

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	極浅水域の円柱列周りの3次元流体解析と波浪実験による精度検証
Title	Three-dimensional hydrodynamic analysis around cylindrical rows in shallow waters and verification of accuracy by wave experiments
著者	関口翔也, 高木泰士
Authors	Sekiguchi Shoya, Takagi Hiroshi
出典	土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 74, No. 2, p. I_551-I_556
Citation	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 74, No. 2, p. I_551-I_556
発行日 / Pub. date	2018, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 (c) 2018 Japan Society of Civil Engineers.

極浅水域の円柱列周りの3次元流体解析と 波浪実験による精度検証

関口 翔也¹・高木 泰士²

¹ 八千代エンジニアリング(株) 事業統括本部 国内事業部 港湾・海洋部
(〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8 CS タワー)

E-mail: sekiguchi.s.ad@gmail.com

² 正会員 東京工業大学大学院准教授 環境・社会理工学院融合理工学系
(〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: takagi@ide.titech.ac.jp

開発途上国では木杭が簡便な消波工として使われる。木杭は波打ち際に設置され、波はほぼ完全な砕波状態で木杭に作用する。このような極浅水域の円筒杭に着目した研究は少なく、消波性能評価や波圧計算に直ちに使用できる算定式はない。したがって、その設計には極浅水域での波浪変形や流体挙動を精度良く再現できる解析モデルが必要となる。本研究では、浅瀬を想定した造波水路実験を行い、解析と実験の結果を比較した。解析モデルには、波浪解析への応用例も増えつつある OpenFOAM を活用した。比較の結果、OpenFOAM による極浅水域の波浪解析は、砕波点の再現性などに課題が残るものの、完全に砕波した後、ボア状の波が到達するような水深条件で特に高い精度を示した。木杭は通常このような場所に設置されるため、OpenFOAM は木杭の詳細な検討にも応用できることがわかった。

Key Words : *developing countries, coastal erosion, wooden piles, cylinder piles, shallow waters, 3D hydrodynamic analysis, OpenFOAM, wave experiment, regular waves*

1. はじめに

筆者らは先の研究で、深刻な海岸侵食により過去10年で最大40 mの海岸線後退が確認されているベトナム・ファンティエット海岸の状況を調査した^{1),2),3),4)}。地方政府による護岸工事がほとんど行われておらず、侵食により次々に家屋が流失している海岸があり、そこでは住民が設置した簡易的な木杭消波工が侵食対策に用いられていた。木杭は汀線付近の非常に浅い場所に設置される場合が多く、年平均レベルの波浪でも完全な砕波状態で木杭に作用するため、その合理的な設計には、極浅水域での流体挙動を精度良く再現できる解析モデルが必要になる¹⁾。杭に関する既往研究は、栈橋や石油プラットフォームなど深水深の構造物を対象にした場合が多い。これに対して、木杭消波工のような極浅水域の円筒杭に数値解析を適用した事例は少なく、設計など実務的な応用のためには解析モデルの精度検証が不可欠である。

本研究では、現地の浅瀬を想定した水路床に円柱列を設置して、造波水路実験を行った。その結果に基づき、極浅水域における波浪変形や円筒杭を通過する波浪の再現に3次元流体解析が有効か検証を行った。

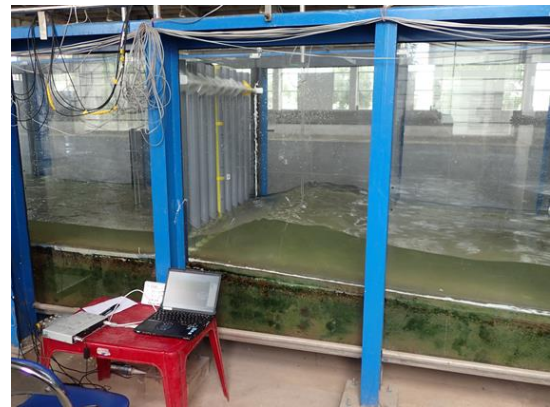


図-1 実験に使用したピストン型造波水路と木杭を模擬した PVC 杭を設置した造波実験

2. 造波水路実験

2017年6月にベトナム・ホーチミン市工科大学と共同で杭模型を設置した造波実験を行った。実験にはベトナムの南部水資源研究所(SIWRR)が所有するピストン型造波水路を使用した(図-1)。水路は全長36 m、幅1.2 mで

