

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04365

研究課題名(和文)大規模津波越流時の海岸堤防裏法被覆ブロックの離脱機構に関する計算力学的研究

研究課題名(英文) Numerical analysis on detachment of armor blocks on coastal levee due to 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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災における海岸堤防の被災事例の一つとして、裏法面上の法肩ブロックの離脱に起因する堤防の崩壊が挙げられる。本現象に関して、既往の水理実験において法肩周辺で発生する圧力低下がブロックの離脱の原因であることが突き止められたが、ブロックや礫の移動を伴う激流であるために計測が困難であることから、流れ場全体の特徴についてはわかっていなかった。本研究では、数値シミュレーションにより裏法面上の流れの流速や圧力について推定するとともに、法肩ブロックの離脱をトリガーとする裏法面上ブロック群全体の崩壊過程の再現に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東日本大震災クラスの地震・津波災害が今後数十年の間に発生する確率は非常に高いと言われている。そのような状況において同規模の津波が作用した場合の海岸構造物の被害予測は、事前の対策を行う上で非常に重要である。数値シミュレーションがそのような被害予測ツールの一つとして有効であることは言うまでもないが、本研究では多数のブロックや礫が流出する被害の再現に初めて成功した。シミュレーションモデルのさらなる改良は必要であるが、これを適用することにより海岸堤防の被害軽減対策を講じるにあたって、より効果的な手段を考える一助となりうるであろう。

研究成果の概要(英文)：In the Great East Japan Earthquake, the detachment of the armor block on the top of coastal levee can be listed as one of the reasons of the failure of a coastal levee. In previous researches, they have reported that the detachment of the block was induced by a pressure drop on the top of a levee from their experiments, however, the characteristics of the entire flow field have not been clarified because it is difficult to measure it due to a violent flow with movement of blocks and cobbles. In this study, the velocity and pressure field of the flow on the slope of coastal levee were estimated from a 3D numerical simulation, and the failure process of the armor blocks triggered by the detachment of the block on the top of coastal levee was successfully simulated.

研究分野：海岸工学

キーワード：津波越流 海岸堤防 被覆ブロック 粒子法 個別要素法

## 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災においては、波高 10m を超える規模の大津波が東北地方太平洋側沿岸を来襲したが、当時の海岸堤防においてはそのような大津波への対策がなされておらず、防護機能が十分に作用せずに、背後地に甚大な被害をもたらした。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南海トラフ地震の規模の大きさを考えると、再び同規模の大津波が発生してもおかしくはない。したがって、海岸堤防の被災の発生メカニズムについて検討し、粘り強い構造とするための対策を講じておくことは非常に急務かつ重要である。

東日本大震災後、国土交通省津波対策検討委員会が発表した海岸堤防に関する被災パターンの一つに“押し波による天端、裏法肩からの被災(裏法尻の洗掘なし)”が挙げられている。堤防裏法面上には被覆ブロックが設置されるが、この被災パターンは、裏法肩部に配置された被覆ブロックの法面からの離脱を起点とし、他の被覆ブロックの流出、さらには、露出した堤体材料の流出へとつながる被災である。既往の水理実験により、被害の起点となる法肩部の被覆ブロックの離脱の原因は法肩における圧力低下であることが示唆されたが、激流となる本現象では、水理実験により調査できる範囲も限られており、詳細なメカニズムの解明に至っていない。また、越流水により被覆ブロックおよび堤体材料が流出する状況が再現された三次元数値シミュレーションの実施例はない。

## 2. 研究の目的

本研究では、ブロックや堤体材料の流出を伴う激流を再現するシミュレーションモデルの構築を行い、計算結果を用いて計算力学的に本現象における流れ場の特徴を整理する。ブロックが移動する状況や堤体の浸透層内の流速場や圧力場については水理実験では測定が困難であるので、この点に特に注目する。

