

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：16301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12491

研究課題名(和文) 堤防表面の微小変形情報を基にした洪水時破堤危険度のリアルタイム評価法構築

研究課題名(英文) Real time levee inspection to detect progress of piping holes during flooding based on settlement of levee surface

研究代表者

岡村 未対 (Okamura, Mitsu)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：50251624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、堤防全体にわたってリアルタイムで取得可能な唯一の情報である高精度の堤防形状データを用い、堤体内部の浸水や内部洗掘による状態と安定性を評価する方法の構築の緒とするため、降雨及び高水の浸透により生じる堤体形状の微小だが特徴的な変形パターンに着目し、変形パターンと堤体及び基礎地盤内パイピングの関係を遠心模型実験により明らかにした。堤体が砂質土だけではなく細粒分の多いシルト質土や粘性土の場合について実験を行い、表面の形状からパイピングの位置、規模を特定できるモデルを開発した。また、高水で被災した堤防の調査を行い、本モデルの適用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：This study, a series of centrifuge tests was conducted first to investigate settlement profile of river levee slope due to loss of soil from the piping inside the levee. Relationship between settlement profile and size and location of piping holes is established, which makes it possible to identify the piping based only on settlement of slope surface. The possible piping holes of Kinugawa river levee, in which sand was ejected from levee toe during the flooding event in 2015, are estimated using the relation. At the same site, penetration tests are conducted to identify the locations where the soil loosened possibly by piping during the flooding. It was found that the location estimated by the relation coincided with that detected by the penetration tests, confirming the validity of the relationship.

研究分野：地盤工学

キーワード：洪水 河川堤防 防災

1. 研究開始当初の背景

河川堤防について、これまでに数百 m ~ 1km 毎のボーリング調査が実施され、またその情報を補完するための物理探査が行われてきた。しかしながら、高水により生じるパイピングなどの変状は、堤体や基礎地盤のごく一部の局所的な弱部が原因となるので、現状の調査では弱部を精度良く特定するに至っていない。そもそも物理探査は、例えばレーダー探査は探査深度の限界が地表から 1, 2m 程度であり、またその探査原理から対象物質内に反射率の異なる明確な境界（例えば土と空洞）が無ければ検知できず、緩み領域を発見することは原理的に不可能である。また比抵抗探査や弾性波速度探査も数十 cm 程度の小さな緩み領域は発見できず、現状の実務的調査法で堤防の変状を引き起こす弱部を特定するのは困難である。

土の力学特性は土質や密度、含水状態、さらには時間によって変化し、またマスとしての堤体の挙動は堤体や基礎地盤の複雑な土層構造に支配される。そのため、堤体の精度良い力学情報の存在を前提とした現在の土質力学体系内で、弱部を含む長大な河川堤防の挙動を予測するのはほぼ不可能である。一方、高水時には浸透により堤体土の含水・応力状態が変化し、それに応じてひずみが生じる。また、堤体が構造体として不安定化すれば、法面滑りやパイピングによる空洞・緩み等が発生する。このように構成する土要素レベルの変化、構造体としての不安定化、の何れによっても堤体は変形し、状態や不安定化に応じた特有の変形パターンが堤体表面に現れるはずである。これまで計測されていない小さなレベルの表面変位を知ることが、堤防の内部構造や力学特性が不明であっても、堤体の状態と危険度の評価に結びつく可能性がある。近年、様々な測定・解析技術が急速に発展しており、植生に隠れた堤体表面の高さを、短時間に面的に cm オーダーで測定することが現実的となってきた。

2. 研究の目的

本研究ではまずパイピングを対象を絞り、堤体表面の微小な変位分布からパイピング部の特定と規模の評価を行う方法を検討する。はじめに、実物の応力状態をほぼ正確に再現できる遠心模型実験装置を用い、堤体内にパイピングによる局所的な土砂流出を模擬した実験を行い、表面変位パターンと変形量を定量的に明らかにする。これを基に、地表面変位から地中のパイピング孔の位置、幅、流出土砂体積を評価する方法を構築する。続いて構築した評価方法を用い、噴砂や漏水が生じた実堤防のパイピング位置を推定すると共に、貫入試験を行ってパイピングによる

