

基盤漏水に伴う噴砂及び パイピング進行条件の検討

STUDY ON SAND BOILING AND PIPING PROGRESSION CONDITIONS ASSOCIATED WITH THE FOUNDATION LEAKAGE

齊藤啓¹・前田健一²・泉典洋³

Hiroshi SAITO, Kenichi MAEDA and Norihiro IZUMI

¹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)

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)

A river levee of the Yabe River was breached due to piping failure induced by prolonged high water levels following heavy rains in Northern Kyushu in 2012. The piping failure was caused by water infiltration into the highly permeable sand and gravel foundation under the clay levee body. However, some levees with similar foundations were deformed but did not fail. In addition, the current judging method for determining the breaking point, is necessary to provide a new evaluation. Therefore, it is necessary to scrutinize the piping system. Piping phenomenon from the results of previous studies and model experiments are divided into three stages, boiling, piping and penetration of the pipe hole. It was carried out to verify the dominant factors for each of the phenomenon. In this report, we clarified the factors that govern the respective phenomenon, and summarized about the piping mechanism as a flow chart.

Key Words : Boiling, Piping, Penetration of the pipe hole

1. はじめに

平成24年に九州北部で発生した豪雨により、矢部川右岸7.3k地点で堤防が決壊し付近に甚大な被害を及ぼした¹⁾。破堤箇所付近では氾濫危険水位を5時間以上超過し、水位が下がり始めたところで決壊するいわゆるパイピングによる被災であった。図-1の通り決壊箇所の土質構成は、堤体が粘性土、基盤層が透水性の高い砂層や粘性シルト層などが互層で分布しており、基盤層を通じパイピング現象が発生したと報告されている。

一方、同河川延長上の破堤地点以外にも基盤層に砂層の分布や旧河道と交差する箇所があり、その内11箇所で基盤漏水が確認されている。こうした漏水に対し

現行の照査法では、いつ、どこで発生し、堤防にとって危険か否かを予め判別することは難しい。今後の浸透に対する効率的・効果的な河川堤防強化のためにもパイピングの照査精度を向上させることは急務である。

2. 目的

河川堤防の構造検討の手引き²⁾より、浸透に対する安全性の照査基準はすべり破壊とパイピング破壊の2つに大別される(表-1)。このうちパイピング破壊―被覆土なしの照査基準は裏法尻付近の動水勾配を0.5として照査を行っている。標準的な土の限界動水勾配は1.0程

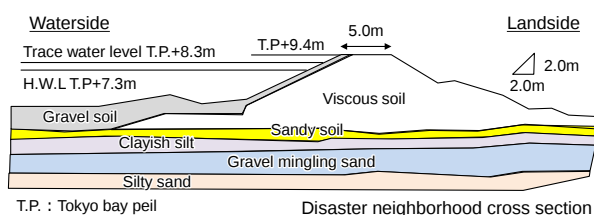


図-1 2012年矢部川破堤箇所の近傍断面、矢部川堤防調査委員会報告書を参考¹⁾

表-1 浸透に対する安全性の照査基準²⁾

項目	部位	照査基準
すべり破壊(浸潤破壊)に対する安全性	裏のり	$F_s \geq 1.2 \times \alpha_1 \times \alpha_2$ F_s : すべり破壊に対する安全率 α_1 : 築堤履歴の複雑さに対する割増係数 築堤履歴が複雑な場合 $\alpha_1 = 1.2$ 築堤履歴が単純な場合 $\alpha_1 = 1.1$ 新設堤防の場合 $\alpha_1 = 1.0$ α_2 : 基礎地盤の複雑さに対する割増係数 被災履歴あるいは要注意地形がある場合 $\alpha_2 = 1.1$ 被災履歴あるいは要注意地形がない場合 $\alpha_2 = 1.0$
	表のり	$F_s \geq 1.0$ F_s : すべり破壊に対する安全率
パイピング破壊(浸透破壊)に対する安全性	被覆土なし	$i < 0.5$ i : 裏のり尻近傍の基礎地盤の局所動水勾配の最大値
	被覆土あり	$G/W > 1.0$ G : 被覆土層の重量 W : 被覆土層基底面に作用する揚圧力

