

91-14-713

MOTC-IOT-IHMT-HA9010

港口突堤效應保護對策之研究(I)



交通部運輸研究所

中華民國九十一年二月

91-14-713

MOTC-IOT-IHMT-HA9010

港口突堤效應保護對策之研究(I)

著者：黃清和、蔡立宏、陳明宗

交通部運輸研究所

中華民國九十一年二月

港口突堤效應保護對策之研究 (I)

著 者：黃清和、蔡立宏、陳明宗

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

電 話：(02)23496789

出版年月：中華民國九十一年二月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 110 冊

工 本 費：300

展 售 處：

交通部運輸研究所港灣技術研究中心 電話：(04)26564216

三民書局：台北市重慶南路一段 61 號 2 樓 電話：(02)23617511

五南文化廣場：台中市中山路 2 號地下 1F 電話：(04)22260330

新進圖書廣場：彰化市光復路 177 號 電話：(04)7252792

青年書局：高雄市青年一路 141 號 電話：(07)3324910

GPN：1009100422

交通部運輸研究所出版品摘要表

出版品名稱：港口突堤效應保護對策之研究(I)			
國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號 1009100422	運輸研究所出版品編號 91-14 -713	
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：黃清和 研究人員：蔡立宏、陳明宗、許泰文、溫志中、陳昇宏 研究助理：李江澤、陳進冰、王培源、蔡瑞成 行政助理：楊怡芸、張惠華 聯絡電話：04-26564216~410 傳真號碼：04-26571329			研究期間 自 90 年 01 月 至 至 90 年 12 月
關鍵詞：布拉格反射、系列潛堤			
摘要：本研究利用水工模型試驗及數值模擬，探討系列潛堤所產生的布拉格反射效應對海岸保護的效果，其中水工模型試驗除了進一步分析張等人（1997）之水平底床系列潛堤配置試驗資料，並於本所港灣技術研究中心進行斜坡底床系列潛堤配置試驗。數值模擬則以延伸拋物線型緩坡方程式，計算波浪通過系列潛堤之波場變化。根據試驗及數值計算結果，探討不同波浪條件、波浪碎波、底床坡度及潛堤佈置(包括堤高(D)、堤距(S)及堤個數(N))等條件下，所產生反射率及布拉格反射效應的變化情形，並與前人研究結果加以比較。本研究另定義重要新參數，包括反射率最大值(R_{max})、反射率最大值發生的波浪條件 $(2S/L)_{max}$ 及布拉格效應之波浪條件帶寬(BW)，並與相關影響因子(N、D/h 及 B/S)迴歸成經驗式，提供研究及設計施工單位重要參考依據。			
出版日期	頁數	工本費	本 出 版 品 取 得 方 式
91 年 2 月	120	300	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中心免費贈閱；私人及私營機關團體可按工本費價購。
機密等級： ☐ 限閱 ☐ 密 ☐ 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			
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: Protective Strategy of Groin-Breakwater Effect			
ISBN(			

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.....	IX
第一章 緒論	1
1.1 研究目的.....	1
1.1 研究方法.....	2
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 本文組織.....	6
第二章 數值模式.....	7
2.1 控制方程式.....	7
2.2 邊界條件和起始條件	9
2.3 數值方法	10
第三章 試驗方法及步驟.....	13
3.1 試驗設備與儀器.....	13
3.2 試驗佈置.....	13
3.3 實驗方法與步驟.....	21
第四章 模式驗證.....	25
4.1 水平底床之模式驗證.....	25
4.2 斜坡底床之模式驗證.....	28
第五章 結果與討論.....	33
5.1 底床坡度的影響.....	34
5.2 潛堤個數的影響.....	37
5.3 潛堤間距的影響.....	39
5.4 潛堤高度的影響.....	42
5.5 堤後碎波的影響.....	45

5.6 經驗公式的推算.....	47
第六章 結論與建議.....	61
6.1 結論	61
6.2 建議	62
參考文獻.....	63
附錄一 摘要內容.....	67
附錄二 簡報內容.....	71
附錄三 審查結果答覆	93

表目錄

表 1-1 前人研究方法比較 (理論方面).....	5
表 1-2 前人研究比較 (試驗方面).....	6
表 3-1 波高計擺設間距表	18
表 4-1 水平底床系列潛堤和波浪條件的佈置(試驗方面).....	25
表 4-2 斜坡底床系列潛堤和波浪條件的佈置(試驗方面).....	28
表 5-1 系列潛堤和波浪條件的配置(數值計算方面).....	34

圖目錄

圖 1-1 波浪通過系列潛堤波高分佈比較圖	2
圖 2-1 底床曲率項 f_1 與坡度平方項 f_2 與相對水深 kh 之關係圖	8
圖 3-1 風洞試驗室試驗流程圖	19
圖 3-2 斜坡上系列潛堤佈置示意圖 ($\tan\beta = 1/30$)	19
圖 3-3 斜坡上系列潛堤佈置示意圖 ($\tan\beta = 1/20$)	19
圖 3-4 斜坡上系列潛堤佈置示意圖 (I)	20
圖 3-5 斜坡上系列潛堤佈置示意圖 (II)	20
圖 3-6 試驗波形 (黑點) 與理論波形 (實線) 比較圖	21
圖 3-7 未擺置系列潛堤配置, 波浪之水位變化圖	22
圖 3-8 擺置系列潛堤配置, 波浪之水位變化圖	23
圖 4-1 不同潛堤個數配置反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖 ($B/S = 0.24$, $D/h = 1/4$)	26
圖 4-2 不同潛堤個數配置反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖 ($B/S = 0.48$, $D/h = 1/2$)	26
圖 4-3 不同相對水深配置反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖 ($N = 4$, $B/S = 0.24$)	27
圖 4-4 不同相對水深配置反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖 ($N = 8$, $B/S = 0.24$)	27
圖 4-5 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖 (無碎波 , $\tan\beta = 1/10$, $h = 1\text{ m}$)	29
圖 4-6 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖 (無碎波 , $\tan\beta = 1/10$, $h = 0.8\text{ m}$)	29
圖 4-7 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖 (無碎波 , $\tan\beta = 1/30$)	31
圖 4-8 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖 (無碎波 , $\tan\beta = 1/20$)	30
圖 4-9 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖 (有碎波 , $\tan\beta = 1/20$)	31
圖 5-1 系列潛堤佈置示意圖	33
圖 5-2 不同底床坡度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖 ($N = 4$, $B/S' = 0.24$, $D/h = 1/2$)	35

圖 5-3 不同底床坡度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 4$, $B/S' = 0.48$, $D/h = 1/2$).....	36
圖 5-4 不同底床坡度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 8$, $B/S' = 0.48$, $D/h = 1/2$).....	36
圖 5-5 不同潛堤個數反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($B/S' = 0.48$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 0.0$).....	37
圖 5-6 不同潛堤個數反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($B/S' = 0.48$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/30$).....	38
圖 5-7 不同潛堤個數反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($B/S' = 0.48$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/20$).....	38
圖 5-8 不同潛堤個數反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($B/S' = 0.48$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/10$).....	39
圖 5-9 不同潛堤間距反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 4$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 0.0$).....	40
圖 5-10 不同潛堤間距反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 4$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/30$).....	41
圖 5-11 不同潛堤間距反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 4$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/20$).....	41
圖 5-12 不同潛堤間距反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 4$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/10$).....	42
圖 5-13 不同潛堤高度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 4$, $B/S' = 0.48$, $\tan\beta = 0.0$).....	43
圖 5-14 不同潛堤高度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 4$, $B/S' = 0.48$, $\tan\beta = 1/30$).....	43
圖 5-15 不同潛堤高度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 4$, $B/S' = 0.48$, $\tan\beta = 1/20$).....	44
圖 5-16 不同潛堤高度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 4$, $B/S' = 0.48$, $\tan\beta = 1/10$).....	44
圖 5-17 有無堤後碎波發生反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖	
($N = 4$, $D/h = 1/2$, $B/S' = 0.24$, $\tan\beta = 1/10$).....	45

圖 5-18 有無堤後碎波發生反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖 ($N = 4$, $D/h = 1/2$, $B/S' = 0.48$, $\tan\beta = 1/10$)	46
圖 5-19 有無堤後碎波發生反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖 ($N = 8$, $D/h = 1/2$, $B/S' = 0.48$, $\tan\beta = 1/10$)	46
圖 5-20 $R_{\max}$ 、 $(2S/L)_{\max}$ 及 BW 參數代表的物理意義圖	47
圖 5-21 反射率最大值($R_{\max}$)與矩形潛堤或沙漣個數(N)關係圖	48
圖 5-22 反射率最大值($R_{\max}$)與潛堤或沙漣相對高度(D/h , b/h)關係圖	50
圖 5-23 反射率最大值($R_{\max}$)與相對間距(B/S)關係圖	51
圖 5-24 反射率最大值($R_{\max}$)的試驗值與迴歸曲線關係圖	51
圖 5-25 反射率最大值($R_{\max}$)與個數(N)及相對高度(D/h)關係圖	52
圖 5-26 反射率最大值($R_{\max}$)與相對高度(D/h)及相對間距(B/S)關係圖	53
圖 5-27 反射率最大值($R_{\max}$)與相對間距(B/S)及相對高度(D/h)關係圖	53
圖 5-28 ($2S/L$) $_{\max}$ 的試驗值與迴歸曲線關係圖	55
圖 5-29 ($2S/L$) $_{\max}$ 與個數(N)及相對高度(D/h)關係圖	55
圖 5-30 ($2S/L$) $_{\max}$ 與相對高度(D/h)及相對間距(B/S)關係圖	56
圖 5-31 ($2S/L$) $_{\max}$ 與相對間距(B/S)及相對高度(D/h)關係圖	56
圖 5-32 試驗的帶寬(BW)與迴歸曲線關係圖	58
圖 5-33 帶寬(BW)與個數(N)及相對高度(D/h)關係圖	58
圖 5-34 帶寬(BW)與相對高度(D/h)及相對間距(B/S)關係圖	59
圖 5-35 帶寬(BW)與相對間距(B/S)及相對高度(D/h)關係圖	59

照片目錄

照片 3-1	風洞實驗室.....	14
照片 3-2	試驗斷面水槽.....	14
照片 3-3	造波機.....	15
照片 3-4	水位變化擷取系統.....	15
照片 3-5	潛堤前方波高計佈置情形.....	16
照片 3-6	潛堤上方波高計佈置情形.....	16

第一章 緒論

1.1 研究目的

近年來由於經濟發展突飛猛進，政府為配合快速發展需求，積極推動各港口開發，如港口新建、改建及擴建。為求港池之穩靜及船隻行進之安全，常須建造一突出海域之港口突堤以達保護的目的，由許多例子經驗獲知：一深入水中之港口突堤，雖可達到波浪遮蔽之效應，但卻破壞原有整個海域漂沙的平衡，故常於港口突堤結構物上下游發生侵蝕與淤積現象；且堤頭流場的劇烈變化，使堤頭附近發生漩渦刷深進而危害堤體本身之穩定。故研擬一適當的保護工法以期有效改善以上港口突堤效應之缺失，實為重要研究之課題。

一般防止海岸侵蝕之保護工法分成剛性工法及柔性工法。前者屬於傳統工法，包括：(1) 突堤 (2) 離岸堤 (3) 海堤或護岸等。後者考量自然海灘特性及海岸景觀，常用的工法包括：(1) 人工養灘 (2) 人工潛礁 (3) 人工岬灣 (4) 沙腸工法 (5) 重力排水系統等，如何以上述方法之一或混和使用，以達保海岸侵蝕保護對策，應從其功能性、安全性、耐久性、經濟性、施工性、環境衝擊以及景觀等因素評估，現今常用的工法則為離岸潛堤，離岸潛堤分為單列潛堤、潛堤群及系列潛堤。系列潛堤為二道或二道以上潛堤並列於海岸垂直線上，而適當的系列潛堤配置，可使波浪通過潛堤配置區，於堤前形成共振波，此現象稱為布拉格效應(Bragg resonance)，圖 1-1 為波浪通過斜坡上系列潛堤時波高分佈圖，圖中實線為布拉格共振發生的情形，虛線為無共振發生的情形，圖形顯示布拉格共振發生時於堤前形成強烈共振波，此時反射率最大，此反射率的增加，不但能使堤後波浪減小，相對使漂沙活動趨緩，進而達到保護海岸侵蝕的目的，這種系列潛堤配置產生布拉格反射(Bragg reflection)以達保護海岸工法，近年來雖已被先進國家應用於現場海岸保護，但目前理論與試驗研究，仍無法有效掌握波浪通過系列潛堤其波場分佈及效果。因此本研究應用數學模式，並從事水工模型試驗，期由本研究成果提供有效模式及系列潛堤

配置，以利爾後相關單位對港口突堤效應所欲採用保護對策之參酌。

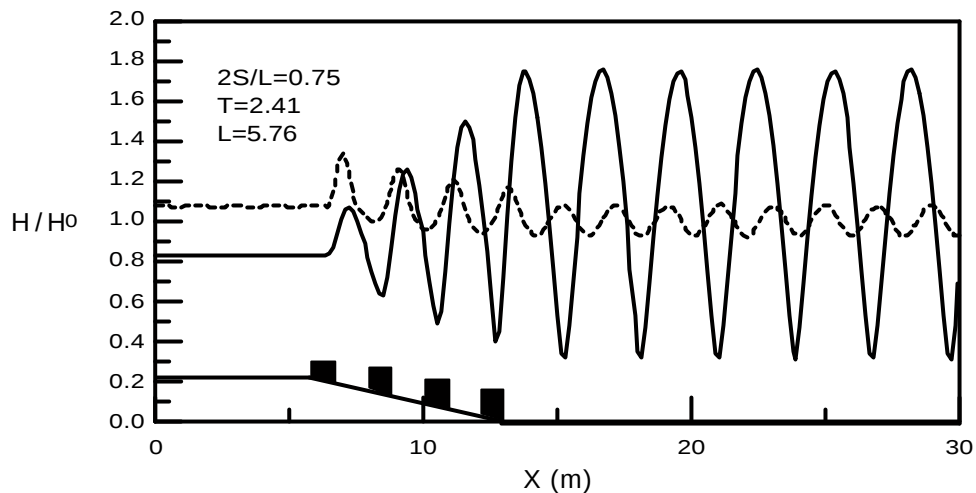


圖 1-1 波浪通過系列潛堤波高分佈比較圖

1.2 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.文獻回顧：收集目前有關如何利用系列潛堤配置，產生布拉格反射之研究報告，作一綜合文獻回顧。
- 2.數學模式建立：選取適當拋物線型緩坡方程式為主要控制方程式，其考慮的波浪現象應包括有淺化、折射、繞射、反射及碎波效應。並運用交替隱函數分析法 (Alternative Direction Implicit, ADI)建立完整之波場數學模式。
- 3.水工模型試驗：進行一連串水工模型試驗，利用水工模型試驗的結果與數值計算加以比較，以驗證其數值模式的正確性，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。

1.3 文獻回顧

往昔有許多學者研究波浪通過沙漣底床的布拉格反射現象。Heathershaw (1982) 發現波浪通過正弦沙漣底床時，當沙漣間距為入射波半波長的整數倍時，即 $2S/L=n$ ， $n=1,2,3$ 時，波浪於沙漣底床前方會形成駐波，並受到沙漣上方水深變化的影響而發生一連串不規則反射，此即所謂的布拉格反射現象。

在理論解析方面，Davies 和 Heathershaw (1984) 以攝動方法解析當波浪通過部份規則起伏之沙漣底床時的二階解，並利用試驗證實此反射現象。Mei (1985) 的理論研究指出，形成沿岸沙漣的動力機制為波浪在底床邊界層所引起的質量傳輸，若要形成沙漣，則此一動力機制需要結合部份駐波才能形成，而此一沙漣造成駐波的巨大反射亦即布拉格反射。陳和湯 (1990) 及陳 (1991) 對餘弦波形底床上規則前進重力波的波動作解析，以攝動法求解波形底床在波浪作用下之流速勢，並對其波場解析至第二階，發現因起伏邊界效應作用，會引發一衍生的波動場，其強度與波浪尖銳度及波形底床之振幅成正比，而當波形底床間距為波浪波長之半時，於有限深度下會有布拉格反射現象產生。由於餘弦底床在實際應用上有其困難，故近代學者發展以人工沙漣或沙洲消減波浪能量。

在波浪通過人工沙漣、沙洲及系列潛堤的反射率推估方面，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。Kirby 和 Anton (1990) 擴展 Miles (1981) 的理論，對人工沙漣形狀以富利葉級數展開，將 Miles 之反射率公式以顯函數表示，同時以理論證實人工沙洲間距為波長之半時，波浪將產生布拉格反射，此時反射率最大。張等人 (1997) 引用 Miles (1981) 理論針對矩形、餘弦函數型及三角形三種人工沙洲計算，並進行斷面水工試驗，結果顯示人工沙洲以矩形的反射率最大；並指出人工沙洲個數在到達 8 個以上時，幾乎可達全反射。岳 (1998~2000) 以邊界元素法來加以解析波浪通過系列潛堤時，探討不同波浪入射角

度、潛堤形狀、堤高、堤寬及堤邊坡時之反射率大小。

對於波浪通過非等水深之地形，一般是以 Berkhoff (1972) 提出的緩坡方程式 (mild-slope equation 即 MSE) 來計算。近年來有許多學者針對緩坡方程式加以修正。如 Kirby (1986) 於 Berkhoff (1972) 之緩坡方程式中引入一個微小之地形變化參數 δ ，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 即 EMSE)，並以數值計算波浪通過正弦沙漣之反射率。Chandrasekera 和 Cheung (1997)

Suh 等人 (1997) 及 Hsu 和 Wen (2001) 等學者則分別將緩坡方程式離散化成橢圓型態 (elliptic type) 雙曲線型態 (hyperbolic type) 及拋物線型態 (parabolic type) 以改善數值計算時的缺點。以上學者的計算結果顯示，加入底床影響因子，能改善過去使用傳統緩坡方程式在計算波浪通過沙漣底床反射率偏低之情況。

Chamberlain 和 Poter (1995) 則把在 MSE 忽略的高階項，如曲率項 $\nabla^2 h$ 和底床坡度平方項 $|\nabla h|^2$ ，放回原方程式提出修正型緩坡方程式 (modified mild slope equation 即 MMSE)，其中 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 平面梯度運算因子， h 為水深。Poter 和 Staziker (1995) 進一步把 MMSE 發展成可以處理振盪波 (evanescent modes) 及不連續底床坡度的形式，當底床波動及曲率過大時，利用消散關係考慮被忽略的高階項來提高 MMSE 的正確性。Zhang 等人 (1999) 則除了將 MSE 所忽略的高階項考慮進去，並加入了地形變化參數 δ ，發展雙曲型態之混合模式 (Hybrid Model 即 HM) 來完全描述整個地形變化的波場。

在實際海域現場試驗方面，Bailard 等人 (1990) 應用 Kirby 和 Anton (1990) 所得之研究結果設計人工沙洲，在美國佛羅里達卡納維爾角海岸 (Cape Canaveral Beach, Florida) 從事現場試驗，結果發現當波浪週期在預期布拉格反射的條件下，反射率可達 0.4 以上，證實現場人工沙洲能發生布拉格反射現象，進而達到防禦海岸目的。對於波浪通過潛堤與沙漣或沙洲底床之前人研究，整理如表 1-1 及表 1-2 所示。

本研究根據試驗及數值計算結果，探討不同波浪條件、波浪碎波、

底床坡度及潛堤佈置(包括堤高(D)、堤距(S)及堤個數(N))等條件下，所產生反射率及布拉格反射效應的變化情形，並與前人研究結果加以比較。並定義影響實際現場海域重要新參數，包括反射率最大值($R_{\max}$)、反射率最大值發生的波浪條件 $(2S/L)_{\max}$ 及布拉格效應之波浪條件帶寬(BW)，並與相關影響因子(N、D/h 及 B/S)迴歸成經驗式，提供研究及設計施工單位重要參考依據。

表 1-1 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。
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，逐漸形成駐波共振。
陳和湯 (1990)	攝動法解析	波場解析至二階。波形底床間距為半波長，將產生布拉格反射。
陳 (1991)		
Kirby (1986)	修正型緩坡方程式	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。
Zhang 等人 (1999)	含高階項及陡變地形項之緩坡方程式	以多層正弦沙漣及複合沙漣佈置，增加布拉格反射所適用的波浪條件。
Guazzelli 等人 (1992)	逐次近似法	布拉格反射在沙漣非為等間距時，會在其它條件下發生。
岳等人 (1998~2000)	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。

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。
喜岡等人 (1989)	複列式潛堤試驗	進行各種佈置，並改變不同的波浪條件來探討反射率和透過率的變化。
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，證實人工沙漣可防止海岸侵蝕。
Guazzelli 等人 (1992)	多層正弦沙漣模型試驗	布拉格反射亦可在沙漣非為等間距時發生。
張等人 (1997)	矩形、餘弦及三角形人工沙漣模型試驗	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	判斷海灘之侵淤性、灘線變化、透過率、反射率。

1.4 本文組織

本研究報告共分為六章，第一章為緒論，說明研究目的、研究方法以及文獻回顧。第二章為數值模式，其中包含波場控制方程式、邊界條件、數值方法及收斂條件。第三章為試驗方法及步驟。第四章為模式驗證，利用數值模式與試驗結果所得的反射率進行比較，以驗證模式的正確性。第五章為結果與討論，針對不同底床及潛堤配置，探討不同波浪條件通過系列潛堤的反射率分佈。第六章為結論與建議。

第二章 數值模式

2.1 控制方程式

本研究以 Hsu 和 Wen (2001) 所推導含有底床非線性項之延伸型拋物線緩坡方程式 (extended mild-slope equation of parabolic type 即 EMSE) 為基礎，模擬波浪通過系列潛堤整個波場分佈的情形，並以堤體中線之波高分佈計算反射率。由於底床上之系列潛堤屬於陡變地形，故方程式中所含之底床非線性項，包含有底床曲率項及底床斜率平方項之係數，更提高數值模式計算之精度。方程式如下所示：

$$\begin{aligned} & -2\omega i \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial t} + \nabla \cdot (CC_g \nabla \bar{\psi}) + CC_g k^2 (1 + f_d) \bar{\psi} \\ & + [f_1(kh)g\nabla^2 h + f_2(kh)(\nabla h)^2 gk] \bar{\psi} = 0 \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中

$$\begin{aligned} f_1(kh) = & [-4kh \cosh(kh) + \sinh(3kh) + \sinh(kh) \\ & + 8(kh)^2 \sinh(kh)] / 8 \cosh^3(kh) \\ & \times [2kh + \sinh(2kh)] - \frac{kh \tanh(kh)}{2 \cosh^2(kh)} \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} f_2(kh) = & \frac{\operatorname{sech}^2(kh)}{6[2kh + \sinh(2kh)]^3} \cdot \{8(kh)^4 + 16(kh)^3 \\ & \sinh(2kh) - 9\sinh^2(2kh) \times \cosh(2kh) + \\ & 12(kh)[1 + 2\sinh^4(kh)][kh + \sinh(2kh)]\} \end{aligned} \quad (2-3)$$

$$f_d = 2.5 \tan \beta \sqrt{\frac{1}{k_0 h}} \sqrt{\frac{\gamma - \gamma_r}{\gamma_s - \gamma_r}} \quad (2-4)$$

式中 $\bar{\psi}$ 為波浪的勢能函數， $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 為水平方向梯度因子， (x, y) 為水平座標， t 為時間因子， C 為波速， C_g 為群波波速， g 為重力加速度， $k = 2\pi/L$ 為週波數， ω 為角頻率， L 為波長， h 為水深， f_1 及 f_2 為底

床曲率及底床斜率平方項係數。式(2-4)為 Isobe (1987) 所用之碎波公式， f_d 為波浪能量消散係數， $\gamma = a/h$ ， $\gamma_r = 0.135$ ， $\gamma_s = 0.4 \times (0.57 + 5.3 \tan \beta)$ 。至於波浪碎波發生位置之決定，在模式計算中，主要以 Isobe (1987) 所提出之碎波判斷公式作為判斷依據，如下所示：

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

若 $\gamma < \gamma_b$ 則 $f_d = 0$ ，若 $\gamma \geq \gamma_b$ 則 f_d 以式(2-4) 計算。其中底床非線性項，底床曲率 $f_1(kh)$ 與底床坡度平方項 $f_2(kh)$ 與相對水深 kh 的關係如圖 2-1 所示。由圖可知，底床曲率 $f_1(kh)$ 在深水波 ($kh > \pi$) 處，其值漸趨於零，影響不大可以忽略。但在中間性波 ($0.1\pi < kh < \pi$) 處，其值為一曲線分佈的變化，不可忽略其影響，尤其在 $kh = 0.7$ 時影響值最明顯。在淺水波 ($kh < 0.1\pi$) 時，其值影響隨 kh 接近於零而減小。然而對於底床坡度平方項 $f_2(kh)$ 而言，在深水波 ($kh > \pi$) 處如同底床曲率 $f_1(kh)$ 可以忽略，但在中間性波及淺水波處，則一凹向上的曲線變化，不可忽略其重要性，尤其在 $kh = 1.2$ 時影響最明顯。

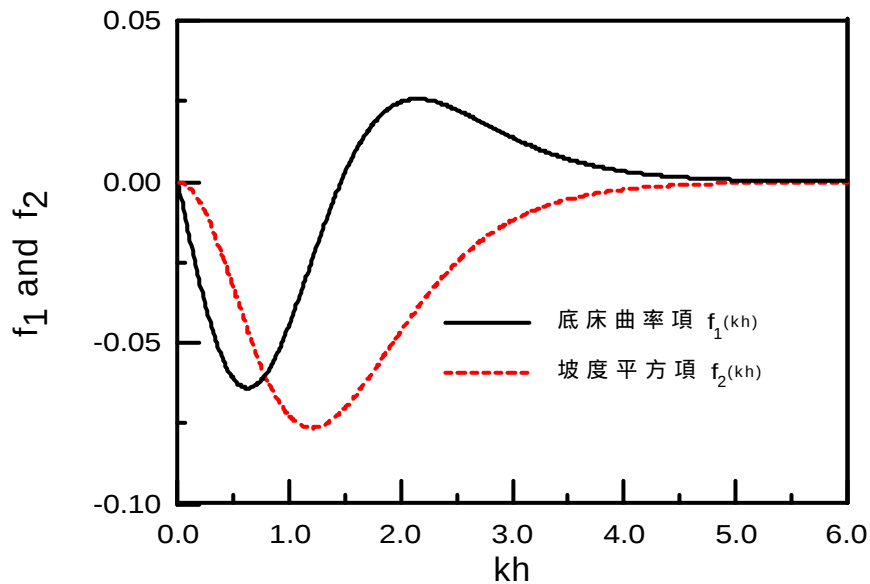


圖 2-1 底床曲率項 f_1 與坡度平方項 f_2 與相對水深 kh 之關係圖

並引用 Radder (1979) 轉換式，如下式所示：

$$\bar{\psi} = \frac{\phi}{\sqrt{CC_g}} \quad (2-6)$$

則式 (2-1) 可簡化為

$$-\frac{2\omega i}{CC_g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla^2 \phi + k_c^2 \phi \quad (2-7)$$

其中

$$k_c^2 = k^2 (1 + if_d) - \frac{\nabla^2 \sqrt{CC_g}}{\sqrt{CC_g}} + [f_1(kh)g\nabla^2 h + f_2(kh)(\nabla h)^2 gk] / (CC_g) \quad (2-8)$$

式中 k_c 為一虛擬週波數。

在數值計算的方法上，採用交替隱函數分析法 (Alternating Direction Implicit 即 ADI) 來解拋物線型緩坡方程式所推導出的矩陣方程式。

2.2 邊界條件和起始條件

2.2.1 邊界條件

幅射邊界條件之目的在於減少反射波能量進入計算領域。幅射邊界條件通常包括兩種：(1) 全反射及部分反射邊界 (2) 給定邊界。兩種幅射邊界之通式如下：

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \pm (-1)^m i \alpha k_x \phi + 2ik_{xi} \phi_i, \text{ 在 } \pm x \text{ 方向} \quad (2-8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \pm (-1)^m i \alpha k_y \phi + 2ik_{yi} \phi_i, \text{ 在 } \pm y \text{ 方向} \quad (2-9)$$

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 x 與 y 方向之週波數； θ 為靠近邊界之波向角；下標“ i ”

表示給定邊界之物理量。對於 (1) 全反射邊界， $\phi_i = 0$ ， $m = 0$ 及 $\alpha = 0$ ；(2) 部份反射邊界， $\phi_i = 0$ ， $m = 0$ 及 $0 < \alpha < 1$ ；(3) 給定邊界， $\phi_i = (igTH_0 / 4\pi)e^{i\zeta_0}$ ， $m = 1$ 和 $\alpha = 1$ ， $\zeta_0 = kx_0 \cos \theta_0 + ky_0 \sin \theta_0 - \omega t$ 二位相函數。 $i = \sqrt{-1}$ ； g 為重力加速度； H_0 為深海波高； T 為週期。波浪正向入射時， $\theta_0 = 0^\circ$ 。

2.2.2 起始條件

在疊代過程中，我們由消散方程式給予週波數一個起始值。在每個格點位置的波向角則是由司乃耳定律 (Snell's law) 計算，波高則是由淺化係數 k_s 及折射係數 k_r 計算而來。

$$H = H_0 k_s k_r \quad (2-10)$$

$$k_s = \left(\frac{1}{(1 + 2kh / \sinh 2kh) \tanh kh} \right)^{1/2} \quad (2-11)$$

$$k_r = (\cos \theta_0 / \cos \theta_s)^{1/2} \quad (2-12)$$

這些變數主要用來計算速度勢 ϕ ，並經由格網系統來給予一起始值。然後利用 ADI 數值方法來計算一新的速度勢。波浪正向入射時， $\theta_0 = \theta_s = 0^\circ$ ， $K_r = 1$ 。

2.3 數值方法

2.3.1 差分方程式

計算時所選用之數值方法，則是以 ADI 法來求解式 (2-7)。在 x 方向及 y 方向上，以有限差分的方法將可產生一帶狀矩陣，並以高斯消去法 (Gauss elimination) 來進行計算。其中式 (2-7) 之離散標準式如式 (2-13) 所示：

$$f_{p,q} \frac{\phi_{p,q}^{n+1/2} - \phi_{p,q}^n}{\Delta t/2} i = \delta_x^2 \phi_{p,q}^{n+1/2} + \frac{1}{2} (k_c^2)_{p,q} \phi_{p,q}^{n+1/2} + \delta_y^2 \phi_{p,q}^n + \frac{1}{2} (k_c^2)_{p,q} \phi_{p,q}^n \quad (2-13)$$

式中

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

$$f_{p,q} = -\frac{2\omega}{(CC_g)_{p,q}} \quad (2-14)$$

$$\delta_x^2 \phi_{p,q}^n = \frac{\phi_{p-1,q}^n - 2\phi_{p,q}^n + \phi_{p+1,q}^n}{\Delta x^2} \quad (2-15)$$

$$\delta_y^2 \phi_{p,q}^n = \frac{\phi_{p,q-1}^n - 2\phi_{p,q}^n + \phi_{p,q+1}^n}{\Delta y^2} \quad (2-16)$$

其中 n 代表時間項， p 、 q 分別為 x 、 y 方向的格點位置。而部分反射及部分折射邊界條件之差分式以式 (2-17) 及式 (2-18) 表示如下：

$$\phi_{p+1,q}^{n+1} - \phi_{p,q}^{n+1} = \frac{i\Delta x (k_x)_{p,q}}{2} [\phi_{p+1,q}^{n+1} + \phi_{p,q}^{n+1}] \quad (2-17)$$

$$\phi_{p+1,q}^{n+1} - \phi_{p,q}^{n+1} = \frac{-i\Delta x (k_x)_{p,q}}{2} [\phi_{p+1,q}^{n+1} + \phi_{p,q}^{n+1}] + 2i(k_{xi})_{p,q} (\phi_i^n)_{p,q} \Delta x \quad (2-18)$$

波向角的計算則可以下式所示：

$$\theta_{p,q} = \tan^{-1} \left[\left(\frac{S_{p+1,q} - S_{p-1,q}}{S_{p,q+1} - S_{p,q-1}} \right) \frac{\Delta y}{\Delta x} \right] \quad (2-19)$$

其中

$$S_{p,q} = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(\phi_{p,q})}{\text{Re}(\phi_{p,q})} \right] \quad (2-20)$$

將流速勢 $\phi_{p,q}$ 及波向角 $\theta_{p,q}$ ，以有限差分的方法展開，則可產生一帶狀矩陣，並以高斯消去法來進行計算。波浪正向入射時， $\theta_{p,q} = 0^\circ$ 。

2.3.2 收斂條件

對於模式疊代計算之收斂條件，採 Li (1994) 所提出當殘差 ε 小於某一微小值時為收斂，其殘差表示式如下所示：

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum_p \sum_q (\phi_{p,q}^n - \phi_{p,q}^{n-1})^2}}{\sum_p \sum_q |\phi_{p,q}^n|} \quad (2-21)$$

本研究以 $\varepsilon < 10^{-4}$ 為疊代計算的收斂條件。在模式計算時，時間的變化(Δt)為疊代的重要參數指標，此參數並影響到收斂的速度。 Δt 參數的型式如下：

$$\Delta t = N \frac{2\omega}{CC_g} \Delta x^2 \quad (2-22)$$

式中 N 為無因次參數，其值為 $N < O(1)$ 。然而在每一個計算步驟時，若能選取最佳化的時間參數，如此可加快收斂速度並節省 CPU 的計算時間。根據 Von Neumann 的穩定分析，數值計算的穩定條件需滿足

$$\text{Max} \{C_r, D_f\} \leq 1 \quad (2-23)$$

式中 $C_r = \sqrt{gh} / (\Delta x / \Delta t)$ 為可蘭數 (Courant number)， $D_f = (CC_g) / (2\omega \Delta x^2 / \Delta t)$ 為擴散係數 (Diffusion number)，本研究 Δt 以 $1/10$ $1/40$ 的週期(T)及 Δx 以 $1/10$ $1/40$ 的波長(L)作基準代入運算。

第三章 試驗方法及步驟

3.1 試驗設備與儀器

水工試驗於本所港灣技術研究中心風洞試驗室進行，如照片 3-1 所示，其試驗設備與儀器如下：

1. 斷面水槽

試驗水槽長 100 公尺×寬 1.5 公尺×高 2 公尺。試驗水槽前端有一造波機，尾端有一斜坡及消波設施。水槽約 36 公尺為透明玻璃，以方便觀察試驗的過程，如照片 3-2 所示。

2. 造波機

造波機為丹麥 DHI 公司出品之直推式油壓式造波機，置於前述水槽的右端，可由電腦所傳輸的波浪水位電壓訊號控制，依試驗需求造出各種不同波浪條件的規則波與不規則波，如照片 3-3 所示。

3. 容量式波高計、增幅器、資料擷取系統

本試驗之水位訊號係以 35 公分之雙測線型電容式波高計所量得，共 18 支，分別置於試驗水槽中。當波高計測線經量測增幅器 (amplifier) 將電壓值放大與分線盒收集各波高計頻道之類比 (analogue) 資料後，經由數位類比訊號轉換卡 (A/D card) 將波高計輸出之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之波浪資料，如照片 3-4 所示。

3.2 試驗佈置

試驗佈置如圖 3-1 所示，試驗中水槽共可分為三部分，一為深水區域，即系列潛堤前方區域，此區域共設置七支波高計，其中第一支波高計用以量測入射波之水位訊號，其餘六支波高計則測量波浪經過潛

堤反射所產生的水位變化，如照片 3-5 所示。。二為淺化區域，即系列潛堤上方區，其上方設置九支的波高計，共分為三組，可用以測量斜坡潛堤上的水位變化，如照片 3-6 中示。三為淺水段，即為潛堤後方的等水深部分段，其間則擺置二支波高計可用來量測透過波的水位。



