

堤防直下の透水性基盤層の浸透流と砂粒子の運動に伴う パイピング発達機構に関する研究

基盤構造, パイピング, 浸透流, 砂粒子の運動,
固液二相流二流体解析

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. 序論

重要な治水施設である堤防の破壊危険性を科学的に推定し, 堤防強化対策に生かすことのできる技術の確立が強く求められている. 堤防下の基盤層のパイピング破壊は, 見えないところで徐々に進行する破壊現象である. これまで模型実験や地盤工学的解析法により, パイピング破壊の発生危険性に関する研究が行われてきたが, 水と土砂が混ざり合った運動として水工学の視点から現象を捉え, 新しい考え方を打ち出していくことも重要である.

本研究では, 固液二相流二流体解析手法によりパイピング進行を表現できるモデルを構築し, 堤防模型実験で確認されてきた基盤層の構造の違いによるパイピング進行特性の再現を試み, 堤防破壊の危険性を高める要因について検討を行った.

2. 既往研究のレビューと本手法の位置付け

図-1 にパイピング進行の概念図を示す. パイピングは, 堤防直下の基盤層内の浸透流によって徐々に進行する現象であり, 洪水水位, 堤体, 基盤層, 堤内地被覆土の土質構造や粒径によってその発生危険性は大きく異なることが経験的に知られてきた.

小高らは, 基盤層の浸透に伴う堤防破壊機構を解明するため, これまで多くの模型実験を実施してきた. この結果, 明確な行き止まり構造が無くても, 基盤が互層構造を成している場合, パイピングを伴う堤防崩壊が発生し得ることを見出した¹⁾. 崩壊パターンは大きく3つに分類されており, I: 基礎地盤内, あるいは基礎地盤の透水性が高く, 堤体の透水性が十分低い場合, II: 上部基礎地盤が厚い場合, III: Iほどの極端な透水性の差がない場合である.

現地堤防がどの崩壊パターンに分類されるかを把握し, 破壊の規模を評価・予測するための技術が求められるが, このためには, パイピングの進行を適切に表現できる数値解析技術が必要となる. 現行の堤防照査法では, 鉛直二次元 Richards 式により基盤層内の浸透流場を解析し, 堤防裏法先付近の浸透圧力を求める. これが被覆土重量を越えるかどうか, または地表面近傍の局所動水勾配が 0.5 を越えるかどうかにより, パイピング発生の危険性が判定される²⁾. この手法により, 互層構造や行き止まり構造をもつ基盤層内の浸透流場の解析が可能で, 噴砂発生危険箇所の推定はできるが, その後パイピングが進行するのか, 堤体が致命的な破壊に至るのかどうかまでは判断できない.

一方, 地盤工学分野では, 有限要素法による間隙水の浸透と土の弾塑性変形の連成解析が行われており, 高い河川

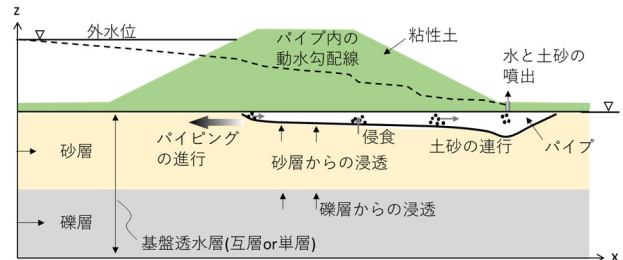


図-1 堤体直下のパイピング進行の概念図

水位が長時間継続すると被覆土直下のせん断ひずみの増加とともに骨格応力が失われ, 局所的に含水比の高い領域, すなわちパイピングの形成が推定可能であることが示されている³⁾.

本研究では, パイピングの進行が水と砂粒子のダイナミックな運動の結果起こると考え, 水と砂粒子の混合体の無限の変位を追跡するため, 地盤工学的アプローチよりも土砂水理学的アプローチにより得られた基本式を用い, 小高らの実験結果の説明を行う.

