

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

波浪通過系列沒水平板引起之變形研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2611-E-009-001-

執行期間：93 年 08 月 01 日至 94 年 07 月 31 日

執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：吳永照

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 9 月 15 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告 波浪通過系列沒水平板引起之變形研究

Wave Motion over a Series of Submerged Plates

計畫編號：NSC93-2611-E-009-001

執行期限：93 年 8 月 1 日至 94 年 7 月 31 日

主持人：吳永照 交通大學土木工程學系

摘要

本研究主要為以數值方法探討線性及非線性波浪通過單一及系列沒水平板時引起的反射及透過現象，首先在頻率域 (Frequency domain) 進行線性分析，計算線性波通過單一沒水平板、雙沒水平板、及參沒水平板引起之波浪反射率及透過率，了解沒水平板設置位置、沒水平板長度、厚度、個數及板與板間之間距對波浪透射的影響。由於線性分析僅適用於微小振幅波理論，而且在頻率域計算，無法觀察波浪變形的發展過程，因此將進行非線性分析，利用數值水槽的方法，採用混合 Eulerian-Lagrangian 方法對相同問題於時間域 (Time domain) 作完整的非線性分析，除了更準確的數值結果之外，也可由數值結果觀察波浪變形的發展過程。最後並將各種數值計算結果相互比較，可更進一步了解沒水平板的防波功效。

關鍵詞：數值方法，非線性，反射，沒水平板

ABSTRACT

This study develops the boundary element method (BEM) to simulate the deformation of linear and nonlinear waves by a series of fixed, submerged, horizontal plates in water of finite depth. At first, the BEM based on linear wave theory will be developed. Reflection and transformation coefficients will be computed to examine the performance of the submerged plates. Numerical results show that the deformation is effected by the arrangement of plates, such as the length, the thickness, the submerged depth, the gap between plates and the number of plates. Since wave motion over plates placed at small submergence depth is highly nonlinear, a fully nonlinear time-dependence BEM (based on mixed Eulerian-Lagrangian method) will be developed to examine the same problem. The numerical results computed under various conditions will be compared each other.

Keywords: Numerical model, Nonlinear, Reflection, Submerged plate

一、前言

台灣山地多，可利用陸地少，但因四面環海，海岸空間的開發利用越來越受重視，開發利用海岸空間，必需構築各式各樣防波用的海岸結構物，保護沿岸設施或路地，早期的防波工程多為出水式防波

堤，由於水式防波堤影響海岸景觀，因此近年來的考慮方向為構築不會影響景觀的新式防波堤，如潛堤、沒水平板等，兩者都具有相當的防波效果，由於沒水平板構造簡單，施工方便，為一不錯的選擇，但是單一的沒水平板防波效果還是不夠好，因此本研究目的就是要探討系列沒水平板的防波效果，本研究除了學術上的價值，也提供實際防波工程設計的參考。

二、研究目的

本研究主要為以數值方法探討線性及非線性波浪通過系列沒水平板時引起的反射及透過現象，除了線性及非線性分析之外，尤其將詳細計算分析入射波遇系列沒水平板造成最大反射或零反射的發展過程，並比較線性分析及非線性分析數值結果。線性分析部分為計算線性波通過單一沒水平板、雙沒水平板、及參沒水平板引起之波浪反射率及透過率，除了板長為引起波浪變形的重要因素之外，板與板間的距離、板的厚度、板的沒水深度等都會影響波浪變形，尤其除了適當板長與波長比會造成幾乎全反射或零反射現象之外，適當的板間距與波長比應該也會造成幾乎全反射或零反射現象。由於線性分析僅適用於微小振幅波理論，而且在頻率域計算，無法觀察波浪變形的發展過程，因此也進行非線性分析，利用數值水槽的方法，採用混合 Eulerian-Lagrangian 方法對相同問題於時間域作完整的非線性分析，除了更準確的數值結果之外，也可由數值結果觀察波浪變形的發展過程，包括共振現象。

三、文獻探討

有關沒水平板的研究已有一段相當長的時間，Stoker (1957) 研究長波通過固定於自由水面的平板引起之反射與透過；Ijima et al. (1974) 將其延伸為入射波通過任意形狀防波堤引起之反射與透過；Siew & Hurley (1977) 提出長波通過沒水平板引波浪反射率與透過率的解析解，Patarapanich (1984) 研究造成最大反射的沒水平板布置條件。Liu & Iskandarani (1989) 及 Patarapanich & Cheong (1989) 分別以 BEM 及 FEM 模擬波浪通過沒水平板引起之變形。Yueh & Kuo (1993) 研究沒水平板對垂直壁的減壓效果。上述主要為線性理論的研究，其他尚有很多，如 Yu et al. (1991)，吳等 (1997)。有關非線性的研究則以數值水槽的方式較多，假設水為勢能流，利用邊界元素法模擬數值水槽，研究波浪碎波 (Longuet-Higgins and Cokelet, 1976)，波浪變形 (Dold and Peregrine, 1984；Grilli et al., 1989)

