

令和元年6月24日現在

機関番号：31302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18153

研究課題名（和文）津波流速低減効果を考慮した最適な海岸堤防構造の検討

研究課題名（英文）Coastal dyke structure for tsunami energy reduction by scour formation

研究代表者

三戸部 佑太（MITOBE, Yuta）

東北学院大学・工学部・講師

研究者番号：60700135

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：巨大津波が海岸堤防を越流すると背後の地面が局所的に大きく侵食される。この堤防背後における洗掘現象は津波による堤防破壊要因として知られるが、津波の勢いを抑え背後域の被害を減少させた可能性が指摘されている。この研究では洗掘の発達およびエネルギー減衰効果を実験に基づき明らかにし、これに基づく数値シミュレーションにより減災効果について議論した。また、洗掘状況が異なる構造においても同様の解析を行い、減災効果を考慮した最適な堤防構造について議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究で得られた成果は今後も発生する巨大津波に対する対策として重要な役割を担う海岸堤防について、その構造の決定に有用な知見を与えるものである。さらに研究の中で得られた洗掘の発達過程およびエネルギー減衰効果の経験式によるモデルを組み込むことで、一般的な津波氾濫計算においてそれらの減災効果を評価することが可能となる。個々の地域特性や想定津波に対し、最適な海岸堤防を検討するための有用なツールとなるものである。

研究成果の概要（英文）：Tsunami overflow causes local scour behind coastal dykes. The scour has been known as one of the main cause of the destruction of dykes by the 2011 tsunami, while it is pointed out that the scour absorbed the tsunami energy to reduce the damages behind them. In this research, the process of the scour development and its effect of tsunami energy reduction were investigated through hydraulic experiments, and the empirical model was proposed to calculate them in numerical simulations of tsunami inundation. Based on the proposed model, numerical experiments were conducted to discuss proper toe structures of coastal dykes to reduce the tsunami energy for disaster reduction measures.

研究分野：海岸工学

キーワード：海岸堤防 津波 局所洗掘 減災効果 水理実験 数値実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年東日本大震災津波により多くの箇所で海岸構造物に大きな被害が発生した。これをきっかけとして、津波による海岸堤防の破壊過程や対策工に関する検討が盛んに行われている。海岸堤防の破壊は主に津波の越流により生じたことが明らかになっており (Kato et al., 2012), また海岸堤防を越流した津波はその背後の地域に甚大な被害をもたらした。将来来襲する巨大津波に対しては津波越流を考慮した対策を行うことが必要不可欠である。津波越流に対して海岸堤防が発揮すべき効果として、まず第一に津波の市街地への氾濫流量の低減が挙げられる。津波の堤防越流流量は津波の高さと堤防の高さの関係で決定されるものであり、より高い海岸堤防を設置し、また津波越流時にもその高さを維持することが必要となる。このことから津波越流時にも堤防の高さを長時間維持可能ないわゆる粘り強い構造に関する検討が多くの研究者によって進められている (例えば鳩貝ら, 2012)。特に海岸堤防裏法尻に発生した局所洗掘は堤防破壊の要因として注目されており、その発達過程や対策構造の検討が必要とされている。

(2) 次に海岸堤防が津波越流に対して発揮すべき効果は堤防背後における流速や流体力を抑制することである。巨大津波が海岸堤防を越流した場合氾濫流の市街地への到達は免れないが、その流速や流体力を低減させることができれば、市街地や重要施設への到達時間の遅延や建物や社会基盤構造物の破壊確率の低減といった効果が期待できる。上述の堤防裏法尻における洗掘は海岸堤防の破壊要因となった一方で、堤防背後域への被害を低減させた可能性が指摘されている。しかし、これまでの既往研究は海岸堤防の安定性に着目した粘り強い構造に関するものが主体であり、後者のような背後域の流れへの影響やその減災効果に関する検討は限られている (Tanimoto and Tokida, 2012)。そこで堤防背後における洗掘のエネルギー減衰効果を考慮した最適な海岸堤防形状に関して検討が必要である。

2. 研究の目的

(1) まず海岸堤防裏法尻における局所洗掘過程およびそのエネルギー減衰効果について水理模型実験に基づき調査を行った。既往の研究において、堤防裏法尻において2つの特徴的な流れの構造が存在し、これに応じて洗掘過程が変化することが知られている。固定床実験における流速分布の計測によりそれぞれの流れ場の特徴およびその洗掘過程への影響を明らかにするとともに、移動床実験に基づいて洗掘の発達過程および洗掘孔による津波エネルギー減衰効果を定量的に評価することを第一の目的とした。

