

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

國科會專題研究計畫成果報告撰寫格式說明

Preparation of NSC Project Reports

計畫編號：NSC 89-2611-E-002-052

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：林銘崇 台灣大學造船及海洋工程學系

共同主持人：丁肇隆 台灣大學造船及海洋工程學系

計畫參與人員：許朝敏 台灣大學造船及海洋工程學研究所

一、中文摘要

當波浪通過結構物時，在結構體前方會產生反射現象，而在結構物後方則會產生繞射現象。若同時存在有水流運動，則這些現象會更加複雜。本文藉著林等[1]所推導出之方程式，在計算領域內加入使用阻尼層之觀念，進行數值模擬計算，期能對波浪、水流與結構物交互作用之複雜現象作一初步探討。

關鍵詞：波浪、水流、阻尼層

Abstract

When progressing wave encounters a circular island, reflect waves and diffract waves occur around the island. The phenomenon would be more complicated with the presence of currents. Based on the equation derived by Lin *et al.* [1], numerical examination was carried with imposing damping layer on boundaries.

Keywords: Waves, Current, Damping Layer

二、緣由與目的

由於海洋資源豐富，近幾十年來人類利用海洋結構物採取開發海洋資源也日趨頻繁。但因為海洋結構物所受外力複雜，故其在設計上較陸上結構物困難許多。其主要外力為波浪力，由於波浪形成機制複雜，其與結構物之交互作用解析更是不易，故以往在海洋結構設計上，常因波浪力之估算不正確，而造成結構物之疲勞破壞或共振破壞等。同時海洋中有潮流、洋流、風揚吹送流及各種不同特性之水流運動。在淺海水域亦有沿岸流、離岸流以及河口處水流等等。綜合上述之現象，在結構物附近的海域內，因為水深變化影響，以及水流與波浪之交互作用，將會使波浪計算更加複雜。最近數十年來，由於海洋工程之迅速發展及大量巨型結構物之建造，為達到合理精確度，水流對波浪之影響已受到相當重視。本研究將針對波浪、流與海洋結構物交互作用之影響，作一初步之研究。

一般處理表面重力波問題時，通常以表面波理

論來描述，但是除了等水深情況外，波浪受水深變化影響後，此時表面波方程式則難以描述此一複雜問題，再加上結構物之存在與水流運動，則會產生極複雜之波況。

有關波浪折射—繞射之共同效應研究，Homma [2] 首先以淺水波方程式，用理論解析圓形島嶼附近之波況。Vanstano & Reid [3] 繼而以有限差分法計算此問題，驗證了 Homma [2] 的理論解。最近二十年，對於折射—繞射問題才開始一連串有系統的研究。Berkhoff [4] 在線性波理論的基本方程式中，利用微擾法 (perturbation method) 導出一個二階微分方程式，目前稱之為 Berkhoff 方程式或緩坡方程式 (mild-slope equation)。Smith & Sprinks [5] 則利用漸近理論，將單一頻率之波浪作近似展開，另行推導緩坡方程式。Tsay & Liu [6] 使用混合有限元素法 (hybrid finite element method) 求解緩坡方程式，並計算離岸結構物所受之波力及動量。對於水流的影響，Booij [7] 將傳統緩坡方程式導入水流效應，並利用變分法中 Lagrangian 理論推導出含流之緩坡方程式，配合有限差分法探討緩變海域波一流交互作用現象。Liu [8] 亦依據 Smith & Sprinks [5] 之漸近理論，另行推導此一方程式，並利用拋物近似法 (parabolic approximation) 之技巧將此方程式轉換，計算傾斜海岸附近垂直入射波和射流之間的交互作用現象，並與 Arthur [9] 之計算例比較。Kirby [10] 修正 Booij [7] 及 Liu [8] 所推導之緩坡方程式，依據 W.K.B. 微擾展開技巧，配合 Lagrangian 理論，重新加以推導緩坡方程式，證明此方程式無須作任何假設近似即可滿足波作用量 (wave action) 守恆方程式。Kirby [10] 並用拋物近似法分解此方程式，將結果與 Turpin *et al.* [11] 之線性化方程式比較，結果頗為一致。Kubo *et al.* [12] 則首將不規則波導入緩坡方程式而提出一適用於不規則波之緩坡方程式。Lin & Hsu [13] 引用 Kubo *et al.* [12] 之觀念，將水流效應入考慮，提出一適用於波流共存場中之不規則波與流之緩坡方程式。

