

不規則波作用於沒水結構物之波力密度 波譜數值研究

石瑞祥¹ 周宗仁²

摘要

本研究以邊界元素法配合時間領域之觀念及流體運動 Lagrangian 描述法所建立之消波式二維數值造波水槽來探討不規則波通過潛堤等沒水結構物後，結構物受隨機波浪影響之波力密度波譜(Force spectra)變化，於自由水面上設置若干個虛擬波高計量取水面之變化作分析，同時於解析領域內結構物前後附近設置若干個測點以求得水分子之運動速度，比較水面上各波高計所測得之波譜以及領域內沒水結構物之受力變化。本研究之水槽一端為虛擬活塞推拉式造波機，入射波浪造波條件參考 Brestschneider-Mitsuyasu 波譜來模擬不規則波之造波，為降低反射波之影響，於水槽末端設有一消能區(sponge zone)。同時在水底配置沒水消波潛堤，利用隨機波浪之反復運動來探討不同潛堤配置受不規則波之影響後其受力情形。

Numerical Estimations of Irregular Wave Force Spectra on Submerged Breakwaters

Ruey-Syan Shih Chung-Ren Chou

ABSTRACT

Numerical estimations of irregular wave forces spectra on submerged breakwaters are investigated by means of boundary element method using linear element. The algorithm of which was 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 estimations of the random wave force spectra are carried out by studying the case of irregular waves propagating the water tank with constant depth, submerged bars are fixed under the water tank. Power spectrum of Brestschneider-Mitsuyasu type was chosen for the generation of irregular waves. Time histories of water elevations are measured with pseudo wave gages on the free water surface, and the velocity of moving particles near the submerged obstacle are calculated by BEM as well, the total horizontal force is obtained by the water elevation and particle velocity, the force spectrum of irregular wave passing over the breakwaters are therefore investigated.

一、緒論

數值水槽(NWT)之研究在近年來由於電子計算科技快速的發展下而有極大的突破，在海岸工程上，大量的數值模式計算方法也因此而開發來應用於各種物理現象之研究與預測上，準確的模擬與預

測各種現象，並提供施工設計及建構上許多可靠之參考數據。傳統在海岸保護上為了達到消波之效果，多以堤防、消波塊、突堤等之護岸工法為之。近來基於親水政策(amenity-oriented policy)之提倡，逐漸改採自然、生態工法(ecological engineering method)以維護海岸自然景觀，利用潛堤、人工暗礁

1. 東南技術學院土木工程系 助理教授
2. 國立台灣海洋大學河海工程學系 教授

等方式來規劃，各類潛堤之研究，國內、外已有相當多的專家學者提出許多傑出之研究結果。本文利用 BEM 法在時間領域內模擬不規則波浪通過潛堤後，結構物受隨機波浪影響之波力密度波譜(Force spectra)變化。實際海面上之波動為隨機事件，除了頻率有不同變化外，波長及波高等無論是在空間上或時間上均為隨機變數，不規則波形將會影響結構物上所受之波力。波力為海岸結構物之主要外力之一，為使結構物能克服波力以保持穩定而不受破壞，於結構物之設計時便需概括計算波力之大小，依其結構物之性質主要有結構物本身之重量、波壓力(wave pressure)、拖曳力(drag force)、波力及上揚力(lift force)或浮力(bouyant force)，由於不規則波之探討乃建立在統計學之基礎上，故對於結構物受力之變化便衍生出波力密度譜(Force spectra)。

對圓柱或柱面結構物(cylinder)受不規則波影響受力之研究甚多，早期如 Goda(1973)以水工實驗對柱狀結構物及暗礁探討波力與波高之相對關係。Longoria(1991)等人利用實驗之方式以常態分佈之 Pierson-Moskowitz 波譜探討圓柱體受隨機振盪流體作用後速度譜(velocity spectrum)、同軸受力譜(in-line force spectrum)及上揚力譜(lift force spectrum)之變化。Boo 等(1997, 2002)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及波力變化，在時間領域內以高階邊界元素模式利用規則波及非線性不規則波探討數值水槽之波力，並應用到短圓柱體之衍射力。Chaplin 與 Subbiah(1997)及 Kriebel(1998)分別以數值及實驗方式探討近岸等水深中之大型水結構物及圓柱不規則波作用下之波力分析。Harland(1998)等則針對於作用於海岸結構物之最大波力作一系列實驗研究。

