

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18123

研究課題名(和文) ケーソン防波堤の越流洗掘型津波被災に関する予測評価モデルの構築

研究課題名(英文) Development of a numerical model for prediction of failure of a caisson breakwater due to a scouring induced by tsunami overtopping flow

研究代表者

五十里 洋行 (Ikari, Hiroyuki)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：80554196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ケーソン防波堤の越流洗掘型被災は、津波がケーソン防波堤に衝突して越流し、その越流水が落下流となって防波堤のマウンド・砂地盤が洗掘され、それによって支持力が失われることでケーソンが移動・転倒する被災形態である。この一連の過程を現象に忠実に解くためには、波浪変形-ケーソン移動-マウンド・砂層変形の三者の相互作用を扱う必要がある。本研究では、この要請に対応可能な数値シミュレーションモデルの構築を行い、ケーソン防波堤の越流洗掘型津波被災に対する本数値モデルの適用性を検討する。

研究成果の概要(英文)：When a large-scaled tsunami attacks on a caisson breakwater, a tsunami overtopping flow falling on a mound or a sand bed can induce a scouring, a bearing capacity can be gradually lost, and then a caisson can overturn. In order to simulate this kind of failure process of a caisson breakwater, a numerical model is needed to have an ability for solving the interaction among a wave deformation, a caisson behavior and deformation of mound and sand bed. In this study, a numerical model satisfying this requirement is developed, and its applicability is examined.

研究分野：水工学

キーワード：ケーソン防波堤 越流洗掘型津波被災 数値シミュレーション 粒子法 地盤変形 弾塑性モデル

1. 研究開始当初の背景

ケーソン防波堤の越流洗掘型津波被災においては、津波がケーソン防波堤に衝突して越流し、その越流水が落下流となって防波堤のマウンドあるいは砂層が洗掘され、その洗掘によってマウンドの支持力が失われることでケーソンが滑動あるいは転倒し、防波堤の機能が大幅に低下する。このような被災形態は、防波堤に対して極めて大規模な津波が来襲した場合に起こるが、今後 30 年以内に約 70% の高確率で発生すると予想されている東海・東南海・南海地震の規模を考えると、再び越流洗掘型被災は発生し得る。したがって、現存する、あるいは新設する防波堤において、本被災の発生可能性について検討し、対策をあらかじめ講じておくことは非常に急務かつ重要である。以上のことから、水理実験による本被災メカニズムの調査が行われているが、水理実験のみですべての既存防波堤において被災可能性を検討することは不可能であるので、数値シミュレーションモデルの開発は不可欠である。越流洗掘型被災の現象再現にあたっては、波浪変形 - ケーソン移動 - マウンド・砂層変形の三者の相互作用を解く必要があるため、数値流体力学的手法による解析モデルの適用が必須である。しかし、既往の研究では、マウンドや砂層の変形については無視するかあるいは簡易に扱っており、現状で本被災過程を完全に再現できる数値モデルは存在しなかった。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らの研究グループが以前の同種の研究で構築した粒子法型数値モデルを改良して本被災過程の再現を目指し、粘り強い防波堤設計の一助となる数値モデルを構築することを目的とする。以前のモデルにおいては、マウンドを DEM 粒子で表現し、その変形を解いた。ただし、流体 - マウンド粒子間の相互作用力の推定やマウンド変形を DEM で解くことの有効性については未検討であった。また、砂層変形については、簡易洗掘モデルにより、砂層表面の変化については考慮したものの、地盤内応力は解けなかったため、応力変化による地盤変形は表現できないモデルとなっていた。これは、実現象と比較してケーソンの滑動・転倒開始時刻を遅く推定することになり、防波堤の粘り強さを過大評価することにつながるため、モデル改良が必須である。以上より、本研究では、モデルの構築にあたってこれら 2 つの課題に先に取り組むこととする。すなわち、流体とマウンド材の相互作用モデルの妥当性の検証と、水中での砂層変形を精度良く解析できる流体 - 砂層連成モデルの構築である。マウンドも砂層も大変形を解くことが要請されるが、この点に関しては研究代表者らの粒子法ベースの解析手法の適用が最適であり、同時に、本研究の特色でもある。これら 2 課題の解決後、最終的な越流洗掘型津波

