

97-46-7332

MOTC-IOT-96-H2DB003

系列潛堤應用於海岸保護之 研究(3/4)



交通部運輸研究所

中華民國 97 年 3 月

97

系列潛堤應用於海岸保護之研究
(3/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1009700839

定價 200 元

97-46-7332

MOTC-IOT-96-H2DB003

系列潛堤應用於海岸保護之 研究(3/4)

著者：徐如娟、蔡立宏、許泰文、張人懿
辛志勇、祝郁絜、柯拓宇

交通部運輸研究所

中華民國 97 年 3 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. (3/4) / 徐如
娟等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研
所, 民97. 03

面 ; 公分

參考書目:面

ISBN 978-986-01-3904-4(平裝)

1. 海岸工程 2. 防波堤

443.3

97006725

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (3/4)

著 者：徐如娟、蔡立宏、許泰文、張人懿、辛志勇、祝郁絜、柯拓宇

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 97 年 3 月

印 刷 者：德輝興業有限公司

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臺灣技術研究中心網站

定 價：200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組• 電話：(02)23496880

五南文化廣場：臺中市中山路 6 號• 電話：(04)22260330

GPN：1009700839

ISBN：978-986-01-3904-4 (平裝)

著作財產權：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

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 (3/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-986-01-3904-4 (平裝)	政府出版品統一編號 1009700839	運輸研究所出版品編號 97-46-7332	計畫編號 96-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、辛志勇、祝郁絜、柯拓宇 地址：台南市大學路1號 聯絡電話：06-2757575		研究期間 自 96 年 3 月 至 96 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發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式系列潛堤佈置所產生的布拉格反射現象，進而探討各種影響因子之特性。本年度研究針對二維平面上之影響因子進行一系列的模擬討論，並歸納布拉格現象於平面上可能之特性。在輔以往昔各學者之研究成果，歸納出現場設計施工初步流程圖，作為日後海岸保育防護工法之參考。最後，應用波浪數值模式於台灣新竹港南海域以進行各項系列潛堤研究，並分析評估各種佈置方案之防禦功效。			
出版日期	頁數	定費	本 出 版 品 取 得 方 式
97 年 03 月	126	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: Application of a series of Submerged Breakwaters to Coastal Protection (2/4)			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-01-3904-4 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009700839	IOT SERIAL NUMBER 97-46-7332	PROJECT NUMBER 96-H2DB003
DIVISION: Center of Harbor & Marine Technology DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Tsai Li-Hung PROJECT STAFF: Hsu Ju-Chuan PHONE: (04) 26587177 FAX: (04) 26560661			PROJECT PERIOD FROM March 2007 TO November 2007
RESEARCH AGENCY: NCKU Hydraulics and Ocean Engineering R&D Foundation PRINCIPAL INVESTIGATOR: Hsu Tai-Wen PROJECT STAFF: Chang Jen-Yi, Shin Chih-Young, Ko To-Yu, Jhu Yu-Jie 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 Mild-Slope Equation (EEMSE) developed by Hsu et al. (2003), was employed to simulate wave transformation of wave propagation over a series of submerged breakwaters in 2-Ds area. And the view of utilizing characteristic energy of the Bragg influence factor in 2-Ds area has systematic putting forward. Then, we design the flow chart of such submerged breakwaters according to the achievements obtained from research. Finally, we apply that submerged breakwaters method to Kungnan's coast and probe into its result by using numerical calculation.			
DATE OF PUBLICATION March 2008	NUMBER OF PAGES 126	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.....	III
表 目 錄.....	VII
符 號 表.....	VIII
第一章 緒 論	1-1
1.1 研究動機	1-1
1.2 文獻回顧	1-3
1.2.1 布拉格共振	1-3
1.2.2 反射係數	1-6
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	1-9
1.4 本研究組織	1-10
第二章 理論基礎	1
2.1 EEMSE 數值模式	2-1
2.2 反射率公式	2-4
2.2.1 理論分析	2-4
2.2.2 反射率公式之限制	2-11
第三章 平面上布拉格反射因子之探討	3-1
3.1 平面佈置系列潛堤之研究	3-3
3.1.1 平面上潛堤長度 (G) 的影響	3-4
3.1.2 平面上縱向堤距 (S_G) 的影響	3-11
3.2 系列潛堤工法佈置設計流程	3-21
第四章 系列潛堤應用於現場之初步研究	4-1

4.1 新竹港南附近海岸現況.....	4-1
4.2 現場地影響因子之初步探討.....	4-4
4.3 EEMSE 模式於現場海域之波場計算.....	4-9
第五章 結果與討論	5-1
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 期中報告簡報檔	附 2-1
附錄三 期末報告意見回覆處理情形	附 3-1
附錄四 期末報告簡報檔	附 4-1

圖 目 錄

圖 1-1 波浪行經沙連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 入射波與反射波座標系統示意圖 (A) 剖面圖；(B) 平面圖	2-6
圖 3-1 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	3-2
圖 3-2 波浪通過無限長系列潛堤之波高分佈圖($N=4$ ， $N_G=1$ ， $D/h=1/2$ ， $B/S=1/3$ ， $2S/L=0.9$ ， $G/S=N=\infty$)	3-7
圖 3-3 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖($N=4$ ， $N_G=1$ ， $D/h=1/2$ ， $B/S=1/3$ ， $2S/L=0.9$ ， $G/S=7$)	3-7
圖 3-4 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖($N=4$ ， $N_G=1$ ， $D/h=1/2$ ， $B/S=1/3$ ， $2S/L=0.9$ ， $G/S=5$)	3-8
圖 3-5 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖($N=4$ ， $N_G=1$ ， $D/h=1/2$ ， $B/S=1/3$ ， $2S/L=0.9$ ， $G/S=3$)	3-8
圖 3-6 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖($N=4$ ， $N_G=1$ ， $D/h=1/2$ ， $B/S=1/3$ ， $2S/L=0.9$ ， $G/S=2$)	3-9
圖 3-7 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖($N=4$ ， $N_G=1$ ， $D/h=1/2$ ， $B/S=1/3$ ， $2S/L=0.9$ ， $G/S=1$)	3-9
圖 3-8 不同潛堤堤長能量衰減率 E_s 與 $2S/L$ 關係圖	3-10
圖 3-9 共振現象 ($2S/L=0.9$) 與非共振現象 ($2S/L=1.5$) 情況下能 量衰減率(E_s)與相對堤長(G/S)關係分佈圖	3-10
圖 3-10 多組系列潛堤佈置下比較能量衰減率縱向擷取範圍示意圖	3-13

圖 3-11A 不同縱向堤距下 S1 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖	3-13
圖 3-11B 不同縱向堤距下 S1 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖	3-14
圖 3-11C 不同縱向堤距下 S1 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖	3-14
圖 3-11D 不同縱向堤距下 S1 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖	3-15
圖 3-11E 不同縱向堤距下 S1 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖	3-15
圖 3-12A 不同縱向堤距下 S2 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖	16
圖 3-12B 不同縱向堤距下 S2 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖	3-16
圖 3-12C 不同縱向堤距下 S2 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖	3-17
圖 3-12D 不同縱向堤距下 S2 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖	3-17
圖 3-12E 不同縱向堤距下 S2 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖	18
圖 3-13A $G/S=1$ 時, S2 位置共振現象 ($2S/L=0.95$) 與非共振現象 ($2S/L=1.5$) 情況下能量衰減率(E_S)與相對組距(S_G/G)關係分佈圖	3-18
圖 3-13B $G/S=2$ 時, S2 位置共振現象 ($2S/L=0.95$) 與非共振現象 ($2S/L=1.5$) 情況下能量衰減率(E_S)與相對組距(S_G/G)關係分佈圖	3-19
圖 3-13C $G/S=3$ 時, S2 位置共振現象 ($2S/L=0.95$) 與非共振現象 ($2S/L=1.5$) 情況下能量衰減率(E_S)與相對組距(S_G/G)關係分佈圖	

.....	3-19
圖 3-13D $G/S=5$ 時, S2 位置共振現象 ($2S/L=0.95$) 與非共振現象 ($2S/L=1.5$) 情況下能量衰減率(E_S)與相對組距(S_G/G)關係分佈圖	3-20
圖 3-13E $G/S=7$ 時, S2 位置共振現象 ($2S/L=0.95$) 與非共振現象 ($2S/L=1.5$) 情況下能量衰減率(E_S)與相對組距(S_G/G)關係分佈圖	3-20
圖 3-14 佈置系列潛堤工法初步設計流程圖	3-22
圖 4-1 新竹港南海岸平面位置圖	4-2
圖 4-2 新竹港南附近海域地形侵淤變化圖 (87.09~94.04)	4-3
圖 4-3 新竹港南附近海域地形圖 (87 年 9 月實測)	4-6
圖 4-4 不同的潛堤個數佈置下反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	4-7
圖 4-5 潛堤堤數 $N=2$ 佈置及波高變化圖	4-8
圖 4-6 潛堤堤數 $N=4$ 佈置及波高變化圖	4-8
圖 4-7 潛堤堤數 $N=6$ 佈置及波高變化圖	4-9
圖 4-8 系列潛堤平面佈置相關參數尺度示意圖	4-10
圖 4-9 系列潛堤斷面佈置相關參數尺度示意圖	4-10
圖 4-10 港南海域附近系列潛堤佈置及斷面示意圖	4-13
圖 4-11 夏季季風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 有潛堤佈置	4-14
圖 4-12 冬季季風波浪作用下之波場分佈圖 (A) 無潛堤佈置 (B) 有潛堤佈置	4-15
圖 4-13 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	4-16

圖 4-14	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) 有潛堤佈置	4-17
圖 4-15A	10 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖	
.....		4-18
圖 4-15B	10 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖	
.....		4-18
圖 4-16A	50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖	
.....		4-19
圖 4-16B	50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖	
.....		4-19
圖 4-17	夏季季風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖	4-20
圖 4-18	冬季季風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖	4-20

表 目 錄

表 3-1	數值模擬之平面系列潛堤佈置	3-4
表 4-1	新竹港南海域之波浪條件資料表	4-5
表 4-2	不同的 $2S/L$ 下之相對週期波長	4-7

符 號 表

a	：波浪振幅
a_i	：入射波振幅
a_r	：反射波振幅
a_0	：外海入射波的振幅
α_l	：波浪吸收係數
α	：位相差
B	：潛堤寬度
C	：波浪速度
C_g	：群波波速
D	：潛堤高度
E_S	：能量衰減率
ε	：攝動參數
ε_i	：入射波的相位差
ε_r	：反射波的相位差
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
g	：重力加速度
G	：潛堤長度
H	：波高
H_t	：系列潛堤堤後方某一格點相對的波高
H_i	：入射波高
h'	：堤頂水深
h	：平均水深
η	：水位函數

i ：下標為給定邊界上的物理量
 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_S ：淺化係數
 K_R ：折射係數
 k ：入射波浪的周波數
 k_m ： x_m 位置的週波數
 L ：入射波波長
 L_m ： x_m 位置的波長
 L_0 ：深海波長
 L_1 ：第一方向波列之波長
 L_2 ：第二方向波列之波長
 l ：沙漣底床沙漣長
 M ：整數
 $\vec{m}_1$ ：第一方向波列其波數向量
 $\vec{m}_2$ ：第二方向波列其波數向量
 N ：潛堤個數
 N_G ：平面系列潛堤組數
 η_i ：入射波的水位
 η_r ：反射波的水位
 $|\eta|$ ：振幅
 θ ：波浪入射邊界之角度
 θ_0 ：深海入射波之波向角
 R ：反射係數
 s ：位相函數

S ：潛堤間距

S_G ：縱向潛堤間距

T ：週期

$\tilde{T}$ ：透射係數

t ：時間因子

$\bar{t}$ ：緩慢時間變量

$\tan \beta$ ：海床坡度

ω ：角頻率

x_r ：近岸點

x_m ：中間點

x_f ：離岸點

Δx_f ：離岸點與中間點的間距

Δx_b ：近岸點與中間點間距

Φ ：流速勢

$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ ：水平方向梯度因子

(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仍記憶猶新。

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作為休閒遊憩的地方，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)。共振之水牆阻擋入射波向岸傳遞之能量，使海岸之波能減小，以達到海岸保護之效果，又為了同時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，不但與離岸堤有類似的消浪效果，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，使波浪能量射於外海，故能以較小的材料達成防波的效果。

本年度研究延續過去兩年的研究成果，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，本年度研究將在平面上佈置各式系列潛堤以探討其相關的影響因子，進而以新竹港南海岸為示範區規劃相關之系列潛堤佈置，並以平面數值模式計算其相關波流場，以探討可能之成效。最後綜整所有的研究成果，以提出具體的設計流程，期望本海岸防護工法之研究能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。

1.2 文獻回顧

1.2.1 布拉格共振

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，這時離岸沙洲阻擋大部分的入射波浪，避免波浪直接衝擊海岸，而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 Miles (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^{15~16} (1990, 1992) 以等間距的人工沙漣底床，進行場實際海岸的保護研究。張等人¹⁷ (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^{18~22} (1997a, 1997b; 1998; 1999; 2000) 以邊界元素法 (boundary element method, BEM) 探討不同入射波浪條件，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²³ (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。

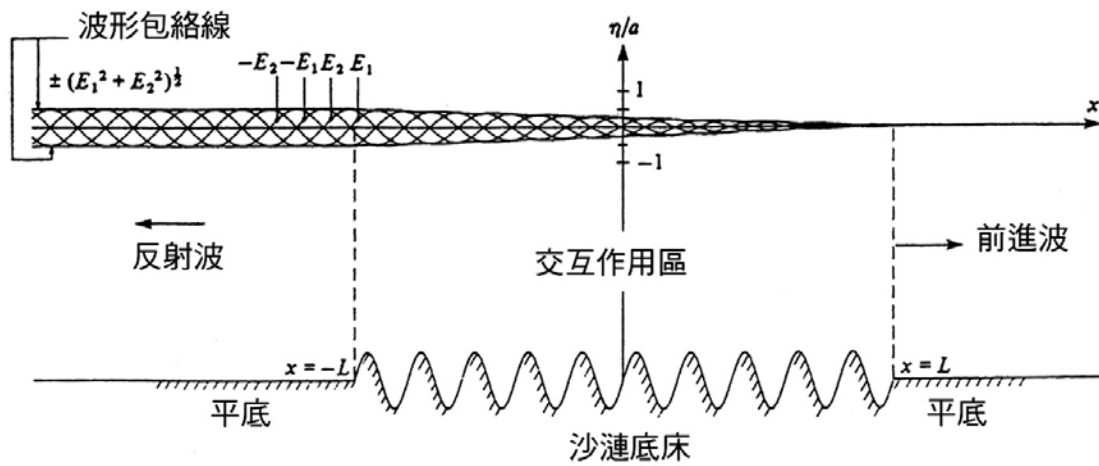


圖 1-1 波浪行經沙漣底床之反射波變化情形
(Davies 和 Heathershaw , 1984)

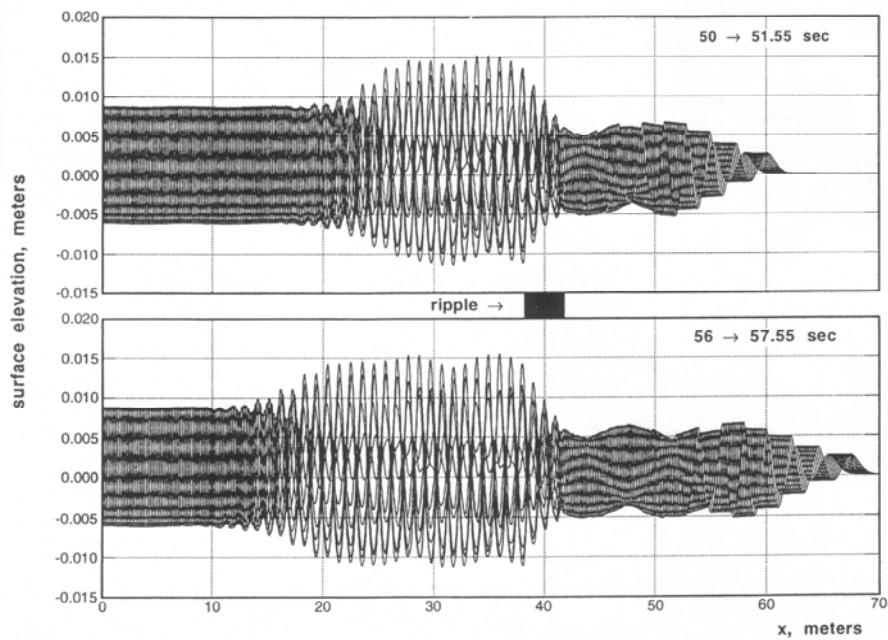


圖 1-2 布拉格共振之時序列 (Webster 和 Wehausen , 1995)

近年來有許多學者針對 Berkhoff²⁴ (1972) 所提出的緩坡方程式 (mild-slope equation, MSE) 加以修正，以數值計算的方法，研究布拉格共振現象。Kirby²⁵ (1986) 在緩變地形中，引入一個微小的地形擾動參數，提出延伸型態緩坡方程式 (extended mild-slope equation, EMSE)。Chamberlain 和 Porter²⁶ (1995) 加入 EMSE 忽略的高階項，成為修正型態緩坡方程式 (modified mild-slope equation, MMSE)。Zhang 等人 (1999) 除將 Kirby (1986) 所忽略的高階項考慮於方程式中，並加入底床擾變量的影響，提出與時間相關之雙曲線型式的混合模式 (hybrid model, HM)。Hsu 和 Wen (2001) 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)。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)。

1.2.2 反射係數

對於波浪入射水平底床的研究，以往的學者利用試驗室的數據，或現場實測的資料，提出各種不同的方法，來分離波浪的入射波與反射波，諸如 Healy²⁷ (1953)、Goda 和 Suzuki²⁸ (1976)、Mansard 和 Funke²⁹ (1980)、Hughes³⁰ (1993)、Frigaard 和 Brorsen³¹ (1995)、Suh 等人³² (2001)、Lin 和 Huang³³ (2004)。這些研究方法，雖然都能分離入射波與反射波，但都僅限於水平底床的情況，對斜坡底床者則不適用。

在相同的波浪條件下，直接引用水平底床的方法，來計算斜坡底床的波浪反射係數，會造成較大的誤差，Baquarizo 等人³⁴ (1997) 認為分析斜坡上波浪的反射時，底床的因素應該加以考慮；Baldock 和 Simmond³⁵ (1999) 也指出，引用波浪入射水平底床的方法，計算波浪入射斜坡底床時的反射係數時，若反射係較大則誤差較小，反之，若反射係較小則誤差較大。他們同時指出，在分離入射波與反射波波高時，若能考慮地形改變所造成的影響，則可降低計算結果的誤差量，

當波浪於水平底傳遞時，各種物理性質均保持不變，而當波浪入射斜坡底床時，產生淺化與折射效應，波浪的各項物理量，包括週波數及波速等，都隨水深產生變化，若以固定值來計算，勢必造成較大的誤差。

中村和森田³⁶ (1988) 利用兩個測點所測到水位變動，以調和分析法，來分離入射與反射波振幅；Isaacson³⁷ (1991) 則提出三點法，利用不同間距的三個測點所量測的波高，來分離入射與反射波高；黃和謝³⁸ (1994) 利用至少三個測點之水位變化，以加權平均法，來分離入射與反射波高，及計算反射係數；黃和黃³⁹ (1995) 更提出兩點法、加權平均法、最小二乘法及三波高法，並比較四種方法，分離入射波與反射波的精確性，這些學者所提出的方法，雖然適用於斜向入射的波浪，但僅能在水平底床時使用，若應用在斜坡底床時，則仍無法達到實際的要求。

Frigaard 和 Brorsen (1995) 應用濾波 (filters) 的觀念，以時間領域 (time domain) 的方法，推導出適合水平底床分離入射波與反射波的理論，Baldock 和 Simmonds (1999) 改善 Frigaard 和 Brorsen (1995) 的方法，以兩個測點的波高與位相，配合線性波的淺化效應，提出波浪正向入射於斜坡底床時，反射係數的計算公式。Chang 和 Hsu⁴⁰ (2003) 利用斜坡上兩測點的波高，以頻率領域 (frequency domain) 的方法，計算波浪正向入射斜坡的反射係數及分離入射與反射波高的技巧，Chang⁴¹ (2002) 則提出反射係數的三點法，兩個方法均在頻率的領域上，應用於試驗室與現場實際情況，來計算波浪正向入射斜坡時的反射係數；但這兩種方法的主要差別在於二點法需先已知深海的入射波高，而三點法則無此需求。Hsu 和 Wang⁴² (2007) 以三點法為基礎提出了斜坡底床波浪斜向入射之反射係數求法。

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。又於反射率的計算上，若要應用於平面以及現場時，應同時考量波浪入射角度以及斜坡底床，故本研究以 Hsu 和 Wang (2007) 所提出之方法為基礎進行計算。

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現象時，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，進而作為現場規劃之依據。
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. 綜整前三年研究成果，探討系列潛堤於學理及實際應用上所能發揮的防護功能。
2. 針對二維平面之布拉格反射因子特性，提出適當之設計流程，並詳述應用於現場海域之方法，以利工程參考。
3. 針對台灣西部海岸面臨侵蝕威脅之區域進行調查，提出可實施系列潛堤防護工法的區域之建議，並提出具體的設計方案以供實際施工設計參考。

1.3.2 預期成果

1. 計算各式二維平面之系列潛堤佈置，以分析布拉格反射之影響因子於二維平面上的變化，進而歸納相關特性，以供現場佈置參考，並同時討論模式於各式地形上之適用性。

2. 利用 Hsu 和 Wang (2007) 所提出之反射率算方式，將可以更貼切的應用於現場平面海域。
3. 於平面計算案例上採用能量的觀點，分析布拉格共振現象之成果，採用能量衰減率的方式將更容易看出系列潛堤工法的特性。
4. 利用蒐集之新竹港南海域海象資料，輔以各影響因子特性，規劃適合之系列潛堤佈置，進而利用數值模式加以計算以探討系列潛堤於現場應用的可行性及優缺點。

1.4 本研究組織

本研究於第一章，將國內外有關係列潛堤、布拉格反射與反射率的文獻，加以分類整理，作為今後研究的參考。第二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。最後，說明反射係數公式之選定與推導。第三章利用各式系列潛堤佈置，用以分析探討平面布拉格反射影響因子，並規劃設計流程圖。第四章將以新竹港南海域為例，先說明其海象資料及侵淤現況，並針對現場海域斷面進行系列潛堤佈置作為初步規劃依據，最後依照流程圖於現場海域規劃系列潛堤佈置並說明其可行性。第五章本年度計畫之結論與建議。

第二章 理論基礎

2.1 EEMSE 數值模式

當外海波浪向近岸傳播時，波浪除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 Suh⁴³ 等人 (1997) 及 Hsu 和 Wen⁴⁴ (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：

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

式中

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

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

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 (2-1) 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 (2-1) 中處理碎波後的波形，即

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

式中 $i = \sqrt{-1}$ 。式 (2-4) 中的能量消散項 f_d ，採用 Isobe⁴⁵ 等人 (1987) 建議

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

$$\gamma_r = 0.135 \quad (2-6)$$

$$\gamma_s = 0.4 \cdot (0.57 + 5.3 \tan \beta) \quad (2-7)$$

$$\gamma = |A|/h \quad (2-8)$$

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

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 Mei⁴⁶ (1983) 之建議，將一緩慢時間變量引入緩坡方程式中，其變量為

$$\bar{t} = \varepsilon t \quad (2-10)$$

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 (2-10)，則流速勢可進一步寫成

$$\Phi(x, y, t) = \bar{\psi}(x, y, \bar{t}) e^{-i\omega t} \quad (2-11)$$

式中 $\bar{\psi}$ 為加入攝動參數之流速勢。將式 (2-11) 代入式(2-4)，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：

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

上式能降低矩陣之維度，降低數值計算之時間。為簡化式 (2-12) 之控制方程式，Hsu 和 Wen (2000) 引用 Radder⁴⁷ (1979) 之尺度因子，如式 (2-13) 所示：

$$\bar{\psi} = \frac{\phi}{\sqrt{CC_g}} \quad (2-13)$$

則式 (2-12) 可簡化為式

$$-\frac{2\omega i}{CC_g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla^2 \phi + k_c^2 \phi \quad (2-14)$$

其中

$$k_c = k^2 (1 + if_d) - \frac{\nabla^2 \sqrt{CC_g}}{\sqrt{CC_g}} + \frac{[f_1 g \nabla^2 h + f_2 (\nabla h)^2 gk]}{CC_g} \quad (2-15)$$

式 (2-14) 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。

當波浪通過計算邊界時，為了使波浪能沿著傳遞的方向通過邊界，使邊界上的反射波，不再反射回計算領域，而提高計算之準確度，EEMSE 使用輻射邊界條件 (radiation boundary condition)，其表示式為

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \pm (-1)^m i \alpha_1 k \cos \theta \phi + 2ik_i \cos \theta \phi_i, \quad \text{on } \pm x \text{ direction} \quad (2-16)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \pm (-1)^m i \alpha_1 k \sin \theta \phi + 2 i k_i \sin \theta \phi_i, \quad \text{on } \pm y \text{ direction} \quad (2-17)$$

式中 $\alpha_1 = (1-R)/(1+R)$ 為吸收係數 (absorption coefficient)，下標 i 表示給定邊界上的物理量。波浪的邊界條件，依波浪在邊界上的特性，可分為 (1) 完全吸收邊界： $\alpha_1=1$ ， $R=0$ ；(2) 全反射或部分反射邊界： $\phi_i=0$ ， $m=0$ ，及 $0 \leq \alpha_1 < 1$ ；(3) 給定邊界條件： ϕ_i 給定為已知， $m=1$ ，及 $\alpha_1=1$ 。有關 EEMSE 的輻射邊界條件，可參考 Li⁴⁸ (1994) 及 Hsu 和 Wen (2000, 2001) 的相關研究。

在 EEMSE 模式中，水位的變化可由上面式中的流速勢求出，而水位變化可表示為 $\eta = a e^{is}$ ，其中 a 為波浪振幅， s 為位相函數，邊界上的波向角 θ ，則可由交替方向隱式法 (alternative direction implicit scheme, ADI) 求出，即

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\partial s / \partial y}{\partial s / \partial x} \right) \quad (2-18)$$

本研究使用的 EEMSE 模式，對於大角度入射的斜向波浪，仍能求得合理的波場變化情形，由 Hsu 和 Wen (2000, 2001) 的數值結果顯示，對於入射角 $\theta = 80^\circ$ 的大角度，EEMSE 亦可得到相當滿意的結果，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 Hsu 和 Wang (2007) 所提出的反射係數模式，則可求出波浪入射各種地形的反射係數。

2.2 反射率公式

2.2.1 理論分析

此節主要闡述本研究所使用的反射率模式。Hau 和 Wang (2007) 利用線性波理論，延伸 Chang (2002) 反射係數的架構，提出一個新的三點法理論，來計算波浪斜向入射斜坡時的反射係數，希望更能適用於實際海域的情況。

波浪斜向入射斜坡或海岸結構物時發生反射現象，當波浪入射角大於 45° ，則有入射角不等於反射角的馬赫反射 (Mach reflection) 產生；而入射海岸的波浪，當其傳遞至近岸區域時，絕大部分波浪之波向角均小於 45° ，故本研究推算波浪反射係數的理論，忽略馬赫反射所造成的影響。波浪斜向入射單一斜坡，其傳播運動之座標系統可以圖 2-1 表示， x 軸為垂直於岸線的方向，以向海為正，並取其與岸線之交點為座標原點， y 軸為平行岸線或等深線的方向， z 軸為水深方向，由平均靜水面向上為正。

波浪自外海斜向入射單一斜坡時，在不考慮海流、波浪碎波及馬赫反射的情況，波浪之入射角等於反射角，任何位置的水位變化 η ，為入射波的水位 η_i 與反射波的水位 η_r 疊加而成，即

$$\begin{aligned}\eta(x, y, t) &= \eta_i + \eta_r \\ &= a_i \cos\left(\int_0^x k \cos \theta dx + \int_0^y k \sin \theta dy + \omega t + \varepsilon_i\right) \\ &\quad + a_r \cos\left(\int_0^x k \cos \theta dx - \int_0^y k \sin \theta dy - \omega t + \varepsilon_r\right)\end{aligned}\quad (2-19)$$

式中 a_i 與 a_r 分別為座標 (x, y) 處入射波與反射波之振幅， k 代表該點之週波數， θ 為該點之波向角， ε_i 與 ε_r 分為入射波與反射波之位相差 (phase shift)， ω 為波浪之角頻率， t 為時間。

利用三角函數將式 (2-19) 展開，經整理後可得任何位置的振幅為

$$|\eta| = a_i \left[1 + R^2 + 2R \cos\left(2 \int_0^x k \cos \theta dx + \varepsilon_i + \varepsilon_r\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-20)$$

式中 $R = a_r / a_i$ 為波浪的反射係數，其值介於 0 與 1 之間。由式 (2-20) 可知，振幅 $|\eta|$ 並非 y 之函數，此因波浪之振幅與水深有關，而本研究僅考慮具有平直等深線之單一斜坡地形，故 $|\eta|$ 僅為 x 之函數。

