^n = \frac{\phi_{p,q-1}^n - 2\phi_{p,q}^n + \phi_{p,q+1}^n}{\Delta y^2} \quad (3-20)$$

式 (3-16) 至式 (3-17) 中，下標 p 代表 x 軸方向的第 p 個格點，下標 q 代表 y 軸方向的第 q 個格點，上標 n 代表時間， Δt 代表差分時間段， Δx 、 Δy 分別為 x 、 y 軸之差分間距。

由於所選取的差分方法為隱式法，所以於計算上無顯式法求解時有著穩定度 (stability) 的問題。上述之數值方法經 Von Neumann's 穩定度分析，設

$$\phi_{p,q}^n = \xi^n e^{i\alpha p \Delta x} e^{i\beta q \Delta y} \quad (3-21)$$

分別代入式 (3-16) 及式 (3-17) 可得

$$\xi_1 = \frac{f_{p,q}i + [\frac{\Delta t}{4}(k_c)_{p,q} - \frac{2\Delta t}{\Delta y^2} \sin^2(\frac{\beta\Delta y}{2})]}{f_{p,q}i - [\frac{\Delta t}{4}(k_c)_{p,q} - \frac{2\Delta t}{\Delta x^2} \sin^2(\frac{\alpha\Delta y}{2})]} \quad (3-22)$$

$$\xi_2 = \frac{f_{p,q}i + [\frac{\Delta t}{4}(k_c)_{p,q} - \frac{2\Delta t}{\Delta x^2} \sin^2(\frac{\alpha\Delta y}{2})]}{f_{p,q}i - [\frac{\Delta t}{4}(k_c)_{p,q} - \frac{2\Delta t}{\Delta y^2} \sin^2(\frac{\beta\Delta y}{2})]} \quad (3-23)$$

式 (3-22) 及式 (3-23) 為擴大因子 (amplification factor)，且

$$|\xi| = |\xi_1 \xi_2| = 1 \quad (3-24)$$

上式證明利用上述之數值方法去求解方程式可獲得穩定 (unconditionally stable) 的結果。

3.2.2 邊界條件

對於波浪通過計算邊界所需給定的條件，於模式中則是採用輻射邊界 (radiation boundary condition) 來加以處理，並依照邊界之特性可將其邊界條件可分為完全吸收、部分吸收邊界條件、給定邊界條件及考慮地形變化之開放邊界條件。

(1). 吸收及部分吸收邊界條件 (fully and partial absorption boundary condition)

對於波浪通過邊界時，所使用的邊界條件若無任何反射波浪產生，則此邊界將波浪完全吸收，此邊界條件為完全吸收邊界條件 (fully absorbed boundary condition)。若於邊界上只吸收部份的波浪能量，則稱為部份吸收邊界 (partial absorption boundary condition)，其數學式如式 (3-25)

$$\frac{d\phi}{dt} = \hat{\alpha} \frac{\partial \phi}{\partial t} + C \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0, \text{ 在 } \partial B \quad (3-25)$$

上式根據 Behrent⁴³ (1985) 所提出來的，主要是在兩側以及結構物的

邊界上使用，式中 r 指的是波浪行進的路徑，經理論推導後在結構物的邊界上可以得到當 $r \rightarrow \infty$ 時，式 (3-25) 會成立，稱之為輻射邊界條件(radiation boundary condition)，其中 $\hat{\alpha}$ 為吸收係數 (absorption coefficient)。假設 $\hat{\alpha} = 1$ ，則波浪完全通過邊界；若 $\hat{\alpha} = 0$ ，則於邊界上產生全反射；若 $0 < \hat{\alpha} < 1$ ，則為部份吸收邊界，式中 $\hat{\alpha}$ 值的決定，需依邊界上的物理特性加以決定。 r 為波浪的路徑。利用 $r = |r| = x \cos \theta' + y \sin \theta'$ 之關係， θ' 為波浪於邊界上的角度。則上式關係可進一步表示

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \cos \theta', \quad \frac{\partial r}{\partial y} = \sin \theta' \quad (3-26)$$

代入式 (3-26) 可得 x 方向的邊界條件為

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \mp i \hat{\alpha} k \cos \theta' \phi = 0, \quad \partial B_{x\pm} \quad (3-27)$$

式 (3-27) 中 ∂B_x 為 x 軸的邊界。同理可知，對於波浪通過垂直於 y 軸的輻射邊界 ∂B_y ，可得式 (3-28)

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \mp i \hat{\alpha} k \sin \theta' \phi = 0, \quad \partial B_{y\pm} \quad (3-28)$$

由於在數值模式計算時，無法先得知波浪入射邊界的夾角 θ' ，故文中利用數值方式疊代求解，將邊界角度疊代至收斂，此一處理方式較能適用於大角度波浪入射之條件 (Hsu 和 Wen, 2000)。

(2). 給定邊界條件 (given boundary condition)

當波浪入射遇結構物所產生的反射波浪通過邊界時。於離岸邊界上包含有入射波波場及反射波波場。由於入射波場為已知，而反射波波場未知且為離岸方向，若波浪沿 x 方向正向入射及反射，其邊界條件可以下式表示：

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = ik(\phi_i - \phi_r) = \pm ik_x \phi + 2ik_{xi} \phi_i, \quad \partial B_{\pm} \quad (3-29)$$

式中 ϕ_i 表示為正 x 方向的入射波， ϕ_r 表示為負 x 方向的反射波。

(3). 考慮地形變化之開放邊界條件

對於水深變化明顯之開放邊界（包含離岸邊界及向離岸方向之側邊界）處，須考慮具地形變化邊界上之邊界條件。Panchang⁴⁴ 等人 (2000) 針對地形變化邊界條件之處理概念，建議將此邊界上之合成波浪分離成包含入射波浪 ϕ_i 、散射波浪 ϕ_s 、以及因地形變化產生之反射波浪 ϕ_r 等三種成份波，故此邊界上之波浪可表示為

$$\phi = \phi_i + \phi_r + \phi_s \quad (3-30)$$

其中由於地形淺化的關係，入射波 ϕ_i 之振幅與相位函數在每一種水深上皆不盡相同，而因地形變化產生之反射波之波形函數 ϕ_r 亦無法預先得知，考量以上之困境，故在此將入射波與反射波合併列入處理，而得 $\phi_0 = \phi_i + \phi_r$ ，即

$$\phi = \phi_0 + \phi_s \quad (3-31)$$

而 ϕ_0 在模式計算剛開始時為未知，為了精準的估算邊界上的值，本研究利用 Panchang(2000) 所提出的概念，先將邊界退化為一維問題，求解邊界上所有格點的速度勢，進而知道邊界上的 ϕ_0 。最後將邊界上 ϕ_0 作為模式計算時的已知值，來處理此一因應地形變化的邊界條件，使得模式於邊界計算具有更高的精準度與穩定性。由於散射波 ϕ_s 需滿足輻射邊界條件式 (3-27) 或式 (3-28) 之關係，因此可得到具地形變化開放邊界之邊界條件如下

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi_0}{\partial x} \pm ik_{sx} \phi_0 \pm ik_{sx} \phi, \quad \partial B_{x\pm} \quad (3-32)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \phi_0}{\partial y} \pm ik_{sy} \phi_0 \pm ik_{sy} \phi, \quad \partial B_{\pm} \quad (3-33)$$

式 (3-32) 及式(3-33)邊界條件中之 ϕ_0 為未知數，如欲以此邊界條件計算波場問題，則需設法以其他方式求解 ϕ_0 。本研究利用波浪斜向入射等坡度平直岸線海域之簡化問題，此一簡化問題可以將波場模式退化為一維 (one-dimension) 模式進行計算，進而求解邊界條件式 (3-32) 及式 (3-33) 中所需之 ϕ_0 值。

3.2.3 收斂條件

對於本模式所採取的收斂條件為殘差小於 ε 時為其收斂條件。其殘差表示式如式 (3-34) 所示：

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum_p \sum_q ABS(\phi_{p,q}^n - \phi_{p,q}^{n-1})^2}}{\sum_p \sum_q ABS(\phi_{p,q}^n)} \quad (3-34)$$

此模式計算時，時間的變化 (Δt) 為疊代的參數指標，且此參數為影響其收斂速度的重要參數。 Δt 參數的型式如下：

$$\Delta t = N \frac{2\omega}{CC_g} \Delta x^2 \quad (3-35)$$

其中 N 為無因次參數，其值界於 $O(1) \sim O(10)$ 之間。

3.3 模式驗證

為驗證模式對於實際平面海域具有良好的可靠性，本研究選擇港嘴海域離岸堤設計案例檢驗本研究波浪數值模式於實際工程設計時對於波場之模擬能力及適用性，此案例以王⁴⁵ (2001) 之有限元素法波浪數值模式進行計算。本研究模式計算之範圍為 $600 \times 1000 \text{m}^2$ 之大小作為計算範圍。

模式計算選擇一代表性之颱風波浪作為輸入之波浪入射條件，入射波高為 4.0m、週期 9.0sec、入射波向 5.0° 。圖 3-2 為港嘴水域水深分佈以及波場位相圖，圖 3-3 為王 (2001) 之模式計算之波場波高分佈圖，圖 3-4 則為本研究模式之波場分佈計算結果。由圖 3-3 與圖

3-4 比較，兩者之平面波浪分佈趨勢約略相似。為再進一步比較本研究模式與王 (2001) 之模式兩者間計算所得之異同，於縱岸及沿岸方向上各選取 3 個斷面，分別為縱岸方向斷面①、②、③ ($Y = 150\text{m}$ 、 $Y = 500\text{m}$ 、 $Y = 850\text{m}$) 及沿岸方向斷面④、⑤、⑥ ($X = 400\text{m}$ 、 $X = 270\text{m}$ 、 $X = 185\text{m}$)，比較之結果如圖 3-5 所示，圖中本研究模式在各斷面上皆與王 (2001) 之波場計算結果呈現良好之一致性，顯示本研究模式可以合理地模擬實際海域之波場。而在圖 3-5(E) 斷面 5 的部分，因波浪有角度的入射計算領域，當波浪傳遞遭遇離岸堤時產生反射波，在穩態的計算結果上，可能出現駐波現象，導致 $Y = 480\text{m}$ 左右的地方出現了極小值。而在圖 3-5(F) 的部分主要探討結構物後方的斷面，波浪通過離岸堤時會產生繞射效應以及波波交會的現象，在穩態的情況下，也會可能有駐波的現象發生，因而導致模式估算時在 $Y = 600\text{m}$ 附近有接近 0 的值出現。又比較本模式與王(2001)模式的控制方程式雖然同為緩坡方程式，但模式可能隨使用的數值方法、離散方式、碎波指標與能量消散公式的不同，而導致估算的值有所偏差，但整體趨勢具一致性。故本研究利用 EEMSE 模式，來模擬波浪通過各種地形時的波場變化情形，藉由所求得的波高分佈，再利用能量的觀點提出的能量透過率的計算方式，即可求出波浪通過系列潛堤之特性。

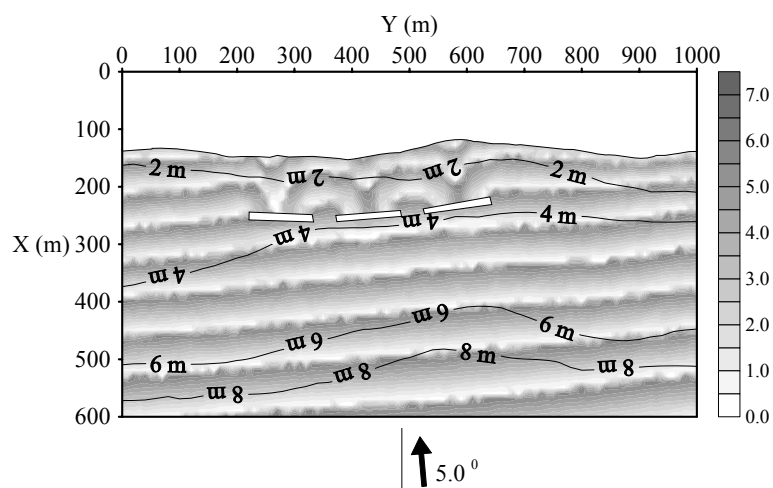


圖 3-2 港嘴海域水深及波場位相分佈圖（颱風波浪條件）

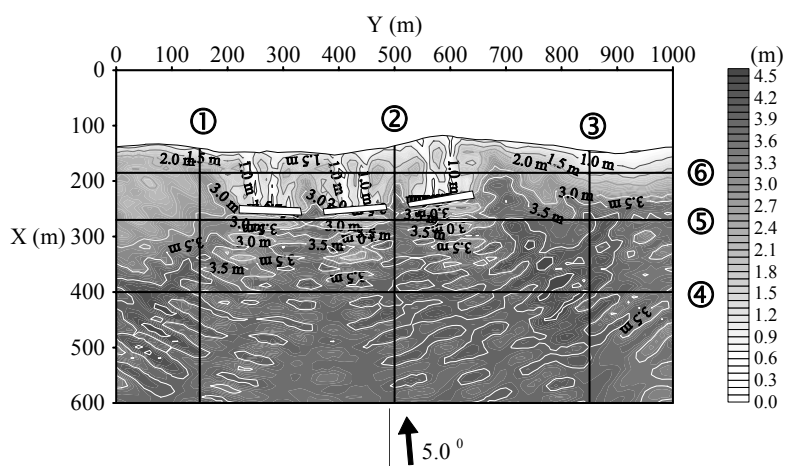


圖 3-3 港嘴海域之波高分佈 [王，2001 (颱風波浪條件)]

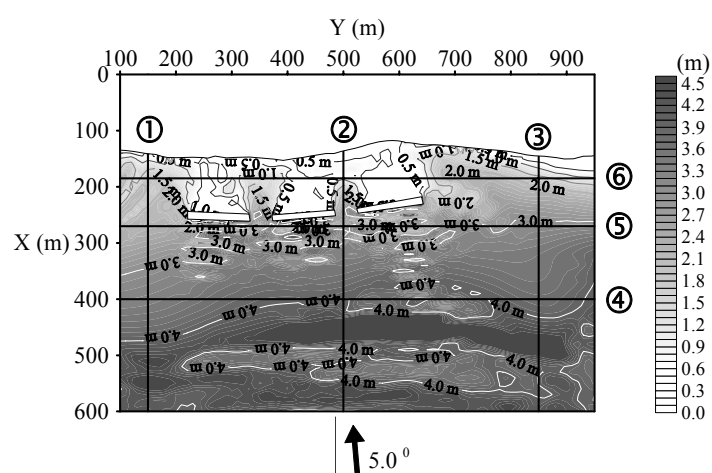


圖 3-4 港嘴海域之波高分佈 [本研究模式 (颱風波浪條件)]

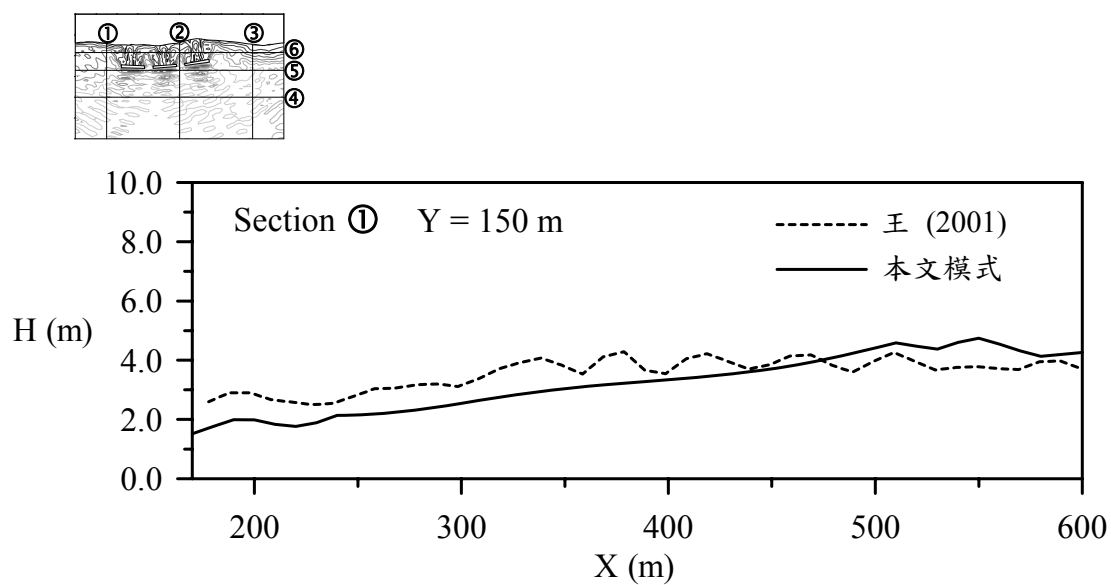


圖 3-5(A) 縱岸方向斷面①上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)

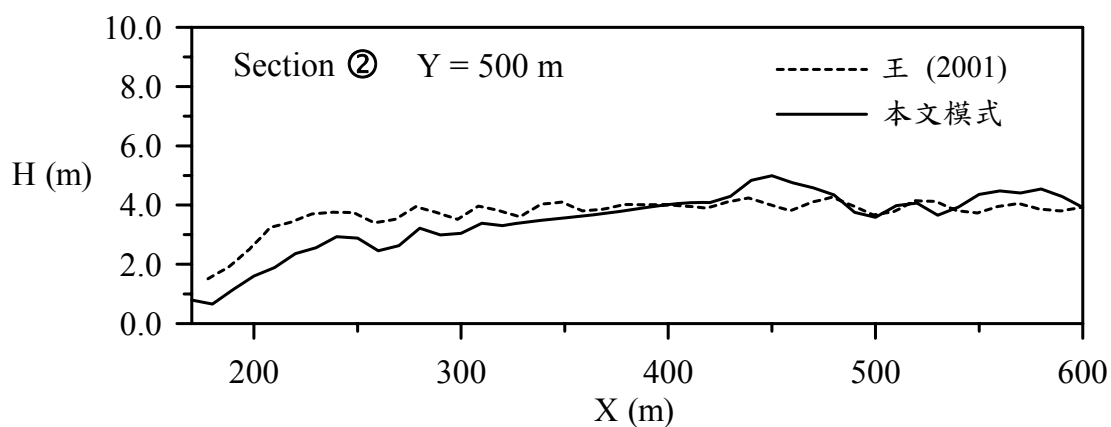


圖 3-5(B) 縱岸方向斷面②上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)

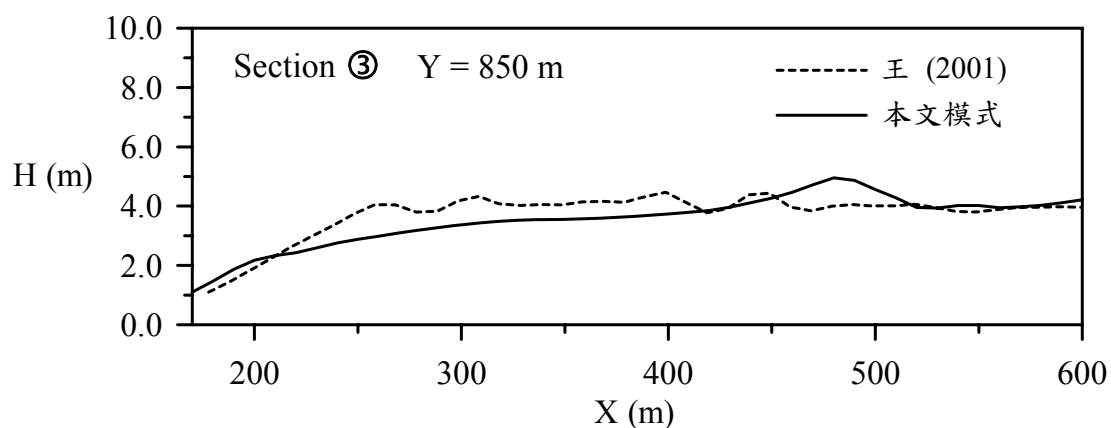


圖 3-5(C) 縱岸方向斷面③上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)

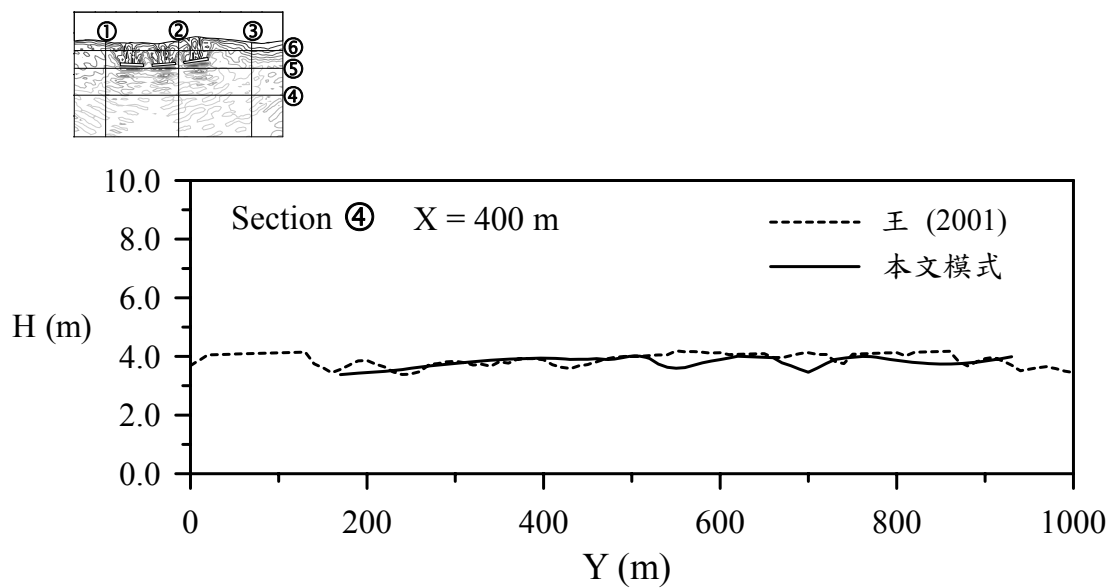


圖 3-5(D) 沿岸方向斷面④上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)

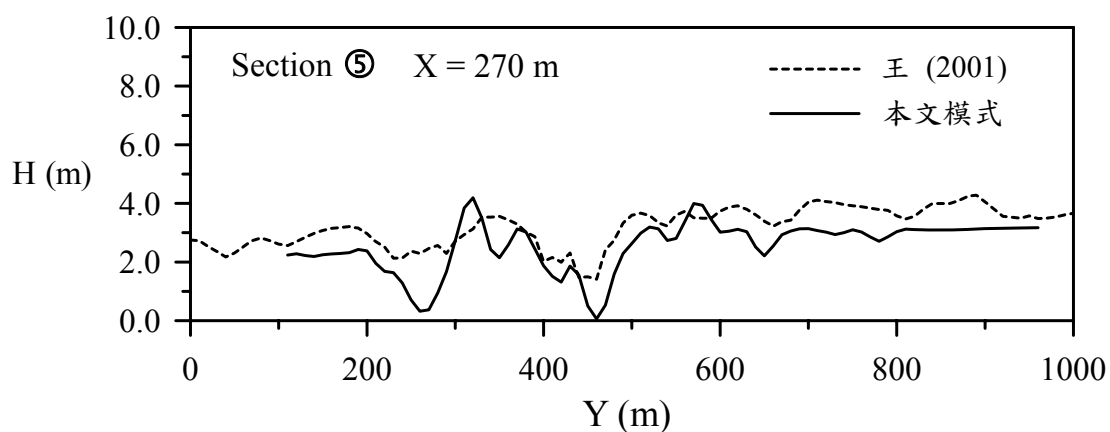


圖 3-5(E) 沿岸方向斷面⑤上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)

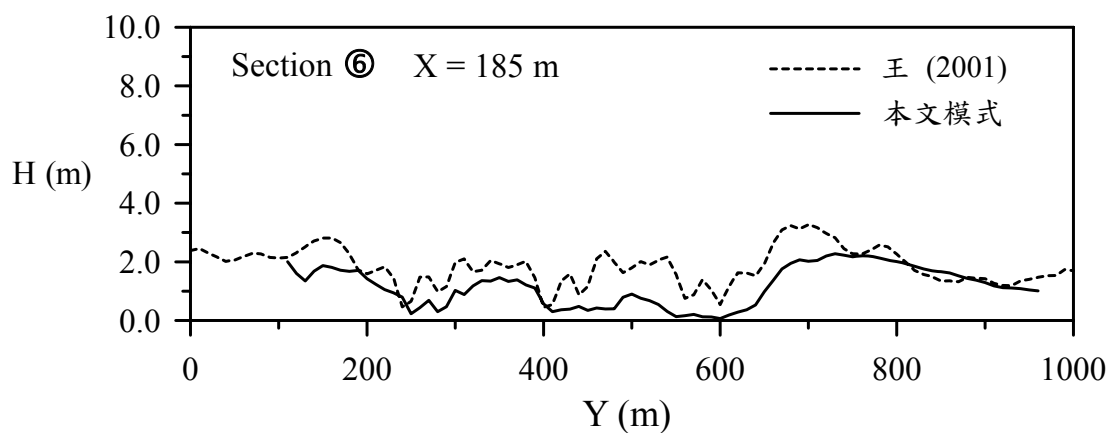


圖 3-5(F) 沿岸方向斷面⑥上之波高分佈比較 (颱風波浪條件)

第四章 系列潛堤工法應用於現場海域之應用-以新竹港南海域為例

本連續性研究最大的目的在於說明系列潛堤工法於實際海域之可行性與適用性，本章利用數值模式以新竹港南海域為例，逐一進行系列潛堤各影響因子之設計模擬，希望以此為範例詳細說明此工法於實際海域之規劃流程，以期能作為往後實際設計及應用之參考依據。

4.1 研究方法

過去對於布拉格共振機制之影響因子的探討研究大多著重在斷面上的討論，然而實際的現場海域應為三維空間，在本研究的第三年度中，已針對二維平面影響因子進行一系列的探討，並利用能量的觀點歸納出各個影響因子之特性，進而提出系列潛堤工法初步設計流程圖。本節將先說明在考慮平面的情況下所歸納出的影響因子及示意圖，接著闡述整個共振機制所採用的研究方法，最後簡述計畫提出的系列潛堤工法設計流程圖，以作為下一節實例應用之基準。

4.1.1 布拉格共振影響因子與能量透過率

研究波浪通過佈置系列潛堤之底床，在不同的佈置條件及不同入射條件作用下，波浪受底床及潛堤的互制作用影響，會使得整個波場產生各種不同變化，導致布拉格共振機制亦有所不同。承襲第三年度之研究成果，歸納平面上主要影響布拉格共振機制的參數包括：潛堤堤高 D 、潛堤長度 G 、潛堤間距 S 、縱向潛堤間距 S_G 、潛堤個數 N 、系列潛堤組數 N_G 、潛堤寬度 B 、入射波水深 h 、波浪入射角 θ 及波浪週期 T ，其特徵函數可以以下式表示：

$$F = f_1(D, G, h, S, S_G, T, N, N_G, B, \theta) \quad (4-1)$$

以波浪能量衰減或反射率 F' 代表特徵函數，則無因次組合可表示為

$$F' = f_1(D/h, G/S, 2S/L, B/S, S_G/G, N, N_G, \theta) \quad (4-2)$$

關於上述各因子之相關平面示意圖如圖 4-1 所示。

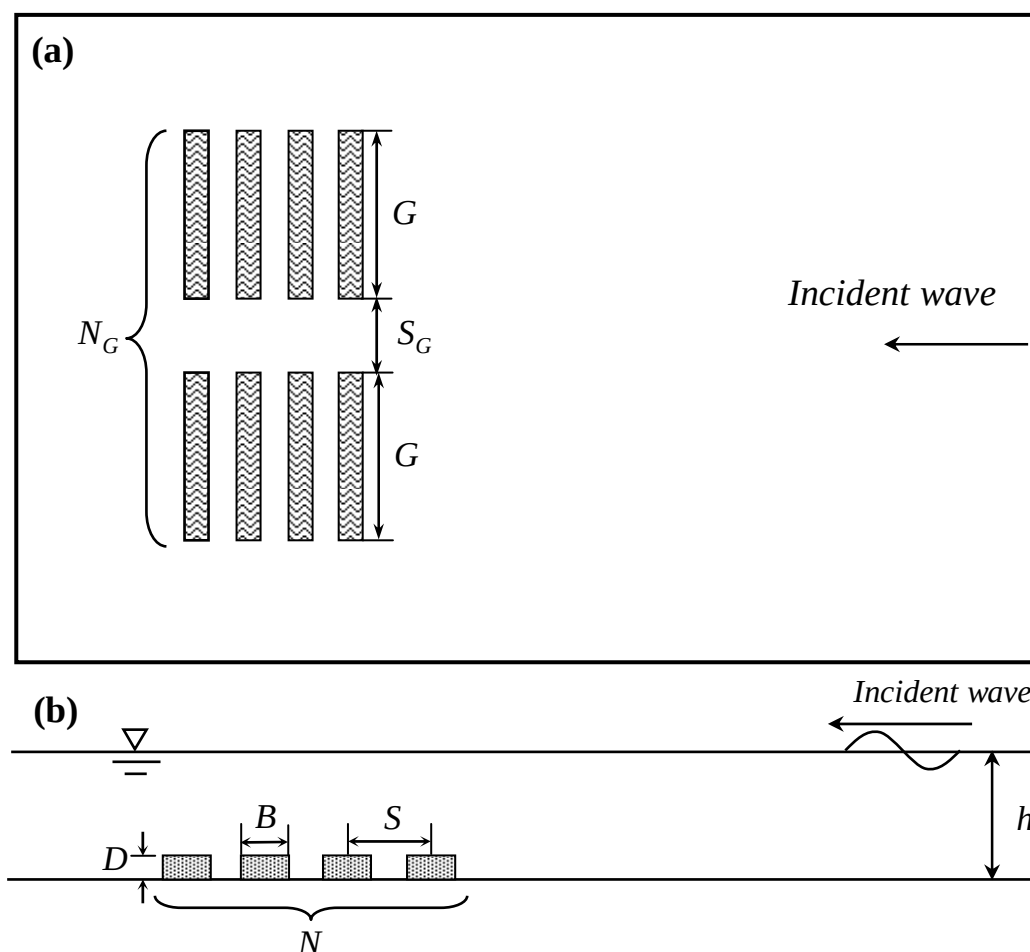


圖 4-1 多組系列潛堤佈置之平面布拉格反射因子示意圖

(a) 平面圖；(b) 剖面圖

往昔對於布拉格共振機制的研究，均假設在無波浪繞射情況下，進行斷面的數值模擬或水工試驗，因此經常以反射率作為研究的特徵函數。然而實際現場應用時，潛堤之堤長不可能無限延伸，因此若將該工法應用於現場海域，理應考慮多組潛堤並排之可能性以及布拉格共振機制產生的情形。針對二維平面的反射率研究，目前並沒有相關的理論基礎可以參考，為了具體的瞭解系列潛堤工法佈置於平面之可行性，本研究利用能量透過率的觀點切入來分析布拉格共振現象。

眾所皆知在波浪場中能量與波高的平方成正比關係，故今將計算領域中系列潛堤的堤後透射波高平方和除以欲比較之波高平方和即可得到相關的能量透過率，其數學式可以表示為

$$E_s = \frac{\sum_j (H_t)_j^2}{\sum_j (H_i)_j^2} \quad (4-3)$$

其中 E_s 為能量透過率， H_t 為系列潛堤堤後方某一格點相對的波高值， H_i 為欲比較之區域中某一格點相對的波高值， $j=1,2,\dots,n$ 為格網點編號。以此方法來進行平面上的分析可以清楚的瞭解在不同條件下，波浪通過結構物時能量減衰的趨勢。

4.1.2 系列潛堤設計流程圖

承襲本系列研究與 Wen 和 Tsai (2008) 之成果，則可以將布拉格共振機制之各項影響因子統合歸納出最適化的參數與流程。本小節遂以計畫的成果提出系列潛堤工法設計流程圖，在下面各節將以此為基礎逐一說明系列潛堤工法於實際海域建構時之各項設計步驟。

根據本研究將系列潛堤設計佈置於現場，欲得到最佳適化的佈置，首先必須確認目標防禦波浪條件，初估其波長後始可決定初步堤距，依照堤距的結果決定堤寬以及堤頂水深，之後檢視目標設定區的堤趾水深，再決定潛堤個數，並重新求算最佳化堤距，若在此佈置條件下其發生布拉格共振的範圍與目標防禦條件不同時則重新設計新的堤距並檢視各影響因子。待完成一維方向影響因子的設定，隨後以堤距作為基礎，決定堤長與平面上各組潛堤之組距，最後再決定系列潛堤組數與擺放位置方向，則得到整個系列潛堤工法於平面上的設計。茲將上述設計步驟繪製成流程圖，如圖 4-2 所示。

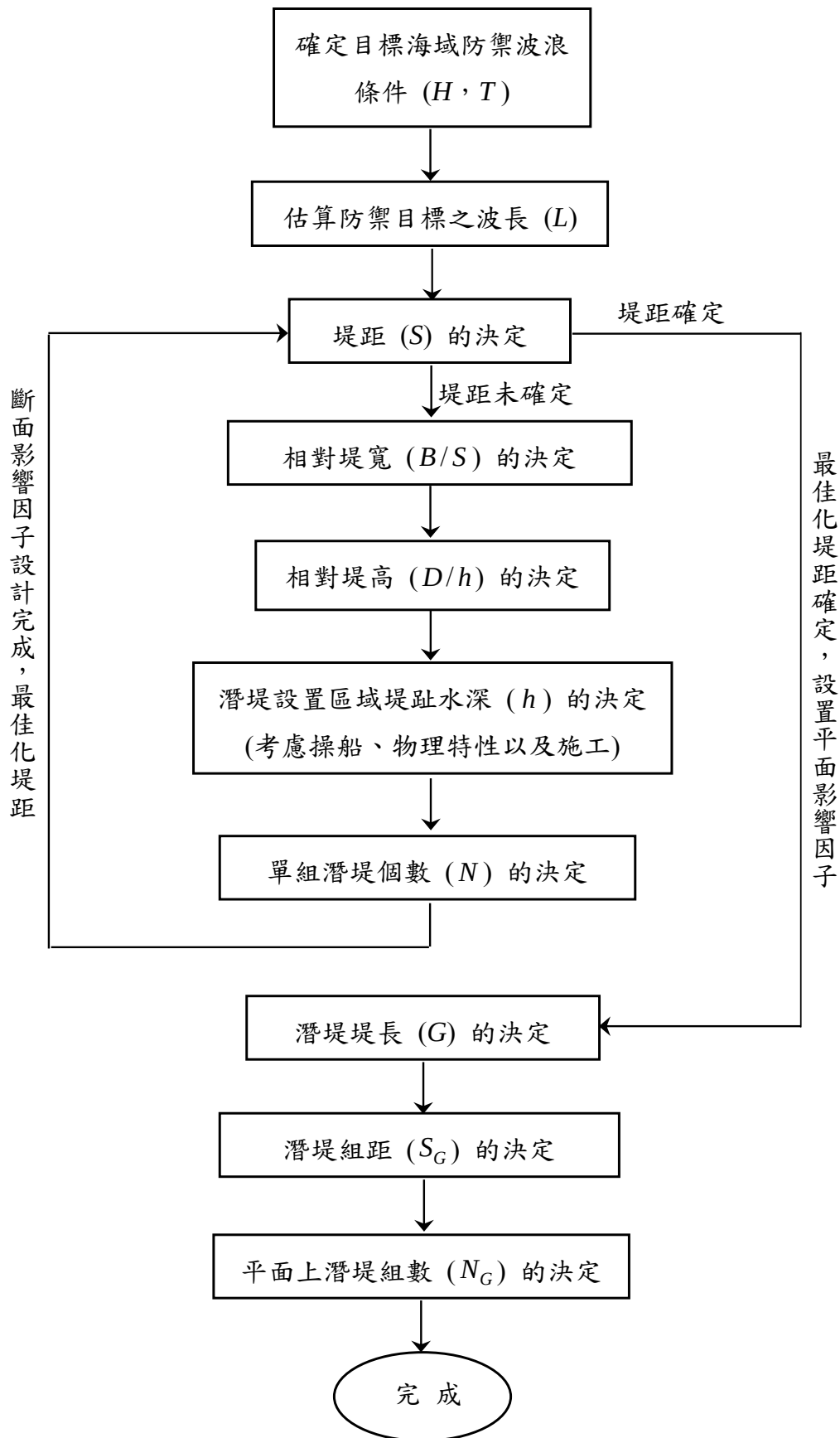


圖 4-2 系列潛堤工法設計流程圖

4.2 新竹港南海域之現況

新竹港南海岸位於新竹市西北方，北與新竹漁港新竹垃圾處理廠事業性海堤相鄰，南至客雅溪口，其平面位置空照圖如圖 4-3 (資料來源：Google Earth) 所示。由眾多專業之研究報告皆指出近年來港南海岸侵蝕情形日益惡化，探究其主要原因應為本區海岸因北邊漁港防波堤攔阻沙源，以及在高潮與颱風期間，近岸沙灘上受波浪侵襲使得灘線向內陸移動之故。早期放置消波塊於港南海岸北側堤前用以防止侵蝕或在消波塊群後上方覆土以改善生態景觀環境，然而此均為暫時性之權宜措施，未能真正有效的改善海岸侵蝕問題，並同時達到生態景觀與親水的多樣化目標。

