

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420529

研究課題名(和文) 海岸構造物の変形・破壊予測に関する3次元数値解析モデルの構築と適用

研究課題名(英文) Three dimensional simulation model to estimate the deformation of coastal structure under wave actions

研究代表者

村上 啓介 (Murakami, Keisuke)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：60219889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、海岸構造物の変形・破壊モードを波浪・構造物・地盤の相互作用を考慮して検討できる数値解析技術の開発を念頭に、流体運動と構造物の変形が取り扱える3次元数値解析モデルの構築を目的に実施した。具体的には、津波による防波堤基礎マウンドの洗掘問題を対象に、SPH法を用いた数値解析モデルを構築した。構築した数値解析モデルの妥当性は水理模型実験結果との比較で評価し、本数値解析モデルが防波堤基礎マウンドの洗掘現象を精度良く再現できることを明らかにした。さらに、数値解析モデルを実構造物に適用し、津波に対する構造物の安定性を水理学的な視点から評価した。

研究成果の概要(英文)：This research was conducted to construct a three-dimensional numerical model which simultaneously simulates fluid motion and structural deformation. This numerical model will be the basis of the numerical simulation model that can deal with the interactions between wave, structure and soil foundation in future. This study discussed the local scouring of rubble mound due to tsunami over a caisson structure. SPH model, Smoothed Particle Hydrodynamics model, was employed to construct the numerical model to investigate the local scouring phenomena. The validity of the numerical model was confirmed by comparing computed results with measured ones that were obtained through hydraulic experiments. The numerical model properly simulated the scouring phenomena observed on the rubble mound. The numerical model, furthermore, applied to the field breakwater at Hosojima por. This research evaluated the stability of rubble mound and breakwater head with using this numerical model.

研究分野：水工水理学

キーワード：海岸構造物 変形 SPHモデル 津波 防波堤 基礎マウンド

1. 研究開始当初の背景

海岸構造物に信頼性設計を適用する際、構造物の変形・破壊モードの特定が重要となる。また、施工時においても、構造物の変形予測は構造物の安全な施工にとって重要である。このような観点から、波浪外力に対して構造物の変形問題が取り扱える数値解析モデル (VOF 法を用いた波動解析モデルに個別要素法を併用する手法や SPH 法等) の開発が進められてきた。

東北地方太平洋沖地震津波による被害を踏まえ、「設計対象の津波高を越えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような海岸構造物」の考え方の導入が進められつつある。波浪外力に対する構造物の粘り強さを適切に評価するためには、構造物の変形・破壊過程を波浪・構造物・地盤の相互作用を考慮して予測できる 3次元数値解析モデルの開発が不可欠である。ただし、波浪による構造物の変形・破壊過程を 3次元問題として取り扱える数値解析モデルは開発されておらず、設計段階では構造物断面の適切性を水理模型実験等で確認する作業が行われ、実施労力やコストが大きく効率性が悪い。以上の背景を踏まえ、3次元数値解析モデルの研究開発が当該分野で強く望まれていることから本研究を着想した。

2. 研究の目的

本研究では、海岸構造物の変形・破壊モードを波浪・構造物・地盤の相互作用を考慮して特定できる数値解析技術の開発を念頭に、波浪による構造物の変形・破壊過程を精度良く予測できる 3次元数値解析モデルの開発と適用性の評価を目的とした。具体的には、津波による防波堤基礎マウンドの変形問題を対象として以下の項目を目的とした。

- (1) 海岸構造物を対象に流体運動と構造物の変形が取り扱える 3次元数値解析モデルを構築する。
- (2) 構築した数値解析モデルの精度と妥当性を水理模型実験により確認する。
- (3) 数値解析モデルを実際の構造物に適用して津波に対する構造物の安定性を水理学的視点から評価する。

3. 研究の方法

(1) 3次元数値解析モデルの構築について

本研究では、波と構造物の変形が精度良く予測できる 3次元数値解析モデルの開発を行う。流体運動と構造物の変形が同時に扱える数値解析モデルとして、VOF 法を用いた波動解析モデルに個別要素法を組み込む手法と SPH 法による手法を対象とした。