或波浪與結構物互制 (Ohyama and Nadaoka, 1991; Mcdougal et al., 1998) 的研究很多；也有學者假設水為黏性流體，利用有限解析法模擬數值水槽，研究波浪的變形及波浪與結構物互制問題 (張與唐, 1996; Tang and Chang, 1998; Hung and Dong, 1999)。有關波浪通過系列沒水平板的研究較少，岳與郭 (1991) 研究直立壁前單一沒水平板及將該平板截成很多小段的多孔板對海牆波壓及沒水平板上揚力消滅的效果。本文的非線性研究部分即為利用數值水槽，模擬非線性波通過系列沒水平板，以瞭解相關參數如：沒水平板的長度、沒水深度、板與板之間距等對波浪透射的影響。

四、研究方法

圖一為本研究波浪通過沒水平板的簡略幾何定義圖，沒水平板之板長各為 B ；沒水深度各為 d ，且浸置於等水深 h 數值水槽中；板與板間之间距各為 G 。線性分析時假設數值水槽左側有一波高為 H 的入射波進入數值水槽，數值水槽的右側假設無限延伸；非線性分析時假設數值水槽最左側有一直推式造波板，數值水槽的右側假設無限延伸。卡氏座標系統之原點在靜水面上， x 軸向右為正， z 軸向上為正，波是向 $+x$ 軸方向前進。假設流體為無黏滯性、不可壓縮、且呈非旋性之流動，因此流場中存在滿足 Laplace 方程式的速度勢 (Φ) ，故流場之控制方程式為

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (1)$$

流場之流速 $\vec{v}$ 可表示成 $\vec{v} = (u, w) = \nabla \Phi$ ，邊界條件則依線性分析及非線性分析分別描述如下。

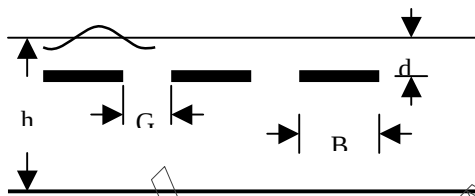


圖 1 波浪通過系列沒水平板定義圖

4.1 線性理論分析

設 $\Phi(x, y, t) = \phi(x, y) \exp(-i\omega t)$ ，自由表面邊界條件為

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\omega^2}{g} \phi \quad (2)$$

$\omega = 2\pi/T$ 為入射波之頻率， T 為週期， g 為重力加速度。底床及平板表面之不透水邊界條件為

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

另於計算域前後分別設置反射面邊界條件及透過面邊界條件 (Hsu & Wu 1999)。

4.2 非線性理論分析

上述之線性理論，比較適用於微小振幅波，當波浪較大或者當波浪通過平板時，波浪尖銳度增加，非線性更顯重要，為了提高精確度，必需利用非線性分析，速度勢除了需滿足控制方程式 (1) 外，尚需滿足下列之邊界條件：

自由水面運動邊界條件：

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \text{ on } z = \eta \quad (4)$$

自由水面動力邊界條件：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \Phi - \int_{x_1}^x \frac{\partial \mu}{\partial x} \Phi|_{z=0} dx = 0 \quad (5)$$

x_1 為海綿層之起始 x 座標， μ 為海綿層之人造阻滯係數，在海綿層中成一線性分布，在海綿層之起始端與無海綿區域之 μ 值為零，在最末端之 μ 值為最大值 $\mu_{\max}$ 。

底床及平板表面為不透水，其法線向量的速度為零，即

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

右邊界輻射邊界條件為

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = -\frac{1}{\sqrt{gh}} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mu \Phi - \int \frac{\partial \mu}{\partial x} \Phi|_{z=0} dx \right) \quad (7)$$

左邊界為直推活塞式造波板，除了造波之外同時必需消除二階自由波 (free wave)，詳細可參考 Wu (1987) 的論文。

4.3 數值方法

本研究中所採用的數值方法為線性元素之邊界元素法。應用 BEM 處理問題時，須利用 Green 第二恆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源點 i 上，其速度勢 Φ_i 可表示成 (Brebbia and Dominguez, 1989)：

$$-\frac{\alpha}{2\pi} \Phi_i = \int_{\Gamma} \left(\Phi \frac{\partial q}{\partial n} - q \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) d\Gamma \quad (8)$$

其中 q 為控制方程式的基本解， Γ 為問題的控制邊界， Φ_i 為邊界上任意點的速度勢， α 為邊界源點 i 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，其基本解為 (Greenberg, 1971)

$$q = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{r} \right) \quad (9)$$

