

92-81-760  
MOTC-IOT-91-HA10

# 海岸保護及親水性結構物 最適化配置研究(2/4)



交通部運輸研究所

中華民國九十二年六月

92-81-760  
MOTC-IOT-91-HA10

# 海岸保護及親水性結構物 最適化配置研究(2/4)

著 者：蔡立宏、何良勝、黃清和

交通部運輸研究所

中華民國九十二年六月

海岸保護及親水性結構物最適化配置研究(2/4)

著 者：蔡立宏、何良勝、黃清和

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：台北市敦化北路 240 號

網 址：[www.iot.gov.tw](http://www.iot.gov.tw)

電 話：(02)23496789

出版年月：中華民國九十二年六月

印 刷 者：全能辦公事務用品有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 110 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：100 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

三民書局重南店：台北市重慶南路一段 61 號 4 樓•電話：(02)23617511

三民書局復北店：台北市復興北路 386 號 4 樓•電話：(02)25006600

國家書坊台視總店：台北市八德路三段 10 號 B1•電話：(02)25787542

五南文化廣場：台中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

新進圖書廣場：彰化市中正路二段 5 號•電話：(04)7252792

青年書局：高雄市青年一路 141 號 3 樓•電話：(07)3324910

## 交通部運輸研究所出版品摘要表

出版品名稱：海岸保護及親水性結構物最適化配置研究 (2/4)			
國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號 1009202111	運輸研究所出版品編號 92-81-760	計畫編號 91-HA10
主辦單位：台灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：蔡立宏 理論分析：蔡立宏、黃清和、許泰文、黃盈純 水工試驗：蔡立宏、陳明宗、何良勝、李江澤、陳進冰、王培源、蔡瑞成 數值模擬：蔡立宏、許泰文、溫志中、黃盈純、陳明宗 行政助理：張惠華 聯絡電話：04-26587177 傳真號碼：04-26571329			研究期間  自 91 年 01 月 至 91 年 12 月
<b>關鍵詞：布拉格反射、系列潛堤</b>			
<b>摘要：</b> 本研究探討新式的海岸保護工法系列潛堤，所產生的布拉格反射效應對海岸保護的效果，由於以往文獻研究僅限於對理論及模式的準確度作研究或對波形底床佈置與波浪互制關係做局部現象的探討。若要將布拉格共振的原理應用至現場的系列潛堤，有必要對系列潛堤在較符合現場條件的配置下，探討其各種相關參數間的關係。因此，本研究以佈置矩型系列潛堤，利用 Miles (1981) 理論、試驗室試驗及數值模式探討在各種不同波浪條件下，波浪通過不同矩型系列潛堤配置的布拉格反射效應，入射波浪條件包括：入射方向、週期、水深以及有、無碎波發生等，潛堤配置條件包括：堤高、堤長、堤間距(等間距及不等間距)、水平底床、斜坡底床等。利用對波浪通過系列潛堤的波場機製作一系列有系統研究，以期對系列潛堤與波浪間互制的關係，有進一步明瞭，俾作為日後研究、工程設計及施政單位之參考依據。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
92 年 06 月	116	100	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
<b>機密等級：</b> 限閱    機密    極機密    絕對機密 （解密【限】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			
<b>備註：</b> 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: Coastal Protection and the Optimum Layout of Seawall for Recreational Virtual Function (2/4)			
ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009202111	IOT SERIAL NUMBER 92-81-760	PROJECT NUMBER 91-HA10
DIVISION: CENTER OF HARBOR & MARINE TECHNOLOGY DIVISION CHIEF: Chiu Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Tsai Li-Hung PROJECT STAFF: Tsai Li-Hung, Ho Liang-Sheng, Hwang Ching-Her, Chen Ming-Tzong, Hsu Tai-Wen, Wen Chih-Chung, Huang Ying-Tsun PHONE: 886-4-26587177 FAX: 886-4-26571329			PROJECT PERIOD FROM Jan. 2002 TO Dec. 2002
KEY WORDS: Bragg reflection, series submerged breakwater			
ABSTRACT: <p>Because of rapid increases of income and leisure time, more multi-recreational activities and facilities will be needed in Taiwan. Alternative seawalls should be proposed along the beach to meet the demand. The design of seawalls along the beach will be important in providing recreational and visual functions. This study focuses on the coastal protection and the optimum layout of seawall for recreational virtual function. Experiments, theory, and numerical model are carried out to study the propagation of monochromatic wave over a series submerged breakwater. The characteristics of Bragg reflection were investigated under the conditions including breakwater number (<math>N</math>), breakwater height (<math>D</math>), spacing interval (<math>S</math>), breakwater length (<math>G</math>), and incident angel (<math>\theta</math>). The reflection coefficients of both experiments and numerical calculations were compared with other researchers' laboratory measurements and models. Their discrepancies among those results were discussed. The results indicate that the effect of Bragg reflection can be greatly improved by increasing the number, height, and spacing interval due to the performances of series of submerged breakwaters. They can be provided as the references for the design of artificial bars to protect the beach in practice.</p>			
DATE OF PUBLICATION June 2003	NUMBER OF PAGES 116	PRICE 100	CLASSIFICATION SECRET CONFIDENTIAL UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄 .....	III
表目錄 .....	V
圖目錄 .....	VI
照片目錄.....	X
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究動機及目的.....	9
1.4 研究方法.....	10
1.5 本文組織.....	11
第二章 理論解析 .....	13
2.1 Miles 理論 .....	13
2.2 沙漣、沙洲及系列潛堤之反射率 .....	16
2.3 複合式系列潛堤之反射率 .....	20
2.4 布拉格共振機制.....	21
2.5 反射率計算.....	25
第三章 數值模式 .....	29
3.1 控制方程式.....	29
3.2 邊界條件和起始條件.....	34
3.3 數值方法.....	35
第四章 模式驗證 .....	39
4.1 複合式正弦沙漣布拉格反射 .....	39
4.2 斷面水工試驗.....	48
4.3 平面水工試驗.....	57
第五章 結果與討論 .....	65
5.1 斷面複合式系列潛堤.....	66
5.2 平面系列潛堤.....	76

第六章 結論與建議 .....	89
6.1 結論.....	89
6.2 建議.....	90
參考文獻.....	93
附錄 A .....	97
附錄 B .....	101

## 表目錄

表 1-1 各式海岸保護工法優缺點 .....	2
表 1-2 前人研究方法比較 (理論方面) .....	7
表 1-3 前人研究比較 (試驗方面) .....	9
表 4-1 波浪通過複合式沙漣底床試驗條件 .....	39
表 4-2 波浪通過複合式人工潛堤底床試驗條件 .....	53
表 5-1 波浪通過複合式系列潛堤的計算條件 .....	67
表 5-2 平面系列潛堤佈置及波浪條件 .....	77



## 圖目錄

圖 1-1 波浪經過沙漣底床之布拉格共振 .....	3
圖 1-2 波浪經過系列潛堤之水位變化圖 .....	3
圖 2-1 波數向量定義圖 .....	13
圖 2-2 不同形狀等間距潛堤示意圖 .....	19
圖 2-3 複合式系列潛堤示意圖 .....	20
圖 2-4 波浪傳遞於正弦波形底床之波動系統 .....	22
圖 2-5 複合式系列潛堤各共振反射示意圖 .....	24
圖 2-6 反射率為 0.4 時的水位振幅分佈圖 .....	27
圖 2-7 不同波高計間距組合的反射率分佈圖 .....	27
圖 3-1 底床上考慮擾變地形參數示意圖 .....	31
圖 4-1 配置 G1、G2 及 G3 複合式沙漣水深地形分佈圖 ( $h_0 = 2.5cm$ ) .....	40
圖 4-2a 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖 (配置 G1 , $h_0 = 4cm$ ) .....	43
圖 4-2b 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖 (配置 G1 , $h_0 = 4cm$ ) .....	43
圖 4-3a 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖 (配置 G1 , $h_0 = 2.5cm$ ) .....	44
圖 4-3b 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖 (配置 G1 , $h_0 = 2.5cm$ ) .....	44
圖 4-4 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖 (配置 G2 , $h_0 = 4cm$ ) .....	45
圖 4-5 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖 (配置 G2 , $h_0 = 2.5cm$ ) .....	45
圖 4-6a 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖 (配置 G3 , $h_0 = 4cm$ ) .....	46
圖 4-6b 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖 (配置 G3 , $h_0 = 4cm$ ) .....	46

圖 4-7a 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖	
(配置 G3 , $h_0 = 2.5cm$ )	48
圖 4-7b 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖	
(配置 G3 , $h_0 = 2.5cm$ )	48
圖 4-8 試驗室儀器、潛堤佈置及資料擷取系統示意圖	50
圖 4-9 試驗與理論波形的比較圖 ( $H = 5cm, T = 1.03sec$ )	51
圖 4-10 試驗與理論波形的比較圖 ( $H = 5cm, T = 4.03sec$ )	51
圖 4-11 波浪通過等間距系列潛堤反射率變化圖	
( $N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 1$ )	55
圖 4-12 波浪通過複合式系列潛堤反射率變化圖	
( $N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 0.75$ )	55
圖 4-13 波浪通過複合式系列潛堤反射率變化圖	
( $N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 1.25$ )	56
圖 4-14 波浪通過複合式系列潛堤反射率變化圖	
( $N = 8, D/h = 0.2, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 0.75$ )	56
圖 4-15 波浪通過複合式系列潛堤反射率變化圖	
( $N = 4, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 1.25$ )	57
圖 4-16 平面二維系列潛堤佈置示意圖	61
圖 4-17 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/2, B/S = 0.5, G/S = \infty$ )	61
圖 4-18 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/2, B/S = 0.5, G/S = 1.7$ )	62
圖 4-19 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/2, B/S = 0.5, G/S = 3.4$ )	62
圖 4-20 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/2, B/S = 0.5, G/S = 5.1$ )	63
圖 4-21 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/2, B/S = 0.5, G/S = 6.8$ )	63
圖 5-1 複合式系列潛堤佈置圖	66
圖 5-2 不同潛堤間距差比下反射率 $R$ 對波浪條件 $2S_1/L$ 的關係圖	
( $N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25$ )	68

圖 5-3 不同潛堤間距差比下反射率 $R$ 對波浪條件 $2S_1/L$ 的關係圖	
( $N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.5$ ) .....	68
圖 5-4 不同潛堤寬度間距比, 反射率 $R$ 對波浪條件 $2S_1/L$ 的關係圖	
( $N = 8, D/h = 0.4, S_2/S_1 = 0.75$ ) .....	69
圖 5-5 不同潛堤寬度間距比, 反射率 $R$ 對波浪條件 $2S_1/L$ 的關係圖	
( $N = 8, D/h = 0.4, S_1/S_1 = 1.25$ ) .....	70
圖 5-6 不同潛堤個數下反射率 $R$ 對波浪條件 $2S_1/L$ 的關係圖	
( $D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 0.75$ ) .....	71
圖 5-7 不同潛堤個數下反射率 $R$ 對波浪條件 $2S_1/L$ 的關係圖	
( $D/h = 0.4, B/S_1 = 0.5, S_2/S_1 = 1.25$ ) .....	72
圖 5-8 不同相對水深下, 反射率 $R$ 對波浪條件 $2S_1/L$ 的關係圖	
( $N = 8, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 0.75$ ) .....	73
圖 5-9 不同相對水深下, 反射率 $R$ 對波浪條件 $2S_1/L$ 的關係圖	
( $N = 8, B/S_1 = 0.5, S_2/S_1 = 1.25$ ) .....	74
圖 5-10 不同角度入射下反射率 $R$ 對波浪條件 $2S_1/L$ 的關係圖	
( $N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 0.75$ ) .....	75
圖 5-11 不同角度入射下反射率 $R$ 對波浪條件 $2S_1/L$ 的關係圖	
( $N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.5, S_2/S_1 = 1.25$ ) .....	76
圖 5-12 平面系列潛堤各影響因子的物理意義示意圖 .....	77
圖 5-13 波浪通過系列潛堤波高分佈圖	
( $G/S = 1.7, D/h = 1/2, N = 4, 2S/L = 0.75$ ) .....	78
圖 5-14 波浪通過系列潛堤波高分佈圖	
( $G/S = 4.7, D/h = 1/2, N = 4, 2S/L = 0.75$ ) .....	78
圖 5-15 波浪通過系列潛堤波高分佈圖	
( $G/S = \infty, D/h = 1/2, N = 4, 2S/L = 0.75$ ) .....	79
圖 5-16 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/2, B/S = 0.5, \tan \beta = 0$ ) .....	80
圖 5-17 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/4, B/S = 0.5, \tan \beta = 0$ ) .....	81
圖 5-18 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/2, B/S = 0.5, \tan \beta = 1/20$ ) .....	81

圖 5-19 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/4, B/S = 0.5, \tan \beta = 1/20$ ).....	82
圖 5-20 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/2, B/S = 0.5, G/S = \infty$ ).....	83
圖 5-21 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/2, B/S = 0.5, G/S = 1.5$ ) .....	83
圖 5-22 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $D/h = 1/2, B/S = 0.5, G/S = 1.0$ ) .....	84
圖 5-23 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $B/S = 0.5, G/S = \infty, \tan \beta = 0$ ) .....	85
圖 5-24 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $B/S = 0.5, G/S = 1.5, \tan \beta = 0$ ) .....	85
圖 5-25 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $B/S = 0.5, G/S = 1.0, \tan \beta = 0$ ).....	86
圖 5-26 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $B/S = 0.5, G/S = \infty, \tan \beta = 1/20$ ) .....	86
圖 5-27 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $B/S = 0.5, G/S = 1.5, \tan \beta = 1/20$ ).....	87
圖 5-28 反射率 $R$ 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖	
( $B/S = 0.5, G/S = 1.0, \tan \beta = 1/20$ ).....	87

## 照片目錄

照片 4-1 試驗斷面水槽 .....	49
照片 4-2 潛堤前方波高計佈置 .....	49
照片 4-3 水位資料擷取過程 .....	52
照片 4-4 試驗室造波試驗的情形 .....	52
照片 4-5 試驗室潛堤及波高計配置情形 .....	58
照片 4-6 試驗室造波試驗的情形 .....	58

# 第一章 緒論

## 1.1 前言

近年來由於對生態環境及休閒生活逐漸重視，在許多海岸侵蝕日益嚴重的地區，為同時達到保護海岸及自然景觀的目的，海岸保護結構物之設置，已由過去以防止海岸侵蝕破壞及保護海岸地區生命財產安全之單純目的，轉變成包含保護海岸、景觀美化與保育並重等多功能之親水性設計，因此，在各種海岸和港灣消波結構物的設置極需作多方面考量。

一般海岸保護工法包括海堤、突堤、離岸堤及人工岬灣等，但由許多現場觀測及文獻報告顯示這些防護工法的不足。其中，海堤具備施工容易，防止海水侵入陸地阻擋暴潮及波浪的功能，但堤線如太靠近灘線易造成堤前的反射，使海灘消失。突堤能攔截沿岸漂沙、控制海灘地形及阻擋沿岸流，但由於突堤的攔截，漂沙在上游側形成堆積，下游側發生侵蝕。離岸堤能使沿岸漂沙堆積堤後，形成突出於原海岸地形的沙舌或繫岸沙洲，但離岸堤工程費高，堤趾易被沖刷，維護費可觀。人工岬灣可以保護和安定因上游漂沙源斷絕而被侵蝕的海岸，但對颱風頻繁的國家而言，後灘區的沙易被颱風波浪帶走，隨之而來的湧浪不易將外海的沙推回岸上，進而造成海岸侵蝕。以上所提保護工法，大多以硬性的方式來保護海岸，其雖然可防止波浪越波，遏阻海水入侵及陸地流失，卻常因反射增加使得堤腳沖刷加劇，導致海灘加速流失，加上這些工法通常以高於海平面的混凝土及消波塊建築於海中，不僅妨礙觀海視線，更因凌亂消波塊破壞海岸景觀，降低人民親水的意願。各式海岸保護工法的優缺點整理如表 1-1 所示。

為了同時達到維護海岸景觀環境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。系列潛堤(a series of submerged breakwaters)為二道以上潛堤並列平行於海岸線，學理上的研究顯示，若入射波浪之波長為海底正弦形沙漣間距二倍，將產生布拉格共振

(Bragg resonance)，系列潛堤即利用此原理，使通過系列潛堤水域的波浪反射至外海，因而到達海岸的波浪變小。圖 1-1 為波浪通過沙漣時，在接近布拉格共振的條件下，反射波變化的情形 (Davies 和 Heathershaw, 1984)，圖中結果顯示，因為布拉格反射效應，反射波隨沙漣長度的增加而成長，其中  $\sqrt{E_1^2 + E_2^2}$  為反射波波形之包絡線 (Envelope)， $E_1$  及  $E_2$  為反射波形分量，由於波浪反射至外海，使得向岸傳遞的透射波減小，進而達到海岸保護的目的。圖 1-2 為波浪通過矩形系列潛堤之實驗與理論分析 (Davies 和 Heathershaw, 1984)，其反射波為部份重覆波，而透射波則波浪之振幅降低而波能減少。故適當的系列潛堤配置改變了傳統高而寬之潛堤形式，以數道較低的堤頂及較狹的堤寬達到抑制波浪的目的。此種工法目前仍缺少一系列的研究，過去的文獻報告較著重於單頻及複合式正弦形沙漣 (sinusoidal ripples) 底床的基礎研究，對於波浪通過系列潛堤的反應機制仍不明瞭，因此本研究將針對於波浪通過系列潛堤所產生的布拉格反射效應，作一系列有系統研究探討。

表 1-1 各式海岸保護工法優缺點

工 法	優 點	缺 點
潛 堤	消減波浪能量	易造成堤址沖刷
離岸堤	堤前消減波浪能量，堤後形成沙舌或繫岸沙洲	景觀不良維護費高
突 堤	可攔截沿岸漂沙，穩定海岸	上游砂源受阻絕 下游易侵蝕
人工養灘	形成自然海灘，對鄰近海域影響較小	成本高，砂源尋找不易
海 堤	施工容易，防浪防潮	堤前波浪反射，容易加速海灘侵蝕
系列潛堤	利用共振波達到保護海岸的效果，堤後波能變小海岸漂沙減少	施工困難

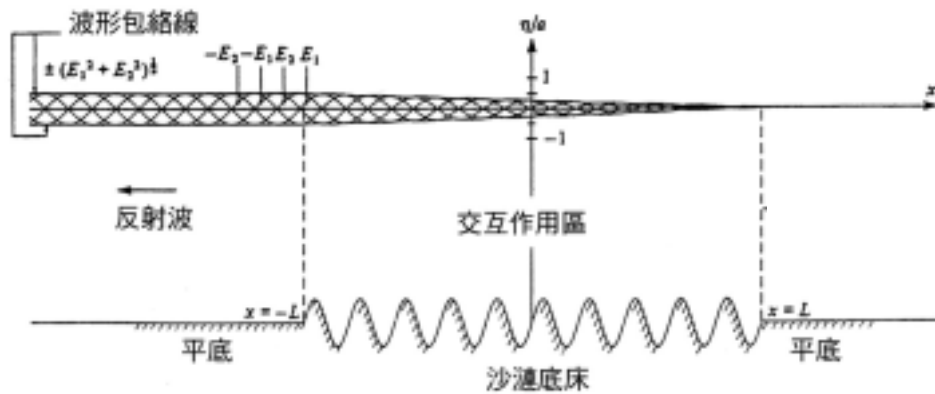


圖 1-1 波浪經過沙漣底床之布拉格共振  
(Davies 和 Heathershaw , 1984)

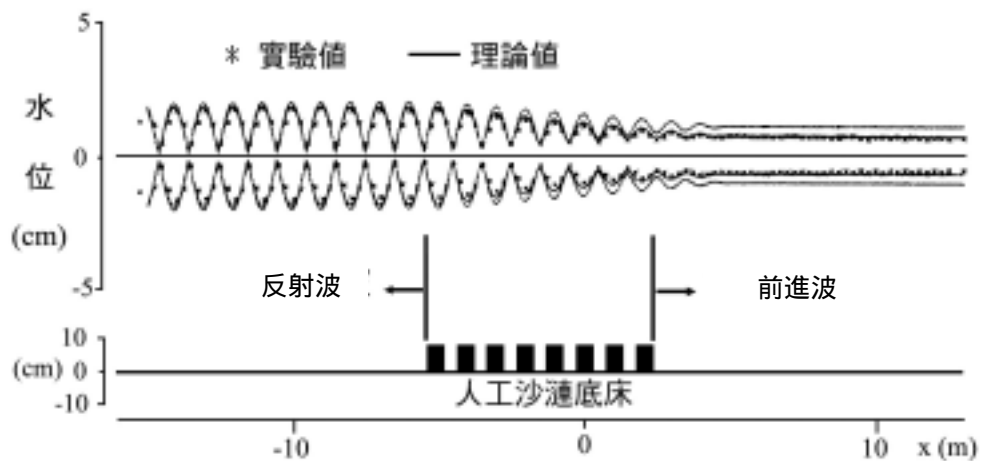


圖 1-2 波浪經過系列潛堤之水位變化圖  
(Davies 和 Heathershaw , 1984)

## 1.2 文獻回顧

自從 Short (1975) 和 Dolan (1983) 發現在海灣及海岸的自然沙灘上常存在平行於海岸之沙洲 (sand bars), 波浪常在這些沙洲頂點附近碎波, 使波能衰減, 這些物理現象啟發學者專家對於海岸防禦工法有了新的構想, 即利用平行海岸的系列人工沙洲或潛堤形成共振波消減波浪能量, 如此既能使到達海岸波浪減小, 減小海岸結構物的破壞及海岸漂沙的流失, 又能保持自然景觀, 同時堤趾沖刷也較不顯著。



有許多學者透過理論、試驗及數值研究波浪通過沙漣底床的布拉格反射現象。所謂布拉格反射(Bragg reflection)現象乃由布拉格(1890~1971)研究 X 射線光波通過二平行晶體的反射，發現當晶體的間距為半波長的整數倍時，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。Davies 和 Heathershaw (1984)及 Mei (1985)發現正弦形沙漣波長若為入射波半倍波長的整數倍，即  $2\ell/L=1$ ，波浪於沙漣底床上逐漸形成駐波，並在底床佈置區前方形成駐波反射，他們將此現象稱之為布拉格共振，此處  $L$  為入射波波長， $\ell$  為沙漣之波長，他們並以模型試驗驗證其正確性。Miles (1981) 對 Laplace 方程式積分，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率公式。陳和湯 (1990) 及 陳 (1991a, 1991b, 1992) 對正弦波形底床上規則前進重力波以攝動法作解析，對於布拉格共振現象針對時間及空間的成長作理論解析。由於正弦波形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)及系列潛堤消減波浪能量，探討其波浪反射率及布拉格反射的情形。

在波浪通過人工沙洲或系列潛堤的反射率推估方面，Kirby 和 Anton (1990) 擴展 Miles 的理論，將人工沙洲形狀以富利葉級數展開，並以顯函數表示 Miles 的反射率公式，同時以理論證實人工沙洲佈置若符合布拉格共振的條件時，將發生布拉格反射現象，此時反射率最大。張等人 (1997) 引用 Miles (1981) 的理論針對矩形、餘弦函數形及三角形三種人工沙洲之反射率進行比較，並進行試驗分析，其分析結果顯示，相同個數的沙洲以矩形之反射率最大，半餘弦形次之，三角形最小，岳等人 (1997~2000) 以邊界元素法(Boundary Element Method, BEM) 探討不同入射波浪條件下，不同的系列潛堤配置的反射率變化情形，Hsu 等人(2002a) 根據張等人 (1997)試驗資料提出布拉格反射機制與波浪條件及配置條件中各影響參數間之經驗公式。

有關波浪通過單頻正弦沙漣底床(single sinusoidal bed)的布拉格反射研究，Davies 等人 (1989) 及 O'Hare 和 Davies (1993) 發現布

拉格反射現象，不僅在  $2k/K \sim 1$  發生主要共振 (primary resonance) ，而且在  $2k/K \sim 2$  也會發生次諧波共振 (second-harmonic resonance) ，其中  $k = 2\pi/L$  和  $K = 2\pi/\ell$  分別為表面波和底床的週波數， $L$  和  $\ell$  分別為表面波長和底床正弦沙連波長。有關波浪通過複合式沙連底床 (multiply sinusoidal bed) 的研究，Belzons 等人 (1991) 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) 指出波浪通過由兩個週波數正弦沙連 ( $K_1, K_2; K_2 > K_1$ ) 所疊加組成的底床時，在低頻處的  $k = (K_2 - K_1)/2$  會發生分諧波共振 (sub-harmonic resonance) ，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) ，亦指出分諧波與高諧波共振的反射率值雖然比主頻共振低，但在實際工程應用上，能增加共振的頻率範圍，具有實質應用的意義，且指出在越低頻區，布拉格共振平移現象愈明顯。Cho 和 Lee (2000) 利用特徵函數展開法 (Eigenfunction Expansion Method : EEM) 發展一套理論模式說明波浪通過陡變水深的反射現象，其模式包含傳遞項 (propagating mode) 及振盪項 (evanescent mode) ，探討波浪通過單一及複合式正弦波形底床的布拉格反射以及正、斜向入射波浪之差異性，但由於計算波形底床需要花費許多時間，故在應用至大範圍的海岸地區並不實際。

近年來有許多學者針對 Berkhoff (1972) 提出的緩坡方程式 (Mild-Slope Equation, MSE) 加以修正用以研究波浪通過非等深地形的變形，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  $\delta$ ，推導波浪通過沉沒障礙物的延伸型態緩坡方程式 (Extended Mild Slope Equation, EMSE)，並對波浪通過正弦沙洲之反射率進行數值計算，由於對高階影響量無加以考慮，故對於陡變雙頻正弦底床所引發的高階共振效應無法預測 (O'Hare 和 Davies, 1993)。Chamberlain 及 Potter (1995) 把 MSE 忽略的底床曲率項  $\nabla_h^2 h$  和底床坡度平方項  $|\nabla_h h|^2$  加入方程式中變成修正型態緩坡方程式 (Modified Mild Slope Equation, MMSE)，數值分析結果顯示可以

增加布拉格共振效應之精度，其中  $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$  為水平梯度運算因子， $h$  為水深。Porter 和 Staziker (1995) 以變分法 (variational derivative method) 及 Galerkin eigenfunction 法對緩坡方程式推導，進而得到一延伸型態的緩坡方程式。Suh 等人 (1997) 在 EMSE 中考慮底床曲率項  $\nabla_h^2 h$  和底床坡度平方項  $|\nabla_h h|^2$ ，以時間相關方程式探討波浪通過陡變底床的變形。Zhang 等人 (1999) 將 Kirby (1986) 所忽略的高階項考慮於方程式中，並加入擾變地形參數  $\delta$  之影響，提出雙曲線型態的混合模式 (Hybrid Model, HM)，用以解析波浪通過複合式正弦底床之布拉格共振效應，結果顯示利用複合式正弦沙洲可同時增加波浪的適用範圍及反射率，但 HM 並沒有考慮波浪斜向入射時的效應。Hsu 及 Wen (2001) 以時間緩變觀念，將雙曲線型態緩坡方程式延伸為包括底床曲率項、底床斜率平方項演進型緩坡方程式 (Evolution Equation of Mild-Slope Equation, EEMSE)，用以描述波浪通過斜坡底床的變形特性。

實際應用方面，Mei (1988) 提出布拉格防波堤的觀念，用以保護位於北海的 Ekofisk 油田的鑽油平臺免受於大波浪的破壞。Bailard 等人 (1990) 應用 Kirby 和 Anton (1990) 的研究結果設計二種形式的人工沙洲，在佛羅里達的卡納維爾角海岸 (Cape Canaveral Beach, Florida) 做現場試驗，由其結果可知波浪週期在預期的布拉格反射的範圍內，其反射率可達 0.4 以上。Bailard 等人 (1992) 以波浪通過等間距的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 Gulf 海岸及 Atlantic 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。有鑒於等間距人工沙洲所形成的布拉格共振反射帶寬較小，在實際應用上，有效的防禦波浪範圍受到限制，若藉由不等間距的沙灘底床佈置，將可增加波浪適用範圍。根據 Guazzelli 等人 (1992) 及 Zhang 等人 (1999) 提出利用複合式正弦沙灘，布拉格反射會在其他條件下發生，而且布拉格共振的大小及波浪適用範圍會隨著沙灘的個數及振幅的增加而增加。

綜合以上學者的文獻報告，分別就理論及試驗研究方面整理如表 1-2 及表 1-3，從文獻報告得知，往昔學者對於布拉格共振研究較著重於利用正弦沙漣底床及人工沙洲作各種不同理論及模式的探討。對實際應用至海岸工程現場，還須有進一步深入及考量多方面條件作有系統的研究。

表 1-2 前人研究方法比較 (理論方面)

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率公式。
Kirby 和 Anton (1990)	擴展 Miles 理論	證實人工沙漣間距為波長之半，波浪產生共振，反射率最大。
Mei (1985)	攝動法解析	解析波形底床之共振隨空間之反射係數。
張等人 (1997)	引用 Miles 理論	矩形形狀反射率最大。人工沙漣在達 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，形成駐波共振。
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)		
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共振現象。
Kirby (1986)	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率，並與試驗結果比較。
Belzons 等人 (1991)	逐次近似模式	相對底床振幅增加，則反射率尖峰值增加相對的反射率帶寬亦增加，在越低頻區，布拉格反射平移現象愈明顯。

O'Hare 和 Davies (1992,1993)	包含消散項的連續應用，矩陣模式	高階的布拉格反射會減低並向低頻區平移，並會增加分諧波共振效應。
Guazzelli 等人 (1992)	逐次近似模式	布拉格反射在沙漣非為等間距時，會在其它條件下發生。
Massel (1993)	含底床高階項及消散項之延伸型態折-繞方程式	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。
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及高階布拉格反射現象。
Suh 等(1997)	含底床高階項之時變緩坡方程式	底床擾動個數愈多，反射率及平移愈大，隨 $2k/K$ 的反射率震盪次數愈多，相對的帶寬愈小。
Zhang 等人 (1999)	含底床高階項及擾變地形項之混合模式(HM)	HM 在複合沙漣的布拉格預測上比 MMSE 正確。
岳等人 (1997~2000)	邊界元素法	探討不同波浪入射角度、潛堤形狀及堤邊坡之反射率大小。
Cho 和 Lee (2000)	以特徵函數展開推導含傳遞項及振盪項理論模式	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，發生反射率平移現象。
Hsu 和 Wen (2001)	含底床高階項及能量消散項之緩坡方程式	有效處理近岸波浪通過斜坡上擾變地形的淺化、碎波及能量消散效應。
Hsu 等人 (2002b)	含底床高階項及擾變地形項之演進形式緩坡方程式	有效模擬波浪通過地形擾變之布拉格反射效應。

表 1-2 前人研究比較 (試驗方面)

作者	研究方法	研究成果
Davies 和 Heathershaw (1984)	正弦沙漣模型試驗	發現沙漣間距為波長之半時，波浪於沙漣底床前逐漸形成駐波共振。
Bailard 等人 (1990)	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，反射率可達 0.4 以上，而且證實人工沙漣可防止海岸侵蝕。
Kirby 和 Auton (1990)	半餘弦人工沙洲試驗	發現布拉格共振發生在 $2k/K=1$ 以外的高頻及低頻區，反射率尖峰值會往較低的 $2k/K$ 值平移。
Belzons 等人 (1991)	雙層正弦沙漣試驗	底床由兩種不同波長組成，會在 $k=(K_2-K_1)/2$ 處發生次頻共振。
Guazzelli 等人 (1992)	雙層正弦沙漣試驗	布拉格反射亦可在沙漣非為等間距時發生。反射率尖峰值會往較低的 $2k/K$ 預測值平移。
張等人 (1997)	矩形 餘弦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，反射率可達 0.8 以上。
郭等人 (1999)	雙列潛堤模型試驗	適當的雙列前堤配置，能增加反射率與減小透射率，減緩海灘侵蝕或促進灘線前進。
Hsu 等人(2002a)	矩形人工沙洲試驗	波浪正向入射與潛堤配置各參數間的經驗公式推算。

### 1.3 研究動機及目的

由於正弦形沙漣及人工沙洲在實際工程應用及設計上有其困難性，因此，本研究以較符合現場的一般潛堤形狀“矩型”作系列潛堤研究。而現場的波浪入射方向非固定正向垂直海岸線，且潛堤為有限

長，潛堤兩端的堤頭繞射效應將影響整體的反射效果，以往文獻皆無探討沙漣底床長度的影響，故本研究亦將探討不同波浪入射方向以及不同潛堤長度的反射效應。此外，等間距潛堤布拉格反射發生的條件，皆在 $2S/L$ 的波浪條件附近，使系列潛堤實際應用至現場受限制，有鑑於此，本研究將利用複合式正弦形底床的觀念，發展一新式不等間距的複合式系列潛堤，針對其海岸防護的布拉格共振作一系列的研究探討。

以往文獻研究僅限於對理論及模式的準確度作研究或對不同波形底床佈置及波浪條件做局部現象的探討。若要將布拉格共振的原理應用至現場的系列潛堤，有必要對系列潛堤在較符合現場條件的配置下，探討其各種相關參數間的關係。因此，本研究以佈置矩型系列潛堤，利用 Miles (1981) 理論、試驗室試驗及數值模式探討在各種不同波浪條件下，波浪通過不同矩型潛堤配置的布拉格反射效應，入射波浪條件包括：入射方向、週期及水深等，潛堤配置條件包括：堤高、堤長、堤間距(等間距及不等間距)等。利用對波浪通過系列潛堤的波場機制作一系列研究，俾作為日後研究、工程設計及施政單位之參考依據。

## 1.4 研究方法

本研究針對底床上佈置系列潛堤結構物，對結構物附近整個波場作嚴密解析，並且針對各種不同結構物配置配合不同水深環境及不同波浪條件，做保護效果優劣的探討，期能實際應用至不同現場情況，故在研究方法上採用以下三個步驟：

- 1.理論解析：擴展 Miles (1981)理論，延伸至矩形複合式系列潛堤，探討其布拉格反射之變化情形。
- 2.數學模式建立：以演進型式緩坡方程式為主要控制方程式，考慮的波浪現象應包括有淺化、折射、繞射及反射等效應。並運用交替方向隱式法 (Alternative Direction Implicit, ADI)建立完整之波場數學

模式。

3. 水工模型試驗：進行一系列水工模型試驗，利用水工模型試驗的結果與理論模式及數值計算加以比較，以驗證模式的正確性，進一步求出各種不同波浪條件下，不同系列潛堤配置的海岸保護效果，並研究其相關性以及最佳配置。

