

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

懸壁板非線性波力分析之數值研究(II)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2611-E-009-002-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立交通大學土木工程學系

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 93 年 10 月 11 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

懸壁板非線性波力分析之數值研究()

The Numerical Study of Nonlinear Wave Force on Cantilever Plate

計畫編號：NSC 92-2611-E-009-002

執行期間：九十二年八月一日至九十三年七月三十一日

計畫主持人：吳永照 國立交通大學土木工程系

一、中文摘要

本研究利用線性元素之邊界元素法,針對二維未碎孤立波通過剛性鏤空式平板之變形進行相關數值上的探討。藉由數值解析的方式,以研究此類長波在通過鏤空式平板的過程中,其作用於鏤空式平板上揚力之變化,以及鏤空式平板造成波浪的變形,作為未來海洋工程上設計及應用的參考,數值模式之正確性,可藉由數值模擬過程中之質量及能量守衡關係而得到合理之印證。由分析得知,平板的長度,平板與水面間的距離,以及入射孤立波的波高均會影響作用於平板的上揚力,也會影響透過波的消滅效果。基本上鏤空式平板越長消滅波能效果越好,但平板承受的波力也越大,鏤空式平板離水面越高承受的波力越小,但對入射波的消滅效果不佳。此外入射孤立波的波越高則作用於平板的波力也越大。

關鍵詞：孤立波、鏤空式平板、上揚力

Abstract

With the assumption of potential flow, the uplift wave forces of solitary waves acting on suspending plates are studied by using boundary element method (BEM) in this study. Numerical results show that the wave force varies with the plate width, the clearance between water surface and plate, and the solitary wave height. Transmitted wave height decreases with the increase of plate width but total wave force on plate

will increase. Low clearance can reduce the transmitted wave height but will increase the uplift force on plate. This study is restricted to the two-dimensional case of nonbreaking solitary waves approaching normal to the suspending plate.

Keywords: Solitary Wave, Suspending Plate, Uplift Force

二、緣由與目的

海岸結構物已是海岸保護中不可或缺的工程,但因海洋波浪不斷的侵襲,容易因堤腳沖刷或波力過大而遭破壞,因此設置適當的消波設施,對於保護海岸結構物確實有其需要。鏤空式平板構造簡單,施工容易且便宜,既可當作一種海洋結構物(如棧橋式碼頭),也可當作消波用的消波構造物,降低海岸或海牆承受的波力。本研究主要目的即在探討孤立波通過剛性鏤空式平板引起的變形及對平板的作用力,考慮的因素包括鏤空式平板的長度及設置高度,入射孤立波的高度。

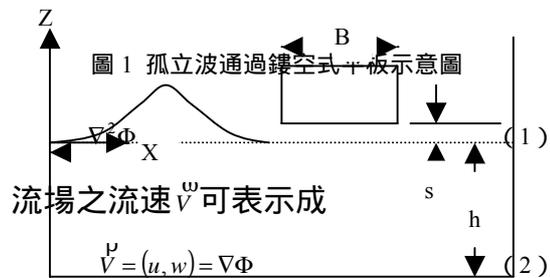
早期研究波浪與海岸結構互制問題多以水工試驗為主,近年由於計算機進步快速,而且在數值計算上也有不少突破性的發展,加上水工試驗花費較大,因此利用數值水槽的方法研究波浪與海岸結構互制問題漸漸廣為應用。利用數值水槽的方法研究波浪與結構物互制的研究有很多(Ohyama and Nadaoka, 1991; Nakayama, 1983; Tang and Chang; 1998; Hung and Dong,

1999)；有關波浪通過平板引起的波浪變形研究也有很多，但以線性及沒水平板為；主要研究對象，或利用試驗研究或利用數值方法分析，主要研究有 Hattori (1975)，Siew and Hurley (1977)，Patarapanich et al. (1989)，McIver (1985)，Yu et al. (1991)，Parsons and Martin (1992)，Kojima et al. (1992)。本研究則利用邊界元素法探討非線性孤立波通過鏤空式水平板的變形及其作用於鏤空式水平板的波力，有關孤立波通過結構物的研究有：Sebra-Santos et al. (1987) 探討孤立波通過一三角突堤與一半無限長平台的變化情形；Cooker et al. (1990) 藉由實驗的方式探討孤立波波高與半圓形潛沒物半徑的相對影響。張、唐 (1992,1996) 利用瞬時貼壁座標的有限解析法探討孤立波與沒水台階及潛堤等之交互作用及波形變化之問題。至於非線性孤立波通過鏤空式水平板的變形及其作用於鏤空式水平板的波力，有關研究並不多，Lee and Lai (1988)及 Lai and Lee (1989) 曾利用領域轉變配合有限元素法研究。French (1969)以實驗方式測量鏤空式平板所承受的波浪上揚力；周與邱(1981)利用水工模型實驗研究棧橋式碼頭的上揚力。本研究利用邊界元素法，模擬非線性孤立波通過鏤空式平板引起的變形及波力變化。

