

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

近岸水域波浪變形數值模擬模式之研究

Numerical Modeling of Wave Deformations in the

Nearshore Zone

The seal of National Taiwan University is a circular emblem. It features a central design with a book and a lamp, surrounded by the university's name in Chinese characters: '國立臺灣大學' at the top and '勵學敦行 忠信篤敬' at the bottom. The name '陳美蓮' is printed in the center of the seal.

陳美蓮

Chen, mei-lien

指導教授：蔡丁貴 教授

Major Professor: Tsay, Ting-Kuei

中華民國 98 年 7 月

Jul. 2009

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

近岸水域波浪變形數值模擬模式之研究

Numerical Modeling of Wave Deformations in the
Nearshore Zone

本論文係陳美蓮君 (R95521324) 在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 98 年 7 月 3 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

蔡丁貴

(簽名)

(指導教授)

楊廷良

林毓崇

系主任

張國鎮

(簽名)

誌謝

在短暫的三年求學生涯，這期間得蒙恩師 蔡丁貴 教授的諸多照顧與關愛，並且不厭其煩的鼓勵及督導，本文得以順利完成，實首要歸功於老師。

論文口試時，幸運地得以承蒙口試委員楊德良教授、林銘崇教授細心審閱及費心框正，讓本篇論文能夠更為嚴謹、完備，學生在此致上無限謝意。

感謝柏旭學長於三年間的費心指教，此外，感謝磅磅在研究生活上各方面的費心，以及可憐的阿焦總在我壓力很大的時候被我欺負，同門學弟小邱、正偉、阿杜、琛豐的陪伴與幫忙。

最後謹將本文獻給關愛我的家人們，這三年期間發生太多事情，感謝媽咪、雅雅、萬利、有緣的包容與支持，使我得以順利完成學業。



中文摘要

本研究選擇以緩坡方程式為基礎，利用緩變因子建立數學控制方程式(任文華,1993；吳明全,1995)，再以 Galerkin 有限元素法建立數值模式用以模擬近岸波浪變形。新控制方程式並納入碎波能量消散項，用來解析近岸波場的折射、反射、繞射及碎波現象。本研究係於緩坡方程式中直接加入能量消散係數模擬，以疊代方式計算碎波帶內波高之變化。和前人之試驗值比較後可發現相關數值計算之結果不僅能合理的解析波場，且在碎波之模擬方面，理論與試驗數據亦呈現合理的一致性。



英文摘要

Based on the mild-slope equation, a slowly-varying factor has been introduced to derive a new governing equation (Jen,1993 ; Wu,1995) by Galerkin method of the finite element approach. An item is added to include breaking wave energy dissipation in the governing equation. It is intended to simulate the nearshore wave field with combined refraction, the reflection, the diffraction and the breaking wave phenomenon. Wave transformations with wave-breaking energy dissipation across the surf zone are solved through iterative method. Present numerical result are then compared with experimented measurement (Maruyama, 1984) in a case of offshore breakwater. Reasonable agreement is observed.



目錄

誌謝.....	II
中文摘要.....	III
英文摘要.....	IV
第一章 序論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	1
1.3 研究目的.....	3
第二章 數學模式之建立.....	4
2.1 控制方程式.....	4
2.2 邊界條件之探討.....	8
第三章 數值方法.....	12
3.1 數值方法.....	12
3.2 葛勒金有限元素法.....	13
第四章 數值模式驗證.....	18
4.1 平行離岸堤計算.....	18
第五章 結論與建議.....	23
5.1 結論.....	23
5.2 建議.....	24

圖目錄

圖 2-1 邊界與結構物示意圖	8
圖 4-1 波浪正向入射離岸堤之計算格網配置	18
圖 4-2 波浪正向入射具坡度底床離岸堤之波場相對波高分佈圖	19
圖 4-3-(a) 波浪正向入射離岸堤，沿岸方向剖面之波高分佈	21
圖 4-3-(b) 波浪正向入射離岸堤，沿岸方向剖面之波高分佈	21
圖 4-3-(c) 波浪正向入射離岸堤，沿岸方向剖面之波高分佈	21
圖 4-4-(a) 波浪正向入射離岸堤，縱岸方向剖面之波高分佈	22
圖 4-4-(b) 波浪正向入射離岸堤，縱岸方向剖面之波高分佈	22
圖 4-4-(c) 波浪正向入射離岸堤，縱岸方向剖面之波高分佈	22



表目錄

表 1.1 三種型態緩坡方程式之優缺點 2



第一章 序論

1.1 研究動機

海岸地區因為生活資源豐富，交通便利，自古以來都是人類群居生活的空間。人類利用海岸水域養殖獵漁，營造港灣方便交通，更讓海岸地區成為人口密集、都市發展的區域。海岸是海洋與陸地交匯的地區，生態資源豐富，但是海洋的水域浩瀚，時常因為氣象條件的改變，產生波浪，這些巨大的能量由海洋傳遞至海岸區域，時常對海岸地區的社區造成破壞，造成國土流失及許多生命財產的損失。因此，了解並準確掌握海洋波浪自深海傳遞至海岸水域所帶來的能量分佈，對於海岸水域資源的利用及海岸社區的災害防護是非常重要的。

1.2 文獻回顧

Chen 和 Mei (1974)使用長波理論數值模式計算水面位移，已考慮到折射、繞射、反射，但缺點是僅適用於長波。

Berkhoff(1972)推導緩坡度方程式計算水面位移，此方程式可以描述包括折射、繞射及反射之物理現象，並可適用於任意波長。但此方程式是橢圓性偏微分方程式，以有限元素法求解邊界值問題時，網格大小受水波波長限制，需大容量電腦以求解整個區域。

Radder (1979) 提出了拋物線型態 (parabolic type) 的緩坡方程式，其將波場分離為向前傳遞量與反射量兩種成份，而在忽略反射量的情況下計算波場以減少計算時所需的計算機記憶體空間。

Booij (1981) 和 Copeland (1985)等學者則提出將時間變數考慮在波浪模式中的雙曲線型態(hyperbolic type)緩坡方程式。Booij(1983)發展以緩坡方程式為基礎之數值模式時，計算當兩個等水深之水域間水深變化為等斜率時，波自深水區入

射而受到斜坡反射效應影響之反射係數。Bettes 和 Zienkiewicz (1977) 利用有限元素法及無限元素法求解波浪之折、繞射問題。

Tsay 及 Liu (1983a)以緩坡方程式為基礎，使用 Chen 及 Mei (1974)所發展之混合元素(Hybrid element)方法應用適當處理數值方法得到有效率之數值模式解緩坡方程式，陳及蔡 (1990)則應用局部輻射邊界(Local radiation boundary)條件取代標準形式之無窮遠處輻射邊界條件，以避開外海區域須為等水深之假設，與 Tsay 及 Liu(1983)模式之結果比較，並討論其適用性。陳及蔡 (1997)以有限元素法於緩坡方程式中，加入碎能量消散項及指標，以解析近岸波場之折射、反射、繞射及碎波現象。任(1993)採用緩變因子，將緩坡方程式化為緩變因子之控制方程式，以克服近岸水域波場數值計算時，網格受到波長大小的限制。吳 (1995)延續任(1993)的研究，進一步探討含緩變因子的水波模式之原理與限制，並特別著力於防波堤附近海域波浪變形之應用。