## 1.5 本文組織

本研究共分六章，第一章為緒論，首先說明布拉格共振的機制，敘述本研究的研究動機及目的，並回顧前人所做的相關文獻研究，最後說明本研究的概要及文章的內容架構。

第二章為理論解析，說明 Miles(1981)理論的推導過程，並以 Miles 理論推算矩型複合式潛堤佈置之布拉格反射率，以推算結果說明複合式系列潛堤的反射率變化及布拉格反射。此外，說明本研究在試驗以及數值模式所應用的反射率計算方法以及所應用的理論。

第三章為數值模式，說明所應用的波浪模式以及考慮的擾動地形影響參數，並包括波場控制方程式的推導過程、邊界條件的設定、數值方法以及收斂條件。

第四章為模式驗證，利用前人的在複合式正弦形底床的試驗，驗證本研究模式的正確性，並與其他理論及數值模式的結果作比較。此外，進行適合本研究的矩形系列潛堤配置的水工試驗，以驗證本研究的理論及模式的正確性。其中，將說明試驗設備、試驗方法和步驟以及試驗的配置條件和波浪條件，並將試驗結果與理論及數值模式依：(1)堤高，(2)不等間距，(3)堤長，(4)堤數，(5)堤距，(6)入射角度，(7)斜坡底床，(8)有、無碎波等作驗證比較，以確保本研究的理論及模式的正確性，其中，等間距配置下的底床坡度及有、無碎波研究已於第一年(90 年)報告完成。

第五章為結果與討論，針對(1). 在複合式系列潛堤配置下，探討



潛堤間距比、個數、堤高、堤距及波浪入射角度，反射率分布在主頻反射及高諧波反射的變化情形，以及各參數間的相互關係。(2). 等間距潛堤在二維水平底床配置下，探討不同潛堤長度的布拉格反射現象。

第六章為本研究之結論與建議。

## 第二章 理論分析

### 2.1 Miles 理論

根據 Miles (1981) 的研究指出，在微小振幅波的條件下，波浪通過等水深  $h$ ，底床變化函數為  $z = \delta(x)$  二維斷面時，其入射波的流速勢函數可表示為

$$\Phi^{(i)} = \text{Re}\{A \exp[i(k \cos \theta x + k \sin \theta y - \omega t)] \cosh kz\} \quad (2-1)$$

其中

$$k \tanh kh = \omega^2 / g = \hat{K} \quad (2-2)$$

式中  $\Phi^{(i)}$  為入射波流速勢， $\text{Re}$  為複數的實部， $A$  為波浪振幅， $i = \sqrt{-1}$  為單位虛數， $x$  為波浪前進方向， $z$  為水深方向且定義向上為正， $z = 0$  為底部， $\omega$  為角頻率， $g$  為重力加速度， $k \cos \theta$ 、 $k \sin \theta$  分別為週波數  $k$  在  $x$ 、 $y$  方向上的分量， $\theta$  為波向角，其定義如圖 2-1 所示。

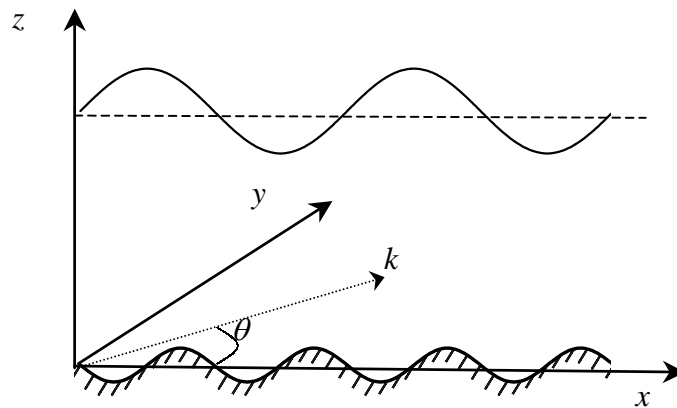


圖 2-1 波數向量定義圖

根據 Laplace 方程式及 Wehausen 和 Laitone (1960) 所提出的表面和底床邊界條件：

Laplace 方程式：

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad , \quad \delta < z < h \quad (2-3)$$

線性化自由表面運動和動力邊界條件（KFSBC 和 DFSBC）：

$$\Phi_z = \hat{K} \Phi \quad , \quad z = h \quad (2-4)$$

底部邊界條件 (BBC)：

$$\Phi_z = \delta' \Phi_x \quad , \quad z = \delta \quad (2-5)$$

其中  $\Phi = \Phi(x, y, z, t)$ ， $\delta$  為底床地形擾變量， $\delta' = d\delta/dx$

流速勢函數須滿足  $x$  在正無窮遠處為透射波形式，在正負無窮遠處為入射波與反射波疊加之形式，如下：

$$\Phi \sim \text{Re} \left\{ A \left[ \begin{array}{l} \hat{T} \exp(ik \cos \theta x) \\ \exp(ik \cos \theta x) + R \exp(-ik \cos \theta x) \end{array} \right] \exp[i(k \sin \theta y - \omega t)] \cosh kz \right\} \quad (2-6)$$

式中  $R$  為反射率， $\hat{T}$  為透射率，此二值可由下列方法求得。假設式 (2-3) 至式 (2-6) 的解可表示為

$$\Phi = \Phi^{(i)} + \text{Re} \left\{ \tilde{\Phi}(x, z) \exp[i(k \sin \theta y - \omega t)] \right\} \quad (2-7)$$

在  $\tilde{\Phi} = O(\varepsilon)$  的假設下，其中  $\varepsilon \equiv \max(\delta/h, \delta')$  為一微小量，將上式代入式(2-3) 式(2-6)，並將式 (2-5) 之底床邊界條件泰勒展開於  $z=0$  處，略去小於  $O(\varepsilon)$  之階量，最後可得

$$\tilde{\Phi}_{xx} + \tilde{\Phi}_{zz} - (k \sin \theta)^2 \tilde{\Phi} = 0 \quad , \quad 0 < z < h \quad (2-8)$$

$$\tilde{\Phi}_z = \hat{K} \tilde{\Phi} \quad , \quad z = h \quad (2-9)$$

$$\tilde{\Phi}_z = (ik \cos \theta \delta' - k^2 \delta) A \exp(ik \cos \theta x) = q(x) \quad , \quad z = 0 \quad (2-10)$$

$$\tilde{\Phi} \sim A \begin{bmatrix} (\hat{T} - 1) \exp(ik \cos \theta x) \\ R \exp(-ik \cos \theta x) \end{bmatrix} \cosh kz \quad , \quad x \rightarrow \pm\infty \quad (2-11)$$

利用有限餘弦轉換法 (Finite cosine transform) 求解式 (2-8) 並結合式(2-9) (2-11) 的邊界條件，可求得反射率和透射率過程如下：

$$\tilde{\Phi}_\kappa(x) = \int_0^h \tilde{\Phi}(x, z) \cos \kappa z \, dz \quad (2-12)$$

其中  $\kappa = ik$  由下式決定

$$\kappa \tan \kappa h = -\hat{K} \quad (2-13)$$

式(2-12)的逆轉換為

$$\tilde{\Phi}(x, z) = 2 \sum_{\kappa} (h - \hat{K}^{-1} \sin^2 \kappa h)^{-1} \tilde{\Phi}_\kappa(x) \cos \kappa z \quad (2-14)$$

轉換式(2-8)，並應用式(2-9)、式(2-10)及式(2-13)等邊界條件可得

$$\tilde{\Phi}_\kappa''(x) - (\kappa^2 + k^2 \sin^2 \theta) \tilde{\Phi}_\kappa(x) = q(x) \quad (2-15)$$

式(2-15)的解可由變異係數法(variation of parameters)求得為

$$\tilde{\Phi}_\kappa(x) = -\frac{1}{2} \beta^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\beta|x - \xi|) q(\xi) \, d\xi \quad (2-16)$$

其中

$$\beta = (\kappa^2 + k^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (2-17)$$

將式(2-16) 代入 式(2-14) 則

$$\tilde{\Phi} = -\sum_{\kappa} \beta^{-1} (h - \hat{K}^{-1} \sin^2 \kappa h)^{-1} \cos \kappa z \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\beta|x - \xi|) q(x) d\xi \quad (2-18)$$

式(2-18)在  $x = \pm\infty$  處為

$$\tilde{\Phi} \approx (ik \cos \theta)^{-1} (h + \hat{K}^{-1} \sinh^2 kh)^{-1} \cosh ky \exp(\pm ik \cos \theta) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\mp ik \cos \theta \xi) q(\xi) d\xi \quad (2-19)$$

將式(2-10)之  $q(x)$  代入式(2-19)，並對  $\delta'$  進行部分積分，最後與式(2-11)比較可得反射率以及透射率為

$$R = \frac{1}{ik \cos \theta (h + \frac{\sinh^2 kh}{\hat{K}})} \left[ (k \cos \theta)^2 - (k \sin \theta)^2 \right] \int_{-\infty}^{\infty} \exp(2ik \cos \theta x) \delta(x) dx \quad (2-20)$$

$$\hat{T} = 1 - \frac{1}{ik \cos \theta (h + \frac{\sinh^2 kh}{\hat{K}})} \left[ (k \cos \theta)^2 - (k \sin \theta)^2 \right] \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx \quad (2-21)$$

## 2.2 沙漣、沙洲及系列潛堤之反射率

Kirby 和 Anton (1990) 以 Kirby (1986) 所發展的 EMSE 解析線性波在微小水深變化 ( $O(k\delta) \ll 1$ ) 的運動現象，Kirby (1986) 的 EMSE 表示如下：

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \phi) - (\omega^2 - k^2 CC_g) \phi - g(1 - \lambda^2) \nabla_h \cdot (\delta \nabla_h \phi) = 0 \quad (2-22)$$

其中  $\phi = \phi(x, y, t)$  ,  $C = \omega/k$  為波速(Wave celerity) ,  $C_g = \partial\omega/\partial k$  為群波速度(Group velocity) ,  $\lambda = \tanh kh$  。考慮一維問題並忽略微小底床變化所造成波速及群波波速變化( $\nabla_h CC_g = 0$ ) , 則式 (2-22) 可簡化為

$$\hat{\phi}_{xx} + k^2 \hat{\phi} - 4\alpha(\delta\hat{\phi}_x)_x = 0 \quad (2-23)$$

式中  $\hat{\phi}(x)$  為流速勢  $\phi$  僅包含  $x$  變數的部分函數 ,  $\alpha$  為常數 , 其值為

$$\alpha = \frac{k}{2kh + \sinh 2kh} \quad (2-24)$$

利用拉普拉斯轉換將式 (2-23) 轉換並解析出反射率 , 其反射率為

$$R = -2ik\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) e^{2ikx} dx \quad (2-25)$$

式(2-25) 與 Miles (1981) 理論在正向入射的反射率表示式相同。以式 (2-25)應用至正弦形沙漣底床 , 底床函數及反射率表示如下 :

$$\delta(x) = \begin{cases} b \sin(Kx), & 0 \leq x \leq N_r \ell \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-26)$$

$$R = \begin{cases} \left| \frac{\alpha b}{2} \frac{\left(\frac{2k}{K}\right)}{\left(\frac{2k}{K}\right)^2 - 1} \sin\left(\frac{2k}{K} \pi N_r\right) \right|, & \frac{2k}{K} \neq 1 \\ \frac{\alpha b}{2} \frac{\pi N_r}{2}, & \frac{2k}{K} = 1 \end{cases} \quad (2-27)$$

式(2-26) 及式(2-27)中  $b$  為底床擾動振幅 ,  $N_r$  為底床沙漣個數。

Kirby 和 Anton (1990) 利用富利葉級數展開法將 Miles (1981) 的理論擴展成底床為人工沙洲的情形。他們將底床變化函數以富利葉級數表示：

$$\delta(x) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(nKx) \quad (2-28)$$

其中  $C_n$  為富立葉級數之係數， $K = 2\pi / S$  為底床週波數， $S$  為人工沙洲間距。將上式代入式(2-25)則反射率表示為

$$R = -2ik\alpha \sum_{n=0}^{\infty} C_n I_n \quad (2-29)$$

其中

$$I_n = \begin{cases} \frac{1}{k} \frac{\hat{\gamma}^2}{\hat{\gamma}^2 - n^2} e^{ik(N-1)S} \cos(n\pi) \sin(KNS) & , \hat{\gamma} \neq n \\ \frac{1}{2} NS & , \hat{\gamma} = n \end{cases} \quad (2-30)$$

且  $\hat{\gamma} = 2S / L$ 。

若人工沙洲的底床擾變量  $\delta(x)$  為已知，可以由式 (2-29) 富利葉級數方式或直接由式(2-25) 積分方式求得反射率值。Hsu 等人 (2002a) 利用 Miles 理論推導波浪通過等間距半餘弦(Rectified cosine)形、三角形和矩形型式的系列潛堤反射率，等間距系列潛堤示意圖如圖 2-2 所示。

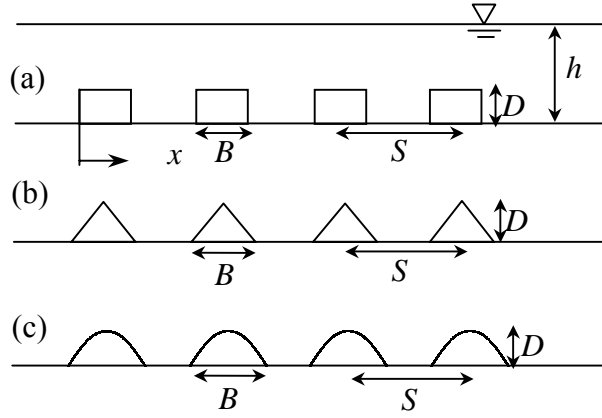


圖 2-2 不同形狀等間距潛堤示意圖

圖中  $D$  潛堤高度， $S$  為潛堤間距， $B$  為潛堤寬度。三種形狀系列潛堤底床高度變化函數表示式如下：

矩形型式:

$$\delta(x) = \begin{cases} D, & n_0 S \leq x \leq n_0 S + B, \quad n_0 = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-31)$$

三角形型式:

$$\delta(x) = \begin{cases} \frac{2D}{B} \left( \frac{B}{2} - |x - n_0 S| \right), & n_0 S \leq x \leq n_0 S + B, \quad n_0 = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-32)$$

半餘弦形型式:

$$\delta(x) = \begin{cases} D \cos \frac{\pi}{B} (x - n_0 S), & n_0 S \leq x \leq n_0 S + B, \quad n_0 = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-33)$$



以式 (2-27) 富立葉級數方式或直接由式(2-25) 積分求得反射率，各型式系列潛堤之反射率如式(2-34)~式(2-36)，推導過程如附錄 A。

矩形型式:

$$R = \left| \frac{2\alpha D \sin kB \sin kSN}{\sin kS} \right| \quad (2-34)$$

三角形型式:

$$R = \left| \frac{2\alpha D(1 - \cos kB) \sin kSN}{kB \sin kS} \right| \quad (2-35)$$

半餘弦形型式:

$$R = \begin{cases} \left| \frac{4\pi k \alpha D \cos kB \sin kSN}{B \left[ \left( \frac{\pi}{B} \right)^2 - 4k^2 \right] \sin kS} \right|, & \frac{\pi}{B} \neq 2k \\ \left| \frac{k \alpha D B \sin kSN}{\sin kS} \right|, & \frac{\pi}{B} = 2k \end{cases} \quad (2-36)$$

## 2.3 複合式系列潛堤之反射率

本文進一步將理論擴展為矩形型式的複合式系列潛堤佈置，圖 2-3 為複合式系列潛堤佈置示意圖。



圖 2-3 複合式系列潛堤示意圖

圖中  $S_i$  為潛堤間距， $N$  為潛堤個數， $x$  為波浪傳遞方向， $z$  軸向上為正。複合式矩形系列潛堤底床高度變化可表示為

$$\delta(x) = \begin{cases} D, & \sum_{j=1}^{n_0} S_{(j-1)} \leq x \leq B + \sum_{j=1}^{n_0} S_{(j-1)}, \quad S_0 = 0, \quad n_0 = 1, 2, \dots, N \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2-37)$$

以直接積分方式將上式代入式(2-25)，則波浪通過不等間距系列潛堤的反射率可表示為

$$\begin{aligned} R &= -2ik\alpha \left( \int_0^B e^{2ikx} dx + \int_{S_1}^{S_1+B} e^{2ikx} dx + \int_{S_2}^{S_1} e^{2ikx} dx + \dots \right) \\ &= -2ik\alpha \frac{D}{2ik} \left( e^{2ikx} \Big|_0^B + e^{2ikx} \Big|_{S_1}^{S_1+B} + e^{2ikx} \Big|_{S_1+S_2}^{S_1+S_2+B} + \dots \right) \\ &= -\alpha D \left\{ (e^{2ikB} - 1) + [e^{2ik(S_1+B)} - e^{2ikS_1}] + [e^{2ik(S_1+S_2+B)} - e^{2ik(S_1+S_2)}] + \dots \right\} \quad (2-38) \\ &= -\alpha D \left[ (e^{2ikB} - 1) + e^{2ikS_1} (e^{2ikB} - 1) + e^{2ik(S_1+S_2)} (e^{2ikB} - 1) + \dots \right] \\ &= -\alpha D \left\{ (e^{2ikB} - 1) [1 + e^{2ikS_1} + e^{2ik(S_1+S_2)} + \dots] \right\} \\ &= -\alpha D (e^{2ikB} - 1) \sum_{j=1}^N \exp \left[ 2ik \sum_{j=1}^N S_{(j-1)} \right] \end{aligned}$$

若系列潛堤配置為等間距，則式 (2-38) 可簡化如式 (2-34)所示。

## 2.4 布拉格共振機制

陳和湯(1990)考慮二維空間，對於波浪傳遞於正弦形波形底床，所形成的波動流場，在攝動法之應用下，解析至第二階次量。其波動系統示意圖如圖 2-4 所示。

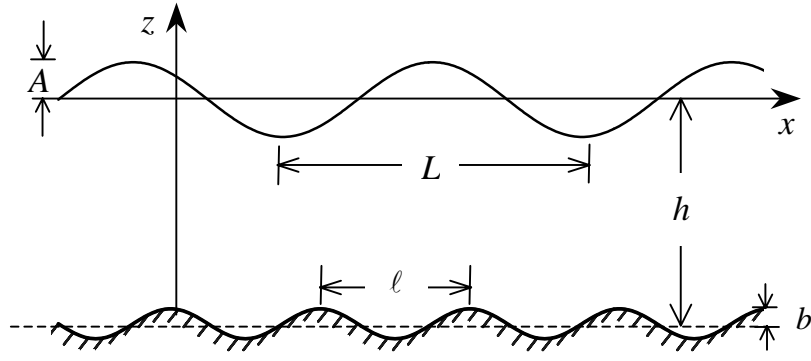


圖 2-4 波浪傳遞於正弦波形底床之波動系統

整體流場結構解析至第二階之全解如下：

$$\begin{aligned}
 \tilde{\Phi}(x, z, t) = & \frac{Ag}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t + \varepsilon_0) - \frac{1}{4} \frac{A^2 \omega^2 t}{\sinh^2 kh} \\
 & + \frac{3}{8} A^2 \omega \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - \omega t + \varepsilon_0) \\
 & + \frac{1}{2} \frac{gkAb}{\omega \cosh kh} \left\{ \frac{(k+K) \cosh(k+K)z + k \tanh kh \sinh(k+K)h}{[(k+K) \tanh(k+K)h - k \tanh kh] \cosh(k+K)h} \sin(kx + Kx - \omega t + \varepsilon_0) \right. \\
 & \left. + \frac{(k-K) \cosh(k-K)z + k \tanh kh \sinh(k-K)h}{[(k-K) \tanh(k-K)h - k \tanh kh] \cosh(k-K)h} \sin(kx - Kx - \omega t + \varepsilon_0) \right\}
 \end{aligned} \tag{2-39}$$

由式(2-39)分母的檢核，可以說明波動系統所發生的共振現象，當分母為 0 時，即

$$(k-K) \tanh(k-K)h - k \tanh kh = 0 \tag{2-40}$$

式(2-40)成立的條件為  $K = 2k$ ，亦即當波形地床之波長為入射波波長之半 ( $\ell = L/2$ ) 時，則整個系統會產生所謂的共振現象。陳 (1991a) 進一步解析出共振情況 ( $K = 2k$ ) 之解，表示如下：

$$\begin{aligned}
\tilde{\Phi}(x, z, t) = & \frac{Ag}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t + \varepsilon_0) - \frac{1}{4} \frac{A^2 \omega^2 t}{\sinh^2 kh} \\
& + \frac{3}{8} A^2 \omega \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - \omega t + \varepsilon_0) \\
& + \frac{1}{2} \frac{gkAb}{\omega \cosh kh} \left\{ \frac{3 \cosh 3kz + k \tanh kh \sinh 3kh}{[3kh \tanh 3kh - k \tanh kh] \cosh 3kh} \sin(3kx - \omega t + \varepsilon_0) \right. \\
& \left. + e^{-k(h+z)} \sin(kx + \omega t - \varepsilon_0) - \frac{1}{2} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh \sinh kh} \omega t \sin(kx + \omega t - \varepsilon_0) \right\} \quad (2-41)
\end{aligned}$$

Davies 等人 (1989) 及 O'Hare 和 Davies (1993) 研究發現：當波浪通過一正弦沙漣底床，不僅在  $2k/K=1$  時發生主頻共振，且在  $2k/K=2$  也會發生次諧波共振。波浪通過複合沙漣底床的研究方面，當底床由兩個週波數正弦沙漣 ( $K_1, K_2; K_2 > K_1$ ) 疊加組成時，Belzons 等人 (1991) 及 Guazzelli 等人 (1992) 研究結果指出在低頻處的  $k=(K_2-K_1)/2$  會發生分諧波共振，在  $k=K_1$ 、 $k=K_2$  及  $k=(K_2+K_1)/2$  會發生高諧波共振。為瞭解波浪通過複合式系列潛堤發生共振的機制，本文利用上述學者對不同共振特性的定義，延伸至本研究的複合式系列潛堤，並以 Miles (1981) 理論計算的結果，說明其互制的關係。

圖 2-5 為系列潛堤在不同配置條件下，波浪通過的反射率變化圖。圖中三條不同曲線分別代表三組不同的配置結果。第一組配置為等間距潛堤配置  $N=4$  及  $S=2.4$  公尺，其結果如虛線所示；第二組配置為等間距潛堤配置個數  $N=4$  及  $S=1.8$  公尺，其結果如點線所示；第三組配置為複合式系列潛堤個數  $N=8$ ，其配置間距各為前兩組  $N=4$ ， $S_1=2.4$  公尺與  $N=4$ ， $S_2=1.8$  公尺所組成，其結果如實線所示。其中相對堤距固定為  $B/S_1=0.25$ ，相對堤高固定為  $D/h=0.4$ ，橫作座標  $2S_1/L$  中  $S_1$  皆以 2.4 公尺作基準。反射率變化圖形顯示複合式系列潛堤反射率分佈，近似為兩組不同的等間距系列潛堤反射率組合而成，且複合式系列潛堤的每個反射率尖峰位置，為另兩組等間距系列潛堤之一的反射率尖峰。

利用 Davies (1989)、O'Hare 和 Davies (1993)、Belzons 等人 (1991) 及 Guazzelli 等人 (1992) 在正弦底床對各不同位置反射率共振的定義，本文令矩形系列潛堤的底床週波數為  $K = 2\pi/S$ ，其中  $S$  為潛堤間距，主頻共振發生條件為  $2k/K_1 = 1$  及  $2k/K_2 = 1$ ，亦即在  $L = 2S_1$  及  $L = 2S_2$ ；高諧波共振發生條件為  $2k/K_1 = 2$ 、 $2k/K_2 = 2$  及  $k = (K_1 + K_2)/2$ ，亦即在  $L = S_1$ 、 $L = S_2$  及  $L = 2S_1S_2/(S_1 + S_2)$  發生高諧波共振。分諧波共振發生條件為  $k = (K_1 - K_2)/2$ ，亦即當  $L = 2S_1S_2/(S_1 - S_2)$  發生分諧波共振。將圖 2-2 第三組配置條件代入以上定義，則複合式系列潛堤在  $2S_1/L = 1$  及  $2S_1/L = 1.33$ （即  $L = 2S_1$  及  $L = 2S_2$ ）條件下發生主頻共振；而在  $2S_1/L = 2$ 、 $2S_1/L = 2.67$  及  $2S_1/L = 2.33$ （即  $L = S_1$ 、 $L = S_2$  及  $L = 2S_1S_2/(S_1 + S_2)$ ）條件下發生高諧波共振；在  $2S_1/L = 0.33$ （即  $L = 2S_1S_2/(S_1 - S_2)$ ）條件下發生分諧波共振。圖 2-5 標示各型式共振發生反射率及分佈的情形。

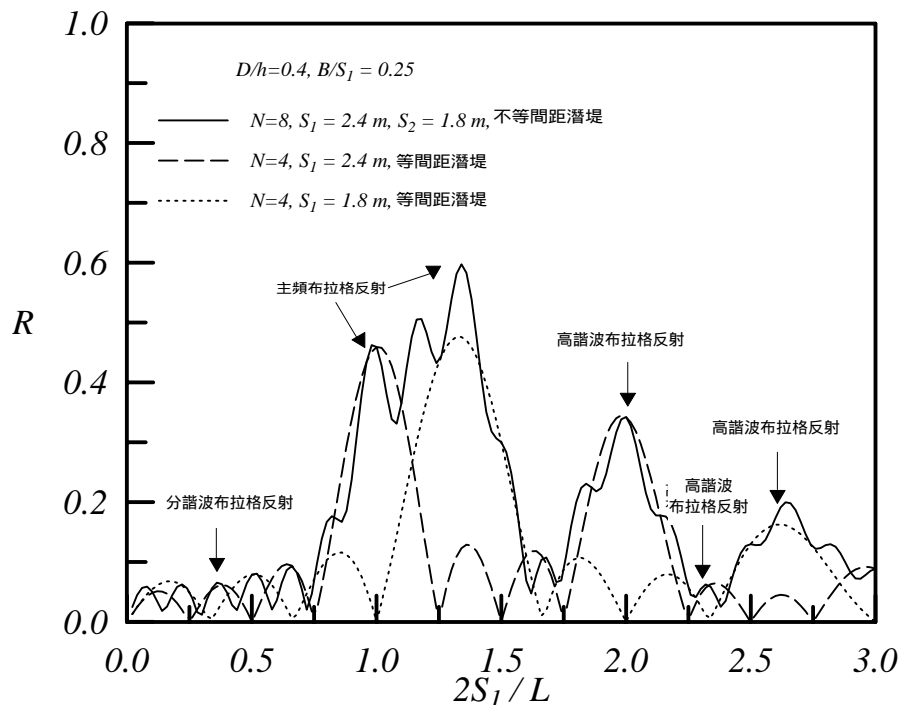


圖 2-5 複合式系列潛堤各共振反射示意圖

## 2.5 反射率計算

波浪由外海入射海岸時，受近岸的斜坡底床或結構物阻擋，而產生反射波，反射波浪與入射波浪重疊成合成波浪。同樣地，在試驗室及數值模式計算，入射波浪遇到所配置的斜坡底床及潛堤時，也產生合成波浪。在原型海岸工程、試驗室及數值計算，如何精確分離入射波及反射波，以獲得正確的反射率，是本研究重要的課題。有關反射率計算的研究，Healy (1953) 量測堤前波形包絡線的最大及最小振幅求取反射率，但量測上有其困難性。Goda 和 Suzuki (1976) 提出二點法，Mansard 和 Funke (1980) 提出最小二乘法，上述方法須測量每一點位置的振幅以及相位角。Isaacson (1991) 利用聯立方程提出不用計算相位角的三點法。張 (2000) 提出波浪垂直入射斜坡的三點反射率計算法，在計算上無須事先分離出入射波與反射波。

反射率計算方法，皆有其限制的條件，為考量本研究在試驗以及數值模擬反射率計算的便利性，以張 (2000) 所提出斜坡上反射率的計算公式為基礎，進而推導至波浪斜向入射下，不等間距的波高計配置的反反射率公式。採用不等間距主要目的係為避免試驗與數值計算時，受反射率公式限制，而必須更換波高計位置。本研究試驗時波高計均設置三支以上，可得多組反射率運算的組合，確保資料的可靠度。反射率公式推導過程詳如附錄 B。反射公式表示如下：

$$R = \frac{\hat{F}^2 \cos \theta_m - \cos(\theta_m + \theta_f) \pm \sqrt{[\hat{F}^2 \cos \theta_m - \cos(\theta_m + \theta_f)]^2 - (1 - \hat{F}^2)^2}}{1 - \hat{F}^2} \quad (2-42)$$

$$R = \frac{\hat{B}^2 \cos \theta_m - \cos(\theta_m - \theta_b) \pm \sqrt{[\hat{B}^2 \cos \theta_m - \cos(\theta_m - \theta_b)]^2 - (1 - \hat{B}^2)^2}}{1 - \hat{B}^2} \quad (2-43)$$

式中  $\hat{F}$ 、 $\hat{B}$ 、 $\theta_m$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_f$  可由式(B-11)、式(B-12)、式(B-15)、式(B-9) 及式(B-10)求得。對於式(2-42) 及式(2-43) 計算式中的正負號選擇，在於反射率介於  $0 \leq R \leq 1$  的限制。

由式(2-42) 及式(2-43) 得知若  $\hat{B} = \hat{F} = 1$  時，則反射率無法求出，由式(B-11) 及式(B-12) 可得到以下關係式：

$$\cos(\theta_m + \theta_f) = \cos(\theta_m) = \cos(\theta_m - \theta_b) \quad (2-44)$$

以式 (2-44)代入式 (B-19) 及式 (B-10)則可得

$$\Delta x_b + \Delta x_f = \frac{n\pi}{k_m} = \frac{nL}{2}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (2-45)$$

此即表示第一支及第三支波高計的間距不能為半波長的整數倍。若三點間的距離為等間距，則限制條件為前後點分別與中間點的距離不能為  $1/4$  波長的整數倍 ( $\Delta x_b = \Delta x_f \neq n\pi/4$ )，本研究在反射率的計算，採用不等間距測點的三點法計算，為避免接近以上限制條件時，發散所造成誤差，波高擷取的位置，採用前後點間距皆限制在  $0.1 \sim 0.4$  倍的波浪波長。

圖 2-6 為利用式(B-2)所作一假想的波浪水位振幅  $|\eta|$  在不同  $x$  軸位置分佈圖，其條件為入射波長  $L = 1$  公尺，反射率  $R = 0.4$ ，圖形顯示水位振幅隨不同位置作規律震盪，震盪波長(0.5 公尺)為入射波長的一半，震盪幅度為 0.4 公分。以圖 2-6 的水位振幅作不同的三支波高計間距組合，計算結果如圖 2-7，圖形顯示波高計第一及第三點的距離 ( $\Delta x_b + \Delta x_f$ ) 若接近半波長的整數倍時，反射率會產生誤差。

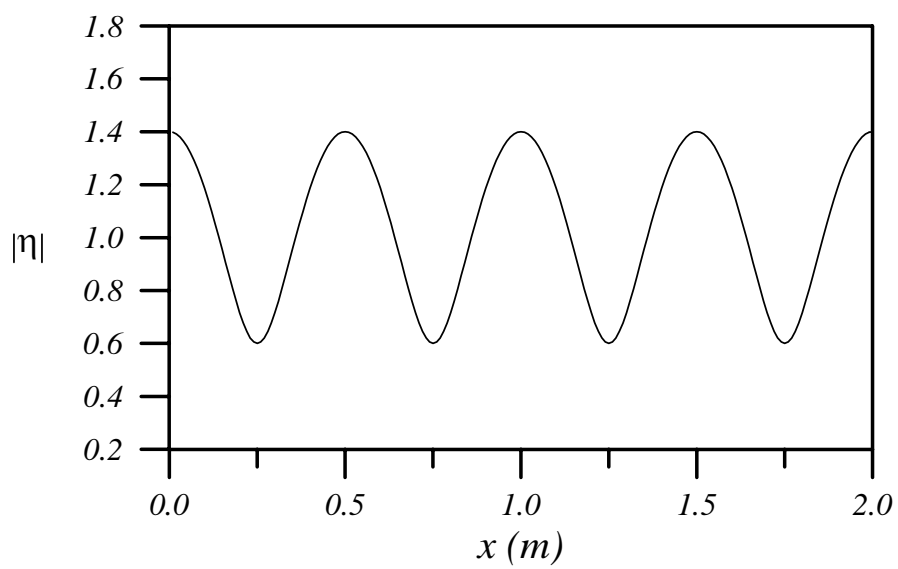


圖 2-6 反射率為 0.4 時的水位振幅分佈圖

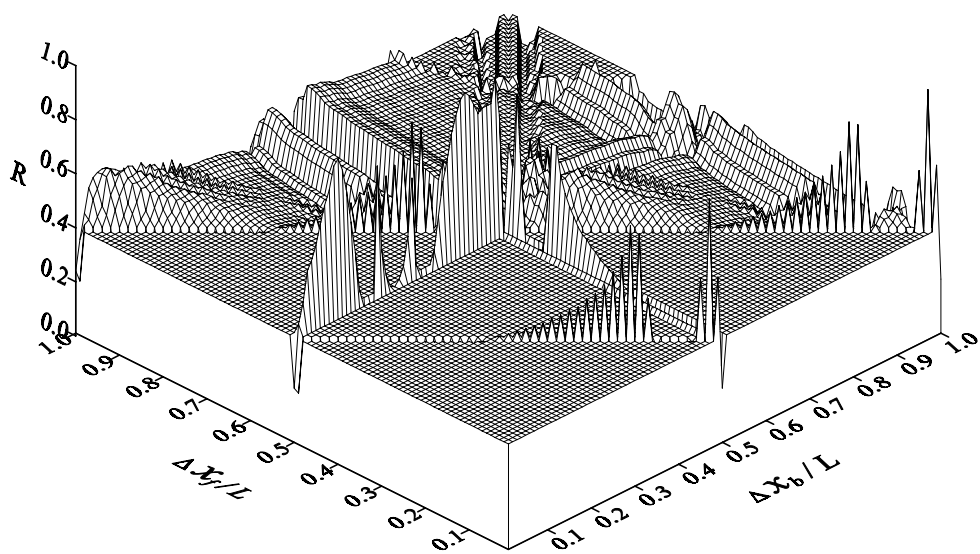


圖 2-7 不同波高計間距組合的反射率分佈圖



### 第三章 數值模式

波浪由深海向海岸傳遞時，受底床水深變化影響與結構物作用，導致波浪發生變形效應，主要包括波浪的淺化 (shoaling)、折射 (refraction)、繞射 (diffraction)、反射 (reflection)、碎波 (wave breaking) 及能量消散 (energy dissipation) 等物理現象。通常上述各種波浪的變形現象是共存的。描述近岸波浪變形之數值方法，其控制方程式分為四大類：(1) 拉普拉斯方程式 (Laplace Equation, LE); (2) 納維爾-斯托克斯方程式 (Navier-Stokes Equation, NSE); (3) 布斯尼斯方程式 (Boussinesq Equation, BE); (4) 緩坡方程式 (Mild-Slope Equation, MSE)。其中 Laplace Equation 求解三維勢能流之波浪變形，能詳細描述波浪局部性之變形；Navier-Stokes Equation 模式考慮流體黏滯性，解析真實流體之波動特性，能描述三維非線性波浪之變形；Boussinesq Equation 模式考慮勢能流與波浪非線性關係，能描述二維平面流場之變形。上述三種模式計算過程較為繁雜，計算機所需記憶容量龐大，且需較長計算時間，因此計算較大範圍海域之波浪變形除需大型計算機外，費時較多。Mild-Slope Equation 模式考慮勢能流與線性波，計算二維平面波場，與 NSE 和 BE 模式相較，計算容量與時間均較為經濟，適用於較大海域範圍計算方法。就工程實用性觀點而言，緩坡方程式建置的波浪數值模式，可以利用較小計算容量與較短的時間計算較大範圍，因此，頗受國內外從事研究及應用實務作為波場計算工具。

