

# 堤防基礎地盤のパイピング発生箇所に対する準二次元非定常浸透流解析の適用

堤防 透水性基盤層 パイピング破壊 準二次元非定常浸透流解析

中央大学研究開発機構 ○田端 幸輔  
中央大学研究開発機構 福岡 捷二

## 1. はじめに

洪水時における河川堤防の破壊の危険性を理解し、弱点箇所の堤防強化や流域の危機管理対策を検討することは重要な治水課題である。近年、堤防ボーリングデータ、堤防被災箇所の詳細な現地調査データ等が得られてきたことから、堤防が不透水性基盤の上に建設されている場合や、基盤が透水性材料で構成されている場合、または基盤層の上に不透水性の土が被覆している場合等、河川堤防の基盤の条件は様々で、このために被災形態や規模も異なることが分かってきた。著者らはこれまで、土質構造が不明確な堤防部分の破壊危険性を推定することを目的とし、洪水流解析と堤防ボーリング調査データに基づいた信頼性解析を用いることで、堤防直下に不透水性基盤が存在すると仮定した場合の堤防の浸透・裏法滑り破壊危険確率の算定手法を構築したり。更に、堤防直下に透水性の基盤層が存在する場合に導かれる準二次元浸透流解析手法を信頼性解析に取り込むことで、より一般化された堤防破壊危険確率算定手法を提示している<sup>2)</sup>。

一方、基盤漏水やパイピング破壊による危険性は、土質材料の不確実性ではなく、むしろ被災が生じた箇所の堤体、基盤層、行き止まり箇所等の土質構造が重要となると考えられ、これらに着目した浸透流解析を行うことで、信頼性解析を用いずに力学的に評価、分析できる可能性がある。

本研究では、洪水時における基盤透水層内の浸透水の挙動と圧力水頭分布を準二次元浸透流解析の枠組みで見積もることで、図1に示すような堤防裏法先から行き止まり箇所までの被覆土の盤膨れ発生と、パイピング進行時の砂の抜け出しによる堤体安定性の低下を検討する手法を提案する。そして、本手法で算出される圧力水頭が、一般的な浸透流解析手法によって得られる値とそれほど相違が無いことを確認する。また、本手法を基盤漏水やパイピングによって破堤、裏法崩れ、噴砂等の被災が生じた矢部川、利根川、子吉川堤防に適用し、本手法によりパイピング破壊及びその危険度を矛盾なく説明可能であることを示す。

## 2. 検討方法

### 2.1 一般的な飽和不飽和浸透流解析手法

一般的な飽和・不飽和浸透流計算では、以下の Richards の式が用いられる。

$$(C + S_s) \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここに、 $\phi$ は圧力水頭(m)、 $k$ は透水係数(m/s)、 $C$ は不飽和土の比水分容量(1/m)、 $S_s$ は飽和土の比貯留容量(1/m)である。

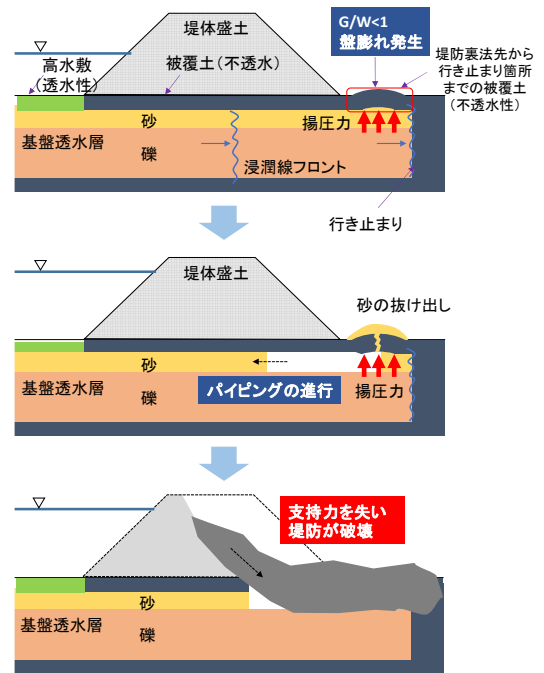


図1 洪水時におけるパイピング破壊プロセスのイメージ

被圧帯水層の場合、式(1)の  $S_s$  が無視でき、 $z=z_b$  (底面) から  $z=z_s$  (水面高) まで積分すると次の式が得られる。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( hk \frac{\partial h}{\partial x} \right) + w \quad (2)$$

