

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 4 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14029

研究課題名(和文) マルチスケール相互作用に着目したパイピングを伴う堤防の進行性破壊メカニズムの解明

研究課題名(英文) Progressive seepage failure of river levee due to piping in multi-scale mechanics

研究代表者

前田 健一 (MAEDA, KENICHI)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50271648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：気候変動に伴い豪雨が頻発し高い河川水位が長く継続する作用下において、河川堤防下の透水性基盤からの漏水、パイピングを切欠とする破堤の原因解明は重要である。本研究では、パイピングを透水による粒子スケールの侵食・目詰まり、土要素や土層スケールの局所的なゆるみ・空洞化、流動化による土砂流や閉塞、構造スケールのすべりを伴う破壊というマルチスケールでの相互作用問題として捉え、数値解析や模型実験でパイピング内部の構造や流速の可視化にチャレンジする。応力鎖の発生・消滅による粒子群のダイナミクスを考慮し、パイピングの発生から発達までの新たな統一的説明に挑戦した。

研究成果の概要(英文)：The relationships among the body-foundation ground properties in river levee, river water level, sand boiling dynamics, piping growth rate, and pore water pressure were investigated by model experiment and three-dimensional seepage analysis. The key parameters for occurrence and consequence conditions of piping was pointed out to be the distance between the slope toe and its dead-end, the inlet condition and the multiple layer in permeable base layer, the unevenness of inside-land, the sizes and locations of sand boiling holes where sand particles were erupted due to the velocity and pressure of the localized flow. The decrease in water velocity also was an important efficiency in traditional methods in leakage control works.

研究分野：地盤工学

キーワード：粒状体 局所化流れ 限界流速 パイピング マイクロメカニクス 浸透破壊 すべり 陥没

1. 研究開始当初の背景

平成24年7月14日に九州北部で発生した豪雨により矢部川堤防でパイピング破壊が発生した。原因として、堤体直下の比較的透水性の高い砂礫へ浸透し、堤内側で漏水が発生、破壊が進行したとされている。国内外を問わず同様の地盤条件の堤防が多い。さらに、近年の多発する豪雨時には河川水位が高く、継続時間が長くなっており、破壊の危険性が増している。堤防をねばり強くし維持管理するためにも、従来は考慮されていなかった高水位継続時間とパイピングを伴う破壊速度の関係を解明することは、新しくチャレンジに値する課題である。

パイピング現象は、古くから土質力学の教科書でも記述されており、固体力学として有効土被り圧、局所動水勾配をキーワードとして発生条件が算定され、その進行性は水みちが短くなることで定性的に説明されてきた。しかし、定常状態中心の議論で、その発達の条件や速度などは明らかになっていない。一方、水工学では、発生後の流動化したパイプ状の土砂流としての単純化された流体の扱いに留まっている。いずれも固体か流体かの両極の視点やマクロな視点に偏っている。そこで、マクロとミクロを繋ぐスケール「粒子が鎖状に繋がり力を伝える応力鎖」、「応力鎖の発生・消滅による固体・流体の相変化の解釈」と「透水に伴う土粒子の侵食と目詰まり構造と土の力学特性と安定性の変化」に着目することで、ブレークスルーに挑戦する。

2. 研究の目的

気候変動に伴い豪雨が頻発し高い河川水位が長く継続する作用下において、河川堤防下の透水性基盤からの漏水、パイピングを切欠とする進行性破堤メカニズムの解明は、学術的観点だけでなく、堤防の強化・維持管理の観点からも重要な研究課題である。本研究では、パイピングを透水による粒子スケールの侵食・目詰まり、土要素や土層スケールの局所的なゆるみ・空洞化、流動化による土砂流や閉塞、構造スケールのすべりを伴う破壊というマルチスケールでの相互作用問題として捉える。複数の粒子が鎖状に連なり力を伝える応力鎖に新たに着目し、数値解析や模型実験でパイピング内部の構造や流速の可視化にチャレンジする。応力鎖の発生・消滅による粒子群のダイナミクスを考慮し、パイピングの発生から発達までの新たな統一的説明に挑戦する。

3. 研究の方法

河川堤防のパイピングのメカニズムは堤体一基礎地盤の地盤特性により大きく異なり特に堤体の強度が高く基礎地盤が透水層の上に不透水層が被覆している複層構造の場合、パイピング破壊の危険度が高いことを明らかにしている。そして、模型実験の結果を基に上

