

## 應用數值模式推估實際海堤堤面波浪之 溯升高

張育誠<sup>1</sup> 邱啓敏<sup>1</sup> 黃清哲<sup>1,2</sup> 林俊遠<sup>2</sup> 曾鈞敏<sup>3</sup>  
馬家驊<sup>3</sup> 王仲豪<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系

<sup>2</sup>國立成功大學近海水文中心

<sup>3</sup>經濟部水利署水文技術組

### 摘要

本文應用自主開發之二維數值波浪模式，模擬颱風波浪侵襲實際海堤之堤前波流場演變情形，藉以推估海堤堤面之波浪溯升高，並與現場量測數據比對。為適切反應現況海堤包含堤面拋石等具透水性之堤面保護工結構物的消波效果，模式乃求解二維非穩態體積平均-雷諾平均方程式 (Volume- Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes equation, VARANS) 及紊流傳輸模式 ( $k-\varepsilon$ )，模擬純水體區域與孔隙介質區域的流體運動情形。並採用質點等位函數法模擬波浪碎波等複雜波場演變。模式上游邊界條件則採用 Goda-JOHNSWAP 與 TMA 波譜法等不規則波浪入射條件，用以比較各波浪入射條件推估最大溯升高度的準確性。

關鍵詞：海堤、透水結構物、溯升、體積平均-雷諾平均方程式、質點等位函數法

## Estimation of Wave Runup Height on a Real Seawall by Using Numerical Wave Model

Yu-Chen Chang<sup>\*</sup> Chi-Min Chiu Ching-Jer Huang Chun-Yuan Lin  
Chung-Min Tseng Jia-Lin Ma Zhong-Hao Wang

<sup>\*</sup> PhD student, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University.

### ABSTRACT

In this study, a two dimensional numerical wave model was developed and applied to simulate the wave and flow field near the seawall during typhoon period. The numerical results of the maximum wave runup height on the seawall were compared with the measurement data. Permeable structures on the real seawalls such as rubble mounds were considered. A two-dimensional Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes equation (VARANS) and  $k-\varepsilon$  turbulence model were solved for simulating the flow characteristics inside and outside the porous media. Particle level set method was adapted for simulating the wave deformation such as breaking waves. Irregular wave conditions were applied at the upstream boundary for simulating nearshore typhoon waves. Both Goda-JOHNSWAP and TMA wave energy spectrum were introduced in present study to investigate the suitability for prediction of wave runup height.

Keywords: Seawall; Permeable structure; Runup; VARANS; Particle level set method

## 一、前言

台灣屬海島國家，四面環海，海岸經常遭受波浪侵襲，尤以颱風期間之暴潮、巨浪直接襲擊海岸，造成沿岸低窪地區發生淹水及海岸被嚴重侵蝕，使國土不斷流失，沿岸居民生命財產飽受威脅。儘管海岸所屬單位逐步興建離岸堤及突堤等保護工程以因應海岸侵蝕問題，然而在砂源減少及海岸不當開發情況下，使得海岸線不斷往陸地方向退縮，進而危及海堤安全性。為防治海岸災害確保沿岸居民安全，台灣省水利局（水利署前身）於民國 65 年，依照當年海岸地形及海氣象資料加以推算並擬定「台灣省海堤整建計畫」作為規劃全省海堤設計高度之藍本。陸續自災情較嚴重地區起於台灣沿岸興建海堤，消弭絕大部份之海岸災害。又於民國 81 年，水利局再次提出「全省海堤設計高度檢討計畫報告」，此計畫是利用數值模式推算全省海堤溯升高程之成果，配合各海岸、海堤之現勘，重新檢討全省海堤設計高程。

沿海岸堤於極端颱風事件的侵襲下，其颱風波浪溯升的高度是大家一直想瞭解與探討的部份，過去雖曾有颱風波浪於海堤上溯升高及波壓演變之研究，但皆屬研發階段。為進一步探討現況海堤抵禦極端颱風侵襲時的波浪溯升越波情形，本研究承襲過去已發展成熟之二維近岸水理數值模式，並延伸考慮現地拋石及消波塊等具透水性質的堤前保護結構物。透過模擬真實流體運動，反應波浪自外海到達近岸時，受底床淺化效應、碎波過程之影響，展現波浪於堤前的複雜波場演變以及堤上發生最大溯升高程之範圍等。

