

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02232

研究課題名(和文) 繰返し浸透負荷による劣化を考慮した土構造物耐災性能評価法の構築

研究課題名(英文) Performance of embankment deteriorated by repeated seepage flow against earthquake/flooding

研究代表者

高橋 章浩 (Takahashi, Akihiro)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：40293047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：堤防やダム、谷埋め盛土のような常に浸透流にさらされている土構造物は、細粒土の流失やパイピングといった内部浸食を受けており、時間とともに劣化していく。本研究では内部浸食の一つである細粒土流失に着目し、繰返し浸透による細粒土の流失過程、それに伴う土の劣化過程、浸食により劣化した盛土の地震や豪雨・洪水といった偶発作用に対する耐災性低下について実験的・解析的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

常に水の浸透流に曝されている土構造物は内部浸食により劣化していると考えられる。本研究の成果は、そのような土構造物の内、地震や豪雨・洪水に対する耐災性低下が懸念されるものの洗い出しや、土構造物の健康寿命の推定に資するものであることから、社会資本の全体最適化に向けた社会資本ストックのマネジメント高度化の一助となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Earthen structures subjected to repeated seepage flow, such as levees or dams, are often deteriorated by internal erosion. In this study, by focusing on suffusion, i.e., one of the modes of internal erosion, the process of deterioration of soils due to the migration of fine particles is identified and the vulnerability of the erosion-deteriorated earthen structures against earthquakes/floods is demonstrated through physical model tests and numerical simulations.

研究分野：地盤工学

キーワード：繰返し浸透 内部浸食 土構造物 耐災性

## 1. 研究開始当初の背景

ダムや堤防、谷埋め盛土といった土構造物においては、繰返し浸透流が土の細粒分の流失やパイピングといった内部浸食を引き起こすとされている。長期にわたる水の繰返し浸透流は、土の圧縮性の増大や強度低下等の土の劣化を引き起こし、地震や豪雨・洪水に対する土構造物の安定性を経年的に低下させている可能性がある。

一般に、新たに構築する土構造物の耐災性は、建設時の地盤情報をもとに評価される。しかし、上記のように水にさらされている土構造物では、内部浸食によって構造物を構成する土の状態は時間とともに変化・劣化している可能性があることを踏まえると、耐災性能の経時変化を考慮した社会資本ストックのマネジメントが、全体最適化には不可欠と考えられる。

土構造物の耐災性能、特に内部浸食による性能の経時変化評価のためには、(a) 土の内部浸食発生条件の評価、(b) 内部浸食された土の劣化程度の評価、(c) 土構造物中の内部浸食進展の評価、(d) 内部浸食された土構造物の地震や洪水に対する安定性評価が必要となるが、この内、(b)～(d) に不明な点が多く残されている。

## 2. 研究の目的

上記のような背景を踏まえ、土構造物として浸透（内部浸食）の影響を受ける盛土を対象として、繰返し負荷条件下での浸食の進展過程の解明と、地震や豪雨・洪水といった偶発作用に対する耐災性低下について実験的・解析的に明らかにすることを目的とする。具体的には、繰返し負荷条件下で発生する浸食の進展過程を実験的に解明し、それを数値解析により説明する。これらを踏まえて、繰返し負荷条件下での浸食進展推定法の枠組みを提示する。

## 3. 研究の方法

研究の背景に示した (b)～(d) について調べるため、実験・数値解析を実施した。

### (1) 内部浸食による土の劣化評価のための要素試験と構成則の構築

初期細粒分含有率が異なる不連続粒度分布砂質土を対象として、三軸試験装置を用いて浸食・せん断試験を行った。実験では、繰返し浸透回数を変化させた上で、試料を非排水条件下のもと、単調・繰返しせん断した。また、このような試験結果を踏まえて、数値解析に必要な浸透流による細粒土の浸食則と内部浸食された土の構成則を構築した。

### (2) 土構造物の内部浸食進展と耐災性低下評価のための遠心模型実験

遠心模型実験用環境制御装置を開発し、これを用いて繰返し浸透流による堤防の内部浸食進展を調べるための浸透実験と、劣化した堤防の振動台実験を遠心力載荷装置上にて実施した。実験では、繰返し浸透による浸食進展解明のため、繰返し浸透回数を変化させて実験を行った。