ここに、 $\lambda$ は空隙率、 $h$ はピエゾ水頭、 $w$ は高水敷等からの鉛直浸透の流入流速である。この偏微分方程式を数値解析によって解くことで、土中浸透流の圧力場が求まる。

### 2.2 堤体と透水性基盤層の準二次元浸潤線解析法

#### (1) 基盤透水層内の浸透流と圧力水頭の算定

図2に堤体と透水性基盤層の模式図を示す。本研究では、堤防の直下に厚さ  $d_0$  の不透水層が、その下には厚さ  $D$  の基盤透水層があり、基盤透水層は川裏側で行き止まり構造となっている場合を対象とする。透水層内の流入量  $q_{in}$ 、高水敷から基盤層内へ流入するフラックス  $q^*$ を考慮し、図2に示す状況での準二次元浸潤線解析法を示す。

基盤透水層を浸透する水の連続条件は式(3)で表される。

$$\lambda D \frac{d\xi(t)}{dt} = q_{in} + q^* \quad (3)$$

基盤透水層の浸透流場にダルシー則を適用すると、基盤透水層への流入量  $q_{in}$  は、基盤層内の動水勾配と透水係数  $k$ 、層厚  $D$  を用いて以下のように表される。

$$q_{in} = kD \frac{\psi_b(t) - \psi_0}{\xi(t)} \quad (4)$$

ここに、 $\psi_b$ は境界部分での圧力水頭で  $H+d_0+D$  で表す。 $\psi_0$ は初期の圧力水頭で、平常時の河川水位から与える。

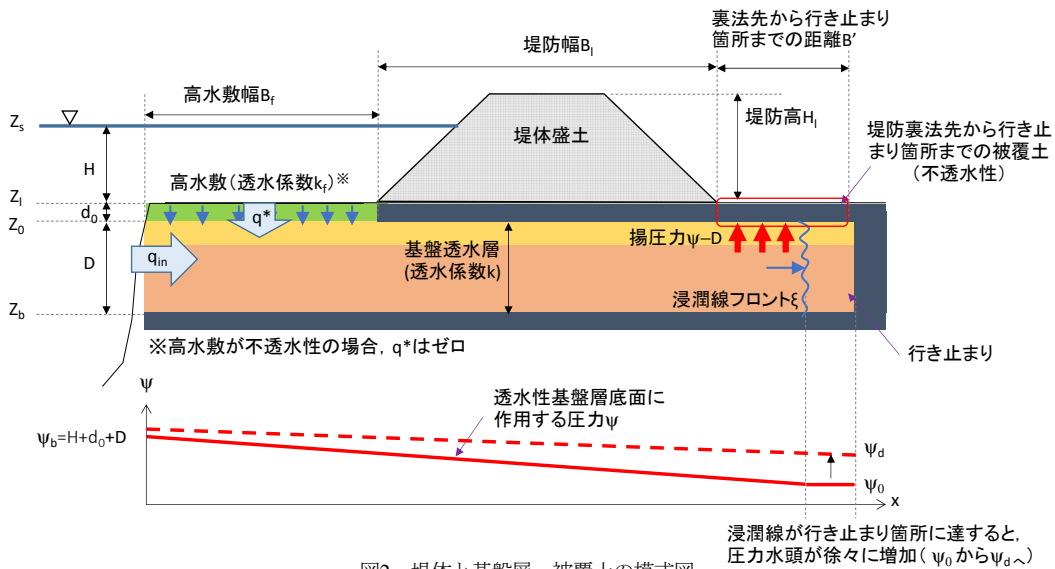


図2 堤体と基盤層、被覆土の模式図

河道水位が上昇し高水敷が冠水すると、高水敷を通過して基盤透水層内に向かう鉛直浸透が生じる。鉛直浸透フラックス  $q^*$ は、ダルシー則を適用すると以下の式で表すことができる。

$$q^* = \int_0^{B_f} w(x,t) dx = \int_0^{B_f} k_a \frac{\psi_b(t) - \psi(x,t)}{d_0 + D} dx \quad (5)$$

