

執行單位：國立交通大學土木工程學系

中華民國九十一年七月三十一日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告 非線性波與透水潛堤的互制研究(3/3)

The Interaction of Nonlinear Waves with Submerged Porous Structures

計畫邊號：NSC 90-2611-E-009-002

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：吳永照 國立交通大學土木工程系

一、中文摘要

本文主要為利用邊界元素法及有限差分法探討各種不同條件下孤立波與可透水潛堤的交互作用問題。問題的領域分為純流體區和可透水潛堤區。在純流體區中水的流動需滿足勢能流理論，因此可利用邊界元素法模擬。而在可透水潛堤區中，孔隙水的流動則需滿足修正後的 Navier-Stokes equations，因此需利用有限差分法模擬。再配合邊界條件及各交界面上壓力和速度連續的關係式，可模擬出各種不同條件下孤立波通過透水潛堤引起的變形。數值結果發現本文所採用之輻射邊界條件及假想海綿層確實能很有效減少孤立波反射，而透水潛堤具有消滅孤立波波能效果。因此透水潛堤堤上及堤後波高低於孤立波通過不可透水潛堤的情況。此外透水潛堤的透水性及幾何形狀也會影響消滅孤立波能量效果。

關鍵詞：孤立波、透水潛堤、邊界元素

Abstract

Based on the boundary element method, a numerical model for the simulation of solitary wavefields generated by a piston-type wavemaker has been developed. The numerical wave tank consists of a sponger layer and a

radiation condition to reduce reflective wave. In this study, the flow field is separated into two regions: a pure water region and a porous structure region. The potential theory is applied to the pure water region and the modified Navier-Stokes equations are applied to the porous structure region. The model employs the BEM in pure water region and FDM in porous structure region. The aim of this study is to develop a combined BEM-FDM model to study the nonlinear interaction between a submerged porous breakwater and solitary waves. Numerical results show that the sponger layer and radiation condition effectively reduce the reflective wave. Moreover, in a comparison between permeable and impermeable submerged breakwaters, it has been found that the wave reduction is affected by the porosity of the breakwater.

Keywords: Solitary wave, Submerged Breakwater, Boundary Element Method

二、緣由與目的

潛堤為完全沉沒在海面下的結構物，除了較不妨礙海岸景觀，亦對海水循環妨礙較小，因此對附近生態的影響也相對減輕。潛堤可又分為不透水式與透水式潛堤。以消波的效率而言，由於潛堤內部摩擦力的作用，透水式潛堤較優於不透水式潛堤(徐及吳，2001)。本文主要以 BEM 及 FDM 探討潛堤透水性質、潛堤高度、長度及寬度對不同波高孤立波變形的影響。

三、理論分析

如圖 1 所示 將一透水潛堤設置於固定水深 h 的數值水槽中 潛堤高為 d 堤寬為 b 。數值水槽的左邊界為一虛擬造波板邊界 右邊界設有一假想海綿層並於最右端設置輻射邊界條件 上邊界為自由水面 將整個區域可分為純流體區與透水潛堤區。

2.1 純流體區

為了簡化問題 我們假設流體為不可壓縮 黏滯性可被忽略 且為非旋性流 則具有一速度勢 $w(x, z, t)$ 的存在 且滿足拉普拉斯方程式(Laplace equation)

$$\nabla^2 w(x, z, t) = 0 \quad (1)$$

2.2 透水潛堤區

假設在透水潛堤內之流體為不可壓縮 但由於受到黏滯性的影響 因此流體的運動方程式可用 Navier-Stokes equation(Sollitt and Cross 1972)表示如下

