

96-27-7246

MOTC-IOT-95-H2DB003

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (2/4)



交通部運輸研究所

中華民國 96 年 4 月

96-27-7246

MOTC-IOT-95-H2DB003

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (2/4)

著 者：蔡立宏、許泰文、張人懿
柯拓宇、吳漢倫、邱炫琦

交通部運輸研究所
中華民國 96 年 4 月

96
系列潛堤應用於海岸保護之研究
(2/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1009600779
定價：200 元

系列潛堤應用於海岸保護之研究. (2/4) / 蔡立
宏等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運研
所， 民96
面： 公分
參考書目：面
ISBN 978-986-00-9254-7 (平裝)

1. 海岸工程 2. 堤

443.3

96006238

系列潛堤應用於海岸保護之研究(2/4)

著 者：蔡立宏、許泰文、張人懿、柯拓宇、吳漢倫、邱炫琦
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96年4月
印 刷 者：福島實業有限公司
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港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
國家書坊臺視總店：臺北市八德路3段10號B1·電話：(02) 25781515
五南文化廣場：臺中市中山路6號·電話：(04) 22260330

GPN：1009600779

ISBN：978-986-00-9254-7 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，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 (2/4)			
國際標準書號（或叢刊號） 978-986-00-9254-7 (平裝)	政府出版品統一編號 1009600779	運輸研究所出版品編號 96-27-7246	計畫編號 95-H2DB003
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：蔡立宏 聯絡電話：04-26583177 傳真號碼：04-26560661	合作研究單位：國立成功大學 計畫主持人：許泰文 研究人員：張人懿、柯拓宇、吳漢倫、邱炫琦 地址：台南市大學路 1 號 聯絡電話：06-2757575		研究期間 自 95 年 3 月 至 95 年 11 月
關鍵詞：沙漣底床、人工潛堤、布拉格反射、不規則波			
摘要： 本計畫探討不規則波通過各種型式之系列潛堤所發生的布拉格反射效應。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，進而推導含有各種波浪變形效應之不規則波浪緩坡方程式，並發展波浪數值模式，用以模擬不規則波通過各式系列潛堤的各種布拉格共振 (Bragg resonance)。本計畫同時進一步以水工模型試驗進行驗證數值模式之計算結果，並探討複合式系列潛堤效應。本文同時根據數值和實驗之結果，歸納布拉格現象可能之影響因子，並針對影響因子規劃各式模擬方案用以分析於不規則波條件下，波浪通過系列潛堤產生布拉格共振效應的特性，做為日後海岸保育防護工法之參考。			
出版日期	頁數	定費	本 出 版 品 取 得 方 式
96 年 4 月	130	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) 978-986-00-9254-7 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009600779	IOT SERIAL NUMBER 96-27-7246	PROJECT NUMBER 95-H2DB003
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Tsai Li-Hung PHONE: (04) 26583177 FAX: (04) 26560661			PROJECT PERIOD FROM March 2006 TO November 2006
RESEARCH AGENCY: National Cheng Kung University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Hsu Tai-Wen PROJECT STAFF: Chang Jen-Yi, Ko To-Yu, Chiu Hsuan-Chi, Wu Han-Lun ADDRESS: No. 1, Ta-Hsueh Road, Tainan 701, Taiwan, R.O.C PHONE: (06) 2757575~63249			
KEY WORDS: rippled bed, artificial bars, Bragg reflection, random waves			
ABSTRACT: In this project, the Bragg reflection for irregular waves propagating over a series of submerged breakwaters is investigated. A numerical model, based on Evolution Equation of Mild-Slope Equation (EEMSE) developed by Hsu et al. (2003), is used to simulate transformation of irregular waves propagating over the submerged breakwaters. We apply spectral method to split the significant wave spectrum into several wave components, and add the combined energy coefficient into the governing equation in terms of energy flux to deal with nonlinear wave shoaling, breaking and wave-wave interaction. The wave model is employed to study the Bragg reflection of irregular waves passing over a series of submerged breakwaters. Experiments are also conducted to provide comprehensive data to compare with numerical results. Various composite submerged breakwaters are assessed and proposed, too.			
DATE OF PUBLICATION April 2007	NUMBER OF PAGES 130	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.....	V
表 目 錄.....	V
符 號 表.....	VI
第一章 緒 論.....	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	1-10
1.3.1 研究方法.....	1-10
1.4 本文組織	1-16
第二章 理論基礎.....	2-1
2.1 演進型緩坡方程式	2-1
2.2 不規則波之緩坡方程式	2-5
2.2.1 控制方程式.....	2-5
2.2.2 能量消散係數.....	2-6
2.2.3 非線性淺化效應.....	2-6
2.2.4 碎波能量消散效應.....	2-8
2.2.5 非線性三波交互作用效應.....	2-9
2.3 邊界條件及起始條件.....	2-11
2.3.1 邊界條件.....	2-11
2.3.2 起始條件.....	2-13
2.4 數值方法與收斂條件.....	2-14
2.5 波譜分割與合成.....	2-16
第三章 不規則波之應用	3-1

3.1 反射係數公式.....	3-1
3.2 波譜的選擇.....	3-4
第四章 水工模型試驗	4-1
4.1 試驗設備.....	4-1
4.2 試驗配置與條件.....	4-3
4.3 試驗數據分析.....	4-4
4.4 入射波譜與透射波譜之比較	4-8
第五章 結果與討論	5-1
5.1 不規則波浪通過複合式矩形潛堤之研究	5-1
5.2 不規則波通過複合式沙漣底床反射係數之研究	5-4
5.3 不規則波通過各式矩形潛堤之研究	5-7
5.3.1 潛堤個數的影響.....	5-8
5.3.2 潛堤高度的影響.....	5-10
5.3.3 相對堤距的影響.....	5-12
第六章 結論與建議	6-1
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 波浪行經沙漣底床之反射波變化情形	1-5
(DAVIES 和 HEATHERSHAW , 1984).....	1-5
圖 1-2 波浪行經沙漣底床之水位變化情形	1-5
(DAVIES 和 HEATHERSHAW , 1984).....	1-5
圖 1-3 波浪通過沙漣底床之水位分佈歷線	1-6
(WEBSTER 和 WEHAUSEN , 1995).....	1-6
圖 1-4 布拉格共振之時序列 (WEBSTER 和 WEHAUSEN , 1995)6	
圖 1-5 波浪傳遞於正弦沙漣底床之波動系統	1-7
圖 2-1 邊界條件設置及格點佈置示意圖	2-11
圖 3-1 入射波與反射波座標示意圖	3-2
圖 3-2 混合波譜分割示意圖	3-6
圖 4-1 試驗水槽斷面圖	4-1
圖 4-2 造波機及蓄水池	4-2
圖 4-3 水位量測系統 (增幅器與波高計)	4-2
圖 4-4 BNC-2090 資料擷取平台	4-3
圖 4-5 試驗系列潛堤之佈置及參數示意圖	4-4
圖 4-6 試驗流程說明	4-7
圖 4-7 不同潛堤個數下 $S_1:S_2=1:0.75$ 時入射波與透射波譜之比較	4-8
圖 4-8 不同潛堤個數下 $S_1:S_2=1:1$ 時入射波與透射波譜之比較 ..	4-9
圖 4-9 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	4-9
圖 5-1 $N=4$ 時不同潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 之關係圖	5-2
圖 5-2 $N=6$ 時不同潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 之關係圖	5-3

圖 5-3	$N = 8$ 時不同潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 之關係圖.....	5-3
圖 5-4	複合式正弦沙漣底床地形示意圖	5-5
圖 5-5	波浪通過複合式沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 G1)	5-6
圖 5-6	規則波通過複合式沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 G2) ...	5-6
圖 5-7	$D/h = 1/2$ 時不同潛堤個數反射率與 $2S/L$ 的關係圖	5-9
圖 5-8	$D/h = 1/3$ 時不同潛堤個數反射率與 $2S/L$ 的關係圖	5-9
圖 5-9	$N = 4$ 時不同水深反射率與 $2S/L$ 的關係圖	5-11
圖 5-10	$N = 6$ 時不同水深反射率與 $2S/L$ 的關係圖	5-11
圖 5-11	$N = 8$ 時不同水深反射率與 $2S/L$ 的關係圖.....	5-12
圖 5-12	$N = 4$ 時潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 的關係圖	5-13
圖 5-13	$N = 6$ 時潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 的關係圖	5-14
圖 5-14	$N = 8$ 時潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 的關係圖.....	5-14

表 目 錄

表 1-1	前人研究方法及成果 (理論解析)	1-11
表 1-2	前人研究方法及成果 (數值模式)	1-12
表 1-2	前人研究方法及成果 (數值模式) (續).....	1-13
表 1-3	前人研究方法及成果 (現場及模型試驗)	1-14
表 3-1	不同個數成份波之合成波誤差比較表	3-7
表 4-1	水工試驗地形相關佈置條件表	4-5
表 5-1	波浪通過複合式沙漣底床試驗條件 (GUAZZELLI 等人 , 1992)	5-5
表 5-2	數值模擬之各式系列潛堤之佈置	5-7

符 號 表

A_w	波浪勢能函數的振幅
a	水位變化振幅
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	波浪吸收係數
α_{BJ}	可調整的參數
α_{EB}	調整比例係數 (tunable proportionality coefficient)
B	潛堤寬度
b	沙漣底床振幅
β_t	雙相位 (biphase)
C	波浪速度
C_i	單一成份波波浪速度
C_g	群波波速
$C_{\omega_i/2}$	發生交互作用之位相速度
C_r	Courant number
D	潛堤高度
D/h	相對水深
D_f	Diffusion number
D_i	單位時間單位面積產生的能量損失
D_{si}	非線性波浪淺化效應項
D_{di}	波浪碎波能量效應項
D_{nl3i}	波浪非線性交互作用效應項
D_{tot}	碎波造成之單位水體能量消散率
δ	底床變化參數

$\hat{\delta}$: 微分運算因子
 E_i : 單位面積的波浪能量
 E_I : 入射波總能量
 E_R : 反射波總能量
 E_{tot} : 波浪總能量
 ε : 攝動參數
 $\tilde{\varepsilon}$: 殘差
 ε_i : 入射波的相位差
 ε_r : 反射波的相位差
 f : 水深函數
 f_{high} : 波譜分割之最高頻率
 f_{low} : 波譜分割之最低頻率
 f_{Di} : 能量消散係數
 f_{si} : 非線性波浪淺化效應項
 f_{di} : 碎波能量消散項
 f_{nl3i} : 非線性三波交互作用效應項
 f_p : 尖峰頻率
 ϕ : 流速勢函數
 g : 重力加速度
 $H_{1/3}$: 示性波高
 H_i : 波高
 $(H_{non})_i$: 非線性波波高
 H_{0i} : 入射波波高
 H_{max} : 最大可能波高
 H_{rms} : 均方根波高
 H_s : 示性波高

H_b : 碎波波高
 h_b : 碎波水深
 h : 平均水深
 η : 水位函數
 i : $\sqrt{-1}$
 J_{nl3} : 交互作用係數
 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 : 入射波浪的波數
 k_i : 波浪之周波數
 k_c : 虛擬周波數
 $k_{\omega_i/2}$: 發生交互作用頻率之周波數
 k_{ω_i} : 中心頻率之周波數
 k_{xi} : 波浪周波數在 x 方向上的分量
 k_{yi} : 波浪周波數在 y 方向上的分量
 k_{si} : 淺化係數
 k_{ri} : 折射係數
 k_s : 線性波的淺化係數
 L : 入射波波長
 l : 沙漣底床沙漣長
 M : 波譜分割數
 m : 沙漣底床係數
 m_k : 波譜之 k 次動差
 N : 潛堤個數
 N_1 : 第一組系列潛堤顆數

N_2 : 第二組系列潛堤顆數
 N_w : 無因次參數
 $\bar{n}$: 時間運算因子
 $\nabla_h h$: 水深變化梯度
 $\nabla_h \eta$: 水位變化梯度
 $\nabla_h^2 h$: 底床曲率項
 $|\nabla_h h|^2$: 底床坡度平方項
 Q_b : 碎波微小量
 θ : 波浪入射邊界之角度
 R : 反射係數
 r : 波浪行經之路徑
 γ : 能量及中度參數
 $S(f)$: 波譜能量密度
 S_1 : 第一組系列潛堤之間距
 S_2 : 第二組系列潛堤之間距
 $\bar{T}$: 平均週期
 $T_{1/3}$: 示性週期
 T_p : 尖峰頻率的倒數
 t : 時間
 Δt : 時間變化量
 $\tan \beta$: 底床平均坡度
 $\bar{\omega}$: 平均角頻率
 ω : 周波率
 ω_i : 波浪之角頻率
 U_r : Ursell number
 ψ : 含有緩變時間量的流速勢函數

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。

過去對於系列潛堤的研究，較著重於單一或複合式正弦沙漣底床，且多以規則波浪進行布拉格反射之研究，然而實際海域的波浪紛紜不一，以單一的規則波浪所得的結果，是否可以直接應用於實際海域的工程設計，則有待進一步的研究，因此，本計畫將針對不同的系列潛堤佈置條件，探討在不規則波浪作用下的海岸保護效果，進行一系列的深入研究，並將此研究成果實際應用於實際台灣海岸之防護設計上。最後綜整所有的研究成果，以提出具體的設計方案，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

在天然的海岸上，常存在有平行於海岸之離岸沙洲 (sand bars)，Short (1975)² 和 Dolan (1983)³ 發現，波浪在這些沙洲頂點附近發生碎波，使波浪能量衰減，且海床沙漣能形成布拉格反射波而使入侵海岸的波浪變小，這些物理現象啟發學者對於海岸防禦工法有了新的構想。相關文獻利用平行海岸的人工沙洲或系列潛堤形成布拉格反射波，如此既能減小入侵海岸的波浪，降低波浪對海岸結構物的破壞，而且因為波浪能量的降低，亦減少海岸漂沙的流失。

波浪通過沙漣底床的布拉格共振現象的相關研究，包括現場觀測與模型試驗、理論解析及數值模擬。Davies 和 Heathershaw (1984)⁴ 及 Mei (1985)⁵ 發現沙漣波長若為入射波半倍波長的整數倍，即 $2\ell/L = n$ (n ：整數) 時，波浪於沙漣底床上逐漸形成駐波，並於底

床佈置區前方形成近乎共振反射，此現象稱為布拉格共振，Davies 和 Heathershaw (1984) 並以模型試驗驗證其正確性。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。圖 1-2 為布拉格共振的附近條件，波浪通過沙漣時 Davies 和 Heathershaw (1984) 所得之水位變化情形，圖中顯示由於布拉格反射，在沙漣前方呈現明顯駐波現象，在沙漣後方則以等水位振幅通過。圖 1-3 為 Webster 和 Wehausen (1995)⁶ 在波浪通過沙漣底床趨近布拉格共振條件下，所得之水位變化分佈歷線，圖中顯示波浪通過沙漣底床上方時，受共振機制影響，隨通過沙漣的距離愈長，波浪振幅逐漸減小，沙漣底床前方逐漸受反射波影響，產生較大的水位振幅，通過沙漣底床後，透射波與入射波相較下，已明顯減小。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 1-4 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。

在理論方面，Miles (1981)⁷ 對拉普拉斯方程式 (Laplace equation) 積分，利用線性波理論解析等水深底床因微小高度變化所造成之反射係數公式。Mei (1985) 於水平空間及時間項加入一組緩慢變量，致使產生較高階次量，再應用攝動法解析出共振及附近解。陳和湯 (1990)⁸、陳 (1991a；1991b；1992)⁹⁻¹¹ 利用攝動法，解析波浪通過正弦沙漣底床的波動流場，並探討共振的條件。陳和郭 (2000)¹² 在雙攝動參數的考量下，解析三度空間波形底床的共振及非共振解，並在共振的情形下，以波浪能通量隨時空成長的觀念，對布拉格共振在時間及空間的成長作詳細的分析，並針對單向或雙向正弦沙漣底床上之布拉格反射進行理論解析及討論。Webster 和 Wehausen (1995) 利用 GN 理論 (Green 和 Naghdi, 1986) 解析沙漣底床的波浪反射現象，方程式中不考量攝動參數，解析結果不受攝動參數的限制。陳和湯 (1990) 考慮二維空間，對於波浪傳遞於正弦沙漣底床，所形成的波動流場，進行理論解析，其示意圖如圖 1-5 所示。

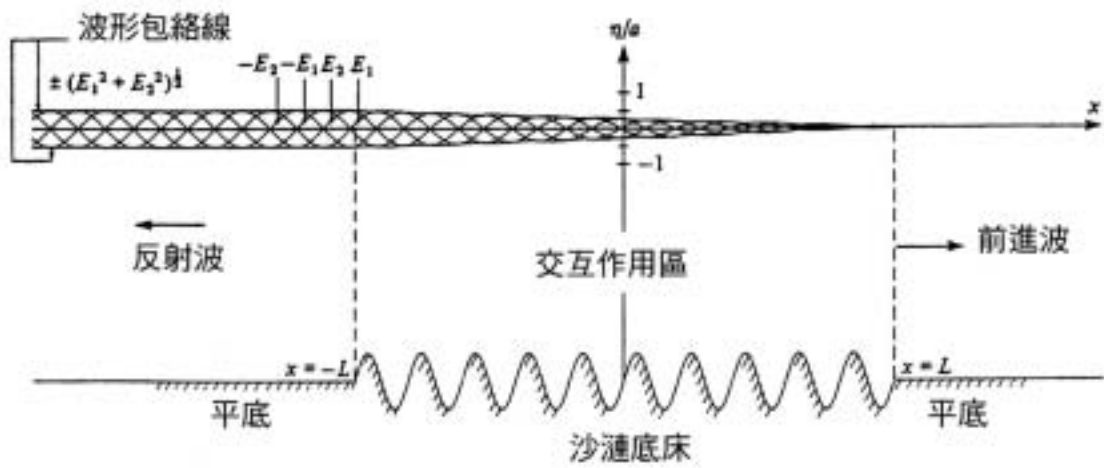


圖 1-1 波浪行經沙漣底床之反射波變化情形
(Davies 和 Heathershaw , 1984)

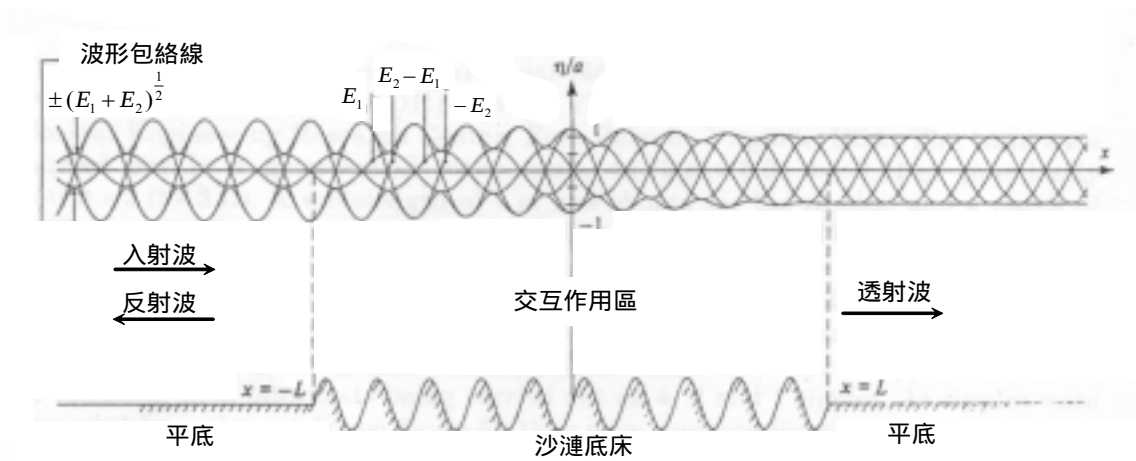


圖 1-2 波浪行經沙漣底床之水位變化情形
(Davies 和 Heathershaw , 1984)

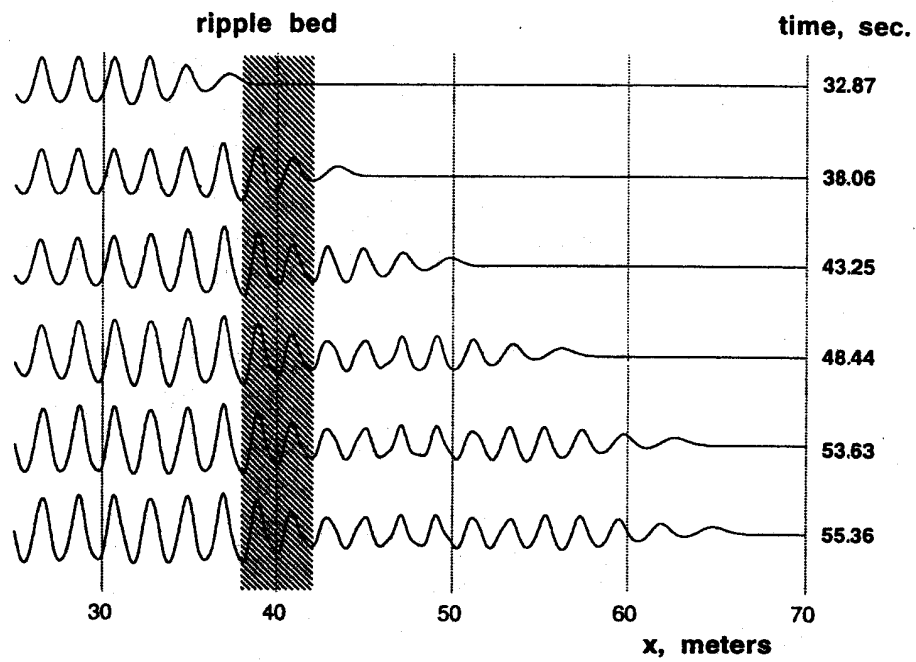


圖 1-3 波浪通過沙漣底床之水位分佈歷線
(Webster 和 Wehausen , 1995)

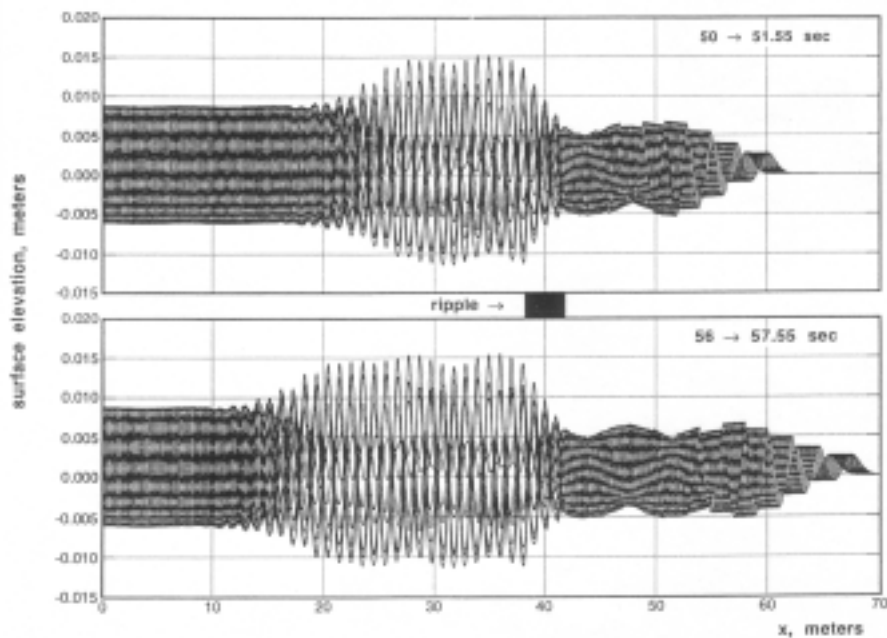


圖 1-4 布拉格共振之時序列 (Webster 和 Wehausen , 1995)

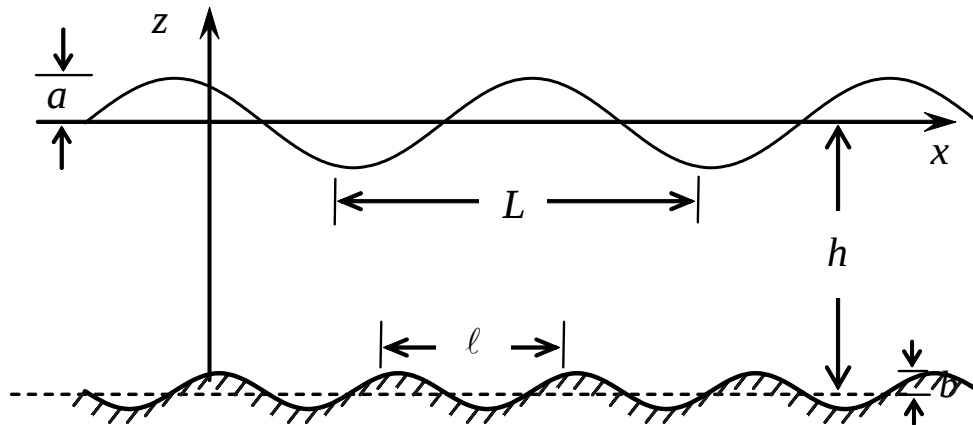


圖 1-5 波浪傳遞於正弦沙漣底床之波動系統

由於正弦沙漣底床在實際應用上具有困難度，故近代學者發展以人工沙洲 (artificial bars) 構成系列潛堤來消減波浪能量，探討波浪反射係數及布拉格反射的情形。Kirby 和 Anton (1990)¹³ 擴展 Miles 的理論，將人工沙洲形狀以富立葉級數 (Fourier series) 展開，並以 Miles 的反射係數公式，表示人工沙洲之布拉格反射情形，他們同時以理論證實人工沙洲佈置若符合布拉格反射的條件，會發生近似布拉格共振現象，此時反射係數最大。張等人 (1997)¹⁴ 擴展 Miles (1981) 的理論探討平底床不同型式系列潛堤及不同潛堤佈置條件之布拉格反射現象，並進行水工試驗。岳等人 (1997~2000)^{15~18} 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變化及布拉格反射現象。

