

碎波帶內斜向高頻波與多方向不規則波 交叉作用流場特性之研究(I)

石瑞祥¹ 周宗仁²

¹ 東南科技大學營建科技系暨防災科技研究所副教授

² 國立台灣海洋大學河海工程學系暨研究所教授

摘要

本研究以邊界元素法所建立之數值斷面水槽探討入射波浪與高頻對向簡諧波交互作用之效應，以水槽兩側造波板分別模擬兩系列波浪為主，探討入射波浪受較高頻擾動波之影響。波浪碎波後返回大海，產生相對大小不同之沿岸流，引起之斜向波交叉作用(cross-shore motion)對不同方向之入射波的變形、能量衰減及碎波點與碎波臨界之影響程度不一，所產生的擾動現象對整個波動場及速度場等之影響會影響到漂砂與海岸變遷之評估。因此本文初步利用 2D 之水槽來模擬對向波浪與入射波作用時之波形變化、速度場與水分子之運動軌跡變化。

關鍵詞：邊界元素法、高頻率簡諧波、波浪交互作用、波動場、徑線

Numerical Study of Wave Characteristics in Multiphase Irregular Breaking Waves Field (I)

Ruey-Syan Shih* Chung-Ren Chou

* Associate Professor, Department of Construction Technology, Tunghan University

ABSTRACT

Numerical investigations of multiphase irregular wave field are presented by using the BEM, which incorporates the interaction between incoming wave and reflected wave as well as fluid and fluid phase. This rudimentary study discusses the case of multi-component wave generation using the 2D-NWT, which incorporates the interaction between in coming wave and reflected wave, the motion of wave field, particle path-line, and wave-wave interaction. The surf beats in the surf zone is mainly the cause of the cross-shore motion, and the generations of high frequency harmonics waves, these phenomena will be study accordingly in this preliminary study for the modeling of oscillations cause by surf beat and back swash, the generation of high frequency multi-phase reflected wave are carried out to investigate the deformation of wave profile, wave field and particle path-line.

Keywords: Boundary element method; High frequency harmonic wave; Wave-wave interaction; Wave field; Path line

一、前言

海岸之工程大多發生在近岸淺水海域，該區域也是波浪發生淺化、折射、碎波及反射等各種物理現象最錯綜複雜的地區，也是影響漂砂活動、淤積與掏刷等海岸變遷相關活動最主要的影響因素。波浪因

發生碎波而產生較高頻之擾動(surf beat and swash oscillation)以反射波之形式返回大海，如圖 1 所示，反射波會產生相對大小不同之沿岸流，發生斜向波交叉作用(cross-shore motion)，沿岸流之方向與地形有直接的關係，對不同方向之入射波的變形、能量衰減及碎波點與碎波臨界之影響程度不一，所產生

的擾動現象對整個波動場及流場等之影響，更會影響到漂砂與海岸變遷之評估。Lekshmi 與 Sannasiraj (2007)以實驗之方式探討不同碎波型態之波能損失狀況，並間接證實 Meza (2000)所提到有關碎波後產生之高頻波對波浪能量損失之影響。發生折射與碎波則會因碎波擾動及型態上而稍微有點變化，會有些許的偏差角度，但主要入射波方向不變，而波浪在海岸區域碎波後所剩餘之能量隨即以反射波之形式返回大海，根據 Beij & Battjes (1994)之實驗研究結果及 Masselink(1998)之說法，這些微小振幅之高頻波能(high frequency harmonic wave)並不會受到沿岸地區碎波之影響，但確會影響到以單向前進波為研究對象所作的碎波效應、碎波帶及海岸變遷等方法評估的結果，導致部分結果有過度評估與預測(over-prediction)之現象。雖然近岸地區波浪之成分波種類繁多相當的複雜，各不同方向之成份波在傳遞過程中波浪與波浪間之交互作用無法如同規則波浪之研究能單純化，並確實的描繪出一些波浪與波浪或結構物間的關係。許多無法實際量取到之物理量及現象，可以利用不同數值方法以一窺其中的奧妙，如波、流場之變化與分佈、水粒子隨時間之運動軌跡變化、水面波浪變形之瞬間表現等。本研究雖擬以三維模式來探討整個入、反射波浪之交互作用下極為複雜的三維流體運動模式，探討多方向不規則波浪所產生的波浪與波浪及波浪與地形之交互作用以及交互作用下所產生的變化，如速度場與水分子運動之軌跡等三維運動模式之研究。Christensen 與 Deigaard (2001) 及 Christensen (2006)以三維模式對斜坡上特定碎波型態碎波後所產生之較大規模的渦流(eddy)場作類似的研究。

