

波と流れの相互作用に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON WAVE-CURRENT INTERACTION

水谷法美¹・李光浩²・小松克弘³・許東秀⁴

Norimi MIZUTANI, Kwang-Ho LEE, Katsuhiko KOMATSU and Dong-Soo HUR

¹正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²工修 名古屋大学 大学院工学研究科土木工学専攻(同上)

³正会員 工修 名古屋市下水道局(〒460-8508 名古屋市中区三の丸3-1-1)

⁴正会員 工博 国立慶尚大学校助教授 海洋土木工学科(大韓民国慶南統営市仁平洞445)

This study investigates, experimentally and numerically, the wave-current interaction and its mechanism. Hydraulic model experiments and numerical analysis have been conducted to measure the wave height distribution and velocity field. Both results show that the wave height increases due to the wave-current interaction at initial stage, and then wave height decreases with wave propagation against the flow. The intensity of interaction seems to depend on incident wave period. It is found that the wave weakens the current velocity and interaction between them raises the mean water level. Also, spilling breaker due to interaction contributes in decreasing wave height.

Key Words : wave-current interaction, numerical wave tank

1. はじめに

日本の多くの海岸で海岸侵食が問題となっている。海岸侵食対策を効率的に行うには、河口から供給される土砂の移動を精度良く予測することが必要である。河口部は河川流と波が共存する場であり、そこでは複雑な流れ場が形成されている。このような波・流れ共存場における両者の相互作用については、これまでにいくつか研究されており(例えば, Mohiuddinら, 1999, 2000; 小林・田中, 2002; 梅山ら, 2003, 沖ら, 2003; 間瀬ら, 2004), 多くの重要な知見が得られている。岩崎・佐藤(1970, 1971)は水深が一様な流れを遡上する波の波高変化が指数関数的である事を見いだしている。Sakai and Saeki(1984)やRonaldら(1989)も両者の相互作用を考究している。しかし、そのほとんどが流れによる波の変形に重点を置いており、波による流れの変化についてはあまり検討されていない。また、これまでの研究は二次元的な検討が中心であり、港湾の様な三次元を対象とした波・流れ共存場における波と流れの相互作用については未解明な部分が多く残されている。そこで本研究では、波と流れが共存する場における両者の相互作用を解明す

るとともに水谷ら(2002)が開発した数値解析手法をさらに改良し、波流れ共存場の数値解析手法を提案する。そして、直線水路を流下する流れを規則波が遡る場合の波や流速場の変形を水理模型実験と数値解析の両面から検討するとともに、河口部に平面的な広がりを持つ場合の波・流れ共存場における両者の相互作用についても水理模型実験に基づいて検討を加える。

2. 実験方法

水理模型実験を長さ28m, 有効幅8m, 深さ0.8mの平面波浪水槽で行った。図-1に示すように、水槽内に全長12.81m, 幅0.35m, 深さ0.46mの直線水路を造波板に垂直になるように設置した。水路の断面図を図-2に示す。水路床は不透過でその勾配を水平とした。また、水路の下流端と上流端はともに開放されている。水槽内に4台の水中ポンプを設置し、パイプを経由して水路の上流端より水を供給し、水路内に流れを発生させた。また、三次元性の影響を検討するために、河口部に広がりを持つ水路(図-3参照)を対象とした実験も行った。