二、理論模式

假設鏤空式平板之板長為 B ，置於靜水面以上 s 的高度，水深為 h (如圖 1 所示)。數值水槽的左、右兩面均為不透水直立牆邊界，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，孤立波是向 $+X$ 軸方向前進，其波高為 H 。由於孤立波為非線性波，為了探討非線性波的效應，本研究將利用 Time Domain 計算的方式，來分析此非

線性孤立波之前進變形及作用於鏤空式水平板的上揚力變化。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



針對位於一數值水槽內的孤立波問題而言，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：

1. 自由水面運動邊界條件：

$$w = \frac{\partial\Phi}{\partial z} = \frac{\partial\eta}{\partial t} + u \frac{\partial\eta}{\partial x} \text{ on } z = \eta \quad (3)$$

η 為水位。

2. 自由水面動力邊界條件：

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2 + w^2}{2} + gz = 0 \text{ on } z = \eta \quad (4)$$

p 為動水壓力， ρ 為水的密度， g 為重力加速度。

3. 底床邊界條件：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } z = -h \quad (5)$$

n 表邊界之單位法線向量，其向外為正。

4. 側向邊界條件：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } x = 0, L \quad (6)$$

L 為數值水槽總長度；

5. 平板底部及兩側之邊界條件：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

而在本研究中，孤立波於等水深區域 h 中的 Φ 及 η 值為已知，其表示式則是採用 Medina (1989) 所提出的近似解析解型式，即

$$\Phi(t=0) = \frac{2gH}{\sqrt{3}c} \sqrt{\frac{h^3}{H}} \tanh \alpha \quad (8)$$

$$\eta(t=0) = \frac{H}{\cosh^2 \alpha} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{H}{h^3}} (x - x_0) \quad (10)$$

$$c = \sqrt{g(h+H)} \quad (11)$$

式中的 H 為波高， x_0 為波峰位置， c 為波速。

三、數值方法

本研究中所採用的數值方法為邊界元素法，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 M 上，

其速度勢 $\hat{\phi}_M$ 可表示成

$$-\frac{\beta}{2\pi} \hat{\phi}_M = \int_{\Gamma} \left(\Phi \frac{\partial q}{\partial n} - q \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) d\Gamma \quad (12)$$

其中 q 為控制方程式的基本解， Γ 為問題的控制邊界， Φ 為邊界上任意點的速度勢， β 為邊界源點 M 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

$$q = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{r} \right) \quad (13)$$

式中 r 為邊界源點 M 與其他邊界上任意點間之距離。將(13)式代入(12)式並經離散化，再代入邊界上適當之邊界條件，最後將已知的部份移至右邊，未知的部份移至左邊，重新整理可得

$$[A][X] = [D] \quad (14)$$

式中 $[X]$ 為由未知之 Φ 及 $\partial \Phi / \partial n$ 所組成的向量， $[D]$ 為已知向量， $[A]$ 為係數矩陣。方程式(14)可採用高斯消去法進行運算。

同時為了保持原來問題的非線性特性，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 Taylor 級數近似展開式(Dold and Peregrine, 1984) 加以計算，即

$$x' = x + \frac{d\xi}{dt} \delta t + O(\delta t)^2 \quad (15)$$

$$z' = z + \frac{d\eta}{dt} \delta t + O(\delta t)^2 \quad (16)$$

$$\Phi' = \Phi + \frac{d\Phi}{dt} \delta t + O(\delta t)^2 \quad (17)$$

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

$$x = \zeta(t, x_0) \quad z = \eta(t, z_0) \quad (18)$$

$$\frac{d\zeta}{dt} = u \quad \frac{d\eta}{dt} = \omega \quad (19)$$

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 進一步求算下一個時刻節點的座標 x' 、 z' 及速度勢 Φ' 則是為 Lagrangian 描述法觀念的應用。整個的數值模擬過程中，其自由水面波形之角度 θ 及切線方向 ($\frac{\omega}{s}$) 的變化量 (如： $\partial\Phi/\partial s$ 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

$$u = \frac{d\zeta}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial s} \cos\theta - \frac{\partial\Phi}{\partial n} \sin\theta \quad (20)$$

$$w = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial s} \sin\theta + \frac{\partial\Phi}{\partial n} \cos\theta \quad (21)$$