對於沒水潛堤受力之研究，Armenio 與 Favretto (1997) 藉由 Morison 方程式以數值水槽探討黏性流對固定式沒水方塊結構物的剪應力、壓應力與水位波動變化之關係。Hur 與 Mizutani (2003) 結合 VOF 模式與透水性沒水潛堤之概念將二維之模式之波力估算經驗公式應用到三維之數值水槽模式上，探討三維模式沒水潛堤之作用波力估算法之可行性。Yuan 與 Tao(2003)利用邊界元素法及有限差分法解析半圓形完全沒水、局部沒水及突出型潛堤所受之波力，解析過程並引入消波透水層之觀念。

本研究擬利用數值方法模擬波浪通過潛堤後結構物後構物所受之波力。2004 年石等以 BEM 法探討不規則波通過沒水結構物後之反射率，得到相當不錯的結果，本文延續此研究模式再進一步探討沒水結構物之波力密度譜變化，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，並於水槽中配置不同之沒水結構物。

二、基本假設

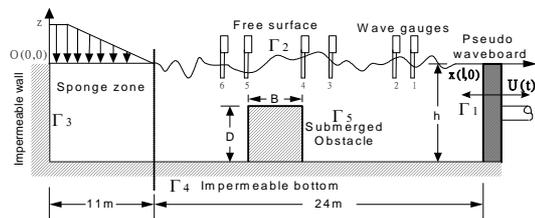


圖 1 造波水槽斷面示意圖

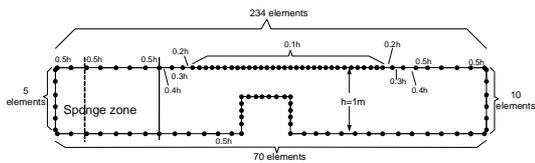


圖 2 解析領域邊界元素分割圖

數值造波水槽之斷面圖如圖 1 所示， x 軸水水平向右為正， z 軸垂直向上為正，於離垂直岸壁 $x=l$ 處設一虛擬造波邊界面 Γ_1 ，其餘各邊界面包括虛擬造波板、自由水面、垂直岸壁、不透水底面及沒水潛堤等，分別以 $\Gamma_1 \sim \Gamma_5$ 表示，使整個解析之領域成爲一封閉之區域，各邊界以 $N_1 \sim N_5$ 個線形元素(linear element)作分割，其中自由水面上之分割採用不等分割，如圖 2 所示。領域內之流體假定爲非粘性、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 Φ ，此速度勢應滿足下列 Laplace 連續方程式：

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

1. 在自由水面 Γ_2 上，令大氣壓力恆爲一定且爲 0，依動力學及運動學邊界條件可得下列關係式：

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

解析領域內任意點之 x 向水平速度與 z 向之垂直速度為：

$$u = \frac{Dx}{Dt} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (3)$$

$$w = \frac{Dz}{Dt} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (4)$$

上列各式中， D 表示全微分， g 為重力加速度， η 為水面波形， P 為水面上之錶計壓力，在非消波段水面上一般令大氣壓力恆為一定並視為 0，故 $P=0$ 。在水槽末端之虛擬消波透水層水面上本研究採用之 $P(x, \zeta)$ 可以表示為：

$$P(x, \zeta) = \mu(x)\Phi(\xi, \eta, t) \quad (5)$$

$$\mu(x) = \mu_0 \rho \left(\frac{x_{B0} - x}{B_0} \right)^\alpha, \quad x_X < x < x_{B0} \quad (6)$$

$$\mu(x) = \mu_0 \rho, \quad x \leq x_X \quad (7)$$

其中 x_X 及 x_{B0} 分別為定值段及漸變段之起點位置， B_0 為漸變段之長度， μ_0 為消能係數。

2. 在虛擬造波板邊界 Γ_1 上，造波板之移動速度 $U(t)$ 應滿足水分子水平方向之速度，即：

$$\bar{\Phi} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = -U(t) \quad (8)$$

根據 $H_{1/3}$ 及 $T_{1/3}$ ，造波板邊界條件之假設可利用下列之波譜或任意波譜來製造不規則波，即：

$$S_0(f) = Af^{-5} \exp(-Bf^{-4}) \quad (9)$$

採用 Brestschneider-Mitsuyasu 波譜時：

$$A = 0.257 H_{1/3}^2 / T_{1/3}^4 \quad (10)$$

$$B = 1.03 T_{1/3}^{-4} \quad (11)$$

自由水面之水位變化根據能量波譜可由下式求得：

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2dfS(f_n)} \cos(\sigma_n t - \varepsilon_n) \quad (12)$$