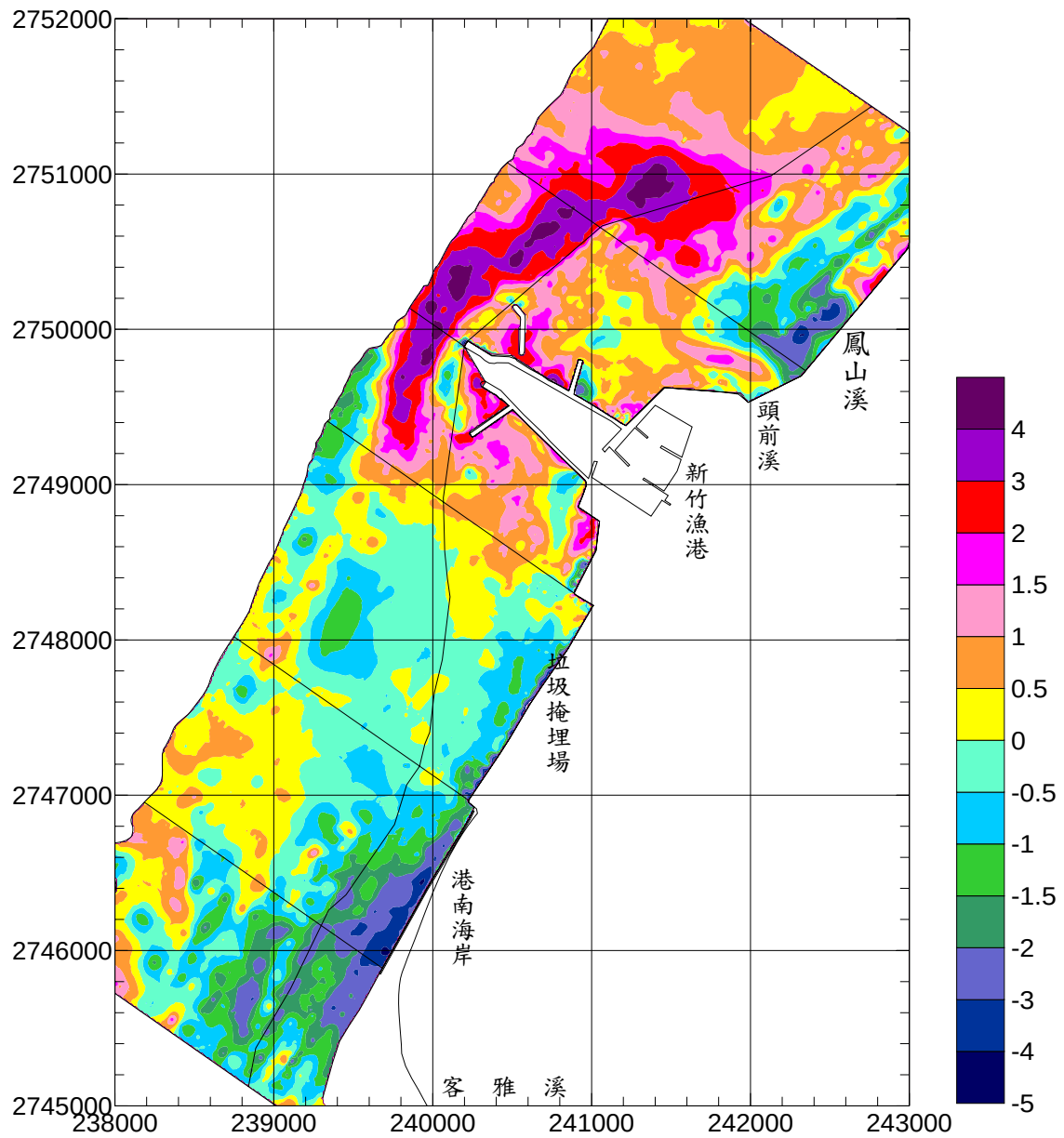
對於海岸防治應先瞭解地形變遷機制，並輔以適當之人工結構物，儘量利用波浪之特性，藉自然之力量達成平衡與防護目的。故在防護工法的規劃設計上，除了考量對波浪之防禦性外，隨著台灣生活品質的提升應同時考慮海岸之親水性與景觀生態。然而由往昔的研究顯示，系列潛堤之保護工法除了可以有效改善海岸景觀外，亦可利用布拉格共振機制之消能效應，將多數的波浪能量阻擋於外海，但在施工甚至實際應用上目前仍無詳盡的規劃流程，故本研究將以台灣新竹港南海岸為案例，針對此進行數值模擬以探討各方面之影響，進而規劃施工的可行性。

圖 4-4 為 87 年 09 月至 94 年 04 月新竹港南附近海域地形侵淤變化圖，由圖可見海岸因北邊漁港防波堤攔阻沙源，且台灣地區於夏季多颱風來襲，颱風之侵蝕性波浪將近岸沙粒搬移至遠岸後，堆積性的季節風波浪並無法將遠岸沙粒再搬移回近岸，導致下游長期飽受侵蝕之苦。主要侵蝕區域港南海岸附近海域，累積之侵蝕程度劇烈已達 3~4m，部分區域侵蝕更達 4~5m。有鑑於此本研究將先以斷面水深佈置系列潛堤，作為現場地形之測試，並參考計畫提出之系列潛堤工法設計流程圖，以該海域為範例，進而說明系列潛堤工法之設計規劃。



資料來源：Google Earth

圖 4-3 新竹港南海岸平面位置圖



資料來源：中華顧問工程司

**圖 4-4 新竹港南附近海域地形侵淤變化圖
(87.09~94.04)**

4.3 系列潛堤工法於新竹港南海域之設計流程步驟

於海洋工程領域，各式的防禦工法最主要的目的皆在於防禦颱風、暴潮所造成的侵蝕與破壞。因此，本節參考圖 4-2 之設計流程以造成海岸侵蝕的颱風波浪作為防禦目標，針對新竹港南海域來進行系列潛堤工法的規劃設計，並且探討該工法對於颱風波浪防禦之效果。

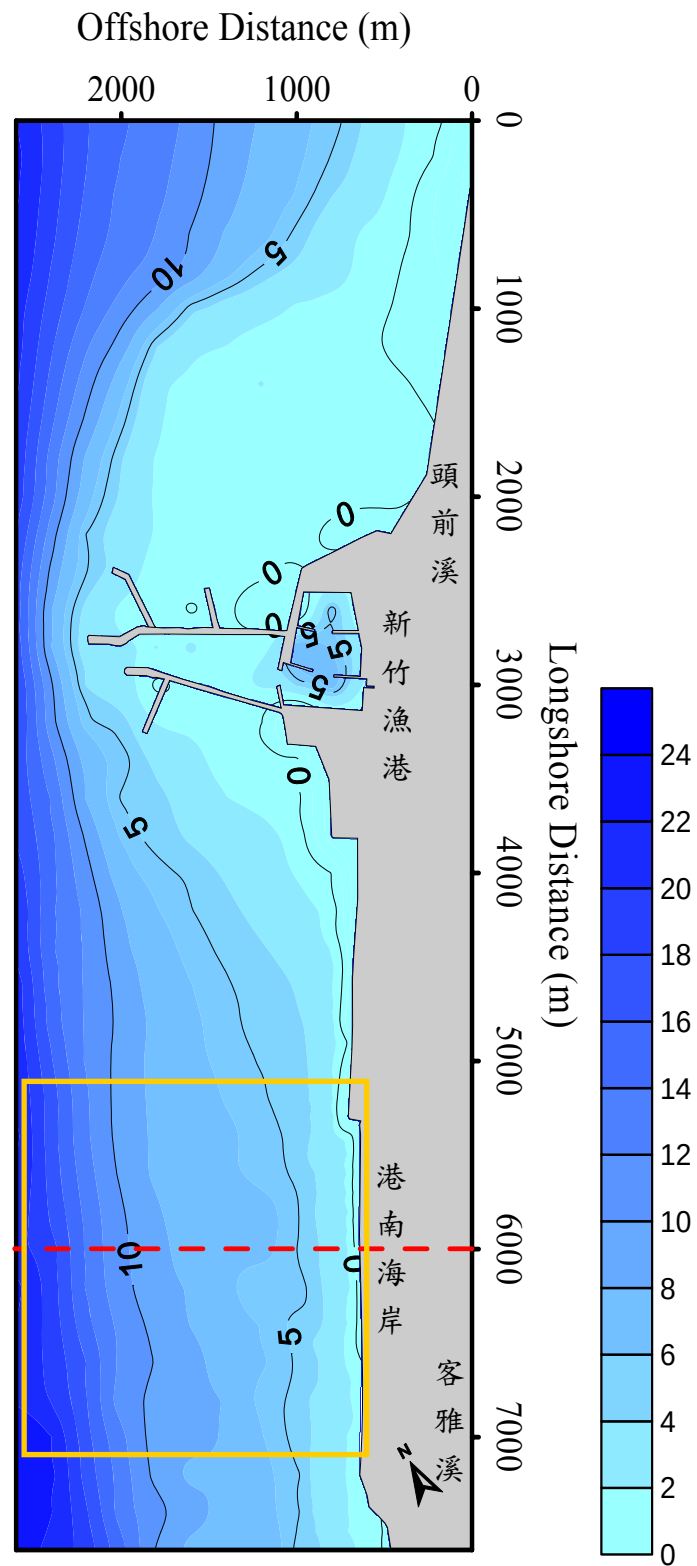
系列潛堤的佈置目標地區為長年受到侵蝕之港南海岸，如圖 4-5 中之黃線區域所示。由圖 4-4 中可知，在漁港北防波堤附近，因新竹漁港防波堤攔阻了由北而南的沿岸漂砂，形成了北淤南侵的突堤效應，並使得沿岸漂砂的分佈範圍往外海發展，甚而繞過堤頭形成港口淤塞的現象，因此在港口與南北側防波堤間，形成一環形分佈的淤積帶，最大淤積幅度超過 3m，至於漁港南側的垃圾掩埋場至港南海岸，水深 -10m 以內之區域普遍呈現侵蝕的狀態，尤以港南海岸一帶為最，侵蝕深度平均約在 3m，最大侵蝕幅度可達 4m 以上，而在港南海岸較遠岸處則有部分淤積區域。

4.3.1 斷面影響因子之決定

參考上一節之系列潛堤設計流程規劃，應逐一探討各影響因子於目標海域的特性，再重新檢討堤距影響，最後才完成斷面上的影響因子設計。由圖 4-5 可知，在目標海域中除了北方新竹漁港防波堤為伸入海中之突出結構物，波浪入射受結構物繞射影響之外，在港南海岸附近地區波浪入射在近岸區與等水深線約成垂直。故在斷面水深佈置測試上，選取的位置為 *Longshore distance* = 6000m 斷面，座標示意圖如圖 4-4 所示。則系列潛堤工法之設計步驟及方法說明如下：

1. 確定防禦目標波浪條件

整個工法的設計目的在於防禦颱風波浪，表 4-1 為新竹港南海域之波浪條件資料表，考慮 10 年迴歸期之颱風波浪，其應以 NNE 向颱風波浪為主，波高為 $H = 6.6\text{m}$ ，週期分別為 $T = 10.6\text{sec}$ ，水位為 +1.91m，水深地形則如圖 4-4 所示。



資料來源：中華顧問工程司

圖 4-5 新竹港南附近海域地形圖 (87 年 9 月實測)

表4-1 新竹港南海域之波浪條件資料表

輸入條件	波高 H (m)	週期 T (sec)	波向	水位 (m)
夏季季風	0.83	4.95	WSW	+0.22
冬季季風	1.27	5.28	N	+0.22
10 年迴歸期颱風	6.60	10.6	NNE	+1.91
50 年迴歸期颱風	9.10	12.7	NNE	+1.91

資料來源：中華顧問工程司

2. 估算防禦目標之波長 (L) 以及初步堤距 (S) 的決定

由上述之波浪條件，依據分散關係式 (dispersion relation) 計算，在佈置水深 $h = 8\text{m}$ 的情況下，考慮目標防禦波浪週期 $T = 10.6\text{sec}$ 的情況其波長約為 90m 。又根據布拉格共振機制的理論，最大共振區可能發生於潛堤間距為波長之半附近，故本區布拉格共振機制可能發生在潛堤間距約為 $S \approx 45\text{m}$ 的佈置條件下，且假設潛堤堤寬為 $B = 15\text{m}$ 也就是 $B/S = 0.33$ 。由於此佈置考慮實際海域，除了防禦性外，尚須考量漁船操船行進之安全性，且堤頂水深較深受到波浪的破壞力較小，故本研究暫以水深為 8m (水位+1.93m) 處作為初步佈置潛堤之水深，因此堤頂水深約為 4m 。堤距 $S = 45\text{m}$ 及堤趾水深 $h = 8$ 初步決定後，在堤寬及堤高條件相同下，以入射波條件做為基準，嘗試比較能量透過率的分佈情形。

圖 4-6 為潛堤個數 $N = 2、3、4、5、6、7、8$ 下，能量透過率 E_s 與週期 T 之關係圖。由圖可發現，當潛堤佈置於水深 8m 處，且 $S = 45$ 、 $D/h = 0.5$ 、 $B/S = 0.33$ 時，不同潛堤個數在波浪週期為 $T = 10.8\text{sec} \sim 14.0\text{sec}$ 會有主頻共振區，而次諧共振發生大約在 $T = 6.6\text{sec} \sim 7.4\text{sec}$ 間。此結果與原本目標防禦之波浪條件 $T = 10.6\text{sec}$ 不同。可能原因為地形的改變與波浪變形效應的發生導致主共振區有所偏移，由過去的研究可以知道當系列潛堤的共振效應與堤距有密不可分的關係，於是進一步探討改變堤距 (S) 後共振區

偏移的特性來決定最後的堤距設計。

圖 4-7 為 $S=40$ 、 45 、 50m 的條件下，在堤趾水深 8m 處 $N=8$ ， $D/h=0.5$ ，能量透過率 E_s 與週期 T 之關係圖。由圖 4-7 可知當堤距 (S) 增加時，整個共振區有往右偏移的現象，當堤距 (S) 減小時，共振區有往左偏移的現象，又當 $S=40$ 時，主共振發生在 $T=10.2\text{sec} \sim 13.8\text{sec}$ 之間；當 $S=50$ 時，主共振發生在 $T>11.8\text{sec}$ 。得知當 S 減小時主共振區會往目標防禦條件偏移，則考慮 $S=30$ 、 35 、 40m 的條件，圖 4-8 為此條件下能量透過率 E_s 與週期 T 之關係圖，由圖中可知當 $S=35$ 時，主共振發生在 $T=9.6\text{sec} \sim 12.4\text{sec}$ 之間；當 $S=30$ 時，主共振發生在 $T=8.5\text{sec} \sim 11.8\text{sec}$ 之間。由以上的結果可知，當 $S=35$ 時，應是最吻合目標防禦條件的設計，則以 $S=35$ 作為本研究堤距的設計方案。最後，根據 Wen 和 Tsai (2008) 的研究結果，其建議 $0.25 < B/S < 0.333$ ， $D/h=0.5$ 時布拉格共振機制會呈現較好的防禦效果，故於本研究中重新規劃 $B/S=0.29$ 、 $D/h=0.5$ ，則堤寬 B 重新設計為 10m 。

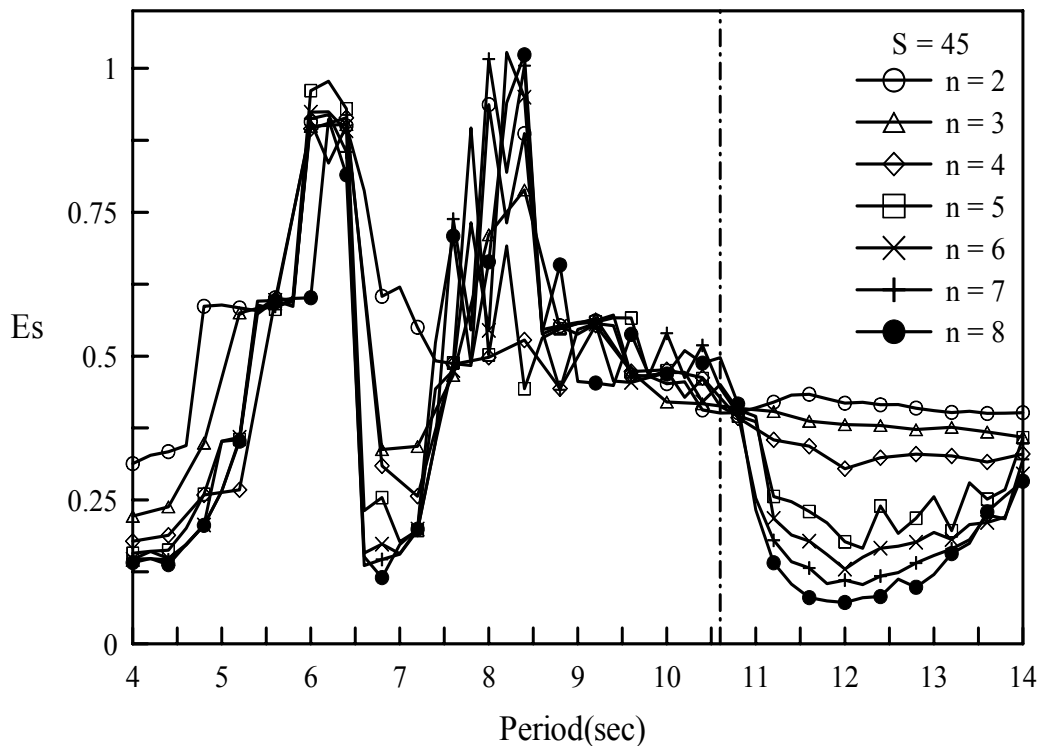


圖 4-6 不同潛堤個數下能量透過率 E_s 與週期 T 之關係圖

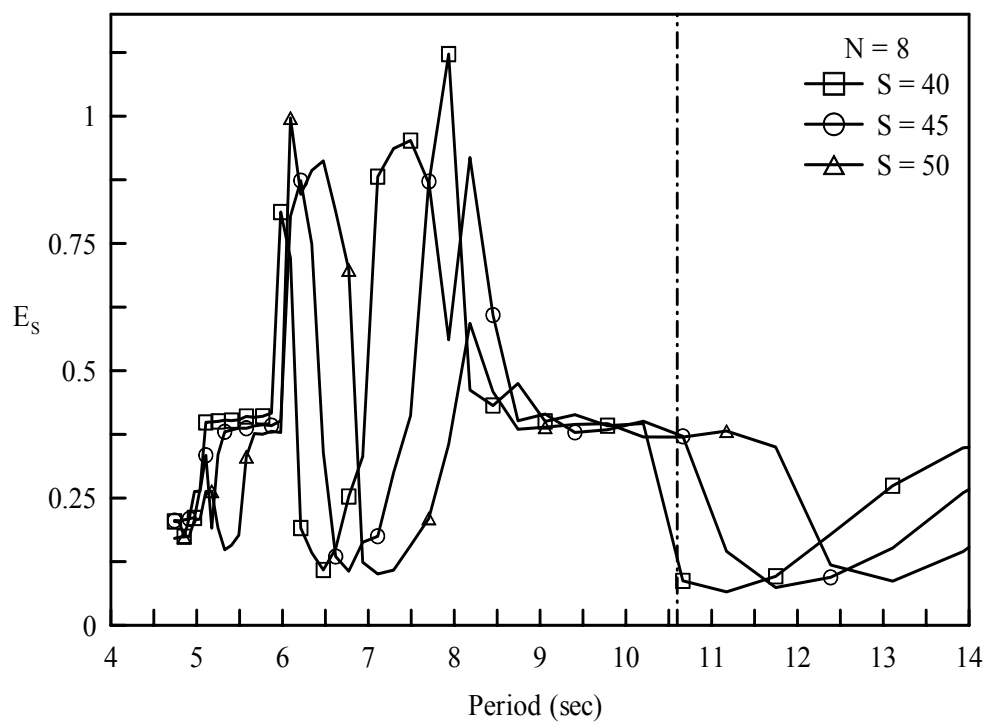


圖 4-7 不同堤距 (S) 下能量透過率 E_s 與 週期 T 之關係圖
($N=8$, $D/h=0.5$)

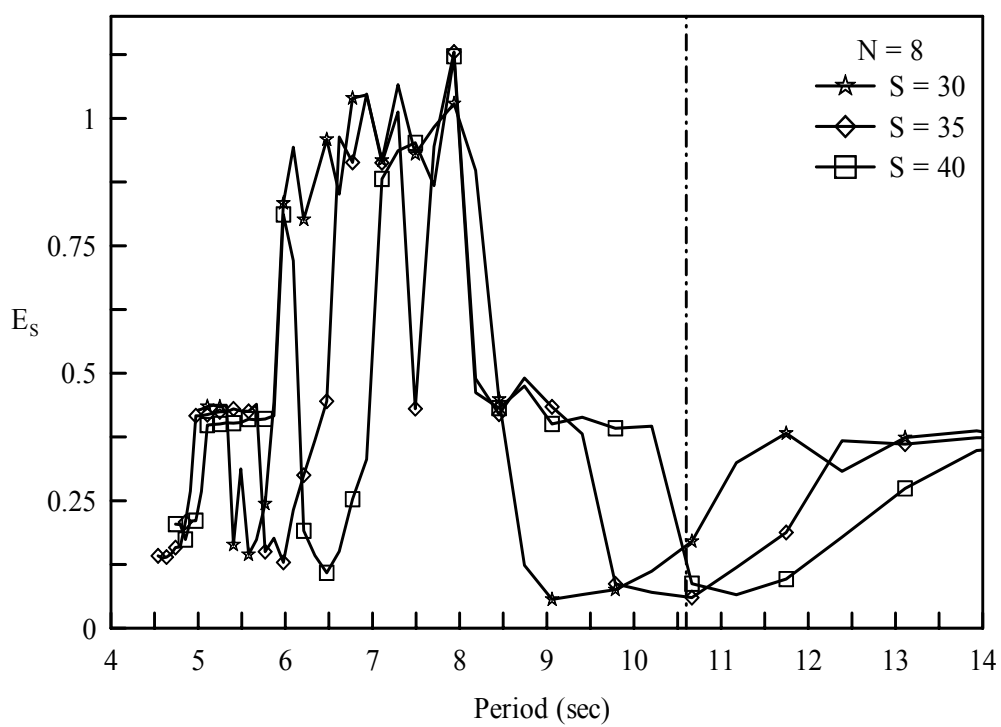


圖 4-8 不同堤距 (S) 下能量透過率 E_s 與 週期 T 之關係圖
($N=8$, $D/h=0.5$)

3. 潛堤設置區域堤趾水深 (h) 的決定

參照上述步驟完成堤距 (S) 初步設計以及堤寬 (B)、堤頂水深 (h) 的設定後，由圖 4-6 瞭解當 $N \geq 4$ 布拉格共振機制即較為完整，在堤趾水深的決定上，考慮到模式採現場地形計算而布拉格共振機制的完整性與波浪通過系列潛堤時之條件息息相關，又波浪變形與地形水深有著密不可分的關係，而在現場佈置過多的潛堤可能導致原本設計的共振機制改變，因此本研究先以 $N=4$ 來進行堤趾水深選定的佈置條件。

本研究選擇在水深 $h=7\text{m}$ 、 $h=8\text{m}$ 、 $h=9\text{m}$ 及 $h=10\text{m}$ (水位 +1.91m) 處，以不同的波浪週期，在相同的相對堤高 $D/h=0.5$ (堤頂水深 $h'=3.5\text{m}$ 、 4.0m 、 4.5m 及 5.0m)、潛堤個數 $N=4$ 、堤距 $S=35\text{m}$ 及堤寬 $B=10\text{m}$ 條件下進行數值模擬，其能量透過率 E_s 與週期 T 之關係如圖 4-9 所示。圖中顯示除了水深 $h=7$ 以外，主共振區的帶寬隨著堤趾水深的減少而增加，且能量透過率隨著堤趾水深的增加而遞增，可能原因為波浪由外海向岸傳遞時，因水深變化使得波長改變，當潛堤佈置於水深 $h=9$ 或 10 時，其波長與設計堤距 $S=35\text{m}$ 所能達成的共振條件較少，因而使得布拉格共振機制不夠完整的原因所致。而入射波高 $H=6.6\text{m}$ ，而現場地形隨著水深的變化，波浪會產生淺化效應，傳遞至 $h=7\text{m}$ 的堤趾水深時系列潛堤的堤頂水深僅有約 5.41m ，故絕大部分的波浪條件通過結構物時都會產生碎波效應，因此導致堤後能量透過率極低，然而，系列潛堤工法最主要的目的在於產生布拉格共振效應來抵禦波浪能量的侵襲，不在使之產生碎波，因此在新竹港南海域堤趾水深 7m ，堤頂水深 3.5m 並不適合系列潛堤工法的佈置。又一般漁船吃水深度約為 3m 左右，因此在考量漁船行進安全及共振帶寬較廣的情形下，本研究於目標海域選定水深 $h=8$ 為工法的佈置水深應較為適當。

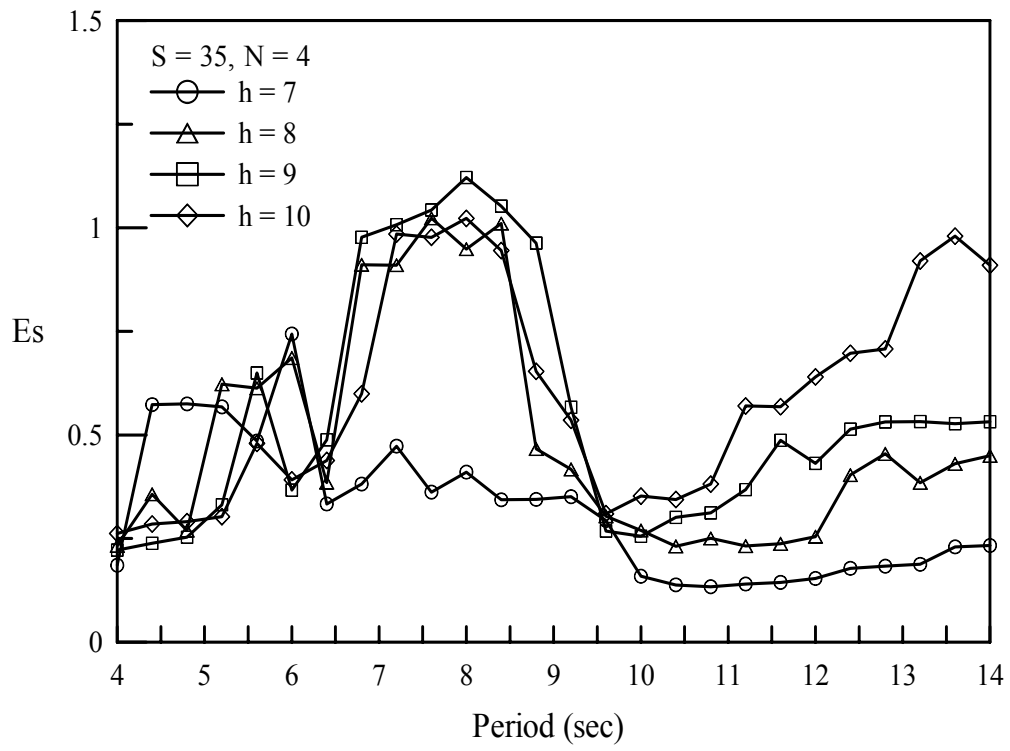


圖 4-9 不同堤趾水深(h)下能量透過率 E_s 與週期 T 之關係圖
($N=8$, $S=35$, $D/h=0.5$)

4. 單組潛堤個數 (N) 的決定

堤距 ($S=35\text{m}$)、堤寬 ($B=10\text{m}$)、堤頂水深 ($h=4\text{m}$) 以及堤趾水深 $h=8\text{m}$ 的決定後，討論不同潛堤個數 (N) 其相關特性為何，再決定整個工法所要採用的數值。圖 4-10 為不同的潛堤個數佈置下，能量透過率 E_s 與週期 T 的關係圖。圖中顯示能量透過率不管在主共振區或者次諧共振區皆隨著堤數的增加而減小，且由於不考慮波浪的繞射效應則當潛堤個數為 8 時，能量透過率約可達 0.13 左右。除了 $N=2$ 以外，當潛堤個數 $N=3、4、5、6、7、8$ 時，除了主頻產生共振現象外，亦會產生分諧共振 (second-order resonance)。然而由圖中可以發現不管是主共振 (primary resonance) 或次諧共振，隨堤數的增加而能量衰減越多的趨勢不變。在僅改變潛堤個數的條件下，共振區的範圍不會隨著堤數的變化有太大的改變，主共振皆大約發生在 $T=9.4\text{sec} \sim 13.1\text{sec}$ 之間，次諧共振皆大約發生在 $T=5.6\text{sec} \sim 6.4\text{sec}$ 以及 $T=4.0\text{sec} \sim 5.0\text{sec}$ 間。

圖 4-11(A) ~ 4-11(D) 分別為在不同潛堤個數下 ($N=2、4、6、8$)，當 $T=10.6\text{sec}$ 時地形佈置及波高變化圖。圖形顯示隨堤數的增加，堤前反射波產生之共振現象相對增加，相對於堤後的透射波則愈小，且可以發現當 $N=2$ 時共振現象並不明顯，但當 $N \geq 4$ 時則產生明顯的共振效應，因此若要在現場實際應用時 $N=2$ 或 3 的條件並不適宜作海岸保護佈置。由圖 4-10，顯示當 $N \geq 4$ 時，在主共振及次諧共振的能量透過率皆可達到 0.5 以下，故在考量實際海域的施工難易、共振效率及經濟成本下，本研究初步選取堤數 $N=4$ 為新竹港南海域模擬佈置之條件。

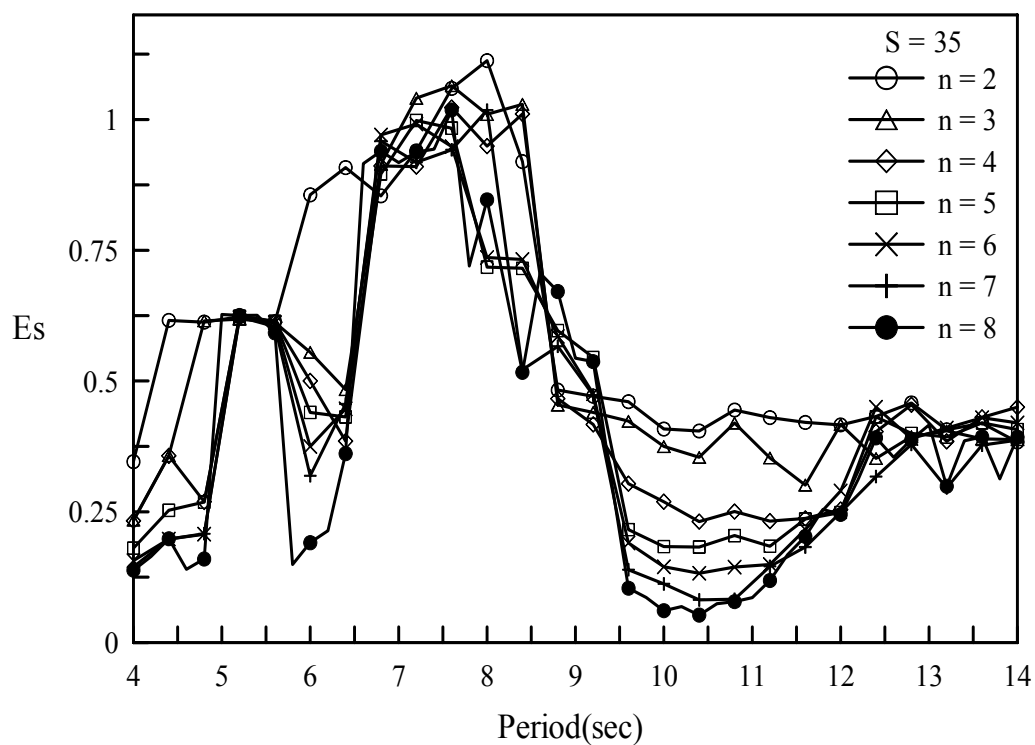


圖 4-10 不同潛堤個數下能量透過率 E_s 與 週期 T 之關係圖
($h=8$, $S=35$, $D/h=0.5$)

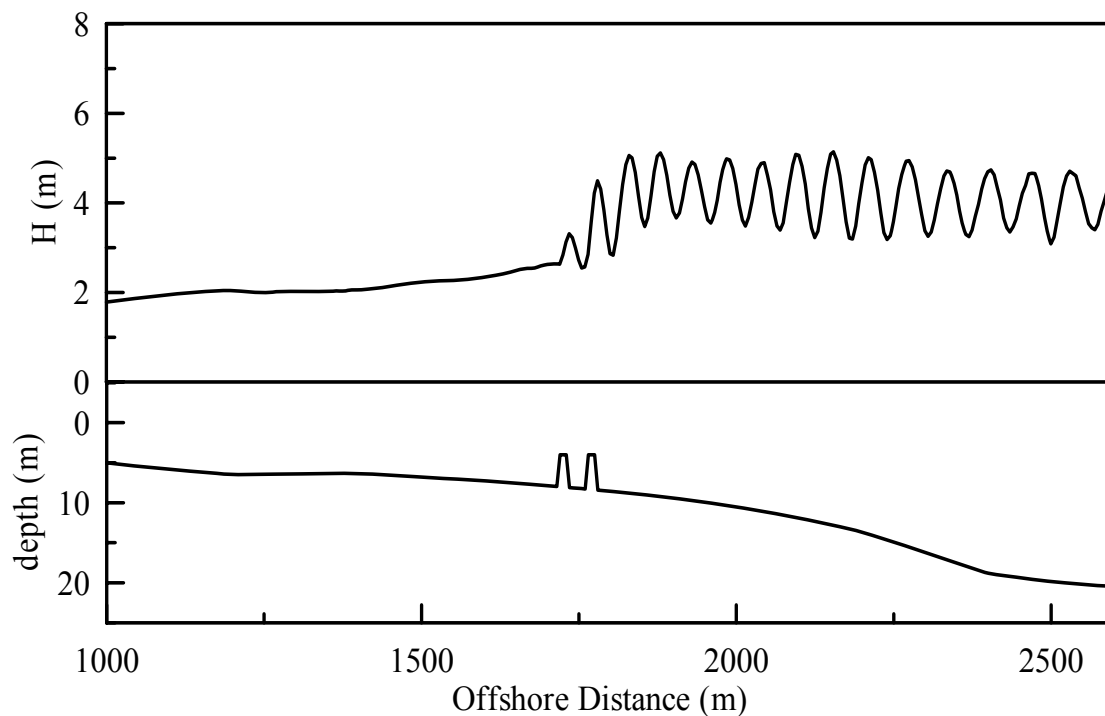


圖 4-11(A) $S=35$ 潛堤堤數 $N=2$ 佈置及波高變化圖
($T=10.6\text{sec}$)

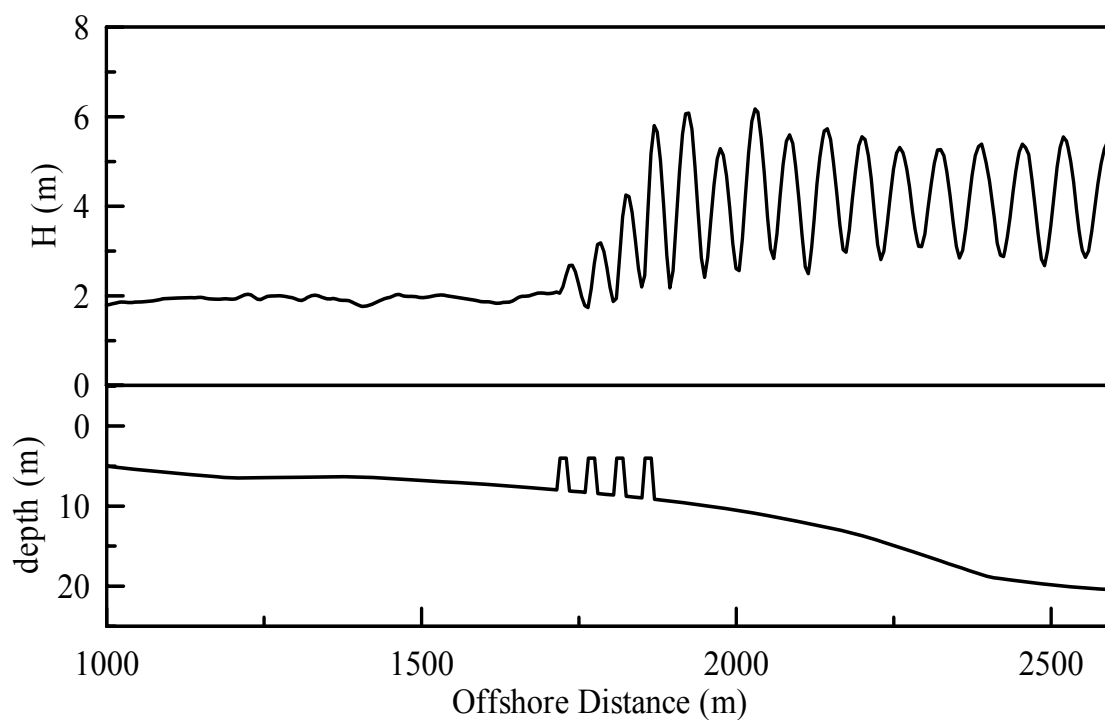


圖 4-11(B) $S = 35$ 潛堤堤數 $N = 4$ 佈置及波高變化圖
($T = 10.6\text{sec}$)

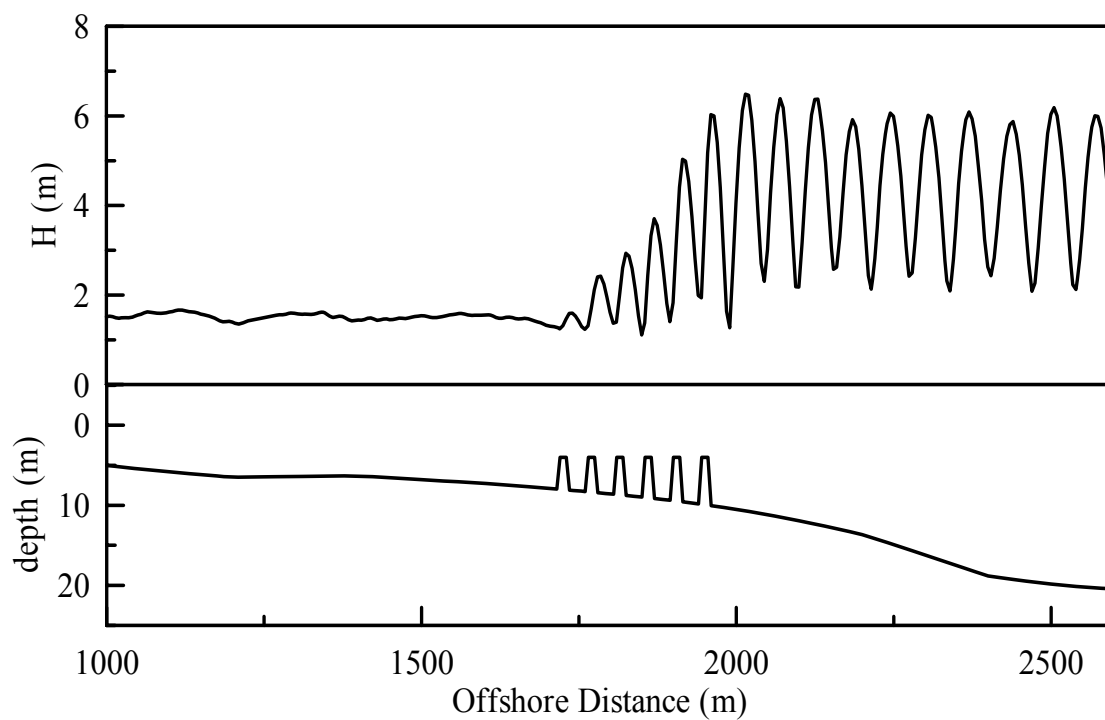


圖 4-11(C) $S = 35$ 潛堤堤數 $N = 6$ 佈置及波高變化圖
($T = 10.6\text{sec}$)

