

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

SAND BOIL DYNAMICS AND PIPING IN RIVER LEVEES WITH DIFFERENT BASE LAYER PROPERTIES AND EFFICIENCY OF LEAKAGE CONTROL WORKS ON FLOOD FIGHTING

西村 柁哉¹・前田 健一²・櫛山 総平¹・泉 典洋³・齊藤 啓⁴

Masaya NISHIMURA, Kenichi MAEDA, Sohei KUSHIYAMA, Norihiro IZUMI and Hiroshi SAITO

¹学生会員 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²正会員 工博 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³正会員 工博 北海道大学教授 環境フィールド工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北十三条西8丁目)

⁴正会員 日本工営株式会社 流域・都市事業部 (〒102-8539 東京都千代田区九段北1-14-6)

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.

Key Words : sand boil, pore water pressure, flow localization, critical velocity, flood protection work

1. はじめに

近年、河川水が透水性基礎地盤に浸透することで、堤内において漏水、噴砂が発生する被災事例が増加している。また、平成24年に矢部川堤防が決壊した事例のように高水位の外力が長時間にわたって作用し漏水、噴砂が長時間継続した場合、基礎地盤でのパイピングが進展し堤防の決壊に至る危険性がある。そこで、パイピングの進展によって河川堤防が損傷したり決壊したりする危険性の高い水理—地盤条件を力学的に把握し、それに基づく重点監視箇所を抽出するための重要指標を見出すことは今後の河川管理には不可欠な課題である。

既往の模型実験から河川堤防のパイピングのメカニズムは堤体—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が明らかになった¹⁾。そして、模型実験の結果を基に上記のような堤体—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²⁾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

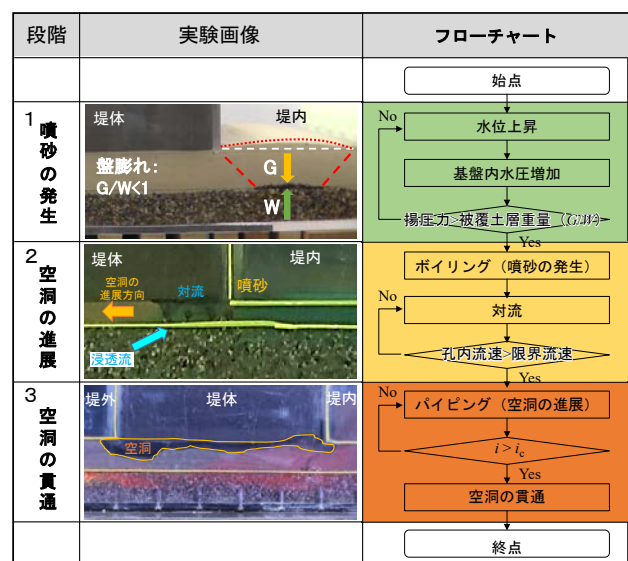


図-1 複層構造におけるパイピングフローチャート

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。

本稿ではなるべく単純化した条件下で基礎的な考察のために三次元飽和・不飽和浸透FEM解析を実施し、基礎地盤への浸透に着目した簡易実験結果との比較から解析の適用範囲を明らかにし、その妥当性を検討した。その上で、実験では検討が難しい、基礎地盤の透水層構造（単一層、複層）、法尻から行き止まり境界までの距離、堤内地の不陸（高低差）、噴砂孔の大きさ、位置、間隔（噴砂の干渉）について、パイピングフローチャートの各段階での支配的要因に着目しながら孔内及び周辺で局所化した流れの速度と水圧に及ぼす影響を調べた。さらに、これらの結果に基づき、伝統的な漏水対策型の水防工法を模擬した簡易実験と浸透流解析から、その効果を考察した。

2. 解析概要

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珪砂7号単一層、上層珪砂7号下層珪砂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（図-2参照）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 $k=3.00 \times 10^{-8}(\text{m/s})$ 、珪砂7号 $k=1.40 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ 、珪砂2号 $k=1.80 \times 10^{-2}(\text{m/s})$ 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。