表 1.1三種型態緩坡方程式之優缺點

型態	優點	缺點
橢圓型態 (elliptic type)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可反應出波浪傳遞過程所產生之特性。 2. 為穩態方程式，不需要時間之疊代。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 求解時需解大量之未知數矩陣，所需之計算機記憶體容量大，計算時間長。
拋物線型態 (parabolic type)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可節省計算機之記憶體容量與計算時間。 2. 能夠應用於大範圍之波場計算。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 只適合處理含有弱反射之波場問題。 2. 面臨含有強反射之波場時，無法反應實際結果。
雙曲線型態 (hyperbolic type)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 方程式中含有時間項，較能掌握時間變化之波形。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 邊界條件複雜不易處理，增加疊代次數及計算時間

1.3 研究目的

外海發生之深海波在傳遞進行靠近海岸時，水深變淺，波浪開始有感覺到水底之存在，並且受到防坡堤等之海岸結構物的影響，改變了波高與波向。在規劃設計海岸結構物時，正確計算波場產生之波力非常重要，但是波高稍微變化，由於海底坡降小，則其碎波點之位置大大地移動。首先，了解波高會因水深變化而起如何變化，亦即波浪之淺化變形 (wave shoaling)。隨著不同水深，波浪之進行速度會有所變化，故波浪進行方向受到地形變化會彎曲，此現象稱為波浪之折射 (refraction)。在波浪之進行方向，若防波堤存在的話，與音波相同，能量會繞射至其背後，稱為波浪繞射(diffraction)。為維持港內靜穩度，防坡堤之配置頗具關鍵。計算作用於近岸結構物之外力時，碎波為最重要要素之一，至今仍是有待解決的問題。河口處，河川水流之相反方向，波浪進入時，碎波更易產生。

波浪由外海傳遞前進靠近海岸地帶時，因為受到水深或海岸結構物之影響，其波高及波向會發生變化。其結果，碎波點（波浪自身無法保有其原有姿態而破碎）的位置在移動。對於海岸結構物之設計條件產生極大的影響，所以了解波浪變形是非常重要的。

在數值方法解析近岸波場時，常遭遇之問題為不規則邊界的處理以及碎波帶附近之波場模擬，若使用一般常用的有限差分法，其有限差分式會受離散過程的影響，存在截尾(truncation)及捨入誤差(round-off)，在運作時所建構之格網受到正交性的限制，這樣對於在面臨形狀不規則之邊界時，由於格點無法與邊界相互契合，而導致數值計算之精度將會相對地降低，而在水深變化較為複雜的海域，有限差分法格網之調整並不容易，如此一來便使得模式計算之範圍與效率容易受限於計算機的能力。所以本研究主要是在利用有限元素法(Finite element method)於緩坡方程式(Mild-slop equation)以解析浪在近岸水域受到淺化、反射、繞射及碎波等現象產生變形的能量分佈。但是由於有限元素法，由於近岸波場因為碎波的關係，網格密度會受到水波波長限制影響，產生的結果會有較大的誤差，所以利用緩變因子減低網格解析度誤差的產生。

第二章數學模式之建立

2.1 控制方程式

含能量消散之緩坡方程式(Mild-slope equation)

$$\nabla \cdot [CC_g \nabla \eta] + (k^2 CC_g + i\omega W)\eta = 0 \quad (2.1)$$

其中 η : 水面變動量

$$C = \frac{\omega}{\kappa} : \text{波速}$$

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial \kappa} : \text{群波速度}$$

$$\kappa = \frac{2\pi}{L} : \text{周波數}$$

ω : 周波率

W : 能量消散項代表每單位波長之單位能量消散率

而且波數 κ 滿足分散關係式(dispersion relationship)

$$\omega^2 = g\kappa \tanh kh \quad (2.2)$$

引用緩變因子的原因是因為規則波適用之方程式是描述邊界條件不變，而時間趨近無限大之後的半穩定態(quasi-steady state)，則其水面位移快速變化的因素是來自於相位函數。因為相位函數每隔一個波長就會變化一個週期，若是能將相位函數分離計算，則振幅函數的變化將是緩慢而不受波長控制的。

因為折射效應受到司乃耳定律(Snell's law)控制，所以基本上可以令以平均波度修正水深之後，折射的波射線方向為水波主要行進方向；至於水波真的行進方

向，則由緩變因子的虛數部分對含折射效應的相位函數修正而得。

所以將水面位移表示成：

$$\eta = FA_0 e^{iS_0} \quad (2.3)$$

式中 η ：水面位移

F ：緩變因子

A_0 ：入射波振幅

S_0 ：分離時間且考慮修正水深後折射效應之位相函數

其中 $F = |F| e^{i\delta_F}$; $\delta_F = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(F)}{\text{Re}(F)} \right]$

所以 $\eta = |F| A_0 e^{i(S_0 + \delta_F)}$

因為平均坡度之後等水深平行海岸線，若以等水深線為 y 軸方向，則：

$$S_0 = \int_{x_0}^x k \cos \theta dx + \int_{y_0}^y k \sin \theta dy \quad (2.4)$$

其中 (x_0, y_0) 為相位參考點座標， θ 為波射線與等水深線之法線(x 軸)的夾角

利用司乃耳定律：

$$k \sin \theta = k_0 \sin \theta_0 \quad (2.5)$$

所以

$$S_0 = \int_{x_0}^x k \cos \theta dx + k \sin \theta_0 (y - y_0) \quad (2.6)$$

W 能量消散是由碎波所產生，則根據渡邊 晃等(1984)、窪泰 浩等(1991)所建議之碎波能量消散項可表示如下式

$$\nabla \cdot [CC_g \nabla \eta] + k^2 CC_g (1 + if_d) \eta = 0 \quad (2.7)$$

$$\text{其中 } f_d = \frac{5}{2} \tan \beta \sqrt{\frac{1}{k_0 h} \sqrt{\frac{\gamma - \gamma_r}{\gamma_s - \gamma_r}}} \quad (2.8)$$

$$\gamma_r = 0.135 \quad (2.9)$$

$$\gamma_s = 0.4 \times (0.57 + 5.3 \tan \beta) \quad (2.10)$$

$$\gamma = \left| \frac{\eta}{h} \right| \quad (2.11)$$

$$\gamma_b = 0.53 - 0.3e^{-3\sqrt{h/L_0}} + 5 \tan^{3/2} \beta e^{-45(\sqrt{h/L_0} - 0.1)^2} \quad (2.12)$$

