

## 沒水結構物對不規則波的影響

周宗仁<sup>1</sup> 尹彰<sup>2</sup> 石瑞祥<sup>3</sup> 黃偉伯<sup>4</sup>

### 摘要

本研究以邊界元素法建立一數值不規則波造波水槽，可於水槽中置入不同之沒水結構物，包括半潛式、海底固定式潛堤等，藉以探討不規則波浪通沒水結構物時其波譜之變化，本文僅先以固定式潛堤探討潛堤對不規則波之影響。本文模式乃利用 Lagrangian 法描述流體運動並配合時間差分之觀念所建立，以 Brestschneider-Mitsuyasu 波譜造波。先以等深水槽模擬不規則波在水槽內之傳遞過程，於自由水面上選定若干個測點量取水面變化之歷時，藉以比較不同時刻之水面波形之變化情形。隨後再於水底置一潛堤，探討潛堤對不規則波之影響。

### Effects Of Submerged Structures To Irregular Wave

Chung-Ren Chou John-Z Yim Ruey-Syan Shih W-B Hwang

### ABSTRACT

Numerical simulation of irregular waves propagate over submerged structures are investigated in this study by means of boundary element method. Based on the Lagrangian description and finite difference of time derivative, with the power spectrum defined by significant wave height and significant wave period employed for the condition of incident waves, the numerical model was first verified by studying the case of irregular waves propagating the water tank with constant depth. Secondly, a set of submerged bars are fixed under the water tank for investigation. Power spectrum of Brestschneider-Mitsuyasu type was chosen in this study. Time histories of water elevation of measured points on free water surface are presented. Also, water profiles at different time step are shown as well.

### 一、緒論

近年來，隨著電腦科技之突進，預測極端條件之波浪的技術快速的發展並提供了海岸結構施工設計及建構上許多可靠之參考數據，許多國內外專家學者對二維斷面數值造波水槽之研究近來亦多有所突破與發展。早期有 Madsen(1970)利用線性造波控制方程式模擬活塞式造波機之週期波造波問題，1978 年 Faltinsen 利用邊界積分法研討水槽內

液體之擾動現象，而 Nakayama(1983)以非線性邊界初值條件及其上之速度勢應用邊界元素法以 Green 函數解析非線性波浪問題，1987 年 Brorsen 與 Larsen 以邊界積分法解析非線性重力波之造波問題，同年 Okamura 與 Yakuma(1987)則利用邊界元素法探討水槽內孤立波之造波、傳遞與波形變化，Sugino 與 Tosaka 在 1990 亦曾發表相類似的研究報告，而 Isaacson 等(1994)以 Green 定理解析時間領域內，瞬時、非線性波於水槽中之傳遞現象。另外，周與石(1996)利用 Lagrangian 法描述流體運動之方式，配合時間差分之觀念以邊界元素法模擬孤立波及有限振幅波之造波、傳遞與波形變化之問題。由以上諸研究可見數值造波水槽對波浪之模擬已自以往簡單的探討水箱內之流體擾動現象發展至

1. 國立臺灣海洋大學河海工程學系教授
2. 國立臺灣海洋大學河海工程學系副教授
3. 私立東南工業專科學校土木工程科助理教授
4. 國立臺灣海洋大學河海工程學系博士班研究生

目前探討實際造波水槽對各種非線性波之造波研究。儘管如此，然實際上海面上之波浪如眾所皆知為隨機運動之不規則波，因此，數值水槽之開發遂逐漸往不規則波之方向發展，如 Xu 與 Pawlowski(1993)利用 Green-Naghdi 定理開發一三維數值水槽之非線性不規則波造波問題，Boo 與 Kim(1994)則以較高階之邊界元素模擬非線性不規則波，1997 年 Boo 等又利用 Stoke 二階非線性不規則波來探討浮體結構物周圍繞射之非線性現象。1998 年周與歐陽則以 Lagrangian 描述流體運動之方法配合時間之差分觀念，以邊界元素法開發一可以不同設計波譜造不規則波之數值造波水槽，並可依不同需要選擇模擬拍拉式(flap type)或推拉式(piston type)之造波方式。本文研究承襲周與歐陽之研究再進一步深入探討，於水槽中配置潛堤，利用有義波高及有義波浪週期所設計之波譜來模擬入射之不規則波，藉以探討不規則波通過水中潛堤時受潛堤影響波形之變形問題。