度であるが、実際は表層に植物根や小動物の巣穴等があることを考慮し照査上を0.5を基準としている³⁾。しかし、理論的な根拠がないことから現行の照査法は危険個所の概略的な絞り込みに留まるものとする。

照査精度向上のためには現行の照査法に加え、新たに評価項目を設けることが必要と考え、その評価項目を決定する上でパイピング機構を改めて精査し現象の特徴を把握する必要がある。本稿は文献調査と模型実験を実施した結果からパイピング機構について考察を行う。

3. パイピング現象の文献調査

長瀬の文献調査結果や近年の論文よりパイピング現

象に関する論文の一部を表-3に整理した。整理するにあたりそれぞれが主張する機構を分類し、現象の捉え方や特徴的な考え方を備考としてまとめた。

文献調査の結果、表-2の通りパイピング機構は①地下浸食による破壊、②膨れ上がりによる破壊、③内部浸食による破壊の3つに分類され、本稿ではその内地下浸食について検討する。

地下浸食はボイリング（噴砂の発生）、パイピング（またはチャンネルング、空洞の進行）を経て破壊に至るとされている。それぞれの現象の支配要因に着目すると、ボイリングは志村、J.W. de Wit が指摘するように間隙水圧により粒子が運動する現象と考えられている。その後発生するパイピング（空洞の進行）は空洞内の水流による土粒子の運搬作用であり、Justinが指摘するように流速と土粒子径が支配的な現象と考えら

表-2 パイピング機構の分類

項目	①地下浸食による破壊	②膨れ上がりによる破壊	③内部浸食による破壊
概念図			
概要	地下浸食による破壊は堤内側で発生する噴砂（ボイリング）を発端として、堤体の底面に沿って上流側へ洗掘し、空洞の上流端が河川水底面にある程度近づくことで発生する。	膨れ上がりによる破壊は河川水位の上昇に伴い基盤層中の浸透圧が増加すると、堤内側でふくれ上がり（ヒービング）が生じ、浸透圧が土の有効重量より大きくなった時点で発生する。	内部浸食による破壊は細粒子及びフィルタ材の間隙を対象としたミクロな現象であり、間隙中の浸透水が細粒子を洗い出すことにより、フィルタ材を目詰まりさせ水圧上昇を引き起こすことで発生する。

表-3 パイピング機構に着目した文献調査結果

番号	年	著者	論文名	パイピング機構			備考
				①地下浸食	②ふくれ上がり	③内部浸食	
1	1922	K.Terzaghi	Der Grundbruch an Stauwerken und seine Verhütung		○		限界動水勾配に達しても土粒子の移動にはさらに大幅な流速の変化が必要であることを指摘。
2	1923	J.D. Justin	The Design of Earth Dams	○			粒子が運動を開始する時の流速を限界流速とし、地下浸食の理論的な取り扱いを試みている。
3	1966	岩垣雄一、松尾新一郎	土質工学ハンドブック 第12章 浸食	○	○		地下浸食の過程を土粒子単位のパイピング、浸透圧が土の有効重量より大きくなり破壊する現象を土塊単位のパイピングと定義。どちらも広義のパイピング。
4	1971	志村孝吉	粗粒度における限界動水勾配について		○		ボイリング発生は浸透圧によるものとしている。浸透流速は非常に小さいためボイリング現象を浸透流による土粒子の流出と考えることは適切でないと指摘。
5	1976	吉越盛次	アメリカ合衆国のTetonダムの決壊に思う	○		○	動水勾配が大きくなり土粒子が運搬されていくと透水による流速からパイプフローや一般水流（Chezyの公式）の流速となる。
6	1980	河野伊一郎	建設工事と地下水（第3章地下水と地盤の安定）	○			ボイリングをクイックサンド状態の砂が地表面へ噴出する現象と定義。地下浸食により浸透路長が短くなり動水勾配が大きくなって浸透力が増大するという悪循環によりパイプが形成される現象をパイピング（チャンネルング）としている。
7	1981	J.W.deWit,J.B.Sellmeijer and A.Penning	Laboratory Test on Piping Proceedings				ボイリングが発生するまでラプラス式により求められる間隙水圧と実験値はよく合うが、流量増加後はラプラス式で説明できず特殊な機構を考える必要があることを指摘。
8	1984	久家勝行、吉岡淳、佐藤正博	水平方向の浸透水によるパイピングの進行について	○			パイピングの発生条件を①一時的な噴砂の発生、②連続的な噴砂、③パイピングの進行の3段階に分けている。
9	1999	高木不折、辻本哲郎、鷲見哲也、井関明子	パイピングによる破壊過程と「月輪工」の効果の評価			○	パイピングを河道側に向かって「穴」が形成される現象ではなく、浸透水によって小さな粒子が洗い出され、粗い砂や礫だけが残り「透水性の高い水の通り道」が形成される現象として捉える。
10	2010	V.M. van Beek, H.T.J. de Bruijn, J.G. Knoeff, A. Bezuijen and U. Förster	Levee Failure Due to Piping: A Full-Scale Experiment	○			実大規模のパイピング実験。地下浸食によりパイプが形成される部分においては水圧が減少する。
11	2015	吉田直人、秋場俊一、石原雅規、佐々木哲也	河川堤防の進行性破壊における破壊形態へ基礎地盤および堤体地盤材料の土質が与える影響の分析			○	浸透流による細粒分の流出に伴い進行的に破壊する可能性があることを指摘。