有關波浪通過單一正弦沙漣底床 (single sinusoidal bed) 的布拉格共振反射研究，Davies 等人 (1989)¹⁹ 及 O'Hare 和 Davies (1993)²⁰ 發現布拉格反射現象，不僅在 $2k/K=1$ 發生主頻共振 (primary resonance)，而且在 $2k/K=2$ 也會發生次諧波共振 (second-harmonic resonance)。波浪通過複合式正弦沙漣底床 (multiply sinusoidal bed) 的研究，Belzons 等人 (1991)²¹ 以逐次近似模式 (step approximation model) 及 Guazzelli 等人 (1992) 以連續運算矩陣

(successive application matrix) 進行分析，研究結果指出波浪通過由兩個週波數正弦沙漣 ($K_1, K_2; K_2 > K_1$) 所疊加組成的底床時，在低頻處 $k = (K_2 - K_1)/2$ 的條件下會發生分諧波共振 (sub-harmonic resonance)；而在 $k = K_1$, $k = K_2$ 和 $k = (K_2 + K_1)/2$ 會發生高諧波共振 (higher-harmonic resonance)。他們研究結果亦顯示，分諧波與高諧波共振的反射係數值雖然比主頻共振低，但此現象在實際工程應用上，能增加高反射值的頻率範圍，具有實質應用的意義。他們同時指出，在越低頻區布拉格反射尖峰值往低頻處平移現象愈明顯。Mattioli (1991)²² 以逐次近似模式研究系列潛堤布拉格反射現象，研究成果指出矩形系列潛堤間距若等於入射波長亦會發生高頻的布拉格反射現象。Porter 和 Porte (2003)²³ 利用轉換矩陣法 (Transfer Matrix Method, TMM) 加入振盪項探討波浪通過正弦沙漣底床以及雙正弦沙漣底床的反射係數變化。

近年來有許多學者針對 Berkhoff (1972)²⁴ 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。Kirby (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 Porter (1995)²⁵ 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 Staziker (1995)²⁶ 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 (1997)²⁷ 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)²⁸ 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 Wen (2001a)²⁹ 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 Wen (2001b)³⁰ 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。

在實際應用方面，Mei (1988)³¹ 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)³² 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)³³ 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。郭等人 (1999)³⁴ 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。Guazzelli 等人 (1992)³⁵ 及 Zhang 等人 (1999) 提出複合式正弦沙漣佈置，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漣的個數及振幅的增加而增加。

綜合以上文獻回顧，本計畫分別就理論解析、數值模式及現場與

模型試驗方面，將研究學者的成果，整理如表 1-1 至表 1-3 所示。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，仍須考量適合實際海域水深地形以及海岸現場條件，本文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。

1.3 研究方法與預期成果

1.3.1 研究方法

本計畫預計分為四年執行，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，作為本計畫及今後研究參考。
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，本計畫擬應用 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，以驗證本計畫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

表 1-1 前人研究方法及成果 (理論解析)

作 者	研究方法	研 究 成 果
Miles (1981)	Laplace 方程式 積分	解析等水深底床因微小高度變化造成之波浪反射係數公式。
Kirby 和 Anton (1990)	擴展 Miles 理論	證實人工沙洲間距為波長之半，波浪產生近似布拉格共振現象，反射係數最大。
張 (1997) ³⁶	引用 Miles 理論	矩形型式人工沙洲形狀反射係數最大，人工沙洲個數達 8 個以上時，幾可達全反射。
Davies 和 Heathershaw (1984)	攝動法解析	發現沙漣間距為波長之半時，在沙漣底床前，形成駐波反射。
Mei (1985)	攝動法解析	於水平空間及時間引入緩慢變量，解析波形底床所產生的之共振反射。
陳和湯(1990)	攝動法解析	解析波形底床之波場至二階次量解，共振波隨傳遞移行空間成長，並隨底床尖銳度及長度而增強，但隨水深增加而指數遞減。
陳(1991a , 1991b , 1992)		
陳和郭(2000)		
Wang ³⁷ 等人 (2006)	引用 Miles 理論	利用 Miles 理論探討雙潛堤之布拉格共振現象

表 1-2 前人研究方法及成果 (數值模式)

作 者	研究方法	研 究 成 果
Kirby (1986) ³⁸	含有地形擾變量之延伸型態緩坡方程式 (EMSE)	以數值計算波浪通過正弦沙漣之反射係數，並與試驗結果比較。
Belzons 等人 (1991)	逐次近似法	相對底床振幅增加，反射係數尖峰值增加，相對的反射係數帶寬亦增加，在越低頻區，布拉格反射平移現象愈明顯。
Mattioli (1991)	逐次近似法	矩形系列潛堤間距若等於入射波長會發生布拉格反射現象。
Guazzelli 等人 (1992)	連續運算矩陣法	沙漣非為等間距時，會發生較多布拉格反射條件。
Massel (1993) ³⁹	含底床高階項及振盪項之延伸型態緩坡方程式	在單一沙漣的布拉格反射的計算與 EMSE (Kirby, 1986) 及試驗值相吻合。
O'Hare 和 Davies (1993)	包含振盪項的連續運算矩陣法	高階的布拉格共振反射會減低並向低頻區平移，並增加分諧波共振效應。
Chamberlain 和 Porter (1995)	含有底床高階項之修正型態緩坡方程式 (MMSE)	MMSE 可以模擬單一及複合沙漣的主頻共振及次諧波布拉格共振現象，並節省計算時間。
Suh 等人 (1997)	含底床高階項之時變緩坡方程式	底床擾動個數愈多，反射係數及平移愈大，隨 $2k/K$ 的反射係數震盪次數愈多，相對的帶寬愈小。

表 1-2 前人研究方法及成果 (數值模式) (續)

作 者	研究方法	研 究 成 果
岳等人 (1997~2000)	邊界元素法	探討不同波浪入射角度、潛堤形狀及潛堤堤邊坡之反射係數及布拉格共振反射現象。
Zhang 等人 (1999)	含底床高階項及地形擾變項之混合模式 (HM)	HM 在複合式沙漣的布拉格反射預測上比 MMSE 正確
Cho 和 Lee (2000) ⁴⁰	包含振盪項的特徵函數展開	波浪斜向入射角度增加，可視為對正弦沙漣底床入射波長的增加，故發生反射係數平移現象。
Hsu 和 Wen (2001a)	含底床高階項之演進型緩坡方程式 (EEMSE)	有效處理近岸波浪通過斜坡及擾變地形的波場分佈及布拉格反射現象。
Hsu 和 Wen (2001b)	在不含底床高階項之 EEMSE (Li, 1994) 加入碎波及能量消散項	有效描述波浪通過斜坡底床的碎波及能量消散其波場分佈。
Porter 和 Porte (2003)	包含振盪項的轉換矩陣法	有效描述波浪通過單一正弦及雙正弦沙漣底床的反射情形。
Hsu 等人 (2003)	含底床高階項及地形擾變項之演進型緩坡方程式	波浪通過系列潛堤之影響參數進行有系統的探討，包括潛堤高度、潛堤寬度、潛堤長度、潛堤個數、潛堤間距、潛堤間距比。
Hsu ⁴¹ 等人 (2006)	Boussinesq equation	利用 Boussinesq equation 做為模擬波浪通過潛堤之布拉格現象

表 1-3 前人研究方法及成果 (現場及模型試驗)

作者	研究方法	研究成果
Davies 和 Heathershaw (1984)	正弦沙漣試驗	發現沙漣間距為波長之半時，波浪於沙漣底床前逐漸形成布拉格反射。
Bailard 等人(1992)	現場試驗(佛羅里達卡納維爾角海岸)	波浪週期在預期的布拉格反射作用的條件時,反射係數可達 0.4 以上，且證實人工沙漣可防止海岸侵蝕。
Kirby 和 Auton (1990)	半餘弦形人工沙洲試驗	發現布拉格反射發生在 $2k/K = 1$ 以外的高頻及低頻區，反射係數尖峰值會往較低的 $2k/K$ 值平移。
Belzons 等人(1991)	雙頻正弦沙漣試驗	底床由兩種不同波長組成，會在 $k = (K_2 - K_1)/2$ 處發生分諧波布拉格共振。
Guazzelli 等人 (1992)	雙頻正弦沙漣試驗	布拉格反射可在沙漣非為等間距時發生，反射係數尖峰值會往較低的 $2k/K$ 預測值平移。
張等人 (1997)	矩形、半餘弦形及三角形人工沙洲試驗	相對水深 $D/h = 1/2$ ，無因次沙漣間距 $B/S = 0.24$ 及沙漣個數 $N = 8$ 時，反射係數可達 0.8 以上。
郭等人 (1999)	雙列潛堤模型試驗	適當的雙列潛堤佈置，能增加反射係數與減小透射係數，減緩海灘侵蝕或促進灘線前進。

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. 選擇台灣特定海岸區域進行海岸環境保護規劃研究，先從實測資料分析本海域歷年海岸線變遷、海域地形變化、漂砂過程以及海岸侵蝕原因探討。
2. 依據水深地形以及海氣象資料，提供數值模式計算之輸入資料。
3. 規劃特定海域可能的系列潛堤配置方案。
4. 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。
3. 提出具體的設計方案以供實際施工設計參考。

1.4 本文組織

本文於第一章，將國內外有關係列潛堤與布拉格反射的文獻，分成理論解析、數值模式及現場與模型試驗，加以分類整理，作為今後研究的參考。第二章敘述利用規則波之緩坡方式，推導不規則波的控制方程式，並說明邊界條件與數值方法的使用，最後針對波譜的分割與合成進行說明。第三章說明反射係數公式之選定與推導，並針對波譜之選擇問題進行探討。第四章說明本文欲模擬之土工模型試驗，其相關設備、條件、配置以及波浪率定的工作，最後，比較波譜能量的衰減，用以說明布拉格現象的效果。第五章將土工試驗結果以及前人研究之試驗與數值模擬比較，進而歸納複合式系列潛堤佈置的效果。進一步歸納各種潛堤影響因子，配合影響因子設置各種潛堤配置，並以數值模式模擬，最後歸納不規則波浪通過系列潛堤之相關特性。第六章為本計畫之結論與建議。

第二章 理論基礎

2.1 演進型緩坡方程式

波浪由外海向近岸傳遞過程中，可能產生的變形包括淺化、折射、繞射、反射、碎波與能量消散，這些變形效應通常並存發生，Berkhoff (1972) 提出緩坡方程式 (mild slope equation, MSE)，包含波浪變形的所有效應，他將 Laplace 方程式乘以滿足底床邊界條件 (BBC) 的水深因子，再由底部至水面對水深積分，將三維問題簡化為二維，以計算緩坡海床整個海域之平面波場。Equation Section 2

假設海水為非旋性且不可壓縮，故滿足 Laplace 方程式：

$$\nabla_h^2 \Phi + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2-1)$$

式中 $\Phi = \Phi(x, y, z, t)$ 為三維波浪流速勢； x 為垂直海岸方向座標，向岸為正； y 為沿岸方向座標，向右為正； z 為水深方向座標，向上為正； t 為時間； $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 為水平梯度因子。

線性波理論中，考慮水平底床之情況，則滿足自由表面動力邊界條件 (DFSBC) 及 BBC 之流速勢以複數型式表示為

$$\Phi = -i \frac{g}{\omega} f \eta \quad (2-2)$$

其中 $\eta = a \cos(kx - \omega t)$ 為水位函數，而 f 為水深函數，表示為

$$f = \frac{\cosh k(z + h)}{\cosh kh} \quad (2-3)$$

若底部為非水平底床且不隨時間而變，則底床邊界條件及自由表面動力邊界條件分別為

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = - \nabla_h \Phi \cdot \nabla_h h, \quad z = -h \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0, \quad z = 0 \quad (2-5)$$

將式 (2-1) 乘以水深函數 f ，從底部至水面積分，並考慮線性波之情況，可得

$$\int_{-h}^0 f \left(\nabla_h^2 \Phi + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) dz = 0 \quad (2-6)$$

式 (2-6) 利用格林第一定律 (Green's first identity) 可得下式之關係：

$$\int_{-h}^0 \left(f \nabla_h^2 \Phi + \Phi \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right) = - \left[f \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \Phi \frac{\partial f}{\partial z} \right]_{z=-h}^{z=0} \quad (2-7)$$

上式等號右邊，當上限 $z = 0$ 時，利用分散關係式 $\omega^2 = gk \tanh kh$ ，再比較式 (2-4) 之自由表面邊界條件後得：

$$f \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} - \Phi \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = 0 \quad (2-8)$$

當下限 $z = -h$ 時， $\partial f / \partial z = 0$ ，故由式 (2-4) 可得式 (2-7) 之等號右邊為

$$\left[f \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \Phi \frac{\partial f}{\partial z} \right]_{z=-h}^{z=0} = \left[-f \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right]_{z=-h} = [f \nabla_h \Phi \cdot \nabla_h h]_{z=-h} \quad (2-9)$$

利用 $\partial^2 f / \partial z^2 = k^2 f$ ，並將式 (2-9) 代入式 (2-7)，因此式 (2-7) 進一步化為

$$\int_{-h}^0 \left(f \nabla_h^2 \Phi + k^2 f \Phi \right) dz = - [f \nabla_h \Phi \cdot \nabla_h h]_{z=-h} \quad (2-10)$$

將式 (2-3) 代入式 (2-2) , 並將流速勢 Φ 與水位 η 互換則

$$\nabla_h^2 \Phi = -\frac{ig}{\omega} \left[f \nabla_h^2 \eta + 2 \frac{\partial f}{\partial h} \nabla_h \eta \cdot \nabla_h h + \eta \frac{\partial f}{\partial h} \nabla_h^2 h + \eta \frac{\partial^2 f}{\partial h^2} (\nabla_h h)^2 \right] \quad (2-11)$$

故式(2-10)改寫為

$$\begin{aligned} & \int_{-h}^0 \left[f^2 \nabla_h^2 \eta + 2 f \frac{\partial f}{\partial h} \nabla_h \eta \cdot \nabla_h h + \eta f \frac{\partial^2 f}{\partial h^2} (\nabla_h h)^2 + \eta f \frac{\partial f}{\partial h} \nabla_h^2 h + k^2 f^2 \eta \right] dz \\ &= - \left[f^2 \nabla_h h \cdot \nabla_h \eta + f \frac{\partial f}{\partial h} \eta (\nabla_h h)^2 \right]_{z=-h} \end{aligned} \quad (2-12)$$

根據雷伯尼茲法則 (Leibnitz rule) , 並假設水深變化是緩變的 , 水深變化梯度遠小於水位之變化梯度 , 即 $\nabla_h h \ll \nabla_h \eta$, 各項高階項可以忽略 , 故可得

$$\nabla_h \cdot \int_{-h}^0 f^2 \nabla_h \eta dz + \int_{-h}^0 k^2 f^2 \eta dz = 0 \quad (2-13)$$

上式第二項乘 g , 並對水深函數 f^2 積分 , 同時利用分散關係式、 $\omega/k = C$ 以及 $\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, t) f(z, h)$, 則可得 Berkhoff (1972) 所提出橢圓型式之緩坡方程式 (Elliptic Mild Slope Equation)

$$\nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \phi) + k^2 CC_g \phi = 0 \quad (2-14)$$

Booij (1983)⁴² 利用 $\partial^2 \eta / \partial t^2 = -\omega^2 \eta$ 的關係式 , 將 MSE 改成雙曲線型式緩坡方程式 (Hyperbolic Mild Slope Equation) , 即

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \phi) + (k^2 CC_g - \omega^2) \phi = 0 \quad (2-15)$$

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 , 式 (2-12) 中有關海床坡度項 $\nabla_h h$ 以及曲率項 $\nabla_h^2 h$ 再加以整理 , 得到新的緩坡方程式。

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \phi) + \left(k^2 CC_g - \omega^2 + F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 g k |\nabla_h h|^2 \right) \phi = 0 \quad (2-16)$$

式中

$$F_1 = \frac{-4kh \cosh kh + \sinh 3kh + \sinh kh + 8(kh)^2 \sinh kh}{8 \cosh^3 kh (2kh + \sinh 2kh)} - \frac{kh \tanh kh}{2 \cosh^2 kh} \quad (2-17)$$

$$F_2 = \frac{\operatorname{sech}^2 kh}{6(2kh + \sinh 2kh)^3} \left[8(kh)^4 + 16(kh)^3 \sinh 2kh - 9 \sinh^2 2kh \cosh 2kh + 12kh(1 + 2 \sinh^4 kh)(kh + \sinh 2kh) \right] \quad (2-18)$$

Hsu 和 Wen (2001) 依據 Mei (1983)⁴³ 之建議，假設波浪變形隨一緩慢時間變量 $\bar{t} = \varepsilon t$ 緩慢變化， ε 為攝動參數， $\varepsilon \ll 1$ ，則波浪流速勢函數可進一步表示為

$$\phi(x, y, t) = \psi(x, y, \bar{t}) e^{-i\omega t} \quad (2-19)$$

式 (2-20) 中 ψ 為含有緩慢時間變量流速勢函數。將式 (2-21) 代入式 (2-15) 雙曲線型緩坡方程式中，並將二階微小量省略，只保留一階以下各項，則可得時變性拋物線型演進緩坡方程式 EEMSE

$$-2\omega i \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \psi) + \left(k^2 CC_g + F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 g k |\nabla_h h|^2 \right) \psi = 0 \quad (2-22)$$

2.2 不規則波之緩坡方程式

2.2.1 控制方程式

本計畫以波譜分割法處理不規則波浪問題，將不規則波視為由無數個單一成份波組成，分別進行計算後再予以合成不規則波之變形，對於單一成份波之計算，本計畫擬以演進型緩坡方程式 EEMSE 作為控制方程式，同時仿照 Isobe (1987)⁴⁴ 之處理方式，在方程式中加入能量消散係數 f_{Di} ，如下所示：

$$-\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot [(CC_g)_i \nabla_h \phi_i] + \left[(k^2 CC_g)_i (1 + if_{Di}) - \omega_i^2 + F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 g k |\nabla_h h|^2 \right] \phi_i = 0 \quad (2-23)$$

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

為簡化式 (2-23)，引用 Radder (1979)⁴⁵ 之尺度因子，如下所示：

$$\Psi_i = \frac{\phi_i}{\sqrt{(CC_g)_i}} \quad (2-24)$$

則式 (2-23) 可簡化如下：

$$-\frac{2\omega_i i}{(CC_g)_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} = \nabla_h^2 \phi_i + (k_c^2)_i \phi_i \quad (2-25)$$

其中 k_c 為虛擬週波數，如下式所示

$$(k_c^2)_i = k_i^2 (1 + if_{Di}) - \frac{\nabla_h^2 \sqrt{(CC_g)_i}}{\sqrt{(CC_g)_i}} + \frac{[F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 (\nabla_h h)^2 g k_i]}{(CC_g)_i} \quad (2-26)$$

式 (2-25) 即為本計畫計算單一成份波之控制方程式。

2.2.2 能量消散係數

對於波浪的能量方程式，可藉由分離緩坡方程式中的實部及虛部推得。波譜分割後的每一個成份波，其波浪勢能函數可以表示為 $\phi = A_w e^{is}$ ，將其代入式 (2-15) 中，並分離方程式中的實部與虛部，再藉由式 (2-2) 波浪勢能函數與水位變化函數的關係，將波浪勢能函數之振幅 A_w 代換為水位變化振幅 a ，則可推得下列一組方程式，如下所示：

$$\frac{1}{a_i} \frac{\partial^2 a_i}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial s_i}{\partial t} \right)^2 = (CC_g)_i [k_i^2 - (\nabla_h s_i)^2] - \omega_i^2 + \frac{\nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h a)_i}{a_i} \quad (2-27)$$

$$-\frac{a_i^2}{\omega_i} \frac{\partial^2 s_i}{\partial t^2} - \frac{2a_i}{\omega_i} \frac{\partial s_i}{\partial t} \frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla_h \cdot \left(\frac{a^2 CC_g \nabla_h s}{\omega} \right)_i = - \left(\frac{fa^2 CC_g k^2}{\omega} \right)_i = -D_i \quad (2-28)$$

式中 D_i 為單位時間內每單位面積所產生的能量損失，其中包含有 (a) 波浪非線性淺化效應 ($D_i = D_{si}$)、(b) 波浪碎波能量消散效應 ($D_i = D_{di}$) 及 (c) 波浪非線性交互作用效應 ($D_i = D_{nl3i}$)。若在穩態情況下，且 $\theta \approx 0^\circ$ ， $\nabla S_i = 1$ ，則式 (2-28) 可簡化為一維波浪能量通率方程式，如下所示：

$$\frac{d(EC_g)_i}{dx} = -D_i = -f_{di} k_i (EC_g)_i \quad (2-29)$$

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

2.2.3 非線性淺化效應

關於波浪淺化效應時波高所需的修正量，本計畫依照能量通率的

觀點，結合 Shuto (1974)⁴⁶ 提出的非線性淺化波高公式，推導出波浪的淺化修正量。假設非線性波高分佈可表示為 $\tilde{H}_i = H_i + (H_{non})_i$ ，其中 $\tilde{H}_i$ 為波浪的總波高， H_i 為線性波浪理論下的波高， $(H_{non})_i$ 為受非線性效應影響所產生的非線性波高。將上式代入式(2-29)波浪的能量通率方程式，並假設 $D_i = D_{si}$ 及 $f_i = f_{si}$ ，則波浪的過剩能量通率可表示為

$$-D_{si} = \frac{1}{8} \rho g \frac{d}{dx} [(2HH_{non} + H_{non}^2)C_g]_i \quad (2-30)$$

其所對應的能量通率方程式為

$$\frac{d(EC_g)_i}{dx} = -D_{si} = -f_{si} k_i (EC_g)_i \quad (2-31)$$

而 Shuto (1974) 提出之斜坡底床上的非線性淺化公式如下所示：

$$\left\{ \begin{array}{ll} \left(\frac{H}{H_0} \right)_i = \sqrt{\frac{1}{2n_i} \frac{1}{\tanh k_i h}} & \text{for } U_r \leq 30 \\ H_i h^{2/7} = \text{const} & \text{for } 30 < U_r \leq 50 \\ H_i h^{5/2} (\sqrt{U_r} - 2\sqrt{3}) = \text{const} & \text{for } U_r > 50 \end{array} \right. \quad (2-32)$$

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

將上式三種情況分別代入式(2-31)，並應用 $\frac{d(\quad)_i}{dx} = \frac{dh}{dx} \frac{d(\quad)_i}{dh} = -\tan \beta \frac{d(\quad)_i}{dh}$ 之關係，其中 $\tan \beta$ 為底床平均坡度，因此可整理得

$$f_{si} = \begin{cases} 0 & \text{for } U_r \leq 30 \\ \frac{1}{k_i h} \left(-\frac{4}{7} + s_1 + s_2 \right) \tan \beta & \text{for } 30 < U_r \leq 50 \\ \frac{1}{k_i h} \left(-\frac{3\sqrt{U_r} - 10\sqrt{3}}{1.5\sqrt{U_r} - 2\sqrt{3}} + s_1 + s_2 \right) \tan \beta & \text{for } U_r > 50 \end{cases} \quad (2-33)$$

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

2.2.4 碎波能量消散效應

關於碎波消耗項本計畫採用 Eldeberky 和 Battjes (1995)⁴⁷ 之理論，首先將 Battjes 和 Janssen (1978)⁴⁸ 之碎波公式推衍至波譜型式，如下所示：

$$S_{br}(\omega_i, \theta_i) = -\frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\omega_i, \theta_i) \quad (2-34)$$

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

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\bar{\omega}}{2\pi} \right) H_{\max}^2 \quad (2-35)$$

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

$$Q_b = \exp \left[\frac{1 - Q_b}{(H_{rms} / H_{\max})^2} \right] \quad (2-36)$$

$$H_{\max} = \frac{0.88}{k} \tanh\left(\frac{\gamma kh}{0.88}\right) \quad (2-37)$$

此處

$$\gamma = 0.5 + 0.4 \tanh\left(33 \frac{H_{rms,0}}{L_0}\right) \quad (2-38)$$

上式中 H_{rms} 為波浪均方根波高，而 $H_{rms,0}$ 為入射波浪之均方根波高， L_0 為入射波之波長。將式 (2-34) 代入式 (2-31) 中，可推得如下關係：

$$\frac{d}{dx}(EC_g)_i = (S_{br})_i = -f_{di} k_i (EC_g)_i \quad (2-39)$$

故

$$f_{di} = -\frac{(S_{br})_i}{k_i (EC_g)_i} \quad (2-40)$$

而碎波指標本計畫選用 McCowan (1894)⁴⁹ 提出之公式進行判斷，碎波判斷式如下所示：

$$\frac{H_b}{h_b} > 0.78 \quad (2-41)$$

式中 H_b 為碎波波高， h_b 為碎波水深。

2.2.5 非線性三波交互作用效應

波浪傳遞至淺水時，受非線性效應之影響，會在波譜主頻與倍頻處產生能量的重新分配，使得波浪能量會由低頻處往高頻區移動，因此波浪整體的平均週期有變小之趨勢。而對於非線性三波交互作用項，最早加入模式計算的為 Eldeberky 和 Battjes (1995)，Eldeberky (1996)⁵⁰ 發表應用 LTA (lumped triad approximation) 來計算三波交互作用項，如下所示：

$$S_{nl3}(\omega_i, \theta_i) = S_{nl3}^-(\omega_i, \theta_i) + S_{nl3}^+(\omega_i, \theta_i) \quad (2-42)$$

