

95-42-7184
MOTC-IOT-94-H2DB003

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (1/4)



交通部運輸研究所
中華民國 95 年 3 月

95-42-7184
MOTC-IOT-94-H2DB003

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (1/4)

著者：蔡立宏、許泰文、張憲國、王順寬、張人懿

交通部運輸研究所
中華民國 95 年 3 月

95
系列潛堤應用於海岸保護之研究
(1/4)

交通部運輸研究所

GPN：1009500749
定價 200 元

國家圖書館出版品預行編目資料

系列潛堤應用於海岸保護之研究. (1/4) / 蔡立
宏等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研
所, 民95

面 : 公分

參考書目:面

ISBN 986-00-4816-9(平裝)

1. 海岸工程 2. 堤

443.3

95005940

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (1/4)

著 者：蔡立宏、許泰文、張憲國、王順寬、張人懿

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 95 年 3 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 130 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價：200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書坊臺視總店：臺北市八德路 3 段 10 號 B1•電話：(02)25781515

五南文化廣場：臺中市中山路 2 號 B1•電話：(04)22260330

GPN：1009500749

ISBN：986-00-4816-9 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：系列潛堤應用於海岸保護之研究 (1/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 986-00-4816-9 (平裝)	政府出版品統一編號 1009500749	運輸研究所出版品編號 95-42-7184	計畫編號 94-H2DB003
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：蔡立宏 聯絡電話：04-26583177 傳真號碼：04-26560661	合作研究單位：國立成功大學 計畫主持人：許泰文 研究人員：張憲國、王順寬、張人懿 地址：台南市大學路 1 號 聯絡電話：06-2757575		研究期間 自 94 年 3 月 至 94 年 11 月
關鍵詞：沙漣底床、人工潛堤、布拉格反射、不規則波			
摘要： 本計畫為四年計畫之第一年研究，研究內容主要探討不規則波通過正弦沙漣底床及等間距半餘弦人工潛堤，發生布拉格反射的學理特性。計畫之數值模式，採用 Hsu 等人 (2001) 所發展的演進型式緩坡方程式，再利用混合波譜分割的方法，計算不規則波通過潛堤之波場，再由波場的結果，利用 Chang (2002) 的三點法及 Goda 和 Suzuki (1976) 的能量觀點，求出不規則波布拉格共振反射係數的分佈情形。計算結果顯示，不規則波入射沙漣底床或人工潛堤，反射係數之分佈型態與規則波所得的結果相似，惟共振尖峰反射係數比規則波小，而帶寬則較規則波寬，即不規則波之反射係數分佈較規則波來的平坦單調。由此可以推論，人工潛堤應用於實際海域，作為海岸保護工法時，對於紊亂的不規則波浪，應用有一某種程度的防禦效果。			
出版日期	頁數	定費	本 出 版 品 取 得 方 式
95 年 3 月	130	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定費價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 (解密條件：☐ 年 月 日解密，☐ 公布後解密，☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密，☐ 另行檢討後辦理解密) ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Application of the Series of Submerged Breakwaters to Coastal Protection (1/4)			
ISBN(OR ISSN) ISBN 986-00-4816-9 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009500749	IOT SERIAL NUMBER 95-42-7184	PROJECT NUMBER 94-H2DB003
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu, Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Tsai, Li-Hung PHONE: (04) 26583177 FAX: (04) 26560661			PROJECT PERIOD FROM March 2005 TO November 2005
RESEARCH AGENCY: National Cheng Kung University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Hsu, Tai-Wen PROJECT STAFF: Chang, Hsien-Kuo, Wang, Swun-Kwang, Chang, Jen-Yi ADDRESS: No. 1, Ta-Hsueh Road, Tainan 701, Taiwan, R.O.C. PHONE: (06) 2757575~63249			
KEY WORDS: rippled bed, artificial bars, Bragg reflection, random waves			
ABSTRACT: The present research is the first-year project of the total period of four-year research. All efforts of the first year stage are presented in this report. In this project, the Bragg reflections for irregular waves propagating over rippled bed and rectified cosinoidal artificial bars are investigated. Based on the EEMSE (Evolution Equation for Mild-Slope Equation) wave model developed by Hsu et al. (2001), the reflection theory of Chang (2002) and Goda and Suzuki (1976), the Bragg reflections of irregular random waves passing over submerged breakwaters are presented. In the cases of irregular waves, the simulated results with regular waves are received. The results reveal that the distribution of Bragg reflection from irregular waves becomes more flat than that of regular waves. It could be concluded that the breakwaters could be used in coastal infrastructures to protect the seashore against the attack of irregular waves.			
DATE OF PUBLICATION March 2006	NUMBER OF PAGES 130	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

目 錄.....	III
圖 目 錄.....	V
表 目 錄.....	VII
符號說明.....	III
第一章 緒 論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究方法與預期成果.....	11
1.4 本文組織.....	17
第二章 規則波之布拉格反射.....	19
2.1 Miles 理論.....	19
2.2 長波理論.....	23
2.3 EEMSE 數值模式.....	27
第三章 規則波理論應用與驗證.....	33
3.1 Miles 理論應用.....	33
3.2 長波理論驗證.....	38
3.3 EEMSE 模式驗證.....	40

第四章	不規則波之緩坡方程式.....	49
4.1	控制方程式	49
4.2	能量消散係數	50
4.3	波譜分割與合成	55
第五章	不規則波應用	57
5.1	反射係數公式	57
5.2	波譜的選擇	61
5.3	不規則波布拉格共振之研究	62
第六章	結論與建議	71
6.1	結論	71
6.2	建議	72
	參考文獻	75
附錄一	期中報告審查意見處理情形	A-1
附錄二	期末報告審查意見處理情形	A-7
附錄三	期中報告簡報資料	A-13
附錄四	期末報告簡報資料	A-25

圖 目 錄

圖 1-1	波浪行經沙漣底床之反射波變化情形	5
圖 1-2	波浪行經沙漣底床之水位變化情形	5
圖 1-3	波浪通過沙漣底床之水位分佈歷線	6
圖 1-4	布拉格共振之時序列(Webster 和 Wehausen, 1995)	6
圖 1-5	波浪傳遞於正弦沙漣底床之波動系統	8
圖 2-1	擾變底床及相對座標示意圖	20
圖 2-2	梯形潛式結構物之示意圖	24
圖 3-1	不同形狀等間距系列潛堤示意圖	35
圖 3-2	不等間距系列潛堤示意圖	37
圖 3-3	正弦沙漣底床地形示意圖	42
圖 3-4	波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D1).....	43
圖 3-5	波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D2).....	43
圖 3-6	波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D3).....	44
圖 3-7	複合式正弦沙漣底床地形示意圖	45
圖 3-8	波浪通過複合式沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 G1).....	46
圖 3-9	波浪通過複合式沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 G2).....	47
圖 3-10	波浪通過複合式沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 G3).....	48

圖 5-1	入射波與反射波座標示意圖	58
圖 5-2	混合波譜分割示意圖	62
圖 5-3	不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D1)...	65
圖 5-4	不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D2)...	65
圖 5-5	不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D3)...	66
圖 5-6	半餘弦人工潛堤底床地形示意圖	68
圖 5-7	不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖 (配置 K1)	69
圖 5-8	不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖 (配置 K2)	69

表 目 錄

表 1-1	前人研究方法及成果 (理論解析).....	12
表 1-2	前人研究方法及成果 (數值模式).....	13
表 1-2	前人研究方法及成果 (數值模式) (續).....	14
表 1-3	前人研究方法及成果 (現場及模型試驗).....	15
表 3-1	梯形潛堤配置情形	39
表 3-2	反射係數及透射係數比較表	39
表 3-3	波浪通過正弦沙漣底床試驗條件 (Davies 和 Heathershaw, 1984)	42
表 3-4	波浪通過複合式沙漣底床試驗條件 (Guazzelli 等人, 1992)	45
表 5-1	不同個數成份波之合成波誤差比較表	63
表 5-2	半餘弦人工潛堤底床試驗條件 (Kirby 和 Anton, 1990).....	68

符號說明

a	：波浪振幅
a_0	：外海入射波振幅
a_I	：入射波浪水位振幅
a_R	：反射波浪水位振幅
A_i	：係數
A_w	：波浪流速勢函數振幅
b	：沙漣底床振幅
B	：人工潛堤堤寬
B_2	：梯形潛堤堤頂寬度
B_i	：係數
C	：波速
C_g	：群波波速
$C_{\omega/2}$	：三波交互作用之位相速度
D	：人工潛堤高度
D_d	：單位時間單位面積的碎波能量消散效應
D_i	：單位時間單位面積的能量損失
D_{nl3}	：單位時間單位面積的非線性三波交互作用效應
D_s	：單位時間單位面積的非線性淺化效應
D_{tot}	：單位水體之平均碎波能量消散率
E	：波浪能浪

E_I	：入射波總能量
E_R	：反射波總能量
E_{tot}	：波浪總能量
$E(\omega, \theta)$	：波譜能量密度
f	：水深函數
f_1, f_{low}	：波譜分割最低頻率
f_D	：能量消散係數
f_d	：碎波能量消散係數
f_N, f_{high}	：波譜分割最高頻率
f_{nl3}	：非線性三波交互作用係數
f_p	：尖峰頻率
f_s	：非線性波浪淺化係數
F_1	：係數
F_2	：係數
g	：重力加速度
h	：水深
h_1	：梯形潛堤堤前水深
h_2	：梯形潛堤堤頂水深
h_3	：梯形潛堤堤後水深
h_b	：碎波水深
H	：波高

H_0	：深海入射波高
H_1	：梯形潛堤堤前波高
H_3	：梯形潛堤堤後波高
$H_{1/3}$	：示性波高
H_b	：碎波波高
H_i	：梯形潛堤輻射傳輸
$H_{\max}$	：最大可能波高
H_{non}	：非線性波高
H_{rms}	：波浪均方根波高
$H_{\text{rms},0}$	：入射波浪之均方根波高
H_t	：梯形潛堤輻射傳輸
$\tilde{H}$	：波浪總波高
i	：單位虛數
J_0	：Bessel 方程第一類零階量
J_{nl3}	：三波交互作用係數
k	：表面波浪週波數
k_0	：深海入射波浪之週波數
k_c	：虛擬週波數
k_s	：線性波淺化係數
k_ω	：三波交互作用中心頻率之週波數
$k_{\omega/2}$	：三波交互作用頻率之週波數

K	：底床週波數
ℓ	：沙漣底床波長
L	：規則波波長
L_0	：入射波波長
$L_{1/3}$	：不規則波示性波長
L_2	：梯形潛堤堤前斜坡水平長度
L_4	：梯形潛堤堤後斜坡水平長度
$\tilde{L}$	：沙漣總長度
m	：沙漣底床係數
m_k	：波譜之 k 次動差
M	：波譜分割數
n	：群波速度與波速比
N	：沙漣個數
Q_b	：碎波微小量
R	：反射係數
Re	：複數函數之實部
s	：位相函數
s_1	：係數
s_2	：係數
S	：等間距人工潛堤之間距
S_2	：梯形潛堤斜坡傳輸

S_4	：梯形潛堤斜坡傳輸
S_n	：不等間距人工潛堤之間距
$S_{br}(\omega, \theta)$	：波譜型態碎波能量消散
$S(f)$	：波譜能量密度
t	：時間變量
$\bar{t}$	：緩慢時間變量
T	：波浪週期
$T_{1/3}$	：示性週期
T_p	：尖峰頻率對應之週期
$\bar{T}$	：平均週期
$\hat{T}$	：透射係數
U_r	：Ursell number
W_3	：梯形潛堤寬度傳輸
x	：離岸座標
y	：沿岸座標
Y_0	：Bessel 方程第二類零階量
z	：水深座標
α	：係數
α_{BJ}	：係數
α_{EB}	：係數
β_t	：雙位相

δ	：底床地形擾變量
Δf	：波譜分割間距頻率
η	：水位變化
θ	：波向角
ρ	：流體密度
σ_0	：係數
σ_1	：係數
∇_h	：水平梯度運算因子
ϕ	：二維波浪流速勢
Φ	：三維波浪流速勢
$\Phi^{(i)}$	：入射波流速勢
$\tilde{\Phi}$	：反射波流速勢
ψ	：緩慢時間變量二維波浪流速勢
Ψ	：尺度因子
ω	：角頻率
$\bar{\omega}$	：平均角頻率
$\tan \beta$	：底床坡度

第一章 緒 論

1.1 研究動機

臺灣四面環海，常年遭受海洋波浪之侵襲，特別是在颱風季節，巨大的颱風波浪，對地形變化的影響尤其顯著。根據中央氣象局 104 年 (1896 ~ 2000 年) 颱風資料統計分析之結果顯示，每年平均約有 3.5 次颱風侵襲臺灣海岸，颱風期間之暴潮巨浪直接侵襲海岸，造成海岸侵蝕，近岸海域變遷而使碎波線內移，甚而靠近海堤堤線，且由於海岸線內移，波浪常越過堤頂而導致海水倒灌及沿海區域之溢淹。近年來因海岸侵蝕，沿海地層下陷以及平均海面上升，海岸災害發生頻率與規模與日俱增，所造成之災害損失為臺灣重要天然災害之一。民國 85 年賀伯颱風所造成的海岸災害至今記憶猶新。

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

應與海岸生態及人類生活並存，海岸景觀的美化、海岸結構的親水性及海岸生態的維持應為台灣海岸永續利用及整體規劃中必須考慮的要素。

往昔一般海岸結構物的設計，大多以保護陸地或經濟開發為主，海堤的興建雖然防止浪潮的入侵，但同時也扼阻了人們與海洋的接觸機會，忽略了自然生態、景觀和人類親近水邊的權利。近年來海岸區自然化的觀念在歐美及日本等先進國家已廣泛被採納，其在保護海岸的同時並利用海洋及海岸天然資源做為休閒遊憩的地方，例如法國的海岸開發政策是以生態景觀和休閒利用為第一優先，產業活動反而居次。日本近年來在海岸港灣開發時，非常注重結構物與海域生態環境的諧和性，對海岸的防災大部份都以「面」的保護工法取代了「線」保護工法，亦即利用離岸堤、突堤、潛堤等保障岸前沙灘，再配合生態工法，使兼具防災與親水的功能，並創造優良的整體生存環境。反觀國內，近年來由於國民所得大增及受世界潮流衝擊，國人環保意識高漲且對遊憩休閒設施需求逐漸殷切，致使海岸空間利用規劃必須滿足更高之期望。因此海岸結構物之設置，從過去防止海浪侵蝕破壞，保護海岸地區生命財產安全的單純目的，轉變成包含景觀美化與遊憩行為並重等多功能的目標。未來，工程與景觀的調和及親水性設計遂成為設計海岸保護設施時必要考慮的因素。

布拉格反射 (Bragg reflection) 為布拉格 (1890~1971) 研究 X 射線光波通過二平行晶體的反射時所發現的現象，其研究發現，當晶體的間距為波長一半的整數倍時，光波的反射最強，此發生光波反射的條件稱之為布拉格定律。系列潛堤 (a series of submerged breakwaters) 即利用此原理，以二道以上的潛堤並列平行於海岸線，讓通過潛堤水域的波浪反射至外海，而使到達海岸的波浪變小。學理上的研究顯示，若入射波浪之波長 (L) 為正弦沙漣底床沙漣波長 (ℓ) 的二倍時，反射現象達到最大，稱為布拉格共振 (Bragg resonance)。為了同時達到維護海岸景觀環境、海域生態、親水以及海岸防災的目的，系列潛堤為目前可考慮的海岸工法之一，由於潛堤沉沒於水面，不妨礙海域景觀，

不但與離岸堤有類似的消浪效果，且仍保持波浪透射效應，使堤內海水能維持交換；除此之外，沉沒潛堤消波塊容易長出青苔，能吸引浮游生物聚集，對海域生態的復育有正面的效果。適當的系列潛堤配置能產生布拉格反射，使波浪能量射於外海，故能以較小的材料達成防波的效果。

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

1.2 文獻回顧

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

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

方形成近乎共振反射，此現象稱為布拉格共振，Davies 和 Heathershaw (1984) 並以模型試驗驗證其正確性。圖 1-1 為波浪通過沙漣時，在接近布拉格共振的條件下，Davies 和 Heathershaw (1984) 得到之反射波變化情形，圖中結果顯示，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， $\eta/a = E_1 \cos \omega t + E_2 \sin \omega t$ ，其中 η 為水位變化， a 為波浪振幅， ω 為角頻率， t 為時間。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 為布拉格共振的附近條件，波浪通過沙漣時 Davies 和 Heathershaw (1984) 所得之水位變化情形，圖中顯示由於布拉格反射，在沙漣前方呈現明顯駐波現象，在沙漣後方則以等水位振幅通過。圖 1-3 為 Webster 和 Wehausen (1995) 在波浪通過沙漣底床趨近布拉格共振條件下，所得之水位變化分佈歷線，圖中顯示波浪通過沙漣底床上方時，受共振機制影響，隨通過沙漣的距離愈長，波浪振幅逐漸減小，沙漣底床前方逐漸受反射波影響，產生較大的水位振幅，通過沙漣底床後，透射波與入射波相較下，已明顯減小。不同時刻波浪通過沙漣底床之空間波形，Webster 和 Wehausen (1995) 所得的結果如圖 1-4 所示，圖中顯示由於布拉格反射作用，沙漣底床前方逐漸形成近似駐波現象，沙漣後方則透射波減低。

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

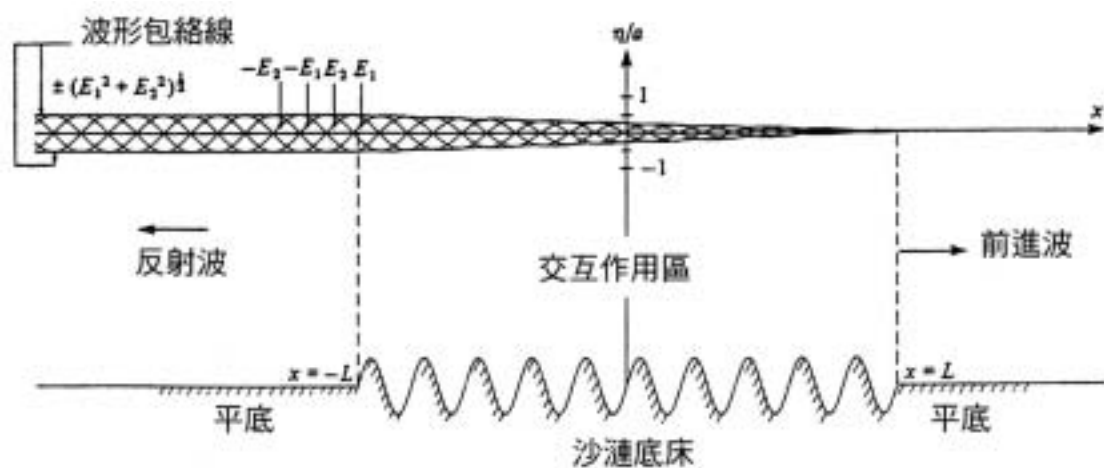


圖 1-1 波浪行經沙漣底床之反射波變化情形
(Davies 和 Heathershaw, 1984)

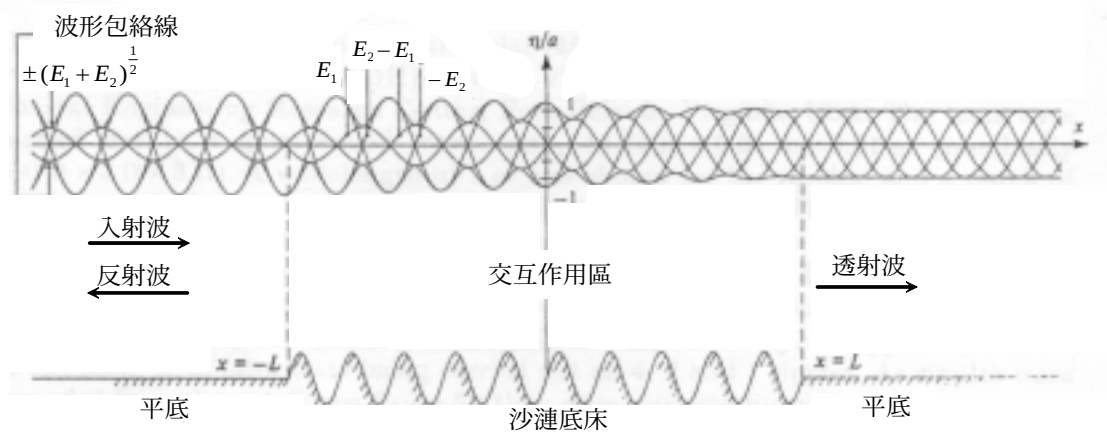


圖 1-2 波浪行經沙漣底床之水位變化情形
(Davies 和 Heathershaw, 1984)

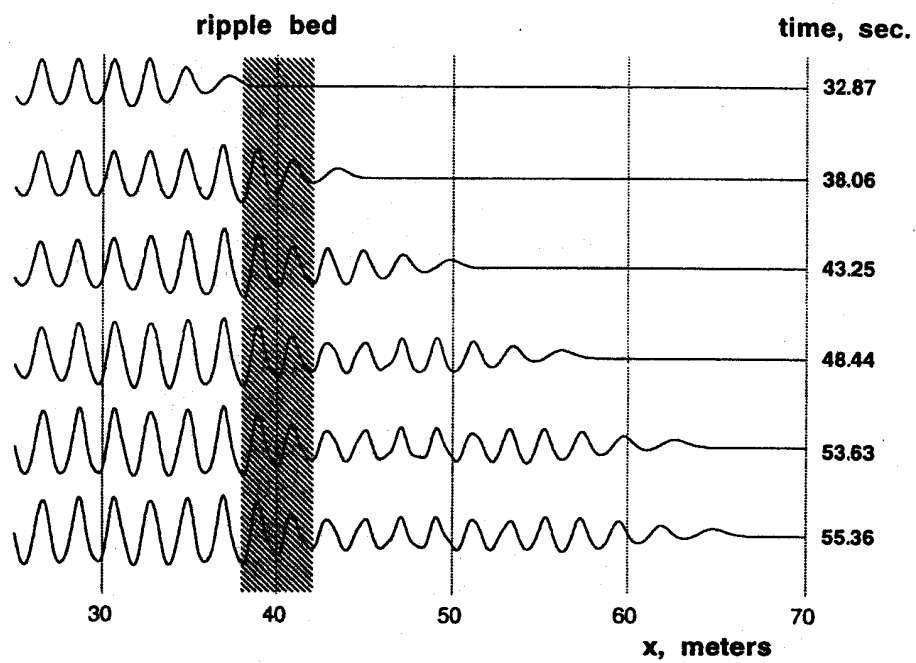


圖 1-3 波浪通過沙漣底床之水位分佈歷線
(Webster 和 Wehausen, 1995)

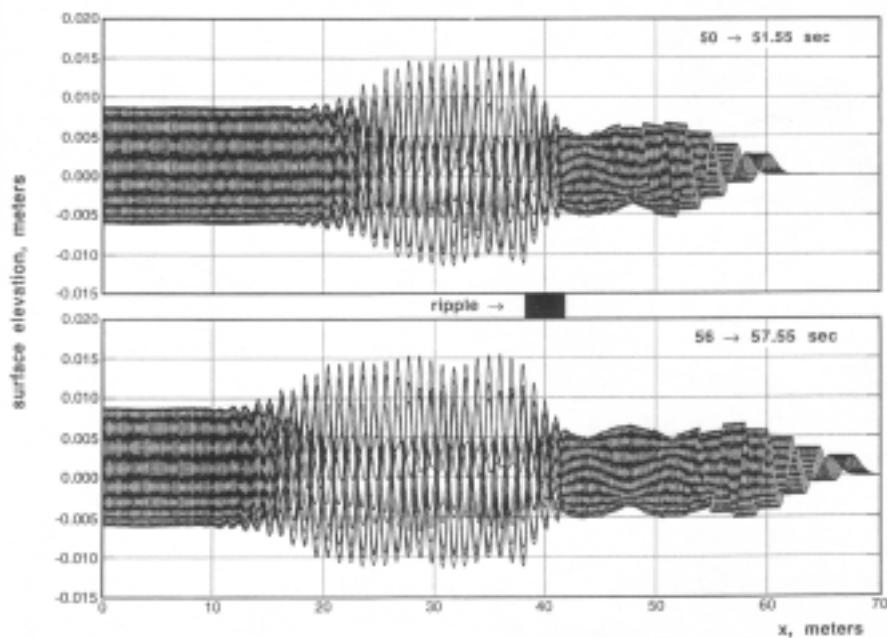


圖 1-4 布拉格共振之時序列(Webster 和 Wehausen, 1995)

和 Naghdi, 1986) 解析沙漣底床的波浪反射現象，方程式中不考量攝動參數，解析結果不受攝動參數的限制。陳和湯 (1990) 考慮二維空間，對於波浪傳遞於正弦沙漣底床，所形成的波動流場，進行理論解析，其示意圖如圖 1-5 所示，在攝動法之應用下，流場的流速勢函數 ϕ ，解析至第二階次量如下所示：

$$\begin{aligned} \phi(x, z, t) = & \frac{ag}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t + \varepsilon_0) - \frac{1}{4} \frac{a^2 \omega^2 t}{\sinh^2 kh} \\ & + \frac{3}{8} a^2 \omega \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - \omega t + \varepsilon_0) + \frac{1}{2} \frac{gkab}{\omega \cosh kh} \times \\ & \left\{ \frac{(k+K) \cosh(k+K)z + k \tanh kh \sinh(k+K)h}{[(k+K) \tanh(k+K)h - k \tanh kh] \cosh(k+K)h} \sin(kx + Kx - \omega t + \varepsilon_0) \right. \\ & \left. + \frac{(k-K) \cosh(k-K)z + k \tanh kh \sinh(k-K)h}{[(k-K) \tanh(k-K)h - k \tanh kh] \cosh(k-K)h} \sin(kx - Kx - \omega t + \varepsilon_0) \right\} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 g 為重力加速度， ω 為角頻率， h 為水深， L 表面波波長， $k = 2\pi/L$ 為表面波週波數， $K = 2\pi/\ell$ 為底床沙漣週波數， ε_0 為時間 $t=0$ 時座標原點相位角。檢核式 (1-1)，當分母為 0 時，可以說明波動系統所發生的布拉格共振現象，即

$$(k-K) \tanh(k-K)h - k \tanh kh = 0 \quad (1-2)$$

式 (1-2) 成立的條件為 $K = 2k$ ，亦即當正弦沙漣底床之波長為入射波波長的一半時 ($\ell = L/2$)，則整個系統會產生所謂的布拉格共振現象。陳 (1991a) 進一步解析出共振情況 $K = 2k$ 時，流速勢函數之解為：

