

洪水時の堤防基盤からの噴砂に関する研究

中央大学大学院
中央大学研究開発機構
中央大学研究開発機構

学生会員
フェロー
正会員

○栗原 克幸
福岡 捷二
田端 幸輔

1. 序論

堤体や基盤からの漏水は河川堤防の安定性を低下させる要因の1つとなるため、洪水時にどの場所が危険になるかを推定することは重要である。福岡、田端¹⁾は、浸透流を支配する無次元量である浸透流ナンバー SFn (Seepage flow number)の各物理量を、堤防浸透流を規定する物理量に置き換えることで、堤防浸透破壊の危険性を表す力学指標である堤防脆弱性指標 t^* を定義した。しかし、基盤層及び被覆土の土質・構造特性や基盤層内の圧力分布は、堤防によって大きく異なっており、基盤漏水に起因する堤防破壊危険性を適確に表すことのできる力学指標は未だないようである。

本研究では、浸透流の力学的相似条件を表す浸透流ナンバー SFn と被覆土のクイックサンド(quicksand)発生条件を用いて、噴砂の発生危険性を表す無次元指標 SFn_{qs} を提示し、堤防模型実験及び現地堤防の被災データを用いて、 SFn_{qs} と堤防法尻噴砂との関係を調べ、 SFn_{qs} が噴砂の発生をどの程度表現できるかを検討する。

2. クイックサンドの発生条件を考慮した浸透流ナンバー SFn_{qs} (Seepage Flow number at the time of the quicksand)

図-1に本研究で想定する堤防下部の模式図を示す。堤体は不透水性材料からなり、堤体盛土直下に厚さ d の不透水被覆土層があり、その下部に厚さ d_s 、 d_g の基盤透水層がある場を考える。このとき、浸透流ナンバー SFn は式(1)のように表わされる¹⁾。

$$SFn = \frac{1}{S_{r0}} \frac{H_0 k_0 T_0}{\lambda_0 L_0^2} = \frac{1}{S_r} \frac{H k T}{\lambda L^2} \quad (1)$$

ここに、 H :洪水水位、 k :透水係数、 T :洪水継続時間、 S_r :飽和度、 λ :空隙率、 L :水平浸透距離、添え字の0は各代表量である。本研究では、河川水位の上昇により基盤層内が直ちに飽和されると考えて式(1)の S_r を1とした。

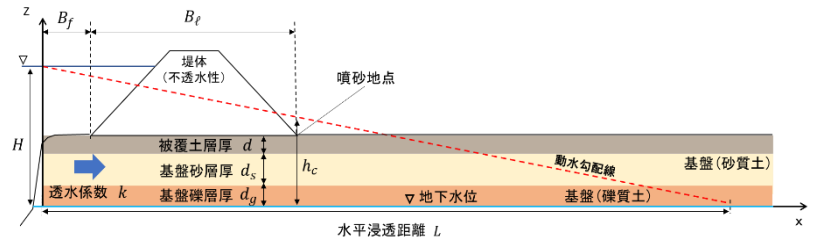


図-1 噴砂を伴う漏水に対する浸透流ナンバーの各物理量の定義

一般に、基盤層内の土砂が地表に大量に噴出することにより、堤体の支持力が低下し、堤体の崩壊や堤防決壊の危険性が高まると推察される。この連続的に生じる破壊現象を時間経過とともに評価することが重要であるが、本稿では、基盤層内の圧力が高まり、堤防裏法尻先の被覆土がクイックサンド(液状化)状態になることが噴砂発生条件となると考え、噴砂発生時の SFn を導く。

図-1の裏法尻部を拡大し、被覆土層に働く力を図-2に示す。被覆土の重量と土に働く剪断力、被覆土層に働く揚圧力のつり合いは、以下のように表される。

$$\gamma' d + R = \{h - (d + d_s + d_g)\} \gamma_w \quad (2)$$

ここに、 γ' :土の水中単体重量($= \gamma_{sat} - \gamma_w$)、 γ_{sat} :飽和土の湿潤単体重量($= (G_s + e) \gamma_w / (1 + e)$)、 γ_w :水の単体重量、 R :土に働く剪断力、 d :被覆土層厚、 $d_s + d_g$:基盤透水層厚、 G_s :土粒子の比重(2.65)、 e :間隙比($= \lambda / (1 - \lambda)$)である。基盤層内の圧力が高まりクイックサンド状態となると、剪断力 R はゼロとみなすことができる。この時の基盤層内のピエゾ水頭を h_c とすると、式(2)の h は式(3)で表現できる。

$$h_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} d + d + d_s + d_g = \frac{G_s - 1}{1 + e} d + d + d_s + d_g \quad (3)$$