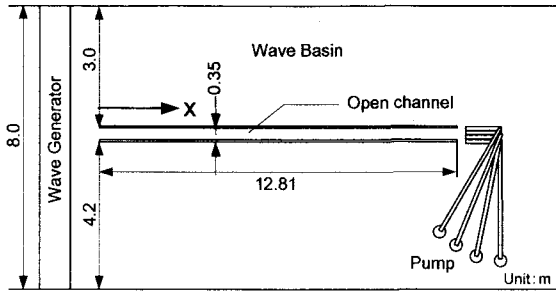


図-1 実験水槽と水路模型（二次元実験）

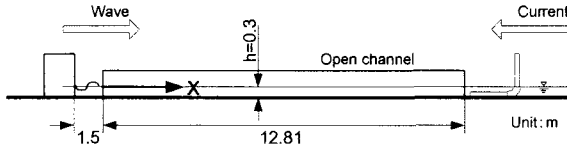


図-2 実験水路の断面図

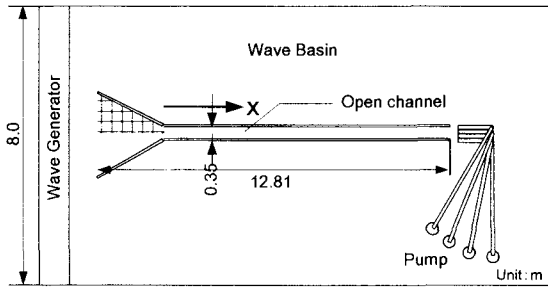


図-3 実験水槽と水路模型（三次元実験）

実験では、規則波のみ発生させた場合、流れのみを発生させた場合、および波と流れが共存する場合の3種類を行った。

直線水路を使用した二次元実験では、流れの条件を2種類（断面平均流速 $U=40, 60\text{cm/s}$ ）変化させ、入射波の周期を3種類（ $T=1.0, 1.4, 1.8\text{s}$ ）、入射波高 H_I を3種類（ $H_I=3.0, 5.0, 7.0\text{cm}$ ）変化させた。河口部を広げた3次元実験の場合は、流れの条件を1種類（断面平均流速 $U=40\text{cm/s}$ ）、入射波の周期を2種類（ $T=1.0, 1.4\text{s}$ ）、入射波高 H_I を2種類（ $H_I=3.0, 5.0\text{cm}$ ）変化させた。なお、波と流れの相互作用が顕著に生じるよう、流れの流速は洪水時に相当する大きい値としている。

それぞれの条件で水路内の水位変動と流速の鉛直分布をそれぞれ容量式水位計と超音波ドップラー流速計を使用して行った。

3. 数値解析手法

波と流れの相互作用を、非線形性を考慮して解析できるよう、ソースによる無反射造波を使用した数値波動水槽を構築する。既に水谷ら（2002）は波と流れのそれぞれに対応するソースを組み込んだ三次元の波・流れ共存

場の強非線形数値解析モデルを提案しているが、開境界処理などに課題を残しており、本研究では従来のモデルを改良することとした。

基礎方程式は3次元非圧縮性流体の連続式(1)と、運動方程式(2a), (2b), (2c), および自由表面の形状を模擬するためのVOF関数 F の移流方程式(3)である。

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = q^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial u}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial u}{\partial z} \\ & = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zx}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial v}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial v}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial v}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial v}{\partial z} \\ & = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zy}}{\partial z} \right) - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y} \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial w}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial w}{\partial z} \\ & = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \gamma_v g + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zz}}{\partial z} \right) \\ & \quad - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \beta w \end{aligned} \quad (2c)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y F v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (3)$$

ここで、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速、 γ_x は体積空隙率、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ はそれぞれ x, y, z 方向の面積空隙率、 g : 重力加速度、 ρ : 流体の密度、 ν : 動粘性係数、 τ : セン断応力、 β : 付加減衰領域のみで正の値を持つ減衰係数、 q : 造波位置での湧き出し強さ、 F : VOF関数（流体の体積率）である。また、 q^* は造波のためのソース項であり、

$$q^* = \frac{q(y, z, t)}{\Delta x_s} : x = x_s \quad (4)$$

で与えられる。これにより波と流れを発生させた。

staggered meshを用いて、(1)~(3)を離散化し、流速と圧力を調整しながら連続方程式を満たすまで繰り返し計算を行った。流速と圧力の収束解法には、SOLAスキームを用いた。