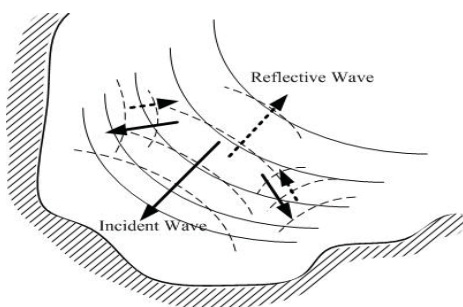


圖 1 海岸波浪斜向波交叉作用示意圖

本文為先期性之研究，以二維數值模式模擬兩系列任意波浪之交叉作用所產生的相關物理量變化

為主，利用二維水槽探討入射波浪與反向波作用時之波形變化、水分子之運動軌跡與速度場變化。二維運動模式之研究成果，可做為三維模式斜向角度為零度時三維模式斜向波(oblique wave)對入射波影響之參考(參閱 Shih 等, 2009)。

如圖 2 所示，在水槽內前、後設兩個虛擬造波機，右側以不同條件之規則波浪來模擬，左側之造波主要模擬較高頻之規律擾動，以較高頻率簡諧波為條件，此部份之波浪與入射波遇結構物受本身同頻率之反射波影響的效應不同，而是相對較高頻、波高較小之波浪。本文旨在探討這些高頻波浪是否會擾亂入射之波浪特性與波動場，並探討水面波形變化、速度場與水分子之運動軌跡。因實際碎波後所產生的高頻擾動具隨機特性，故可將左側造波條件改為不規則波浪，如圖 2(b)所示。不規則波之速度場較複雜，故本文先以規則波來探討其變化。

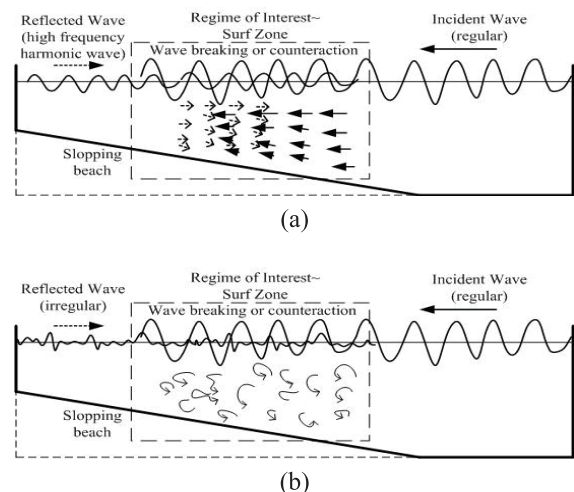


圖 2 二維數值雙向造波水槽示意圖

二、基本理論與假設

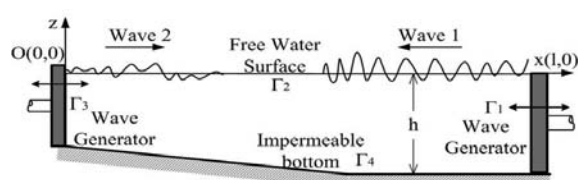


圖 3 二維數值雙向造波水槽示意圖

1. 基本假設

數值造波水槽之斷面圖如圖 2 所示， x 軸向右為正， z 軸向上為正，水槽前、後兩端各設置一組虛擬造波機 Γ_1 及 Γ_3 ，其餘包括自由水面 Γ_2 及不透水