式中 β : 底床坡度

h : 水深

L_0 : 深水之波長

將(2.3)式代入(2.7)式，展開可得：

$$\begin{aligned} & \nabla(C C_g) \cdot \nabla F + i F \nabla(C C_g) \cdot \nabla S_0 + C C_g \nabla^2 F + 2i C C_g \nabla F \cdot \nabla S \\ & - C C_g F (\nabla S_0 \cdot \nabla S_0) + C C_g i F \nabla^2 S_0 + k^2 C C_g (1 + i f_d) F = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

(2.13)式即為包含緩變因子之控制方程式。

其中 磯部雅彥等(1986)建議：

1. 規則波下，當 $\gamma > \gamma_b$ 時於方程式中加入碎波能量消散；
2. 不規則波下，當 $\gamma > 0.8\gamma_b$ 時於方程式中加入碎波能量消散。



2.2 邊界條件之探討

考慮以深海等水深線 Γ_1 、海岸線(或是另一條淺海等深線) Γ_3 、兩條穿透等水深線的波射線 Γ_2 以及 Γ_4 以及人工結構物 Γ_5 所圍成之海域(如圖 2.1)：

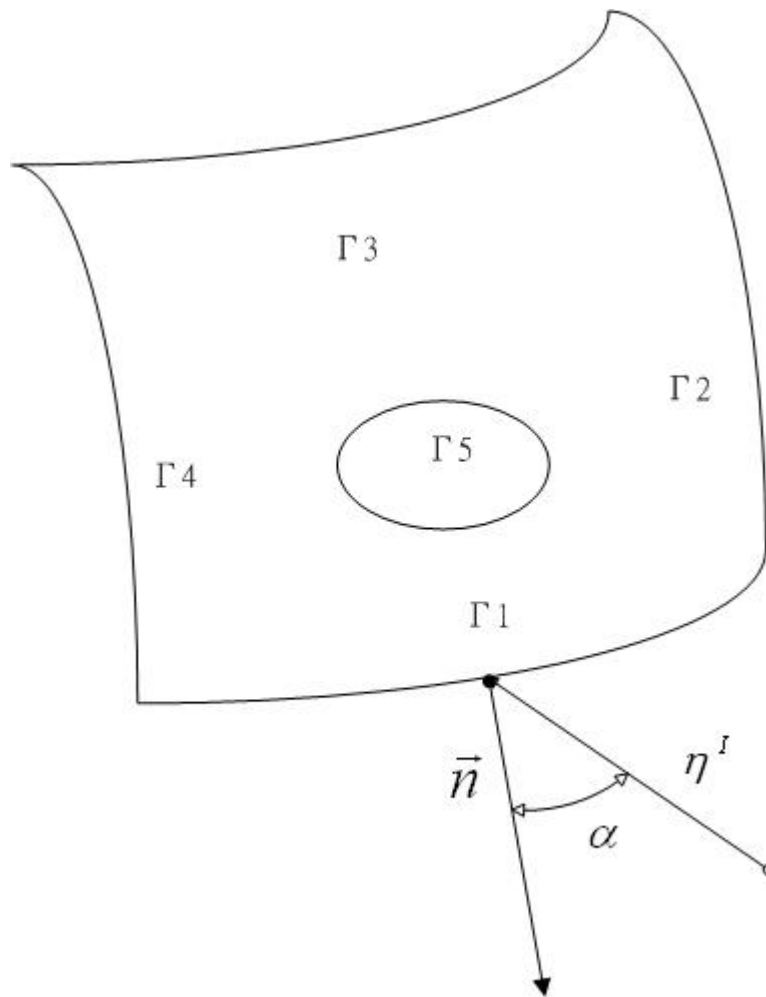


圖 2-1 邊界與結構物示意圖

緩坡方程式之解可以表示為：

$$\eta = \eta^I + \eta^S \quad (2.14)$$

其中 $\eta^I = A_0 e^{iS_0}$: 修正入射波水面位移

η^S : 散射波水面位移

如果邊界是不透水人工結構物，計算區域內之結構物邊界滿足無流通量邊界條件則必須滿足不可穿透之邊界條件(No-flux boundary condition)：

$$\frac{\partial \eta}{\partial n} = 0 \quad (2.15)$$

在不受拘束之邊界(open boundary)處的散射波(scattering wave) η^S 必須滿足輻射邊界條件(radiation boundary condition)，數學形式為

$$\frac{\partial \eta^S}{\partial n} - ik_{S_n} \eta^S = 0 \quad (2.16)$$

其中 $\eta^S = \eta - \eta^I$ 為散射波水面位移

$k_{S_n} = \frac{\partial S_n}{\partial n}$, S_n 為散射波法線相位函數。

因為是線性理論，所以 η^I 、 η^S 均滿足緩坡方程式。

假設當不受拘束之邊界遠離結構物時，散射波射線與邊界法線之夾角等於修正入射波射線與邊界法線之夾角：

$$|k_{s_n}| = |k_{0_n}| \quad (2.17)$$

其中 $k_{s_n} = \vec{k}_s \cdot \hat{n} = \frac{\partial S_s}{\partial n}$ S_s : 散射波相位函數 \hat{n} : 邊界法線向量

$$k_{0_n} = \vec{k}_0 \cdot \hat{n} = \frac{\partial S_0}{\partial n} \quad S_0 : \text{考慮修正水深後折射效應之相位函數}$$

此假設在應用時必須特別留意。尤其當邊界位於強繞射區，此假設不符，誤差將會變大；所以最好將開放邊界拉遠一點，在感興趣區域所得解才不會受邊界條件模擬誤差破壞而失去準確性。

將(2.3)式、(2.14)式、(2.15)式、(2.16)式結合可得：

$\Gamma 1$ (深海等水深線)： $k_{s_n} = -k_{0_n}$

$$\frac{\partial F}{\partial n} = -2ik_{0_n} F + 2ik_{0_n} \quad (2.18)$$

$\Gamma 2$ $\Gamma 4$ (完全透射)： $k_{s_n} = k_{0_n}$

$$\frac{\partial F}{\partial n} = 0 \quad (2.19)$$

$\Gamma 3$ (若海岸線完全反射)：

$$\frac{\partial F}{\partial n} = ik_{0_n} F \quad (2.20)$$

$\Gamma 3$ (完全透射) :

$$\frac{\partial F}{\partial n} = 0 \quad (2.21)$$

$\Gamma 5$ (結構物完全反射) :

$$\frac{\partial F}{\partial n} = -ik_{0_n} F \quad (2.22)$$



第三章 數值方法

3.1 數值方法

為了求解波浪在不定水深，及任意形狀區域之波場變化，採用葛勒金(Galerkin)有限元素法，建立數值模式。

將近似解(Approximate solution)定義為元素內節點上之未知量乘上形狀函數(Shape function)，將近似解代入控制方程式，在這個區域內每個節點上皆會產生一個殘差(Residual)，並強迫元素內節點權重平均殘差值為零。

