

洪水時の基盤浸透による堤防被害の評価法に関する研究

Study on evaluation method of levee failures due to under seepage flow during a flood

15D3102007B 栗原 克幸 (河川工学研究室)
Katsuyuki KURIHARA/ River Engineering Lab.

Key Words : Seepage flow number, under seepage, leakage, sand boil

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、田端らは、Richards 式の無次元化により、一般的な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)を導出し、SFn の物理量を、堤体内浸透流を規定する物理量に置き換えることで、堤体浸透破壊の危険性を表す堤防脆弱性指標 t^* を定義し、これを用いて堤防破壊危険性の高い場所の推定を可能にした。しかし、堤体法先の基盤漏水に起因する堤防破壊危険箇所を予測する手法は未だないようである。

本論文では、浸透流ナンバー-SFn と被覆土のクイックサンド発生条件を用いて、噴砂を伴う漏水に対する力学指標 SFn_{qs} を提示する。そして、堤防模型実験及び現地堤防にこの指標を適用することで、基盤漏水の発生危険性を検討し、SFn_{qs} と被災規模との関係を分析することを目的とする。

2. 検討方法

図-1 に本研究で想定する堤体と基盤層の模式図を示す。ここでは、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 を式(1)のように表わす。

$$SF_n = \frac{1}{S_{r0}} \frac{H_0 k_0 T_0}{\lambda_0 L_0^2} = \frac{1}{S_r} \frac{HkT}{\lambda L^2} \quad (1)$$

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 : 浸透路長、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。

噴砂を伴う箇所では、基盤層内の圧力が図-1 に示す h_c の高さまで増加する時に、被覆土が液状化し、危険になると考える。漏水地点での鉛直方向の動水勾配 i_z (図-1) が、クイックサンドに対する限界動水勾配 i_c (図-1) と一致する条件を用いれば、 h_c は以下のように表現できる。

$$h_c = d + d_s + d_g + \frac{G_s - 1}{1 + e} d \quad (2)$$

ここに、 d : 被覆土層の厚さ、 $d_s + d_g$: 基盤透水層、 G_s : 土粒子の比重(2.65)、 e : 間隙比($\lambda(1-\lambda)$)である。基盤透水層内の圧力分布が直線であるとし、河川水位 H と h_c を直線で繋ぐ動水勾配線を仮定する。すなわち、 $x=0$ で $z=H$ 、 $x=B_f+B_l+B_w$ で $z=h_c$ 、 $x=L$ で $z=0$ となる直線の動水勾配線(図-1、赤色破線)を考えることで、クイックサンド発生時点における浸透路長 L を式(3)で表わす。

