

## 週期波於海堤附近之黏性流場演變

張育誠<sup>1</sup> 邱啟敏<sup>2</sup> 劉冠亨<sup>3</sup> 林俊遠<sup>4</sup> 陳志欣<sup>5</sup> 黃清哲<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士生

<sup>2</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系博士生

<sup>3</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士

<sup>4</sup> 國立成功大學近海水文中心助理研究員

<sup>5</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系博士後研究員

<sup>6</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

### 摘要

本文以二維波浪數值模式，模擬週期波入射直立堤，以及堤面坡度 1:2 與 1:5 的斜坡堤時，堤前黏性流體的波流場特性。為模擬黏性流體，模式求解二維時變的雷諾平均方程式 (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations, RANS) 及紊流模式 ( $k - \varepsilon$  model)。旨在探討波浪入射至不同堤面坡度之海堤時，其溯升及溯降期間的波浪碎波過程、堤前駐波流場演變、堤面波壓以及堤前底床剪應力分佈等特性。在穩定狀態下，週期平均流場會有穩環流胞及水下逆流等現象。

關鍵詞：雷諾平均方程式、質點等位函數法、修正型沉浸邊界法、駐波、穩環流胞

## The Characteristic of Viscous Flow Field Induced by Periodic Wave Near Seawalls

Yu-Chen Chang<sup>\*</sup> Chi-Min Chiu Guan-Heng Liu Chun-Yuan Lin Chen Chih-Hsin  
Ching-Jer Huang

<sup>\*</sup> Graduate Student, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

In this study, a numerical wave scheme is applied to investigate the viscous flow fields induced by periodic waves propagating on three different seawalls, involving vertical wall and steep seawalls with slope of 1:2 and 1:5. A two-dimensional Reynolds Averaged Navier-Stokes equations and  $k - \varepsilon$  turbulence model are developed to simulate the viscous flow field near seawalls. The free-surface evolutions, the wave pressure on the seawalls, the bottom shear stress prior to seawalls and the time-averaged flow field are discussed. An accompanying steady recirculating cells were observed in the time-averaged flow field of standing wave. However, breaking wave leads to an undertow on the seawall surface.

Keywords: RANS; particle level set method; improved immersed boundary method;  
standing wave; recirculating cell

### 一、前言

為保護沿岸居民的生命財產安全，台灣本島的禦潮設施建置率極高（如堤防、護岸及離岸堤等），海堤可防止海水入侵陸地、阻擋波浪衝擊及保護沿海環境。而近年來因氣候變遷影響及全球海水位上

升之問題，以及颱風帶來之暴潮巨浪極值增大，現有海堤的設計標準可能需要重新探討。其設計規範取決於波浪溯升的高度及在溯升過程中堤面所受波浪作用的影響，因此如何有效降低溯升高，實為保護海岸及海岸結構物的重要議題。

根據台灣省水利局 1979 年的「海堤規劃設計手

冊」海堤之設計坡度約介於 1:0.5 ~ 1:5 之間。因此，本文將以二維波浪數值模式對於直立堤，及堤面坡度 1:2 與 1:5 的斜坡堤，進行模擬分析。

Carrier and Greenspan (1958) 以非線性淺水波理論解析非碎波波浪傳遞於斜坡底床上之溯升。Madsen et al. (1997) 求解 Boussinesq 方程式，證明 slot method 可有效模擬波浪於斜坡上的溯升，但在與 Carrier and Greenspan (1958) 比較最大溯升高度時卻有 10% 的誤差。Kennedy et al. (2000) 亦求解 Boussinesq 方程式，在動量方程式中引進渦黏性係數 (eddy viscosity) 且考慮底床摩擦效應，結果與實驗值符合。

觀測週期波之瞬時流場，有 Tsuchiya (1971) 利用超音波流速儀，量測水粒子速度剖面垂直分佈。黃等人 (1988) 應用單點量測的都卜勒雷射測速儀 (Laser Doppler Velocimetry, LDV) 量測不同波浪尖銳度之入射波在斜坡上的流場變化。Nadaoka et al. (1989) 和 Ting and Kirby (1994、1995、1996) 則利用光纖都卜勒雷射流速儀 (Fiber-optic Laser Doppler Velocimetry, FLDV) 量測在斜坡上的碎波流場演變，並探討在溢波 (Spilling) 及捲波 (Plunging) 發生時的紊流變化及水下逆流 (undertow) 現象。

