T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	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
Title	THREE-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC ANALYSIS FOR THE DESIGN OF WOOD PILE BREAKWATERS UNDER IRREGULAR WAVES
著者	関口 翔也, 高木 泰士
Authors	Shoya SEKIGUCHI, Hiroshi TAKAGI
出典	土木学会論文集B3（海洋開発）, Vol. 73, No. 2, p. I 48-I 53
Citation	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 73, No. 2, p. I 48-I 53
発行日 / Pub. date	2017,
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) 2017 Japan Society of Civil Engineers.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

土木学会論文集B3（海洋開発）, Vol. 73, No. 2, I_48-I_53, 2017.

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

関口　翔也[1]・高木　泰士[2]

[1] 東京工業大学大学院修士課程　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: sekiguchi.s.ad@m.titech.ac.jp
[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

開発途上国では様々な環境問題が発現しているが，海岸侵食は最も深刻な問題の一つである．途上国においては木杭のようなローカル材料を利用した低コストの侵食対策が必要とされるが，科学的には有効性が十分に検証されておらず，最適な設計法も確立されていない．本研究では，現在急激な海岸侵食が起きているベトナム・ファンティエット海岸を対象として不規則波条件での高解像度波浪解析を行い，木杭の性能評価や力学設計に 3 次元流体解析が有用であるか確認した．スーパーコンピュータを用いた 3 次元流体解析により木杭列を詳細に再現し，消波性能や耐力を遡上軽減量や曲げ応力で簡易的に評価した．また，不規則波を 3 次元解析で考慮することで，規則波では十分に現れない杭背後の複雑な波の重畳や水位の増幅，水塊の滞留を評価できることを確認した．

Key Words : *developing countries, coastal erosion, wooden piles, 3D hydrodynamic analysis, SWAN, OpenFOAM, irregular waves*

1.　はじめに

急激な沿岸域開発や人口増加のため，開発途上国の海岸では様々な環境問題が発現している．その中でも，海岸侵食は最も深刻な問題の一つである．例えば，ベトナム南部のファンティエットでは過去10年で最大40 mの海岸線後退が確認されている[1]．また，メコンデルタのソクチャン県では，海岸線の急速な後退の影響によりマングローブが年々消失しており，背後の住居や農地が危険にさらされている[2]．自然海岸は台風や津波，高潮などの災害ハザードに対して効果的な緩衝帯になるため，侵食により海岸線が後退した地域では災害に対する脆弱性が増大する恐れがある[3]．

ファンティエットでは地方政府による護岸工事が十分に行われていない海岸があり，住民自らが木杭や土嚢，シートにより緊急的・簡易的な対策を施している[4]（**図-1**）．また，ソクチャン県では土堰堤前面に土砂を堆積させるため，地域住民が中心となり竹と藁を束ねた消波フェンスを設置している．途上国においては，このようにローカル材料を利用した低コストの海岸保全対策が実践されているが，科学的にはその有効性や効果は十分に検証されておらず，最適な設計法も確立されていない．

図-1　ファンティエットの海岸侵食状況と人がまだ住む被害住家（筆者撮影）

本研究では，将来的に木杭消波工の性能評価や力学設計に繋げるため, 3次元流体解析の活用を試みるとともに, その有用性を確認する．このため，ファンティエットの波浪・地形条件を対象として，不規則波浪条件下での木杭周囲の高解像度波浪解析を行った．