應用殘差(Weighted residual)法的觀念，將控制方程式乘上權重函數(Weight function)並加以積分可得整個領域(Domain)的積分方程式。將控制方程式置入對元素之積分中：

$$\sum_{e=1}^M \int^{(e)} f \mathfrak{R} d\Omega = 0 \quad (3.1)$$

其中 f : 權重函數(Weight function)

\mathfrak{R} = 控制方程式(2.13)等號左邊諸項

M = 元素個數； e = 元素編號； Ω = 計算區域

再利用高斯散度定理(Divergence theorem)及部分積分(integration by parts)的

技巧，將原本強化形式(Strong form)之控制方程式改寫為包含有邊界條件的弱化形式(Weak form)。

3.2 葛勒金有限元素法

在葛勒金有限元素法中，以形狀函數(shape function) ψ_i^e 來代替權重函數 w ，而元素內之未知變數可利用元素節點上之變數值做內差近似。

本文中元素皆採用三角線性等參元素(Linear triangular isoparametric)，權重函數表示如下：

$$w = \psi_j^e = [\psi_1^e, \psi_2^e, \psi_3^e] \quad (3.2)$$

所有變數皆可以下列通式離散化，

$$\chi = \sum_{i=1}^3 \psi_i^e \chi_i^e = \left\{ \psi_i^e \right\}_{1 \times 3}^T \left\{ \chi_i^e \right\}_{3 \times 1} \quad (3.3)$$

其中 上標 e 代表局部(Local)元素之特性

定義為行矩陣， $\left\{ \right\}^T$ 定義為列矩陣

下標數字乘積則表示為矩陣的大小

形狀函數(Shape function)可由元素內節點座標表示而成。

$$\{\psi_i^e\}^T = [\psi_1^e, \psi_2^e, \psi_3^e] \quad (3.4)$$

$$\text{而 } \{\psi_i^e\} = \frac{a_i + b_i x + c_i y}{2\Delta^e} \quad i=1,2,3 \quad (3.5)$$

$$\text{其中 } a_1 = x_2^e y_3^e - x_3^e y_2^e \quad b_1 = y_3^e - y_2^e \quad c_1 = x_2^e - x_3^e$$

A^e 表示元素的面積

$$A^e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix}$$

同理可得。

$$a_2 = x_3^e y_1^e - x_1^e y_3^e \quad b_2 = y_1^e - y_3^e \quad c_2 = x_3^e - x_1^e \quad (3.6)$$

$$a_3 = x_1^e y_2^e - x_2^e y_1^e \quad b_3 = y_2^e - y_1^e \quad c_3 = x_1^e - x_2^e \quad (3.7)$$

以形狀函數 ψ_i^e 對元素三頂點參數作線性內插，以求得三角元素內各點參數：

$$CC_g^e = \sum_{l=1}^3 \psi_l^e (CC_g)_l^e \quad (3.8)$$

$$k^e = \sum_{m=1}^3 \psi_m^e k_m^e \quad (3.9)$$

$$k \cos \theta^e = \sum_{n=1}^3 \psi_n^e k \cos \theta_n^e \quad (3.10)$$

$$F^e = \sum_{j=1}^3 \psi_j^e F_j^e \quad (3.11)$$

綜合(3.8)式、(3.9)式、(3.10)式、(3.11)式以及(3.1)式，再合併同類項，得：

$$\sum_{j=1}^3 K_j^{i(e)} F_j^{(e)} = Q^{i(e)} \quad i=1,2,3 \quad (3.12)$$

其中

$$Q^{i(e)} = -\oint_{\Gamma} \sum_{l=1}^3 \psi_l^e (CC_g)_l^e \frac{\partial}{\partial n} \left(\sum_{j=1}^3 \psi_j^e F_j^e \right) dS \quad (3.13)$$

$$K_j^{i(e)} = \sum_{l=1}^3 \sum_{n=1}^3 (CC_g)_l^e k \cos \theta_n^e \begin{bmatrix} 2ia_j^e \int^e \psi_i^e \psi_l^e \psi_n^e d\Omega \\ +ia_l^e \int^e \psi_i^e \psi_j^e \psi_n^e d\Omega \\ +ia_n^e \int^e \psi_i^e \psi_l^e \psi_j^e d\Omega \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{l=1}^3 (CC_g)_l^e \begin{bmatrix} 2ik_0 \sin \theta_0 b_j^e \int^e \psi_i^e \psi_l^e d\Omega \\ + ik_0 \sin \theta_0 b_l^e \int^e \psi_i^e \psi_j^e d\Omega \\ - k_0^2 \sin^2 \theta_0 \int^e \psi_i^e \psi_l^e \psi_j^e d\Omega \\ - (a_i^e a_j^e + b_i^e b_j^e) \int^e \psi_l^e d\Omega \end{bmatrix} \\
& + \sum_{l=1}^3 \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 (CC_g)_l^e \begin{bmatrix} k_m^e k_n^e \int^e \psi_i^e \psi_j^e \psi_l^e \psi_m^e \psi_n^e d\Omega \\ - k \cos \theta_m^e k \cos \theta_n^e \int^e \psi_i^e \psi_j^e \psi_l^e \psi_m^e \psi_n^e d\Omega \end{bmatrix} \\
& + i \sum_{l=1}^3 \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \sum_{p=1}^3 (fd)_p^e (CC_g)_l^e \left[k_m^e k_n^e \int^e \psi_i^e \psi_j^e \psi_l^e \psi_m^e \psi_n^e \psi_p^e d\Omega \right] \quad (3.14)
\end{aligned}$$

而且

$$\int^e \psi_i^{(e)p} \psi_j^{(e)q} \psi_l^{(e)r} d\Omega = 2A^e \frac{p!q!r!}{(2+p+q+r)!} \quad (3.15)$$

其中 Γ ：區域邊界，邊界積分為逆時針方向積分。

A^e ：元素面積。

(3.13)式中，邊界的 $\frac{\partial F}{\partial n}$ 由(2.17)式、(2.18)式、(2.19)式、(2.20)式及(2.21)式決

定，其中

$$k_{0_n} = \frac{1}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} [(\Delta x)k \cos \theta + (\Delta y)k \sin \theta] \quad (3.16)$$

其中 $\Delta x = x_{i+1} - x_i$, $\Delta y = y_{i+1} - y_i$;

(x_i, y_i) , (x_{i+1}, y_{i+1}) 代表邊界上各點之座標



第四章 數值模式驗證

4.1 平行離岸堤計算

為驗證本文所提出計算程序概念是否可行，特別以水工模型試驗丸山康樹等(1984) 案例驗證。其試驗佈置及本文數值計算格網與領域如圖 4-1， 試驗主要在 $x \times y = 5 \times 8 \text{ m}^2$ 大小之範圍，且堤長為 2.67m，試驗模型之堤身為不透過性之鋼板。波浪條件為正向入射，模式計算時將此薄鋼板之厚度取為一個元素寬，並設定堤體為全反射邊界條件。