傳統的緩坡方程式在推導過程中，假設海床坡度為緩變，水深地形空間的變化梯度遠小於波形的變化梯度，忽略了擾變地形影響量，即  $|\nabla_h h| \ll |\nabla_h \eta|$ ，忽略的地形參數包括底床曲率項 ( $\nabla_h^2 h$ )、斜率平方項 ( $|\nabla_h h|^2$ ) 及底床地形擾變量 ( $\delta$ )。本文探討波浪通過系列潛堤所產生的布拉格反射，考量實際海域斜坡底床設置潛堤，造成底床陡變，上述三種擾變地形影響量均不可忽略。本研

究在控制方程式中均予以考慮，並且進一步加入波浪傳遞至近岸過程中，發生碎波能量消散所造成影響。基於上述考量，本研究以 Hsu 等人 (2002b) 所推導演進型式緩坡方程式 (Evolution Equation for Mild-Slope Equation, EEMSE) 為基礎，模擬波浪通過各種系列潛堤波場變化情形，並以潛堤前的波高分佈計算其反射率，探討系列潛堤佈置的布拉格共振效應，茲將本文採用的數值模式敘述如後。

### 3.1 控制方程式

緩坡方程式為 Berhoff (1972) 所提出，主要將 Laplace 方程式乘以滿足底部邊界條件的水深因子，再由底部至水面對水深積分，將三維問題簡化為二維，以計算整個海域之平面波場。

假設流體為非旋性且不可壓縮，故滿足 Laplace equation，可表示為

$$\nabla_h^2 \Phi + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0, \quad -h'(x, y) \leq z \leq \eta(x, y, t) \quad (3-1)$$

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； $h'(x, y)$  為含擾變地形水深變化函數； $\eta(x, y, t)$  為水位變化函數，底床地形及座標示意圖如圖 3-1 所示。

波浪自由表面滿足伯努力方程式 (Bernoulli equation)，此即自由表面動力邊界條件 (DFSBC)，可以下式表示

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + g\eta + \frac{p_\eta}{\rho} = C(t), \quad z = \eta(x, y, t) \quad (3-2)$$

式中  $u$ 、 $v$  及  $w$  各為波浪在  $x$ 、 $y$  及  $z$  方向上的速度， $\rho$  為流體密度， $p_\eta$  為自由表面壓力， $C(t)$  為 Bernoulli equation 常數。

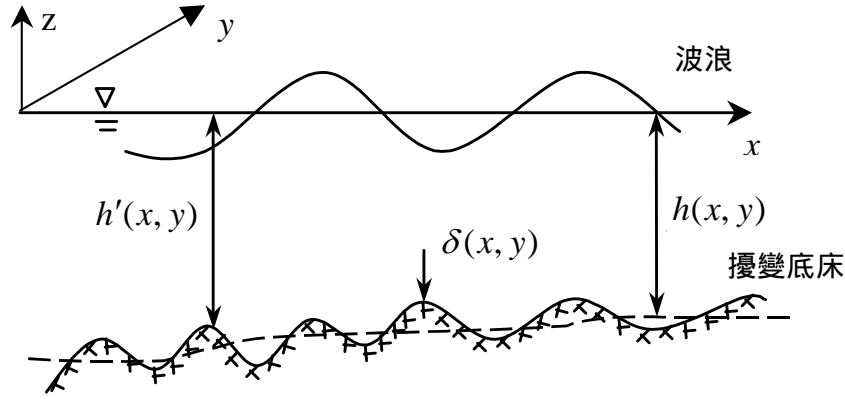


圖 3-1 底床上考慮擾變地形參數示意圖

波浪自由表面運動邊界條件（KFSBC），可表示為

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad z = \eta(x, y, t) \quad (3-3)$$

Dean 和 Dalrymple (1984) 由式(3-2) 及式(3-3) 推導為自由表面邊界條件為

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = 0 \quad (3-4)$$

將包含擾變地形水深函數  $h'(x, y)$  視為平均水深函數  $h(x, y)$  及擾變地形函數  $\delta(x, y)$  的組合，即  $h'(x, y) = h(x, y) - \delta(x, y)$ ，則底床地形邊界條件可以式(3-5)表示

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \nabla_h h' \cdot \nabla_h \Phi = 0, \quad z = -h'(x, y) \quad (3-5)$$

傳統緩坡方程式在描述波浪通過擾變地形時，並無法將底床的擾變特性考慮於方程式中，致使方程式在描述底床變化對自由表面波浪的影響受到限制。本研究所描述的底床為一擾變的底床地形，對於描述擾變地形所需邊界條件，利用 Kirby (1986)的概念，以平均水深地形  $h(x, y)$  為中心，對擾變地形進行泰勒展開

(Taylor expansion) , 取其階數至  $O(\delta)$  , 展開後方程式可寫成式 (3-6)。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \nabla_h h' \cdot \nabla_h \Phi + \delta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0, \quad z = -h(x, y) \quad (3-6)$$

利用水深積分方式對三維問題進行簡化為平面二維的型式 , 波浪通過擾變底床地形之波浪勢能函數 , 以下式進行假設

$$\Phi(x, y, z, t) = f(z, h)\phi(x, y, t) + \text{非前進波浪傳遞量} \quad (3-7)$$

式中  $f$  為滿足 BBC 之水深方向垂直分布函數 , 表示如下 :

$$f = \frac{\cosh(h+z)}{\cosh kh} \quad (3-8)$$

以式 (3-1) 乘以水深方向垂直分布函數 , 從底部積分至水面 , 可得

$$\int_{-h}^0 f(\nabla_h^2 \Phi + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}) dz = 0 \quad (3-9)$$

利用格林第一定律(Green first identity) , 將上式轉換為

$$\int_{-h}^0 (f \nabla_h^2 \Phi + \Phi \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}) dz = -[f \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \Phi \frac{\partial f}{\partial z}]_{z=-h}^{z=0} \quad (3-10)$$

以式(3-7) 代入式(3-10) 中 , 則

$$\begin{aligned} & \int_{-h}^0 [f(f \nabla_h^2 \phi + 2 \nabla_h \phi \cdot \nabla_h f) + \phi f \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}] dz \\ &= -[f \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \Phi \frac{\partial f}{\partial z}]_{z=-h}^{z=0} - \int_{-h}^0 \phi f \nabla_h^2 f dz \end{aligned} \quad (3-11)$$

再將邊界條件式(3-4)及式(3-6)代入式(3-11) , 則方程式可表示為

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \phi) - (\omega^2 - k^2 CC_g) \phi - g(1 - \lambda^2) \nabla_h \cdot (\delta \nabla_h \phi) \\ &= -g(2 \vec{F}_1 \cdot \delta \nabla_h \phi + \vec{F}_1 \cdot \nabla_h \delta \phi + F_2 \phi) \end{aligned} \quad (3-12)$$

式(3-12)中

$$\bar{F}_1 = \lambda(1 - \lambda^2)(k\nabla_h h + h\nabla_h k) = F_{11}\nabla_h h \quad (3-13)$$

$$F_2 = \alpha_1(\nabla_h h)^2 k + \alpha_2\nabla_h^2 h + \alpha_3\nabla_h k \cdot \nabla_h h / k + \alpha_4\nabla_h^2 k / k^2 + \alpha_5(\nabla_h k)^2 / k^3 \quad (3-14)$$

其中  $\omega = gk \tanh kh$  為角頻率，參數  $\alpha_i (i = 1, \dots, 5)$  為

$$\alpha_1 = -\lambda(1 - \lambda^2)(1 - \lambda q) - 2(1 - \lambda^2)\lambda^2 k \delta \quad (3-15)$$

$$\alpha_2 = -\sigma q(1 - \lambda^2) / 2 + (1 - \lambda^2)\lambda k \delta \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned} \alpha_3 = & q(1 - \lambda^2)(2q\lambda^2 - 5\lambda / 2 - q / 2) \\ & - 2(1 - \lambda^2)(2\lambda^2 q - \lambda - q)k \delta \end{aligned} \quad (3-17)$$

$$\alpha_4 = q(1 - \lambda^2)(1 - 2\lambda q) / 4 - \lambda / 4 + (1 - \lambda^2)\lambda q k \delta \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} \alpha_5 = & q(1 - \lambda^2)(4\lambda^2 q^2 - 4q^2 / 3 - 2\lambda q - 1) / 4 + \lambda / 4 \\ & + (1 - \lambda^2)q^2(1 - 2\lambda^2)k \delta \end{aligned} \quad (3-19)$$

式(3-12) 所得結果與 Zhang 等人 (1999) 所推導的混合模式 (hybrid model, HM) 結果相同。由於雙曲線型緩坡方程式為含有二階時間微分量之偏微分方程，在求解過程中不易直接加以處理。Li (1994) 假設波浪變形隨一微小時間變量  $\bar{t} = \varepsilon t$  緩慢變化， $\bar{t}$  = 緩慢時間變量， $\varepsilon$  = 攝動參數 (perturbation coefficient)  $O(\nabla h / kh)$ ， $\varepsilon \ll 1$ 。根據上述對時間變量的假設，波浪速度勢能函數可進一步表示為

$$\phi(x, y, t, \bar{t}) = \psi(x, y, \bar{t}) e^{-i\omega t} / \sqrt{[CC_g - g(1 - \lambda^2)\delta]} \quad (3-20)$$

其中  $\psi$  為含有緩慢時間變量勢能函數。將式(3-20)代入式(3-12)演進型式緩坡方程式中，如式(3-21)所示：

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{t}^2} \varepsilon^2 e^{-i\omega t} - 2 \frac{\partial \psi}{\partial \bar{t}} \varepsilon(i\omega) e^{-i\omega t} - \psi \omega^2 e^{-i\omega t} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \psi e^{-i\omega t}) \\
& + (\omega^2 - k^2 CC_g) \psi e^{-i\omega t} + g(1 - \lambda^2) (\nabla \delta \cdot \nabla \psi e^{-i\omega t} + \delta \nabla^2 \psi e^{-i\omega t}) \\
& - g(2\bar{F}_1 \cdot \delta \nabla \psi e^{-i\omega t} + \bar{F}_1 \cdot \nabla \delta \psi e^{-i\omega t} + F_2 \psi e^{-i\omega t}) = 0
\end{aligned} \tag{3-21}$$

式中  $\partial / \partial t = \varepsilon \partial / \partial \bar{t}$  及  $\partial^2 / \partial t^2 = \varepsilon^2 \partial^2 / \partial \bar{t}^2$ 。若將式中的二階微小量  $\varepsilon^2$  省略，只保留一階項  $O(\varepsilon)$ ，則可得演進型式緩坡方程式，如式 (3-22) 所示：

$$\begin{aligned}
& \left[ \frac{-2\omega i}{CC_g - g(1 - \lambda^2)\delta} \right] \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) \\
& = \nabla_h^2 \psi + k_c^2 \psi + \frac{g}{\sqrt{CC_g - g(1 - \lambda^2)\delta}} \left[ 2\bar{F}_1 \cdot \delta \nabla_h \frac{\psi}{\sqrt{CC_g - g(1 - \lambda^2)\delta}} \right] \\
& + \frac{\delta}{\sqrt{CC_g - g(1 - \lambda^2)\delta}} \nabla_h [g(1 - \lambda^2)] \cdot \nabla_h \left[ \frac{\psi}{\sqrt{CC_g - g(1 - \lambda^2)\delta}} \right]
\end{aligned} \tag{3-22}$$

其中

$$k_c^2 = \left[ \frac{g\bar{F}_1 \cdot \nabla_h \delta + gF_2 + k^2 CC_g}{CC_g - g(1 - \lambda^2)\delta} \right] - \frac{\nabla_h^2 \sqrt{CC_g - g(1 - \lambda^2)\delta}}{\sqrt{CC_g - g(1 - \lambda^2)\delta}} \tag{3-23}$$

式中  $k_c$  為一虛擬週波數。本文在數值模式計算上，採用交替方向隱式法 (Alternating Direction Implicit, ADI) 來求解演進型式緩坡方程式，並以此模式計算波浪通過系列潛堤的布拉格反射效應。

### 3.2 邊界條件

輻射邊界條件為 Sommerfeld (1964) 所提出，其目的為確保漸減振幅的波浪徹底離開計算領域，並減少反射波能量進入計算領域。輻射邊界條件通常包含兩種 (1) 全反射或部分反射邊界條件 (2) 給定邊界條件。此兩種邊界條件的通式如下：

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \pm(-1)^m i \alpha k_x \phi + 2ik_x \phi_i, \quad \text{在 } \pm x \text{ 方向} \quad (3-24)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \pm(-1)^m i \alpha k_y \phi + 2ik_y \phi_i, \quad \text{在 } \pm y \text{ 方向} \quad (3-25)$$

式中  $\alpha = (1 - R)/(1 + R)$ ，為吸收係數； $R$  為反射率； $k_x = k \cos \theta$ ， $k_y = k \sin \theta$ ，分別為週波數在  $x$  與  $y$  方向的分量； $\theta$  為波浪在邊界上的角度；下標“ $i$ ”表示入射波的量。對於 (1) 波浪通過邊界時產生全反射的邊界條件， $\phi_i = 0$ ， $m = 0$  及  $\alpha = 0$ ；(2) 波浪通過邊界時的部份反射或完全通過邊界條件， $\phi_i = 0$ ， $m = 0$  及  $0 < \alpha \leq 1$ ；(3) 散射波通過邊界時，沿邊界的給定邊界條件， $\phi_i = (Ag/\omega)e^{iS_0}$ ， $m = 1$  和  $\alpha = 1$ ， $S_0 = x_0 k \cos \theta_0 + y_0 k \sin \theta_0 - \omega t$  為波浪的二位相函數。 $i = \sqrt{-1}$ ； $g$  為重力加速度； $A$  為波浪振幅； $\omega$  為角頻率。波浪正向入射時， $\theta_0 = 0^\circ$ 。

### 3.3 數值方法

本文演進型態緩坡方程式的數值解係以 ADI 法進行數值解析，其方法為將  $x$  與  $y$  方向的流速勢以有限差分法展開形成帶狀矩陣，接著以高斯消去法 (Gauss elimination) 解其形成的帶狀矩陣，其離散方程式如下：

$$\begin{aligned} & (f_1)_{p,q} \frac{\phi_{p,q}^{n+1/2} - \phi_{p,q}^n}{\Delta t/2} i \\ &= \delta_x^2 \phi_{p,q}^{n+1/2} + \frac{1}{2} (k_c^2)_{p,q} \phi_{p,q}^{n+1/2} + \delta_y^2 \phi_{p,q}^n + \frac{1}{2} (k_c^2)_{p,q} \phi_{p,q}^n \\ &+ (f_2)_{p,q} [(\delta_x h)(\delta_x \phi_{p,q}^{n+1/2}) + (\delta_y h)(\delta_y \phi_{p,q}^n)] \\ &+ (f_3)_{p,q} \{[\delta_x g(1 - \lambda^2)](\delta_x \phi_{p,q}^{n+1/2}) + [\delta_y g(1 - \lambda^2)](\delta_y \phi_{p,q}^n)\} \end{aligned} \quad (3-26)$$

$$\begin{aligned}
& (f_1)_{p,q} \frac{\phi_{p,q}^{n+1} - \phi_{p,q}^{n+1/2}}{\Delta t/2} i \\
&= \delta_x^2 \phi_{p,q}^{n+1/2} + \frac{1}{2} (k_c^2)_{p,q} \phi_{p,q}^{n+1/2} + \delta_y^2 \phi_{p,q}^{n+1} + \frac{1}{2} (k_c^2)_{p,q} \phi_{p,q}^{n+1} \\
&\quad + (f_2)_{p,q} [(\delta_x h)(\delta_x \phi_{p,q}^{n+1/2}) + (\delta_y h)(\delta_y \phi_{p,q}^{n+1})] \\
&\quad + (f_3)_{p,q} \{ [\delta_x g(1-\lambda^2)](\delta_x \phi_{p,q}^{n+1/2}) + [\delta_y g(1-\lambda^2)](\delta_y \phi_{p,q}^{n+1}) \}
\end{aligned} \tag{3-27}$$

式中

$$(f_1)_{p,q} = -\frac{2\omega}{[CC_g - g(1-\lambda^2)\delta]_{p,q}} \tag{3-28}$$

$$(f_2)_{p,q} = \frac{2g\delta F_{11}}{[\sqrt{CC_g - g(1-\lambda^2)\delta}]_{p,q}} \tag{3-29}$$

$$(f_3)_{p,q} = \frac{\delta}{[\sqrt{CC_g - g(1-\lambda^2)\delta}]_{p,q}} \tag{3-30}$$

$$\delta_x^2 \phi_{p,q}^n = \frac{\phi_{p-1,q}^n - 2\phi_{p,q}^n + \phi_{p+1,q}^n}{\Delta x^2} \tag{3-31}$$

$$\delta_y^2 \phi_{p,q}^n = \frac{\phi_{p,q-1}^n - 2\phi_{p,q}^n + \phi_{p,q+1}^n}{\Delta y^2} \tag{3-32}$$

$$\delta_x \phi_{p,q}^n = \frac{\phi_{p+1,q}^n - \phi_{p,q}^n}{\Delta x} \tag{3-33}$$

$$\delta_y \phi_{p,q}^n = \frac{\phi_{p,q+1}^n - \phi_{p,q}^n}{\Delta y} \tag{3-34}$$

式中上標" $n$ "為時間因子，下標" $p$ "和" $q$ "分別為 $x$ 和 $y$ 方向的網格點，" $\delta$ "為微分運算值。部分反射邊界條件和給定邊界條件的差分式可分別表示為

$$\phi_{p+1,q}^{n+1} - \phi_{p,q}^{n+1} = \frac{i\Delta x(k_x)_{p,q}}{2} [\phi_{p+1,q}^{n+1} + \phi_{p,q}^{n+1}] \tag{3-35}$$



$$\phi_{p+1,q}^{n+1} - \phi_{p,q}^{n+1} = \frac{-i\Delta x(k_x)_{p,q}}{2} [\phi_{p+1,q}^{n+1} + \phi_{p,q}^{n+1}] + 2i(k_{xi})_{p,q}(\phi_i^n)_{p,q} \Delta x \quad (3-36)$$

將勢能函數  $\phi_{p,q}$  代入每一個疊代時間，可得到每一個疊代過程中的波浪邊界近似角度  $\theta_{p,q}$ ，其值為

$$\theta_{p,q} = \tan^{-1} \left[ \left( \frac{S_{p+1,q} - S_{p-1,q}}{S_{p,q+1} - S_{p,q-1}} \right) \frac{\Delta y}{\Delta x} \right] \quad (3-37)$$

式中

$$S_{p,q} = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}(\phi_{p,q})}{R_e(\phi_{p,q})} \right] \quad (3-38)$$

在疊代過程中，週波數的起始值是由消散方程式所求得，每個網格點上的波向角是由 Snell's law 計算求得，波高則是由淺化係數  $k_s$  和折射係數  $k_r$  計算而來，其表示式為

$$H = H_0 k_s k_r \quad (3-39)$$

$$k_s = \left( \frac{1}{(1 + 2kh / \sinh 2kh) \tanh kh} \right)^{1/2} \quad (3-40)$$

$$k_r = (\cos \theta_0 / \cos \theta_s)^{1/2} \quad (3-41)$$

利用這些變數可以計算速度勢  $\phi$ ，並透過網格系統得到一個猜測起始值，然後利用 ADI 法求解式(3-26) 和式(3-27) 得到新的速度勢，接著利用新的速度勢  $\phi_{p,q}$  求解式(3-37)的波向角  $\theta_{p,q}$  及式(3-35)和式(3-36) 的週波數  $k_x$  和  $k_y$ ，疊代過程疊代至前後速度勢的相對差值小於某一微小值始停止，此微小值即為本模式的收斂條件。本文採用的收斂條件為 Li (1994) 所提，其定義模式計算殘差  $E$  小於給定的計算誤差時為其收斂條件，其值為

$$E = \frac{\sqrt{\sum_p \sum_q (\phi_{p,q}^n - \phi_{p,q}^{n-1})^2}}{\sum_p \sum_q |\phi_{p,q}^n|} \quad (3-42)$$

本模式取  $E < 10^{-4}$  為其計算的收斂條件。在模式計算時，時間變化量  $\Delta t$  會影響收斂的速度，其值受 Courant number  $C_r = \sqrt{gh} / (\Delta x / \Delta t)$  及 Diffusion number  $D_f = (CC_g) / (2\omega \Delta x^2 / \Delta t)$  影響，藉由上述兩個參數亦可控制本文模式及邊界條件的穩定性，根據 Von Neumann 的穩定分析，數值計算的穩定條件需滿足

$$\text{Max} \{C_r, D_f\} \leq 1 \quad (3-43)$$

## 第四章 模式驗證

以往文獻報告並無波浪通過矩形系列潛堤的相關試驗，可供本研究模式進行模式驗證，為驗證本研究模式能有效預測波浪通過系列潛堤所產生的布拉格反射，除應用本模式與其他文獻報告在複合式正弦形底床所進行試驗及模式計算的結果，進行比較驗證。另外進行適合本研究主題的水工試驗，包括斷面水工試驗以及平面水工試驗，以驗證本研究的數值模式正確性。茲將驗證過程描述如後：

### 4.1 複合式正弦沙漣布拉格反射

為驗證本研究模式能有效預測波浪通過複合式系列潛堤所產生的布拉格反射，將本研究模式在波浪通過複合式正弦沙漣的計算結果與 Guazzelli 等人 (1992) 的實驗值、Kirby (1986)、Zhang 等人 (1999)、Cho 和 Lee (2000) 和 Hsu 和 Wen (2001) 的數值解做比較。Guazzelli 等人 (1992) 的試驗佈置條件如表 4-1 所示：

表 4-1 波浪通過複合式沙漣底床試驗條件

試驗	$\hat{A}$	$\bar{\lambda}$ (K)	$m$	$\hat{l}$	$h_0$
G1	1.0 cm	12 cm ( $0.52\text{cm}^{-1}$ )	2	48 cm	2.5 cm, 4cm
G2	0.5	6 (1.05)	1.5	48	2.5, 4
G3	1.0	6 (1.05)	1.5	48	2.5, 4

上表中  $\hat{A}$  為沙漣底床振幅， $\bar{\lambda}$  為沙漣底床之波長， $m$  為沙漣底床之係數， $\hat{l}$  為沙漣長度， $h_0$  為水平底床之水深。對於計算波浪通過複合式沙漣底床的反射率，本研究選定數值計算的格網間距為  $\Delta x = 0.01m$ ，於試驗佈置下，若  $h_0 = 4\text{cm}$  則  $\Delta t = 0.01\text{sec}$ ，所對應的 Diffusion numbers 及 Courant numbers 分別為  $D_f = 0.22$ ， $C_f = 0.9$ 。若  $h_0 = 2.5\text{cm}$  則  $\Delta t = 0.008\text{sec}$ ，所對應的 Diffusion numbers 及 Courant

numbers 分別為  $D_f = 0.25$  ,  $C_f = 0.9$ 。計算時將波浪特性與底床地形特性相結合，以波浪波長與沙漣底床波長之比值為探討的參數，進行反射率計算。計算過程中本研究修正型式以  $\delta(x, y) = \hat{A} \sin(mKx)$  進行計算，其水深佈置關係式如下式所示：

$$h'(x) = \begin{cases} h_0 & , \quad x \leq 0 \\ [h_0 - \hat{A} \sin(Kx)] - \delta & , \quad 0 < x < n\bar{\lambda} \\ h_0 & , \quad x \geq n\bar{\lambda} \end{cases} \quad (4-1)$$

圖 4-1 為複合式沙漣底床水深  $h_0 = 2.5\text{cm}$ ，配置 G1、G2 及 G3 的水深地形分佈圖。

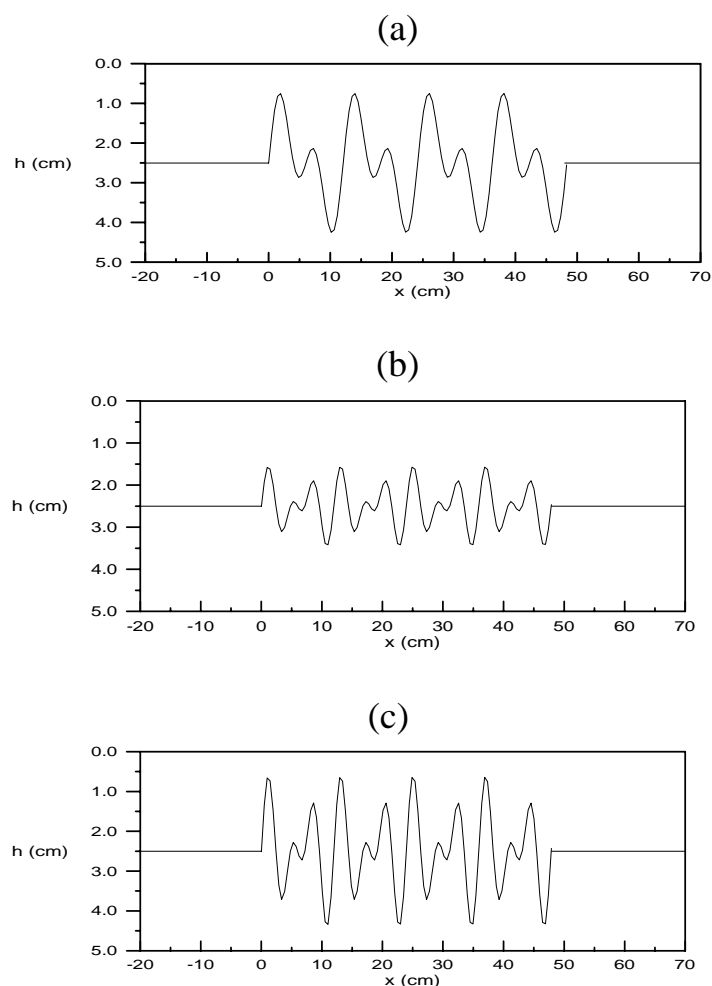


圖 4-1 配置 G1、G2 及 G3 複合式沙漣水深地形分佈圖 ( $h_0 = 2.5\text{cm}$ )

本研究計算水平底床擾變地形時，以同時含有底床曲率項  $\nabla_h^2 h$ 、底床斜率平方項  $|\nabla_h h|^2$  及擾變地形影響量  $\delta$  的演變型緩坡方程式(EEMSE) 不含有底床曲率項  $\nabla_h^2 h$  及底床斜率平方項  $|\nabla_h h|^2$  的延伸型態方程式(Kirby, 1986) 只含有底床曲率項  $\nabla_h^2 h$  及底床斜率平方項  $|\nabla_h h|^2$  的延伸型態方程式(Suh 等人, 1997、Cho 和 Lee, 2000 以及 Hsu 和 Wen, 2001) 進行模式的計算與比較,其結果如圖 4-2 至圖 4-7 所示。

圖 4-2a 與圖 4-2b 為在配置 G1 水深為 4cm 的條件下，波浪通過複合式沙漣底床反射率變化圖。圖形顯示：本研究模式計算所得結果較 Guazzelli 等人 (1992)的試驗結果反射率變化趨勢、布拉格反射發生的位置以及大小，具高度的一致性。對於其他模式的計算結果，皆與本研究模式計算結果相近，尤其在較高頻的位置。而在主頻布拉格反射的反射率變化，本研究所應用的模式仍有較佳的預測值。

圖 4-3a 及圖 4-3b 為在配置 G1 水深為 2.5cm 條件下，波浪通過複合式沙漣底床地形反射率變化圖。圖形顯示：本研究模式與其他模式計算結果在反射率分佈趨勢、布拉格反射發生的位置，皆與 Guazzelli 等人 (1992)的試驗結果相近。值得注意的是：在主頻共振 ( $2k/K = 1$  附近) 及次頻共振 ( $2k/K = 2$  附近) 的反射率分布以及值的大小，以本研究的結果較接近 Guazzelli 等人 (1992)的試驗結果。由圖 4-2a 至圖 4-3b 結果顯示：本模式在水深較小的配置條件，更能表現與試驗值的一致性。

圖 4-4 為在配置 G2 且水深為 4cm 條件下，波浪通過複合式沙漣底床地形反射率變化圖，此配置的底床分布較配置 G1 擾動頻率增加。圖形顯示本研究模式和其他模式在主頻布拉格反射的反射率值以及發生位置皆與 Guazzelli 等人 (1992)的試驗結果相當接近。在分譜波反射的反射率值以及發生位置 ( $2k/K = 0.5$  附近) 則以本研究模式計算結果與 Guazzelli 等人 (1992)的試驗結果較為接近。

圖 4-5 為在配置 G2 且水深為  $2.5\text{cm}$  條件下，波浪通過複合式沙漣底床地形反射率分佈圖。圖形顯示在水深較小的條件下，各模式在布拉格共振發生的位置皆有很好的的一致性，但在主頻以及高諧波共振的尖峰值比 Guazzelli 等人 (1992) 的試驗結果為高。其原因為水深較淺相對反射率較大，底床的摩擦效應使試驗的反射率值偏低；另一原因模式計算的誤差所引起。雖然本配置條件的擾變地形振幅（擾變影響量）較配置 G1 小，在水深較深條件下(如圖 4-4)只在分諧波共振較明顯與試驗值吻合；但在較小水深條件下(如圖 4-5)，本研究模式與其他模式結果則有較明顯差異，以本研究模式與試驗值吻合度較高。

圖 4-6a 及圖 4-6b 為在配置 G3 且水深為  $4\text{cm}$  條件下，波浪通過複合式沙漣底床地形反射率分佈圖。在 G3 佈置條件下，地形擾動頻率較配置 G1 增加，地形擾動振幅較配置 G2 增加。圖形顯示本研究模式在各布拉格反射的值的與試驗值的吻合性，皆較其他模式的結果佳，尤其在高諧波共振（ $2k/K = 1.5$  附近）的表現尤其明顯。

圖 4-7a 及圖 4-7b 為在配置 G3 且水深為  $2.5\text{cm}$  條件下，波浪通過複合式沙漣底床地形反射率分佈圖。在 G3 佈置條件下，地形擾動頻率較配置 G1 增加，地形擾動振幅較配置 G2 增加。圖形顯示本研究模式在各布拉格反射值與試驗值的吻合性，明顯的較其他模式的結果好。

以上利用本文模式、其他模式與試驗值的比較結果得知：各模式在各種底床配置及水深條件下，計算結果與試驗值在反射率的分佈位置及反射尖峰值的表現，皆有很好的的一致性。但以本文模式的結果與試驗值的吻合度較高，尤其在較高的底床擾動頻率、較高的底床擾動振幅以及較小的水深條件下，本研究模式與其他模式的差異性更為明顯。

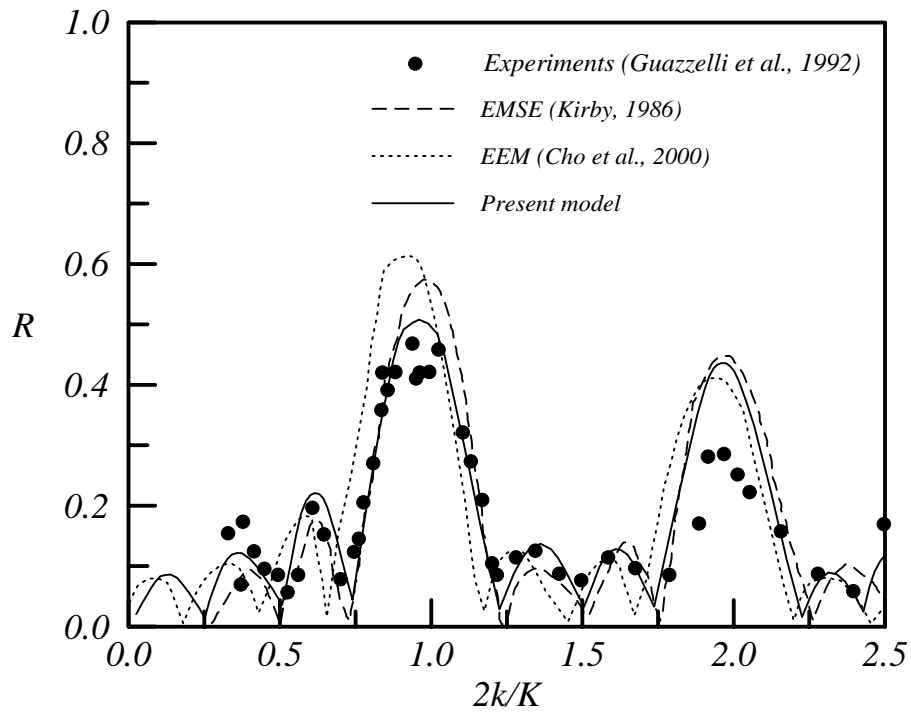


圖 4-2a 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖(配置 G1 ,  $h_0 = 4cm$  )

