

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

傾斜防波板引起非線性波溯上與變形研究 The Interaction of Nonlinear Waves and Surface Penetrating Inclined Wave Barriers

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC 96-2221-E-009-242-

執行期間：96年08月01日至97年07月31日

計畫主持人：吳永照

共同主持人：

計畫參與人員：詹智為

成果報告類型：精簡報告

處理方式：立即公開查詢

執行單位：國立交通大學 土木工程學系

中 華 民 國 97 年 8 月 30 日

傾斜防波板引起非線性波溯上與變形研究

摘要

本研究以邊界元素法模擬直推式造波之非線性波浪數值水槽，並與 Stokes 五階理論波形比較後，進而在水槽中設置單一與兩穿入式防波板，利用數值方法探討非線性波與防波板之間的交互作用，計算波浪通過穿入式防波板的透射率與實驗值相符驗證本模式之正確性。由數值模擬結果發現，波浪的透射率與防波板之沒水深度、寬度與傾斜角度及兩防波板的間距有關；數值模擬證實適當的調整穿入式防波板的配置可有效降低非線性波透射率。此外也利用數值方法探討調整兩穿入式防波板間距控制非線性波浪溯上高度的可行性，研究結果發現經由適當的調整兩穿入式防波板間距，確實可有效的控制非線性波浪溯上高度，即可使溯上高度變低也可增加溯上高度，本研究也嘗試在固定兩穿入式防波板間距的情況之下，調整防波板傾斜角度，探防波板傾斜角度對非線性波浪溯上高度的影響。

關鍵詞：數值水槽、防波板、溯上、非線性波、透過率

The Interaction of Nonlinear Waves and Surface Penetrating Inclined Wave Barriers

ABSTRACT

Based on the boundary element method (BEM), a time stepping lagrangian technique is developed to simulate the generation of nonlinear water wave by a piston type wavemaker in a numerical wave tank. To demonstrate the accuracy of the proposed numerical scheme, the surface elevation is computed and compared with the fifth order Stokes wave theory. The numerical scheme is applied to study the interaction of nonlinear waves with vertical thin barriers. The transmissivity predicted by this study is compared to laboratory data and numerical results from other investigations. After having verified the accuracy of the numerical scheme, the interaction of nonlinear waves with inclined thin barriers is investigated in detail. Our numerical results show that transmissivity is affected by the width, the submerged depth, the inclined slope of barrier, and the clearance between two barriers. Furthermore, the numerical wave tank is applied to study nonlinear wave runup on sloping dike. The current study examines the influence of such parameters as the slope of wave barriers and the clearance between inclined barriers on runup height. Numerical results show that nonlinear wave runup on sloping dike can be controlled by adjusting the arrangement of wave barriers.

Keywords: Numerical wave tank; Wave barrier; Runup; Nonlinear wave; Transmissivity

一、前言

海岸工程除了波浪的探討之外，用以保護沿海居民身家安全的海岸結構物同時也是一項重要的議題。近年，有不少以理論或實驗方法於有限水深中，探討不同類型結構物與波浪之交互作用的研究，但多著重在線性波與結構物之間的相互關係；然而在水深較淺的情況之下，探討波浪與結構物之間的交互作用時，非線性波之影響便成為不可忽視的重要因素。因此本文針對非線性波與穿入式防波板之間的交互作用以數值方法進行模擬，並對數值結果深入分析，同時以數值分析線性波之結果及部分前人實驗之成果加以比較。

二、文獻回顧

關於波浪通過單一穿入式防波板的相關研究 Wiegel (1960) 以微小振幅波理論得近似解，探討波浪通過穿入式防波板的透射率並配合實驗加以驗證。Liu and Abbaspour (1982) 以邊界積分法探討穿入式防波板之沒水深度與傾斜角度對於線性波透射率及波高的影響。Losada 等人 (1992) 根據線性波理論解析線性波斜向入射一系列垂直自由水面之防波板後，波浪之透射率與波浪作用於防波板之水平淨力。關於波浪通過兩穿入式防波板的相關研究，Wu and Liu (1988) 以特徵方程式展開，配合數值方法發展一解析解，探討斜向入射之微小振幅波與兩垂直自由水面之防波板的相互關係，吳與詹 (2007) 利用數值波浪水槽探討非線性通過二穿入式防波板的變形，研究利用防波板降低非線性波透過率的效果。