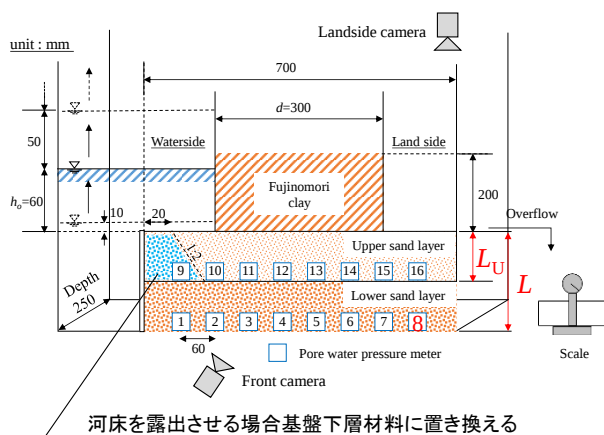
れている。空洞内の流速についてはダルシー則による浸透流速が発生するとされているが、吉越が指摘するようにパイプフローや一般水流（Chezyの法則）のような流速という見方もある。最後にパイピングが進行し空洞上流端が河川水底面にある程度近づくことで空洞が貫通する。

以上より、地下浸食によるパイピング現象をボーリング、パイピング、空洞の貫通の3段階と考え、それぞれの現象を支配する要因に着目して後述する実験結果を整理することでパイピング機構について考察する。

4. 実験概要

図- 2に実験装置の概略図、表- 4に実験条件を示す。土槽の作成方法について、基盤層は水中落下で堆積させ、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%の藤森粘土を使用し十分締め固めた。図- 3に外力として作用させた平均動水勾配の時間変化、図- 4に実験試料の粒度分布及び透水係数を示す。

間隙水圧計は土槽奥行中央に設置し、No.1から8は土槽底面に固定、No.9から16は砂層に埋め込むように設置した。堤防断面及び堤内地盤上空からビデオ撮影を行い現象の観察を行った。また、堤内側の漏水流量は重量計を用い計測を行っている。



$$\text{層厚比 } L_{ratio} = \frac{L_U}{L} \quad \text{※単一層の場合} 1.0 \quad (1)$$

図- 2 実験装置の概要

表- 4 実験条件一覧

ケース名	堤体土質	基盤層		基盤下層の河床への露出	
		上層 (cm)	下層 (cm)	無し	有り
Case1	藤森粘土	珪砂7号 9.0cm		-	-
Case2, 2' ※		珪砂7号 2.0cm	珪砂2号 7.0cm	○	○
Case3, 3' ※		珪砂7号 4.5cm	珪砂2号 4.5cm	○	○
Case4, 4' ※		珪砂7号 7.0cm	珪砂2号 2.0cm	○	○
Case5, 5' ※		珪砂4号 2.0cm	珪砂2号 7.0cm	○	○
Case6, 6' ※		珪砂4号 4.5cm	珪砂2号 4.5cm	○	○
Case7, 7' ※		珪砂4号 7.0cm	珪砂2号 2.0cm	○	○