VOF 法を用いた波動解析モデルに個別要素法を組み込む手法は、2次元問題ではあるが数値解析コードが公開されている。それを 3次元問題に拡張して数値計算の安定性と精度を確認した。本手法は流体計算と基礎マウンドの変形計算を交互に進めるが、計算条件によっては精度が不十分で計算が不安定に

なる場合が生じた。よって、SPH 法による数値計算モデルを用いて開発を進めることとした。

SPH 法は粒子型解法の一つであり、計算点となる粒子に解くべき物理量を与えて計算を進める。このとき、物理量は影響範囲内に空間分布していることを想定し、その分布形状を重み関数で与える。SPH 法はラグランジュ的手法であるが、解析粒子の属性を考慮することで流体解析と構造物の変形問題を同時に扱うことができる。

本研究では自由表面流れが取り扱える解析モデルの一つである SPHysics を使い、防波堤を越流した津波が基礎マウンドを洗掘する問題を取り扱う。数値解析水路の長さは 10m、高さは 1m とし、ダムブレイクモデルにより津波流を再現した。発生した段波津波は下流側の防波堤を越流して背後の基礎マウンドを洗掘する。

数値計算結果の妥当性を検証するため、水理模型実験と同じ粒径の捨石を防波堤背後に約 0.2m 厚で敷き詰めて数値計算を行った。計算では、流体の密度は $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 粘性係数は $\mu=10^{-3}\text{Ns/m}^2$ とし、配置した捨石粒子の比重は水理模型実験との比較を考慮して 2.56 とした。また、ヤング率は 155~170 MPa、捨石粒子の摩擦限界速度は粒径に応じて 3.1~9.9 m/s の範囲で与えた。

(2) 水理模型実験について

実験には長さ 1.2m、幅 0.4m、高さ 0.6m の水槽 (以下、下部水槽と呼ぶ) と長さ 10m、幅 0.4m、高さ 0.4m の二次元開水路 (以下、開水路と呼ぶ) を用いた。図-1 に示すように開水路の下流端に下部水槽を設置し、開水路の流れを水路末端から下部水槽に自由落水させることで防波堤を越流する津流を再現

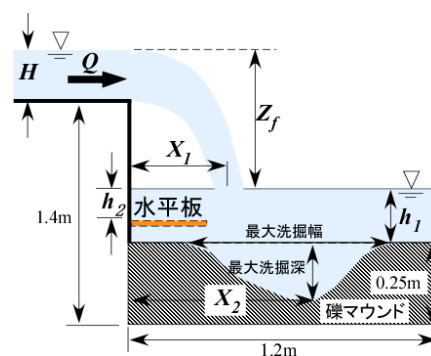


図-1 実験に用いた下部水槽の概略図



写真-1 下部水槽内の洗掘発生状況 ($d_{50}=20\text{mm}$, $h_1=0.18\text{m}$)

した。下部水槽内には、ふるいで粒度調整した碎石を0.25m厚で敷き詰めて捨石マウンドを模した。

実験は1/20程度の模型縮尺を想定して行なった。津波越流量を $Q=6.2\times 10^{-3}\sim 4.0\times 10^{-2}\text{m}^3/\text{s}$ の範囲で7通り、碎石粒径を $d_{50}=10\text{mm}$, 20mm, 40mmの3通り、マウンド上水深を $h_1=0\text{m}$, 0.1m, 0.18mの3通りに変え、それらを組み合わせた条件で実験を行った。開水路から下部水槽に落流した水脈は大規模な定在渦を形成して碎石層を洗掘する(写真-1参照)。

(3)実構造物への適用について

本研究では宮崎県日向市細島港の余島防波堤と南沖防波堤を対象とした(図-2参照)。内閣府の想定では、マグニチュード9クラスの南海トラフ地震が発生した場合、細島港には最大で15mの津波が17分で来襲し、ケーソン天端の越流水深は最大で6m程度と見積もられている。数値計算では最大越流水深が継続する条件を設定した。

各防波堤の基礎マウンドは500~700kgの基礎捨石をコアとし、港外側の基礎マウンド法面は消波ブロックで覆われている。また、南沖防波堤の港内側は腹付石と被覆ブロックで構成されているが、余島防波堤の港内側は被覆ブロックのみ敷設されており、津波越流による洗掘が生じ易い状況にある。