關於溯上問題的研究，莊與林 (1991) 取溯上水體為一二次線性分布，並根據能量守恆定理，並與實驗值迴歸出不同堤面坡度下之相對溯上高與波浪尖銳度間的關係。Liu and Cho (1994) 則以邊界元素法以數值計算模擬 Solitary Wave 及 Cnoidal Wave，探討底床的摩擦效應對於波浪在溯上之影響。為了有效降低溯上波高，有學者 Neelamani and Sandhya (2004) 以堤面上設計有規則小凸起方塊、凹形方格來進行溯上實驗，而發現均能比光滑堤面有效的降低溯上高度。莊等 (1993) 以不同的矩形條狀物來模擬粗糙堤面進行溯上試驗。

三、理論模式

本文先以一純水槽進行驗證數值造波模式的可行性，假設一固定水深 h 的數值水槽，水槽的左邊界為一虛擬活塞式造波板 (piston type) 邊界，上邊界為自由水面，右邊界為幅射邊界 (Radiation condition) 並有假想海綿置於前端，下邊界為不透水底床邊界。定義造波板的初始位置與自由水面交界點為卡氏座標系之原點。在波浪通過穿入式防波板並於斜面海堤溯上模式中，防波板設置於水槽內，定義離海堤較遠的防波板為第一防波板，較近的防波板為第二防波板，第一防波板離海堤距離固定為 3 倍波長，兩防波板之沒水深為 d ，寬度為 b ，傾斜角度為 θ ，兩防波板隔間距為 q ，斜面海堤傾斜角度為 α ，如圖 1 所示。本文數值模式計算領域由造波板邊界、自由水面邊界、不透水邊界 (底床、防波板與斜面海堤) 所圍成之封閉區間。

假設水槽中的流體為非黏滯性，不可壓縮，且為非旋性流場，則有一速度勢 $\Phi(x, z, t)$ 的存在，配合勢能流理論，整個數值研究領域之控制方程式為 Laplace equation：

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

卡氏座標 (x, z) ，水平速度 u 及垂直速度 w 定義為：

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} ; w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (2)$$

沿著自由表面點，定義一區域座標 (s, n) ，其中 s 為單位切線向量， n 為單位法線向量。數值模式需滿足以下邊界條件：

1. 左邊界條件：為一虛擬造波板之運動邊界條件(KBC)造波板上水分子的位移為

$$x = \hat{S}(t, x_0) = \frac{s_0}{2} \sin \omega t + \frac{s_f}{2} \sin(2\omega t - \varphi - \pi) + x_0 \quad (3)$$

則造波板之 KBC 則為：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = -\frac{d\hat{S}}{dt} \quad (4)$$

x_0 為造波板初始位置之 x 座標值， s_0 為造波板之衝程， ω 為造波板的運動頻率， s_f 為消除二階自由波所需之衝程， φ 為一階 Stokes 波與二階自由波之相位差。由於造波板產生的自由波為自然界的波浪所不存在的，因此於造波板上水分子的位移部分另外需加上 $s_f/2 \sin(2\omega t - \varphi - \pi)$ ，目的在消除造波板所產生的自由波。圖 2 為消除二階自由波與包含二階自由波之水面波形比較，顯示消除自由波的效果很好。