圖 4-1 所示之計算格網為 11,648 個三角形元素所構成，其中共有 6,015 個節點數，輸入之波浪入射週期 $T = 1.2 \text{ sec}$ ，波高 $H_0 = 0.02 \text{ m}$ ，計算等緩坡度 $S = 1/50$ 之測試領域。

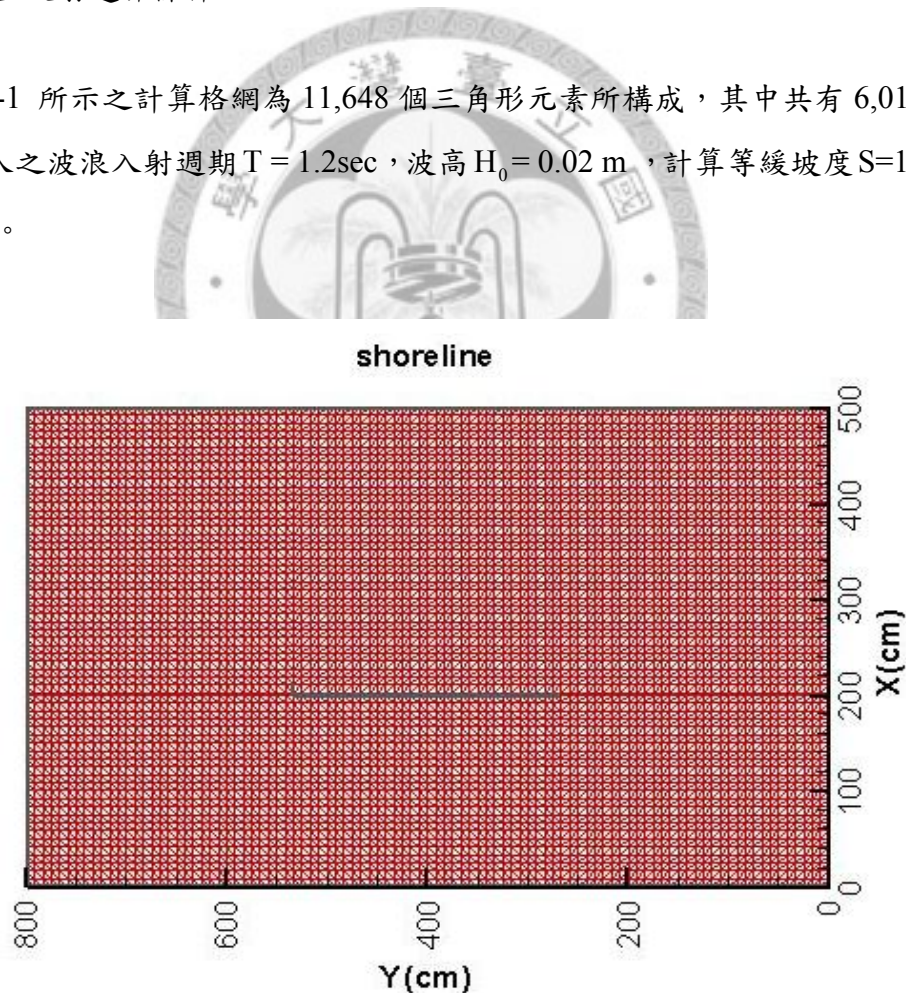


圖 4-1 波浪正向入射離岸堤之計算格網配置

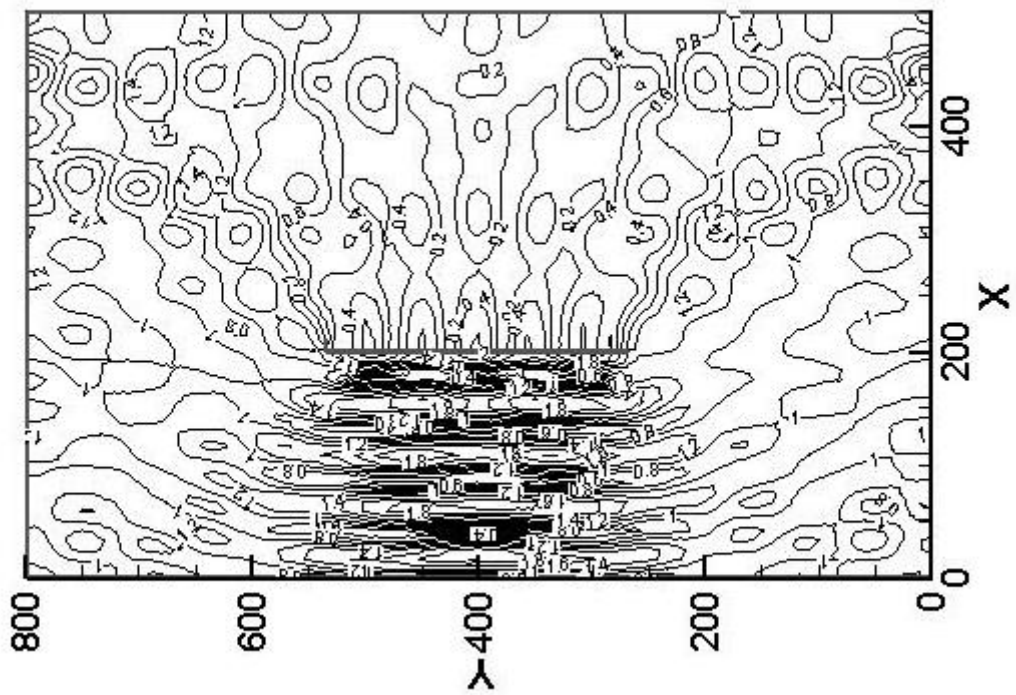
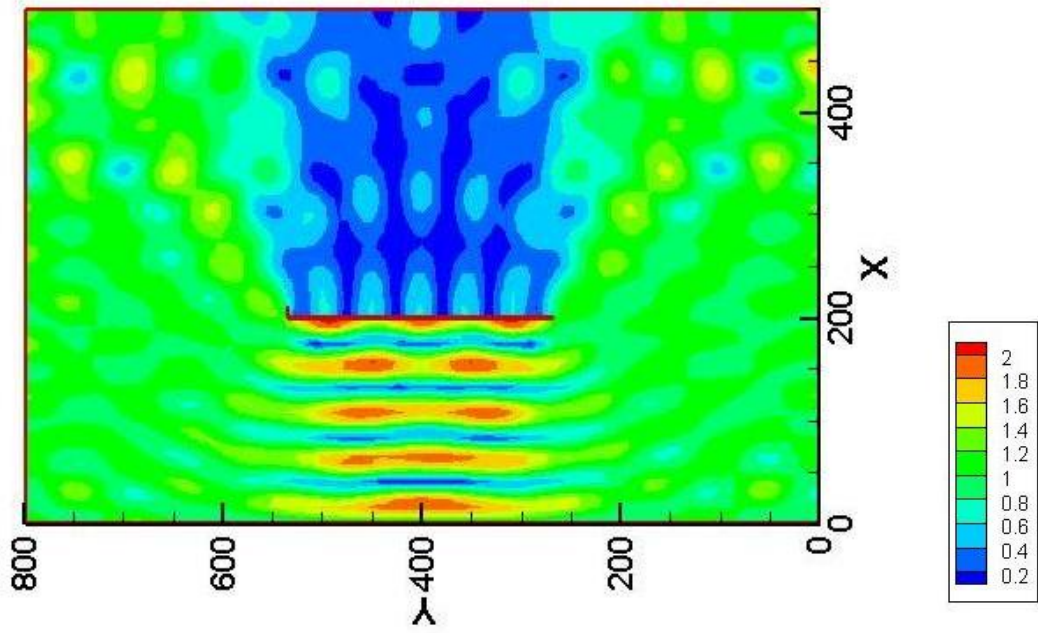