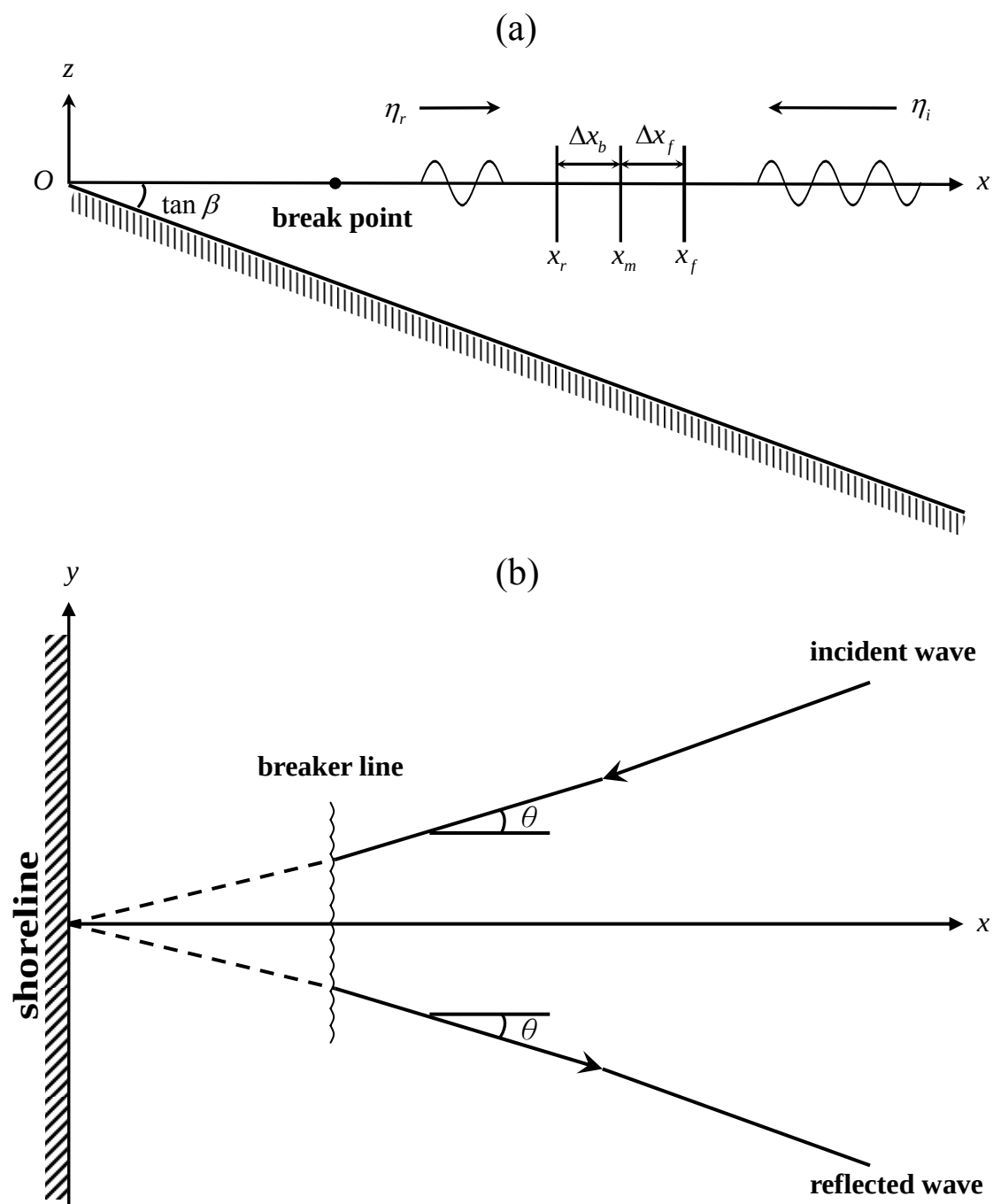


圖 2-1 入射波與反射波座標系統示意圖
(a) 剖面圖；(b) 平面圖

斜向入射斜坡的波浪包含淺化 (shoaling) 及折射 (refraction) 效應，故式 (2-20) 中之入射波振幅，可由下式求得

$$a_i = a_0 \cdot K_S \cdot K_R \quad (2-21)$$

式 (2-21) 之 a_0 為深海入射波浪之振幅， K_S 、 K_R 分別為淺化係數與折射係數，可由線性波理論分別求得

$$K_S = \left(\frac{2 \cosh^2 kh}{2kh + \sinh 2kh} \right)^{1/2} \quad (2-22)$$

$$K_R = \left(\frac{1 - \sin^2 \theta_0}{1 - \tanh^2 kh \sin^2 \theta_0} \right)^{1/4} \quad (2-23)$$

式中 h 為水深， θ_0 為深海入射波之波向角。

如圖 2-1，在 x 軸上任取三點，分別為近岸點 x_r 、中間點 x_m 及離岸點 x_f ，近岸點與中間點間距為 Δx_b ，離岸點與中間點的間距則為 Δx_f ，式 (2-20) 中 x_f 位置的空間位相 (spatial phase) 函數積分，可進一步表示為

$$\begin{aligned} \int_0^{x_f} k \cos \theta dx &= \int_0^{x_m} k \cos \theta dx + \int_{x_m}^{x_m + \Delta x_f} k \cos \theta dx \\ &= X_m + \int_{x_m}^{x_m + \Delta x_f} k \cos \theta dx \end{aligned} \quad (2-24)$$

式 (2-24) 中，等號右邊第一項表示波浪斜向入射時， x 軸方向由原點至 x_m 處之累積空間位相；第二項則代表 x 軸方向，與 x_m 點間距 Δx_f 之空間位相差 (spatial phase shift)，此位相差除空間距離的影響外，亦包含因水深改變所造成週波數與折射角變化的影響，故較難直接求得解析結果。應用中值定理 (mean value theorem) 則可得

$$\int_{x_m}^{x_m + \Delta x_f} k \cos \theta dx = \int_{x_m}^{x_m + \Delta x_f} \left[k \cos \theta + \frac{d(k \cos \theta)}{dx} \frac{\Delta x_f}{2} \right]_{x=x_m} dx \quad (2-25)$$

式(2-25) 表示 x_m 與 x_f 兩點之間的累積空間位相，受 x_m 位置的位相 $k \cos \theta$ 及位相梯度 $k \cos \theta / dx$ 的影響，利用連鎖律 (chain rule)，則位相梯度可改寫為

$$\frac{d(k \cos \theta)}{dx} = \frac{d(k \cos \theta)}{dh} \frac{dh}{dx} = (\cos \theta \frac{dk}{dh} + k \frac{d \cos \theta}{dh}) \tan \beta \quad (2-26)$$

式中 $\tan \beta = dh/dx$ 為底床坡度。 dk/dh 與 $d \cos \theta / dh$ 可分別由分散關係式 (dispersion relation) 及司乃爾定律 (Snell's law) 求出

$$\frac{dk}{dh} = \frac{-2k^2}{2kh + \sinh 2kh} \quad (2-27)$$

$$\frac{d \cos \theta}{dh} = \frac{-2 \sin^2 \theta_0 k \tanh^2 kh}{(2kh + \sinh 2kh) \cos \theta} \quad (2-28)$$

將式 (2-27) 及式 (2-28) 代回式(2-26)，經化簡後可得

$$\frac{d(k \cos \theta)}{dx} = \frac{-2k^2 \tan \beta}{(2kh + \sinh 2kh) \cos \theta} \quad (2-29)$$

當波浪正向入射海岸，即 $\theta = \theta_0 = 0^\circ$ 時，式 (2-29) 可簡化為

$$\frac{dk}{dx} = \frac{-2k^2 \tan \beta}{2kh + \sinh 2kh} \quad (2-30)$$

式 (2-30) 與 Chang (2002) 所提出，正向入射波浪的結果一致。

對於水平底床 $\tan \beta = 0$ 而言，式 (2-29) 可簡化成 $d(k \cos \theta)/dx = 0$ ，亦即波浪沿水平底床前進時，沿波浪行進方向的週波數保持不變；再參考式 (2-25) 亦可得知，這時兩點間的空間累積位相，僅與兩點間的距離有關。

當波浪於深水區域 $kh \rightarrow \infty$ 時，式 (2-29) 的分母趨近於無限大，故對於分子部分之有限的底床坡度 $\tan \beta$ 與週波數 k ，可得到 $d(k \cos \theta)/dx \approx 0$ ，此即表示，在深水區域，水深的變化對週波數影響

有限，反之，於淺水區域 $\sinh 2kh \approx 2kh$ ，從式 (2-29) 可得到 $d(k \cos \theta)/dx = -k \tan \beta / (2h \cos \theta)$ 的結果，亦即波浪在淺水區域的週波數會隨水深的變化而改變。

將式 (2-21) 至式(2-29) 的結果代回式 (2-20)，則 x_r 、 x_m 及 x_f 三點的振幅分為

$$|\eta|_b = a_0 K_{Sb} K_{Rb} \left[1 + R^2 + 2R \cos(\alpha - \alpha_b) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-31)$$

$$|\eta|_m = a_0 K_{Sm} K_{Rm} \left[1 + R^2 + 2R \cos \alpha \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-32)$$

$$|\eta|_f = a_0 K_{Sf} K_{Rf} \left[1 + R^2 + 2R \cos(\alpha + \alpha_f) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-33)$$

其中

$$\alpha = 2X_m + 2\varepsilon_i + \varepsilon_r \quad (2-34)$$

$$\alpha_b = 2k_m \cos \theta_m \Delta x_b + \frac{2k_m^2 \Delta x_b^2 \tan \beta}{(2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m) \cos \theta_m} \quad (2-35)$$

$$\alpha_f = 2k_m \cos \theta_m \Delta x_f - \frac{2k_m^2 \Delta x_f^2 \tan \beta}{(2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m) \cos \theta_m} \quad (2-36)$$

式 (2-34) 為未知的位相，利用方程式的閉合性可以求出。式 (2-35) 及式 (2-36) 表示， x_r 及 x_f 兩點與中間位置 x_m 由於距離的變化，所引起的空間位相差，其中包括兩個部分：(1) 單一波浪行進於水平底床，間距 Δx_b 或 Δx_f 的影響；(2) 由於水深、底床坡度及波向的變化，造成週波數的改變，所帶來的影響。

若已知深海入射波浪的波浪振幅 a_0 、波浪週期 T 及波浪入射角 θ_0 等波浪條件，則可求出斜坡上已知水深的三點 x_r 、 x_m 及 x_f 之波

浪情況。將式 (2-31) 及式 (2-33) 分別除以式 (2-32) 可得

$$B = \left(\frac{|\eta|_b K_{Sm} K_{Rm}}{|\eta|_m K_{Sb} K_{Rb}} \right)^2 = \frac{1 + R^2 + 2R \cos(\alpha - \alpha_b)}{1 + R^2 + 2R \cos \alpha} \quad (2-37)$$

$$F = \left(\frac{|\eta|_f K_{Sm} K_{Rm}}{|\eta|_m K_{Sf} K_{Rf}} \right)^2 = \frac{1 + R^2 + 2R \cos(\alpha + \alpha_f)}{1 + R^2 + 2R \cos \alpha} \quad (2-38)$$

式 (2-37) 及式 (2-38) 中之 B 及 F 值，可由各點實測之振幅、淺化係數及折射係數求得，而 α_b 及 α_f 可分別由式 (2-35) 及式 (2-36) 求出，故利用方程的閉合性，經三角函數展開整理後，可求得位相差 α 及反射係數 R 為

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{B - F + (1 - B) \cos \alpha_f - (1 - F) \cos \alpha_b}{(1 - B) \sin \alpha_f + (1 - F) \sin \alpha_b} \right] \quad (2-39)$$

$$R = \frac{B \cos \alpha - \cos(\alpha - \alpha_b) \pm \sqrt{[B \cos \alpha - \cos(\alpha - \alpha_b)]^2 - (1 - B)^2}}{1 - B} \quad (2-40)$$

或

$$R = \frac{F \cos \alpha - \cos(\alpha + \alpha_f) \pm \sqrt{[F \cos \alpha - \cos(\alpha + \alpha_f)]^2 - (1 - F)^2}}{1 - F} \quad (2-41)$$

在式 (2-40) 及式 (2-41) 中，正負號 ($\pm$) 的取捨，可由反射係數的條件 $0 \leq R \leq 1$ 來決定。

將位相差 α 及反射係數 R 的結果，代回式 (2-31) 至式 (2-33)，則可求得各點的入射波振幅，並進一步求得反射波振幅，以離岸點 x_f 而言，其計算式為

$$a_i = \frac{|\eta|_f}{\left[1 + R^2 + 2R\cos(\alpha + \alpha_f)\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2-42)$$

$$a_r = a_i \cdot R \quad (2-43)$$

2.2.2 反射率公式之限制

Hsu 和 Wang (2007) 所提出之反射率公式，包含波浪的淺化及折射效應，故往昔學者提出的波浪斜向入射水平底床的反射係數，與波浪正向入射斜坡的反射係數，均屬此公式之退化情況。再者，一般推求反射係數之方法，其測點間距均有所限制，下面則針對此加以探討。

檢視式 (2-35) 及式 (2-36) 得知，當波浪入射角趨近 90° 時，其位相 α_b 和 α_f 變為無限大，進而無法求出反射係數，亦即當波浪沿等深線前進時，本研究的模式無法計算出反射係數。然而當波浪平行岸線傳播時，這時的透射係數 $\tilde{T}=0$ ，依據能量守恆 (energy conservation) 的原則，可進而求得反射係數 $R=1$ 的理論值，且在實際的海岸上，近岸的波浪均為向岸邊傳遞，即入射角度不為 90° ，故本模式應可應用於實際之海域。

由式 (2-40) 及式 (2-41) 可以看出，當 $B=F=1$ 時，兩式的分母為 0，故無法利用本研究的模式求出反射係數。再由式 (2-37) 及式 (2-38) 可以發現，當 $B=F=1$ 時，則可得到下列的條件

$$\cos(\alpha - \alpha_b) = \cos \alpha = \cos(\alpha + \alpha_f) \quad (2-44)$$

將式 (2-44) 代入式 (2-35) 及式 (2-36) 可得

$$\begin{aligned}
\Delta x_b + \Delta x_f &= \frac{M\pi}{k_m \cos \theta_m} - \frac{2Mk_m \tan \beta}{(2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m) \cos \theta_m^2} (\Delta x_b^2 - \Delta x_f^2) \\
&= \frac{ML_m}{2 \cos \theta_m} - \frac{2M\pi \tan \beta}{L_m (2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m) \cos \theta_m^2} (\Delta x_b^2 - \Delta x_f^2)
\end{aligned}
\tag{2-45}$$

式中 k_m 與 L_m 分別為 x_m 位置的週波數與波長， M 為整數。若 $\Delta x_b = \Delta x_f = \Delta x$ ，則式 (2-45) 可簡化為 $\Delta x = ML_m/4 \cos \theta_m$ ，當前後測點與中間測點之間距為四分之一波長的整數倍時，無法以本研究的模式計算出反射係數，此點限制與 Goda 和 Suzuki (1976) 的理論相似。

第三章 平面上布拉格反射因子之探討

往昔對於布拉格反射因子的探討與研究大多著重在二維斷面上的討論，然而實際的現場海域應為三維，不過多數研究並未針對二維方向之影響因子詳加討論。有鑑於此，為提高系列潛堤工法能應用於現場海域，選擇針對平面布拉格共振因子特性的瞭解與探討將有其必要性。本章即針對此部分進行相關的討論，以期能在實際海域規劃應用時有良好的參考依據。

研究波浪通過佈置系列潛堤之底床，在各種佈置條件及不同入射波浪條件作用下，波浪受底床及潛堤的互制作用，使得波場機制產生各種不同變化，進而使堤前發生反射共振現象的布拉格效應機制亦不相同。系列潛堤實際應用於海岸保護工法之前，必須針對相關影響因子間之關係作深入研究。而綜合歸納二維平面上影響布拉格反射的參數包括：潛堤堤高 D 、潛堤長度 G 、潛堤間距 S 、縱向潛堤間距 S_G 、底床坡度 $\tan \beta$ 、潛堤個數 N 、系列潛堤組數 N_G 、潛堤寬度 B 、入射波水深 h 及波浪週期 T ，其特徵函數可以下式表示：

$$F = f_1(D, G, h, S, S_G, T, N, N_G, B, \tan \beta) \quad (3-1)$$

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

$$F' = f_1(D/h, G/S, 2S/L, B/S, S_G/G, N, N_G, \tan \beta) \quad (3-2)$$

然而往昔有眾多學者已經針對二維斷面上之影響因子進行過詳細的分析討，因此關於潛堤個數 N 、潛堤高度 D 、底床坡度 $\tan \beta$ 以及潛堤寬度 B ，在此便不詳加討論。關於上述各因子之相關平面示意圖如圖 3-1 所示。

本章節針對影響因子以演進型態緩坡方程式 (EEMSE) 進行數值計算，並將計算結果分為下列各項予以討論：

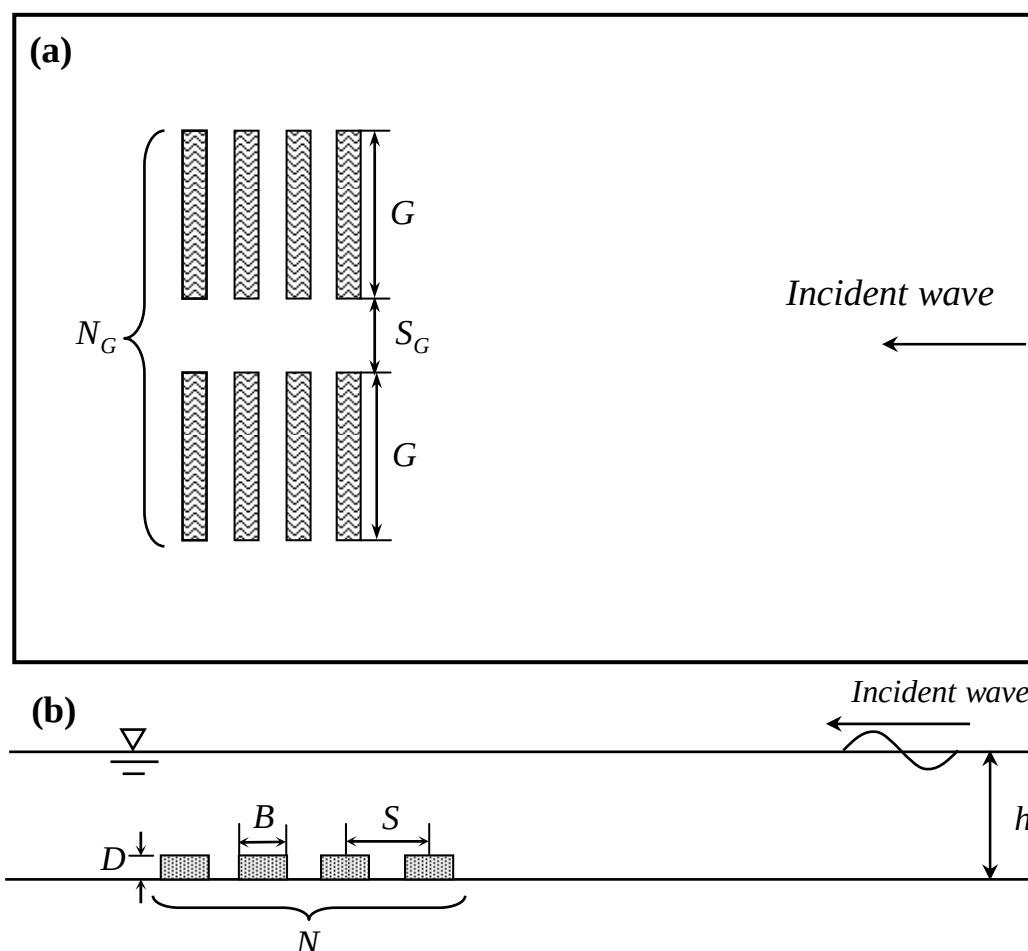


圖 3-1 多組系列潛堤佈置之平面布拉格反射因子示意圖

(a) 平面圖；(b) 剖面圖

1. G/S 的特性：利用能量的觀點，針對不同潛堤長度 G ，探討在不同的波浪條件 $2S/L$ 下，潛堤堤頭繞射對布拉格共振機制的影響，並歸納潛堤長度於整個機制中的特性。
2. S_G/G 的特性：當於平面佈置為多組系列潛堤時，縱向堤距 S_G 將影響堤頭繞射以及兩組潛堤間的布拉格共振機制，因此在平面佈置上將是一個重要的影響因子，本研究利用 EEMSE 模式模擬大量的佈置方案，以期能分析其相關特性。
3. 系列潛堤設計流程圖：利用過去計畫成果以及往昔眾多學者對於布拉格共振之各項影響因子的研究，結合本年度研究對於平面影響因子的分析，歸納出系列潛堤工法之初步設計流程圖，以期能

作為現場海域佈置之參考。

3.1 平面佈置系列潛堤之研究

往昔對於布拉格反射研究，均假設在無波浪繞射情況下，進行斷面二維佈置模擬計算或試驗。但在現場實際應用時，潛堤堤長不可能無限延伸，且若要應用於現場應考慮若有多組潛堤並排時可以產生之情形。因此，在有限長潛堤佈置情況下，堤頭繞射勢必影響整個波場變化及布拉格反射現象。考量現實的情況，實際海域不可能僅佈置單一組無限長或有限長之系列潛堤進行防禦必定為多組，因此各組潛堤之間的縱向堤距將也是一個重要的影響因子。

過去布拉格共振現象的影響因子已有許多學者進行歸納研究，但對於平面影響因子潛堤堤長 G 以及縱向堤距 S_G 很少有相關的討論。有鑑於此，本節最主要的研究將釐清這兩個影響因子在平面布拉格共振現象機制中所表現的特性，進而歸納出系列潛堤工法設計流程。

由於目前在二維平面波場的反射率並無相關的研究理論基礎可以參考，為了具體的瞭解系列潛堤工法佈置於平面之可行性，本研究利用能量衰減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堤後透射波高平方和除以入射波高平方和即可得到能量衰減率，其數學式可以表示為

$$E_s = \frac{\sum_l (H_t)_l^2}{\sum_l (H_i)_l^2} \quad (3-3)$$

其中 E_s 為能量衰減率， H_t 為系列潛堤堤後方某一格點相對的波高值， $l=1,2,\dots,n$ 為格網點編號。下面針對堤頭繞射效應佈置平面三維系列潛堤地形，主要研究的影響因子為潛堤堤長 G 及縱向堤距 S_G ，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。

其它布拉格共振機制影響因子的設置，本研究參考 Wen and Tsai⁵¹ (2007) 於 China Ocean Engineering 所發表的研究成果作為參考依據，則固定相對水深為 $D/h=1/2$ ，相對堤寬為 $B/S=1/3$ ，潛堤個數 $N=4$ ，潛堤形式則固定為矩形以方便討論。其中表 3-1 為所進行之各項模擬條件。茲將計算結果討論如下：

表3-1 數值模擬之平面系列潛堤佈置

潛堤型式	個數 N	組數 N_G	D/h	B/S	G/S	S_G/G
矩形	4	1,2	1/2	1/3	1、2、3、5、7	1/4
						1/2
						3/4
						1
						3/2
						2
		1			∞	0

3.1.1 平面上潛堤長度 (G) 的影響

本小節以討論二維平面上潛堤長度之影響為主，故以佈置單組系列潛堤為基礎，考慮在不同堤長下，所產生影響。其中堤長 G ，波浪入射波高 $H_i=0.02\text{m}$ ，週期則隨著不同的 $2S/L$ 而改變，地形佈置示意圖如圖 3-1 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 $B/S=1/3$ 、相對堤高 $D/h=1/2$ 、潛堤組數 $N_G=1$ 、相對堤長 $G/S=1、2、3、5、7$ 及 ∞ 。計算領域大小為 $35\text{m}\times 46.8\text{m}$ ，所採用格網間距為 $\Delta x=\Delta y=0.1\text{m}$ ，計算所需的格點為 351×469 ，每個地形所計算的波浪條件則為 $2S/L=0.05\sim 3.00$ ，每間格 0.5 計算一個方案，則相當於每一個地形計算 60 個方案。

圖 3-2 ~ 圖 3-7 為水平底床上佈置相對堤長分別為 $G/S=1、2、$

3、5、7 及 ∞ ，相對水深為 $D/h=1/2$ ，相對堤距 $B/S=1/3$ ，潛堤個數 $N=4$ ，潛堤組數 $N_G=1$ ，波浪入射條件為 $2S/L=0.9$ 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 3-2 所示。圖 3-3 ~ 圖 3-7 顯示，在共振條件下，當佈置較長的潛堤，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 3-8 為水平底床上佈置相對堤長分別為 $G/S=1、2、3、5、7$ 及 ∞ ，相對水深為 $D/h=1/2$ ，相對堤距 $B/S=1/3$ ，潛堤個數 $N=4$ ，潛堤組數 $N_G=1$ 時，能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 的關係圖。由圖中可以明顯看出在主頻附近，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，而在次階頻的部分也有二次共振的現象產生。而愈靠近長波浪週期也就是 $2S/L$ 較小處，能量衰減受到堤長的影響越大，其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變越小，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，但當 $2S/L>1.5$ 左右時，能量衰減卻隨著堤長的減少而略有遞減，且當 $G/S=1$ 時急遽減少，可能的主要原因應為當堤長變短，而波長也越短時，波浪受堤頭繞射的影響越大，故能量也因此衰減更多。綜合觀之，主頻布拉格共振的機制隨潛堤長度的減小而遞減的幅度，大於次頻共振。其原因為主頻布拉格共振現象產生時，較長週期的波浪不易減衰且較容易繞射進入潛堤佈置區，進而影響布拉格反射的機制所致。而當波浪為高頻時，由於波浪週期較短，受堤頭繞射的影響即越明顯，故能量衰減率隨相對堤長

的增加而略有增加，而當 $G/S < 2$ 時因堤長過小導致堤後能量驟減。

圖 3-9 為共振現象 ($2S/L=0.9$) 與非共振現象 ($2S/L=1.5$) 的情況下能量衰減率 (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 ($2S/L=1.5$)，不管相對堤長為多少，其能量衰減率皆大於 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 $G/S > 5$ 波浪衰減率可達 0.5 以下，也就是能量將減少一半以上，並隨著相對堤長的增加會緩緩趨於一定值，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，使得能量衰減漸漸趨於一個定值。由此可知，潛堤堤頭繞射作用，影響布拉格反射效應甚大，且隨波浪週期增加，影響幅度愈趨明顯，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。

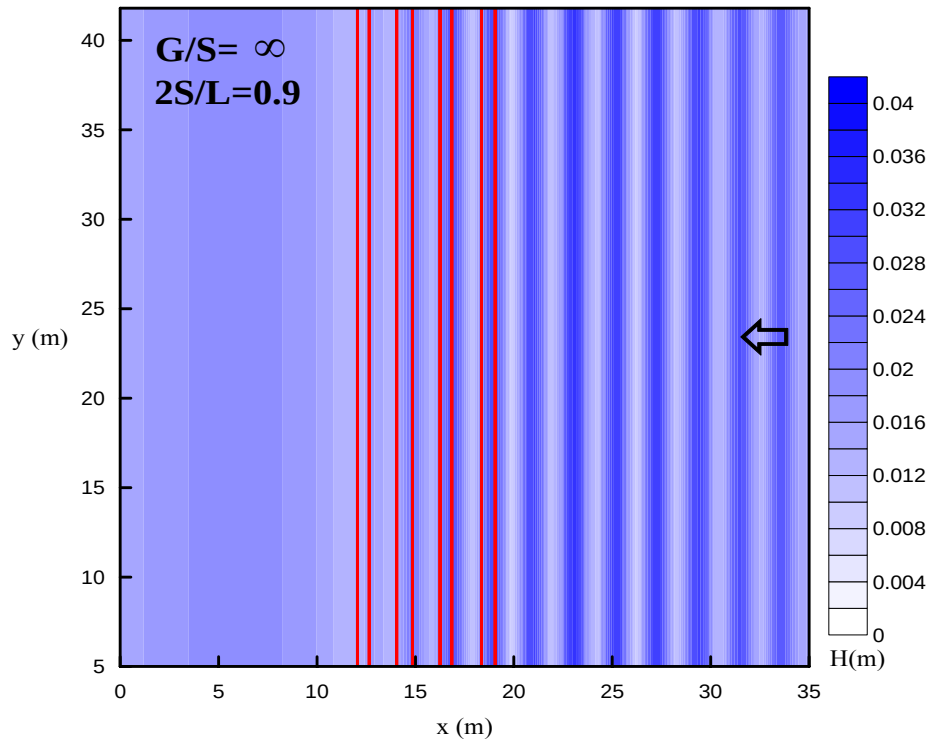


圖 3-2 波浪通過無限長系列潛堤之波高分佈圖

($N = 4$, $N_G = 1$, $D/h = 1/2$, $B/S = 1/3$, $2S/L = 0.9$, $G/S = N = \infty$)

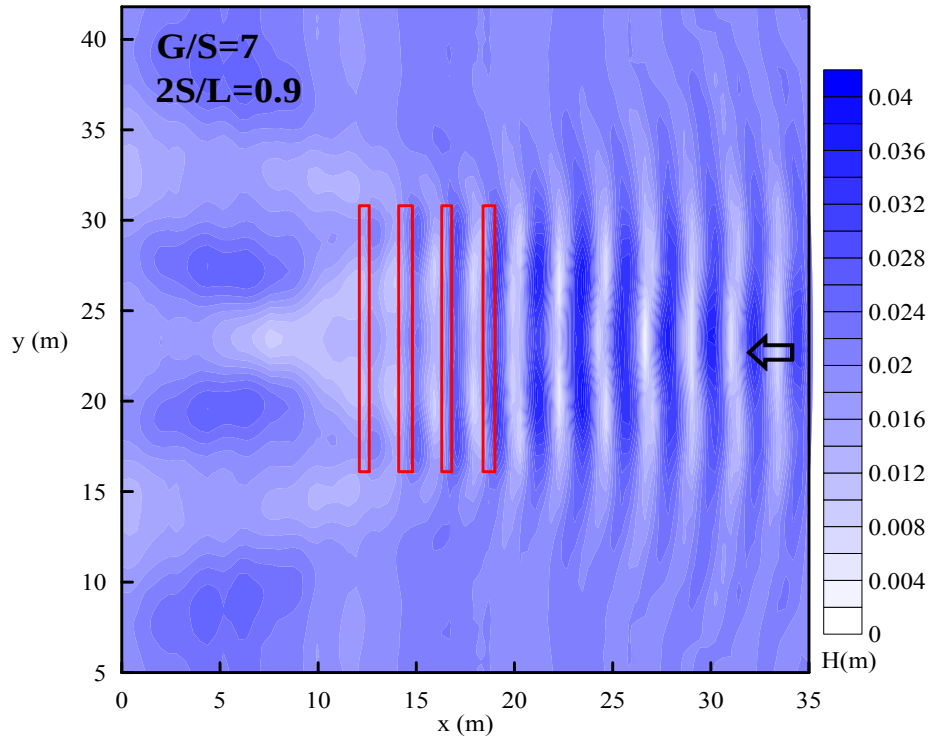


圖 3-3 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

($N = 4$, $N_G = 1$, $D/h = 1/2$, $B/S = 1/3$, $2S/L = 0.9$, $G/S = 7$)

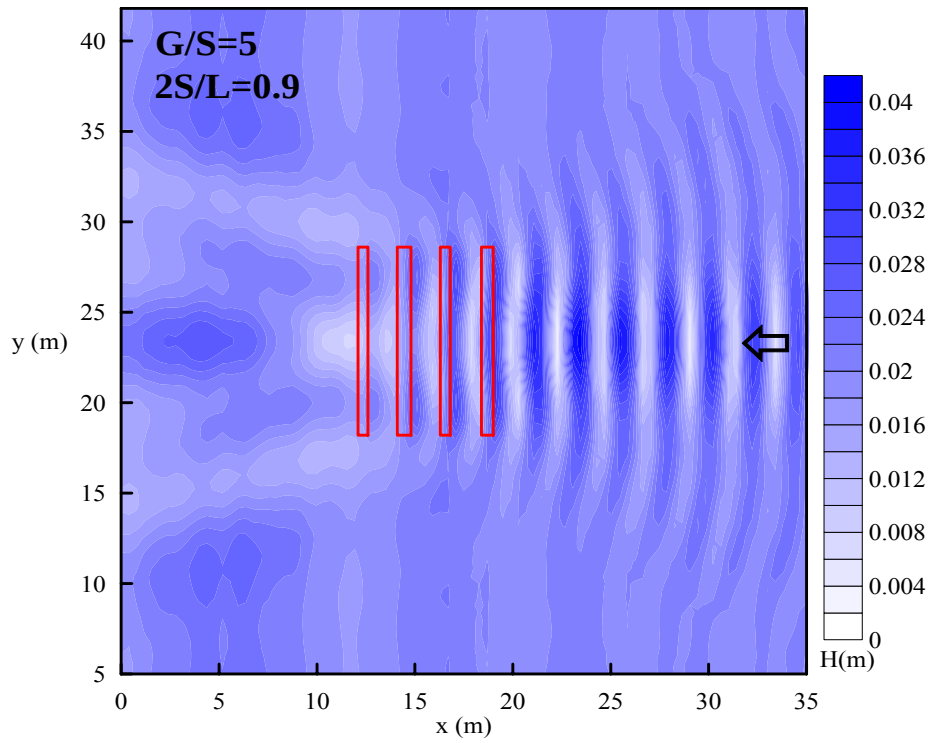


圖 3-4 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

($N = 4$, $N_G = 1$, $D/h = 1/2$, $B/S = 1/3$, $2S/L = 0.9$, $G/S = 5$)