記のような堤体一基礎地盤の地盤条件でのパイピング機構を「噴砂の発生」、「空洞の進展」、「空洞の貫通」の3段階に分けて図-1のようなパイピングフローチャートを作成した。また、「噴砂の発生」は被覆土層厚と基礎地盤内の揚圧力が、「空洞の進展」はパイプ内の流速と土粒子径が、「空洞の貫通」は限界動水勾配がそれぞれの段階での現象を支配する主要因であると推定している。

図-2に解析モデルの概要図を示し、図-3に入力した外力波形の平均動水勾配の経時変化を示す。堤体は粘土を使用し基礎地盤は硅砂7号単一層、上層硅砂7号下層硅砂2号の複層、河川水が下層に直接流入するよう露出した複層の3ケースについて解析を行った。堤内側の基礎地盤の右端は浸透流が浸出しないよう設定し、いわゆる行き止まり境界になっている。また、解析モデルと同様のスケールの模型を用いて解析と同じ水位、地盤条件で実験を行った。なお模型実験では図-2のように基礎地盤底部の土層奥行中央に間隙水圧計を設置した。各材料の透水係数は模型実験と比較するため粘土 $k=3.00 \times 10^{-8} (m/s)$ 、硅砂7号 $k=1.40 \times 10^{-5} (m/s)$ 、硅砂2号 $k=1.80 \times 10^{-2} (m/s)$ に設定した。模型実験で用いた材料の粒度分布は図-4に示す。

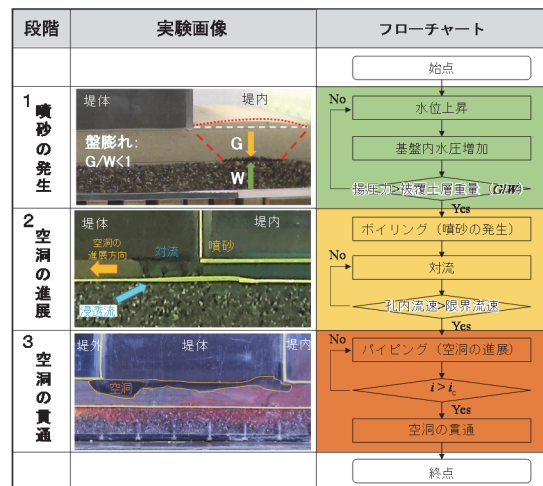


図-1 複層構造におけるパイピングフローチャート

4. 研究成果

(1) 基礎地盤の透水層構造の影響

図-2に示した位置の間隙水圧の実験値と解析値を、模型実験での噴砂の発生前後で比較した。表-1に比較する模型実験の噴砂の発生及び破堤した時の時刻と平均動水勾配を示す。図-5に各ケースの圧力水頭の実験値と解析値を示す。単一層の場合、噴砂の発生前後ともに実験値と解析値は非常に近い値を示している。しかし、複層の2ケースでは噴砂の発生前は比較的近い値を示しているが噴砂の発生後は実験値が解析値よりも顕著に低い圧力になっている。模型実験において単一層のケースは噴砂などの変状が小さく突発的に破堤するのに対し、複層のケースは早い段階(平均

動水勾配 $i=0.20$ で噴砂が発生し破堤に至るまで徐々に変状が拡大することが確認されており、模型実験での変状の大きさが実験値と解析値のずれを増大させることが分かった。以上から、複層で噴砂が発生し始める平均動水勾配 $i=0.20$ までは高い精度で解析結果が適応可能であると言える。