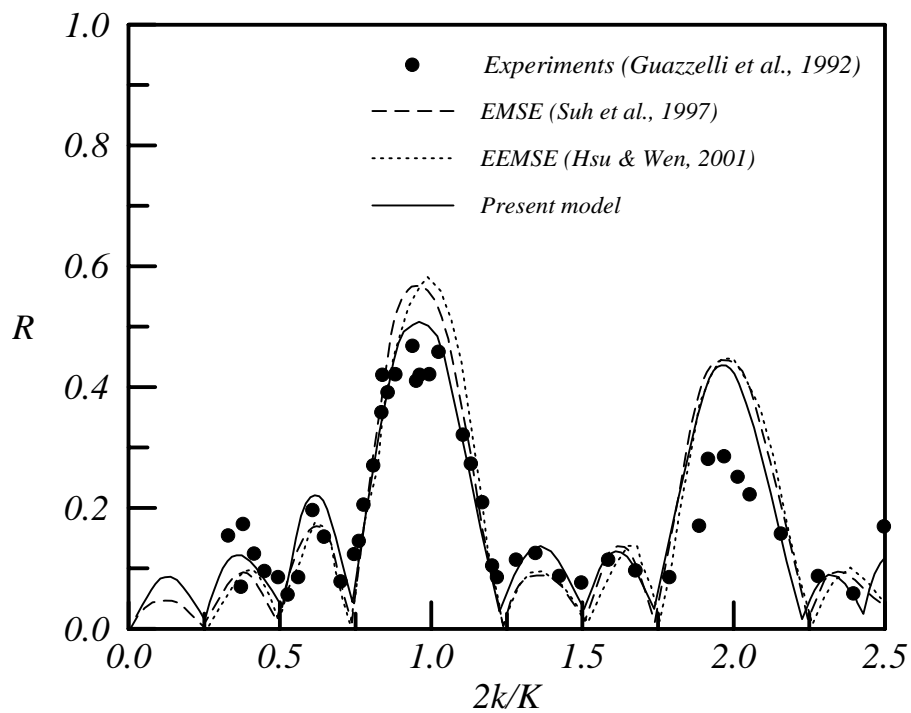


圖 4-2b 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖(配置 G1 ,  $h_0 = 4cm$  )

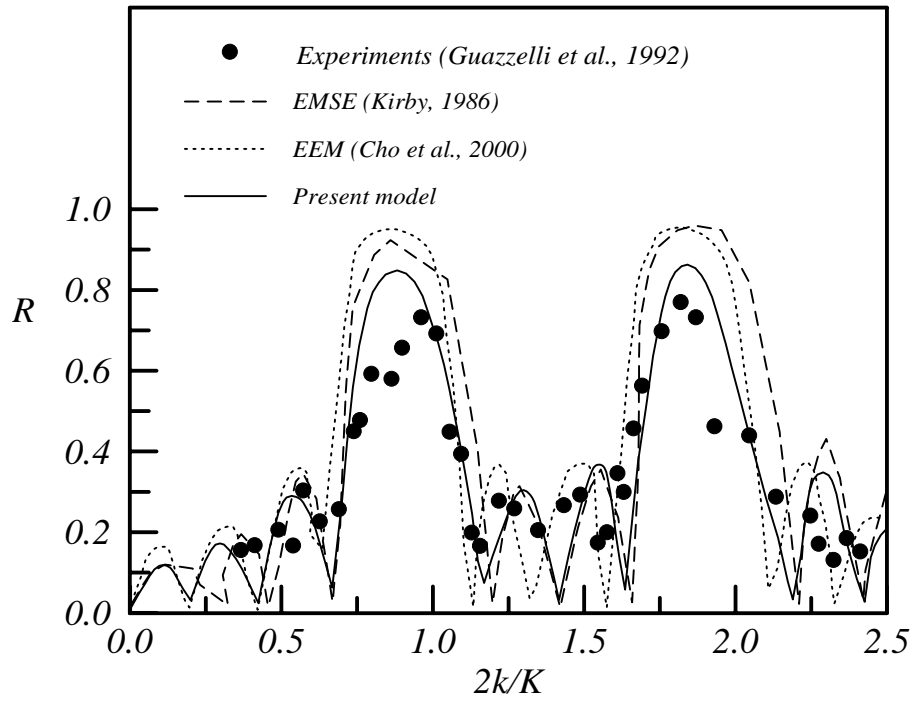


圖 4-3a 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖(配置 G1 ,  $h_0 = 2.5\text{cm}$  )

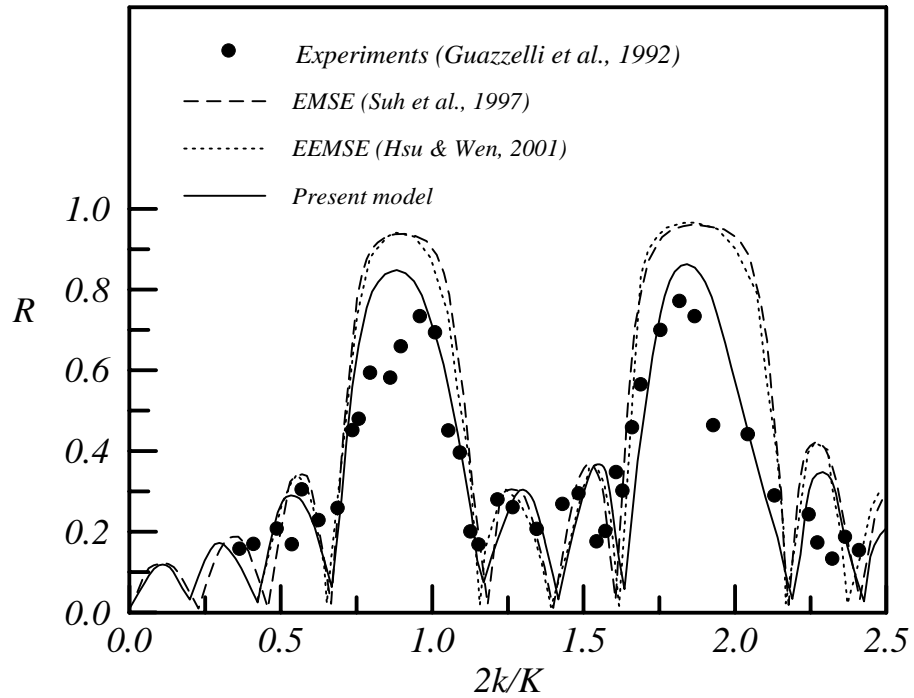


圖 4-3b 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖(配置 G1 ,  $h_0 = 2.5\text{cm}$  )



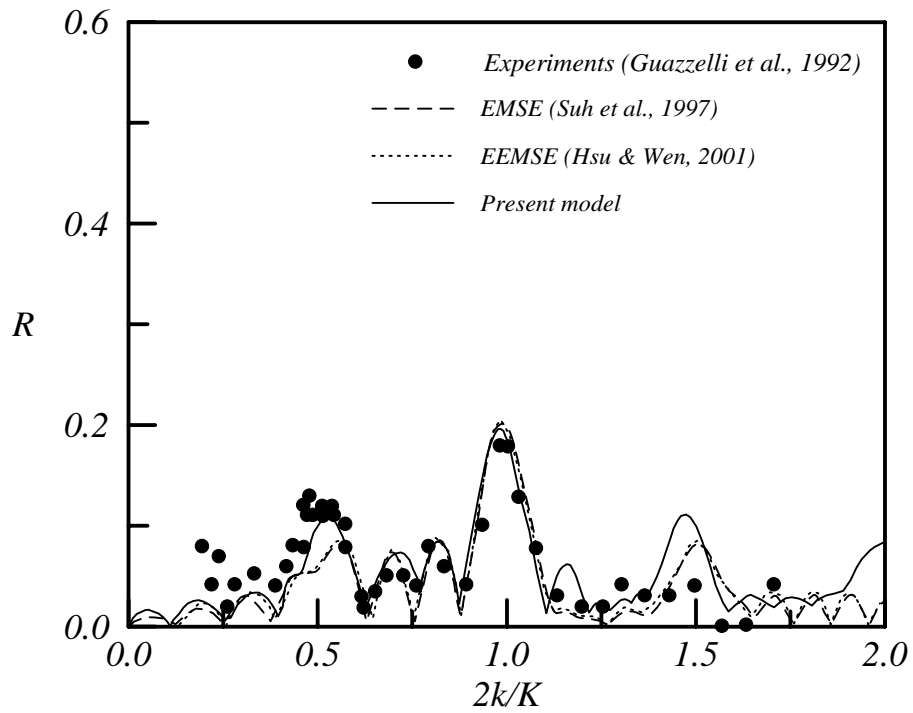


圖 4-4 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖(配置 G2 ,  $h_0 = 4cm$  )

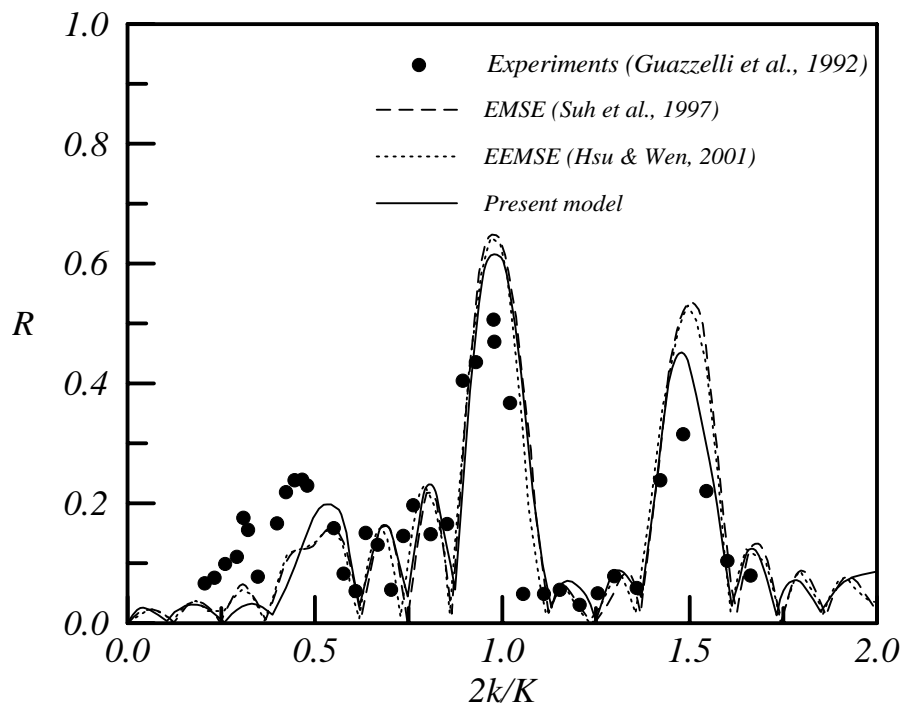


圖 4-5 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖(配置 G2 ,  $h_0 = 2.5cm$  )

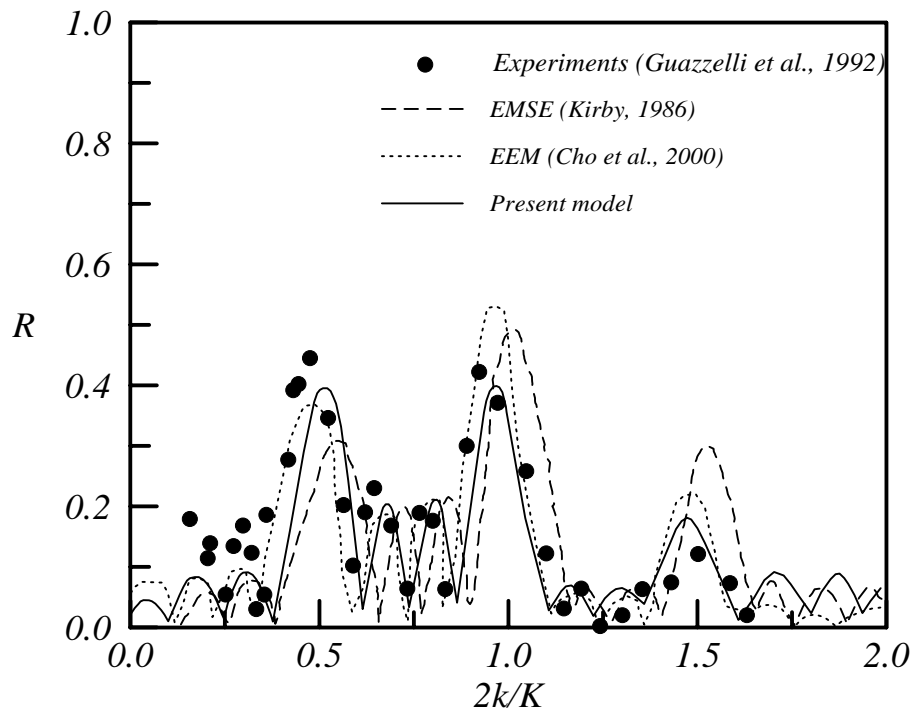


圖 4-6a 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖(配置 G3 ,  $h_0 = 4cm$  )

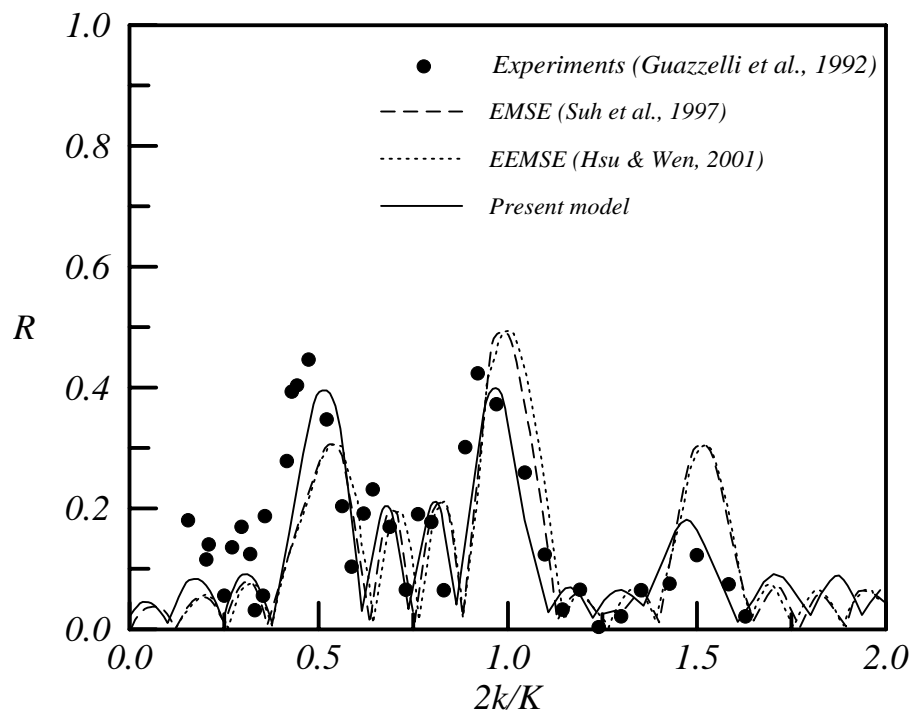


圖 4-6b 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖(配置 G3 ,  $h_0 = 4cm$  )

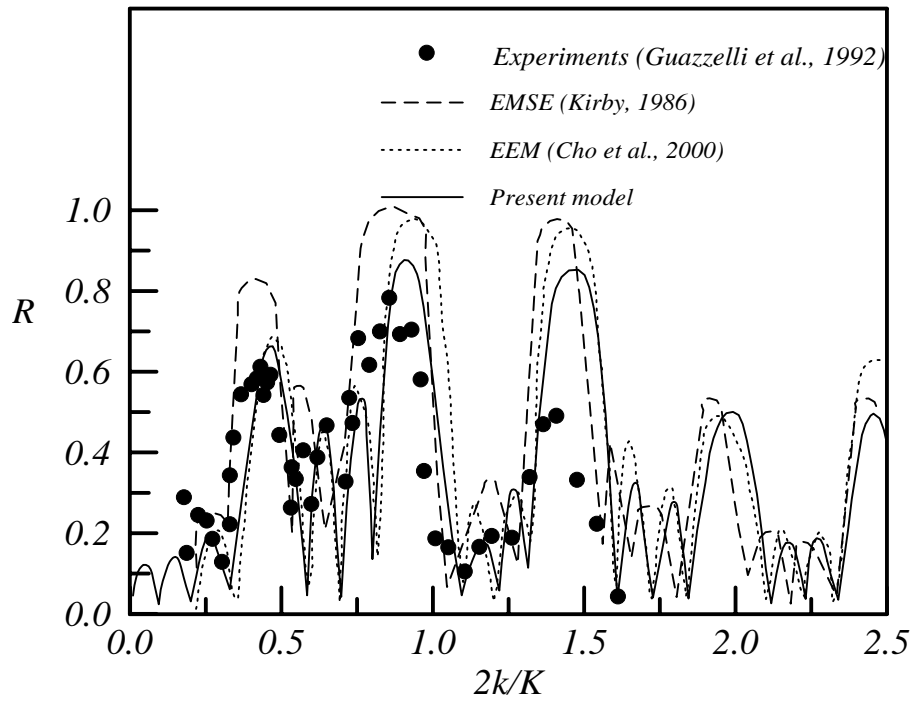


圖 4-7a 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖(配置 G3 ,  $h_0 = 2.5\text{cm}$  )

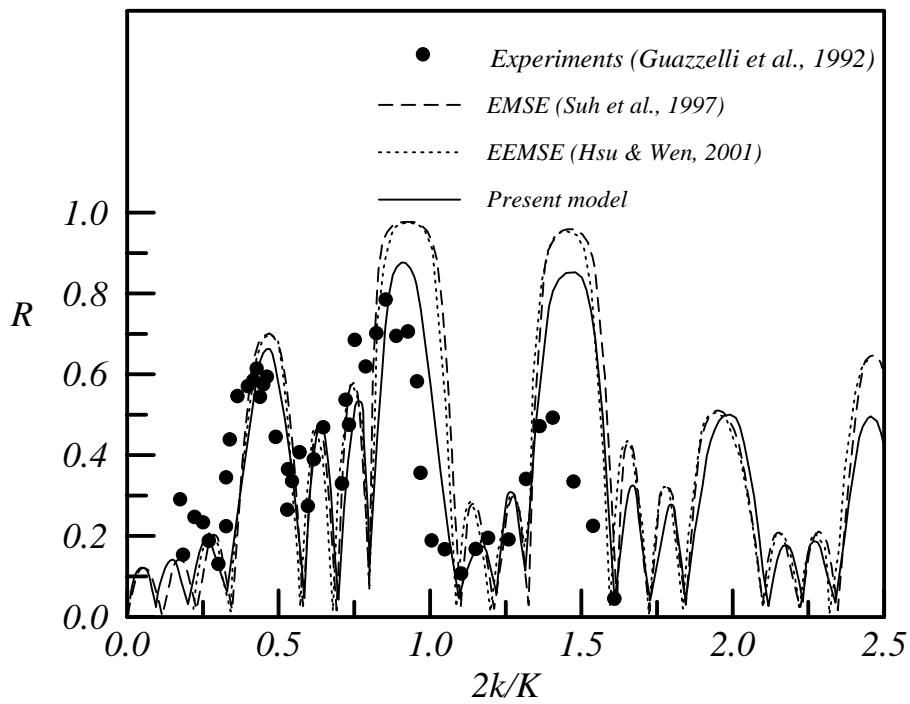


圖 4-7b 波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖(配置 G3 ,  $h_0 = 2.5\text{cm}$  )

## 4.2 斷面水工試驗

### 4.2.1 試驗儀器與佈置

本試驗於交通部運輸研究所港灣技術中心風洞實驗室進行，試驗水槽長 100 公尺×寬 1.5 公尺×高 2 公尺，如照片 4-1 所示。試驗水槽右端設置一造波機，左端有消波設施，造波板前約 35 公尺為透明水槽，以方便觀察波浪進行時的變化過程。造波機為丹麥 DHI 公司出品的直推式油壓式造波機，可由電腦控制，依試驗需求造出各種不同波浪條件的規則波與不規則波。

本試驗的水位訊號係為 35 公分的雙測線型電容式波高計所量得，共 11 支，置於試驗水槽中。試驗水槽可分為三部份，一為入射段，此段放置 1 支波高計於造波板前約 5 公尺處，以計算入射波。二為堤前段，此區域為系列潛堤的前方區域，在最接近造波板前方約 5 公尺 10 公尺處，放置 9 支波高計，以量測不同波浪條件堤前的水位變化，如照片 4-2 所示。三為堤後段，此為潛堤後方等水深的區域，此區放置 1 支波高計，以便觀測波浪的透射現象。在波高計擺置方面，由於擁有 9 支不同的間距波高計，故可量測不同波浪條件的反射率。

水槽中設置兩組潛堤，每組間距相等，分別為  $s_1=2.4$  公尺和  $s_2=1.8$  公尺，潛堤由木板釘製成，寬度皆為 0.6 公尺，兩組潛堤間的間距  $s$  設與第二組潛堤的間距相等( $s = s_2$ )，入射水深為 0.6 公尺，潛堤高度為 0.12 公尺和 0.24 公尺兩種。此佈置的主要目的為在相同的潛堤寬度及水深條件下，藉由改變潛堤間距和潛堤高度，比較不同波浪條件通過等間距和複合式系列潛堤的反射現象，試驗室儀器及潛堤佈置以及資料擷取系統如圖 4-8 所示，。



照片 4-1 試驗斷面水槽



照片 4-2 潛堤前方波高計佈置

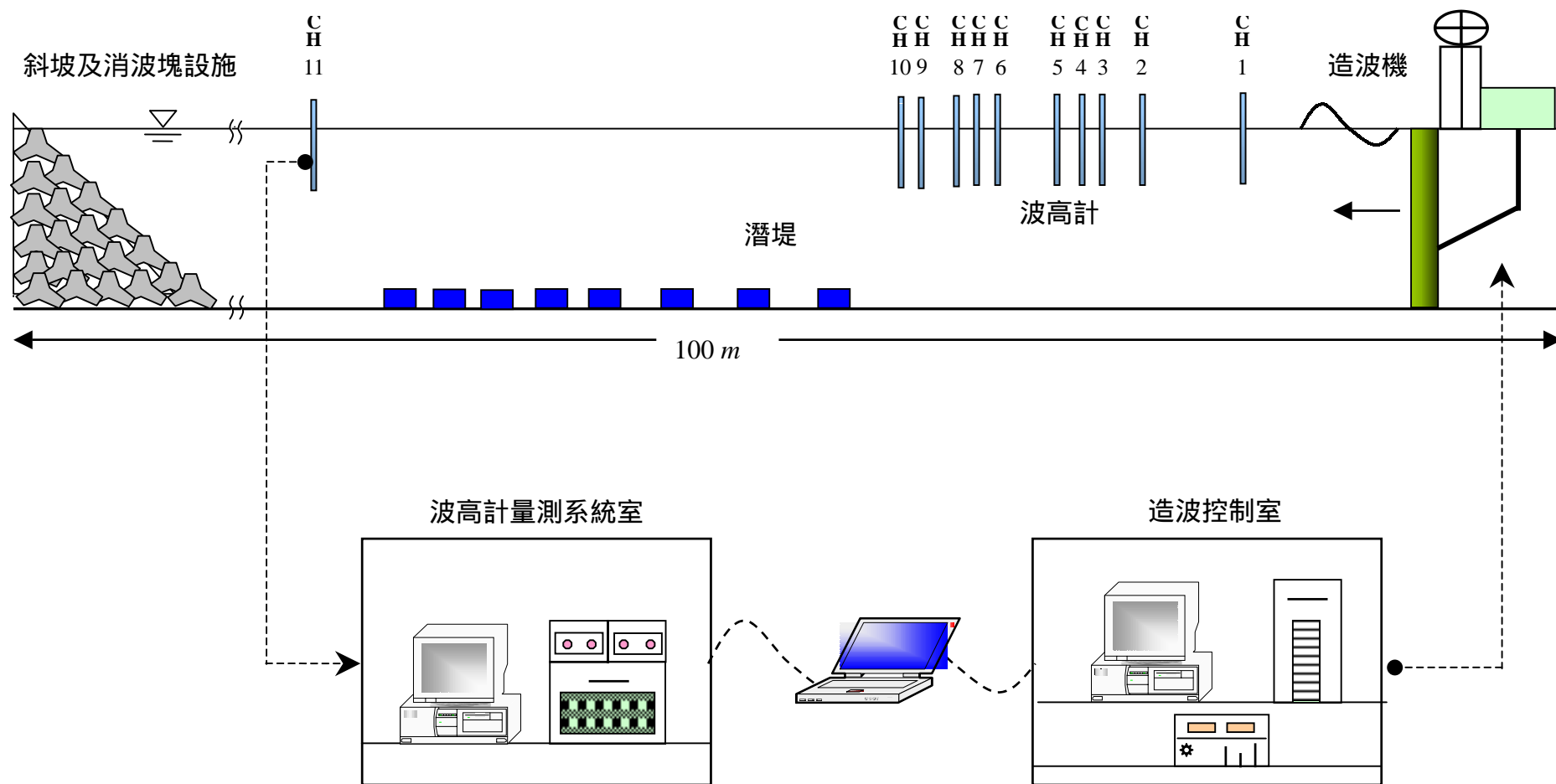


圖 4-8 試驗室儀器、潛堤佈置及資料擷取系統示意圖

#### 4.2.2 試驗波形檢測

於正式試驗前，先進行預備試驗，檢測未佈置複合式潛堤情形下，僅包含水平底床時的入射波形和其反射率，部分試驗波形（黑點）與理論波形（實線）的比較圖如圖 4-9 及圖 4-10 所示。由圖可知，試驗波形與理論波形頗為吻合，故本研究所採用的試驗波形足以代表本研究所需的微小振幅波波。將上述試驗資料分析反射率，發現試驗數據之反射率均在 3% 以內，尚能滿足本試驗精度之要求。照片 4-3 為水位資料擷取結果，照片 4-4 為試驗室造波試驗的情形。

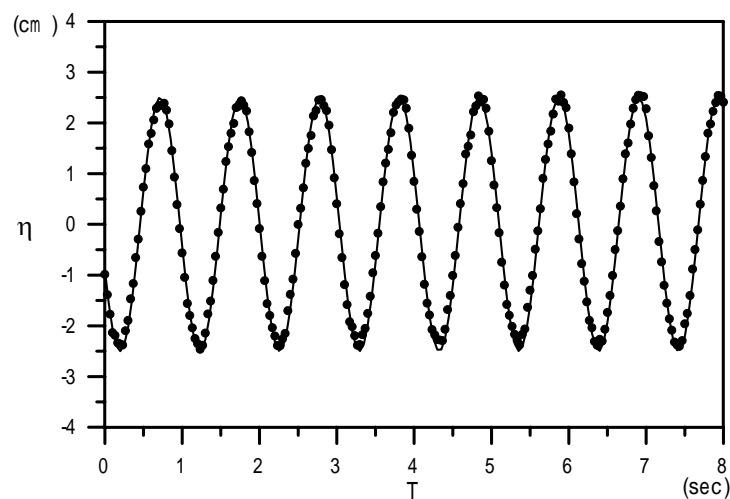


圖 4-9 試驗與理論波形的比較圖 ( $H = 5\text{cm}, T = 1.03\text{sec}$ )

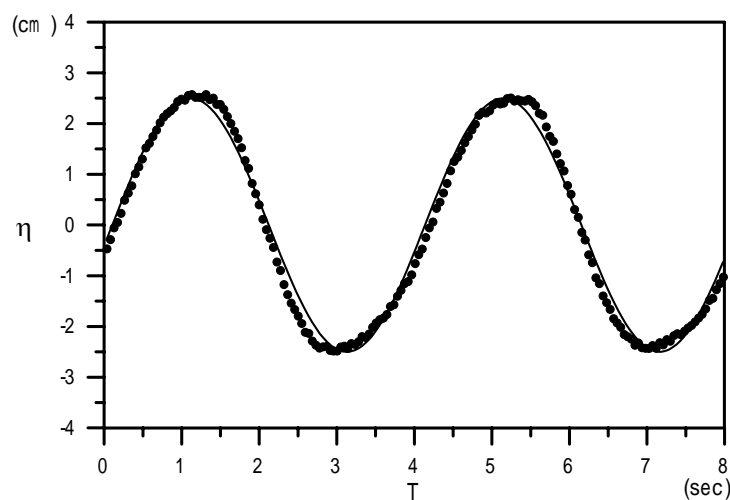
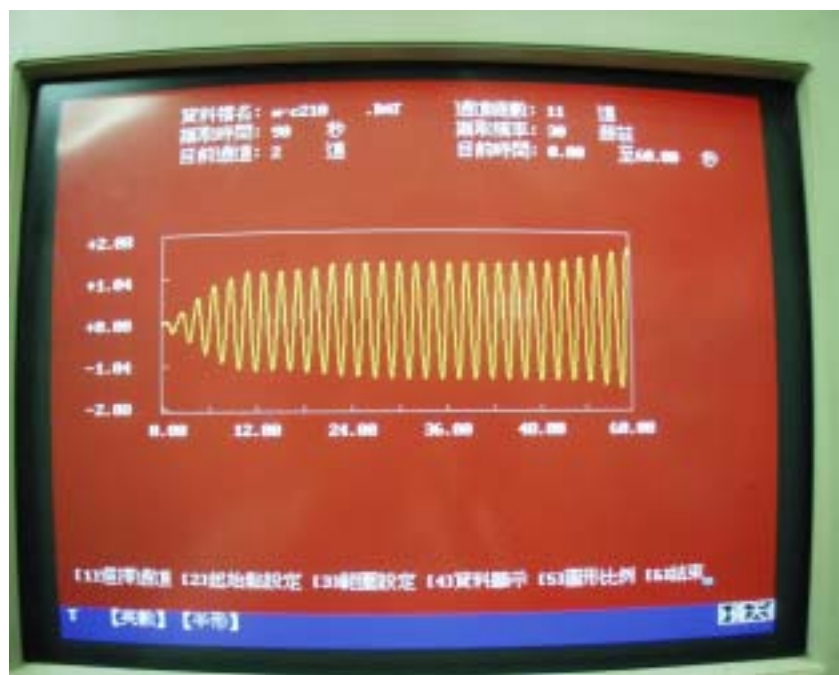


圖 4-10 試驗與理論波形的比較圖 ( $H = 5\text{cm}, T = 4.03\text{sec}$ )



照片 4-3 水位資料擷取過程



照片 4-4 試驗室造波試驗的情形



### 4.2.3 試驗數據之處理與分析

波高計的連續電壓訊號經增幅器 (amplifier) 將電壓值放大與分線盒收集各波高計頻道的類比 (analogue) 資料後，經由數位類比訊號轉換卡 (A/D card) 將波高計輸出的類比資料轉換為數據 (digital) 資料輸入 486 電腦中，以便於電腦處理分析所得的波浪資料，如照片 4-3 所示。為能擷取波浪通過系列潛堤區之後的反射波，取樣時間為 90 秒。

本研究中為避免相位角的量測誤差，採用第二章的反射率計算方法，以三支固定波高計量測結構物前三測點合成波的振幅  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$ ，利用式(2-42)及式(2-43)求得反射率，此法無需量測相位角。

### 4.2.4 複合式人工潛堤布拉格共振

為驗證數值模式在複合式人工潛堤的適用性，本研究並進行水工試驗，將試驗數據與 EEMSE (Hsu 和 Wen, 2001)、Miles (1981) 理論值做比較，其結果如圖 4-11 至圖 4-14 所示。所應用的佈置條件為潛堤個數  $N = 8$ 、 $4$ ，水深  $h = 0.6$  公尺，潛堤高度  $D = 0.12$  公尺、 $0.24$  公尺，潛堤間距  $S_1 = 2.4$  公尺、 $S_2 = 1.8$  公尺，潛堤間距比  $S_2 / S_1$ ，潛堤寬度  $B = 0.6$  公尺，波浪週期  $T$  約為  $1.03 \sim 4.03$  秒，入射波高  $H_i$  為  $0.05$  公尺的規則波，試驗條件如表 4-2 所示：

表 4-2 波浪通過複合式人工潛堤底床試驗條件

Case	$N_1$	$N_2$	$N$	$S_1(m)$	$S_2(m)$	$D(m)$	$B(m)$	$h(m)$
1	4	4	8	2.4	1.8	0.24	0.6	0.6
2	4	4	8	2.4	1.8	0.12	0.6	0.6
3	2	2	4	2.4	1.8	0.24	0.6	0.6
4	4	4	8	2.4	3.0	0.24	0.6	0.6
5	4	4	8	2.4	2.4	0.24	0.6	0.6

由圖 4-11~圖 4-14 可知，試驗結果與數值計算及 Miles (1981) 理論有相似的變化趨勢，惟其試驗數據與數值計算結果發生尖峰值的位置較吻合，而 Miles (1981) 理論反射率有往較大  $2S_1/L$  偏移的現象，其原因為 Miles(1981) 理論將波場中各點的波速與群波速視為定值，事實上底床起伏會造成波速和群波速的改變，由於本研究數值模式能表現波速和群波速在波場中各點的不同，故與試驗數據較為一致。在布拉格反射的尖峰值表現上，以本研究 EEMSE 計算值與試驗的結果最接近；Hsu 和 Wen (2001) EEMSE 的計算值則大於本研究 EEMSE 計算值，而與試驗結果有較大差異，尤其愈高頻處 ( $2S_1/L$  愈大) 差異愈大，由此可知，本研究模式考慮底床擾變項，確實能達到增加模式計算的精確度。

圖 4-11 和圖 4-12 為波浪通過等間距和不等間距系列潛堤的反射率變化圖，由圖可知，波浪通過不等間距系列潛堤配置，發生布拉格共振時的反射率帶寬較等間距潛堤配置為寬，此表示不等間距適用防禦波浪的範圍較廣。圖 4-12 和圖 4-13 為固定入射水深、潛堤個數和潛堤間距，改變潛堤高度  $D$  為 0.12 公尺和 0.24 公尺，反射率  $R$  與無因次堤體間距與波長比  $2S_1/L$  的關係圖，其結果顯示反射率在不同相對水深的變化趨勢大致相同，且隨著相對水深的減少，反射率有變小的趨勢。

圖 4-12 和圖 4-14 為潛堤個數  $N$  為 8 和 4 時的反射率變化圖，圖中顯示，利用本研究模式 (EEMSE) 計算潛堤個數增加時的反射率變化，可以正確地描述反射率值隨著潛堤個數增加而變大的情形，此論點與張等人 (1997) 的試驗結果一致，故以本研究模式計算波浪通過複合式系列潛堤的布拉格反射，具有高度可靠性及正確性。