底面 Γ_4 等，整個解析領域成一封閉之區域，各邊界以 $N_1 \sim N_4$ 個線形元素(linear element)作分割。領域內之流體假定為非粘性、非壓縮性之理想流體，當波浪由造波板往前推進時，領域內之流體運動速度勢 Φ 應滿足下列 Laplace 連續方程式：

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

2. 邊界條件

(1). 自由水面 Γ_2 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：

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

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，在水面上一般令大氣壓力恆為一定並視為 0，故 $P=0$ 。

(2). 斜坡面及水底面均假定為不透水，故其法線方向之流速均為 0，即：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

其中 n 為法線方向之單位向量。

(3). 造波板右側之造波板 Γ_1 上及左側造波板 Γ_3 上，水粒子運動速度與造波板的移動速度 $U_1(t)$ 、 $U_3(t)$ 必須連續，故：

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial n} = U(j_1) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi_3}{\partial n} = U(j_2) \quad (7)$$

其中 $U(j_1)$ 、 $U(j_2)$ 依不同造波條件可視需要各自造出不同類型之波浪。領域內速度場可以對各點速度勢之 x 軸與 y 軸方向微分以前進差分式求得。

根據 Green 定理，流體內任意一點 (x, z) 的速度勢 Φ 可由邊界上點 (ξ_x, ξ_z) 以下列積分方程式表示：

$$\alpha \cdot \Phi(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \left\{ \frac{\partial \Phi(\xi_x, \xi_z; t)}{\partial n} \ln \left(\frac{1}{r} \right) - \Phi(\xi_x, \xi_z; t) \frac{\partial}{\partial n} \left(\ln \frac{1}{r} \right) \right\} d\Gamma \quad (8)$$

$$\alpha(\chi) = \begin{cases} 1 & \text{within the fluid domain} \\ 1/2 & \text{on the smooth boundary} \\ 0 & \text{outside the fluid domain} \end{cases}$$

$$r = |\xi - \chi| = \sqrt{(\xi_x - x)^2 + (\xi_z - z)^2}$$

r 為流體內任意一點與邊界上任意一點間的距離。

對各邊界面以加以離散，可以再化為下列之矩陣形式：

$$[\Phi_i] = [O_{ij}] [\bar{\Phi}_j] \quad , \quad i, j = 1 \sim 4 \quad (9)$$

$[\Phi]$ 及 $[\bar{\Phi}]$ 分別為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。對時間做前進差分，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 Φ_2^{k+1} ，即

$$\Phi_2^{k+1} = \Phi_2^k + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial s} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial n} \right)^2 \right]^k \Delta t - g z^{k+1} \Delta t - \frac{P^k}{\rho} \Delta t \quad (10)$$

其中 s, n 分別表示切線及法線方向。

將 $t=(k+1)\Delta t$ 時刻之各已知物理量及水面各點新位置重新求解係數矩陣 $[O]$ 之值進行下一時刻之計算，可得 $t=(k+1)\Delta t$ 時刻各邊之相關物理量矩陣。反覆計算，可得各時刻自由水面上的速度勢值。