其中

$$S_{nl3}^+(\omega_i, \theta_i) = \max \left\{ \begin{array}{l} 0, \\ \alpha_{EB} 2\pi (CC_g)_i (J_{nl3}^2)_i |\sin(\beta_t)| E^2(\omega_i/2, \theta_i) - 2 E(\omega_i/2, \theta_i) E(\omega_i, \theta_i) \end{array} \right\} \quad (2-43)$$

$$S_{nl3}^-(\omega_i, \theta_i) = -2S_{nl3}^+(2\omega_i, \theta_i) \quad (2-44)$$

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

$$\beta_t = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh \left(\frac{0.2}{U_r} \right) \quad (2-45)$$

而三個波波交互作用發生時 U_r 的範圍為 $1116 > U_r > 11$ 。 J_{nl3} 為交互作用係數 , 由 Madsen 和 Sørensen (1993)⁵¹ 建議其表示式為

$$(J_{nl3})_i = \frac{k_{\omega_i/2}^2 (g h + 2 C_{\omega_i/2}^2)}{k_{\omega_i} h (g h + \frac{2}{15} g h^3 k_{\omega_i}^2 - \frac{2}{5} \omega_i^2 h^2)} \quad (2-46)$$

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

將式 (2-42) 代入式 (2-31) 可得

$$\frac{d(EC_g)_i}{dx} = -f_{nl3i} k_i (EC_g)_i = (S_{nl3})_i \quad (2-47)$$

即

$$f_{nl3i} = -\frac{(S_{nl3})_i}{k_i(EC_g)_i} \quad (2-48)$$

2.3 邊界條件及起始條件

2.3.1 邊界條件

對於波浪通過邊界時所需給定的邊界條件，本文採用輻射邊界條件 (radiation boundary condition) 來加以處理。輻射邊界條件為 Sommerfeld (1964) 所提出，其物理意義為當波浪通過邊界時散射波 (scattering waves) 呈輻狀衰減。其數學表示式如下所示：

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \alpha \frac{\partial \phi_i}{\partial t} + C_i \frac{\partial \phi_i}{\partial r} = 0, \quad \text{在 } \partial B \quad (2-49)$$

式中 $\alpha = (1 - R / (1 + R))$ 為波浪吸收係數； R 為反射係數； $C_i = \omega_i / k_i$ 為波速； $r = |r| = x \cos \theta + y \sin \theta$ 為波浪行經之路徑； θ 為波浪入射邊界的角， ∂B 為波浪所通過的邊界。邊界條件與格點佈置示意圖如圖 2-1 所示。

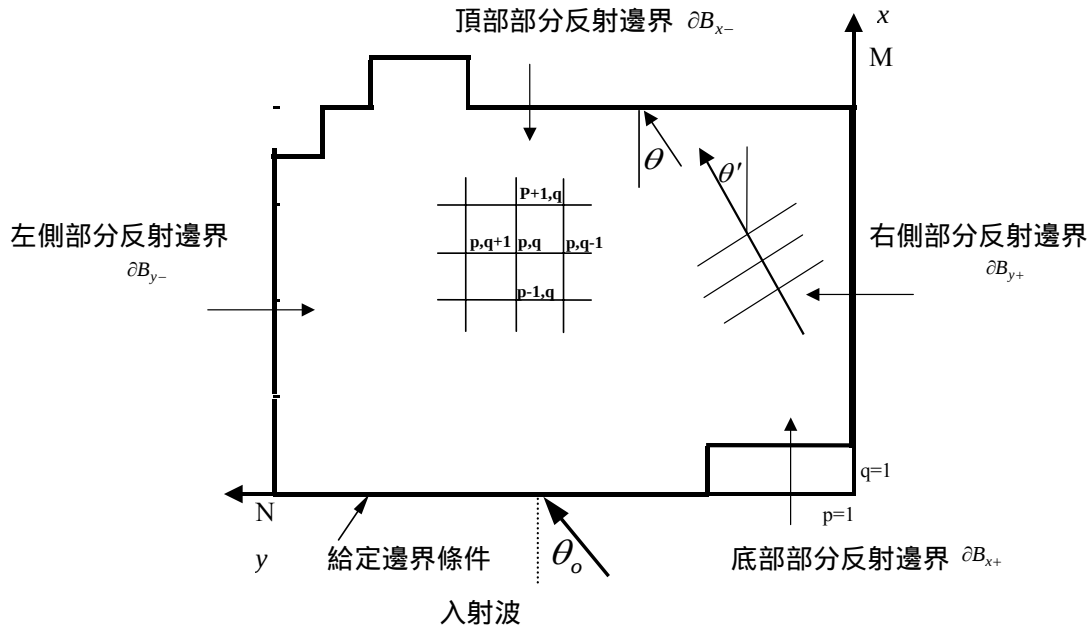


圖 2-1 邊界條件設置及格點佈置示意圖

假設波浪的速度勢能函數在卡氏直角座標上可表示為

$$\phi_i = a_i e^{i(k_{xi}x + k_{yi}y - \omega_i t)} \quad (2-50)$$

並利用下列關係式

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \cos \theta, \quad \frac{\partial r}{\partial y} = \sin \theta \quad (2-51)$$

則 x 方向及 y 方向上的輻射邊界條件為

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial x} \mp i\alpha k_{xi} \phi_i = 0, \quad \text{在 } \partial B_{x^+} \text{ or } \partial B_{x^-} \quad (2-52)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial y} \mp i\alpha k_{yi} \phi_i = 0, \quad \text{在 } \partial B_{y^+} \text{ or } \partial B_{y^-} \quad (2-53)$$

式中 $k_{xi} = k_i \cos \theta$ 及 $k_{yi} = k_i \sin \theta$ 為週波數 k_i 在 x 方向上及 y 方向上的分量； θ 為波浪在邊界上的角度； ∂B_x 及 ∂B_y 分別為垂直於 x 及 y 軸的邊界，如圖 2-1 所示。

邊界條件的型態則可依波浪於邊界處的特性區分為 (1) 完全吸收邊界條件 (fully absorbed boundary condition)；(2) 全反射或部分吸收邊界條件 (total reflection or partial absorption boundary condition)；及 (3) 給定邊界條件 (specified boundary condition)。本文模式使用之邊界條件在外海入射端為給定邊界條件，其餘為完全吸收邊界條件，以下分別介紹二種邊界條件之特性。

1. 完全吸收邊界條件

對於波浪通過邊界時沒有任何反射波浪產生，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。本文所採用的完全吸收邊界條件，其方程式如式 (2-52) 及 (2-53) 所示，其中 $\alpha = 1$ 。

2. 給定邊界條件

波浪由外海入射至近岸時，受水深地形及海岸結構物影響，產生散射波 (scattering wave)。當產生的散射波浪通過邊界時，邊界上會

包含兩種不同特性的波浪，一為已知的入射波浪，另一為未知的散射波浪。對於沿邊界 ∂B_{x^+} 或 ∂B_{x^-} 的給定邊界條件，其總速度勢能函數可表示為

$$\phi_i = \phi_{ii} + \phi_{si} \quad (2-54)$$

式中 $\phi_{ii} = \hat{\phi}_{ii} e^{i(k_i x \cos \theta' + k_i y \sin \theta' - \omega_i t)}$ 為入射波速度勢能函數， $\phi_{si} = \hat{\phi}_{si} e^{i(k_i x \cos \theta' + k_i y \sin \theta' + \omega_i t)}$ 為散射波速度勢能函數，將式 (2-54) 代入式 (2-52) 中，則可得

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial x} = \mp i \alpha k_{xi} \phi_i \pm 2i \alpha k_{xi} \phi_{ii} \quad , \text{ 在 } \partial B_{x^+} \text{ or } \partial B_{x^-} \quad (2-55)$$

上式中入射波浪的吸收係數 $\alpha = 1$ ，因此可重新整理為

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial x} = \mp i k_{xi} \phi_i \pm 2i k_{xi} \phi_{ii} \quad (2-56)$$

同理，沿著邊界 ∂B_{y^+} 或 ∂B_{y^-} 的邊界條件可表示為

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial y} = \mp i k_{yi} \phi_i \pm 2i k_{yi} \phi_{ii} \quad (2-57)$$

2.3.2 起始條件

由於演進型緩坡方程式為一時變性之緩坡方程式，因此在模式求解過程中，對於計算領域之各網格點，需要給定一個起始值來進行疊代計算。在給定起始條件過程中，首先計算波浪的波數向量，而對於波浪的波向角則利用司乃爾定律對每一網格點進行計算。而對於每一網格點上的波高分佈，則以等坡度底床下的線性波理論來加以預估，如下所示：

$$H_i = H_{0i} k_{si} k_{ri} \quad (2-58)$$

式中 k_{si} 為淺化係數， k_{ri} 為折射係數，其表示式分別如下所示：

$$k_{si} = \left[\frac{1}{(1 + 2k_i h / \sinh 2k_i h) \tanh k_i h} \right]^{1/2} \quad (2-59)$$

$$k_{ri} = (\cos \theta_0 / \cos \theta)^{1/2} \quad (2-60)$$

式中 θ_0 為外海入射角度，而起始波浪勢能函數 $\phi_i = 0$ ，若考慮一維方向波浪之變形，則 $\theta_0 = 0^\circ$ 且 $\cos \theta_0 = 1$ ， $\cos \theta = 1$ ， $k_{ri} = 1$ 。

2.4 數值方法與收斂條件

對於模式之數值方法，本文選用交替方向隱式法 (ADI 法) 來計算波場，在計算過程中分別對 x 及 y 方向進行交替疊代。而方程式之離散方式，則是利用二階中央差分法來離散控制方程式與邊界條件，所需求解的矩陣為帶寬 (band width) 為 3 的矩陣。

本文計算波場之控制方程式其離散式如下所示：

$$(f_i)_{p,q} \frac{(\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1/2} - (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}}}{\frac{1}{2} \Delta t} i = \hat{\delta}_x^2 (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1/2} + \frac{1}{2} (k_{ci}^2)_{p,q} (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1/2} + \hat{\delta}_y^2 (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}} + \frac{1}{2} (k_{ci}^2)_{p,q} (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}} \quad (2-61)$$

$$(f_i)_{p,q} \frac{(\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1} - (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1/2}}{\frac{1}{2} \Delta t} i = \hat{\delta}_x^2 (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1/2} + \frac{1}{2} (k_{ci}^2)_{p,q} (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1/2} + \hat{\delta}_y^2 (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1} + \frac{1}{2} (k_{ci}^2)_{p,q} (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1} \quad (2-62)$$

$$(f_i)_{p,q} = -\frac{2\omega_i}{(C_i C_{gi})_{p,q}} \quad (2-63)$$

式中

$$\hat{\delta}_x^2 (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}} = \frac{(\phi_i)_{p-1,q}^{\bar{n}} - 2(\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}} + (\phi_i)_{p+1,q}^{\bar{n}}}{\Delta x^2} \quad (2-64)$$

$$\hat{\delta}_y^2 (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}} = \frac{(\phi_i)_{p,q-1}^{\bar{n}} - 2(\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}} + (\phi_i)_{p,q+1}^{\bar{n}}}{\Delta y^2} \quad (2-65)$$

其中上標 “ $\bar{n}$ ” 表示時間因子，下標 “ p ” 和 “ q ” 分別為 x 和 y 方向上的格點，可參考圖 2-1 之格點示意圖， $\hat{\delta}$ 為微分運算子， Δx 和 Δy 分別為 x 與 y 方向之格網間距。

對於計算時所需的邊界條件，本文是以完全吸收邊界條件及給定邊界條件來加以計算。其離散式分別如下所示：

$$(\phi_i)_{p+1,q}^{\bar{n}+1} - (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1} = \frac{i\Delta x(k_{xi})_{p,q}}{2} [(\phi_i)_{p+1,q}^{\bar{n}+1} + (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1}] \quad (2-66)$$

$$(\phi_i)_{p+1,q}^{\bar{n}+1} - (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1} = -\frac{i\Delta x(k_{xi})_{p,q}}{2} [(\phi_i)_{p+1,q}^{\bar{n}+1} + (\phi_i)_{p,q}^{\bar{n}+1}] + 2i(k_{xi})_{p,q}(\phi_{ii})_{p,q}^{\bar{n}} \Delta x \quad (2-67)$$

在模式計算時，時間變化量 (Δt) 為疊代次數的參數指標，且此參數為影響收斂速度的重要因素。 Δt 參數的型式如下式所示：

$$\Delta t = N_w \frac{2\omega}{CC_g} \Delta x^2 \quad (2-68)$$

其中 N_w 為無因次參數，其值介於 $O(1)$ $O(10)$ 之間。

對於模式所設的時間變化量 (Δt)，在求解方程式的過程中，需滿足 Diffusion number $D_f = CC_g / (2\omega \Delta x^2 / \Delta t)$ 的限制，而為滿足邊界條件上的穩定條件，則需滿足 Courant number $C_r = \sqrt{gh} / (\Delta x / \Delta t)$ 的限制。在同時滿足這兩個限制條件的情況下，時間變化量 (Δt) 需遵守下式之情況

$$\text{Max}\{C_r, D_f\} \leq 1 \quad (2-69)$$

對於本文模式於疊代過程中所採用的收斂條件，採用 Li (1994b) 之殘差計算式 $\tilde{\varepsilon}$ ，當其值小於給定的計算誤差時表示達到收斂條件。殘差表示式如下所示：

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\sqrt{\sum_p \sum_q Abs(\phi_{p,q}^{\bar{n}} - \phi_{p,q}^{\bar{n}-1})^2}}{\sum_p \sum_q Abs(\phi_{p,q}^{\bar{n}})} \quad (2-70)$$

對於模式中計算所得的殘差，文中選用 $\tilde{\varepsilon} < 10^{-4}$ 為其收斂條件。

2.5 波譜分割與合成

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

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

$$\Delta f_i = \left[\left(\frac{f_{high}}{f_{low}} \right)^{\frac{1}{M-1}} - 1 \right] f_i \quad (2-71)$$

各成份波對應之頻率如下所示：

$$f_1 = f_{low} \quad (2-72)$$

$$f_M = f_{high} \quad (2-73)$$

$$f_{i+1} = \left(\frac{f_M}{f_1} \right)^{\frac{1}{M-1}} f_i \quad (2-74)$$

而各成份波對應之波高與週期以下式計算

$$H_i = 4\sqrt{S(f_i)\Delta f_i} \quad , \quad T_i = 1/f_i \quad (2-75)$$

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

由成份波所對應之波高及頻率，利用前述切割之觀念，可由式 (2-75) 反推成份波能譜與成份波波高之關係，如下所示：

$$S(f_i) = H_i^2 / 16\Delta f_i \quad (2-76)$$

根據 Longuet-Higgins (1952)⁵² 之推導指出，波浪之示性波高 $H_{1/3}$ 、平均週期 $\bar{T}$ 與波譜之各次動差如下所示：

$$H_{1/3} = 4.004\sqrt{m_0} \quad (2-77)$$

$$\bar{T} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2-78)$$

式中， m_k 為波譜之 k 次動差，以下式計算

$$m_k = \int_0^{\infty} S(f) f^k df \quad (2-79)$$

根據 Bretschneider (1968)⁵³、Goda 和 Nagai (1968)⁵⁴ 依實測數據

之分析結果顯示，示性週期與平均週期間之關係為

$$T_{1/3} = \bar{T} / 0.9 \quad (2-80)$$

由式 (2-77) 與式 (2-80) 即可求得此能譜所代表之波浪條件，亦即示性波高與示性週期。

第三章 不規則波之應用

3.1 反射係數公式

有關反射係數的計算公式，目前已有許多文獻提出不同的計算方法，如 Goda 和 Suzuki (1976)⁵⁵ 的兩點法 Mansard 和 Funke (1980)⁵⁶ 及 Chang (2002)⁵⁷ 的三點法。Goda 和 Suzuki (1976) 將波高計固定於斷面水槽，並將量測到的波形利用富立葉級數 (Fourier series) 展開，進而計算波浪的反射係數。Chang (2002) 提出頻率領域反射係數之推算方法，利用空間任意三點等間距的水位振幅，進而求出斜坡底床的波浪反射係數。由於本文模式計算所得為波場，而非時系列之波形，故以 Chang (2002) 之反射係數公式作為本計畫規則波反射係數之依據，對於單一規則波，其反射係數推算過程如下：

Equation Section 3

如圖 3-1 所示，任意水深合成波之波形可表示為

$$\begin{aligned}\eta(x,t) &= a_I \cos\left(\int_0^x k dx + \omega t + \varepsilon_i\right) + a_R \cos\left(\int_0^x k dx - \omega t + \varepsilon_r\right) \\ &= a_I \left\{ \left[\cos\left(\int_0^x kx + \varepsilon_i\right) + R \cos\left(\int_0^x k dx + \varepsilon_r\right) \right] \cos \omega t \right. \\ &\quad \left. + \left[\sin\left(\int_0^x k dx + \varepsilon_i\right) - R \sin\left(\int_0^x k dx + \varepsilon_r\right) \right] \sin \omega t \right\}\end{aligned}\quad (3-1)$$

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

$$\begin{aligned}|\eta| &= a_I [1 + R^2 + 2R \cos(2 \int_0^x k dx + \varepsilon_i + \varepsilon_r)]^{1/2} \\ &= a_0 k_s [1 + R^2 + 2R \cos(2 \int_0^x k dx + \varepsilon_i + \varepsilon_r)]^{1/2}\end{aligned}\quad (3-2)$$

式中 a_0 為外海入射波之振幅， k_s 為線性波之淺化係數。

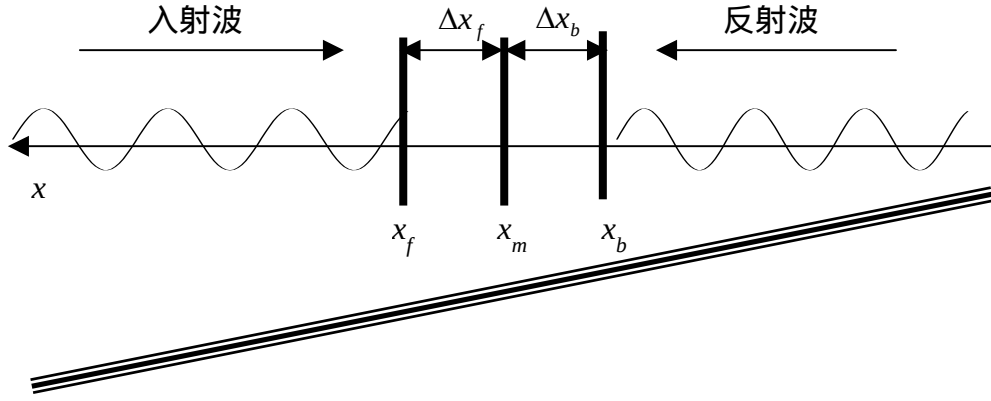


圖 3-1 入射波與反射波座標示意圖

由圖 3-1， x_f 處之空間位相函數為

$$\begin{aligned} \int_0^{x_f} k dx &= \int_0^{x_m} k dx + \int_{x_m}^{x_m + \Delta x_f} k dx = X_m + \int_{x_m}^{x_m + \Delta x_f} \left(k_m + \frac{dk}{dx}\right) dx \\ &= X_m + k_m \Delta x_f + \frac{dk}{dx} \bigg|_{x=x_m} \frac{\Delta x_f^2}{2} \end{aligned} \quad (3-3)$$

式中 k_m 為 x_m 處的週波數， dk/dx 為週波數隨距離的變化，其變化值可由微小振幅波的延散關係式 (Dispersion Relation) 求得，其關係式如下所示：

$$\frac{dk}{dx} = \frac{dk}{dh} \frac{dh}{dx} = \frac{k^2 \tan \beta}{(kh + 1/2 \sinh 2kh)} \quad (3-4)$$

式中 $\tan \beta$ 為底床坡度，如水平底床則 $\tan \beta = 0$ 。根據式 (3-2) 至式 (3-4)， x_b 、 x_m 及 x_f 三點之水位振幅分別為

$$|\eta|_b = a_0 k_{sb} \left[1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 - \alpha_b) \right]^{1/2} \quad (3-5)$$

$$|\eta|_m = a_0 k_{sm} \left[1 + R^2 + 2R \cos \alpha_1 \right]^{1/2} \quad (3-6)$$

$$|\eta|_f = a_0 k_{sf} \left[1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 + \alpha_f) \right]^{1/2} \quad (3-7)$$

其中

$$\alpha_1 = 2X_m + \varepsilon + \varepsilon_r \quad (3-8)$$

$$\alpha_b = 2k_m \Delta x_b + \frac{2k_m^2 \Delta x_b^2 \tan \beta}{2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m} \quad (3-9)$$

$$\alpha_f = 2k_m \Delta x_f - \frac{2k_m^2 \Delta x_f^2 \tan \beta}{2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m} \quad (3-10)$$

由式 (3-5) 至式 (3-7) , 則可得以下之關係 :

$$B = \left(\frac{|\eta_b|}{k_{sb}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 - \alpha_b)] \quad (3-11)$$

$$M = \left(\frac{|\eta_m|}{k_{sm}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos \alpha_1] \quad (3-12)$$

$$F = \left(\frac{|\eta_f|}{k_{sf}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 + \alpha_f)] \quad (3-13)$$

利用式 (3-11) 至式 (3-13) 可解得位相 α_1 及波浪反射係數 R 分別表示如下 :

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left[\frac{F - B + (B - M) \cos \alpha_f - (F - M) \cos \alpha_b}{(B - M) \sin \alpha_f + (F - M) \sin \alpha_b} \right] \quad (3-14)$$

$$R = \frac{B - F}{2a_0^2 [\cos(\alpha_1 - \alpha_b) - \cos(\alpha_1 + \alpha_f)]} \quad (3-15)$$

由已知之反射係數, 代入式 (3-5) 至式 (3-7) 可求出各點之入射波水位振幅, 至於各點之反射波水位振幅可由 $a_R = a_I \cdot R$ 求得。而目前本計畫所測試之地形皆以水平底床為主, 故於上面各式中先假令

$\tan \beta = 0$ 進行反射波之估算，則 α_1 、 α_b 、 α_f 退化如下所示

$$\alpha_1 = 2X_m + \varepsilon + \varepsilon_r \quad (3-16)$$

$$\alpha_b = 2k_m \Delta x_b \quad (3-17)$$

$$\alpha_f = 2k_m \Delta x_f \quad (3-18)$$

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

$$R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \quad (3-19)$$

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

$$E_I = \sum_i \left(\frac{1}{2} a_I^2 \right)_i \quad (3-20)$$

$$E_R = \sum_i \left(\frac{1}{2} a_R^2 \right)_i \quad (3-21)$$

由以上的分析可知，由波譜切割而成之各個成份波，先利用 EEMSE 模式，計算出各成份波之水位振幅，再以 Chang (2002) 之方法，分別求出各成份波之入射波與反射波振幅，代入式 (3-19) 至式 (3-21) 即可求得不規則波之反射係數。

3.2 波譜的選擇

一般而言，為了達到保護海岸的目的，人工潛堤均設置於淺水區

域或中間性水深，就波譜而言，TMA 波譜較能適用於淺水區域，而 JONSWAP 波譜則是有限吹送距離下，常被使用的標準波譜，兩者的差別在於 TMA 波譜比 JONSWAP 波譜多了一個水深函數，Bouws 等人 (1987)⁵⁸ 認為 JONSWAP 波譜亦可以適用於有限水深，故本文以 Goda (1999)⁵⁹ 提議之 JONSWAP 波譜，做為本文計算之波譜，其型式如下：

$$S(f) = \sigma_1 H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma_0^2]} \quad (3-22)$$

$$\sigma_1 = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (3-23)$$

$$T_p = \frac{T_{1/3}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}} \quad (3-24)$$

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

利用本文建議之混合分割方法，分割 JONSWAP 波譜之結果示於圖 3-2。由圖中顯示，尖峰頻率附近的能量變化較為迅速，而在高頻處的能量變化則較為緩慢。波譜混合分割的方法，主要利用密次方指數，來離散波浪頻率，在改善等頻率分割時，各成分波的能量差異太大，及等能量分割時，高頻部份其中心代表頻率所代表的範圍太大的缺點。由圖 3-2 可以看出，在高頻部份分割的間距，較尖峰頻率附近為寬，且在尖峰頻率附近之分割間距又不致於太窄，顯示混合分割的方法，能夠改善等能量分割及等頻率分割方法的缺點。

再者，為了驗證混合分割方法，能夠掌握波譜的特性，本文以週期 $T_{1/3} = 1.67921$ 秒，示性波高 $H_{1/3} = 0.01 m$ 之條件，利用式 (3-22) 得到 JONSWAP 波譜，選擇不同的成份波個數，再以本文之波譜分割與合成的方法，得到合成波之示性波高及週期，表 3-1 為不同個數成份波所得之誤差情形，由表中可以看出，各種成份波個數，其合成波之週期，誤差均在 1% 以下，而合成波波高的誤差，則隨分割成份波個數的增加而減少，基於計算時間的考量，本文以 50 個成份波，做為計算不規則波反射係數的依據。