照片 3-1 風洞實驗室



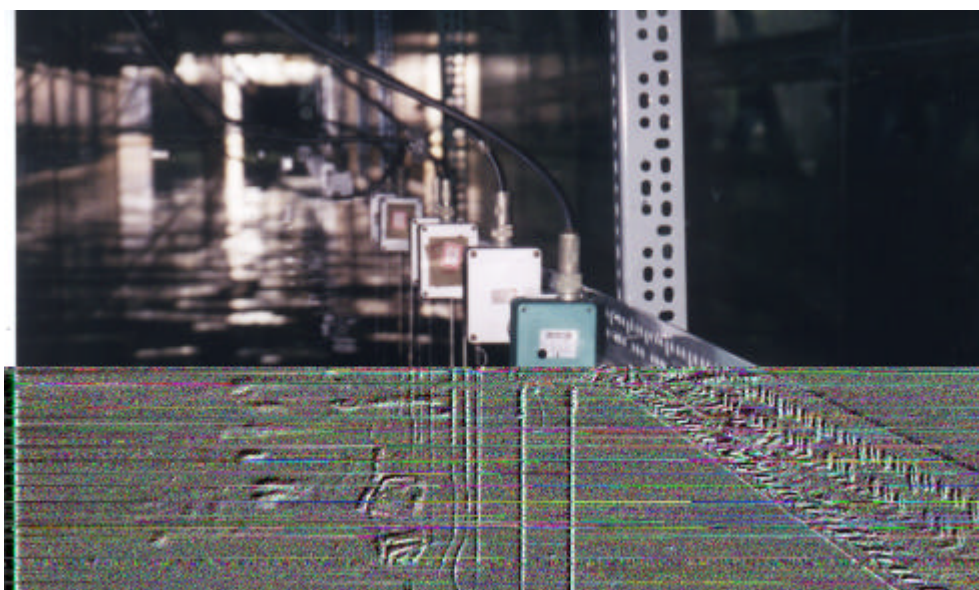
照片 3-2 試驗斷面水槽



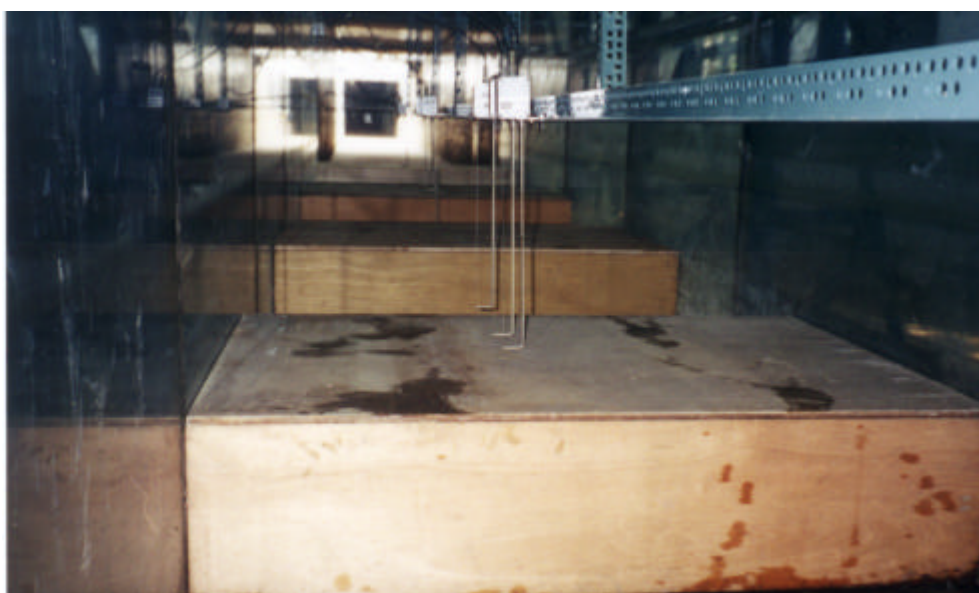
照片 3-3 造波機



照片 3-4 水位變化擷取系統



照片 3-5 潛堤前方波高計佈置情形



照片 3-6 潛堤上方波高計佈置情形

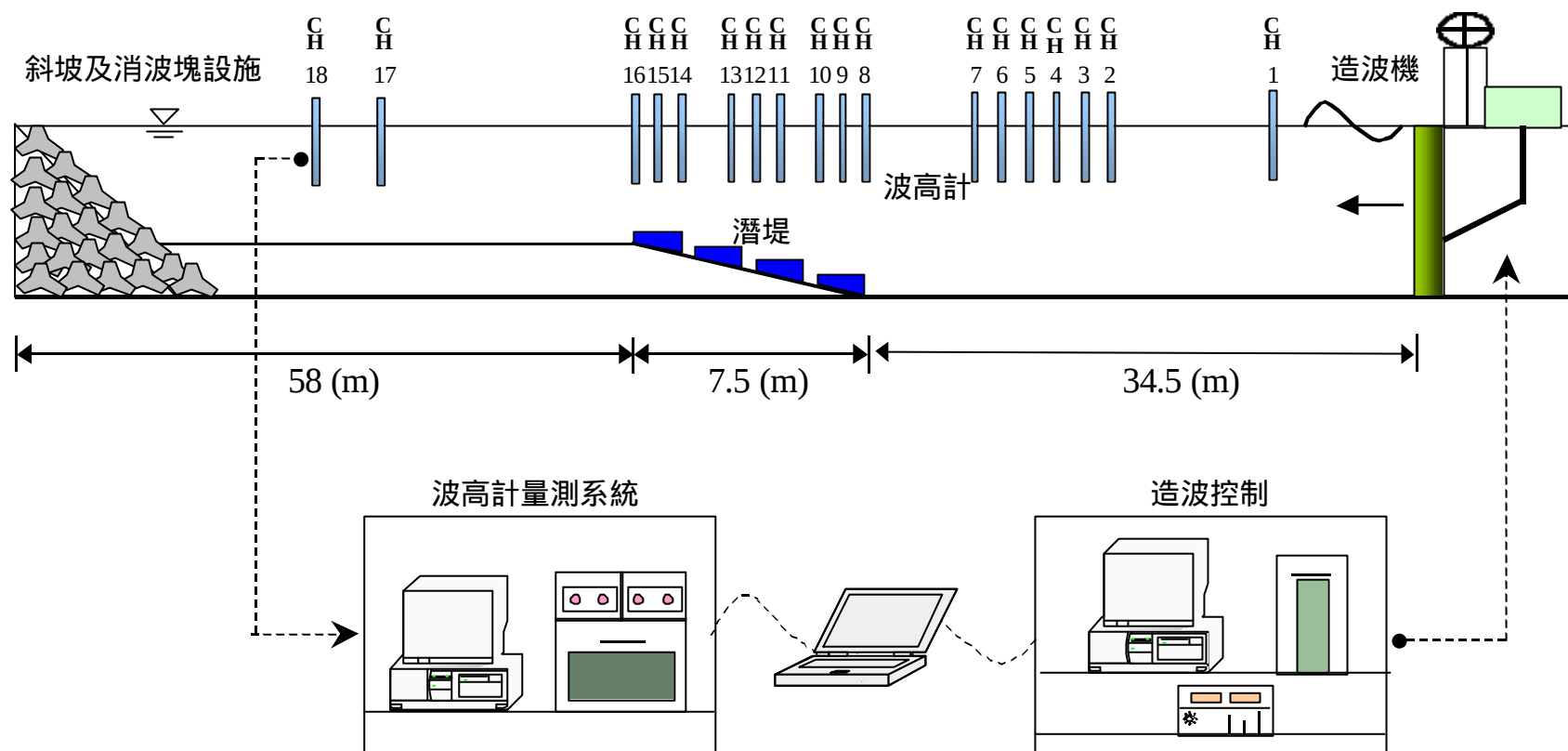


圖 3-1 風洞試驗室試驗流程圖

1.波高計佈置

本研究試驗之入射波週期(T)為 0.8~8.0 秒，入射波高(H_i) 6 公分的規則波。為配合 Isaacson (1991) 計算反射係數之三波高法及取樣頻率的限制，所以在波高計的佈置方面，由多支波高計組成數組以三支波高計為反射率計算單位的波高計量測組。並以適當之不等距離的分配方式來進行佈置。其中波高計間距的決定主要依據試驗之波長大小決定，在不同波長的條件下，波高計均可量測到足夠的有效數據，進行試驗之分析及反射率計算。其中共有兩種波高計的擺置方式，而每支波高計所採取的佈置距離如下表 3-1 所示：

表 3-1 波高計擺設間距表 (單位: 公尺)

組別	造波板	CH 0~1	CH 1~2	CH 2~3	CH 3~4	CH 4~5	CH 5~6	CH 6~7	CH 7~8	CH 8~9	CH 9~10	CH 10~11	CH 11~12	CH 12~13	CH 13~14	CH 14~15	CH 15~16	CH 16~17	CH 17~18
一	0	15.0	16.1	0.3	0.5	0.2	0.7	0.3	2.0	0.3	0.8	1.6	0.3	0.8	1.6	0.3	0.8	2.0	2.0
二	0	15.0	17.1	0.15	0.25	0.1	0.35	0.15	2.0	0.15	0.4	2.42	0.15	0.4	2.42	0.15	0.4	1.5	2.0

2.潛堤佈置

在潛堤佈置上，則分別參考張等人 (1997) 及岳等人 (2000) 的試驗及數值佈置方式，設置方式如下：

- (1) 以張等人 (1997) 之水平底床系列潛堤佈置作為參考，並考量本研究中心斷面水槽大小，其佈置區係由一平滑底床及一漸變段的斜坡所組成。該斜坡水平長度為 750 公分，並設置 1/20 及 1/30 兩種坡度，在其上擺置四個矩形潛堤。另外在碎波的試驗條件中，為在坡度為 1/20 的底床佈置下，延長斜坡長度至水面上，以形成堤後碎波的試驗條件，探討在有無碎波情形下系列潛堤反射的變化情形。其中矩形潛堤寬度固定為 103 公分，潛堤間距固定為 215 公分。入射水深為 69 公分，潛堤高度採取的標準為依據斜坡上該潛堤中心位置之水深的二分之一，即固定相對潛堤高度為 $D/h=1/2$ 。在坡度 1/30 的斜坡上，四個潛堤中心高度(D)分別是 33.6、30、26.4 及 22.8 公分。在 1/20 公分的斜坡上，潛堤中心高

度則為 33.2、27.8、22.4 及 17 公分。此型式的佈置主要目的為固定相同潛堤間距(S)、寬度(B)及高度(D)等條件，進行斜坡與水平底床試驗比較，以探討有無斜坡的差異，其佈置示意圖如圖 3-2 及圖 3-3 所示。

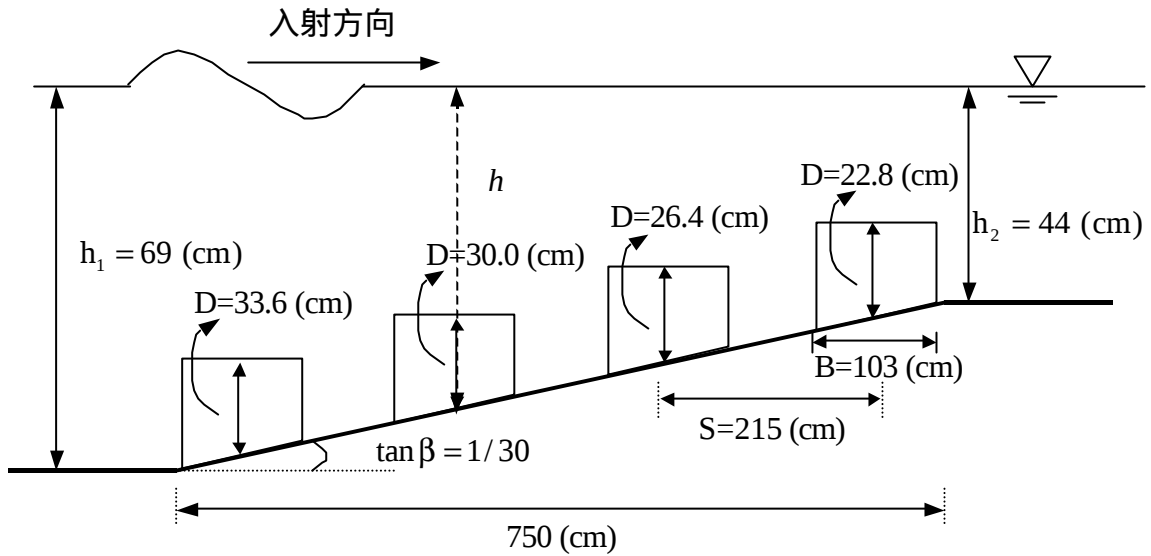


圖 3-2 斜坡上系列潛堤佈置之示意圖 ($\tan \beta = 1/30$)

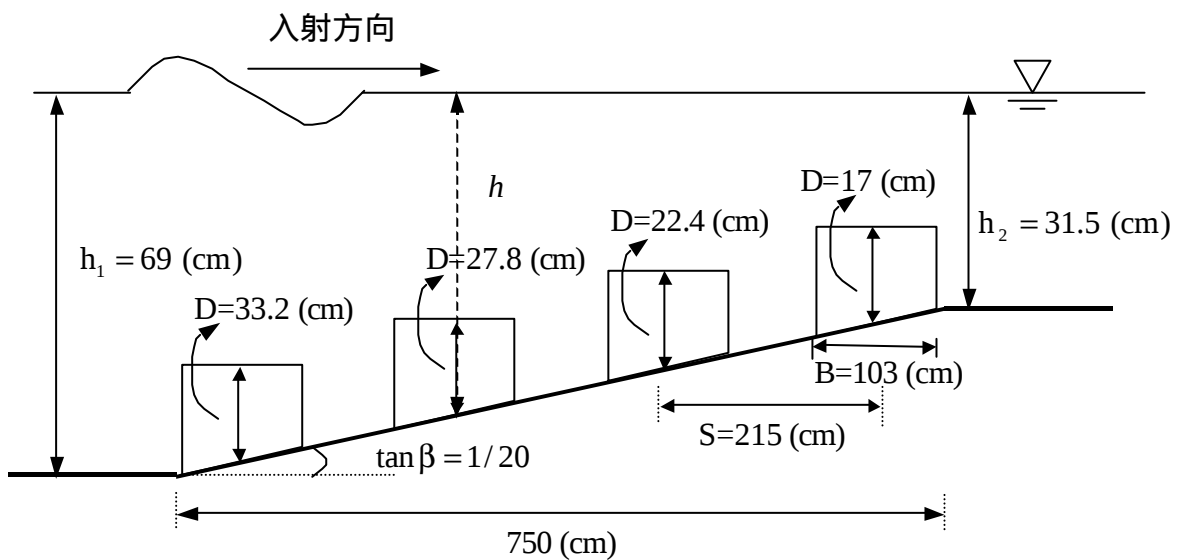


圖 3-3 斜坡上系列潛堤佈置之示意圖 ($\tan \beta = 1/20$)

(2) 以岳 (2000) 數值計算例中的斜坡上雙列潛堤佈置為試驗佈置參考，其入射水深有 100 公分及 80 公分，斜坡坡度為 1/10，該斜坡水平長度為 250 公分。並擺置兩個矩形潛堤，其中潛堤寬度為 50 公分，潛堤間距為 200 公分，而堤上水深固定即 $(h-D)/h$ 為定值，故在入射水深為 100 公分時，堤上水深為 50 公分如圖 3-4 所示，入射水深 80 公分時則堤上水深為 30 公分，如圖 3-5 所示。

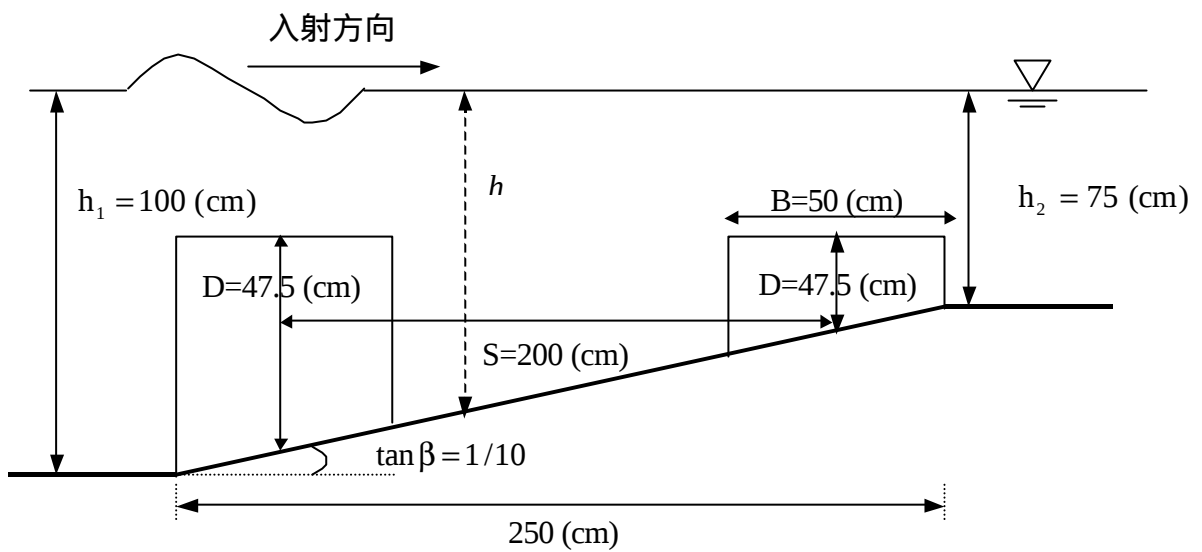


圖 3-4 斜坡上系列潛堤佈置之示意圖 (I)

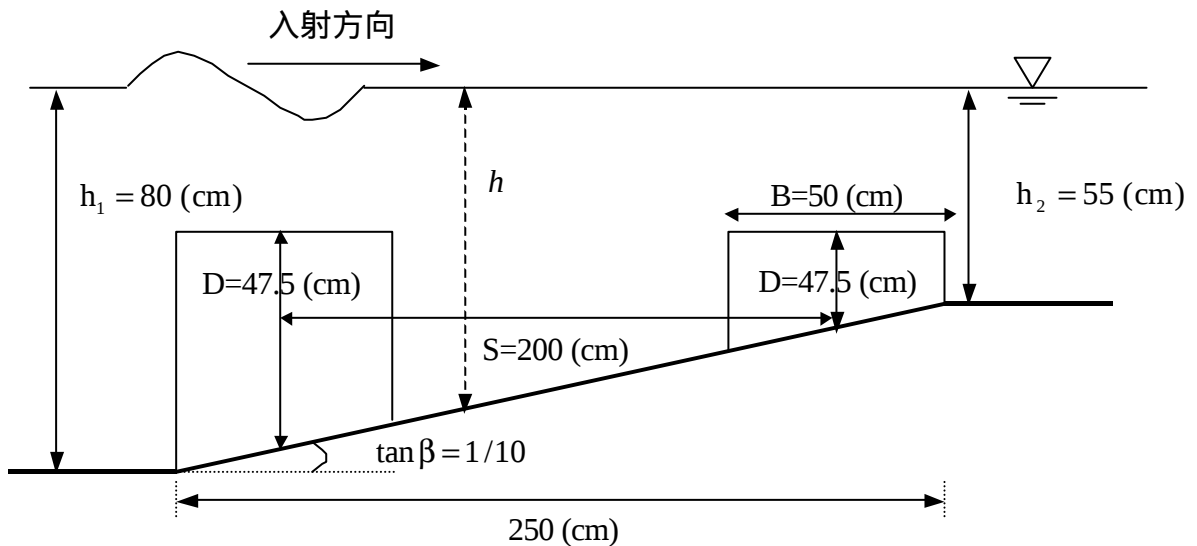


圖 3-5 斜坡上系列潛堤佈置之示意圖 (II)

3.3 試驗方法與步驟

1. 試驗波形檢測

為檢測有限水槽中二次反射所造成之影響程度，故於正式試驗前，先進行預備試驗，來檢測未佈置系列潛堤之情形下，僅包含水平底床時之入射波形及其反射率，其部份試驗波形與理論波形比較如圖 3-6 所示。由圖可知，試驗波形與理論波形頗為相近，故本研究所採用之試驗波形足以代表所需之理論波形。

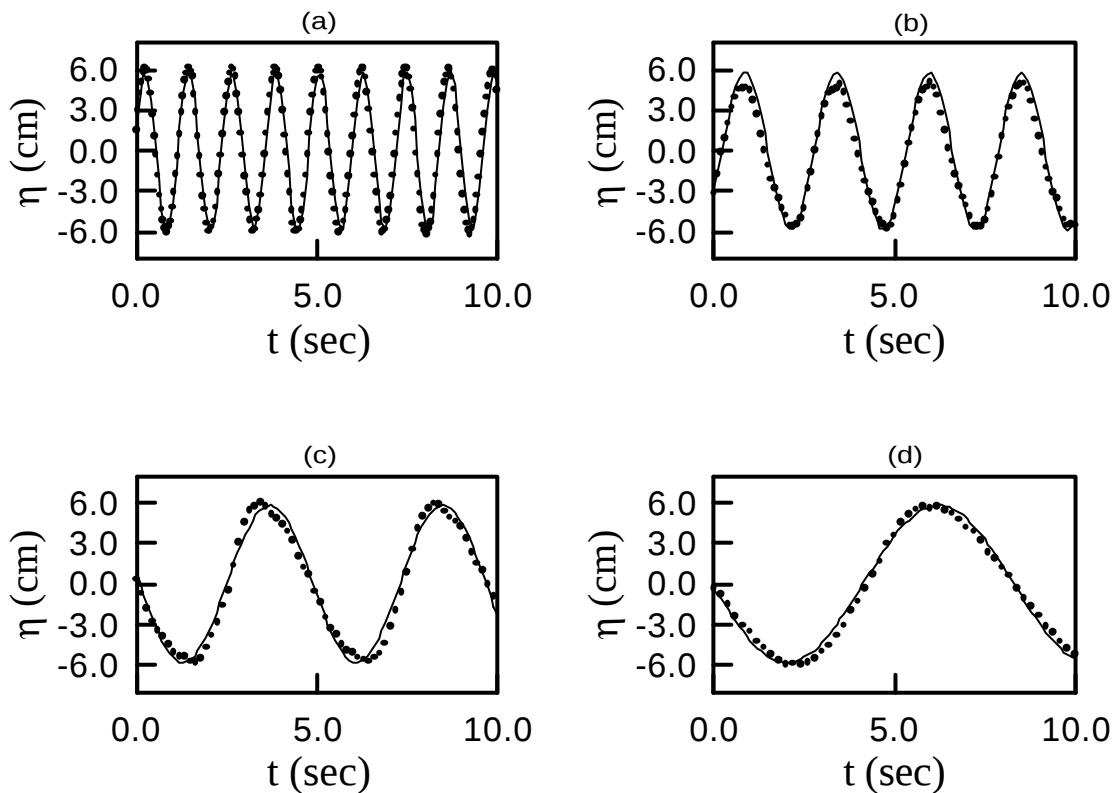


圖 3-6 試驗波形 (黑點) 與理論波形 (實線) 比較圖。(a) 波浪週期為 1.20 秒；(b) 波浪週期為 2.56 秒；(c) 波浪週期為 4.86 秒；(d) 波浪週期為 8.39 秒。

此外，以上述試驗資料分析其反射率，發現試驗數據之反射率均在 0.08 以內，尚能滿足本試驗精度之要求。圖 3-7 即為未擺置系列潛前資料擷取時間內水位之變化情形，圖形顯示水位變化受水槽邊界反射影響並不明顯。圖 3-8 為擺置系列潛堤時，選取水槽各區段波高計所量

測之水位變化情形。在系列潛堤前方之深水段，非線性量不大因此水位無劇烈擾動之變化，而在淺化段與淺水段之系列潛堤中間及後方，則因潛堤作用，有明顯非線性淺化的結果。

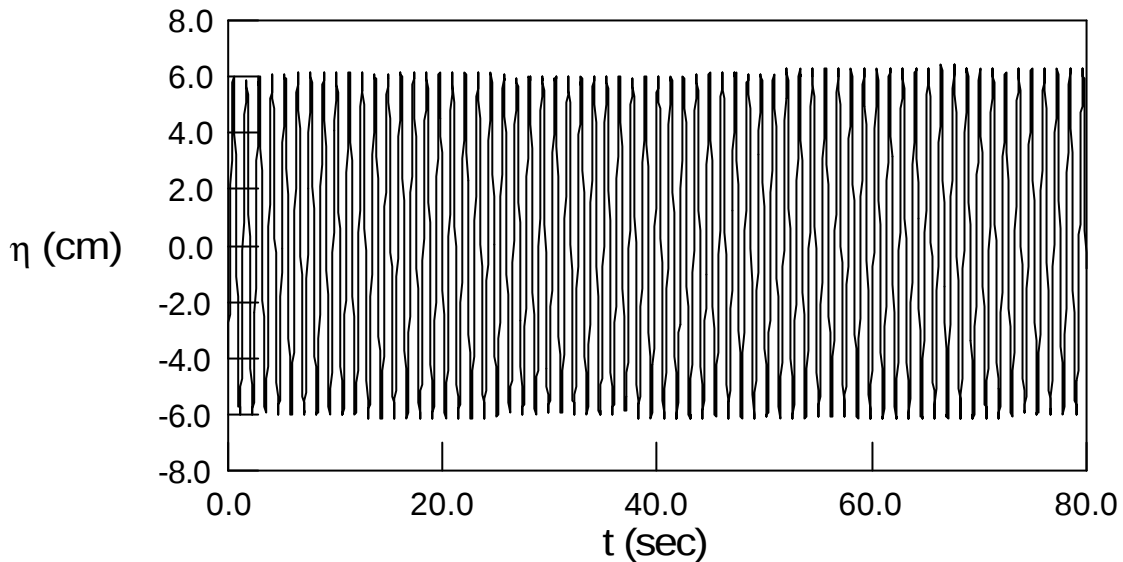


圖 3-7 未擺置系列潛堤情形下，波浪之水位變化圖

2. 反射率計算方法

當入射波經過結構物反射後，在結構物前與原入射波浪產生合成波浪，故波高計測得之波浪時序列為入射波與反射波疊加之結果。因此，在實際工程上或試驗室中，必須經過分離出入、反射波浪程序，方能精確估算波浪反射率。有關反射率的計算，一般採用 Goda 和 Suzuki (1976) 的二點法及 Mansard 和 Funke (1980) 的三點法。Goda 和 Suzuki (1976) 的反射率計算僅採用兩個測點，取樣波浪頻率範圍受測點間距影響甚大，對測點間距限制較多，且資料分析時受量測之誤差影響亦甚大。而 Mansard 和 Funke (1980) 則取三個測點，可增加取樣波浪頻率範圍，雖可提高分析精度，但無法處理斜向入射波浪，且在波高計擺置方面有其限制。

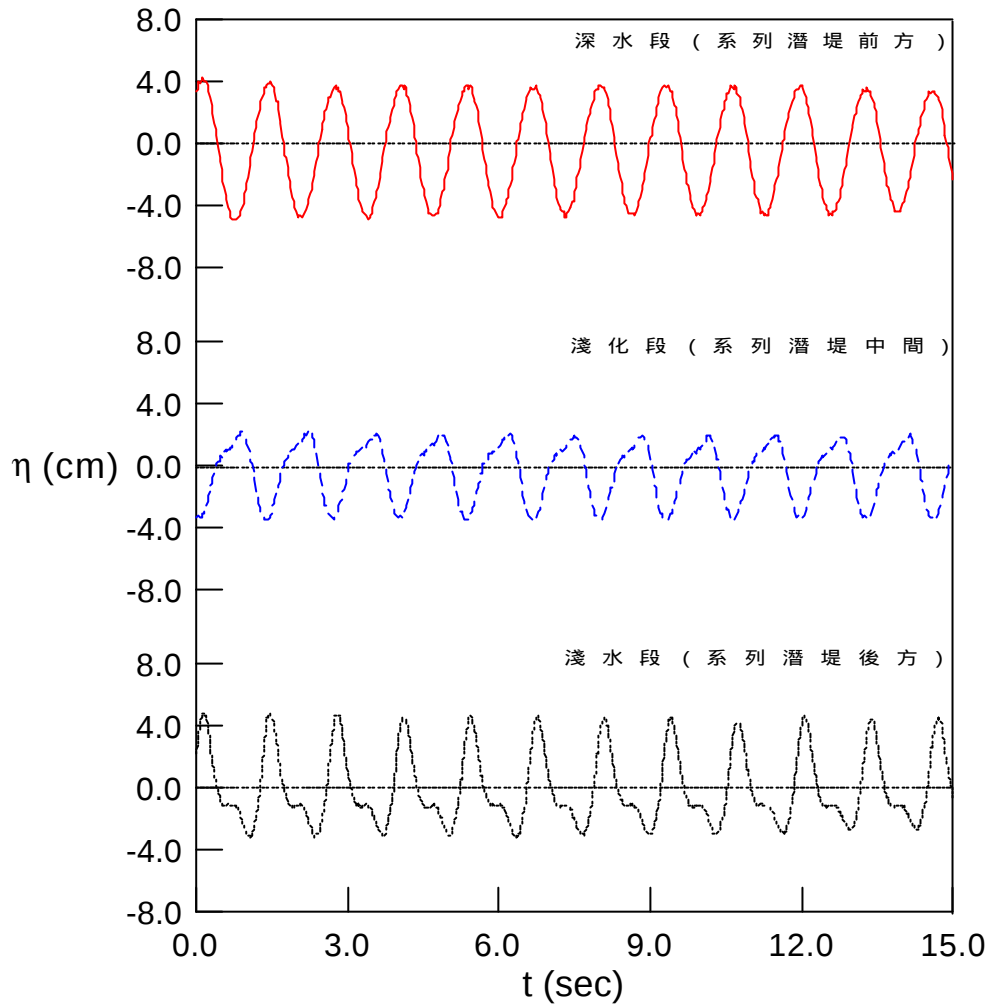


圖 3-8 擺置系列潛堤時，波浪之水位變化圖

本研究採用反射率的計算方法為 Isaacson (1991) 之三波高法，其係以三支固定波高計量測結構物前三測點合成波之振幅 A_1 、 A_2 及 A_3 ，無須量測相位角，即可求得入、反射波振幅及反射率。此法除可避免因相位角量測誤差所造成之影響，同時可利用簡單的波高計 (如鉤尺、計尺) 測取三測點之波高，推估正向及斜向入射波浪之反射率。其對於規則波浪之正向反射情況為假設自由水面變化為一入射及反射正弦波列重疊而成，座標系統一般以 x 軸為靜水面， x 與反射結構物之交點為 $x=0$ ，當入射波波峰到達 $x=0$ 時，時間取為 $t=0$ ，則自由水位變化 η 表示如下：

$$\eta_i = a_i \cos(kx \cos \theta - \omega t) + a_i R \cos(kx \cos \theta + \omega t + \epsilon)$$

$$\begin{aligned}
&= a_i [\cos(kx \cos \theta) \cdot \cos \omega t + \sin(kx \cos \theta) \cdot \sin \omega t + R \cos(kx \cos \theta + \varepsilon) \cdot \cos \omega t \\
&\quad - R \sin(kx \cos \theta + \varepsilon) \cdot \sin \omega t] \\
&= a_i [(\cos(kx \cos \theta) + R \cos(kx \cos \theta + \varepsilon)) \cdot \cos \omega t + (\sin(kx \cos \theta) + R \sin(kx \cos \theta + \varepsilon)) \cdot \sin \omega t]
\end{aligned} \tag{3-1}$$

$$\begin{aligned}
a^2 &= a_i^2 \{ [\cos(kx \cos \theta) + R \cos(kx \cos \theta + \varepsilon)]^2 + [\sin(kx \cos \theta) + R \sin(kx \cos \theta + \varepsilon)]^2 \} \\
&= a_i^2 [\cos^2(kx \cos \theta) + 2R \cos(kx \cos \theta) \cdot \cos(kx \cos \theta + \varepsilon) + R^2 \cos^2(kx \cos \theta + \varepsilon) \\
&\quad + \sin^2(kx \cos \theta) + 2R \sin(kx \cos \theta) \cdot \sin(kx \cos \theta + \varepsilon) + R^2 \sin^2(kx \cos \theta + \varepsilon)] \\
&= a_i^2 [1 + R^2 + 2R(\cos(kx \cos \theta + kx \cos \theta + \varepsilon))]
\end{aligned} \tag{3-2}$$

$$\tan \varepsilon = \frac{(A-1) \cdot (\cos(kx_2 \cdot (\cos \theta + \cos \theta)) - B) - (B-1) \cdot \cos(kx_1 \cdot (\cos \theta + \cos \theta)) - A}{(A-1) \cdot \sin(kx_2 \cos \theta + kx_2 \cos \theta) - (B-1) \cdot \sin(kx_1 \cdot (\cos \theta + \cos \theta))} \tag{3-3}$$

$$A = \frac{a_1^2}{a_0^2} = \frac{1 + R^2 + 2R \cos(kx_1 \cdot (\cos \theta + \cos \theta) + \varepsilon)}{1 + R^2 + 2R \cos \varepsilon} \tag{3-4}$$

$$B = \frac{a_2^2}{a_0^2} = \frac{1 + R^2 + 2R \cos(kx_2 \cdot (\cos \theta + \cos \theta) + \varepsilon)}{1 + R^2 + 2R \cos \varepsilon} \tag{3-5}$$

$$\begin{aligned}
\therefore R &= \frac{1}{1-A} [A \cos \varepsilon - \cos(kx_1 \cdot (\cos \theta + \cos \theta) + \varepsilon) \\
&\quad \pm \sqrt{(\cos(kx_1 \cdot (\cos \theta + \cos \theta) + \varepsilon) - A \cos \varepsilon)^2 - (1-A)^2}]
\end{aligned} \tag{3-6}$$

$$0 \leq R \leq 1$$

式中 a_i , a_r 為入、反射波振幅 , θ 為波相角 , ε 為結構物反射引起之相位改變 , η_i 為入射水位 , R 為反射率 , k 、 ω 分別為週波數、週頻率。

第四章 模式驗證

在波浪通過系列潛堤之模式驗證，本研究主要分為水平底床及斜坡底床上設置系列潛堤的配置作模式驗證。

4.1 水平底床之模式驗證

在波浪通過水平底床系列潛堤之模式驗證，參考張等人 (1997) 的試驗條件及結果，對於不同波浪條件和潛堤佈置進行反射率數值計算。利用本研究模式 (EMSE) 計算不同潛堤個數、不同水深、不同潛堤間距下的反射率變化情形。其中波浪週期為 0.4~1.6 秒，波高為 1.0 公分的規則波，水深分別為 8、12 及 16 公分，潛堤的個數分別為 4、6 及 8 個，潛堤間距為 25 及 50 公分，堤高固定為 4 公分，堤寬固定為 12 公分，其計算條件如表 4-1 所示：

表 4-1 水平底床系列潛堤和波浪條件的佈置 (張等人，1997)

潛堤型式	潛堤數(N)	潛堤間距(S)	水深(h)	波浪條件	
				週期	波高
				0.4~1.6sec	1.0 cm

圖 4-1 及圖 4-2 為固定水深及潛堤間距，改變不同潛堤個數($N=4, 6$ 及 8)，其不同波浪條件與反射率值變化情形。由圖中可知，本研究模式 (EMSE) 在計算潛堤個數增加的反射率變化時，可以適切地反應出在 $2S/L$ 於整數倍附近時，反射率明顯變大的情形，且亦可反應出隨著潛堤個數的增加，反射率尖峰值($R_{\max}$)變大的趨勢，以上趨勢與張等人 (1997) 的試驗結果相近。圖 4-3 及圖 4-4 為變化水深($D/h=1/2$ 、 $1/3$ 及 $1/4$)，其波浪條件 $2S/L$ 與反射率變化的情形，結果顯示若 D/h 愈大時，本研究模式所計算結果反射率尖峰值增大，且非反射率尖峰值的部分亦增大。此現象與張等人 (1997) 的試驗結果相近。因此本研究模式計算波浪通過水平底床系列潛堤之反射率變化具有相當準確性。

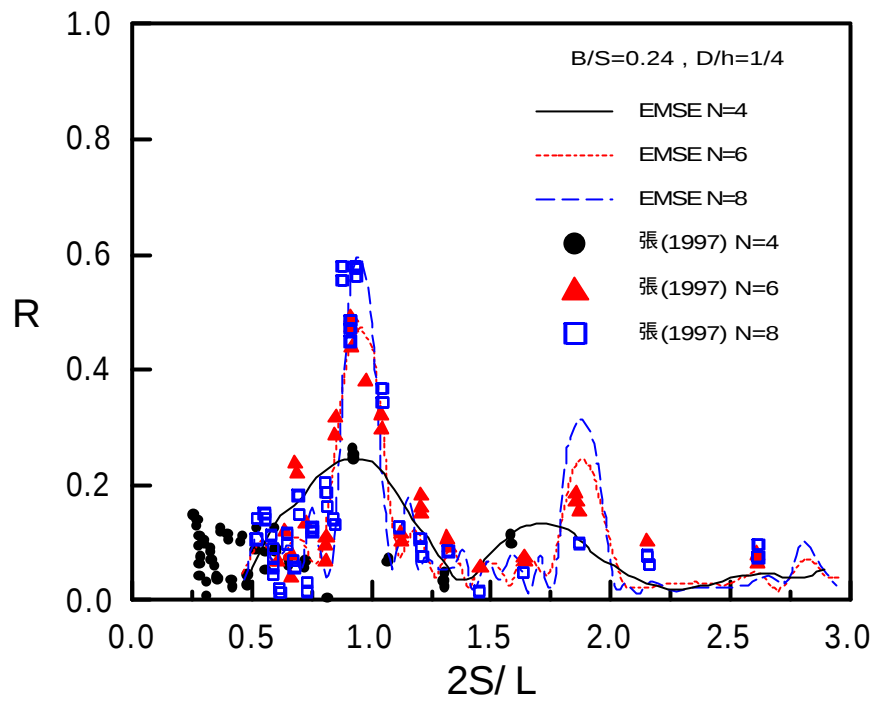


圖 4-1 不同潛堤個數反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($B/S = 0.24$, $D/h = 1/4$)

