

河川堤防のパイピングの進行性と漏水動態に及ぼす透水性基盤特性と間隙流速の影響

THE EFFECTS OF PIPING BEHAVIORS AND DYNAMIC SAND BOILS
FROM STRUCTURE OF PERMEABILITY FOUNDATION AND INTERSTITIAL VELOCITY

榎山総平¹，前田健一²，泉典洋³，斉藤啓⁴，李兆卿¹

1 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・28415033@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学教授・高度防災工学センター

3 北海道大学教授・環境フィールド工学専攻

4 日本工営株式会社・流域都市事業部

概 要

近年、パイピングによる被災が数多く報告されている中で、平成24年に矢部川右岸7.3k地点で高水の継続によりパイピングを引き起こした。パイピングによる進行性破壊について正しく理解することで、決壊に至る条件を明確にするとともに、パイピングによる決壊のリスクが低い箇所、事前の対策が不可欠の箇所、水防活動で対応可能といった効果的な維持管理について貢献できると考えられる。本稿では、層厚比を変えて行う模型実験により透水性基盤のパイピング進行特性や噴砂口動態に及ぼす層構造の影響を検討した。また層構造によって変化するパイピング進行度を噴砂動態や水圧分布とともに経時変化を段階ごとに整理し観察することで、高水やその継続による、決壊リスクを予測する方法について検討している。また層構造によって変化するパイピング時の流速と粒子を運ぶ限界流速との比較をすることで、パイピング時の流速が限界流速に達しているのかを検討した。

キーワード：パイピング，層構造，限界流速

1. はじめに

近年、パイピングによる被災が数多く報告されている中で、平成24年に矢部川右岸7.3k地点で高水の継続によりパイピングを引き起こし、堤防が決壊し付近に甚大な被害を及ぼした¹⁾。図-1に決壊箇所の近傍土質断面を示す。土質構成に着目すると、堤体は粘性土、基盤は透水性のある砂層や粘性シルト層等が互層で分布しており、基盤透水性の存在がパイピングによる決壊を招いたと報告されている。平成28年の鬼怒川左岸21k地点の決壊箇所においても基盤層に互層構造が確認でき越流洗掘が決壊の原因とされているが越流前、越流中のパイピングが主要因ではないとされているが決壊を助長する可能性がある²⁾と報告

されている。パイピング発生箇所にはこうした細砂層と透水層の互層の存在が度々確認されている²⁾。

本稿では、層厚比を変えて行う模型実験により動水勾配と漏水の流速に着目した透水性基盤層構造の堤防のパイピング破壊への影響を検討した。また層構造によって変化するパイピング時の浸透流速と粒子を運ぶ限界流速との比較をすることで、パイピング時の流速が限界流速に達しているのかを検討した。そして、パイピング機構を「噴砂発生」、「空洞の進行」、「空洞の貫通」の三段階に分けて考察した。

2. 実験概要

図-2に、久楽らの実験³⁾を参考にした実験概略図を示す。基盤透水性の下流端は行き止まり地盤となっている。基盤層は水中落下で堆積させ、上層は珪砂7号（細砂）、下層は珪砂2号（砂礫）を使用し相対密度が70%程度になるように締め固めた。堤体部分は含水比20%の藤森粘土をアクリル壁で囲われた箇所に入れ締め固めた。実験中は基盤層に間隙水圧計を16本用いて下層に8本、互層間に8本設置し堤外側から堤内側へとNo.1からNo.16までナンバリングし設置し間隙水圧を計測した。また、堤内側から排水される流量を計測し、堤内側の噴砂の発生や動きをビ