2. 右邊界條件：

A、右邊界條件為一假想無窮遠邊界，即幅射邊界條件

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (5a)$$

其中 c 為波速

B、右邊界條件為不透水斜面海堤

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (5b)$$

3. 自由水面運動邊界條件(KFSBC)：自由水面的水 粒子速度等於波形速度，所以給予表面水粒子一座標為：

$$x = \xi(t, x_0) ; z = \zeta(t, z_0) \quad (6)$$

$$\frac{d\xi}{dt} = u ; \frac{d\zeta}{dt} = w \quad (7)$$

其中 $x_0 = \xi(t, x_0) ; z_0 = \zeta(t, z_0)$ 。

4. 自由水面動力邊界條件(DFSBC)：可由 Bernoulli's equation 推導

A. 溯上水槽的 DFSBC：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta + \frac{1}{2}[u^2 + w^2] = 0 \quad (8)$$

ζ 為水面之高程，令自由表面大氣壓力 p 為零。

B. 純水槽的 DFSBC：幅射邊界(5)是基於線性長波的假設，因此仍會有些微的反射波，本文在(8)式以 Ohya and Nadaoka (1991)假想自由表面海綿層來修正，借以消除些微反射波。

5. 底床、沒水板邊界條件：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

自由水面邊界、幅射邊界與不透水邊界於 $t=0$ 水粒子屬於完全靜止狀態，即 Φ 或 Φ_n 為零。

四、數值方法

本研究中所採用的數值方法為邊界元素法，對一邊界值問題而言，如果其自由空間之 Green 函數基本解為已知，既可應用 BEM 來計算。應用 BEM 處理問題時，須利用 Green 第二恒等式將原來的邊界值問題轉換成一積分方程式的形式。而在某一個任意選定的邊界點(Source Point) P 上，其速度勢能 $\Phi(P)$ 可表示成 (Brebbia and Dominguez, 1989)

$$-\frac{\gamma}{2\pi}\Phi(P) = \int_{\Gamma} \left(\Phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) d\Gamma \quad (10)$$

其中 G 為基本解， Γ 為問題的控制邊界， Φ 為所求邊界上的速度勢能， γ 為邊界點 P 之內角。對一個控制方程式為 Laplace 方程式的二維邊界值問題而言，基本解為 (Greenberg, 1971)：

$$G = (1/2\pi)\ln r \quad (11)$$

式中 r 為邊界點 P 與其他邊界點間之距離。

為了追蹤自由水面上水粒子在每增加一時間間距 δt 移動軌跡，採用 Dold and Peregrine (1984)之模式來模擬。藉由連接各個水粒子的位置來得到整個自由水面在任一時刻的波形。若時間間隔 δt 夠小的話，則任一水粒子從 t 的位置 (ξ, ζ) 移動至下一時刻 $t + \delta t$ 的位置 (ξ', ζ') 及其速度勢 Φ' 可以 Taylor 級數展開式來表示成：

$$\xi' = \xi + \frac{d\xi}{dt}\delta t + \frac{d^2\xi}{dt^2}\frac{(\delta t)^2}{2} + O(\delta t)^3 \quad (12)$$

$$\zeta' = \zeta + \frac{d\zeta}{dt}\delta t + \frac{d^2\zeta}{dt^2}\frac{(\delta t)^2}{2} + O(\delta t)^3 \quad (13)$$

$$\Phi' = \Phi + \frac{d\Phi}{dt}\delta t + \frac{d^2\Phi}{dt^2}\frac{(\delta t)^2}{2} + O(\delta t)^3 \quad (14)$$

式中之右項為時刻 t 的各項值，假如已知其各項值對時間的全微分，新的位置及速度勢即可求得。

在整個計算過程中，採用 Euler-Lagrangian 描述法的觀念，即在每一時刻給定自由水面之 ξ 、 ζ 及已知的 Φ 及 Φ_n 計算未知的 Φ 及 Φ_n 是為 Euler 描述法觀

念的應用，而由上一時刻 ξ 、 ζ 及 Φ ，進一步求算下一時刻的 ξ' 、 ζ' 及 Φ' 則是為 Lagrangian 描述法觀念的應用。

五、數值結果與討論

數值模式中邊界上元素長度大致等於波長的 1/30，時間間距取一個週期 128 點(T/128)。而透射率 T 由下式求得，其中 a_i^1 、 a_i^2 與 a_r^1 、 a_r^2 為頻率為 ω 、 2ω 之入射波與透射波振幅。

$$T = \frac{\sqrt{a_r^1{}^2 + a_r^2{}^2}}{\sqrt{a_i^1{}^2 + a_i^2{}^2}} \quad (15)$$

