

jh210020-NAH

透水モデルにおける代表粒径に関する解析的検討

森口 周二（東北大学）

概要

複数の解析コードを用いて、粒度分布を有する粒子群の間隙を流れる水の挙動を直接的に表現し、粒状体の透水性を評価する際に用いられる代表粒径の意味や間隙率の影響を分析することを目的として研究を実施した。まず、単純な解析モデルを用いた事前解析により、空間解像度に対する解の収束性を確認した。その後、多数粒子モデルを個別要素法を用いて作成するとともに、各解析コードで透水シミュレーションを実施した。事前解析で確認された必要となる空間解像度が予想よりも高いものであり、当初予定していた計算ケースを十分に実施するには至らず、計算結果に基づいて代表粒径の物理的意味の議論にまで発展させることができなかった。一方で、各解析コードによる結果の比較を通じて、計算結果の妥当性と必要な空間解像度について議論が進み、粒状体の透水に関する過去の知見とも整合する結果を得ることができた。これにより、代表粒径や間隙率の影響を分析するための基盤となる情報を蓄積した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

京都大学

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

森口周二（東北大学） ※研究代表者

全体総括、解析条件設定、結果分析

牛島省（京都大学） ※研究副代表者

有限体積法（FVM）による解析

寺田賢二郎（東北大学）

解析条件設定、結果分析

浅井光輝（九州大学）

計算高速化支援

高瀬慎介（八戸工業大学）

安定化有限要素法（SFEM）による解析

西浦泰介（海洋研究開発機構）

計算高速化支援

鳥生大祐（京都大学）

有限体積法（FVM）による解析

橘一光（福島工業高等専門学校）

差分法と IB 法（FD-IBM）による透水解析

2. 研究の目的と意義

粒子群の間隙を流れる水の挙動については、古くから実験・理論・解析の様々な研究がなされている。特に地盤工学の分野では Darcy 則が基礎的なモデルとしてよく知られており、実務レベルでも広く利用されている。また、Darcy 則は数値解析の中でも土と水の相互作用項を担う重要な物理式として認知されているが、近年では地盤材料の特性をより詳細に表現できる Kozeny-Carman 式などの高度なモデルの導入も進んでいる。さらに、豪雨時の斜面崩壊や堤防破堤など、地盤中の間隙水圧の増加が起因する地盤材料の大変形や流水による地盤表面の洗堀などが発生する現象については、非 Darcy 流れの効果の導入の必要性も議論されている。一方で、非 Darcy 流れについては、数値解析の中でこれを扱うための基盤は十分に整備されていない。この主な理由は、非 Darcy 流れの非線形性を数値解析の中で精度よく表現可能な統一モデルが存在しないためである。その骨格をなすものとしては Forchheimer 式があり、これに含まれる 2 つの係数が粒径や間隙率を用いてどのように表現されるのかを調べた研究は多く報告されている。それらの成果として得られている 2 つ

の係数の推定式は形が類似しているものが多いものの、含まれる係数やパラメータの幂数が異なっており、粒径の情報は代表粒径として 1 種類の粒径サイズに集約されて表現される。しかしながら、実際の地盤材料には粒度分布が存在し、大小様々な粒径の粒子群の集合体である。より現実に則した非 Darcy 流れのモデリングの高精度化は今後の地盤材料の数値解析のために解消すべき課題の 1 つである。

本研究では、先述の学術的背景に基づき、粒子群中の非 Darcy 流れを対象として数値実験を実施する。具体的には、粒度分布や間隙率を変化させた球形粒子群中の透水を Navier-Stokes 方程式に基づく直接的な 3 次元数値解析で表現し、結果として得られる圧力損失に対する粒度分布や間隙率の関係を整理することで、粒度分布や間隙率が非 Darcy 流れに与える影響を整理するとともに、代表粒径の物理的意味を考察することを目的とする。なお、本研究では、有限要素法 (FEM: Finite Element Method)、有限差分法 (FDM: Finite Difference Method)、有限体積法 (FVM: Finite Volume Method) に基づく 3 種類の解析コードを用いて同一の問題を解くことでお互いの解の妥当性を確認しながら研究を進めるものとする。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