圖 4-2 波浪正向入射具坡度底床離岸堤之波場相對波高分佈圖

由圖 4-2 相對波高分佈等值線來看，堤前因入、反射波波峰或波谷相疊加之故導致等波高線分佈密集；而堤後則因堤體影響產生遮蔽效應，造成波高分佈明顯偏低；堤端較遠處之等波高線呈現彎曲狀分佈，其變化趨勢與波峰線之繞射現象相符。

在以局部之剖面分別檢視各剖面上之波高分佈，並令其與丸山康樹等(1984)案例的試驗值相較驗證。圖 4-3、4-4 為各剖面上波高分佈與試驗值之相較情形，圖中實線為本文模式之計算結果，實心三角型為渡辺 晃及丸山 康樹(1984)所得之實測數據。

而圖 4-3 為沿岸方向上，堤前 $X = 200\text{cm}$ 與堤後 $X = 202\text{cm}$ 、 $X = 300\text{cm}$ 之波高分佈圖，在與試驗值相較下，本文模式所計算出之波高分佈雖在堤後部份計算出之波高值似乎低估了些，但在堤體前端卻有著不錯的預測結果，數值計算所得之結果與試驗值之趨勢一致。

圖 4-4 為縱岸方向上 $Y = 200\text{cm}$ 、 $Y = 300\text{cm}$ 以及 $Y = 400\text{cm}$ 處之波高分佈，在近岸斷面 $Y = 200\text{cm}$ 處，本文模式計算出之波高預測值與實測值在趨勢上約略相同，但於碎波點之位置卻仍有差異，而於 $Y = 300\text{cm}$ 、 $Y = 400\text{cm}$ 處之波高分佈，數值計算所得之結果與試驗值之趨勢一致，但是渡辺 晃及丸山 康樹(1984)的波高試驗觀測值在 $X = 400\text{cm}$ 到 $X = 450\text{cm}$ 之間。