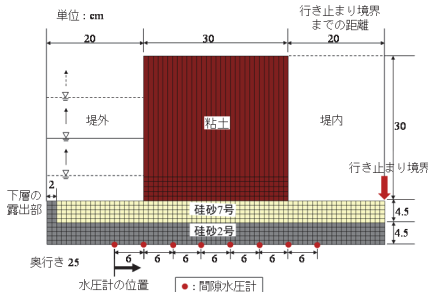


図-2 解析モデル（実験模型）の概要図

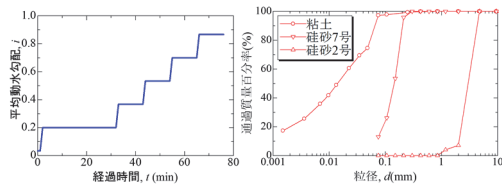


図-3 平均動水勾配 図-4 材料の粒度分布

表-1 比較する模型実験の詳細

	単一層	複層（露出なし）	複層（露出あり）
噴砂の発生	$t=68\text{min}$ ($i=0.87$)	$t=4.6\text{min}$ ($i=0.20$)	$t=1.6\text{min}$ ($i=0.20$)
パイピング	$t=78\text{min}$ ($i=0.87$)	$t=59\text{min}$ ($i=0.70$)	$t=47\text{min}$ ($i=0.53$)

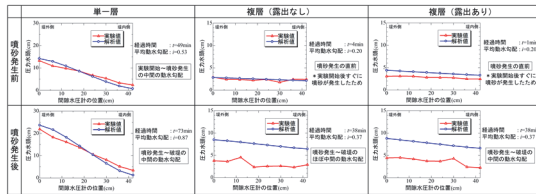


図-5 実験と解析の間隙水圧分布の比較

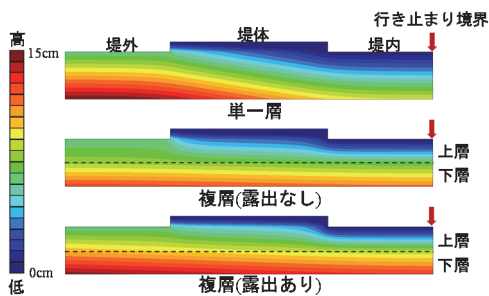


図-6 層構造が異なる透水性基礎地盤の圧力水頭分布

平均動水勾配 $i=0.20$ で 30 分維持した時刻 ($t=32\text{min}$) における圧力水頭分布を図-6 に示す。単一層は堤外から堤内に行くにつれて基礎地盤の圧力水頭が減衰しているが、複層では下層の圧力水頭の減衰が小さく堤内まで高い圧力が維持されている。さらに下層の透水層が堤外に露出しているケースでは行き止まり境界まで非常に高い圧力が伝播していることが分かる。以上より、基礎地盤が複層

構造で特に透水層が堤外に露出している場合、法尻から離れた行き止まり境界まで、堤内の広い範囲で噴砂が発生しやすい条件であると言える。この結果は模型実験の噴砂動態の観察結果とも一致している。

(2) 行き止まり境界までの距離の影響

矢部川の破堤箇所の基礎地盤は、堤内側に粘土層が分布し透水層が行き止まりになっていた。そこで、裏法尻から行き止まり境界までの距離を 5 から 100cm に変えたときの基礎地盤の圧力水頭の変化を比較し、行き止まり境界までの距離が基礎地盤の圧力伝播に与える影響を検討した。なお本章以降は解析結果の適用範囲を考慮し、平均動水勾配 $i=0.20$ を一定に保った状態を想定し、定常解析を行った結果を示す。図-7 は裏法尻から行き止まり境界までの距離と裏法尻直下の透水性基礎地盤の底面の圧力水頭の関係である。図よりいずれの基礎地盤でも行き止まり境界までの距離が小さいほど高い圧力が伝播していることが分かる。また、各ケースの行き止まり境界までの距離が 5cm と 100cm のケースを比較すると、単一層では 1.02 倍、複層（露出なし）では 1.26 倍、複層（露出あり）では 1.20 倍になっており、複層のケースは単一層に比べて圧力水頭の変化が顕著で行き止まりの影響を強く受けていることが分かる。よって基礎地盤が複層構造になっている場合は堤内側基礎地盤の行き止まりの有無及び法尻から行き止まり境界までの距離がパイピング破壊に対する重要指標の一つと考える。