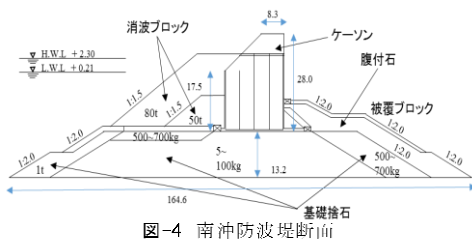


図-4 南沖防波堤断面

(a) 南沖防波堤の代表断面

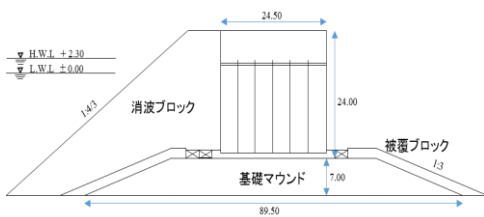


図-2 余島防波堤断面図

(b) 余島防波堤の代表断面

図-2 細島港防波堤断面

4. 研究成果

(1)基礎マウンドの洗掘に対する数値計算の再現性について

数値計算による洗掘現象の再現結果の一例を図-3に示す。図は、粒径20mmのマウンド材を防波堤背後に敷き詰め、 $Q=2.5\times 10^{-2}\text{m}^3/\text{s}$ の流量を越流させた場合の洗掘時系列を示

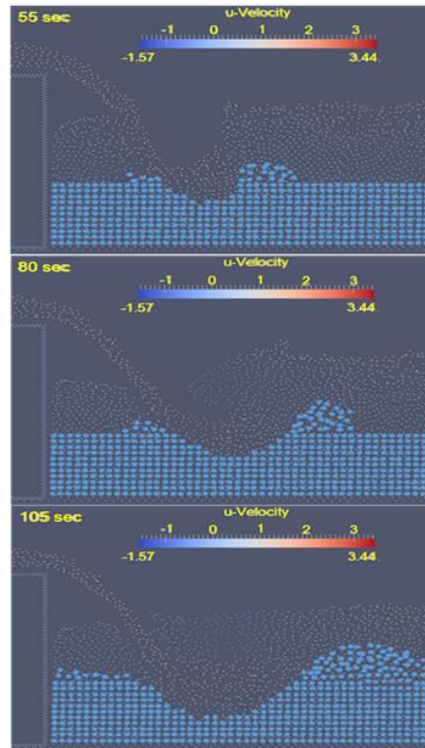
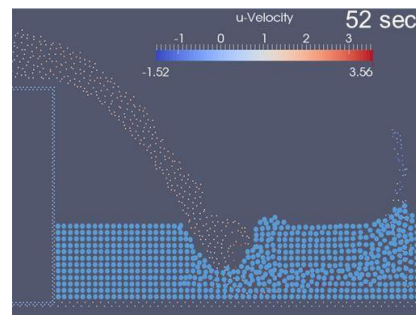
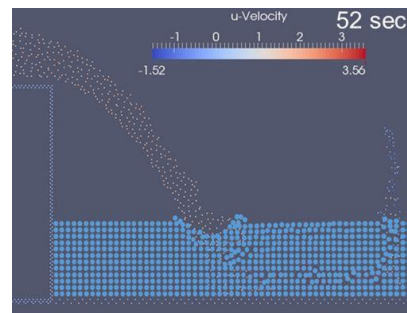