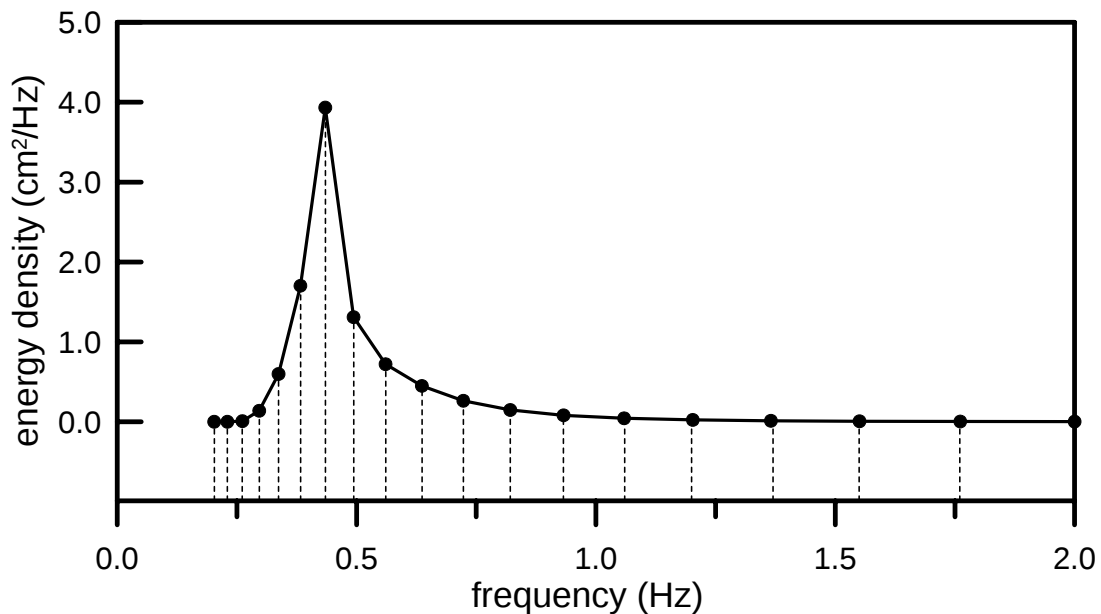


圖 3-2 混合波譜分割示意圖

表 3-1 不同個數成份波之合成波誤差比較表

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

第四章 水工模型試驗

過去有關布拉格反射係數之試驗，不管正弦沙漣底床或人工潛堤，均僅限於規則波之研究，然而實際海域的波浪紛紜不一，並非單一的規則波浪所能模擬，由單一規則波浪作用於結構物，所得之反射係數，應與不規則作用所得的結果有所出入，因此瞭解不規則波之布拉格共振情形，應是值得研究的課題。本文試驗主要針對在不規則波的條件下，波浪通過各式人工潛堤配置所產生之布拉格共振效應，進而分析歸納其特性，做為未來海岸防護施工的參考。茲將水工試驗設備、試驗過程及數據處理方法敘述如後。

4.1 試驗設備

本文之各項試驗均在成功大學水利暨海洋工程學系雷射實驗室完成。試驗水槽長 25 m × 寬 0.5 m × 高 0.6 m，試驗水槽前端設置不規則波造波機，尾端設有消波設施，水槽兩壁為強化透明玻璃，可藉透明玻璃觀察試驗進行時波浪的變化過程，如圖 4-1 所示。此不規則波造波機為日本 ISEYA 公司所設計製造，命名為“標的造波機”(target wave generator)，如圖 4-2 所示。其型式為一自動回授控制活塞式驅動系統，造波板長 60 cm × 寬 24 cm × 厚 0.4 cm 之不鏽鋼板，其進退運動由活塞式伺服馬達所控制，最大可以造出 20 公分波高(水深 40 公分時)，週期介於 0.5 秒 ~ 5.0 秒之間。於試驗水槽另一

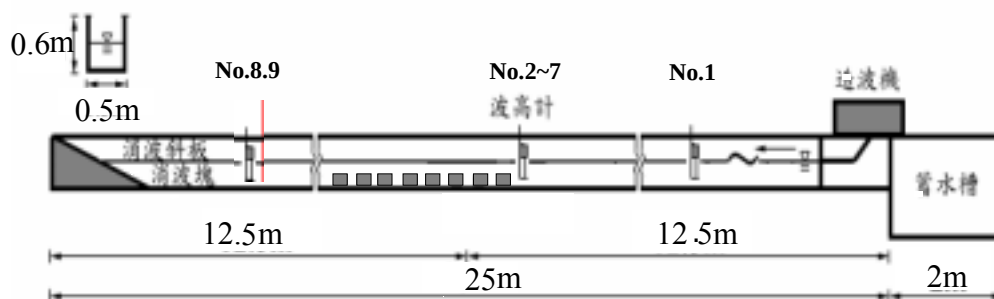


圖 4-1 試驗水槽斷面圖

端設置消波塊，其上並擺設消波斜板以及各式消波工具，經詳細量測空水槽之反射率約在 5 ~ 8 % 之間。本試驗之水位訊號是由盛邦科技公司所生產的 45 公分之雙測線型容量式波高計 (parallel-wire-resistance-type wave gauge) 所量得，如圖 4-3 所示。而透過波高計不同水位的變化將得到所對應之電壓值，則即可利用增幅器 (amplifier) 將量測到的電壓值放大，進一步運用美國 National Instruments 公司生產型號為 BNC-2090 的資料擷取平台，將所量得之類比訊號，經本實驗室自行撰寫的 Labview 程式，轉換為水位數位訊號，再經由電腦處理分析，便可得到即時波浪水位資料。另外，水位量測系統以及 BNC-2090 資料擷取平台，如圖 4-3 以及圖 4-4 所示。



圖 4-2 造波機及蓄水池



圖 4-3 水位量測系統 (增幅器與波高計)



圖 4-4 BNC-2090 資料擷取平台

4.2 試驗配置與條件

本試驗將在水平底床分別進行等間距以及複合式系列潛堤試驗，整體試驗於造波機前 17 公尺處進行第一個潛堤的配置，其餘潛堤則往尾端方向依序佈置。波高計則配置主要配置於三區，一為入射區，於造波板前 5 公尺放置 1 支波高計，藉以量測入射波浪。二為堤前區，於系列前堤前 0.9 公尺處放置 6 支波高計，藉以量測堤前水位變化，進而經過資料擷取系統及計算程式，得到所需之波高與反射率。三為系列潛堤後方等水深區域，此區放置 2 支波高計，用以觀測透射波傳遞的情形。

依據張等人 (1997) 的試驗，其分別以矩形、三角形、半餘弦形的結構物進行規則波之等間距系列潛堤試驗，而其中以矩形結構物配置下所得到的布拉格反射效應最為明顯，故本文於潛堤型式上僅考慮以矩形結構物來進行試驗。本文並參考蔡等人 (2003)⁶⁰ 所做的規則波通過複合式系列潛堤試驗，進而規劃各式地形配置用以模擬不規則波浪通過結構物的現象。

本文試驗類型主要分為兩大部分：(1) 水平底床配置等間距系列潛堤試驗；(2) 水平底床配置複合式系列潛堤試驗。

水工試驗的佈置，本文採用兩組不同潛堤間距 (s_1 及 s_2) 的組

合，當試驗潛堤為等間距擺設時，即 $S = S_1 = S_2 = 0.48 \text{ m}$ ，潛堤寬度為 $B = 0.24 \text{ m}$ ，潛堤高度為 $D = 0.1 \text{ m}$ ，水深則恆固定為 $h = 0.2 \text{ m}$ ，並分別進行潛堤個數 $N = 8, 6, 4$ 之試驗。若試驗配置改為複合式潛堤時，則將改變 S_1 與 S_2 的比值，使其分別為 0.75 與 1.25，並固定 $S = S_1 = 0.48 \text{ m}$ ，僅改變 S_2 之值。也就當 $S_1:S_2 = 1:0.75$ 時， $S_1 = 0.48 \text{ m}$ 、 $S_2 = 0.36 \text{ m}$ ；而當 $S_1:S_2 = 1:1.25$ 時， $S_1 = 0.48 \text{ m}$ 、 $S_2 = 0.60 \text{ m}$ 。然而複合式配置之試驗皆以相同的潛堤個數進行模擬 $N_1 = N_2 = N/2$ ， $N = 8, 6, 4$ ，且試驗潛堤寬度皆為 $B = 0.24 \text{ m}$ ，潛堤高度皆為 $D = 0.1 \text{ m}$ ，水深則恆固定為 $h = 0.2 \text{ m}$ 。考量造波機模擬不規則波時，因其各成分波之波高不一，故為了避免所產生之成分波高於示性波高太多而造成碎波現象，於是本試驗採用之示性波高為 $H_s = 0.02 \text{ m}$ ；波浪主頻範圍在 $f_p = 0.65 \sim 2.00 \text{ Hz}$ 之間，包含等間距與複合式地形本試驗共有 9 種不同潛堤佈置條件，每種潛堤佈置條件配合 27 種不同入射波浪主頻進行試驗。本文試驗詳細佈置圖如下圖 4-5 所示；詳細的試驗條件如下表 4-1 所示。

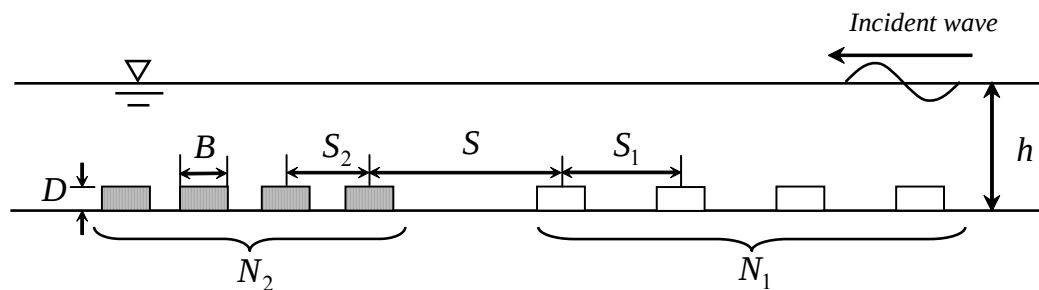


圖 4-5 試驗系列潛堤之佈置及參數示意圖

4.3 試驗數據分析

1. 資料擷取系統

試驗過程中，波高計所感應波浪水位連續變動的訊號經由增幅器 (amplifier) 將電壓值放大，資料擷取平台收集各波高計頻道類比

表 4-1 水工試驗地形相關佈置條件表

潛堤 型式	個數 N	N_1	N_2	堤寬 $B(m)$	堤高 $D(m)$	水深 $h(m)$	間距 $S_1(m)$	間距 $S_2(m)$	間距比值
矩形	8	4	4	0.24	0.10	0.2	0.48	0.36	$S1:S2=1:0.75$
								0.48	$S1:S2=1:1$
								0.60	$S1:S2=1:1.25$
	6	3	3					0.36	$S1:S2=1:0.75$
								0.48	$S1:S2=1:1$
								0.60	$S1:S2=1:1.25$
	4	2	2					0.36	$S1:S2=1:0.75$
								0.48	$S1:S2=1:1$
								0.60	$S1:S2=1:1.25$

(analogue) 資料後,再經由類比數位轉換卡 (A/D card) 將波高計輸出的類比資料轉換為數據 (digital) 資料存入電腦中,最後由本實驗室以 Labview 所寫的程式將其轉換為正確的水位資料。資料擷取系統所轉換出來的水位資料,目前未經過濾波處理,去除數據中的雜訊。每次實驗過程中,水位取樣時間為 180 秒,取樣頻率為 30 Hz,電腦波浪水位擷取過程如照片所示。

2. 不規則波之率定

本試驗室所使用之造波機於模擬不規則波時,須先計算目標波譜,其中幾個重要的特徵包括主頻、能量大小、以及波譜形狀。造波程式中提供三種波譜形式以供選用,分別為 JONSWAP、Pierson-Moscowitz、Bretschneider,如本文第三章所述本試驗將採用 JONSWAP 波譜,固定波譜的形式與參數後,主要輸入的內容為波浪的主頻 (f_p) 和主頻能量 ($S(f_p)$) 大小、以及水深修正(依試驗水深給定),然後造波機程式經過一系列的運算後可得到一個 numerical filter,此為造波機運動時所需輸入的相關電壓值,其後配合程式內部的 initial value 可以給予隨機相位來造波,最後需給予一衝程值

(att)。簡單而言之，固定使用同一個 numerical filter 造波可以得到相同主頻的不規則波，固定 initial value 則可固定不規則波各成分波之間的相位，而衝程值則影響到整體不規則波的波高大小，也就是波譜能量的大小。而實際上輸入的目標波譜與造波機實際造波量測出來的波譜並非完全相同，故本試驗的率定工作就是希望能使得量測到的波譜經過調整後，能接近我們希望的目標波譜。

本試驗採用 GODA (1999) 所提出的 JONSWAP 修正公式來計算目標波譜，而示性波高則採用 $0.02m_0$ 在 $f_p = 0.65 \sim 2.0$ Hz 之間，每隔 0.05 Hz 取一主頻計算 numerical filter，然後固定 initial value 的值，試驗不同的 att 值，直到量測直吻合所需之示性波高為止。經此過程將可以得到一系列不同主頻、示性波高相同的不規則波。然而為了配合造波機本身的限制（適用週期範圍約在 0.55 ~ 2.0 秒之間）以及結構物、水深等影響，故本試驗將定義 $S = S1 = 0.48m$ ，如此一來在頻率 0.65 ~ 2.0Hz 之間的波浪即可以概括 $2S/L = 0.5 \sim 2.5$ 範圍內的反射率。

3.反射率計算

有關試驗反射率的計算方法，本文採用 Mansard 和 Funke (1980) 所提出的最小二乘法，其理論基礎主要是以分散關係式來分離各成份波，波浪在不同的週期下速度不同，因此到達三個部同位置波高計的時間也不同，因此在波高的疊加上也會產生差異，藉由分散關係式和最小二乘法來計算出各成分波之間正確的相位關係，以此分離出入反射波。反射率計算上，以符合間距限制條件的三支波高計所測得的資料計算，又本試驗於潛堤前佈置 6 支波高計，因此在每一次的試驗，均可根據不同波高計組合，得到 3 ~ 15 個反射率值，再將全部的反射率平均，即得當次試驗之反射係數。多組的波高計組合，計算所得到的反射率值，其正確性更加提高。試驗內容、試驗步驟及資料處理流程如圖 4-6 所示。

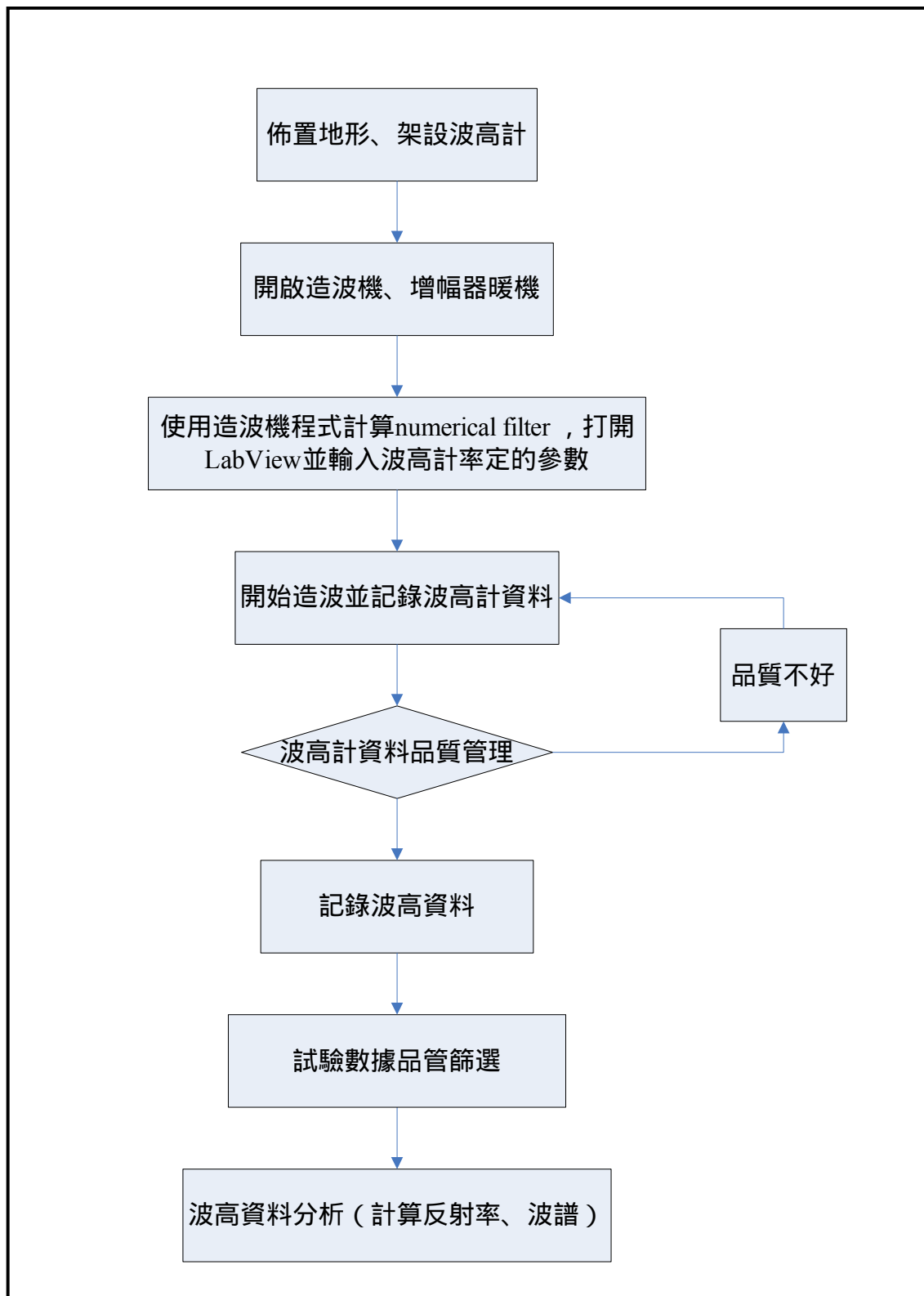


圖 4-6 試驗流程說明

4.4 入射波譜與透射波譜之比較

如節 4-1 所言，本文試驗於潛堤後方至消波段間的等深區，放置一根波高計，用以量測透射高。為證實系列潛堤的效用與能量衰減率，本節將針對波浪之入射與透射之波譜做一簡單比較。首先利用快速傅立業轉換將試驗水槽之第一支波高計所量到的入射波以及最後一支波高計所量得的透射波資料轉換為波譜資訊，並繪製比較。下圖 4-7 ~ 圖 4-9 則分別是 $S_1:S_2=0.75, 1, 1.25$ 時，波浪入射波譜與 $N=4, 6, 8$ 的情況下透射波譜之比較圖。所取的 $2S/L$ 皆約為 0.8 左右。觀察圖 4-7 ~ 圖 4-9，不難得知不管是潛堤個數為多少，當波浪通過系列潛堤之後，波譜能量皆有大幅衰減的趨勢，且隨著潛堤個數的增加，衰減的比率隨之增高，尤其在主頻的部分能量迅速遞減。由此可知當潛堤個數增加時，能量確實會隨之減少，此一現象與規則波相符。

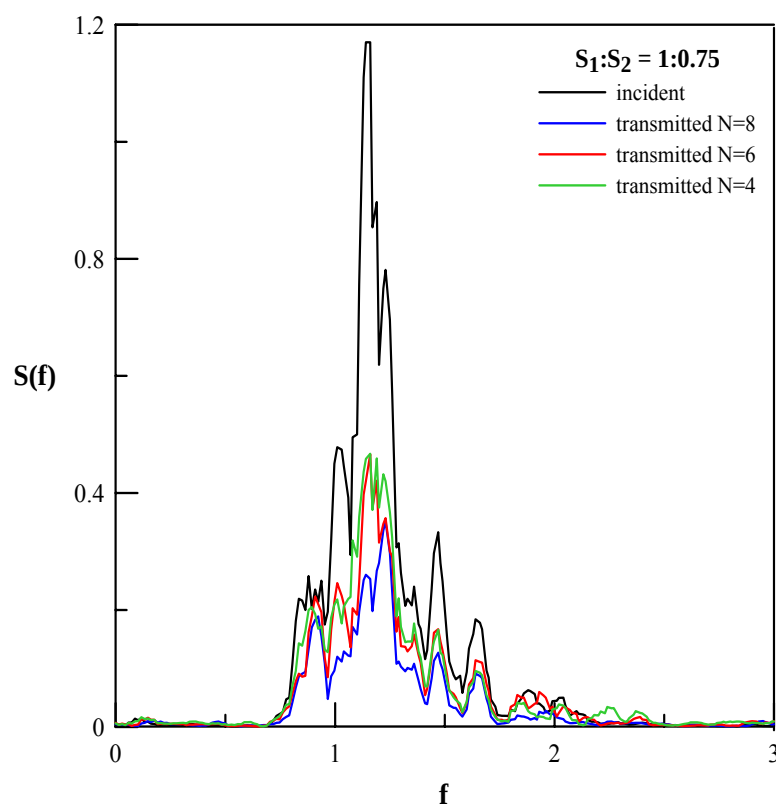


圖 4-7 不同潛堤個數下 $S_1:S_2=1:0.75$ 時入射波與透射波譜之比較

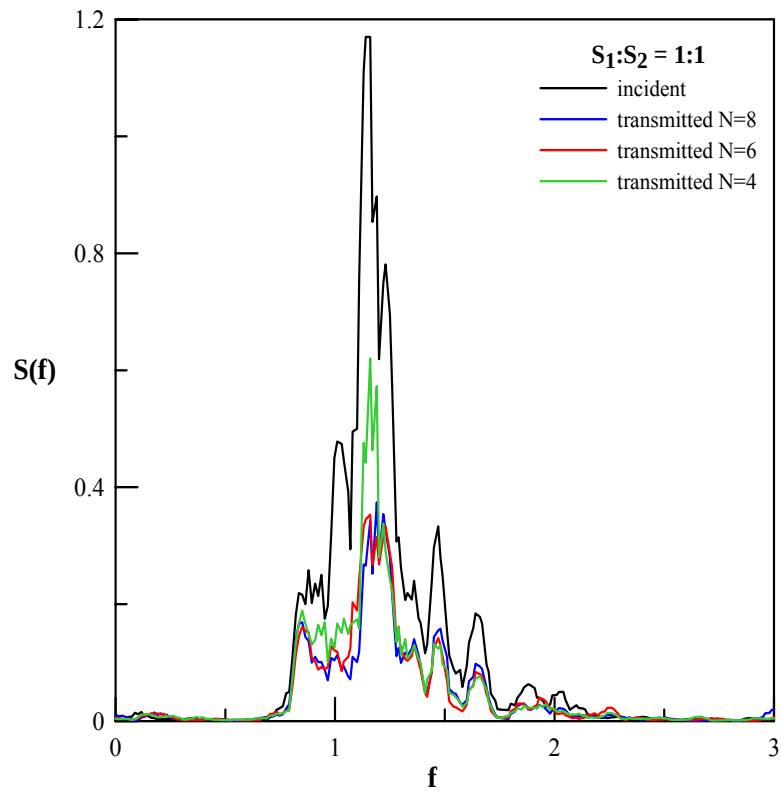


圖 4-8 不同潛堤個數下 $S_1:S_2 = 1:1$ 時入射波與透射波譜之比較

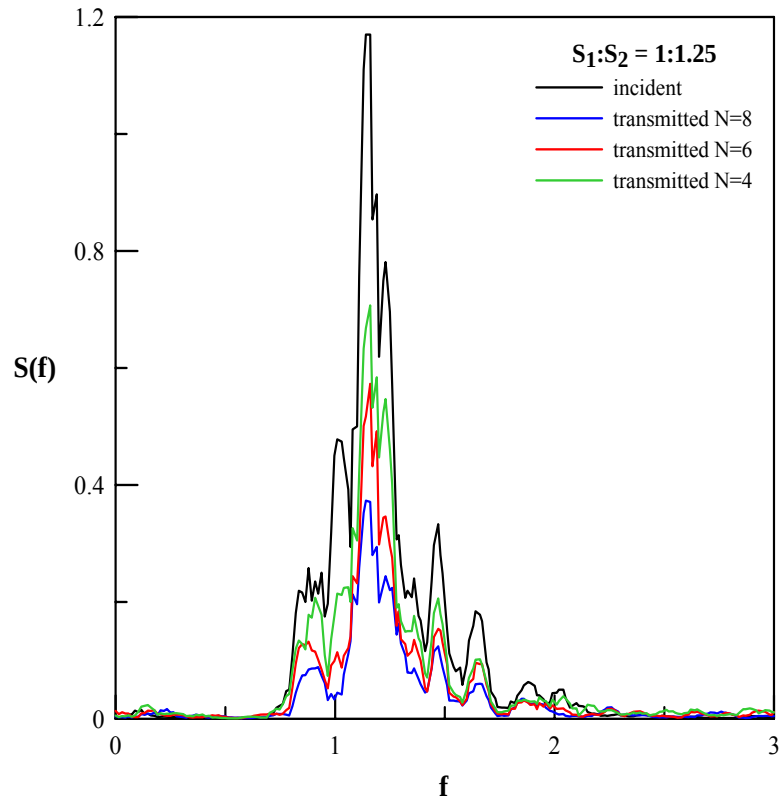


圖 4-9 不同潛堤個數下 $S_1:S_2 = 1:1.25$ 時入射波與透射波譜之比較

第五章 結果與討論

任何物理現象的理論解析或數值模式計算結果之可信度，應以現場或實驗室所測得的資料進行比較驗證。因此，為驗證本文所應用的數值模式，是否能有效預測不規則波浪通過各式系列潛堤配置，所產生布拉格反射的特性，故本章首先針對前文所述之土工試驗與數值模式進行比較，並分析各項試驗與數值結果，以探討布拉格效應於不規則波浪的作用下的特性。