週期波對海岸結構物的作用具有長時間、往復性的特性。而堤前底床沖刷、堤面波壓等波浪作用力則與波流場長時間的週期平均有關。本文將參考過去研究中，Sumer and Fredsøe (2000) 探討週期波與直立堤之交互作用，並繪製堤前完全駐波的週期平均流場流線圖 (steady streaming)，發現水下流場與邊界層內存在對稱的穩環流胞 (steady recirculating cells) 如圖 1。

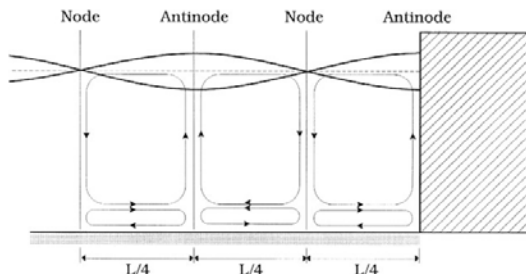


圖 1 直立堤前駐波平均流場所之流線圖 (摘錄自 Sumer, 2000)。

## 二、理論分析

本研究將利用完整的數值模式，求解二維時變的雷諾平均方程式 (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations, RANS) 及低雷諾數紊流傳輸模式 (Low-Reynolds number turbulent model,  $k - \varepsilon$  model)，並結合等位函數法 (Level Set Method) 及質點等位函數法 (Particle Level Set Method)，來模擬波浪遇到海堤後產生溯升 (run-up) 或碎波 (breaking water) 時，不可壓縮之黏性流體的運動情形及其複雜的自由液面變化。為了使本模式更適用於流固耦合的計算上，在描述海堤邊界的部分，引用本研究團隊所發展之方法，可正確模擬出固體邊界附近流場的變化情形，詳細可參考陳 (2011)。

模擬之數值水槽如下圖 2 所示，造波條件設定為 Stokes 波二階解；流體之靜水深為  $h_0$ ，波浪在時間  $t = 0$  時位於起始位置並由左向右移動。其數值方法主要架構可分為下列三個部分：

- (1) 水體部分：RANS 方程式、 $k - \varepsilon$  紊流模式。
- (2) 自由液面：等位函數法、質點等位函數法。
- (3) 固體邊界：修正型沉浸邊界法。

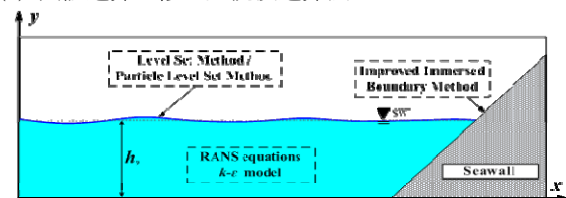


圖 2 數值水槽示意圖

等位函數法使由 Osher and Sethian (1988) 所發展，用來處理複雜的自由液面變化。同時為提高等位函數的準確性，本研究進一步地引用 Enright et al. (2002) 提出之質點等位函數法 (Particle Level Set Method)，並結合 Maeker-And-Cell 法追蹤質點的觀念。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)。

## 三、模式應用

### 3.1 波浪作用於斜坡之驗證

為證明本模式在模擬波浪與海堤互制的準確

性，本文將模擬週期波在斜坡上溯升之模式驗證。本節選取蔡等人 (1997) 觀測週期波入射斜坡式海堤後發生捲浪型碎波 (Plunging breaker) 之波高變化分佈，實驗水槽長 15 公尺，寬 0.5 公尺，高 0.6 公尺，離造波板 10 公尺處擺放坡度為  $S = 1:5$  的斜坡式海堤。實驗水槽上游設置平推式造波機，入射之波浪條件為：靜水深  $h_0 = 0.35$  公尺，入射波週期  $T = 1.266$  秒，入射波高  $H_i = 0.05$  公尺，座標原點定於水平底床與斜坡式海堤之交點，座標原點向右 (上) 定義為正。水槽佈置圖如 3.1 所示。為比對實驗結果，數值模式採用與實驗相同之座標系統，上游入射波浪條件採用二階有限振幅波理論 (Second-order Stokes wave theory) 之波形與流場邊界條件，以滿足上游造波條件。