$$L = \frac{H(B_f + B_l + B_w)}{H - h_c} \quad (3)$$

ここに、 B_f : 高水敷幅、 B_l : 堤体幅、 B_w : 裏法尻から漏水地点までの水平距離である。この場合の浸透流

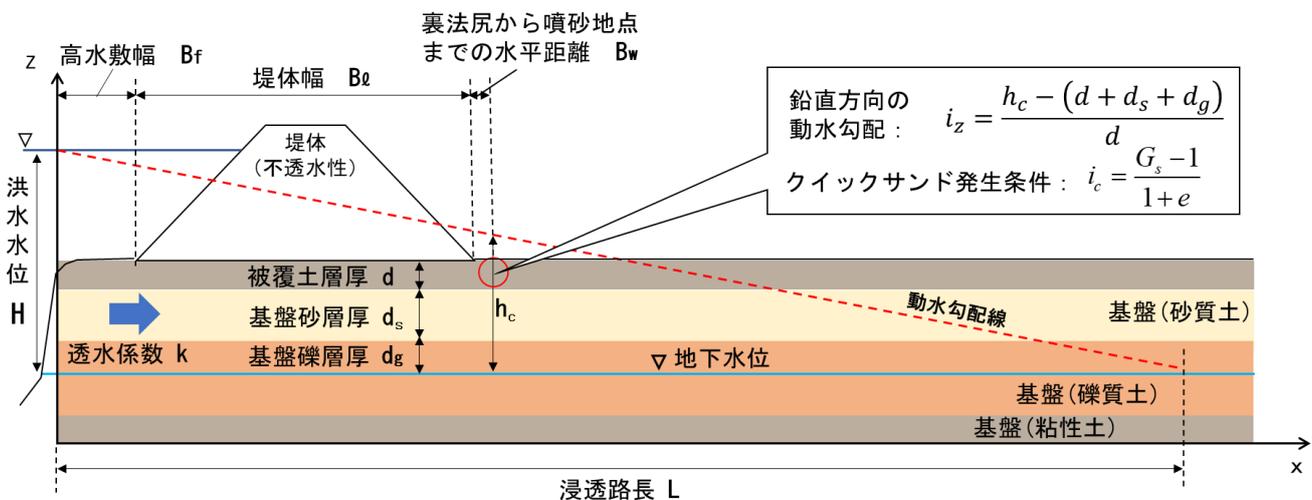


図-1 噴砂発生に対する浸透流ナンバーの各物理量の定義

表-2 SFn, qs の算定に用いた模型実験データ²⁾³⁾

| ケース | 模型 | d[m] | ds[m] | hc[m] | Bf[m] | Bl[m] | Bw[m] | Lz[m] | H[m] | k[m/s] | T[s] | | SFn, qs | SFn, qs' |
|---------|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----------|---------|------|----------|----------|
| | | | | | | | | | | | 噴砂を伴う漏水 | 堤体変形 | | |
| a | 2次元半断面 | 0.02 | 0.13 | 0.17 | 0 | 0.7 | 0 | 1.83 | 0.27 | 2.67E-03 | 25 | - | 1.09E-02 | - |
| b | | 0.05 | 0.1 | 0.19 | 0 | 0.7 | 0 | 2.43 | 0.27 | 2.67E-03 | 20 | - | 4.97E-03 | - |
| c | | 0.02 | 0.13 | 0.17 | 0 | 0.7 | 0 | 1.83 | 0.27 | 2.67E-03 | 30 | - | 1.31E-02 | - |
| d | | 0.02 | 0.13 | 0.17 | 0 | 0.7 | 0 | 1.83 | 0.27 | 2.67E-03 | 40 | - | 1.75E-02 | - |
| case1 | 2次元全断面模型 | 0.03 | 0.02 | 0.08 | 0.1 | 0.9 | 0 | 1.49 | 0.23 | 2.67E-03 | 13 | - | 7.36E-03 | - |
| case2 | | 0.03 | 0.02 | 0.08 | 0.1 | 0.9 | 0 | 1.49 | 0.23 | 2.67E-03 | 29 | - | 1.64E-02 | - |
| case3-1 | | 0.03 | 0.02 | 0.08 | 0.1 | 0.9 | 0 | 1.49 | 0.23 | 2.67E-03 | 55 | - | 3.11E-02 | - |
| case3-2 | 3次元全断面模型 | 0.03 | 0.02 | 0.08 | 0.1 | 0.9 | 0.2 | 1.79 | 0.23 | 2.67E-03 | 55 | - | 2.16E-02 | - |
| case1 | | 0.03 | 0.02 | 0.08 | 0.1 | 0.9 | 0 | 1.49 | 0.23 | 2.67E-03 | 60 | 195 | 3.40E-02 | 1.10E-01 |
| case2 | | 0.03 | 0.02 | 0.08 | 0.1 | 0.9 | 0.2 | 1.79 | 0.23 | 2.67E-03 | 35 | - | 1.38E-02 | - |
| case3-1 | | 0.03 | 0.02 | 0.08 | 0.1 | 0.9 | 0 | 1.49 | 0.23 | 2.67E-03 | 94 | 120 | 5.32E-02 | 6.80E-02 |
| case3-2 | 3次元全断面模型 | 0.03 | 0.02 | 0.08 | 0.1 | 0.9 | 0.2 | 1.79 | 0.23 | 2.67E-03 | 94 | 120 | 3.70E-02 | 4.72E-02 |
| case4 | | 0.03 | 0.12 | 0.18 | 0.1 | 0.54 | 0.2 | 1.80 | 0.18 | 2.67E-03 | 70 | 70 | 2.12E-02 | 2.12E-02 |

表-1 模型実験に用いた土質の透水系数²⁾³⁾

| | 領域 I | 領域 II | 領域 III |
|----------|----------|----------|----------|
| a, b | 2.67E-03 | 6.30E-04 | 6.30E-04 |
| c | 2.67E-03 | 5.58E-07 | 9.96E-05 |
| d | 2.67E-03 | 6.30E-04 | 5.58E-07 |
| case1 | 2.67E-03 | 6.30E-04 | 9.96E-05 |
| case2, 4 | 2.67E-03 | 2.57E-04 | 9.96E-05 |
| case3 | 2.67E-03 | 3.98E-05 | 9.96E-05 |

unit [m/s]