3. 解析手法

3.1 基礎方程式

固液二相流二流体解析手法を用いて, 基盤層内の間隙水と砂粒子の非平衡運動を表現する. この手法は, 液相, 固相をそれぞれ連続体として扱い, 十分な個数の土粒子を含む空間領域を考え, その内部で空間平均化して得られる各相の支配方程式を連立して解くものである⁴⁾.

水(液相)の連続式と運動方程式を式(1), (2)に, 土砂(固相)の連続式と運動方程式を式(3), (4)に示す.

$$\frac{\partial \rho_1 \lambda}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 \lambda u_1}{\partial x} + \frac{\partial \rho_1 \lambda w_1}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\lambda \frac{D u_1}{D t} = -\frac{\lambda}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_1} \left(\frac{\partial \lambda \tau_{1x}}{\partial x} + \frac{\partial \lambda \tau_{1z}}{\partial z} \right) - \frac{F_x}{\rho_1} \quad (2)$$

$$\lambda \frac{D w_1}{D t} = -\lambda g - \frac{\lambda}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho_1} \left(\frac{\partial \lambda \tau_{1z}}{\partial z} + \frac{\partial \lambda \tau_{1x}}{\partial x} \right) - \frac{F_z}{\rho_1}$$

$$\frac{\partial \rho_2 (1-\lambda)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 (1-\lambda) u_2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_2 (1-\lambda) w_2}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$(1-\lambda) \frac{D u_2}{D t} = -\frac{1-\lambda}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_2} \left\{ \frac{\partial (1-\lambda) \tau_{2x}}{\partial x} + \frac{\partial (1-\lambda) \tau_{2z}}{\partial z} \right\} + \frac{F_x}{\rho_2} \quad (4)$$

$$(1-\lambda) \frac{D w_2}{D t} = -(1-\lambda) g - \frac{1-\lambda}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho_2} \left\{ \frac{\partial (1-\lambda) \tau_{2z}}{\partial z} + \frac{\partial (1-\lambda) \tau_{2x}}{\partial x} \right\} + \frac{F_z}{\rho_2}$$

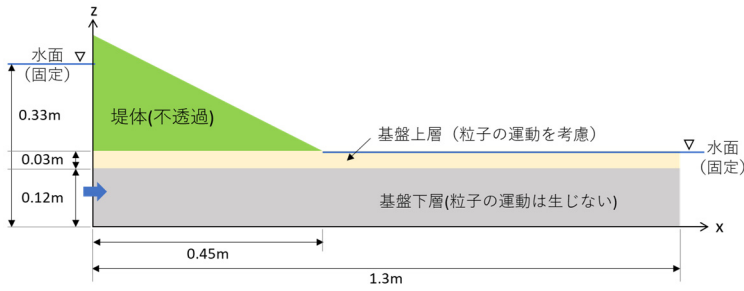


図-2 計算対象とした基盤透水層の諸元

添え字 1, 2 はそれぞれ液相, 固相を表しており, ρ は密度, u, w は水平方向, 鉛直方向の速度, p は間隙水圧, τ は応力テンソル, λ は空隙率, g は重力加速度, F は相互作用力である.

3.2 基礎方程式の解法

式(1)~(4)は古くに導出され, 山地溪流河川や海岸域の碎波帯のような水と土砂の相互干渉が顕在化する場の非平衡運動を記述するために用いられてきた. これらの式を実際に解くためには, 特に固液間の相互作用力と固相の応力テンソルに何らかの物理モデルを適用する必要がある.

本研究では, 固液間の相互作用力, 粒子の動き出す条件, 固相の構成則, 噴砂箇所境界条件を, 以下に示すようになるべく簡潔に取り扱い, 小高らが模型実験により明らかにした基盤層の構造や空隙率, 粒径に応じたパイピング進行特性を, 二相流二流体モデルにより再現する.