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

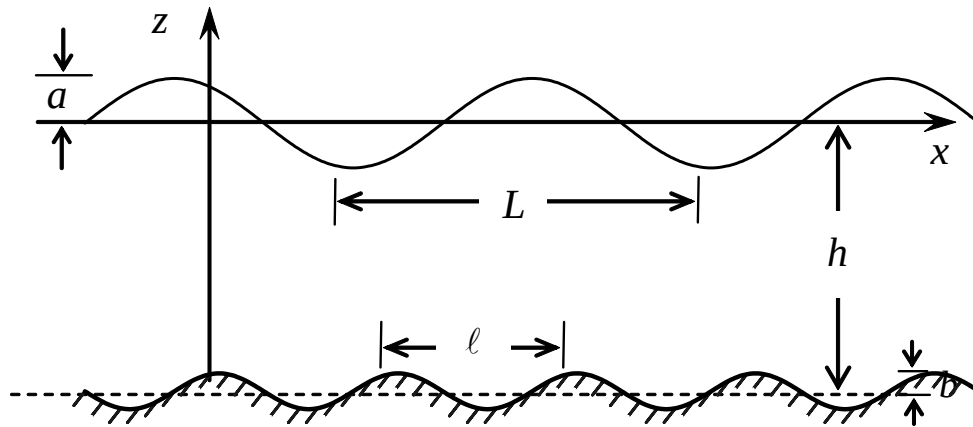


圖 1-5 波浪傳遞於正弦沙漣底床之波動系統

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

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

進行分析，研究結果指出波浪通過由兩個週波數正弦沙漣 ($K_1, K_2; K_2 > K_1$) 所疊加組成的底床時，在低頻處 $k = (K_2 - K_1)/2$ 的條件下會發生分諧波共振 (sub-harmonic resonance)；而在 $k = K_1, k = K_2$ 和 $k = (K_2 + K_1)/2$ 會發生高諧波共振 (higher-harmonic resonance)。他們研究結果亦顯示，分諧波與高諧波共振的反射係數值雖然比主頻共振低，但此現象在實際工程應用上，能增加高反射值的頻率範圍，具有實質應用的意義。他們同時指出，在越低頻區布拉格反射尖峰值往低頻處平移現象愈明顯。Mattioli (1991) 以逐次近似模式研究系列潛堤布拉格反射現象，研究成果指出矩形系列潛堤間距若等於入射波長亦會發生高頻的布拉格反射現象。Cho 和 Lee (2000) 利用特徵函數展開法 (Eigenfunction Expansion Method, EEM) 求解沙漣之布拉格反射情形，他們將海底地形切割為無數個台階，因此能計算波浪通過陡變水深的反射現象，所考慮的波形包含傳遞項 (propagating mode) 及振盪項 (evanescent mode)，探討波浪通過單一及複合式正弦沙漣底床的布拉格反射以及正、斜向入射波浪之差異性。但 EEM 將地形細部切割再求解 Laplace 方程式，計算時需要花費許多時間，故應用在大範圍的海岸地區並不實用。Porter 和 Porter (2003) 利用轉換矩陣法 (Transfer Matrix Method, TMM) 加入振盪項探討波浪通過正弦沙漣底床以及雙正弦沙漣底床的反射係數變化。

近年來有許多學者針對 Berkhoff (1972) 所提出的緩坡方程式 (Mild-Slope Equation, MSE) 加以修正，以數值計算方式研究布拉格反射。Kirby (1986) 在 Berkhoff (1972) 的緩坡方程式中，引入一個微小的地形變化參數 δ ，推導波浪通過潛沒障礙物的延伸型態緩坡方程式 (Extended Mild-Slope Equation, EMSE)，並針對波浪通過正弦沙漣之反射係數進行數值計算。O'Hare 和 Davies (1993) 指出由於 EMSE 未考慮高階影響量，因此對於擾變雙正弦沙漣底床所引發的次諧波共振效應無法預測。Chamberlain 及 Porter (1995) 將 EMSE 忽略的高階項：底床曲率項 $\nabla_h^2 h$ 和底床坡度平方項 $|\nabla_h h|^2$ 加入方程式中，推導成修正型態緩坡方程式 (Modified Mild-Slope Equation, MMSE)，其

中 $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 為水平梯度運算因子, h 為平均水深。數值分析結果顯示, 由於擾變地形參數的考慮, MMSE 可以增加布拉格反射效應之精度。Porter 和 Staziker (1995) 以變分法 (variational method) 及葛拉金特徵函數法 (Galerkin eigenfunction method) 對緩坡方程式推導, 進而得到另一延伸型態的緩坡方程式。Suh 等人 (1997) 將 EMSE 改為與時間相關之方程式, 探討波浪通過擾變底床的時序列變形。Zhang 等人 (1999) 將 Kirby (1986) 所忽略的高階項考慮於方程式中, 並加入底床地形擾變量 δ 之影響, 提出與時間相關之雙曲線型式的混合模式 (Hybrid model, HM), 用以解析波浪通過複合式正弦沙漣底床之布拉格反射效應。數值計算結果顯示, 利用複合式正弦沙漣可增加布拉格反射的範圍, 但 HM 並未考慮波浪斜向入射及斜坡底床時的效應, 同時在求解緩坡方程式所花費時間龐大, 實際應用上不能符合計算效率。Hsu 和 Wen (2001a) 於緩坡方程式引入微小時間變量, 提出演進型緩坡方程式 (Evolution Equation of Mild-Slope Equation, EEMSE), 方程式的型式為拋物線, 與雙曲線型的方程式相較, 能節省 G 倍的計算時間, 此處 G 為格網的個數。Hsu 和 Wen (2001b) 引入碎波及能量消散項於 EEMSE 中, 用以描述波浪通過斜坡底床的碎波效應。

在實際應用方面, Mei (1988) 提出布拉格防波堤的觀念, 用以保護位於北海 Ekofisk 油田的鑽油平臺, 免於受大波浪的破壞。Bailard 等人 (1990) 應用 Kirby 和 Anton (1990) 的研究結果, 設計二種型式的人工沙洲, 在佛羅里達的卡納維爾角海岸 (Cape Canaveral Beach, Florida) 做現場試驗, 試驗結果可知波浪週期在預期的布拉格反射的範圍內, 其反射係數可達 0.4 以上。Bailard 等人 (1992) 以波浪通過等間距的人工沙洲底床進行海岸保護研究, 結果顯示以八個等間距的人工沙洲, 可以減少美國海灣及大西洋海岸約 25% 的侵蝕率, 在潛堤前方可達到所預期的布拉格反射效應, 惟其可執行的波浪範圍狹小。郭等人 (1999) 試驗室研究指出雙列潛堤佈置, 不但增加堤前反射係數及減少堤後透射係數, 並能減緩海灘侵蝕或促進灘線前進。有鑒於等間距人工沙洲所形成的布拉格反射帶寬較小, 在實際應用上, 有效的防禦

波浪範圍受到限制。若能藉由不等間距的沙漣底床佈置，將可增加波浪適用範圍，故 Guazzelli 等人 (1992) 及 Zhang 等人 (1999) 提出複合式正弦沙漣佈置，使布拉格反射發生的條件能增加，且布拉格反射的大小及波浪適用範圍隨著沙漣的個數及振幅的增加而增加。

綜合以上文獻回顧，本計畫分別就理論解析、數值模式及現場與模型試驗方面，將研究學者的成果，整理如表 1-1 至表 1-3 所示。從研究文獻得知，往昔學者對於布拉格反射研究較著重於以各種理論及模式在正弦沙漣底床及人工沙洲進行布拉格反射探討，如要將布拉格反射效應實際應用至海岸現場，仍須考量適合實際海域水深地形以及海岸現場條件，以較符合實際海岸工法—矩形潛堤，探討不同潛堤佈置條件在不同入射波浪條件的海岸保護效果，進一步作有系統深入研究。

1.3 研究方法與預期成果

1.3.1 研究方法

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

一、國內外相關文獻收集

收集國內外有關係列潛堤與布拉格反射理論的文獻報告，並歸納整理其優劣及適用的條件，作為本計畫及今後研究參考。

二、波浪理論和數值模式的建立與驗證

波場模式必須具備波浪的淺化、反射、折射、繞射及碎波等效應，本計畫擬應用 EEMSE 模式，計算規則波通過系列潛堤波場分佈情形，所得結果將與理論結果比較，以驗證本計畫之數值模式的適用性。

三、不規則波浪之數值模擬

表 1-1 前人研究方法及成果 (理論解析)

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

表 1-2 前人研究方法及成果 (數值模式)

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

表 1-2 前人研究方法及成果 (數值模式) (續)

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

表 1-3 前人研究方法及成果 (現場及模型試驗)

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

以 EEMSE 數值模式，應用至不規則波，計算波浪通過正弦沙漣底床地形，波場之分佈情形，並應用反射係數公式求出各系列潛堤前反射係數以檢驗各系列潛堤之防禦功效。

第二年 (95 年) 的研究項目及進行步驟分別為：

- 一、不規則波浪通過複合式正弦沙漣底床地形之理論分析與數值模擬。
- 二、改進等間距系列潛堤在布拉格反射條件上的限制，發展複合式系列潛堤，以不同的潛堤間距組合，達到增加布拉格反射帶寬效果，擴大防禦波浪條件的範圍。
- 三、針對不同系列潛堤配置的海岸防禦效果提出適當的經驗公式。

第三年 (96 年) 的研究項目及進行步驟分別為：

- 一、選擇台灣特定海岸區域進行海岸環境保護規劃研究，先從實測資料分析本海域歷年海岸線變遷、海域地形變化、漂砂過程以及海岸侵蝕原因探討。
- 二、依據水深地形以及海氣象資料，提供數值模式計算之輸入資料。
- 三、規劃特定海域可能的系列潛堤配置方案。
- 四、進行數值計算，探討各種系列潛堤配置方案的優缺點及可行性。

第四年 (97 年) 的研究項目及進行步驟分別為：

- 一、綜整前三年研究成果，探討系列潛堤於學理及實際應用上所能發揮的防護功能。
- 二、針對台灣西部海岸面臨侵蝕威脅之區域進行調查，提出可實施系列潛堤防護工法的區域之建議。
- 三、提出具體的設計方案以供實際施工設計參考。

1.3.2 預期成果

1. 對波浪通過系列潛堤之布拉格反射理論進行分析，以供數值模式計算之基本驗證。
2. 建立適當的波浪理論與數值模式，並將模式計算結果與理論及試驗資料進行比較，以驗證模式計算能力的正確性。利用所發展的波浪數值模式，可對本計畫所針對的不規則波浪通過系列潛堤之布拉格反射現象進行一系列的理論分析與數值模擬。
3. 進行不規則波浪通過規則變化地形之數值模擬，本年度研究對象為正弦沙漣底床地形以及等間距之系列潛堤地形。藉由發展布拉格共振理論並模擬計算此等較為單純變化的地形，可初步了解布拉格反射現象的學理特性，並建立分析問題的程序，以供未來研究沿循。

1.4 本文組織

本文於第一章，將國內外有關係列潛堤與布拉格反射的文獻，分成理論解析、數值模式及現場與模型試驗，加以分類整理，作為今後研究的參考。第二章敘述有關布格反射之 Miles 理論、梯形潛堤長波理論與考慮底床擾動影響的緩坡方程數值模式。第三章首先應用 Miles 理論，求得包括正弦沙漣底床、人工系列潛堤等的反射係數；其次對長波理論加以驗證，並與 Miles 理論做比較；最後利用試驗資料，驗證本文採用的數值模式之適用。第四章利用規則波緩坡方式，推導不規則波的數值方法。第五章選用適當的不規則波波譜，利用不規則緩坡方程式，研究正弦沙漣底床及人工系列潛堤的布拉格反射情形。第六章為本計畫的結論與建議。

第二章 規則波之布拉格反射

2.1 Miles 理論

本計畫以 Miles (1981) 的理論為基礎，推導水平底床上，各式系列潛堤的反射係數解析解，作為比較數值模式結果之依據，茲將 Mile (1981) 理論推導過程說明如下：

如圖 2-1 所示，波浪斜向通過等水深 h ，底床變化函數為 $\delta(x)$ 的地形，在微小振幅波的條件下，入射波的流速勢函數可表示為

$$\Phi^{(i)} = \text{Re}\{a \cosh k(z+h) \exp[i(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t)]\} \quad (2-1)$$

其中

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

式中 $\Phi^{(i)}$ 為入射波流速勢， 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， $z = -h$ 為底部， ω 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， θ 為波向角。

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

Laplace 方程式：

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

線性化自由表面運動和動力邊界條件（KFSBC 和 DFSBC）：

$$\Phi_z = \hat{K} \Phi \quad , \quad z = 0 \quad (2-4)$$

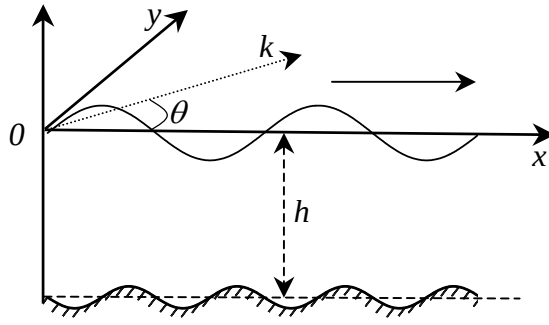


圖 2-1 擾變底床及相對座標示意圖

不透水底部邊界條件 (BBC)：

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

其中 $\Phi = \Phi(x, y, z, t)$, δ 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：

$$\Phi \sim \text{Re} \left\{ a \left[\frac{\hat{T} e^{ikx \cos \theta}}{e^{ikx \cos \theta} + R e^{-ikx \cos \theta}} \right] e^{i(ky \sin \theta - \omega t)} \cosh k(z + h) \right\}, \quad x = \pm \infty \quad (2-6)$$

式中 R 為反射係數, $\hat{T}$ 為透射係數, 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

$$\Phi = \Phi^{(i)} + \text{Re} \left\{ \check{\Phi}(x, z) e^{i(ky \sin \theta - \omega t)} \right\} \quad (2-7)$$

其中 $\check{\Phi}(x, z)$ 為反射波之流速勢函數, 在 $\check{\Phi} = O(\varepsilon)$ 的假設下, 而 $\varepsilon = \max(\delta/h, \delta')$ 為一微小量, 將上式代入式 (2-3) 至式 (2-6), 並將式 (2-5) 之底床邊界條件泰勒展開於 $z = -h$ 處, 略去小於 $O(\varepsilon)$ 之階量, 最後可得

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

$$\ddot{\Phi}_z = \hat{K} \ddot{\Phi}, \quad z = 0 \quad (2-9)$$

$$\ddot{\Phi}_z = (ik \cos \theta \delta' - k^2 \delta) a e^{(ikx \cos \theta)} = q(x), \quad z = -h \quad (2-10)$$

$$\ddot{\Phi} \sim a \begin{bmatrix} (\hat{T} - 1) e^{(ikx \cos \theta)} \\ R e^{(-ikx \cos \theta)} \end{bmatrix} \cosh k(z + h), \quad x \rightarrow \pm \infty \quad (2-11)$$

利用有限餘弦轉換法 (finite cosine transform) 求解式 (2-8) 並結合式 (2-9) 至式 (2-11) 的邊界條件, 可求得反射係數和透射係數過程如下:

$$\ddot{\Phi}_\kappa(x) = \int_{-h}^0 \ddot{\Phi}(x, z) \cos \kappa(z + h) dz \quad (2-12)$$

式 (2-12) 的逆轉換為

$$\ddot{\Phi}(x, y) = 2 \sum_{\kappa} (h - \hat{K}^{-1} \sin^2 \kappa h)^{-1} \ddot{\Phi}_\kappa(x) \cos \kappa(z + h) \quad (2-13)$$

其中 $\kappa = ik$ 由下式決定

$$\kappa \tan \kappa h = -\hat{K} \quad (2-14)$$

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

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

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

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

其中

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

將式 (2-16) 代入式 (2-15) 則

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

式 (2-18) 在 $x = \pm\infty$ 處為

$$\begin{aligned} \check{\Phi} &\approx (ik \cos \theta)^{-1} (h + \hat{K}^{-1} \sinh^2 kh)^{-1} \cosh k(z + h) e^{(\pm ikx \cos \theta)} \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} e^{(\mp ik \cos \theta \xi)} q(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (2-19)$$

將式 (2-10) 之 $q(x)$ 代入式 (2-19), 並對 δ' 進行部分積分, 最後與式(2-11) 比較可得反射係數及透射係數為

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{ik \cos \theta (h + \frac{\sinh^2 kh}{\hat{K}})} [(k \cos \theta)^2 - (k \sin \theta)^2] \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} e^{(2ikx \cos \theta)} \delta(x) dx \end{aligned} \quad (2-20)$$

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

Kirby 和 Anton (1990) 以 Kirby (1986) 所發展的 EMSE 模式, 解析線性波在微小水深變化 ($O(k\delta) \ll 1$) 的運動現象, 在 EMSE 模式中考慮一維問題, 並忽略微小底床變化造成波速與群波波速乘積的變化 ($\nabla_h CC_g = 0$), 利用拉普拉斯轉換解析出反射係數及透射係數, 其表示式為

$$\hat{R} = -2ik\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) e^{2ikx} dx \quad (2-22)$$

$$\alpha = \frac{k}{2kh + \sinh 2kh} \quad (2-23)$$

當波浪正向入射時，式 (2-20) 可簡化為式 (2-22)。

2.2 長波理論

考慮波浪於梯形潛堤的反射係數情形，圖 2-2 為梯形潛堤之示意圖，其中 x 軸代表平均水位線。座標原點則是設置於結構物堤址與 x 軸的交會位置， B_2 則代表堤頂寬度，而 h_1 、 h_2 、 h_3 則分別代表區域 I、III、V 的水深。

控制方程式可由長波理論之連續方程式以及運動方程式推得。假若水深 h 為一任意變數，依據 Mei (1983) 之理論，一維線性運動方程式可以下式表示：

$$gh \frac{d^2 \eta}{dx^2} + g \frac{dh}{dx} \frac{d\eta}{dx} + \omega^2 \eta = 0 \quad (2-24)$$

式中 η 為水位振幅， $\omega = 2\pi/T$ 代表角頻率， T 為週期， g 為重力加速度， h 代表任意水深。考慮線性長波理論，則所有的物理量可以表示為 $\exp(-i\omega t)$ 的函數，其中 $i = \sqrt{-1}$ 為單位虛數。如圖 2-2 所示，若海床為一水平底床，因此式(2-24)中，等號左邊第二項為零，則式(2-24)之解為：

$$\eta = A_i e^{ik_i x} + B_i e^{-ik_i x} \quad (2-25)$$

上式中 $k_i = \omega / \sqrt{gh_i}$, $i=1,3,5$ 代表週波數， A_i 及 B_i 則是代表包含波浪振幅的待定係數。而上式(2-25)中，等號右邊第一項代表入射波傳遞，第二項則是反射波傳遞方向。

當考慮斜坡底床變化時，令 $X = h = h_1 - x \tan \beta$ ，將其代入式(2-24)

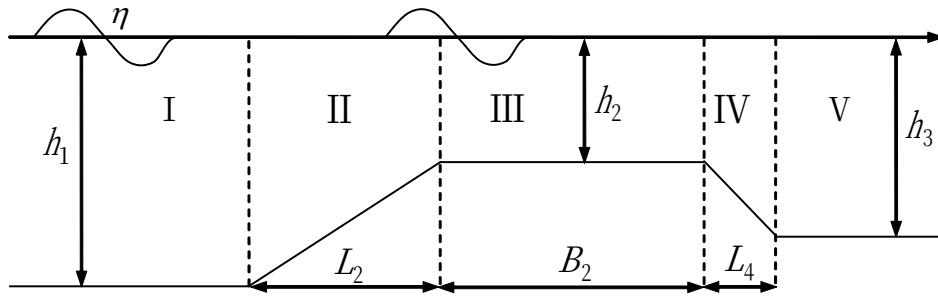


圖 2-2 梯形潛式結構物之示意圖

中，則式 (2-24) 可改寫為

$$X \frac{d^2 \eta}{dX^2} + \frac{d\eta}{dX} + p\eta = 0 \quad (2-26)$$

其中

$$p = \frac{\omega^2}{g \tan^2 \beta} \quad (2-27)$$

式中 $\tan \beta$ 為斜率，式 (2-26) 為一特殊的微分方程式，其可轉換為 Bessel 方程式，故對應於區域 II 及 IV 之解我們可以下面的通式來表示之

$$\eta = A_i J_0(2\sqrt{nX}) + B_i Y_0(2\sqrt{nX}) \quad (2-28)$$

其中 J_0 與 Y_0 分別代表 Bessel 方程的第一類 (first kind) 與第二類 (second kind) 的零階量， A_i 與 B_i 則為待定係數。

基於能量以及動量守恆原理，水位振幅及其導數，在每個區域間的交界都必須是連續的，各交接面之控制方程式以矩陣方式描述如下：

區域 I 及 II 的交界面

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ ik_1 & -ik_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_0(2\sqrt{n_{12}h_1}) & Y_0(2\sqrt{n_{12}h_1}) \\ J'_0(2\sqrt{n_{12}h_1}) & Y'_0(2\sqrt{n_{12}h_1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{I-II} \\ B_{I-II} \end{pmatrix} \quad (2-29)$$

區域 II 及 III 的交界面

$$\begin{pmatrix} J_0(2\sqrt{n_{12}h_2}) & Y_0(2\sqrt{n_{12}h_2}) \\ J'_0(2\sqrt{n_{12}h_2}) & Y'_0(2\sqrt{n_{12}h_2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{I-II} \\ B_{I-II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ ik_2 & -ik_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{II-III} \\ B_{II-III} \end{pmatrix} \quad (2-30)$$

區域 III 及 IV 的交界面

$$\begin{pmatrix} e^{ik_2B_2} & e^{-ik_2B_2} \\ ik_2e^{ik_2B_2} & ik_2e^{-ik_2B_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{II-III} \\ B_{II-III} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_0(2\sqrt{n_{23}h_2}) & Y_0(2\sqrt{n_{23}h_2}) \\ J'_0(2\sqrt{n_{23}h_2}) & Y'_0(2\sqrt{n_{23}h_2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{III-IV} \\ B_{III-IV} \end{pmatrix} \quad (2-31)$$

區域 IV 及 V 的交界面

$$\begin{pmatrix} J_0(2\sqrt{n_{23}h_3}) & Y_0(2\sqrt{n_{23}h_3}) \\ J'_0(2\sqrt{n_{23}h_3}) & Y'_0(2\sqrt{n_{23}h_3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{III-IV} \\ B_{III-IV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ ik_3 \end{pmatrix} \hat{T} \quad (2-32)$$

上述之之矩陣式，以矩陣相乘原理可得

$$\begin{pmatrix} 1 \\ R \end{pmatrix} = H_i S_2 W_3 S_4 H_t \hat{T} = \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{21} \end{pmatrix} \hat{T} \quad (2-33)$$

其中

$$H_i = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ ik_1 & -ik_1 \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{i}{k_1} \\ 1 & \frac{i}{k_1} \end{pmatrix} \quad (2-34)$$

$$S_2 = \begin{pmatrix} J_0(2\sqrt{n_{12}h_1}) & Y_0(2\sqrt{n_{12}h_1}) \\ J'_0(2\sqrt{n_{12}h_1}) & Y'_0(2\sqrt{n_{12}h_1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_0(2\sqrt{n_{12}h_2}) & Y_0(2\sqrt{n_{12}h_2}) \\ J'_0(2\sqrt{n_{12}h_2}) & Y'_0(2\sqrt{n_{12}h_2}) \end{pmatrix}^{-1} \quad (2-35)$$

$$W_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ ik_2 & -ik_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{ik_2B_2} & e^{-ik_2B_2} \\ ik_2e^{ik_2B_2} & ik_2e^{-ik_2B_2} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos k_2B_2 & -\frac{1}{k_2}\sin k_2B_2 \\ k_2 \sin k_2B_2 & \cos k_2B_2 \end{pmatrix} \quad (2-36)$$

$$S_4 = \begin{pmatrix} J_0(2\sqrt{n_{23}h_2}) & Y_0(2\sqrt{n_{23}h_2}) \\ J'_0(2\sqrt{n_{23}h_2}) & Y'_0(2\sqrt{n_{23}h_2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_0(2\sqrt{n_{23}h_3}) & Y_0(2\sqrt{n_{23}h_3}) \\ J'_0(2\sqrt{n_{23}h_3}) & Y'_0(2\sqrt{n_{23}h_3}) \end{pmatrix}^{-1} \quad (2-37)$$

$$H_t = \begin{pmatrix} 1 \\ ik_3 \end{pmatrix} \quad (2-38)$$

其中 H_i 以及 H_t 稱為輻射傳輸 (radiation transfer) 表示波浪輻射至無窮水平底床處。 W_3 為寬度傳輸 (width transfer) 代表波浪傳遞於有限的水平區域。 S_2 及 S_4 則代表波浪於斜坡上的反射及透射，故稱其為斜坡傳輸 (slope transfer)，而前者代表波浪由深水處傳遞至淺水處，後者則代表波浪由淺水處傳遞至深水處。若梯形潛堤兩側之斜坡與水深皆相同，則我們可以得 $n_{12} = n_{23}$ 及 $h_1 = h_3$ ，比較式 (2-35) 與式(2-37)，則 $S_4 = S_2^{-1}$ 。

波浪通過梯形潛堤，其反射波與透射波，事實上為一系列輻射傳輸 (radiation transfer)、斜坡傳輸 (slope transfer) 及寬度傳輸 (width transfer)的結果，式 (2-33) 明確指出這些形狀傳輸 (shape transfer) 的物理意義。在各矩陣相乘後，式 (2-33) 最後得到一 2×1 矩陣，且透射係數與反射係數，可以簡單地分別以下式來表示。

$$\hat{T} = \frac{1}{c_{11}} \quad (2-39)$$

及

$$R = \frac{C_{21}}{C_{11}} \quad (2-40)$$

若忽略梯形潛堤的斜坡，即堤面為直立壁，堤址水深呈現不連續，則依照 Mei (1983) 所提出的理論，反射係數與透射係數可化為

$$R_{Mei} = \left| \frac{-(1-s_{12})(1+s_{32})e^{-ik_2B_2} + (1+s_{12})(1-s_{32})e^{ik_2B_2}}{(1+s_{12})(1+s_{32})e^{-ik_2B_2} - (1-s_{12})(1-s_{32})e^{ik_2B_2}} \right| \quad (2-41)$$

$$\hat{T}_{Mei} = \left| \frac{4s_{12}}{(1+s_{12})(1+s_{32})e^{-ik_2B_2} - (1-s_{12})(1-s_{32})e^{ik_2B_2}} \right| \quad (2-42)$$