(2) 次に洗掘の発達過程およびエネルギー減衰効果を津波数値計算に取り入れるためのモデル化を行うことを目的とした。一般的な津波遡上計算手法に取り入れるため、移動床実験結果に基づいて堤防条件や越流条件に対する洗掘孔の大きさやエネルギー減衰率の時間変化のモデル化を行った。

(3) 次にいくつかの通常と異なる構造の海岸堤防について同様に洗掘の発達過程およびエネルギー減衰率をモデル化することを目的とした。粘り強い構造として提案・実施されている法尻保護工を設置した条件および被災後に確認されている裏法面のみ破壊された半壊条件の堤防背後における洗掘を移動床実験により計測し、その発達過程およびエネルギー減衰率のモデル化を行った。

(4) 最後にモデル化した洗掘過程およびエネルギー減衰率を取り込んだ津波遡上数値計算を実施し、裏法尻洗掘による減災効果を明らかにするとともに、津波減勢効果を考慮した上での最適な海岸堤防構造について議論することを目的とした。

3. 研究の方法

ここでは上述の研究目的の内容ごとに対応した研究方法を示す。

(1) 先行研究において実施した移動床実験によって得られた堤防裏法尻の洗掘形状の計測結果を参考に洗掘形状をモデル化し、これを再現した透明アクリル製の固定床上の流れを Particle Tracking Velocimetry (PTV) により計測した。床面下側に設置した鏡により鉛直断面に光を照射し、鉛直2次元断面の流速分布を計測した。移動床実験では堤防背後に砂層を設け、一定の越流水深に調整した定常流下での洗掘の発達過程を調べるとともに、その背後域における水深の測定結果および流量からエネルギーフラックスを推定し、その固定床条件の値との比によりエネルギー減衰率を求めた。これに基づき洗掘形状とエネルギー減衰率の関係を議論した。

(2) 上述の移動床実験及びその他の既往研究から得られる洗掘形状の時間変化およびエネルギー減衰率の実験結果を整理し、モデル化を行った。まず最終的な洗掘の大きさと越流水深について堤防高さで正規化を行い、経験式を求めた。次に最終的な洗掘の大きさを平衡状態と仮定し、これに漸近するように洗掘の大きさの時間微分を定式化し、最小二乗法により係数を決定した。また、洗掘の大きさとエネルギー減衰率の関係についてモデル化を行った。以上により、堤防高さおよび越流条件から、洗掘の大きさの時間変化およびこれに応じて変化するエネルギー減衰率を推定可能なモデルを作成した。

(3) 堤防裏法尻に保護工を設置したケースと堤防裏法面を破壊された半壊ケースを対象として追加の移動床実験を実施し、(2)の方法と同様にモデル化を行った。前者については保護工部分までを固定床、その背後を移動床として水理実験を実施した。後者は裏法面も移動床で作成

し、越流開始後すぐに洗掘されるようにすることで、半壊状態を再現した。

(4) 一般的に津波遡上計算に用いられる浅水流方程式モデルにより堤防背後域における水深、流速、流体力の変化を調べた。基本ケースとして、通常の堤防構造で洗掘が生じないケースを計算し、これと洗掘が生じた場合や堤防構造が異なる場合の計算結果を比較することで、背後域における減災効果を考慮した最適な海岸堤防構造について議論した。洗掘形状の発達やそれによるエネルギー減衰効果は(2)(3)によって取得したモデルにより数値計算に取り込んで、その影響を反映させた。

4. 研究成果

(1) はじめに実施した固定床実験では、法尻において流れが洗掘孔に潜り込むタイプの流れ場 (Type I) および法尻通過時に斜め上方に跳ね上がり洗掘後方に落下するタイプの流れ場 (Type II) が確認された

