

吸出しに起因する粒度変化を伴う粒状体の変形・破壊挙動解析

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 温谷 恵美
 名古屋工業大学 正 会 員 前田 健一
 ブリストル大学 D. M. WOOD

1. はじめに

本研究は、カナダのフィルダム WAC Bennet Dam(1968年完成)の天端に突然、直径 2.4m 深さ 6.7m もの大きさの陥没孔が開くという被害が発生(1996年)したことに端を発する^{1), 2)}。陥没孔の下部は鉛直方向約 80m に渡って極端に緩んでいた。これは浸透力によって細粒分が流出することが一因とされている。上部にあった細粒分が下部へと移動することによって元の領域の間隙は大きくなり、徐々に緩い状態になり、この緩みが鉛直上方向に伝わることで陥没に繋がると推測される。このような水流による細粒分流出は、振動水圧を受ける際の吸出しや堤体の決壊前の内部侵食においても同様である。

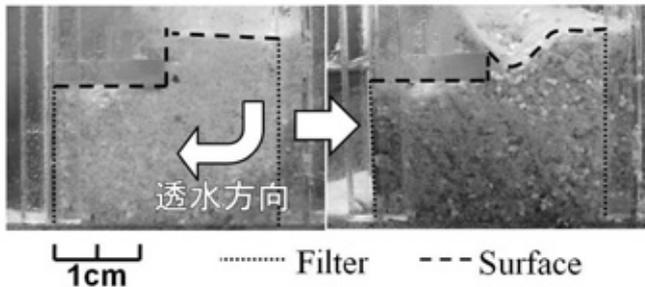


図-1 透水実験における陥没孔の再現

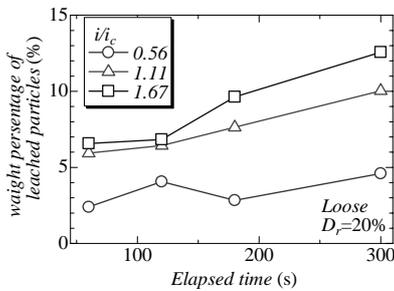


図-2 浸透による粒子の流出量

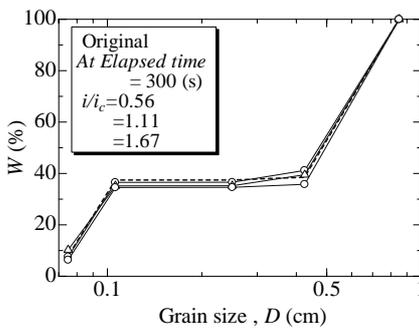


図-3 浸透による粒度の変化

この現象を極簡単に再現した透水実験の様子と結果をそれぞれ図-1,2,3 に示す。図-1 の破線部は透水実験前後の地盤表面を示しており、実験後(右図)では破線部下の細粒分の流出と表面の陥没が生じ、地盤内に局所的な変形が生じている。図-2 に流出重量率と浸透時間の関係に及ぼす動水勾配 i/i_c の影響を調べた結果を示す。ここで、 i_c は一次元鉛直上向き浸透の限界導水勾配である。時間が経過し、 i が大きいほど流出率が上昇している。また、図-3 から細粒分が流出しており、これが変形を誘導していることは明らかである。一方、従来の力学モデルでは、このような粒子特性自体が変化する際の応答は着目されてこなかった²⁾。しかし、この現象のメカニズム解明や対策の検討には、細粒分損失で粒度変化(材料自体の変化)が生じた際の変形・破壊挙動の考慮が必要不可欠である。

