

大きさ・配列の異なる粒子群中の飽和浸透流の水理学的研究

中央大学大学院 学生会員 ○栗原 克幸
 中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二
 中央大学研究開発機構 正会員 田端 幸輔

1. 序論

空隙構造が大きく変化する飽和土では、浸透流の加速・減速が生じる。Volker¹⁾は、これを非線形流れと呼び、粒子配置を不均質にした場合や、土中の止水矢板近傍において非線形浸透流が生じることを模型実験から確認し、このような流れを説明するには Darcy 則では不十分で、Forchihimer 則のように運動方程式の慣性項を考慮した手法が必要であることを指摘している。このように、浸透流場に及ぼす粒子配置の影響は古くから研究され、近年では空隙の三次元構造を直接考慮した流れの計算²⁾も行われている。

土中の非線形流れの発達は、土粒子を連行させ、土の後退侵食、すなわちパイピング形成に大きく関わる。よって、堤防裏法先からの噴砂の発生やパイピングの形成機構の解明には、不均質な空隙構造を有する地盤内の浸透流の水理特性を明らかにすることが重要である。本研究では、不均質な空隙構造を有する地盤内の浸透流の水理特性の解明を目的とし、局所的に空隙の大きな部分が存在することが、浸透流の発達にどの程度影響を及ぼすのかについて、空隙内の流速及び圧力分布、透水係数、Re 数の観点から検討を行った。

表-1 解析ケースと検討条件

2. 解析方法と解析条件

本検討では、不透水性材料で出来た堤防直下の透水性基盤層を考え（表-1の右の図）、空隙スケールに着目した飽和浸透流解析を実施した。土粒子は動かないものとし、空隙部分の領域を連続式と Navier-Stokes 方程式を用いて直接解析した。通常、河川水位と堤内地盤高との間の大きな動水勾配によっ

	計算領域 縦×横[cm]	動水勾配	空隙率 λ	粒径[mm] (構成比率)	粒子配置図 空隙率 1 0
case1	1.18×4.5	1/10	0.40	0.6 (10%) 1.0 (80%) 2.0 (10%)	
case2	1.18×4.5	1/10	0.43	0.6 (10%) 1.0 (80%) 2.0 (10%)	

て、堤防を横断する方向に浸透流が卓越するが、空隙中の微視的な流れは粒子配置に応じて奥行方向（堤防長手方向）も含め三次元的に発達する。このため、粒子の三次元形状を考慮する必要があるが、現時点では奥行方向の運動は解かず、鉛直二次元場を想定して計算を行った。表-1 に解析ケースと検討条件を示す。粒子配置の考え方を以下に説明する。不透水性堤体と透水性基盤の境界部分では、雨水や河川水の浸透作用により細粒分が洗い流され、水みちが形成されることが知られている。本研究では、これを考慮し、堤体直下付近には細粒分(0.6mm)を配置せず、1.0、2.0mm の粒子で土骨格を構成した (case1)。前田ら³⁾が行った堤防模型によるパイピング実験では、堤防裏法先からの噴砂が生じる直前に、堤体と基盤層の境界部分の空隙が大きくなり、流れが集中する様子が観察されている。そこで case2 では、噴砂発生直前の状態を想定し、case1 に比べて法先から堤体直下の部分(表-1の赤枠)の空隙が大きくなるように、粒子群を配置した。両ケース共に、裏法先位置を左端から 3cm とし、平成 27 年 9 月鬼怒川洪水の噴砂地点での粒径加積曲線を基に、粒径 0.6、1.0、2.0mm の粒子を 1:8:1 の割合で与えた。初期水位は、基盤層上面の高さとし、計算開始と同時に一気に河川側の水位を上昇させ、法先に対して 1/10 の動水勾配となる高さに達したところで河川側の水位を固定した。法先より堤内地側の水位は、基盤層表層に相当する高さで維持した。計算メッシュは 0.0001m 間隔で作成し、最小粒径を十分解像できるようにした。

キーワード 堤防, 基盤, 飽和浸透流, 空隙構造, 浸透流の直接解析

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

3. 解析結果と考察

図-2 に各ケースの流速コンター図を示す. 図中の白色線は, $x=0m$, $z=0.01m$ の地点から出発し, 裏法先に到達する1本の流線を示している. case1 では, 全体の流速が概ね $0.4\sim 0.7cm/s$ で, 一様に近い流れとなる. 一方, case1 に比べて空隙の大きい部分を考慮した case2 では, 空隙の大きい部分を経由し, 堤防裏法先に向かう流路が形成されることが分かる. 流れ方向に空隙が小さくなる箇所と, 地表面に接する堤防裏法先付近において流速が著しく増加しており, 最大流速は case1 の2倍の $1.4cm/s$ に達する.

空隙構造の違いが流速の発達に及ぼす影響について考察する. 図-3 に, 各ケースの流線(図-2の白色線)に沿ったピエゾ水頭と速度水頭の分布を, 図-4 に, 基盤層内の平均流速と平均動水勾配から算出した平均透水係数と, 各ケースの流線に沿って算出した局所透水係数の比較をそれぞれ示す. 両ケース共に, 流れ方向に空隙が小さくなる箇所で速度水頭が増加し, 局所的にピエゾ水頭が減少している. この影響は, 流れ方向の空隙変化の大きい case2 の方が顕著に現れている. また, case2 では, 裏法先に近づくにつれて, 空隙の大きな領域を連ねた各流路が合流し, 地表面付近の広い範囲で高流速が形成されている. このような流速増大箇所では, 平均透水係数に比べて約 $10^3\sim 10^4$ 倍の透水性を有することがわかった.