被災シミュレーションモデルを構築し、本被災に対する再現性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 流体 - マウンド間相互作用モデルの基礎的検討

モデルの検証材料とするために先に水理実験を実施する。鉛直二次元水槽の水路途中に防波堤を模擬した固定壁を設置し、その下流側にマウンドを模した捨石を台形状に配置する。循環流を発生させ、固定壁天端からの越流水による落下流がマウンドを叩き、洗掘が発生する様子を水路側面からビデオカメラで記録し、それを基にマウンドの変形形状を計測する。図 1 に、実験の撮影画像の一例を示す。



図 1 落下流によるマウンド変形実験

シミュレーションにおいては、以前の研究と同様に、マウンドを DEM 粒子で構成し、落下流による変形を解く。マウンドの変形形状に関して水理実験結果と比較する。

(2) 水中砂層変形解析モデルの構築

砂層は、研究代表者らの開発したモデルを用いて、弾塑性体としてその変形を解く。水粒子と砂粒子の相互作用においては、砂層内の浸透流をも解くことを念頭に、粒子法の通常の粒子間相互作用モデルを適用せず、両者を別レイヤーで解いて、水粒子と砂粒子の重なる位置の相対速度に比例した外力項を別途与える。この外力項は、FEM などで一般的に実施されている浸透流解析で採用されているダルシー則に基づいたモデルである。以上のモデルを用いて、砂地盤の鉛直噴流洗掘解析(図 2)を実施し、既往の水理実験結果と本計算結果を比較して、モデルの検証を行う。

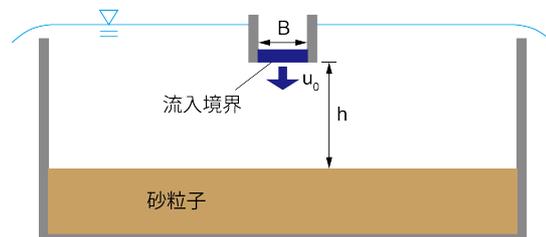


図 2 鉛直噴流洗掘解析模式図

(3) ケーソン防波堤の越流洗掘型津波被災シミュレーション

上記で構築した数値モデルを用いて、ケーソン防波堤を対象に、越流洗掘型津波被災過程の数値シミュレーションを実施する。防波堤の諸元は、東日本大震災時に実際に被災した東北地方太平洋沖に設置されていた防波堤をモデルに既往の水理実験で用いられたモデルと同様にする。また、防波堤前後の水位差も既往の水理実験を参考に設定する。

4. 研究成果

(1) 流体 - マウンド間相互作用モデルの基礎的検討

数値シミュレーションを実施したところ、計算結果におけるマウンドの変形形状は、実験結果を十分に再現できていない結果となった。計算結果から推察するに、DEM 計算においては、粒子の移動において粒子配置（骨格構造）の影響を受けやすく、マウンド全体の変形を見た場合に、粒子配置の影響が顕著に表れる結果となった。そこで本研究では、マウンドを DEM 粒子で構成することを止め、代わりに、弾塑性体として連続体近似する手法を採用した。連続体近似する場合は、粒子は単なる計算点であり、変形形状に粒子配置の影響を強く受けることはない。流体との相互作用力の推定には、水中砂層変形解析と同様に水粒子とマウンド粒子を別レイヤーで解いた上で、外力を与えるものとした。ただし、マウンドは砂地盤と比較して透水係数が大きいので、外力項には、水粒子とマウンド粒子の相対速度の2乗に比例する非線形項も加えた Forchheimer 則を採用した。本改良モデルを用いて、水理実験と同様の条件の計算を実施した結果、計算結果におけるマウンドの変形形状は概ね実験結果と一致した。