高水敷から基盤層に向かう鉛直浸透速度  $w$  は、河道水位  $z_s$  と基盤透水層内の圧力水頭  $\psi$ 、平均透水係数  $k_a$  を用いて表している。基盤透水層内の圧力水頭  $\psi$  は式(6)によって表現する。

$$\psi(x,t) = \psi_b(t) - \frac{\psi_b(t) - \psi_0}{\xi(t)} x \quad (6)$$

式(3)に式(4)、(5)を代入し、微分方程式を解くことで、浸潤線フロント位置  $\xi$  について式(7)の解析解が得られる。

$$\xi(t) = \sqrt{\frac{(\psi_b(t) - \psi_0) 2kD(d_0 + D) + kaB_f^2}{\lambda D(d_0 + D)} t} \quad (7)$$

基盤透水層内の浸透流が行き止まり箇所到達するまでの間は式(7)によって浸潤線フロント位置  $\xi$  を計算し、式(6)により基盤透水層内の圧力水頭分布  $\psi$  を計算する。

## (2) 浸潤線が行き止まり箇所に到達した後の圧力変化

基盤透水層内の流速は流入部と行き止まり箇所の圧力勾配により決まることから、行き止まり箇所の流速をゼロとすると、式(2)は式(8)のように表される。

$$\lambda \frac{d\psi_d(t)}{dt} - \frac{Dk}{\Delta L} \frac{\psi_b(t) - \psi_d(t)}{B_f + B_l + B'} = 0 \quad (8)$$

ここに、 $\Delta L$  は流速が低減するまでの水平距離、 $B_l$  は堤防幅、 $B'$  は裏法先から行き止まり箇所までの距離である。この微分方程式を解くと、基盤透水層に浸透した水が行き止まり箇所に到達した後の末端部分の圧力水頭  $\psi_d$  の時間変化を表す以下の式が得られる。

$$\psi_d(t) = \psi_b(t) - (\psi_b(t) - \psi_0) \exp\left(-\frac{\lambda Dk}{\Delta L B} t\right) \quad (9)$$

また、このときの基盤透水層内の圧力水頭分布 (式(6))

は、次のように表現することができる。

$$\psi(x,t) = \psi_b(t) - \frac{\psi_b(t) - \psi_d(t)}{B_f + B_l + B'} x \quad (10)$$

基盤透水層の浸潤線フロントが行き止まり箇所に到達した後は、式(9)、(10)を用いて透水層内の圧力水頭の変化を計算する。

## (3) 被覆土に作用する揚圧力の増大に伴う盤膨れ評価

堤防裏法先から行き止まり箇所までの被覆土 (図2の赤枠で囲った範囲) に作用する揚圧力と被覆土の重量から、盤膨れの安全率  $G/W$  を評価する。

$$G/W(x,t) = \frac{\gamma d_0(x)}{\gamma_w (\psi(x,t) - D)} \quad (11)$$

ここに、 $\gamma$ : 被覆土の単位体積重量、 $\gamma_w$ : 水の単位体積重量である。

## (4) パイピングによって基盤層内の砂が抜け出す時の堤体安定性の評価

本研究では、パイピングの進行に伴い起こる砂の流出量フラックスを見積もり、これを堤体の体積で無次元化した指標によって、堤体安定性の低下を表現する。時刻  $t=t_h$  において、堤防裏法先から行き止まり箇所までの被覆土の最も薄い箇所 ( $x=x_h$ ) で盤膨れが発生した直後に、被覆土に亀裂が生じると考える。亀裂部分を通過する鉛直方向の浸透流フラックス  $q_h$  を、被覆土に作用する揚圧力  $\psi(x=x_h) - D$ 、亀裂幅  $a$ 、透水係数  $k_s$  を用いて以下のように表す。

$$q_h(t) = ak_s \frac{\psi(x_h,t) - D}{d_0(x_h)} \quad (12)$$

鉛直方向の浸透流フラックス  $q_h$  の内、空隙を除いた分が砂分に相当すると仮定すると、堤防縦断方向の単位距離あたりに抜け出る砂のボリュームは式(13)で表現される。

