

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

名古屋工業大学 学生会員 ○榎山総平
名古屋工業大学 正会員 前田健一
日本工営株式会社 正会員 齊藤 啓
名古屋工業大学 学生会員 李 兆卿

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、基盤透水層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。昨年の鬼怒川の被災においても同様の痕跡が見られた。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流速を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。

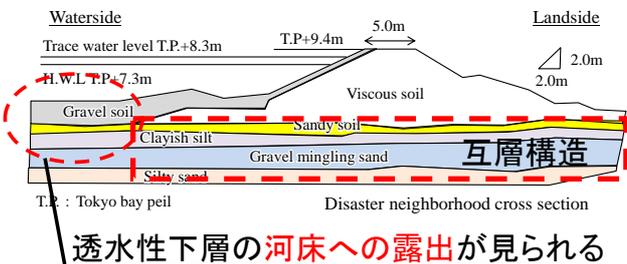


図-1 2012年矢部川破堤箇所の近傍土質断面

2. 簡易パイピング実験概要

図-2に、久楽らの実験³⁾を参考にした実験概略図を示す。基盤透水層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。実験中は基盤内の間隙水圧や堤内側から排水される流量を計測している。

異なる基盤層条件下(54ケース)で実験を実施し、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. 層厚比とパイピング時平均動水勾配の関係

図-3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54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

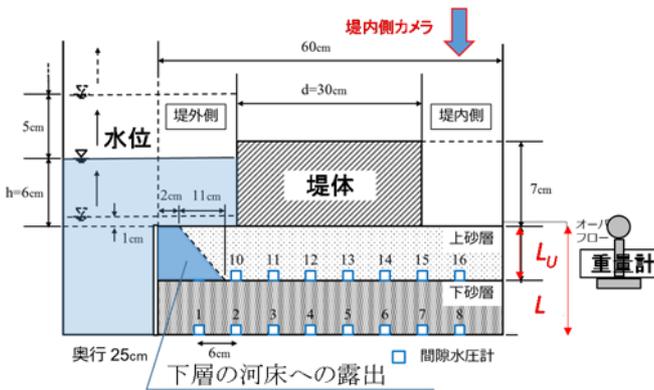


図-2 模型実験装置概略図

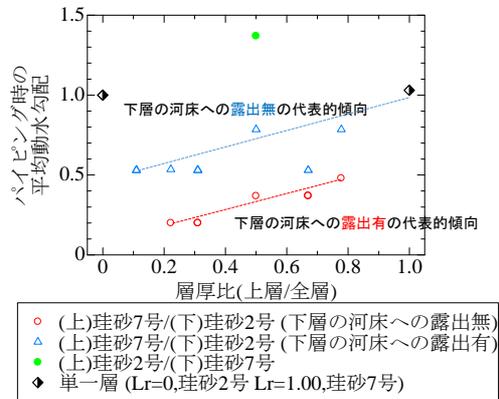


図-3 パイピング破壊時の平均動水勾配と基盤層構造

層厚比 R_L $R_L = \frac{L_U}{L}$ ※単一層の場合 0, 1.0 (1)

パイピング 層厚比 流速

〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学
16号館 227号室 TEL 052-735-5497 FAX 052-735-5497

表-1 パイピング時の流速の計算結果

基盤層構造 流速(cm/s)	$R_L=0.22$ 露出無	$R_L=0.50$ 露出無	$R_L=0.78$ 露出無	$R_L=0.22$ 露出有	$R_L=0.50$ 露出有	$R_L=0.78$ 露出有	$R_L=0$ (珪砂 2号)	$R_L=1.0$ (珪砂 7号)
	① $v=ki$	3.67×10^{-2}	2.03×10^{-2}	1.31×10^{-2}	2.08×10^{-2}	1.50×10^{-2}	2.09×10^{-2}	8.30
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 $v = \frac{Q_{sv} \times N_{sv}}{\pi/4 d_{sv}^2}$	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

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いことがわかる. 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. 流速について

ダルシー則が成立する土粒子が動かない状態に比べ, 実験では, 噴砂やパイピングの進展に伴う空洞周辺などでは粒子の移動がみられた. この局所化した流れの流速を直接測ることは難しいので, ここでは, 簡易に計測可能な量から推定してみた. その結果を表-1 に示す.