計算では、まず流れを発生させ、流れが安定したら波を発生させ、波と流れの共存場を解析した。

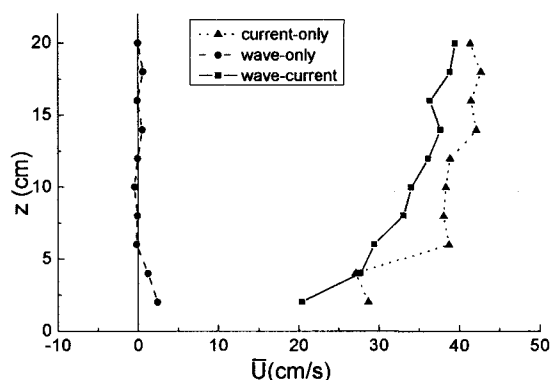
4. 結果と考察

(1) 二次元実験

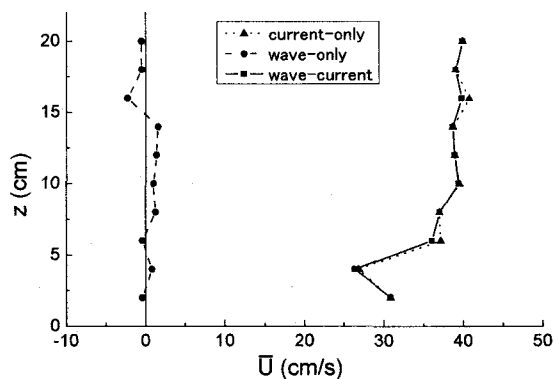
波が流れを遡る場合、波高の減衰が顕著に生じる場合と波高がほとんど減衰しない場合のあることが確認された。図-4に波高の減衰が確認された場合の平均流速の鉛直分布を、波のみ、流れのみ、および両者が共存する場合の3つに対して比較した結果を例示する。同図(a)に見られるように、波と流れが共存する場合、流れの平均流速は減少する。しかし、波が流れを遡るにしたがって両

者の差は小さくなり、下流端より2波長程度波が遡ると波が流れに及ぼす影響はほとんど無く、流れのみの場合と流速はほぼ同じになる(図-4(b)参照)。

図-5に波高の減衰が確認されなかった場合の3つの条件に対する平均流速の鉛直分布を示す。図-4(a)で波・流れ共存の影響が見られた位置でも波高の減衰が確認されなかった場合には、波の有無による平均流速の差は非常に小さく、下流端より2波長程度波が遡った位置での比較(図-5(b))でも波の有無による差はほとんど無い。したがって波と流れの相互作用が生じると、波高の減衰と平均流の減少が同時に起こるといえる。

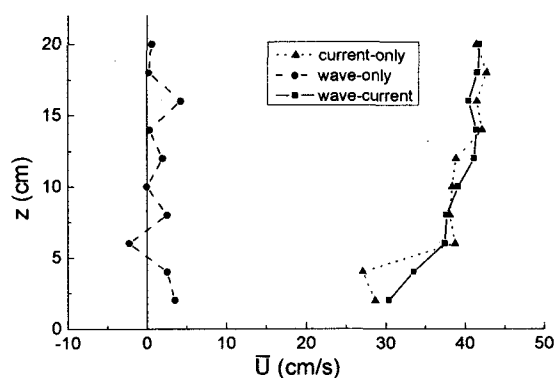


(a) $x/L=0.0$

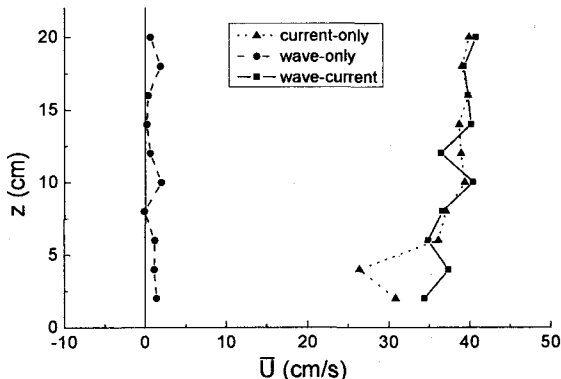


(b) $x/L=2.0$

図-4 時間平均流速の鉛直分布
($T=1.0s$, $H_f=3.0cm$, $U=40.0cm/s$)