緩み位置を特定し、推定結果の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では次のような遠心模型実験を実施した。

実験では剛土槽（幅 430mm、深さ 230mm、奥行 120mm）を用い、図-1 のような模型堤防を作製した。まず表面粗のアクリルブロックを設置し、パイピング部を模した直方体の溶解性固結体（炭酸カルシウムの固結物）を二本固定した。この固結体は厚さ 0.02mm のフレキシブルなビニールシートでパックし片端部はシンフレックスチューブを接続、多端は解放した状態とした。その上に乾燥した豊浦砂（相対密度 50%）あるいは鳴瀬川堤防の堤体粘性土で高さ 10cm、法面勾配 1:2 の堤体を作成した。粘性土の場合は含水比を 32% に調整し、締固め度 89% の堤体とした。この模型を遠心装置に搭載し、遠心加速度場にて給水タンクからシンフレックスチューブを通して水を流し、固結体を溶解することにより、パイピングによる堤体からの土砂流出を模擬した。このパイピング模擬実験では 2 つの固結体（図-1 の と ）を一本ずつ順に溶解し、溶解前後の堤体表面形状を三次元測定した。この 3D 測定は、レーザープロファイラーとそれを土槽の長手方向に等速度移動させるアクチュエーターを用い、位置及び高さの測定精度 0.1mm で行った。

実験条件を表-1 に示す。砂質土堤防の実験では固結体の幅は 1cm とし、Case1 では 2 本の固結体の間隔 b を 0、Case2 では 1cm とした。また粘性土堤防の Case3 では固結体の幅を 2cm、間隔を 1cm とした。何れの実験でも固結体を始めに溶解し、その後固結体を溶解した。固結体については、対称性を考慮すると幅 2cm (Case1, 2) または 4cm (Case3) で高さ 1cm のパイピング部の半断面を模擬しており、固結体は の後に生じる幅 1cm または 2cm のパイピングである。

本実験は 25g の遠心加速度場にて行ったので、原型では高さ 2.5m の堤体底部に生じる幅 25cm ~ 1m、高さ 25cm のパイピングに対応する。

4. 研究成果

Case1 の実験で、一本目および二本目のパイピング部（部、部）の流出後に法面に現れた沈下量分布を図-2 に示す。パイピング部直上では、土被りの小さな法尻部で沈下量が大きく法肩に近づくにつれて小さくなっている。また縦断方向（ x 方向）でも直上で大きく、距離 x の増加と共に減少していることがわかる。

表-1 実験条件

実験 Case	堤体試料	パイピング部 幅×高さ	パイピング部 間 隔 b(cm)
1	乾燥豊浦砂	1cm×1cm	0
2			1
3	鳴瀬川粘土	2cm×1cm	2

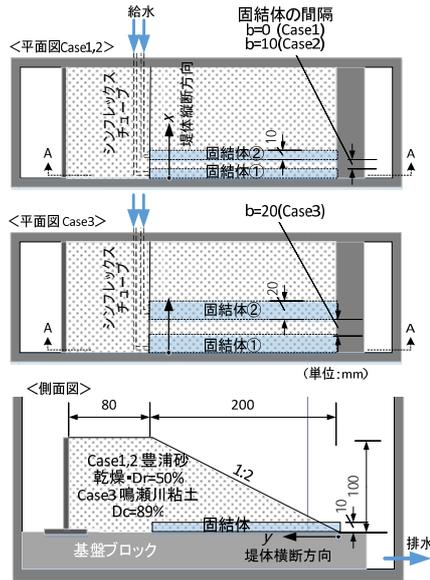


図-1 遠心模型の概要(砂質土堤体模型)。

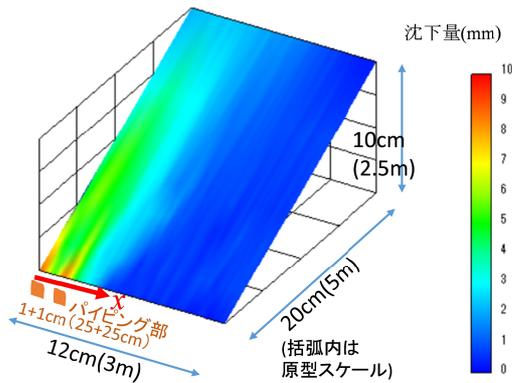


図-2 流出後の法面表面の沈下分布 (Case1)