式中 r 為邊界源點 i 與其他邊界上任意點間之距離。將 (8) 式離散化並代入線性分析的邊界條件可計算入射波的透過率及反射率。

對於非線性分析，本研究係採 Time Domain 的計算方式。自由水面上水粒子的移動軌跡是採用 Dold and Peregrine (1984) 的 Tayler 級數二階近似展開式加以計算，即

$$x' = x + \frac{d\zeta}{dt} \alpha + \frac{d^2 \zeta}{dt^2} \frac{(\alpha)^2}{2} + O(\alpha^3) \quad (10)$$

$$z' = z + \frac{d\eta}{dt} \tilde{\alpha} + \frac{d^2\eta}{dt^2} \frac{(\tilde{\alpha})^2}{2} + O(\tilde{\alpha})^3 \quad (11)$$

$$\Phi' = \Phi + \frac{d\Phi}{dt} \tilde{\alpha} + \frac{d^2\Phi}{dt^2} \frac{(\tilde{\alpha})^2}{2} + O(\tilde{\alpha})^3 \quad (12)$$

同時為了便於追蹤自由水面水粒子的運動，表面水粒子的座標及運動速度定義為

$$x = \zeta(t, x_0) \quad z = \eta(t, z_0) \quad (13)$$

$$\frac{d\zeta}{dt} = u \quad \frac{d\eta}{dt} = w \quad (14)$$

其中 $x_0 = \zeta(0, x_0)$, $z_0 = \eta(0, z_0)$ 。在整個的計算過程中，則採用 Euler-Lagrangian 描述法的觀念，即在固定時間 t 時，由已知邊界上的節點作標及節點上已知的 Φ 及 $\partial\Phi/\partial n$ 求未知的 Φ 及 $\partial\Phi/\partial n$ 為一 Euler 描述法觀念的應用，而在自由水面上，由上一個時段每一節點的座標 x, z 及速度勢 Φ 進一步推算下一個時刻節點的座標 x', z' 及數值勢 Φ' 則是為 Lagrangian 描述法觀念的應用。數值模擬過程中，其自由水面波形之角度 θ 及切線方向 (s) 的變化量 (如： $\partial\Phi/\partial s^w$ 、 $\partial^2\Phi/\partial s^2$ 及 $\partial\theta/\partial s^w$ 等)，均是採用曲線近似法 (Cubic Spline Method) 的方式求得。而水粒子的水平速度 (u) 及垂直速度 (w)，則可藉由下列的關係式求得

$$u = \frac{d\zeta}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial s} \cos\theta - \frac{\partial\Phi}{\partial n} \sin\theta \quad (15)$$

$$w = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial s} \sin\theta + \frac{\partial\Phi}{\partial n} \cos\theta \quad (16)$$

而 Φ 對時間的全微分變量 ($d\Phi/dt$) 與偏微分變量 ($\partial\Phi/\partial t$) 之關係可表示成

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\Phi \quad (17)$$

將式 (15)、(16) 所求得的速度 u 及 w ，代入式 (5) 中，並由式 (17) 可得

$$\frac{d\Phi}{dt} = -g\eta + \frac{(u^2 + w^2)}{2} \quad (18)$$

式 (10) 至 (12) 中的一階全微分變化量 ($d\zeta/dt$ 、 $d\eta/dt$ 及 $d\Phi/dt$)，可由式 (15)、(16) 及 (18) 求得。而二階全微分變化量 ($d^2\zeta/dt^2$ 、 $d^2\eta/dt^2$ 及 $d^2\Phi/dt^2$) 則是藉由 Grill et al. (1989) 所提出的關係式計算得之，即

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} = \frac{du}{dt} = \left[\frac{\partial\Phi_t}{\partial s} + \frac{\partial\Phi}{\partial s} \frac{\partial^2\Phi}{\partial s^2} + \frac{\partial\Phi}{\partial n} \frac{\partial\Phi}{\partial s} \right] \cos\theta + \left[\frac{\partial\Phi}{\partial n} \frac{\partial^2\Phi}{\partial s^2} - \frac{\partial\Phi}{\partial s} \frac{\partial\Phi}{\partial n} - \frac{\partial\Phi_t}{\partial n} - \frac{\partial\theta}{\partial s} (u^2 + w^2) \right] \sin\theta \quad (19)$$

$$\frac{d^2\eta}{dt^2} = \frac{dw}{dt} = \left[\frac{\partial\Phi_t}{\partial s} + \frac{\partial\Phi}{\partial s} \frac{\partial^2\Phi}{\partial s^2} + \frac{\partial\Phi}{\partial n} \frac{\partial\Phi}{\partial s} \right] \sin\theta + \left[\frac{\partial\Phi}{\partial s} \frac{\partial\Phi}{\partial n} + \frac{\partial\Phi_t}{\partial n} - \frac{\partial\Phi}{\partial n} \frac{\partial^2\Phi}{\partial s^2} - \frac{\partial\theta}{\partial s} (u^2 + w^2) \right] \cos\theta \quad (20)$$

$$\frac{d^2\Phi}{dt^2} = -g \frac{d\eta}{dt} + u \frac{d^2\zeta}{dt^2} + w \frac{d^2\eta}{dt^2} \quad (21)$$