① 相互作用力

相互作用力は, 液相と固相の運動量交換を表す項であり, 液相と固相の相対速度の関数で表される. 間隙水の運動が平衡状態にある場合, 式(2)の相互作用力と圧力項及び重力項が釣り合うと考えれば, 間隙水の速度と動水勾配の関係が得られる. よって浸透流を扱う場合には, 相互作用力を Darcy 則等の浸透流式と対応させて表現されることが多い. 本研究では, 空隙率と粒径が含まれる Kozeny-Carman 式に基づいて相互作用力を表すものとした.

$$F_x = 150 \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^2} \frac{\mu_l}{d_r^2} (u_1 - u_2), F_z = 150 \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^2} \frac{\mu_l}{d_r^2} (w_1 - w_2) \quad (5)$$

ここに, μ_l は水の粘性係数, d_r は砂粒子の平均粒径である. 相互作用力項は, 土の透水性と, 間隙水と土粒子の運動量交換を表す重要な項であるため, なるべく浸透流式に頼らず, 力学的に表現することが望ましいと考えるが, これについては今後の検討課題とする.

② 砂粒子の動き出す条件

静止している土粒子が間隙水による流体力を受けて動き出す条件を厳密に扱うには, 土粒子骨格がもつ有効応力の変化を考慮する必要がある. 本研究では, 液状化発生条件としてよく用いられるクイックサンドの限界勾配 i_c^5 を導入する. 間隙水の圧力 p の空間分布と位置水頭から鉛直方向の動水勾配を求め, これが i_c を越えた箇所では砂粒子の流動化が起こると仮定することで, 簡易的に取り扱った.

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (6)$$

ここに, G_s は砂粒子の比重, e は間隙比 ($=\lambda/1-\lambda$) であ

表-1 検討 Case

Case	基盤の構造	平均粒径	空隙率
1	互層	上層: 0.2mm ^{※1} 下層: 1.2mm ^{※2}	上層: 0.50 下層: 0.47
2	単層	0.2mm	0.50
3	互層	上層: 0.12mm ^{※3} 下層: 1.2mm	上層: 0.50 下層: 0.47

※1: 珪砂6号に相当, ※2: 珪砂3号に相当, ※3: 珪砂7号に相当

る. 式(6)は土の重量と釣り合うときの間隙水の鉛直動水勾配を表している. 砂の流出によって空隙率が大きくなり, 土の重量が減ると, i_c が減少し液状化が生じやすくなる.

③ 流動状態での固相の構成則

液状化し, 運動が開始された後の固相の構成則については, Boyer, et.al⁶⁾の実験を参考に土砂濃度の関数によりモデル化することで, 土砂濃度の変化に伴うせん断応力の増減特性を表現する.

$$\tau_{xy} = \mu_2(c) \frac{\partial u_{2x}}{\partial x_j}, c = 1 - \lambda \quad (7)$$

$$\mu_2(c) = \left\{ 1 + \frac{5}{2} c \left(1 - \frac{c}{c_m} \right)^{-1} + \mu^*(c) \left(\frac{c}{c_m - c} \right)^2 \right\} \mu_1$$

$$\mu^*(c) = \mu_a + (\mu_b - \mu_a) \sqrt{1 + I_0 c^2 (c_m - c)^{-2}}$$

c は土砂濃度, c_m は最大土砂濃度で 0.6 とした. μ_a や μ_b , I_0 は実験から同定されたパラメータで, Boyer, et.al が提示している値 ($\mu_a = 0.32$, $\mu_b = 0.7$, $I_0 = 0.005$) を準用した.