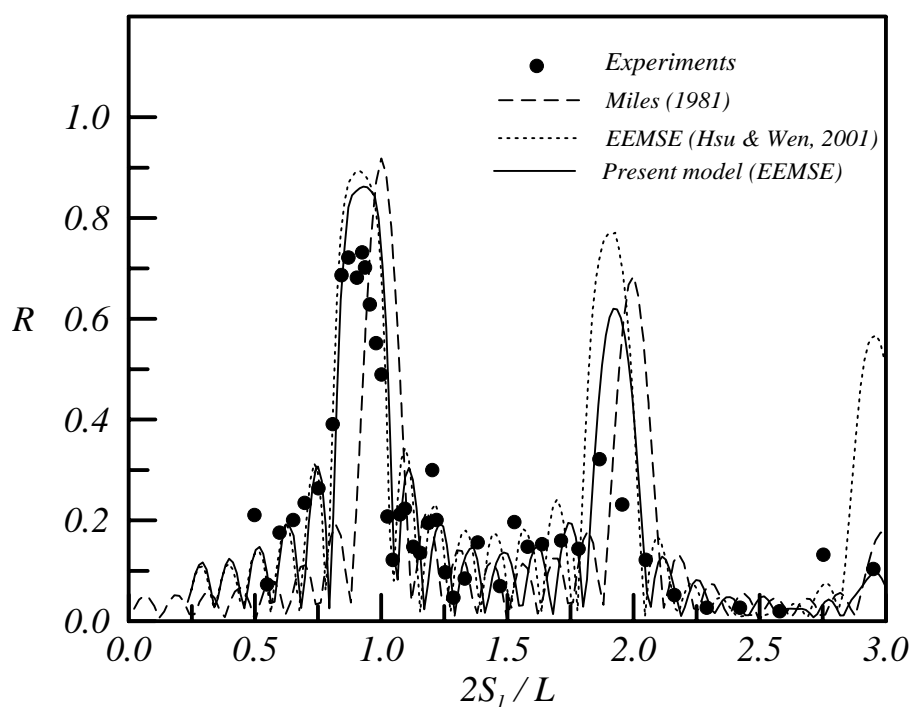


圖 4-11 波浪通過等間距系列潛堤反射率變化圖

( $N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 1.00$ )

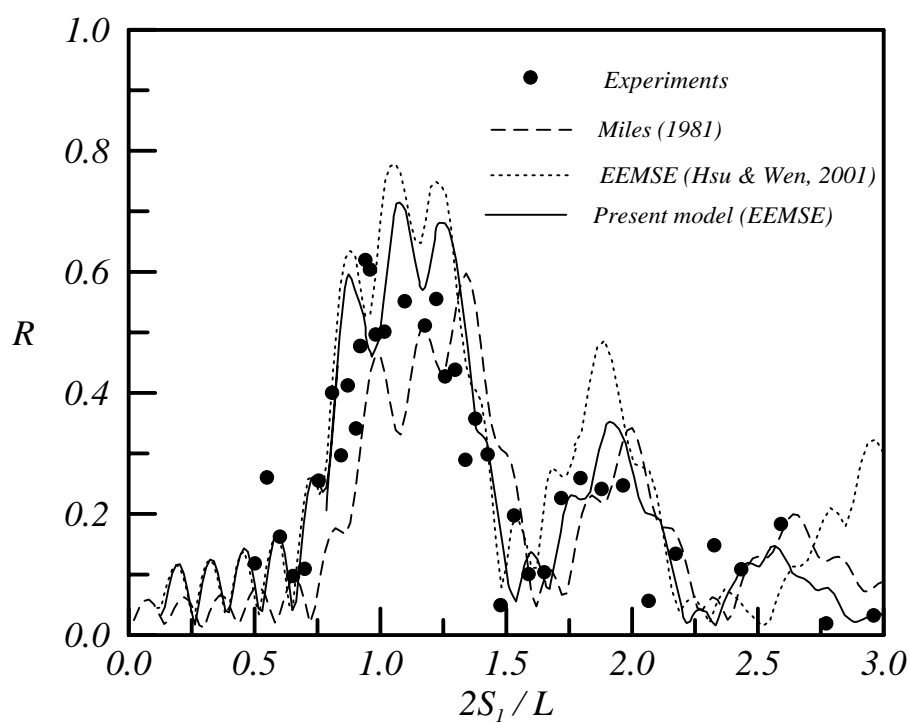


圖 4-12 波浪通過複合式系列潛堤反射率變化圖

( $N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 0.75$ )

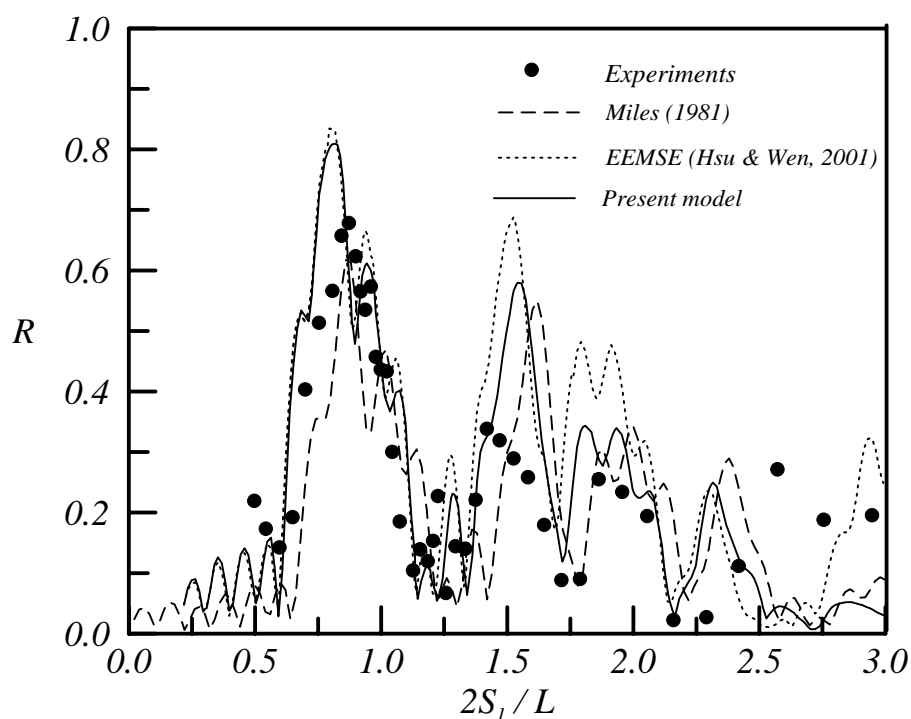


圖 4-13 波浪通過複合式系列潛堤反射率變化圖  
 $(N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 1.25)$

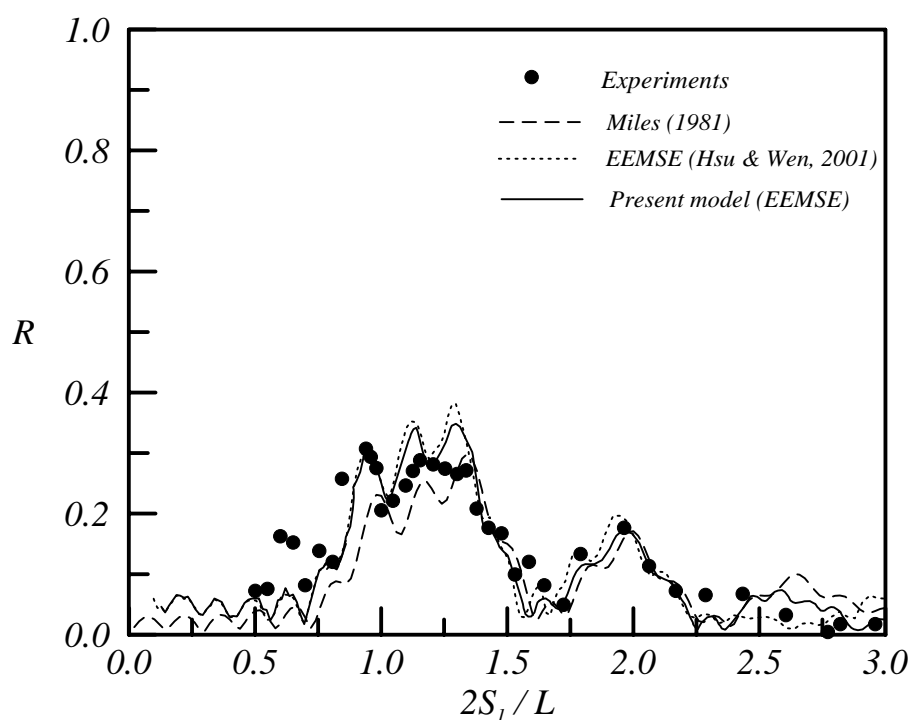


圖 4-14 波浪通過複合式系列潛堤反射率變化圖  
 $(N = 8, D/h = 0.2, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 0.75)$

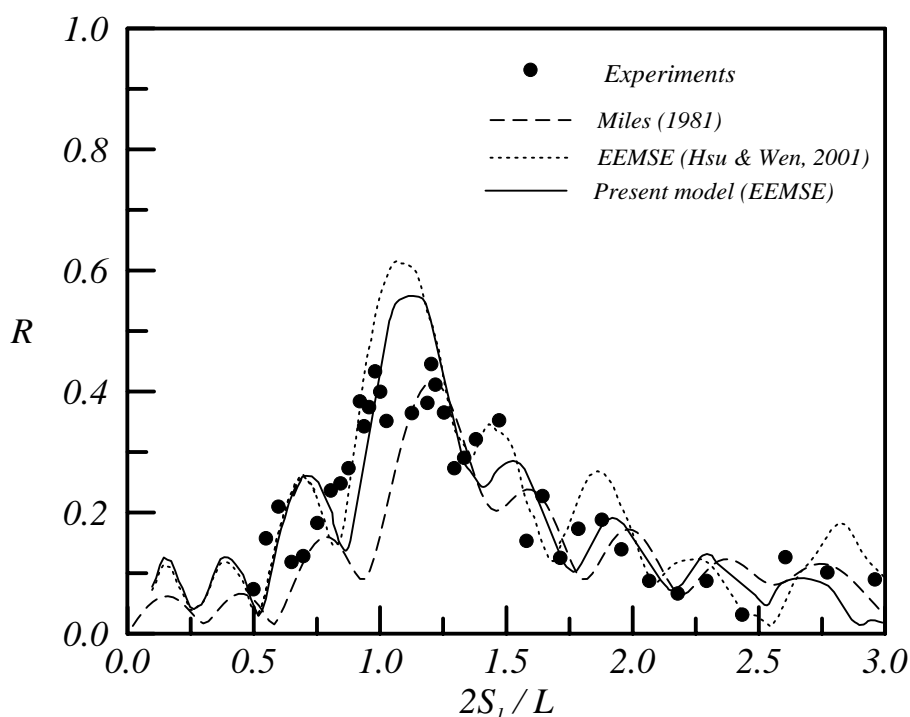


圖 4-15 波浪通過複合式系列潛堤反射率變化圖  
 $(N = 4, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 0.75)$

### 4.3 平面水工試驗

#### 4.3.1 試驗儀器與佈置

本試驗於交通部運輸研究所港灣技術第一試驗廠棚進行，試驗水槽長 62 公尺×寬 57 公尺×高 1 公尺。造波機為丹麥 DHI 公司出品的油壓式造波機，可由電腦控制，依試驗需求造出各種不同波浪條件的規則波與不規則波。

本試驗的水位訊號係為 35 公分的雙測線型電容式波高計所量得，共 11 支。波高配置分為三部份，一為入射段，放置 1 支波高計於造波板前約 5 公尺處以量測入射波。二為堤前段，此區域，在最接近造波板前方約 5 公尺 10 公尺處，放置 6 支波高計，量測堤前的水位變化，如照片 4-5 所示。三為堤後段，此為潛堤後方等水深的區域，此區放置 4 支波高計，以便觀測波浪的透射現象，照片 4-6 為試驗室造波試驗的情形。



照片 4-5 試驗室潛堤及波高計配置情形



照片 4-6 試驗室造波試驗的情形

### 4.3.2 試驗數據之處理與分析

波高計的連續電壓訊號經增幅器 (amplifier) 將電壓值放大與分線盒收集各波高計頻道的類比 (analogue) 資料後，經由數位類比訊號轉換卡 (A/D card) 將波高計輸出的類比資料轉換為數據 (digital) 資料輸入 486 電腦中，以便於電腦處理分析所得的波浪資料。為能擷取波浪通過系列潛堤區之後的反射波，取樣時間為 90 秒。

本研究中為避免相位角的量測誤差，採用第二章的反射率計算方法，以三支固定波高計量測結構物前三測點合成波的振幅  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$ ，利用式(2-42)及式(2-42)求得反射率，此法無需量測相位角。

### 4.3.3 平面等間距潛堤布拉格共振

在模式驗證研究上，本研究針對波浪通過平面二維水平底床系列潛堤，進行布拉格反射研究。其平面系列潛堤之佈置條件：潛堤個數 ( $N$ ) 為 4 個，潛堤寬度 ( $B$ ) 為 35 公分，潛堤高度 ( $D$ ) 為 22.5 公分，潛堤間距 ( $S$ ) 為 70 公分，入射波水深 ( $h$ ) 為 45 公分，波浪週期 ( $T$ ) 約為 0.7~1.5 秒，入射波高 ( $H_i$ ) 則採用 4 公分的規則波來進行試驗。試驗中對於波浪通過潛堤的反射效應，則是量取垂直堤體中心前方的反射波浪，其配置示意圖如圖 4-16 所示。試驗中變換潛堤長度 ( $G$ ) 介於 120 至 480 公分，探討不同堤體長度，平面系列潛堤的反射效應。

進行不同潛堤堤長研究前，為比較前述二維斷面配置的差異性，先進行未發生堤頭繞射情況的二維斷面配置研究。圖 4-17 為水平底床上，潛堤佈置條件  $D/h = 1/2$ ， $B/S = 0.5$  及  $G/S = \infty$  反射率變化比較圖。圖中圓點為試驗結果，實線為本文 EEMSE 模式計算值，反射率變化顯示 EEMSE 模式計算值與試驗結果在  $2S/L = 0.78$  附近條件，會發生主頻

布拉格反射現象，反射率尖峰值約為 0.75，本研究 EEMSE 模式計算結果在高頻  $2S/L=1.7$  附近條件會發生次諧波布拉格反射，但試驗結果的布拉格反射現象並不明顯。大體而言，本研究 EEMSE 模式除在次諧波布拉格反射與試驗值有較大差異外，在主頻布拉格反射及反射率變化均與試驗結果有一致的趨勢。

系列潛堤在相對堤長  $G/S=1.7$  其餘配置條件維持  $D/h=1/2$ ， $B/S=0.5$  條件下，不同  $2S/L$  的反射率變化繪如圖 4-18。圖形顯示，在  $2S/L=0.75$  條件下，本研究 EEMSE 模式的計算值及試驗結果均會發生主頻布拉格反射現象，且反射率明顯較前述不受堤頭繞射情況下偏小，本研究 EEMSE 模式的計算值在次諧波布拉格反射的反射率比試驗結果大。圖 4-18 中有限長度堤長，兩端堤頭對波浪造成繞射，影響潛堤佈置區整個波場機制，造成反射率與未發生繞射情況下（斷面配置）的差異。

相對堤長分別採用  $G/S=3.4$ 、 $5.1$  及  $6.8$ ，相對堤高及相對堤距維持  $D/h=1/2$  與  $B/S=0.5$  佈置情況下，試驗與計算結果反射率變化比較繪如圖 4-19 圖 4-21，圖中顯示，本研究 EEMSE 模式的計算值除了次諧波布拉格反射外，皆與試驗結果相當一致。因堤長愈長，堤頭兩端繞射對潛堤佈置區域波場機制影響愈不明顯，造成主頻布拉格反射現象隨相對堤長的增加而增大。



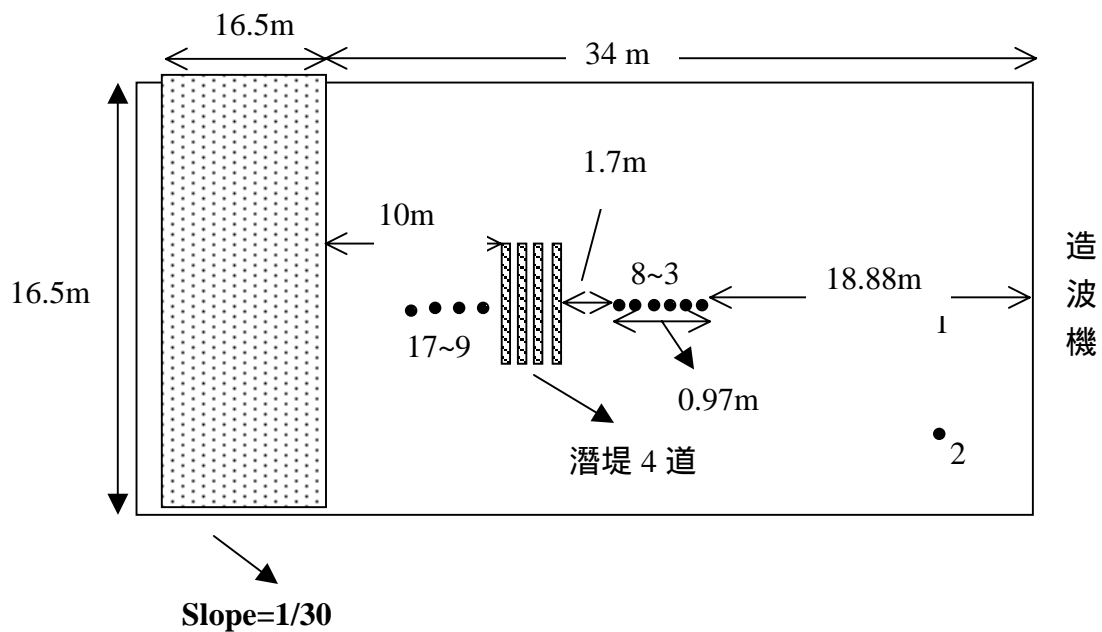


圖 4-16 平面系列潛堤佈置示意圖

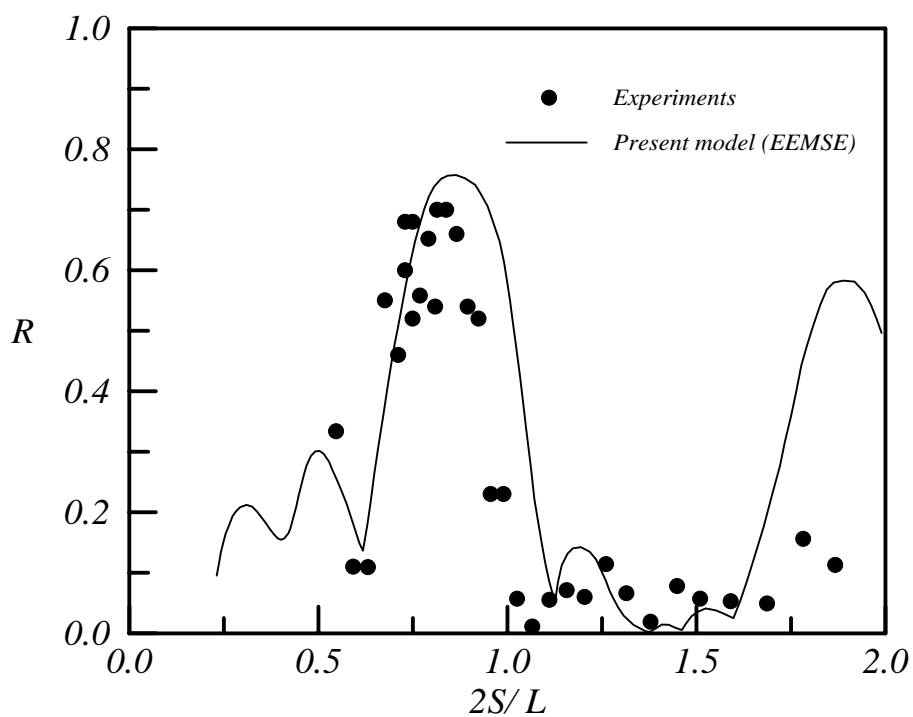


圖 4-17 二維斷面潛堤佈置未受堤頭繞射影響下，反射率變化比較圖

( $D/h = 1/2$  ,  $B/S = 0.5$  ,  $G/S = \infty$ )

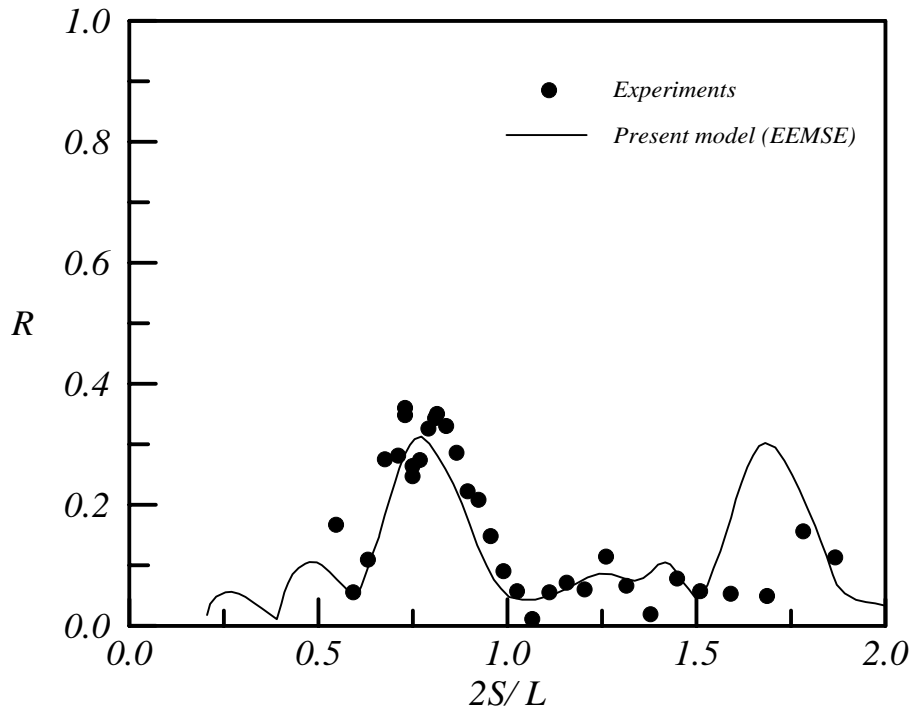


圖 4-18 平面潛堤佈置受堤頭繞射影響下，反射率變化比較圖  
 $(D/h = 1/2, B/S = 0.5, G/S = 1.7)$

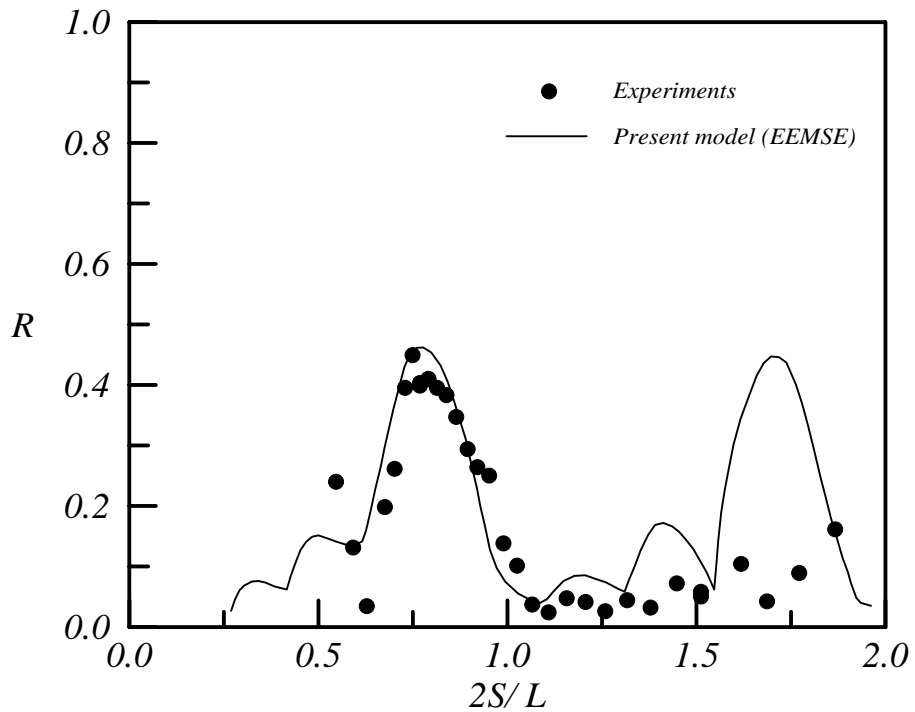


圖 4-19 平面潛堤佈置受堤頭繞射影響下，反射率變化比較圖  
 $(D/h = 1/2, B/S = 0.5, G/S = 3.4)$

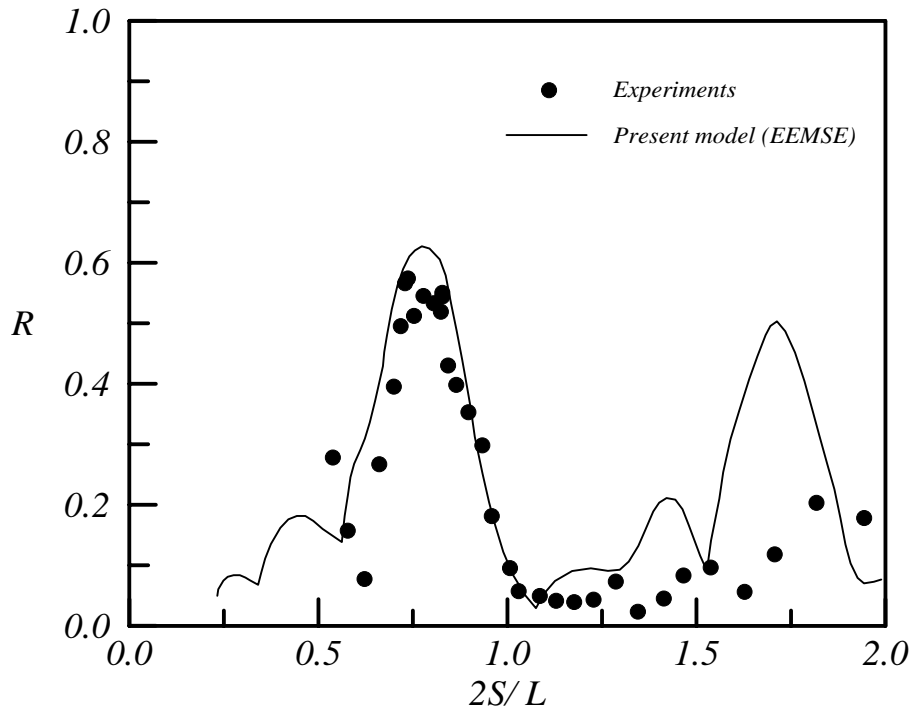


圖 4-20 平面潛堤佈置受堤頭繞射影響下，反射率變化比較圖  
( $D/h = 1/2$  ,  $B/S = 0.5$  ,  $G/S = 5.1$ )

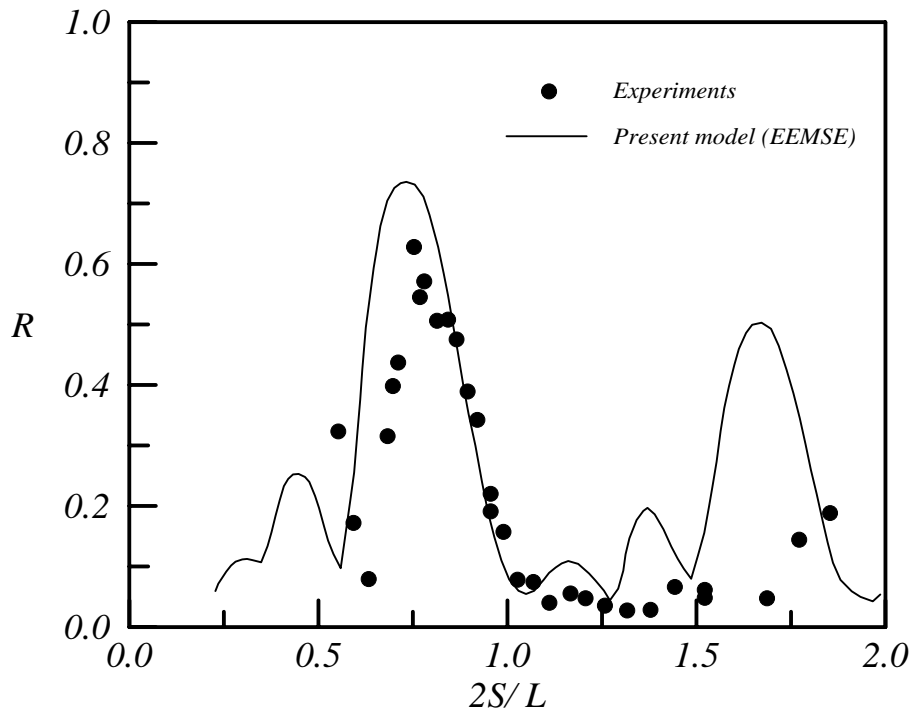


圖 4-21 平面潛堤佈置受堤頭繞射影響下，反射率變化比較圖  
( $D/h = 1/2$  ,  $B/S = 0.5$  ,  $G/S = 6.8$ )

## 第五章 結果與討論

波浪通過底床系列潛堤佈置，各種佈置條件在不同入射波浪條件作用下，波浪受底床及潛堤的互制作用，波場機制產生各種不同變化，堤前發生反射率劇增的布拉格反射現象亦不相同。系列潛堤實際應用於海岸保護工法之前，必須針對相關因子及其相互之關係作探討。

本研究主要針對影響波浪通過系列潛堤的參數特性進行有系統的分析探討，影響參數包括潛堤堤高  $D$ 、潛堤寬  $B$ 、潛堤長  $G$ 、潛堤個數  $N$ 、潛堤間距  $S$  (複合式潛堤為  $S_1$  及  $S_2$ )、潛堤間距比  $S_2/S_1$ 、底床坡度  $\tan \beta$ 、入射波水深  $h$ 、入射角度  $\theta$ 、波浪週期  $T$ ，其特徵函數可以下式表示：

$$F = f_1(D, h, B, S, N, T, \tan \beta, \theta, g) \quad (5-1)$$

波浪反射率  $R$  代表特徵函數，則無因次組合可表示為

$$R = f_1(D/h, B/S, N, 2S/L, S_1/S_2, \tan \beta, \theta, g) \quad (5-2)$$

波浪通過系列潛堤的布拉格反射研究，本文針對影響因子以演進型態緩坡方程式 (EEMSE) 進行數值計算，計算結果分下列各項予以討論：

1. 探討斜坡底床的反射率變化及布拉格反射現象，包括不同底床坡度  $\tan \beta$ 、潛堤個數  $N$ 、潛堤高度  $D$ 、潛堤間距  $S$  及不同波浪條件  $2S/L$ 。
2. 探討有、無碎波發生的反射率變化及布拉格反射現象，包括不同潛堤個數  $N$ 、潛堤間距  $S$  以及不同波浪條件  $2S/L$ 。
3. 探討複合式潛堤佈置的反射率變化及布拉格反射現象，包括不同潛堤個數  $N$ 、潛堤高度  $D$ 、潛堤間距  $S$ 、波浪入射方向  $\theta$  及不同波浪條件  $2S/L$ 。

4. 探討平面潛堤佈置，潛堤堤頭繞射對反射率變化及布拉格反射現象，包括不同潛堤長度  $D$ 、底床坡度  $\tan \beta$  及不同波浪條件  $2S/L$ 。

以上第 1 項及第 2 項斜坡底床效應已於第一年(90 年度)報告中探討，今年度則針對第 3 項及第 4 項作研究探討。

## 5.1 斷面複合式系列潛堤

波浪通過複合式系列潛堤布拉格反射研究，以斷面二維潛堤佈置，亦即波浪不受堤頭繞射的影響，潛堤佈置示意圖如圖 5-1 所示。針對不同的潛堤間距比  $S_2/S_1$ 、相對堤距  $B/S_1$ 、相對堤高  $D/h$ 、潛堤個數  $N$  以及波浪入射角度  $\theta$ ，探討波浪通過系列潛堤，在不同的  $2S_1/L$  條件下，反射率變化及布拉格反射現象。波浪及佈置條件與試驗驗證情況相同，入射水深為  $h = 0.6$  公尺，堤高分別為 0.12、0.18 及 0.24 公尺，故相對堤高分別為  $D/h = 0.2$ 、0.33 及 0.4，潛堤個數  $N$  分別為 4、6 及 8 個，第一組潛堤間距  $S_1$  為 2.4 及 1.2 公尺兩種，第二組潛堤間距  $S_2$  則根據間距比  $S_2/S_1 = 0.75$ 、1.0 及 1.25 而定，堤間距為  $S_2 = 0.9 \sim 3.0$  公尺，堤寬  $B$  為 0.6 公尺，潛堤佈置和波浪的條件如表 5-1 所示。

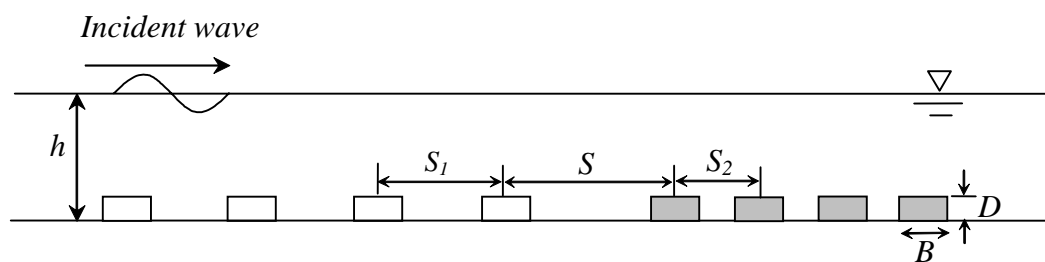


圖 5-1 複合式系列潛堤佈置示意圖

表 5-1 波浪通過複合式系列潛堤的計算條件

潛堤型式	個數 $N$	堤高 $D(m)$	間距 $S_1(m)$	間距 $S_2(m)$	堤寬 $B(m)$	水深 $h(m)$	波浪條件			
矩形	8	0.12	2.4 1.8 1.2	1.8、 2.4、 3.0	0.6	0.6	週期 $T(sec)$	波高 $H_i(m)$		
		0.18		1.35、 2.25						
		0.24		0.9、 1.2、 1.5						
	6	0.24	2.4	1.8、 2.4、 3.0			1.03~4.03	0.04		
	4									

#### 5.1.1 潛堤間距比的影響

圖 5-2 為潛堤個數  $N=8$ 、相對堤高  $D/h=0.4$  及相對堤距  $B/S_1=0.25$ ，第一組潛堤間距  $S_1=2.4$  公尺，兩組潛堤間之間距  $S=S_2$ ，第二組潛堤間距各為  $S_2=1.8$  公尺、2.4 公尺、3 公尺，即潛堤間距比  $S_2/S_1=0.75$ 、1.0 及 1.25 的反射率變化結果。由圖可知，主頻和高諧波布拉格反射尖峰值，等間距系列潛堤  $S_2/S_1=1$  佈置比複合式系列潛堤 ( $S_2/S_1=0.75$  及 1.25) 佈置大；發生主頻反射的反射率帶寬則以複合式潛堤佈置較寬，不僅在  $2S_1/L=1$  附近發生主頻布拉格反射， $S_2/S_1=0.75$  及 1.25 兩組佈置分別在  $2S_1/L=2$  和 2.6 及  $2S_1/L=1.6$  和 1.9 附近發生明顯高諧波布拉格反射，而反射率變化帶寬亦較寬。以上顯示複合式系列潛堤佈置確實可增加入射波浪產生布拉格反射。利用不同的相對堤距  $B/S_1=0.5$  進行比較計算結果如圖 5-3。圖中顯示在等間距及複合式系列潛堤佈置下，無高頻的布拉格反射現象，由此可知在高頻的布拉格反射受  $B/S_1$  影響不容忽視。根據上述結果，利用複合式系列潛堤可增加反射率的帶寬範圍，針對現場特定的波浪週期，如能對潛堤位置作適當佈置，即可達到增加反射減低透射波浪效果。