如此的步驟反覆運算，直至模擬所需的時間為止。

五、結果與討論

利用 BEM 分析線性及非線性波通過單一或系列沒水平板的基本理論架構及計算方法已如前述，波浪條件及系列平板之幾何條件與系列平板布置方式對波浪變形的影響將整理歸納於下。圖中符號定義如下：水深 h 固定為 1m， B 為板長， d 為沒水深度、 L 為線性波之波長、 k 為波數、 w 為沒水平板的厚度、 G 為板與板之間距、 n 為平板個數。圖 2 所示為線性波通過單一沒水平板 ($B=5h$, $d=0.3h$) 引起變形的數值計算結果，顯示相對水深 (h/L) 較小時比較有防波效果；此外由圖 2 也發現，一般情況下，增加厚度會降低反射率增加透過率，而且波越長越明顯，此可由圖 3 更進一步證實。由圖 2 中取 $h/L=0.06$ 及 $h/L=0.2$ 並改變板的厚度 (w)，反射率數值計算結果繪如圖 3，當 w/h 小於 0.07，反射率隨厚度增加漸增；當 w/h 大於 0.07，反射率隨厚度增加明漸減。

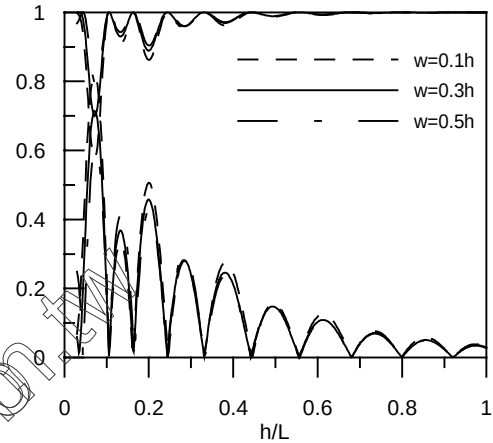


圖 2 線性波變形與相對水深的關係

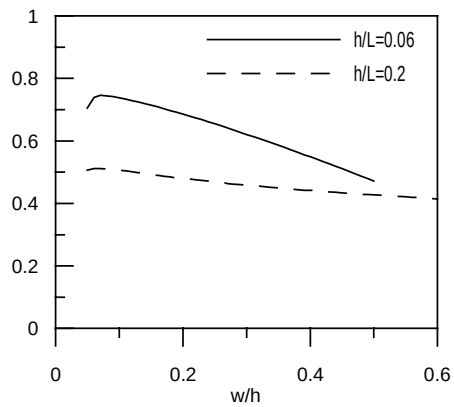


圖 3 平板厚度對線性波反射率的影響

單一平板板長對波浪變形的影響則如圖 4 所示 ($d=0.3h$, $kh=1$)，透過率隨著板長的增加幾乎成略為遞增的週期性變化，同時由圖 4 可再次證實增加板的厚度會降低反射率增加透過率。圖 5 及圖 6 顯示沒

水平板數目由一個增加為二個再增加到三個時($d=0.3h$, $B=5h$, $G=2h$, $w=0.1h$)，波浪反射率有明顯的增加，而透過率則明顯降低。圖 7 為將三個沒水平板置於不同沒水深度時($h/L=0.2$, $B=5h$, $G=2h$, $w=0.1h$)，波浪反射率及透過率的數值計算結果，大致上沒水平板放置的位置越靠近水面防波效果越佳，但本研究並未考慮水深太淺可能造成碎波的因素。

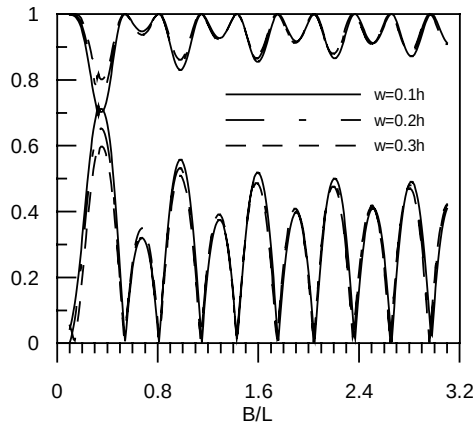


圖 4 單一平板板長對線性波變形的影響

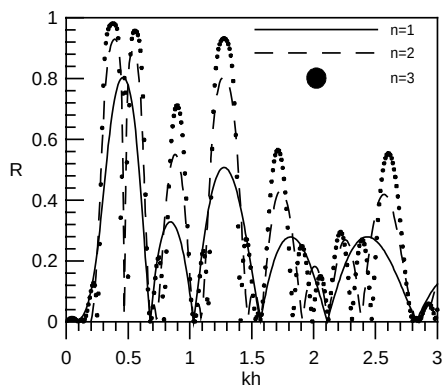


圖 5 平板數目對反射率的影響

為了更進一步了解板與板間距離對波浪變形的影響，取圖 1 中 $h/L=0.2$ (相當於圖 5 中 $kh=1.257$) 的相同條件，但改變板與板間距離 G 進行數值計算，數值計算結果如圖 8 所示。顯然板與板間距離對波浪變形的影響成週期性，因此要利用系列沒水平板達到防波效果，不能忽視板與板間距離