④ 噴砂箇所の境界条件

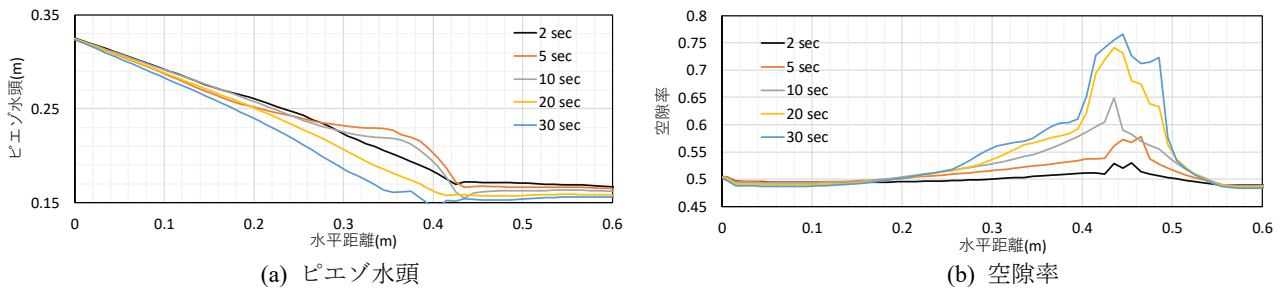
著者ら⁷⁾はこれまでに, パイプを一次元的に扱い, 周囲の浸透層との水と土砂のやりとりを考えた固液二相流解析モデルを提案してきたが, 噴砂箇所での水と土砂の流出量の変化を考慮するため, 水位変動を強制的に与えており, 普遍的なモデルになり得ていない. 本研究では, 地表面は大気に接するため圧力ゼロを境界条件とした. このとき, 基盤から地表面に噴出される水と砂は, 即座に拡散され消失するものとして取り扱った.

4. パイピングの進行解析

4.1 解析条件

本研究では, 先に述べた小高らの崩壊パターン分類に基づいた検討を行う. まず, 崩壊パターン I と II に相当する条件に対し, 提示した計算手法を適用し, パイピング進行機構の違いを検証する. 次に, パターン I の上部基礎地盤の粒径を小さくした場合の噴砂量, パイピング進行領域等の変化を調べ, 粒径とパイピング規模の関係を考察する. なお, 堤体崩壊規模としては, パターン III が最も大きくなるのが模型実験により確認されているが, これは基盤漏水と堤体浸透が組み合わさった複合的な破壊現象であり, 現時点では検討対象としない.

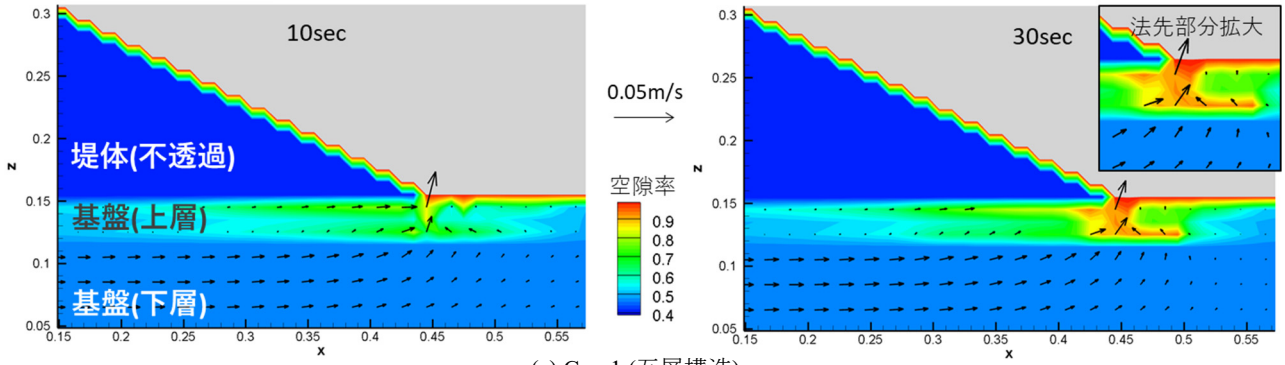
小高らによる堤防模型実験を参考に, 堤防, 基盤層の諸元と水位条件を図-2 のように設定した. 検討 Case を表-1 に示す. 基盤構造, 上部基礎地盤の粒径の異なる 3 つの