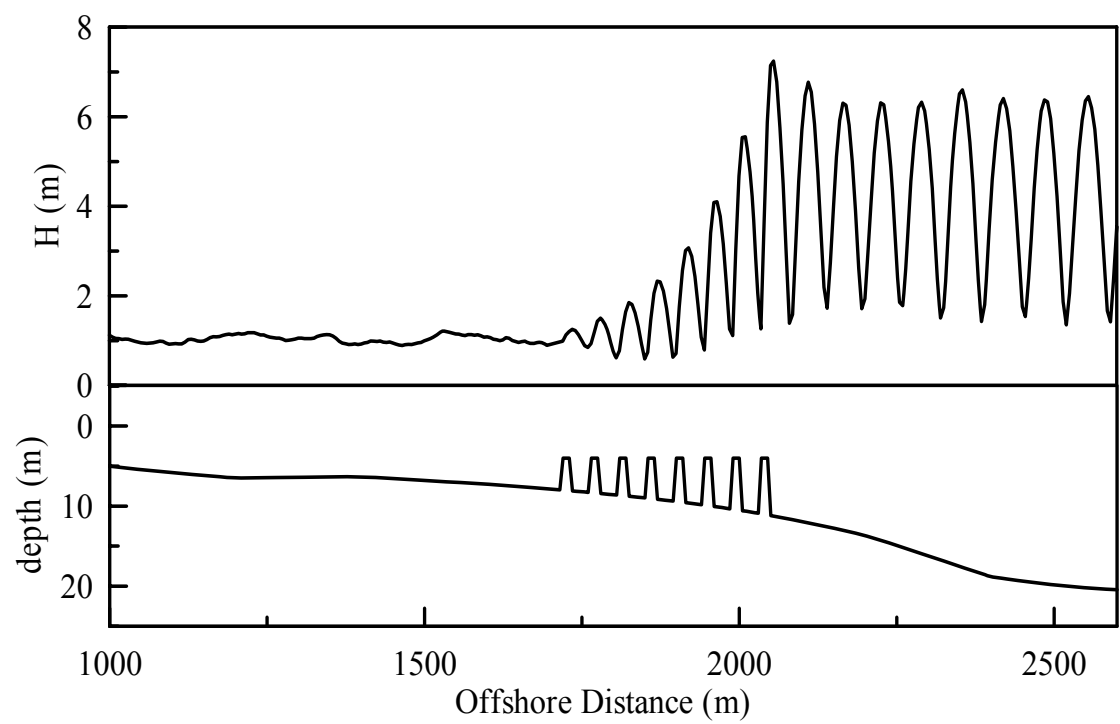


圖 4-11(D) $S = 35$ 潛堤堤數 $N = 8$ 佈置及波高變化圖
($T = 10.6\text{sec}$)

5. 堤距 (S) 的重新校驗

在堤距 ($S = 35\text{m}$)、堤寬 ($B = 10\text{m}$)、堤頂水深 ($h = 4\text{m}$)、堤趾水深 $h = 8\text{m}$ 以及潛堤個數 $N = 4$ 決定後，整個系列潛堤工法於斷面上的影響因子也決定完成了。由於在各個影響因子決定的過程中可能與最初利用目標防禦條件所決定的結果有所不同，又整個工法的設計以堤距 (S) 做為無因次化的參數，故必須重新檢驗 (S) 是否吻合整個設計的需求。

由上述可知，在本研究設置的目標海域中，波浪防禦條件為 $T = 10.6\text{sec}$ ，又初始設計條件為 $S = 45\text{m}$ ， $D/h = 0.5$ ， $B = 10\text{m}$ ，潛堤堤趾水深 $h = 8$ 。經過數值模式的模擬後，設計條件轉變為 $S = 35\text{m}$ ， $D/h = 0.5$ ， $B = 10\text{m}$ ， $h = 8$ 。根據 Wen 和 Tsai (2008) 的研究結果，其建議 $0.25 < B/S < 0.333$ ， $D/h = 0.5$ 時布拉格共振機制會呈現較好的防禦效果，在修正堤距 (S) 後，也同時修正了堤寬 B ，而無因次參數 $B/S = 0.29$ 在 Wen 和 Tsai (2008) 所提出的範圍內。圖 4-12(A)~4-12(C) 分別為潛堤個數 $N = 4、6、8$ 的情況下，兩種不同堤距 $S = 35、45$ 時能量透過率 E_s 與週期 T 的比較圖。圖中顯示不管堤距為多少，能量透過率會隨著潛堤的增加而降低，而主共振與次諧共振則因為堤距的修正而往左偏移，使得目標防禦條件位於主共振的中心達到原本的需求。圖 4-13 為 $S = 35$ 、 $D/h = 0.5$ 、 $B/S = 0.29$ 以及堤趾水深 $h = 8\text{m}$ 的條件下，不同潛堤個數下能量透過率 E_s 與 $2S/L$ 之關係圖，圖中顯示 $N = 2$ 時共振現象並不明顯，當 $N \geq 4$ 時，在主共振及次諧共振的能量透過率皆可達到 0.5 以下。承上吾人考慮經費與效率問題，以 $N = 4$ 為設計條件應為合理的選擇。

在重新校驗堤距之後，得到於目標海域設置系列潛堤工法在斷面影響因子上的最佳設計，下一節將以此作為基礎規劃探討平面影響因子之設計流程，期望最後能作為應用於實際海岸的參考。

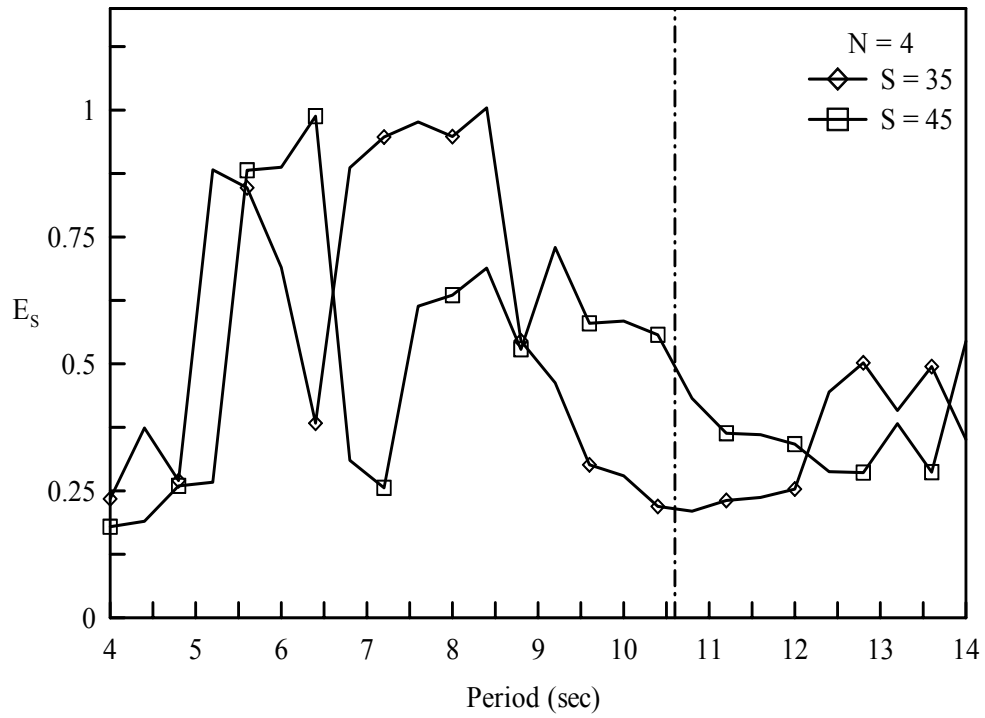


圖 4-12(A) 不同堤距 (S) 下能量透過率 E_s 與 週期 T 之關係圖
($S = 35$, $D/h = 0.5$, $N = 4$)

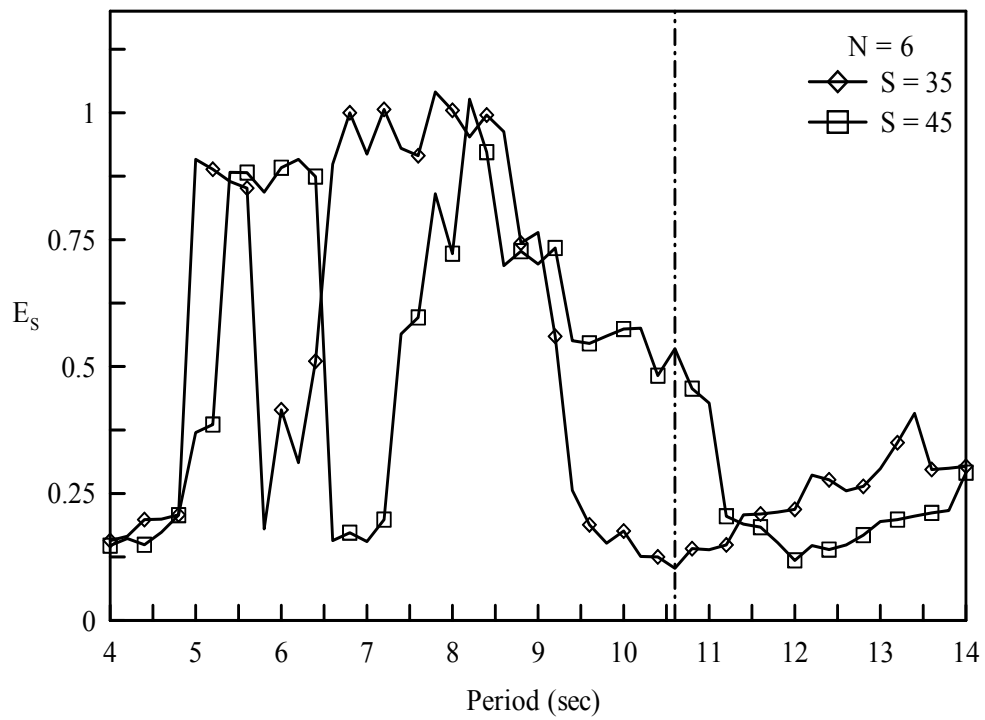


圖 4-12(B) 不同堤距 (S) 下能量透過率 E_s 與 週期 T 之關係圖
($S = 35$, $D/h = 0.5$, $N = 6$)

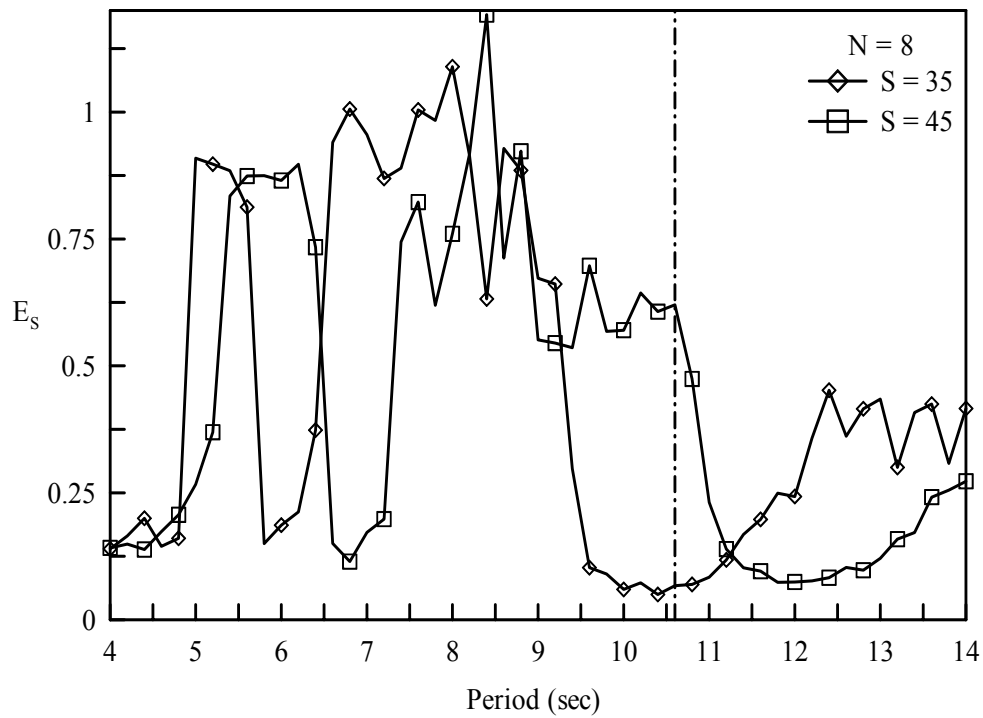


圖 4-12(C) 不同堤距 (S) 下能量透過率 E_s 與 週期 T 之關係圖
($S=35$, $D/h=0.5$, $N=8$)

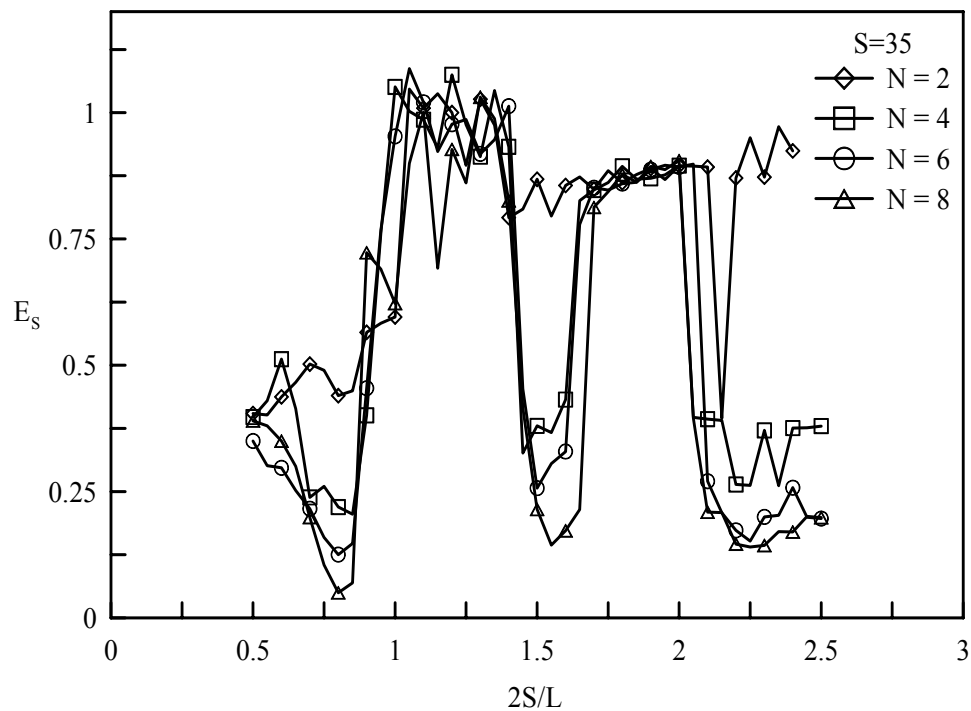


圖 4-13 不同潛堤個數下能量透過率 E_s 與 $2S/L$ 之關係圖
($S=35$, $D/h=0.5$, $B/S=0.29$)

4.3.2 平面影響因子之決定

完成斷面影響因的決定後，依據堤距探討平面系列潛堤佈置，地形採新竹港南海域 *Longshore distance* = 6000m 之地形佈置成二維平面，主要決定的影響因子為潛堤堤長 G 、組距 S_G 以及組數，故將針對無因次參數 G/S 及 G/S_G 的不同來進行地形規劃。其它影響因子則依循報告上一節中所討論的結果而定，則潛堤堤距 $S=35\text{ m}$ 、相對水深 $D/h=0.5$ 、相對堤寬 $B/S=0.29$ 、潛堤個數 $N=4$ 、堤趾水深 $h=8\text{ m}$ ，潛堤形式則固定為矩形以方便討論。其中表 4-2 為所進行之各項模擬條件，茲將計算結果討論如下：

表4-2 數值模擬之平面系列潛堤佈置參數

潛堤型式	個數 N	組數 N_G	D/h	B/S	G/S	S_G/G
矩形	4	1,4	0.50	0.29	1、3、5、7	0.25
						0.50
						1.00
						1.50
						2.00
		1			∞	0

6. 平面上堤長 (G) 的決定

依照系列潛堤設計流程圖，於平面影響因子應先決定堤長，故在此僅佈置單組系列潛堤改變各方案的堤長 G ，其中波浪條件以現場之 10 年回歸期颱風為條件 $H=6.6\text{ m}$ 、 $T=10.6\text{ sec}$ ，各項影響因子的示意圖如圖 4-1 所示，但僅考慮單組系列潛堤也就是 $N_G=1$ 。其他佈置條件為：水平底床上佈置潛堤個數 $N=4$ 、相對堤距 $B/S=0.29$ 、相對堤高 $D/h=0.5$ 、潛堤組數 $N_G=1$ 、相對堤長 $G/S=1、3、5、7$ 及 ∞ 。計算領域大小為 $2600\text{ m} \times 505\text{ m}$ ，所採用格網間距為 $\Delta x = \Delta y = 5\text{ m}$ ，計算所需的格點為 521×101 ，每個地形所計算的波浪條件則為 $T=4.0 \sim 14.0\text{ sec}$ ，每間格 0.2 sec 計算一個方

案，則相當於每一個地形計算 51 個方案。

圖 4-14 ~ 圖 4-18 為水平底床上佈置相對堤長分別為 $G/S=1$ 、3、5、7 及 ∞ ，相對水深為 $D/h=1/2$ ，相對堤距 $B/S=0.29$ ，潛堤個數 $N=4$ ，潛堤組數 $N_G=1$ ，波浪入射條件為 $T=10.6\text{sec}$ 時，波高的平面分佈圖。當堤長延伸至無限長時，波浪不受堤頭繞射而影響布拉格反射機制，堤前有完整的布拉格反射現象，如圖 4-14 所示。圖 4-15 ~ 圖 4-18 顯示，在共振條件下，當潛堤堤長佈置較長時，波浪經堤頭兩端繞射進入潛堤佈置區，繞射波干擾僅侷限在堤頭附近及堤後區域，對整個潛堤佈置區的布拉格反射機制影響不大，且於堤前具明顯的波浪反射現象。隨著相對堤長的縮小，在較小的堤長佈置下，波浪經堤頭兩端繞射進入潛堤配置區域，干擾原有布拉格反射機制，而使堤前的反射波減小，導致布拉格共振機制不甚明顯。

圖 4-19 為水平底床上佈置相對堤長分別為 $G/S=1$ 、3、5、7 及 ∞ ，相對水深為 $D/h=1/2$ ，相對堤距 $B/S=0.29$ ，潛堤個數 $N=4$ ，潛堤組數 $N_G=1$ 時，能量透過率 E_S 與週期 T 的關係圖。由圖中可以明顯看出在主頻區 $T=9.4\text{sec} \sim 13.1\text{sec}$ 之間，隨著相對堤長的增加，能量衰減越多布拉格共振機制愈明顯，而在次階頻 $T=5.6\text{sec} \sim 6.6\text{sec}$ 之間也有二次共振的現象產生。而愈靠近長波浪週期也就是低頻區，能量衰減受到堤長的影響越大，可能原因為當潛堤愈長，而波長也越長時波浪受堤頭繞射效應便越小，則潛堤佈置區的布拉格反射機制愈完整，故所發生布拉格共振現象較為明顯；當潛堤較短 ($G/S=1$) 時，波浪通過潛堤時，堤頭兩端繞射進入潛堤佈置區，干擾前進波與堤體交互作用導致布拉格共振機制並不完整，因此能量衰減並不明顯。而當 $G/S=1$ 時整體布拉格共振現象並不明顯，大部分的能量透過率皆大於 1，可能的主要原因應為當堤長較短時，波浪傳遞會因波長的關係受堤頭繞射的影響越大，故堤後能量累積較大衰減較少。綜合觀之，不管在主頻或者次頻區布拉格共振的機制隨潛堤長度的減小而遞減，而當 $G/S=1$ 時因堤長過小導致整個平面計算

領域布拉格共振機制不完全，因此能量衰減的情況亦不明顯。

圖 4-20 為共振現象 ($T=10.6\text{sec}$) 與非共振現象 ($T=7.6\text{sec}$) 的情況下能量透過率 (E_s) 與相對堤長 (G/S) 關係分佈圖。由圖中可以明顯觀察出當處於非共振現象條件下時 ($T=7.6\text{sec}$)，不管相對堤長為多少，其能量透過率最低接近左右 1，表示系列潛堤工法並無法有效減少波浪能量。而在共振條件時，波浪能量隨著相對堤長的增加而明顯遞減，且當 $G/S > 4$ 波浪透過率可達 0.5 以下，也就是能量將減少一半以上，當 $G/S > 6$ 之後，隨著相對堤長的增加能量透過率的衰減有減緩的趨勢。故當考量現場海域之設計時，如何決定系列潛堤堤長，此部分的研究將提供一個良好的參考依據。

綜合以上結果，當潛堤愈長，波浪傳遞較不受堤頭繞射的影響，因此布拉格共振機制越完整，則波浪能量衰減越多，而當相對堤長 G/S 大於 5 後，布拉格共振機制受到堤頭繞射效應明顯較小，使得能量透過率衰減趨緩。由此可知，潛堤堤頭繞射作用，影響布拉格反射效應甚大，且與波浪週期有明顯關係，因此在實際施工設計相對堤長的決定將是使得布拉格共振機制是否有效的重要的影響因子之一。由於堤長越長所需要的造價成本相對越高，在兼顧現場海域的海象條件與堤長對布拉格共振的影響下，在本報告的選取 $G/S=6$ 作為研究之設定值。

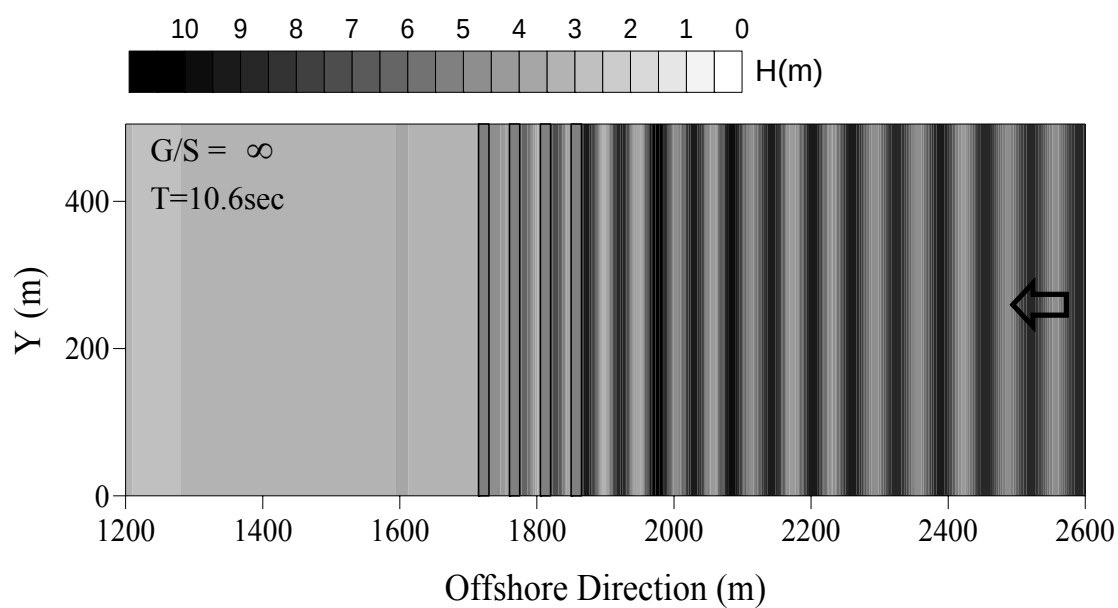


圖 4-14 波浪通過無限長系列潛堤之波高分佈圖

($N = 4$, $N_G = 1$, $D/h = 0.5$, $B/S = 0.29$, $T = 10.6\text{sec}$)

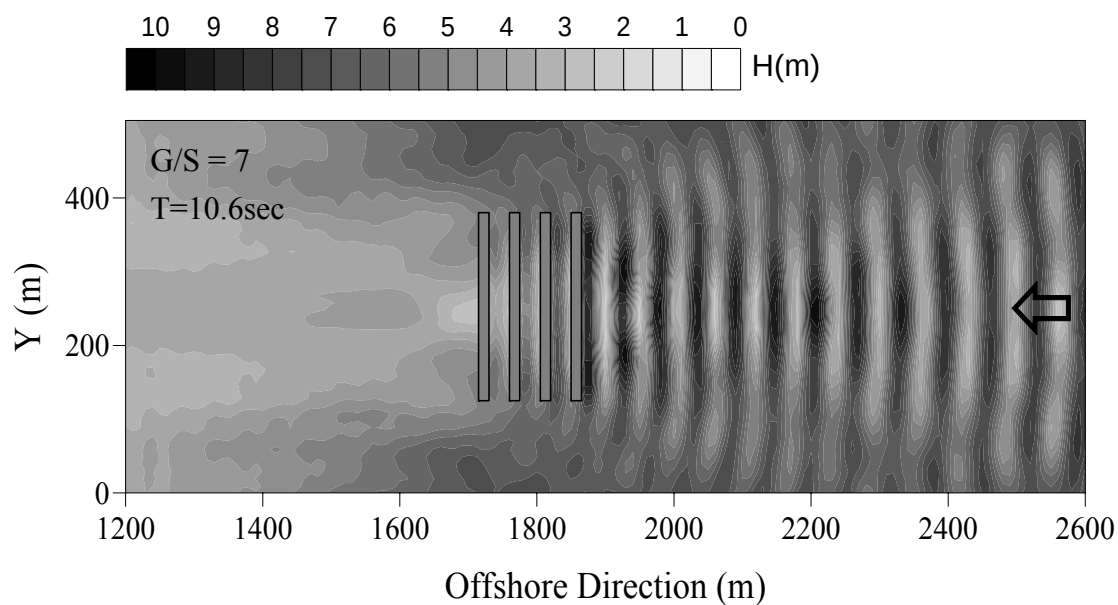


圖 4-15 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

($N = 4$, $N_G = 1$, $D/h = 0.5$, $B/S = 0.29$, $T = 10.6\text{sec}$, $G/S = 7$)

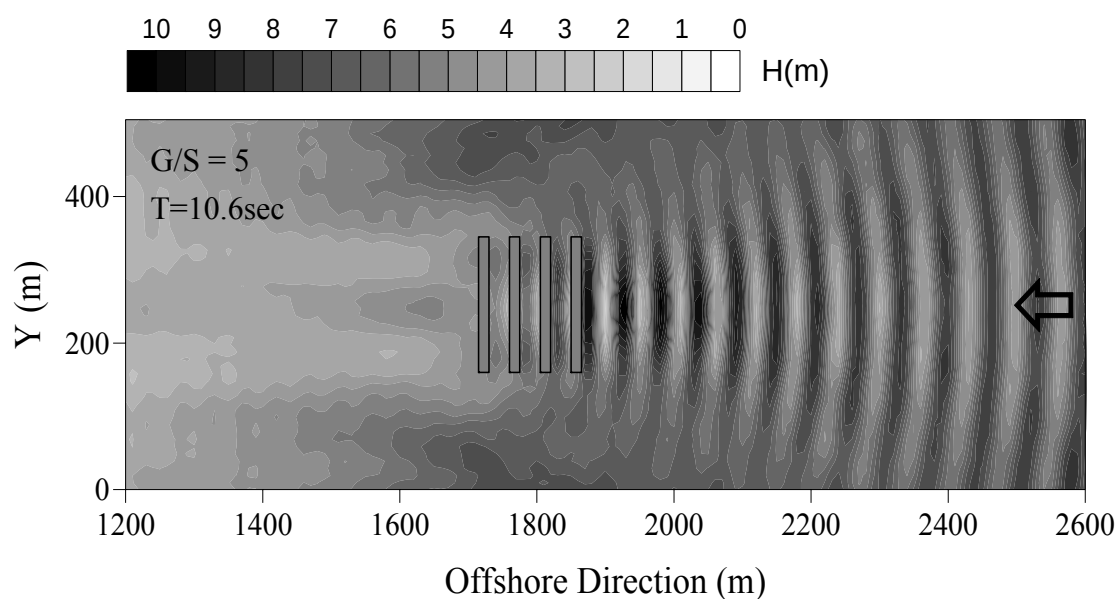


圖 4-16 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

($N=4$, $N_G=1$, $D/h=0.5$, $B/S=0.29$, $T=10.6\text{sec}$, $G/S=5$)

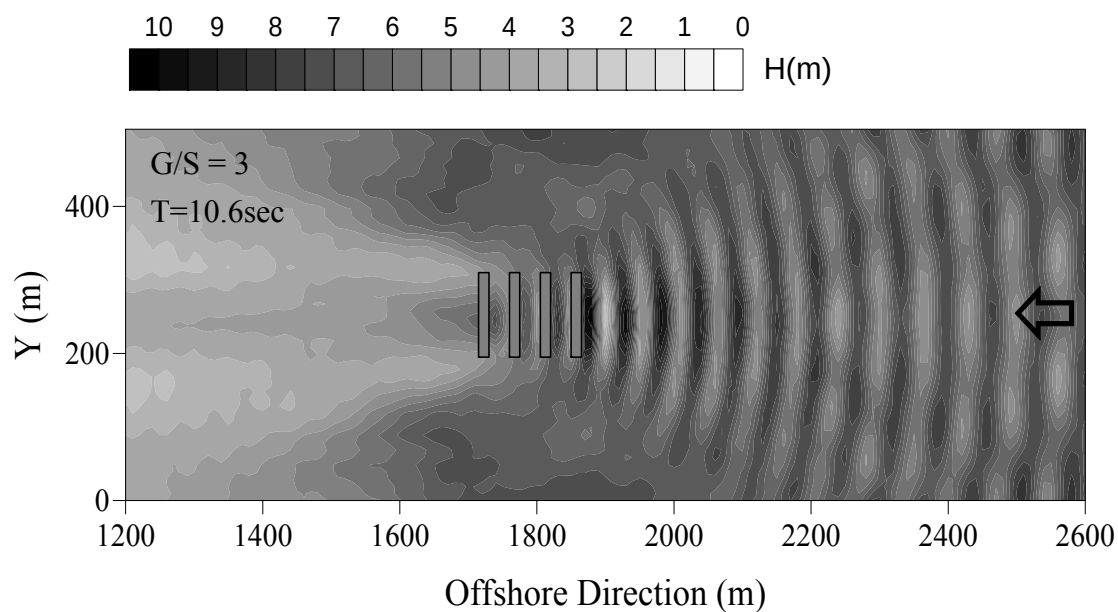


圖 4-17 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

($N=4$, $N_G=1$, $D/h=0.5$, $B/S=0.29$, $T=10.6\text{sec}$, $G/S=3$)

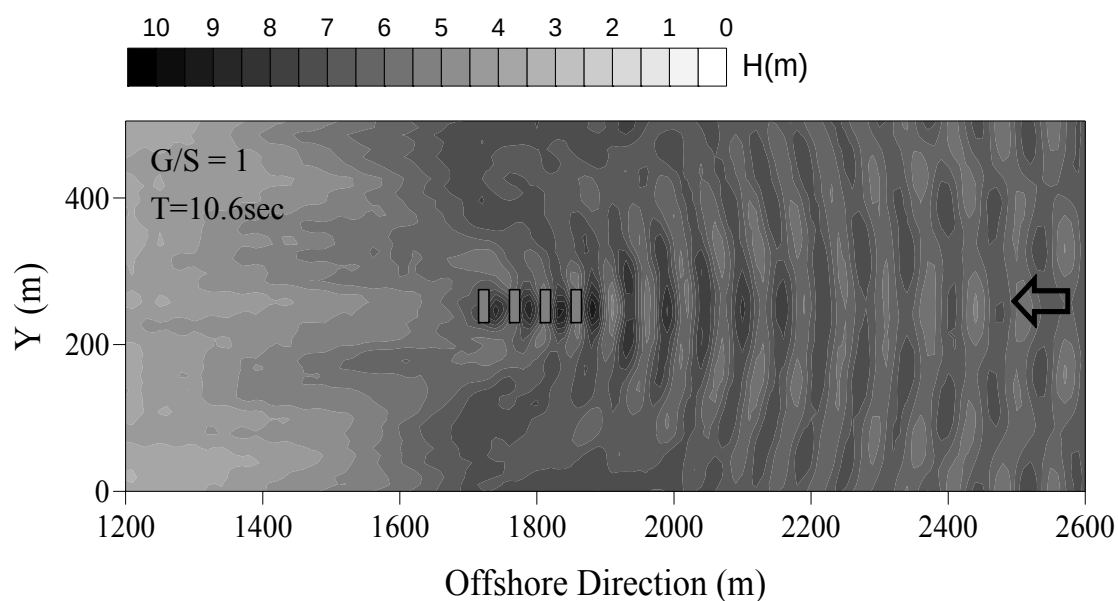


圖 4-18 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

($N = 4$, $N_G = 1$, $D/h = 0.5$, $B/S = 0.29$, $T = 10.6\text{sec}$, $G/S = 1$)

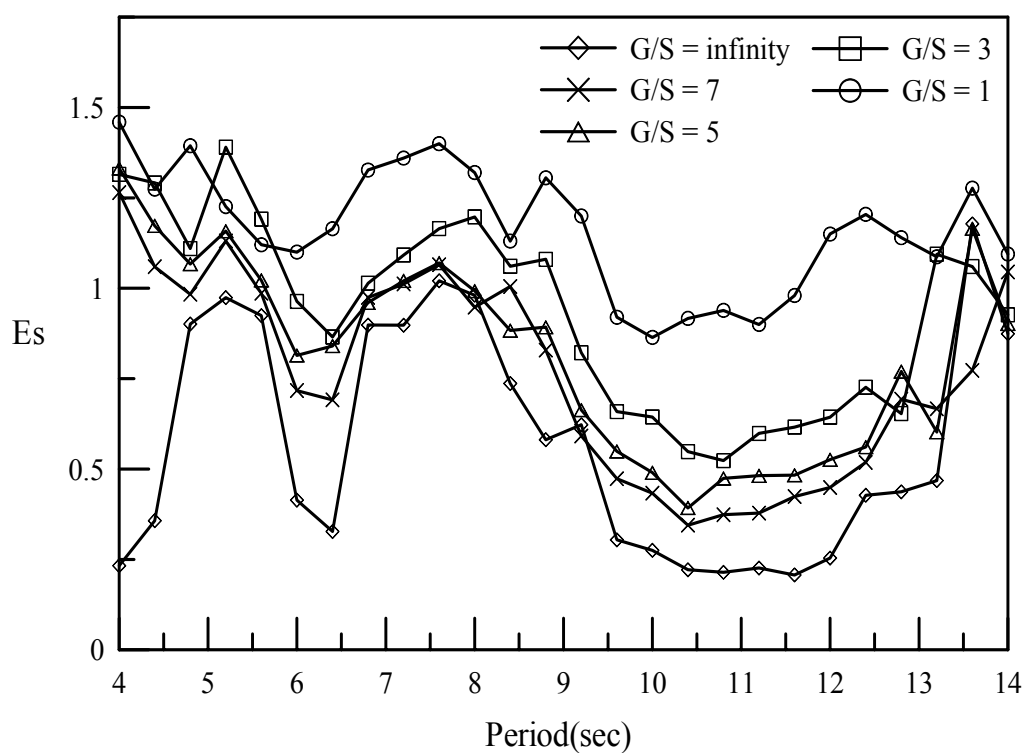


圖 4-19 不同潛堤堤長度下能量透過率 E_s 與週期 T 之關係圖

($N = 4$, $N_G = 1$, $D/h = 1/2$, $B/S = 0.29$)