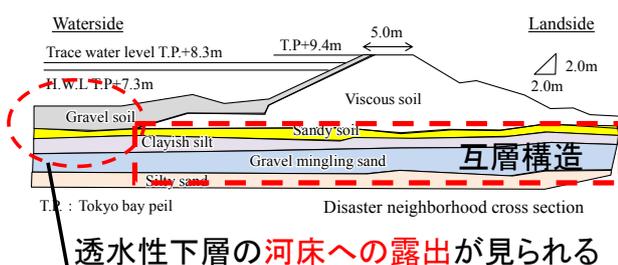


図-1 2012年矢部川破堤箇所の近傍土質断面

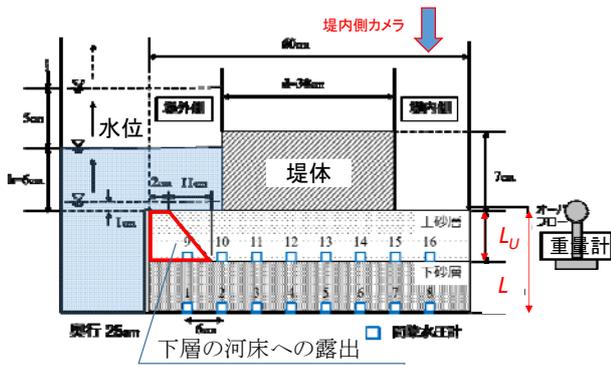


図-2 実験概略図

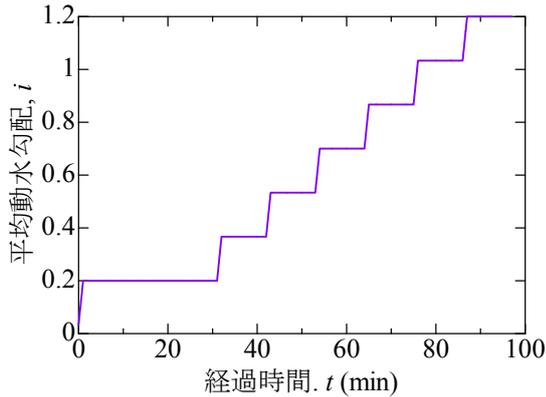


図-3 平均動水勾配の経時変化

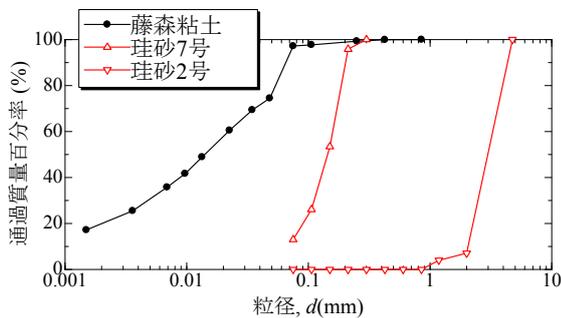


図-4 実験試料の粒度分布

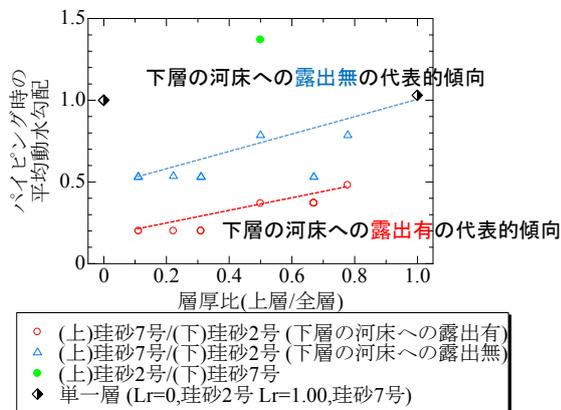


図-5 層構造・層厚比と平均動水勾配の関係

層厚比 : R_L $R_L = \frac{L_U}{L}$ ※単一層の場合 1.0 (1)

デオカメラにより撮影した。

図- 3 に平均動水勾配(以下 i と記す)の経時変化を示す。また、図-4 に実験で用いた試料の粒度分布を示す。

水位条件は、 $i=0.20$ で 30 分間維持し、5cm/min で水位上昇し 10 分間保持をパイピングするまで繰り返した。異なる基盤層条件下 (56 ケース) で実験を実施した。基盤透水層の上・下層の層厚比及び透水層が河床に露出しているかどうかの有無に着目した層構造特性に着目した。

3. 実験結果および考察

3.1 層構造とパイピング時平均動水勾配の関係

図- 4 に層構造・層厚比とパイピング破壊時の平均動水勾配の関係を示す。ここで、層厚比に関しては、式(1)のようにして求めた。単一基盤に関しては、珪砂 2 号の場合は層厚比=0、珪砂 7 号の場合は層厚比=1.0 とした。