## 3. 研究の方法

本研究では、複数のブロックの離脱・流出挙動を追跡するので、移動物体の取り扱いが容易な粒子法をベースに数値モデルを構築して、シミュレーションを実施する。大規模津波の堤防越流過程においては、法肩部で負圧域にまで達するほどの圧力低下が発生する。粒子法は元々圧力ノイズの問題があり、特に、粒子間で引力が作用する際にはノイズが増幅して数値的に不安定になる傾向がある(いわゆる tensile instability)。それゆえ、引力を誘発しやすい負圧が支配的な現象に対しては安定した計算が難しいため、法肩部で負圧の発生する大規模津波の越流過程を再現することは困難であった。しかし、近年開発された高精度化スキームを複数併用することにより、圧力ノイズのレベルが劇的に改善することが示された。申請者らは、既往の研究において、この高精度化スキームを適用し、断面二次元計算での被覆ブロック離脱挙動の再現に成功しており、本研究ではこれを三次元計算に拡張して計算を実施する。

研究は、下記に示す三種類の小テーマを段階的に行った。

### (1) 法肩ブロック離脱に関するモデルの再現性の確認

まず始めに、二次元計算で適用した高精度化スキームを三次元計算に対応させて数値シミュレーションを実施し、数値計算結果から推定された法肩ブロックの離脱限界水深と既往の水理実験での離脱限界水深とを比較することによりモデルの再現性を確認する。この段階では、水路中央の法肩被覆ブロック 1 個のみを可動とし、それ以外のブロックは固定とする。また、ブロックは剛体として扱う。法尻部は固定壁とし、洗掘は扱わない。ブロック直下には一般的に比較的大きなサイズの大きい礫がフィルター層として配置されるので、それを流体が透過する透水層として設定する。これは、既往の水理実験と同様の境界条件である。透水層に浸入した流体粒子には抗力が与えられる。堤防上流側に設置した流入境界からの流入流量を変えることにより、越流水深を調整する。

### (2) ブロック孔部からの礫の吸出し現象の再現

ブロック表面上を流れる高速流によって、ブロック直下のフィルター層の礫が吸い出されることが既往の水理実験によって報告されている。フィルター層内においては、礫が密に存在するために測定が困難であるので、実験からは流れ場の情報を全く得ることができない。そこで、ここでは、ブロックの移動を固定し、礫のみを可動として高速流によってブロック孔部から吸い出される礫の挙動の再現計算を行うとともに、フィルター層内を含むブロック列上下の流速場および圧力場の推定を行う。

### (3) 法肩の圧力低下によるブロック離脱を起因とする被覆ブロック群崩壊過程の再現計算

最後に、裏法面上の被覆ブロックおよびフィルター層内の礫をすべて可動として被覆ブロック群が崩壊する様子の数値シミュレーションを実施する。既往の水理実験において、裏法肩での圧力低下による法肩周辺のブロックの離脱・流出がトリガーとなって裏法面が全面的に崩壊すると報告されている。ここでは、そのような崩壊現象が本数値モデルによって再現されるかどうかを検証する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 法肩ブロック離脱に関するモデルの再現性の確認

図1に示される通り、法肩に配置したブロックが回転しながら離脱し、流出する過程が良好に再現された。また、図1最下段にはブロックの回転中の流跡線を示している。ブロックの起立前は流れはほぼ裏法面に沿っているが、起立後はブロックとの衝突前に減速し、一部がブロックの孔部を通して主流部に合流していることが確認できる。

なお、離脱限界水深について同条件の水理実験結果と比較したところ、若干計算結果の方が大きくなったが、その差は0.01m程度（実スケール換算で0.4m）であり、概ね良好に対応していると言える。