流体解析の分野では、Euler 型の運動記述に基づく解析手法が広く用いられているが、球周りの流体挙動を精度よく計算には、粒子表面部での格子の細分化が必要となる。または、粒子表面での境界条件を満たすための流速の修正、または境界適合格子を用いるなどの手段が必要となる。しかしながら、そのようなアプローチをとったとしても、粒子表面付近には多くの計算点が必要である。また、単一球周りの流れなどの粒子数が少ない条件であれば、ある程度の計算コストで解析可能であるものの、粒子群の間隙を流れる流体挙動については、解析領域内の大部分が粒子の表面付近という条件になるため、単一球のような単純な条件と比べて計算コストが著しく増加する。

ここまで説明したように、粒子群の間隙を流れる流体挙動の計算は計算コストが高くなりやすい。ただし、本研究で対象としている粒度分布や間隙率の変化を考慮した計算では、計算コストはさらに高いものとなる。粒度分布を考えた場合は、解析領域の中でサイズの異なる粒子を扱う必要があるが、計算解像度は小さい粒子サイズを基準として考える必要があり、粒度分布の幅が大きくなるほど爆発的に計算コストが増大することになる。また、間隙率については、解析領域内の粒子数が多い間隙率の低い条件では、粒子表面が多くなるだけでなく、異なる粒子の表面が近接した条件で境界層を精度よく表現する必要があり、やはり高い計算解像度を求められる。さらに、本研究では非 Darcy 流れの発生に伴って発生する非線形を表現する必要があるが、この場合、1 つの解析モデルに対して Darcy 流れ領域、遷移領域、非 Darcy 流れ領域の 3 つの領域をカバーするように計算条件を変化させる必要がある。そのため、先述のように計算が大規模になるだけでなく、多くの解析ケース数が必要となる。また、先述の 3 種類の解析コードに必要な計算解像度の検証も必要となり、研究全体に必要な計算資源が非常に大きなものとなる。このように、本研究で想定している解析は、計算が大規模になるだけでなく、多くの解析ケース数が必要となるため、拠点公募型研究で提供される計算資源が非常に重要となる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

継続研究ではないため該当しない。

5. 今年度の研究成果の詳細

本研究では、まず、3 種類の各解析コード (以下では、FEM, FDM, FVM と記載する) の妥当性と精度の確認を目的として、シンプルな条件で事前解析を実施した。その後、多数の粒子群を対象とした解析モデルを作成し、そのモデルを対象として透水シミュレーションを実施した。この多数の粒子群を対象とした解析を本解析と呼ぶ。なお、利用した計算機は京都大学・学術情報メディアセ

ンターの Cray XC40(Camphor2: Xeon Phi KNL 68cores/node) である。

(1) 解析コードの説明

ここでは、本研究で使用した 3 種類の解析コードの概要を説明する。

FEM に基づく解析コードでは、安定化有限要素法による離散化と非構造メッシュを採用しており、粒子表面の球面をある程度直接的に表現可能である。並列計算には flat MPI を用いている。

FDM に基づく解析コードでは、有限差分法による離散化とスタガード格子を採用しており、物体表面部には境界埋め込み法によってその影響を表現する並列計算には flat MPI を用いている。

FVM に基づくコードでは、有限体積法による離散化とコロケート格子を採用しており、物体表面部の流速場は計算格子内の物体の占有率によって修正される。また、流体計算の時間刻み幅の制限を緩和するために、移流項と粘性項の計算段階で陰的解法である C-ISMALC 法 (牛島ら、2008) を使用した。FVM に基づくコードは MPI と OpenMP によるハイブリッド並列計算が可能であり (本研究では flat MPI で計算)、これまでの拠点公募型共同研究で継続的に使用してきた。

(2) 事前解析

事前解析の計算条件のイメージ図を図 1 に示す。この解析では、直径 1mm の粒子 2 個が単純な条件を想定し、解析領域内は水で満たされていると仮定した。また、流入面から流出面の方向に動水勾配を与えつことで透水を表した。先述のように、この事前解析は必要な計算解像度と計算結果の妥当性を確認することが主な目的であるため、各手法について計算解像度を変化させて解の収束性を確認した。また、レイノルズ数によっても必要となる空間解像度が異なる可能性も考慮して、動水勾配を 0.01, 0.1, 1.0 の 3 種類について解析を実施した。なお、流体は常温での水を想定し、動粘性係数を $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ に設定した。