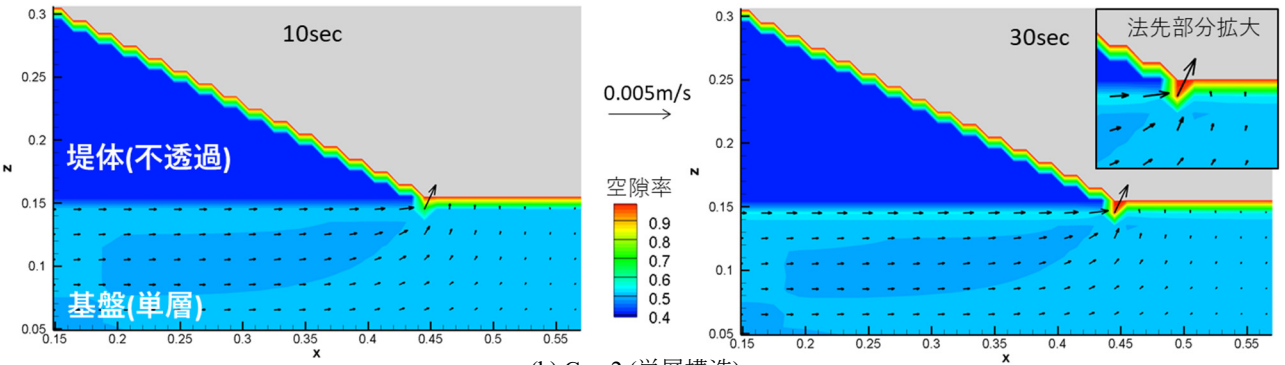
(a) ピエゾ水頭

(b) 空隙率

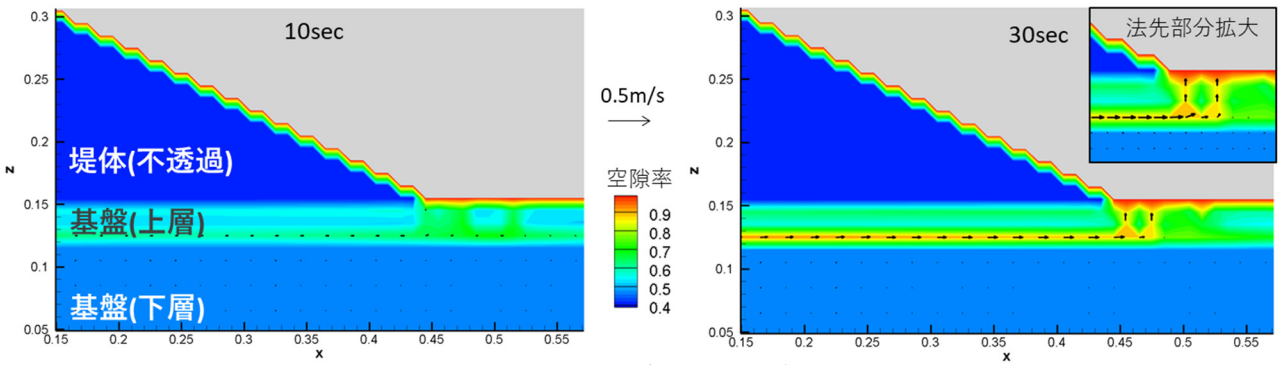
図-3 Case1 の上層のピエゾ水頭と空隙率の時間変化



(a) Case1 (互層構造)



(b) Case2 (単層構造)



(c) Case3 (互層構造, 上層の粒径小)