図-5 に case2 の局所 Re 数分布を示す. 局所 Re 数は, 各メッシュの慣性項と粘性項の比により算出した. 局所 Re 数は, ほとんどの領域で1より十分低く, 慣性項の影響は小さいが, 空隙が流れ方向に大きく変化する箇所や, 堤防裏法先付近では局所 Re 数の値が大きくなり, 慣性力の無視できない流れが発達することが分かった.

4. 結論

局所的に大きな空隙構造を有する地盤内では, 粒子間の空隙を連ねた流路において, 流れ方向の空隙変化により慣性力の大きい流れが形成される. このような流路が堤防裏法先付近で合流し流れが集中することで, 噴砂発生をもたらす可能性のある高流速を形成していることを示した. 今後は, 模型実験等を基に三次元空隙構造を再現し, 三次元的に生じる局所の高流速域が粒子の移動, 水みち発達に及ぼす影響を明らかにしていく.

参考文献 1). Raymond E. Volker: Numerical solutions to problems of nonlinear flow through porous materials, 1969. 2). Howard F. Taylor et.al: Sub-particle-scale investigation of seepage in sands, Soils and Foundations 57, 439-452, 2017. 3). 齋藤啓, 前田健一ら: 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, Vol.21, 349-354, 2015.

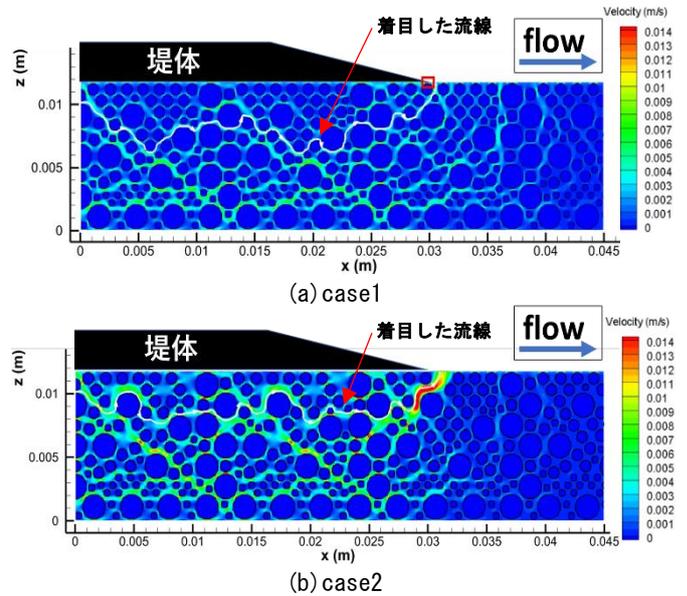


図-2 流速コンター図

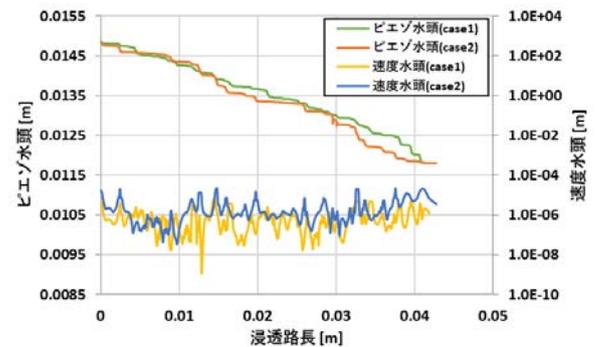


図-3 流線に沿ったピエゾ水頭と速度水頭の分布

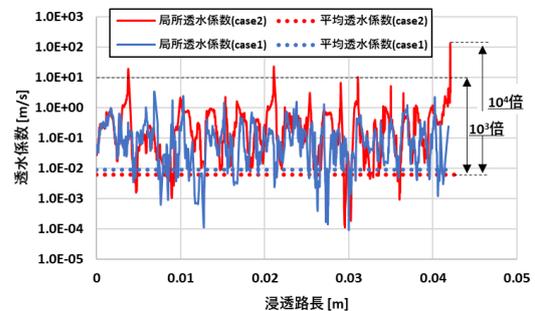


図-4 平均透水係数と局所透水係数の比較

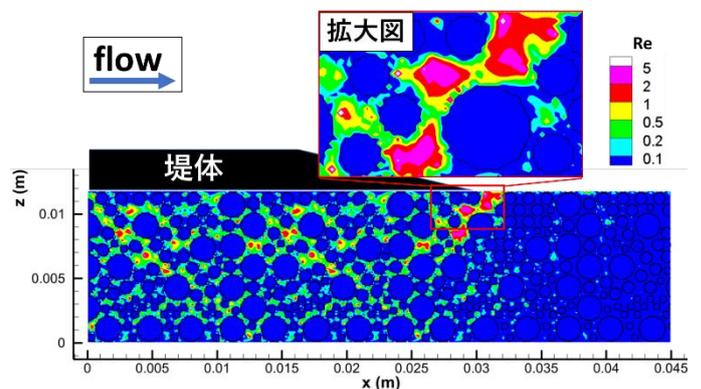


図-5 慣性項と粘性項の比を用いて算出した局所 Re 数分布 (case2)