本研究團隊過去即致力於流固耦合與複雜自由液面模擬之研究能力，並自主開發二維近岸水理數值模式，模擬結果與實驗室量測資料比對，獲得相當不錯之成果。開發完成之數值模式亦實際參與水利署建教計畫數年，製作海岸溢淹潛勢圖表。過去參與之水利署計畫，如「海堤區域非接觸式水文觀測及越波溢堤預測新興技術之研發」、「氣候變遷對中部（雲中彰）與花東海岸防護衝擊與調適研究(1/2)」等。

## 二、研究方法

### 2.1 理論解析

本研究近岸水理數值模式擬求解包括 (1) 二維非穩態體積平均-雷諾平均方程式 (Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes equation, VARANS) 及紊流傳輸模式 ( $k-\varepsilon$  model)，模擬純水體區域與孔隙介質區域（如堤前消波塊及拋石保護工範圍內）的流體運動情形；(2) 並結合沉浸邊界法 (Immersed Boundary Method)，可於卡式座標下，計算流體與不可透水固體邊界的互制情形，適切反應波浪由外海入射至近岸海堤時，受實際海床地形影響的波浪淺化效應；(3) 為捕捉波形的複雜變化，本模式採用質點等位函數法 (Particle Level Set Method)，模擬波浪的溯升 (run-up)、越波 (overtopping) 或碎波 (breaking) 現象。模擬之數值水槽如下圖 1 所示， $h_0$  為靜水深，情境模擬外海波浪自左而右入射至近岸海堤。

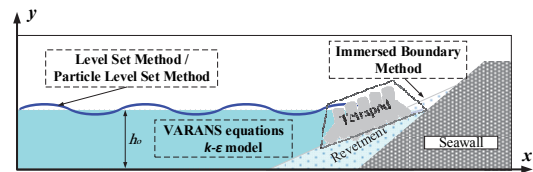


圖 1 數值水槽示意圖

為模擬孔隙介質內的平均流場變化情形，模式選取的控制方程式，為體積平均後的體積平均 - 質量守恆方程式 (volume-averaged mass equations) 與體積平均 - 雷諾平均 Navier-Stokes 方程式 (VARANS)，可寫為：

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \bar{u}_j \rangle}{n(1+c_A)} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \\ &= \frac{1}{1+c_A} \left[ -\frac{n}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{P} \rangle^f}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle \bar{u}_i \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} \right) + n g_i \right] \\ & - \frac{1}{1+c_A} \left[ \frac{\alpha \nu (1-n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \bar{u}_i \rangle \right. \\ & \left. + \frac{\beta (1-n)}{n^2 D_{50}^2} \sqrt{\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2} \langle \bar{u}_i \rangle \right] \quad (2) \end{aligned}$$

其中， $\bar{u}$  與  $\bar{p}$  分別代表平均流速與壓力。 $n$  為孔隙率 (porosity)， $D_{50}$  為孔隙介質均值粒徑 (equivalent mean diameter)。 $\rho$  為流體密度， $\nu$  為流體運動黏滯係數， $g$  為重力加速度。 $c_A$  為附加質量參數 (added mass coefficient)， $\alpha$  與  $\beta$  為實驗待定係數。值得注意的是，當  $n=1.0$  時，VARANS 則恢復成適用於純水區域的雷諾平均方程式 (RANS)。

達西體積平均紊流動能  $\langle k \rangle$  及其消散量  $\langle \varepsilon \rangle$  則模式化為：

$$\frac{\partial \langle k \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \bar{u}_j \rangle}{n} \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial x_j} = - \frac{\langle \bar{u}_i \bar{u}_j \rangle}{n} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\langle v_t \rangle}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial x_j} \right] - \langle \varepsilon \rangle + n \varepsilon_\infty \quad (3)$$

$$\frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \bar{u}_j \rangle}{n} \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} = - C_{1\varepsilon} \frac{\langle \varepsilon \rangle}{n \langle k \rangle} \langle \bar{u}_i \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\langle v_t \rangle}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} \right] - C_{2\varepsilon} \frac{\langle \varepsilon \rangle^2}{\langle \varepsilon \rangle} + n C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon_\infty^2}{k_\infty} \quad (4)$$