## 二、數值方法

為探討本數值模式之妥適性，本節將對整個過程分別以下列四個部分作討論：首先是虛擬造波板之邊界條件設定，其次為本數值造波水槽之基本假設與邊界之初值條件，最後為數值計算，並將模擬結果與入射波作比較以評估其準確性。

### 2.1 虛擬造波板之邊界條件

根據有義波高及有義波浪週期，造波板邊界條件之假設可利用下列三種既定之波譜或任意波譜來製造不規則波，即：

$$S_0(f) = Af^{-5} \exp(-Bf^{-4}) \quad (1)$$

當選擇 Brestschneider-Mitsuyasu 波譜時：

$$A = 0.257H_{1/3}^2 / T_{1/3}^4 \quad (2)$$

$$B = 1.03 T_{1/3}^{-4} \quad (3)$$

當選擇修正式 Brestschneider-Mitsuyasu 波譜時：

$$A = 0.205H_{1/3}^2 / T_{1/3}^4 \quad (4)$$

$$B = 0.75T_{1/3}^{-4} \quad (5)$$

當選擇 Jonswap 波譜時：

$$A = \frac{0.0624}{0.23 + 0.033\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} (1.094 - 0.01915 \ln \gamma) \gamma \exp[-(f/f_p)^2 / 2\sigma^2] \quad (6)$$

$$B = 1.25 f_p^{-4} \quad (7)$$

$$f_p = 1/T_p \quad (8)$$

$$T_p = \frac{T_{1/3}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}} \quad (9)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f \geq f_p \end{cases} \quad (10)$$

$$\gamma = 1 \sim 7 \quad (11)$$

其中  $T_p$  為尖峰週期， $f_p$  為尖峰頻率， $\gamma$  為尖峰集中度係數，其值於本文研究中定為 3.3。此外，由於本數值水槽亦可同時模擬推拉式及拍拉式兩種不同造波型式之造波機，故上式之波譜型式修正為：

$$S(f) = \alpha(f) S_0(f) \quad (12)$$

其中  $\alpha(f)$  為造波機之造波特性係數。當造波機為推拉式造波機時：

$$\alpha(f) = \frac{\sinh kh \cosh kh + kh}{2 \sinh^2 kh} \quad (13)$$

當造波機為拍拉式造波機時：

$$\alpha(f) = \frac{\sinh kh \cosh kh + kh}{\sinh^2 kh} \quad (14)$$

其中  $k$  為波數而  $h$  為造波機之水深。忽略週期過短或過長之波浪，模擬波浪之週期範圍設定為：

$$T_{min} < T < T_{max} \quad (15)$$

本文研究給定值為  $T_{min} = 0.5$  秒而  $T_{max} = 2.5$  秒。

自由水面之水位變化根據能量波譜可由下式求得：

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2dS(f_n)} \cos(\sigma_n t - \varepsilon_n) \quad (16)$$

其中  $\sigma_n = 2\pi f_n$ ， $\varepsilon_n$  為界於 0 與  $2\pi$  間之隨機變數。因此任意水深水粒子之水平向速度  $U(t)$  可以表示如下：

$$U(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2dfS(f_n)} \sigma_n \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos(\sigma_n t - \varepsilon_n) \quad (17)$$

## 2.2 造波水槽之基本假設

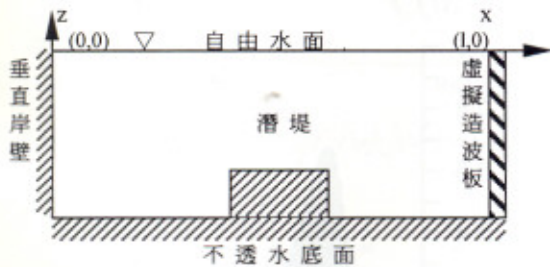


圖 1 造波水槽配置定義圖

如圖 1 所示，假定  $x-z$  平面有一造波水槽之斷面地形， $x$  軸以水平向右為正， $z$  軸以垂直向上為正，於離垂直岸壁相當遠的  $x=l$  等水深處設一虛擬造波邊界面  $\Gamma_1$ ，使整個解析之領域形成一封閉之區域，其中  $\Gamma_2$ 、 $\Gamma_3$ 、 $\Gamma_4$  及  $\Gamma_1$  分別表示自由水面、垂直岸壁、不透水底面及水中潛堤。領域內之流體假定為非粘性、非壓縮性之理想流體，當波浪自造波板往垂直岸壁之方向推進時，領域內之流體運動存有一速度勢  $\Phi$ ，此速度勢應滿足下列 Laplace 連續方程式：