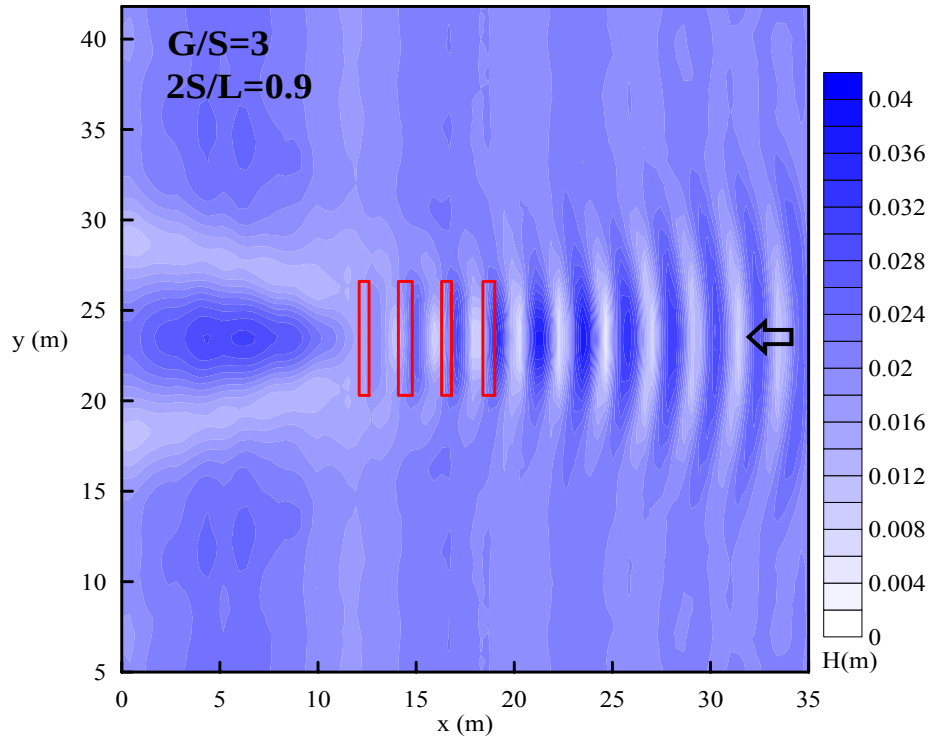


圖 3-5 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

($N = 4$, $N_G = 1$, $D/h = 1/2$, $B/S = 1/3$, $2S/L = 0.9$, $G/S = 3$)

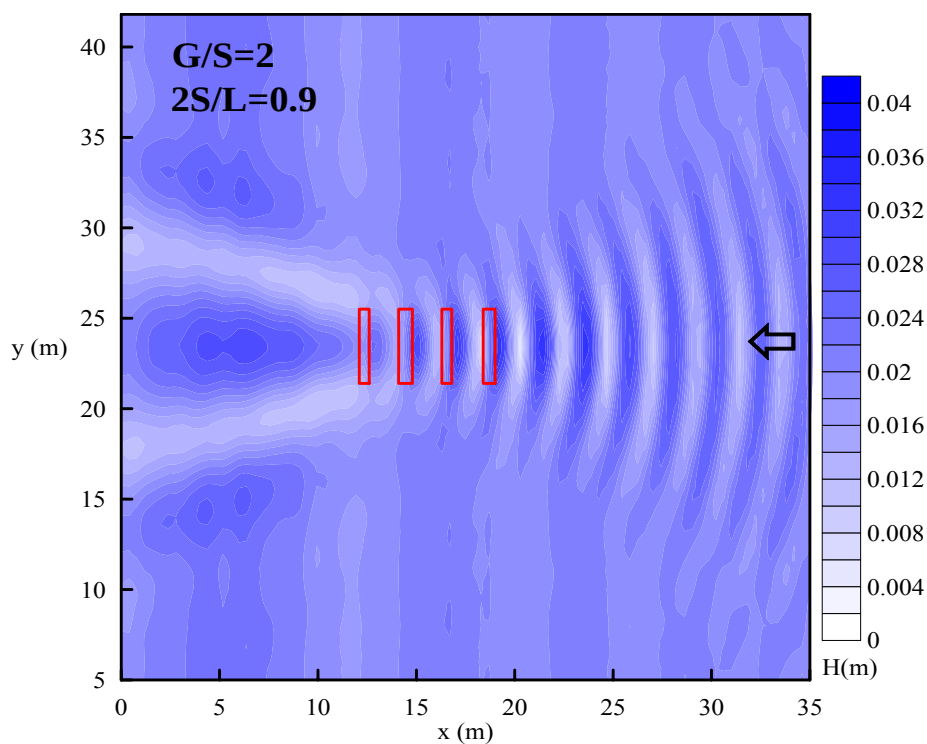


圖 3-6 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

($N=4$, $N_G=1$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$, $2S/L=0.9$, $G/S=2$)

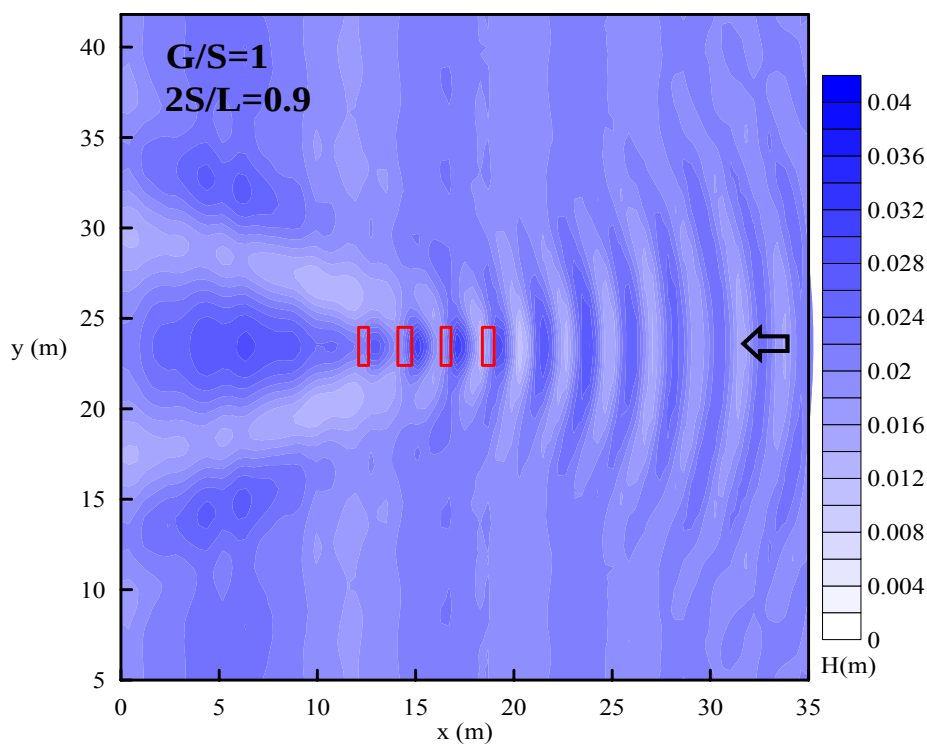


圖 3-7 波浪通過有限長系列潛堤之波高分佈圖

($N=4$, $N_G=1$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$, $2S/L=0.9$, $G/S=1$)

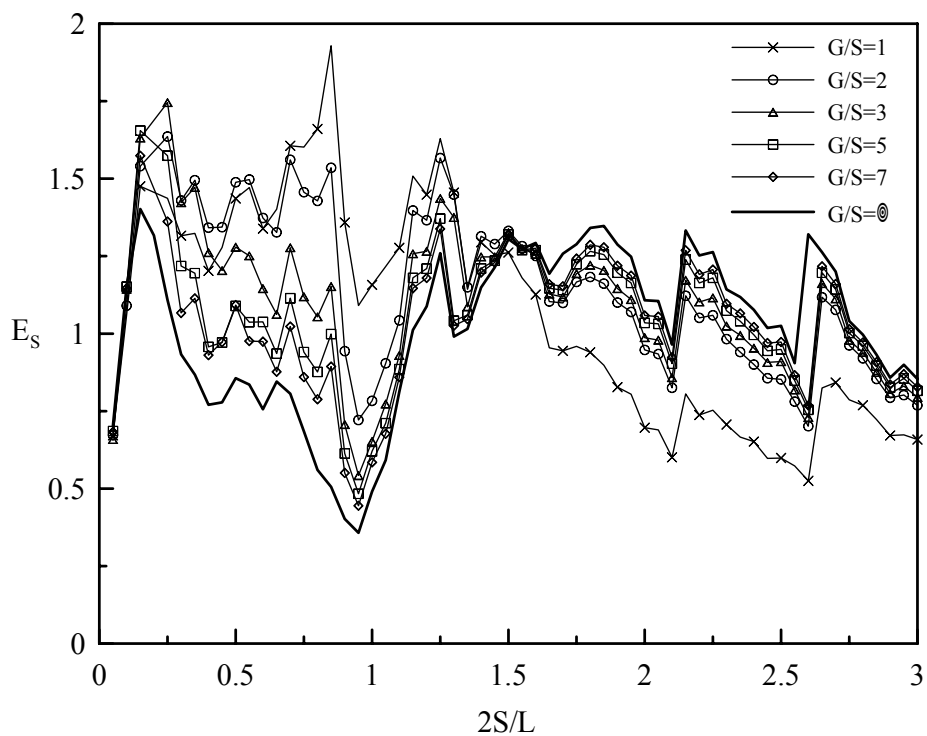


圖 3-8 不同潛堤堤長能量衰減率 E_s 與 $2S/L$ 關係圖
($N=4$, $N_G=1$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$)

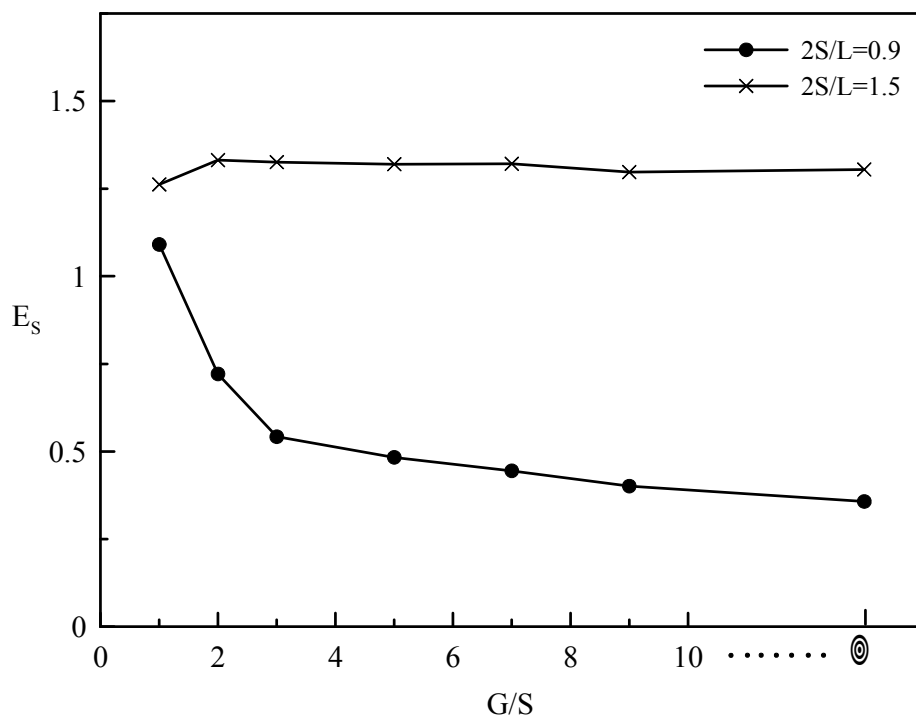


圖 3-9 共振現象 ($2S/L=0.9$) 與非共振現象 ($2S/L=1.5$) 情況下
能量衰減率(E_s)與相對堤長(G/S)關係分佈圖

3.1.2 平面上縱向堤距 (S_G) 的影響

本小節以討論二維平面上各組系列潛堤之間的距離之影響為主，故擬佈置雙組系列潛堤方式，將不同堤距列為評估對象。其中縱向堤距 S_G ，波浪入射波高 $H_i = 0.02\text{m}$ ，週期則隨著不同的 $2S/L$ 而改變，地形佈置示意圖如圖 3-1 所示。其他佈置條件為：水平底床上佈置潛堤個數 $N = 4$ 、相對堤距 $B/S = 1/3$ 、相對堤高 $D/h = 1/2$ 、潛堤組數 $N_G = 2$ 、相對堤長 $G/S = 1、2、3、5、7$ 及 ∞ 、縱向堤距 $S_G/G = 1/4、1/2、3/4、1、3/2、2$ ，如表 3-1 所示。計算領域大小為 $35\text{m} \times 90\text{m}$ ，所採用格網間距為 $\Delta x = \Delta y = 0.1\text{m}$ ，計算所需的格點為 351×901 ，每個地形所計算的波浪條件則為 $2S/L = 0.25 \sim 2.50$ ，每間格 0.5 計算一個方案，則相當於每一個地形計算 45 個方案，總共計算 30 個地形，1350。

關於在計算堤後能量衰減率的格點擷取上，本研究採用兩個位置來進行比較，一為系列潛堤組與組之間的位置，另一個為一組堤長一組堤距的位置，如下圖 3-10 所示，分別稱之為 S1 位置與 S2 位置。圖 3-11A~圖 3-11E 分別為水平底床上佈置相對堤長為 $G/S = 1、2、3、5、7$ ，相對水深為 $D/h = 1/2$ ，相對堤距 $B/S = 1/3$ ，潛堤個數 $N = 4$ ，潛堤組數 $N_G = 2$ 時，改變縱向堤距下 S1 位置之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖。由各圖可以發現，不管 G/S 為多少，在主頻部分整體的能量衰減率皆隨著 S_G/G 的增加而增加，也就是說當縱向堤距變大時，能量衰減較少。而在次階頻的部分當 G/S 大於 3 後，整體能量衰減率的趨勢則隨著 S_G/G 的減少而增加，其可能原因為當堤長較長，而組間距變大，則各組系列潛堤間相互的影響減小，而高頻波之波長較小，受堤頭繞射較大，而 S1 的位置謹代表兩組中間的波浪的能量，因此繞射強，中央的能量自然衰減較大。

圖 3-12A ~圖 3-12E 分別為水平底床上佈置相對堤長為 $G/S = 1、2、3、5、7$ ，相對水深為 $D/h = 1/2$ ，相對堤距 $B/S = 1/3$ ，潛堤個數 $N = 4$ ，潛堤組數 $N_G = 2$ 時，改變縱向堤距下 S2 位置之

能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖。由各圖可以發現，當同時以一堤一距的範圍比較能量衰減率時，不管 S_G/G 為多少，整體能量衰減率趨於穩定，且在主頻的部分隨著 S_G/G 的減少而遞減，說明當系列潛堤組距越小時，共振機制越完整。

圖 3-13A ~ 圖 3-13E 分別為當 $G/S=1、2、3、5、7$ 時，在 S2 位置共振現象 ($2S/L=0.95$) 與非共振現象 ($2S/L=1.5$) 之情況下能量衰減率 (E_S) 與相對組距 (S_G/G) 關係分佈圖。由圖中可以明顯觀察出當布拉格共振現象產生時 ($2S/L=0.95$)，不管相對組距為多少，其能量衰減率皆小於 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 3/4 能量衰減率有明顯遞減的現象，然而相較於堤長較長的方案， S_G/G 對於能量衰減的影響並不是很大，可能原因為當堤長夠長時，系列潛堤工法便具備了一定的消波能力，因此受到組距的影響相對之下變比較小，反之，當堤長較短時，系列潛堤佈置受組距的影響便較大。因此如何決定各組系列潛堤之間的組距，此部分的研究將提供一個良好的參考依據。

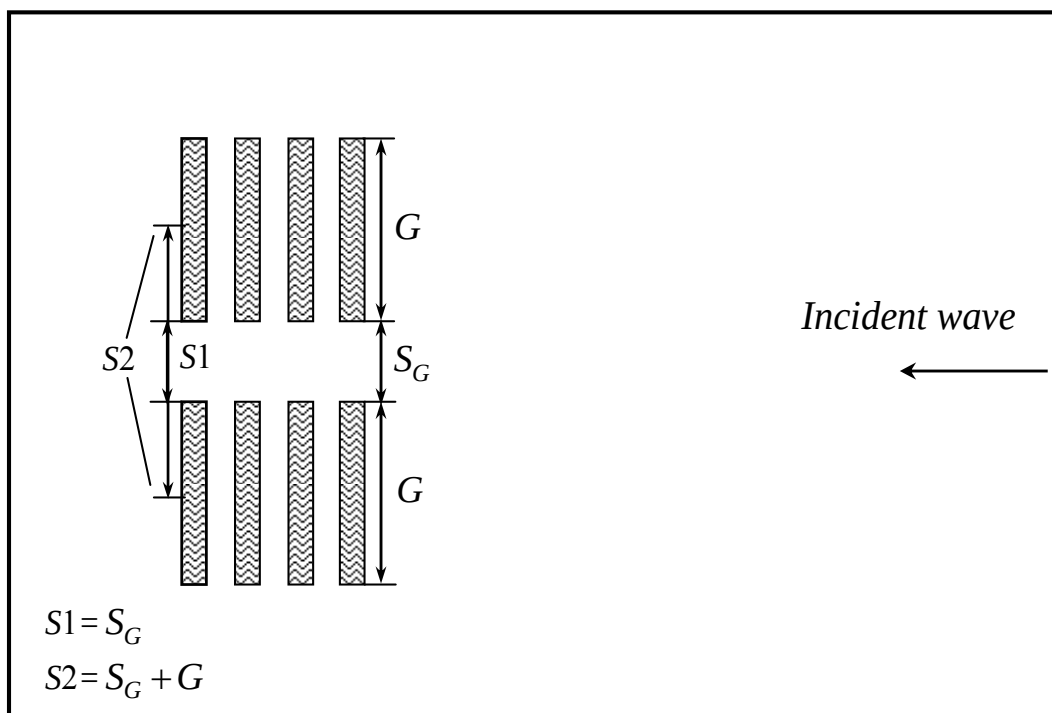


圖 3-10 多組系列潛堤佈置下比較能量衰減率縱向擷取範圍示意圖

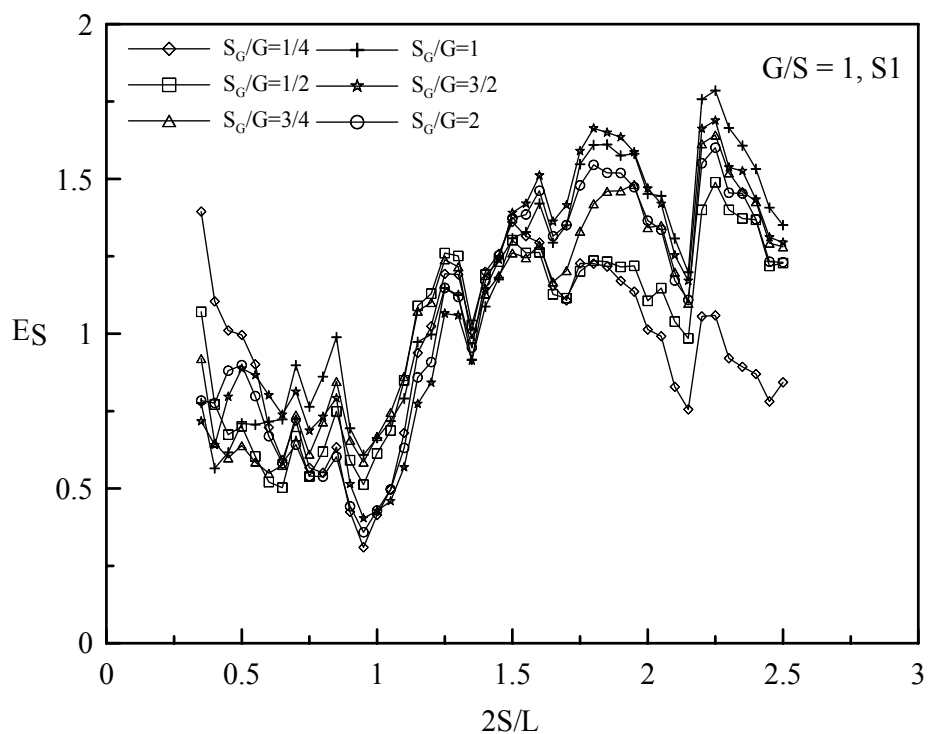


圖 3-11A 不同縱向堤距下 S1 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖
 ($N=4$, $N_G=2$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$, $G/S=1$)

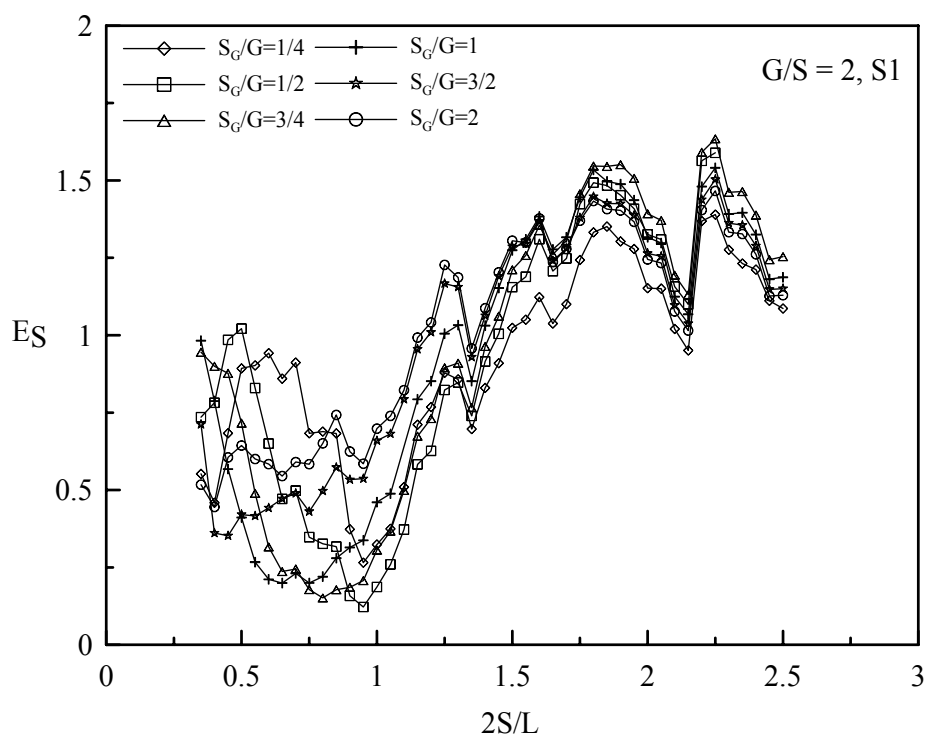


圖 3-11B 不同縱向堤距下 S1 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖
($N=4$, $N_G=2$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$, $G/S=2$)

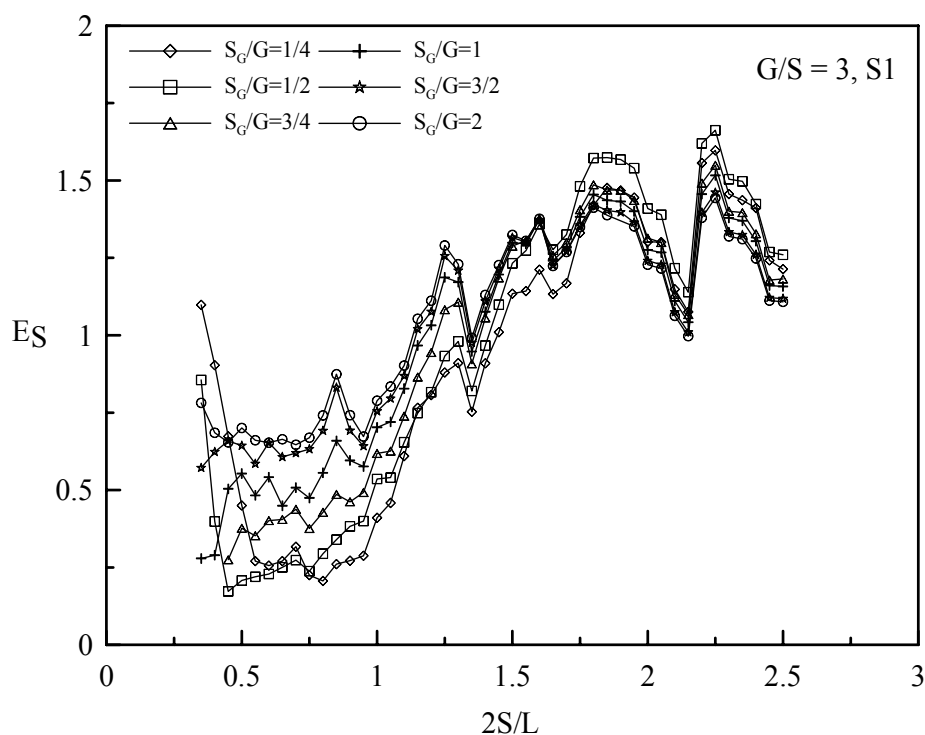


圖 3-11C 不同縱向堤距下 S1 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖
($N=4$, $N_G=2$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$, $G/S=3$)

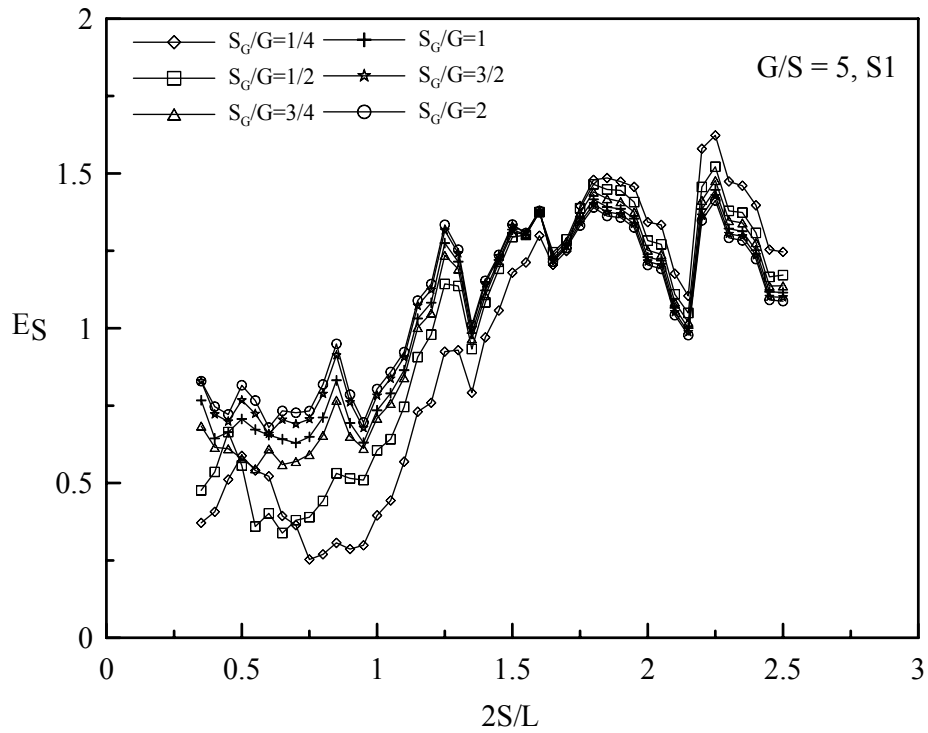


圖 3-11D 不同縱向堤距下 S1 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖
($N=4$, $N_G=2$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$, $G/S=5$)

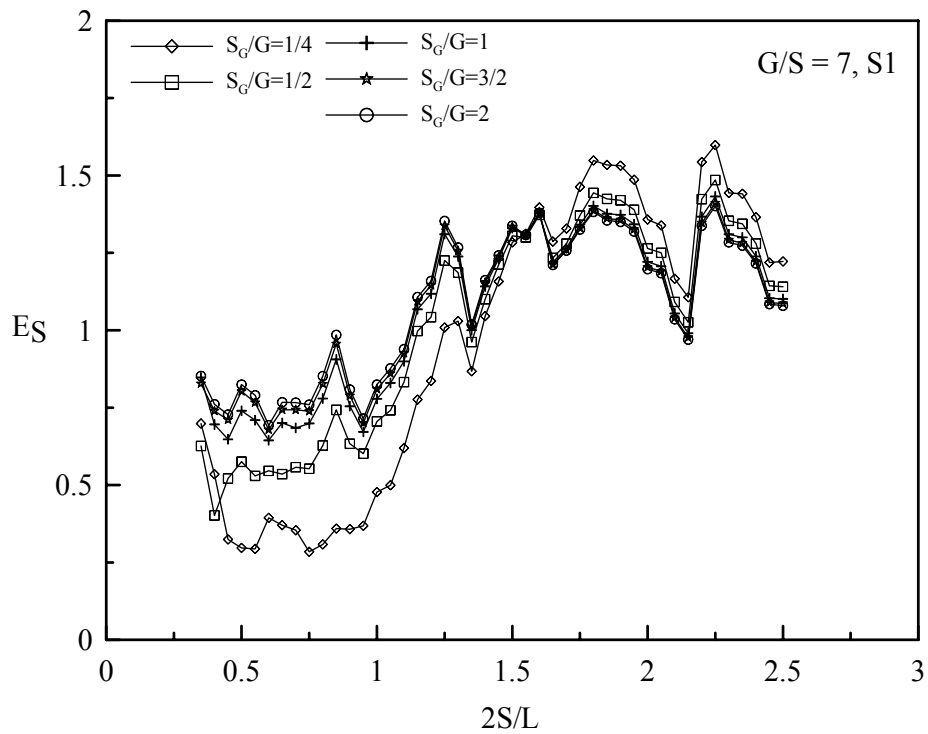


圖 3-11E 不同縱向堤距下 S1 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖
($N=4$, $N_G=2$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$, $G/S=7$)