(1) 1 本目のパイピングによる表面沈下性状

a) 1 本目パイピング部直上の横断形状

図-3 は砂堤防の実験においてパイピング部の流出後により生じた測線 A (図-1 参照) 上の堤体沈下量である。法尻からの水平距離 y が 0 から 2cm までの範囲は固結体上面が露出し堤体土が被っていないため、2cm 以降の沈下量のみを示してある。パイピング部の

流出による沈下量は、土被り厚がゼロの法尻部 ($y=2\text{cm}$) において固結体の初期高さに等しいほぼ 10mm で、距離 y の増加とともに沈下量は減少し、 $y>20\text{cm}$ の範囲(天端)では直下に固結体がないために沈下量は急減した。粘性土堤防 (Case3) では、粘土の強度が大きかったためパイピングによって生じた空洞が崩壊せずにある程度保持されたため、全体的に沈下量が小さくなった。

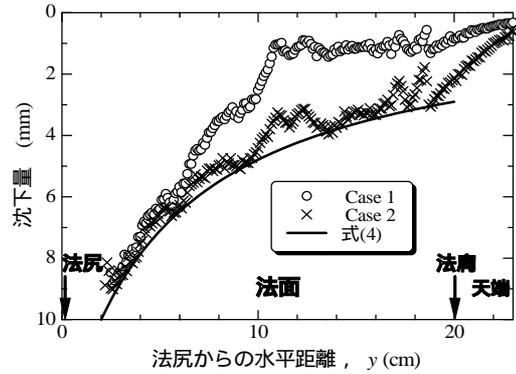


図-3 固結体後の A-A 断面での沈下量分布 (堤体横断方向)。

b) 縦断形状

固結体の流出による法面の堤体縦断方向 (x 方向) の沈下量分布を図-4 に示す。縦断方向の沈下量分布は、土槽壁面 ($x=0$) 付近で壁面との摩擦による影響により沈下量が小さくなっているが、このことを除けばパイピング部の直上で最も大きく、土槽側面からの距離 x がある程度大きくなった地点から沈下量はほぼゼロとなりパイピングの影響は見られなくなる。

Case1 の砂質土堤防の結果を詳細に見ると (図-4(a)), 法尻 ($y=0$) 近くではパイピング部直上の土被り厚さが小さく、そのため地表面沈下量の最大値は大きい影響範囲は狭い。法尻 ($y=20\text{cm}$) に近づくにつれ土被り厚は大きくなり沈下量は小さく、逆に影響範囲は広い。このような傾向は Case1, 2 とともに見られた。

何れの断面においても沈下分布は正規分布曲線状の形状となっている。一方、粘性土堤防では、表面から 4cm 程度の深さまで乾燥による含水比の低下と強度の増加が見られ、この影響をより強く受ける法尻付近ではほとんど沈下が生じなかった。しかしながらおよそ $y>9\text{cm}$ の範囲では沈下分布は正規分布曲線状の形状となっている。

(2) 沈下部分のモデル化

シールドトンネルの掘削に伴う地表面沈下特性に関する多くの研究により、トンネルの幅で正規化した土被り厚と地表面沈下領域の広さとに良い関係があることが知られている。図-5 に示すようにトンネルの幅(直径)を B 、土の体積損失部の高さを H 、トンネルまでの深さを D とし、ガウス曲線分布の地表

面沈下の変曲点距離を x_i (標準偏差) とすると, x_i/B と D/B の間に図-6 に示すような関係があることが知られている²⁾³⁾.