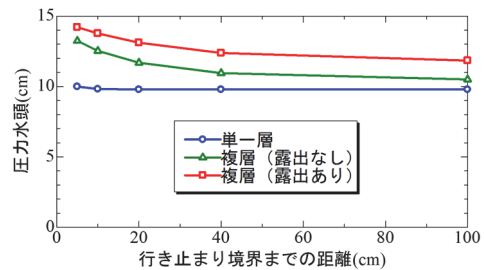


図-7 行き止まり境界までの距離と圧力水頭

(3) 堤内地の不陸の影響

漏水、噴砂などの浸透破壊を助長する要因の一つとして堤内地の不陸（高低差）が考えられる。そこで、解析モデルの奥行中央の堤内側法尻地表面に縦横 1cm の正方形の低地を作成し、高低差を変化させた場合の低地部分の浸透流速を比較した。外力条件は堤外に地表面から 6cm の水位を一樣に作用させ、堤内は平地の地表面を水位に設定し、平均動水勾配が 0.20 で定常解析を実施した。また、メッシュサイズの感度分析も実施し、メッシュサイズの影響は充分小さいことを確認している。

図-8 に単一層と複層（露出なし）のケースの高低差と低地部分の流速の関係を示す。単一層は低地部分の流速は最大で平地の 1.37 倍しか増加せず不陸の影響はほとんど受けていないが、複層では低地の深度が 3.6cm で流

速が平地の 3.09 倍に増加し、下層まで達する 4.5cm では平地の 81.9 倍に跳ね上がっている。よって、複層は単一層に比べて不陸の影響を強く受けていると言える。

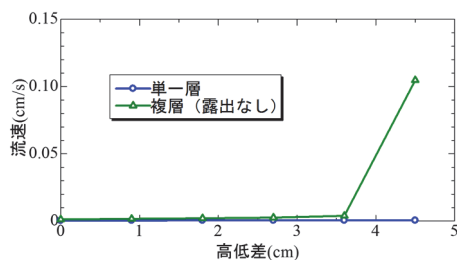


図-8 堤内地の不陸箇所における流速

第 1 章で述べたようにパイピングフローチャートの第 2 段階「空洞の進展」はパイプ内の流速と土粒子の粒径が支配的な要因であると考えている。そこで、本解析で得られた複層の低地部分の流速を、粒径と限界流速の関係と比較した結果を図-9 に示す。図には透水係数、単粒子の沈降速度や浮き上がりの限界流速も示しており、珪砂 7 号の平均粒径 D_{50} は 0.15mm である。不陸がない場合はいずれの限界流速も超えないが、不陸が下層まで到達しパイプ孔状となると約 100 倍の流速が発生し、久楽らの限界流速の 10 倍以上となることから、地表面から下層へ貫通する鉛直パイプが形成されることで噴砂が発生し得る流速が発生することが示された。ただし、久楽らの実験は単一層の結果であり複層への適用性は今後検討を要する。一方で、浸透流解析の流速は単粒子の限界流速までは達していない。本解析では土粒子は移動しないが、実際は、噴砂孔周辺の局所的な動水勾配によって土要素が液状化状態となって流動したり、粒子が流出したりしてより速い流れとなる可能性があり、今後検討を進める。

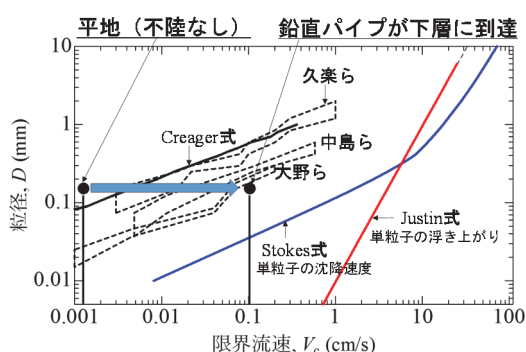


図-9 限界流速との比較

噴砂の発生には下層に鉛直パイプが貫通することが重要であることが分かった。そこで、複層 (露出なし) の高低差 4.5cm のケースについて外力条件、パイプの位置は変えずにパイプの太さを縦横 1、2、3cm に変化させ、パイプの太さが流速、漏水流量に及ぼす影響を検討した。表-2 にパイプの太さと流速、漏水流量の関係を示す。

表-1 鉛直パイプの太さ (噴砂孔径) と流速、漏水流量

	鉛直パイプの太さ (噴砂孔径)		
	1cm	2cm	3cm
流速 (cm/s)	0.107	0.053	0.0318
漏水流量 (cm ³ /s)	0.108	0.212	0.289

パイプの太さが太くなると漏水流量は増加するが流速は低下していることが分かる。漏水流量の増加は空洞の進展速度の増加に繋がるが、流速が低下することで土粒子の運搬能力は低下することになる。よって、噴砂が継続するためには土粒子の運搬能力を失わない範囲の太さのパイプが形成され続ける必要があると考えられる。