其中 $s_{ij} = k_i h_i / k_j h_j$ ($i, j=1, 2, 3$) 代表所對應水深下的係數。

2.3 EEMSE 數值模式

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

假設海水為非旋性且不可壓縮，故滿足 Laplace 方程式：

$$\nabla_h^2 \Phi + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2-43)$$

式中 $\Phi = \Phi(x, y, z, t)$ 為三維波浪流速勢； x 為垂直海岸方向座標，向岸為正； y 為沿岸方向座標，向右為正； z 為水深方向座標，向上為

正； t 為時間； $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 為水平梯度因子。

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

$$\Phi = -i \frac{g}{\omega} f \eta \quad (2-44)$$

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

$$f = \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad (2-45)$$

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

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = -\nabla_h \Phi \cdot \nabla_h h, \quad z = -h \quad (2-46)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0, \quad z = 0 \quad (2-47)$$

將式(2-43)乘以水深函數 f ，從底部至水面積分，並考慮線性波之情況，可得

$$\int_{-h}^0 f \left(\nabla_h^2 \Phi + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) dz = 0 \quad (2-48)$$

式(2-48)利用格林第一定律 (Green's first identity) 可得下式之關係：

$$\int_{-h}^0 \left(f \nabla_h^2 \Phi + \Phi \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right) dz = - \left[f \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \Phi \frac{\partial f}{\partial z} \right]_{z=-h}^{z=0} \quad (2-49)$$

上式等號右邊，當上限 $z = 0$ 時，利用分散關係式 $\omega^2 = gk \tanh kh$ ，再比較式(2-46)之自由表面邊界條件後得：

$$f \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} - \Phi \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = 0 \quad (2-50)$$

當下限 $z = -h$ 時， $\partial f / \partial z = 0$ ，故由式(2-46)可得式(2-49)之等號右邊為

$$\left[f \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \Phi \frac{\partial f}{\partial z} \right]_{z=-h}^{z=0} = \left[-f \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right]_{z=-h} = [f \nabla_h \Phi \cdot \nabla_h h]_{z=-h} \quad (2-51)$$

利用 $\partial^2 f / \partial z^2 = k^2 f$ ，並將式(2-51)代入式(2-49)，因此式(2-49)進一步化為

$$\int_{-h}^0 (f \nabla_h^2 \Phi + k^2 f \Phi) dz = -[f \nabla_h \Phi \cdot \nabla_h h]_{z=-h} \quad (2-52)$$

將式(2-45)代入式(2-44)，並將流速勢 Φ 與水位 η 互換則

$$\nabla_h^2 \Phi = -\frac{ig}{\omega} \left[f \nabla_h^2 \eta + 2 \frac{\partial f}{\partial h} \nabla_h \eta \cdot \nabla_h h + \eta \frac{\partial f}{\partial h} \nabla_h^2 h + \eta \frac{\partial^2 f}{\partial h^2} (\nabla_h h)^2 \right] \quad (2-53)$$

故式(2-52)改寫為

$$\begin{aligned} & \int_{-h}^0 \left[f^2 \nabla_h^2 \eta + 2 f \frac{\partial f}{\partial h} \nabla_h \eta \cdot \nabla_h h + \eta f \frac{\partial^2 f}{\partial h^2} (\nabla_h h)^2 + \eta f \frac{\partial f}{\partial h} \nabla_h^2 h + k^2 f^2 \eta \right] dz \\ &= - \left[f^2 \nabla_h h \cdot \nabla_h \eta + f \frac{\partial f}{\partial h} \eta (\nabla_h h)^2 \right]_{z=-h} \end{aligned} \quad (2-54)$$

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

$$\nabla_h \cdot \int_{-h}^0 f^2 \nabla_h \eta dz + \int_{-h}^0 k^2 f^2 \eta dz = 0 \quad (2-55)$$

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

$$\nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \phi) + k^2 CC_g \phi = 0 \quad (2-56)$$

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

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \phi) + (k^2 CC_g - \omega^2) \phi = 0 \quad (2-57)$$

為了擴展緩坡方程式的適用範圍，Suh (1997) 等人考慮海床坡度以及海床曲率之變化，式(2-54)中有關海床坡度項 $\nabla_h h$ 以及曲率項 $\nabla_h^2 h$ 再加以整理，得到新的緩坡方程式。

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \phi) + (k^2 CC_g - \omega^2 + F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 g k |\nabla_h h|^2) \phi = 0 \quad (2-58)$$

式中

$$F_1 = \frac{-4kh \cosh kh + \sinh 3kh + \sinh kh + 8(kh)^2 \sinh kh}{8 \cosh^3 kh (2kh + \sinh 2kh)} - \frac{kh \tanh kh}{2 \cosh^2 kh} \quad (2-59)$$

$$F_2 = \frac{\text{sech}^2 kh}{6(2kh + \sinh 2kh)^3} \left[8(kh)^4 + 16(kh)^3 \sinh 2kh - 9 \sinh^2 2kh \cosh 2kh + 12kh(1 + 2 \sinh^4 kh)(kh + \sinh 2kh) \right] \quad (2-60)$$

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

$$\phi(x, y, t) = \psi(x, y, \bar{t}) e^{-i\omega t} \quad (2-61)$$

式 (2-62) 中 ψ 為含有緩慢時間變量流速勢函數。將式 (2-63) 代入式 (2-57) 雙曲線型緩坡方程式中，並將二階微小量省略，只保留一階以下各項，則可得時變性拋物線型演進緩坡方程式 EEMSE

$$-2\omega i \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \psi) + (k^2 CC_g + F_{1g} \nabla_h^2 h + F_2 g k |\nabla_h h|^2) \psi = 0 \quad (2-64)$$

第三章 規則波理論應用與驗證

3.1 Miles 理論應用

由 2.1 節得知，任何形態的底床擾動函數 $\delta(x)$ 若為已知，則應用式 (2-22)，Miles (1981) 理論之反射係數則可輕易求出。Davies 和 Heathershaw (1984) 利用正弦沙漣底床，觀測布拉格共振現象時，其底床擾動函數為

$$\delta(x) = \begin{cases} b \sin(Kx), & 0 \leq x \leq N\ell \\ 0 & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3-1)$$

式中 b 為沙漣振幅， N 為底床沙漣個數。將式 (3-1) 代入式 (2-22)，則反射係數表示如下：

$$R = \begin{cases} \left| \frac{2\alpha b k K}{4k^2 - K^2} \sin\left(\frac{2k}{K} N\pi\right) \right|, & \frac{2k}{K} \neq 1 \\ \alpha b \pi N, & \frac{2k}{K} = 1 \end{cases} \quad (3-2)$$

Kirby (1986) 及 Guazzelli 等人 (1992) 研究布拉格共振時，使用複合式沙漣，其底床函數為

$$\delta(x) = \begin{cases} b \sin(Kx) + b \sin(mKx), & 0 \leq x \leq N\ell \\ 0 & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3-3)$$

式中 m 為沙漣底床係數。實際上 Guazzelli 等人 (1992) 所用的複合式沙漣，為兩個正弦沙漣之線性疊加，故其反射係數可將個別正弦沙漣分別代入式 (2-22)，再以線性疊加的方法求得。

由於實際海域並不一定有沙漣存在，或存在的沙漣型式，並不一定完全符合正弦沙漣底床的形狀，但布拉格反射效應，確能達到反射波浪，削減波浪能量，達到保護海岸的目的，故人工潛堤因應而生，以 2-2 節所述之梯形潛堤，應用 Miles (1981) 的方法，則其反射係數及透射係數為

$$R = \frac{1}{2(2kh + \sinh 2kh)} \cdot \left[\begin{aligned} & -2ie^{2ikL_2}(-1 + e^{2ikB_2})(h_1 - h_2)k + \frac{h_1 - h_2}{L_2}(-1 + e^{2ikL_2} - 2ie^{2ikL_2}kL_2) \\ & + \frac{e^{2ik(L_2+B_2)}(h_2 - h_3)}{L_4}(1 - e^{2ikL_4} + 2ik(-1 + e^{2ikL_4})(L_2 + B_2) + e^{2ikL_4}L_4) \end{aligned} \right] \quad (3-4)$$

$$\hat{T} = \left| 1 + \frac{i}{2} \frac{2k^2}{2kh + \sinh 2kh} \cdot [h_1(L_2 + 2B_2) + h_2(L_2 + L_4) - h_3(2L_2 + 2B_2 + L_4)] \right| \quad (3-5)$$

近來年更多學者從事人工系列潛堤的研究(Kirby and Anton, 1990; Hsu et al., 2002; Hsu et al., 2003)，系列潛堤不但可以增加布拉格反射的反射係數，且能加大布拉格共振的頻寬，增加共振效應的範圍。若人工系列潛堤的底床擾變量 $\delta(x)$ 為已知，則可由式 (2-22) 積分方式求得反射係數值。圖 3-1 為三種不同型式系列潛堤之佈置情形，圖中 D 為潛堤高度， 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及反射係數為：

矩形型式：

$$\delta(x) = \begin{cases} D, & nS \leq x \leq nS + B, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-6)$$

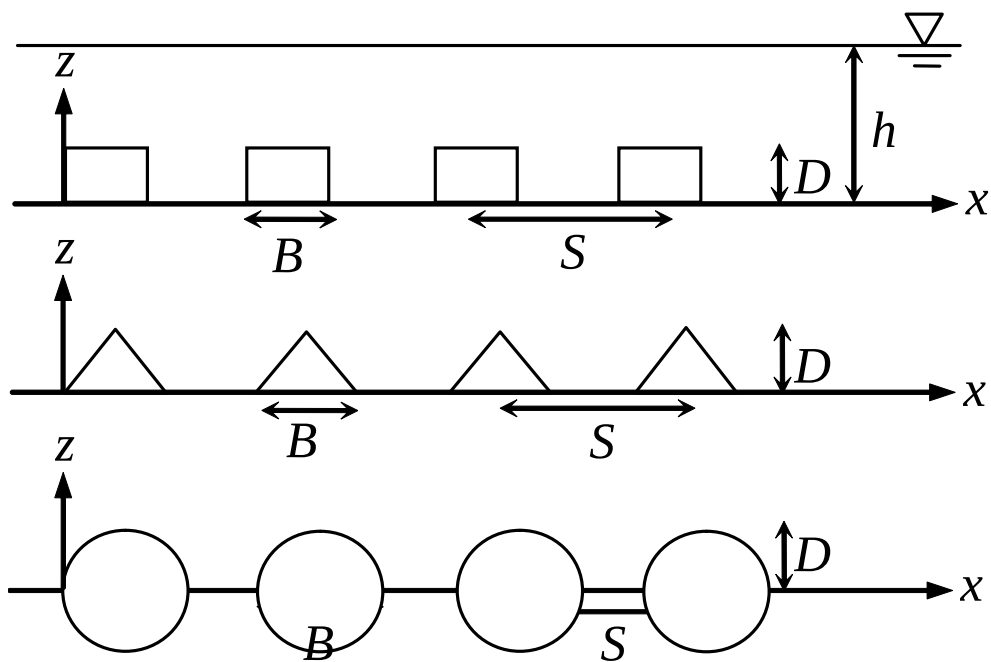


圖 3-1 不同形狀等間距系列潛堤示意圖

$$R = \left| \frac{2\alpha D \sin(kB) \sin(kSN)}{\sin(kS)} \right| \quad (3-7)$$

三角形型式：

$$\delta(x) = \begin{cases} \frac{2D}{B}(x - nS) & , \quad nS \leq x \leq nS + \frac{B}{2} & , \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ -\frac{2D}{B}(x - B - nS) & , \quad nS + \frac{B}{2} \leq x \leq nS + B, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0 & , \quad otherwise \end{cases} \quad (3-8)$$

$$R = \left| \frac{2\alpha D [1 - \cos(kB)] \sin(kSN)}{kB \sin(kS)} \right| \quad (3-9)$$

半餘弦形型式：

$$\delta(x) = \begin{cases} D \cos \left[-\frac{\pi}{B} \left(x - \frac{B}{2} - nS \right) \right], & nS \leq x \leq nS + B, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-10)$$

$$R = \begin{cases} \left| \frac{4\pi k \alpha D \cos(kB) \sin(kSN)}{B \left[\left(\frac{\pi}{B} \right)^2 - 4k^2 \right] \sin(kS)} \right|, & \frac{\pi}{B} \neq 2k \\ \left| \frac{k \alpha D B \sin(kSN)}{\sin(kS)} \right|, & \frac{\pi}{B} = 2k \end{cases} \quad (3-11)$$

圖 3-2 為不等間距系列潛堤佈置情形，圖中 S_n 為第 n 個及第 $n+1$ 個潛堤間距， N 為潛堤個數， x 為波浪傳遞方向， z 軸向上為正。應用 Miles (1981) 的理論，則波浪通過系列潛堤的反射係數，亦可輕易求得：

矩形型式：

$$\delta(x) = \begin{cases} D, \sum_{n=0}^{N-1} S_n \leq x \leq B + \sum_{n=0}^{N-1} S_n, S_0 = 0, n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3-12)$$

$$R = \left| -\alpha D (e^{2ikB} - 1) \sum_{n=0}^{N-1} e^{2ik \sum_{n=0}^{N-1} S_n} \right| \quad (3-13)$$

三角形型式：

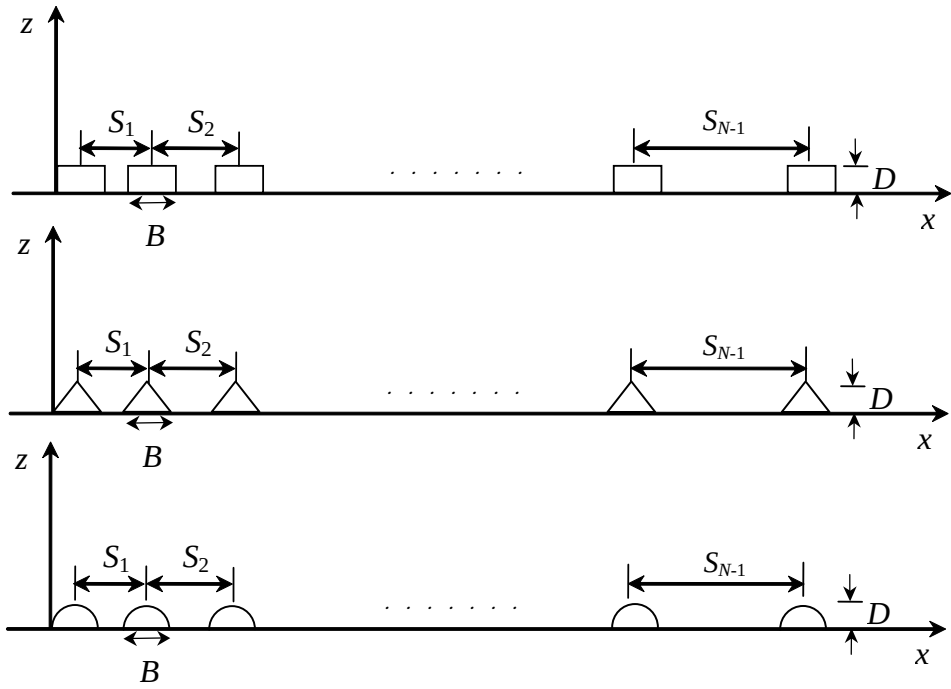


圖 3-2 不等間距系列潛堤示意圖

$$\delta(x) = \begin{cases} \frac{2D}{B} \left(x - \sum_{n=0}^{N-1} S_n \right), & \sum_{n=0}^{N-1} S_n \leq x \leq \sum_{n=0}^{N-1} S_n + \frac{B}{2}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ -\frac{2D}{B} \left(x - B - \sum_{n=0}^{N-1} S_n \right), & \sum_{n=0}^{N-1} S_n + \frac{B}{2} \leq x \leq \sum_{n=0}^{N-1} S_n + B, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-14)$$

$$R = \left| \frac{-\alpha D}{ikB} (e^{ikB} - 1)^2 \sum_{n=0}^{N-1} e^{2ik \sum_{n=0}^{N-1} S_n} \right| \quad (3-15)$$

半餘弦形型式：

$$\delta(x) = \begin{cases} D \cos \left[-\frac{\pi}{B} \left(x - \frac{B}{2} - \sum_{n=0}^{N-1} S_n \right) \right], & \sum_{n=0}^{N-1} S_n \leq x \leq \sum_{n=0}^{N-1} S_n + B, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0 & , \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-16)$$

$$R = \left| -2ik\alpha D \frac{\frac{\pi}{B}(e^{2ikB} + 1)}{\left(\frac{\pi}{B}\right)^2 - 4k^2} \sum_{n=0}^{N-1} e^{2ik \sum_{m=0}^{N-1} S_m} \right| \quad (3-17)$$

3.2 長波理論驗證

為驗證波浪通過單一梯形潛堤的長波理論，本文以兩種潛堤的配置，來計算反射係數及透射係數，配置的情形如表 3-1 所示，兩種配置的主要差別，在於配置二中，潛堤前後水深不同；計算之波浪週期 $T = 10 \text{ sec}$ ，故相對水深為 $1/19.9$ ，屬於淺水波的範圍，這是潛堤在實際的設計上，常被使用的條件。利用本文之長波理論、Mei (1983) 及 Miles (1981) 的方法，計算所得的反射係數及透射係數結果示於表 3-2，另於配置二中，由於潛堤前後水深不同，再以能量通率來證驗能量守恆的原理，其中 $(EC_g)_T$ 為反射波能量通率 $(EC_g)_r$ 與透射波能量通率 $(EC_g)_t$ 的總和，而 $(EC_g)_i$ 則為入射波之能量通率。在配置一中，梯形潛堤前後水深相同，即具有相同的群波速度，故滿足 $(EC_g)_T / (EC_g)_i = R^2 + \hat{T}^2$ 。

在配置一中，長波理論及 Mei (1983) 所得的結果均滿足 $R^2 + \hat{T}^2 = 1$ ，顯示本文的長波理論及 Mei (1983) 的方程式，皆能遵守能量守恆的原則，而 Miles (1981) 則有無法滿足能量守恆的缺點，這是因為 Miles (1981) 雖然假設底床為擾動，但在求解過程中，仍將相

表 3-1 梯形潛堤配置情形

方 案	$h_1(m)$	$L_2(m)$	$h_2(m)$	$B_2(m)$	$L_4(m)$	$h_3(m)$
配置一	2.4	3.2	0.8	4.0	2.4	2.4
配置二	2.4	3.2	0.8	4.0	2.4	1.6

表 3-2 反射係數及透射係數比較表

作 者	配 置 一			配 置 二			
	R	$\hat{T}$	$R^2 + \hat{T}^2$	R	$\hat{T}$	$R^2 + \hat{T}^2$	$\frac{(EC_g)_T}{(EC_g)_i}$
長波理論	0.4724	0.8814	1.0000	0.3967	1.0159	1.1894	1.0000
Mei (1983)	0.4113	0.9115	1.0000	0.3449	1.0388	1.1980	1.0000
Miles (1981)	0.5227	1.0092	1.2917	0.3579	1.0062	1.1132	0.9547

關的物理量，如週波數等均視為定值，所以造成無法完全滿足能量守恆情形，且出現透射係數 $\hat{T} > 1$ 的不合理情形。再從表 3-2 中可以看出，長波理論計算所得的反射係數，約比 Miles (1981) 小 0.05，而比 Mei (1983) 的方法大了 0.06，三者之間相差有限。

在配置二中，三種理論所求得之反射係數相差亦不大，長波理論計算所得的反射係數，比 Miles (1981) 及 Mei (1983) 的方法分別大了 0.05 及 0.04。再從表中可以發現，所有計算方法的結果皆呈現 $R^2 + \hat{T}^2 > 1$ ，這是因為潛堤前後兩端水深不同造成的結果，由於堤後水深較堤前水深淺，當波浪通過潛堤後，發生淺化效應，造成透射係數

$\hat{T} > 1$ 的現象。依照能量通率的觀點，波浪向前傳遞，經過兩不同區域時，能量通率必須守恆，即 EC_g 為固定值，根據線性波理論，淺水區域之群波速度為 $C_g = \sqrt{gh}$ ，而波浪能量為 $E = \rho g H^2 / 8$ ，其中 ρ 為水體的密度， H 則為波高。區域 I 與 V 的能量通率守恆可以下式表示

$$(1 - R^2) \frac{\rho g H_1^2}{8} \sqrt{gh_1} = \frac{\rho g H_3^2}{8} \sqrt{gh_3} \quad (3-18)$$

H_1 及 H_3 分別代表水深 h_1 與 h_3 的波高。因此，透射係數可以表示為

$$\hat{T} = \frac{H_3}{H_1} = \left[(1 - R^2) \sqrt{\frac{h_1}{h_3}} \right]^{1/2} \quad (3-19)$$

將表 3-2 中之反射係數 $R = 0.3967$ 及配置二中 $h_1 / h_3 = 1.5$ 之關係，代入式 (3-19) 則得透射係數 $\hat{T} = 1.0159$ ，此結果與表 3-2 中直接由理論計算的結果一致，表示本文長波理論能滿足能量通率守恆的物理意義。

從表 3-2 中可以看出，長波理論及 Mei (1983) 所得的結果，均能滿足能量通率守恆 $(EC_g)_T / (EC_g)_i = 1$ 的情況，而 Miles (1981) 則無法滿足，此因 Miles (1981) 將週波數視為定值，所造成的結果。

3.3 EEMSE 模式驗證

本文以 Davies 和 Heathershaw (1984) 沙漣試驗及 Guazzelli 等人 (1992) 複合式沙漣試驗，來驗證 EEMSE 數值模式的模擬能力，並與傳統的緩坡方程式及 Miles (1981) 理論做比較。

3.3.1 正弦沙漣底床反射係數之研究

計算波浪通過沙漣底床的反射係數，本文配合 Davies 和 Heathershaw (1984) 的試驗，選用其中三個試驗配置，做為驗證 EEMSE 模式計算能力的依據，其試驗條件及配置圖如表 3-3 及圖 3-3 所示。如同前述，表中 b 為沙漣底床振幅， ℓ 為沙漣底床之波長， K 為沙漣底床之週波數， N 為沙漣底床之沙漣個數， h 為水平底床水深。三種配置反射係數計算結果，示於圖 3-4 至圖 3-6，圖中實線代表本文之 EEMSE 模式，虛線代表傳統緩坡方程式。

由圖 3-4 至圖 3-6 可以發現，EEMSE 模式計算的結果，不管在反射係數的趨勢，或是反射係數的大小，均比傳統緩坡方程更能吻合試驗的結果，傳統緩坡方程所得的反射係數，不管沙漣底床個數多少，均有偏低的現象，特別是在共振頻率 $2k/K=1$ 附近更為明顯，且隨著沙漣個數的增加，計算的結果誤差更大，這是因為傳統的緩坡方程忽略底床擾動效應的結果，由圖 3-4 及圖 3-5，當沙漣底床個數分別為 $N=2$ 及 $N=4$ 時，底床起伏現象較緩，傳統緩坡方程式所得的結果，誤差並無太大的差異，但由圖 3-6 可以看出，當沙漣個數 $N=10$ 時，底床的擾動效應明顯加大，傳統緩坡方程式，由於忽略底床效應的影響，故無法得到滿意的結果。再由圖 3-4 至圖 3-6 可以發現，布拉格共振的帶寬，隨著底床沙漣個數的增加而減少，對於這種現象，本文的 EEMSE 模式，表現出良好的計算能力。

再從圖 3-4 至圖 3-6 可以看出，Miles (1981) 理論所得的結果，雖然在共振的帶寬與 EEMSE 模式之結果相當一致，但在共振頻率 $2k/K=1$ 時，其反射係數則有高估的現象，且隨底床沙漣個數的增加，其高估的現象愈加的明顯，再從表 3-2 中可以發現，梯形潛形配置一的情況時，Miles (1981) 理論所得的反射係數，亦比其他兩個理論之結果為大，由此顯示當潛堤前後水深相同時，Miles (1981) 理論所求得的反射應有高估的現象。

表 3-3 波浪通過正弦沙漣底床試驗條件 (Davies 和 Heathershaw, 1984)

試驗配置	b (cm)	ℓ (K) (cm)	N	h (cm)
D1	5.0	100 (0.0628 cm^{-1})	2	15.6
D2	5.0	100 (0.0628 cm^{-1})	4	15.6
D3	5.0	100 (0.0628 cm^{-1})	10	31.3

