

## 浸透力の作用する粒状体内の粒子移動と細粒分のダイナミクス

名古屋工業大学 学生会員 ○近藤 明彦  
 名古屋工業大学 学生会員 山田 高弘  
 名古屋工業大学 正会員 前田 健一

## 1. はじめに

近年、我が国では地盤の陥没災害が地域を選ばず発生しており、甚大な被害が発生している。陥没災害の多くは、浸透力などの作用により粒子が流出し、微小な空洞の発生・進展が原因とされる<sup>1)2)</sup>。このような粒子流出現象は、護岸近くでは吸出し、石油資源開発の分野では出砂というように様々な分野で問題となっている課題である<sup>3)</sup>。しかし、陥没災害に有効な対策はもとより、細粒分の流出に起因する空洞の発生・進行メカニズムにも未解明な部分が多い。これを検討する上では、粒子単位の浸透力による移動(内部浸食)や目詰まりといった細粒分のダイナミクスを検討することが必要不可欠である。本稿では、粒度分布の影響に焦点を当て、一次元透水を模した模型実験と三次元個別要素法を用いて検討した。

## 2. 粒度分布形状と流出量

模型実験は定水位一次元鉛直下向き浸透を模し、供試体下部より流出量を計測した。また、供試体内には局所的な変化を観察するために水圧計を深さ方向に等間隔で設置している(図1)。流出粒子については供試体底面に設置した多孔質フィルター盤によって0.300mm以下の粒子が通過できる。試料には粒度分布による幾何学的な影響を顕著にするため、球形ガラスビーズ( $\rho_s=2.50$ )を用い、突き固めにより相対密度80%の密な状態にしている。図2には使用した粒度分布とともに、供試体底面の多孔質フィルター盤の孔径、フィルター径 $D_f=0.300\text{mm}$ も示している。この粒度分布はKennyらの間隙くびれ径<sup>4)5)</sup>をもとに、流出しにくいとされる境界の直線分布(st)、流出に対して不安定とされる分布(sp)、stよりも中間粒径の多い安定とされる分布(cv)となっている。実験条件として、図3中に示す動水勾配*i*の変化によって供試体に浸透力を作用させた。動水勾配は、 $i=0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.5, 10.0$ のように段階的に増加させた後、 $i=0.3$ に一度減少させた。また、動水勾配を変化させる時間間隔は20分とした。

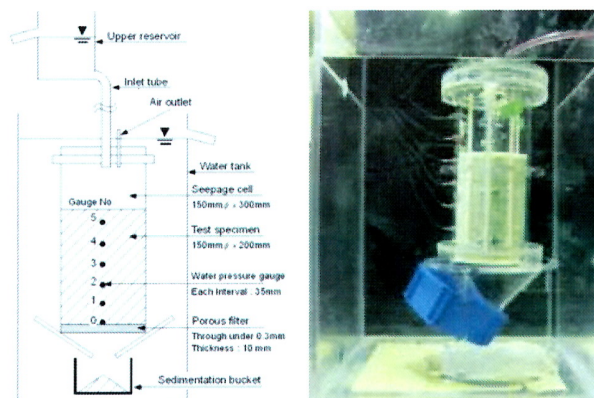


図1 細粒分流出実験模型概略図と供試体写真

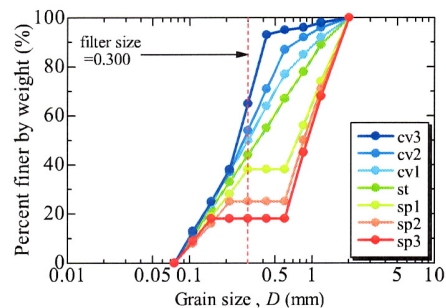


図2 実験で用いた粒度分布

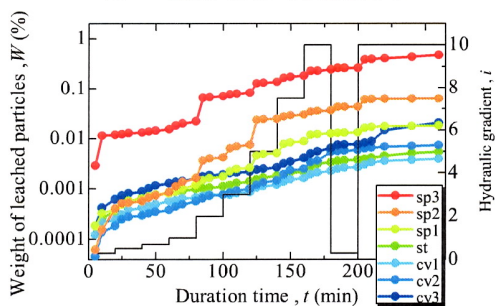


図3 動水勾配増加に伴う細粒分流出量の経時変化

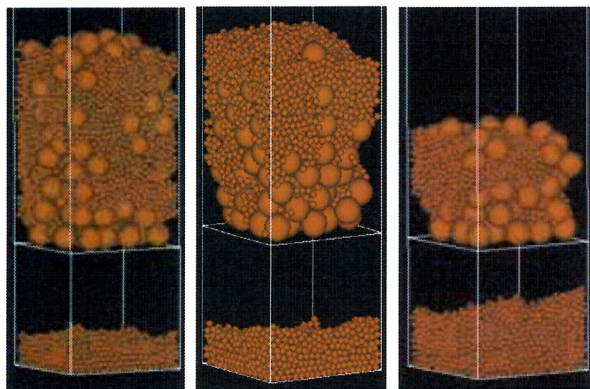
図3に各粒度分布における流出量の経時変化を示す。st, cv1の分布が全粒度分布中で流出量が最も低く、次いで中間粒径が増加していく場合(cv2,3)、減少する場合(st1,2,3)の順に流出量が増加している。これは、流出可能粒径に対する4倍粒径(中間粒径)の存在割合の増減によって、間隙くびれ径とその間隙に対する細粒分の含有率が変化したために、流出量が増加したと考えられる。