$$\Delta V_s(t) = (1 - \lambda) \int_{t_h}^t q_h(t) dt \quad (13)$$

パイピングによって砂が抜け出ると、堤体が支持力を失って変形し、破壊に至ると考えると (図3)、抜け出る砂

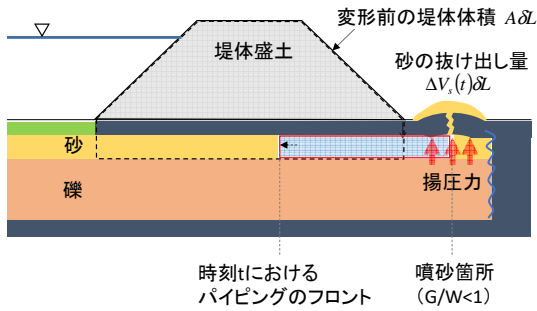


図3 基盤層内の砂が抜け出す時の堤体安定性の模式図

のボリュームに対して堤体体積が小さい場合に破壊につながりやすいと考えられる。よって、抜け出した砂のボリュームを堤体の体積で無次元化し、逆数をとった式(14)により、堤体安定性を表すものとする。無次元量  $S$  は、基盤層からの砂の抜け出し時における堤体の体積ひずみの逆数であり、 $S$  値が小さいほど破壊時の堤体変形量が大きく危険となる。本研究では、 $S$  をパイピングに伴う堤体安定性指標と呼ぶ。

$$S(t) = \frac{A\delta L}{\Delta V_s(t)\delta L} = \frac{A}{\Delta V_s(t)} \quad (14)$$

ここに、 $\delta L$  は堤防縦断方向の単位距離、 $A$  は堤体の断面積である。被覆土に発生する亀裂幅  $a$  は矢部川と利根川大越地先で計測された噴砂跡の諸元を基に  $0.3\text{m}$  とし、 $k_s$  は基盤透水層内に存在する砂の透水係数を与える。

### 3. パイピング被災が生じた河川堤防への適用

#### 3.1 パイピング破壊危険性の検討

##### (1) 矢部川 7.3k 右岸堤防の概要

矢部川では、平成 24 年 7 月洪水時に漏水や法崩れが数多く発生し、7.3k 右岸では透水性基盤層のパイピングによって 14 日 13 時 20 分頃に堤防決壊に至った<sup>3)</sup>。図 4 に、パイピングの進行によって破堤した 7.3k 右岸堤防の土質構造図と諸元を示す。堤体及び被覆土は粘性土から成り、その下に約  $1\text{m}$  ほどの厚さの砂質土層が存在している。堤防裏法尻から川裏方向に約  $30\text{m}$  付近には行き止まり構造が見られる。

##### (2) 本提案手法と一般的な浸透流解析手法との比較

矢部川 7.3k 右岸堤防に、一般的な浸透流の式を水深積分した手法 (式(2)) と、2 章で提示した準二次元非定常浸透流解析手法 (式(6), (7), (9), (10)) を適用し、両者の比較から本手法の妥当性を検証した。

基盤層厚  $D$ 、堤防裏法先から行き止まり箇所までの被覆土層厚  $d_0$  は堤防土質構造図に基づき設定した。透水係数の値には各地点での現地調査結果を与えた。浸透解析の境界条件となる河道の水位ハイドログラフは、被災箇所近傍の観測所の水位ハイドログラフを用い、被災箇所の洪水痕跡水位高となるように調整したものを与えた。

図 5 に、基盤透水層内のピエゾ水頭、堤防裏法先から行き止まり箇所までの被覆土に作用する圧力水頭の時間変

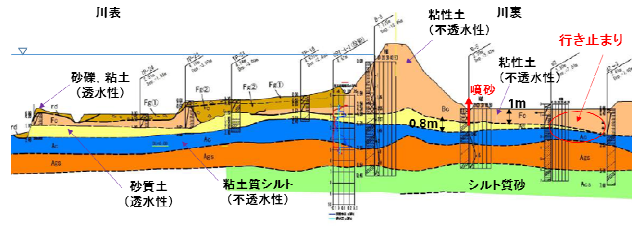
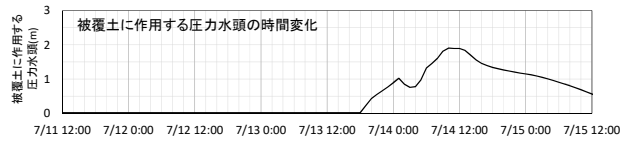
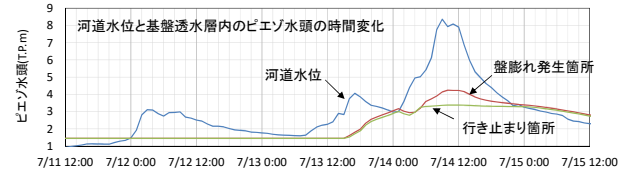
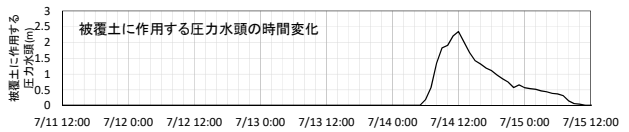
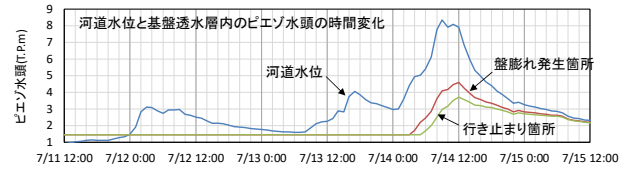