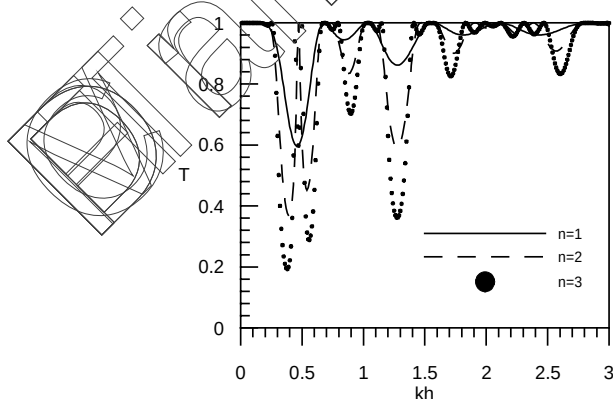


圖 6 平板數目對透過率的影響

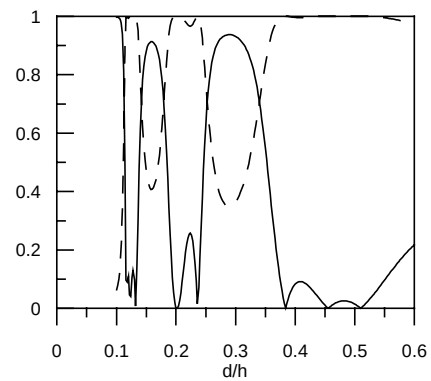


圖 7 平板沒水深度對波浪變形的影響

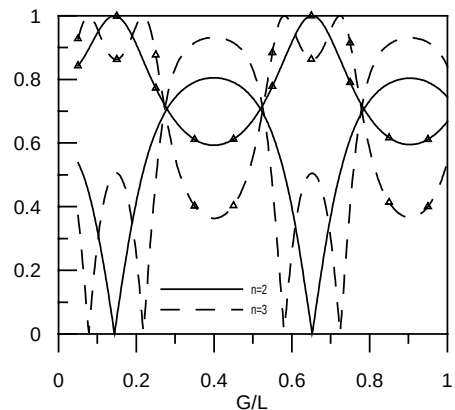


圖 8 板與板間距離對波浪變形的影響

的影響。若將平板數增為 3 個，改變板長作數值計算並與單板之數值計算結果相互比較繪於圖 9 ($d=0.3h$, $kh=1$, $w=0.1h$)，顯示板長對於波浪變形的影響趨勢並不因平板數目增加而改變，透過率及反射率隨著板長的增加幾乎成略為遞減的週期性變化，但板的數目越多其反射越大。

以上為線性分析的數值計算結果及討論，接著為利用數值水槽作非線性數值計算結果及討論。首先計算非線性波通過單一沒水平板的變形，圖 10 ($kh=1$, $d=0.3h$, $B=0.4L$) 為數值水槽中 $t=40T$ 至 $t=44T$ 之水面變化情形，顯示波