図-4 空隙率コンターと間隙水の速度ベクトル

Case を対象とした。Case1 の基礎地盤の上層には珪砂 6 号、下層には珪砂 3 号に相当する粒径を与えた。Case2 は単層構造とし、珪砂 6 号に相当する粒径を与えた。Case3 は、Case1 の上部基礎地盤の粒径を半分の大きさに設定した。空隙率は、小高らの実験条件を参考に、材料に応じて 0.47 または 0.50 を与えた。

上下流端にはいずれも水位を境界条件として与えた。上流端境界条件となる河川側の水位は 0.33m、下流端境界条件となる地下水位は、堤内地側の地表面高と同じ 0.15m を一定で与え続けた。堤体直下部分の水平方向の平均動水勾

配は 0.73 となる。基礎式は有限体積法を用いて離散化し、圧力の解法には SMAC 法を用いた。メッシュサイズは $0.01\text{m} \times 0.01\text{m}$ とし、時間刻み Δt は 10^{-5}sec とした。

4.2 解析結果

図-3 に Case1 における基盤上層部分 ($z=0.12 \sim 0.15\text{m}$) の平均ピエゾ水頭及び空隙率の時間変化を、図-4 に解析により得られた各 Case の空隙率コンターと間隙水の速度ベクトルをそれぞれ示す。Case1 では、堤防裏法先の地表面露出箇所付近につれて急激にピエゾ水頭が低減する (図-3(a))。特に 10sec 時点までは、空隙率は 0.5~0.6 程度

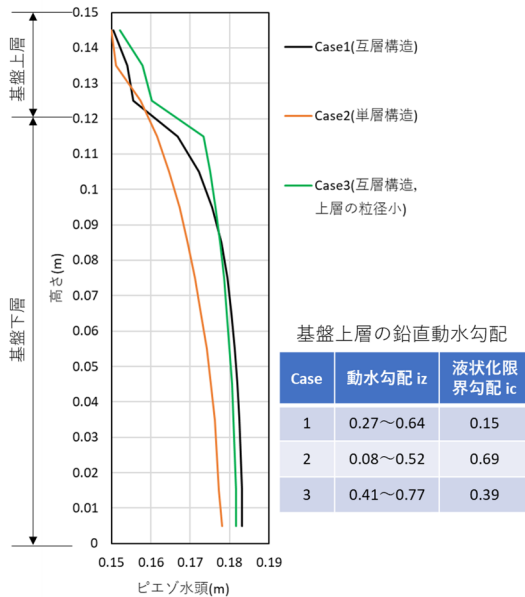


図-5 裏法先での鉛直方向動水勾配の深度分布 (x=0.45m, t=30sec)

と小さく、間隙水が砂粒子から受ける抵抗が大きいいため、法先付近の水平動水勾配は局所的に 1.0 を越える。大きな動水勾配が作用することで砂粒子が水平方向に移動し、空隙率の大きい領域が河川側へと広がっていくことが確認できる (図-3(b), 図-4 の Case1(30sec))。本解析では、完全な空洞は形成されなかったが、基盤上層の空隙率は法先付近で局所的に 0.9 程度となり、法先から 0.2m の範囲で 0.6 を上回っていることから、河川側に向かうパイピングの進行が表現できていると判断できる。

一方、基盤層を全て単一材料とした Case2 では、パイピングの進行は見られなかった (図-4 の Case2)。この結果は、小高らの実験結果と同様であり、単一層の場合には堤内地側に明確な行き止まり構造がない限り、そう簡単にパイピングが進行しないことが本解析によっても表現された。また、基盤上層の粒径を小さくした Case3 では、Case1 に比べて砂粒子の移動が活発で、特に上層と下層の間の狭い部分でパイピングの進行が顕著となる一方、噴砂孔やパイプ径はやや小さくなる (図-4 の Case3)。

図-5 に、噴砂が発生箇所となっている裏法先部分の鉛直方向動水勾配の深度分布を示す。互層構造とした Case1 (黒色)、Case3 (緑色) では、透水性の高い下層と移動性粒子群で構成される上層との境界付近で、鉛直方向の動水勾配が大きくなり、単層とした Case2 (黄色) よりも明らかに液状化しやすくなっている。