図-3 数値計算による洗掘過程の再現



(a) $d_{50}=10\text{mm}$

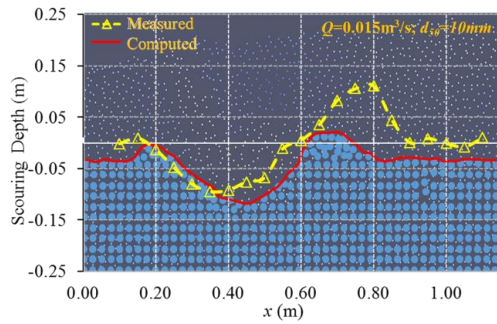


(b) $d_{50}=40\text{mm}$

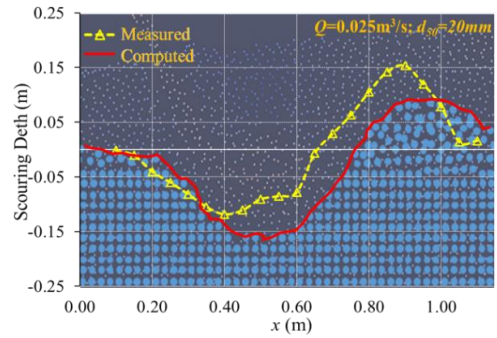
図-4 粒径が異なる条件での洗掘状況

している。防波堤から落水した水脈が着水点付近を徐々に洗掘していく様子が再現されている。この様子は、写真-1に示した水理模型実験のスナップショットと類似しており、数値計算が実現現象に類似した洗掘プロセスを再現していることが確認できる。

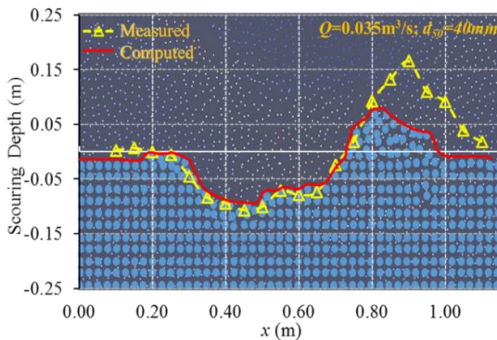
図-4は捨石マウンドの粒径が異なる条件での洗掘状況を比較したものである。粒径が



(a) $d_{50}=10\text{mm}$, $Q=0.015\text{m}^3/\text{sec}$



(b) $d_{50}=20\text{mm}$, $Q=0.025\text{m}^3/\text{sec}$



(c) $d_{50}=40\text{mm}$, $Q=0.035\text{m}^3/\text{sec}$

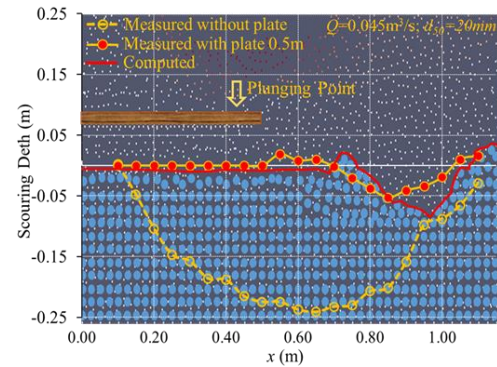
図-5 マウンドの地形変化に関する数値計算結果と実験結果の比較

大きいほど洗掘量が小さい結果となった。水理模型実験でも同様の特徴が確認され、数値計算が洗掘現象を良く再現している。

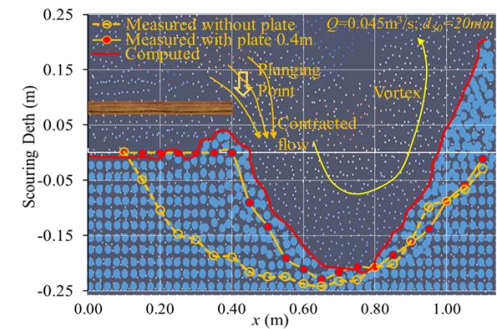
図-5 は洗掘が常態に達した後の捨石マウンド形状を数値計算と水理模型実験で比較したものである。捨石粒径が $d_{50}=40\text{mm}$ のケースは、模型縮尺を考慮して実寸に換算すると直径が 0.8m 程度の捨石に相当し、重量としては図-2 に示す細島港防波堤の基礎捨石に相当する。

防波堤基礎マウンドの洗掘は、越流量、越流高さ、マウンド材粒径、マウンド上水深等のパラメータに依存する。図-5 より、粒径や越流量を組み合わせた各ケースにおいて、数値計算から求めた地形変化が水理模型実験結果と良好に一致することを確認し、本解析手法の妥当性が明らかとなった。