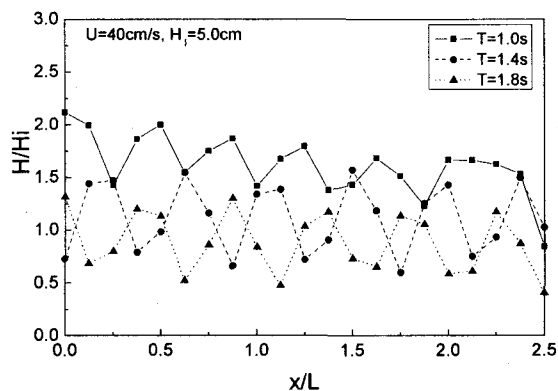


(a) $x/L=0.0$

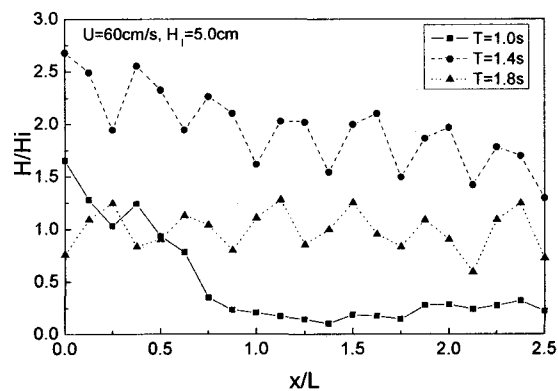


(b) $x/L=2.0$

図-5 時間平均流速の鉛直分布
($T=1.8s$, $H_f=5.0cm$, $U=40.0cm/s$)



(a) $U=40.0cm/s$



(b) $U=60.0cm/s$

図-6 波高の空間分布に及ぼす周期の影響

図-6(a), (b)はそれぞれ $U=40\text{cm/s}$ と $U=60\text{cm/s}$ のそれぞれに対して、波高分布に及ぼす周期の影響を比較したものである。全般的に波高の分布が変動しているのは部分重複波の影響と考えられる。両図より、周期の短い $T=1.0\text{s}$ の場合に明瞭な波高の減衰が確認できる。図-6(b)より、 $T=1.0\text{s}$ の波は、 $x/L>1.0$ でほぼ $0.2\sim 0.3$ 程度と一定値となっているが、これは $x/L=1.0$ 付近で既に波はほとんど減衰し、それより上流では明確な波の存在を認められないことによる。 $T=1.0\text{s}$ の場合、微小振幅波理論では群速度が $C_g=92.9\text{cm/s}$ であるのに対し、流れの流速がその約65%にもなり、波のエネルギーが上流に伝搬しにくい状況になっていることが一因として挙げられる。したがって流れに波が入射する場合、入射波の周期の短い方が波高は減衰しやすいとえる。波高の減衰は波と流れの相互作用によって生じると考えられるが、周期が小さいほど波速が遅く、単位距離を進行する時間が長くなり、流れの作用を受ける時間が長くなるため、相互作用の影響が顕著になるためであると考えられる。

図-7は、流速の違いによる波高分布の比較を $T=1.4\text{s}$, $H_f=5.0\text{cm}$ の波に対して例示したものである。この波の場合、 $U=40\text{cm/s}$ の場合では波のみの場合と波高分布は同程度であり、明瞭な相互作用の影響は認められない。一方、 $U=60\text{cm/s}$ の場合は、波の伝搬にともなう波高の減衰が認められる。この場合、波が水路に入射するまでもに相互作用があるため、下流端ではすでに入射波高よりも波高は増大している。そして、波が流れを遡るにした