布斯尼斯克方程式 (Boussinesq equation) 可解析波浪在變水深時之淺化、折射、繞射、部分反射及有限振幅且可處理方向性與不規則性等現象。此方程式對於非線性與分散性之效應同時考慮，在處理不同問題時，其速度變數表示有一些不

同型式，如表面速度、水底速度、水深平均速度與水深積分速度等不同型態。其次由於非線性與分散性等項都是高次項，所以可以配合線性長波方程式求解。傳統布斯尼斯克方程式在應用上之限制主要是必須滿足淺水條件。Peregrine [14] 首先導出一方程式適用於變水深中處理長波問題，當水深不變時此方程式與傳統之等水深布斯尼斯克方程式是一致的。Madsen 等人 [15] 提供一改善原傳統布斯尼斯克方程式分散特性之方程式，可描述從深水到淺水之波浪變化且比原方程式在水深條件方面限制較少（水深與深水波長比可小於 0.05），在深水條件時此方程式與司脫克第一階理論 (Stokes first-order theory) 一致，而淺水條件時與標準布斯尼斯克方程式是一致的，並且在處理不規則波浪之淺化與折射及波浪間之非線性作用比傳統布斯尼斯克方程式有更精確之結果。Nwogu [16] 使用任意水深之水平速度為變數從連續方程式 (Continuity equation) 及尤拉方程式 (Euler equation) 導出一新布斯尼斯克方程式，此方程式與 Madsen *et al.* [15] 使用不同型態之 Pade approximation 處理分散關係式。Gobbi *et al.* [17] 推導出一準確到 $O(kh^4)$ 之非線性布斯尼斯克方程式，此方程式可以表現弱非線性包絡波在中間水深，而在窄頻不規則波之應用上，可以將波高表示成 stokes 展開，我們可以得到二次簡諧之非線性分散與穩定性結果如同水丁格方程式 (Schrödinger equation) 一樣好。Kennedy *et al.* [18] 使用布斯尼斯克方程式處理 surf zone，在模擬碎波狀況時使用 momentum-conserving eddy viscosity 技術，viscosity 位在碎波的前面。經過數值與實驗驗證後發現對於規則波與不規則波之淺化、碎波與湧生 (runup) 有相當好的結果。

Luke [19] 首先將動力邊界條件以變分法 (Variational method) 處理，可獲得控制方程式及邊界條件。Isobe [20] 同樣運用此一方法，且假設波浪之速度勢函數可以視為一水深方向分佈函數與水平方向分佈函數之乘積，將其代入 Euler Equation 後可得到兩個控制方程式，並經由不同水深方向函數之物理假設，可以推導至不同物理現象之控制方程式。然而上述之結果只適用於純波動現象，林等 [1] 將運用此一方法將水流現象含括討論，推導出一含流效應控制方程式，本文引用此一方程式進行數值計算，期能對於結構物存在於波流場中之交互作用能進一步了解。

三、理論推導

首先假設波流場中之流體滿足非壓縮性及非黏性，使用林等(2000)所推導出之含流淺水長波方程式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot [(h + \eta)\mathbf{u}] + \mathbf{U} \cdot [\nabla \eta + \nabla h] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + g\nabla \eta + |\mathbf{U}| \nabla |\mathbf{U}| + \nabla(\mathbf{U} \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

其中 $\mathbf{u} = (u, v)$ 為波流交互作用後之流場速度、 $\mathbf{U} = (U,$

$V)$ 為純流所產生之流場速度、 η 表示水表面變動量、而 x, y, z 代表空間座標、 t 是時間、 h 為水深、 g 為重力加速度。

當 (1)、(2) 二式中 $\mathbf{U} = 0$ ，可簡化成為淺水長波方程式。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot [(h + \eta)\mathbf{u}] = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + g\nabla \eta = 0 \quad (4)$$

四、計算結果與討論

使用 Liu *et al.* [21] 有限差分交錯網格 (staggered grid method) 顯式蛙跳 (explicit leap-frog) 計算法，進行數值計算，其計算領域定義如圖 1 所示： X 範圍為 0~60m， Y 為 0~50m，水深 $h_0 = 0.32$ m，圓島高 0.625m，緩變地形斜率為 1/4。