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (18)$$

在自由水面上，令大氣壓力恆為一定且為 0，依動力學及運動學邊界條件可得下列關係式：

$$u = \frac{Dx}{Dt} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (19)$$

$$w = \frac{Dz}{Dt} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (20)$$

$$\frac{D\Phi}{Dt} + g\eta - \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] = 0 \quad (21)$$

上式中之  $D$  表拉氏全微分， $g$  為重力加速度， $\eta$  為水面波形。由於垂直岸壁、水底面及潛堤表面均假定為不透水，故其法線方向之流速均為 0，即：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (22)$$

其中  $n$  為法線方向之單位向量。另外，虛擬造波板邊界面之水平移動速度  $U(t)$  與水分子之水平速度必須連續，故假想邊界面上有下列之關係式成立：

$$\bar{\Phi} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = -U(t) \quad (23)$$

依據 Green 第二定理 (Green's Second Identity)，解析領域內任意一點之速度勢  $\Phi(x, z, t)$  可藉由邊界上之速度勢  $\Phi(\xi, \eta, t)$  及其對邊界上法線方向之一次導函數  $\partial \Phi(\xi, \eta, t) / \partial n$  來決定，即解析領域內任意一點  $(x, z)$  之速度勢可以下列積分方程式表示：

$$\Phi(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \left[ \frac{\partial \Phi(\xi, \eta, t)}{\partial n} \ln \frac{1}{r} - \Phi(\xi, \eta, t) \frac{\partial}{\partial n} \ln \frac{1}{r} \right] ds \quad (24)$$

其中  $r = [(\xi - x)^2 - (\eta - z)^2]^{1/2}$ 。當領域內之任意點  $(\xi', \eta')$  趨近於平滑之邊界面  $(\xi, \eta)$  時，其速度勢則可由下列積分方程式表示：

$$\Phi(\xi', \eta'; t) = \frac{1}{\pi} \int_{\Gamma} \left[ \frac{\partial \Phi(\xi, \eta, t)}{\partial n} \ln \frac{1}{R} - \Phi(\xi, \eta, t) \frac{\partial}{\partial n} \ln \frac{1}{R} \right] ds \quad (25)$$

其中  $R = [(\xi - x)^2 - (\eta - z)^2]^{1/2}$ 。

如圖 1 所示之定義圖，各邊界面  $\Gamma_1 \sim \Gamma_5$  分別以  $N_1 \sim N_5$  個節點加以分割，使全部節點數  $N = \sum N_i$  ( $i = 1 \sim 5$ )，每個元素以一次度線形元素作為分離化元素，即任意元素  $e_i$  之兩端節點分別以  $(x_j, z_j)$  及  $(x_{j+1}, z_{j+1})$  來表示，為了便於將各邊之邊界條件代入，上式經以線形元素離散化後(細節請參閱文獻周[1])，可以再化為下列之矩陣形式：

$$[\Phi_i] = [O_j] [\bar{\Phi}_j] \quad i, j = 1 \sim 5 \quad (26)$$

上式之  $[\Phi]$  及  $[\bar{\Phi}]$  分別表示邊界上之速度勢及其法線方向之導函數值， $[O]$  為與邊界幾何形狀有關之係數矩陣。

## 2.3 各邊界之初值條件

於起始造波時間  $t=0$  時，各邊界之起始值邊界條件分別如下所示：

1. 虛擬造波邊界面  $\Gamma_1$  於  $t=0$  時有下列之關係：

$$\bar{\Phi}_1^k = \frac{\partial \Phi_1^k}{\partial n} = -U(k) \quad k = 0 \quad (27)$$

式中之上標“0”表起始造波時間  $t=0$  時刻。

2. 自由水面 $\Gamma_2$ 在最開始 $t=0$ 時為完全靜止之液面，其速度勢為0，即：

$$\Phi_2^k = 0, \quad k=0 \quad (28)$$

3. 垂直岸壁 $\Gamma_3$ 、海底面 $\Gamma_4$ 及潛堤 $\Gamma_5$ 均為不透水，故其法線方向之流速於任何時刻均為0，可得：

$$\overline{\Phi}_i^k = \frac{\partial \Phi_i^k}{\partial n} = 0 \quad (i=3,4,5; k=0,1,2,3,\dots) \quad (29)$$