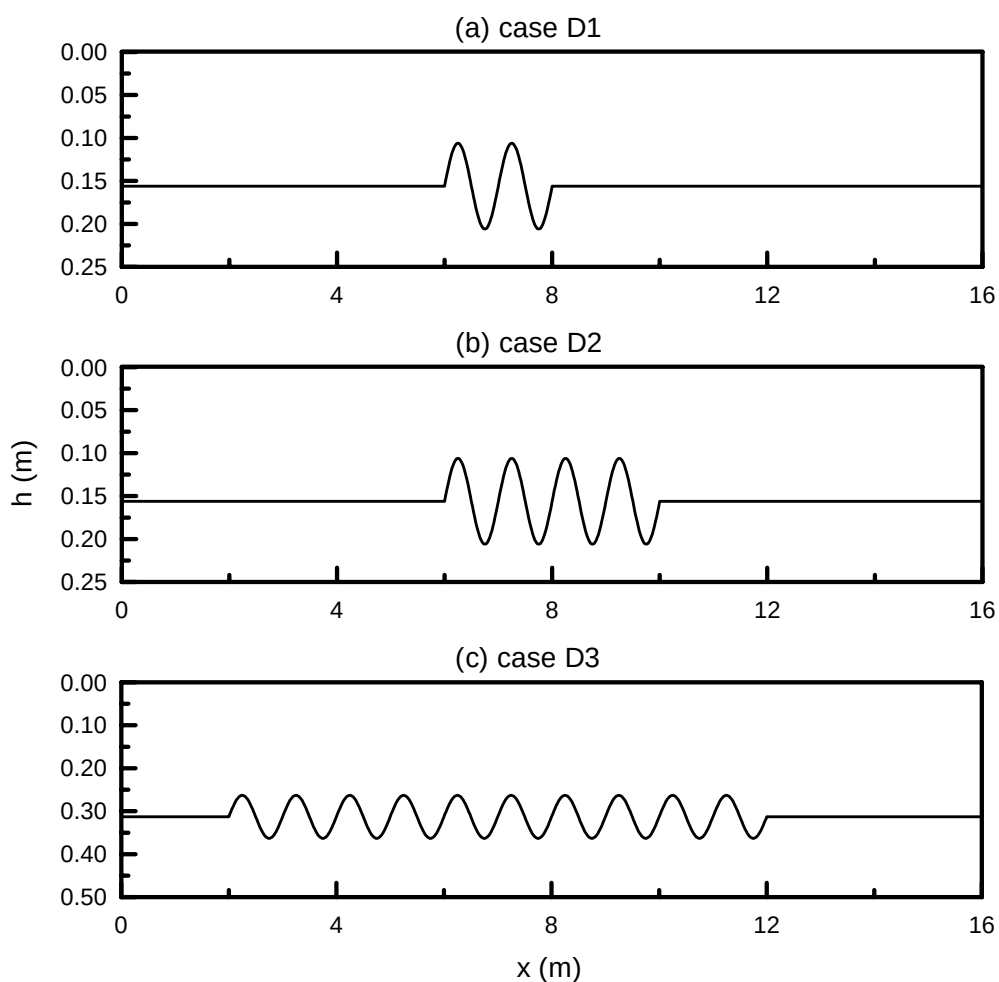


圖 3-3 正弦沙漣底床地形示意圖

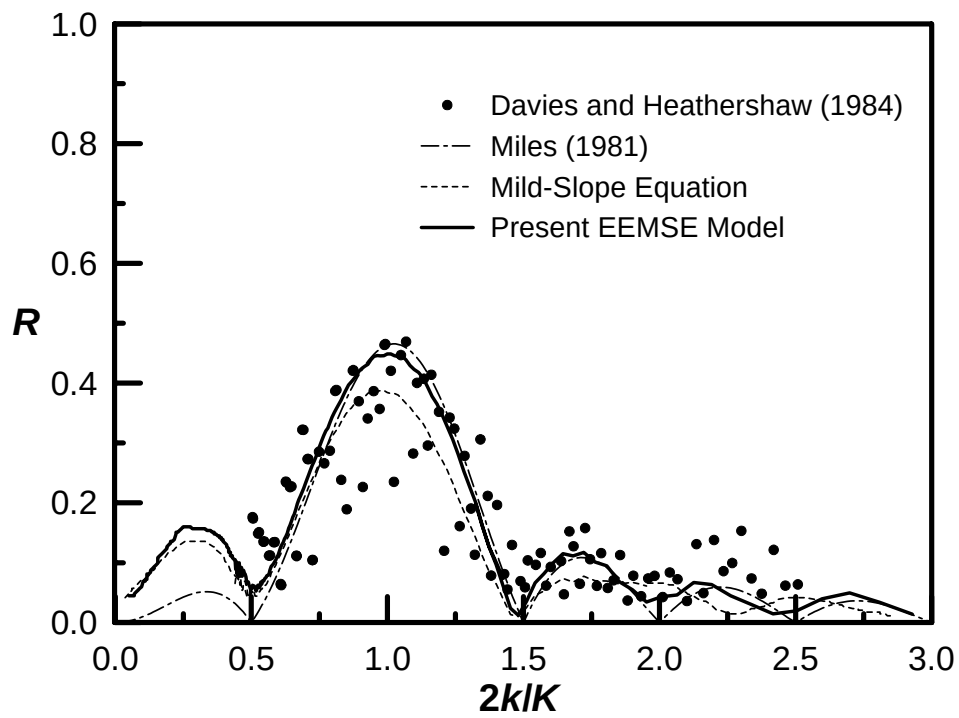


圖 3-4 波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D1)

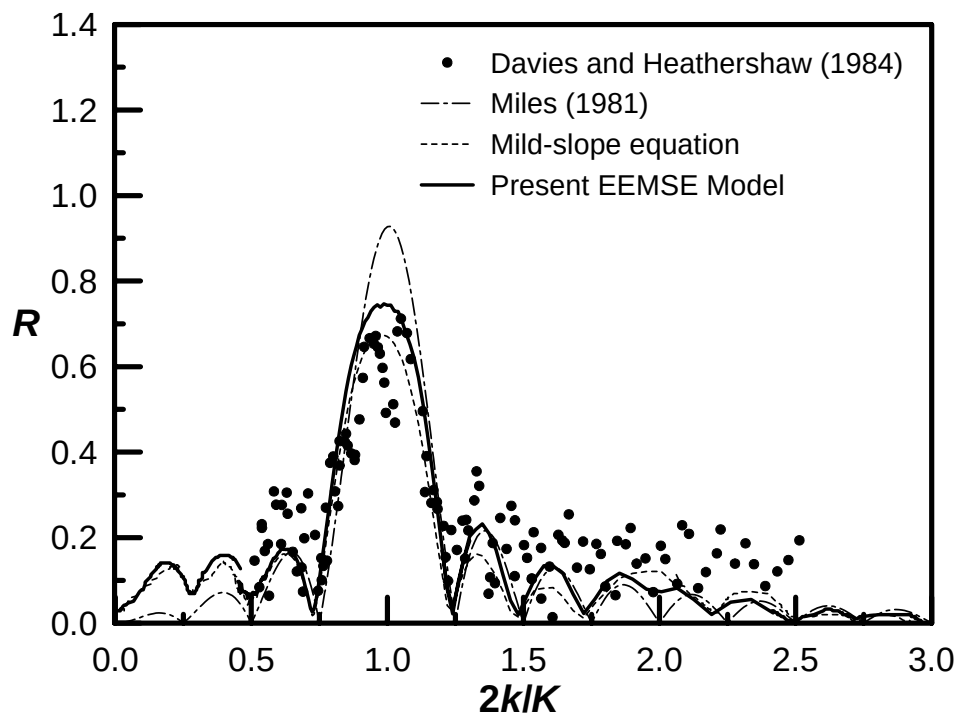


圖 3-5 波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D2)

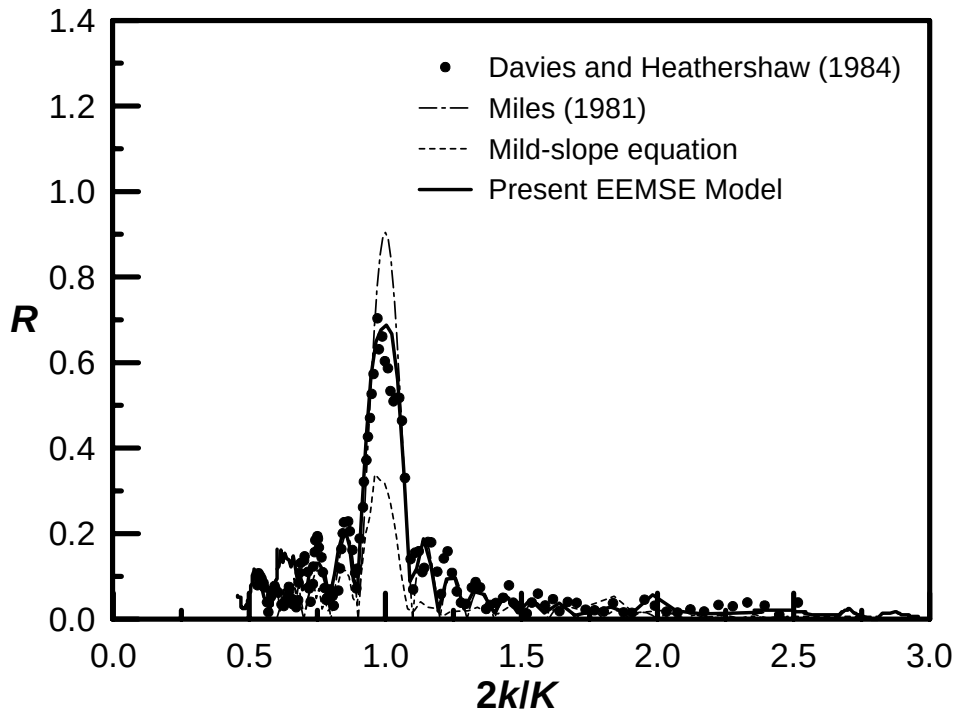


圖 3-6 波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D3)

3.3.2 複合式沙漣底床反射係數之研究

波浪通過複合正弦沙漣地形，布拉格反射效應，本文以 Guazzelli 等人 (1992) 的試驗做為比較，驗證 EEMSE 模式的計算結果，Guazzelli 等人 (1992) 的試驗條件與配置情形示於表 3-4 及圖 3-7，表中 m 為沙漣底床係數， $\tilde{L}$ 為沙漣總長度。

圖 3-8 為在試驗配置 G1 條件下，波浪通過複合式沙漣底床地形反射係數分佈圖。由圖中結果顯示，本文 EEMSE 模式計算所得結果，與試驗結果的分佈趨勢有著高度的一致性，但傳統的緩坡方程，由於未考慮底床擾動的影響，故計算結果較差，尤其在尖峰位置更為明顯，在共振頻率 $2k/K = 1$ 附近，傳統緩坡方程所得的反射係數，有偏低的現象，但在共振頻率 $2k/K = 2$ 附近，所得的反射係數，則呈偏高的情形。再由圖 3-8 中可以看出，Miles (1981) 理論所得的反射係數，均比 EEMSE 模式計算所得結果要來的小，除在尖峰共振頻率

表 3-4 波浪通過複合式沙漣底床試驗條件 (Guazzelli 等人, 1992)

試驗配置	b (cm)	ℓ (K) (cm)	m	$\tilde{L}$ (cm)	h_0 (cm)
G1	1.0	12 (0.52 cm^{-1})	2	48	4
G2	0.5	6 (1.05 cm^{-1})	1.5	48	4
G3	1.0	6 (1.05 cm^{-1})	1.5	48	4

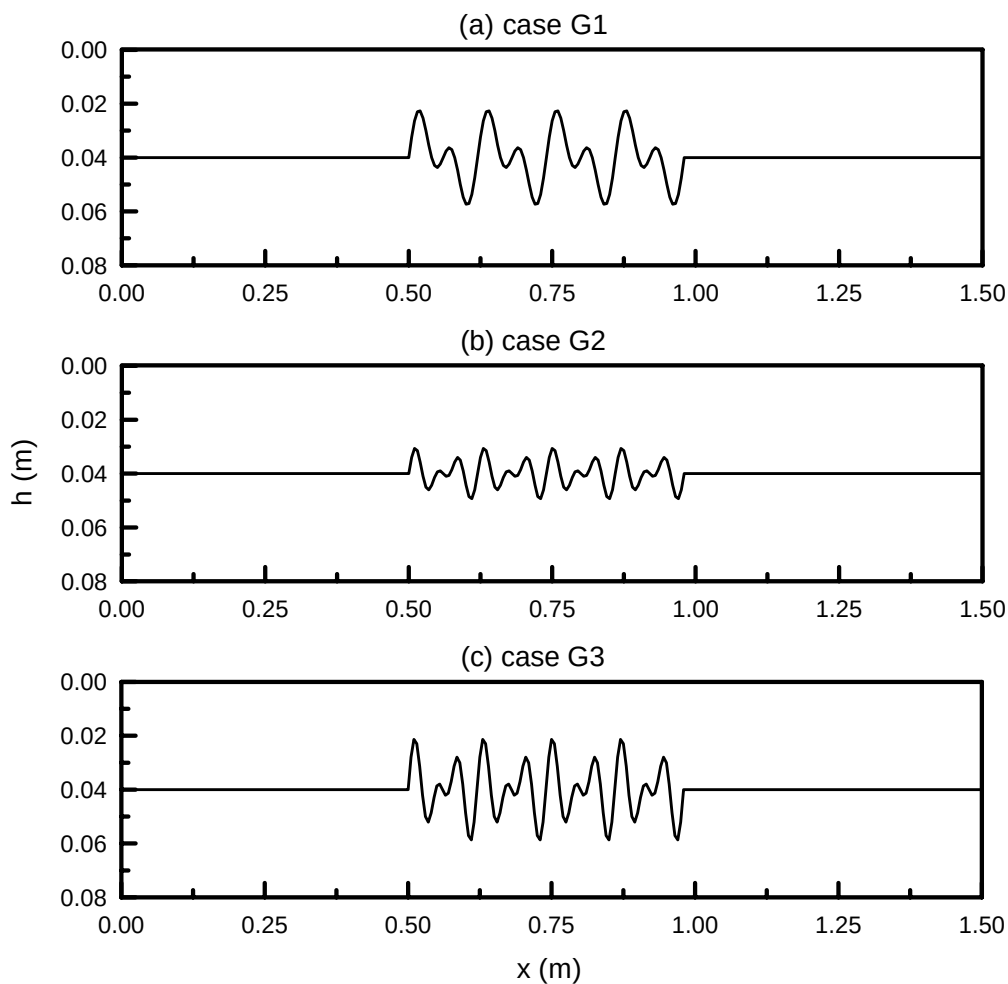


圖 3-7 複合式正弦沙漣底床地形示意圖

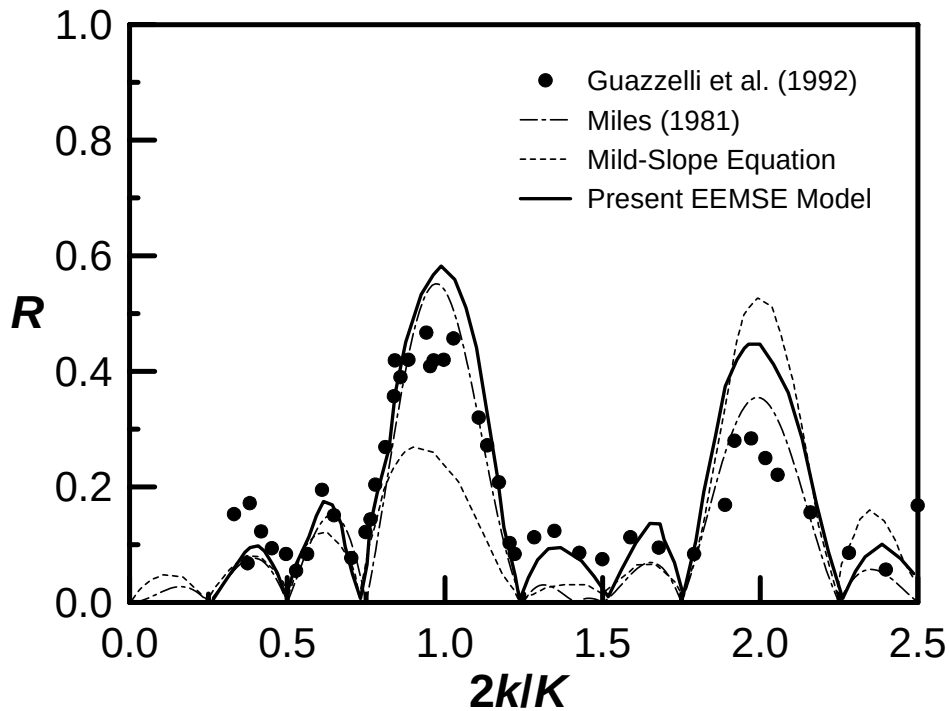


圖 3-8 波浪通過複合式沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 G1)

$2k/K=1$ 及 $2k/K=2$ 時，較接近試驗的結果外，在其餘的頻率部份，EEMSE 模式計算的結果均比 Miles (1981) 理論更接近試驗結果。

在試驗配置 G2 條件下，其計算結果如圖 3-9 所示。由圖中可以看出，本文 EEMSE 模式計算結果與試驗值相當吻合，傳統緩坡方程計算的結果，在尖峰反射係數發生位置，即共振頻率 $2k/K=1$ 及 $2k/K=2$ 時，與試驗結果有明顯的差異，且在主共振頻率 $2k/K=1$ 附近的共振帶寬亦無法確實掌握，G2 試驗的振幅比 G1 試驗小，但地形擾動頻率較 G1 試驗增加，由計算的結果顯示，傳統緩坡方程式，無法反應底床擾變地形的影響量，此結果與圖 3-5 相當一致。再由圖中結果可以發現，如同 G1 試驗，EEMSE 模式計算所得的反射係數，均較 Miles (1981) 理論所得的結果要大些，但除了在 $2k/K=1.5$ 附近外，EEMSE 模式所得的反射係數，則均比 Miles (1981) 理論更接近於試驗的結果。

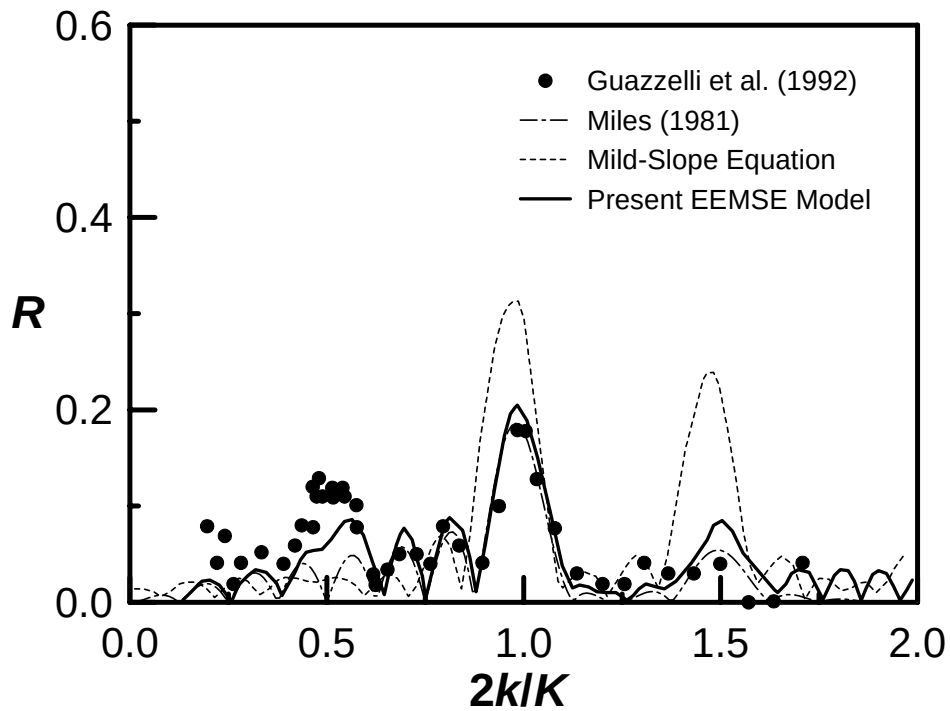


圖 3-9 波浪通過複合式沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 G2)

在 G3 佈置條件下，波浪通過複合式沙漣底床地形，反射係數分佈情形如圖 3-10 所示。G3 試驗的振幅雖然比 G2 試驗大，且地形擾動頻率較 G1 試驗增加，由圖中結果顯示，本文 EEMSE 模式計算的結果，與試驗值尚為吻合，但傳統緩坡方程式，由於並沒有考慮底床擾變特性的影響，在地形擾動頻率增加及振幅加大的情況下，故計算所得結果與試驗值有明顯差異。再由圖 3-10 中可以看出，EEMSE 模式仍較 Miles (1981) 理論得到較大的反射率，且與 G2 試驗相同，在 $2k/K = 1.5$ 附近，EEMSE 模式所得的反射係數較偏離試驗結果，但在其餘的頻率部份，EEMSE 模式則比 Miles (1981) 理論得到更合理的結果。

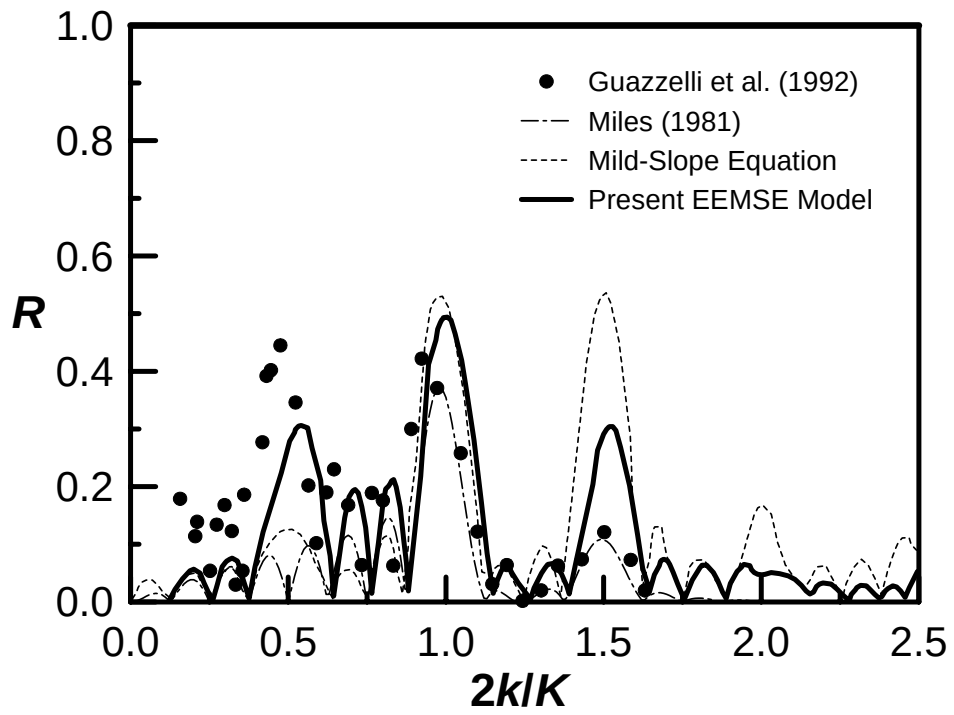


圖 3-10 波浪通過複合式沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 G3)

第四章 不規則波之緩坡方程式

4.1 控制方程式

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

$$-\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot [(CC_g)_i \nabla_h \phi_i] + \left[(k^2 CC_g)_i (1 + if_{Di}) - \omega_i^2 + F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 g k |\nabla_h h|^2 \right] \phi_i = 0 \quad (4-1)$$

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

為簡化式(4-1)，引用 Radder (1979) 之尺度因子，如下所示：

$$\Psi_i = \frac{\phi_i}{\sqrt{(CC_g)_i}} \quad (4-2)$$

則式(4-1)可簡化如下：

$$-\frac{2\omega_i i}{(CC_g)_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} = \nabla_h^2 \phi_i + (k_c^2)_i \phi_i \quad (4-3)$$

其中 k_c 為虛擬週波數，如下式所示

$$(k_c^2)_i = k_i^2(1 + if_{Di}) - \frac{\nabla_h^2 \sqrt{(CC_g)_i}}{\sqrt{(CC_g)_i}} + \frac{[F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 (\nabla_h h)^2 g k_i]}{(CC_g)_i} \quad (4-4)$$

式(4-3)即為本計畫計算單一成份波之控制方程式。

4.2 能量消散係數

對於波浪的能量方程式，可藉由分離緩坡方程式中的實部及虛部推得。波譜分割後的每一個成份波，其波浪勢能函數可以表示為 $\phi = A_w e^{is}$ ，將其代入式 (2-57) 中，並分離方程式中的實部與虛部，再藉由式 (2-44) 波浪勢能函數與水位變化函數的關係，將波浪勢能函數之振幅 A_w 代換為水位變化振幅 a ，則可推得下列一組方程式，如下所示：

$$\frac{1}{a_i} \frac{\partial^2 a_i}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial s_i}{\partial t} \right)^2 = (CC_g)_i [k_i^2 - (\nabla_h s_i)^2] - \omega_i^2 + \frac{\nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h a)_i}{a_i} \quad (4-5)$$

$$-\frac{a_i^2}{\omega_i} \frac{\partial^2 s_i}{\partial t^2} - \frac{2a_i}{\omega_i} \frac{\partial s_i}{\partial t} \frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla_h \cdot \left(\frac{a^2 CC_g \nabla_h s}{\omega} \right)_i = - \left(\frac{fa^2 CC_g k^2}{\omega} \right)_i = -D_i \quad (4-6)$$

式中 D_i 為單位時間內每單位面積所產生的能量損失，其中包含有 (a) 波浪非線性淺化效應 ($D_i = D_{si}$)、(b) 波浪碎波能量消散效應 ($D_i = D_{di}$) 及 (c) 波浪非線性交互作用效應 ($D_i = D_{nl3i}$)。若在穩態情況下，且 $\theta \approx 0^\circ$ ， $\nabla s_i = 1$ ，則式(4-6)可簡化為一維波浪能量通率方程式，如下所示：

$$\frac{d(EC_g)_i}{dx} = -D_i = -f_{di} k_i (EC_g)_i \quad (4-7)$$

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

4.2.1 非線性淺化效應

關於波浪淺化效應時波高所需的修正量，本計畫依照能量通率的觀點，結合 Shuto (1974) 提出的非線性淺化波高公式，推導出波浪的淺化修正量。假設非線性波高分佈可表示為 $\tilde{H}_i = H_i + (H_{non})_i$ ，其中 $\tilde{H}_i$ 為波浪的總波高， H_i 為線性波浪理論下的波高， $(H_{non})_i$ 為受非線性效應影響所產生的非線性波高。將上式代入式(4-7)波浪的能量通率方程式，並假設 $D_i = D_{si}$ 及 $f_i = f_{si}$ ，則波浪的過剩能量通率可表示為

$$-D_{si} = \frac{1}{8} \rho g \frac{d}{dx} [(2HH_{non} + H_{non}^2)C_g]_i \quad (4-8)$$

其所對應的能量通率方程式為

$$\frac{d(EC_g)_i}{dx} = -D_{si} = -f_{si} k_i (EC_g)_i \quad (4-9)$$

而 Shuto (1974) 提出之斜坡底床上的非線性淺化公式如下所示：

$$\left\{ \begin{array}{ll} \left(\frac{H}{H_0} \right)_i = \sqrt{\frac{1}{2n_i} \frac{1}{\tanh k_i h}} & \text{for } U_r \leq 30 \\ H_i h^{2/7} = \text{const} & \text{for } 30 < U_r \leq 50 \\ H_i h^{5/2} (\sqrt{U_r} - 2\sqrt{3}) = \text{const} & \text{for } U_r > 50 \end{array} \right. \quad (4-10)$$