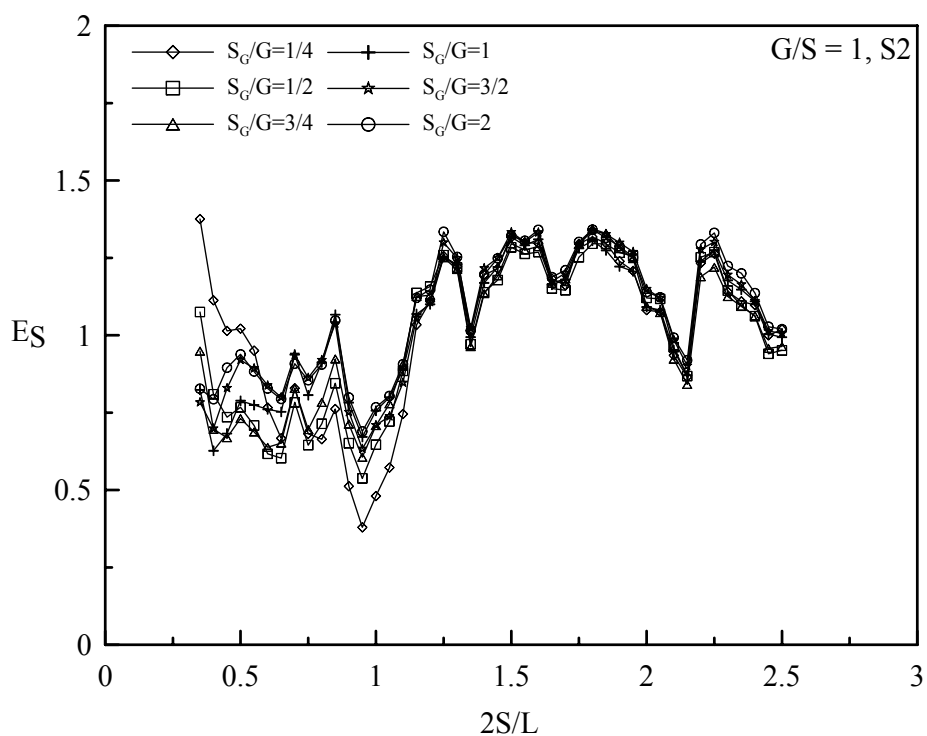


圖 3-12A 不同縱向堤距下 S2 之能量衰减率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖
($N=4$, $N_G=2$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$, $G/S=1$)

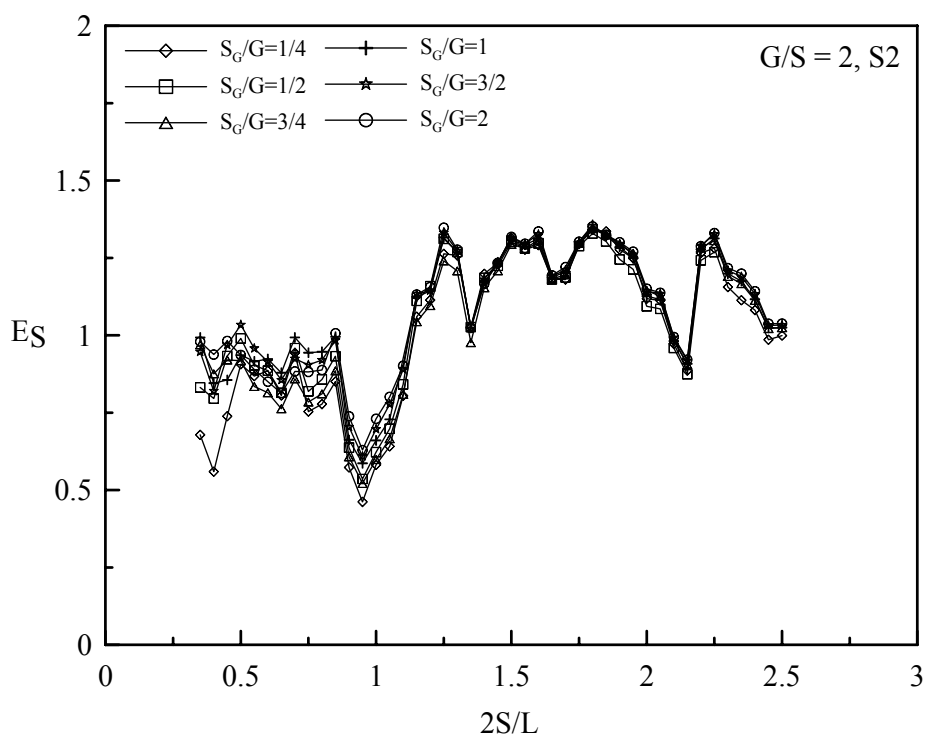


圖 3-12B 不同縱向堤距下 S2 之能量衰减率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖
($N=4$, $N_G=2$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$, $G/S=2$)

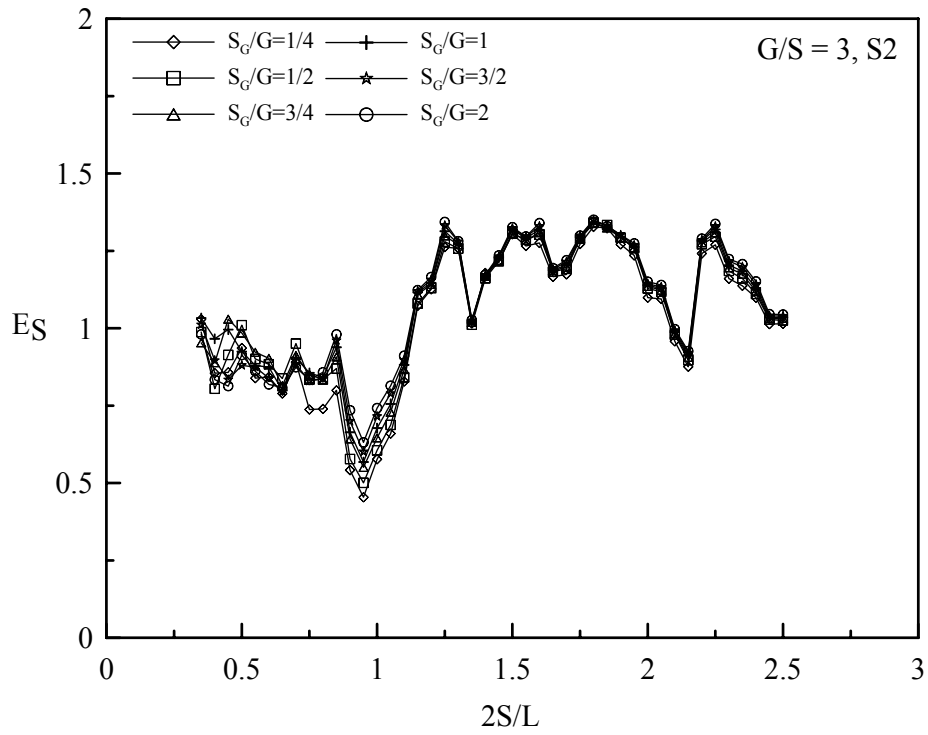


圖 3-12C 不同縱向堤距下 S2 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖
 $(N=4, N_G=2, D/h=1/2, B/S=1/3, G/S=3)$

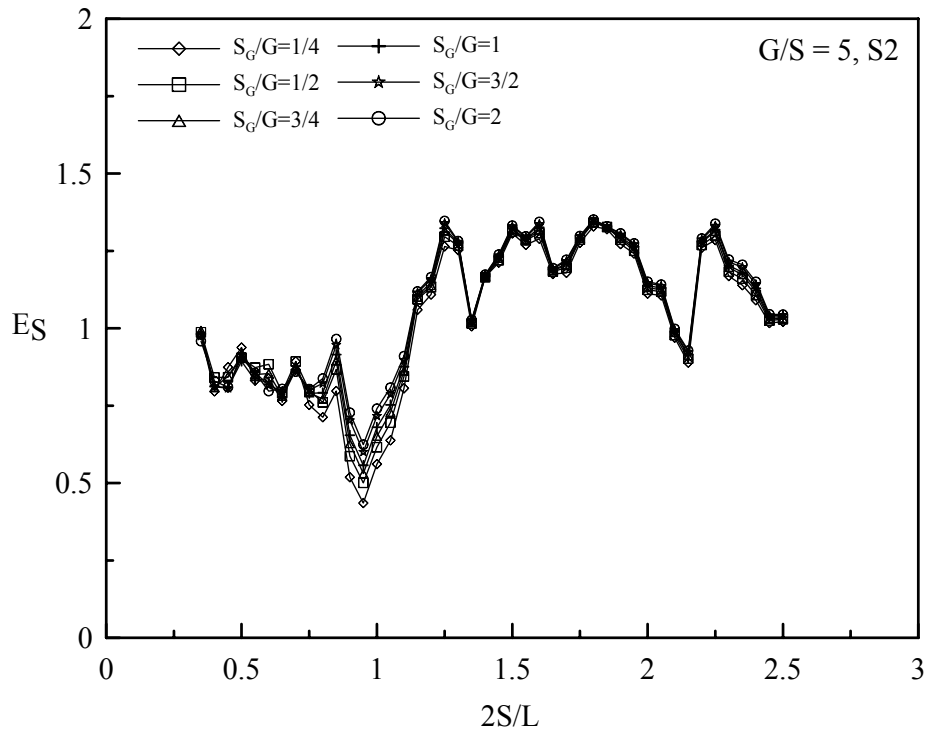


圖 3-12D 不同縱向堤距下 S2 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖
 $(N=4, N_G=2, D/h=1/2, B/S=1/3, G/S=5)$

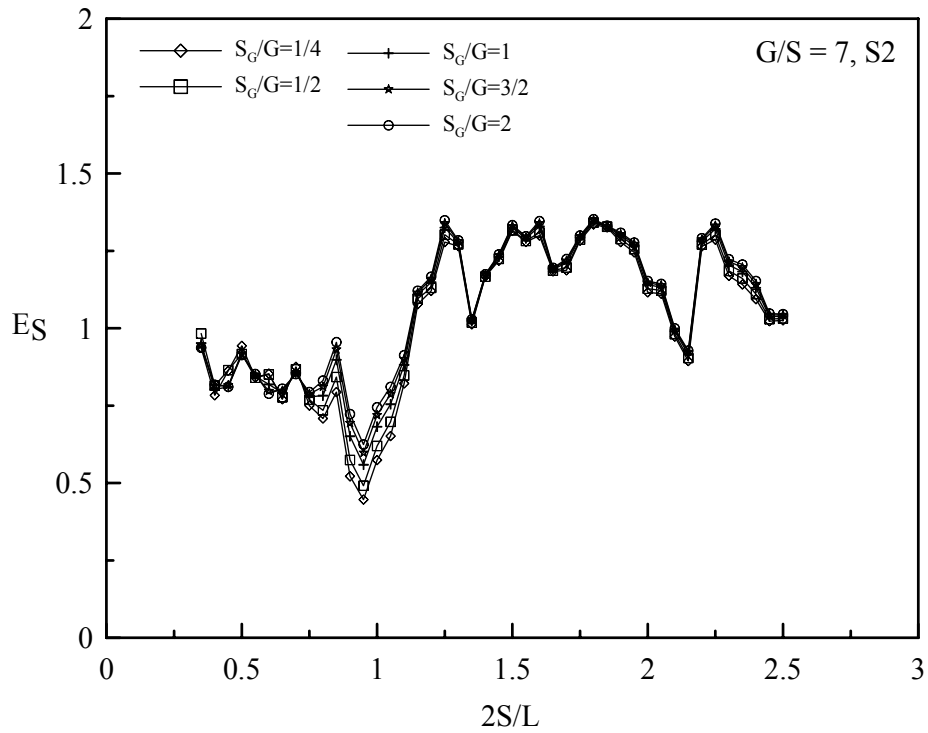


圖 3-12E 不同縱向堤距下 S2 之能量衰減率 E_S 與 $2S/L$ 關係圖
($N=4$, $N_G=2$, $D/h=1/2$, $B/S=1/3$, $G/S=7$)

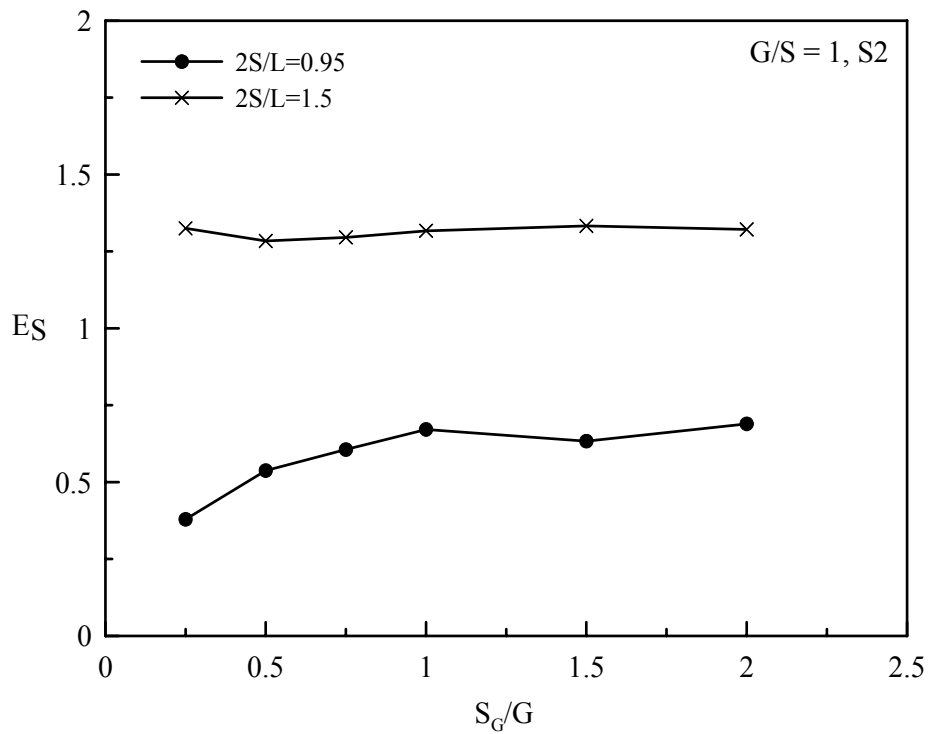


圖 3-13A $G/S=1$ 時，S2 位置共振現象 ($2S/L=0.95$) 與非共振現象 ($2S/L=1.5$) 情況下能量衰減率(E_S)與相對組距(S_G/G)關係分佈圖

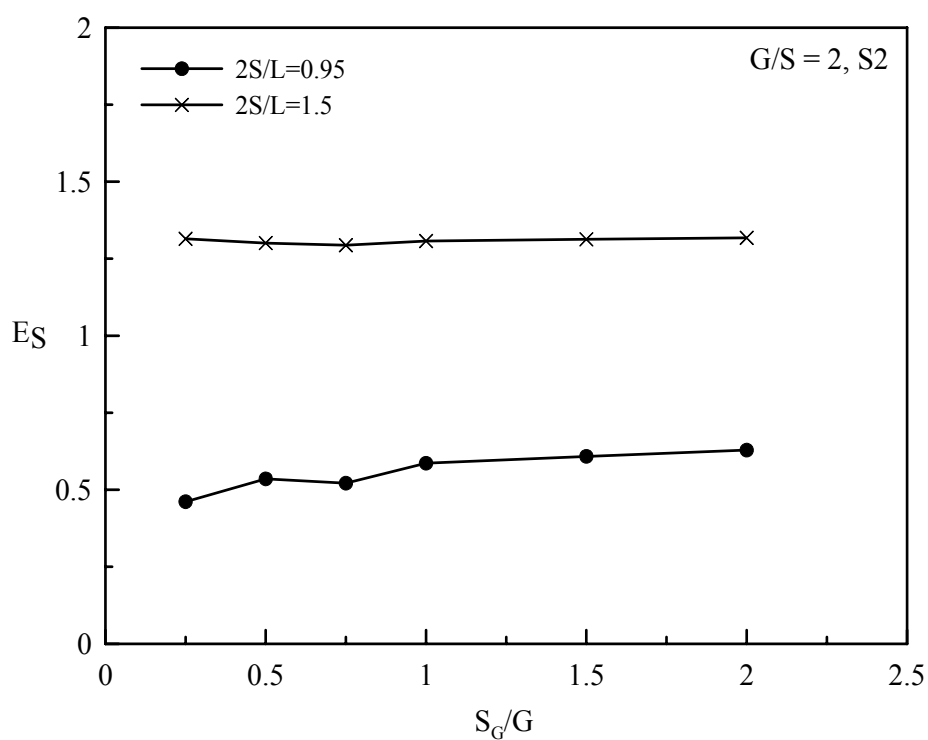


圖 3-13B $G/S = 2$ 時， $S2$ 位置共振現象 ($2S/L = 0.95$) 與非共振現象 ($2S/L = 1.5$) 情況下能量衰減率(E_S)與相對組距(S_G/G)關係分佈圖

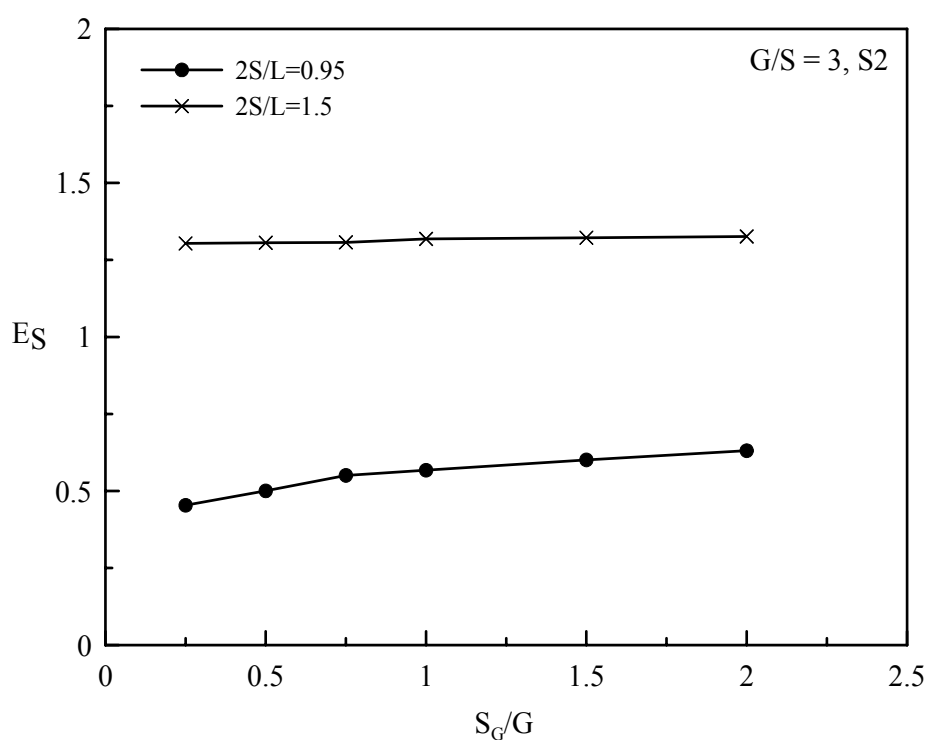


圖 3-13C $G/S = 3$ 時， $S2$ 位置共振現象 ($2S/L = 0.95$) 與非共振現象 ($2S/L = 1.5$) 情況下能量衰減率(E_S)與相對組距(S_G/G)關係分佈圖

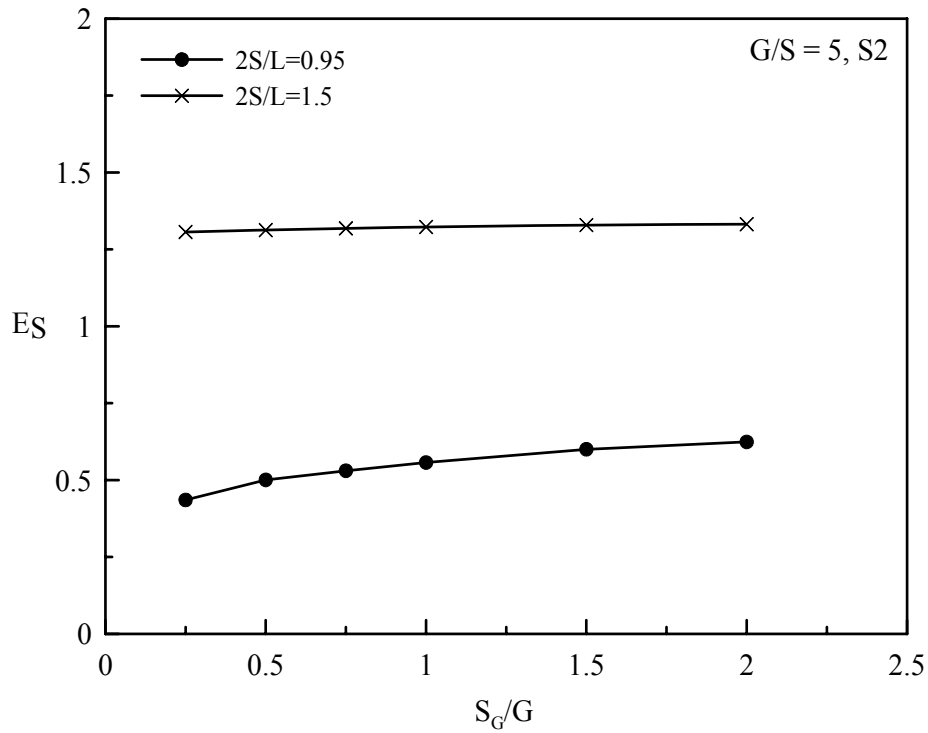


圖 3-13D $G/S = 5$ 時，S2 位置共振現象 ($2S/L = 0.95$) 與非共振現象 ($2S/L = 1.5$) 情況下能量衰減率(E_S)與相對組距(S_G/G)關係分佈圖

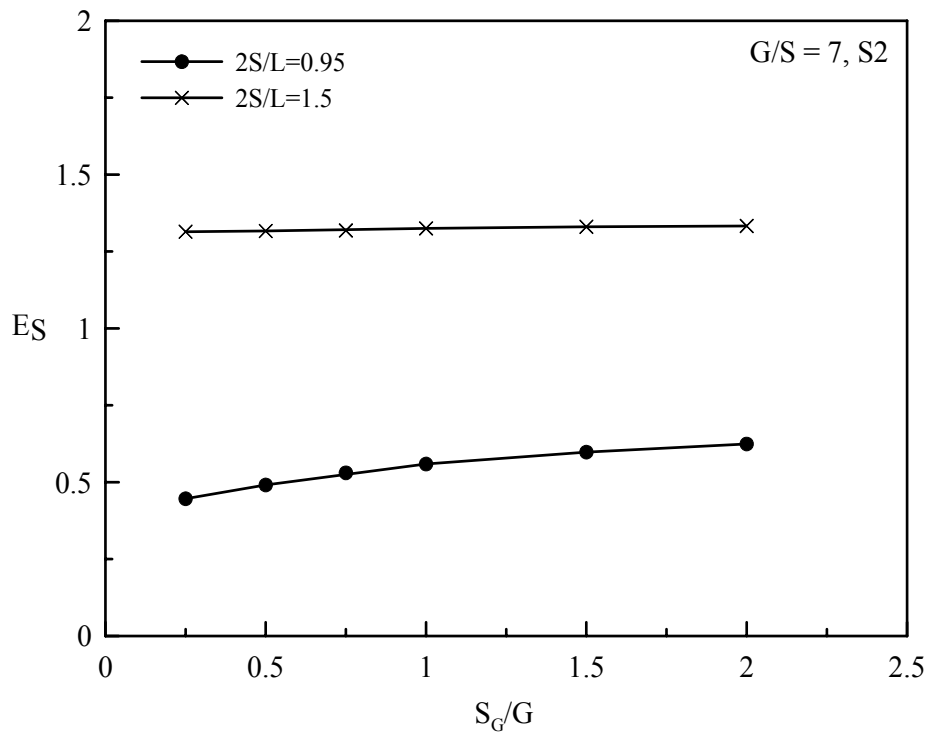


圖 3-13E $G/S = 7$ 時，S2 位置共振現象 ($2S/L = 0.95$) 與非共振現象 ($2S/L = 1.5$) 情況下能量衰減率(E_S)與相對組距(S_G/G)關係分佈圖

3.2 系列潛堤工法佈置設計流程

統合本研究前兩年度之結論與 Wen and Tasi (2007) 研究成果以及上述對於平面影響因子的探討，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。本小節即針對往昔學者的建議以及年度計畫研究的成果，歸納出系列潛堤工法初步設計流程圖，以期能作為現場施工的參考。

在經過許多斷面以及平面影響因子的測試後，證實初始系列潛堤佈置設計在所欲防禦波浪條件下，可得到最佳防禦效果，故不再重複作設計測試。若測試驗證結果，必須改變原初始設計條件，則必須重作堤距最佳化再次驗證測試。

根據以上研究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，則可先決定初步的堤距，在依照順序決定堤寬、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，其發生布拉格反射的範圍為現場所欲防禦的波浪條件。茲將上述設計步驟繪製成流程圖，如圖 3-24 所示。

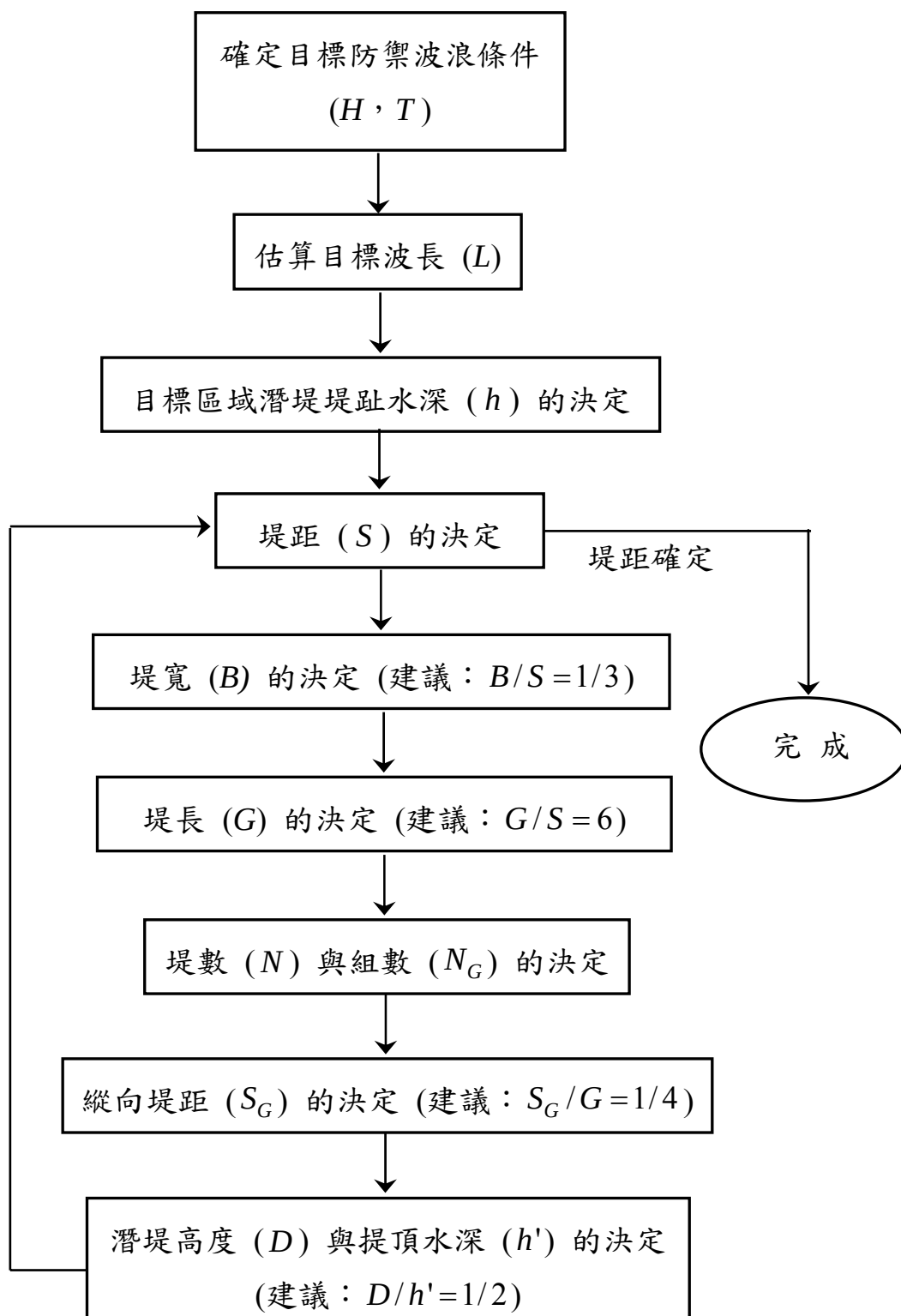


圖 3-14 佈置系列潛堤工法初步設計流程圖

第四章 系列潛堤應用於現場之初步研究

承襲本研究前兩年度之成果以及上一章對於波浪通過各式平面地形系列潛堤反射機制特性之研究，本章節欲將此保護工法實際應用於台灣現場海域，進而探討系列潛堤佈置於實際海域的可行性。由於考量施工便利以及地形因素的影響，本研究擬選取台灣西部新竹港南海域附近作為海岸保護工法規劃之初步研究區域。

4.1 新竹港南附近海岸現況

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 4-1（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砂源，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，同時也不能達到生態景觀與親水的多樣化目標。