### (3) 土構造物の内部浸食進展と耐災性低下評価のための数値解析

遠心模型実験での浸食過程における堤防内の透水係数の時空間分布の変化を浸透流解析のデータ同化によって把握した。また、上記の堤防に対する浸食・振動台実験の再現解析も有限要素解析により実施した。加えて、内部浸食の度合いが地震時の堤防の動的応答（耐震性）に与える影響を調べるためのパラメトリック・スタディも実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 内部浸食による土の劣化評価のための要素試験と構成則の構築

初期細粒分含有率が異なる不連続粒度分布砂質土を対象として浸食・せん断試験をしたところ、初期細粒分含有率が 30%未満であれば容易に浸食が発生し、図 1 に示すように、内部浸食によって非排水せん断強度が低下すること等が明らかとなった (Prasomsri & Takahashi, 2020)。また図 2 に示すように、繰返しせん断によって (Test ID の N の後の数字が繰返し浸透回数) 液状化抵抗が低下することも確認された (Prasomsri & Takahashi, 2021)。

上記のような土の要素試験結果を踏まえて、数値解析に必要な浸透流による細粒土の浸食則と内部浸食された土の構成則も構築できた (Wang *et al.*, 2020; Wang & Takahashi, 2022)。

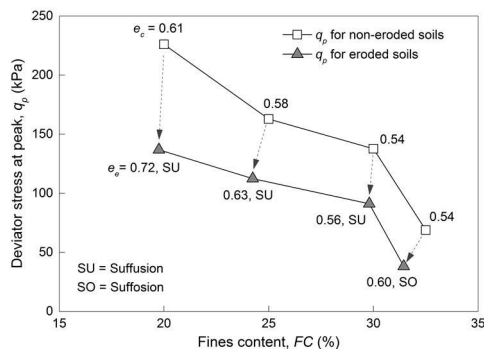


図 1 内部浸食の有無と非排水せん断強度

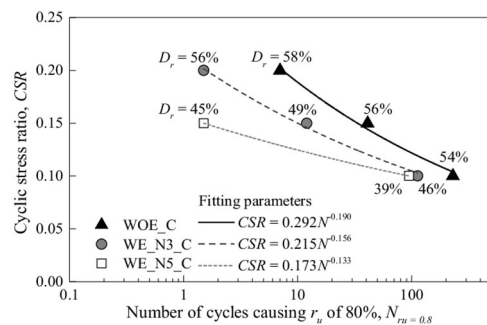


図 2 繰返し浸透に伴う液状化抵抗の低下

(2) 土構造物の内部浸食進展と耐災性低下評価のための遠心模型実験

図3に示すような遠心模型実験用環境制御装置を開発し、浸透・振動台実験を堤防に対して行った。堤防右側の河川内水位を上下させることによって、洪水による繰返し浸透流を再現した。堤防に繰返し浸透流を与えると、図4に示すように、川裏側法尻付近から川裏側に向かって内部浸食が進展することが明らかとなった(井上ら, 2021)。

このように内部浸食された盛土に対して、振動台実験を実施した。その結果、内部浸食の進展に伴い、図5に示すように盛土内のせん断波速度が低下すること、盛土の固有振動数も図6に示すように低下すること等を明らかにした。なお、このように内部浸食に起因する劣化による盛土の動的挙動の変化を示した実験事例はこれまでにない(山縣ら, 2021)。