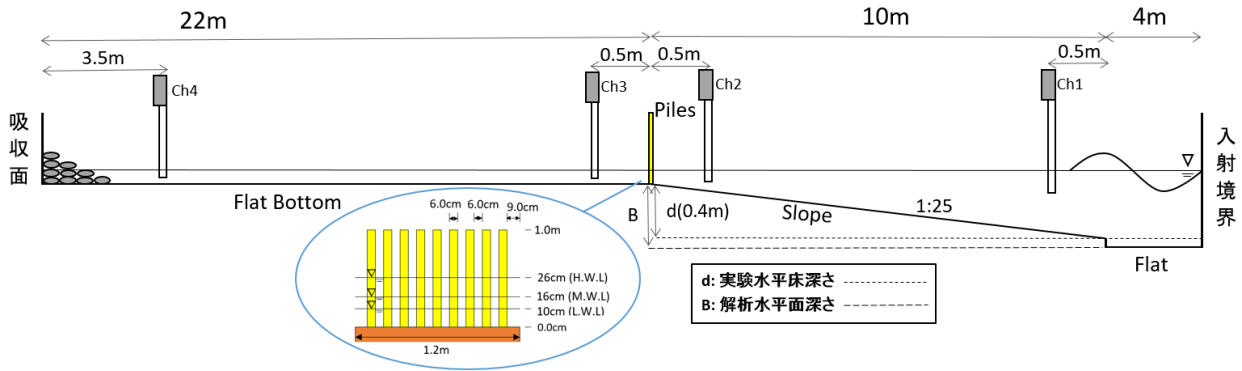


図-2 実験および3次元流体解析における地形（岸沖方向）および杭配列（正面図）

あり、図-2に示すように造波板から14 mの地点に、木杭を模擬した直径6 cmのPVCプラスチック杭を6 cmの隙間を空けて1列に配置した。波高計測のため4つの水位計（容量式波高計）を使用し、傾斜の始点から0.5 m地点(Ch1)、杭の前後0.5 m地点(Ch2, Ch3)、水路終点の手前3.5 m（砕石消波の直前）地点(Ch4)にそれぞれ設置した。目標とする入射波条件は波高10 cm、20 cm、周期2.0 sの規則波とし、初期水位は杭設置地点において10 cm (L.W.L)、16 cm (M.W.L)、26 cm (H.W.L)の3条件とした。通過波を検定するため、杭を設置していない状態でも同様に実験を行い、合計12ケースの実験を行った。

表-1 各ケースにおける目標波高 H_t 、造波境界入力波高 H_i 、および周期 T と水平面の深度 B （解析）、 d （実験）（図-2参照）

ケース	H_t (cm)	T (s)	B (m)	d (m)
H.W.L・Ht=10cm	10.7	2.0	0.4	0.4
H.W.L・Ht=20cm	20.1	2.0	0.55	0.4
M.W.L・Ht=10cm	9.8	2.0	0.4	0.4
M.W.L・Ht=20cm	19.1	2.0	0.47	0.4
L.W.L・Ht=10cm	10.0	2.0	0.45	0.4
L.W.L・Ht=20cm	20.0	2.0	0.45	0.4

3. OpenFOAM を用いた3次元流体解析

数値解析には、近年波浪解析への応用例も増えつつある OpenFOAM を活用した。以下にこのモデルの概要や検討条件について示す。

(1) 解析モデル・条件

本数値解析で用いた解析ソフト OpenFOAM には interFoam というソルバが標準で導入されており、VOF法を用いた非圧縮2相ソルバである。基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = -\nabla(p) + \mu \nabla(\nabla u) + \rho g \quad (2)$$