利用上訴之已知初始值條件，可以(26)式求得同一時刻假想造波邊界面之速度勢 $\Phi_1^k$ 、自由水面法線方向之導函數 $\overline{\Phi}_2^k$ 以及垂直岸壁、水底部、潛堤等三個邊界面上之速度勢 $\Phi_3^k$ 、 $\Phi_4^k$ 及 $\Phi_5^k$ ，利用(19)、(20)及(21)式對時間作前進差分，可得下一時刻 $t=(k+1)\Delta t$ 水面各點之新位置 $(x^{k+1}, z^{k+1})$ ，以及其速度勢 $\Phi_2^{k+1}$ ，即：

$$\Phi_2^{k+1} = \Phi_2^k + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi_2^k}{\partial s} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi_2^k}{\partial n} \right)^2 \right] \Delta t - g z^{k+1} \Delta t \quad (30)$$

其中 $s, n$ 分別表示切線及法線方向。另外， $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_3$ 、 $\Gamma_4$ 、 $\Gamma_5$ 在 $t=(k+1)\Delta t$ 時刻之法線方向導函數 $\overline{\Phi}_1^{k+1}$ 、 $\overline{\Phi}_3^{k+1}$ 、 $\overline{\Phi}_4^{k+1}$ 及 $\overline{\Phi}_5^{k+1}$ 分別可由(27)式及(29)式求得，將 $t=(k+1)\Delta t$ 時刻之各已知物理量及水面各點新位置以(26)式重新求解係數矩陣 $[O]$ 之值以便進行下一時刻之計算。利用(22)、(23)式及上式可得 $t=(k+1)\Delta t$ 時刻各邊之相關物理量之矩陣如下：

$$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} I & -O_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -O_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -O_{32} & I & 0 & 0 \\ 0 & -O_{42} & 0 & I & 0 \\ 0 & -O_{52} & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} O_{11} & 0 & O_{13} & O_{14} & O_{15} \\ O_{21} & -I & O_{23} & O_{24} & O_{25} \\ O_{31} & 0 & O_{33} & O_{34} & O_{35} \\ O_{41} & 0 & O_{43} & O_{44} & O_{45} \\ O_{51} & 0 & O_{53} & O_{54} & O_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\Phi}_1 \\ \overline{\Phi}_2 \\ \overline{\Phi}_3 \\ \overline{\Phi}_4 \\ \overline{\Phi}_5 \end{bmatrix}^{k+1} \quad (31)$$

其中 $I$ 為單位矩陣。時間反覆計算流程之細節請參閱Chou&Shih[7]。

## 2.4 數值計算

於本文之數值計算中，水深定為 $h=1m$ ，而水槽長度 $l=100h$ ，有義波高及有義波週期分別採用 $H_{1/3}=3cm$ 及 $T_{1/3}=0.8sec$ ，能量波譜則選用Brestchneider-Mitsuyasu型波譜。將整個波譜分成 $N=512$ 等分，取樣時間 $dT=0.5$ ，頻率 $df=1/NdT=1/256$

，此理論能量波譜如圖2所示，而由虛擬推拉式造波板根據上述之條件並經設定有效週期範圍後，所模擬之能量波譜則如圖3所示，於造波時入射波所呈現的水位變化歷時如圖4所示。