図4 矢部川7.3k 右岸堤防の土質構造と諸元



(a) 一般的な浸透流解析手法 (式(2))



(b) 準二次元非定常浸透流解析手法 (式(6),(7),(9),(10))

図5 矢部川7.3k 右岸堤防の土質構造と諸元

化をそれぞれ示す。図の(a)は一般的な浸透流解析手法、(b)は準二次元非定常浸透流解析手法の結果を示している。

一般的な浸透流解析手法では、準二次元非定常浸透流解析手法に比べて、盤膨れ発生箇所と行き止まり箇所の圧力がかかなり早く上昇しており、水位ピーク後の圧力の低減は緩やかである。しかし、いずれの手法においても、三波目のピークである 7/14 12:00 頃に圧力の最大値が現れており、両者の値には大きな差は見られない。このことから、準二次元非定常浸透流解析手法は、一般的な浸透流解析手法とそれほど差がなく、透水性基盤層内の圧力分布を算定できることが確認された。

##### (3) 矢部川 7.3k 右岸堤防の $G/W$ 、パイピングに伴う堤体安定性指標 $S$ の検討

次に、準二次元非定常浸透流解析により、矢部川 7.3k 右岸堤防の  $G/W$ 、パイピングに伴う堤体安定性指標  $S$  を算出した。図 6 に矢部川 7.3k 右岸堤防における洪水時の基盤透水層内の浸潤線フロント位置、 $G/W$ 、パイピングに伴う堤体安定性指標  $S$  の時間変化の算定結果をそれぞれ示す。洪水位上昇及び洪水継続時間の経過に伴い、基盤層内の浸潤線フロント位置が進行し、7/13 18:00 頃に行き止