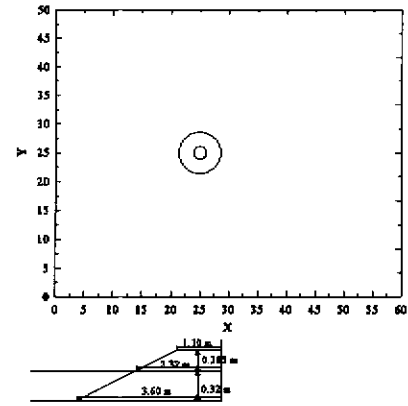


圖 1 計算領域定義圖

方程式(1)及(2)重新表示如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [u(h + \eta)] + \frac{\partial}{\partial y} [v(h + \eta)] + U \frac{\partial}{\partial x} (h + \eta) + V \frac{\partial}{\partial y} (h + \eta) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \sqrt{U^2 + V^2} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (Uu + Vv) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \sqrt{U^2 + V^2} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (Uu + Vv) = 0 \quad (7)$$

方程式中有關 convective term 採用 upwind method 方法。在邊界條件處理方面，因計算領域左邊為入射條件，右邊及上面邊界假設滿足輻射邊界條件 (radiation boundary condition)，意即波浪傳遞到此邊界時不產生反射波。但由於輻射邊界條件在某些情況下會使得計算模式產生無法計算，因此為降低反射現象，我們參考 Cruz *et al.* [22] 在計算領域內加上一層阻尼層 (damping layer or sponge layer)。如圖 2 所示，其在阻尼層之計算方法以方程式(5)及以下二個方程式進行計算：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \sqrt{U^2 + V^2} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(Uu + Vv) = -\epsilon_x \mu \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \sqrt{U^2 + V^2} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}(Uu + Vv) = -\epsilon_y \nu \quad (9)$$

其中

$$\epsilon_x(R) = \epsilon_y(R) = \frac{\theta \gamma \epsilon_m}{2(\sinh \gamma - \gamma)} [\cosh(\gamma R / F) - 1]$$

F : 阻尼層厚度 $\approx 2 \sim 3$ 倍的波長

$\epsilon_m = \sqrt{g/h}$, $\gamma = 3$, $\theta = 0.15 \sim 5.0$, R = 阻尼層內計算點與非阻尼層的距離。

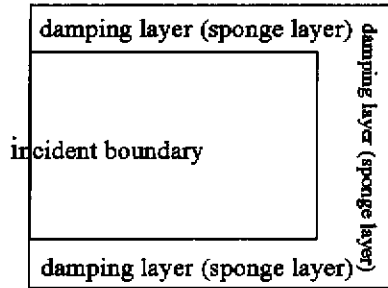


圖 2 計算阻尼層位置圖

在輻射邊界條件處理方法如下：如圖 3 所示，假設 o 點在 n 時刻之物理量在下一時刻 $n+1$ 時移動到 b 點，故此物理量可表示為

$$\eta_b^{n+1} = \eta_o^n, u_b^{n+1} = u_o^n, v_b^{n+1} = v_o^n$$

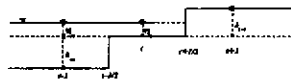
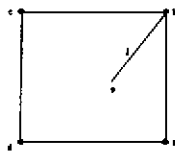


圖 3 輻射邊界及移動邊界示意圖

由於我們所針對處理之問題為淺水長波，因其波速 $C = \sqrt{gh}$ ，所以 $l = \sqrt{gh} \Delta t$ 。而 η_o^n 、 u_o^n 、 v_o^n 可由 a 、 b 、 c 、 d 四點在 n 時刻值內差獲得，如此便可得到邊界點在 $n+1$ 時刻值。

而在圓島岸線附近採用移動邊界條件 (moving boundary condition)，須要每一時刻重新推算岸線位置，在此定義水深在水線底下為正，在水線上則為負，若 $H_{i,j} = h_{i,j} + \eta_{i,j}$ 則在 X 方向可決定如下：

1. 若 $H_{i+1,j} \leq 0$ 且 $h_{i+1,j} + \eta_{i,j} \leq 0$ ，則岸線介於點 (i,j) 和 $(i+1,j)$ 之間，而 $u_{i+1/2,j} = 0$ 。