由此測試案例，對於波浪由外海正向入射近岸結構物而產生折、繞、反射等效應的波場而言，本文模式之預測能力有著一定的可靠性。

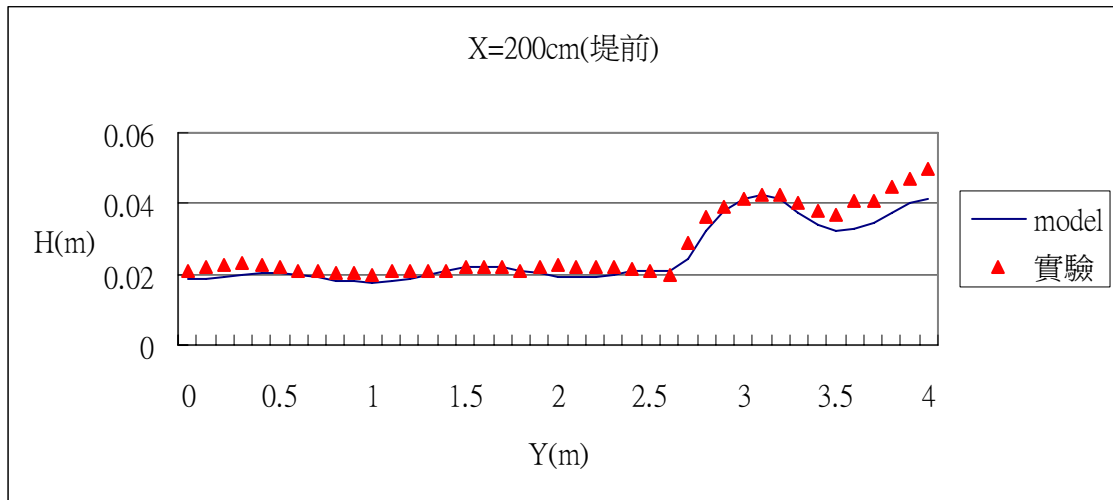


圖 4-3-(a) 波浪正向入射離岸堤，沿岸方向剖面之波高分佈

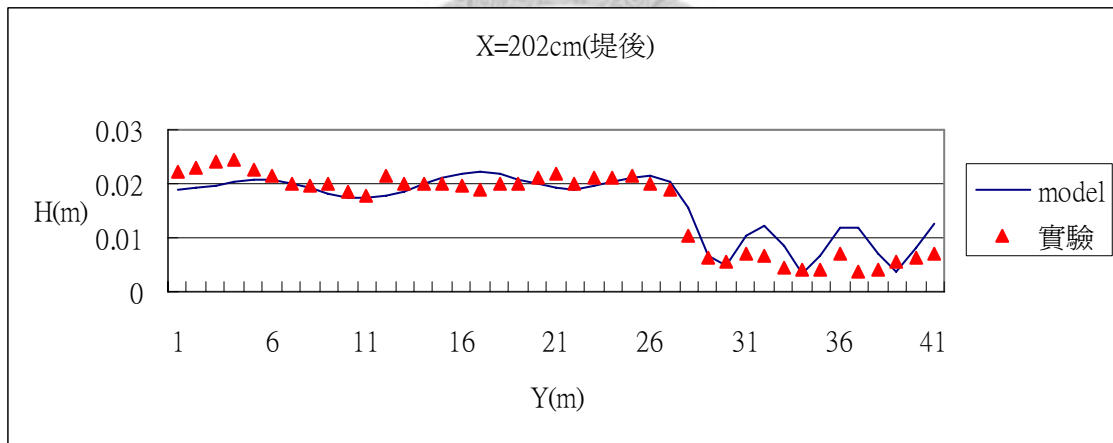


圖 4-3-(b) 波浪正向入射離岸堤，沿岸方向剖面之波高分佈

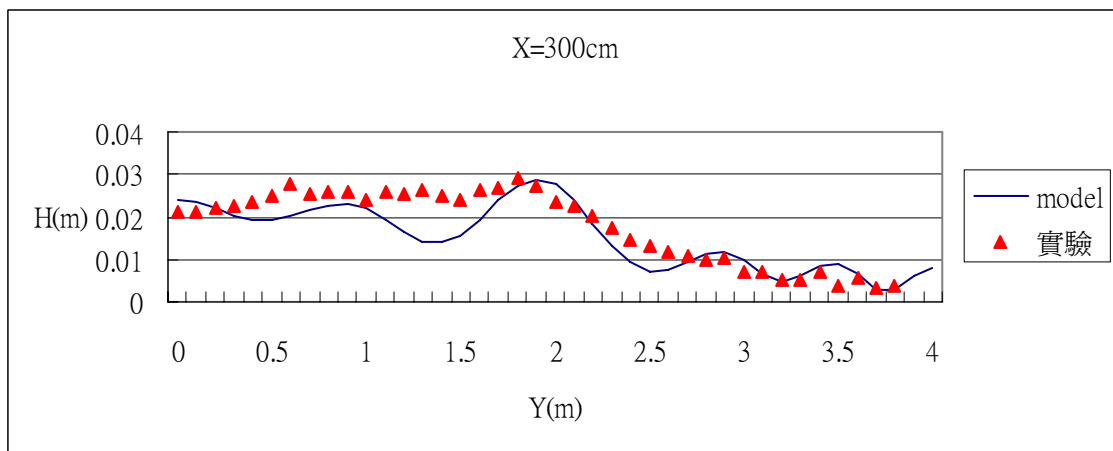


圖 4-3-(c) 波浪正向入射離岸堤，沿岸方向剖面之波高分佈

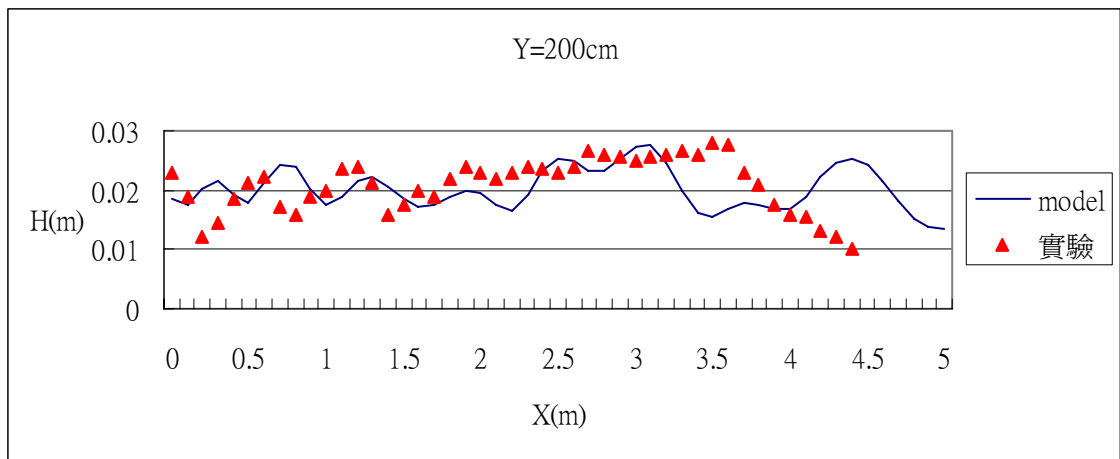


圖 4-4-(a) 波浪正向入射離岸堤，垂直岸方向剖面之波高分佈

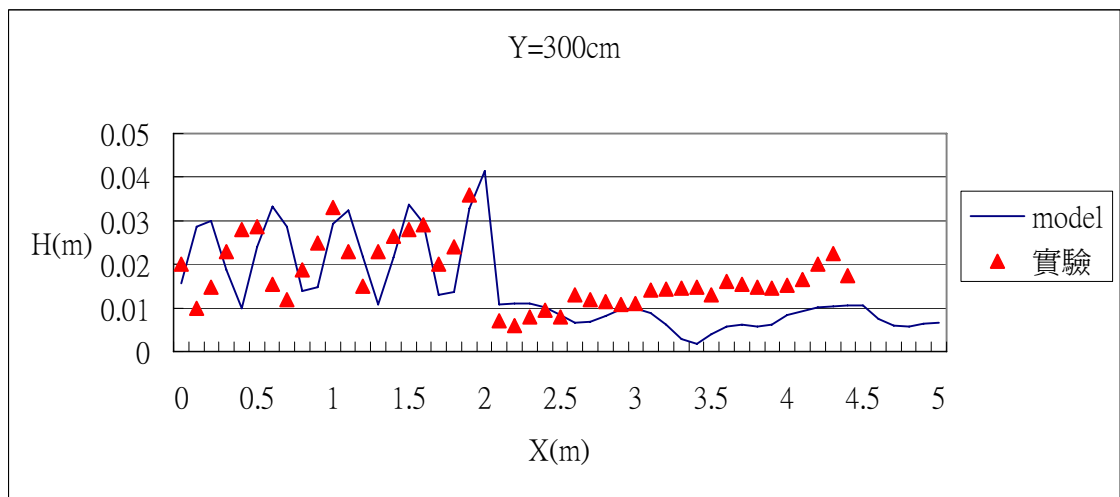


圖 4-4-(b) 波浪正向入射離岸堤，垂直岸方向剖面之波高分佈

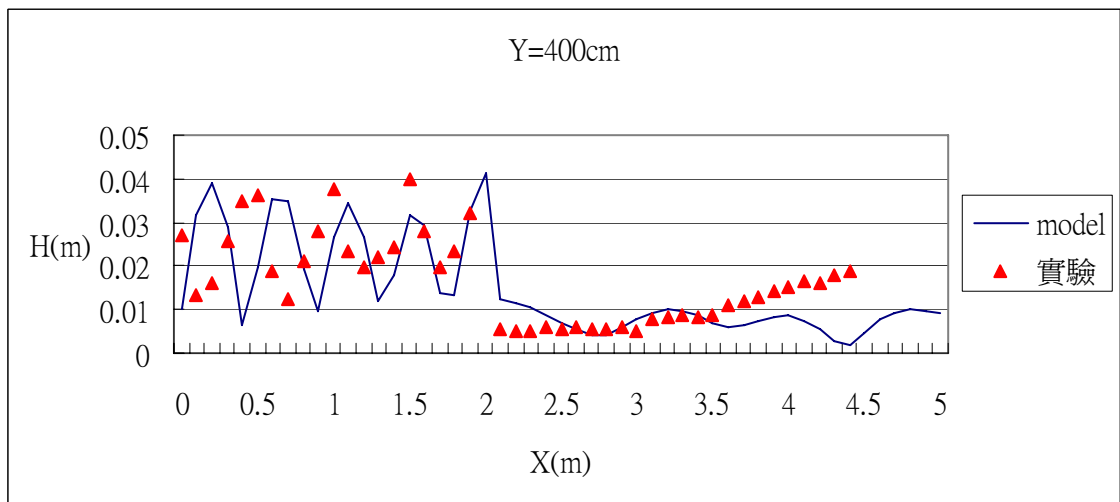


圖 4-4-(c) 波浪正向入射離岸堤，垂直岸方向剖面之波高分佈

第五章 結論與建議

5.1 結論

從前人研究中, Berkhoff(1972); Smith 及 Sprinks(1975); Mei 及 Chen(1974) 和 Tasy 及 Liu(1983)等利用緩坡方程式, 以有限元素法計算水面位移。此方程式是橢圓型偏微分方程式, 可以描述包含折射、繞射、反射及碎波之物理現象。本文在發展一套可以適用於大範圍海域的波浪傳遞數值模式, 採用緩變因子, 將緩坡方程式化為緩變因子之控制方程式, 配合適當的邊界條件, 以葛勒金有限元素法進行數值計算, 再將結果轉換成為所需的波場資料。