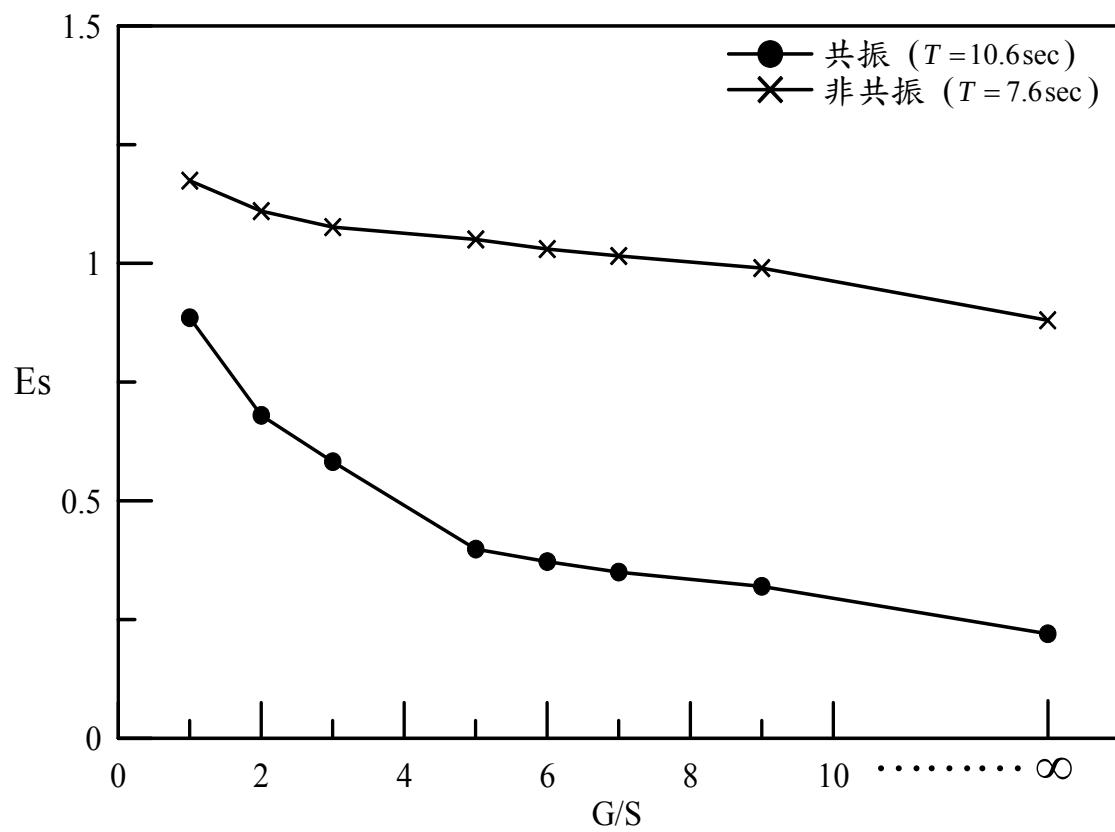


圖 4-20 共振與非共振情況下能量透過率 (E_s) 與相對堤長 (G/S) 之關係分佈圖

7. 平面上潛堤組距 (S_G) 的決定

由於平面上不可能佈置無限長之系列潛堤，因此若要應用於實際海域會以多組系列潛堤作為主要佈置方式，故每組潛堤之間的組距便成了影響系列潛堤工法共振機制的重要因子之一。在決定潛堤堤長 G 後，以堤長為參考因子討論平面上各組系列潛堤間的距離影響。利用上述之平面地形佈置四組系列潛堤改變各方案的組距 S_G ，其中波浪條件以現場之 10 年回歸期颱風為入射波條件 $H=6.60\text{ m}$ 、 $T=10.6\text{ sec}$ ，各項影響因子的示意圖如圖 4-1 所示，並考慮多組系列潛堤 $N_G=4$ 。其他佈置條件為：水平底床上佈置潛堤個數 $N=4$ 、相對堤距 $B/S=0.29$ 、相對堤高 $D/h=0.5$ ，計算領域大小為 $2600\text{ m}\times 4940\text{ m}$ ，所採用格網間距為 $\Delta x=\Delta y=5\text{ m}$ ，計算所需的格點為 521×589 ，每個地形所計算的波浪條件則為 $T=4.0\sim 14.0\text{ sec}$ ，每間格 0.2 sec 計算一個方案，則相當於每一個地形計算 51 個方案，總共計算 20 個地形 1020 個方案。

關於在計算堤後能量透過率的格點擷取上，本研究選取的範圍的長度為中央兩組潛堤中心點的之間長度，也就是一組堤長一組堤距的距離 ($G+S_G$)，寬則採用堤距 (S)，如圖 4-21 所示，圖中 $S1\times S2$ 即為所選取的範圍，而 $S1=S$ 、 $S2=G+S_G$ 。

圖 4-22(A) ~ 圖 4-22(C) 分別為水平底床上佈置相對堤長為 $G/S=3、5、7$ ，相對水深為 $D/h=1/2$ ，相對堤距 $B/S=0.29$ ，潛堤個數 $N=4$ ，潛堤組數 $N_G=4$ 時，改變潛堤組距 $S_G/G=0.25、0.5、1.0、1.5、2.0$ 下之能量透過率 E_S 與週期 T 關係圖。由圖顯示，不管 G/S 為多少，在 $T=9.6\text{ sec}\sim 12.4\text{ sec}$ 的區間也就是主頻部分整體的能量透過率隨著 S_G/G 的增加而增加，也就是說當潛堤堤距變大時，能量衰減較少。而在 $T=5.5\text{ sec}\sim 7.0\text{ sec}$ 的區間也就是次階頻的部分亦有相同的趨勢。

圖 4-23(A) ~ 圖 4-23(C) 分別為當 $G/S=3、5、7$ 時，共振現象 ($T=10.6\text{ sec}$) 與非共振現象 ($T=7.6\text{ sec}$) 之情況下能量透過率 (E_S)

與潛堤相對組距 (S_G/G) 之關係分佈圖。由圖中可以明顯觀察出當布拉格共振現象為產生時 ($T=10.6\text{sec}$)，不管相對組距為多少，其能量透過率皆小於 1，表示系列潛堤工法有效減少波浪能量，且隨著 S_G/G 的遞減而減少。且不管堤長為多少，當 S_G/G 小於 1 時能量透過率皆有明顯遞減的現象。然而，相較於相對堤長的影響相對堤距 S_G/G 不管堤長為多少皆有共同的特性，且整體能量變化的幅度是一致的，因此兩者之間應為獨立變化關係。由上可知潛堤的相對組距至少要是小於 1 方能共同發揮系列潛堤工法的效果。總結圖 4-23 之成果，當 $S_G/G \leq 1$ 則布拉格共振機制即有一定的效果產生，而當相對組距越小時所產生的共振機制更完整，故於現場海域中應考慮施工難抑來選取適當的參數，於本研究中堤距 $S=35\text{m}$ 若 $S/G=6$ 、 $S_G/G=0.25$ 則 $S_G \approx 55\text{m}$ 於施工上應可以接受，因此在下面的模擬實際海域時，本研究選取 $S_G/G=0.25$ 作為系列潛堤相對組距佈置的條件。

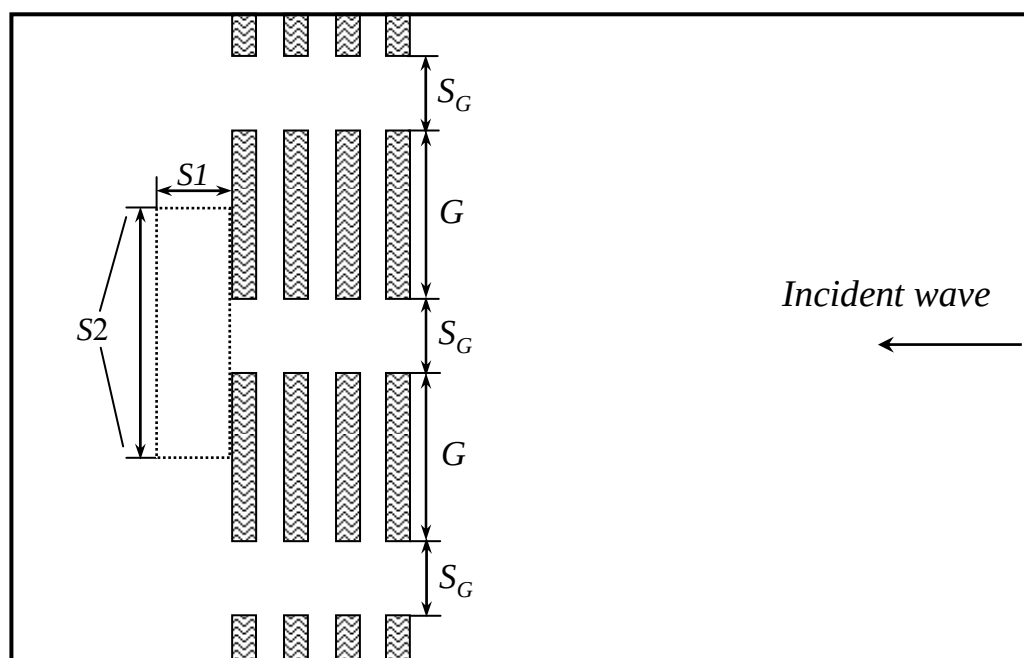


圖 4-21 多組系列潛堤佈置下能量透過率擷取範圍示意圖

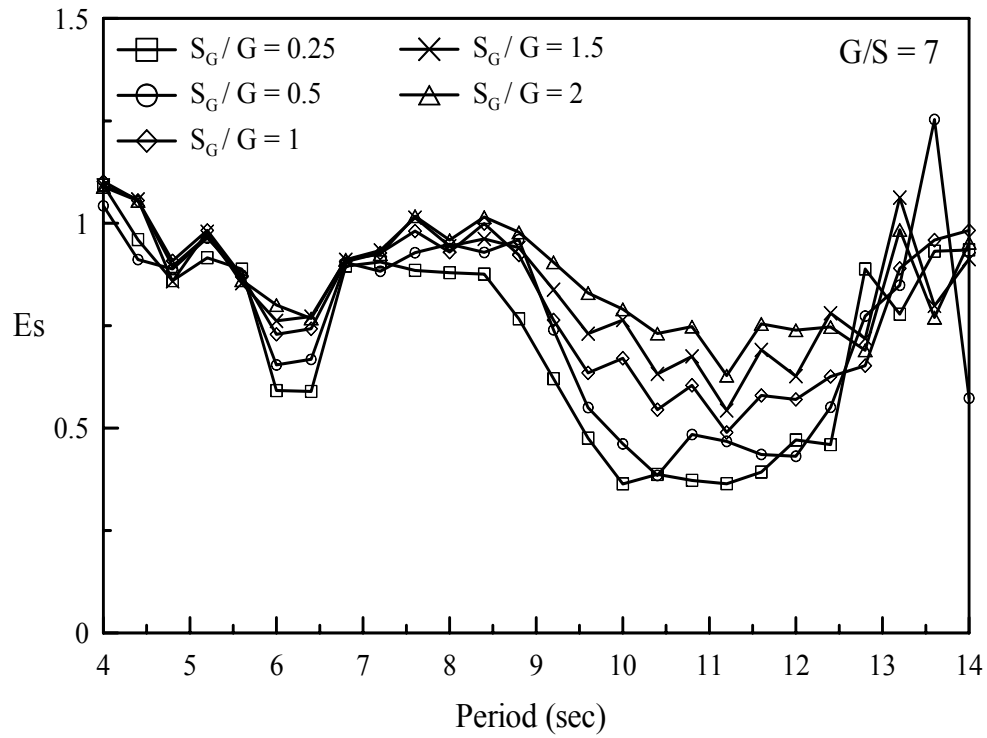


圖 4-22(A) 不同組距下堤後之能量透過率 E_s 與週期 T 之關係圖
($N = 4$, $N_G = 4$, $D/h = 1/2$, $B/S = 0.29$, $G/S = 7$)

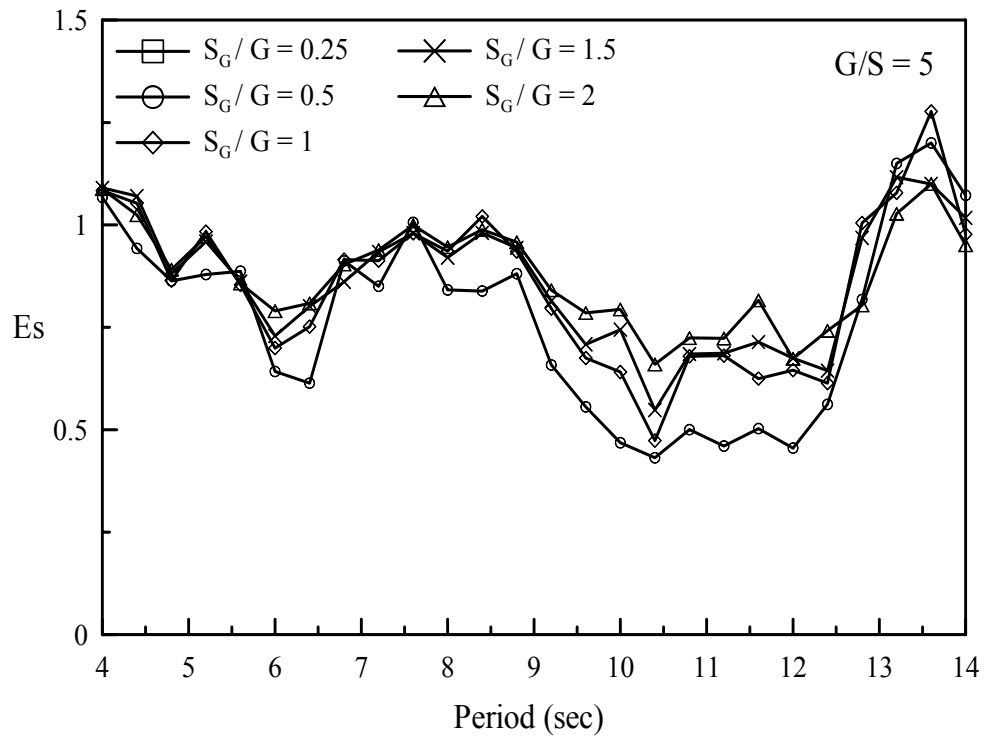


圖 4-22(B) 不同組距下堤後之能量透過率 E_s 與週期 T 之關係圖
($N = 4$, $N_G = 4$, $D/h = 1/2$, $B/S = 0.29$, $G/S = 5$)

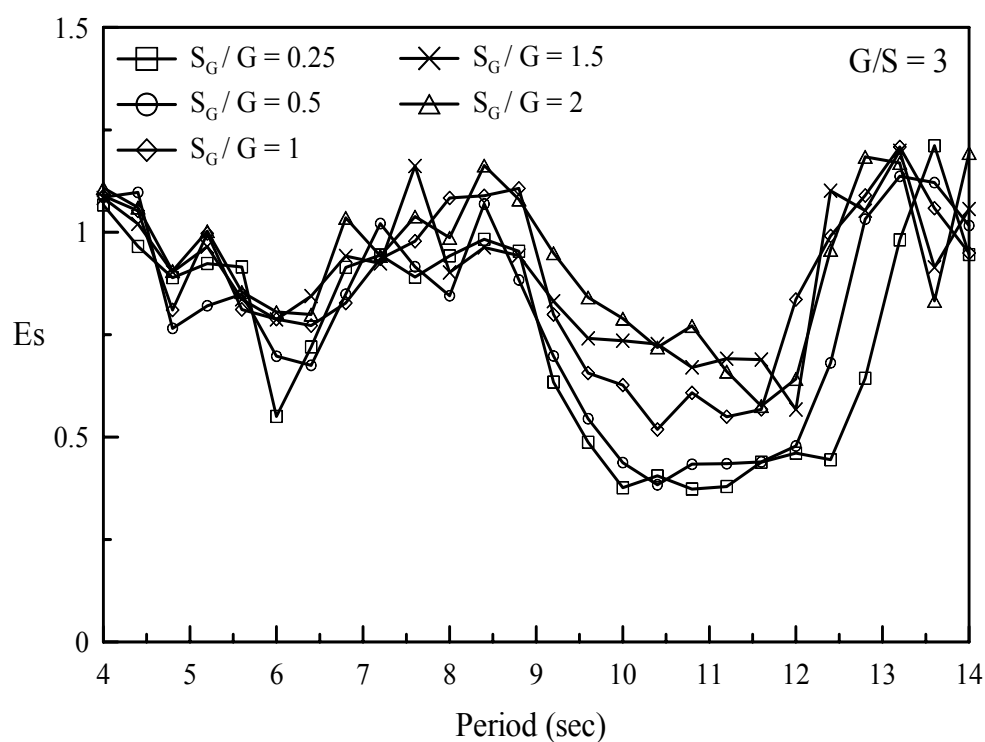


圖 4-22(C) 不同組距下堤後之能量透過率 E_s 與週期 T 之關係圖
($N = 4$, $N_G = 4$, $D/h = 1/2$, $B/S = 0.29$, $G/S = 3$)

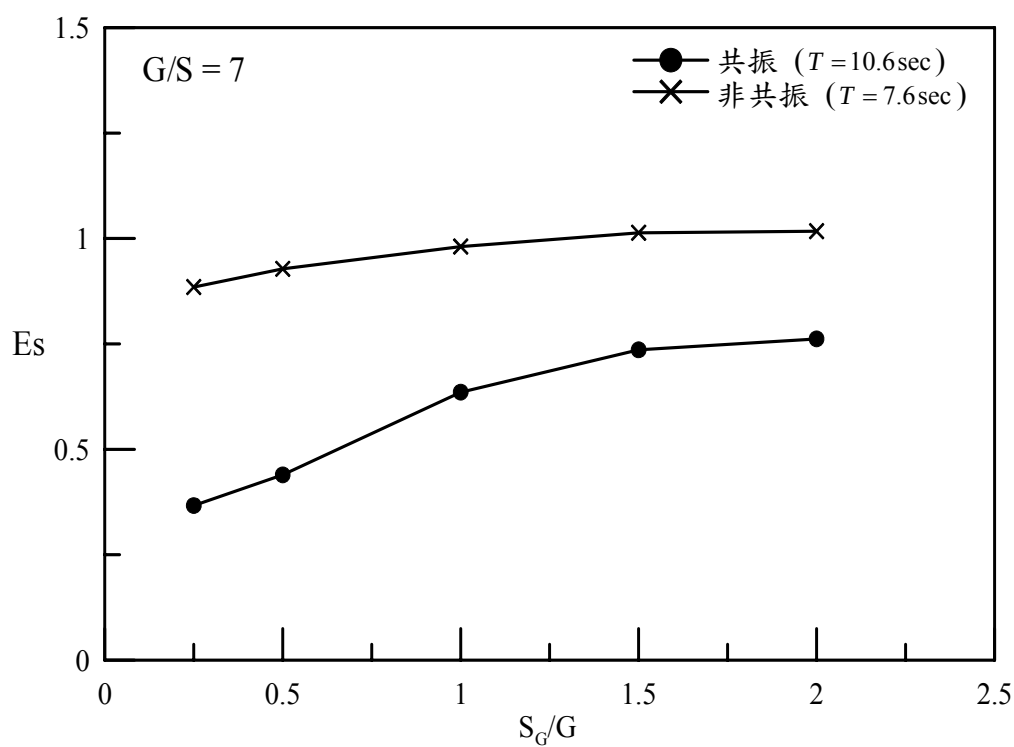


圖 4-23(A) $G/S = 7$ 時共振與非共振情況下能量透過率情況下能量
透過率 (E_s) 與相對組距 (S_G/G) 關係分佈圖

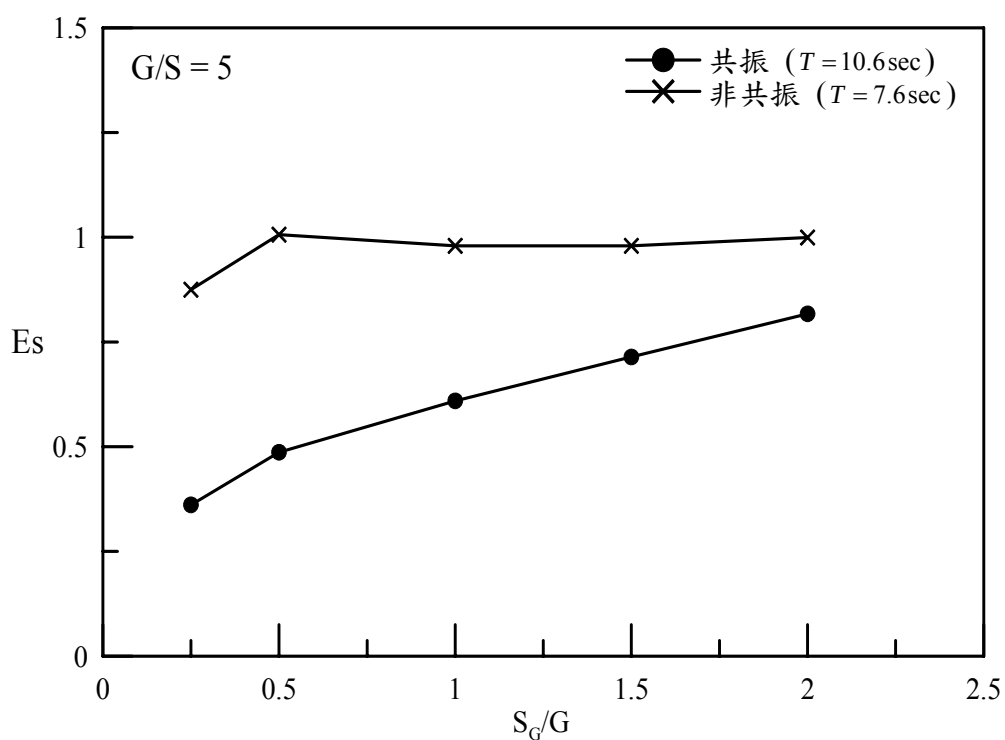


圖 4-23(B) $G/S = 5$ 時共振與非共振情況下能量透過率情況下能量透過率 (E_s) 與相對組距 (S_G/G) 關係分佈圖

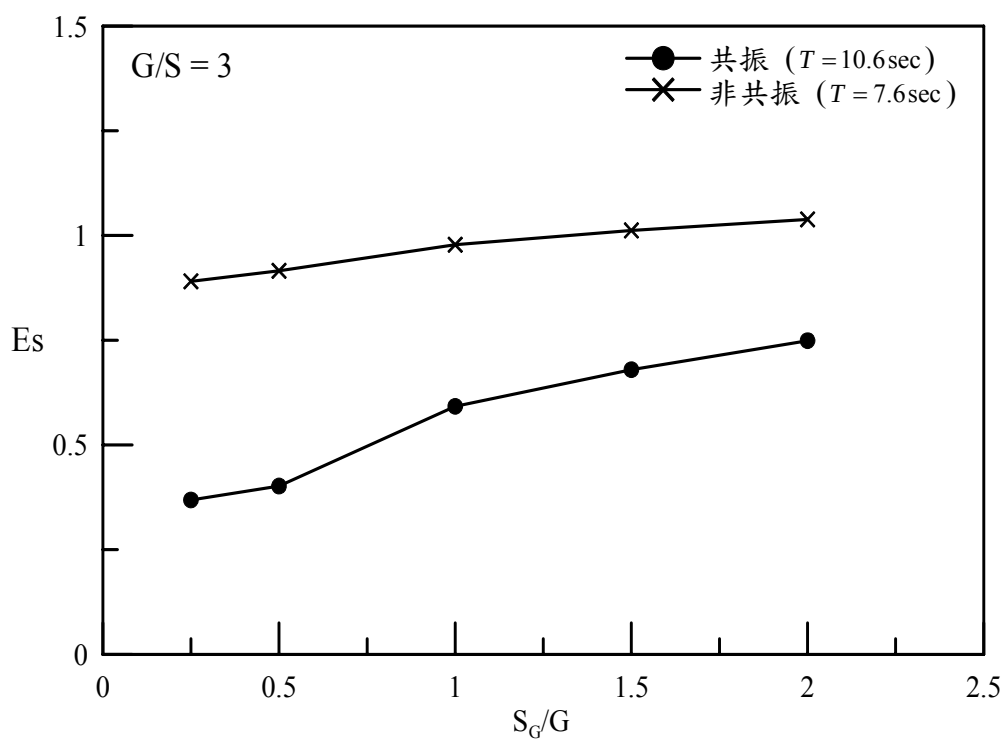


圖 4-23(C) $G/S = 3$ 時共振與非共振情況下能量透過率情況下能量透過率 (E_s) 與相對組距 (S_G/G) 關係分佈圖

8. 平面上潛堤組數 (N_G) 的決定

在決定各項參數後，最後要決定於現場海域系列潛堤所要擺放的組數，圖 4-24 為 $G/S=6$ 時不同組數下堤後之能量透過率 E_S 與週期 T 之關係圖，圖中顯示不管組數為多少其結果明顯是一致的，也就是說當堤距 S 、堤長 G 、潛堤組距 S_G 決定之後，潛堤組數 N_G 的多寡整體上並不影響布拉格共振機制中央部分的能量透過率。

由上一小節的研究中，考量到系列潛堤所造成的共振機制效率以及經濟問題，計畫報告中建議單組潛堤個數為 $N=4$ 是比較可以兼顧工法效果以及成本的考量。因此上面的平面數值模擬上皆以單組潛堤個數 $N=4$ 作為佈置標準。又由上面幾個段落的討論可以瞭解在平面上當潛堤堤長無限長時可以達到最好的類布拉格共振效果，然而現實中不可能佈置無限長之系列潛堤，因此若要應用於實際海域理應採用多組系列潛堤佈置作為主要的方式。由數值模擬對於平面影響因子的研究中，可以知道潛堤組距對於系列潛堤工法上的重要性，組距的寬窄將直接影響整個工法的效果，當然系列組數越多則越容易達到海岸防禦的效果。因此，對於潛堤組數本研究建議應同時考量現場海域的防禦目標、工程經費、現場海況等因素因地制宜，選取可以同時兼顧各方面的最佳參數。在本研究的現場模擬中，考慮的防禦目標為港南海域整個海岸線長約 1600 公尺，其中選取相對堤長 $G/S=6$ ，則潛堤堤長應為 210 公尺，加上相對組距選取 $S_G/G=0.25$ ，因此選用 $N_G=4$ 組系列潛堤做為現場佈置防禦範圍應可包含目標海岸，故乃屬可行之方案。在下面一小節中本研究將上述確立的各項因子於現場海域中進行系列潛堤的佈置與並利用數值模式進行平面波場的模擬。

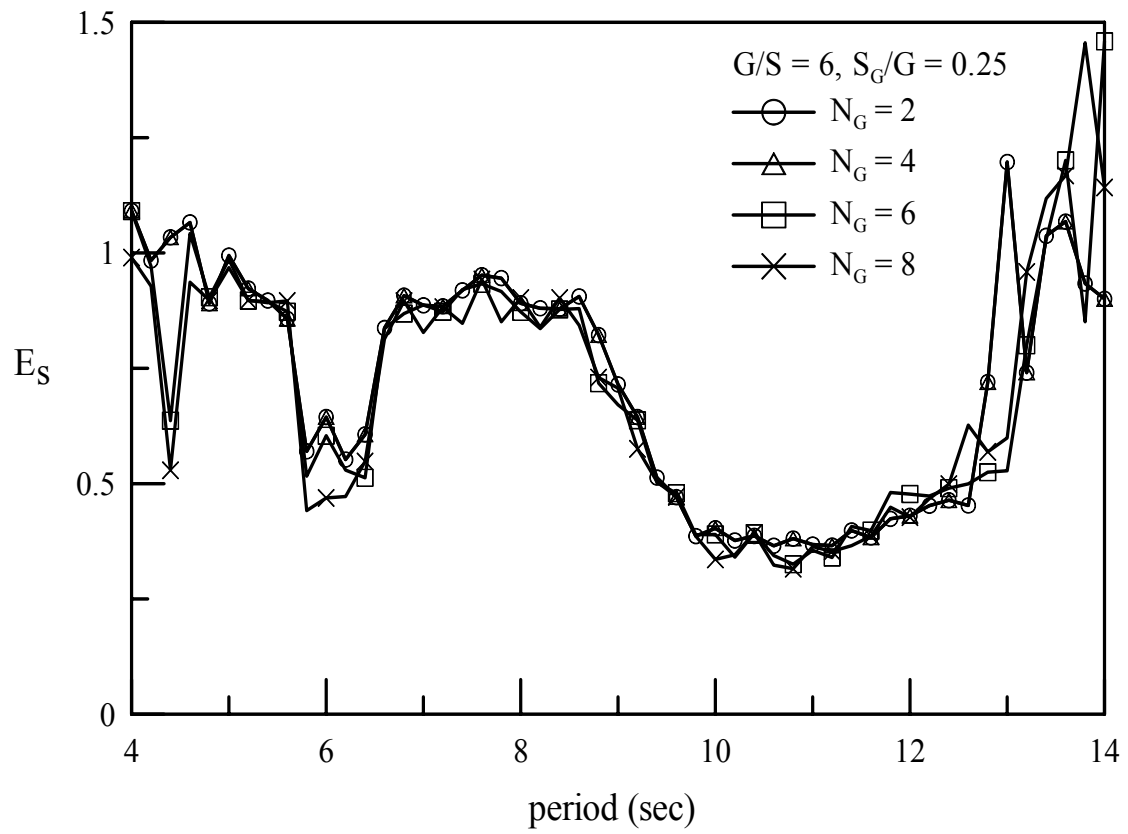


圖 4-24 $G/S = 6$ 時不同組數下堤後之能量透過率 E_s 與週期 T 之關係圖

4.3.3 現場海域之波場模擬

根據以上各小節的研究成果，現以平面佈置的方式應用於實際現場海域。由於季風波浪對於海岸之侵蝕影響較小，故參考表 4-1，以 10 年回歸週期之波浪作為設計防禦條件。除了考慮防禦性外，於現場尚須考量漁船行進之安全性，一般船隻吃水深約在 3m 以內，又考慮之設計相對堤高為 $D/h=0.5$ ，故本研究將第一座潛堤水深定為 8m (水位 +1.93m) 處作為佈置潛堤之水深。其他佈置條件根據上述以設計流程圖所分析的參數給定。潛堤間距為 $S=35\text{ m}$ 、潛堤個數 $N=4$ 、相對堤距 $B/S=0.29$ 、潛堤組數 $N_G=4$ 、相對堤長 $G/S=6$ 、潛堤組距 $S_G/G\approx 0.25$ 。根據以上設計條件，以堤寬 $B=10\text{ m}$ ，第一座潛堤水深 $h=-8\text{ m}$ (水位為 +1.93m 時)，依序往深水處佈置，堤頂水深保持 $h'=-4\text{ m}$ ，潛堤堤高則為 $D=h-h'$ ，潛堤

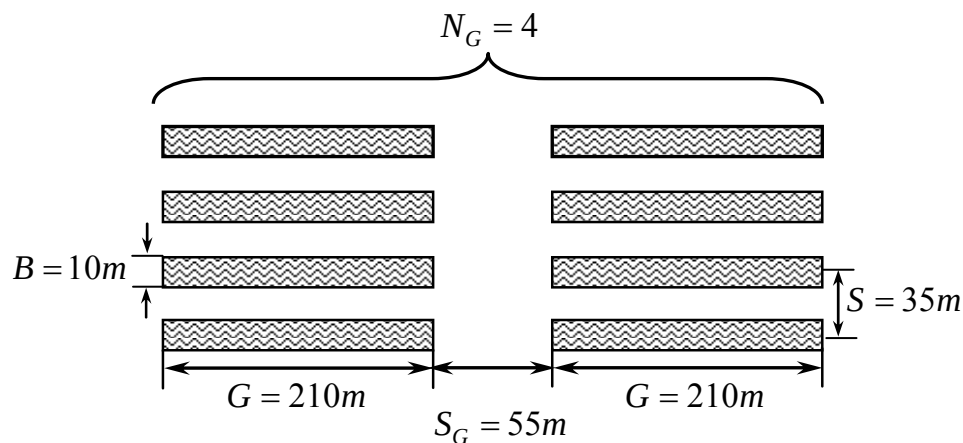


圖 4-25 系列潛堤平面佈置相關參數尺度示意圖

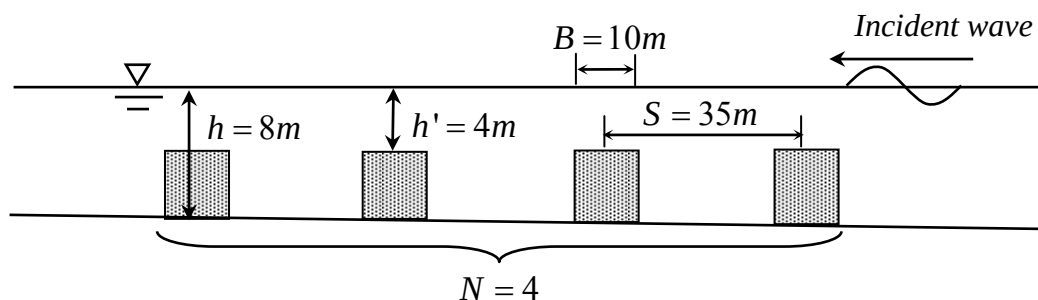


圖 4-26 系列潛堤斷面佈置相關參數尺度示意圖

長度 $G = 210\text{ m}$ ，各組潛堤間的組距 $S_G = 55\text{ m}$ ，其中平面佈置及斷面佈置示意圖如圖 4-25 及圖 4-26 所示。

在布拉格反射理論中若波浪正向入射於結構物會使得共振現象產生最大的效果，因此計畫中於現場海域佈置三種不同的方案進行比較，一為將系列潛堤的擺放平行等深線（約為逆時針旋轉與海岸線夾 18° 角），二為平行於地形海岸線的佈置，三為將潛堤順時針旋轉與海岸線夾 18° 角的佈置，實際的佈置位置及水深變化如下圖 4-27 所示。而數值模式之計算領域範圍與圖 4-27 相同，北起頭前溪出海口北側，南至客雅溪出海口，離岸約到水深 20 m 處，面積為 $2.6 \times 7.6\text{ km}^2$ 。波場數值格網採 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 之矩形網格建構。

圖 4-28(A) 為 10 年迴歸期颱風波浪作用下未佈置系列潛堤工法之波場分佈圖，圖 4-28(B) 為 10 年迴歸期颱風波浪作用下佈置平行地形等深線之平面波場分佈圖，圖 4-28(C) 為 10 年迴歸期颱風波浪作用下佈置平行海岸之系列潛堤平面波場分佈圖。圖 4-28(D) 為 10 年迴歸期颱風波浪作用下佈置潛堤逆時針旋轉與海岸線夾 18° 角之平面波場分佈圖。圖 4-29(A) 為 50 年迴歸期颱風波浪作用下未佈置系列潛堤工法之波場分佈圖，圖 4-29(B) 為 50 年迴歸期颱風波浪作用下佈置平行地形等深線之平面波場分佈圖，圖 4-29(C) 為 50 年迴歸期颱風波浪作用下佈置平行海岸之系列潛堤平面波場分佈圖。圖 4-29(D) 為 50 年迴歸期颱風波浪作用下佈置潛堤逆時針旋轉與海岸線夾 18° 角之平面波場分佈圖。由於系列潛堤以颱風波浪作為防禦目標來進行設計，故在颱風波浪作用下不管哪個方案皆有明顯的消能效果，且 NNE 向颱風波浪之入射角度幾乎平行岸線，加上計畫區的地形水深影響，在漁港南側，波浪有明顯的折射現象。於港南海岸前佈置不同配置的系列潛堤，皆使得堤後波高明顯降低，乃至近岸時波高明顯比未設置系列潛堤的情況還小，顯示系列潛堤工法於實際海域實行的可靠性。

圖 4-30(A) 為夏季季風波浪作用下未佈置系列潛堤工法之波場

分佈圖，圖 4-30(B) 為夏季季風波浪作用下佈置平行地形等深線之平面波場分佈圖，圖 4-30(C) 為夏季季風波浪作用下佈置平行海岸之系列潛堤平面波場分佈圖。圖 4-30(D) 為夏季季風波浪作用下佈置潛堤逆時針旋轉與海岸線夾 18 度角之平面波場分佈圖。圖 4-31(A) 為冬季季風波浪作用下未佈置系列潛堤工法之波場分佈圖，圖 4-31(B) 為冬季季風波浪作用下佈置平行地形等深線之平面波場分佈圖，圖 4-31(C) 為冬季季風波浪作用下佈置平行海岸之系列潛堤平面波場分佈圖。圖 4-31(D) 為冬季季風波浪作用下佈置潛堤逆時針旋轉與海岸線夾 18 度角之平面波場分佈圖。由圖中可知，在季風波浪作用下，港南海岸近岸處之波高皆不超過 0.5m，而在鳳山溪口北側，因有一砂洲地形，故無波高分佈。雖然系列潛堤工法是針對颱風波浪條件下去設計，對季風條件大致上也座落於次階共振的條件附近，因此由波場分佈圖中仍可見到其對於季風波浪仍有一定的防禦效果，雖無法達到一般離岸堤的功效但仍具有消波能力。在圖 4-30(B)中由於夏季季風部分由於波向恰好與系列潛堤呈現平行，故潛堤後方有明顯的聚焦效果出現。

為了更進一步確認何種配置較為適合新竹港南海域，依照前述的研究概念，定義相對能量透過率 $E'_s = \sum_j (H_t)_j^2 / \sum_j (H_o)_j^2$ 為佈置方案的波高 (H_t) 平方和除以無佈置結構物的波高 (H_o) 平方和，利用此方式來進行比較更可以突顯佈置系列潛堤後結構物消能的效果。如圖 4-27 虛線範圍所示，本研究擷取三個方案潛堤後方矩形區內所有的格點波高值的平方除以相同區域沒有佈置結構物的計算結果，最後得到不同方案的相對能量透過率，三個方案在不同的波浪條件下的能量透過率關係如表 4-3 所示。由表可以瞭解，在季風波浪作用下三種系列潛堤配置相對於沒有結構物的波場結果，能量大概可以降低百分之 12 到 18；而在十年回歸期颱風的作用下，平行地形等深線的佈置可以比原本沒有結構物的狀態降低百分之 21 左右的能量，但平行海岸線的佈置卻能降低百分之 27 左右，而順時針旋轉與海岸線夾 18 度

角的方案更可以降低百分之 44 左右；在 50 年回歸期的颱風作用下，平行地形等深線的配置則可以降低百分之 36 的能量，平行海岸線的配置則可以降低多達百分之 40 左右，而順時針旋轉與海岸線夾 18 度角的配置更可以降低百分之 50 左右。有此差異可能原因為在新竹港南海域颱風波浪多以 NNE 方向為主，經過地形的影響產生折射，而當波浪傳遞至系列潛堤時平行海岸線的配置相較於平行等深線的配置更接近正向入射，因此有較佳的消能效果，因此採用結構物順時針旋轉與海岸線夾 18 度角的配置相較於平行海岸線以及平行等深線的配置更為適合新竹港南海域。

根據上述的結果為了更細部的瞭解整個結構物的功效，本研究分別擷取沒有佈置結構物以及系列潛堤順時針旋轉與海岸線夾 18 度角的配置方案中各種波浪條件下結構物附近之斷面波高進行比較，所擷取斷面如圖 4-27 方案 3 所示，分別為整個系列潛堤佈置範圍的正中央以及中央偏北的第一組潛堤之中央斷面。

