

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K19248

研究課題名（和文）構造物の壊し方をデザインすることで減災は可能か？

研究課題名（英文）Is it possible to reduce disasters by designing how to destroy structures?

研究代表者

澤田 豊（SAWADA, Yutaka）

神戸大学・農学研究科・准教授

研究者番号：60631629

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：豪雨や津波など水による侵食や洗掘で土構造物が破壊される事例は多い。本研究では、ため池と海岸堤防を対象に新たな侵食・洗掘対策法を考案するとともに、地盤の一部を意図的に侵食させること（侵食の促進）による減災の可能性を各種実験により検証した。その結果、地盤の一部を水中比重の小さい材料に置換することで、侵食が促進された。また、侵食促進により海岸堤防背後に窪地を形成することで水平方向の流速が低下した。ため池の天端に高低差を設けた条件で実施した越流実験では、法面の侵食は先行する上部の侵食痕や石や根の存在により複雑に進展するため、天端の起伏だけで侵食を制御することは困難であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

堤防の越流侵食に関する先行研究では、対象となる堤防は砂など均一な土で構成されており、堤軸方向の侵食については同一と見なされ、2次元的に議論されてきた。しかしながら、本研究で実施した天端に若干の起伏がある場合や石や根を含む実際の土を対象とした場合、法面の侵食は2次元的には評価できないことが明らかとなり、学術的に意義がある成果が得られた。

また、本研究で提案したEPSなど軽量な材料で地盤を置換することで、鉛直方向の侵食が促進されることは、当初から予想はされていたものの、その侵食速度は予想以上に速く、工夫次第で様々な応用が考えられる。

研究成果の概要（英文）：There are many cases in which embankments are destroyed caused by erosion or scour due to a heavy rainfall and a huge tsunami. In this study, new countermeasures against erosion and scour for small earth dams and coastal dykes have been proposed, and the possibilities of disaster reduction by promoting erosion of a part of ground has been verified by various experiments. As a result, erosion could be promoted by replacing a part of ground to lightweight materials. The depression formed by promoting erosion could effectively reduce horizontal flow velocity. Moreover, a model experiment on overtopping erosion of a small earth dam with the different crest height has showed that the erosion of the slope complicatedly progresses by the existence of other erosion, stones and roots. Therefore, it is impossible to control erosion of slope by only setting ups and down of crest.

研究分野：地域環境工学

キーワード：ため池 海岸堤防 減災 侵食 洗掘

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、気候変動による局地的な大雨により、ため池堤体での越流侵食による決壊が後を絶たない。また、東日本大震災では、津波の越流により海岸堤防が破壊する事例が多数生じた。財政状況が逼迫する中、新たな放流設備や堤防嵩上げではなく、低コストかつ環境負荷の小さい防災対策が望まれていた。

2. 研究の目的

上記の背景の中、地盤の一部を意図的に侵食させる(侵食を促進する)ことで減災を達成することを考えた。具体的には洪水時にため池天端の一部を侵食させ、天端の高さを変化させることで下流法面の侵食位置を制御することと海岸堤防を越流した津波により背後地盤の一部を侵食させることで窪地を形成させ、津波の流速を低減することである。また、現実的にはこうした侵食促進だけでは、減災効果は不十分であり、侵食・洗掘対策も併せて実施する必要がある。そこで、従来とくに対策が施されていなかったため池堤体法面の侵食対策として、竹を用いた侵食対策を考案した。さらに、海岸堤防法面の洗掘対策工として、従来のコンクリート製ブロックを用いる方法ではなく、液状化地盤でも沈下しないように、軽量のメッシュシートを用いた洗掘対策工を考案した。本研究は、上記の新たなアイデアに対して、その効果などを実験的に検証するものである。

3. 研究の方法

上記研究目的を達成するためには、(1) 地盤の侵食促進方法を提案するとともにそれらの効果を検証する必要がある。そこで、3種類の地盤侵食促進方法を考え、これらの方を対象に小型アクリル水路を用いた水理模型実験を実施した。また、(2)