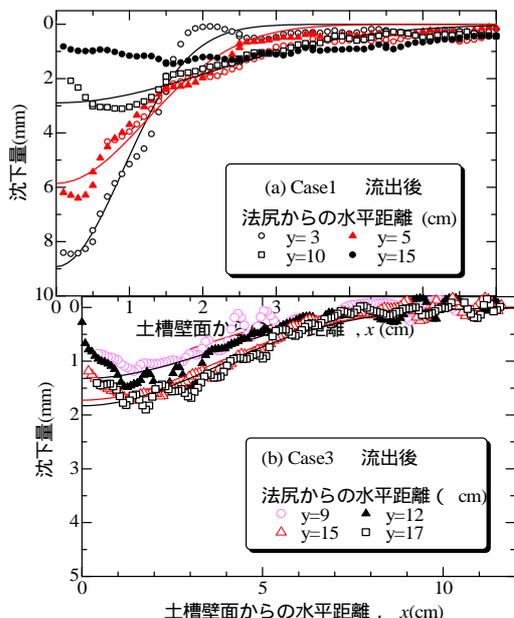


図-4 堤体縦断方向の沈下分布 (固結体 流出後).

本研究の実験結果を式(1)のガウス分布曲線により最小自乗近似した結果を図-4 に曲線で示す.

$$S = S_{\max} \exp\left(-x^2/2x_i^2\right) \quad (1)$$

パイピングの流出による沈下分布は, ガウス分布曲線によく近似できている. この近似曲線の x_i と土被り厚(パイピング部上面から法面までの高さ)の関係を図-6 中に示してある. 砂堤防の実験結果は, 飽和砂地盤におけるシールドトンネルの事例³⁾と近い位置にプロットされている. また, 粘性土堤防の Case3 の結果も Peck³⁾と良く一致している. シールドトンネルの事例のほとんどは地表面が水平であるが, 堤体法面のように地表に傾斜があっても, 沈下分布形状は水平地盤の場合と同様になることがわかる.

砂堤防において 堤体表面から D の深さで, 幅 B , 高さ H の矩形部分の土がパイピングにより流出することを考える. 図-6 に示した砂堤防の結果を直線近似すると,

$$D/B = 4.6(2x_i/B - 0.8) \quad (2)$$

となり, 地表面の沈下面積がパイピング部の流出断面積と等しいと仮定すると, 沈下面積 V は

$$V = \sqrt{2\pi} S_{\max} x_i = BH \quad (3)$$

となる. 式(2)(3)より, S_{\max} は,

$$S_{\max} = \frac{BH}{\sqrt{2\pi}(D/9.2 + 0.4B)} \quad (4)$$

となる. この関係は図-3 中に示すとおり, Case2 の実験結果とよく合っている.

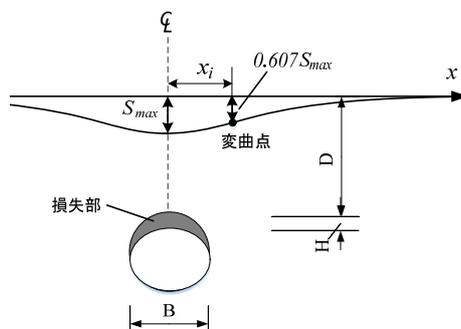


図-5 地下の体積欠損による地表沈下の模式図.

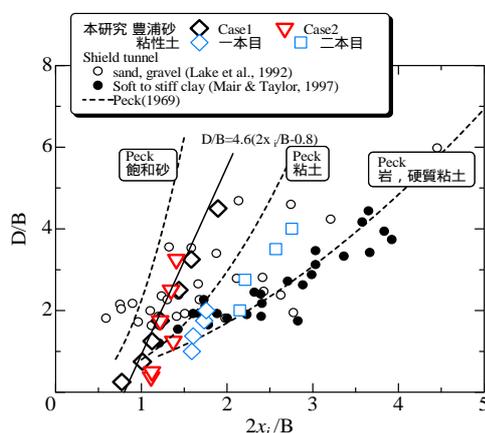


図-6 縦断面沈下分布の変曲点距離と深さの関係

本研究で行った実験での H/B は, 固結体 では $0.25 \sim 0.5$, 固結体 では $0.5 \sim 1$ である. 実地盤ではパイピングが発生する飽和砂質土層内で縦横比 H/B の大きな空洞が安定的に形成されることは考えにくい. そこで, H/B が $0.1 \sim 0.5$ の範囲にあると仮定すると, B と D は次式のように表せ, 沈下量の横断分布 (S_{\max} と x_i) を測定すればパイピング部の H , B , D が求まる.