2. 若 $H_{i+1,j} \leq 0$ 且 $h_{i+1,j} + \eta_{i,j} > 0$ ，則岸線介於點 $(i+1,j)$ 和 $(i+2,j)$ 之間，而 $u_{i+3/2,j} = 0$ 。

同理依循上面方式可決定 Y 方向岸線變化，而且因為岸線變化與整個計算領域比較起來算是很小的部份，故僅須計算附近變化以節省計算時間。

由以上之差分式及邊界條件便可計算模擬淺水長波作用後之整個水位變化及流場狀況。在此須強調的是式 (5) 必須對整個計算領域進行計算，而式 (6) 及 (7) 只要計算岸線以下有水的部份即可。

因為採用顯式差分式，對於網格間距及時間間距值不能太大。故選定網格間距 $\Delta x = 0.1m$ 、 $\Delta y = 0.1m$ ，計算時階 $\Delta t = 0.02sec$ 。以下針對計算結果進行討論：

為了解不同水流強度及流向對波浪之影響性，所以選定 $U = 3cm/sec$ 、 $5cm/sec$ 二種強度，及順向與逆向二種流向進行計算。其中順向流場分佈圖如圖 4 及圖 5 所示。

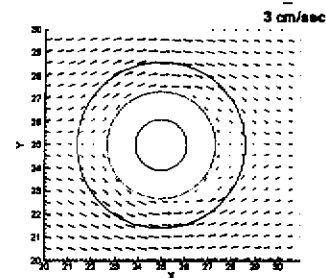


圖 4 純流 $U = 3cm/sec$ 之流場速度分佈圖

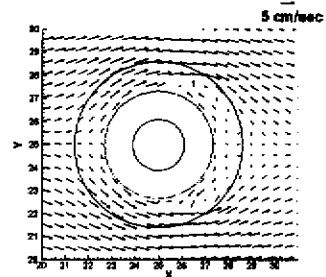


圖 5 純流 $U = 5cm/sec$ 之流場速度分佈圖

圖 6 及圖 7 分別為波浪週期 $T = 6 sec$ 通過圓島在不同計算時間之流場速度分佈圖。圖 8 及圖 9 為順向流 $U = 3cm/sec$ 作用後之流場速度分佈圖。圖 10 及圖 11 為順向流 $U = 5cm/sec$ 作用後之流場速度分佈圖。圖 12 及圖 13 為逆向流 $U = 3cm/sec$ 作用後之流場速度分佈圖。圖 14 及圖 15 為逆向流 $U = 5cm/sec$ 作用後之流場速度分佈圖。我們可以知道當波浪與流作用時，波浪之流場速度分佈不僅是大小會改變，而且其相位也會受到影響。由圖 6、8、10 中可以看出，當波與強度愈強之順向流作用時，其速度會變的趨小，且相位會越往強前發生。而當在圓柱後方時，因為流在圓柱後方會產生 vortex，此現象為波與逆向流作用，故其速度會變大，但因為在圓柱前方為波與順向流作用時間較長，故其相位會往前移動，如圖 7、9、11 所示。