窪地での流速低減については、その発生メカニズムを明らかにするため、同小型水路を用いた水理実験ならびに数値解析を実施した。さらに、(3) メッシュシートを用いた海岸堤防の法面洗掘対策に関して、その効果を検証するため、鉛直噴流による洗掘実験を実施した。

一方、ため池に関する検討項目としては、(4) 天端に高低差がある条件で越流した場合での下流法面の侵食特性を把握するため、模型斜面を用いた越流侵食実験を実施した。また、(5) 竹を用いた法面侵食対策に関して、その効果を検証するため、同対策を施した模型斜面を対象に降雨+越流実験を行った。以下、それぞれの具体的方法について述べる。

(1) 地盤の侵食促進方法に関する実験

本研究では、地盤侵食を促進させるために、①地盤密度、②地盤材料の粒径、③地盤材料の水中比重に注目し、これらの影響について検証するため図1および表1に示す条件で水理実験を実施した。Case 1-4は常流、Case 5は射流条件とした。Case 4およびCase 5では、地盤上流部100×100×100mmの空間を粒子密度が0.07 g/cm³であるEPS破砕片で埋め戻した。なお、本実験でのシルズ数は限界シルズ数以上の値である。

(2) 窪地による流速低減メカニズムに関する実験および数値解析

本実験でも(1)で用いた小型アクリル水路を用いた。ただし、(1)の移動床部分には、地盤材料ではなく、窪地を模擬するためのアクリル製の段差(3.3, 4.7, 5.1, 5.3, 10, 20 mm)を設けた。また、数値解析には、オープンソースコードOpenFOAM²⁾を用いて、段差流れに関する水路実験をシミュレーションした。

(3) メッシュシートを用いた地盤の洗掘抑制方法の検証実験

図2に示すように、本実験では、津波来襲時の

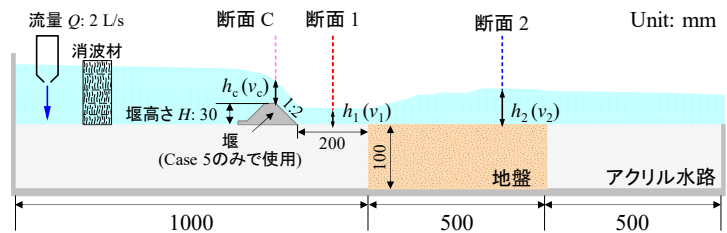


図1 アクリル水路と実験(1)の状況¹⁾

表1 実験ケース¹⁾

	地盤材料	相対密度
Case1 ($Fr=0.56$)	6,7 混合珪砂	90%
Case2 ($Fr=0.56$)	6,7 混合珪砂	15%
Case3 ($Fr=0.56$)	8号珪砂	90%
Case4 ($Fr=0.56$)	6,7 混合珪砂 EPS破砕片	90%
Case5 ($Fr=2.1$)	6,7 混合珪砂 EPS破砕片	90%

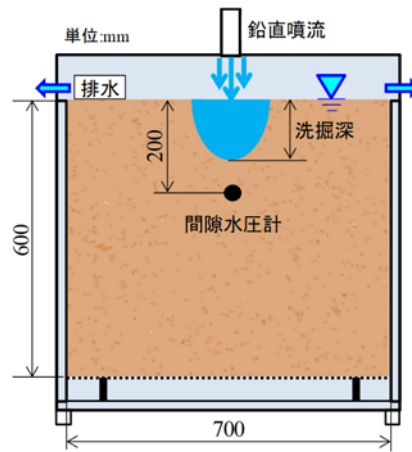


図2 アクリル水槽と実験(3)の状況³⁾

表2 実験ケース³⁾

	目合い	被覆率
Case 1 (無対策)		
Case 2	1.07 mm	29.0%
Case 3	1.07 mm	42.4%
Case 4	1.02 mm	58.8%
Case 5	0.33 mm	58.1%
Case 6	0.11 mm	58.4%