其中 $\sigma_n = 2\pi f_n$ ， ε_n 為界於 0 與 2π 間之隨機變數。故造波板邊界面上任意水深水粒子之水平向速度 $U(t)$ 可以表示如下：

$$U(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2dfS(f_n)} \sigma_n \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos(\sigma_n t - \varepsilon_n) \quad (13)$$

3. 在垂直岸壁 Γ_3 、不透水底床 Γ_4 及沒水結構物 Γ_5 上，垂直其方向水分子之速度在任意時刻均為 0，即：

$$\bar{\Phi} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (14)$$

三、數值方法

依據 Green 第二定理，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：

$$\Phi(x, z; t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \left[\frac{\partial \Phi(\xi, \eta; t)}{\partial n} \ln \frac{1}{r} - \Phi(\xi, \eta; t) \frac{\partial}{\partial n} \ln \frac{1}{r} \right] ds \quad (15)$$

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

$$\Phi(\xi', \eta'; t) = \frac{1}{\pi} \int_{\Gamma} \left[\frac{\partial \Phi(\xi, \eta; t)}{\partial n} \ln \frac{1}{R} - \Phi(\xi, \eta; t) \frac{\partial}{\partial n} \ln \frac{1}{R} \right] ds \quad (16)$$

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

上式經以線形元素離散化後，可以再化為下列之矩陣形式：

$$[\Phi_i] = [O_{ij}] [\bar{\Phi}_i] \quad i, j = 1-5 \quad (17)$$

$[\Phi_i]$ 及 $[\bar{\Phi}_i]$ 分別表示邊界上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。

3.1 水分子運動速度之計算

根據第(15)式，領域內任意點之 x 向速度 $u(t)$ 及 z 向速度 $w(t)$ 可由其速度勢分別對 x 軸方向及 z 軸方向微分求得，即：

$$u(t) = \frac{\partial \Phi(x, z; t)}{\partial x} \quad (18)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^n \int_{\Gamma} \left\{ \left(M_1 \bar{\Phi}_j(\xi, \eta; t) + M_2 \bar{\Phi}_{j+1}(\xi, \eta; t) \right) \left(\frac{x-\xi}{r^2} \right) - \left(M_1 \Phi_j(\xi, \eta; t) + M_2 \Phi_{j+1}(\xi, \eta; t) \right) \left[n_x \left(\frac{1}{r^2} - \frac{2(x-\xi)^2}{r^4} \right) - n_z \frac{(x-\xi)(z-\eta)}{r^4} \right] \right\} ds_j \quad (19)$$

$$w(t) = \frac{\partial \Phi(x, z; t)}{\partial z}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^n \int_{\Gamma} \left\{ \left(M_1 \bar{\Phi}_j(\xi, \eta; t) + M_2 \bar{\Phi}_{j+1}(\xi, \eta; t) \right) \left(\frac{x-\eta}{r^2} \right) - \left(M_1 \Phi_j(\xi, \eta; t) + M_2 \Phi_{j+1}(\xi, \eta; t) \right) \left[n_x \left(\frac{1}{r^2} - \frac{2(x-\eta)^2}{r^4} \right) - n_z \frac{(x-\xi)(z-\eta)}{r^4} \right] \right\} ds_j \quad (20)$$

其中 M_1 、 M_2 為形狀函數， $M_1=(1-\chi)$ ； $M_2=(1+\chi)$ ， χ 為各元素所使用之無次元座標系。

3.2 作用在潛堤之不規則波波力譜

對於波浪力之分析除了考慮波高之變化外，須同時考慮波長之變化，故需採用波譜法來描述波力之變化，而所謂波譜法即利用波高之變化所測得之能量波譜來推求作用於結構物上之波力密度譜，可推估不同累積機率之波壓力，即波力密度譜可以經由不規則波浪之能量譜乘上一個相對應之頻率反應函數之平方求得，此函數為波力的傳遞函數。

$$S_f(f) = [F_f]^2 \cdot S_0(f) \quad (21)$$

其中 S_0 、 S_f 及 F_f 分別為能量波譜、波力密度譜及波力傳遞函數。

對於波力 F_{Total} 之計算，如前面所訴述，主要的力成份有堤重量、波壓力、拖曳力、波力及上揚力或浮力等，在計算波力時同時考慮入射波之特性、結構物之種類及波浪與結構物之相互關係。若水中結構物突出水面，則波浪直接拍擊堤面之波浪動壓力以及堤面上碎波之波壓力為主要之破壞力，結構為柱狀物(cylinder)，則根據 Morison 公式，慣性力與拖曳力為主要探討之作用力。本文探討不規則波浪通過沒水潛堤之問題，雖然結構物受各項外力之