※数字右肩の「'」は河床への露出有を示す

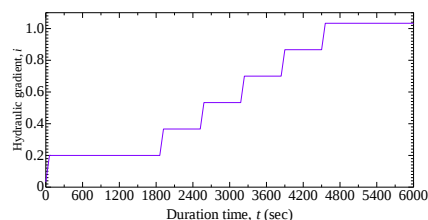


図- 3 実験時の平均動水勾配

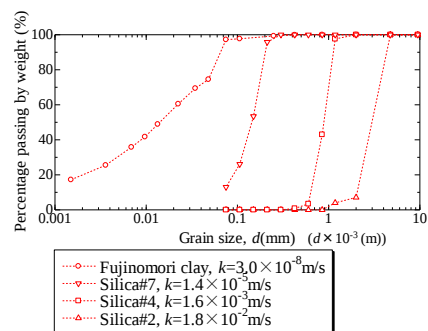


図- 4 実験試料の粒度分布

実験の手順は次の通りである。

- 土槽作製後堤外側で水位を10mm維持し、間隙水圧計の値が平衡になるまで放置する。
- 間隙水圧計の値を0にセットする。
- 実験開始から60秒後に水位を50mm/60secの速度で上昇させ、基盤層から水位60mmを1800秒維持する。
(この水位は矢部川破堤時の平均動水勾配を参考)
- 破壊しない場合更に水位を50mm/60secの速度で上昇させ600秒維持する。これを破壊するまで繰り返す。

実験中に間隙水圧の増分を計測する理由について次のように考える。漏水・噴砂の発生で流れが局所化し空洞が進展することが推定されるがその一方で、基盤層内の過剰間隙水圧の消散も考えられる。また、漏水・噴砂の発生によらず基盤層内に過剰間隙水圧が蓄積することで支持力が低下することも想定される。そこで、漏水の有無によって基盤層内の水圧の蓄積や消散の様子を捉えるため、実験中は間隙水圧の増分を計測する。

5. 既往検討

(1) パイピングにおける基盤層構造の影響

基礎地盤のパイピングに関して、これまで現況堤防と旧河道との交差地によくみられる砂層分布が注目されており、特にパイピング発生箇所の基礎地盤で度々確認されている透水性の異なる互層基盤が危険視されてきた⁴⁾。これまで模型実験において基盤層の粒度分布を変えた実験や互層基盤の実験を行ってきたが、なかでも小さい外力（低い水位）で破壊したのは基盤上層が細砂、下層が砂礫の互層基盤であった。