3. 基礎地盤の透水層構造の影響

(1) 解析結果の適用性

浸透流解析では堤体、基礎地盤の変状に伴う幾何学的非線形性や土の状態変化に伴う透水係数の変化などが考慮されていないため、模型実験の結果と解析結果を比較し解析結果の適用範囲を明らかにする必要がある。そこで、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。なお各ケースで噴砂、破堤する時刻が異なるため比較する時刻は図-5に示す方法で決定した。

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=68min ($i=0.87$)	t=4.6min ($i=0.20$)	t=1.6min ($i=0.20$)
パイピング	t=78min ($i=0.87$)	t=59min ($i=0.70$)	t=47min ($i=0.53$)

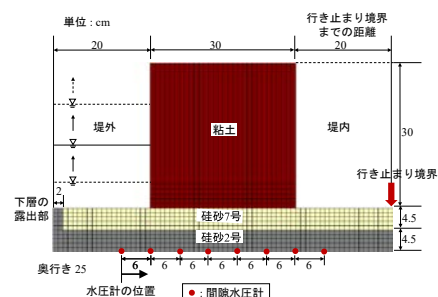


図-2 解析モデル（実験模型）の概要図

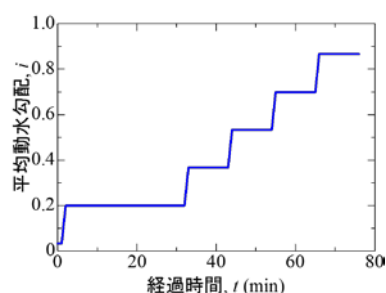


図-3 平均動水勾配の経時変化

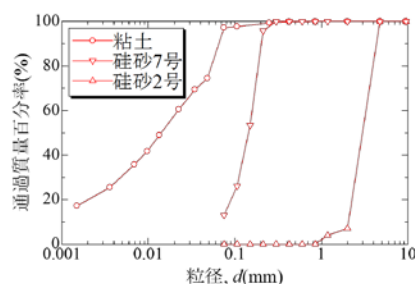


図-4 材料の粒度分布

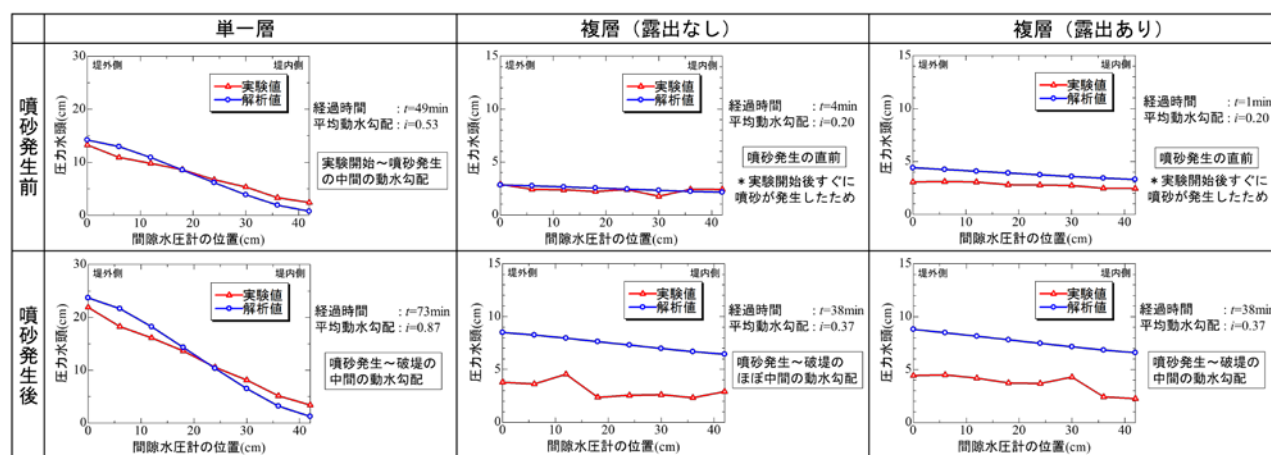


図-5 実験と解析の間隙水圧分布の比較

図-5より単一層の場合、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。

(2) 圧力分布の比較

平均動水勾配 $i=0.20$ で30分維持した時刻（ $t=32\text{min}$ ：図-3参照）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。