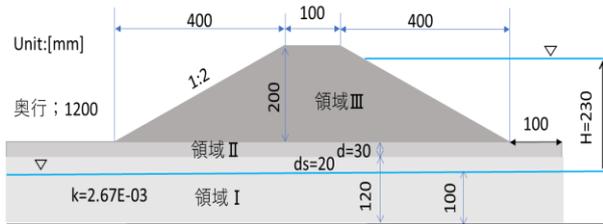


図-2 三次元全断面模型実験の諸元³⁾

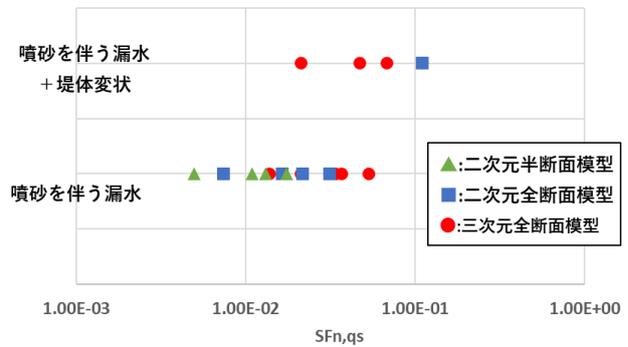


図-3 堤防模型実験の SFn, qs と被災形態の関係

ナンバーを SFn,qs と表現した。

3. 模型実験への SFn, qs の検討

現地堤防では、基盤層の厚さや空隙率、透水系数が複雑に変化し、各物理量を正確に与えることが困難である。ここでまず、一様な厚さの基礎地盤で均質な土質材料で作られた堤防模型を用いて行われた基礎実験を対象に、SFn, qs を算出し、実験時に生じた基盤漏水に起因する堤防破壊現象との関係を検討する。

(1) 模型実験の概要と検討条件

小高ら²⁹⁾は、二次元半断面、二次元全断面、三次元全断面の模型実験を用いて、基盤層の厚さや透水系数を变化させた場合の基盤漏水による堤防破壊実験を行っている。

図-2 に例として三次元全断面模型実験の諸元を、表-1 に実験に用いられた土質条件を示す。模型堤防は高さ 0.2m、堤防幅 0.7~0.9m である。基盤層は上下 2 層の異なる透水性材料からなり、下層の方が透水系数が大きい。実験では、時間経過とともに噴砂を伴う漏水及び堤体変形の挙動が観察されている。なお、初期条件として底面から高さ 0.1m の基盤層を飽和状態にさせておき、この状態から急速に外水位を高め、0.23m 上昇させた高さで水位を一定に保つ条件で、実験が行われた。

表-2 に 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土層高を地下水面と考え、この高さからピーク水位までの高さを洪水水位 H とする。洪水継続時間 T には、初期水位上昇から噴砂を伴う漏水、堤

体変状が生じるまでの時間をそれぞれ与える。基盤層の透水系数の相対関係から基盤上層の土層を被覆土層 d と考え、地下水面から被覆土層までの鉛直高さを透水層厚 ds とし、透水系数 k には ds 層の透水系数を与えた。

(2) 浸透流ナンバー-SFn, qs の模型実験データへの適用

図-3 に模型堤防に適用した SFn,qs と被災形態の関係を示す。噴砂を伴う漏水実験のケースでは、概ね $10^{-3} \sim 10^{-1}$ の範囲に大きくばらついている。これに対して、噴砂を伴う漏水により堤体変状が生じた実験ケースでは、概ね $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 付近の値を取ることが分かる。以上より、堤体に変状をきたすような危険な場合では、概ね $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 付近に集中する傾向にあることから、SFn,qs によって、基盤漏水被害の危険性を推定できる可能性がある。以降では、本指標を現地堤防の基盤漏水被災箇所に応用し、その妥当性を検討する。

4. 洪水時の基盤漏水被災箇所への SFn, qs の検討

(1) 検討対象の河川と洪水

基盤浸透による漏水被害が生じた平成 27 年 9 月鬼怒川洪水、平成 24 年 7 月矢部川洪水、平成 25 年 9 月梯川洪水を対象に、主な堤防被災箇所における SFn,qs を算した。