其中， $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  為實驗待定係數。相關研究請參閱 Hsu et al. (2002)。

為準確描述如碎波等複雜自由液面變化情形，本研究乃採用 Osher and Sethian (1988) 所提出之等位函數法 (Level Set Method)，以 Euler 觀點描述自由液面演變。為提高模擬的準確度，本模式亦結合質點等位函數法 (Enright et al., 2002)，以 Lagrangian 觀點校驗等位函數法計算結果。其詳細相關可參閱 Lin (2007)。

黏性流體在固體邊界上必須同時滿足固液界面上之無滑移且不可穿透的特性，即在底床與結構物邊界上流體速度須等於零。其相關理論請參閱陳 (2011)。

## 2.2 上游造波邊界條件

為適切模擬現地海堤遭遇紛紜波浪侵襲所造成之堤上溯升越波情形，在過去海岸工程相關研究中，通常給定滿足特定波譜形式之不規則波浪作為水理模式上游波浪入射邊界條件，JONSWAP 波譜為較常被引用的波譜形式。此波譜已普遍定義為外

海有限吹送距離下，有限水深條件時的標準波譜。

在傳統波浪理論中，不規則波浪可視為有限個不同週期的規則波線性疊加所組成，各成分波可經由切割波譜能譜的方式，以能量的觀點，分析出各個週期條件下的波浪振幅 (Goda, 1988)。

$$\eta(x,t) = \sum_i^N \eta_i(x,t) = \sum_i^N a_i \cos(kx_i - \omega_i t + \phi_i) \quad (5)$$

其中， $\eta(x,t)$  為紛紜波浪隨時間 ( $t$ ) 與空間 ( $x$ ) 變化之波形。 $a_i$ 、 $k_i$ 、 $\omega_i$ 、 $\phi_i$  分別為第  $i$  個成分波  $\eta_i(x,t)$  的振幅、週波數、角頻率以及相位差。 $N$  為成分波的組成個數。依據大範圍波浪場產出的波譜條件， $N$  設定為 25。

根據傳統波浪理論，各個成分波振幅可經由波浪能量計算觀點，由波譜能量密度函數 ( $S(f)$ , spectral density) 求得：

$$a_i = \sqrt{2S(f_i)\Delta f} \quad (6)$$

其中， $f_i$  為第  $i$  個成分波的頻率，乃其對應週期之倒數， $\Delta f$  為單位頻寬。

## 三、模式應用

### 3.1 模式驗證

為確立本研究開發之二維近岸水理數值模式的準確性，在此選取週期波浪通過潛沒式透水海堤之試驗研究 (Losada et al., 1997)。試驗水槽長 69m、寬 2m、高 2m。水槽上游設置平推式造波機，生成入射波浪。為減少下游反射波浪進入待測區域，水槽下游距離上游造波機 51m 處設置 1:20 斜坡。在沒有設置海堤情況下，透過測試、分析，反射波浪對於待測區域之影響可忽略不計。潛沒式透水海堤則設置於距上游造波機 44m 處，其堤高 0.385m、長 0.8m，孔隙率  $n$  為 0.521、均值粒徑  $D_{50}$  為 2.09cm。水槽另設置移動式平台，架設波高計，量測各處波形演變。如下圖所示：

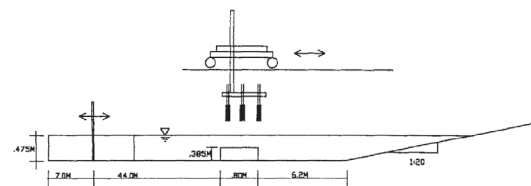


圖 2 波浪通過透水潛堤之實驗配置。  
(摘自 Losada et al., 1997)