(図1)。Type I の流れでは洗掘孔の底面沿いに強い流れが通って洗掘背後に流れていく一方で、Type II の流れ場では水面付近で強い流速が生じ洗掘孔内にType I と逆方向の大規模渦が生じることが確認された。これはType I の流れ場では法尻近傍で大きな底面流速を生じて洗掘深が急速に発達し、Type II の流れ場では法尻で跳ね上がった水の着地点付近で洗掘が進み、侵食された土砂の一部が洗掘孔を埋め戻す、という各タイプの流れ場における洗掘の特徴を説明するものである。移動床実験においては同様な2つの特徴的な流れ場が確認され、これに応じた洗掘形状の変化を経て、洗掘が発達していく過程が計測された。Type I の流れ場では洗掘深が洗掘幅の0.3倍程度、Type II の流れ場では洗掘深が洗掘幅の0.1倍程度に近づくことが分かった(図2)。この洗掘の大きさとエネルギー減衰率を比較し、堤防高さおよび限界水深により正規化した洗掘深によりエネルギー減衰率が決定されることを明らかにした(図3)。洗掘深が小さい場合有意な効果は見られないが、洗掘深が大きくなると大規模渦や流れの分岐が生じ、エネルギー損失が生じる。さらに洗掘深が大きくなると、裏法尻における大規模渦のスケールよりも洗掘孔が大きく、流れに抵抗を与えにくくなることでエネルギー減衰率が低下することが分かった。また流れ場のタイプは洗掘過程に大きく影響する一方で、エネルギー減衰率に差は生じないことが分かった。

(2) 上述の洗掘過程およびエネルギー減衰率の特徴を踏まえてモデル化を行った。実験終了時の最終的な洗掘幅について堤防高さで正規化し、越流水深との関係を調べることで、他の既往研究のデータも含めて一つの曲線上に乗ることがわかった(図4)。これは洗掘孔の大きさが堤防越流流れにおける裏法尻の渦スケールに依存することを示している。一方で洗掘深は流れ場のタイプによって変化するため、洗掘幅の0.1~0.3倍の間の値を持つことが分かった。洗掘幅はケースによらず最終的な洗掘幅に向かって漸近するように増加する傾向があり、一つの経験式により表現が可能である。また、エネルギー減衰率は、渦や分岐の発生によるエネルギー損失の増加を表す関数と、渦スケールに対して洗掘深が大きくなることによるエネルギー減衰率の低下を表す関数の積として表現することができた(図5)。以上の成果により、堤防高さおよび越流水深から洗掘の大きさの時間発展およびエネルギー減衰率を定量化し、経験式に基づき計算可能とした。