(2) 水中砂層変形解析モデルの構築

図2に示すような境界条件で計算を実施し、水路中央において発生する最大洗掘深を既往の水理実験結果と比較した（図3）。

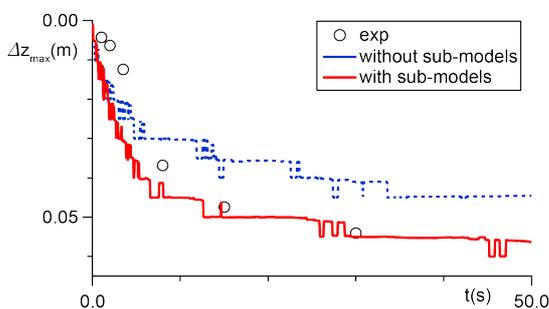


図3 鉛直噴流洗掘解析における最大洗掘深の時系列

上図中の青点線は、砂層変形においてそのまま弾塑性モデルを導入した場合の結果である。図の通り、実験結果と比較して洗掘の進行が遅くなる。洗掘が進行するにつれて砂層表面に作用する掃流力は低下するが、多数の

底質の代表点である砂粒子は底質の十数倍の大きさであるため、底質が十分に動き得る掃流力でも砂粒子の場合は運動せず、代表点としての扱いにギャップが生じることとなる。そこで、このギャップを解消するために、粒子径以下の大きさの底質の運動を考慮するサブモデルを導入した。砂粒子には、底質保有率をパラメータとして持たせ、砂粒子が水中に取り込まれた場合には、周辺の水粒子に浮遊砂という形で底質を受け渡す。受け渡した分だけ底質保有率は下がり、砂粒子の密度を減少させ、砂粒子の運動を促進させる。浮遊砂は、移流拡散方程式に従ってその輸送を計算する。浮遊砂を保持した水粒子が砂層表面に近接した際には、堆積という形で砂粒子へ浮遊砂を渡し、底質保有率を回復させる。以上のようなサブモデルを導入して鉛直噴流洗掘解析を行った結果が、図3の赤実線である。底質の挙動を考慮することにより、より実験結果に近い洗掘深を得ることができた。

また、浮遊砂の輸送に関しては、粒子法で計算された事例が国内外であまり存在しないため、追加検討を行った。奥行き方向に一樣な鉛直二次元水槽で水深を一定とし、その一端のゲートで区切られた範囲の流体のみ濁質を均一に混ぜた混合水として、ゲート急開密度流のシミュレーションを行った。図4は、計算結果の瞬間像の一例である。

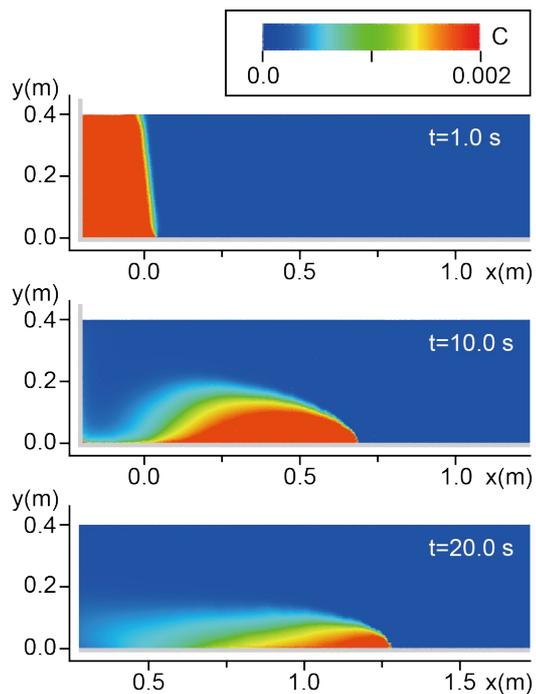


図4 ゲート急開密度流計算

まず、以前に提案された粒子法による移流拡散方程式の離散化モデルをそのまま適用してシミュレーションを行い、計算初期に浮遊していた濁質の最終堆積分布を実験結果と比較したものが図5の薄青色の点線である。図に示される通り、計算結果から得られた堆積分布では、ゲート設置位置周辺の堆積量が