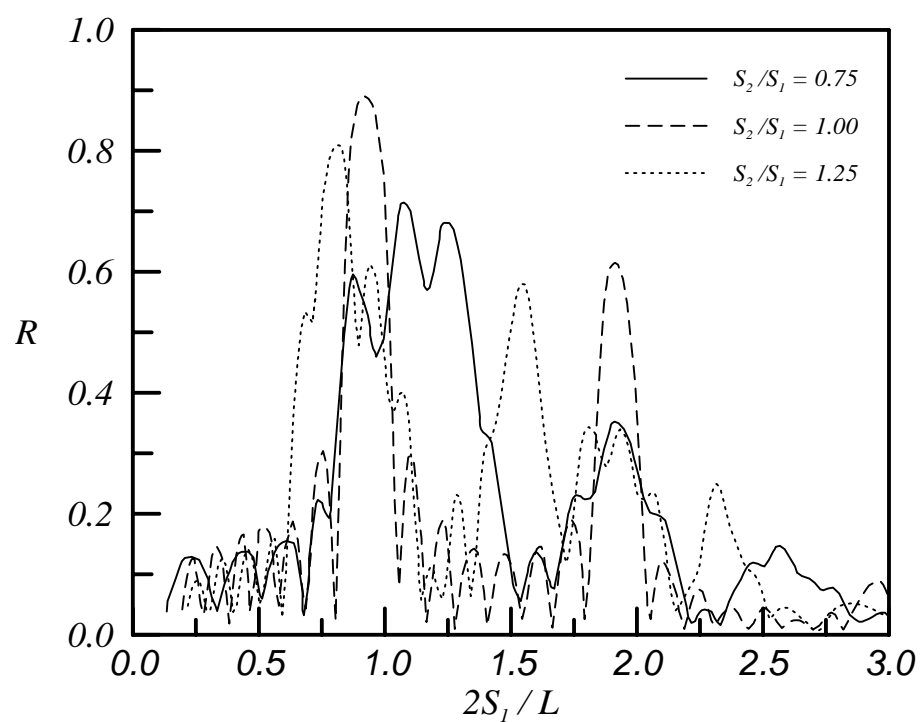


圖 5-2 不同潛堤間距比反射率  $R$  與  $2S_1/L$  關係圖

( $N=8$  ,  $D/h=0.4$  ,  $B/S_1=0.25$ )

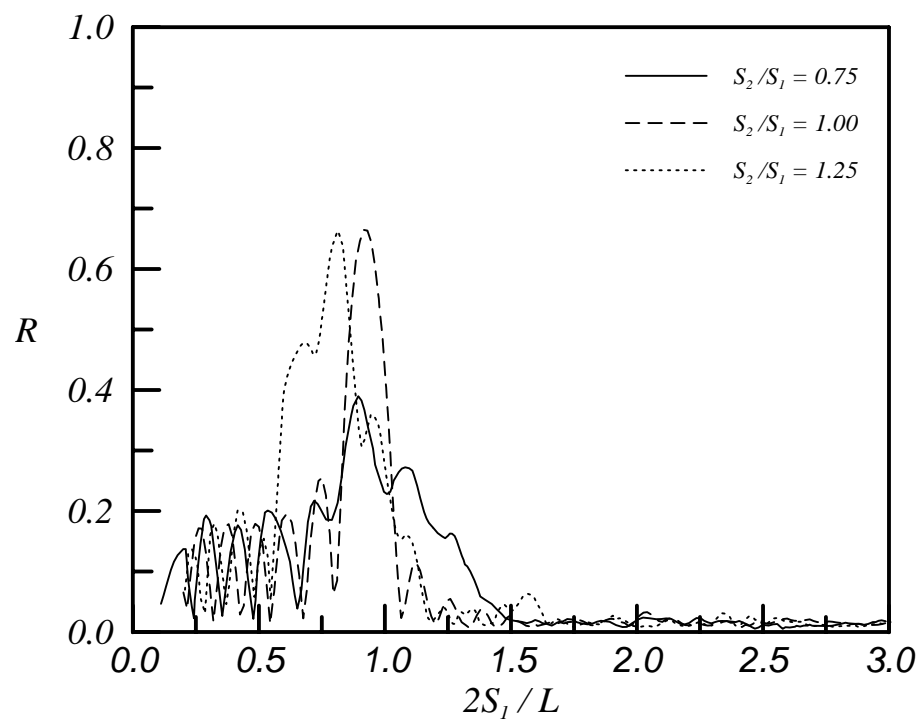


圖 5-3 不同潛堤間距比反射率  $R$  與  $2S_1/L$  關係圖

( $N=8$  ,  $D/h=0.4$  ,  $B/S_1=0.5$ )

### 5.1.2 相對堤距的影響

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。圖 5-4 及圖 5-5 為潛堤個數  $N=8$ 、相對堤高  $D/h=0.4$  及潛堤間距比  $S_2/S_1=0.75$  與  $1.25$ ，在不同相對堤距  $B/S_1=0.25$  及  $0.5$  計算結果反射率變化圖。反射率變化顯示潛堤間距較大相對堤距  $B/S_1$  較小佈置條件下，波浪通過複合式系列潛堤可得到較大的布拉格反射尖峰值及較大的反射率帶寬，而且高頻的高諧波布拉格反射現象明顯，此種現象與 Kirby 和 Anton (1990) 在人工沙洲所得研究結果相同。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。此外，潛堤間距較小相對堤距  $B/S_1$  較大佈置條件，並未發生高諧波布拉格反射，此現象與岳等人 (1997) 及 Hsu 等人 (2002) 在等間距系列潛堤所得研究結果相同。

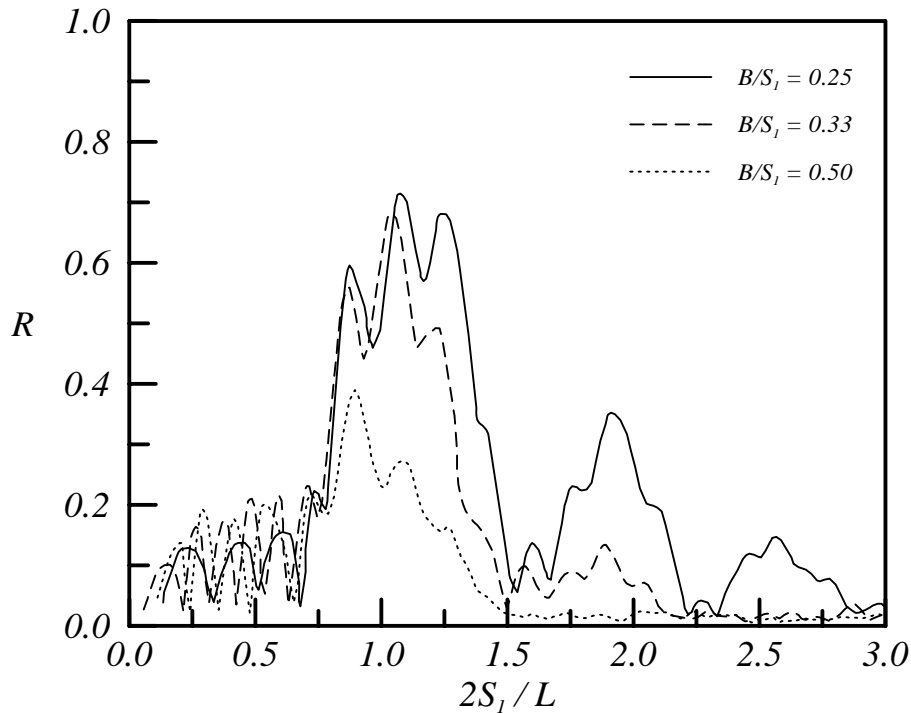


圖 5-4 不同潛堤間距比反射率  $R$  與  $2S_1/L$  關係圖  
( $N=8$  ,  $D/h=0.4$  ,  $S_2/S_1=0.75$ )



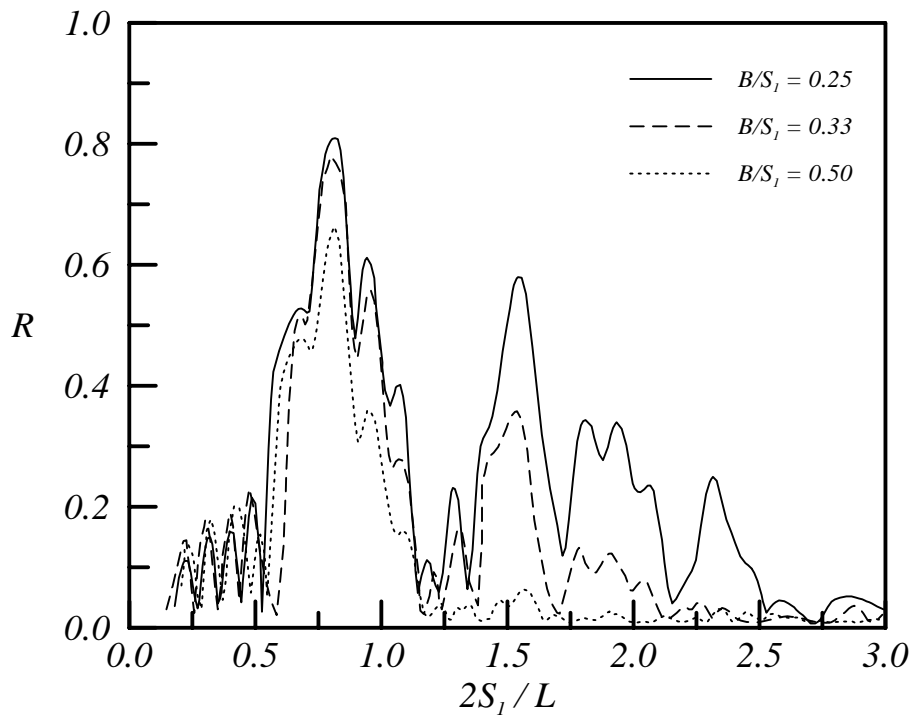


圖 5-5 不同潛堤間距比反射率  $R$  與  $2S_1/L$  關係圖  
( $N=8$  ,  $D/h=0.4$  ,  $S_2/S_1=1.25$ )

### 5.1.3 潛堤個數的影響

陳(1997b)、Guazzelli 等人 (1992)、Suh 等人 (1997) 及 Zhang 等人 (1999) 在正弦形底床研究結果指出，正弦形底床波數愈多，反射率尖峰值愈大，但相對的反射率帶寬減小。張等人 (1997)、岳等人 (1997) 及 Hsu 等人 (2002a) 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。圖 5-6 為不同潛堤個數  $N=4$ 、6 及 8，在固定的相對堤距  $B/S_1=0.25$ 、相對堤高  $D/h=0.4$  及潛堤間距比  $S_2/S_1=0.75$  佈置下，波浪通過複合式系列潛堤的反射率變化情形。圖形顯示，在  $2S_1/L=1$  和 2 附近的主頻及高諧波布拉格反射，反射率隨潛堤個數增加而變大，但在  $2S_1/L=0.33$  和 2.67 附近的分諧波及高諧波布拉格反射並無增加趨勢。布拉格反射的反射率帶寬方面，潛堤個數愈多，反射率帶寬愈大，此趨勢與 Guazzelli 等人 (1992) 及 Belzons 等人 (1991) 在正弦形底床的試驗及理論模式所得結果並不一致。探究其原

因主要為堤數較多（ $N=6$  及  $8$ ）的條件，因二個布拉格反射的高峰接近，形成一個反射率帶寬較寬的杜拉格反射區，所以潛堤為  $6$  及  $8$  個時，主頻布拉格反射的反射率帶寬相近，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，反射率尖峰值呈小幅增加，但不像主頻度拉格反射明顯。圖 5-7 相對堤距改變為  $B/S_1 = 0.5$  的結果，主頻布拉格反射尖峰值亦隨著潛堤個數增加而增大，主頻反射率帶寬亦隨著潛堤個數的增加而增大。因此，複合式潛堤佈置較多潛堤個數情況，不但可提高布拉格反射尖峰值，若潛堤間距佈置（ $S_2/S_1$ ）適當，亦能增加布拉格反射的反射率帶寬，有效改善等間距佈置堤數增加時，布拉格反射的反射率帶寬反而減小的缺點。

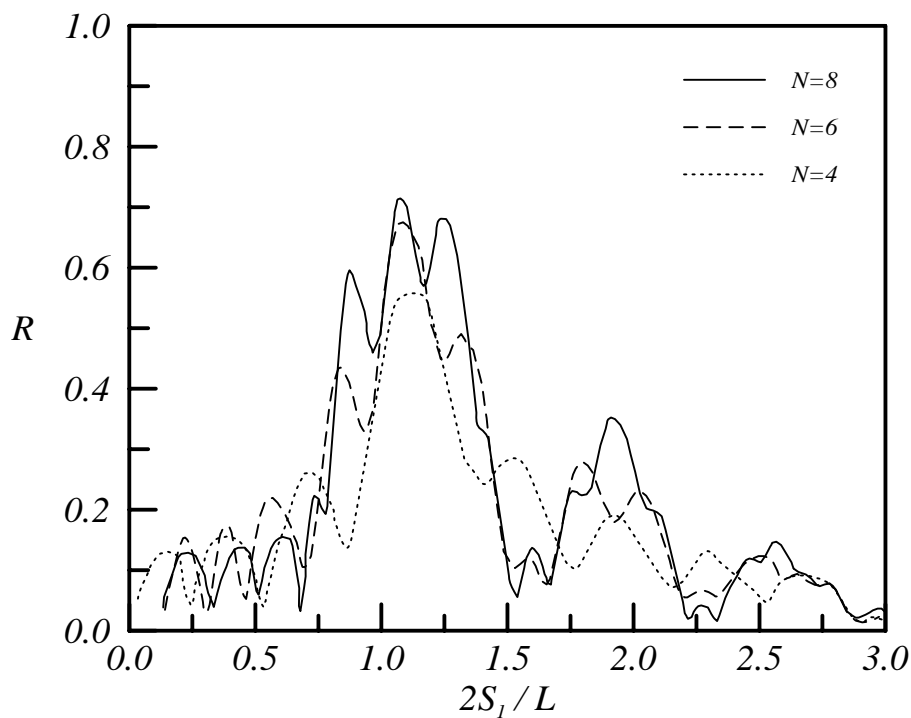


圖 5-6 不同潛堤個數反射率  $R$  與  $2S_1/L$  關係圖  
 ( $D/h = 0.4$  ,  $B/S_1 = 0.25$  ,  $S_2/S_1 = 0.75$ )

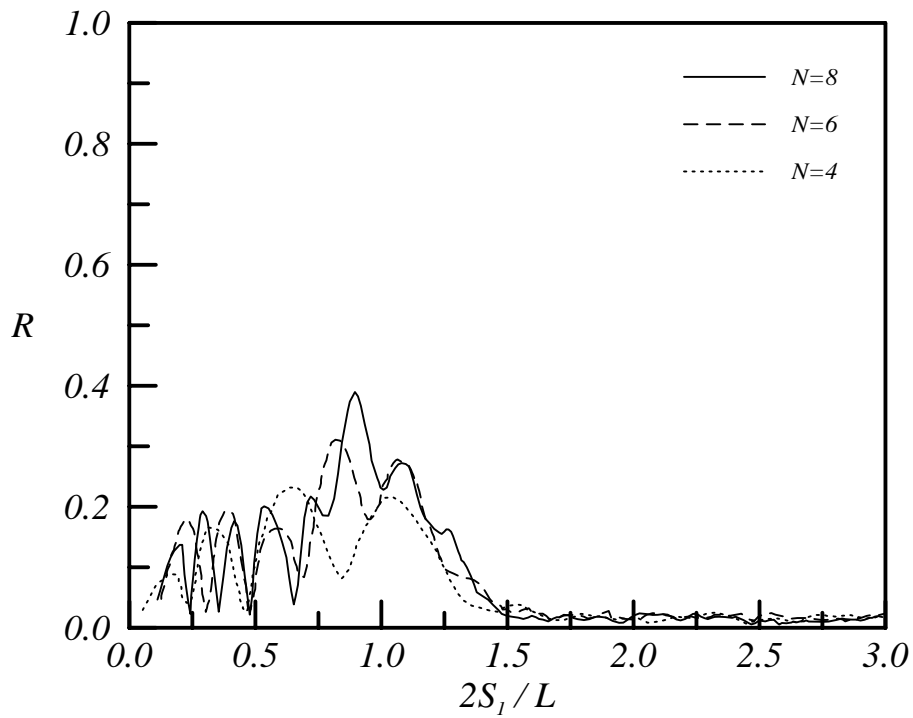


圖 5-7 不同潛堤個數反射率  $R$  與  $2S_1/L$  關係圖  
( $D/h = 0.4$  ,  $B/S_1 = 0.5$  ,  $S_2/S_1 = 0.75$ )

#### 5.1.4 潛堤高度的影響

Guazzelli 等人 (1992) 及 Zhang 等人 (1999) 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。圖 5-8 為潛堤個數  $N = 8$ 、間距比  $S_2/S_1 = 0.75$ 、相對堤距  $B/S_1 = 0.25$ ，在相對堤高  $D/h = 0.4$ 、 $0.3$  及  $0.2$  條件下，計算結果反射率  $R$  與  $2S_1/L$  關係圖。圖中顯示潛堤高度增加，因入射波浪受較高的潛堤阻撓，使主頻和高諧波布拉格反射增大，且反射率帶寬亦隨潛堤高度增加而明顯增寬。整體反射率在  $2S_1/L$  分佈上，隨著潛堤高度增高，向較小  $2S_1/L$  平移。Mattioli (1991) 在複合式正弦形底床研究上亦發現此種平移現象，並認為平移量與底床擾變振幅的平方成正比。

Guazzelli 等人 (1992) 則指出反射率尖峰值平移的原因可能是振盪因子(Evanescent modes)的影響。因本研究在未考慮振盪因子情形下，仍然發生明顯的平移現象。由此可知，振盪因子並不是平移的主要因素，由 Hsu 等人(2002b)的研究分析結果顯示，平移主要因為總延散關係與線性延散關係的差異所造成。圖 5-9 為相對堤距改變為  $B/S_1 = 0.5$  時，反射率  $R$  與  $2S_1/L$  的關係圖。反射率及主頻反射率帶寬亦隨著潛堤高度增加，有明顯增加的現象；整體反射率曲線在  $2S_1/L$  分佈上，亦隨著潛堤高度增加向  $2S_1/L$  較小處平移。以上結果顯示，潛堤高度增加，因底床擾變增加，加大水深變化，使布拉格反射更明顯，反射率帶寬更寬，整體反射率曲線向  $2S_1/L$  較小處平移。

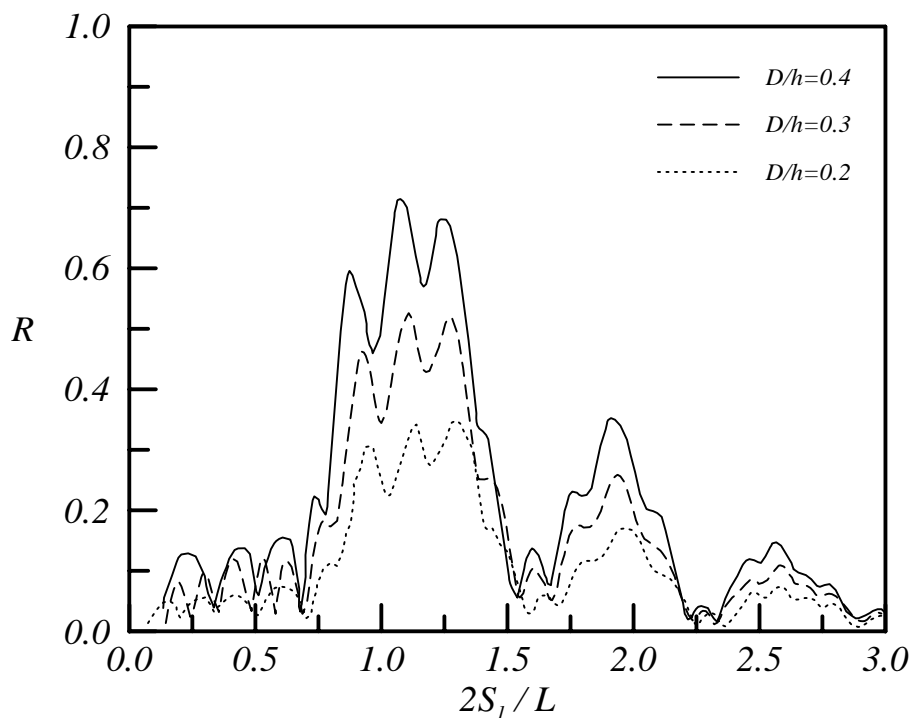


圖 5-8 不同潛堤高度反射率  $R$  與  $2S_1/L$  關係圖  
( $N = 8$  ,  $B/S_1 = 0.25$  ,  $S_2/S_1 = 0.75$ )

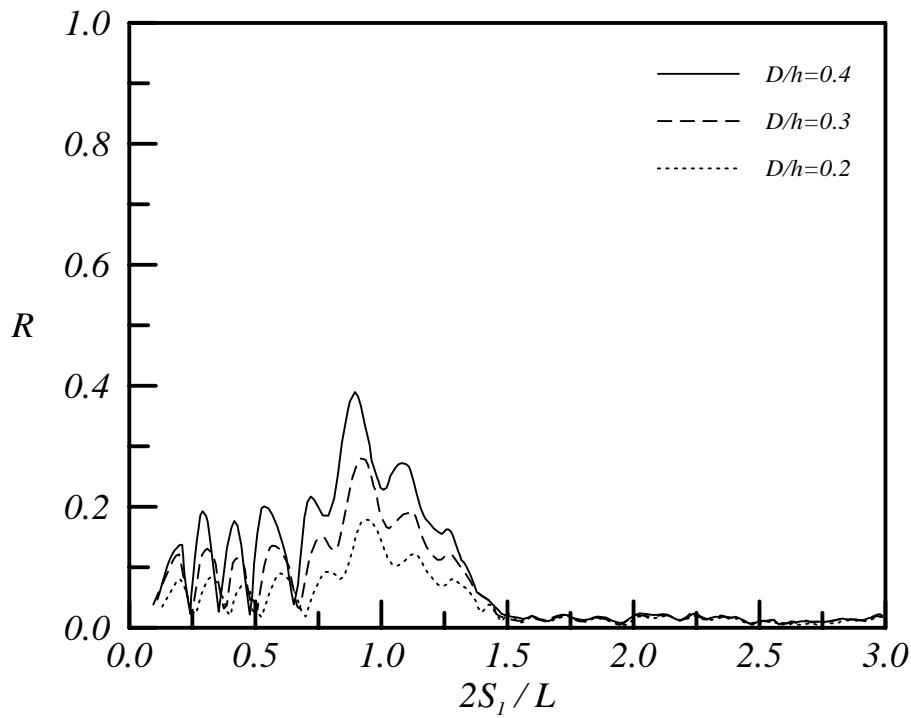


圖 5-9 不同潛堤高度反射率  $R$  與  $2S_1/L$  關係圖  
( $N=8$  ,  $B/S_1=0.5$  ,  $S_2/S_1=0.75$ )

### 5.1.5 波浪入射角度的影響

Dalrymple 和 Kirby (1986) 利用 EMSE 模式及 Cho 和 Lee (2000) 利用特徵函數展開 (Eigenfunction Expansion Method) 的理論模式在單一及複合式正弦形底床以及岳等人 (1997) BEM 計算雙列潛堤的布拉格反射研究結果指出，當波浪斜向入射時，將減弱布拉格反射現象並向較高頻處平移。圖 5-10 及圖 5-11 為相同的潛堤個數  $N=8$ 、相對堤高  $D/h=0.4$ 、潛堤間距比  $S_2/S_1=0.75$  及相對堤距分別為  $B/S_1=0.25$  和  $0.5$  的佈置條件下，不同波浪入射角度  $\theta=0^\circ$ 、 $30^\circ$  及  $45^\circ$ ，反射率  $R$  與  $2S_1/L$  的關係圖。圖中顯示，波浪正向入射時，布拉格反射現象最明顯，反射率尖峰值最大，隨著波浪入射角度增加，反射率尖峰值漸減，且遞減幅度亦隨入射角度增加，反射率尖峰值向較大  $2S_1/L$  偏移。Dalrymple 和 Kirby (1986) 研

究指出，波浪以斜向角度  $\theta$  入射時，布拉格反射將發生於  $2S_1 \cos \theta / L = 1$  的條件。在圖 5-10 中，當波浪入射角  $\theta = 0^\circ$ ，主頻布拉格反射發生於  $2S_1 / L = 1.12$ 。依上述條件，當波浪入射角  $\theta = 30^\circ$  時，主頻布拉格反射發生於  $2S_1 / L = 1.27$  條件；當波浪入射角  $\theta = 45^\circ$  時，發生於  $2S_1 / L = 1.53$ 。此外，岳等人 (1997) 的研究結果指出，波浪以斜向角度  $\theta$  入射時，布拉格反射將發生於  $2(2B + \ell' \cos \theta) / L = 1$  的條件，其中  $\ell' = S_1 - B$ ，依此條件，當波浪入射角  $\theta = 30^\circ$  時，主頻布拉格反射發生於  $2S_1 / L = 1.21$ ；當波浪入射角  $\theta = 45^\circ$  時，發生於  $2S_1 / L = 1.34$ 。本研究佈置計算結果在  $\theta = 30^\circ$  及  $45^\circ$  的布拉格反射條件分別為  $2S_1 / L = 1.25$  及  $1.49$  與以上學者研究所得理論值均極為接近。

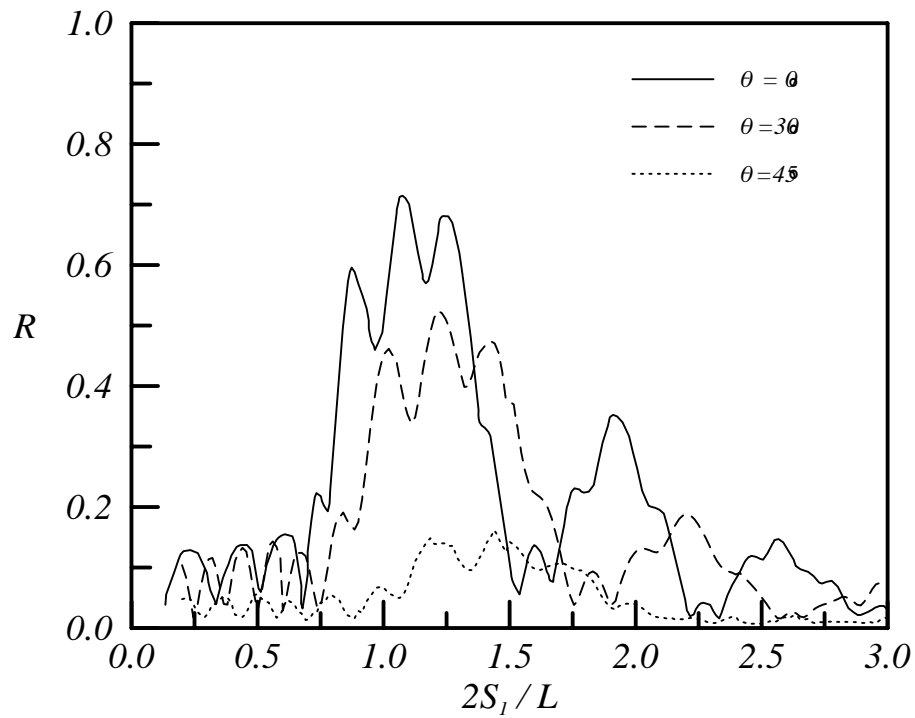


圖 5-10 不同波浪入射角度反射率  $R$  與  $2S_1 / L$  關係圖

$$(N = 8, D/h = 0.4, B/S_1 = 0.25, S_2/S_1 = 0.75)$$

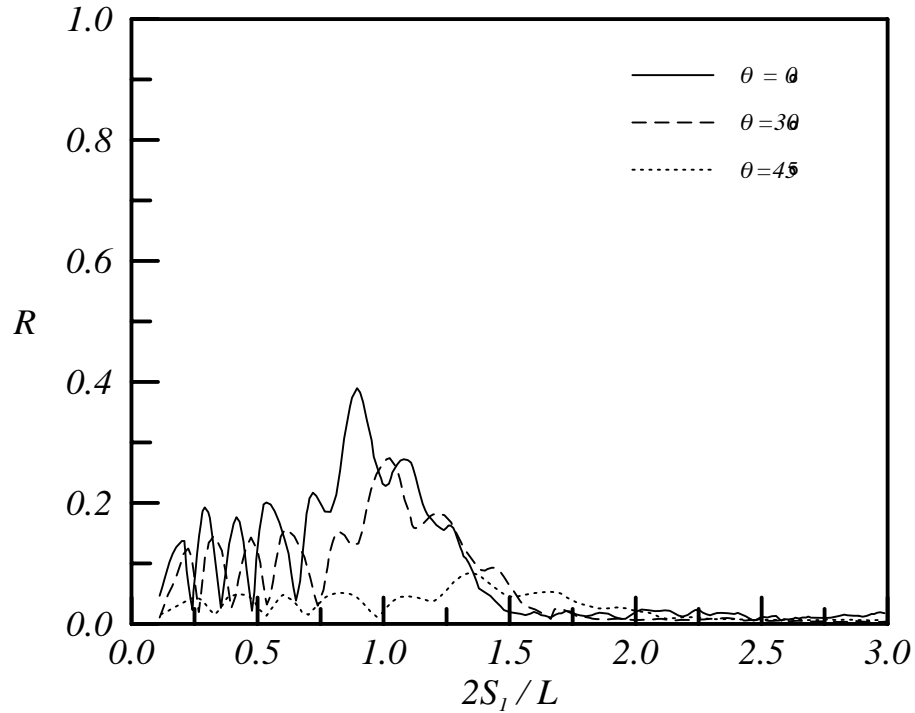


圖 5-11 不同波浪入射角度反射率  $R$  與  $2S_1/L$  關係圖  
( $N=8$  ,  $D/h=0.4$  ,  $B/S_1=0.5$  ,  $S_2/S_1=0.75$ )

## 5.2 平面系列潛堤

往昔對於布拉格反射研究，均假設在無波浪繞射情境下進行，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。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其發生布拉格反射現象。針對堤頭繞射效應平面二維系列潛堤佈置，進行各種潛堤佈置，包括相對堤長  $G/S$ 、底床坡度  $\tan \beta$  及相對堤高  $D/h$  等，探討布拉格反射及反射率與  $2S/L$  的變化情形。佈置條件為入射波水深  $h=45$  公分，堤高分別  $D=22.5$ 、 $15$  及  $11.25$  公分，潛堤個數  $N=4$ ，潛堤寬  $B=35$  公分，潛堤間距  $S=70$  公分，堤長為  $105$ 、 $70$  公分及無限長，底床坡度  $\tan \beta=0$  及  $1/20$ 。圖 5-12 為平面系列潛堤佈置示意圖，潛堤佈置及波浪條件如表 5-2 所示，茲將計算結果討論如下：

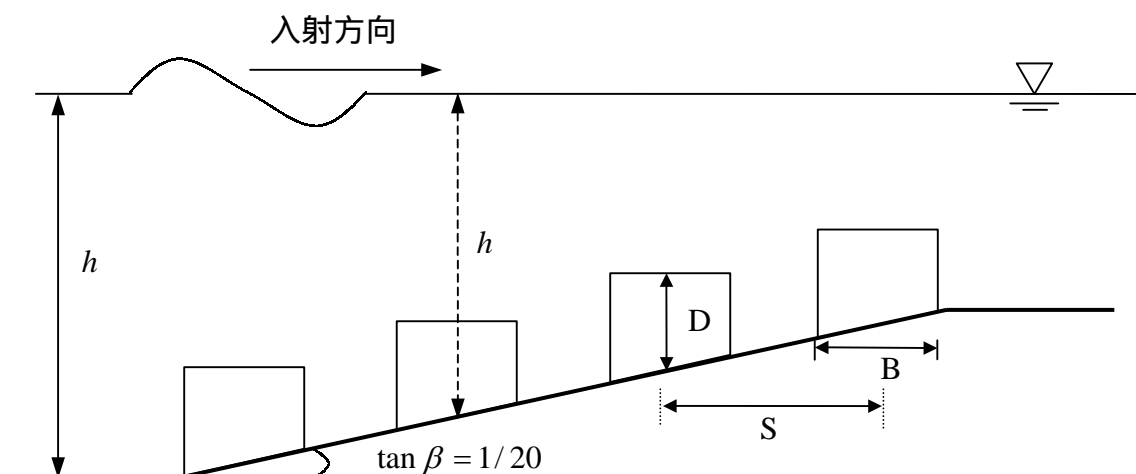


圖 5-12 平面系列潛堤各影響因子的物理意義示意圖

表 5-2 平面系列潛堤佈置及波浪條件表

潛堤 型式	堤數 ( $N$ )	堤矩 ( $S$ )	堤寬 ( $B$ )	堤高 ( $D$ )	堤長 ( $G$ )	底床 坡度 ( $\tan \beta$ )	水深 ( $h$ )	波浪條件	
								週期 ( $T$ )	波高 ( $H_i$ )
矩型	4	70 cm	35 cm	22.5 cm 15 11.25	70 cm 105 $\infty$	0 1/20	45 cm	0.60~3.42 sec	1.0 cm

### 5.2.1 堤長的影響

圖 5-13 圖 5-15 為水平底床上佈置堤長分別為  $G=120$  公分、400 公分及  $\infty$ ，相對水深為  $D/h=1/2$ ，潛堤個數  $N=4$ ，波浪入射條件為  $2S/L=0.75$ ，波高的平面分佈圖。在圖 5-13 中，佈置的堤長較小，波浪經兩端堤頭繞射進入潛堤配置區域，干擾原有反射機制，而使堤前的反射波減小。圖 5-14 顯示，佈置的較長的潛堤，波浪經兩端堤頭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，對整個潛堤佈置的布拉格反射機制影響不大，在堤前有明顯的波浪反射現象。當堤長延伸至無限長時，波浪不再受堤頭繞射影響反射機制，堤前有完整的布拉格反射現象，如圖 5-15 所示。