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (3)$$

ここで、 u : 流速ベクトル、 p : 圧力、 μ : 流体の粘性係数、 g : 重力加速度ベクトルであり、 ρ_1, ρ_2 は水と空気の密度、 α は水の体積分率 ($0 < \alpha < 1$) である。本数値解析では造波境界での反射波吸収機能を用いるため、interFoamを

もとに、IHcantabria⁵⁾が波浪場解析に拡張したIHFoamソルバを使用した。乱流モデルには杭周囲での複雑な流体現象を評価するためLES-Smagorinsky SGSモデルを設定した。本モデルを東京工業大学所有のスーパーコンピュータTSUBAME3.0（汎用CPUとGPU型アクセラレータにより単精度24.3 PFLOPS）に移植し、並列解析により解析時間の大幅短縮を図った。並列数112で、時間ステップはクーラン数0.5を下回るように時々刻々変化させ、効率化を図ったが、計算格子数が約729万に達したため、55秒間の解析でも実計算時間で約4時間を要した。

図-2に示すよう解析での地形は実験床の傾斜の始点（造波板から4 m地点）から水路終点（造波板から36 m地点）まで実験と同一の条件となるようCADを用いて正確に作成した。但し、実験では水路の終端に吸収帯となる砕石を設置したが、解析では代わりに反射波吸収境界を設定した。また、実験でのピストン式造波の代替として解析では固定境界より正弦波を入射させた。実験と解析で同一の入射波とするため波高計Ch1（傾斜開始より50cm地点）で両者がほぼ同じ波となるよう入射境界上の入力波 H_i と水平床の深度 B （図-2）を試行錯誤の上調節し、表-1の入射波条件を得た。計算格子サイズは計算量の削減のため地形モデル全体を最大24 cmと粗く設定し、詳細な再現が必要な杭周辺や水面、水中、底面付近の格子サイズを細かく設定した。特に杭周辺の計算格子を細かく設定し、最も精緻な箇所1.5 cmに設定した（図-3）。

(2) 実験と解析の波高比較 (杭無し条件)

図-4にH.W.L. 目標波高 (以下, H_t) 10 cmの杭無しケースでのCh1の波高比較を示す. Ch1地点では碎波は発生しておらず, 実験と解析は非常によく一致している. な

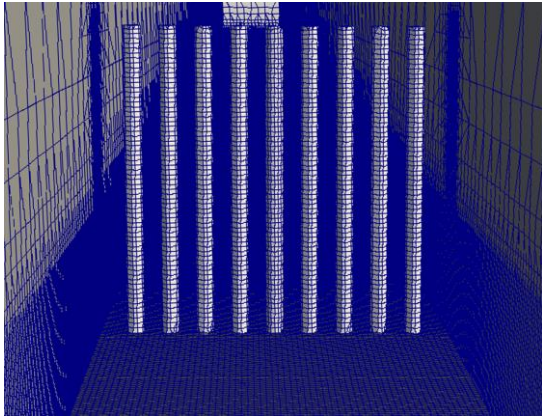


図-3 杭周辺の計算格子 (入射境界側から見た図)

お, 一部の実験ケースで微小な (1 cm以下) 水面のゆらぎが発生しているケースが見られた. これは実験前に30分ほどの静水待ちを行ったが, ごくわずかな長周期の波が残っていたためと考えられる.