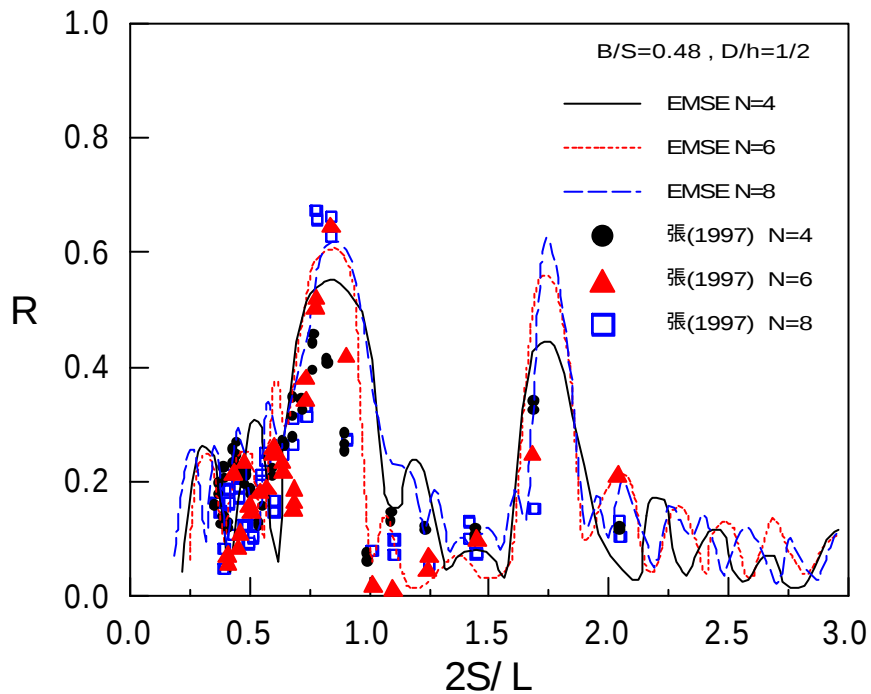


圖 4-2 不同潛堤個數反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($B/S = 0.48$, $D/h = 1/2$)

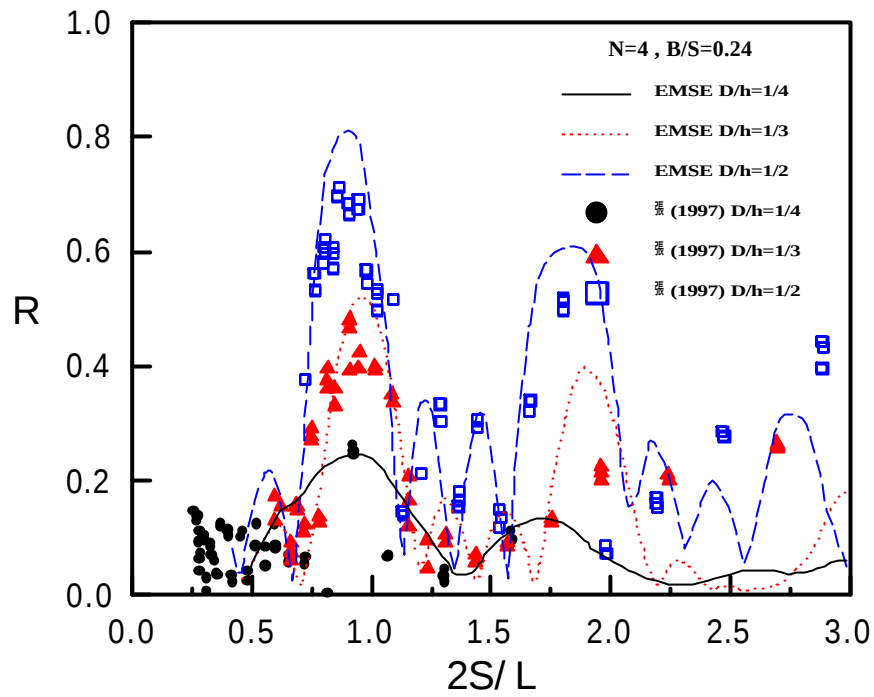


圖 4-3 不同相對水深反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N = 4$, $B/S = 0.24$)

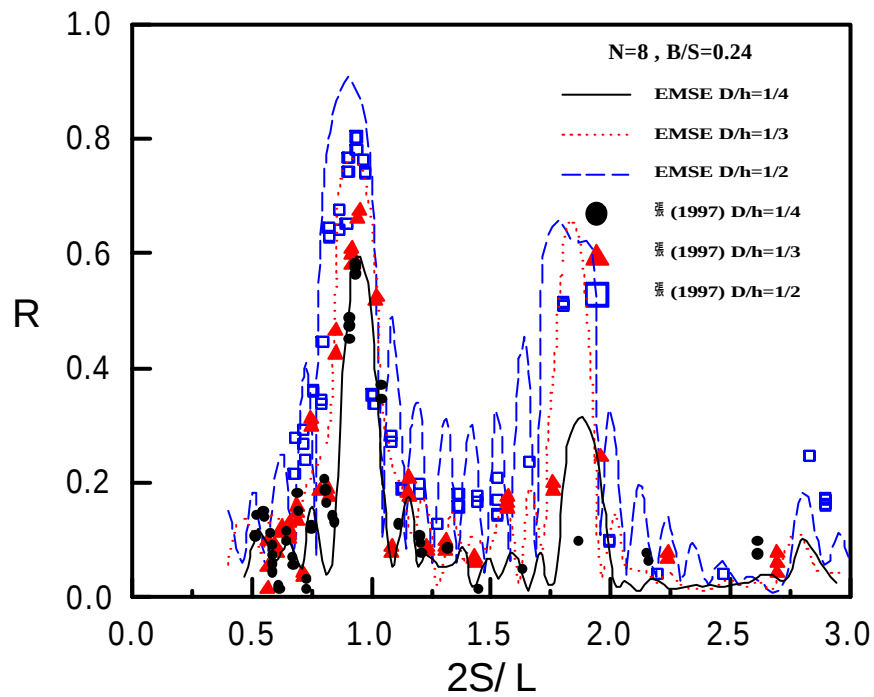


圖 4-4 不同相對水深反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N = 8$, $B/S = 0.24$)

4.2 斜坡底床之模式驗證

除了以張等人 (1997) 的試驗結果驗證本模式之適用性，有關波浪通過斜坡底床系列潛堤模式驗證，本研究並在本所港灣技術研究中心進行水工模型試驗，以驗證斜坡底床的適用性，驗證條件如表 4-2 所示。圖 4-5 及圖 4-6 為斜坡上設置兩個系列潛堤試驗，其條件為潛堤個數 (N) 為 2 個，潛堤寬度 (B) 為 50 公分，潛堤間距 (S) 為 200 公分，斜坡坡度為 1/10，入射波水深 (h_1) 為 100 及 80 公分兩種，波浪週期 (T) 為 0.8~8.0 秒，入射波高 (H_1) 則採用 6 公分的規則波來進行計算。在圖中圓點為實驗結果，實線則為模式的計算結果。由圖可知在 $2S/L=1.0\sim2.0$ 的波浪條件範圍內，共發生三次的反射率振盪變化，並在 $2S/L=0.75$ 的附近發生反射率尖峰值。其水工試驗數據和數值計算的結果，在整體的趨勢而言十分吻合。

圖 4-7 圖 4-9 為斜坡上設置四個系列潛堤試驗的佈置，佈置條件為潛堤個數(N) 4 個，潛堤寬度(B)為 103 公分，潛堤間距(S)為 215 公分，入射波水深(h_1)為 69 公分，波浪週期(T)約為 0.8~8.0 秒，入射波高(H_1)則為 6 公分的規則波來進行計算。其中圖 4-7 及圖 4-8 是坡度分別為 1/20 及 1/30 之底床，結果顯示在 $2S/L=0.75$ 及 $2S/L=1.75$ 的波浪條件下，會發生反射率尖峰值，其試驗值和數值計算的結果，其趨勢非常相似，且反射值雖有增減但亦非常相近。整體而言，本研究模式 (EMSE) 具有相當正確性。在圖 4-9 中則為坡度為 1/20 並且堤後有碎波之情形，其數值計算和實驗數據的比較亦是相當的吻合，顯示本研究模式可以正確地模擬堤後碎波的情形。因此，根據圖 4-5 圖 4-9 的結果，若利用本研究模式來計算波浪通過斜坡底床上系列潛堤之反射率變化，具有其可靠的精確度。

表 4-2 斜坡底床系列潛堤和波浪條件的佈置

潛堤型式	潛堤數 (N)	潛堤間距(S) (單位:公分)	水深(h) (單位:公分)	底床坡度 ($\tan \beta$)	波浪條件	
					週期 (單位:秒)	波高 (單位:公分)
矩型	4	215	69	1/30、1/20	0.8~8.0	6.0
	2	200	80、100	1/10	0.8~8.0	6.0

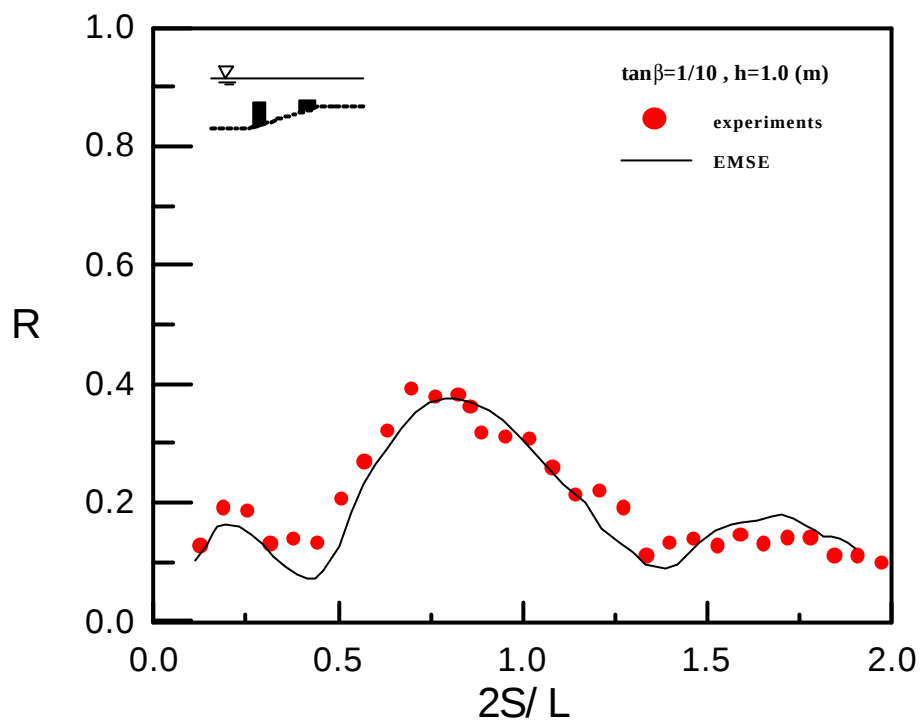


圖 4-5 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖
(無碎波, $\tan\beta = 1/10$, $h = 1$ m)

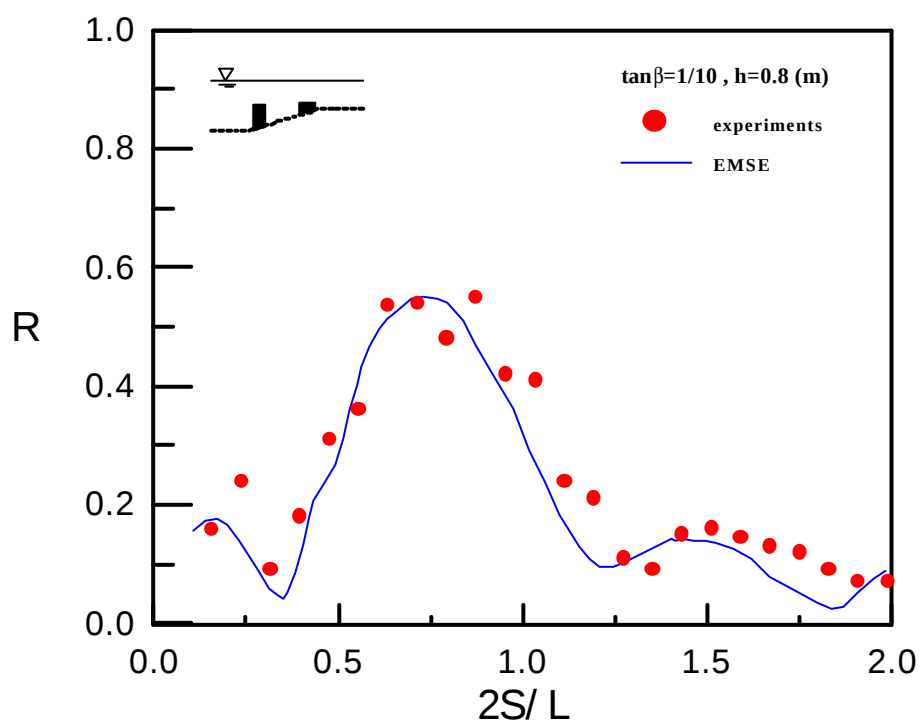


圖 4-6 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖
(無碎波, $\tan\beta = 1/10$, $h = 0.8$ m)

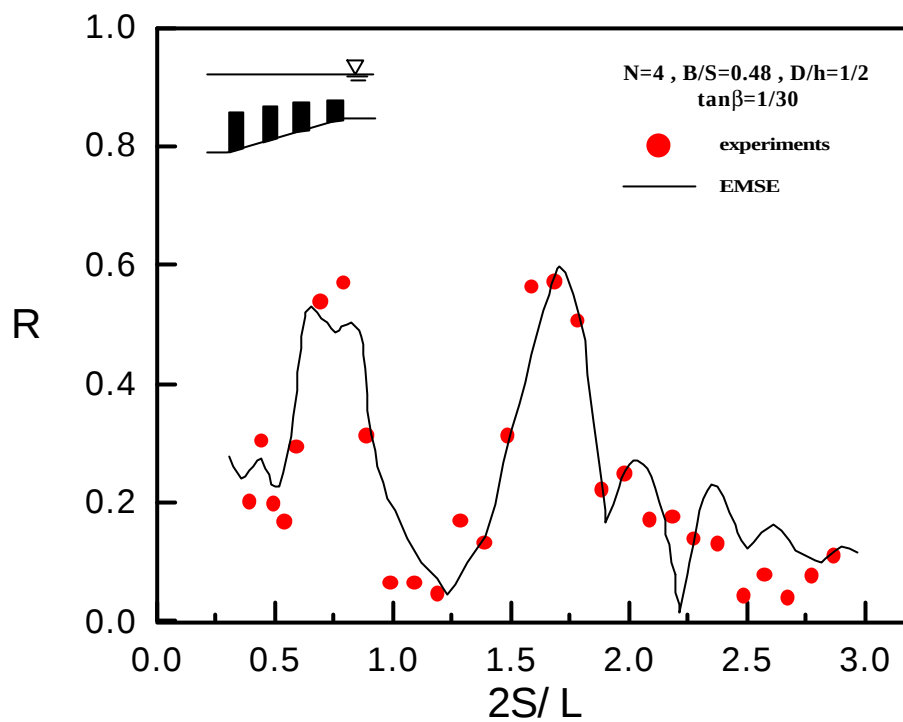


圖 4-7 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖
(無碎波, $\tan\beta = 1/30$)

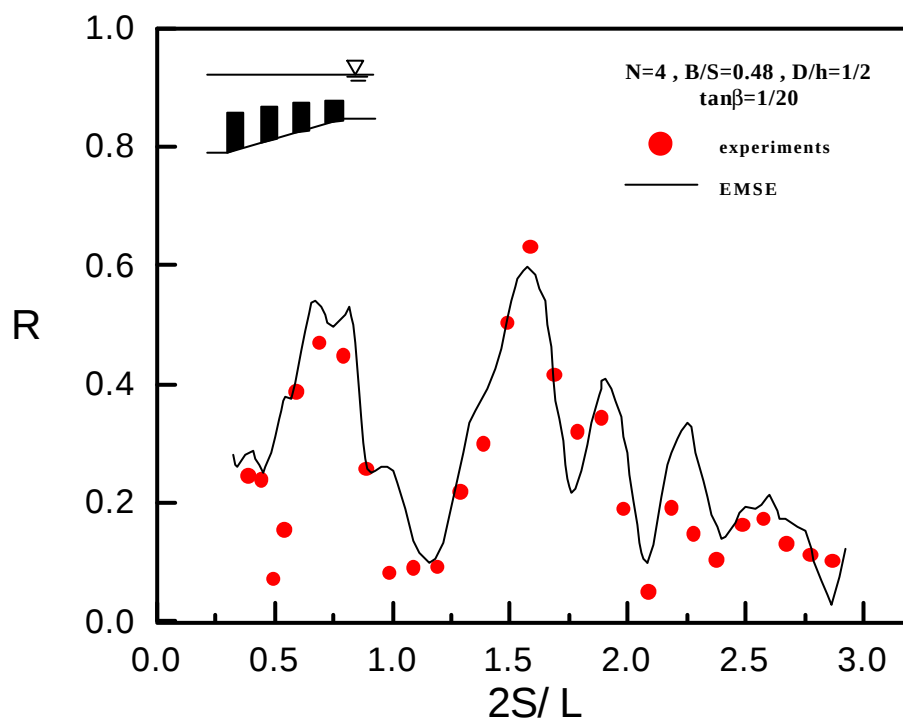


圖 4-8 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖
(無碎波, $\tan\beta = 1/20$)

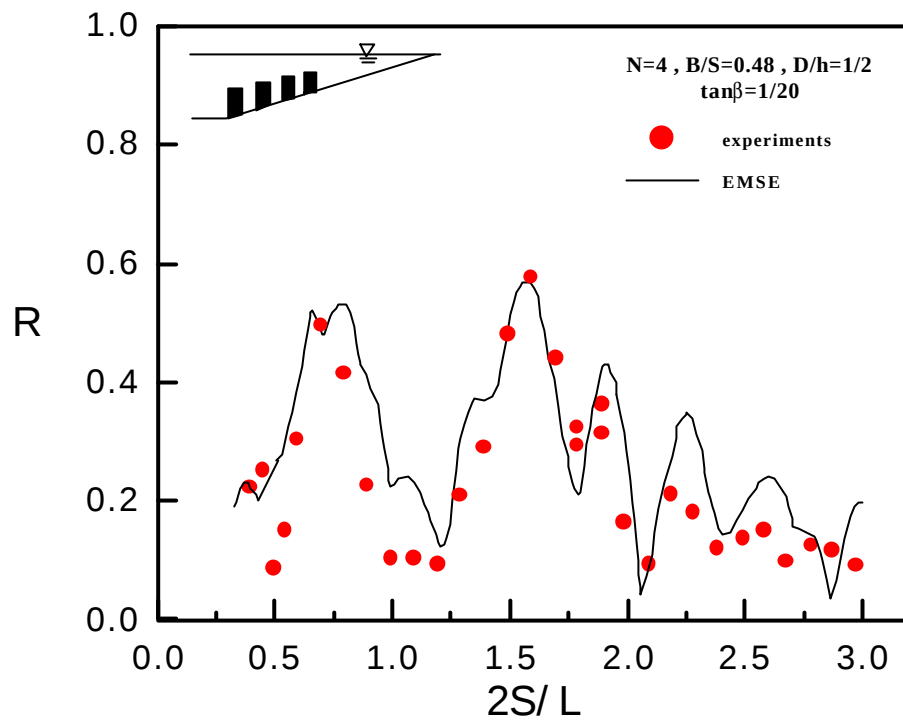


圖 4-9 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖
 (有碎波, $\tan\beta = 1/20$)

第五章 結果與討論

底床上佈置系列潛堤在應用至實際工程上之前，須先瞭解潛堤佈置與各影響因子的關係，如此才能使潛堤發揮最大之防治功能。圖 5-1 為各影響因子所代表的物理意義示意圖，本研究依據潛堤堤體本身、佈置方式及底床坡度的不同，針對不同波浪條件通過系列潛堤所產生的布拉格反射效應來進行探討。其影響因子關係式及無因次關係式表示如下：

$$\begin{aligned} R &= f_1(H, L, h, S, B, N, D, \tan \beta) \\ &= f_2(S/L, B/S, D/h, N, \tan \beta) \end{aligned} \quad (5-1)$$

圖 5-1 及式(5-1)的物理意義為 h_1 為入射水深， h_2 為透射水深， h 為堤體中心位置水深， B 為潛堤堤寬， D 為潛堤堤高， S' 為堤體間距， N 為堤體個數， H_1 為入射波高， L 為入射波長， $\tan \beta$ 為底床坡度。

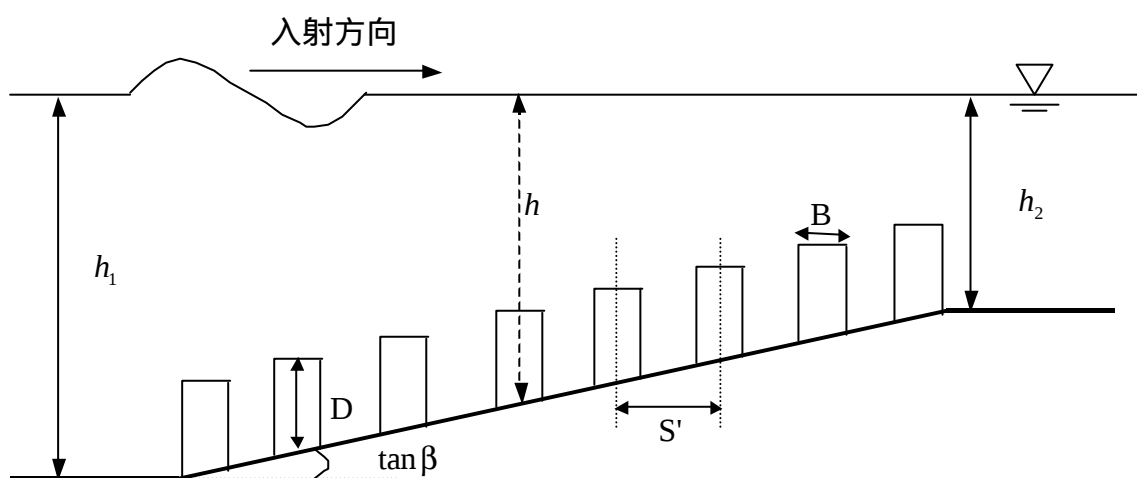


圖 5-1 系列潛堤佈置示意圖

對於波浪通過系列潛堤之布拉格反射研究，在本研究中主要利用模式計算，探討在不同波浪條件通過不同系列潛堤配置如水深、底床坡度、潛堤個數、潛堤間距、潛堤高度以及有無碎波發生其反射率變化之情形。

本研究的波浪週期範圍為 0.4 ~ 4.0 秒，波高為 1.0 公分的規則波，入射波水深為 30 公分，底床坡度為 $\tan \beta = 0, 1/30, 1/20$ 及 $1/10$ 為潛堤個數(N)為 4、6 及 8 個，潛堤間距 (S') 則採一基本量 S 為 25 公分及其倍數間距 $2S$ 為 50 公分兩組。潛堤高度 (D) 則依據相對高度 $D/h=1/2, 1/3$ 及 $1/4$ 等 3 組變化。堤寬 (B) 固定為 12 公分，計算條件表 5-1 所示。

表 5-1 系列潛堤和波浪條件的配置

潛堤型式	底床坡度 ($\tan \beta$)	潛堤數 (N)	潛堤間距 (S')	水深 (h_1)	波浪條件	
					週期(T)	波高(H_i)
矩型	0,1/30,1/20,1/10	4、6、8	50、25cm	30 cm	0.4~4.0 sec	1.0 cm

由 Miles (1981) 理論知在布拉格反射條件下，波浪反射率與兩倍沙漣間距除以波長之值（即 $2S/L$ ）有關。亦即在 $2S/L$ 等於整數倍時反射率有激增之現象，故以 $2S/L$ 之值來探討布拉格反射之波浪場反射率變化情形。本研究所分析之圖形，其縱座標軸為反射率值 R ，橫座標軸為 $2S/L$ ，其中 L 為原入射波波長而非潛堤上波長， S 則採用一潛堤間距之單位基本量 25 公分。在 S 固定下，改變波浪週期 T 亦即改變 L ，對不同潛堤間距佈置時，可相應於同一波長進行比較。本研究並將各影響因子無因次化（如： $\tan \beta$ 、 N 、 B/S 、 D/h 及 S/L ）探討其互相影響之關係，茲將計算結果討論如下：

5.1 底床坡度的影響

圖 5-2 為潛堤個數 $N=4$ ，潛堤寬度 $B=12$ 公分及潛堤間距 $S'=50$ 公分，即 $B/S'=0.24$ 。潛堤高度為潛堤堤址中心位置的相對高度固定(即 D/h)為 $1/2$ 。改變不同的底床坡度 $\tan \beta = 0, 1/30, 1/20$ 及 $1/10$ 和波浪條件($2S/L$)進行反射率計算。由圖可知 R 和 $2S/L$ 的關係呈現一連串波動形狀，在 $2S/L=0.4$ 及 1.5 附近皆有布拉格反射的現象，且底床坡度愈大，布拉格的反射率尖峰值愈大，發生反射率最大值的波浪條件，

愈向較小之 $2S/L$ 值偏移。其表示當坡度增加時，水深相對變淺，波浪入射後，造成波浪性質的改變，如波長及波速等，使發生布拉格反射條件相對改變，所以斜坡上之系列潛堤發生布拉格反射時之 $2S/L$ 值會向較小之 $2S/L$ 偏移。在週期較短的布拉格效應發生時，即 $2S/L=1.5$ 附近，其反射率尖峰值隨著底床坡度而有明顯變化，其原因為底床坡度變化所造成的波浪波長變化與原入射波長比值較大所致。

圖 5-3 及圖 5-4 分別為潛堤個數 4 及 8 個的佈置，潛堤間距改變為 $B/S'=0.48$ ，圖形顯示：底床坡度在 $\tan\beta=0.0$ 、 $1/30$ 及 $1/20$ 時，發生布拉格反射的現象並不明顯。但當底床坡度達 $1/10$ 時，則可清楚看出有明顯反射率激增布拉格共振的現象。在較大 B/S' 配置時，由於 S' 較小，潛堤配置區較小，底床坡度必須高達 $1/10$ 時，由於水深變化較大所造成之波浪特性的改變較大，才足以使系列潛堤產生明顯之布拉格反射。且當坡度變大時，系列潛堤堤體本身高度增加，堤頂水深小，堤體對通過的波浪產生較大的影響，其表示系列潛堤設置在坡度較大的底床上，布拉格反射的效果較好。

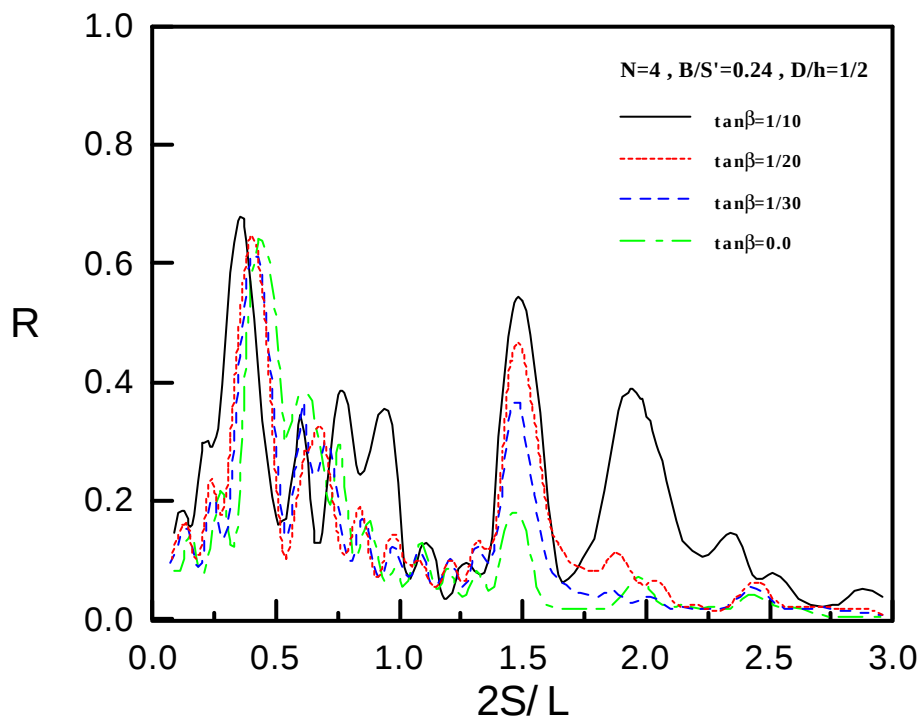


圖 5-2 不同底床坡度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖

($N=4$, $B/S'=0.24$, $D/h=1/2$)

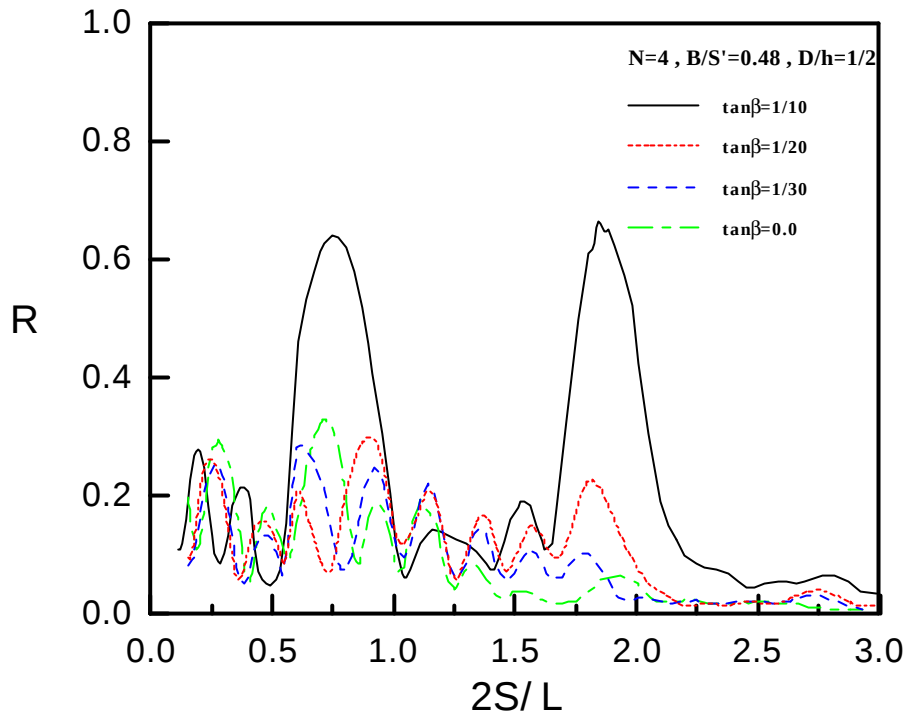


圖 5-3 不同底床坡度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N=4$, $B/S'=0.48$, $D/h=1/2$)

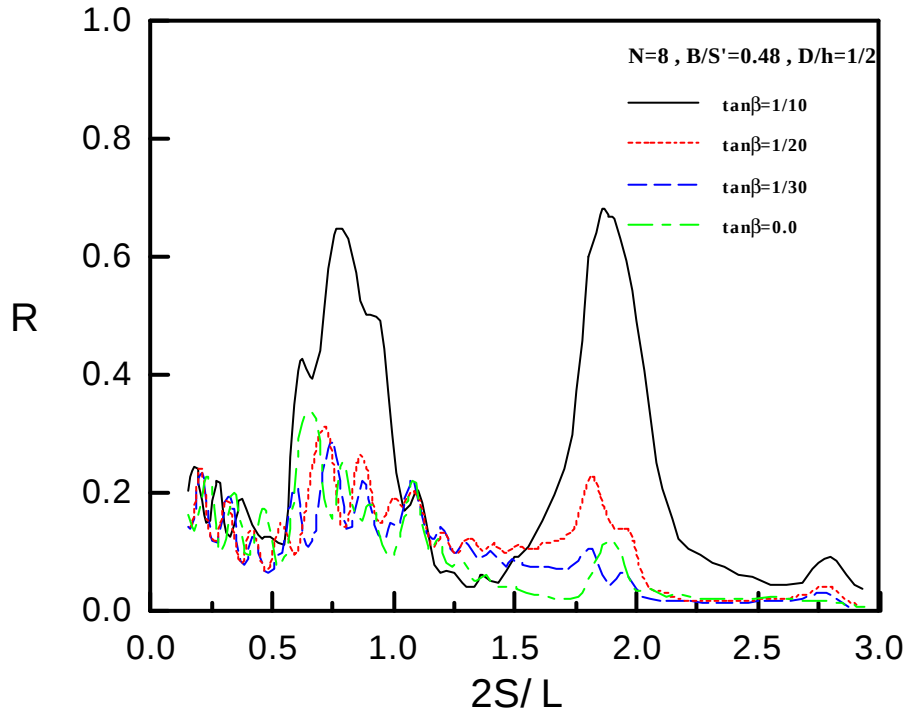


圖 5-4 不同底床坡度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N=8$, $B/S'=0.48$, $D/h=1/2$)

5.2 潛堤個數的影響

圖 5-5 圖 5-8 為固定潛堤間距 ($B/S'=0.48$) 及潛堤高度 ($D/h=1/2$) 探討不同潛堤個數，在水平與斜坡底床反射率變化情形。圖 5-5 顯示：水平底床上系列潛堤之布拉格反射情形並不明顯，在 $2S/L=0.7$ 附近反射率最大，在 $2S/L=1.9$ 時，反射率值會隨著潛堤個數增加而增大。圖 5-6 則為底床坡度 $1/30$ 之系列潛堤佈置，其整體反射率變化會隨著潛堤個數的增加而有所變動，但反射率與潛堤個數並無明顯的趨勢。而圖 5-7 及圖 5-8 亦是同樣之情形，且當底床坡度達 $1/10$ 時，潛堤個數增加並無反射率有明顯之變化。其表示斜坡底床上之系列潛堤，個數多寡對反射率影響差異不大。探討其原因為反射率之大小主要受底床斜坡頂端之少數幾個潛堤來決定，因為在斜坡頂端的潛堤，堤頂水深較小，波浪受影響較大；而在水深愈深之位置，潛堤對於波浪反射的影響相對較小。基於上述結果，反射率大小對於斜坡底床之系列潛堤(D/h 及 $\tan \beta$ 固定)而言，其個數多寡影響不大，潛堤所在位置的影響較大。

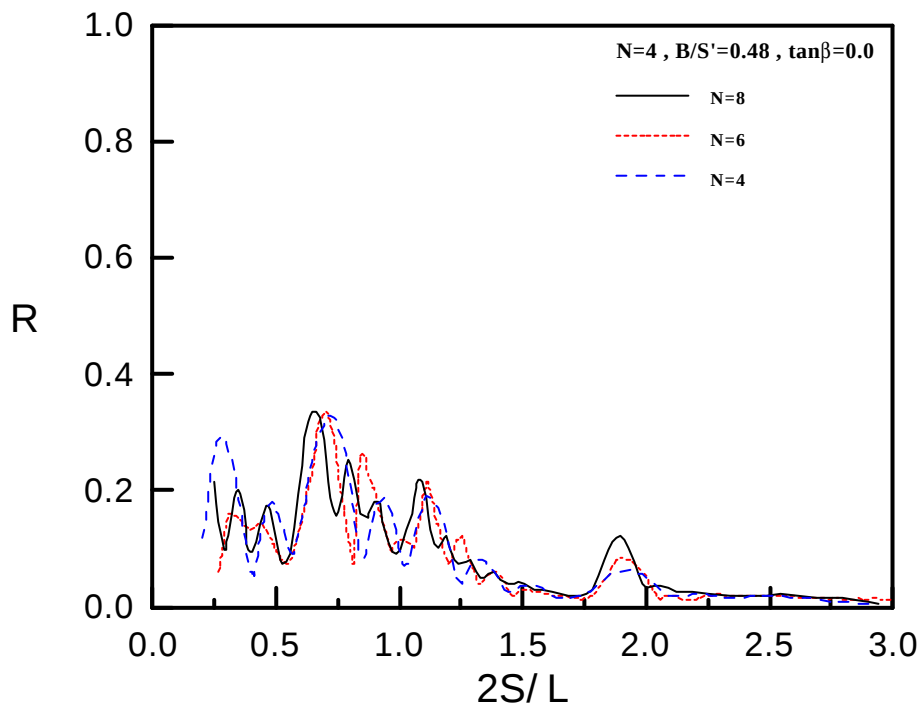


圖 5-5 不同潛堤個數反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($B/S'=0.48$, $D/h=1/2$, $\tan\beta=0.0$)