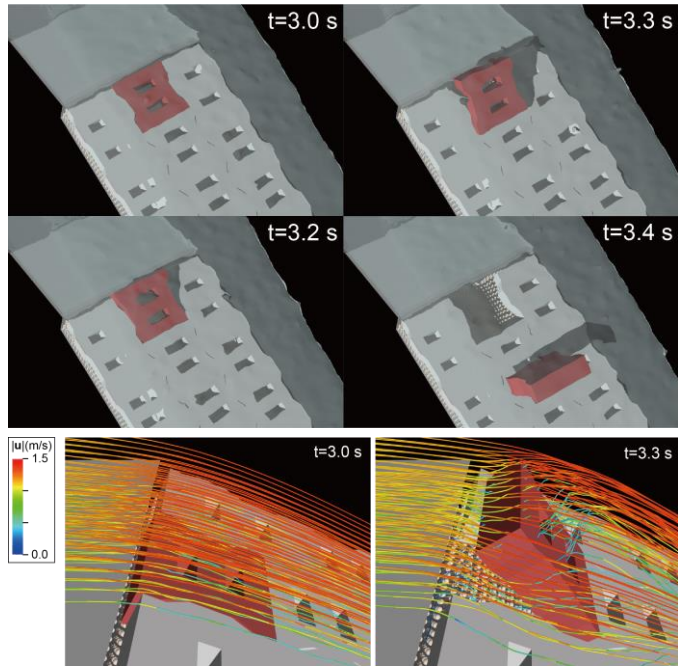


図1 法肩ブロックの離脱（上）およびブロック周辺の流跡線（下）

##### (2) ブロック孔部からの礫の吸出し現象の再現

次に、ブロックは固定し、フィルター層の礫のみを可動として礫の吸出しに注目したシミュレーションを実施した。図2上段に、計算結果のスナップショットの一例を示す。法肩に近い上層ブロック孔部からの吸出しが顕著である。これについてブロック孔部およびブロック間の間隙における圧力および流速を調査したところ、法肩周辺では大きな圧力勾配力が作用しており、かつ、上向きの流速が表れていることから、礫の吸出しが頻繁に発生する理由が明確に示されている（図2下段）。なお、礫の吸出しはブロック孔部よりも間隙部からのほうが多く、ブロックの配置を変えてブロック間の間隙の開孔率を変えた場合、礫の吸出し個数が減少することを別途確認している。

図3に、ブロック間間隙を通る断面A（図2参照）における流速ベクトル分布および圧力分布を示す。1段目の間隙においては法肩における圧力低下による上昇流が全体的に見られるが、2