杭設置位置近傍での解析精度を検証するため, 杭前後50 cmに配置したCh2, Ch3で測定した水位変化からゼロアップクロス法で1波を定義し, 実験と解析の波高を個々の波ごとに比較した. ここで, 造波開始後の立ち上がり部分のデータを取り除き, 造波板からの再反射の影響を受けていない波を抽出した. 抽出された波の数は, ケースにより異なり最小で14波, 最大で21波であった. さらに, t 分布表から各ケースのサンプル数の5%基準値 (両側検定) を読み取り, 実験値の平均値および95%信頼区間を算出した. 図-5および図-6に杭無しケースでのCh2, Ch3の波形を示し, 表-2に観測された平均波高および実験値の95%信頼区間に収まった解析値の波数を示す. 但し, Ch3ではH.W.L. $\cdot H_t = 20$ cmの実験データに欠落があったため除外した. また, 図-7に杭無しケースの

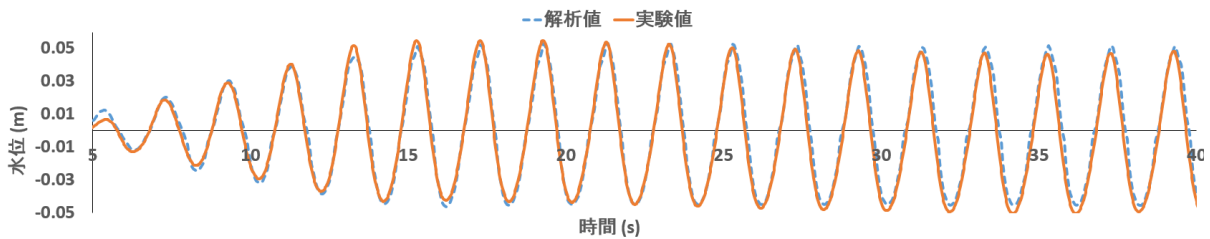


図-4 Ch1 (造波板前面約 4.5 m) の水位比較 (H.W.L. $\cdot H_t = 10$ cm, 杭無し)

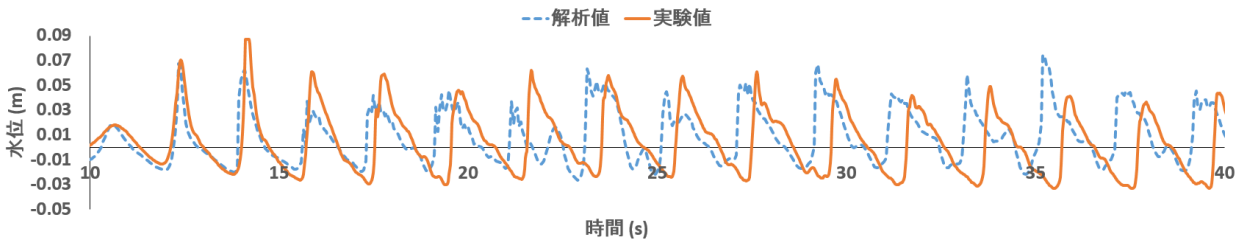


図-5 Ch2 (杭前面沖側 50 cm) の水位比較 (L.W.L. $\cdot H_t = 20$ cm, 杭無し)

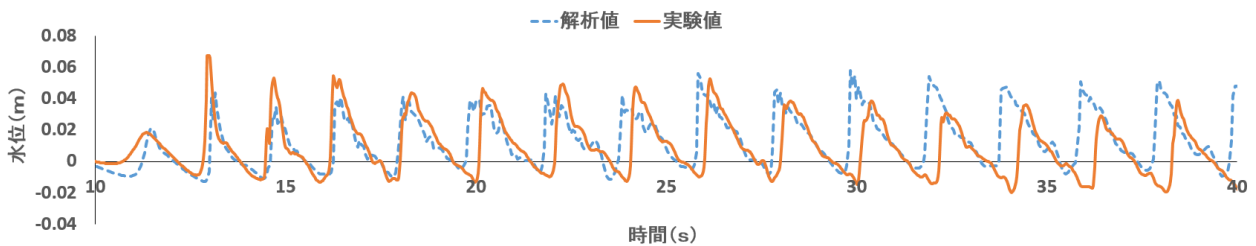


図-6 Ch3 (杭背面岸側 50 cm) の水位比較 (L.W.L. $\cdot H_t = 20$ cm, 杭無し)