5.1 不規則波浪通過複合式矩形潛堤之研究

在考慮不規則波作用下，波浪通過複合式系列潛堤布拉格反射研究，以本文第四章所提之相關試驗作為基礎，配合各式數值模擬，除了驗證數值模式之可靠性外，亦可歸納在不同的潛堤個數、間距比下，布拉格現象所呈現的特性。本文相關試驗方案如前表 4-1 所示，而圖 5-1 ~ 圖 5-3 則分別為潛堤個數 (N) 為 4、6、8 的情況下，不同潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 之關係圖。

圖 5-1 為潛堤個數 $N=4$ ，相對提高 $D/h=0.5$ ，相對堤距比分別為 $S_2/S_1=0.75, 1, 1.25$ 下反射率的變化結果。圖 5-2 為潛堤個數 $N=6$ ，相對提高 $D/h=0.5$ ，相對堤距比分別為 $S_2/S_1=0.75, 1, 1.25$ 下反射率的變化結果。圖 5-3 為潛堤個數 $N=8$ ，相對提高 $D/h=0.5$ ，相對堤距比分別為 $S_2/S_1=0.75, 1, 1.25$ 下反射率的變化結果。首先將數值計算與試驗結果相比，整體的走向趨勢為一致，皆會產生主頻共振與二次諧波共振。然而試驗的主頻共振約產生在 $2S/L$ 為 0.7 左右，而二次諧波共振大都發生在 $2S/L$ 為 1.75 左右，相較於數值計算的結果，當 $N=4$ 時除了主頻共振略有低估外，二次諧波共振大致相符；當 $N=6$ 時除了主頻共振略有低估外，二次諧波共振確有高估的現象；當 $N=8$ 時主頻共振卻大致吻合，二次諧波共振有高估的現象。且在 $N=4、6$ 時，尖峰值皆有偏宜的現象。導致此一結果，在數值方面有可能為模式主要以規則波理論為基本架

構，雖在波譜分割上能有效地模擬不規則波，但仍有其不足之處。又在試驗進行時，有可能為因為試驗中使用較小的示性波高，因此造波機本身的搖動或其他高頻雜訊會影響波浪試驗數據的誤差，亦有可能為試驗水槽儀器本身的誤差，導致此一結果。但整體而言，數值模式與試驗之趨勢一致，證實在不規則波的作用下，系列潛堤的佈置，其反射率帶寬會較大，且在較高頻的部分反射率亦有所提昇。

綜合觀察圖 5-1 ~ 圖 5-3，發現當潛堤個數 N 僅等於 4 時，不同的間距比與等間距時所產生的共振效應差異不大，也就是說利用複合式系列潛堤的佈置，雖有其效果呈現，但卻不如預期的好。然而當潛堤個數 N 改變 n 為 6 或 8 時，不管是數值或試驗的結果皆顯示，改變間距比將可提高主共振之反射率，且有效地提高二次諧波共振的尖峰值，足以證實在同樣的潛堤個數下，若採用複合式的排列方式，即可有效的提升布拉格共振效率，且在高頻部分更為顯著，其中又以 $S_2/S_1=1.25$ 時效果最為明顯。

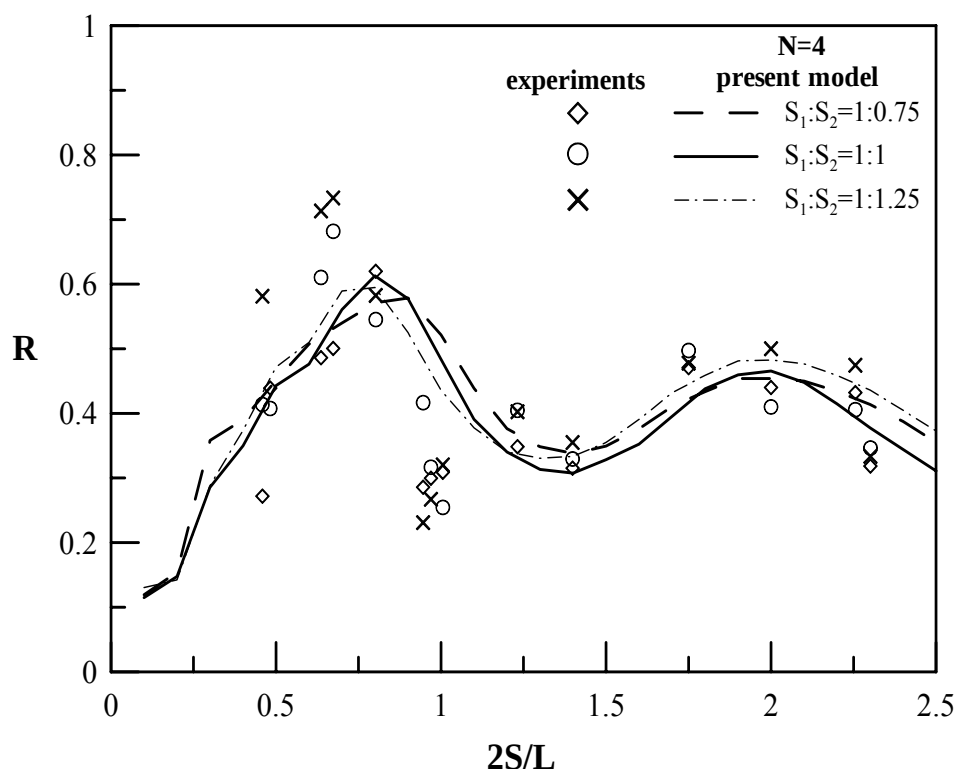


圖 5-1 $N = 4$ 時不同潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 之關係圖

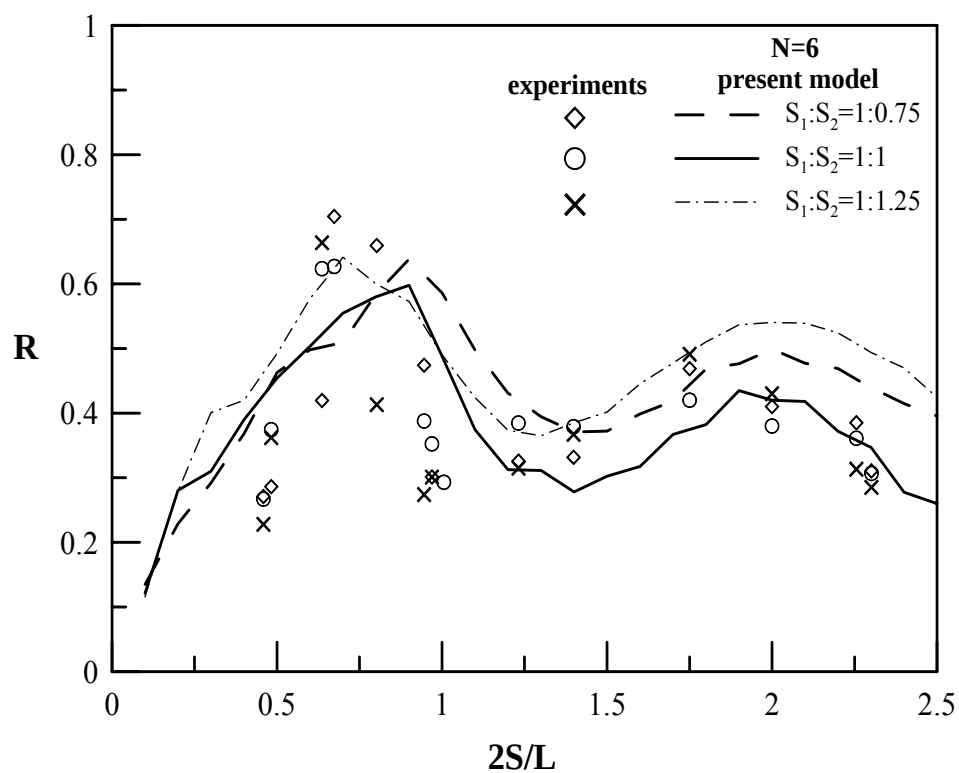


圖 5-2 $N=6$ 時不同潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 之關係圖

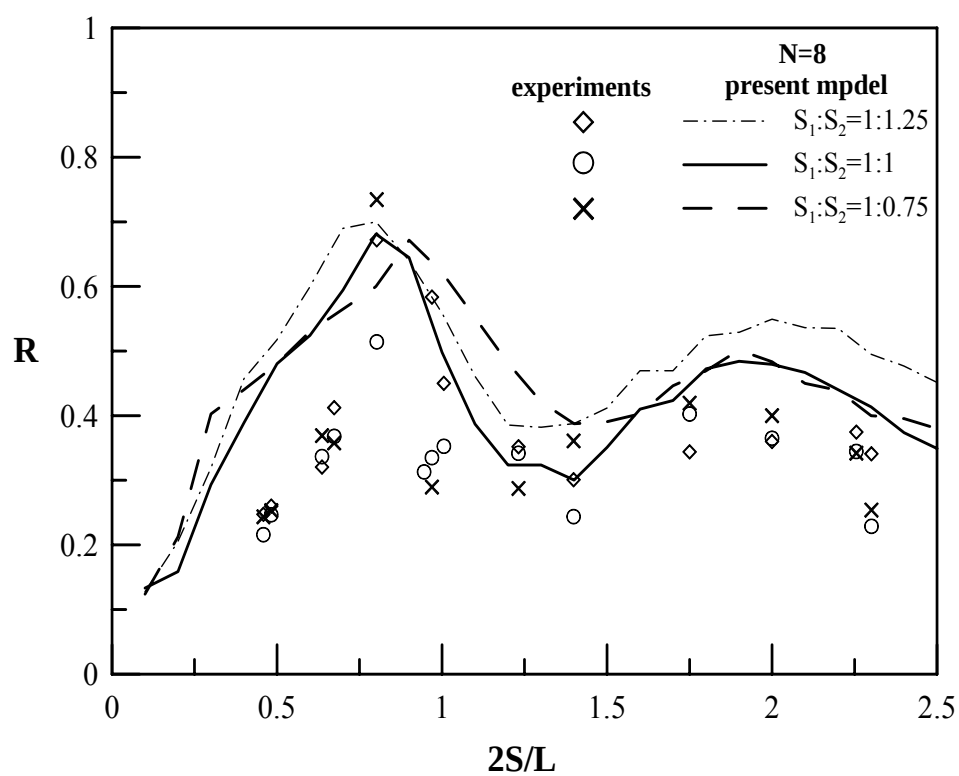


圖 5-3 $N=8$ 時不同潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 之關係圖

5.2 不規則波通過複合式沙漣底床反射係數之研究

延續上節之複合式潛堤，本節主要為探討波浪通過複合正弦沙漣地形之布拉格反射效應，本文以 Guazzelli 等人 (1992) 的試驗做為比較，進而驗證 EEMSE 模式的計算結果，Guazzelli 等人 (1992) 的試驗條件如表 5-1 所示，表中 b 為沙漣底床振幅， m 為沙漣底床係數， $\tilde{L}$ 為沙漣總長度。圖 5-4 則為各種配置之地形分佈。

圖 5-5 與 圖 5-6 為模式分別以規則波和不規則波條件針對試驗地形計算沙漣底床前反射率 R 和 $2S/L$ 之關係圖，其中不規則波之波長 L 以示性週期 $T_{1/3}$ 對應的波長代表之，而圖中試驗數據僅有規則波試驗之結果。

圖 5-5 為在試驗配置 G1 條件下，波浪通過複合式沙漣底床地形反射係數分佈圖。在規則波方面圖中結果顯示 EEMSE 模式計算所得結果，與試驗結果的分佈趨勢有著高度的一致性。圖 5-6 為在 G2 佈置條件下，波浪通過複合式沙漣底床地形，G2 試驗的地形擾動頻率較 G1 試驗增加，由圖中結果顯示，本文 EEMSE 模式計算的結果，與試驗值尚為吻合，在 $2S/L=1.5$ 附近，EEMSE 模式所得的反射係數較偏離試驗結果，但在其餘的頻率部份，EEMSE 模式得到合理的結果。

觀察各圖以 EEMSE 模擬不規則波計算與其他規則波之結果比較，整體趨勢大致與規則波一致，而不規則波反射率在主共振處亦有尖峰值存在，但其值不如規則波情況來得大，另外可看出主共振區的反射率帶寬皆較規則波情況為寬。此結果與計畫第一年之結論相輔，推估造成此結果的原因可由能量觀點進行闡述，在共振條件附近，其所對應頻率的入射成分波會產生布拉格共振，而規則波能量幾乎集中於此共振頻率處，因此入射波能量絕大部分會受布拉格共振影響而產生相當大的反射波，而不規則波可視為不同頻率之成分波線性疊加而成，故不規則波之總能量內含不同頻率成分波之能量，其集中於主頻

附近之能量不若規則波為大。

與 5.1 節地形模擬之結果比較，可發覺複合式沙漣底床相較於複合式矩形潛堤，會產生較多的共振頻率，且反射率帶寬範圍略有變大，但其尖峰反射率卻不如複合式矩形佈置大。當同樣使用不規則波進行模擬複合式地形時皆會使得反射率帶寬之分佈更加廣泛，如此一來在實際海域的應用上即有著更好的實用性。

表 5-1 波浪通過複合式沙漣底床試驗條件 (Guazzelli 等人, 1992)

試驗配置	b (cm)	L (K) (cm)	m	$\tilde{L}$ (cm)	h_0 (cm)
G1	1.0	12 (0.52 cm^{-1})	2	48	4
G2	1.0	6 (1.05 cm^{-1})	1.5	48	4

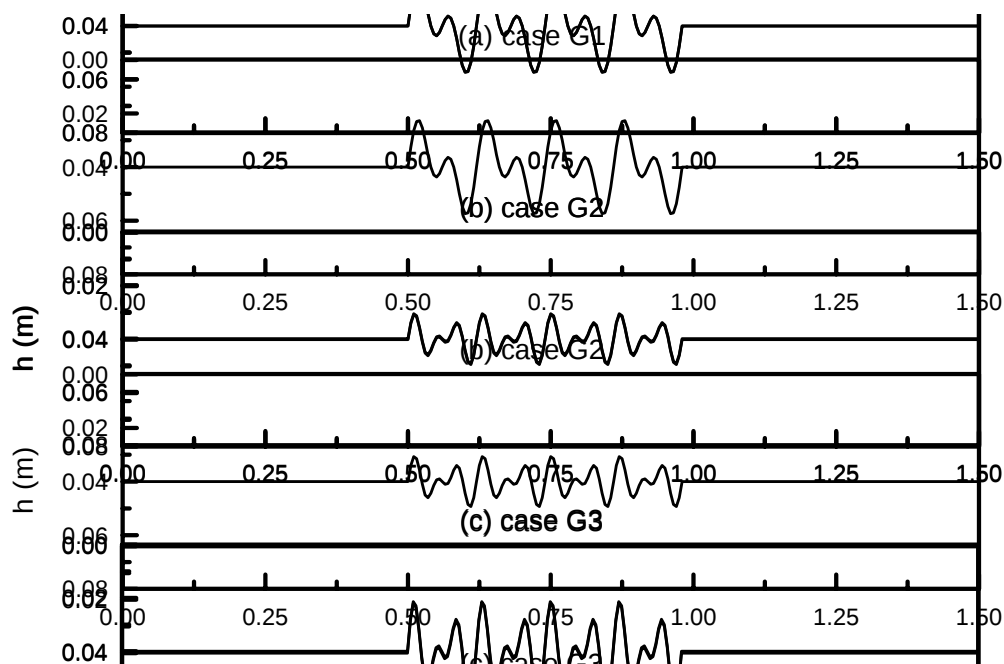


圖 5-4 複合式正弦沙漣底床地形示意圖

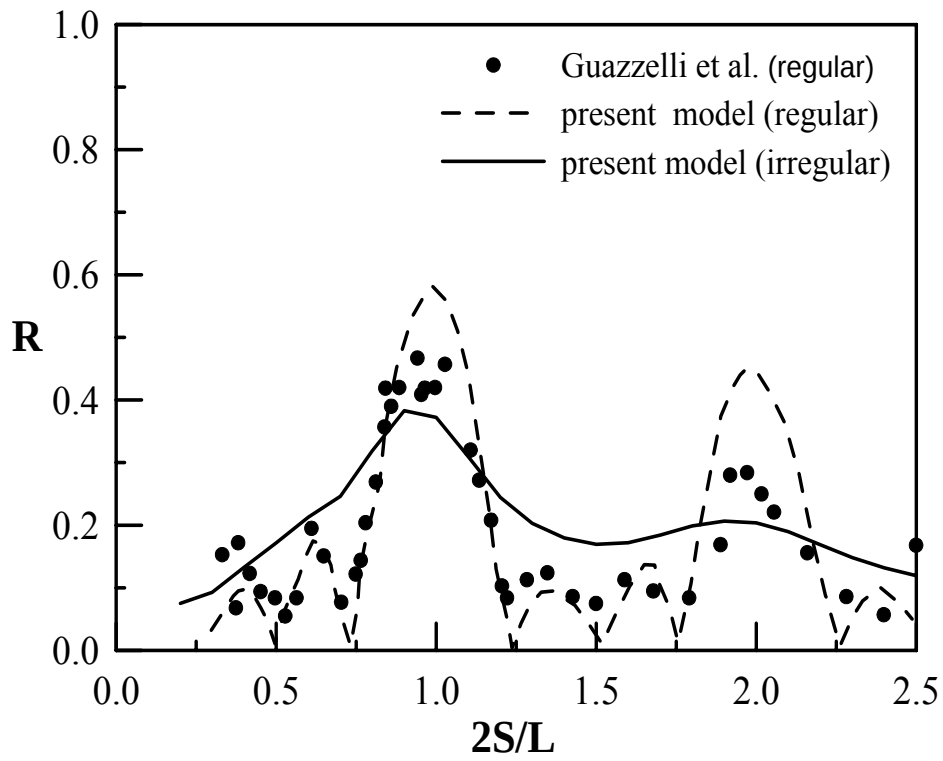


圖 5-5 波浪通過複合式沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 G1)

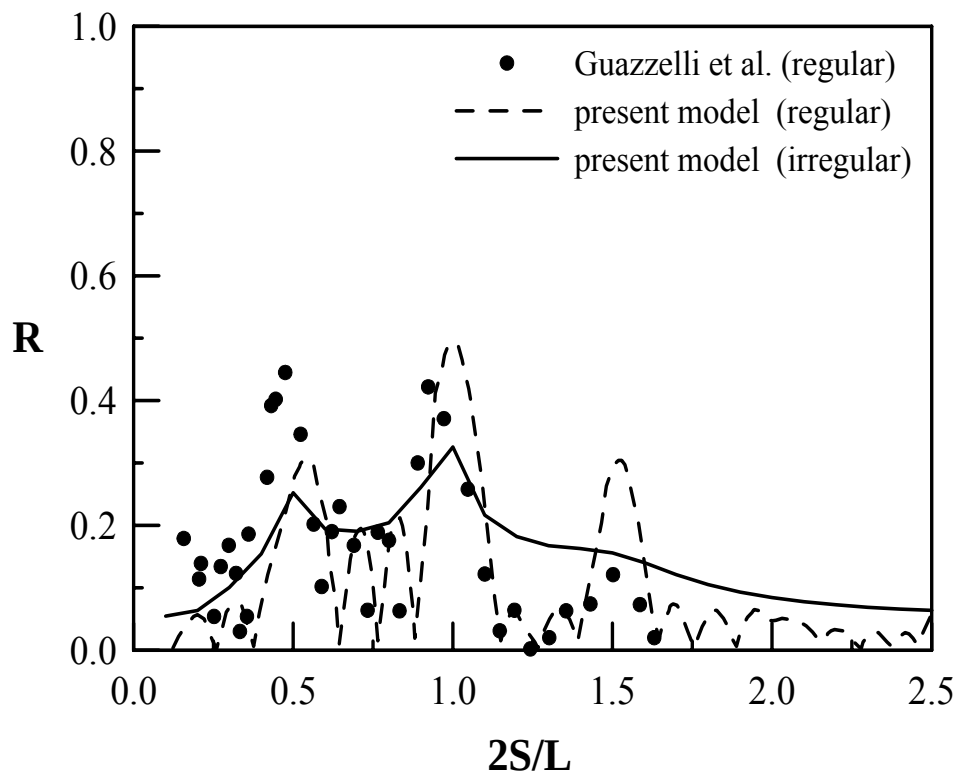


圖 5-6 規則波通過複合式沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 G2)

5.3 不規則波通過各式矩形潛堤之研究

不規則波浪通過系列潛堤地形，在各種佈置條件作用下，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，而在堤前發生布拉格反射效應亦各不相同。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。本節主要將針對在不規則波浪的作用下影響布拉格反射之參數特性進行分析探討，分析的影響參數包括：潛堤堤高 D 、潛堤寬度 B 、潛堤個數 N 、潛堤間距 S 。而本節所探討的地形佈置皆以第四章的試驗作為基本架構，所有的數值計算方案如下表 5-2 所示。其特徵函數可以下式表示：[Equation Section 5](#)

$$F = f_1(D, h, B, S, N) \quad (5-1)$$

以波浪反射率 R 代表特徵函數，則無因次組合可表示為

$$R = f_1(D/h, B/S, N, 2S/L) \quad (5-2)$$

表 5-2 數值模擬之各式系列潛堤之佈置

潛堤型式	個數 N	堤寬 $B(m)$	堤高 $D(m)$	水深 $h(m)$	間距 $S(m)$	D/h	B/S
矩形	8	0.24	0.1	0.2	0.96	1/2	1/4
				0.3	0.48		1/3
				0.4		1/4	
	6			0.2	0.48	1/2	1/4
				0.3	0.48		1/3
				0.4		1/4	
	4			0.2	0.48	1/2	1/4
				0.3	0.48		1/3
				0.4		1/4	

5.3.1 潛堤個數的影響

在規則波浪的研究上，Guazzelli 等人 (1992)指出正弦形底床波數愈多或波形底床長度愈長，布拉格反射尖峰值愈大，但相對的反射率帶寬則減小。張等人 (1997) 及岳等人 (1997) 在等間距系列潛堤研究結果亦顯示潛堤個數愈多，反射率尖峰值增加。本小節以不規則波的條件下，利用數值模式模擬不同的水深下，改變潛堤個數，對於反射率的影響。

圖 5-7 為不同潛堤個數 $N = 4、6、8$ ，在固定相對堤高 $D/h = 1/2$ 、相對堤距 $B/S = 0.5$ ，潛堤以等間佈置下，不規則波浪通過系列潛堤的反射率變化情形。圖中顯示在 $2S/L = 0.8$ 和 1.9 附近發生的主頻及高諧波布拉格反射，反射率隨潛堤個數增加而略有變大的趨勢。圖 5-8 為不同潛堤個數 $N = 4、6、8$ ，在固定相對堤高 $D/h = 1/3$ 、相對堤距 $B/S = 0.5$ ，潛堤以等間佈置下，不規則波浪通過系列潛堤的反射率變化情形。圖中顯示在 $2S/L = 0.9$ 和 2.0 附近發生的主頻及高諧波布拉格反射，反射率同樣隨潛堤個數增加而有變大的趨勢。綜觀兩圖探究其原因主要為堤數較多 ($N = 6$ 及 8) 的條件，造成的布拉格反射高峰接近，形成一個反射率帶寬較寬的布拉格反射區，所以潛堤為 6 及 8 個時，主頻布拉格反射的帶寬相近，且較潛堤 4 個時帶寬增大。高諧波布拉格反射方面，潛堤個數愈多，反射率尖峰值呈遞增趨勢，且比主頻更甚，此應為不規則波包含數十個成分波，而其高頻的部分引此有明顯的共振。故針對在潛堤個數的影響因子上，若其應用於不規則波時，主頻共振僅略有增加，且隨著相對堤高比的增加而遞減，但在二次諧波共振不管相對堤高的改變皆有明顯的提升。