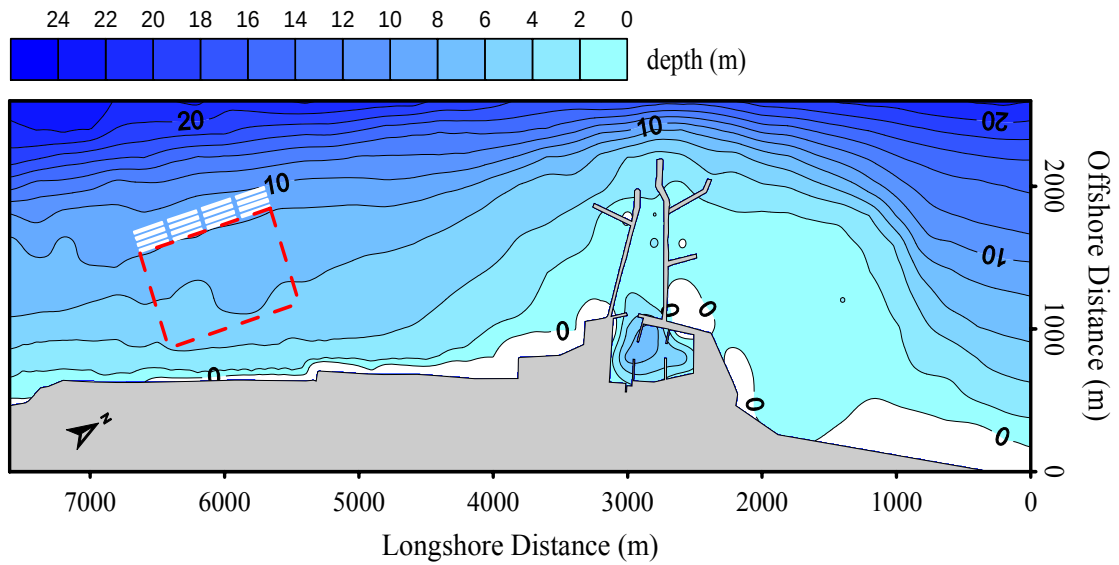
圖 4-32(A)為 10 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖，圖 4-32(B)為 10 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖。圖 4-33(A)為 50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖，圖 4-33(B)為 50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖。由於整個工法以 10 年回歸期颱風作為防禦目標來進行設計，因此由圖中明顯看出當波浪通過系列潛堤設置區時波高有明顯衰減的趨勢，且相較於無佈置結構物的結果其在堤前有波浪震盪的現象，顯示系列潛堤工法對於颱風波浪的防禦能力。觀察 50 年回歸期颱風作用下的成果，顯示在 50 年回歸週期之颱風條件作用下波浪通過結構物設置區時波高亦有衰減的趨勢，而相較於 10 年回歸期之颱風波浪作用所模擬的結果其在堤前波浪震盪的現象較不明顯。由上述結果說明系列潛堤工法對於颱風波浪的防禦能力，以及對於主頻區內的條件亦有良好的防禦效果。為了更加突顯系列潛堤工法的效果，在圖 4-34 中本研究依據前述之相對能量透過率的方式，比較圖 4-27 中斷面 3

於 50 年回歸期颱風波浪作用下無佈置系列潛堤與佈置方案 3 中每個格點的比較，由結果明顯看出於結構物後方的每個點所計算之相對能量透過率除了一些繞射造成的聚焦結果外其值皆小於 1，由此可知系列潛堤工法對於此海域之暴潮有一定的消能效果。

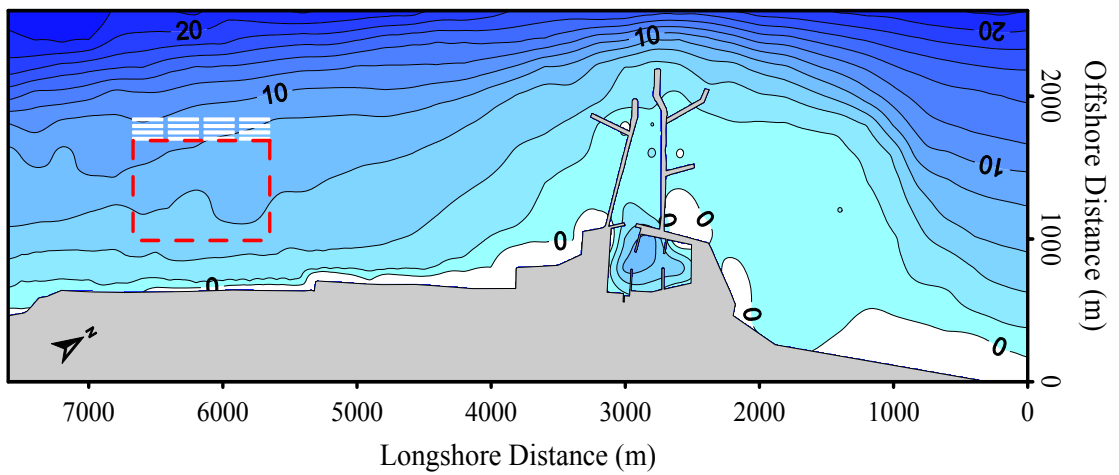
圖 4-35(A) 為冬季季風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖，圖 4-35(B) 為冬季季風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖。圖 4-36(A) 為夏季季風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖，圖 4-36(B) 為夏季季風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖。由冬季季風的結果顯示不管斷面 1 或斷面 2 的波高分佈，在波浪通過系列潛堤工法的佈置區時潛堤後波高則有明顯的衰減趨勢，而夏季季風的結果也呈現雷同的趨勢。此現象說明冬季季風波浪條件為 $T = 5.28 \text{ sec}$ 、夏季季風波浪條件為 $T = 4.95 \text{ sec}$ ，兩者皆恰好座落於整個系列潛堤工法設計的次諧共振區附近，因此亦有類布拉格共振的現象產生，導致堤後波浪能量有些許的衰減。

為探討新竹港南海岸實施系列潛堤保護工法之可行性，本研究針對計畫區附近海域進行數值模式之模擬，並探討其之波浪場之變化，期望可瞭解整個海域的特性，並進一步以此做為系列潛堤工法施行之範例依據。由以上系列潛堤佈置於實際海岸地形的研究成果顯示，本研究所設計之系列潛堤條件，於實際現場能利用布拉格共振機制的特性，發揮預期浪防禦效果，且因地形及次諧共振現象的關係使得系列潛堤工法對於一般季風波浪亦有部分的防禦效果。由前述得知布拉格反射機制，於現場實用的可能性，只要能掌握各種影響因子，依序規劃出佈置流程，並輔以數值計算，相信足以說明系列潛堤工法於現場應用的可能性。下一章本研究將參考國內外對潛堤工法之研究，以此為依據針對系列潛堤工法的特質作適當的斷面設計與使用材料的評估，並在圖 4-2 之設計流程中導入含成本效益之施工流程。

方案 1 系列潛堤平行等深線



方案 2 系列潛堤平行海岸



方案 3 系列潛堤順時針旋轉與海岸線夾 18 度角

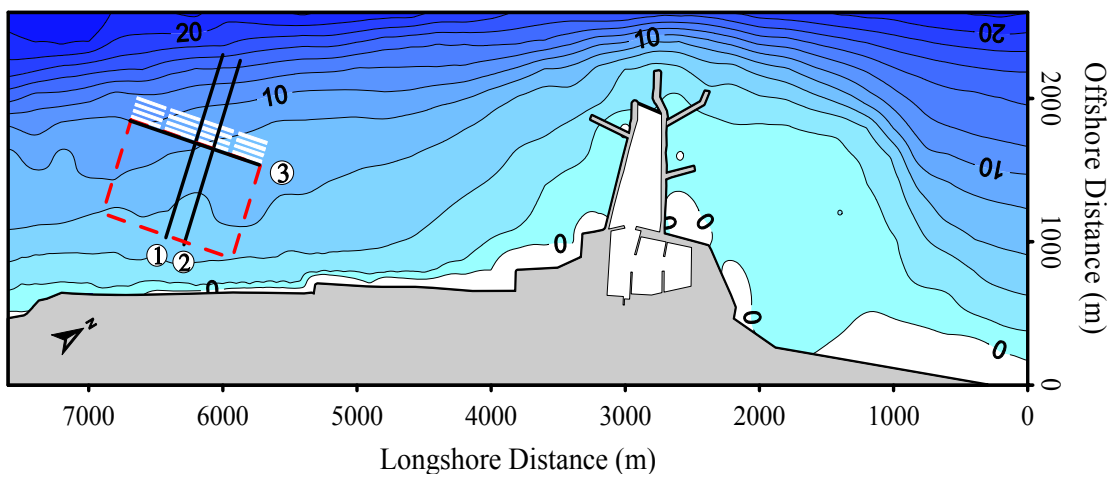


圖 4-27 港南海域附近系列潛堤佈置示意圖

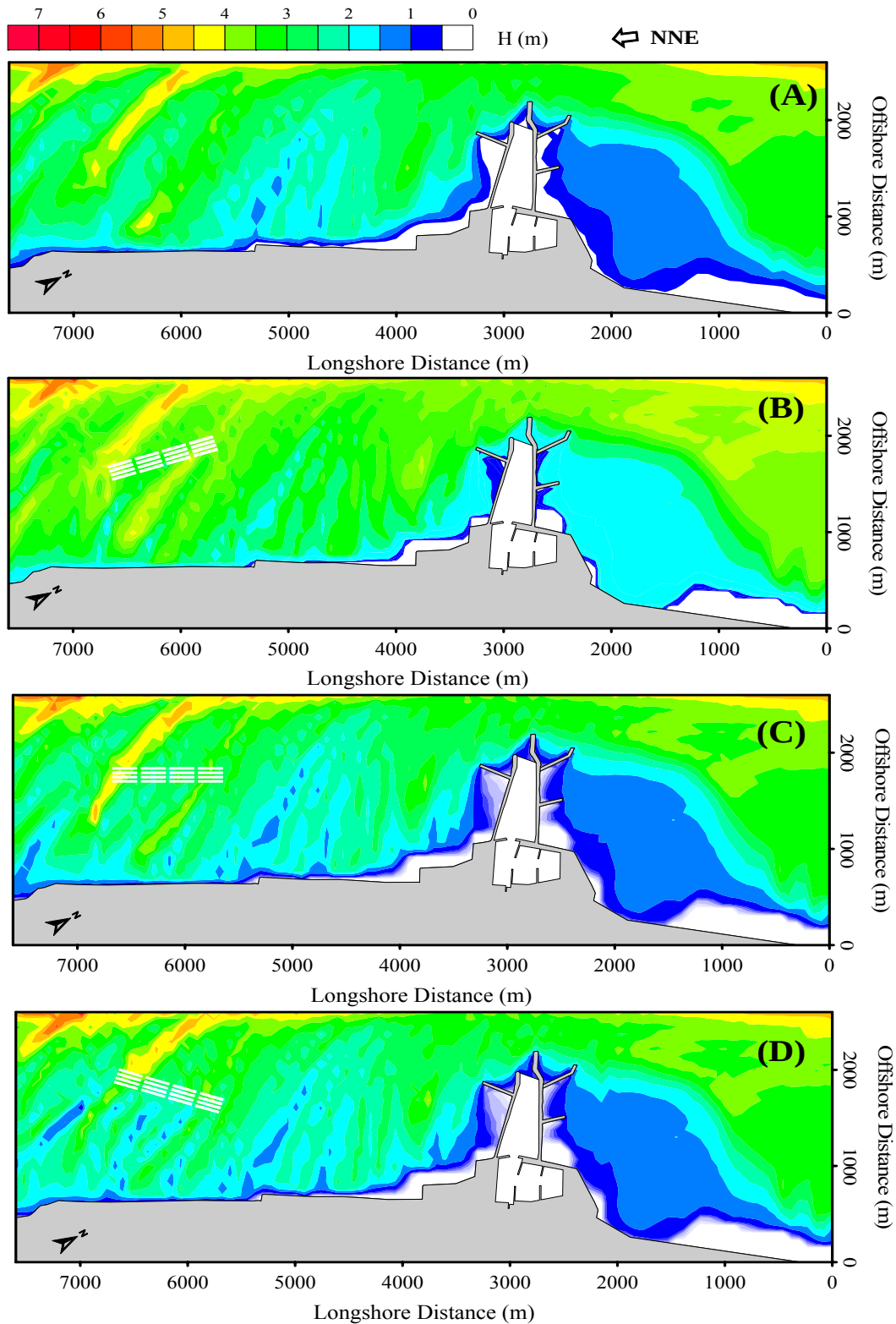


圖 4-28 10 年迴歸期颱風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 潛堤佈置平行等深線 (C) 潛堤佈置平行海岸線 (D) 潛堤逆時針旋轉與海岸線夾 18 度角 ($H=6.6\text{m}$, $T=10.8\text{sec}$, 波向 NNE)

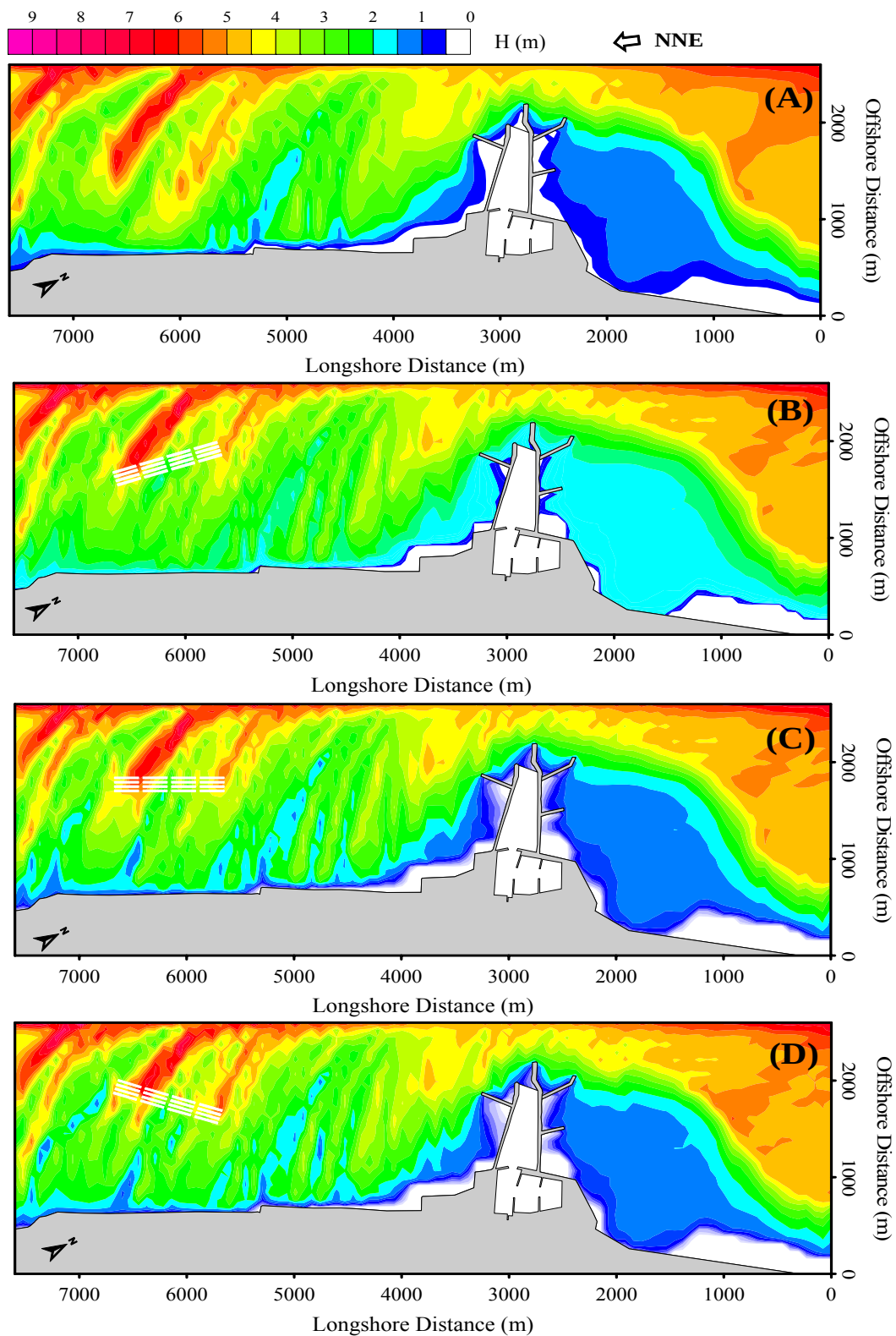


圖 4-29 50 年迴歸期颱風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 潛堤佈置平行等深線 (C) 潛堤佈置平行海岸線 (D) 潛堤逆時針旋轉與海岸線夾 18 度角 ($H=9.1\text{m}$, $T=12.7\text{sec}$, 波向 NNE)

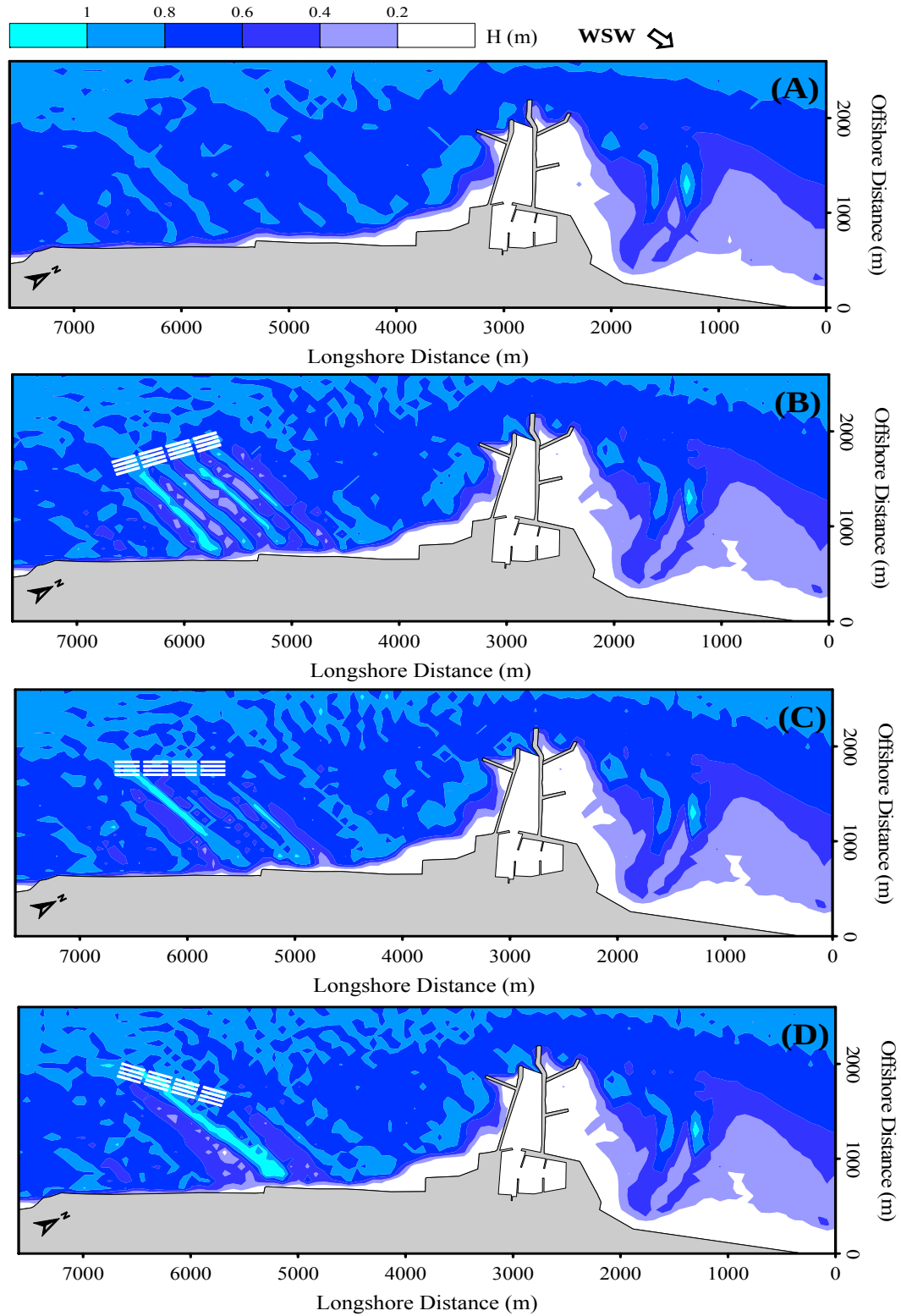


圖 4-30 夏季季風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 潛堤佈置平行等深線 (C) 潛堤佈置平行海岸線 (D) 潛堤逆時針旋轉與海岸線夾 18 度角 ($H=0.83\text{m}$, $T=4.95\text{sec}$, 波向 WSW)

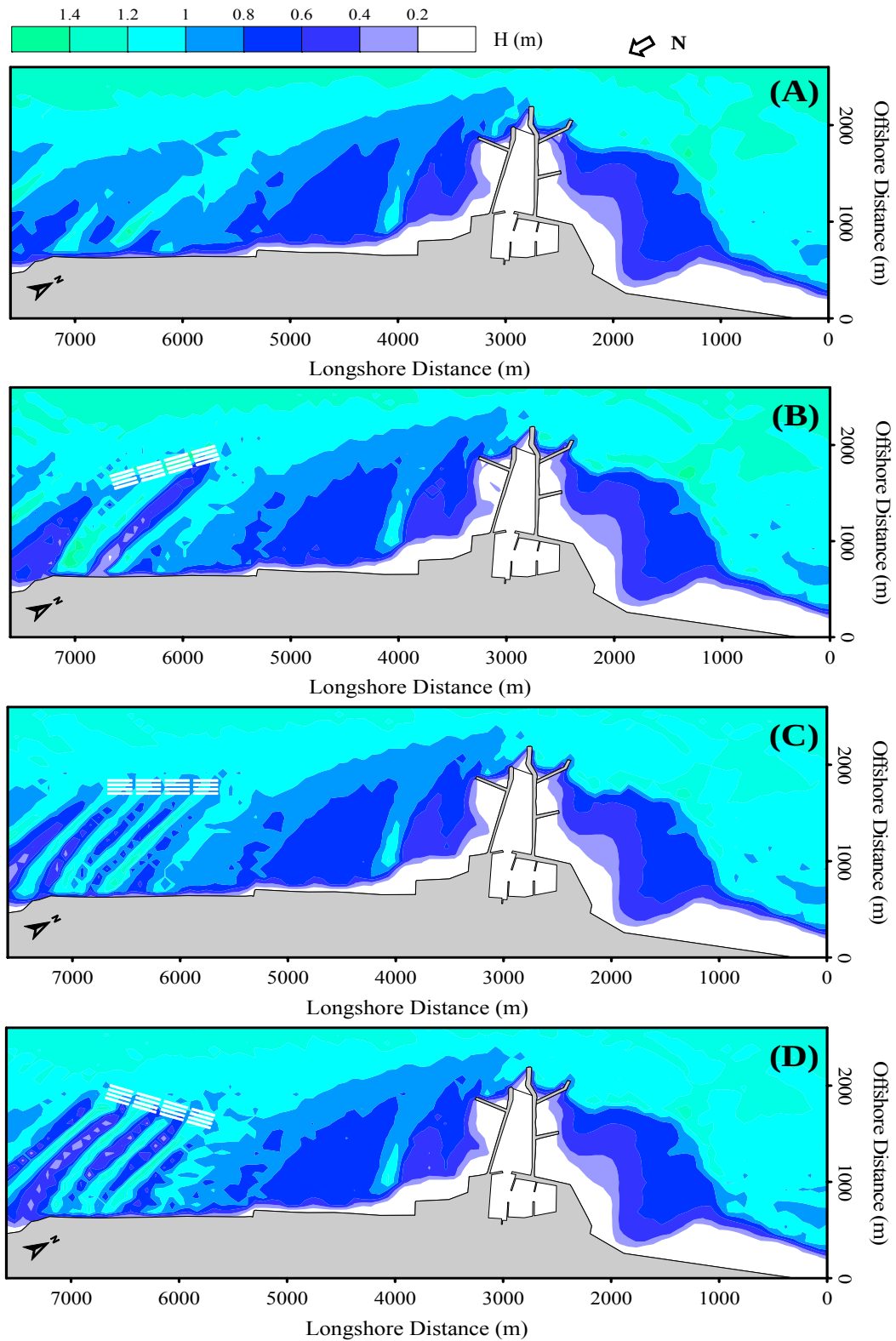


圖 4-31 冬季季風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 潛堤佈置平行等深線 (C) 潛堤佈置平行海岸線 (D) 潛堤逆時針旋轉與海岸線夾 18 度角 ($H=1.27\text{m}$, $T=5.28\text{sec}$, 波向 N)

表4-3 不同系列潛堤佈置下港南海域相對能量透過率之比較表

	方案 1 平行地形 等深線 E'_S	方案 2 平行海岸 線 E'_S	方案 3 順時針旋 轉與海岸線夾 18 度角 E'_S
夏季季風	0.8322	0.8841	0.8508
冬季季風	0.8381	0.8141	0.8340
10 年迴歸期颱風	0.7972	0.7306	0.5646
50 年迴歸期颱風	0.6398	0.6084	0.5072