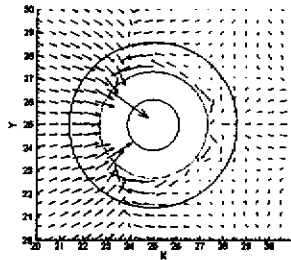


圖6 波浪週期 $T=6\text{sec}$ 在計算時間 36sec 後之流場速度分佈圖

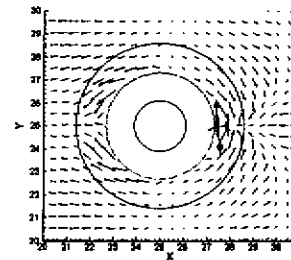


圖11 波浪週期 $T=6\text{sec}$ 與順向流 $U=5\text{cm/sec}$ 作用在計算時間 45sec 後之流場速度分佈圖

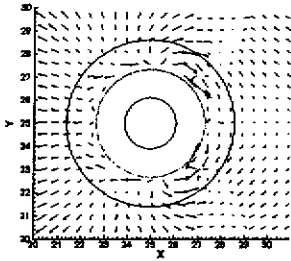


圖7 波浪週期 $T=6\text{sec}$ 在計算時間 45sec 後之流場速度分佈圖

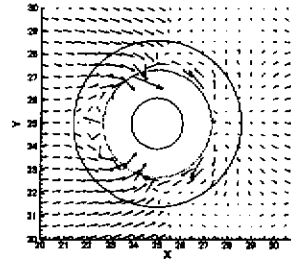


圖12 波浪週期 $T=6\text{sec}$ 與逆向流 $U=3\text{cm/sec}$ 作用在計算時間 36sec 後之流場速度分佈圖

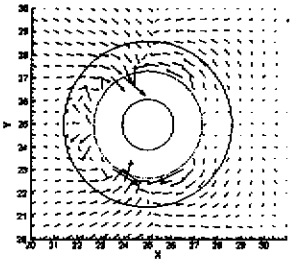


圖8 波浪週期 $T=6\text{sec}$ 與順向流 $U=3\text{cm/sec}$ 作用在計算時間 36sec 後之流場速度分佈圖

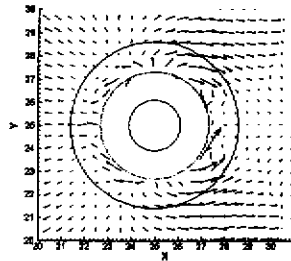


圖13 波浪週期 $T=6\text{sec}$ 與逆向流 $U=3\text{cm/sec}$ 作用在計算時間 45sec 後之流場速度分佈圖

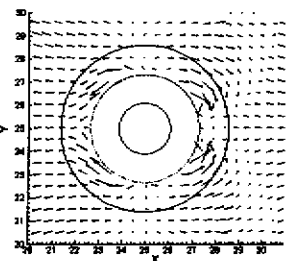


圖9 波浪週期 $T=6\text{sec}$ 與順向流 $U=3\text{cm/sec}$ 作用在計算時間 45sec 後之流場速度分佈圖

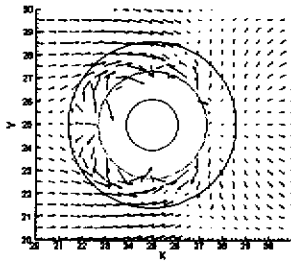


圖14 波浪週期 $T=6\text{sec}$ 與逆向流 $U=5\text{cm/sec}$ 作用在計算時間 36sec 後之流場速度分佈圖

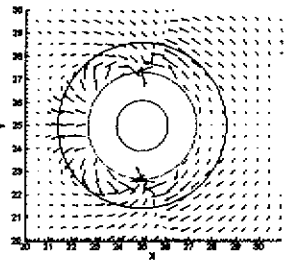


圖10 波浪週期 $T=6\text{sec}$ 與順向流 $U=5\text{cm/sec}$ 作用在計算時間 36sec 後之流場速度分佈圖

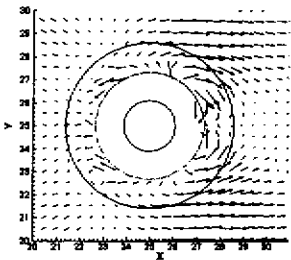


圖15 波浪週期 $T=6\text{sec}$ 與逆向流 $U=5\text{cm/sec}$ 作用在計算時間 45sec 後之流場速度分佈圖

而當波與逆向流作用時，相位明顯改變，由圖 6、12、14 可以看出結果。在無流狀況下，圓柱前方之速度為向 $+x$ 方向，而遭遇逆向流時，已改變成為 $-x$ 方向。而圖 13 及圖 15 為不同強度之逆向流，與圖 7 比較可以得到，在圓柱後方其速度明顯較大，在圓柱前方其速度明顯變小。

綜合以上之計算結果可知，波浪、水流與圓島交互作用後，流場中不僅速度會改變，其相位也會改變。改變大小與水流的強度與方向有很大的關係。故在設計建造時，必須要予以注意。

五、計畫成果自評

參與人員經由理論研究與數值計算，將對於波浪變形、波浪與水流及結構物間之交互作用有初步了解，並且對於海洋工程設計與規劃重點得到更進一步的了解，同時對於理論方法的提升與數值技巧會有充份的訓練，有助於以後從事相關問題研究能力與創造性。與原先申請計劃之目的相符合，預估達到八成五之期望，此成果預定發表於第二十三屆海洋工程研討會。