がって波高は減衰している。すなわち、相互作用により波高が減衰する場合には、波高はまず増大し、その後伝搬とともに減衰するといえる。また、流れの流速の大きい方が相互作用の影響は顕著である。

実験の目視観測によると、波高の減衰が顕著な範囲では波峰でspilling型碎波が生じる場合の多いことが確認されている。したがって波高の減衰の要因として、碎波による擾乱が挙げられ、これによってエネルギーが失われることがこの現象の一原因であると考えられる。すなわち、相互作用により波高が増大すると波が不安定になりやすく、碎波が生じやすくなることが考えられる。

図-8に流れの有無による波一波長当たりのエネルギーの比較を示す。波一波長当たりのエネルギーは、エネルギー $E = (1/8)\rho g H^2$ に波長 L を乗じて求めた。この時、理論値には入射波高 H_f と微小振幅波理論による波長を用い、計測値には水路の入り口地点の波高 H と計測により求められた波長 L' を用いた。なお、波長は流れによって短くなることを確認している。図-8より、全般的に EL と $E'L'$ は近い値を示しており、波長の変化にとまななって波高が増大している傾向が指摘できる。

波と流れの相互作用が最も顕著であった $T=1.0\text{s}$, $H_f=5.0\text{cm}$, $U=60.0\text{cm/s}$ の場合は理論値と比べ小さい値を示しており、下流端までにエネルギーが既に減少してい

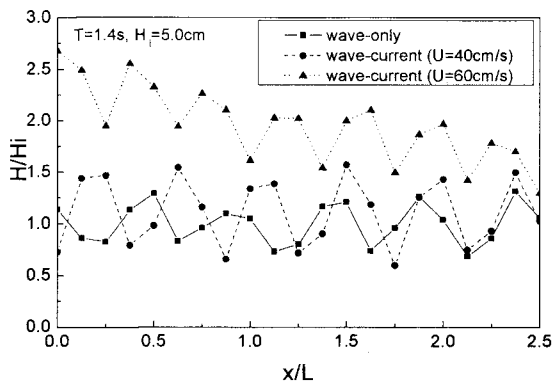


図-7 波高分布に及ぼす流速の影響

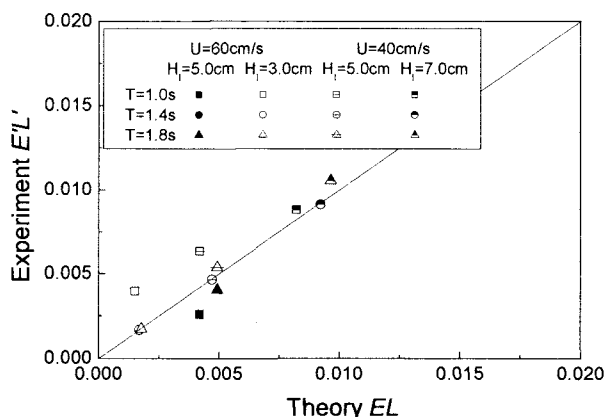
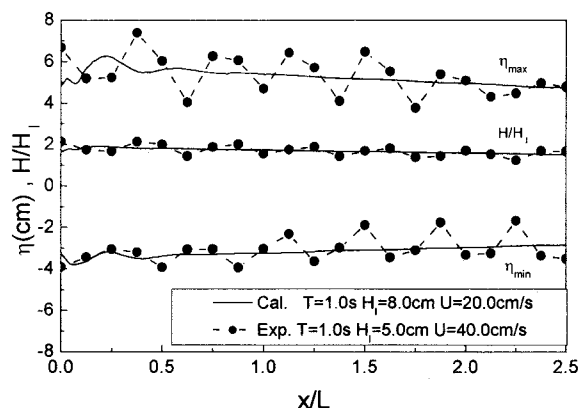
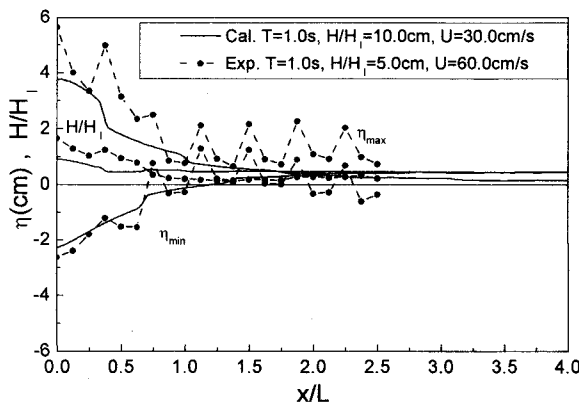