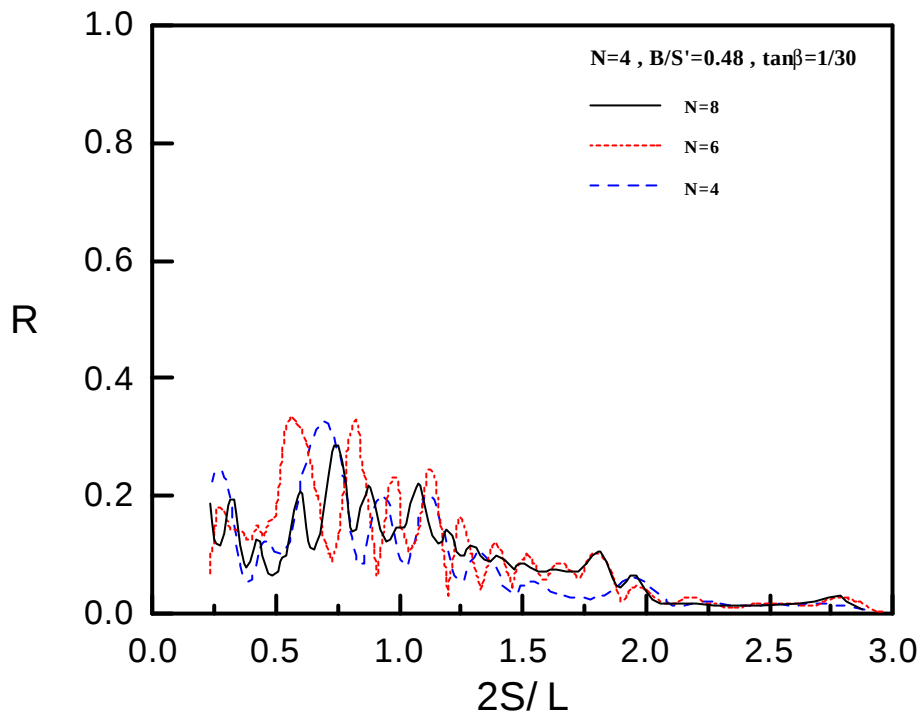


圖 5-6 不同潛堤個數反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($B/S' = 0.48$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/30$)

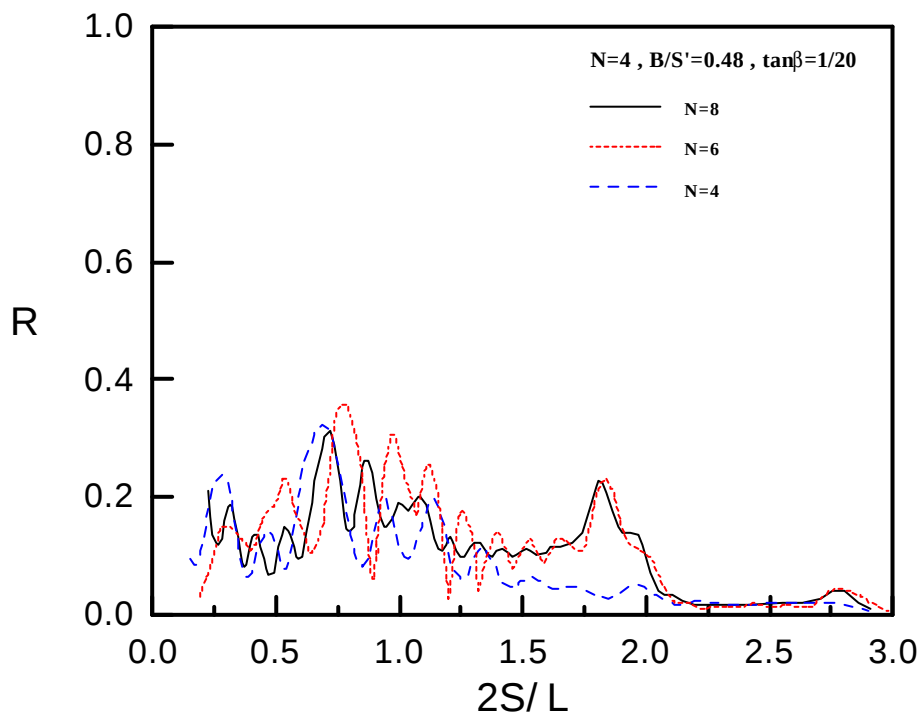


圖 5-7 不同潛堤個數反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($B/S' = 0.48$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/20$)

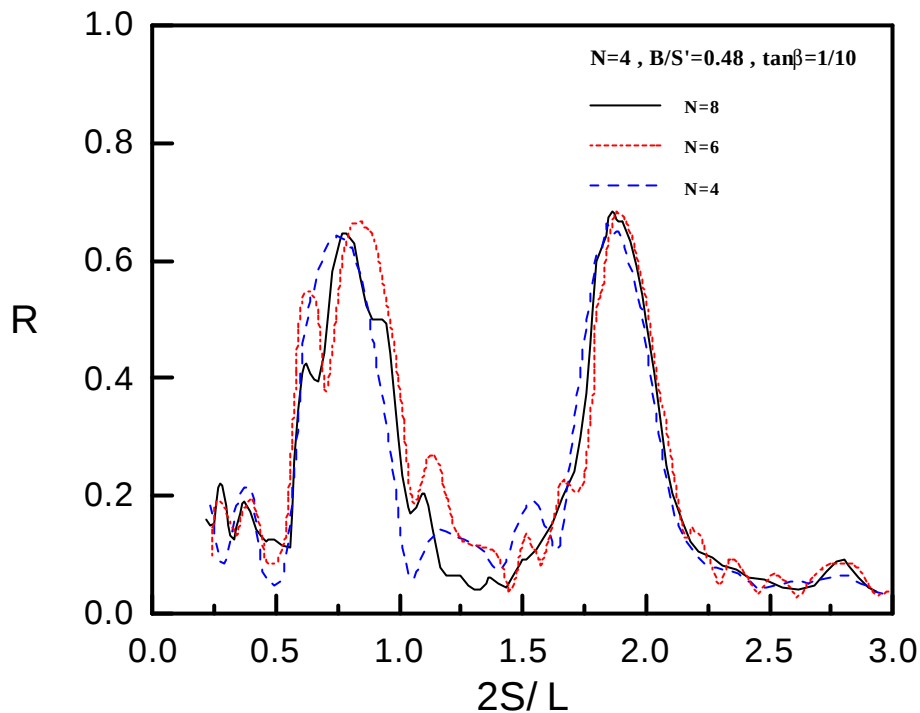


圖 5-8 不同潛堤個數反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖

($B/S' = 0.48$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/10$)

5.3 潛堤間距的影響

有關潛堤間距的影響比較，為能使相對應於同一波長進行比較，故在以下討論圖中 $2S/L$ 橫座標軸之 S ，採用固定一潛堤間距(S)的單位基本量 25 公分，故對於不同潛堤間距(S')佈置時，其產生尖峰反射率時之 $2S/L$ 值，並不全然在其整數倍附近，必須再乘上實際間距與單位基本間距，才是實際的 $2S'/L$ 。

圖 5-9 圖 5-12 為不同底床坡度，兩種潛堤間距($S' = 25, 50$ 公分)在不同波浪條件($2S/L$)下，反射率變化的情形。圖 5-9 顯示在水平底床上，當潛堤間距(S')為 25 公分時，即無因次參數 $B/S' = 0.48$ ，反射率在 $2S/L = 0.25$ 及 0.75 附近，雖有尖峰反射率值出現，但並不明顯，而在其餘的波浪條件下，反射率並無明顯增大的現象。但潛堤間距若增大為 50 公分時，即無因次參數 $B/S' = 0.24$ 時，反射率尖峰除出現在 $2S/L = 0.5$ 波浪條件，亦會在 $2S/L = 1.5$ 及 2.0 附近出現一較小之反射率尖峰。若

將 $2S/L$ 座標改為實際 $2S'/L$ ，則反射率尖峰值將發生在 $2S'/L$ 整數倍的位置，亦即在較大堤距($S'=50$ 公分)布拉格反射會發生在潛堤間距為半波長整數倍的波浪條件。

在斜坡底床之系列潛堤佈置，其布拉格反射變化情形則與水平底床佈置有所不同，隨著坡度增加及潛堤間距加大（即 $B/S'=0.24$ ），在相同波浪條件範圍($2S/L=0.2\sim 2.5$)會出現較多次之反射尖峰，且反射率尖峰值增大。因此底床坡度分別為 $1/30$ 及 $1/20$ 之圖 5-10 及圖 5-11 中，在 $2S/L=0.5$ 、 0.75 及 1.5 時均發生尖峰反射。所以水平底床與斜坡底床之不同在於潛堤間距變大時，斜坡底床有助於尖峰反射之產生與反射值增大。當坡度達 $1/10$ 時，如圖 5-12 所示，反射率隨波浪條件的變化，因坡度之增大及潛堤間距增加而波動更明顯，亦即各個反射率尖峰值表現得更加明顯。綜合以上分析結果，當斜坡底床上潛堤間距增大時，發生反射率尖峰的值將增大且發生尖峰值的頻率增加。

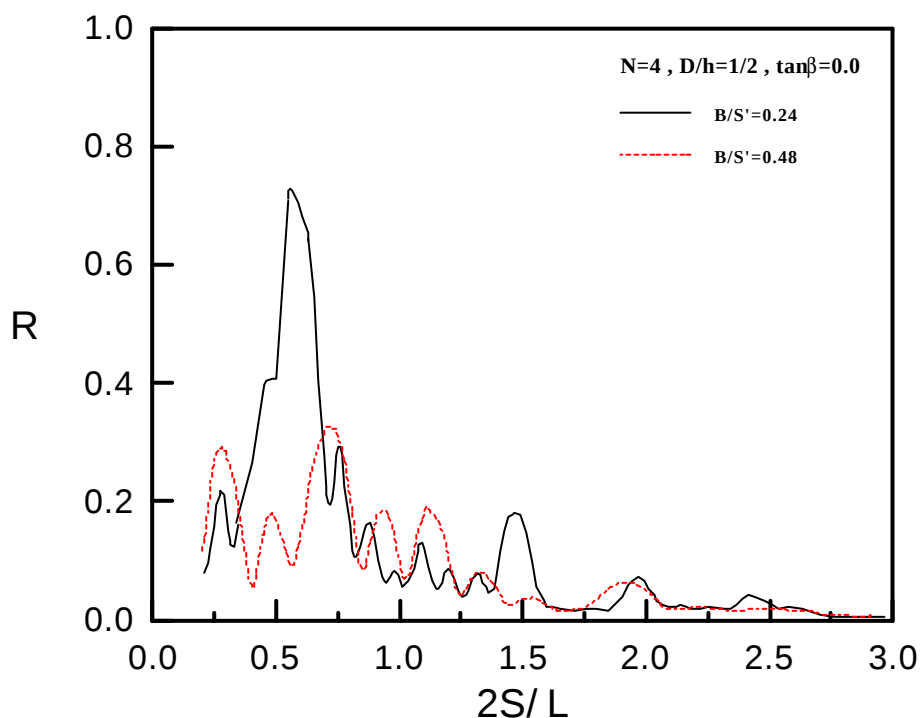


圖 5-9 不同潛堤間距反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N = 4$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 0.0$)

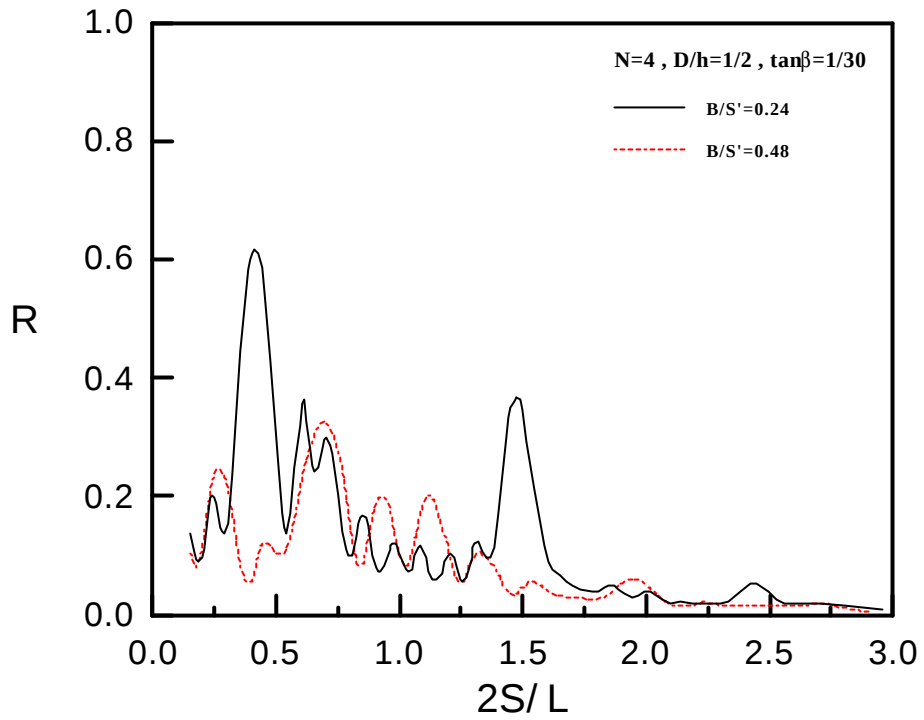


圖 5-10 不同潛堤間距反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N = 4$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/30$)

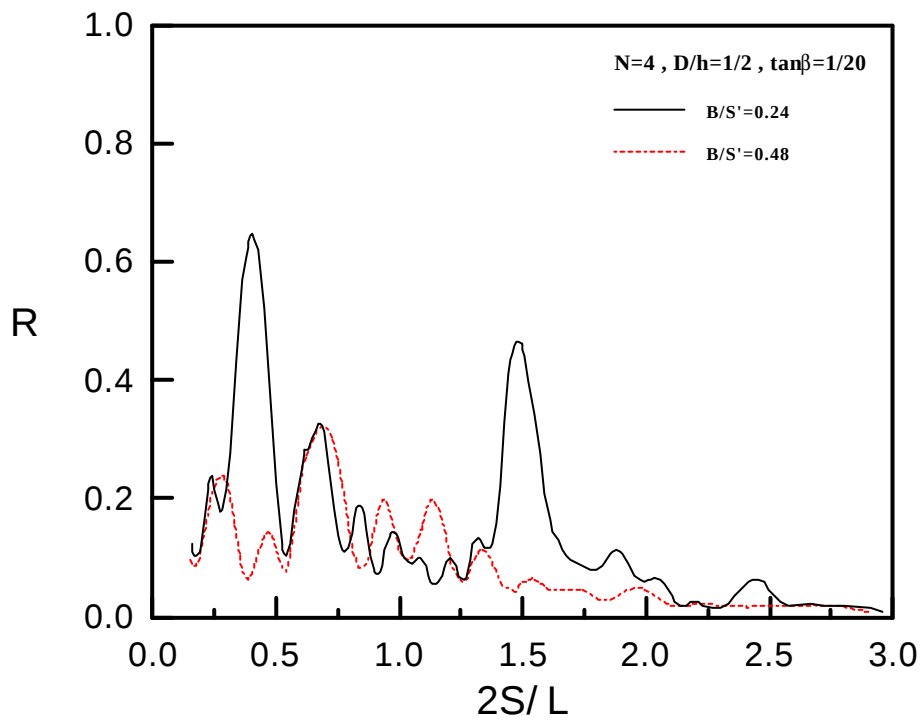


圖 5-11 不同潛堤間距反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N = 4$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/20$)

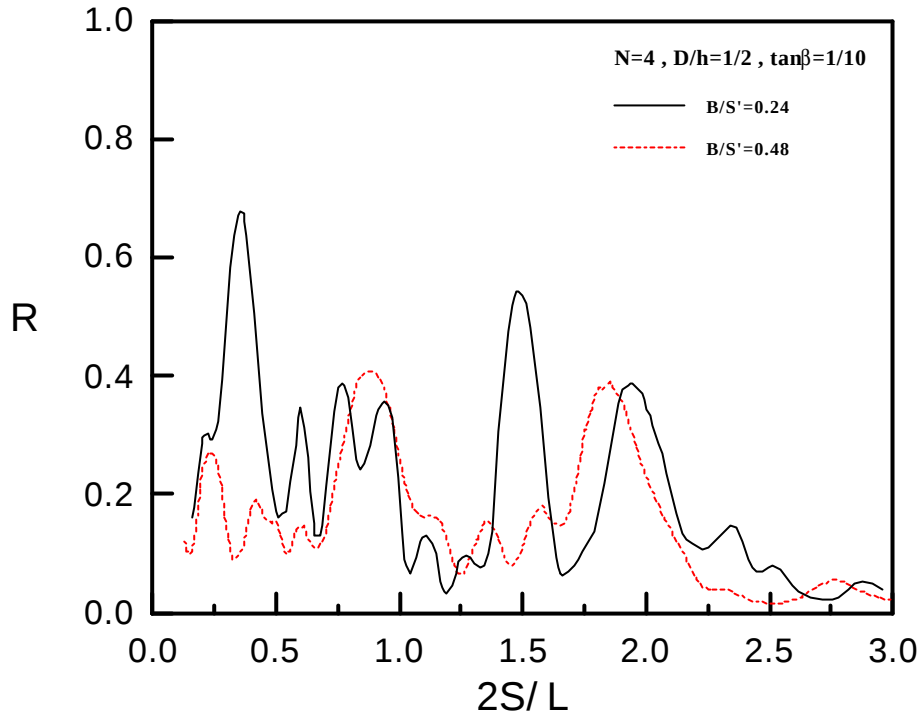


圖 5-12 不同潛堤間距反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖

($N = 4$, $D/h = 1/2$, $\tan\beta = 1/10$)

5.4 潛堤高度的影響

圖 5-13 圖 5-16 為固定潛堤間距($B/S'=0.48$)及底床坡度($\tan\beta = 0.0$ 、 $1/30$ 、 $1/20$ 及 $1/10$)探討不同潛堤高度及波浪條件與反射率變化情形中。圖 5-13 顯示在水平底床及潛堤佈置 ($N=4$ 及 $B/S'=0.48$)，改變不同的潛堤高度 ($D/h=1/2$ 、 $1/3$ 及 $1/4$) 的計算結果，由圖顯示反射率隨 D/h 增加而增大。而在斜坡底床上，如圖 5-14 圖 5-16 亦是相同之情形，尤其當坡度為 $1/10$ 時，其 R 隨 D/h 增加而變大之趨勢更明顯，且 $R_{\max}$ 有往較小 $2S/L$ 條件發生的趨勢。因此當設置的潛堤高度愈大，即 D/h 愈大時，其波浪透過量會愈小，潛堤對波浪產生之反射率增加。在圖形中不但反射率尖峰值會增大，連非反射率尖峰之波浪條件反射率亦會增大，在水平底床與斜坡底床情形皆相似。綜合以上結果，潛堤高度的增加，有助於波浪反射，且在較大底床坡度及 D/h ，其反射率最大值($R_{\max}$) 有往較小 $2S/L$ 條件發生的趨勢。

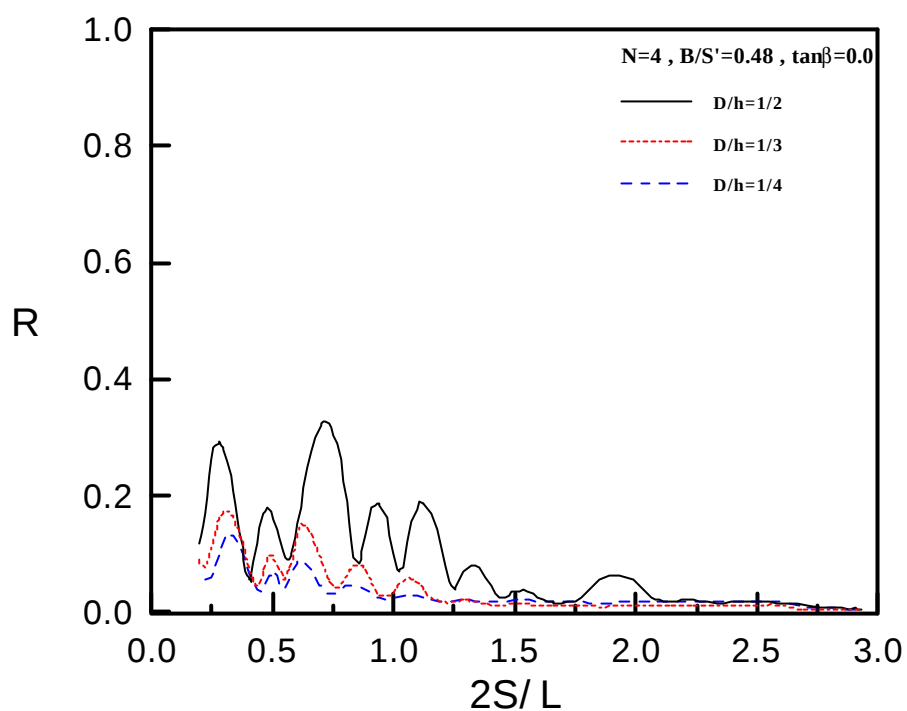


圖 5-13 不同潛堤高度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N = 4$, $B/S' = 0.48$, $\tan\beta = 0.0$)

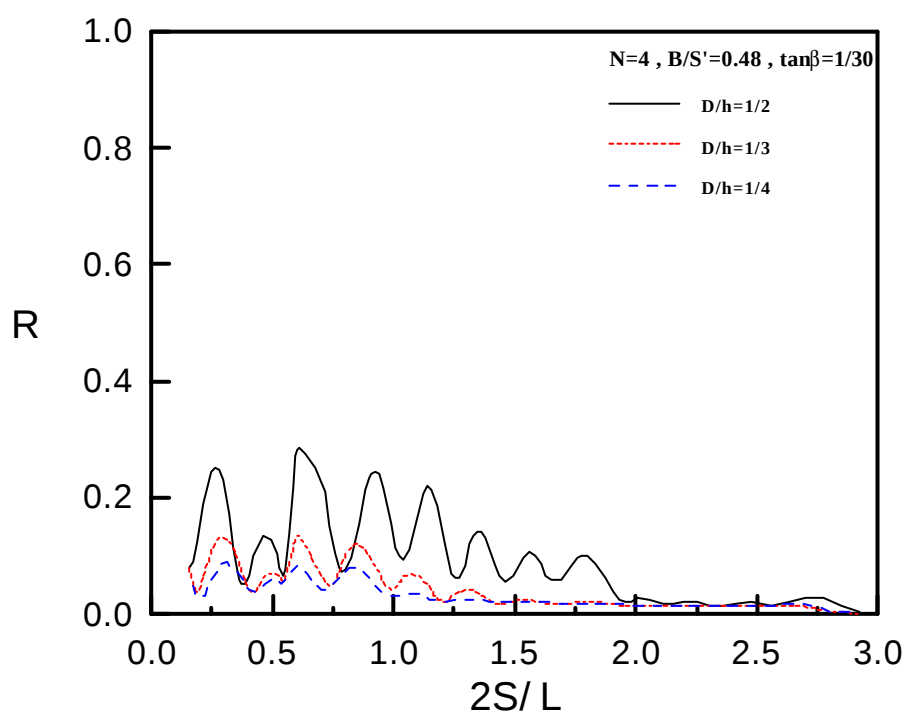


圖 5-14 不同潛堤高度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N = 4$, $B/S' = 0.48$, $\tan\beta = 1/30$)

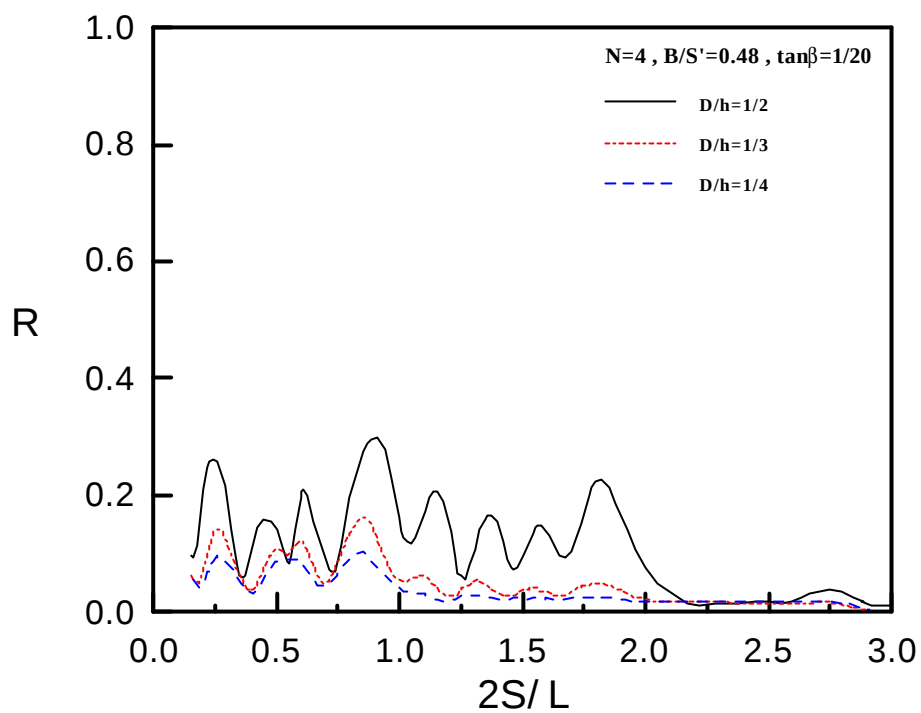


圖 5-15 不同潛堤高度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N = 4$, $B/S' = 0.48$, $\tan\beta = 1/20$)

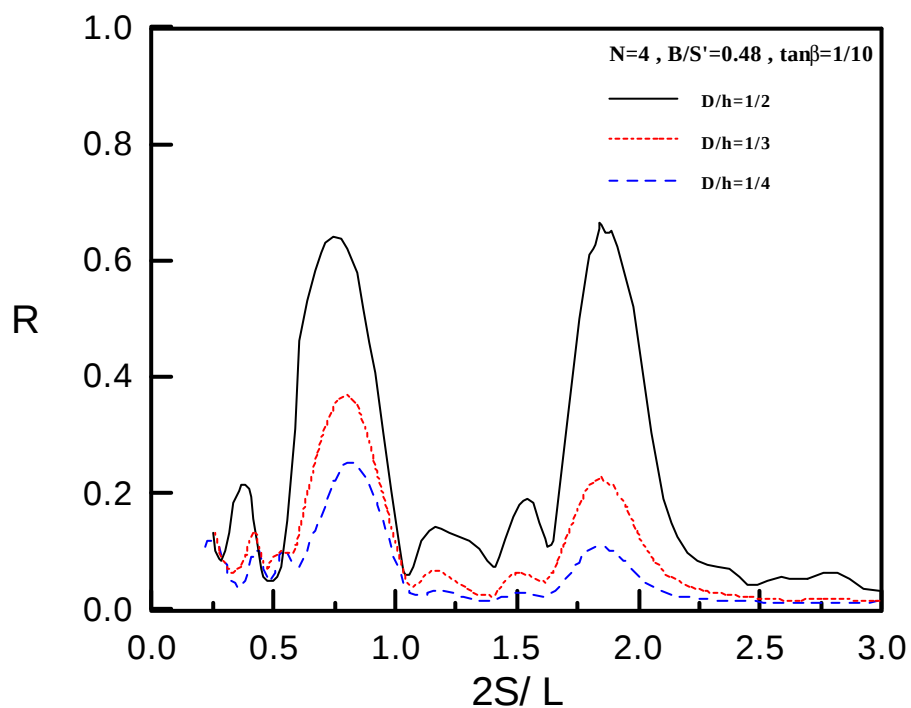


圖 5-16 不同潛堤高度反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N = 4$, $B/S' = 0.48$, $\tan\beta = 1/10$)

5.5 堤後碎波的影響

以上計算斜坡底床上之系列潛堤，均假設潛堤後方是等水深地形可允許波浪通過，但在實際海岸斜坡地形，波浪行進至近岸區將發生淺化及碎波現象。因此本研究將堤後碎波情形列入考慮。

圖 5-17 為固定底床坡度 $1/10$ ，潛堤高度 $D/h=1/2$ 及潛堤間距 $B/S'=0.24$ 之佈置下，比較有無堤後碎波發生的反射率變化情形。圖形顯示二者反射率變化雖互有增減，但在整體趨勢上大致相近。反射率在碎波情形下比無碎波有較多波動變化，兩者之反射率值相差不大。在圖 5-18 及圖 5-19 中，若潛堤間距為 $B/S'=0.48$ 與個數 $N=4$ 及 8 個潛堤配置，反射率變化情形亦與上述條件相似。由圖 5-17 圖 5-19 顯示：在碎波條件下，布拉格效應發生時的帶寬較寬，表示系列潛堤設置在碎波條件的地形，其適用的波浪範圍較大，尤其在較小 B/S' 及 N 配置下其現象更明顯。因此，系列潛堤設置至現場的海岸地形，由於具淺化及碎波效應，使更多的波浪條件能發生較大反射率。

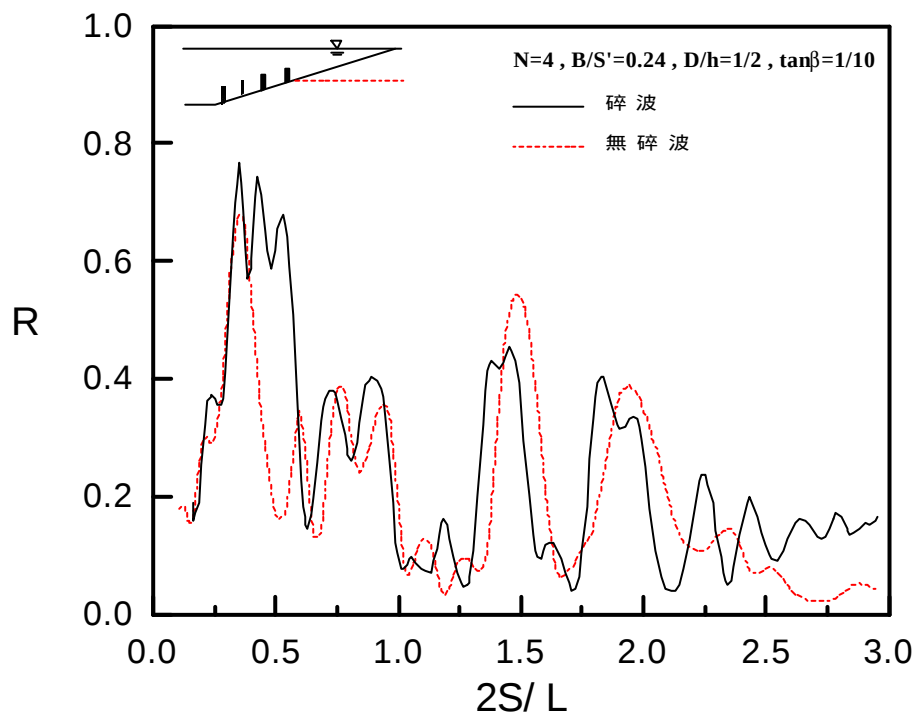


圖 5-17 有無堤後碎波發生反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N=4, D/h=1/2, B/S'=0.24, \tan\beta=1/10$)

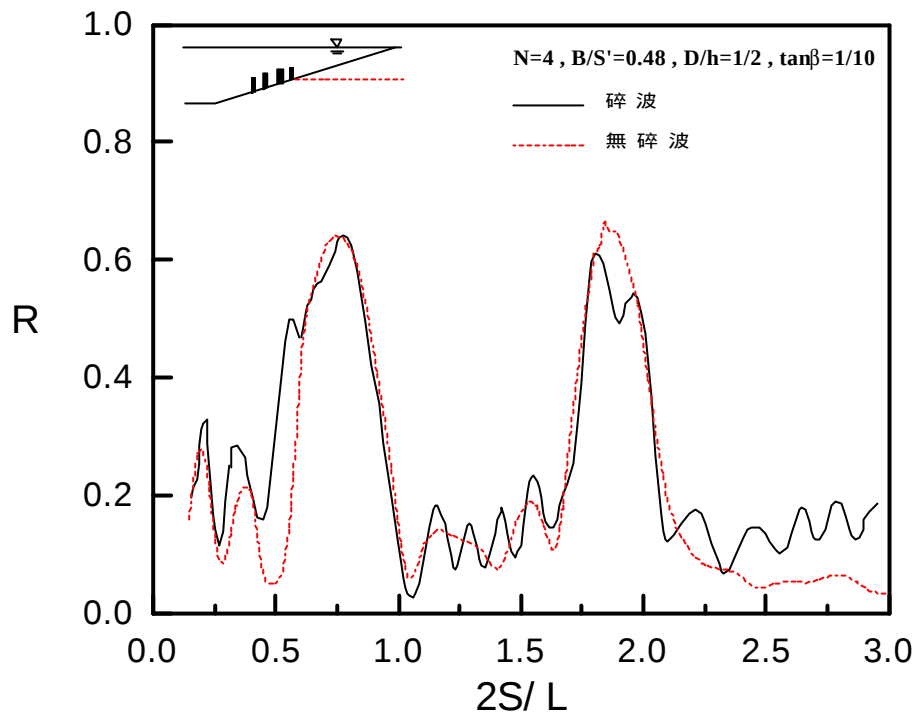


圖 5-18 有無堤後碎波發生反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N=4$, $D/h=1/2$, $B/S'=0.48$, $\tan\beta=1/10$)

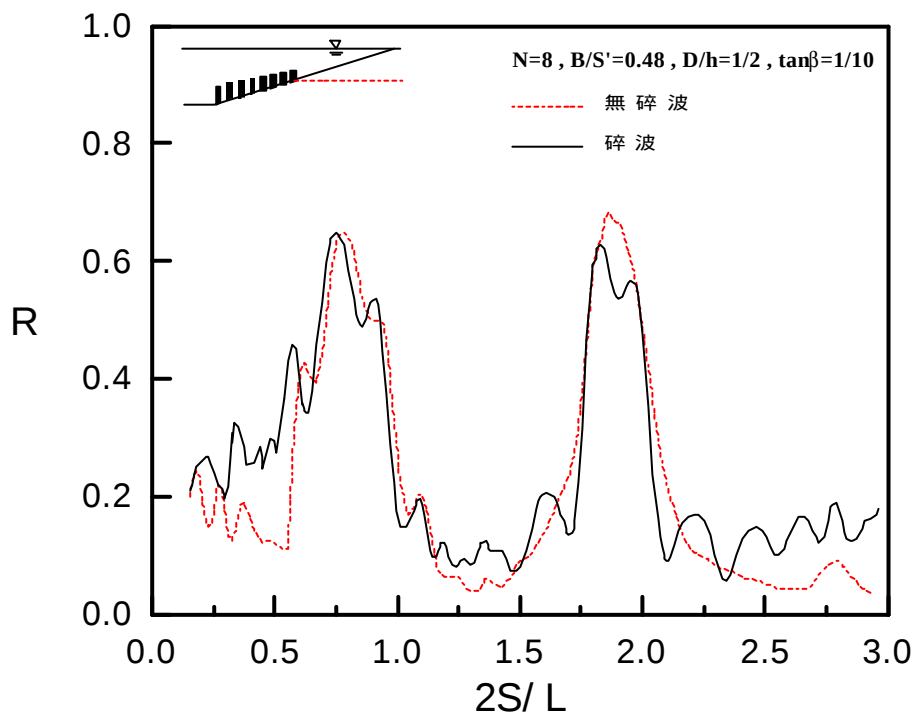


圖 5-19 有無堤後碎波發生反射率 R 與 $2S/L$ 之關係圖
($N=8$, $D/h=1/2$, $B/S'=0.48$, $\tan\beta=1/10$)

5.6 經驗公式的推算

由文獻報告及本研究結果得知:布拉格反射發生的波浪條件並不一定在 $2S/L$ 為整數時, 由於潛堤形狀、個數及高度等皆影響布拉格反射發生的波浪條件位置。不同的系列潛堤配置具有不同的布拉格反射效果, 當布拉格反射發生時, 布拉格反射尖峰的分佈對設計者非常重要, 若布拉格反射尖峰的分佈非常尖銳, 亦即較大的反射率只發生於某極小的波浪範圍, 如此系列潛堤配置所適用的波浪條件範圍極小, 將失去設置系列潛堤的目的, 無法達到預期消波的功能。故發生反射率最大值($R_{\max}$)及反射率最大值發生的波浪條件為 $(2S/L)_{\max}$, 在研究設計上必須加以考量。由 Bailard 等人 (1992) 現場試驗研究指出一海床上設置系列人工沙洲, 若反射率達 0.4 時, 可以有效減小海岸侵蝕達約 20%, 故本研究以反射率 $R=0.4$ 作為基準, 將布拉格反射發生時, $R>0.4$ 的波浪範圍定義為反射率帶寬(BW), 茲將以上參數所代表的物理意義表示如圖 5-20。

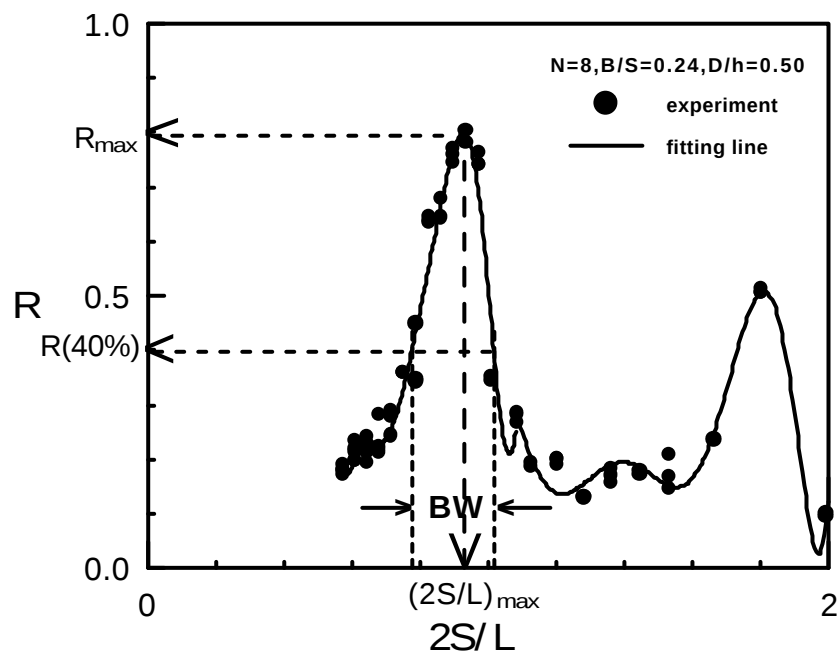


圖 5-20 $R_{\max}$ 、 $(2S/L)_{\max}$ 及 BW 參數代表的物理意義圖

本研究除了以數值模擬計算探討其系列潛堤配置各影響因子與反射率關係，並以 Davies 和 Heathershaw (1984)、Kirby 和 Anton (1990) 以及張等人 (1997) 文獻報告研究裡的試驗值重新分析其特性，探討參數(R_{max})、 $(2S/L)_{max}$ 及 BW 與 N、D/h 及 B/S 間的關係，進而統計迴歸成經驗公式，以利今後研究及設計者之參酌。

