

令和元年6月16日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06519

研究課題名(和文) 越水ならびに浸透による河川堤防決壊のメカニズムに関する研究

研究課題名(英文) Mechanism of river embankment collapse by overflow of river and water seepage

研究代表者

関根 正人 (Sekine, Masato)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60187854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：堤防を構成する「礫・砂・粘土」の比率に応じて決壊のプロセスに顕著な差が現れることを明らかにし、そのメカニズムの解明に挑みました。砂礫の間隙を埋めるほどの粘土が含有されると粘土の耐浸食性ゆえに浸食が抑制され、決壊にしにくい粘り強い堤防となります。粘土と砂に加えてある比率で礫を含有されると礫粒子間のかみ合わせによる効果が顕著に見られるようになり、堤防決壊を起こし難くなります。ある比率以上に粘土が含有されると堤防が変形を起こすようになり、礫の含有比率が大きすぎると材料全体の透水性が増し浸透による決壊を招くこととなります。粘り強い堤防とするには最適な「礫・砂・粘土」の含有比率が存在すると推察されます。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球規模での気候変動と気象の極端化の影響により、記録的な豪雨が毎年のように発生しています。これに伴い、河川での堤防決壊も稀ではなく、2015年の鬼怒川の決壊に伴う大規模浸水を始め、国内のどこかで毎年のように甚大な被害に遭遇するようになりました。河川堤防は洪水による被害を食い止める最後の砦であるため、堤防を決壊し難い「粘り強い」ものとしていく必要があります。本研究によれば、堤防材料に占める「礫・砂・粘土」の比率に最適値が存在することが示され、現時点で言えば「3：4：3」がこれに当たるとの結論が得られました。これは、これまでに経験的に定めてきた指標に力学的な裏づけを与える結果と言えます。

研究成果の概要(英文)：It was clarified experimentally that a noticeable difference appeared in the process of collapse according to the ratio of "gravel, sand, clay" constituting the embankment, and the elucidation of the mechanism was revealed considerably. When clay is contained enough to fill the gap of the gravel, erosion is suppressed because of the erosion resistance of clay, and the embankment becomes much more tenacious and difficult to collapse. In addition to clay and sand, when gravel is contained in a certain ratio, the effect of the interlocking between the gravel particles becomes noticeable, and the embankment collapse is difficult to cause. If clay is contained more than a certain ratio, the embankment becomes easier to deform. If the content ratio of the gravel is too large, the permeability of the entire material is increased and collapse by penetration. It is believed that the best ratio of mixture among "gravel, sand, and clay" exists for a tenacious embankment.

研究分野：河川工学、水工水理学

キーワード：河川工学 水工水理学 移動床水理学 河川堤防の決壊 粘着性土の浸食 洪水

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球規模で進行する気候変動とこれに伴う気象の極端化の影響により、わが国でも毎年のように記録的な豪雨に襲われるようになりました。このような状況下で、2015年9月には鬼怒川の堤防が決壊し、大規模な浸水被害が発生しました。河川堤防は、洪水から我々の生活を守る最後の砦であり、ひとたび堤防が決壊するとこれに伴う被害はきわめて甚大なものとなります。ただし、堤防は基本的に砂礫や粘土などの材料によりつくられている構造物であり、他の人工構造物とはこの点で明らかな違いがあります。堤防が決壊する可能性について考える上で大きな障害はまさにこの点にあり、ボーリング調査を行った地点を除けばその土質構造は未知であり、推定をするほかありません。こうしたことから、堤防の決壊プロセスやメカニズムを力学的あるいは移動床水理学的に解明しようとする研究が系統的に行われることはありませんでした。ただし、千代田実験水路の堤防を用いた実物大スケールの決壊実験が寒地土木研究所<sup>1)</sup>により行われたことなど、いくつかの研究グループにより着実に知見の蓄積が進められてきました。堤防決壊を起こしにくい「粘り強い堤防」とはどのようなものか、今後に向けてどのような対策が有効であるか、といった問いに答えを見出すことが喫緊の課題であると言えます。

- 1) 島田友典・横山 洋・三宅 洋：千代田実験水路における背割堤を用いた越流破堤実験、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.67、No.4、pp.L841-L846、2011.

### 2. 研究の目的

研究開始の「背景」を踏まえて、模擬堤防を対象とした移動床水理実験を通じて、上記の問いの答えとなる知見を得ることが本研究の目的です。堤防が砂礫と粘土からなる混合材料でつくられていることから、「礫・砂・粘土」の含有比率を系統的に変化させることにし、異なる比率からなる材料で模擬堤防を作成し、これが越流により決壊するメカニズムの解明を目指しました。特に、砂礫のみの堤防に比べると、粘土がある比率を超えて含有されただけで、堤防が破壊されていくプロセスが明らかに変わる点は注目に値し、これがどのような理由によるものなのかを土砂水理学的に明らかにすることは学術的に大きな意味があると考えました。著者は、これまで長年にわたって、水流により粘土が浸食されるメカニズムに関わる研究を進めてきており、実験技術においても十分な蓄積とアドバンテージがあります。そこで、堤防決壊の問題をこれまでの研究の延長線上に位置づけ、解明に向けて挑むことにしました。