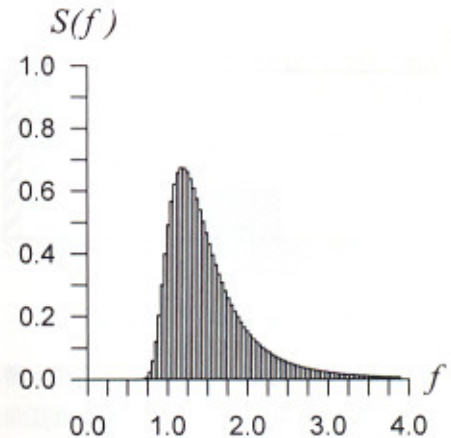


圖2 Brestschneider-Mitsuyasu 型能量波譜

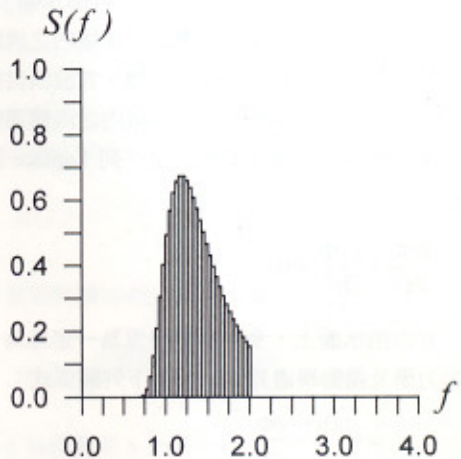


圖3 本文修正能量波譜

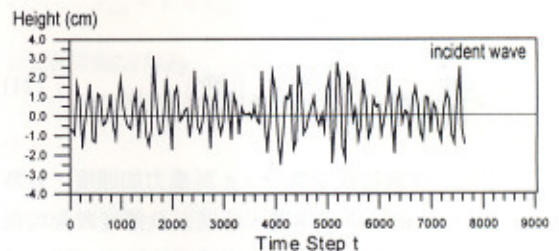


圖4 入射波之自由水位變化歷時

模擬造波時，時間間距採 $\Delta t=0.04$ 秒。另外，為比較自由水面上不同位置之水面變化，本文於水

面上自虛擬造波板起算之第 10 個、第 50 個、第 220 個、第 225 個及第 230 個節點上各設置一個測點，令其分別為 A 點、B 點、C 點、D 點及 E 點。首先在未置潛堤前所模擬之不規則波由各測點所量得之水位變化歷時如圖 5 所示。

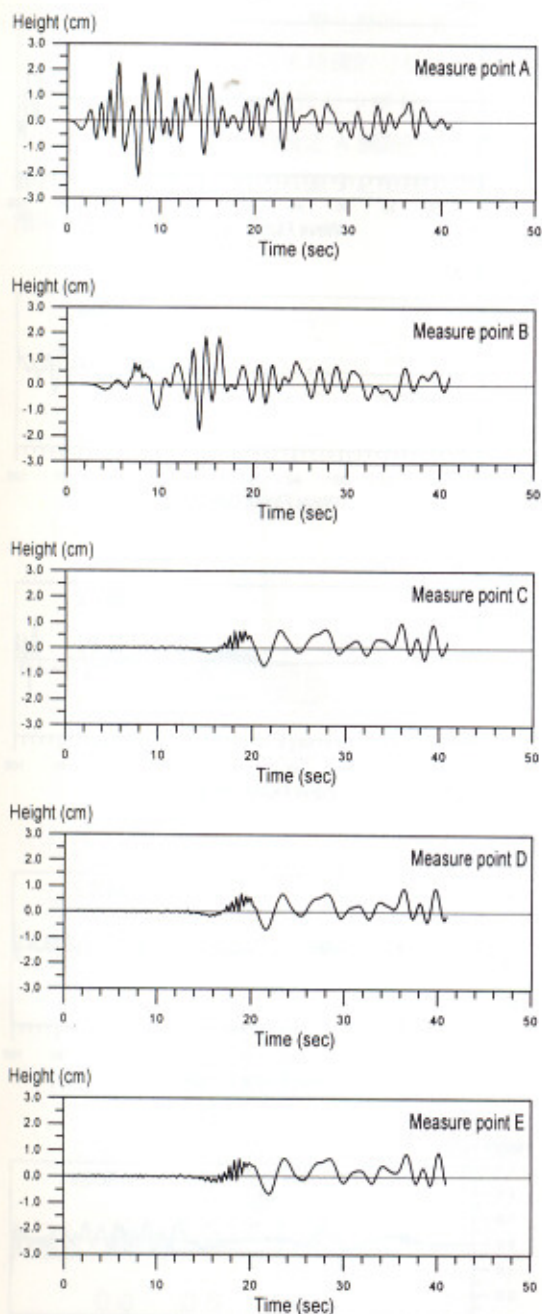


圖 5 自由水面各測點之水位變化歷時

圖 6 為不同造波時刻  $t=1600\Delta t$ 、 $t=3200\Delta t$ 、 $t=4800\Delta t$ 、 $t=6400\Delta t$  及  $t=8000\Delta t$  自由水面所呈現之波形。