圖 3 展示在水深 0.475 m 條件下，波高 4.29 cm、週期 1.8 sec 的波浪入射至潛沒式透水海堤時（堤趾位置假定為  $x = +0.0m$ ），波高計於堤前（ $x = -0.04m$ ）、堤上（ $x = +0.04m$ 、 $x = +0.44m$ 、 $x = +0.68m$ ）以及堤後（ $x = +1.40m$ 、 $x = +2.12m$ ）量測所得波高時序資料。將本數值模擬結果比對實驗室波高計量測資料，結果令人滿意。說明本模式可適切反應波浪與透水結構物互制所產生的波場演變。

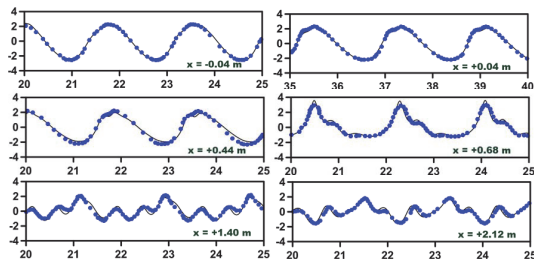


圖 3 規則波浪（波高 4.29 cm、週期 1.8 sec、水深 0.475 m）通過透水潛堤（ $n = 0.521$ 、 $D_{50} = 2.09$ ）時，水槽各處相對於堤趾（ $x = +0.0m$ ）的波高時序資料（橫軸：sec；縱軸：cm）。（●）實驗室量測資料（Losada et al., 1997）；（—）本模式計算結果。

## 3.2 模擬結果

本節應用已驗證之二維近岸水理數值模式，情境模擬 2013 年尤特颱風（2013/08/16 AM:04:00）侵臺期間，曾文海埔地海堤堤面發生最大溯升高時時的堤前波場演變，並應用兩種不同上游造波邊界射條件作比較。

### 3.2.1 Goda-JOHNSWAP 波譜法

選取之堤前示性波高、平均週期、水位高度條件，如表 1 所示。如此，即可根據預測波場條件，經由 Goda-JOHNSWAP 波譜法給定模式上游不規則波浪入射條件。當中之波譜密度函數  $S(f)$  可表示為：

$$S(f) = \beta H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \times \exp\left[-1.25(T_p f)^{-4}\right] \cdot \gamma \exp\left[-(T_p f - 1)^2 2\alpha^2\right] \quad (7)$$

其中， $H_{1/3}$  為示性波高（significant wave height）。 $f_p$  為尖峰頻率（peak-spectral frequency）； $T_p = 1/f_p$  為尖峰頻率對應之週期。 $S(f)$  為尖峰集中度係數（peak enhancement factor），其他相關參數設定亦可參閱水利署「海堤區域非接觸式水文觀

測及越波溢堤預測新興技術之研發 (1/2) 計畫成果報告。

以尤特颱風為例（2013/08/16 AM 04:00），對應預測波場條件的不規則波浪波譜與模式上游給定的不規則波浪時序資料展示於圖 4 及圖 5。依據 Goda-JOHNSWAP 波譜給定之不規則波浪時序列，進行情境模擬堤前波流場演變，結果展示於圖 6 中。圖 6(d) 為波浪於堤面發生最大溯升高時，其值為 2.807m。