表-2 各ケースの杭前後 (Ch2, Ch3) で観測された平均波高および実験値の95%信頼区間に収まった解析上の波数 (但し, H.W.L・Ht=20cmは実験データ不良のため除外)

杭無し(Ch2)	観測波数	解析平均波高 (m)	実験平均波高 (m)	波高差(解析 - 実験)	信頼区間に収まった波数
H.W.L・Ht=10cm	14	0.1159	0.1134	0.0026 (2.3%)	12 (86%)
H.W.L・Ht=20cm	16	0.2084	0.2388	-0.0304 (-13%)	7 (44%)
M.W.L・Ht=10cm	17	0.1315	0.1303	0.0012 (0.9%)	17 (100%)
M.W.L・Ht=20cm	21	0.0829	0.1030	-0.0201 (-20%)	16 (76%)
L.W.L・Ht=10cm	16	0.0684	0.1228	-0.0543 (-44%)	0 (0%)
L.W.L・Ht=20cm	17	0.0699	0.0762	-0.0063 (-8.3%)	14 (82%)
杭無し(Ch3)	観測波数	解析平均波高 (m)	実験平均波高 (m)	波高差(解析 - 実験)	信頼区間に収まった波数
H.W.L・Ht=10cm	14	0.1256	0.1249	0.0007 (0.5%)	14 (100%)
H.W.L・Ht=20cm	—	—	—	—	—
M.W.L・Ht=10cm	17	0.1053	0.1300	-0.0246 (-19%)	0 (0%)
M.W.L・Ht=20cm	21	0.0653	0.0771	-0.0117 (-15%)	12 (57%)
L.W.L・Ht=10cm	16	0.0338	0.0575	-0.0237 (-41%)	1 (6%)
L.W.L・Ht=20cm	17	0.0545	0.0531	0.0014 (2.7%)	17 (100%)
杭有り(Ch3)	観測波数	解析平均波高 (m)	実験平均波高 (m)	波高差(解析 - 実験)	信頼区間に収まった波数
H.W.L・Ht=10cm	15	0.1136	0.1250	-0.0114 (9.1%)	0 (0%)
L.W.L・Ht=20cm	15	0.0541	0.0537	0.0004 (0.6%)	15 (100%)

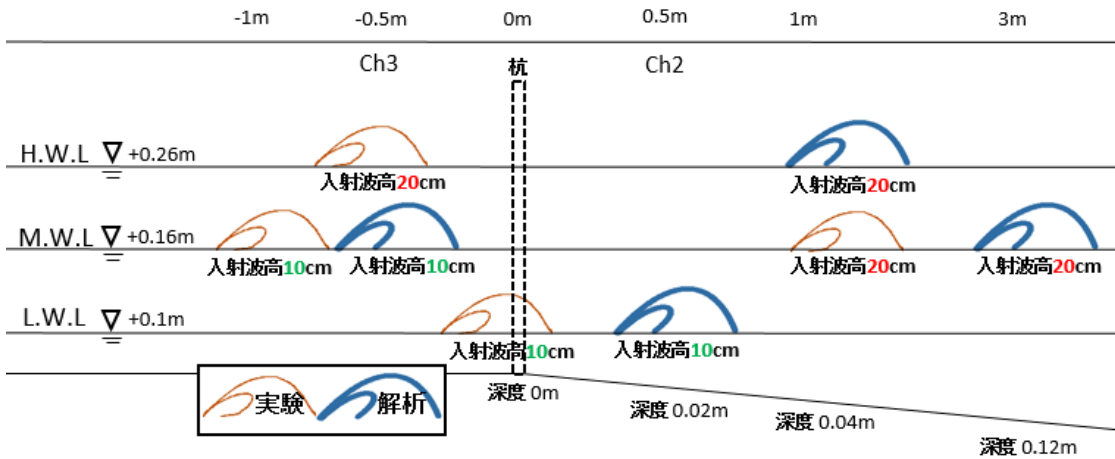


図-7 杭無しケースにおける実験・解析の各碎波点 (判別範囲: 杭近傍 -1 m ~ 3 m)