事前解析では、解析開始と同時に動水勾配による力が流体に作用し、時間の経過とともに定常状

態へ向かう。その定常状態の流出面における速度の平均値を透水流速と定義した。図-2~4 は、粒子直径あたりのメッシュ数と流速の関係を示しており、それぞれの図が動水勾配の異なる条件の結果を示している。また、図中には、3 種類の手法の結果を示している。これらの図より、収束傾向は各解析コードで異なるものの、空間解像度難くなる (直径あたりのメッシュ数が増加する) と流速収束する傾向が確認できる。特に、FEM と FVM のコードの結果は、収束値が概ね一致すると推定され、直径あたりのメッシュ数が 40 程度で概ね収束していると判断した。このため、後述する本解析では、この事前解析で確認された空間解像度で計算を行うものとした。一方で、FDM のコードについては、直径あたり 50 程度のメッシュ数の条件までを対象として事前解析を実施したが、他の 2 つのコードに比べて収束の度合いが不十分な結果となった。事前解析の条件であれば、さらに解像度の高い条件で計算することも可能であるが、そのような解像度の条件で本解析の計算を行う場合、FDM のコードによる計算に多くの計算資源を費やすことになり、他のコードによる計算に支障がでる可能性があったため、本解析については FEM と FVM の 2 種類の解析コードのみで実施する方針とした。