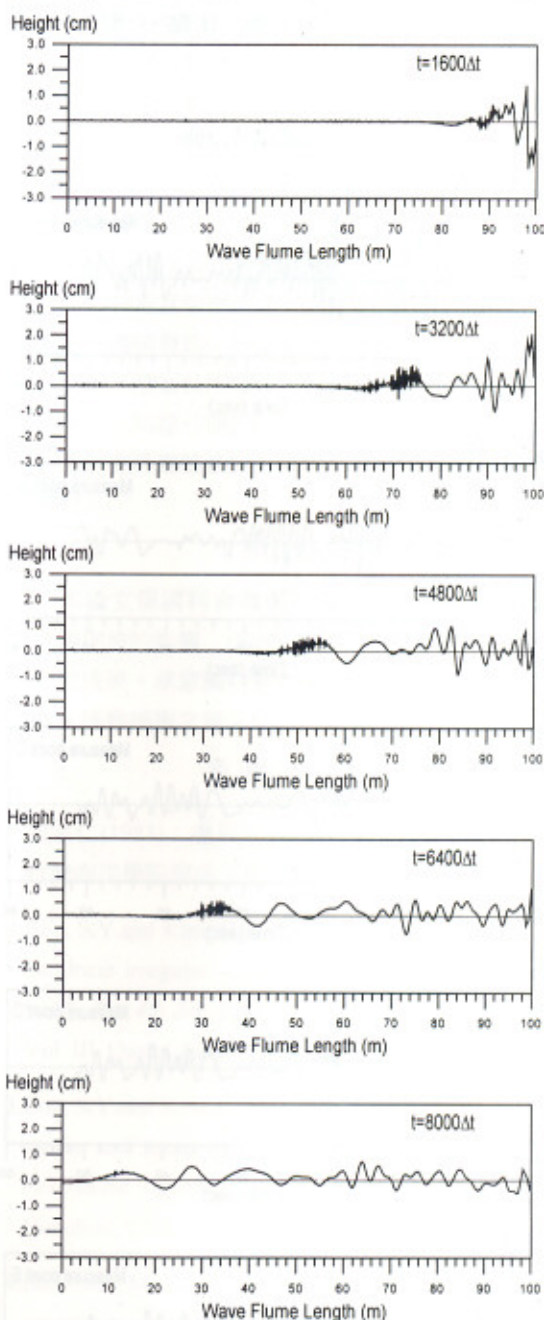


圖 6 不同造波時刻自由水面之波形

其次於水槽中配置沒水結構物，如半潛式、海底固定式潛堤等等，本文僅採海底固定式潛堤來作探討，其中潛堤長為  $2h$ ，提高  $d$  前後均為  $0.25h$ ，

潛堤中心點距垂直岸壁 50h，於水面上自虛擬造波板起算之第 10 個、第 50 個、第 220 個、第 225 個及第 230 個節點上各測點所量得之水位變化歷時如圖 7 所示，令其分別為 A 點、B 點、C 點、D 點及 E 點。

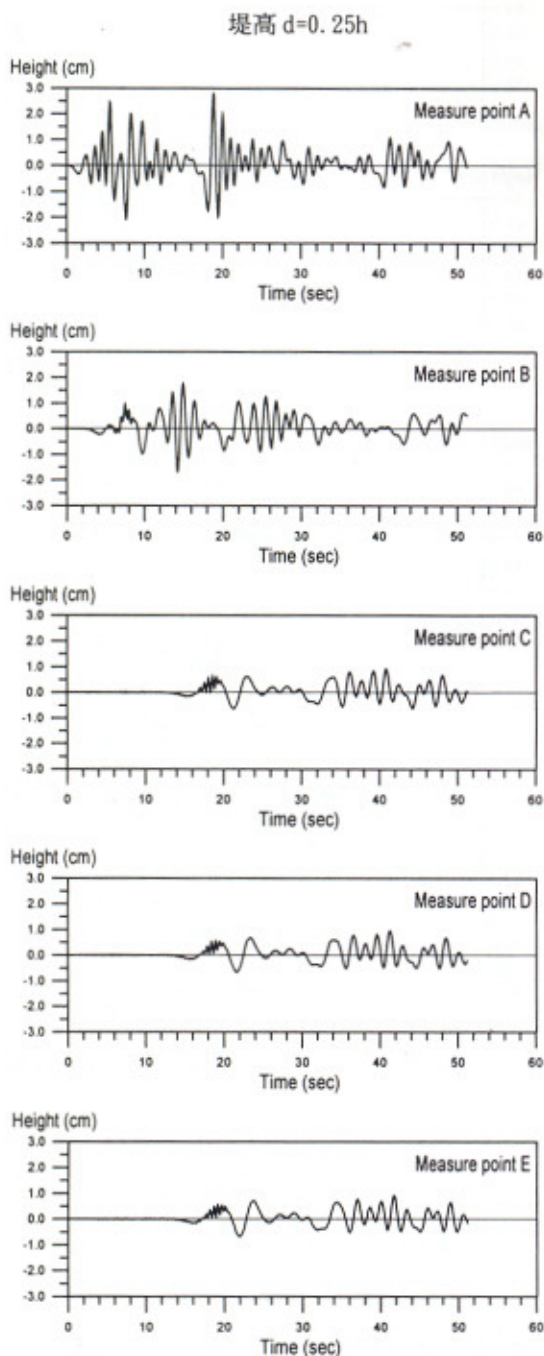


圖 7 自由水面各測點之水位變化歷時

配置潛堤後自由水面不同造波時  $t=1600\Delta t$ 、 $t=3200\Delta t$ 、 $t=4800\Delta t$ 、 $t=6400\Delta t$  及  $t=7650\Delta t$  所呈現之波形如下圖所示。