2.　平面 2 次元波浪解析

後述する木杭列を含む 3 次元流体解析の境界および初

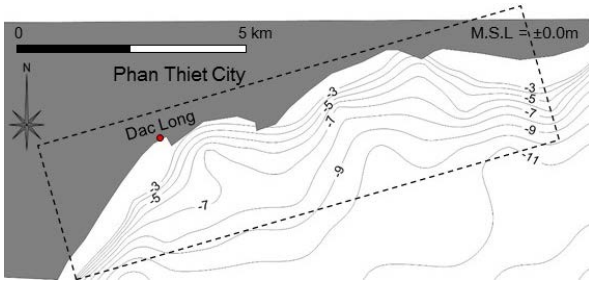

図-2　ファンティエット湾と深浅図（破線内が SWAN の解析範囲）

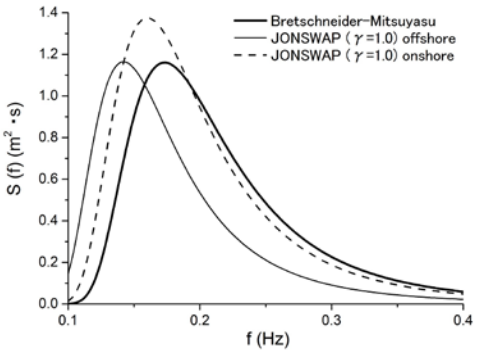

図-3　2 次元と 3 次元解析で用いたスペクトルの比較

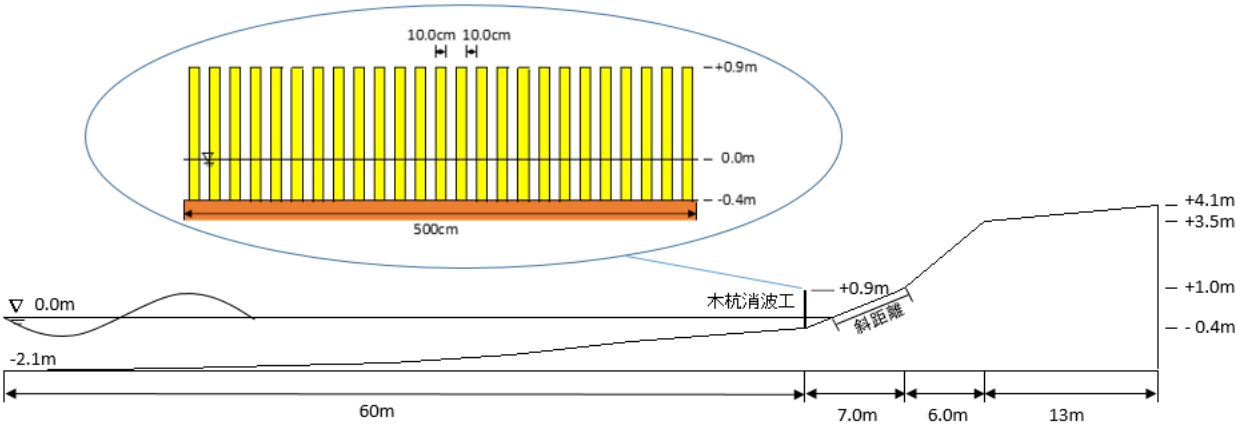

図-4　3 次元流体解析における地形（岸沖方向）および杭配列（正面図）

期条件を与えるため，最初にファンティエット沖広域の 2 次元波浪解析を行った．解析モデルは第 3 世代波浪推算モデル SWAN を使用し，計算領域は沿岸方向 12 km，岸沖 3.6 km とした（**図-2**）．地形データはファンティエット沿岸部の深浅測量結果 [2]をもとに作成し，計算格子は沿岸方向，岸沖方向ともに 10 m 間隔とした．ファンティエット沖の波浪境界条件は Windguru [5] が公開している 2011 年の波浪推算データ(NOAA wave watch III)に基づき，年平均波 $H_{1/3}$=1.32 m, $T_{1/3}$=6.25 s を設定した．次節で述べる 3 次元流体解析の造波境界ではブレットシュナイダー・光易型スペクトルを仮定したが，SWAN では設定できないため，代替として JONSWAP 型スペクトルを選択し，ピーク増幅係数 γ を 1.0 と最も小さく設定し，BM 型のスペクトル形状に近づけた．**図-3** は両スペクトルを比較している．3 次元流体解析の沖側境界となる汀線から沖合 62 m の地点では，年平均 $H_{1/3}$=1.50 m, $T_{1/3}$=5.54 s と計算された．砕波によるエネルギー減衰として Battjes-Janssen のエネルギー輸送方程式モデル [6]を設定したが，ファンティエット沖での波浪と比較すると顕著な砕波が起きていないことが確認できる．すなわち，この地点では**図-3** が示すように沖波に比べてピーク周期が若干高周波数側に移動するとともに，浅水変形により 10 %ほど波高が増加している．なお，この海域では年最大波高は 3 m 程度であるが，後述するように遠浅な海岸のため，岸に到達前に大部分が砕波する．したがって，年最大波でも木杭位置では年平均波と同程度の波浪となるため，本研究では年平均波のみを対象とした．しかし，急勾配の海岸では大きな差異が生じると考えられるため，平均波に加えて，最大波に対する検討も必要となる．