越流水を模擬した鉛直噴流（流量：190 L/min，流速 4.2 m/s，噴流径 0.031 m）を 1 分間地盤に作用させ、洗堀の進行過程を亚克力前面より撮影した。対策工としてメッシュシートを使用し、表 2 に示すように、目合いおよび被覆率（単位面積あたりに占める洗堀対策工の割合）を変化させることで、シートの特徴が洗堀抑制効果に与える影響について検証した。

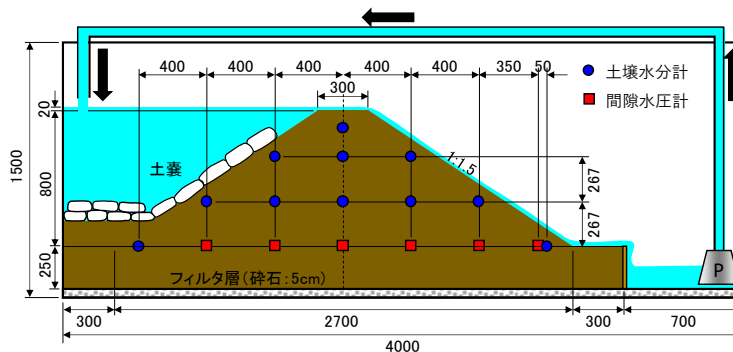


図 3 模型ため池堤体の越流実験の状況

(4) 天端に高低差がある条件下で堤体を越流した場合の侵食実験

堤体天端に起伏がある（あるいは意図的に高低差を設けた）場合の法面の越流侵食特性を明らかにするため、天端軸方向の高さに差を設けて（軸方向に 15mm）、越流実験を実施した。実験中央断面を図 3 に示す。堤高 800 mm，天端幅 300 mm，奥行き 1000 mm の堤体模型（ $\rho_t = 1.658 \text{ g/cm}^3$ ， $w = 29.6\%$ ）を対象に、堤体中央部での越流水深が 10～22.5 mm なるように段階的に循環水の流量を増加させ、計 75 分の越流を与えた。実験終了後に法面侵食状況を観察した。なお、本実験では、越流前に降雨（25.7 mm/h で 60 分，54.8 mm/h で 10 分）を与え、堤体内の浸透特性についても検討した。

(5) 竹材による侵食対策を行った模型斜面の降雨+越流実験

下流法面の侵食対策としての竹材の有効性を検証するため、写真 1 に示すように、竹を流下方向と直交するように配置した。基本的には図 3 に示した実験断面と同じとしたが、流速を増加させるため堤高を 150 mm 高とした（堤高 950 mm）。また、堤体の密度は $\rho_t = 1.583 \text{ g/cm}^3$ で、含水比は $w = 29.0\%$ である。降雨強度は 52.1 mm/h とし、連続で 1 時間作用させた。また、越流は、天端での水深を 20 mm として 35 分間発生させた。



写真 1 竹材の法面への設置状況

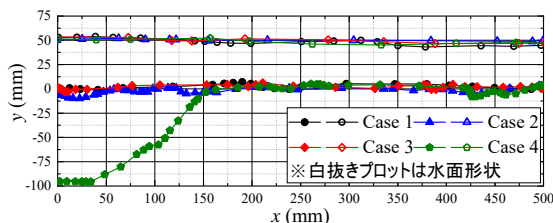


図 4 Case 1-4 の地表面および水面形状¹⁾
(実験開始より 30 秒後)

4. 研究成果

(1) 地盤の侵食促進方法に関する実験

図 4 に各ケースにおける流れ開始 30 秒後の地表面および水面形状を示す。Case 1-3 の地表面形状に多少の差は確認されるものの、侵食速度そのものは極めて小さく限界シールド数を超える水理条件においても、鉛直方向の侵食が発達するとは限らないことが明らかとなった。Case 4 では EPS 破砕片が下流側へと運搬され、大きな窪地が形成されていることがわかる。一方、Case 4 の水面形状に関しては、各位置における水深（流速）が Case 1-3 と同程度である。本実験における比エネルギー E と水深 h の関係（図 5）から、流れが常流の場合では比エネルギーの減少に伴い水深が減少し、流量一定の条件下では流速が増加することがわかる。このことから、越流流量が一定で常流であれば、窪地などが形成された場合においても流速の低減は期待できないと考えられる。