プロットは全実験 56 ケースの珪砂 7 号と 2 号を使用した実験ケースのパイピング時における平均動水勾配を層構造・層厚比ごとの平均値をプロットした。

まず層厚比に着目すると、層厚比が小さいほどパイピングに至る平均動水勾配が小さくなりパイピングを生じやすくなる。これは上層厚が薄くなることで小さい揚圧力でも噴砂が生じること、また下層が厚くなることでより透水流量が増し上層土砂が洗い流され空洞の進行を促進したことが考えられる。

次に実際に決壊した矢部川堤防では基盤透水層が河床に露出 (図- 1 参照) していたことから、基盤透水層の河床への露出の有無とパイピングの関係について検討する。結果を見ると、露出有りの方がパイピングに至る平均動水勾配が半分程度まで小さくなり、パイピングを生じやすことがわかる。露出有りの条件では、堤外側で直接間隙の大きい下層に流入できるため透水によるエネルギーロスが小さくなり透水流量が維持されることで、空洞の進行を促進したと考える。

3.2 噴砂動態

図- 6 に各ケースの噴砂口分布の経時変化を示す。水位が上昇する 2 分前と水位が上昇しきってから 2 分後の時間で噴砂口を観察した。層厚比 0.22 では、3min で噴砂口が行き止まり地点付近で噴砂口が発生し、噴砂口が徐々に法尻に近づいていき堤体下のパイピングに至った。層厚比 0.70 では、35min で堤内側法尻付近から噴砂口が発生し、その後も法尻付近でのみ噴砂が続けた。

3.3 パイピング進行度

図- 7 にパイピング進行の様子を示す。パイピングの様子を断面から観察できた実験ケースについて堤内側法尻、堤外側法尻から空洞先端までの距離を測り、式(2)のようにパイピング進行度を求めた。