図-8 波一波長当たりのエネルギーの比較



(a) $U=40.0\text{cm/s}$



(b) $U=60.0\text{cm/s}$

図-9 実験結果と解析結果の比較

たことが考えられる。

(2) 数値解析

河口部では、上記のような複雑な現象が生じているが、それを定量的に評価するためには、波と流れの相互作用を再現できる数値解析手法を構築しておく必要がある。これまでも波と流れの共存場を扱った数値計算は行われているが（例えば、Yoon and Liu, 1989）、波による流れの変化までを十分に考慮した解析手法はほとんどない。本研究では、造波ソースを組み込んだVOF法に基づく数値波動水槽を使用し、一つの造波ソースから流れを与え、もう一つの造波ソースから波を発生させた。

本数値解析手法で実験条件の再現を試みた結果、波高の減衰を過大評価する傾向が見られた。その程度を検討するため流速を種々変化させて計算を実施したところ、実験値の1/2の流速を使用した計算結果と実験結果がほぼ同程度の波高減衰となることが判明した。

図-9に無次元波高 H/H_0 、 η_{max} 、 η_{min} の空間分布の数値解析結果と実験結果の比較を示す。ただし、数値解析の流速は上述のように実験値の1/2を与えてある。また、数値解析の入射波の波高は実験値よりも大きい。これは実験では水路に入射するまでにすでに波高が流れとの干渉により大きくなっているため、実験における開口部付近の波高を与えたことによる。なお、数値計算が波高減衰を過大評価する原因については明らかにできなかったため、ここでは定量的な比較をせず、定性的な検討を行うこととする。

同図より、実験値と解析値の波高減衰と波峰高や波谷深さの傾向は定性的には同様で、波高の減衰が同程度であれば、波峰と波谷の減衰の程度も同じである。また、減衰の大きい図-9(b)より、波高がほぼ減衰しきった $x/L > 2.5$ では、水位変動の収束値が0より大きくなっていることが確認できる。これは、平均水位の上昇が発生していることを示している。平均水位の上昇に関しては、実験結果からは明瞭に認めることができなかった。これは本実験では三次元水槽内に二次元水路を設置しており、さらにその水路の上流端・下流端をとともに開放していたため平均水位の変化が明瞭に認められなかったことが原因として挙げられる。

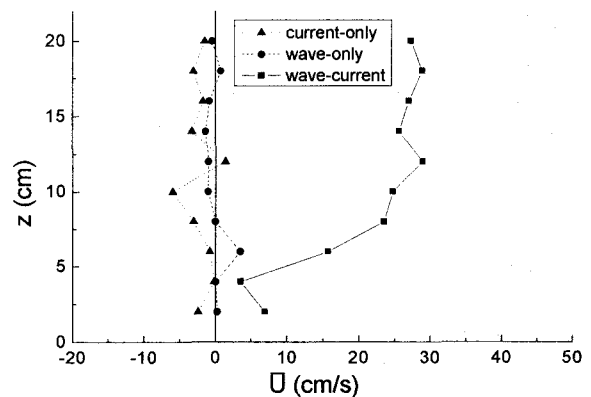
実験では、spilling型の碎波が認められているが、数値計算結果からは碎波の状況を確認するのは困難であった。また、本研究では乱流モデルを採用していないため、spilling型碎波が生じていても計算上で大きなエネルギー損失は期待できない。したがって計算結果にみられる波高の減衰は乱れ以外の機構によると考えられる。図示していないが、流速の時間変化より、波が流れを遡る場合、流れの流速が大きいと一周期を通じて上流へ向かう流速が発生しなくなる。したがってエネルギーを上流に輸送することができなくなり、波は上流に伝搬されなくなることになる。図に示した場合、波峰前後の位相で全体の