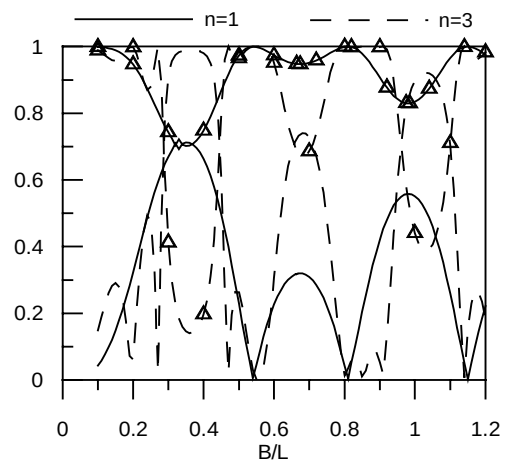


圖 9 板長對線性波變形的影響

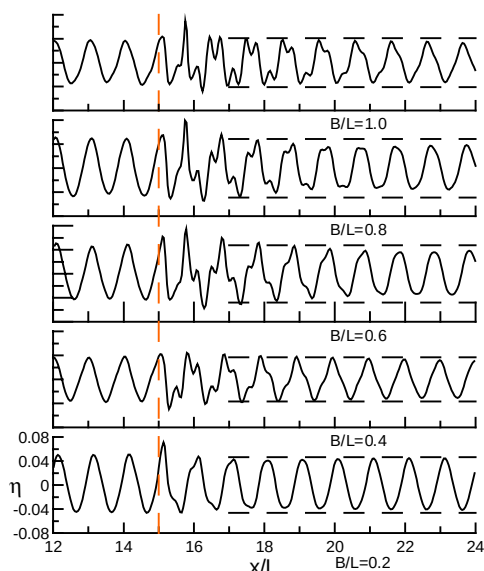


圖 10 非線性波通過單一沒水平板水面變化

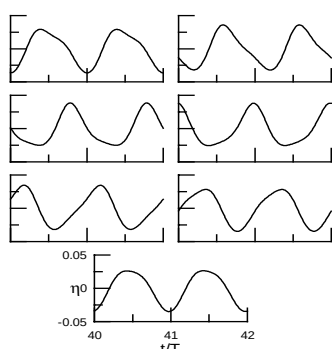


圖 11 $B=0.4L$ 時板後固定點波形變化

形已達穩定，虛線區域為沒水平板位置，由於板的前及後端會產生二階自由波 (free wave)，因此板後波形不是很均勻，

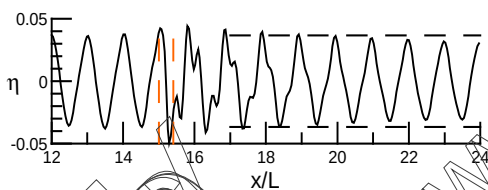


圖 12 線性及非線分析數值計算結果之比較

若將板後第五個波分成七段，則各點之(固定位置)波形如圖 11 所示，自由波的存在明顯可見。

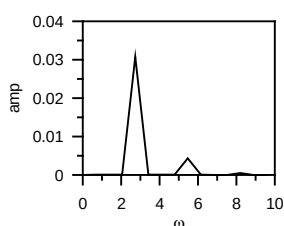


圖 13 $B=0.4L$ 時非線性透過波波譜分析

圖 12 為線性及非線分析數值計算結果之比較，水平虛線為線性透過波的波峰及波谷位置，顯示非線性分析之透過波高小於線性分析之透過波高。非線性透過波

經由波譜分析結果如圖 13 所示，其一階線性波振幅為 $0.0308m$ ，二階波振幅(含 Stokes wave 及 Free wave)為 $0.0044m$ ，而前述線性分析之透過波振幅為 $0.0367m$ 。改變板長也可獲得類似現象，圖 14 為不同板長之數值計算結果。

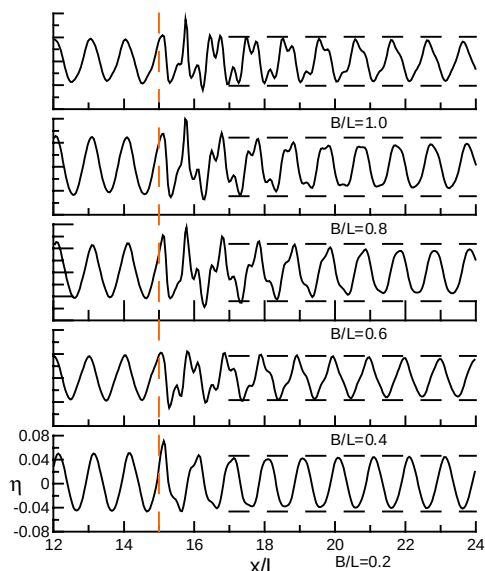


圖 14 不同板長時線性及非線性透過波比較

若將圖 14 不同板長的資料進行如圖 13 的波譜分析，並將分析結果繪於圖 15 可發現透過波第二階 (2ω) 的振幅具有隨板長增加而漸漸增加的趨勢，有可能是因為板越長則自由波越強造成的現象。

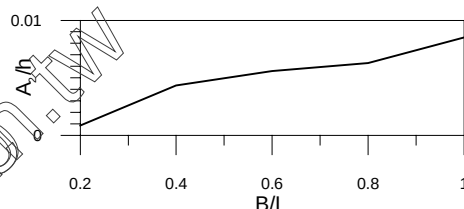


圖 15 透過波第二階振幅隨板長增加的變化

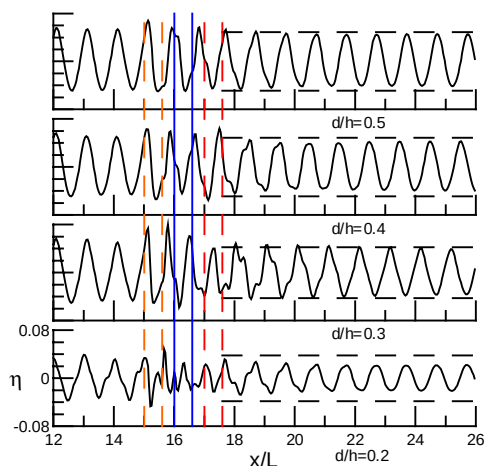


圖 16 不同沒水深度時線性及非線性透過波比較

若使用三塊等長的沒水平板，板長 $B=0.6L$ ，布置於不同水深進行波浪變形的非線性數值計算 ($kh=1$, $G=2.5h$)，其數值

計算結果如圖 16 所示。基本上非線性分析之透過波高小於線性分析之透過波高，此與板長的影響相似，但其透過波第二階 (2ω) 的振幅變化並無一定的趨勢。

有關板間距對於波浪變形的影響則以二塊等長 ($B=5h$) 沒水平板，置於沒水深度 $d=0.3h$ ，相對水深為 $h/L=0.2$ 的條件下，改變板間距 G 進行非線性數值計算，數據結果如圖 17 所示，大致上非線性分析之透過波高小於線性分析之透過波高，與板長及水深變化的影響一致，因此根據上述數值分析，或可確定，波浪通過沒水平板時，其實際的透過波高應該小於線性分析計算所得之透過波高。