作用，本文之作用力分析僅考量水平方向之作用力，即各瞬時時間波高及波長變化對沒水結構物前、後因水面變化所產生之壓力差的作用力 (Pressure Force) F_p ，以及該瞬時時刻結構物前後水分子運動之水平速度產生之水平向作用力 F_U (Horizontal Force)。關於壓力差所產生之作用力 F_p 可由下列之關係式求得各時刻之水壓作用力：

$$F_{p1}(t) = \int_{-h}^{\eta_1} \rho g z dz - \int_{-h+D}^{\eta_1} \rho g z dz \quad (22)$$

$$F_{p2}(t) = \int_{-h}^{\eta_2} \rho g z dz - \int_{-h+D}^{\eta_2} \rho g z dz \quad (23)$$

$$F_p(t) = F_{p2}(t) - F_{p1}(t) \quad (24)$$

其中 ρ 、 η_1 、 η_2 、 F_{p1} 、 F_{p2} 分別為密度、潛堤前後之水面水位與水壓作用力。

其次，利用潛堤前後所得之水分子水平方向之運動速度 $U(t)$ ，因在不透水潛堤表面上 $\partial \Phi / \partial n = 0$ ，故可求得其瞬時加速度。而 ΔS 為水分子速度參考點與潛堤之水平距離，取 $\Delta S = 0.5h$ ， $U_{0.5}$ 、 $U_{-0.5}$ 分別表示堤前、後水分子之速度，則水分子運動對潛堤所產生之水平方向之作用力 $F_{Total}(t)$ ：

$$F_{U1}(t) = \frac{1}{2\Delta S} \rho \nabla \int_{-h}^{-h+D} U_{0.5} \cdot |U_{0.5}| dz \quad (25)$$

$$F_{U2}(t) = \frac{1}{2\Delta S} \rho \nabla \int_{-h}^{-h+D} U_{-0.5} \cdot |U_{-0.5}| dz \quad (26)$$

$$F_U(t) = F_{U1}(t) + F_{U2}(t) \quad (27)$$

$$F_{Total}(t) = F_p(t) + F_U(t) \quad (28)$$

模擬造波自由水面所呈現之不規則波形，本研究於水面上將自虛擬造波板起在潛堤前後各取若干個測點，以虛擬波高計量取其水面變化之歷時，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，利用各時刻之水面變化及水分子運動速度之資料計算所得之結構物受力應用上述之原理可求得其水平向之波力密度譜(Horizontal Force Spectrum)。關於不規則波受潛堤影響之反射率及入反射波能量波譜之探討可參考石等(2004)。

四、結果與分析

4.1 潛堤之水平壓力變化

如圖 1 所示，潛堤之長度為 $B=h$ ($x_1=20h, x_2=19h$) $\sim 4h$ ($x_1=20h, x_2=16h$)，表 1. 為潛堤前後各測站之位置，各計算例取四個測站作分析，堤前為測點 1 及 2，堤後為測點 3 及 4，a、b、c、d 分別為四種不同長度之潛堤。圖 3 分別為由 x_1 及 x_2 測點所測得之水面波形變化歷時圖，其中潛堤長度 $B=4h$ 、高度 $D=0.25h$ ，由於不規則波浪對潛堤所產生之壓力差會因不同潛堤長度而呈現不同之結果，相對於不同週期之不同波長亦有不同之影響。另外，當堤長增加時，入射波浪受潛堤之影響增加，水深變淺使淺化效應時間加長，尤其當潛堤高度也同時增加時，有發生堤上碎波的可能性，影響波譜分析之有效樣本數(波數)，故本文僅討論不發生碎波之情況。

圖 4 為 x_1 及 x_2 測點所測水面波形變化之能量波譜，圖中之能量波譜圖之主頻率大約為 0.7Hz，即週期波大約為 1.43~1.48 sec 之間，較設計波譜之 1.4 sec 稍微大一點。然而不同於規則波具有固定性之週期、波長與波高，不規則波在傳遞過程各成份波之排列秩序為時變性，亦即各成份波之相對位置隨不同時間與空間而有所不同，水平壓力差所產生之最大或最小波力則取決於潛堤前後之相對水位差，同時波長之大小直接影響水分子之水平流速，也影響波力之推算。圖 5 為利用上述由 x_1 及 x_2 測點在同一瞬時間在潛堤前後側所測得之波高變化在不考慮水分子運動速度之影響下，僅考量水位落差所產生之壓力差，單位面積乘上其相對應之壓力差所得之水平向作用力歷時。由 x_1 及 x_2 測點所測得水面波形變化可以明顯看出大約有 2~3 個波群，但作用力歷時圖中僅能看出一個包絡線(envelope)。