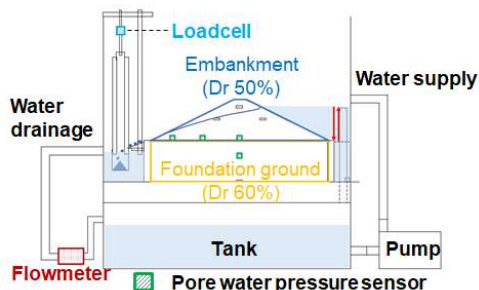


図3 遠心模型実験用環境制御装置

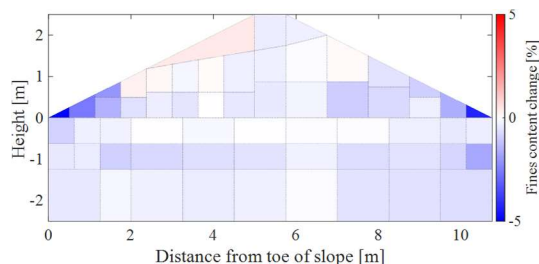


図4 繰返し浸透流による細粒土増減の例

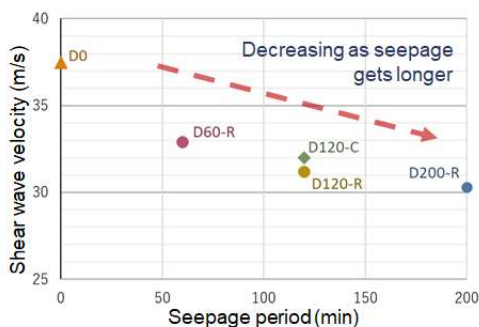


図5 浸食進展に伴うせん断波速度の低下

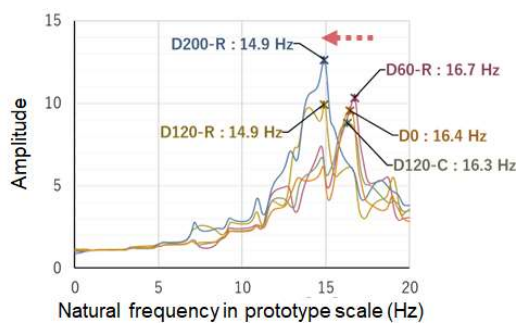


図6 浸食進展に伴う盛土固有振動数の低下

(3) 土構造物の内部浸食進展と耐災性低下評価のための数値解析

遠心模型実験での浸食過程における堤防内の透水係数の時空間分布の変化を浸透流解析のアンサンブル・カルマン・フィルターを用いたデータ同化によって推定することができた。解析では、実験での間隙水圧変化と流量を観測値として透水係数の推定を試みた。観測点が限られていることから、図7に示すように堤防及び基礎地盤を分割し、各領域の透水係数を逐次推定した(図8)。浸食された細粒土の沈降による基礎地盤の透水係数の減少や、川裏側法尻付近から川裏側に向かう内部浸食の進展に伴う透水係数の増加といった、実験結果と整合する透水係数の変化を推定することができた。

堤防に対する浸食・振動台実験の再現解析も有限要素解析により実施した。このような再現解析に加えて、内部浸食の度合いが地震時の堤防の動的応答(耐震性)に与える影響を調べるためのパラメトリック・スタディも実施した。これらを通じて解析法の妥当性を検証し、繰返し負荷条件下での浸食進展推定法の枠組みを概成した。

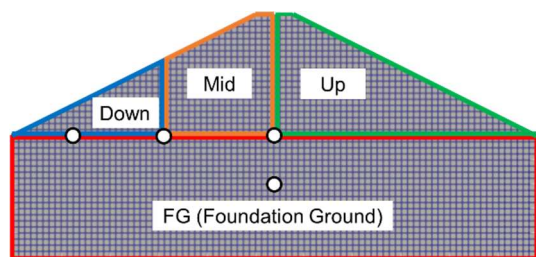


図7 透水係数推定のための領域分割

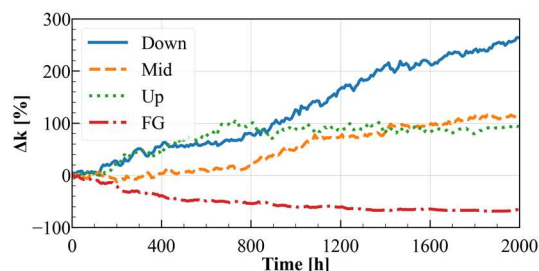


図8 浸食進展による透水係数変化の例

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Wenyue Zhang, Akihiro Takahashi.	4. 巻 40
2. 論文標題 Statistical and parametric studies on natural levees as weak points against leakages in river levees	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geotechnical and Geological Engineering	6. 最初と最後の頁 5643-5666
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10706-022-02238-y	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 Mao Ouyang, Akihiro Takahashi	4. 巻 45
2. 論文標題 Mechanical consequence observation and microscopic visualization of internal erosion using developed plane strain erosion apparatus	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geotechnical Testing Journal	6. 最初と最後の頁 411-431
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1520/GTJ20200298	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 Prasomsri Jitrakon, Takahashi Akihiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Experimental study on suffusion under multiple seepages and its impact on undrained mechanical responses of gap-graded soil	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1660 ~ 1680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2021.10.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Prasomsri J., Shire T., Takahashi A.	4. 巻 11
2. 論文標題 Effect of fines content on onset of internal instability and suffusion of sand mixtures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geotechnique Letters	6. 最初と最後の頁 209 ~ 214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1680/jgele.20.00089	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 該当する