3.　木杭周囲の 3 次元流体解析

(1)　解析モデル・条件

3 次元流体解析にはオープンソース数値解析モデル OpenFOAM を用い，ソルバには VOF 法を用いた標準の 2 相流ソルバである interFoam に代えて IHCantabria [7]によって波浪場解析に拡張された IHFoam を利用した．本モデルを東京工業大学のスーパーコンピュータ TSUBAME2.5（汎用 CPU と GPU 型アクセラレータにより単精度 17 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．乱流モデルには木杭周囲での複雑な流体現象を評価するため LES-Smagorinsky サブグリッドスケールモデルを用いた．時間ステップはクーラン

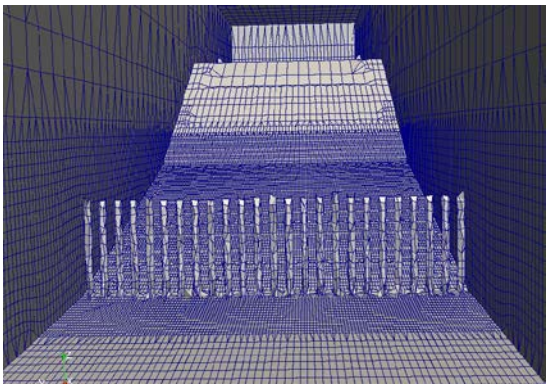

図-5　木杭周辺の計算格子（奥側が浜崖部）

数 1.0 を下回るように時々刻々変化させる等，可能な限り効率化を図ったが，計算格子数が約 184 万に達し，並列数 96 でも実計算時間で約 20 日間を要した．

図-4 に 3 次元流体解析の地形モデルを示す．木杭設置地点（**図-2** の Dac Long Village）前面の海底勾配が遠浅のため，造波水深を十分深くとるためには，計算領域を沖方向へさらに 1-2 km 程度延長する必要がある．しかし，計算量の限界のため，今回は岸沖 86 m，高さ 6.2 m，奥行き 5 m の範囲に限定して検討を行った．この計算領域において現地を参考に，沖側境界から 60 m 地点の汀線付近に木杭消波工を設置した．木杭は直径 10.0 cm，突出長