そこで、本報告では粒度変化に伴う変形・破壊挙動を二次元個別要素法 (DEM) 解析によって検討した。

2. 解析手法

2.1 基本設定

解析には二次元個別要素法 (DEM) を用いた³⁾。主なパラメータや試料特性は既報³⁾に詳しい。ここでは円形粒子のみを用い、4種類の重量分布による正規分布の粒度とした。最大粒径 $D_{max}=100\text{mm}$ のもとで最小粒径 D_{min} を変化させ、粒度指標として粒径比 $R_D = D_{max}/D_{min}(=2, 5, 10, 20)$ を用いた。最大・最小間隙比 (e_{max} と e_{min}) を定義して相対密度 $D_r=0, 100\%$ の最緩、最密な試料を作成した。また、無重力下において二軸圧縮試験を実施した。4枚の壁要素(摩擦なし)により、供試体の応力・ひずみを Adaptive control のアルゴリズムを導入し極力素早く制御できるようにしている。最大主応力方向を y 方向とし、直ひずみ ϵ_{xx} と ϵ_{yy} 、体積ひずみ ϵ_v 、平均主応力 σ_m と最大せん断応力 τ_m を用いて整理する。

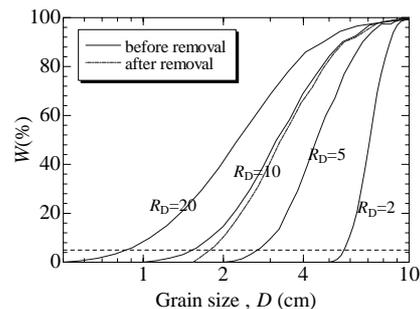


図-4 計算に用いた試料の粒度分布

2.2 粒子流出を模擬した粒子除去 (removal) 解析方法

応力状態を一定に保ちながら、各状態の粒度からその時点での最小径粒子を取り除き、それに伴う内部の不釣り合い力の発生によってマクロな変形を誘発させる。これを粒子流出の過程の模擬とし、この操作を、除去粒子の径が原粒度の5%粒径までか、 $\epsilon_{yy} > 25\%$ となるまで粒子除去を繰り返すものとする。

3. 解析結果及び考察

3.1 粒度の異なる単調載荷変形挙動と限界状態

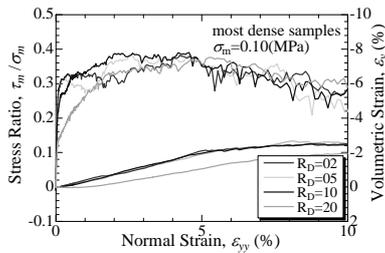


図-5 最も密な試料の単調載荷時の変形・破壊解析挙動

図-5には平均主応力 $\sigma_m=0.1\text{MPa}$ のときの単調載荷時の応答を示している。締固め状態 (D_r) が同じであれば粒度に関わらずほぼ同じ挙動を示し、この関係から流れ則 (flow rule) は同一のもので表されることになる。

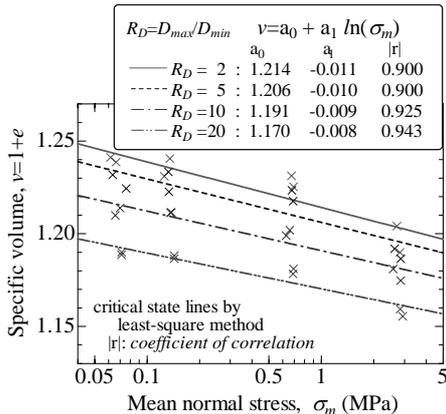


図-6 限界状態線の特性に及ぼす粒度の影響

図-6には比体積 $v \sim \sigma_m$ 関係における限界状態線を示す。直線の傾き項 a_1 は変わらないが、 R_D が大きく粒度が良いと、切片項 a_0 つまり限界比体積 v_{cs} は小さくなる。