六、參考文獻

- [1]. 林銘崇、許朝敏、丁肇隆(1999)“含流效應之淺水長波方程式”，第二十一屆海洋工程研討會論文集，115頁-122頁。
- [2]. Homma, S. (1950) “On the Behavior of Seismic Sea Waves Around a Circular Island,” *J. Geophys. Mag.*, Vol. 21, pp.199-208.
- [3]. Vanstano, A.C. and R.O. Reid (1967) “Tsunami Response for Island: Verification of a Numerical Procedure,” *J. Mar. Res.*, Vol. 25, pp.129-139.
- [4]. Berkhoff, J.C.W. (1972) “Computation of Combined Refraction-Diffraction,” Proc. of 13th International Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp.471-490.
- [5]. Smith, R. and T. Sprinks (1975) “Scattering of Surface Wave by a Conical Island,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 72, pp.373-384.
- [6]. Tsay, T.K. and P.L. -F. Liu (1982) “Numerical Solution of Water Wave Refraction and Diffraction Problem in the Parabolic Approximation,” *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, No. 10, pp.7932-7940.
- [7]. Booij, N. (1981) “Gravity Waves on Water with Non-Uniform Depth and Current,” Communication on Hydraulics, Report No. 81-1, Dept. of Civil Eng., Delft Univ of Technology, The Netherlands.
- [8]. Liu, P.L. -F. (1983) “Wave-Current Interactions on a Slowly Varying Topography,” *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, pp.4421-4426.
- [9]. Arthur, R.S. (1950) “Refraction of Shallow Water Waves: The Combined Effects of Currents and Underwater Topography,” *EOS Trans. AGU*, Vol. 31, pp.549-552.
- [10]. Kirby, J.T. (1985) “A Note on Linear Surface Wave-Current Interaction over Slowly Varying Topography,” *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, No. C1, pp.325-331.
- [11]. Turpin, F.M., C. Benmoussa and C.C. Mei (1983) “Effects of Slowly Varying Depth and Current on the Evolution of a Stokes Wave-Packet,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 132, pp.1-23.
- [12]. Kubo, Y., M. Isobe and A. Watanabe (1992) “Time-Dependent Mild Slope Equation for Random Waves,” Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp.419-431.
- [13]. Lin M.C. and C.M. Hsu (1996) “Refraction-Diffraction of Random Waves in the Presence of Currents,” Proc. of 2nd International Conf. on Hydrodynamics, pp.471-476.
- [14]. Peregrine, D.H. (1967) “Long Waves on Beach,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 27, Part 4, pp.815-827.
- [15]. Madsen, P.A., Russel Murry and Ole R. Sorensen (1991) “A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics. Part 1,” *Coastal Eng.*, Vol. 15, pp.371-388.
- [16]. Nwogu, O. (1993) “An Alternative Form the Boussinesq Equation for Near Shore Wave Propagation,” *J. Waterway, Port, Coast Ocean Eng. ASCE*, Vol. 119(6), pp.618-638.
- [17]. Gobbi, M.F., J.T. Kirby and G. Wei (2000) “A Fully Nonlinear Boussinesq Model for Surface Waves. Part 2. Extension to $o(kh^4)$,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 405, pp.181-210.
- [18]. Kennedy, A.B., Q. Chen, J.T. Kirby, and R.A. Dalrymple (2000) “Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking, and Runup. I: 1D,” *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, pp.39-47.
- [19]. Luke, J.C. (1967) “A Variational Principle for a Fluid with a Free Surface,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 27, pp.395-397.
- [20]. Isobe, M. (1994) “Comparative Study of Equations for Analyzing Coastal Wave Transformation,” *Journal of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering, JSCE*, No.491, pp.1-14. (in Japanese)
- [21]. Liu, P.K. -F., Y.S. Cho, M.J. Briggs, U.K. Lu, and C.E. Synolakis (1995) “Runup of Solitary Waves on a Circular Island,” *J. Fluid Mech.*, Vol.302, pp.259-285.
- [22]. Cruz, E., Yokoki, M. Isobe and A. Watanabe (1993) “Nonreflecting Boundary Conditions for Nonlinear Wave Equation,” Proc. Of Coastal Eng., JSCE, Vol. 40, pp.45-60. (in Japanese)