実験および解析のおおよその碎波点を示す。動画より目視で判断したため数十センチ程度の誤差がありえる。L.W.L・Ht = 20 cmのケースは図領域外の斜面途中で碎波しており, H.W.L・Ht = 10 cmのケースは領域を通過後に碎波し, 動画に収まっていなかったため記載していない。

H.W.L・Ht = 10 cm, L.W.L・Ht = 20 cmの2ケースは, Ch2, Ch3共に解析値が実験値の95%信頼区間内におおむね収まっており, 良好な再現性が確認できる(表-2)。この2ケースは碎波地点がCh2およびCh3から離れているケースであり, これらの波高計の場所で非碎波あるいは完全碎波の状態では波が伝播している。関口・高木¹⁾が実施した解析では, 現地においても完全碎波の状態では波が木杭に作用することを確認しているが, 本解析では L.W.L・Ht = 20 cmのケースがこの条件に一番近い。

その他の解析4ケースでは, 杭無し条件での比較で, 波高が最大44%程度過小評価されている。これらのケー

スでは実験と解析の間で, 碎波点にわずかな違いが生じており(図-7), 碎波の発生有無の違いが波高の差として顕著に現れたと考えられる。また, 碎波がCh3近傍で発生しているM.W.L・Ht = 10 cmのケースは, Ch2での解析値と実験値が良好に一致しているが, Ch3に関しては, 多くの解析値が実験値の95%信頼区間に収まっていない(表-2)。このように, 碎波地点が観測点に近いと解析精度が低下する傾向がある。また, これら4ケースすべてで解析値が実験値に比べて過小となっており, 解析では実験と比べて碎波しやすく, 碎波地点が入射境界側に寄っていることがわかる。

(3) 実験と解析の波高比較 (杭有り条件)

前節の杭無し条件で特に再現性が高いことが確認された2条件 (H.W.L・Ht = 10 cm, L.W.L・Ht = 20 cm) に関して, 杭有り条件でも解析を行い, 実験値と解析値を

比較した。図-8に杭背後(Ch3)の波高比較を示す。杭有りL.W.L・ $H_t = 20\text{cm}$ のケースではすべての解析値が実験値の95%信頼区間に収まっており(表-2)、杭を通過する波浪に対しても高い解析精度であることがわかる。これに対して、H.W.L・ $H_t = 10\text{cm}$ のケースは95%信頼区間には収まっていない。しかし、図-8に示すように解析値と実験値の誤差は20%程度で、かつ誤差が一对一の軸回りにばらついており、解析の信頼性は比較的高いといえる。

通常木杭消波工は人力で波打ち際の極浅水深に設置され¹⁾、常時波浪のレベルでも、ほぼ完全に砕波した状態で波浪が作用する。したがって、L.W.Lの水位条件に対する推定精度が特に高い本解析モデルは木杭消波工の設計に有用と考えられる。

なお、L.W.L・ $H_t = 20\text{cm}$ のケースではCh2およびCh3の解析が実験と比べて1cm程度上昇した(図-5, 図-6, 図-9)。この要因としては、解析において反射波吸収境界で波が完全に吸収されなかったことや、浅水変形が過大評価されたこと、杭周囲で水塊の滞留が発生したことなどが考えられるが原因の特定はできていない。

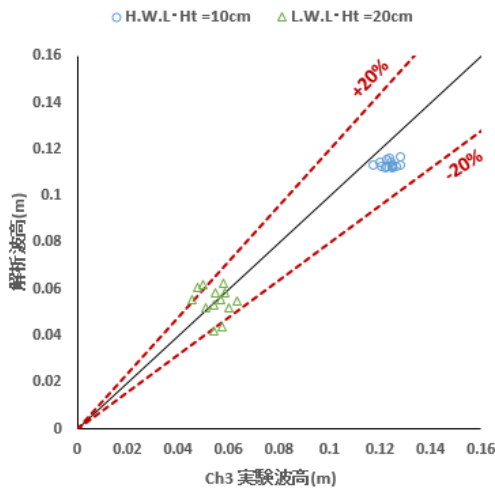


図-8 Ch3 (杭背面岸側50cm)での波高比較(杭有り)