$$H = (0.1 \sim 0.5)B, B = \left[\frac{\sqrt{2\pi}}{0.1 \sim 0.5} S_{\max} x_i \right]^{0.5} \quad (5a)$$

$$D = 4.6B(2x_i/B - 0.8) \quad (5b)$$

(3) 2本目のパイピングによる表面沈下性状

一本目のパイピング部(固結体)を溶解・流出させた後に固結体に通水し, これを溶解・流出させた. 図-2 に示した Case1 の固結体 流出後の沈下分布において, では W 型の沈下分布が明瞭に見られ, との流出による沈下の履歴が現れている. すなわち

を一体のパイピング部(パイピング幅 $B=4\text{cm}$)とした時に現れる幅の広い一つの正

規分布状の沈下分布にはなっていない。

(4) 実堤防における検証

平成 27 年の台風 17・18 号に伴う豪雨災害により、鬼怒川では漏水と噴砂が発生した⁵⁾。噴砂・漏水の発生箇所において堤体表面形状を測定し、前節で構築したモデルを用いてパイピング部を推定する。推定結果は、原位置で実施した貫入試験で特定した緩み箇所と比較することで推定結果の妥当性を検証する。

a) 堤体表面形状の計測

対象地点は漏水・噴砂が複数発生した鬼怒川左岸堤防 13.2k 付近である。堤内側横断面図と平面図を図-7 に示す。4 つの月の輪の直上に A から D の測線を設け、それぞれからの位置にて堤防縦断方向にテープを貼り、法面（土の表面）の鉛直方向の凹凸を植生を避けて 10cm 毎に計測した。なお、A と B の月の輪に溜まっていた噴砂の体積は、おおよそ 0.2~0.3m³であった。また、この堤体は砂質土であった⁵⁾。

b) 計測結果

噴砂が見られた A 測線の表面形状計測結果を図-8 に示す。法先に近い位置では深さ約 7cm、幅約 1m の窪みが 2 つ見られ、位置（小段の上）でも同様の窪みが見られ。何れも沈下分布は正規分布形状でありからにかけて窪みの沈下量は徐々に小さく、幅は広がっており、パイピングに特有の形状であることから、この位置の直下で 2 本のパイピング孔が発生し、土砂流出が起きたと考えられる。また、からの法面上部では特徴的な形状の窪みは見られないが、これはこの直下で土砂流出が生じなかったのか、あるいは土被り厚が大きくなり判別できる地表面沈下が生じなかったのかは不明である。このような表面形状は同等量の噴砂のあった B 測線でもみられたが、漏水のみで噴砂が無かった他の測線や他の計測箇所ではいずれもこのような特徴的な窪みは見られなかった。