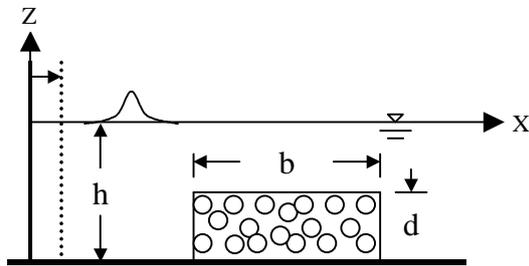


圖 1 數值造波水槽及潛堤配置定義圖

$$\bar{A} \frac{\partial u}{\partial t} + \bar{B} u \frac{\partial u}{\partial x} + \bar{C} w \frac{\partial u}{\partial z} + \bar{D} \frac{\partial P}{\partial x} + \bar{E} u + \bar{F} u \sqrt{u^2 + w^2} = 0 \quad (2)$$

$$\bar{A} \frac{\partial w}{\partial t} + \bar{B} w \frac{\partial w}{\partial x} + \bar{C} w \frac{\partial w}{\partial z} + \bar{D} \frac{\partial P}{\partial z} + \bar{E} w + \bar{F} w \sqrt{u^2 + w^2} = 0 \quad (3)$$

其中

$$\bar{A} = \frac{S_M}{g} \quad \bar{B} = \bar{C} = \frac{1}{g} \quad \bar{D} = \frac{1}{-g}$$

$$\bar{E} = \frac{\gamma_n}{gk} \quad \bar{F} = \frac{C_f n^2}{g\sqrt{k}}$$

式中 S_M 為虛質量係數 C_f 為亂流阻力係數 n 為孔隙率 k 為孔隙介質的比滲透係數。此外在潛堤內流動的流體亦要同時滿足連續方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

2.3 邊界條件

在純流體區與透水潛堤區內除了滿足控制方程式外 還必須滿足下列邊界條件

1. 底床不透水之邊界 其法線向量的速度為零 即

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

自由水面邊界 可分為表面運動邊界條件和表面動力邊界條件。在 KFSBC 方面 水表面的水粒子速度等於表面速度：即

$$\frac{dc}{dt} = u \quad \frac{dg}{dt} = w \quad (6)$$

在 DFSBC 方面 可由白努利方程式配合假想海綿邊界 (Ohyama and Nadaoka 1991) 最後可得一關係式表示如下

$$\frac{\partial w}{\partial t} + gg + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \tilde{w} \int_{x_1}^x \frac{\partial \tilde{w}}{\partial x} dx = 0 \quad (7)$$

其中 g 為水面之高程 x_1 為海綿層之起始 x 座標 \tilde{w} 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 \tilde{w} 值為零 在最末端之 \tilde{w} 值為最大值 \tilde{w}_{max} 。

3. 虛擬造波板邊界 採用 Synolakis (1990) 造孤立波的公式 若造波板欲造出波高為 H 之孤立波 則造波板速度

$$\frac{dw}{dn} = \frac{dx}{dt} = \frac{H \sec h^2 / (x - ct)}{1 + H \sec h(x - ct)} \quad (8)$$

造波板位移

$$x(t) = \left(\frac{H}{l} \right) \tanh[l / (x - ct)] \quad (9)$$

其中

$$l = \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} \quad (10)$$

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

c 為波速。(8)式及(9)式可用 Newton-Raphson method 求解 得不同時間之數值造波板位移及速度 此即為數值水槽造波板之邊界條件。

4. 純流體區與透水潛堤之交界邊界 沿著交界之邊界條件必須滿足其法線速度相等 而且在交界面上的壓力相等 即

$$\frac{\partial W}{\partial n} = J u_n \quad (12)$$

$$P_w = P_p \quad (13)$$

式中等號左邊代表純流體區邊界之值 右邊代表透水潛堤區邊界之值。

5. 右側輻射邊界條件

$$W_x = -\frac{1}{C} W_t \quad (14)$$

四、數值方法

解析孤立波通過透水潛堤的波形變化 本文可配合已知的邊界條件與交界面連續條件 利用邊界元素法來計算純流體區之邊界速度或速度勢 並利用有限差分法計算透水潛堤內之流場(計算所用的差分法主要是利用壓力修正法 配合交錯網格) 在自由水面各節點運動的模擬方面 則利用 Eulerian Lagrangian 混合數值技巧 其水面節點在下一時刻的新位置及其速度勢是由 Taylor 級數展開式(至第二階)所求得的(Grilli et al., 1989)。而壓力修正法的原理主要是利用反覆疊代計算 強迫壓力與速度快速收斂 進而滿足控制方程式而求得正確壓力與速度之解。