表 1 各測點波高計之位置

測站編號	位置(m) 【堤前】	測站編號	位置(m) 【堤後】
01	21.0	03a	19.0
02	20.5	04a	18.5
		03b	18.0
		04b	17.5
		03c	17.0
		04c	16.5
		03d	16.0
		04d	15.5

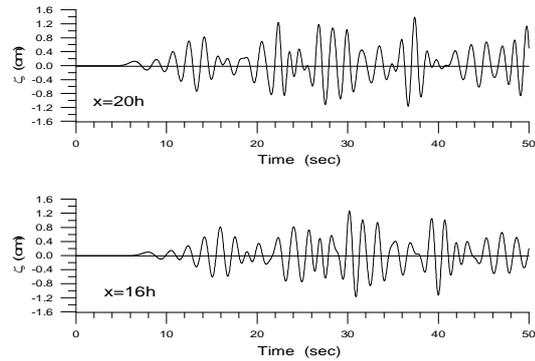


圖 3 潛堤前後之波高變化歷時 ($T_{1/3}=1.4$, $B=4h$, $D=0.25h$)

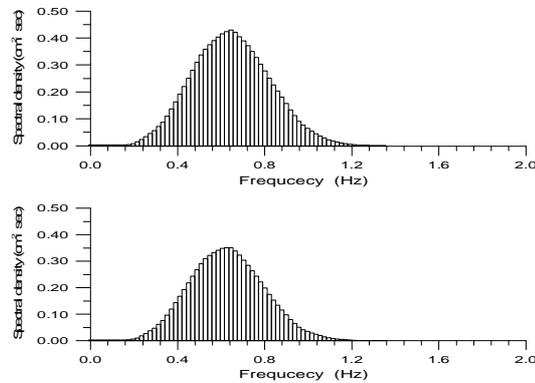


圖 4 潛堤前、後波浪能量波譜 ($T_{1/3}=1.4$, $B=4h$, $D=0.25h$)

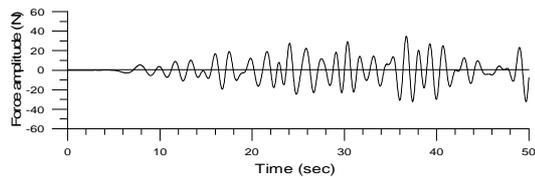


圖 5 不規則波通過潛堤之水壓作用力歷時 ($T_{1/3}=1.4$, $B=4h$, $D=0.25h$)

4.2 潛堤前後水分子運動速度與作用力變化

如前面所述，影響水分子運動速度大小之原因之一為相對水深之波長大小，除了各成份波間之波與波交互作用 (wave-wave interaction) 所產生之影響外，反射波亦為一主要原因。圖 6 為堤潛堤長度 $B=4h$ 、高度 $D=0.5h$ 時，潛堤前 0.5h 處與後 0.5h 處水分子運動之水平分量速度，由圖中顯見在水深 0.5h 處堤頂之前後水分子運動速度有明顯的差別，潛堤前直接受入射波之衝擊，有較大的速度變化，堤後雖然水平速度似乎較小，根據歐等(2004)之實

驗研究，在堤後很可能會有渦流產生，因此在堤後下方可能會有較複雜之流況。另外，當入射波遇潛堤時，部分反射波將影響水分子之運動，即堤前入射波與反射波所形成的部份重複波會導致使水分子之運動產生非規律性之瞬間運動，如圖 7 所示，水分子運動所產生之瞬時作用力相較於波壓力有較大的起伏。此外，水平運動速度隨著水深逐漸減小，本文在計算過程中，當取點太接近水槽底部時，速度有增大之現象，計算誤差變大，故在分析計算時僅取至水面下 $z=-0.8h$ 或 $0.85h$ 之數據作計算，以減少誤差之發生，經計算後如圖 8 所示，圖中在 $z=-0.7h$ 變化曲線後方有較大之振盪，是否可能係因堤後渦流所產生之影響，有待作進一步探討。

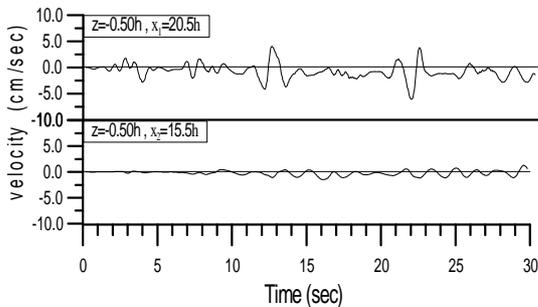


圖 6 潛堤前、後水分子之速度變化 ($T_{1/3}=1.2$, $B=4h$, $D=0.50h$)