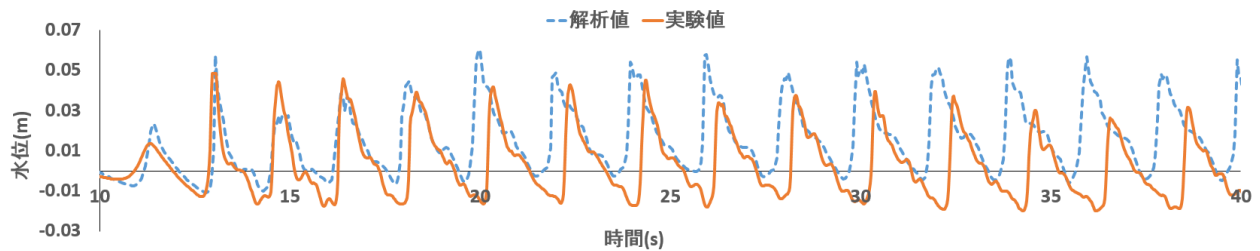


図-9 Ch3 (杭背面岸側50cm)の水位比較(L.W.L・ $H_t = 20\text{cm}$, 杭有り)

(4) 通過波に対する杭の効果

L.W.L・ $H_t = 20\text{cm}$ の杭背後Ch3の平均波高は、実験・解析ともに杭の有無に伴う波高変化は1mm以下である(表-2)。したがって、今回の配置パターンでは透過率が100%に近く、杭の波高減衰効果はほとんどないといえる。

図-10に杭周辺の断面流速ベクトルを杭有り・無しで比較した一例を示す。上段が波浪到達前(29.3秒)、下段が杭位置通過中(29.9秒)のスナップショットであり、各々上図が杭有り、下図が杭無しのケースである。波浪到達前は杭有り無しに関わらず、流速ベクトルがおおむね水平方向である。これに対して、波浪通過中では杭有りのケースで顕著な鉛直流速成分が現れて、杭背後では強い蛇行現象が見られる。これは杭の前面と背面での水位差に伴い、鉛直下向きの流速ベクトルが発生するためと考えられる。このような現象は木杭無しのケースでは発生しておらず、杭の設置が波の流速ベクトルに影響を及ぼ

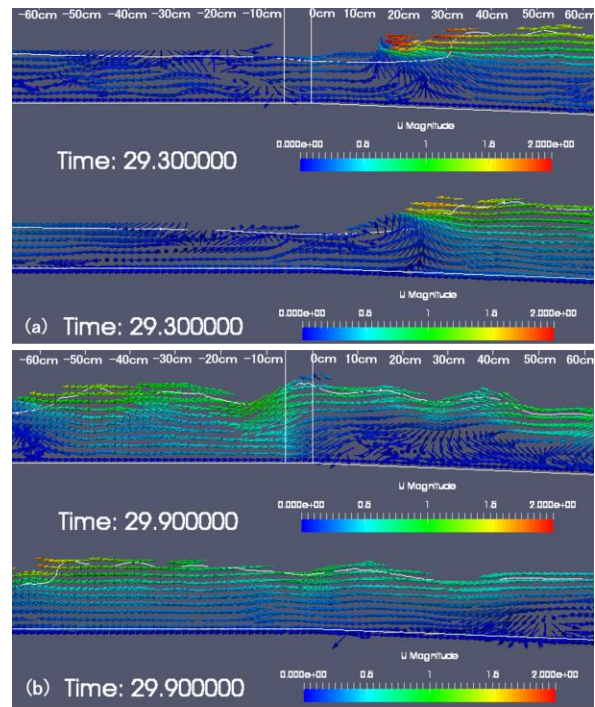


図-10 L.W.L・ $H_t = 20\text{cm}$ での流速ベクトルの変化(a)29.3秒, (b)29.9秒(上部:杭有り, 下部:杭無し)(右方向より波浪が伝播)