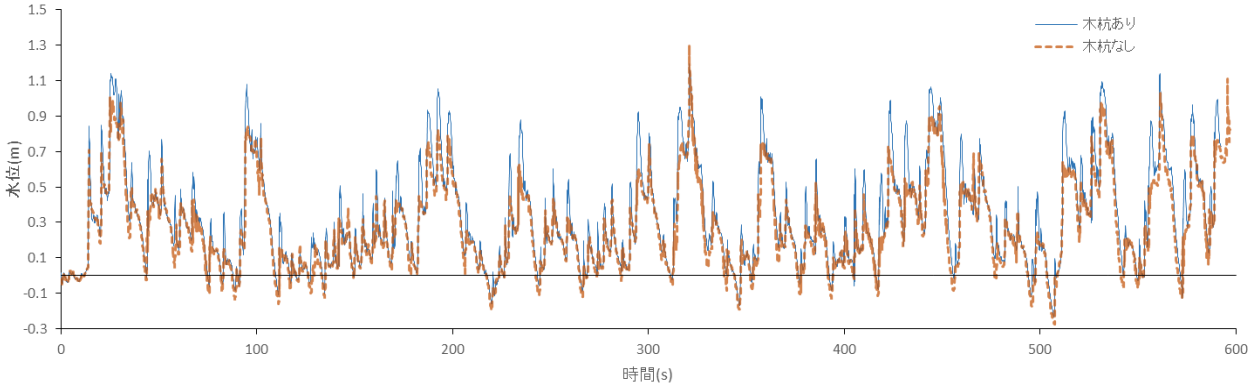

図-6　木杭隙間における水位変化

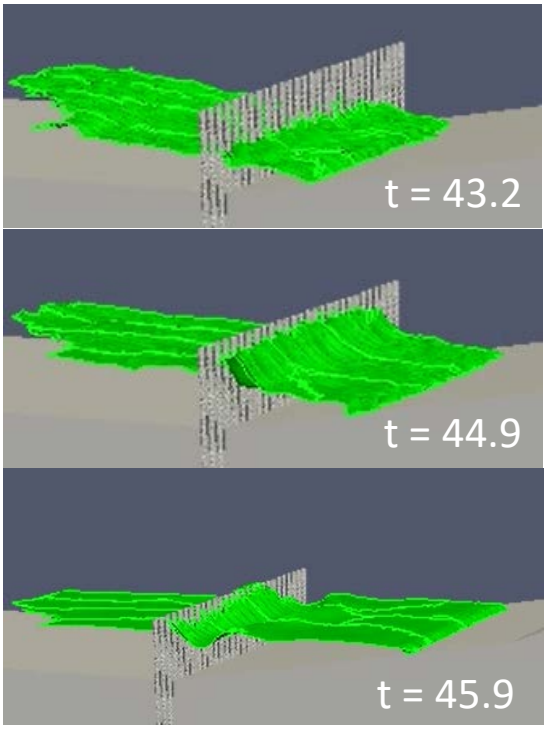

図-7　木杭周辺における水位の増幅（盛り上がり）（上：入射波先端通過時，中：入射波ピーク通過時，下：最大遡上時）

1.3m の円筒を幅 10.0 cm の透過部を設けて海岸線に平行して 1 列に設置した．**図-5** に木杭周辺の計算格子を示す．木杭周辺の計算格子を特に細かく設定し，この部分での格子サイズは最も精緻な箇所で 3.6 cm に設定した．したがって，円筒杭の近似精度は±1.8 cm 程度である．入射波は BM 型スペクトルを仮定して，2 次元波浪解析の結果より水位と流速の時系列データを作成し，水深 2.1 m の沖側境界から入射させた．597 秒間の計算を行い，入射境界において計 126 の波を入射させた．したがって 20 分間には満たないが，波浪統計で必要とされる 100 波程度の条件[8]は満足する．なお，木杭消波工の効果を比較検討するため，木杭を設置しないケースについても同様に解析を行った．

(2)　解析結果

図-6 は木杭の隙間における水位変動を示している．木杭の有無に関わらず，どちらのケースについても時間的な水位変化が大きい．320 秒付近のように前後に比べて極端に大きな水位が発生する原因は，様々な周期・位相をもつ不規則波の入反射，杭が戻り流れをせき止めることで起こる水塊の滞留，長周期変動など複雑な水位変化が重畳することで発生すると考えられる．特に 1 つ前の波が大きく砕波し，前浜に水塊が滞留しているうちに次