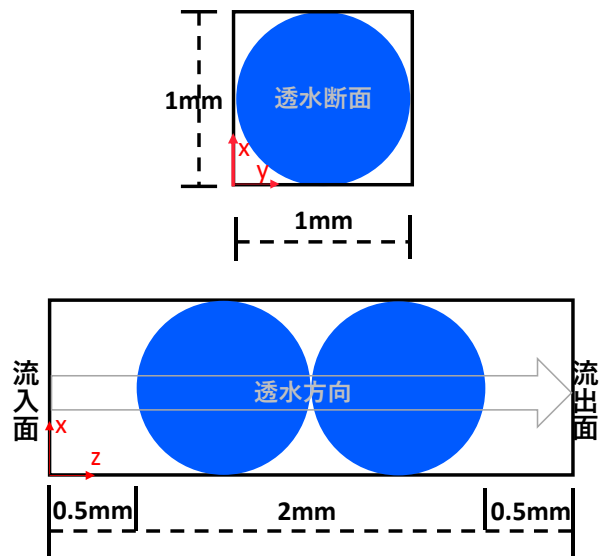


図-1 事前解析の解析モデル

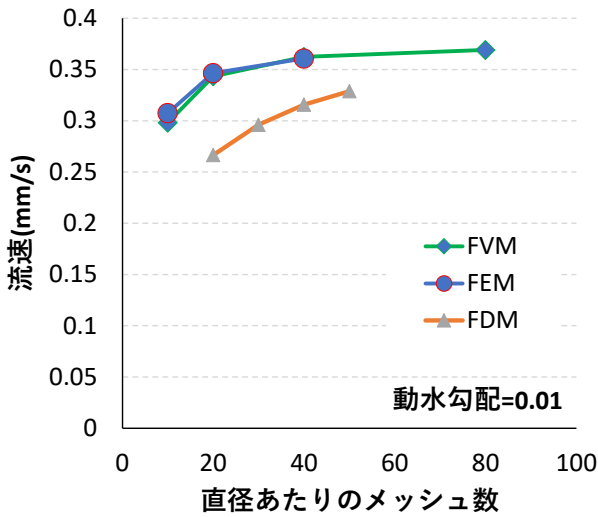


図-2 事前解析の解析結果（動水勾配 0.01）

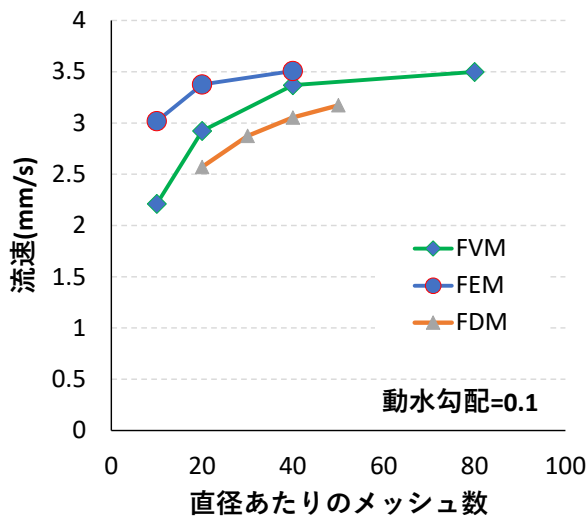


図-3 事前解析の解析結果（動水勾配 0.1）

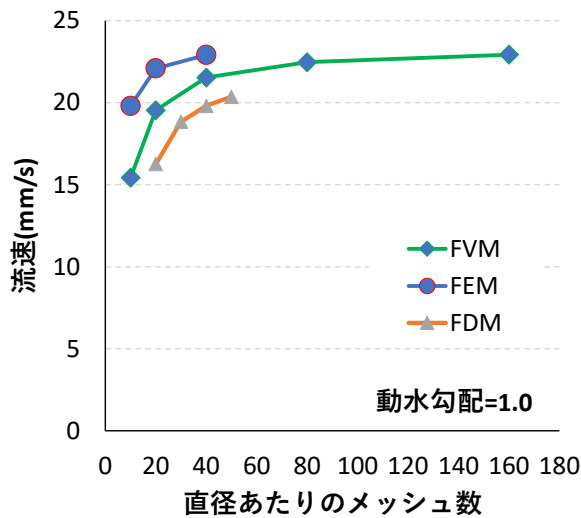


図-4 事前解析の解析結果（動水勾配 1.0）

(3) 本解析のための解析モデル作成

本解析のための解析モデルの作成方法について説明する。先述のように、本解析では、粒度分布を持つ多数の粒子が解析領域内に存在する条件で透水シミュレーションを実施した。当初の研究計画では、粒度分布と間隙率を様々に変化させて、代表粒径の物理的意味を分析する方針であったが、事前解析によって得られた適切な空間解像度が予想よりも高いものであり、粒度分布を大幅に変化させて計算を実施することが困難となった。そのため、粒度分布は与えるが一定の条件とし、間隙率を2種類変化させて計算を実施した。

粒度分布については、0.8, 0.91, 0.99, 1.03mmの4種類の粒子を、質量比でそれぞれ20, 20, 15, 45%となるように配合し、個別要素法によって粒子を解析領域内にパッキングした。解析領域のサイズは、6mm×6mm×1cmの直方体であり、図-5に示すように自由落下によって解析領域内に落下させ、上部から剛板で押し込むことで解析領域内に充填させている。間隙率は48%と43%の2種類とし、その間隙率に対応する粒子数を上部から落下させて充填している。ただし、間隙率が低くなると上部からの押し込みだけでは解析領域内部への重点が困難となるため、粒子間摩擦角を変化させ、粒子が解析領域内に適切にパッキングできるように試行錯誤を繰り返して解析モデルを作成した。