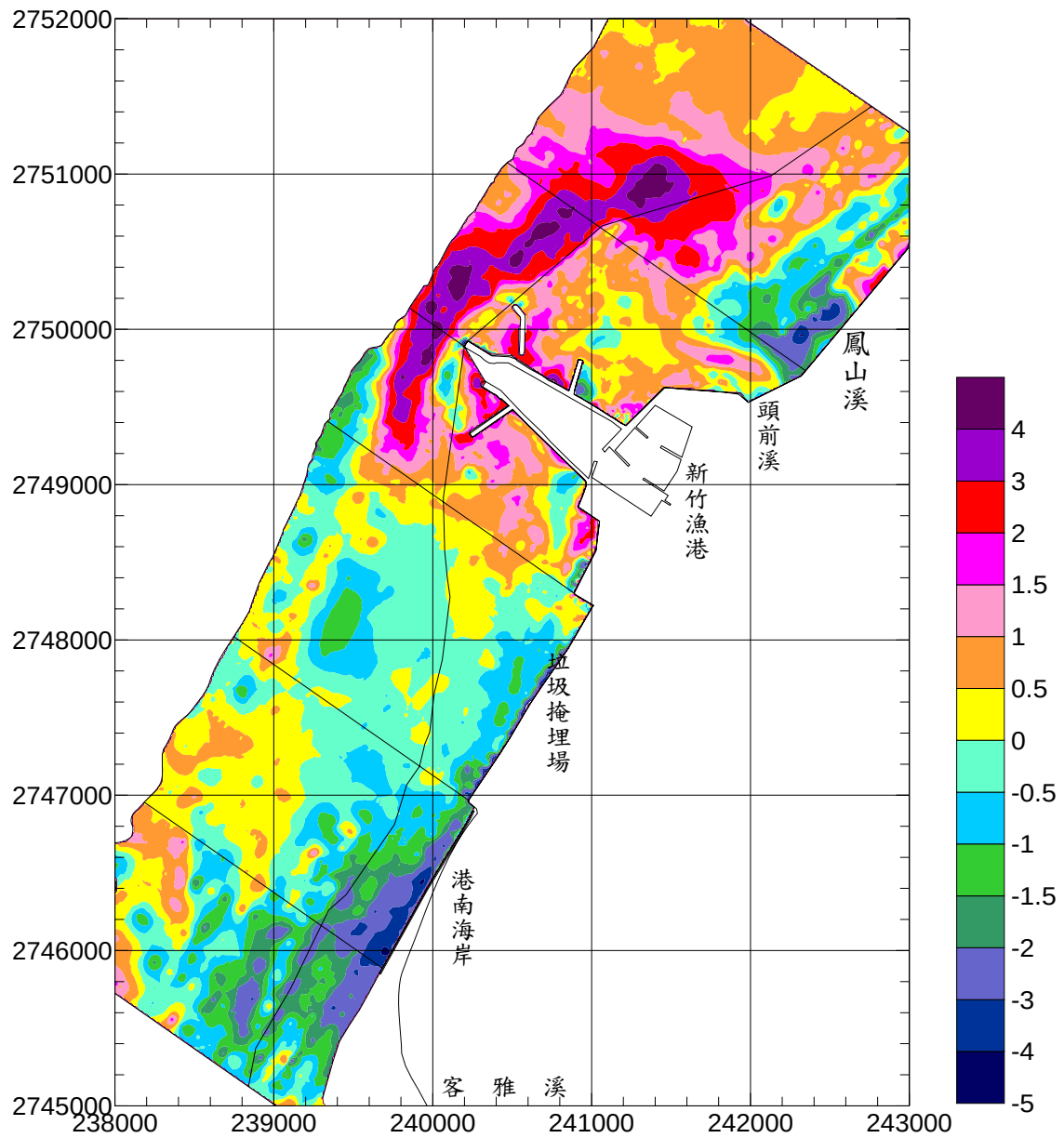
對於海岸防治應先瞭解地形變遷機制，並輔以適當之人工結構物，儘量利用波浪之特性，藉自然之力量達成平衡與防護目的。故在防護工法的規劃設計上，除了考量對波浪之防禦性外，隨著台灣生活品質的提升，應同時考慮海岸之親水性與景觀生態。然而往昔的研究顯示，系列潛堤之保護工法考慮到面的問題，除了可以有效改善海岸景觀外，亦可利用布拉格共振機制產生水牆，將多數的能量阻擋於外海，然而在施工甚至實際應用上，目前仍無詳盡的流程規劃，故本研究將以新竹港南海岸為案例，針對此進行初步的數值模擬以探討各方面之影響，進而規劃施工的可行性。

圖 4-2 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，由圖可見因海岸因北邊漁港防波堤攔阻砂源，且台灣地區於夏



資料來源：Google Earth

圖 4-1 新竹港南海岸平面位置圖



資料來源：中華顧問工程司

**圖 4-2 新竹港南附近海域地形侵淤變化圖
(87.09~94.04)**

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，作為現場地形之初步測試，歸納各影響因子，期望最終可繪製出設計佈置流程圖。

4.2 現場地影響因子之初步探討

本研究主要以佈置系列潛堤，針對造成海岸侵蝕的颱風波浪進行海岸保護工規劃設計，並探討颱風波浪防禦效果。系列潛堤佈置目標地為長年受到侵蝕之港南海岸，如圖 4-3 中之黃線區域所示。由圖 4-2 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。

本研究主要在系列潛堤保護工法之實際應用，故將針對造成海岸侵蝕的颱風波浪進行海岸保護工之規劃設計，由下表 4-1 資料顯示，考慮 10 年迴歸期之颱風波浪，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，水深地形則如下圖 4-3 所示，以 87 年 9 月量測的資料為依據。

為確認模式之可靠性，在進行現場平面佈置前，先對斷面水深佈置系列潛堤進行設計測試，探討其海岸保護效果。由圖 4-3 可知，在目標海域中除了北方新竹漁港防波堤為一個伸入海中之突出結構物，當波浪入射時受結構物繞射影響之外，在港南海岸附近地區，則

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，

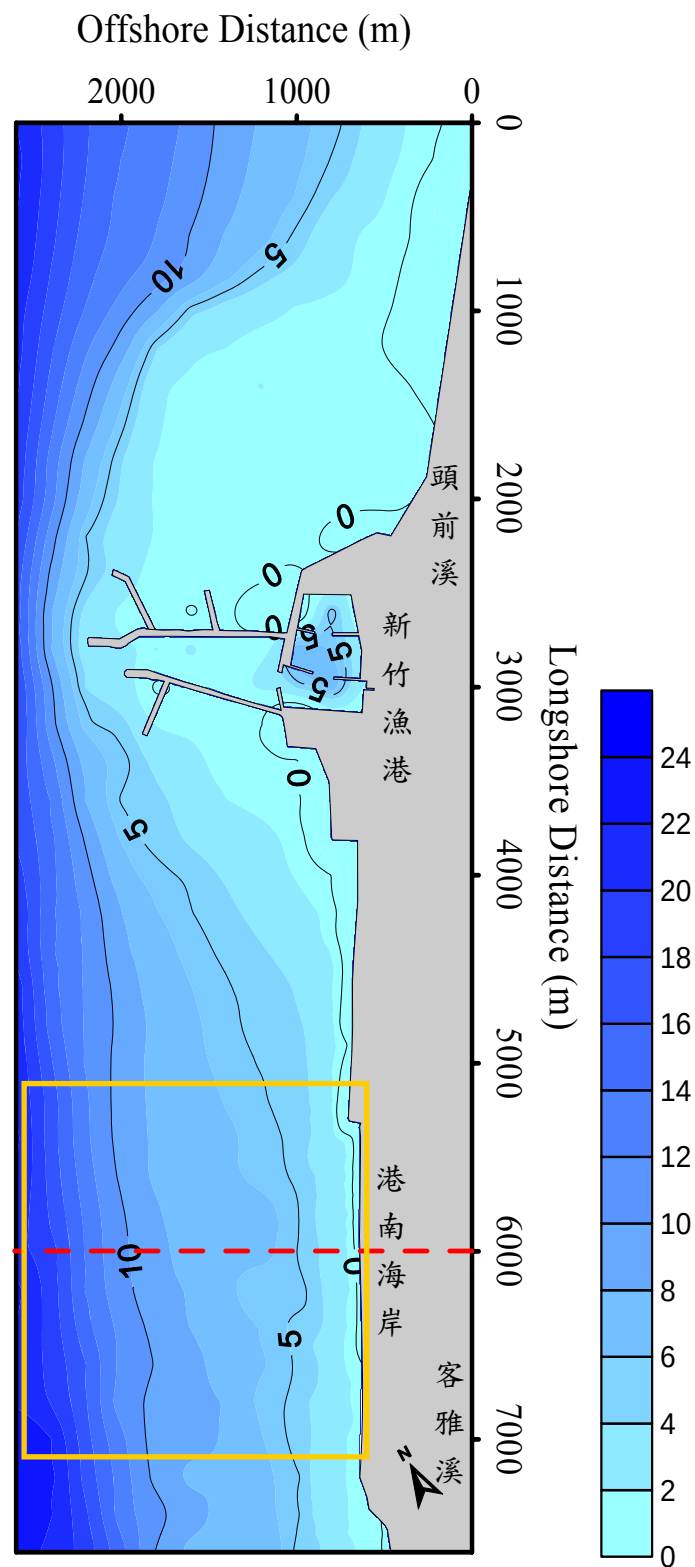
表 4-1 新竹港南海域之波浪條件資料表

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

選取的位置為 $Longshore\ distance = 6000m$ 斷面，座標示意圖如圖 4-3 所示。由於考量此為現場佈置，除了防禦性外，尚須考量漁船行進之安全性，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) 處作為佈置潛堤之水深。依據分散關係式 (dispersion relation) 深海入射波浪週期為 $T = 10.6sec$ ，則波長為 90m。根據布拉格反射原理，最大反射率發生於潛堤間距為波長之半附近，故本區布拉格反射可能發生在潛堤間距約為 $S \approx 45m$ 佈置條件。若假設潛堤堤寬為 $B = 10m$ ，下表 4-2 則為在不同之 $2S/L$ 下波浪條件的關係。

堤距 $S = 45m$ 及堤趾水深 $h = 8$ 初步決定後，在堤寬及堤高條件相同下，作不同的堤數 ($N = 2、4、6$) 反射率分析，圖 4-4 為不同的潛堤個數佈置，不同波浪週期的反射率變化圖，圖形顯示堤數為 $N = 4$ 及 $N = 6$ 佈置條件，在波浪週期為 $T = 6.4sec \sim 10.6sec$ 均能達到一定的反射效果，且尖峰值 $R > 0.55$ ，而潛堤個數 $N = 2$ 條件，發生布拉格反射極大值約為 0.5 左右，明顯略低於其他佈置，不適宜作海岸保護佈置。圖 4-5、圖 4-6 及圖 4-7 為不同堤數 ($N = 2、4、6$) 在入射波浪為週期 $T = 10.6sec$ 、入射波高 $H = 6.6$ 條件下的潛堤佈置及波高變化圖。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。



資料來源：中華顧問工程司

圖 4-3 新竹港南附近海域地形圖 (87 年 9 月實測)

表 4-2 不同的 $2S/L$ 下之相對週期波長

S	h	$2S/L$	L	T	S	h	$2S/L$	L	T
45	8	0.5	180	20.58	45	8	1.5	60	7.492
45	8	0.55	163.6	18.76	45	8	1.55	58.06	7.293
45	8	0.6	150	17.24	45	8	1.6	56.25	7.108
45	8	0.65	138.5	15.97	45	8	1.65	54.55	6.934
45	8	0.7	128.6	14.87	45	8	1.7	52.94	6.771
45	8	0.75	120	13.93	45	8	1.75	51.43	6.619
45	8	0.8	112.5	13.11	45	8	1.8	50	6.475
45	8	0.85	105.9	12.39	45	8	1.85	48.65	6.34
45	8	0.9	100	11.75	45	8	1.9	47.37	6.212
45	8	0.95	94.74	11.18	45	8	1.95	46.15	6.092
45	8	1	90	10.66	45	8	2	45	5.978
45	8	1.05	85.71	10.2	45	8	2.05	43.9	5.87
45	8	1.1	81.82	9.786	45	8	2.1	42.86	5.768
45	8	1.15	78.26	9.407	45	8	2.15	41.86	5.67
45	8	1.2	75	9.061	45	8	2.2	40.91	5.578
45	8	1.25	72	8.744	45	8	2.25	40	5.49
45	8	1.3	69.23	8.452	45	8	2.3	39.13	5.406
45	8	1.35	66.67	8.184	45	8	2.35	38.3	5.325
45	8	1.4	64.29	7.936	45	8	2.4	37.5	5.249
45	8	1.45	62.07	7.706	45	8	2.45	36.73	5.176

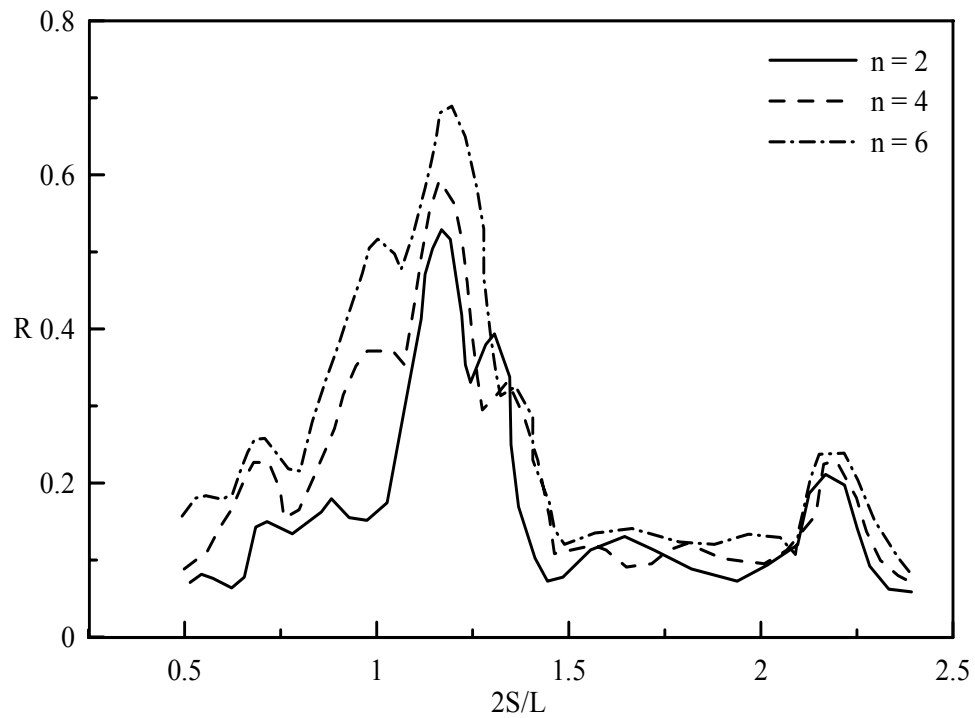


圖 4-4 不同的潛堤個數佈置下反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖

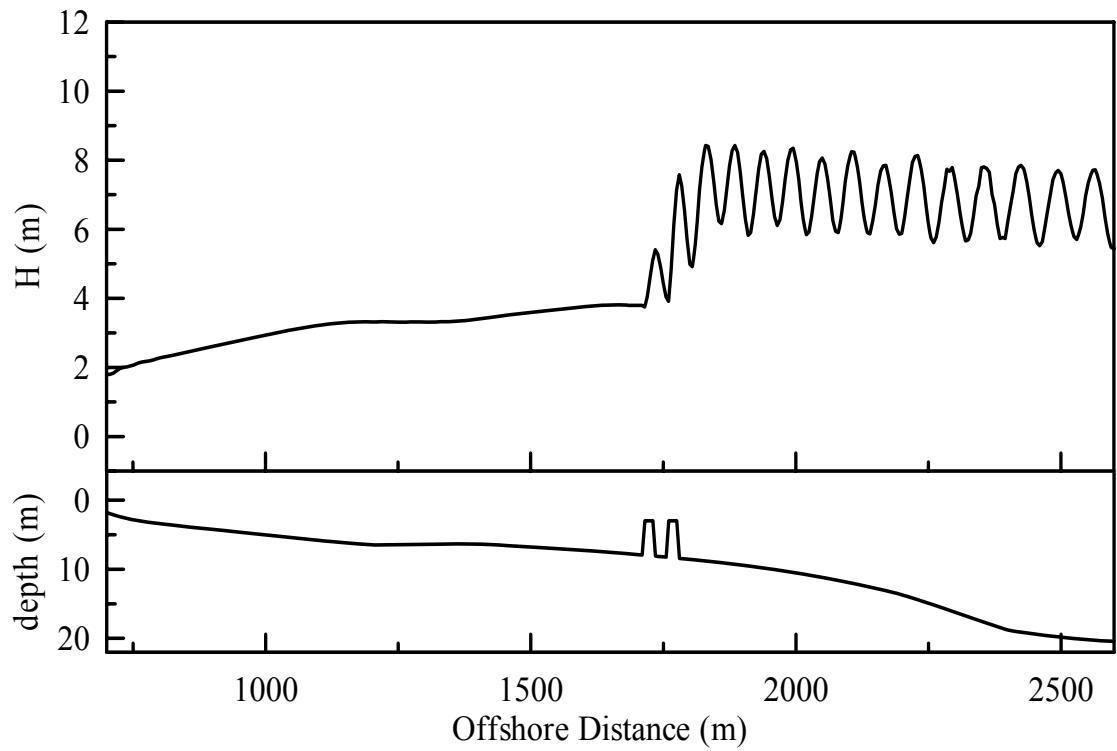


圖 4-5 潛堤堤數 $N = 2$ 佈置及波高變化圖

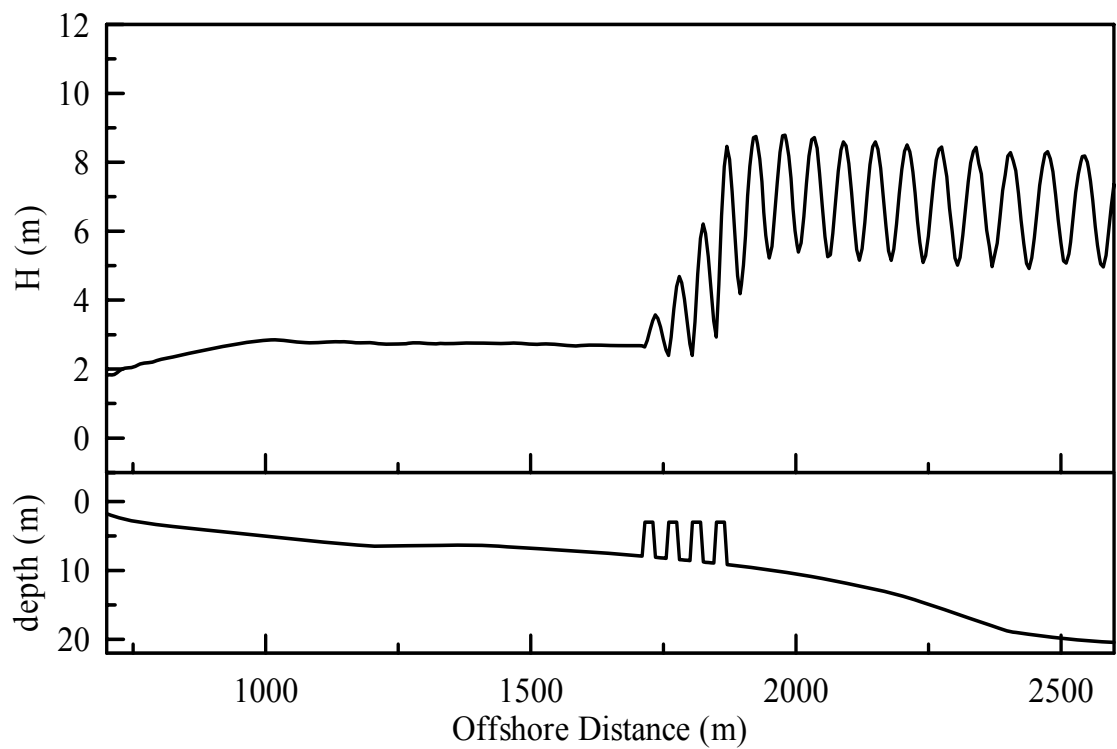


圖 4-6 潛堤堤數 $N = 4$ 佈置及波高變化圖

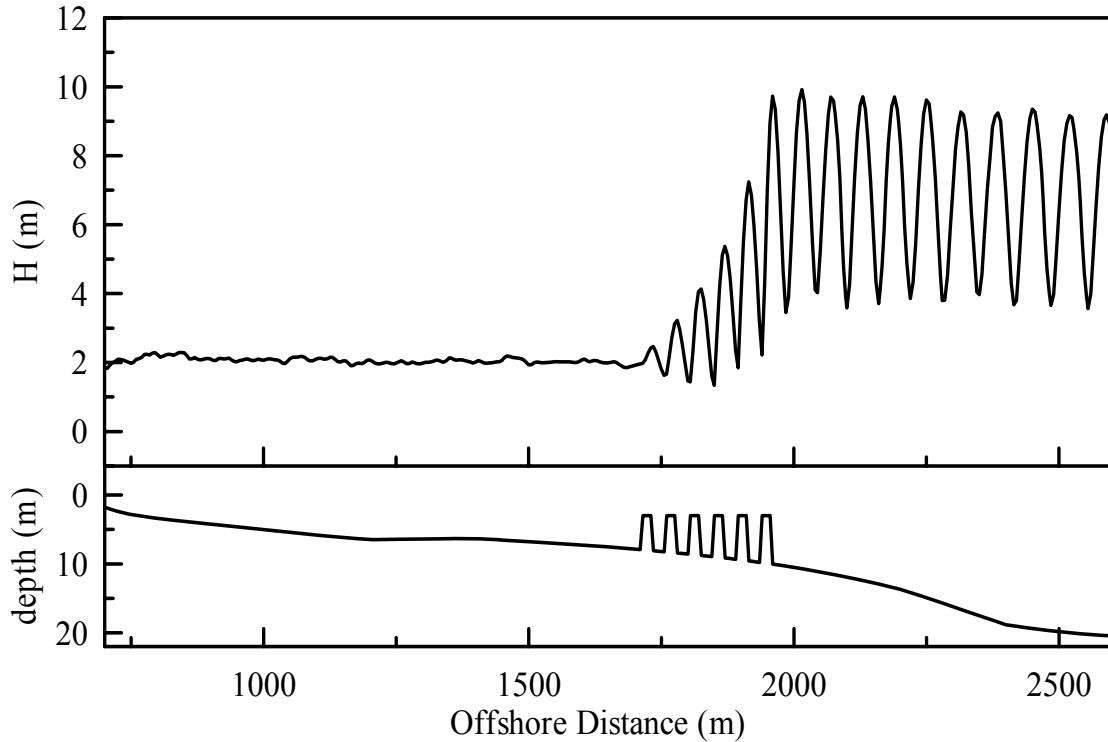


圖 4-7 潛堤堤數 $N=6$ 佈置及波高變化圖

4.3 EEMSE 模式於現場海域之波場計算

根據上面第三章之結果與上述斷面測試的成果，擬以平面佈置的方式應用於實際現場。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 $D/h=1/2$ ，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。依據分散關係式 (dispersion relation) 當深海入射波浪週期為 $T=10.6\text{sec}$ ，則波長約為 90m。根據布拉格反射原理，最大反射率發生於潛堤間距為波長之半附近，故本區布拉格反射可能發生在潛堤間距約為 $S \approx 45\text{m}$ 佈置條件。決定堤距 S 後，利用圖 3-14，其他佈置條件為潛堤個數 $N=4$ 、相對堤距 $B/S=1/3$ 、潛堤組數 $N_G=4$ 、相對堤長 $G/S=6$ 、相對縱向堤距 $S_G/G=1/4$ 。根據以上設計的結果，以實際現場條件為堤寬 $B=15\text{m}$ ，第一座潛堤水深 $h=8\text{m}$ (水位為 +1.93m 時)，依

序往深

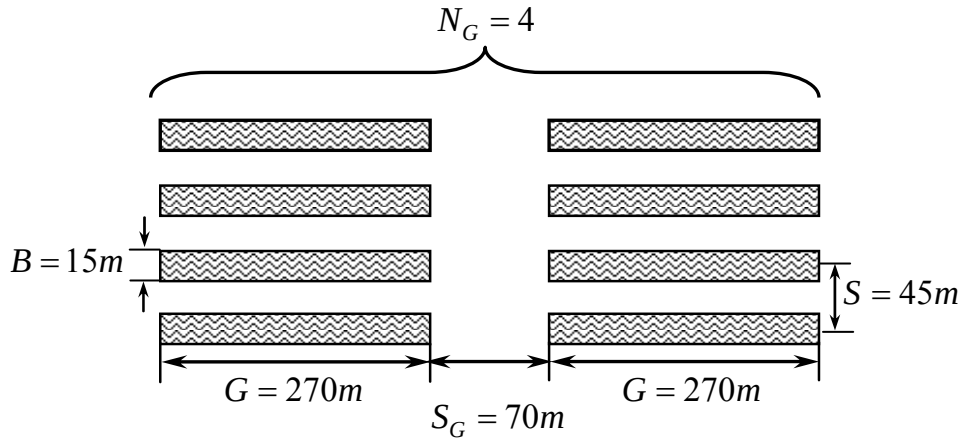


圖 4-8 系列潛堤平面佈置相關參數尺度示意圖

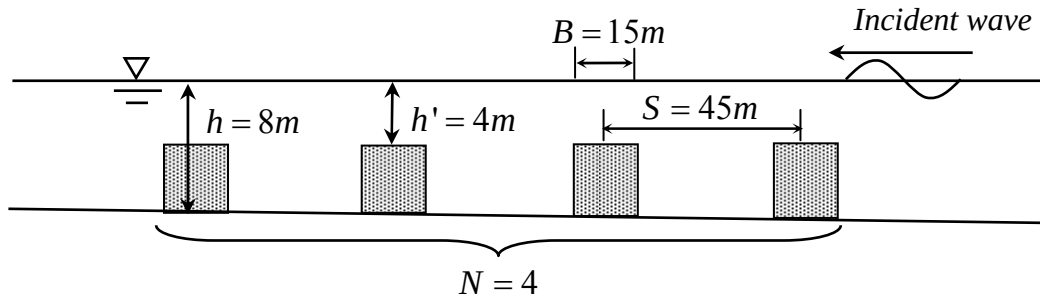


圖 4-9 系列潛堤斷面佈置相關參數尺度示意圖

水處佈置，堤頂水深保持 $h' = 4m$ ，潛堤長度 $G = 270m$ ，潛堤組數 $N_G = 4$ ，當縱向堤距 $S_G = 70m$ 平面佈置及斷面佈置示意圖如圖 4-8 及圖 4-9 所示。將以上條件佈置至港南附近海域，實際的佈置位置及水深變化如下圖 4-10。

數值模式之計算範圍如圖 4-10 所示，北起頭前溪出海口北側，南至客雅溪出海口，離岸約到水深 20m 處，面積為 $2.6 \times 7.6 \text{ km}^2$ 。波場數值格網採 $5m \times 5m$ 之矩形網格建構。依據所蒐集的海象資料分析，模式所採用之季風及颱風波浪輸入條件如表 4-1 所示。

圖 4-11(A)為未佈置系列潛堤工法夏季季風波浪作用下之平面波場分佈圖，圖 4-11(B)為佈置系列潛堤夏季季風波浪作用下之平面波場分佈圖。圖 4-12(A)為未佈置系列潛堤工法冬季季風波浪作用下之

平面波場分佈圖，圖 4-12(B)為佈置系列潛堤工法冬季季風波浪作用下之平面波場分佈圖。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。且雖然系離潛堤工法是針對颱風波浪條件下去設計，但對於季風時之波浪仍有阻擋的效果。又系列潛堤工法的設置目標防禦條件是以 10 年迴歸期的颱風作為基礎，但由波場分佈圖中仍可見到其對於季風波浪仍有防禦效果，雖無法達到一般離岸堤的功效但仍具有一定的消波能力。又在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與消波的效果出現。

圖 4-13(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 4-13(B)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 4-14(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 4-14(B)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。在颱風波浪作用下，由於 NNE 向颱風波浪之入射角度幾乎呈平行岸線，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。又於港南海岸佈置系列潛堤，使得堤後波高明顯降低，且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能性。

為更進一步確認系列潛堤工法是否適合應用於現場海域，本研究擷取各計算領域系列潛堤佈置區域之斷面波高進行比較，所擷取斷面如圖 4-10 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。下圖 4-15A 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 4-15B 為 10 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖。由圖中顯示不管斷面 1 或斷面 2 在 10 年迴歸期颱風波浪作用下波浪通過系列潛堤工法的佈置區後，波浪的能量明顯要比未設置時減小。而堤前的波高要比為設置系列潛堤時震盪的更加劇烈，顯示系列潛堤工法對於 10 迴歸週期波浪之防禦效果。圖 4-16A 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 4-16B 為 50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖。由圖中顯示 50 年迴歸週期之颱風波浪雖不是設置之目標防禦條件，但由表 4-2 的初略估算其波浪條件應在主頻範圍附近，故波浪經過系列潛堤設置區時能量還是有明顯衰減的線向，且在堤前亦有波浪震盪的現象，顯示系列潛堤工法除了可以防禦目標條件外，對於主頻附近的波浪亦有防禦的效果。圖 4-17 為夏季季風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖，由圖中顯示當波浪通過系列潛堤佈置時，波高驟減但靠近岸線約 600m 的地方波波卻遽增，可能原因為夏季季風波向恰好與系列潛堤佈置約略成平行且波浪條件座落在次諧共振條件附近，使得波浪通過後，系列潛堤佈置產生次諧共振現象而又因波長較短受到堤頭繞射效應影響較大，使得波浪於潛堤後方聚焦所致。圖 4-18 為冬季季風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖，由圖中顯示當波浪通過系列潛堤佈置時，波高略有降低而傳遞至近岸又略微增加，可能原因為波浪因地形佈置的影響，使得波浪部分能量被阻擋於結構物前方，而又因繞射效應影響導致近岸時波高略有聚焦的現象。

為探討新竹港南海岸實施系列潛堤保護工法之可行性，本研究擬以數值模式模擬計畫區附近海域之波場變化，期望可瞭解整個海域之特性，並進一步以此為參考依據。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。