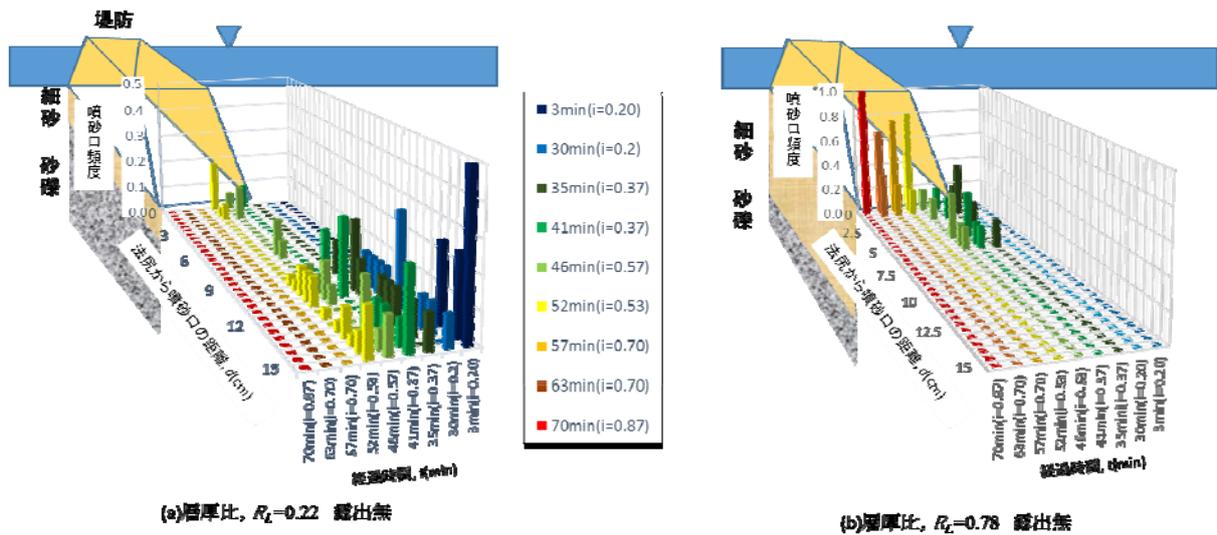


図-6 噴砂動態：発生タイミングと空間分布の変化

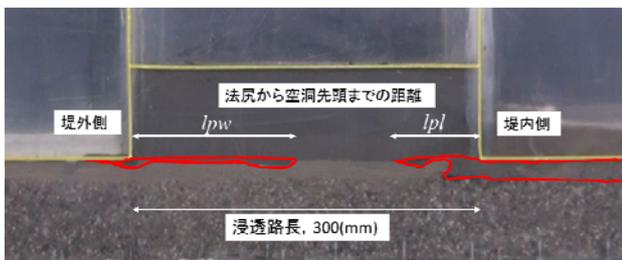


図-7 パイピング進行の様子：ゆるみと空洞の発達

$$\begin{aligned}
 & \text{[パイピング進行度]} = \\
 & \frac{\text{[堤内側法尻から空洞先頭までの距離, } l_{pl}(\text{mm})\text{]} + \text{[堤外側法尻から空洞先頭までの距離, } l_{pw}(\text{mm})\text{]}}{\text{[浸透路長, } 300(\text{mm})\text{]}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

図-8に各層構造・層厚比についてのパイピング進行度を示す。下層が河床への露出有の層構造は、低い平均動水勾配でパイピング破壊しており事前に対策が必要である。層厚比1.00の単一層は、平均動水勾配1.03でパイピングしており、パイピング破壊を起こしにくいことがわかる。

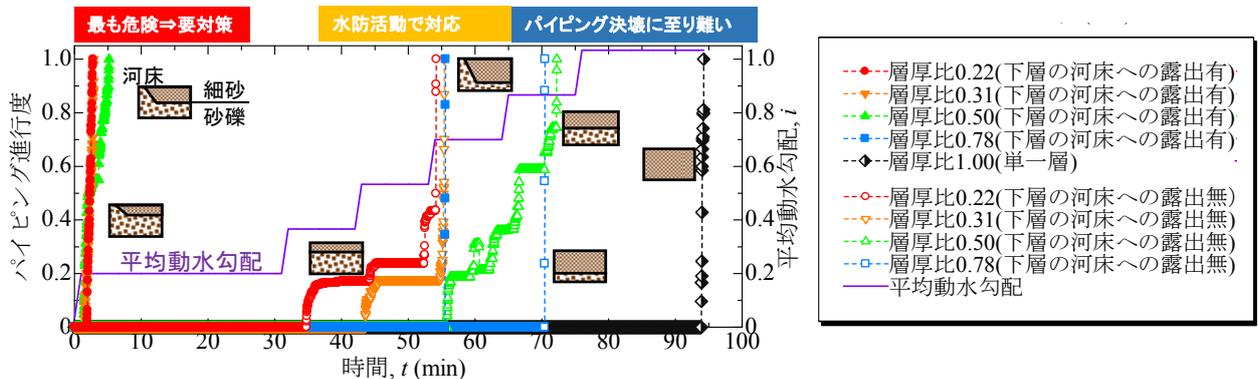


図-8 パイピング進行度：基礎地盤特性と進行性破壊

基盤層の間隙水圧上昇に伴う支持力低下、堤体のすべり破壊等の別の破壊モードを考慮する必要がある。その他の層構造は水防活動などで対処できる可能性がある。特に、パイピング進行が始まる前に噴砂が生じる層構造・層厚比で、噴砂口が法尻付近で発生し移動しない条件（例えば図-6(b)）では、従来までの釜段工法等の水防活動で進行を抑制できるといえる。層厚比が小さく噴砂口が移動する場合（図-6(a)）では、別の水防方法が必要と考えられる。

4. パイピング機構の検討

4.1 噴砂の発生

層厚比が小さくなることで噴砂が生じやすくなりパイピングに至りやすくなったことがわかった。噴砂の発生は浸透水圧が上載荷重を超えて地表面に噴出する現象であり、被覆土層重量と基盤内の揚圧力（G/W）により決まり、式(3)となるときに噴砂発生となる。