少なく、一方で、密度流の最終到達位置が実験結果よりも大きく超える結果となった。これは、濁質の沈降速度を過小評価していることが原因と考えられた。

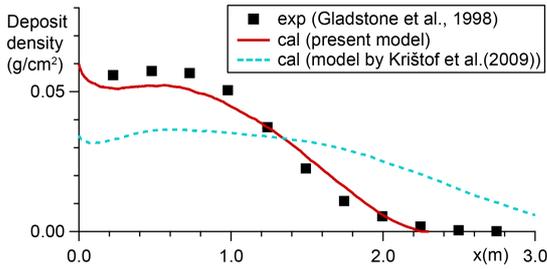


図5 濁質堆積分布

そこで、移流拡散方程式中の沈降速度に関する移流項の離散化モデルの改良を行った。以前のモデルでは、沈降速度に Stokes 則等から推定した一定値を与えていたが、これを単一球の運動方程式等から導出される変動沈降速度に置換した。これによって当該移流項が2項に分離され、さらにそれに伴って離散化モデルが修正される。この改良型モデルを用いて再度シミュレーションを行った結果が図5の赤線である。計算結果は実験結果と良好に一致した。

(3) ケーソン防波堤の越流洗掘型津波被災シミュレーション

図6に、計算領域の模式図を示す。計算領域右端に設置した流入境界より常に一定の流量を供給することで堤外側(図中防波堤右側)の水位を保ち、一方で、計算領域左端の越流堰を越えた粒子を消去することで堤内側(図中防波堤左側)の水位を保持する。なお、堤内外の水位差は0.4mとした。ケーソンは弾性体として計算するが、マウンドや地盤と異なり、水粒子と同レイヤーで運動の計算を行う。したがって、水粒子との相互作用は通常の粒子法の粒子間相互作用モデルを通じて計算される。