1. 本模式推導納入碎波能量損失之控制方程式, 建立有限元素之數值模式。模式計算以平行之離岸堤為例, 與實驗量測比較, 結果良好。
2. 本研究的緩變因子附屬於入射波相位, 當反射波很小時, 在計算上則不受波長限制。但若是反射現象強時, 不受波長的好處就不存在。

5.2 建議

1. 因為附屬於入射波向之緩變因子在描述弱反射區域時不受到波長的限制，是很有效率的計算方式；附屬於反射波向之緩變因子則是在描述強反射區域時不受到波長的限制。可以聯合兩種方式處理大範圍海岸區域的波浪傳遞問題上。
2. 本文對於碎波問題之探討只單以據渡邊 晃等(1984)、窪泰 浩等(1991)所建議之碎波能量消散項計算，而無比較使用其他碎波公式及碎波判斷式所得之結果，故將來若能將各種碎波公式及碎波判斷式合併比較，進一步歸納整理出最適合之碎波處理條件，則模式將對於近岸波場中碎波問題之處理能有更好的預測結果。
3. 本文建立模式之目的旨在求得正確之近岸波場，在達到此一近程目標之後，希冀未來能進一步以此波場模式結合流場及地形變化演算模式，建立一套合適於近岸海域行為模擬之數值計算系統。

參考文獻

1. Battjes, J.A. and Janssen J.P.F.M. "Energy loss and set-up due to breaking in random waves," Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering, pp.569-578, 1978.
2. Berkhoff, J.C.W., "Computation of Combined Refraction-Diffraction," Proceedings of 13th International Conference on Coastal Engineering, pp. 471-490 , 1972.
3. Berkhoff, J.C.W., N. and A.C. Radder, "Verification of Numerical Wave Propagation Models for Simple Harmonic Linear Water Waves," Coastal Engineering, Vol. 6, pp. 255-279, 1982.
4. Booij, N., "Gravity Waves on Water with Non-uniform Depth and Current," Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Report No. 81-1, 1981.
5. Bettess, P. and O.C. Zienkiewicz, "Diffraction and Refraction of Surface Waves Using Finite and Infinite Element," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, pp. 1271-1290 , 1977.
6. Chen, H.S. and C.C. Mei, "Oscillation and Wave Force on an Offshore Harbor," Ralph M. Parsons Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Report No.190 , 1974.
7. Copeland, G.J.M., "A Practical Alternative to the Mild-slope Wave Equation," Coastal Engineering, Vol. 9, pp. 125-149 , 1985.
8. Dally, W.R., R.G. Dean and R.A. Dalrymple, "Wave Height Variation Across Beaches of Arbitrary Profile, " Journal of Geophysical Research , Vol. 90, pp. 11917-11927, 1985.
9. Iosbe, 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.

10. Lé Méhauté, B. and J. D. Wang, "On the Breaking of Waves Arriving at an Angle to the Shore," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 141, pp. 265-274, 1984.
11. Panchang, V.G., B.R. Pearce, Ge Wei and B. Cushman-Roisin, "Solution of The Mild-Slope Wave Problem by Iteration," *Applied Ocean Research*, 13(4), pp.187-199, 1991.
12. Panchang, V., W. Chen, B. Xu, K. Schlenker, Z. Demirbilek, and M.Okihiro, "Exterior Bathymetric Effects in Elliptic Harbor Wave Models", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 126, pp. 71-78, 2000.
13. Radder, A.C., "On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 95, pp. 159-176, 1979.
14. Liu, P. L.-F. and Tsay, T. -K., "Water Wave Motion around a Breakwater on Slowly Varying Topography", *Proc. Conf. Coastal Structures*, pp.979-987, 1983a.
15. Liu, P. L.-F. and Tsay, T. -K., "On Weak Reflect of water Waves" *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.131 pp.59-71, 1983b.
16. Liu, P. L.-F., S.B. Yoon and R.A. Dalrymple, "Wave reflection from energy dissipation region", *J. Waterway Port Coastal Ocean Eng. ASCE*, 112, pp.632-644, 1986.
17. Tsay, T. -K. and Liu, P. L.-F., "Numerical Solution of Water-Wave Refraction and Diffraction Problems in the Parabolic Approximation", *J. Geophys. Res.*, 87(C10):7932-7940, 1982
18. Tsay, T. -K. and Liu, P. L.-F., "A Finite Element Model for Wave Refraction and Diffraction", *Applied Ocean Research* Vol.5, No.1, pp.30-37, 1983.
19. Watanabe, A. and K. Maruyama, "Numerical Modeling of Nearshore Wave Field under Combined Refraction, Diffraction and Breaking," *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 29, pp. 19-39, 1986.
20. 渡辺 晃，丸山 康樹，" 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法 "，*海岸工学研究発表会論文集 JSCE*，pp.103-107， 1984。

21. 郭一羽主編，「海岸工程學」，文山書局，第 149 頁-第 153 頁，2001。
22. 陳伯旭，蔡丁貴，「局部輻射邊界條件在水波數值模式上之應用」，第十二屆海洋工程研討會論文集，第 1 頁-第 9 頁，1990。
23. 陳伯旭，蔡丁貴，「以有限元素法模擬模擬近岸碎波波場」，八十六年度海岸工程數值模式研討會論文集，第 29 頁-第 40 頁，1997。
24. 漥 泰浩，小竹康夫，磯部雅彥，渡邊晃，「非定常緩勾配不規則波動方程式」，海岸工_ 論文集，第 38 卷，pp. 46-50 ，1991。
25. 許泰文，蔡丁貴，顏朝卿，陳伯旭，「以有限元素法模擬近岸波場」，第二十屆海洋工程研討會論文集，第 491 頁-第 499 頁，1998。
26. 許泰文編，「近岸水動力學」，科技圖書，第 137 頁-第 143 頁，2003。
27. 王永和，「利用有限元素法模擬波浪變形」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，2001。
28. 任文華，「以有限元素法模擬近岸碎波波場」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，1993。
29. 吳明全，「防波堤附近海域波浪變形之數值模式研究」國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，1995。