圖 5-21 為反射率最大值(R_{max})與矩形潛堤或沙漣個數(N)的關係，圖中空心標號為 Davies 和 Heathershaw (1984) 在 sinusoid 形沙漣底床的試驗結果，參數 b 為沙漣的振幅；實心標號為張等人 (1997) 的矩形系列潛堤佈置的試驗結果。圖形顯示不論是波浪通過 sinusoid 形沙漣底床或矩形系列潛堤，其反射率最大值(R_{max})皆隨著潛堤或沙漣個數(N)的增加而增大。由於 Davies 和 Heathershaw (1984) 及張等人 (1997) 試驗的底床為水平，潛堤或沙漣個數(N)愈多，波浪通過時所受的影響愈大，故 R_{max} 愈大。在潛堤或沙漣相對高度相近的條件下($D/h=0.33$ ， $b/h=0.32$)，波浪通過 sinusoid 形沙漣底床其反射率最大值(R_{max})較矩形系列潛堤為大。其為 sinusoid 形沙漣底床，沙漣頂與底的水深比，較矩形系列潛堤大，此現象亦在 Kirby 和 Anton (1990) 的研究報告中提及。

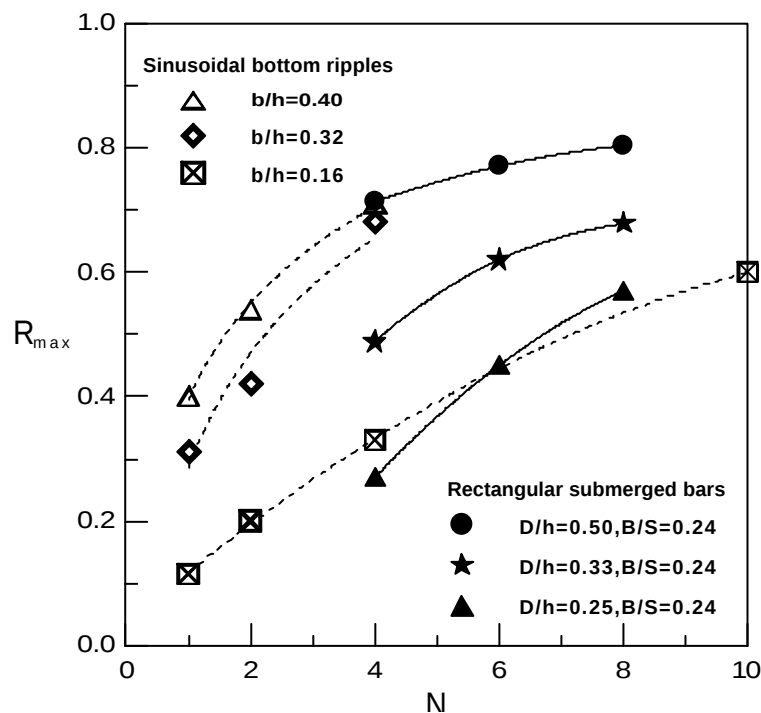


圖 5-21 反射率最大值(R_{max})與矩形潛堤或沙漣個數(N)關係圖

圖 5-22 為反射率最大值($R_{\max}$)與潛堤或沙漣相對高度(D/h , b/h)的關係，圖中空心標號為 Davies 和 Heathershaw (1984) 在 sinusoid 形沙漣底床的試驗結果，實心標號為張等人 (1997) 的矩形系列潛堤佈置的試驗結果。圖形顯示不論是 sinusoid 形沙漣底床或矩形系列潛堤，其反射率最大值($R_{\max}$)皆隨著潛堤或沙漣相對高度(D/h , b/h)的增加而增大。由於潛堤或沙漣相對高度(D/h , b/h)愈大，堤頂水深愈小，沙漣頂與漣底及堤頂與底床的水深的比值較大，波浪通過時受堤體直接反射及水深變化的影響愈大，故反射率最大值($R_{\max}$)愈大。圖形亦顯示矩形潛堤或沙漣個數(N)愈多， $R_{\max}$ 皆隨著潛堤或沙漣相對高度(D/h , b/h)的增加而增大程度愈大。以上結果顯示欲達到某程度之反射率，可用大的堤高配合較少潛堤個數或以小的堤高配合較多潛堤個數來配置。

圖 5-23 為反射率最大值($R_{\max}$)與矩形潛堤或 cosine 形人工淺礁相對間距(B/S)的關係，圖中空心標號為 Kirby 和 Anton (1990)在 cosine 形人工淺礁底床的試驗結果，實心標號為張等人 (1997) 的矩形系列潛堤佈置的試驗結果。圖形顯示不論是 cosine 形人工淺礁底床或矩形系列潛堤，其反射率最大值($R_{\max}$)皆隨著相對間距(B/S)的增加而減小。亦即間距(S)愈小，反射率最大值($R_{\max}$)愈小，其原因為在固定潛堤個數的前提下，間距(S)愈小，潛堤結構物的設置區愈小波浪通過潛堤結構物區域所受的影響範圍愈小，相對的反射率最大值($R_{\max}$)愈小。

為了更進一步了解布拉格反射發生時，反射率最大值($R_{\max}$)、反射率最大值發生的波浪條件($2S/L$) $_{\max}$ 以及布拉格反射率帶寬(BW)個別與潛堤個數、間距及高度等無因次因子(N 、 B/S 及 D/h)間之關係，本研究以其矩形系列潛堤的試驗值，計算其個別的迴歸分析，分析結果如式(5-2) 式(5-4)所示。

$$R_{\max} = 0.29 N^{0.37} (B/S)^{-0.62} (D/h)^{0.77} \quad (5-2)$$

$$(2S/L)_{\max} = 0.29 N^{0.06} (B/S)^{-0.12} (D/h)^{-0.15} \quad (5-3)$$

$$BW = 0.16 N^{-0.37} (B/S)^{-1.29} (D/h)^{0.97} \quad (5-4)$$

式(5-2)為圖 5-24 的迴歸結果，圖形顯示：在各不同的反射率最大值($R_{\max}$)分佈上，試驗值與迴歸線的關係具有良好的相關性，進一步分析相關係數其值為 0.946，可謂具有高度相關。再由與各參數無因次的關係指數值作說明：反射率最大值($R_{\max}$) 為潛堤個數(N)的 0.37 次方成正比，亦即為正相關，潛堤個數(N)愈多，反射率最大值($R_{\max}$)愈大；反射率最大值($R_{\max}$) 為潛堤相對間距(B/S)的-0.62 指數比，亦即其關係為逆相關，相對潛堤間距(B/S)愈大（即 S 愈小），反射率最大值($R_{\max}$) 愈小；反射率最大值($R_{\max}$) 為潛堤相對高度(D/h)的 0.77 指數比，亦即其關係為正相關，潛堤相對高度(D/h)愈大，反射率最大值($R_{\max}$) 愈大。且由指數值知反射率最大值($R_{\max}$)隨潛堤相對高度(D/h)增加而增大的程度比潛堤個數(N)增加而增大的程度大。

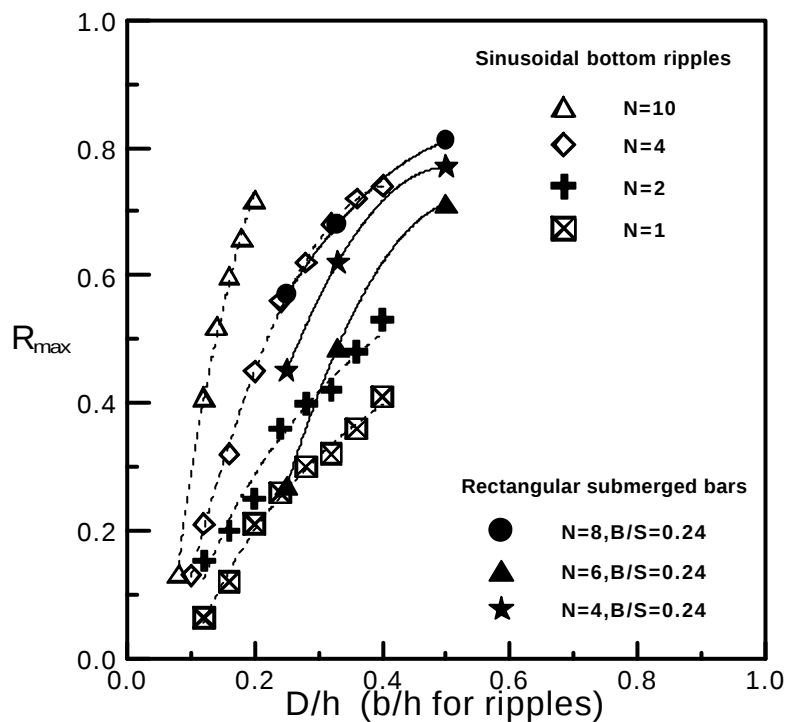


圖 5-22 反射率最大值($R_{\max}$)與潛堤或沙漣相對高度(D/h ， b/h)關係圖

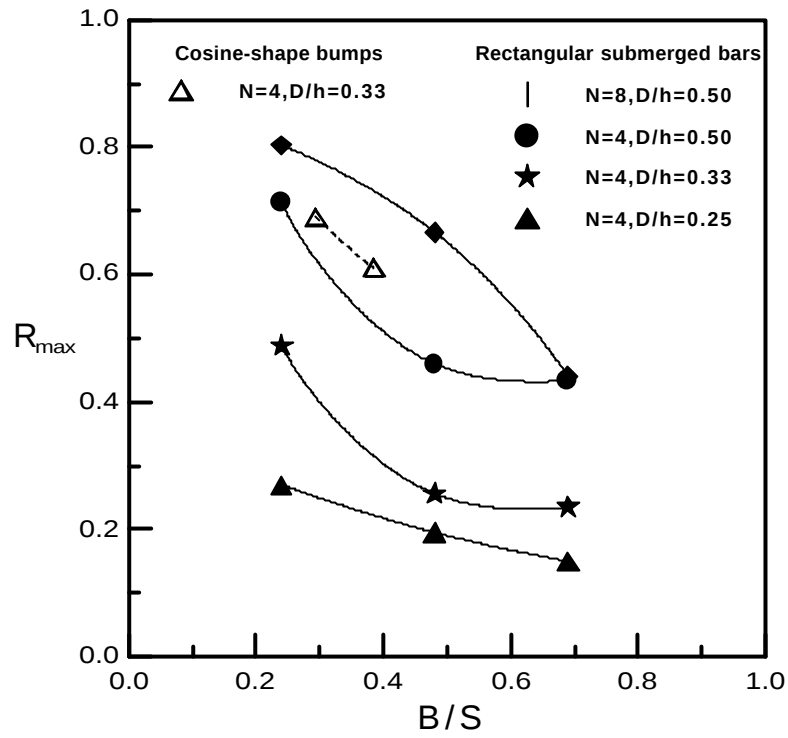


圖 5-23 反射率最大值($R_{\max}$)與相對間距(B/S)關係圖

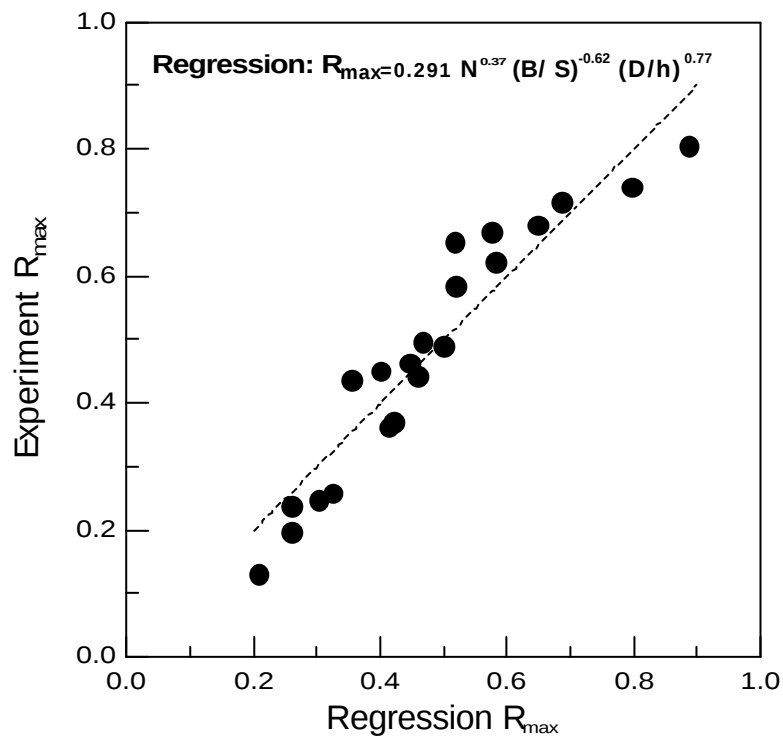


圖 5-24 反射率最大值($R_{\max}$)的試驗值與迴歸曲線關係圖

將各種不同潛堤配置組合如 N 、 B/S 及 D/h 等，利用式(5-2)的迴歸式，計算出反射率最大值($R_{\max}$)與各潛堤配置因子的關係經驗式，並將結果繪置如圖 5-25 圖 5-27 所示，由圖形更容易了解各種潛堤配置組合與反射率最大值($R_{\max}$)的關係。圖 5-25 為反射率最大值($R_{\max}$)與潛堤個數(N)及潛堤相對高度(D/h)的關係圖，圖形顯示: $R_{\max}$ 隨著 N 的增加而加大，而在較大的潛堤相對高度(D/h)，其 $R_{\max}$ 隨著 N 增加而增大的程度加劇，當 $N=8$ ， $D/h=0.5$ ， $B/S=0.4$ 時，其反射率最大值($R_{\max}$)可達 0.65。圖 5-26 為反射率最大值($R_{\max}$)與潛堤相對高度(D/h)及相對潛堤間距(B/S)的關係圖，圖形顯示:反射率最大值($R_{\max}$)隨著潛堤相對高度(D/h)的增加而加大，且反射率最大值($R_{\max}$)隨著相對潛堤間距(B/S)減小而增大的程度加劇，故當 $N=4$ ， $D/h=0.6$ ， $B/S=0.2$ 時，其反射率最大值($R_{\max}$)可達 0.80。圖 5-27 為圖 5-26 反射率最大值($R_{\max}$)與潛堤相對高度(D/h)及相對潛堤間距(B/S)的另一表示方式，圖形顯示反射率最大值($R_{\max}$)隨著相對潛堤間距(B/S)的減小而增大，而較小的潛堤相對間距(B/S)，其增大的程度加劇。

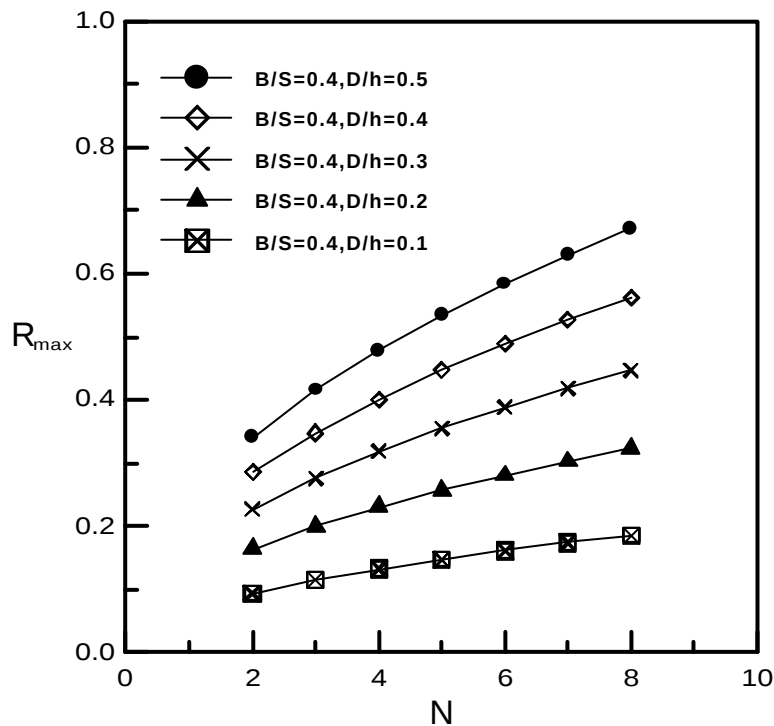


圖 5-25 反射率最大值($R_{\max}$)與個數(N)及相對高度(D/h)關係圖

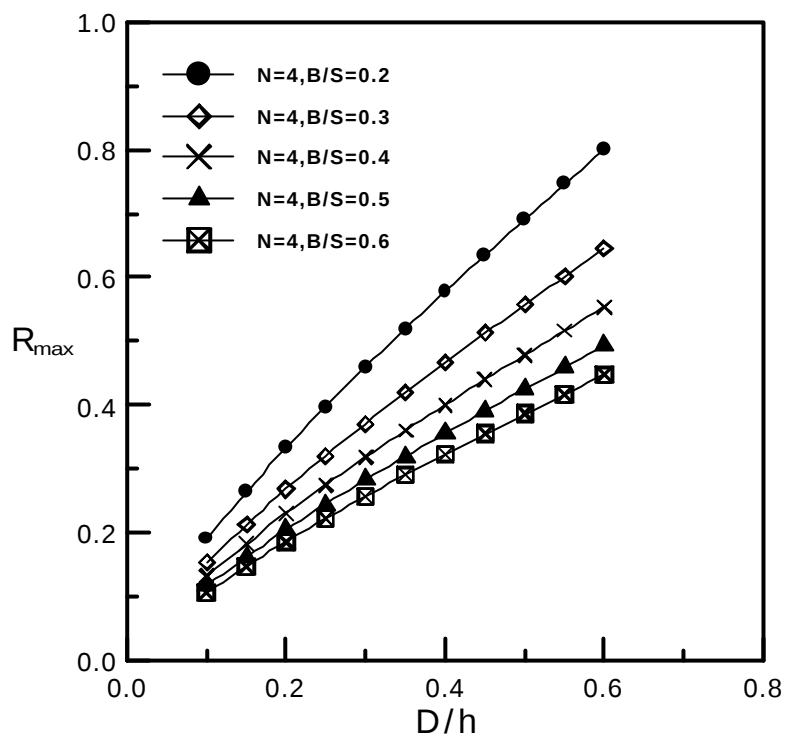


圖 5-26 反射率最大值($R_{\max}$)與相對高度(D/h)及相對間距(B/S)關係圖

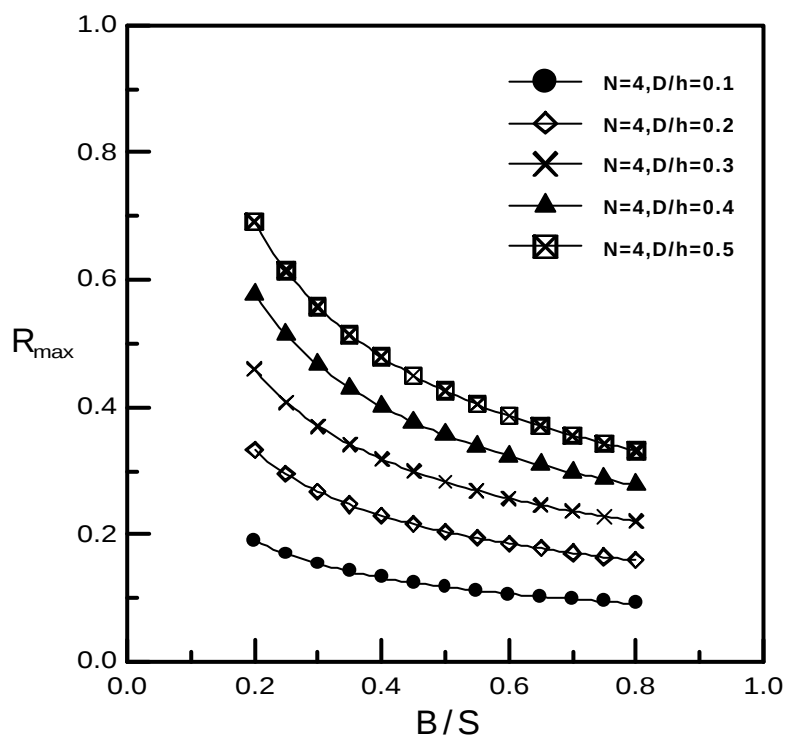


圖 5-27 反射率最大值($R_{\max}$)與相對間距(B/S)及相對高度(D/h)關係圖

在前人文獻研究指出當波浪通過 sinusoid 形沙漣底床(如 Davies 和 Heathershaw (1984))、cosine 形人工淺礁底床(如 Kirby 和 Anton (1990))，布拉格反射都發生 $2S/L$ 整數倍的條件，而將少許發生 $2S/L$ 不是整數倍的現象歸因於試驗誤差，但經本研究重新分析前人的試驗數據以及數值計算的結果，再加上本研究的水工試驗驗證及數值計算的結果顯示:布拉格反射並不一定發生 $2S/L$ 整數倍條件，其發生布拉格反射尖峰值的波浪條件 $2S/L$ 因潛堤形狀、個數、高度及間距等的不同而不同，由於布拉格反射發生的條件對實際應用至現場的設計影響很大，因設計的結構物適用條件與現場的波浪條件發生誤差，將無法達到預期的保護海岸效果，故研究布拉格反射發生的波浪條件 $2S/L$ 為一非常重要之工作。

圖 5-28 為反射率最大值發生的波浪條件 $(2S/L)_{\max}$ 與迴歸曲線的關係圖，圖形顯示在各不同的 $(2S/L)_{\max}$ 分佈上，其試驗值與迴歸曲線的關係具有一定程度的相關性，進一步分析相關係數其值為 0.899，故具有可信的相關性。

布拉格反射發生的 $(2S/L)_{\max}$ 為潛堤個數(N)的 0.06 次方成正比，亦即為正相關，潛堤個數(N)愈多， $(2S/L)_{\max}$ 愈大，也就是平移整數倍 ($2S/L=1$) 位置較少。利用式(5-3)的迴歸式，計算出 $(2S/L)_{\max}$ 與潛堤個數(N)的關係經驗式，並繪置如圖 5-29，由圖形更清楚看出其關係。

布拉格反射發生的 $(2S/L)_{\max}$ 為相對潛堤相對高度(D/h)的-0.15 次方成正比，亦即成逆相關，潛堤相對高度(D/h) 愈大， $(2S/L)_{\max}$ 愈小，也就是平移整數倍位置愈多，其平移原因為: 相對高度愈高，入射波之波速 C 及群波速 C_g 與潛堤上之 C 及 C_g 相差較大，故發生最大反射率之 $2S/L$ 偏離 1 愈多。利用式(5-3)的迴歸式，繪置其關係如圖 5-30 所示。

圖 5-31 為布拉格反射發生的 $(2S/L)_{\max}$ 與潛堤相對間距(B/S)的關係圖，由於其關係為-0.12 次方即為逆相關，故 B/S 愈大，則 $(2S/L)_{\max}$ 愈小 (即平移愈多)，原因為堤間距(S)愈小則 B 與 S 比值愈大，堤頂 C 與 C_g 的改變，對整個潛堤結構物區影響愈大，故相對平移現象較明顯。

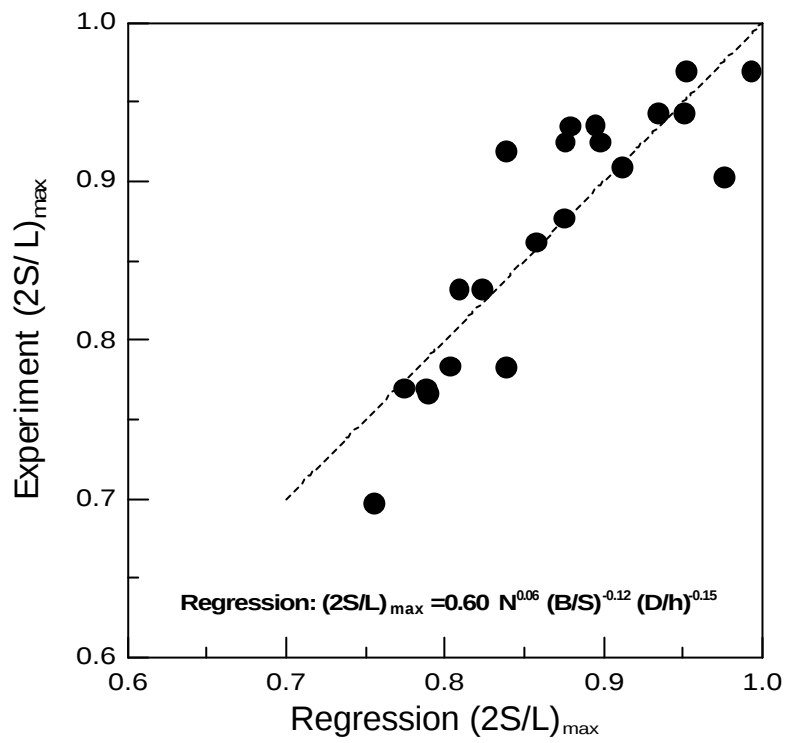


圖 5-28 $(2S/L)_{\max}$ 的試驗值與迴歸曲線關係圖

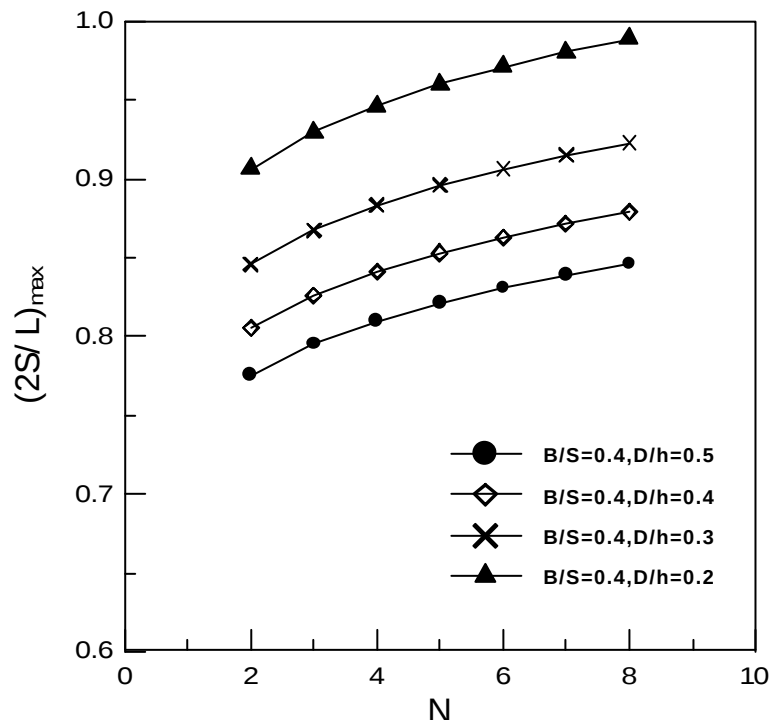


圖 5-29 $(2S/L)_{\max}$ 與個數(N)及相對高度(D/h)關係圖

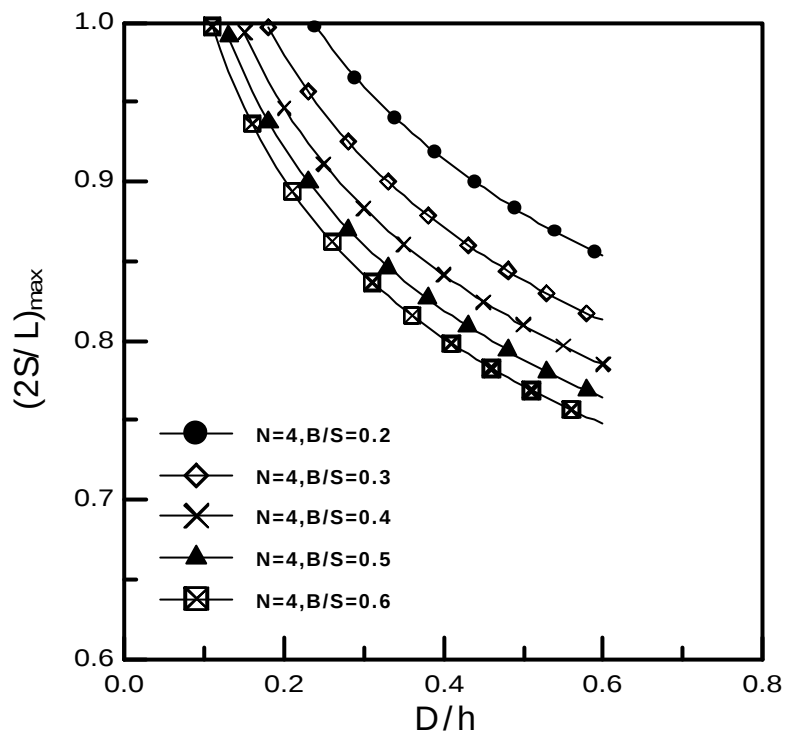


圖 5-30 $(2S/L)_{\max}$ 與相對高度(D/h)及相對間距(B/S)關係圖

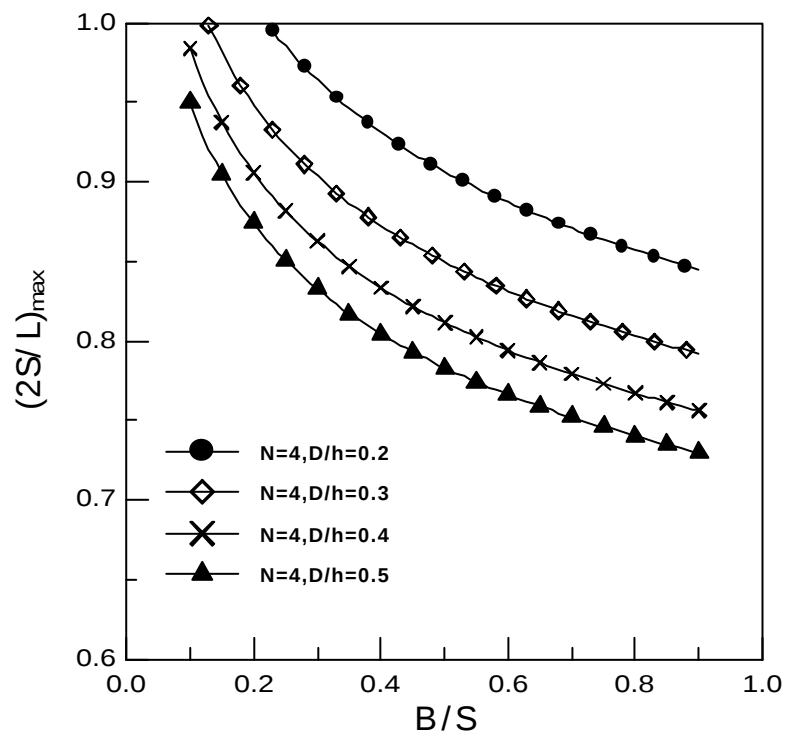


圖 5-31 $(2S/L)_{\max}$ 與相對間距(B/S)及相對高度(D/h)關係圖

當布拉格反射發生時，反射率將隨 $2S/L$ 的增加而由小的反射率連續激增至布拉格反射最大值($R_{\max}$)，接著再連續迅速減至小的反射率。在這連續的遞增再遞減的過程中，其實已有許多的波浪條件($2S/L$)可達到保護效果的反射率，若以一反射率值作基準，大於該反射率所對應的波浪條件($2S/L$)皆呈現在局部範圍內，亦即相對成一帶寬(BW)，此帶寬(BW)的研究對工程界非常重要，因為詳細明瞭帶寬(BW)的特性，才能設計出符合現場條件的潛堤結構物，而發揮真正的功效。本研究以反射率 $R=0.4$ 作為基準，大於該反射率所對應的波浪條件($2S/L$)為帶寬(BW)，探討帶寬(BW)與潛堤個數、間距及高度等無因次因子(N 、 B/S 及 D/h)間之關係。

圖 5-32 為帶寬(BW)與迴歸曲線的關係圖，圖形顯示在各不同的試驗結果帶寬(BW)分佈上，其試驗值與迴歸線的關係具有非常高的相關性，其相關係數達 0.972。

帶寬(BW)與潛堤個數(N)的-0.37 次方成正比，亦即為逆相關，潛堤個數(N)愈多，帶寬(BW)愈小，這是值得注意的現象，因潛堤個數(N)的增加雖可使反射率最大值($R_{\max}$)的值增大，但卻相對使較大反射率發生的 $2S/L$ 範圍減小。而利用式(5-4)的迴歸式，計算出 $(2S/L)_{\max}$ 與潛堤個數(N)的關係經驗值，繪置如圖(5-33)所示。

帶寬(BW)與潛堤相對高度(D/h)的 0.97 次方成正比，亦即為正相關，潛堤相對高度(D/h)愈大，帶寬(BW)愈大，也就是適用的波浪條件範圍愈廣。利用式(5-4)的迴歸式，繪置其關係如圖(5-34)所示。圖形顯示:在較小的相對潛堤間距(B/S)，其帶寬(BW)隨著潛堤相對高度(D/h)的增加幅度更大。

圖 5-35 為帶寬(BW)與相對潛堤間距(B/S)的關係圖，其關係為-1.29 次方即為逆相關， B/S 愈大，則帶寬(BW)愈小，其原因為潛堤間距(B/S)愈大則 S 愈小，對整個設置潛堤結構物的區域變小，故相對波浪反射影範圍較小。