(4) 噴砂孔の集水性

先述の透水性基礎地盤の下層の砂礫層に鉛直パイプが貫通することで噴砂が発生し得る流速が発生することが確認された。そこで、この下層に貫通したパイプを噴砂孔のモデルと捉えパイプに発生する流速と漏水流量を比較することで噴砂孔の三次元的集水性、噴砂の発生位置、噴砂の発生間隔 (噴砂の干渉) について検討を行った。図-10 に解析モデルの概要図を示す。堤体は粘土を使用し基礎地盤は上層珪砂 7 号下層珪砂 2 号の複層で作成し、解析モデルの中心部分の堤内側法尻に噴砂孔を模擬した縦横 1cm 深さ 4.5cm の鉛直パイプを設置した。外力条件として堤外に地表面から 6cm の水位を一樣に作用させ、堤内は平地の地表面を水位に設定し平均動水勾配が 0.20 で定常解析を実施した。また、噴砂孔のモデル化による検討はパイピングフローチャートにおける第 2 段階に相当するため流速、流量に着目して検討を行った。

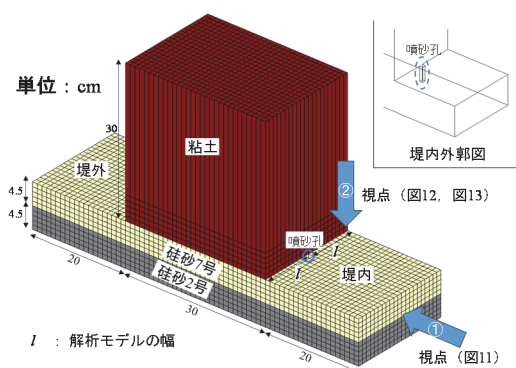


図-10 解析モデルの概要図

1) 噴砂孔の三次元的集水性

図-10 における解析モデルの幅 I を 0 から 40cm の 7 ケースに変化させた場合の噴砂孔底面の流速、漏水流量を比較することで、透水性基礎地盤の縦断方向の広がり浸透破壊の進展にどのように影響するか検討した。図-11 は解析モデルの幅 I と噴砂孔底面の漏水流量の関係である。図-12 は $I=40$ cm のケースの基礎地盤内の流速ベクトルを図-10 の矢印①の方向から見た断面図である。

図-11 より解析モデルの幅が大きいほど流速、漏水流量が増加していることが分かる。また、図-12 では透水性の高い下層の珪砂2号の層において浸透流が噴砂孔へ集中している様子が顕著に確認でき、下層の透水層において噴砂孔は広範囲にわたって集水性を発揮していることが分かった。よって、解析モデルの幅が大きいほどより広い範囲の浸透流が噴砂孔に集中し流速、漏水流量が増加したと考えられる。以上より、堤体の直下に透水性基礎地盤が広く分布している方が浸透破壊の危険性が高いと考えられる。また、 $l=40\text{cm}$ (三次元) のケースの流速、漏水流量は $l=0\text{cm}$ (二次元) のケースの約 14 倍であり非常に顕著な差が生じていることから、噴砂の発生などで堤防の断面が一樣でなくなった場合の浸透メカニズムの整理は二次元よりも三次元での検討が適切であると考えられる。また図-11 のグラフから l の増加に従い漏水流量が収束している様子が確認でき、噴砂孔の集水範囲には限界値が存在することが推察できる。

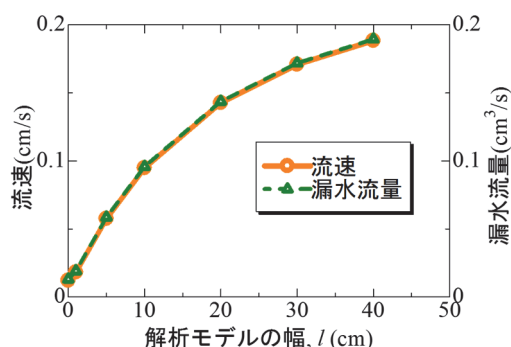


図-11 解析モデル幅と流速、漏水流量の関係

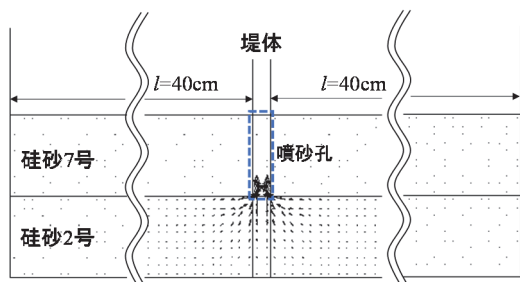


図-12 流速ベクトル図 (堤内・断面図; 図-10 の視点①)