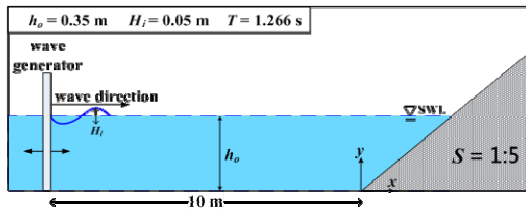


圖 3.1 波浪入射斜坡式海堤之實驗水槽示意圖

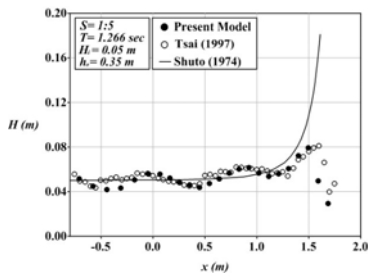


圖 3.2 週期波入射斜坡式海堤 ( $S = 1:5$ ) 上之波高分佈比較結果。

圖 3.2 為本數值模式模擬斜坡式海堤堤前的波高變化，並與實驗量測結果作比對結果，圖中符號 (●) 為本模式計算結果，符號 (○) 為蔡等人 (1997) 實驗結果，而實線 (—) 為 Shuto (1974) 所提出之淺化變形經驗公式。其比較結果可知，本模式數值模擬結果與蔡等人 (1997) 的實驗量測結果比對相符，可適切反應堤前的部分駐波造成波高在空間上的震盪分佈特性。

### 3.2 週期波與斜坡之交互作用

在實際的海岸問題中，當波浪衝擊海堤時，因海堤設置位置之水深、波浪性質及海堤斷面形狀、坡度等影響，使得波浪在海堤附近的流場亦有所不

同。而週期波的特性在於其波流場對海堤有長期且規律性之影響，故本文將藉由探討週期波入射至海堤之黏性流場，瞭解其波浪流場特性。

表 3.1 本文數值模式之造波條件與溯升高結果

Case	Slope (S)	T (s)	$H_i$ (m)	$h_0$ (m)	L (m)	$H_i/L$	$U_i$	$R/H_i$
1	Vertical							0.88
2	1:2	1.266	0.05	0.35	2.00	0.025	4.7	2.82
3*	1:5							1.96
4	Vertical							0.91
5	1:2	1.19*	0.05	0.35	3.20	0.016	11.9	2.2*
6*	1:5							1.96

\*表示有碎波現象

本文模式上游週期波條件給定二階有限振幅波理論 (Second-order Stokes wave theory) 之波形與流場邊界條件，波浪由左至右入射至海堤。研擬兩種不同 Ursell 數的週期波條件，配合三種不同的海堤坡度共六組案例 (Case 1~Case 6)，各組案例的海堤堤前地形均設定為水平底床，表 3.1 為本方案例所選用的波浪條件及各種參數設定，其中， $T$  為波浪週期、 $H_i$  為入射波高、 $L$  為波長、 $h_0 = 0.35m$  為靜水深、 $S$  為海堤坡度 ( $S = 1: \cot \alpha$ )。

#### 3.2.1 週期波瞬時流場

圖 3.3、圖 3.4 為 Case1 規則波入射至直立壁時，不同時序列之結果。(a) 為自由液面與流場速度、(b) 為邊界層流場、(c) 為堤前底床剪應力、(d) 為堤面波壓。由自由液面與流場速度的變化可看出波浪在直立堤前有駐波的現象發生。

當堤前流場之流速趨近於零 (圖 3.3)，此刻大部分的水體動能皆已轉換為位能，自由液面溯升達最高點，此時堤面發生最大正向壓力。波浪於堤面溯降至最低點時 (圖 3.4)，堤前流場之流速遞減為零，此時堤面發生最大負向壓力。由上述兩張圖的流場與邊界層流場，可發現邊界層內流速分布與邊界層外不同，此現象與傳統線性波理論形成駐波下，底床流速為零有差異。邊界層內受到自由液面高程差的影響而產生逆向壓力梯度 (adverse pressure gradient)，造成邊界層內流場 (separation) 產生分離，驅使水體往壓力較小方向流動，而發生邊界層內外流速分布不同之情形，此現象稱為回流 (reverse flow)。因此，邊界層內的流速方向可直接由自由液面的變化判斷得知。

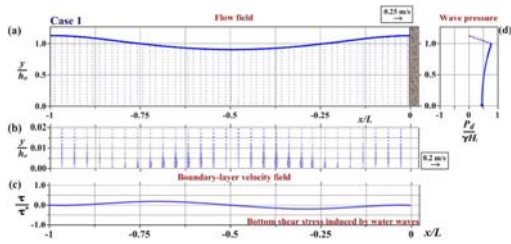


圖 3.3  $t^* = 0.5T$  時， $Ur = 4.7$  週期波入射至直立堤之模擬結果。(a) 自由液面與流場速度、(b) 邊界層流場、(c) 堤前底床剪應力、(d) 堤面波壓。