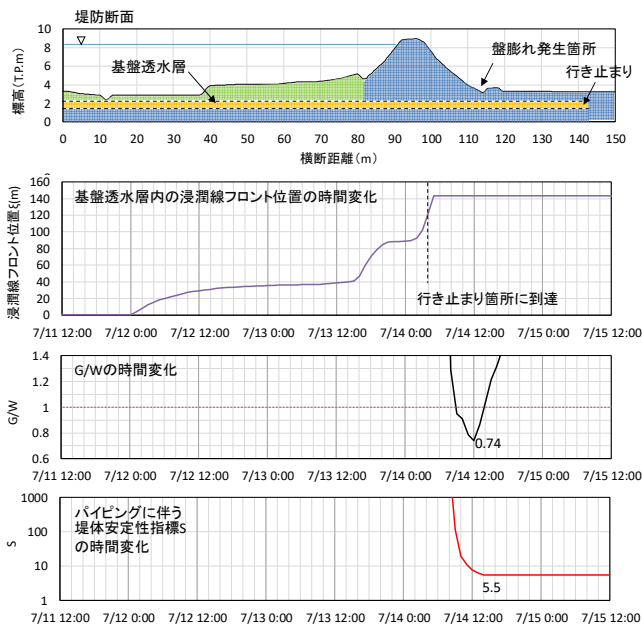


図6 矢部川7.3k右岸堤防の基盤透水路内の浸潤線フロント位置、ピエゾ水頭、G/W、パイピングに伴う堤体安定性指標Sの時間変化

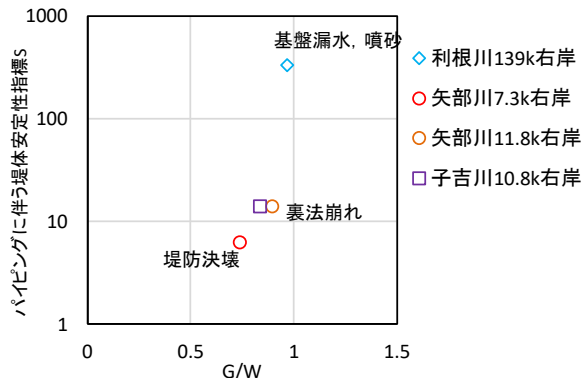


図7 利根川、矢部川、子吉川におけるG/W、パイピングに伴う堤体安定性指標S、パイピングによる被災規模の関係

まり箇所へ到達する。そして河道水位の上昇と共に基盤層内の圧力が高まる。水位が最大となる第3波の立ち上がり時(7/14 7:00)にG/Wが1を下回る。そして、水位ピーク付近にかけて、パイピングに伴う堤体安定性指標Sは低減していき、実際に堤防決壊が生じた13:20頃に最低値となる。矢部川7.3k右岸堤防では、現行の堤防照査手法によりG/Wが検討されている<sup>3)</sup>。透水係数等を変化させた複数のケースで検討が行われているが、いずれのケースにおいてもG/Wは7/14 13:00頃に最小となり、その値は0.35~0.62(本検討と同様の計算条件を用いたケースでは0.44)と算出されている。本手法により算出されるG/Wは、これらの値よりやや大きめに算出されているものの、現行照査手法と概ね同程度の精度で、盤膨れの発生危険性を検討出来ることが分かる。以上より、詳細な土質構造の入力を要する鉛直二次元飽和・不飽和浸透流方程式に基づいた現行堤防照査手法を用いなくても、本論文で示した準二次元浸透流解析手法によって、現地でパイピングによる被災が生じた堤防の破壊危険性を力学的に説明することが可能であることが示された。

### 3.2 G/W、パイピングに伴う堤体安定性指標Sと被災規模の関係

矢部川7.3k右岸堤防に加えて、平成13年9月洪水時に漏水、噴砂が発生した利根川139k右岸堤防<sup>4)</sup>、平成24年7月洪水時に裏法崩れが生じた矢部川11.8k右岸堤防<sup>3)</sup>、平成25年7月洪水時に大規模な堤防裏法崩れが生じた子吉川10.8k右岸堤防<sup>5)</sup>にも本手法を適用し、G/Wとパイピングに伴う堤体安定性指標Sを算出した。図7に利根川、矢部川、子吉川におけるG/Wとパイピングに伴う堤体安定性指標S及び被災規模の関係を示す。G/W、Sの大きさは、堤防が決壊した矢部川7.3k、裏法崩れが生じた矢部川11.8k、子吉川、漏水、噴砂が生じた利根川139k右岸の順となる。この検討から分かった最も重要なことは、実際に起きたパイピングによる破壊の規模、程度が、本手法により算出されるG/W、パイピングに伴う堤体安定性指標Sによって概ね矛盾なく説明できるということである。特に、パイピングによって堤防決壊に至った矢部川7.3k右岸堤防ではG/W、Sともに最も小さくなり、パイピング破壊危険性が著しく高くなっていたことが確認された。

### 4. おわりに

本研究で提案した、基盤透水路内の準二次元浸透流解析手法により算出される圧力水頭分布及びG/Wは、一般的に用いられる浸透流解析手法とそれほど差がなく、また、基盤漏水、パイピング、噴砂、漏水による被害を受けた矢部川、利根川、子吉川堤防の破壊及びその危険性を本手法によって概ね矛盾なく説明できることが確認された。以上より、鉛直二次元飽和・不飽和浸透流方程式に基づいた現行堤防照査手法を用いなくても、本論文で示した準二次元浸透流解析手法によって、堤防のパイピング破壊危険性を力学的に説明することが可能である。

堤体裏法先での浸透水が行き止まり状態になることがパイピング破壊に繋がる可能性が高いことから、今後は堤防裏法先の土質構造を簡易な方法で調べ対応することがパイピング対策にとって重要である。そして、さまざまなパイピング被災箇所に本手法を適用し、基盤土質構造、洪水外力と破壊規模の関係を明らかにしていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 田端幸輔, 福岡捷二, 瀬崎智之: 超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.4, 1\_1273-1\_1278, 2015.2.
- 2) 福岡捷二, 田端幸輔: 堤防破壊危険確率と堤防脆弱性指標に基づく堤防破壊タイムラインを用いた被災プロセスの見える化, 第4回河川堤防技術シンポジウム(印刷中), 2016.11.
- 3) 矢部川堤防調査委員会: 矢部川堤防調査委員会報告書, 2013.
- 4) 佐藤宏明, 中山修, 佐古俊介: 利根川堤防で発生した漏水に関する調査事例, 河川技術論文集, 第11巻, 2005.
- 5) 国土交通省東北地方整備局秋田河川国道事務所: 子吉川における堤防被災メカニズムと調査分析結果について, 第二回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, 2014.