4.3 波力密度譜分析

波力密度譜乃根據水面虛擬波高計所測得之水位變化計算所得之水壓作用力加上潛堤前後水分子運動所產生之作用力。本文根據周等(2002)對孤立波及週期波所作之研究結果採用消能係數 $\mu=1$ 來消滅不規則波自垂直岸壁反射之能量，但水槽內設置沒水結構物後，入射波通過結構物所產生之反射波無法利用水槽末端之消波技術將反射波消除，此反射波將直接對造波板邊界產生直接之影響，間接影響水面波形變化及解析領域之水分子運動，也影響數值計算之穩定性與精確性。圖 9 為 $T_{1/3}=1.2$ 之不規則波通過長度 $B=4h$, $D=0.25h$ 之潛堤前後之水位變化歷時，同時考量壓力差的作用力及水分子運動所產生之水平向作用力後則如圖 11 所示，經轉換計算後得其作用力波譜，如圖 12 所示，圖中除低頻之部份外，在頻率 $f=1.4 \sim 3.0\text{Hz}$ 之間有亦有微小之能量存在，此部份屬週期較短之波力成份。潛堤較

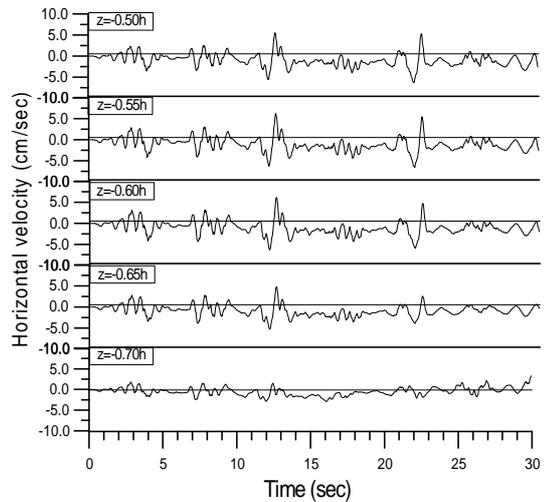


圖 7 潛堤前、後水分子之速度變化 ($T_{1/3}=1.2$, $B=4h$, $D=0.50h$)

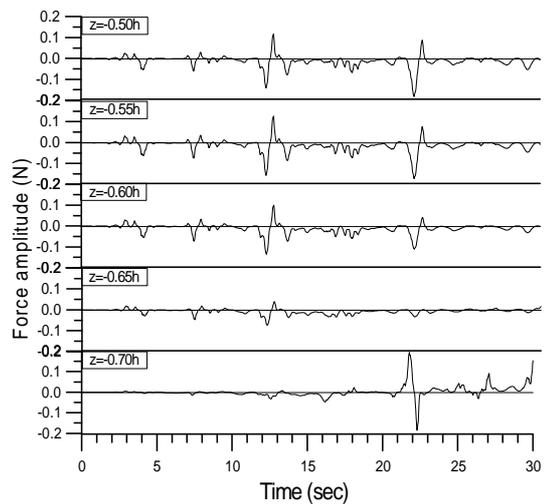


圖 8 水分子運動之作用力變化 ($T_{1/3}=1.2$, $B=4h$, $D=0.50h$)

低時，水分子之運動所產生之作用力影響較小，水位變化之水壓作用力亦因受力面積較小而較小。潛堤高度增加後，如圖 14 為 $T_{1/3}=1.2$ 之不規則波通過長度 $B=4h$, $D=0.50h$ 之潛堤前後之水位變化歷時，水平向作用力則如圖 15 所示，比較圖 16 之波譜圖後發現在較高頻率 $f=1.4 \sim 3.0$ 間並無如前例之微小之能量存在。同時主頻之部分最高點較圖 12 中之部分大，此二例之波力密度譜主頻大約為 $f=0.8\text{Hz}$ ，即 $T=1.25\text{sec}$ ，與潛堤前後波高之能量波譜圖 10 比較後發現其主頻部分大致上是一致的。