3.2 Removal (粒度変化) に伴う変形・破壊挙動

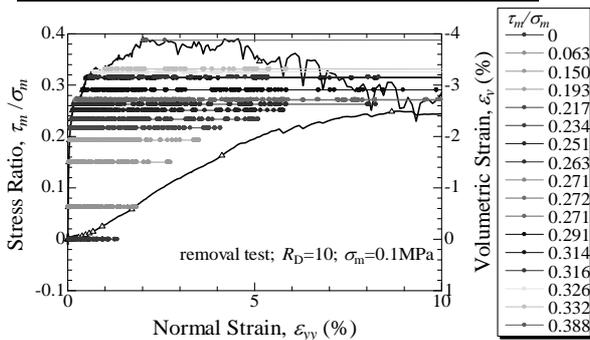


図-7 応力比一定下の粒度変化に伴う軸変形

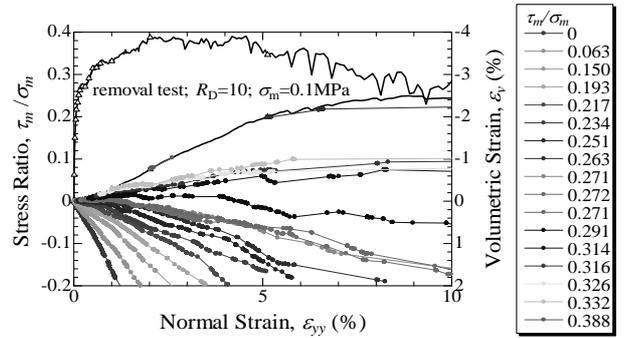


図-8 応力比一定下の粒度変化に伴うダイレタンス

図-7、図-8は removal 試験を行った結果を示している。1回の removal で生じる変形量は、除去された粒子の応力状態によって異なるが、過程が進行し粒度が悪くなる (R_D が減少) と軸ひずみが発達し、高い応力比 (限界状態応力比 $(\tau_m / \sigma_m)_{cv} = 0.272$ 以上から原粒度の破壊応力比 $(\tau_m / \sigma_m)_f = 0.390$ の間) になる程大きな軸ひずみ (10%以上) が生じ破壊している。

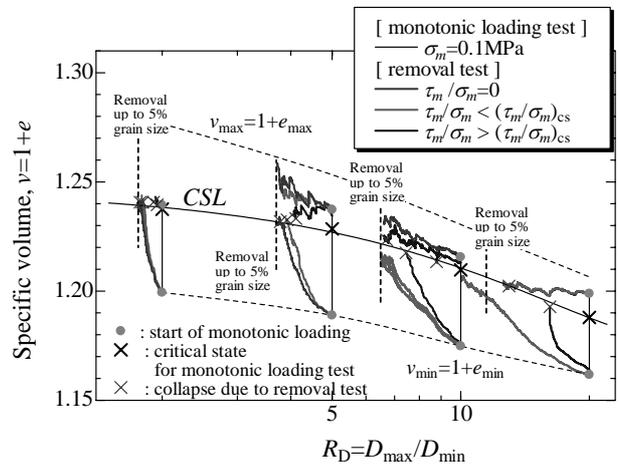


図-9 応力比一定下の粒度変化に伴う間隙比の変化

図-9は removal による $v \sim R_D$ の関係を示している。図中には図-6 から得られる各粒度の限界間隙比 ($\sigma_m=0.1\text{MPa}$) と R_D の関係を補間した関係 (太実線) も示している。密な場合、removal による R_D の低下は比体積を増加させるとともに ($\delta v \geq 0$)、材料が変化することで限界堆積比 v_{cs} の増加 ($\delta v_{cs} \geq 0$) するため、 $\delta v \geq \delta v_{cs}$ の場合には、例えば応力条件が一定の場合であっても材料は限界状態に近づくことになる ($v = v_{cs}$)。また、 $\delta v \geq \delta v_{cs}$ の場合には相対密度 Dr が低くなることから発現可能な最大強度が低下することで removal による破壊が促進されることになる ($v = v_{cs}$ の時には発現可能な最大強度は $Dr=0\%$ の $(\tau_m / \sigma_m)_f = (\tau_m / \sigma_m)_{cv}$ となる)。DEM によるミクロ数値実験とマクロ限界状態力学を融合させることで実問題解決の手掛りを得ることが可能である。

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., 3) K. MAEDA and H. HIRABAYASHI: Influence of grain properties on macro mechanical behaviors of granular media by DEM, *J. of Appl. Mech.*, Vol.9, JSCE, pp.623-630, 2006.