流速が上流に向かうため、若干のエネルギーが上流に伝搬するが流れによって下流に輸送される成分が大きく、徐々に波高が減衰すると考えられる。

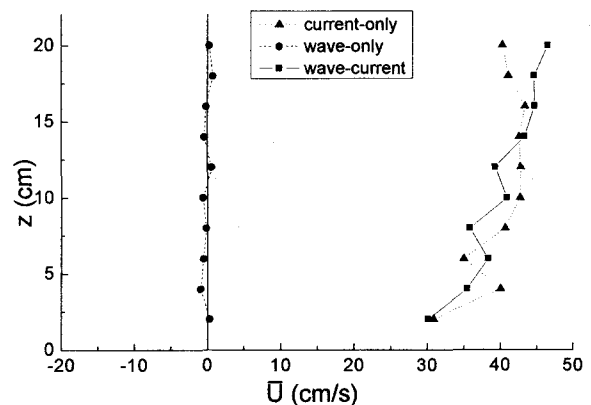
(3) 三次元実験

下流端に広がりを持つ三次元実験においても、一樣水路幅の部分では二次元実験での直線水路と同様の傾向、すなわち、波が流れを遡るにしたがい、波高が減少すること、また、波と流れが共存する場合には流れのみの場合と比べて平均流速は小さくなるが、波高が減衰してくると流れのみの場合との流速の差は小さくなる傾向が確認できた。

図-10(a)、(b)にそれぞれ水路幅が変化する拡幅部の壁面付近と一樣水路幅部分（中央部）における流速分布を示す。流れのみの場合、拡幅部へ達した流れも水路中央部が卓越しているため、壁面付近は強い流れは発生していない。しかし、波と流れが共存する場合、波によって流れが水路幅方向に広がり、共存場では下流方向に強い流れが認められるようになる。一樣水路幅部分では、二次元実験とほぼ同様の傾向が認められる。また、三次元実験では、入射波高が大きい方が流れの向きが激しく変化していることが確認された。これは、入射波高が大きい場合、流れ場に乱れによる流れの方向の変化が生じやすくなるためであると考えられる。



(a) 拡幅部側方における流速分布



(b) 一樣水路幅部分における流速分布

図-10 時間平均流速の鉛直分布の比較
($T=1.4s$, $H=3.0cm$, $U=40.0cm/s$)

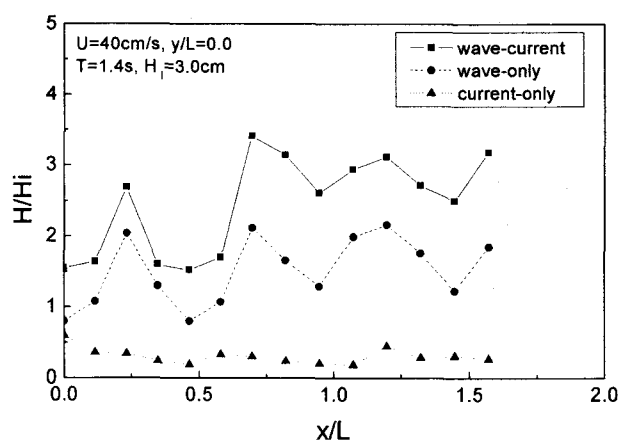


図-11 波高の空間分布
($T=1.4s$, $H_i=3.0cm$, $U=40.0cm/s$)

