

パイピング現象の進行条件に関する考察

日本工営株式会社

正会員

○齊藤 啓

名古屋工業大学

正会員

前田 健一

名古屋工業大学

学生会員

李 兆卿, 櫛山 総平

1. はじめに

平成24年に矢部川右岸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⁾。図-1に示す、決壊箇所の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、基盤層を通じパイピング現象が発生したと報告されている。パイピングによる被災を未然に防ぐためにも照査精度を向上させることは急務である。

照査精度向上のためには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。本稿は模型実験の結果からパイピング機構について検討する。

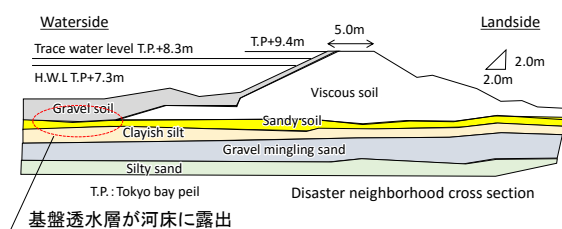


図-1 2012年矢部川破堤箇所の近傍土質断面

2. 実験概要

図-2に、久楽らの実験²⁾を参考にした実験概略図を示す。基盤層は水中落下で堆積させ、上層は珪砂7号、下層は珪砂2号を使用し相対密度が70%程度になるように締め固める。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る。

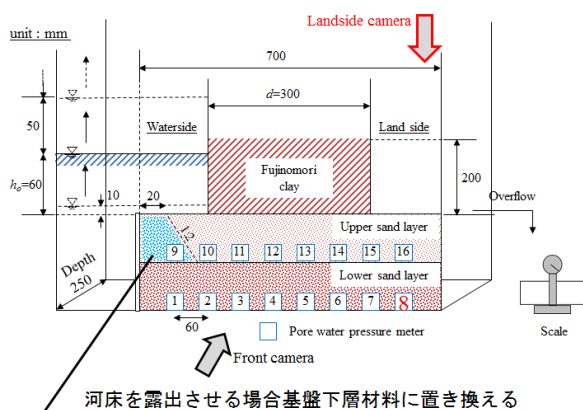


図-2 模型実験装置概略図

3. 検討方針

先行研究や模型実験を実施した結果³⁾から、基盤互層のパイピング現象は、ボイリング（噴砂の発生）、パイピング（空洞の進行）、空洞の貫通の3段階にわかれると考え、本稿ではそれぞれの段階の検証を行った。

4. 実験結果

(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）により決まると考えられる。

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 2.65g/cm³ e: 珪砂7号の間隙比 0.90

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

間隙水圧計 No.8 の間隙水圧値（噴砂発生時）を揚圧力、基盤上層厚を被覆土層厚として図-3に整理した。

互層基盤では、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。一方、単一層には被覆土層がない

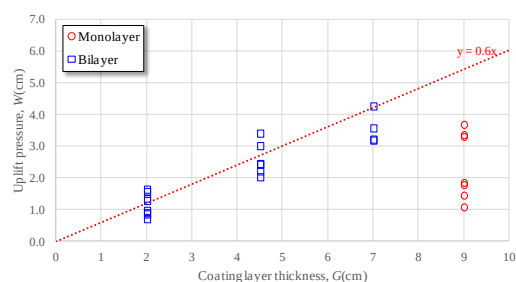


図-3 基盤内揚圧力と被覆層厚（上層厚）との関係

キーワード ボイリング パイピング 空洞の貫通

連絡先 〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6 日本工営株式会社 河川水工部 TEL 03-3238-8045

ため、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）

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-4 参照）。

図-5 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 $1.4 \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ 程度であった。求めた浸透流速と図-6 に示す土粒子と限界流速のグラフから珪砂 7 号における運動の発生を検証する。

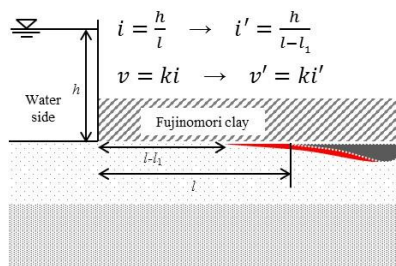


図-4 パイピングに伴う平均動水勾配の変化（透水係数 k は珪砂 7 号の $1.4 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ を用いる）

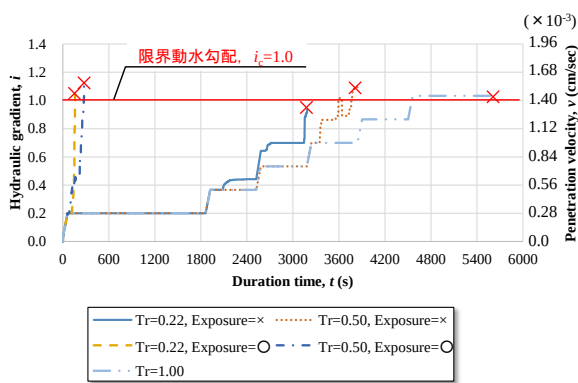


図-5 平均動水勾配、浸透流速の時間変化

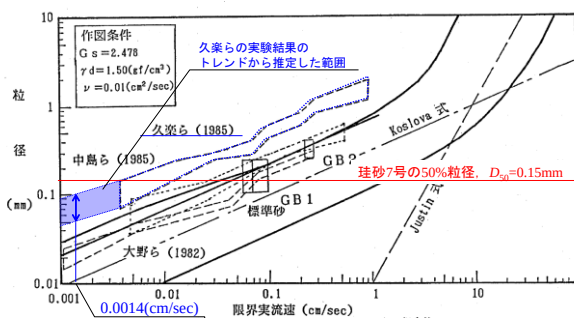


図-6 限界実流速と粒径の関係

図-6 より、本実験と条件に近い久楽らの結果を採用する。浸透流速は約 $1.4 \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ であり、図-6 より珪砂 7 号の大部分が運動できないため、パイプ内では浸透流速以上の流速が発生している可能性が高い。実験では基盤下層から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したと考える。

(3) 空洞の貫通

空洞の貫通についてここで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。本稿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-5 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可能と考える。

5. 結論

互層におけるパイピング現象はボイリング、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、それぞれの段階について検討した。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。

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報告書, 2013.
- 2) 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.
- 3) 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.