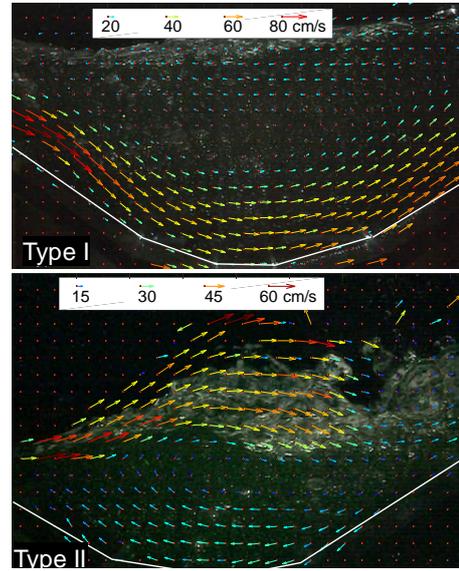


図1 固定床実験における特徴的な流れ場

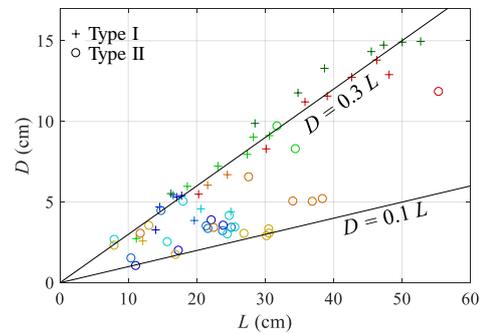


図2 洗掘幅と洗掘深

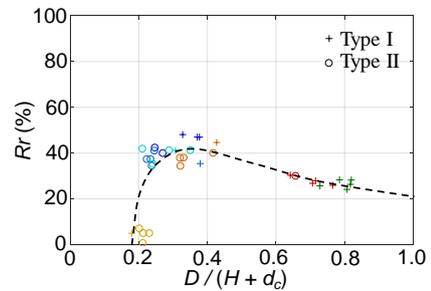


図3 洗掘幅とエネルギー減衰率

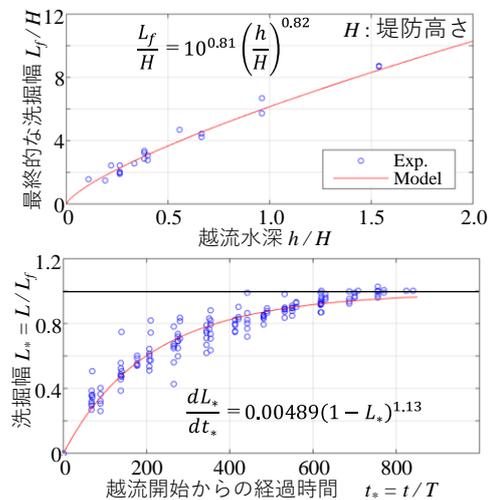


図4 洗掘の発達過程のモデル化

(3) 法尻保護および半壊条件の法面破壊ケースについても(2)と同様の解析によりモデル化を行った。法尻保護ケース、法面破壊ケースのいずれにおいても洗掘幅の最終的な大きさおよび時間発展は通常構造のものと同様一致する値を示し、洗掘幅は通常構造と同じモデルにより計算可能であることがわかった(図6)。堤防高さおよび越流水深に対する堤防背後の渦スケールは堤防裏法面・裏法尻の構造によらず、これにより洗掘幅が決定する。一方で洗掘深は、法尻保護ケースで洗掘幅の0.1倍、法面破壊ケースで洗掘幅の0.2倍で概ね安定した。法尻保護のケースでは法尻において流れの方向が水平に変わること、Type II の流れ場が生じやすく、これにより0.1倍に安定し、法面破壊ケースでは堤防天端からの落下流れとなり、こちらも通常構造のような流れ場のタイプの遷移が生じにくいいため、洗掘形状が安定するものと考えられる。エネルギー減衰率についても通常構造と同様な傾向が得られたが、法尻保護ケースではエネルギー減衰率の増加が早い。これはより小さな洗掘深において跳水による渦が生じ、エネルギー損失が生じるためであり、渦や分岐の発生によるエネルギー減衰率の増加を表す関数を修正することで、法尻保護条件の減衰率を表現できた。以上の結果から、粘り強い構造として提案・実用されている法尻保護条件や半壊の法面破壊条件における洗掘の発達過程およびエネルギー減衰率を定量化し、経験式による計算を可能とした。

(4) 最後に上述のモデルを組み込んだ津波氾濫計算を行い、洗掘状況や堤防構造の背後域への影響を検討した。仮想的な入射波に対し数値実験的に各条件における水深、流速、流体力を比較した。これにより以下の結論を得た。

- ① 通常構造では背後に形成される流れ場のタイプにより、背後域の流れへの効果が異なる。Type I の流れ場となり深く洗掘されるケースでは、大規模の越流に対し抗力を低減する効果があるが、越流の規模が小さい条件では抗力を逆に増加させる可能性がある。Type II の流れ場となる場合は洗掘深が大きくなり、効果が無い。
- ② 法尻保護工を設置する場合や裏法面が破壊される半壊条件においては抗力を低減させるが、その効果の発生までに時間を要し、最大抗力に変化は生じない。一方で越流規模が小さい場合でも抗力の増加は生じなかった。
- ③ 越流規模が大きくなる巨大津波に対し、通常構造の洗掘は減災効果を発揮する可能性はあるが、流れ場のタイプの制御は難しく、また越流規模によっては逆効果となる可能性があるため、安定的な効果は期待できない。一方で、法尻保護や裏法面の破壊が生じる条件では安定して抗力を低減する側の効果となる。

④以上の結果から、法尻保護工や裏法面破壊時は流れ場の構造が安定し、流れ場のタイプに不確定要素を含む通常構造よりも津波対策として安定した効果が得られるものと考えられる。裏法面破壊条件については、鋼矢板二重壁による堤防補強構造など、法面破壊が生じても堤防天端高に損失を生じない堤防補強を施すことで、実現可能であろう。

(5) 本研究により、津波以後重要視されている堤防背後における洗掘現象について基礎的な知見を得るとともに、その発達過程および津波減勢効果についてモデル化し、その減災効果を検証する手法を構築した。より具体的に減災効果に基づく最適な堤防条件を決定する上では、個々の地域の特性や想定津波に基づく数値計算が必要となるが、本研究で提案したモデルはそのような個々の地域における堤防背後の洗掘の発達およびエネルギー減衰による減災効果の検討に応用が可能である。ただし、本研究において提案したモデルは水理実験に基づくものであり、大スケールを対象とした実験や数値計算に基づくスケール効果の検討が今後の課題である。