為確保數值造波的可行性，在此驗證模式中，在純水槽的末端前加入虛擬海綿層用以消除前進波及反射波。依據 Ohyama 與 Nadaoka(1991)以線性波針對此種類型之海綿層的寬度小於等於一個波長且阻滯係數 $\mu_{\max} \cong c\sqrt{g/h}$ 呈線性變化時。本研究將海綿層的寬度加長到 3 倍波長寬度，分別以 C=0.1、0.2、0.3 及 0.4 進行模擬。水槽長度為 10 倍波長，靜水深 $h=1.0\text{m}$ ，入射波條件($kh=1.0$ 、 $H/L=0.04$)，造波經過 40 週期後，截取水槽其中一段水面之波形來與 Fenton(1985)提出的 Stokes 五階理論波形比較，由圖 3 中可以觀察出從四組模擬出的數據與 Stokes 五階理論的結果很接近。本文造波模式的總質量與初始質量的比值、總位能、總動能與總能量均隨時間最後有達穩定收斂的趨勢。

關於波浪通過兩穿入式防波板的探討中，本研究與吳和劉（1988）的數值結果相互比較。靜水深 $h=1.0\text{m}$ ，防波板條件為 $d_1/h=0.2$ ， $b_1/h=0.5$ ， $d_2/h=0.3$ ， $b_2/h=0.4$ ，兩板間距 $q/h=0.6$ 。圖 4 為在相同的防波板條件下，利用數值水槽的方式固定入射波尖銳度分別為 0.02 與 0.03，探討相對水深與透射率的關係。如圖顯示本數值計算結果與吳和劉的數值結果有相似的趨勢，透射率在 $kh=1.0\sim 3.0$ 間先升高而後迅速遞減。由圖中顯示本模式所模擬之結果較吳和劉的數值結果小，原因是非線性波尖銳度愈大時，非線性效應愈大，而對應的透射率則愈低。

接著，本研究針對波浪通過防波板之透射率做分析討論。波浪的尖銳度 H/L 、相對水深 kh 、防波板的沒水深度、防波板的寬度及防波板傾斜的角度對透射率及波浪達到穩定時間都會有不同的影響。

固定防波板之幾何形狀，改變 kh ，配合 H/L 分別為 0.02、0.03 與 0.04 探討波浪通過單一與兩防波板之透射率，如圖 5 所示，當 kh 愈大，透射波高愈小，非線性效應愈弱，故透射率隨著 kh 增加而降低。而波浪經過兩防波板阻擋後，透射率較通過單一防波板時為低。

僅改變尖銳度，固定防波板幾何形狀 $d/h=0.4$ 、 $b/h=0.2$ ，配合 $kh=1.0$ ，兩板間距 $q=0.675L$ 以線性與非線性理論模擬波浪通過單一與兩防波板，結果如圖 6 所示透射率隨著尖銳度增加而降低，且波浪通過兩防波板時的透射率較僅通過單一防波板時為低。入射波通過防波板後，波高愈高則非線性效應愈明顯，使得高頻波能量所佔的比率變大而主頻波能量減小，如(17)式，主頻波振幅 a_t^1 減小，高頻波振幅 a_t^2 增加，而 a_t^1 遠大於 a_t^2 ，故透射率 T 遞減。

波浪通過兩平行防波板的透射率會隨著間距的增長而呈現類似周期性的變化，並在特定的間距情況下，波浪在兩平行防波板之間會產生共振，造成極高的透射率。若僅考慮改變兩板間距，固定波浪條件與防波板之寬度與沒水深進行模擬，並且與線性波情況下之透射率作比較。結果如圖 7 非線性波與線性波結果相互比較，雖然相位上有些許差異，但是仍有相同的趨勢。