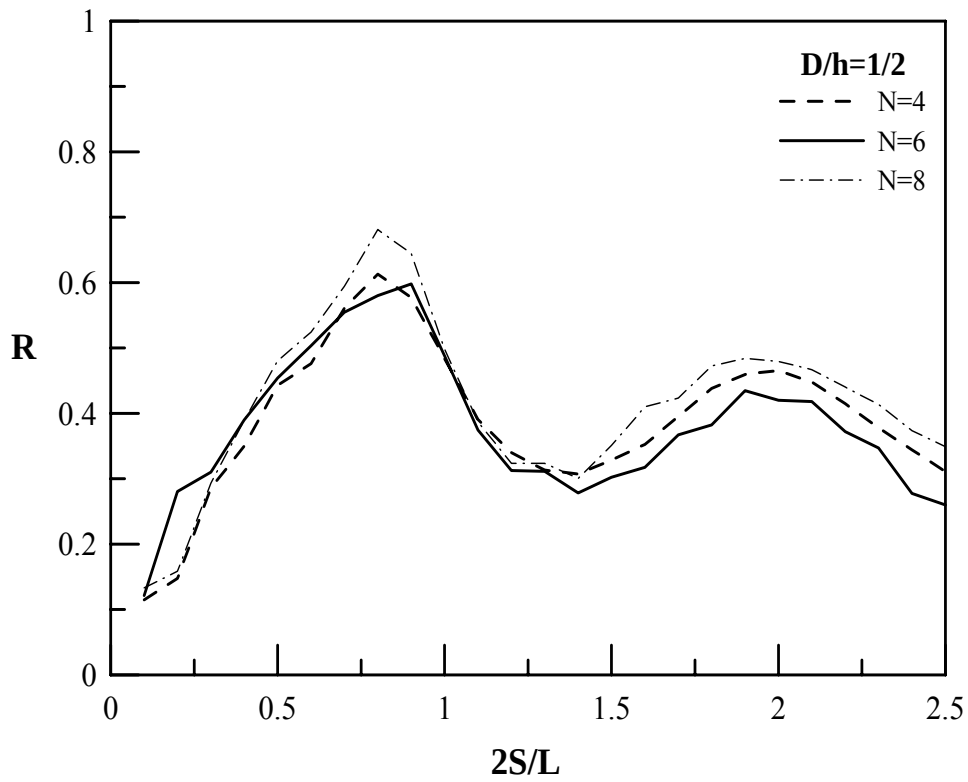


圖 5-7 $D/h=1/2$ 時不同潛堤個數反射率與 $2S/L$ 的關係圖

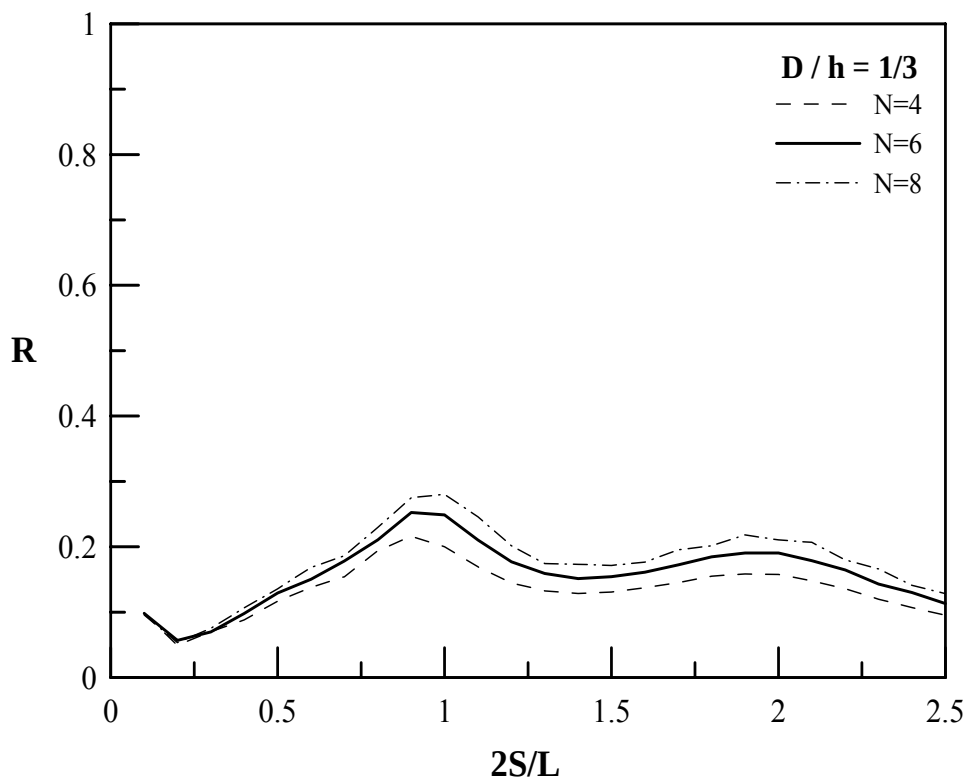


圖 5-8 $D/h=1/3$ 時不同潛堤個數反射率與 $2S/L$ 的關係圖

5.3.2 潛堤高度的影響

在規則波研究方面，Guazzelli 等人 (1992) 數值計算及試驗結果指出，沙漣底床振幅增加時，可增加高諧波布拉格反射的強度及相對應的反射率帶寬。張等人 (1997) 在等間距系列潛堤研究結果指出，堤高增加有助於整體的反射率值增加。本小節針對在不規則波的條件下，利用數值模式模擬在相同的潛堤個數 (N) 下，改變水深堤高比 (D/h)，對於布拉格共振效應的影響性為何。

圖 5-9 為潛堤個數 $N=4$ 、相對堤距 $B/S=0.5$ 、在不同的相對堤高 ($D/h=1/2, 1/3, 1/4$) 佈置下，不規則波浪通過系列潛堤的反射率變化情形。圖 5-10 為潛堤個數 $N=6$ 、相對堤距 $B/S=0.5$ 、在不同的相對堤高 ($D/h=1/2, 1/3, 1/4$) 佈置下，不規則波浪通過系列潛堤的反射率變化情形。圖 5-11 為潛堤個數 $N=8$ 、相對堤距 $B/S=0.5$ 、在不同的相對堤高 ($D/h=1/2, 1/3, 1/4$) 佈置下，不規則波浪通過系列潛堤的反射率變化情形。綜觀上述各圖，顯示相對堤高的增加，會使得入射波浪受較高的潛堤阻撓，導致主頻和高諧波布拉格反射增強，且反射率帶寬亦隨潛堤高度增加而明顯增寬。且整體反射率在 $2S/L$ 分佈上，隨著潛堤高度增高，並向較小 $2S/L$ 平移。在本計畫第一年度探討規則波時同樣有此一現象產生，又本研究之數值模式在不規則波的處理上，將不規則波分解為數十個成分波計算並線性疊加，固有此一現象應為合理。有發生此現象的原因應為當波浪通過沙漣底床時，由於地形起伏的影響實際上會造成波速和群波波速的改變，反觀 5.1 節 試驗數據亦可反應波速與群波速度之變化，故在反射率分佈上表現較為一致。以上結果顯示，相對堤高增加，因底床擾變增加，且堤頂水深變淺，使布拉格反射現象更明顯，相對的透射率更小，反射率及透射率帶寬更寬，不但防禦波浪範圍較大，防禦的效果更佳，且若要有明顯的布拉格現象發生 D/h 最好不要低於 0.3，此一結果與蔡 (2003) 利用規則波模擬之結果一致。

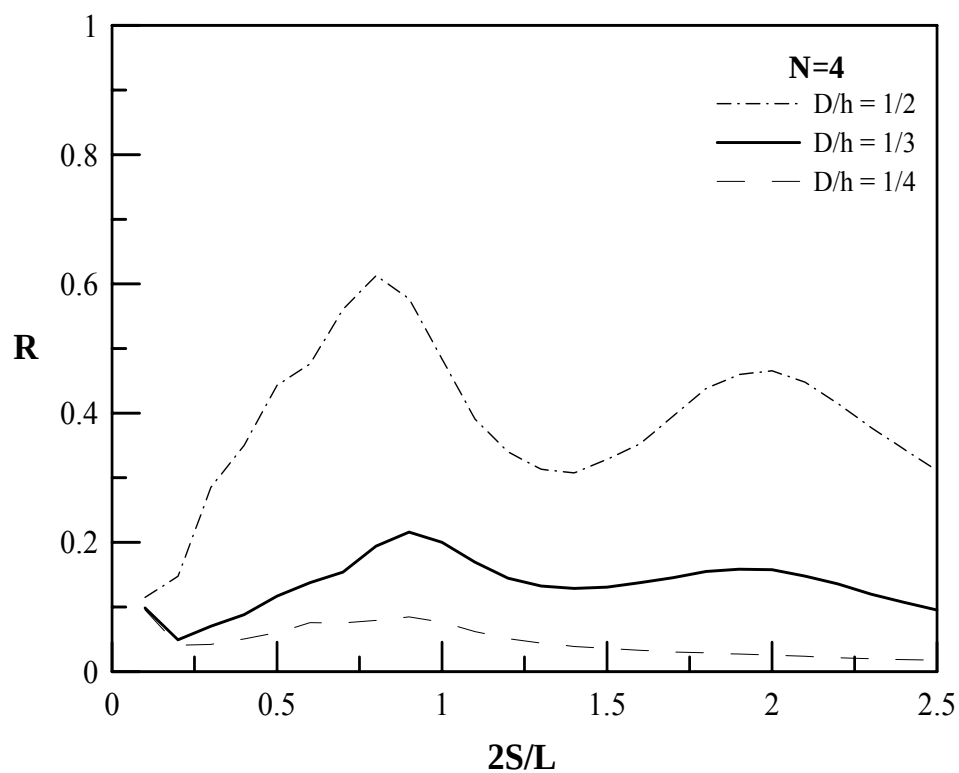


圖 5-9 $N = 4$ 時不同水深反射率與 $2S/L$ 的關係圖

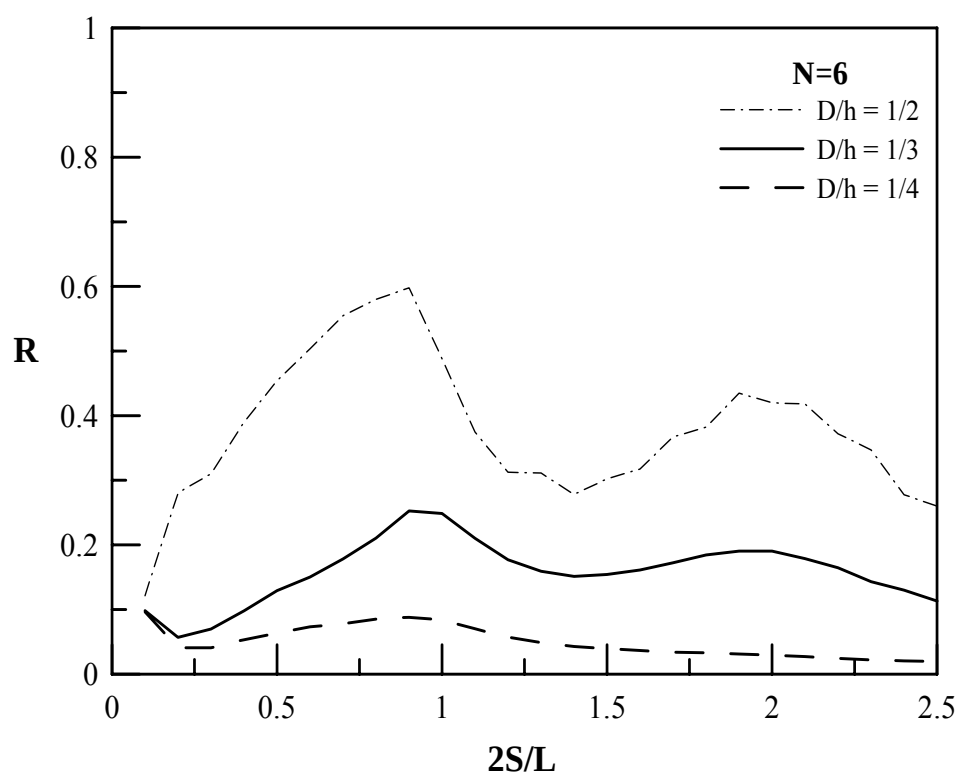


圖 5-10 $N = 6$ 時不同水深反射率與 $2S/L$ 的關係圖

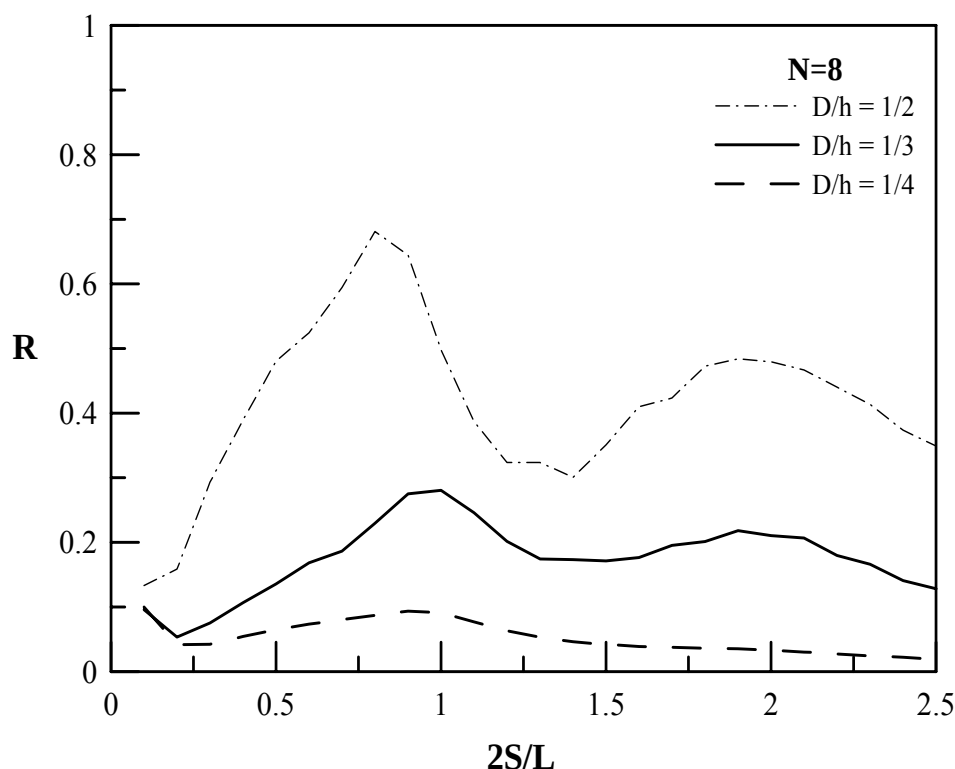


圖 5-11 $N = 8$ 時不同水深反射率與 $2S/L$ 的關係圖

5.3.3 相對堤距的影響

在規則波前人研究研究方面，Kirby 和 Anton (1990) 在人工沙洲的研究結果指出，高頻的布拉格反射尖峰值隨人工沙洲間距減小而降低。本小節針對在不規則波的條件下，利用數值模式模擬在相同的潛堤個數 (N) 與水深堤高比 (D/h) 下，改變間距 S ，也就是探討不同相對堤距 (B/S) 對於布拉格共振效應的影響性為何。

圖 5-12 為潛堤個數 $N = 4$ 、相對水深 $D/h = 0.5$ 、在不同的相對堤距 ($B/S = 1/2, 1/4$) 佈置下，不規則波浪通過系列潛堤的反射率變化情形。圖 5-13 為潛堤個數 $N = 6$ 、相對水深 $D/h = 0.5$ 、在不同的相對堤距 ($B/S = 1/2, 1/4$) 佈置下，不規則波浪通過系列潛堤的反射率變化情形。圖 5-14 為潛堤個數 $N = 8$ 、相對水深 $D/h = 0.5$ 、在不同的相對堤距 ($B/S = 1/2, 1/4$) 佈置下，不規則波浪通過系列潛堤的反射率變化情形。綜觀上述各圖，反射率變化顯示相對堤距 B/S

較小佈置條件下，波浪通過系列潛堤可得到較大的布拉格反射尖峰值，而且高諧波的布拉格反射現象略有遞增。此現象與蔡等人 (2003) 利用規則波模擬系列潛堤所得的研究結果相同。主要原因為潛堤間距增加，波浪於堤體間相互作用空間增大，使反射率增加。然而在尖峰值的位置隨著 B/S 的遞減，高頻與主頻有向中心靠攏的現象，此有可能是因為不規則波包含數十個成分波，故在不同的間距下會使得不同的成分波產生共振現象，使得尖峰位置偏移。此外，間距較小相對堤距 B/S 較大的佈置條件，所產生之高諧波布拉格反射較小，此現象在岳等人 (1997) 及 張等人 (1997) 在等間距系列潛堤所得研究結果有異，主要應為波浪為不規則波條件所致。。

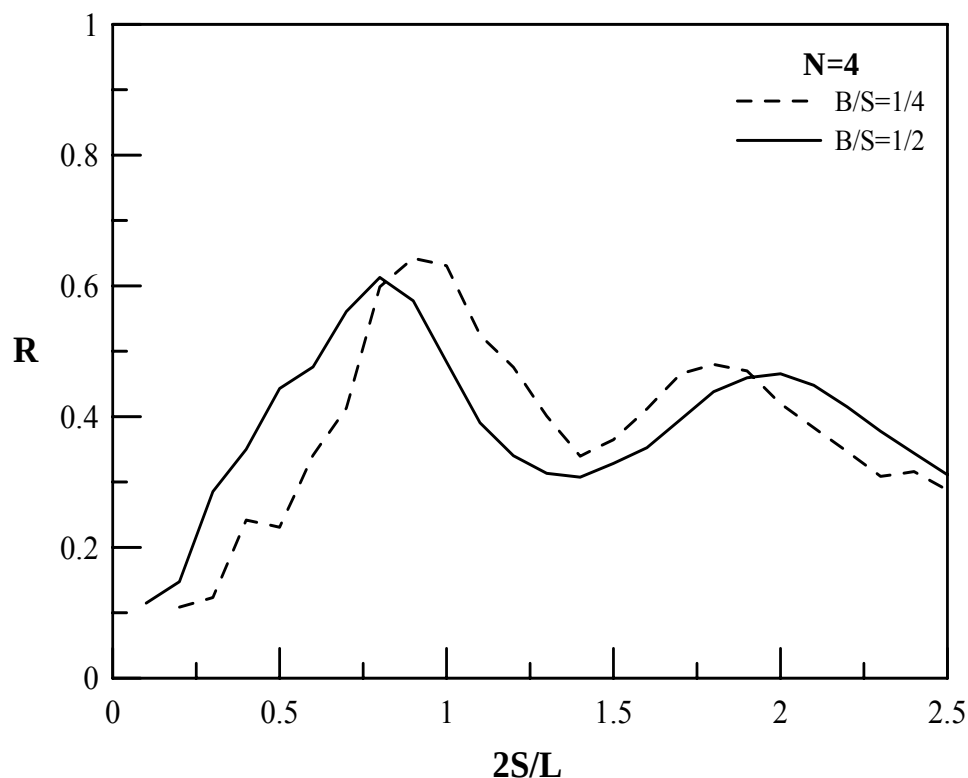


圖 5-12 $N = 4$ 時潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 的關係圖

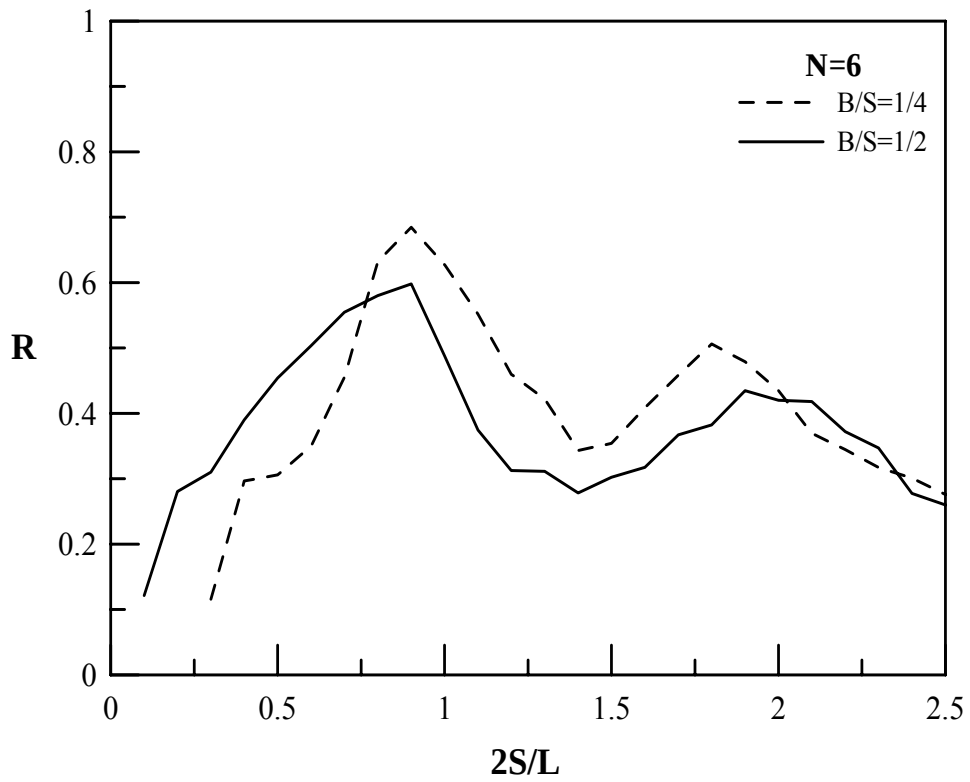


圖 5-13 $N = 6$ 時潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 的關係圖

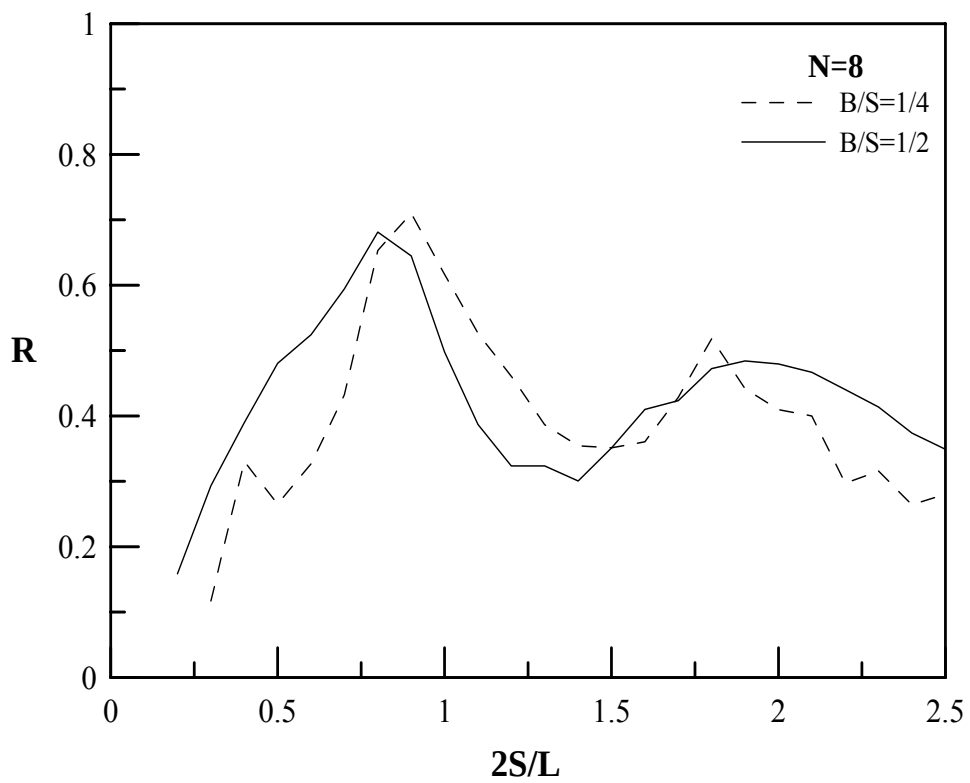


圖 5-14 $N = 8$ 時潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 的關係圖

第六章 結論與建議

1. 本文利用 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效應，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沙漣底床，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，且於不規則波之計算時對於共振頻率之帶寬，亦有良好的模擬，故利用 EEMSE 當作本計畫研究之數值模式，計算不規則波通過各種系列潛堤的布拉格反射現象，應該具有一定的適用性。
2. 於本計畫中針對不規波的計算模式，採用混合能譜分割的方法，兼具等頻率分割與等能量分割的優點，對於波浪能量消散方面，同時考慮非線性淺化效應、碎波能量消散效應及非線性三波交互作用效應，對於計算不規則波浪，通過各種系列潛堤的反射係數，應有一定程度的可靠性。
3. 由本文可歸納出規則波與不規則波通過系列潛堤之主要差異，兩者於通過系列潛堤時同樣會發生布拉格反射的現象，但不規則波主共振和次諧波共振反射率不如規則波情況時大，不過其反射率帶寬會較規則波為大，且在較大的 $2S/L$ 時反射率亦有所提昇。由此可見，若以示性波浪來設計人工沙漣時，主共振區反射率雖不能如規則波情況來得理想，但仍有不錯的防護作用，且非共振區之平均反射率相對提高不少，亦可增加防禦的波浪條件，對於寬譜海域之適用性應有所助益。
4. 本文於水工模式試驗中，模擬不規則波浪通過複合式系列潛堤，不管在波浪的率定與波浪的條件選取上皆有理論依據，雖試驗設備先天限制，導致不規則波的模擬有所限制，但整體而言仍具有良好的可信度。並且在波譜的衰減上進行詳細的比較，足以證實當布拉格效應產生時，能量有明顯的遞減。
5. 本文將試驗與數值模式進行校驗，數值模擬之趨勢與試驗有良好

的一致性且同樣有不規則波於布拉格現象產生時，尖峰頻率略減、帶寬變寬以及高階共振效應顯著的特性。且於複合式潛堤的應用上雖其反射效果隨潛堤個數的增加而遞增，但若考慮經濟效率與施工性，本文建議僅可採用 4 顆潛堤即可達到成效。