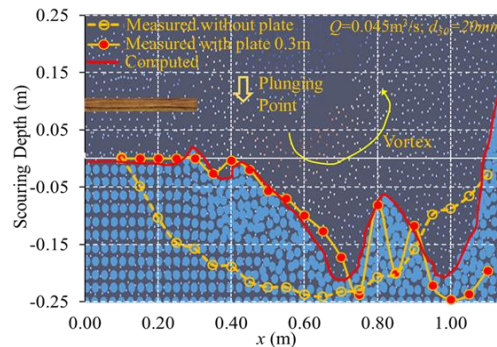
本研究では、図-1 中に示す水平板による基礎マウンドの洗掘抑制効果についても検討



(a) $B=0.5\text{m}$, $d_{50}=20\text{mm}$, $Q=0.045\text{m}^3/\text{s}$



(b) $B=0.4\text{m}$, $d_{50}=20\text{mm}$, $Q=0.045\text{m}^3/\text{s}$



(c) $B=0.3\text{m}$, $d_{50}=20\text{mm}$, $Q=0.045\text{m}^3/\text{s}$

図-6 水平板を設置した場合の数値計算結果と実験結果の比較

している。水平板を設置することによりマウンド上の流況はより複雑になる。

図-6 は水平板を設置した場合の洗掘地形を示したものである。図中の B は水平板の長さを意味し、赤色の実線は水平板がある場合の数値計算結果である。また、赤色のプロットを結んだ線は実験結果で、水平板がない場合の実験結果を黄色の破線で示している。

図-6(a)~(c)の各ケースにおいて、数値計算結果と実験結果は良好に一致していることが確認できる。また、水平板を設置することによりマウンドの洗掘地形は大きく変化している。水平板長が最も長い図-6(a)は、防波堤天端から落水する水脈の着水点よりも水平板が長い場合洗掘はほとんど生じていない。一方、図-6(b)と(c)は、水脈の着水点水平板の先端より港内側になる。その場合の最大洗掘が生じる場所は、ケーソンからより離

れた位置になるだけで最大洗掘深さに差は見られず、水平板の効果はほとんど確認できない。

水平板を設置するとマウンド上の流況は複雑になるが、数値計から求めた地形変化は実験結果と良く一致しており、数値計算が現象を精度良く再現していることが明らかとなった。

(2) 防波堤基礎マウンドの洗掘特性について

防波堤基礎マウンドの洗掘には、越流量、越流高さ、マウンド材粒径、マウンド上水深等のパラメータが関係する。図-7は、マウンド上の水深が異なる場合の洗掘地形を比較したものである。マウンド上の水深が浅くなると洗掘量は増大し、よりケーソンに近い位置で洗掘が生じる傾向が読み取れる。

砂地盤を対象とした場合の最大洗掘深さは、落水によって形成される定在渦径に比例することが知られている。図-8は本実験で得られた定在渦径と最大洗掘深さの関係を示したものである。礫材においても最大洗掘深さは定在渦径に比例することが確認できる。最大洗掘深さがマウンド上の水深と捨石粒径に依存することから、比例関係式を式(1)で仮定して最大洗掘深さの推定式を誘導した。計算結果と実験結果を比較した結果、両者の一致は良好で、式(1)により最大洗掘深さが推定できることを明らかにした。