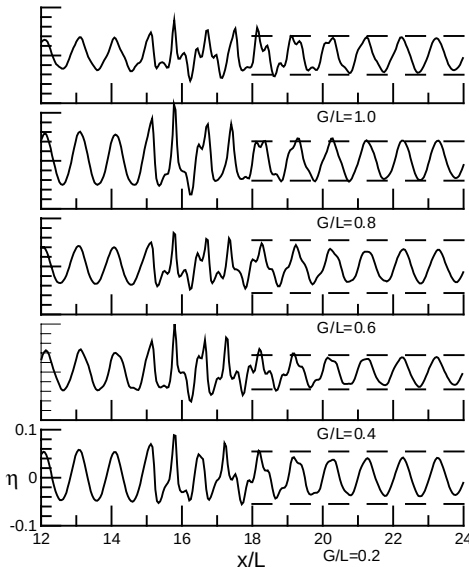


圖 17 不同板間距時線性及非線性透過波比較

其反射率 0.9895 透過率為 0.1444，若將此相同波浪條件及沒水平板布置利用前述數值水槽概念作非線性分析，水面起伏隨時間的變化如圖 18 所示 ($t=15T$ 至 $t=48T$)，原之入射線性波高為 0.0982m，由波譜分析得一階線性透過波高為 0.0129m，相當於透過率為 0.1318，而其二階線性透過波高為 0.0036m，約為一階波高的 28%，比例相當高，應為自由波的貢獻。

本研究主要在探討單一及多塊沒水平板對波浪變形的影響，分別就線性理論及非線性理論進行數值分析，採用的數值方法為邊界元素法，線性數值分析是在頻率域進行計算，非線性數值分析則利用數值水槽的方法於時間域進行計算。基本上板長、板厚、沒水深度、板的數目及板與板之間距都會影響波浪的變形，板越薄則反射率越大透過率越小，但影響很有限；板長對波浪變形的影響成週期性變化，反射率隨著板長的增加幾乎成略為遞減的週期性變化；而沒水深度的影響則會受入射波條件的影響，但基本上其影響也成週期性；此外板與板之間距對透過波及反射波的影響也是週期性；增加板的數目確可有效降低透過波高。非線性分析是在時間域進行計算，因此可以觀察波在浪遭遇沒水平板引起變形 (包含共振) 的完整過程，由於沒水平板上部水深較淺，非線性較強，因此非線性波在此的交互作用可能影響波浪的變形，根據非線性數值計算結果發現，實際的透過波高比線性理論計算得之透過波高低；沒水平板兩端會產生自由波，二階自由波的波高有時比二階 Stokes 波的波高還高；此外二階分量會隨著板長增加而變大。因此利用系列沒水平板防波必需綜合考量上述各種因素的影響，才能達成預期的效果。

參考文獻

1. 吳永照、林建亨、徐虎嘯 (1997) "彈性消波板之消波效應"，第二十一屆力學會議論文集，297 頁-304 頁。
2. 吳永照 (1987) "Constant Wave Form Generated by a Hinged Wavemaker of Finite Draft in Water of Constant Depth," 第九屆海洋工程研討會論文集，552 頁-569 頁。
3. 岳景雲、郭一羽 (1991) "不同型式水平板對直立壁波壓及上揚力之研究"，The Chinese J. of Mechs., Vol.7, pp. 205-214。
4. 張志華、唐啟釗 (1996) "孤立波與潛堤後直立壁互制作用分析"，第十八屆海洋工程研討會論文集，253 頁-236 頁。
5. Brebbia, C. A. and J. Dominguez (1989) *Boundary Elements: An Introductory Course*, McGraw-Hill, New York.
6. Dold, J. W. and D. H. Peregrine (1984) "Steep Unsteady Water Waves: An