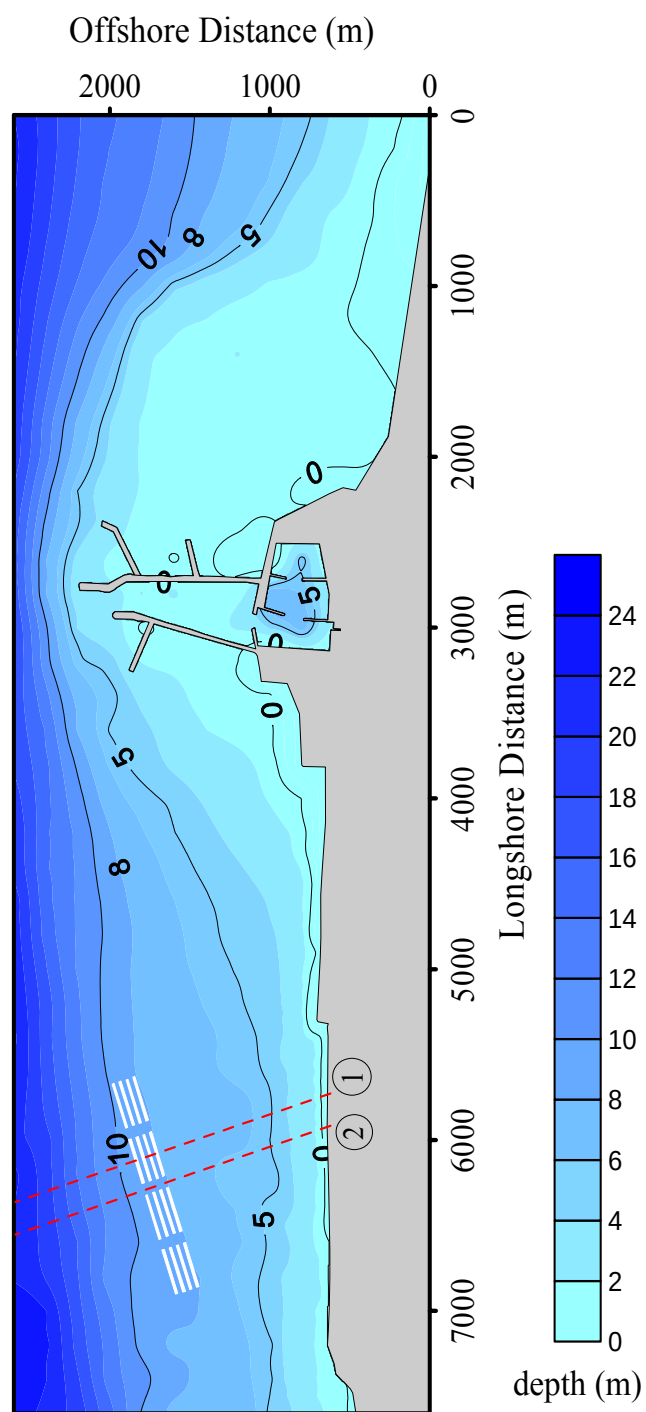


圖 4-10 港南海域附近系列潛堤佈置及斷面示意圖

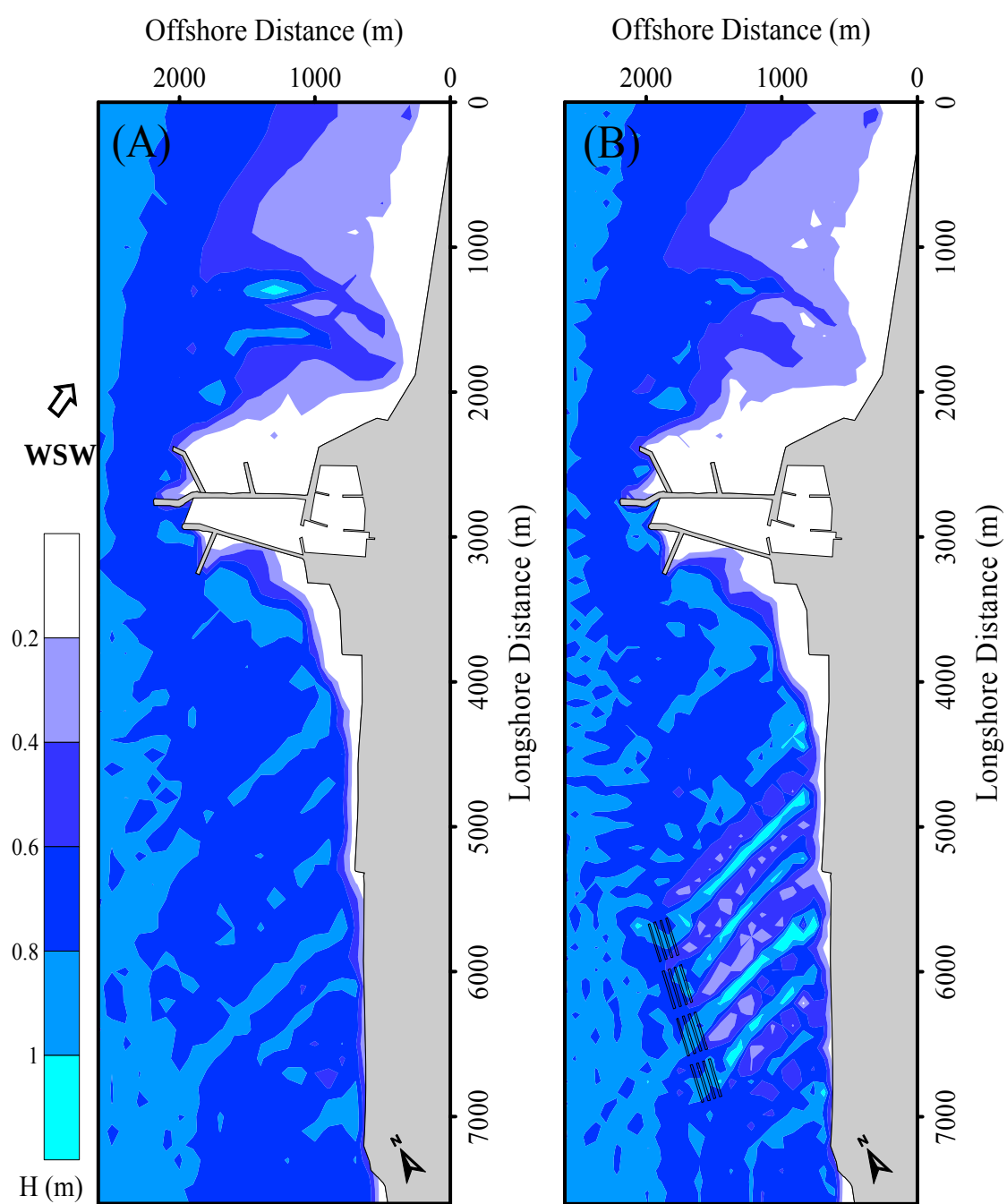


圖 4-11 夏季季風波浪作用下之波場分佈圖

(A) 無潛堤佈置 (B) 有潛堤佈置

($H=0.83\text{m}$, $T=4.95\text{sec}$, 波向 WSW)

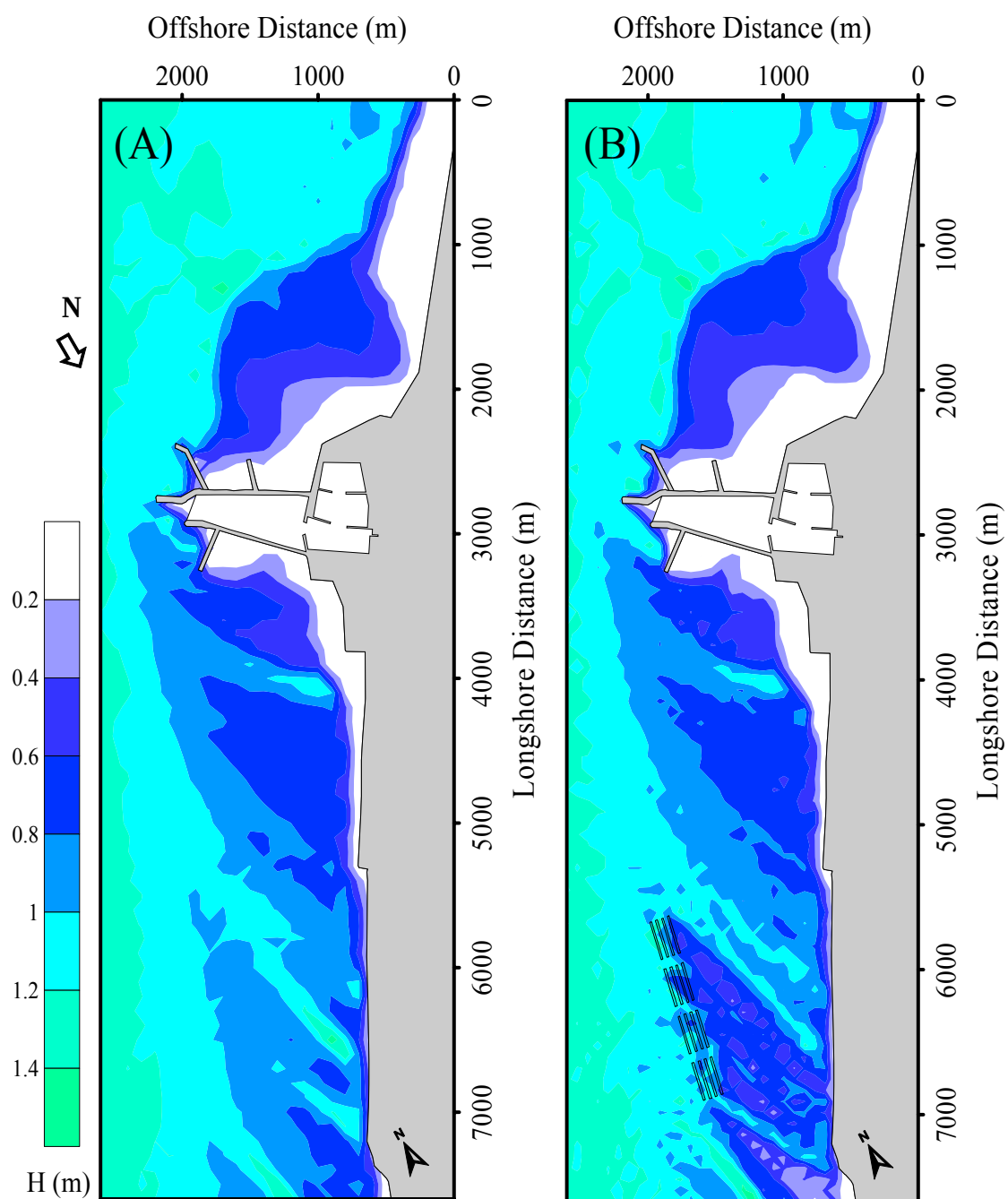


圖 4-12 冬季季風波浪作用下之波場分佈圖

(A) 無潛堤佈置 (B) 有潛堤佈置

($H=1.27\text{m}$, $T=5.28\text{sec}$, 波向 N)

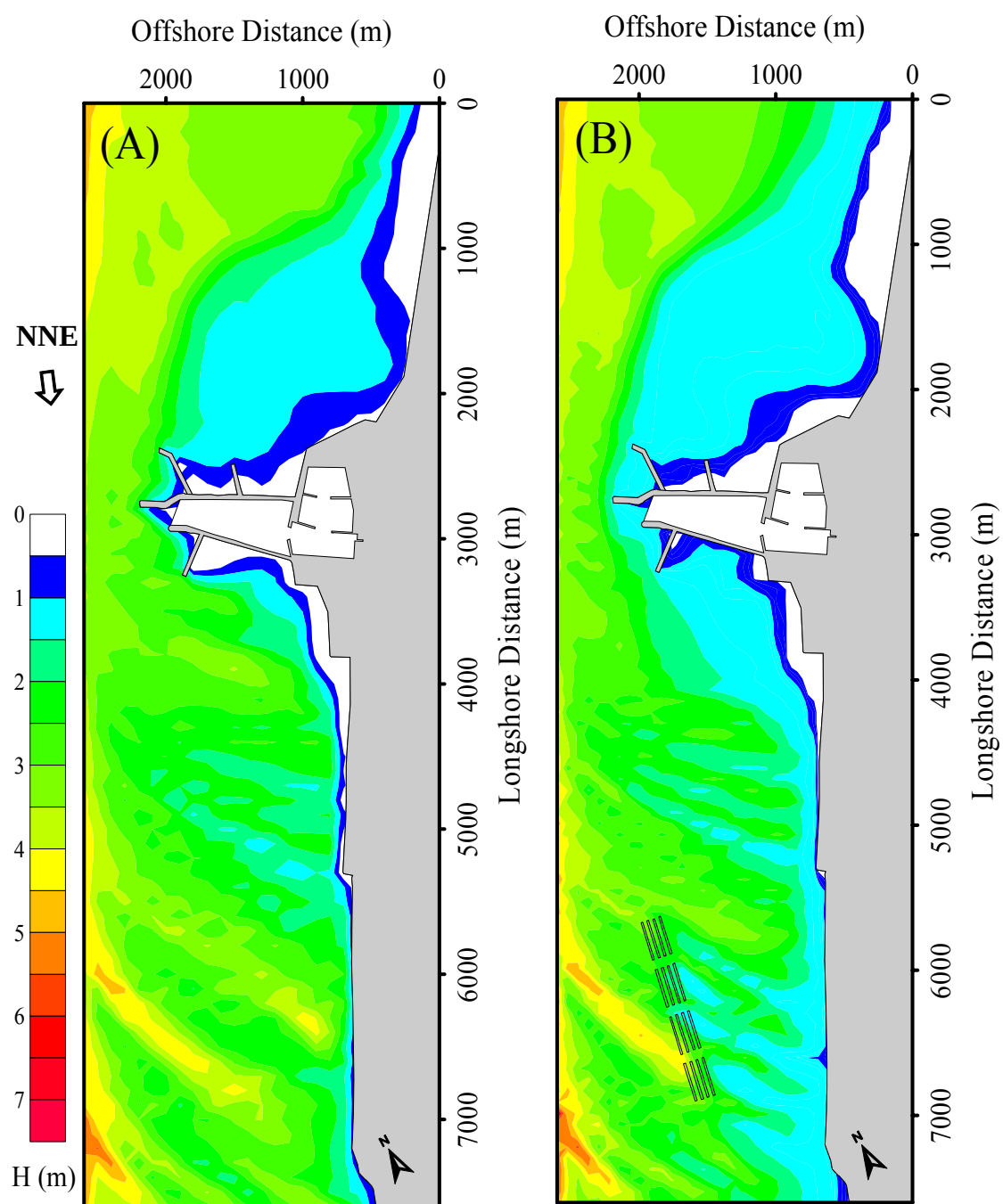


圖 4-13 10 年迴歸期颱風波浪作用下之波場分佈圖

(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)

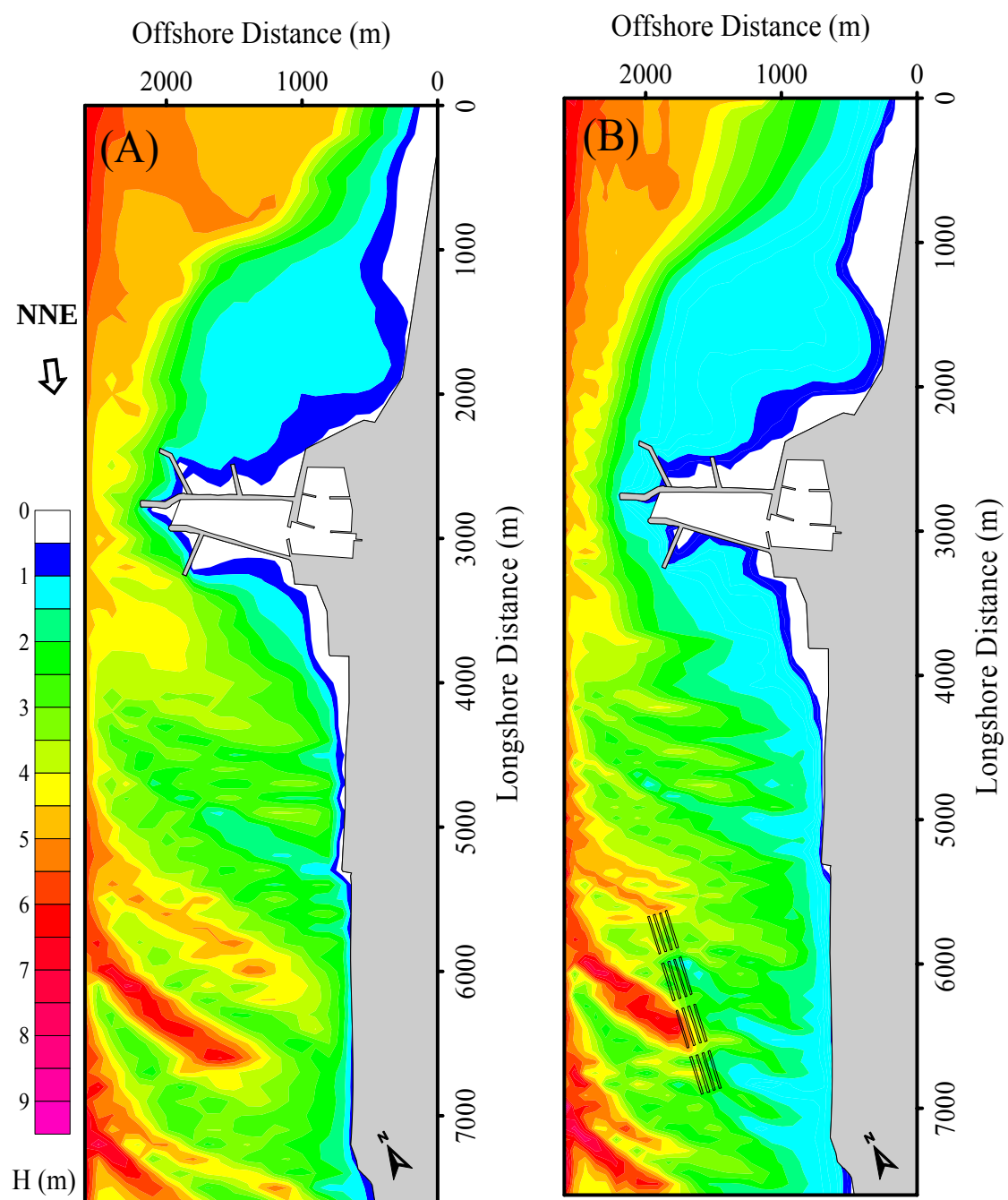


圖 4-14 50 年迴歸期颱風波浪作用下之波場分佈圖

(A) 無潛堤佈置 (B) 有潛堤佈置

($H=9.1\text{m}$, $T=12.7\text{sec}$, 波向 NNE)

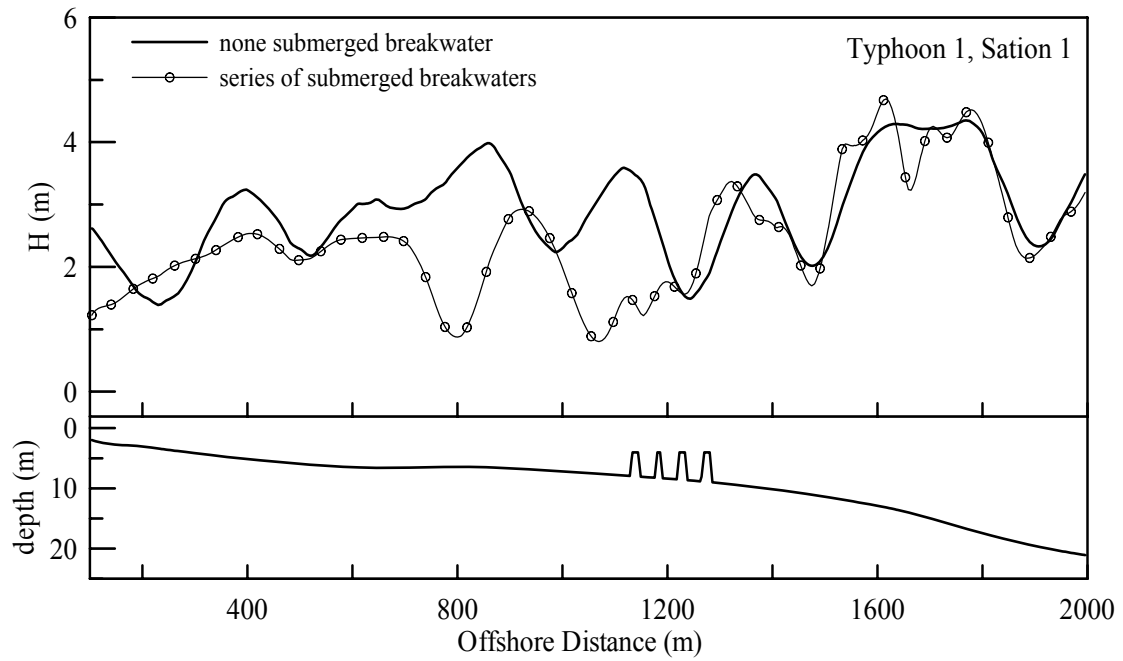


圖 4-15A 10 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖

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

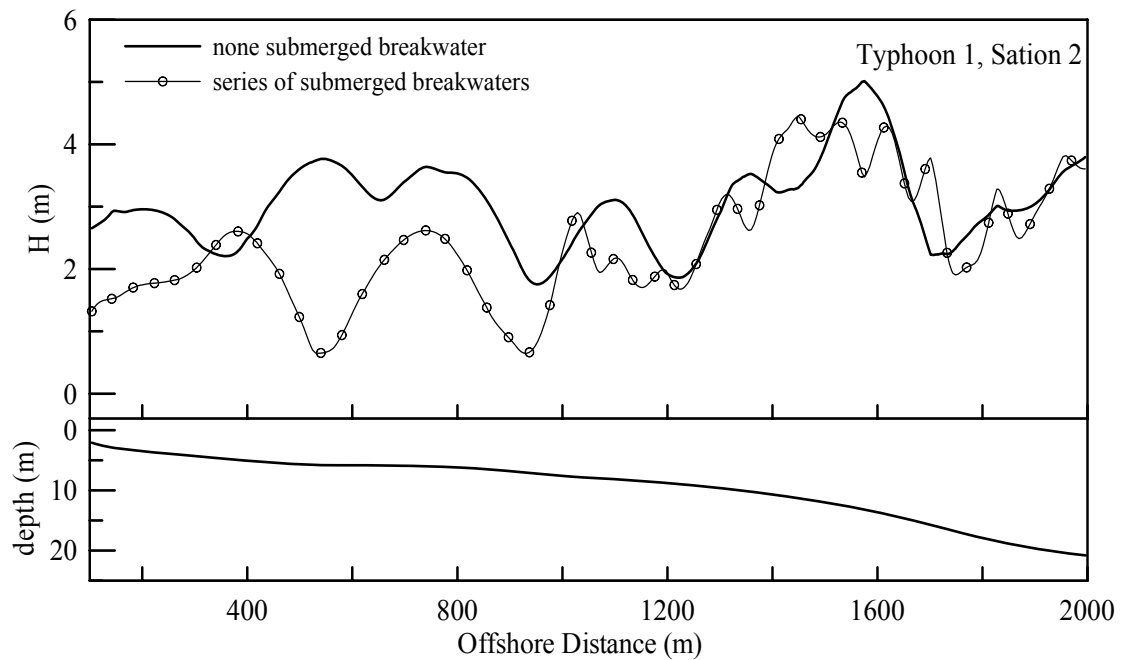


圖 4-15B 10 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖

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

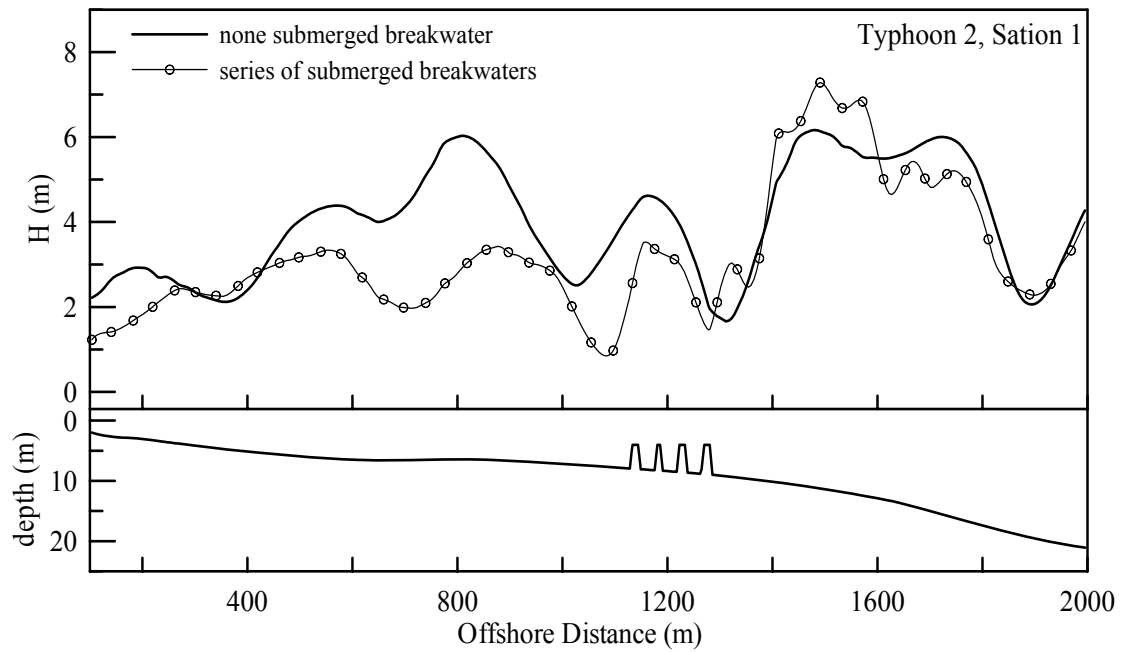


圖 4-16A 50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖

($H=9.1\text{m}$, $T=12.7\text{sec}$, 波向 NNE)

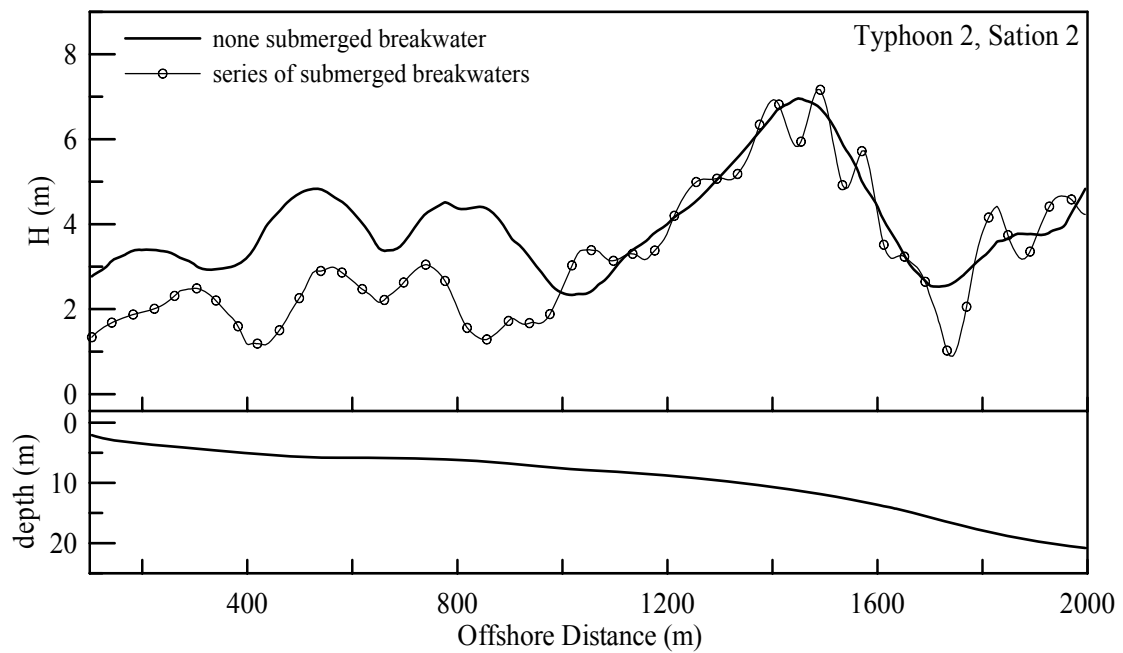


圖 4-16B 50 年迴歸期颱風波浪作用下斷面 2 之波高比較分佈圖

($H=9.1\text{m}$, $T=12.7\text{sec}$, 波向 NNE)

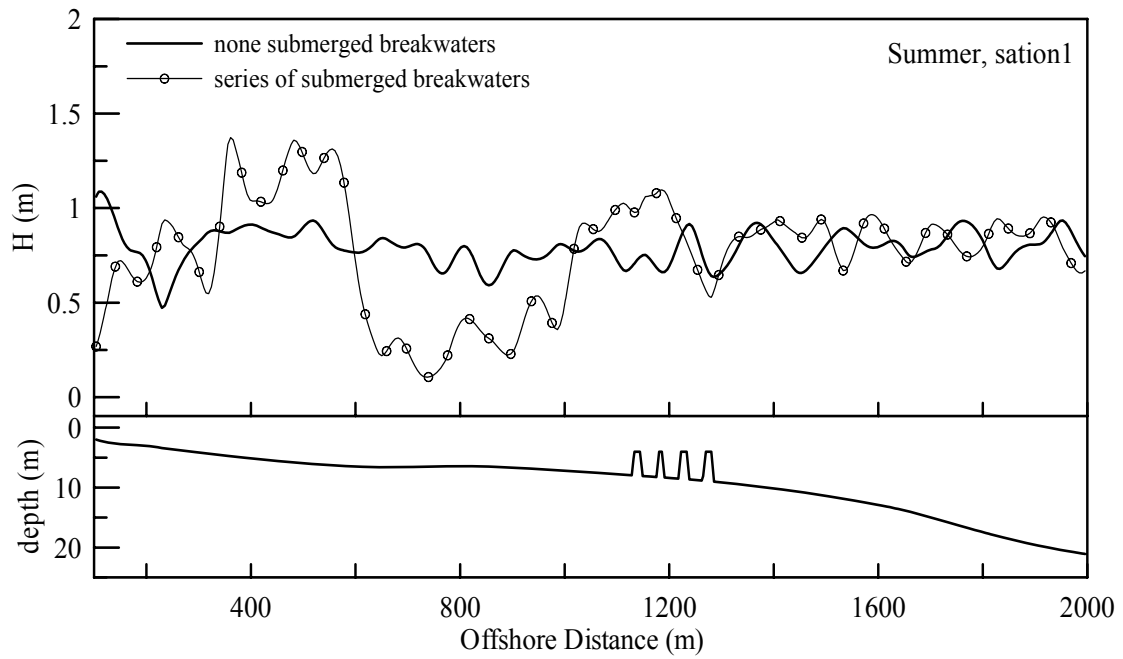


圖 4-17 夏季季風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖

($H = 0.83\text{m}$, $T = 4.95\text{sec}$, 波向 WSW)

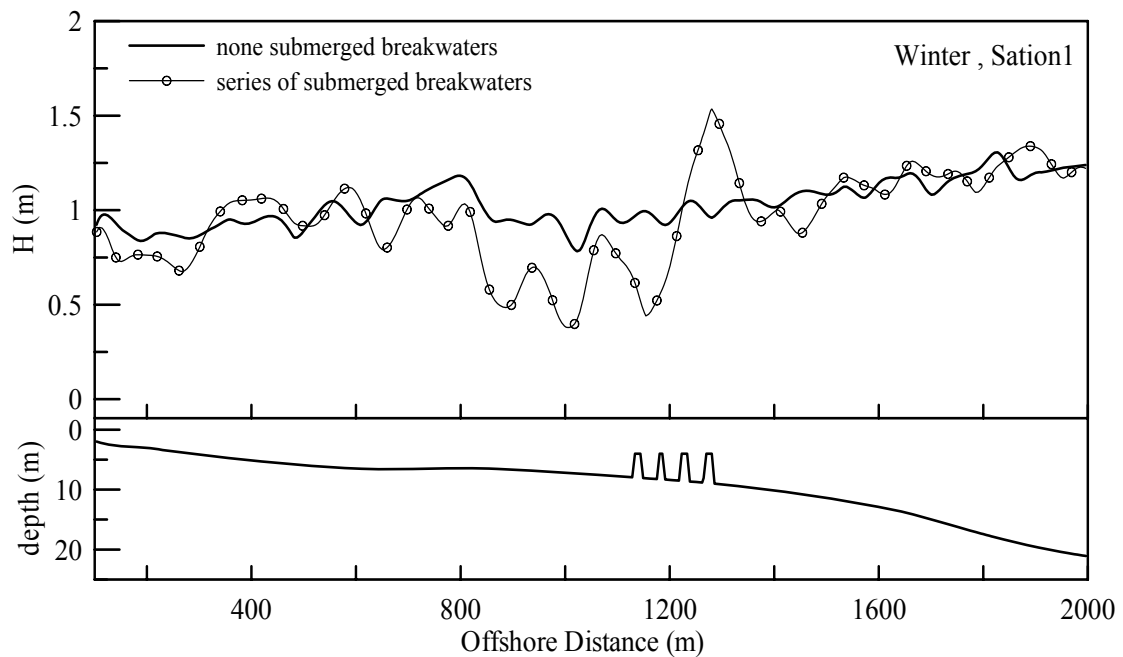


圖 4-18 冬季季風波浪作用下斷面 1 之波高比較分佈圖

($H = 1.27\text{m}$, $T = 5.28\text{sec}$, 波向 N)