これまで、模型実験や地盤工学的解析手法により、基盤の層構造や粒度構成が、パイピングの発生に影響を及ぼすことが確認されてきたが、固液二相流二流体モデルを用いた手法においてもこの傾向を概ね矛盾なく説明出来ることが確認できた。

4.3 現地堤防のパイピング破壊危険性評価に向けた課題

鉛直上向きの浸透流と土砂移動により、地表面からの噴砂が活発に生じれば、パイピングは水平方向に容易に進行する。よって、活発な噴砂が広範囲で発生し続けるかどうか

かを判定することが、パイピング破壊危険性を評価する上で重要となると考えられる。

基盤が互層構造を成しており、かつ、下層の透水性が高く、上層の厚さが薄いことが活発な噴砂を引き起こす要因となる。しかし、Case3 のように上層材料の透水性が低い場合には、形成される噴砂孔幅が小さく、上層と下層の境界部の狭い範囲でのみパイピングが形成されるため、堤体崩壊の規模はそれほど大きくならない可能性もある。

今後は、矢部川のようにパイピング或いは顕著な噴砂による被災経験があり、基盤土質データが豊富に計測された現地堤防において本解析手法を適用し、洪水時における基盤上層の鉛直動水勾配、粒度構成、空隙率と、地表面への流出土砂量、パイピング形成領域を調べ、パイピング発生危険度と各諸量との関係を明らかにするとともに、危険度把握のために有効な調査項目を提示していく必要がある。

5. 結論

間隙水と砂粒子の運動を扱う固液二相流二流体解析モデルにより、堤防模型実験で確認されてきた基盤層の構造の違いによるパイピング進行特性の再現を試みた。

現時点では相互作用力、砂粒子の動き出し条件、固相の構成則の取り扱い等を単純化しており、必ずしも現象を精緻に再現できないが、堤防法先付近で噴砂が生じ、その付近の動水勾配が局所的に大きくなることで砂が水平方向に連行されること、基盤が互層構造を成している場合、上層と下層の境界部付近で鉛直動水勾配が増大し、これが上層材料の液状化を引き起こし、噴砂とパイピングの進行に大きな影響を及ぼすことが表現された。

今後は、現地堤防に本手法を適用し、基盤の土質・構造と地表面への流出土砂量、パイピング形成領域の関係を明らかにし、パイピングによる堤防破壊危険度の定量評価法の構築に繋げたい。

参考文献

- 1) 小高猛司, 李圭太, 崔瑛, 森智彦, 森三史郎, 林愛実: 浸透に伴う基礎地盤の弱体化に起因する堤防法すべり崩壊に関する考察, 第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.55-58, 2017.
- 2) 財団法人国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き (改訂版), 2012.
- 3) 加藤健太, 吉川高広, 野田利弘, 小高猛司, 高稲敏浩, 李圭太: 空気~水~土骨格連成有限変形解析に基づく河川堤防基礎地盤の透水性がパイピング破壊に及ぼす影響評価, 第50回地盤工学研究発表会, 519, 2015.
- 4) 芦田和男ら: 固液混相流における支配方程式の構造について, 水工学論文集, 第38巻, pp.563-570, 1994.
- 5) 例えば, 石原研而: 地盤の液状化 発生原理と予測・影響・対策, 朝倉書店, 2017.
- 6) François Boyer, Elisabeth Guazzelli, and Olivier Pouliquen: Unifying Suspension and Granular Rheology, Physical Review Letters, 188301, 2011.
- 7) 田端幸輔, 福岡捷二: 堤防基盤漏水によるパイピング発達過程の実験結果に対する鉛直二次元固液二相流解析の適用性に関する研究, 第6回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.63-66, 2018.12.