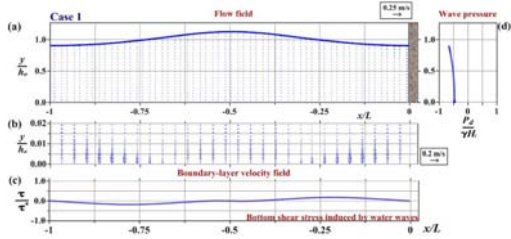


圖 3.4  $t^* = T$  時， $Ur = 4.7$  週期波入射至直立堤之模擬結果。(a) 自由液面與流場速度、(b) 邊界層流場、(c) 堤前底床剪應力、(d) 堤面波壓。

### 3.2.2 週期波平均流場

為探討週期波浪長時間作用於海堤的波流場特性，本節選取穩定狀態 (steady state) 的流場資料加以分析討論，探討各條件下的週期平均流場 (time-averaged flow field)、邊界層內水平平均流速剖面等特性。

於前言提出之過去研究中，Summer and Fredsøe (2000) 探討週期波與直立堤之交互作用，並繪製堤前駐波平均流場所得之流線圖 (steady streaming)，發現水下流場與邊界層內存在對稱的穩環流胞 (steady recirculating cell) 結構，如圖 1 所示。

本研究模擬不同  $Ursell$  數之週期波入射至不同坡度海堤，觀察堤前週期平均流場。圖 3.5 為  $Ur = 4.7$  週期波入射至直立堤 (Case 1) 之週期平均流場。由全域週期平均流場可知，當波浪達穩定狀態時，波浪在堤前形成駐波狀態。其駐波流場會存在對稱之穩環流胞 (steady recirculating cell) 結構，波節與波腹間有封閉之循環流場。

圖 3.6 為  $Ur = 4.7$  週期波入射  $S = 1:2$  斜坡堤 (Case 2) 之週期平均流場結果。由全域週期平均流場可知，波浪在堤前形成部分駐波，堤面上亦存在穩環流胞之結構。與直立堤相比，斜坡堤上的穩環流胞結構略有不同，由於穩環流胞同時受到自

由液面的限制及斜坡堤的擠壓，造成規模較小且不對稱分布。

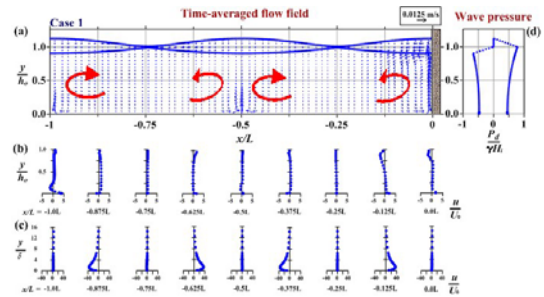


圖 3.5 Case 1 ; (a) 全域週期平均流場、(b) 水平平均流速剖面、(c) 邊界層內水平平均流速波面、(d) 堤面最大正(負)向波壓。

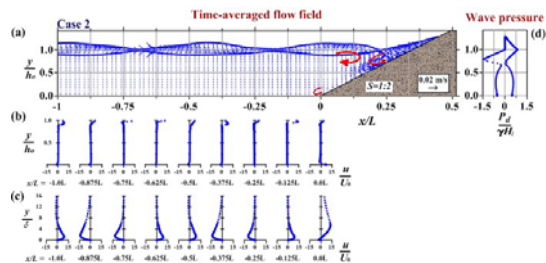


圖 3.6 Case 2 ; (a) 全域週期平均流場、(b) 水平平均流速剖面、(c) 邊界層內水平平均流速波面、(d) 堤面最大正(負)向波壓。

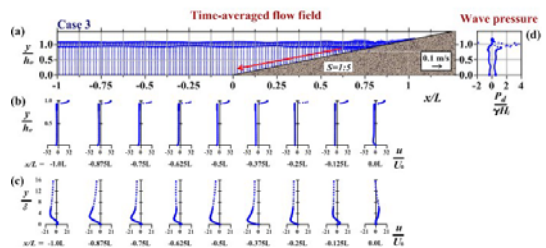


圖 3.7 Case 3 ; (a) 全域週期平均流場、(b) 水平平均流速剖面、(c) 邊界層內水平平均流速波面 (d) 堤面最大正(負)向波壓。

由圖 3.7 可知發生碎波時，其週期平均流場較為紊亂，駐波現象較不明顯，其流場中亦無發現穩環流胞之結構。此外，當波浪碎波後會產生向岸的衝擊射流，造成碎波區域之自由液面有強烈的向岸質量輸送，為平衡此區的質量傳送，沿著堤面有一股較大的離岸流速，產生離岸之質量輸送即為水下逆流或暗流 (undertow)。