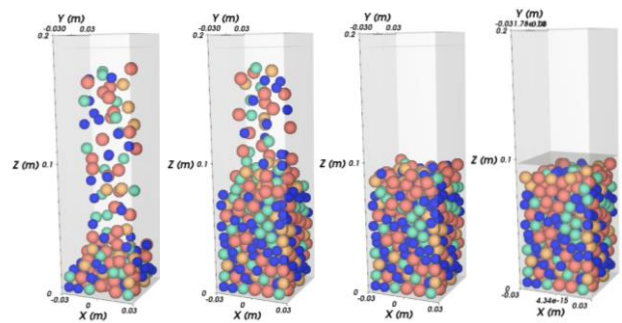


図-5 粒子パッキングのイメージ

(4) 本解析の結果

先述のように、本解析については、 $6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 1\text{cm}$ の直方体の内部に直径 $0.8\text{mm} \sim 1.03\text{mm}$ の粒度分布を持つ粒子群をパッキングし、事前解析の結果に基づいて決定した計算解像度 ($1/40\text{mm}$) の条件で透水解析を実施した。なお、先述の間隙率が 48% と 43% のモデルを、それぞれ Model 1 と Model 2 と呼ぶ。動水勾配については、0.1, 0.5, 1.0 の 3 種類として、先述の粒度分布を持った間隙率の異なる 2 種類の解析モデルを対象に計算を実施した。図-6~8 は FEM のコードの計算結果を可視化したものである。それぞれ、動水勾配が 0.1, 0.5, 1.0 の条件の結果であり、各図の中で間隙率の異なる結果をそれぞれ示している。上部領域には流線を、下部領域には流速の空間分布を可視化しており、それらの色が流速の強さを示している。これらの図より、粒子群の間隙を流れる複雑な流路とそれに伴う局所的な流速の変化が確認できる。また、間隙率が低い Model 2 の方が全体的に小さい流速が発生している様子も確認できる。これは、Model 1 に比べて Model 2 の間隙率が低いため、圧力損失が大きくなるためと考えられる。

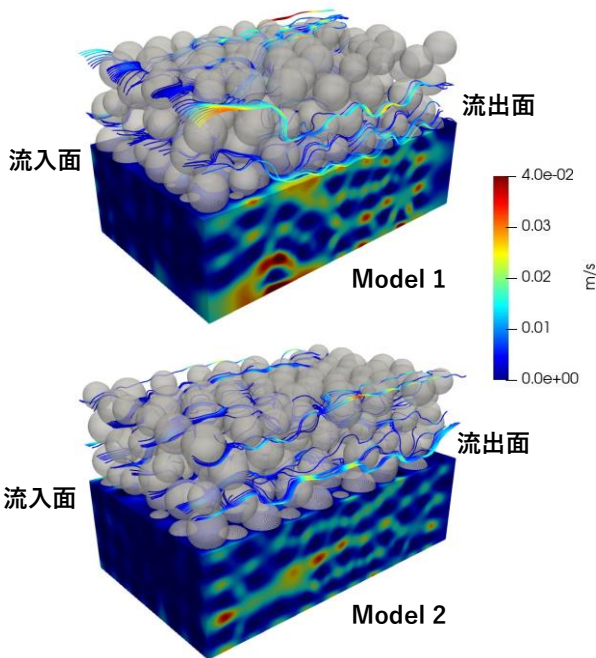


図-6 流線と流速分布 (動水勾配 0.1)

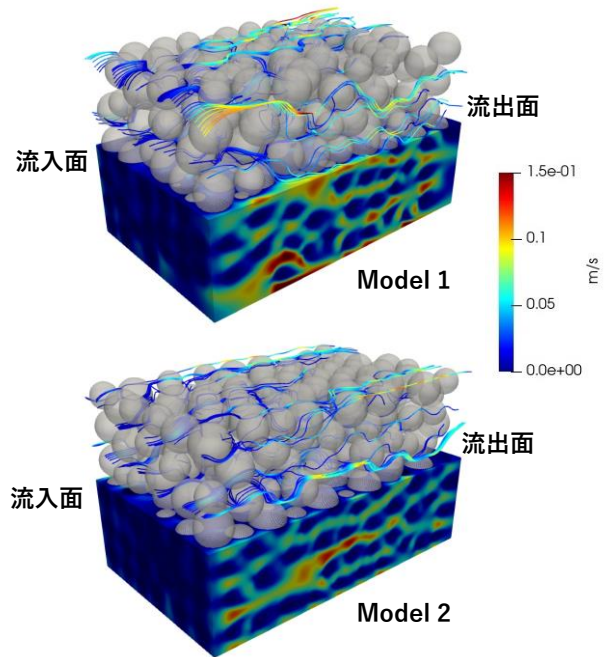


図-7 流線と流速分布 (動水勾配 0.5)