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

將上式三種情況分別代入式 (4-9)，並應用 $\frac{d()_i}{dx} = \frac{dh}{dx} \frac{d()_i}{dh} = -\tan \beta \frac{d()_i}{dh}$ 之關係，其中 $\tan \beta$ 為底床平均坡度，因此可整理得

$$f_{si} = \begin{cases} 0 & \text{for } U_r \leq 30 \\ \frac{1}{k_i h} \left(-\frac{4}{7} + s_1 + s_2 \right) \tan \beta & \text{for } 30 < U_r \leq 50 \\ \frac{1}{k_i h} \left(-\frac{3\sqrt{U_r} - 10\sqrt{3}}{1.5\sqrt{U_r} - 2\sqrt{3}} + s_1 + s_2 \right) \tan \beta & \text{for } U_r > 50 \end{cases} \quad (4-11)$$

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

4.2.2 碎波能量消散效應

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

$$S_{br}(\omega_i, \theta_i) = -\frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\omega_i, \theta_i) \quad (4-12)$$

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

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\bar{\omega}}{2\pi} \right) H_{\max}^2 \quad (4-13)$$

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

$$Q_b = \exp \left[\frac{1 - Q_b}{(H_{rms} / H_{\max})^2} \right] \quad (4-14)$$

$$H_{\max} = \frac{0.88}{k} \tanh\left(\frac{\gamma kh}{0.88}\right) \quad (4-15)$$

此處

$$\gamma = 0.5 + 0.4 \tanh\left(33 \frac{H_{rms,0}}{L_0}\right) \quad (4-16)$$

上式中 H_{rms} 為波浪均方根波高，而 $H_{rms,0}$ 為入射波浪之均方根波高， L_0 為入射波之波長。將式(4-12)代入式(4-9)中，可推得如下關係：

$$\frac{d}{dx}(EC_g)_i = (S_{br})_i = -f_{di} k_i (EC_g)_i \quad (4-17)$$

故

$$f_{di} = -\frac{(S_{br})_i}{k_i (EC_g)_i} \quad (4-18)$$

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

$$\frac{H_b}{h_b} > 0.78 \quad (4-19)$$

式中 H_b 為碎波波高， h_b 為碎波水深。

4.2.3 非線性三波交互作用效應

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

$$S_{nl3}(\omega_i, \theta_i) = S_{nl3}^-(\omega_i, \theta_i) + S_{nl3}^+(\omega_i, \theta_i) \quad (4-20)$$

其中

$$S_{nl3}^+(\omega_i, \theta_i) = \max \left\{ \begin{array}{l} 0, \\ \alpha_{EB} 2\pi (CC_g)_i (J_{nl3}^2)_i |\sin(\beta_t)| E^2(\omega_i/2, \theta_i) - 2 E(\omega_i/2, \theta_i) E(\omega_i, \theta_i) \end{array} \right\} \quad (4-21)$$

$$S_{nl3}^-(\omega_i, \theta_i) = -2S_{nl3}^+(2\omega_i, \theta_i) \quad (4-22)$$

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

$$\beta_t = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh \left(\frac{0.2}{U_r} \right) \quad (4-23)$$

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

$$(J_{nl3})_i = \frac{k_{\omega_i/2}^2 (g h + 2 C_{\omega_i/2}^2)}{k_{\omega_i} h (g h + \frac{2}{15} g h^3 k_{\omega_i}^2 - \frac{2}{5} \omega_i^2 h^2)} \quad (4-24)$$

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

將式(4-20)代入式(4-9)可得

$$\frac{d(EC_g)_i}{dx} = -f_{nl3i} k_i (EC_g)_i = (S_{nl3})_i \quad (4-25)$$

即

$$f_{nl3i} = -\frac{(S_{nl3})_i}{k_i (EC_g)_i} \quad (4-26)$$

4.3 波譜分割與合成

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

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

$$\Delta f_i = \left[\left(\frac{f_{high}}{f_{low}} \right)^{\frac{1}{M-1}} - 1 \right] f_i \quad (4-27)$$

各成份波對應之頻率如下所示：

$$f_1 = f_{low} \quad (4-28)$$

$$f_M = f_{high} \quad (4-29)$$

$$f_{i+1} = \left(\frac{f_M}{f_1} \right)^{\frac{1}{M-1}} f_i \quad (4-30)$$

而各成份波對應之波高與週期以下式計算

$$H_i = 4\sqrt{S(f_i)\Delta f_i}, \quad T_i = 1/f_i \quad (4-31)$$

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

由成份波所對應之波高及頻率，利用前述切割之觀念，可由式(4-31)反推成份波能譜與成份波波高之關係，如下所示：

$$S(f_i) = H_i^2 / 16\Delta f_i \quad (4-32)$$

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

$$H_{1/3} = 4.004\sqrt{m_0} \quad (4-33)$$

$$\bar{T} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (4-34)$$

式中， m_k 為波譜之 k 次動差，以下式計算

$$m_k = \int_0^{\infty} S(f) f^k df \quad (4-35)$$

根據 Bretschneider (1968)、Goda 和 Nagai (1968) 依實測數據之分析結果顯示，示性週期與平均週期間之關係為

$$T_{1/3} = \bar{T} / 0.9 \quad (4-36)$$

由式 (4-33) 與式 (4-36) 即可求得此能譜所代表之波浪條件，亦即示性波高與示性週期。

第五章 不規則波應用

5.1 反射係數公式

5.1.1 EEMSE 模式之反射係數

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

如圖 5-1 所示，任意水深合成波之波形可表示為

$$\begin{aligned}\eta(x,t) &= a_I \cos\left(\int_0^x k dx + \omega t + \varepsilon_i\right) + a_R \cos\left(\int_0^x k dx - \omega t + \varepsilon_r\right) \\ &= a_I \{[\cos\left(\int_0^x k x + \varepsilon_i\right) + R \cos\left(\int_0^x k dx + \varepsilon_r\right)] \cos \omega t \\ &\quad + [\sin\left(\int_0^x k dx + \varepsilon_i\right) - R \sin\left(\int_0^x k dx + \varepsilon_r\right)] \sin \omega t\}\end{aligned}\quad (5-1)$$

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

$$\begin{aligned}|\eta| &= a_I [1 + R^2 + 2R \cos(2\int_0^x k dx + \varepsilon_i + \varepsilon_r)]^{1/2} \\ &= a_0 k_s [1 + R^2 + 2R \cos(2\int_0^x k dx + \varepsilon_i + \varepsilon_r)]^{1/2}\end{aligned}\quad (5-2)$$

式中 a_0 為外海入射波之振幅， k_s 為線性波之淺化係數。

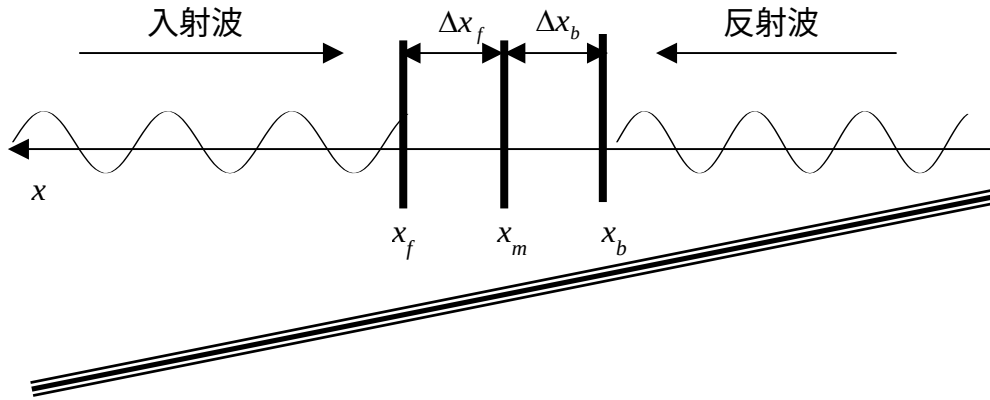


圖 5-1 入射波與反射波座標示意圖

由圖 5-1， x_f 處之空間位相函數為

$$\begin{aligned} \int_0^{x_f} k dx &= \int_0^{x_m} k dx + \int_{x_m}^{x_m + \Delta x_f} k dx = X_m + \int_{x_m}^{x_m + \Delta x_f} \left(k_m + \frac{dk}{dx}\right) dx \\ &= X_m + k_m \Delta x_f + \left. \frac{dk}{dx} \right|_{x=x_m} \frac{\Delta x_f^2}{2} \end{aligned} \quad (5-3)$$

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

$$\frac{dk}{dx} = \frac{dk}{dh} \frac{dh}{dx} = \frac{k^2 \tan \beta}{(kh + 1/2 \sinh 2kh)} \quad (5-4)$$

式中 $\tan \beta$ 為底床坡度，如水平底床則 $\tan \beta = 0$ 。根據式 (5-2) 至式 (5-4)， x_b 、 x_m 及 x_f 三點之水位振幅分別為

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

$$|\eta|_m = a_0 k_{sm} [1 + R^2 + 2R \cos \alpha_1]^{1/2} \quad (5-6)$$

$$|\eta|_f = a_0 k_{sf} [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 + \alpha_f)]^{1/2} \quad (5-7)$$

其中

$$\alpha_1 = 2X_m + \varepsilon + \varepsilon_r \quad (5-8)$$

$$\alpha_b = 2k_m \Delta x_b + \frac{2k_m^2 \Delta x_b^2 \tan \beta}{2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m} \quad (5-9)$$

$$\alpha_f = 2k_m \Delta x_f - \frac{2k_m^2 \Delta x_f^2 \tan \beta}{2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m} \quad (5-10)$$

由式 (5-5) 至式 (5-7) ，則可得以下之關係：

$$B = \left(\frac{|\eta_b|}{k_{sb}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 - \alpha_b)] \quad (5-11)$$

$$M = \left(\frac{|\eta_m|}{k_{sm}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos \alpha_1] \quad (5-12)$$

$$F = \left(\frac{|\eta_f|}{k_{sf}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 + \alpha_f)] \quad (5-13)$$

利用式 (5-11) 至式 (5-13) 可解得位相 α_1 及波浪反射係數 R 分別表示如下：

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left[\frac{F - B + (B - M) \cos \alpha_f - (F - M) \cos \alpha_b}{(B - M) \sin \alpha_f + (F - M) \sin \alpha_b} \right] \quad (5-14)$$

$$R = \frac{B - F}{2a_0^2 [\cos(\alpha_1 - \alpha_b) - \cos(\alpha_1 + \alpha_f)]} \quad (5-15)$$

由已知之反射係數，代入式 (5-5) 至式 (5-7) 可求出各點之入射波水位振幅，至於各點之反射波水位振幅可由 $a_r = a_i \cdot R$ 求得。

至於不規則波之反射係數，Goda 和 Suzuki (1976) 認為可由入射

波與反射波之總能量求得，即

$$R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \quad (5-16)$$

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

$$E_I = \sum_i \left(\frac{1}{2} a_I^2 \right)_i \quad (5-17)$$

$$E_R = \sum_i \left(\frac{1}{2} a_R^2 \right)_i \quad (5-18)$$

由以上的分析可知，由波譜切割而成之各個成份波，先利用 EEMSE 模式，計算出各成份波之水位振幅，再以 Chang (2002) 之方法，分別求出各成份波之入射波與反射波振幅，代入式 (5-16) 至式 (5-18) 即可求得不規則波之反射係數。

5.1.2 Miles 理論之不規則波反射係數

Miles (1981) 理論雖然可適用於各種不同的底床型式，但其反射係數僅適合單一成份之規則波，對於 Miles (1981) 理論之不規則波反射係數，目前並沒有相關文獻做探討，本文以 Goda 和 Suzuki (1976) 之能量觀點，計算不規則波 Miles (1981) 理論之反射係數為：

$$R = \sqrt{\frac{\sum_i S(f_i) df \cdot R_i^2}{\sum_i S(f_i) df}} \quad (5-19)$$

式中 f_i 為不規則波各成份波之頻率， $S(f_i)$ 為各成份波之波譜能量密度函數， R_i 為頻率 f_i 的成份波，應用 Miles (1981) 理論所求得之反射係數。式 (5-19) 中 $S(f_i) df$ 代表各成份波之入射波能量，而

$S(f_i)df \cdot R_i^2$ 則為各成份波之反射波能量，故式 (5-19) 即為反射波總能量與入射波總能量之比，此與 Goda 和 Suzuki (1976) 之能量方法，具有相同之物理意義。

5.2 波譜的選擇

一般而言，為了達到保護海岸的目的，人工潛堤均設置於淺水區域或中間性水深，就波譜而言，TMA 波譜較能適用於淺水區域，而 JONSWAP 波譜則是有限吹送距離下，常被使用的標準波譜，兩者的差別在於 TMA 波譜比 JONSWAP 波譜多了一個水深函數，Bouws 等人 (1987) 認為 JONSWAP 波譜亦可以適用於有限水深，故本文以 Goda (1999) 提議之 JONSWAP 波譜，做為本文計算之波譜，其型式如下：

$$S(f) = \sigma_1 H_{1/3}^2 T_p^4 f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma_0^2]} \quad (5-20)$$

$$\sigma_1 = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (5-21)$$

$$T_p = \frac{T_{1/3}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}} \quad (5-22)$$

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

利用本文建議之混合分割方法，分割 JONSWAP 波譜之結果示於圖 5-2。由圖中顯示，尖峰頻率附近的能量變化較為迅速，而在高頻處的能量變化則較為緩慢。波譜混合分割的方法，主要利用密次方指數，來離散波浪頻率，在改善等頻率分割時，各成分波的能量差異太大，及等能量分割時，高頻部份其中心代表頻率所代表的範圍太大的缺點，

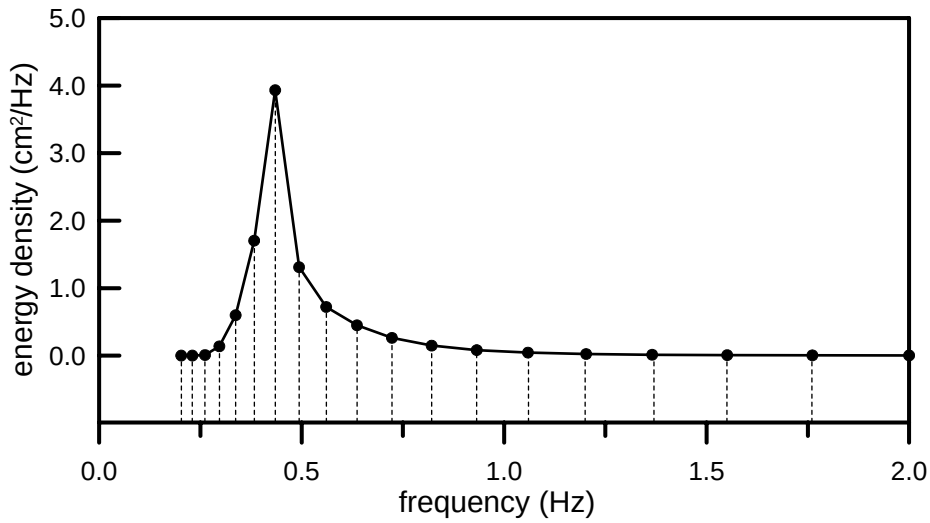


圖 5-2 混合波譜分割示意圖

點。由圖 5-2 可以看出，在高頻部份分割的間距，較尖峰頻率附近為寬，且在尖峰頻率附近之分割間距又不致於太窄，顯示混合分割的方法，能夠改善等能量分割及等頻率分割方法的缺點。

再者，為了驗證混合分割方法，能夠掌握波譜的特性，本文以週期 $T_{1/3} = 1.67921$ 秒，示性波高 $H_{1/3} = 0.01$ m 之條件，利用式 (5-20) 得到 JONSWAP 波譜，選擇不同的成份波個數，再以 4.3 節波譜分割與合成的方法，得到合成波之示性波高及週期，表 5-1 為不同個數成份波所得之誤差情形，由表中可以看出，各種成份波個數，其合成波之週期，誤差均在 1% 以下，而合成波波高的誤差，則隨分割成份波個數的增加而減少，基於計算時間的考量，本文以 50 個成份波，做為計算不規則波反射係數的依據。

5.3 不規則波布拉格共振之研究

過去有關布拉格反射係數之試驗，不管正弦沙漣底床或人工潛堤，均僅限於規則波之研究，然而實際海域的波浪紛紜不一，並非單一的規則波浪所能模擬，由單一規則波浪作用於潛堤，所得之反射係

表 5-1 不同個數成份波之合成波誤差比較表

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

數，應與不規則作用所得的結果有所不同，因此瞭解不規則波之布拉格共振情形，應是值得研究的課題。

5.3.1 正弦沙漣底床反射係數之研究

本文依據 Davies 和 Heathershaw (1984) 所做之試驗，來瞭解不規則波作用於正形沙漣底床，布拉格反射之變化情形，其試驗條件如表 3-3 所示。由前人之研究得知，規則波入射沙漣底床時，當入射波浪之波長 (L) 約為沙漣底床波長 (ℓ) 的兩倍時，此時產生布拉格共振，得到最大的反射係數，故波浪入射沙漣底床時，其反射係數應與兩倍沙漣底床波長與波浪波長之比值 ($2\ell/L$) 有關，本文比照規則波理論，針對 Davies 和 Heathershaw (1984) 之試驗，求得 EEMSE 模

式不規則波之反射係數，其結果示於圖 5-3 至圖 5-5，圖中橫軸之 $L_{1/3}$ 為不規則波示性週期 $T_{1/3}$ 所對應之波長。

Suh et al. (1997) 及 Lee et al. (2003) 雖曾利用不規則波緩坡方程，對 Davies 和 Heathershaw (1984) 試驗之正弦沙漣底床，進行布拉格共振之數值計算，但這些學者僅對布拉格共振頻率 $2\ell/L_{1/3}=1$ 時，穿透波頻譜衰減與入射波頻譜進行比較，並沒對布拉格反射係數，做整體之描述，故由於並無相關試驗數據及數值結果可做驗證，本文僅將計算的結果，與 Miles (1981) 理論及傳統緩坡方程所求得的不規則波反射係數進行比較。

由圖 5-3 至圖 5-5 之結果可以發現，如同規則波之布拉格反射現象，不規則波反射係數在頻率 $2\ell/L_{1/3}=1$ 附近亦發生主頻共振現象，而有尖峰值存在，再比較圖 3-4 至圖 3-6 與圖 5-3 至圖 5-5，不規則波布拉格共振之尖峰反射係數比規則波來得小，但不規則波共振區的帶寬則較規則波為寬。造成此結果的原因可由能量觀點進行闡述，在共振條件附近，其所對應頻率的入射成份波會產生布拉格共振，單一規則波的能量均集中於此共振頻率，因此入射波能量會因布拉格共振的影響而產生相當大的反射作用，而不規則波為不同頻率之成份波線性疊加而成，其總能量為各種不同頻率的成份波加總而成，集中於共振頻率附近之能量僅佔總能量之部份，當示性週期 $T_{1/3}$ 所對應之波長符合共振條件時，此時僅有約等於此共振波長之成份波才會發生共振效應，但由於造成共振之成份波能量不如規則波來得集中，因此反應出的尖峰反射係數便較規則波小，而其他不符合共振條件之成份波，沙漣底床雖仍會對其造成反射作用，但其反射效果較差，對整體反射係數的提昇作用不大。同理，當計算的示性週期所對應之波長並非造成共振之波長，此時主頻能量較不會受到共振之影響，但其他成份波仍含有可造成布拉格共振條件之波長，其對整體反射係數仍有影響，尤其示性週期愈趨近共振情況，對整體反射係數更有相當程度的提昇，因此主共振區之帶寬才會產生變寬的現象。

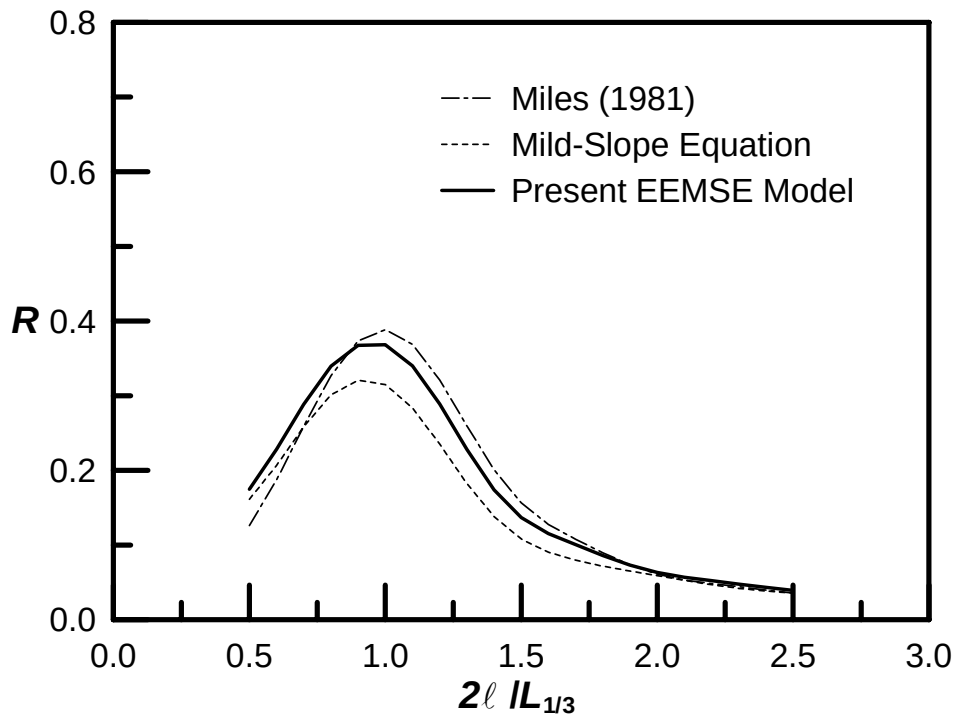


圖 5-3 不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D1)

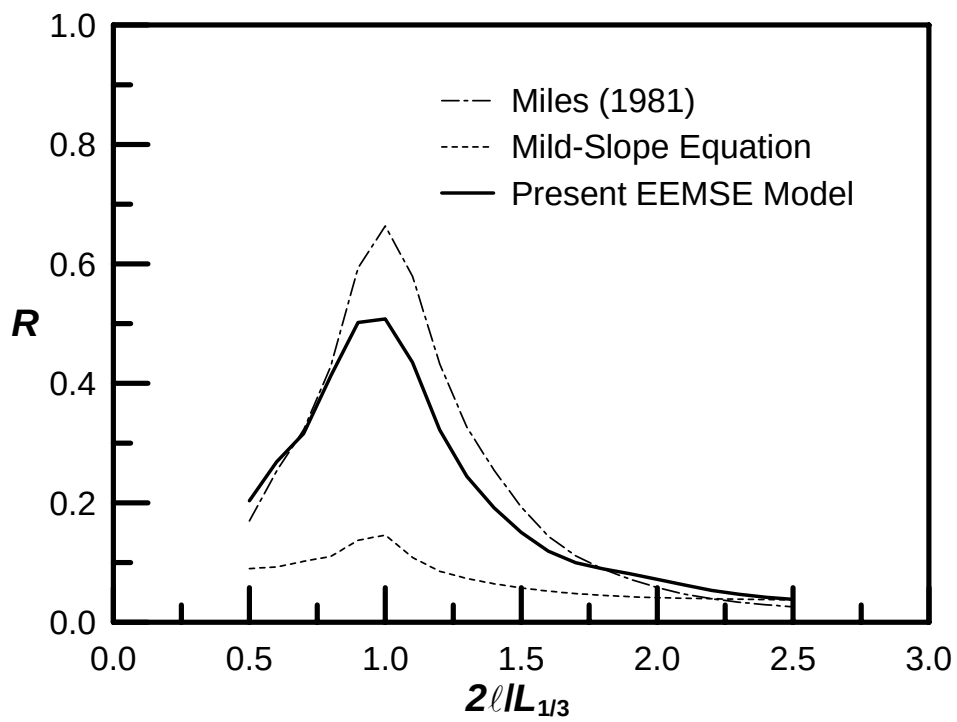


圖 5-4 不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D2)

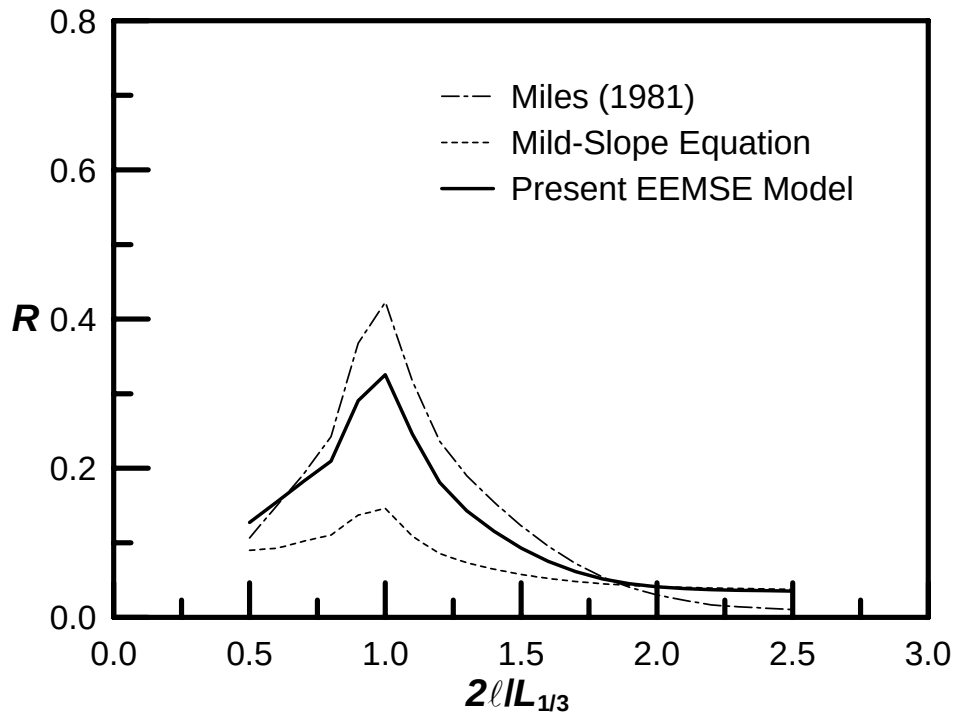


圖 5-5 不規則波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖 (配置 D3)

比較圖 5-3 至圖 5-5 中，本文 EEMSE 模式、傳統緩坡方程及 Miles (1981) 理論的結果可以發現，在頻率 $2\ell/L_{1/3}=1$ 附近，EEMSE 所得的反射係數，較 Miles (1981) 理論所得的反射係數小，而比傳統緩坡方程所得的反射係數大，此結果與規則波所得的結果相似，故造成這種現象的理由，應與規則波相同，在此不再詳述。