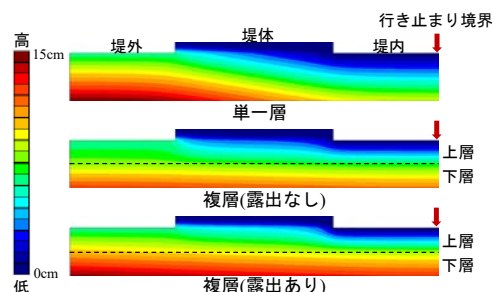


図-6 層構造が異なる透水性基礎地盤の圧力水頭分布

4. 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³⁾。そこで、裏法尻から行き止まり境界までの距離を5, 10, 20, 40, 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であると考えられる。

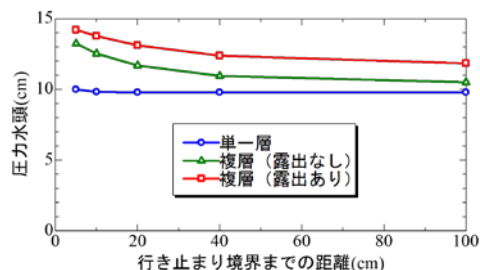


図-7 行き止まり境界までの距離と圧力水頭

5. 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。

(1) 流速の比較

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。

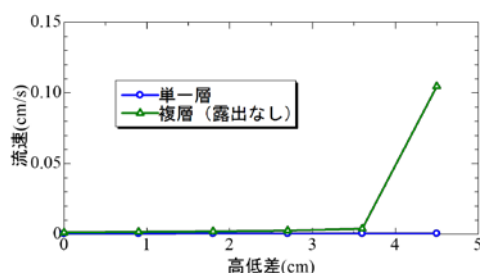


図-8 堤内地の不陸箇所における流速

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。

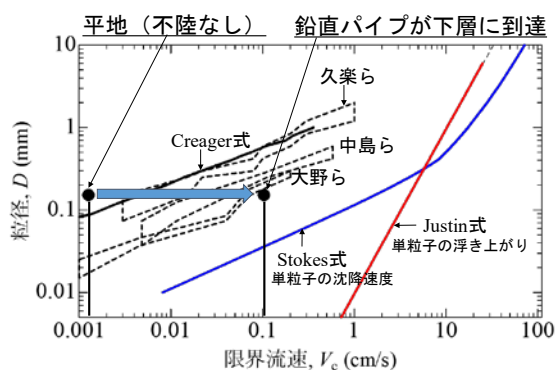


図-9 限界流速との比較

(2) 鉛直パイプの太さ（噴砂孔径）の影響

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-2 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(cm³/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。

6. 噴砂孔の集水性

前章において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。

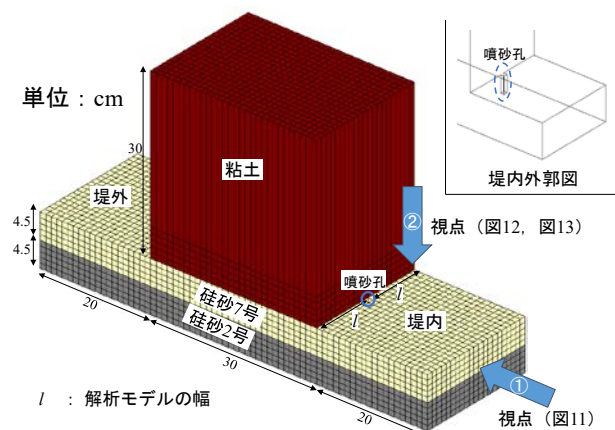


図-10 解析モデルの概要図

(1) 噴砂孔の三次元的集水性の検討

図-10における解析モデルの幅 l を0, 1, 5, 10, 20, 30, 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が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 l と噴砂孔底面の漏水流量の関係である。図-12は $l=40$ 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くほど流速、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く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。