表-3 SFn, qs に用いた検討条件と被災形態

| 河川 | 被災箇所 | d[m] | ds[m] | dg[m] | hc[m] | Bf[m] | Bl[m] | Bw[m] | Lz[m] | H[m] | T[hr] | ks[m/s] | kg[m/s] | k[m/s] | SFn, qs | 被災形態の分類 | | | |
|--------------------------|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | | | | | | | | | | | | | | | | 噴砂 | 漏水+堤体変状 | 漏水(裏法尻) | 漏水(堤内地) |
| 鬼怒川 H27.9洪水 | 右岸36.75k | 0.71 | 1.43 | 0.00 | - | 30.0 | 44.6 | 12.6 | - | 4.7 | 9 | 6.11E-06 | 2.31E-04 | 6.11E-06 | - | x | - | - | O |
| | 左岸40k | 3.24 | 2.70 | 0.67 | - | 501.4 | 29.1 | 0.0 | - | 10.7 | 23 | 1.23E-05 | 1.50E-03 | 7.58E-04 | - | x | - | O | - |
| | 左岸8k | 0.15 | 6.50 | - | 6.8 | 116.7 | 28.8 | 0.0 | 1001.2 | 8.0 | 13 | 1.77E-05 | - | 1.77E-05 | 1.64E-05 | O | - | O | - |
| 矢部川 H24.7洪水 | 右岸38.25k | 0.31 | - | 5.00 | 5.6 | 118.1 | 45.5 | 0.0 | 314.3 | 11.7 | 20 | - | 1.98E-04 | 1.98E-04 | 4.22E-03 | O | - | O | - |
| | 右岸11.8k | 1.88 | - | 0.00 | 3.7 | 24.0 | 34.5 | 2.0 | 176.5 | 5.7 | 7 | - | 3.00E-04 | 3.00E-04 | 3.61E-03 | O | O陥没, 亀裂 | - | - |
| 梯川 H25.7洪水 H25.9洪水 | 左岸16.0k | 1.55 | - | 1.58 | 4.7 | 35.7 | 38.5 | 0.0 | 340.9 | 6.0 | 9 | - | 1.50E-04 | 1.50E-04 | 6.11E-04 | O | - | O | O |
| | 右岸8.2k | 1.29 | - | 0.92 | 3.5 | 13.0 | 17.7 | 15.0 | 143.5 | 5.1 | 9 | - | 1.85E-04 | 1.85E-04 | 3.70E-03 | O | - | - | O |
| | 右岸8.4k | 0.63 | 1.05 | 0.00 | 2.3 | 38.9 | 22.8 | 1.0 | 113.2 | 5.2 | 9 | 7.56E-05 | 1.85E-04 | 1.30E-04 | 4.25E-03 | O | O裏法滑り | - | - |
| | 右岸8.6k | 0.45 | 0.50 | 0.68 | 2.1 | 33.8 | 21.2 | 0.0 | 92.0 | 5.2 | 9 | 7.56E-05 | 1.85E-04 | 1.30E-04 | 6.46E-03 | O | - | O | - |
| | 左岸9.6k | 0.88 | - | 0.62 | - | 24.6 | 17.8 | 10.0 | - | 5.2 | 15 | - | 2.71E-02 | 2.71E-02 | - | x | - | - | O |

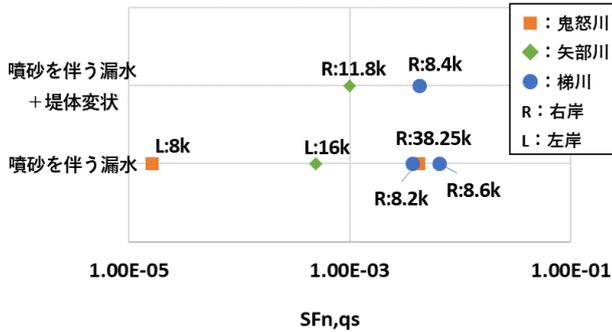


図-4 現地堤防のSFn, qs と被災形態の関係



写真-1 梯川右岸 8.6k の被災状況

(2) 現地堤防の被災形態の分類

本研究では、洪水時に基盤層内を河川水が浸透することで生じたと考えられる漏水被害に対して、以下の3つに分類して検討を行う。

a) 漏水(裏法尻)