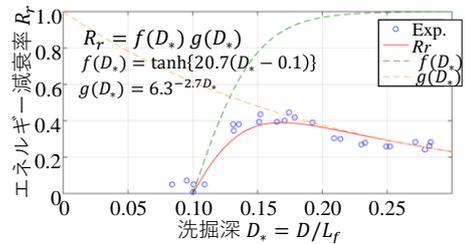


図5 エネルギー減衰率のモデル化

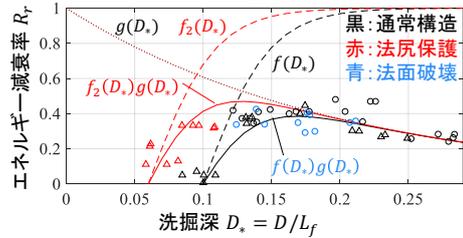
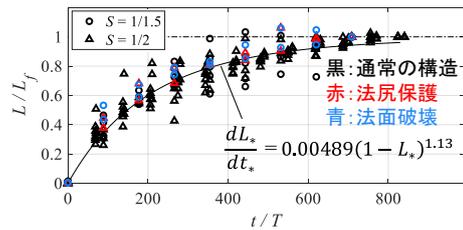
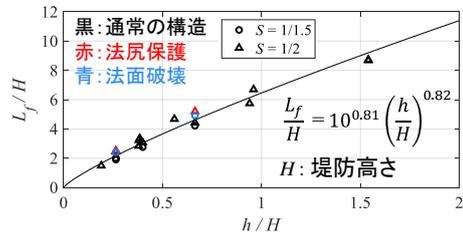


図6 法尻保護・法面破壊のモデル化

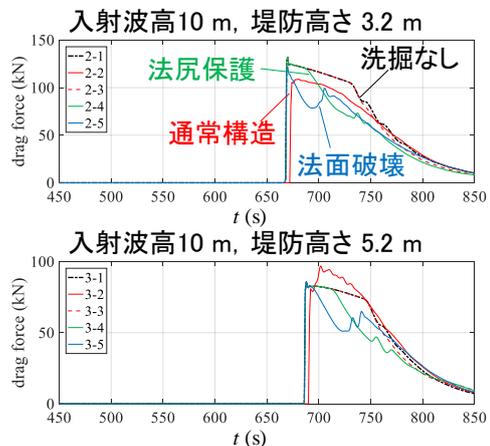


図7 堤防から1500m地点の流体力

<引用文献>

- ① Kato, F. et al., Proc. of 33rd Int. Conf. on Coastal Eng., 9 pages, 2012.
- ② 鳩貝聡ら, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_406-I_410, 2012.
- ③ Tanimoto, R. and K. Tokida, Int. Symp. on Earthquake Eng., Vol. 1, pp. 143-150, 2012.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 三戸部佑太、阿部こゆき、海岸堤防裏法尻洗掘による津波エネルギー減衰の減災効果に関する数値実験、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、査読有、Vol. 74, No. 2, 2018, pp. I_223-I_228
DOI: https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_223
- ② 金子祐人、三戸部佑太、田中 仁、会田俊介、小森大輔、海岸堤防裏法尻の洗掘孔の発達過程と津波減勢効果に関する水理実験、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、査読有、Vol. 73, No. 2, 2017, pp. I_871-I_876
DOI: https://doi.org/10.2208/kaigan.73.I_871
- ③ 金子祐人、三戸部佑太、乙志和孝、黒澤辰昭、田中 仁、小森大輔、海岸堤防裏法尻の洗掘孔内の流れ場と流速低減効果に関する水理実験、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、査読有、Vol. 72, No. 2, 2016, pp. I_913-I_918
DOI: https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_913

[学会発表] (計 3 件)

- ① 三戸部佑太、阿部こゆき、海岸堤防裏法尻洗掘による津波エネルギー減衰の減災効果に関する数値実験、第 65 回海岸工学講演会、2018
- ② 金子祐人、三戸部佑太、田中 仁、会田俊介、小森大輔、海岸堤防裏法尻の洗掘孔の発達過程と津波減勢効果に関する水理実験、第 64 回海岸工学講演会、2017
- ③ 金子祐人、三戸部佑太、乙志和孝、黒澤辰昭、田中 仁、小森大輔、海岸堤防裏法尻の洗掘孔内の流れ場と流速低減効果に関する水理実験、第 63 回海岸工学講演会、2016

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：金子 祐人

ローマ字氏名：KANEKO Yuto

研究協力者氏名：阿部 こゆき

ローマ字氏名：ABE Koyuki

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。