表 1 情境模擬颱風波浪條件

颱風事件	日期	預測水位高度(m)	預測示性波高(m)	預測平均週期(sec)
尤特	2013/08/16 AM 04:00	1.376	1.704	9.05

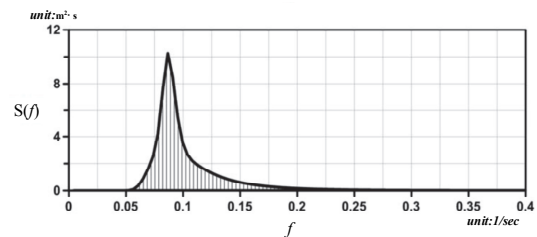


圖 4 根據 Goda-JOHNSWAP 波譜法給定不規則波譜（以尤特颱風為例（2013/08/16））

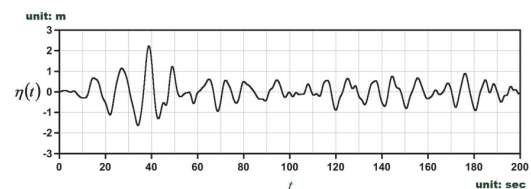


圖 5 近岸水理數值模式上游給定不規則波浪時序資料（以尤特颱風為例（2013/08/16））

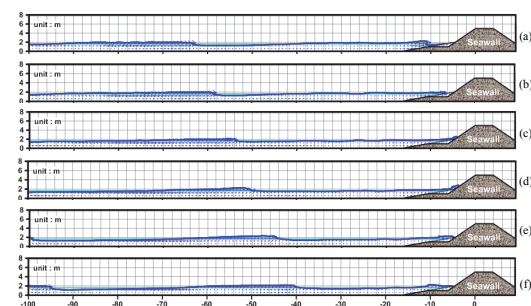


圖 6 情境模擬尤特颱風侵臺期間曾文海埔地海堤發生當日最大溯升高時之堤前波流場演變

### 3.2.2 TMA 波能譜

為實際反應海堤堤前地形造成的波場演變，本節選用大範圍波浪場 (SWAN) 產出的近岸波譜條件，作為模式波場情境條件。圖 7 展示大範圍波浪場模擬尤特颱風 (2013/08/16 AM 04:00) 於曾文海埔地海堤之近岸波譜條件。圖 8 展示依據近岸波能譜給定之不規則波浪時序列資料，用以做為近岸水理數值模式的上游不規則波浪入射邊界條件。情境模擬堤前波流場演變結果展示於圖 9 中。圖 9(d) 為波浪於堤面發生最大溯升高度，其值為 3.361m。

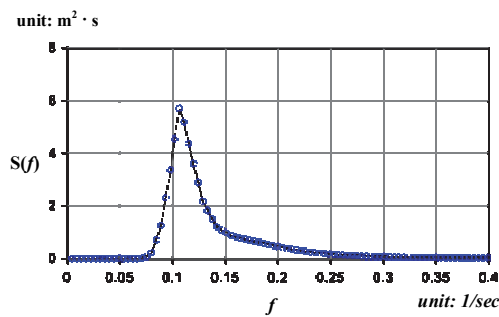


圖 7 大範圍波浪場模擬反應現地地形之近岸波浪能譜圖 (以尤特颱風為例 (2013/08/16))

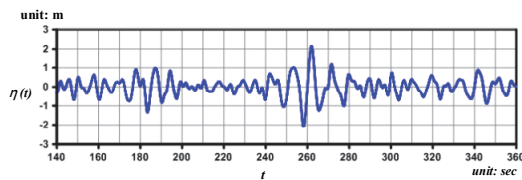


圖 8 根據近岸波浪能譜圖產出的不規則波浪時序列資料 (以尤特颱風為例 (2013/08/16))

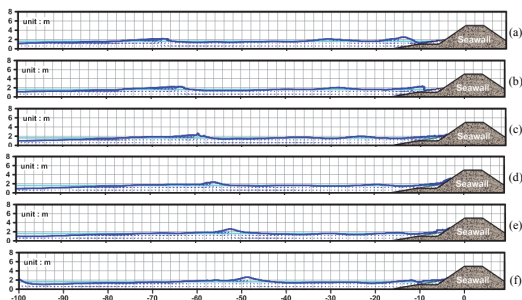


圖 9 情境模擬尤特颱風侵臺期間曾文海埔地海堤發生當日最大溯升高時之堤前波流場演變

### 3.2.3 結果與討論

為展示本模式預估波浪溯升高度的準確性，本

節乃參考水利署「海堤區域非接觸式水文觀測及越波溢堤預測新興技術之研發」計畫成果報告，比對本模式預估結果與經驗公式以及現地量測資料結果，說明各方法的適用性。表 2 列出尤特颱風侵臺期間 (2013/08/16 AM 04:00)，海堤堤面波浪溯升量測系統量測的堤面最大溯升高度、美國陸軍工兵團海岸工程手冊透過大範圍波潮模式 (SWAN 與 POM) 產出波潮資料估算超越機率 2% 的溯升高度，以及本模式分別採用 Goda-JOHNSWAP 波譜、近岸波能譜作為上游造波邊界條件之模擬結果。