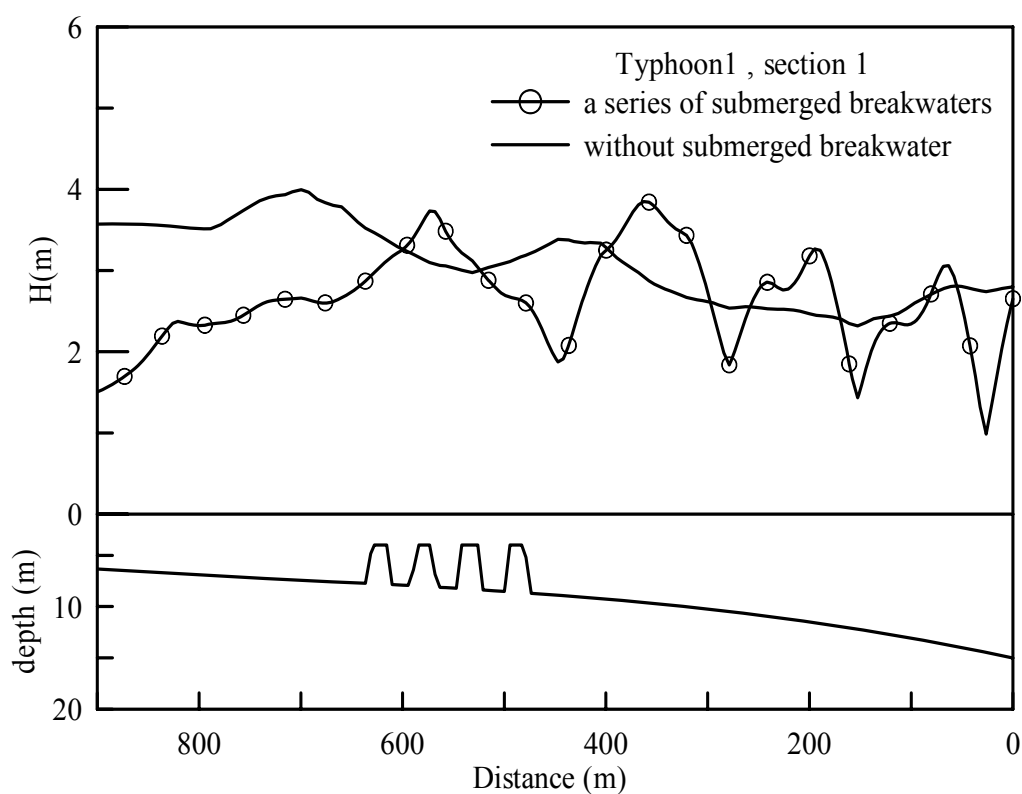


圖 4-32(A) 10 回歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波場分佈圖

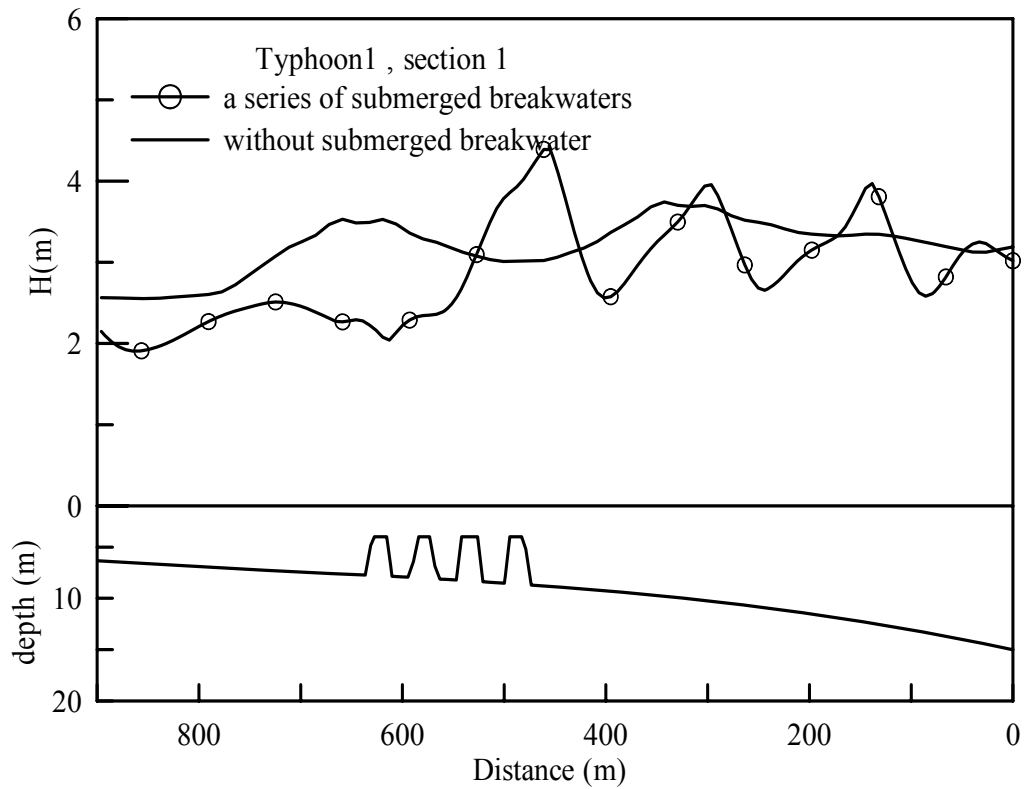


圖 4-32(B) 10 回歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波場分佈圖

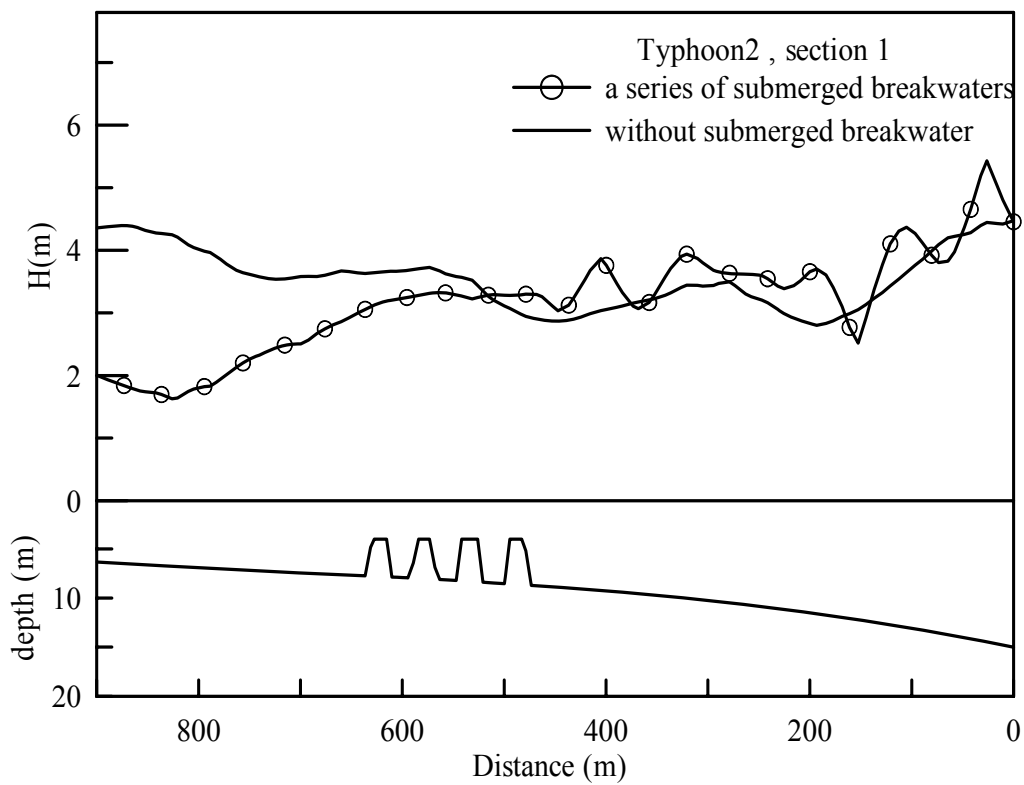


圖 4-33(A) 50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖

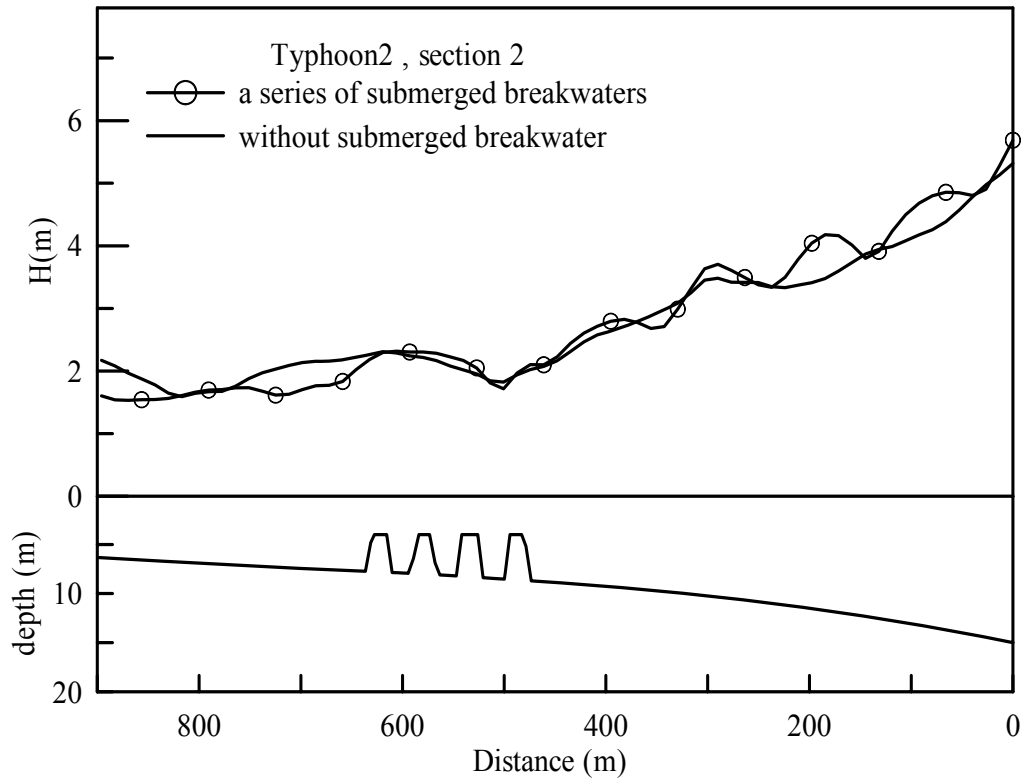


圖 4-33(B) 50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖

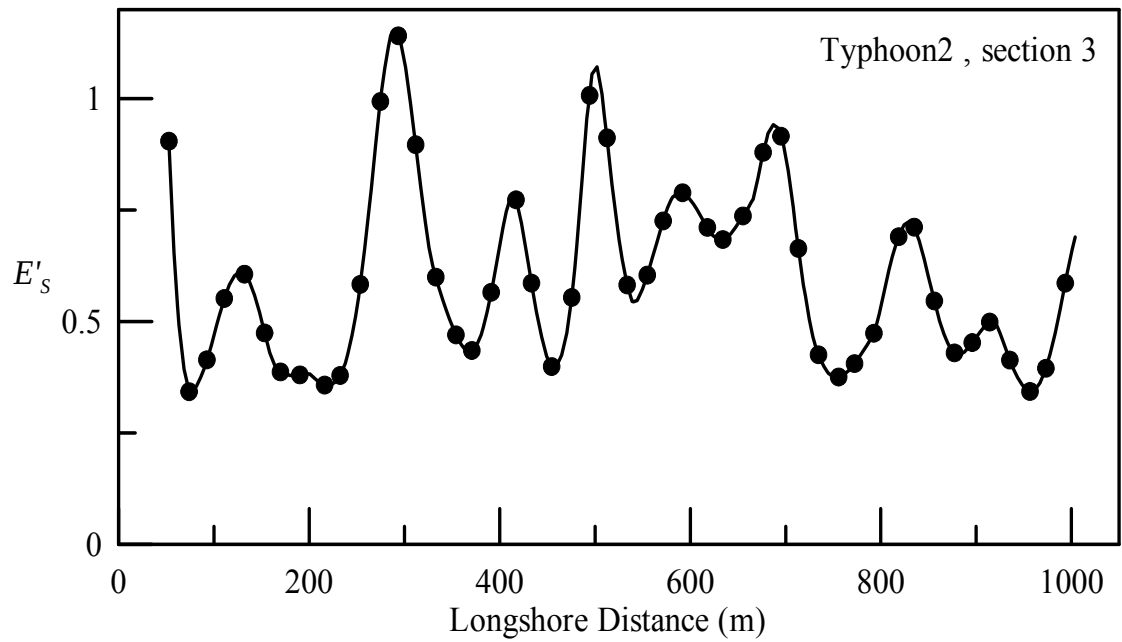


圖 4-34 颱風波浪作用下斷面 3 之相對能量透過率分佈圖

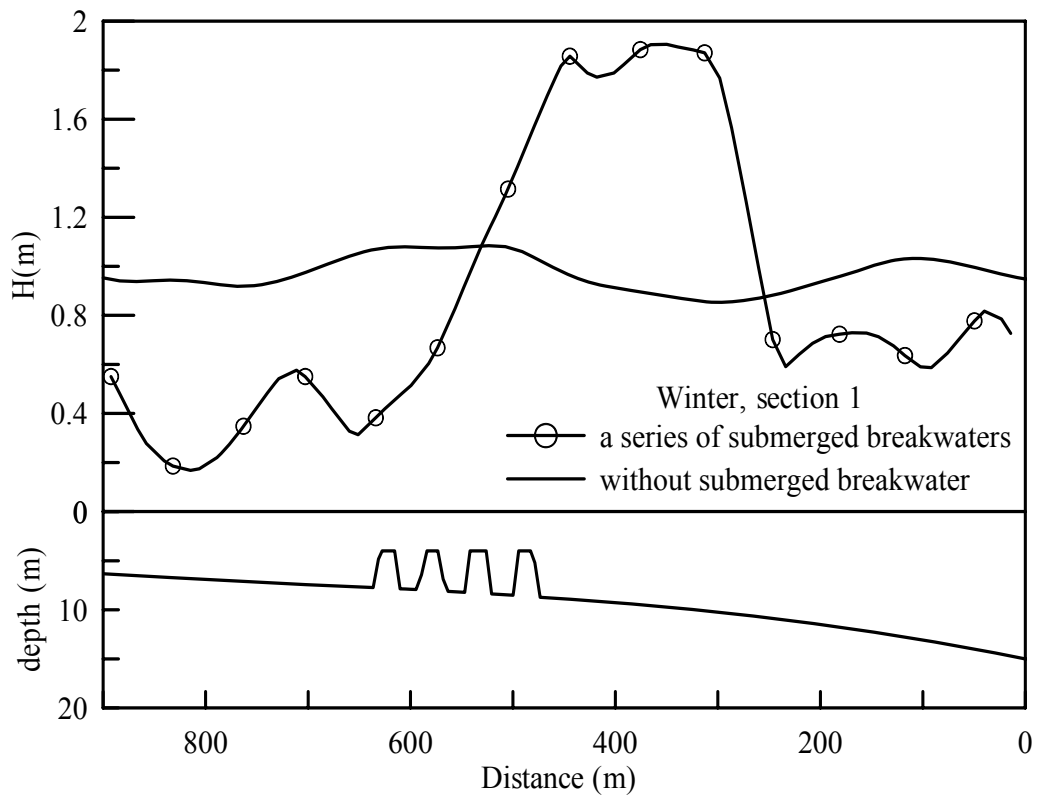


圖 4-35(A) 冬季季風波浪作用下斷面 1 之波場分佈圖

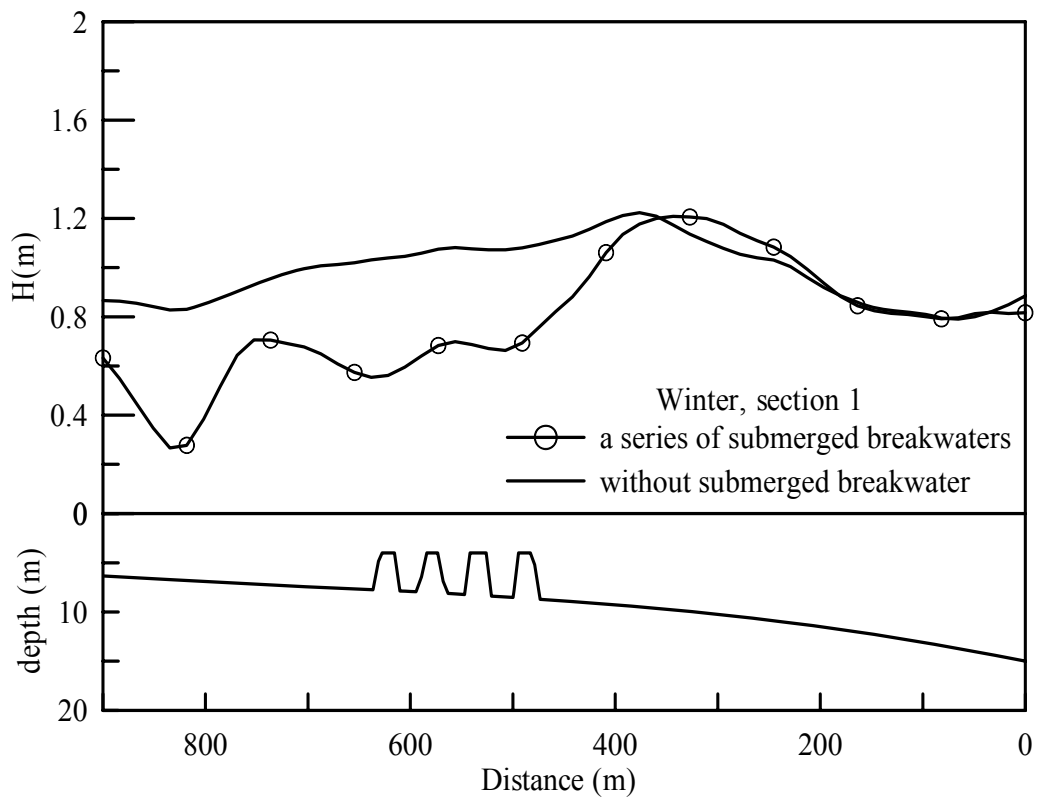


圖 4-35(B) 冬季季風波浪作用下斷面 2 之波場分佈圖

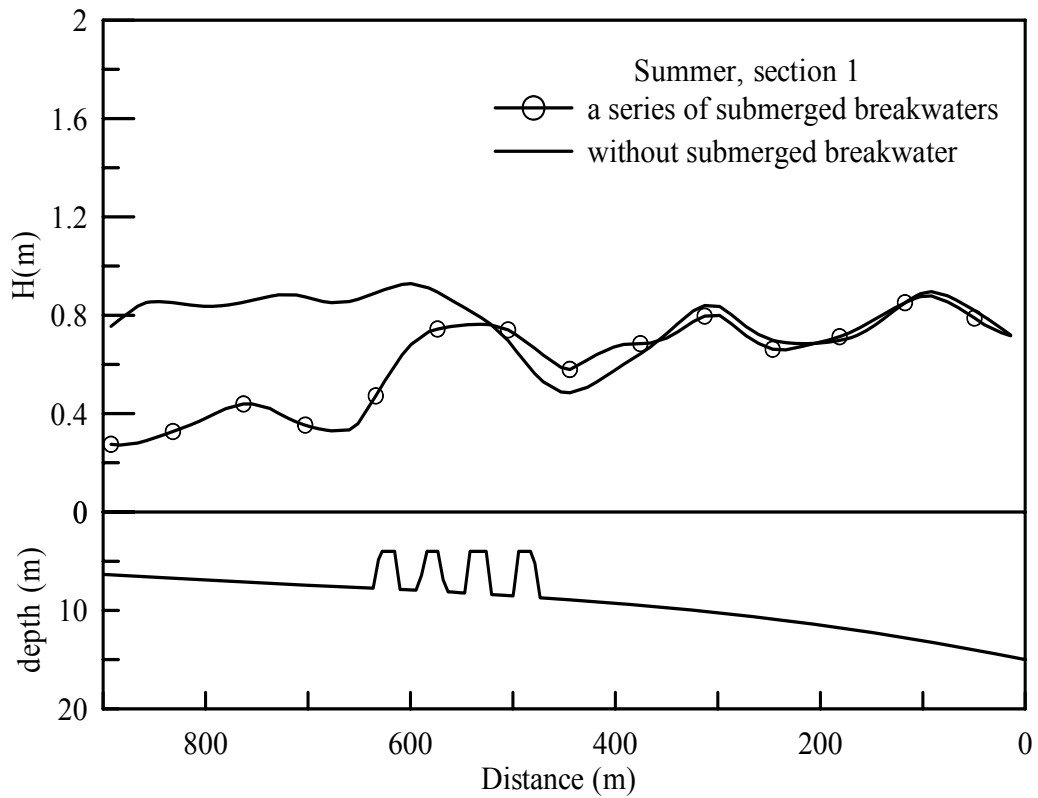


圖 4-36(A) 夏季季風波浪作用下斷面 1 之波場分佈圖

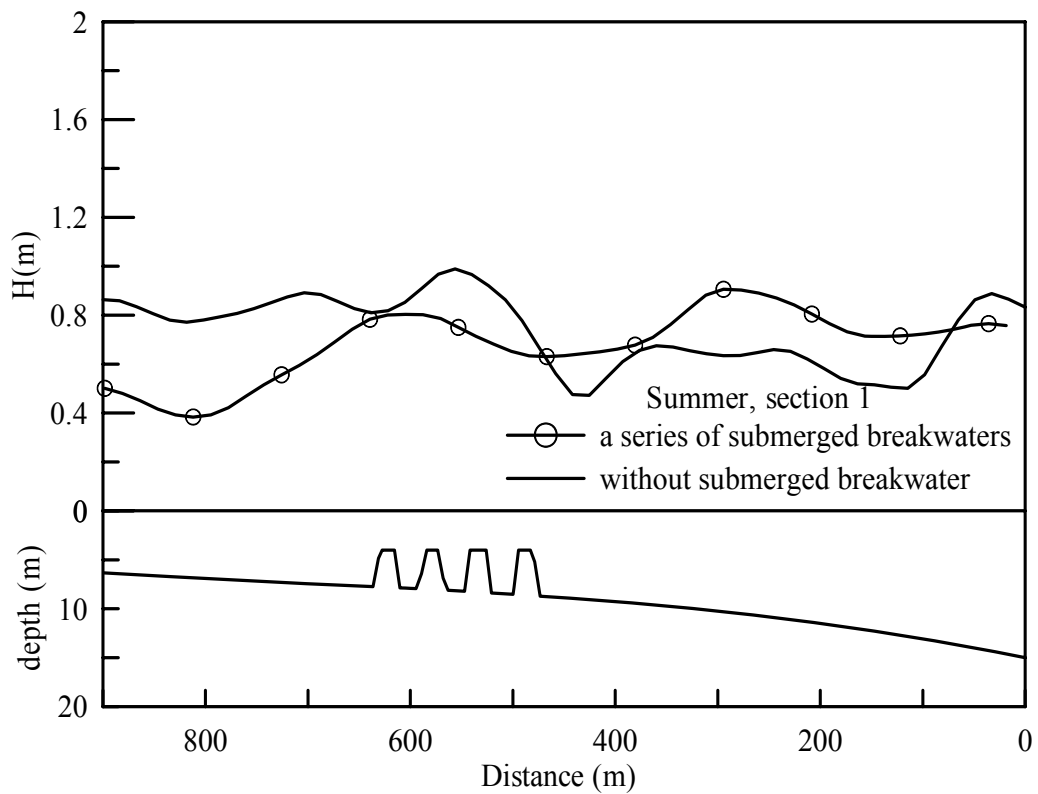


圖 4-36(B) 夏季季風波浪作用下斷面 2 之波場分佈圖

第五章 系列潛堤工法安全性及成本評估之初步研究— 以新竹港南海域為例

有鑑於系列潛堤工法在台灣地區尚未有任何建構案例，本年度計畫欲初步估算系列潛堤工法於實際海域建構時結構物可能之成本作為實際應用時之基本參考。由於系列潛堤工法僅適用於地形平緩的海域，因此於本章節中將延續過去三年度之計畫成果，以新竹港南海域作為示範海域進行工程材料、施工佈置等基礎費用的成本評估分析。

系列潛堤類似離岸潛堤的概念，利用塊石或混凝土型塊沉浸於海中代替天然礁石，形成海岸的生態系統，其中利用天然的塊石堆積屬於近自然工法的範疇，而用混凝土塊堆積形成潛礁，在經過一段時間的自然力作用，表面可能會有藻類滋生及附著性水中動植物生長，使礁體與週遭環境可形成一種接近自然的生態環境。由於本研究乃屬研究型計畫，因此對於系列潛堤工法實際的規劃僅止於初步的安全性以及斷面計算，並不詳細考慮波力、結構物承載或維護性等問題。下面將循序漸進，從工法斷面的研擬到材料的選擇與成本的初步估算，最後，將現地設計結合第四章所提出的流程圖，提出完整的系列潛堤工法設計流程。

5.1 潛堤工程斷面之研擬

5.1.1 常用的潛堤分類

參考郭⁴⁶ (2004) 的資料，重新對潛堤作定義：只要是在平均潮位的情況下不露出水面之海岸結構物都可歸屬於潛堤 (submerged breakwater)。潛堤也有稱為潛礁者 (reef)，主要指堤寬較寬延伸至岸者。參考國內相關文獻資料與本研究相關之潛堤大致可以分類如下

(a) 依潛堤高度：

1. 高潛堤：堤頂高等於或大約等於堤趾水深，堤頂水深甚小用於消能，由於高度往往超過平均水面，故堤趾掏刷的問題相

對之下較為嚴重，需要的維護費用也較高。

2. 低潛堤：堤高較低，堤頂水深大於等於堤高者，其往往有較特殊的作用，不一定在於使波浪碎波，由於堤高關係堤趾掏刷會較輕微，需要的維護費用相對之下也較低。

(b) 依潛堤寬度：

1. 一般潛堤：一般堤頂寬只有約數公尺至十公尺寬與波長比甚小，主要目的在藉由堤體產生碎波及波浪分裂來減衰波浪能量。
2. 寬頂潛堤：堤頂寬度達數十公尺甚至近百公尺，其長度約為約與波長同位階猶如珊瑚礁岩，又可稱之為人工潛礁 (artificial reef)。其主要目的在於藉助寬大之淺水區使波浪於堤上碎波，並有充份的距離使波浪隨傳遞的距離而衰減。

(c) 依潛堤列數：

1. 單列式潛堤：僅有一道潛堤防護，主要使得波浪碎波能量消散以達海岸保護的目的。
2. 多列式潛堤：二道或二道以上潛堤並列，利用堤與堤之間的間距使得波浪共振及碎波達到能量減衰，乃至保護海岸的目的。

上述為參考目前常用之潛堤工法後所歸納的結果，而本研究所採用的系列潛堤依照分類應為低潛堤、一般潛堤以及多列式潛堤，其除了可以維持海岸景觀更能利用波浪共振機制達到充分消波之效果，唯其初始造價經費可能有過高之虞。

5.1.2 斷面型式

在工程的應用上潛堤之型式，大致上可分為三種：

(a) 直立堤

參考交通部運輸研究所—「港灣構造物設計基準修訂」⁴⁷(2005)，其將直立堤定義為壁面垂直安放於海底之結構物，最主要為反射波之動能，此種型式稱為直立堤。

(b) 斜坡堤

依設計基準中的定義，以塊石或消波塊堆成者，堤身兩側成斜面，使波浪衝上斜坡時受斜坡表面凹凸不平之阻礙以及堤身之孔隙會使波能減衰，並阻其侵入堤內領域，以維護水面穩定。

(c) 合成堤

依設計基準中的定義，上部直立堤下部拋石堤所組合而成。直立堤部份放置於拋石堤之頂部，拋石堤同時作為直立堤部份之基礎。與波高相比斜坡拋石面較淺時，與斜坡堤之功能相近。反之，當水較深波高較小時則與直立堤之功能相似。

斜坡堤能將載重分佈於較廣面積對基礎土壤之要求較不高，施工也較容易，並易於擴建加高與維護，雖適於各種水深，但當水深較大時，斷面的坡堤所需的工程費用也相對增加，故多用於中、小水深或陸上。直立堤則依賴重力保持安定，除實體混凝土沉箱外亦有方塊混凝土等，以中、大水深處採用較宜，對施工經驗及技術要求較高。而合成堤兼具兩者優點，並能夠兼顧經濟效益。

由於直立堤需特別要求基礎土壤載重力，若設計不當易造成危害，故於本研究研究內容中僅考慮斜坡堤與合成堤之設計。參考海岸保護相關研究，通過潛堤後之透過率計算如下：

A 斜坡透水堤（拋石堤）

Van der Meer（1990）公式：

$$K_T = 0.46 - 0.3 \frac{R_c}{H_{si}} \quad (5-1)$$

其中 K_T ：透過率 R_c ：堤頂出水高（潛堤 $R_c < 0$ ） H_{si} ：入射波有

義波高。

B 合成堤

拋石護基上直立不透水堤之透過率

Kondo and Sato (1964) 公式：

$$K_T = 0.3 \left(1.5 - \frac{R_c}{H_i} \right) ; 0 \leq \frac{R_c}{H_i} \leq 1.25 \quad (5-2)$$

$$K_T = 0.3 \left(1.1 - \frac{R_c}{H_i} \right) ; 0 > \frac{R_c}{H_i} > -0.75 \quad (5-3)$$

其中 H_i 為入射波高， K_T 為透過率， R_c 為堤頂出水高（潛堤 $R_c < 0$ ）。於參考第三章之設計條件，其中 $R_c = -4\text{m}$ ， $H_i = 6.6\text{m}$ 為入射波高， $H_{si} = 6.6\text{m}$ 為入射波有義波高，計算如表 4.1。

表5-1 斜坡堤與合成堤透過率比較

透過率	斜坡堤	合成堤
K_T	0.64	0.63

由表 5-1 可得知合成堤防禦效果略佳於斜坡堤，但以成本而言，斜坡堤面積需求大材料需求也多，故成本較昂貴。故本研究計畫採用合成堤為主要斷面設計。

5.2 安全性估算與基本斷面設計

5.2.1 表面載重

於潛堤工法的設計上，表面載重的決定是重要的因子之一，其關係到整個結構物抵抗波壓、波力的能力，若載重不足則結構物有翻覆受損的危機，且可能間接影響到往後的維護費用。本節將針對系列潛堤工法的表面載重進行一系列的計算。

參考海岸工程相關研究後，本研究計畫考慮完全浸沒水面下之靜態安定潛堤應用於斜坡堤的安定性，將採用 Givler & Sorensen, Van der Meer (1990) 所建議的方式來計算，其經驗公式如下所示：

$$h'_c/h = (2.1 + 0.1S') \exp(-0.14N_s^*)$$

$$\Rightarrow N_s^* = -\frac{1}{0.14} \ln \left(\frac{h'_c}{h(2.1 + 0.1S')} \right) \quad (5-4)$$

其中 h'_c 為底床至堤頂高， h 為堤趾水深， S' 為損壞程度

$S' = 2$ ：開始損壞

$S' = 5 \sim 8$ ：中度損害

$S' = 12$ ：破壞

據此式得到相關係數 N_s^* 後，代入 Ahrens (1987) 所提出的試驗推算式，進一步估算表面載重 W ：

$$N_s^* = N_s (H_s/L_s)^{-1/3} = \left[H_s / (\Delta \cdot d_{n50}) \right] (H_s/L_s)^{-1/3}$$

$$\Rightarrow d_{n50} = \frac{H_s}{\Delta \cdot N_s^*} (H_s/L_s)^{-1/3} \quad (5-5)$$

其中 H_s/L_s 表示堤趾的有義波尖銳度， $\Delta = (r_r/r_w) - 1$ 為塊石相對密度， r_r 為被覆塊單位體積重 (石塊 = $2.65t/m^3$ 、混凝土 = $2.3t/m^3$)， r_w 為水單位體積重 ($1.03t/m^3$)。

參考第四章所提出之現場系列潛堤配置方案，得本研究確立之潛堤基本條件，並由數值模式計算得到由外海開始計算系列潛堤第一根堤之堤趾波高 H_s 約為 3.707m，而堤趾波長 L_s 經由分散關係式與數值模式計算約為 101m，整體參數計算如表 5-2 所示：

由表得本研究計畫初步估算之單一潛堤表面載重 W 為 1.644t，然而一般工程考量時至少選取 $1.644W$ 作為實際施工之表面

載重，於本研究中吾人選取兩倍載重作為實際應用之條件，即 $W_{design} = 2W \approx 3.3t$ 。

表5-2 覆蓋層載重參數計算表

h'_c	h	S	H_s / L_s	N_s^*	d_{n50}	W
5.1m	9.1m	2	0.037	10.085	0.894	1.644

5.2.2 基本斷面設計

潛堤斷面的設計，國內外皆有許多文獻案例，參考各式海岸工程關於潛堤斷面之研究報告，本研究決定依照日本青島海岸潛堤設計的方式來設計。初步設計圖如下圖 5-1 所示，其中 B 為潛堤寬度， B_c 為潛堤靠岸側之堤趾保護寬度，面海側第一根潛堤的堤趾保護寬度則為兩倍的 B_c ，根據日本青島海岸設計比例， $B_c = 0.25B$ ，潛堤兩側斜坡斜率皆為 1:2， W_{design} 為設計表面載重， W' 初步設計等於 $W_{design} / 200$ 約僅為 16.5kg，由於安全及便利考量採用 50kg~200kg 不等之碎石材料， D' 為基腳高度其視覆蓋層使用材料來決定。橫向堤長設計斷面圖如圖 5-2 所示，為簡化計算初步以 1:2 之坡度作為設計之橫向坡度。

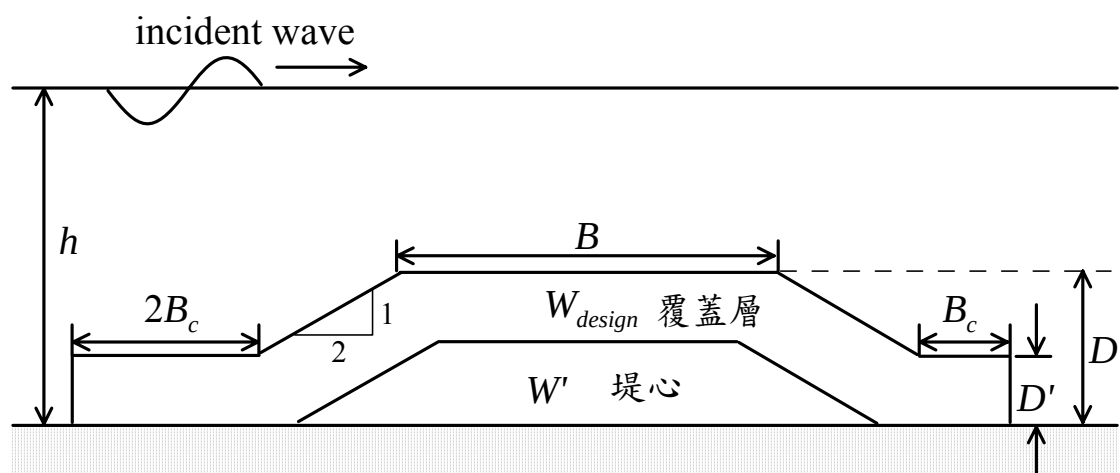


圖 5-1 本研究之單一潛堤縱向斷面設計示意圖

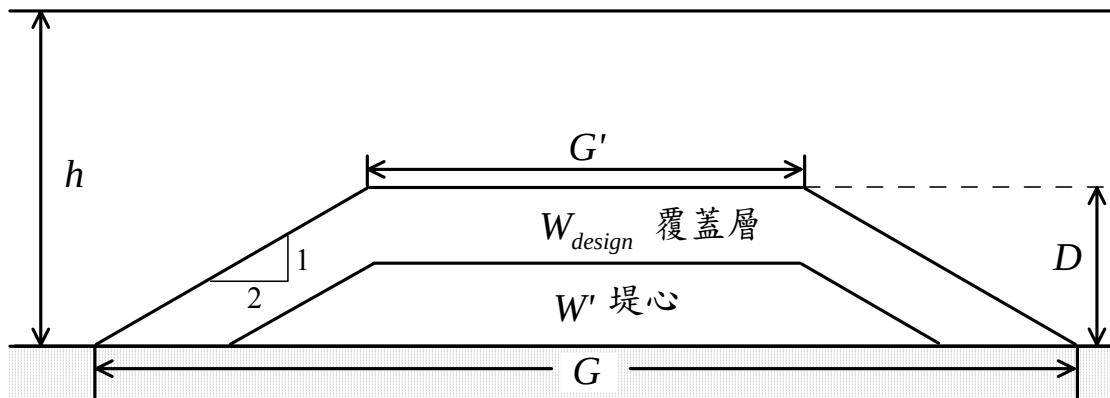


圖 5-2 本研究之單一潛堤橫向斷面設計示意圖

5.3 潛堤材質的選擇與成本的初步估算

5.3.1 潛堤材質的選擇

目前國內外潛堤之使用材質種類眾多，常用的有各式的消波塊、塊石、沈箱、混凝土塊以及方塊等等。考量到系列潛堤工法施工地區多在水深 8 米左右的海域，且結構物佈置之水深較深，因此建議使用混凝土方塊作為系列潛堤工法之使用材料。因其於工程施工上有其便利性尤以海上作業更甚，且方塊僅需混凝土即可快速施工，此外不需要複雜的設計可以節省其他費用。由研究物理性的觀點，因方塊的組成方式將使得潛堤工法不具透水性，此與本文研究的考量具有一致性，因此以方塊作為潛堤的材料將更適用於本研究所提出的設計流程。

參考交通部運輸研究所，「港灣構造物設計基準修訂」(2005)，說明方塊設計上，頂面與地面建議做成凹凸形楔樁，以增加方塊互相接合的整體性並防止滑動。方塊接合部楔樁，設計如圖 5-2 所示，凹部尺寸較凸部尺寸大 5 公分為原則，故圖中 $a' \leq a + 5\text{cm}$ 、 $b' \leq b + 5\text{cm}$ 。在施吊設計的部分，以能安全施工為原則，設計方塊吊點配置及吊筋。作用於施吊部位之載重，應考量方塊自重、製作處附著力以及施吊時的衝擊力等外在影響。至於方塊的詳細規格可視施工船隻與現場海況做進一步的規劃調整。

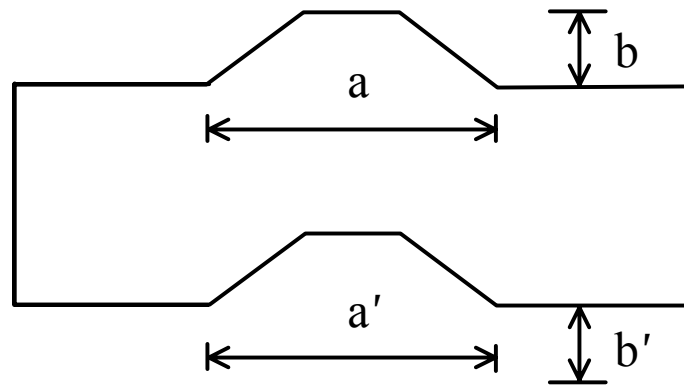


圖 5-3 方塊凹凸形楔樁示意圖

5.3.2 潛堤成本的初步估算

完成表面載重、斷面設計以及材質選擇後，最後將初步估算單組系列潛堤所需要的成本。材料價格的部分參考『臺灣營建研究院公共工程技術資料庫整合中心—PCCES 電子估價資料庫』，由於目標海域在新竹港南地區，故以北部地區的價格作為估算標準。

由第四章針對新竹港南海域所設置的系列潛堤之相關資料，假定實際海域之設計堤長 G 為 210m，而混凝土規格主要取決於所需防禦波浪強度，一般在波浪挾帶泥沙較多的地區，侵蝕破壞效應較大，使用規格建議應達到 5000psi，而本計畫係屬潛沒低頂堤未受直接波浪侵襲，故在經費與需求的考量上本研究採用較低的規格 3000psi，除了能節省成本外還能兼顧安全性。而為了避免石料拋放後因為地形不均勻而沉陷，因此在拋放石料前先於堤址鋪設襯墊，再拋放堤心石料，進行整平整坡後，使堤心塊石基礎水平部分寬度 B 為 10m、頂部高程 4m。考量波浪對堤基的冲刷作用，在堤前後加長覆蓋層之長度向海外及內陸延伸，避免受損引起崩落。由於本研究目標為系列潛堤工法，故僅於靠海第一座堤前延伸長度設計為 $2B_c$ ，以防止外海波浪強烈的衝擊，其餘系列潛堤前後堤趾接採用 B_c 設計即可。參考圖 5-1 以及圖 5-2 之潛堤斷面設計以及表 5-3 之北部地區潛堤所需

材料價格表後，將整體斷面切割數個部分分別計算其面積，如下表 5-4 所示。由於第一座潛堤之前列堤趾設計較長故造價較高，表中分別計算潛堤各部分的價格。而不織布襯墊面積為結構物接觸地面面積，靠海第一座底部面積為 7035m^2 ，其後每座為 6510m^2 。則單座潛堤價格初步估算表如表 5-4。又根據上述 $W_{\text{design}} = 3.3\text{t}$ ，水泥比重 2.3，故 $V = 3.3 / 2.3 = 1.43\text{m}^3$ 而材料形狀設計為正立方體，得每邊長 $D' = \sqrt[3]{1.43} = 1.13\text{m}$ 。因此，經由計算可得覆蓋層面積為 34.75m^2 ，堤心面積為 54.7m^2 。橫向堤長設計斷面圖如圖 5-2 所示，為簡化計算初步以 1:2 之坡度設計，原設計堤長 G 為 210m，減去斜坡部分後堤長 G' 為 202m。進一步計算單組系列潛堤可能之成本，以 $N = 4$ 作為估算因子，混凝土強度使用 3000psi，則可概估材料總經費表如表 5-5 所示。

表5-3 潛堤材料價格表（北部地區）

資源名稱	單位	單價
預拌混凝土($210\text{kg}/\text{cm}^2(3000\text{psi})$)	m^3	1,670
碎石($50\text{kg}\sim 200\text{kg}$ 不等)	m^3	627
不織布襯墊	m^3	120

資料來源：臺灣營建研究院公共工程技術資料庫整合中心—PCCES 電子估價資料庫）

臺灣經濟部礦務局 - 各縣市砂石 97 年 1~7 月份產量及價格整合資料 - 新竹縣市

表5-4 單一潛堤各部分材料成本計算表

區域	面積 (m ²)	堤長 (m)	體積 (m ³)	價格 (3000psi)
覆蓋層(第一座)	34.75	202	7019.5	11,722,565
覆蓋層	31.95	202	6453.9	10,778,013
堤心	54.7	202	11049.4	6,927,974
堤底不織布襯墊 (第一座)	7035			844,200
堤底不織布襯墊	6510			781,200

表5-5 單組潛堤 ($N=4$) 價格初步估算表

堤號	覆蓋層	堤心	總價
第一座	11,722,565	6,927,974	19,494,739
後列 (單一座)	10,778,013	6,927,974	18,487,187
合計(第一座+後列三座)			74,956,299

5.4 系列潛堤工法之限制與優缺點

系列潛堤工法最主要的目的在於產生類布拉格共振效應，進而使得波浪通過結構物後能量有大幅的減少。不同的工法具有不同的功用及效果，同時也兼具不同的優缺點與限制。必須要對各種工法之優劣與限制有詳細的瞭解，才能適當的應用進而使得整個工程達到預期效果。故本節將參考過去前人研究與各年度之成果，歸納系列潛堤工法之限制與優缺點，如表 5-6 所示，以下則詳述相關項目。

系列潛堤工法的限制如下所示：

1. 系列潛堤工法僅適用於緩坡地形：系列潛堤工法的目的與一般離岸潛堤希望堤上碎波消能的機制不同，其主要目的在於產生布拉格共振現象使得能量可以消耗衰減，因此一般佈置於波浪非碎波區，故考慮到施工與使用材質的問題，建議此工法的應用適於地形緩變的海域。
2. 系列潛堤工法的擺放位置需考慮主波向：由實驗以及理論分析的結果可以瞭解，當波浪正向入射系列潛堤時所能產生的布拉格共振機制最為完整，因此在現場海域應用時應先以數值模擬瞭解海域的現況找出最適當的擺放佈置。

系列潛堤工法的優點如下所示：

1. 系列潛堤可免於海岸景觀的破壞，並降低環境衝擊：系列潛堤工法大多佈置於水深較深處且潛沒於水下，相較於其他防護工法可以使得海岸景觀與遊憩的規劃較不受限制，且不直接建構於海岸附近，對於沿岸的環境影響也可以降至最低。
2. 系列潛堤工法維護費用低：相較於其他工法，系列潛堤潛沒於水深較深處，且不似一般潛堤波浪於堤上碎波，因此建構後需要的防護費用將遠比一般工法要低。

系列潛堤工法的缺點如下所示：

1. 系列潛堤工法施工難度較高：系列潛堤工法佈置於水深較深處且重是各影響因子之設計，相較於其他防護工法多於近岸施工，其難度較大。
2. 系列潛堤工法相較於傳統離岸潛堤費用較高：系列潛堤工法相較於傳統離岸潛堤由於個數以及堤高設計的關係，由表 5-5 的案例可知若包含施工成本後單組系列潛堤可能要比單座離岸潛堤要來的高。
3. 系列潛堤工法防禦條件受限制：由於系列潛堤工法最主要的目的在於產生布拉格共振現象，使得波浪通過該結構物時能量可以有衰減的效果，因此系列潛堤工法之堤距等相關因子的設計將直接影響整個工法適用的防禦條件與範圍，也因此本研究才會進行一系列的模擬與討論來規劃設計流程圖，希望可以釐清整個機制與流程使得系列潛堤工法有機會應用於實際海域。

表5-6 系列潛堤工法之限制與優點缺點比較表

	限制	優點	缺點
系列潛堤工法	僅適用於緩坡之地形	免於海岸景觀的破壞，並降低環境衝擊	施工難度相對較高
	結構物之擺放位置需因地制宜	維護費用低	相較於傳統潛堤成本較高
			防禦條件受限制

5.5 含工程施工之系列潛堤工法設計流程圖

根據以上研究要將系列潛堤設計佈置於現場，並初步估算其成本，必須先決定潛堤的形式以及表面載重，再決定其斷面設計以及使用材質。待結構物使用材質決定完成後，依照不同地區參考其材料之基本費用，並估算單列乃至單組潛堤之基本造價。最後評估是否符合工程計畫的需求來決定採用與否。綜合計畫過去三年度以及上述之研究，茲將圖 4-2 之系列潛堤工法流程圖加以改善，初步規劃出含成本概念之系列潛堤工法設計流程圖，如圖 5-3 所示。

圖 5-3 之流程中，從考慮現場之波浪資料的蒐集開始，考慮現地之主要防禦目標，隨後利用波浪模式或實驗來探討各相關影響因子的變化並決定堤距，堤距決定後考慮平面上之相關影響因子以及成本，進一步設定平面影響因子之參數，在基本參數皆完成後，細部考慮建構之材質、安全係數以及經濟成本，最後，評估整個工法於目標地區的適用性。然而，相同的工法所需之成本造價理應因地制宜，工程的實施經濟成本的多寡佔了非常重要的影響，因此應在同時兼顧工程結構物的效率以及成本下來決定需要且適當的工法。

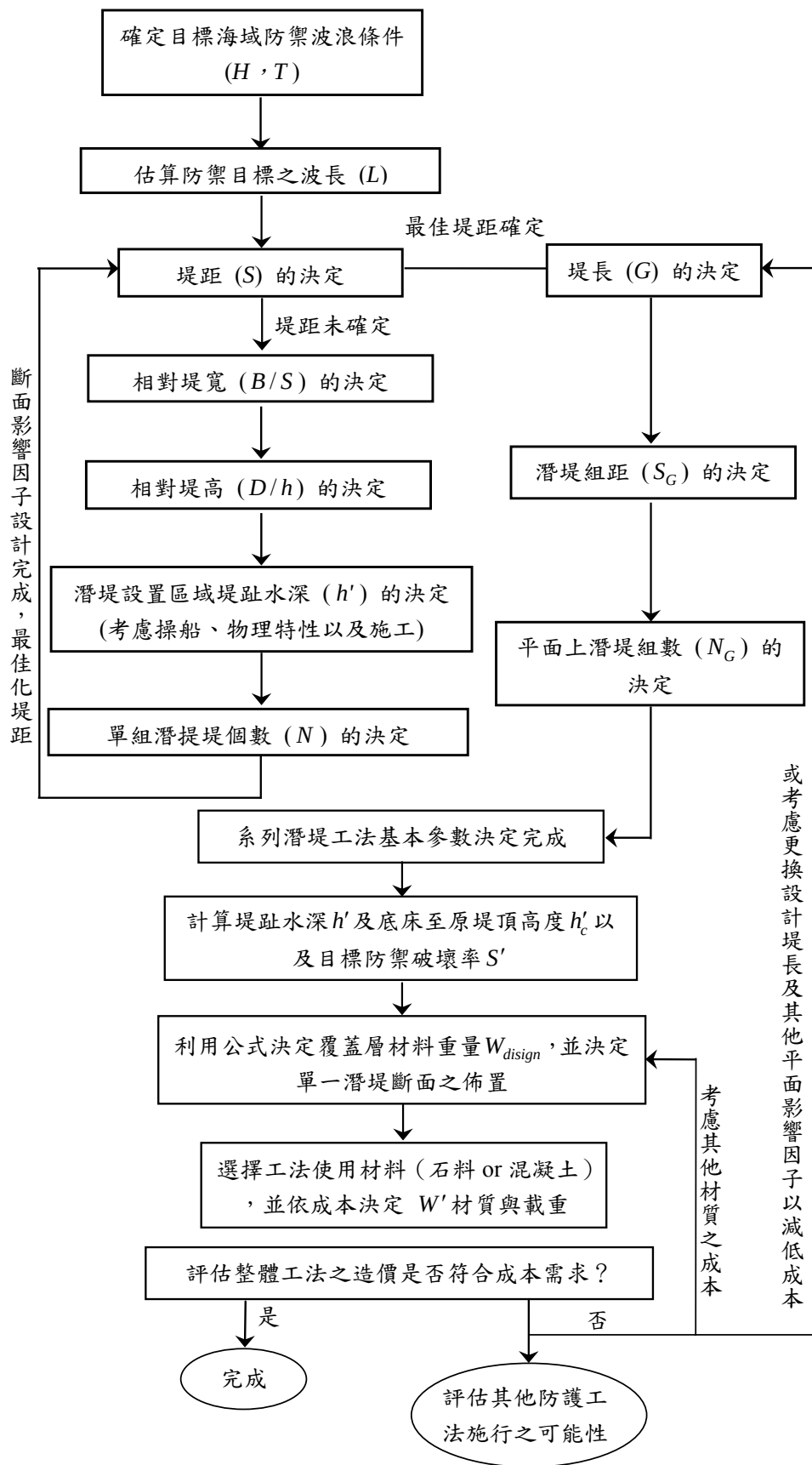


圖 5-4 含成本效益之系列潛堤工法初步設計流程圖

第六章 結論與建議

往昔學者對於布拉格反射研究較著重於以各種理論及模式在正弦沙漣底床及人工沙洲進行布拉格反射探討，如要將布拉格反射效應實際應用至海岸現場，除了考量適合實際海域水深地形以及海岸現場條件，更應將探討的範圍擴展在二維平面上。本研究以臺灣實際之海岸水深地形，模擬布置系列潛堤，探討不同潛堤佈置條件在不同入射波浪條件的海岸保護效果。本研究延續過去三年度的成果，以 Hsu 等人 (2003) 所發展的演進型式緩坡方程式為基礎，利用數值模式模擬波浪於二維平面上通過各種系列潛堤佈置所產生的布拉格反射現象，探討各種影響因子之特性，並將系列潛堤工法應用於實際海域作為主要目標。有鑑於目前多數相關的研究皆以一維斷面之布拉格反射因子進行探討，然而實際空間是三維的，若能在二維平面上佈置各式系列潛堤，並進一步探討其各項影響因子，進而利用此研究結果規劃現場佈置並輔以數值計算，最終可將整體規劃應用於實際海域。因此，本年度研究以過去的成果作為基礎，更詳細地分析平面上布拉格共振的影響因子，並檢視第三年度所提出的系列潛堤工法初步設計流程圖，除了改善整個流程使之更符合工程實際應用外，並以台灣新竹港南海域作為設計範例，運用數值模式逐步檢視流程各步驟的合理性。此外，考量臺灣的現況，選擇適當的潛堤安定估算公式以及材質來進行系列潛堤工法的斷面設計。當平面佈置與斷面設計都完成後，利用數值模式計算對象海域之波場，並探討波浪能量因系列潛堤工法所導致的衰減情況，藉以說明系列潛堤工法之成效。最後，彙整四年度的研究結果，提出系列潛堤工法設計方法及步驟，並分析系列潛堤工法的優缺點、適用性以及相關限制。