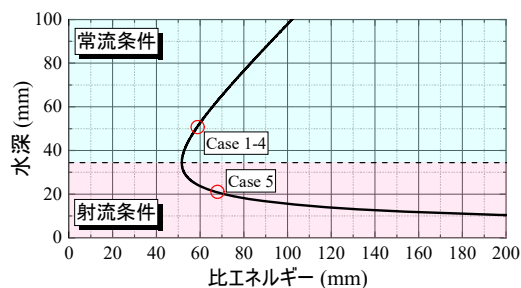


図 5 比エネルギーと水深の関係¹⁾

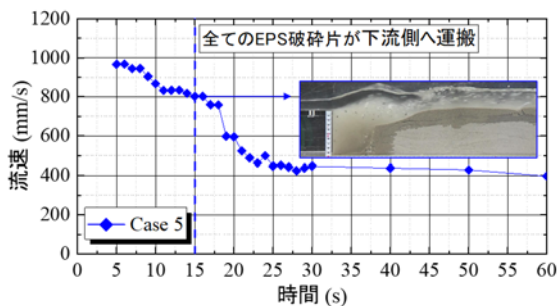


図 6 地盤上流端における Case 5 の流速変化¹⁾

地盤上流端における Case 5 ($Fr = 2.1$) の流速変化を図 6 に示す。窪地の形成により、流れの状態が射流から常流へ遷移し（跳水現象）、流速初期条件として設定した流速から 60%程度流速が減少している。すなわち、流れが射流である場合、窪地による洪水・津波流速の減勢手法は効果的であると言える。

(2) 窪地による流速低減メカニズムに関する実験および数値解析

海岸堤防背後地盤に形成された窪地による流速の低減メカニズムを明らかにするため、OpenFOAM を用いて、窪地を想定した段差流れに関する数値解析を実施した。段差の上流端を原点とし、陸側方向および鉛直方上向きを正とした。実験と同様の解析状況とし、流入境界から 2 L/s の水を発生させた。段差高さについては $s = 10 \text{ mm}$ とし、跳水現象が生じる直前の圧力分布を抽出した（図 7）。青プロットが正の値の場合は逆圧力勾配、負の値の場合は順圧力勾配を意味している。コンタ図から $x = 0 \sim 20 \text{ mm}$ の段差背後の領域で圧力低下が生じており、 $x = 30 \sim 50 \text{ mm}$ の水路底面部で特に圧力が上昇していることがわかる。これは、段差背後の圧力低下領域によって、流れが下向きへと変化し、水路底面部に衝突した結果、大きな逆圧力勾配が生じ、跳水現象が生じたと考えられる。

(3) メッシュシートを用いた地盤の洗堀抑制方法に関する実験

図 8 に洗堀深の時間変化を示す。Case 2~Case 4 ではシートが目合いが約 1 mm とおおよそ一定であり、被覆率はそれぞれ約 29, 42, 59%である。実験終了時における Case 2~Case 4 の洗堀深は Case 1（無対策）と比較して、それぞれ約 19%~27%減少しているものの、被覆率の 29~59%のという変動幅に対しては、洗堀深の減少率の変化はやや小さい。Case 4~Case 6 では被覆率が約 58%とおおよそ一定であり、目合いが 1.02, 0.33mm, 0.11 mm である。Case 1 と比較した実験終了時における洗堀深の減少率は、Case 4 が 27%であるのに対して、Case 5 および Case 6 で 78%および 86%と大幅に増加している。このことから、メッシュシートでは、洗堀が大幅に抑制される目合いに関する閾値が存在すると推察される。メッシュの目合いを m とすると、珪砂の 85%粒径 D_{85} ($= 0.36 \text{ mm}$) と m の比 m/D_{85} は、Case 4~Case 6 で 2.83, 0.92, 0.31 となる。洗堀抑制効果は Case 4 で小さかったことから、鉛直噴流など非常に強い流体力が作用する場合、 m/D_{85} が 2.83 程度では、土粒子が容易にメッシュシートを通過することが伺える。Case 5 および Case 6 では、他のケースと比較して大幅に洗堀深が減少したことから、地盤材料の 85%粒径とメッシュシートの目合いの比 m/D_{85} に関して少なくとも 1.0 より小さいことが望まれる。