6. 本文最後參考前人於規則波方面的研究，歸納各種潛堤影響因子，配合影響因子設置各種地形佈置，並以數值模式模擬，最後歸納不規則波浪通過系列潛堤之相關特性。並得知在布拉格效應的反射效率隨著潛堤個數的增加、相對堤高的遞增以及相對堤距的減少有逐趨顯著。不關為規則波或不規則波皆有雷同的特性，但在不規則波方面，由於其包含數十種成分波，故共振帶寬與範圍往往比規則波要來的明顯。
7. 本年度計畫進行一系列不規則波產生布拉格效應之研究，並歸納其相關特性，具有良好的信心可提供作為海岸工程施的參考依據。

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. Short, A.D., "Multiple Offshore Bars and Standing Waves," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, pp. 3838-3840 (1975).
3. Dolan, T.J., Wave Mechanics for the Formation of Multiple Longshore Bars with Emphasis on the Chesapeake Bay, Master thesis, Department of Civil Engineering, University of Delaware (1983).
4. Davies, A.G. and Heathershaw, A.D., "Surface Wave Propagation over Sinusoidally Varying Topography," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 144, pp. 419-443 (1984).
5. Mei, C.C., "Resonance Reflection of Surface Waves by a Periodic Sandbars," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 152, pp. 315-335 (1985).
6. Webster, W.C. and Wehausen, J.V., "Bragg Scattering of Water Waves by Green-Naghdi Theory," *Z angew Math Phys* 46 Special Issue, pp.S566-S583 (1995).
7. Miles, J.W., "Oblique Surface-wave Diffraction by a Cylindrical Obstacle," *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Vol. 6, pp. 121-123 (1981).
8. 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)。
9. 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)。
10. 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)。
11. 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)。
 12. 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 99-18 頁 (2000)。
 13. 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).
 14. 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)。
 15. 岳景雲、曹登皓、陳丙奇，「波浪通過系列潛堤反射係數之研究」，第八屆全國海岸工程學術討論會暨 1997 年海峽兩岸港口及海岸開發研討會論文集（下），中國北京，第 683-690 頁 (1997)。
 16. 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)。
 17. 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)。
 18. 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)。
 19. Davies, A.G., Guazzelli, E. and Belzons, M., "The Propagation over Sinusoidally Varying Topography," *Physical Fluids*, Vol. 144, A1 (8),

- pp. 1331-1340 (1989).
20. 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).
 21. Belzons, M., Rey, V. and Guazzelli, E., "Subharmonic Bragg Resonance for Surface Water Waves," *Europhysics Letters*, Vol. 16, No.2, pp. 189-194 (1991).
 22. Mattioli, F., "Resonant reflection of surface waves by non-sinusoidal bottom undulations," *Applied Ocean Research*, Vol. 13, pp. 43-53 (1991).
 23. Porter, R. and Porter, D., "Scattered and Free Waves over Periodic Beds," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 483, pp. 129-163 (2003).
 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. Chamberlain, P.G. and Porter, D., "The Modified Mild-slope Equation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 291, pp. 393-407 (1995).
 26. Porter, D. and Staziker, D.J., "Extensions of the Mild-Slope Equation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 300, pp. 367-382 (1995).
 27. 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).
 28. 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).
29. 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)
 30. Hsu, T.W., and Wen, C.C., “On Radiation Boundary Conditions and Wave Transformation across the Surf Zone,” *China Ocean Engineering*, Vol. 15, pp. 405-416 (2001b).
 31. 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).
 32. 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).
 33. 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).
 34. 郭金棟、陳文俊、陳國書，「雙列潛堤對海灘防治效益之研究」，第二十一屆海洋工程研討會論文集，台灣新竹，第 307-313 頁 (1999)。
 35. 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).
 36. 張憲國，「人工沙洲對波浪反射係數之影響」，*港灣技術*，第 12 卷，第 23-38 頁 (1997)。

37. Wang, S.-K., T.-W. Hsu, L.-H. Tsai, S.-H. Chen “An application of Miles’ theory to Bragg scattering of water waves by doubly composite artificial bars” *Ocean Engineer*, Vol.33, No.3~4, pp.331-349. (2006)
38. Kirby, J.T., “A General Wave Equation for Wave over Rippled Beds,” *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 162, pp. 171-186 (1986).
39. Massel, S.R., “Extended Refraction-Diffraction Equation for Surface Waves,” *Coastal Engineering*, Vol. 19, pp. 97-126 (1993).
40. Cho, Y.S. and Lee, C., “Resonant Reflection of Waves over Sinusoidally Varying Topographies,” *Journal of Coastal Research*, Vol. 16, No. 3, pp.870-876 (2000).
41. Hsu, T.-W., S.-C. Hsiao, S.-H. Ou, S.-K. Wang, B.-D. Yang, “An application of Boussinesq equation to Bragg reflection of water waves” *Ocean Engineer*, on line published. (2006)
42. Booij, N., “A Note on the Accuracy of Mild-Slope Equation,” *Coastal Engineering*, Vol. 7, pp. 191-203 (1983).
43. Mei, C.C., “*The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*,” World Scientific, 2nd ed., pp. 135 (1983).
44. 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).
45. Radder, A.C., “On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 95, No. 1, pp. 159-176 (1979).
46. Shuto, N., “Nonlinear Long Waves in a Channel of Variable Section,” *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 17, pp. 1-12 (1974).

47. Eldeberky, Y. and Battjes, J.A., "Parameterization of Triad Interactions in Wave Energy Models," *Proceedings of Coastal Dynamics Conference '95*, Gdansk, Poland, pp. 140-148 (1995).
48. Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M., "Energy Loss and Set-up due to Breaking in Random Waves," *Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Hamburg, Vol. 1, pp. 569-578 (1978).
49. McCowan, J., "On the Highest Wave of Permanent Type," *Philos. Mag. Edinburgh*, 38(5), pp. 351-358 (1894).
50. Eldeberky, Y., *Nonlinear Transformation of Wave Spectra in the Nearshore Zone*, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands (1996).
51. Madsen, P.A. and Sørensen, O.R. , "Bound Waves and Triad Interactions in Shallow Water," *Ocean Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 359-388 (1993).
52. Longuet-Higgins, M.S., "On the Statistical Distributions of the Height of Sea Waves," *Jour. Marine Res.*, Vol. IX, No. C5, pp. 245-266 (1952).
53. Bretschneider , C.L., "Significant Waves and Wave Spectrum," *Ocean Industry*, pp. 40-46 (1968).
54. Goda, Y. and Nagai, K., "Report of the Port and Harbour," *Res. Inst.*, No. 61, pp.64 (1968)
55. 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).

56. 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).
57. 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)
58. Bouws, E., Günther, H., Rosenthal, W., Vincent, C. L., “Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water. Part 2: Statistical Relations between Shape and Growth Stage,” *Dt. Hydrogr. Z.* 40 (1987).
59. Goda, Y., “A Comparative Review on the Functional forms of Directional Wave Spectrum,” *Coastal Engineering Journal*, Vol. 41(1), pp. 1-20 (1999).
60. 蔡立宏 , 「波浪通過系列潛堤之布拉格反射研究」, 博士論文 (2003)

附錄一 期中報告意見回覆處理情形

時間：中華民國九十四年七月十九日(星期三)下午四點十分

地點：交通部運輸研究所港灣技術中心二樓視聽室

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：系列潛堤應用於海岸保護之研究

執行單位：國立成功大學水利及海洋工程學系

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
張金機委員： 一、試驗條件：建議參考現場波浪常態特性，並考慮工程之可行性。 二、試驗結果：除分析反射係數外，建議繪製水位變化，並量測透射波分析波譜。 三、颱風、季風及湧波之波譜特性不同，因此，同一系列潛堤佈置，建議利用不同性質之波浪進行計算及試驗。	一、遵照辦理，會在試驗時進一步考量實際應用所需要的條件。 二、遵照辦理，將於期末報告中加入透射波相關圖表。 三、於期末報告將盡可能規劃不同性質之波浪進行計算及試驗，又明年度將以現場模式計算為主，應可以進一步考量實際波浪之特性。	
李忠潘委員： 一、理論推導及內容詳實嚴謹。 二、中英文摘要可加入初步重要結果。 三、本研究之理論架構基本上為線性波範圍，但最後於能量損	一、感謝委員肯定。 二、遵照辦理。 三、感謝委員肯定。	

耗部分，則加入非線性及碎波之效應，於實用上較能接近實際的現象。		
岳景雲委員： 一、建議增加『符號表』。 二、參考文獻增加蔡博士論文。 三、本文模式與許等(2004) Boussinesq 方程式有何差異性？ 四、文中 $2l/L$ 於矩行潛堤時應修改為 $2S/L$ 五、p.3-5，式(3-23)、式(3-24)是否有誤？請確認。 六、水槽波高計擺放位置是否有誤？為何於圖中有設置 PIV 等相關儀器？	一、依據審查意見於期末報告加入『符號表』。 二、依據審查意見於期末報告中參考文獻中加入。 三、Boussinesq 方程式考慮非線性效應，故於非線性效應較強的區域將比本文模式有更良好的模擬效果，然而本計畫之主要目的為計算二維平面海域，進而推廣至工程應用，又 Boussinesq 方程式計算繁雜且計算機所需時間長久，為兼顧效率及適用性問題，本計畫暫不考慮此一控制方程式。 四、依據審查意見於期末報告中進行修改。 五、式 (3-23) 經查證無誤，式 (3-24) 於期末報告中修正。 六、圖 4-15 為試驗配置示意圖，波高計繪製位置為做業疏失，與實際試驗擺放並不吻合，至於圖 4-11 中，PIV 等相關儀器於示意圖中亦為做業疏失，實際並無此設備，將於期末	

七、波譜使用 JONSWAP 的目的？	報告一併修正。 七、於期中報告文中 p.3-5 ~ p.3-7 中有詳細說明，煩請參閱。	
沈建全委員： 一、研究內容充實理論推導堅實，前人研究蒐集詳實，值得讚賞。 二、不規則波之波譜最好以國內各海岸實測波譜進行數值推導。 三、不同海岸不同季節（夏、冬季）之適合潛堤群及波浪入射角度皆不同？如何才能使其反射增加，以保護海灘。 四、在花東宜蘭海岸之地形陡峭，若無足夠長之沙灘以供潛堤群之建造，何以產生布拉格共振？ 五、本研究採用等水深之	一、感謝委員肯定。 二、本文仍處於基礎研究，故波譜的使用仍以較普遍適用的 JONSWAP 波譜，而計畫於第三年將以平面數值計算為主，而在選定特定海域時將會加考慮當地實測波譜。 三、冬季或夏季季風皆有主要的示性波，又波浪接近海岸時將垂直入射海岸線，故於實際應用時，我們可考慮以冬夏季風之波浪條件為主要共振因子，輔以複合式系列潛堤進行，此一問題將於第三年度進一步說明探討。 四、布拉格共振需要系列潛堤之結構來產生，進而達到海岸防護的效果，又台灣東部海域地形變化急遽陡且深，應不適用於此一工法，故本文將僅考慮以坡度較緩的西部海域為主要研究方向。 五、模式於控制方程式中有加	

潛堤群為分析的標的，但現實海底地形為逐漸變淺，是否可將水深變化考量進去。	入底床變化的效應，而目前計畫以二維斷面之基礎測為基本架構，故還是以水平底床作為基礎。於計畫第三年度將推廣至平面二維模式，並選定台灣特定地區計算，故未來將會進一步考量底床水深變化。	
蕭松山委員： 一、理論推導與數值模式嚴謹，計算成果良好。 二、波譜分割採用混合能譜分割法，效果良好值得推廣。 三、沙漣佈放水深及沙漣高度如何決定始能產生共振效應。 四、現階段研究等水深地形，為符合實際海岸保護應用，建議為來研究考量底床水深變化。 五、模型試驗之透過率量測之波高計位置決定建議於期末報告	一、感謝委員肯定。 二、感謝委員肯定。 三、依據前人研究所示，一般潛堤高度與水深比約為0.33 時會產生共振效應，故於期末報告終將進一步說明，並展示試驗條件等相關圖表。 四、模式於控制方程式中有加入底床變化的效應，而目前計畫以二維斷面之基礎測為基本架構，故還是以水平底床作為基礎。又於本計畫第三年度將推廣至平面二維模式，並選定台灣特定地區計算，故未來將會進一步考量底床水深變化。 五、遵照辦理，將於期末報告中詳細說明試驗規劃配置，並加入透射率之計	

中說明。	算。	
何良勝委員： 一、本研究引用之學者論文相當多，建議於期末報告中加強說明其與本研究之相關性及應用處。 二、研究中有關各學者之反射係數比較結果，其應用求解反射係數計算公式是否相同？	一、遵照辦理 二、於文中僅分為規則波反射係數與不規則波反射係數之計算，於規則波部分採用 Chang (2003) 之三點法進行計算，不規則波部分則使用能量觀點進行估算，由於文中前人研究部分，所提理論甚多以致委員誤會，將於期末報告進一步改善。	

附錄二 期中報告簡報檔

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (2/4)

On the applications of a series of submerged
breakwaters to coastal protection (2/4)

計畫編號: MOTC-IOT-95-H2DB003

期中簡報

簡報人：許泰文 教授

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14

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
承辦人	蔡立宏	主辦及協助計畫進行
執行單位	國立成功大學水利及海洋工程學系	
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	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	吳漢倫	成功大學水利及海洋工程學系碩士班研究生
兼任助理	邱炫琦	成功大學水利及海洋工程學系碩士班研究生

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14



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

交通部運輸研究所

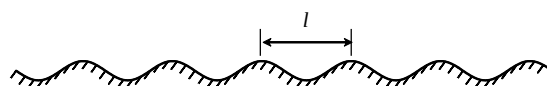
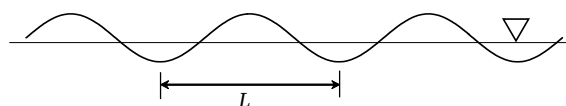
期中簡報

報告日期：2006/07/14



布拉格共振 (1/2)

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

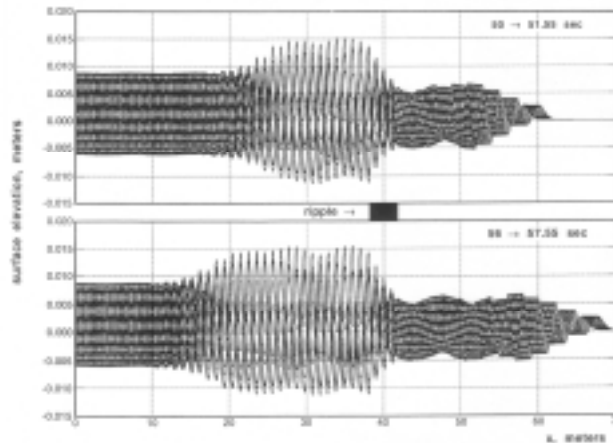
交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14



布拉格共振 (2/2)



布拉格共振之時序列 (Webster 和 Wehausen, 1995)

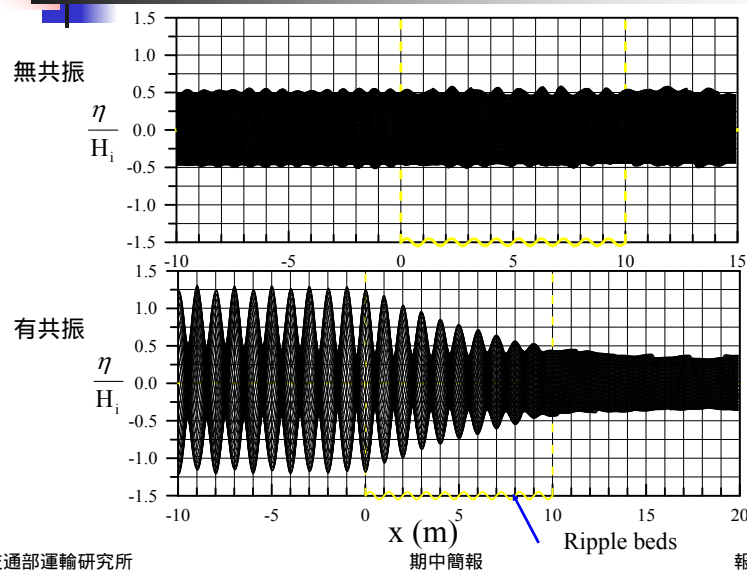
交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14



真實流體布拉格共振模擬動畫

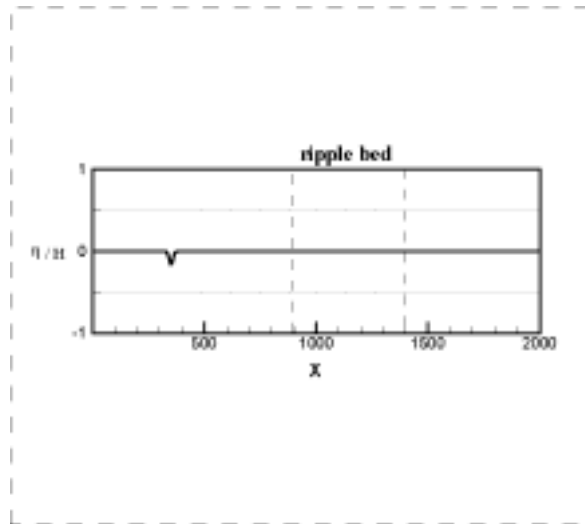


交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14

模擬不規則波產生布拉格反射現象



交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14

研究目的

- 系列潛堤工法於過去的研究文獻均較著重於單一或複合式正弦形沙漣底床，且多以規則波浪進行布拉格反射之研究，然而實際海域卻為不規則波，故些研究成果並無法直接應用於實際工程設計。
- 本計畫將針對不同的系列潛堤佈置條件，探討在不規則波浪作用下的海岸保護效果，對此進行一系列的深入研究，並將此研究成果實際應用於實際台灣海岸之防護設計上。
- 最後綜整所有的研究成果，以提出具體的設計方案，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。

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14



本年度主要研究內容

- **不規則波浪**通過複合式沙漣底床及人工潛堤地形之**數值模擬**，並利用試驗模型模擬相關配置。
- 探討不同間距系列潛堤在布拉格反射條件上的限制，並以**複合式系列潛堤**為方向，進行各種潛堤組合與布拉格現象之關係研究，進而討論波浪條件的於海岸防禦之範圍。並以數值模擬布拉格反射效果，且**規劃試驗**以利數值驗證。



EEMSE 數值模式

- 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

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

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

不規則波之緩坡方程式(1/2) - 控制方程式

- 以EEMSE作為控制方程式，並加入能量消散係數，且引用 Radder (1979) 之尺度因子，則得計算單一成份波之控制方程式

$$-\frac{2\omega_i}{(CC_g)_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} = \nabla_h^2 \phi_i + (k_c^2)_i \phi_i \quad (4)$$

其中

$$(k_c^2)_i = k_i^2 (1 + if_{Di}) - \frac{\nabla_h^2 \sqrt{(CC_g)_i}}{\sqrt{(CC_g)_i}} + \frac{[F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 (\nabla_h h)^2 g k]}{(CC_g)_i} \quad (5)$$

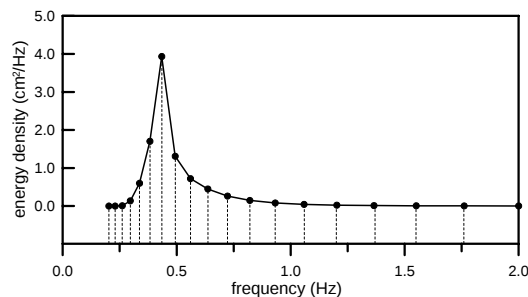
交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14

不規則波之緩坡方程式(2/2) - 波譜分割

- 混和分割：因考慮波浪在主頻附近的能量變化較為迅速，在高頻處的能量變化較為緩慢，利用指數分佈來離散波浪頻率。



混合波譜分割示意圖

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14



不規則波反射係數公式 - EEMSE 模式

- Goda 和 Suzuki (1976) 認為由入射波與反射波之總能量，可求得不規則波之反射係數

$$R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}}$$

$$E_I = \sum_i \left(\frac{1}{2} a_i^2\right)_i$$

$$E_R = \sum_i \left(\frac{1}{2} a_R^2\right)_i$$
(7)

- (1) 波譜切割成份波，先由 EEMSE 模式，計算水位振幅。
- (2) 以 Chang (2003) 之方法，求出各成份波之入、反射波振幅。
- (3) 利用 Goda 和 Suzuki (1976) 的能量觀點可求得不規則波之反射係數。



波譜的選擇(1/2)

- Bouws 等人 (1987) 認為 JONSWAP 波譜亦可以適用於有限水深，故本文以 Goda (1999) 提議之 JONSWAP 波譜，做為本文計算之波譜，其型式如下：

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

$$\sigma_1 = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (9)$$

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



波譜的選擇(2/2)

不同個數成份波之合成波誤差比較表

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

交通部運輸研究所

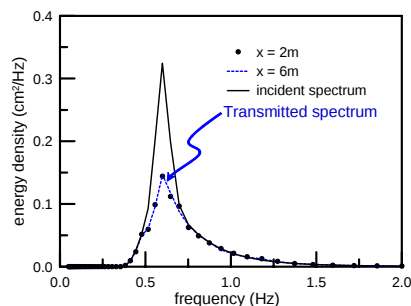
期中簡報

報告日期：2006/07/14



$2\ell/L$ 對反射率的影響 - 正弦人工沙漣

- Suh et al. (1997) 及 Lee et al. (2003) 曾利用不規則波緩坡方程，對 Davies 和 Heathershaw (1984) 試驗，進行布拉格共振之數值計算，但這些學者僅對布拉格共振頻率時，透射波頻譜衰減與入射波頻譜進行比較。



EEMSE 模式透射波譜與入射波譜比較圖 (case D2)

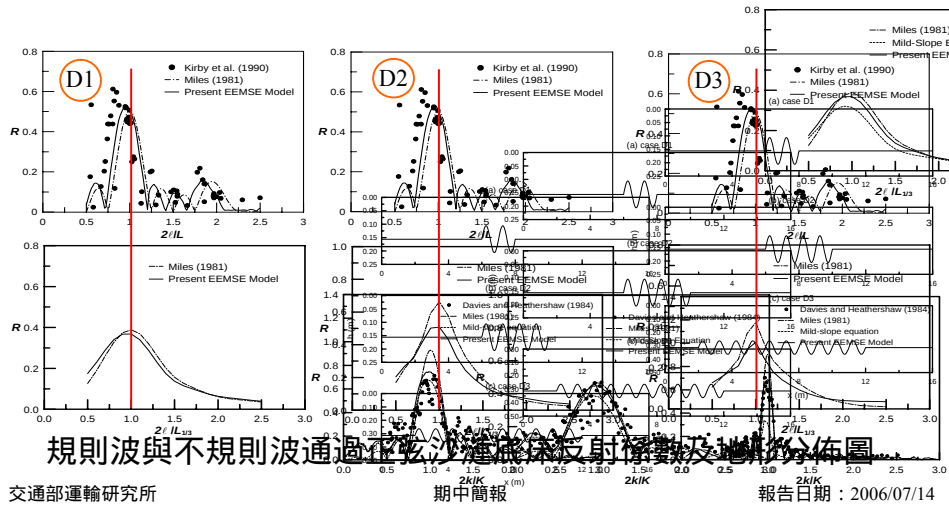
交通部運輸研究所

期中簡報

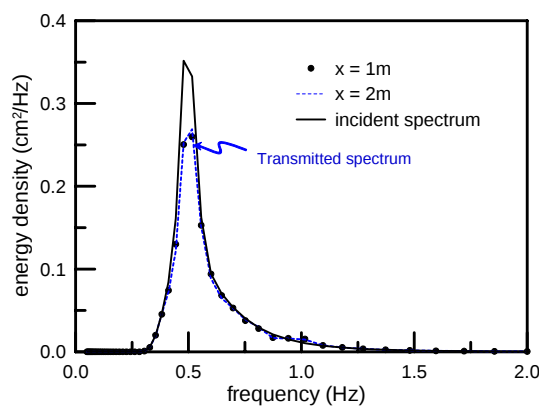
報告日期：2006/07/14



$2\ell/L$ 對反射率的影響 - 正弦人工沙漣



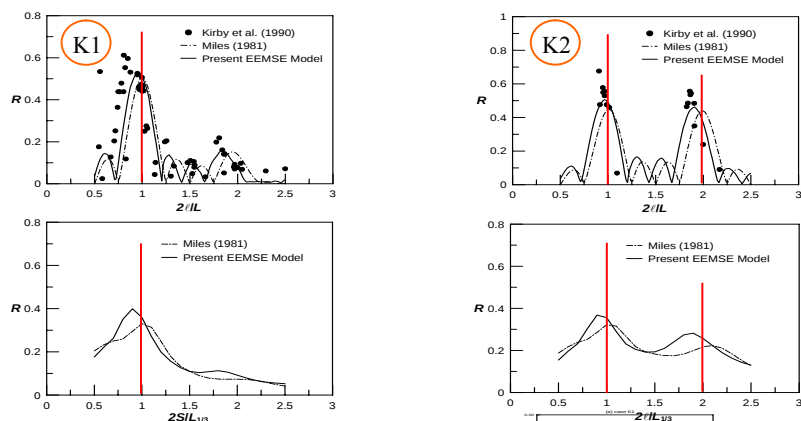
$2\ell/L$ 對反射率的影響 - 正弦人工沙漣



EEMSE 模式透射波譜與入射波譜比較圖 (case K2)