6.1 結論

1. 本年度研究整合過去三年度的主要成果，詳述各年度之研究目的與成效，用以說明系列潛堤工法於實際海域的可行性與適用性，

使得整個連續性研究有各完整的連慣性。

2. 往昔學者多著重於一維斷面之布拉格反射因子的討論，本研究利用 EEMSE 數值模式模擬二維平面系列潛堤布拉格共振，並探討各項影響因素對共振特性之影響。進而提出相對堤長 G/S 至少大於 5 以及潛堤相對組距 S_G/G 至少小於 1 才能達到較好的共振的機制與其特性，並進一步將其應用於現場海域。
3. 本研究先以現場斷面及有限堤長之系列潛堤佈置檢視計畫第三年度所提出的系列潛堤流程圖，藉以瞭解現場布拉格共振發生機制，並據此重新歸納提出更適合現場應用的系列潛堤工法設計流程圖。
4. 本研究以新竹港南海域作為示範區，利用系列潛堤工法設計流程圖提出適合該海域之系列潛堤工法佈置，並採用兩種不同的方案計算該地區冬、夏季以及颱風之波場，發現雖採用颱風之波浪條件設計系列潛堤，但因地形及次諧共振現象的關係，使得系列潛堤工法對於季風波浪作用下亦有部分的防禦效果。由此得知布拉格共振機制，於現場實用的可能性，只要能掌握各種影響因子，依序規劃出佈置流程，並輔以數值計算，相信足以說明系列潛堤工法於現場應用的可行性。
5. 本研究參考目前各種潛堤的設計方式，在考量學理以及現實的情況下，提出系列潛堤工法安全性及材料選擇之造價，並估算台灣北部地區施作的可能價格，以期作為未來施工之經濟成本參考。最後在考慮實際施工以及相關影響因子的情況下，提出含設計經濟效益的系列潛堤工法設計流程圖，作為未來實際設計的參考依據。
6. 系列潛堤工法最重要的部分即為造成波浪產生共振現象，進而使得能量通過結構物時可以大幅消減，然而如何使之產生類共振現象，所有的影響因子皆必須考量，才可達到最佳效果。本系列計

畫參考各方學者之研究成果，並利用數值模式、理論分析、水工模型探討各種條件下布拉格共振影響因子的特性，並提出實際的設計流程來模擬現場海域進而探討系列潛堤工法於現場海域施行之可行性。

6.2 建議

1. 整個四年度計畫對於系列潛堤工法進行了許多的模擬及研究，相信足以說明該工法於現場施行的可能性。而在系列潛堤工法的工程材料以及斷面設計上本研究僅作初步的分析探討，並沒有詳加考慮波力作用、內波作用以及其他各式建築的材料（例如含有透水性或者兼具環保、生態效益的構造物），建議可以另闢計畫來詳細探討整個系列潛堤工法的斷面設計與適用材質。
2. 本研究對於系列潛堤工法於實際海域的模擬皆採用等間距的方式，然而在計畫第一年以及第二年度的研究中發現利用複合式間距的方式可以有效增加整個布拉格共振機制的帶寬，因此建議於未來的研究中導入複合式系列潛堤的概念於平面影響因子中。
3. 整個系列計畫中提出系列潛堤工法有效的設計流程並模擬實際海域實況，利用各種方式說明於系列潛堤工法的可行性與可靠性，但若要實際應用於現場海域時建議另闢計畫輔以現場調查與大型的平面水工模型試驗。
4. 本研究成果證實系列潛堤海岸保護工法應用至臺灣海岸，具有海岸保護之可行性效益，並對系列潛堤工法在平面布置，其入射波浪條件與潛堤布置條件，所形成的水理機制，作進一步的解析。依據本研究所提出之設計步驟與施工經費計算方法，以及系列潛堤與波浪間之水理特性研究成果，可作為本所、施政設計單位以及各機關擬進行軟式工法—系列潛堤工法重要的參考。

依據本研究之成果，證實具生態性之系列潛堤海岸保護工法應用至臺灣海岸，具有海岸保護之可行性效益，並對系列潛堤工法在平面

布置，其入射波浪與潛堤布置條件，所形成的水理機制以及特殊之布拉格反射現象，作進一步的解析以及更深入探討與瞭解。上述研究成果部分已於國內外研討會發表，未來將再整理其他成果，擬發表於國內外研討會以及期刊。至於後續應用方面，依據本研究所提出之系列潛堤設計步驟與施工經費計算方法，以及系列潛堤與波浪間之水理特性研究成果，可作為本所、施政設計單位以及各執掌海岸港灣機關擬施行具生態性之軟式工法－系列潛堤之重要參考。

參 考 文 獻

1. Hsu, T.W., Tsai, L.H., Huang, Y.T., "Bragg Scattering of Water Waves by Multiply Composite Artificial Bars," *Coastal Engineering Journal*, Vol. 45(2), pp. 235-253 (2003).
2. Mei, C.C., "Resonance Reflection of Surface Waves by a Periodic Sandbars," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 152, pp. 315-335 (1985).
3. 陳陽益、湯麟武，「波床底床上規則前進重力波之解析」，第十二屆海洋工程研討會論文集，台灣台北，第 270-305 頁 (1990)。
4. 陳陽益，「波形底床上規則重力波之解析(2)」，港灣技術第六期，第 55-83 頁 (1991a)。
5. 陳陽益，「自由表面規則前進重力波傳遞於波形底床上共振現象」，第十五屆全國力學會議論文集，台灣台南，第 289-296 頁 (1991b)。
6. 陳陽益，「規則前進重力波傳遞於波形底床上」，港灣技術第七期，第 17-47 頁 (1992)。
7. Davies, A.G. and Heathershaw, A.D., "Surface Wave Propagation over Sinusoidally Varying Topography," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 144, pp. 419-443 (1984).
8. Webster, W.C. and Wehausen, J.V., "Bragg Scattering of Water Waves by Green-Naghdi Theory," *Zangew Math Phys 46 Special Issue*, pp.S566-S583 (1995).
9. Davies, A.G, Guazzelli, E. and Belzons, M., "The Propagation over Sinusoidally Varying Topography," *Physical Fluids*, Vol. 144, A1 (8), pp. 1331-1340 (1989).
10. O'Hare, T.J. and Davies, A.G., "A Comparison of Two Models for

- Surface-wave Propagation over Rapidly Topography,” *Applied Ocean Research*, Vol. 15, pp. 1-11 (1993).
11. Belzons, M., Rey, V. and Guazzelli, E., “Subharmonic Bragg Resonance for Surface Water Waves,” *Europhysics Letters*, Vol. 16, No.2, pp. 189-194 (1991).
 12. Guazzelli, E., Rey, V. and Belzons, M., “Higher-Order Bragg Reflection of Gravity Surface Waves by Periodic Beds,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 245, pp. 301-317 (1992).
 13. Mei, C. C., Hara, T. and Naciri, M., “Note on Bragg Scattering of Water Waves by Parallel Bars on the Seabed,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 186, pp. 147-162 (1988).
 14. 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).
 15. Miles, J.W., “Oblique surface-wave diffraction by a cylindrical obstacle,” *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Vol.6, pp. 121-133 (1981)
 16. Bailard, J.A., Deveries, J.W., Kirby J.T. and Guza, R.T., “Bragg Reflection Breakwater : A New Shore Protection Method,” *Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, pp. 1702-1715 (1990).
 17. Bailard, J.A., Deveries J.W. and Kirby, J.T., “Considerations in Using Bragg Reflection for Storm Erosion Protection,” *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 118, pp. 62-74 (1992)。
 18. 張憲國、許泰文、李逸信，「波浪通過人工沙洲之試驗研究」，第十九屆海洋工程研討會論文集，台灣台中，第 242-249 頁

(1997)。

19. 岳景雲、曹登皓、陳丙奇，「波浪斜向入射任意形狀潛堤反射率之研究」，第十九屆海洋工程研討會論文集，台灣基隆，第 204-211 頁 (1997a)。
20. 岳景雲、曹登皓、陳丙奇，「波浪通過系列潛堤反射率之研究」，第八屆全國海岸工程學術討論會暨 1997 兩岸港口及海岸開發研討會論文集（下），中國北京，第 683-690 頁 (1997b)。
21. 岳景雲、曹登皓、陳丙奇，「波浪斜向入射正方形複列潛堤反射係數之研究」，第二十屆海洋工程研討會論文集，台灣基隆，第 265-272 頁 (1998)。
22. 岳景雲、曹登皓、江天授、李厚慶，「波浪斜向入射斜坡底床上不透水潛堤之研究」，第二十一屆海洋工程研討會論文集，台灣新竹，第 191-197 頁 (1999)。
23. 岳景雲、曹登皓、翁文凱，「波浪通過不透水雙列潛堤之研究」，2000 兩岸港口及海岸開發研討會論文集，台灣新竹，第 112-118 頁 (2000)。
24. Zhang, L., Kim, M.H., Zhang, J. and Edge, B.L., “Hybrid Model for Bragg Scattering of Water Waves by Steep Multiply-sinusoidal Bars,” *Journal of Coastal Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 486-495 (1999).
25. Twu, S.W., Liu, C.C., “Interaction of non-breaking regular waves with a periodic array of artificial porous bars,” *Coastal Engineering*, Vol. 51, pp.223-236 (2004).
26. Wang, S.K., Hsu, T.W., Tsai, L.H., Chen, S.H., “An application of Miles’ theory to Bragg scattering of water waves by doubly composite artificial bars,” *Ocean Engineering*, Vol. 33, pp. 331-349 (2006).

27. Li, Y., Mei, C.C., "Bragg scattering by a line array of small cylinders in a waveguide. Part 1. Linear aspects," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 583, pp. 161-187 (2007).
28. Berkhoff, J.C.W., "Computation of Combined Refraction-Diffraction," *Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Vancouver, Vol. 1, pp. 705-720 (1972).
29. Kirby, J.T., "A General Wave Equation for Wave over Rippled Beds," *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 162, pp. 171-186 (1986).
30. Chamberlain, P.G. and Poter, D., "The Modified Mild-slope Equation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 291, pp. 393-407 (1995).
31. Porter, D., and Staziker, D.J., "Extensions of the Mild-Slope Equation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 300, pp. 367-382 (1995).
32. 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).
33. Hsu, T.W. and Wen, C.C., "A Model Equation Extended to Account for Rapidly Varying Topography," *Ocean Engineering*, Vol. 28, pp.1479-1498 (2001a).
34. Hsu, T.W. and Wen, C.C., "On Radiation Boundary Condition and Wave Transformation across the Surf Zone," *China Ocean Engineering*, Vol. 15, pp.405-416 (2001b).
35. 郭金棟、陳文俊、陳國書，「雙列潛堤對海灘防制效益之研究」，第二十一屆海洋工程研討會論文集，台灣新竹，pp. 307-131 (1999)。

36. Wang, S.K., Hsu, T.W., Tsai, L.H. and Chen, S.H., "An application of Miles' theory to Bragg scattering of water waves by doubly composite artificial bars," *Ocean Engineering*, Vol. 33, No. 3~4, pp. 331-349 (2006).
37. Hsu, T.W., Hsiao, S.C., Ou, S.H., Wang, S.K., Yang, B.-D. and S.-E. Chau "An application of Boussinesq equations to Bragg reflection of irregular waves," *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 870-883(2007).
38. Wen, C.C., and Tsai, L.H. "Numerical Simulation of Bragg Reflection Based on Linear Waves Propagating over a Series of Rectangle Sea Bed," *China Ocean Engineering* Vol.22, pp. 71-86 (2008).
39. Hsu, T.W. and Wen, C.C., "A study of using parabolic equation extended to account for rapidly varying topography," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 23, pp.515-527 (2000).
40. 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).
41. Mei, C.C., "The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves," *World Scientific*, 2nd ed., pp. 135 (1983).
42. Radder, A.C., "On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 95, No. 1, pp. 159-176 (1979).
43. Behrendt, L., "A Finite Element Model for Water Wave Diffraction Including Boundary Absorption and Bottom Friction," *Series Paper 37, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering*, University of Denmark (1985)
44. Panchang, V.G., Chen, W., Xu, B., Schlenker, K., Demirbilek, Z.,

Okihiro, M., "Exterior Bathymetric Effects in Elliptic Harbor Wave Models," *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 126, pp. 71-78 (2000).

45. 王永和，「利用有限元素法模擬波浪變形」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文(2001)。
46. 郭金棟，「海岸保護－海岸環境創造序論」，科技圖書（2004）。
47. 交通部運輸研究所，「港灣構造物設計基準修訂」，交通部（2005）

附錄一 期中報告意見回覆處理情形

時間：中華民國九十七年七月十四日(星期一)下午兩點二十分

地點：交通部運輸研究所港灣技術中心

主持人：何良勝 科長

交通部運輸研究所合作研究計畫

☒期中☐期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：97 年系列潛堤應用於海岸保護之研究(4/4)

執行單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
一、林朝福委員： 1.p2-12 圖 2-5(e),(f)波高出現 0 或近乎 0，請說明。	1. 本研究模式中，包含對波浪折射、繞射、反射以及能量消散等變形問題，在圖 2-5(e) 斷面 5 的部分，因波浪有角度的入射計算領域，當波浪傳遞遭遇離岸堤時產生反射波，在穩態的計算結果上，可能出現駐波現象，導致 $y=480\text{m}$ 左右的地方出現了極小值。而在圖 2-5(f) 的部分主要探討結構物後方的斷面，波浪通過離岸堤時會產生繞射效應以及波波交會的現象，在穩態的情況下，也會可能有駐波的現象發生，因而導致模式估算時在 $y=600\text{m}$ 附近有接近 0 的值出現。又比較本模式與王(2001)模式的控制方程式雖然同為緩坡方程	說明完整。

2.p.3-15，只計算水深 8m,9m，其他 7m,10m 是否有計算，8m 之結論如何得？ 3.系列潛堤數皆以偶數堤數，關於奇數堤是否可以採用，最後採用 N=4 請在詳細說明。 4.防禦波長計算，強調外海波長 90m，此波長如何計算？ 5.波浪斜向入射之設計條件，請予考慮。	式，但模式可能隨使用的數值方法、離散方式、碎波指標與能量消散公式的不同，而導致估算的值有所偏差，但整體趨勢具一致性。 2. 感謝委員建議，將在期末報告中將建議之 7m,10m 列入設計評估的範圍。 3. 感謝委員建議，將在期末報告中將建議之奇數堤方案加入評估的範圍，使得設計更加完整。至於在最後的設計上選用 N=4 的條件，最主要的原因是由能量透過率與週期的關係圖中顯示，當 $N \geq 4$ 時相較於 $N=2$ 能量有明顯衰減的趨勢，但當堤數增加至 6 或 8 時能量仍有衰減，但比例並不如堤數從 2 到 4 時多，因此在考慮到效益以及成本之後，本研究選擇了 $N=4$ 作為最後的堤數設計。 4. 感謝委員糾正，這部分的波長本研究利用分散關係式計算，在佈置水深 $h=8m$ 的情況下，考慮目標防禦波浪週期 $T=10.6s$ 的情況所估算出來的，因此文中強調為外海波長說法上有誤，應改為設計波長比較正確。 5. 感謝委員建議，將在期末報告中將平面影響與斜向入	已增列分析。 說明完整。 已修正。 已增列分析。
---	---	--

6. 實際海面是不規則波浪，如何決定設計波浪的條件，系列潛堤產生最大效果？	射條件進一步列入考慮。 6. 於計畫第二年度有針對不規則波浪進行模擬以及試驗，發現在不規則波浪的作用下，系列潛堤工法仍可產生類布拉格共振現象，且帶寬更寬，但主頻的反射率會有下降的趨勢，因此系列潛堤工法應可實際應用於不規則波浪。另外，於計畫第二年度中亦針對複合式系列潛堤進行研究發現在兩種不同的堤距下，相互配合可以使得系列潛堤工法的共振帶寬更大，因此在經濟成本的許可下，可以利用複合式的設計方式，使得系列潛堤工法產生最大的效果。又由期中報告的圖 3-11 中顯示，在這樣的設計下，主共振區域帶寬約在 9.6 秒到 13 秒之間，在高階共振上則約發生在 5.6 秒到 6.4 秒以及 4.0 秒到 5.0 秒之間，因此整個系列潛堤工法雖然是針對防禦目標 10.6 秒的颱風波浪進行設計，但由於布拉格共振條件應為一區域範圍且有主共振以及高階共振，因此亦可兼具防禦其他相關的目標，故在單一堤距的設計下，系列潛堤工法亦可達到不錯的成效。	說明完整。
--	---	--------------

二、李忠潘委員： 1.請說明 (2-25) 式為什麼 $D\phi/Dt=0$? 2.請說明 (2-31) 式，為什麼 ϕ_0 為已知。	1. 文中(2-25)式中，$D\phi/Dt=0$ 是根據 Behrent (1985)所提出來的，主要是在兩側以及結構物的邊界上使用，式中 r 指的是波浪行進的路徑，經理論推導後在結構物的邊界上可以得到當 $r \rightarrow \infty$ 時，式(2-25)會成立，稱之為輻射邊界條件 (radiation boundary condition)。此部分於期末報告文章中會再詳述推導過程，謝謝委員指教。 2. 於文中 p2-7 第 18 行中所述『進而在 ϕ_0 已知的前提下，處理此一因地形變化的邊界條件』，這部分所謂的 ϕ_0 已知的意思是指在模式計算剛開始時為未知，而為了精準的估算，本研究利用 Panchang(2000)所提出的概念，先將邊界退化為一維問題，求解邊界上所有格點的速度勢，進而知道邊界上的 ϕ_0。最後將 ϕ_0 作為模式計算時邊界的已知值，因此才說明『在 ϕ_0 已知的前提下，處理此一因地形變化的邊界條件』。此部分文字內容描述不夠詳細，於期末報告時會再補充說明，感謝委員指教。	說明完整。 說明完整。
---	---	---------------------------

三、沈建全委員 1. 本研究預計使用合成堤，且預定使用水泥方塊，此種方塊缺乏孔隙，對生態叫不佳，宜以改進。 2. 以水泥方塊堆置成系列潛堤，宜考慮其因淘空而沈陷，致使其使用壽命不長，而影響經濟效益。 3. 海洋波浪為不規則波，而布拉格共振效應只能針對單一波週期，新竹港南海域之冬、夏、颱風週期分別為 4.95s、5.28s、10.6s、12.7s，如何設置出能使四種週期皆能共振之系列潛堤？	1. 感謝委員建議，由於本研究屬於研究型計畫，對於工程上的部分僅予初步的規劃，於期末報告的部分會進一步考慮不同材質可能的成本造價，但整體詳細的規劃考量，包含生態環境的考量並不在整個計畫範圍內，建議未來可另闢專案來實行。 2. 感謝委員建議，本研究屬研究型計畫之範疇，對於實際海域結構物興建後的維護與波力的計算，建議未來可以另闢專案計畫進行更詳細的研究。 3. 於計畫第二年度有針對不規則波浪進行模擬以及試驗，發現在不規則波浪的作用下，系列潛堤工法仍可產生類布拉格共振現象，且帶寬更寬，但主頻的反射率會有下降的趨勢，因此系列潛堤工法應可實際應用於不規則波浪。另外，由期中報告的圖 3-11 中顯示，在這樣的設計下，主共振唯一區域帶寬約在 9.6 秒到 13 秒之間，在高階共振上約發生在 5.6 秒到 6.4 秒以及 4.0 秒到 5.0 秒之間，因此整個系列潛堤工法雖然是針對防禦目標 10.6 秒的颱風波浪進	說明完整。 說明完整。 說明完整。
---	--	--

	行設計，但由於布拉格共振現象應為一帶寬條件，因此亦可兼具防禦其他相關的目標。再者目前並沒有任何一個單一工法可以完全抵禦海洋的波浪，而系列潛堤工法的主要目的在於防禦具侵略性的波浪，並做為第一線的防禦工法，因此這樣的目的以及效應再搭配其他特性的防護工法，相信是可以達到海岸保護、景觀以及親水等目標的。	
4. 能否針對新竹港能海域以各種不同防波方法（潛堤、潛礁、防波堤）等各種工法之粗估施工成本，以估算本向工法相對於其他工法之經濟效益。	4. 感謝委員建議，本研究屬研究型計畫範疇，對於實際海域的設計僅初步規劃出設計斷面與進行安全性的估算，主要目的在於提出規劃的流程，對於不同的結構物與工法的比較建議另闢計畫詳細討論。	說明完整。
5. 本研究經四年來之辛苦研究，對布拉格效應之深入探討，使我國在至方面趕上先進國家團隊值得肯定。	5. 感謝委員肯定。	
6. 下一階段之研究或許可以朝向以當地實測波譜來設計一組完整之系列，如此應可將此地區之波浪大致抵擋於海岸外。	6. 感謝委員建議，除委員建議的部分外，針對現場海域工法的比較與設計，乃至工程材料的選擇，應可另闢專案計畫，作為下一階段研究的目標。	說明完整。

四、何良勝委員： 1.建議期末報告增加前三年較詳細之研究成果。 2.有關第三章，不同提數所計算之波高變化圖，建議刪除近岸處之波高計算值。 3.應說明本研究所建議之配置方案，適用於何種海岸坡度情況。	1. 感謝委員建議，遵照辦理。 2. 感謝委員建議，於期末報告中，波高變化分佈圖將著重於結構物前後的變化。 3. 感謝委員建議，於期末報告中將進一步說明，整個系列潛堤工法於實際海岸的適用性、優缺點以及相關限制。	已增列。 說明完整。 說明完整。
四、蔡立宏委員： 1.文中 1.2 小節文獻回顧中，請增列近年的文獻研究成果。 2.p3-3 中的式 3-3 Es 的定義為能量透過率，是否改成能量透過率較恰當？ 3.p3-20 中 Wen&Tsai(2008)應為 $0.25 < B/S < 0.333$，建議增加說明為水平底床研究結果。 4.p3-22 上下圖的橫座標建議應統一。	1. 感謝委員建議，將於期末報告中增添近年的研究成果。 2. 感謝委員建議，於期末報告終將重新定義 Es 為能量透過率。 3. 感謝委員建議，此部分為參考文獻的疏失，於期末報告中會修正為 $0.25 < B/S < 0.333$，並補述相關研究條件。 4. 於期中報告 p3-22 中，上圖 3-13(c)所要表達的是在不同的堤距下，能量透過率與週期的關係，來說明堤距設計為 35 確實比 45 更佳理想。下圖 3-14 為堤距 35，不同潛堤個數下能量透過率與 $2S/L$ 的關係圖，此圖主要描述在堤距 35 的情況下，亦會產生主共振以及高諧共	已增列。 已修正。 已修正。 已修正。

5. 潛堤建造經費似乎估得過高，建議考慮其他材質並在安全考量下，以降低建造經費。 6. 斷面佈置設計步驟中，因潛堤間距對於布拉格共振的發生週期影響較大，建議先設計測試不同的潛堤間距之效果，再行測試設計其他影響因子。	振，因此如此的設計符合原先利用系列潛堤產生類布拉格共振現象的需求。因此兩者所要闡述的目的不同，座標應無統一之需要。 5. 感謝委員建議，由於過去在台灣並沒有系列潛堤工法設計與建造的案例，因此有許多的時間利用在資料蒐集上，期中報告的評估確實有高估的現在，將於期末報告中，更詳細的探討工程設計與材質選擇的問題。 6. 感謝委員建議，將於期中報告中重新檢視設計流程問題，使得整個設計過程更有效率。	說明完整。 說明完整。
---	--	---------------------------

附錄二 期末報告意見回覆處理情形

時間：中華民國九十七年十一月十八日(星期二)下午三點整

地點：交通部運輸研究所港灣技術中心

主持人：何良勝 科長

交通部運輸研究所合作研究計畫

☐期中 ☒期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：97 年系列潛堤應用於海岸保護之研究(4/4)

執行單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
一、李忠潘委員： 1.P.4-3, (4-3)式，請以圖示說明式中各項意義。 2.能量透過率 E_s，在第四章中的計算中有多處大於 1 (Fig.4-6, Fig.4-24) 請說明原因。	1. 感謝委員建議，將於期末報告完稿中詳述。 2. 由於在計畫中我們利用現場海域地形來進行平面影響因子的分析，波浪傳遞會因地形的改變導致淺化、繞射的現象，使得結構物後方亦有聚焦的情況，如此能量透過率 E_s 產生大於 1 的情況應屬合理現象。而計畫中所採用的能量透過率計算方式是將結構物後方區塊波高平方的總和除以入射波高平方的總和，並沒有考慮到必須導入波速以及群波速才是完整的能量估算方式。因此在這樣的機制下期末計畫報告中將進一步導入相對能量透過率的概	已增列。 說明完整。

3.以結合理論及實用，成果應可提供未來海岸防護工法之參考。	念，在同一個區塊內將有佈置系列潛堤的方案與沒有佈置的方案進行波高平方的比較，如此應可更詳細的表現整個平面影響因子的特性。 3. 感謝委員肯定。	
二、沈建全委員 1.本研究經四年仔細詳實之研究分析、水工試驗，其成果十分豐碩，深具實用性及學術性，應予高度肯定。 2.本研究針對系列潛堤工法提出初步設計流程圖可執行性甚高，但建議再加入不同防禦波浪之消波率判別式，以瞭解在季風波浪（不同週期、不同波向）發生時，入侵到岸邊之波高是否可以接受。	1. 感謝委員肯定。 2. 於期末報告完稿中，將會更詳述整個設計流程圖的限制與使用方式，而在期末報告初稿的 4.3.3 節中，我們有針對不同的波浪條件去探討結構物的適用性，不同的海域有其不同的特性，設計流程圖建構在學理的分析上，但實際應用必須因地制宜，故在不同海域規劃時所採用的消波率判斷式應有所差異性，這部分可於實際使用時考慮當地現況再進一步討論。	說明完整。

3.不同緩坡坡度對布拉格效應之消波率差異為何？能否名確定義出系列潛堤是用坡度範圍。	3. 於計畫中系列潛堤工法考慮的設計方式主要是以不碎波的水深為主，有關坡度的關係於 Tasi et al. (2008) 以及計畫第一年度有詳細探討，主要特性在於坡度的改變會導致共振區的偏移，也就是因坡度的不同造成共振條件改變，而於本研究所提出之設計流程圖中，在斷面影響因子設計完成後再回去檢視最佳堤距，這樣的步驟即是考慮到水深以及坡度變化的問題而產生的。系列潛堤工法最主要的目的在於防禦該海域的主要成分波，因此再使用設計流程圖時考慮到主要共振區之正確性即可有完善的設計方案。	說明完整。
4.部分未能從本案得到解決之疑問，建議可於未來另編預算執行之，希望獲得更好成果。	4. 感謝委員建議，將於期末報告建議的部分補充說明。	說明完整。

三、何良勝委員： 1.本計畫研究提之保護工法，頗值得嘗試應用工作成果值得肯定。 2.為使本計畫所提之工法更符合實際使用，建議補充有關後續維護及如何持續監測以達成計畫預設之防護目的。 3.建議簡略結論部分。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議，將於期末報告完稿中詳述。 3. 感謝委員建議，將於期末報告完稿中修改。	已說明。 已修正。
四、蔡立宏委員： 1.結論中提到系列潛堤佈置的方向，以與波浪前進方向垂直為最佳，最後的布置方案中，缺乏此一布置條件，建議再增加分析研究，以比較得到最佳布置方案。 2.p4-37 中為潛堤組數的設計，文中卻沒有提到，請再修改。 3.於 4.3.3 小節之後的現場佈置後效果分析，應先討論之前設計的颱風條件下之效果，再行討論其他季節風之防禦效果。 4.成本估算中，潛堤堤體以混凝土方塊堆置而成，是否消波塊堆置，經費是否會更少，效果是否更好？	1. 感謝委員指教，於期末報告完稿中，將補充相關的佈置與分析，使得計畫成果更加完善。 2. 感謝委員建議，將於期末報告完稿中修改。 3. 感謝委員建議，將於期末報告完稿中修改。 4. 感謝委員建議，在計畫期末報告中對於系列潛堤工法的工程材料以及斷面設計上本研究僅作初步的分析	已增加分析及說明。 已修正。 已修正。 說明完整。

	探討，並沒有詳加考慮其他各式建築的材料（例如含有透水性或者兼具環保、生態效益的構造物），建議可以另闢計畫來詳細探討整個系列潛堤工法的斷面設計與適用材質。	
--	---	--

附錄三 期中報告簡報檔

交通部運輸研究所

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (4/4)

On the applications of a series of submerged
breakwaters to coastal protection (4/4)

計畫編號: MOTC-IOT-97-H2DB003

期中簡報

計畫主持人：許泰文 教授

報告人：張人懿

成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期：2008/07/14

交通部運輸研究所

計畫工作團隊

主辦單位	交通部運輸研究所臺灣技術研究中心	
類別	姓名	主要工作
主任	邱永芳	督導計畫進行與報告審議
副主任	李豐博	督導計畫進行與報告審議
科長	何良勝	督導計畫進行與報告審議
承辦人	徐如娟	主辦及協助計畫進行
承辦人	蔡立宏	主辦及協助計畫進行
執行單位	財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會	
類別	姓名	相關經歷與專長
主持人	許泰文	成功大學水利及海洋工程學系教授
兼任助理	張人懿	成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生
兼任助理	辛志勇	成功大學海洋科技與事務研究所博士班研究生
兼任助理	柯拓宇	成功大學水利及海洋工程學系碩士班研究生
兼任助理	祝郁絜	成功大學水利及海洋工程學系碩士班研究生

成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期：2007/07/19

潛堤+養灘+景觀+生態



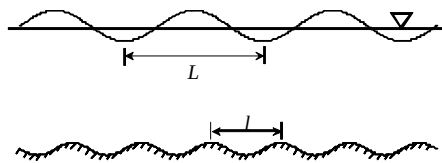
高雄縣蚵子寮海岸之侵蝕



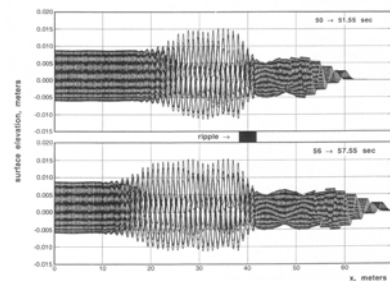
面狀分布的礁石海岸適合西部遠淺海岸

布拉格共振

- $\ell/L = 1/2 \Rightarrow$ 布拉格共振 (Bragg resonance)
- Davis and Heathershaw (1984) 實驗證實，正弦沙漣和水波交互作用也有此現象



表面波長和正弦形沙漣波長示意圖





本年度主要研究內容

- 以**第三年之計畫示範區為基礎**，進一步考慮結構可能成本、基礎操船等現實問題，輔以**數值模式**探討示範海域可能之最佳系列潛堤工法配置。
- 根據示範區海域之現場實況，在考慮各項布拉格共振影響因子下，歸納出**系列潛堤工法之設計方法、步驟及流程圖**。
- **整合前三年度之計畫成果**，歸納分析系列潛堤工法於實際海岸可能的限制以及優缺點，作為未來實際工程應用之參考。



期中報告執行內容

- 利用數值模式**重新校驗系列潛堤工法設計流程圖**，並利用台灣常用之海洋保護工法資料作為基礎，藉以**初步評估系列潛堤結構物可能之成本**，再說明工法適用於實際海域的位置以及其功效。
- **導入系列潛堤工法結構物之建構成本於工法設計流程圖中**，並以現場海域作為示範佈置區，運用數值模式實際模擬波場並**探討波浪通過結構物後之能量衰減率**，以期可以做為未來實際應用時之依據與參考。

EEMSE 數值模式

- 本文於數值模式上，採用 Hsu and Tsai (2003) 所推導含有底床曲率、底床斜率平方項及底床擾變項的EEMSE模式進行研究，其控制方程式如下所示

$$-\frac{2\omega i}{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla_h^2 \phi + k_c^2 \phi + \frac{g}{\sqrt{\Omega}} \left(2\vec{F}_1 \cdot \delta \nabla_h \frac{\phi}{\sqrt{\Omega}} \right) + \frac{\delta}{\sqrt{\Omega}} \nabla_h \left[g(1-\lambda^2) \right] \cdot \nabla_h \left(\frac{\phi}{\sqrt{\Omega}} \right) \quad (1)$$

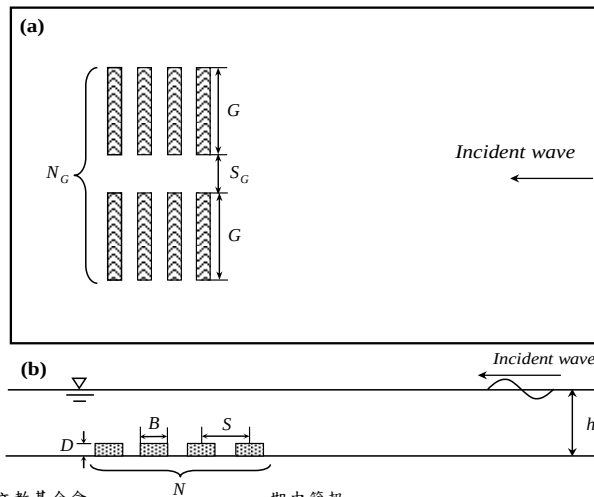
$$k_c^2 = \left[(g\vec{F}_1 \cdot \nabla_h^2 \delta + gF_2 + k^2 CC_g) / \Omega \right] - \left[(\nabla_h^2 \sqrt{\Omega}) / \sqrt{\Omega} \right]$$

$$\vec{F}_1 = \lambda(1-\lambda^2)(k\nabla_h h + h\nabla_h k)$$

$$F_2 = \alpha_1 (\nabla_h h)^2 k + \alpha_2 \nabla_h^2 h + \alpha_3 \nabla_h k \cdot \nabla_h h / k \\ + \alpha_4 \nabla_h^2 k / k^2 + \alpha_5 (\nabla_h h)^2 / k^3$$

平面上布拉格共振因子示意圖

$$F' = f_1(D/h, G/S, 2S/L, B/S, S_G/G, N, N_G, \tan \beta)$$

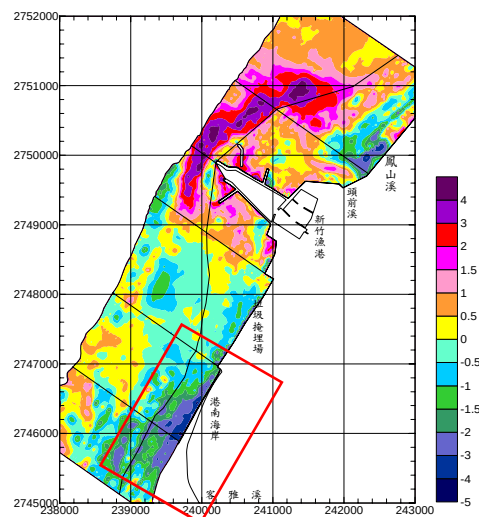


工作項目與研究方法

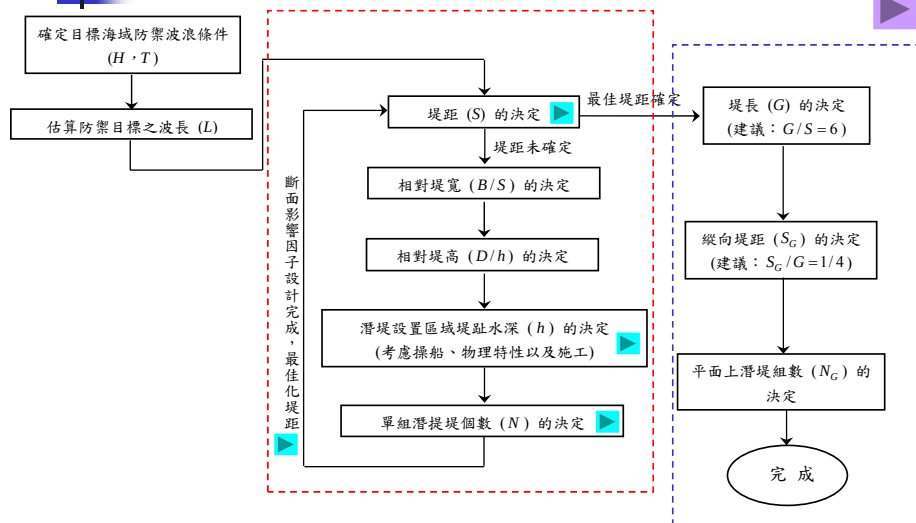
- 系列潛堤設計流程圖的校驗(二維斷面部分)
- 含工程施工之系列潛堤工法設計流程圖的決定

$$\text{能量衰減率} = \frac{\text{透射波波高平方和}}{\text{入射波波高平方和}} \Rightarrow E_s = \frac{\sum_i (H_t)_i^2}{\sum_i (H_i)_i^2}$$