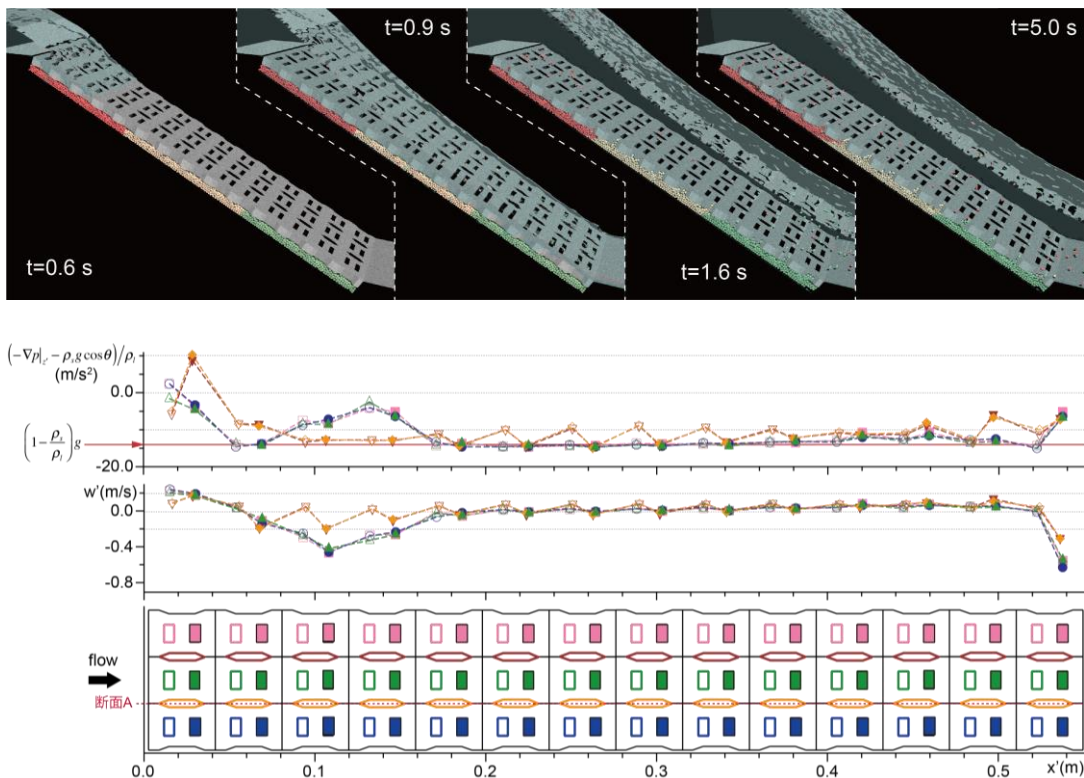


図2 各ブロック孔部およびブロック間間隙における圧力勾配力の法面鉛直方向成分および法面鉛直方向流速



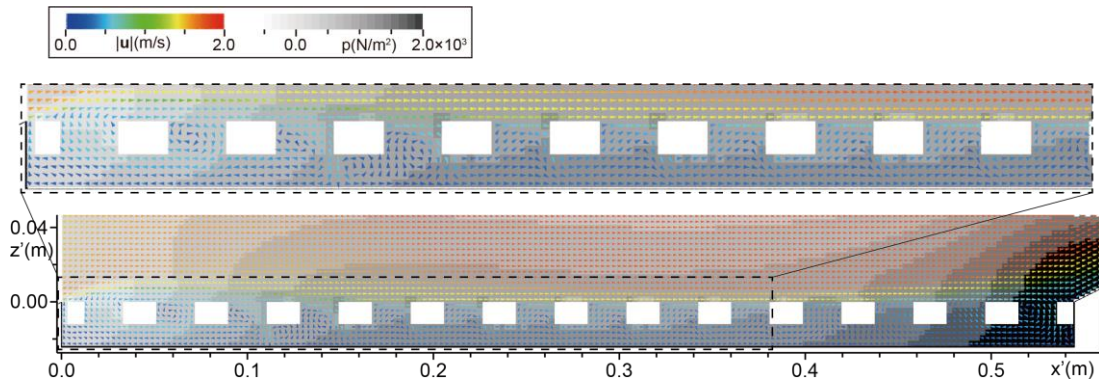


図3 ブロック間隙を通る断面Aにおける流速ベクトル分布および圧力分布

～4 段目においては 1 段目の間隙における上昇流の補償流としての下降流が現れている。また、中層部においては水面に向かって層状の圧力分布が見られるが、法尻では流れが水平床に衝突するために圧力が急激に上昇している様子が確認できるとともに、その衝突により主流の一部がフィルター層へ流入していることもわかる。

### (3) 法肩の圧力低下によるブロック離脱を起因とする被覆ブロック群崩壊過程の再現計算

図 4 に、裏法面上のすべての被覆ブロックおよびフィルター層の礫群を可動とした計算結果のスナップショットを示す。越流が発生し、徐々に水位が上昇すると、まず法尻・法肩周辺のブロック孔部からの礫の吸出しが発生した。続いて、最上段ブロックが水路幅方向を軸として回転振動し、上から 2 段目のブロックが最上段ブロックとの接触によって徐々に上昇する。最上段ブロックが 2 段目のブロックの下に潜り込んだ後、2～4 段目のブロックが浮上し、流出に至る。それに連動してそれら以外のブロックおよび礫の大多数が最終的には流出した。以上の一連の崩壊過程についてはまだ詳細な検証を行っていないが、水理実験で観察された現象とはほぼ一致しており、本シミュレーションが定性的には再現性があることが確認された。このようなシミュレーションはこれまでに国内外で成功されておらず、この点で本研究の意義は大きいと言える。