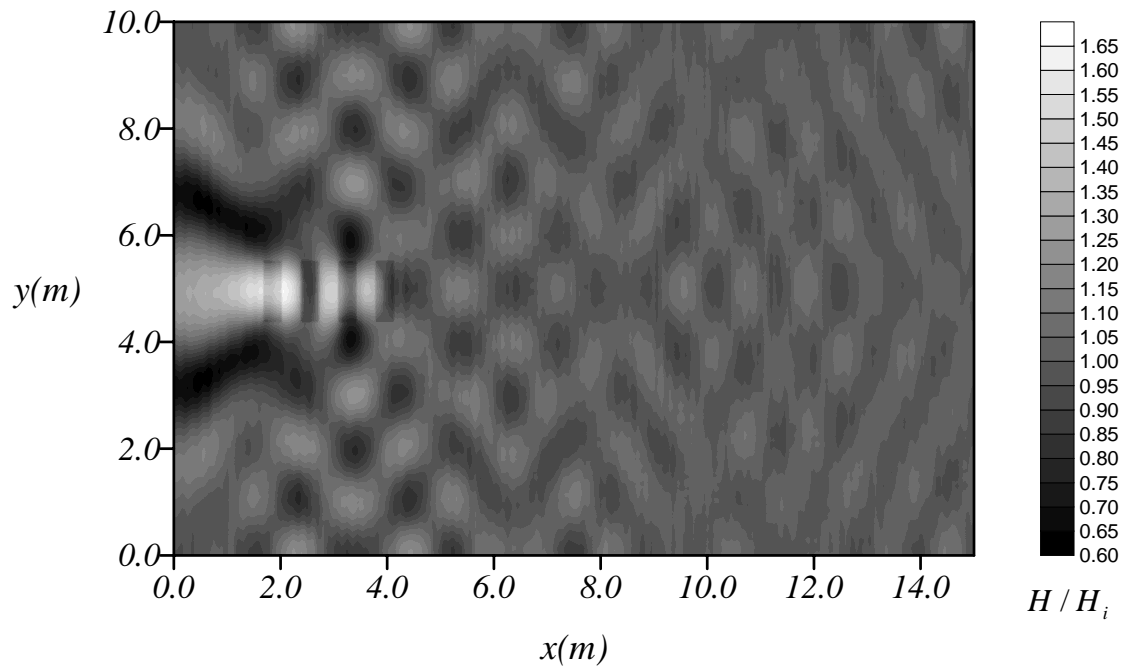


圖 5-13 波浪通過系列潛堤波高分佈圖  
 $(G/S = 1.7, D/h = 1/2, N = 4, 2S/L = 0.75)$

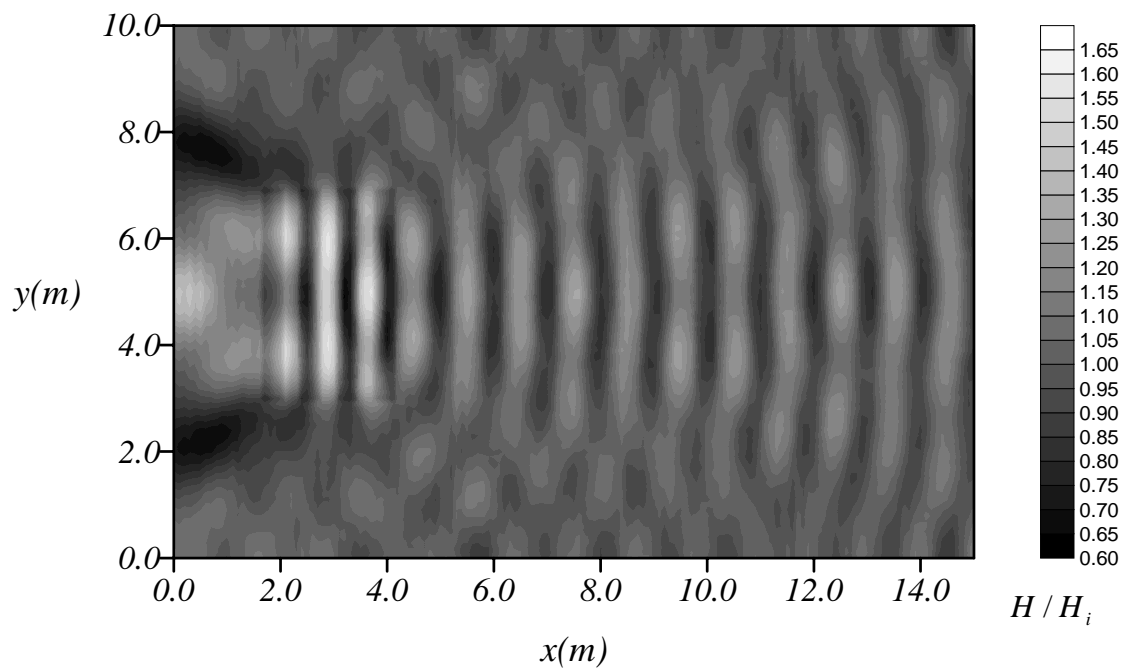


圖 5-14 波浪通過系列潛堤波高分佈圖  
 $(G/S = 4.7, D/h = 1/2, N = 4, 2S/L = 0.75)$

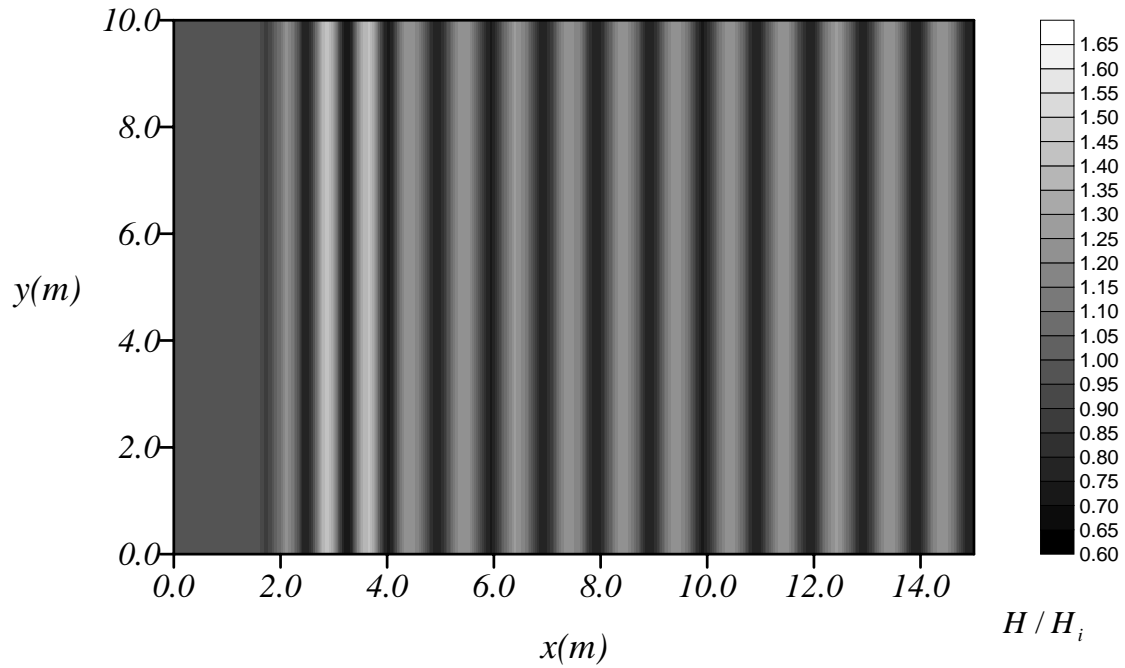


圖 5-15 波浪通過系列潛堤波高分佈圖

( $G/S = \infty$  ,  $D/h = 1/2$  ,  $N = 4$  ,  $2S/L = 0.75$ )

水平底床上佈置潛堤個數  $N = 4$  , 相對堤距  $B/S = 0.5$  , 相對水深為  $D/h = 1/2$  , 三種相對堤長  $G/S = 1.0$ 、 $1.5$  及  $\infty$  配置下, 反射率與  $2S/L$  的關係如圖 5-16。圖形顯示, 相對堤長愈大時, 主頻及次諧波布拉格反射愈明顯, 反射率尖峰值愈大, 且愈向長波浪週期  $2S/L$  較小處平移。主要因為潛堤愈長, 波浪在堤體間的反射機制愈完整, 所發生反射現象較明顯; 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。主頻布拉格反射尖峰值隨潛堤長度的減小而遞減的幅度, 則大於次諧波反射。其原因為主頻布拉格反射發生時, 較長週期的波浪不易減衰且較容易繞射進入潛堤區, 影響布拉格反射的機制。圖 5-17 為潛堤高度改變為  $D/h = 1/4$  , 其他維持相同佈置條件下, 計算結果反射率比較圖。堤高比較小條件下, 仍然可以清楚顯示主頻及次諧波布拉格反射隨潛堤長度的減小而減弱的趨勢。圖 5-18 及圖 5-19 為底床坡度  $\tan \beta = 1/20$  的反射率計算結果比較圖,

在斜坡底床佈置下，布拉格反射特性及反射率變化趨勢與圖 5-16 及圖 5-17 在水平底床佈置條件相似，堤長增加時，高諧波布拉格反射的平移現象特別明顯，而且反射率帶寬亦明顯增加。

綜合以上結果顯示，不論水平底床或斜坡底床佈置下，潛堤愈長，布拉格反射現象愈明顯，反射率尖峰值愈大，而且愈向  $2S/L$  較小處平移。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，影響幅度愈明顯

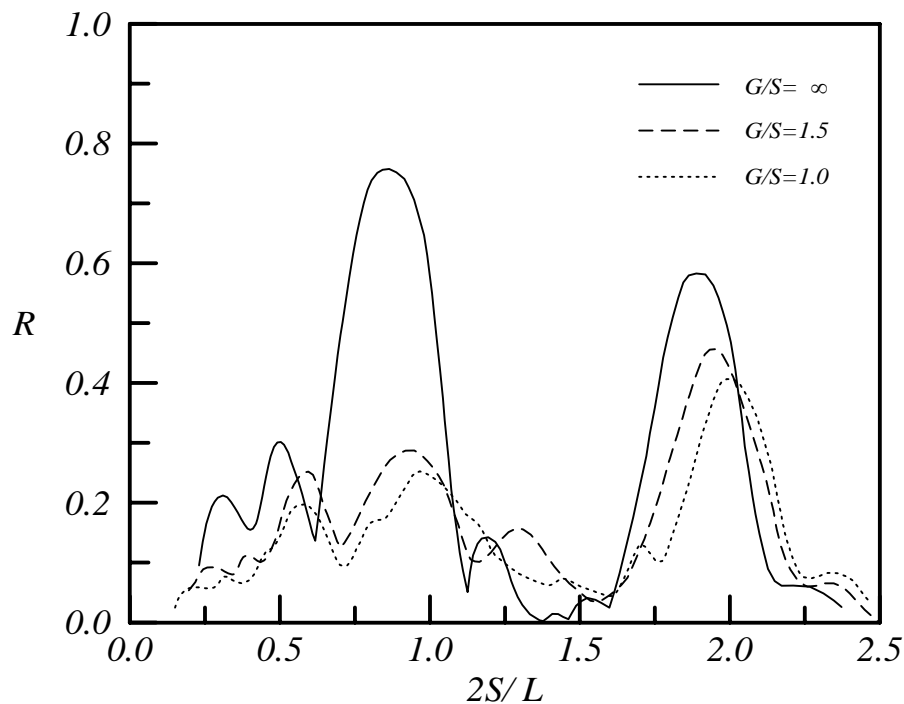


圖 5-16 不同潛堤堤長反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖

( $N = 4$  ,  $D/h = 1/2$  ,  $B/S = 0.5$  ,  $\tan \beta = 0$ )

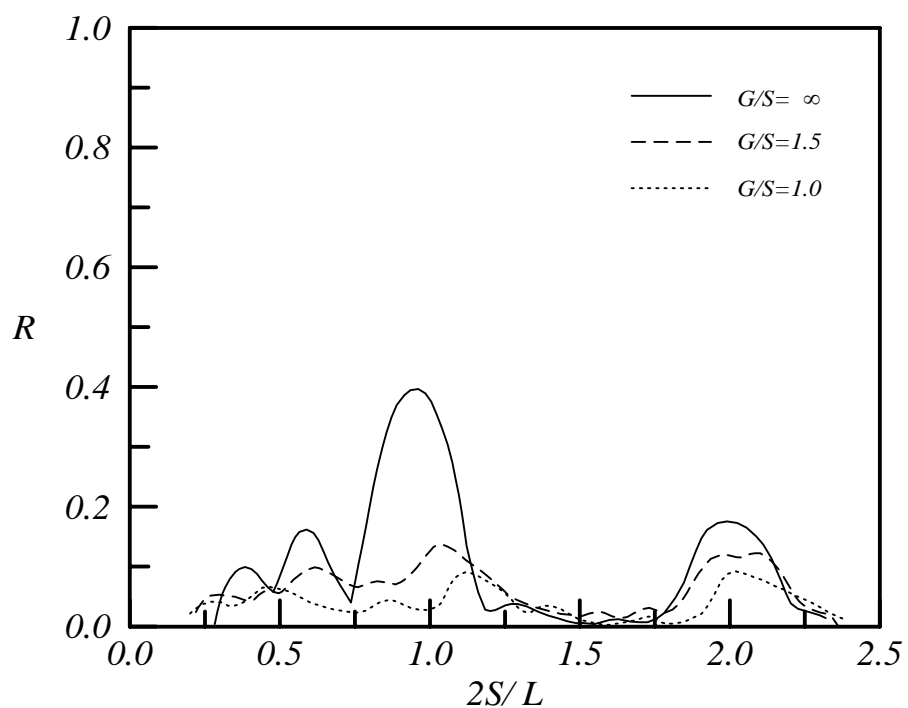


圖 5-17 不同潛堤堤長反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
( $N=4$  ,  $D/h=1/4$  ,  $B/S=0.5$  ,  $\tan \beta=0$ )

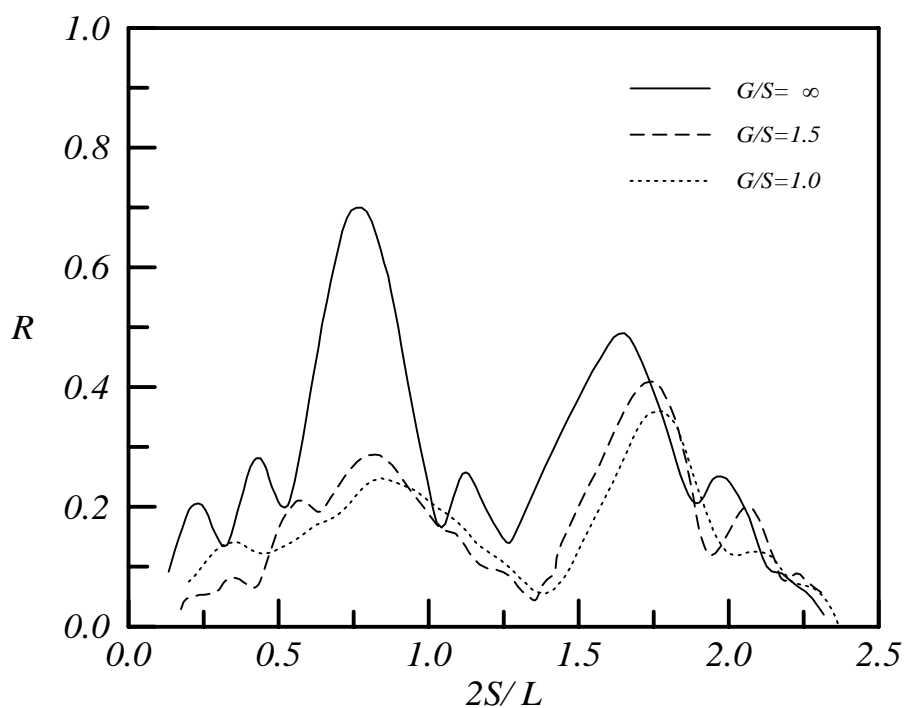


圖 5-18 不同潛堤堤長反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
( $N=4$  ,  $D/h=1/2$  ,  $B/S=0.5$  ,  $\tan \beta=1/20$ )

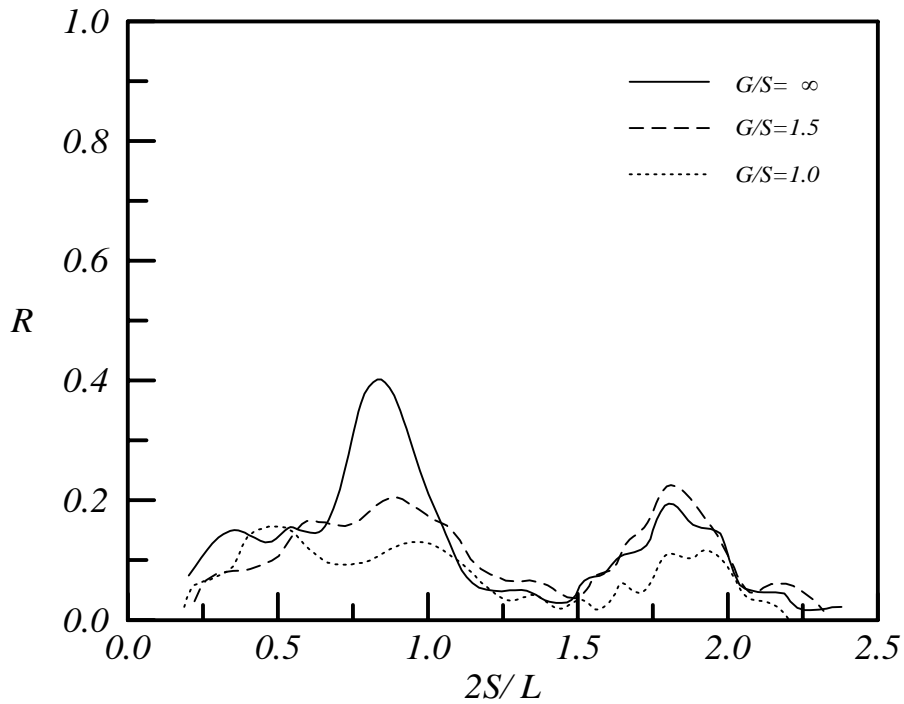


圖 5-19 不同潛堤堤長反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖

( $N = 4$  ,  $D/h = 1/4$  ,  $B/S = 0.5$  ,  $\tan \beta = 1/20$ )

### 5.2.2 不同底床坡度的影響

潛堤佈置在相同的  $N = 4$  ,  $B/S = 0.5$  ,  $D/h = 1/2$  , 相對堤長為  $G/S = \infty$ 、1.5 及 1.0 , 不同的底床坡度  $\tan \beta = 0$  及  $1/20$  佈置下 , 計算結果反射率  $R$  與  $2S/L$  的關係如圖 5-20 至圖 5-22 所示。當底床為斜坡 , 反射率尖峰值較小且向低頻條件平移 , 且高頻波浪時更為明顯。探究其原因為在相同入射水深及相對堤高條件下 , 斜坡底床上及潛堤堤頂的水深較平底床佈置情況下更小 , 影響波速及群波速度較大 , 使布拉格反射機制偏向較小頻率的波浪條件發生 , 反射率尖峰值向低頻條件平移。

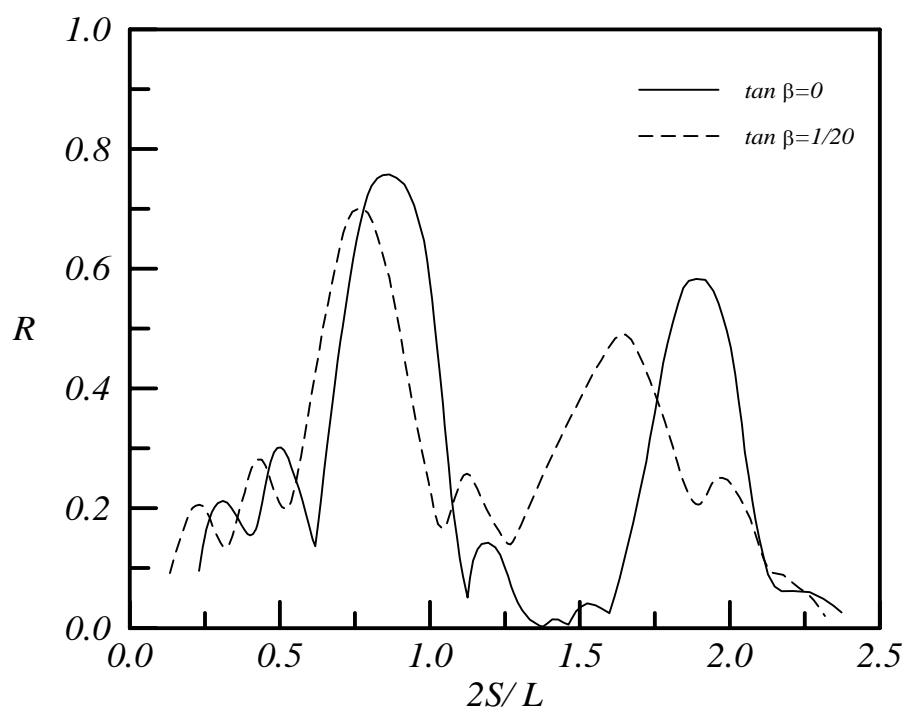


圖 5-20 不同底床坡度反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
( $D/h=1/2$  ,  $B/S=0.5$  ,  $G/S=\infty$ )

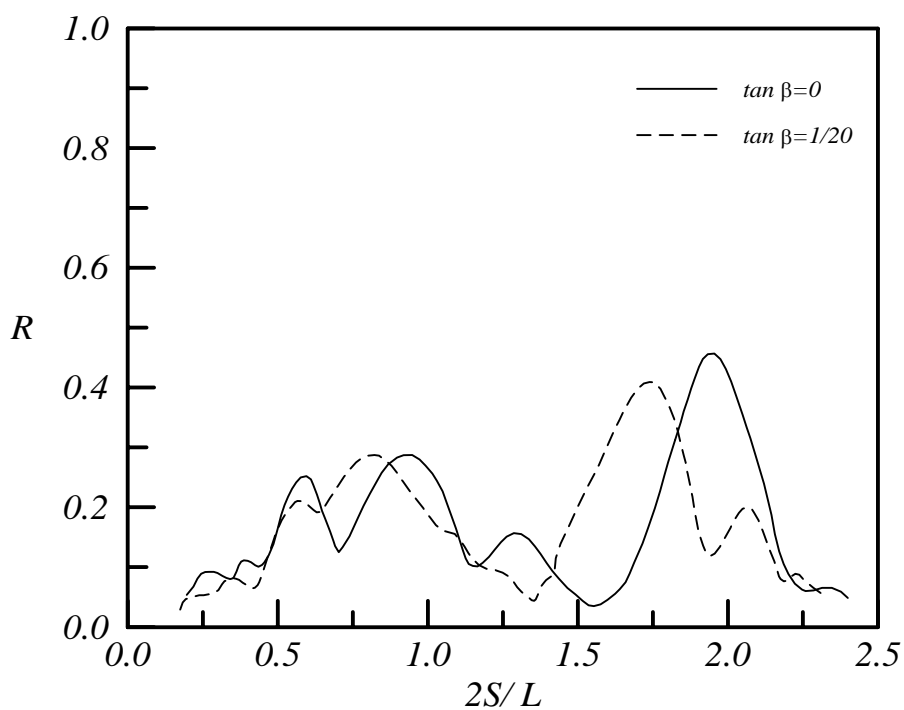


圖 5-21 不同底床坡度反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
( $D/h=1/2$  ,  $B/S=0.5$  ,  $G/S=1.5$ )

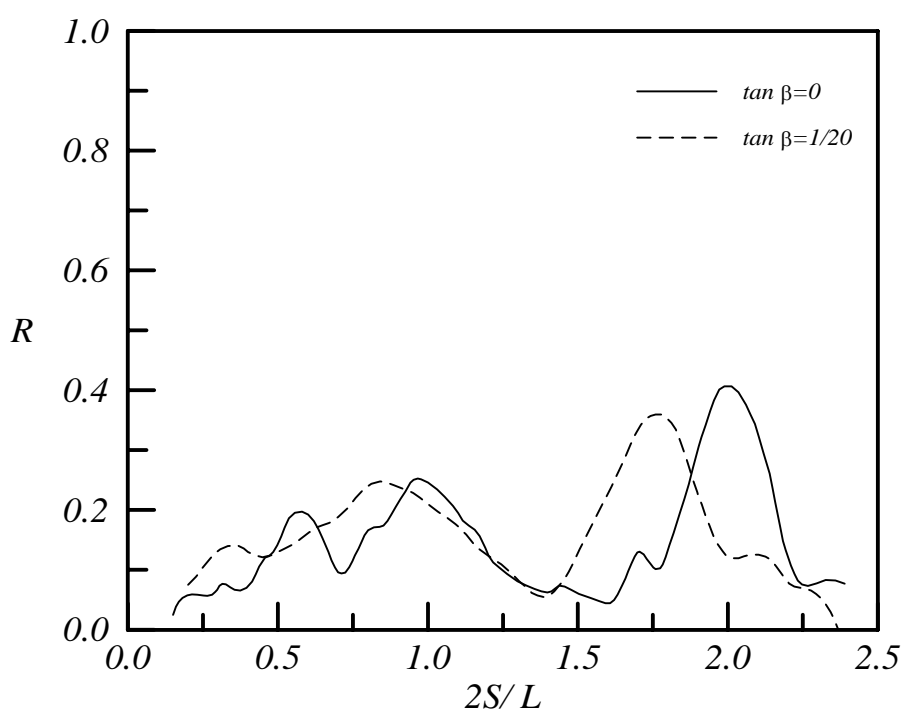


圖 5-22 不同底床坡度反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
( $D/h=1/2$  ,  $B/S=0.5$  ,  $G/S=1.0$ )

### 5.2.3 堤高的影響

圖 5-23 至 圖 5-25 為水平底床，在固定潛堤個數  $N=4$  及潛堤間距  $B/S=0.5$  情況下，潛堤堤長分別為  $G/S=1.0$ 、 $1.5$  及  $\infty$ ，相對堤高為  $D/h=1/2$ 、 $1/3$  及  $1/4$  數值計算結果反射率變化圖。當相對堤高  $D/h$  愈大時，整體反射率均增大，布拉格反射現象更明顯，且發生反射率尖峰值位置愈向低頻平移，反射率帶寬亦較寬。主要係因相對堤高  $D/h$  較大時，增加堤體對波浪互制作用，產生較大的反射波浪。

相同佈置條件，改採斜坡底床坡度  $\tan \beta = 1/20$  情況下，反射率  $R$  與波浪條件  $2S/L$  關係計算結果繪如圖 5-26 圖 5-28。斜坡底床反射率變化與水平底床下的趨勢相似，但在尖峰值的平移量，較水平底床明顯，尤其在次諧波布拉格反射更加明顯，因為入射波浪波形受斜坡底床影響，較水平底床更為顯著所致。

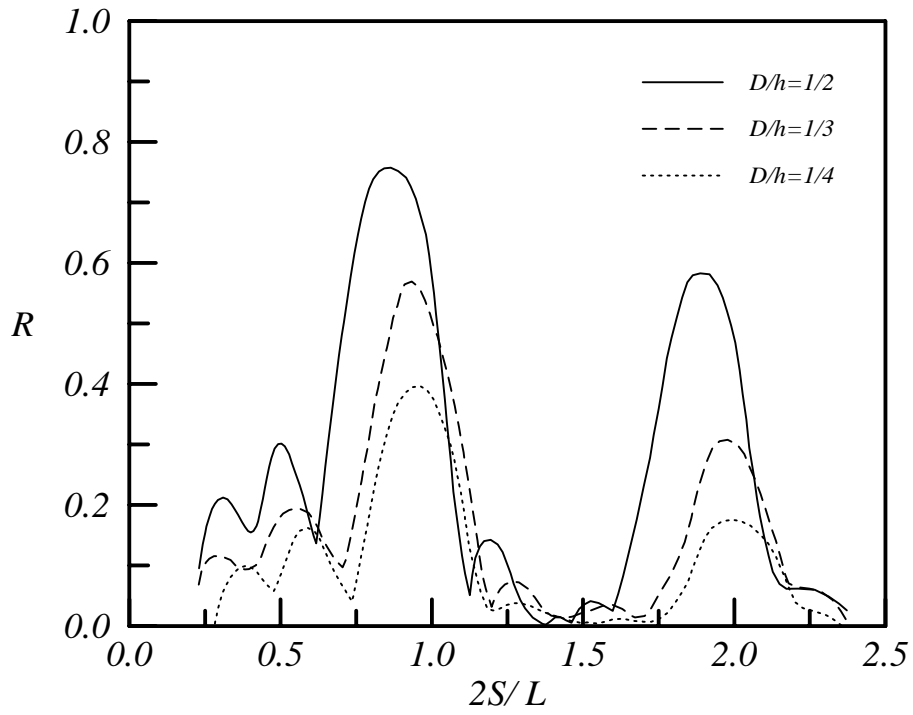


圖 5-23 不同堤高反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
 ( $B/S = 0.5$  ,  $G/S = \infty$  ,  $\tan \beta = 0$ )

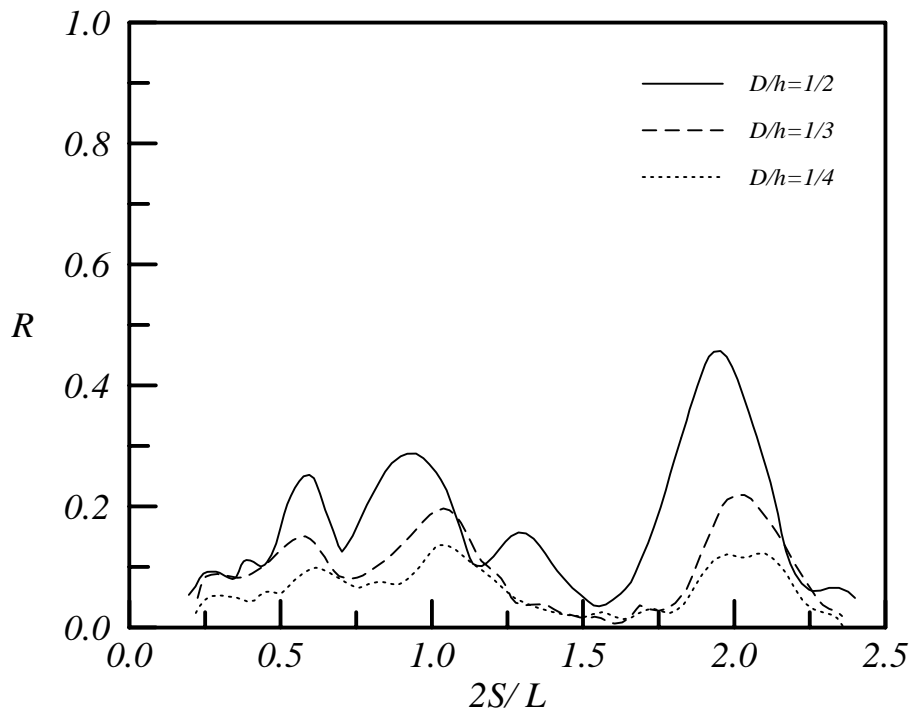


圖 5-24 不同堤高反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
 ( $B/S = 0.5$  ,  $G/S = 1.5$  ,  $\tan \beta = 0$ )



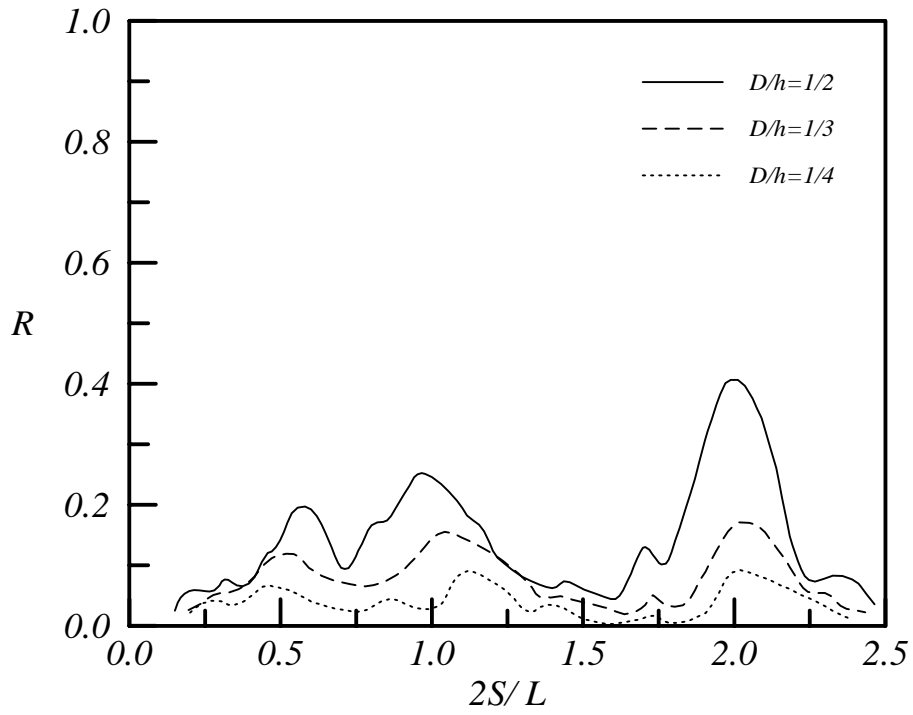


圖 5-25 不同堤高反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
( $B/S = 0.5$  ,  $G/S = 1.0$  ,  $\tan \beta = 0$ )

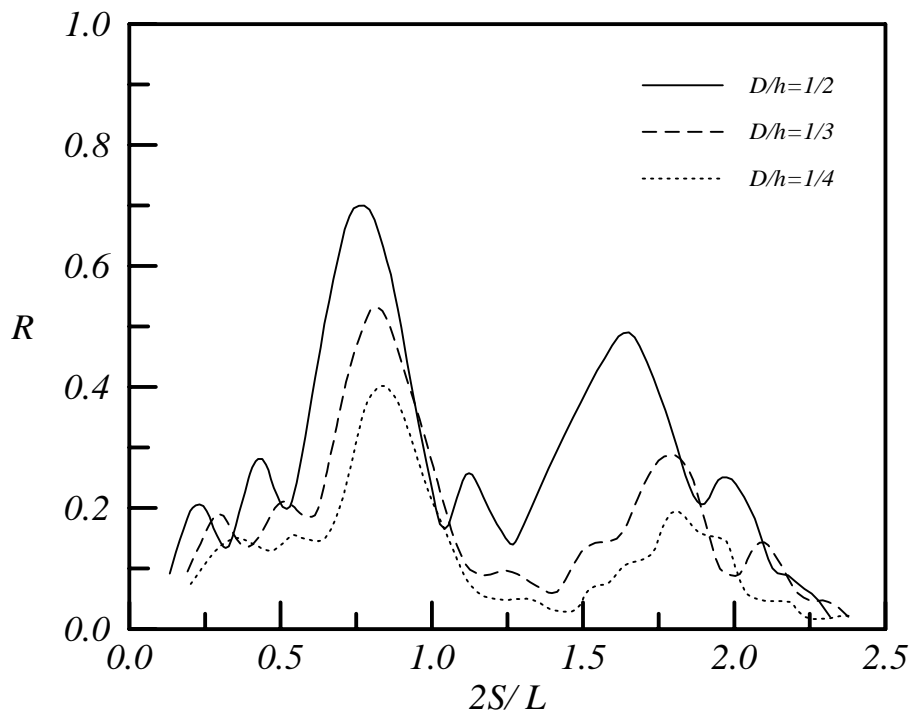


圖 5-26 不同堤高反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
( $B/S = 0.5$  ,  $G/S = \infty$  ,  $\tan \beta = 1/20$ )

