

局所的粒子移動と粒子間構造に着目した目詰まり現象の検討

名古屋工業大学 学生会員 ○山室 大軌  
 名古屋工業大学 学生会員 近藤 明彦  
 名古屋工業大学 国際会員 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いる。陥没は、同様のメカニズムで生じる吸出しや出砂なども含め、様々な分野で問題となっているが、陥没に有効な対策はもとより、詳細な発生・進行メカニズムも未解明な部分が数多く残されている<sup>1)2)</sup>。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。その微小な発生メカニズムにおいては粒子単位の移動・影響から考える必要がある。

本報告では、細粒分の流出を定性的に評価するための円筒透水試験と、透水による地盤内部の局所の変化を評価するためのメッシュ透水試験、目詰まりにおける内部構造を想定したアーチング試験を行い、3段階のスケールにおいて細粒分のダイナミクスを検討した。

2. 模型実験による粒子流出特性の検討

2.1 実験概要

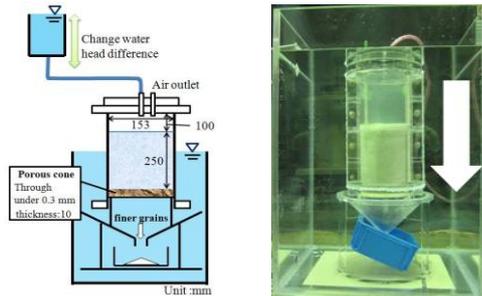


図-1 透水実験機概略図と実験写真

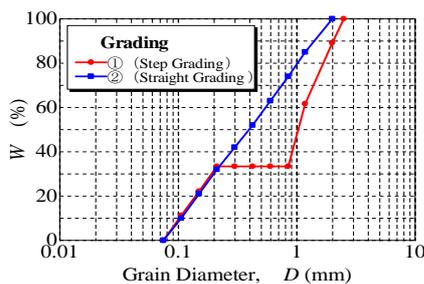


図-2 粒子流出実験で用いた粒度分布

図1に実験機概要と実験中の写真を示す。実験試料にはガラスビーズ（以下 G.B.）を用いた。図2に粒子流出実験で用いた粒度分布を示す。この粒度分布は Kenny らの提案した間隙くびれ径<sup>4)5)</sup>の考え方をもとに、粒子流出が発生しやすいもの（Step Grading：赤線）と発生しにくいもの（Straight Grading：青線）を用いた。

2.2 実験結果

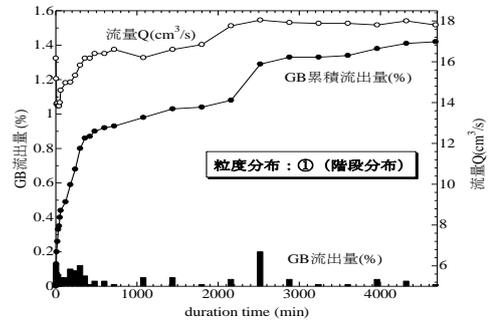


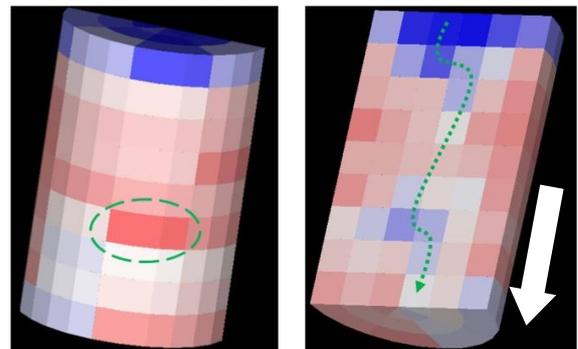
図-3 水位差一定時における粒子流出量と流量の変化

図-3 に細粒分流出量と流量の経時変化を示す。Straight Grading については流出がなかったため割愛する。流量変化と流出量変化を併せて考えると、流出量変化の前に流量の増減(透水係数の変化)が見られる。また、流出量が増減を繰り返していることから、粒子流出は目詰まりと流出を繰り返す現象と考えられる。

2.3 粒子移動量の局所の変化

本項では目詰まりと流出を繰り返す過程における供試体内部の粒子移動を検討する。供試体は直径 7.4[cm]、高さ 11.5[mm]の円筒供試体を用い、試料には粒径 600[μm]、1.06[μm]の G.B.を質量比 7 : 3 で一様に混合したものを用いた。試験は動水勾配  $i=5.0$  (一定) で 38 時間透水した後の細粒分含有率を測定した。測定メッシュは、供試体の最上 6[mm]・最下 10[mm]を除き、各層を層厚 1.0[cm]、45[deg.]毎に半径を 3 等分するよう分割した。(分割総数 216 個 : 24 個/層 × 9 層)

図-4 は供試体作成時の細粒分含有率(30%)が供試体内で一様と仮定して、細粒分含有率の増減を示している。(増加を赤色, 低下を青色) 図より実験終了後の供試体内部では細粒分含有率は不均一であり、内部でも局所的に目詰まりや流出の発生が確認出来る。



(a) 壁面での目詰まり (b) 供試体内部での粒子流出

図-4 透水試験後の細粒分含有率の局所の変化

### 3. アーチ構造の安定な構造条件

流出する粒子が間隙くびれ径より小さい場合でも目詰まりが確認された理由として、粒子間でのアーチ構造の形成が考えられる。アーチ構造について、任意の外力条件に対して最も安定な構造をとる条件について考える。それぞれの条件は、粒子間の接点が連続的に並び、重力加速度  $g$  が作用する二次元応力場 ( $\sigma_{yy}=\sigma_1$ ,  $\sigma_{xx}=\sigma_2$ ) について接触面の接線方向のせん断力が作用せず、軸方向圧縮力のみが作用するとする。構造部材の微小部分  $ds$  の釣り合い式は以下のようになる。

$$\begin{cases} \frac{d}{ds} \left( f_n \frac{dx}{ds} \right) - \sigma_2 \frac{dy}{ds} = 0 \\ \frac{d}{ds} \left( f_n \frac{dy}{ds} \right) + \sigma_1 \frac{dx}{ds} + \rho g s = 0 \end{cases} \quad (1)$$