噴砂時の揚圧力と被覆土層厚による重量の関係から理論的な噴砂発生条件は式(5)となる。

堤内側法尻にあるNo.8の間隙水圧値を揚圧力として、基盤上層厚を被覆土層厚として整理した。間隙水圧値は堤

表 1 パイピング時の流速の計算結果

流速(cm/s)	基盤層構造	$R_L=0.22$	$R_L=0.50$	$R_L=0.78$	$R_L=0.22$	$R_L=0.50$	$R_L=0.78$	$R_L=0$	$R_L=1.0$
		露出無	露出無	露出無	露出有	露出有	露出有	(珪砂2号)	(珪砂7号)
1	$v=ki$	8.90×10^{-3}	5.83×10^{-3}	3.74×10^{-3}	6.58×10^{-3}	5.44×10^{-3}	4.53×10^{-3}	1.80	1.44×10^{-3}
2	$v=Q/S$	9.53×10^{-2}	1.37×10^{-1}	2.10×10^{-1}	2.89×10^{-1}	2.52×10^{-1}	2.08×10^{-1}	1.31	7.26×10^{-2}
3	$v=(Q_{sv} \times N_{sv}) / (\pi \times d_{sv}^2 / 4)$	1.85×10^2	2.46×10	4.09	1.11×10^2	6.11×10	1.09×10	-	0
4	$v=\sqrt{2gh}$	5.01×10	5.58×10	5.59×10	5.17×10	5.79×10	7.27×10	-	8.37×10
5	$v=\sqrt{2gh}$	2.03×10^2	2.26×10^2	2.26×10^2	1.08×10^2	1.08×10^2	2.03×10^2	2.43×10^2	2.47×10^2

k : 平均透水係数 i : 平均動水勾配 Q : 排水流量 S : 透水層断面積 g : 重力加速度 H : 水頭高さ
 h : 噴砂口から噴出する水の高さ Q_{sv} : パイピング1分前の排水流量 N_{sv} : 噴砂口数 d_{sv} : 噴砂口の直径

内側上部のカメラより確認される噴砂発生時点の値を読み取った。

互層に限ると、噴砂時の揚圧力と被覆土層厚の関係より噴砂の発生条件は式(6)の通りとなる。

図-9に実験による基盤内揚圧力と被覆層(上層厚)との関係を示す。(5)と比較すると、実験では小さい揚圧力で噴砂する。堤内側で発生する噴砂の位置を観察すると、噴砂は主に土槽境界部で発生しており、こうした境界部では間隙が大きくなるため理論値よりも小さい揚圧力で噴砂したと考える。

単一層は被覆土層がないため噴砂の機構が互層と異なり、単一層の厚さに関係なく水の浸透圧が土の有効重量を超えた場合に噴砂が発生する。つまり単一層にお

ける噴砂は層厚と法尻の浸透水圧でなく単一層全体でみた平均動水勾配が支配的となる。このことから単一層は噴砂の発生や空洞の進行の段階を踏まない現象となり空洞の貫通が生じると考える。以上より、互層においてボーリングは被覆土層重量と基盤内の揚圧力、単一層においては平均動水勾配が支配要因であると考えられる。

4.2 空洞の進行

前述した通りパイピングはパイプ内の流速と土粒子径が支配的な現象であり、パイプ内の流速についてはダルシー則による浸透流速が発生すると考えられているが、パイプフローや一般水流(Chezyの法則)のような流速である見方もある。そこで、局所化した流れの流速を簡易に計測可能な量から推定した。その結果を表-1に示す。求めた浸透流速と図-10に示す限界流速と粒径との関係⁴⁾から珪砂7号を運ぶ限界流速に達しているか検証する。

また、本稿では水平流れに着目した久楽らの結果と比較した。

まず、ダルシー則が成り立つとして仮定して、浸透流速を求めた。表-1より層構造の中でも多くのケースで浸透流速が珪砂7号の粒径をすべて流す流速に達していないことがわかった。その中で最大でも0.10~0.14mmの粒子を動かすことが可能であるといえる。しかし、珪砂7号の50%粒径は $D_{50}=0.15\text{mm}$ であるため浸透流速と仮定し求めた流速では珪砂7号の大部分が運動できないことがわかる。