現場模擬之示範區 - 新竹港南海域



系列潛堤工法佈置設計流程

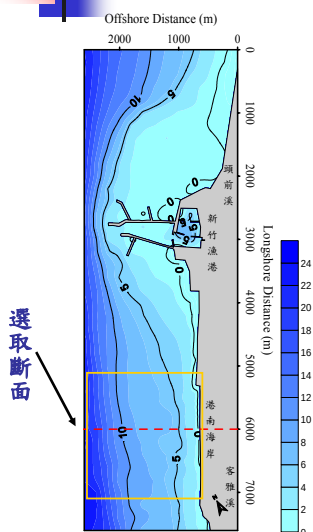


成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期: 2008/07/14

確定防禦目標波浪條件以及以及初步堤距的決定



輸入條件	H (m)	T (sec)	波向	水位 (m)
夏季季風	0.83	4.95	WSW	+0.22
冬季季風	1.27	5.28	N	+0.22
10年迴歸期颱風	6.60	10.6	NNE	+1.91
50年迴歸期颱風	9.10	12.7	NNE	+1.91

- 以10年回歸週期颱風作為規劃佈置之條件

$$T = 10.6 \text{ sec} \Rightarrow L \approx 90 \text{ m}$$

$$S = 45 \text{ m}, G/S = \infty, B = 10 \text{ m}$$

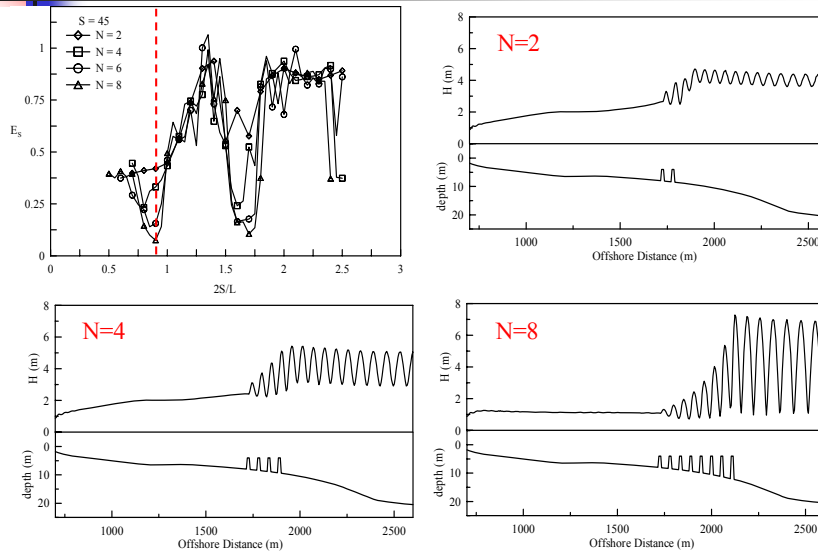
$$h = 8 \text{ m}, D/h = 1/2$$

成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期: 2008/07/14

初步堤距 $S = 45\text{m}$ 之結果

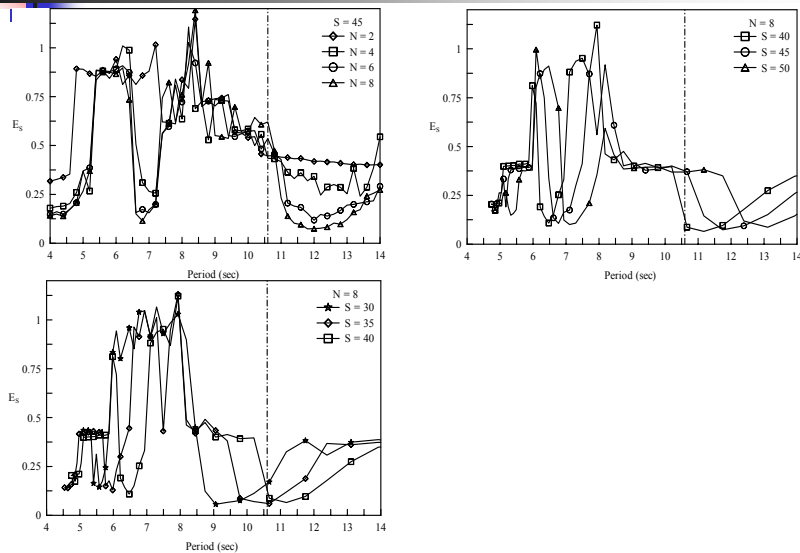


成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期：2008/07/14

初步堤距之修正



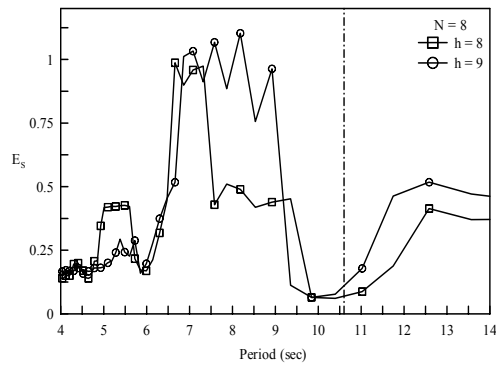
成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期：2008/07/14



潛堤設置區域堤趾水深 (h) 的決定



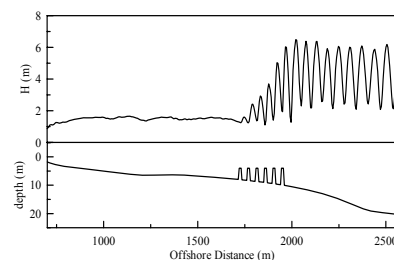
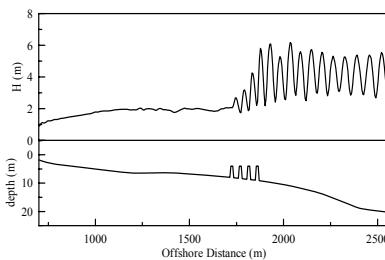
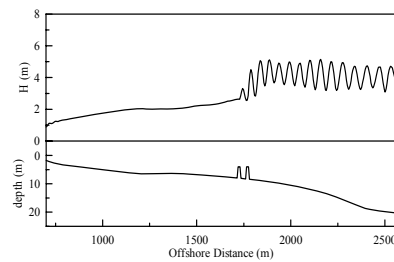
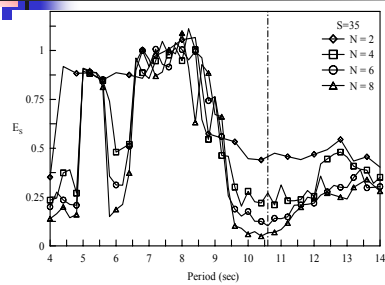
成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期：2008/07/14



單組潛堤堤個數 (N) 的決定

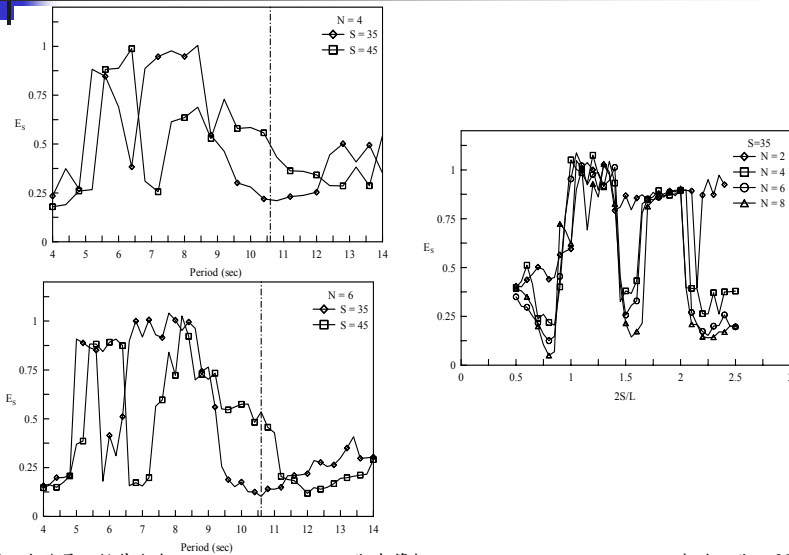


成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期：2008/07/14

堤距 (S) 的重新校驗



成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

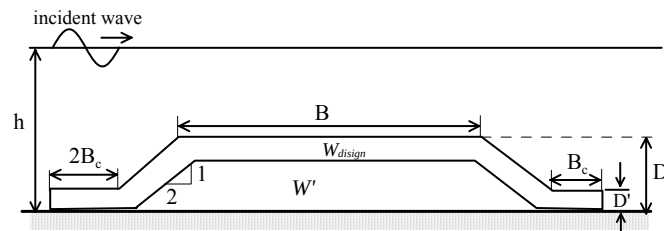
報告日期：2008/07/14

安全性估算與斷面設計

- 表面載重：採用 Givler & Sorensen, Van der Meer (1990)

h'_c	h	S	H_s/L_s	N_s^*	d_{n50}	W
5.1m	9.1m	2	0.037	10.085	0.894	1.644

$$W_{design} = 2W \approx 3.3t, B_c = 0.25B, W' = W_{design}$$



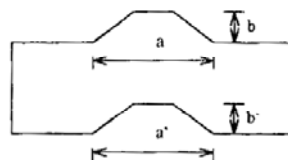
成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

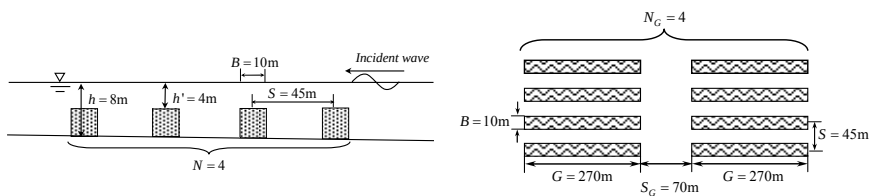
報告日期：2008/07/14

潛堤材質的選擇與成本的初步估算

■ 潛堤材質的選擇：方塊



■ 成本估算：設計堤長仿照第三年計畫於現場系列潛堤之設計



成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期：2008/07/14

潛堤材質的選擇與成本的初步估算

潛堤	混凝土規格	單價(元/m ³)	體積(m ³)	複價(元)
第一座	3000psi	1670	15120	25,250,400
不織布襯墊		120	7560	907,200
後列	3000psi	1670	13770	22,995,900
堤心	3000psi	1670	7560	12,625,200
不織布襯墊		120	6210	745,200

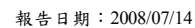
■ 單組潛堤 N=4 價格初步估算表

項目	第一座單價(元)	後列單價(元)	堤心單價(元)	數量	複價(元)
系列潛堤	25,250,400	22,995,900	12,625,200	4	132,113,700
不織布襯墊	907,200	745,200		4	3,142,800

成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期：2008/07/14



- 報告日期：2008/07/14

初步結果與討論 (2/2)

3. 系列潛堤成本之初步估算：本文考量學理以及現實的情況下，初步提出系列潛堤工法**安全性計算及材料選擇與造價**，以期做為未來施工之經濟成本參考。並提出**含成本效益之系列潛堤工法整體設計的流程圖**，作為未來實際應用的參考依據。。
4. 期末報告之工作項目：本計畫將於期末報告進一步**重新較驗設計流程圖中二維平面設計的部分**，並將整個新竹港南海域的設計和施工流程修訂更為完善。最後，**綜合歸納計畫過去三年度的成果**，說明整個計畫的貢獻以及完成度，並提出未來可以繼續研究的方向與目標。。

成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期：2008/07/14

計畫執行進度

工作項目	第一月	第二月	第三月	第四月	第五月	第六月	第七月	第八月	備註
各式海岸保護工法之經濟成本基本的資料蒐集	※								
各種平面佈置系列潛堤配置方案之波場模擬									
平面上各種系列潛堤之能量衰減率分析		※							
實際海域之波場模擬									
期中報告									
探討各式工法與系列潛堤之優缺點及經濟效益					※				
系列潛堤工法之設計流程圖規劃							※		
期末報告									
工作進度估計百分比(累積數)	20	35	45	60	70	80	90	100	

成大水利研究發展文教基金會

期中簡報

報告日期：2008/07/14



報告完畢 謝謝大家

附錄四 期末報告簡報檔



系列潛堤應用於海岸保護之研究 (4/4)

On the applications of a series of submerged breakwaters to coastal protection (4/4)

計畫編號: MOTC-IOT-97-H2DB003



期末簡報

計畫主持人：許泰文 教授

報告人：張人懿

成大水利研究發展文教基金會

期末簡報

報告日期：2008/11/18



計畫工作團隊

主辦單位	交通部運輸研究所港灣技術研究中心	
類別	姓名	主要工作
主任	邱永芳	督導計畫進行與報告審議
副主任	李豐博	督導計畫進行與報告審議
科長	何良勝	督導計畫進行與報告審議
總計畫主持人	蔡立宏	主辦及協助計畫進行
承辦人	徐如娟	主辦及協助計畫進行
執行單位	財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會	
類別	姓名	相關經歷與專長
主持人	許泰文	成功大學水利及海洋工程學系教授
兼任助理	張人懿	成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生
兼任助理	林達遠	成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生
兼任助理	李裕群	成功大學水利及海洋工程學系碩士班研究生

成大水利研究發展文教基金會

期末簡報

報告日期：2008/11/18

潛堤+養灘+景觀+生態



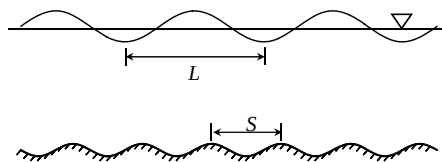
高雄縣蚵子寮海岸之侵蝕



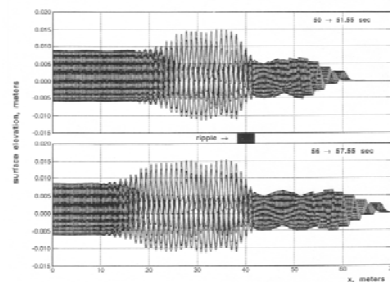
面狀分布的礁石海岸適合西部遠淺海岸

布拉格共振現象

- $2S / L = n, n = 1, 2, 3 \dots \Rightarrow$ 布拉格共振 (Bragg resonance)
- Davis and Heathershaw (1984) 實驗證實，正弦沙漣和水波交互作用也有此現象



表面波長和正弦形沙漣波長示意圖



本年度主要研究內容

- 以**第三年之計畫示範區為基礎**，進一步考慮結構可能成本、基礎操船等現實問題，輔以**數值模式**探討示範海域可能之最佳系列潛堤工法配置。
- 根據示範區海域之現場實況，在考慮各項布拉格共振影響因子下，歸納出**系列潛堤工法之設計方法、步驟及流程圖**。
- **整合前三年度之計畫成果**，歸納分析系列潛堤工法於實際海岸可能的限制以及優缺點，作為未來實際工程應用之參考。

EEMSE 數值模式

- 本文於數值模式上，採用 **Hsu and Tsai (2003)** 所推導含有**底床曲率、底床斜率平方項及底床擾變項**的EEMSE模式進行研究，其控制方程式如下所示

$$-\frac{2\omega i}{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla_h^2 \phi + k_c^2 \phi + \frac{g}{\sqrt{\Omega}} \left(2\bar{F}_1 \cdot \nabla_h \frac{\phi}{\sqrt{\Omega}} \right) + \frac{\delta}{\sqrt{\Omega}} \nabla_h \left[g(1-\lambda^2) \right] \cdot \nabla_h \left(\frac{\phi}{\sqrt{\Omega}} \right) \quad (1)$$

$$k_c^2 = \left[(g\bar{F}_1 \cdot \nabla_h^2 \delta + g\bar{F}_2 + k^2 CC_g) / \Omega \right] - \left[(\nabla_h^2 \sqrt{\Omega}) / \sqrt{\Omega} \right]$$

$$\bar{F}_1 = \lambda(1-\lambda^2)(k\nabla_h h + h\nabla_h k)$$

$$F_2 = \alpha_1 (\nabla_h h)^2 k + \alpha_2 \nabla_h^2 h + \alpha_3 \nabla_h k \cdot \nabla_h h / k \\ + \alpha_4 \nabla_h^2 k / k^2 + \alpha_5 (\nabla_h h)^2 / k^3$$

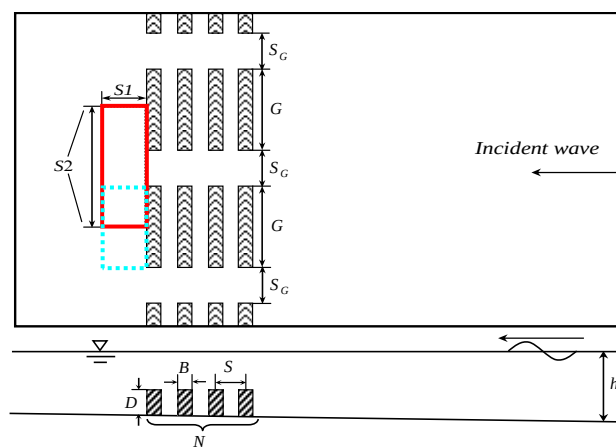
工作項目與研究方法

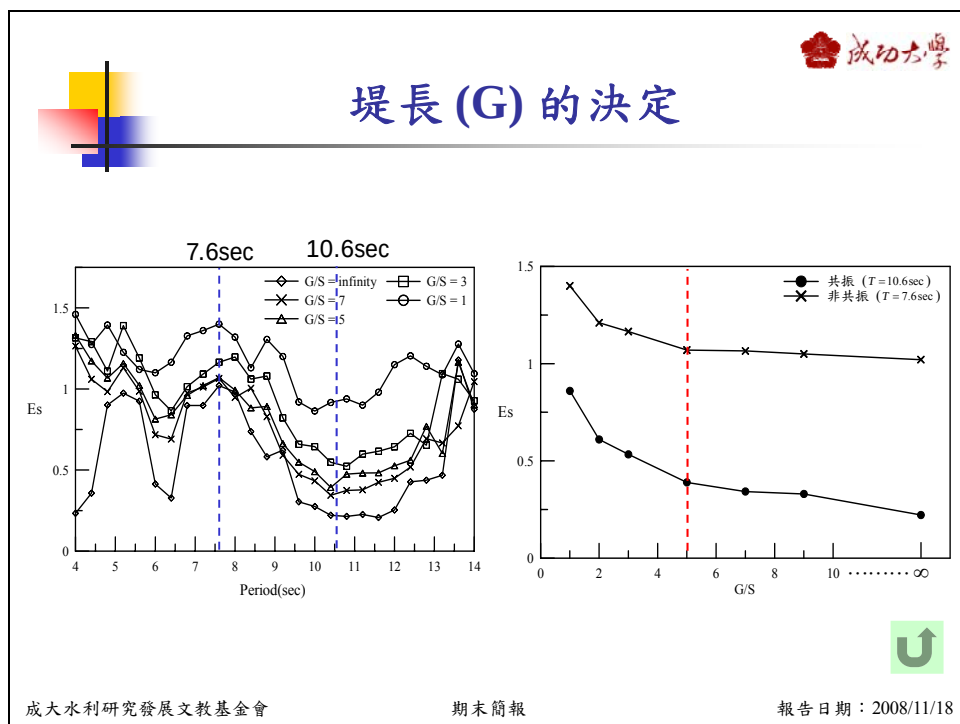
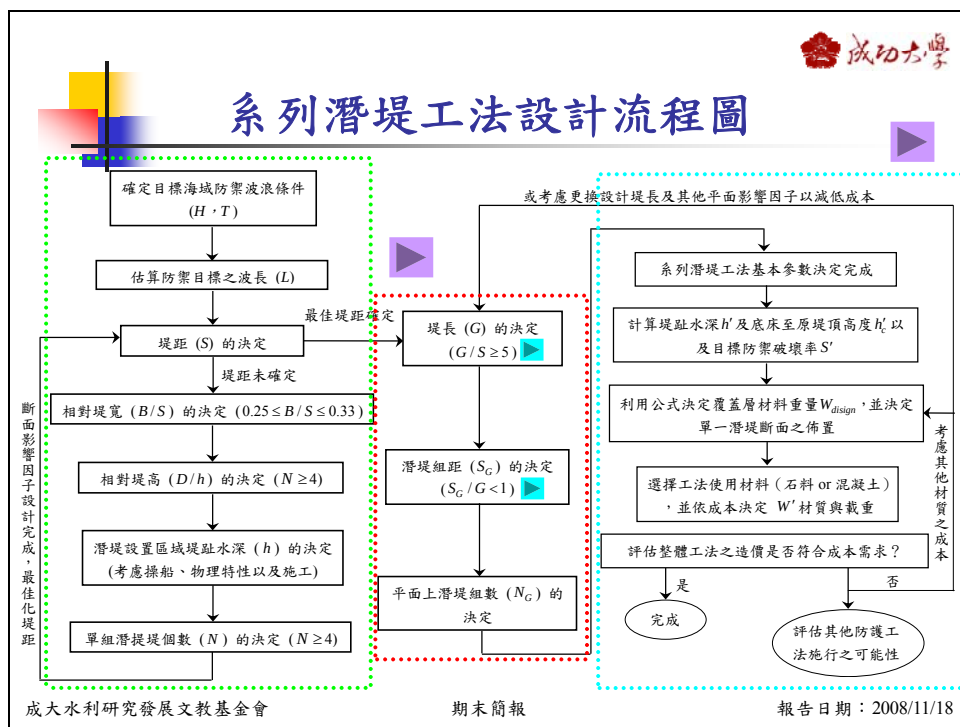
- 系列潛堤設計流程圖的校驗(平面部分)
- 含工程施工之系列潛堤工法設計流程圖的決定

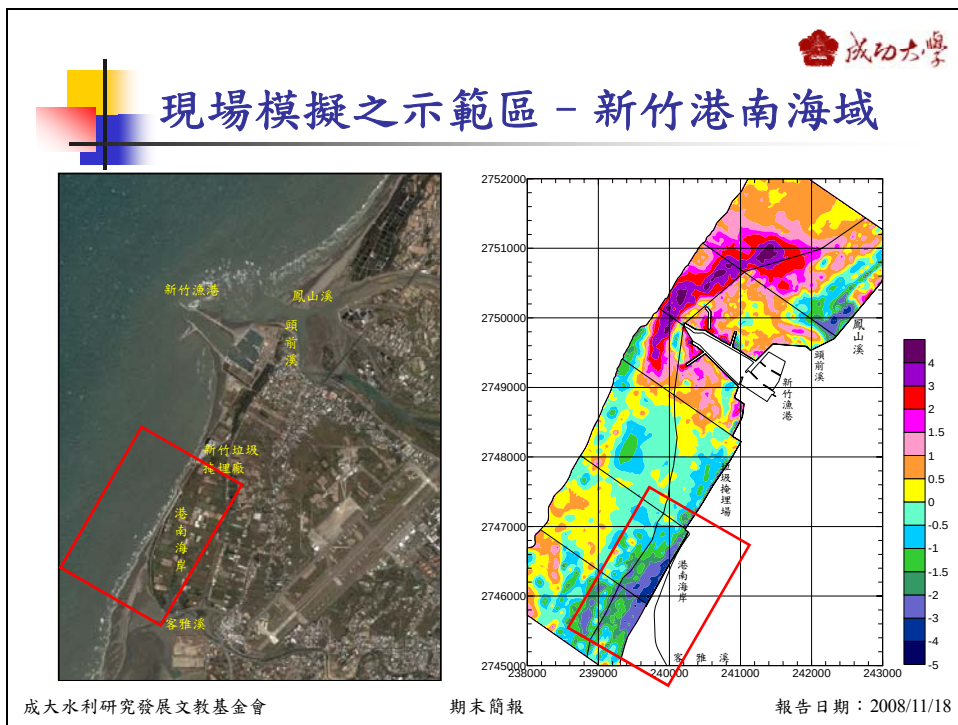
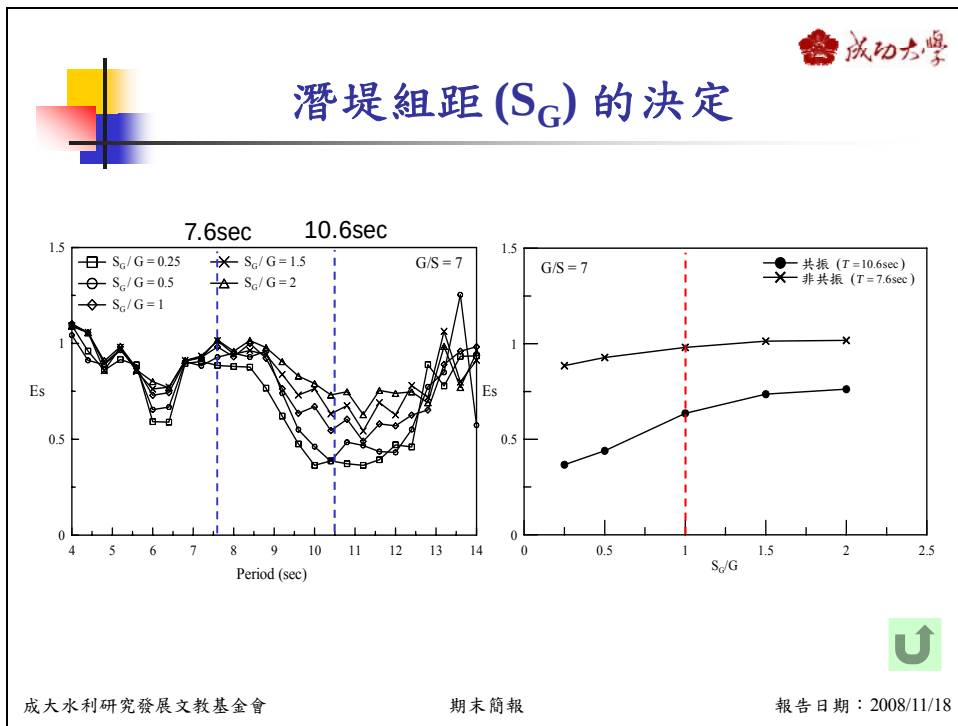
$$\text{能量衰減率} = \frac{\text{透射波波高平方和}}{\text{入射波波高平方和}} \Rightarrow E_s = \frac{\sum_i (H_t)_i^2}{\sum_i (H_i)_i^2}$$

平面上布拉格共振因子示意圖

$$F' = f_1(S_G / G, G / S, D / h, 2S / L, B / S, N, N_G, \tan \beta)$$







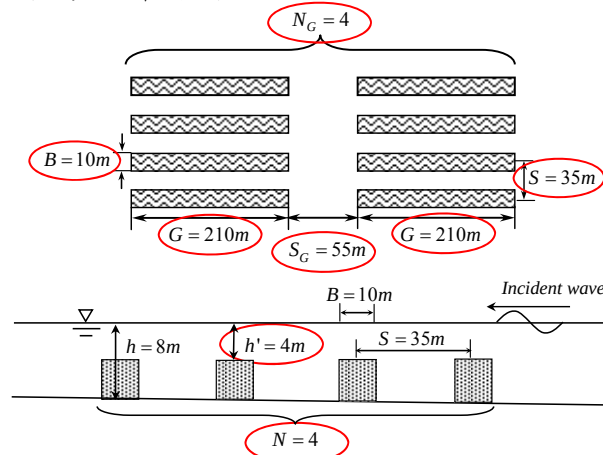


系列潛堤工法現場佈置相關參數示意圖

- 以颱風波浪作為設計條件

$$S = 35\text{m}$$

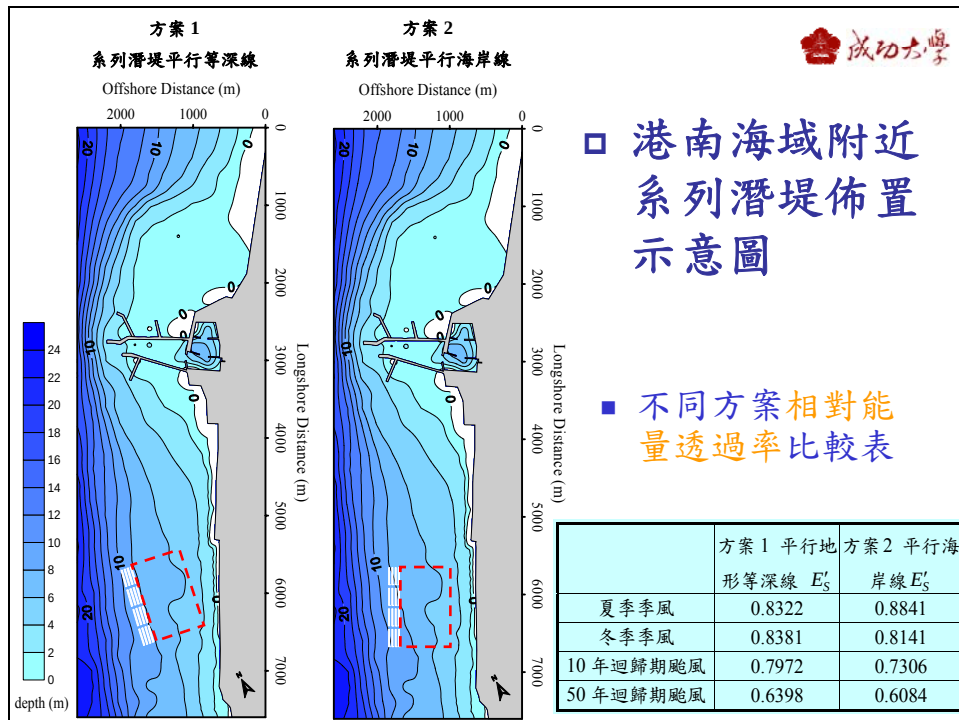
$$h = 8\text{m}$$



成大水利研究發展文教基金會

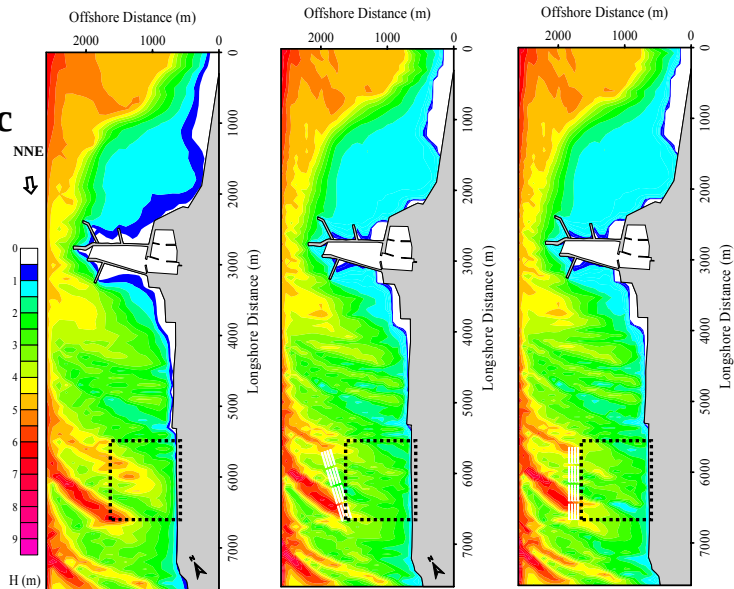
期末簡報

報告日期：2008/11/18

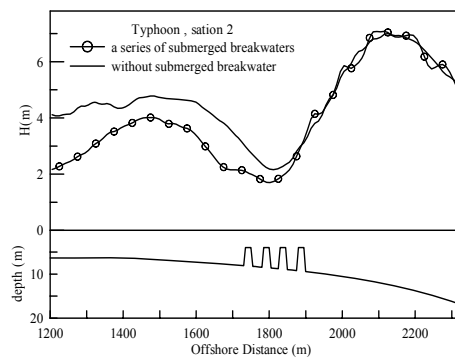
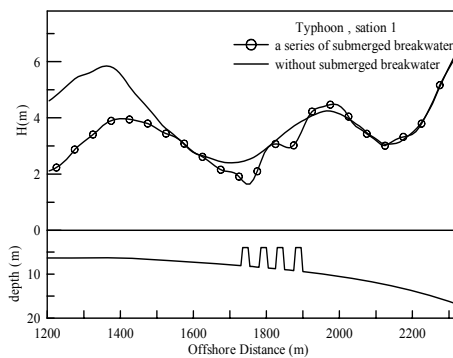
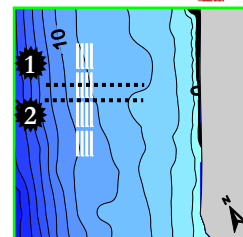


50年迴歸期颱風作用下之波場分佈

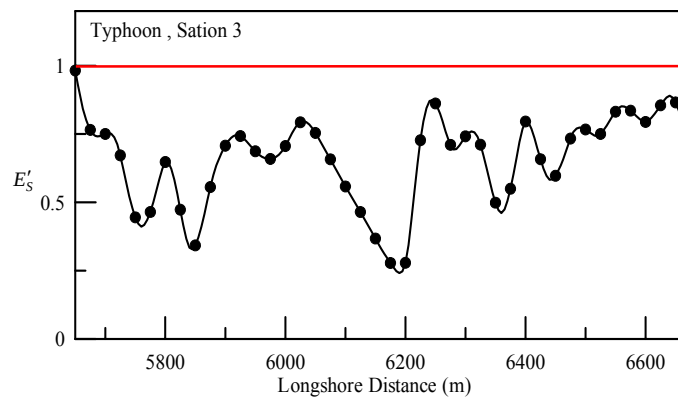
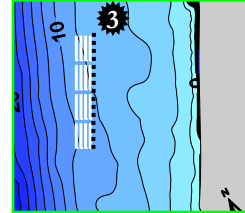
$H = 9.1\text{m}$
 $T = 12.7\text{sec}$
 NNE



50年迴歸期颱風波浪作用下各斷面之波高比較分佈圖



□ 颱風作用下堤後斷面之 相對能量透過率分佈圖



成大水利研究發展文教基金會

期末簡報

報告日期：2008/11/18

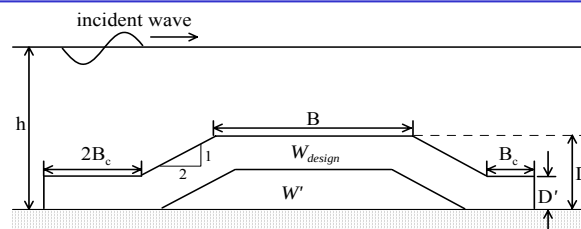


安全性估算與斷面設計

- 表面載重：採用 Givler & Sorensen, Van der Meer (1990)

h'_c	h	S	H_s / L_s	N_s^*	d_{n50}	W
5.1m	9.1m	2	0.037	10.085	0.894	1.644

$$W_{design} = 2W \approx 3.3t, B_c = 0.25B, W' = W_{design} / 200 = 16.5kg$$



成大水利研究發展文教基金會

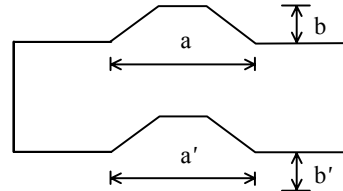
期末簡報

報告日期：2008/11/18

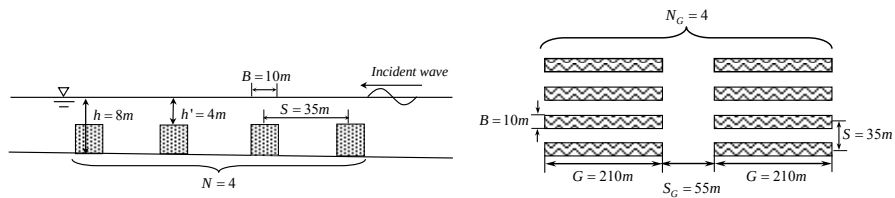


潛堤材質的選擇與成本的初步估算

■ 潛堤材質的選擇：方塊



■ 成本估算：設計堤長仿照計畫於現場系列潛堤之設計



成大水利研究發展文教基金會

期末簡報

報告日期：2008/11/18



潛堤材質的選擇與成本的初步估算

區域	面積 (m ²)	堤長 (m)	體積 (m ³)	價格(3000psi)
覆蓋層(第一座)	56	210	11760	19,639,200
覆蓋層	51	210	10710	17,885,700
堤心	28	210	5880	9,819,600
堤底(第一座)	7035			844,200
堤底	6510			781,200

■ 單組潛堤 N = 4 價格初步估算表

項目	第一座單價(元)	後列單價(元)	堤心單價(元)	數量	複價(元)
系列潛堤	19,639,200	17,885,700	781,200	4	79,608,900

成大水利研究發展文教基金會

期末簡報

報告日期：2008/11/18



系列潛堤工法的限制與優缺點

■ 限制：

- 系列潛堤工法僅適用於緩坡地形
- 系列潛堤工法的擺放位置需考慮主波向

■ 優點：

- 系列潛堤可免於海岸環境與景觀的破壞
- 建構後，系列潛堤工法相對維護費較低

■ 缺點：

- 系列潛堤工法施工困難度較高



結論

- 整個計畫利用EEMSE 數值模式研究具有可靠性
- 整合四年度計畫成果使報告更具有連慣性
- 針對平面影響因子詳細討論相關特性
- 考慮系列潛堤工法可能的經濟成本
- 提出系列潛堤工法設計流程圖做為未來研究之參考依據
- 以現場海域為例實際模擬系列潛堤工法之功效
- 系列計畫利用數值模式、理論分析、水工模型說明了系列潛堤工法施行的可能性

建議

- 系列計畫在工程材料以及斷面設計上僅作初步的分析探討，並沒有詳加考慮波力、內波作用以及其他各式建築的材料，建議可以另闢計畫來詳細探討。
- 計畫雖在一、二年中瞭解複合式間距可以有效增加整個布拉格共振機制的帶寬，但於平面現場部分並無詳加研究，建議於未來的研究中可導入。
- 整個系列計畫中利用各種方式說明於系列潛堤工法的可行性與可靠性，但若要實際應用於現場海域時建議另闢計畫輔以現場調查與大型的平面水工模型試驗。

報告完畢
謝謝大家