解は以下の円錐曲線となる。

1) 重力場のみの場合 ( $g \neq 0, \sigma_1, \sigma_2 = 0$ )

$$y = a \cosh\left(\frac{x-b}{a}\right) - c \quad : \text{懸垂線 (2)}$$

2) 一次元応力場 ( $g=0, \sigma_1 \neq 0, \sigma_2=0$ )

$$y = (ax+b)^2 \quad : \text{放物線 (3)}$$

3) 二次元応力場 ( $g=0, \sigma_1 \neq 0, \sigma_2 \neq 0$ )

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{(\sigma_1/\sigma_2)^2 b^2} = 1 \quad : \text{楕円 (4)}$$

ここで、 $a, b, c$  はいずれも幾何学条件から決まる定数であり、特に二次元応力場において安定な構造の条件は楕円形状となる。いずれの構造も外力条件に対して最も安定な構造は、その構造の長軸方向  $\alpha_s$  が空間内の最大主応力方向  $\alpha_{ms}$  と一致する場合であり、形状は次式を満たすものである。(長軸半径  $a$ 、短軸半径  $b$ )

$$a/b = \sqrt{\sigma_1/\sigma_2} \quad \alpha_{ms} = \alpha_s \quad (5)$$

### 4. 目詰まりにおける粒子間構造を模した模型実験

#### 4.1 実験概要

前項より、目詰まりが生じる一因としてアーチ構造が形成されることが挙げられ、その形状は地盤内部の応力状態に関係していることを述べた。本実験では予め与えるアーチ(以下:既設アーチ)の形状に対し、その形状を維持したまま目詰まりを再現できるかを検討する。また、既設アーチの形状を維持した場合は最大で  $35^\circ$  の傾斜を与えることで、主応力方向の変化に耐えうるアーチの限界傾斜角  $\phi$  を観測し、その傾向を考察する。

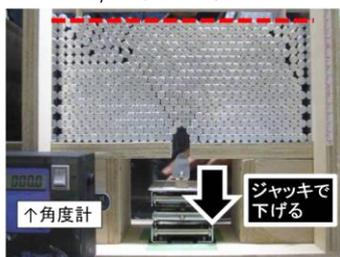


図-5 アーチ実験概要

図の装置において、材料、壁面、既設アーチは全てアルミ製である。材料は直径  $d=10\text{mm}$  のアルミ棒を用い、上部堆積厚はどの条件でも常に一定とする。既設アーチは横幅  $3\text{cm}, 3.5\text{cm}, 4\text{cm}$  のそれぞれに対し、 $a/b=1, 1.5, 2, 2.5, 3$  の計 15 種類の半楕円形を用い、開口幅  $D$  は既設アーチの横幅に合わせて変化させる。

#### 4.2 実験結果

表 1 アーチの形成個数・限界傾斜角

a / b \ D / d	1	1.5	2	2.5	3
3cm	5個 35 <sup>※</sup>	6個 29.3	6個 18.5	7個 27.4	8個 25.3
3.5cm	6個 35	7個 2.4	8個 7.4		
4cm	6個 35	8個 1.4	9個 35		

※ アーチ形成個数:5個 限界傾斜角  $\phi$ :35[deg.]

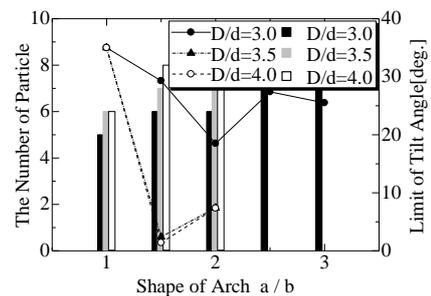


図-6 形状別のアーチ形成個数・限界傾斜角



(a)  $D=3\text{cm}, a/b=2, \phi=18.5[\text{deg.}]$  (b)  $D=4\text{cm}, a/b=1, \phi=35[\text{deg.}]$

図-7 アーチ形状による強度の違い

図-6 より、アーチの  $D/d$  や  $D$  が大きいと、そのアーチを形成するのに必要とする粒子の個数が多くなるが、必要な個数が多くなるほど、アーチの発生は難しくなることが考えられる。またアーチの個数は同じでも、限界傾斜角  $\phi$  に違いが生じる原因を検討する。図-7 より、アーチの  $\phi$  はその形状が深く関わっていることがうかがえる。このように  $\phi$  の値が大きい構造に関してはアーチの曲率が均一であることが特徴として観察できた。

今後は、アーチ構造の強度や発生・破壊を考慮することで、目詰まりの発生・解消に起因する細粒分のダイナミクスの解明を行っていく。

**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)20360120 によるものであり、深謝の意を表します。

**参考文献:** 1) D. M. Wood: The magic of sands, The 20th Bjerrum Lecture, *Canadian Geotech. J.*, pp.1329-1350, 2007., 2) D. M. WOOD and K. MAEDA: Changing grading of soil: effect on critical states, *Acta Geotechnica, on-line*, 2007., 4) Wood, D. M., Maeda, K. and Nukudani, E.: Modelling mechanical consequences of erosion, *Geotechnique*, 2010.5) T.C.Kenny and D.Lau, Internal stability of granular finers, *Canadian Geotech. J.*, pp.215-225, 1985.