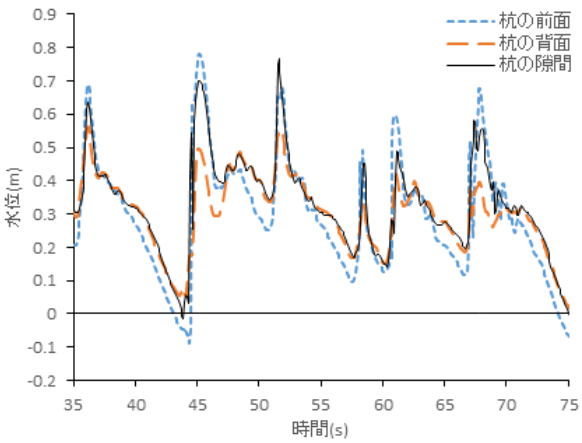

図-8　木杭の前面，背面，隙間における水位変化（35 秒から 75 秒まで）

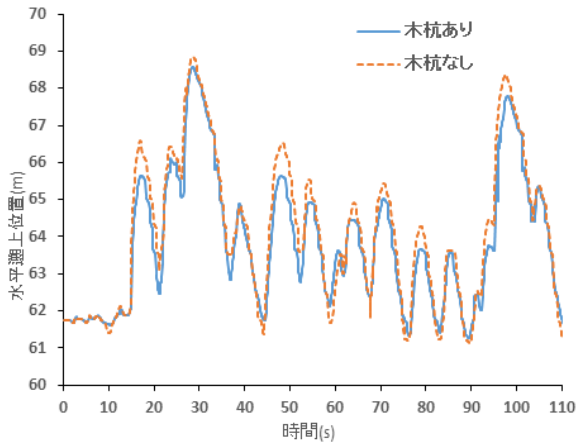

図-9　水平遡上距離（110 秒まで）

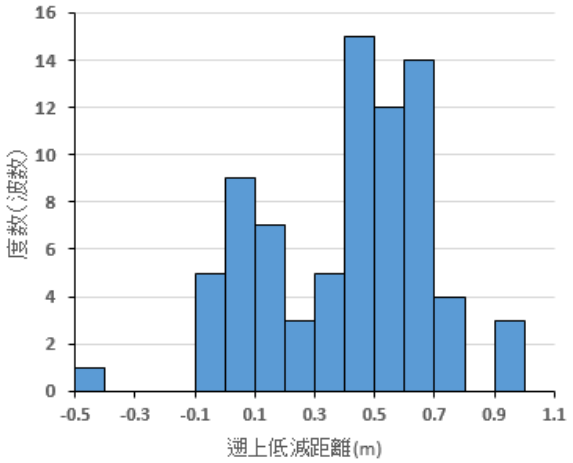

図-10　木杭による水平遡上距離の軽減値

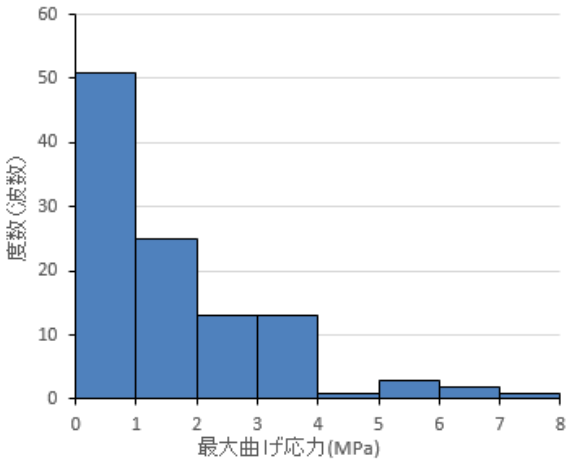

図-11　年平均波浪下での岸方向最大曲げ応力

の大波が重なる場合にこのような水位増加が確認された．

また，杭を設置したケースでは設置していないケースに比べると隙間の水位が顕著に増加した．これは木杭モデルが円筒に近いため，波が反射しにくく，水流が隙間に集中しやすい形状になっており，このため水位の増幅（盛り上がり）が発生することも関係すると考える（**図-7**）．

図-8 に杭の前面・背面・隙間における水位変化の比較を示す．波の到達時（押し波時）では杭前面に比べて背面で水位が低くなっており，杭が波の透過率を効果的に引き下げていることがわかる．一方，引き波時は杭背面の水位が前面水位と同程度か，若干高くなっていることから，杭によって戻り流れがせき止められ水塊が滞留していると考えられる．また，杭隙間では前背面のおおよそ中間程度の水位になっている．

図-9 は木杭消波工の設置有・設置無における計算開始後 110 秒までの遡上距離の水平成分（水平遡上距離）の時系列の比較を示している．消波工ありのケースの遡上位置の最大点が消波工なしのケースに比べ低い値となっており，木杭消波工によって遡上距離が軽減されていることが読み取れる．

図-10 は木杭消波工を設置することによる遡上距離の軽減値を示すヒストグラムである．入射波 126 波に対して遡上が明瞭に確認できた波の数は 75 波であり，平均で 0.4 m，最大で 0.9 m ほどの遡上軽減効果が確認された．これは勾配方向の斜距離に直すと各々0.41 m, 0.92 m 程度の軽減となる．**図-1** のように砂浜が住家の軒下まで迫っている状況では，わずかながらでも海岸侵食の進行を遅らせる効果が期待できる．

図-11 および**図-12** は，最も中央に配置した木杭に作用する曲げ応力の時系列グラフとその最大値のヒストグラムである．海側・陸側の応力差分より求め，岸方向の曲げ