另外從圖 5-3 至圖 5-5 中亦可看出，在主頻共振區外，較大值之 $2\ell/L_{1/3}$ 區域，不規則波之反射係數，呈現較平均的狀態，不像規則波會有極小的反射係數出現，且高諧波之布拉格共振現象並不存在。就波譜的能量觀點而言，這種現象仍屬合理，雖然示性週期遠離主頻共振區，但在整個頻譜中，仍包含引起布拉格共振現象之成份波存在，故對反射係數仍有所助益，以致於造成在主頻共振區外，仍有相當程度的反射作用。

由以上的結果可以得知，當正弦沙漣底床實際應用於海岸防禦工

程時，其防禦效果應與規則波的效果有所不同，實際應用時，不規則波雖仍會發生布拉格反射的現象，但主頻共振和高諧波共振的反射係數，不如規則波情況時大，但其反射係數帶寬則較規則波來的大，且在較大的 $2\ell/L_{1/3}$ 時，反射係數亦有所提昇；由此可見，若以示性波浪來設計人工沙漣時，主頻共振區反射係數雖不能如規則波情況來得理想，但仍有不錯的防護作用，且由於主頻共振區外之反射係數提高，增加可防禦的波浪條件，對於海岸保護應仍有所助益。

5.3.2 系列潛堤反射係數之研究

Kirby 和 Anton (1990) 以半餘弦人工潛堤地形，研究規則波之布拉格反射效果，本文以其試驗地形，做為不規則波通過等間距人工系列潛堤，數值計算的依據，藉以瞭解布拉格反射的變化情形，Kirby 和 Anton (1990) 之試驗條件與本文數值計算之地形示於表 5-2 及圖 5-6。由於缺乏不規則波之試驗數據，及數值計算結果的相關文獻可作參考驗證，本文僅將 EEMSE 數值計算的結果，與 Miles (1981) 理論及傳統緩坡方程所求得的不規則波反射係數進行比較。

圖 5-7 及圖 5-8 為不規則波通過半餘弦人工潛堤，反射係數與 $2S/L_{1/3}$ 之關係圖，圖中顯示，人工潛堤在 $2S/L_{1/3} = 2$ 附近，有很明顯高諧波布拉格共振現象發生，此結果與 Kirby 和 Anton (1990) 所作之規則波試驗及數值計算結果相當一致，且從圖中可以發現，隨著潛堤間距的增加，主頻共振之尖峰反射係數有變小的趨勢，而高諧波共振之反射係數則隨之變大，此現象又與 Kirby 和 Anton (1990) 之研究吻合，然而本文應用不規則波，所得的尖峰反射係數，較 Kirby 和 Anton (1990) 所用之規則波來得小，而共振區之帶寬，則比 Kirby 和 Anton (1990) 的帶寬為大，此現象如同正弦沙漣底床，其原因應與前述相同，概因不規則波之能量分散所造成的結果。

表 5-2 半餘弦人工潛堤底床試驗條件 (Kirby 和 Anton, 1990)

試驗配置	D (m)	B (m)	S (m)	N	h_0 (cm)	D/h_0
K1	0.05	0.5	0.8	4	0.15	0.33
K2	0.05	0.5	1.2	4	0.15	0.33

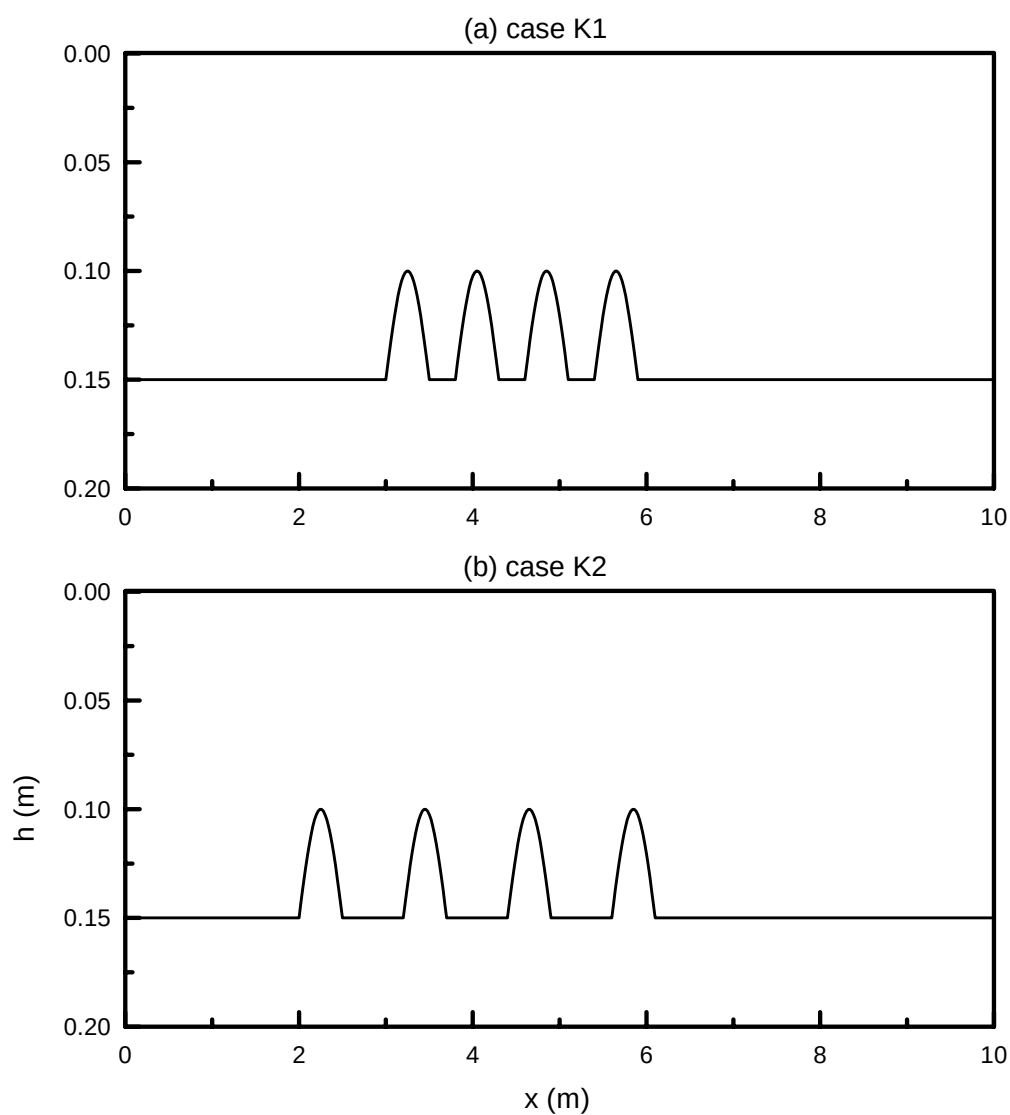


圖 5-6 半餘弦人工潛堤底床地形示意圖

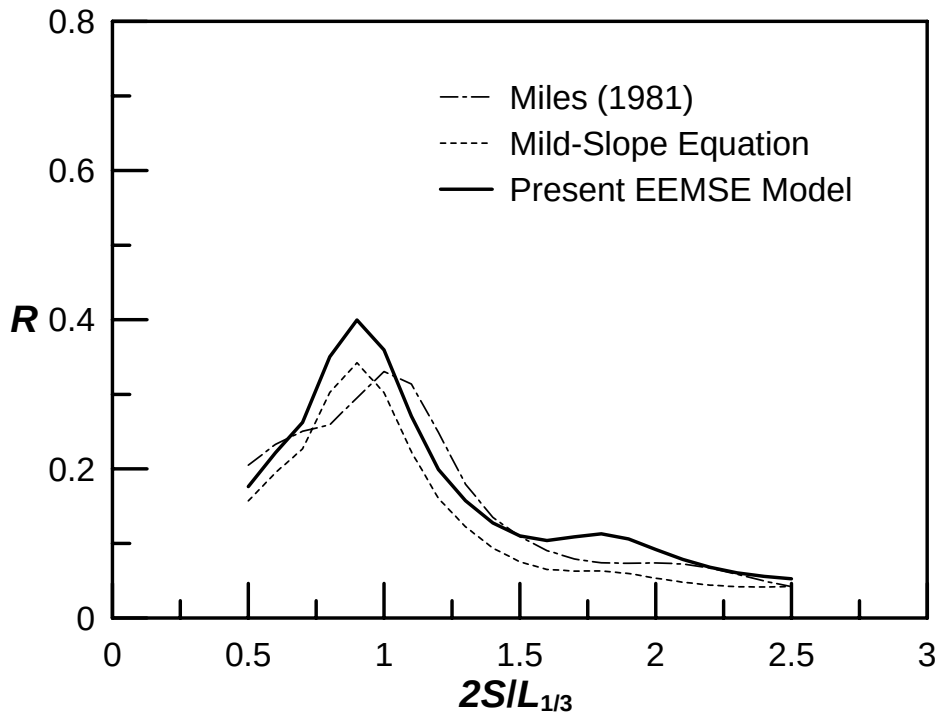


圖 5-7 不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖 (配置 K1)

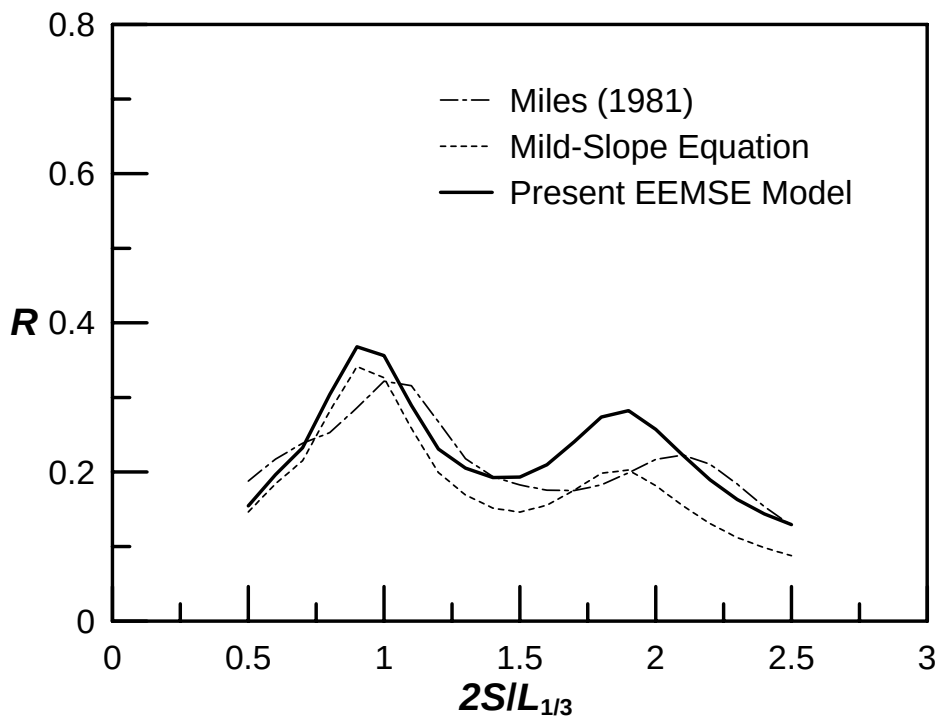


圖 5-8 不規則波浪通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖 (配置 K2)

雖然 Miles (1981) 理論能夠很容易的求得反射係數，在工程應用上較為方便，且可當作一般研究的佐證，但由於其方法視週波數為定值，故無法完全滿足某些物理現象。Kirby 和 Anton (1990) 的研究指出，當規則波入射人工潛堤時，主頻共振與高諧波共振應發生於 $2S/L=1$ 與 $2S/L=2$ 附近，尖峰反射係數會有偏移 (shift) 的現象，由圖 5-6 及圖 5-7 可以發現，不規則波入射人工潛堤時，EEMSE 模式所得的結果亦有相同的情況，但 Miles (1981) 理論所得的主頻尖峰反射係數卻仍發生於 $2S/L=1$ 處。

比較 Kirby 和 Anton (1990) 與 Davies 和 Heathershaw (1984) 的試驗條件，除了正弦沙漣底床之波長與半餘弦人工潛堤之間距較為不同外，其他因素則為相近或相同，故比較圖 5-3、圖 5-6 及圖 5-7 的結果，人工潛堤在主頻共振之尖峰反射係數雖減少的現象，但會有高諧波共振產生，且共振帶寬較正弦沙漣底床增加，對於來擊的波浪，不管其示性週期為何，均有某種程度的反射作用，若將人工潛堤應用於海岸保護工程時，應與正弦沙漣底床同樣，具備海岸保護的功用。

第六章 結論與建議

6.1 結論

1. 長波理論由於包含輻射傳輸、斜坡傳輸及寬度傳輸等形狀傳輸因子的效應，故計算波浪通過梯形潛堤之反射係數與透射係數時，能符合能量通率守恆的物理現象，其計算結果比 Miles (1981) 的理論更為合理，但受於假設的限制，這個方法僅能適用線性長波，且由於考慮斜坡傳輸的影響，故僅能計算梯形潛堤的反射係數及透射係數。
2. Miles (1981) 理論計算潛堤之反射係數及透射係數時，雖然無法滿足能量守恆等物理現象，但其計算結果尚屬合理，應在可以接受的範圍內，且 Miles (1981) 理論較不受限制，能適用於任何形狀的潛堤，理論上，只需知道底床變動函數，即能輕易求得反射係數及透射係數，對工程應用上較為方便。
3. EEMSE 數值模式，由於慮底床擾動因素的影響，對於波浪通過單一正弦沙漣底床，或是複合式正弦沙漣底床，其反射係數的計算結果，與試驗結果均有相當合理的吻合程度，且對共振頻率的帶寬，具有良好的計算結果，故以 EEMSE 當作本研究的數值模式，計算不規則波通過各種系列潛堤的布拉格反射現象，應該具有一定的適用性。
4. 對不規波的計算模式，採用混合能譜分割的方法，兼具等頻率分割與等能量分割的優點，對於波浪能量消散方面，同時考慮非線性淺化效應、碎波能量消散效應及非線性三波交互作用效應，對於計算不規則波浪，通過各種系列潛堤的反射係數，應有一定程度的可靠性。
5. 利用 Goda 和 Suzuki (1976) 的能量方法，求出的不規則波布拉格

反射係數，其反射係數的分佈型態，與規則波之布拉格反射係數相似，但由於不規則波譜是由各種不同頻率之成份波組成，各個成份波之能量不如規則波來得集中，造成尖峰反射係數較規則波小，而共振區之帶寬變寬的現象。

6. 由於缺乏不規則波之試驗數據，及相關數值計算的文獻結果可以驗證，本文以 EEMSE 模式之計算結果與 Miles (1981) 理論及傳統緩坡之結果比較。由於 Miles (1981) 理論能夠很容易的求得沙漣底床或人工潛堤的反射係數，在工程應用上較為方便，且可當作一般研究的佐證，但由計算的結果發現，本文 EEMSE 模式所得的反射係數，不管在共振帶寬，或尖峰共振頻率的偏移，應較 Miles (1981) 理論的結果更能符合實際的物理現象。
7. 由布拉格反射係數的分佈情形來看，當沙漣底床或人工潛堤應用於實際海域時，對於紊亂的不規則波浪，均具有一定的反射效果，雖然其尖峰反射係數不如單一規則波的反射係數，但其共振帶寬明顯加大，即對任何來襲的波浪，均有一定的削波作用，能夠達到保護海岸的目的。

6.2 建議

1. 為了驗證本文採用的 EEMSE 模式的可靠性，本年度在潛堤的型式上，選擇文獻中對規則波有試驗的正弦沙漣底床與半餘弦人工潛堤，作為研究的對象，但這兩種型式的潛堤，在實際應用上均不方便，故建議明年可選擇較容易應用的潛堤型式，如矩形或梯形潛堤，繼續從事相關的研究，如此才可應用於實際的海域，達到保護海岸的目的。
2. 由於目前的文獻中，對於不規則波浪方面，並沒有布拉格共振的相關試驗，由 EEMSE 模式所得的數值結果，僅能與 Miles (1981) 的理論，或規則波所作的試驗結果加以比較，對於實際的布拉格反射

係數分佈情形，仍無法確實得知，故若經費許可，建議於明年的研究中，加入水工模型試驗來驗證數值模式計算的結果，如此才可應用於實際的潛堤設計。

參 考 文 獻

1. Bailard, J.A., Deveries, J.W., Kirby J.T. and Guza, R.T., "Bragg Reflection Breakwater : A New Shore Protection Method," *Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, pp. 1702-1715 (1990).
2. Bailard, J.A., Deveries J.W. and Kirby, J.T., "Considerations in Using Bragg Reflection for Strom Eroision Protection," *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 118, pp. 62-74 (1992).
3. Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M., "Energy Loss and Set-up due to Breaking in Random Waves," *Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Hamburg, Vol. 1, pp. 569-578 (1978).
4. Belzons, M., Rey, V. and Guazzelli, E., "Subharmonic Bragg Resonance for Surface Water Waves," *Europhysics Letters*, Vol. 16, No.2, pp. 189-194 (1991).
5. Berkhoff, J.C.W., "Computation of Combined Refraction-Diffracton," *Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Vancouver, Vol. 1, pp. 705-720 (1972).
6. Booij, N., "A Note on the Accuracy of Mild-Slope Equation," *Coastal Engineering*, Vol. 7, pp. 191-203 (1983).
7. Bouws, E., Günther, H., Rosenthal, W., Vincent, C. L., "Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water. Part 2: Statistical Relations between Shape and Growth Stage," *Dt. Hydrogr. Z.* 40 (1987).
8. Bretschneider , C.L., "Significant Waves and Wave Spectrum," *Ocean Industry*, pp. 40-46 (1968).
9. Chamberlain, P.G. and Poter, D., "The Modified Mild-slope Equation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 291, pp. 393-407 (1995).
10. Chang, H.K., "A Three-point method for separating of incident and reflected waves over a sloping bed," *China Ocean Engineering*, Vol. 16 pp.

499-511 (2002)

11. Cho, Y.S. and Lee, C., “Resonant Reflection of Waves over Sinusoidally Varying Topographies,” *Journal of Coastal Research*, Vol. 16, No. 3, pp.870-876 (2000).
12. Davies, A.G. and Heathershaw, A.D., “Surface Wave Propagation over Sinusoidally Varying Topography,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 144, pp. 419-443 (1984).
13. Davies, A.G., Guazzelli, E. and Belzons, M., “The Propagation over Sinusoidally Varying Topography,” *Physical Fluids*, Vol. 144, A1 (8), pp. 1331-1340 (1989).
14. Dolan, T.J., Wave Mechanics for the Formation of Multiple Longshore Bars with Emphasis on the Chesapeake Bay, Master thesis, Department of Civil Engineering, University of Delaware (1983).
15. Eldeberky, Y., *Nonlinear Transformation of Wave Spectra in the Nearshore Zone*, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands (1996).
16. Eldeberky, Y. and Battjes, J.A., “Parameterization of Triad Interactions in Wave Energy Models,” *Proceedings of Coastal Dynamics Conference '95*, Gdansk, Poland, pp. 140-148 (1995).
17. Goda, Y., “A Comparative Review on the Functional forms of Directional Wave Spectrum,” *Coastal Engineering Journal*, Vol. 41(1), pp. 1-20 (1999).
18. Goda, Y. and Nagai, K., “Report of the Port and Harbour,” *Res. Inst.*, No. 61, pp.64 (1968)
19. Goda, Y. and Suzuki, Y., “Estimation of incident and reflected waves in random wave experiment,” *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Hawaii, pp. 628-650 (1976).
20. Guazzelli, E., Rey, V. and Belzons, M., “Higher-Order Bragg Reflection of Gravity Surface Waves by Periodic Beds,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 245, pp. 301-317 (1992).
21. Hsu, T.W. and Wen, C.C., “A Model Equation Extended to Account for

- Rapidly Varying Topography,” *Ocean Engineering*, Vol. 28, pp. 1479-1498 (2001a)
22. Hsu, T.W., and Wen, C.C., “On Radiation Boundary Conditions and Wave Transformation across the Surf Zone,” *China Ocean Engineering*, Vol. 15, pp. 405-416 (2001b).
 23. Hsu, T.W., Chang, H.K, Tsai, L.H., “Bragg reflection of waves by different shapes of artificial bars,” *China Ocean Engineering*, Vol. 16(3), pp. 21-30 (2002).
 24. Hsu, T.W., Tsai, L.H., Huang, Y.T., “Bragg Scattering of Water Waves by Multiply Composite Artificial Bars,” *Coastal Engineering Journal*, Vol. 45(2), pp. 235-253 (2003).
 25. Isobe, M., “A Parabolic Equation Model for Transformation of Irregular Waves due to Refraction, Diffraction and Breaking,” *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 30, pp. 33-47 (1987).
 26. Kirby, J.T., “A General Wave Equation for Wave over Rippled Beds,” *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 162, pp. 171-186 (1986).
 27. Kirby, J.T. and Anton, J.P., “Bragg Reflection of Waves by Artificial Bars,” *Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, pp. 757-768 (1990).
 28. Lee, C., Kim, G., Suh, K.D., “Extended mild-slope equation for random waves” *Coastal Engineering*, Vol. 48, pp. 277-287 (2003).
 29. Longuet-Higgins, M.S., “On the Statistical Distributions of the Height of Sea Waves,” *Jour. Marine Res.*, Vol. IX, No. C5, pp. 245-266 (1952).
 30. Madsen, P.A. and Sørensen, O.R. , “Bound Waves and Triad Interactions in Shallow Water,” *Ocean Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 359-388 (1993).
 31. Mansard, E.P.D. and Funke, E.R., “The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method”, *Proceeding of the 17th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 154-172 (1980).
 32. Massel, S.R., “Extended Refraction-Diffraction Equation for Surface

- Waves,” *Coastal Engineering*, Vol. 19, pp. 97-126 (1993).
33. Mattioli, F., “Resonant reflection of surface waves by non-sinusoidal bottom undulations,” *Applied Ocean Research*, Vol. 13, pp. 43-53 (1991).
 34. McCowan, J., “On the Highest Wave of Permanent Type,” *Philos. Mag. Edinburgh*, 38(5), pp. 351-358 (1894).
 35. Mei, C.C., “*The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*,” World Scientific, 2nd ed., pp. 135 (1983).
 36. Mei, C.C., “Resonance Reflection of Surface Waves by a Periodic Sandbars,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 152, pp. 315-335 (1985).
 37. Mei, C. C., Hara, T. and Naciri, M., “Note on Bragg Scattering of Water Waves by Parallel Bars on the Seabed,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 186, pp. 147-162 (1988).
 38. Miles, J.W., “Oblique Surface-wave Diffraction by a Cylindrical Obstacle,” *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Vol. 6, pp. 121-123 (1981).
 39. O’Hare, T.J. and Davies, A.G., “A Comparison of Two Models for Surface-wave Propagation over Rapidly Topography,” *Applied Ocean Research*, Vol. 15, pp. 1-11 (1993).
 40. Porter, D. and Staziker, D.J., “Extensions of the Mild-Slope Equation,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 300, pp. 367-382 (1995).
 41. Porter, R. and Porte, D., “Scattered and Free Waves over Periodic Beds,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 483, pp. 129-163 (2003).
 42. Radder, A.C., “On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 95, No. 1, pp. 159-176 (1979).
 43. Short, A.D., “Multiple Offshore Bars and Standing Waves,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, pp. 3838-3840 (1975).
 44. Shuto, N., “Nonlinear Long Waves in a Channel of Variable Section,” *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 17, pp. 1-12 (1974).
 45. Suh, K.D., Lee, C. and Part, W.S., “Time-Dependent Equations for Wave Propagation on Rapidly Varying Topography,” *Coastal Engineering*, Vol.