したと考えられる。

筆者らの先の研究¹⁾では、ベトナム・ファンティエツト海岸のケーススタディで木杭消波工によって波浪の遡上が若干軽減することを示したが、この蛇行現象がその一因になっている可能性がある。したがって、通過波に対する杭の効果を検討する際には、波高は減衰しない場合でも、流速や流向の変化を通じて効果を発揮する可能性があるため、今後の研究では留意する必要がある。

4. 結論

本研究では、浅瀬を想定した水路床に円柱列を設置して、造波水路実験を行い、OpenFOAMによる解析と実験の結果を比較した。OpenFOAMによる波浪解析は、完全に砕波した後、ボア状の波が到達するような極浅水域で、解析値が実験値の95%信頼区間に収まり、十分な解析精度を示すことがわかった。通常木杭消波工は、このような波打ち際の極浅水域に設置されるため、OpenFOAMによる3次元流体解析は木杭消波工の設計にも有用といえる。その一方で、砕波の発生が実験よりも早めに現れる傾向や、杭周囲での過大な水位上昇、砕波点付近での波高の過小評価など課題も残っている。また、杭の効果を検討する際には、杭前後の波高変化だけでなく、流速・

流向変化にも留意する必要があることを示した。

謝辞：住友財団環境研究助成(No.163017)および科学研究費助成事業国際共同研究加速基金(16KK0121)の支援の下実施した。また、実験は Nguyen Danh Thao 博士, Nguyen Kiet 氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 関口翔也, 高木泰士, 不規則波を考慮した3次元流体解析の木杭消波工設計への応用, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 73, No. 2, pp.48-53, 2017.
- 2) 高木泰士, Nguyen Danh Thao, Miguel Esteban, Tran Thu Tam, Hanne Louise Knaepen, 三上貴仁: ベトナム南部の沿岸域における災害脆弱性の検証, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 4, pp.888-893, 2012.
- 3) Takagi H., Esteban M., Tam T. T.: Coastal Vulnerabilities in a Fast-Growing Vietnamese City, Coastal Disasters and Climate Change in Vietnam, Elsevier, pp.157-171, 2014.
- 4) 高木泰士, グェン ダン タオ, レバン コング: 高い経済成長の渦中にあるベトナムの沿岸域開発の現状, 沿岸域学会誌, Vol.21, No.4, pp.113-122, 2008.
- 5) Higuera P., Lara J. L., Losada I. J.: Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM to breaking of random waves, Coastal Engineering, 83, pp. 57-72, 2014.

(2018.2.8 受付)

THREE-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC ANALYSIS AROUND CYLINDRICAL ROWS IN SHALLOW WATERS AND VERIFICATION OF ACCURACY BY WAVE EXPERIMENTS

Shoya SEKIGUCHI and Hiroshi TAKAGI

In developing countries, wood piles are often used as a simple breakwater solution. In the previous study, the authors investigated the situation on the Phan Thiet coast in Vietnam, where wood piles were installed by local people to stop severe coastal erosion. On this beach the waves are mainly reaching the installed wood piles in a completely broken state. In order to create scientifically proven design for wood piles defense, an analytical model, which accurately reproduces fluid behavior in shallow waters, is needed. However, few studies focus on cylindrical piles in shallow waters, but it is essential to verify the accuracy of those analytical models with the aim of future sound implementation by local communities. In this study, a wave-flume experiment was conducted with the cylindrical piles installed at a shallow-depth floor, assuming simplified beach profile. OpenFOAM, which draws attention as a tool of wave analysis in recent years, was applied in this study. The results of analysis and experiment were compared to investigate the reliability of the model. It was found that the wave analysis by OpenFOAM shows sufficient accuracy particularly in very shallow-depth conditions in which most of waves are forced to break, and consequently bore-like waves impact the piles.