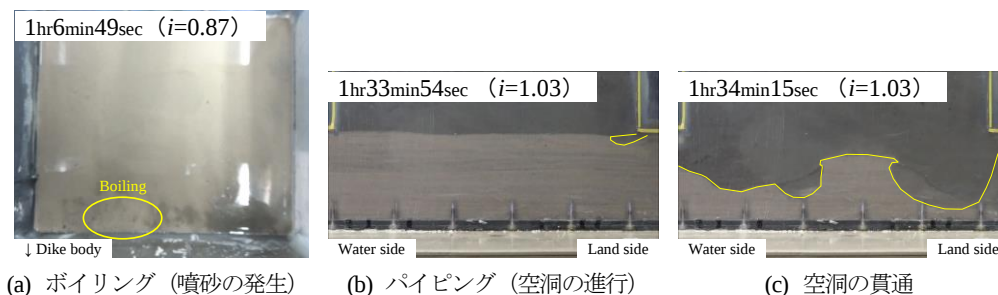


図-5 基盤が珪砂7号の単一層におけるパイピング破壊に至るまでの様子

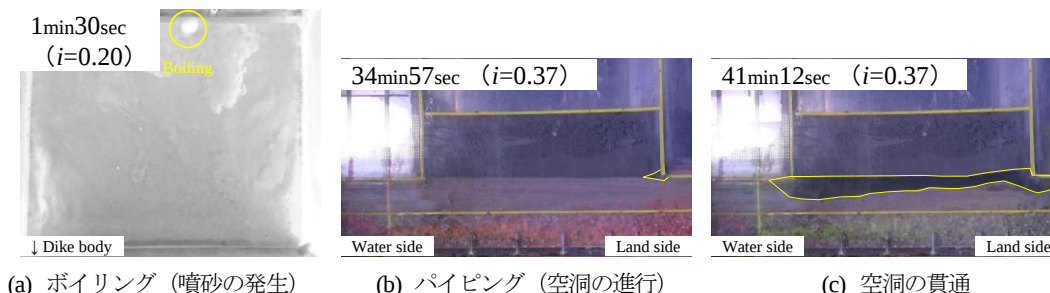


図-6 基盤の上層が珪砂7号、下層が珪砂2号の互層におけるパイピング破壊に至るまでの様子

(2) 基盤層構造による破壊過程の違い

文献調査の結果より、ボイリング（噴砂の発生）、パイピング（空洞の進行）、空洞の貫通に分けて破壊過程を整理した。図-5、図-6に単一層と互層におけるパイピング破壊に至るまでの様子を示す。

破壊時の平均動水勾配 i ($=$ 水位 h / 堤幅 d) を比較すると単一層では $i=1.03$ 、互層では $i=0.37$ となり単一層では限界動水勾配で破壊するが、互層ではその4割程度の動水勾配で破壊する。破壊前における堤内側の漏水流量から基盤層内における流速の推定値を算出したところ、互層では裏法尻から離れた箇所において、低い動水勾配でボイリング（噴砂）が発生しており、その流速は単一層の5倍程度であった。こうした流速の違いがパイピングに影響し互層では破壊が速くなったと考える。（詳細は既報を参照⁵⁾）

次に空洞の進行が始まってから貫通するまでの時間を比較すると、単一層では21秒、互層では6分15秒と比較的単一層は突発的、互層は進行的な破壊であった。

以上の結果から、単一層は膨れ上がりによる破壊（限界動水勾配）、互層は地下浸食による破壊（限界流速）と分類できると考える。

実験で観察されたボイリング、パイピング、空洞の貫通についてそれぞれの機構を考察する。

(3) パイピング進行に及ぼす基礎地盤特性

互層構造の幾何学的特性とパイピング特性との関係について整理した結果を考察する。

パイピング貫通時の動水勾配と堤体幅 d に対して発達した空洞幅（堤内外の合計）の割合をパイピング進行度とする。そしてその結果に及ぼす互層基盤の層構造と層厚比の影響をそれぞれ図-7上図、下図に示す。

パイピング変状の進行度には水位、基盤層の互層構造と堤外側の構造が強く影響をしている。実堤防で平均動水勾配0.2以下にすることでパイピングの進行を大幅に抑制できることがわかる。また、基盤土層区分によって、破壊時の動水勾配が低く直ぐに対策が必要な箇所（互層基盤：上層の細砂層が薄く、下層の砂礫層が河床に露出有り）、パイピングで決壊し難いがすべりには注意が必要な箇所（単一層基盤）、噴砂を伴いながら徐々にパイピングが進行することから水防活動で対応可能な箇所（上層が薄い互層基盤）というように大まかに堤防の分類・危険箇所の抽出が可能と考えられる。これに加え、相似則の検討を進めることで、小規模実験によって得られたパイピング発生・進展の閾値が実際のスケールでどの程度の値に対応するのかを明らかにし、堤防管理への貢献を目指す。