次にダルシー則から求めた浸透流速と他の流速を比較する。流速1のダルシー則から求めた浸透流速と比べると、流速2のような計測流速は約1~10倍の速さが出ており、すべてのケースで上砂層の全ての粒径を運ぶ流速が出ていることがわかる。また、流速3,4のような局所的流速は浸透流速と比べると約 $10^2 \sim 10^4$ 倍の流速となっている。流速5の場合は極端に異なる。

図-11に層厚比0.50露出有の噴砂が流入するゆるみの移動を示す。ゆるみを追ってゆるみの移動速度を求めると

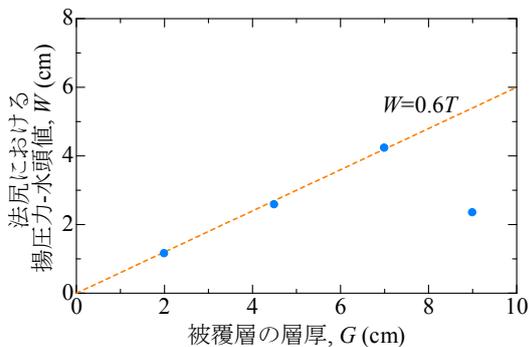


図-9 基盤内揚圧力と被覆層厚(上層厚)との関係

$$W = \gamma' \times G \quad (3)$$

W : 揚圧力 γ' : 水中単位体積重量 G : 上層厚

$$\gamma' = \frac{G_s - 1}{1 + e} \approx 0.86 \quad (4)$$

G_s : 土粒子密度 2.65g/cm³ e : 珪砂7号の間隙比 0.90

$$W = 0.86G \quad (5)$$

$$W = 0.60G \quad (6)$$

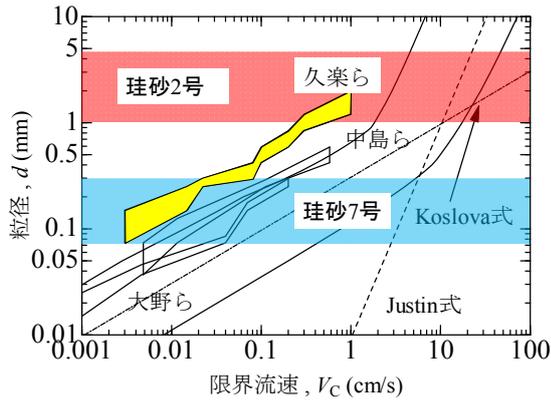


図-10 粒径-限界流速関係 (長瀬 (1987年) に加筆)

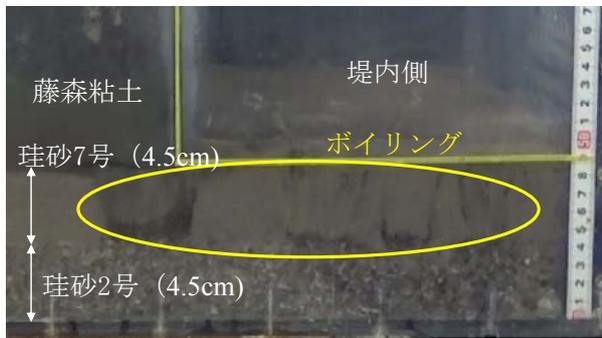


図-11 空洞内への噴砂流入の様子



(a)ゆるみ範囲



(b)ゆるみ範囲の移動

図-12 噴砂流入によるゆるみの移動

1.24×10cm/sとなり流速3,4に近いオーダーとなるので、噴砂が流入する中では、浸透流速以上の流速が発生している可能性が高い。図-11に示す通り実験ではパイプ内に噴砂が流入する様子が観察されており、これが流速増加の要因となりパイピングを助長すると考える。

4.3 空洞の貫通

空洞の貫通とは、空洞が進行しその上流端が河川水底面にある程度近づくことで突然その進行速度が速くなり決壊する現象を指す。最後の破壊を決定付けるこの現象についてこれまで実験や理論に基づく詳細な検討はなされていないため、ここでは動水勾配が支配要因と仮定して検証する。