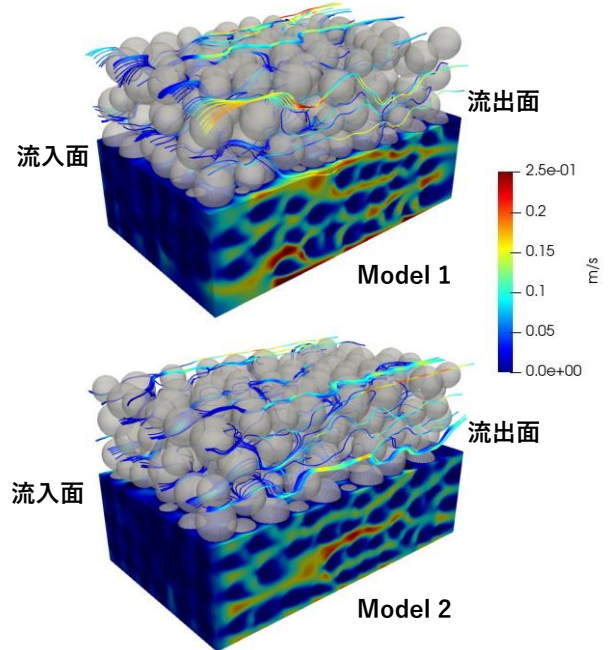


図-8 流線と流速分布 (動水勾配 1.0)

図-9 と図-10 は、Model 1 と Model 2 のそれぞれの結果について動水勾配と流速の関係を示したものである。FEM と FVM の結果はよく一致しており、計算結果の妥当性が確認できる。透水挙動が Darcy 則に従う場合、動水勾配と流速の間は線形関係となる。そのため、最も動水勾配の小さい条件を基準とすれば図中の点線のような結果となる。ただし、動水勾配が大きくなって流速が増加するにつれて非線形性が現れる。このような傾向

は過去の実験，解析，理論に基づく関連研究で得られている知見と整合する。

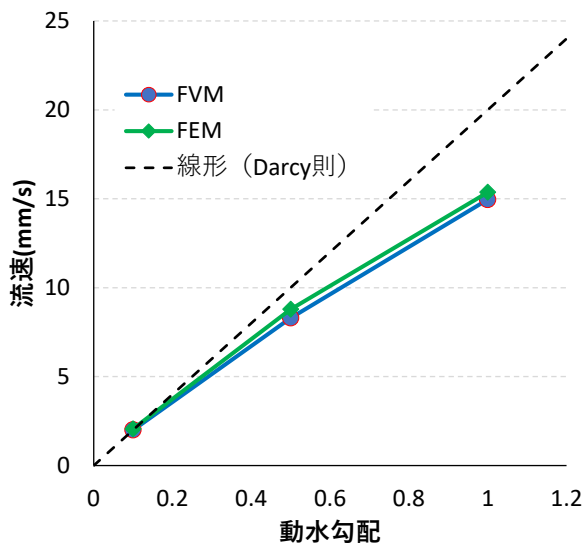


図-9 動水勾配と流速の関係 (Model 1)

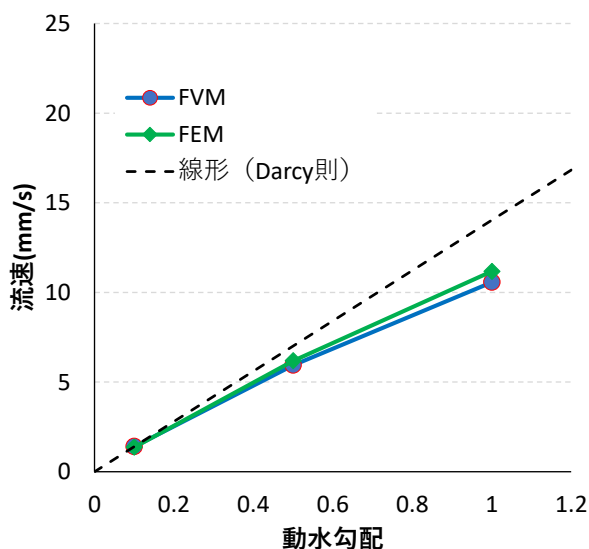


図-10 動水勾配と流速の関係 (Model 2)