### 3.2.3 堤前底床最大剪應力

本節將比較不同坡度海堤前水平底床上各點的剪應力變化。為了展示出各計算點相對於堤趾的水平位置，在此定義堤趾處水平座標為  $x/L = 0$ ，向左為負。

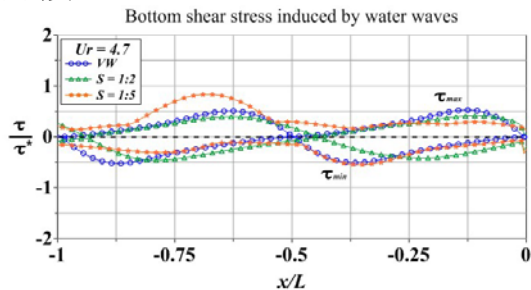


圖 3.8 不同坡度堤前最大底床剪應力比較圖。

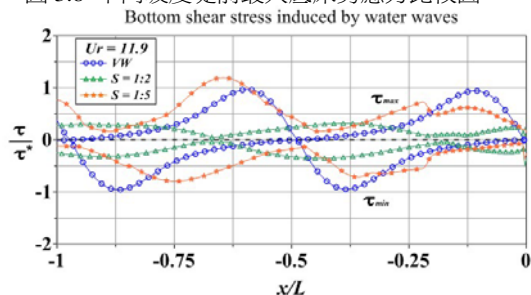


圖 3.9 不同坡度堤前最大底床剪應力比較圖。

為比較週期波入射不同堤面坡度海堤引致堤前底床剪應力大小之分佈情形，本文圖 3.8、圖 3.9 展示波浪入射不同坡度海堤之堤前剪應力比較。在堤趾處之最大正負向底床剪應力的絕對值皆為  $S = 1:5 > S = 1:2 > VW$ 。即由於波浪接近海堤時會有部分水體產生反射，反射時所產生的負向水平流速會抵消正向的水平流速，且抵銷效應隨著坡度愈陡而愈強，故堤趾處最大正向剪應力隨海堤坡度變陡而愈小。而當波浪朝離岸方向前進而遠離斜坡時，有碎波現象時會產生較大之下刷水流，故堤趾處有較大之負向剪應力，直立堤前則因入反射波抵銷，故堤趾處底床剪應力為零。而觀察整體之底床剪應力分佈，可發現  $S = 1:2$  斜坡堤引致的底床剪應力較小，推測原因為波浪在  $S = 1:5$  斜坡堤上會發生碎波，而直立堤對波浪有較大的反射效應，故兩者整體之底床剪應力分佈皆比  $S = 1:2$  斜坡堤來的大。