上述の影響について整理したものを図 9 に示す。縦軸は各ケースにおける実験時の最大間隙水圧と実験終了時の洗堀深が Case 1 の値で無次元化されている。本実験の最も効果が確認されたケースにおいて、メッシュシートを地盤表層に設置することで、実験時に観察された間隙水圧の最大の増加量を約 91%、洗堀深を約 86%減少できたことは特筆すべき事項である。また、ここで得られた被覆率や目合いなどシート状洗堀対策工の効果を最大限に引き出すための知見は、経済的な洗堀対策の設計指針を確立する上で極めて重要なものである。

(4) 天端に高低差がある条件下で堤体を越流した場合の侵食実験

図 10 に実験後の法面の侵食状況を示す。天端右側は左端よりも約 15mm 低く調整されており、その分だけ越流水深が深い。図より天端については、右側が左側よりも侵食されている様子が見て取れる。法面に関しては、上部と下部で様子が異なる。法面上部では、右側の侵食が左側よりも激しく、深さ 10cm 程度の侵食が堤軸方向に向かって中央より右側に発生していることがわか

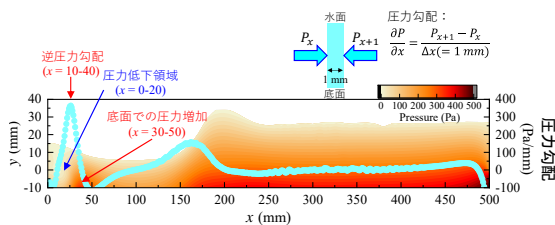


図 7 圧力勾配および圧力分布¹⁾

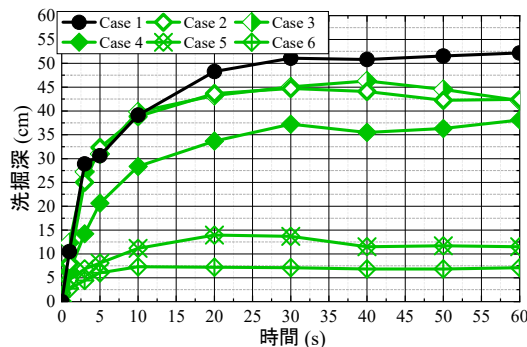
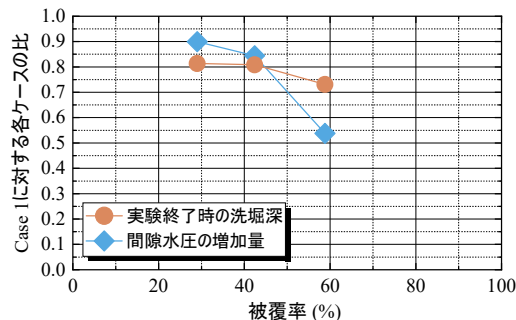
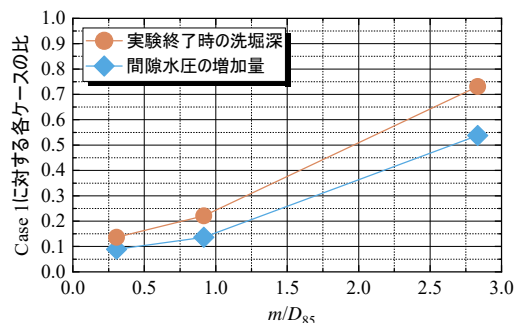