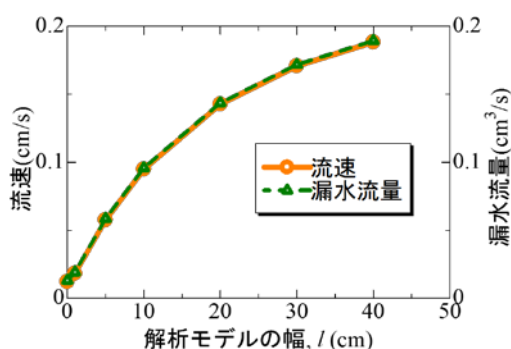


図-11 解析モデルの幅と流速、漏水流量の関係

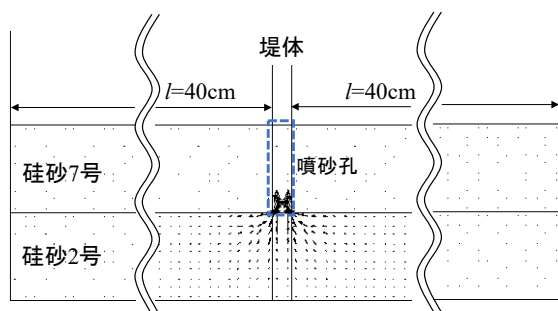


図-12 流速ベクトル図(堤内・断面図；図-10の視点①)

(2) 噴砂の発生位置の検討

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(端部)<B(三等分点)<A(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。

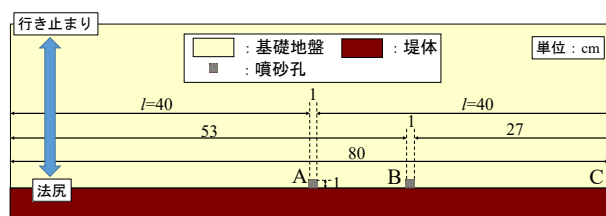


図-13 噴砂孔の位置(堤内・平面図；図-10の視点②)

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)	0.188	0.186	0.170
漏水流量(cm³/s)	0.190	0.185	0.161

(3) 噴砂の発生間隔の検討

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箇所での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。

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、集水可能な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。裏返すと噴砂孔の集水範囲が重複・干渉しないにより多くの流量が確保でき、噴砂孔により高い流速を確保できる箇所での噴砂が進展し、局所的な浸透破壊が発達すると考えられる。また、前節において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。

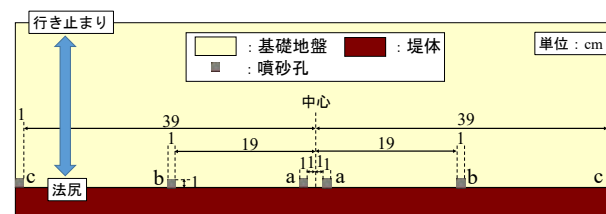


図-14 噴砂孔の位置(堤内・平面図；図-10の視点②)

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)	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

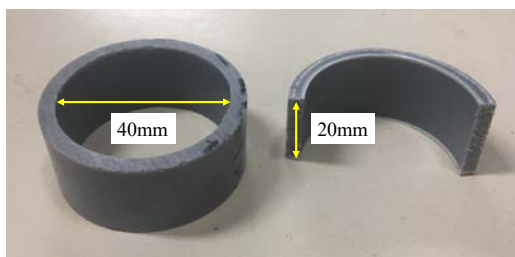


図-15 水防工法を模した装置
(左：釜段工，右：月の輪工)

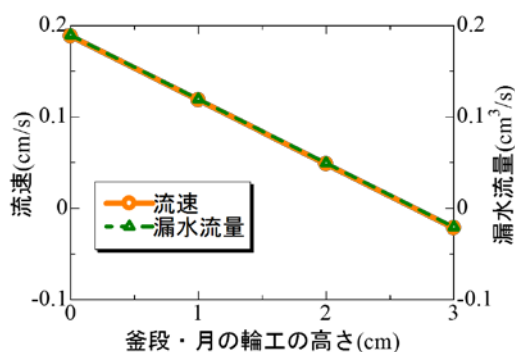


図-16 釜段・月の輪工の高さと流速、漏水流量

7. 漏水対策型の水防工法の効果

河川堤防の漏水、噴砂に対する水防活動として釜段・月の輪工法が伝統的に行われている。これは漏水、噴砂の発生地点を中心に土嚢を積み、水を蓄えその水圧で水の噴出を止める工法であるが、これまで釜段・月の輪工法の効果を定性的に検証した例⁴⁾は少ない。そこで、模型実験と三次元浸透流解析によりその効果を検証した。