四、數值結果

4.1 造波模式的驗證

假設水深 $h=1.0\text{m}$ 孤立波之波高 $H=0.15h$ 而 $\zeta_{\max} \cong f\sqrt{g/h}$ 其中係數 $f=0.05$ 對應總質量 98% 之有效波長為 L (Nakayama,1983) 則

$$L = 9.5766h\sqrt{\frac{h}{H}}$$

本文採用之造波方法及消波效果如圖 2 及圖 3 所示 圖 2 之數值計算結果顯示僅有些微的反射波影響 低於 2%。圖 3 為水深 $h=1.0\text{m}$ 時間 $t=10\text{sec}$ 時數值計算結果與理論二階孤立波(Sarpkaya and Isaacson 1981) 的比較 可看出數值造波模式的計算結果與理論值相當一致 顯示了採用此數值模式的準確性。

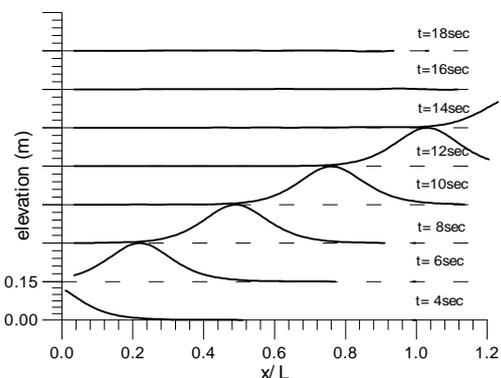


圖 2 海綿層與輻射邊界條件的效果

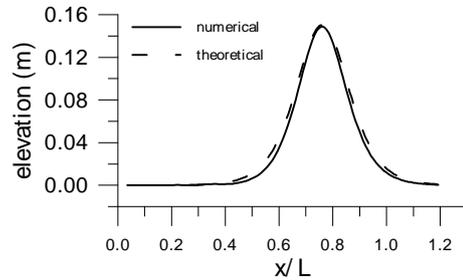


圖 3 數值水槽波形與二比較圖階理論孤立波波形

4.2 孤立波通過透水潛堤之波形變化

影響透水潛堤與孤立波間交互作用的因素有很多 本文分別就波高及潛堤之透水性質及幾何形狀討論。以下之數值結果是基於水深 $h=0.4\text{m}$ 的假設 而矩形的透水潛堤之透水性質及幾何條件如表一所示。

表一、潛堤之透水性質及幾何條件

Type	b/h	d/h	n	d_{50} (cm)	$k(10^{-7} m^2)$	C_f
C	20	0.5	0.521	2.09	3.220	0.73
D	20	0.5	0.400	1.50	0.522	0.39
E	20	0.5	0.600	5.00	27.76	0.89

本文所有結果皆以 $S_M=1$ 來計算。假設入射孤立波波高為 $H_i=0.15h$ 定義波高比(若在潛堤後則稱為透過率) $r=H/H_i$ 其中 H 為數值計算所得之任一位置的波高。數值計算結果如圖 4 所示 顯示當潛堤寬度為 $b=20h$ 此即為表一的 Type C 及 Type D 孤立波通過較寬透水潛堤時 由於能量消耗增加 因此波高比通過不透水潛堤低 此外波速也因波能減少而變慢 然而 Type C 及 Type D 透水潛堤引致孤立波的變形其差異並不大 為了確定透水性質的影響 特別將 $t=15\text{sec}$ 的波形放大 並加入孔隙率較大且能量消耗較大的 Type E 透水潛堤 圖 5 為數值模式計算所得波形在潛堤上不同位置的變化