三、結果分析與討論

1. 規則波-波交互作用水面波形變化

圖 4~圖 6 為兩向規則波之造波運動模擬， x 軸之正向與反向分別以不同頻率之規則波造波，在右側入射波以 $\sigma_1^2 h/g=0.5$ 之規則波造波，在左側造波板之運動以較高頻率、波高較小之規則波造波，波浪之無因次週頻率則分別為 $\sigma_2^2 h/g=1.5$ 、 2.0 及 2.5 ，波高設定為入射波高之一半，與右側之入射波交會於水槽中央區域，最後形成一穩定之部分重複波波形，與單側造波水槽之波浪傳遞與波形之變化過程，比較兩向波交互作用對入射波及重複波波形、水分子運動軌、及速度場跡之影響。圖 4 為 $\sigma_2^2 h/g=1.5$ 時一週期之波形變化，當 $t=1200\Delta t$ 時兩波列開始交會於中央 $x=15h$ 處，右側入射波尚未受到影響，待 $t=1800\Delta t$ 時，左、右側入射波開始產生擾動，在 $x=13\sim 23h$ 之間產生明顯重複波，於 $t=2400\Delta t$ 時有最大波高，之後同時受到二次反射波之影響，整個區域之重複波高度有些微的下降許多。

圖 5 為 $\sigma_2^2 h/g=2.0$ 時一週期之波形變化，與圖 4 作比較發現當 $t=1200\Delta t$ 時，右側入射波波高分佈與波形變化無明顯差異性，兩波列開始交會點稍微往前移動至 $x=13h$ 處後，左、右側入射波開始逐漸產生擾動，於 $t=2400\Delta t \sim 3000 \Delta t$ 比較左側 $x=0 \sim 5h$ 之

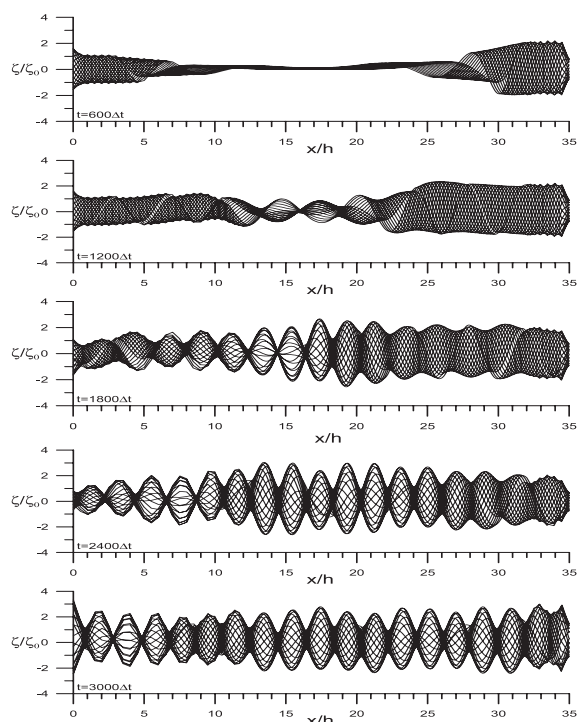


圖 4 $\sigma_1^2 h/g=0.5$ 入射與 $\sigma_2^2 h/g=1.5$ 反向波交互作用波型變化圖

波高分佈與波形變化發現比 $\sigma_2^2 h/g=1.5$ 時小許多，右側入射波浪確實受到左側反向波動之影響而降低其產生重複波後之波高，而右側入射波之波高亦受到不同頻率反向波動之影響，雖然亦形成部分重複波現象，但整個區域之平均波高與原先 $t=1200\Delta t$ 前之入射波高有明顯的降低。將反向入射波之條件改以 $\sigma_2^2 h/g=2.5$ 造波時如圖 6 所示，由於比較圖 4 及圖 5 發現當 $\sigma_2^2 h/g=1.5$ 改成 2.0 時對右側入射波波高與波形及左側 $x=0\sim 5h$ 之波高分佈與波形變化均有明顯的變小，但當 $\sigma_2^2 h/g=2.5$ 時發現由於與 $\sigma_1^2 h/g=0.5$ 波高與波長差異太大，以至於對入射波所產生的影響無法改變既有的流場機制，故由圖 6 發現左側之反向入射波似乎沒有產生任何作用，故在水槽左側 $x=0\sim 10h$ 處形成完全重複波波型。