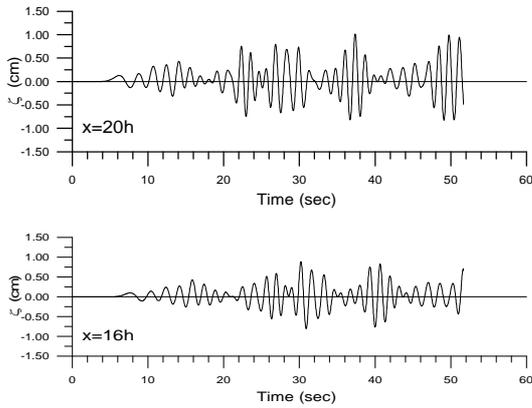


圖 9 波高變化歷時($T_{1/3}=1.2, B=4h, D=0.25h$)

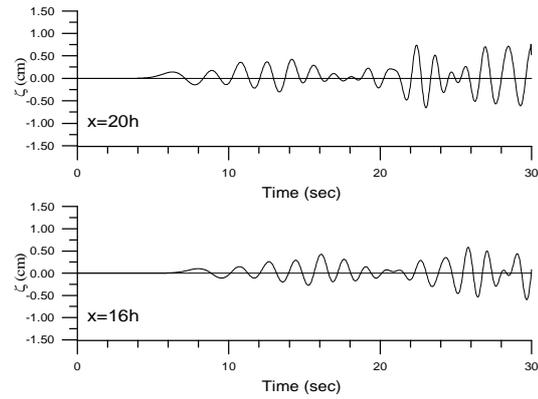


圖 13 波高變化歷時($T_{1/3}=1.2, B=4h, D=0.50h$)

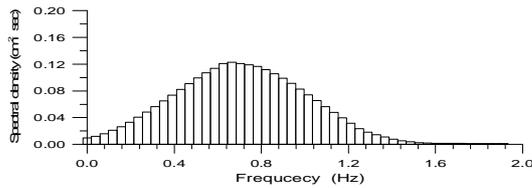
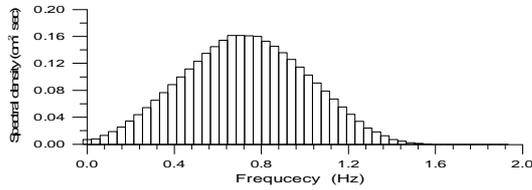


圖 10 潛堤前、後能量波譜($T_{1/3}=1.2, B=4h, D=0.25h$)

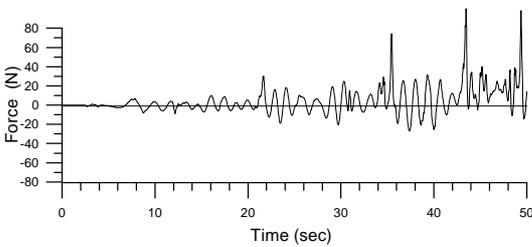


圖 11 不規則波通過潛堤之作用力歷時($T_{1/3}=1.2, B=4h, D=0.25h$)

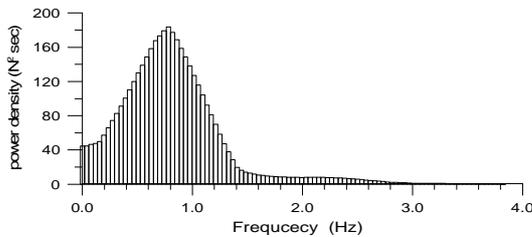


圖 12 潛堤之波力密度譜($T_{1/3}=1.2, B=4h, D=0.25h$)

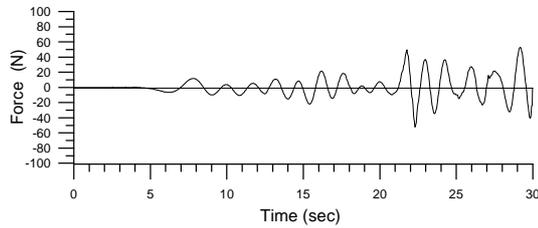


圖 14 不規則波通過潛堤之作用力歷時($T_{1/3}=1.2, B=4h, D=0.50h$)

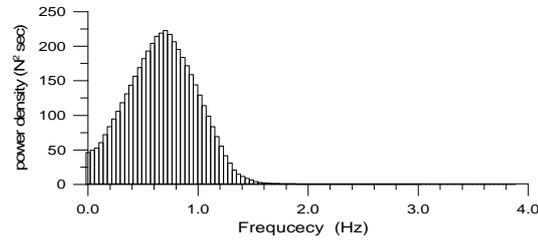


圖 15 潛堤之波力密度譜($T_{1/3}=1.2, B=4h, D=0.50h$)