河川水位 H と裏法先でのピエゾ水頭 h_c の間の動水勾配線(図-1、赤色破線)を直線で仮定すると、式(1)の水平浸透距離 L は式(4)で表される。

$$L = \frac{H(B_f + B_\ell)}{H - h_c} \quad (4)$$

ここに、 B_f :高水敷幅、 B_ℓ :堤体幅である。この時の SFn を、被覆土のクイックサンド発生時の浸透流ナンバー SFn_{qs} とし、式(5)で表現する。

$$SFn_{qs} = \frac{H k T}{\lambda} \left\{ \frac{H - \left(d + d_s + d_g + \frac{G_s - 1}{1 + e} d \right)}{H(B_f + B_\ell)} \right\}^2 \quad (5)$$

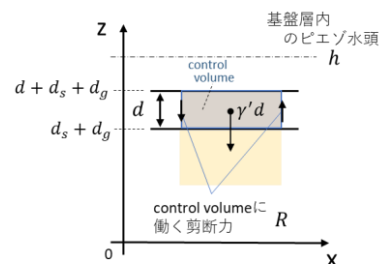


図-2 裏法尻部の被覆土層に働く力

キーワード 浸透流ナンバー SFn 、相似則、基盤浸透、噴砂、クイックサンド、 SFn_{qs}

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1615

表-1 模型堤防及び現地堤防の検討条件

(a) 堤防模型実験の場合									(b) 現地の被災箇所の場合											
実験ケース	模型	d[m]	ds[m]	Bf[m]	Bd[m]	H[m]	k[m/s]	T[s]	河川	被災箇所	d[m]	ds[m]	dg[m]	Bf[m]	Bd[m]	H[m]	k[m/s]	T[hr]	被災状況	噴砂量
case1	二次元 全断面模型	0.03	0.02	0.1	0.9	0.23	2.67E-03	13	鬼怒川	左岸8k	0.15	6.5	-	116.7	28.8	8.0	1.77E-05	13	裏法尻で1箇所の噴砂	少ない
case2		0.03	0.02	0.1	0.9	0.23	2.67E-03	29	H27.9洪水	右岸38.25k	0.31	-	5.00	118.1	45.5	11.7	1.98E-04	20	裏法尻で8箇所の噴砂	多い
case3		0.03	0.02	0.1	0.9	0.23	2.67E-03	55	梯川	右岸8.6k	0.45	0.50	0.68	33.8	21.2	5.2	1.30E-04	9	裏法尻で3箇所の噴砂	多い
case1	三次元 全断面模型	0.03	0.02	0.1	0.9	0.23	2.67E-03	60												
case2		0.03	0.02	0.1	0.9	0.23	2.67E-03	35												
case3		0.03	0.02	0.1	0.9	0.23	2.67E-03	94												
case4		0.03	0.12	0.1	0.54	0.18	2.67E-03	70												

1.E+00

1.E-01

顕著な噴砂
が発生

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

△

<

この指標は、基盤噴砂現象に関する無次元量であり、洪水外力、堤防の大きさ、基盤の構造・土質の異なる堤防の噴砂発生を表す力学的相似条件であるので、現地堤防、模型堤防の噴砂発生に用いることが可能である。以降では、堤防模型実験と現地堤防データを用いて、 SFn_{qs} の値と噴砂規模との関係について検討する。

3. 検討条件

(1) 模型実験

模型実験データには、小高ら²⁾が行った基盤層厚・透水係数を変化させた場合の堤防基盤の漏水実験結果を用いた。模型堤防は透水性の低い材料で作られている。基盤層は上下2層から成り、下層の方が透水係数は大きい材料で構成されている。実験は、下層の基盤層を飽和させた状態から急速に外水位を高めた後、一定水位に保つ条件で行われた。なお、全ての実験で裏法尻から大量の噴砂が発生し、その時の時間が計測されている。表-1(a)に実験条件及び SFn_{qs} の算定に用いた模型実験データを示す。飽和状態に設定した基盤層高を地下水面と考え、この高さからピーク水位までの垂直高さを洪水水位 H とした。洪水継続時間 T には、初期水位上昇から噴砂を伴う漏水発生までの時間を与えた。