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

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\Phi \quad (22)$$

將式 (20) (21) 所求得的速度 u 及 w ，代入式 (4) 中，並由式 (22) 的關係式及自由水面上的壓力為大氣壓力 ($P=0$)，可得

$$\frac{d\Phi}{dt} = -g\eta + \frac{(u^2 + w^2)}{2} \quad (23)$$

式 (15) ~ (17) 中的一階全微分變化量 ($d\zeta/dt$ 、 $d\eta/dt$ 及 $d\Phi/dt$)，可由式 (20) (21) 及 (23) 求得。如此的步

驟反覆運算，直至模擬所需的時間為止。

四、數值結果與討論

本研究係利用線性元素的邊界元素數值方法，針對未碎孤立波通過剛性鏤空水平板之變形及作用於板底之上揚力進行相關數值上的探討。藉由數值解析的方式，以窺探此類長波在通過平板時，其作用於岸壁上的波力變化，作為未來海洋工程上設計及應用的參考，以確保海牆及後方海域的安全。

首先，為確保本數值模式之正確性，圖 2 顯示孤立波 ($H=0.05h$) 於等水深 ($h=1m$) 數值水槽中向前傳遞並遇垂直岸壁而反射的波形變化之數值計算結果，圖 3 及圖 4 分別為本文數值模式計算過程中每一時刻的總質量 (V) 與初始質量 (V^*) 及總能量 (E) 與初始能量 (E^*) 的變化關係圖。

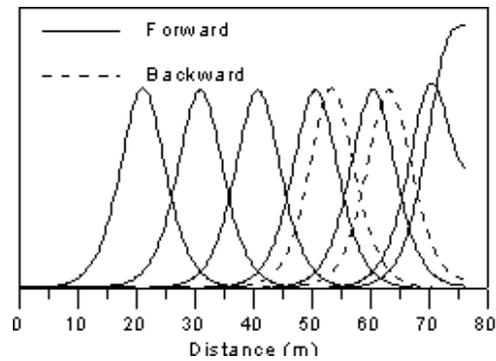


圖 2 前進及反射孤立波波形變化

由圖 2 可發現波形及波高於向前傳遞及向後反射均保持幾乎不變，由圖 3 及圖 4 中可看出 V/V^* 及 E/E^* 的比值皆趨近於 1，也就是孤立波於向前傳遞及向後反射過程中，質量及能量均維持不變，顯示本數值模式具有一定之精確性，由圖 4 並可發現孤立波遇垂直岸壁時，動能先轉變為位能造成波高增加，

然後位能再轉變為動能造成波浪反射的現象。圖 5 至圖 8 為入射孤立波高 $H=0.3\text{m}$ ，水深 $h=1.0\text{m}$ ，板長 $B=5.0\text{m}$ ，板與靜水面間距 $s=0.11\text{m}$ 的情況下，孤立波通過鏤空平板時波形的變化及板承受的上揚力變化。