- 32, pp. 91-117 (1997).
46. Webster, W.C. and Wehausen, J.V., "Bragg Scattering of Water Waves by Green-Naghdi Theory," *Z angew Math Phys* 46 Special Issue, pp.S566-S583 (1995).
 47. Wehausen, J.V. and Laitone, E.V., *Surface Waves, Encyclopedia of Physics*, Springer-Verlag, Berlin, Vol. 9, pp.469 ff (1960).
 48. Zhang, L, Kim, M.H., Zhang, J. and Edge, B.L., "Hybrid Model for Bragg Scattering of Water Waves by Steep Multiply-sinusoidal Bars," *Journal of Coastal Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 486-495 (1999).
 49. 陳陽益、湯麟武,「波床底床上規則前進重力波之解析」,第十二屆海洋工程研討會論文集,台灣台北,第 270-305 頁 (1990)。
 50. 陳陽益,「波形底床上規則重力波之解析(2)」,港灣技術第六期,第 55-83 頁 (1991a)。
 51. 陳陽益,「自由表面規則前進重力波傳遞於波形底床上共振現象」,第十五屆全國力學會議論文集,台灣台南,第 289-296 頁 (1991b)。
 52. 陳陽益,「規則前進重力波傳遞於波形底床上」,港灣技術第七期,第 17-47 頁 (1992)。
 53. 張憲國,「人工沙洲對波浪反射係數之影響」,港灣技術,第 12 卷,第 23-38 頁 (1997)。
 54. 張憲國、許泰文、李逸信,「波浪通過人工沙洲之試驗研究」,第十九屆海洋工程研討會論文集,台灣台中,第 242-249 頁 (1997)。
 55. 岳景雲、曹登皓、陳丙奇,「波浪通過系列潛堤反射係數之研究」,第八屆全國海岸工程學術討論會暨 1997 年海峽兩岸港口及海岸開發研討會論文集 (下),中國北京,第 683-690 頁 (1997)。
 56. 岳景雲、曹登皓、陳丙奇,「波浪斜向入射正方形複列潛堤反射係數之研究」,第二十屆海洋工程研討會論文集,台灣基隆,第 265-272 頁 (1998)。
 57. 岳景雲、曹登皓、江天授、李厚慶,「波浪斜向入射斜坡底床上不透

- 水潛堤之研究」，第二十一屆海洋工程研討會論文集，台灣新竹，第 191-197 頁 (1999)。
58. 郭金棟、陳文俊、陳國書，「雙列潛堤對海灘防治效益之研究」，第二十一屆海洋工程研討會論文集，台灣新竹，第 307-313 頁 (1999)。
59. 岳景雲、曹登皓、翁文凱，「波浪通過不透水雙列潛堤之研究」，2000 兩岸港口及海岸開發研討會論文集，台灣新竹，第 112-118 頁 (2000)。
60. 陳陽益、郭少谷，「三維波形底床上前進波列之傳遞 I」，第二十二屆海洋工程研討會論文集，台灣高雄，第 99-18 頁 (2000)。

附錄一 期中報告審查意見處理情形

時間：中華民國九十四年七月六日(星期三)上午十點十分

地點：交通部運輸研究所港灣技術中心二樓簡報室

主持人：邱永芳 主任

交通部運輸研究所合作研究計畫

■期中□期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：系列潛堤應用於海岸保護之研究

執行單位：國立成功大學水利及海洋工程學系

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
林朝福委員： 一、混合分割之結果能否反映在尖峰頻率附近的分割數較密，如何決定代表頻率。	一、混合分割的方式，在改善等能量分割時，在高頻部分其中心代表頻率所代表的範圍太大，配合 JONSWAP 波譜，混合分割時，在尖峰頻率附近的分割密度，較高頻時要來的密，以 Goda (1999) 提議的波譜，由輸入之 $T_{1/3}$ 可得代表頻率 $\frac{1}{f_p} = \frac{T_{1/3}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}}$ $\gamma = 3.3$	一、說明完整。
二、如何整合成分譜計算 R, T 係數	二、本計畫以 Goda 和 Suzuki (1976) 之方法求取反射係數， $R = \sqrt{E_R / E_I}$ ， E_R 及 E_I 分別為入射波及反射波總能量。	二、說明完整。
三、波譜分割後，其成份譜的能量消散如何處理，處理方式應能反應實際不規則波	三、由於採用線性疊加的方式，故能量消散是對各成分波分別處理。	三、說明完整。

之能量損失。		
李忠藩委員： 一、梯型潛堤配置二，堤前與堤後的水深不同時，本研究所用的長波理論，並不符合能量守恆的基本物理理論，則所得結果不可信，請說明可原因及其應用上的限制。 二、台灣的海岸，波浪主要為颱風浪、東北季風浪與西南季風浪三種，則如何將本研究的結果，同時可以涵蓋此三種不同不規則波，設置一系列的潛堤呢？	一、配置二雖然無法滿足 $R^2 + \hat{T}^2 = 1$，但滿足能量通率 (EC_g) 守恆，表示能符合物理現象，報告 3.2 節最後有詳細說明。 二、本計畫共為四年，本年度的研究內容，尚未包含現場的情況，在往後的研究中，會將這些情況納入考慮的內容。	一、說明完整。 二、說明完整。
莊甲子委員： 一、本研究為四年計畫，故第二至四年之研究項目概述建議應加補充。 二、梯形潛堤(表 3.1)正弦沙漣底床(表 3.3)之配置圖宜加補充說明。 三、第 3.2 節長波理論驗證中，部份結論與數據由來宜加引證(配置一及配置二之結果說明)。 四、第 3.3.2 節複合式沙漣底床的定義及圖示宜加補充。 五、波譜分割與合成(第	一、依委員意見，於期末報告中加入。 二、梯形潛堤配置圖已示於圖 2-2，依委員意見，於期末報告中加入沙漣底床示意圖。 三、表 3-2 之結果，是依據 2.2 長波理論計算求出。 四、複合沙漣底床如式(3-3)，依委員意見，於期末報告中加入示意圖。 五、由分割的方式及分割的	一、期末報告須改進。 二、期末報告須改進。 三、說明完整。 四、期末報告須改進。 五、說明完整。

4.3 節)採用混合分割方式，只為提高計算效率似較不妥，宜以精確性與實際性為主要考量。 六、能量消散係數(p.43)能否線性相加 ($f_i = f_{si} + f_{di} + f_{nl3i}$)，建請再予考量。	成分波的數目，本研究可符合波譜分的精確性。 六、能量消散係數是依據 Isobe (1987) 之建議，依據文獻所示，線性相加的處理方式，應屬可行的方法。	六、說明符合問題。
岳景雲委員： 一、文獻回顧、前人研究方法資料蒐集很多、整理詳細，值得肯定。少部份遺漏部份請補足。 二、p7 方程式 (1-3) 與 (1-4) 同請更正。 三、p19 Φ 符號說明表？ 四、p43 緩“波”=> 坡。 五、長波理論梯形適用，矩形不適用原因？ 六、模式可否用在平面(三維)？ 七、“透水”系列潛堤是否可行？	一、依委員意見，再詳細核對相關參考文獻。 二、依委員意見，於期末報告修正。 三、依委員意見，於期末報告處理。 四、於期末報告中修正。 五、長波理論一開始即假設潛堤前後有坡度，如此才可由各種轉換函數求得反射係數，故僅能適用梯形潛堤。 六、緩坡方程式可適用平面三維。 七、緩坡方程式可以計算透水潛堤，本計畫僅就不透水潛堤作探討。	一、期末報告須改進。 二、期末報告須改進。 三、期末報告須改進。 四、期末報告須改進。 五、說明完整。 六、說明完整。 七、說明完整。
邱永芳委員： 一、本計畫應著重在海岸保護，應討論系列潛堤對海岸線的影響特性。	一、本計畫共分四年，在後續幾年的研究中，會將結果與現場結合，達到海岸保護的目的。	一、說明完整。

二、系列潛堤應用在陡坡地形之保護上其功能如何，應列為研究重點。 三、系列潛堤與其他保護工法之優缺點或適用性應有研究。	二、本計畫僅針對緩坡進行研究，陡坡的機制與緩坡，基本上有所不同，可由其他計畫從事研究。 三、潛堤與其他保護工法之優缺點已於 1.1 研究動機中有所說明。	二、說明完整。 三、說明完整。
何良勝委員： 一、建議未來以台灣地區已有之潛堤案例，或適合於台灣地區可用之潛堤型式，並配合已有之波浪條件作為測試。 二、建議未來計算不規則波計算時，以有否考慮非線性三波交互作用之情況區分，分別計算測試。	一、依委員建議，後續幾年的研究中，會將其列入考量。 二、依委員建議處理。	一、說明完整。 二、說明完整。
林柏青委員： 一、遺漏字或錯別字 1.第 3 頁第 9 行：進一步的研究。 2.第 7 頁第 11 行：底床沙漣週波數。 3.第 25 頁第 11 行：radiation transfer。 4.第 25 頁第 14 行：簡單比別。 5.第 3 頁第 1 行：並不一定有沙漣存在，或存在的沙漣。 6.第 31 頁第 11 行：列潛堤不但可以。 7.第 51 頁 1.之第 2 行：符合$\oplus$量守恆。	一、感謝委員指正，於期末報告中予以訂正。	一、期末報告須改進。

風浪在不平衡輸砂造成的沿岸漂沙、海岸侵蝕，則以潛堤代替人工岬灣的岬頭(headland)，即可以達到定沙效又可以美化環境。 四、波浪越過離岸潛堤進入堤與海岸間水域必然須由兩堤之間縫隙流出，此時會產生較強離岸流，而帶出去的漂沙可能受阻於潛堤無法帶回海岸沙灘區，既然本研究目的在利用EEMSE 找出最佳防護工法，使潛堤設計能達到防災禦浪及親水海岸的效果，本模式是否能同時探討潛堤佈置引起的流場及漂沙作用，而非只討論其反射率及透射率。	四、EEMSE 模式主要是計算波場，再以波場的計算結果，利用 Horikawa (1988) 的流場模式，可求得流場情形，本計畫僅針對波場作為研究。	四、說明完整。
--	---	----------------

附錄二 期末報告審查意見處理情形

時間：中華民國九十四年十一月十日(星期四)上午十一點廿十分

地點：交通部運輸研究所港灣技術中心二樓簡報室

主持人：邱永芳 主任

交通部運輸研究所合作研究計畫

□期中■期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：系列潛堤應用於海岸保護之研究

執行單位：國立成功大學水利及海洋工程學系

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
岳景雲委員： 一、建議加“符號表”。 二、是否考慮進行“水工模型試驗”與數值計算結果驗證。 三、針對矩形、梯形系列潛堤加以計算，較符合實際。 四、Hsu 等人 (2004) 參考文獻請補充或更正。	一、依委員之意見，於定稿中加入“符號表”。 二、若經費許可，預計於明年加入水工模型試驗來驗證數值模式計算的結果。 三、本年度僅考慮正弦沙漣底床等地形，明年度會針對矩形系列潛堤加以研究。 四、將於定稿中予以更正。	一、於定稿中改進。 二、說明完整。 三、說明完整。 四、於定稿中改進。
林朝福委員： 一、針對圖 3-8 至圖 3-10，Miles 理論與 EEMSE 所得結果，建議將兩者再加以比較說明。 二、波譜分割採用 (4-27) 式分割，針對該式能否反應在主頻附近分割較	一、依委員意見，於定稿中加以說明 二、依委員意見，於定稿中增加說明。	一、於定稿中改進。 二、於定稿中改進。

密，在低頻及高頻分割較疏，請再加說明。 三、建議在圖 5-2 至圖 5-4，加入示性規則波之計算圖形，方便與不規則波比較。	三、規則波之計算結果已示於期末報告中之圖 3-4 至圖 3-6。	三、完整說明。
莊甲子委員： 一、文獻回顧資料蒐集詳盡。 二、工程應用上半餘弦形式較難建造，如改採梯形形式其應用性將較佳。 三、圖 3-1 中原點座標宜標示出將較明瞭。 四、第三章中各型潛堤配置圖示宜加補充。 五、部份透射係數計算結果大於 1 所代表之物理意義宜加補充說明。 六、結論 6 中提到 Miles (1981) 理論在工程應用上較為方便，而 EEMSE 模式所得結果能符合物理現象，後續研究如何加以定位或採選建議能加以說明。	一、感謝委員的肯定。 二、本年度僅考慮簡單的底床地形，明年度會考慮較實用之矩形或梯形人工潛堤。 三、將於定稿中加以修正。 四、已遵照委員意見辦理。 五、除於定稿中加以說明外，並加上能量通率 EC_g 的表示方式，使呈現之結果更能符合物理現象。 六、依委員意見修改。	一、感謝肯定。 二、考慮建議案。 三、於定稿中改進。 四、於定稿中改進。 五、於定稿中改進。 六、於定稿中改進。
李忠潘委員： 一、已同時考慮接近實際物理世界的不規則波，且進一步以複合式的潛堤來因應，使理論應用的可行性	一、謝謝委員的肯定。	一、謝謝肯定。

大增。 二、請修正“能量守恆”與否僅以 $R^2 + T^2$ 的標準來衡量的觀點，如 p.36-37 已用 EC_g 來考量。故 p.36 及 37 頁內相關文字與表格，請改用 EC_g 來表示。	二、依委員意見，於定稿中增加能量通率 EC_g 的說明。	二、於定稿中改進。
邱永芳委員： 一、建議著重在海岸保護之應用說明。 二、建議加強說明系列潛堤之優點與潛礁之差別。 三、未來如何與生態結合應加強說明其相關性。	一、本計畫先從基礎研究及學理分析出發，待學理分析有具體成果，則進一步應用於實際海域之布拉格共振效應，並對海岸保護效進行可行評估。 二、系列潛堤不會造成波浪之碎波，旨在創造共振現象而造成一道水牆，用以阻擋外海之入射波浪，因此降低透射波之波高，使近岸波高變小而保護海岸；潛礁則使外海波浪提前碎波而消滅波能，兩者在應用上之學理基礎不同。 三、由於系列潛堤沈沒於水底，故能聚苔而誘使浮游生物聚集，對生態復育應有正面之效果。未來使用時可以考慮增加潛堤的粗糙度或孔隙率，使潛堤更能提供底棲動物生存之環境。	一、完整說明。 二、完整說明。 三、完整說明。

四、系列潛堤構置之經濟可行性與工程可行性應有說明。	四、系列潛堤之工程材料為混凝土之塊狀結構物，如長方形、三角形或半圓形等，故材料和模板製作非常簡單，工程施作僅依設計水深和排列方式於工作船施放，故經濟和工程可行性都沒有問題，對船隻之航行也不會造成任何不便。	四、完整說明。
何良勝委員： 一、研究結果正確且符合預期工作成果。 二、第六章之結論，建議修正為「結論與建議」，並增加說明未來可能研究之議題及可能改進之方法。 三、不論是潛型式或排列方式或底床沙漣型式，應考量實務及可能施行之措施，故建議未來之研究應儘量依此方向進行，以便未來可提供適用之配置方案。	一、感謝委員的肯定。 二、依照委員意見辦理。 三、感謝委員的建議，後續研究會朝此方向進行。	一、感謝委員的肯定。 二、於期末定搞改進。 三、接受建議。
林柏青委員： 一、本計畫為四年計畫，第一年為資料蒐集與模式發展；第二年將不規則波模式應用在複合式系列潛堤，探討不同配置的結果；第三年針對特定海域進行模式演算；第四年則討論整體研究成果。根據上	一、後續計畫預計會應用在實際海域，會將波浪斜向入射的情形，納入研究的範圍；若經費許可，明年將加入水工模型試驗來驗證數值模式計算的結果。	一、完整說明。

次期中報告審查結果，本計畫好像只考慮複合式系列潛堤對正向入射波浪的反射效果，與實際海域最可能遭遇的斜向入射波浪效應有些差距，是否能一併列考量；另外本計畫只作模式演練，如果不規則波在複合式系列潛堤的應用是一種新的模式，如果經費許可，是不是應該同時在在水工模型實驗上進行驗證，然後才能推廣應用於實際現場施工設計參考。 二、p60 第三段第三行應是比較圖 3-4 至圖 3-6 與圖 5-2 至圖 5-4。 三、離岸堤的缺點是工程費，施工不易，堤址易沖刷，維護費高，此種系列離岸潛堤是否會更嚴重，花費更高，同時增加岸漁船作業航行或水上休閒活動的危險性。 四、考量台灣實際海域波浪狀況，是否能考量交叉性排列的可行性及其反射效果。	二、感謝委員指正，將在定稿中予以更正。 三、潛堤設置位置比離岸離更遠離岸線，水深較深，且沒入海中，只要在建構時，考量其堤頂高度，並利用浮標標示其位置，對於海面上從事水上活動及漁船作業應不致造成危險。 四、交叉性排列的潛堤其機制更為複雜，應可作為其他研究的議題；本計畫後續研究中，會考慮斜向入射的波浪，使其更符合實際海域情況。	二、於期末定稿改進。 三、完整說明。 四、完整說明。
--	---	---

附錄三 期中報告簡報資料

交通部運輸研究所

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (1/4)

On the application of a series of submerged breakwaters to coastal protection (1/4)

計畫編號: MOTC-IOT-94-H2DB003

期中簡報

簡報人：張憲國 教授



計畫工作團隊

主辦單位 交通部運輸研究所港灣技術研究中心		
類別	姓名	主要工作
主任	邱永芳	督導計畫進行及報告審議
副主任	李豐博	督導計畫進行及報告審議
科長	何良勝	督導計畫進行及報告審議
承辦人	蔡立宏	主辦及協助計畫進行
執行單位 國立成功大學水利及海洋工程學系		
類別	姓名	相關經歷與專長
主持人	許泰文	成功大學水利及海洋工程學系教授
協同主持人	張憲國	交通大學土木工程學系副教授
兼任助理	王順寬	成功大學水利及海洋工程所博士候選人
兼任助理	張人懿	成功大學水利及海洋工程所碩士

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

規則波之布拉格反射(1/7) – Miles理論

- Kirby 和 Anton (1990) 解析線性波在微小水深變化 ($O(k\delta) \ll 1$) 的運動現象，在EMSE模式中考慮一維問題，並忽略微小底床變化造成波速與群波波速乘積的變化 ($\nabla_h C C_g = 0$)，利用拉普拉斯轉換解析出反射率及透射率，其表示式為

$$\hat{R} = -2ik\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) e^{2ikx} dx \quad (1)$$

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

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

規則波之布拉格反射(2/7) – Mei 理論

- 若堤面為直立壁，堤址水深呈現不連續，則依照 Mei (1983) 所提出的理論，反射係數與透射係數可化為

$$R_{Mei} = \left| \frac{-(1-s_{12})(1+s_{32})e^{-ik_2B_2} + (1+s_{12})(1-s_{32})e^{ik_2B_2}}{(1+s_{12})(1+s_{32})e^{-ik_2B_2} - (1-s_{12})(1-s_{32})e^{ik_2B_2}} \right| \quad (9)$$

$$T_{Mei} = \left| \frac{4s_{12}}{(1+s_{12})(1+s_{32})e^{-ik_2B_2} - (1-s_{12})(1-s_{32})e^{ik_2B_2}} \right| \quad (10)$$

其中 $s_{ij} = k_i h_i / k_j h_j$ ($i, j=1, 2, 3$) 代表所對應水深下的係數

交通部運輸研究所

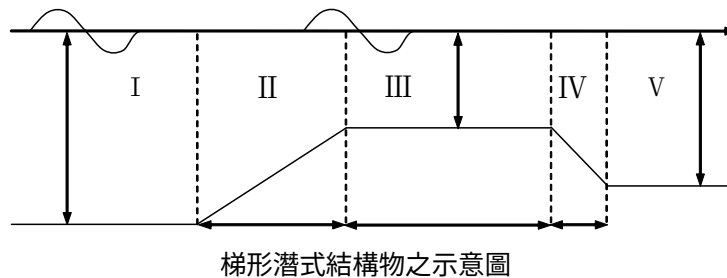
期中簡報

報告日期：2005/07/06

規則波之布拉格反射(3/7) – 長波理論

- 考慮波浪於梯形潛堤的反射率情形如下圖所示，控制方程式由長波理論推得。 B_2 則代表堤頂寬度，而 h_1 、 h_2 、 h_3 則分別代表區域 I、III、V 的水深。一維線性運動方程式可以下式表示

$$gh \frac{d^2 \eta}{dx^2} + g \frac{dh}{dx} \frac{d\eta}{dx} \pm \sigma^2 \eta = 0 \quad B_2 \quad L_4 \quad (5)$$



交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

規則波之布拉格反射(4/7) – 長波理論

- 基於**能量以及動量守恆**原理，水位振幅及其導數，在每個區域間的交界都必須是連續的，各交接面之控制方程式以**矩陣方式**描述表示如下

$$\begin{pmatrix} 1 \\ R \end{pmatrix} = H_i S_2 W_3 S_4 H_t T = \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{21} \end{pmatrix} T \quad (6)$$

其中 H_i 以及 H_t 稱為**輻射轉換** (adiation transfer) 表示波浪輻射至無窮水平底床處。 W_3 為**寬度轉換** (width transfer) 代表波浪傳遞於有限的水平區域。 S_2 及 S_4 則代表波浪於斜坡上的反射及透射，故稱其為**斜坡轉換** (slope transfer)

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

規則波之布拉格反射(5/7) – 長波理論

- 波浪通過梯形潛堤，其反射波與透射波，為一系列**形狀轉換 (shape transfer)**的結果。在各矩陣相乘後，式 (6) 最後得到一 2×1 矩陣，且透射係數與反射係數，可以簡單地以下式來表示

$$T = \frac{1}{c_{11}} \quad (7)$$

$$R = \frac{c_{21}}{c_{11}} \quad (8)$$

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

規則波之布拉格反射(6/7) – EEMSE數值模式

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

$$-\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \Phi) + (k^2 CC_g - \omega^2 + f_1 g \nabla_h^2 h + f_2 g k |\nabla_h h|^2) \Phi = 0 \quad (11)$$

式中

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

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

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

規則波之布拉格反射(7/7) – EEMSE數值模式

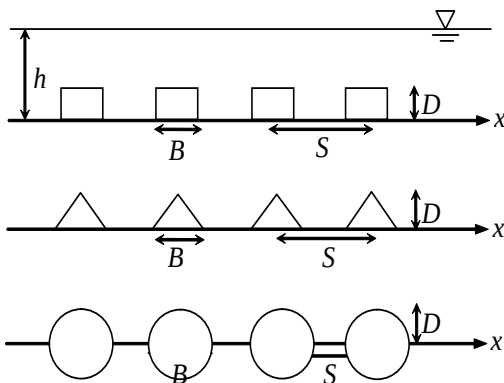
- Hsu 和 Wen (2001) 導入一緩慢時間變量 $\bar{t} = \varepsilon t$ 則波浪流速勢函數可表示為

$$\Phi(x, y, t) = \Psi(x, y, \bar{t})e^{-i\omega t} \quad (12)$$

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

$$-2\omega i \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \Psi) + (k^2 CC_g + f_1 g \nabla_h^2 h + f_2 g k |\nabla_h h|^2) \Psi = 0 \quad (13)$$

規則波理論應用與驗證(1/4) – Miles理論應用



不同形狀等間距系列潛堤示意圖

矩形型式

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

三角形型式

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

半餘弦型式

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

規則波理論應用與驗證(2/4) – 長波理論驗證

單一梯形潛堤配置情形

方 案	h_1 (m)	L_2 (m)	h_2 (m)	B_2 (m)	L_4 (m)	h_3 (m)
配置一	2.4	3.2	0.8	4.0	2.4	2.4
配置二	2.4	3.2	0.8	4.0	2.4	1.6

反射率及透射率比較表

作 者	配 置 一			配 置 二		
	R	T	$R^2 + T^2$	R	T	$R^2 + T^2$
長波理論	0.4724	0.8814	1.0000	0.3967	1.0159	1.1894
Mei (1983)	0.4113	0.9115	1.0000	0.3449	1.0388	1.1980
Miles (1981)	0.5227	1.0092	1.2917	0.3579	1.0062	1.1132

交通部運輸研究所

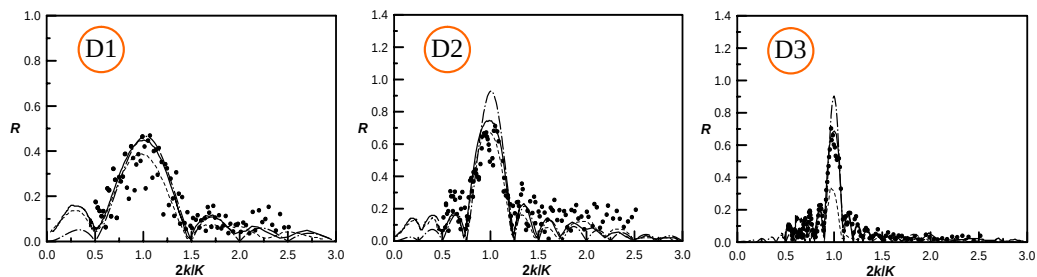
期中簡報

報告日期：2005/07/06

規則波理論應用與驗證(3/4) – EEMSE驗證

波浪通過正弦沙漣底床試驗條件 (Davies和 Heathershaw, 1984)

試驗配置	(cm)	(K) (cm)	N	$\frac{cm}{cm^{-1}}$ (cm)
D1	5.0	100 (0.0628)	2	15.6
D2	5.0	100 (0.0628)	4	15.6
D3	5.0	100 (0.0628)	10	31.3



波浪通過正弦沙漣底床反射率分佈

交通部運輸研究所

期中簡報

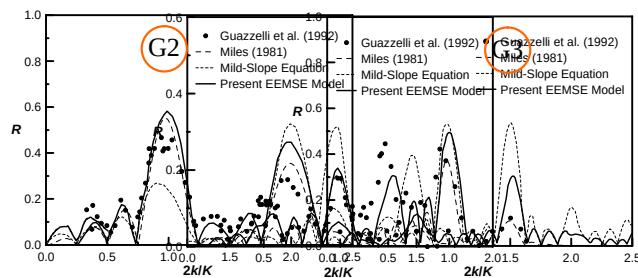
報告日期：2005/07/06

規則波理論應用與驗證(4/4) – EEMSE驗證

波浪通過複合式沙漣底床試驗條件 (Guazzelli 等人, 1992)

試驗配置	(cm)	(K) (cm)	$\frac{cm^{-1}}{m}$	(cm)	(cm)
G1	1.0	12 (0.52)	2	48	4
G2	0.5	6 (1.05)	1.5	48	4
G3	1.0	6 (1.05)	1.5	48	4

G1



波浪通過複合式沙漣底床反射率分佈圖

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

不規則波之緩坡方程式(1/5) – 控制方程式

- 以波譜分割法處理不規則波浪問題，將不規則波視為由無數個單一成份波組成，分別進行計算後再予以合成不規則波之變形，對於單一成份波之計算，以EEMSE作為控制方程式，並加入能量消散係數，且引用 Radder (1979) 之尺度因子，則得計算單一成份波之控制方程式

$$-\frac{2\omega_i}{(CC_g)_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} = \nabla_h^2 \phi_i + (k_c^2)_i \phi_i \quad (14)$$

其中

$$(k_c^2)_i = k_i^2 (1 + if_i) - \frac{\nabla_h^2 \sqrt{(CC_g)_i}}{\sqrt{(CC_g)_i}} + \frac{[f_1 g \nabla_h^2 h + f_2 (\nabla_h h)^2 g k]}{(CC_g)_i} \quad (15)$$

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

不規則波之緩坡方程式(2/5) – 非線性淺化效應

- 關於波浪淺化效應時波高所需的修正量，依照能量通率的觀點，結合Shuto (1974) 提出的非線性淺化波高公式，推導出波浪的淺化修正量。如下所示

$$f_{si} = \begin{cases} 0 & \text{for } U_r \leq 30 \\ \frac{1}{k_i h} \left(-\frac{4}{7} + s_1 + s_2 \right) \tan \beta & \text{for } 30 < U_r \leq 50 \\ \frac{1}{k_i h} \left(-\frac{3\sqrt{U_r} - 10\sqrt{3}}{1.5\sqrt{U_r} - 2\sqrt{3}} + s_1 + s_2 \right) \tan \beta & \text{for } U_r > 50 \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{式中 } s_1 = \frac{k_{0i} h - h^2 (k_i^2 + k_{0i}^2)}{4n_i^2 \sinh^2 k_i h} \quad s_2 = \frac{2n_i - 1}{2n_i}$$

k_{0i} 為入射波浪之週波數

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

不規則波之緩坡方程式(3/5) – 碎波能量消散效應

- 關於碎波消耗項採用 Eldeberky 和 Battjes (1995) 之理論，則碎波能量消散公式如下

$$f_{di} = -\frac{(S_{br})_i}{k_i (EC_g)_i} \quad (17)$$

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

$$\frac{H_b}{h_b} > 0.78 \quad (18)$$

H_b ：碎波波高 h_b ：碎波水深

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

不規則波之緩坡方程式(4/5) – 三波交會作用

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

$$f_{nl3i} = -\frac{(S_{nl3})_i}{k_i(EC_g)_i} \quad (19)$$

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

不規則波之緩坡方程式(5/5) – 波譜分割

- 假設不規則波之入射波波譜**具有線性波譜之特性**，每一個成分能譜各有一代表頻率。實際應用時將波譜分割成**有限個成份能譜**，分割數的多寡視要求的精度而定。
 - (1) **等頻率分割**：方法較為簡單，但各個成份波之間的**能量差距過大**。
 - (2) **等能量分割**：缺點為在高頻部分其中心代表頻率所**代表之範圍過大**，但在工程上之應用較具實用性。
 - (3) **混和分割**：本文因考慮波浪在主頻附近的能量變化較為迅速，在高頻處的能量變化較為緩慢，為**提高計算效率**，故採用混和分割方式，利用指數分佈來離散波浪頻率