図-11に水路中央断面における波高の空間分布を示す。横軸は開口部の下流端を0とし、流れを遡る方向を正として図示しており、流れのみの H/H_i の値は流れにおける水面の振動の振幅による値である。

図より流れの有無に関わらず波が存在している場合には、一様幅の水路の入口($x/L=0.69$)地点で波高は著しく増大することがわかる。開口部の中心付近でも波高の増大が認められるが、これは $T=1.4s$ の場合のみ確認されており、水槽固有の特性であると考えられる。波高の増大は、場合によっては波高が入射波高の約4倍にもなり、spilling型砕波が観測される場合もある。そして、開口部における波の収斂による波高の増大等の影響で二次元実験と比較して、spilling型砕波が発生しやすく、それに伴い波高の減衰も発生しやすくなることが考えられる。

5. 結論

本研究では、波・流れ共存場における波高変形や流れ場の変形とその機構を検討した。本研究で得られた結論を以下に要約する。

- (1) 波が流れを遡る場合、両者の相互作用により流れの平均流速は減少する傾向がある。
- (2) 波が流れを遡る場合、流れと波の相互作用により波長が短くなり、波高が増大する。その後波が流れを遡るにしたがって波高は減衰する。
- (3) 数値解析結果より、波と流れの相互作用による平

均流速の減少によって平均水位が上昇することが明らかとなった。

- (4) 三次元実験の場合も二次元実験と同様の結果が確認された。河川に波が進行する場合、河口幅の減少があると波の集中により波高の増大が生じる。

参考文献

- 岩崎敏夫・佐藤道郎：流れを遡る波のエネルギーの減衰について，第17回海岸工学講演会論文集，pp.41-46, 1970.
- 岩崎敏夫・佐藤道郎：流れを遡る波のエネルギーの減衰について (II)，第18回海岸工学講演会論文集，pp.55-59, 1971.
- 梅山元彦・野田有一・三野史朗・井上貴子 (2003)：乱流混合モデルを用いた波・流れ共存場のオイラー平均流速分布解析，海岸工学論文集，第50巻，pp.36-40.
- 沖和哉・酒井哲郎・芦谷淳志 (2003)：波と流れの相互干渉を考慮したBoussinesq方程式による数値解析，海洋開発論文集，第19巻，pp.159-164.
- 小林英樹・田中博道 (2002)：波・流れ共存場の平均流速分布に関する研究，海岸工学論文集，第49巻，pp.21-25.
- 間瀬肇・由比政年・雨森洋司・高山知司 (2004)：波・流れ共存場における砕波および回折効果を考慮した位相平均波浪変形予測モデルの構築，海岸工学論文集，第51巻，pp.6-10.
- 水谷法美・許東秀・前田祐介：港内の波と流れの非線形相互作用の数値解析に関する研究，海岸工学論文集，第49巻，pp.51-55, 2002.
- Mohammad Mohiuddin・富樫宏由・平山康志：傾斜海底地形上における波・流れ相互干渉のモデル構築，海岸工学論文集，第46巻，pp.71-75, 1999.
- Mohammad Mohiuddin・富樫宏由・平山康志：波変形に対する流れの影響のモデル化，海岸工学論文集，第47巻，pp.16-20, 2000.
- Ronald J. L., Steven R. L. and N. E. Huang (1989)：Laboratory Studies of Wave-Current Interaction: Kinematics of the Strong Interaction, *J. of Geophysical Research*, Vol.94, pp.201-214.
- Sakai, S. and H. Saeki (1984)：Effects of Opposing Current on Wave Transformation on Sloping Sea Bed, *Proc. of 19th Int. Conf. on Coastal Eng.*, pp.1219-1232.
- Yoon, S. B. and P. L. -F. Liu (1989)：Interactions of currents and weakly nonlinear water waves in shallow water, *J. Fluid Mech.*, pp.397-419.