圖 8 為波浪通過穿入式防波板並於斜面海堤溯上定義圖，假設波浪水槽水深固定為 $h=1\text{m}$ 、防波板的寬度 $b=0.2h$ ， kh 為相對水深、 L 為波長、 T 為週期、 H 為波高、波浪的尖銳度為 H/L ，而斜面海堤傾斜角度 $\alpha=30$ 度。入射波條件為 $kh=1.5$ ，波浪尖銳度為 $H/L=0.03$ ，此時波長 $L=4.189\text{m}$ ，圖 7 顯示調整防波板間距 q/L 可有效改變波浪於海堤溯上最高水位，為了方便比較，同時計算單一防波板及無防波板時波浪溯上最高水位並繪於圖 9，由圖 9 發現雖然改變入射波條件，但適當的調整間距 q 值，一樣可以有效控制溯上高度 R/h ，由圖 9 也發現 $q/L=0.55$ 時溯上高度 $R/h=0.072$ 為最小，遠小於單一防波板的 $R/h=0.136$ 及無防波板的 $R/h=0.163$ ；但若想增加溯上高度，可將間距調為 $q/L=0.35$ ，則溯上高可達 $R/h=0.323$ ，約為入射波高的 2.6 倍。

六、結論

本文以邊界元素法建立一數值造波水槽，模擬非線性波通過防波板後之變化，探討防波板對非線性波透射率及非線性波於傾銷海堤溯上的影響，數值計算結果可歸納成下列幾點結論：

1. 在單一或兩防波板之模式下，波浪通過防波板之透射率皆隨相對水深與尖銳度增加而降低。
2. 相同條件的入射波情況下，波浪通過防波板之透射率會隨著沒水深度與寬度的增加而降低。
3. 波浪通過防波板之透射率會隨著傾斜角度愈大時，波浪沿著防波板溯上的高度愈高，反射波愈大，故透射率亦愈低。
4. 在兩穿入式防波板模式中，透射率隨著兩板間距 q 的增加呈現類似週期性之變化，在特定的間距情況之下，對應極低的透射率。
5. 無論是要增加或降低非線性波於海堤的溯上高度，都可以經由適當的調整二防波板間距及防波板傾斜角度達成。
6. 針對降低溯上高度而言，所謂最佳的二板間距或板的最佳傾斜角度，都與入射波條件有關，並無一定規則。
7. 除非根據入射波條件，適當調整二防波板的間距及傾斜角度，否則設置二防波板降低溯上高度的效果並不一定優於設置單一防波板，甚至有可能比未設置防波板還差。

謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「傾斜防波板引起非線性波溯上與變形研究」(編號 NSC96-2221-E-009-242)之部份研究成果，承蒙國科會經費之贊助使本研究得以順利完成，謹致感謝之意。