模型実験は第2章の図-2と同じで複層（露出なし）を用いた。水防工法の実施は水位上昇に伴い噴砂が発生した場合、噴砂地点に釜段・月の輪工を模擬した図-15の様な装置を設置した。平均動水勾配の経時変化は図-3と同様であるが、平均動水勾配が0.87まで到達しても破堤しなかった場合、平均動水勾配を1.37まで段階的に上昇させた。その結果、無対策のケースは平均動水勾配 $i=0.70$ で破堤したが、釜段・月の輪を設置したケースでは平均動水勾配を1.37まで上昇させたが破堤せず実験を終了した。釜段・月の輪を設置したケースと無対策のケースで破堤に至る時間、動水勾配に顕著な差が見られた。

三次元浸透流解析では第4章の図-10の $l=40\text{cm}$ の解析モデルの噴砂孔に釜段・月の輪工の高さ分だけ水圧を上乗せしてモデル化し、噴砂孔の流速、漏水流量の変化を比較した。外力条件は平均動水勾配が0.20で釜段・月の輪工の高さは0cm（無対策）、1、2、3cmの4ケースで定常解析を実施した。図-16に釜段・月の輪工の高さと噴砂孔の流速、漏水流量の関係を示す。図-16より釜段・月の輪工による流速と漏水流量の低減効果を確認できる。流速と漏水流量の減少が直線的になる理由は噴砂孔に設

定した外力条件がダイレクトに流速、漏水流量値へ反映されたためだと考えられる。また、釜段・月の輪を3cm積んだケースで流速、流量値が負になっているのは噴砂孔から基礎地盤へ逆流が発生していることを示している。流速、流量値が0になる釜段・月の輪の高さは約2.7cmであり本ケースでは釜段・月の輪を約2.7cm積むことで揚圧力と釜段・月の輪による水圧が釣り合い完全に漏水が止まることになる。

8. まとめ

三次元浸透流解析により単一層と複層で圧力伝播の様子が大きく異なり、複層では法尻から離れた行き止まり境界付近でも噴砂が発生する可能性があることが示された。さらに、複層では単一層に比べて行き止まり境界と堤内地の不陸の影響が大きいことが分かった。堤防の性能評価において堤体の力学特性把握に偏るのではなく、堤内地の地形や基礎地盤の層構造などの大まかな地盤条件がパイピング破壊の重要指標になると考える。これらの指標は、近年発達した測量技術や簡易ボーリングなどによって比較的簡単に入手しやすい情報である。

また、噴砂の干渉の検討から、噴砂の発生に伴って噴砂動態が変化する可能性があることも示され、噴砂の継続的な監視と被災履歴の記録が破壊危険度の高い箇所の抽出に有益な情報となることも分かった。今後は、土の流動状態を考慮した限界流速の検討が必要である。

そして、パイピング破壊の危険度が高い地盤条件において漏水対策型水防工法は浸透流速、漏水流量を低減し、破壊の進行を抑制する効果が改めて確認された。今後は実規模のスケールでの検討も進めたい。

謝辞：本研究の成果は、国土交通省・河川砂防技術研究開発制度平成27年度国総研からの委託研究によるものである。末筆ながら深謝の意を示します。

参考文献

- 1) 櫛山総平，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，pp.1093-1094，2016.
- 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22巻，pp.251-256，2016
- 3) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書，2013.
- 4) 高木不折，辻本哲朗，鷺見哲也，井関明子：パイピングによる破堤課程と「月の輪工」の効果の評価，河川技術に関する論文集，第5巻，pp.123-128，1999.

(2017. 4. 3受付)