第五章 結果與討論

1. 本研究利用 EEMSE 數值模式計算各種潛堤配置進而探討因結構物所產生之布拉格共振現象，又模式中考慮底床擾動等影響因子，故對於模擬波浪通過各式系列潛堤，其反射係數之計算與試驗結果均有相當的吻合度與合理性，故利用 EEMSE 當作本研究研究之數值模式，應該具有一定的可靠性。
2. 本研究採用 Hsu and Wang (2007) 之反射率公式，此公式除了適用於斜坡地形以外，更能計算波浪以不同角度入射計算領域之反射率。故此反射率之計算方式將比往昔學者所提出之方法，更適用於本研究之研究。
3. 往昔學者多著重於二維斷面之布拉格反射因子的討論，本研究利用 EEMSE 數值模式輔以良好的反射率計算模式，將其應用於二維平面上，並依序探討各項影響因子之特性。
4. 本研究利用 EEMSE 模式，探討二維平面之布拉格共振現象的影響因子，其中包括相對堤長 G/S 以及相對組距 S_G/G ，歸納其特性得到良好結果。並得知當相對堤長 G/S 越大時，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，使得能量衰減漸漸趨於一個定值。且當 S_G/G 小於 $3/4$ 能量衰減率有明顯遞減的現象。因此在實際施工設計時，平面影響因子的決定將是使得布拉格共振機制是否有效的重要因素之一。
5. 本研究延續過去兩年度的結果及往昔學者對於斷面影響因子的研究，提出系列潛堤工法之初步施工流程圖，說明系列潛堤工法應用時現場之可能性及可適性。
6. 本研究應用 EEMSE 模式於現場，探求目標海域波場之相關特性，最後模擬現場於冬、夏季以及颱風之波場，得知於港南海岸

佈置防護工法之必要性與急迫性。

7. 本研究進一步將系列潛堤工法佈置於現場海域，並計算其冬、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一般冬季夏季季風波浪亦有部分的防禦效果。由此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。
8. 系列潛堤工法最重要的部分即是使得波浪產生共振現象，造出水牆進而將能量阻擋於外海，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。本研究參考各方學者之研究成果，並探討平面影響因子，提出實際的設計流程，並模擬現場海域進而探討系列潛堤工法於現場海域使用之可行性。
9. 目前雖初步將系列潛堤工法應用於現場海域，並說明其於現場之可行性，但現場海域波浪紛紜，於下年度計畫可考慮在平面導入複合式系列潛堤，使得共振現象產生的範圍較為寬廣，進而達到多方面防禦的目標。

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. 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).
 16. 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)。
 17. 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)。
 18. 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)。

19. 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)。
20. 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)。
21. 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)。
22. 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)。
23. 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).
24. 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).
25. Kirby, J.T., “A General Wave Equation for Wave over Rippled Beds,” *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 162, pp. 171-186 (1986).
26. Chamberlain, P.G. and Poter, D., “The Modified Mild-slope Equation,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 291, pp. 393-407 (1995).
27. Healy, J.J., “Wave damping effect of beaches,” *Proceedings of*

- Minnesota International Hydraulics Convention*, pp. 213-220 (1953).
28. Goda, Y. and Suzuki, Y., “Estimation of incident and reflected waves in random wave experiment,” *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Hawaii, pp. 628-650 (1976).
 29. Mansard, E.P.D. and Funke, E.R., “The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method”, *Proceeding of the 17th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 154-172 (1980).
 30. Hughes, S.A., “Laboratory wave reflection analysis using co-located gages,” *Coastal Engineering*, Vol. 20, pp. 223–247 (1993).
 31. Frigaard, P. and Brorsen, M., “A time domain method for separating incident and reflected irregular waves,” *Coastal Engineering*, Vol. 24, pp. 205-215 (1995).
 32. Suh, K.D., Park, W.S., Park, B.S., “Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes,” *Coastal Engineering*, Vol. 43, pp. 149-159 (2001).
 33. Lin, C.Y. and Huang, C.J., “Decomposition of incident and reflected higher harmonic waves using four wave gauges,” *Coastal Engineering*, Vol. 51, pp. 395-406 (2004).
 34. Baquerizo, A., Lasoda, M.A., Smith, J.M., Kobayashi, N., “Cross-shore variation of wave reflection from beaches,” *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 123, pp. 274–279 (1997).
 35. Baldock, T.E. and Simmonds, D.J., “Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry,” *Coastal Engineering*, Vol. 38, pp. 167-176 (1999).

36. 中村孝幸、森田知志，「斜坡中における透過性防波堤の消波効果と作用波力の特性について」，日本第 35 回海岸工学講演會論文，第 547-551 頁 (1988)。
37. Isaacson, M., "Measurement of regular wave reflection," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 117, pp.553-569 (1991).
38. 黃正欣、謝景琦，「斜向入反射波浪分離方法之研究」，第十六屆海洋工程研討會，台灣高雄，part B，第 268-287 頁 (1994)。
39. 黃正欣、黃正利，「波浪斜向入射堤面反射率之研究」，第十七屆海洋工程研討會，暨 1995 兩岸港口及海岸開發研討會論文集（上），台灣台南，第 765-781 頁 (1995)。
40. Chang, H.K. and Hsu, T.W., "A two-point method for estimating wave reflection over a sloping beach," *Ocean Engineering*, Vol. 30, pp. 1833-1847 (2003).
41. Chang, H.K., "A Three-point method for separating of incident and reflected waves over a sloping bed," *China Ocean Engineering*, Vol. 16 pp. 499-511 (2002).
42. Hsu, T.W. and Wang, S.K., "Wave Setup, Setdown, Reflection and Bragg Resonance of Obliquely Incident Waves," Ph.D dissertation (2007).
43. 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).
44. 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).

45. 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).
46. Mei, C.C., "The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves," *World Scientific*, 2nd ed., pp. 135 (1983).
47. Radder, A.C., "On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 95, No. 1, pp. 159-176 (1979).
48. Li, B., "An evolution equation for water waves," *Coastal Engineering*, Vol. 23, pp.227-242 (1994).
49. 蔡立宏,「波浪通過系列潛堤之布拉格反射研究」, 博士論文 (2003)。
50. 王順寬,「斜向波浪之波揚與波降及反射係數之研究」, 博士論文 (2007)。
51. 財團法人中華顧問工程司「新竹港南海岸生態工法之研擬(1)-人工養灘對底棲生物之影響」(2005)。
52. 陳陽益、郭少谷,「三維波形底床上前進波列之傳遞 I」, 第二十二屆海洋工程研討會論文集, 台灣高雄, 第 9-18 頁(2000)。
53. Wen, C.C., Tsai, L.H., "Numerical Simulation of Bragg Reflection Based on Linear Waves Propagating over a Series of Rectangle Sea Bed," *China Ocean Engineering* (2007).

附錄一 期中報告意見回覆處理情形

時間：中華民國九十六年七月十九日(星期四)上午九點

地點：交通部運輸研究所港灣技術中心二樓階梯教室

主持人：李豐博 副主任

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：系列潛堤應用於海岸保護之研究(3/4)

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.底床坡度的影響最主要在共振頻率的平移，若無模型實驗驗證可否據以作為工程佈置之依據。 2.p3-12 之圖 3-12,3-13，次諧頻率的反射率較高，請說明。	1.目前於眾多的研究中並無二維平面斜坡潛堤共振之試驗，且於整個年度計畫中並無規劃水工模型試驗，此計畫僅將系列潛堤工法之可行性提出，要於現場施工仍須許多的研究，故建議於往後的研究計畫中，規劃水工模型試驗，進而以利數值之佐證。 2.於圖 3-12,3-13 的圖中，由於考慮不同的相對堤長 G/S ，在有限的堤長下，波浪入射計算領域，使得堤頭產生繞射，導致布拉格共振機制不完整，進而影響主頻之反射率，而在高階能量的波浪較不容易因此而使能量降低，故在有限且堤長小的條件下模式模擬之結果於次諧的反射率反而有較高的現象。	1.說明完整。 2.說明完整。

3.在諸多影響因子的特性中，如何綜合考慮決定最佳工程佈置，請說明。	3.由於布拉格平面之影響因子眾多，故本研究希望能於期末報告中將各平面影響因子之特性分析出來，進而規劃畫系列潛堤設計流程圖，希望能在考慮現場條件下，歸納出最佳的佈置方案。	3.說明完整。
4.利用布拉格效應以及僅有單純潛堤減低波浪能量之效應，是否可以利用數值模式同時模擬並列兩種效應之成果？	4.於本研究的數值模式中並未考量潛堤之摩擦性、透水性、結構性等問題，故在模擬布拉格效應之餘並無法同時考慮潛堤消能的效果。	4.說明完整。
二、陳陽益委員： 1.簡報中的(3)式是否打錯？若無誤請問其解如何？ 2.因共振情形沒解出，故不可言為含有共振情形，那要如何說明，請考量。 3.於模式中有無包含反射波之折射？ 4.反射波流場的機制未明，請說明一下。 5.沿斜坡斜向流場的波浪如何解出，又如何由理論來印證具正確性。 6.以數值來求出與數據相合性是不難的，因任何曲線以 Fourier 級數就可以很密合了，但實場的解要清清楚楚的推求及與實	1.感謝委員的提點，於簡報製作中公式確實有筆誤。 2.本研究雖無利用解析方式解出正確的共振條件，但在研究中顯示反射率激增至高峰的現象為共振現象。 3.本研究之數值模式並無包含反射波之折射現象。 4.本研究於理論以及模式中，並無考慮反射波之流場，此亦為往後研究需要努力的方向。 5.於本研究於理論以及模式中，並無考慮流場的計算，此為往後研究需要考慮的因子。 6.感謝委員的提點與建議，將於往後的研究中將以此奉為主臬。	1.已說明。 2.已說明。 3.已說明。 4.已說明。 5.已說明。 6.已說明。

況的物理觀像合提！ 7.數值模式於虛擬邊界上的吸波現象如何，然大前提這是不合理的現況。	7.本研究之數值模式於邊界上使用輻射邊界條件，在近岸的部分採用完全吸收之邊界條件來吸波。如委員所言此現象於大自然中為不合理之現象，整個大自然為無窮範圍區域，然而數值模式在計算上，是需要有一定的範圍，因此邊界條件的訂立是必要且無可避免的，因此目前之研究技術並無法克服於邊界上不合理的現象。	7.說明完整。
三、沈建全委員： 1.本研究內容十分紮實，成果良好，值得肯定。 2.針對不同相對水深 D/h 以 0.5 及 0.33 及潛堤數目 $N=6 > 4 > 2$ 能否考量經濟效應以數值模擬方式於未來找出最具經濟效益之佈置方式（潛堤數）及系列潛堤斷面與高度？ 3.本研究若在不同海底地形坡度下，其共振效果是否仍相似？如台灣西北新竹海岸、台中港海岸、西南梓官海岸之間會有何差異？ 4.針對夏季季風、冬季季風及不同週期之颱風波	1.感謝委員肯定。 2.目前整體研究仍處於基礎研究的階段，針對各項影響因子分析其特性，並無進一步考量經濟施工的問題。建議於延續的計畫中以此為最終目標邁進。 3.本研究於期中報告中最後初步模擬現場海域之地形，模擬的結果證明於現場地形中佈置系列潛堤亦可產生共振的現象，故於不同的海域地形應也可以產生共振，但需要因應不同的影響因子進行規劃方可達最佳效果。 4.現場海域波浪紛紜不均，在設計時僅能針對幾個主要之波	2.已說明。 3.已說明。 4.說明完整。

浪，如何能設計出一種『系列之潛堤』來產生共振以防制波浪、消除波能，會不會有一些波浪不產生共振而越過潛堤群，侵襲海岸？	浪條件進行防範之設計，要面面俱到應為難事。在本研究第二年度的研究中顯示可以利用複合式之系列潛堤來使得多個主頻產生共振，進而達到海岸防禦的效果。於理想的情況下，應可於下一年度的計畫中將複合式系列潛堤佈置於現場海域中，進而探討其可防禦之波浪的範圍。	
四、陳明宗委員： 1. 將理論應用到實際工程，甚至能應用到海岸保護，實在是值得嘉許。 2. 第四章新竹港南附近海域之波場計算，既有 87 年至 94 年之侵淤變化表示應該有較新的地形；為何模式計算時仍用 87 年之地形來計算？ 3. 系列潛堤工法係於水下施做潛堤，對於船隻而言猶如潛礁，如何配置、如何公告或通知，以免影響船隻航行安全；亦應列入考慮。	1. 感謝委員肯定。 2. 第四章所取得之侵淤圖為數值模擬計算之成果，並非為實際量測。而經多方的資料蒐集，僅能取得 87 年度之地形資料進行分析模擬，若於計畫的執行中可以取得更新之地形資料將立即更換地形。 3. 此為重要之規劃目標，於現場初步模擬中，考量操船亦將系列潛堤工法佈置於水深 8 米處。但目前仍無統一的依據準則，主要的原因為，目前整體研究仍處於基礎研究的階段，對於人文經濟並無進一步考量。若計畫時間許可將會將此列入考慮因子。	2. 已說明。 3. 說明完整。

附錄二 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 (3/4)

On the applications of a series of submerged breakwaters to coastal protection (3/4)

計畫編號: MOTC-IOT-96-H2DB003

期中簡報

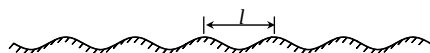
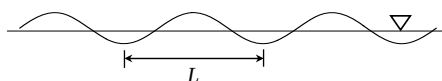
期中簡報

報告日期: 2007/07/19

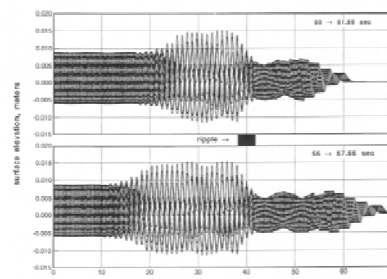
交通部運輸研究所

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



期中簡報

報告日期: 2007/07/19

本年度主要研究內容

- 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。
- 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。
- 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。

期中簡報

報告日期：2007/07/19

EEMSE 數值模式(1/2)

- 波浪由外海向近岸傳遞過程中，可能產生各種變形效應，為了擴展緩坡方程式的適用範圍，Suh (1997) 等人考慮海床坡度以及海床曲率之變化，得到新的緩坡方程式

$$-\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \Phi) + (k^2 CC_g - \omega^2 + f_1 g \nabla_h^2 h + f_2 g k |\nabla_h h|^2) \Phi = 0 \quad (1)$$

式中

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

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

期中簡報

報告日期：2007/07/19



EEMSE 數值模式 (2/2)

- Hsu 和 Wen (2001) 導入一緩慢時間變量 $\bar{t} = \varepsilon t$ 則波浪流速勢函數可表示為

$$\Phi(x, y, t) = \Psi(x, y, \bar{t})e^{-i\omega t} \quad (2)$$

其中 Ψ 為含有緩慢時間變量流速勢函數，並將二階微小量省略，得時變性拋物線型演進緩坡方程式 EEMSE

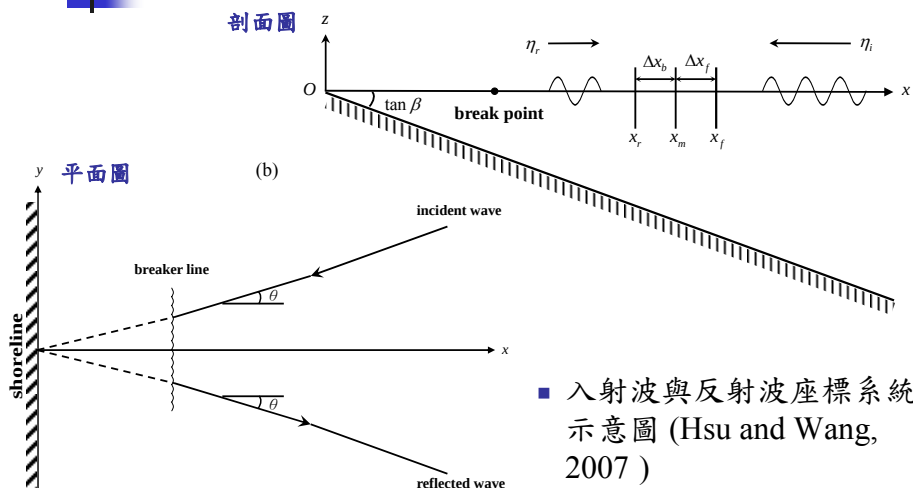
$$-2\omega i \frac{\partial \Psi}{\partial \bar{t}} = \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \Psi) + (k^2 CC_g + f_1 g \nabla_h^2 h + f_2 g k |\nabla_h h|^2) \Psi = 0 \quad (3)$$

期中簡報

報告日期：2007/07/19



斜向波浪之反射係數 (1/3)



期中簡報

報告日期：2007/07/19



斜向波浪之反射係數 (2/3)

■ 反射係數

$$R = \frac{B \cos \alpha - \cos(\alpha - \alpha_b) \pm \sqrt{[B \cos \alpha - \cos(\alpha - \alpha_b)]^2 - (1 - B)^2}}{1 - B} \quad (7)$$

$$R = \frac{F \cos \alpha - \cos(\alpha + \alpha_f) \pm \sqrt{[F \cos \alpha - \cos(\alpha + \alpha_f)]^2 - (1 - F)^2}}{1 - F} \quad (8)$$

■ x_f 處入、反射波振幅

$$a_i = \frac{|\eta|_f}{\left[1 + R^2 + 2R \cos(\alpha + \alpha_f)\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

$$a_r = a_i \cdot R$$

期中簡報

報告日期：2007/07/19



斜向波浪之反射係數(3/3)

■ 參數

$$B = \left(\frac{|\eta|_b K_{Sm} K_{Rm}}{|\eta|_m K_{Sb} K_{Rb}} \right)^2 = \frac{1 + R^2 + 2R \cos(\alpha - \alpha_b)}{1 + R^2 + 2R \cos \alpha}$$

$$F = \left(\frac{|\eta|_f K_{Sm} K_{Rm}}{|\eta|_m K_{Sf} K_{Rf}} \right)^2 = \frac{1 + R^2 + 2R \cos(\alpha + \alpha_f)}{1 + R^2 + 2R \cos \alpha}$$

■ 位相差

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{B - F + (1 - B) \cos \alpha_f - (1 - F) \cos \alpha_b}{(1 - B) \sin \alpha_f + (1 - F) \sin \alpha_b} \right]$$

期中簡報

報告日期：2007/07/19

反射率的限制

- 波浪入射角 $\theta = 90^\circ$ ，位相 α_b 和 α_f 變為無限大，無法求出反射係數

- 當 $B = F = 1$ 時

$$\cos(\alpha - \alpha_b) = \cos \alpha = \cos(\alpha + \alpha_f)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_b + \Delta x_f &= \frac{M\pi}{k_m \cos \theta_m} - \frac{2Mk_m \tan \beta}{(2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m) \cos \theta_m^2} (\Delta x_b^2 - \Delta x_f^2) \\ &= \frac{ML_m}{2 \cos \theta_m} - \frac{2M\pi \tan \beta}{L_m(2k_m h_m + \sinh 2k_m) \cos \theta_m^2} (\Delta x_b^2 - \Delta x_f^2) \end{aligned}$$

若 $\Delta x_b = \Delta x_f = \Delta x$ ，Goda和Suzuki (1976)

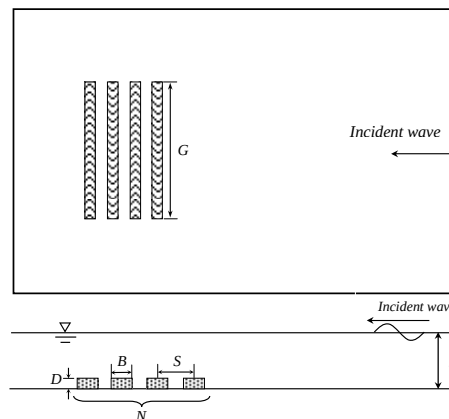
$$\Delta x = ML_m / 4 \cos \theta_m \quad (10)$$

期中簡報

報告日期：2007/07/19

平面上布拉格反射因子之探討

$$R = f_1(D/h, G/S, 2S/L, B/S, N \tan \beta)$$

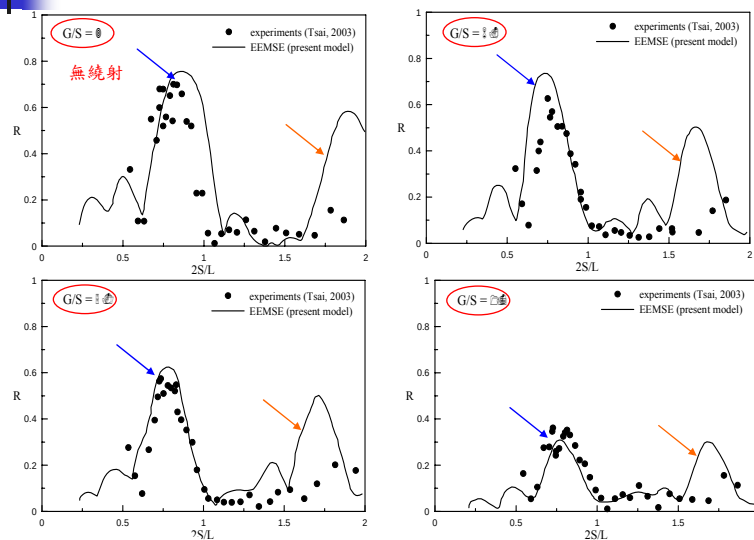


平面布拉格反射因子示意圖

期中簡報

報告日期：2007/07/19

平面上布拉格反射因子之探討 - 模式驗證 (G/S)

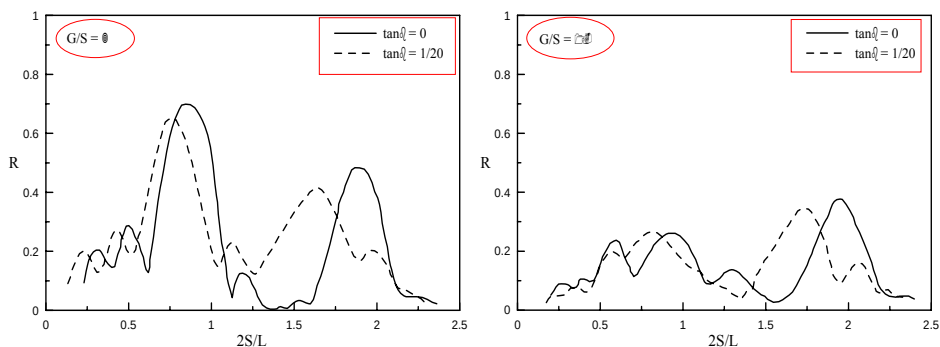


期中簡報

報告日期：2007/07/19

平面上布拉格反射因子之探討 - 不同坡度的影響

■ 不同潛堤長度與不同坡度的影響



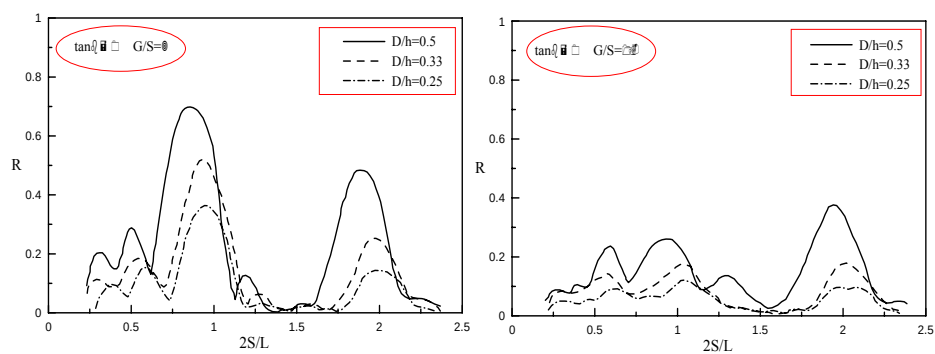
期中簡報

報告日期：2007/07/19



平面上布拉格反射因子之探討 - 潛堤高度的影響

■ 不同潛堤長度與不同潛堤高度的影響

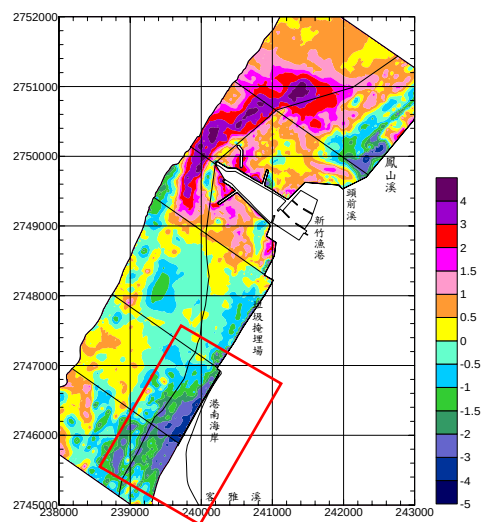


期中簡報

報告日期：2007/07/19



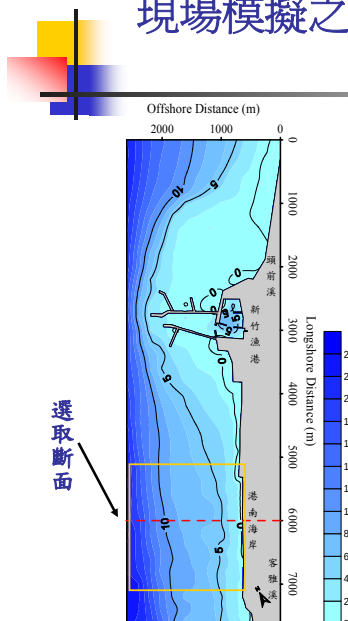
現場模擬之初步研究-新竹港南海域



期中簡報

報告日期：2007/07/19

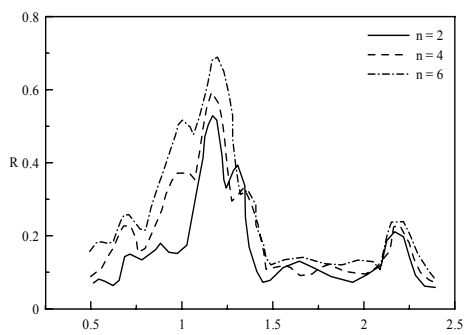
現場模擬之初步研究-佈置二維斷面無限長系列潛堤



- 以10年回歸週期之颱風為規劃佈置之條件

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

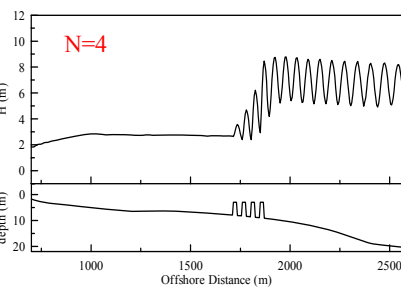
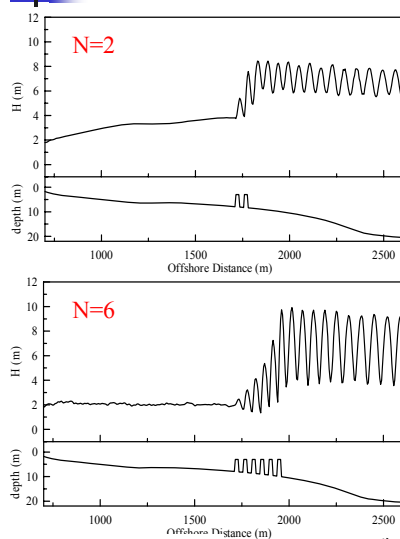
$$h = 8m, D/h = 1/2$$



期中簡報

報告日期：2007/07/19

現場模擬之初步研究-佈置二維斷面無限長系列潛堤



- $2S/L = 1.15$ ，不同潛堤個數下，模擬實際海域斷面地形產生共振之波高變化圖

期中簡報

報告日期：2007/07/19



初步結果與討論 (1/2)

1. **EEMSE 數值模式**：EEMSE 數值模式各式波浪變形效應，對於模擬波浪通過各式系列潛堤，其反射係數之計算與試驗結果均有相當的吻合度與合理性，故利用 EEMSE 當作本計畫研究之數值模式，應該具有一定的可靠性。
2. **反射率公式**：本計畫採用 Hsu and Wang (2007) 之反射率公式，此公式除了適用於斜坡地形以外，更能計算波浪以不同角度入射計算領域之反射率。故此反射率之計算方式應更適用於本文之研究。

期中簡報

報告日期：2007/07/19



初步結果與討論 (2/2)

3. **二維平面布拉格反射因子之研究**：往昔學者多著重於斷面之布拉格反射因子的討論，本文利用EEMSE數值模式輔以良好的反射率計算模式，將其應用於二維平面上，並依序探討各項影響因子之特性，做為現場規劃之依據。
4. **現場之初步模擬**：在現場以二維斷面的方式模擬布拉格反射效應之可能性，得到良好的初步成果，即說明模式以及布拉格反射應用於現場的可能性。

期中簡報

報告日期：2007/07/19

計畫執行進度

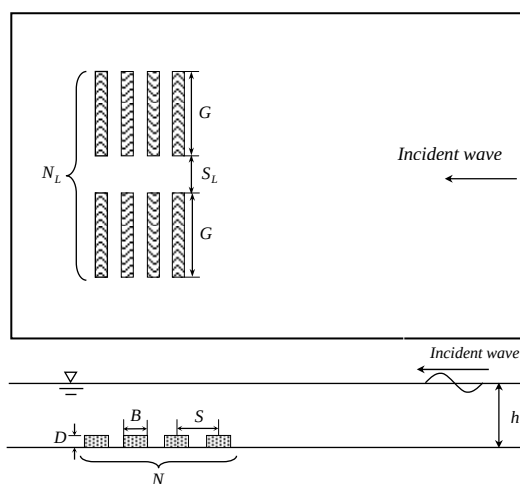
工作項目	第一 月	第二 月	第三 月	第四 月	第五 月	第六 月	第七 月	第八 月	第九 月	第十 月
實際海域基本資料蒐集與分析	※									
各種平面佈置系列潛堤配置方案之波場模擬										
實際海域之波場模擬										
各種系列潛堤堤前反射率分析										
期中報告										
探討各種系列潛堤配置於實際海域的優缺點及可行性										
期末報告繳交及簡報會議										
完成報告修正與交付成果										
工作進度估計百分比(累積數)	15	35	45	60	70	75	80	85	90	100