$$D = \alpha(d_{50}, h_1)R + \beta(d_{50}, h_1) \quad (1)$$

$$\alpha(d_{50}, h_1) = -9.0h_1 - 0.1d_{50} + 3.1 \quad (2)$$

$$\beta(d_{50}, h_1) = 0.7h_1 - 3.4d_{50} - 0.1 \quad (3)$$

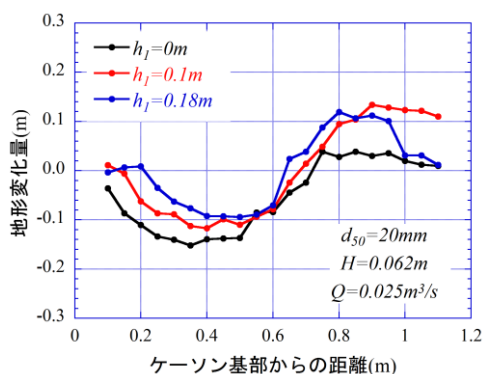


図-7 マウンド水深が異なる場合の比較

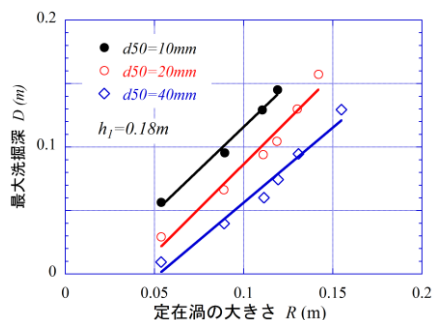
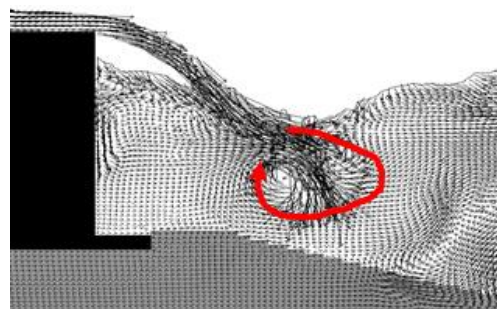


図-8 定在渦径と最大洗掘深さの関係

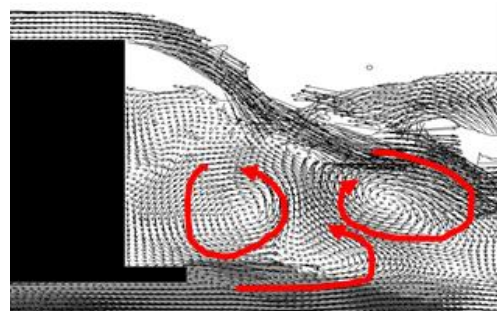
(3) 実断面の防波堤基礎マウンドを対象とした安定性の評価について

基礎マウンドの被覆材の洗掘被災を検討する際に、マウンド内の浸透流の影響は重要である。図-9は、余島防波を例にマウンド内の浸透流の有無による防波堤背後の流れ場の相違を示したものである。浸透流を考慮しない場合は、着水した水脈が基礎マウンド上で時計回りの定在渦を形成している。一方、浸透流を考慮すると、マウンド上に時計回りの定在渦と反時計回りの定在渦が形成され、マウンド法面に沿った流れが加速されている。この差異は被覆材に作用する揚力の違いに表れ、被覆材の安定性を評価する上で浸透流の影響は無視できないことを意味する。

図-10は余島防波堤の被覆材に作用する揚力の時系列を数値計算から求めたものである。200kNを越える揚力が被覆材に作用しており、20t以上のブロックが必要なことが確認できる。基礎マウンドの法肩付近や法尻付近でも同様の結果となり、余島防波堤の洗掘対策では、被覆材に対して相当重量のブロッ



(a) マウンド内浸透流を考慮しない場合



(b) マウンド内浸透流を考慮した場合

図-9 マウンド内浸透流の有無による流れ場の相違 (余島防波堤)

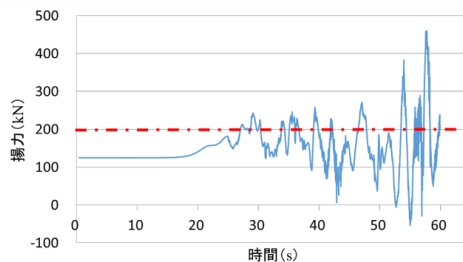
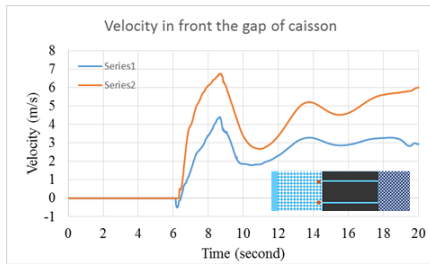
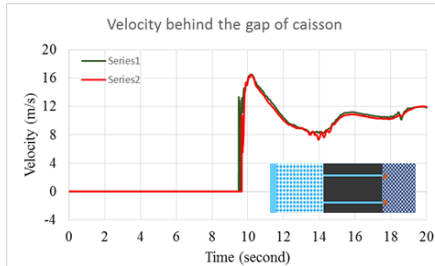


図-10 基礎マウンド被覆材に作用する揚力の時間変化 (余島防波堤)