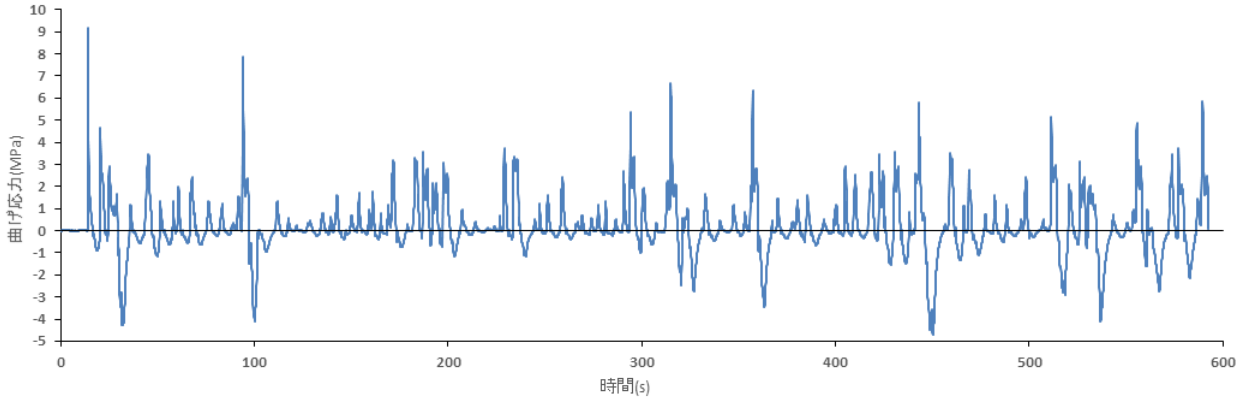

図-12　木杭に作用する曲げ応力（岸方向を正とする）

を正とした．時系列グラフにおいて 9 MPa ほどの大きな曲げ応力が最初に計算されている．これは解析直後の第一波によるもので，この時点では斜面からの反射波等の影響がなく，砕波が杭近傍で発生し，大きな応力が発生したと考えられる．続く波を観察したところ，この第一波が特異であったため，**図-11** の最大曲げ応力のヒストグラムには含めていない．

木杭にて曲げ応力が判別できた波は合計 109 波であり，平均で岸方向に 1.57 MPa，沖方向に 0.57 MPa ほどの値であった．しかし曲げ応力の波ごとの変動は大きく，平均と比べて 5 倍以上(7.88 MPa)となる極端に大きな波が観測された（図-12 の 100 秒付近）．また，全般的に岸方向の曲げ応力が沖方向よりも大きくなったことから，引き波時に発生する杭背後での水塊滞留による沖方向の曲げに比べて，入射波による岸方向の曲げが支配的であると考えられる．したがって，繊維や節の関係で強軸，弱軸を持つ材料では，入射波に対してより耐力が発揮できる方向に設置するのが望ましい．

4.　木杭設計への応用と課題

このように不規則波を考慮した 3 次元流体解析を行うことにより，規則波条件や断面 2 次元解析では再現できない木杭の隙間内外の複雑な水位変化を評価でき，これにより木杭の曲げ破壊などの詳しい照査が可能になると期待する．例えばベトナムで一般に入手可能な木材は，松，アカシア，ユーカリ，竹などである．これらの樹木の曲げ強さを破壊試験から推定することにより，現地で入手可能な木材が消波工に適したものであるか判定できる．例えば，直径 10 cm の木杭の曲げ強さは 49~78 MPa[9), 10), 11)]程度と考えられる．今回の試解析では，最大の曲げ応力は 8 MPa であったため，これらの木材は今回の波浪条件に対しては少なくとも十分な耐力を有すると判断できる．しかし，さらに具体的な設計に結びつけるためには，数値解析の多方面からの検証が不可欠であり，このためには，造波水路での再現実験や現地実証試験を行なう必要がある．その他，数値解析上，特に重要と考える検討課題を以下に示す．

1)　広領域～狭領域の正確な接続：本研究ではスペクトル法に基づく SWAN と時間積分法の OpenFOAM を接続したため，**図-3** のスペクトルの比較でわかるように，両者の波浪条件は接続境界で必ずしも一致していない．正確な接続を行うため，広領域の解析には SWAN に代えてブシネスクモデル等を使用することが考えられる．