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

初步結論 (1/2)

1. 長波理論由於包含輻射轉換、斜坡轉換及寬度轉換等形狀轉換因子的效應，故計算反射率與透射率時，能符合質量守恆的物理現象，但受於長波假設的限制，這個方法僅能適用線性長波，且由於考慮斜坡轉換的影響，故僅能計算梯形潛堤的反射率及透射率。
2. Miles (1981) 理論計算潛堤之反射率及透射率時，無法滿足質量守恆等物理現象，但能適用於任何形狀的潛堤，理論上，只需知道底床變動函數，即能輕易求得反射率及透射率，對工程應用上較為方便。

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

初步結論 (2/2)

3. EEMSE數值模式，由於慮底床擾動因素的影響，對於波浪通過沙漣底床，其反射率的計算結果，與試驗結果均相當合理，且對共振頻率的帶寬，有良好的計算結果，故以EEMSE當作本研究的數值模式，計算不規則波通過各種系列潛堤的布拉格反射現象，應該具有一定的適用性。
4. 對不規波的計算模式，本研究採用混合能譜分割的方法，且考慮波浪能量消散方面，同時考慮非線性淺化效應、碎波能量消散效應及非線性三波交互作用效應。

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

計畫執行進度

工作項目	第一 月	第二 月	第三 月	第四 月	第五 月	第六 月	第七 月	第八 月	第九 月	第十 月	第十一 月	第十二 月
蒐集系列潛堤海岸保護工法資料及國內外相關文獻												
波浪通過系列潛堤之布拉格反射理論分析												
波場模式之建立與驗證												
各種系列潛堤堤前反射率分析												
期中報告												
分析各種系列潛堤配置之防禦效果												
期末簡報會議												
完成報告修正與交付成果												
工作進度估計 百分比(累積數)	5	10	20	30	40	55	65	75	85	90	95	100

交通部運輸研究所

期中簡報

報告日期：2005/07/06

附錄四 期末報告簡報資料

交通部運輸研究所

系列潛堤應用於海岸保護之研究 (1/4)

On the application of a series of submerged breakwaters to coastal protection (1/4)

計畫編號: MOTC-IOT-94-H2DB003

期末簡報

簡報人：許泰文 教授



潛堤+養灘+景觀+生態



高雄縣蚵子寮海岸之侵蝕



面狀分布的礁石海岸適合西部遠淺海岸

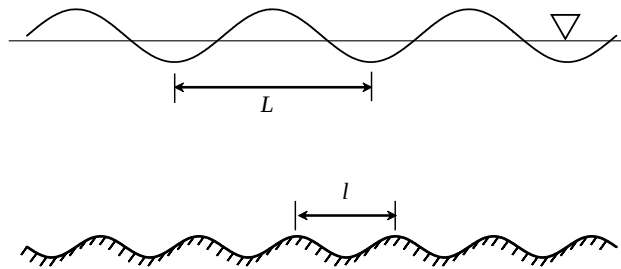
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

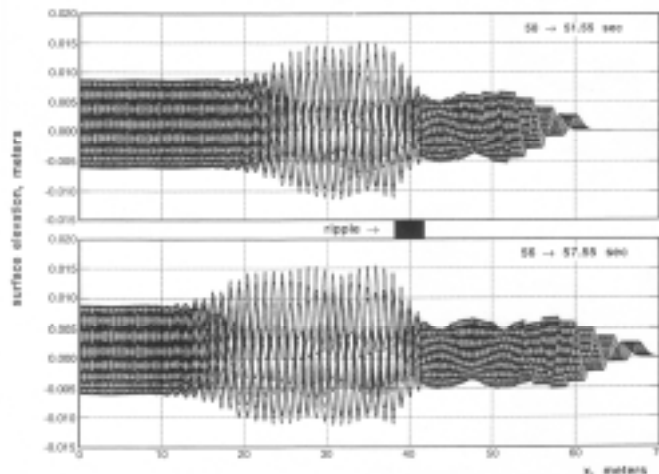
布拉格共振(1/2)

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



表面波長和正弦形沙漣波長示意圖

布拉格共振(2/2)



布拉格共振之時序列 (Webster 和 Wehausen, 1995)

研究目的

- 系列潛堤工法於過去的研究文獻均較著重於單一或複合式正弦形沙漣底床，且多以規則波浪進行布拉格反射之研究，而這些研究成果並無法直接應用於實際工程設計。
- 本計畫將針對不同的系列潛堤佈置條件，探討在不規則波浪作用下的海岸保護效果，對此進行一系列的深入研究，並將此研究成果實際應用於實際台灣海岸之防護設計上。
- 最後綜整所有的研究成果，以提出具體的設計方案，期望本海岸防護工法之研究能達到防災禦浪之效果，並兼具親水海岸之功能，符合海岸永續利用之理想與目標。

本年度研究內容

- 蒐集國內外相關文獻：收集國內外有關係列潛堤與布拉格反射理論的文獻報告，並歸納整理其優劣及適用的條件，作為本計畫及今後研究參考。
- 波浪理論和數值模式的建立及模式驗證：本計畫擬應用EEMSE模式 (Hsu 和 Wen; 2001) 計算不規則波通過系列潛堤波場分布情形，所得結果將與理論結果比較，以驗證本計畫模式之適用性。
- 不規則波浪之數值模擬：包含正弦形沙漣底床地形以及等間距之系列潛堤地形之模擬。應用反射率公式求出各系列潛堤提前反射率以檢驗各系列潛堤之防禦功效。

EEMSE 數值模式(1/2)

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

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

式中

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

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

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

EEMSE 數值模式(2/2)

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

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

Ψ

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

$$-2\omega i \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \Psi) + (k^2 CC_g + F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 g k |\nabla_h h|^2) \Psi = 0 \quad (3)$$

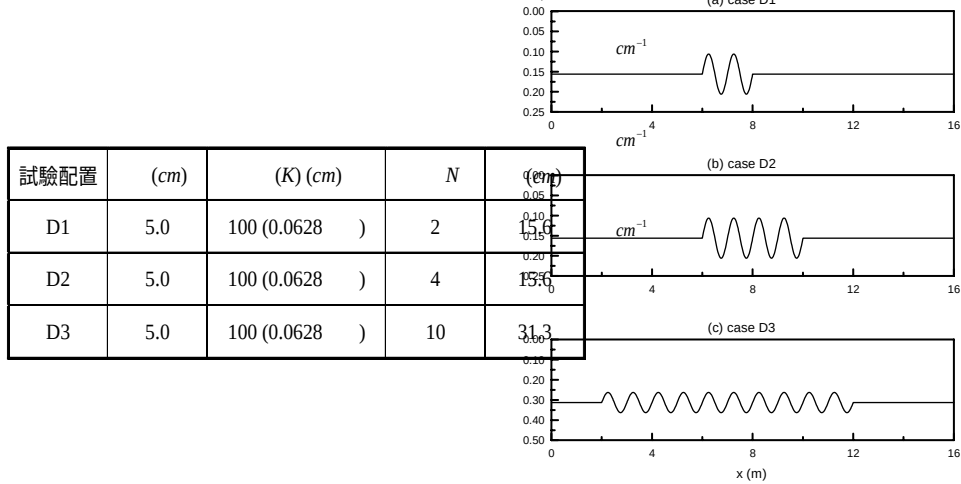
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

規則波理論應用與驗證(1/2) – EEMSE 模式驗證

波浪通過正弦沙漣底床試驗條件 (Davies和 Heathershaw, 1984)

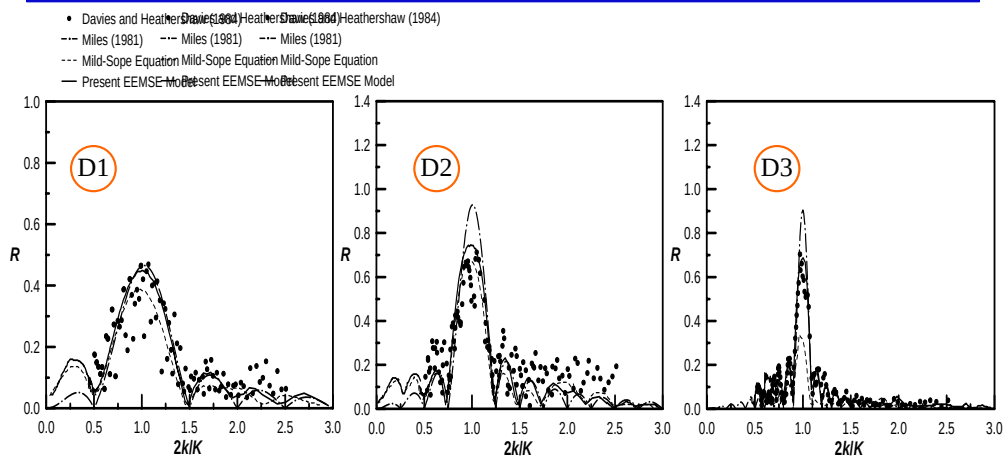


交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

規則波理論應用與驗證(2/2) – EEMSE 模式驗證



波浪通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波之緩坡方程式(1/2) – 控制方程式

- 以波譜分割法處理不規則波浪問題，將不規則波視為由無數個單一成份波組成，分別進行計算後再予以合成不規則波之變形，對於單一成份波之計算，以EEMSE作為控制方程式，並加入能量消散係數，且引用 Radder (1979) 之尺度因子，則得計算單一成份波之控制方程式

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

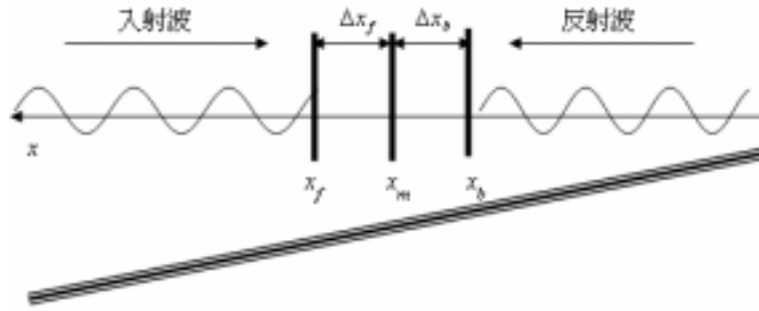
$$\text{其中 } (k_c^2)_i = k_i^2 (1 + if_{Di}) - \frac{\nabla_h^2 \sqrt{(CC_g)_i}}{\sqrt{(CC_g)_i}} + \frac{[F_1 g \nabla_h^2 h + F_2 (\nabla_h h)^2 g k]}{(CC_g)_i} \quad (5)$$

不規則波之緩坡方程式(2/2) – 波譜分割

- 實際應用時將波譜分割成有限個成份能譜，分割數的多寡視要求的精度而定。本計畫採混合分割進行數值計算。
- 混和分割：因考慮波浪在主頻附近的能量變化較為迅速，在高頻處的能量變化較為緩慢，利用指數分佈來離散波浪頻率。

不規則波反射係數公式 (1/3) - EEMSE 模式

- Chang (2002) 提出頻率領域反射係數之推算方法，利用空間任意三點的水位振幅，進而求出斜坡底床的波浪反射係數。



入射波與反射波座標示意圖

不規則波反射係數公式 (2/3) - EEMSE 模式

- 反射係數 R 為

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{B - F}{2a_0^2 [\cos(\alpha_1 - \alpha_b) - \cos(\alpha_1 + \alpha_f)]} \\
 \alpha_1 &= \tan^{-1} \left[\frac{F - B + (B - M) \cos \alpha_f - (F - M) \cos \alpha_b}{(B - M) \sin \alpha_f + (F - M) \sin \alpha_b} \right] \\
 \alpha_b &= 2k_m \Delta x_b + \frac{2k_m^2 \Delta x_b^2 \tan \beta}{2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m} \\
 \alpha_f &= 2k_m \Delta x_f - \frac{2k_m^2 \Delta x_f^2 \tan \beta}{2k_m h_m + \sinh 2k_m h_m} \\
 B &= \left(\frac{|\eta_b|}{k_{sb}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 - \alpha_b)] \\
 M &= \left(\frac{|\eta_m|}{k_{sm}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos \alpha_1] \\
 F &= \left(\frac{|\eta_f|}{k_{sf}} \right)^2 = a_0^2 [1 + R^2 + 2R \cos(\alpha_1 + \alpha_f)]
 \end{aligned} \tag{6}$$

不規則波反射係數公式 (3/3) - EEMSE 模式

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

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

- (1) 波譜切割成份波，先由 EEMSE 模式，計算水位振幅。
- (2) 以 Chang (2002) 之方法，求出各成份波之入、反射波振幅。
- (3) 利用 Goda 和 Suzuki (1976) 的能量觀點可求得不規則波之反射係數。

不規則波反射係數公式 - Miles 理論

- 由各成分波求得之 Miles (1981) 理論反射係數，再以 Goda 和 Suzuki (1976) 之能量觀點，可得不規則波 Miles (1981) 理論之反射係數為

$$R = \sqrt{\frac{\sum_i S(f_i) df \cdot R_i^2}{\sum_i S(f_i) df}}$$
(8)

- $S(f_i) df$ 代表各成份波之入射波能量，而 $S(f_i) df \cdot R_i^2$ 則為各成份波之反射波能量，故上式即為反射波總能量與入射波總能量之比，此與 Goda 和 Suzuki (1976) 之能量方法，具有相同之物理意義。

波譜的選擇(1/2)

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

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

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

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

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

波譜的選擇(2/2)

不同個數成份波之合成波誤差比較表

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

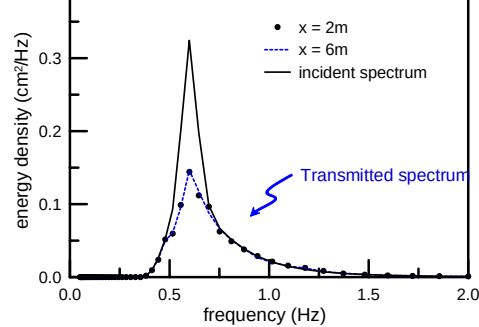
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(1/5) - 正弦沙漣底床

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



EEMSE 模式透射波譜與入射波譜比較圖 (case D2)

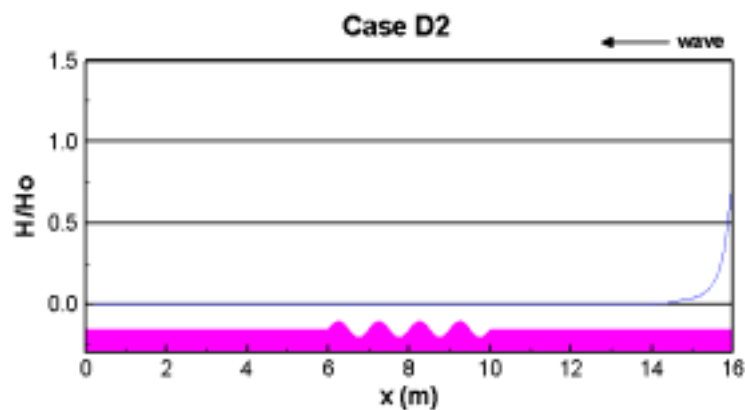
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(2/5) - 正弦沙漣底床

- 不規則波通過正弦沙漣底床波高變化動畫



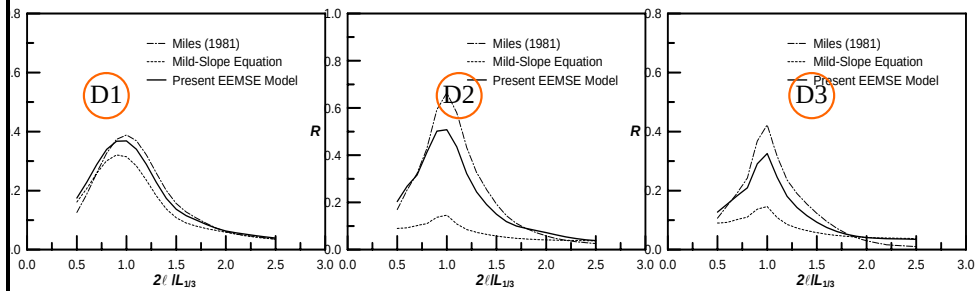
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(3/5) - 正弦沙漣底床

- 規則波入射沙漣底床時，當 $2\ell/L = 1$ 時產生布拉格共振，故波浪入射沙漣底床時，其反射係數應與 $2\ell/L$ 有關



不規則波通過正弦沙漣底床反射係數分佈圖

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(4/5) - 正弦沙漣底床

- 不規則波頻率 $2\ell/L_{1/3} = 1$ 附近亦發生主頻共振現象，而有尖峰值存在。不規則波布拉格共振之尖峰反射係數比規則波來得小，但共振區的帶寬則較規則波為寬。
- 布拉格共振時，規則波的能量均集中於此共振頻率，而不規則波之能量，為各種不同頻率的成份波加總而成，集中於共振頻率附近之能量僅佔總能量之部份，因此反應出的尖峰反射係數便較規則波小。
- 計算的示性週期所對應之波長並非造成共振之波長，此時主頻較不會受到共振之影響，但其他成份波仍含有造成布拉格共振條件之波長，其對整體反射係數仍有影響，，因此主共振區之帶寬才會產生變寬的現象。

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(5/5) - 正弦沙漣底床

- 在頻率 $2\ell/L_{1/3}=1$ 附近，EEMSE所得的反射係數，較 Miles (1981) 理論所得的反射係數小，而比傳統緩坡方程所得的反射係數大，此結果與規則波所得的結果相似。
- 在主頻共振區外，較大值之 $2\ell/L_{1/3}$ 區域，不規則波之反射係數，呈現較平均的狀態，不像規則波會有極小的反射係數出現。雖然示性週期遠離主頻共振區，但在整個頻譜中，仍包含引起布拉格共振現象之成份波存在。

交通部運輸研究所

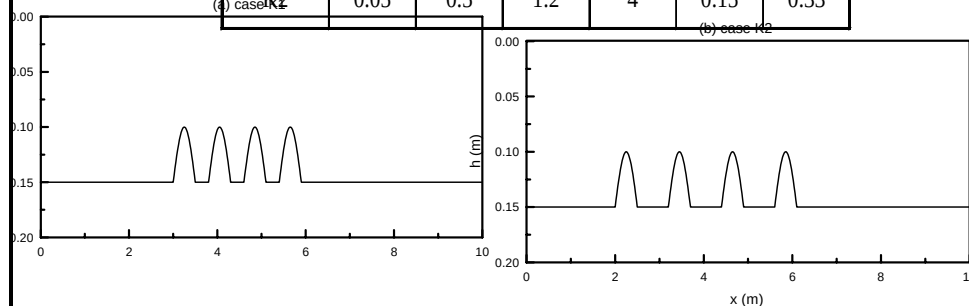
期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(1/6) – 系列潛堤

半餘弦人工潛堤底床試驗條件 (Kirby 和 Anton, 1990)

試驗配置	D (m)	B (m)	S (m)		(cm)	
K1	0.05	0.5	0.8	4	0.15	0.33
K2	0.05	0.5	1.2	4	0.15	0.33



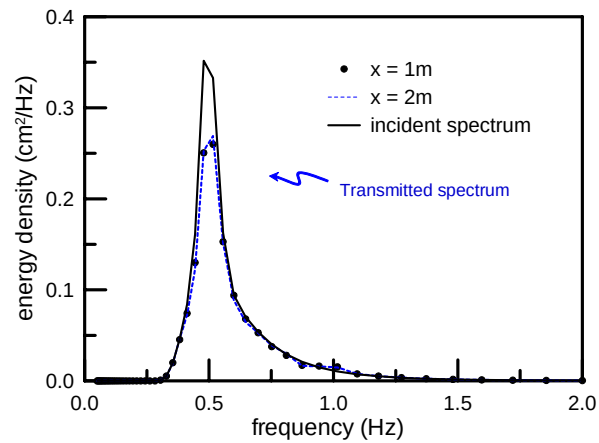
半餘弦人工潛堤底床地形示意圖

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(2/6) – 系列潛堤



EEMSE 模式透射波譜與入射波譜比較圖 (case K2)

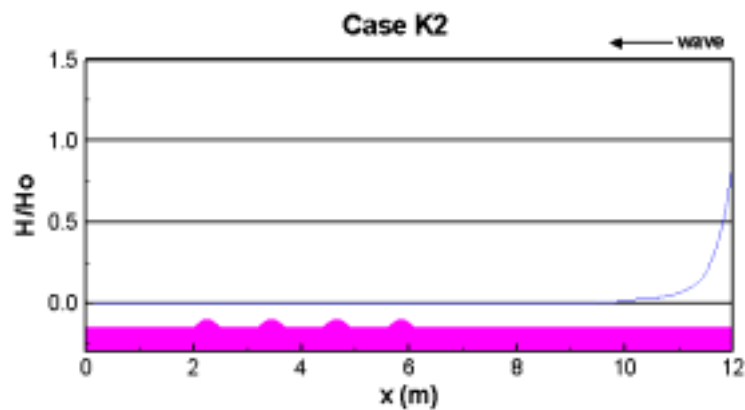
交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(3/6) – 系列潛堤

- 不規則波通過半餘弦形人工潛堤波高變化動畫

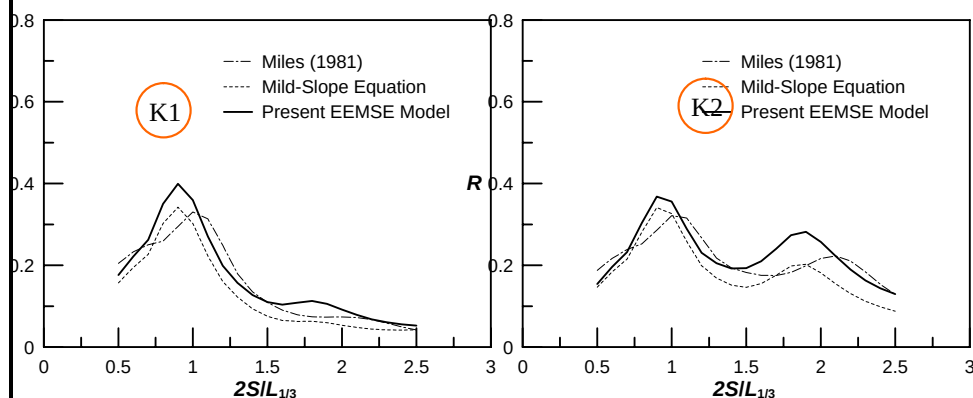


交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(4/6) – 系列潛堤



不規則波通過半餘弦人工潛堤反射係數分佈圖

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(5/6) – 系列潛堤

- 人工潛堤在 $2S/L_{1/3} = 2$ 附近，有很明顯高諧波布拉格共振現象發生，此結果與 Kirby 和 Anton (1990) 所作之規則波試驗及數值計算結果相當一致。
- 隨著潛堤間距的增加，主頻共振之尖峰反射係數有變小的趨勢，而高諧波共振之反射係數則隨之變大，此現象又與 Kirby 和 Anton (1990) 之研究吻合。

交通部運輸研究所

期末簡報

報告日期：2005/11/10

不規則波布拉格共振(6/6) – 系列潛堤

- 尖峰反射係數較規則波小，而共振區之帶寬，則比規則波的帶寬為大，此現象與正弦沙漣底床相同，概因不規則波之能量分散所造成的結果。
- 規則波入射人工潛堤時，主頻共振與高諧波共振發生於 $2S/L_{1/3}=1$ 與 $2S/L_{1/3}=2$ 附近，尖峰反射係數會有偏移 (shift) 的現象，當不規則波入射人工潛堤時，EEMSE 模式所得的結果亦有相同的情況，但 Miles (1981) 理論所得的主頻尖峰反射係數卻仍發生於 $2S/L_{1/3}=1$ 處。

結 論 (1/4)

1. 長波理論由於包含輻射轉換、斜坡轉換及寬度轉換等形狀轉換因子的效應，故計算反射率與透射率時，能符合質量守恆的物理現象，但受於長波假設的限制，這個方法僅能適用線性長波，且由於考慮斜坡轉換的影響，故僅能計算梯形潛堤的反射率及透射率。
2. Miles (1981) 理論計算潛堤之反射率及透射率時，無法滿足質量守恆等物理現象，但能適用於任何形狀的潛堤，理論上，只需知道底床變動函數，即能輕易求得反射率及透射率，對工程應用上較為方便。

結 論 (2/4)

3. EEMSE數值模式，由於慮底床擾動因素的影響，對於波浪通過沙漣底床，其反射率的計算結果，與試驗結果均相當合理，且對共振頻率的帶寬，有良好的計算結果，故以EEMSE當作本研究的數值模式，計算不規則波通過各種系列潛堤的布拉格反射現象，應該具有一定的適用性。
4. 對不規波的計算模式，本研究採用混合能譜分割的方法，且考慮波浪能量消散方面，同時考慮非線性淺化效應、碎波能量消散效應及非線性三波交互作用效應。

結 論 (3/4)

5. 不規則波布拉格反射係數，其分佈型態與規則波之布拉格反射係數相似，但由於不規則波譜是由各種不同頻率之成份波組成，各個成份波之能量不如規則波來得集中，造成尖峰反射係數較規則波小，而共振區之帶寬變寬的現象。
6. 本文以 EEMSE 模式之計算結果與 Miles (1981) 理論及傳統緩坡之結果比較，由計算的結果發現，本文之 EEMSE 模式所得的反射係數分佈情形，較 Miles (1981) 理論的結果更能符合物理現象。

結 論 (4/4)

7. 正弦沙漣底床或人工潛堤，對於紊亂的不規則波浪，均具有一定的反射效果，雖然其尖峰反射係數不如單一規則波的反射係數，但其共振帶寬明顯加大，即對任何來襲的波浪，均有一定的削波作用，能夠達到保護海岸的目的。