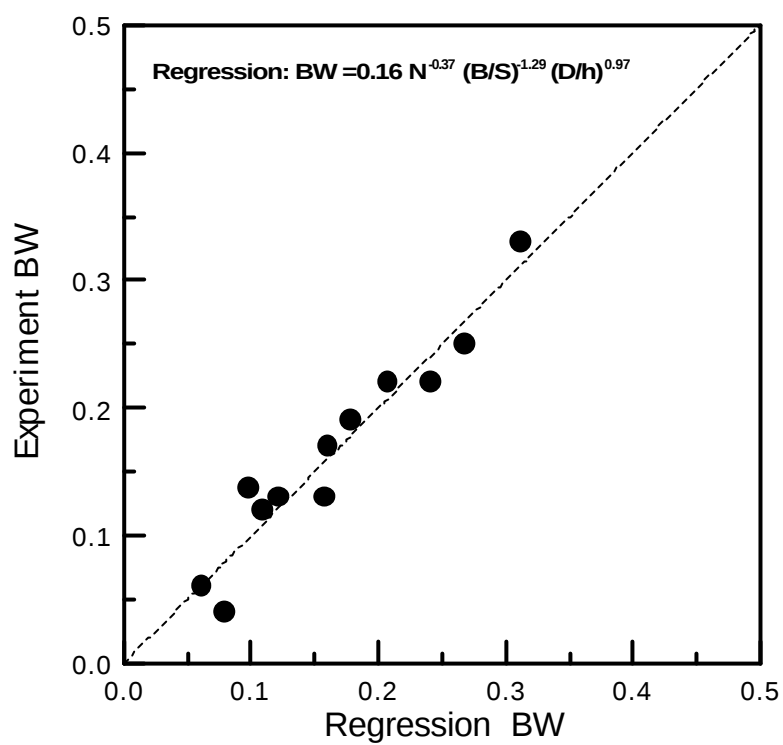


圖 5-32 試驗的帶寬(BW)與迴歸曲線關係圖

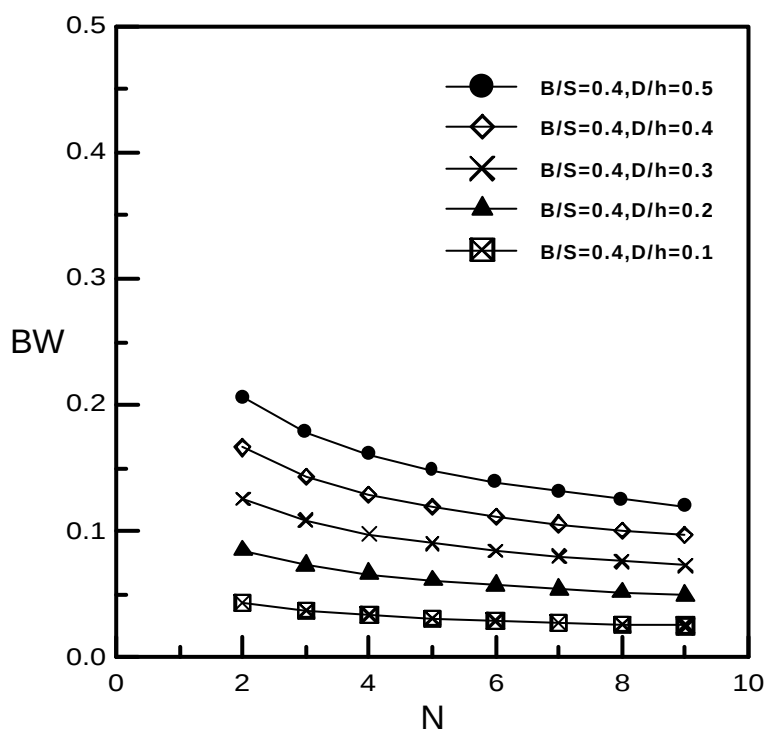


圖 5-33 帶寬(BW)與個數(N)及相對高度(D/h)關係圖

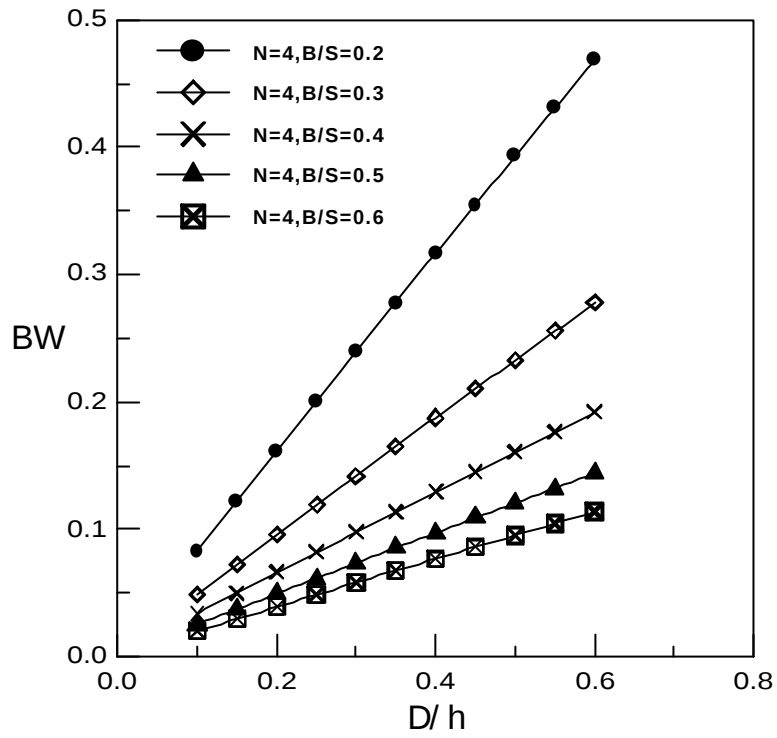


圖 5-34 帶寬(BW)與相對高度(D/h)及相對間距(B/S)關係圖

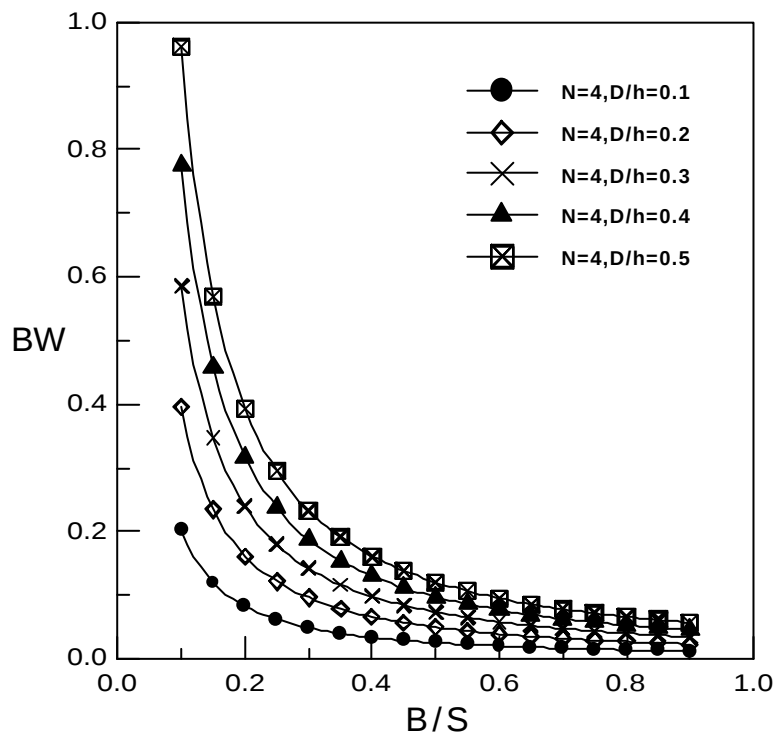


圖 5-35 帶寬(BW)與相對間距(B/S)及相對高度(D/h)關係圖

第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究以試驗及數值計算探討系列潛堤在各種不同配置下，探討各影響因子間與波浪反射率之關係，以及布拉格反射的現象。茲將以上結果與討論作以下結論：

1. 斜坡底床反射率較平底床大，而且隨著底床坡度增大，反射率增大，且尖峰反射率發生位置向較小之 $2S/L$ 偏移。由於隨著底床坡度的增加，其水深變淺，造成波速及波長之改變，進而影響布拉格反射所相應之波長所致。
2. 在不同潛堤個數配置下，系列潛堤之個數多寡對反射率的影響不大其原因為反射率主要受斜坡頂上水深較淺的少數幾個潛堤影響，故 6 及 8 個潛堤配置與 4 個潛堤相差不多。
3. 在斜坡底床上，潛堤間距增大，發生反射率尖峰的值增大且發生尖峰值的頻率增加，但平底床上潛堤間距增大雖反射率尖峰有增大現象，但尖峰值以外條件並無反射率增大現象。
4. 潛堤高度的增加，有助於波浪反射，且在較大底床坡度及 D/h ，其反射率最大值($R_{\max}$)有往較小 $2S/L$ 條件發生的趨勢，而平底床與斜坡底床情形相似。
5. 反射率在碎波情形下比無碎波有較多波動變化，兩者之反射率值相差不多。
6. 反射率最大值($R_{\max}$)與潛堤個數(N)及相對高度(D/h)成正相關，而與潛堤相對間距(B/S)成逆相關，較小的 B/S 配置，影響程度較大。
7. 反射率最大值發生的波浪條件($2S/L$) $_{\max}$ 與潛堤個數(N)成正相關，而與潛堤相對高度(D/h)及相對間距(B/S)成逆相關。

8. $R=0.4$ 的反射率帶寬(BW)與潛堤相對高度(D/h)成正相關，而與潛堤個數(N)及相對間距(B/S)潛成逆相關。較小的 B/S 配置，影響程度較明顯。

6.2 建議

1. 本研主要以等間距系列潛堤為主要探討對象，若欲增加布拉格反射發生之波浪條件範圍，可考慮以不等間距之系列潛堤配置。
2. 在實際之海岸工程中，系列潛堤佈置時並非單一斷面，而是在一開放水域中，其包含折射 繞射及潛堤堤頭兩端水域等效應，所以應加考慮開放水域下對於布拉格反射所有之影響。

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] Chamberlain, P.G. and D. Potter, (1995), The Modified Mild-slope Equation. *Journal of Fluid Mechanics*, 291: 393-407.
- [4] Chandrasekera, C.N. and K.F. Cheung, (1997), Extended Linear Refraction-diffraction Model. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 123(5): 280-286.
- [5] Davies, A.G. and A.D. Heathershaw, (1984), Surface Wave Propagation over Sinusoidally Varying Topography. *Journal of Fluid Mechanics*, 144: 419-443.
- [6] Funke, E.R. and E.P.D. Mansard, (1980), The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method. *Proceedings of 17th Conference on Coastal Engineering*, 1: 154-172.
- [7] Goda, Y. and Y. Suzuki, (1976), Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments. *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Hawaii, 628-650.
- [8] 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.
- [9] Heathershaw, A.D. (1982), Seabed-Wave Resonance and Sand Bar Growth. *Nature*, 296: 343-345.

- [10] Hsu, T.W. and C.C. Wen, (2001), A Parabolic Equation Extended to Account for Rapidly Varying Topography. *Ocean Engineering*, 28: 1479-1498.
- [11] Hsu T.W. ,H.K. Chang, L.H. Tsai, (2001), Experiment on Bragg Reflection on Wave by Difference Type of Artificial Bar. *The 11th International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition*, in press.
- [12] Isobe, M., (1987), A Parabolic Equation Model for Transformation of Irregular Waves Due to Refraction, Diffraction and Breaking. *Coastal Engineering in Japan*, 30: 33-47.
- [13] Isaacson, M., (1991), Measurement of Regular Wave Reflection. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 117(6): 553-569.
- [14] Kirby, J.T., (1986), A General Wave Equation for Wave over Rippled Beds. *Journal Fluid Mechanics*, 162: 171-186.
- [15] 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.
- [16] Li, B., (1994), An Evolution Equation for Water Waves. *Coastal Engineering*, 23: 227-242.
- [17] Miles, J.W., (1981), Oblique Surface-wave Diffraction by a Cylindrical Obstacle. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 6: 121-123.
- [18] Poter, D. and D.J. Staziker, (1995), Extensions of the Mild-slope Equation. *Journal of Fluid Mechanics*, 300: 367-382.
- [19] Radder, A.C., (1979), On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation. *Journal of Fluid Mechanics*, 95(1): 159-176.

- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 陳陽益 (1991), 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, 289-296.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 岳景雲、曹登皓、翁文凱 (2000), 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, 112-118.
- [30] 喜岡 涉、松野忠幸、源川秀樹 (1989), 複列配置した波浪制御. 海岸工論6: 549-553.

「港口突堤效應保護對策之研究(I)」摘要內容

本研究報告共分為六章，第一章為緒論，說明研究目的、研究方法以及文獻回顧。第二章為數值模式，其中包含波場控制方程式、邊界條件、數值方法及收斂條件。第三章為試驗方法及步驟。第四章為模式驗證，利用數值模式與試驗結果所得的反射率進行比較，以驗證模式的正確性。第五章為結果與討論，針對不同底床及潛堤配置，探討不同波浪條件通過系列潛堤的反射率分佈。第六章為結論與建議。

第一章 緒論

近年來由於經濟發展突飛猛進，積極推動各港口開發，如港口新建、改建及擴建。為求港池之穩靜及船隻行進之安全，常需建造一突出海域之港口突堤以達保護的目的，由許多經驗獲知：一深入水中之港口突堤，雖可達到波浪遮蔽之效應，但卻破壞原有整個海域漂沙的平衡，故常於港口突堤結構物上下游發生侵蝕與淤積現象；且堤頭流場的劇烈變化，使堤頭附近發生漩渦刷深進而危害堤體本身之穩定。故研擬一適當的保護工法以期有效改善以上港口突堤效應之缺失，實為重要研究之課題。

一般防止海岸侵蝕之保護工法分成剛性工法及柔性工法。前者屬於傳統工法，包括：(1) 突堤 (2) 離岸堤 (3) 海堤或護岸等。如何以上述方法之一或混和使用，以達保海岸侵蝕保護對策，應從其功能性、安全性、耐久性、經濟性、施工性、環境衝擊以及景觀等因素評估，現今常用的工法為離岸潛堤，離岸潛堤分為單列潛堤、潛堤群及系列潛堤。系列潛堤為二道或二道以上潛堤並列於海岸垂直線上，而適當的系列潛堤配置，可使波浪通過潛堤配置區，於堤前形成共振波，此現象稱為布拉格效應(Bragg resonance)，此反射率的增加，不但能使堤後波浪減小，相對使漂沙活動趨緩，進而達到保護海岸侵蝕的目的，這種系列潛堤配置產生布拉格反射(Bragg reflection)以達保護海岸工法，近年來雖已被先進國家應用於現場海岸保護，但目前理論與試驗研究，仍無法有效掌握波浪通過系列潛堤其波場分佈及效果。因此本研究應用數學模式，並從事水工模型試驗，期由本研究成

果提供有效模式及系列潛堤配置，以利爾後相關單位對港口突堤效應所欲採用保護對策之參酌。

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.文獻回顧：收集目前有關如何利用系列潛堤配置，產生布拉格反射之研究報告，作一綜合文獻回顧。
- 2.數學模式建立：選取適當拋物線型緩坡方程式為主要控制方程式，其考慮的波浪現象應包括有淺化、折射、繞射、反射及碎波效應。並運用交替隱函數分析法 (Alternative Direction Implicit, ADI)建立完整之波場數學模式。
- 3.水工模型試驗：進行一連串水工模型試驗，利用水工模型試驗的結果與數值計算加以比較，以驗證其數值模式的正確性，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。

第二章 數值模式

本研究以 Hsu 和 Wen (2001) 所推導含有底床非線性項之延伸型拋物線緩坡方程式 (extended mild-slope equation of parabolic type 即 EMSE) 為基礎，模擬波浪通過系列潛堤整個波場分佈的情形，並以堤體中線之波高分佈計算反射率。由於底床上之系列潛堤屬於陡變地形，故方程式中所含之底床非線性項，包含有底床曲率項及底床斜率平方項之係數，更提高數值模式計算之精度。模式所採用之邊界條件為幅射邊界條件，其目的在於減少反射波能量進入計算領域。幅射邊界條件通常包括兩種：(1) 全反射及部分反射邊界 (2) 給定邊界。在數值計算的方法上，採用交替隱函數分析法(ADI) 來解拋物線型緩坡方程式所推導出的矩陣方程式。

第三章 試驗方法及步驟

本研究水工試驗於本所港灣技術研究中心風洞試驗室進行。試驗中水槽共可分為三部分，一為深水區域，共設置七支波高計，第一支波高計用以量測入射波之水位訊號，其餘六支波高計則測量波浪經過潛堤反射所產生的水位變化。二為系列潛堤上方區，其上方設置九支的波高計，用以測量斜坡潛堤上的水位變化。三為潛堤後方的等水深區域，擺置二支波高計用來量測透過波的水位。反射率的計算方法為 Isaacson (1991) 之三波高法。在潛堤佈置上，則分別參考張等人 (1997) 及岳等人 (2000) 的試驗及數值佈置方式。

第四章 模式驗證

在波浪通過系列潛堤之模式驗證，主要分為水平底床及斜坡底床上設置系列潛堤的配置作模式驗證。在波浪通過水平底床系列潛堤之模式驗證，參考張等人 (1997) 及岳等人 (2000) 的試驗條件佈置及結果，對於不同波浪條件和潛堤佈置進行反射率數值計算。有關波浪通過斜坡底床系列潛堤模式驗證，本研究在本所港灣技術研究中心進行不同波浪條件和潛堤佈置水工模型試驗，並針對有無碎波發生進行試驗，以驗證斜坡底床模式的適用性。

第五章 結果與討論

底床上佈置系列潛堤在應用至實際工程上之前，須先瞭解潛堤佈置與各影響因子的關係，如此才能使潛堤發揮最大之防治功能。本研究對於波浪通過系列潛堤之反射率研究，主要利用模式計算，探討在不同波浪條件通過不同系列潛堤配置如水深、底床坡度、潛堤個數、潛堤間距、潛堤高度以及有無碎波發生其反射率變化之情形。

第六章 結論與建議

本研究以試驗及數值計算系列潛堤在各種不同配置下，探討各影響因子間與波浪反射率之關係以及布拉格反射的現象。茲將分析結果作以下結論與建議：

1. 斜坡底床反射率較水平底床大，而且隨著底床坡度增大，反射率增大，且尖峰反射率發生位置向較小之 $2S/L$ 偏移。由於隨著底床

坡度的增加，其水深變淺，造成波速及波長之改變，進而影響布拉格反射所相應之波長所致。

2. 在不同潛堤個數配置下，系列潛堤之個數多寡對反射率的影響不大其原因為反射率主要受斜坡頂上水深較淺的少數幾個潛堤影響，故 6 及 8 個潛堤配置與 4 個潛堤相差不多。
3. 在斜坡底床上，潛堤間距增大，發生反射率尖峰的值增大且發生尖峰值的頻率增加，但水平底床上潛堤間距增大雖反射率尖峰有增大現象，但尖峰值以外條件並無反射率增大現象。
4. 潛堤高度的增加，有助於波浪反射，而且在較大底床坡度及 D/h ，其反射率最大值($R_{\max}$) 有往較小 $2S/L$ 條件發生的趨勢，而水平底床與斜坡底床情形相似。
5. 反射率在碎波情形下比無碎波有較多波動變化，兩者之反射率值相差不多。
6. 反射率最大值($R_{\max}$)與潛堤個數(N)及相對高度(D/h)成正相關，而與潛堤相對間距(B/S)成逆相關，較小的 B/S 配置，影響程度較大。
7. 反射率最大值發生的波浪條件($2S/L$) $_{\max}$ 與潛堤個數(N)成正相關，而與潛堤相對高度(D/h)及相對間距(B/S)成逆相關。
8. $R=0.4$ 的反射率帶寬(BW)與潛堤相對高度(D/h)成正相關，而與潛堤個數(N)及相對間距(B/S)潛成逆相關。較小的 B/S 配置，影響程度較明顯。
9. 本研主要以等間距系列潛堤為主要探討對象，若欲增加布拉格反射發生之波浪條件範圍，可考慮以不等間距之系列潛堤配置。
10. 在實際之海岸工程中，系列潛堤佈置時並非單一斷面，而是在一開放水域中，其包含折射、繞射及潛堤堤頭兩端水域等效應，所以應加考慮開放水域下對於布拉格反射所有之影響。

計劃編號；MOTC-IOT-IHMT-HA9010

港口突堤效應保護對策之研究 (I)

黃清和 蔡立宏 陳明宗

交通部運輸研究所

大綱

- 緒 論
- 數 值 模 式
- 試驗方法與步驟
- 模 式 驗 証
- 結 果 與 討 論
- 結 論 與 建 議

緒 論

港池穩靜 → 港口突堤 → 侵蝕及淤積

海岸保護工法：突堤、離岸堤、護岸、潛堤

離岸潛堤：單列、潛堤群、系列潛堤

系列潛堤：二道以上潛堤並列於海岸垂直線

防禦工法優缺點

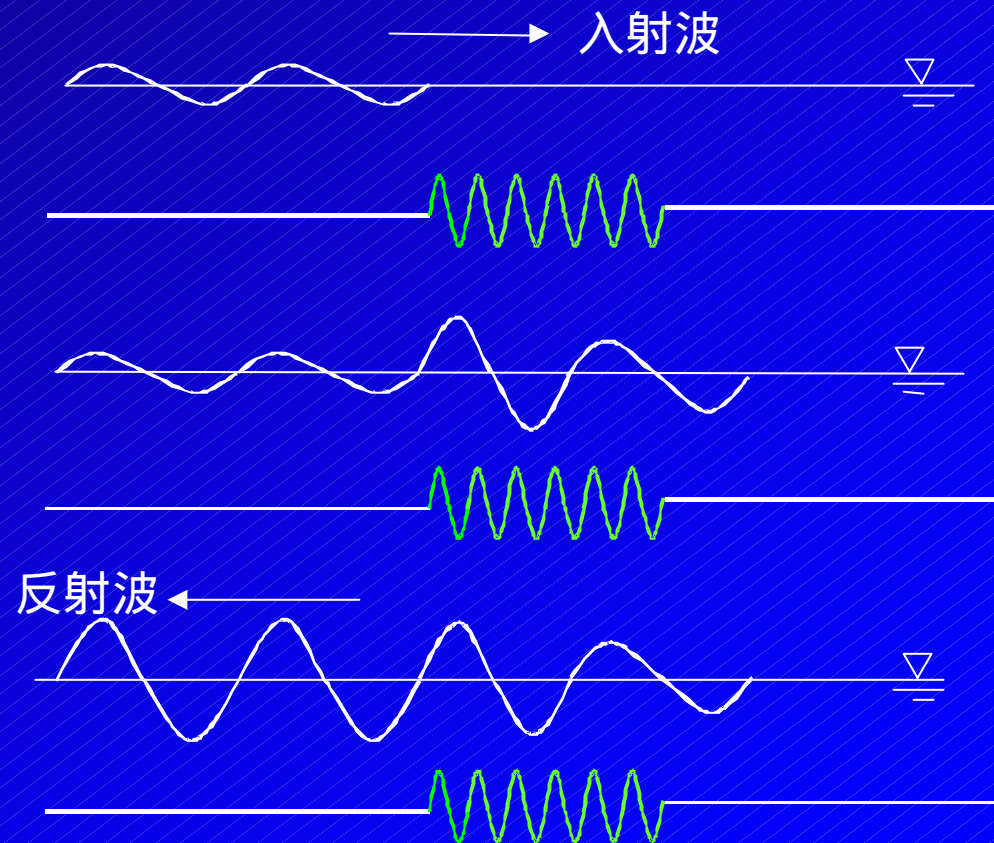
	優點	缺點
潛堤	消減波浪能量	易造成堤址沖刷
離岸堤	堤前消減波浪能量,堤後形成沙舌或繫岸沙洲	景觀不良、維護費高
突堤	可攔截沿岸漂沙,穩定海岸	上游砂源受阻絕,下游海岸易侵蝕
人工養灘	形成自然海灘,對鄰近海域影響較少	成本高,砂源尋找不易
海堤	施工容易,防浪防潮	堤前波浪反射,容易加速海灘侵蝕
系列潛堤	1.利用共振波達到保護海岸的效果 2.堤後波能變小,海岸漂沙減少	成本高 施工困難

系列潛堤原理

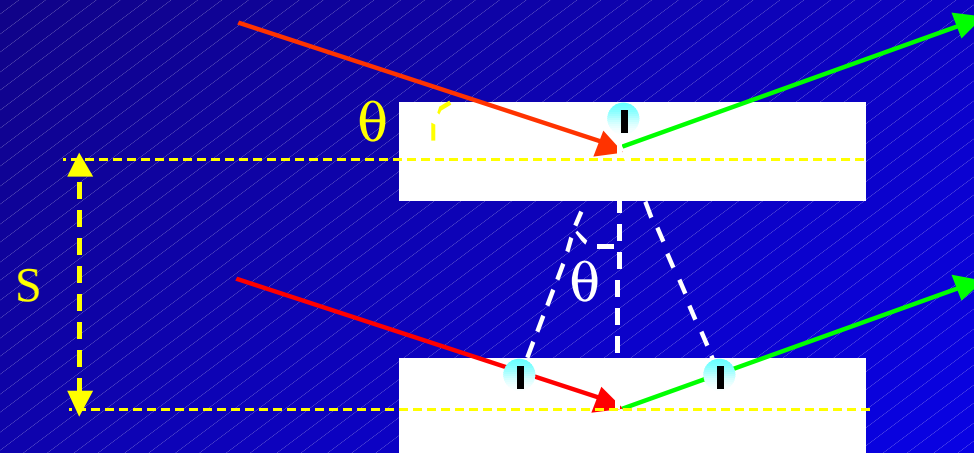
海床沙漣漣長為波長之半時，產生共振波（**布拉格反射**），使通過沙漣的波浪反射回外海，到達海岸波能減小，使海岸安定



系列潛堤

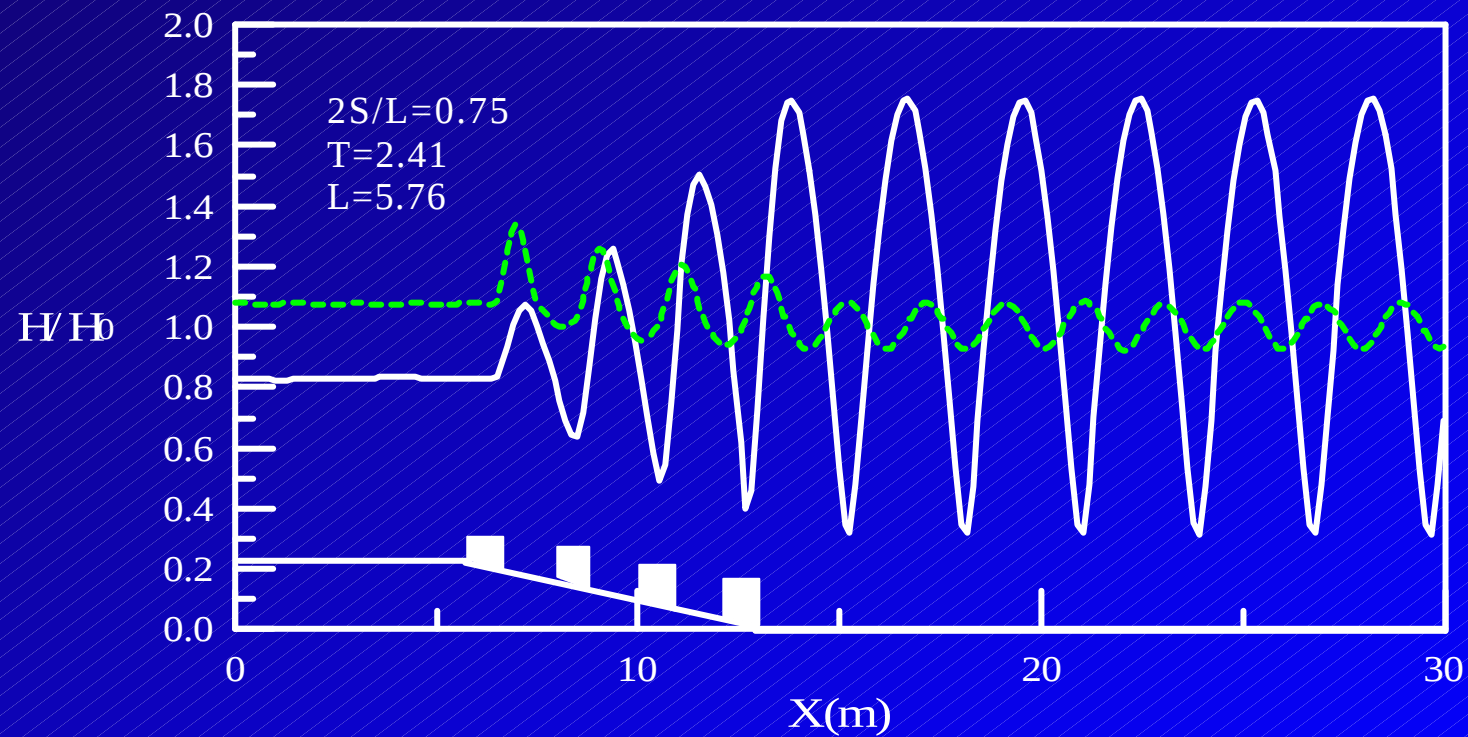


布拉格反射 (Bragg Reflection)



$$S \sin q = n L / 2$$

共振與無共振情形之比較



前人研究 (理論方面)

作者	年代	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所造成之反射率公式
Kirby 和 Anton	1990	擴展 Miles 理論	證實人工沙洲間距為波長之半，波浪產生共振，且反射率最大
張等人	1997	引用 Miles 理論	矩形反射率最大。人工沙洲在達 8 個以上時，幾可達全反射
Davies 和 Heathershaw	1984	攝動法解析	發現沙洲間距為波長之半時，在沙洲底床前逐漸形成駐波共振
陳和湯	1990	攝動法解析	波場解析至二階，波形底床間距為半波長則產生布拉格共振
陳	1991		
Mei	1985	質量傳輸之觀念	結合部份駐波能形成沙洲，造成駐波的巨大反射即布拉格反射
Kirby	1986	修正型緩坡方程式	以數值計算波浪通過正弦沙洲之反射率，並和試驗比較
Zhang	1999	含高階項及陡變地形項之緩坡方程式	以多層正弦沙洲及複合沙洲增加布拉格反射所適用的波浪頻率
Guazzelli	1992	逐次近似法	布拉格反射在沙洲非為等間距時，會在其它條件下發生。
岳等人	1997~2000	邊界元素法	探討波浪入射角度、潛堤形狀及堤邊坡時之反射率大小

前人研究 (試驗方面)

作者	年代	研究方法	研究成果
Davies 和 Heathershaw	1984	正弦沙洲模型試驗	發現沙洲間距為波長之半時，波浪於沙洲底床前逐漸形成駐波共振
喜岡等人	1989	複列式潛堤試驗	進行各種佈置，並改變不同的波浪條件來探討反射率和透過率的變化。
Bailard 等人	1990	現場試驗(佛羅里達卡納維爾角海岸)	發現當波浪週期在預期的布拉格反射作用的範圍內，其反射率可達 0.4 以上，證實人工沙洲的布拉格反射可防止海岸侵蝕
Guazzelli	1992	多層正弦沙洲模型試驗	布拉格反射在沙洲非為等間距時，會在其它條件下發生
張等人	1997	矩形、餘弦及三角形等人工沙洲模型試驗	結果顯示相對水深 $D/h=1/2$ ，無因次沙洲間距 $B/S=0.24$ 及沙洲個數 $N=8$ 時，反射率可達 0.8 以上
郭等人	1999	雙列潛堤模型試驗	判斷海灘之侵淤性、灘線變化、透過率、反射率

研究目的

- 本研究以數值計算及模型試驗，並比較前人研究結果，探討各種系列潛堤佈置的海岸保護的效果。

延伸型拋物線緩坡方程式 (Hsu 和Wen ,2001)

$$-2\omega i \frac{\nabla \bar{y}}{\nabla t} = \nabla \cdot (CC_g \nabla \bar{y}) + CC_g k^2 (1 + if_d) \bar{y} \\ + [f_1(kh)g\nabla^2 h + f_2(kh)(\nabla h)^2 gk] \bar{y}$$

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

= bottom curvature

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

=bottom slope

輻射邊界條件

- 全反射及部份反射邊界條件
- 給定邊界條件

幅射邊界條件

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \pm(-1)^m i a k_x f + 2i k_{xi} f_i \quad \text{在 } \pm x \text{ 方向}$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \pm(-1)^m i a k_y f + 2i k_{yi} f_i \quad \text{在 } \pm y \text{ 方向}$$

$a = (1 - R)(1 + R)$ ，為吸收係數

R 為反射係數

$k_x = k \cos q$ 分別為 x 與 y 方向之週波數

$k_y = k \sin q$

q 為靠近邊界之波向角

數值計算穩定條件及收斂條件

Diffusion Number $D_f = CC_g / (2w \Delta x^2 / \Delta t)$

Courant Number $C_r = \sqrt{gh} / (\Delta x / \Delta t)$

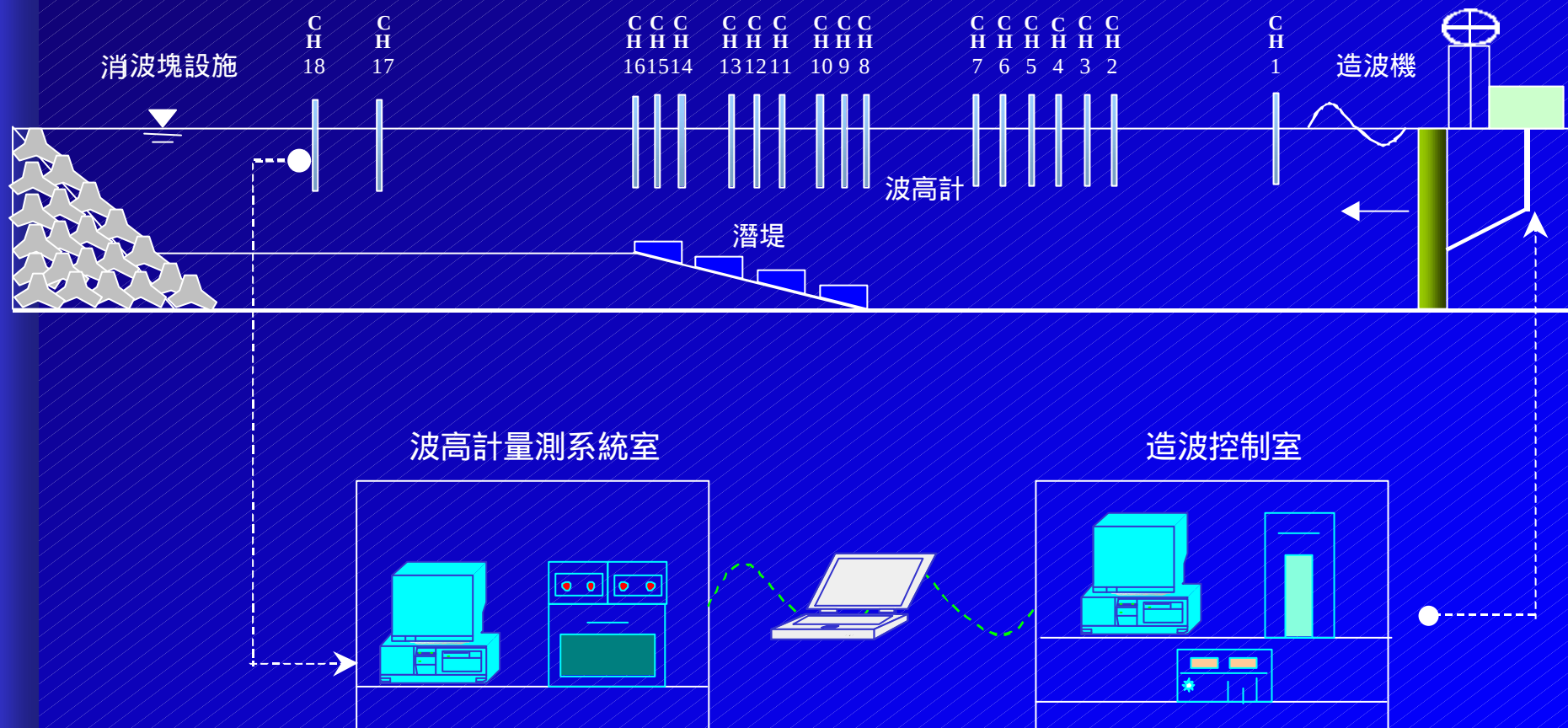
Δt satisfy $Max\{C_r, D_f\} \leq 1$

$$e' = \frac{\sqrt{\sum_p \sum_q (f_{p,q}^n - f_{p,q}^{n-1})^2}}{\sum_p \sum_q |f_{p,q}^n|} < 10^{-4}$$

試驗設備與儀器

- **斷面水槽** (長 100 公尺×寬 1.5 公尺×高 2.0 公尺)
- **造波機** (丹麥 DHI 直推式油壓式造波機)
- **容量式波高計** (35 公分之雙測線型電容式波高計)
- **增幅器、資料擷取系統**