1. 著者名 Wang Gang, Takahashi Akihiro	4. 巻 17
2. 論文標題 A modified subloading Cam-clay model for granular soils subjected to suffusion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geomechanics and Geoengineering	6. 最初と最後の頁 1294-1308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17486025.2021.1928769	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 Prasomsri Jitrakon, Takahashi Akihiro	4. 巻 60
2. 論文標題 The role of fines on internal instability and its impact on undrained mechanical response of gap-graded soils	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1468-1488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2020.09.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wang Gang, Horikoshi Kazuki, Takahashi Akihiro	4. 巻 38
2. 論文標題 Effects of Internal Erosion on Parameters of Subloading Cam-Clay Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geotechnical and Geological Engineering	6. 最初と最後の頁 1323-1335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10706-019-01093-8	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 Enomoto Tadao, Horikoshi Kazuki, Ishikawa Keisuke, Mori Hiroto, Takahashi Akihiro, Unno Toshiyasu, Watanabe Kenji	4. 巻 61
2. 論文標題 Levee damage and bridge scour by 2019 typhoon Hagibis in Kanto Region, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 566-585
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2021.01.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yusaku Ito, Shota Noda, Akihiro Takahashi, Kazuki Horikoshi
2. 発表標題 Measurement techniques for capturing piping-induced deformation of levees in centrifuge model
3. 学会等名 10th International Conference on Scour and Erosion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jitrakon Prasomsri, Akihiro Takahashi
2. 発表標題 Experimental Study on Internal Instability of Dike Foundation Soil and Its Impact on Mechanical Response
3. 学会等名 10th International Conference on Scour and Erosion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上珠希, 山縣沙季, 堀越一輝, 高橋章浩
2. 発表標題 繰り返し浸透負荷による堤防内での内部侵食進行に関する実験的研究
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山縣沙季, 井上珠希, 堀越一輝, 高橋章浩
2. 発表標題 繰返し浸透流による内部侵食が堤防の地震時挙動に与える影響
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠山弘毅, 笠間清伸, 高橋章浩, 堀越一輝
2. 発表標題 土の内部侵食に関する鉛直上向き浸透流実験
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤優作, 高橋章浩, 堀越一輝
2. 発表標題 縦断方向に敷幅が変化する河川堤防のパイピングに伴う法面変位
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤優作, 野田章太, 高橋章浩, 堀越一輝
2. 発表標題 深度センサーを用いた遠心場での堤防変形の計測
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田章太, 堀越一輝, 高橋章浩
2. 発表標題 旧河道に起因する空間的な地盤構成が堤防のパイピングに与える影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jitrakon Prasomsri, Akihiro Takahashi
2. 発表標題 Impact of suffusion and suffosion on undrained mechanical response of sandy soils
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Horikoshi, Shota Noda, Ayumi Takizawa, Akihiro Takahashi
2. 発表標題 Centrifuge Modeling for Visualization of Backward Erosion Piping Progression
3. 学会等名 27th Meeting European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams & their Foundations (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀越一輝, 野田章太, 高橋章浩
2. 発表標題 洪水バターンの違いが堤防基礎地盤のパイピングに及ぼす影響の検討
3. 学会等名 第7回河川堤防技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田章太, 堀越一輝, 高橋章浩
2. 発表標題 旧河道に起因した土質構成が河川堤防の耐浸透性に及ぼす影響
3. 学会等名 第16回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Jitrakon Prasomsri, Akihiro Takahashi
2. 発表標題 Preliminary tests on suffusion characteristics and its mechanical consequences on sandy soil subjected to multistage seepage flows
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
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
研究分担者	堀越 一輝  (Horikoshi Kazuki)  (90771965)	東京工業大学・環境・社会理工学院・助教    (12608)	

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		
英国	University of Glasgow		