### 3. 研究の方法

実験は、全長 1.6 m、幅 1.0 m の実験水路内に作成した模擬堤防を対象に行われました。堤防の高さは 0.15 m であり、その下には基礎地盤として厚さ 0.05 m の土層を設けました。この層の構成材料は堤体材料と同一としました。本実験では、水平な水路の上流側壁面と堤防とで囲まれた空間を河川に見立て、注水を行うことによりこの水位を上昇させることによって堤防を越える流れを生じさせました。この堤防の下流側に当たる空間が堤内地に相当します。堤防を構成する材料としては、礫として珪砂 1 号(粒径 4.3 mm、比重 2.65)、砂として珪砂 7 号(粒径 0.15 mm、比重 2.65)、粘土として TA カオリン(粒径  $7.0 \times 10^{-3}$  mm、比重 2.65)をそれぞれ用い、これらの礫・砂・粘土の混合比率を系統的に変化させた一連の実験を行いました。材料全体に占める粘土の重量比率  $R_{cc}$  を「粘土含有率」、礫の重量比率を礫含有率  $R_{gc}$  と呼ぶことにすると、残りの  $1 - (R_{cc} + R_{gc})$  が砂の比率ということになります。実験に当たっては、それぞれの材料を所定の配合比率で水と一緒に十分練り混ぜ、一様となったもので模擬堤防を作成しました。堤防は本来に締め固められた状態にあることから、実験前に細心の注意を払い、実

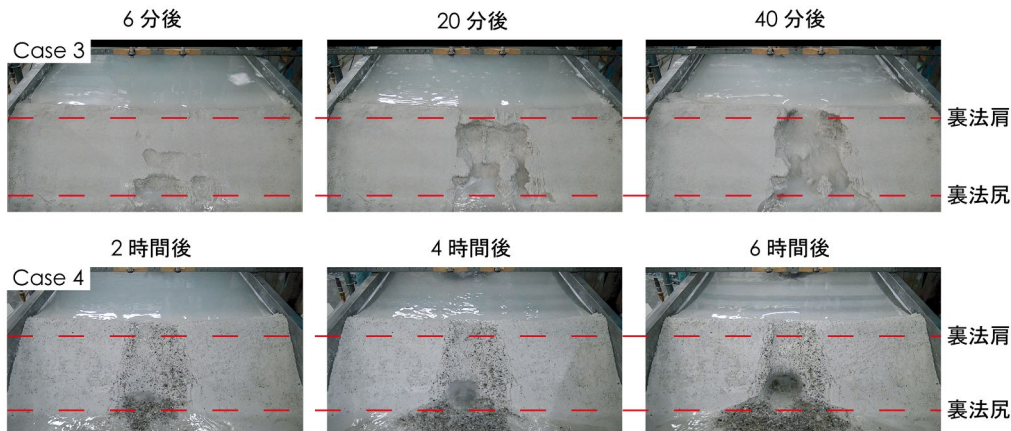


写真-1 模擬堤防の決壊プロセス：  
礫：砂：粘土の含有比率は、上段が 0：70：30%、下段が 30：40：30%

堤防と同程度の状態となるように努めました。

堤防の決壊プロセスを計測により捉えることは容易ではないことから、4 方向から同時に動画を撮影することにし、画像解析を通じて現象の本質に迫ることにしました。具体的には、(1) 堤防の真上から鉛直に見下ろすように撮影した画像、(2) 堤防の下流側から「裏法面」を水平に撮影した画像、(3) 堤防の天端と裏法面を斜め上方から撮影した画像に加えて、(4) 水中から表法面を撮影した画像、ということになります。このほか、堤防を含めた地形の形状を二次元レーザ式変位センサにより計測した結果をも考慮に入れ、堤防が決壊へいたるプロセスを三次元的に捉えることができました。このほか、河川区間側の水位の時間変動を超音波センサにより計測したほか、水路下流端から流出する水の流量ならびに砂礫の流砂量の計測も行いました。

本研究では、模擬堤防の決壊というダイナミックな地形の変動状況を把握するための実験技術を確立することも目指して行われており、試行錯誤を経て当初の目的が達成できたものと考えています。

#### 4．研究成果

本研究では、砂のみからなる模擬堤防を対象とした越流決壊実験を基本となる対照実験とし、砂に粘土あるいは礫、さらにはその両方を含有させた材料からなる堤防を対象とした実験を行いました。具体的には、「礫・砂・粘土」の配合比率を変化させた数十通りの材料からなる堤防に対して、その決壊プロセスを調べ上げ、粘土の含有比率  $R_{cc}$ 、礫の含有比率  $R_{gc}$  の違いが決壊プロセスに与える影響を定量的に評価しました。写真-1 には、二つの条件下で行われた実験時に撮影された画像を整理したものを示しています。上段は、 $R_{cc} = 0.3$ 、 $R_{gc} = 0$  の場合のプロセスを、下段は  $R_{cc} = 0.3$ 、 $R_{gc} = 0.3$  の場合のプロセスをそれぞれ表しています。なお、 $R_{cc} = R_{gc} = 0$  の砂のみの堤防の場合には、1 分程度で完全に決壊する結果となっています。これと比べると、粘土を 30% も含有しているため写真の右端の時刻であっても決壊には到っておらず、決壊に対して強い「粘り強い堤防」となっていることがわかります。さらに、上段と下段を比べると、同じ粘土含有率であっても 30% 分の砂が礫に置き換わっただけでさらに決壊し難い堤防になることがわかります。