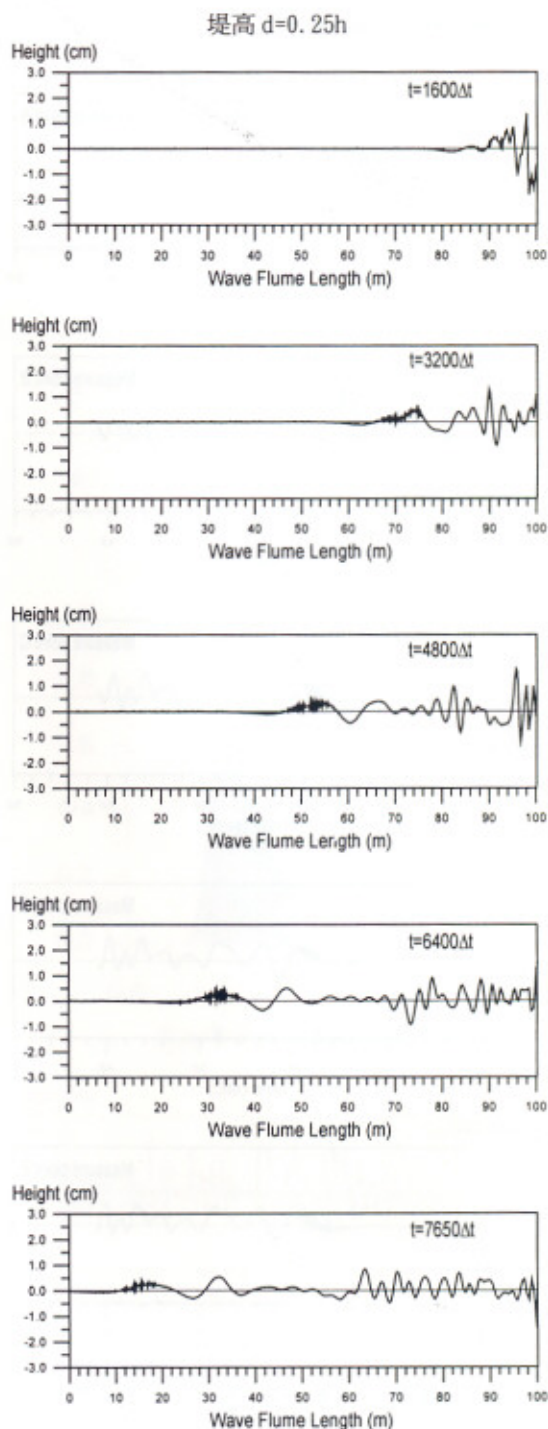


圖 8 潛堤配置不同造波時刻自由水面之波形

### 三、結果分析

模擬造波後自由水面所呈現之不規則波形，可以經由平均水位以零上切法(zero-up cross)之方式求得示性波高  $H_{1/3}$  及示性波週期  $T_{1/3}$ ，並利用快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transfer, FFT)求得其能量波譜。由圖 4 之入射波水位變化歷時可看出水面入射波有四十個以上，但為更精確的分析其波譜，本數值計算之發展目標則定為至少要有一百個波以上。本計算例配置潛堤前後之 A 測點所測得之水位變化經 FFT 轉換後得到下列圖 9 之波譜，其中 d 表潛堤高度。