2. 水分子運動軌跡變化

圖 7 為 $\sigma_2^2 h/g=2.5$ 與高頻反向入射波交互作用之波高分佈與變化圖，分別紀錄 $t=1200\Delta t\sim 1400\Delta t$ 、 $t=1600\Delta t\sim 1800\Delta t$ 及 $t=2000\Delta t\sim 2400\Delta t$ 三個時段之變化，選取交互作用區域 $x=30h\sim 40h$ 之範圍探討水分子之運動軌跡，如圖 8 所示，左側圖形運動軌跡記錄時間為 $t=200\Delta t\sim 1800\Delta t$ 之軌跡變化，此時段兩相波浪自開始造波到相互交會，而右側圖形則為 $t=200\Delta t\sim 2400\Delta t$ 之軌跡變化，主要探討交

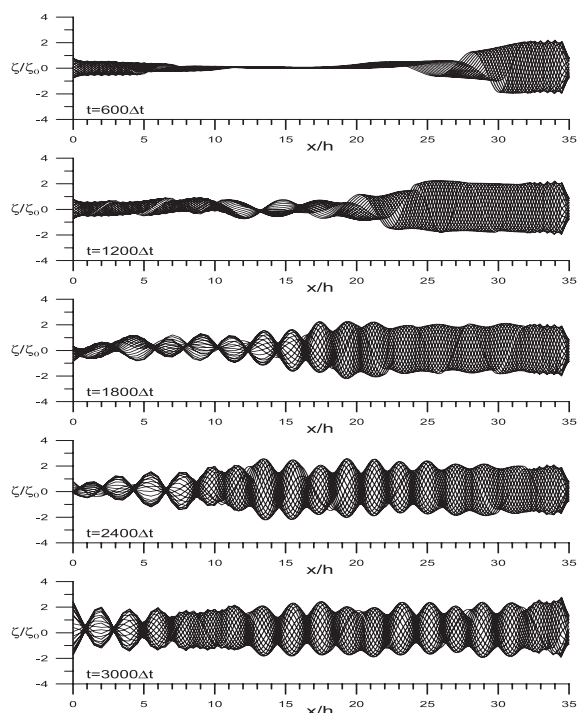


圖 5 $\sigma_1^2 h/g=0.5$ 入射與 $\sigma_2^2 h/g=2.0$ 反向波交互作用波型變化圖

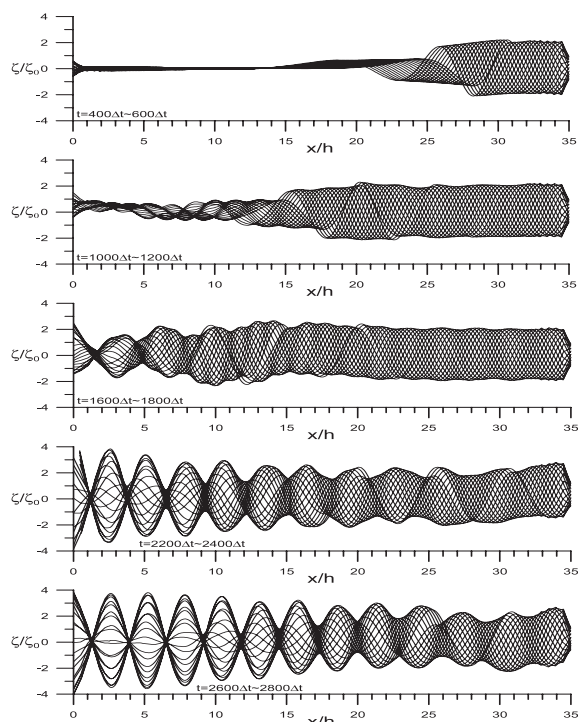


圖 6 $\sigma_1^2 h/g=0.5$ 入射與 $\sigma_2^2 h/g=2.5$ 反向波交互作用波型變化圖

互作用前後之軌跡變化。由軌跡運動分三個階段來看當，發現波浪波浪到達作用點之前($t<1200\Delta t$)的軌跡呈現微小的旋轉運動，然後逐漸加大其運動之旋轉範圍，等 $t>1200\Delta t$ 之後，其運動軌跡有明顯的