參考文獻

1. 莊甲子、林漢文(1991)「波浪越波之試驗研究」, 第十三屆海洋工程研討會論文集, 第 142-159 頁。
2. 莊甲子、周哲民、簡仲璟(1993)「粗糙堤面對波浪溯升溯降影響之試驗研究」, 第十五屆海洋工程研討會論文集, 第 385-393 頁。
3. 吳永照、詹智為(2007)「傾斜防波板引起非線性波溯上與變形研究」, 第二十九屆海洋工程研討會論文集, 第 95-100 頁。
4. Brebbia, C.A. and Dominguez, J. (1989), *Boundary Elements: An Introductory Course*, McGraw-Hill, New York.
5. Dold, J.W., and Perpgrine D.H. (1984), "Steep Unsteady Water Waves: An efficient computational scheme," *Proc. 19th Intl. Conf. On Coastal Eng.*, pp. 955-967.
6. Fenton, J.D. (1985), "A Fifth-order Stokes Theory For Steady Waves," *Journal of Waterways and Harbors Division*, Vol. 111, pp. 216-234.
7. Greenberg, M.D. (1971), *Application of Green's functions in science and engineering*, Prentice-Hall, New Jersey.
8. Grilli, S.T., Skourup, J. and Svendsen, I.A. (1989) "An Efficient Boundary Element Method for Nonlinear Water Waves," *Eng. Analysis with Boundary Elements*, Vol. 6, pp. 97-107.
9. Liu, P. L.-F. and Abbaspour, M. (1982), "Wave Scattering By A Rigid Thin Barrier", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 108, pp. 479-491.
10. Liu, P. L.-F. and Cho, Y.S. (1994), "Integral Equation Model for Wave Propagation with Bottom Frictions", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 120, pp. 594-608.
11. Losada, I.J., Losada, M.A. and Roldan, A.J. (1992), "Propagation Of Oblique Incident Waves Past Rigid Vertical Thin Barriers", *Applied Ocean Research*, Vol. 14, pp. 191-199.
12. Neelamani, S. and Sandhya, N. (2004), "Wave Reflection, Run-up, Run-down and Pressures on Plane, Dentated and Serrated Seawalls", *Coast Engineering Journal*, Vol. 46, pp.141-169.
13. Ohyaama, T. and Nadaoka, K. (1991), "Development of a numerical wave tank for analysis of nonlinear and irregular wave field", *Fluid Dynamics Research*, Vol. 8, pp. 231-251.
14. Wiegel, R.L. (1960), "Transmission of Wave Past a Rigid Vertical Thin Barrier," *Journal of Water Port Coast and Ocean Engineering*, Vol. 86, pp. 1-12.
15. Wu, J.K. and Liu P. L.-F. (1988), "Interaction Of Obliquely Incident Water Waves With Two Vertical Obstacles", *Applied Ocean Research*, Vol. 10, pp. 66-73.

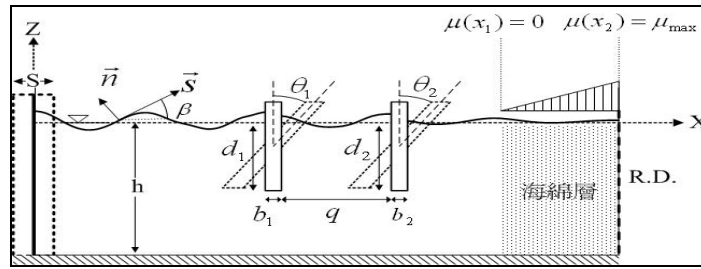
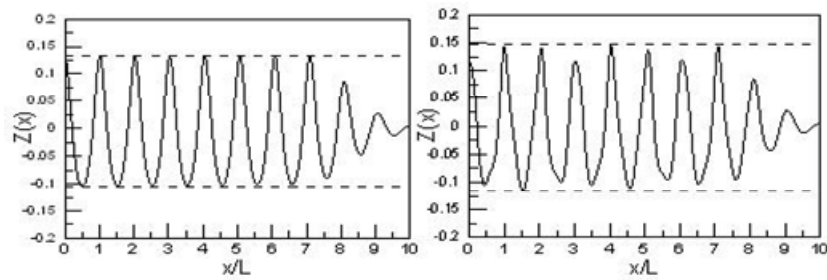