「漏水(裏法尻)」とは、河川水が基盤層内を浸透することにより生じた漏水の内、漏水による堤体変状がなく、裏法尻付近(2m以内)で漏水が確認されたものを指す。

b) 漏水(堤内地)

「漏水(堤内地)」とは、基盤層内を河川水が浸透し、堤防の川裏側で漏水が生じたものの内、漏水による堤体変状がなく、裏法尻から堤内地側に2m以上離れた地点で漏水が確認されたものを指す。

c) 漏水+堤体変状

「漏水+堤体変状」とは、基盤漏水の発生が要因となり、堤体裏法滑り等、堤防裏法面が変状したものを指す。以下に堤体変状の種類と被災箇所を示す。

- ・「裏法滑り」：梯川右岸 8.4k
- ・「陥没」：鬼怒川右岸 38.25k, 矢部川右岸 11.8k
- ・「亀裂」：矢部川右岸 11.8k

なお、「漏水」は「漏水(裏法尻)」で生じたものを指す。ただし、パイピングによる堤防直下の空洞化により堤防決壊が生じた矢部川右岸 7.3kでは、裏法尻付近から高さ1m程度の濁った水が噴き上がっており、本研究で扱う漏水メカニズムとは大きく異なると考え、ここでは検討対象から除外した。

噴砂の有無及び被災状況については、被災箇所の調査報告書⁹⁾及び既往研究論文⁷⁾に基づいて把握した。

(3) 検討条件

表-3に対象とする河川堤防の被災形態とSFn,b, SFn,qsの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⁸⁾により得られた水位ハイドログラフを用いた。基盤のk, d, ds, dg, Bf, Bl, Bwを地質横断図、開削調査、公開されているボーリング調査データから設定した。なお、基盤透水層厚(ds+dg)は地下水位の高さから被覆土層までの垂直高さとした。kは粒度試験の20%粒径D20, 10%粒径D10を用いるCreager, Hazenの推定式より算出し、同じ基盤透水層にボーリングデータが複数ある場合はkを平均して与えた。また、基盤透水層が砂や礫による多層構造を成している場合については、各層のkの平均値を与えた。表-3のds, dgが0の地点では、洪水に伴う水位上昇以前からその層が飽和状態であったことを指す。

(4) 浸透流ナンバー-SFn, qsの基盤漏水箇所への適用

図-4に算定した浸透流ナンバー-SFn,qsと被災形態との関係を示す。噴砂を伴う基盤漏水箇所では、SFn,qsの値が概ね10⁻⁵~10⁻²の範囲に大きくばらつく。また、堤体変状が生じ、危険な状態となった矢部川右岸 11.8k, 梯川左岸 8.4kでは、SFn,qsがやや大きめに算定され、10⁻³~10⁻²の範囲に分布する。一方、梯川左岸 8.6kや鬼怒川右岸 38.25kでは、堤体変状が生じなかったが、SFn,qsがかなり大きく算定された。梯川右岸 8.6kでは、写真-1に示すように、裏法尻部で大量の噴砂を伴う漏水が確認されている。鬼怒川右岸 38.25kでは、裏法尻で噴砂を