2) 噴砂の発生位置

噴砂孔のモデルは三次元で検討することが重要であると明らかになった。そこで、最も幅の広い $l=40\text{cm}$ の解析モデルを用いて、解析モデル内で噴砂孔の位置を A(中心)、B(三等分点)、C(端部) の 3 ケースに変化させ噴砂の発生位置と流速、漏水流量の関係を検討した。図-13 に噴砂孔の設置位置の概略図を示す。なお図-13 は解析モデルを図-10 矢印②の方向から見た平面図である。また、表-3 に各ケースの噴砂孔底面の流速、漏水流量を示す。流速、漏水流量の大小関係は $C(\text{端部}) < B(\text{三等分点}) < A(\text{中心})$ となった。前節で述べたように噴砂孔には集水可能な範囲が存在すると

仮定すれば、最も効率的に集水できる解析モデルの中心に噴砂孔を設置したケースで流速、漏水流量が最大になった結果は妥当であると言える。よって、透水性基礎地盤が縦断方向に広く分布している場合、分布範囲の中心が危険箇所の一つであると言える。

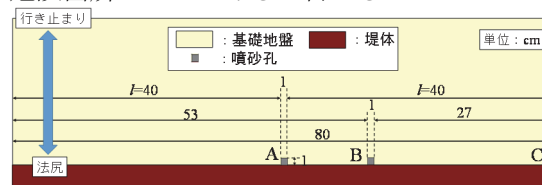


図-13 噴砂孔の位置 (堤内・平面図; 図-10 の視点②)

表-3 噴砂孔の位置と流速、漏水流量

噴砂孔の位置	A(中心)	B(三等分点)	C(端部)
流速(cm/s), 漏水流量(cm³/s)	0.190	0.185	0.161
噴砂孔の位置	A(中心)	B(三等分点)	C(端部)
流速(cm/s)	0.188	0.186	0.170
漏水流量(cm³/s)	0.190	0.185	0.161

3) 噴砂の発生間隔

2016年に被災した常呂川の現地調査において噴砂は密集して発生することが確認されている。そこで、2箇所噴砂が同時に発生した場合の噴砂孔同士の影響を検討するため、全幅が80cmの解析モデルを用いて、解析モデルの中心を境に左右対称に噴砂孔を2つ設置し、2つの噴砂の間隔を a(近い)、b(中程度)、c(遠い) の3ケースに変化させ、それぞれの噴砂孔底面の流速、漏水流量を比較した。図-14 に噴砂孔の設置位置の概略図を示す。なお図-14 は解析モデルを図-10の矢印②の方向から見た平面図である。また表-4に各ケースの流速、漏水流量を示す。

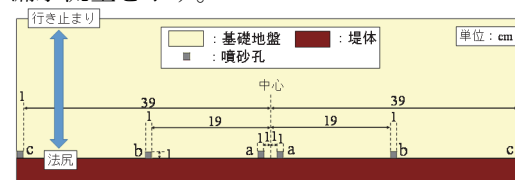


図-14 噴砂孔の位置 (堤内・平面図; 図-10 の視点②)

表-4 噴砂孔の間隔と流速、漏水流量

噴砂孔の間隔	a(近い)	b(中程度)	c(遠い)
流速(cm/s), 噴砂孔1つあたりの漏水流量(mm³/s)	0.126	0.139	0.148
噴砂孔の間隔	a(近い)	b(中程度)	c(遠い)
流速(cm/s)	0.127	0.141	0.149
噴砂孔1つあたりの漏水流量(mm³/s)	0.126	0.139	0.148