表 2 各方法預估曾文海埔地海堤堤面最大溯升高度 (單位: m)

現地量測	美國海岸工程手冊	Goda-JOHNSWAP 波譜模擬結果	近岸波能譜模擬結果
3.35 – 3.90 之間	3.983	2.807	3.361

由比較結果可知，本模式之上游波浪邊界條件，選取近岸波能譜進行情境模擬之最大溯升高度結果 (3.361m)，相較以 Goda-JOHNSWAP 波譜之模擬結果 (2.807m)，更接近現地量測的值 (3.35m – 3.90m)。

觀察圖 6 與圖 9 中之波浪場變化，不規則波入射至近岸提前，由於淺化效應，波浪進入碎波帶區域後隨即發生碎波。偶有碎波後波場再次形成近岸長浪，爾後進入海堤區域，形成堤面溯上結果。或因溯降水體反射回離岸方向，與入射長波交互作用，於堤前再次形成碎波現象。上述波浪場變化與現場實際觀測結果定性上相同。顯示本模式可適切模擬颱風長浪侵襲海堤時的波場演變情形。

## 四、結論

探究最大溯升高度情境模擬結果，模式上游不規則波浪採用大範圍波浪模式模擬之近岸波浪能譜條件，相較採用 Goda-JOHNSWAP 波譜法，更能實際反應近岸多變地形造成的不規則波場條件。

本文發展之二維數值波浪模式之模擬結果與現地量測資料、美國海岸工程手冊預估結果比對，其成果相當不錯。希望能進一步的修正模式，將可更貼近了解實際海岸地形的流場演變，期望提供台灣海岸防護上的設計依據。

## 謝誌

感謝經濟部水利署第六河川局提供台南市七股區曾文海埔地海堤附近水深地形資料，使本研究成果更臻完善，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 台灣省水利局(1976)台灣省海堤整建計畫書。
2. 台灣省水利局(1992)全省海堤設計高度檢討計畫報告書。
3. 陳志欣(2011)應用質量守恒邊界法模擬波浪於不規則近岸結構物上之溯升與越波，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
4. 經濟部水利署(2013)海堤區域非接觸式水文觀測及越波溢堤預測新興技術之研發(1/2)，經濟部水利署(102)科專計畫。
5. 經濟部水利署(2014)氣候變遷對中部(雲中彰)與花東海岸防護衝擊與調適研究(1/2)。
6. 經濟部水利署(2014)海堤區域非接觸式水文觀測及越波溢堤預測新興技術之研發(2/2)，經濟部水利署(103)科專計畫。
7. Enright, D., Fedkiw, R., Ferziger, F. and Mitchell, I. (2002) A hybrid particle level set method for improved interface capturing, *Journal of Computational Physics*, 183, 88-116.
8. Goda, Y. (1988) Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum *Coastal Eng.*, 31, 39-52, Japan.
9. Headquarters, U. S. Army Corps of Engineers. (2003) *Coastal engineering manual*, (Part II).
10. Hsu, T.J., Sakakiyama, T. and Liu, P.L.-F. (2002) A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater, *Coastal Engineering*, 46, 25-50.
11. Huang C.J., Lin C.Y. and Chen, C.H. (2013) An improved immersed boundary method for simulating fluid-structure interaction, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, in revision.
12. Lin, C. Y. (2007) *Simulation of Breaking Waves Using Particle Level Set Method*，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
13. Losada, I.J., Patterson, M.D. and Losada, M.A. (1997) Harmonic generation past a submerged porous step, *Coastal Eng.*, 31, 281-304.
14. Osher, S. and Sethian, J.A. (1988) Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations, *Journal of Computational Physics* 79(1), 12-49.