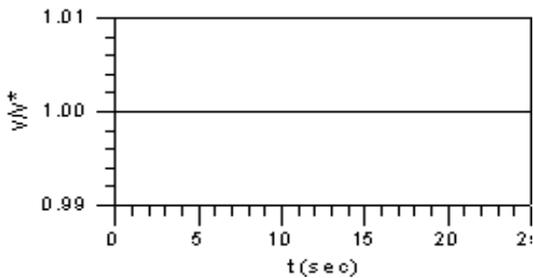


圖 3 數值計算期間質量變化圖

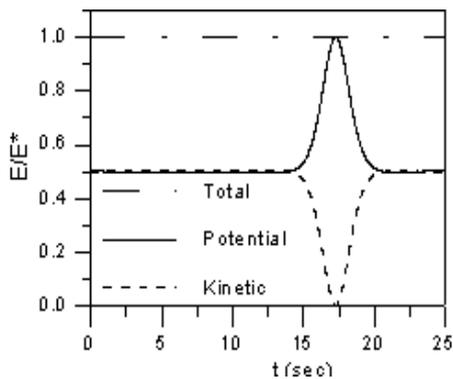


圖 4 數值計算期間能量變化圖

由圖 5 發現鏤空平板基本上很難消滅孤立波的透過，尤其當板的寬度較窄時，消滅孤立波的效果並不明顯。圖 6 及圖 7 分別為孤立波作用於鏤空平上 A 及 B 兩點的上揚壓力隨時間的變化，其中 A 點位於距離前面端點 0.4m ；B 點位於距離後面端點 0.4m ，圖 8 為孤立波作用於鏤空平板的總上揚力。圖中無因次的壓力強度 p^* 無因次的總壓力 P^* 及無因次的時間 t^* 分別定義為

$$p^* = p / \gamma h$$

$$P^* = P / \gamma h^2$$

$$t^* = t \sqrt{g/h}$$

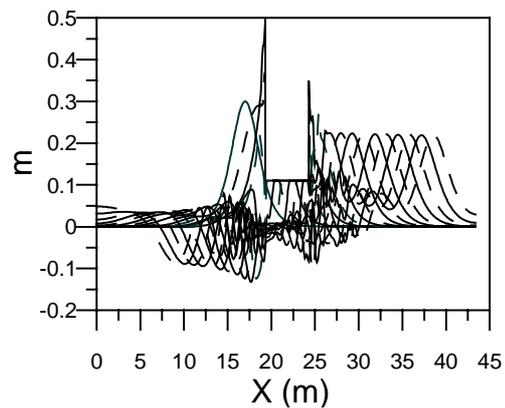


圖 5 孤立波通過鏤空平板的變形

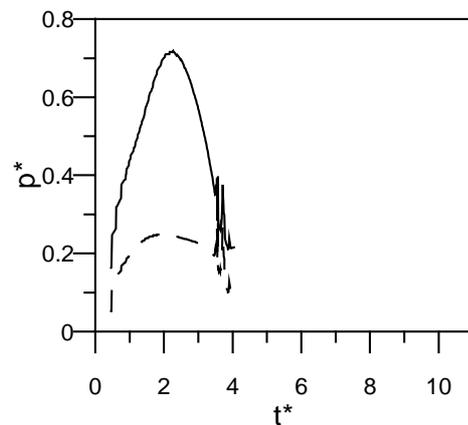


圖 6 A 點之上揚壓力強度隨時間變化

圖中虛線代表動壓力實線代表總壓力。由圖 6 及圖 7 可發現當 t^* 等於 3.7 時 ($t=1.185\text{sec}$) 壓力強度會突然上升，此現象不止發生在壓力強度圖，總壓力變化圖也看得出此現象，經詳細檢查數值計算過程發現，此現象發生於波前將通過鏤空平板的右端時，此時端點附近 $\partial\Phi/\partial t$ 變大，因此壓力強度突然上升，此現象的發生是否因為數值誤差造成或是實際上會有此一現象則有待進一步研

究。

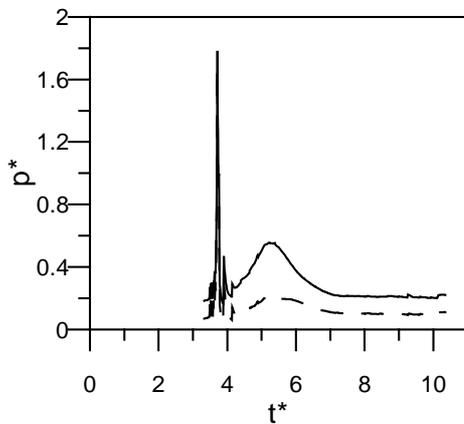


圖 7 B 點之上揚壓力強度隨時間變化

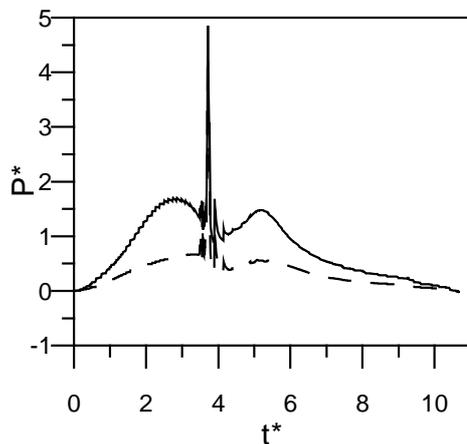


圖 8 總上揚力隨時間的變化

五、結論

本研究係利用線性元素的邊界元素法來模擬二維未碎孤立波通過剛性鏤空平板之變形及其作用於平板之波力。藉由數值模擬過程中之質量及能量守衡關係，來驗證本數值模式的正確性。數值計算結果發現下列因素將影響透過波的大小及鏤空平板的上揚力：鏤空平板的長度，鏤空平板與靜水面之距離，入射孤立波之波高，當然水深也是一影響因素。基本上鏤空式平板越長消減波能效果越好，但平板承受的波力也越大，鏤空式平板離靜水面越高承受的