キーワード 内部浸食, 目詰まり, 間隙くびれ径, 移動可能距離

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 TEL: 052-735-5497

また、sp<sub>2,3</sub>の流出挙動に着目すると、動水勾配が2.0,5.0の時点で、にこれまでの流出量の2倍程度の流出をしている。この現象に関して、間隙くびれ径を粒子一つが通り抜けたとした場合、動水勾配の上昇による突然の大量流出を説明することは難しい。つまり、間隙くびれ径よりも小さな粒子たちがアーチのような構造をつくることで目詰まりが発生し、その構造の破壊による大量流出の発生が示唆される。

3. 細粒分の移動可能距離



(a) 細粒分混合率 40% (b) 50% (c) 60%  
 図4 二粒径混合試料の細粒分混合率増加に伴う流出量の増加と目詰まりのアーチ構造 (破線)

図4に本報告で用いた三次元個別要素法の計算例を示す。簡単のため最大粒径  $D_{max}=0.05[m]$ 、最小粒径  $D_{min}=0.0125[m]$ である二粒径混合試料 (粒子数: 7000) を用いて行った。粒子流出は重力 packing を行った後、流出境界の壁要素を細粒分のみが通過できるように変化させることで再現している。図4では細粒分混合率の増加に伴って、流出量の顕著な増加が確認できる。

本項では三次元個別要素法を用いて3つの形状の粒度分布: st(粒子数: 5254)、sp(3102)、cv(9117)を対象として、内部浸食時における粒子移動量の検討を行った。主に幾何学的な検討であるため、時間刻みを考慮して最大粒径  $D_{max}=0.08[m]$ 、最小粒径  $D_{min}=0.01[m]$ と比較的大きな粒径を用いた。(粒径加積曲線: 図4, 5右上)

図4に、この3つの粒度分布における間隙くびれ径の頻度分布を示す。間隙くびれ径は、壁面付近の間隙が大きい部分を除き、供試体内の任意の点から他の粒子に接触せず存在できる最大径とした。また、図中の間隙くびれ径は最小粒径で正規化しているため、供試体内を動くことの出来る範囲は1.0以上となる。

図より細粒分の四倍粒径混合量が多い分布ほど間隙

くびれ径の頻度は小さいものに集中している。ただし、移動可能な間隙くびれ径の頻度が高いspの分布でも移動できる間隙は全体の5%程度であることから、大量の粒子が移動することは難しいと考えられる。

図5には間隙くびれ径の連続性を検討した結果を示す。連続性とは、任意の高さにおける間隙くびれ径のうち、最小粒径が間隙をぬって移動出来る最も長い道のりを指す。spの最も長い移動距離でも最小粒径の8倍程度であるから、大きい粒子一つ分程度しか移動可能な間隙は連続して存在していないといえる。

以上を踏まえると、模型実験で観察されたような流出量を得ることは難しいと考えられる。そこで、境界付近の流出メカニズムに着目することで問題解決の手掛かりを得ることが可能であると考えられる。

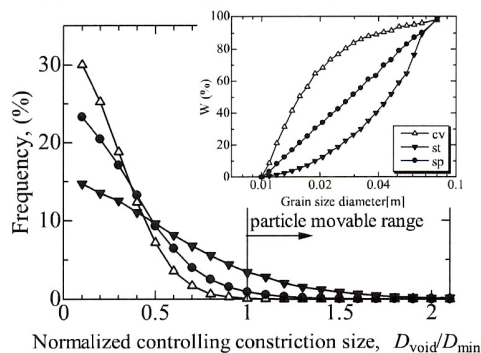


図5 供試体内に存在する間隙くびれ径の頻度分布

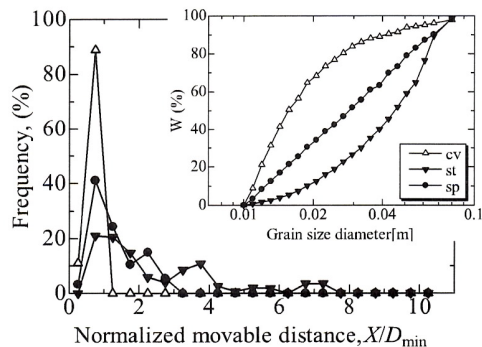


図6 最小粒径粒子が移動可能な道のりの頻度分布

謝辞: この研究で用いた装置の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B) 23360203によるものであり、深謝の意を表します。

参考文献: 1)Wood, D. M. and Maeda, K.: Changing grading of soil: effect on critical states, *Acta Geotechnica*, 3 (1), pp.3-14, 2008. 2)Wood, D. M., Maeda, K. and Nukudani, E.: Modelling Mechanical consequences of erosion, *Geotechnique*, 60(6), pp.447-457, 2010. 3)前田健一, 山田高弘, 近藤明彦: 内部構造の安定性に着目した細粒分のダイナミクスに関する検討とモデル化の試み, 第3回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, pp.10-17, 2011. 4)Kenny T.C. and Ofogbu G.I.: Permeability of compacted granular materials, *Canadian Geotech.Eng.*, 21, 726-729, 1984.5)杉井俊夫, 山田公夫, 名倉晋: 境界流速からみた浸透破壊の発生と進行, *地盤工学会誌*, 57-9, pp.26-29, 2009.