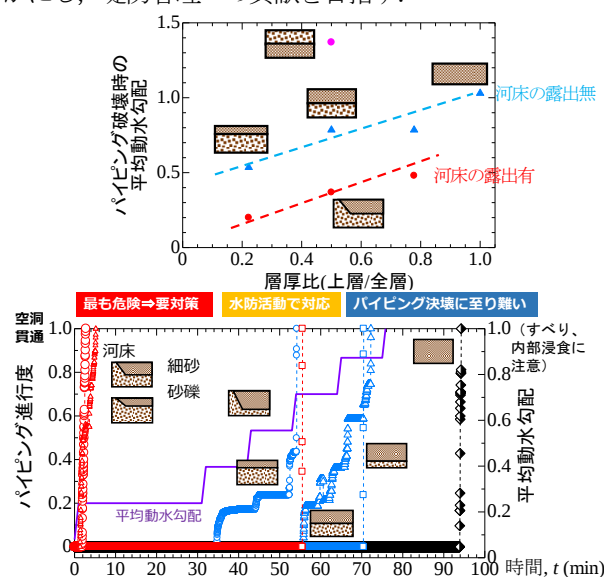


図-7 水位上昇時のパイピング破壊の平均動水勾配と進行速度と基盤層構造（土層分布で大よそ危険度分類可）

6. パイピング機構の検討

(1) ボイリング（噴砂の発生）

ボイリング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）により決まる。

噴砂時の揚圧力と被覆土層厚の関係から理論的な噴砂発生条件は式(4)となる。

$$W = \gamma' \times G \quad (2)$$

W：揚圧力 γ' ：水中単位体積重量 G：上層厚

$$\gamma' = \frac{G_s - 1}{1 + e} \approx 0.86 \quad (3)$$

G_s ：土粒子密度 2.65 g/cm^3 e ：珪砂7号の間隙比 0.90

$$W = 0.86G \quad (4)$$

堤内側法尻にあるNo.8の間隙水圧値を揚圧力、基盤上層厚を被覆土層厚として図-8に整理した。間隙水圧値は堤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(5)の通りとなる。

$$W \approx 0.60G \quad (5)$$

式(4)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っており、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パイピング機構は互層のような層厚と法尻の浸透水圧の関係でなく、単一層全体でみた平均動水勾配が支配的になると考える。

以上より、互層におけるボイ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。

(2) パイピング（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、吉越が指摘するように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。パイプ内の流速を浸透流速によるものと仮定し、空洞の進

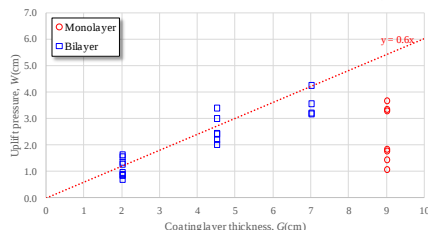


図-8 基盤内揚圧力と被覆層厚（上層厚）との関係

行に伴い時間的に変化する浸透路長を断面より読み取り、その時点における水位から平均動水勾配の時間変化及びダルシー則が成り立つとして浸透流速の時間変化を求めた（算定方法は図-9参照）。

図-10より空洞の貫通直前の浸透流速はいずれのケースにおいても約 $1.4 \times 10^{-3} \text{ (cm/sec)}$ であった。求めた浸透流速と図-11に示す土粒子と限界流速のグラフから珪砂7号の運動の有無を検証する。

図-11に示す土粒子径と限界流速の相関図より、本稿では久楽らの結果を援用し検討する。久楽は堤内側で発生する噴砂により粒子が移動を開始する時点の流速を限界流速として図-11にプロットしている。久楽の結果を援用した理由として、観察されたパイピング孔の下流端にあたる堤内側の噴砂孔では鉛直方向に十分な流速がないとパイピング孔が閉塞してしまい空洞が維持できないと考えたためである。

ここで、浸透流速が久楽らの範囲外であったため、久楽らの結果から左下方に推定した範囲を延長した。先ほど求めた浸透流速は約 $1.4 \times 10^{-3} \text{ (cm/sec)}$ であるため、図-11より最大でも0.10mm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 $D_{50} = 0.15 \text{ mm}$ であり、仮定した浸透流速では珪砂7号の大部分が運動できないため、実際のパイプ内には浸透流速以上の流速が発生している可能性が高い。図-12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、こうした流れの局所化、空洞への流れの三次元的集中、透水性の異なる層間・部分間でのボイリングの発生（空洞内の流量増加）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。また、空洞の上流端では、土のアーチング作用による孔壁と水圧、流速のいくつかの要素が浸食を進行させていると考えられるが、今後の多角的視点による研究が必要である。

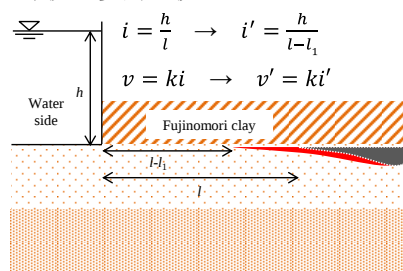


図-9 パイピングに伴う平均動水勾配の変化（透水係数kは珪砂7号の $1.4 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ を用いる）