先述の図-9 と図-10 に関する説明では，透水挙動の非線形性を確認したが，より詳細に非線形性の傾向を確認するために，FVM の解析コードを用いて追加計算を実施した．具体的には，図-9 と図-10 に示した 3 種類の動水勾配に加えて，0.01～2.5 までの範囲で 7 種類の条件で計算を行った．また，その結果を透水係数と粒子直径を長さの基準とするレイノルズ数（粒子レイノルズ数）の関係で整理した．その結果を図-11 に示す．過去の関連研究によれば，レイノルズ数が 1～10 付近で非

線形性が発現し始めるという知見が報告されている．その非線形性は圧力損失の低下に伴う見かけの透水係数の低下として表現されるが，図中の結果はその傾向をよく表現している．

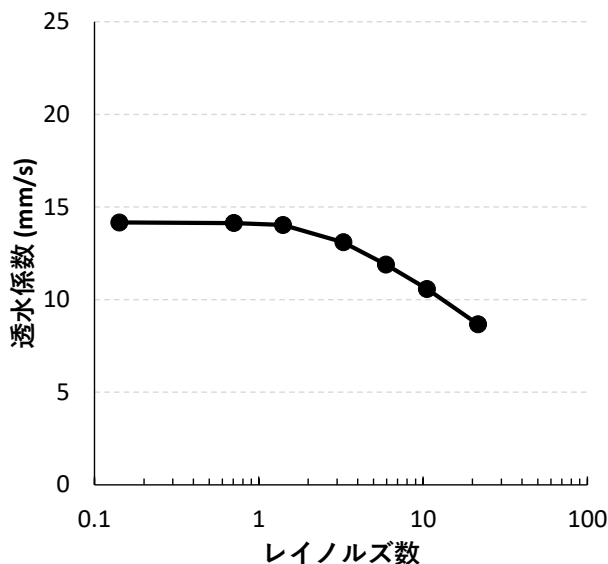


図-11 動水勾配と流速の関係 (Model 2)

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

当初の計画は，粒度分布と間隙率を変化させた粒子群を対象とした透水シミュレーションを実施し，透水係数の推定式に含まれる代表粒径の意味を分析するというものであった．しかし，事前解析によって必要となる空間解像度を確認した結果，予想よりも高い解像度が必要であることが判明し，十分な検討にまで至らなかった．この結果は，計算コストの見積りの甘さが原因であり，本来であれば，必要となる空間解像度のチェックや解くべき問題設定，および異なる解析プログラム間の結果の整合性の確認のために十分な時間と計算資源を計画すべきであった．一方で，得られた計算結果は過去の関連研究で報告されている知見と整合性し，事前解析と本解析の実施に対して複数の解析手法による異なる解析コードを利用したため，必要な計算解像度や計算結果の妥当性についての議論を可能とするデータが蓄積された．そのため，今後，より詳細な分析をするために基盤となる情報を蓄積することができた．

7. 研究業績一覧

(発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない)

(1) 学術論文 (査読あり)

なし

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

1. S. Ushijima, J. Ohno, D. Toriu, Y. Ueno, Particle-scale FSI computation for internal fluidization in gravel-particle bed by upward water jet, JSST 2021 Student Session Proceedings, pp. 42-45, 2021.

(3) 国際会議発表 (査読なし)

なし

(4) 国内会議発表 (査読なし)

1. 牛島省, 上野友登, 鳥生大祐, 大野絢平, 鉛直上昇流による礫層内部流動化と破壊の流体・固体連成計算, 第 24 回土木学会応用力学シンポジウム, 2021 年 5 月, オンライン開催.
2. 榎谷みなみ, 上野礼慈, 中村優真, 高瀬慎介, 土粒子の間隙を流れる水の挙動に関する基礎的研究, pp.37-42, 東北地域災害科学研究, 第 58 号(2022)
3. 牧志峰, 大野絢平, 鳥生大祐, 牛島省, 底面から流入する鉛直上昇水流による礫層破壊の流体・固体連成計算, 第 25 回土木学会応用力学シンポジウム, 2022 年 5 月 (発表予定), オンライン開催.

(5) 公開したライブラリなど

なし

(6) その他 (特許, プレスリリース, 著書等)

なし