(2) 現地堤防

現地堤防データは、基盤浸透により裏法尻で漏水噴砂被害が生じた平成27年9月鬼怒川洪水³⁾、平成25年7月梯川洪水⁴⁾を対象とした。表-1(b)に現地堤防での SFn_{qs} 算定に用いた検討条件を示す。 H と T には、観測水面形の時間変化に基づく洪水流・河床変動解析⁵⁾により得られた水位ハイドログラフから設定した。基盤の k 、 d 、 d_s 、 d_g 、 B_f 、 B_d は、ボーリング調査データを基に設定した。

4. 浸透流ナンバー SFn_{qs} と噴砂規模の関係

図-3に算定した SFn_{qs} を示す。模型実験では、 SFn_{qs} が $10^{-2} \sim 10^{-1}$ の範囲に集中してプロットされていることが分かる。一方、現地堤防では、 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ の広い範囲にプロットされる。ただし、噴砂の規模が小さかった鬼怒川左岸8kでは、 SFn_{qs} は 10^{-3} より小さい範囲にプロットされる。また、堤体の安定性低下に繋がるような大量の噴砂が裏法尻で集中して発生した鬼怒川右岸38.25k、梯川右岸8.6k、模型実験では、いずれも SFn_{qs} は、概ね 10^{-3} より大きい範囲に集中している。

SFn_{qs} が 10^{-3} より大きいものに着目し、噴砂箇所数と SFn_{qs} の関係を図-4に示す。三次元模型実験のcase2とcase3、現地堤防の鬼怒川右岸38.25kと梯川右岸8.6kを比較すると、それぞれ3~8箇所で顕著な噴砂が確認されている。しかし、模型実験、現地堤防共に噴砂箇所数の少ない方が、 SFn_{qs} は大きく算定されており、 SFn_{qs} と噴砂箇所数には明確な相関は見られなかった。これは、本指標が基盤層内の砂の移動機構までを考慮できていないことが理由として考えられる。

5. 結論

浸透流の力学的相似則である浸透流ナンバー SFn を堤防基盤に適用することにより、噴砂の発生危険性を表す無次元指標として SFn_{qs} を導いた。この指標を堤防模型実験及び現地堤防に適用した結果、 SFn_{qs} が 10^{-3} より大きいときに顕著な噴砂が発生した。今後は噴砂データを収集し、噴砂発生限界の精度を上げることが必要である。

本研究を進めるにあたって、名城大学小高猛司教授から貴重なデータの提供を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

1)福岡,田端:浸透流を支配する力学指標と浸透破壊の力学相似条件.浸透流ナンバー SFn と堤防脆弱性指標 t^* ,土木学会論文集 B1(水工学),2018.
2)林,小高ら:複層構造基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊実験における三次元効果の検討,第72回土木学会年次学術講演会,III-095,2017. 3)鬼怒川堤防調査委員会:堤防における漏水発生個所の詳細調査報告,2016. 4)佐藤,大淵,福岡:梯川における基盤漏水が発生する地形・地質及びパイピングによる堤防変状,土木学会論文集B1(水工学),2018.2. 5)福岡ら:平成27年9月洪水における鬼怒川下流区間の流下能力,河道貯留及び河道安定性の検討,河川技術論文集,第22巻,2016.6.

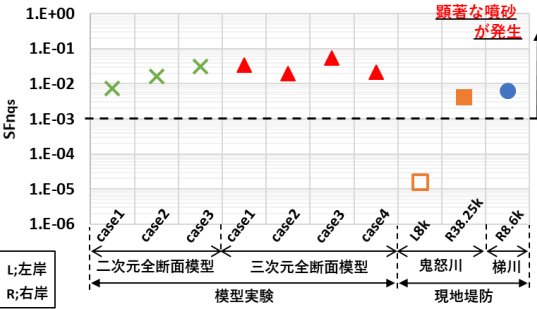


図-3 SFn_{qs} と噴砂を伴う漏水の関係

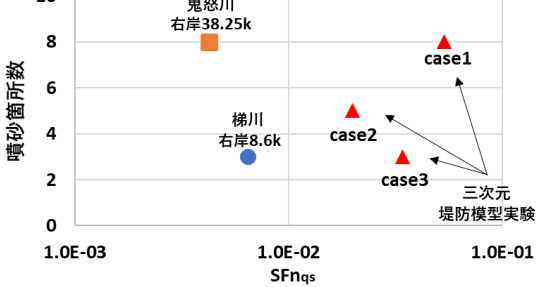


図-4 噴砂が顕著なデータの SFn_{qs} と噴砂箇所数の関係