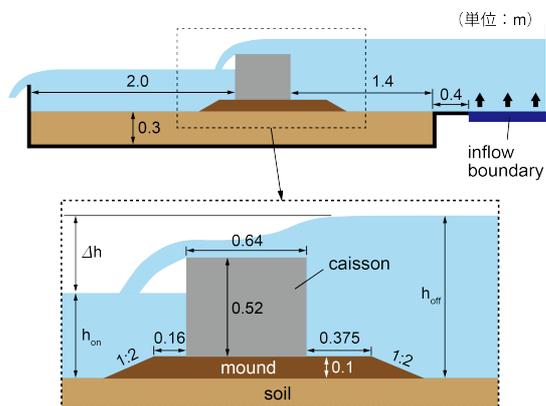


図6 ケーソン防波堤の津波越流洗掘解析模式図

計算結果の一例を図7に示す。落下流により堤内側で地盤洗掘が発生し、徐々に洗掘孔が大きくなった後、ケーソンが転倒しながら洗掘孔内へ落下していく様子が良好に再現さ

れている。洗掘孔がある程度拡大するまではケーソンは静止しており、洗掘孔の発生・拡大による地盤内応力の変化が、ケーソンの転倒の原因であることがわかる。

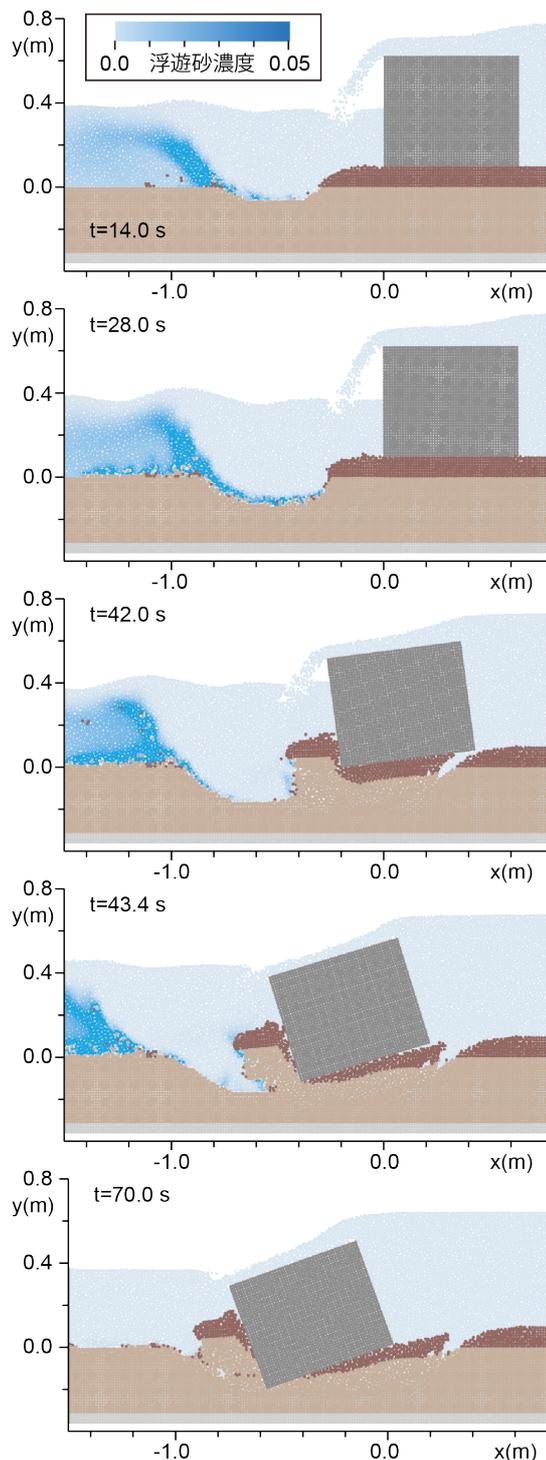


図7 津波越流によるケーソン防波堤の崩壊過程

上記のようなケーソンの挙動は、マウンド・地盤の変形を解かない限りは得られないが、このような数値解析結果を提示した例は国内外において存在しない。まだモデルの再現性については詳細な検証が必要ではあるが、本研究によって越流洗掘型津波被災に対する防波堤の粘り強さをより精度良く推定できるシミュレーションツールが示された点

で、本研究の意義は大きいと言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

五十里洋行, 後藤仁志, 江尻知幸, 小西晃大: 流体 - 弾塑性体連成粒子法によるケーソン防波堤越流洗掘型津波被災過程の数値解析, 土木学会論文集B 2 (海岸工学), 査読有, 第73巻, 2017 (採択済)

五十里洋行, 後藤仁志, 松島良太郎: 粒子法濁質輸送モデルによる濁水の水面突入・拡散過程の数値解析, 土木学会論文集B 2 (海岸工学), 査読有, 第72巻, 2016, 61-66

Ikari, H. and Gotoh, H.: SPH-based simulation of granular collapse on an inclined bed, Mechanics Research Communications, 査読有, Vol.73, 2016, 12-18,

DOI:10.1016/j.mechrescom.2016.01.014

五十里洋行, 後藤仁志, 反保朋也, 江尻知幸: 微細土砂の巻き上げを考慮した粒子法鉛直噴流洗掘解析, 土木学会論文集B 2 (海岸工学), 査読有, 第71巻, 2015, 19-24

〔学会発表〕(計4件)

松島良太郎, 五十里洋行: 粒子法濁質輸送モデルによる濁水の水面突入・拡散過程の数値解析, 第63回海岸工学講演会, 2016年11月, 大阪大学中之島センター(大阪府大阪市)

Hiroyuki Ikari: Numerical simulation on lock-exchange density currents by incompressible SPH method, THESIS2016, 2016年9月, 中央大学研究開発機構(東京都文京区)

Hiroyuki Ikari: Numerical modeling of dike erosion due to overtopping flow using incompressible SPH method, Violent Flows 2016, 2016年3月, I-site なんば(大阪府大阪市)

五十里洋行: 微細土砂の巻き上げを考慮した粒子法鉛直噴流洗掘解析, 第62回海岸工学講演会, 2015年11月, タイム24ビル(東京都江東区)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

五十里 洋行 (IKARI, Hiroyuki)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号: 80554196

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者
なし