#### 四、結論與建議

為探討週期波在海堤附近長期作用下黏性流場的演變與物理特性，本文選用三種台灣沿岸常見之堤岸坡度，分別為直立堤與  $S = 1:2$ 、 $S = 1:5$  之

斜坡堤。並配合兩種不同  $U_r$  數之波浪條件入射至海堤產生溯升、溯降及碎波等變化。經由數值模擬的結果，可歸納出以下幾點：

1. 在自由液面方面，經由週期波溯升及溯降的過程中得知，入射波與反射波在海堤前方形成駐波狀態，且其駐波程度會隨著堤面坡度愈緩而愈不明顯。
2. 在水下流場與邊界層流場方面，當週期波於堤面上溯升速度減緩時，邊界層外的流體朝向岸方向流動，而邊界層內的流體則朝離岸方向前進，此一現象稱為回流 (reverse flow)。回流現象為邊界層內流場受自由液面高程差影響，而產生逆向壓力梯度 (adverse pressure gradient) 導致流體產生分離。
3. 在堤面波壓部分，發生最大正向波壓與負向波壓時，恰好是溯升最高與溯降最低的時刻。觀察堤面波壓的正負向，推測應與其對應自由液面高程變化有關。
4. 在底床剪應力方面，由不同堤面坡度海堤前之整體底床剪應力分佈，可發現  $S = 1:2$  斜坡堤引致的底床剪應力最小，推測原因可能為波浪在  $S = 1:5$  斜坡堤上會發生碎波，而直立堤對波浪有較大的反射效應，故兩者整體之底床剪應力分佈皆比  $S = 1:2$  坡堤來的大。
5. 在週期平均流場方面，可知直立堤前形成駐波後其週期平均流場每  $L/4$  會產生方向相反，大小對稱之穩環流胞 (steady recirculating cell) 結構。此現象於  $S = 1:2$  之斜坡堤，亦可發現在斜坡堤面與堤前存在類似穩環流胞的結構，但其結構較不對稱，大小亦不同。而當波浪入射至較緩之  $S = 1:5$  斜坡堤時，波浪發生碎波現象，使其流場較為複雜。故其駐波現象較不明顯，並未發現有穩環流胞之結構，而其流場因碎波作用，沿著堤面有一離岸質量傳輸之流速，稱之為水下逆流或暗流 (undertow)。

本數值模式經一系列驗證已可適切模擬波浪與不同坡度海堤交互作用時的波浪場演變。本文為簡化問題複雜度將底床坡度條件設定為水平底床，但實際海岸問題中，許多海堤在設計上，常在海堤前建造透水離岸堤或拋放消波塊，其流場演變將更為複雜。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

本論文係國科會專題研究計畫(編號 NSC98-2221-E-006-252-MY3)之研究成果，承蒙國科會經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 陳志欣 (2011)，應用質量守恆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*。
2. 蔡清標、李宇曜、陳鴻彬 (1997)，陡坡海床上波浪變形之實驗研究，*第十九屆海洋工程研討會論文集*，第 137-144 頁。
3. 劉冠亨 (2013)，海堤附近波浪引致黏性流場之數值模擬，*國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文*。
4. Carrier, G. and Greenspan, H. (1958). Water waves of finite amplitude on a sloping beach. *J. Fluid Mech*, 4(1), pp. 97-109.
5. Carter, T.G., Liu, L. F. P. and Mei, C. C., (1973). Mass transport by waves and offshore sand bed forms. *Journal of Waterway Harbors and Coastal Engineering, ASCE*, Vol.99. No. WW2, pp. 165-184.
6. Chen, C. J. and Chen, H. C. (1984). Finite analytic numerical method for unsteady two-dimensional Navier-Stokes equations. *Journal of computational physics*, 53(2), pp. 209-226.
7. Enright, D., R. Fedkiw, et al. (2002). "A hybrid particle level set method for improved interface capturing." *Journal of computational physics* 183(1): 83-116.
8. Gislason, K., Fredsøe, J., Mayer, S. and Sumer, B. M., (2000). The mathematical modeling of the scour in front of the toe of a rubble-mound breakwater. *In: Book of abstracts, 27<sup>th</sup> international coastal engineering conference. Vol. 1. Sydney (Australia): ASCE*, pp. 130.
9. 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.
10. 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*。
11. Nadaoka, K. and Hino, M. et al. (1989). Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone. *Journal of Fluid Mechanics*, 204(1), pp. 359-387.
12. Osher, S. and J. A. Sethian (1988). "Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations." *Journal of computational physics* 79(1): 12-49.
13. Peng, D., B. Merriman, et al. (1999). "A PDE-based fast local level set method." *Journal of computational physics* 155(2): 410-438.
14. Saville. (1956). Wave run-up on shore structures. *Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE* 82(925).
15. Shuto, N. (1967). Run-up of long waves on a sloping beach. *Coastal Eng. In Japan*, Vol. 10, pp. 23-38.
16. Shuto, N. (1972). Standing waves in front of a sloping dike. *Coastal Eng. In Japan*, Vol. 17, pp. 1-12.
17. Shuto, N. (1974) Nonlinear long waves in a channel of variable section. *Coastal Eng. In Japan*, Vol. 17, pp. 1-12.
18. Sumer, B. M. and Fredsøe, J. (2000). Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater. *Coastal Engineering*, 40(1), pp. 59-87.
19. Tsai, C. P. , Wang, J. S. and Lin, C. (1998). Down-rush flow waves on sloping seawalls., *Ocean Engineering*, Vol. 25, No. 4-5, pp. 295-308.
20. Tsuchiya, Y. and Yamaguchi, M. (1970) Horizontal and vertical water particle velocities induced by waves. *Proc. 12th conf. on Coastal Eng.* p.555-567.