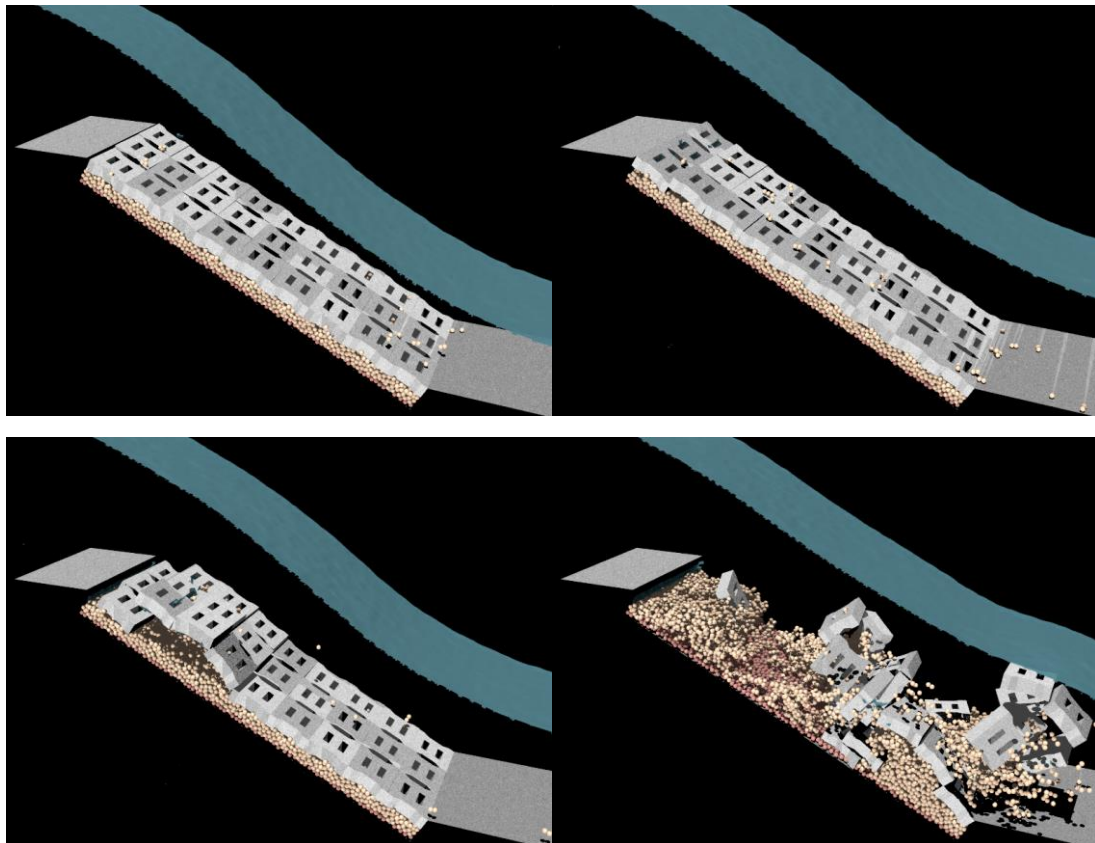


図4 大規模津波による裏法面上被覆ブロック群崩壊過程のシミュレーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroyuki Ikari, Takashi Yamano and Hitoshi Gotoh	4. 巻 208
2. 論文標題 Multiphase particle method using an elastoplastic solid phase model for the diffusion of dumped sand from a split hopper	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 104639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2020.104639	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 五十里洋行・後藤仁志・樋口優一・長田直樹	4. 巻 76
2. 論文標題 多数粒子群の突入による水面波発生解析における固液間相互作用モデルの検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 25-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_1_25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 五十里洋行, 後藤仁志, 丹羽元樹, 藤原聖史	4. 巻 76
2. 論文標題 海岸堤防裏法被覆ブロック孔部からのフィルター材の吸出しに関する数値解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 871-876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_1_871	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 五十里洋行, 後藤仁志, 小林祐司, 藤原聖史	4. 巻 75
2. 論文標題 三次元高精度粒子法による海岸堤防裏法肩被覆ブロック離脱過程の数値解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 853-858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.75.1_853	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 五十里洋行
2. 発表標題 多数粒子群の突入による水面波発生解析における固液間相互作用モデルの検討
3. 学会等名 第67回海岸工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五十里洋行
2. 発表標題 三次元高精度粒子法による海岸堤防裏法肩被覆ブロック離脱過程の数値解析
3. 学会等名 第66回海岸工学講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------