期中簡報

報告日期：2007/07/19

計畫下半年度方向－平面布拉格
影響因子部分

■ 考慮縱向相對堤距之影響

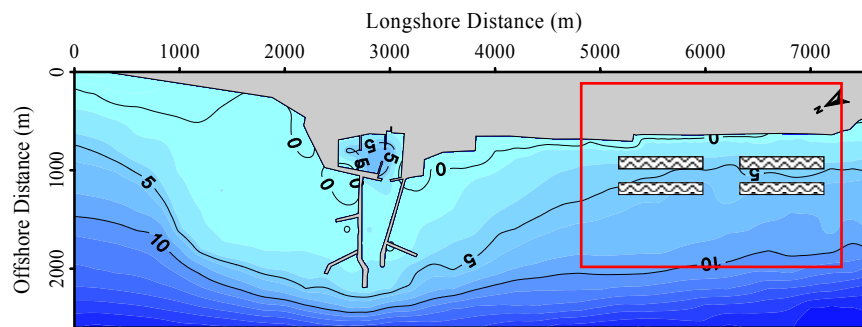


期中簡報

報告日期：2007/07/19

計畫下半年度方向－現場模擬部分

- 於目標海域規劃各式潛堤，並模擬其波場，進而探討施工之可能性



期中簡報

報告日期：2007/07/19

報告完畢
謝謝大家

期中簡報

報告日期：2007/07/19

附錄三 期末報告意見回覆處理情形

時間：中華民國九十六年十一月十五日(星期四)上午九點半

地點：交通部運輸研究所港灣技術中心二樓階梯教室

主持人：李豐博 副主任

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：系列潛堤應用於海岸保護之研究(3/4)

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.建議補正部分英文摘要內容，俾與中文摘要一致。 2.圖 4-2 無法看出海岸侵淤變化歷程。圖 4-3 水深建議以負值標示，文內並應統一用字（例如 p4-4 用負，p4-5 用正。） 3.P4-5 建議增加 N=2、4、6 時共振後波高比較表。	1.遵照委員意見辦理，將於期末完稿中重新修正中英文摘要部分。 2.圖 4-2 所引用之資料，為過去中華顧問工程司針對港南附近海域所進行的研究成果，圖中顯示由 87 年 9 月至 94 年 4 月為止的累積侵淤量，本研究引用之目的為凸顯港南海岸附近侵蝕的嚴重性，進而說明目標海域防護之急迫性，故侵淤之變化歷程並非引用之重點。關於水深的表現方式，遵照委員建議於期末報告完稿中統一以正值作為標示。 3.N=2、4、6 之斷面波高分佈圖如圖 4-5～圖 4-7 所示，可以明顯看出於斷面之分佈，而本研究主要目的以平面因子為主，故於報告終將不詳列共	1. 依審查意見辦理。 2. 依審查意見辦理。 3.已說明。

4. P4-13，圖 4-10，圖名內之斷面應予刪除，系列潛堤應使用較鮮明顏色標示。 5. 第三章皆以正向入射波探討系列潛堤重要因子對共振特性的探討。第四章則應用於斜向入射波之計算，建議將第四章工程佈置的背景考慮及潛堤設置水深位置在文中詳細交代說明。 6. 實際海面並非單一波長，而波長對潛堤佈置及共振效果影響非常大，未來第四年計畫提到複合系列潛堤的構想，盼望未來能發展更實用的佈置方案。	振波高比較表。 4. 遵照委員意見辦理，但於圖 4-10 中之斷面為圖 4-16 ~圖 4-18 之示意圖，故斷面將不予以刪除，其他部分將於期末報告完稿中修正。 5. 遵照委員意見辦理，將於期末報告完稿詳述潛堤擺放位置之根據與設置方法。 6. 感謝委員建議，由報告中之數值模擬成果可以發現，現場佈置雖然是根據 10 年回歸其颱風的波浪條件進行設計，但在 50 年回歸週期的颱風作用下，依然能凸顯系列潛堤工法的效果，主要是整個工法於主頻附近皆會產生近共振的現象，因此於共振區附近皆可有效的阻擋波浪能量，因此理論基礎上雖針對單一週期之波浪共振，實際上主頻附近之波浪皆有可能有共振之現象，並非只能防禦單一波浪。因此只要導入複合式概念則可使得防禦波浪範圍大大增加進而達到防禦效果。	4. 已修正。 5. 已修正。 6. 完整說明。
二、林坤田委員： 1. 過去在布拉格共振機制的研究，大多以「反射率」	1. 本年度之重點著重於平面影響因子的研究，又由於在二維	1. 完整說明。

的趨勢來觀察影響因子的特性，但本研究是以能量的觀點作為研究的方法，是否可闡釋緣由。	平面上目前並無反射率之理論基礎。故經過多方討論，本研究決定採用能量的觀點來說明波浪經過結構物之後能量衰減的比率，藉此瞭解平面上布拉格共振機制之特性。	
2.圖 3-24 的設計流程此處設的無因次參數是如何界定的？請進一步說明。	2.各無因次參數之設計主要參考過去眾多學者於一維上影響因子的研究成果，來訂定適合的標準，平面上則以本年度之研究建議為主。	2.已說明。
3.目前本工法並未實際應用於海岸工程的案例，本工法的優缺點及限制條件是否可進一步說明。	3.系列潛堤工法於現場海域目前國內外皆尚未有相關的施工案例，說明本工法尚在整體評估研究的階段。本工法之主要限制條件為因理論基礎的關係其不能應用於陡變底床，如台灣東部海域，但在緩變底床則是相當好的防護工法。主要的優點是其工法可以產生布拉格共振現象進而將波量主要能量阻擋於外海，倘若可以配合各式的工法，相信在海岸防護上將是一大突破。主要缺點為施工困難度高，且相關費用昂貴。	3.完整說明。
4.本研究內容將潛堤、景觀、學理、生態融為一體，值得肯定。	4.感謝委員肯定。	4.感謝肯定。
三、沈建全委員： 1.本年研究成果豐碩，已完成本年度計畫目標，值得肯定。 2.針對系列潛堤工法之佈	1.感謝委員肯定。 2.經濟因素部分將於下一年度	1.感謝肯定。 2.已說明。

置提出設計流程是一種良好之做法，但仍須考慮經濟因素。	計畫進行討論，進而將此納入施流程的一部份。	
3.將海灘以颱風波浪為潛堤設計對象，雖無法防制季風作用，但海灘在季風作用下大部份為堆積，因此較為可行。	3.感謝委員肯定，季風部分將可能因為二諧共振以及地形變化得到部分的防禦效果，而整個工法以颱風條件進行設計，將有效防護共振區附近之颱風條件，進而將大部分能量阻擋於外海。	3.感謝肯定。
4.系列潛堤若能結合多孔隙消波塊，可一方面當系列潛堤，一方面消減波能，一方面作為生態魚礁保育海岸生態。	4.感謝委員提供之建議，關於多孔隙結構物於整各部拉格共振機制確實有其實行的可能性，國內外學者亦有針對此部分進行一維斷面的研究，於明年度計畫會考慮將多孔結構物納入研究範圍。	4.已說明。
5.若颱風波浪之週期有二組而週期無法形成單一共振，而需建構二組系列潛堤群時，應在設計流程加入經濟成本考量因素。	5.由報告中之圖 4-13、圖 4-14、圖 4-15、圖 4-16 可以看出，雖然現場是根據 10 年回歸其颱風的波浪條件進行公法的設計，但 50 年回歸週期的颱風作用下，依然能凸顯系列潛堤工法的效果，主要是整個工法於主頻附近皆會產生近共振的現象，因此於共振區附近皆可有效的阻擋波浪能量，因此理論基礎上雖針對單一週期之波浪共振，實際上主頻附近之波浪皆有可能有共振之現象，並非只能防禦單一波浪。因此只要導入複合式概念則可使得防禦波浪範圍大大增加進而達到防禦效果。	5.已說明。

6.建議明年研究考慮潛堤群採用多孔消波塊具有消波率時，對波浪產生共振及消減波能之增加功效。 7.未來系列潛堤運用，可考慮與漁業署合作，投放多條帶狀潛堤（人工魚礁）以保護海岸、培育漁業資源，同時與國防部合作，作為反登陸之潛礁利用。	6.感謝委員提供之建議，明年度計畫會考慮將多孔結構物納入研究範圍。 7.感謝委員提供之建議，未來將會考慮以此為主要目標。	6.已說明。 7.已說明。
四、蔡立宏委員： 1.建議於中英文摘要中，增列本研究重要的成果及貢獻。如：本研究分析系列潛堤平面佈置各影響參數間之關係，並提出建議之佈置條件。此外，本研究提出佈置系列潛堤於現場地形之設計步驟及方法。 2.本研究計畫進行中，成大研究團隊不時與本中心研究人員保持聯繫，並研討新的分析方法，本研究成果符合預期目標，值得肯定。 3.建議未來計畫，能朝系列潛堤建造的成本施工費分析、現場及防禦波浪條件的適用性、與其他工法差異性等作探討。	1.遵照委員意見辦理，將於期末完稿中重新修正中英文摘要部分。 2.感謝委員肯定。 3.感謝委員提供之建議，明年度計畫將會以此作為研究之主要方向。	1.已修正。 2.感謝肯定。 3.已說明。

附錄四 期末報告簡報檔

交通部運輸研究所

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (3/4)

On the applications of a series of submerged breakwaters to coastal protection (3/4)

計畫編號: MOTC-IOT-96-H2DB003

期末簡報

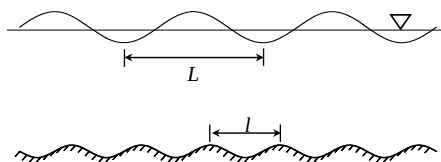
期末簡報

報告日期: 2007/11/15

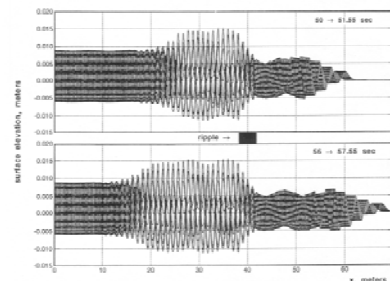
交通部運輸研究所

布拉格共振現象

- $\ell/L = 1/2 \Rightarrow$ 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



期末簡報

報告日期: 2007/11/15

本年度主要研究內容

- 利用數值模式分析布拉格共振機制於平面上之各項影響因子，進而做為現場規劃之依據。
- 參考各影響因子特性，初步規劃系列潛堤工法設計流程圖，做為現場施工佈置之參考。
- 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。最後參考研究成果，佈置系列潛堤工法於實際海域，探討其可行性。

期末簡報

報告日期：2007/11/15

EEMSE 數值模式(1/2)

- 波浪由外海向近岸傳遞過程中，可能產生各種變形效應，為了擴展緩坡方程式的適用範圍，Suh (1997) 等人考慮海床坡度以及海床曲率之變化，得到新的緩坡方程式

$$-\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \Phi) + (k^2 CC_g - \omega^2 + f_1 g \nabla_h^2 h + f_2 g k |\nabla_h h|^2) \Phi = 0 \quad (1)$$

式中

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

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

期末簡報

報告日期：2007/11/15

EEMSE 數值模式 (2/2)

- Hsu 和 Wen (2001) 導入一緩慢時間變量 $\bar{t} = \varepsilon t$ 則波浪流速勢函數可表示為

$$\Phi(x, y, t) = \Psi(x, y, \bar{t}) e^{-i\omega t} \quad (2)$$

Ψ 其中為含有緩慢時間變量流速勢函數，並將二階微小量省略，得時變性拋物線型演進緩坡方程式EEMSE

$$-2\omega i \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \Psi) + (k^2 CC_g + f_1 g \nabla_h^2 h + f_2 g k |\nabla_h h|^2) \Psi = 0 \quad (3)$$

期末簡報

報告日期：2007/11/15

平面上布拉格共振因子之探討

- 模式驗證 ←
- 平面上相對堤長 G/S 的特性
- 平面上縱向相對堤距 s_g/G 的特性
- 系列潛堤設計流程圖

能量衰減率 = $\frac{\text{透射波波高平方和}}{\text{入射波波高平方和}} \Rightarrow$

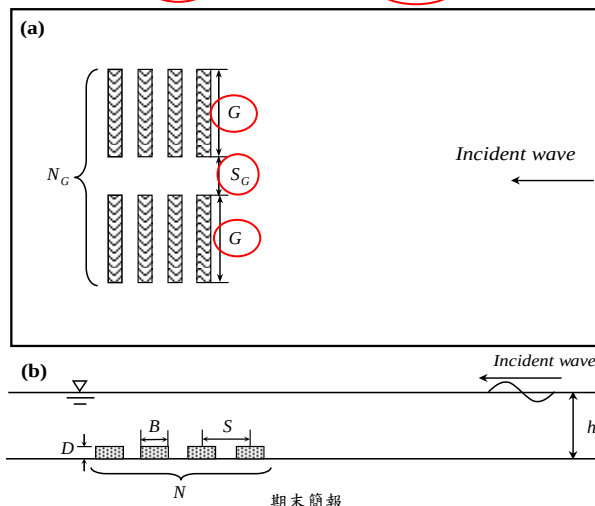
$$E_s = \frac{\sum_l (H_t)_l^2}{\sum_l (H_i)_l^2}$$

期末簡報

報告日期：2007/11/15

平面上布拉格共振因子示意圖

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



期末簡報

報告日期：2007/11/15

平面上布拉格反射因子之探討

數值模擬之平面系列潛堤佈置表

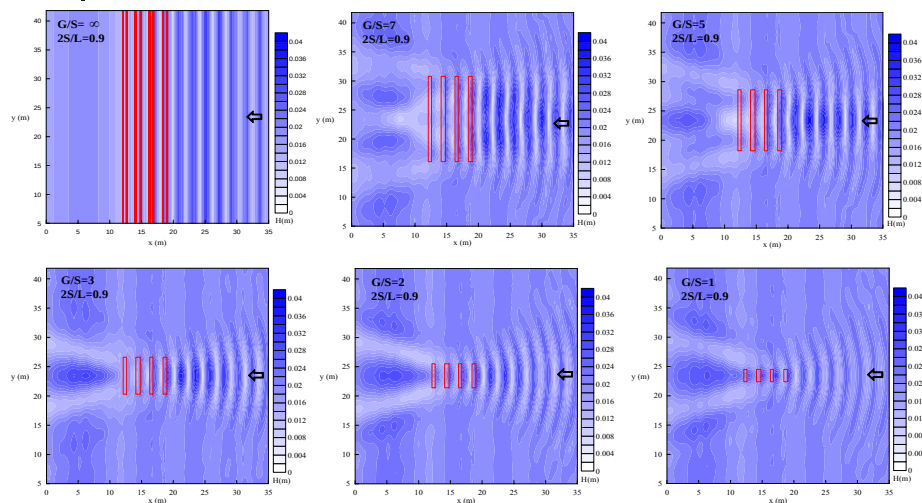
潛堤型式	個數 N	組數 N_G	D/h	B/S	G/S	S_G/G
矩形	4	1,2	1/2	1/3	1、2、3、5、7	1/4
						1/2
						3/4
						1
						3/2
						2
	1	1			∞	0

期末簡報

報告日期：2007/11/15



平面上潛堤長度的影響

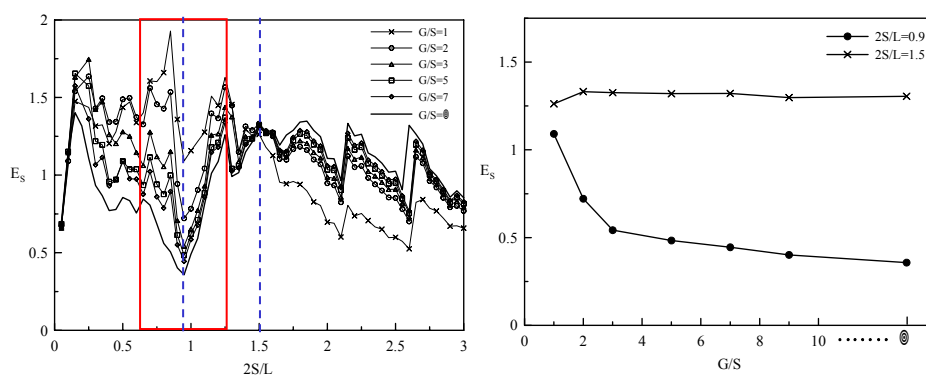


期末簡報

報告日期：2007/11/15



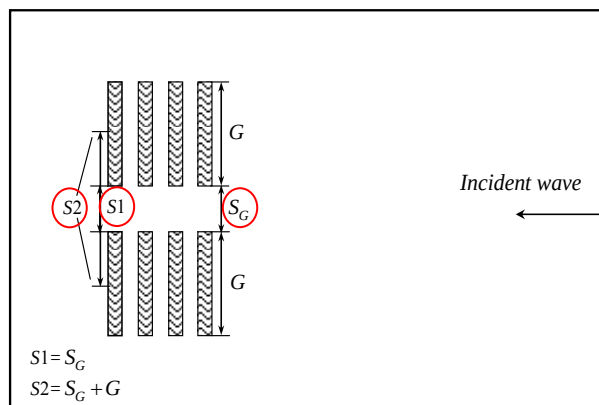
平面上潛堤長度的影響



期末簡報

報告日期：2007/11/15

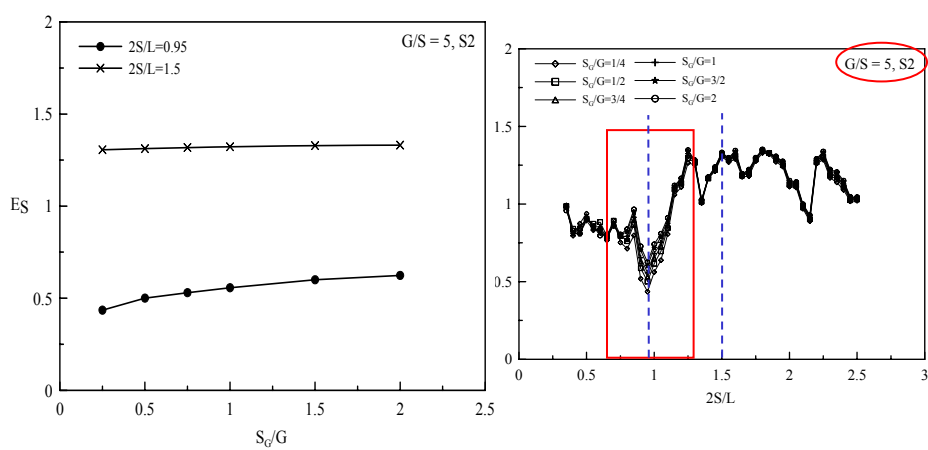
平面上縱向堤距的影響



期末簡報

報告日期：2007/11/15

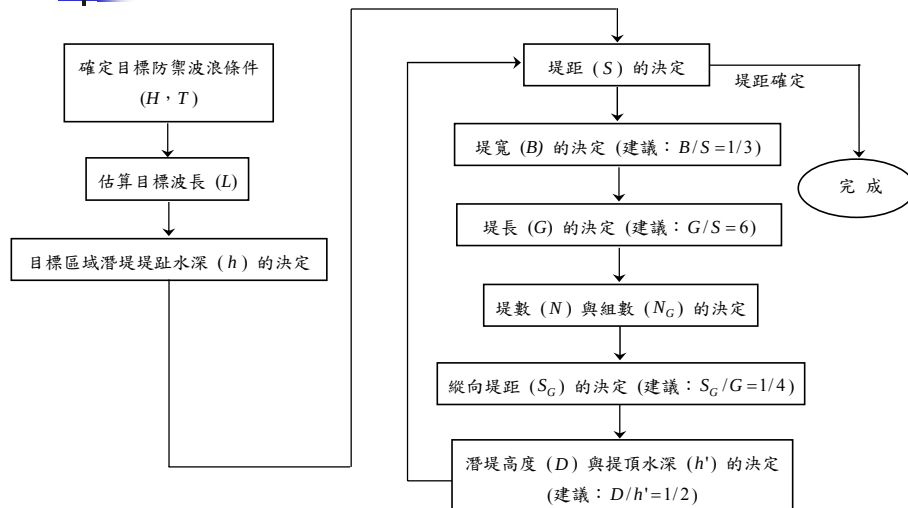
平面上縱向堤距的影響



期末簡報

報告日期：2007/11/15

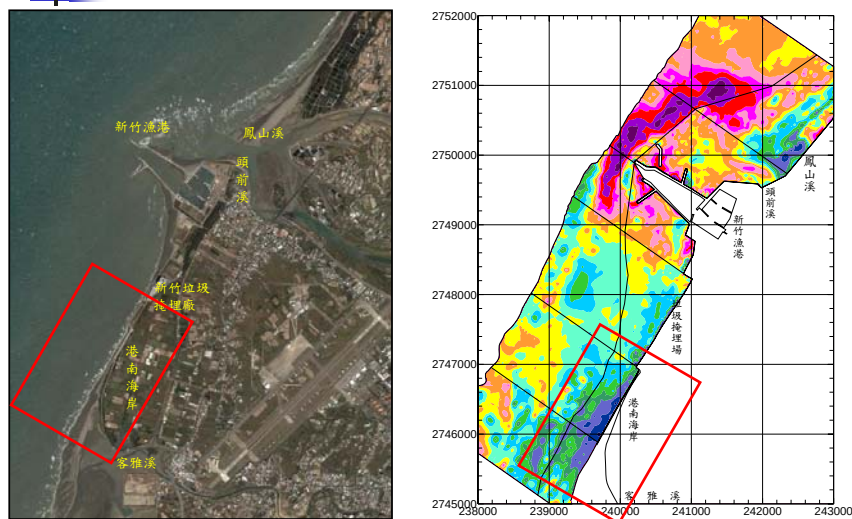
系列潛堤工法佈置設計流程



期末簡報

報告日期: 2007/11/15

現場模擬之初步研究-新竹港南海域

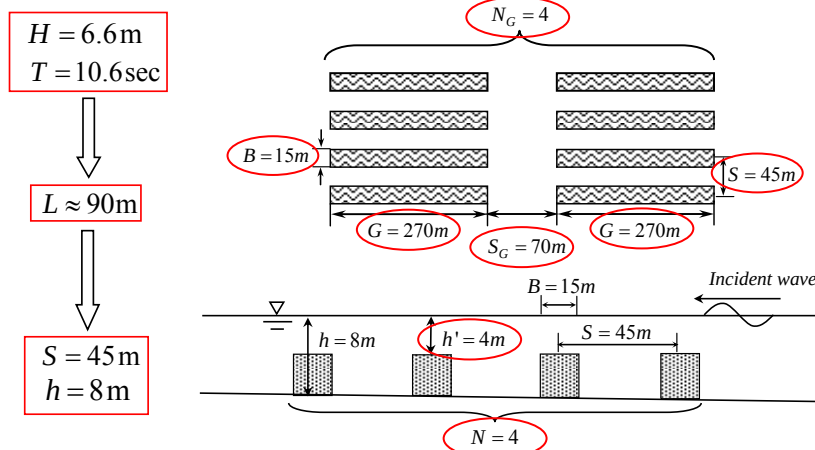


期末簡報

報告日期: 2007/11/15

現場海域佈置系列潛堤工法相關參數 尺度示意圖

- 以10年迴歸週期之颱風波浪作為設計條件

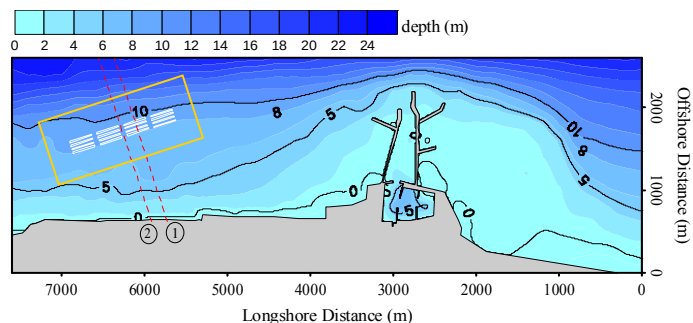


期末簡報

報告日期：2007/11/15

港南海域附近系列潛堤佈置示意圖

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

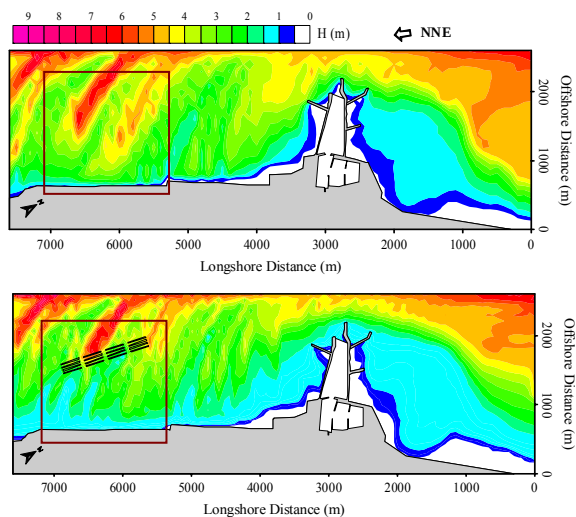


期末簡報

報告日期：2007/11/15

50年迴歸期颱風波浪作用下之波場分佈圖

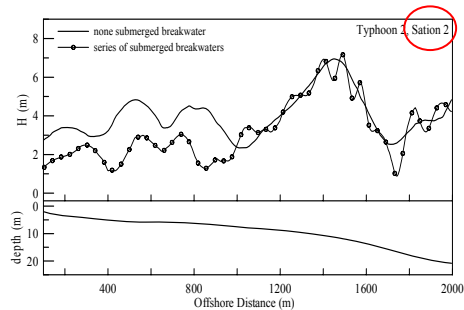
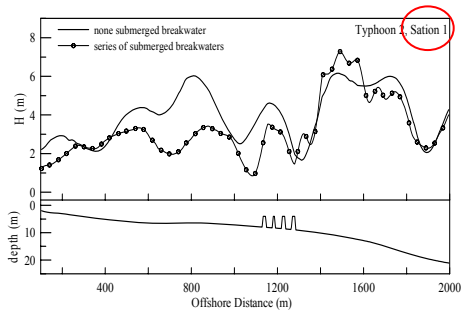
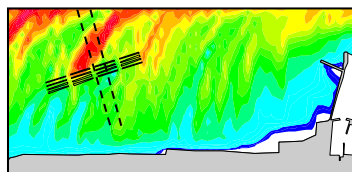
波浪條件

 $H = 9.10\text{m}$ $T = 12.7\text{ sec}$ 

期末簡報

報告日期：2007/11/15

50年迴歸期颱風波浪下之斷面波高分佈圖

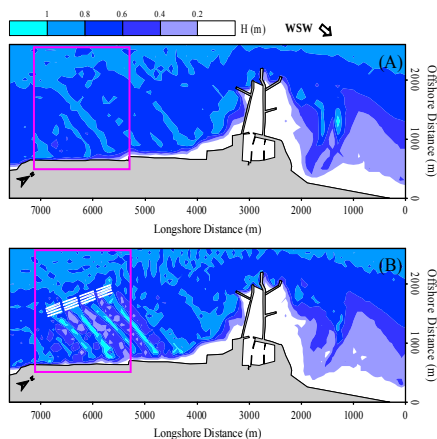


期末簡報

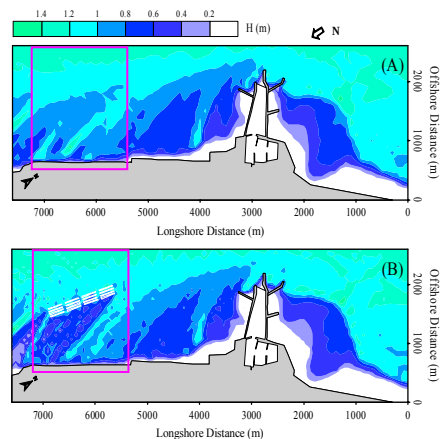
報告日期：2007/11/15

季風波浪作用下之波場分佈圖

夏季季風

 $H = 0.83\text{m}$, $T = 4.95\text{ sec}$ 

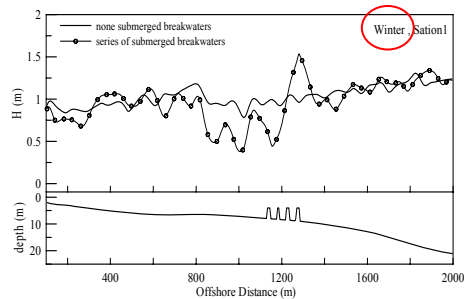
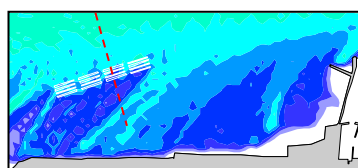
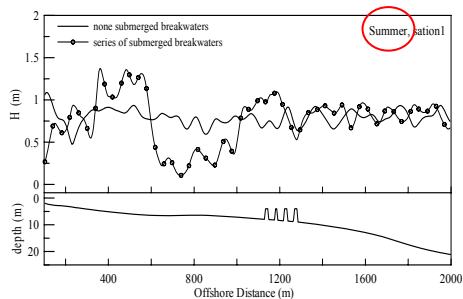
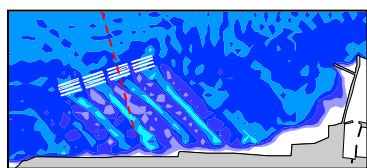
冬季季風

 $H = 1.27\text{m}$, $T = 5.28\text{ sec}$ 

期末簡報

報告日期：2007/11/15

季風波浪作用下之斷面波高分佈圖



期末簡報

報告日期：2007/11/15



結果與討論 (1/2)

1. **EEMSE 數值模式**：EEMSE 數值模式各式波浪變形效應，對於模擬波浪通過各式系列潛堤，其反射係數之計算與試驗結果均有相當的吻合度與合理性，故利用 EEMSE 當作本計畫研究之數值模式，應該具有一**定的可靠性**。
2. **平面布拉格共振因子之研究**：往昔學者多著重於斷面之**布拉格反射因子**的討論，本文將數值模式應用於**二維平面上**，並應用**能量觀點依序探討各項影響因子之特性**，做為現場規劃之依據。

期末簡報

報告日期：2007/11/15



結果與討論 (2/2)

3. **系列潛堤工法初步設計流程圖**：本研究延續過去研究的成果，提出**系列潛堤工法之初步施工流程圖**，說明系列潛堤工法應用時現場之可能性與可適性。
4. **系列潛堤工法於現場應用之模擬**：計算**港南海域季風及颱風波場**。得知布拉格共振機制於現場現應用的可能性，文中說明只要能**掌握各種影響因子，依序規劃出佈置流程，並輔以數值計算**，足以說明系列潛堤工法於現場應用的**可行性**。

期末簡報

報告日期：2007/11/15



下年度研究方向

- 整合過去幾年之研究成果，將過去對於系列潛堤工法的特性作歸納分析的動作，希望能進一步說明此工法應用於現場海域的可行性。
- 利用已發展的數值模式，於現場海域佈置更多樣化的系列潛堤，並導入複合式系列潛堤的概念，希望能使共振現象的條件範圍更為廣泛，進而達到多方面防禦的目標

期末簡報

報告日期：2007/11/15



報告完畢
謝謝大家

期末簡報

報告日期：2007/11/15