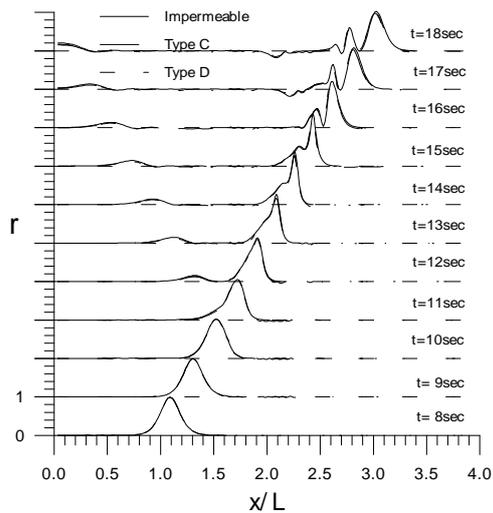


圖 4 孤立波通過透水(Type C 及 D)與不透水潛堤時不同時間波高之變化比較圖

由圖 5 可看出透水性越大 能量消耗越大 因此波高變得較低且波速也變得變慢。

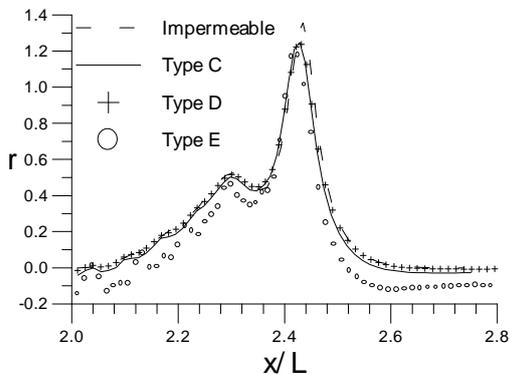


圖 5 孤立波於潛堤上(TypeC、D、E)波形比較(t=15sec)

此外 若入射孤立波之波高為 0.15h 當其通過不同高度之 Type C 透水潛堤時 潛堤上的最大波高隨著提高增加而逐漸上升 但透過波高則不一定。

入射孤立波之波高仍為 0.15h 不同寬度的 Type C 透水潛堤引致透過率比較 顯然潛堤越寬 消耗越多波能 因此透過率越低。

當孤立波通過 Type C 之透水潛堤時 若改變入射波高 H 固定其他條件不變 則越高的入射孤立波 受潛堤消耗的能量越多 因此透過率越低。

五、結論

本文以邊界元素法建立一數值水槽 模擬直推式造

波法造出孤立波 並在等深的底床設置一個透水潛堤 利用壓力修正法模擬潛堤內流體的流動 計算分析不同條件的入射孤立波與透水潛堤間的交互作用 以判斷潛堤消波的效能。經由數值計算結果可得下列幾點結論

1. 本文 BEM 模擬之孤立波數值水槽與二階孤立波理論波形相當接近 數值精確度高。
2. 本文在數值水槽的末端加入一個虛擬的海綿層並於最尾端設置長波之輻射邊界條件來避免波浪反射回水槽內 當寬度為 5 倍水深 $\zeta_{\max}=0.05$ 時 反射率很低 約只有 2%。
3. 當潛堤寬度較窄時 孤立波通過透水潛堤引起之變形與通過不透水潛堤幾乎沒有差異。
4. 當潛堤寬度增長 潛堤上及潛堤後之波高均比通過不透水潛堤時低 波速也因波能減少而變得較慢。
5. 孤立波通過較高透水性潛堤時 波高變得較低且波速也變得變慢。
6. 當潛堤高度增加 潛堤上的最大波高增加但透過波高則不一定。
7. 當透水潛堤寬度越長 透過波高越低。
8. 當入射孤立波之波高越大 透過率越低。

六、謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「非線性波與透水潛堤的互制研究(3/3)」編號 NSC 90-2611-E-009)002 之研究成果 承蒙國科會經費之贊助使得本研究得以完成 謹致感謝之意。

七、參考文獻

1. 徐虎嘯、吳永照(2001)“波浪與潛堤結構物消波作用之分析” 第二十三屆海洋工程研討會論文集 233 頁-240 頁。
2. Grilli, S., J. Skourup and I. A. Svendsen (1989) “An Efficient Boundary Element Method for Nonlinear Water Waves,” *Eng. Anal. With Boundary Elements* Vol.6, pp.97-107.
3. 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.
4. Sarpkaya T. and M. Isaacson 1981, *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold Company.

5. Sollitt, C. K. and R. H. Cross (1972) "Wave Transmission through Permeable Breakwaters," *Proc. 13th Coastal Eng. Conf.*, pp.1827-1846, 1972.
6. Synolakis, C. E. (1990) "Generation of Long Waves in Laboratory," *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 116, pp.252-266.
7. Ward, J. C. (1964) "Turbulent Flow in Porous Media," *J. Hydraulic Div.*, Vol.5, pp.4019-4021.