試驗佈置圖

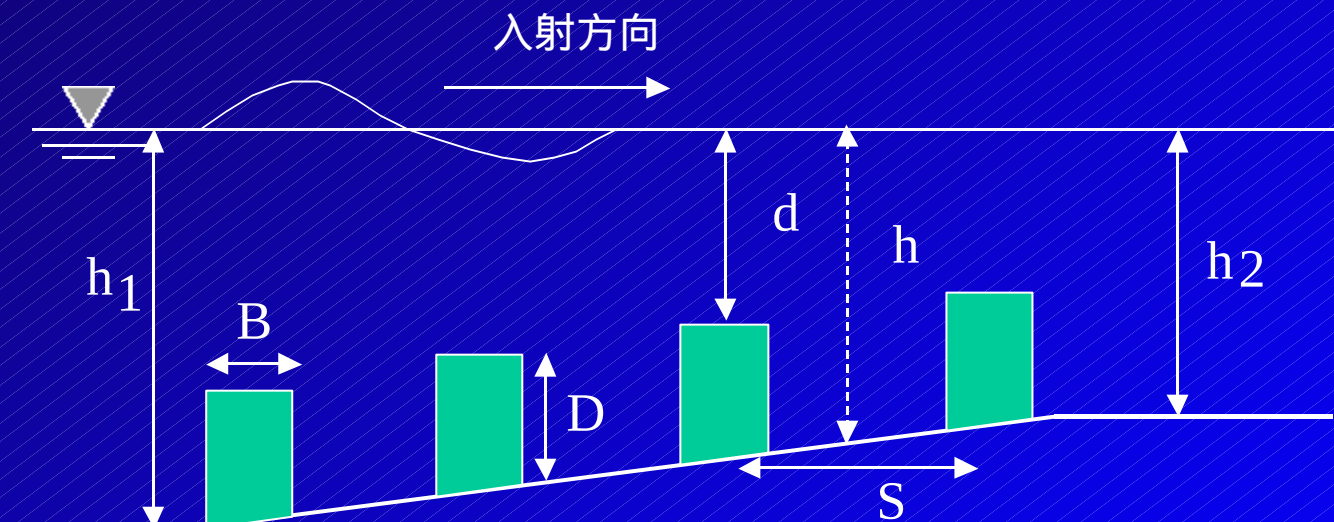


試驗步驟

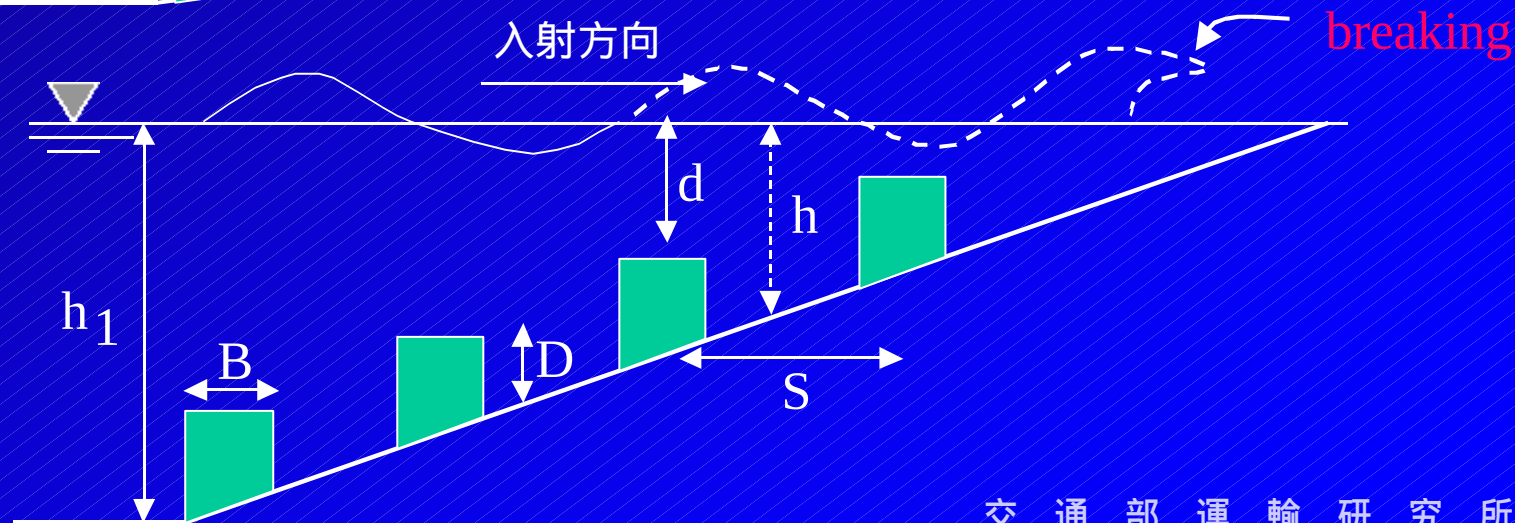


潛堤佈置示意圖

無碎波



碎波



模式驗證

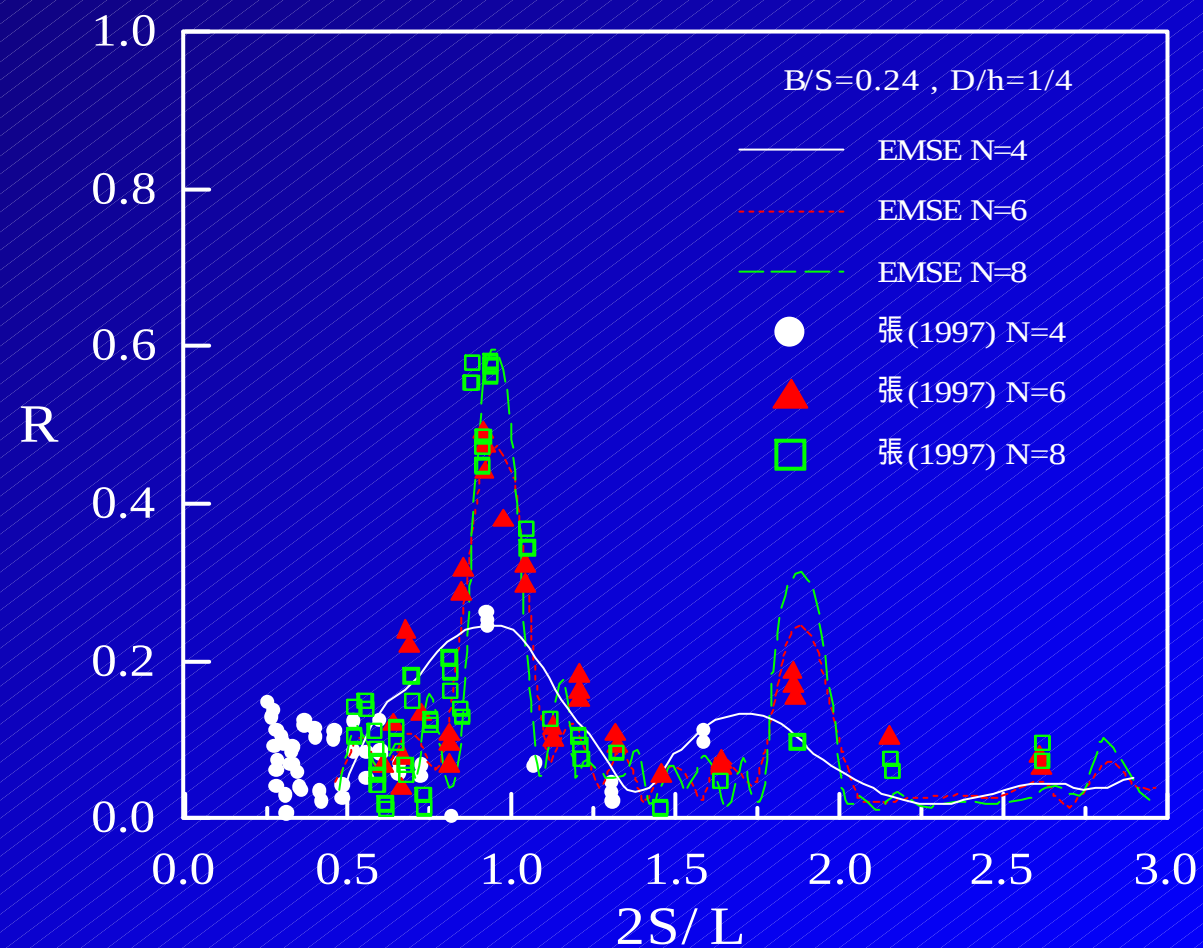
• 水平底床系列潛堤佈置

潛堤型式	潛堤數(N)	潛堤間距(S) (單位:公分)	水深(h) (單位:公分)	波浪條件	
矩型	4、6、8	25、50	8、12、16	週期 (單位:秒)	波高 (單位:公分)
				0.4~1.6	1.0

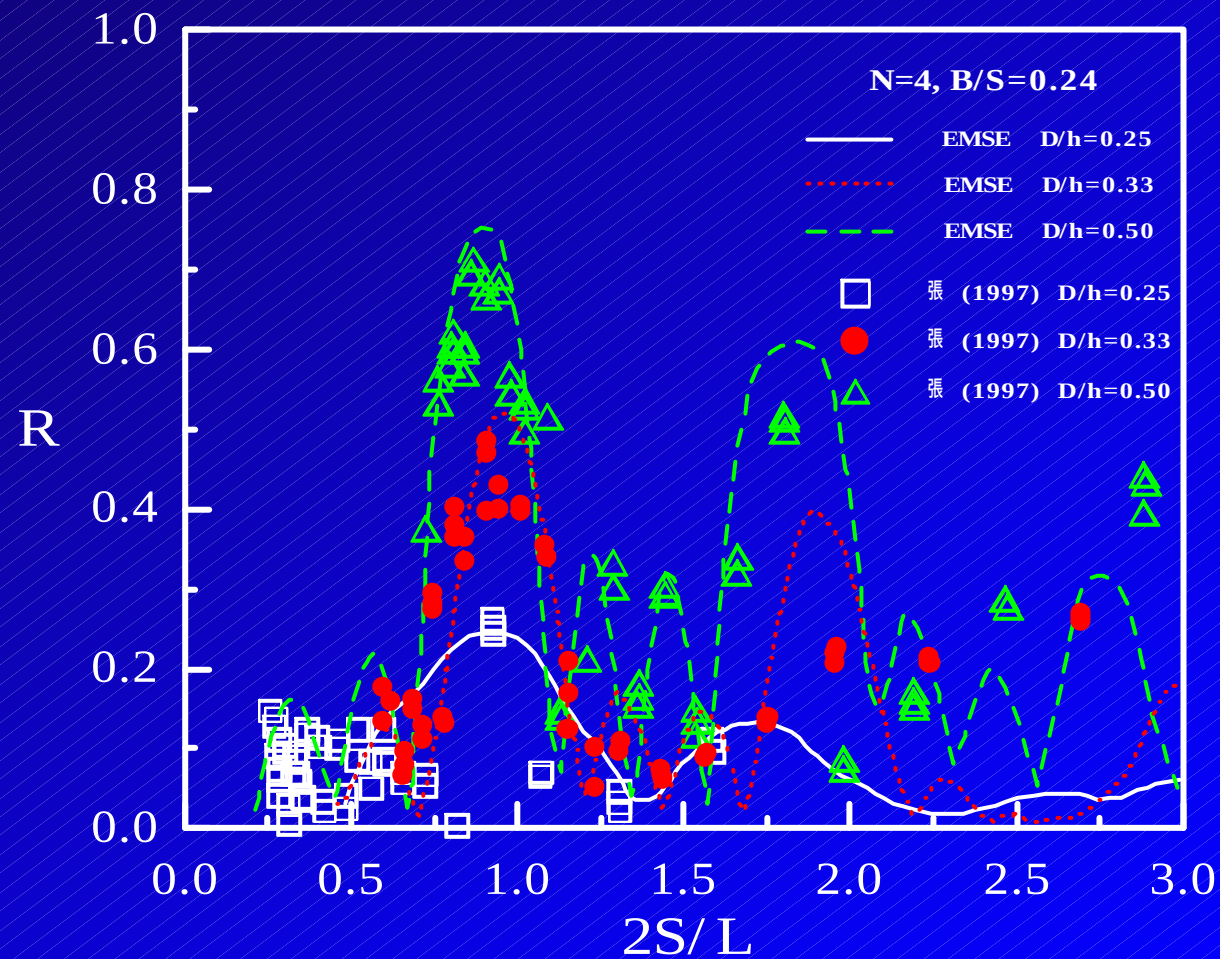
• 斜坡底床系列潛堤佈置

潛堤型式	潛堤數(N)	潛堤間距(S) (單位:公分)	水深(h) (單位:公分)	底床坡度 ($\tan \beta$)	波浪條件	
矩型	4	215	69	1/30、1/20	週期 (單位:秒)	波高 (單位:公分)
	2	200	80、100	1/10	0.8~8.0	6.0

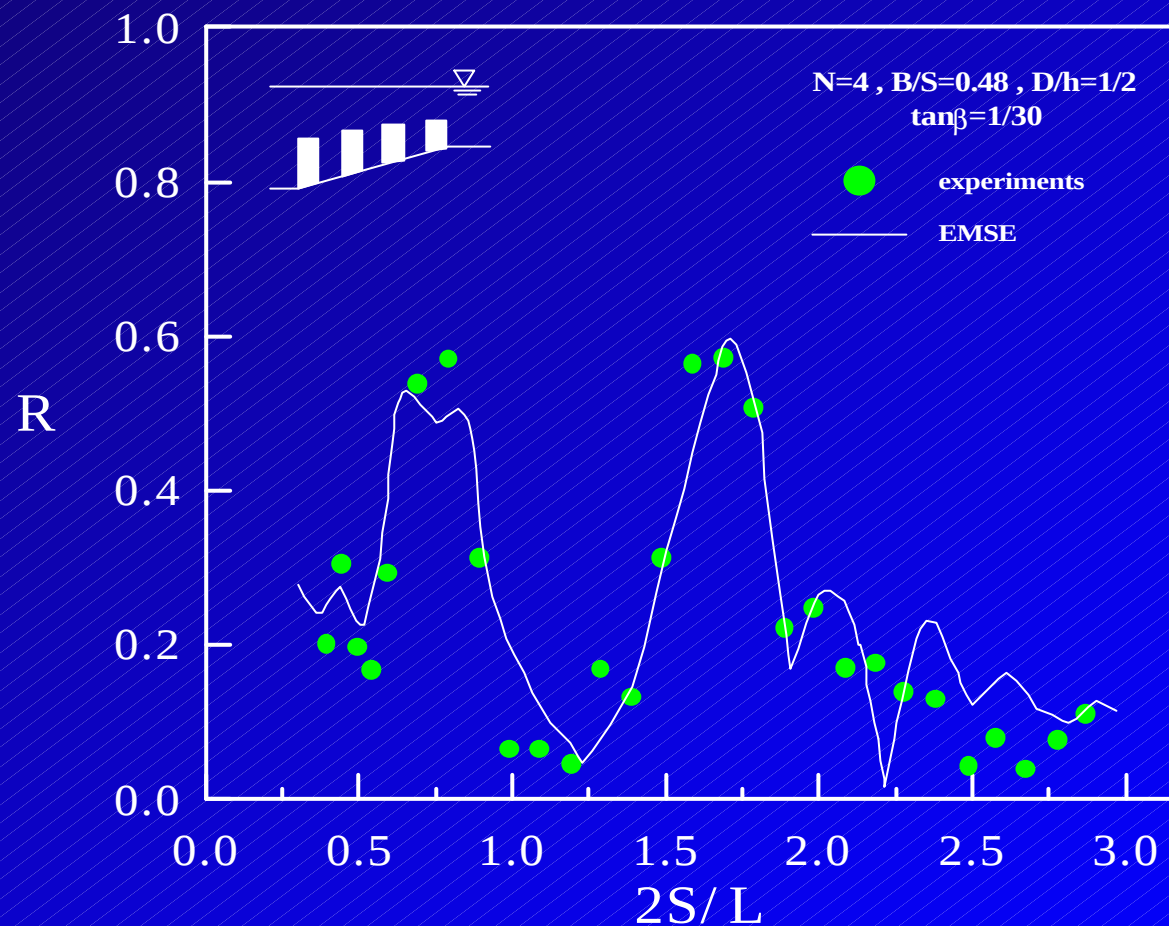
水平底床 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖



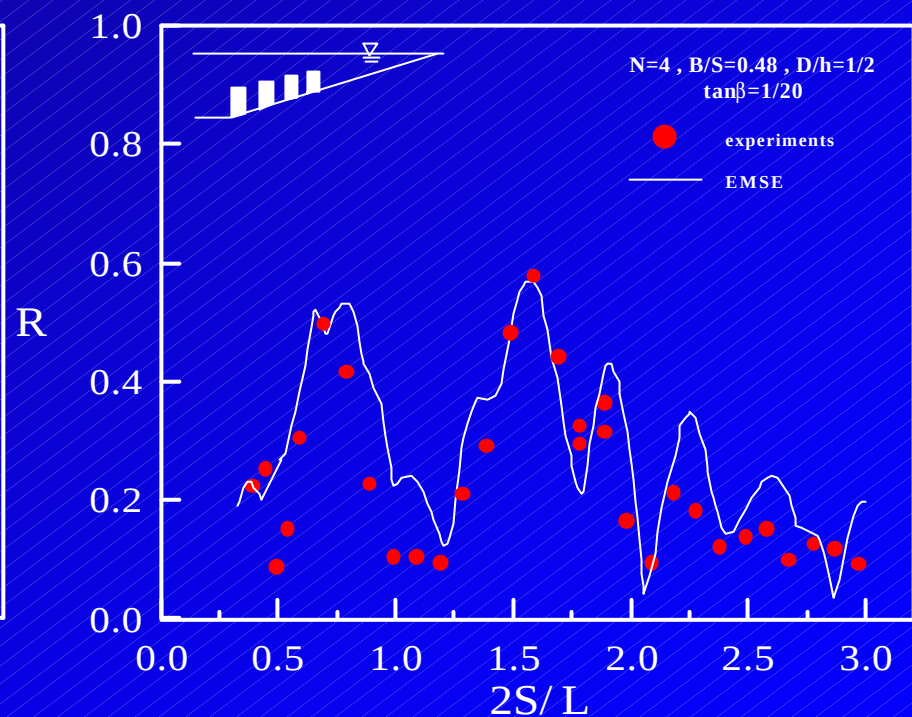
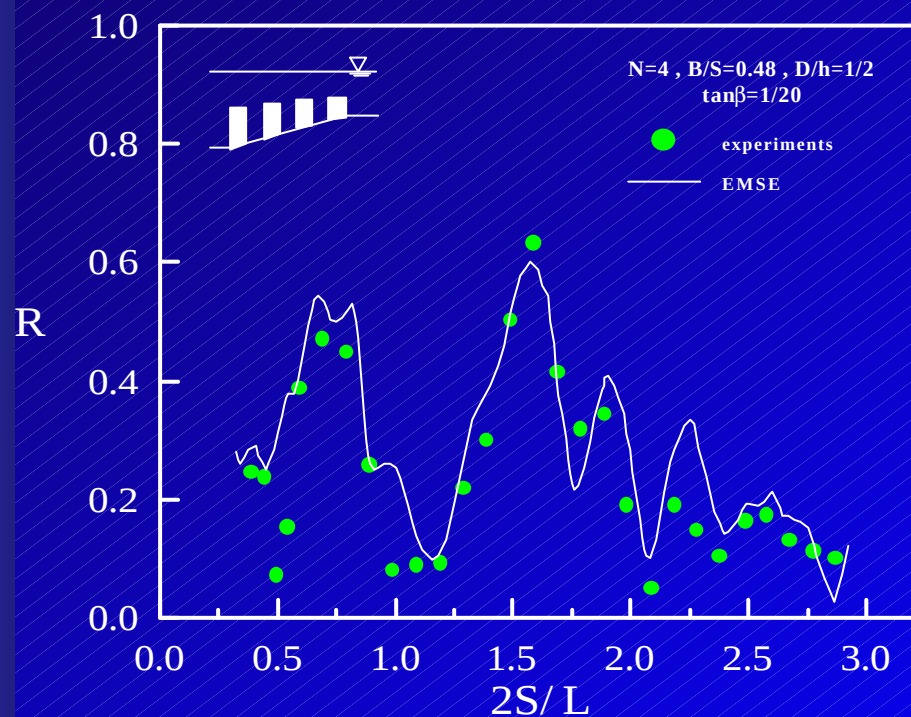
水平底床 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖



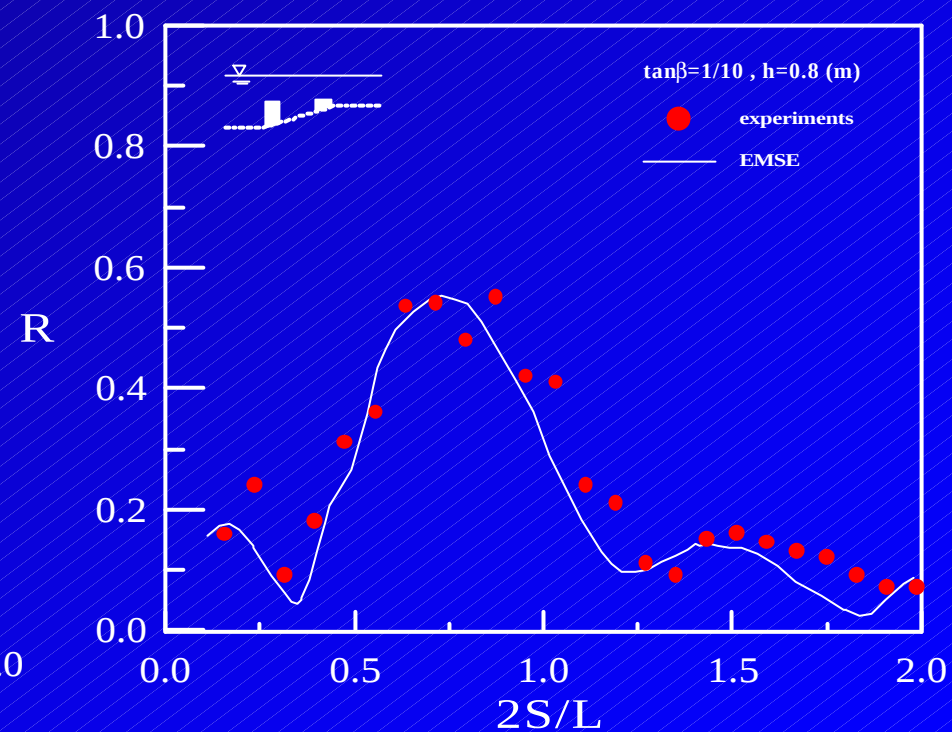
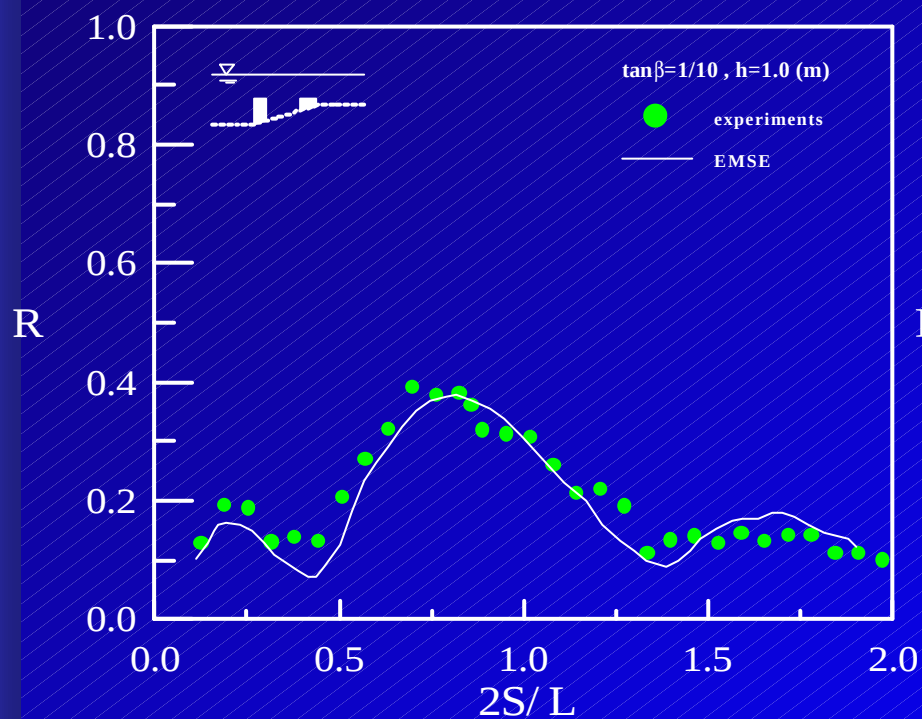
斜坡底床 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖 (無碎波 $\tan b = 1/30$)



斜坡底床 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖 ($\tan b = 1/20$)

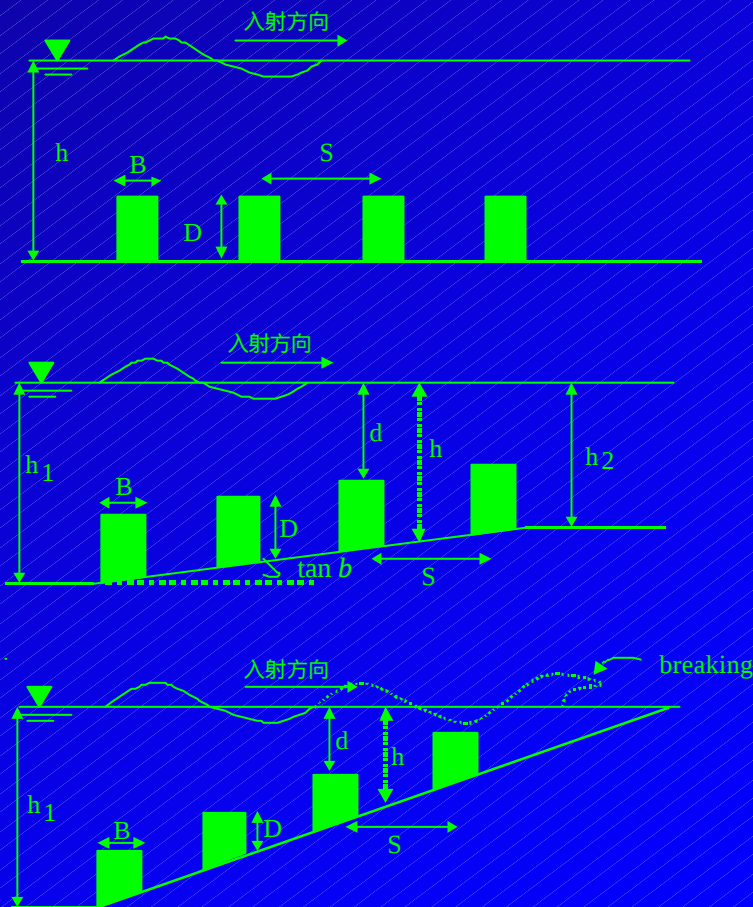


斜坡底床 反射率 R 與波浪條件 $2S/L$ 關係圖 ($\tan b = 1/10$)



結果與討論

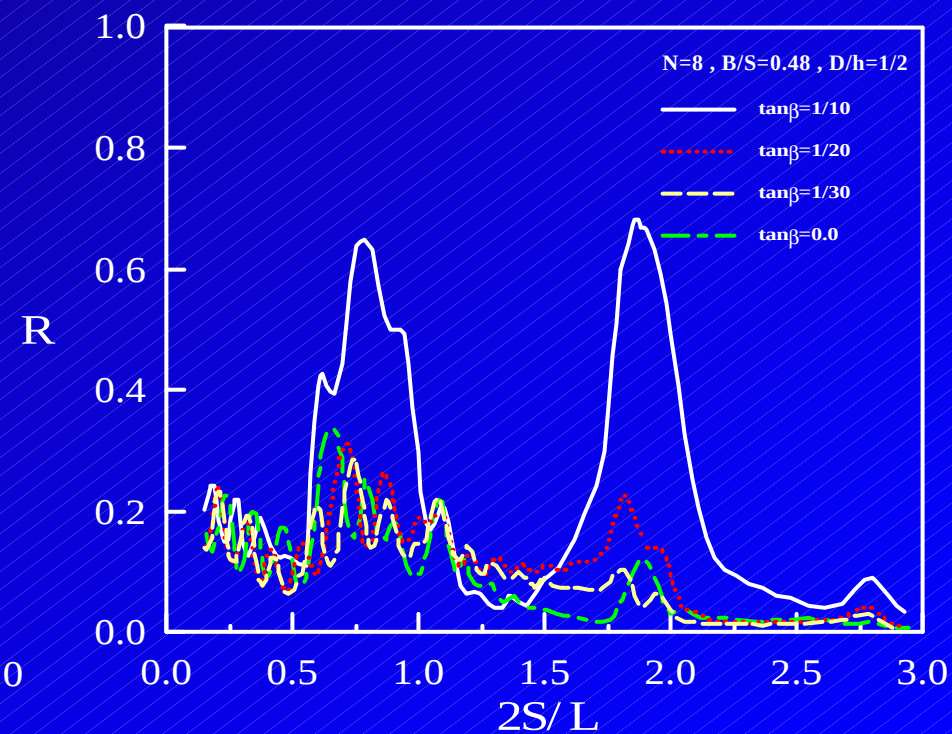
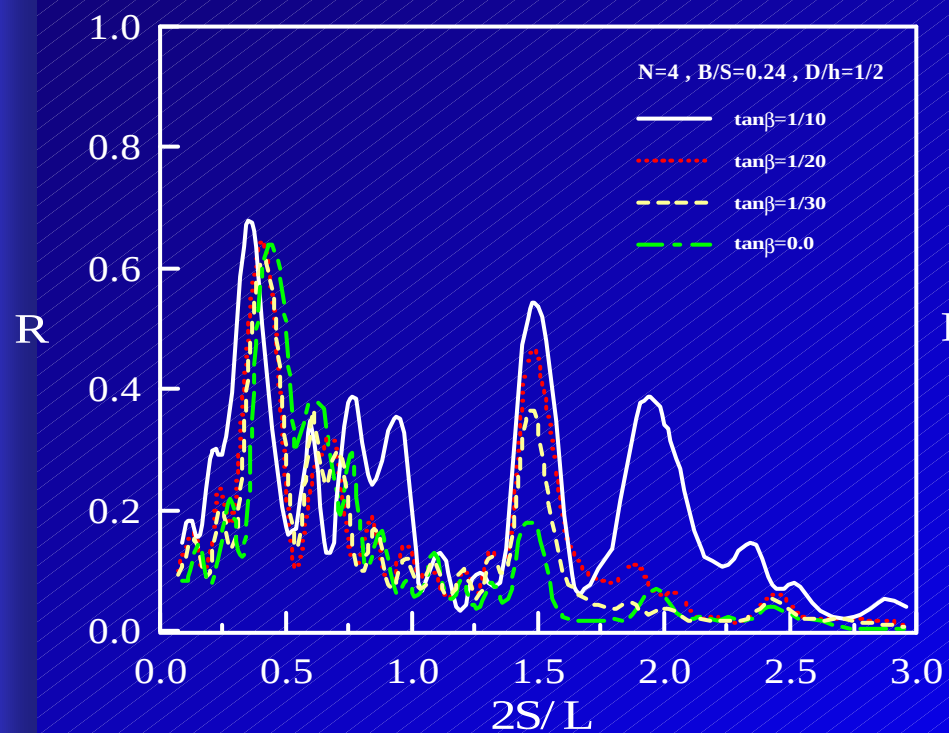
- (1) 底床坡度 ($\tan\beta$) 的影響
- (2) 潛堤個數 (N) 的影響
- (3) 相對高度 (D/h) 的影響
- (4) 堤體間距 (B/S) 的影響
- (5) 堤後碎波的影響
- (6) 經驗公式的推算



系列潛堤配置及波浪條件

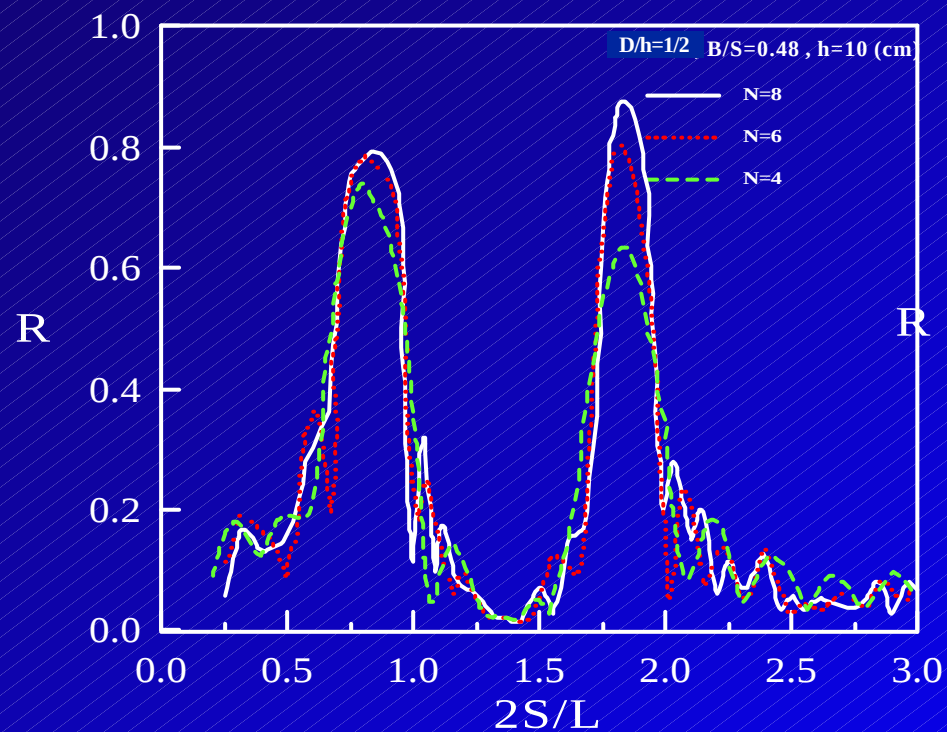
潛堤型式	底床坡度 ($\tan \beta$)	潛堤數 (N)	潛堤間矩 (S')	水深 (h_1)	波浪條件	
					週期(T)	波高(H_i)
矩型	0,1/30,1/20,1/10	4、 6、 8	50、 25cm	30 cm	0.4~4.0 sec	1.0 cm