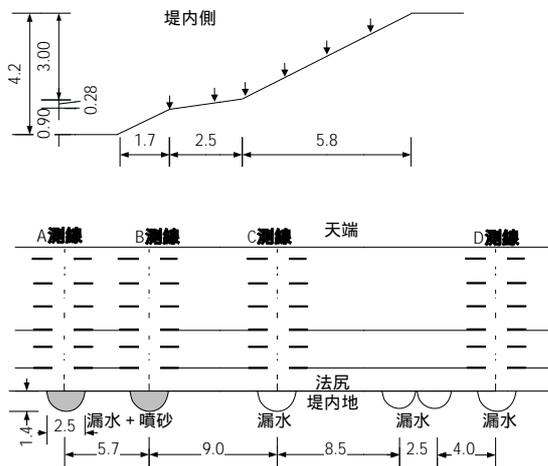


図-7 鬼怒川左岸 13.2k 漏水箇所における堤体表面の計測位置

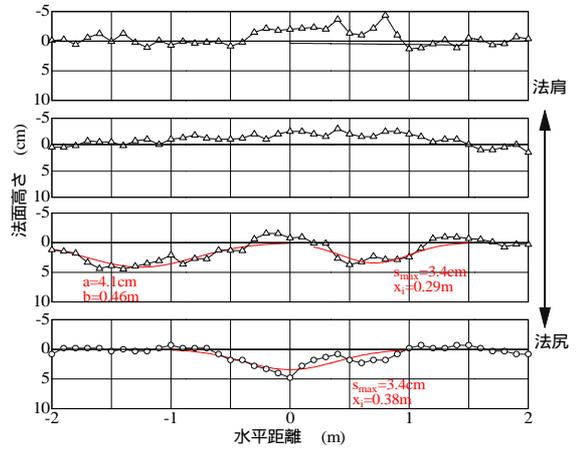


図-8 鬼怒川左岸 13.2k, A 測線における堤体表面の縦断形状。

c) 堤体・地盤内部のパイピング位置の推定
特徴的な窪み形状が見られた A 測線, B 測線を対象に、地表面形状からパイピング位置とその規模を推定する。表面形状をガウス曲線で近似した結果を図-9 に曲線で示す。各凹部分の S_{max} と x_i を式(5)に代入して求めたパイピング部の位置と大きさを図-9 に示す。なお、 H/B が 0.1 と 0.5 の場合について示してある。図中の赤い実線部が直上の表面形状から推定したパイピング部である。A 測線では位置では幅が 57cm、高さが 6cm ($H/B=0.1$) で表面から 1m の位置にパイピング部があり、その先は 2 つに分岐し位置では幅が 68cm と 50cm、高さが 5cm と 7cm のパイピング部が存在すると推定した。A 測線の位置の左側パイピング部では $D=84\text{cm}$ ($H/B=1$) が $D=184\text{cm}$ ($H/B=0.5$)、右側パイピング部では $D=140\text{cm}$ ($H/B=0.1$) が $D=255\text{cm}$ ($H/B=5$) となる。今回は計測位置 ~ の間に 2~3m の間隔があったためこのように離散的な推定結果となったが、測定位置間の間隔を狭くし、あるいは面的に高密度で計測することにより連続的なパイピング位置の推定が出来る。

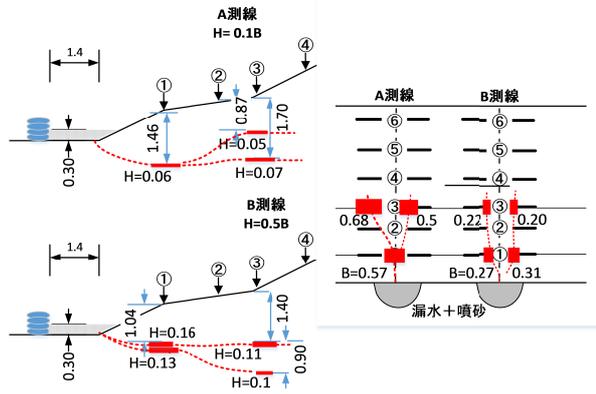


図-9 噴砂のあった A, B 測線で推定したパイピング位置

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 1 件)

1. 岡村未対, 平尾優太郎, 前田健一, パイピングにより堤体表面に現れる沈下の特徴, 河川技術論文集, 査読有, Vo.23, 2017, 399-404

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 左橋直也, 岡村未対, パイピングが引き起こす堤防表面沈下分布の堤体土質による違い, 平成 29 年度土木学会四国支部技術研究発表会, 2017.5.20, CD-ROM, 愛媛大学(愛媛県・松山市)

2. 岡村未対, 平尾優太郎, 左橋直也, パイピングによる堤体表面形状変化の特徴, 第 4 回河川堤防技術シンポジウム, 2016.11.28, 53-56, 土木学会(東京都・新宿区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡村 未対 (Mitsu Okamura)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 50251624

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

新清 晃 (Akira Shinsei)

安永 一夫 (Kazuo Yasunaga)

玉岡 亮一 (Ryoichi Tamaoka)