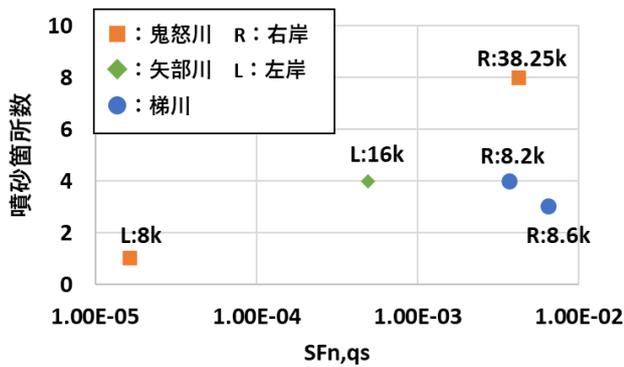


図-5 SFn,qs と噴砂箇所数の関係

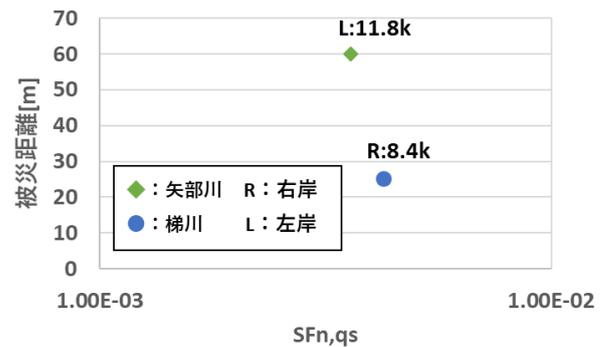


図-6 SFn,qs と堤体変状部分の縦断距離の関係

伴う漏水が 8 箇所も確認されていた。このため、これらの地点では堤体変状にまで発達しなかったものの、危険な状態であったと推定される。以上より、3 章で検討した模型実験ほど顕著ではないものの、堤防変状が生じた箇所では SFn,qs が大きめに算定されることが分かった。

次に、噴砂被害のみ生じた箇所では噴砂箇所数が、堤防変状に至った箇所では変状部分の縦断距離が、それぞれ被災の程度を表すものと考え、これらと SFn,qs の対応関係を分析した。

図-5 に SFn,qs と噴砂を伴う基盤漏水箇所数との関係を、図-6 に堤体変状が生じた被災箇所での SFn,qs と堤体変状の規模との関係を示す。噴砂のみ生じた箇所では、SFn,qs の値が大きくなるほど噴砂箇所数が増大する傾向にあることが分かる。一方、堤防変状が生じた箇所では、SFn,qs と被災距離には明確な相対関係は確認できなかった。(図-6)これは、現地の複雑な基盤構造や透水係数分布を本手法により十分に考慮できていないことが理由として考えられる。よって、本手法により噴砂を伴う基盤漏水による堤体変状の規模までを推定することは、現時点では困難であることが分かった。

5. 結論と今後の課題

堤防下部の基盤層内の浸透現象に、浸透流ナンバー SFn を適用することにより、噴砂の発生危険性を表す指標として、SFn,qs を提示した。そして、これらの指標を堤防模型実験と平成 27 年鬼怒川、平成 24 年矢部川、平成 25 年梯川洪水の漏水事象に適用した。堤防模型実験では、堤体変状の生じたケースの SFn,qs は、噴砂を伴う漏水が生じた場合に比べて大きくなり、 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ の範囲に集中する傾向が確認できた。また、現地堤防では、噴砂箇所数の多い地点では SFn,qs が大きくなる傾向にあることを示した。ただし、堤体変状が発生する箇所では、SFn,qs と被災規模の対応関係を十分説明できなかった。

本手法では、基盤層厚の変化に伴う現地の複雑な基盤構造や透水係数分布が動水勾配変化に及ぼす影響を考慮できていない。特に、SFn,qs の値は基盤層内の水の動きやすさを規定する透水係数の精度に大きく依存す

ることから、現地においてこれを正しく推定することが課題となる。佐藤ら⁹⁾は、一様断面管路の内側に 1/2, 1/4 球を密に貼り付けることで土中内の空隙構造を再現し、この中を流れる浸透流の水理特性について実験的研究を行っている。この実験を用いて、空隙変化に伴う圧力水頭分布の変化特性を分析し、空隙変化が浸透流の挙動及び透水係数に与える影響を明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 田端幸輔: 浸透流を支配する力学指標と堤防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 ϵ^* , 土木学会論文集 B1(水工学), 2018.
- 2) 崔 瑛, 小高猛司, 李圭太, 森三史郎, 林愛実: 高透水性基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊メカニズムの検討, 第 28 回中部地盤工学シンポジウム, pp.81-88, 2016.
- 3) 林愛実, 森三史郎, 森智彦, 小高猛司, 崔 瑛, 李圭太: 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.
- 4) 矢部川堤防調査委員会: 矢部川調査委員会報告書, 平成 25 年 3 月.
- 5) 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.
- 6) 応用地質株式会社: H27 東山排水樋管外 5 箇所地質調査業務, 平成 29 年 3 月. (国土交通省関東地方整備局下館河川国道事務所提供資料)
- 7) 佐藤豊, 大淵貴, 福岡捷二: 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.
- 8) 福岡捷二, 田端幸輔, 出口桂輔: 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.
- 9) 佐藤邦明, 室田明: 地下水流の層-乱流遷移限界と抵抗則に関する基礎的研究, 水理講演会講演集, 1966.