圖 1 非線性波通過穿入式防波板示意圖



消除自由波

含自由波

圖 2 消除二階自由波之效果比較

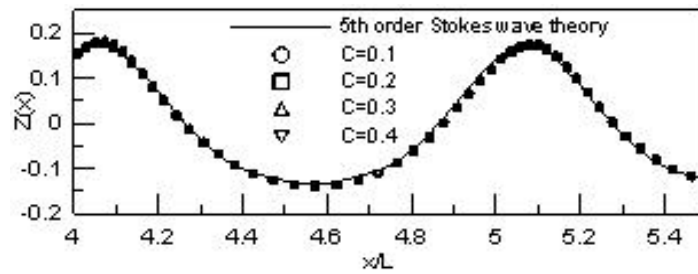


圖 3 本模式與 Stokes 五階波形比較

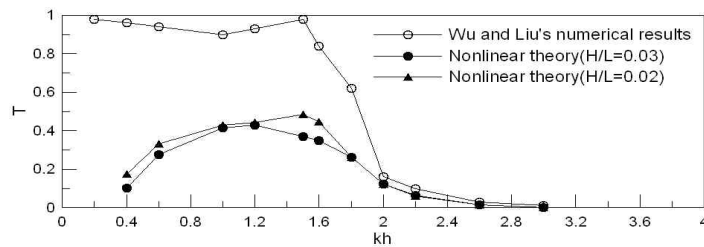


圖 4 波浪通過兩穿入式防波板之透射率與 kh 係

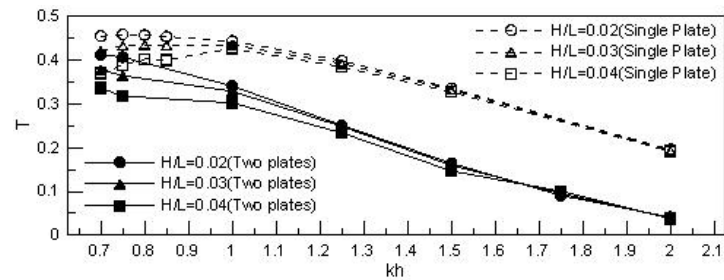


圖 5 波浪通過防波板之透射率與 kh 及尖銳度 係

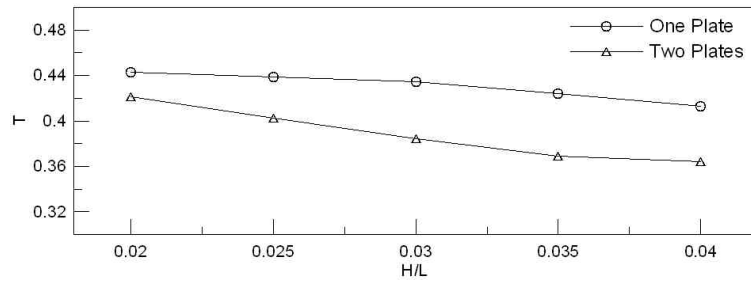
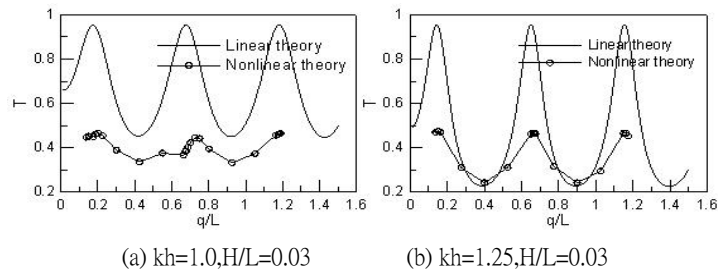


圖 6 波浪通過防波板之透射率與尖銳度關係



(a) $kh=1.0, H/L=0.03$

(b) $kh=1.25, H/L=0.03$

圖 7 透射率與兩板間距關係

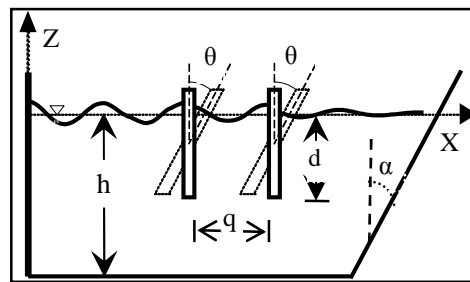


圖 8 波浪通過穿入式防波板溯上示意圖

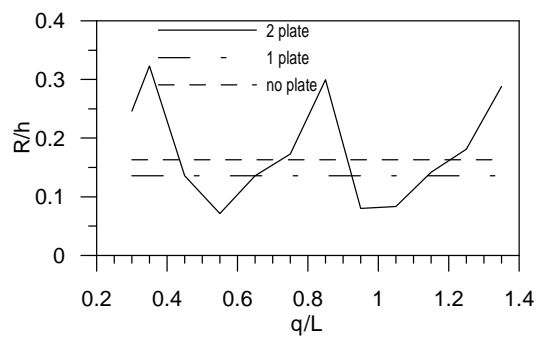


圖 9 溯上最高水位與防波板間距關係圖($kh=1.5$)