底床坡度($\tan\beta$)的影響

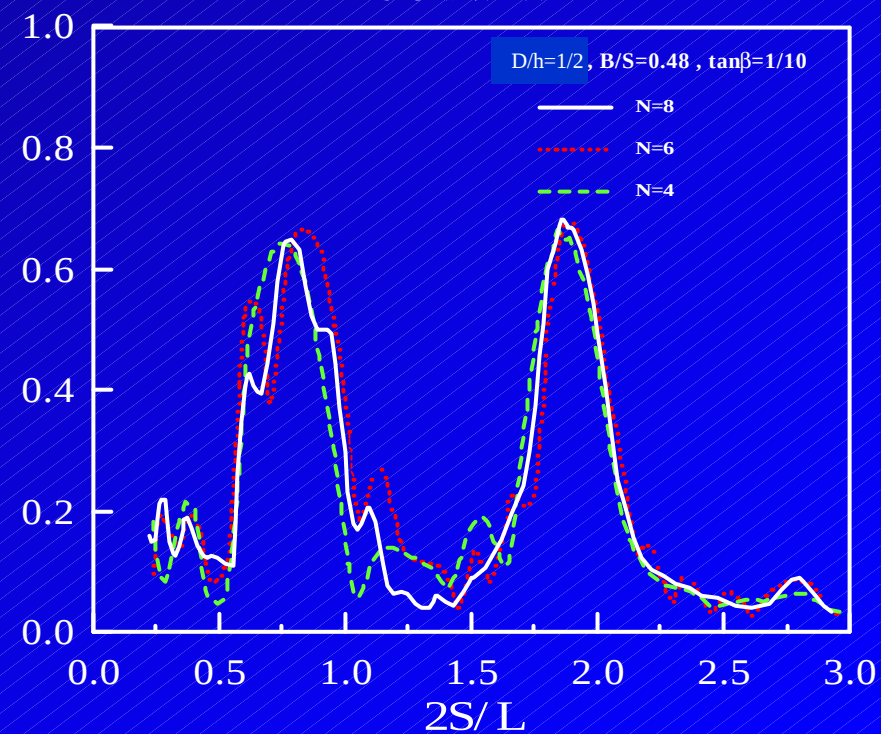


潛堤個數(N)的影響

水平底床

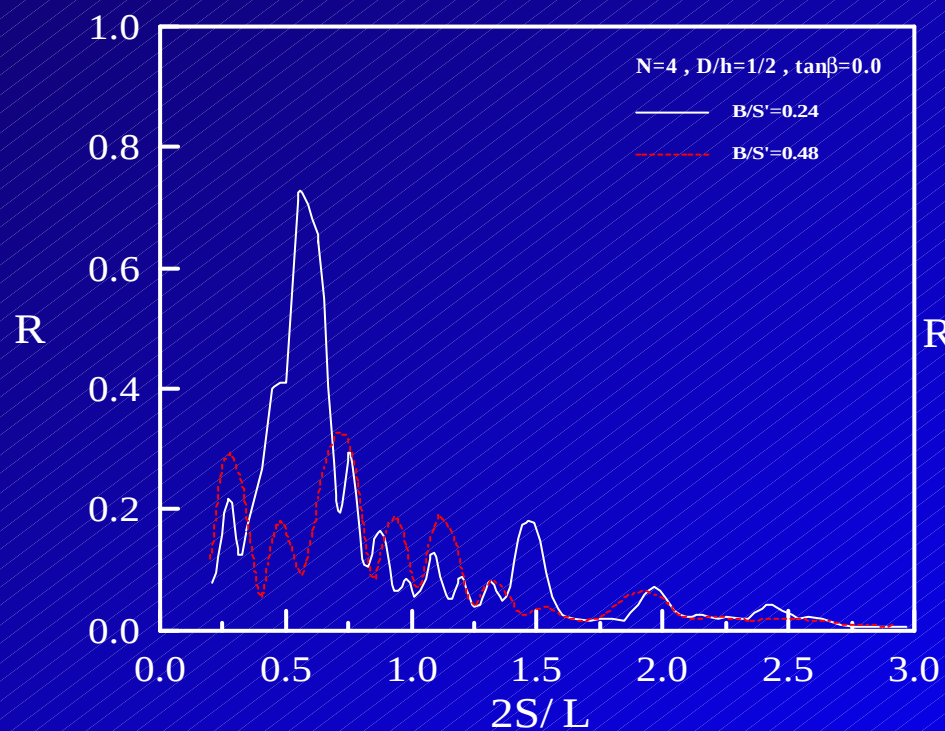


斜坡底床

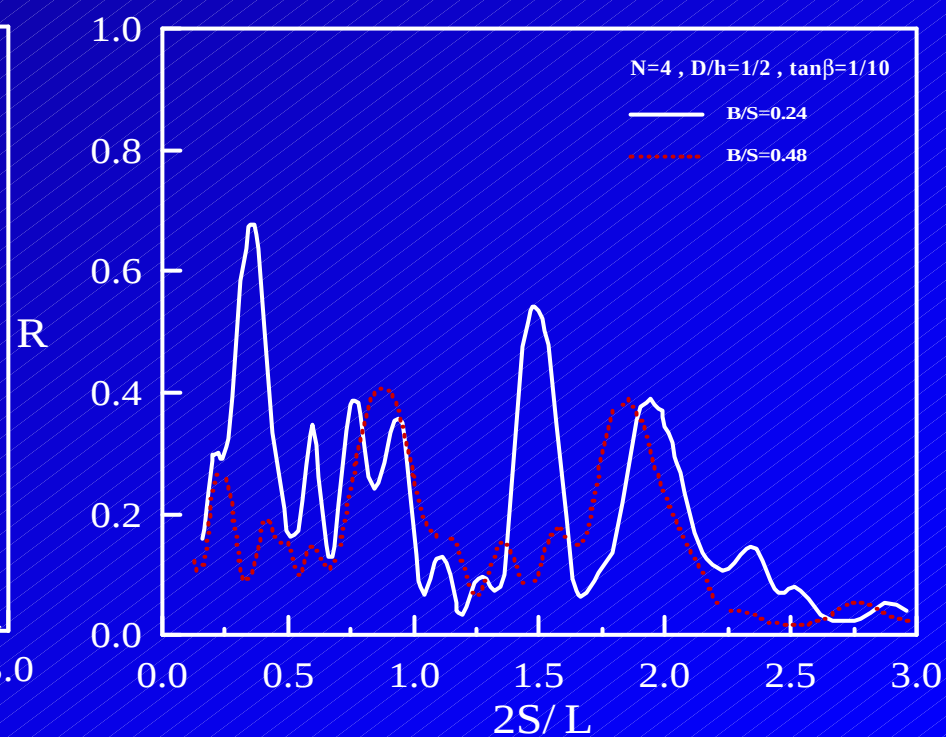


潛堤間距(B/S)的影響

水平底床

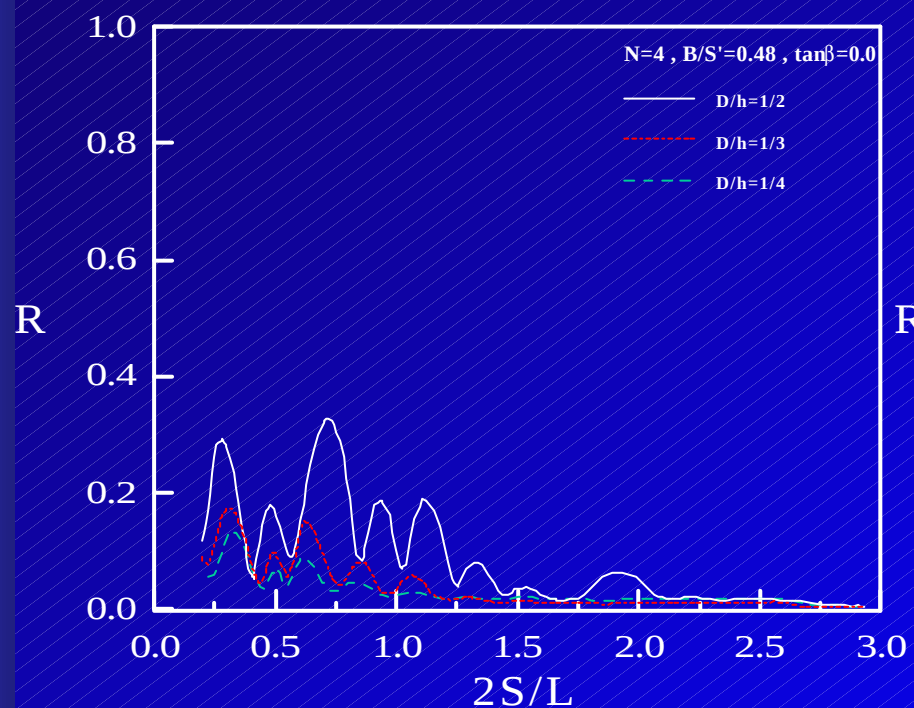


斜坡底床

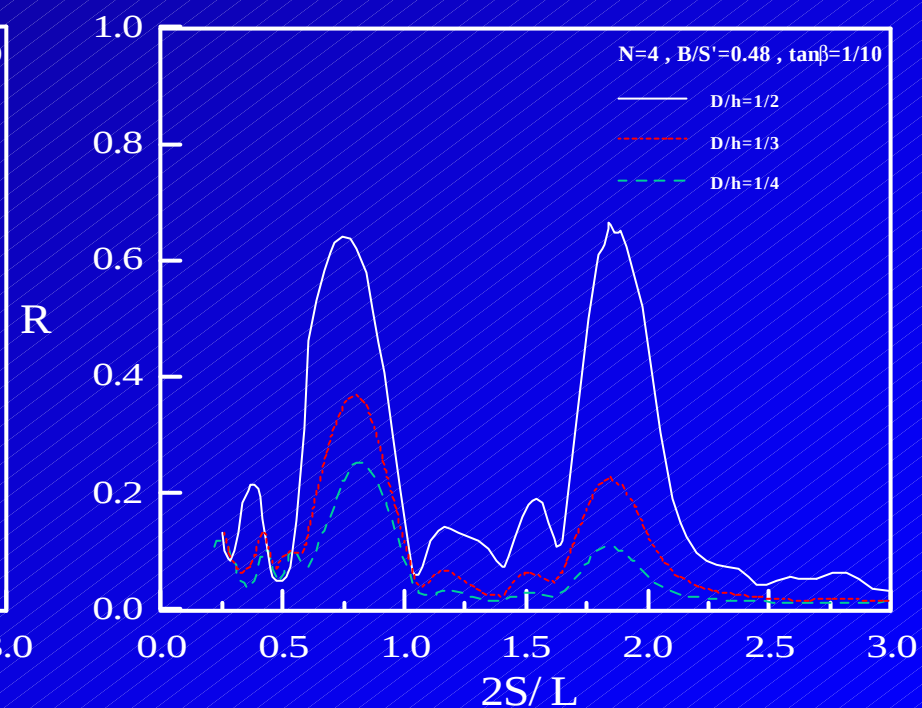


相對高度(D/h)的影響

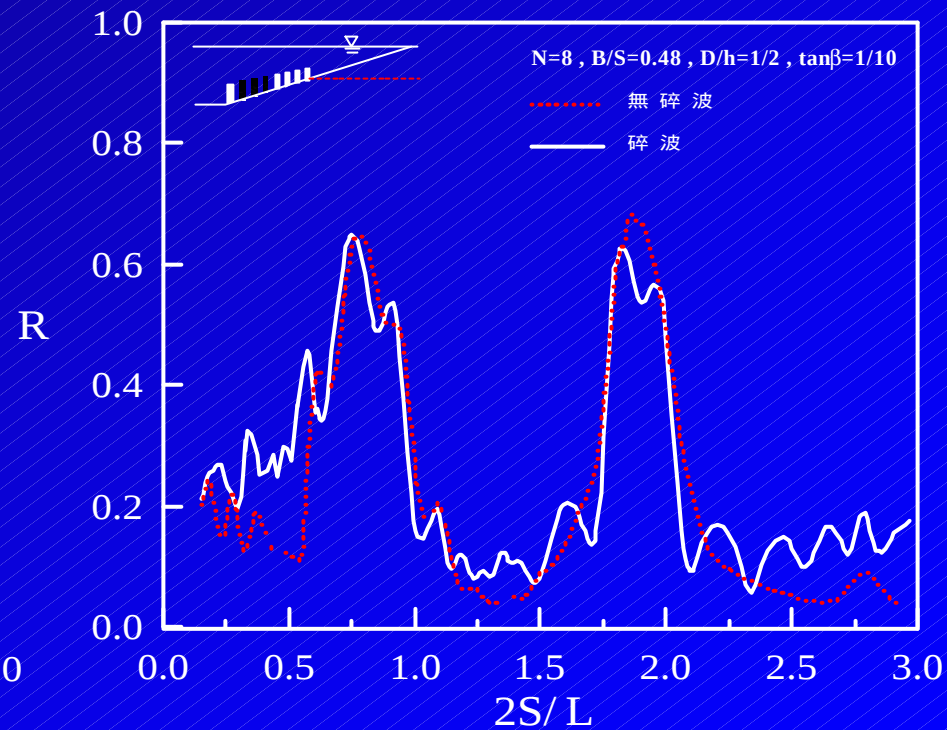
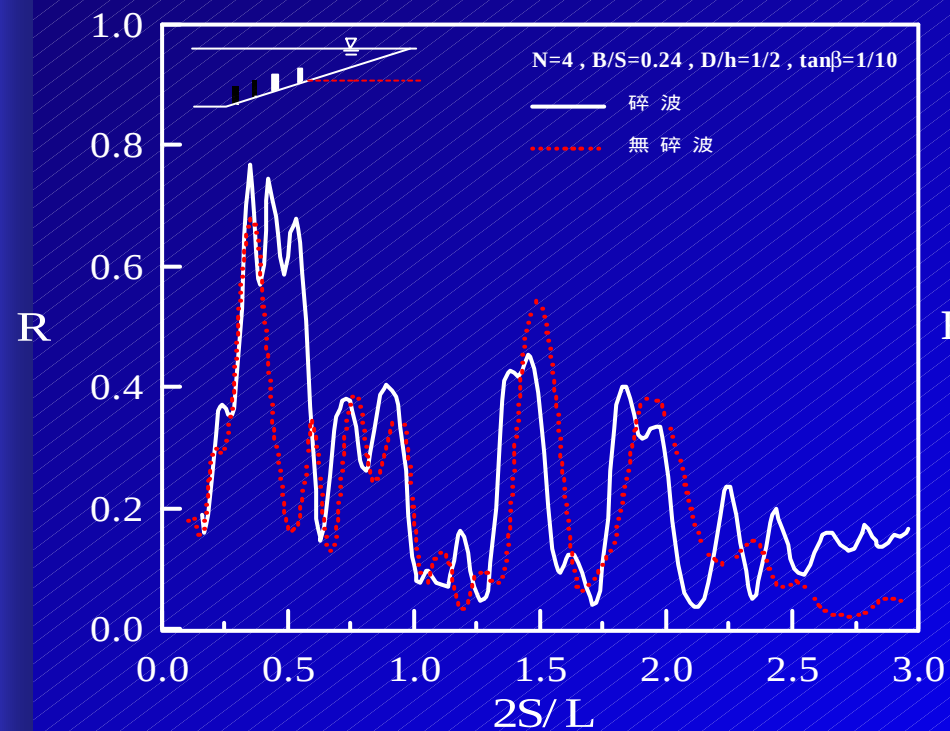
水平底床



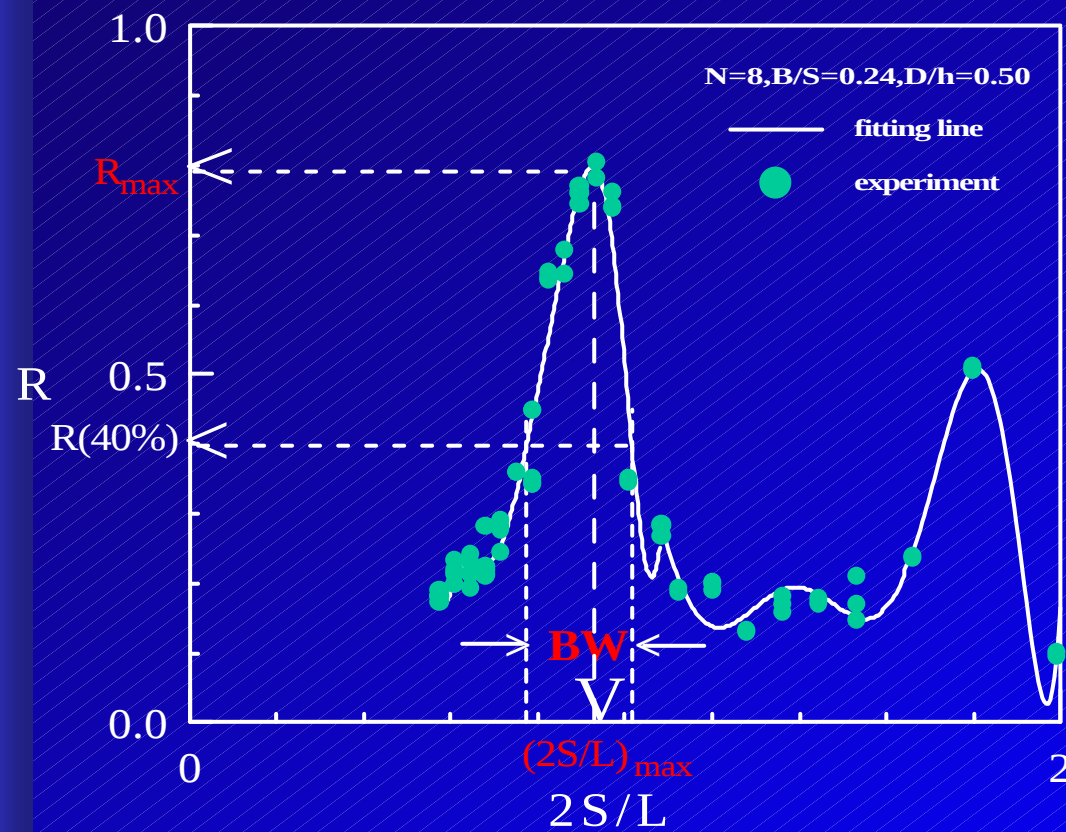
斜坡底床



堤後碎波的影響

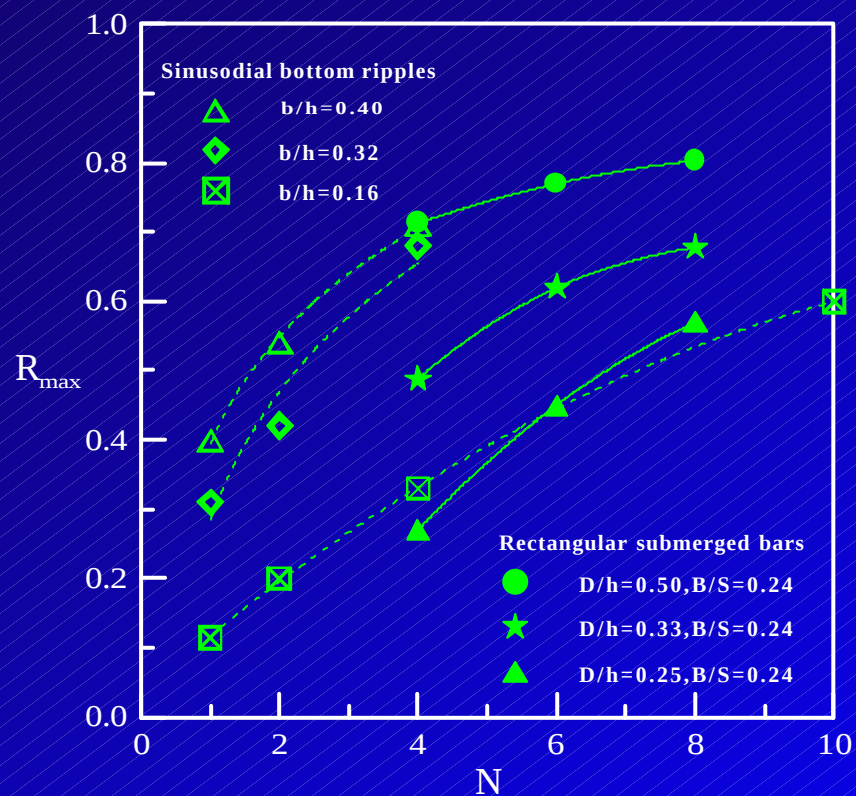


經驗公式的推算

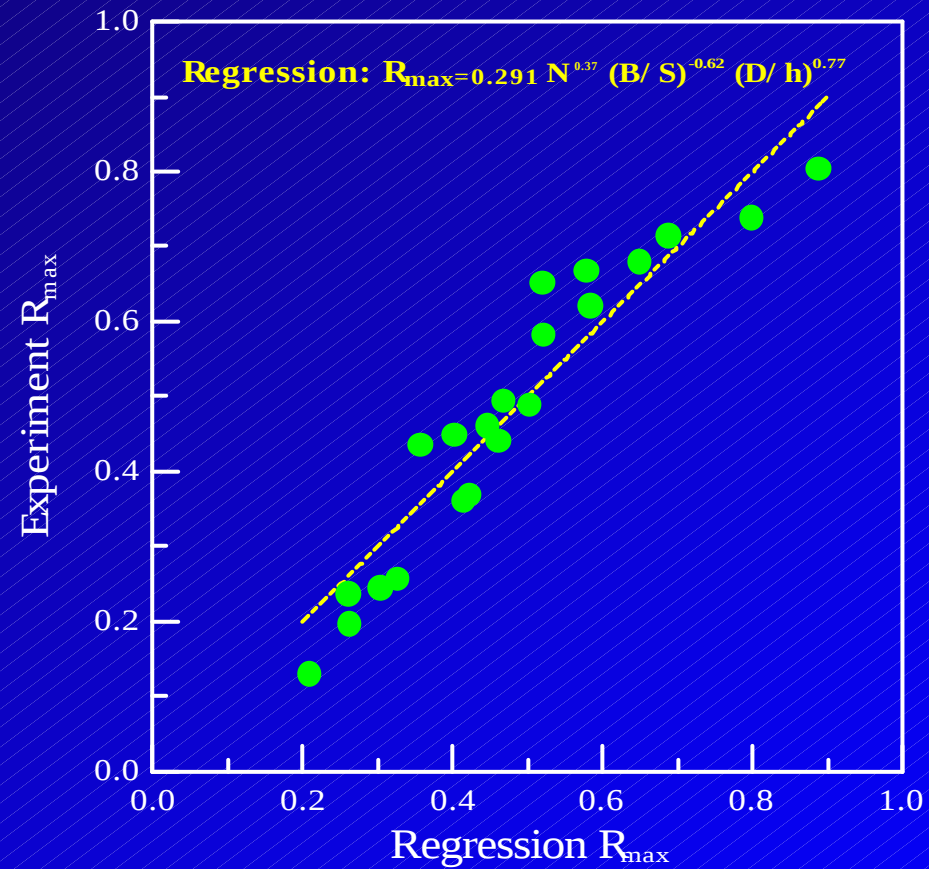


$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\max} = f(N, D/h, B/S) \\ (2S/L)_{\max} = f(N, D/h, B/S) \\ BW = f(N, D/h, B/S) \end{array} \right.$$

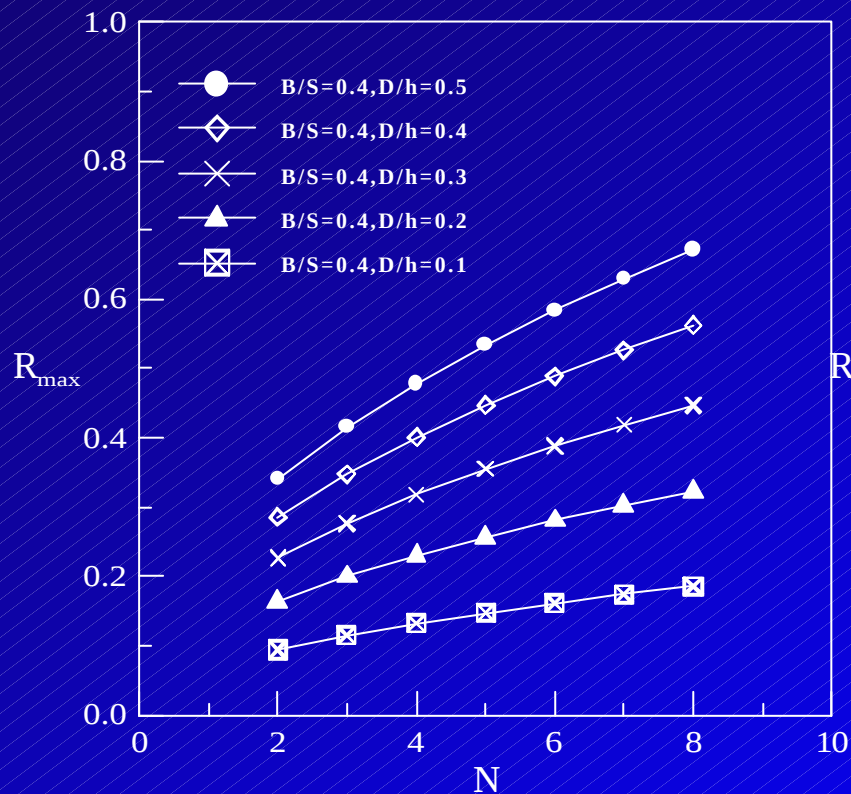
$R_{\max}$ 與 N 、 D/h 及 B/S 的關係



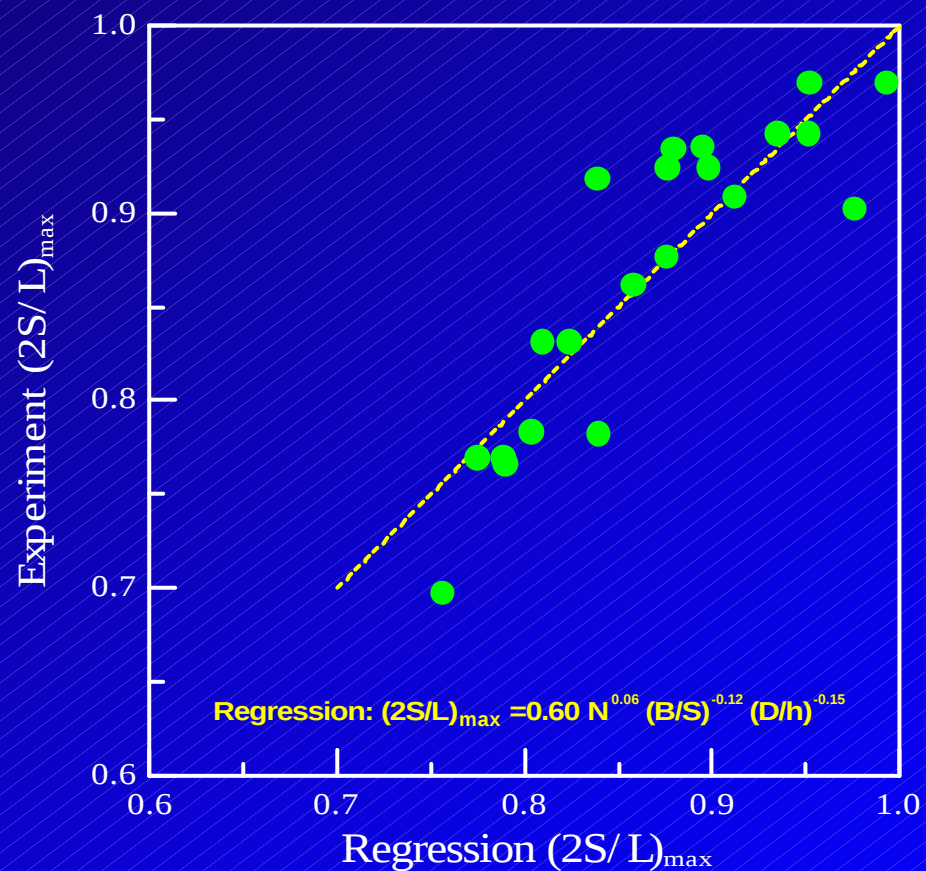
$R_{\max}$ 與 N , B/S 及 D/h 的關係



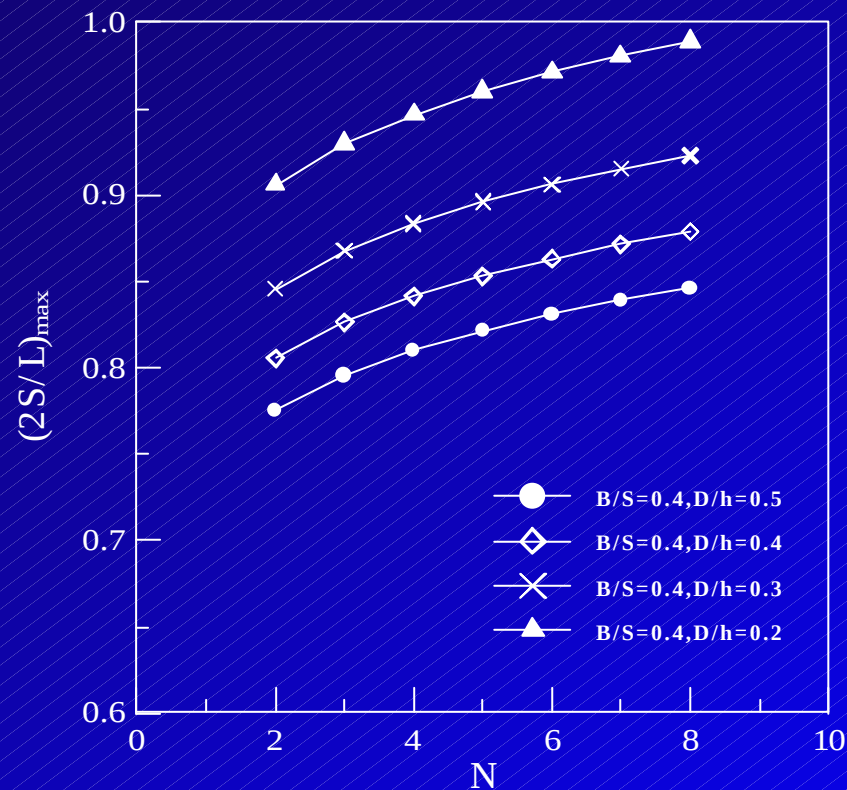
$R_{\max}$ 與 N , B/S 及 D/h 的關係



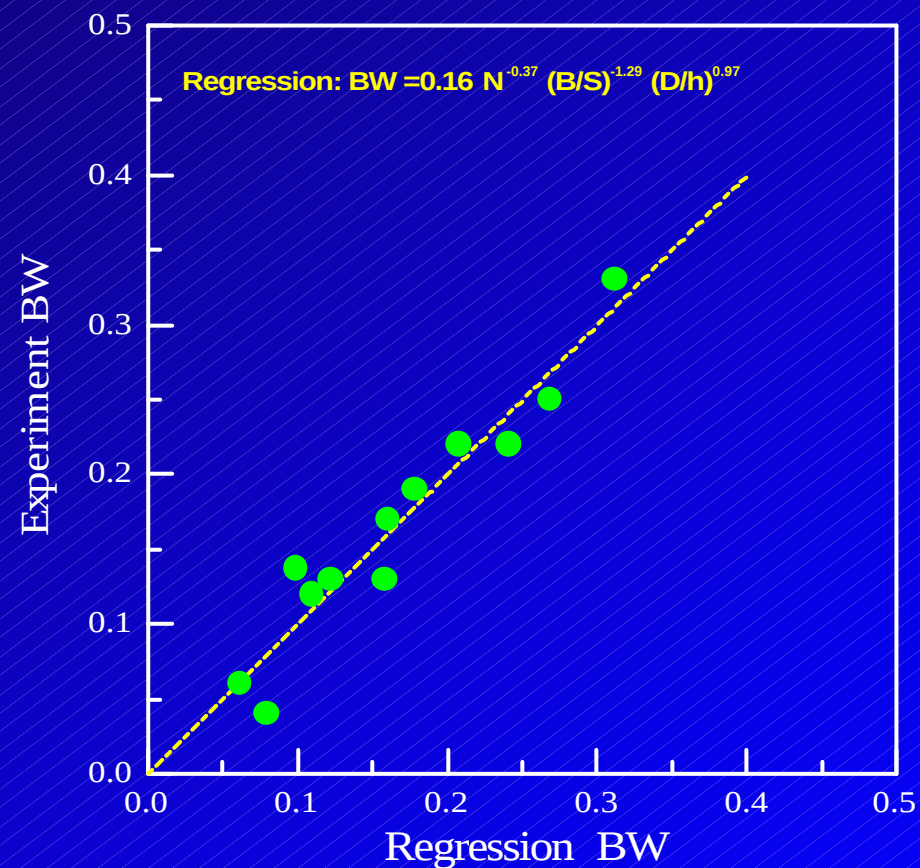
$(2S/L)_{\max}$ 與 N , B/S 及 D/h 的關係



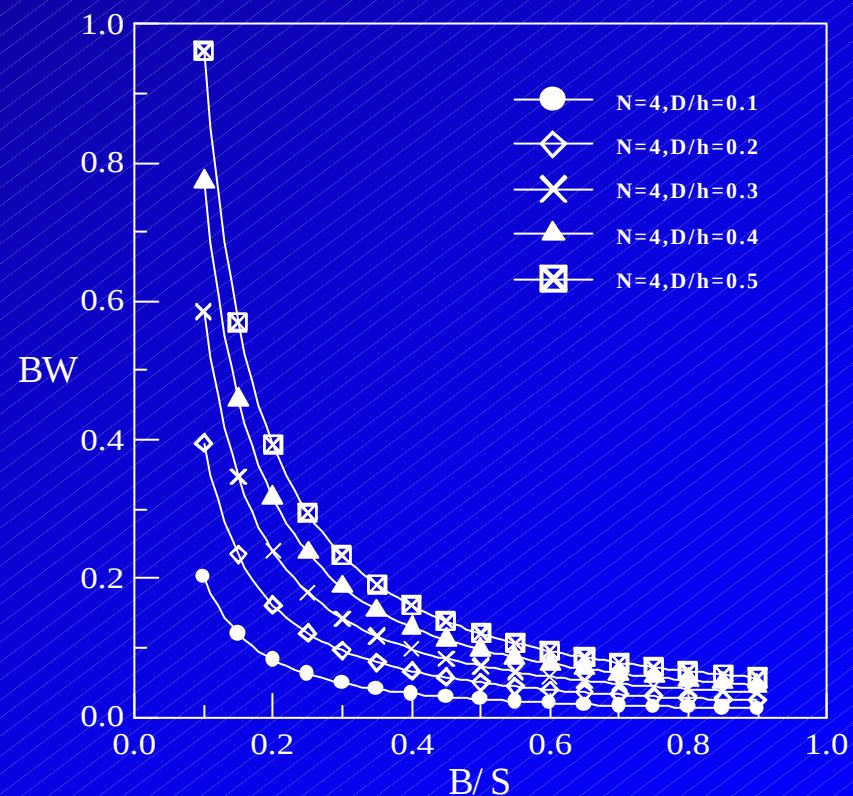
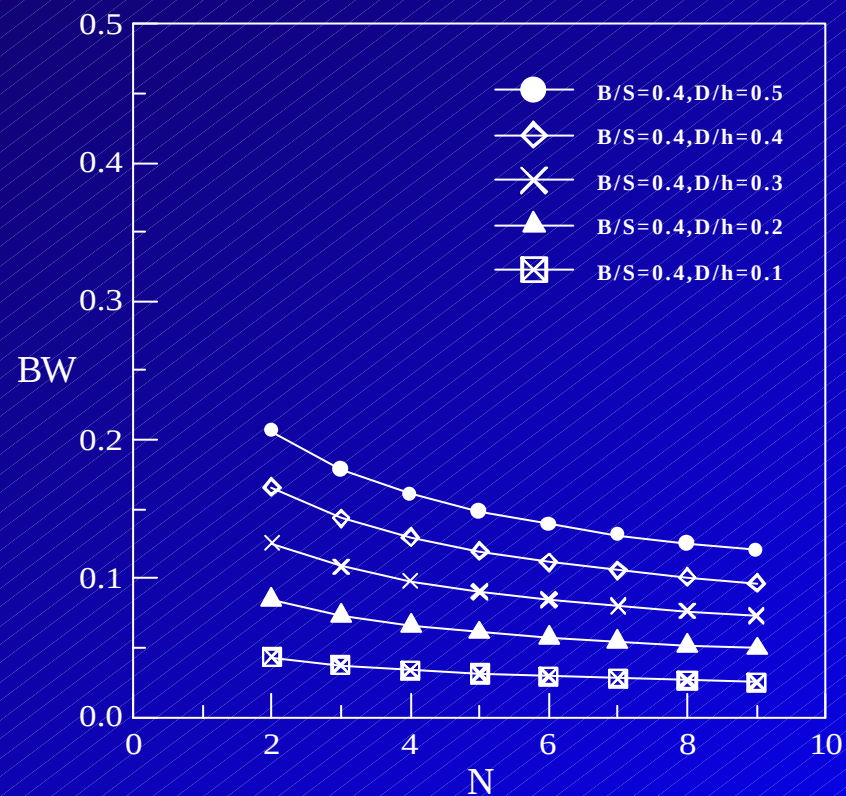
$(2S/L)_{\max}$ 與 N , B/S 及 D/h 的關係



BW 與 N, B/S 及 D/h 的關係



BW 與 N, B/S 及 D/h 的關係



結 論

- 變化底床坡度 ($\tan \beta$)

底床坡度愈大，反射率愈大，並向較小 $2S/L$ 偏移。

因底床坡度變大，水深變淺，造成波速及波長之改變，進而影響布拉格反射所相應之波長所致。

- 變化潛堤個數 (N)

在**水平底床**下，潛堤個數增加，反射率值增加，但帶寬變窄。

在**斜坡底床**下，潛堤個數增加，反射率值變化不大。由於水深變化，潛堤擺設位置的影響大於潛堤個數之多寡。

結 論

- 變化潛堤間距 (B/S)

在斜坡底床上，(B/S)愈小，反射率尖峰值愈大且發生尖峰值的頻率增加，但平底底床上潛堤間距增大雖反射率尖峰有增大現象，但尖峰值以外條件並無反射率增大現象。

- 變化相對堤高 (D/h)

平底底床與斜坡底床情形相似。

潛堤高度的增加，有助於波浪反射，在較大底床坡度及 D/h ，其反射率最大值($R_{\max}$)有往較小 $2S/L$ 條件發生的趨勢。

結 論

- 有、無堤後碎波之情形

反射率在碎波情形下比無碎波有較多波動變化，布拉格效應發生的帶寬較寬，適用的波浪範圍較大，兩者之反射率值相差不大。

- $R_{\max} = f(N, D/h, B/S)$

反射率最大值($R_{\max}$)與潛堤個數(N)及相對高度(D/h)成正相關，而與潛堤相對間距(B/S)成逆相關，較小的 B/S 配置，影響程度較大。

結 論

- $(2S/L)_{\max} = f(N, D/h, B/S)$

反射率最大值發生的波浪條件 $(2S/L)_{\max}$ 與潛堤個數(N)成正相關而與潛堤相對高度(D/h)及相對間距(B/S)成逆相關。

- $BW = f(N, D/h, B/S)$

R=0.4的反射率帶寬(BW)與潛堤相對高度(D/h)成正相關，而與潛堤個數(N)及相對間距(B/S)成逆相關。較小的B/S配置，影響程度較明顯。

建 議

- 本研究主要以等間距系列潛堤為主要探討對象，若欲增加布拉格反射發生之波浪條件範圍，可考慮以不等間距之系列潛堤配置。
- 在實際之海岸工程中，系列潛堤佈置時並非單一斷面，而是在一開放水域中，其包含折射、繞射及潛堤堤頭兩端水域等效應，所以應加考慮開放水域下對於反射率之影響。

敬 請 指 教

交通部運輸研究所港灣技術研究中心

九十年度自辦研究計畫期末審查意見回覆表

審查委員及審查意見	意見回覆
港口突堤效應保護對策之研究() 成功大學許泰文教授： 1. 布拉格共振(Bragg resonance) 為本研究重要論點，故應於第一章中對於布拉格共振形成機制作詳細說明，或採用圖示說明共振時水位之變化。 2. 數值計算中，式(2-22)及(2-23) 中 Δx, Δt, C_r, D_f 等參數如何決定？其值多少建議於報告中補充說明。 3. 模型試驗或數值計算為何取潛堤個數 $N=4$？從圖 3-8 是否能看出布拉格反射之水位變化？ 4.5-6 經驗公式推算中，取 $R=0.4$ 作為基準其根據如何？所分析數據為平底海床試驗結果，能否將斜坡試驗結果加入？ 成功大學呂錦山教授： 1. 圖 5-22 至圖 5-27 並未說明樣本數，須在符合常態分佈下進行分析。	將補充文字及圖示說明布拉格共振現象。 將於報告中補充說明。 文獻研究中，以潛堤個數 4 個的試驗資料最多，為了與前人研究結果作比較，故採用 $N=4$ 作基準加以探討。至於

2.模式如能測試信賴區間可靠度會較高。	模式目前皆未作信賴區分析，以後若有較多分析資料，在作經驗式分析將測試其信賴區間，增加其可靠度。
逢甲大學林朝福教授： 1.本試驗之布拉格效應與其他人所做不同，應說明原因。 2.試驗波高多採不同大小。 3.潛堤個數影響布拉格反射為0.06 次方，應加以說明。	由於本研究所用的潛堤形狀為矩形，形狀差異為布拉格效應分佈不同的原因，將於報告中增加說明。本研究為使相關影響參數單純化故採用單一波高，今後將朝不同波高作研究。 由於個數(N)變化為整數倍，相對於整個迴歸經驗式而言，指數值必須相對減小，如此才不致影響整個參數變化的相關性。
港研中心王慶福研究員： 1.本研究無論就數值理論說明或試驗過程，其所考量之影響因素均頗為嚴謹，值得肯定。 2.以系列潛堤來減附入侵波浪能量，為值得探討之一方向，唯因影響海岸變遷之因素頗多，是否可以系列潛堤探討對漂沙之影響(侵蝕、堆積)。 3.就	

3.理論與試驗相互配合,結果值得肯定。 4.何種佈置對於消能效果最適?是否未來也有作不規則波之計畫。	朝三維動床進行研究。 謝謝肯定。 不同的波浪條件,最適的佈置並不相同,可參考圖 5-25~圖 5-35 消能效果分佈圖。目前無研究不規則波條件計畫,若經費及時間許可,非常願意作不規則波研究。
--	---