變化，除了原本的橢圓形運動外，因受到其他的外力作用而導致運動軌跡有程度不一樣的偏差，如 $x=34.35h\sim 34.55h$ 間之水分子運動可看出為旋轉運動，但 $x=33.4h\sim 33.5h$ 間之水分子運動則呈現反向之動作，而 $x=32.4h\sim 32.5h$ 間之水分子運動幅度較小，研判為靠近部份重複波的波節附近。由各水分子之運動軌跡可以發現其流場將因為波與波之交互作用而導致無法如同規則波浪之研究能單純化並確實的描繪出一些水分子在波浪通過時之具規律性運動。

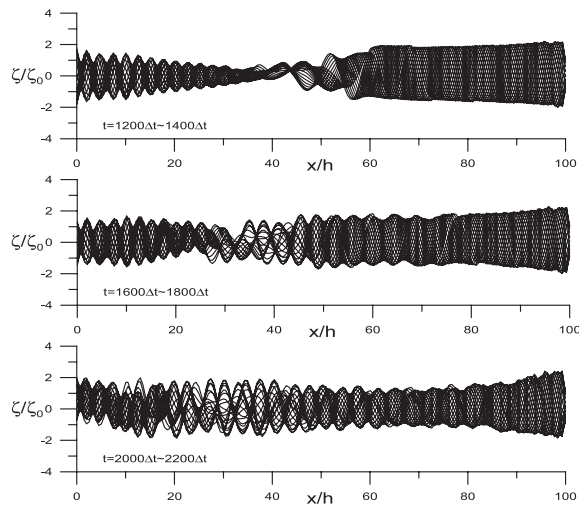


圖 7 $\sigma^2 h/g=2.5$ 與高頻反向入射波交互作用變化圖

3. 速度場變化

圖 9 為上節 $\sigma^2 h/g=2.5$ 與高頻反向入射波交互作用水分子運動軌跡所對應的速度場變化，分別為 $t=1200\Delta t\sim 2000\Delta t$ 等五個時段之速度場變化，顯示當波浪只有單方向之運動模式時，其速度場呈規律性變化，但當兩列波浪以反方向運動時，同一點附近會同時出現兩個大小不同之速度，也會同時出現同向及反向的速度，如圖中 $t=1600\Delta t$ 之分圖中有不少大小不一的交錯箭頭，箭頭大小為速度之大小，交錯並非流線被穿越或破壞，僅在附近出現兩股不同大小與方向之作用力，產生多相流，交互作用之成份波位相分佈在 $0\sim 2\pi$ 之範圍內之任意數，取決於作用後之合力方向，由速度場的分佈發現在任意觀測點兩側速度除了大小不連續變化外，其方向亦不符合流線之平滑現象，如 $t=1600\Delta t$ 之分圖有許多向右轉向下，突然向上再轉向右之箭頭，在 $t=1800\Delta t$ 之及 $2000\Delta t$ 之分圖中亦發現有不在 $x=30h\sim 32h$ 間之速度場有時會出現停滯現象，這些速度場的變化造成上節所示之水分子運動軌跡之不規則變化，也可能是造成軌跡運動突然以大角度轉向的原因之一。