本研究により得られた主要な点を以下にまとめて、本研究の結論とします。

(1) 砂のみからなる模擬堤防では、越流水が堤体表面に沿う形で浸食が進行するため、その決壊プロセスは単調なものとなります。これに対して、粘土を一定量以上に含有すると、浸食の仕方が変化し、ステップが形成されるような決壊のプロセスとなり、水の流れは落下流のよう

な体をなします。

(2) 堤体に粘土の粘着性の効果が顕著に現れるのは、粘土が最低でも7%程度含有される場合であることがわかりました。また、粘土含有率が30%を超える程度までは、耐浸食性は単調に向上する。しかし、ある上限を超えると、堤体が側方に膨れ出すなど変形しやすくなるため、安定が損なわれる可能性があります。

(3) 砂礫のみの条件では、粒子同士がかみ合う効果は発揮されないのに対して、定量の粘土が含有されるとこのかみ合わせ効果が顕著に現れるようになります。ただし、礫の含有比率が大きくなるにつれて透水性が増大するため、浸透破壊を引き起こす可能性が増すこととなります。

(4) 粘り強い堤防とするためには、礫・砂・粘土の比率も最適値があると推察されます。本研究の範囲内で判断するならば「礫：砂：粘土 = 3：4：3」の比率がこれにあたりと判断されました。この結果が前傾の下段の写真ということになります。また、この比率は、これまで経験的に望ましいとされてきた数値に近いこともわかっています。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計6件)

- 関根 正人、佐藤 耕介、菅 俊貴、模擬河川堤防の決壊プロセスに及ぼす含有する砂礫・粘土の影響に関する検討、土木学会論文集 B1(水工学)、査読有、Vol.74、No.5、2018、I\_1099-I\_1104
- 関根 正人、芦澤 穂波、佐藤 裕、吉川 文崇、河道湾曲部で発生する粘着性河床の変動プロセスに及ぼす掃流砂礫の影響、土木学会論文集 B1(水工学)、査読有、Vol.74、No.5、2018、I\_931-I\_936
- 関根 正人、佐藤 裕、芦澤 穂波、吉川 文崇、粘土河床上に配置した模擬巨石による砂礫の捕捉効果と河床変動プロセス、土木学会論文集 B1(水工学)、査読有、Vol.74、No.5、2018、I\_937-I\_942
- 関根 正人、堀江 翼、佐藤 耕介、越流による模擬河川堤防の決壊プロセスに関する検討、土木学会論文集 B1(水工学)、査読有、Vol.74、No.4、2018、I\_1057-I\_1062
- 関根 正人、池田 憲昭、芦澤 穂波、佐藤 裕、砂礫の移動に起因する粘土河床の浸食促進・抑制効果と河床変動プロセス、土木学会論文集 B1(水工学)、査読有、Vol.74、No.4、2018、I\_1087-I\_1092
- 関根 正人、佐野 正太、鈴木 昌宏、堀江 翼、粘土を含有した模擬河川堤防の決壊プロセスに関する実験的検討、土木学会論文集 B1(水工学)、査読有、Vol.73、No.4、2017、I\_817-I\_822

### 〔学会発表〕(計7件)

- 関根 正人、菅 俊貴、佐藤 耕介、礫を含有する模擬堤防の越流決壊プロセス、土木学会第73回年次学術講演会、2018年
- 関根 正人、芦澤 穂波、佐藤 裕、吉川 文崇、粘土河床上に配置した模擬巨石による河床変動と砂礫の捕捉効果、土木学会第73回年次学術講演会、2018年
- 関根 正人、佐藤 裕、芦澤 穂波、吉川 文崇、掃流砂の作用により生じる一様湾曲流路内の粘土河床の変動、土木学会第73回年次学術講演会、2018年
- 関根 正人、吉川 文崇、芦澤 穂波、佐藤 裕、掃流砂礫による粘土河床の浸食促進・抑制効果、土木学会第73回年次学術講演会、2018年
- 関根 正人、佐藤 耕介、堀江 翼、佐野 正太、鈴木 昌宏、堤防の土質構造の違いが決壊プロセスに及ぼす影響、土木学会第72回年次学術講演会講演会、2017年
- 関根 正人、芦澤 穂波、池田 憲昭、佐藤 裕、掃流砂の移動に伴い生じる粘土河床の浸食促進・抑制効果、土木学会第72回年次学術講演会講演会、2017年
- 関根 正人、佐藤 裕、芦澤 穂波、池田 憲昭、掃流砂の移動に伴う河道湾曲部の粘土河床の浸食現象、土木学会第72回年次学術講演会講演会、2017年

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。