(a)ケーソン目地部前面での流速波形



(b)ケーソン目地部背面での流速波形

図-11 ケーソン目地部内の流速の比較

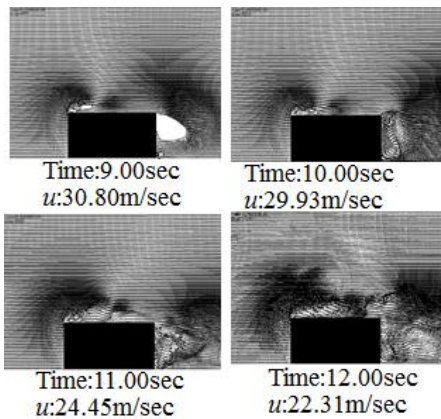


図-12 防波堤堤頭部付近の流速場

クが必要となることを示した。

地震によって防波堤が変位することで、防波堤基礎マウンドの被害が助長される場合がある。本研究では、ケーソン継目部の幅が拡大することの影響とケーソン列の一部が部分的に沈下することによる影響を、3次元数値計算モデルを用いて検討した。また、防波堤堤頭部の脆弱性についても評価した。

図-11 はケーソン継目部が拡大し、津波流が継目内部で加速する結果を示している。ケーソン継目部が開いて防波堤背後の基礎マウンドの洗掘が助長された事例は東日本大震災時に報告されている。本数値計算においても、ケーソン継目部の拡大は防波堤背後に到達する流れを加速し、基礎マウンドの洗掘を助長する要因になることを示している。

図-12 は余島防波堤の堤頭部における底面付近の流速場を示したものである。堤頭部では津波が防波堤背後に回り込み、端部で強い渦が形成されている。渦が形成される箇所ではマウンド内の浸透流が加わって複雑な流れ場が形成され、堤頭部付近での水平流速は

最大で約 30m/s 程度に達し、揚力とせん断力により被覆ブロックが容易に被災する状況にあることが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

①村上啓介, 徳富裕貴, 内村将吾, 真木大介: 津波越流による防波堤基礎マウンドの洗掘特性に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol.71, No.2, 2015, 1207-1212

②Akhmad Adi Sulianto, Keisuke MURAKAMI: Study on Local Scouring of Gravel Mound due to Tsunami Overflow, Elsevier Journal Procedia Engineering, 査読有, Vol. 116, 2015, 195 - 202

③Akhmad Adi Sulianto, Keisuke MURAKAMI: SPH Simulation of Local Scouring on Rubble Mound due to Tsunami Overflow, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, Vol.71, No.2, 2015, 1065-1070

④Akhmad Adi Sulianto, Keisuke MURAKAMI, Yuki TOKUTOMI and Kouichi UENO: Local Scouring of Gravel Mound due to Tsunami Overflow and Its Countermeasure, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, Vol.70, No.2, 2014, 606-611

〔学会発表〕(計 6 件)

①阿南聡太, 数値計算による細島港余島防波堤基礎マウンドの津波安定性の評価, 土木学会西部支部研究発表会, 2016/3/6, 九州産業大学 (福岡市)

②Akhmad A. Sulianto, Three Dimensional Hydraulic Characters around Breakwater under Tsunami Overflow, 土木学会西部支部研究発表会, 2016/3/6, 九州産業大学 (福岡市)

③村上啓介, 津波越流による防波堤基礎マウンドの洗掘特性に関する実験的検討, 土木学会海岸工学講演会, 2015/11/11, タイム 24 ビル (東京都江東区)

④Akhmad A. Sulianto, SPH Simulation of Local Scouring on Rubble Mound due to Tsunami Overflow, 土木学会海洋開発シンポジウム, 2015/6/22, 神戸市国際会議場 (神戸市)

⑤Akhmad A. Sulianto, Numerical Simulation of Tsunami Overflow on the Breakwater using SPH Model, 土木学会西部支部研究発表会, 2015/3/7, 琉球大学 (中頭村西原町)

⑥Akhmad A. Sulianto, Local Scouring of Gravel Mound due to Tsunami Overflow and Its Countermeasure, 土木学会海洋開発シンポジウム, 2014/6/26, 朱鷺メッセ (新潟市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 啓介 (MURAKAMI Keisuke)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号: 60219889