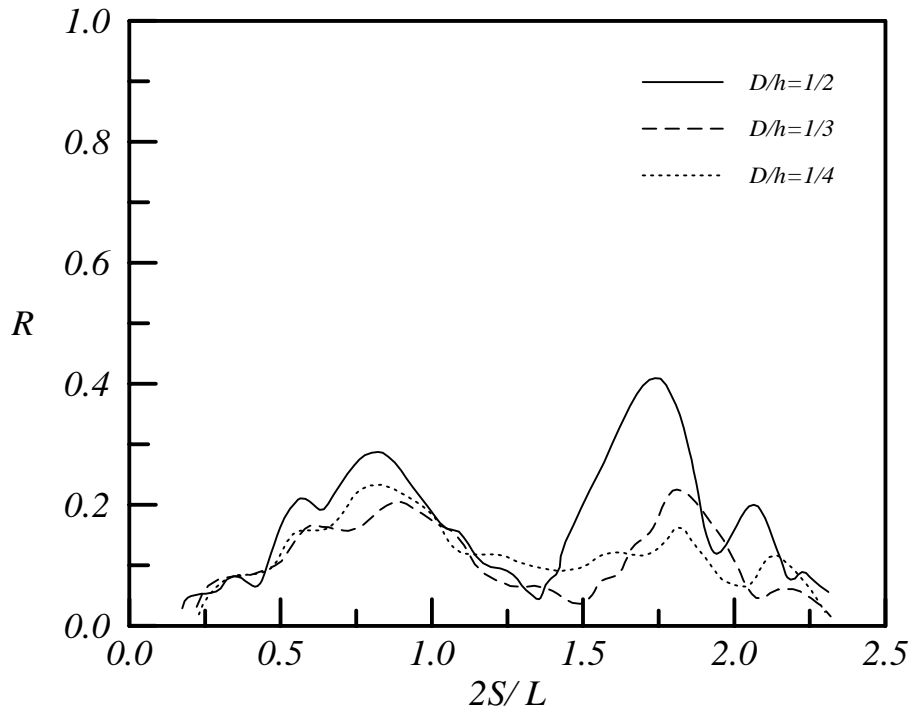


圖 5-27 不同堤高反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
( $B/S = 0.5$  ,  $G/S = 1.5$  ,  $\tan \beta = 1/20$ )

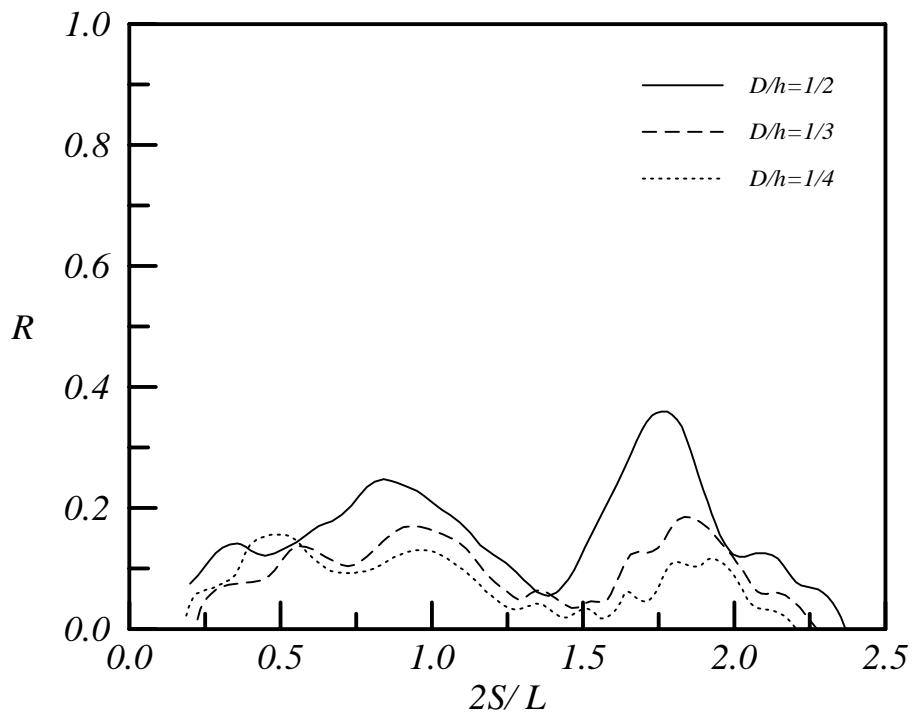


圖 5-28 不同堤高反射率  $R$  與  $2S/L$  關係圖  
( $B/S = 0.5$  ,  $G/S = 1.0$  ,  $\tan \beta = 1/20$ )

## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論

本研究分別進行水工試驗、理論解析及數值模式計算，探討不同系列潛堤在不同入射波浪條件下，各影響因子間與波浪反射率及布拉格共振之關係。綜合本文整個論述，獲得以下結論，並對未來研究提出建議：

1. 各模式在各種底床配置及水深條件下，計算結果與試驗值在反射率的分佈位置及布拉格反射的表現，均有很好的的一致性。本研究模式 (EEMSE) 考慮  $|\nabla_h h|^2$ 、 $\nabla_h^2 h$  及地形變化參數  $\delta$ ，驗證結果以本研究模式與試驗值的吻合度最高，尤其在較高的底床擾動頻率、較高的底床擾動振幅以及較小的水深條件下，更能顯示本研究模式的正確性。
2. Miles (1981) 理論計算值能表現不同佈置系列潛堤布拉格反射現象，但因忽略底床擾動所造成波速及群波波速影響，在相對堤高較大佈置情況下，反射率尖峰值及布拉格反射條件均產生偏差。因此，僅在相對堤高 ( $D/h$ ) 較小情況下適用。
3. 利用不等間距的複合式系列潛堤配置，雖然布拉格反射的尖峰值較等間距配置減小少許，在布拉格反射發生的反射率帶寬有明顯增加的功用，亦即可增加防禦波浪條件範圍。以適當的複合式系列潛堤佈置，除發生主頻布拉格反射，亦在其他波浪條件下發生高諧波布拉格反射。
4. 當潛堤個數  $N$  增加時，主頻布拉格反射尖峰值增大，以適當的複合式系列潛堤佈置，可以使主頻布拉格反射之反射率帶寬隨潛堤個數  $N$  增加而增大。

5. 潛堤高度增加，主頻及高諧波布拉格反射尖峰質變大，且反射率帶寬亦明顯增加，反射率尖峰值在  $2S_1/L$  分佈上，向較小  $2S_1/L$  平移的現象更加明顯。
6. 潛堤間距愈大，波浪通過複合式系列潛堤可得到較大的反射率及較大的反射率帶寬，且高諧波的布拉格反射現象明顯。利用較小的  $B/S_1$  潛堤佈置可防禦較多週期的波浪條件，亦即在海岸保護上能適用較多海象條件。
7. 波浪斜向入射系列潛堤，入射角度愈大，布拉格反射尖峰值向高頻處平移，而且反射率尖峰值明顯遞減。入射角度為  $\theta = 45^\circ$  時，已無法表現明顯的布拉格反射現象。
8. 在平面等間距系列潛堤配置下，波浪於堤前的反射率隨潛堤長度的增加而增大。反射率變化在水平底床與斜坡底床具相同的分佈趨勢，反射尖峰值的位移量則以斜坡底床較為明顯，當入射波浪為高頻條件時愈為明顯。
9. 在等間距系列潛堤配置下，相對堤高愈大則反射率愈大，平面與斷面的佈置具相同的趨勢，但以斷面配置反射率值較高。潛堤在有限長度佈置下，在水平底床相對堤高的改變，反射率尖峰值位移較不顯著，但在斜坡底床佈置下，相對堤高愈大，反射率尖峰值的位移量較明顯。

## 6.2 建議

1. 本研究在波浪通過複合式系列潛堤的布拉格反射效應，底床佈置條件是採兩組不同堤距來探討反射率的變化情形，可嘗試以漸變式潛堤間距加以討論，或者更加複雜性的間距組合，找出其布拉格反射

之機制以供參考。本研究主要探討複合式系列潛堤在水平底床上布拉格反射的變化情形，但實際的海岸並非等水深的地形，可進一步探討波浪通過置於斜坡底床上的複合式系列潛堤之布拉格反射效應。

2. 本研究並未分析試驗數據以及數值計算的透射率，若欲更深入了解複合式系列潛堤對海岸防禦的效果，可針對透射率進行討論。
3. 理論及數值模式與水工模型試驗結果均能驗證布拉格反射效應，對海岸保護具有正面效果，但水工試驗受模型縮尺影響，究竟系列潛堤配置能否應用於實際海岸保護，建議未來能進行原型試驗選擇適當海岸地形，根據數值計算及所得最佳潛堤系列佈置建造後，再進行現場量測試驗，以探討潛堤系列對海岸保護功效。
4. 本研究數值模式採用線性波浪理論忽略波浪非線性效應；水工模型試驗佈置之系列潛堤均為矩形，且為不透水，光滑表面堤體，不符合實際海岸潛堤條件，因此建議未來研究除應考量波浪非線性效應外，堤體則應改為梯形透水潛堤及沙質底床。

## 參考文獻

- [1] Berkhoff, J.C.W. (1972), Computation of Combined Refraction-Diffraction. *Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Vancouver, 1: 705-720.
- [2] Bailard, J.A., J. Deveries, J.M. Kirby, and R.T. Guza, (1990), Bragg Reflection Breakwater : A New Shore Protection Method. *Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 1702-1715.
- [3] Bailard, J. A., J.W. DeVries, and J.T. Kirby, (1992), Considerations in using Bragg reflection for storm erosion protection, *J. Waterway Port Coastal Ocean Eng.* 118(1): 63-74.
- [4] Belzons, M., V. Rey, and E. Guazzelli, (1991), Subharmonic Bragg resonance for surface water waves, *Europhysics Letters*. 16, 2: 189-194.
- [5] Chamberlain, P.G. and D. Potter, (1995), The Modified Mild-slope Equation. *Journal of Fluid Mechanics*, 291: 393-407.
- [6] Cho, Y. S. and C. Lee, (2000), Resonant reflection of waves over sinusoidally varying topographies, *J. Coastal Research*. 16(3): 870-876.
- [7] Davies, A.G. and A.D. Heathershaw, (1984), Surface Wave Propagation over Sinusoidally Varying Topography. *Journal of Fluid Mechanics*, 144: 419-443.
- [8] Davies, A. G., E. Guazzelli, and M. Belzons, (1989), The Propagation of Long Waves over an Undulating Bed. *Physics of Fluids*, 1: 1331-1340.
- [9] Dean, R.G. and R.A. Dalrymple, (1984), Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. *Prentice-Hall, Inc., New Jersey*: 56-60.
- [10] Guazzelli, E., V. Rey, and M. Belzons, (1992), Higher-Order Bragg Reflection of Gravity Surface Waves by Periodic Beds. *Journal of Fluid Mechanics*, 245: 301-317.

- [11] Hsu, T.W. and C.C. Wen, (2001), A Parabolic Equation Extended to Account for Rapidly Varying Topography. *Ocean Engineering*, 28: 1479-1498.
- [12] Hsu T.W., H.K., Chang, and L.H., Tsai, (2001), Experiment on Bragg Reflection on Wave by Difference Type of Artificial Bar. *Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition*, 601-606.
- [13] Hsu, T.W., H.K. Chang, and L.H. Tsai, (2002a), Experiment on Bragg Reflection on Wave by Difference Type of Artificial Bar. *China Ocean Engineering*, 16, 3: 343-358.
- [14] Hsu, T.W., L.H. Tsai, and Y.T. Huang, (2002b), Bragg Scattering of Water Waves by Multiply Composite Artificial Bars. *Coastal Engineering Journal*, Submitted.
- [15] Kirby, J.T., (1986), A General Wave Equation for Wave over Rippled Beds. *Journal Fluid Mechanics*, 162: 171-186.
- [16] Kirby, J.T. and J.P. Anton, (1990), Bragg Reflection of Waves by Artificial Bars. *Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 757-768.
- [17] Li, B., (1994), An Evolution Equation for Water Waves. *Coastal Engineering*, 23: 227-242.
- [18] Massel, S.R., (1993), Extended Refraction-Diffraction Equation for Surface Waves, *Coastal Engineering*, 19: 97-126.
- [19] Mattioli, F., (1991), Resonant reflection of surface waves by non-sinusoidal bottom undulations, *Applied Ocean Research*, 13: 43-53.
- [20] Mei, C. C., (1985), Resonant Reflection of Surface Water Waves by Periodic Sandbars. *J. Fluid Mech*, 152: 315-335.

- [21] Mei, C. C., T. Hara, and M. Naciri, (1988), Note on Bragg Scattering of Water Waves by Parallel Bars on the Seabed, *J. Fluid Mech.* 186: 147-162.
- [22] Miles, J.W., (1981), Oblique Surface-wave Diffraction by a Cylindrical Obstacle. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 6: 121-123.
- [23] O'Hare, T. J. and A. G. Davies, (1993), A Comparison of Two Models for Surface-wave Propagation over Rapidly Topography, *Applied Ocean Research*. 15: 1-11.
- [24] Potter, D. and D.J. Staziker, (1995), Extensions of the Mild-slope Equation. *Journal of Fluid Mechanics*, 300: 367-382.
- [25] Radder, A.C., (1979), On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation. *Journal of Fluid Mechanics*, 95(1): 159-176.
- [26] Sommerfeld, A., (1964), Mechanics of Deformable Bodies. Vol. 2 of Lectures on Theoretical Physics, Academic Press, New York.
- [27] Suh K.D., C. Lee and W.S. Park, (1997), Time-dependent Equations for Wave Propagation on Rapidly Varying Topography. *Coastal Engineering*, 32: 91-117.
- [28] Zhang. L, M.H. Kim, J. Zhang and B.L. Edge, (1999), Hybrid Model for Bragg Scattering of Water Waves by Steep Multiply-sinusoidal Bars. *Journal of Coastal Research*, 15(2): 486-495.
- [29] 陳陽益、湯麟武 (1990) , 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 , 270-205。
- [30] 陳陽益 (1991a) , 波形底床上規則重力波之解析(2) , 港灣技術第六期 , 55-83。
- [31] 陳陽益 (1991b) , 自由表面規則前進重力波傳遞於波形底床上反射現象 , 第十五屆全國力學會議論文集 , 台灣台南 , 289-296。



- [32] 陳陽益 (1992), 規則前進重力波傳遞於波形底床上, 港灣技術第七期, 17-47。
- [33] 張憲國、許泰文、李逸信 (1997), 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, 242-249。
- [34] 李逸信 (1997), 波浪通過人工沙洲之試驗研究, 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
- [35] 岳景雲、曹登皓、陳丙奇 (1998), 波浪斜向入射正方形複列潛堤反射率之研究, 第二十屆海洋工程研討會論文集, 台灣基隆, 265-272。
- [36] 岳景雲、曹登皓、江天授、李厚慶 (1999), 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, 191-197。
- [37] 郭金棟、陳文俊、陳國書 (1999), 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, 307-313。
- [38] 岳景雲、曹登皓、翁文凱 (2000), 浪通過不透水雙列潛堤之研究, 2000 年兩岸港口及海岸開發研討會論文集, 台灣新竹, 112-118。
- [39] 張憲國 (2000), 斜坡上入反射波的推估方法, 2000 兩岸港口及海岸開發研討會論文集, 台灣新竹, 39-44。

## 附錄 A 等間距系列潛堤之反射率

若人工沙洲的底床擾變量  $\delta(x)$  為已知，可以由式 (2-29) 富立葉級數方式或直接由式(2-25) 積分方式求得反射率值。本研究利用 Miles 理論以直接積分方式，推導波浪通過等間距半餘弦(Rectified cosine)形、三角形和矩形型式的系列潛堤反射率，三種型式等間距系列潛堤佈置示意圖如圖 A-1 所示。

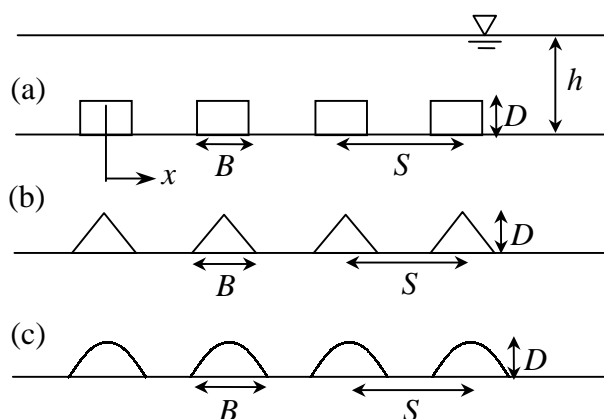


圖 A-1 不同形狀等間距潛堤示意圖

圖中  $D$  潛堤高度， $S$  為潛堤間距， $B$  為潛堤寬度。若潛堤個數為  $N$  個，則三種形狀系列潛堤底床高度變化函數表示式如下：

矩形型式:

$$\delta(x) = \begin{cases} D, & nS \leq x \leq nS + B, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A-1})$$

三角形型式:

$$\delta(x) = \begin{cases} \frac{2D}{B}(x - nS), & nS \leq x \leq nS + \frac{B}{2}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ -\frac{2D}{B}(x - B - nS), & nS + \frac{B}{2} \leq x \leq nS + B, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A-2})$$

半餘弦形型式:

$$\delta(x) = \begin{cases} D \cos \left[ -\frac{\pi}{B} \left( x - \frac{B}{2} - nS \right) \right], & nS \leq x \leq nS + B, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A-3})$$

將以上三種型式系列潛堤的底床變化函數代入式(2-25) 積分求得反射率，推算過程及結果如下：

等間距矩形系列潛堤型式：

$$\begin{aligned} R &= -2ik\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) e^{2ikx} dx \\ &= -2ik\alpha D \left[ \int_0^B e^{2ikx} dx + \int_S^{B+S} e^{2ikx} dx + \dots + \int_{(N-1)S}^{B+(N-1)S} e^{2ikx} dx \right] \\ &= -\alpha D \left\{ \left( e^{2ikB} - 1 \right) + \left[ e^{2ik(B+S)} - e^{2ik(S)} \right] + \dots + \left[ e^{2ik[B+(N-1)S]} - e^{2ik(N-1)S} \right] \right\} \\ &= -\alpha D \left\{ \left( e^{2ikB} - 1 \right) \left[ 1 + e^{2ik(S)} + e^{2ik(2S)} + \dots + e^{2ik(N-1)S} \right] \right\} \\ &= -\alpha D \left( e^{2ikB} - 1 \right) \sum_{n=0}^{N-1} e^{2iknS} \\ &= -\alpha D \left( e^{2ikB} - 1 \right) \frac{1 - e^{2ikSN}}{1 - e^{2ikS}} \\ &= -\alpha D \left( e^{2ikB} - 1 \right) \frac{\sin kSN}{\sin kS} e^{ikS(N-1)} \\ &= -\alpha D e^{ikB} 2i \sin kB \frac{\sin kSN}{\sin kS} e^{ikS(N-1)} \\ &= -2i\alpha D \frac{\sin kB \sin kSN}{\sin kS} e^{ik[B+S(N-1)]} \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

式(A-4)取絕對值則波浪通過等間距矩形系列潛堤反射率為

$$R = \left| \frac{2\alpha D \sin kB \sin kSN}{\sin kS} \right| \quad (\text{A-5})$$

等間距三角形系列潛堤型式：

$$\begin{aligned}
R &= -2ik\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) e^{2ikx} dx \\
&= -2ik\alpha \left\{ \int_0^{\frac{B}{2}} \frac{2D}{B} x e^{2ikx} dx + \int_S^{S+\frac{B}{2}} \frac{2D}{B} (x-S) e^{2ikx} dx \right. \\
&\quad + \int_{2S}^{2S+\frac{B}{2}} \frac{2D}{B} (x-2S) e^{2ikx} dx + \dots - \int_{\frac{B}{2}}^B \frac{2D}{B} (x-B) e^{2ikx} dx \\
&\quad \left. - \int_{S+\frac{B}{2}}^{S+B} \frac{2D}{B} (x-B-S) e^{2ikx} dx - \int_{2S+\frac{B}{2}}^{2S+B} \frac{2D}{B} (x-B-S) e^{2ikx} dx \dots \right\} \\
&= -\frac{4ik\alpha D}{B} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \frac{B}{4ik} e^{ik(B+2nS)} - \left( \frac{1}{2ik} \right)^2 e^{2iknS} (e^{ikB} - 1) \right] \right. \\
&\quad \left. - \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \frac{B}{4ik} e^{ik(B+2nS)} - \left( \frac{1}{2ik} \right)^2 e^{2iknS} (e^{2ikB} - e^{ikB}) \right] \right\} \\
&= -\frac{4ik\alpha D}{B} \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \left( \frac{1}{2ik} \right)^2 e^{2iknS} (e^{2ikB} - 2e^{ikB} + 1) \right] \\
&= \frac{-\alpha D}{ikB} (e^{ikB} - 1)^2 \sum_{n=0}^{N-1} e^{2iknS} \\
&= \frac{-\alpha D}{ikB} e^{ikB} (2\cos kB - 2) \sum_{n=0}^{N-1} e^{2iknS} \\
&= \frac{\alpha D}{ikB} e^{ikB} (2 - 2\cos kB) \frac{1 - e^{2ikSN}}{1 - e^{2ikS}} \\
&= -\frac{2i\alpha D}{kB} e^{ikB} (1 - \cos kB) \frac{\sin kSN}{\sin kS} e^{ikS(N-1)} \tag{A-6} \\
&= -\frac{2i\alpha D}{kB} (1 - \cos kB) \frac{\sin kSN}{\sin kS} e^{ik[B+S(N-1)]}
\end{aligned}$$

式(A-6)取絕對值則波浪通過等間距三角形系列潛堤反射率為

$$R = \left| \frac{2\alpha D (1 - \cos kB) \sin kSN}{kB \sin kS} \right| \tag{A-7}$$

等間距半餘弦形系列潛堤型式：

$$\begin{aligned}
 R &= -2ik\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) e^{2ikx} dx \\
 &= -2ik\alpha \left\{ \int_0^B D \cos \left[ \frac{-\pi}{B} \left( x - \frac{B}{2} \right) \right] e^{2ikx} dx + \int_S^{S+B} D \cos \left[ \frac{-\pi}{B} \left( x - \frac{B}{2} - S \right) \right] e^{2ikx} dx \right. \\
 &\quad \left. + \dots + \int_{(N-1)S}^{(N-1)S+B} D \cos \left[ \frac{-\pi}{B} \left( x - \frac{B}{2} - (N-1)S \right) \right] e^{2ikx} dx \right\} \\
 &= -2ik\alpha D \left[ \frac{\frac{\pi}{B}(e^{2ikB} + 1)}{\left(\frac{\pi}{B}\right)^2 - 4k^2} + \frac{\frac{\pi}{B}e^{2ikS}(e^{2ikB} + 1)}{\left(\frac{\pi}{B}\right)^2 - 4k^2} + \dots + \frac{\frac{\pi}{B}e^{2ik(N-1)S}(e^{2ikB} + 1)}{\left(\frac{\pi}{B}\right)^2 - 4k^2} \right] \\
 &= -2ik\alpha D \frac{\frac{\pi}{B}(e^{2ikB} + 1)}{\left(\frac{\pi}{B}\right)^2 - 4k^2} \sum_{n=0}^{N-1} e^{2iknS} \\
 &= -2ik\alpha D \frac{\frac{\pi}{B}e^{ikB}(2\cos kB)}{\left(\frac{\pi}{B}\right)^2 - 4k^2} \frac{1 - e^{2ikSN}}{1 - e^{2ikS}} \\
 &= -4ik\alpha D \frac{\pi \cos kB}{B \left[ \left(\frac{\pi}{B}\right)^2 - 4k^2 \right] \sin kS} e^{ik[B+S(N-1)]}
 \end{aligned}$$

(A-8)

式(A-8)取絕對值則波浪通過等間距半餘弦形系列潛堤反射率為

$$R = \begin{cases} \left| \frac{4\pi k \alpha D \cos k B \sin k S N}{B \left[ \left( \frac{\pi}{B} \right)^2 - 4k^2 \right] \sin k S} \right|, & \frac{\pi}{B} \neq 2k \\ \left| \frac{k \alpha D B \sin k S N}{\sin k S} \right|, & \frac{\pi}{B} = 2k \end{cases} \quad (\text{A-9})$$

## 附錄 B 反射率計算公式

反射率計算方法，皆有其限制的條件，為考量本研究在試驗以及數值模擬反射率計算的便利性，以張（2000）所提出斜坡上反射率的計算公式為基礎，進而推導至波浪斜向入射下，不等間距的波高計配置的反射率公式。採用不等間距主要目的係為避免試驗與數值計算時，受反射率公式限制，而必須更換波高計位置。本研究試驗時波高計均設置三支以上，可得多組反射率運算的組合，確保資料的可靠度。反射率公式推導過程概述如下。

波浪斜向入射之斷面座標系統與波高計配置各參數示意圖，如圖 B-1，平面系統座標示意圖，如圖 B-2，波浪由外海向近岸傳遞，所對應的座標系統為  $x$  軸離岸為正， $z$  軸向上為正， $y$  軸為平行岸線。入射波浪向負  $x$  方向傳遞，而反射波浪向正  $x$  方向傳遞，空間上設定三個位置量測水位的變化如圖 B-1 所示。

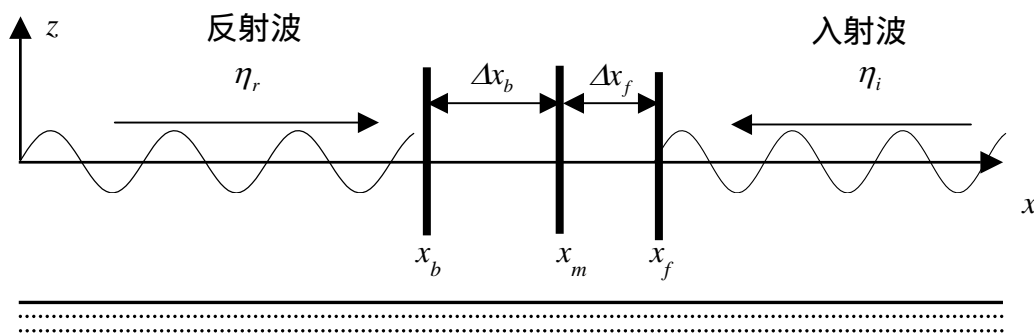


圖 B-1 波浪斜向入射斷面座標系統示意圖

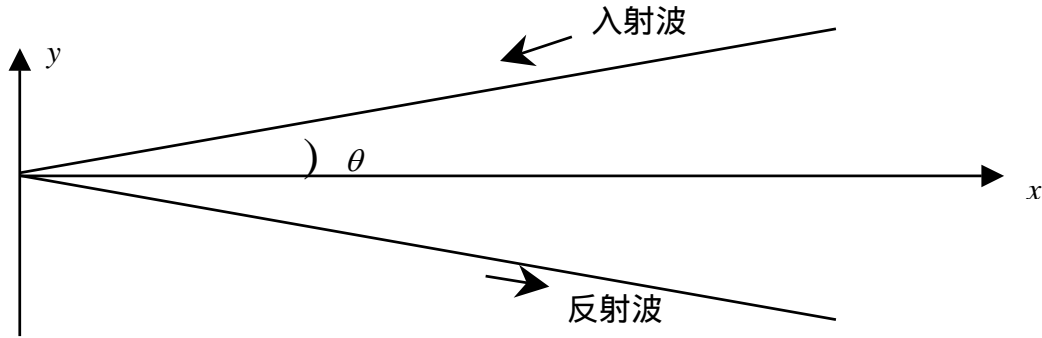


圖 B-2 波浪斜向入射平面座標系統示意圖

波浪斜向入射，若僅考慮線性規則波，其任意位置的水位變化  $\eta$  可表示為

$$\begin{aligned}
 \eta(x,t) &= \eta_i + \eta_r \\
 &= a_i \cos(k \cos \theta x + k \sin \theta y + \omega t + \varepsilon_i) + a_r \cos(k \cos \theta x + k \sin \theta y - \omega t + \varepsilon_i + \varepsilon_r) \\
 &= a_i \{ [\cos(k \cos \theta x + k \sin \theta y + \varepsilon_i) + R \cos(k \cos \theta x + k \sin \theta y + \varepsilon_i + \varepsilon_r)] \cos \omega t \\
 &\quad + [-\sin(k \cos \theta x - k \sin \theta y + \varepsilon_i) + R \cos(k \cos \theta x + k \sin \theta y + \varepsilon_i + \varepsilon_r)] \sin \omega t \}
 \end{aligned} \tag{B-1}$$

式(B-1)中  $\eta_i$  為入射波水位變化， $\eta_r$  為反射波水位變化， $a_i$  為入射波在  $x$  處的振幅， $a_r$  為反射波在  $x$  處的振幅， $k$  為表面波週波數， $R = a_r / a_i$  為波浪的反射率， $\varepsilon_i$  為座標原點與入射波峰的位相差， $\varepsilon_r$  為入、反射波的位相差， $\omega$  為波浪角頻率， $t$  為時間， $\theta$  為波浪的波向角。依據式(B-1)可假設在  $x$  位置處的水位振幅為

$$|\eta| = a_i [1 + R^2 + 2R \cos(2k \cos \theta x + 2\varepsilon_i + \varepsilon_r)]^{1/2} \tag{B-2}$$

圖 B-1 中，在  $x_b$  處，空間的位相函數為

$$k \cos \theta x_b = X_m - k \cos \theta \Delta x_b \tag{B-3}$$

在  $x_f$  處，空間的位相函數為

$$k \cos \theta x_f = X_m + k \cos \theta \Delta x_f \tag{B-4}$$



式(B-3)及式(B-4)中  $k \cos \theta$  為週波數  $k$  在  $x$  軸方向之分量，等號右邊第一項表示波浪斜向入射時， $x$  軸方向的累積空間位相，而第二項為  $x$  軸方向的  $x_m$  與  $x_b$  點及  $x_f$  點空間位相差。

在  $x_b$ 、 $x_m$  及  $x_f$  處的水位振幅則可由模式計算及試驗數據求得，其數學表示式分別如下所示：

$$|\eta|_b = a_i [1 + R^2 + 2R \cos(\theta_m - \theta_b)]^{1/2} \quad (\text{B-5})$$

$$|\eta|_m = a_i [1 + R^2 + 2R \cos \theta_m]^{1/2} \quad (\text{B-6})$$

$$|\eta|_f = a_i [1 + R^2 + 2R \cos(\theta_m + \theta_f)]^{1/2} \quad (\text{B-7})$$

其中

$$\theta_m = 2X_m + 2\varepsilon_i + \varepsilon_r \quad (\text{B-8})$$

$$\theta_b = 2k \cos \theta \Delta x_b \quad (\text{B-9})$$

$$\theta_f = 2k \cos \theta \Delta x_f \quad (\text{B-10})$$

分別以式(B-5)及式(B-7)除以式(B-6) 得到

$$\frac{|\eta|_b}{|\eta|_m} = \left[ \frac{1 + R^2 + 2R \cos(\theta_m - \theta_b)}{1 + R^2 + 2R \cos \theta_m} \right]^{1/2} = \hat{B} \quad (\text{B-11})$$

$$\frac{|\eta|_f}{|\eta|_m} = \left[ \frac{1 + R^2 + 2R \cos(\theta_m + \theta_f)}{1 + R^2 + 2R \cos \theta_m} \right]^{1/2} = \hat{F} \quad (\text{B-12})$$

式(B-11)及式(B-12)中  $\hat{B}$  及  $\hat{F}$  值可由試驗量測或模式計算求得，上兩式可分別改寫成

$$(1 + R^2)(1 - \hat{B}^2) = 2R[\hat{B}^2 \cos \theta_m - \cos(\theta_m - \theta_b)] \quad (\text{B-13})$$

$$(1 + R^2)(1 - \hat{F}^2) = 2R[\hat{F}^2 \cos \theta_m - \cos(\theta_m + \theta_f)] \quad (\text{B-14})$$

以式 (B-13) 除以式 (B-14)，整理可得

$$\theta_m = \tan^{-1} \left[ \frac{(\hat{B}^2 - \hat{F}^2) - (1 - \hat{B}^2) \cos \theta_f + (1 - \hat{F}^2) \cos \theta_b}{(1 - \hat{B}^2) \sin \theta_f + (1 - \hat{F}^2) \sin \theta_b} \right] \quad (\text{B-15})$$

將式(B-14) 重新整理可得二階多項式，如下式所示：

$$R^2(1 - \hat{F}^2) + 2R[\cos(\theta_m + \theta_f) - \hat{F}^2 \cos \theta_m] + (1 - \hat{F}^2) = 0 \quad (\text{B-16})$$

由式(B-16) 可解得

$$R = \frac{\hat{F}^2 \cos \theta_m - \cos(\theta_m + \theta_f) \pm \sqrt{[\hat{F}^2 \cos \theta_m - \cos(\theta_m + \theta_f)]^2 - (1 - \hat{F}^2)^2}}{1 - \hat{F}^2} \quad (\text{B-17})$$

同理可得另一解：

$$R = \frac{\hat{B}^2 \cos \theta_m - \cos(\theta_m - \theta_b) \pm \sqrt{[\hat{B}^2 \cos \theta_m - \cos(\theta_m - \theta_b)]^2 - (1 - \hat{B}^2)^2}}{1 - \hat{B}^2} \quad (\text{B-18})$$

式中  $\hat{F}$ 、 $\hat{B}$ 、 $\theta_m$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_f$  可由式(B-11)、式(B-12)、式(B-15)、式(B-9) 及式(B-10)求得。對於式(B-17) 及式(B-18) 計算式中的正負號選擇，在於反射率介於  $0 \leq R \leq 1$  的限制。

海岸保護及親水性結構物最適化配置研究  
(2/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1009202111

定價 100 元