図-13に空洞の進行に伴い時間的に変化する浸透路長を断面から読み取り、その時点における水位から求めた平均動水勾配の時間変化の様子を示す。また、図-14に各ケースによる平均動水勾配の時間変化を示す。

基盤層構造の条件に関わらず空洞の貫通直前における平均動水勾配は約1.0であり、理論的に求められる限界動水勾配に概ね一致する。このことから空洞の貫通は浸透路長と水位より求められる平均動水勾配と理論的に求められる限界動水勾配から判定することができると思われる。

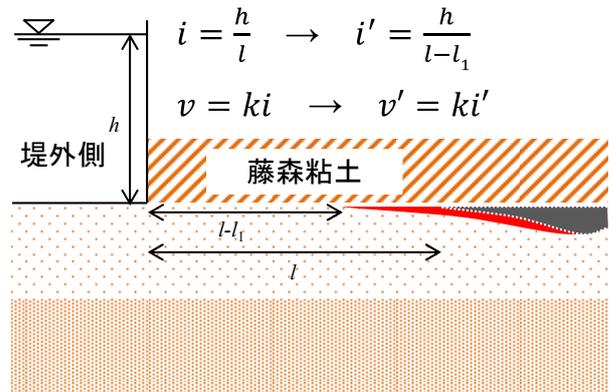


図-7 パイピングに伴う平均動水勾配の変化

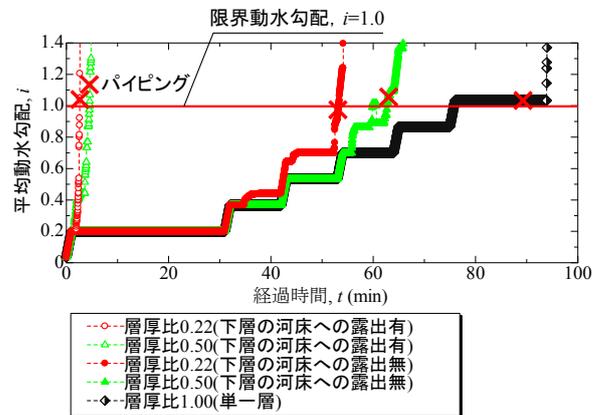


図-14 平均動水勾配の時間変化

4.4 パイピングフローチャート

図-15に先行研究⁴⁾と実験結果を基にして作成したパイピングフローチャートを示す。パイピング現象はボイリング、パイピング、空洞の貫通からなると考えられ、実験の結果からそれぞれの現象を支配する要因を以下のように推定した。

- ・ボイリング：被覆土層厚と基盤内の揚圧力
- ・パイピング：パイプ内の流速と土粒子径
- ・空洞の貫通：限界動水勾配

パイピング現象は一連で同じ支配要因があるわけではなく、各段階において支配要因が異なる現象と考える。ここでは互層における概念を示しているが、空洞の貫通時には単一層も互層もおおよそ限界動水勾配で発生しており、単一層で見られるような膨れ上がりによる破壊はパイピングフローチャートにおいて3段階目だけが生じる現象とも考えられる。