表-4より噴砂孔同士の間隔が近いほど流速、漏水流量が減少していることが分かる。噴砂孔の間隔が近いほど、それぞれの噴砂孔の集水範囲が重複し、集水範囲が減少するため流速、漏水流量が減少したと考えられる。つまり噴砂が密集して発生した場合、それぞれの噴砂孔の流速、漏水流量が低下するため、噴砂の継続は難しくなると言える。噴砂孔の集水範囲が重複・干渉しないことでより多くの流量が確保でき、噴砂孔がより高い流速を確保できる箇所噴砂が進展し、局所的な浸透破壊

が発達すると考えられる。また、前節では透水層の縦断方向の分布範囲の中心(a部)で流速、漏水流量が最大であったが本節では端部(c部)で最大になった。よって、噴砂の発生に伴って噴砂動態や破壊の進展特性が変化する可能性があると考えられる。

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6件)

- ① 西村柁哉、前田健一、榎山総平、泉典洋、齊藤啓：異なる基礎地盤特性の堤防の噴砂動態・パイピング挙動と漏水対策型水防工法の効果，河川技術論文集，第24巻，2017
- ② 齊藤啓、前田健一、泉典洋：基盤漏水に伴う噴砂及びパイピング進行条件の検討，河川技術論文集，第23巻，2016，pp. 251 - 354.
- ③ 松田達也，前田健一，泉典洋，伊藤嘉，山口敦志，鶴ヶ崎和博，宮本順司：自由表面流れに起因して発生する地盤内の過剰間隙水圧に関する一考察，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.72, No.2, 2016, I_565-I_570
- ④ 松田達也，山口敦志，前田健一，高木健太郎，鶴ヶ崎和博，宮本順司：ジェット流による二層地盤の洗掘メカニズムに関する実験的考察，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.72, No.2, 2016, I_1195-I_1200
- ⑤ Weijie Zhang, Kenichi Maeda, Hiroshi Saito, Zhaoqing Li, Yu Huang: Numerical analysis on seepage failures of dike due to water level-up and rainfall using a water soil-coupled smoothed particle hydrodynamics model, Acta Geotechnica, Vol.11, 2016, pp.1401-1418
- ⑥ 齊藤啓、前田健一、泉典洋、李兆卿：基盤の地盤特性が異なる河川堤防の高水位の継続作用による漏水とパイピングの進行特性，河川技術論文集，Vol.22, 2015, pp.349 - 354

[学会発表] (計7件)

- ① 山口敦志，前田健一，高木健太郎：地盤表層流れに伴う間隙圧に着目した洗掘現象に関する DEM-CFD 解析，計算工学講演会論文集，Vol.21, C-3-1, 新潟市，2016.05.31-06.02.
- ② 榎山総平、前田健一、齊藤啓、李兆卿：動水勾配と漏水の流速に着目した透水性基盤構造の堤防のパイピング破壊への影響，平成28年度全国大会第71回年次学術講演会(土木学会)，仙台市，2016.09.07-09.
- ③ 榎山総平、前田健一、齊藤啓、李兆卿：透水性基盤の層構造による噴砂口動態およびパイピング進行性への影響，第51回地盤工学研究発表会，岡山市，2016.09.13-15.

- ④ 榎山総平、前田健一、齊藤啓、李兆卿，西村柁哉：漏水・噴砂の動態に着目した堤防のパイピングの進行性に及ぼす地盤条件と水位条件，第4回河川堤防技術シンポジウム，pp.9-12，東京，2016.11.29.
- ⑤ Maeda K., Zhang W. and Saito H.: Geo-engineering simulation for seepage-induced erosion and progressive failure of river levee due to climate changes, IWACOMIII: The 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics, CD-ROM, OW6: Simulation for natural disaster mitigation and environmental problems, Tokyo, 2015.10.
- ⑥ 李兆卿，前田健一，齊藤啓，山口敦志：透水性基盤の成層構造条件に着目したパイピング発生メカニズム，第50回地盤工学研究発表会，pp.1046-1047，札幌市，2015.9.
- ⑦ 齊藤啓，前田健一，泉典洋，李兆卿，榎山総平：基盤条件に着目したパイピングの進行特性及び相似則に関する一考察，第3回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，pp.53-56，東京都，2015.12.

[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

<http://www.maeda-lab.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 健一 (MAEDA, Kenichi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50271648

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

泉典洋 (IZUMI, Norihiro)

榊原淳一 (SAKAKIBARA, Junichi)

David, Muir WOOD