まず, 互層の平均透水係数 k とパイピング時の平均動水勾配 i から求めた ($v=ki$). 次に, 透水性基盤の内, 透水性の大きい下層のみ (断面積 S) に透水したと仮定した時の速度 $v=Q/S$ (全体の漏水量を Q) を求めた (単一層については全基盤層断面で計算する). また, 漏水が, 噴砂口からのみ噴出すると仮定した速度 $v = (Q_{sv} \times N_{sv}) / (\pi/4 d_{sv}^2)$ (動画から噴砂口の数 N_{sv} , 口径 d_{sv}), 噴砂口に噴出した水の高さ h から求めた ($v=\sqrt{2gh}$). さらに, 参考のために, パイプが堤内外で貫通したことを仮定した $v=\sqrt{2gH}$ を算定した. この値は他に比べて非常に大きな値となる.

①のダルシー則から算定した速度と比べると, ②のような計測実流速は約 1~10 倍の速さが出ている. しかし, ③④のような局所的流速はダルシー則と比べると約 $10^2 \sim 10^4$ 倍の流速となっている. ⑤の場合は極端にことなる.

3.3. 基盤層内の粒径と限界流速

図- 4 に限界実流速と粒径との関係²⁾を示し, 本稿では水平流れに着目した久楽らの結果と比較した. 実験時の流速としてパイピング直前の流量から砂層全断面を透水する見かけの流速 (表-1 パイピング時の流速の計算結果の色塗り速度②) を比較対象とする. パイピングに至る平均動水勾配が $i \cong 1.0$ を超える (図- 3 参照)

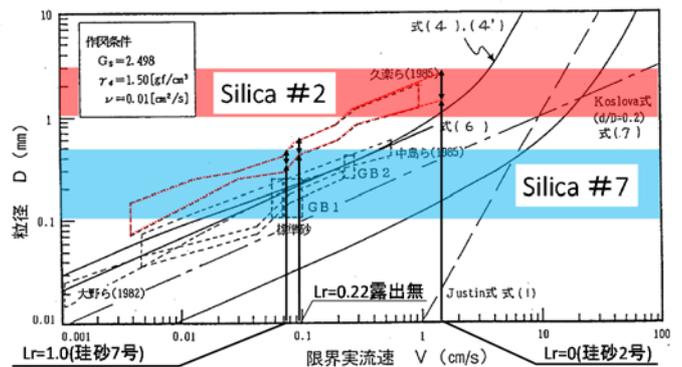


図- 4 粒径-限界流速関係 (長瀬 (1987 年) に加筆)

単一層 ($R_L=0, 1.00$) に関して, それぞれの珪砂の粒径をすべて運ぶ限界流速に達していることがわかる. また, 互層構造の中で流速が一番小さい $R_L=0.22$ 露出無も珪砂 7 号 (上砂層) のすべての粒径を運ぶ流速が出ていることがわかる.

4. 結論

基盤漏水に伴うパイピングに関して, 層構造・層厚比の影響について整理した結果, 単一の透水性基盤層ではパイピング破壊は極めて発生する可能性が低く (堤体すべりを考える必要がある), 上層の細砂層が薄く, 下層の砂礫層が河床に露出している互層基盤はパイピングが極めて発生しやすいことが明らかになった. 重要危険個所の特定の際のポイントと考えられる.

噴砂が生じ粒子自体も動き, 流れの局所化が起きると, ダルシー則よりも大きな流速が生じており, 粒子を押し流す限界流速に達していることがわかった.

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) 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.