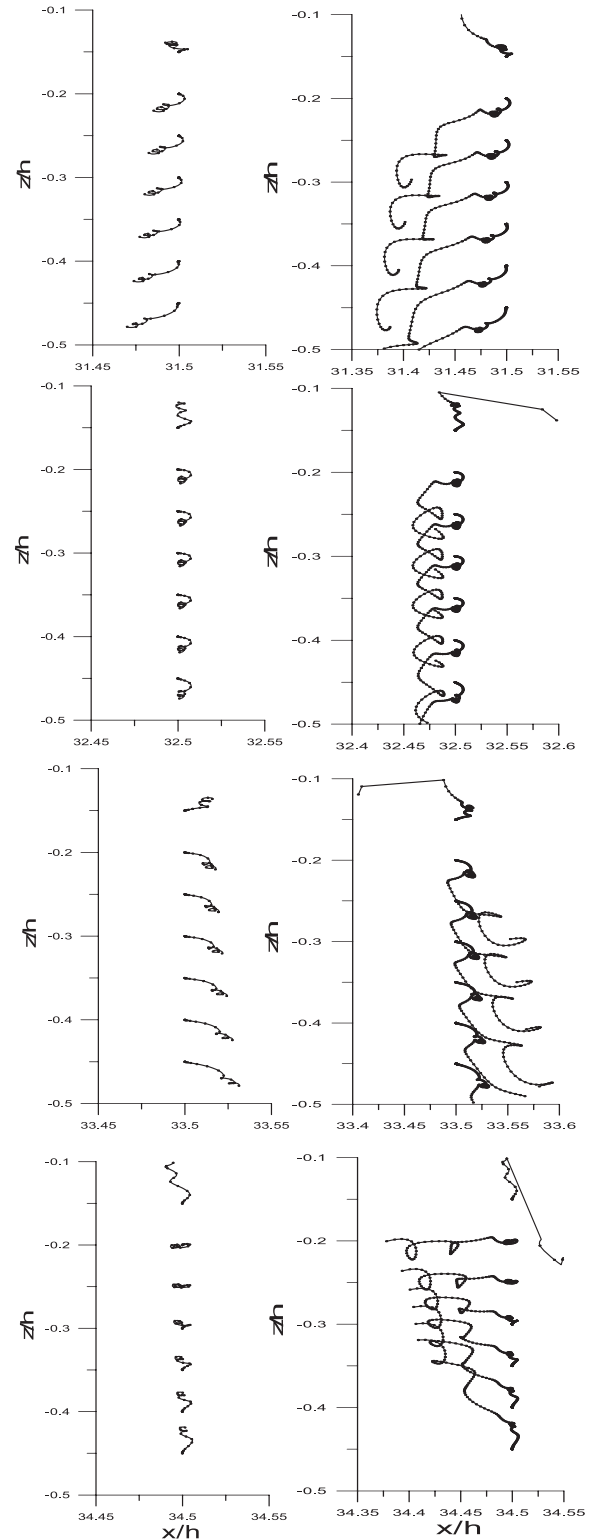


圖 8 入射波與反向高頻波交互作用水分子運動軌跡

四、結論

本研究利用邊界元素以數值水槽探討淺水區域內波與波之交互作用，在水槽內前、後設兩個虛擬

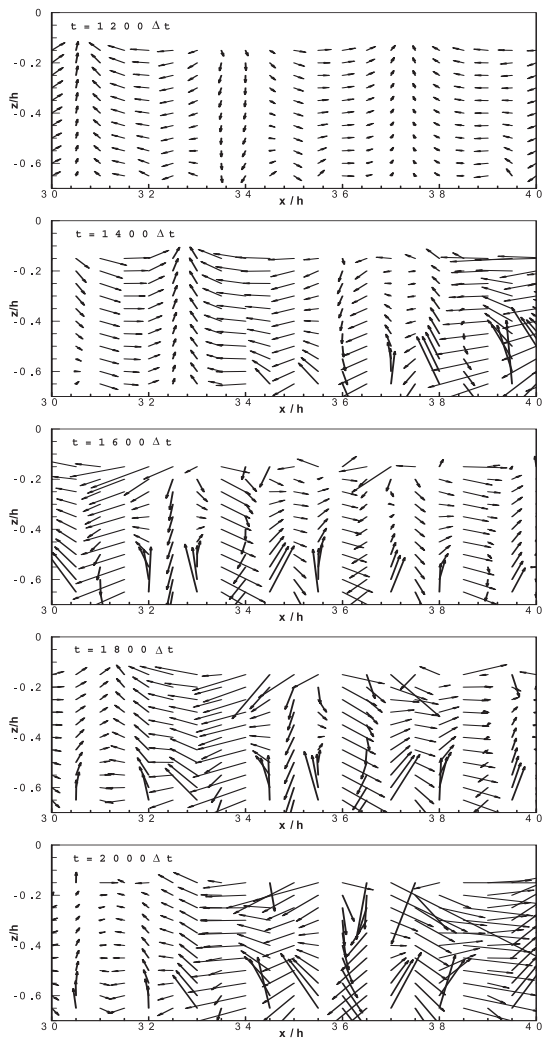


圖 9 多方向不規則波造波水面波形變化

造波機，探討波浪交會後之波場特性，經模擬後初步得到以下之結論：

1. 不同條件之波高及週期波交互作用區域水面波形之變化與水分子之運動軌跡顯示原先入射波高受到左側反向較高頻波之影響，整個平均波高有明顯的降低，但當 $\sigma_2^2 h/g > 2.5$ 時發現由於與原入射波之波高與波長差異太大，對入射波似乎沒有產生任何作用，而在水槽左側形成完全重複波波形。
2. 速度場的分佈發現在任意觀測點兩側發現有不少大小不一的交錯箭頭，代表在同一個點上附近出現兩股不同大小與方向之作用力，速度除了大小呈不連續變化外，方向亦呈現不符合流線之平滑現象，造成水分子運動軌跡不規則變化，可能是造成軌跡運動突然以大角度轉向的原因之一。

3. 本文模式可將右側入射波條件改為隨機波浪，以不同條件之示性波週期及示性波波高來模擬不規則波交互作用區域波場與速度場之變化。亦可在同一側造波板依時間前、後分別造出同方向兩列不同條件之波浪來探討波與波之交互作用。
4. 本文為先期性之研究，未來由二維運動模式之結果來完成三維模式之建立，可用來檢驗三維模式斜向角度為零度時波浪之交互作用。

謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「碎波帶內斜向高頻波與多方向不規則波交叉作用流場特性之研究」(編號 NSC97-2221-E236-011-)之研究成果，承蒙國科會經費之補助，謹致謝忱。

參考文獻

1. Beji, S. and Battjes, J.A. (1994) "Numerical simulation of nonlinear wave propagation over a bar," *Coastal Engineering*, Vol. 23, pp. 1-16.
2. Christensen, E.D. (2006) "Large eddy simulation of spilling and plunging breakers," *Coastal Engineering*, Vol. 53, pp. 463-485.
3. Christensen, E.D. and Deigaard, R. (2001) "Large eddy simulation of breaking waves," *Coastal Engineering*, Vol. 42, pp. 53-86.
4. Lekshmi, G.R. and Sannasiraj, S.A. (2007) "Correlation of Breaking Wave Characteristics with Energy Dissipation," *Journal of Coastal Research*, Special Issue 50, pp. 307-311.
5. Masselink G. (1998) "Field investigation of wave propagation over a bar and the consequent generation of secondary waves," *Coastal Engineering*, Vol. 33, pp. 1-9.
6. Meza, E., Zhang, J. and Seymour, R.J. (2000) "Free-wave energy dissipation in experimental breaking waves," *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 30, Issue 9, pp. 2404-2418.
7. Shih, R.S., Chou, C.R. and Weng W.K. (2009) "Numerical Modelling of 3D Oblique Waves by L-type Multiple Directional Wave Generator," *Proc. 19th Int. Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, pp. 918-925.