図 8 洗堀深の時間変化³⁾



(a) 被覆率



(b) 目合い

図 9 目合いと被覆率が洗堀深および間隙水圧の上昇に与える影響³⁾

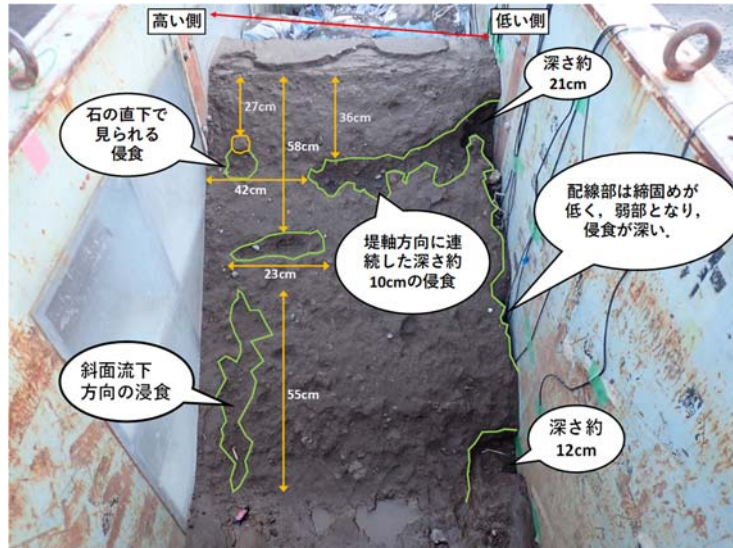


図 10 天端に高低差がある条件での越流による侵食状況



図 11 竹による侵食対策を実施した場合の侵食状況

る。特に右の壁面沿いに深い侵食が生じているが、これは計測機器のケーブルの影響であると考えられる。一方、法面下部については、右側の侵食が左側より明らかに大きいとは認められない。むしろ、上で述べた堤軸方向の侵食痕の存在により、流れが左側に誘導され、その結果、比較的大きな侵食痕や流下方向の侵食が発生している様子がわかる。また、本実験のように石や根を含んだ場合、これらの存在により侵食の進展は変化することから極めて複雑となる。したがって、本研究で当初期待した天端に高低差を設けることで法面の侵食を制御することは現実的には困難であると言える。

(5) 竹材による侵食対策を行った模型斜面の降雨+越流実験

越流前に 52.1 mm/h の降雨強度にて 1 時間の降雨を与えた。その結果、降雨による侵食は認められなかった。竹材を再度設置し、越流実験を実施した。実験終了後、竹を撤去した後の侵食状況を図 11 に示す。図より天端には大きな侵食は生じていないものの、天端から下流に 22-29cm の位置で極めて大きな侵食が生じている。これは、竹と土の間に回り込んだ水が、竹材の間から流出することで小さな侵食が発生し、その後次第に発達したものである。竹の節部では隙間があるため、この隙間を埋めることで防止できると考えられるが、これらの検証については今後の課題となった。

引用文献

- 1) Takegawa, N., Sawada, Y. and Kawabata, T., Mitigating tsunami damage by promoting ground erosion. (Submitted to *Marine Georesources & Geotechnology*)
- 2) OpenFOAM project web pages, <http://www.openfoam.org> (accessed 2020/05/18)
- 3) Takegawa, N., Sawada, Y. and Kawabata, T., (2020): Scour reduction in sand beds against vertical jets by applying sheet-like countermeasures, *Marine Georesources & Geotechnology*, DOI: 10.1080/1064119X.2020.1737893

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Takegawa Naoki, Sawada Yutaka, Kawabata Toshinori	4. 巻 -
2. 論文標題 Scour reduction in sand beds against vertical jets by applying sheet-like countermeasures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine Georesources & Geotechnology	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/1064119X.2020.1737893	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 竹川尚希, 角川莉央, 澤田豊, 河端俊典
2. 発表標題 EPS破砕片を用いた地盤侵食の促進に関する水理実験
3. 学会等名 2019年度農業農村工学会 大会講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

神戸大学大学院農学研究科土地環境学研究室 http://www.research.kobe-u.ac.jp/ans-soilenv/

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
---------------------------	-----------------------	----