2)　3 次元解析領域の非砕波水深への延伸：高波浪では砕波や非線形性が強く現れるため，造波水深を十分に深くとる必要がある．しかし，遠浅な地形ではかなり沖合まで砕波帯が広がるため，解析負荷の増大が避けられない．このため非線形性の弱い領域で粗い格子を採用したり，並列数を増やしたりすることで，沖側境界を可能な限り延伸する必要がある．これでも不十分な場合は，木杭周辺での流体運動に影響を及ぼさない範囲で，沖側の地形モデルを作為的に増深化するなど工夫が必要となる．

3)　設計指標の拡充：本研究では遡上距離と曲げ応力の 2 指標のみを検討したが，その他，杭の引き抜きや洗掘，耐久性，耐塩性などの評価が必要となる．

4)　異常時の検証：高波浪時にはセットアップ，また台風時には高潮により平均水位が上昇し，常時の状態で設定した木杭を大きく乗り越える可能性があるため，このような異常時の検証も必要となる．ただし，このような状況に木杭で対応するのは自ずと限界があるため，どのような状況で杭が破壊され，機能を失うか，その限界値を確認する必要がある．

5.　結論

開発途上国においては，木杭のようなローカル材料を利用した低コストの海岸侵食対策が実践されているが，

科学的にはその有効性は十分に検証されていない．本研究では，スーパーコンピュータを用いた 3 次元流体解析により，ベトナム・ファンティエットの海岸に設置されている木杭工の消波性能や耐力を遡上軽減量と曲げ応力の 2 指標で評価した．また，不規則・3 次元性を考慮することで，木杭周囲で波の重なりや水位の増幅，水塊の滞留，杭間への水流集中など複雑な流体メカニズムが現れ, 杭の安定性や消波性能にも影響することを確認した．今後，造波水路実験や現地実証試験を通じて，モデルの妥当性が検証されれば，杭列数や杭径，間隔，突出長などをより現実に近い条件に変えて，3 次元流体解析を木杭消波工の最適設計に応用できると考える．

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(No. 16KK0121)の支援の下実施した．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1) 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.
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) Schmitt K., Albers T.: Area Coastal Protection and the Use of Bamboo Breakwaters in the Mekong Delta, Coastal Disasters and Climate Change in Vietnam, pp.107-132, Elsevier, 2014.
4) 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.
5) Windguru, http://old.windguru.cz/int/index.php.
6) Battjes, J., Janssen J.: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings 16th International Conference Coastal Engineering, ASCE, pp.569-587, 1978
7) Higuera P., Lara J. L., Losada I. J.: Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM to breaking of random waves, ProceediCoastal Engineering, 83, pp. 57-72, 2014.
8) 合田良実: 増補改訂港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，333p., 1990.
9) 米田昌世: 針葉樹中小径丸太・タイコ材の強度試験, 林産試場報 Vol. 1, No. 4, 1987
10) Mechanical properties of bamboo, http://bambus.rwth-aachen.de/eng/fr_referate.html, 2002.
11) Ravenshorst, G.J.P., Species independent strength grading of structural timber, pp.103, Technische Universiteit Delft, 2015.

(2017.2.2 受付)

THREE-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC ANALYSIS FOR THE DESIGN OF WOOD PILE BREAKWATERS UNDER IRREGULAR WAVES

Shoya SEKIGUCHI and Hiroshi TAKAGI

Phan Thiet is a coastal city located in Vietnam. Recently, the coastal areas of the city have been suffering from severe coastal erosion due to a rapid coastal development such as land reclamations and port constructions. Without receiving a sufficient financial relief from the government, the local people have resorted to wood piles as a wave-breaking countermeasure to prevent coastal erosion. Particularly in developing countries, usage of low-cost countermeasures such as wood piles could be very beneficial. However, its effectiveness has yet to be scientifically proven. This study aims at confirming the effectiveness of a three-dimensional hydrodynamic analysis in evaluating the performance of wood piles. The present study performed a 3D numerical simulation, considering the offshore irregular waves and bathymetric conditions in Phan Thiet, Vietnam. The wave-energy dissipation and durability of wood piles were simply evaluated by two criteria: 1) wave run-up distance and 2) bending stress on pile. It is worth noted that remarkably large water levels could be generated because of multiple mechanisms such as the overlap of incident and reflected waves, stagnant water behind the piles, and intensified flow through the gap of the piles. These mechanisms cannot be adequately evaluated by a common 2D-numerical model with regular waves, demonstrating the benefit of the use of the 3D model.