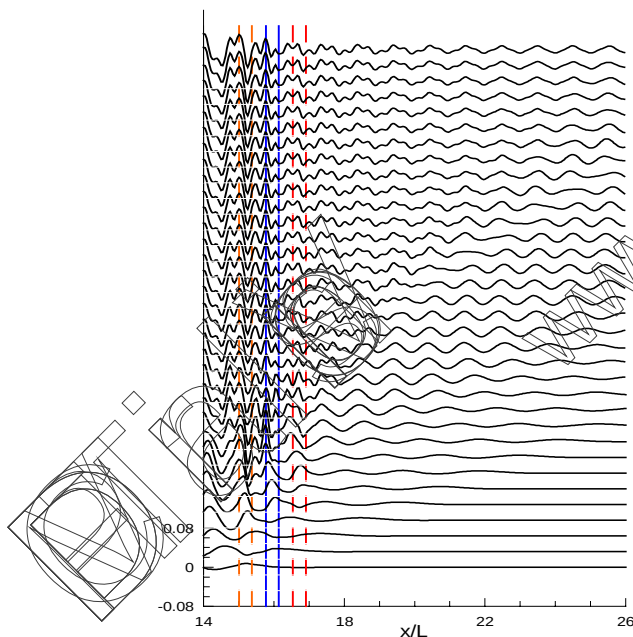
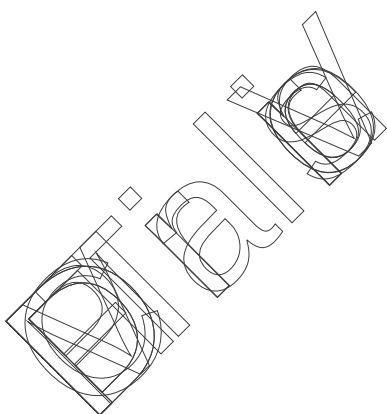


圖 18 最小透過波 (共振) 之發展過程

由於數值水槽非線性分析是在時間域進行計算，因此可觀察到波浪變形的詳細發展過程，依線性數值計算結果發現 3 個沒水平板， $kh=1$ ， $d=0.3h$ 情況下， $B/L=0.37$ 附近造成最大反射，最小透射，或可稱為此布置可造成入射波產生共振，

- Efficient Computational Scheme," *Proc. 19th Intl. Conf. on Coastal Eng.*, pp. 955-967.
- 7.Greenberg, M. D. (1971) *Application of Green's Function in Science and Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
 - 8.Grilli, S. T., J. Skourup and I. A. Svendsen (1989) "An Efficient Boundary Element Method for Nonlinear Water Waves," *Engrg. Anaylsis with Boundary Elements*, Vol. 6, pp. 97-107.
 - 9.Huang, C. J. and C. M. Dong (1999) "Wave Deformation and Vortex Generation in Water Waves Propagating over a Submerged Dike," *Coastal Eng.*, Vol.37, pp. 123-148.
 - 10.Hsu, H. H. and Y. C. Wu (1999) "Scattering of Water Wave by a Submerged Horizontal Plate and a Permeable Breakwater," *Ocean Eng.*, Vol.26, pp. 326-341.
 - 11.Ijima, T., C. R. Chou and Y. Yumura (1974) "Wave Scattering by Permeable and Impermeable Breakwater of Arbitrary Shape," *Proc. 14th Intl. Conf. on Coastal Eng.*, pp. 1866-1905.
 - 12.Liu, P. L.-F. and M. Iskandarani (1989) "Hydro -dynamic Wave Forces on Submerged Horizontal Plates," *Proceedings of the 23rd Congress, IAHR*, pp. C51-C64.
 - 13.Longuet-Higgins, M. S. and E. D. Cokelet (1976) "The Deformation of Steep Surface Waves on Water; I , A Numerical Method of Computation," *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol.350, pp. 1-26.
 - 14.McDougal W. G., N. Mizutani and A. M. Mostafa (1998) "Nonlinear Wave Forces on a Rubble Covered Pipeline," *Proc. 27th Coastal Eng. Conf.*, pp.1650-1664.
 - 15.Ohyama, 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.
 - 16.Patarapanich M. (1984) "Maximum and Zero Reflection from Submerged Plate," *J. Wtrwy., Port, Coast., Oc. Engng*, ASCE, Vol. 110, pp. 171-181.
 - 17.Patarapanich, M. and H. F. Cheong (1989) "Re- flection and Transmission Characteristics of Regular and Random Waves from a Submerged Horizontal Plate," *Coastal Eng.*, Vol.13, pp.161-182.
 - 18.Siew, P. F. and D. G. Hurley, 1977, Long Surface Waves Incident on a Submerged Horizontal Plate, *J. Fluid Mech.*, Vol.83, pp.141-151.
 - 19.Stoker, G. G. (1957) *Water Waves*, Interscience, New York.
 - 20.Tang, C. J. and J. H. Chang (1998) "Flow Separation during Solitary Wave Passing over Submerged Obstacle," *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 124, pp. 742-749.
 - 21.Yu, X., M. Isobe, A. Watanabe, and K. Sakai (1991) "Analysis of Wave Motion over Submerged Plate by BEM," *Proc. Int. Assoc. BEM Symp.*, Kyoto, pp. 393-402.
 - 22.Yueh, C. Y. and Y. Y. Kuo (1993) "The Nonlinear Wave Effects by a Submerged Horizontal Plate to the Vertical Wall," *J. Hydraulic Res.*, Vol. 31, pp. 651-664.



www.cdn.tw