2 ℓ/L 對反射率的影響 - 半餘弦人工潛堤



規則波與不規則波通過半餘弦沙漣底床反射係數及地形分佈圖

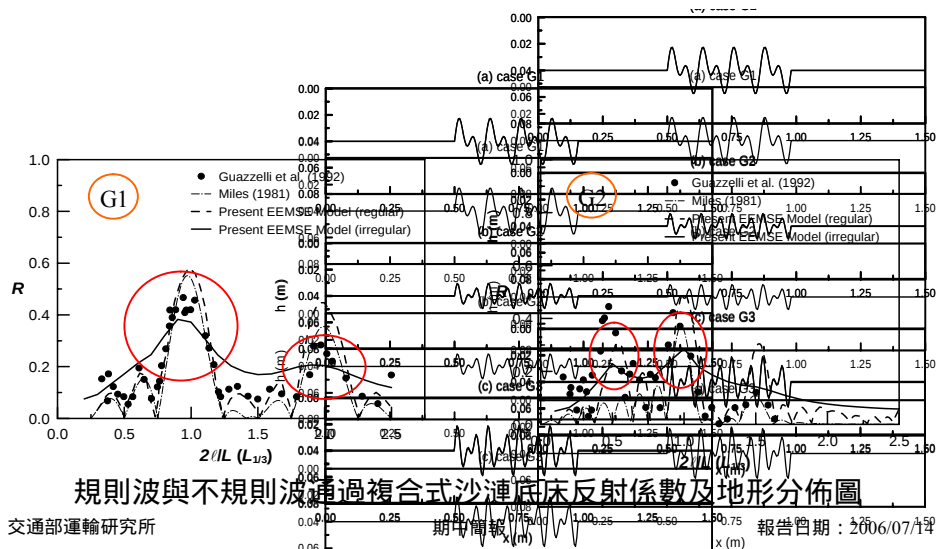
交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14



不規則波通過複合式沙漣底床之研究



規則波與不規則波通過複合式沙漣底床反射係數及地形分佈圖

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14



交通部運輸研究所

報告日期：2006/07/14



初步結果與討論(1/3)

1. 規則波與不規則波通過系列潛堤之主要差異：不規則波主共振反射率不如規則波大，但其反射率帶寬會較規則波為大。故若以示性波浪來設計結構物時，主共振區反射率雖不能如規則波情況來得理想，對於寬譜海域之適用性應有所助益。
2. EEMSE 數值模式：沒有考慮不規則波之計算時對於共振頻率之帶寬，亦有良好的模擬，故利用 EEMSE 模式計算不規則波通過各種系列潛堤的布拉格反射現象，具有一定的適用性。



初步結果與討論(2/3)

3. 波譜切割：對不規則波的計算模式，本研究採用混合能譜分割的方法，且考慮波浪能量消散方面，同時考慮非線性淺化效應、碎波能量消散效應及非線性三波交互作用效應。
4. 試驗模擬：本文利用試驗模擬規則波通過系列矩形潛堤，得到結果相當合理且數值計算部分亦有相當高的一致性，故本文所使用之試驗器材與模擬方式皆具有一定之可靠性，對於往後不規則波之試驗模擬提供良好的信心。



計畫執行進度

工作項目	第三 月	第四 月	第五 月	第六 月	第七 月	第八 月	第九 月	第十 月	第十 一 月
收集文獻與實驗規劃安排									
波浪通過複合式正弦形沙漣底床 地形之模擬									
堤前反射率分析									
探討布拉格反射與影響因子關係									
期中報告									
進行不規則波各種沙漣底床試驗									
檢核分析試驗與模式之合理性									
歸納不同系列潛堤配置的海岸防 禦效果提出適當的經驗公式									
期末簡報會議									
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	55	65	75	85	90	100

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14

報告完畢

謝謝大家

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2006/07/14

附錄三 期末報告意見回覆處理情形

時間：中華民國九十五年十一月十七日(星期五)上午十點五十五分

地點：交通部運輸研究所港灣技術中心五樓電子海圖簡報室

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：系列潛堤應用於海岸保護之研究

執行單位：國立成功大學水利及海洋工程學系

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
張金機委員： 一、透射波比較，如能加進未設潛堤時最後一支波高計之波譜更能顯現有無潛堤之差異。(底床水平影響較小) 二、P5-2，圖 5-1 至 5-3，數值計算以規則波理論發展之模式利用波譜切割，計算不規則波，畢竟規則波為單一波，而不規則波分割後各成份波間之互制效應可能無法避免，應可作為未來探討題目。 三、P5-7，數值模擬潛堤佈置 $N=8$, $h=0.3m$, $S=0.48m$, $D/h=1/3$, $B/S=1/2$, 主頻 $2S/L=0.8$, 則 $L=2 \times 0.48/0.8=1/2m$, $h/L=1/4=0.25$	一、明年度計畫，若有相關試驗將遵照辦理。 二、感謝委員指教。 三、由於本年度計畫仍處於基礎研究階段，對於應用於實際海域之情形尚須進一步考量現實問題，在往後之研究中將詳細考量委員建議。	

h=0.2 時 $h/L=1/6$; h=0.4 時 $h/L=1/3$ 超過一般海岸保護水深。 四、錯字 P4-2 Fig 4-13, 14 應為 4-3&4-4 ; P5-1 " 接會 " 應為 " 皆會 " , P5-4 2k/K 改為 2S/L , P5-6 點線代表 2k 的條件為何 ?	四、錯誤部分遵照建議修改完成。	
李忠潘委員： 一、構想、理論及實驗結果均值肯定。 二、實用上，系列潛堤以反射降低岸邊波能，及單一潛堤以碎波降低岸邊波能，其經濟考量可以稍做評估，此外，系列潛堤產生的反射波，可能造成的航行安全影響，也會影響實際推動時的困難。	一、感謝委員肯定。 二、本研究尚處於基礎因子研究階段，距離現場實際應用尚有差距，於往後的研究中將進一步考量委員的建議，並擬為未來之方向。	
沈建全委員： 一、水工試驗只使用 3 支波高計是否足以量測出反射波之波高？ 二、針對不規則波之系列潛堤列數 $N=4、6、8$ 中如何在建造成本與消波率間取得最適配置？ 三、較高之相對水深 $D/h=1/2$ 時所產生之	一、詳細說明如期末報告 p.4-3 所示。 二、由於本年度計畫以基礎研究為主，關於現場應用以及經濟效應部分將在計畫最後一年度進行討論。 三、由於本年度計畫以基礎研究為主，關於現場應用以	

消波效率較佳，但系列潛堤建造成本太高，是否符合經濟效益？ 四、本研究內容紮實且研究內容十分實用，值得贊許。 五、如何考量在不同不規則波波譜下，調整系列潛堤群之配置方式，使其達到消波最大效果。	及經濟效應部分將在計畫最後一年度進行討論。 四、感謝委員肯定。 五、首先以目標波譜之主頻作為基本依據設計潛堤間距，再導入次高頻作為複合式系列潛堤間距之依據，如此即可使得不規則波浪之主要部分產生共振進而將能量阻擋於外海。	
蕭松山委員： 一、本研究探討不規則波產生布拉格反射現象，經數值計算及模型試驗研究，成果良好，值得肯定。 二、系列潛堤間距不同配置考量，對實際不規則波之布拉格反射現象分析為甚佳之構想。不同配置產生共振水牆位置，對反射效應影響如何？建議說明。 三、試驗研究中透射波量測分析建議說明斜坡反射效應的影響。	一、感謝委員肯定。 二、遵照辦理。 三、已於期末報告 p.4-2 中進行說明。	

岳景雲委員： 一、內容詳實，前人研究資料蒐集豐，往前進一大步！ 二、參考文獻是否有統一格式，先中文後英文。 三、P5-6 圖 5-5 ----- 表示意義。 四、$S_1 = 48\text{cm}$, $S_2 = 36, 48, 60\text{cm}$ S 定義=？。 五、P4-1 圖 4-1 波高計 6 支？ 六、成份波個數 50, $f_{\min} = ?$ $f_{\max} = ?$ CPU 計算時間？	一、感謝委員肯定。 二、格式遵照運輸研究所公佈之標準格式。 三、此為文字編輯上之圖誤，於期末報告完稿中修正。 四、已於期末報告 p.4-4 中進行說明。 五、將針對圖 41 之試驗示意圖進行修改，詳細配置如報告 p.4-3 所示 六、一個方案計算的時間約為 12 個小時，但會依據電腦之相關配備而有所差異。而 $f_{\min} = S_{\max} \times 10^{-5}$ $f_{\min} = S_{\max} \times 10^5$。	
蘇青和委員： 一、數值模擬部份，引用緩坡方程式計算潛堤部份除考慮淺化(折射)效應是否包含反射效應，本模式計算潛堤與水深比值是否有限制。 二、潛堤保護海床可利用波浪淺化碎波降低能量功法，也可利用本文重點布拉格共振增加能量功法，二	一、此部分之相關效應已於控制方程式中考慮，模式對於結構物之擺設並無限制。但本研究以系列潛堤為主，如報告第五章所討論 D/h 的比值應小於 0.5，將會有較佳的效果。 二、由於本年度計畫以基礎研究為主，關於現場應用以及經濟效應部分將在計畫最後一年度進行討論。	

者功法一為減低波高，一為增加波高效應，實際應用如何取一平衡點。		
何良勝委員： 一、符號表有些模糊，應更明確。 二、第三章有關反射係數之計算方法，其原有理論推算方式似為規則波理論，如用於不規則波應審慎處理。 三、第四章之試驗結果良好，惟相關應用條件應儘量符合實際現場情況，建議未來工作項目宜考量現場狀況。	一、遵照辦理。 二、關於不規則波之反射率計算，由於目前參考文獻尚嫌不足，故僅能以 Goda 之能量觀點進行計算。 三、由於考量造波機及水槽之先天限制，對於試驗並無法如現場規劃，若未來有較佳之試驗場地及設置，將進一步考量現場情況進行模擬。	

附錄四 期末報告簡報檔

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (2/4)

On the applications of a series of submerged
breakwaters to coastal protection (2/4)

計畫編號: MOTC-IOT-95-H2DB003

期末簡報

簡報人：許泰文 教授

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17

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
承辦人	蔡立宏	主辦及協助計畫進行
執行單位	國立成功大學水利及海洋工程學系	
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	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	吳漢倫	成功大學水利及海洋工程學系碩士班研究生
兼任助理	邱炫琦	成功大學水利及海洋工程學系碩士班研究生

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



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

交通部運輸研究所

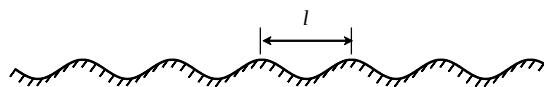
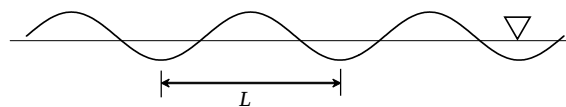
期末簡報

報告日期：2006/11/17



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



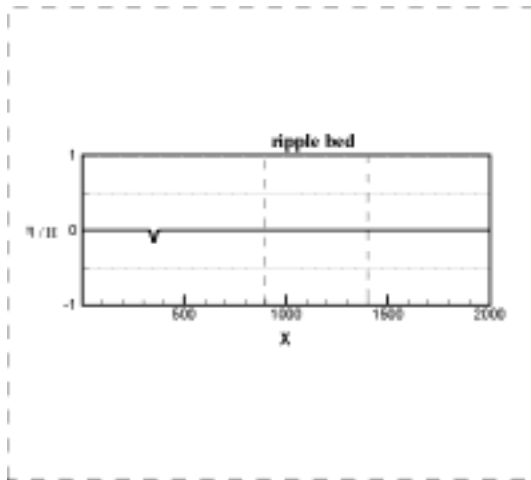
表面波長和正弦形沙漣波長示意圖

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17

模擬不規則波產生布拉格反射現象



交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17

研究目的

- 過去多以**規則波浪**進行布拉格反射之研究，然而實際海域卻為不規則波浪，故些研究成果並無法直接應用於實際工程設計。
- 本計畫將針對**不同的系列潛堤佈置條件**，探討在**不規則波浪**作用下的海岸保護效果，對此進行一系列的深入研究，並將此研究成果實際應用於實際台灣海岸之防護設計上。
- 最後彙整所有的研究成果，分析歸納各種影響因子對於布拉格共振的影響，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。

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



本年度主要研究內容

- 進行**不規則波浪**通過複合式人工潛堤地形之**數值模擬**，並利用**試驗**模型模擬相關配置。
- 探討不同間距系列潛堤在布拉格反射條件上的限制，並以**複合式系列潛堤**為方向，討論波浪條件的於海岸防禦之範圍。並以數值模擬布拉格反射效果，且**規劃試驗**以利數值驗證。
- 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**相關特性**。

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



不規則波之緩坡方程式(1/3) - 控制方程式

- 以**EEMSE**作為**控制方程式**，並加入能量消散係數，且引用 Radder (1979) 之尺度因子，則得計算單一成份波之控制方程式

$$\frac{-2\omega_i}{(CC_g)_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} = \nabla_h^2 \phi_i + (k_c^2)_i \phi_i \quad k_c^2 = k^2(1 + if_D) - \frac{\nabla_h^2 \sqrt{CC_g}}{\sqrt{CC_g}} + \frac{F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 g k (\nabla_h h)^2}{CC_g}$$

$$F_1 = \frac{-4kh \cosh kh + \sinh 3kh + \sinh kh + 8(kh)^2 \sinh kh}{8 \cosh^3 kh (2kh + \sinh 2kh)} - \frac{kh \tanh kh}{2 \cosh^2 kh}$$

$$F_2 = \frac{\sec^2 kh}{6(2kh + \sinh 2kh)^3} \left[8(kh)^4 + 16(kh)^3 \sinh 2kh - 9 \sinh^2 2kh \cosh 2kh + 12kh(1 + 2 \sinh^4 kh)(kh + \sinh 2kh) \right]$$

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



不規則波之緩坡方程式(2/3) - 能量消散項

■ 能量消散項 $f_D = f_d + f_s + f_{nl3}$

■ 碎波能量消散係數 (Eldeberky and Battjes, 1995)

$$f_d = -\frac{(S_{br})}{k(EC_g)} \quad \frac{H_b}{h_b} > 0.78 \quad S_{br}(\omega_i, \theta_i) = -\frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\omega_i, \theta_i)$$

■ 非線性淺化效應 (Shuto, 1974)

$$f_s = \frac{D_s}{kEC_g} \quad D_s = -\frac{1}{8} \rho g \frac{d}{dx} [(2HH_{non} + H_{non}^2)C_g]$$

■ 非線性三波交互作用效應 (Eldeberky, 1996)

$$f_{nl3} = -\frac{S_{nl3}}{kEC_g} \quad S_{nl3}(\omega_i, \theta_i) = S_{nl3}^-(\omega_i, \theta_i) + S_{nl3}^+(\omega_i, \theta_i)$$

交通部運輸研究所

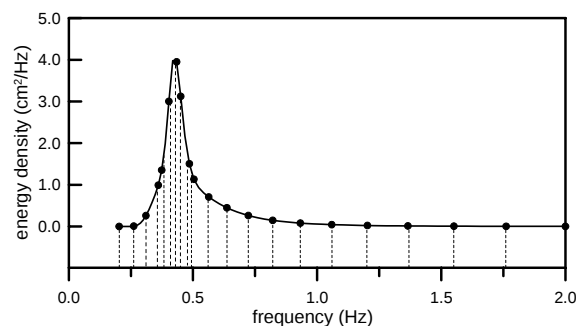
期末簡報

報告日期：2006/11/17



不規則波之緩坡方程式(3/3) - 波譜分割

- **混和分割**：因考慮波浪在主頻附近的能量變化較為迅速，在高頻處的能量變化較為緩慢，利用指數分佈來離散波浪頻率。



混合波譜分割示意圖

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



不規則波反射係數公式 - EEMSE 模式

- Goda 和 Suzuki (1976) 認為由入射波與反射波之總能量，可求得不規則波之反射係數

$$R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}}$$

$$E_I = \sum_i \left(\frac{1}{2} a_i^2 \right)_i$$

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

- (1) 波譜切割成份波，先由 EEMSE 模式，計算水位振幅。
- (2) 以 Chang (2003) 之方法，求出各成份波之入、反射波振幅。
- (3) 利用 Goda 和 Suzuki (1976) 的能量觀點可求得不規則波之反射係數。

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



波譜的選擇(1/2)

- Bouws 等人 (1987) 認為 JONSWAP 波譜亦可以適用於有限水深，故本文以 Goda (1999) 提議之 JONSWAP 波譜，做為本文計算之波譜，其型式如下：

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

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

$$T_p = \frac{T_{1/3}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}}, \quad \begin{cases} f \leq f_p \Rightarrow \sigma_0 = 0.07 \\ f > f_p \Rightarrow \sigma_0 = 0.09 \end{cases}, \quad \gamma = 3.3$$

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



波譜的選擇(2/2)

不同個數成份波之合成波誤差比較表

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

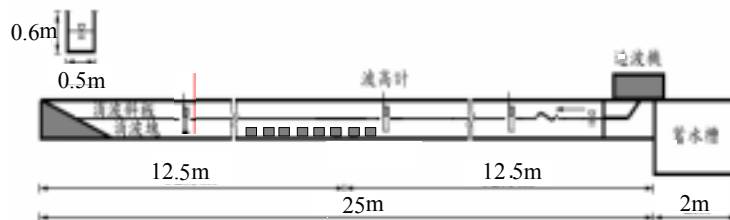
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



水工模型試驗 - 試驗水槽



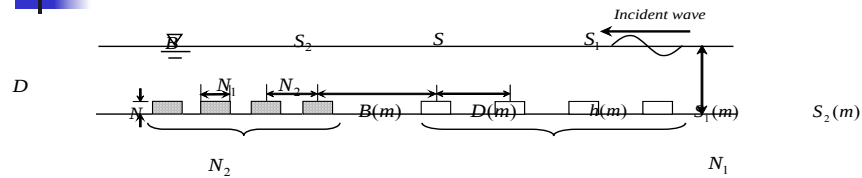
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



水工模型試驗·地形配置與試驗條件



潛堤型式	個數			堤寬	堤高	水深	間距	間距	間距比值
矩形	8	4	4	0.24	0.10	0.2	0.48	0.36	
								0.48	
								0.60	
	6	3	3					0.36	
								0.48	
								0.60	
	4	2	2					0.36	
								0.48	
								0.60	

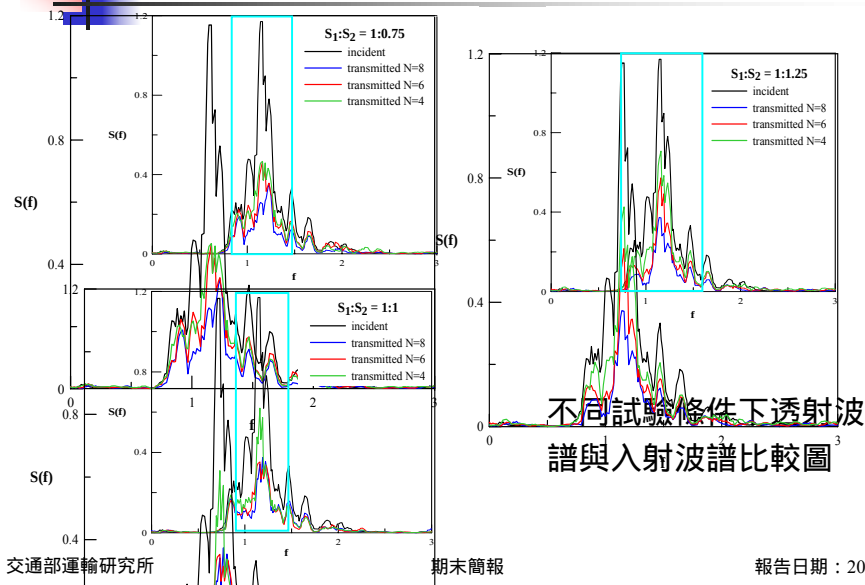
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



水工模型試驗·入射波譜與透射波譜比較圖



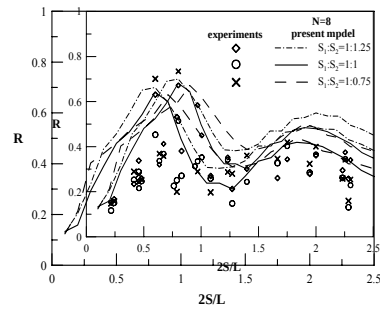
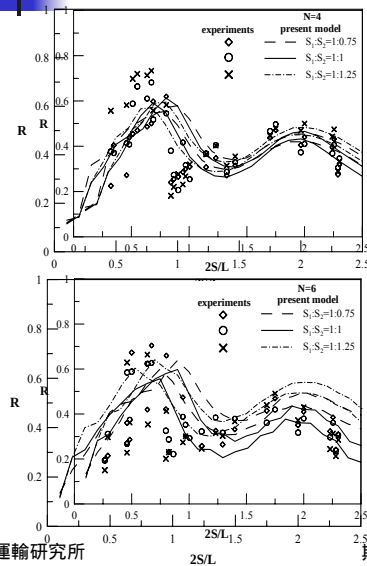
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



水工模型試驗 – 試驗結果與數值模擬比較圖



複合式系列潛堤之試驗與數值結果比較圖

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



布拉格反射之影響因子

$$R = f_1(D/h, B/S, N, 2S/L)$$

潛堤型式	個數	堤寬	堤高	水深	間距		
矩形	8	0.24	0.1	0.2	0.96	1/2	1/4
				0.3	0.48	1/3	1/2
						1/4	
	6			0.2	0.48	1/2	1/4
				0.3	0.48	1/3	1/2
						1/4	
	4			0.2	0.48	1/2	1/4
				0.3	0.48	1/3	1/2
						1/4	

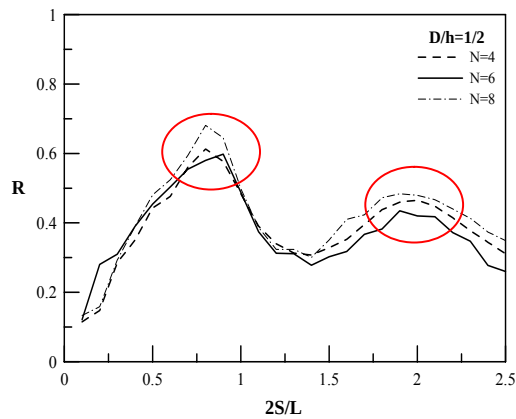
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



布拉格反射之影響因子 - 潛堤個數 N



$D/h = 1/2$ 時不同潛堤個數反射率與 $2S/L$ 的關係圖

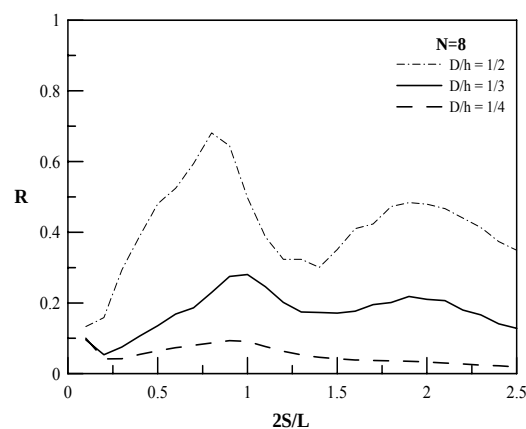
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



布拉格反射之影響因子 - 潛堤高度 D/h



$N = 8$ 時不同水深反射率與 $2S/L$ 的關係圖

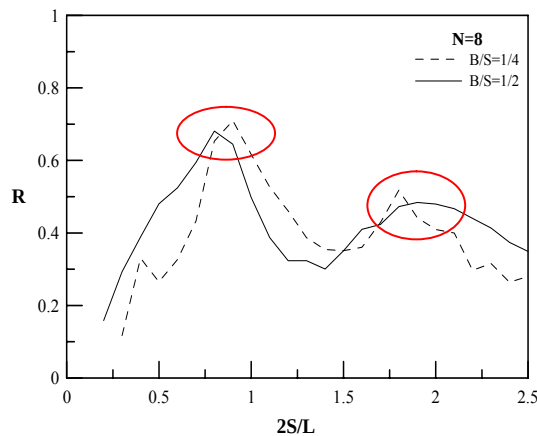
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2006/11/17



布拉格反射之影響因子 - 潛堤間距 B/S



$N=8$ 時潛堤間距比反射率與 $2S/L$ 的關係圖



初步結果與討論(1/2)

1. 規則波與不規則波通過系列潛堤之主要差異：依照試驗與數值結果，不規則波主共振反射率不如規則波大，但其反射率帶寬會較規則波為大。故若以示范性波浪來設計結構物時，主共振區反射率雖不能如規則波情況來得理想，但能提高寬譜海域之共振效應。
2. EEMSE 數值模式：比對試驗與數值結果，在考慮不規則波的條件下，通過各種系列潛堤的布拉格反射現象，試驗結果與數計算結果相當，證實數值模式的可靠性。



初步結果與討論(2/2)

3. **波譜切割與數值考量：**對不規波的計算模式，本研究採用混合能譜分割的方法，且考慮波浪能量消散方面，同時考慮非線性淺化效應、碎波能量消散效應及非線性三波交互作用效應。
4. **布拉格共振之影響因子：**本文歸納各種潛堤影響因子，配合影響因子設置各種地形佈置，並以數值模式模擬，最後討論其相關特性。得知反射效率隨著潛堤個數的增加、相對堤高的遞增以及相對堤距的減少逐趨變大。且不規則波包含數十種成分波，故共振帶寬與範圍往往比規則波要來的明顯。

報告完畢

謝謝大家