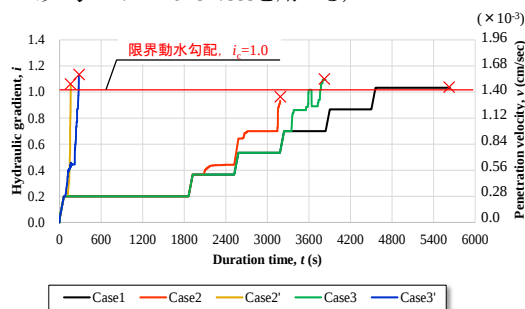


図-10 平均動水勾配、浸透流速の時間変化

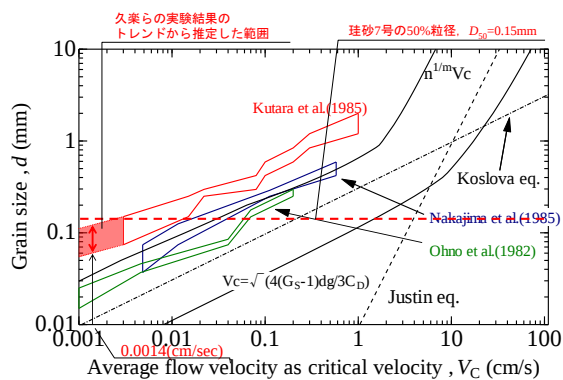


図- 11 限界実流速と粒径の関係⁴⁾

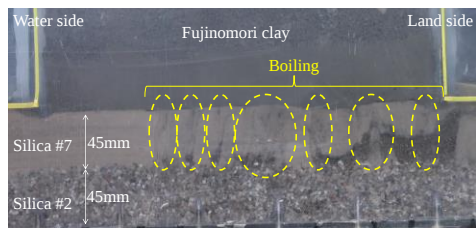


図- 12 空洞内への噴砂流入の様子

(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。

空洞の進行に伴う平均動水勾配の時間変化は図- 10に示す通りである。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。

7. パイピングフローチャート

図- 13に先行研究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ーリング、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。

- ・ボーリング：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、空洞の貫通時において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

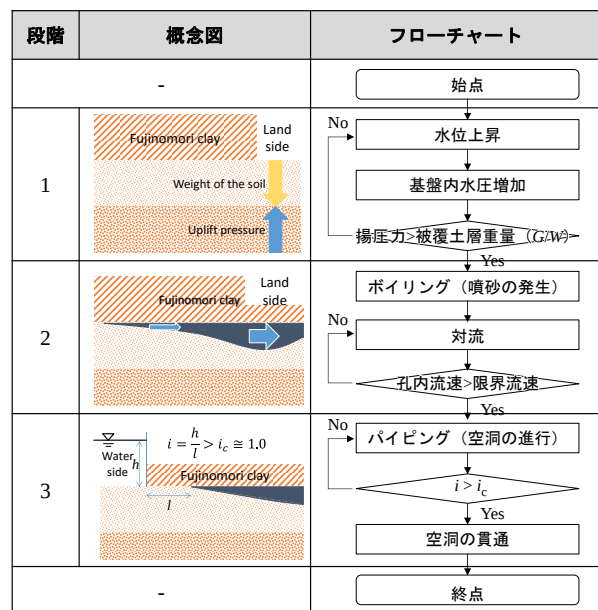


図- 13 互層地盤におけるパイピングフローチャート

よる破壊はパイピングフローチャートにおいて3段階目が主に生じる現象とも考えられる。

8. まとめ

パイピング機構の一つである地下浸食は、ボーリング、パイピング、空洞の貫通という3つの現象に区別されると考え、それぞれの現象を支配する要因に着目し実験結果を整理した。その結果、パイピング現象は噴砂の発生から破壊に至る一連で同じ支配要因ではないことがわかった。各段階における支配要因を把握することで照査を行う際に着目すべき点や有効な対策工の検討につながることを期待する。

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年度公募の援助によるものである。末筆ながら深謝の意を示します。

参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書，2013。
- 2) 財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），pp. 47，平成24年2月。
- 3) 中島秀雄：図説 河川堤防，pp. 107，2003。
- 4) 長瀬進夫：浸透破壊に関する考え方と破壊発生条件（その2），応用地質年報No. 15，1993。
- 5) 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，第21巻，pp. 349-354，2015。

(2016. 4. 4受付)