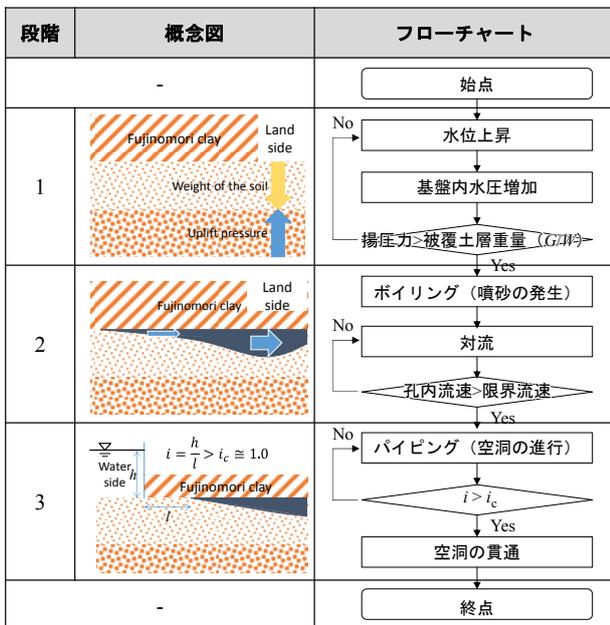


図-85 互層地盤におけるパイピングフローチャート

4.5 想定外力と河川堤防の特性を一体考えた破壊の把握の必要性

以上の結果を踏まえつつ、想定外力と河川堤防の特性を一体考えた総合的視点の下で(図-16参照)、堤防決壊の危険性の高い弱点箇所の把握と水防・対策の合理化等に資する必要がある。例えば、透水層内の速い流れによる変状、堤体の変形、空洞周辺の不安定性を再現、浸透による細粒分移動による内部侵食による堤体の変状を表現可能な粒子法による数値解析結果を紹介する(図-17)。単に破壊パターンを分類をするのではなく、透水性基盤～堤体～外力を一体で整理し、破壊モードが連続的に変化し、どのような条件でどのような破壊形態を示しやすいのかを示すことが可能になってきている。

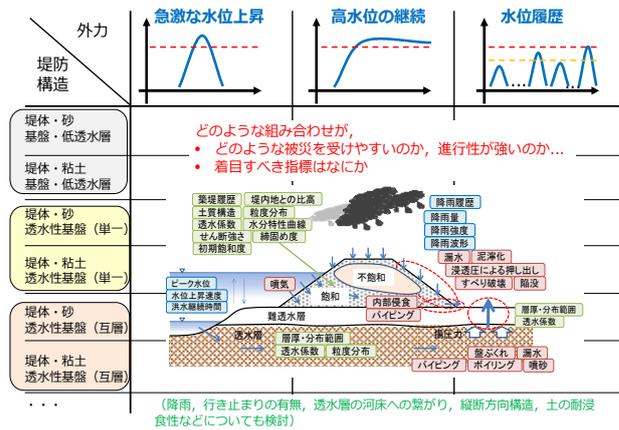


図-16 力特性と堤防特性を一体考えた被災の総合的検討

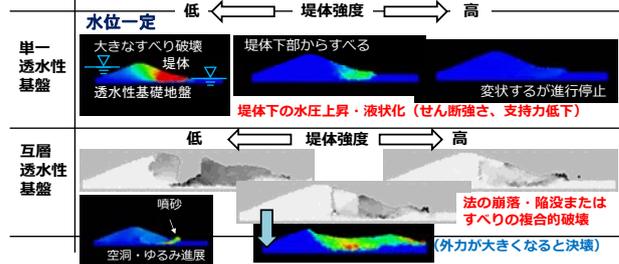


図-17 堤体・基礎地盤の特性の組み合わせによる浸透破壊形態と被災の違い：浸透破壊モードとその発現条件の整理

5. まとめ

基盤漏水に伴うパイピングに関して、層構造・層厚比に着目してパイピングによる決壊リスクの整理をしたところ、砂礫層の河床への露出の有無・層厚比によって破壊に至る平均動水勾配に大きな違いが見られ、単一層の基盤透水層ではパイピングの可能性が低いことが分かった。

また、パイピング機構を支配要因が異なる3段階に区分した。空洞の進行段階では三次元的流れの局所化によってダルシー則よりも大きな流速が生じ、粒子を押し流す限界流速に達することで噴砂が起きることが分かった。

水位外力波形、基盤構造とパイピングの進行度の関係を整理することで、要事前対策箇所、決壊危険度の低い箇所、水防活動で破壊を抑制できる箇所を分類できる可能性を示した。今後、地盤内部でのパイピング進行度と観察可能な噴砂動態の関係を調べることで重点監視箇所の絞り込み方法を提案する。

参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会: 矢部川堤防調査委員会報告書, 国土交通省, 2013.
- 2) 長瀬迪夫: 浸透破壊に関する考え方と破壊発生の条件(その2), 応用地質年報 No.15, 1993.
- 3) 久楽勝行, 吉岡淳, 佐藤正博: 水平方向浸透流下における砂地盤のパイピングについて, 第20回土質工学研究発表会, pp.1483-1484, 1985.
- 4) 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, 2015.