五、結論

本文利用邊界元素法建立數值造波水槽來探討不規則波通過沒水潛堤時，結構物之波力之密度波譜變化。經分析整理後得到以下之結論：

1. 本文模式在探討不規則波受潛堤影響之研究就整體而言為一可行之方式，由於不規則波在傳遞過程各成份波之排列秩序為時變性之影響因素，亦即堤前、後各成份波之瞬時相對水位差與位置隨不同時間與空間而有所不同，除了影響水平之壓力差所產生之波力外，其波長之大小亦影響水分子之水平流速，直接影響波力之推算。

2. 水槽內波浪受結構物之影響之碎波現象及入射波通過結構物後反射波所產生的二次造波問題無法利用水槽末端之消波技術將能量消除，反射波將影響水面波形變化及解析領域之水分子運動，也影響數值計算之穩定性與精確性，故未來將研究把造波板邊界改為無反射、吸收式造波機。
3. 潛堤前、後 0.5h 處水分子之運動速度有明顯的差別，潛堤前直接受入射波之衝擊，有較大的速度變化，堤後水平速度較小，影響水分子運動速度大小之原因除了各成份波間相對水深之波長大小所引起波與波的交互作用外，堤前之反射波將影響水分子之運動導致水分子之運動產生更不規律之運動，所產生之瞬時作用力相較於波壓力會有較大之起伏。在 $d=0.7h$ 變化曲線後方有較大之振盪，是否可能係因堤後渦流現象所產生之影響，有待作進一步探討。
4. 在頻率 $f=1.4\sim 3.0\text{Hz}$ 之間有微小之能量存在，此部份屬週期較短之波力成份。潛堤較低時，受水分子之運動及水位變化壓力差所產生之作用力影響較小，分析所得作用力也較小。 $D=0.50h$ 時在頻率 $f=1.4\sim 3.0$ 間並無如前述之微小能量存在。同時主頻之部分最高後者較前者大，此二例之波力密度譜主頻大約為 $f=0.8\text{Hz}$ ，相當於 $T=1.25\text{sec}$ ，與潛堤前後波高之能量波譜比較後發現其主頻部分大至上是一致的。

謝誌

本文係國科會研究計畫「不規則波作用於沒水結構物之波力密度波譜數值研究」(編號 NSC93-2611-E-236-001)之研究成果，承蒙台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. 石瑞祥，周宗仁，尹彰(2004)“時間領域不規則波受沒水結構物作用下波浪反射率與波形變化之數值研究”，第 26 屆海洋工程研討會論文集，456 頁-463 頁。
2. 歐善惠，廖建明，陳義芳，陳一文(2004)“波浪通過斜坡底床上潛堤之流場研究”，第 26 屆海洋工程研討會論文集，385 頁-392 頁。

3. Armenio, V. and Favretto, M. (1997) “Development of a viscous numerical wave tank and numerical evaluation of dynamic loads on submerged bodies at small KC numbers”, *Proceedings of the seventh international Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol.3, Honolulu, USA, PP.98~106.
4. Boo, S.Y. and Kim, C.H. (1997) “Nonlinear irregular waves and forces on truncated vertical cylinder”, *Proceedings of the seventh international Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 3, Honolulu, USA, PP.76~84.
5. Boo, S.Y. (2002) “Linear and nonlinear irregular waves and forces in a numerical wave tank”, *Ocean Engineering*, Vol.29, PP.475~493.
6. Chaplin, J.R. and Subbiah, K. (1997) “Large scale horizontal forces in waves and currents”, *Applied Ocean Research*, Vol.19, PP.211~223.
7. Goda, Y. (1973) “Wave forces on circular cylinders erected upon reefs”, *Coastal Engineering in Japan*, Vol.16, PP.137~146.
8. Harland, L.A., Taylor, P.H. and Vugts, J.H. (1998) “The extreme force on an offshore structure and its variability”, *Applied Ocean Research*, Vol.20, PP.3~14.
9. Hur, D.S. and Mizutani, N. (2003) “Numerical estimation of the wave force acting on a three dimensional body on submerged breakwater”, *Coastal Engineering*, Vol.47, PP.329~345.
10. Kriebel, D.L. (1998) “Nonlinear wave interaction with a vertical circular cylinder: wave forces”, *Ocean Engng.*, Vol.25, No.7, PP.597~605.
11. Longoria, R.G., Beaman, J.J. and Miksad, R.W. (1991) “An experimental investigation of forces induced on cylinders by random oscillatory flow”, *Trans. ASME, J. Offshore Mechanics and Artic Engineering*, Vol.113, pp.275~285.
12. Yuan, D. and Tao, J. (2003) “Wave forces on submerged, alternately submerged, and emerged semicircular breakwaters”, *Coastal Engineering*, Vol.48, PP.75~93.