波力越小，但對入射波的消滅效果不佳。此外入射孤立波的波越高則作用於平板的波力也越大。而當波前將通過鏤空平板的右端時，壓力強度突然上升，此現象的發生原因尚待進一步研究。

六、參考文獻

- 1.張志華、唐啟釗 (1992) "孤立波與浸沒台階之交互作用", 第十四屆海洋工程研討會論文集, 817 頁-829 頁。
- 2.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。
- 3.周宗仁、邱國瑞 (1981) "棧橋式碼頭上揚力之研究", 河海研究第 9 號, 海洋大學河海工程系。
- 4.Cooker, M. J., D. H. Peregrine, C. Vidal and J. W. Dold (1990) "The Interaction between a Solitary Wave and a Submerged Semicircular Cylinder," J. Fluid Mech., Vol. 215, pp.1-22.
- 5.Dold, J. W. and D. H. Peregrine (1984) "Steep Unsteady Water Waves : An Efficient Computational Scheme," Proc. 19th Intl. Conf. on Coastal Eng., pp.955-967.
- 6.French, J. A. (1969) "Wave Uplift Pressure on Horizontal Platforms," Report No. KH-R-19, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Cal. Tech..
- 7.Hattori, M. (1975) "Wave Transmission through a Submerged Plate," Proc. 22nd Japanese Conf. Coastal Eng., JSCE, pp.513-517.
- 8.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.
- 9.Kojima, H., T. Ijima and A. Yoshida (1992) “Decomposition and Interaction of Long Waves by a Submerged Horizontal Plate,” Proc. 22nd Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.1228-1241.
 - 10.Lai, C. P. and J. J. Lee (1989) “Interaction of Finite Amplitude Waves with Platforms or Docks,” J. WPCOE, ASCE, Vol. 115, pp.19-39.
 - 11.Lee, J. J. and C. P. Lai (1988) “Wave Uplift Forces on Platforms with Energy Absorbers,” Proc. 20th Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.2313-2325.
 - 12.McIver, M. (1985) “Diffraction of Water Waves by a Moored, Horizontal, Flat Plate,” J. Eng. Math., Vol.19, pp.297-319.
 - 13.Medina, D. E. (1989) Advanced Applications of the Boundary Element Method to Groundwater Flow in Fractured Rock and Free Surface Hydrodynamics, Ph. D. Dissertation, University of Cornell.
 - 14.Nakayama, T. (1983) “Boundary Element Analysis of Nonlinear Water Wave Problem,” Int. J. for Numerical Method in Eng., Vol.19, pp.953-970.
 - 15.Ohyama, T., and K. Nadaoka (1991) “Development of a Numerical Wave Tank for Analysis of Nonlinear and Irregular Wave Field,” Fluid Dynamics Research, Vol.8, pp. 231-251.
 - 16.Parsons, N. F. and P. A. Martin (1992) “Scattering of Water Waves by Submerged Plates using Hypersingular Integral Equations,” Appl. Ocean Res. Vol.14, pp.313-321.
 - 17.Patarapanich, M. and H. F. Cheong (1989) “Reflection and Transmission Characteristics of Regular and Random Waves from a Submerged Horizontal Plate,” Coastal Eng., Vol.13, pp.161-182.
 - 18.Seabra-Santos, F. J., D. P. Renouard and A. M. Temperville (1987) “Numerical and Experimental Study of the Transformation of a Solitary Wave over a Shelf or Isolated Obstacle,” J. Fluid Mech., Vol. 176, pp.117-134.
 - 19.Siew, P. F. and D. G. Hurley (1977) “Long Surface Wave Incident on a Submerged Horizontal Plate,” J. Fluid Mech., Vol.83, pp.141-151.
 - 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 and A. Watanabe (1991) “Analysis of Wave Motion over Submerged Plate by Boundary Element Method,” Proc. Int. Assoc. BEM Symp., Kyoto, pp.393-402.