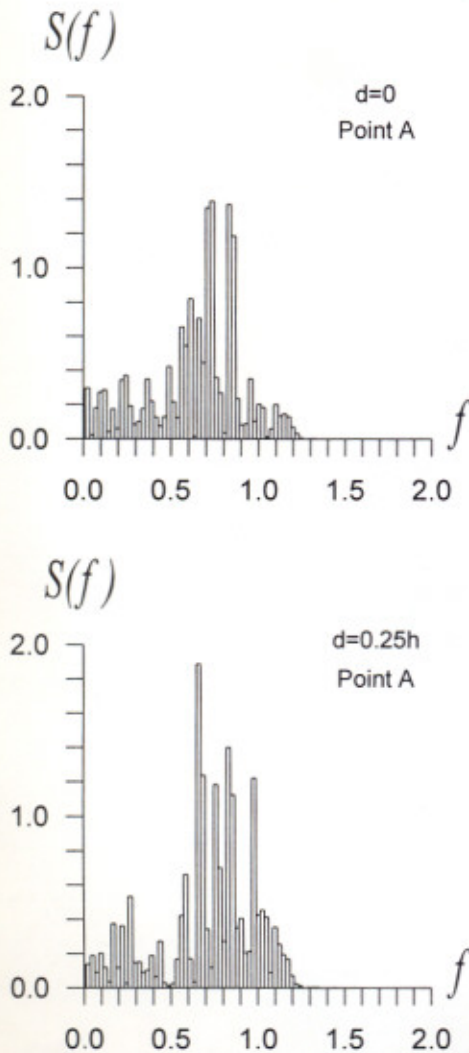


圖 9 潛堤配置前後 A 測點波浪之波譜

### 四、結論

本研究以邊界元素法所建立之二維斷面數值不規則造波水槽經初步分析之結果，除證實其可行性極高外，並歸納出兩點將來所須要再持續努力解決之問題，其一為本數值模式所模擬之不規則波浪的穩定性，降低數值計算所產生之數值誤差。其次則是為有效的取樣來分析不規則波，必需增加模擬之波數，此亦即模擬時間與水槽長度均需加長，如此一來除了模式之計算節點數除須大量增加外，數值計算之時間亦即相對加長許多，為解決這個問題，可以將垂直岸壁視為一無反射式消波面，即將此數值水槽開發為一無反射式造波水槽，如此一來便可解決水槽加長所帶來之計算節點數增加與計算時間增長之問題，同時又可增加取樣之波數。因此。本文之研究將繼續朝此方向作進一步之開發、研究與探討。

### 謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「沒水結構物對不規則波的影響」(編號 NSC88-2611-E-019-021)之研究成果，承蒙國科會經費之贊助使本研究得以完成，謹致感謝之意。

### 參考文獻

- 1.周宗仁(1983)：邊界元素法在波浪力學之應用，台灣海洋學院河海工程學會。
- 2.Boo, S.Y.and Kim, C.H. (1994) "Simulation of fully nonlinear irregular waves in a 3-D numerical wave tank", *Pro.4th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Vol. III, Osaka, Japan, PP.17-23.
- 3.Boo, S.Y.and Kim, C.H. (1997) "Nonlinear irregular waves and forces on truncated vertical cylinder", *Pro.7th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Vol. III, Honolulu, USA, PP.76-84.
- 4.Brorsen, M. and Larsen, J. (1987) "Source generation of nonlinear gravity waves with the boundary integral equation method", *Coastal Engineering*, Vol.11, No.4, PP.93-113.
- 5.Chou, C.R. and Ouyang, K. (1998) "Development of numerical irregular wave making channel", *Pro. Of*

- the 8<sup>th</sup> China-Japan symposium on Boundary Element Method, Int. Acadmic Publisher, pp.142-149.
6. Chou, C.R. and Shih, R.S. (1996) "Generation and deformation of solitary waves", *China Ocean Eng.*, China Ocean Press, Vol.10, No.4, pp.419-432.
  7. Chou, C.R., Shih, R.S. and Fang, H.M. (1996) "Deformation of solitary wave in coastal zones", *Pro. Of the 7<sup>th</sup> Japan-China symposium on Boundary Element Method*, Elsevier Press, pp.171-180.
  8. Faltinsen, O. (1978) "A numerical nonlinear method of sloshing in tanks with two-dimensional flow", *J. of ship research*, Vol.22, No.3, pp.193-202.
  9. Isaacson, M., Cheung, K.F., Mansard, E. and Miles, M.D. (1994) "Transient wave propagation in a laboratory flume", *J. of Hydraulic Research*, Vol.31, No.5, pp.665-680.
  10. Nakayama, T. (1983) "Boundary element analysis of nonlinear water wave problem", *Int. J. for numerical method in engineering*, No.19, pp.953-970.
  11. Sugino, R. and Tosaka, N. (1990) "Boundary element analysis of nonlinear irregular water wave problem", *Pacific congress on marine science and technology*, pp.18-25.
  12. Xu, Q., Pawlowski, J.S. and Baddour, R.E. (1993) "Simulation of nonlinear irregular waves by Green-Naghdi Theory", *Int. workshop on water wave and floating bodies*, New-foundland, Canada.